

104

MOTC-IOT-103-H3DB001

# 整合臺灣海岸及港灣海氣地象 模擬技術之研究(4/4)



交通部運輸研究所

中華民國 104 年 1 月

104

MOTC-IOT-103-H3DB001

# 整合臺灣海岸及港灣海氣地象 模擬技術之研究(4/4)

著者: 邱永芳、蘇青和、李俊穎、劉正琪  
李兆芳、陳冠宇、陳明宗、單誠基

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 1 月







## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(4/4)			
國際標準書號 (或叢刊號) ISBN - - - - (平裝)	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號 -	計畫編號 103-H3DB001
本所主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：邱永芳 共同主持人：蘇青和、李俊穎 研究人員：陳明宗、單誠基、鄭博今、劉清松、林珂如 參與人員：錢爾潔、陳正義、馬維倫 聯絡電話：04-26587175 傳真號碼：04-26564415	合作研究/共同研究單位：成功大學、中山大學 計畫主持人：李兆芳、劉正琪、陳冠宇 研究人員：陳陽益、涂力夫、謝佳紘、姚建中、劉俊志 地址：臺南市大學路一號;高雄市蓮海路 70 號 聯絡電話：06-2757575; 07-5255000	研究期間 自 103 年 01 月 至 103 年 12 月	
關鍵詞：預警系統、風浪預報、暴潮預報、流場預報、海嘯			
<p>本計畫目的為整合“提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究”及“海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究”。提供國內航運及各主要港口海域安全之風浪、暴潮及海嘯等預警資訊。</p> <p>本年度具體研究成果包括：(1)針對各主要商港海象觀測資料完成波浪、潮位、海流等資料特性分析，瞭解各港口海象之特性；(2)完成海象預報系統風壓場資料更新工作，以中央氣象局第四代天氣預報模式(WRF)模擬預報資料執行海象預報系統相關海象模擬，提昇臺灣周圍海域風浪、水位及海流模擬之精確性；(3)完成中尺度臺灣周圍海域暴潮模式之建置與驗證，並依據歷年(1980~)侵臺颱風暴潮偏差模擬結果，以極端值回歸分析方法推算主要商港50年復現期之暴潮位分別為：基隆港1.25 m、臺北港1.26 m、臺中港1.44 m、高雄港1.20 m、蘇澳港1.22 m、花蓮港0.85 m、安平港1.03 m、及布袋港0.97m；(4)針對本年度計畫研究對象花蓮港區及蘇澳港區，分別完成小尺度近岸港區風浪模組、細尺度港域波浪模組及小尺度水動力模組之更新，以及相關模擬結果之改善研究；(5)以主要商港細尺度港域波浪模組分別完成各種波浪週期港域波高放大率模擬，並依據數值模擬結果分析各港口港池共振之特性；(6)完成本年度計畫海象作業化預報成果評估與報告，達成本年度海象預報系統作業化維運目標。</p> <p>本計畫不僅達到海象預報系統作業化維運目的，其成果可延伸至實際的應用，達到防救災的目的。此外，本計畫結合「港灣環境資訊系統」具有平時提供各港務單位及港口使用保障船舶交通航運安全，面臨緊急海難或各種海岸災害防救時可迅速提供救災必要資訊等應用效益。</p> <p>海嘯會在沿海地區的引起巨大的破壞，而一個實用的海嘯預警系統的實施，將可減輕這毀滅性的災難。在2004年印度洋海嘯後，在印度洋周邊的國家已經建立海嘯預警系統。然而，最近發生的海嘯事件，如2009年美屬薩摩亞海嘯和2010年印尼海嘯及2011年東日本海嘯之案例也曝露一些問題存在於目前海嘯預警系統。此外，臺灣、呂宋島、馬尼拉海溝、琉球群島和東太平洋的周邊地區地震頻繁，因此建構適用的海嘯預警系統是對臺灣特別重要的意義。</p> <p>本研究建構海嘯速報系統以及蘇澳、花蓮兩港之子系統，使能自動擷取USGS (United States Geological Survey)網站來更新，再自動進行海嘯模擬。另一方面，本計劃利用機率之概念評估蘇澳港及花蓮港在未來50年及100年所可能遭受之海嘯風險，以及建立跨河橋梁之海嘯模式，以模擬海嘯受淺化效應溯升對其跨河橋梁影響，其結果將對現有港灣結構物設計準則有所幫助。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
104年1月	680		凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 (解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密) <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			



# 整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(4/4)

## 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
第一部分 提昇臺灣主要商港海象模擬技術之精進及系統維運	
第二部分 海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究	



# 第一部分

## 臺灣主要商港海象模擬技術之 精進及系統維運





## 摘要

本研究計畫為「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫之分項子計畫，目的在確保波浪、水位及海流等海象預報系統(TaiCOMS)作業化之運作與維護，並就作業化預報與觀測資料進行比較與分析，研究相關海象模擬技術之精進。

本年度具體研究成果包括：(1)針對各主要商港海象觀測資料完成波浪、潮位、海流等資料特性分析，瞭解各港口海象之特性；(2)完成海象預報系統風壓場資料更新工作，以中央氣象局第四代天氣預報模式(WRF)模擬預報資料執行海象預報系統相關海象模擬，提昇臺灣周圍海域風浪、水位及海流模擬之精確性；(3)完成中尺度臺灣周圍海域暴潮模式之建置與驗證，並依據歷年(1980~)侵臺颱風暴潮偏差模擬結果，以極端值回歸分析方法推算主要商港 50 年復現期之暴潮位分別為：基隆港 1.25 m、臺北港 1.26 m、臺中港 1.44 m、高雄港 1.20 m、蘇澳港 1.22 m、花蓮港 0.85 m、安平港 1.03 m、及布袋港 0.97m；(4)針對本年度計畫研究對象花蓮港區及蘇澳港區，分別完成小尺度近岸港區風浪模組、細尺度港域波浪模組及小尺度水動力模組之更新，以及相關模擬結果之改善研究；(5)以主要商港細尺度港域波浪模組分別完成各種波浪週期港域波高放大率模擬，並依據數值模擬結果分析各港口港池共振之特性；(6)完成本年度計畫海象作業化預報成果評估與報告，達成本年度海象預報系統作業化維運目標。

本計畫不僅達到海象預報系統作業化維運目的，其成果可延伸至實際的應用，達到防救災的目的。此外，本計畫結合「港灣環境資訊系統」具有平時提供各港務單位及港口使用保障船舶交通航運安全，面臨緊急海難或各種海岸災害防救時可迅速提供救災必要資訊等應用效益。

## **ABSTRACT**

This study is a sub-project of "A study on the integration of Taiwan coastal and harbor's oceanographic modeling systems." The aims are to ensure the operation and maintenance of the marine meteorology forecast system (TaiCOMS) for waves, water levels and currents, to compare and analyze the forecasting and observing data, and to enhance the simulating techniques.

Specific results this year are included:(1) completing the characteristic analyses of observing data of waves, water levels and currents for the major commercial ports; (2) updating the wind field data of marine meteorology forecasting system by employing the forth-generation weather forecasting model (WRF) of CWB to enhance the accuracy of simulation; (3) establishment and certification of the middle-scale storm surge model for the sea areas around Taiwan, and utilizing the extreme value regression analysis method to estimate the storm surge of 50-year recurrence for the major ports; (4) updating the small-scale nearshore wave module, fine-scale wave module and small-scale hydrodynamic module for Hualien and Suao harbor areas; (5) using fine-scale wave module of the major ports to simulate the wave height amplification and analyzing the characteristics of basin resonance for each port according to the numerical results; (6) accomplishment of assessment and report of operating forecasting results of the marine meteorology for this year project, and achievement of the target of maintenance and operation of the marine meteorology forecasting system.

This four-year project achieves the target of maintenance and operation of the marine meteorology forecasting system for IHMT. In addition, associated studies and improved results proposed for the marine meteorology simulation techniques fill the bill. Based on forecasting data of the marine meteorology helpful to harbor operation and security maintenance, follow-up maintenance of the marine meteorology forecasting system and associated improving studies are still necessary.

# 臺灣主要商港海象模擬技術之精進及系統維運

## 目 錄

計畫摘要.....	I
目 錄 .....	III
表目錄 .....	V
圖目錄 .....	X
第一章 緒論.....	1-1
1.1 計畫緣起.....	1-1
1.2 本年度主要工作項目 .....	1-2
1.3 報告內容架構.....	1-3
第二章 主要商港海象觀測資料特性分析.....	2-1
2.1 主要商港海象測站位置.....	2-1
2.2 主要商港潮汐特性.....	2-9
2.3 主要商港海(潮)流特性 .....	2-47
2.4 主要商港波浪特性分析 .....	2-81
2.5 侵臺颱風統計特性.....	2-96
第三章 海象作業化模擬風場.....	3-1
3.1 中央氣象局數值天氣預報作業控制系統.....	3-1
3.2 海象作業化風場簡介.....	3-5
3.3 風場模組作業化架構.....	3-9
3.4 WRF 風場與觀測風場評估 .....	3-19
第四章 主要商港風浪及波浪場模擬研究.....	4-1

4.1	臺灣周圍海域風浪模擬.....	4-1
4.2	主要商港小尺度港區近岸波浪場模擬.....	4-19
4.3	港域波浪場模擬與研究.....	4-36
第五章	臺灣周圍海域暴潮模式.....	5-1
5.1	臺灣周圍海域暴潮模式建置.....	5-1
5.2	數值模擬風壓場之建置.....	5-8
5.3	侵臺颱風暴潮模擬.....	5-14
5.4	主要商港暴潮位復現期分析.....	5-43
第六章	主要商港水位及流場模擬與研究.....	6-1
6.1	主要商港水動力模組改善成果.....	6-1
6.2	小尺度花蓮港區水動力模組改善研究.....	6-25
6.3	小尺度蘇澳港區水動力模組改善研究.....	6-38
第七章	海象作業化預報成果評估.....	7-1
7.1	風場評估.....	7-1
7.2	風浪模擬成果評估.....	7-6
7.3	水位與流場模擬成果評估.....	7-13
第八章	結論與建議.....	8-1
8.1	結論.....	8-1
8.2	建議.....	8-4
參考文獻	.....	參-1
附錄一	波浪模式基本理論介紹.....	附1-1
附錄二	水動力模式基本理論介紹.....	附2-1

## 表目錄

表2.1	蘇澳港(2008~2011年)重要代表性潮位統計結果表 .....	2-10
表2.2	花蓮港(2008~2011年)重要代表性潮位統計結果表 .....	2-12
表2.3	基隆港(2008~2011年)重要代表性潮位統計結果 .....	2-12
表2.4	臺北港(2011~2013年)重要代表性潮位統計結果 .....	2-14
表2.5	臺中港(2010~2013年)重要代表性潮位統計結果表 .....	2-15
表2.6	高雄港(2010~2013年)重要代表性潮位統計結果表 .....	2-18
表2.7	安平港2013年代表性潮位逐月統計表 .....	2-19
表2.8	布袋港2013年11月至2014年10月代表性潮位逐月統計 表 .....	2-20
表2.9	蘇澳港2012年潮位調和分析成果表 .....	2-26
表2.10	花蓮港2012年潮位調和分析成果表 .....	2-27
表2.11	基隆港2012年潮位調和分析成果表 .....	2-28
表2.12	臺北港2012年潮位調和分析成果表 .....	2-29
表2.13	臺中港2012年潮位調和分析成果表 .....	2-30
表2.14	高雄港2012年潮位調和分析成果表 .....	2-31
表2.15	安平港2013年潮位調和分析成果表 .....	2-32
表2.16	布袋港潮位(2013年11月~2014年10月)調和分析成果表 .....	2-33
表2.17	蘇澳港逐時海流流速大小分布年統計結果 .....	2-48
表2.18	蘇澳港逐時海流流向分布年統計結果 .....	2-48
表2.19	花蓮港逐時海流流速分布年統計結果 .....	2-53
表2.20	花蓮港逐時海流流向分布年統計結果 .....	2-54
表2.21	基隆港逐時海流流速分布年統計結果 .....	2-54
表2.22	基隆港逐時海流流向分布年統計結果 .....	2-55
表2.23	臺北港逐時海流流速分布年統計結果 .....	2-55

表2.24	臺北港逐時海流流向分布年統計結果.....	2-56
表2.25	臺中港逐時海流流速分布年統計結果.....	2-56
表2.26	臺中港逐時海流流向分布年統計結果.....	2-57
表2.27	高雄港逐時海流流速分布年統計結果.....	2-57
表2.28	高雄港逐時海流流向分布年統計結果.....	2-58
表2.29	安平港逐時海流流速分布年統計結果.....	2-58
表2.30	安平港逐時海流流向分布年統計結果.....	2-59
表2.31	蘇澳港夏季海流觀測資料(SA01)之潮流調和分析成果 表 .....	2-66
表2.32	蘇澳港冬季海流觀測資料(SA02)之潮流調和分析成果 表 .....	2-66
表2.33	花蓮港夏季海流觀測資料(HL01)之潮流調和分析成果 表 .....	2-66
表2.34	花蓮港冬季海流觀測資料(HL02)之潮流調和分析成果 表 .....	2-67
表2.35	基隆港夏季海流觀測資料(KL01)之潮流調和分析成果 表 .....	2-67
表2.36	基隆港冬季海流觀測資料(KL02)之潮流調和分析成果 表 .....	2-67
表2.37	臺北港夏季海流觀測資料(TP01)之潮流調和分析成果表 ....	2-68
表2.38	臺北港冬季海流觀測資料(TP02)之潮流調和分析成果表 ....	2-68
表2.39	蘇澳港逐時波高分布年統計結果.....	2-82
表2.40	蘇澳港逐時平均波向分布統計表 .....	2-83
表2.41	花蓮港逐時波高分布年統計結果.....	2-84
表2.42	花蓮港逐時平均波向分布統計表 .....	2-85
表2.43	基隆港逐時波高分布年統計結果.....	2-86
表2.44	基隆港逐時平均波向分布統計表 .....	2-87

表2.45	臺北港逐時波高分布年統計結果.....	2-88
表2.46	臺北港逐時平均波向分布統計表.....	2-89
表2.47	臺中港逐時波高分布年統計結果.....	2-90
表2.48	臺中港逐時平均波向分布統計表.....	2-91
表2.49	高雄港逐時波高分布年統計結果.....	2-92
表2.50	高雄港逐時平均波向分布統計表.....	2-93
表2.51	安平港逐時波高分布年統計結果.....	2-94
表2.52	安平港逐時平均波向分布統計表.....	2-95
表2.53	歷年(1897~2012年)各月侵臺颱風之次數及頻率統計表.....	2-97
表2.54	2011~2013年侵臺颱風事件一覽表.....	2-98
表3.1	每日各模式成員的作業趟次與預報長度.....	3-3
表3.2a	中央氣象局風場NFS風場資料格式.....	3-7
表3.2b	中央氣象局風場WRF風場資料格式.....	3-7
表3.2c	作業系統內大尺度及中尺度風、波及流場資料格式.....	3-8
表3.2d	作業系統內展示風場資料格式.....	3-8
表3.3	有限區域模式(NFS)氣象主要資料彙整表.....	3-10
表3.4	每日所擷取風場資料以第3日模擬風場為範例說明表.....	3-15
表3.5	WRF主要提供氣象資料彙整表.....	3-17
表3.6a	蘇澳、基隆、安平及臺中港7月風速發生頻率分析表.....	3-21
表3.6b	蘇澳、基隆、安平及臺中港7月風向發生頻率分析表.....	3-21
表3.7	蘇澳、基隆、安平及臺中港7月實測及模擬風速風向統計表.....	3-22
表3.8	蘇澳、基隆、安平及臺中港7月21日6時至24日0時實測及模擬風速風向統計表.....	3-23
表4.1	主要商港港區近岸波浪模組之數值參考網格基本資料.....	4-20
表4.2	港域波浪模擬之數值計算細網格基本資料.....	4-38
表5.1	1980~2013年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表.....	5-16

表5.2	歷年(1980~2013年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最大 暴潮位模擬值 .....	5-33
表5.3	基隆港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-38
表5.4	臺北港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-39
表5.5	臺中港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-40
表5.6	高雄港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-40
表5.7	蘇澳港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-41
表5.8	花蓮港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-41
表5.9	安平港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-41
表5.10	布袋港最大暴潮位模擬值超過0.5 m之侵臺颱風事件 .....	5-42
表5.11	主要商港年最大暴潮位頻率分析樣本 .....	5-48
表5.12	主要商港暴潮位頻率分析樣本之基本統計資料(unit: mm) .....	5-49
表5.13	基隆港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-49
表5.14	臺北港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-49
表5.15	臺中港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-50
表5.16	高雄港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-50
表5.17	蘇澳港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-50
表5.18	花蓮港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-50
表5.19	安平港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-51
表5.20	布袋港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果 .....	5-51
表5.21	主要商港年最大暴潮位頻率分析樣本(unit: m) .....	5-51
表7.1	2014年主要商港觀測及WA01預報風速偏差統計表 .....	7-2
表7.2	2014年主要商港觀測及WA01預報風向偏差統計表 .....	7-3
表7.3	2014年主要商港觀測及WA02預報風速偏差統計表 .....	7-4
表7.4	2014年主要商港觀測及WA02預報風向偏差統計表 .....	7-5
表7.5	2014年主要商港觀測及SWAN預報示性波高偏差統計	



表 .....	7-7
表7.6 2014年主要商港觀測及SWAN預報示性波向偏差統計表 .....	7-8
表7.7 2014年主要商港觀測及SWAN預報示性週期偏差統計表 .....	7-9
表7.8 2014年主要商港觀測及WAM預報示性波高偏差統計表 .....	7-10
表7.9 2014年主要商港觀測及WAM預報示性波向偏差統計表 .....	7-11
表7.10 2014年主要商港觀測及WAM預報示性週期偏差統計表 .....	7-12
表7.11 2014年主要商港觀測及中尺度預報流速偏差統計表 .....	7-14
表7.12 2014年主要商港觀測及中尺度預報流向偏差統計表 .....	7-15
表7.13 2014年主要商港觀測及小尺度預報流速偏差統計表 .....	7-16
表7.14 2014年主要商港觀測及小尺度預報流向偏差統計表 .....	7-17
表7.15 2014年主要商港觀測及中尺度預報水位偏差統計表 .....	7-18
表7.16 2014年主要商港觀測及小尺度預報水位偏差統計表 .....	7-19

## 圖目錄

圖2.1	國內主要商港之地理位置示意圖 .....	2-2
圖2.2	基隆港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-3
圖2.3	臺北港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-3
圖2.4	蘇澳港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-5
圖2.5	花蓮港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-5
圖2.6	臺中港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-6
圖2.7	高雄港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-6
圖2.8	安平港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-7
圖2.9	布袋港海氣象觀測位置示意圖 .....	2-8
圖2.10	2008~2013年蘇澳港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖 .....	2-10
圖2.11	2009年中度颱風莫拉克侵臺路徑圖 .....	2-11
圖2.12	2008~2013年花蓮港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖 .....	2-13
圖2.13	2008~2013年基隆港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖 .....	2-13
圖2.14	2008~2013年臺北港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖 .....	2-15
圖2.15	2013年中度颱風菲特侵臺路徑圖 .....	2-16
圖2.16	2008~2013年臺中港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖 .....	2-16
圖2.17	2012年中度颱風蘇拉侵臺路徑圖 .....	2-17
圖2.18	2008~2013年高雄港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖 .....	2-18
圖2.19	2013年強烈颱風天兔侵臺路徑圖 .....	2-20

圖2.20	主要商港2012年潮位資料年平均潮位分布圖 .....	2-21
圖2.21	蘇澳港2008 ~ 2013年潮位能譜圖 .....	2-34
圖2.22	蘇澳港歷年(2008 ~ 2013年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖 .....	2-35
圖2.23	花蓮港2008 ~ 2013年潮位能譜圖 .....	2-36
圖2.24	花蓮港歷年(2008 ~ 2013年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖 .....	2-37
圖2.25	基隆港2008 ~ 2013年潮位能譜圖 .....	2-38
圖2.26	基隆港歷年(2008 ~ 2013年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖 .....	2-39
圖2.27	臺北港2008年及2011 ~ 2013年潮位能譜圖 .....	2-40
圖2.28	臺北港歷年(2008 ~ 2013年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖 .....	2-41
圖2.29	臺中港2008 ~ 2013年潮位能譜圖 .....	2-42
圖2.30	臺中港歷年(2008 ~ 2013年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖 .....	2-43
圖2.31	高雄港2008 ~ 2013年潮位能譜圖 .....	2-44
圖2.32	高雄港歷年(2008 ~ 2013年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖 .....	2-45
圖2.33	安平港2013年潮位能譜圖 .....	2-46
圖2.34	布袋港潮位(2013年11月至2014年10月)能譜圖 .....	2-46
圖2.35	2013年強烈颱風蘇力侵臺路徑圖 .....	2-59
圖2.36	基隆港測站(X2) 2012年6月海流觀測資料時序列圖圖 .....	2-60
圖2.37	基隆港測站(X2) 2012年7月海流觀測資料時序列圖圖 .....	2-61
圖2.38	2012年輕度颱風泰利侵臺路徑圖 .....	2-62
圖2.39	2012年中度颱風天秤侵臺路徑圖 .....	2-62
圖2.40	蘇澳港夏季海流資料(SA01)之速度分量能譜圖 .....	2-69

圖2.41	蘇澳港冬季海流資料(SA02)之速度分量能譜圖 .....	2-69
圖2.42	蘇澳港夏季海流觀測資料SA01之潮流及非潮流成份圖 .....	2-70
圖2.43	蘇澳港冬季海流觀測資料(SA02)之潮流及非潮流成份 圖 .....	2-71
圖2.44	花蓮港夏季海流資料(HL01)之速度分量能譜圖 .....	2-72
圖2.45	花蓮港冬季海流資料(HL02)之速度分量能譜圖 .....	2-72
圖2.46	花蓮港夏季海流觀測資料HL01之潮流及非潮流成份圖 .....	2-73
圖2.47	花蓮港冬季海流觀測資料HL02之潮流及非潮流成份圖 .....	2-74
圖2.48	基隆港夏季海流資料(KL01)之速度分量能譜圖 .....	2-75
圖2.49	基隆港冬季海流資料(KL02)之速度分量能譜圖 .....	2-75
圖2.50	基隆港夏季海流觀測資料KL01之潮流及非潮流成份圖 .....	2-76
圖2.51	基隆港冬季海流觀測資料KL02之潮流及非潮流成份圖 .....	2-77
圖2.52	臺北港夏季海流資料(TP01)之速度分量能譜圖 .....	2-78
圖2.53	臺北港冬季海流資料(TP02)之速度分量能譜圖 .....	2-78
圖2.54	臺北港夏季海流觀測資料TP01之潮流及非潮流成分圖 .....	2-79
圖2.55	臺北港冬季海流觀測資料TP02之潮流及非潮流成分圖 .....	2-80
圖2.56	2012年強烈颱風杰拉華侵臺路徑圖 .....	2-95
圖2.57	歷年(1897~2013)侵襲臺灣之颱風路徑統計圖 .....	2-99
圖2.58	侵臺颱風登陸地點統計圖(1897-2013年).....	2-100
圖3.1	氣象局作業模式啟動及資料關係圖 .....	3-3
圖3.2	1994年至2010年中央氣象局颱風路徑主要作業模式對 西北太平洋颱風路徑之24、48與72小時預報之平均誤差 值。 .....	3-4
圖3.3	中央氣象局風場NFS及WRF風場資料範圍圖 .....	3-6
圖3.4	作業化風場資料輸出範圍 .....	3-6
圖3.5	風場模組作業流程圖 .....	3-11
圖3.6	NFS(RC)及WRF(WA01)風場輸出範圍圖 .....	3-11

圖3.7	NFS(MC)及WRF(WA02)風場輸出範圍圖.....	3-12
圖3.8	WRF(WA03)風場輸出範圍圖.....	3-12
圖3.9a	天兔颱風9月21日14時RC風場向量圖.....	3-13
圖3.9b	天兔颱風9月21日14時MC風場向量圖.....	3-13
圖3.10	中央氣象局天兔颱風衛星雲圖(2013-09-23-14:32).....	3-14
圖3.11	每日所擷取風場資料以第3日模擬風場為範例圖.....	3-15
圖3.12a	天兔颱風9月21日14時WRF(WA01)風場向量圖.....	3-17
圖3.12b	天兔颱風9月21日14時WRF(WA02)風場向量圖.....	3-18
圖3.12c	天兔颱風9月21日14時WRF(WA03)風場向量圖.....	3-18
圖3.13	每日WRF擷取風場及提供每日波風場資料.....	3-19
圖3.14a	201407蘇澳實測與預測WRF_WA01風速風向時序.....	3-23
圖3.14b	201407蘇澳實測與預測WRF_WA02風速風向時序.....	3-24
圖3.14c	201407蘇澳實測與預測WRF_WA03風速風向時序.....	3-24
圖3.15a	201407基隆實測與預測WRF_WA01風速風向時序.....	3-24
圖3.15b	201407基隆實測與預測WRF_WA02風速風向時序.....	3-25
圖3.15c	201407基隆實測與預測WRF_WA03風速風向時序.....	3-25
圖3.16a	201407安平實測與預測WRF_WA01風速風向時序.....	3-25
圖3.16b	201407安平實測與預測WRF_WA02風速風向時序.....	3-26
圖3.16c	201407安平實測與預測WRF_WA03風速風向時序.....	3-26
圖3.17a	201407臺中實測與預測WRF_WA01風速風向時序.....	3-26
圖3.17b	201407臺中實測與預測WRF_WA02風速風向時序.....	3-27
圖3.17c	201407臺中實測與預測WRF_WA03風速風向時序.....	3-27
圖3.18	蘇澳港2014年7月風速風向觀測及預測相關圖.....	3-28
圖3.19	基隆港2014年7月風速風向觀測及預測相關圖.....	3-29
圖3.20	安平港2014年7月風速風向觀測及預測相關圖.....	3-30
圖3.21	臺中港2014年7月風速風向觀測及預測相關圖.....	3-31

圖3.22	蘇澳港實測與預測(WRF_WA01~WA03)7月風玫瑰圖 .....	3-32
圖3.23	基隆港實測與預測(WRF_WA01~WA03)7月風玫瑰圖 .....	3-32
圖3.24	安平港實測與預測(WRF_WA01~WA03)7月風玫瑰圖 .....	3-33
圖3.25	臺中港實測與預測(WRF_WA01~WA03)7月風玫瑰圖 .....	3-33
圖3.26	2014年7月10日2時及17日02時WA02風速風向分布圖 .....	3-34
圖3.27	2014年7月10日2時及17日02時WA03風速風向分布圖 .....	3-34
圖3.28	蘇澳港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖 .....	3-35
圖3.29	基隆港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖 .....	3-35
圖3.30	安平港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖 .....	3-36
圖3.31	臺中港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖 .....	3-36
圖4.1	大尺度西太平洋範圍風浪模組模擬範圍及水深分布圖 .....	4-4
圖4.2	中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組模擬範圍與水深分布圖 .....	4-4
圖4.3	TaiCOMS架構下風浪作業化模擬預報流程圖 .....	4-5
圖4.4	大尺度西太平洋範圍風浪模組模擬範圍及更新後水深分布圖 .....	4-6
圖4.5	原作業化程式碼模擬颱風期間之波高分布情況圖 .....	4-6
圖4.6	本計畫作業化程式碼修正後模擬颱風期間之波高分布情況圖 (向量為作業化RC風場之風速).....	4-7
圖4.7	原作業化程式碼模擬颱風期間之平均週期分布圖 .....	4-7
圖4.8	本計畫作業化程式碼修正後模擬颱風期間之平均週期分布圖 (向量代表模式模擬之風浪去向).....	4-8
圖4.9	TaiCOMS每日線上作業程式模擬時間示意圖 .....	4-8
圖4.10	模式風浪模擬之平均週期 $T_{-1}$ (圓圈)及 $T_{m02}$ (三角形)與觀測波浪平均週期(圓點)之比較 .....	4-9
圖4.11	中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組更新後模擬範圍及地形水深分布圖 .....	4-11

圖4.12	中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組原模擬範圍之地形 水深資料更新前後之差異分布圖 .....	4-12
圖4.13	平行化處理SWAN時間比較(72小時模擬) .....	4-12
圖4.14a	蘇澳港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差時序變化圖 .....	4-13
圖4.14b	花蓮港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差時序變化圖 .....	4-13
圖4.14c	基隆港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差時序變化圖 .....	4-13
圖4.14d	臺北港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差分析結果 .....	4-14
圖4.14e	臺中港2012年9月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差時序變化圖 .....	4-14
圖4.14f	高雄港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差時序變化圖 .....	4-14
圖4.14g	安平港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之絕對誤差時序變化圖 .....	4-15
圖4.15a	蘇澳港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-15
圖4.15b	花蓮港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-15
圖4.15c	基隆港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-16
圖4.15d	臺北港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-16
圖4.15e	臺中港2012年9月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-16
圖4.15f	高雄港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)	

與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-17
圖4.15g 安平港2012年7月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期) 與觀測資料之相對誤差時序變化圖 .....	4-17
圖4.16 高雄港作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資 料間標準偏差之月變化圖 .....	4-17
圖4.17 高雄港作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資 料間相關係數之月變化圖 .....	4-18
圖4.18 基隆港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-21
圖4.19 臺北港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-22
圖4.20 臺北港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位A波高模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-23
圖4.21 臺北港小尺度波浪模組邊界條件校驗後，點位A波高模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-23
圖4.22 臺中港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-24
圖4.23 臺中港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位A波高模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-25
圖4.24 臺中港小尺度波浪模組邊界條件校驗後，點位A波高模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-25
圖4.25 布袋港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-26
圖4.26 安平港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-27
圖4.27 安平港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位O波高模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-28
圖4.28 安平港小尺度波浪模組邊界條件校驗後，點位O波高模	



	擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-28
圖4.29	高雄港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-29
圖4.30	高雄港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位A波高模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-30
圖4.31	高雄港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位A波向模 擬值與觀測值之對應關係圖 .....	4-30
圖4.32	蘇澳港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-32
圖4.33	蘇澳港港區102年度水深調查結果之水深分布圖 .....	4-32
圖4.34	蘇澳港港區衛星影像圖 .....	4-33
圖4.35	蘇澳港小尺度波浪模組更新後參考網格之地形水深分 布圖 .....	4-33
圖4.36	花蓮港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布 圖 .....	4-35
圖4.37	花蓮港港區102年度水深調查結果之水深分布圖 .....	4-35
圖4.38	基隆港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分 布圖 .....	4-38
圖4.39	臺北港細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布 圖 .....	4-39
圖4.40	臺中港細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布 圖 .....	4-39
圖4.41	布袋港細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布 圖 .....	4-40
圖4.42	安平港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分 布圖 .....	4-40
圖4.43	高雄港區一港口細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗 網格分布圖 .....	4-41

圖4.43 (續)高雄港區二港口細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖 .....	4-41
圖4.44 蘇澳港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖 .....	4-42
圖4.45 花蓮港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖 .....	4-42
圖4.46 基隆港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、NW).....	4-43
圖4.47 布袋港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、SW).....	4-43
圖4.48 安平港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、SW).....	4-44
圖4.49 高雄港一港口區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、W) .....	4-44
圖4.50 基隆港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-45
圖4.51 臺北港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-45
圖4.52 臺中港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-46
圖4.53 布袋港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-46
圖4.54 安平港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-47
圖4.55 高雄港一港口港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-47
圖4.56 高雄港二港口港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-48
圖4.57 蘇澳港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-48
圖4.58 花蓮港港域波高規劃展示點位分布圖 .....	4-49
圖4.59 蘇澳港港域平面配置圖 .....	4-50
圖4.60 蘇澳港細尺度波浪模組港池配置更新後，非結構粗網格及水深分布圖 .....	4-51
圖4.61 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、ENE).....	4-51
圖4.62 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、E).....	4-52
圖4.63 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、SE).....	4-52
圖4.64 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、S).....	4-53

圖4.65	花蓮港港域平面配置圖 .....	4-54
圖4.66	花蓮港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、ESE) .....	4-55
圖4.67	花蓮港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、E) .....	4-55
圖4.68	花蓮港區細尺度波浪場波高分布圖(週期10s、SW).....	4-56
圖4.69	基隆港港池共振數值分析檢核點位置圖 .....	4-57
圖4.70	基隆港港池共振數值分析檢核點A之波高放大率圖 .....	4-58
圖4.71	基隆港港池共振數值分析檢核點B之波高放大率圖 .....	4-58
圖4.72	基隆港港池共振數值分析檢核點C之波高放大率圖 .....	4-59
圖4.73	基隆港基本共振模態之港池波高放大率分布圖 .....	4-59
圖4.74	蘇澳港港池共振數值分析檢核點位置圖 .....	4-60
圖4.75	蘇澳港港池共振數值分析檢核點A之波高放大率圖 .....	4-61
圖4.76	蘇澳港港池共振數值分析檢核點B之波高放大率圖 .....	4-61
圖4.77	蘇澳港港池共振數值分析檢核點C之波高放大率圖 .....	4-62
圖4.78	蘇澳港基本共振模態之港池波高放大率分布圖 .....	4-62
圖4.79	花蓮港港池共振數值分析檢核點位置圖 .....	4-64
圖4.80	花蓮港港池共振數值分析檢核點A之波高放大率圖 .....	4-64
圖4.81	花蓮港港池共振數值分析檢核點B之波高放大率圖 .....	4-65
圖4.82	花蓮港港池共振數值分析檢核點C之波高放大率圖 .....	4-65
圖4.83	花蓮港基本共振模態之港池波高放大率分布圖 .....	4-66
圖4.84	花蓮港第二共振模態之港池波高放大率分布圖 .....	4-66
圖4.85	臺北港港池共振數值分析檢核點位置圖 .....	4-67
圖4.86	臺北港港池共振數值分析檢核點A之波高放大率圖 .....	4-68
圖4.87	臺北港港池共振數值分析檢核點B之波高放大率圖 .....	4-68
圖4.88	臺北港港池共振數值分析檢核點C之波高放大率圖 .....	4-69
圖4.89	臺北港基本共振模態之港池波高放大率分布圖 .....	4-69
圖4.90	布袋港港池共振數值分析檢核點位置圖 .....	4-70

圖4.91	布袋港港池共振數值分析檢核點A之波高放大率圖	4-71
圖4.92	布袋港港池共振數值分析檢核點B之波高放大率圖	4-71
圖4.93	布袋港港池共振數值分析檢核點C之波高放大率圖	4-72
圖4.94	布袋港基本共振模態之港池波高放大率分布圖	4-72
圖5.1	臺灣周圍海域暴潮模式模擬範圍(100年度計畫)	5-4
圖5.2	臺灣周圍海域暴潮模式採用的非結構三角網格分布圖	5-4
圖5.3	101年度計畫臺灣周圍海域暴潮模式之模擬範圍	5-5
圖5.4	101年度計畫臺灣周圍海域暴潮模式採用的非結構三角網格分布圖	5-5
圖5.5	臺灣周圍海域暴潮模式之地形水深分布圖	5-6
圖5.6	臺灣周圍海域暴潮模式之天文潮邊界條件時序圖	5-7
圖5.7	模型颱風數值風壓場之等壓線分布圖	5-11
圖5.8	TaiCOMS作業化MC風壓場之等壓線分布圖	5-12
圖5.9	本計畫有限元素網格風壓場之等壓線分布圖	5-13
圖5.10	2011年強烈颱風南瑪都侵臺路徑圖	5-22
圖5.11	2012年中度颱風蘇拉侵臺路徑圖	5-22
圖5.12	2012年中度颱風天秤侵臺路徑圖	5-23
圖5.13	2013年強烈颱風蘇力侵臺路徑圖	5-23
圖5.14	主要商港颱風暴潮模擬結果之輸出點位圖	5-24
圖5.15	2011年強烈颱風南瑪都侵臺期間高雄港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖	5-25
圖5.16	2012年中度颱風蘇拉侵臺期間，花蓮港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖	5-25
圖5.17	2012年中度颱風蘇拉侵臺期間，蘇澳港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖	5-26
圖5.18	2012年中度颱風蘇拉侵臺期間，基隆港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖	5-26

圖5.19	2012年中度颱風蘇拉侵臺期間，臺北港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-27
圖5.20	2012年中度颱風天秤侵臺期間，高雄港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-27
圖5.21	2012年中度颱風天秤侵臺期間，花蓮港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-28
圖5.22	2012年中度颱風天秤侵臺期間，蘇澳港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-28
圖5.23	2013年強烈颱風蘇力侵臺期間，花蓮港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-29
圖5.24	2013年強烈颱風蘇力侵臺期間，蘇澳港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-29
圖5.25	2013年強烈颱風蘇力侵臺期間，基隆港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-30
圖5.26	2013年強烈颱風蘇力侵臺期間，臺北港暴潮模擬結果與 水位觀測資料分析結果圖 .....	5-30
圖6.1	基隆港水動力模組之有限元素格網分佈圖 .....	6-2
圖6.2	基隆港水動力模組之地形水深分佈圖 .....	6-3
圖6.3	基隆港水動力模式東、西開放邊界之水位邊界條件時序 圖 .....	6-3
圖6.4	基隆港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析 ( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果之比較.....	6-4
圖6.5	臺北港水動力模式之有限元素細格網分佈圖 .....	6-6
圖6.6	臺北港99年度水深地形量測結果之水深分佈圖 .....	6-6
圖6.7	臺北港水動力模式左、右開放邊界之水位邊界條件時序 圖 .....	6-7
圖6.8	臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析 ( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果之比較.....	6-8

圖6.9	臺中港區流場模擬範圍之有限元素格網分佈圖 .....	6-10
圖6.10	臺中港區流場模擬範圍與水深分佈圖 .....	6-11
圖6.11	臺中港水動力模式南、北開放邊界之水位邊界條件時序 圖 .....	6-11
圖6.12	臺中港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析 結果之比較 .....	6-12
圖6.13	布袋港區流場模擬範圍之有限元素格網分佈圖 .....	6-14
圖6.14	布袋港區流場模擬範圍與水深分佈圖 .....	6-15
圖6.15	布袋港水動力模式南、北開放邊界之水位邊界條件時序 圖 .....	6-15
圖6.16	布袋港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析 ( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果之比較 .....	6-16
圖6.17	安平港區近岸水動力模組之細網格三角形元素分佈圖 .....	6-18
圖6.18	安平港港區近岸水動力模組模擬範圍及水深分布圖 .....	6-19
圖6.19	本年度計畫安平港水動力模組南、北開放邊界近岸節點 之水位時序圖 .....	6-19
圖6.20	安平港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分 析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果比較圖 .....	6-20
圖6.21	高雄港水動力模組模擬範圍內有限元素網格圖 .....	6-22
圖6.22	高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖 .....	6-22
圖6.23	高雄港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位時序 圖 .....	6-23
圖6.24	高雄港水位與潮流模擬結果與海流觀測資料調和分析 ( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )之E-W及N-S向速度分量比較圖 .....	6-24
圖6.25	花蓮港區近岸水動力模組之模擬範圍及地形水深分佈 圖 .....	6-26
圖6.26	花蓮港區近岸水動力模組之細網格三角形元素分佈圖 .....	6-27

圖6.27	花蓮港港域及港口附近細網格之三角形元素分布圖.....	6.27
圖6.28	前期計畫花蓮港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之 水位時序圖.....	6-29
圖6.29	本年度計畫花蓮港水動力模組南、北開放邊界近岸節點 之水位時序圖.....	6-29
圖6.30	花蓮港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分 析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果比較圖.....	6-31
圖6.31	前期計畫花蓮港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料 之調和分析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果比較圖.....	6-32
圖6.32	花蓮港流場模擬結果之流速向量圖.....	6-33
圖6.33	蘇澳港水動力模式之有限元素格網分佈圖(98年計畫).....	6-40
圖6.34	蘇澳港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖.....	6-41
圖6.35	蘇澳港水動力模組之模擬範圍及有限元素格網分佈圖.....	6-42
圖6.36	蘇澳港港域及港口附近細網格之三角形元素分布圖.....	6-43
圖6.37	蘇澳港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位時序 圖.....	6-43
圖6.38	蘇澳港水位與潮流模擬結果與海流觀測資料調和分析 ( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )之E-W及N-S向速度分量比較圖.....	6-44
圖6.39	蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖.....	6-45





# 第一章 緒論

## 1.1 計畫緣起

台灣地狹人稠、陸上資源有限且四面環海，為了能夠合理且有效地規劃與開發近岸生活圈，政府機構近年來積極推動規劃近岸海域的開發利用，更致力保護與維護沿海的百姓生命財產及活動、近海的各種遊憩及漁業活動、海上運輸的安全。除此之外，更從基礎教育著手積極推廣海洋科技教育以向國人傳達正確的海洋知識與海洋資源利用。同時，為了躋身國際先進的海洋國家目標，兼顧海洋/海岸空間利用以及海洋/海岸環境生態復育的政策與法規措施是絕對必須的。執行策略上，除了戮力推動海岸生活圈的開發外，更應著手於海岸災害之預警、防災與避災的架構與規畫。此外，因全球環境變遷所致，水災、風災、地震及海嘯等似乎都進入發生頻率高之時期，使得近岸預警、防災與避災已成為近年來必須列為政府首要施政方針之一。基於此，交通部運輸研究所為考量臺灣周遭水域的船舶與人員航行安全，以及水環境維護等，乃率先推動近岸/近海防救災相關海象預報系統，並配合已經推動多年的海氣象觀測，成立海情中心，提供相關海象觀測與預測的資料，協助相關單位維護臺灣水域的安全。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心已於前期四年計畫(民國 96~99 年)「臺灣近岸防救災預警系統技術與作業化之研究」計畫中，推動了 1.)近岸風浪模擬技術之研發及預警精度改進；2.)結合本所相關計畫之海象即時監測作業，發展颱風波浪之模擬技術，建置近岸防災預警方法，以減低颱風期間海岸災害破壞。3.)近岸防災預警系統之作業化研究，加強作業效能之提昇，預報系統採人性化操作界面，以利相關單位使用。然而由於臺灣附近水域的地形與環境複雜，仍有諸多影響因子需要持續進行研究與改善，乃於本四年期計畫(民國 100~103 年)「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」之計畫中依據海象模擬技術屬性分別規劃「提昇海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究」及「提昇海岸及港灣海域水位與海流模擬技術之研究」四年期合作研

究計畫。並於 100 年度依據期程規劃針對基隆港港區及臺北港港區分別完成波浪、水位及海流等海象模擬相關研究，以及 101 年度分別針對臺中港港區及布袋港港區分別完成波浪、水位及海流等海象模擬相關研究。

然基於海象作業化模擬整合需求，自 102 年度起將上述合作計畫整合為「提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究」(102 年)及「臺灣主要商港海象模擬技術之精進及系統維運」(103 年)合作研究計畫，藉以提昇臺灣周圍海岸及港灣海域海象(波浪、水位及海流)模擬技術之研究。

### **1.1.1 計畫目的**

本計畫目的除了進行現有波浪、潮位及海流等海象預報系統的維護，以及相關預報與實測資料之比較分析外，並將進一步探討水位對風浪預報的影響與系統建置，此外也進行近岸海象預報系統的改善尋求其他可能方案。

### **1.1.2 計畫研究範圍與對象**

本計畫研究範圍包含波浪、潮位及海流等海象模擬，並以基隆、臺北、蘇澳、花蓮、高雄、安平、臺中及布袋等 8 個港域為研究對象，其中本年度計畫主要研究對象為蘇澳港域及花蓮港域，並協助港研中心建立蘇澳港域及花蓮港域海象模擬預警子系統，並進行教育推廣工作。

## **1.2 本年度主要工作項目**

本年度計畫為「臺灣主要商港海象模擬技術之精進及系統維運」合作研究計畫，本年度主要研究內容及工作項目如下：

1. 精進海象自動化預報模擬系統之預報精確度：以基隆、臺北、蘇澳、花蓮、高雄、安平、臺中及布袋等 8 個港域為對象，針對海象預報模擬系統每日執行 72 小時(含昨日、今日、明日)波浪、水位及流場

等海象作業化模擬相關資訊進行改善研究，並以颱風侵臺時期之颱風波浪及暴潮為研究重點。

2. 波浪、水位及流場等海象預報作業化成果評估：以前述 8 個港域為對象，配合港灣技術研究中心(或中央氣象局)之現場觀測資料進行模擬結果之校驗及精度評估等工作。
3. 波浪、水位及流場等海象模擬結果之特性分析：針對前述 8 個港域進行包括典型夏季季風、典型冬季季風及颱風侵臺期間等海象分析成果。
4. 針對前述 8 個港域海象模擬預警系統辦理教育訓練，另對颱風發生期間之海象進行模擬作業演練。
5. 建置臺灣周圍海域暴潮模式：以本年度或歷史颱風資料進行暴潮模擬與驗證。
6. 配合港研中心進行作業系統維護與資料分析、軟硬體之更新與測試、預報成果與實測之差異性檢討與改進、模式作業化環境之改善及維護等相關工作。
7. 為建立相關數值模擬系統及數值預報系統之模式計算、資料庫維護管理、資料統計、繪圖等工作，需派碩士級（含）以上專業人員一員至本所港研中心駐點服務，其人員工作期間為履約時限(自簽約日起算)。

### 1.3 報告內容架構

本期中報告主要內容及架構簡述如下：

#### 1. 主要商港海象觀測特性

本報告第二章介紹本計畫主要商港的海象觀測資料蒐集與特性分析，包括各主要商港海象測站位置之介紹，以及各主要商港港域風速及風向特性、波浪統計特性、潮汐與海(潮)流頻譜分析與調和分解結果特性說明。

## 2. 海象作業化模擬風場

本報告第三章介紹目前已作業化的風場模式，內容包括中央氣象局數值天氣預報作業控制系統的發展與運作情形、海象作業化 WRF 風場簡介及其組織架構，以及 WRF 風場與觀測風場評估的方式。

## 3. 主要商港風浪及波浪場模擬研究

本報告第四章說明本計畫主要商港風浪及波浪場模擬研究之成果，包括模擬臺灣周圍海域風浪之大尺度西太平洋範圍風浪模組、中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組，以及主要商港小尺度港區近岸波浪場模擬與細尺度港域波浪模擬。

## 4. 臺灣周圍海域暴潮模式

本報告第五章介紹本計畫所發展之臺灣周圍海域暴潮模式，內容包括模式之建置、數值模擬風壓場之建置、歷年侵臺颱風暴潮之模擬，以及主要商港暴潮位之復現期分析。

## 5. 主要商港水位及流場模擬與研究

本報告第六章係介紹本期計畫各主要商港小尺度水動力模組研究成果，包括前三年基隆港、臺北港、臺中港、布袋港、安平港與高雄港水動力模組改善成果，以及本年度重點工作項目即花蓮港與蘇澳港水動力模組研究成果。

## 6. 海象模擬作業化成果評估

本報告第七章海象作業化預報成果評估，主要針對已作業化之各主要商港港區為對象，說明 TaiCOMS 作業化成果評估內容及結果；內容分為風場評估、風浪模擬成果評估、水位模擬成果評估及流場模擬成果評估等。

## 7. 結論

第八章為結論，係以上述本年度計畫工作項目中資料特性分析結果與海象模擬研究結果做簡要之總結說明。

## 第二章 主要商港海象觀測資料特性分析

本章節主要針對基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、安平港、高雄港及布袋港等八個主要港口(如圖 2.1 所示)，彙整港灣技術研究中心海象觀測資料或中央氣象局潮位觀測資料，說明各商港海象觀測資料分析結果及特性。

### 2.1 主要商港海象測站位置

港灣技術研究中心歷年海氣象觀測之測站位置，如圖 2.2 至圖 2.9 所示，圖中測站 X 代表潮波流即時傳送監測系統測站(以下簡稱 AWCP 測站)，測站 T 代表壓力式潮位站，測站 W 為風力觀測站，測站 F 及測站 E 分別代表中央氣象局所屬潮位站及風力觀測站。有關本章節引用各港口海象觀測資料測站位置說明：

#### (1) 基隆港

基隆港潮位測站(T)及風力觀測站(W)均設置於西 33 號碼附近，AWCP 測站(X)於 2011 年 8 月起移至東防波堤堤頭北方測站 X2 處(距離堤頭約 200 m，水深約 48 m)，如圖 2.2 所示。

#### (2) 臺北港

臺北港潮位測站 T 於 2009 年 9 月設置，AWCP 測站於 2004 年 12 月裝置於新的海上觀測樁(測站 X1)，風力觀測站(W)於 2009 年 8 月設置，如圖 2.3 所示。

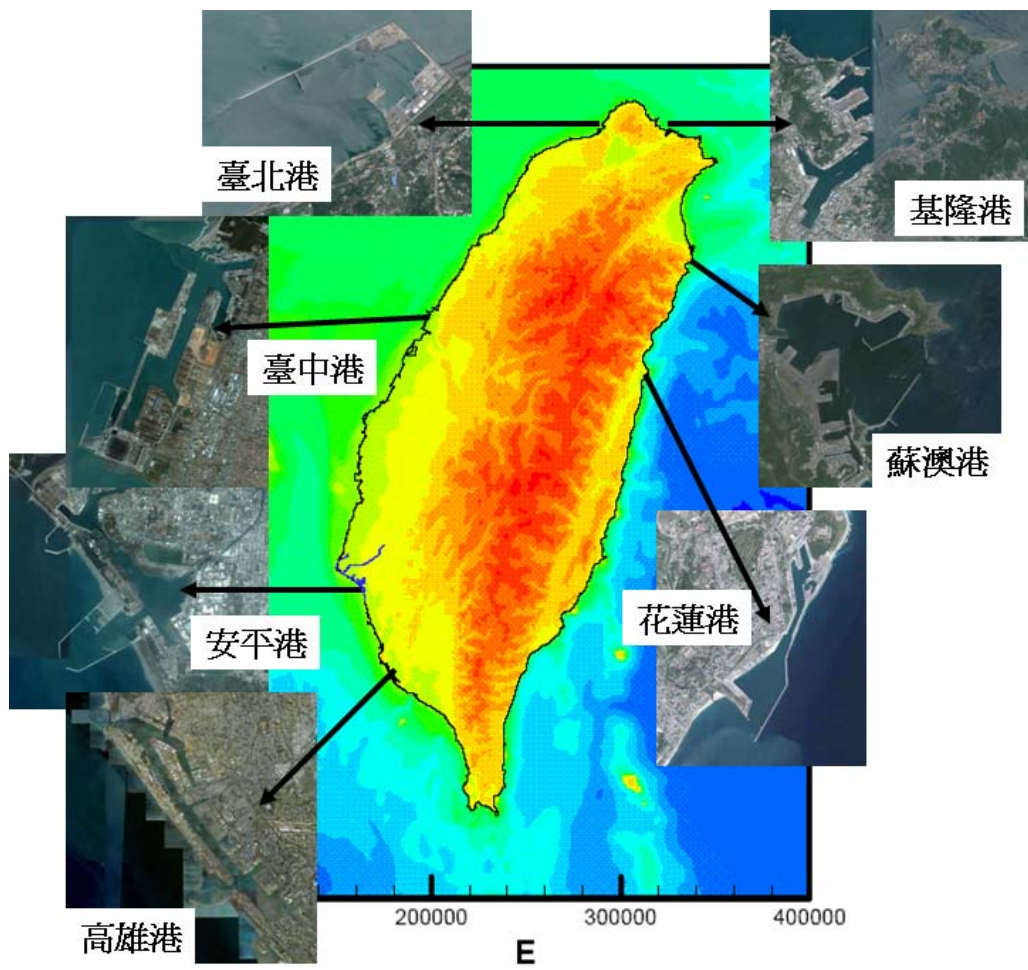


圖 2.1 國內主要商港之地理位置示意圖





圖 2.2 基隆港海氣象觀測位置示意圖

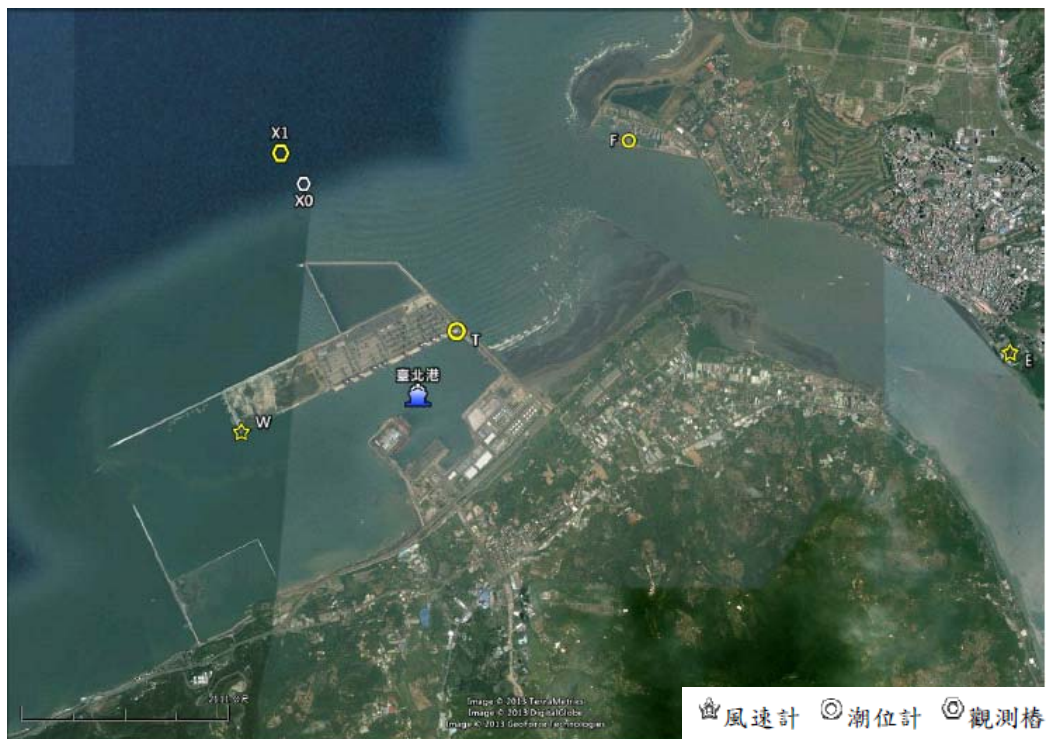


圖 2.3 臺北港海氣象觀測位置示意圖

### (3) 蘇澳港

蘇澳港潮位測站 T 及風力觀測站 W 均設置於港內貯木池水域之北側，其中風力觀測站於 2012 年 10 月更新為 Gill 二維超音波式風速計至今；AWCP 測站 X 於 2002 年 7 月設置於蘇澳港港口外約 700m 附近，水深約 25 m 處，如圖 2.4 所示。

### (4) 花蓮港

花蓮港潮位測站 T 設置於西防波堤堤頭附近，風力觀測站 W 設置於花蓮港務分公司樓頂，於 2007 年 11 月更新為 Gill 三維超音波式風速計至今；AWCP 測站 X 於 2001 年 8 月設置於花蓮港東防波堤往南延長 380 m，水深 34 m 處，如圖 2.5 所示。

### (5) 臺中港

臺中港潮位測站 T0 設置於四號碼頭附近，風力觀測站 W1 設置於北防波堤白燈塔頂，於 2009 年 9 月更新為 Gill 二維超音波式風速計；AWCP 測站 X1 自 2003 年 7 月設置於臺中港北防波堤堤頭 150 m 外，水深 25 m 處，如圖 2.6 所示。

### (6) 高雄港

高雄港潮位測站 T 於 2003 年 6 月設置於 10 號碼頭附近，風力觀測站 W1 於 2010 年 10 月設置於第二港口南防坡堤堤頭，採用 Gill 二維超音波式風速計；AWCP 測站 X1 於 2005 年 8 月移置第二港口附近海域，水深約 18 m 處，如圖 2.7 所示，目前 AWCP 測站 X1 處於暫停觀測狀態。





圖 2.4 蘇澳港海氣象觀測位置示意圖

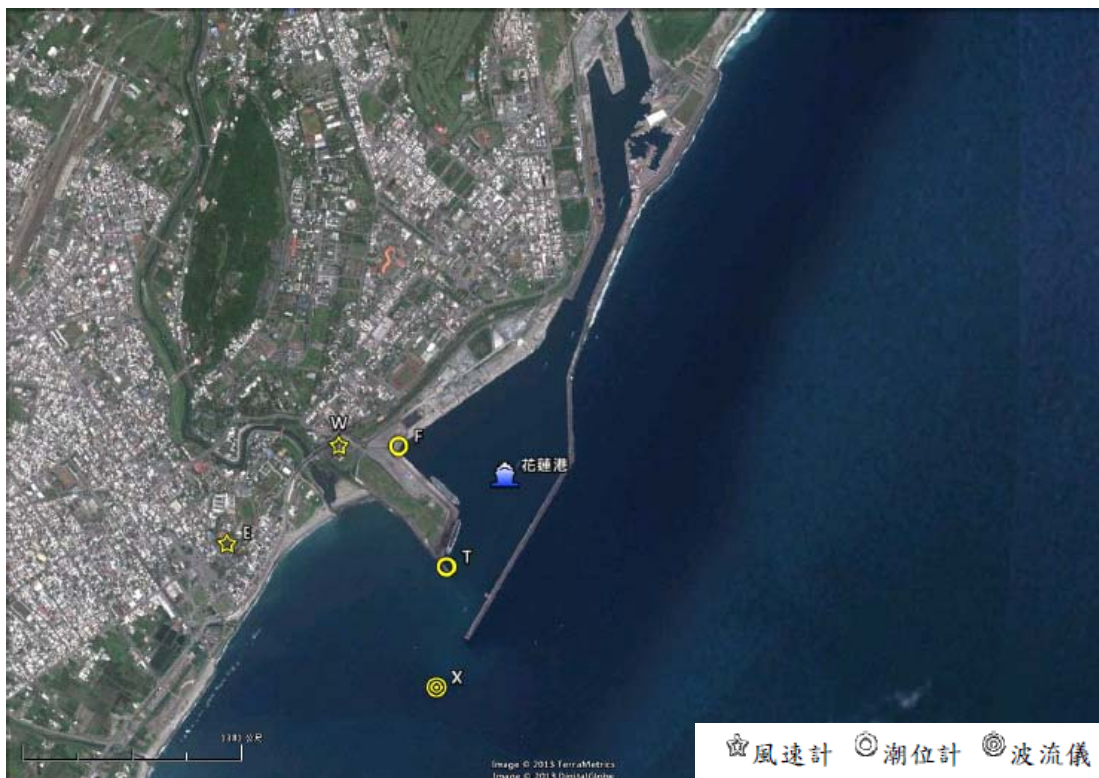


圖 2.5 花蓮港海氣象觀測位置示意圖



圖 2.6 臺中港海氣象觀測位置示意圖



圖 2.7 高雄港海氣象觀測位置示意圖



### (7) 安平港

安平港潮位測站 T2 設置於 2008 年 8 月，風力觀測站 W 於 2009 年 8 月設置於 7 號碼頭，測站 W1 於 2011 年 12 月增設於南外防波堤堤頭處(風速計高度約為海平面上 23 m)；AWCP 測站 X1 於 2011 年 7 月改設於南外防波堤外海附近海域，水深約 14 m 處，如圖 2.8 所示。

### (8) 布袋港

布袋港潮位測站 T1 設置時間為 2011 年 8 月，風力觀測站 W 設置時間為 2006 年 8 月，AWCP 測站 X 設置水深約 7 m 處，如圖 2.9 所示。



圖 2.8 安平港海氣象觀測位置示意圖



圖 2.9 布袋港海氣象觀測位置示意圖

## 2.2 主要商港潮汐特性

本計畫蒐集主要商港包括基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港等港口潮位資料進行統計與天文潮調和分析，其中天文潮調和分析採用 60 個天文分潮進行。在潮位資料補遺方面，本計畫分別針對每年的潮位觀測資料利用天文潮調和分析預測資料補遺。各商港代表性潮位統計值包括最高潮位、平均高潮位、平均潮位、平均低潮位、最低潮位及平均潮差等。此外，針對安平港及布袋港本計畫選取臺灣技術研究中心於港內觀測之潮位資料進行相關分析。

### 2.2.1 主要商港潮位統計特性

#### (1) 蘇澳港

本計畫蒐集中央氣象局 2008 年 1 月至 2013 年 12 月逐時潮位觀測資料(測站代碼 1246)，共計 50,764 筆資料，資料觀測率(資料觀測數/資料應觀測數)達 0.965。蘇澳港逐時潮位觀測資料月平均及年平均統計結果，如圖 2.10 所示，圖中括號所示百分比為該年度資料觀測率；2008~2013 年潮位年平均值之低點為 0.066m，出現在 2011 年，潮位年平均值之高點為 0.126m，發生於 2012 年，年平均潮位之高低值相差 0.06m。表 2.1 所列為蘇澳港(2008~2011 年)重要代表性潮位統計結果，其中最高潮位值為+1.390 m 發生於 2009 年 8 月 7 日 06 時中度颱風莫拉克侵臺期間，颱風侵臺路徑如圖 2.11 所示。

表 2.1 蘇澳港(2008~2011 年)重要代表性潮位統計結果表

代表性潮位	高程值 (m)
最高高潮位 (H.H.W.L.)	+1.390
平均高潮位 (M.H.W.L.)	+0.537
平均潮位 (M.W.L.)	+0.074
平均低潮位 (M.L.W.L.)	-0.386
最低低潮位 (L.L.W.L.)	-1.182
平均潮位差	0.923
觀測資料數 34337	
測站位置:(24° 35'33"N, 121° 52'01"E)	
基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001) : 0 m	

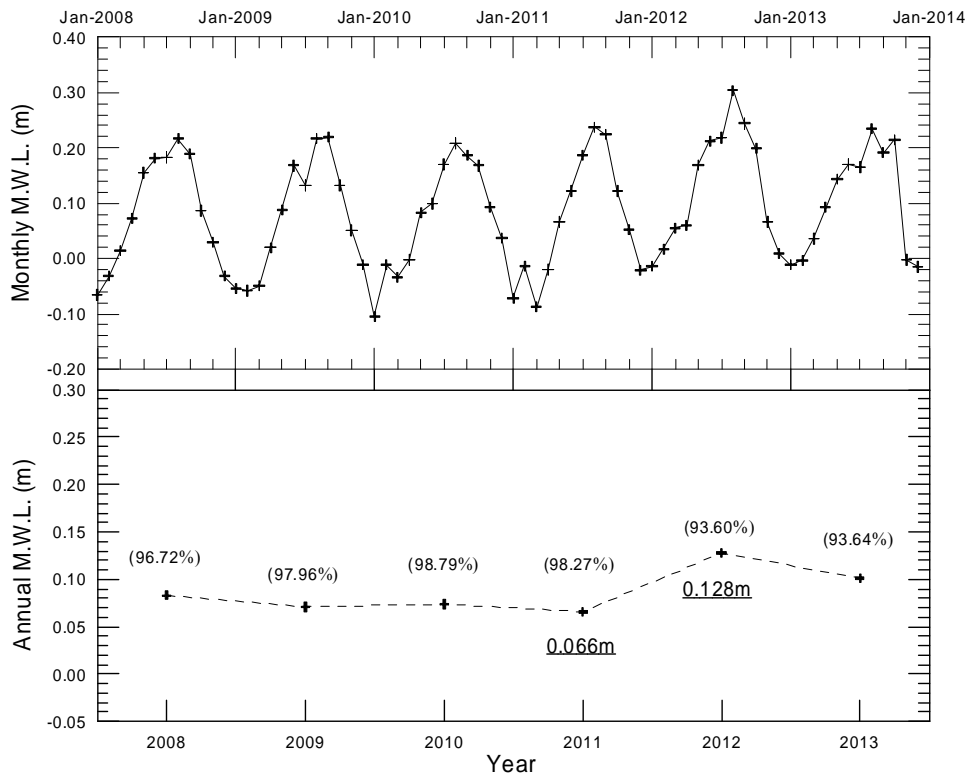


圖 2.10 2008~2013 年蘇澳港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖

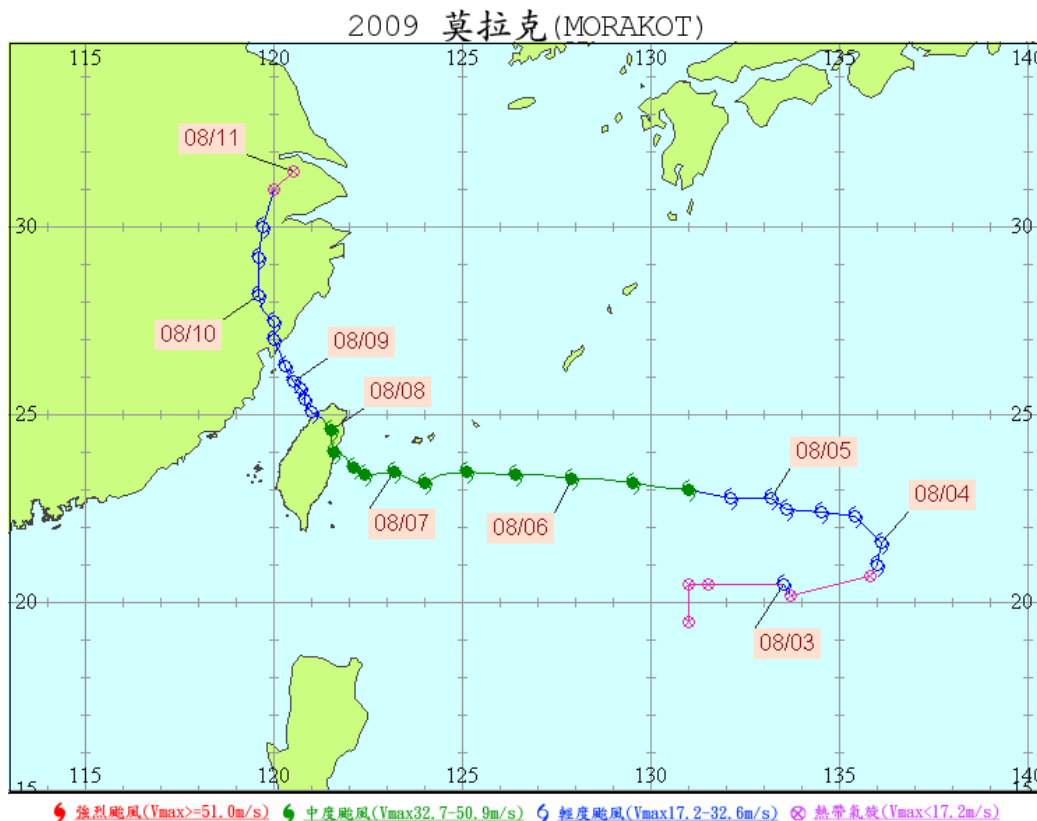


圖 2.11 2009 年中度颱風莫拉克侵臺路徑圖

### (2) 花蓮港

本計畫蒐集花蓮港中央氣象局 2008 年 1 月至 2013 年 12 月逐時潮位觀測資料(測站代碼 1256)，共計 51,078 筆資料，資料觀測率為 0.971。花蓮港歷年(2008~2013)逐時潮位觀測資料月平均及年平均統計結果，如圖 2.12 所示；統計結果顯示花蓮港 2008~2013 年潮位年平均值之低點為 0.086m，出現在 2011 年，潮位年平均值之高點為 0.161m，發生於 2012 年，年平均潮位之高低值相差 0.075m。表 2.2 所列為花蓮港 2008~2011 年重要代表性潮位統計結果，表中最高潮位值為 +1.455 m，與蘇澳港相同發生於中度颱風莫拉克侵臺期間，發生時間為 2009 年 8 月 7 日 07 時。

### (3) 基隆港

本計畫同樣蒐集基隆港中央氣象局 2008 年 1 月至 2013 年 12 月逐

時潮位觀測資料(測站代碼 1516)，共計 48,318 筆資料，資料觀測率為 0.918。歷年(2008~2013)基隆港逐時潮位觀測資料之月平均及年平均統計結果，如圖 2.13 所示，統計結果顯示基隆港 2008~2013 年潮位年平均價值之低點為 0.048m，出現在 2011 年，潮位年平均價值之高點為 0.111m，發生於 2012 年，年平均潮位之高低值相差 0.063m。表 2.3 所列為基隆港(2008~2011 年)重要代表性潮位統計結果，表中最高潮位值為+0.957 m，同樣發生於 2009 年中度颱風莫拉克侵臺期間，發生時間為 2009 年 8 月 6 日 23 時。

**表 2.2 花蓮港(2008~2011 年)重要代表性潮位統計結果表**

代表性潮位	高程值 (m)
最高高潮位 (H.H.W.L.)	+1.455
平均高潮位 (M.H.W.L.)	+0.571
平均潮位 (M.W.L.)	+0.095
平均低潮位 (M.L.W.L.)	-0.378
最低低潮位 (L.L.W.L.)	-1.113
平均潮位差	0.949
觀測資料數 34679	
測站位置:(23°58'50"N, 121°37'25"E)	
基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001)：0 m	

**表 2.3 基隆港(2008~2011 年)重要代表性潮位統計結果**

代表性潮位	高程值 (m)
最高高潮位 (H.H.W.L.)	+0.957
平均高潮位 (M.H.W.L.)	+0.346
平均潮位 (M.W.L.)	+0.059
平均低潮位 (M.L.W.L.)	-0.208
最低低潮位 (L.L.W.L.)	-1.060
平均潮位差	0.554
觀測資料數 34337	
測站位置:(25°09'18"N, 121°45'08"E)	
基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001)：0 m	



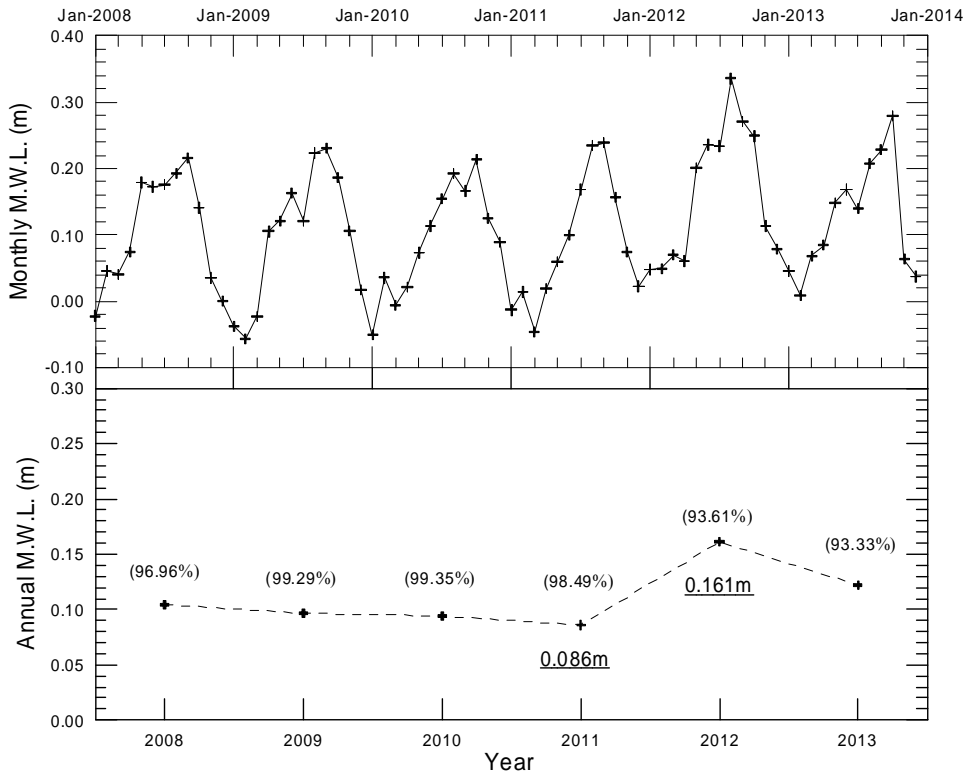


圖 2.12 2008~2013 年花蓮港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖

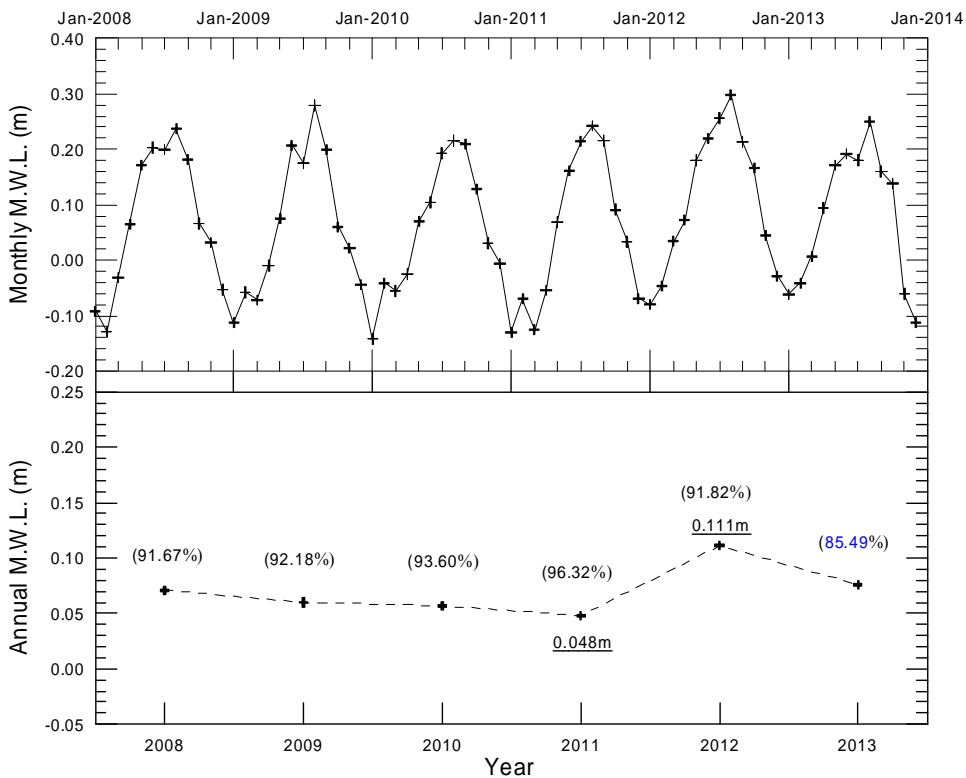


圖 2.13 2008~2013 年基隆港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖

#### (4) 臺北港

本計畫蒐集臺北港中央氣象局 2008 年 1 月至 2013 年 12 月逐時潮位觀測資料(測站代碼 1306)，共計 39,599 筆資料，資料觀測率為 0.753。臺北港 2008~2013 年逐時潮位觀測資料之月平均及年平均統計結果，如圖 2.14 所示，圖中顯示 2009 年及 2010 年臺北港逐時潮位資料觀測率分別為 0.482 及 0.489 明顯偏低，此可能導致年統計資料失去代表性；因此本計畫僅利用 2011 年至 2013 年逐時潮位觀測資料進行代表性潮位統計，統計結果如表 2.4 所列。表中最高潮位值為+2.542 m，發生於 2013 年中度颱風菲特侵臺期間(颱風移動路徑如圖 2.15 所示)，時間為 2013 年 10 月 6 日 12 時。

表 2.4 臺北港(2011~2013 年)重要代表性潮位統計結果

代表性潮位	高程值 (m)
最高高潮位(H.H.W.L.)	+2.542
平均高潮位(M.H.W.L.)	+1.511
平均潮位(M.W.L.)	+0.341
平均低潮位(M.L.W.L.)	-0.804
最低低潮位(L.L.W.L.)	-1.900
平均潮位差	2.316
觀測資料數 22665	
測站位置:(25°09'24"N, 121°22'18"E)	
基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001)：0 m	

#### (5) 臺中港

中央氣象局 2008 年 1 月至 2013 年 12 月臺中港逐時潮位觀測資料(測站代碼 1436)，共計 48,244 筆資料，資料觀測率為 0.917。臺中港歷年(2008~2013)逐時潮位觀測資料月平均及年平均統計結果，如圖 2.16 所示，由年平均值統計結果顯示臺中港 2008~2013 年潮位年平均值低點為 2008 年之平均值 0.075m，年平均潮位值高點為 2012 年之平均值 0.222m，年平均潮位之高低值相差達 0.147m，顯示臺中港年平均潮位值變動差異頗大。有鑑於此，本計畫選取 2010~2013 年潮位年平均變

動較小的資料進行臺中港代表性潮位統計，統計結果如表 2.5 所列；表中臺中港 2010~2013 年最高潮位值為+3.192m，發生於 2012 年中度颱風蘇拉(SAOLA)侵臺期間，時間為 2012 年 8 月 2 日 11 時，蘇拉颱風移動路徑如圖 2.17 所示。

表 2.5 臺中港(2010~2013 年)重要代表性潮位統計結果表

代表性潮位	高程值 (m)
最高高潮位( H.H.W.L.)	+3.192
平均高潮位( M.H.W.L.)	+2.070
平均潮位( M.W.L.)	+0.188
平均低潮位( M.L.W.L.)	-1.713
最低低潮位( L.L.W.L.)	-2.997
平均潮位差	3.783
觀測資料數 32,116	
測站位置:(24° 17'16"N, 120° 31'59"E)	
基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001)：0 m	

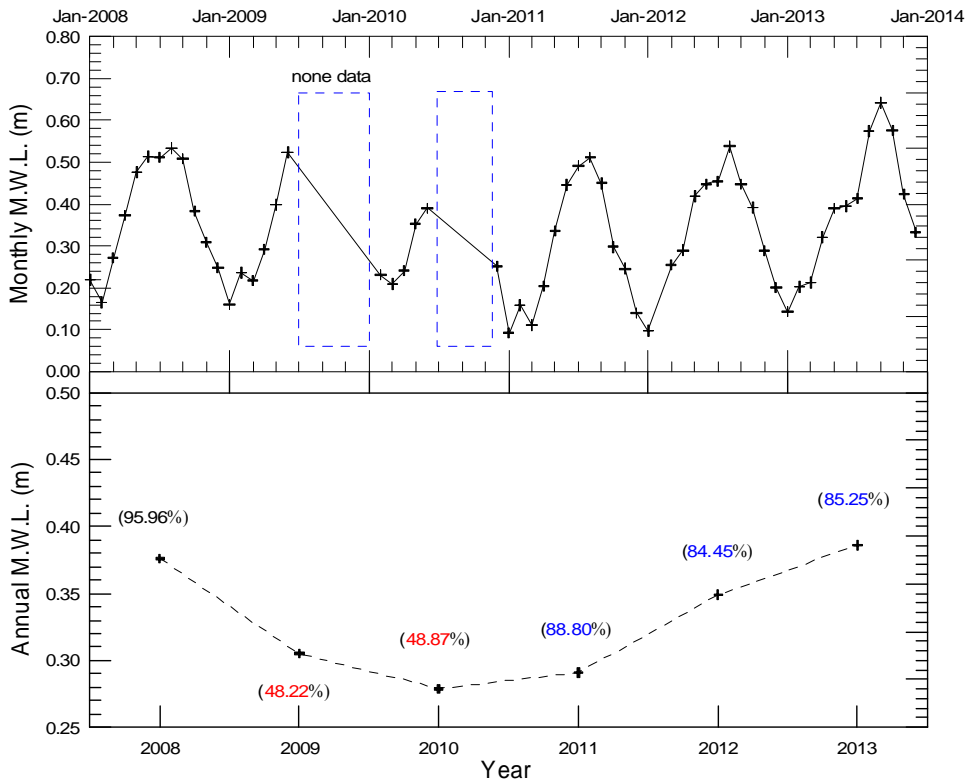


圖 2.14 2008~2013 年臺北港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖

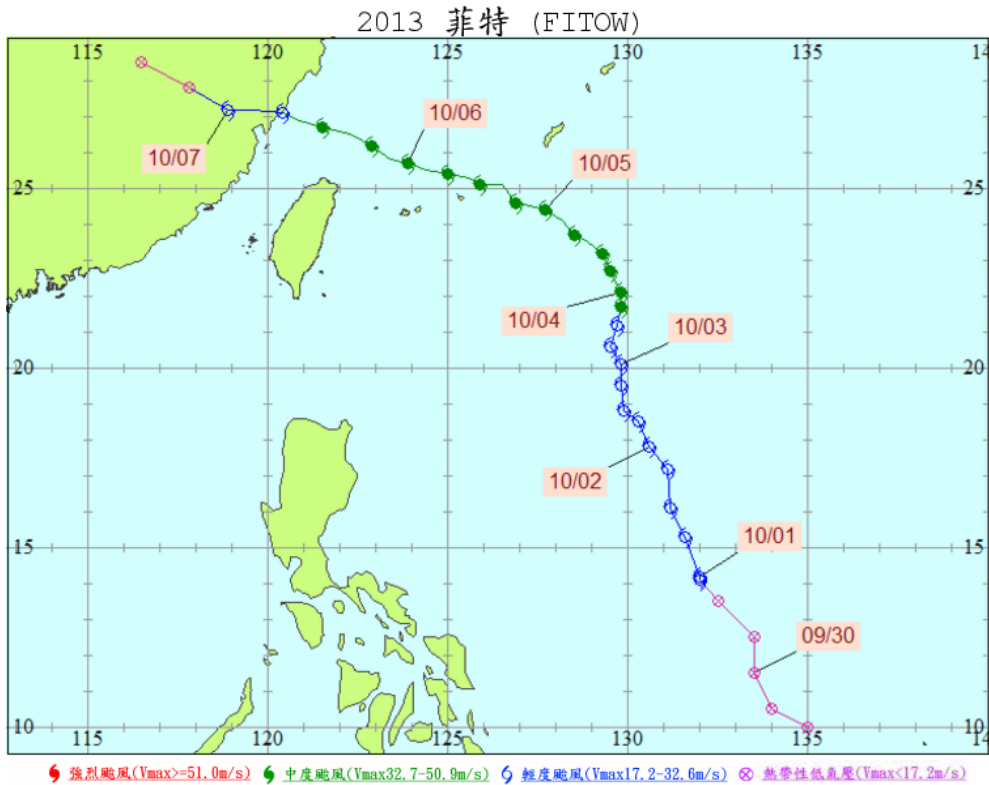


圖 2.15 2013 年中度颱風菲特侵臺路徑圖

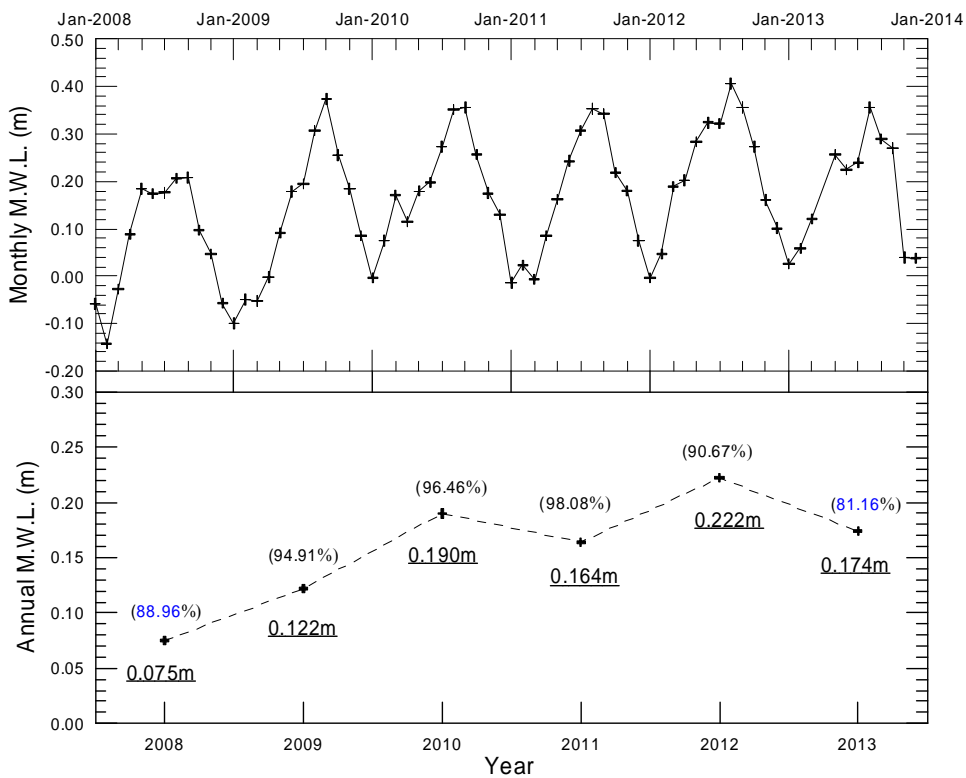


圖 2.16 2008~2013 年臺中港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖

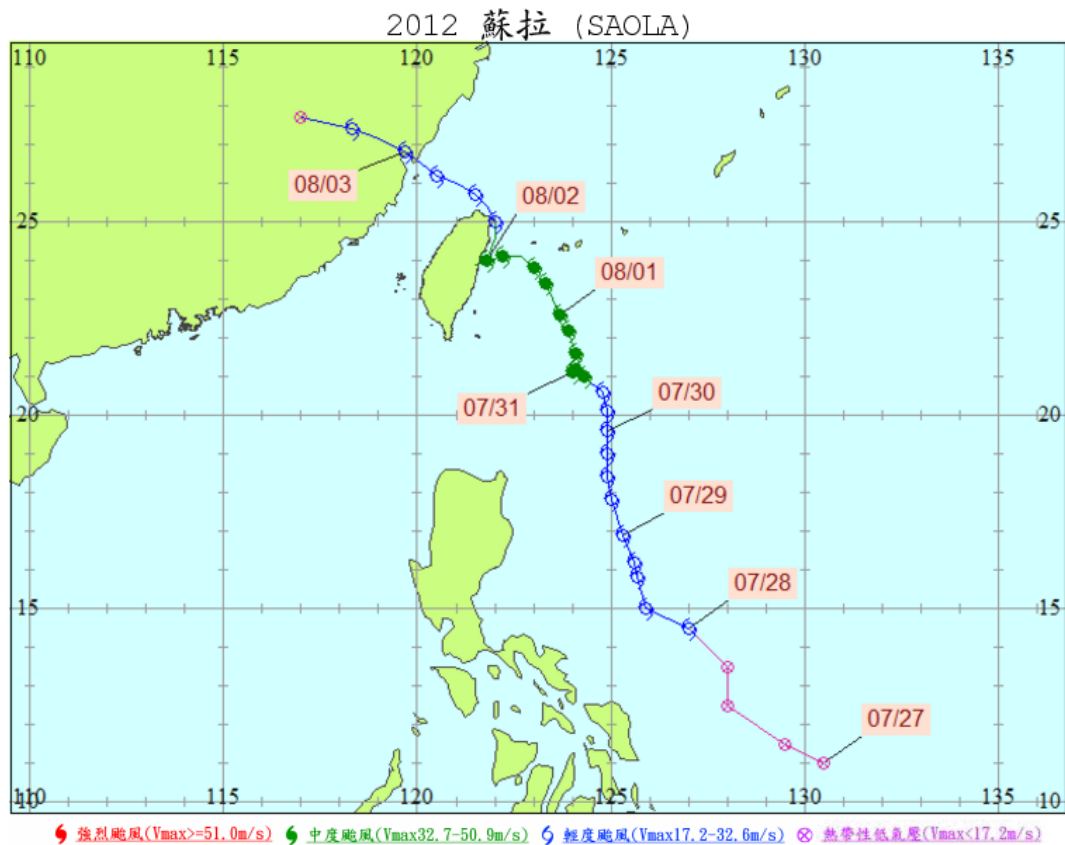


圖 2.17 2012 年中度颱風蘇拉侵臺路徑圖

### (6) 高雄港

中央氣象局 2008 年 1 月至 2013 年 12 月高雄港逐時潮位觀測資料 (測站代碼 1486)，共計 47,077 筆資料，資料觀測率為 0.895。高雄港 2008 ~ 2013 年逐時潮位觀測資料之月平均及年平均統計結果，如圖 2.18 所示，顯示高雄港潮位資料有顯著的潮位基準變動現象，其分界點約在 2009 年 9 月前後。因此本計畫僅選取 2010~2013 年潮位觀測資料進行高雄港代表性潮位統計，統計結果如表 2.6 所列；表中最高潮位值為 +1.174m，同樣發生於 2012 年中度颱風蘇拉(SAOLA)侵臺期間，時間為 2012 年 8 月 1 日 7 時。

表 2.6 高雄港(2010~2013 年)重要代表性潮位統計結果表

代表性潮位	高程值 (m)
最高高潮位 (H.H.W.L.)	+1.174
平均高潮位 (M.H.W.L.)	+0.453
平均潮位 (M.W.L.)	+0.201
平均低潮位 (M.L.W.L.)	-0.059
最低低潮位 (L.L.W.L.)	-0.505
平均潮位差	0.515
觀測資料數 32,116	
測站位置:(24° 17'16"N, 120° 31'59"E)	
基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001) : 0 m	

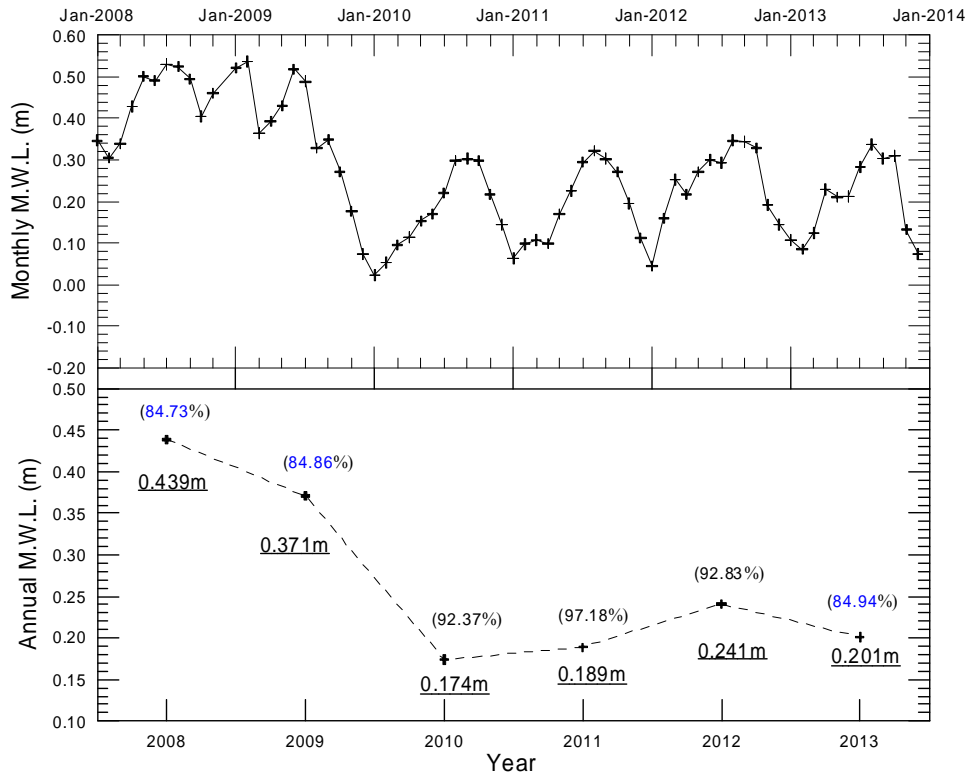


圖 2.18 2008~2013 年高雄港逐時潮位資料月及年平均潮位變化圖

(7) 安平港

本計畫選取 2013 年 1 月至 12 月逐時潮位觀測資料(港研中心測站代碼 T2, 位置參考圖 2.8 所示), 共計 7,220 筆資料, 潮位資料觀測率

約為 0.8242。因安平港僅蒐集近一年潮位資料，故本計畫僅表列 2013 年逐月代表性潮位統計結果，如表 2.7 所列；表中 2013 年 11 月份安平港潮位觀測資料數為零，最高潮位值為+1.93m，發生於 2013 年 9 月 22 日 10 時，適值強烈颱風天兔(USAGI)侵臺期間，其中天兔颱風移動路徑如圖 2.19 所示。由於安平港潮位觀測基準值港研中心並未提供本計畫參考，因此本計畫僅能由表性潮位統計值推論其屬於低潮系統，與前述港口中潮系統有別。

### (8) 布袋港

布袋港本計畫選取 2013 年 11 月至 2014 年 10 月逐時潮位觀測資料(港研中心測站代碼 T1，位置參考圖 2.9 所示)，共計 8,207 筆資料，資料觀測率約為 0.937。同安平港，本計畫僅表列布袋港逐月代表性潮位進行統計結果，如表 2.8 所列，表中最高潮位觀測值為+2.98m，發生於 2014 年 10 月 9 日 11 及 23 時。潮位觀測基準因港研中心並未提供相關資料，因此本計畫亦僅能由潮位統計資料判斷布袋港位觀測資料屬於低潮系統。

表 2.7 安平港 2013 年代表性潮位逐月統計表

年 月	最高高潮位(m)	平均高潮位(m)	平均潮位(m)	平均低潮位(m)	最低低潮位(m)	最大潮差(m)	平均潮差(m)	觀測資料數
2013/01	1.290	0.820	0.537	0.247	-0.040	1.330	0.573	744
2013/02	1.130	0.830	0.529	0.237	-0.050	1.180	0.593	672
2013/03	1.050	0.867	0.571	0.277	-0.020	1.070	0.591	744
2013/04	1.260	0.981	0.681	0.378	0.030	1.230	0.603	720
2013/05	1.310	0.979	0.678	0.379	-0.040	1.350	0.601	708
2013/06	1.400	1.007	0.709	0.421	-0.020	1.420	0.586	706
2013/07	1.510	1.084	0.795	0.502	0.130	1.380	0.582	744
2013/08	1.600	1.146	0.849	0.540	0.210	1.390	0.607	687
2013/09	1.930	1.122	0.832	0.532	0.270	1.660	0.589	611
2013/10	1.600	1.083	0.768	0.447	0.000	1.600	0.636	606
2013/11	—	—	—	—	—	—	—	0
2013/12	1.270	0.905	0.630	0.356	-0.010	1.280	0.548	278
年平均 年極值	1.930	0.984	0.689	0.392	-0.050	1.660	0.592	7220

表 2.8 布袋港 2013 年 11 月至 2014 年 10 月代表性潮位逐月統計表

年 月	最高高潮位(m)	平均高潮位(m)	平均潮位(m)	平均低潮位(m)	最低低潮位(m)	最大潮差(m)	平均潮差(m)	觀測資料數
2013/11	2.730	2.288	1.511	0.812	0.360	2.370	1.476	720
2013/12	2.580	2.208	1.426	0.725	0.170	2.410	1.483	744
2014/01	2.670	2.243	1.461	0.749	0.170	2.500	1.494	744
2014/02	2.630	2.294	1.506	0.796	0.280	2.350	1.499	671
2014/03	2.580	2.289	1.509	0.788	0.300	2.280	1.501	739
2014/04	2.590	2.351	1.601	0.899	0.450	2.140	1.452	716
2014/05	2.580	2.342	1.617	0.939	0.410	2.170	1.402	743
2014/06	2.790	2.431	1.709	1.032	0.480	2.310	1.399	716
2014/07	2.920	2.483	1.752	1.062	0.490	2.430	1.421	727
2014/08	2.850	2.460	1.721	1.012	0.510	2.340	1.448	743
2014/09	2.820	2.488	1.721	1.011	0.630	2.190	1.478	704
2014/10	2.980	—	—	—	0.020	2.960	—	240
平均		2.353	1.594	0.893			1.459	
極值	2.980				0.020	2.960		8207

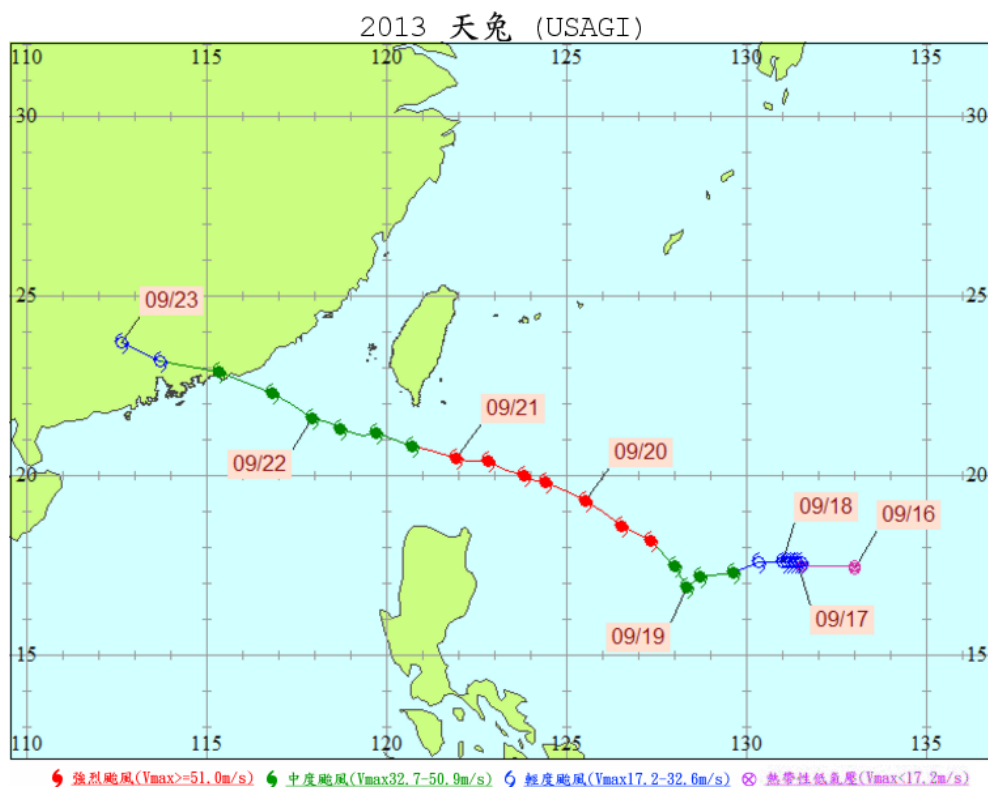


圖 2.19 2013 年強烈颱風天兔侵臺路徑圖



針對上述各商港潮位觀測基準問題，除了安平港及布袋港潮位資料屬於低潮系統外，目前中央氣象局提供的各港潮位資料均屬中潮系統，有別於以往各港務系統常用之低潮系統。本計畫各港潮位資料均透過中央氣象局申請(安平港及布袋港除外)，雖然在中央氣象局潮位資料說明欄中均有提供潮位觀測基準面相對於臺灣高程基準(TWVD2001)資料，但因各港潮位資料說明欄中均為 0 cm，是否代表各港潮位觀測資料均已校正至同一相對基準面，中央氣象局並未說明。

本計畫將各港口中央氣象局所屬潮位資料之年平均潮位統計值(2012 年)以柱狀圖表示，如圖 2.20 所示，顯示各港口年平均潮位值以臺北港最高，臺中港年平均潮位值則小於高雄港，此等現象與以往認知或前人研究(如劉，1996)略有出入，因此本計畫僅能推論中央氣象局潮位資料說明欄中潮位觀測基準面相對於臺灣高程基準之資料應非正確資料。

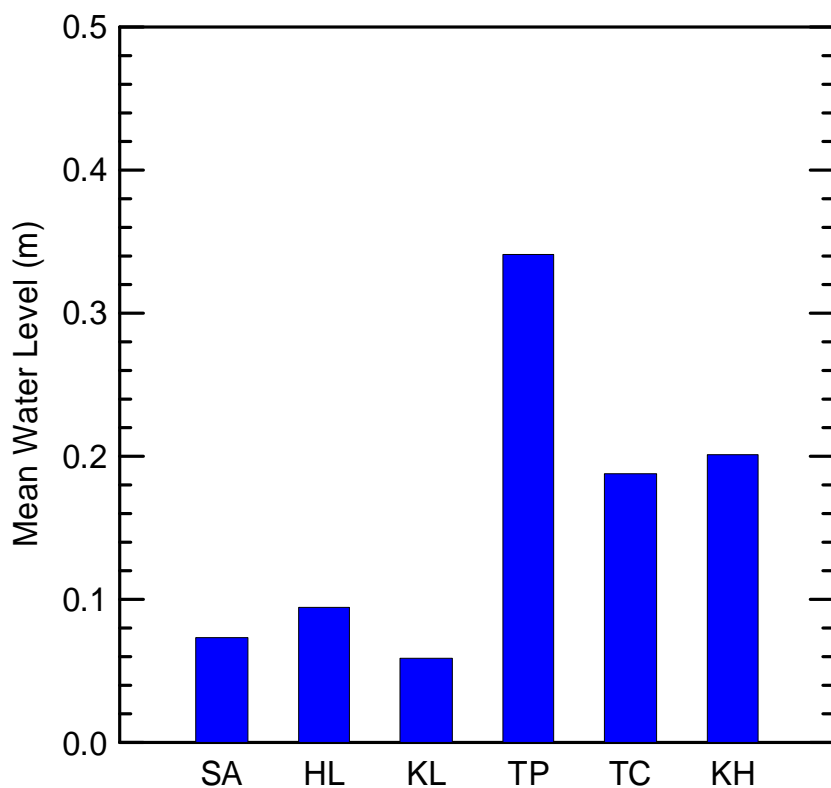


圖 2.20 主要商港 2012 年潮位資料年平均潮位分布圖

## 2.2.2 主要商港天文潮位特性

### (1) 蘇澳港

蘇澳港 2008~2013 年歷年潮位能譜分析結果，如圖 2.21 所示，圖中“+”代表為天文潮 60 個分潮之能量密度值。蘇澳港潮位能譜分析結果顯示蘇澳港歷年潮汐主要分潮能量以半日潮  $M_2$  分潮最大，全日潮能量有逐年(2008~2013 年)下降趨勢，其中  $O_1$  能量下降相當明顯，如 2011~2013 年  $O_1$  分潮能量已明顯低於半日潮  $S_2$  能量。

蘇澳港 2012 年潮位天文潮調和分析結果，如表 2.9 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1615m 及 0.1896m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 0.4255m、0.0859m 及 0.1804 m；此外，長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.1416 m，潮位平均值為 +0.1294 m。由潮位能譜及天文潮調和分析結果得知各主要分潮之振幅大小存在年變化特性，如圖 2.22 所示，顯示全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅大小下降趨勢相當明顯，半日潮  $M_2$  分潮振幅大小微幅上升， $S_2$  分潮振幅變化不顯著。因此本計畫選取 2008 ~ 2013 年主要分潮振幅之平均值，計算蘇澳港潮型指標  $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$  值約等於 0.624，顯示蘇澳港潮汐型態屬於混合潮型。(註：當潮型指標小於 0.5 者屬於半日潮型，大於 1.25 者屬於全日潮型，介於二者之間為混合潮型)

### (2) 花蓮港

花蓮港 2008~2013 年歷年潮位能譜分析結果，如圖 2.23 所示，依據潮位能譜歷年分析結果顯示花蓮港潮汐主要分潮能量排序無顯著變化，亦即以半日潮  $M_2$  分潮能量最大，半日潮  $S_2$  能量次之，全日潮  $K_1$  與  $O_1$  能量分別排三及第四。

花蓮港 2012 年潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.10 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1345m 及 0.1525m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 0.4584m、0.0913m 及 0.1969 m；長週期之年

分潮  $S_a$  振幅為 0.1311m，潮位平均值為 +0.1615 m。花蓮港 2008 ~ 2013 年歷年潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化情形，如圖 2.24 所示，本計畫選取 2008 ~ 2013 年主要分潮振幅之平均值，計算花蓮港潮型指標 $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$ 值約為 0.476，顯示花蓮港潮汐型態屬於半日潮型。

### (3) 基隆港

基隆港 2008 ~ 2013 年歷年潮位能譜分析結果，如圖 2.25 所示，依據潮位能譜分析結果顯示基隆港潮汐最大分潮能量為  $M_2$  分潮，全日潮  $K_1$  能量略大於  $O_1$  能量，半日潮  $N_2$  能量略大於  $S_2$  能量；整體而言，基隆港潮汐能譜特性為全日潮能量大於半日潮能量。

基隆港 2012 年潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.11 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1426m 及 0.1771m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 0.2437m、0.0578m 及 0.0575m；長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.1678m，潮位平均值為 +0.1092 m。基隆港 2008 ~ 2013 年歷年潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化情形，如圖 2.26 所示，同樣本計畫選取 2008 ~ 2013 年主要分潮振幅之平均值，計算潮型指標 $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$ 值等於 1.192，介於 0.5 ~ 1.25 之間，顯示基隆港潮汐型態屬於混合潮型。

### (4) 臺北港

臺北港 2008 年及 2011 ~ 2013 年潮位資料能譜分析結果如圖 2.27 所示，由潮位能譜分析結果顯示臺北港潮汐最大分潮能量為  $M_2$  分潮，其次為  $S_2$  分潮，全日潮能量  $K_1$  分潮大於  $O_1$  分潮。

臺北港 2012 年潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.12 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1667m 及 0.207m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 1.1291m、0.2155m 及 0.3165m；長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.178m，潮位平均值為 +0.3403 m。臺北港 2008 ~ 2013 年歷年潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化情形，如

圖 2.28 所示，潮型指標 $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$ 值約等於 0.286，小於 0.5，代表臺北港潮汐型態屬於半日潮型。

### (5) 臺中港

臺中港 2008 ~ 2013 年歷年潮位能譜分析結果，如圖 2.29 所示，依據潮位能譜分析結果顯示，臺中港潮汐主要分潮最大分潮能量為  $M_2$  分潮，其次為  $S_2$  分潮，全日潮能量  $K_1$  分潮大於  $O_1$  分潮。

臺中港 2012 年潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.13 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.195m 及 0.2396m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 1.8348m、0.3402m 及 0.5264m；長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.1689m，潮位平均值為 +0.2255m。臺中港 2008 ~ 2013 年歷年潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化情形，如圖 2.30 所示，同理，本計畫選取 2008 ~ 2013 年主要分潮振幅之平均值，計算潮型指標 $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$ 值約等於 0.198，小於 0.5，代表臺中港潮汐型態屬於半日潮型。

### (6) 高雄港

高雄港 2008 ~ 2013 年歷年潮位能譜分析結果，如圖 2.31 所示，由潮位能譜分析結果顯示，高雄港潮汐主要分潮能量排序為  $K_1$ 、 $M_2$ 、 $O_1$  及  $S_2$  分潮，其中  $S_2$  分潮量明顯小於其他主要分潮。

高雄港 2012 年潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.14 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1519m 及 0.1679m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 0.1944m、0.0449m 及 0.0704m；長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.1088m，潮位平均值為 +0.2414m。高雄港 2008 ~ 2013 年歷年潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化情形，如圖 2.32 所示，同理，本計畫選取 2008 ~ 2013 年主要分潮振幅之平均值，計算高雄港潮型指標 $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$ 值等於 1.36，顯示高雄港潮汐型態屬於全日潮型。

## (7) 安平港

針對安平港潮位資料能譜分析，本計畫選取 2013 年經補遺後潮位資料進行能譜分析，得到安平港潮位能譜如圖 2.33 所示；依據安平港潮位能譜分析結果顯示，安平港潮汐主要分潮能量排序為  $M_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  及  $S_2$  分潮。

安平港 2013 年潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.15 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1522m 及 0.1687m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 0.2647m、0.0593m 及 0.061m；長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.1427m，潮位平均值為 +0.6879m。安平港潮型指標  $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$  值約等於 0.985，介於 0.5 ~ 1.25 之間，顯示安平港潮汐型態屬於混合潮型。

## (8) 布袋港

布袋港 2013 年 11 月至 2014 年 10 月逐時潮位資料(經補遺後)之能譜分析結果如圖 2.34 所示，依據潮位能譜分析結果顯示，布袋港潮汐主要分潮能量排序為  $M_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  及  $S_2$  分潮。

布袋港潮位資料天文潮調和分析結果，如表 2.16 所列；表中全日潮  $O_1$  及  $K_1$  分潮振幅分別為 0.1616m 及 0.1984m，半日潮  $M_2$ 、 $N_2$  及  $S_2$  分潮振幅分別為 0.6868m、0.125m 及 0.1522m；長週期之年分潮  $S_a$  振幅為 0.1532m，潮位平均值為 1.5967m。布袋港潮型指標  $[(O_1+K_1)/(M_2+S_2)]$  值約為 0.429，小於 0.5，代表布袋港潮汐型態已屬於半日潮型。

表 2.9 蘇澳港 2012 年潮位調和分析成果表

蘇澳港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
$S_a$	0.04106860	0.1416	30.4869	$M_2$	28.98410416	0.4255	118.9757
$S_{aa}$	0.08213730	0.0240	138.2088	$MKS_2$	29.06624222	0.0025	290.4260
$M_m$	0.54437470	0.0060	111.7893	$\lambda_2$	29.45562553	0.0042	337.9081
$M_{sf}$	1.01589584	0.0148	14.9014	$L_2$	29.52847862	0.0146	292.6134
$M_f$	1.09803307	0.0158	186.5437	$T_2$	29.95893288	0.0136	13.6079
$2Q_1$	12.85428619	0.0050	350.0406	$S_2$	30.00000000	0.1804	202.3346
$\sigma_1$	12.92714024	0.0047	274.2859	$R_2$	30.04106712	0.0031	133.5410
$Q_1$	13.39866066	0.0316	346.5031	$K_2$	30.08213806	0.0450	342.7086
$\rho_1$	13.47151470	0.0063	266.7994	$MSN_2$	30.54437447	0.0012	32.2054
$O_1$	13.94303513	0.1615	342.2869	$KJ_2$	30.62651253	0.0018	311.6165
$MP_1$	14.02517319	0.0007	186.5268	$2SM_2$	31.01589584	0.0020	179.6212
$M_1$	14.49202538	0.0105	43.3344	$MO_2$	42.92713928	0.0026	70.8981
$\chi_1$	14.56954765	0.0020	242.5675	$M_3$	43.47615814	0.0070	100.2782
$\pi_1$	14.91786480	0.0054	232.7084	$SO_3$	43.94303513	0.0012	150.0100
$P_1$	14.95893097	0.0636	52.4966	$MK_3$	44.02517319	0.0010	109.9216
$S_1$	15.00000000	0.0048	90.7471	$SK_3$	45.04106903	0.0004	176.1010
$K_1$	15.04106903	0.1896	27.7334	$MN_4$	57.42383194	0.0004	53.5229
$\psi_1$	15.08213520	0.0003	246.1310	$M_4$	57.96820831	0.0029	39.1773
$\phi_1$	15.12320614	0.0024	169.9553	$SN_4$	58.43972778	0.0008	159.0804
$\theta_1$	15.51258945	0.0005	98.2393	$MS_4$	58.98410416	0.0029	148.8822
$J_1$	15.58544350	0.0084	6.4378	$MK_4$	59.06624222	0.0012	311.6230
$SO_1$	16.05696487	0.0014	137.9142	$S_4$	60.00000000	0.0007	221.0458
$OO_1$	16.13910103	0.0047	252.6619	$SK_4$	60.08213806	0.0008	69.5985
$OQ_2$	27.34169579	0.0022	156.2422	$2MN_6$	86.40793610	0.0004	307.8940
$MNS_2$	27.42383385	0.0044	36.9995	$M_6$	86.95231628	0.0005	13.6260
$2N_2$	27.85935402	0.0016	161.0666	$MSN_6$	87.42383575	0.0001	208.1479
$\mu_2$	27.96820450	0.0171	40.3284	$2MS_6$	87.96820831	0.0002	179.9672
$N_2$	28.43972969	0.0860	130.1747	$2MK_6$	88.05034637	0.0002	311.3178
$v_2$	28.51258278	0.0162	29.2178	$2SM_6$	88.98410797	0.0001	94.9341
$OP_2$	28.90196609	0.0061	321.8863	$MSK_6$	89.06623840	0.0003	49.5002
平均潮位 = 0.1294 m							
資料時間 : 2012/07/02 00:00:00							

表 2.10 花蓮港 2012 年潮位調和分析成果表

花蓮港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
Sa	0.04106860	0.1311	39.3416	M2	28.98410416	0.4584	123.4315
S <sub>aa</sub>	0.08213730	0.0122	129.1416	MKS <sub>2</sub>	29.06624222	0.0007	222.7845
M <sub>m</sub>	0.54437470	0.0092	51.7292	λ <sub>2</sub>	29.45562553	0.0004	143.4290
M <sub>sf</sub>	1.01589584	0.0148	19.4415	L <sub>2</sub>	29.52847862	0.0146	285.0241
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0129	194.2214	T <sub>2</sub>	29.95893288	0.0115	14.1705
2Q <sub>1</sub>	12.85428619	0.0040	357.0663	S <sub>2</sub>	30.00000000	0.1969	206.6881
σ <sub>1</sub>	12.92714024	0.0056	272.9426	R <sub>2</sub>	30.04106712	0.0033	73.2467
Q <sub>1</sub>	13.39866066	0.0295	349.1444	K <sub>2</sub>	30.08213806	0.0513	342.7299
ρ <sub>1</sub>	13.47151470	0.0067	276.3762	MSN <sub>2</sub>	30.54437447	0.0021	66.8381
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.1345	344.4980	KJ <sub>2</sub>	30.62651253	0.0031	323.4993
MP <sub>1</sub>	14.02517319	0.0031	301.3387	2SM <sub>2</sub>	31.01589584	0.0014	133.1588
M <sub>1</sub>	14.49202538	0.0079	41.6203	MO <sub>2</sub>	42.92713928	0.0039	93.5489
χ <sub>1</sub>	14.56954765	0.0017	289.4333	M <sub>3</sub>	43.47615814	0.0068	98.7712
π <sub>1</sub>	14.91786480	0.0041	247.2803	SO <sub>3</sub>	43.94303513	0.0014	254.4241
P <sub>1</sub>	14.95893097	0.0515	46.3191	MK <sub>3</sub>	44.02517319	0.0008	227.7049
S <sub>1</sub>	15.00000000	0.0025	114.1471	SK <sub>3</sub>	45.04106903	0.0012	31.8061
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.1525	20.3849	MN <sub>4</sub>	57.42383194	0.0026	0.0333
ψ <sub>1</sub>	15.08213520	0.0023	276.9551	M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0048	350.3968
φ <sub>1</sub>	15.12320614	0.0042	119.0154	SN <sub>4</sub>	58.43972778	0.0009	138.4240
θ <sub>1</sub>	15.51258945	0.0026	94.7069	MS <sub>4</sub>	58.98410416	0.0041	116.4458
J <sub>1</sub>	15.58544350	0.0092	14.0343	MK <sub>4</sub>	59.06624222	0.0012	352.9581
SO <sub>1</sub>	16.05696487	0.0031	117.4921	S <sub>4</sub>	60.00000000	0.0010	158.1543
OO <sub>1</sub>	16.13910103	0.0035	231.3151	SK <sub>4</sub>	60.08213806	0.0009	95.6263
OQ <sub>2</sub>	27.34169579	0.0005	357.0108	2MN <sub>6</sub>	86.40793610	0.0008	218.4527
MNS <sub>2</sub>	27.42383385	0.0034	50.5468	M <sub>6</sub>	86.95231628	0.0010	260.8360
2N <sub>2</sub>	27.85935402	0.0011	138.5371	MSN <sub>6</sub>	87.42383575	0.0004	312.8508
μ <sub>2</sub>	27.96820450	0.0158	32.0204	2MS <sub>6</sub>	87.96820831	0.0007	319.4399
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0913	134.0395	2MK <sub>6</sub>	88.05034637	0.0007	94.0442
v <sub>2</sub>	28.51258278	0.0186	42.0401	2SM <sub>6</sub>	88.98410797	0.0001	81.1209
OP <sub>2</sub>	28.90196609	0.0024	168.1656	MSK <sub>6</sub>	89.06623840	0.0002	120.3100
平均潮位 = 0.1615 m							
資料時間 : 2012/07/02 00:00:00							

表 2.11 基隆港 2012 年潮位調和分析成果表

基隆港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
S <sub>a</sub>	0.04106860	0.1678	24.5386	M <sub>2</sub>	28.98410416	0.2437	225.2540
S <sub>aa</sub>	0.08213730	0.0179	170.3513	MKS <sub>2</sub>	29.06624222	0.0044	350.7419
M <sub>m</sub>	0.54437470	0.0074	140.0719	λ <sub>2</sub>	29.45562553	0.0100	211.3195
M <sub>sf</sub>	1.01589584	0.0070	341.5114	L <sub>2</sub>	29.52847862	0.0126	100.5067
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0156	167.4459	T <sub>2</sub>	29.95893288	0.0034	92.9810
2Q <sub>1</sub>	12.85428619	0.0068	334.2090	S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0575	280.4146
σ <sub>1</sub>	12.92714024	0.0068	274.2547	R <sub>2</sub>	30.04106712	0.0025	123.9346
Q <sub>1</sub>	13.39866066	0.0276	346.4634	K <sub>2</sub>	30.08213806	0.0143	66.4082
ρ <sub>1</sub>	13.47151470	0.0071	241.2545	MSN <sub>2</sub>	30.54437447	0.0045	230.9787
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.1426	344.4731	KJ <sub>2</sub>	30.62651253	0.0023	346.4012
MP <sub>1</sub>	14.02517319	0.0024	82.1883	2SM <sub>2</sub>	31.01589584	0.0059	344.0485
M <sub>1</sub>	14.49202538	0.0092	41.3822	MO <sub>2</sub>	42.92713928	0.0030	34.9765
χ <sub>1</sub>	14.56954765	0.0040	268.3537	M <sub>3</sub>	43.47615814	0.0054	85.4597
π <sub>1</sub>	14.91786480	0.0047	226.3541	SO <sub>3</sub>	43.94303513	0.0005	106.8036
P <sub>1</sub>	14.95893097	0.0591	51.1692	MK <sub>3</sub>	44.02517319	0.0024	325.1409
S <sub>1</sub>	15.00000000	0.0024	231.4517	SK <sub>3</sub>	45.04106903	0.0020	105.8128
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.1771	27.3540	MN <sub>4</sub>	57.42383194	0.0048	178.9731
ψ <sub>1</sub>	15.08213520	0.0049	264.7165	M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0124	167.8082
φ <sub>1</sub>	15.12320614	0.0062	164.8478	SN <sub>4</sub>	58.43972778	0.0016	243.1388
θ <sub>1</sub>	15.51258945	0.0027	132.6585	MS <sub>4</sub>	58.98410416	0.0084	254.0567
J <sub>1</sub>	15.58544350	0.0093	31.0716	MK <sub>4</sub>	59.06624222	0.0029	22.3247
SO <sub>1</sub>	16.05696487	0.0023	111.3486	S <sub>4</sub>	60.00000000	0.0012	349.1593
OO <sub>1</sub>	16.13910103	0.0040	256.7423	SK <sub>4</sub>	60.08213806	0.0015	81.6100
OQ <sub>2</sub>	27.34169579	0.0020	201.4424	2MN <sub>6</sub>	86.40793610	0.0024	67.8043
MNS <sub>2</sub>	27.42383385	0.0060	24.4840	M <sub>6</sub>	86.95231628	0.0034	71.2147
2N <sub>2</sub>	27.85935402	0.0041	239.0577	MSN <sub>6</sub>	87.42383575	0.0008	257.0926
μ <sub>2</sub>	27.96820450	0.0262	18.9263	2MS <sub>6</sub>	87.96820831	0.0032	214.8761
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0578	219.7194	2MK <sub>6</sub>	88.05034637	0.0015	305.1904
v <sub>2</sub>	28.51258278	0.0133	136.1788	2SM <sub>6</sub>	88.98410797	0.0005	335.8741
OP <sub>2</sub>	28.90196609	0.0036	204.7785	MSK <sub>6</sub>	89.06623840	0.0003	84.2244
平均潮位 = 0.1092 m							
資料時間 : 2012/07/02 00:00:00							





表 2.12 臺北港 2012 年潮位調和分析成果表

臺北港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
$S_a$	0.04106860	0.1780	27.2503	$M_2$	28.98410416	1.1291	260.9990
$S_{aa}$	0.08213730	0.0232	182.4714	$MKS_2$	29.06624222	0.0054	61.3868
$M_m$	0.54437470	0.0068	103.0531	$\lambda_2$	29.45562553	0.0313	194.2592
$M_{sf}$	1.01589584	0.0084	353.3135	$L_2$	29.52847862	0.0614	99.4013
$M_f$	1.09803307	0.0174	167.3032	$T_2$	29.95893288	0.0222	167.6142
$2Q_1$	12.85428619	0.0064	345.8826	$S_2$	30.00000000	0.3165	353.5406
$\sigma_1$	12.92714024	0.0060	294.5858	$R_2$	30.04106712	0.0034	24.4854
$Q_1$	13.39866066	0.0328	6.3841	$K_2$	30.08213806	0.0781	135.2035
$\rho_1$	13.47151470	0.0074	270.8132	$MSN_2$	30.54437447	0.0126	228.4045
$O_1$	13.94303513	0.1667	0.0416	$KJ_2$	30.62651253	0.0027	88.1559
$MP_1$	14.02517319	0.0015	37.2567	$2SM_2$	31.01589584	0.0128	326.1714
$M_1$	14.49202538	0.0117	64.6472	$MO_2$	42.92713928	0.0091	38.0719
$\chi_1$	14.56954765	0.0037	299.2304	$M_3$	43.47615814	0.0055	53.4671
$\pi_1$	14.91786480	0.0062	253.0357	$SO_3$	43.94303513	0.0026	139.7842
$P_1$	14.95893097	0.0698	70.6387	$MK_3$	44.02517319	0.0080	87.7294
$S_1$	15.00000000	0.0031	0.5295	$SK_3$	45.04106903	0.0014	161.0089
$K_1$	15.04106903	0.2070	46.0388	$MN_4$	57.42383194	0.0044	134.1843
$\psi_1$	15.08213520	0.0050	330.4184	$M_4$	57.96820831	0.0105	118.8315
$\phi_1$	15.12320614	0.0037	198.1139	$SN_4$	58.43972778	0.0017	229.1361
$\theta_1$	15.51258945	0.0021	106.1014	$MS_4$	58.98410416	0.0102	218.8416
$J_1$	15.58544350	0.0120	47.5535	$MK_4$	59.06624222	0.0029	349.5273
$SO_1$	16.05696487	0.0033	199.1026	$S_4$	60.00000000	0.0023	328.8699
$OO_1$	16.13910103	0.0049	279.9384	$SK_4$	60.08213806	0.0013	68.7555
$OQ_2$	27.34169579	0.0048	208.2057	$2MN_6$	86.40793610	0.0017	14.3909
$MNS_2$	27.42383385	0.0131	343.3682	$M_6$	86.95231628	0.0027	21.4262
$2N_2$	27.85935402	0.0125	221.3722	$MSN_6$	87.42383575	0.0013	25.5080
$\mu_2$	27.96820450	0.0477	353.4067	$2MS_6$	87.96820831	0.0008	41.8554
$N_2$	28.43972969	0.2155	260.6223	$2MK_6$	88.05034637	0.0004	353.2034
$\nu_2$	28.51258278	0.0518	168.6052	$2SM_6$	88.98410797	0.0015	69.9265
$OP_2$	28.90196609	0.0212	224.1848	$MSK_6$	89.06623840	0.0003	204.0568
平均潮位 = 0.3403 m							
資料時間 : 2012/07/02 00:00:00							



表 2.13 臺中港 2012 年潮位調和分析成果表

臺中港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
$S_a$	0.04106860	0.1689	26.7103	$M_2$	28.98410416	1.8348	270.0389
$S_{aa}$	0.08213730	0.0472	171.5863	$MKS_2$	29.06624222	0.0197	250.9142
$M_m$	0.54437470	0.0142	246.9473	$\lambda_2$	29.45562553	0.0615	192.5612
$M_{sf}$	1.01589584	0.0188	11.0607	$L_2$	29.52847862	0.0945	93.7672
$M_f$	1.09803307	0.0189	166.4625	$T_2$	29.95893288	0.0374	157.3594
$2Q_1$	12.85428619	0.0070	1.9832	$S_2$	30.00000000	0.5264	8.3737
$\sigma_1$	12.92714024	0.0114	322.1092	$R_2$	30.04106712	0.0217	152.3316
$Q_1$	13.39866066	0.0400	34.3235	$K_2$	30.08213806	0.1311	151.5066
$\rho_1$	13.47151470	0.0090	239.4277	$MSN_2$	30.54437447	0.0170	245.9198
$O_1$	13.94303513	0.1950	19.1203	$KJ_2$	30.62651253	0.0100	112.2130
$MP_1$	14.02517319	0.0070	63.7199	$2SM_2$	31.01589584	0.0176	322.8015
$M_1$	14.49202538	0.0091	91.9160	$MO_2$	42.92713928	0.0128	354.4831
$\chi_1$	14.56954765	0.0132	315.1855	$M_3$	43.47615814	0.0061	350.6194
$\pi_1$	14.91786480	0.0097	279.5516	$SO_3$	43.94303513	0.0093	118.5381
$P_1$	14.95893097	0.0749	85.7277	$MK_3$	44.02517319	0.0075	66.4626
$S_1$	15.00000000	0.0074	124.2043	$SK_3$	45.04106903	0.0012	6.3084
$K_1$	15.04106903	0.2396	67.9749	$MN_4$	57.42383194	0.0031	120.9011
$\psi_1$	15.08213520	0.0025	23.7914	$M_4$	57.96820831	0.0079	75.9206
$\phi_1$	15.12320614	0.0073	176.4381	$SN_4$	58.43972778	0.0031	254.7888
$\theta_1$	15.51258945	0.0026	18.0018	$MS_4$	58.98410416	0.0053	161.9524
$J_1$	15.58544350	0.0168	65.5668	$MK_4$	59.06624222	0.0031	246.5899
$SO_1$	16.05696487	0.0117	184.9530	$S_4$	60.00000000	0.0034	202.9068
$OO_1$	16.13910103	0.0075	263.9713	$SK_4$	60.08213806	0.0022	20.7686
$OQ_2$	27.34169579	0.0041	344.4345	$2MN_6$	86.40793610	0.0086	350.9971
$MNS_2$	27.42383385	0.0137	359.9452	$M_6$	86.95231628	0.0164	350.4034
$2N_2$	27.85935402	0.0238	229.4461	$MSN_6$	87.42383575	0.0028	81.0585
$\mu_2$	27.96820450	0.0852	342.7390	$2MS_6$	87.96820831	0.0152	89.0941
$N_2$	28.43972969	0.3402	270.3045	$2MK_6$	88.05034637	0.0043	278.6327
$\nu_2$	28.51258278	0.0852	184.9288	$2SM_6$	88.98410797	0.0030	186.3856
$OP_2$	28.90196609	0.0227	209.2095	$MSK_6$	89.06623840	0.0032	26.7692
平均潮位 = 0.2255 m							
資料時間 : 2012/07/02 00:00:00							



表 2.14 高雄港 2012 年潮位調和分析成果表

高雄港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
$S_a$	0.04106860	0.1088	27.4887	$M_2$	28.98410416	0.1944	171.3288
$S_{aa}$	0.08213730	0.0574	176.6241	$MKS_2$	29.06624222	0.0019	312.6849
$M_m$	0.54437470	0.0089	1.8824	$\lambda_2$	29.45562553	0.0028	102.3302
$M_{sf}$	1.01589584	0.0160	25.4421	$L_2$	29.52847862	0.0042	16.8491
$M_f$	1.09803307	0.0097	268.7894	$T_2$	29.95893288	0.0042	66.5059
$2Q_1$	12.85428619	0.0047	43.8590	$S_2$	30.00000000	0.0704	235.6351
$\sigma_1$	12.92714024	0.0028	308.2141	$R_2$	30.04106712	0.0014	192.4833
$Q_1$	13.39866066	0.0287	29.0378	$K_2$	30.08213806	0.0160	26.7680
$\rho_1$	13.47151470	0.0062	300.1311	$MSN_2$	30.54437447	0.0011	222.3009
$O_1$	13.94303513	0.1519	34.6414	$KJ_2$	30.62651253	0.0020	86.4031
$MP_1$	14.02517319	0.0023	143.7581	$2SM_2$	31.01589584	0.0006	51.2958
$M_1$	14.49202538	0.0107	87.3918	$MO_2$	42.92713928	0.0028	73.3044
$\chi_1$	14.56954765	0.0019	342.1065	$M_3$	43.47615814	0.0036	148.4232
$\pi_1$	14.91786480	0.0073	263.2777	$SO_3$	43.94303513	0.0015	158.2258
$P_1$	14.95893097	0.0548	114.0206	$MK_3$	44.02517319	0.0023	75.5755
$S_1$	15.00000000	0.0056	149.4716	$SK_3$	45.04106903	0.0012	274.1923
$K_1$	15.04106903	0.1679	90.5265	$MN_4$	57.42383194	0.0011	203.7604
$\psi_1$	15.08213520	0.0017	350.5897	$M_4$	57.96820831	0.0021	181.8304
$\phi_1$	15.12320614	0.0038	149.5055	$SN_4$	58.43972778	0.0012	301.6790
$\theta_1$	15.51258945	0.0015	225.8293	$MS_4$	58.98410416	0.0022	274.2755
$J_1$	15.58544350	0.0066	56.4091	$MK_4$	59.06624222	0.0014	6.3880
$SO_1$	16.05696487	0.0023	72.5294	$S_4$	60.00000000	0.0003	340.8206
$OO_1$	16.13910103	0.0014	47.6556	$SK_4$	60.08213806	0.0009	99.3993
$OQ_2$	27.34169579	0.0007	204.1174	$2MN_6$	86.40793610	0.0023	225.5167
$MNS_2$	27.42383385	0.0033	79.9909	$M_6$	86.95231628	0.0036	221.4448
$2N_2$	27.85935402	0.0013	215.9940	$MSN_6$	87.42383575	0.0009	341.5487
$\mu_2$	27.96820450	0.0071	40.4754	$2MS_6$	87.96820831	0.0034	342.3246
$N_2$	28.43972969	0.0449	177.2547	$2MK_6$	88.05034637	0.0010	135.0367
$\nu_2$	28.51258278	0.0095	87.4479	$2SM_6$	88.98410797	0.0004	105.1371
$OP_2$	28.90196609	0.0091	91.2018	$MSK_6$	89.06623840	0.0004	105.9266
平均潮位 = 0.2414 m							
資料時間 : 2012/07/02 00:00:00							

表 2.15 安平港 2013 年潮位調和分析成果表

安平港潮位站							
分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
S <sub>a</sub>	0.04106860	0.1427	43.8912	M <sub>2</sub>	28.98410416	0.2647	149.3413
S <sub>aa</sub>	0.08213730	0.0333	179.0112	MKS <sub>2</sub>	29.06624222	0.0022	207.7635
M <sub>m</sub>	0.54437470	0.0080	102.1579	λ <sub>2</sub>	29.45562553	0.0049	320.8124
M <sub>sf</sub>	1.01589584	0.0065	81.0600	L <sub>2</sub>	29.52847862	0.0114	267.7473
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0018	281.7184	T <sub>2</sub>	29.95893288	0.0037	107.1094
2Q <sub>1</sub>	12.85428619	0.0058	6.7648	S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0610	307.0393
σ <sub>1</sub>	12.92714024	0.0059	285.5441	R <sub>2</sub>	30.04106712	0.0027	125.3394
Q <sub>1</sub>	13.39866066	0.0275	224.3285	K <sub>2</sub>	30.08213806	0.0152	90.3123
ρ <sub>1</sub>	13.47151470	0.0093	212.5404	MSN <sub>2</sub>	30.54437447	0.0020	140.3076
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.1522	130.6219	KJ <sub>2</sub>	30.62651253	0.0004	244.5079
MP <sub>1</sub>	14.02517319	0.0051	222.5713	2SM <sub>2</sub>	31.01589584	0.0027	68.5666
M <sub>1</sub>	14.49202538	0.0094	18.7309	MO <sub>2</sub>	42.92713928	0.0019	125.7644
χ <sub>1</sub>	14.56954765	0.0016	46.6313	M <sub>3</sub>	43.47615814	0.0026	98.6755
π <sub>1</sub>	14.91786480	0.0037	48.6975	SO <sub>3</sub>	43.94303513	0.0007	78.5502
P <sub>1</sub>	14.95893097	0.0591	298.3958	MK <sub>3</sub>	44.02517319	0.0021	160.6598
S <sub>1</sub>	15.00000000	0.0068	342.3038	SK <sub>3</sub>	45.04106903	0.0009	51.2742
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.1687	277.8307	MN <sub>4</sub>	57.42383194	0.0031	153.1978
ψ <sub>1</sub>	15.08213520	0.0087	143.1753	M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0075	54.0639
φ <sub>1</sub>	15.12320614	0.0028	21.1954	SN <sub>4</sub>	58.43972778	0.0012	350.0075
θ <sub>1</sub>	15.51258945	0.0037	207.3477	MS <sub>4</sub>	58.98410416	0.0039	255.8795
J <sub>1</sub>	15.58544350	0.0067	137.5516	MK <sub>4</sub>	59.06624222	0.0024	348.9467
SO <sub>1</sub>	16.05696487	0.0021	311.6929	S <sub>4</sub>	60.00000000	0.0007	128.3830
OO <sub>1</sub>	16.13910103	0.0025	190.7119	SK <sub>4</sub>	60.08213806	0.0011	134.6332
OQ <sub>2</sub>	27.34169579	0.0025	142.4269	2MN <sub>6</sub>	86.40793610	0.0024	110.3810
MNS <sub>2</sub>	27.42383385	0.0018	256.6466	M <sub>6</sub>	86.95231628	0.0043	22.9043
2N <sub>2</sub>	27.85935402	0.0026	13.5750	MSN <sub>6</sub>	87.42383575	0.0013	289.3718
μ <sub>2</sub>	27.96820450	0.0105	196.9749	2MS <sub>6</sub>	87.96820831	0.0020	211.4912
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0593	242.0487	2MK <sub>6</sub>	88.05034637	0.0013	20.2530
v <sub>2</sub>	28.51258278	0.0158	236.7245	2SM <sub>6</sub>	88.98410797	0.0010	318.9279
OP <sub>2</sub>	28.90196609	0.0051	341.7458	MSK <sub>6</sub>	89.06623840	0.0005	196.6412
平均潮位 = 0.6879m							
資料時間：2013/07/02 11:00:00							

表 2.16 布袋港潮位(2013 年 11 月~2014 年 10 月)調和分析成果表

布袋港潮位站							
分潮名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)	分潮名稱	角頻率 (度/小時)	振幅 (m)	位相角 (度)
S <sub>a</sub>	0.04106860	0.1532	78.5415	M <sub>2</sub>	28.98410416	0.1804	193.2441
S <sub>aa</sub>	0.08213730	0.0319	244.4926	MKS <sub>2</sub>	29.06624222	0.0040	345.6134
M <sub>m</sub>	0.54437470	0.0291	245.5046	λ <sub>2</sub>	29.45562553	0.0058	3.3772
M <sub>sf</sub>	1.01589584	0.0043	244.7507	L <sub>2</sub>	29.52847862	0.0075	18.8151
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0083	283.9364	T <sub>2</sub>	29.95893288	0.0038	54.3029
2Q <sub>1</sub>	12.85428619	0.0039	120.4320	S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0667	237.7388
σ <sub>1</sub>	12.92714024	0.0081	337.1605	R <sub>2</sub>	30.04106712	0.0026	156.7167
Q <sub>1</sub>	13.39866066	0.0338	28.1341	K <sub>2</sub>	30.08213806	0.0244	31.4102
ρ <sub>1</sub>	13.47151470	0.0064	181.8127	MSN <sub>2</sub>	30.54437447	0.0026	98.2810
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.1616	275.7802	KJ <sub>2</sub>	30.62651253	0.0035	7.1835
MP <sub>1</sub>	14.02517319	0.0040	116.6107	2SM <sub>2</sub>	31.01589584	0.0002	325.5240
M <sub>1</sub>	14.49202538	0.0063	86.1040	MO <sub>2</sub>	42.92713928	0.0049	83.6098
χ <sub>1</sub>	14.56954765	0.0061	263.2355	M <sub>3</sub>	43.47615814	0.0026	348.7040
π <sub>1</sub>	14.91786480	0.0057	297.1168	SO <sub>3</sub>	43.94303513	0.0039	220.7060
P <sub>1</sub>	14.95893097	0.0664	237.1111	MK <sub>3</sub>	44.02517319	0.0023	168.4786
S <sub>1</sub>	15.00000000	0.0026	35.4554	SK <sub>3</sub>	45.04106903	0.0007	312.3118
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.1984	335.3083	MN <sub>4</sub>	57.42383194	0.0009	326.6051
ψ <sub>1</sub>	15.08213520	0.0059	200.9137	M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0021	265.1973
φ <sub>1</sub>	15.12320614	0.0015	282.5330	SN <sub>4</sub>	58.43972778	0.0007	318.2829
θ <sub>1</sub>	15.51258945	0.0029	80.7430	MS <sub>4</sub>	58.98410416	0.0010	266.6755
J <sub>1</sub>	15.58544350	0.0066	234.4862	MK <sub>4</sub>	59.06624222	0.0019	108.6594
SO <sub>1</sub>	16.05696487	0.0006	88.3994	S <sub>4</sub>	60.00000000	0.0006	344.8409
OO <sub>1</sub>	16.13910103	0.0043	199.5421	SK <sub>4</sub>	60.08213806	0.0010	37.0372
OQ <sub>2</sub>	27.34169579	0.0038	116.9949	2MN <sub>6</sub>	86.40793610	0.0015	268.9419
MNS <sub>2</sub>	27.42383385	0.0118	348.9675	M <sub>6</sub>	86.95231628	0.0028	300.2706
2N <sub>2</sub>	27.85935402	0.0075	353.2726	MSN <sub>6</sub>	87.42383575	0.0011	317.3645
μ <sub>2</sub>	27.96820450	0.0331	233.9590	2MS <sub>6</sub>	87.96820831	0.0019	31.8005
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.1250	146.4314	2MK <sub>6</sub>	88.05034637	0.0015	212.6782
v <sub>2</sub>	28.51258278	0.0365	317.8092	2SM <sub>6</sub>	88.98410797	0.0007	152.6989
OP <sub>2</sub>	28.90196609	0.0037	35.2802	MSK <sub>6</sub>	89.06623840	0.0005	81.9595
平均潮位 = 1.5967m							
資料時間：2014/05/02 11:00:00							



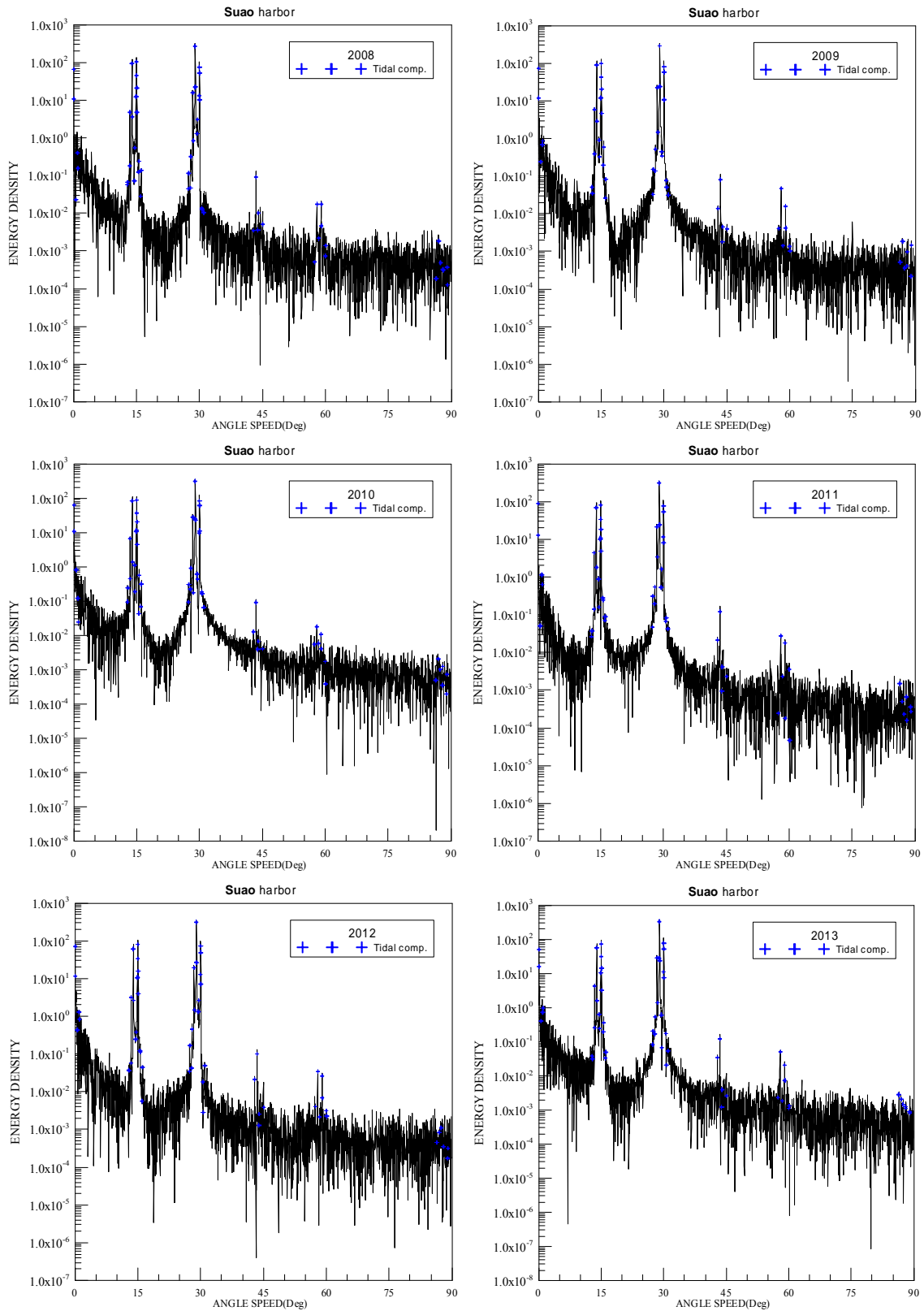


圖 2.21 蘇澳港 2008 ~ 2013 年潮位能譜圖

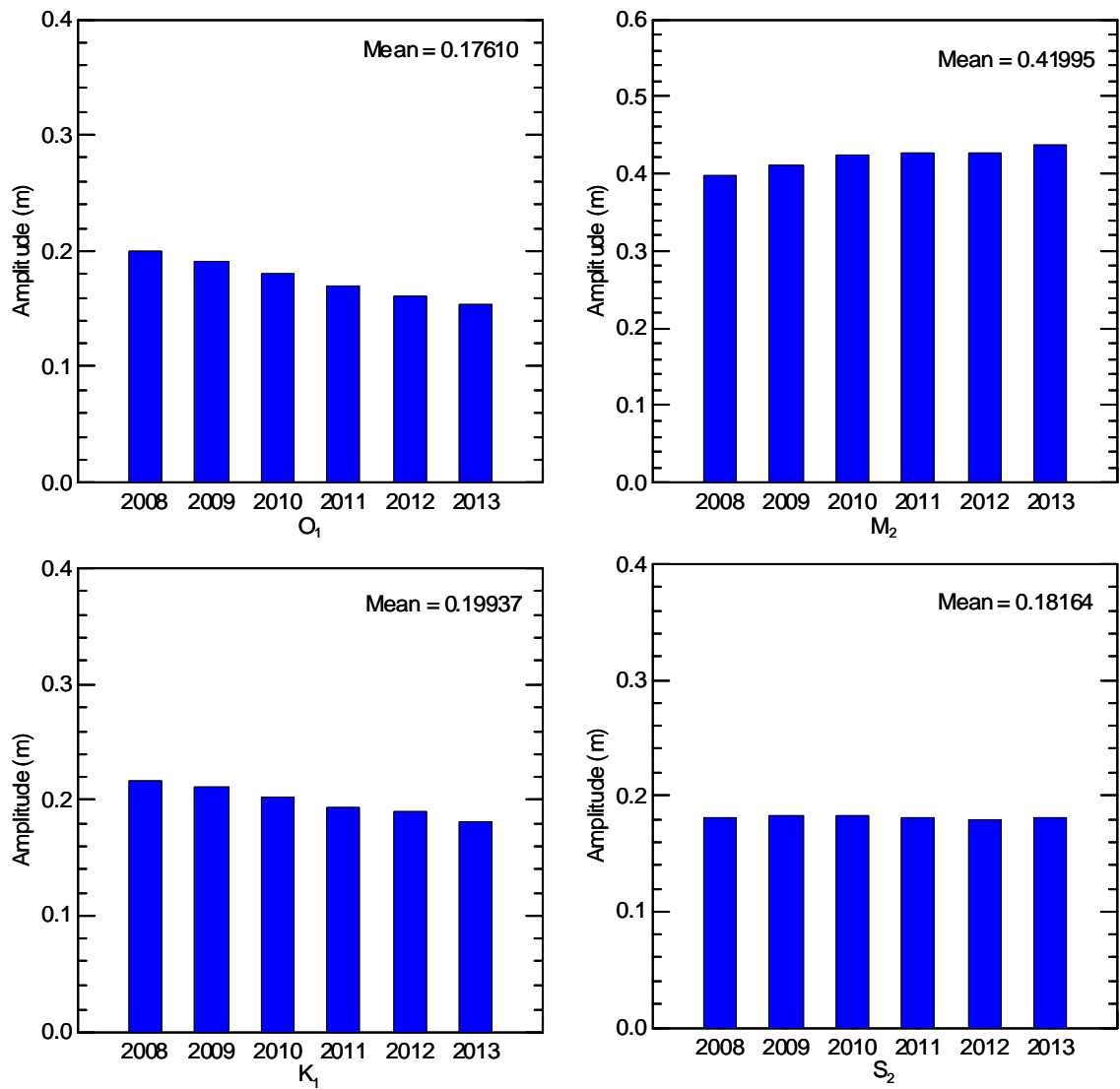


圖 2.22 蘇澳港歷年(2008 ~ 2013 年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖

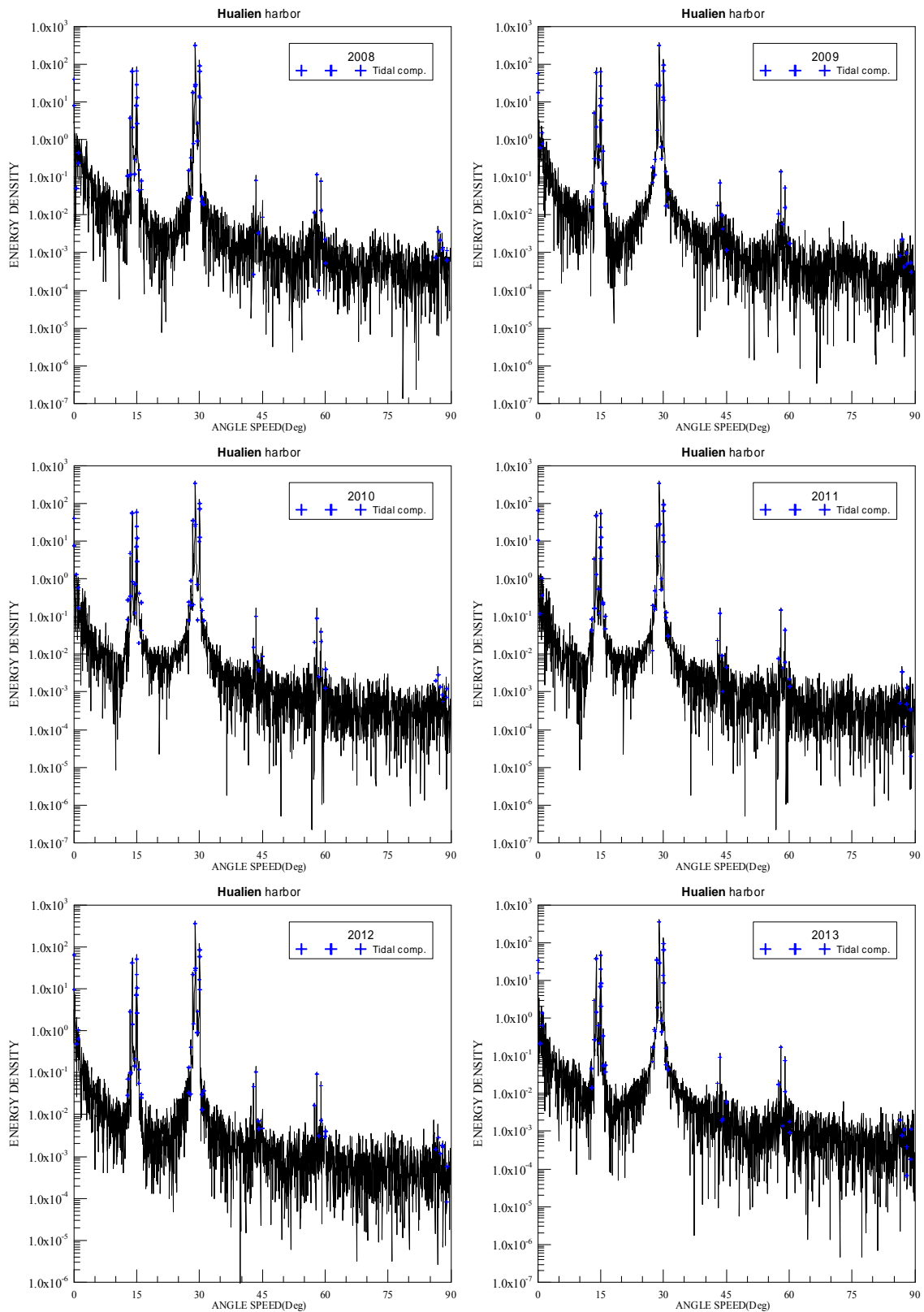


圖 2.23 花蓮港 2008 ~ 2013 年潮位能譜圖

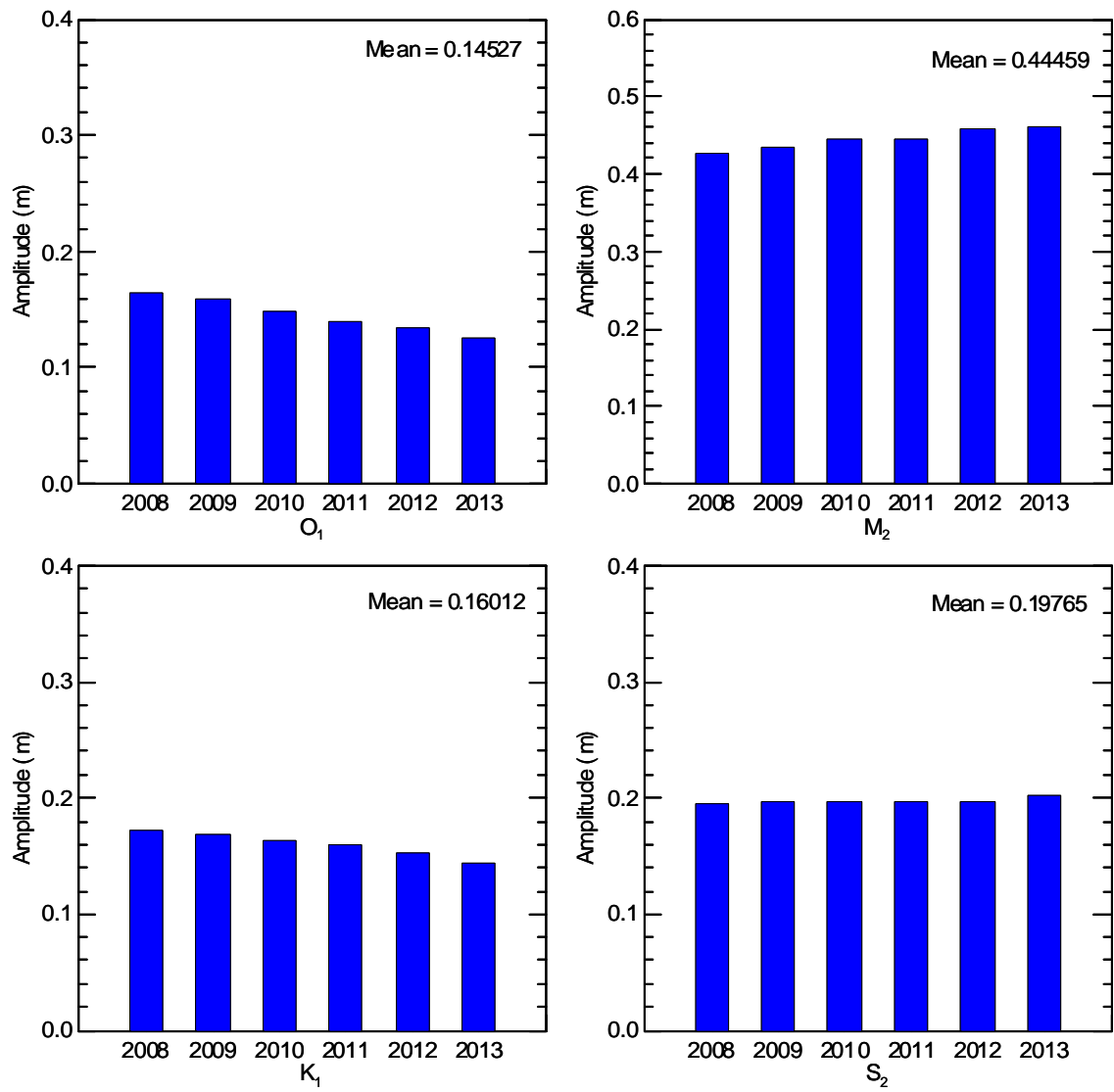


圖 2.24 花蓮港歷年(2008 ~ 2013 年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖

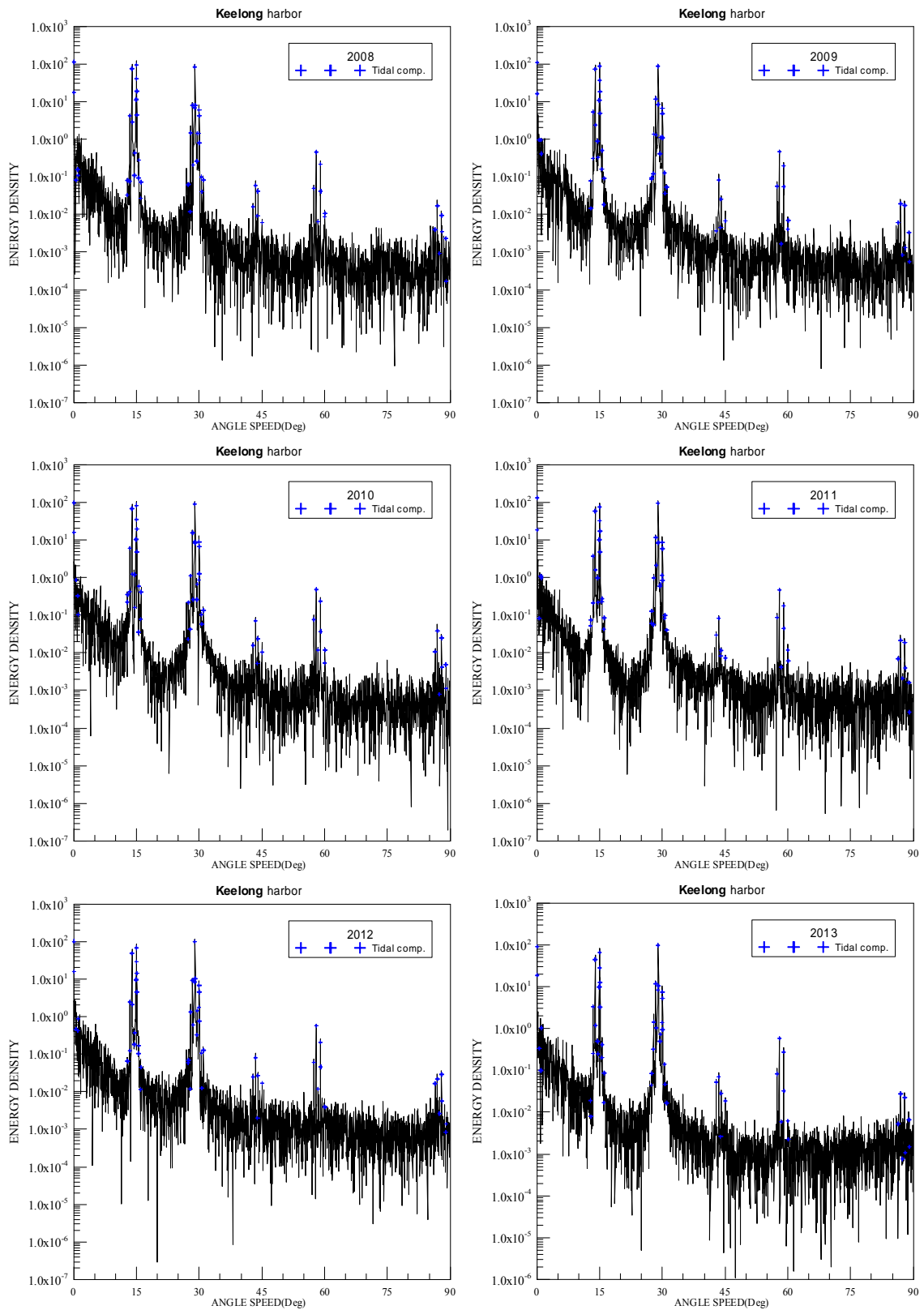


圖 2.25 基隆港 2008 ~ 2013 年潮位能譜圖

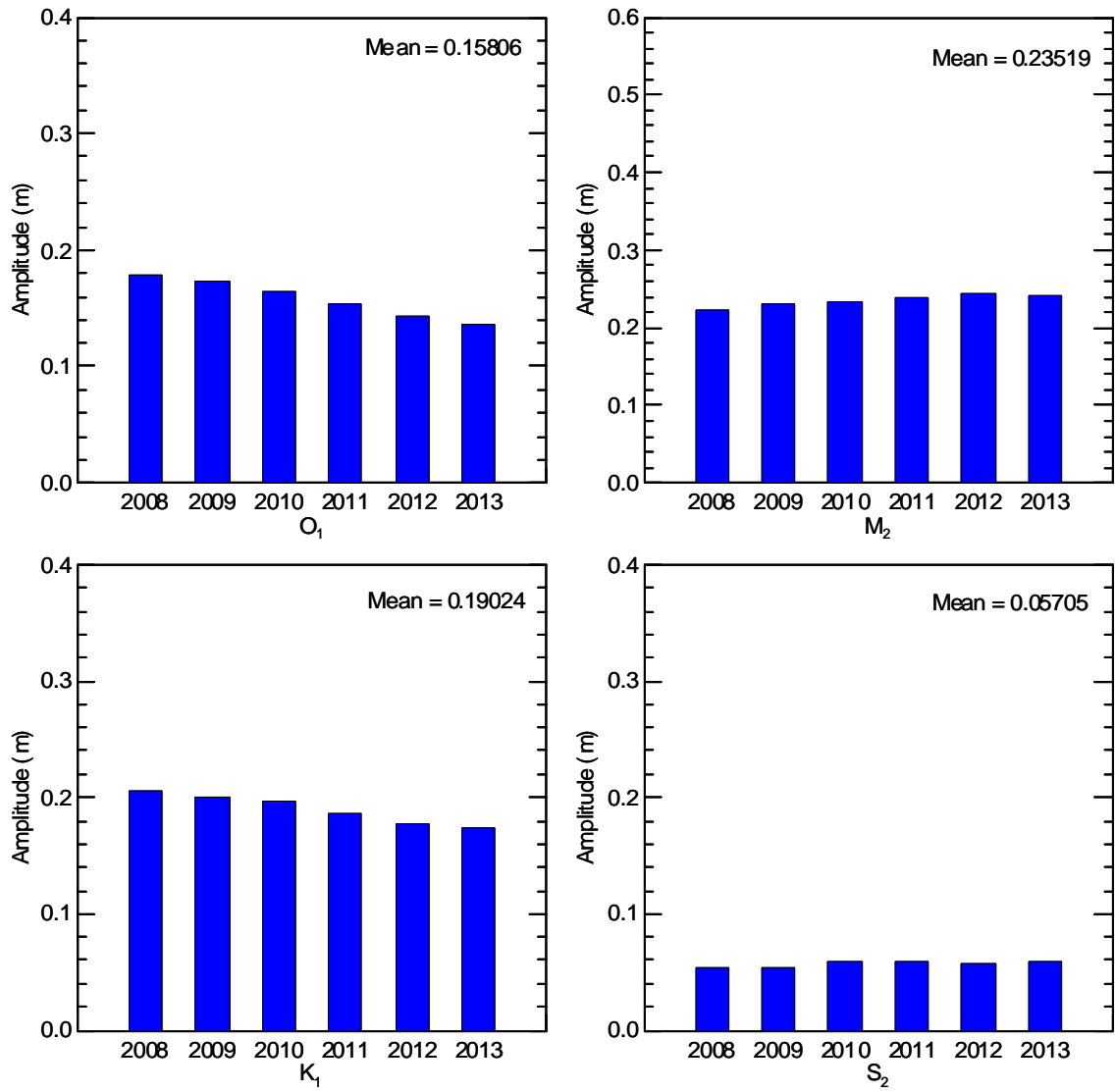


圖 2.26 基隆港歷年(2008 ~ 2013 年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖

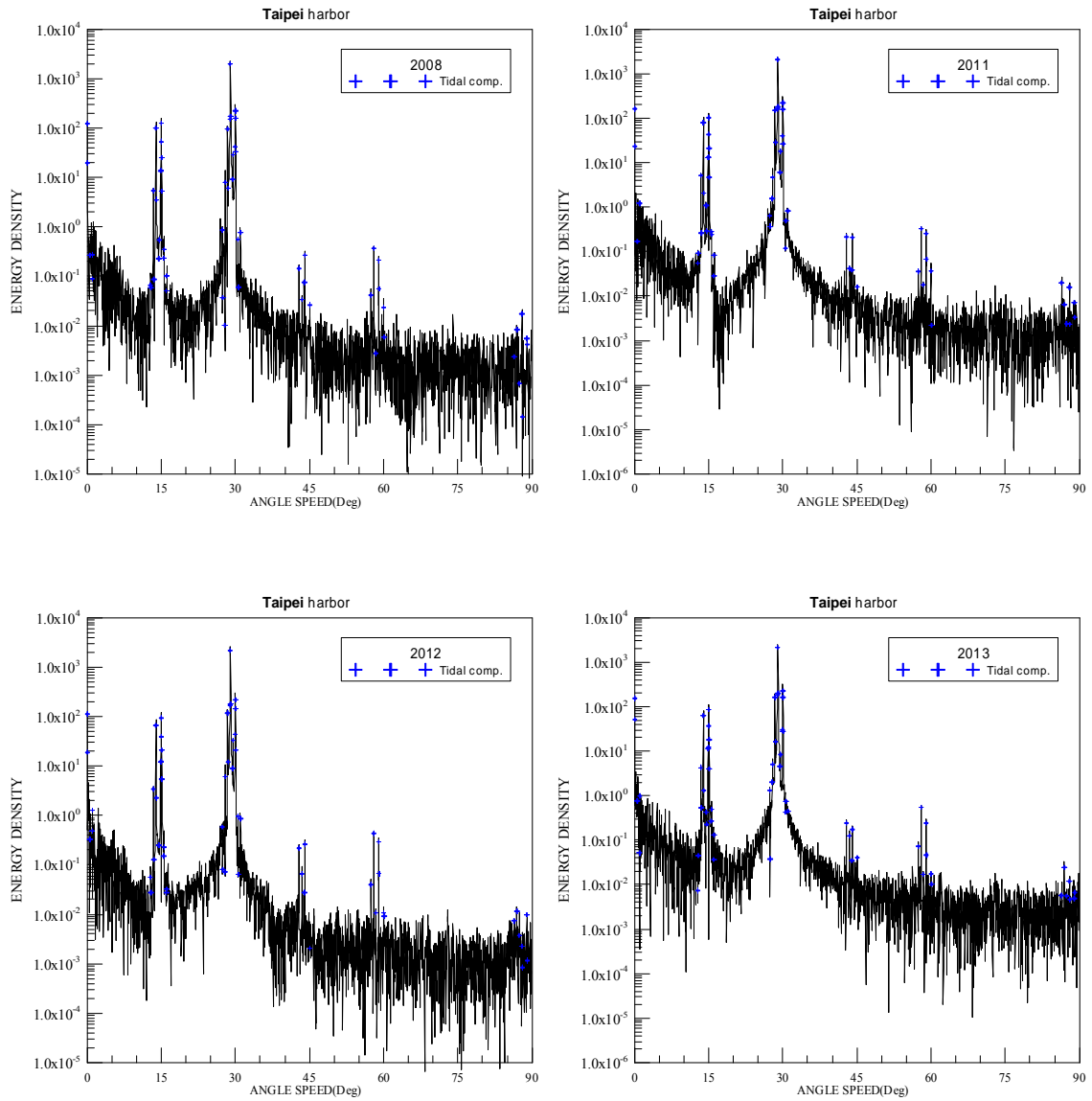


圖 2.27 臺北港 2008 年及 2011 ~ 2013 年潮位能譜圖

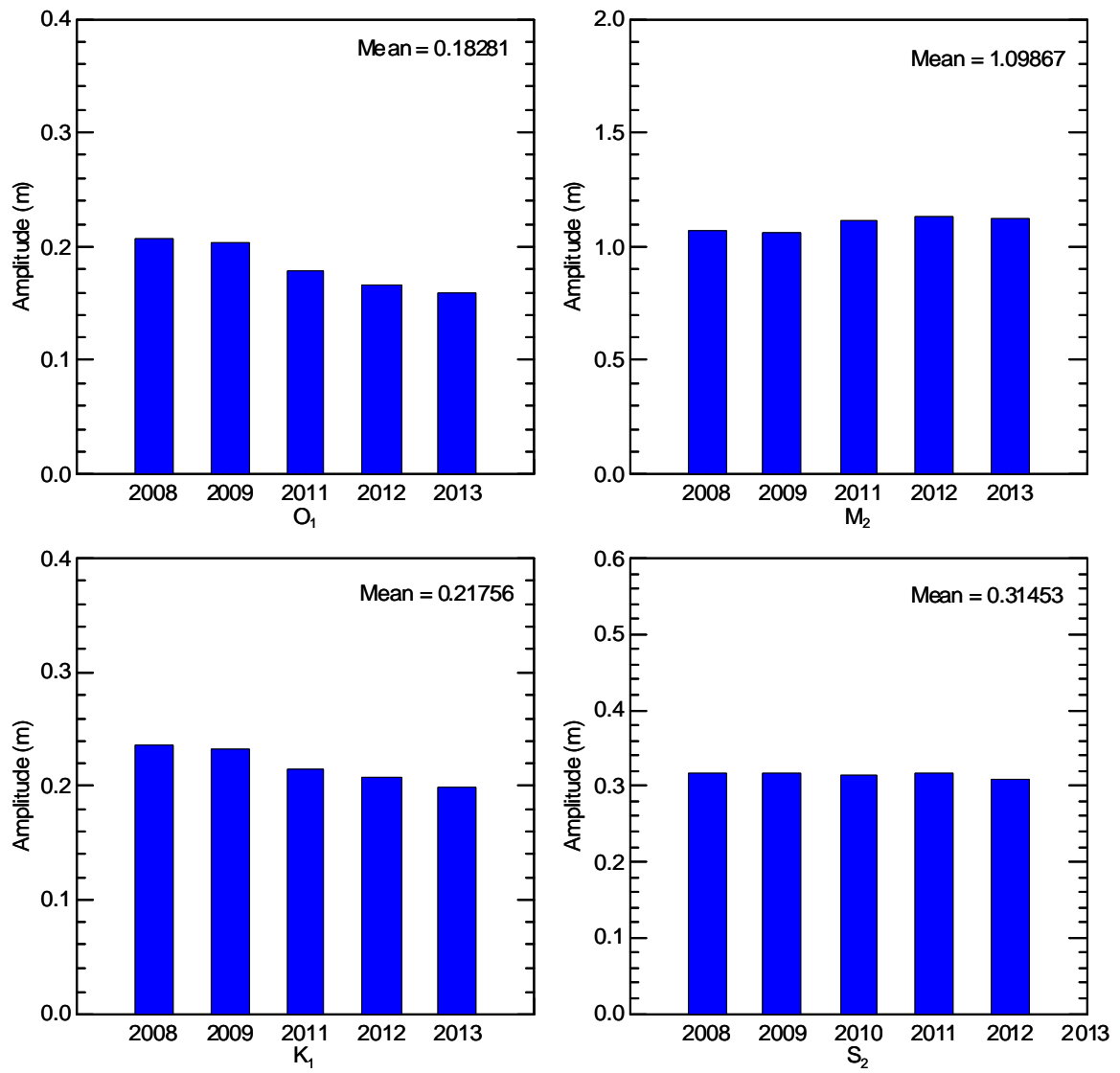


圖 2.28 臺北港歷年(2008 ~ 2013 年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖



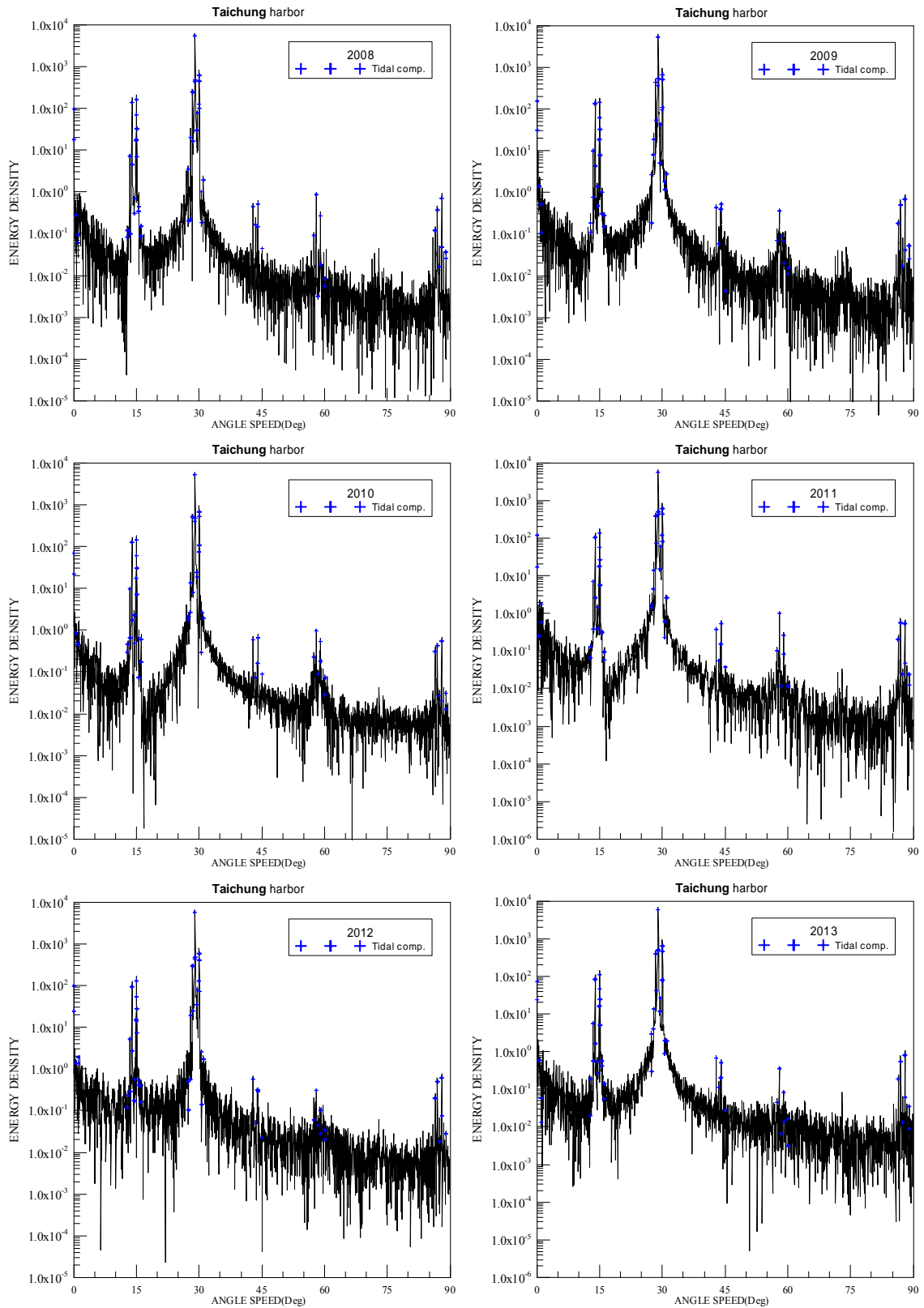


圖 2.29 臺中港 2008 ~ 2013 年潮位能譜圖

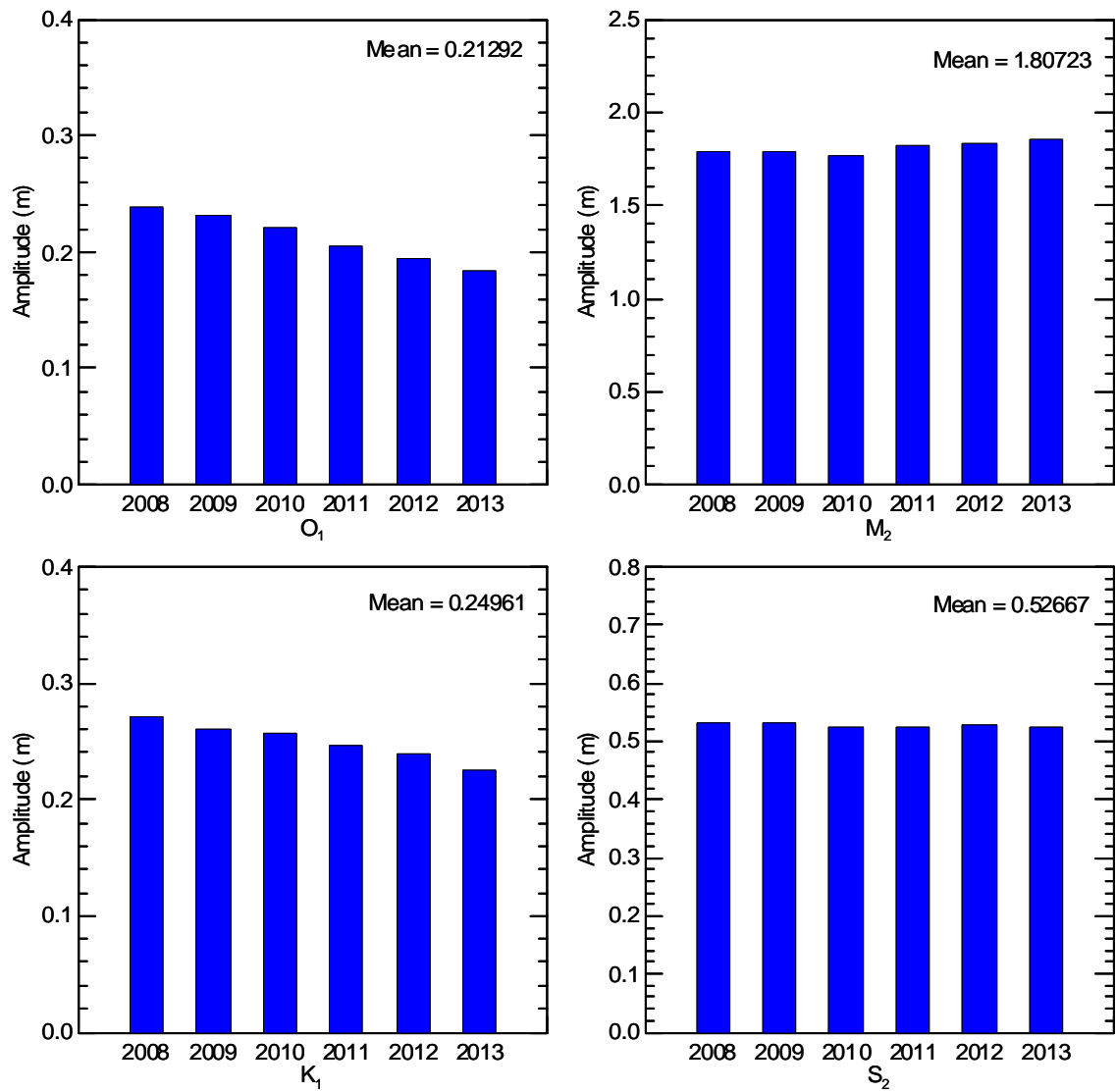


圖 2.30 臺中港歷年(2008 ~ 2013 年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖

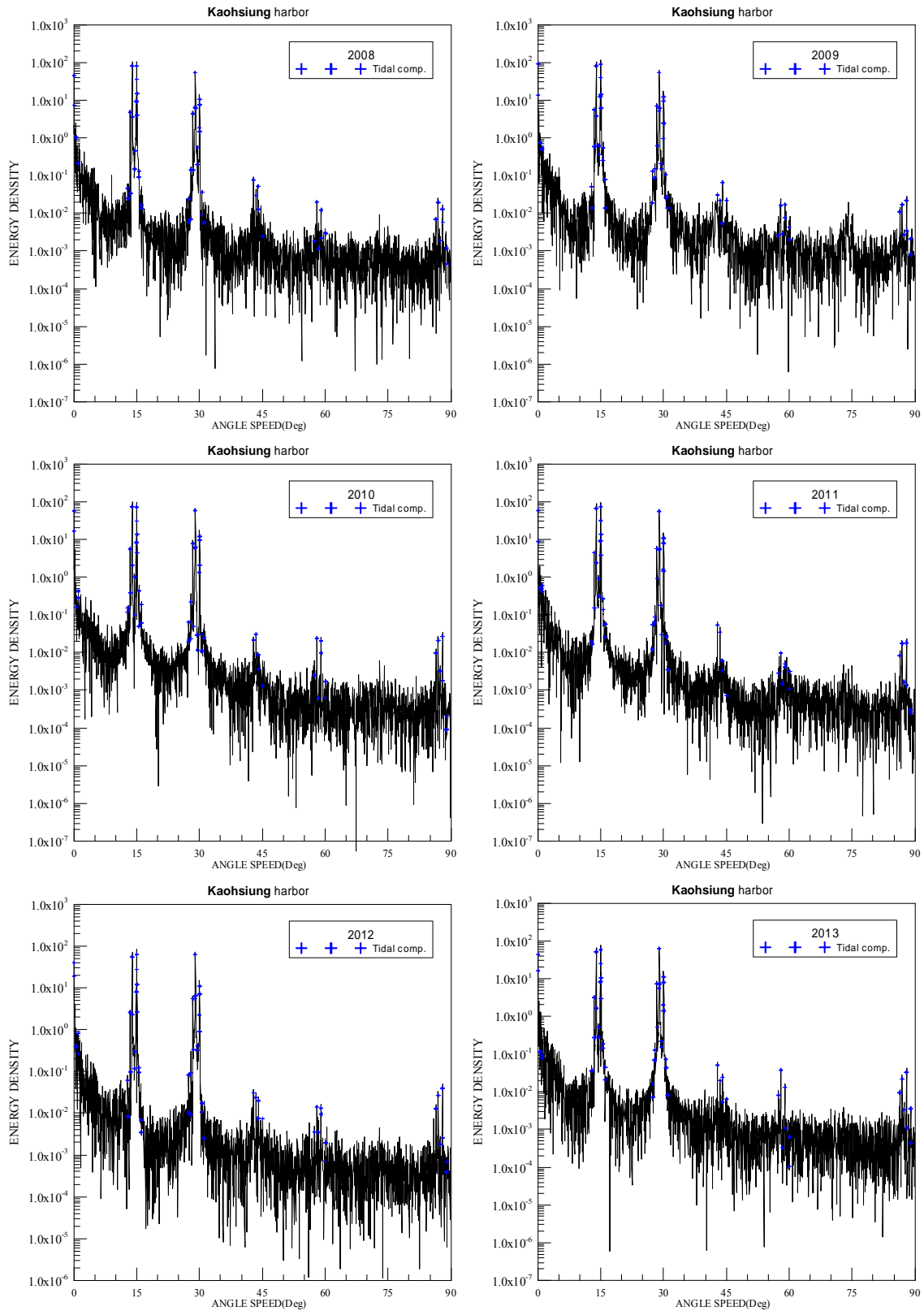


圖 2.31 高雄港 2008 ~ 2013 年潮位能譜圖

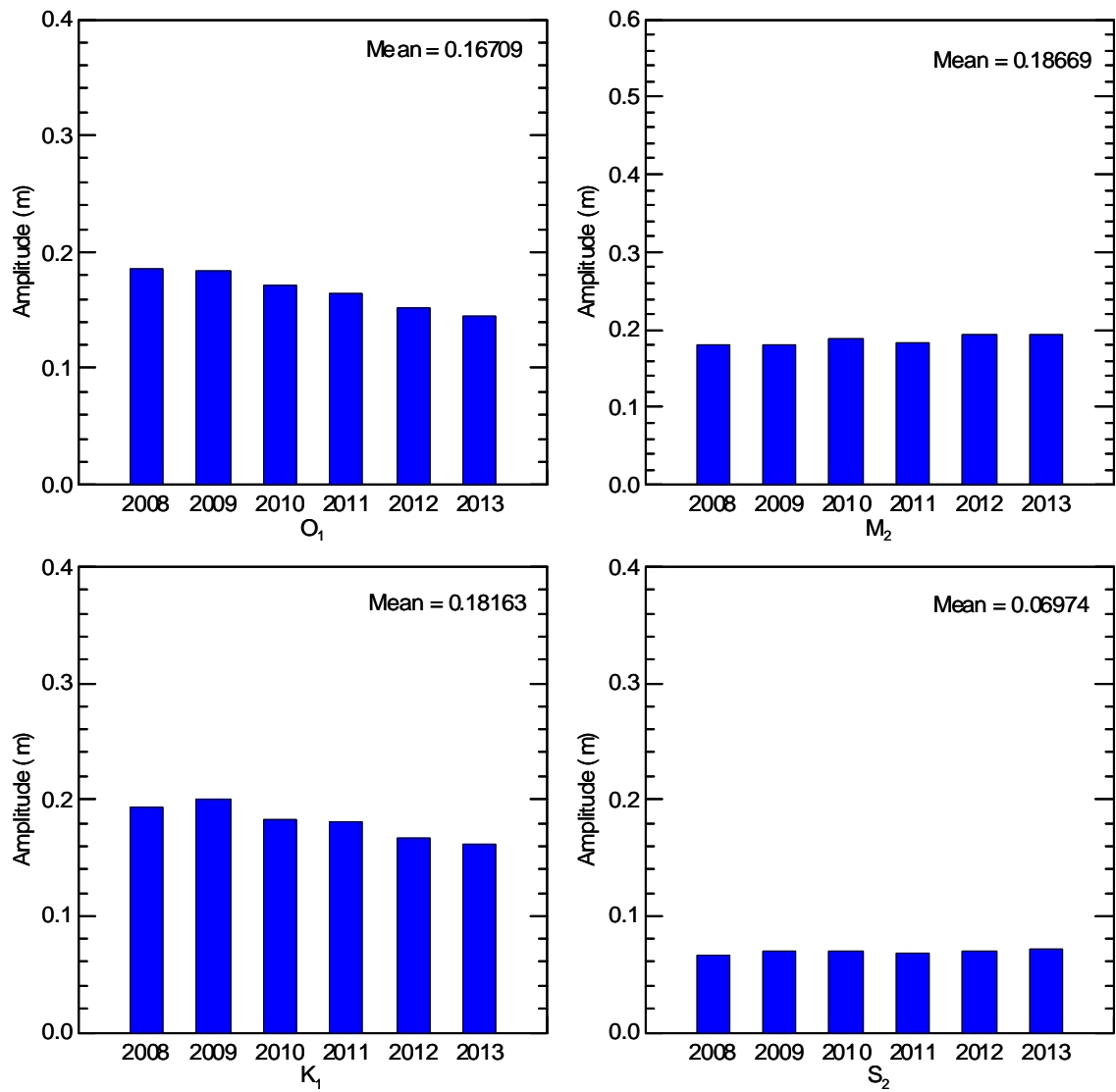


圖 2.32 高雄港歷年(2008 ~ 2013 年)潮位調和分析主要分潮( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )振幅大小之變化圖

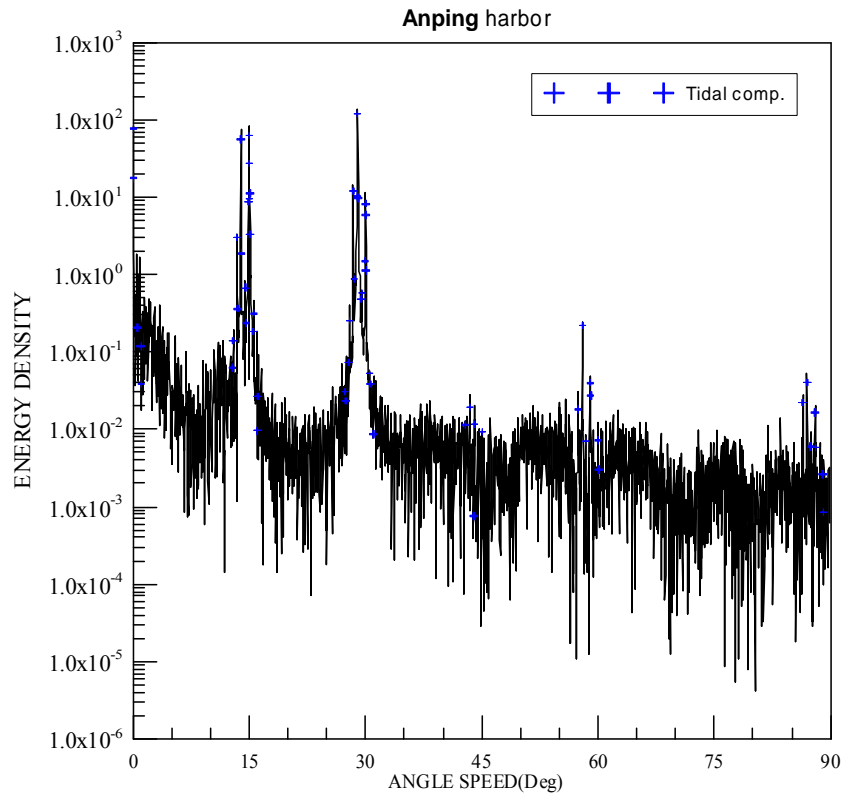


圖 2.33 安平港 2013 年潮位能譜圖

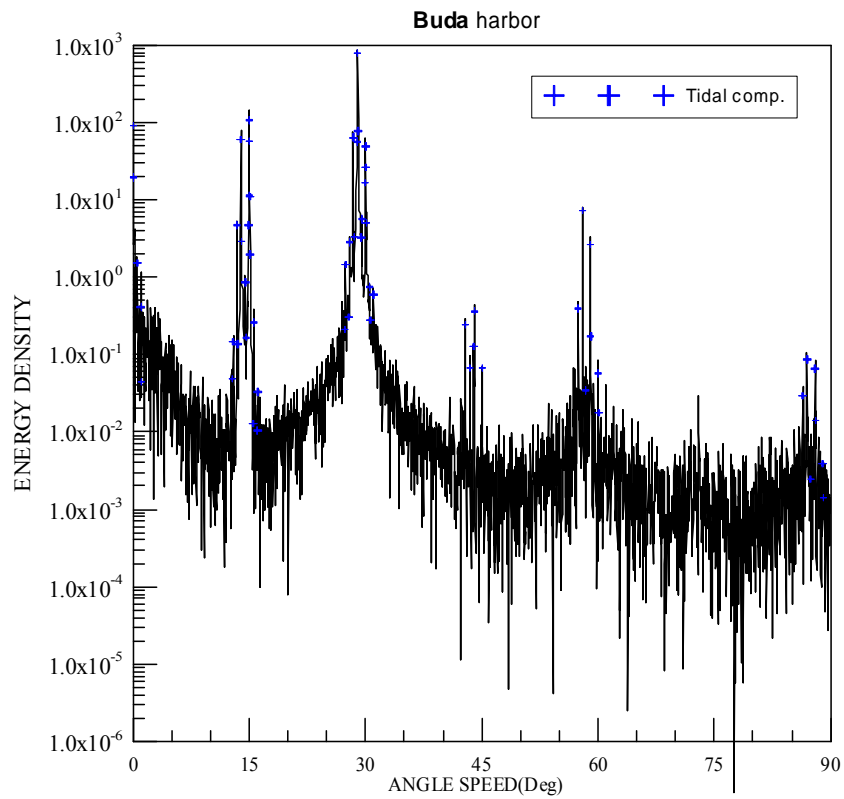


圖 2.34 布袋港潮位(2013 年 11 月至 2014 年 10 月)能譜圖

## 2.3 主要商港海(潮)流特性

本計畫針對蘇澳港、花蓮港、基隆港、臺北港、臺中港、高雄港及安平港等七個商港，蒐集 2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料(註：資料附屬檔名為.0H0，與港研中心觀測年報採用的資料附屬檔名為.1HA 有所區別)進行海(潮)流特性分析。同時本計畫針對已蒐集的海流資料分別篩選出夏季及冬季代表性海流資料，進行速度能譜分析及天文潮流調和分析；其中臺中港等港口因海流觀測資料連續性均未達本計畫設定的頻譜分析資料數 512 門檻，因此本計畫並未進一步分析臺中港等港口海流觀測資料之天文潮流特性。

### 2.3.1 海流資料統計特性

#### (1) 蘇澳港

蘇澳港海象觀測站(X) 2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 16,834 筆，其中海流資料之觀測率約為 0.96。有關海流流速大小分布及流向分布之年統計分析結果，如表 2.17 及表 2.18 所列；其中流速大小分布年統計結果得知，蘇澳港海象觀測站海流流速小於 0.25 m/s 者約佔全部觀測資料之 82.14%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間者佔全部觀測資料之 16.63%，二者合計約達 98.77%。在海流最大流速觀測上，2012 年蘇澳港海流最大流速觀測值為 1.89 m/s，流向為 117.5°(偏東南東向)，發生時間為 2012 年 1 月 19 日 6 時，經查核該筆資料相鄰之觀測資料(最大值僅 0.56 m/s)，研判該異常資料代表性不足。2013 年海流最大流速觀測值為 1.16 m/s，流向為 214.0°(偏東南東向)，發生時間為 2013 年 7 月 13 日 2 時，適值強烈颱風蘇力侵臺期間(颱風移動路徑如圖 2.35 所示)。

在海流流向分布年統計結果方面，蘇澳港海象觀測站海流主要漲、退潮流向分別為 N(約佔 21.66%)及 WS(約佔 19.18%)，其次為 NE(約佔 12.94%)及 S(約佔 14.66%)。此外，由表 2.18 海流流向分布及平均

流速分析結果得知，在漲、退潮主要流向上海流平均流速分別約為 0.202 m/s 及 0.184 m/s，均具明顯高於其它次要流向平均流速值的特性。此外，表 2.18 蘇澳港海流觀測統計呈現出 2012 年各流向內海流平均流速統計值均高於 2013 年各流向內海流平均流速值之現象。

表 2.17 蘇澳港逐時海流流速大小分布年統計結果

年份 流速區間(m/s)	2012 年	2013 年	平均
	資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25	6475 / (79.24)	7351 / (84.86)	<b>82.14</b>
0.25 ~ 0.50	1573 / (19.25)	1227 / (14.16)	<b>16.63</b>
0.50 ~ 0.75	110 / ( 1.35)	78 / ( 0.90)	<b>1.11</b>
0.75 ~ 1.00	11 / ( 0.13)	5 / ( 0.06)	<b>0.10</b>
1.00 <	1 / ( 0.01)	2 / ( 0.02)	<b>0.02</b>
合計	8170 / (100.00)	8663 / (100.00)	<b>100.00</b>
備 註	最大流速值(1.89) 流 向(117.5°) 時 間(01/19 06)	最大流速值( 1.16) 流 向(214.0°) 時 間(07/13 02)	

表 2.18 蘇澳港逐時海流流向分布年統計結果

年份 流向	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)
N	1699	20.79	0.211	1947	22.47	0.195	<b>21.66</b>	<b>0.202</b>
NE	1048	12.83	0.161	1130	13.04	0.151	<b>12.94</b>	<b>0.156</b>
E	662	8.10	0.119	536	6.19	0.095	<b>7.12</b>	<b>0.108</b>
SE	822	10.06	0.149	612	7.06	0.099	<b>8.52</b>	<b>0.128</b>
S	1298	15.89	0.161	1170	13.51	0.133	<b>14.66</b>	<b>0.148</b>
WS	1432	17.53	0.196	1797	20.74	0.174	<b>19.18</b>	<b>0.184</b>
W	656	8.03	0.147	816	9.42	0.118	<b>8.74</b>	<b>0.131</b>
NW	554	6.78	0.136	655	7.56	0.105	<b>7.18</b>	<b>0.120</b>
合計 平均	8171	100.0	0.170 (平均)	8663	100.0	0.1496 (平均)	100.0	<b>0.160</b> (平均)
註 1：平均流速採用流速純量計算 註 2：流向判斷採用 $\pm 22.5^\circ$								

## (2) 花蓮港

花蓮港海象觀測站 X(如圖 2.5 所示)自 2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 15,581 筆，海流資料之觀測率約為 0.89。有關花蓮港海象觀測站海流流速大小分布及流向分布之年統計分析結果，如表 2.19 及表 2.20 所列；由海流流速大小分布年統計結果得知，花蓮港海象觀測站海流流速小於 0.25 m/s 之比例佔全部觀測資之 65.15%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間之比例約為 26.14%，二者合計約達 91.29%。另比較 2012 年及 2013 年流速大小分佈之統計結果得知：2012 年海流觀測資料因其低流速(小於 0.25 m/s)的比例明顯低於 2013 年觀測資料，因此花蓮港 2012 年較大流速資料的比例將明顯高於 2013 年觀測資料，此可能為 2012 年及 2013 年花蓮港海流觀測資料統計一致性較差的原因。在海流最大流速觀測上，2012 年花蓮港海流最大流速觀測值為 1.10m/s，流向為 75.7°(北北東偏北)，發生時間為 2012 年 9 月 19 日 0 時；2013 年海流最大流速觀測值為 0.96 m/s，流向為 64.9°(北北東偏東)，發生時間為 2013 年 3 月 26 日 10 時；以上最大流速發生原因均與颱風影響因素無關。

在海流流向分布年統計結果方面，表 2.20 花蓮港海象觀測站海流主要漲、退潮流向分別為 E(約佔 17.84%)及 WS(約佔 22.89%)，其次為 NE(約佔 15.99%)及 W(約佔 11.40%)。在漲、退潮主要流向上海流平均流速分別約為 0.293 m/s 及 0.289 m/，二者大小約相當。另外，花蓮港各流向內海流平均流速統計結果亦顯示出，2012 年觀測資料各流向內海流平均流速統計值均高於 2013 年各流向內海流平均流速統計值之現象，此與蘇澳港海流觀測結果相同。

## (3) 基隆港

基隆港海流測站(X2，如圖 2.6 所示) 2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 17,079 筆，海流觀測資料之觀測率約為 0.974。基隆港海象觀測站海流之流速分布及流向分布年統計分析結果，如表 2.21 及表 2.22 所列。由表 2.21 流速分布年統計結果之平均得知，觀測



站海流流速小於 0.25 m/s 之資料約佔全部觀測資料之 52.97%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間之資料約佔全部觀測資料之 35.64%，二者合計約達 88.61%。海流流速超過 1.0 m/s 之資料數共計 59 筆(其中 2012 年出現 52 筆)，約佔全部觀測資之 0.35%。針對 2012 年高流速(大於 1.0 m/s)資料出現異常頻繁現象進行分析，可發現上述高流速資料發生時間點多集中於 6 月 14 日至 17 日之間(共共出現 13 次)及 7 月 20 日至 27 日之間(共共出現 22 次)等現象，如圖 2.36 及圖 2.37 所示；均屬於非颱風侵臺期間，因此無法判斷觀測資料發生原因及其合理性。

基隆港 2013 年海流最大流速觀測值為 1.27 m/s，流向為  $60.4^\circ$  (屬東北東向)，發生時間為 2013 年 3 月 11 日 23 時。另比較 2012 年及 2013 年基隆港測站 X2 流速分佈統計結果可發現，在流速低於 1.0 m/s 的分佈上，2012 年及 2013 年海流觀測資料具有高度的一致性在；僅在強(或高)流速(大於 1.0 m/s)的部份，2012 年海流觀測資料出現的次數明顯偏多。

依據海流流向分布之年統計量平均結果(表 2.22)得知，基隆港測站 X2 海流流速平均值約為 0.297 m/s，漲退潮主要流向分別為 W(約佔 17.83%，平均流速約為 0.305 m/s)及 E(約佔 24.60%，平均流速值約為 0.309 m/s)，其次為 WS(約佔 11.44%，平均流速約為 0.239 m/s)及 NE(約佔 21.04%，平均流速約為 0.319 m/s)。同樣地，基隆港海流各流向之海流平均流速統計結果顯示，除了 NE 方向平均流速 2012 年統計值小於 2013 年統計值外，其餘各流向之平均流速 2012 年統計值均大於 2013 年統計值。

#### (4) 臺北港

臺北港海流測站(X1，如圖 2.7 所示) 2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 14,178 筆，海流資料觀測率約為 0.808。臺北港觀測海流之流速分布及流向分布年統計分析結果，如表 2.23 及表 2.24 所列。

由表 2.23 流速分布年統計之平均得知，臺北港觀測站海流之低流速(小於 0.25 m/s)資料約佔全部觀測資料之 23.61%，中間流速在 0.25 ~ 0.50 m/s 及 0.50 ~ 0.75 m/s 區間之資料分別各佔全部觀測資料之 34.11% 及 29.90%(二者合計約達 74.9%)；強流速(超過 1.0 m/s)觀測資料數共計 146 筆，約佔全部觀測資之 1.03%；其中最大流速觀測值為 1.63m/s，流向為 59.00°(東北東向)，發生時間為 2013 年 6 月 24 日 13 時；另 2012 年最大流速觀測值為 1.38 m/s，流向為 43.5°(東北向)，發生時間為 8 月 3 日 02 時，適值中度颱風蘇拉侵臺期間。

在海流流向分布年統計特性上，由表 2.24 得知臺北港測站 X1 海流流速 2012 及 2013 年之平均值約為 0.45 m/s，海流漲、退主要流向分別為 WS(約佔 32.57%，平均流速約為 0.465 m/s)及 NE(約佔 42.16%，平均流速值約為 0.535 m/s)，亦即退潮期間平均流速值略大於漲潮期間平均流速。

#### (5) 臺中港

臺中港海流測站(X1，如圖 2.8 所示) 2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 8,811 筆，海流資料觀測率約為 0.502；臺中港海流資料觀測率偏低主要是 2011 年 12 月 5 日儀器故障或資料傳輸電纜因故斷裂，直至 2012 年 8 月始恢復觀測及傳輸資料所致。臺中港 2012 及 2013 年海流觀測資料之流速分布及流向分布年統計分析結果，如表 2.25 及表 2.26 所列。由於 2012 年海流觀測資料數偏低，因此本計畫臺中港海流觀測資料特性說明以 2013 年海流觀測資料統計結果為依據。

由海流流速大小分布 2013 年年統計結果得知，臺中港海象觀測站海流流速小於 0.25 m/s 之比例佔全部觀測資料 38%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間之比例約為 41.15%，二者合計約達 79.15%。顯示臺中港海流流速超過 0.5 m/s 之比例高達 20.85%，其中流速超過 1.0 m/s 者約佔觀測資料數 1.52%，相對高於其他主要港口海流觀測統計特性。在海流最大流速觀測上，2013 年臺中港海流最大流速觀測值為 1.49m/s，流向為 131.2°(約為東南向)，發生時間為 2013 年 7 月 13 日

15 時，適值強烈颱風蘇力侵臺期間(參考圖 2.35 所示)。

在海流流向分布年統計特性上，表 2.26 顯示 2013 年統計結果顯示臺中港海象觀測站海流主要漲、退潮流向分別為 SW(約佔 26.67%)及 N(約佔 27.72%)，其次為 W 向(約佔 18.92%)及 NW 向(約佔 15.45%)，漲、退潮所佔的比例相當。另在漲、退潮主要流向之海流平均流速分別約為 0.562 m/s 及 0.314 m/s，代表臺中港漲潮流向流速明顯較退潮時流速強勁。

## (6) 高雄港

高雄港海流測站(X1，如圖 2.9 所示)2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 10,551 筆，海流資料觀測率約為 0.601；高雄港海流資料觀測率偏低的原因，為 2013 年 5 月資料傳輸電纜因故斷裂導致觀測無法即時傳輸所致。高雄港 2012 及 2013 年海流觀測資料之流速分布及流向分布年統計分析結果，如表 2.27 及表 2.28 所列。同樣因 2013 年海流觀測資料數偏低，因此本計畫高雄港海流觀測資料特性說明以 2012 年海流觀測資料統計結果為依據。

高雄港 2012 年海流流速大小分布年統計結果得知，高雄港海象觀測站海流流速小於 0.25 m/s 之比例佔全部觀測資料 57.98%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間之比例約為 33.31%，二者合計約達 91.29%。海流流速超過 1.0 m/s 之資料數共計 33 筆，約佔全年觀測資之 0.33%。在海流最大流速觀測上，2012 年高雄港海流最大流速觀測值為 1.47m/s，流向為 311°(約為西北向)，發生時間為 2012 年 6 月 20 日 11 時，適值輕度颱風泰利以穿越臺灣海峽路徑侵襲臺灣(參考圖 2.38 所示)。

在海流流向分布年統計特性上，高雄港 2012 年統計結果顯示高雄港海象觀測站海流主要流向分別有 S(約佔 29.45%)及 SE(約佔 24.38%)，其次為 NW 向(約佔 18.23%)。主要流向海流平均流速分別為 S 向 0.27 m/s 及 SE 向 0.277 m/s，二者大小相差有限；NW 向海流平均流速約為 0.312 m/s，略大於其他流向之平均流速。

## (7) 安平港

安平港海流測站(X1，如圖 2.10 所示)2012 年 1 月至 2013 年 12 月逐時海流觀測資料共計 14,685 筆，海流資料觀測率約為 0.837。安平港 2012 及 2013 年海流觀測資料之流速分布及流向分布年統計分析結果，如表 2.29 及表 2.30 所列；由海流流速大小分布之年統計結果得知，安平港海象觀測站 2012 年及 2013 年海流流速大小分佈之統計特性極為近似；其中海流流速小於 0.25 m/s 之比例佔全部觀測資之 55.59%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間之比例約為 37.29%，二者合計約達 92.88%。在海流最大流速觀測上，安平港 2012 年海流最大流速觀測值為 1.06m/s，流向為 271.0°(西向)，發生時間為 2012 年 8 月 25 日 14 時，適值中度颱風天秤侵臺期間(颱風路徑如圖 2.39 所示)；2013 年海流最大流速觀測值為 1.44 m/s，流向為 292°(約為西北西)，發生時間為 2013 年 9 月 22 日 6 時，適值強烈颱風天兔侵臺期間(路徑參考圖 2.19 所示)。

在海流流向分布年統計特性上，表 2.30 顯示安平港海象觀測站海流主要漲、退潮流向分別為 NW(約佔 20.59%)及 S(約佔 32.07%)，往南流向海流比例明顯高於往北流向海流。整體海流平均流速約為 0.246m/s 其中漲、退潮主要流向海流之平均流速分別約為 0.268m/s(NW 向)及 0.283 m/s(S 向)，二者大小相差有限。

表 2.19 花蓮港逐時海流流速分布年統計結果

流速區間(m/s)	年份	2012 年	2013 年	平均
		資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25		4644 / (53.47)	5096 / (73.90)	<b>62.51</b>
0.25 ~ 0.50		2661 / (30.64)	1412 / (20.48)	<b>26.14</b>
0.50 ~ 0.75		1201 / (13.83)	361 / ( 5.23)	<b>10.03</b>
0.75 ~ 1.00		177 / ( 2.04)	27 / ( 0.39)	<b>1.31</b>
1.00 <		2 / ( 0.02)	—	<b>0.01</b>
合計		8685 / (100.00)	6896 / (100.00)	<b>100.00</b>
備註		最大流速值(1.10) 流 向( 75.7°) 時 間(09/19 00)	最大流速值(0.96) 流 向( 64.9°) 時 間(03/26 10)	

表 2.20 花蓮港逐時海流流向分布年統計結果

年份 流向	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)
N	997	11.48	0.265	706	10.24	0.164	<b>10.93</b>	<b>0.223</b>
NE	1357	15.62	0.280	1134	16.44	0.198	<b>15.99</b>	<b>0.243</b>
E	1636	18.84	0.346	1143	16.57	0.217	<b>17.84</b>	<b>0.293</b>
SE	486	5.60	0.194	475	6.89	0.140	<b>6.17</b>	<b>0.167</b>
S	777	8.95	0.234	602	8.73	0.168	<b>8.85</b>	<b>0.205</b>
WS	1903	21.91	0.324	1664	24.13	0.248	<b>22.89</b>	<b>0.289</b>
W	1010	11.63	0.218	767	11.12	0.173	<b>11.40</b>	<b>0.199</b>
NW	519	5.98	0.177	405	5.87	0.133	<b>5.93</b>	<b>0.158</b>
合計 平均	8685	100.0	0.278	6896	100.0	0.1965	100.0	<b>0.242</b>
註 1：平均流速採用流速純量計算								
註 2：流向判斷採用 $\pm 22.5^\circ$								

表 2.21 基隆港逐時海流流速分布年統計結果

年份 流速區間(m/s)	2012 年	2013 年	平均
	資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25	4366 / (52.03)	4680 / (53.87)	<b>52.97</b>
0.25 ~ 0.50	2993 / (35.66)	3095 / (35.63)	<b>35.64</b>
0.50 ~ 0.75	833 / (9.93)	791 / (9.11)	<b>9.51</b>
0.75 ~ 1.00	148 / (1.76)	114 / (1.31)	<b>1.53</b>
1.00 ~ 1.25	31 / (0.37)	6 / (0.05)	<b>0.22</b>
1.25 ~ 1.50	11 / (0.13)	1 / (0.02)	<b>0.08</b>
1.50 ~ 1.75	4 / (0.05)	—	<b>0.02</b>
1.75 ~ 2.00	4 / (0.05)	—	<b>0.02</b>
2.00 <	2 / (0.02)	—	<b>0.01</b>
合計	8392 / (100.00)	8687 / (100.00)	<b>100.00</b>
備 註	最大流速值(2.07)* 流 向(99.44°) 時 間(07/22 21)	最大流速值(1.27) 流 向(60.4°) 時 間(03/11 23)	
*觀測資料之合理性無法判斷			

表 2.22 基隆港逐時海流流向分布年統計結果

年份 流向	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)
N	518	6.17	0.148	343	3.95	0.139	<b>5.04</b>	<b>0.144</b>
NE	1936	23.07	0.313	1658	19.09	0.327	<b>21.04</b>	<b>0.319</b>
E	2052	24.45	0.325	2150	24.75	0.294	<b>24.60</b>	<b>0.309</b>
SE	604	7.20	0.203	710	8.17	0.172	<b>7.69</b>	<b>0.186</b>
S	415	4.95	0.186	589	6.78	0.163	<b>5.88</b>	<b>0.173</b>
WS	890	10.61	0.250	1064	12.25	0.230	<b>11.44</b>	<b>0.239</b>
W	1386	16.52	0.313	1659	19.10	0.299	<b>17.83</b>	<b>0.305</b>
NW	591	7.04	0.212	514	5.92	0.182	<b>6.47</b>	<b>0.198</b>
合計 平均	8392	100.0	0.2778	8687	100.0	0.2619	100.0	<b>0.2697</b>
註 1：平均流速採用流速純量計算								
註 2：流向判斷採用 $\pm 22.5^\circ$								

表 2.23 臺北港逐時海流流速分布年統計結果

年份 流速區間(m/s)	2012 年	2013 年	平均
	資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25	2149 / (25.94)	1198 / (20.32)	<b>23.61</b>
0.25 ~ 0.50	2923 / (35.29)	1913 / (32.45)	<b>34.11</b>
0.50 ~ 0.75	2293 / (27.68)	1946 / (33.01)	<b>29.90</b>
0.75 ~ 1.00	856 / (10.33)	754 / (12.79)	<b>11.36</b>
1.00 ~ 1.25	59 / ( 0.71)	69 / ( 1.17)	<b>0.90</b>
1.25 ~ 1.50	3 / ( 0.04)	12 / ( 0.20)	<b>0.10</b>
1.50 <	—	3 / ( 0.05)	<b>0.02</b>
合計	8283 / (100.00)	5895 / (100.00)	<b>100.00</b>
備 註	最大流速值( 1.38) 流 向( 43.5°) 時 間(08/03 02)	最大流速值( 1.63) 流 向( 59.0°) 時 間(06/24 13)	

表 2.24 臺北港逐時海流流向分布年統計結果

年份 流向	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)
N	414	5.00	0.271	126	2.14	0.222	<b>3.81</b>	<b>0.260</b>
NE	3443	41.57	0.515	2534	42.99	0.563	<b>42.16</b>	<b>0.535</b>
E	172	2.08	0.112	232	3.94	0.254	<b>2.85</b>	<b>0.194</b>
SE	95	1.15	0.070	85	1.44	0.137	<b>1.27</b>	<b>0.102</b>
S	186	2.25	0.127	92	1.56	0.159	<b>1.96</b>	<b>0.138</b>
WS	2913	35.17	0.451	1705	28.92	0.490	<b>32.57</b>	<b>0.465</b>
W	819	9.89	0.333	917	15.56	0.418	<b>12.24</b>	<b>0.379</b>
NW	241	2.91	0.197	204	3.46	0.255	<b>3.14</b>	<b>0.224</b>
合計 平均	8283	100.0	0.4309	5895	100.0	0.4769	100.0	<b>0.4500</b>
註 1：平均流速採用流速純量計算								
註 2：流向判斷採用 $\pm 22.5^\circ$								

表 2.25 臺中港逐時海流流速分布年統計結果

年份 流速區間(m/s)	2012 年	2013 年	平均
	資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25	641 / (28.43)	2491 / (38.00)	<b>35.55</b>
0.25 ~ 0.50	1018 / (45.41)	2698 / (41.15)	<b>42.17</b>
0.50 ~ 0.75	375 / (16.63)	908 / (13.85)	<b>14.56</b>
0.75 ~ 1.00	151 / ( 6.70)	359 / ( 5.48)	<b>5.79</b>
1.00 ~ 1.25	63 / ( 2.79)	86 / ( 1.31)	<b>1.69</b>
1.25 ~ 1.50	7 / ( 0.31)	14 / ( 0.21)	<b>0.24</b>
1.50 <	—	—	—
合計	2255 / (100.00)	6556 / (100.00)	<b>100.00</b>
備 註	最大流速值( 1.42) 流 向(240.4°) 時 間(12/23 10)	最大流速值( 1.49) 流 向(131.2°) 時 間(07/13 15)	

表 2.26 臺中港逐時海流流向分布年統計結果

年份 流向	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)
N	475	21.06	0.319	1817	27.72	0.314	<b>26.01</b>	<b>0.315</b>
NE	94	4.17	0.271	494	7.54	0.271	<b>6.67</b>	<b>0.271</b>
E	4	0.18	0.140	144	2.20	0.154	<b>1.68</b>	<b>0.153</b>
SE	4	0.18	0.063	131	2.00	0.145	<b>1.53</b>	<b>0.143</b>
S	15	0.67	0.115	70	1.07	0.137	<b>0.96</b>	<b>0.133</b>
WS	865	38.36	0.564	1683	26.67	0.562	<b>28.92</b>	<b>0.562</b>
W	504	22.35	0.291	1150	17.54	0.293	<b>18.77</b>	<b>0.292</b>
NW	294	13.04	0.272	1067	16.28	0.242	<b>15.45</b>	<b>0.249</b>
合計 平均	2255	100.0	0.3965	6556	100.0	0.3502	100.0	<b>0.362</b>
註 1：平均流速採用流速純量計算								
註 2：流向判斷採用 $\pm 22.5^\circ$								

表 2.27 高雄港逐時海流流速分布年統計結果

年份 流速區間(m/s)	2012 年	2013 年	平均
	資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25	4437 / (57.98)	1932 / (66.67)	<b>60.36</b>
0.25 ~ 0.50	2549 / (33.31)	842 / (29.05)	<b>32.14</b>
0.50 ~ 0.75	557 / ( 7.28)	115 / ( 3.97)	<b>6.37</b>
0.75 ~ 1.00	85 / ( 1.11)	9 / ( 0.31)	<b>0.89</b>
1.00 ~ 1.25	20 / ( 0.26)	0 / ( 0.00)	<b>0.19</b>
1.25 ~ 1.50	5 / ( 0.07)	0 / ( 0.00)	<b>0.05</b>
1.50 <	—	—	—
合計	7653 / (100.00)	2898 / (100.00)	<b>100.00</b>
備 註	最大流速值( 1.47) 流 向(311.0°) 時 間(06/20 11)	最大流速值( 0.79) 流 向(154.6°) 時 間(01/13 13)	



表 2.28 高雄港逐時海流流向分布年統計結果

年份 流向	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)	百分比 (%)	平均 流速 (m/s)
N	491	6.42	0.223	157	5.42	0.166	<b>6.14</b>	<b>0.209</b>
NE	190	2.48	0.123	59	2.04	0.112	<b>2.36</b>	<b>0.120</b>
E	324	4.23	0.155	137	4.73	0.126	<b>4.37</b>	<b>0.147</b>
SE	1866	24.38	0.277	576	19.88	0.256	<b>23.14</b>	<b>0.272</b>
S	2254	29.45	0.270	1070	36.92	0.242	<b>31.50</b>	<b>0.261</b>
SW	611	7.98	0.139	277	9.56	0.146	<b>8.42</b>	<b>0.141</b>
W	522	6.82	0.150	191	6.59	0.118	<b>6.76</b>	<b>0.142</b>
NW	1395	18.23	0.312	431	14.87	0.234	<b>17.31</b>	<b>0.294</b>
合計 平均	7653	100.0	0.2493	2898	100.0	0.2138	100.0	<b>0.2395</b>
註 1：平均流速採用流速純量計算								
註 2：流向判斷採用 $\pm 22.5^\circ$								

表 2.29 安平港逐時海流流速分布年統計結果

年份 流速區間(m/s)	2012 年	2013 年	平均
	資料數 / (百分比)	資料數 / (百分比)	百分比
< 0.25	3501 / (53.82)	4662 / (56.99)	<b>55.59</b>
0.25 ~ 0.50	2461 / (37.83)	3015 / (36.86)	<b>37.29</b>
0.50 ~ 0.75	516 / ( 7.93)	434 / ( 5.31)	<b>6.47</b>
0.75 ~ 1.00	25 / ( 0.38)	59 / ( 0.72)	<b>0.57</b>
1.00 ~ 1.25	2 / ( 0.03)	8 / ( 0.10)	<b>0.07</b>
1.25 ~ 1.50	0 / ( 0.00)	2 / ( 0.02)	<b>0.01</b>
1.25 <	—	—	—
合計	6505 / (100.00)	2898 / (100.00)	<b>100.00</b>
備 註	最大流速值( 1.06) 流 向(271.0°) 時 間(08/25 14)	最大流速值( 1.44) 流 向(292.0°) 時 間(09/22 06)	

表 2.30 安平港逐時海流流向分布年統計結果

年份	2012 年			2013 年			平均	
	資料數	百分比 (%)	平均流速 (m/s)	資料數	百分比 (%)	平均流速 (m/s)	百分比 (%)	平均流速 (m/s)
N	182	2.80	0.160	297	3.63	0.135	<b>3.26</b>	<b>0.145</b>
NE	66	1.01	0.119	129	1.58	0.090	<b>1.33</b>	<b>0.100</b>
E	68	1.05	0.111	327	4.00	0.127	<b>2.69</b>	<b>0.124</b>
SE	899	13.82	0.265	1877	22.95	0.252	<b>18.90</b>	<b>0.256</b>
S	2392	36.77	0.300	2317	28.33	0.265	<b>32.07</b>	<b>0.283</b>
SW	710	10.91	0.189	655	8.01	0.171	<b>9.30</b>	<b>0.180</b>
W	842	12.94	0.207	900	11.00	0.221	<b>11.86</b>	<b>0.214</b>
NW	1346	20.69	0.257	1678	20.51	0.276	<b>20.59</b>	<b>0.268</b>
合計 平均	6505	100.0	0.2544	8180	100.0	0.2390	100.0	<b>0.2458</b>

註 1：平均流速採用流速純量計算  
 註 2：流向判斷採用  $\pm 22.5^\circ$

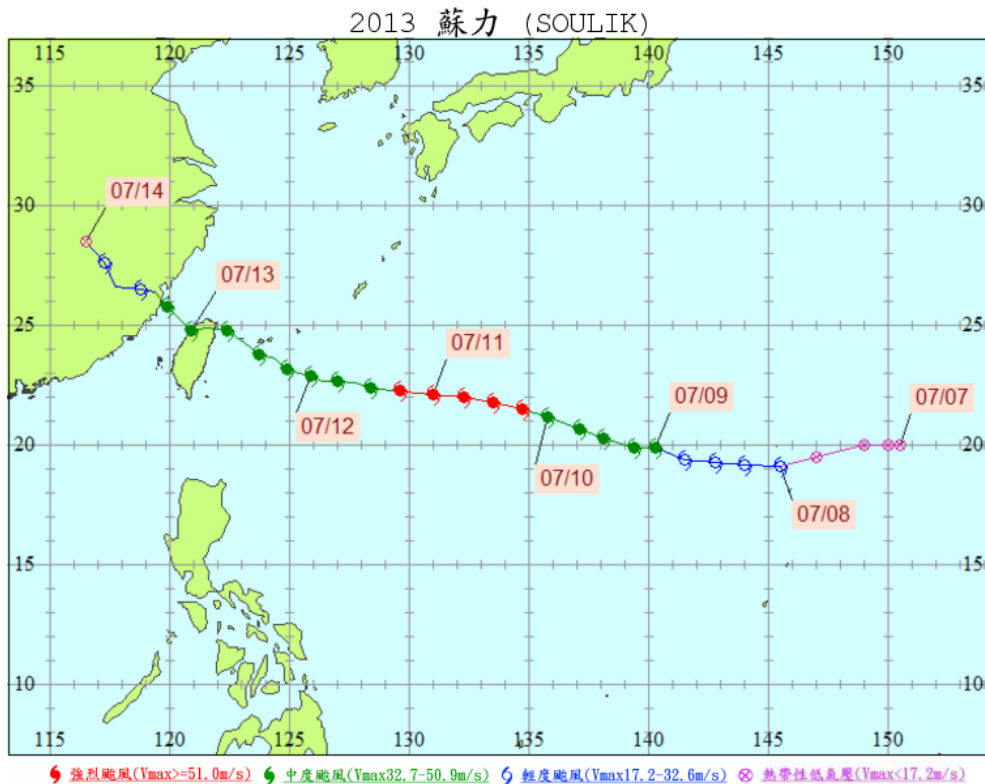


圖 2.35 2013 年強烈颱風蘇力侵臺路徑圖

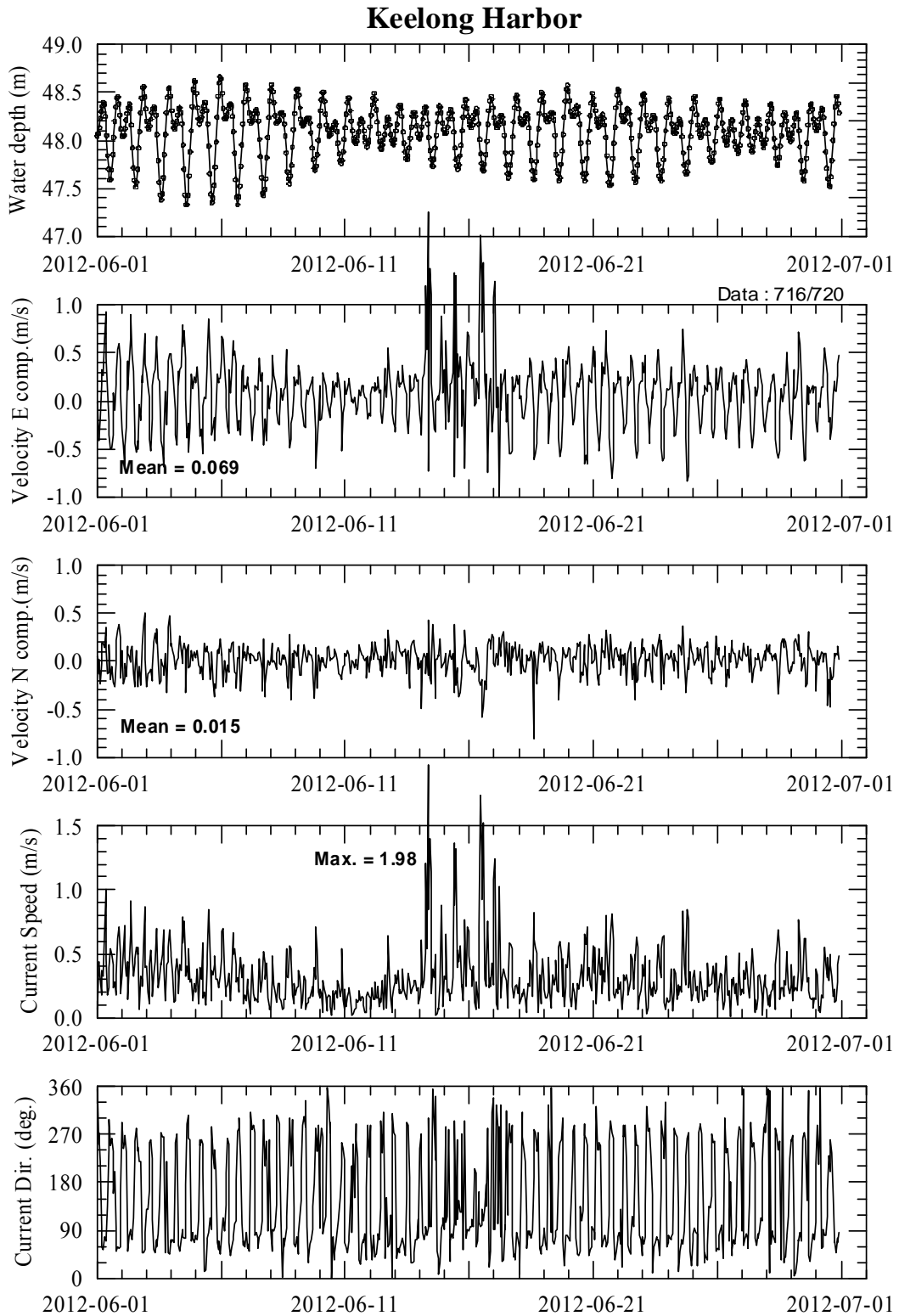


圖 2.36 基隆港測站(X2) 2012 年 6 月海流觀測資料時序列圖

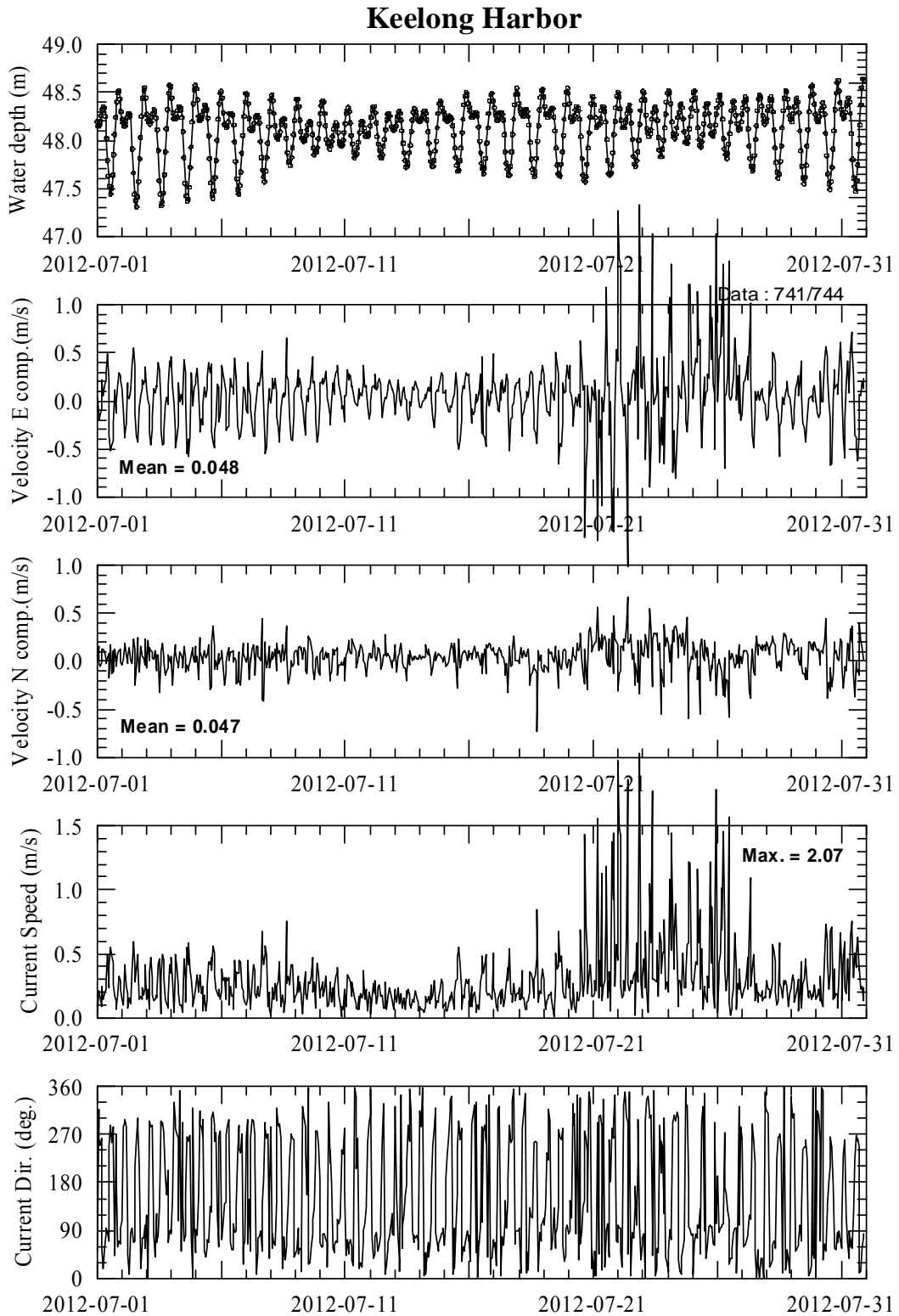


圖 2.37 基隆港測站(X2) 2012 年 7 月海流觀測資料時序列圖

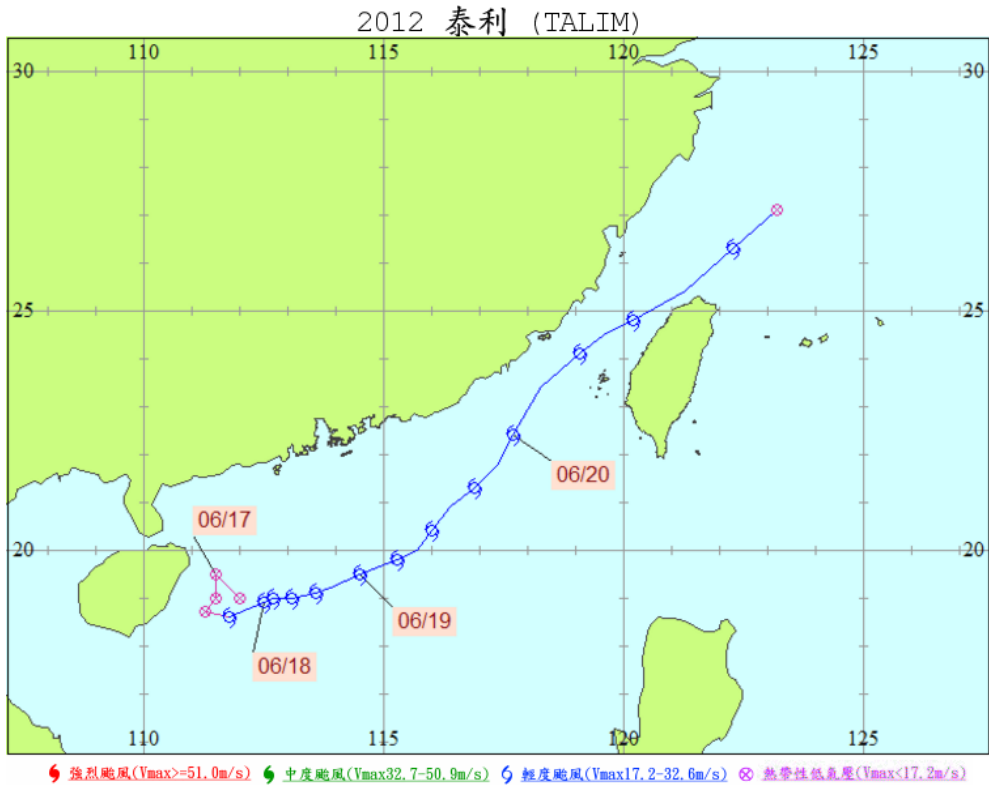


圖 2.38 2012 年輕度颱風泰利侵臺路徑圖

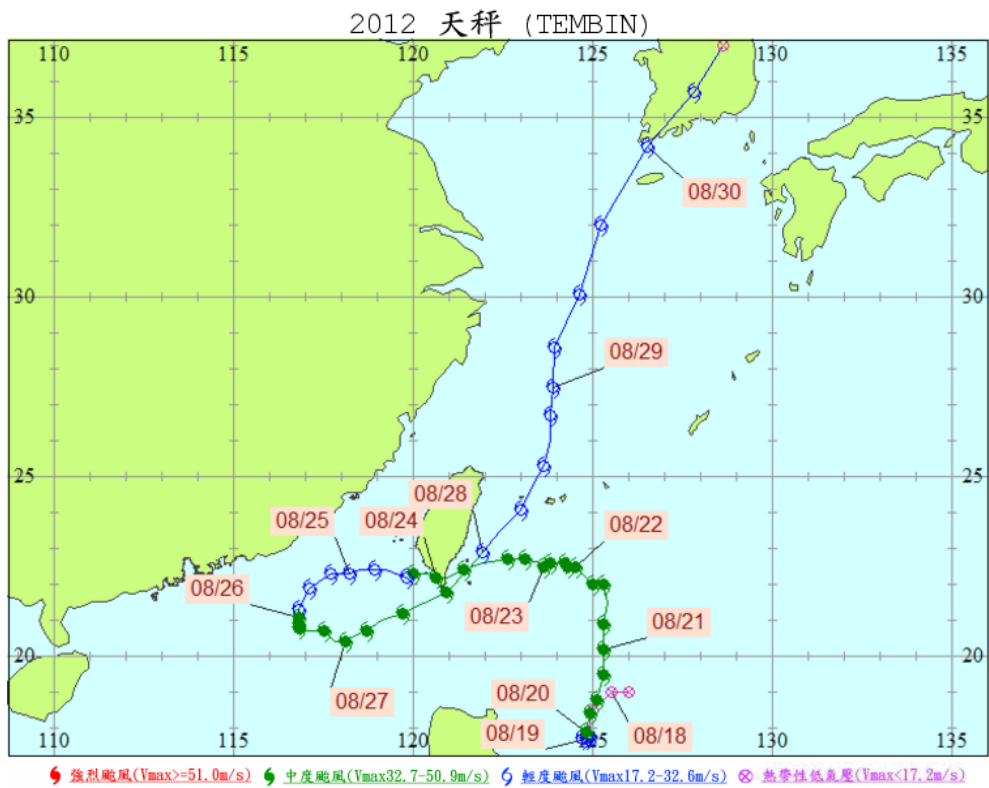


圖 2.39 2012 年中度颱風天秤侵臺路徑圖

## 2.3.2 天文潮流特性分析

### (1) 蘇澳港

本計畫依海流觀測資料之連續性篩選出：觀測期間為 2013 年 07 月 01 00 時至 08 月 23 日 10 時共計 1283 筆資料(資料代號 SA01)，以及 2013 年 12 月 01 日 00 時至 12 月 31 日 22 時共計 743 筆資料(資料代號 SA02)兩組海流觀測資料，進行速度能譜及調和分析。其中代號 SA01 資料可為蘇澳港夏季海流之代表，SA02 資料則代表蘇澳港冬季海流。圖 2.40 及圖 2.41 所示分別為 SA01 及 SA02 海流資料之能譜分析結果，其中夏季海流 N-S 向速度分量明顯大於 E-W 向速度分量，以及半日潮能量較全日潮能量顯著；冬季海流速度分量能譜分析結果顯示，測站 X 冬季海流 N-S 向與 E-W 向分量之速度能量相近，其中半日潮能量 N-S 向分量明顯高於 E-W 向分量。

本計畫針對蘇澳港海流資料選取  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$  及  $S_2$  等 5 個分潮進行潮流調和分析，表 2.31 及表 2.32 所列分別為 SA01 及 SA02 兩組海流觀測資料之潮流調和分析結果。表 2.31 分析結果顯示夏季海流平均淨流速約為 0.062 m/s，流向往北偏東  $10.5^\circ$ ，其中東西(E-W)向平均淨流速約為 0.0113 m/s，南北(N-S)向平均淨流速為 0.061 m/s。表 2.32 冬季海流平均淨流速為 0.052 m/s，流向往南偏西  $43.7^\circ$ ，其中東西向平均淨流速為 -0.0376 m/s，南北向平均淨流速為 -0.036 m/s。此外，蘇澳港夏季及冬季潮流調和分析均顯示以  $M_2$  分潮振幅最大。

依據潮流調和分析結果，本計畫將東西向及南北向流速資料分別分離成潮流及非潮流兩種成份流，如圖 2.42 及圖 2.43 所示。

### (2) 花蓮港

本計畫依據花蓮港海流觀測資料之連續性，分別篩選出夏季及冬季海流觀測代表資料 HL01 及 HL02 等兩組；其中 HL01 資料觀測時間為 2013 年 07 月 01 00 時至 07 月 25 日 08 時共計 585 筆資料，HL02 資料觀測時間為 2013 年 11 月 01 日 00 時至 12 月 15 日 13 時共計 1070

筆資料。夏季及冬季海流觀測資料 HL01 及 HL02 之速度能譜分析結果，分別如圖 2.44 及圖 2.45 所示；依據海流速度東西向及南北向分量之能譜分析結果顯示，花蓮港測站海流東西向速度分量明顯大於南北向速度分量；在能量分布上，冬季海流其全日潮流能量明顯大於半日潮流能量，夏季海流則全日潮流能量與半日潮流能量相近。

針對花蓮港潮流調和分析，本計畫選取  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$  及  $S_2$  等 5 個分潮進行潮流調和分析，分析結果如表 2.33 及 2.34 所列。表 2.33 分析結果顯示夏季海流平均淨流速為 0.044 m/s，流向約東北偏北( $33.7^\circ$ )；表 2.32 冬季海流平均淨流速為 0.041 m/s，流向往南為主。花蓮港夏季及冬季潮流調和分析均顯示以  $K_1$  分潮合成振幅最大。

本計畫依據花蓮港潮流調和分析結果，將夏季及冬季海流觀測資料 HL01 及 HL02 分別分離成潮流及非潮流兩種成份流，如圖 2.46 及圖 2.47 所示，分析結果顯示在花蓮港冬季海流觀測資料中，非潮流成份明顯大於夏季非潮流成份。

### (3) 基隆港

本計畫依據基隆港海流觀測資料之連續性，分別篩選出夏季及冬季海流觀測代表資料 KL01 及 KL02 等兩組；其中 KL01 資料觀測時間為 2013 年 07 月 01 00 時至 08 月 01 日 11 時共計 759 筆資料，KL02 資料觀測時間為 2013 年 12 月 01 日 00 時至 12 月 31 日 22 時共計 743 筆資料。基隆港夏季及冬季海流觀測資料 KL01 及 KL02 之速度能譜分析結果，分別如圖 2.48 及圖 2.49 所示；依據海流速度東西向及南北向分量之能譜分析結果顯示，基隆港測站海流速度分量之優勢分量應屬於東西向分量，故東西向分量之速度能量明顯高於南北向速度分量之能量，且具有顯著的半日潮流能量(以  $M_2$  分潮為主)；南北向速度能譜分析結果則呈現出以全日潮流能量為主的特性，此與東西向速度能譜以半日潮流能量為主的特性迥異，可能為基隆港海流變化複雜因素之一。

在潮流調和分析上，本計畫選取半月潮  $M_f$ 、全日潮  $O_1$  及  $K_1$ 、半日潮  $N_2$ 、 $M_2$  及  $S_2$ 、1/4 日潮  $M_4$  以及 1/6 日潮  $2MS_6$  等 8 個分潮針對基隆港觀測資料 KL01 及 KL02 進行潮流調和分析，結果如表 2.35 及 2-36 所列。表中夏季海流平均淨流速約為 0.016 m/s，流向約為西南向；冬季海流平均淨流速約為 0.065 m/s，流向約為東北偏東向( $51.3^\circ$ )，顯示基隆港夏季海流平均淨流速明顯小於冬季海流平均淨流速。同理，本計畫依據潮流調和分析結果將基隆港夏季海流觀測資料 KL01 及 KL02 分離成潮流及非潮流兩種成份流，如圖 2.50 及圖 2.51 所示；顯示基隆港冬季海流觀測資料(2013 年 12 月)東西向天文潮流相當顯著。

#### (4) 臺北港

本計畫依據臺北港海流觀測資料之連續性，分別篩選出夏季及冬季海流觀測代表資料 TP01 及 TP02 等兩組；其中 TP01 資料觀測時間為 2013 年 06 月 01 00 時至 06 月 28 日 11 時共計 562 筆資料，TP02 資料觀測時間為 2012 年 12 月 01 日 00 時至 12 月 28 日 19 時共計 668 筆資料。臺北港夏季及冬季海流觀測資料 TP01 及 TP02 之速度能譜分析結果，分別如圖 2.52 及圖 2.53 所示；依據海流速度能譜分析結果顯示，臺北港海流東西向及南北向分量能譜相當近似，此現象與海流主流向 WS-NS 是一致的；東西向及南北向分量之半日潮流能量相當顯著，且全日潮流能量分布普遍較小。

在臺北港潮流分析上，本計畫同樣選取半月潮  $M_f$ 、全日潮  $O_1$  及  $K_1$ 、半日潮  $N_2$ 、 $M_2$  及  $S_2$ 、1/4 日潮  $M_4$  以及 1/6 日潮  $2MS_6$  等 8 個分潮，分別針對臺北港觀測資料 TP01 及 TP02 進行潮流調和分析，結果如表 2.37 及 2.38 所列。表中夏季海流平均淨流速約為 0.0825 m/s，流向為北向，其東西向平均淨流速非常小；冬季海流平均淨流速約為 0.0695 m/s，流向約為西南偏南向；顯示臺北港測站夏季海流與冬季海流平均淨流速呈現相反流向。同理，本計畫將臺北港夏季及冬季海流觀測資料 TP01 及 TP02 分離成潮流及非潮流兩種成份流，如圖 2.54 及圖 2.55 所示；其中夏季海流資料疑因觀測品質不佳導致潮流及非潮流成份分



離效果不佳。

表 2.31 蘇澳港夏季海流觀測資料(SA01)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0115	358.538	0.0174	64.471
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0062	327.657	0.0547	349.421
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0118	171.929	0.0288	127.477
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.0224	113.052	0.0642	69.213
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0203	69.175	0.0217	84.534
平均淨流速		0.0113 m/s		0.0610 m/s	
觀測資料時間		2013/07/01 00:00 ~ 2013/08/23 10:00			
原點時間		2013/07/27 17:00			

表 2.32 蘇澳港冬季海流觀測資料(SA02)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0117	166.779	0.0081	191.403
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0290	211.296	0.0232	169.052
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0032	177.737	0.0198	206.507
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.0452	174.405	0.0697	139.260
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0259	237.361	0.0381	209.785
平均淨流速		-0.0376 m/s		-0.0360 m/s	
觀測資料時間		2013/12/01 00:00 ~ 2013/12/31 22:00			
原點時間		2013/12/16 11:00			

表 2.33 花蓮港夏季海流觀測資料(HL01)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0049	56.712	0.0306	359.544
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0632	331.874	0.0318	322.979
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0048	104.723	0.0109	348.021
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.0464	52.571	0.0462	107.858
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0263	356.795	0.0266	53.274
平均淨流速		0.0242 m/s		0.0363 m/s	
觀測資料時間		2013/07/01 00:00 ~ 2013/07/25 08:00			
原點時間		2013/07/13 04:00			

表 2.34 花蓮港冬季海流觀測資料(HL02)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0309	135.297	0.0353	88.884
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0830	354.099	0.0418	351.386
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0259	32.220	0.0059	356.685
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.0453	353.727	0.0330	5.731
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0175	50.980	0.0136	55.036
平均淨流速		0.0009 m/s		-0.0409 m/s	
觀測資料時間		2013/11/01 00:00 ~ 2013/12/15 13:00			
原點時間		2013/11/23 06:00			

表 2.35 基隆港夏季海流觀測資料(KL01)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0306	267.513	0.0054	312.317
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0108	43.465	0.0073	347.132
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0466	134.106	0.0834	121.792
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0527	335.063	0.0133	30.531
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.1436	14.715	0.0352	9.988
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0265	219.088	0.0217	33.968
M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0422	131.961	0.0025	210.594
2MS6	87.96820831	0.0166	256.113	0.0112	202.323
平均淨流速		-0.0111 m/s		0.0115 m/s	
觀測資料時間		2013/07/01 00:00 ~ 2013/08/01 11:00			
原點時間		2013/07/16 17:00			

表 2.36 基隆港冬季海流觀測資料(KL02)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0421	260.848	0.0267	222.509
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0154	82.681	0.0156	211.872
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0204	103.278	0.0117	266.882
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0355	75.259	0.0103	8.101
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.3126	320.824	0.1095	306.954
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.0788	15.182	0.0126	331.453
M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0662	18.773	0.0230	272.872
2MS6	87.96820831	0.0325	291.450	0.0205	289.564
平均淨流速		0.0910 m/s		0.0343 m/s	
觀測資料時間		2013/12/01 00:00 ~ 2013/12/31 22:00			
原點時間		2013/12/16 11:00			

表 2.37 臺北港夏季海流觀測資料(TP01)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0880	170.929	0.0206	224.635
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0151	137.276	0.0496	35.845
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.1051	270.161	0.0965	186.298
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.1226	192.805	0.0460	222.413
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.4590	348.094	0.2848	7.690
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.1373	307.518	0.0579	337.190
M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0679	57.971	0.0192	292.627
2MS6	87.96820831	0.0179	66.457	0.0171	357.285
平均淨流速		0.0097 m/s		0.0820 m/s	
觀測資料時間		2013/06/01 00:00 ~ 2013/06/24 09:00			
原點時間		2013/06/12 16:00			

表 2.38 臺北港冬季海流觀測資料(TP02)之潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
M <sub>f</sub>	1.09803307	0.0428	7.087	0.0319	354.843
O <sub>1</sub>	13.94303513	0.0272	47.598	0.0258	13.702
K <sub>1</sub>	15.04106903	0.0396	50.764	0.0520	19.976
N <sub>2</sub>	28.43972969	0.0879	116.503	0.1060	138.284
M <sub>2</sub>	28.98410416	0.4220	123.185	0.4982	133.287
S <sub>2</sub>	30.00000000	0.1070	135.701	0.1153	137.865
M <sub>4</sub>	57.96820831	0.0153	12.732	0.0090	236.166
2MS6	87.96820831	0.0041	162.865	0.0042	310.650
平均淨流速		-0.0376 m/s		0.0585 m/s	
觀測資料時間		2012/12/01 00:00 ~ 2012/12/28 19:00			
原點時間		2012/12/14 21:00			

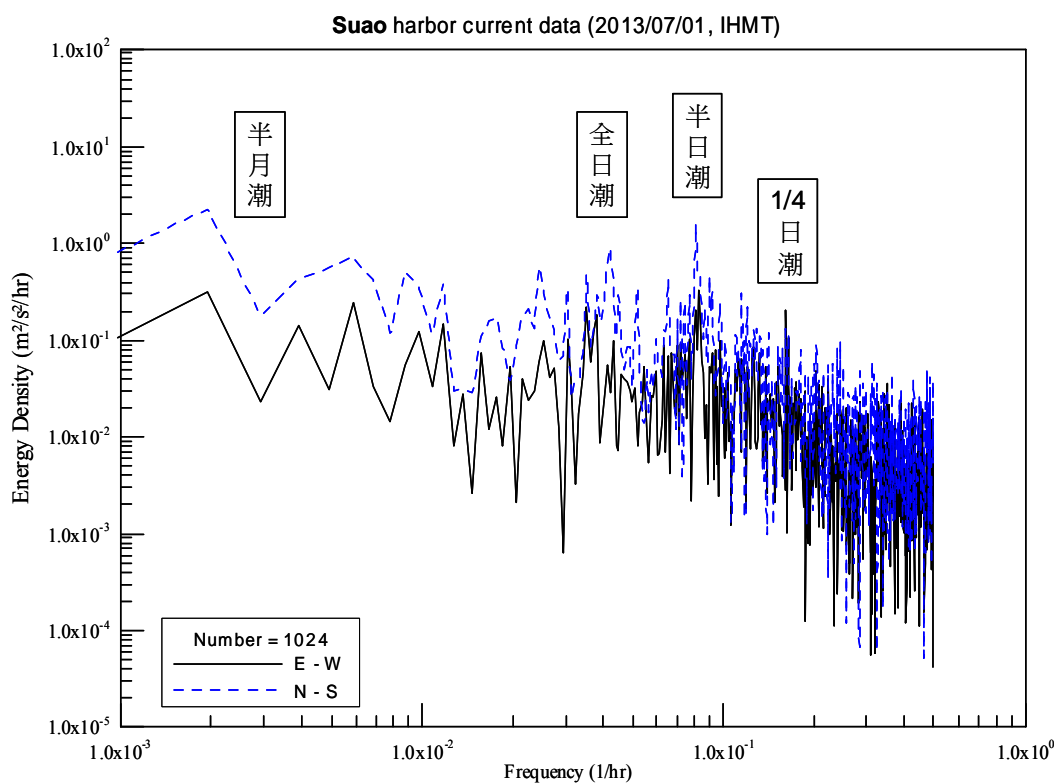


圖 2.40 蘇澳港夏季海流資料(SA01)之速度分量能譜圖

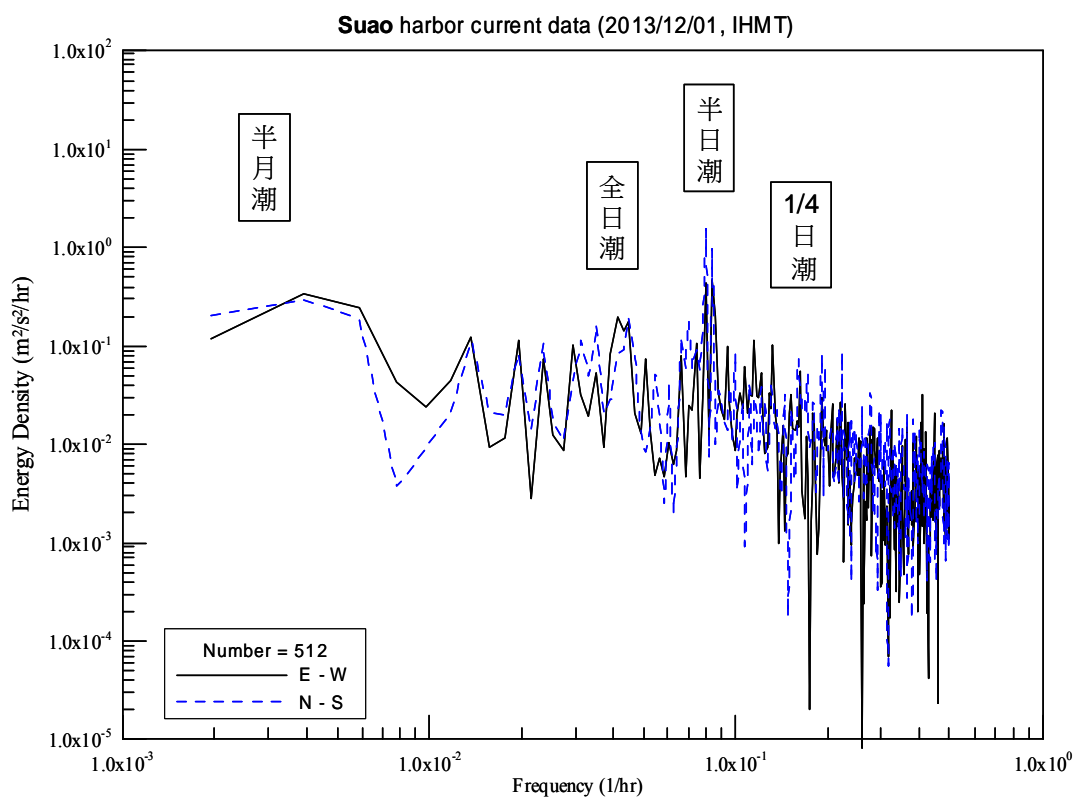


圖 2.41 蘇澳港冬季海流資料(SA02)之速度分量能譜圖

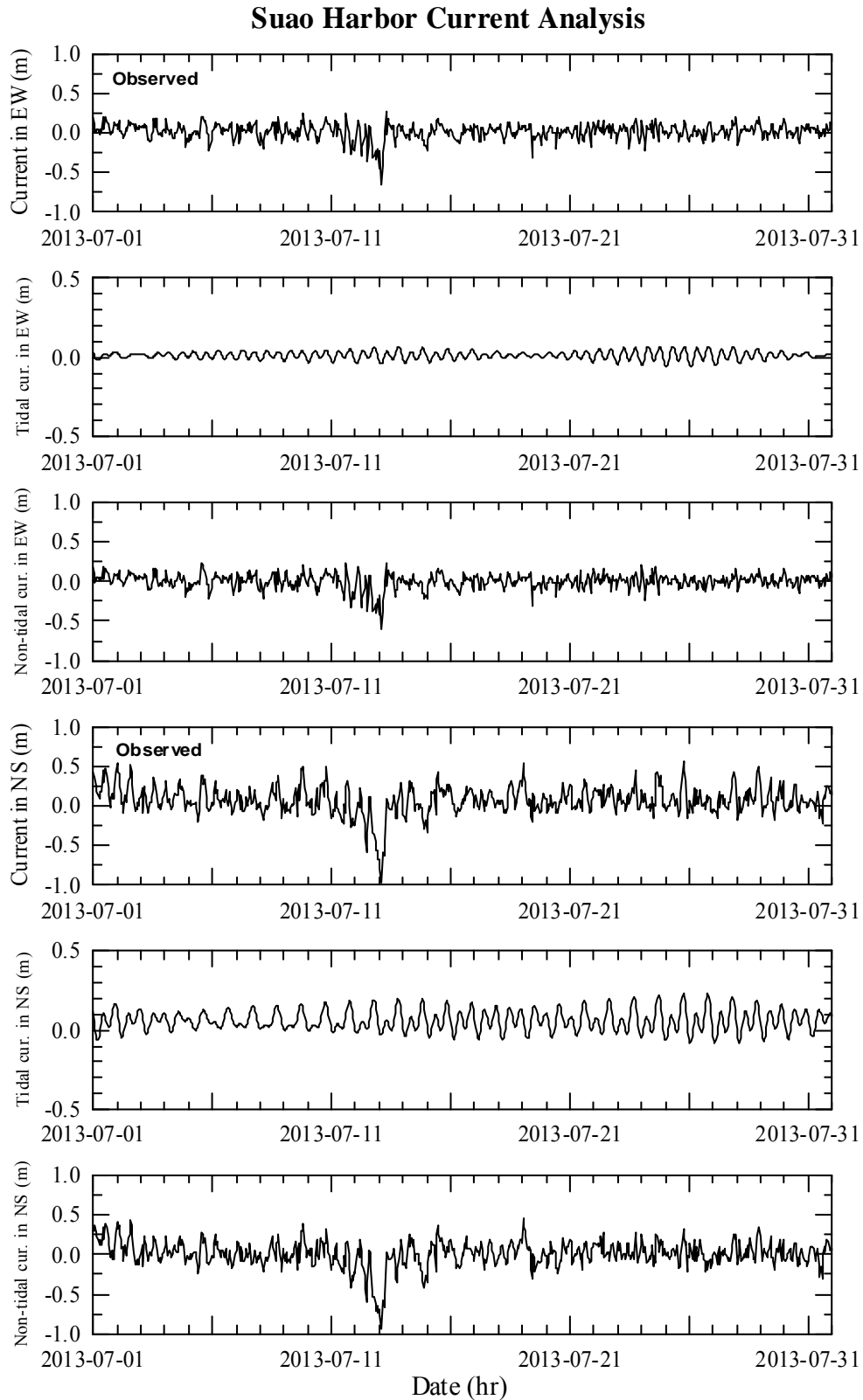


圖 2.42 蘇澳港夏季海流觀測資料 SA01 之潮流及非潮流成份圖

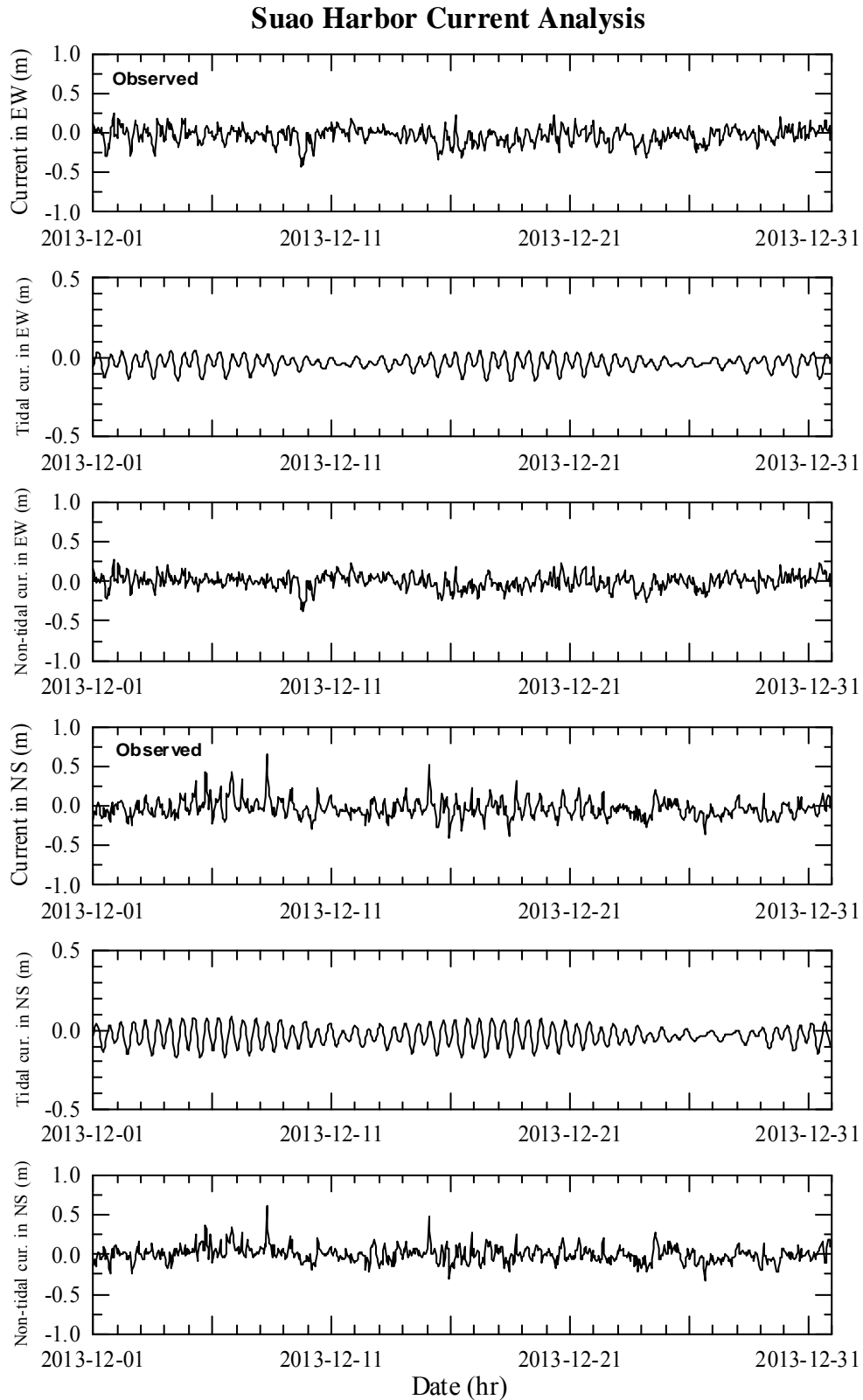


圖 2.43 蘇澳港冬季海流觀測資料(SA02)之潮流及非潮流成份圖

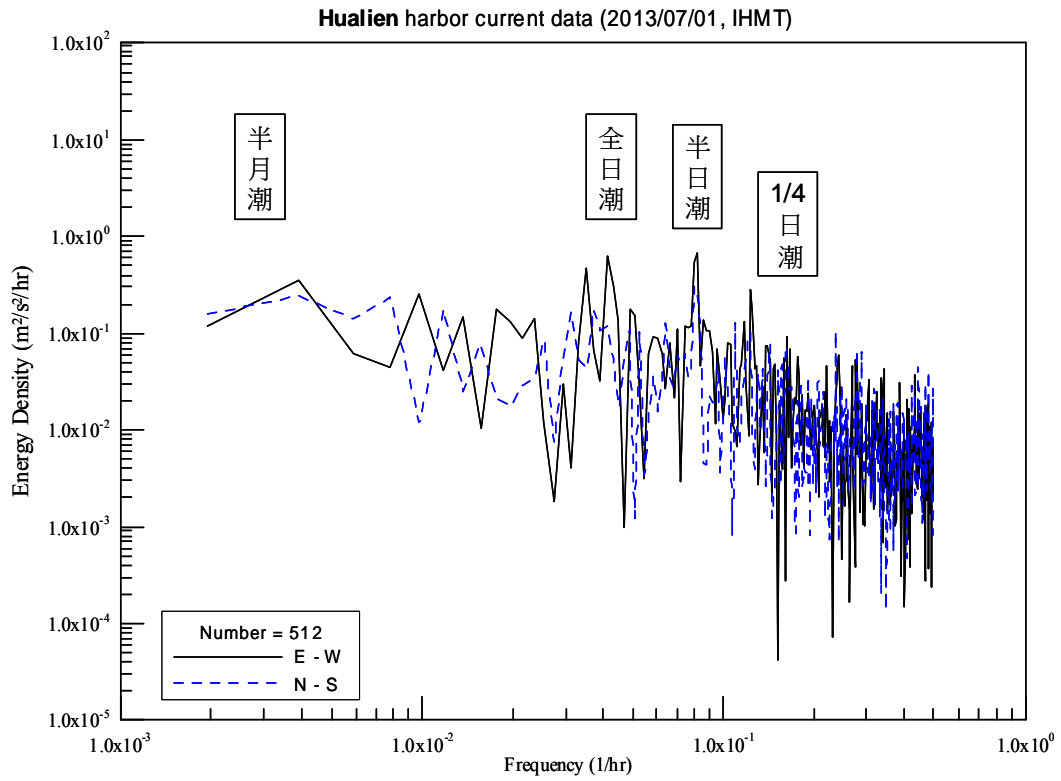


圖 2.44 花蓮港夏季海流資料(HL01)之速度分量能譜圖

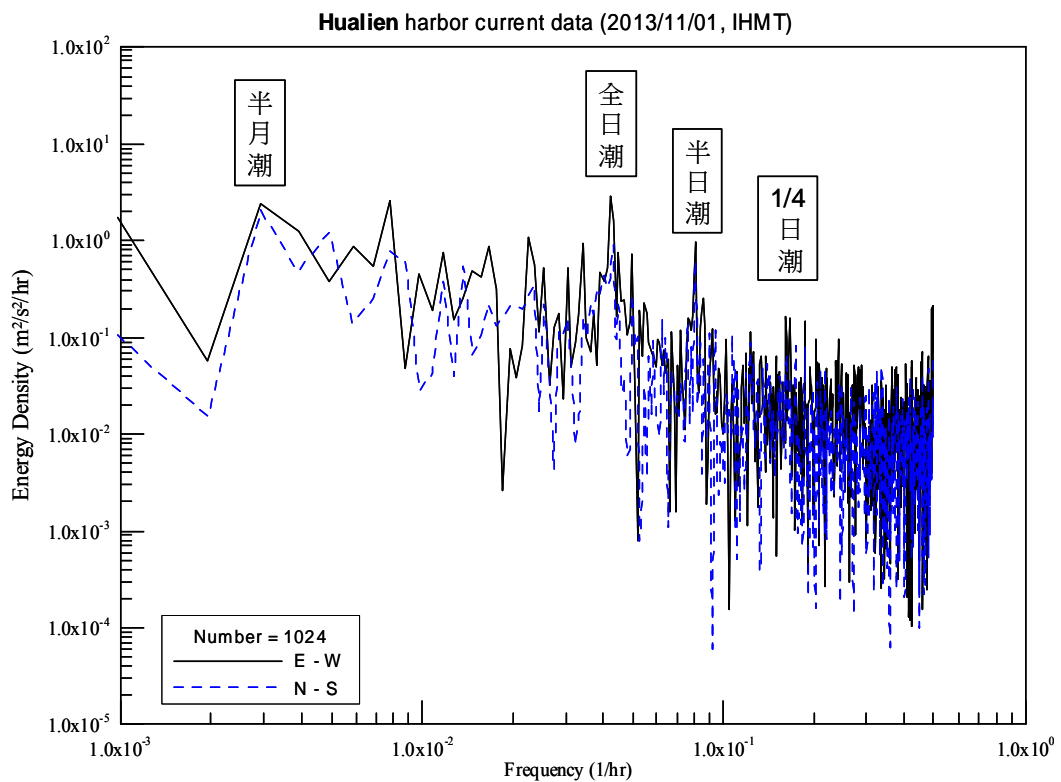


圖 2.45 花蓮港冬季海流資料(HL02)之速度分量能譜圖

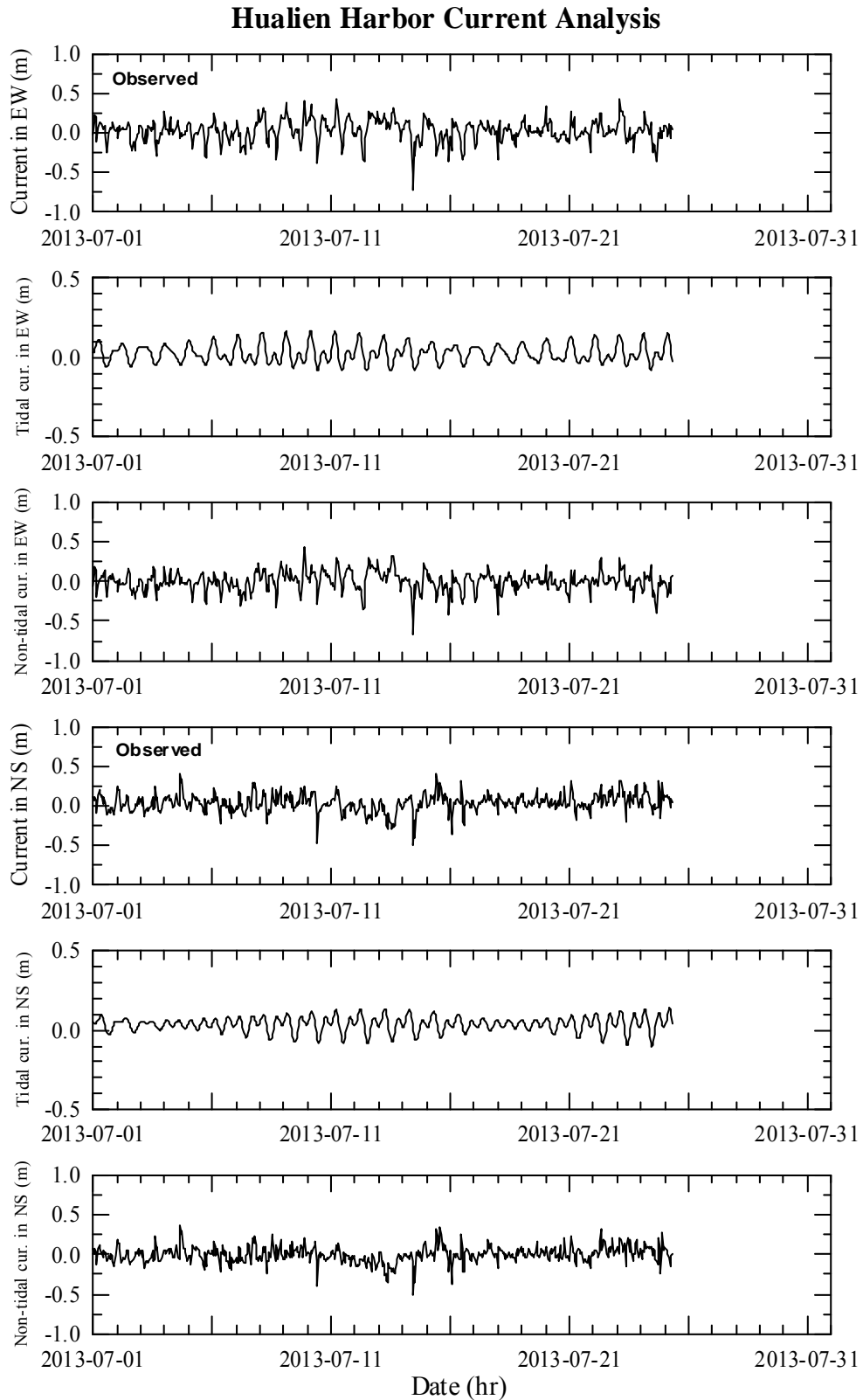


圖 2.46 花蓮港夏季海流觀測資料 HL01 之潮流及非潮流成份圖



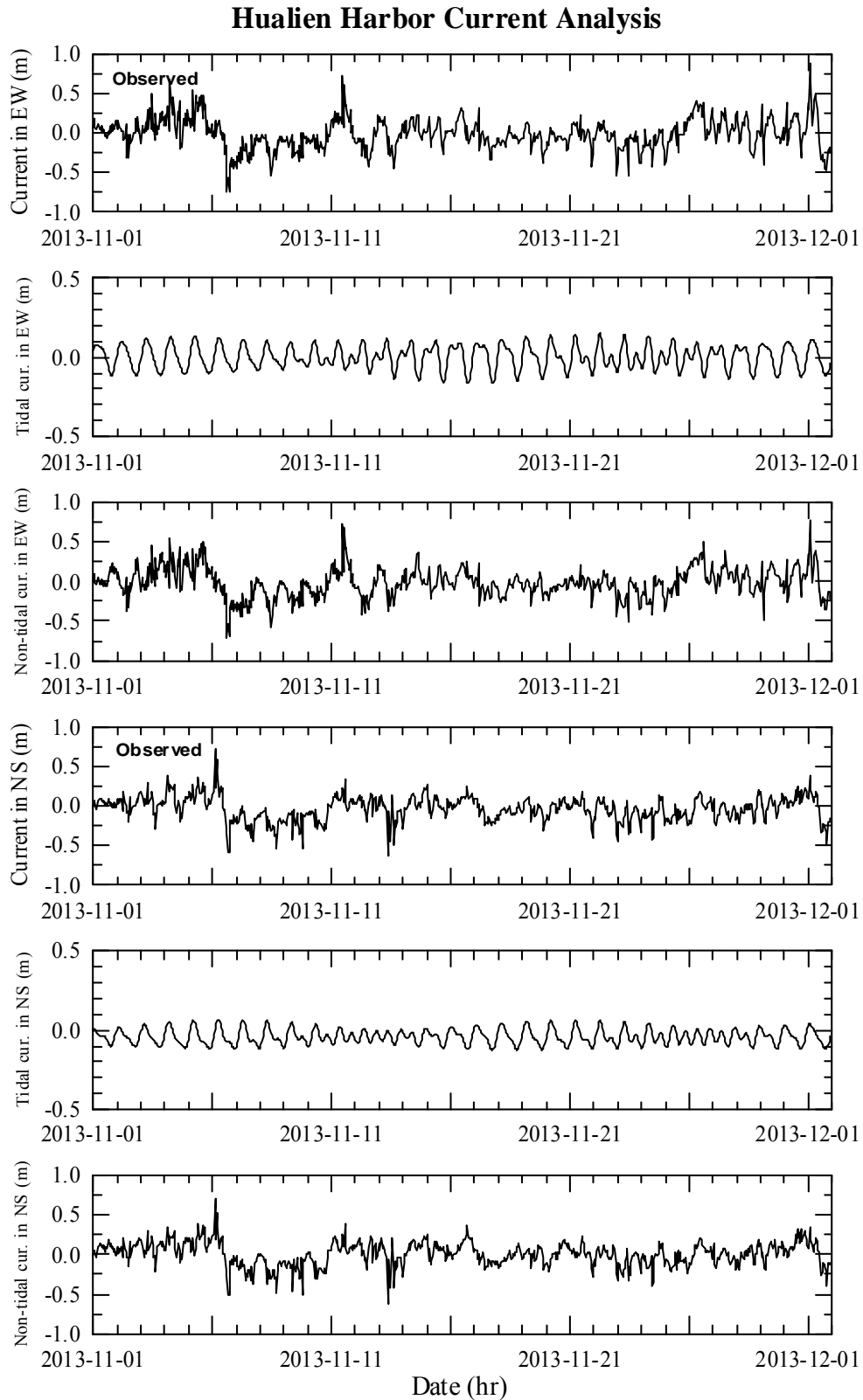


圖 2.47 花蓮港冬季海流觀測資料 HL02 之潮流及非潮流成份圖

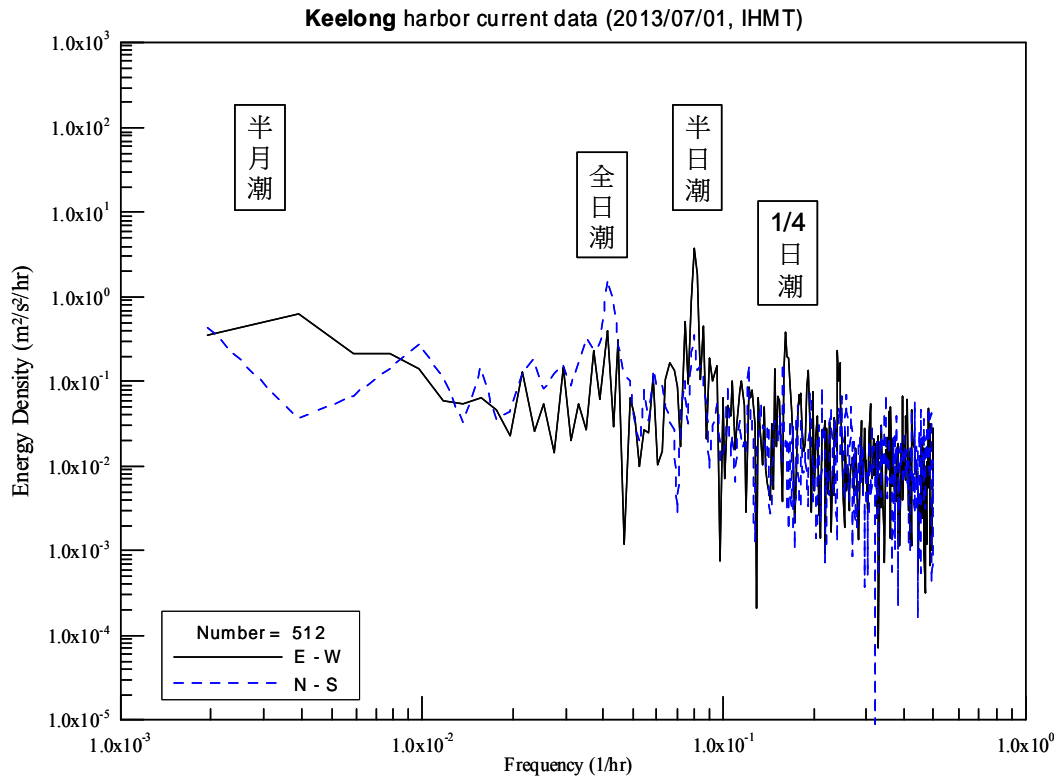


圖 2.48 基隆港夏季海流資料(KL01)之速度分量能譜圖

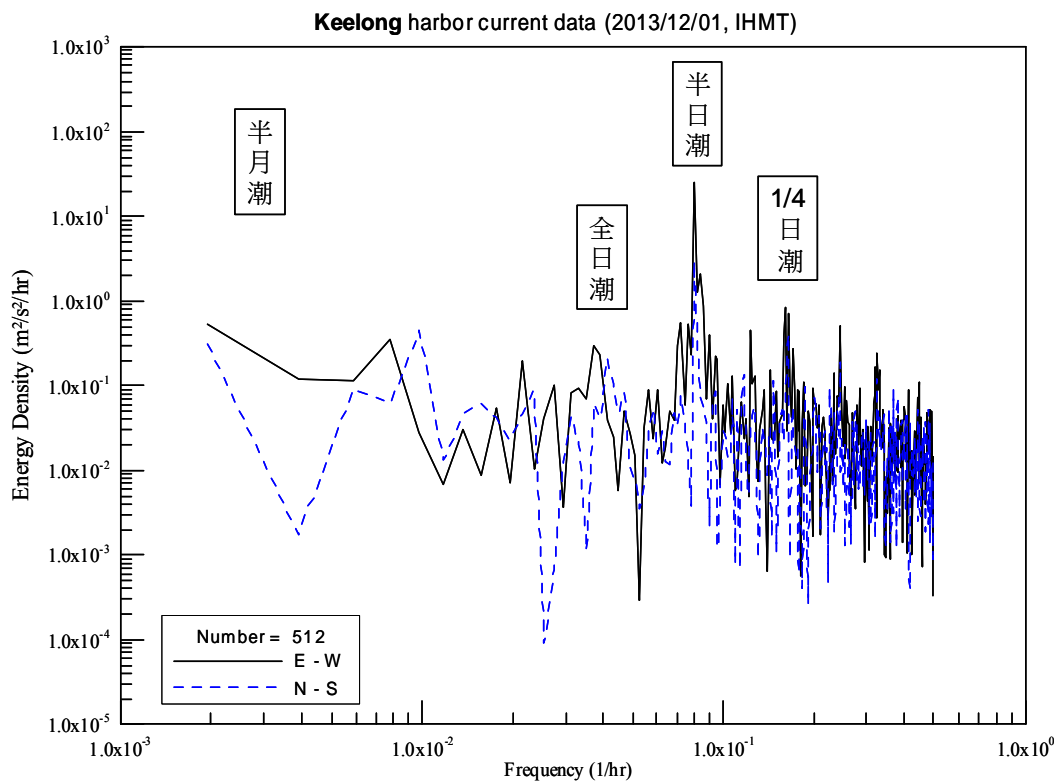


圖 2.49 基隆港冬季海流資料(KL02)之速度分量能譜圖

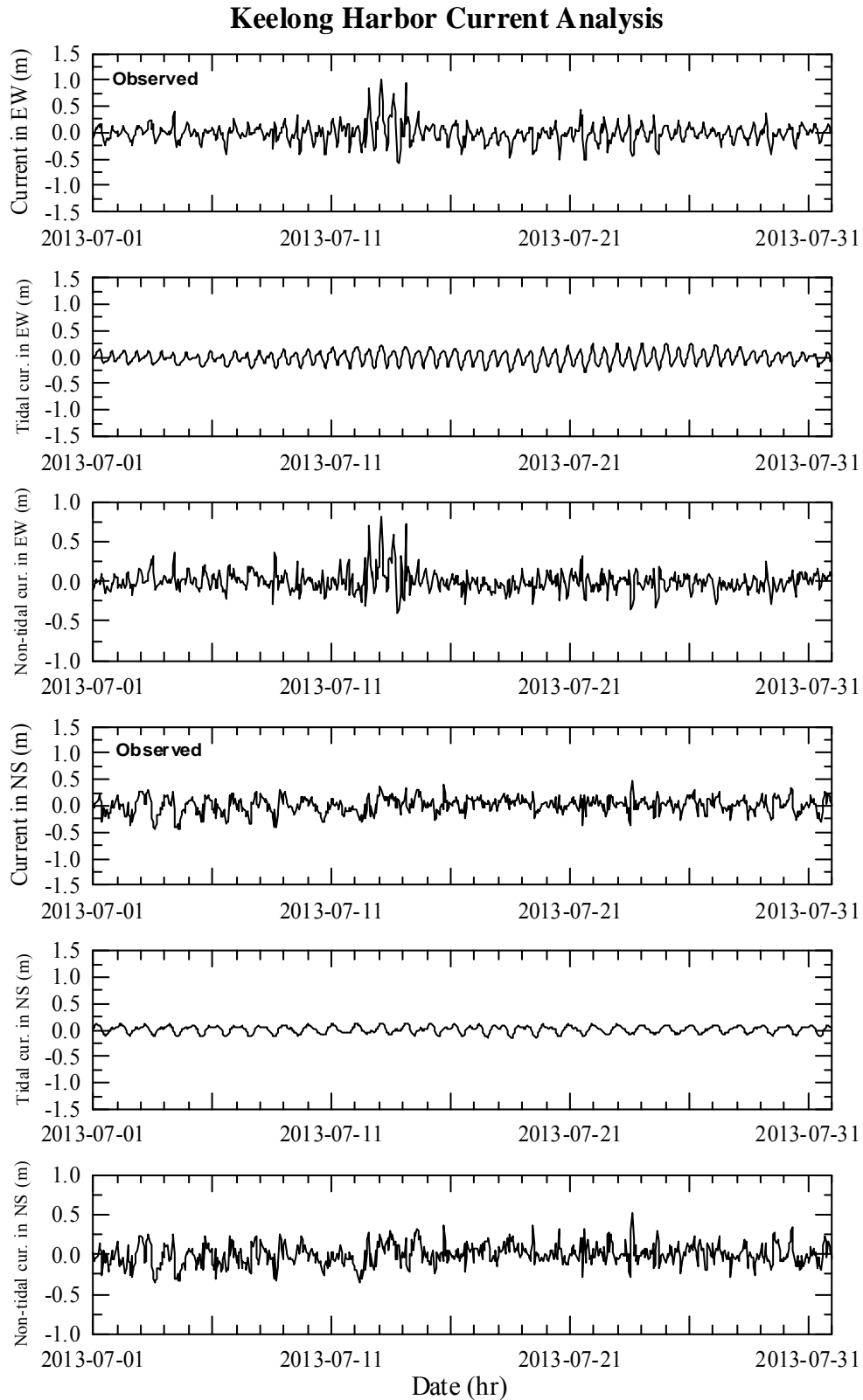


圖 2.50 基隆港夏季海流觀測資料 KL01 之潮流及非潮流成份圖

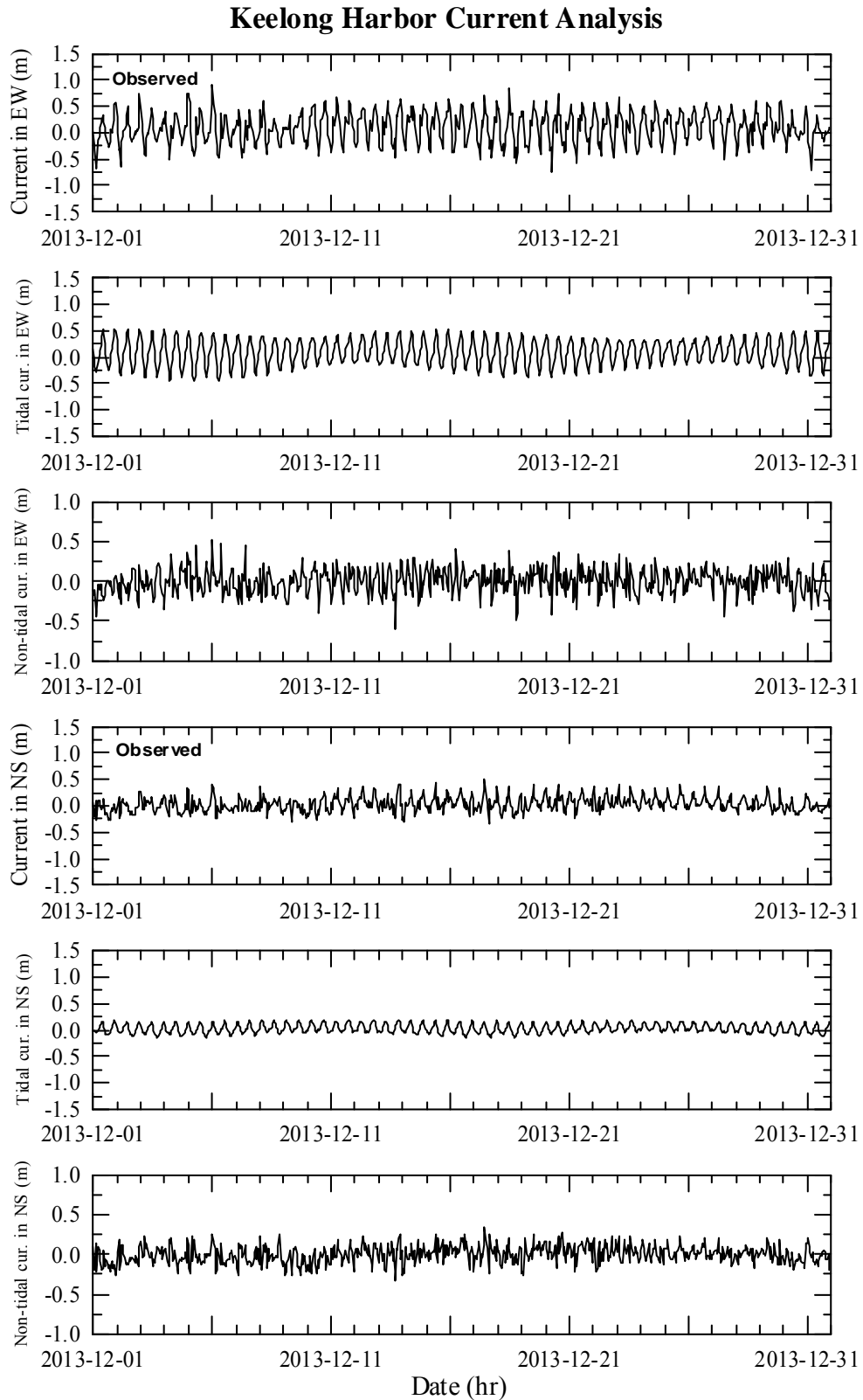


圖 2.51 基隆港冬季海流觀測資料 KL02 之潮流及非潮流成份圖

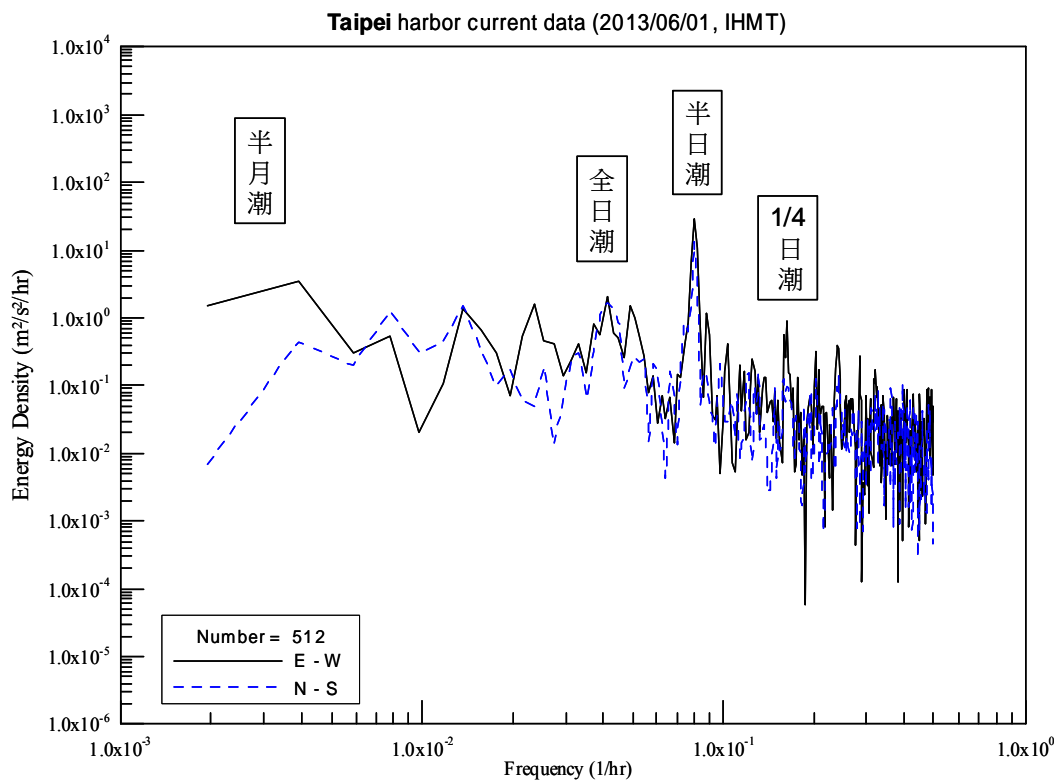


圖 2.52 臺北港夏季海流資料(TP01)之速度分量能譜圖

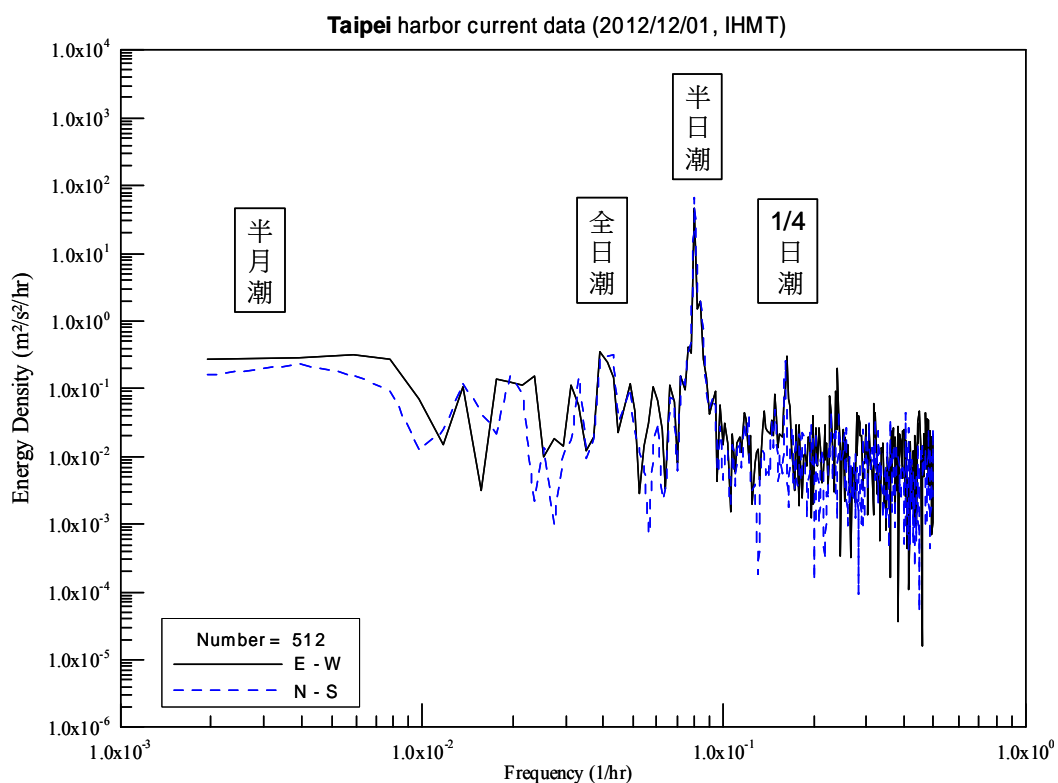


圖 2.53 臺北港冬季海流資料(TP02)之速度分量能譜圖

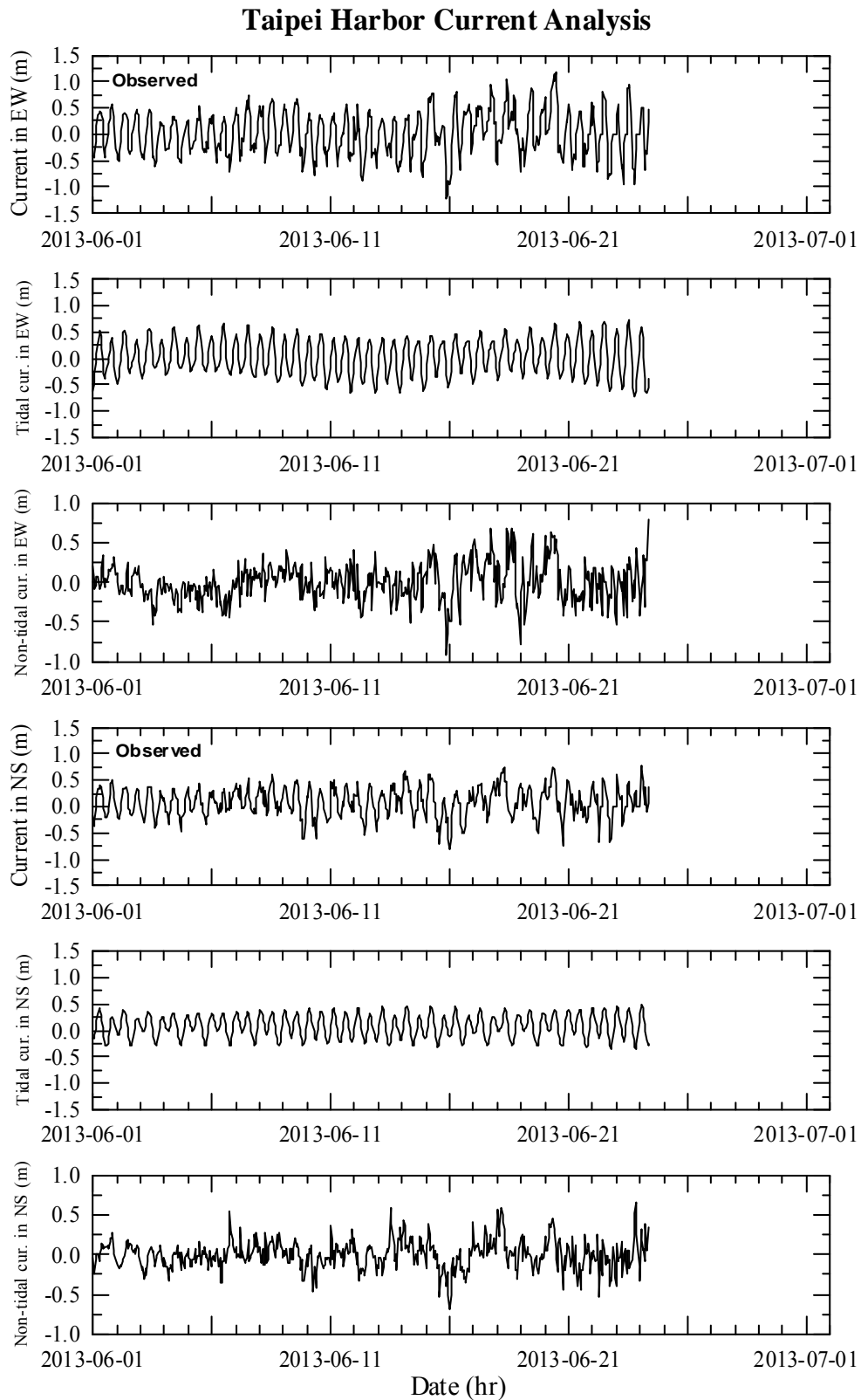


圖 2.54 臺北港夏季海流觀測資料 TP01 之潮流及非潮流成分圖

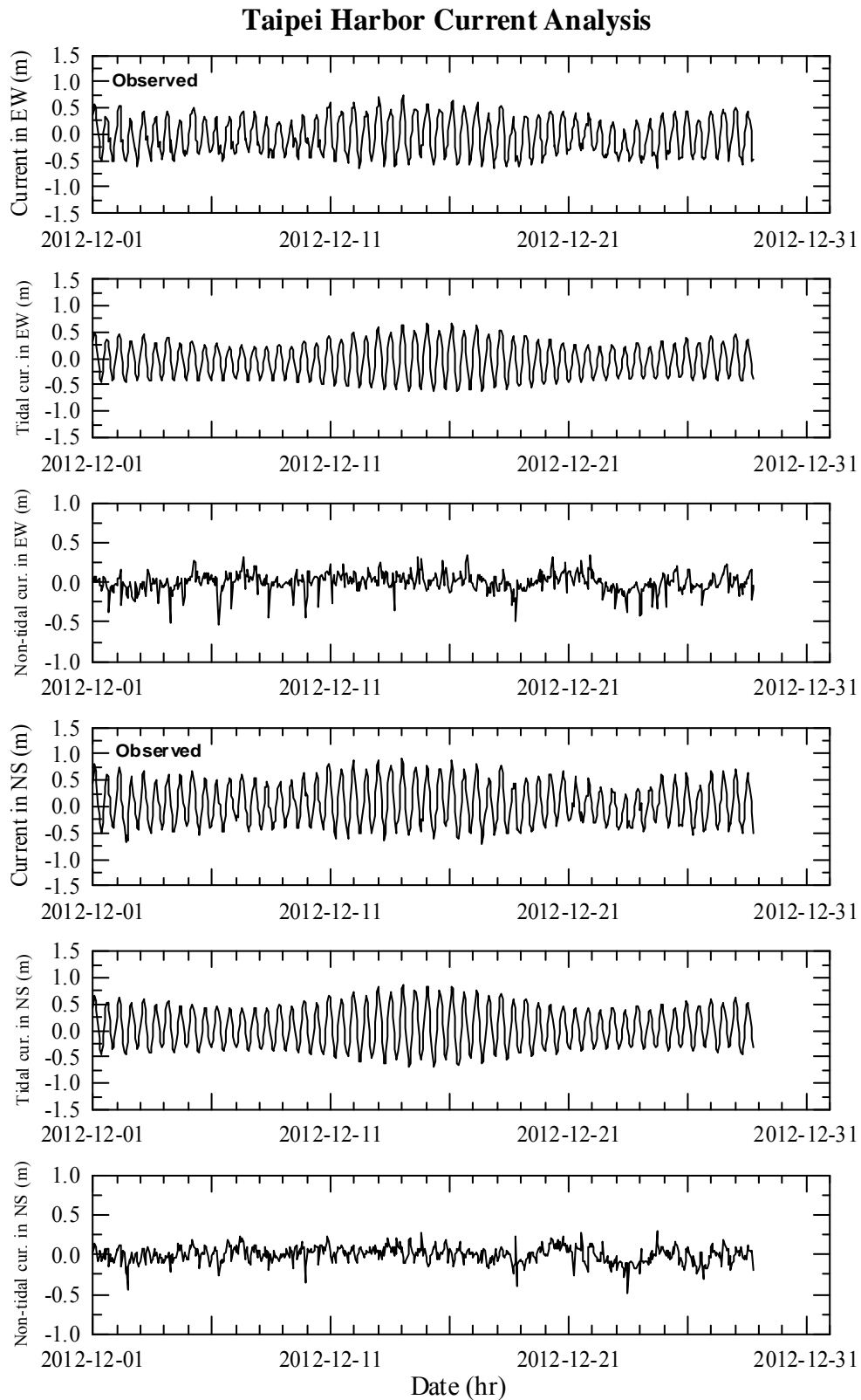


圖 2.55 臺北港冬季海流觀測資料 TP02 之潮流及非潮流成分圖

## 2.4 主要商港波浪特性分析

本章節主要依據港灣技術研究中心 AWCP 觀測的波浪資料，分析主要商港波浪之統計特性；其中各港口波浪觀測資料取自於港灣技術研究中心 2012 年及 2013 年海象預報作業化成果之波浪觀測資料。在資料品管上，主要針對異常波高值及異常週期值，其中異常波高值判斷採取逐時波高值與前後相鄰波高之差值平均為判斷門檻，例如差值平均大於 3.0m 即屬異常波高；異常週期值判斷包括(1)譜峰週期( $T_p$ )小於平均週期( $T_m$ )之異常資料，以及(2)波浪尖銳度( $H/L$ )大於理論極限值(2.1)式者。

$$\frac{H}{L} = 0.142 \tanh(2\pi h/L) \dots\dots\dots(2.1)$$

式中 H 為波高，L 為波長，h 為水深。

### (1) 蘇澳港

蘇澳港 2012 及 2013 年逐時波浪觀測資料數共計 16423 筆，波浪觀測率(=實際觀測資料數/應觀測資料數)約為 93.61%；通過本計畫資料品管之資料數為 16393 筆，觀測資料數之合格率(=通過資料品管數/觀測資料數)約為 99.82%。蘇澳港波高及波向觀測資料之年統計分析結果如表 2.39 及表 2.40 所列，顯示蘇澳港 2012 及 2013 年波浪觀測資料之年統計特性相當近似。

在波高分布方面，波浪示性波高小於 0.5 m 僅佔 0.74%，代表蘇澳港海域屬於波浪偏大的特性；蘇澳港示性波高分布主要集中於 0.5 m ~ 2.0 m 之間約佔 87.46%，其中波高介於 1.0 m ~ 1.5 m 者約佔 36.53%；示性波高大於 4.0 m 以上的資料計有 118 筆，約佔 0.72%。由波高分布與波浪週期平均值之關係得知，蘇澳港示性波高大小之分布與波浪週期平均值具有正相關性，即波浪週期平均值之變化會隨示性波高值增大而增加。最大示性波高觀測值在 2012 年為 8.74m，週期為 9.22sec，



波向為  $103.3^\circ$ ，發生時間適值中度颱風蘇拉侵襲臺灣東部海域；2013 年示性波高最大值為 7.17m，週期為 9.36sec，波向為  $89.0^\circ$ ，發生時間為強烈颱風力侵襲臺灣東部海域。

在波向分布方面，蘇澳港波浪波向分布以 E 方向所佔比例最高約 31.34%，其次為 ESE 向(約佔 20.83%)、SE 向(約佔 13.75%)及 ENE 向(約佔 12.54%)，顯示蘇澳港波浪來向相當集中，主要分布於 ENE 向至 SE 向之間。

表 2.39 蘇澳港逐時波高分布年統計結果

年 波高 (m)	2012 年		2013 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	64 / (0.80)	3.92	57 / (0.68)	3.69	0.74
0.5 ~ 1.0	1949 / (24.49)	3.74	2812 / (33.34)	4.31	29.78
1.0 ~ 1.5	3025 / (38.01)	4.54	2964 / (35.14)	5.00	66.31
1.5 ~ 2.0	1927 / (24.21)	5.03	1661 / (19.69)	5.52	88.20
2.0 ~ 2.5	606 / (7.61)	5.97	593 / (7.03)	6.09	95.52
2.5 ~ 3.0	207 / (2.60)	6.69	189 / (2.24)	6.53	97.93
3.0 ~ 3.5	87 / (1.09)	7.23	53 / (0.63)	6.80	98.79
3.5 ~ 4.0	38 / (0.48)	7.95	43 / (0.51)	7.75	99.28
4.0 ~ 5.0	36 / (0.45)	8.13	23 / (0.27)	8.17	99.64
5.00 <	19 / (0.24)	8.70	40 / (0.47)	8.53	100.00
合計	7958 / (100.00)		8435 / (100.00)		
備註	最大波高值：8.74 m 週期：9.22 sec 波向： $103.3^\circ$ 發生時間：08/02 01		最大波高值：7.17 m 週期：9.36 sec 波向： $89.0^\circ$ 發生時間：07/13 01		

表 2.40 蘇澳港逐時平均波向分布統計表

波向	2012	2013 年	百分率 (%)	波向	2012	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00	S	440 (5.53)	744 (8.82)	7.22
NNE	3 (0.04)	0 (0.00)	0.02	SSW	223 (2.80)	384 (4.55)	3.70
NE	57 (0.72)	23 (0.27)	0.49	SW	32 (0.40)	40 (0.47)	0.44
ENE	1247 (15.67)	811 (9.61)	12.55	WSW	6 (0.08)	2 (0.02)	0.05
E	2385 (29.97)	2760 (32.72)	31.39	W	1 (0.01)	0 (0.00)	0.01
ESE	1907 (23.96)	1512 (17.93)	20.86	WNW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
SE	1017 (12.78)	1241 (14.70)	13.77	NW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
SSE	640 (8.04)	924 (10.90)	9.51	NNW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 7958 及 8435

## (2) 花蓮港

花蓮港 2012 及 2013 年逐時波浪觀測資料數共計 15297 筆，波浪觀測率約為 87.19%；波浪觀測資料通過資料品管之資料數為 15288 筆，合格率約為 99.94%。花蓮港波高及波向觀測資料之年統計分析結果如表 2.41 及表 2.42 所列，顯示花蓮港 2012 年及 2013 年波浪統計特性相近。

在波高分布方面，花蓮港波浪示性波高小於 0.5 m 僅佔 3.94%，代表花蓮港屬於波浪偏大的海域；示性波高分布主要集中於 0.5 m ~ 2.0 m 之間約佔 84.45%，其中波高介於 0.5 m ~ 1.0 m 者約佔 31.13%，波高介於 1.0 m ~ 1.5 m 者約佔 34.7%；示性波高大於 4.0 m 以上的資料僅有 31 筆(遠少於蘇澳港)，約佔 0.2%。同樣地，花蓮港波浪觀測資料在各示性波高統計區間內，波浪週期平均值之變化與波高大小呈現正相關

之關係。花蓮港 2012 年示性波高最大值為 4.73m，週期為 8.90sec，波向為 110.5°，發生時間為中度颱風蘇拉侵襲臺灣東部海域；2013 年示性波高最大值為 4.6m，週期為 10.43sec，波向為 110.8°，發生時間為強烈颱風力侵襲臺灣東部海域。此外，花蓮港 2012 年及 2013 年示性波高最大值不僅較蘇澳港示性波高最大值小很多，且發生的時間均比蘇澳港示性波高最大值發生的時間早。

在波向分布方面，花蓮港波浪波向分布以 ESE 方向所佔比例最高約 39.5%，其次為 E 向(約佔 31.3%)及 SE 向(約佔 24.94%)，顯示花蓮港波向主要分布集中於 E 向至 SE 向之間。

表 2.41 花蓮港逐時波高分布年統計結果

年 波高 (m)	2012 年		2013 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	339 / (4.00)	4.38	263 / (3.85)	4.39	3.93
0.5 ~ 1.0	2592 / (30.64)	4.92	2164 / (31.69)	4.69	35.04
1.0 ~ 1.5	3169 / (37.46)	5.56	2140 / (31.34)	5.35	69.77
1.5 ~ 2.0	1477 / (17.46)	6.00	1371 / (20.08)	5.77	88.40
2.0 ~ 2.5	561 / (6.63)	6.57	547 / (8.01)	6.25	95.64
2.5 ~ 3.0	176 / (2.08)	6.90	275 / (4.03)	6.84	98.59
3.0 ~ 3.5	71 / (0.84)	7.49	41 / (0.60)	7.34	99.33
3.5 ~ 4.0	55 / (0.65)	7.97	17 / (0.25)	7.88	99.80
4.0 ~ 5.0	21 / (0.25)	8.34	10 / (0.15)	9.25	100.00
5.00 <	0 / (0.00)	—	0 / (0.00)	—	100.00
合計	8460 / (100.00)		6828 / (100.00)		
備註	最大波高值：4.73 m 週期：8.90 sec 波向：110.5° 發生時間：08/01 18		最大波高值：4.60 m 週期：10.43 sec 波向：110.8° 發生時間：07/12 21		

表 2.42 花蓮港逐時平均波向分布統計表

波向	2012	2013 年	百分率 (%)	波向	2012	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	1 (0.01)	0 (0.01)	0.01	S	1 (0.01)	0 (0.00)	0.01
NNE	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00	SSW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
NE	1 (0.01)	3 (0.04)	0.03	SW	1 (0.01)	0 (0.00)	0.01
ENE	13 (0.15)	145 (2.12)	1.03	WSW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
E	2333 (27.58)	2454 (35.94)	31.31	W	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
ESE	3564 (42.13)	2474 (36.23)	39.50	WNW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
SE	2134 (25.22)	1678 (24.58)	24.93	NW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
SSE	412 (4.87)	74 (1.08)	3.18	NNW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 8460 及 6828

### (3) 基隆港

基隆港 2012 年及 2013 年逐時波浪觀測資料數共計 16611 筆，資料數蒐集率約為 94.68%，其中波浪資料通過資料品管之資料數為 16605 筆，合格率約為 99.80%。基隆港波高及波向觀測資料之年統計分析結果，如表 2.43 及表 2.44 所列；顯示基隆港 2012 年及 2013 年波浪觀測資料年統計特性仍屬相近，唯 2013 年大波浪觀測資料數有明顯增加現象。

在波高分布年統計上，基隆港波浪示性波高小於 0.5 m 約佔 19.60%，相較於蘇澳港及花蓮港比例明顯增加；示性波高分布介於 0.5 m ~ 2.0 m 之間約佔 59.47%，其中波高介於 1.0 m ~ 2.0 m 者約佔 28.99%；示性波高大於 4.0 m 以上的資料約佔 1.38%，明顯高於蘇澳港

及花蓮港之波浪觀測結果，由於 4.0 m 以上示性波高資料數 2013 年較 2012 年增加近一倍，因此 2013 年觀測資料的合理性仍待確認。同樣地，基隆港波浪觀測資料在各示性波高統計區間內，波浪週期平均值之變化與波高大小亦具有正相關之關係。2012 年基隆港示性波高最大值为 5.67m，週期為 7.82sec，波向為 28.1°，發生時間約為強烈颱風杰拉華(JELAWAT)颱風警報期間(路徑如圖 2.56 所示)；2013 年示性波高最大值为 10.28m，週期為 9.36sec，波向為 57.9°，發生時間為強烈颱風蘇力侵襲臺灣東北部海域。

在波向分布統計上，基隆港波浪波向分布以 NNE 方向所佔比例最高約 41.40%，其次為 NE 向，約佔 39.64%，另 ENE 向波浪約佔 12.63%，合計約佔 93.67%，代表基隆港波浪波向主要集中於 NNE 向至 ENE 向之間。

**表 2.43 基隆港逐時波高分布年統計結果**

年 波高 (m)	2012 年		2013 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	1298 / (16.10)	3.23	1956 / (22.89)	3.25	19.60
0.5 ~ 1.0	2714 / (33.67)	4.05	2348 / (27.48)	4.05	50.08
1.0 ~ 1.5	1306 / (16.20)	4.61	1344 / (15.73)	4.64	66.04
1.5 ~ 2.0	1102 / (13.67)	5.03	1062 / (12.43)	5.07	79.07
2.0 ~ 2.5	837 / (10.38)	5.38	769 / (9.00)	5.38	88.74
2.5 ~ 3.0	439 / (5.45)	5.86	488 / (5.71)	5.76	94.33
3.0 ~ 3.5	200 / (2.48)	6.30	265 / (3.10)	6.15	97.13
3.5 ~ 4.0	88 / (1.09)	6.53	160 / (1.87)	6.50	98.62
4.0 ~ 5.0	62 / (0.77)	6.95	128 / (1.50)	7.01	99.77
5.00 <	14 / (0.17)	7.53	25 / (0.29)	7.80	100.00
合計	8060 / (100.00)		8545 / (100.00)		
備註	最大波高值：5.67 m 週期：7.82 sec 波向：28.1° 發生時間：09/29 09		最大波高值：10.28 m 週期：9.36 sec 波向：57.9° 發生時間：07/13 02		

表 2.44 基隆港逐時平均波向分布統計表

波向	2012	2013 年	百分率 (%)	波向	2012	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	774 (9.60)	199 (2.33)	5.86	S	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
NNE	3431 (42.57)	3444 (40.30)	41.40	SSW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
NE	2953 (36.64)	3630 (42.48)	39.64	SW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
ENE	838 (10.40)	1260 (14.75)	12.63	WSW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
E	32 (0.40)	9 (0.11)	0.25	W	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
ESE	4 (0.05)	0 (0.00)	0.02	WNW	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00
SE	1 (0.01)	0 (0.00)	0.01	NW	1 (0.01)	0 (0.01)	0.01
SSE	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00	NNW	26 (0.32)	3 (0.04)	0.17

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 8060 及 8545

#### (4) 臺北港

臺北港 2012 年及 2013 年逐時波浪觀測資料數共計 15049 筆，資料數蒐集率約為 85.78%；其中通過波浪資料品管之資料數為 14968 筆，資料合格率为 99.46%。臺北港波高及波向觀測資料之年統計分析結果，如表 2.45 及表 2.46 所列；顯示臺北港 2012 年及 2013 年波浪統計特性略有差異，此可能與 2013 年波浪觀測率較低有關。

在波高分布年統計上，臺北港波浪示性波高小於 0.5 m 約佔 21.15%，示性波高分布介於 0.5 m ~ 2.0 m 之間約佔 59.47%，其中波高介於 1.0 m ~ 2.0 m 者約佔 32.57%，均略高於基隆港波浪觀測統計結

果；另示性波高大於 4.0 m 以上的資料計有 60 筆，約佔 0.4%。示性波週期平均統計上，除了 2013 年 5.0m 以上示性波高之週期平均值偏小外，其餘各波高分布區間之週期平均值與波高間仍具正相關性。臺北港 2012 年示性波高最大觀測值為 4.91m，週期為 5.54sec，波向為 342.0°，發生時間屬於東北季風盛行期間；2013 年示性波高最大值為 6.94m，週期為 6.27sec，波向為 196.4°，發生時間為強烈颱風蘇力侵襲臺灣北部海域。

在波向分布統計方面，臺北港波浪波向分布以 N 方向所佔比例最高約佔 23.55%，其次為 NNE 向，約佔 21.72%；惟臺北港波浪觀測資料波向分布顯示在每個波向上均有顯著的觀測資料數，其原因仍有待釐清。

表 2.45 臺北港逐時波高分布年統計結果

年 波高 (m)	2012 年		2013 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	1412 / (17.17)	3.27	1754 / (26.01)	3.27	21.15
0.5 ~ 1.0	2639 / (32.09)	3.56	2141 / (31.75)	3.58	53.09
1.0 ~ 1.5	1736 / (21.11)	3.94	1269 / (18.82)	4.06	73.16
1.5 ~ 2.0	1125 / (13.68)	4.35	745 / (11.05)	4.45	85.66
2.0 ~ 2.5	668 / ( 8.12)	4.62	406 / ( 6.02)	4.77	92.83
2.5 ~ 3.0	379 / ( 4.61)	4.76	227 / ( 3.37)	5.15	96.88
3.0 ~ 3.5	194 / ( 2.36)	4.87	117 / ( 1.74)	5.41	98.96
3.5 ~ 4.0	48 / ( 0.58)	5.31	48 / ( 0.71)	5.53	99.60
4.0 ~ 5.0	24 / ( 0.30)	5.65	31 / ( 0.46)	6.22	99.97
5.00 <	0 / ( 0.00)	—	5 / ( 0.06)	5.55	100.00
合計	8225 / (100.00)		6743 / (100.00)		
備註	最大波高值：4.91 m 週期：5.54 sec 波向：342.0° 發生時間：12/02 16		最大波高值：6.94 m 週期：6.27 sec 波向：196.4° 發生時間：07/13 03		

表 2.46 臺北港逐時平均波向分布統計表

波向	2012	2013 年	百分率 (%)	波向	2012	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	2612 (31.76)	913 (13.54)	23.55	S	44 (0.53)	320 (4.75)	2.43
NNE	1827 (22.21)	1424 (21.12)	21.72	SSW	65 (0.79)	383 (5.68)	2.99
NE	602 (7.32)	676 (10.03)	8.54	SW	122 (1.48)	214 (3.17)	2.24
ENE	210 (2.55)	373 (5.53)	3.89	WSW	468 (5.69)	211 (3.13)	4.54
E	79 (0.96)	399 (5.92)	3.19	W	297 (3.61)	367 (5.44)	4.44
ESE	66 (0.80)	242 (3.59)	2.06	WNW	287 (3.49)	275 (4.08)	3.75
SE	47 (0.57)	188 (2.79)	1.57	NW	373 (4.53)	245 (3.63)	4.13
SSE	48 (0.58)	212 (3.14)	1.74	NNW	1078 (13.11)	301 (4.46)	9.21

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 8225 及 6743

### (5) 臺中港

因臺中港 2012 年波浪觀測資料蒐集率偏低，本計畫選取 2011 年及 2013 年逐時波浪觀測資料數共計 12936 筆進行波浪統計分析，其中觀測資料數之蒐集率約為 73.73%，通過波浪資料品管之資料數為 12577 筆，合格率約為 97.22%。臺中港 2011 年及 2013 年波浪觀測資料之波高及波向年統計分析結果，如表 2.47 及表 2.48 所列；顯示臺中港 2011 年及 2013 年波浪統計特性仍具有相似性。

在波高分布年統計上，臺中港波浪示性波高小於 0.5 m 約佔 6.38%，波浪週期之平均值約為 2.73 sec；示性波高分布介於 0.5 m ~ 2.0



m 之間約佔 61.7%，其中波高介於 1.0 m ~ 2.0 m 者約佔 30.14%；示性波高大於 4.0 m 以上的資料計有 79 筆，約佔 0.63%。示性波週期平均統計上，除了 2013 年 5.0m 以上示性波高之週期平均值外，其餘各波高分布區間之週期平均值與波高間仍具有正相關性。臺中港 2011 年示性波高最大觀測值為 6.40m，週期為 5.48sec，波向為 25.9°，發生時間屬於東北季風盛行期間；2013 年示性波高最大值為 5.60m，週期為 6.22sec，波向為 297.5°，發生時間為強烈颱風蘇力侵襲臺灣期間。

在波向分布統計方面，臺中港波浪波向分布以 NNE 方向所佔比例最高約佔 41.15%，其次為 N 向，約佔 33.66%；另外，在 W 向至 NNW 向之間亦有顯著的波浪觀測資料數，比例約佔 22.52%

表 2.47 臺中港逐時波高分布年統計結果

年 波高 (m)	2011 年		2013 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	556 / (10.94)	2.99	246 / (3.28)	2.13	6.38
0.5 ~ 1.0	1206 / (23.74)	3.33	2764 / (36.87)	2.43	37.94
1.0 ~ 1.5	701 / (13.80)	4.09	1224 / (16.33)	3.24	53.25
1.5 ~ 2.0	818 / (16.10)	4.63	1047 / (13.97)	3.90	68.08
2.0 ~ 2.5	741 / (14.58)	5.01	1020 / (13.61)	4.42	82.08
2.5 ~ 3.0	500 / (9.84)	5.31	792 / (10.57)	4.84	92.35
3.0 ~ 3.5	347 / (6.83)	5.52	277 / (3.70)	5.24	97.31
3.5 ~ 4.0	188 / (3.70)	5.62	71 / (0.95)	5.63	99.37
4.0 ~ 5.0	24 / (0.47)	6.04	52 / (0.69)	6.09	99.98
5.00 <	0 / (0.00)	—	3 / (0.04)	6.07	100.00
合計	5081 / (100.00)		7496 / (100.00)		
備註	最大波高值：6.40 m 週期：5.48 sec 波向：25.9° 發生時間：01/15 18		最大波高值：5.60 m 週期：6.22 sec 波向：297.5° 發生時間：07/13 10		

表 2.48 臺中港逐時平均波向分布統計表

波向	2011 年	2013 年	百分率 (%)	波向	2011 年	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	964 (18.97)	3270 (43.62)	33.66	S	9 (0.18)	0 (0.00)	0.07
NNE	3296 (64.87)	1879 (25.07)	41.15	SSW	4 (0.08)	1 (0.01)	0.04
NE	111 (2.81)	7 (0.09)	0.94	SW	2 (0.04)	1 (0.01)	0.02
ENE	24 (0.47)	0 (5.53)	0.19	WSW	57 (1.12)	91 (1.21)	1.18
E	8 (0.16)	0 (0.00)	0.06	W	135 (2.62)	868 (11.57)	7.97
ESE	5 (0.10)	0 (0.00)	0.04	WNW	151 (2.97)	560 (7.47)	5.65
SE	6 (0.12)	0 (0.00)	0.05	NW	124 (2.44)	331 (4.42)	3.62
SSE	8 (0.16)	1 (0.01)	0.07	NNW	177 (3.48)	487 (6.50)	5.28

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 5081 及 7496

## (6) 高雄港

高雄港波浪觀測因 2013 年資料傳輸故障致波浪蒐集率偏低，本計畫選取 2011 年及 2012 年逐時波浪觀測資料數共計 15468 筆(資料數蒐集率約為 88.17%)進行波浪統計分析，其中通過波浪資料品管之資料數為 15357 筆(合格率約為 99.28%)。高雄港 2011 年及 2012 年波浪觀測資料之波高及波向年統計分析結果，如表 2.49 及表 2.50 所列；顯示高雄港 2011 年及 2013 年波浪統計特性仍具一定程度的相似性。

在波高分布年統計上，高雄港波浪示性波高小於 0.5 m 約佔 10.75%，波浪週期之平均值約為 3.21 sec；示性波高分布介於 0.5 m ~ 2.0

m 之間約佔 86.48%，其中波高介於 1.0 m ~ 2.0 m 者約佔 19.73%；示性波高大於 4.0 m 以上的資料計有 50 筆，約佔 0.33%。示性波週期平均統計上，除了 2012 年 1.0m ~ 1.5m 之間示性波高之週期平均值偏小外，其餘各波高分布區間之週期平均值與波高間仍具有正相關性。另示性波週期平均統計結果顯示，2011 年週期平均統計值明顯大於 2012 年波浪週期平均統計值。高雄港 2011 年示性波高最大觀測值為 5.42m，週期為 9.40sec，波向為 217.5°；2012 年示性波高最大觀測值為 6.57m，週期為 8.17sec，波向為 237.6°，發生時間為輕度颱風泰利侵襲臺灣期間。

在波向分布統計方面，高雄港波浪波向主要分布於 S 向至 WNW 向之間，各波向分布佔的比例均相當，其中以 W 向波浪佔的比例略高，約為 18.52%。

**表 2.49 高雄港逐時波高分布年統計結果**

年 波高 (m)	2011 年		2012 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	1082 / (13.83)	3.13	569 / ( 7.56)	3.37	10.75
0.5 ~ 1.0	5340 / (68.23)	3.78	4911 / (65.21)	3.49	77.50
1.0 ~ 1.5	893 / (11.41)	4.45	1504 / (19.97)	3.06	93.11
1.5 ~ 2.0	366 / ( 4.68)	5.03	267 / ( 3.55)	4.66	97.23
2.0 ~ 2.5	100 / ( 1.28)	5.02	127 / ( 1.69)	5.10	98.71
2.5 ~ 3.0	6 / ( 0.08)	6.23	87 / ( 1.16)	5.59	99.32
3.0 ~ 3.5	9 / ( 0.12)	6.39	25 / ( 0.33)	5.73	99.54
3.5 ~ 4.0	8 / ( 0.10)	8.80	13 / ( 0.17)	6.89	99.67
4.0 ~ 5.0	20 / ( 0.25)	8.93	9 / ( 0.12)	6.79	99.86
5.00 <	2 / ( 0.03)	9.48	19 / ( 0.26)	7.54	100.00
合計	7928 / (100.00)		7531 / (100.00)		
備註	最大波高值：5.42 m 週期：9.40 sec 波向：217.5° 發生時間：09/29 14		最大波高值：6.57 m 週期：8.17 sec 波向：237.6° 發生時間：06/20 13		

表 2.50 高雄港逐時平均波向分布統計表

波向	2011 年	2013 年	百分率 (%)	波向	2011 年	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	5 (0.06)	0 (0.00)	0.03	S	1030 (13.16)	707 (9.39)	13.31
NNE	76 (0.97)	0 (0.00)	0.49	SSW	1396 (17.84)	929 (12.34)	15.14
NE	0 (0.00)	2 (0.03)	0.01	SW	1335 (17.06)	1332 (17.69)	17.37
ENE	2 (0.03)	1 (0.01)	0.02	WSW	1014 (12.96)	1269 (16.85)	14.87
E	0 (0.00)	0 (0.00)	0.00	W	1466 (18.73)	1378 (18.30)	18.52
ESE	2 (0.03)	1 (0.01)	0.02	WNW	997 (12.74)	1513 (20.09)	16.34
SE	23 (0.29)	1 (0.01)	0.16	NW	39 (0.50)	132 (1.75)	1.11
SSE	438 (5.60)	266 (3.53)	4.58	NNW	3 (0.04)	0 (0.00)	0.02

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 7928 及 7531

### (7) 安平港

安平港 2012 年及 2013 年逐時波浪觀測資料數共計 14008 筆，資料數蒐集率約為 79.85%；其中通過波浪資料品管之資料數為 13887 筆，合格率約為 99.14%。安平港波浪觀測資料之波高及波向 2012 年及 2013 年統計分析結果，如表 2.51 及表 2.52 所列；顯示安平港 2012 年波浪觀測資料雖較少，但波浪統計特性仍與 2013 年有一定程度相似性。

在波高分布年統計上，安平港波浪示性波高小於 0.5 m 約佔 37.53%，波浪週期之平均值約為 3.05 sec；示性波高分布介於 0.5 m ~ 2.0 m 之間約佔 60.39%，其中波高介於 1.0 m ~ 2.0 m 者約佔 9.04%；示性

波高大於 4.0 m 以上的資料計有 13 筆，均屬於 2013 年波浪觀測資料，約佔 0.09%。安平港 2012 年示性波高最大觀測值為 3.78m，週期為 4.87sec，波向為 230.1°，發生時間為中度颱風侵襲臺灣期間；2013 年示性波高最大值為 5.32m，週期為 5.34sec，波向為 227.3°，發生時間為強烈颱風通過臺灣西南海域。

在波向分布統計方面，安平港波浪波向分布主要集中於 SW 向至 WNW 向之間，其中以 WNW 向波浪佔的比例最高，約為 28.31%，其次為 W 向，約佔 25.09%。

**表 2.51 安平港逐時波高分布年統計結果**

年 波高 (m)	2012 年		2013 年		累計百分比
	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	資料數 / (百分比)	週期平均值(sec)	
< 0.5	2199 / (38.29)	2.96	3016 / (37.03)	3.11	37.55
0.5 ~ 1.0	3124 / (54.04)	3.09	4006 / (49.19)	3.50	88.90
1.0 ~ 1.5	229 / ( 3.99)	2.90	706 / ( 8.67)	4.46	95.63
1.5 ~ 2.0	127 / ( 2.21)	3.79	194 / ( 2.38)	5.03	97.94
2.0 ~ 2.5	24 / ( 0.42)	4.54	102 / ( 1.25)	5.10	98.85
2.5 ~ 3.0	22 / ( 0.38)	5.36	72 / ( 0.88)	5.42	99.52
3.0 ~ 3.5	14 / ( 0.24)	5.75	22 / ( 0.27)	5.24	99.78
3.5 ~ 4.0	4 / ( 0.07)	6.24	13 / ( 0.16)	5.47	99.91
4.0 ~ 5.0	0 / ( 0.00)	—	11 / ( 0.13)	5.51	99.99
5.00 <	0 / ( 0.00)	—	2 / ( 0.02)	5.91	100.00
合計	5743 / (100.00)		8144 / (100.00)		
備註	最大波高值：3.78 m 週期：4.87 sec 波向：230.1° 發生時間：08/25 13		最大波高值：5.32 m 週期：5.34 sec 波向：227.3° 發生時間：09/22 10		

表 2.52 安平港逐時平均波向分布統計表

波向	2012 年	2013 年	百分率 (%)	波向	2012 年	2013 年	百分率 (%)
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)			資料數 (百分率)	資料數 (百分率)	
N	8 (0.14)	0 (0.00)	0.06	S	114 (1.99)	213 (2.62)	2.35
NNE	28 (0.49)	2 (0.02)	0.22	SSW	235 (4.09)	426 (5.23)	4.76
NE	41 (0.71)	2 (0.02)	0.31	SW	770 (13.14)	1219 (14.97)	14.32
ENE	71 (1.24)	1 (0.01)	0.52	WSW	1026 (17.87)	1776 (21.81)	20.18
E	200 (3.48)	6 (0.07)	1.48	W	1550 (26.99)	1934 (23.75)	25.09
ESE	58 (1.01)	10 (0.12)	0.49	WNW	1551 (27.01)	2380 (29.22)	28.31
SE	10 (0.17)	29 (0.36)	0.28	NW	23 (0.40)	56 (0.69)	0.57
SSE	53 (0.29)	88 (1.08)	1.02	NNW	5 (0.09)	2 (0.02)	0.05

1. 波向判斷採用  $\pm 11.25^\circ$   
 2. 2012 及 2013 年波浪觀測資料數分別為 7928 及 8144

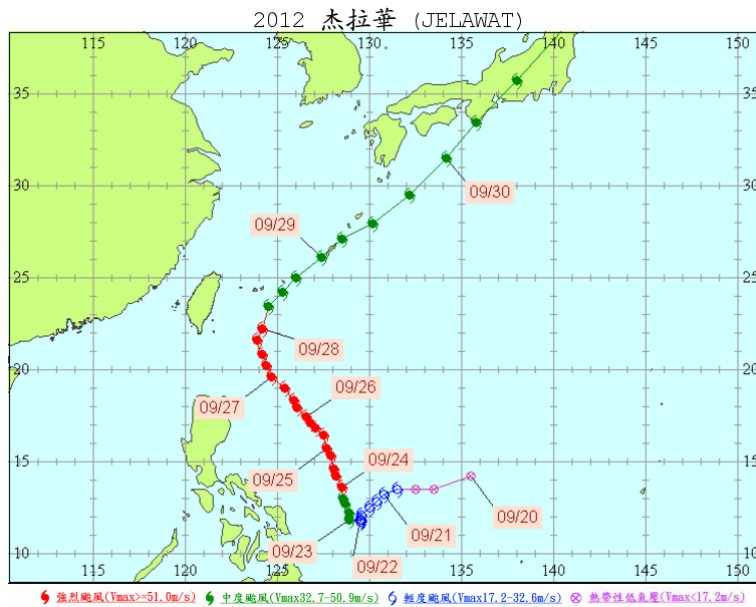


圖 2.56 2012 年強烈颱風杰拉華侵臺路徑圖

## 2.5 侵臺颱風統計特性

依據中央氣象局颱風統計資料顯示：自 1897 至 2013 年間侵襲臺灣及其附近海域之颱風共計 412 次，相關統計特性簡述如下：

### (1) 颱風侵臺頻率

歷年(1887 ~ 2012 年)颱風侵襲臺灣之頻率統計如表 2.53 所示，其中出現颱風侵臺事件最早之月份為 4 月共計 1 次，最晚之月份為 12 月份共計 1 次；發生颱風侵臺事件最多之月份為 8 月份，共計 123 次，約佔總數之 30.22%，其次分別為 7 月及 9 月；每年發生颱風侵臺事件之次數最多可達 9 次，最少為零次；平均每年發生颱風侵臺事件之次數約為 3.48 次，其中 8 月份平均每年發生颱風侵臺事件約一次以上。

### (2) 颱風侵臺路徑

歷年颱風侵臺路徑分類及統計，如圖 2.57 所示，顯示以第五類侵臺路徑，即經由臺灣南部海面向西或西北行進之颱風，發生次數最多共計 73 次，約佔總數之 17.72%；其次為第一類侵臺路徑，共計發生 56 次，約佔總數之 13.59%。

### (3) 颱風侵臺登陸地點

歷年颱風侵臺事件中登陸臺灣本島共計 202 次，約佔侵臺颱風總數之 43.82%，如圖 2.58 所示，其中登陸地段以宜蘭、花蓮間之 42 次最多。

### (4) 2011 ~ 2014 年侵臺颱風資料

本計畫執行期間(2011 ~ 2013 年)發生颱風侵臺事件之資料，如表 2.54 所列，每年發布的颱風警報次數依序分別為 5 次、8 次及 6 次，共計 19 次。

**表 2.53 歷年(1897~2012 年)各月侵臺颱風之次數及頻率統計表**

月份	侵台次數	佔總數百分比(%)	年平均次數
1	0	0.0	0.00
2	0	0.0	0.00
3	0	0.0	0.00
4	2	0.49	0.02
5	15	3.69	0.13
6	30	7.37	0.26
7	98	24.08	0.84
8	123	30.22	1.05
9	93	22.85	0.79
10	37	9.09	0.32
11	8	1.97	0.07
12	1	0.25	0.01
合計	407	100.00	3.48



表 2.54 2011 ~ 2013 年侵臺颱風事件一覽表

年份	颱風名稱	路徑分類	警報時間	颱風強度	中心最低氣壓(hpa)	7 級暴風半徑(km)	備註
2011	艾利(AERE)	...	2011/05/09 05 2011/05/10 17	輕度	990	150	
	桑達(SONGDA)	...	2011/05/27 02 2011/05/28 14	強烈	920	200	
	米雷(MEARI)	...	2011/06/23 23 2011/06/25 14	輕度	982	200	
	梅花(MUIFA)	...	2011/08/04 17 2011/08/06 11	中度	928	280	
	南瑪都(NANMADOL)	4	2011/08/27 05 2011/08/31 08	強烈	920	180	
2012	泰利(TALIM)	9	2012/06/19 05 2012/06/21 05	輕度	985	150	
	杜蘇芮(DOKSURI)	...	2012/06/28 05 2012/06/29 08	輕度	995	120	
	蘇拉(SAOLA)	2	2012/07/30 20 2012/08/03 14	中度	960	220	
	海葵(HAIKUI)	...	2012/08/06 11 2012/08/07 17	中度	960	180	
	啟德(KAI-TAK)	...	2012/08/14 14 2012/08/15 17	輕度	995	150	
	天秤(TEMBIN)	特殊	2012/08/21 14 2012/08/25 14	中度	945	180	
			2012/08/26 11 2012/08/28 23	中度	945	180	
杰拉華(JELAWAT)	...	2012/09/27 02 2012/09/28 20	強烈	910	250		
2013	蘇力(SOULIK)	2	2013/07/11 08 2013/07/13 23	強烈	92	280	
	西馬隆(CIMARON)	...	2013/07/17 10 2013/07/18 11	輕度	998	100	
	潭美(TRAMI)	1	2013/08/20 11 2013/08/22 08	輕度	970	180	
	康芮(KONG-REY)	6	2013/08/27 11 2013/08/29 20	輕度	985	120	
	天兔(USAGI)	5	2013/09/19 23 2013/09/22 14	強烈	910	280	
	菲特(FITOW)	1	2013/10/04 23 2013/10/07 08	中度	960	250	

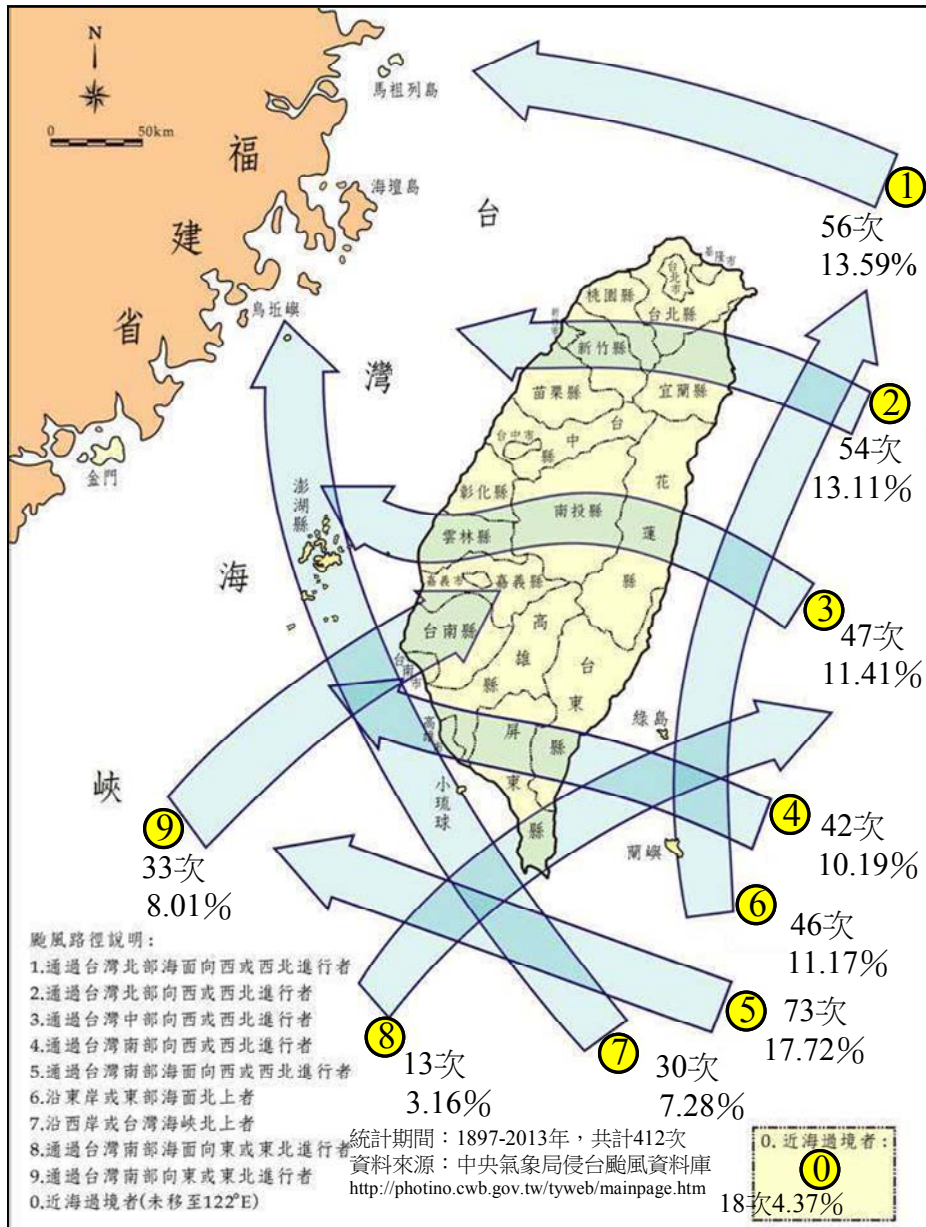


圖 2.57 歷年(1897~2013)侵襲臺灣之颱風路徑統計圖

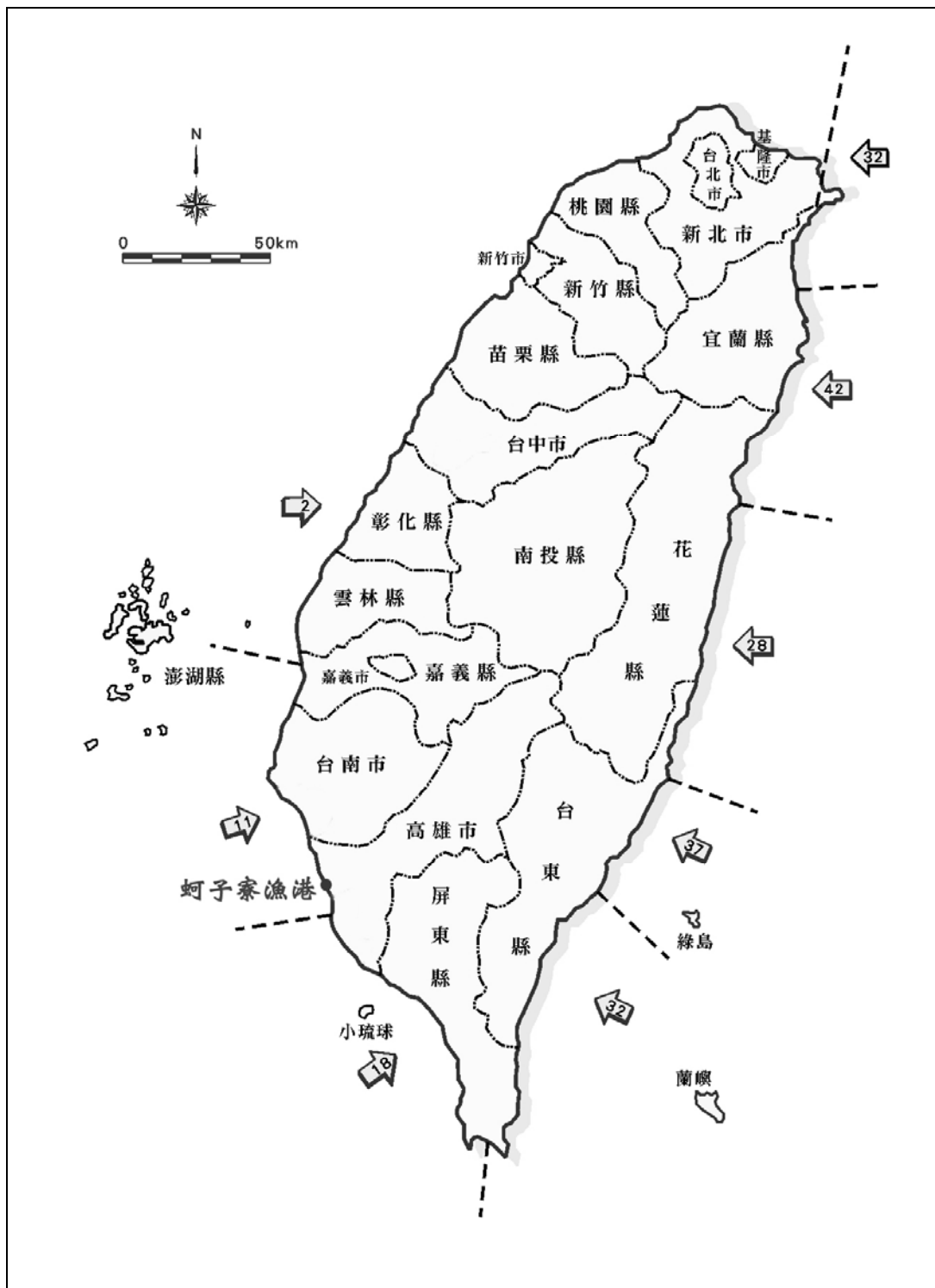


圖 2.58 侵臺颱風登陸地點統計圖(1897-2013 年)

(參考資料：蚵子寮漁港暨中芸漁港靜穩度改善研究分析期中報告)



## 第三章海象作業化模擬風場

在 TaiCOMS 系統架構下海象風場預報資料，主要來源為中央氣象局第三代數值天氣預報系統，該系統屬於非靜力平衡預報系統(Non-hydrostatical Forecast System，簡稱 NFS)。針對第三代數值天氣預報系統作業，中央氣象局每日執行兩次天氣預報作業(8 時及 20 時)，因此 TaiCOMS 風場作業系統係配合中央氣象局 NFS 預報資料上傳作業時程，規劃執行風壓場資料下載、資料解碼及資料處理等流程，目的產生 TaiCOMS 執行海象模擬預報所需之預報風壓場組合資料。基於中央氣象局天氣預報系統已進入第四代數值天氣預報系統(簡稱 WRF)，因此本期計畫規劃以 WRF 風場預報資料取代 NFS 風場預報資料為海象作業化模擬風場改善之研究重點。

### 3.1 中央氣象局數值天氣預報作業控制系統

中央氣象局數值天氣預報作業控制系統(NWP operation Control System，簡稱 NCS)已於 2012 年底在第五代高速運算電腦系統 Fujitsu PRIMEHPC FX10 上運行。目前數值天氣預報作業系統包括全球預報系統(Global Forecast System，簡稱 GFS)、區域模式之非靜力平衡預報系統(NFS)、天氣研究與預報模式(Weather Research and Forecasting，簡稱 WRF)以及包含針對颱風調校的成員和系集成員之系集預報系統(Ensemble Forecast System，簡稱 EFS)等 4 大類模式及 30 餘成員。其中 WRF 為美國近年來集合美國學術界和作業單位人力所發展之中尺度天氣研究與預報數值模式；中央氣象局最初於 2002 年開始試用，並於 2007 年底正式上線使其融合於氣象局數值天氣預報模式作業環境，建構成中尺度數值天氣資料同化系統，稱為 CWB WRF。

目前中央氣象局各模式成員每日預報作業次數與預報長度如表 3.1 所列，各作業模式啟動及資料間之關係如圖 3.1 所示。其中區域模式包含非靜力平衡預報系統(NFS)及天氣研究與預報模式(WRF)。

表 3.1 中 NFS 有兩個作業成員分別為 M00 及 M02，二者採用的網格解析度均為水平解析分為 45km、15km 及 5km 之巢狀網格，垂直層數為 30 層；M00 及 M02 成員間之差異主要在於使用之側邊界資料上游模式來源不同。WRF 有四個主要成員分別為 M00、M01、M02 及 M03，其中 M00、M01 及 M02 模式同樣採用水平三層之巢狀網格，各層解析度分別為 45km、15km 及 5km，垂直層數則為 45 層。

在 WRF 系統中，M00 與 M02 成員之差異為側邊界資料採用的上游模式不同；模式之初始場同為經由 WRF 和 WRF 三維變分 (Three-dimensional variational assimilation，簡稱 3DVAR) 所建構之資料同化系統產生。M01 主要為針對颱風預報所調校的模式成員，其 3DVAR 之設定和颱風渦旋處理程序不同。另 M03 成員之模式設定與 M00 成員相同，但數值網格採用水平二層之巢狀網格，各層解析度分別為 20km 及 4km。WRF 作業系統另有系集調整卡爾曼濾波 (Ensemble Adjustment Kalman Filter，簡稱 EAKF)，以及 20 組系集成員 (WRF Ensemble Prediction System，簡稱 WEPS) 運行。

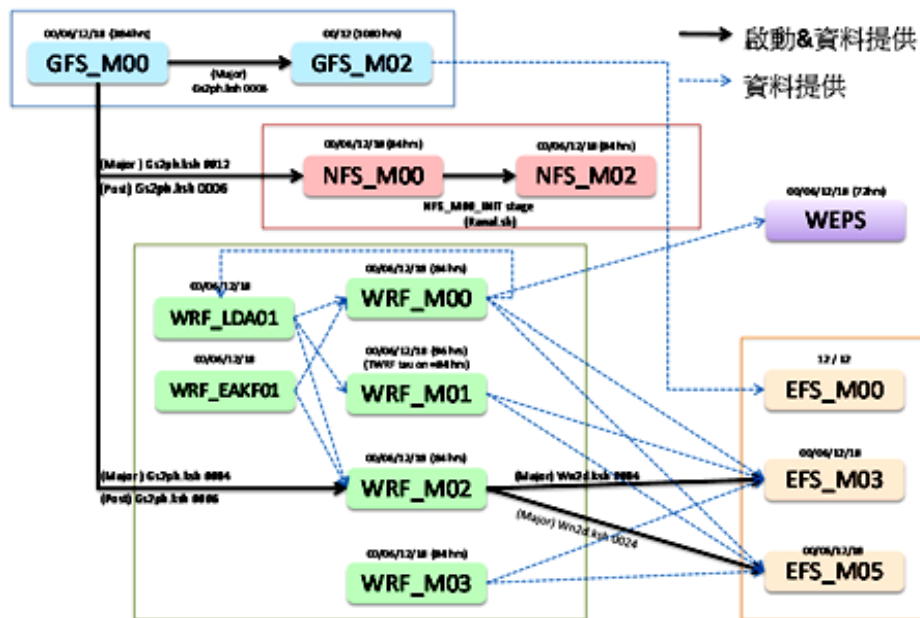
EAKF 模式採用水平解析度 45 km 網格，垂直層數為 45 層。初始係利用美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction，簡稱 NCEP) 全球預報系統預報資料，配合 3DVAR 產生 32 組擾動猜測場；之後，再利用 32 組成員進行 6 小時預報，其產出的預報場將作為下次預報之猜測場，模式產生的分析場將提供 M00、M02 成員使用。WEPS 模式則利用主要作業模式執行間之空檔時間，採冷啟動 (cold start) 方式執行預報作業 (每日執行 4 次)，每次產生 72 小時預報資料。

系集預報系統 (EFS) 作業分別有 M00、M03 及 M05 等成員運作中，其中 M00 成員除了採用所有網格點等權重的全球系集預報模式執行預報時間為 28 天之預報作業外，同時以多模式迴歸法執行的全球超系集預報模式，亦即採用每個網格點之權重因地點及預報時間而異方式，每次預報時間長度 7 天。M03 成員則為採用多模式迴歸法進行的觀測點時間序列預報模式，每個測站的權重隨預報時間而異。M05 成員則

是利用貝氏模型平均 (Bayesian Model Averaging) 的統計方法對多個模式的預報進行後置處理後，預報觀測點極端天氣發生的機率。

表 3.1 每日各模式成員的作業趟次與預報長度

模式	成員	預報長度	Major Run 趟次	Post Run 趟次
GFS	M00	384 小時	00、06、12、18	00、06、12、18
GFS	M02	1080 小時	00、12	N/A
NFS	M00、M02	84 小時	00、06、12、18	00、06、12、18
WRF	M00、M02、M03	84 小時	00、06、12、18	00、06、12、18
WRF	M01	120 小時	00、06、12、18	00、06、12、18
WEPS	E01~E20	72 小時	00、06、12、18	N/A
EFS	M00	28 天/7 天	12	12
EFS	M03	72 小時	00、06、12、18	N/A
EFS	M05	24 小時	00、06、12、18	N/A



摘自吳 2014

圖 3.1 氣象局作業模式啟動及資料關係圖

有關中央氣象局目前風場對於颱風路徑預報能力探討，葉(2012)曾對於氣象局預報風場資料提出說明；圖 3.2 所示為葉(2012)分析 1994 年至 2010 年中央氣象局颱風路徑主要作業模式對西北太平洋颱風路徑預報之誤差平均值，其中主要作業模式在 1994 至 2003 年為颱風預報系統(Typhoon Forecast System，簡稱 TFS)，2004 至 2007 年作業模式為 NFS，2008 年作業模式為 WRF，2009 作業模式為 WRF 與 NFS 系集預報，2010 年作業模式為 TWRF。由圖 3.2 分析結果顯示針對 24 與 48 小時颱風路徑之預測，模式預報之誤差值約由早期的 200 與 400 公里縮小至 100 與 200 公里，約為原來的二分之一；在 72 小時颱風路徑預測上模式預報之誤差值約由原來誤差 500 公里縮小至 300 餘公里。此外，TWRF 作業模式主要改進項目包含引進含質量場之颱風渦旋植入(bogus scheme)及渦旋移置(relocation scheme)技術之颱風渦旋初始化流程、partialcycling 作業流程、三維變分資料同化系統中之背景誤差(background error)與 outer loop、Kain-Fritsch 積雲參數化。顯示採用這些改進技術之 WRF 模式對 2008，2009 年 11 個颱風 247 個案之 00、24、48、72 小時颱風路徑預測誤差約為 8、93、148、248 公里。

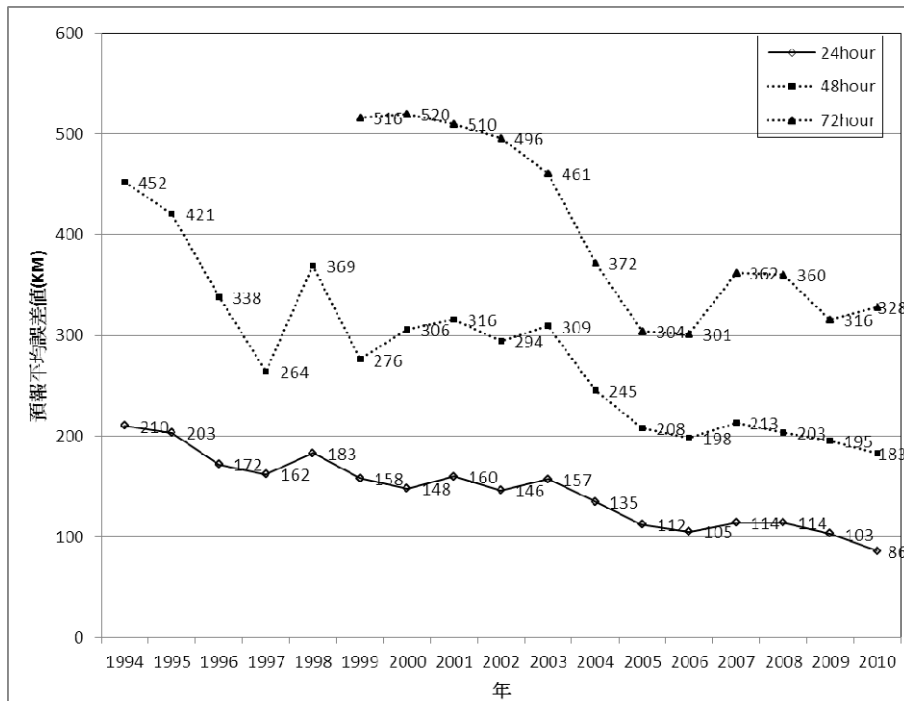


圖 3.2 1994 年至 2010 年中央氣象局颱風路徑主要作業模式對西北太平洋颱風路徑之 24、48 與 72 小時預報之平均誤差值。



### 3.2 海象作業化風場簡介

本計畫 TaiCOMS 系統自 2006 年以作業化方式取得氣象局 NFS 預報風場資料，針對 NFS 水平三層之巢狀網格分別以 RC、MC 及 HC 表示之，各層網格之格點數分別為 191x127、145x139、與 91x121；其中最高解析度 5km 之 HC 網格涵蓋範圍係以臺灣為中心，東西 450km、南北 600km。

本期計畫作業系統自 2013 年 4 月開始同步接收氣象局提供的 WRF M02 模組之預報風場資料，本年度(2014 年)5 月配合氣象局作業改接收氣象局提供的 WRF M00 模組之預報風場資料。針對 CWB WRF 使用的水平三層之巢狀網格，本計畫分別以 WA01、WA02 及 WA03 稱之，各層網格解析度分別為 45km、15km 及 5km；其中 WA01 及 WA02 網格涵蓋範圍分別與 NFS 之 RC 及 MC 網格相同，5km 解析度之 WA03 網格涵蓋範圍則由 HC 網格大小 91x121 擴充至網格大小 148x178。圖 3.3 所示分別為中央氣象局 NFS 及 WRF 之風場資料範圍，有關 NFS 及 WRF 風場資料格式之詳述如表 3.2a 及表 3.2b 所列。本計畫 TaiCOMS 作業系統下大尺度及中尺度風、波及流場資料格式如表 3.2c 所列，作業系統針對 WRF 各層風場資料規劃之輸出格式及範圍如表 3.3d 所列。圖 3.4 所示為本計畫作業化風場資料之輸出範圍，圖中藍色為系統擷取 RC 及 MC 範圍，紅色線為系統擷取 WA01、WA02 及 WA03 範圍。

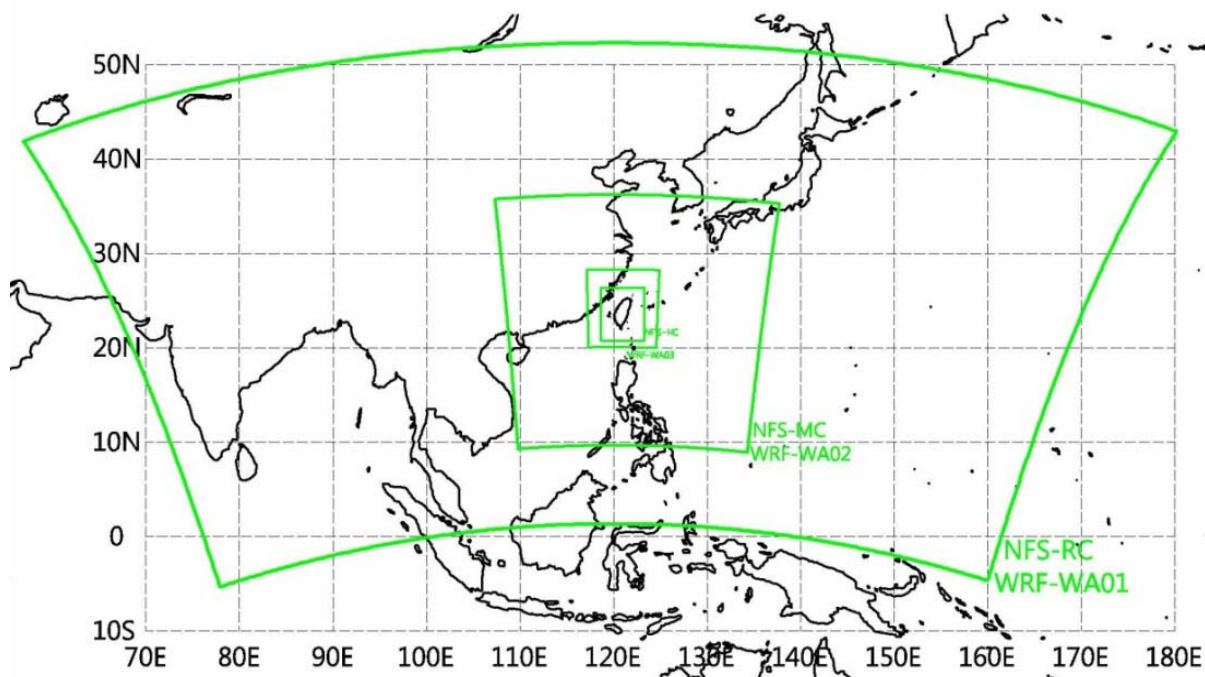


圖 3.3 中央氣象局風場 NFS 及 WRF 風場資料範圍圖

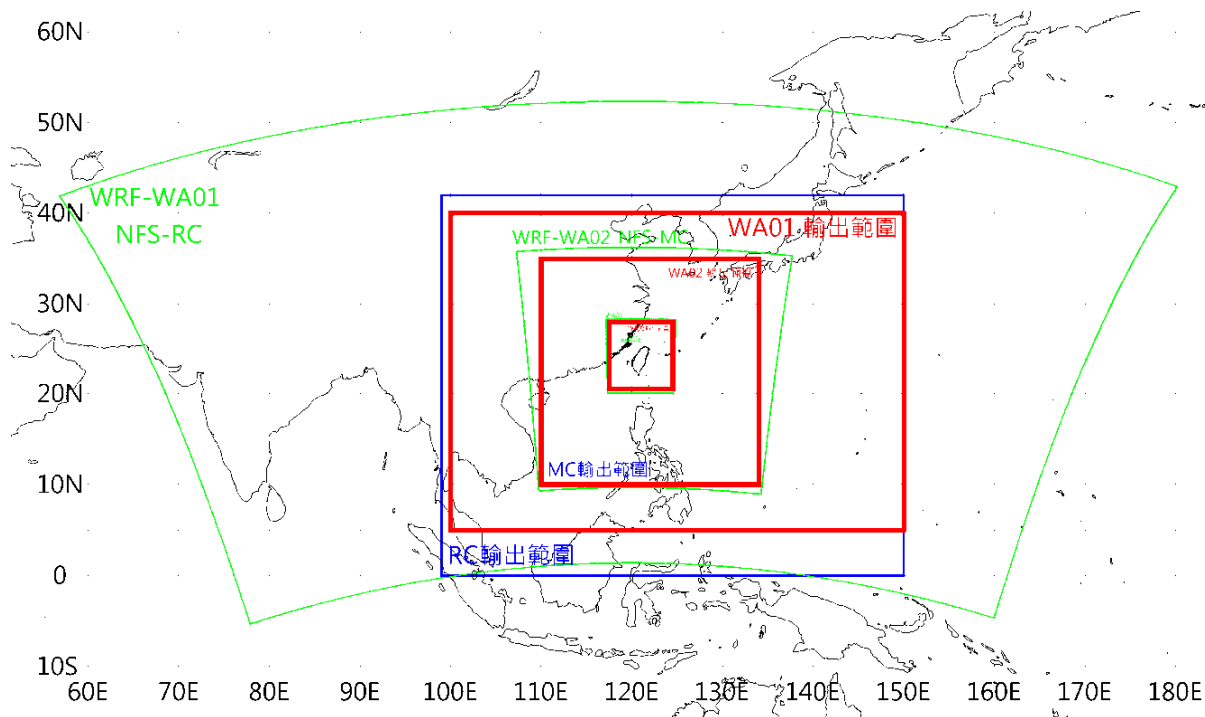


圖 3.4 作業化風場資料輸出範圍

表 3.2a 中央氣象局風場 NFS 風場資料格式

DMS FLAP	座標系統	dimension	relocation	格點位置
RC	Lambert conformal mapping	221*127	45KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(114,71)位置位於(30N,120E) 底圖左下點(-5.34068N,77.91867E) 右上點(42.92812N,180.2034E)
MC	Lambert conformal mapping	181*193	15KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(76,148)位置位於(30N,120E) 底圖左下點(9.28194N,109.7727E) 右上點(35.26665N,137.7342E) 座標(1,1)對應至 45KM MESH 之(89,22)座標位置
HC	Lambert conformal mapping	91*121	5KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(28,199)位置位於(30N,120E) 底圖左下點(20.78609N,118.6597E) 右上點(26.33824N,123.2724E) 座標(1,1)對應至 15KM MESH 之(67,82)座標位置

表 3.2b 中央氣象局風場 WRF 風場資料格式

DMS FLAP	座標系統	dimension	relocation	格點位置
WA01	Lambert conformal mapping	221×127	45KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(114,71)位置位於(30N,120E) 底圖左下點(-5.34068N,77.91867E) 右上點(42.92812N,180.2034E)
WA02	Lambert conformal mapping	181×193	15KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(76,148)位置位於(30N,120E) 底圖左下點(9.28194N,109.7727E) 右上點(35.26665N,137.7342E) 座標(1,1)對應至 45KM MESH 之(89,22)座標位置
WA03	Lambert conformal mapping	148×178	5KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(55,214)位置位於(30N,120E) 底圖左下點(20.07030 N, 117.3342 E) 右上點(28.24893°N, 124.9106°E) 座標(1,1)對應至 15KM MESH 之(59,78)座標位置

表 3.2c 作業系統內大尺度及中尺度風、波及流場資料格式

	模式	dimension	模式格網	格點位置
風場	採用 NFS/WRF 之 RC 風場內插	307*211	1/6 度 =0.166667	底圖左下點(0N,99E) 右上點(35N,150E)
	採用 NFS/WRF 之 MC 風場內插	301*301	1/12 度 =0.083333	底圖左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
波場	西太平洋範圍模式 (WAM 模式)	121*126	0.2 度 (約 20 公里)	底圖左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
	臺灣周圍海域波浪模式 (SWAN 模式)	101*126	0.04 度 (約 5 公里)	底圖左下點(21N,117E) 右上點(27N,123E)
流場	西太平洋海域複合潮模式 (COHERENS 模式)	541*325	1/12 度 =0.083333	底圖左下點(15N,105E) 右上點(42N,150E)
	臺灣海域複合潮模式 (COHERENS 模式)	511*331	1/60 度 =0.016667	底圖左下點(21N,116.5E) 右上點(26.5N,125E)

表 3.2d 作業系統內展示風場資料格式

模式	DIMESION	模式格網 度(°)	格點位置
採用 WRF 之 WA01 風場內插	101×71	1/2° =0.5°	左下點(5N,100E) 右上點(40N,150E)
採用 WRF 之 WA02 風場內插	145×151	1/6° =0.167°	左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
採用 WRF 之 WA03 風場內插	169*181	1/24° =0.042°	左下點(20.5N,117.5E) 右上點(28N,124.5E)

### 3.3 風場模組作業化架構

在 TaiCOMS 系統設定架構下，風場及氣壓場預報資料係採用中央氣象局提供的全域即時預報風場及氣壓場資料，經由 TaiCOMS 作業化系統處理成系統內其他模式所需之風場及氣壓場格式。

本年度除延續原系統 NFS 風場，至本年度(2014 年)5 月，5 月後全面調整採用 WRF 風場(WRF\_M02)資料進行運作，已完成 WA01、WA02、WA03 資訊提供及網頁展示，並利用 WA01 取代 RC 風場，WA02 取代 MC 風場進行波場與水動力作業化。

#### 3.3.1 NFS 風場模組作業化架構

系統風場及氣壓場預報資料 2014 年 4 月前係採用中央氣象局所提供的 NFS 全域即時預報風場及氣壓場資料，經由作業化系統處理成系統內其他模式所需之風場及氣壓場格式。所提供風場為每日兩組 73 小時資料，分別於當日 12 時及 24 時(0 時)於 FTP 網站發布資料，透過自行撰寫批次排程檔抓取資料，每小時資料約為 3MB，故每天風場原始資料共約 440MB，其資料格式採用 GRIB 格式，每小時檔案內資訊共包含 87 層相關風場、氣壓場及溫度資料主要資料如表 3.3 所示，相關解碼則須配合此格式擷取不同資訊，再進行內插作業。

有關風場模組作業流程如圖 3.5 所示，包括原始風場資料解碼以及利用內插方式產生大、中、小尺度範圍之 RC、MC、HC 風場資料後，分別提供風浪模組及潮流模組執行相關作業化模擬；風場資料之後處理包括出圖及各港口風場資料轉出，最後進行風場資料備份存檔。有關本計畫大、中、小尺度範圍之 RC、MC、HC 風場與中央氣象局 NFC 及 WRF 各風場資料輸出範圍之對應關係，圖 3.6 至圖 3.8 所示。

有關作業化所展示的風壓場資料分別為大尺度範圍 RC 及中尺度範圍 MC 之二維資料，各港口風場歷線資料係輸出自中尺度範圍 MC

風場；其中風場向量圖檔如圖 3.9a 及 3.9b 所示，另提供中央氣象局天兔颱風侵臺時衛星照片，如圖 3.10 所示，可作為相關比對。

**表 3.3 有限區域模式(NFS)氣象主要資料彙整表**

氣象資料	解析度
海平面氣壓場	(45km, 15km,5km)
地表空氣溫度場	(45km, 15km,5km)
700 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
850 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
925 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
1000 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
10 米高風場	(45km, 15km,5km)
2 米高風場	(45km, 15km,5km)

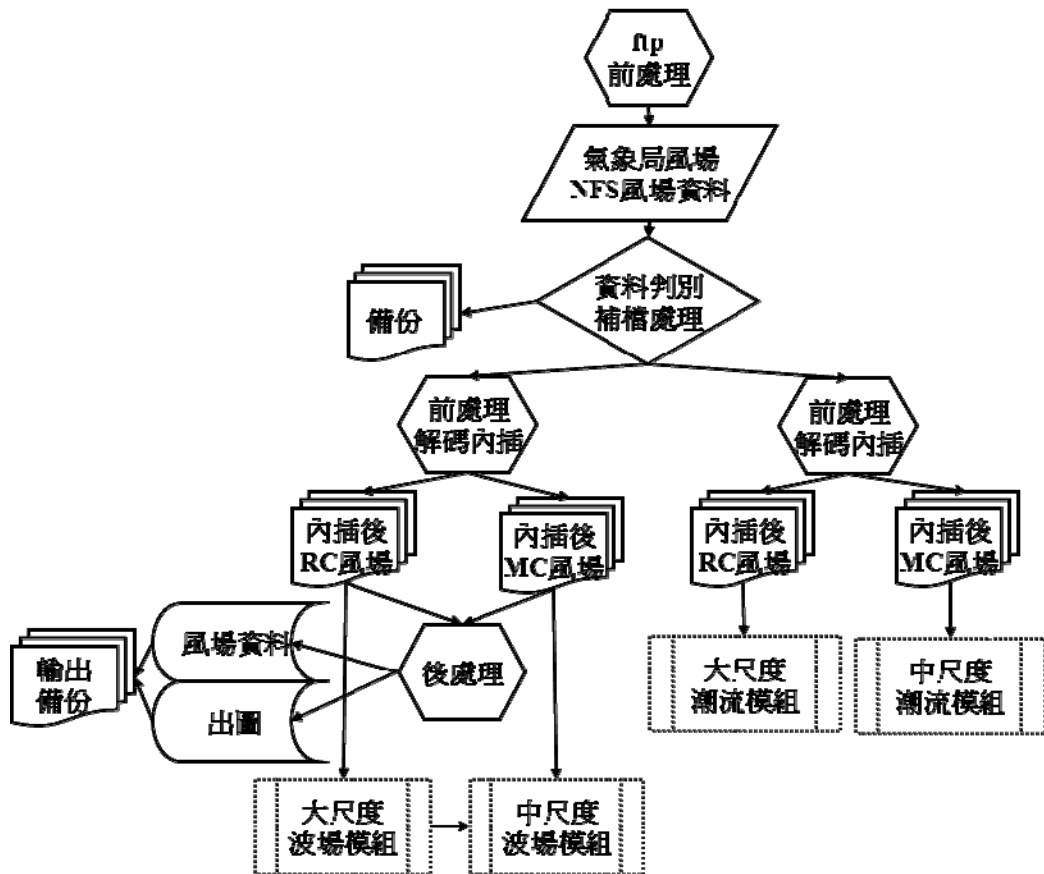


圖 3.5 風場模組作業流程圖

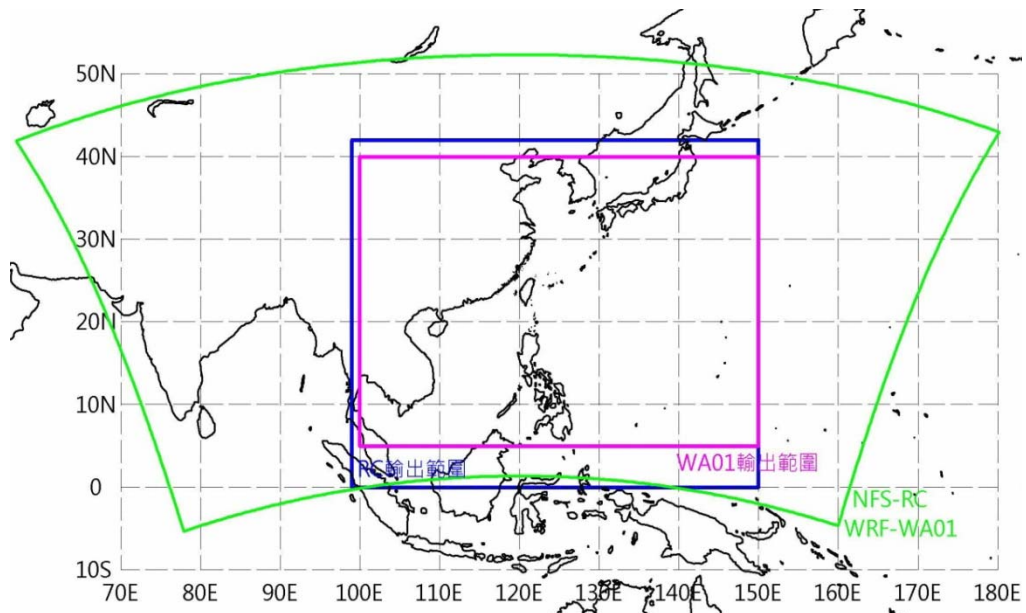


圖 3.6 NFS(RC)及 WRF(WA01)風場輸出範圍圖

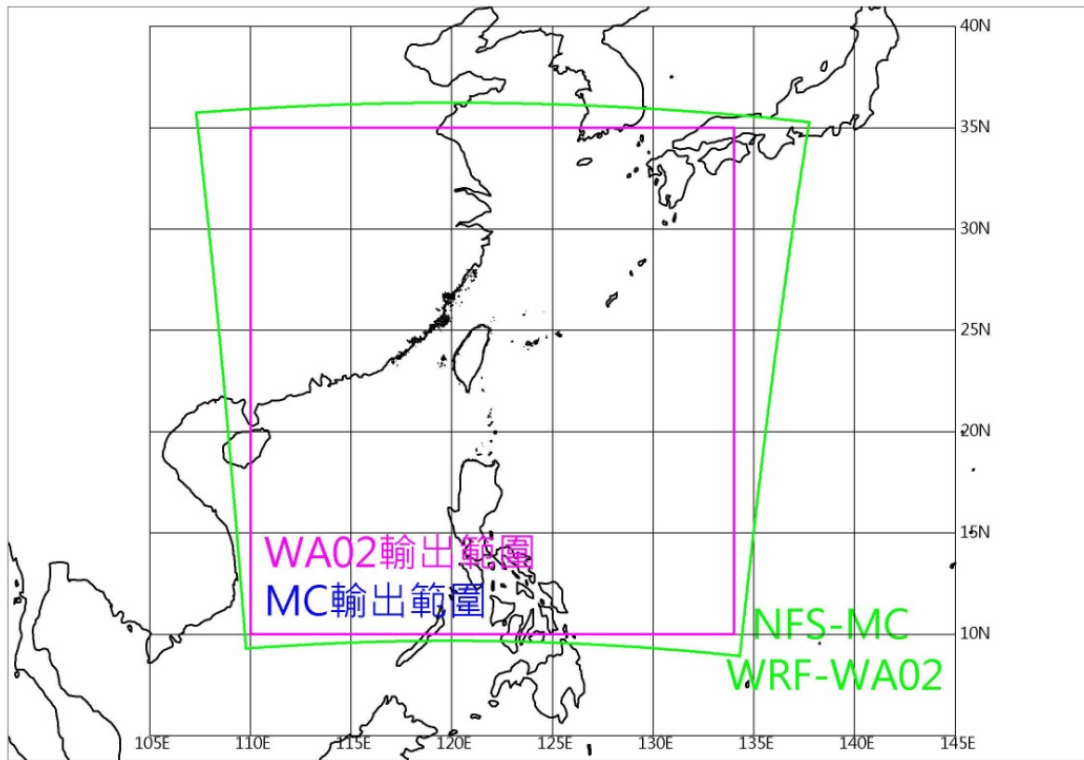


圖 3.7 NFS(MC)及 WRF(WA02)風場輸出範圍圖

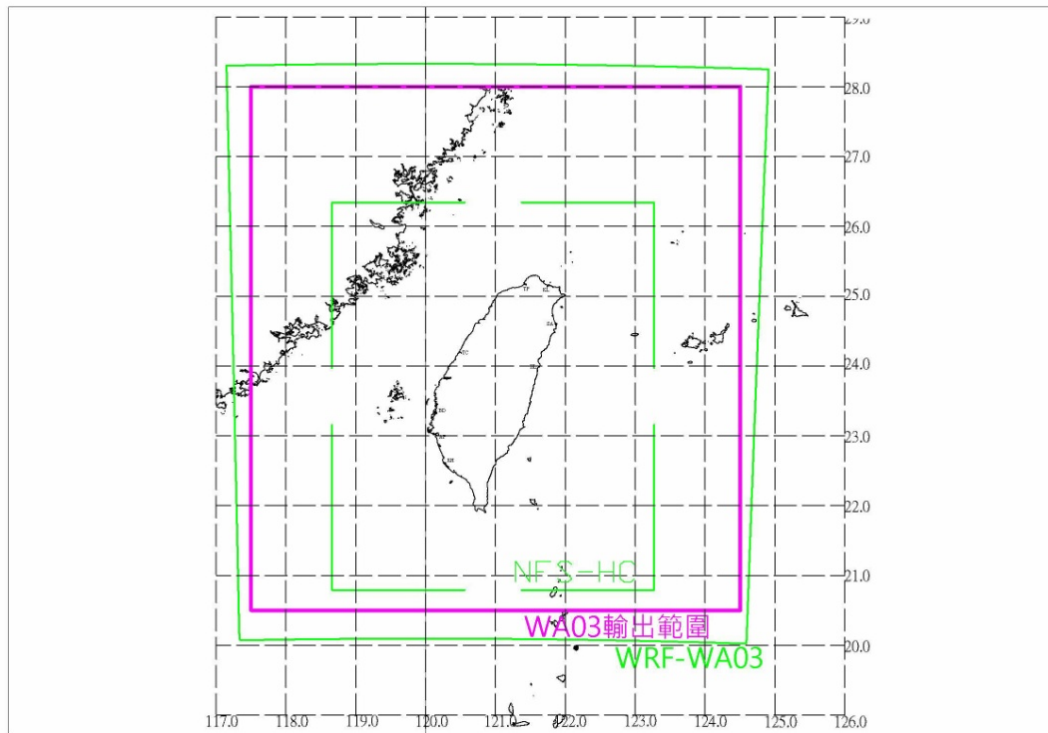


圖 3.8 WRF(WA03)風場輸出範圍圖



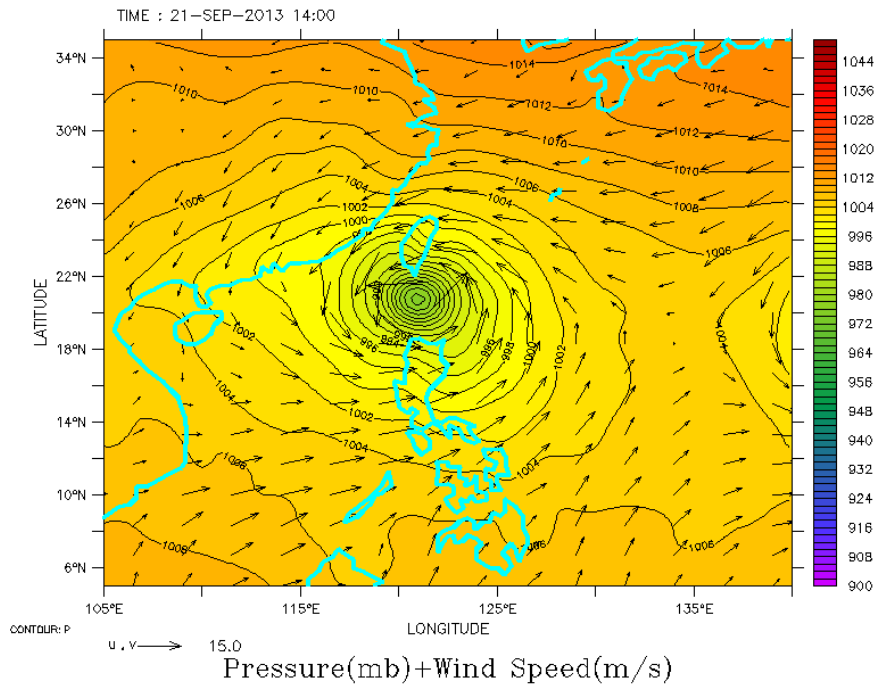


圖 3.9a 天兔颱風 9 月 21 日 14 時 RC 風場向量圖

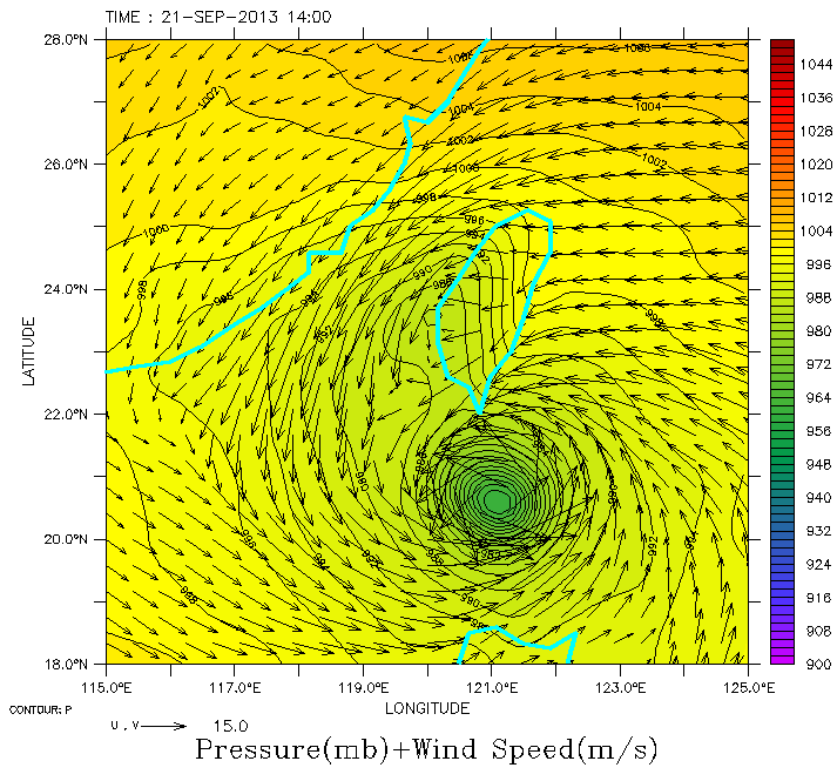


圖 3.9b 天兔颱風 9 月 21 日 14 時 MC 風場向量圖

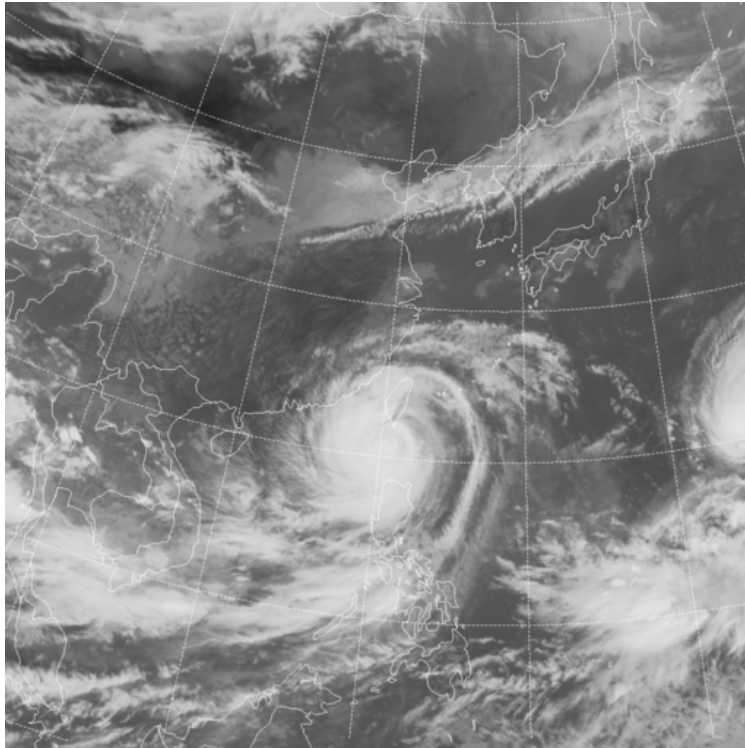
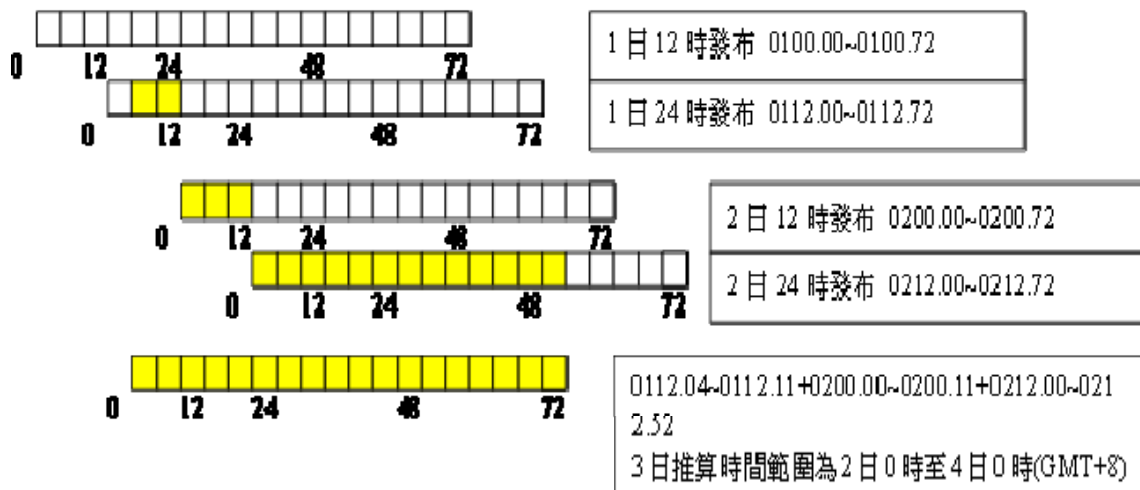


圖 3.10 中央氣象局天兔颱風衛星雲圖(2013-09-23-14:32)

每日預報風場作業化配合整體海象作業化流程將氣象局所提供風場資料以較接近預報時間資料為先擷取方式彙整，實際擷取方式可以第3日模擬作業進行範例說明如表 3.4 及圖 3.11 所示，3日氣象模擬資料設定時間範圍為2日0時至4日0時(GMT+8)在氣象局提供檔案為，lbyyyymm0112.04~lbyyyymm0112.11+lbyyyymm0200.00~lbyyyymm0200.11+lbyyyymm0212.00~lbyyyymm0212.52。其中中央氣象局風場檔名命名方式為 lbyyyymmddHH.hhm，yyyy=西元年、mm=月、dd=日、HH+hh=時，檔案原始時間為 GMT(Greenwich Mean Time 格林威治標準時間)時間。

表 3.4 每日所擷取風場資料以第 3 日模擬風場為範例說明表

氣象局預報資料			海象模擬系統擷取資料	
氣象局發布時間(臺灣時間 GMT+8)	預報資料檔名 每小時一筆資料	檔名對應成臺灣時間(GMT+8)	03 日作業化擷取資料	03 日作業化擷取資料對應臺灣時間(GMT+8)
01 日 12:00 發布	lbyyyymm0100.00m ~lbyyyymm0100.72m	*0108.00~*0108.72 (等於 1 日 8 時至 4 日 20 時)		
01 日 24:00 發布(02 日 00:00)	lbyyyymm0112.00m ~lbyyyymm0112.72m	*0120.00~*0120.72 (等於 1 日 20 時至 5 日 08 時)	*0112.04m ~*0112.11m	0120.04 ~0120.11 (等於 2 日 0 時至 2 日 7 時)
02 日 12:00 發布	lbyyyymm0200.00m ~lbyyyymm0200.72m	*0208.00~*0208.72 (等於 2 日 8 時至 5 日 20 時)	*0200.00m ~*0200.11m	0208.00 ~0208.11 (等於 2 日 8 時至 2 日 19 時)
02 日 24:00 發布(03 日 00:00)	lbyyyymm0212.00m ~lbyyyymm0212.72m	*0220.00~*0220.72 (等於 2 日 20 時至 6 日 08 時)	*0212.00m ~*0212.52m	0220.00 ~0220.52 (等於 2 日 20 時至 4 日 0 時)
			共擷取 73 筆資料	模擬計算時間範圍為 2 日 0 時至 4 日 0 時



註：灰階部分為擷取資料範圍

圖 3.11 每日所擷取風場資料以第 3 日模擬風場為範例圖

### 3.3.2 WRF 風場模組作業化架構

採用中央氣象局所提供的 WRF 全域即時預報風場及氣壓場資料 (WRF\_M00)，已經由作業化方式處理成系統內其他模式所需之風場及氣壓場格式。目前每日提供 4 組風場資料供出圖與網頁展示應用及每日提供 1 組供波場及水動力作業使用。

中央氣象局 WRF 風場所提供本中心檔名命名方式與 NFS 雷同為 wbyyyymmddHH.hhm，yyyy=西元年、mm=月、dd=日、HH+hh=時，檔案原始時間為 GMT(Greenwich Mean Time 格林威治標準時間)時間。所提供風場為每日 4 組 84 小時資料(其 hh 為 00、01...、84)，分別於當日 0 時、6 時、12 時及 18 時於 FTP 網站開始發布資料，氣象局約需 90 分鐘至 2 小時才完成發布資料，本所於該日 2 時、8 時、14 時及 18 時進行解壓及內插計算，調整格式及製圖產出。現已透過自行撰寫批次排程檔擷取資料，每小時資料約為 3MB，故每天風場原始資料共約 876MB，其資料格式採用 GRIB 格式，每小時檔案內資訊共包含 82 層相關風場、氣壓場及溫度資料如表 3.5 所示，相關解碼則須配合此格式擷取不同資訊，再進行內插作業。

每日預報風場作業化不同於 NFS 風場處理方式，配合每日 4 筆資料，每日分時段提供 4 筆資料，整體作業化流程將氣象局所提供風場資料以較接近預報時間資料為先擷取方式彙整，實際擷取方式依 102 年度評估結果為求整體風場穩定扣除 00~05 等 6 筆資料，直接擷取 06 至 77 筆資料，提供風場模擬資料，每次可展示及提供未來 72 小時風場及氣壓場預報資料，表示 WRF 預報風場較 NFS 預報風場更密集且可供查詢預報時間會更多，可提供風浪及水動力模擬使用。作業化所展示資料為 WA01、WA02 及 WA03 之二維資料風場向量圖檔如圖 3.12a 至圖 3.12c 所示，有關轉出資料格式如表 3.2d 所示，其展示畫面亦不同於 NFS 風場，提供風速風向箭頭表示，將海平面氣壓場僅以輪廓線呈現，並將氣壓值小於 1000 百帕，改以紅色輪廓線標示，可增加颱風等低氣壓辨識度。

表 3.5 WRF 主要提供氣象資料彙整表

氣象資料	解析度
10 百帕風場	(45km, 15km,5km)
700 百帕風場	(45km, 15km,5km)
850 百帕風場	(45km, 15km,5km)
925 百帕風場	(45km, 15km,5km)
1000 百帕溫度場和風場	(45km, 15km,5km)
地表空氣氣壓場、溫度場和風場	(45km, 15km,5km)
相對濕度	(45km, 15km,5km)
10 米高風場	(45km, 15km,5km)
80 米高風場	(45km, 15km,5km)
平均海水面氣壓	(45km, 15km,5km)

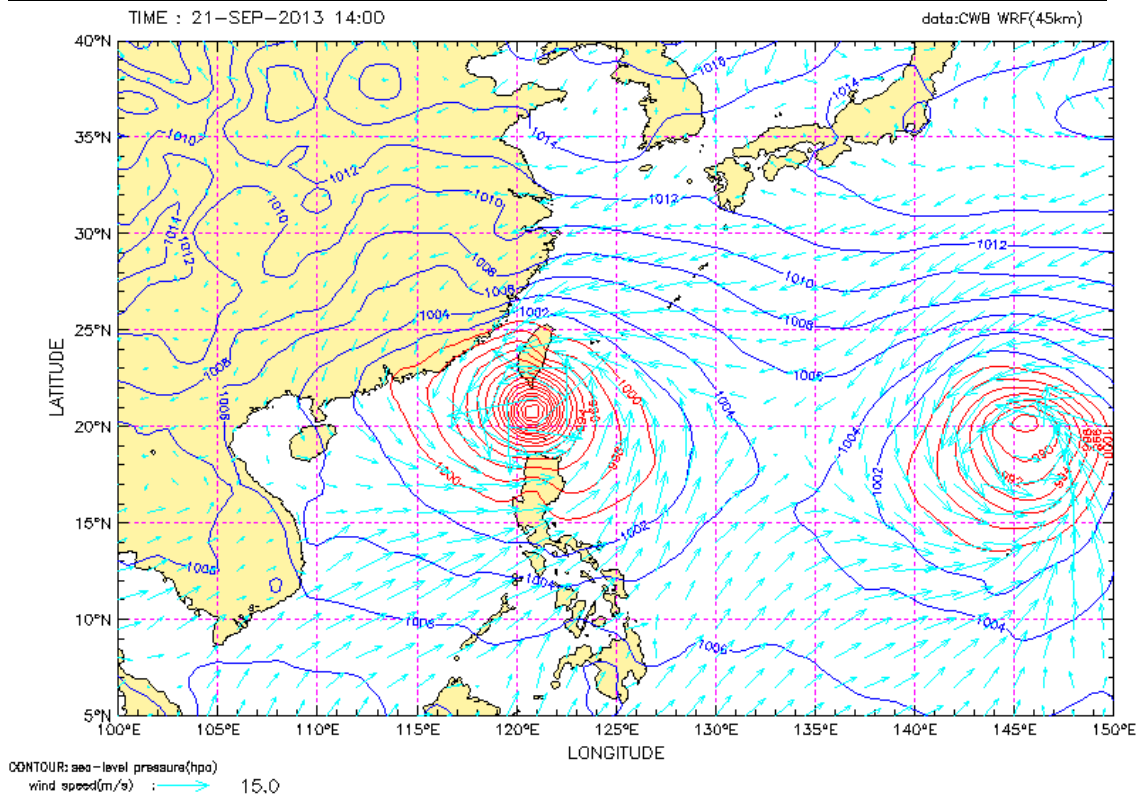


圖 3.12a 天兔颱風 9 月 21 日 14 時 WRF(WA01)風場向量圖

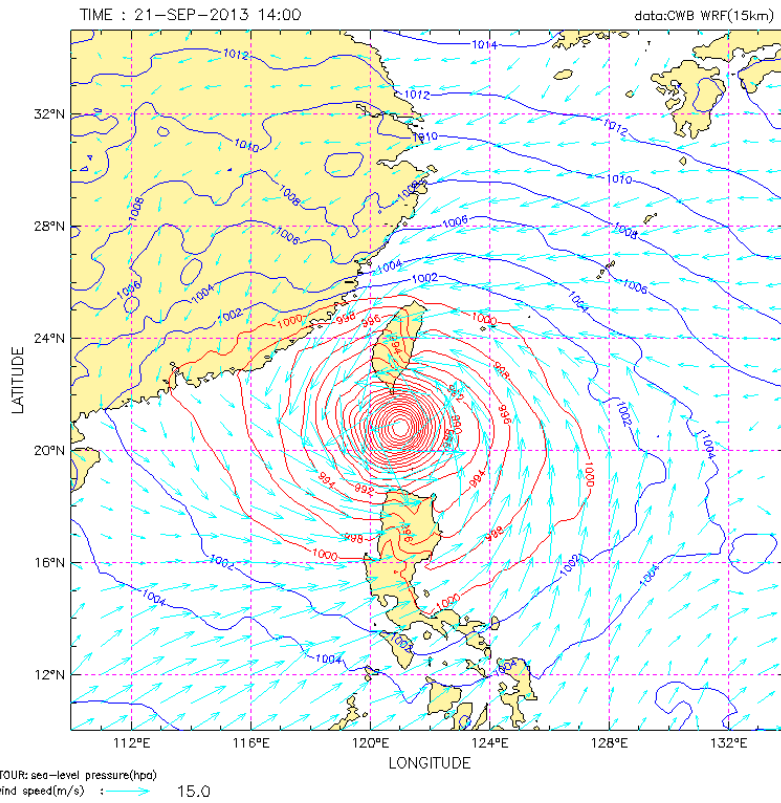


圖 3.12b 天兔颱風 9 月 21 日 14 時 WRF(WA02)風場向量圖

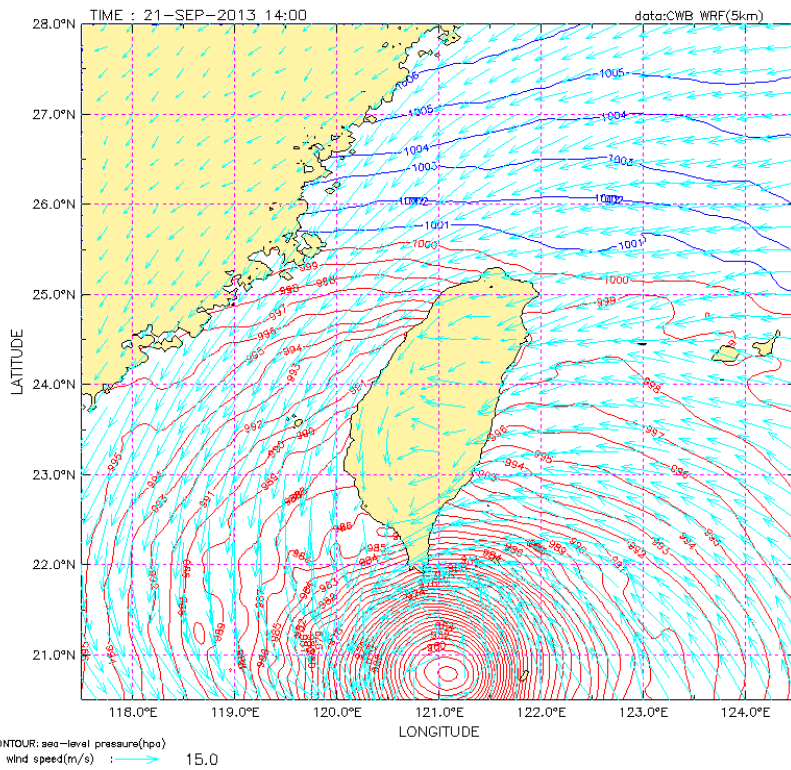
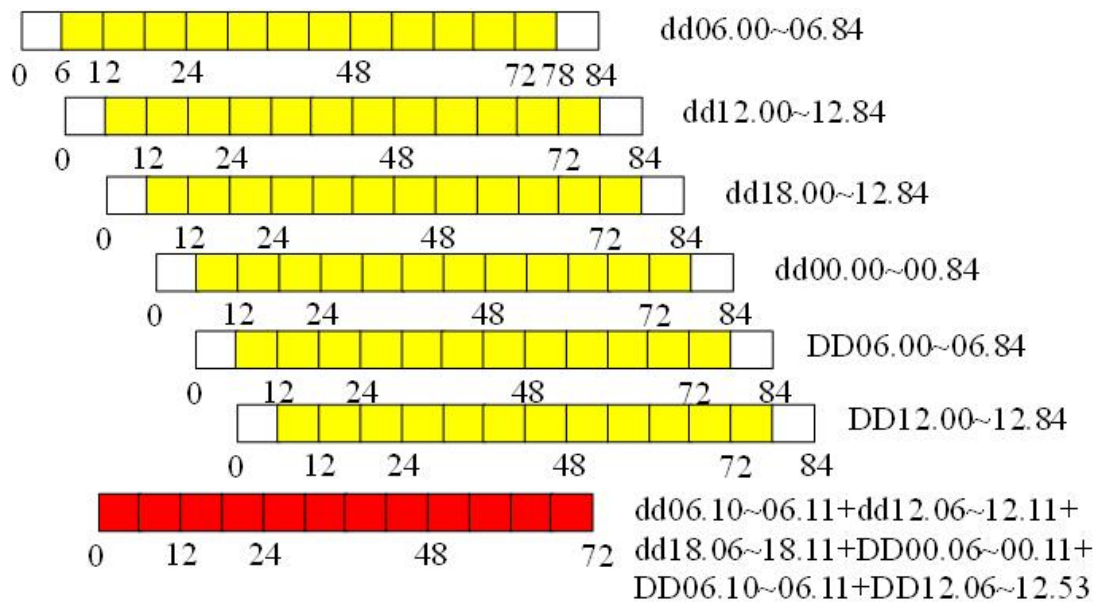


圖 3.12c 天兔颱風 9 月 21 日 14 時 WRF(WA03)風場向量圖



由於本年度(2014年)自5月以後，氣象局即不再對外提供 NFS 風場資料，因此 TaiCOMS 系統配合全面調整採用 WRF 風場(WRF\_M00)資料進行運作。為利於整體作業環境，利用 WA01 取代 RC 風場，WA02 取代 MC 風場進行每日 1 組風場產出，作為波場與水動力作業化模擬輸入條件。另每日在上午 2 時收到自中央氣象局提供的最新 12.00~12.84 資料後，配合之前已下載的預報資料彙整成 73 小時風場模擬資訊，每日提供風浪及水動力所需輸入資料 1 組，如同圖 3.13 所示，黃色為每次輸出部分，紅色為每日提供後續波流作業化部分。



dd 為 DD 減 1 日

備註：風力預報(黃)，提供波浪及水動力預報(紅)每日 1 次

圖 3.13 每日 WRF 擷取風場及提供每日波風場資料

### 3.4 WRF 風場與觀測風場評估

本計畫已長期針對風場資料進行評估比對，本節採用港研中心基隆港、蘇澳港、安平港、臺中港 7 月份風場觀測資料與自 WRF 風場不同解析度(45 公里、15 公里及 5 公里)WA01、WA02 及 WA03 分別選取預報時間 06hr 至 11hr 資料，進行預報與觀測資料之比對。整體 7 月評估結果彙整於表 3.6 風速與風向發生頻率分析表及表 3-7 風速風向統計

表，另觀測值與模擬值之時序列比對，如圖 3.14 至圖 3.17 所示，圖中虛線及圓點符號為觀測值，實線及十字符號為模擬值，上圖為風速歷線圖，下圖為風向歷線圖，期間經歷麥德姆颱風侵臺(7 月 23 日登陸)。觀測資料之風速及風向與模擬值之對應關係，如圖 3.18 至圖 3.21 所示，觀測資料之風速及風向玫瑰圖與模擬值之比較，如圖 3.22 至圖 3.25 所示。

就預報風速平均值來看，蘇澳、基隆、安平較大，臺中預報較小，WA02 及 WA03 差異不大，但在臺中港部分 WA03 較接近臺中風速；就風速平均偏差為 1.5~3m/s 之間，WA01 偏差較大在 2~3m/s 之間；整體風速相關係數在 0.62~0.85 之間，決定係數在 0.4~0.7 之間，風速整體觀測與模擬值趨勢尚屬一致。

由歷線資料得知，風向易受限於觀測位置在港區內會受附近地形、早晚海陸風變化、與臺灣周圍海域風場迎風或背風區影響故誤差較大。如蘇澳港觀測站在 7 月期間每日清晨(約 23 時至隔日 7 時)常有西北西風為主，而此時模擬值則仍以南風為主，所以整體在風向上的誤差會增加。在蘇澳港觀測資料之玫瑰圖 3.22 中亦可看出在風速 5m/s 以下時，實測資料有明顯西北西風。另參考圖 3.26 及圖 3.27 在 2014 年 7 月 10 日 2 時及 7 月 17 日 02 時 WA02 及 WA03 整體風速風向分布圖，可顯示出當 7 月 10 日時臺灣周圍海域以東南風為主，故安平及臺中實測與預報風向較為一致，但基隆及蘇澳則在背風區所觀測到的風向與模擬較不一致；反之在 7 月 17 日時基隆及蘇澳實測與預報風向較為一致，安平及臺中則為背風區所觀測風向與模擬較不一致。

針對颱風期間風場模擬結果之比對，選取 7 月 21 日至 7 月 27 日風速歷線如圖 3.28 至圖 3.31 所示，顯示此段時間主要受到侵臺之麥德姆颱風(23 日登陸)所影響，並統計海上颱風警報發布期間 7 月 21 日 6 時至 24 日 0 時風速風向資料如表 3.8。其中 WA02 及 WA03 風場較 WA01 佳，平均偏差 2.32~4.9 之間，風速相關係數良好約在 0.7~0.55 之間，比 7 月整體較佳，風速變化趨勢一致，臺中港在 WA03 風場較接近觀測值。



表 3.6a 蘇澳、基隆、安平及臺中港 7 月風速發生頻率分析表

港口		風速(cm/s)					平均風速 (cm/s)	最大風速 (cm/s)
		<5	5~10	10~15	15~20	>20		
蘇澳	Obs.	58.20	38.04	1.88	1.88	0.00	4.65	18.70
	WA01	30.65	54.57	11.69	1.88	1.21	6.95	26.10
	WA02	49.33	43.41	6.05	1.21	0.00	5.48	18.66
	WA03	36.02	45.70	15.19	1.61	1.48	6.91	27.98
基隆	Obs.	85.22	12.90	1.21	0.67	0.00	3.34	16.40
	WA01	70.70	27.15	2.02	0.13	0.00	4.07	16.67
	WA02	68.28	29.70	2.02	0.00	0.00	3.98	14.12
	WA03	77.28	21.10	1.34	0.27	0.00	3.60	15.42
安平	Obs.	63.04	30.38	4.57	1.88	0.13	4.70	20.43
	WA01	52.15	40.46	6.32	0.54	0.54	5.30	21.33
	WA02	59.14	36.56	3.09	0.81	0.40	4.75	26.44
	WA03	59.01	34.14	5.51	1.21	0.13	5.03	21.40
臺中	Obs.	38.84	42.74	11.02	6.05	1.34	6.94	28.60
	WA01	60.75	34.81	3.63	0.81	0.00	4.42	15.85
	WA02	52.15	39.25	6.99	1.48	0.13	5.31	20.44
	WA03	50.27	40.32	6.85	2.42	0.13	5.52	23.35

表 3.6b 蘇澳、基隆、安平及臺中港 7 月風向發生頻率分析表

港口		百分比(%)																最多 風向
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
蘇澳	Obs.	2.28	2.96	1.75	0.94	2.55	3.76	5.38	18.82	26.75	1.48	1.08	1.21	3.09	15.05	8.60	4.30	S
	WA01	2.02	2.15	2.55	6.18	4.17	6.32	8.60	22.31	27.28	6.85	1.75	0.67	1.21	1.75	3.23	2.96	S
	WA02	2.96	1.61	1.88	3.36	5.38	3.09	6.05	18.55	42.88	5.65	0.27	0.40	0.27	1.21	3.23	3.23	S
	WA03	2.96	1.75	1.61	1.61	2.82	2.28	4.44	8.33	46.51	13.58	2.15	0.67	0.67	1.08	5.38	4.17	S
基隆	Obs.	4.57	5.51	4.84	6.18	8.74	5.65	13.44	7.80	9.27	12.37	5.24	1.88	0.54	2.02	5.51	6.45	SE
	WA01	3.23	1.61	1.61	3.76	9.41	11.56	22.31	13.04	4.84	3.36	2.96	7.26	6.99	2.96	3.09	2.02	SE
	WA02	3.23	3.63	4.57	4.84	11.02	9.81	18.82	12.10	5.24	3.09	2.82	7.39	3.90	2.55	3.63	3.36	SE
	WA03	4.30	2.55	3.90	4.84	10.35	8.47	18.55	8.06	5.38	5.78	7.80	5.24	1.88	3.09	4.70	5.11	SE
安平	Obs.	5.24	7.93	4.97	1.61	2.15	3.23	6.32	4.97	2.69	11.02	10.89	6.45	4.57	5.78	14.11	8.06	NW
	WA01	2.28	1.34	1.34	0.67	0.94	4.57	6.59	9.01	20.30	15.46	6.05	6.18	2.15	2.82	6.32	13.98	S
	WA02	4.84	2.82	1.48	1.48	0.27	0.13	1.88	6.32	17.61	14.92	8.74	6.85	3.90	5.38	10.35	13.04	S
	WA03	4.98	4.17	2.29	3.10	3.50	4.31	3.10	5.25	9.42	13.19	8.48	6.59	4.31	4.31	9.02	14.00	NNW
臺中	Obs.	9.14	14.5	3.23	1.08	0.81	0.40	0.94	3.23	8.60	19.35	16.80	6.18	1.61	1.88	4.84	7.39	SSW
	WA01	8.06	8.87	3.63	2.02	2.82	1.48	2.69	2.42	8.74	23.12	13.71	5.51	2.42	2.82	5.51	6.18	SSW
	WA02	9.81	10.3	2.02	0.40	1.21	1.48	0.94	2.96	16.26	15.46	11.83	6.85	3.63	4.44	5.11	7.26	S
	WA03	9.81	9.41	3.09	1.48	1.08	1.48	2.55	5.91	19.35	11.96	13.58	5.11	2.82	3.23	3.90	5.24	S

表 3.7 蘇澳、基隆、安平及臺中港 7 月實測及模擬風速風向統計表

港口		風速(m/s)					風向(°)	
		平均值	觀測與模擬平均偏差	觀測與模擬最大偏差	觀測與模擬相關係數	決定係數	平均值	觀測與模擬風向平均偏差
蘇澳	Obs.	4.65	-	-	-	-	198.29	-
	WA01	6.95	2.78	13.40	0.66	0.44	163.84	51.86
	WA02	5.48	2.01	9.85	0.68	0.46	171.77	48.45
	WA03	6.91	2.80	14.21	0.70	0.49	186.53	44.63
基隆	Obs.	3.34	-	-	-	-	164.52	-
	WA01	4.07	1.65	7.03	0.70	0.49	167.63	48.48
	WA02	3.98	1.62	6.93	0.70	0.49	160.71	41.20
	WA03	3.60	1.41	7.93	0.68	0.46	167.79	38.76
安平	Obs.	4.70	-	-	-	-	203.15	-
	WA01	5.30	2.19	9.96	0.62	0.38	212.47	57.71
	WA02	4.75	1.68	11.90	0.75	0.56	228.13	54.31
	WA03	5.03	1.64	13.12	0.75	0.57	216.14	55.52
臺中	Obs.	6.94	-	-	-	-	187.79	-
	WA01	4.42	2.95	17.25	0.79	0.62	189.92	34.73
	WA02	5.31	2.22	14.91	0.85	0.72	196.48	28.13
	WA03	5.52	2.23	16.06	0.82	0.68	183.48	31.26

備註：

1. 觀測與模擬平均偏差 =  $\frac{\sum |觀測值 - 模擬值|}{個數}$

2. 觀測與模擬最大偏差 =  $\max\{|觀測值 - 模擬值|\}$

3. 觀測與模擬之相關係數 =  $\frac{\sum(觀測值 - \overline{觀測值})\sum(模擬值 - \overline{模擬值})}{\sqrt{\sum(觀測值 - \overline{觀測值})^2}\sqrt{\sum(模擬值 - \overline{模擬值})^2}}$

4. 決定係數為觀測與模擬線性迴歸之 R\_square(Coefficient of determination)

5. 觀測與模擬風向平均偏差 =  $\frac{\sum |觀測風向 - 模擬風向|}{個數}$

表 3.8 蘇澳、基隆、安平及臺中港 7 月 21 日 6 時至 24 日 0 時實測及模擬風速風向統計表

港口		風速(m/s)				風向(°)		
		平均值	觀測與模擬平均偏差	觀測與模擬最大偏差	觀測與模擬相關係數	決定係數	平均值	觀測與模擬風向平均偏差
蘇澳	Obs.	7.34					184.75	
	WA01	12.23	4.90	13.40	0.86	0.44	98.90	63.78
	WA02	8.02	2.32	9.85	0.88	0.46	105.18	64.15
	WA03	10.29	3.66	14.21	0.87	0.49	132.09	58.15
基隆	Obs.	5.96					120.61	
	WA01	8.04	2.83	6.77	0.84	0.49	98.03	26.54
	WA02	7.77	2.77	6.29	0.88	0.49	106.01	23.55
	WA03	7.38	3.08	7.93	0.69	0.46	104.78	23.91
安平	Obs.	8.29					204.57	
	WA01	9.03	2.56	8.51	0.83	0.38	287.17	52.99
	WA02	7.59	2.44	11.90	0.83	0.56	267.21	49.60
	WA03	7.91	2.23	13.12	0.84	0.57	256.01	46.02
臺中	Obs.	10.48					150.46	
	WA01	7.89	4.60	17.25	0.67	0.62	84.59	37.14
	WA02	8.33	3.84	14.91	0.79	0.72	99.50	45.47
	WA03	9.12	3.41	16.06	0.80	0.68	127.89	38.81

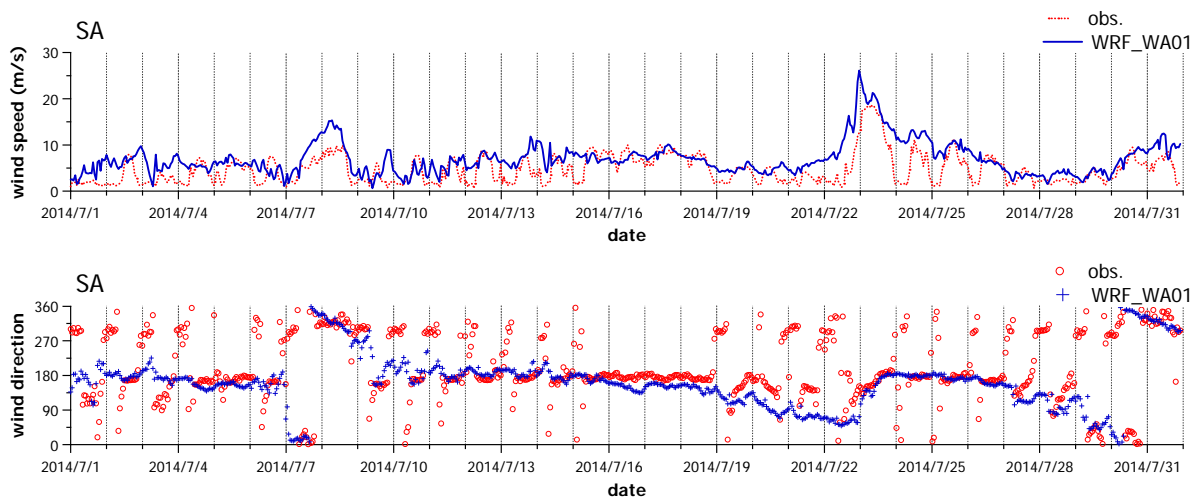


圖 3.14a 201407 蘇澳實測與預測 WRF\_WA01 風速風向時序

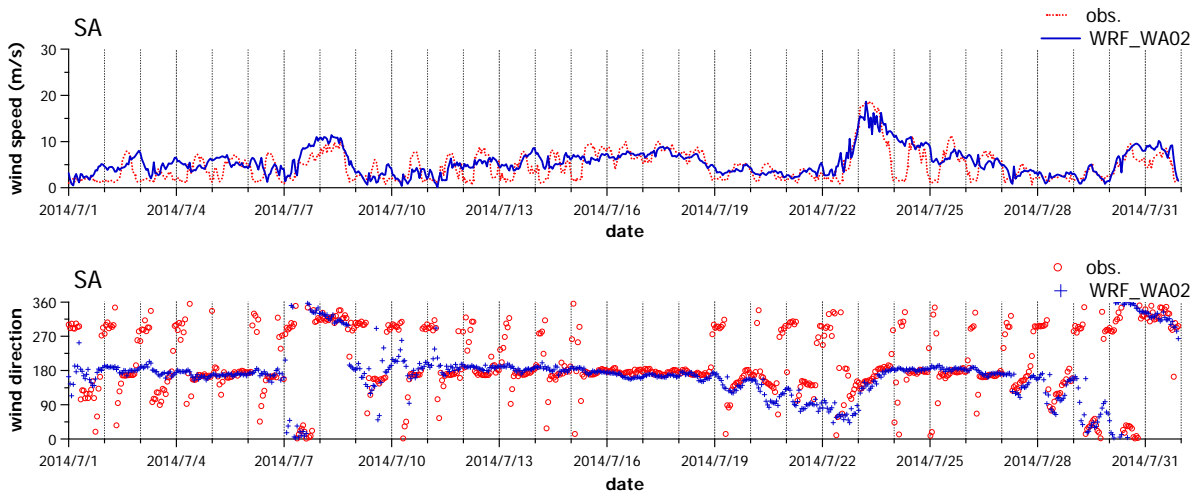


圖 3.14b 201407 蘇澳實測與預測 WRF\_WA02 風速風向時序

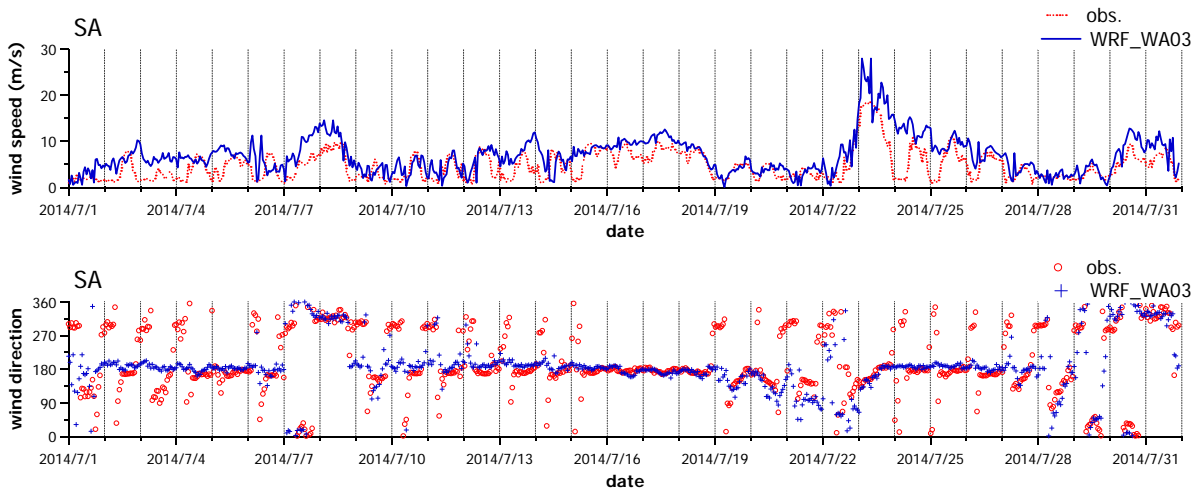


圖 3.14c 201407 蘇澳實測與預測 WRF\_WA03 風速風向時序

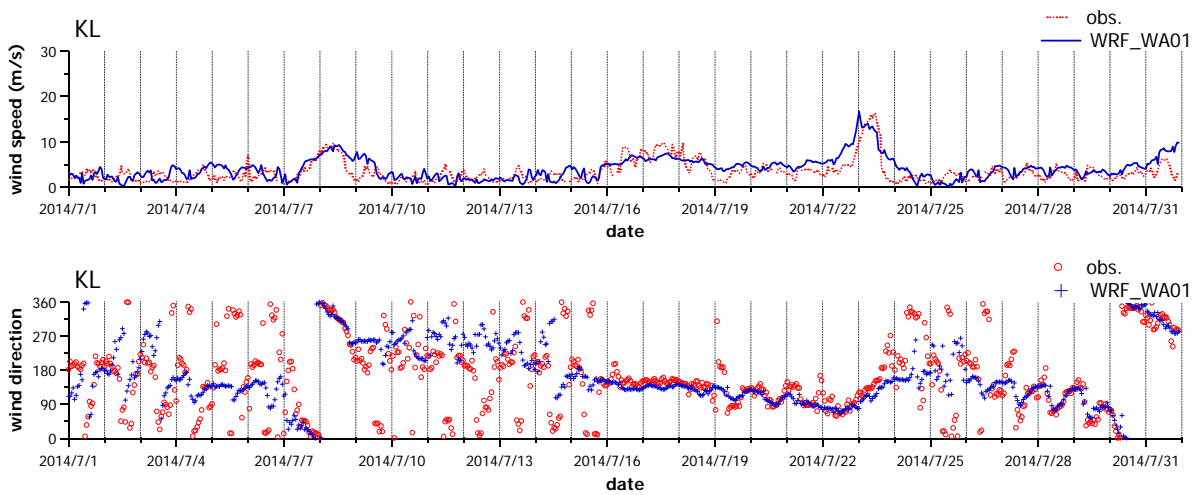


圖 3.15a 201407 基隆實測與預測 WRF\_WA01 風速風向時序

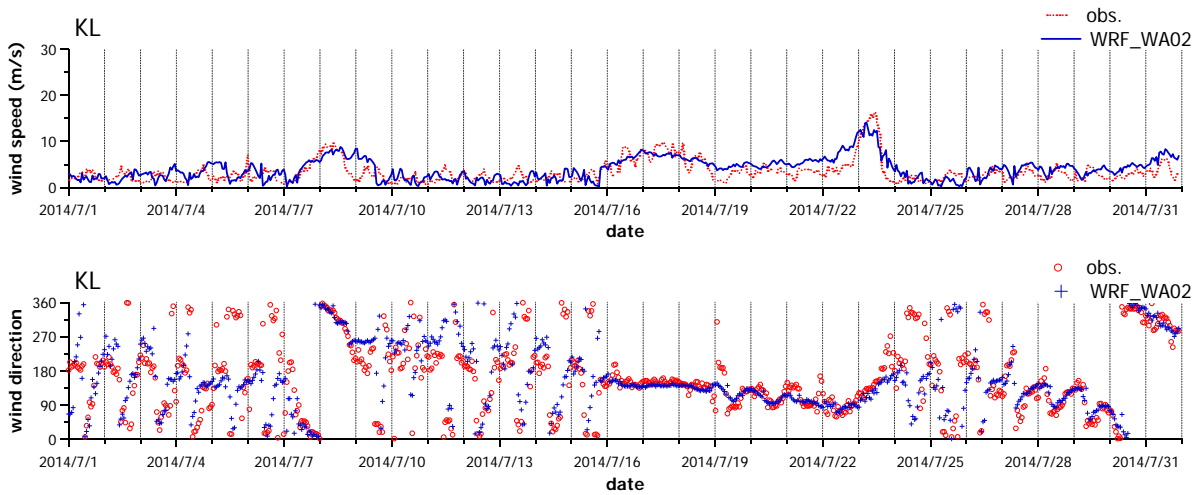


圖 3.15b 201407 基隆實測與預測 WRF\_WA02 風速風向時序

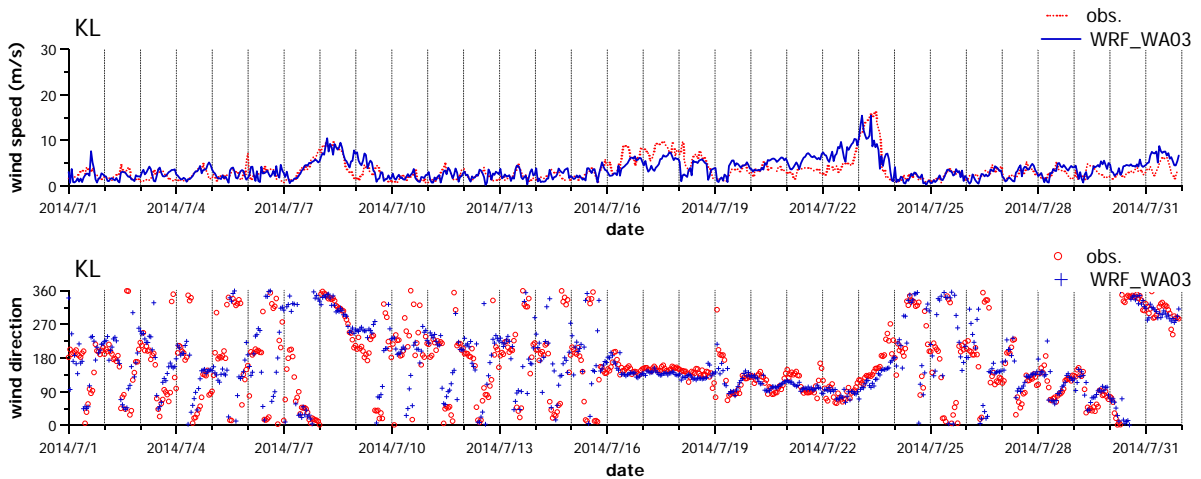


圖 3.15c 201407 基隆實測與預測 WRF\_WA03 風速風向時序

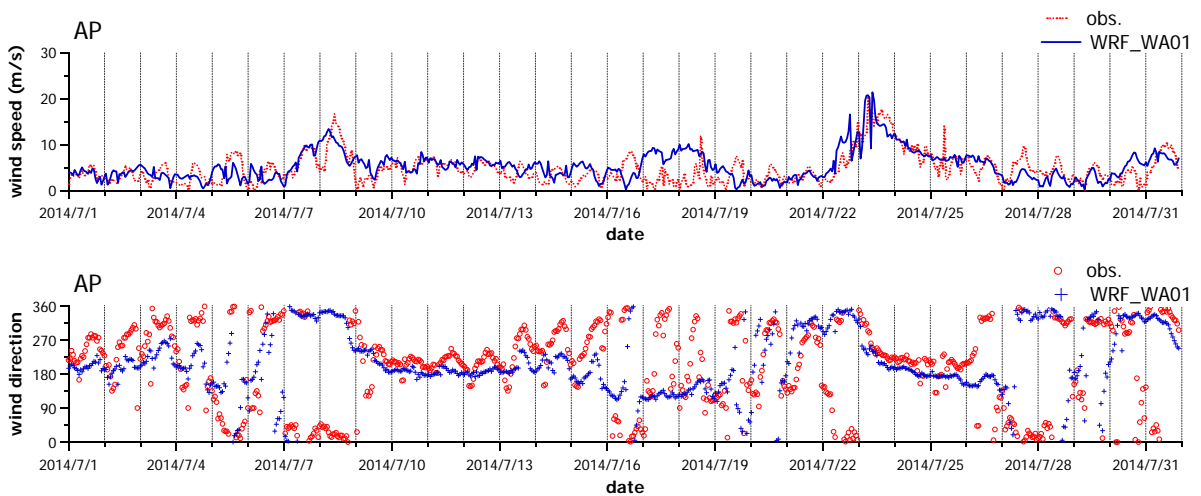


圖 3.16a 201407 安平實測與預測 WRF\_WA01 風速風向時序

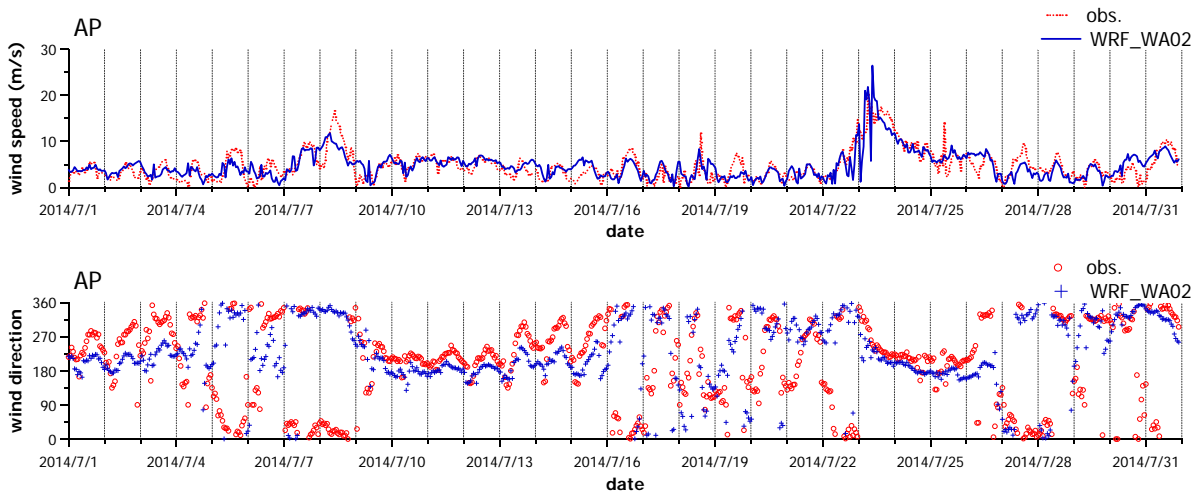


圖 3.16b 201407 安平實測與預測 WRF\_WA02 風速風向時序

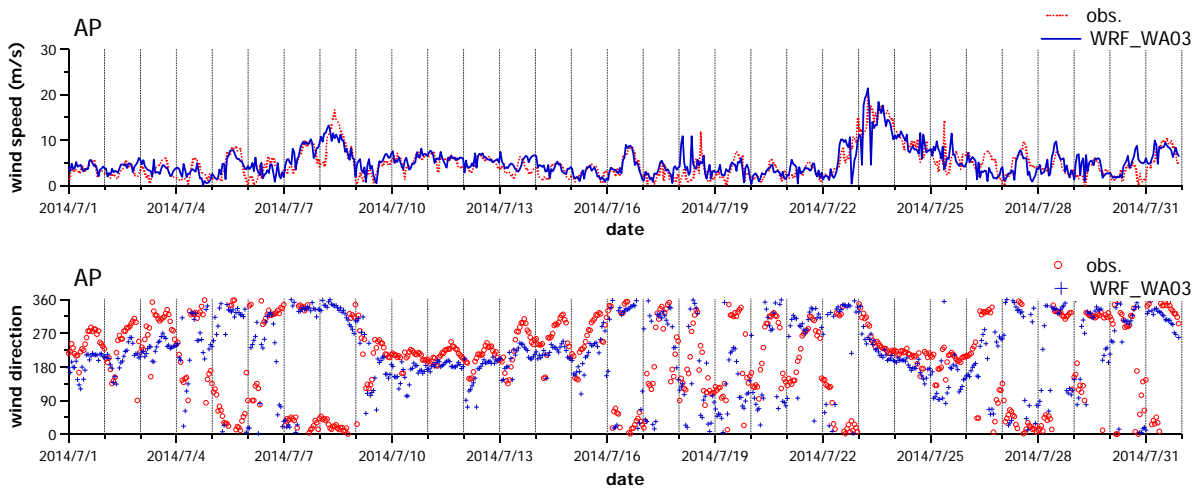


圖 3.16c 201407 安平實測與預測 WRF\_WA03 風速風向時序

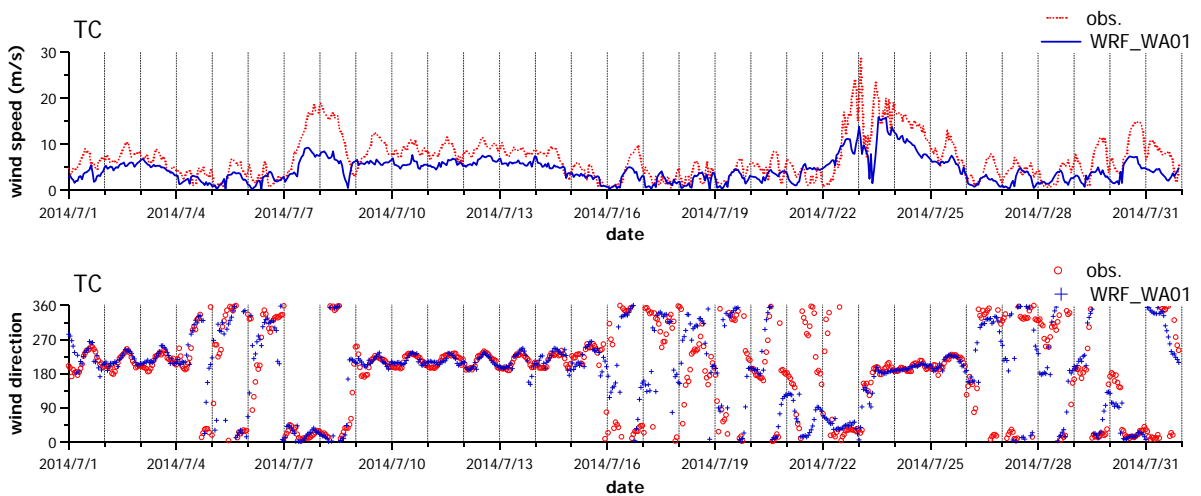


圖 3.17a 201407 臺中實測與預測 WRF\_WA01 風速風向時序



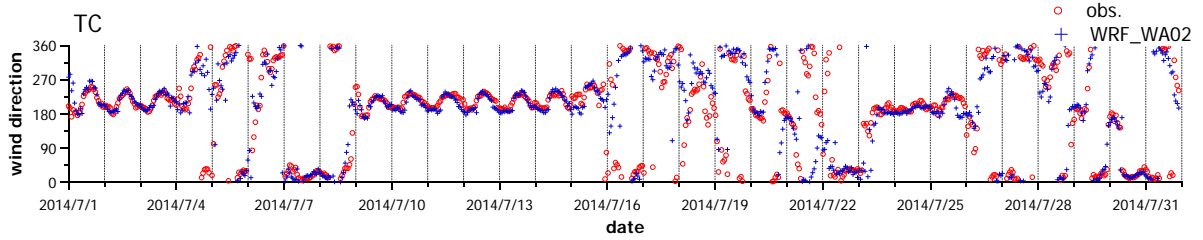
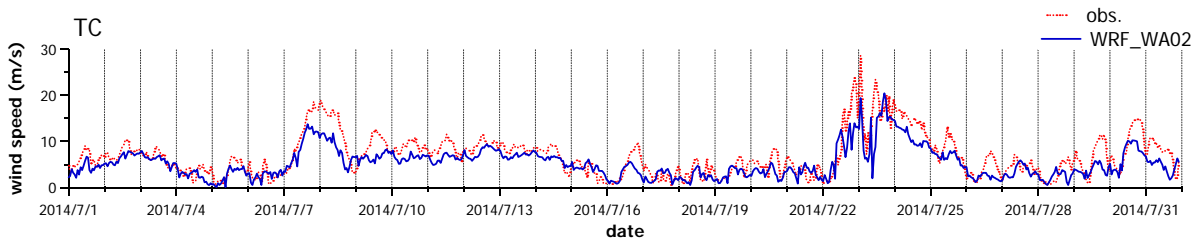


圖 3.17b 201407 臺中實測與預測 WRF\_WA02 風速風向時序

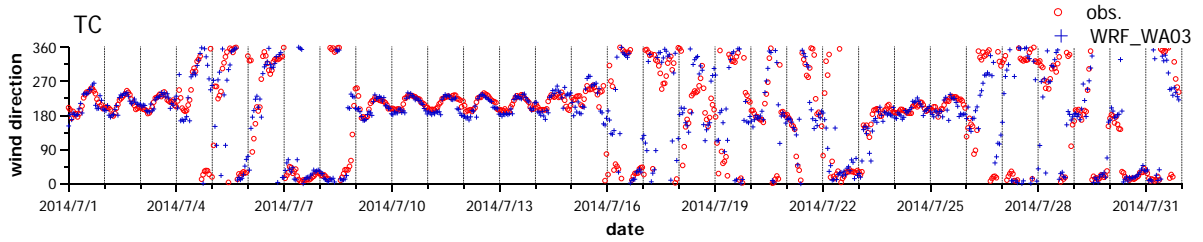
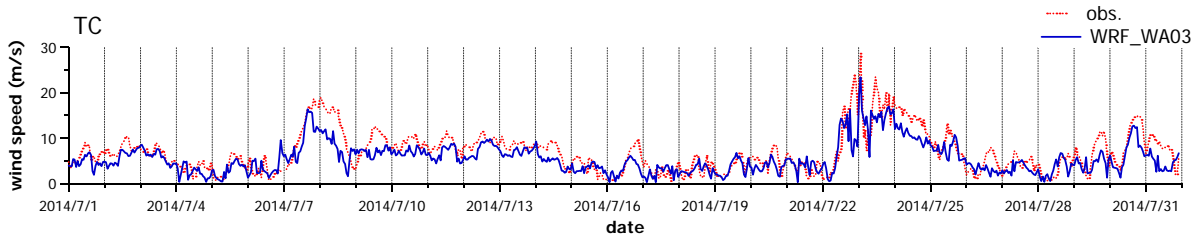


圖 3.17c 201407 臺中實測與預測 WRF\_WA03 風速風向時序

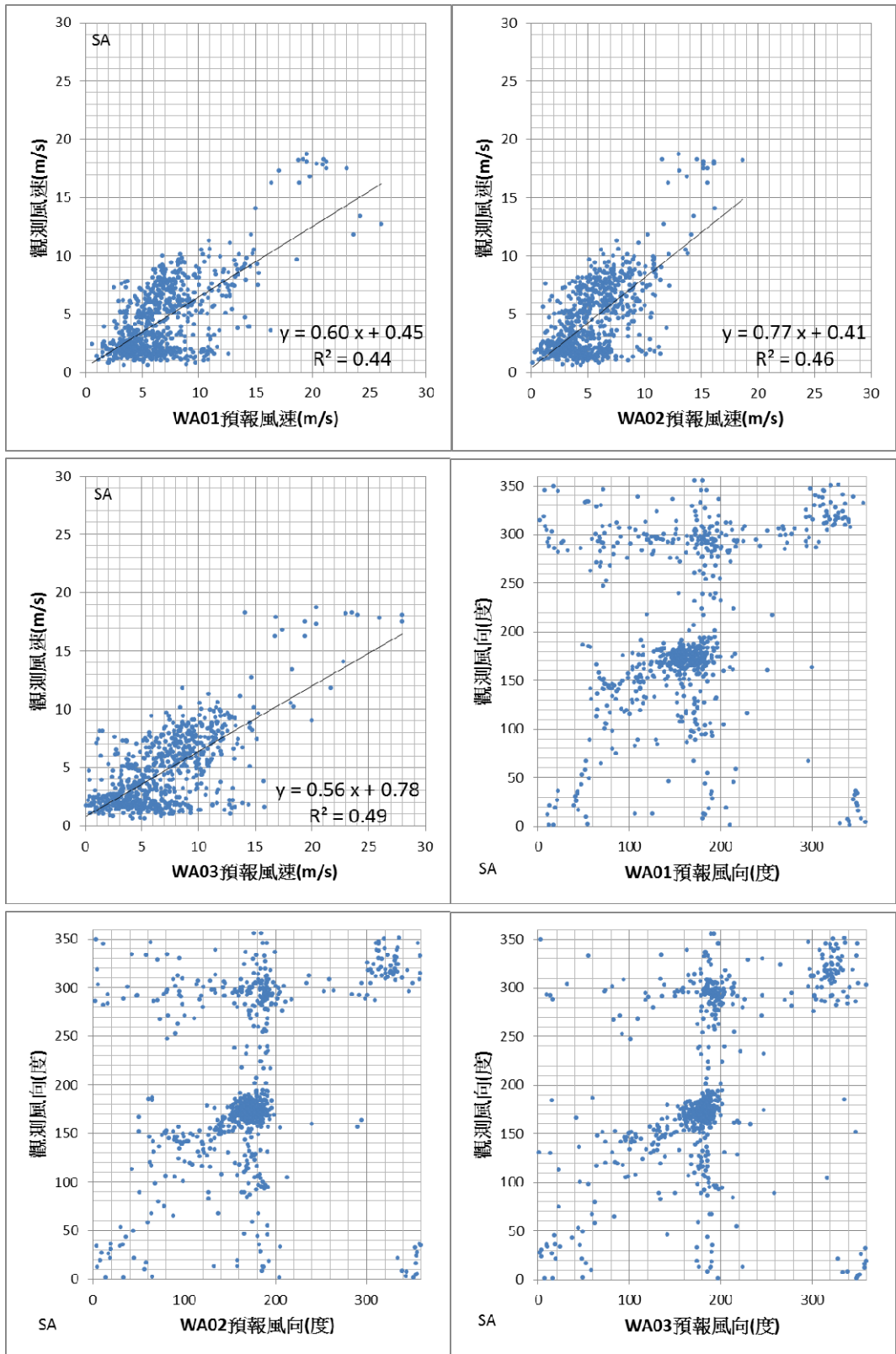


圖 3.18 蘇澳港 2014 年 7 月風速風向觀測及預測相關圖



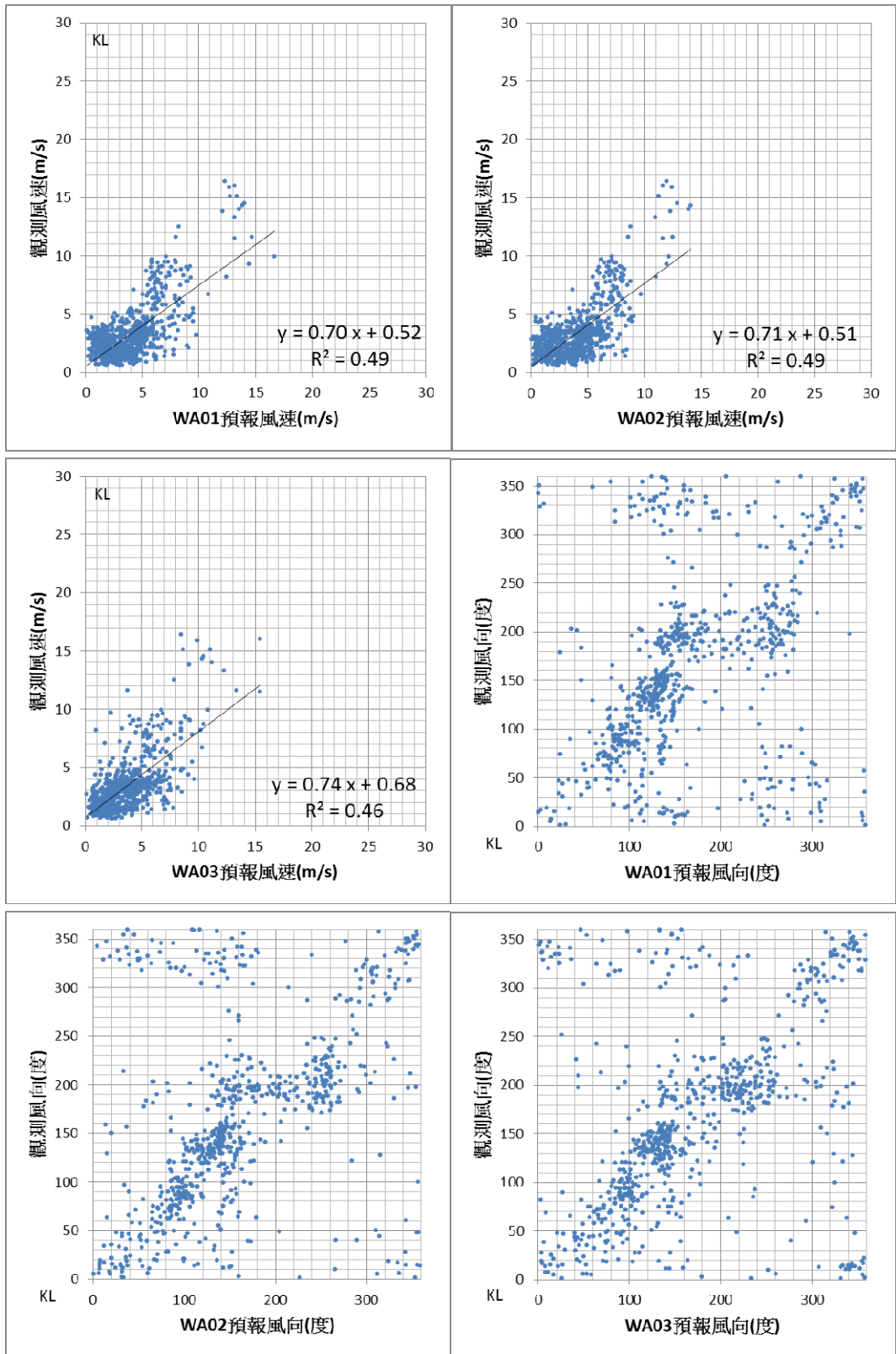


圖 3.19 基隆港 2014 年 7 月風速風向觀測及預測相關圖

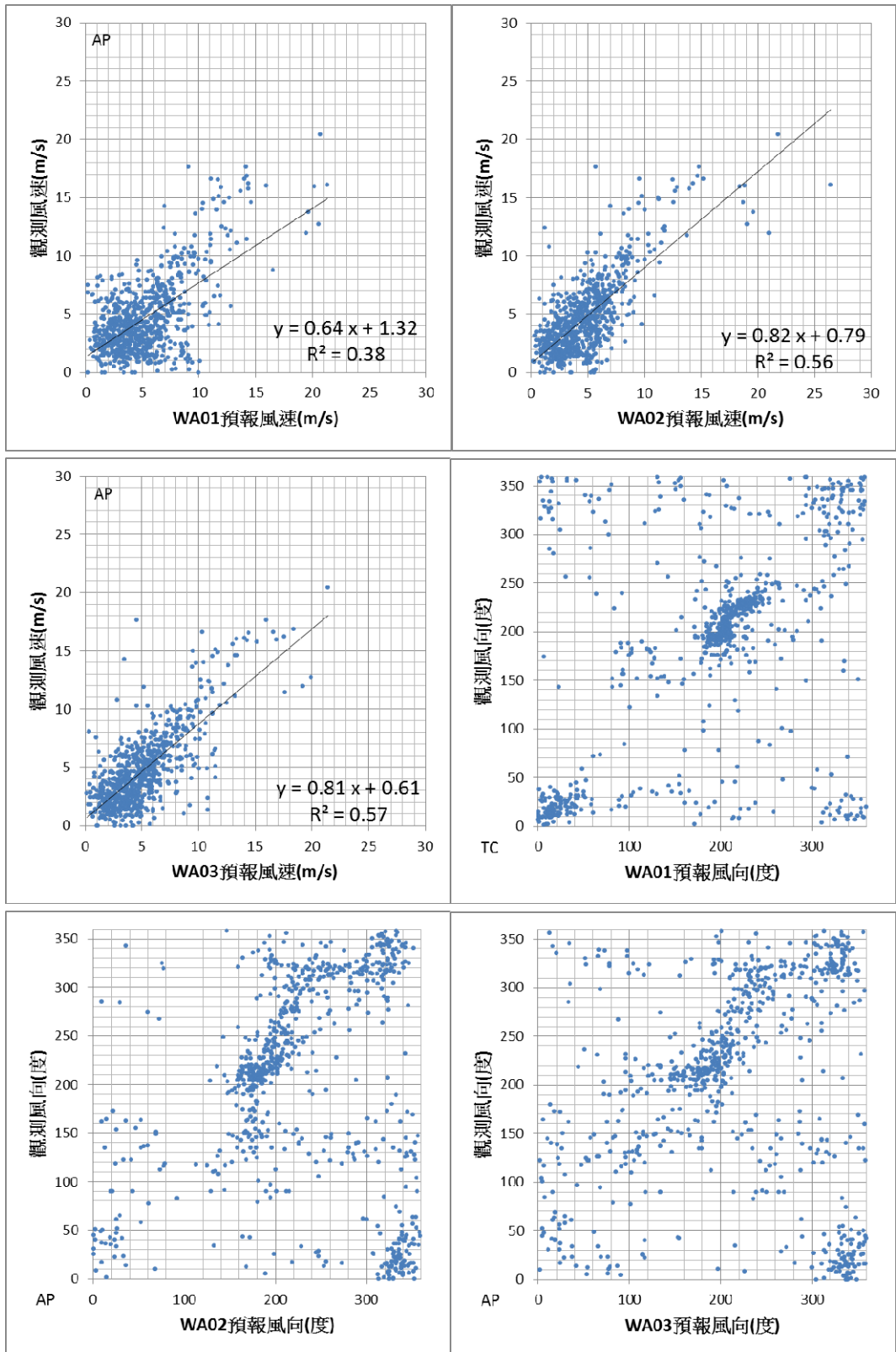


圖 3.20 安平港 2014 年 7 月風速風向觀測及預測相關圖

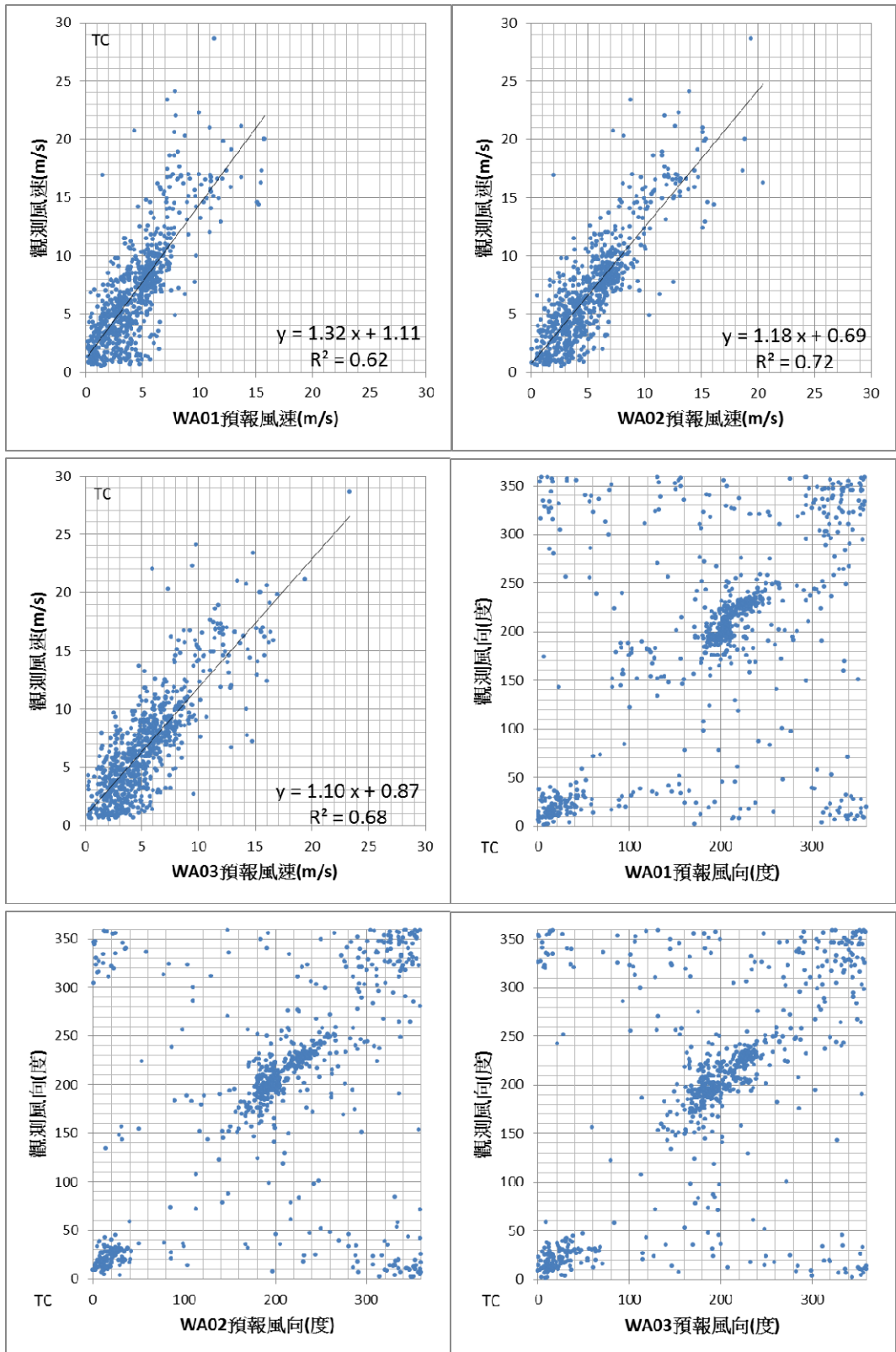


圖 3.21 臺中港 2014 年 7 月風速風向觀測及預測相關圖

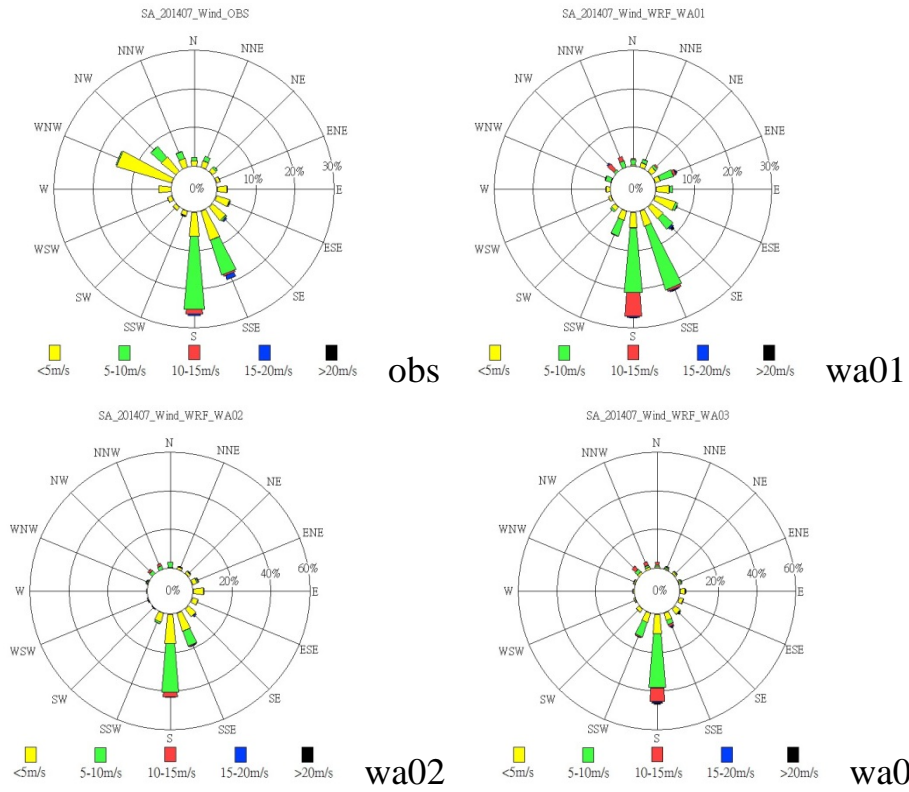


圖 3.22 蘇澳港實測與預測(WRF\_WA01~WA03)7月風玫瑰圖

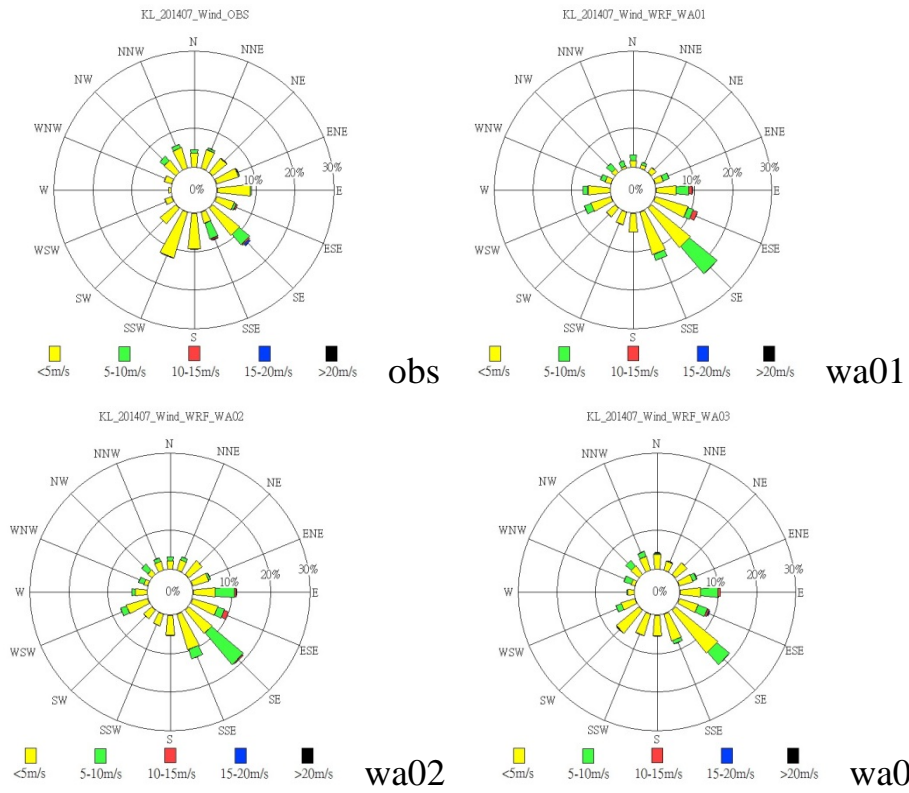


圖 3.23 基隆港實測與預測(WRF\_WA01~WA03)7月風玫瑰圖

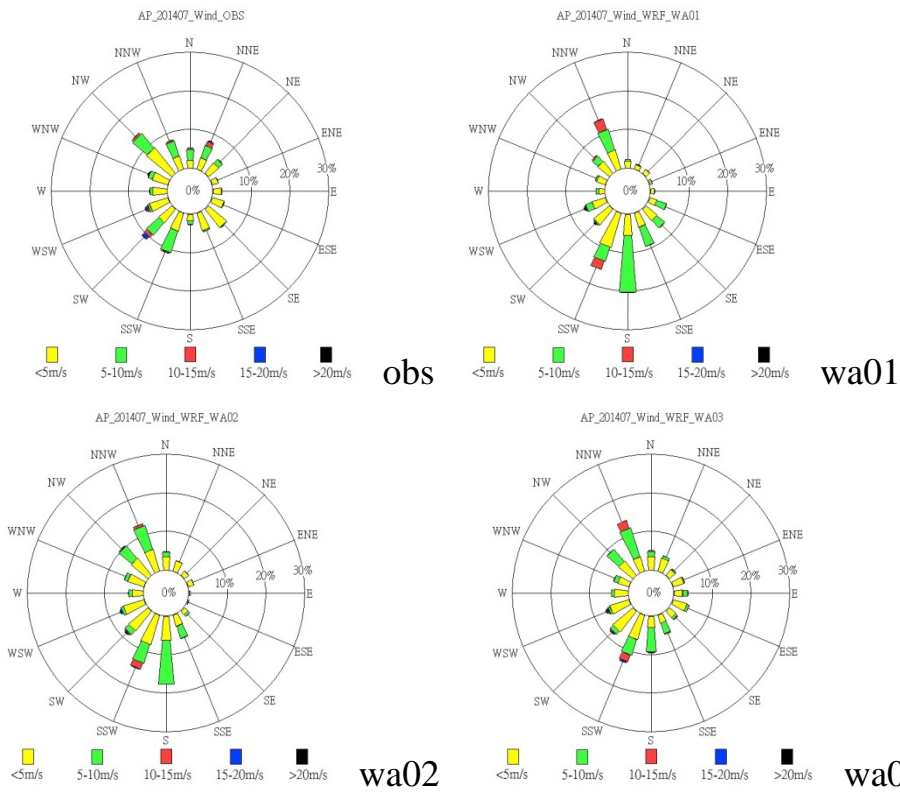


圖 3.24 安平港實測與預測(WRF\_WA01~WA03)7月風玫瑰圖

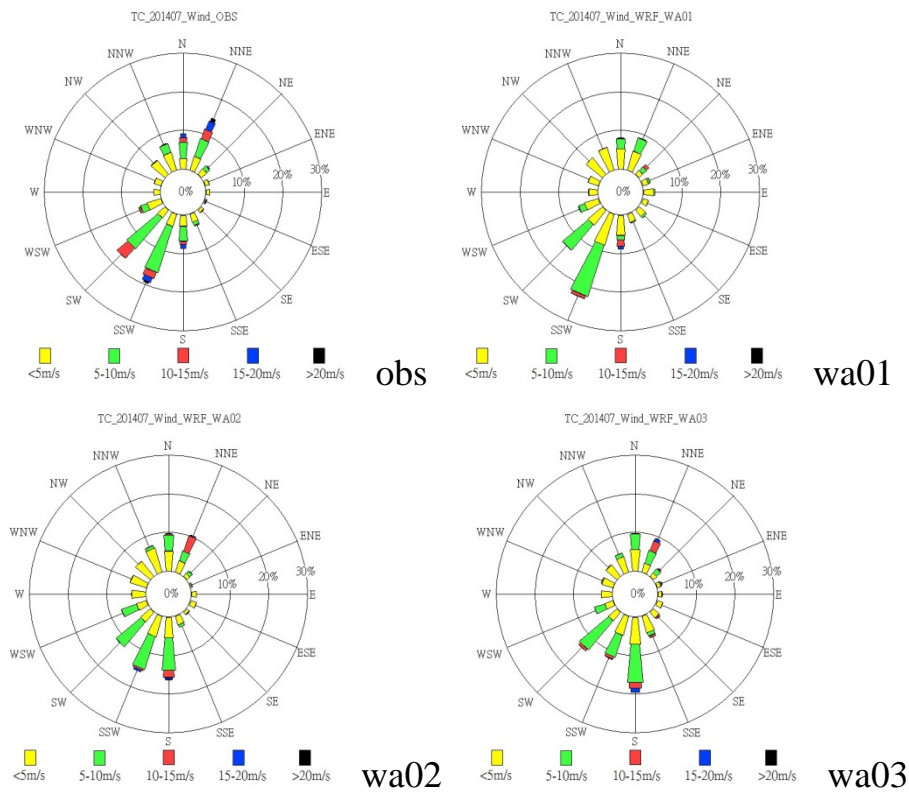


圖 3.25 臺中港實測與預測(WRF\_WA01~WA03)7月風玫瑰圖

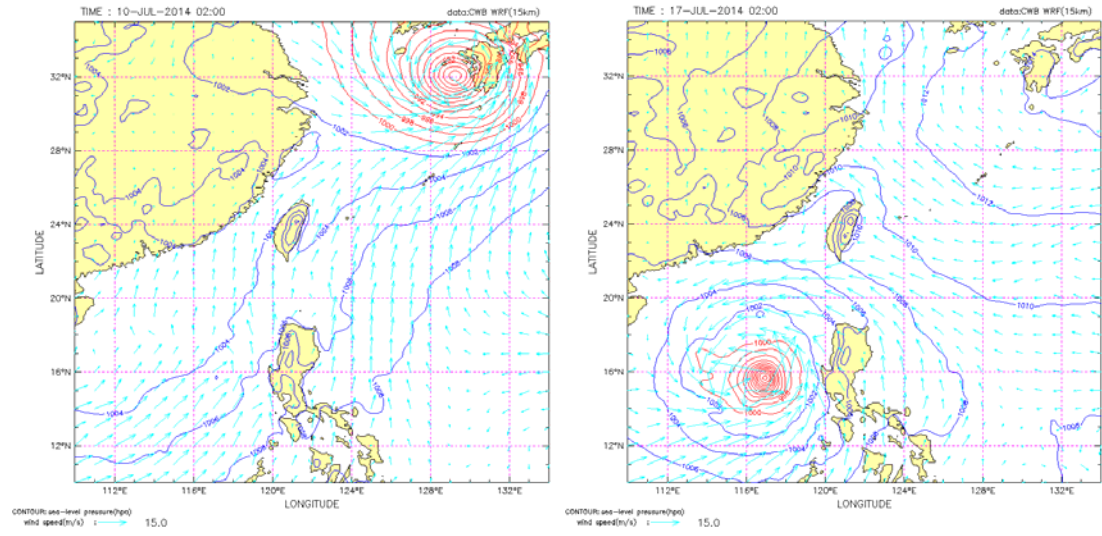


圖 3.26 2014 年 7 月 10 日 2 時及 17 日 02 時 WA02 風速風向分布圖

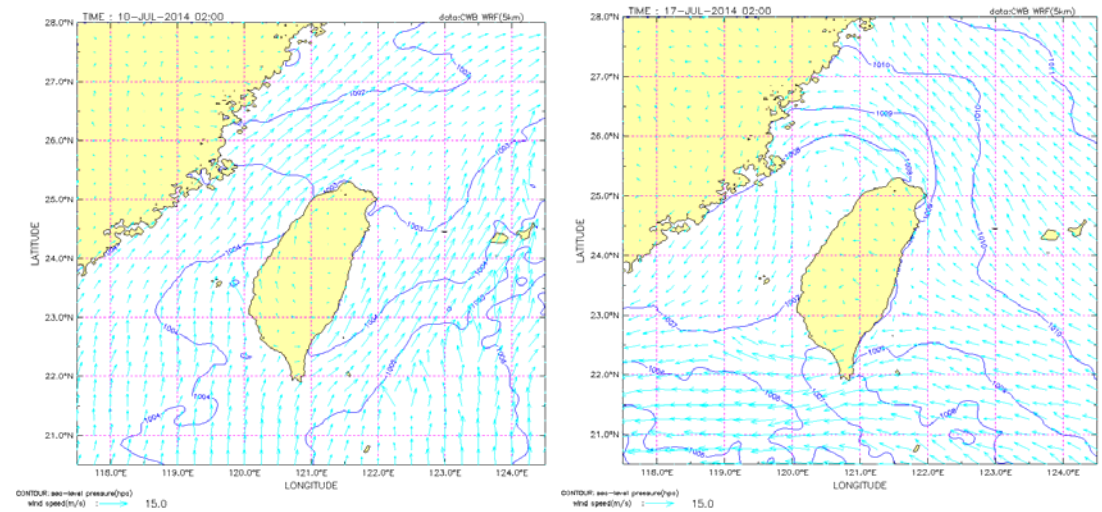


圖 3.27 2014 年 7 月 10 日 2 時及 17 日 02 時 WA03 風速風向分布圖



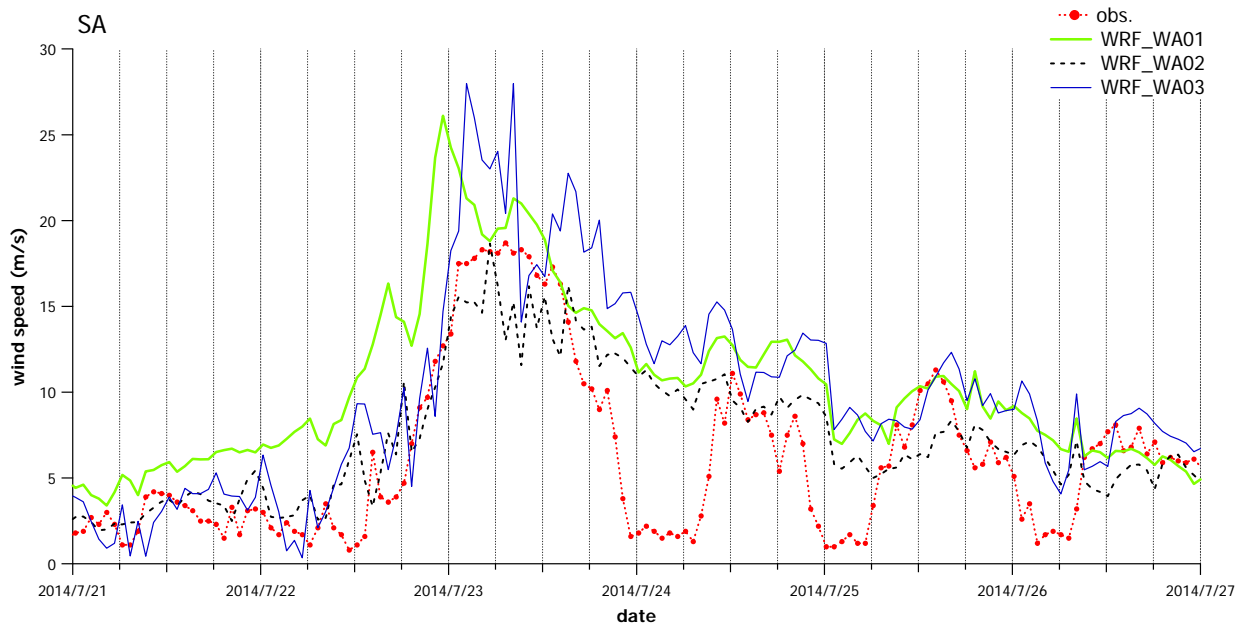


圖 3.28 蘇澳港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖

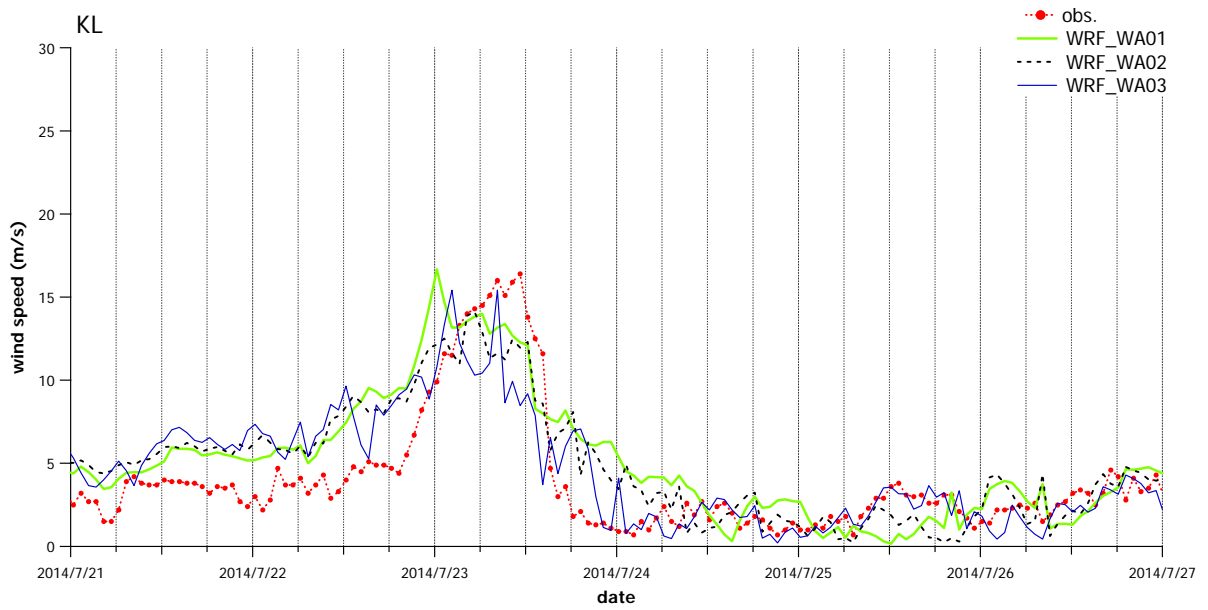


圖 3.29 基隆港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖

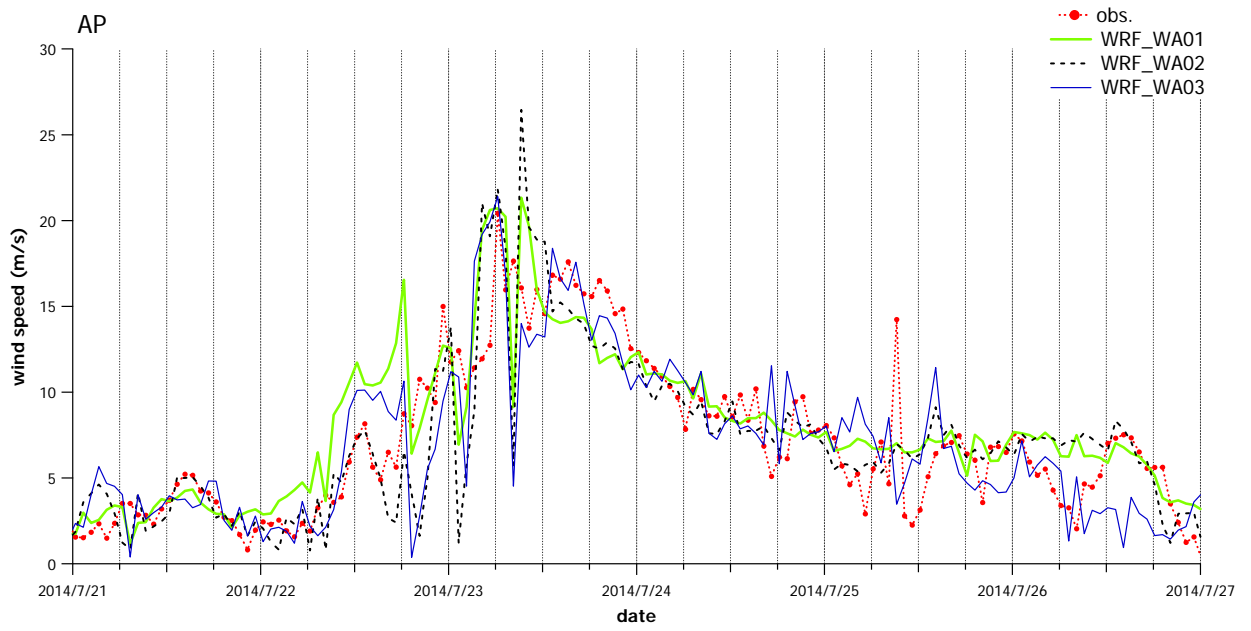


圖 3.30 安平港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖

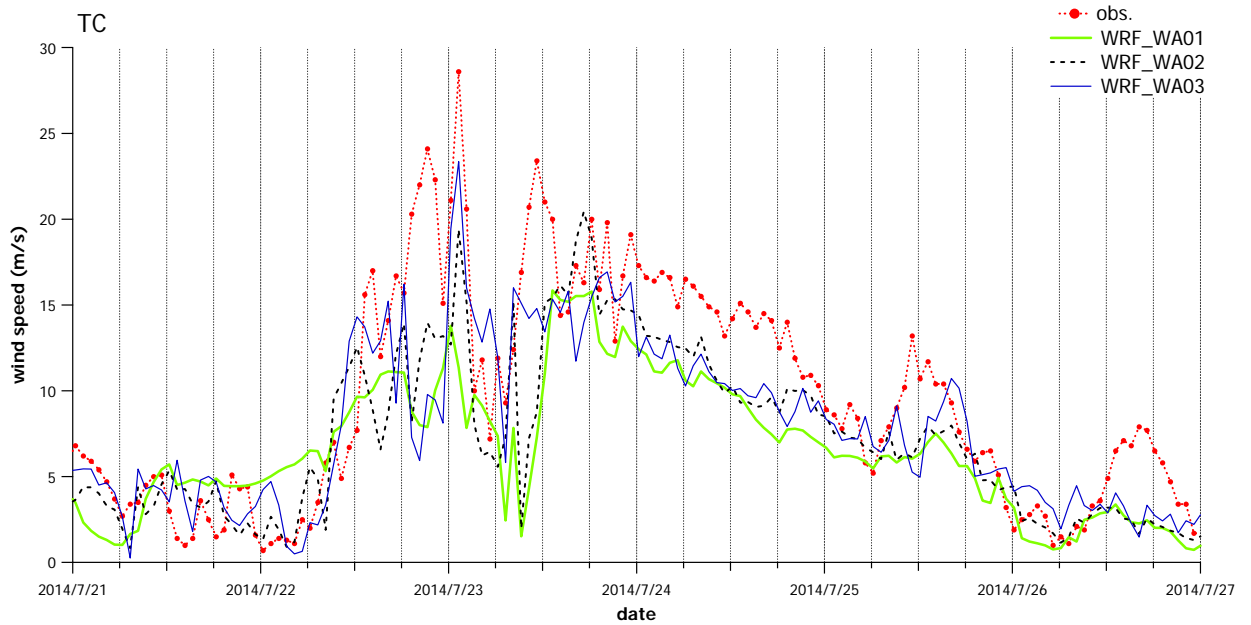


圖 3.31 臺中港實測與預測麥德姆颱風前後期間風速歷線圖



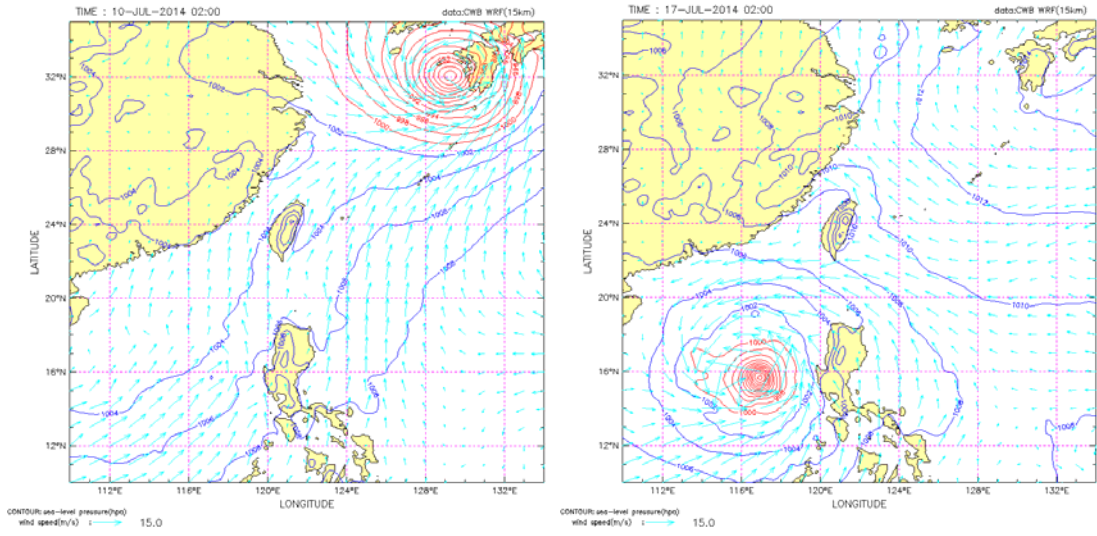


圖 3.30 2014 年 7 月 10 日 2 時及 17 日 02 時 WA02 風速風向分布圖

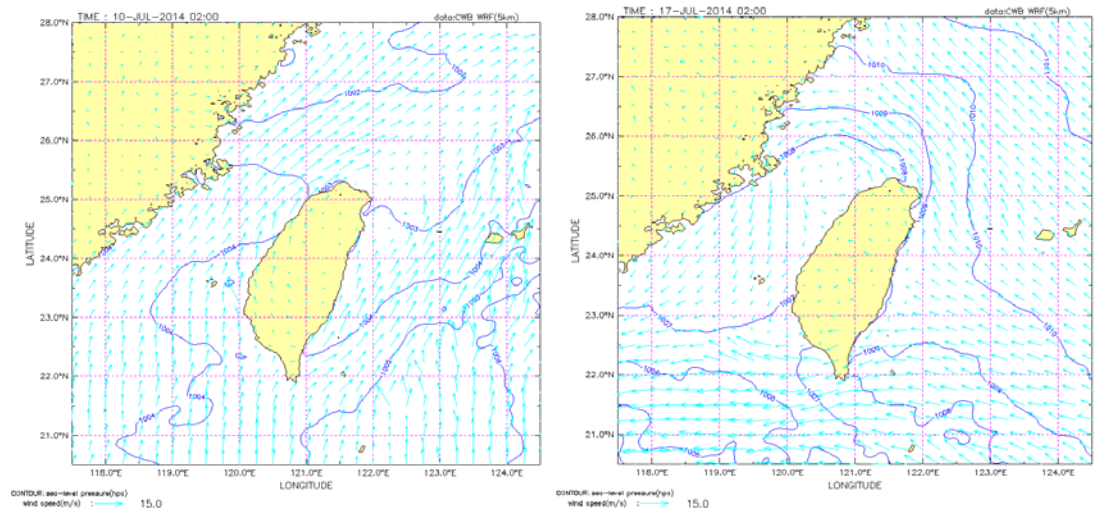


圖 3.31 2014 年 7 月 10 日 2 時及 17 日 02 時 WA03 風速風向分布圖



## 第四章 主要商港風浪及波浪場模擬研究

本章主要針對臺灣環島海象預報系統(TaiCOMS)風浪及波浪模擬改善研究成果進行說明。

### 4.1 臺灣周圍海域風浪模擬

在 TaiCOMS 波浪模擬架構下，針對臺灣周圍海域風浪模擬規劃出兩種不同尺度的風浪模組，分別為大尺度西太平洋範圍風浪模組(簡稱大尺度風浪模組)及中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組(簡稱中尺度風浪模組)；其中大尺度風浪模組模擬範圍含蓋西太平洋北緯 10 度至北緯 35 度，東經 110 度至 134 度之區域，數值計算網格採用解析度為 12 分之地球弧形網格(如圖 4.1 所示)；中尺度風浪模組之模擬範圍係以臺灣本島為中心，南起於北緯 21 度，往北至北緯 26 度，西向至東經 119 度，往東至東經 123 度，採用網格解析度 0.04 度(2.4 分)方格網格(如圖 4.2 所示)。

依據 TaiCOMS 風浪模擬預報作業化流程之規劃，如圖 4.3 所示，本計畫大尺度風浪模組在作業化上主要依據 TaiCOMS 風場模組所產生的 73 小時組合平面風場資料(NFS 第一層風場，簡稱 RC 風場)執行每日作業化模擬預報流程；並於大尺度風浪模組作業化模擬預報結束後，由中尺度風浪模組接續執行每日作業化近海風浪模擬預報，最後完成各主要港口小尺度波浪模組每日作業化風浪模擬預報。中尺度風浪模組輸入資料包括前述系統風場模組所產生的 73 小時組合平面風場資料(NFS 第二層風場，簡稱 MC 風場)及在開放邊界格點上由大尺度風浪模組所產生的逐時模擬預報風浪資料。

本四年期計畫風浪模擬具體改善研究成果綜整說明如下：

#### 4.1.1 大尺度西太平洋範圍風浪模組

本計畫大尺度風浪模組採用海洋波浪預測模式 WAM (Wave Modeling，參考附錄一所述)執行西太平洋範圍風浪模擬，由於 WAM

模式相當簡易且成熟，故常被用於大尺度的海洋風浪模擬。有關大尺度風浪模組之改善研究成果如下：

#### 1. 提升數值計算網格之精確性

(1)更新地形水深資料解析度：大尺度網格水深資料為原計畫採用美國國家地球物理資料中心(National Geophysical Data Center, NGDC)公布的全球 2 弧分格網數值地形資料(Etopo2)建置的，基於提昇地形水深資料解析度目的，本期計畫改以 NGDC 公布之全球 1 弧分格網數值地形資料(Etopo1)取代之，如圖 4.4 所示為本期計畫大尺度風浪模組之模擬範圍及地形水深分布情形。

(2)提升數值計算網格之精度：為提升數值計算網格之精度，本計畫同時以 6 分(或  $0.1^\circ$ )網格間距大小建置大尺度風浪模組之數值網格，藉以評估數值計算網格解析度對風浪模擬結果之影響，及作業化模擬預報之可行性及效益。在效益評估上，12 分及 6 分數值計算網格實際運算的海洋格點數目分別為 11180 及 44373，運算時間相差約為 4.3 倍；基於作業化系統負荷及模擬時效性考量，目前硬體設備對於提升數值計算網格精度之可行性低。

#### 2. 風浪模擬結果之改善研究：

針對數值模式 WAM 程式碼相關模擬功能進行模擬測試與研究，並提出修正的作業化程式碼，其中程式碼具體修正內容包括：

(1)釐清模式程式碼風速、風向及風應力相關定義：前期計畫原作業化程式碼因風速、風向及風應力相關定義未能釐清，致模擬結果常與觀測資料不一致。圖 4.5 及圖 4.6 所示分別為原作業化程式碼採用錯誤的風向及風應力計算定義之模擬結果與程式碼修正後模式之模擬結果，比較二者波高分布狀顯示作業化程式碼修正後之颱風波高分布較為合理。圖 4.7 及圖 4.8 所示分別為原作業化程式碼模擬之平均週期分布結果與程式碼修正後模式模擬之平均週期分布結果，其中圖 4.8 所示模擬波浪之去向與圖 4.6 所示風場之風向具有高度的一致性。

- (2)修正程式碼熱啟動輸出檔之輸出時間：原程式碼輸出熱啟動檔案之輸出時間為程式終止前，此與 TaiCOMS 作業化流程規劃採用第 24 小時計算結果為次日作業化模擬預報之熱啟動輸入資料有出入。圖 4.9 所示為 TaiCOMS 每日線上作業程式模擬時間示意圖。
- (3)修正程式碼模擬結果輸出內容：於程式碼中增加以零階動差與 2 階動差比值平方根定義風浪之平均週期  $T_{m02}$ (註：原程式僅提供以負一階動差計算之平均週期  $T_{-1}$ )，以及利用二次拋物線契合(fit)方法計算模擬風浪之譜峰週期  $T_p$ (註：原程式僅提供波譜頻率數上的譜峰週期)，以改善風浪模擬週期輸出結果與觀測資料間之誤差。模式風浪模擬之平均週期  $T_{-1}$  及  $T_{m02}$  與基隆港波浪觀測之平均週期比較結果，如圖 4.10 所示，顯示模式模擬之平均週期  $T_{m02}$  值與觀測資料輸出之平均週期較為接近，有效降低以往作業化成果評估高估現象。

### 3. 精進數值風場改善風浪模擬結果：

在數值預報風場改善方面，包括

- (1)以 MC 風場取代 RC 風場提升模式輸入風場精度：中央氣象局 NFS 風場之上層風場(即 RC 風場)其網格精度為 45 km，中層風場(即 MC 風場)其網格精度為 15 km；前者為本計畫大尺度風浪模組作業化模擬預報輸入風場，後者為中尺度風浪模組作業化模擬預報輸入風場；由於在颱風期間中央氣象局預報之 RC 及 MC 風場具有顯著差異，經由模擬測試結果顯示，在颱風接近臺灣本島時二風場模擬結果具有顯著差異，因此建議以 MC 風場取代現行以 RC 風場為大尺度風浪模組作業化模擬預報輸入風場。
- (2)提升作業化風場為中央氣象局第四代天氣預報模式預報數值風場：NFS 數值風場及 WRF 數值風場分別為中央氣象局發展的第三代及第四代天氣預報模式所預報的數值風場，本年度因中央氣象局停止提供 NFS 數值風場措施，故以中央氣象局提供的 WRF 數值風場之第二層風場(即 WA02 風場)作為本計畫西太平洋範圍風浪模組作業化模擬之輸入風場(詳見第三章所述)。

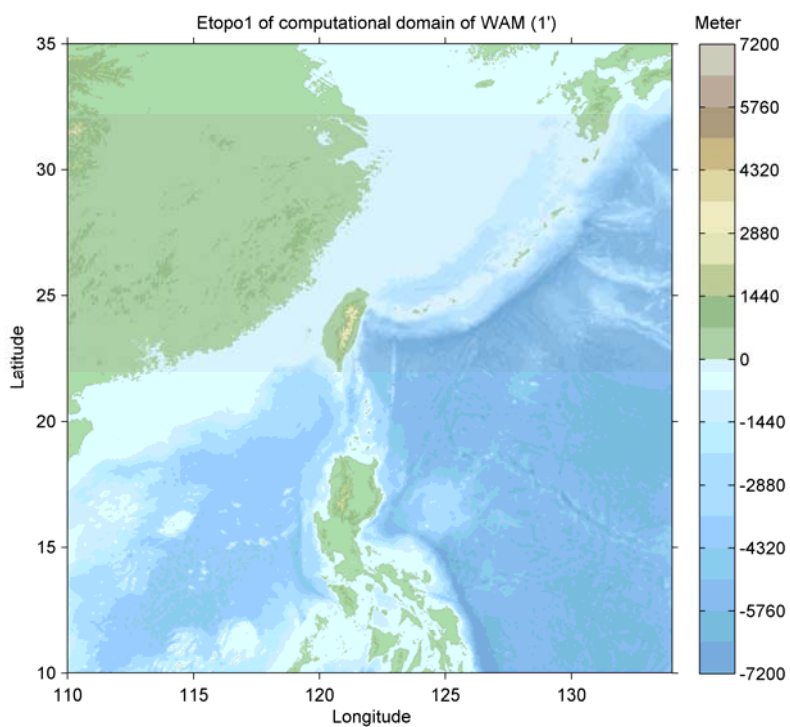


圖 4.1 大尺度西太平洋範圍風浪模組模擬範圍及水深分布圖

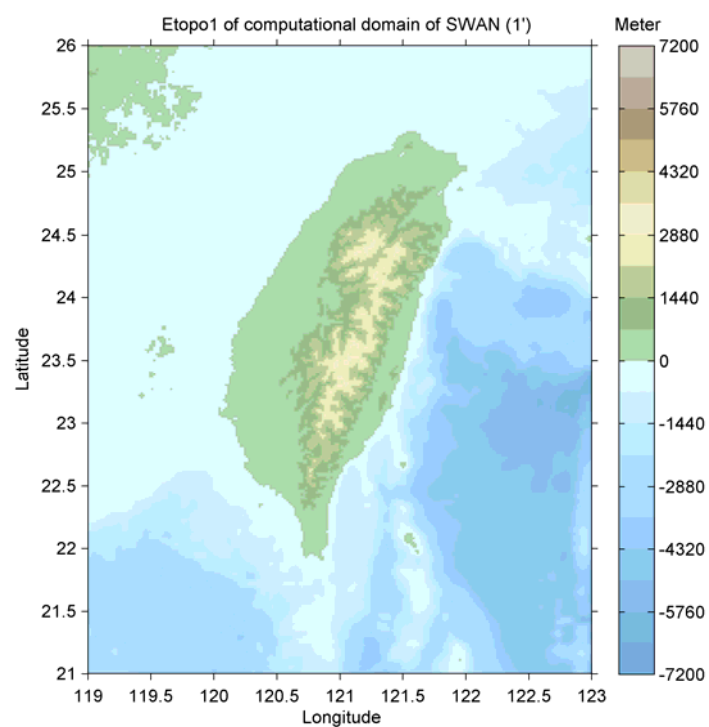


圖 4.2 中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組模擬範圍與水深分布圖

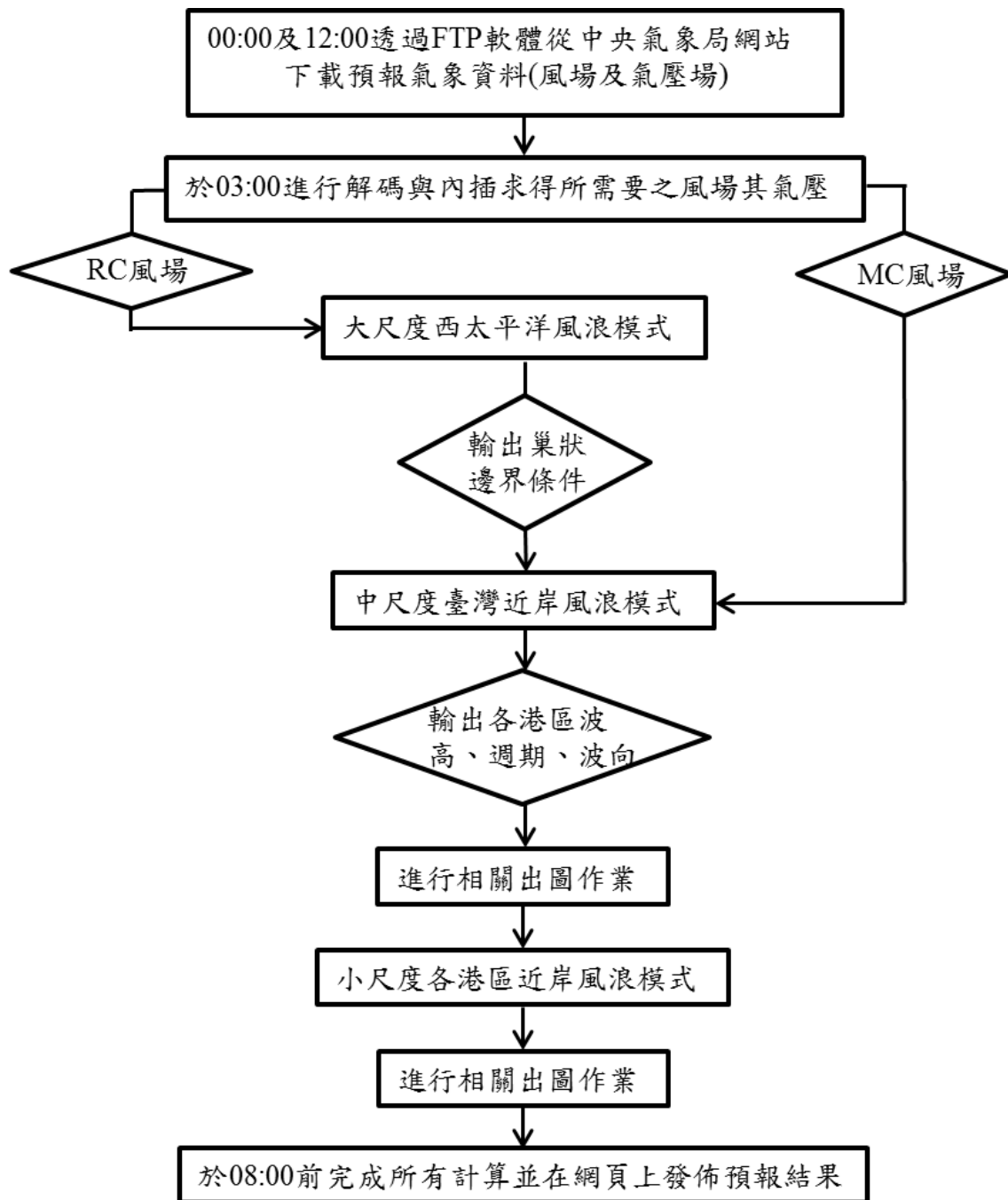


圖 4.3 TaiCOMS 架構下風浪作業化模擬預報流程圖

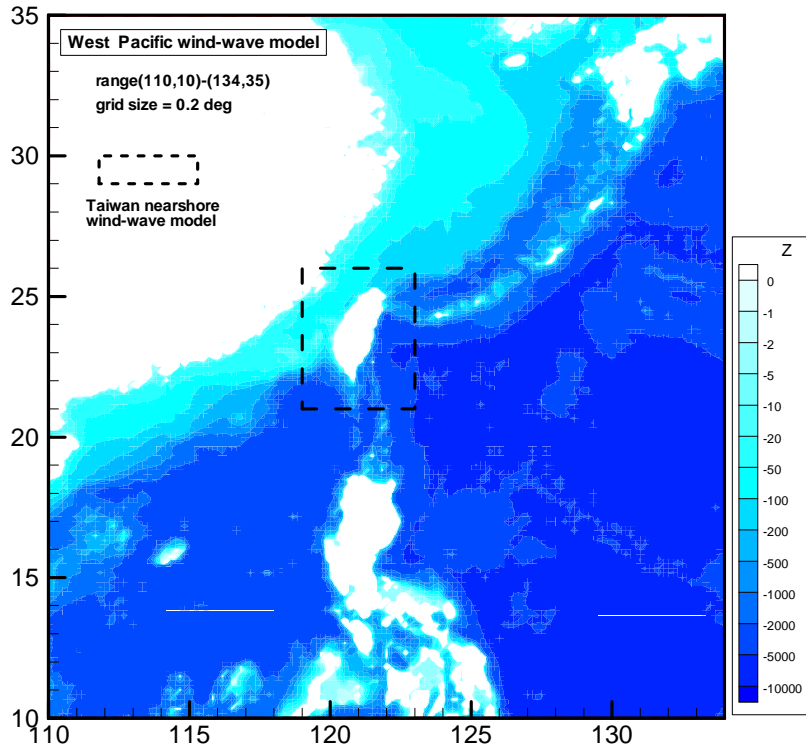


圖 4.4 大尺度西太平洋範圍風浪模組模擬範圍及更新後水深分布圖

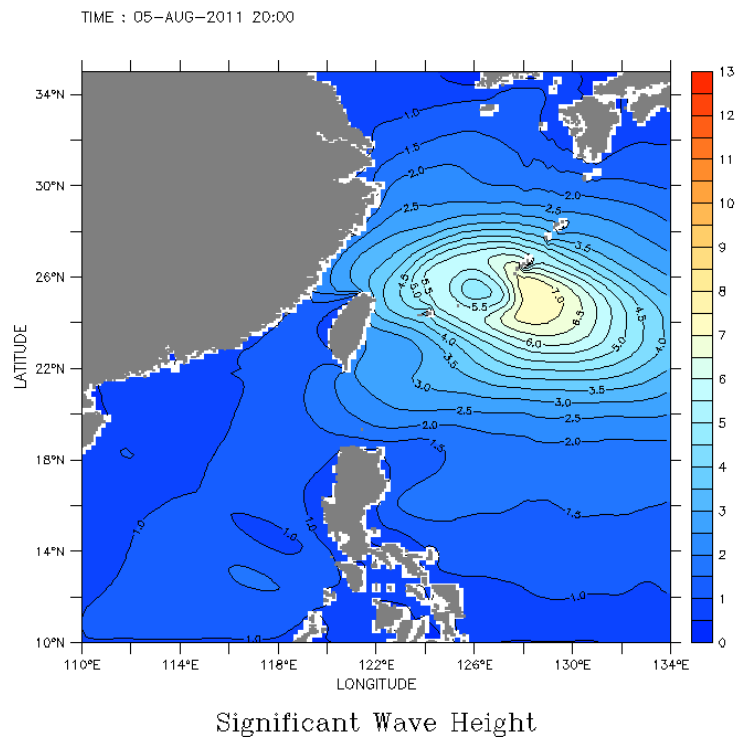


圖 4.5 原作業化程式碼模擬颱風期間之波高分布情況圖



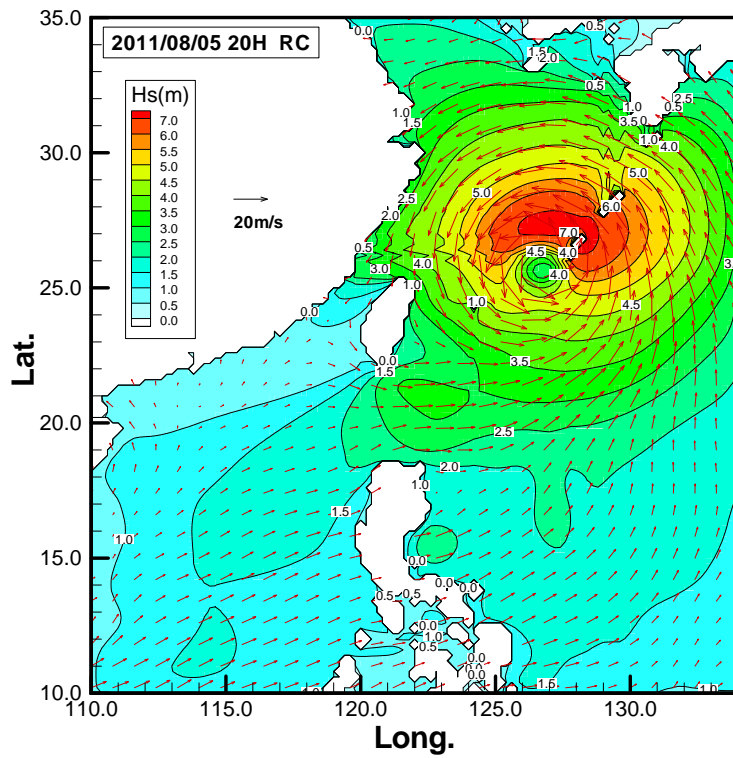


圖 4.6 本計畫作業化程式碼修正後模擬颱風期間之波高分布情況圖  
(向量為作業化 RC 風場之風速)

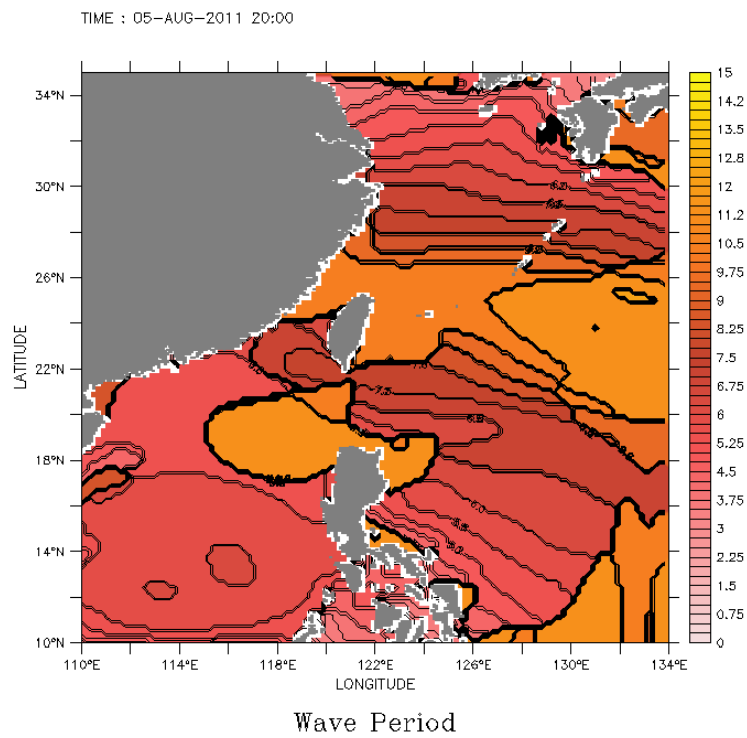


圖 4.7 原作業化程式碼模擬颱風期間之平均週期分布圖

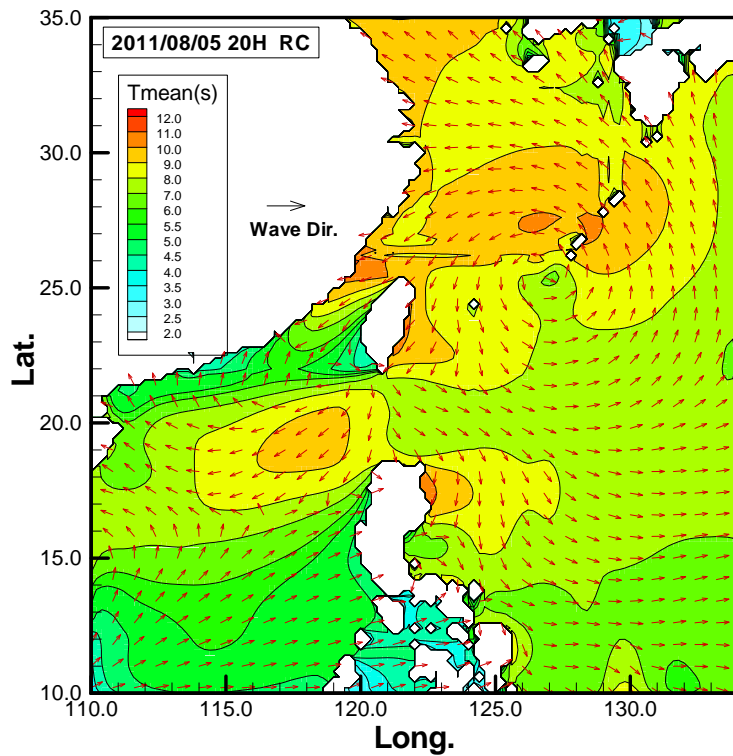


圖 4.8 本計畫作業化程式碼修正後模擬颱風期間之平均週期分布圖  
(向量代表模式模擬之風浪去向)

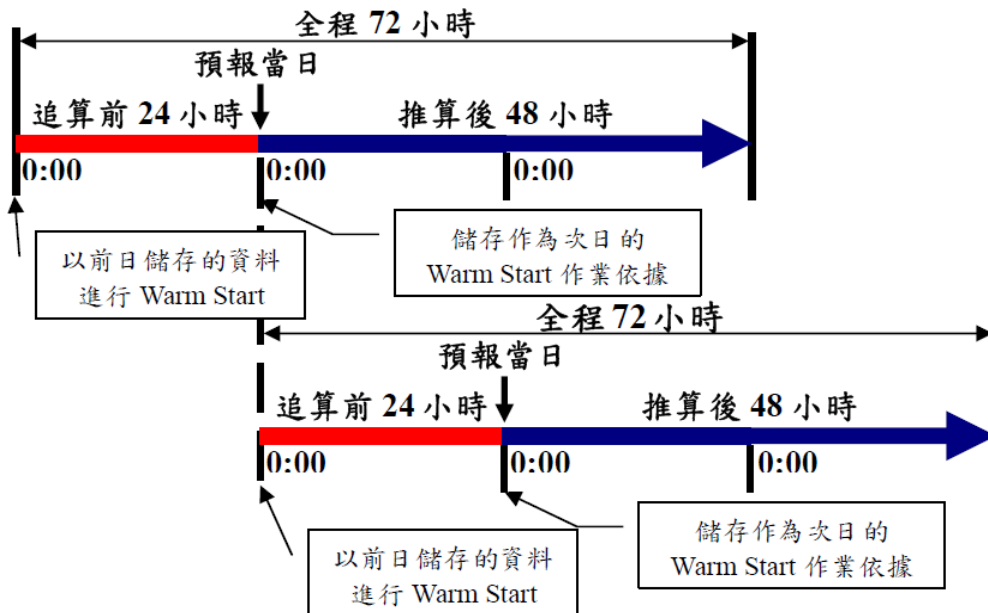


圖 4.9 TaiCOMS 每日線上作業程式模擬時間示意圖

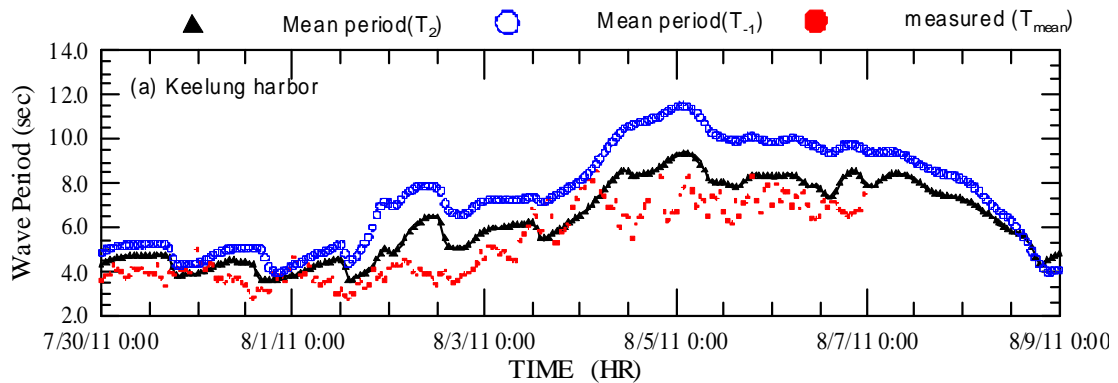


圖 4.10 模式風浪模擬之平均週期  $T_{-1}$ (圓圈)及  $T_{m02}$ (三角形)與觀測波浪平均週期(圓點)之比較

#### 4.1.2 中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組

本計畫中尺度風浪模組採用荷蘭 Delft 大學所發展之近海風浪模式 SWAN (Simulating Waves Nearshore) 為作業化程式(參考附錄一所述)，亦即透過 SWAN 模式執行臺灣周圍近海範圍風浪模擬。本期計畫針對中尺度風浪模組改善之研究成果如下：

##### 1. 提升數值計算網格之精確性

(1) 擴大風浪模擬範圍：本期計畫因應離島航運日顯重要，預期離島船舶航程之安全將為交通部未來議題之一，因此本期計畫配合港研中心需求，將中尺度風浪模組擴大至含蓋金門與馬祖等離島地區及海域，如圖 4.11 所示，圖中修正後中尺度風浪模組模擬範圍為東經  $117^{\circ}\text{E}\sim 123^{\circ}\text{E}$  及北緯  $21^{\circ}\text{N}\sim 27^{\circ}\text{N}$  之海域。

(2) 提昇地形水深資料解析度：同樣基於提昇地形水深資料解析度之目的，本期計畫改以 NGDC 公布之全球 1 弧分格網數值地形資料 (Etopo1)，取代 2 弧分格網數值地形資料(Etopo2)更新資料。圖 4.12 所示為原中尺度風浪模組地形水深資料更新前、後之差值分布情形，顯示兩版本數值地形誤差大的區域，主要在臺灣周圍海域東側與南側之海溝區內。由於該處水深均相當大，惟對本計畫模擬之風浪而言，其影響應可以忽略。

##### 2. 風浪模擬系統軟硬體提升

(1)更新作業化程式版本及硬體：由於近海風浪模式 SWAN (Simulating WAves Nearshore)程式碼仍持續地發展及更新中；因此本期計畫配合港研中心 TaiCOMS 之主機伺服器更新計畫，同步更新作業化程式版本。

(2)提昇作業化風浪模擬效率：配合港研中心 TaiCOMS 之主機伺服器更新計畫，利用模式多核心運算功能提升中尺度風浪作業化模擬之效率，達到縮短模擬預報作業化時間及計畫精進目標。圖 4.13 所示為目前採用多核心運算測試模式運算時間之結果。顯示採用多核心運算方式執行本計畫臺灣周圍近海範圍風浪模擬所需時間在 cpu 數達 12 顆以後即不再減少而呈現增加之現象。另由模擬時間曲線之變化得知當 cpu 數達 8 顆以後，模式模擬時間縮短之趨勢明顯趨緩，多核心運算之效益顯著降低。

### 3. 精進數值風場改善風浪模擬結果：

為提升作業化風場預報資料精確性，本期計畫自 2013 年著手規劃以中央氣象局第四代天氣預報模式(WRF)預報數值風場取代原 NFS 數值風場之相關作業研究，並自本年度(2014 年)5 月正式上線。其中中尺度風浪模組採用的作業化預報風場為解析度 5 km 之 WA03 風場，即藉由精進的數值預報風場資料達到提昇風浪預報準確性之目的。

#### 4.1.3 風浪模擬結果改善評估

為瞭解(說明)本期計畫對風浪模擬結果改善之具體成果，本節以大尺度風浪模組為例，分別針對基隆港等主要商港評估風浪模組改善前、後風浪模擬結果與觀測資料間之差異。本計畫選取 2012 年 7 月至 9 月期間改善前 TaiCOMS 作業化預報模擬資料、各港波浪作業化評估之觀測資料及本計畫風浪模組改善後模擬資料進行誤差分析。

在誤差分析方面，本計畫針對逐時資料分別採用絕對誤差值及相對誤差作為評估指標，各港口風浪模擬結果之絕對誤差及相對誤差分析結果，分別如圖 4.14 所示及圖 4.15 所示，圖中相對誤差分析為模擬值減去觀測值，其中臺中港因 2012 年 7 月觀測資料數偏低改採用 2012

年 9 月模擬值與觀測資料。本計畫同時以月為單位分析模擬值與觀測值間誤差之標準偏差(SD)如圖 4.16 所示，以及模擬值與觀測值間相關係數之分析結果如圖 4.17 所示。由各港誤差分析資料之時序變化得知，本計畫風浪模擬改善研究成果雖仍無法確保模擬過程所有的模擬預測值均可獲得較小的誤差結果；惟整體而言，相關誤差分析結果仍可呈現出本期計畫修正之風浪模組模擬結果與觀測值較為接近之具體改善成果。

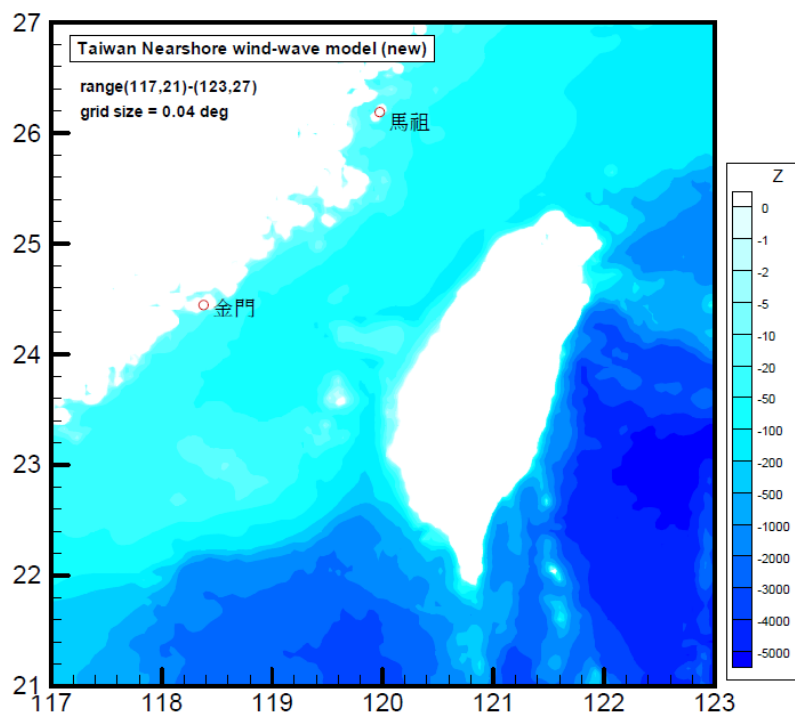


圖 4.11 中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組更新後模擬範圍及地形水深分布圖

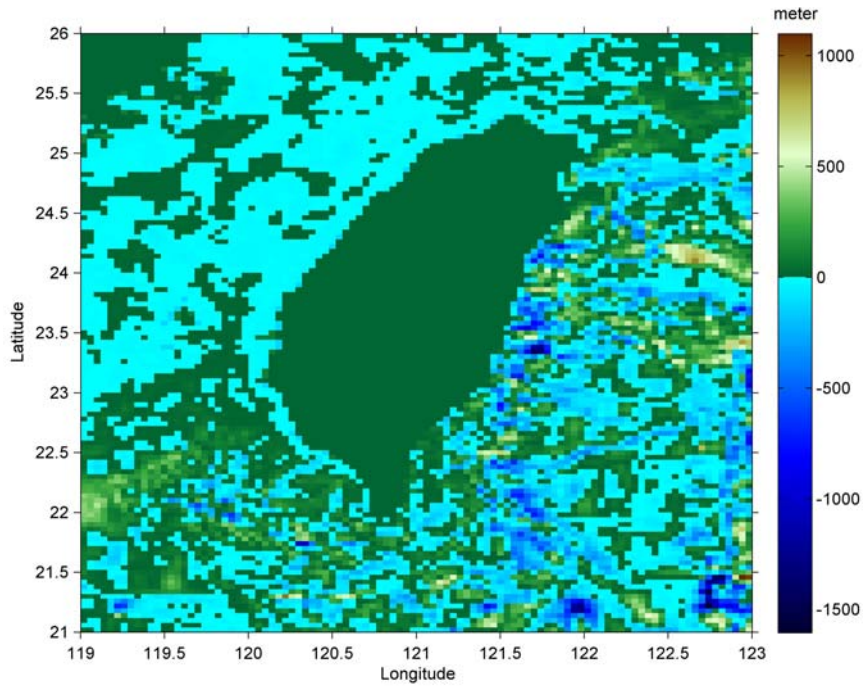


圖 4.12 中尺度臺灣周圍近海範圍風浪模組原模擬範圍之地形水深資料更新前後之差異分布圖

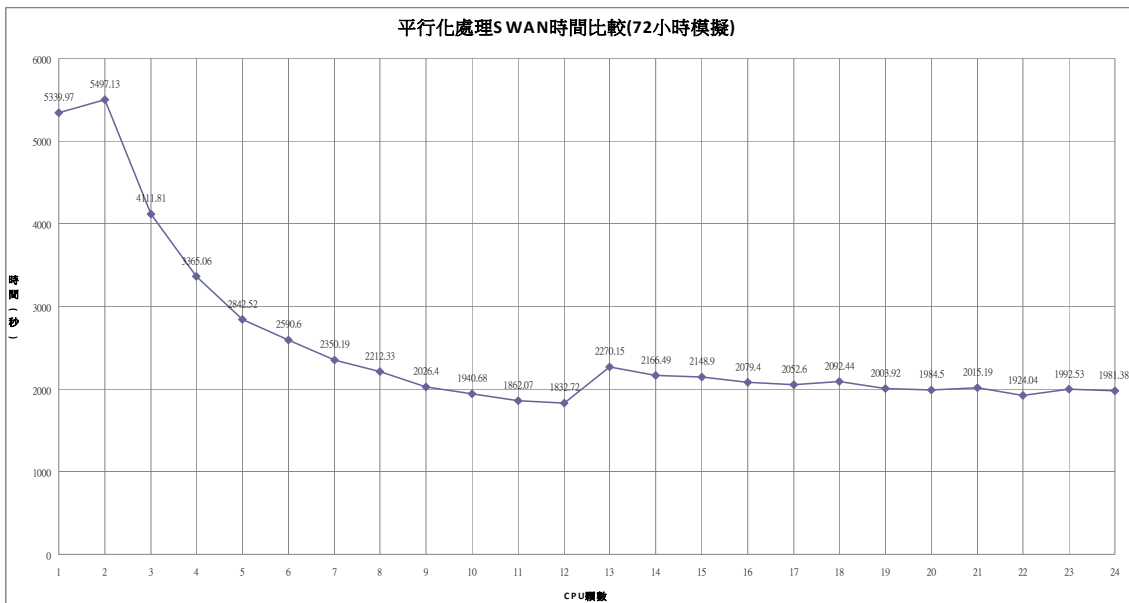


圖 4.13 平行化處理 SWAN 時間比較(72 小時模擬)

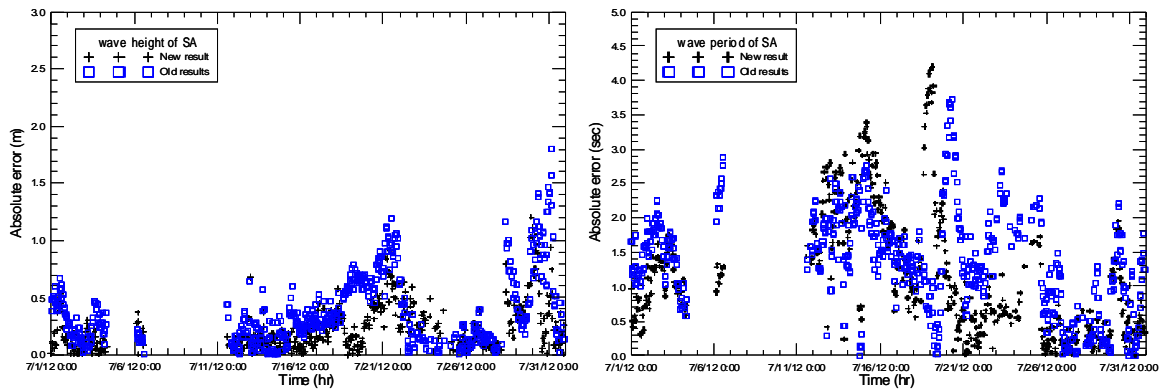


圖 4.14a 蘇澳港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差時序變化圖

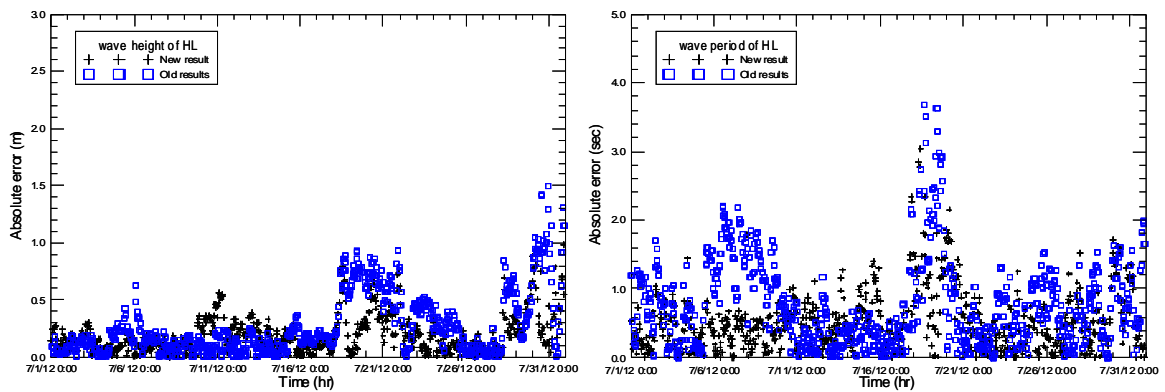


圖 4.14b 花蓮港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差時序變化圖

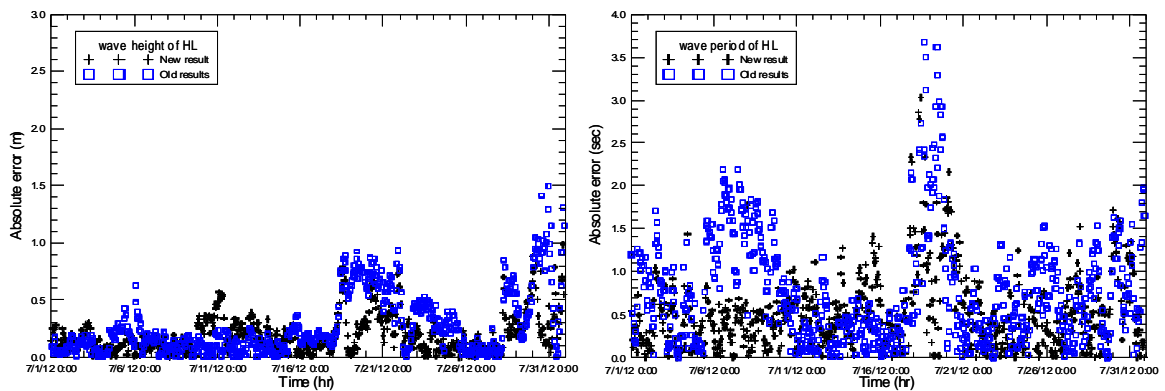


圖 4.14c 基隆港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差時序變化圖



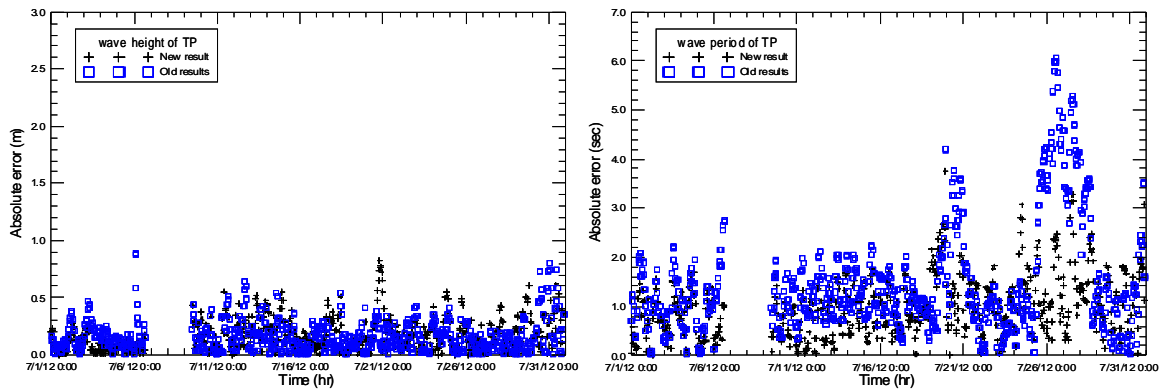


圖 4.14d 臺北港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差分析結果

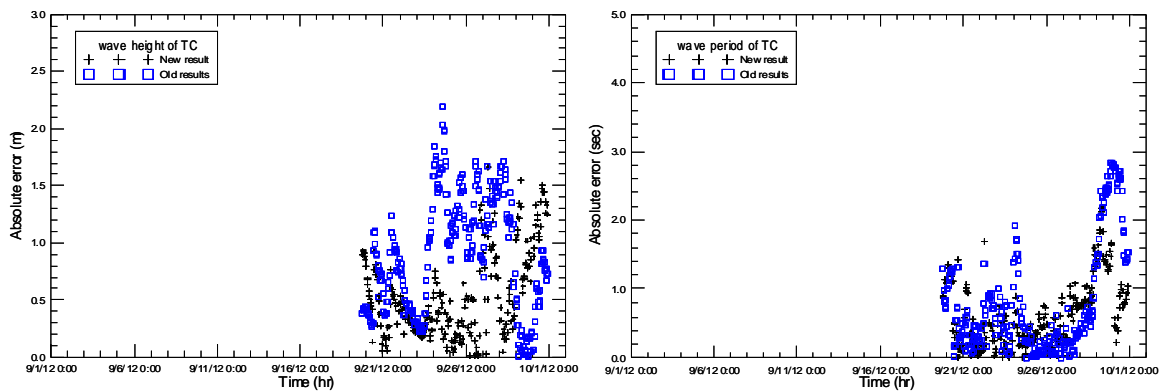


圖 4.14e 臺中港 2012 年 9 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差時序變化圖

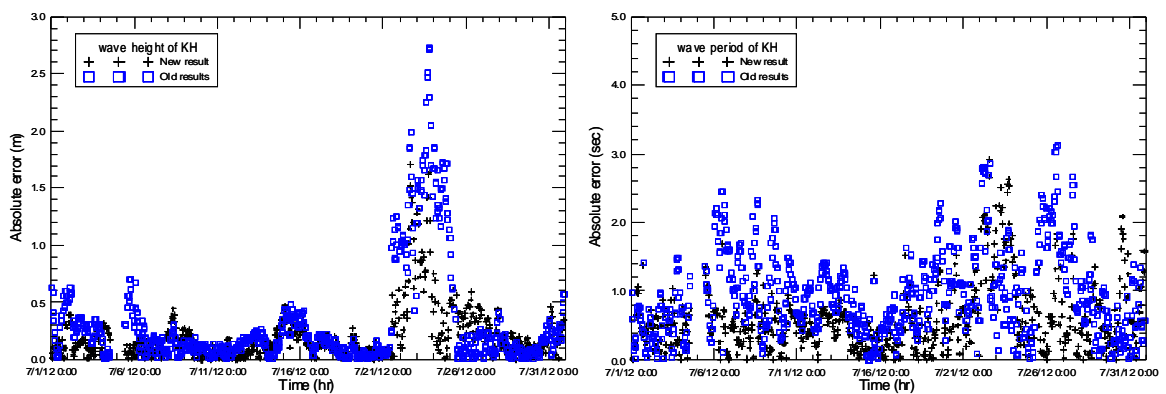


圖 4.14f 高雄港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差時序變化圖



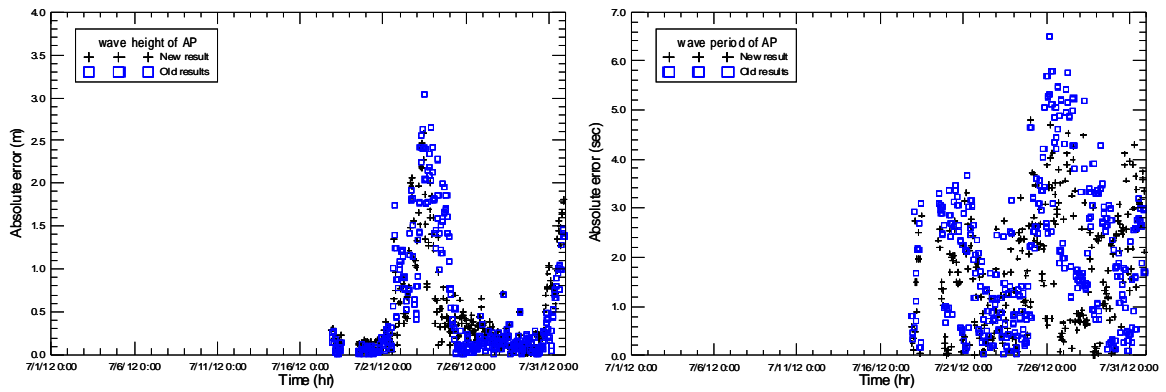


圖 4.14g 安平港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之絕對誤差時序變化圖

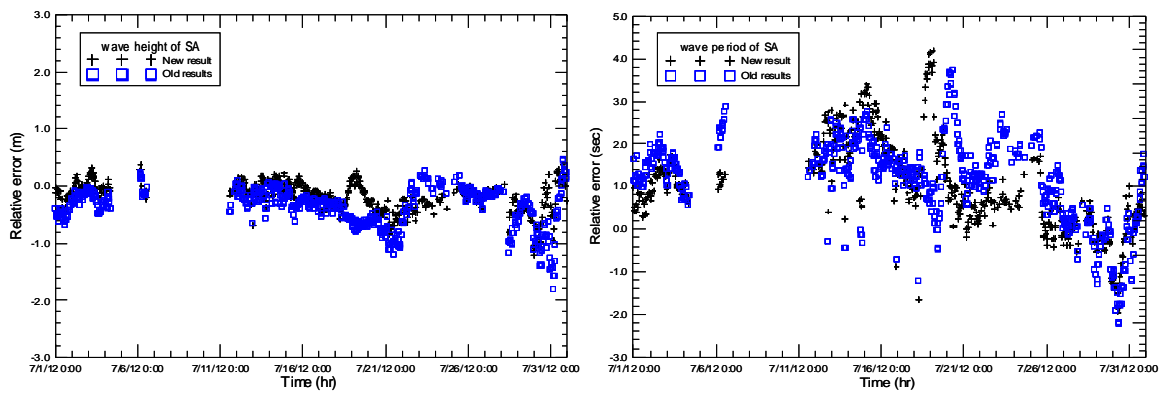


圖 4.15a 蘇澳港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

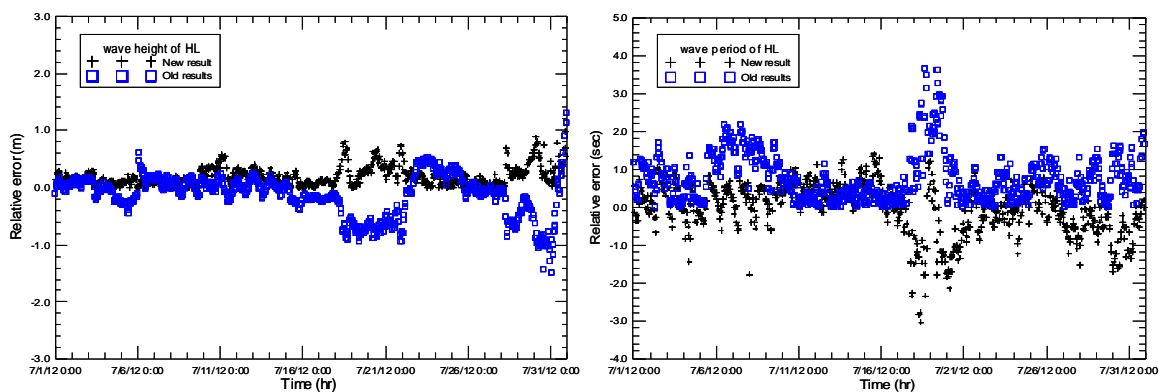


圖 4.15b 花蓮港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

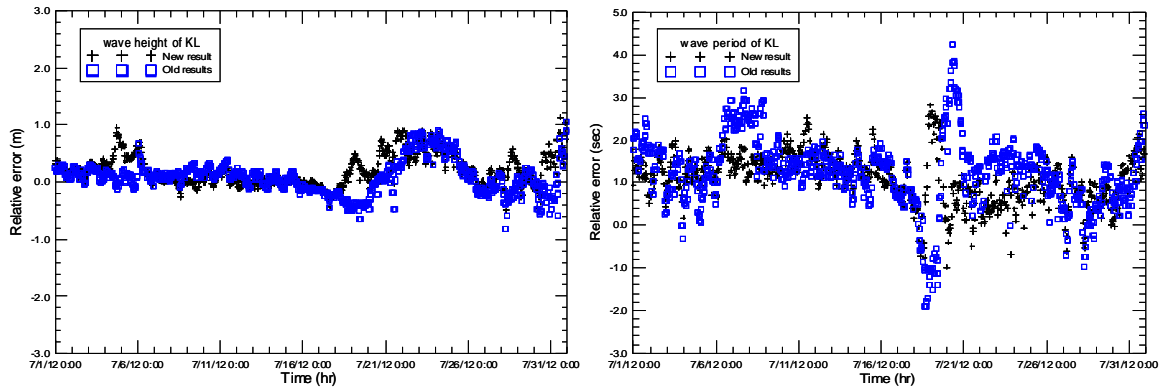


圖 4.15c 基隆港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

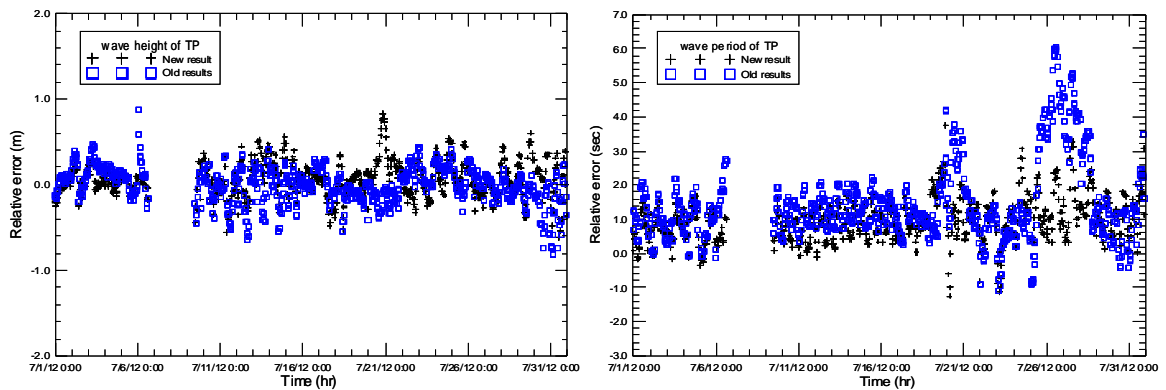


圖 4.15d 臺北港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

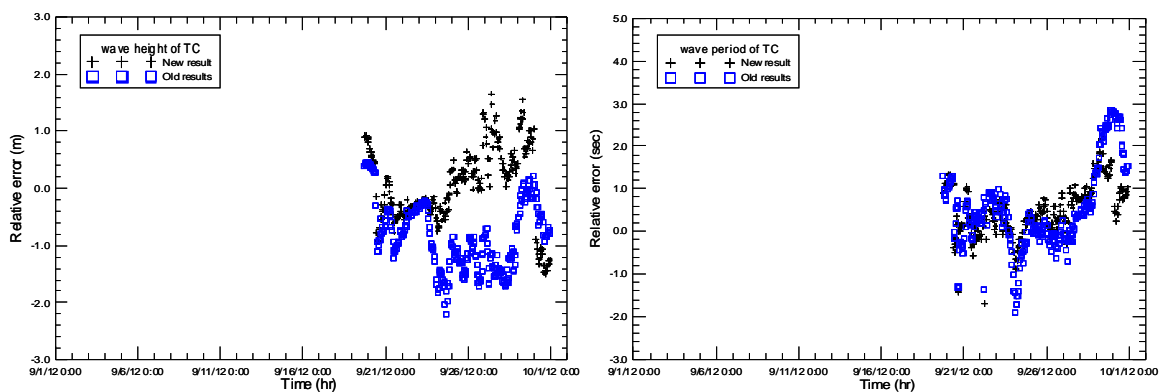


圖 4.15e 臺中港 2012 年 9 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

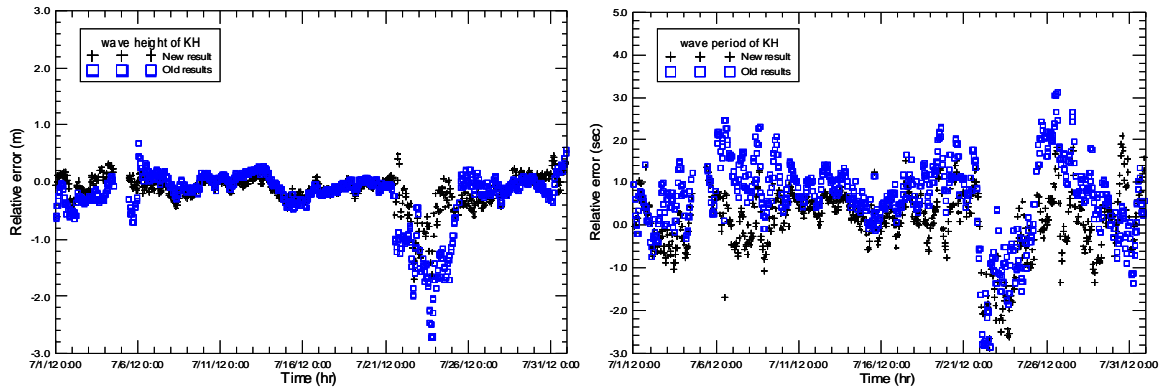


圖 4.15f 高雄港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

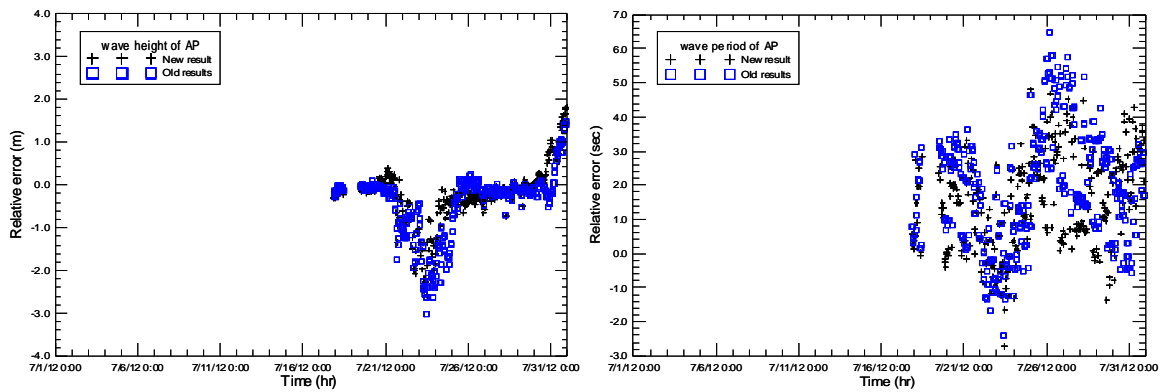


圖 4.15g 安平港 2012 年 7 月作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料之相對誤差時序變化圖

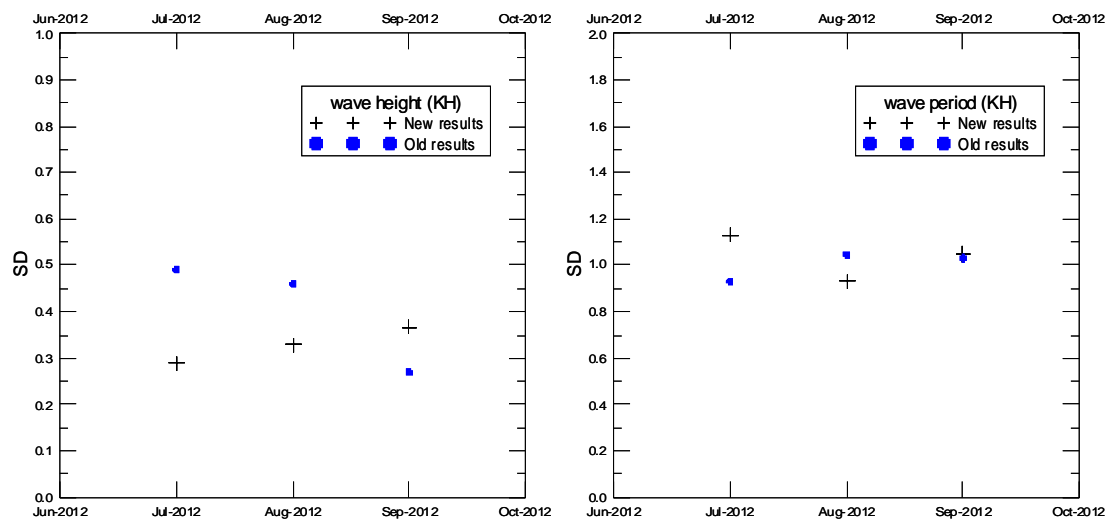


圖 4.16 高雄港作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料間標準偏差之月變化圖

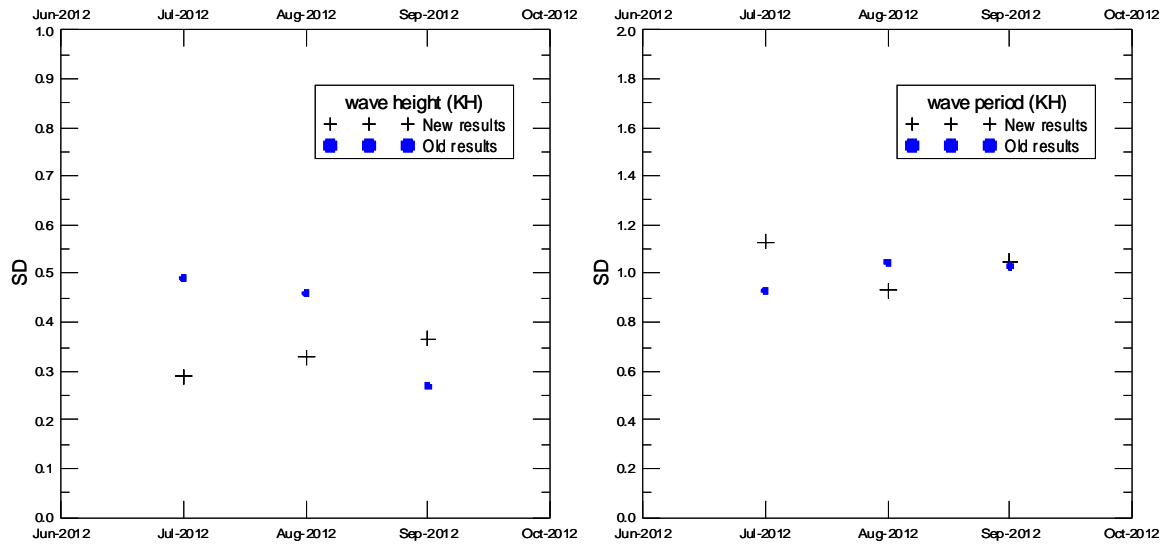


圖 4.17 高雄港作業化風浪模擬逐時資料(波高、週期)與觀測資料間相關係數之月變化圖

## 4.2 主要商港小尺度港區近岸波浪場模擬

在 TaiCOMS 波浪模擬架構下，波浪場模擬主要針對國內主要商港基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、安平港、高雄港及布袋港等八個港口，分別建置小尺度港區近岸波浪模組(簡稱小尺度波浪模組)，執行作業化模擬預報各港口外海近岸波浪場。目的為接續中尺度風浪模組模擬結果，分別針對各主要港口近岸海域模擬外海風浪向岸傳播之波場(波高及波向)變化情形，以提供港勤或船舶較詳細的波浪分布資訊，維護船舶進港安全。有關主要商港小尺度波浪模組之作業化模擬預報流程，如圖 4.3 所示，亦即每日小尺度波浪場作業化模擬係依據中尺度風浪模組每日作業化模擬預報之各港口風浪資料(含波高、週期及波向等)執行 73 小時之港區近岸波浪場模擬，並將波浪場模擬結果提供港灣資訊網展示。

小尺度波浪模組作業化程式為 Kirby 及 Dalrymple (1983)發展的波浪折繞射模式(REF/DIF 1)，此模式係以拋物線型緩坡方程式為理論基礎(參考附錄一所述)；REF/DIF 1 模式主要優點包括：(1)模式下游端之邊界條件不再是必要的，(2)具有高度數值運算效率；缺點有：(1)模式受到垂直波向之橫向導數近似表示式之限制，對於大角度入射波浪較不適用；(2)無法合理地反應波浪受到結構物影響產生的反射波現象等。各港口小尺度波浪模組建置的數值計算參考網格，主要依據各港口港域大小及海岸地形水深變化狀況選取其模擬範圍，各港口數值計算參考網格之基本資料，如表 4.1 所列。

依據四年期計畫期程規劃逐年針對基隆港及臺北港(100 年度)、臺中港及布袋港(101 年度)、安平港及高雄港(102 年度)、蘇澳港及花蓮港(103 年度)分別完成作業系統小尺度波浪模組更新與研究。因此本年度(103 年度)主要研究對象為蘇澳港及花蓮港，工作內容除了更新蘇澳港及花蓮港小尺度波浪模組之參考網格基本資料外，亦配合港研中心進行 TaiCOMS 小尺度波浪模組作業化流程更新，例如以中尺度風浪模組模擬風浪之譜峰週期( $T_p$ )取代風浪之平均週期( $T_m$ )，模擬各港口小尺度

波浪場等精進，以改善模擬風浪平均週期( $T_m$ )偏小對 TaiCOMS 作業化模擬成果之影響等。

**表 4.1 主要商港港區近岸波浪模組之數值參考網格基本資料**

港口 名稱	原點座標(tw97 二度分帶)		座標系統 旋轉角度	網格大小 (10m)
	X(m)	Y(m)		
基隆港	322539.0	2787360.0	256.0°	621× 731
台北港	278577.0	2784690.0	-55.0°	801×1301
台中港	198113.0	2696163.0	-36.0°	1001×1901
布袋港	150038.7	2579393.8	11.00°	1601× 901
安平港	160526.8	2531091.8	31.44°	1401×1041
高雄港	177877.0	2487555.0	38.0°	801×1701
蘇澳港	342011.8	2725729.3	185.00°	601× 801
花蓮港	316892.0	2655232.0	150.0°	321× 801

以下僅就本期計畫主要商港小尺度港區近岸波浪模組研究結果整理如下；

#### 4.2.1 基隆港小尺度港區近岸波浪模組

基隆港小尺度波浪模組之波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.18 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 7.3km，離岸方向(X 軸)之距離為 6.2km，外海邊界水深約介於 50m~60m 間。波浪場模擬使用的參考網格座標原點座標(TW67)為(322539.0, 2787360.0)，網格座標 Y 軸與方位正北之逆時針方向夾角 256.0°；參考網格間距為 10 m，網格維度(大小)為 621×731。

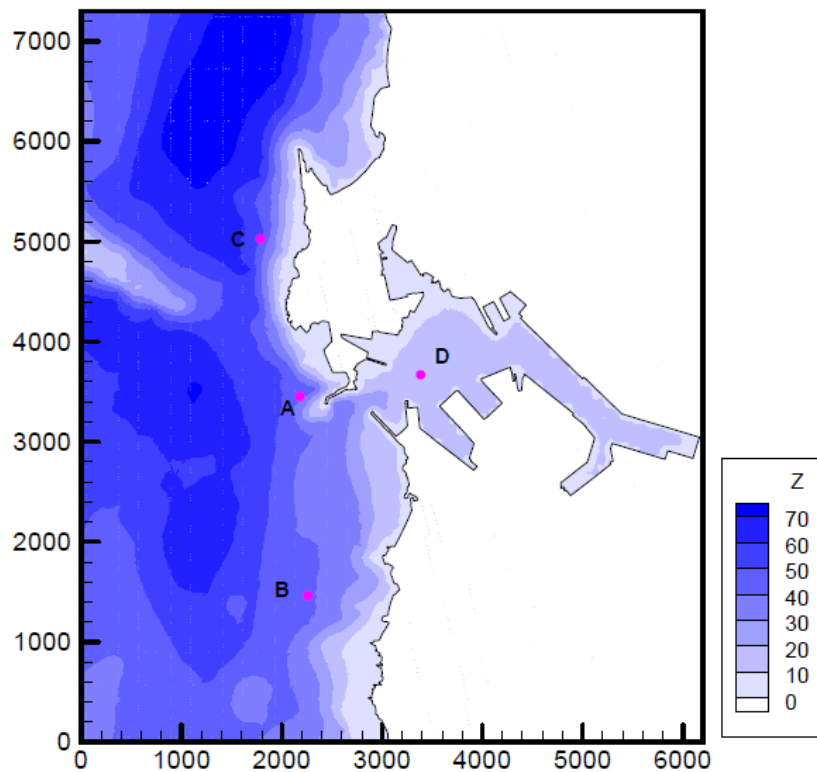


圖 4.18 基隆港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

本期計畫 100 年度針對基隆港小尺度波浪模組研究成果包括配合基隆港東防波堤延伸工程及西 18、19 號貨櫃碼頭延建暨後線場地填建工程完工，分別修正小尺度波浪模組參考網格之東防波堤延長 200 公尺至水深 42 m 處，及港內西 18、19 號貨櫃碼頭附近參考網格相關資料。同時配合港研中心海象觀測位置東移，如圖 4.18 之點位 A，校驗模式邊界波高模擬條件與觀測資料波高之關係。

#### 4.2.2 臺北港小尺度港區近岸波浪模組

臺北港小尺度波浪模組之波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.19 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 13.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 8.0 km，外海邊界水深約介於 30m~35m 間。本期計畫臺北港小尺度波浪模組更新參考網格之維度(大小)、網格間距及網格座標與二度分帶座標系統(TW97)之關係，如表 4.1 所列。

100 年度本期計畫針對臺北港小尺度波浪模組更新內容包括：(1)修正參考網格中臺北港外廓邊界，如圖 4.19 所示；(2)更新臺北港港區

水深資料(99 年 10 月)，(3)配合臺北港海象觀測位置遷移，如圖 4.15 所示之輸出點位 A，校驗模式邊界模擬條件與波浪觀測資料間之關係，如圖 4.20 及圖 4.21 所示。

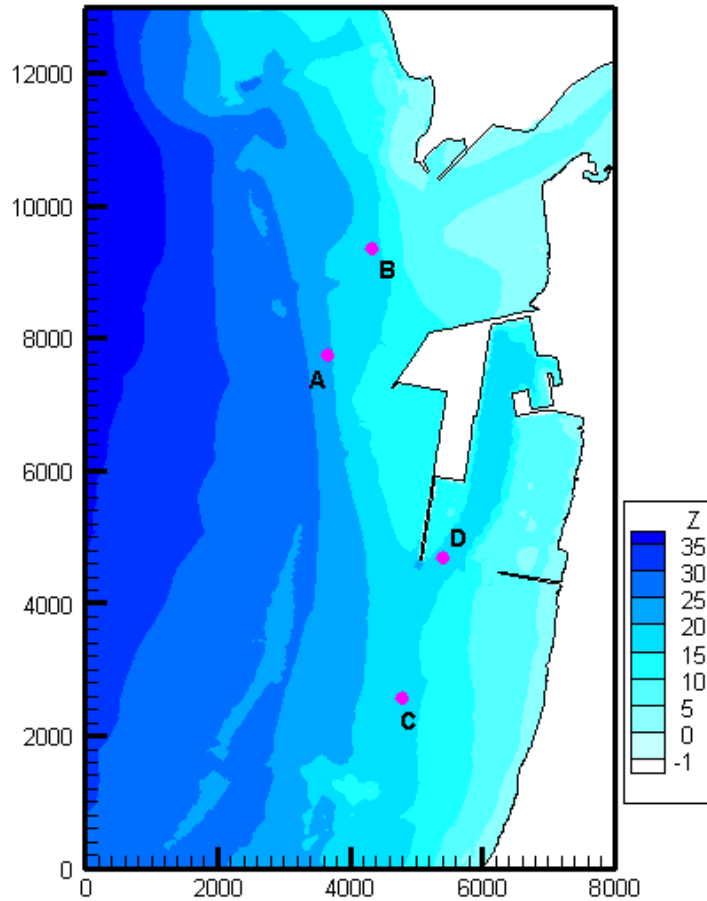


圖 4.19 臺北港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖



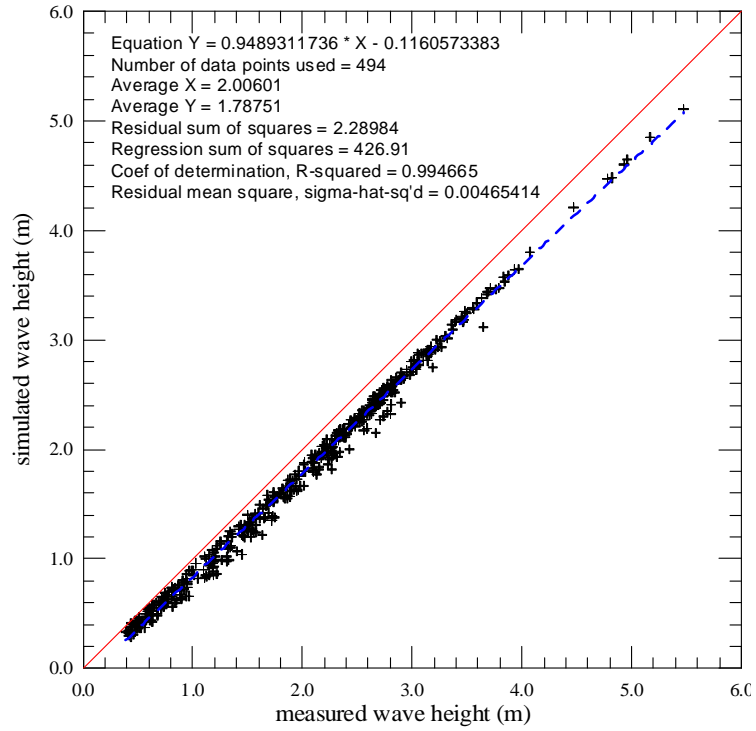


圖 4.20 臺北港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位 A 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

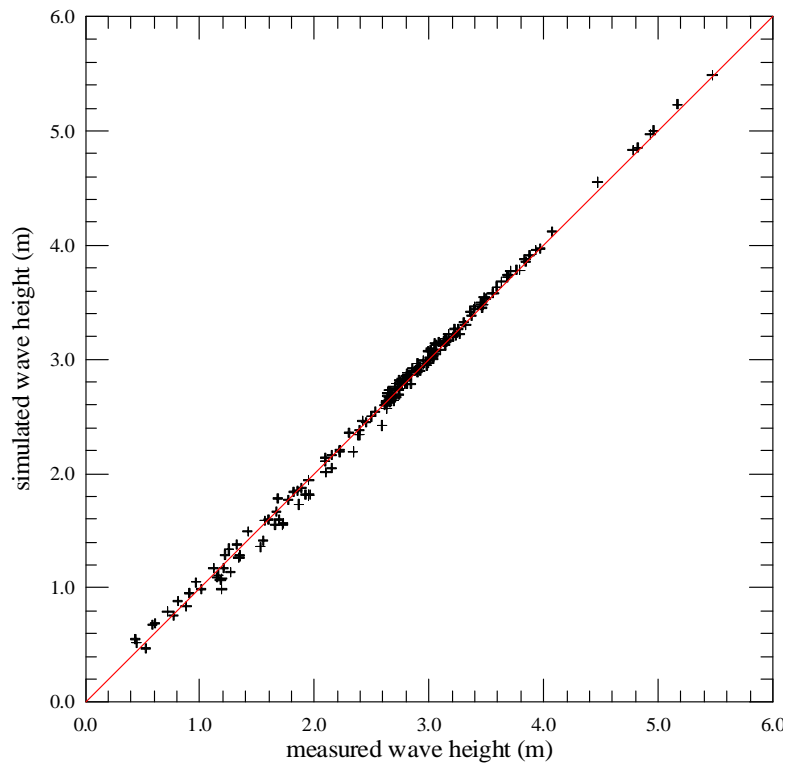


圖 4.21 臺北港小尺度波浪模組邊界條件校驗後，點位 A 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

### 4.2.3 臺中港小尺度港區近岸波浪模組

臺中港小尺度波浪模組之模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.22 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 19.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 10.0 km，外海邊界水深約 50.0m。本計畫臺中港小尺度波浪模組參考網格之維度(大小)、網格間距及網格座標與二度分帶座標系統(TW97)之關係，如表 4.1 所列。

101 年度本期計畫針對臺中港小尺度波浪模組進行更新研究，包括更新數值計算參考網格港區內水深資料以及檢驗模式邊界條件之修正參數，如圖 4.23 及圖 4.24 所示。

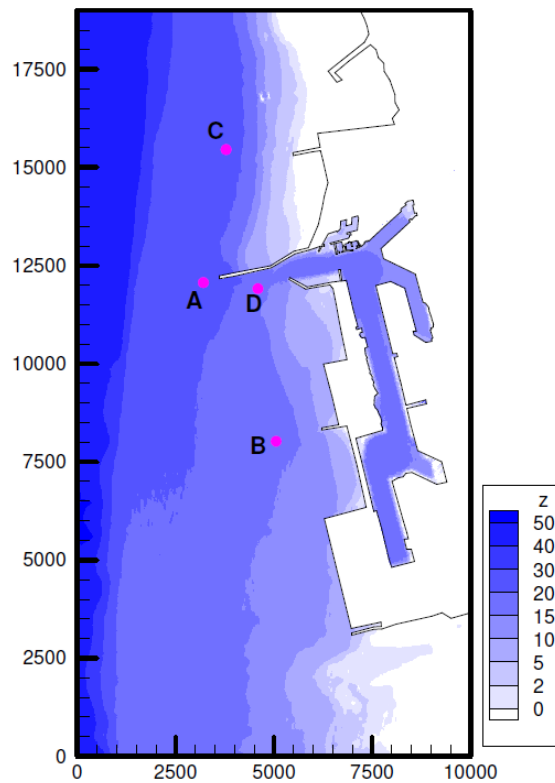


圖 4.22 臺中港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

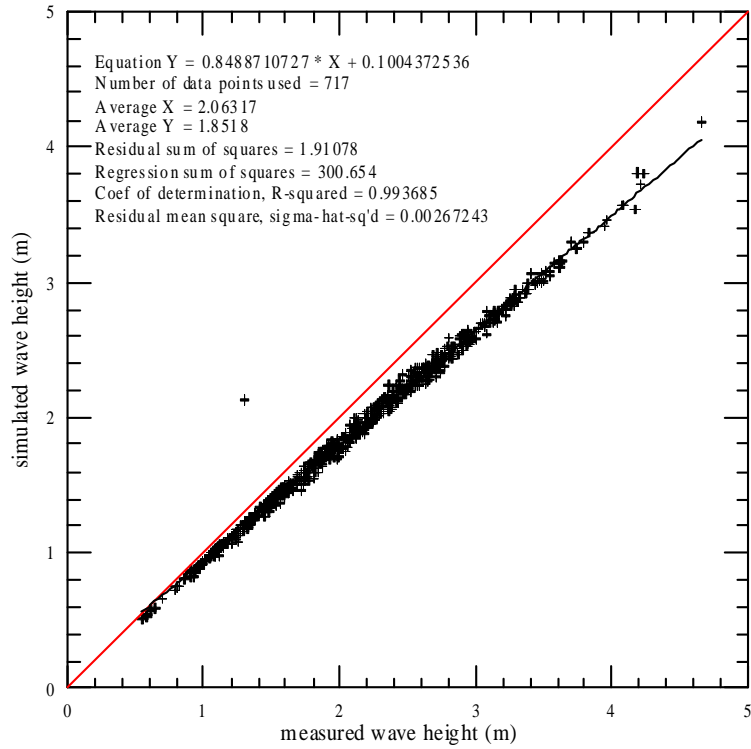


圖 4.23 臺中港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位 A 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

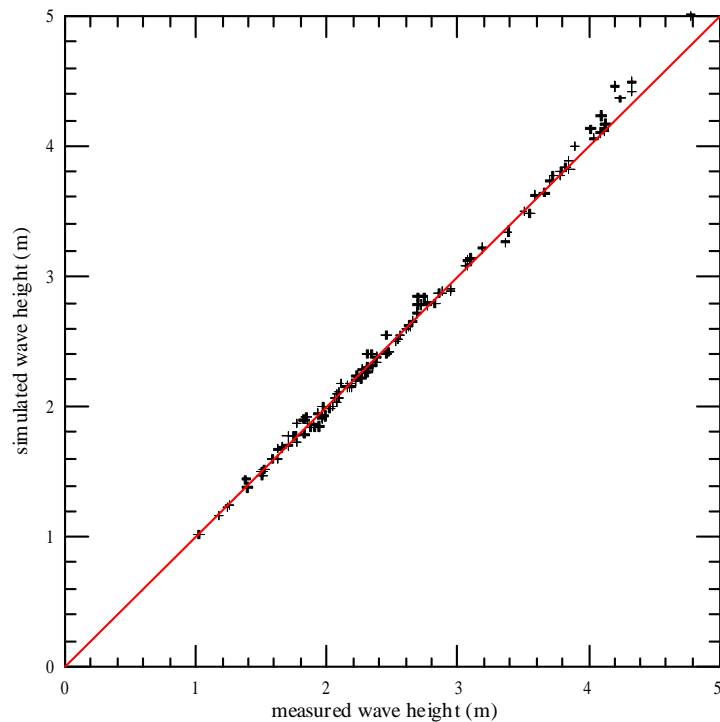


圖 4.24 臺中港小尺度波浪模組邊界條件校驗後，點位 A 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

#### 4.2.4 布袋港小尺度港區近岸波浪模組

布袋港小尺度港區近岸波浪模組之波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.25 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 9.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 16.0 km，外海邊界水深約介於 15m~20m 間。有關本計畫布袋港小尺度波浪模組參考網格之維度(大小)、網格間距及網格座標與二度分帶座標系統(TW97)之關係，如表 4.1 所列。

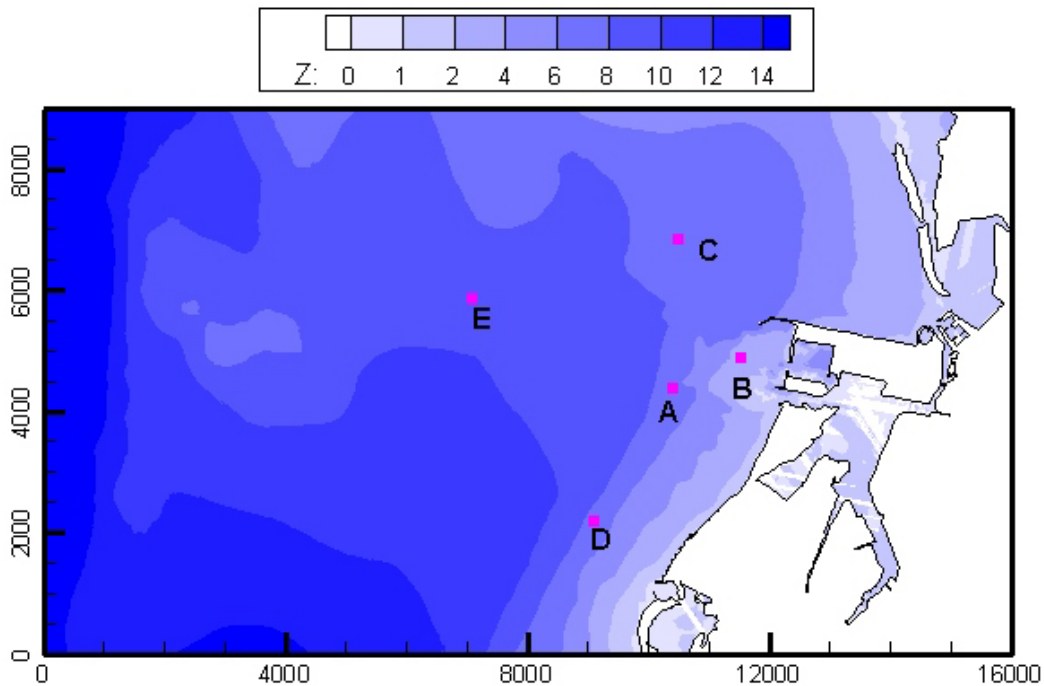


圖 4.25 布袋港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

#### 4.2.5 安平港小尺度港區近岸波浪模組

安平港小尺度波浪模組於 102 年度計畫配合安平漁港舊港口通航，修正波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.26 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 14.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 10.2 km，外海邊界水深約介於 18m~30m 間。波浪場模擬使用的參考網格座標原點之二度分帶座標(TW97)分別為(160526.8，2531091.8)，其中網格座標 X 軸之旋轉角度  $31.44^\circ$ (相對於二度分帶座標 E 軸);參考網格維度(大

小)為 1401×1041，網格間距為 10 m。

同時配合安平港波浪觀測位置由舊觀測樁(水深約 17 m)移至安平港南外防波堤西南側海域(水深約 14 m)，重新校驗模式邊界條件修正參數，如圖 4.27 及圖 4.28 所示。

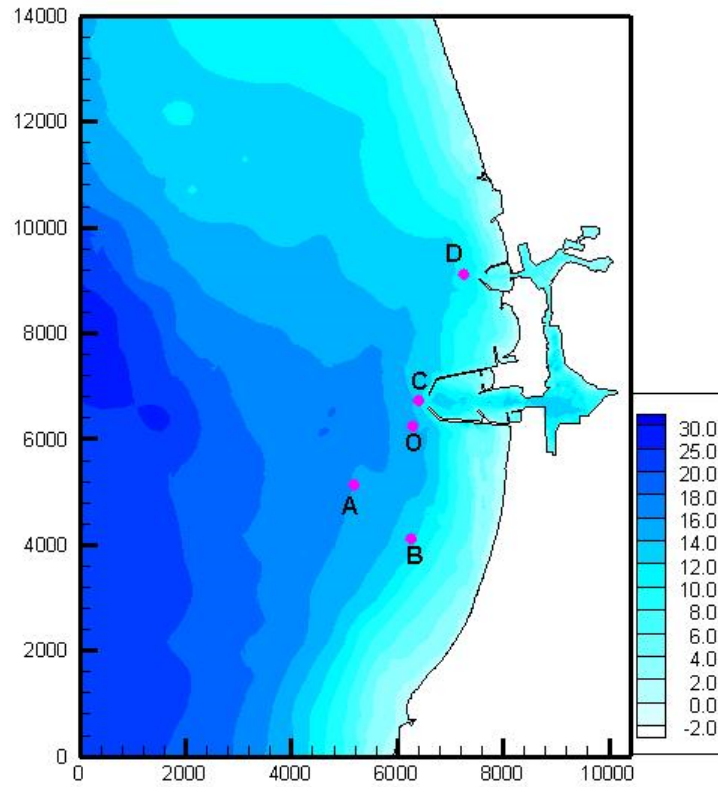


圖 4.26 安平港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

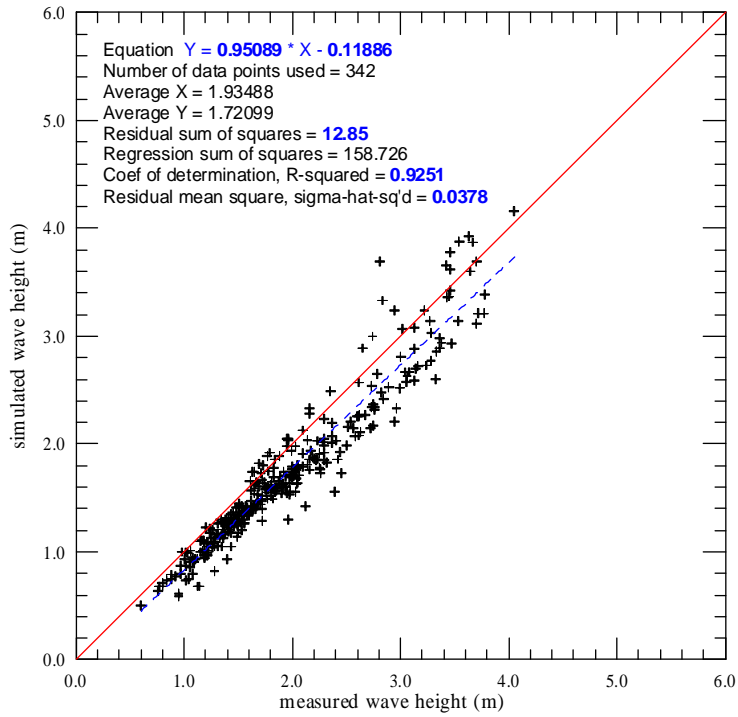


圖 4.27 安平港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位 O 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

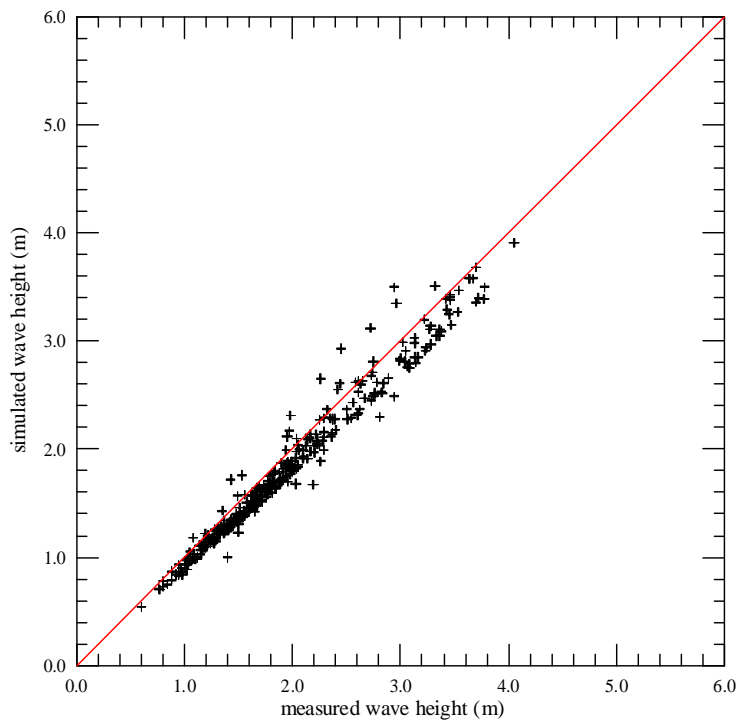


圖 4.28 安平港小尺度波浪模組邊界條件校驗後，點位 O 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

#### 4.2.6 高雄港小尺度港區近岸波浪模組

高雄港小尺度波浪模組之波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.29 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 17.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 8.0 km，外海邊界水深約介於 20m~30m 間。波浪場模擬使用的參考網格座標原點之二度分帶座標(TW67)分別為(177877.0，248755.0)，其中網格座標 X 軸之旋轉角度為 38.0°(相對於二度分帶座標 E 軸)；參考網格維度(大小)為 801×1701，網格間距為 10 m。

101 年度計畫針對高雄港小尺度波浪模組更新內容主要有港區水深資料更新及校驗波高、波向邊界條件之修正參數，分別如圖 4.30 及圖 4.31 所示。

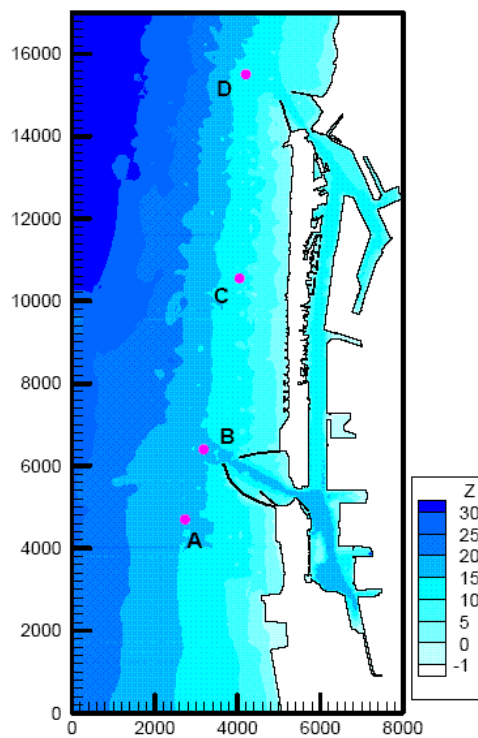


圖 4.29 高雄港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

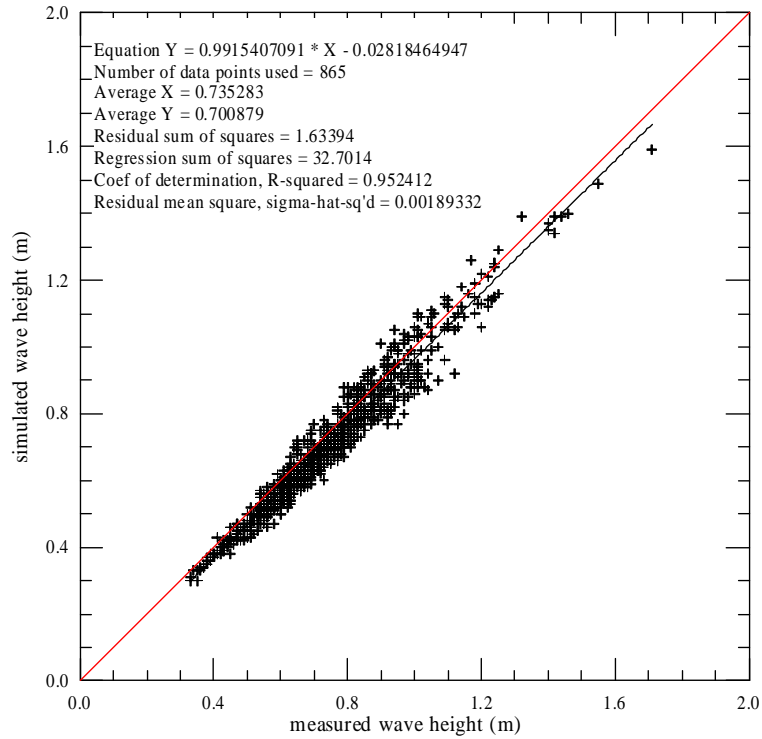


圖 4.30 高雄港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位 A 波高模擬值與觀測值之對應關係圖

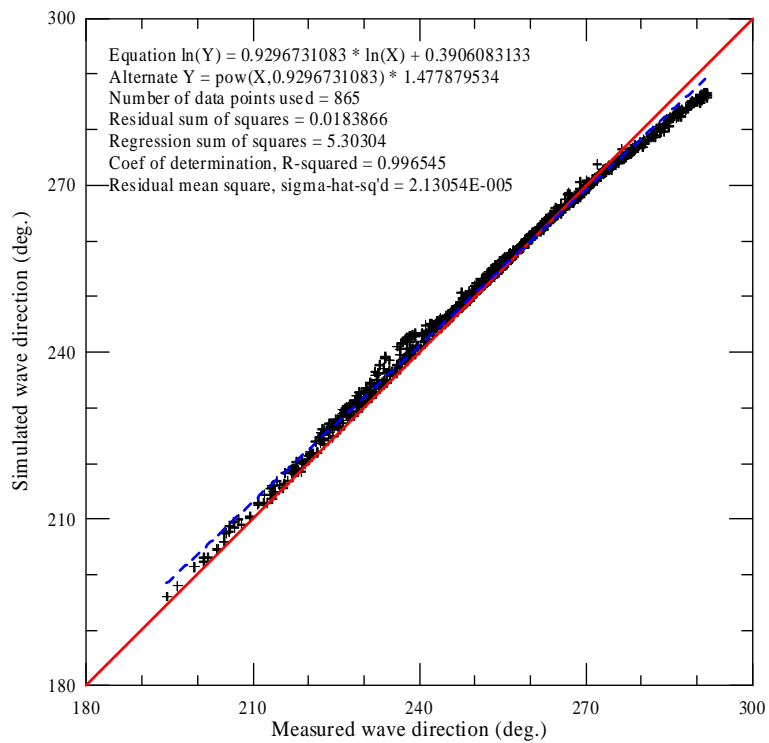


圖 4.31 高雄港小尺度波浪模組邊界條件校驗前，點位 A 波向模擬值與觀測值之對應關係圖



#### 4.2.7 蘇澳港小尺度港區近岸波浪模組

蘇澳港小尺度港區近岸波浪模組之波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.32 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 8.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 6.0 km，外海邊界水深約 80 m。波浪場模擬使用的參考網格座標原點之二度分帶座標(TW67)分別為(341180.0, 2725933.0)，其中網格座標 X 軸之旋轉角度為 185.0° (相對於二度分帶座標 E 軸)；參考網格維度(大小)為 601×801，網格間距為 10 m。圖示點位 A~D 代表蘇澳港小尺度波浪場模擬結果之輸出點位，其中點位 A 代表港灣技術研究中心設置波浪觀測之位置。

(1)更新參考網格相關資料：本項工作內容包括地形水深及港池配置等資料，其中地形水深資料包括 102 年度(2013 年)港域水深調查資料，如圖 4.33 所示，以及海軍大氣海洋局刊行的蘇澳港水道圖(圖號 04516)之水深資料；在港池配置方面，主要針對南方澳與東防波堤內側水域新增圍堤填土水域，如圖 4.34 所示，修正參考網格非計算格點資料。本年度蘇澳港小尺度參考網格更新之港池配置及地形水深分布情形，如圖 4.35 所示，其中參考網格邊界(Y 軸)上水深變化約介於-34 m 至-100 m 之間，以及北方澳鼻外海存在有潛礁地形，顯示原蘇澳港小尺度模組參考網格之水深資料與實際的地形水深差異相當大。

(2)校驗邊界條件之校正參數：本項工作計畫依據 2012 及 2013 年波浪觀測資料篩選具代表性波浪資料進行波浪場模擬，再依據觀測點位波高模擬值與觀測值間的對應關係，率定邊界波浪輸入條件之校正參數。同時，配合 TaiCOMS 以模擬風浪之譜峰週期取代模擬風浪之平均週期，更新小尺度波浪模組作業化模擬預報結果。

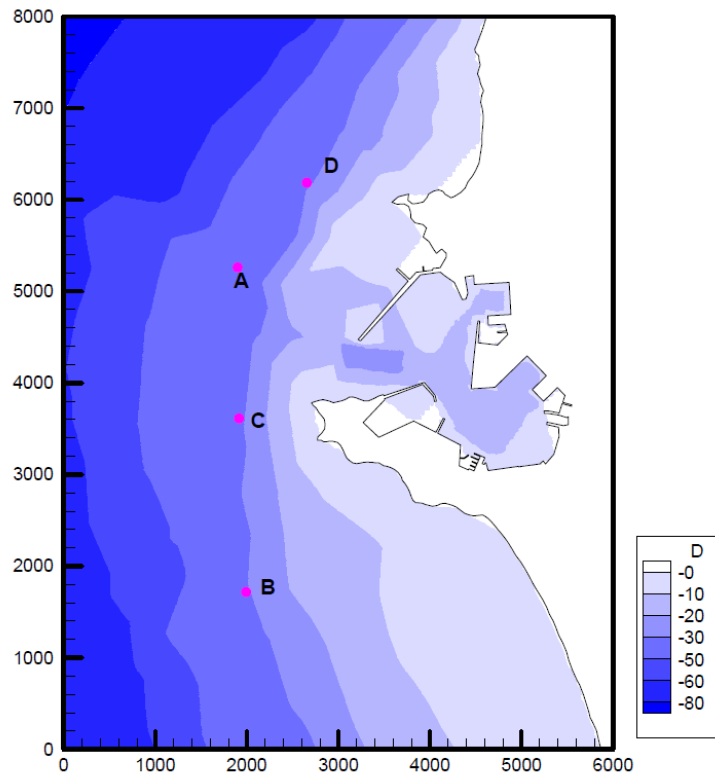


圖 4.32 蘇澳港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

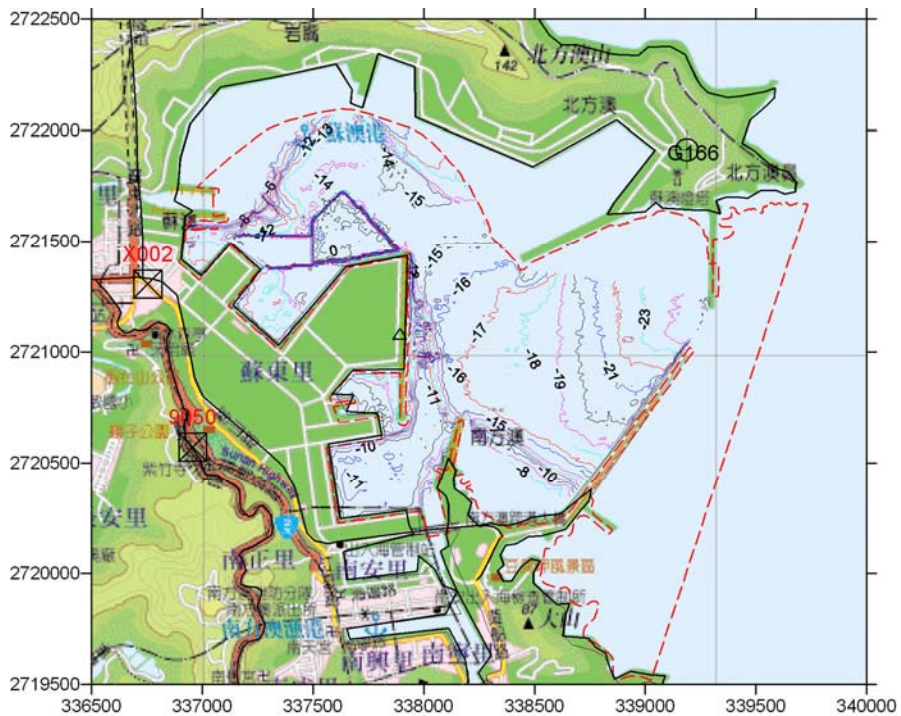


圖 4.33 蘇澳港港區 102 年度水深調查結果之水深分布圖



圖 4.34 蘇澳港港區衛星影像圖

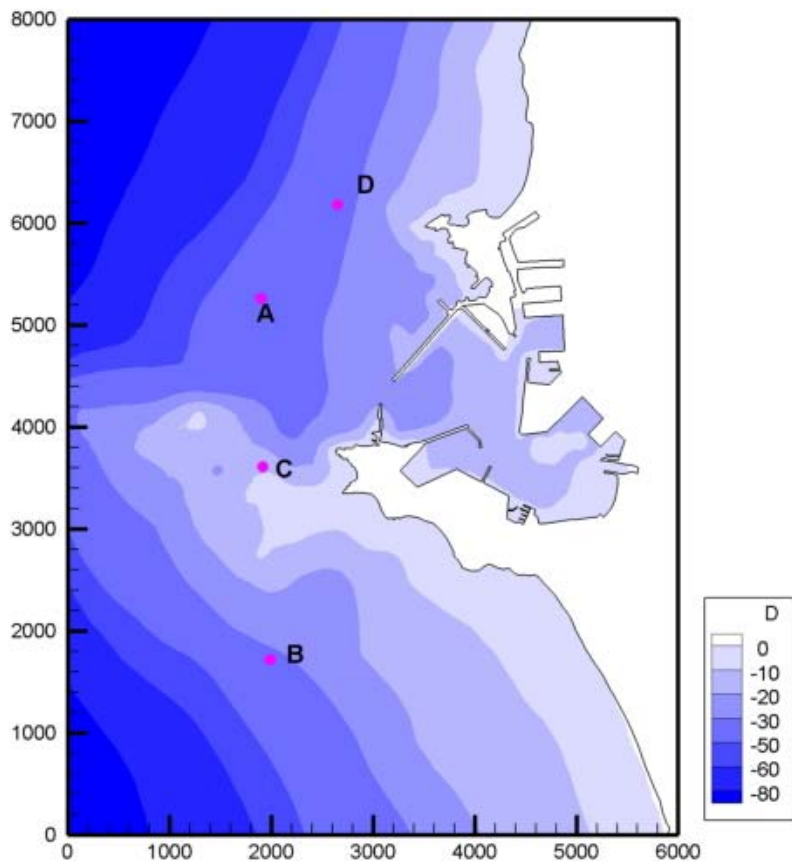


圖 4.35 蘇澳港小尺度波浪模組更新後參考網格之地形水深分布圖

#### 4.2.8 花蓮港小尺度港區近岸波浪模組

花蓮港小尺度波浪模組波浪場模擬範圍及數值計算參考網格，如圖 4.36 所示，圖中沿岸方向(Y 軸)之距離為 8.0 km，離岸方向(X 軸)之距離為 3.2 km，外海邊界最大水超過 150 m。波浪場模擬使用的參考網格座標原點之二度分帶座標(TW67)分別為(316892.0, 2655232.0)，其中網格座標 X 軸之旋轉角度為 150.0°(相對於二度分帶座標 E 軸)；參考網格維度(大小)為 321×801，網格間距為 10 m。

(1)更新參考網格相關資料：本年度僅依據 102 年度(2013 年) 花蓮港港域水深調查資料，如圖 4.37 所示，更新小尺度波浪模組參考網格港內水深資料。

(2)校驗邊界條件之校正參數：本項工作計畫依據 2012 及 2013 年花蓮港波浪觀測資料篩選具代表性波浪資料進行波浪場模擬，再依據觀測點位波高模擬值與觀測值間的對應關係，率定邊界波浪輸入條件之校正參數。同前述蘇澳港，為配合 TaiCOMS 以模擬風浪之譜峰週期取代模擬風浪之平均週期之作業化更新，此處波浪觀測資料週期亦選取浪觀測資料之譜峰週期為模式輸入條件。

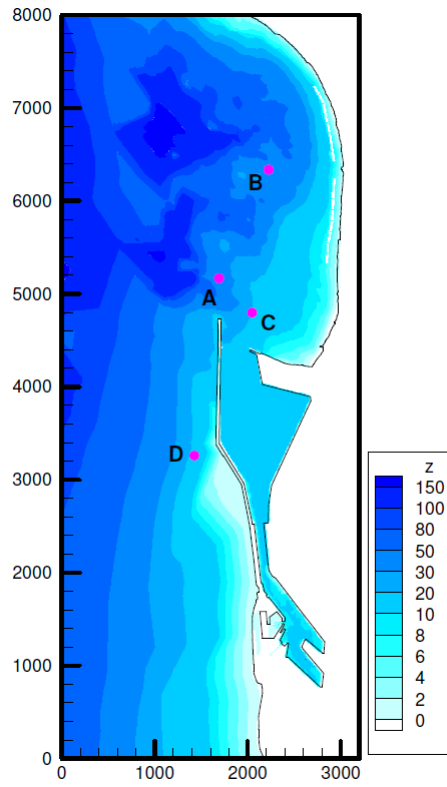


圖 4.36 花蓮港小尺度波浪模組參考網格大小及地形水深分布圖

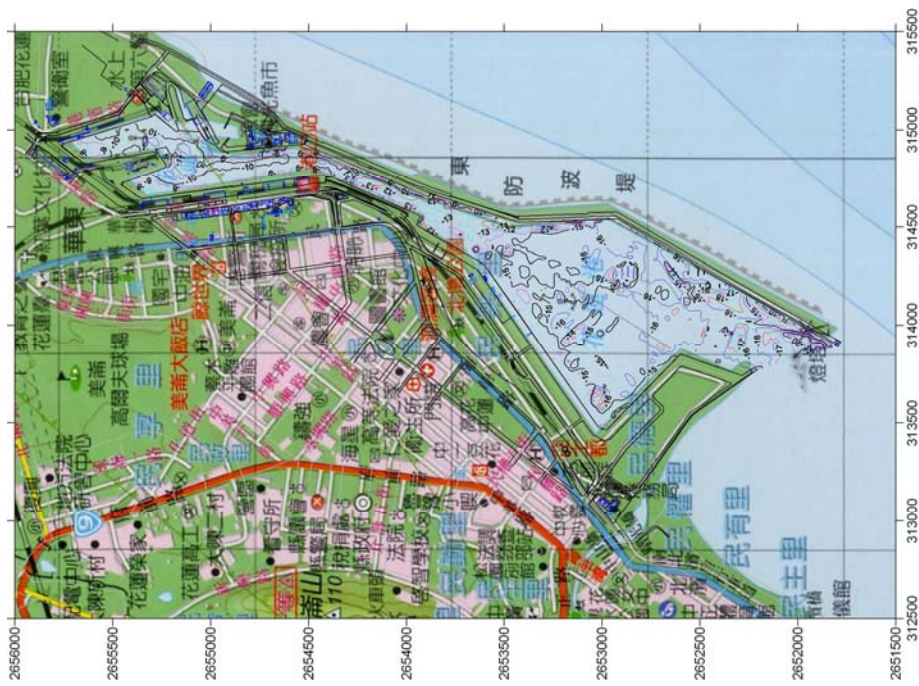


圖 4.37 花蓮港港區 102 年度水深調查結果之水深分布圖



### 4.3 港域波浪場模擬與研究

與 TaiCOMS 小尺度波浪模組建置架構相同，港域波浪場模擬主要針對國內主要商港基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、安平港、高雄港及布袋港等八個主要港口為之；為與前述小尺度波浪模組區隔，細尺度港域波浪模組(簡稱細尺度波浪模組)主要應用範圍為港口及港內等水域，目的在於研究主要商港之遮蔽及共振等問題，並應用於模擬颱風波浪作用下港口及港內波浪狀況，藉以評估颱風侵臺期間港外颱風波浪是否可能影響船舶泊靠安全。

由於細尺度波浪模組必需具備能夠模擬波浪受結構物作用產生的折、繞射及反射現象的能力，因此 TaiCOMS 細尺度波浪模組採用的數值模式係以橢圓型緩坡方程式為控制方程式，以有限元素法為數值求解方法(參考附錄一所述)。由於細尺度波浪模組使用的數值計算網格不僅空間網格尺度小於小尺度波浪模組數值計算參考網格，且模式數值計算時間更為費時；由於細尺度波浪模組模擬效率無法符合 TaiCOMS 波浪模擬架構規劃之作業化模擬預報時程，因此各港口細尺度波浪模組並未納入 TaiCOMS 每日作業化模擬流程(參考圖 4.3)。

與 TaiCOMS 小尺度波浪模組規劃之研究期程相同，四年期計畫採逐年針對基隆港及臺北港(100 年度)、臺中港及布袋港(101 年度)、安平港及高雄港(102 年度)、蘇澳港及花蓮港(103 年度)分別進行細尺度波浪模組相關改善與研究，本年度(103 年度)主要研究對象為蘇澳港及花蓮港。各商港細尺度波浪模組規劃之模擬範圍分別如圖 4.38 至 4.45 所示，各港口數值模式計算採用的非結構性細網格基本資料，如表 4.2 所列，表中內容包括三角形元素及節點數目、外海假想邊界半徑及最大水深值等資訊。

由於本計畫有限元素數值模式要求數值計算網格解析度需滿足每個波長內節點數至少 8 個以上，因此本計畫各港口非結構性細網格的產生係依據各港粗網格節點水深資料，如圖 4.38 至 4.45 所示，配合波浪週期及波長內節點數(本計畫採用 8 或 10)等判斷條件，利用電腦程

式自動產生非結構性細網格之節點位置，再以三角形元素組成非結構性細網格。故由表 4.2 所列各港口網格元素數目及節點數目組成的數值計算細網格，在波浪場模擬應用上均有適用波浪週期之限制，換言之，表 4.2 所列各港口細網格適用的最小波浪週期分別為：基隆港 8 sec、臺北港 10 sec、蘇澳港 8 sec、花蓮港 10 sec、臺中港 10 sec、安平港 10 sec、高雄港 10 sec 及布袋港 8 sec 等。

本計畫針對主要商港港域波浪場模擬所考慮的波浪條件主要有波高、週期及波向等參數，其中波高參數因本計畫數值模式屬於波浪線性理論，故港域波浪場之波高計算可以採用入射波高之無因次化方式表示，即假設入射波高或振幅為 1.0，將波浪場模擬條件簡化為僅考慮波浪週期及外海無限領域之波浪來向(即採用波浪觀測資料之波向定義)等參數。其中波浪模擬週期之間隔為 0.1 sec，波浪週期模擬範圍上限為 20 sec，下限為各港口細網格解析度適用之最小波浪週期(同上所述)；波向配合波浪觀測資料採用 16 個方向定義(即 N、NNE、NE、ENE、E、...等)，當波浪來向超出各港口假想半圓領域即不被採用或忽略。

此外，本計畫主要商港細尺度港域波浪場模擬結果，如圖 4.46 至圖 4.49 所示分別為基隆港、布袋港、安平港及高雄港一港口等港區波浪場模擬結果之波高分布情況，將提供 TaiCOMS 建置成臺灣主要商港細尺度港域波浪場模擬資料庫，規劃於颱風期間利用各港口外海風浪模擬預報值推估港內波高分布狀況，呈現於港灣資訊網。另外，針對主要商港港內碼頭前波高變化展示，本期計畫初步規劃各港口波高展示之碼頭區分布如圖 4.50 至圖 4.58 所示。

以下各小節僅就本年度主要商港細尺度港域波浪模組研究成果整理如下；

表 4.2 港域波浪模擬之數值計算細網格基本資料

港口 名稱	數值計算之三角網格		外海假想邊界 半徑(m)	最大水深 (m)
	元素數目	節點數目		
基隆港	59,694	30,679	1000.0	50.0
臺北港	268,830	135,484	3500.0	25.0
臺中港	327,611	166,214	3500.0	23.0
布袋港	287,564	144,968	1300.0	7.0
安平港	210,394	107,016	2000.0	17.0
高雄港一港口	126,709	64,838	2000.0	15.0
高雄港二港口	214,486	109,157	2800.0	18.0
花蓮港	122481	62116	2200.0	100.0
蘇澳港	70,797	36,436	826.0	30.0

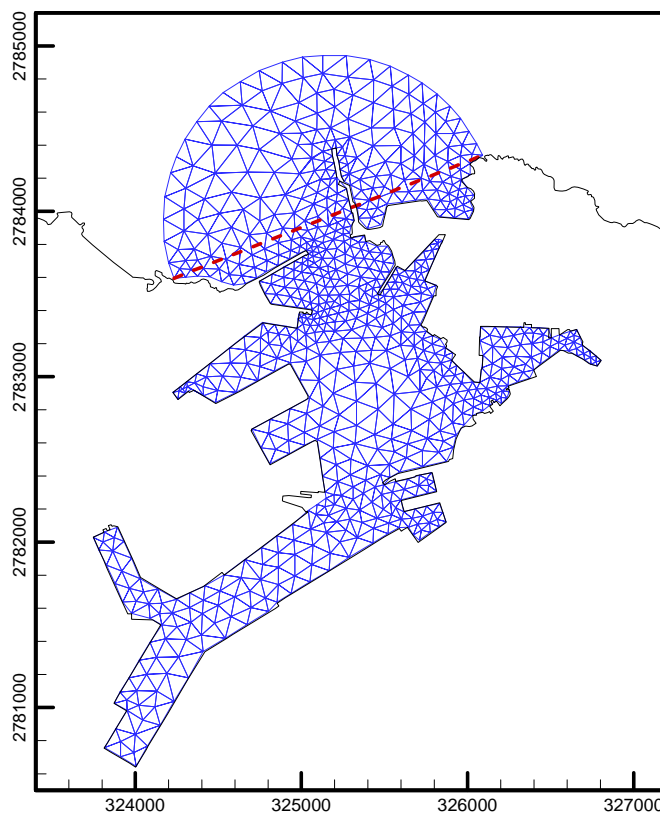


圖 4.38 基隆港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖



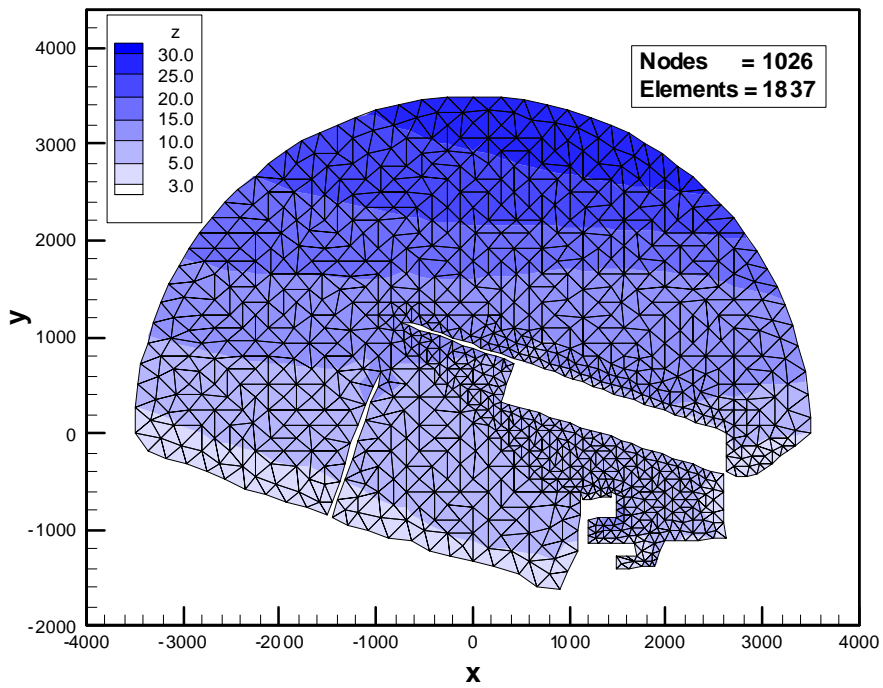


圖 4.39 臺北港細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

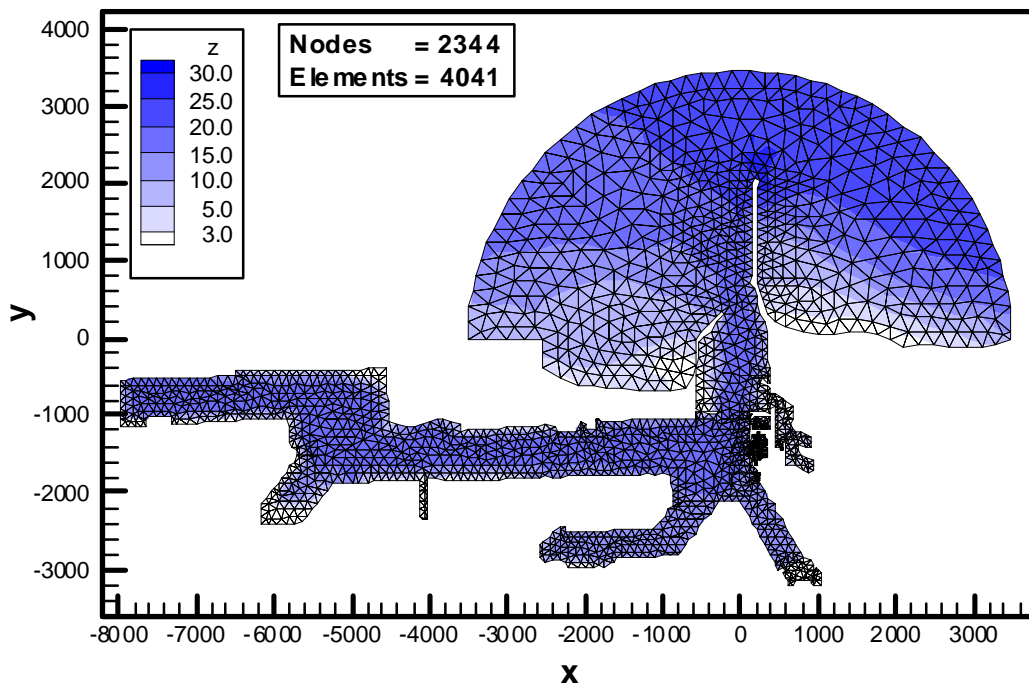


圖 4.40 臺中港細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

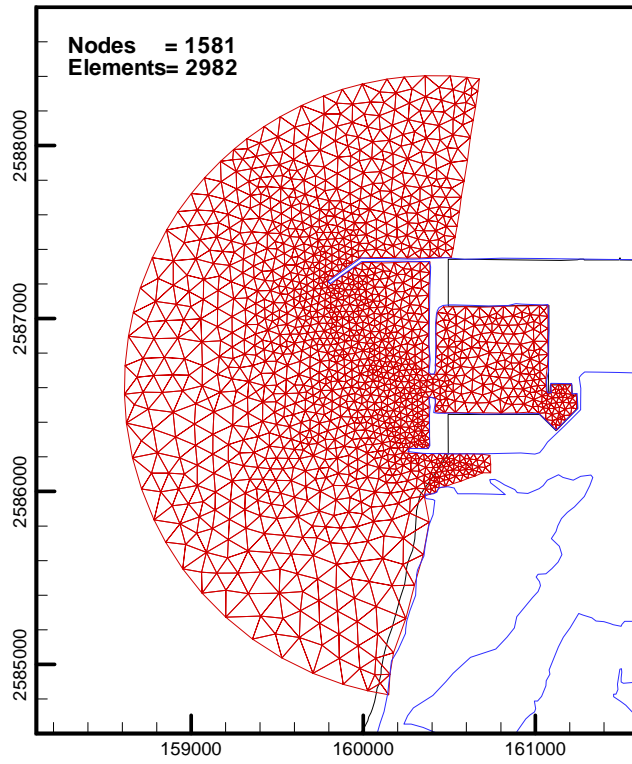


圖 4.41 布袋港細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

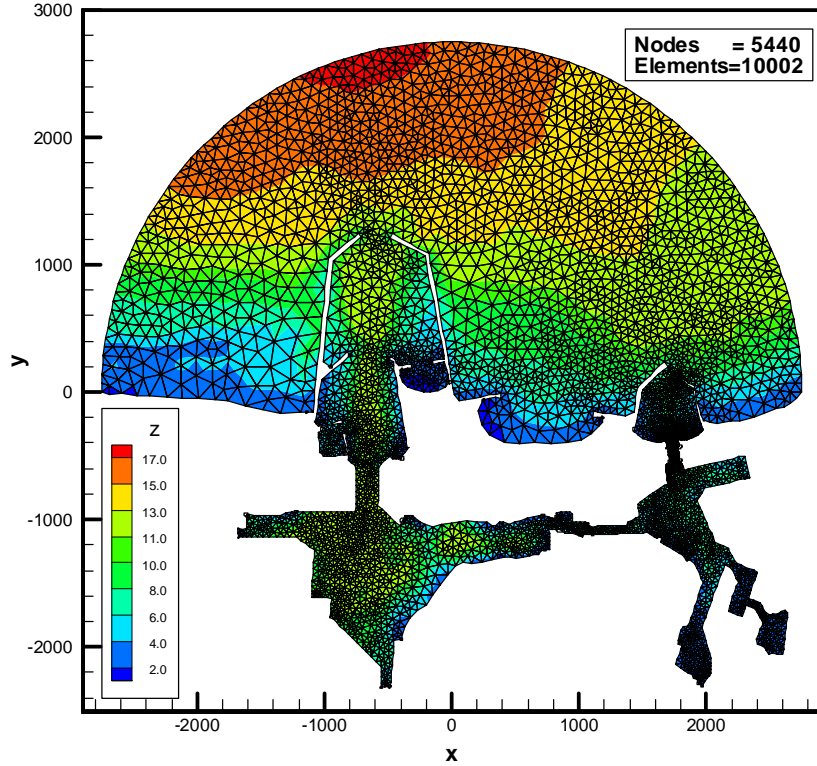


圖 4.42 安平港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

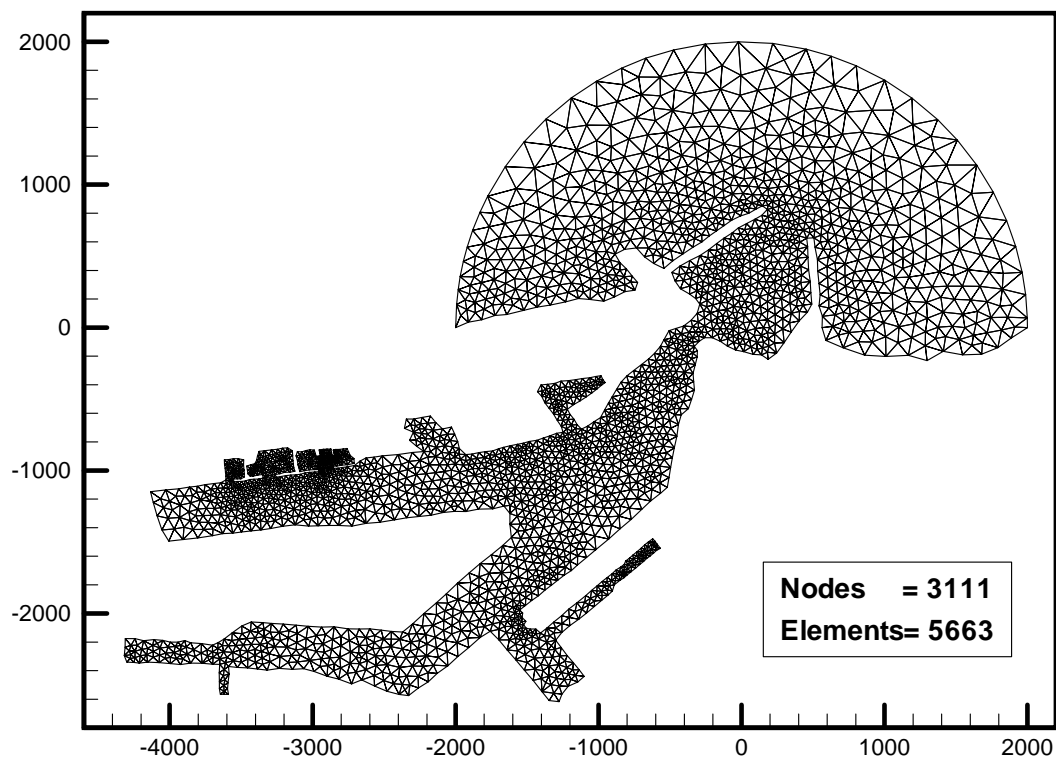


圖 4.43 高雄港區一港口細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

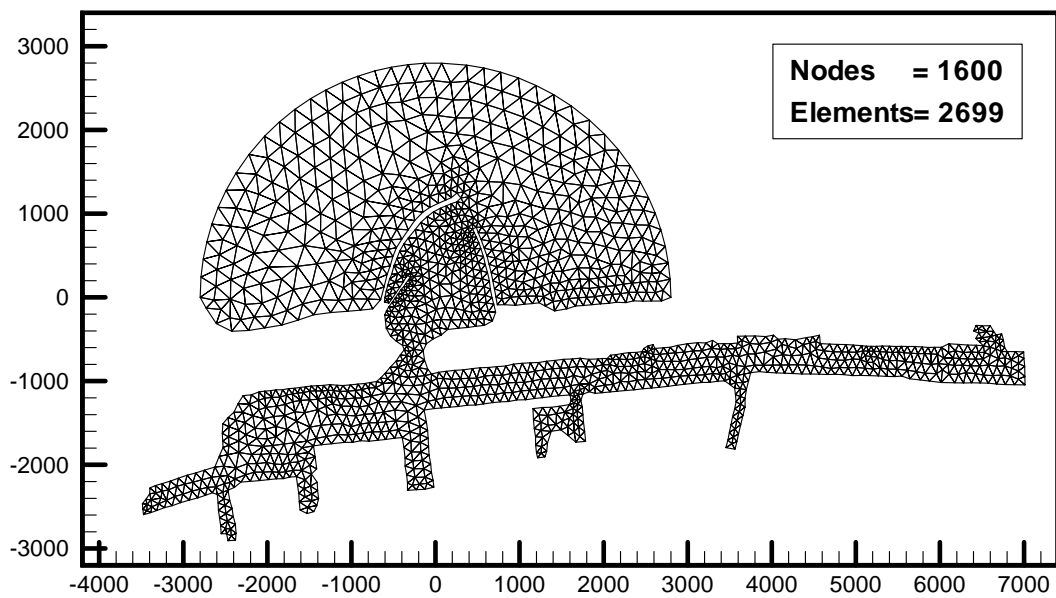


圖 4.43 (續)高雄港區二港口細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

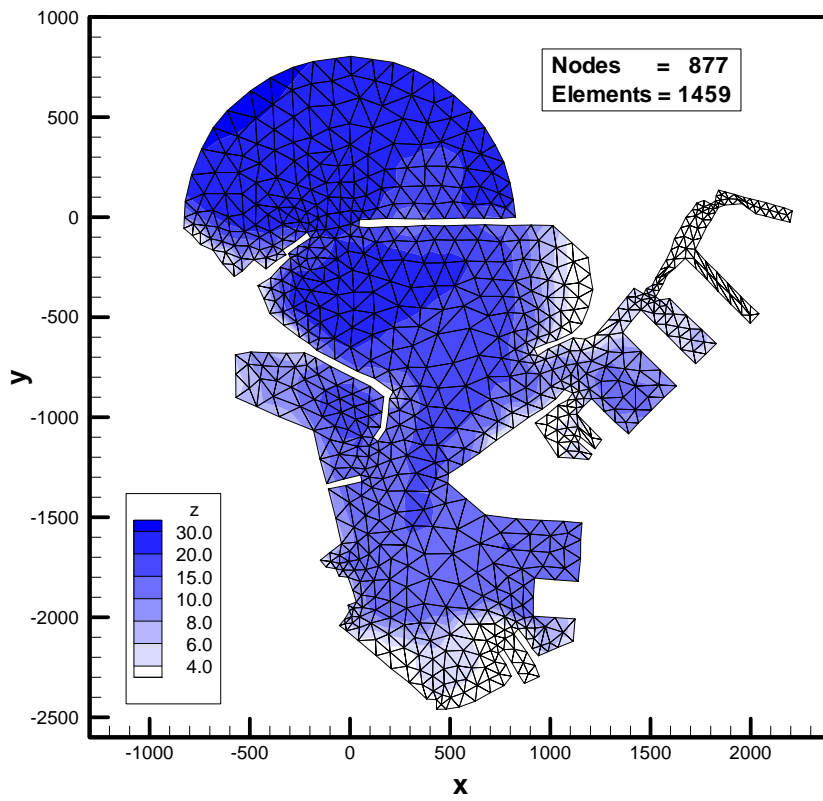


圖 4.44 蘇澳港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

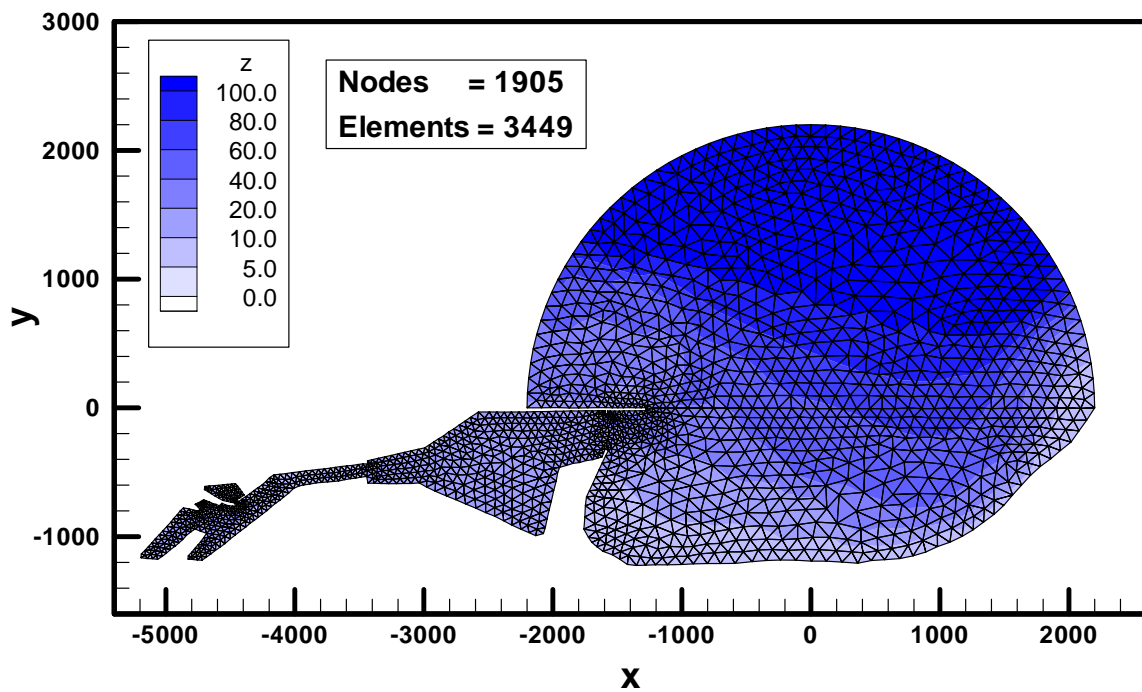


圖 4.45 花蓮港區細尺度波浪模組模擬範圍及非結構粗網格分布圖

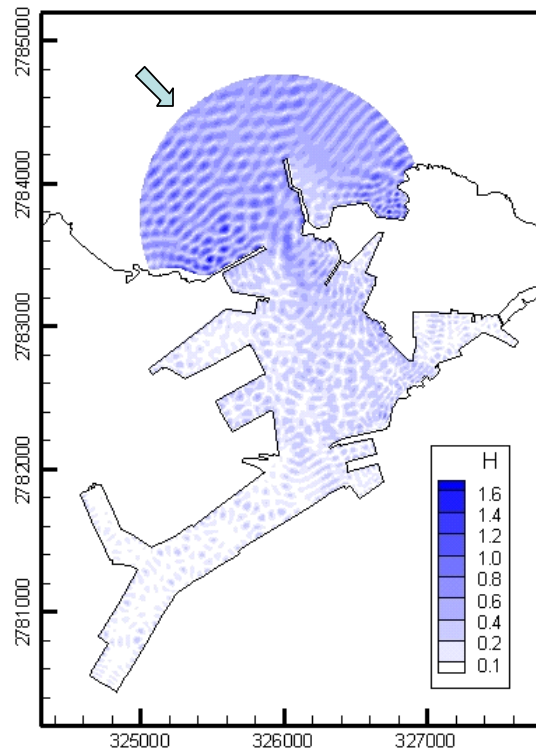


圖 4.46 基隆港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、NW)

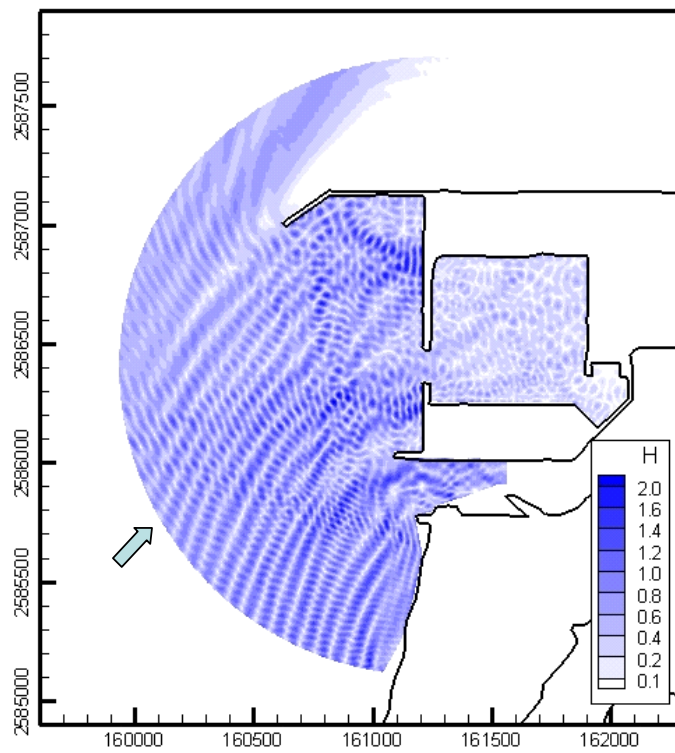


圖 4.47 布袋港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、SW)

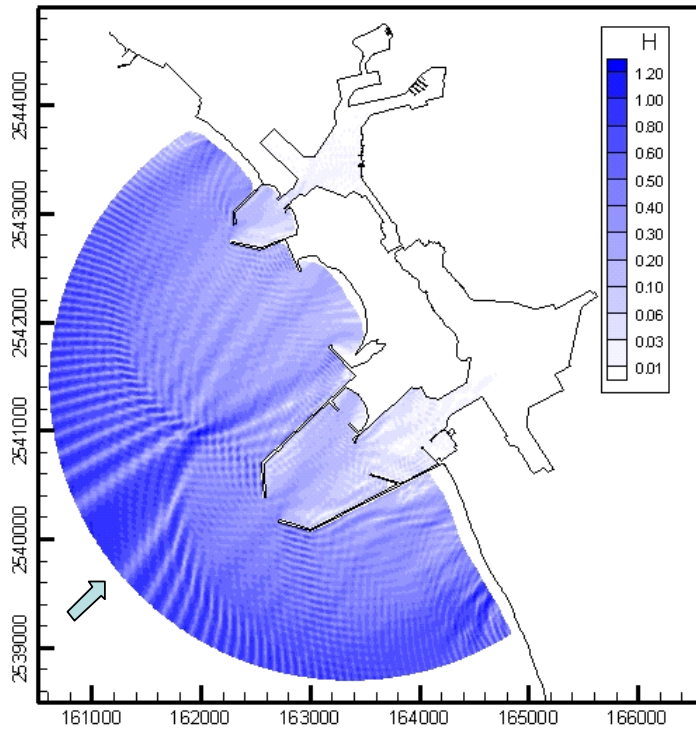


圖 4.48 安平港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、SW)

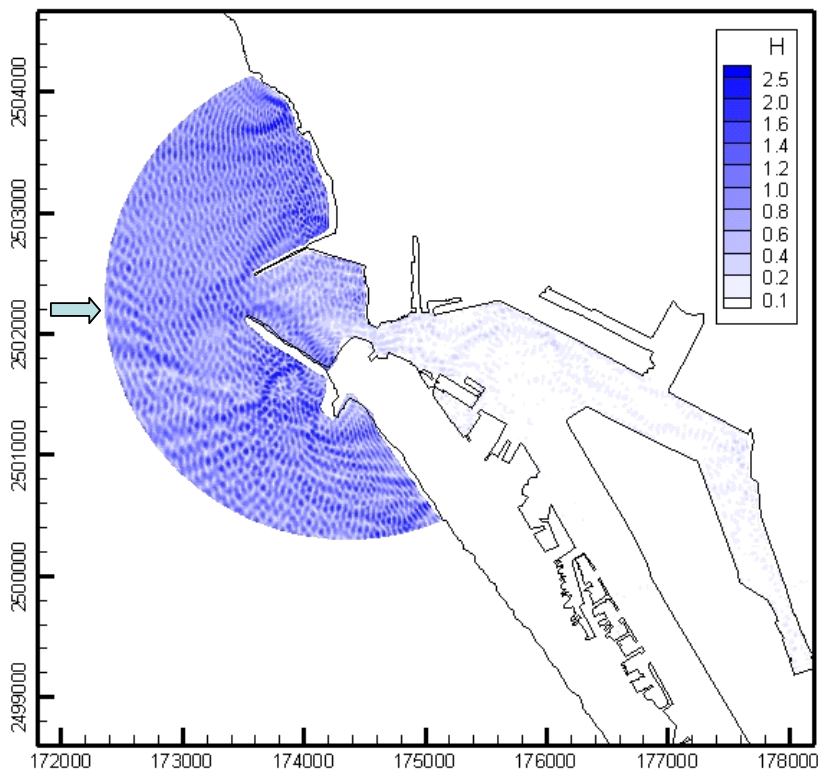


圖 4.49 高雄港一港口區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、W)



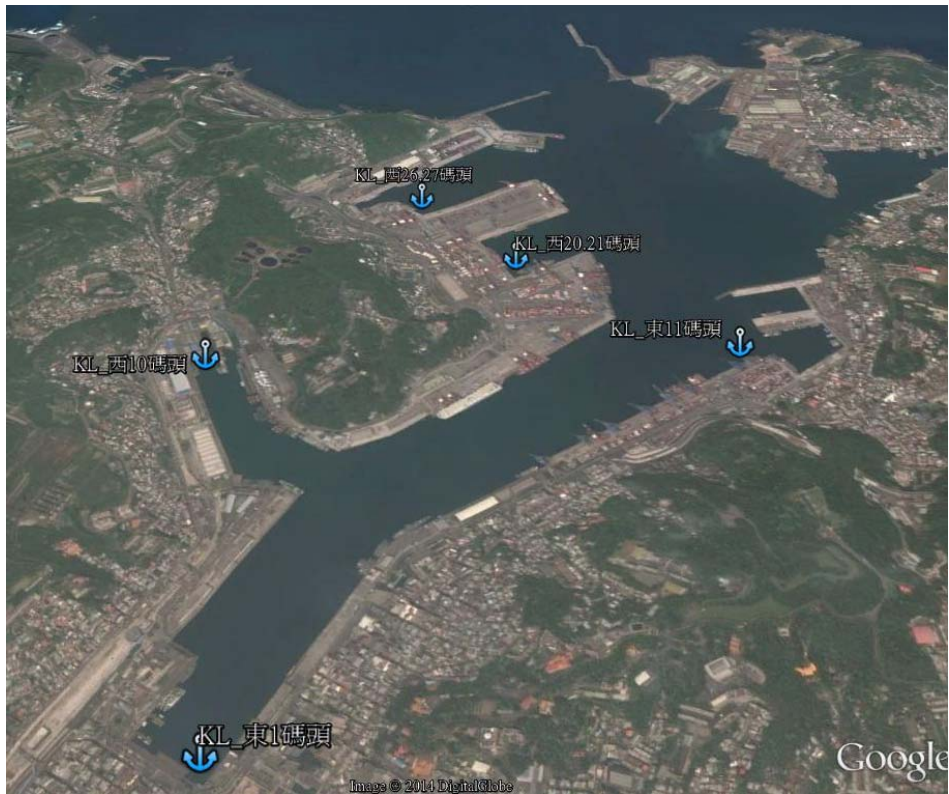


圖 4.50 基隆港港域波高規劃展示點位分布圖



圖 4.51 臺北港港域波高規劃展示點位分布圖



圖 4.52 臺中港港域波高規劃展示點位分布圖



圖 4.53 布袋港港域波高規劃展示點位分布圖



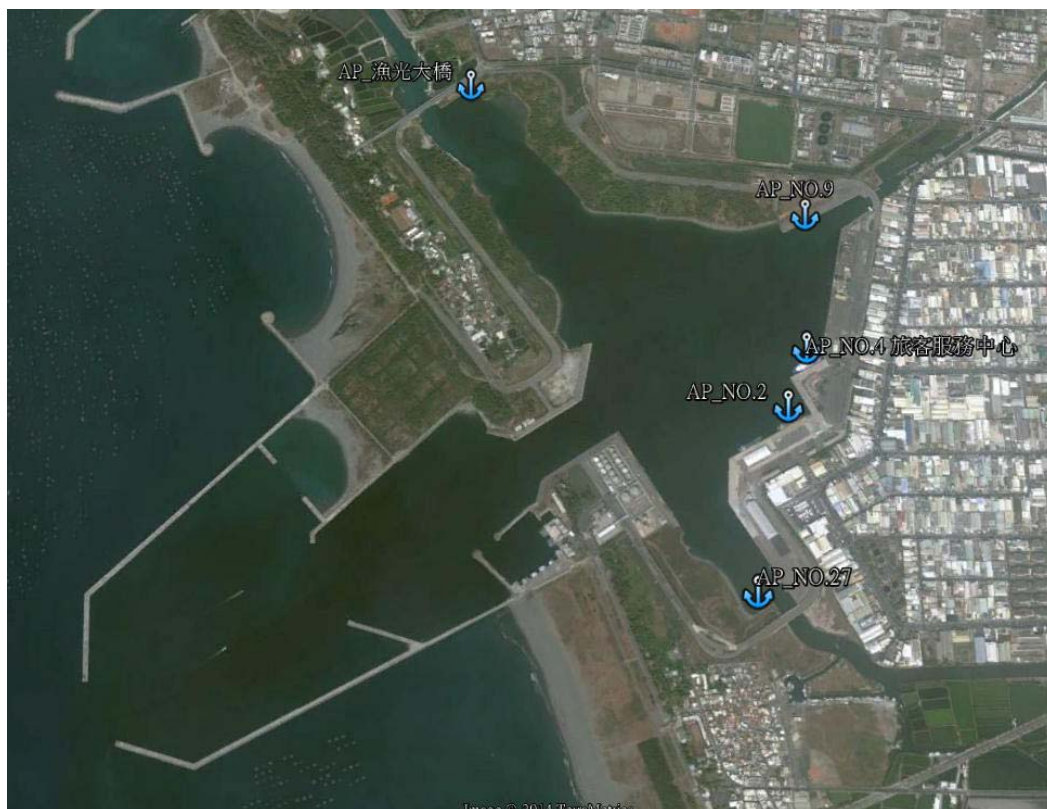


圖 4.54 安平港港域波高規劃展示點位分布圖

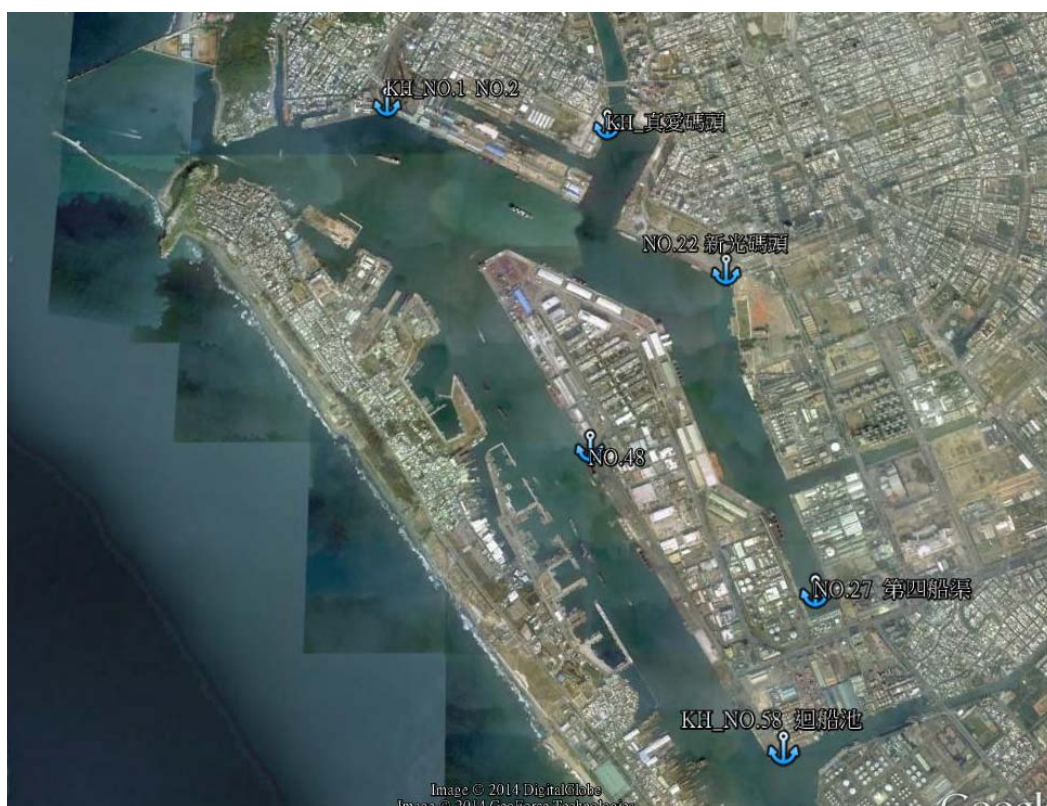


圖 4.55 高雄港一港口港域波高規劃展示點位分布圖

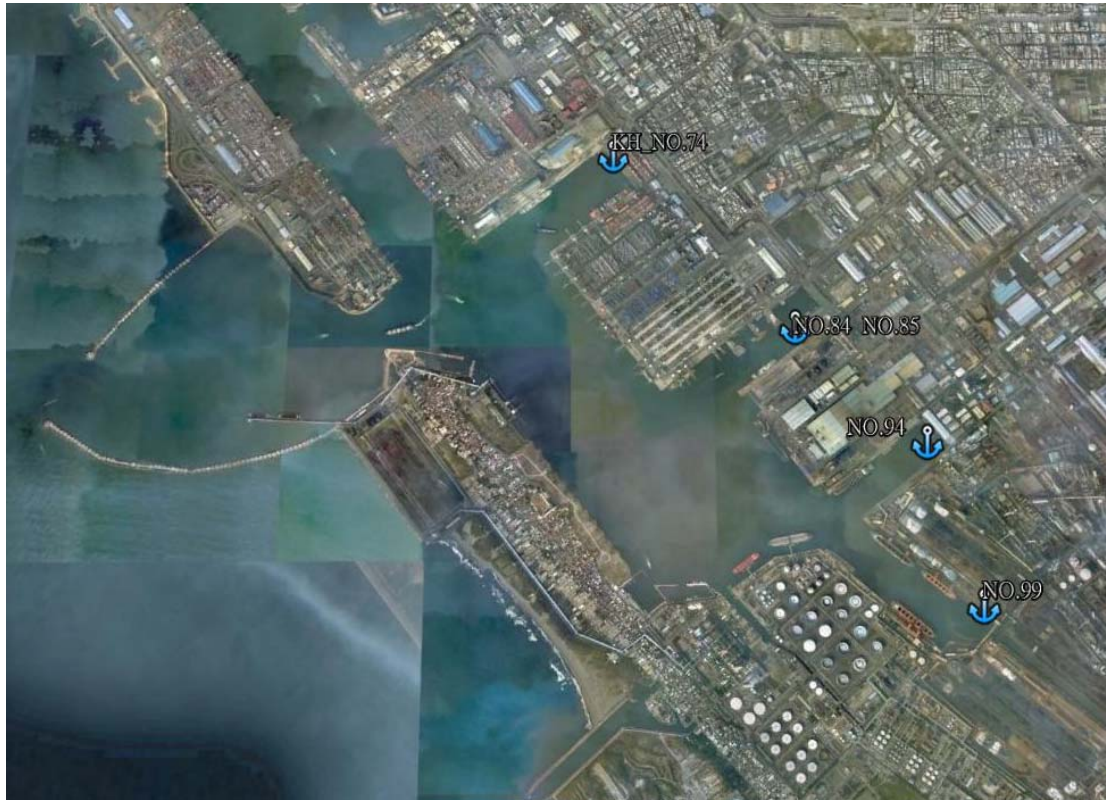


圖 4.56 高雄港二港口港域波高規劃展示點位分布圖

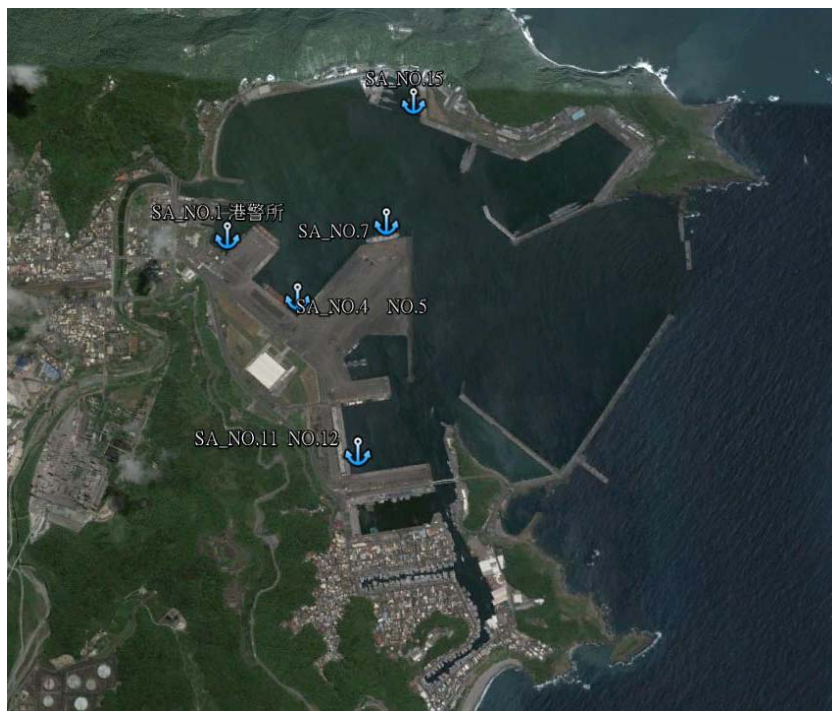


圖 4.57 蘇澳港港域波高規劃展示點位分布圖



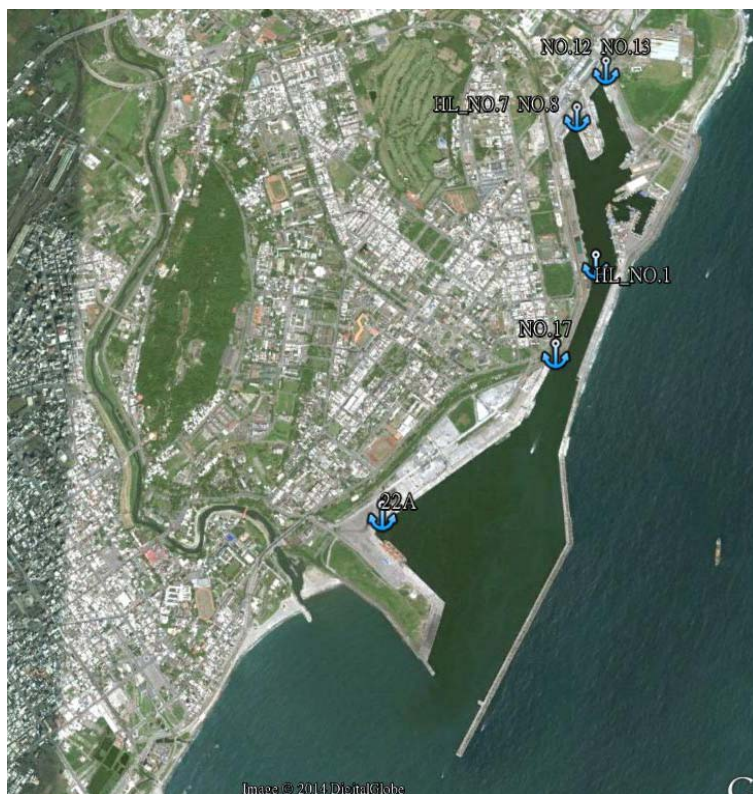


圖 4.58 花蓮港港域波高規劃展示點位分布圖

#### 4.3.1 蘇澳港細尺度港域波浪模擬

本年度計畫蘇澳港細尺度波浪模組之研究成果如下：

(1)更新波浪場模擬之非結構性細網格：針對蘇澳港港池配置現況(如圖 4.59 所示)與前期計畫蘇澳港港池配置之差異(參考圖 4.34 所示)，以及配合 102 年度港域水深調查資料(如圖 4.33 所示)，更新本年度蘇澳港細尺度波浪模組之非結構粗網格配置及網格節點水深資料，如圖 4.60 所示。圖中蘇澳港商港區之迴船池水域水深約介於 14 ~ 15 m，商港碼頭水深約介於 7 m ~ 12 m 之間；外海水深超過 30 m。同時依據蘇澳港波場模擬之最小波浪週期(8 sec)及波長內至少含 10 個節點等條件更新波浪場模擬之非結構細網格，其中三角元素數目為 99069，節點數目為 50843。與前期計畫波浪場模擬之非結構細網格(70,797 個三角元素及 36,436 節點)相較，本年度更新之非結構細網格解析度明顯提升，其中元素及節點數目約為表 4.2 所列之 1.4 倍。

(2)更新港池邊界反射係數：針對蘇澳港港池配置重新分類與修正

其反射係數，其中具有消波功能之構造物包括外廓防波堤( $K_r=0.85$ )、港內消波設施(含內防波堤、導流堤及碎波堤等， $K_r=0.75$ )、礁岩海岸( $K_r=0.9$ )及自然沙灘段( $K_r=0.65$ )等；此外，半無限領域岸線及碼頭區岸壁之反射率，本文假設其為全反射( $K_r=1$ )，完全透波邊界條件( $K_r=0$ )則應用於港內蘇澳溪出水口邊界。

(3)更新蘇澳港港域波浪場模擬結果：本計畫蘇澳港港域波浪場模擬條件係由外海波浪週期模擬範圍為 8 ~ 20 sec，週期間距為 0.1 sec；以及 NE、ENE、E、ESE、SE、SSE 及 S 等 7 個波向組合而成。此外，本計畫蘇澳港港域波浪場模擬結果將提供 TaiCOMS 建置成蘇澳港細尺度港域波浪場模擬資料庫。圖 4.61 至圖 4.64 所示分別為波浪週期 10 sec 不同波向(ENE、E、SE 及 S)模式模擬結果之波高分布圖，由港內波高分布情形可瞭解不同波向作用下蘇澳港港內波浪靜穩或遮蔽情況。

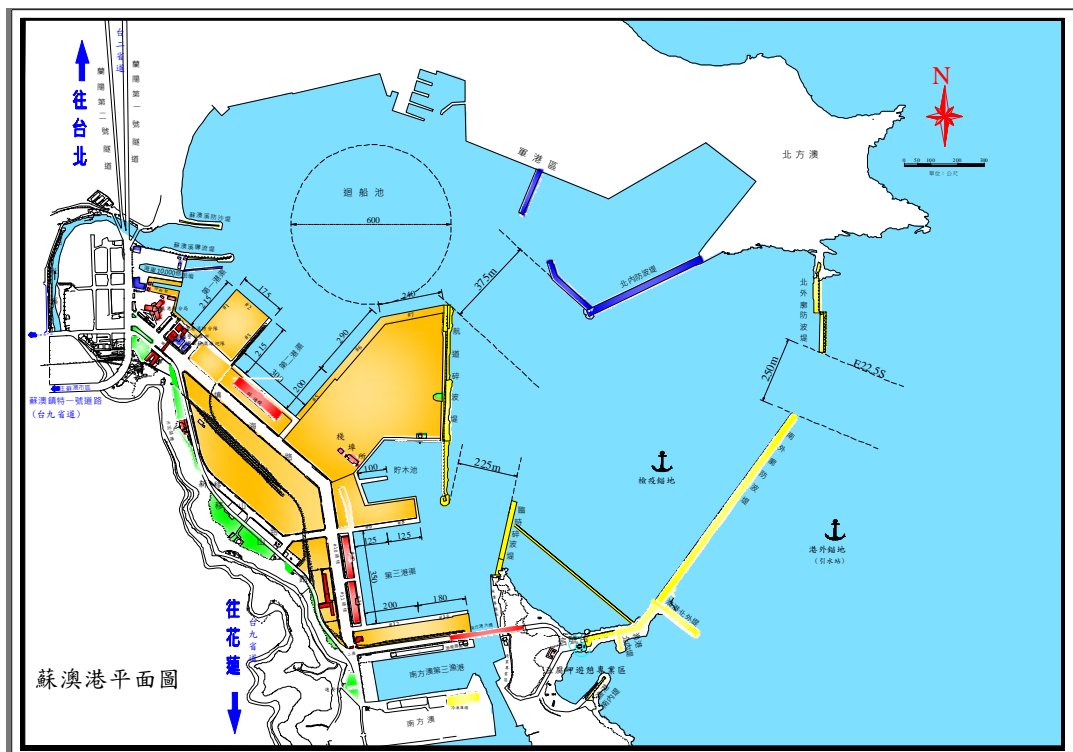


圖 4.59 蘇澳港港域平面配置圖

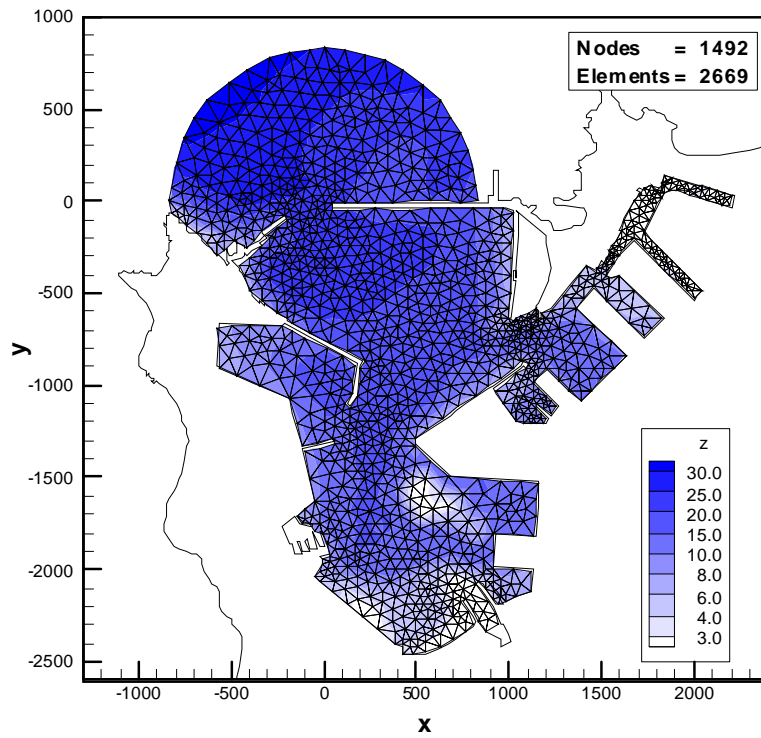


圖 4.60 蘇澳港細尺度波浪模組港池配置更新後，非結構粗網格及水深分布圖

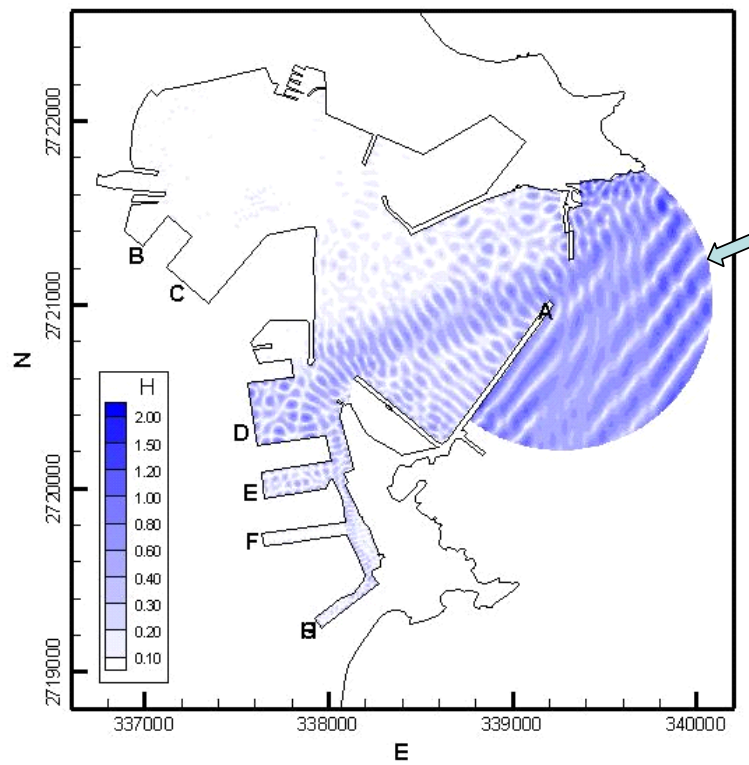


圖 4.61 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、ENE)

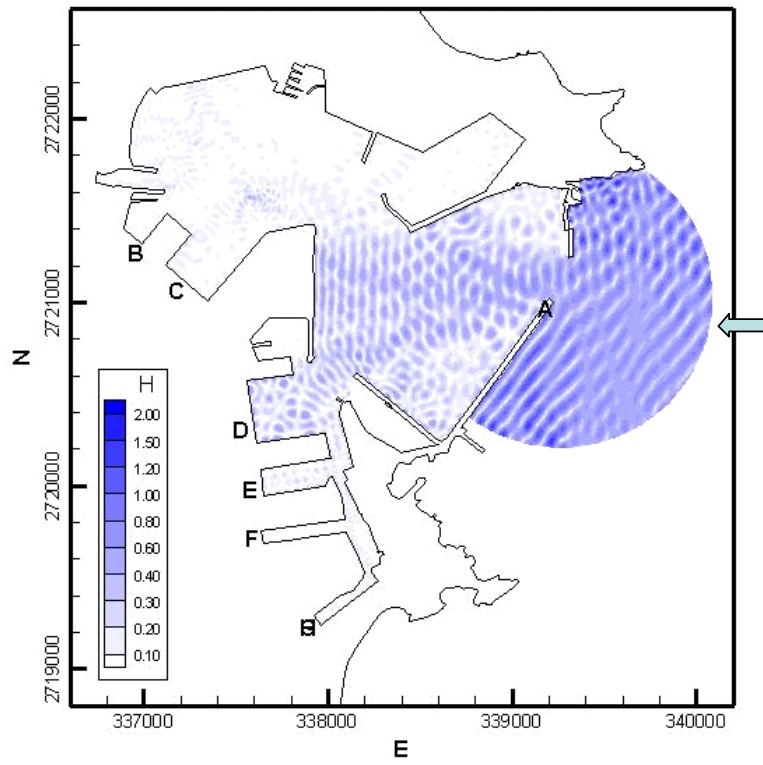


圖 4.62 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、E)

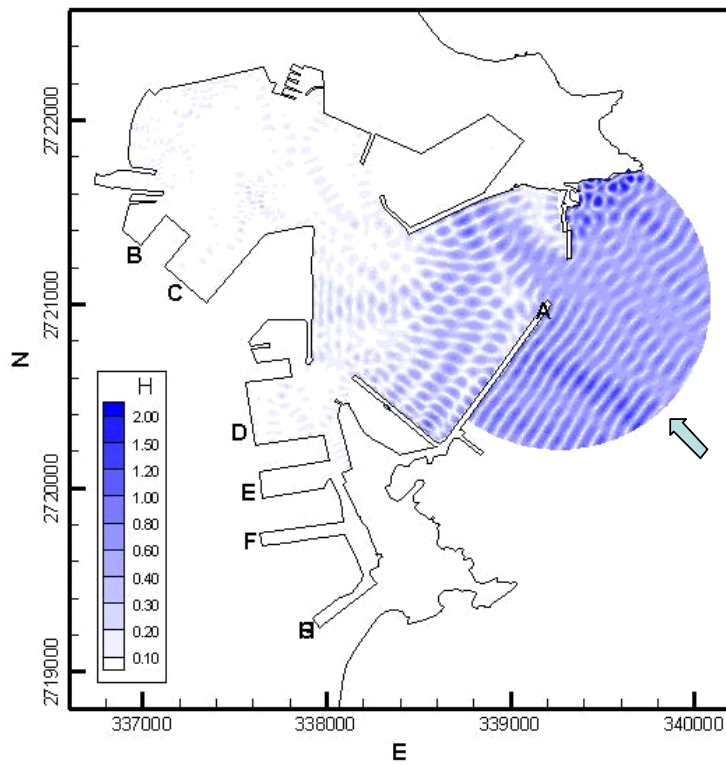


圖 4.63 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、SE)



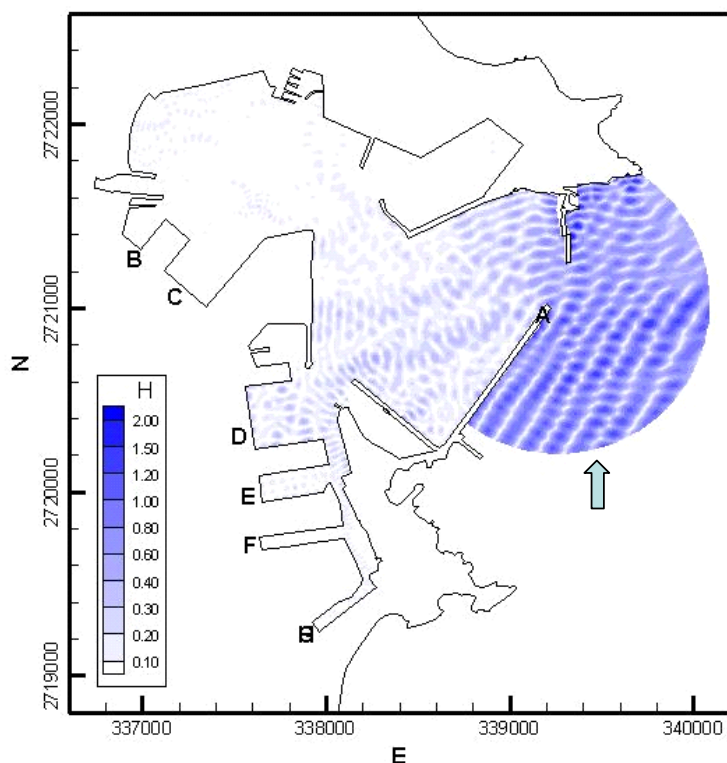


圖 4.64 蘇澳港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、S)

### 4.3.2 花蓮港細尺度港域波浪模擬

本年度計畫花蓮港細尺度波浪模組之研究成果如下：

(1)提升非結構性細網格之解析度：本年度計畫除了依據 102 年度花蓮港港域水深調查資料(如圖 4.37 所示)，更新花蓮港細尺度波浪模組之非結構粗網格節點水深資料外，同時採用最小波浪週期 7 sec 及波長內至少含 8 個節點等條件，建構新的非結構細網格作為本計畫花蓮港細尺度波浪模組數值計算網格之替代選項。高解析度之非結構細網格係由 258,117 個三角形元素及 130,169 個節點所組成，不僅三角形元素數目及節點數目均較原低解析度細網格(參考表 4.2)增加近 1.1 倍，且適用波浪模擬範圍可提昇至週期 7 sec 以上的波浪。

(2)更新港池邊界反射係數：針對花蓮港港池配置如圖 4.65，本年度重新分類與修正其反射係數，其中具有消波功能之構造物包括外廓防波堤( $K_r=0.85$ )、港內防波堤設施(東防波堤港內側段等,  $K_r=0.98$ )及港

外自然沙灘段( $K_r=0.4$ )及離岸(潛)堤群( $K_r=0.65$ )等；此外，半無限領域岸線及碼頭區岸壁之反射率，本文假設其為全反射( $K_r=1$ )。

(3)更新花蓮港港域波浪場模擬結果：本計畫花蓮港港域波浪場模擬條件為外海波浪週期模擬範圍為 7 ~ 20 sec，週期間距為 0.1 sec；以及 NE、ENE、E、ESE、SE、SSE 及 S 等 7 個波向之組合。此外，本計畫花蓮港港域波浪場模擬結果將提供 TaiCOMS 建置成花蓮港細尺度港域波浪場模擬資料庫。圖 4.66 至圖 4.68 所示分別為波浪週期 10 sec 不同波向(ENE、E 及 SE)花蓮港港細尺度波浪場模擬結果之波高分布圖，同理由花蓮港港內波高分布情形本計畫可瞭解不同波向作用下花蓮港港內波浪靜穩或遮蔽情況。



圖 4.65 花蓮港港域平面配置圖



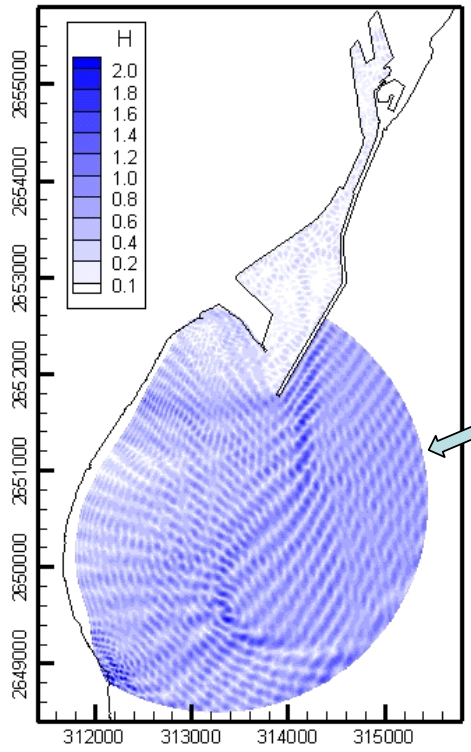


圖 4.66 花蓮港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、ESE)

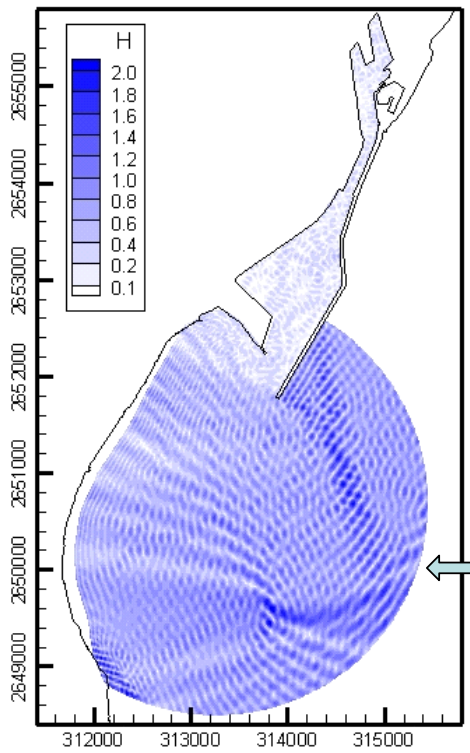


圖 4.67 花蓮港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、E)

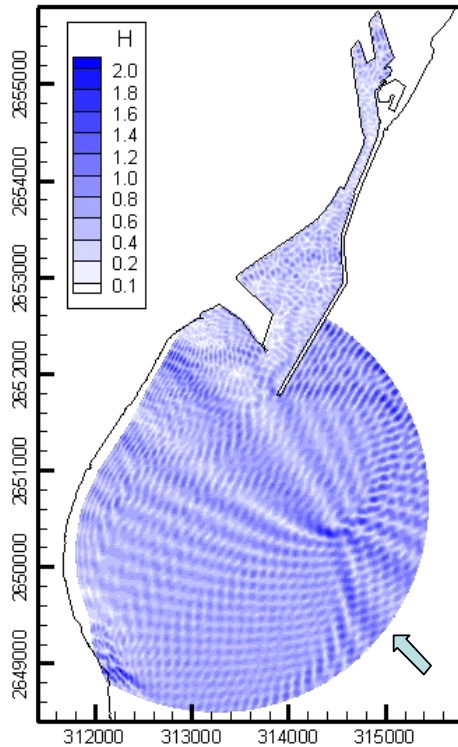


圖 4.68 花蓮港區細尺度波浪場波高分布圖(週期 10s、SW)

### 4.3.3 主要商港港池共振特性

一般而言，任意港池均存在特有之自然週期(natural periods,  $T_N$ )，其與港池形狀及地形(或水深)關係密切，對於不規則形狀或地形之港域往往需要藉由數值方法才能探討港池之共振問題。為瞭解本計畫主要商港各港池共振之特性，本計畫乃利用各港池已建置的細尺度波浪模組分別進行數值模擬與分析。

本計畫各港池共振數值模擬之波浪條件計算範圍為  $kL=0.25 \sim 100$ ，其中  $k$  為波數(採用各港外海無限領域等水深值為計算依據)， $L$  為港池特性長度。

#### (1) 基隆港

基隆港港池形狀如圖 4.69 所示，基本上屬於狹長型；圖中 A、B、C 點位為本計畫港池共振數值分析波高放大率之檢核點位置，其中基隆港港口至檢核點 A 之距離約 3700 m，因此本計畫假設此距離為基隆

港池特性長度，即  $L=3700$  m。本計畫假設外海無限領域水深為 45 m，外海假想海岸線反射率  $K_r=1$ ，有限領域底床摩擦係數假設為 0.001，外海入射波波向為  $339^\circ$  (來向)；港內碼頭岸壁反射率  $K_r=1$ ，具消波作用之海岸線及海岸構造物反射率  $K_r=0.95$ 。在上述假設條件下港池內檢核點 A、B、C 之波高放大率與無因次參數  $kL$  之關係如圖 4.70 至圖 4.72 所示，圖中標示之週期係依據外海無限領域等水深條件計算得到的波浪週期值。依數值分析結果顯示基隆港域港池共振第一(或基本)共振模態約落在  $KL=0.845$  附近，此時港域內波高放大率分布情形如圖 4.73 所示，顯示波高放大率自港口往港渠末端增大，港內無任何節點產生，符合港池基本共振模態之定義。

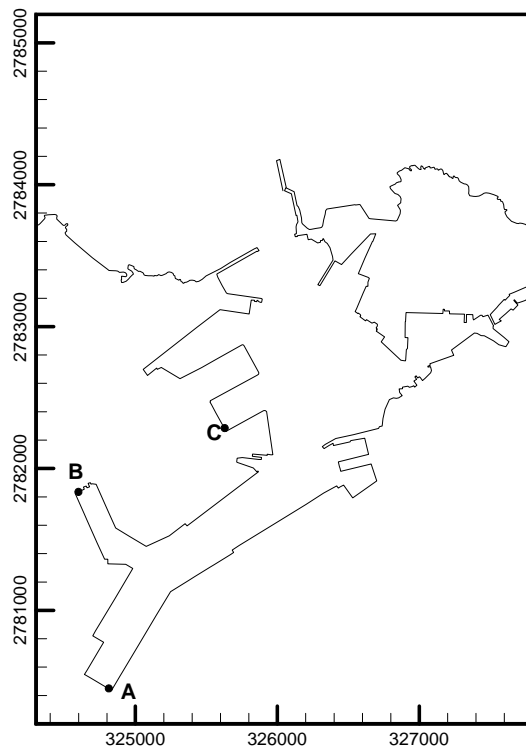


圖 4.69 基隆港港池共振數值分析檢核點位置圖

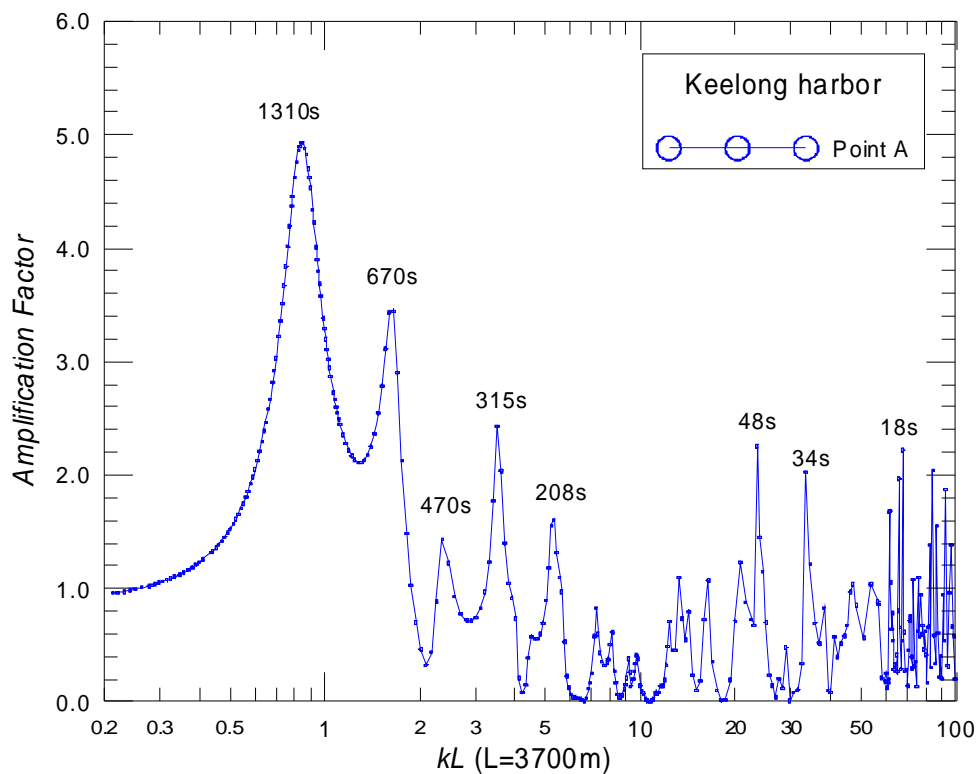


圖 4.70 基隆港港池共振數值分析檢核點 A 之波高放大率圖

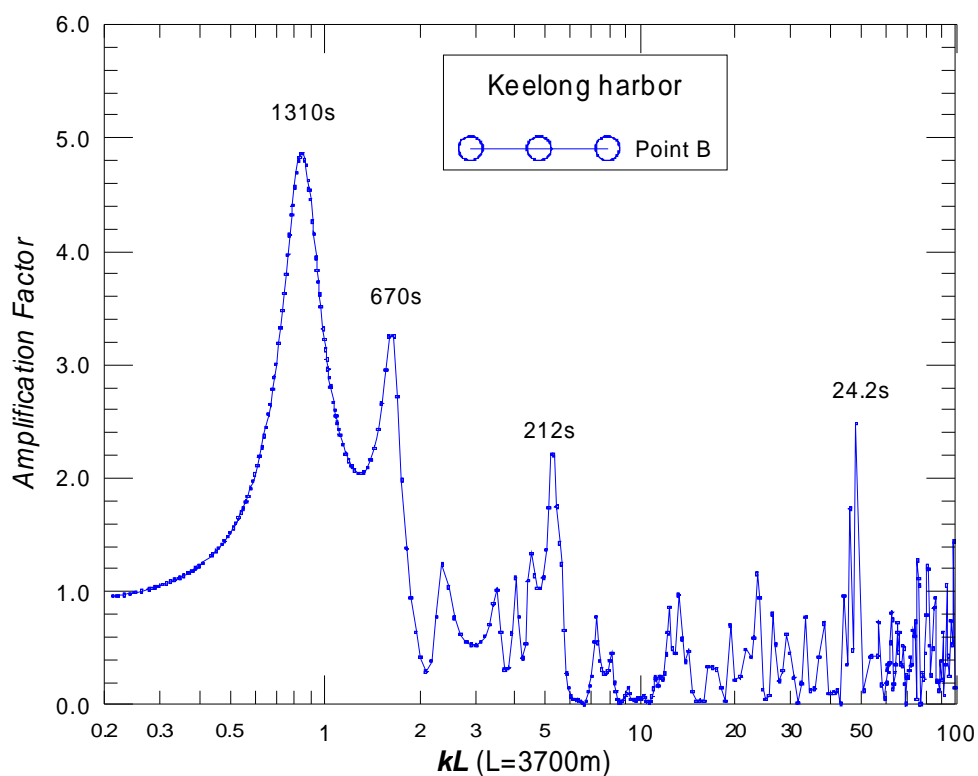


圖 4.71 基隆港港池共振數值分析檢核點 B 之波高放大率圖

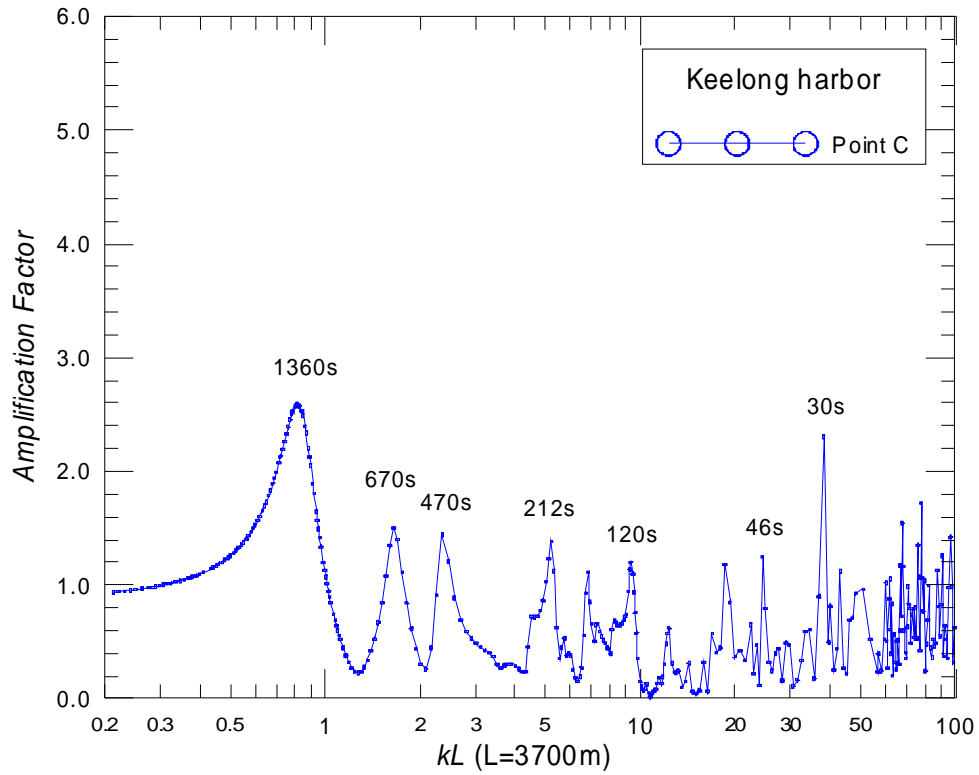


圖 4.72 基隆港港池共振數值分析檢核點 C 之波高放大率圖

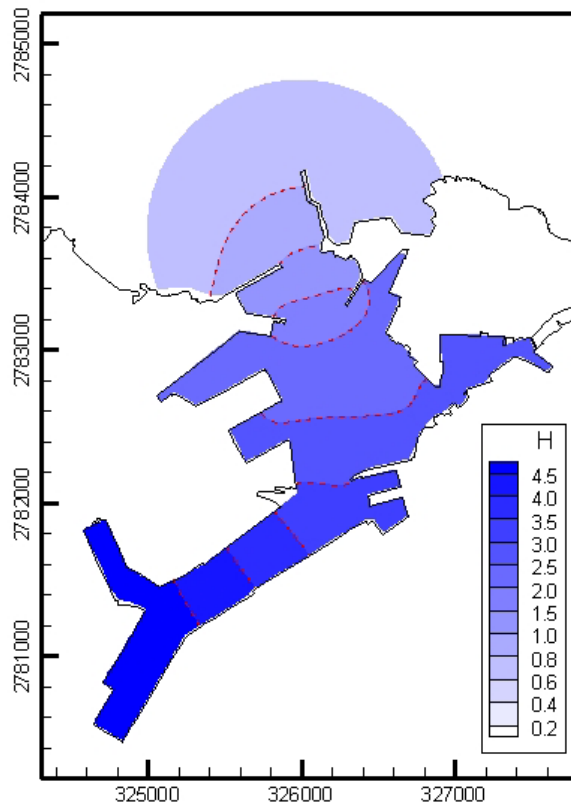


圖 4.73 基隆港基本共振模態之港池波高放大率分布圖

## (2) 蘇澳港

蘇澳港港池形狀如圖 4.74 所示，港池水域寬闊；圖中 A、B、C 點位為本計畫蘇澳港港池共振數值分析波高放大率之檢核點位置，其中蘇澳港港口至西側邊界之距離約 2460 m，因此本計畫假設此距離為蘇澳港港池特性長度，即  $L=2460$  m。本計畫假設蘇澳港外海無限領域水深為 30 m，外海假想海岸線反射率  $K_r=1$ ，有限領域底床摩擦係數假設為 0.001，外海入射波波向為  $127^\circ$  (來向)，與外海假想海岸線垂直；港內碼頭岸、具消波作用之海岸線及海岸構造物反射率  $K_r=0.98$ ，港內蘇澳溪出水口邊界反射率  $K_r=0$ 。在上述假設條件下蘇澳港港池內檢核點 A、B、C 之波高放大率與無因次參數  $kL$  之關係如圖 4.75 至圖 4.77 所示。數值分析結果顯示蘇澳港區之基本共振模態約落在  $KL=0.69$  附近，此時港區內波高放大率分布情形如圖 4.78 所示，同樣顯示出基本共振模態之波高放大率係由港口往港渠末端增大現象，此時港內波高放大率最大值發生在漁港區狹長水域內。

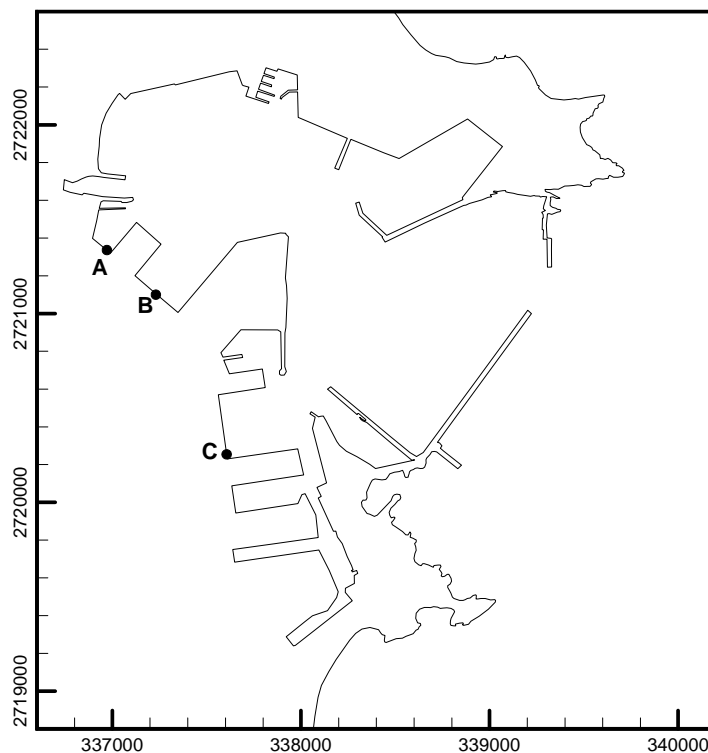


圖 4.74 蘇澳港港池共振數值分析檢核點位置圖

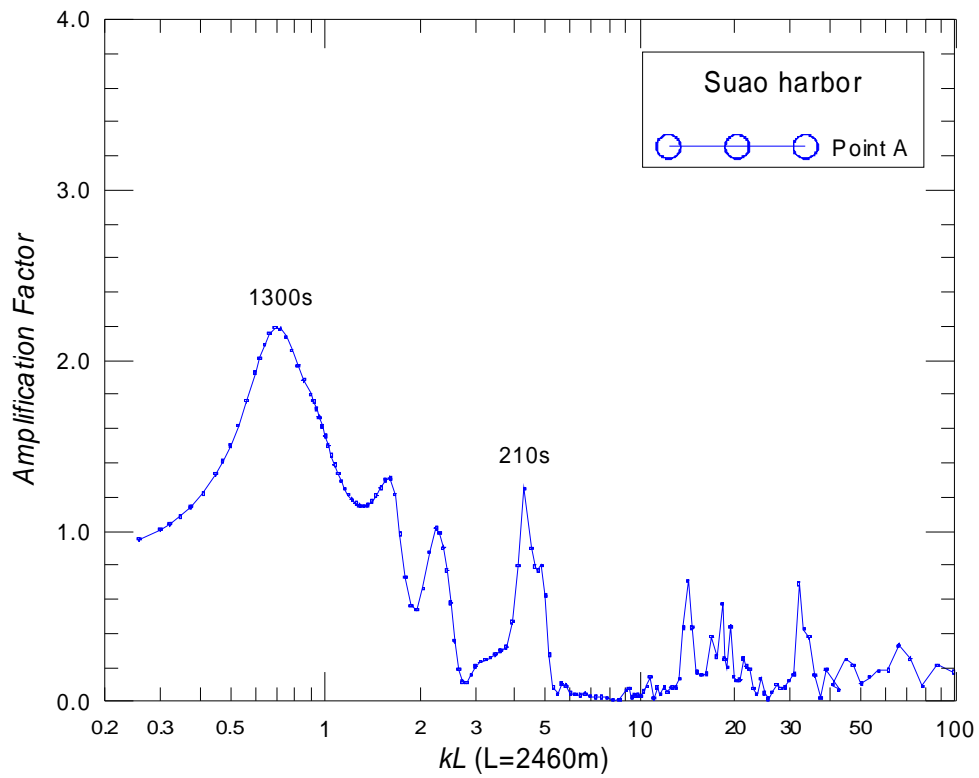


圖 4.75 蘇澳港港池共振數值分析檢核點 A 之波高放大率圖

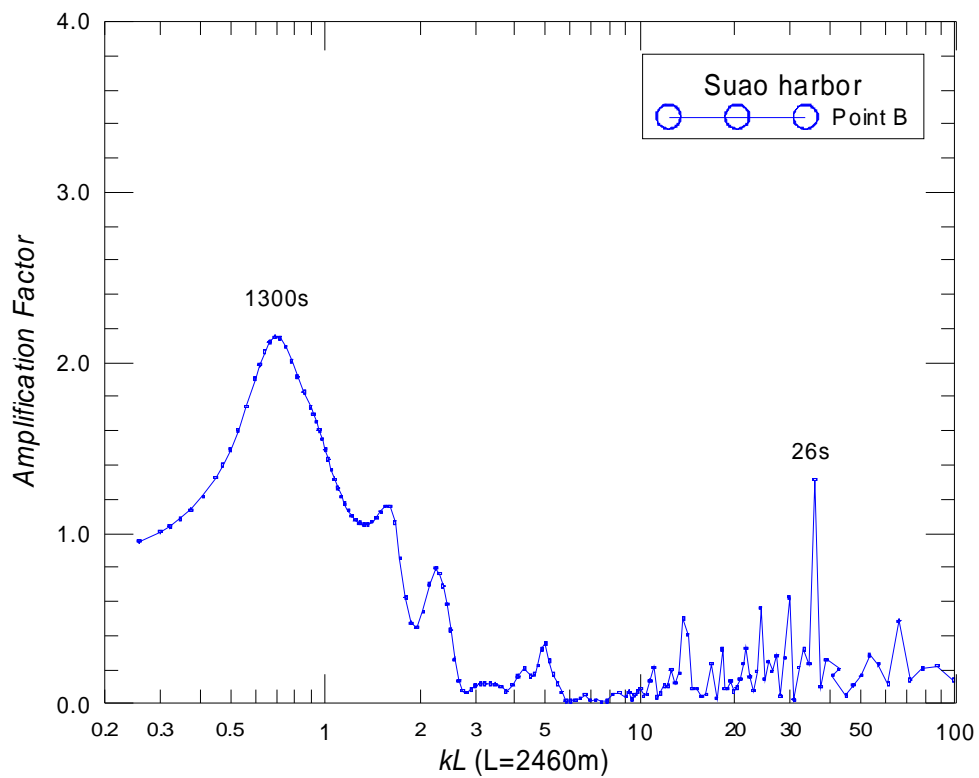


圖 4.76 蘇澳港港池共振數值分析檢核點 B 之波高放大率圖

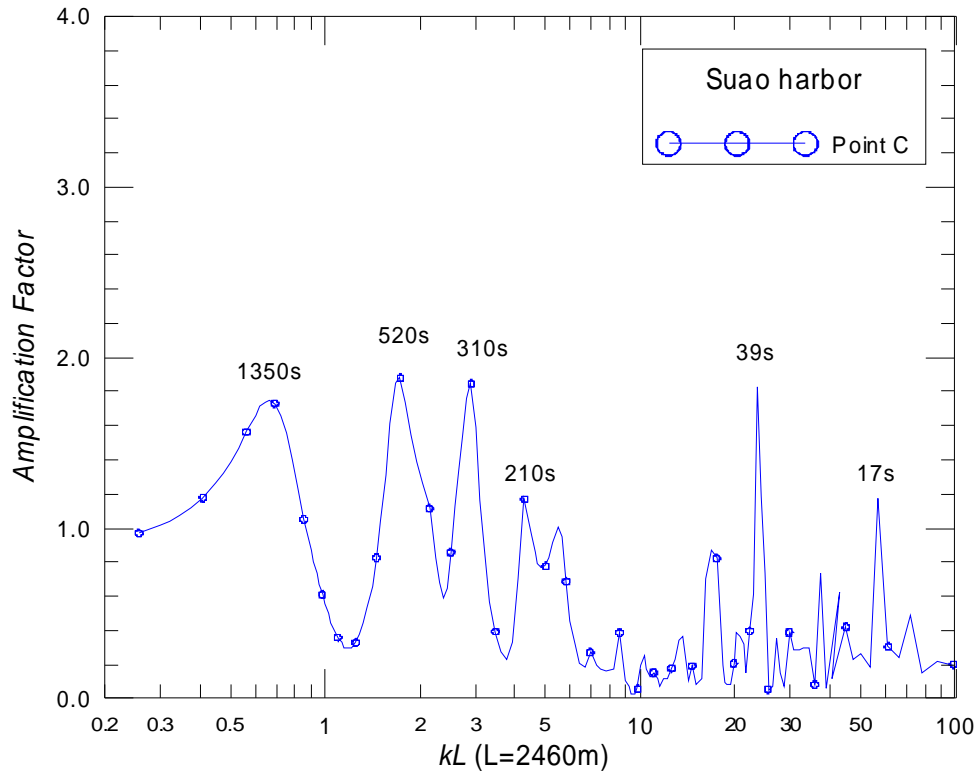


圖 4.77 蘇澳港港池共振數值分析檢核點 C 之波高放大率圖

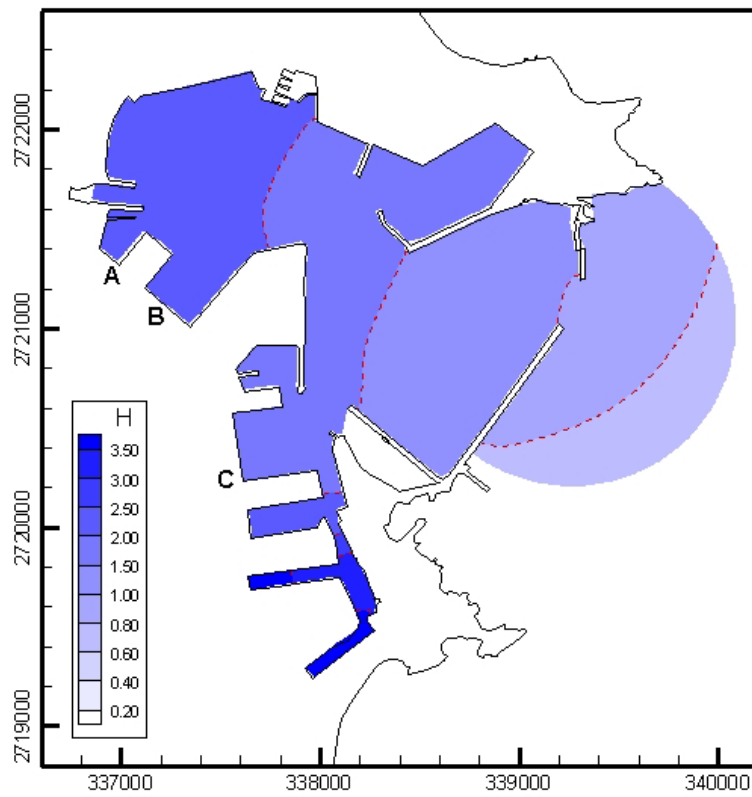


圖 4.78 蘇澳港基本共振模態之港池波高放大率分布圖



### (3) 花蓮港

花蓮港港池形狀如圖 4.79 所示，屬於狹長型，其中外港池水域較寬闊；圖中 A、B、C 點位為本計畫花蓮港港池共振數值分析波高放大率之檢核點位置，其中花蓮港港口至檢核點 A 之距離約 4000 m，因此本計畫假設花蓮港港池特性長度  $L=4000$  m。本計畫假設花蓮港外海無限領域水深為 100 m，外海假想海岸線反射率  $K_r=1$ ，有限領域底床摩擦係數假設為 0.001，外海入射波波向為  $157.5^\circ$  (SSE 向)；港內碼頭岸岸壁反射率  $K_r=1$ 、具消波作用之海岸線及海岸構造物反射率  $K_r=0.98$ 。在上述假設條件下花蓮港港池內檢核點 A、B、C 之波高放大率與無因次參數  $kL$  之關係如圖 4.80 至圖 4.82 所示。數值分析結果顯示花蓮港港池共振基本共振模態約落在  $KL=0.57$  附近，此時檢核點 A、B 波高放大率最大值發生的外海波浪週期約為 1400 秒，港區內波高放大率分布情形如圖 4.83 所示。另檢核點 C 因位於外港池近港口位置，故波高放大率最大值不會出現在基本共振模態上；理論上，檢核點 C 波高放大率最大值發生於近第二共振模態(外海波浪週期約為 725 秒)，此時港區內波高放大率分布情形如圖 4.84 所示，顯示在外港池及內港池末端有波高放大現象，節點則出現在進入內港池水道中。

### (4) 臺北港

由於臺北港目前仍在持續擴建中，因此本期計畫採用的港池水域及形狀如圖 4.85 所示，南外堤內側規劃的第二貨櫃儲運中心尚未開發，故港內水域相當寬闊。圖中 A、B、C 點位為本計畫花蓮港港池共振數值分析波高放大率之檢核點位置，其中臺北港港口至檢核點 C 之距離約 4000 m，因此本計畫假設臺北港港池特性長度  $L=4000$  m。假設臺北港外海無限領域等水深為 20 m，外海假想海岸線反射率  $K_r=1$ ，有限領域底床摩擦係數假設為 0.001，外海入射波波向為  $157.5^\circ$  (SSE 向)；港內碼頭岸岸壁反射率  $K_r=1$ 。

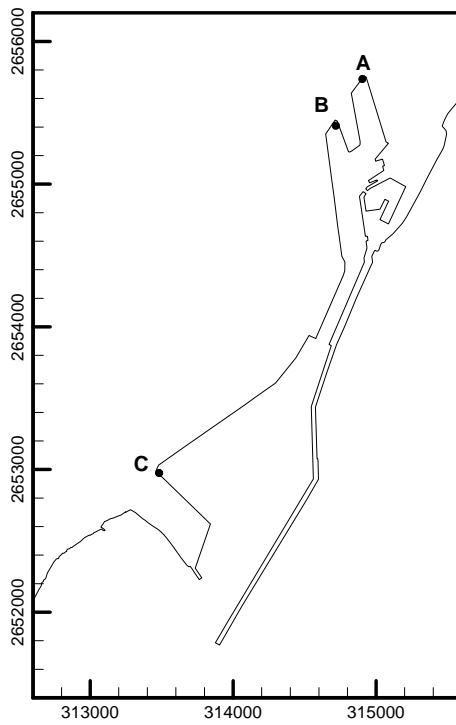


圖 4.79 花蓮港港池共振數值分析檢核點位置圖

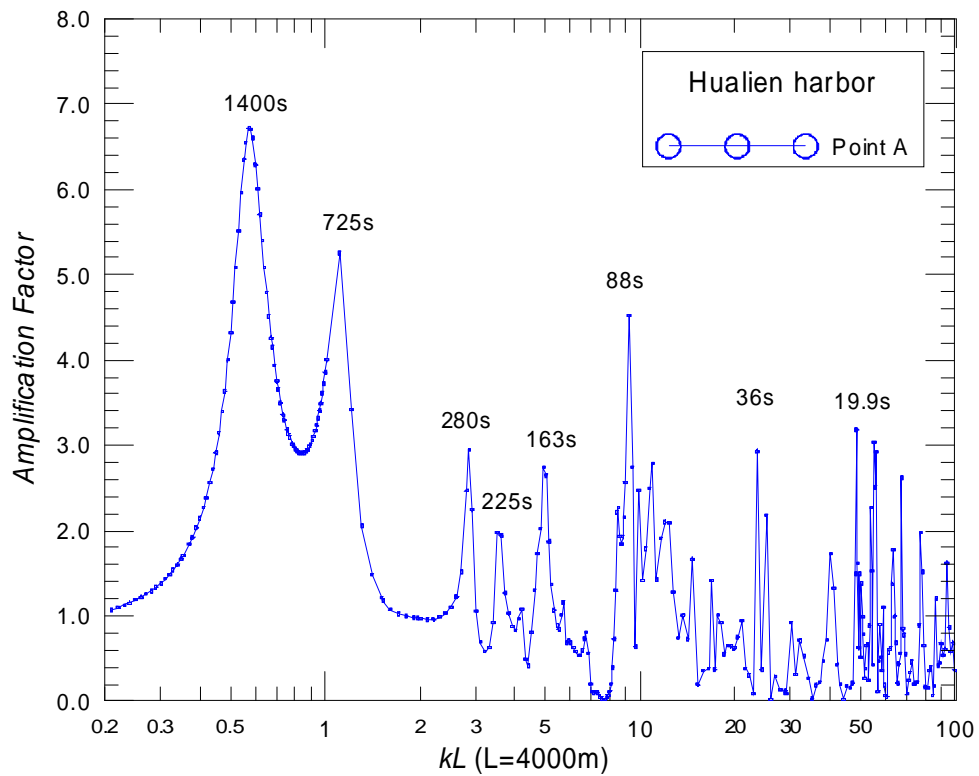


圖 4.80 花蓮港港池共振數值分析檢核點 A 之波高放大率圖

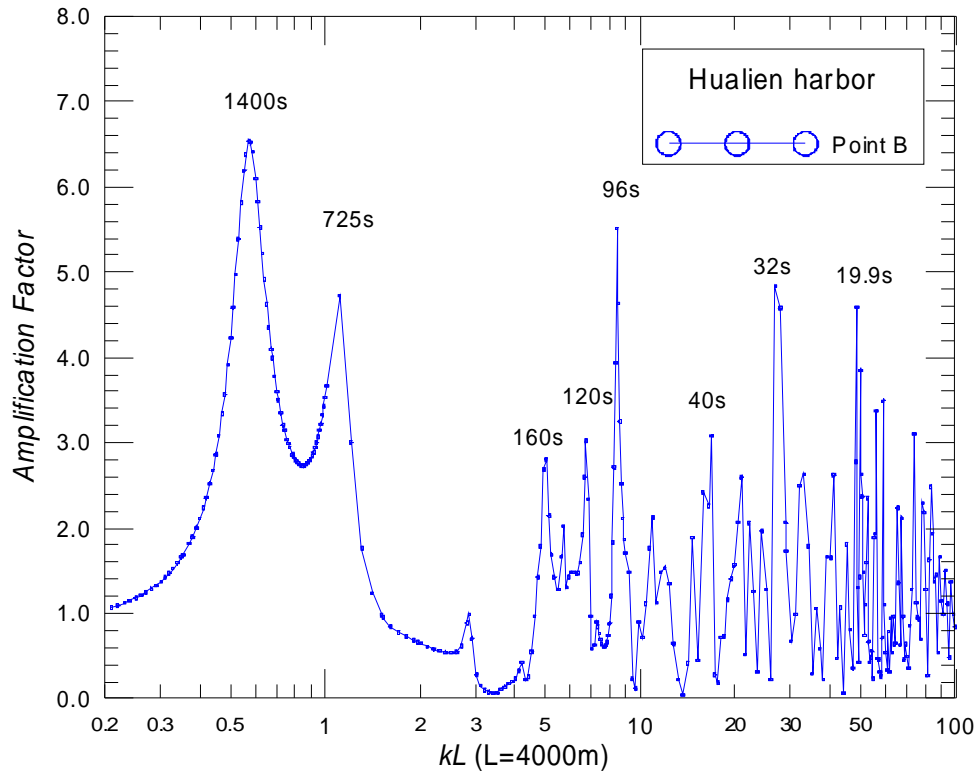


圖 4.81 花蓮港港池共振數值分析檢核點 B 之波高放大率圖

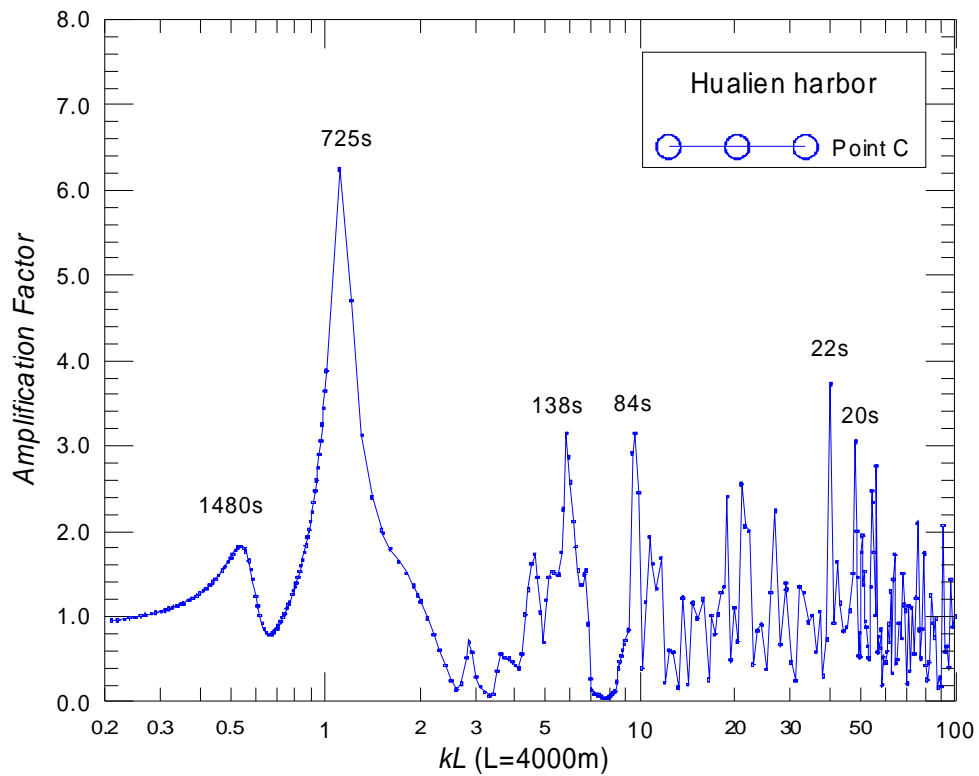


圖 4.82 花蓮港港池共振數值分析檢核點 C 之波高放大率圖

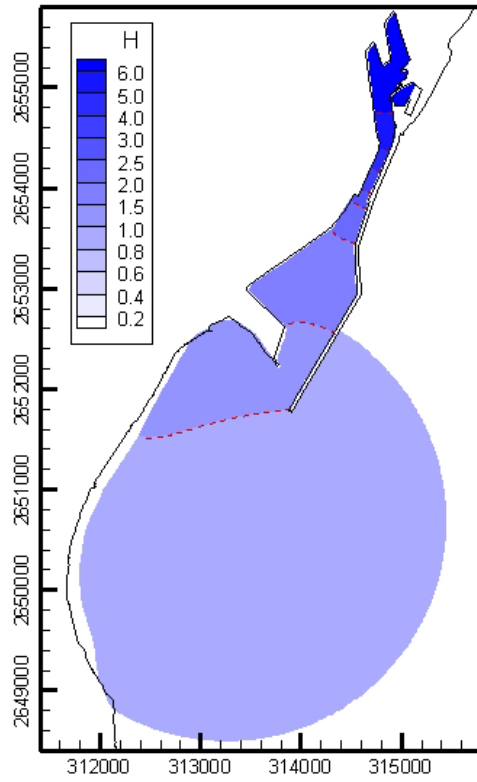


圖 4.83 花蓮港基本共振模態之港池波高放大率分布圖

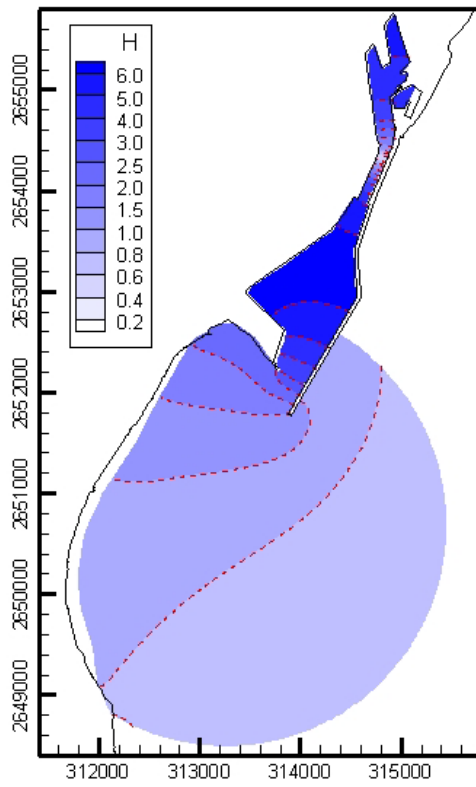


圖 4.84 花蓮港第二共振模態之港池波高放大率分布圖

在上述假設條件下臺北港港池內檢核點 A、B、C 之波高放大率與無因次參數  $kL$  之關係如圖 4.86 至圖 4.88 所示。數值分析結果顯示臺北港港池共振基本共振模態約落在  $KL=0.902$  附近，此時港區內波高放大率分布情形如圖 4.89 所示；因臺北港外港池水域寬闊，故波高放大率未有顯著快速增大現象發生，此與蘇澳港模擬結果相似。此外，臺北港港池第二共振模態約落在  $KL=1.991$  附近，檢核點 A 波高放大率最大值發生的外海波浪週期約為 259 秒，檢核點 B 及 C 波高放大率最大值發生的外海波浪週期約為 37.7 秒。

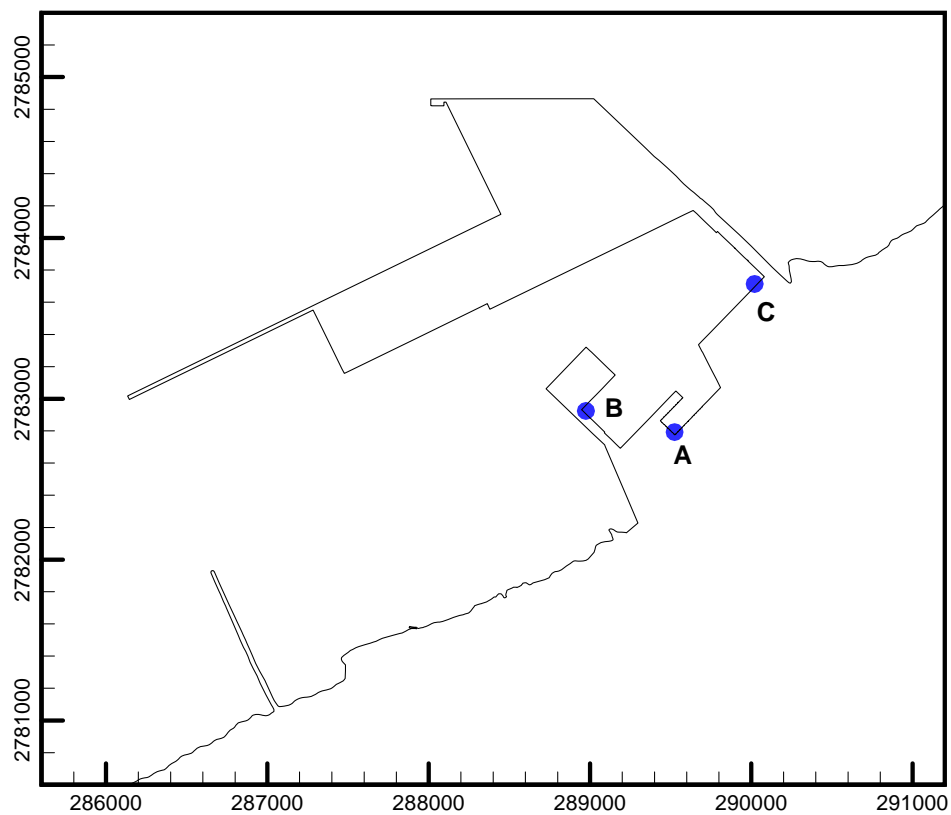


圖 4.85 臺北港港池共振數值分析檢核點位置圖

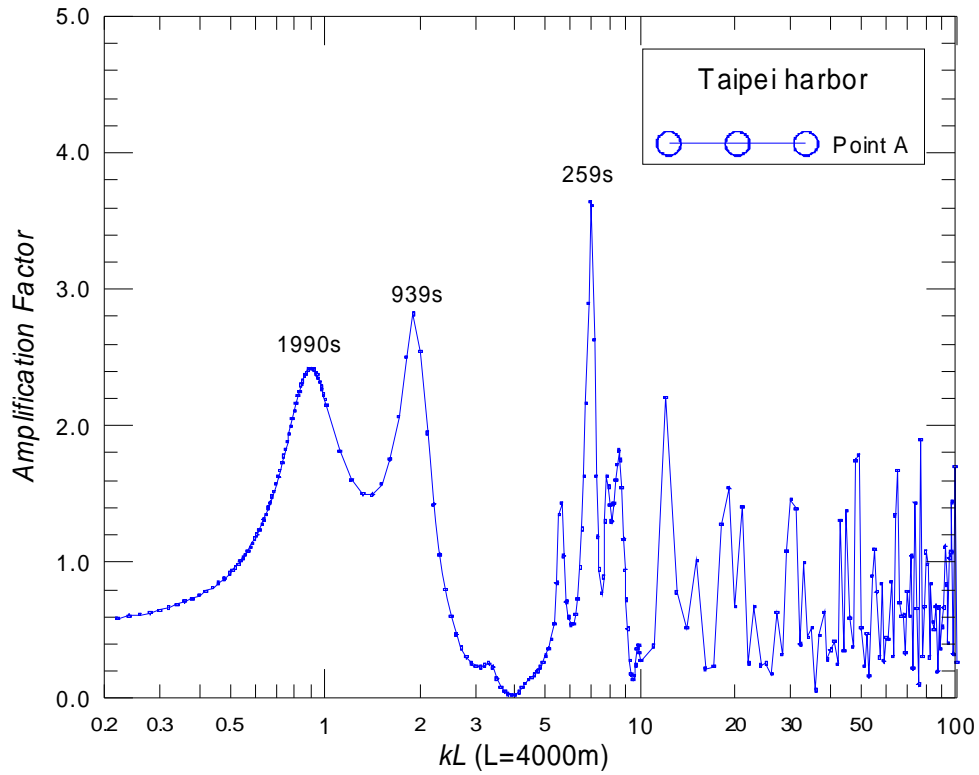


圖 4.86 臺北港港池共振數值分析檢核點 A 之波高放大率圖

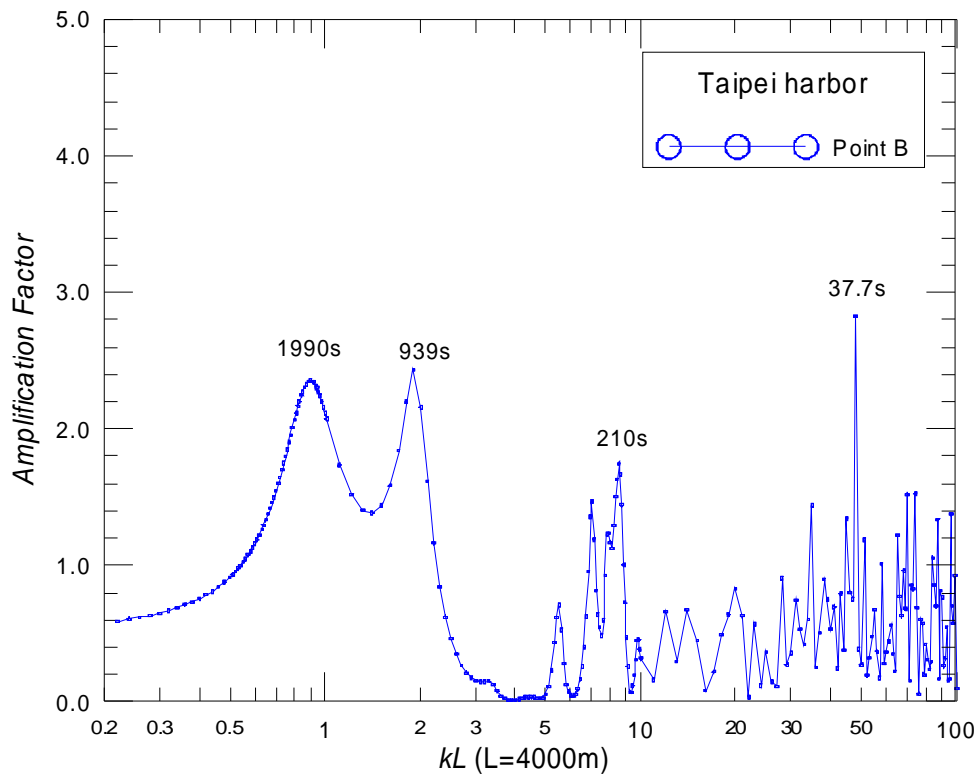


圖 4.87 臺北港港池共振數值分析檢核點 B 之波高放大率圖

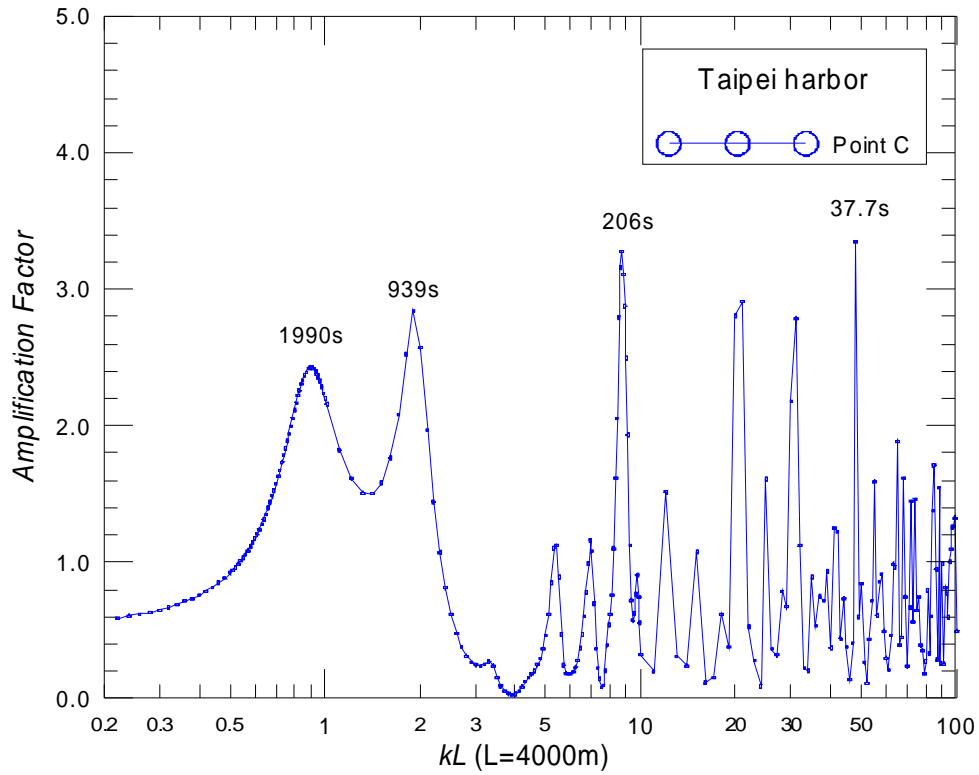


圖 4.88 臺北港港池共振數值分析檢核點 C 之波高放大率圖

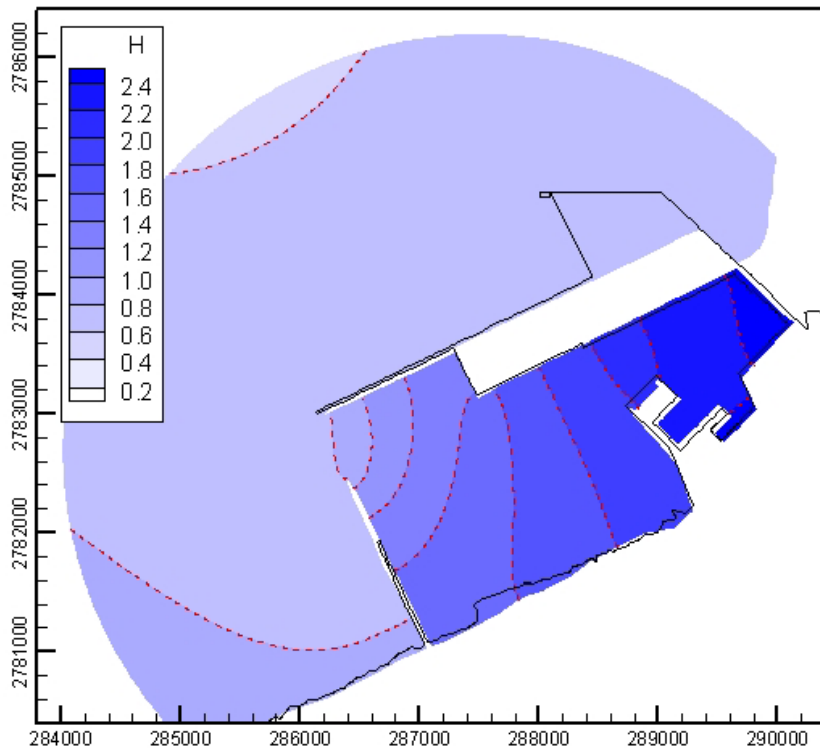


圖 4.89 臺北港基本共振模態之港池波高放大率分布圖

### (5) 布袋港

布袋港港池形狀近似方形狀，長、短邊長分別約為 650m 及 625m，如圖 4.90 所示，因此本計畫假設布袋港港池特性長度  $L=650$  m，圖中 A、B、C 點位為本計畫布袋港港池共振數值分析波高放大率之檢核點位置。本計畫假設布袋港外海無限領域等水深為 7 m，外海假想海岸線反射率  $K_r=1$ ，有限領域底床摩擦係數假設為 0.0015，外海入射波波向為  $279.0^\circ$  (垂直入射港口方向)；港內碼頭岸岸壁反射率  $K_r=1$ 。

在上述假設條件下布袋港港池內檢核點 A、B、C 之波高放大率與無因次參數  $kL$  之關係，如圖 4.91 至圖 4.93 所示。由數值分析結果顯示布袋港港池共振基本共振模態約落在  $KL=0.379$  附近，此時港區內波高放大率分布情形如圖 4.94 所示；由於  $KL$  值明顯較預期的合理範圍低，此可能為前述布袋港港池特性長度  $L=650$  m 僅考慮內港水域與布袋港固有的特性長度不一致有關。此外，臺北港港池第二共振模態約落在  $KL=1.991$  附近，檢核點 A 波高放大率最大值發生的外海波浪週期約為 259 秒，檢核點 B 及 C 波高放大率最大值發生的外海波浪週期約為 37.7 秒。

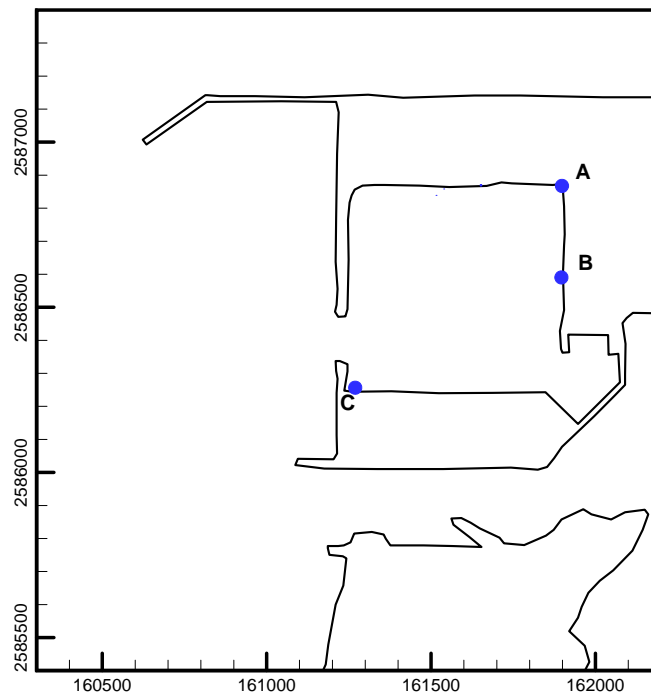


圖 4.90 布袋港港池共振數值分析檢核點位置圖



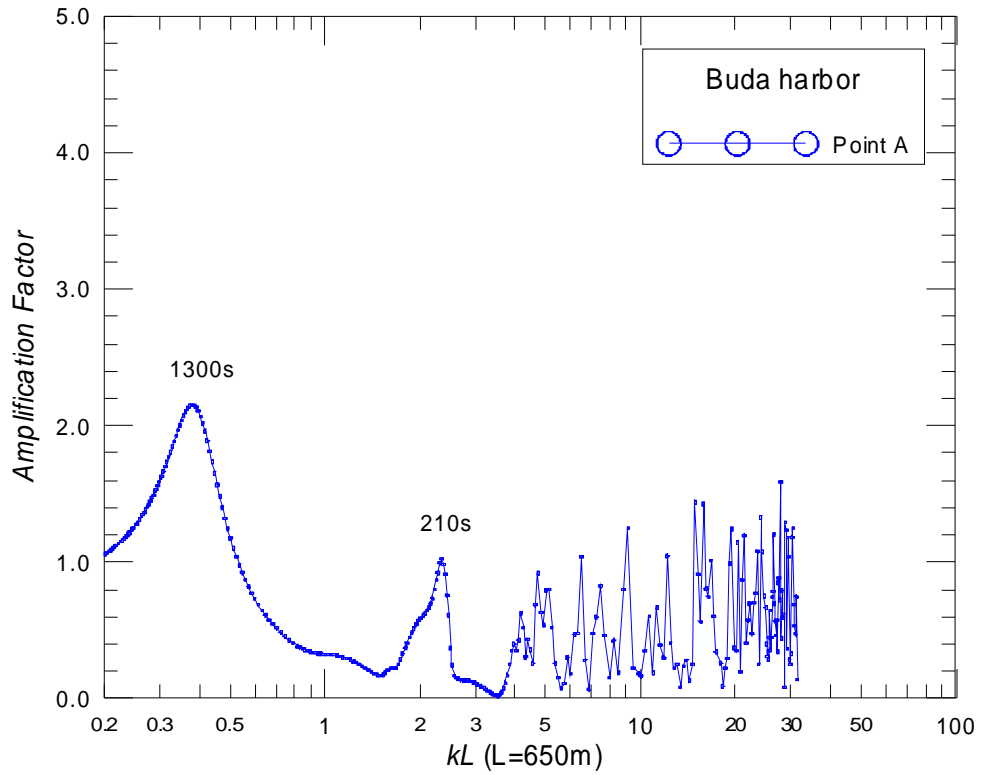


圖 4.91 布袋港港池共振數值分析檢核點 A 之波高放大率圖

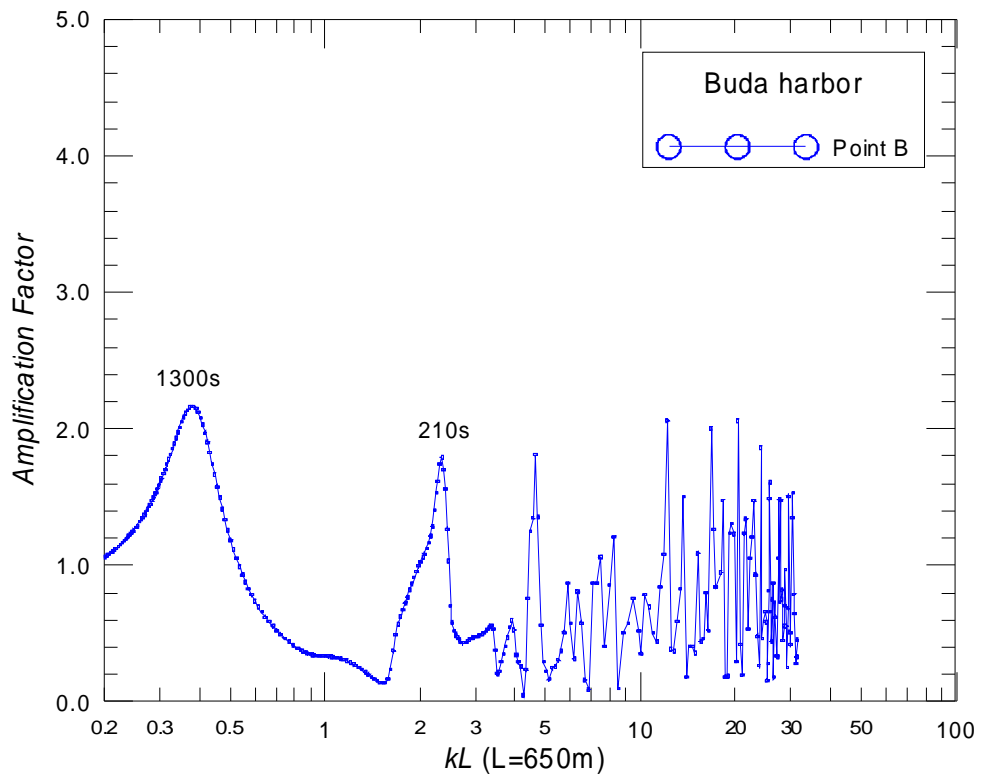


圖 4.92 布袋港港池共振數值分析檢核點 B 之波高放大率圖

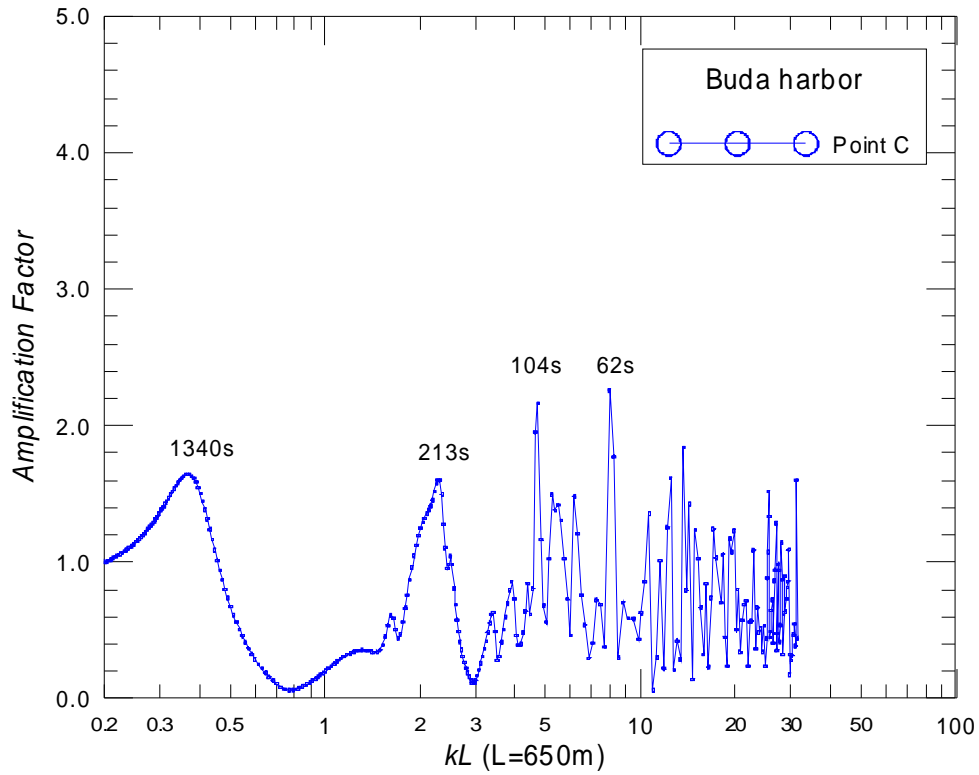


圖 4.93 布袋港港池共振數值分析檢核點 C 之波高放大率圖

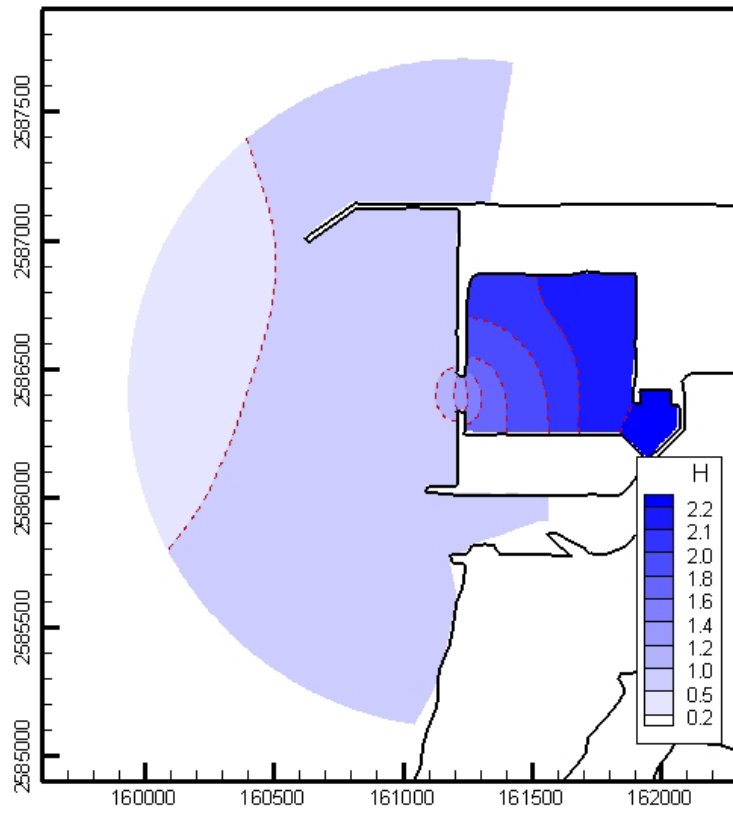


圖 4.94 布袋港基本共振模態之港池波高放大率分布圖

## 第五章 臺灣周圍海域暴潮模式

在臺灣環島海象預報系統(TaiCOMS)架構下，水動力(或稱水位及海流)模擬系統建有大尺度西太平洋範圍水動力模組及中尺度臺灣周圍海域範圍水動力模組，執行臺灣周圍海域水位及海流作業化模擬預報；本期計畫研究主要針對中尺度臺灣周圍海域範圍水動力模組進行模擬改善與研究，並以颱風期間暴潮模擬為主要對象(研究重點)。

### 5.1 臺灣周圍海域暴潮模式建置

考量 TaiCOMS 現有大、中尺度水動力模組之作業化模式維護不易，本期計畫另以有限元素法水動力模式(參考附錄二)建置中尺度臺灣周圍海域範圍暴潮模組(簡稱暴潮模組)。

#### 5.1.1 數值計算網格之建置

本計畫臺灣周圍海域暴潮模組之模擬範圍初期(100 年度)選取東經 116°及 123°經線為模擬範圍之東、西邊界，以北緯 20°及 26°為其南、北邊界，如圖 5.1 所示。基於本計畫水動力模式座標系統為直角座標系統，因此本計畫暴潮模組之數值計算網格採用六度分帶投影座標系統建置非結構性三角形元素網格，如圖 5.2 所示。圖中數值計算網格係由 5,807 個節點及 11,103 個三角形元素組成，其中最小三角形元素之邊長約 2.5km，主要構建於本計畫所在之海域；最大三角形元素之邊長約 15km，分佈於水深較深之海洋開放邊界附近。

基於前述暴潮模組模擬範圍之東側邊界(東經 123°)離臺灣本島東部海岸之距離偏小，以及離島馬祖海域未納入模擬範圍內等考量，101 年度計畫進一步更新臺灣周圍海域暴潮模式之模擬範圍，以東經 116.5°及 125°為模式東、西邊界，以北緯 21°及 26.5°為模式南、北邊界，如圖 5.3 所示。因應模擬範圍之更新，本計畫暴潮模組採用的非結構性數值計算網格，如圖 5.4 所示，由 6528 個節點及 12514 個三角形元素組成。

上述數值計算網格之水深資料來源為海科中心臺灣附近海域格網數值地形資料及海軍測量局刊行之海軍水道圖(編號 0307)，如圖 5.5 所示。

### 5.1.2 邊界條件及初始條件

本計畫暴潮數值模式之邊界型態分為海域開放邊界及陸地邊界兩種，其中陸地邊界條件分為滑動或不滑動邊界條件，本計畫暴潮模式採用不滑動邊界為陸地邊界條件，亦即假設陸地邊界節點之流速等於零。海域開放邊界通常採用水位條件為模式之邊界條件，當模式模擬對象僅為暴潮引起的水位偏差(即所謂的暴潮偏差)時，模式開放邊界之水位條件值可由邊界上氣壓差推估其水位值如下

$$\eta = \eta_a(t) = \frac{\Delta P(t)}{\rho g} \quad (5.1)$$

當模式模擬對象包含天文潮位變化時，模式開放邊界之水位條件值除了考慮上述氣壓差引起的水位抬昇(如 5.1 式)外，尚需加上天文潮產生的水位時間變化量。

在天文潮引起的水位及潮流模擬方面上，本計畫以 Matsumoto et al.(2000)發展的 NAO.99Jb 模式模擬及預測數值計算網格開放邊界節點之天文潮水位時序列資料，作為模式之開放邊界條件，執行臺灣周圍海域水位及潮流模擬(註：NAO.99Jb 網格間距為 1 分)。圖 5.6 所示分別為本計畫以 NAO.99Jb 模式模擬預測於數值計算網格開放邊界上四個角落節點(參考圖 5.4 所示)之天文潮時序列資料，顯示數值計算網格左上角臨近陸地(中國大陸)之開放邊界節點天文潮位呈現半日潮型，臺灣東部太平洋海上開放邊界節點之天文潮位屬於混合潮型態，網格西南角落開放邊界節點之天文潮位則呈現全日潮型態。

此外，模式模擬之初始條件在冷啟動模擬(cold start)狀況下模式假設流場之初始速度及水位均為零，另在熱啟動模擬(hot start)狀況下模式採用前次模擬結果儲存的流場速度及水位值為初始條件。

### 5.1.3 模式物理參數率定

本計畫暴潮模組主要的物理參數率定包括時間間距、底床摩擦係數及渦動粘滯性係數等，上述參數率定結果說明如下：模式計算的時間間距 $\Delta t$ 為 2.0 sec，計算底床摩擦係數值之曼寧係數  $n = 0.022$  (註：部份元素之底床摩擦係數值則視模擬結果予以適度地修正)；渦動粘滯性係數計算則選取無因次係數  $a = 0.025$ ，代表性潮差  $= 1.20$  m，潮流代表性流速為 0.5 m/s，分別計算各個元素代表性的渦動粘滯係數值。

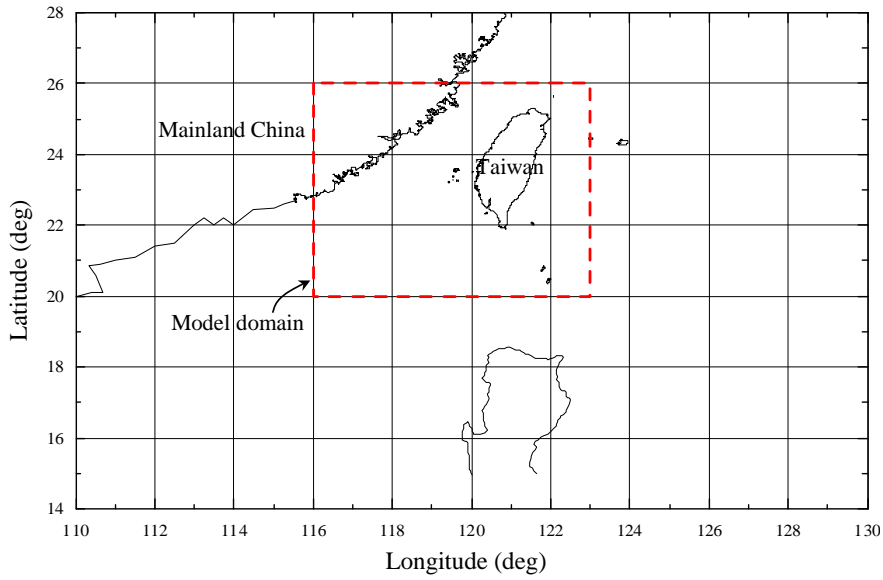


圖 5.1 臺灣周圍海域暴潮模式模擬範圍(100 年度計畫)

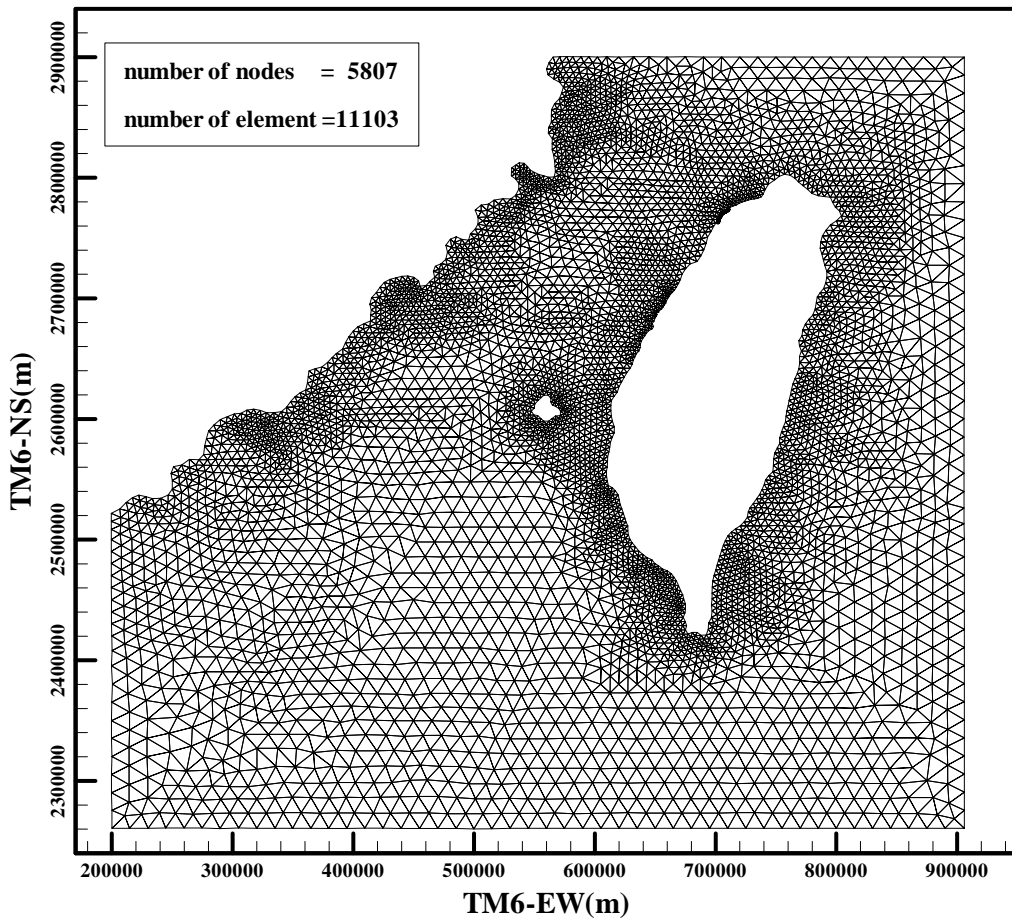


圖 5.2 臺灣周圍海域暴潮模式採用的非結構三角網格分布圖

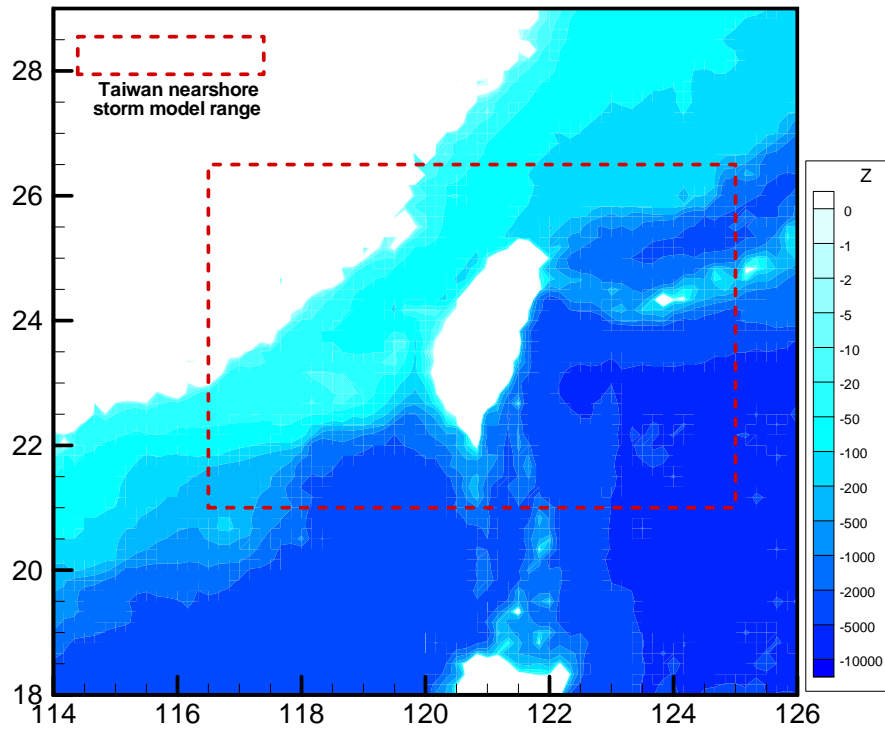


圖 5.3 101 年度計畫臺灣周圍海域暴潮模式之模擬範圍

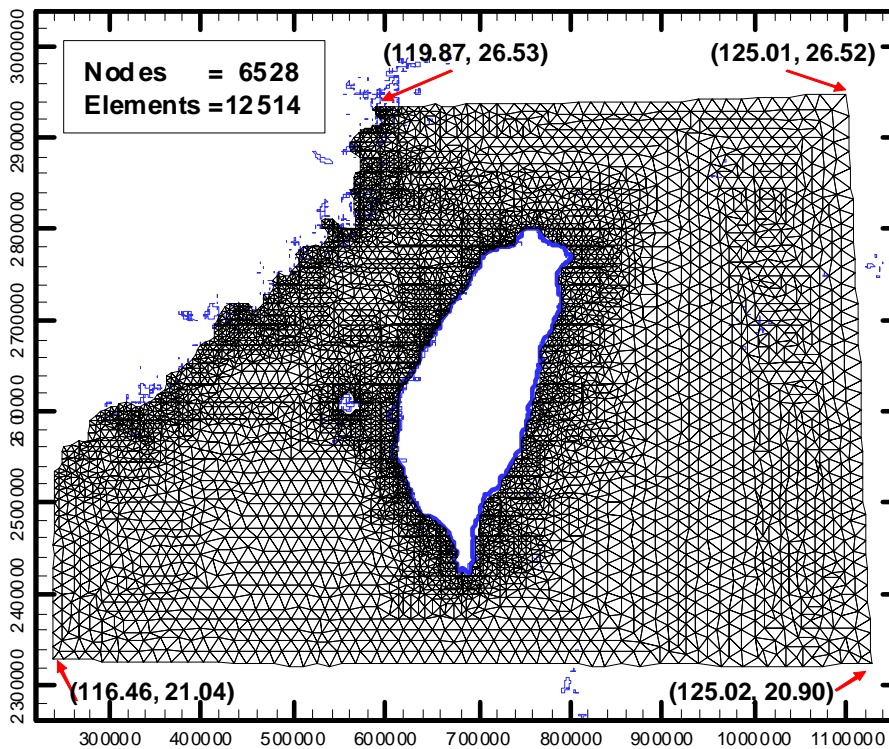


圖 5.4 101 年度計畫臺灣周圍海域暴潮模式採用的非結構三角網  
格分布圖

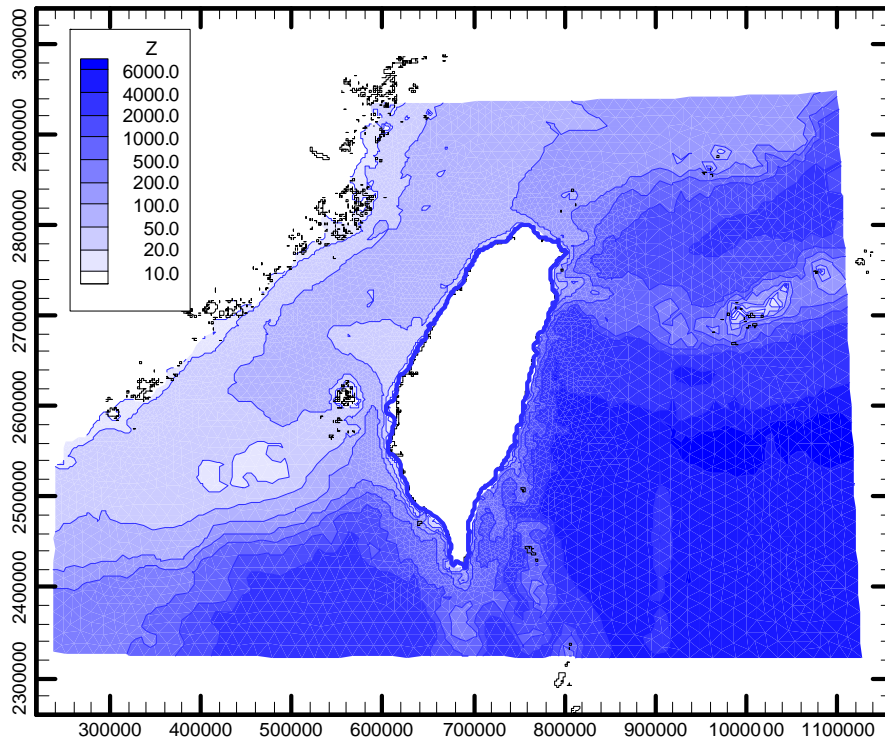


圖 5.5 臺灣周圍海域暴潮模式之地形水深分布圖



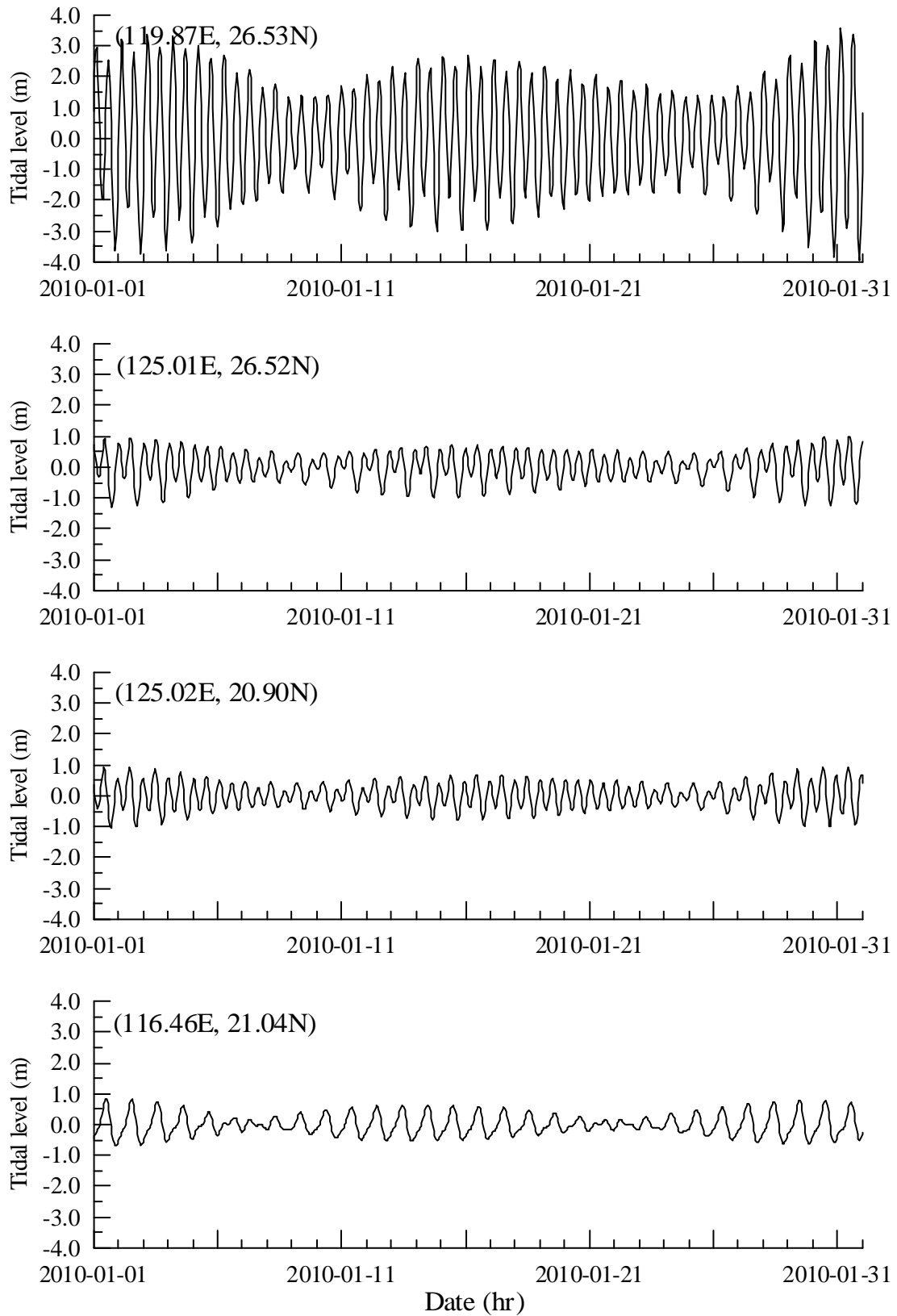


圖 5.6 臺灣周圍海域暴潮模式之天文潮邊界條件時序圖

## 5.2 數值模擬風壓場之建置

本計畫暴潮模式採用的數值模擬風壓場資料來源包括模式程式碼內建之模型颱風數值風壓場及 TaiCOMS 使用的中央氣象局天氣預報模式提供的數值風壓場組合資料。

### 5.2.1 模型颱風移動風域之風壓場

本計畫模型颱風移動風域之風場及氣壓場計算說明如下：

假設模型颱風之等壓線幾近呈現圓形分佈，則模型颱風之氣壓分佈可採用 Myers(1954)之經驗式表示如下：

$$P = P_c + a \exp(-r_0/r) \quad (5-2)$$

式中  $P_c$  為颱風中心之氣壓值(mb)， $r_0$  為颱風最大風速之半徑， $a$  為颱風中心氣壓常數。任意座標位置(x,y)之模型颱風氣壓梯度計算如下：

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{r_0(x-x_c)}{r^3} a \exp(-r_0/r) \quad (5-3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{r_0(y-y_c)}{r^3} a \exp(-r_0/r) \quad (5-4)$$

式中  $x_c$  及  $y_c$  為颱風中心座標。於(5-2)式中  $r_0$  及  $a$  值較不易估計，如有數站氣壓資料，便可由最小二乘法求出，惟海上颱風暴風圈內之氣壓值通常不易獲得。因此係數  $a$  值通常採用假設值，即假設  $a = \Delta P_c = P_\infty - P_c$ ， $P_\infty$  為遠離颱風中心之外圍氣壓，一般取其值為標準海平面氣壓約 1013mb。

颱風最大風速半徑  $r_0$  值可根據 Graham 及 Nunn 提出之經驗公式如下：

$$r_0 = [28.52 \tanh[0.0873(\phi - 28)]] + 12.22 \exp[(P_c - 1013.2)/33.86] + 0.2V_F + 37.22 \quad (5-5)$$

式中  $\phi$  為緯度， $V_F$  為颱風移動速度(km/hr)。

在颱風風場之計算上，模式將科氏力之影響納入，因此颱風風場引起的傾度風風速  $W_g$  計算如下

$$W_g = \left[ \frac{ar_0}{\rho_a r} \exp(-r_0/r) + (fr/2)^2 \right]^{1/2} - (fr/2) \quad (5-6)$$

式中  $\rho_a$  為空氣密度， $a$  為颱風中心氣壓常數， $f$  為科氏參數， $r_0$  為颱風最大風速之半徑。當  $r = r_0$  時可得到最大傾度風  $(W_g)_{\max}$ 。

此外，移動中之颱風除了因氣壓梯度引起的風速  $\vec{W}'$  外，尚有因颱風移動而產生的速度  $\vec{W}''$ 。其中  $\vec{W}'$  與傾度風成正比， $\vec{W}''$  與颱風進行速度  $\vec{V}_f$  成正比，即

$W' = c_1 V_g$ ，其方向與等壓線切線夾角  $\alpha$  約為  $30^\circ \sim 35^\circ$ ；

$\vec{W}'' = c_2 \vec{V}_f$ ，其方向與颱風進行方向同。

其中  $c_1$  值約為  $0.5 \sim 0.7$  之間，臺灣地區可用  $0.6$ ； $c_2 = \frac{0.6V_g}{(V_g)_{\max}}$ 。

因此颱風圈內，任何地點之海面上風速可表示如下：

$$W_x = -\frac{c_1 W_g}{r} [(x - x_c) \sin \alpha + (y - y_c) \cos \alpha] + c_2 \frac{(V_f)_x}{(W_g)_{\max}} W_g \quad (5-7)$$

$$W_y = \frac{c_1 W_g}{r} [(x - x_c) \cos \alpha - (y - y_c) \sin \alpha] + c_2 \frac{(V_f)_y}{(W_g)_{\max}} W_g \quad (5-8)$$

本計畫模型颱風風壓場之建置主要依據中央氣象局發布的颱風警報單蒐集颱風資料，內容主要有颱風中心位置(觀測時間及經緯度座標)、颱風中心氣壓值等資料；至於，颱風移動速度則由颱風中心之觀測時間及經緯度座標推算，颱風最大風速半徑  $r_0$  值由(5-5)式計算之。有關模型颱風風壓場之計算本計畫直接建置於模式之程式碼內，因此風

壓場資料產生之時間間距與水動力模擬相同(即 $\Delta t$  為 2.0 sec)。

圖 5.7 所示為 2012 年輕度颱風泰利侵臺期間，以模型颱風模擬數值風壓場之氣壓分布情形，顯示颱風等壓線呈現圓形分佈特性。

### 5.2.2 中央氣象局天氣預報模式模擬之風壓場

目前 TaiCOMS 作業化模擬預報使用的風壓場資料，係利用中央氣象局天氣預報模式提供的數值風壓場資料組合成的，因此本計畫另規劃以 TaiCOMS 使用的風壓場資料，如第二層 15km 解析度之 MC 風場或 WA02 風場，配合暴潮模組之非結構性三角形元素網格產生逐時之風壓場預報資料，作為本計畫數值模式之風壓場輸入條件，模擬臺灣周圍海域之氣象潮變化情形。

圖 5.8 所示為 2012 年輕度颱風泰利侵臺期間，由 TaiCOMS 作業化模擬預報提供的 MC 風壓場資料繪製的氣壓分布情形；圖 5.9 所示為本計畫將前述 MC 風壓場資料經由前置處理作業，產生非結構性三角形網格風壓場資料之氣壓分布情形，顯示二者等壓線分布相當一致，代表本計畫前置處理產生的風壓場資料可直接應用於模擬氣象潮或颱風暴潮。

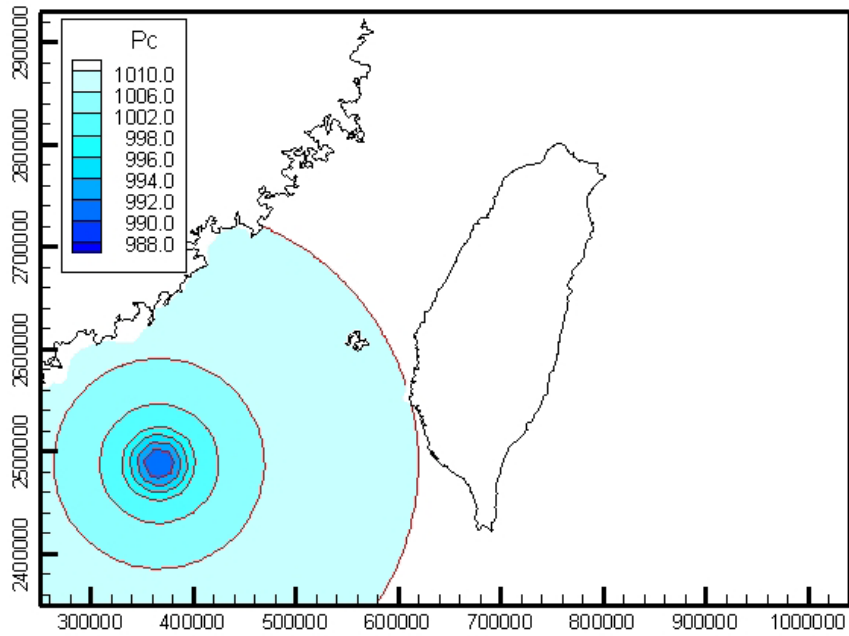


圖 5.7 模型颱風數值風壓場之等壓線分布圖  
(2012 年輕度颱風泰利，2012/06/20 08 時)

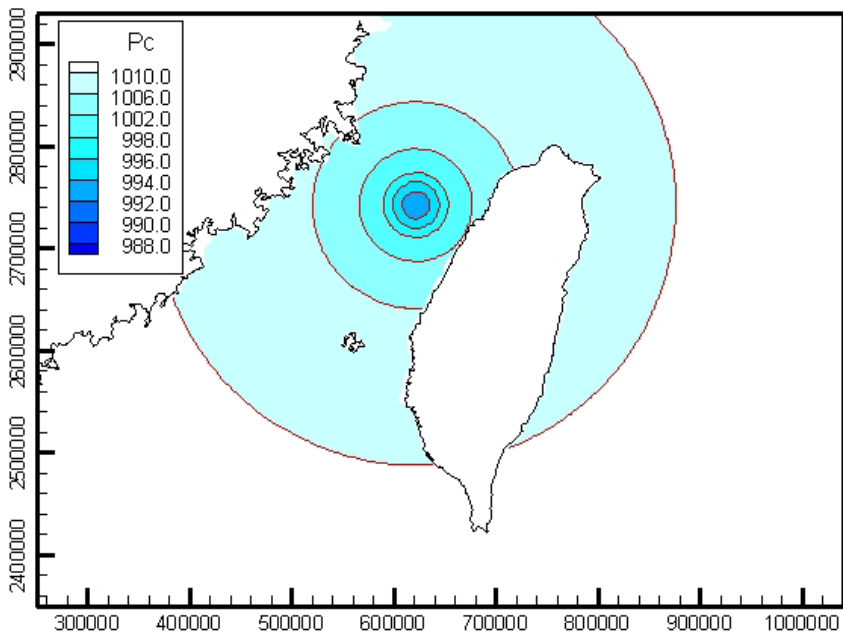


圖 5.7 (續)模型颱風數值風壓場之等壓線分布圖  
(2012 年輕度颱風泰利，2012/06/20 08 時)

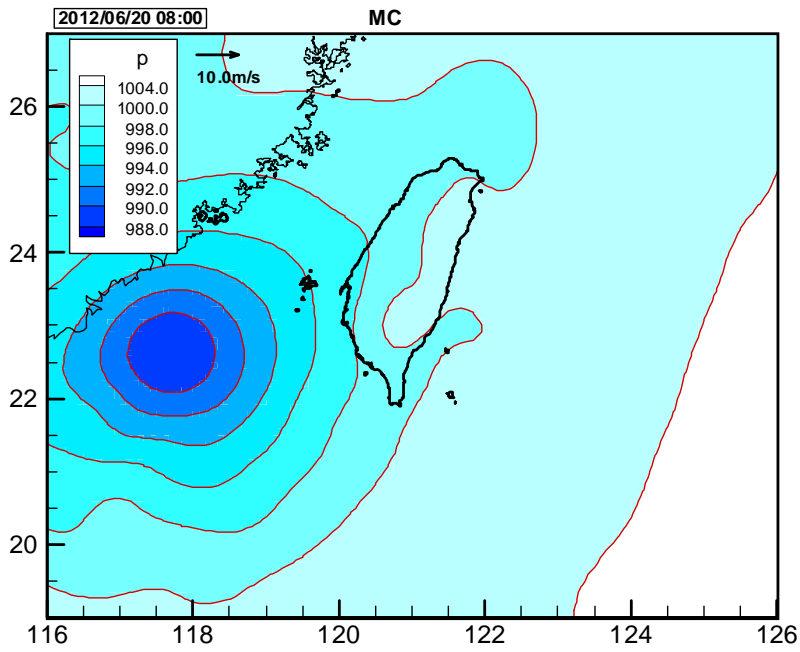


圖 5.8 TaiCOMS 作業化 MC 風壓場之等壓線分布圖  
(2012 年輕度颱風泰利)

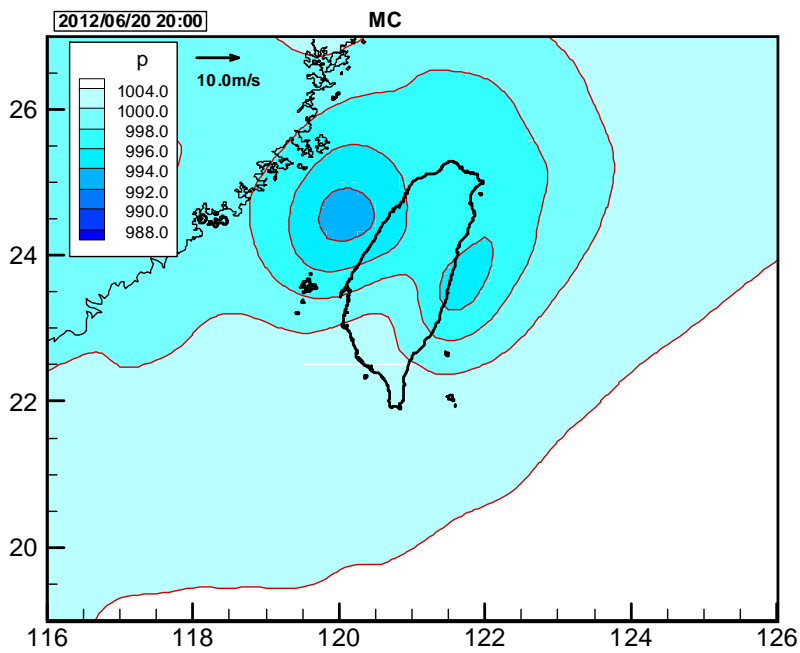


圖 5.8 (續) TaiCOMS 作業化 MC 風壓場之等壓線分布圖  
(2012 年輕度颱風泰利)

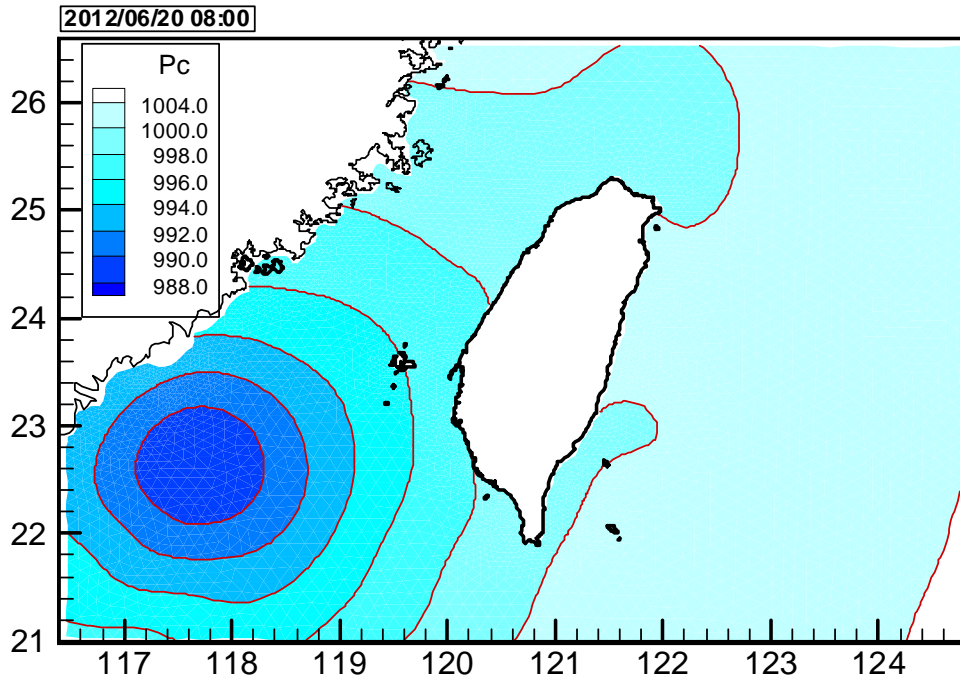


圖 5.9 本計畫有限元素網格風壓場之等壓線分布圖  
(2012 年輕度颱風泰利)

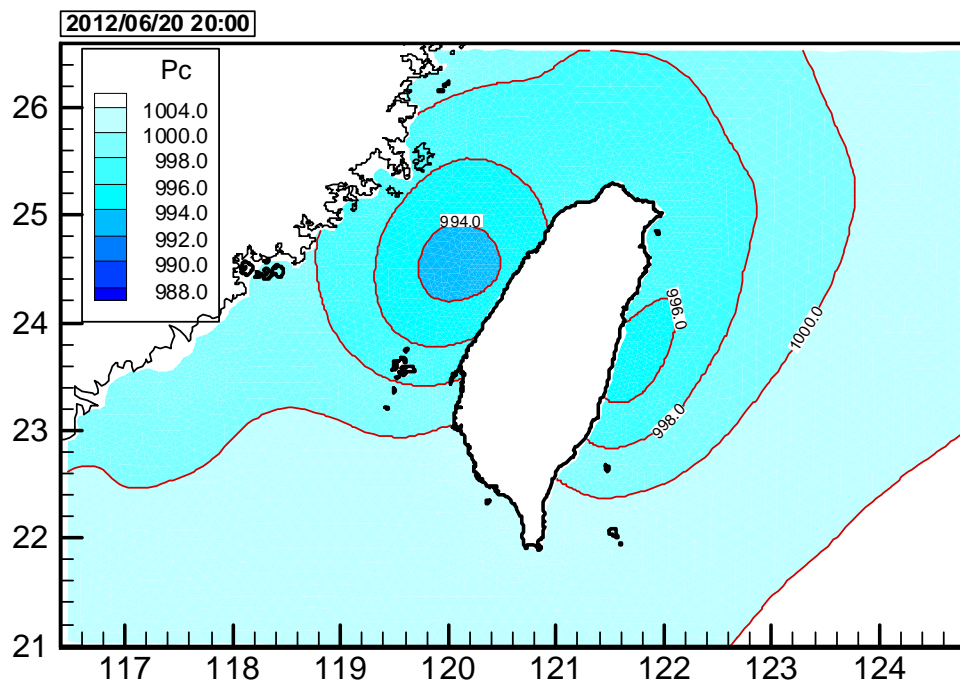


圖 5.9 (續)本計畫有限元素網格風壓場之等壓線分布圖  
(2012 年輕度颱風泰利)

### 5.3 侵臺颱風暴潮模擬

瞭解主要商港歷史最大暴潮位實為本計畫颱風暴潮模擬主要目的之一，因此本計畫依據歷史侵臺颱風資料，利用前述模型颱風方法執行臺灣周圍海域暴潮模擬，並分析本計畫主要商港歷史最大暴潮位。

#### 5.3.1 侵臺颱風歷史資料蒐集

本計畫參考中央氣象網站整理 1980 年至 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風資料，如表 5.1 所列，顯示 1980 ~ 2013 年合計曾發生 213 個颱風侵臺；其中屬於強烈颱風者共計 50 個，屬於中度颱風者計有 94 個。另外，曾發布颱風警報兩次以上的侵臺颱風分別有 2012 年中度颱風天秤(TEMBIN)、2001 年中度颱風納莉(NARI)、1991 年強烈颱風耐特(NAT)及 1986 年中度颱風韋恩(WAYNE)等。本計畫依據中央氣象發布的颱風警報單資訊逐一建置模型颱風模擬風壓場所需颱風資料，除少數侵臺颱風之颱風警報單資訊不全者外，計有 195 組歷史侵臺颱風資料。

#### 5.3.2 颱風暴潮模擬驗證

依據本報告第二章主要商港潮汐觀測資料分析結果，本計畫選取 2011 年強烈颱風南瑪都(NANMADOL，如圖 5.10 所示)、2012 年中度颱風蘇拉(SAOLA，如圖 5.11 所示)、中度颱風天秤(TEMBIN，如圖 5.12 所示)及 2013 年強烈颱風蘇力(SOULIK，如圖 5.13 所示)等數值模擬結果與各主要商港潮位調和分析得到的潮位偏差進行比較與分析，其中各港口暴潮數值模擬結果之點位分布，如圖 5.14 所示。

2011 年強烈颱風南瑪都路徑屬於第四類侵臺路徑，如圖 5.10 所示，圖中顯示颱風登陸前已減弱為中度颱風，登陸後亦快速減弱為輕度颱風，因此臺灣西南海岸高雄港水位觀測資料並無顯著暴潮偏差，如圖 5.15 所示。圖中高雄港暴潮偏差數值模擬結果顯示：因颱風登陸前高雄港海岸模擬風場朝向外海，故模擬水位呈現遞減變化；直至模擬風場轉為朝向海岸後，模擬水位呈現快速遞增變化。



2012 年中度颱風蘇拉移動路徑屬於第二類侵臺路徑，如圖 5.11 所示，圖中顯示蘇拉颱風登陸前移動路徑呈現不規則狀，最後減弱為輕度颱風並由臺灣北部海域掠過，颱風中心並未實質登陸。蘇拉颱風侵臺期間花蓮港、蘇澳港、基隆港及臺北港等港口潮位分析結果均有較顯著的暴潮水位偏差，如圖 5.16 至圖 5.19 所示；本計畫暴潮數值模擬結果顯示除花蓮港暴潮偏差最大值略為低估外，其餘港口暴潮偏差最大值均出現略微高估現象。

2012 年中度颱風天秤移動路徑，如圖 5.12 所示，其移動路徑不僅屬於特殊侵臺路徑且共發布兩次颱風警報；天秤颱風侵臺期間影響海域包括臺灣南部海域及東部海域，其中高雄港及花蓮、蘇澳等港口潮位分析結果暴潮偏差均不顯著，如圖 5.20 至圖 5.22 所示。本計畫暴潮數值模擬結果顯示高雄港暴潮位有顯著高估的現象，此係由於模型颱風模擬之風壓場不受臺灣陸地之影響所致。

2013 年強烈颱風蘇力移動路徑屬於第二類侵臺路徑，如圖 5.13 所示，顯示颱風登陸前已減弱為中度颱風；蘇力颱風侵臺期間花蓮港、蘇澳港、基隆港及臺北港等港口潮位分析結果均有顯著的暴潮水位偏差，如圖 5.23 至圖 5.26 所示。依據各港潮位調和分析結果顯示花蓮港最大暴潮偏差值約 0.61 m、蘇澳港最大暴潮偏差值約 0.52 m、基隆港最大暴潮偏差值約 0.81 m、臺北港最大暴潮偏差值約 0.76 m；另數值模擬結果顯示花蓮港、蘇澳港、基隆港及臺北港等港口最大暴潮偏差值分別約為 0.21 m、0.52 m、0.81 m、1.04m，整體而言，花蓮港數值模擬結果偏低，臺北港數值模擬結果有高估之現象，蘇澳港及基隆港數值模擬結果與觀測資料分析結果相當。

臺灣西部海岸由於受到陸地之屏障，以模型颱風模擬風壓場變化，易導致數值模擬結果出現最大暴潮值高估之結果，愈近颱風中心附近海岸地區高估的現象愈為顯著。整體而言，利用模型颱風之風壓場雖無法模擬實際的暴潮變化，但對於海岸地區最大暴潮偏差模擬與分析仍具有應用性與便利性。

表 5.1 1980 ~ 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表

年份	名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓(hPa)	近台近中心最大風速(m/s)	警報發布報數
2013	菲特 FITOW	10/04~10/07	中度	1	960	38	20
2013	天兔 USAGI	09/19~09/22	強烈	5	910	55	22
2013	康芮 KONG-REY	08/27~08/29	輕度	6	985	25	20
2013	潭美 TRAMI	08/20~08/22	輕度	1	970	30	16
2013	西馬隆 CIMARON	07/17~07/18	輕度	--	998	18	10
2013	蘇力 SOULIK	07/11~07/13	強烈	2	925	51	22
2012	杰拉華 JELAWAT	09/27~09/28	強烈	--	910	55	15
2012	天秤 TEMBIN	08/26~08/28	中度	特殊路徑	965	35	21
2012	天秤 TEMBIN	08/21~08/25	中度	特殊路徑	945	45	33
2012	啟德 KAI-TAK	08/14~08/15	輕度	--	995	20	10
2012	海葵 HAIKUI	08/06~08/07	中度	--	960	35	11
2012	蘇拉 SAOLA	07/30~08/03	中度	2	960	38	31
2012	杜蘇芮 DOKSURI	06/28~06/29	輕度	--	995	23	10
2012	泰利 TALIM	06/19~06/21	輕度	9	985	25	17
2011	南瑪都 NANMADOL	08/27~08/31	強烈	4	920	53	34
2011	梅花 MUIFA	08/04~08/06	中度	--	945	43	15
2011	米雷 MEARI	06/23~06/25	輕度	--	982	28	14
2011	桑達 SONGDA	05/27~05/28	強烈	--	920	55	13
2011	艾利 AERE	05/09~05/10	輕度	--	990	23	13
2010	梅姬 MEGI	10/21~10/23	中度	9	935	48	24
2010	凡那比 FANAPI	09/17~09/20	中度	4	940	45	22
2010	莫蘭蒂 MERANTI	09/09~09/10	輕度	--	990	23	10
2010	南修 NAMTHEUN	08/30~08/31	輕度	--	995	18	9
2010	萊羅克 LIONROCK	08/31~09/02	輕度	9	990	23	15
2009	芭瑪 PARMA	10/03~10/06	中度	特殊路徑	945	43	29
2009	莫拉克 MORAKOT	08/05~08/10	中度	3	955	40	36
2009	莫拉菲 MOLAVE	07/16~07/18	輕度	--	980	28	13
2009	蓮花 LINFA	06/19~06/22	輕度	9	980	28	21
2008	薔蜜 JANGMI	09/26~09/29	強烈	2	925	53	25
2008	哈格比 HAGUPIT	09/21~09/23	中度	--	940	45	15
2008	辛樂克 SINLAKU	09/11~09/16	強烈	2	925	51	43
2008	如麗 NURI	08/19~08/21	中度	--	955	40	16
2008	鳳凰 FUNG-WONG	07/26~07/29	中度	3	948	43	25
2008	卡玫基 KALMAEGI	07/16~07/18	中度	2	970	33	20
2007	米塔 MITAG	11/26~11/27	中度	--	955	35	11
2007	柯羅莎 KROSA	10/04~10/07	強烈	2	925	51	27
2007	韋帕 WIPHA	09/17~09/19	中度	1	935	48	18
2007	聖帕 SEPAT	08/16~08/19	強烈	3	920	53	27
2007	梧提 WUTIP	08/08~08/09	輕度	3	992	18	9
2007	帕布 PABUK	08/06~08/08	輕度	4	980	28	14

表 5.1 (續 1)1980 ~ 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表

年份	名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓(hPa)	近台近中心最大風速(m/s)	警報發布報數
2006	珊珊 SHANSHAN	09/14~09/16	中度	--	945	48	17
2006	寶發 BOPHA	08/07~08/09	輕度	4	985	23	15
2006	桑美 SAOMAI	08/09~08/10	中度	--	935	48	16
2006	凱米 KAEMI	07/23~07/26	中度	3	960	38	21
2006	碧利斯 BILIS	07/12~07/15	輕度	2	978	25	25
2006	艾維尼 EWINIAR	07/07~07/09	中度	--	925	43	11
2006	珍珠 CHANCHU	05/16~05/18	中度	9	943	45	17
2005	龍王 LONGWANG	09/30~10/03	強烈	3	925	51	21
2005	丹瑞 DAMREY	09/21~09/23	輕度	--	955	25	17
2005	卡努 KHANUN	09/09~09/11	中度	--	950	43	16
2005	泰利 TALIM	08/30~09/01	強烈	3	920	53	22
2005	珊瑚 SANVU	08/11~08/13	輕度	--	985	25	19
2005	馬莎 MATSA	08/03~08/06	中度	1	955	40	25
2005	海棠 HAITANG	07/16~07/20	強烈	3	912	55	29
2004	南瑪都 NANMADOL	12/03~12/04	中度	9	940	38	13
2004	納坦 NOCK-TEN	10/23~10/26	中度	6	945	43	19
2004	米雷 MEARI	09/26~09/27	中度	--	940	40	11
2004	海馬 HAIMA	09/11~09/13	輕度	6	998	18	12
2004	艾利 AERE	08/23~08/26	中度	1	960	38	28
2004	蘭寧 RANANIM	08/10~08/13	中度	--	955	40	18
2004	康伯斯 KOMPASU	07/14~07/15	輕度	--	995	20	10
2004	敏督利 MINDULLE	06/28~07/03	中度	6	942	45	39
2004	康森 CONSON	06/07~06/09	中度	--	970	33	19
2003	米勒 MELOR	11/02~11/03	輕度	8	975	25	15
2003	杜鵑 DUJUAN	08/31~09/02	中度	5	950	43	19
2003	科羅旺 KROVANH	08/22~08/23	中度	--	970	33	11
2003	梵高 VAMCO	08/19~08/20	輕度	--	998	18	9
2003	莫拉克 MORAKOT	08/02~08/04	輕度	4	990	23	19
2003	尹布都 IMBUDO	07/21~07/23	中度	--	935	48	15
2003	蘇迪勒 SOUDELOR	06/16~06/18	中度	--	960	38	18
2003	南卡 NANGKA	06/01~06/03	輕度	--	990	23	11
2003	柯吉拉 KUJIRA	04/21~04/24	中度	--	925	43	30
2002	辛樂克 SINLAKU	09/04~09/08	中度	1	950	40	33
2002	娜克莉 NAKRI	07/09~07/10	輕度	9	987	18	15
2002	雷馬遜 RAMMASUN	07/02~07/04	中度	--	950	45	18

表 5.1 (續 2) 1980 ~ 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表

年份	名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓 (hPa)	近台近中心最大風速 (m/s)	警報發布報數
2001	海燕 HAIYAN	10/15~10/16	中度	--	965	35	14
2001	利奇馬 LEKIMA	09/23~09/28	中度	4	965	35	37
2001	納莉 NARI	09/08~09/10	中度	特殊路徑	960	40	12
2001	納莉 NARI	09/13~09/19	中度	特殊路徑	960	40	52
2001	桃芝 TORAJI	07/28~07/31	中度	3	962	38	28
2001	玉兔 YUTU	07/23~07/24	輕度	--	962	30	8
2001	潭美 TRAMI	07/10~07/11	輕度	4	995	20	13
2001	尤特 UTOR	07/03~07/05	中度	5	960	38	20
2001	奇比 CHEBI	06/22~06/24	中度	7	965	35	19
2001	西馬隆 CIMARON	05/11~05/13	輕度	8	990	23	20
2000	貝碧佳 BEBINCA	11/06~11/07	輕度	--	970	28	9
2000	象神 XANGSANE	10/30~11/01	中度	6	960	38	17
2000	雅吉 YAGI	10/23~10/26	中度	--	970	33	21
2000	寶發 BOPHA	09/08~09/10	輕度	特殊路徑	990	23	17
2000	巴比侖 PRAPIROON	08/27~08/30	輕度	6	965	33	23
2000	碧利斯 BILIS	08/21~08/23	強烈	3	930	53	21
2000	啟德 KAI-TAK	07/06~07/10	中度	6	965	35	30
1999	丹恩 DAN	10/04~10/09	中度	7	968	38	43
1999	山姆 SAM	08/19~08/21	輕度	--	970	30	18
1999	瑪姬 MAGGIE	06/04~06/06	中度	5	965	38	20
1998	芭比絲 BABS	10/25~10/27	中度	9	950	35	18
1998	瑞伯 ZEB	10/13~10/17	強烈	6	920	55	30
1998	楊妮 YANNI	09/27~09/29	輕度	6	975	25	14
1998	奧托 OTTO	08/03~08/05	輕度	3	985	30	17
1998	妮蔻兒 NICHOLE	07/09~07/10	輕度	9	998	18	10
1997	艾文 IVAN	10/19~10/21	強烈	--	905	55	16
1997	卡絲 CASS	08/29~08/30	輕度	--	995	20	8
1997	安珀 AMBER	08/27~08/30	中度	3	945	48	23
1997	溫妮 WINNIE	08/16~08/19	中度	1	945	43	21
1996	薩恩 ZANE	09/27~09/28	中度	--	955	43	11
1996	魏萊特 VIOLET	09/15~09/16	強烈	--	940	51	9
1996	莎莉 SALLY	09/07~09/08	中度	--	950	48	12
1996	麗莎 LISA	08/06~08/07	輕度	--	993	20	6
1996	賀伯 HERB	07/29~08/01	強烈	2	920	53	29
1996	葛樂禮 GLORIA	07/24~07/27	中度	7	965	35	26
1996	凱姆 CAM	05/20~05/23	輕度	8	995	20	24

表 5.1 (續 3) 1980 ~ 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表

年份	名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓 (hPa)	近台近中心最大風速 (m/s)	警報發布報數
1995	賴恩 RYAN	09/20~09/23	中度	8	955	45	23
1995	肯特 KENT	08/27~08/31	中度	5	955	45	32
1995	珍妮絲 JANIS	08/23~08/24	輕度	--	990	23	10
1995	海倫 HELEN	08/09~08/11	輕度	--	980	23	15
1995	蓋瑞 GARY	07/31~07/31	輕度	7	980	28	7
1995	荻安娜 DEANNA	06/04~06/08	輕度	9	995	20	33
1994	席斯 SETH	10/07~10/11	強烈	6	925	51	30
1994	葛拉絲 GLADYS	08/31~09/02	中度	2	970	35	18
1994	弗雷特 FRED	08/19~08/22	強烈	1	935	55	26
1994	道格 DOUG	08/06~08/09	強烈	6	930	58	24
1994	凱特琳 CAITLIN	08/03~08/04	輕度	3	987	25	12
1994	提姆 TIM	07/09~07/11	強烈	3	945	53	10
1993	亞伯 ABE	09/10~09/14	中度	5	950	43	15
1993	楊希 YANCY	08/31~09/02	強烈	--	935	51	8
1993	塔莎 TASHA	08/17~08/19	輕度	--	975	25	8
1992	泰德 TED	09/20~09/23	輕度	6	985	30	14
1992	寶莉 POLLY	08/27~08/31	輕度	3	975	23	17
1992	歐馬 OMAR	09/03~09/05	中度	3	945	40	11
1992	馬克 MARK	08/16~08/19	輕度	--	988	20	13
1992	芭比 BOBBIE	06/26~06/28	中度	--	948	48	10
1991	席斯 SETH	11/12~11/14	中度	--	920	33	8
1991	露絲 RUTH	10/26~10/30	強烈	--	910	58	17
1991	耐特 NAT	09/30~10/02	輕度	特殊路徑	935	30	20
1991	耐特 NAT	09/22~09/24	強烈	特殊路徑	945	51	20
1991	密瑞兒 MIREILLE	09/25~09/27	強烈	--	925	53	9
1991	愛麗 ELLIE	08/16~08/18	中度	2	965	33	12
1991	布藍登 BRENDAN	07/22~07/23	中度	--	978	33	6
1991	艾美 AMY	07/17~07/19	強烈	5	950	51	10
1990	艾德 ED	09/14~09/15	中度	--	960	33	6
1990	黛特 DOT	09/06~09/08	中度	3	960	38	11
1990	蓓琪 BECKY	08/26~08/27	輕度	--	970	30	6
1990	亞伯 ABE	08/29~08/31	中度	1	955	45	9
1990	楊希 YANCY	08/17~08/20	中度	2	960	40	14
1990	蘿賓 ROBYN	07/09~07/10	輕度	--	990	20	7
1990	波西 PERCY	06/26~06/30	強烈	--	950	51	16
1990	歐菲莉 OFELIA	06/21~06/24	中度	6	968	38	13
1990	瑪麗安 MARIAN	05/18~05/19	中度	9	960	40	6

表 5.1 (續 4) 1980 ~ 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表

年份	名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓 (hPa)	近台近中心最大風速 (m/s)	警報發布報數
1989	安吉菀 ANGELA	10/05~10/07	強烈	--	930	67	9
1989	薇拉 VERA	09/14~09/15	輕度	--	985	25	6
1989	莎拉 SARAH	09/08~09/13	強烈	3	952	51	23
1989	羅拉 LOLA	07/31~08/03	輕度	--	980	28	11
1989	賀璞 HOPE	07/18~07/19	輕度	--	990	25	6
1989	戈登 GORDON	07/15~07/17	強烈	--	920	65	11
1989	白蘭黛 BRENDA	05/18~05/20	中度	--	970	35	9
1988	魯碧 RUBY	10/25~10/27	中度	--	916	48	8
1988	派特 PAT	10/19~10/21	中度	--	968	38	8
1988	歐黛莎 ODESSA	10/12~10/14	輕度	--	954	25	7
1988	尼爾森 NELSON	10/03~10/06	強烈	--	898	63	10
1988	李尹 LEE	09/23~09/24	輕度	--	984	28	5
1988	克蒂 KIT	09/21~09/22	輕度	--	984	28	5
1988	華倫 WARREN	07/17~07/19	強烈	--	927	55	11
1988	蘇珊 SUSAN	05/31~06/02	中度	9	963	40	9
1987	琳恩 LYNN	10/22~10/27	強烈	5	898	53	20
1987	傑魯得 GERALD	09/07~09/11	強烈	5	937	51	15
1987	黛納 DINAH	08/27~08/30	強烈	--	910	62	12
1987	凱瑞 CARY	08/15~08/19	中度	--	968	38	16
1987	亞力士 ALEX	07/25~07/27	中度	6	976	35	10
1987	費南 VERNON	07/19~07/22	中度	6	981	33	11
1987	賽洛瑪 THELMA	07/11~07/15	強烈	--	991	60	16
1986	艾倫 ELLEN	10/14~10/17	中度	--	970	40	14
1986	艾貝 ABBY	09/16~09/20	強烈	3	943	51	18
1986	韋恩 WAYNE	08/28~09/03	中度	特殊路徑	951	40	26
1986	韋恩 WAYNE	08/24~08/25	輕度	特殊路徑	951	28	4
1986	韋恩 WAYNE	08/20~08/23	中度	特殊路徑	951	38	12
1986	薇拉 VERA	08/25~08/27	中度	--	923	45	10
1986	莎拉 SARAH	08/01~08/03	輕度	--	986	23	9
1986	佩姬 PEGGY	07/07~07/11	強烈	5	900	70	18
1986	南施 NANCY	06/22~06/24	中度	6	955	38	9
1985	白蘭黛 BRENDA	10/02~10/05	中度	6	964	45	11
1985	衛奧 VAL	09/15~09/17	輕度	5	992	25	11
1985	蒂絲 TESS	09/03~09/05	中度	--	967	33	7
1985	派特 PAT	08/27~08/30	中度	--	961	35	12
1985	尼爾森 NELSON	08/20~08/24	中度	1	961	48	15
1985	傑夫 JEFF	07/28~07/30	中度	1	967	35	11
1985	海爾 HAL	06/21~06/24	中度	5	955	48	12

表 5.1 (續 5) 1980 ~ 2013 年曾發布颱風警報之侵臺颱風歷史資料表

年份	名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓 (hPa)	近台近中心最大風速 (m/s)	警報發布報數
1984	比爾 BILL	11/17~11/18	強烈	--	910	51	6
1984	裘恩 JUNE	08/28~08/31	輕度	5	983	32	11
1984	郝麗 HOLLY	08/17~08/19	中度	6	964	35	10
1984	傑魯得 GERALD	08/16~08/19	輕度	--	985	28	12
1984	芙瑞達 FREDA	08/06~08/08	輕度	2	982	25	8
1984	亞力士 ALEX	07/02~07/04	中度	6	980	35	8
1984	魏恩 WYNNE	06/21~06/24	輕度	4	982	28	13
1983	佛瑞特 FORREST	09/23~09/27	強烈	--	883	65	14
1983	艾倫 ELLEN	09/05~09/08	強烈	5	928	63	11
1983	艾貝 ABBY	08/08~08/13	強烈	--	888	67	15
1983	韋恩 WAYNE	07/23~07/25	強烈	5	920	63	10
1982	南施 NANCY	10/14~10/15	強烈	--	933	58	6
1982	肯恩 KEN	09/18~09/22	強烈	--	936	55	18
1982	費依 FAYE	08/26~08/27	輕度	--	961	25	6
1982	黛特 DOT	08/13~08/15	中度	4	966	33	11
1982	西仕 CECIL	08/06~08/10	強烈	6	920	55	20
1982	安迪 ANDY	07/26~07/30	強烈	4	915	60	16
1982	蒂絲 TESS	07/01~07/02	輕度	--	990	18	4
1981	伊瑪 IRMA	11/25~11/26	輕度	--	902	28	7
1981	蓋依 GAY	10/20~10/21	中度	--	947	45	4
1981	葛萊拉 CLARA	09/19~09/22	強烈	5	945	58	12
1981	艾妮絲 AGNES	08/29~08/31	中度	1	945	47	9
1981	莫瑞 MAURY	07/18~07/20	輕度	1	982	30	8
1981	裘恩 JUNE	06/18~06/21	中度	6	963	38	12
1981	艾克 IKE	06/12~06/14	輕度	9	965	30	8
1980	貝蒂 BETTY	11/06~11/07	輕度	--	915	23	5
1980	魏恩 WYNNE	10/10~10/13	強烈	--	890	65	11
1980	珀西 PERCY	09/15~09/19	強烈	4	915	60	15
1980	諾瑞斯 NORRIS	08/26~08/28	中度	2	945	43	9
1980	開梅 KIM	07/25~07/27	中度	--	908	45	10
1980	艾達 IDA	07/08~07/11	輕度	5	980	30	13
1980	喬琪亞 GEORGIA	05/23~05/25	輕度	--	985	28	7

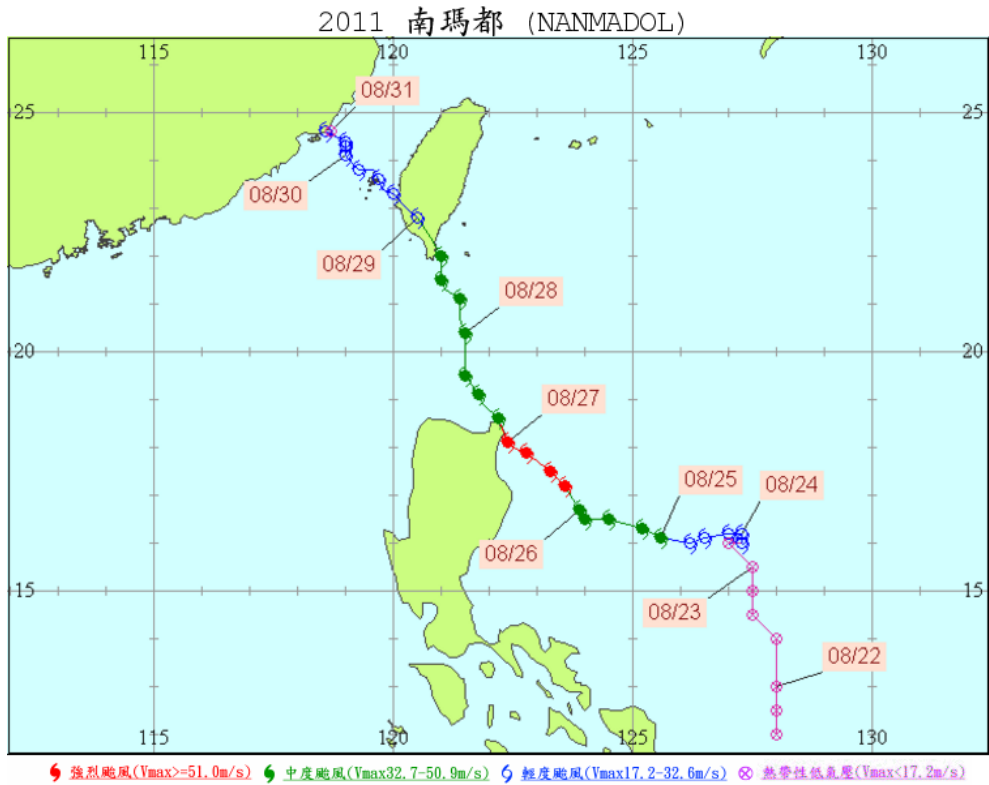


圖 5.10 2011 年強烈颱風南瑪都侵臺路徑圖

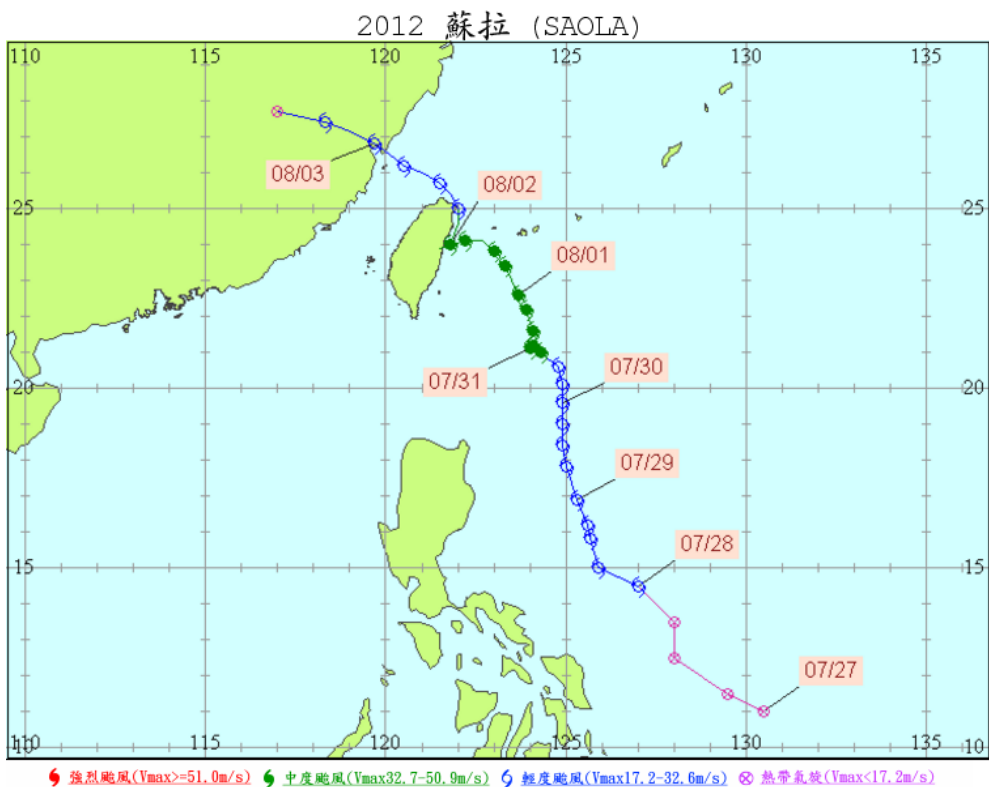


圖 5.11 2012 年中度颱風蘇拉侵臺路徑圖



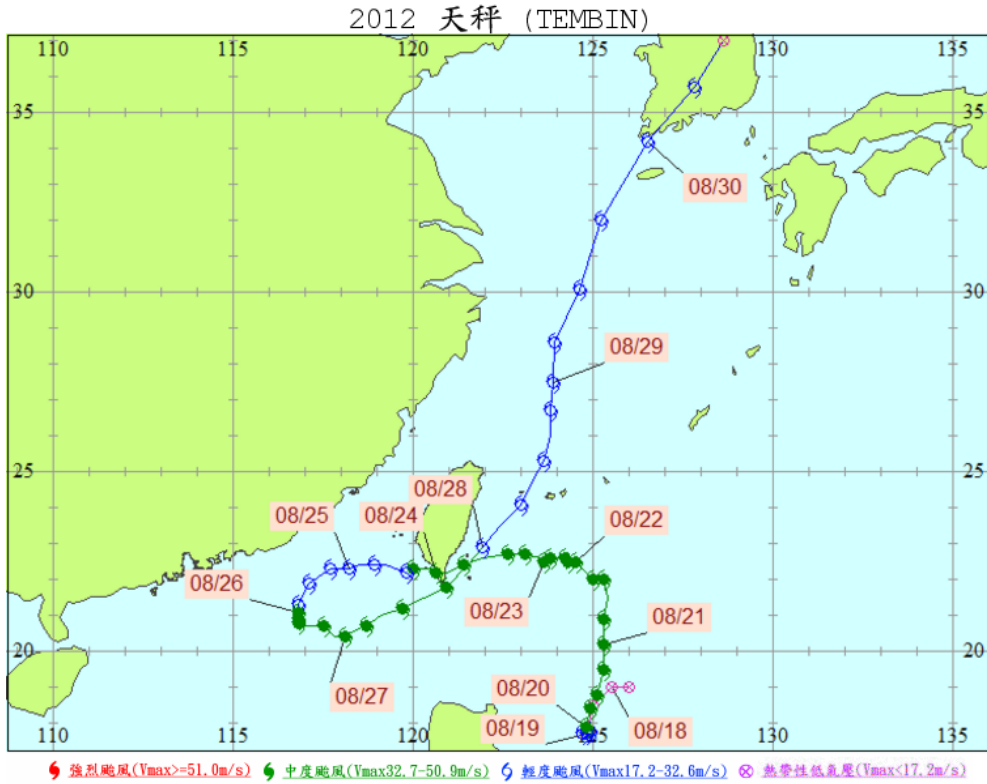


圖 5.12 2012 年中度颱風天秤侵臺路徑圖

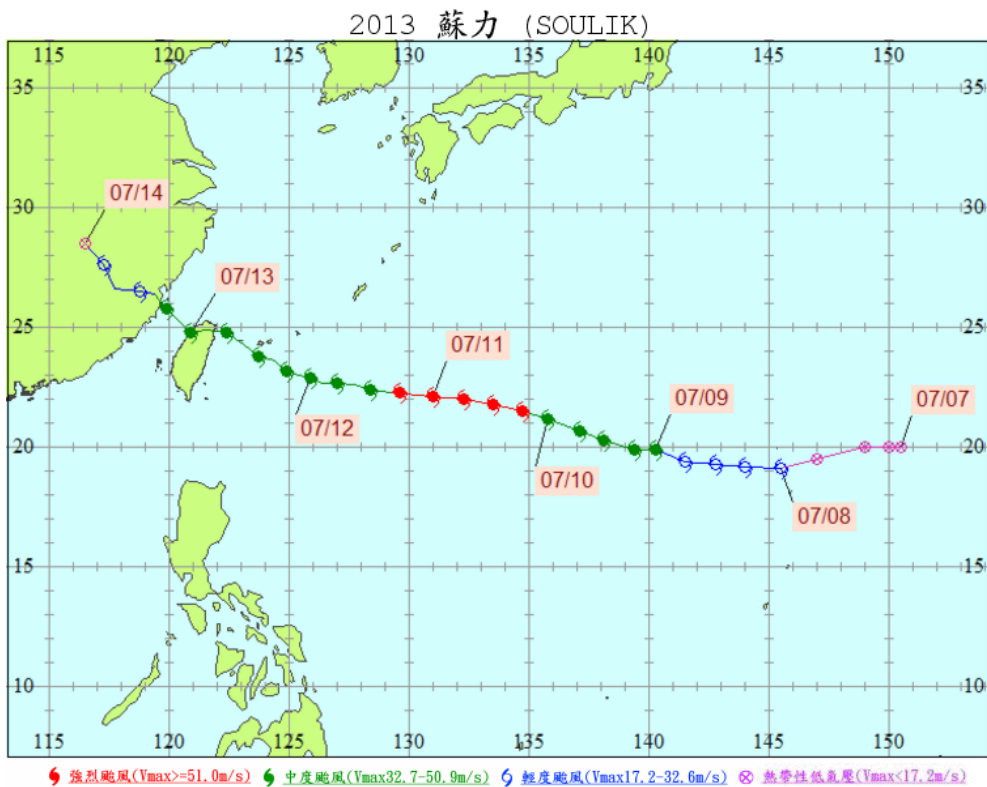


圖 5.13 2013 年強烈颱風蘇力侵臺路徑圖

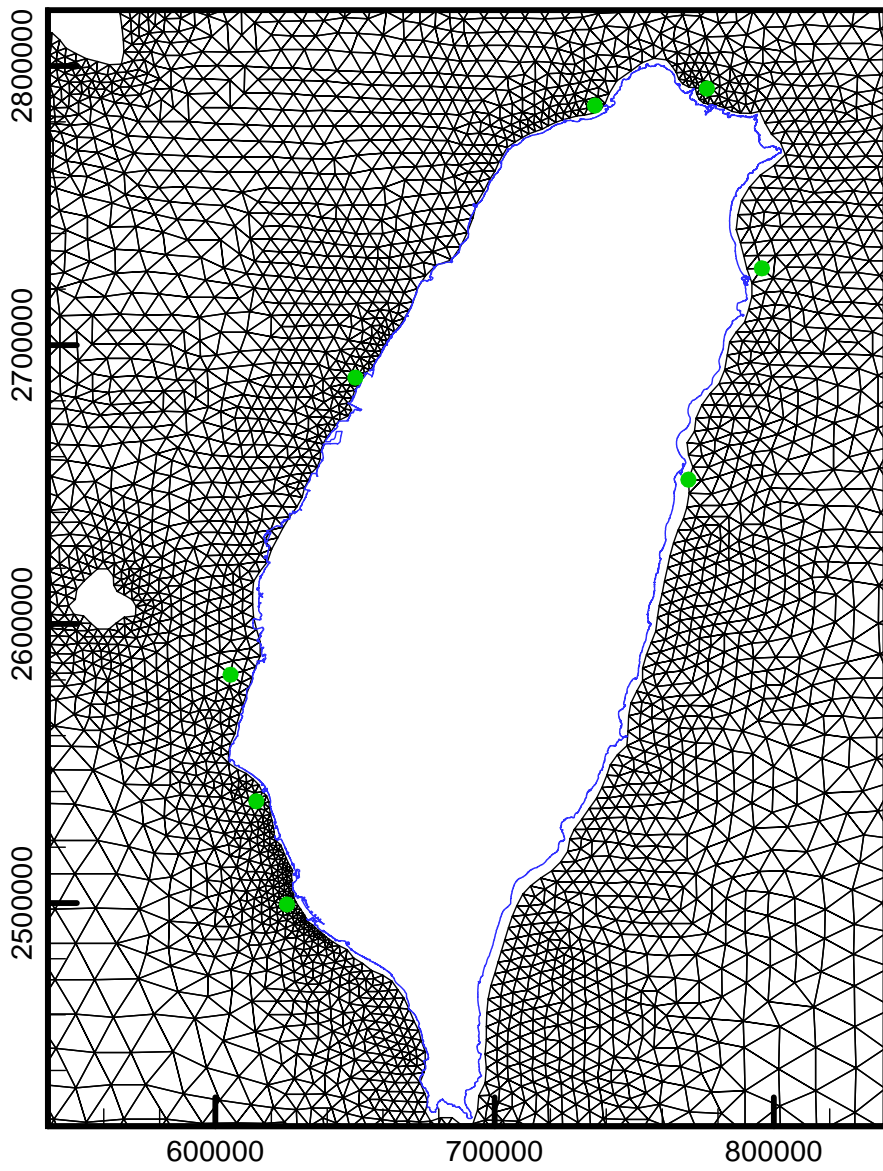


圖 5.14 主要商港颱風暴潮模擬結果之輸出點位圖

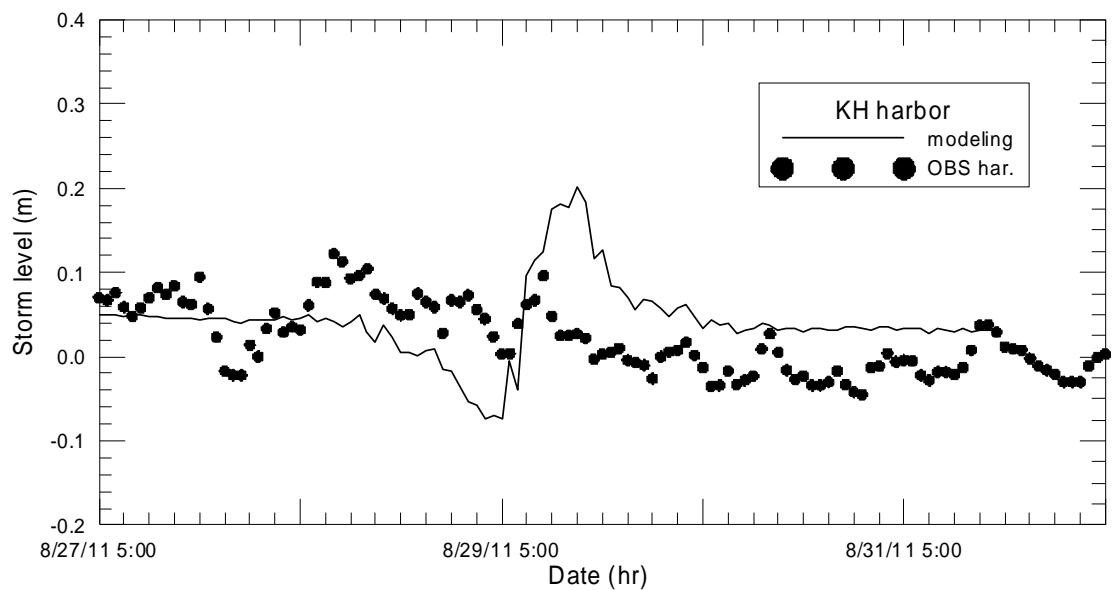


圖 5.15 2011 年強烈颱風南瑪都侵臺期間高雄港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

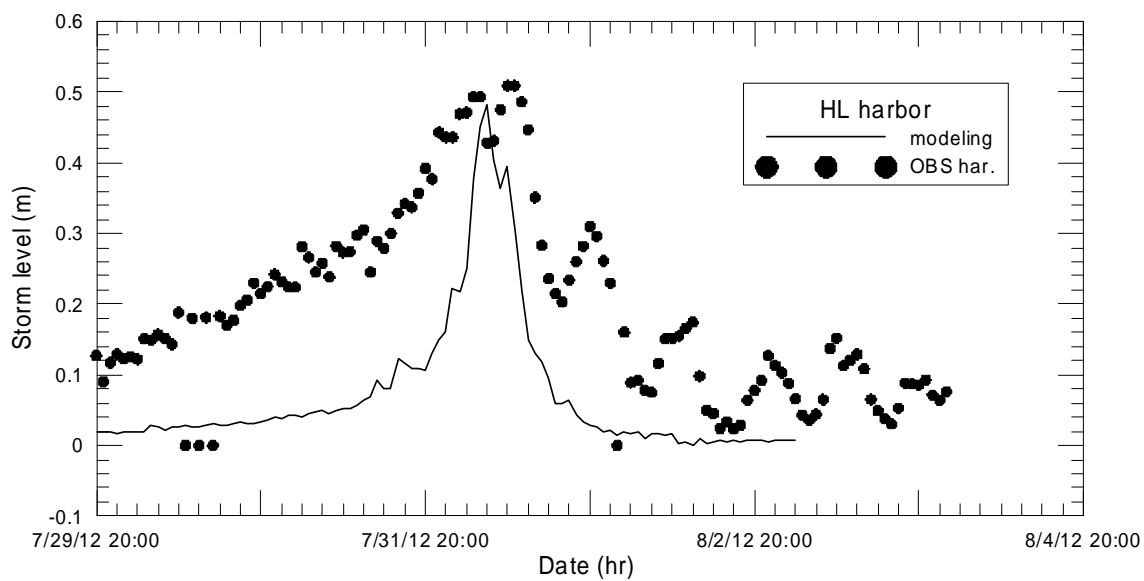


圖 5.16 2012 年中度颱風蘇拉侵臺期間，花蓮港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

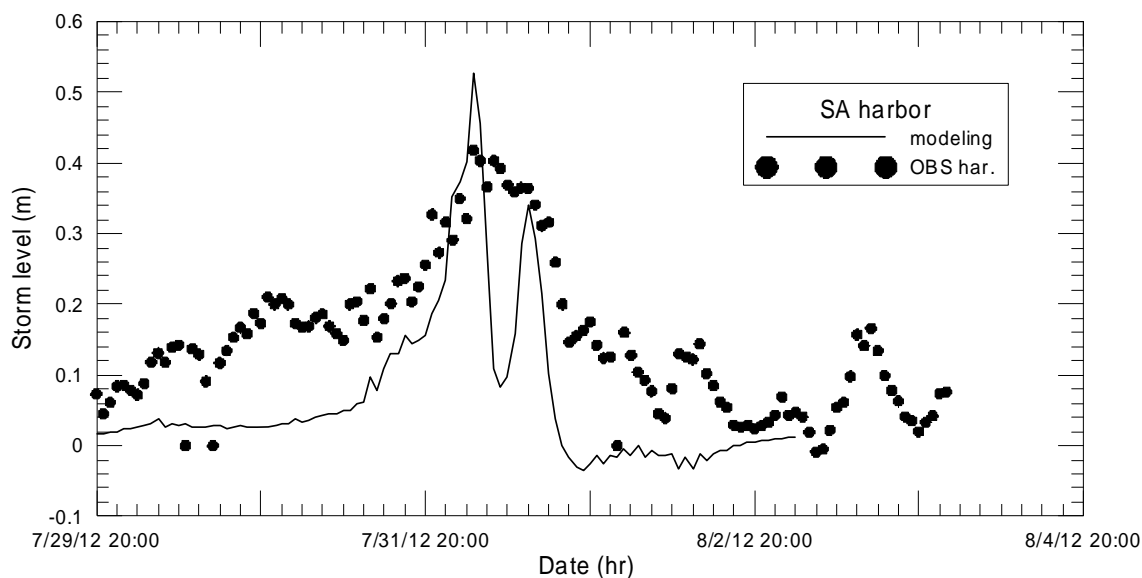


圖 5.17 2012 年中度颱風蘇拉侵臺期間，蘇澳港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

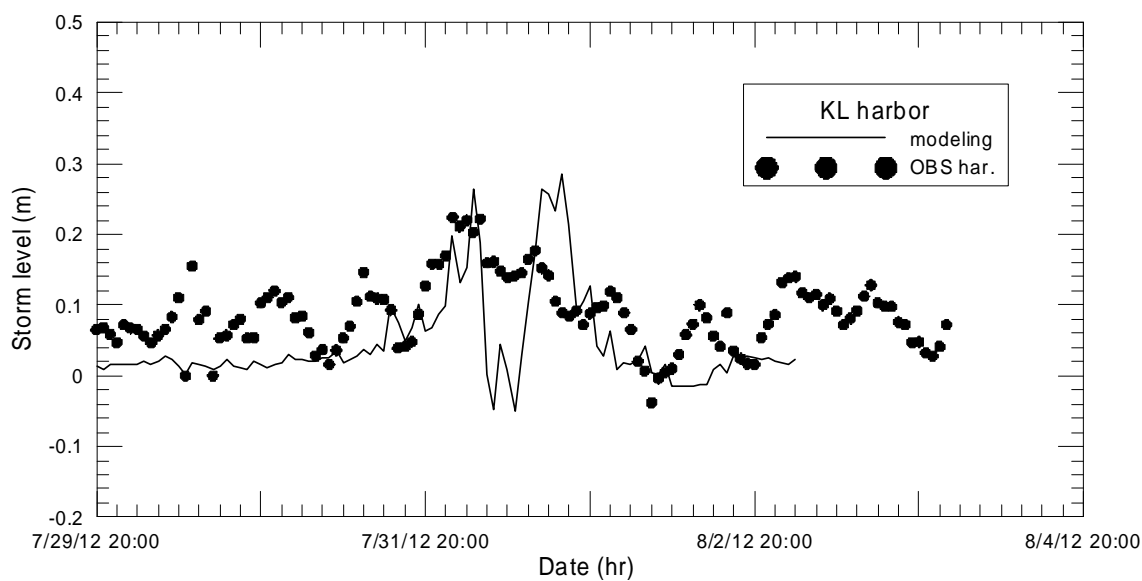


圖 5.18 2012 年中度颱風蘇拉侵臺期間，基隆港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

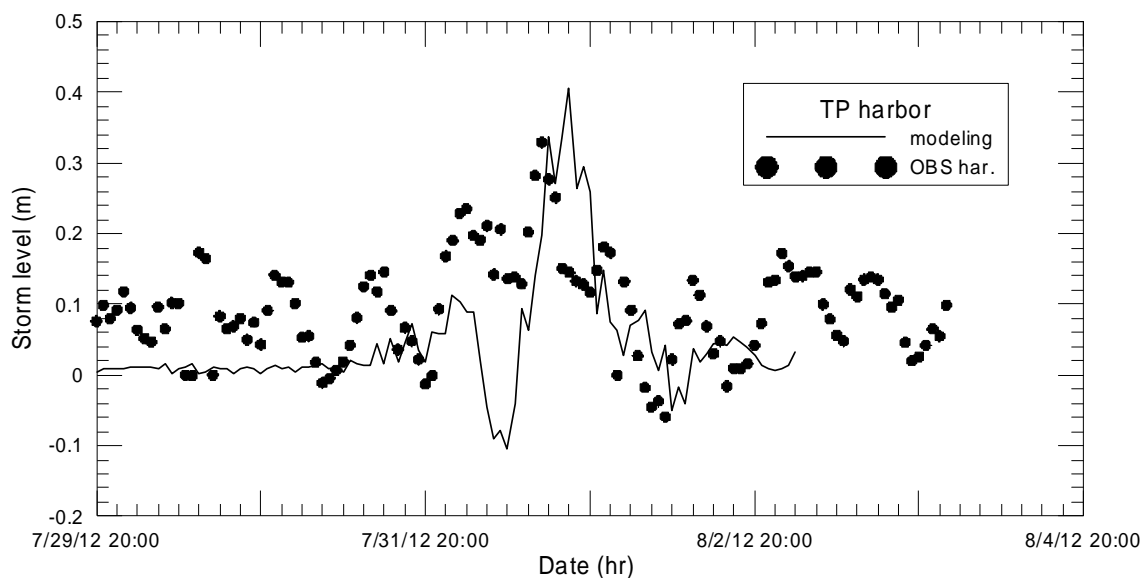


圖 5.19 2012 年中度颱風蘇拉侵臺期間，臺北港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

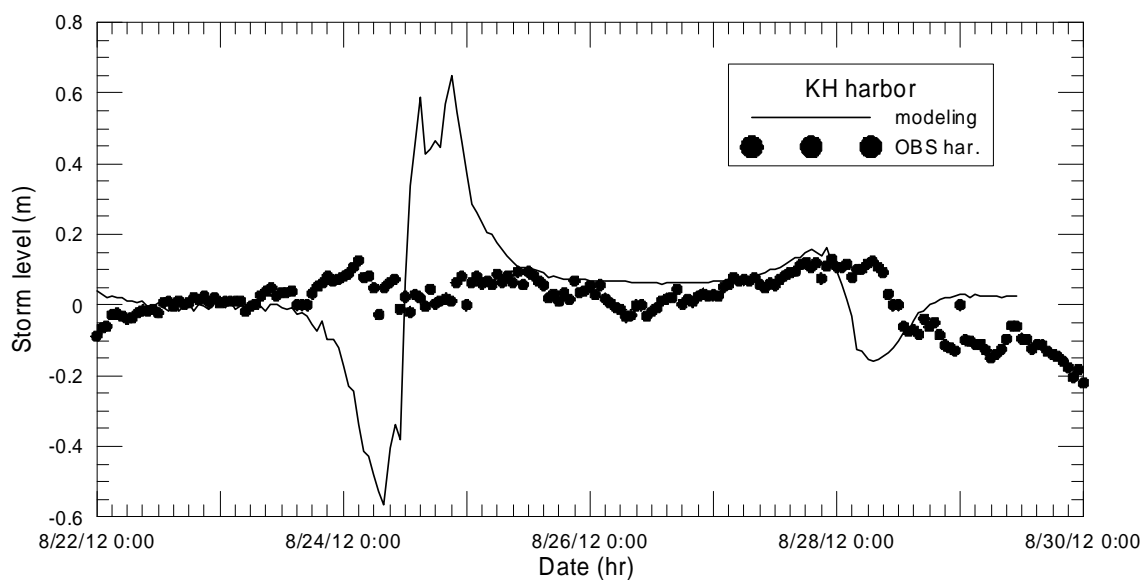


圖 5.20 2012 年中度颱風天秤侵臺期間，高雄港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

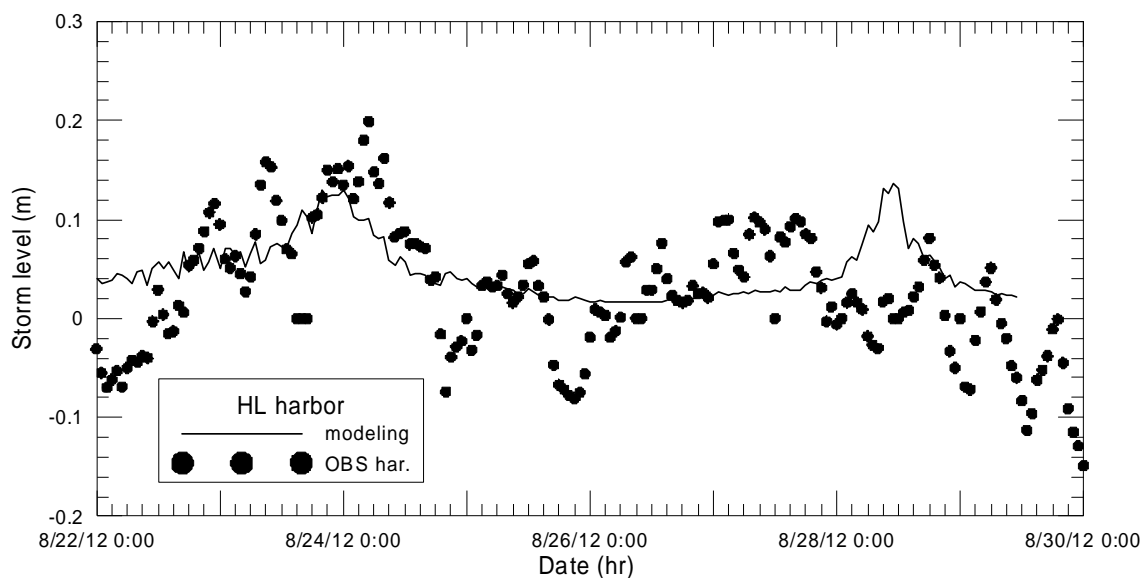


圖 5.21 2012 年中度颱風天秤侵臺期間，花蓮港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

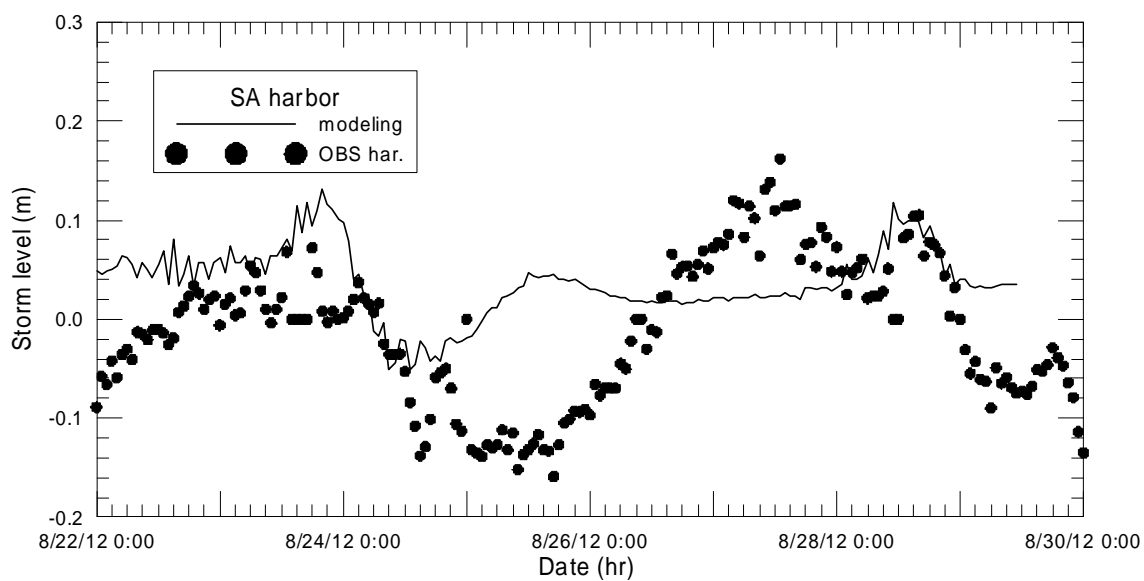


圖 5.22 2012 年中度颱風天秤侵臺期間，蘇澳港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

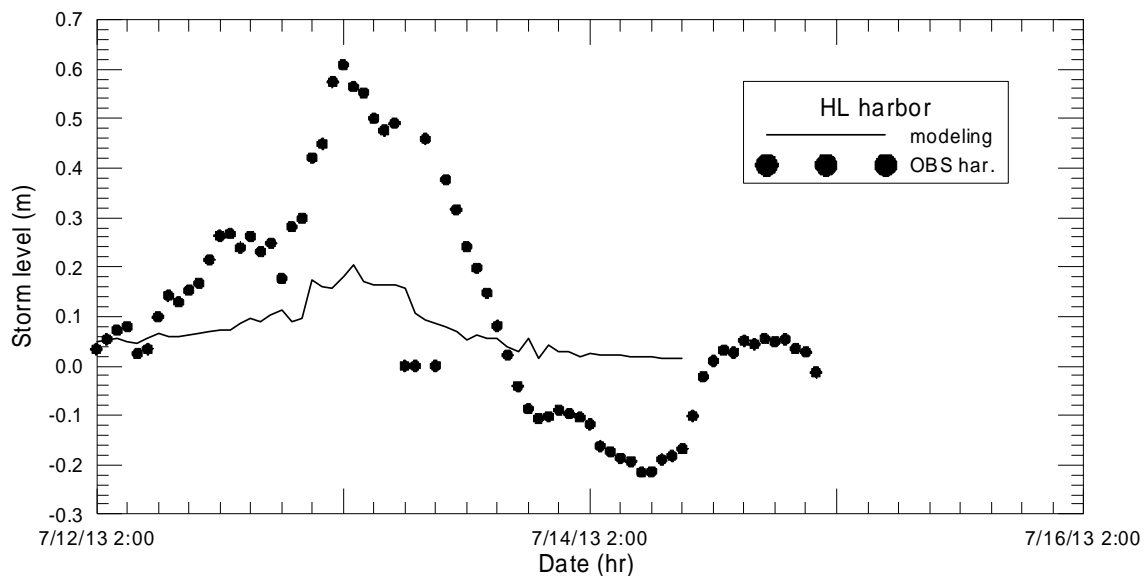


圖 5.23 2013 年強烈颱風蘇力侵臺期間，花蓮港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

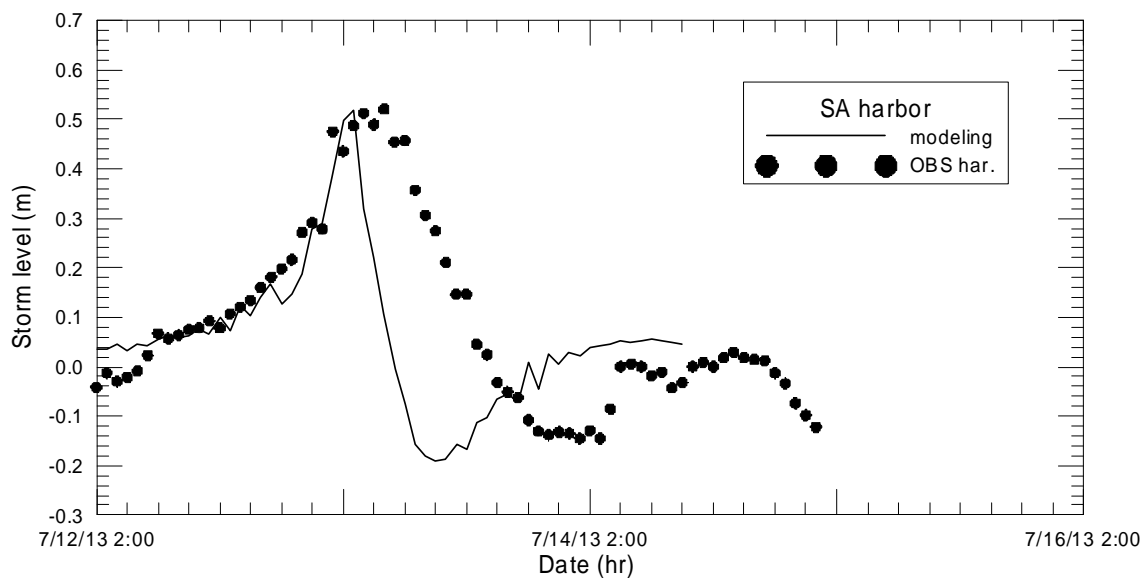


圖 5.24 2013 年強烈颱風蘇力侵臺期間，蘇澳港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

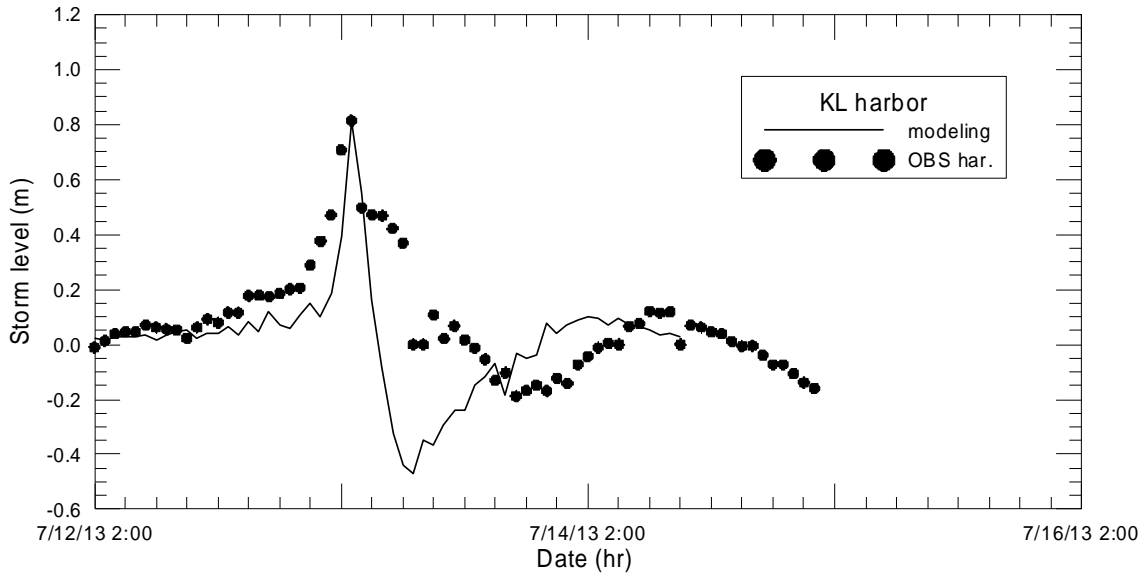


圖 5.25 2013 年強烈颱風蘇力侵臺期間，基隆港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖

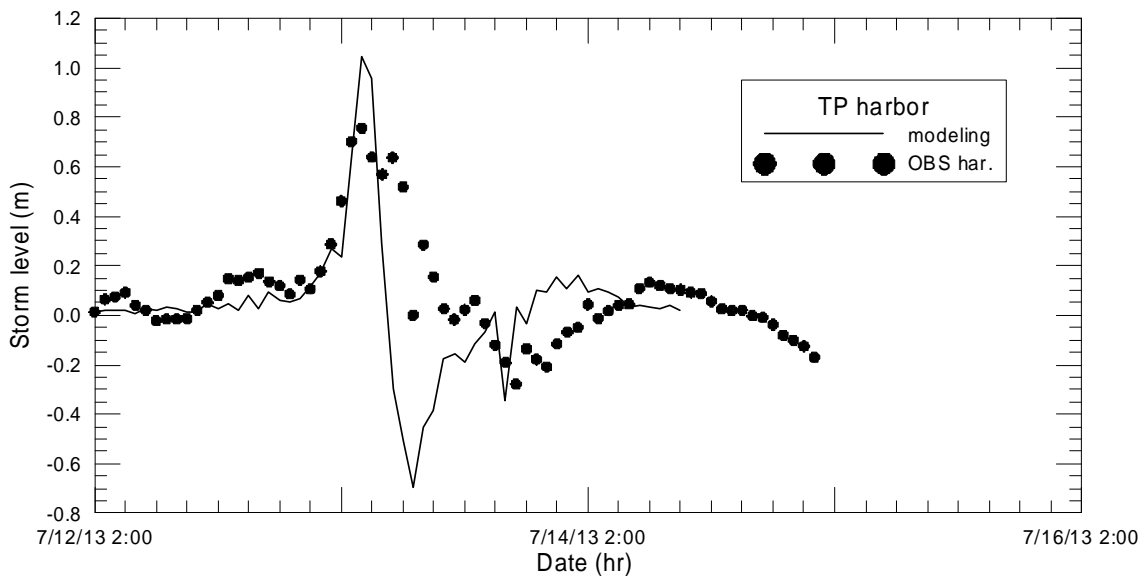


圖 5.26 2013 年強烈颱風蘇力侵臺期間，臺北港暴潮模擬結果與水位觀測資料分析結果圖



### 5.3.3 歷年侵臺颱風暴潮模擬結果與分析

本計畫針對歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風共 195 組資料，假設不考慮天文潮效應，以模型颱風模擬移動風域之風壓場逐一執行臺灣周圍海域颱風暴潮模擬。依據各主要商港港口驗證點位(如圖 5.14 所示)之逐時數值模擬結果，分析每一颱風侵臺期間各港口最大暴潮位(或稱最大暴潮偏)模擬值，如表 5.2 所列。依據表 5.2 數值模擬值分析結果整理各港口歷年(1980 ~ 2013 年)最大暴潮位模擬值如下：

基隆港：歷年最大暴潮位模擬值為 1.13 m，發生於 1996 年 7 月 30 日強烈颱風賀伯(HERB)侵臺期間，颱風移動路徑為第二類侵臺路徑；此外，颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 11 組。如表 5.3 所列。

臺北港：歷年最大暴潮位模擬值為 1.069m，發生於 2004 年 8 月 23 日中度颱風艾利(AERE)侵臺期間，颱風移動路徑屬於第一類侵臺路徑；歷年侵臺颱風之中，臺北港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 17 組。如表 5.4 所列。

臺中港：歷年最大暴潮位模擬值為 1.574m，發生於 2005 年 7 月 16 日強烈颱風海棠(HAITANG)侵臺期間，颱風移動路徑屬於第三類侵臺路徑；歷年侵臺颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 25 組。如表 5.5 所列。

高雄港：歷年最大暴潮位模擬值為 0.976 m，發生於 1983 年 7 月 23 日強烈颱風韋恩(WAYNE)侵臺期間，颱風移動路徑屬於第五類侵臺路徑；歷年侵臺颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 10 組。如表 5.6 所列。

蘇澳港：歷年最大暴潮位模擬值為 1.247 m，發生於 2007 年 10 月 4 日強烈颱風柯羅莎(KROSA)侵臺期間，颱風移動路徑為第二類侵臺路徑；歷年侵臺颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 11 組。如表 5.7 所列。

花蓮港：歷年最大暴潮位模擬值為 0.892 m，發生於 2005 年 8 月 30 日強烈颱風泰利(TALIM)侵臺期間，颱風移動路徑為第三類侵臺路徑；歷年侵臺颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 6 組，如表 5.8 所列。

安平港：歷年最大暴潮位模擬值為 0.966 m，發生於 1987 年 9 月 7 日強烈颱風傑魯得(GERALD)侵臺期間，颱風移動路徑屬於第五類侵臺路徑；歷年侵臺颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 14 組，如表 5.9 所列。

布袋港：歷年最大暴潮位模擬值為 0.973 m，發生於 1986 年 8 月 20 日中度颱風韋恩(WAYNE)侵臺期間，颱風移動路徑屬於第五類侵臺路徑；歷年侵臺颱風最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 者，計有 12 組，如表 5.10 所列。

**表 5.2 歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最大  
暴潮位模擬值**

年/月/日	颱風名稱	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
1980/07/08	IDA	0.074	0.110	0.136	0.248	0.040	0.025	0.271	0.165
1980/08/26	NORRIS	0.340	0.147	0.815	0.053	0.847	0.262	0.108	0.165
1980/09/15	PERCY	0.187	0.364	0.618	0.908	0.082	0.102	0.750	0.467
1980/10/11	WYNNE	0.108	0.098	0.056	0.041	0.107	0.074	0.041	0.039
1980/11/05	BETTY	0.029	0.035	0.020	0.040	0.033	0.032	0.033	0.042
1981/06/12	IKE	0.085	0.082	0.056	0.389	0.178	0.254	0.281	0.100
1981/06/18	JUNE	0.107	0.330	0.281	0.039	0.354	0.194	0.047	0.068
1981/07/18	MAURY	0.271	0.364	0.218	0.026	0.125	0.057	0.045	0.072
1981/08/30	AGNES	0.095	0.109	0.072	0.038	0.076	0.054	0.043	0.036
1981/09/19	CLARA	0.073	0.110	0.122	0.182	0.043	0.042	0.179	0.127
1981/11/25	IRMA	0.018	0.014	0.015	0.033	0.024	0.032	0.028	0.024
1982/07/01	TESS	0.019	0.024	0.027	0.047	0.015	0.016	0.044	0.031
1982/07/27	ANDY	0.139	0.226	0.357	0.346	0.114	0.196	0.627	0.527
1982/08/06	CECIL	0.340	0.413	0.162	0.039	0.229	0.162	0.032	0.055
1982/08/13	DOT	0.056	0.086	0.125	0.222	0.029	0.049	0.344	0.216
1983/07/23	WAYNE	0.277	0.476	0.644	0.976	0.118	0.091	0.825	0.629
1983/09/05	ELLEN	0.037	0.051	0.045	0.138	0.032	0.035	0.105	0.095
1983/09/25	FORREST	0.130	0.160	0.101	0.052	0.098	0.078	0.049	0.046
1984/06/21	WYNNE	0.059	0.081	0.100	0.288	0.042	0.054	0.232	0.143
1984/07/02	ALEX	0.105	0.262	0.541	0.028	0.124	0.203	0.072	0.108
1984/08/06	FREDA	0.321	0.257	0.288	0.034	0.222	0.085	0.056	0.058
1984/08/16	GERALD	0.018	0.024	0.026	0.041	0.013	0.014	0.055	0.027
1984/08/28	JUNE	0.050	0.073	0.081	0.068	0.029	0.018	0.087	0.058
1984/11/17	BILL	0.027	0.030	0.010	0.041	0.031	0.042	0.031	0.031
1985/06/21	HAL	0.071	0.101	0.112	0.184	0.041	0.033	0.201	0.121
1985/07/28	JEFF	0.154	0.224	0.120	0.027	0.086	0.050	0.046	0.038
1985/08/21	NELSON	0.536	0.736	0.398	0.041	0.199	0.092	0.078	0.138
1985/08/27	PAT	0.025	0.017	0.017	0.017	0.019	0.018	0.034	0.017
1985/09/03	TESS	0.014	0.018	0.019	0.025	0.011	0.010	0.030	0.019
1985/09/16	VAL	0.036	0.049	0.064	0.165	0.023	0.025	0.146	0.093
1985/10/02	BRENDA	0.208	0.336	0.165	0.030	0.174	0.123	0.051	0.051
1986/06/22	NANCY	0.140	0.315	0.119	0.021	0.214	0.457	0.041	0.063
1986/07/07	PEGGY	0.070	0.103	0.121	0.136	0.038	0.029	0.157	0.107
1986/08/20	WAYNE	0.102	0.127	0.254	0.366	0.246	0.467	0.872	0.973
1986/09/17	ABBY	0.241	0.721	1.159	0.059	0.116	0.294	0.144	0.163

表 5.2 (續 1) 歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最  
大暴潮位模擬值

年/月/日	颱風名稱	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
1987/07/12	THELMA	0.111	0.112	0.062	0.029	0.095	0.062	0.037	0.041
1987/07/19	VERNON	0.143	0.177	0.084	0.017	0.200	0.132	0.026	0.028
1987/07/25	ALEX	0.331	0.544	0.287	0.037	0.456	0.249	0.059	0.058
1987/08/27	DINAH	0.085	0.089	0.068	0.035	0.076	0.059	0.054	0.041
1987/09/07	GERALD	0.139	0.236	0.340	0.972	0.069	0.061	0.966	0.611
1987/10/22	LYNN	0.037	0.046	0.038	0.164	0.031	0.033	0.137	0.094
1988/05/31	SUSAN	0.029	0.027	0.026	0.244	0.067	0.118	0.229	0.075
1988/07/17	WARREN	0.084	0.135	0.152	0.197	0.043	0.033	0.209	0.142
1988/09/21	KIT	0.060	0.104	0.140	0.072	0.029	0.021	0.100	0.066
1988/10/03	NELSON	0.048	0.035	0.027	0.030	0.076	0.073	0.046	0.038
1989/05/18	BRENDA	0.023	0.031	0.036	0.032	0.016	0.016	0.046	0.026
1989/07/15	GORDON	0.034	0.045	0.041	0.083	0.031	0.037	0.081	0.060
1989/07/18	HOPE	0.036	0.033	0.029	0.018	0.034	0.025	0.020	0.016
1989/07/31	LOLA	0.027	0.025	0.022	0.017	0.022	0.020	0.018	0.019
1989/09/08	SARAH	0.247	0.435	0.178	0.017	0.318	0.381	0.022	0.052
1989/09/14	VERA	0.053	0.055	0.041	0.023	0.043	0.034	0.025	0.022
1989/10/05	ANGELA	0.023	0.030	0.027	0.079	0.031	0.037	0.060	0.055
1990/05/18	MARIAN	0.058	0.086	0.103	0.703	0.093	0.162	0.524	0.192
1990/06/21	OFELIA	0.137	0.274	0.535	0.032	0.156	0.412	0.062	0.070
1990/06/26	PERCY	0.102	0.164	0.202	0.170	0.053	0.028	0.194	0.127
1990/08/17	YANCY	0.714	0.692	0.678	0.072	0.380	0.141	0.147	0.157
1990/08/26	BECKY	0.013	0.015	0.013	0.028	0.014	0.016	0.038	0.024
1990/08/29	ABE	0.245	0.335	0.145	0.033	0.135	0.079	0.046	0.045
1990/09/06	DOT	0.115	0.205	0.322	0.257	0.123	0.192	0.495	0.510
1991/07/17	AMY	0.025	0.015	0.010	0.095	0.039	0.065	0.030	0.019
1991/07/22	BRENDAN	0.051	0.075	0.085	0.124	0.024	0.024	0.133	0.088
1991/08/16	ELLIE	0.333	0.356	0.330	0.031	0.174	0.067	0.059	0.086
1991/09/22	NAT	0.064	0.095	0.125	0.808	0.059	0.088	0.485	0.278
1991/09/25	MIREILLE	0.102	0.104	0.067	0.045	0.095	0.068	0.051	0.047
1991/09/30	NAT	0.094	0.147	0.170	0.112	0.047	0.025	0.147	0.100
1991/10/26	RUTH	0.019	0.017	0.010	0.039	0.029	0.034	0.029	0.033
1991/11/12	SETH	0.010	0.012	0.009	0.026	0.012	0.013	0.023	0.019
1992/06/26	BOBBIE	0.060	0.037	0.032	0.031	0.078	0.088	0.046	0.036
1992/08/16	MARK	0.075	0.114	0.137	0.076	0.040	0.023	0.116	0.083
1992/08/27	POLLY	0.085	0.141	0.414	0.024	0.159	0.386	0.053	0.073

表 5.2 (續 2) 歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最  
大暴潮位模擬值

年/月/日	颱風名稱	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
1992/09/03	OMAR	0.106	0.170	0.255	0.162	0.119	0.184	0.307	0.285
1992/09/20	TED	0.128	0.418	0.208	0.047	0.140	0.249	0.074	0.089
1993/08/17	TASHA	0.022	0.034	0.040	0.057	0.013	0.014	0.072	0.038
1993/08/31	YANCY	0.099	0.089	0.058	0.034	0.091	0.063	0.042	0.040
1993/09/10	ABE	0.119	0.183	0.227	0.224	0.062	0.044	0.292	0.187
1994/07/09	TIM	0.156	0.245	0.386	0.189	0.201	0.341	0.347	0.312
1994/08/03	CAITLIN	0.028	0.049	0.174	0.041	0.068	0.107	0.101	0.116
1994/08/06	DOUG	0.797	0.893	0.342	0.041	0.497	0.208	0.071	0.075
1994/08/19	FRED	0.280	0.392	0.167	0.050	0.158	0.102	0.052	0.067
1994/08/31	GLADYS	0.153	0.170	0.596	0.058	0.502	0.221	0.092	0.141
1994/10/07	SETH	0.417	0.514	0.193	0.035	0.268	0.138	0.038	0.075
1995/06/04	DEANNA	0.092	0.150	0.267	0.184	0.040	0.023	0.295	0.258
1995/07/31	GARY	0.116	0.217	0.276	0.102	0.046	0.025	0.139	0.120
1995/08/09	HELEN	0.013	0.016	0.015	0.032	0.010	0.011	0.030	0.023
1995/08/23	JANIS	0.053	0.061	0.044	0.026	0.044	0.035	0.022	0.019
1995/08/27	KENT	0.127	0.206	0.264	0.377	0.063	0.047	0.357	0.241
1995/09/20	RYAN	0.082	0.075	0.050	0.150	0.088	0.110	0.127	0.080
1996/05/20	CAM	0.012	0.010	0.010	0.022	0.014	0.018	0.026	0.017
1996/07/24	GLORIA	0.120	0.194	0.334	0.274	0.065	0.119	0.468	0.522
1996/07/30	HERB	1.130	0.854	1.099	0.069	0.640	0.220	0.151	0.159
1996/08/06	LISA	0.081	0.140	0.181	0.065	0.037	0.019	0.094	0.079
1996/09/07	SALLY	0.055	0.078	0.096	0.152	0.031	0.034	0.157	0.102
1996/09/15	VIOLET	0.022	0.015	0.011	0.025	0.029	0.030	0.030	0.022
1996/09/27	ZANE	0.052	0.033	0.024	0.038	0.066	0.052	0.035	0.027
1997/08/17	WINNIE	0.187	0.293	0.161	0.047	0.115	0.074	0.057	0.054
1997/08/27	AMBER	0.115	0.185	0.799	0.080	0.189	0.412	0.185	0.188
1997/08/29	CASS	0.150	0.312	0.467	0.093	0.047	0.019	0.153	0.156
1997/10/19	IVAN	0.022	0.020	0.006	0.042	0.029	0.034	0.034	0.039
1998/07/09	NICHOLE	0.036	0.055	0.163	0.154	0.028	0.029	0.333	0.194
1998/08/03	OTTO	0.074	0.118	0.314	0.068	0.068	0.122	0.108	0.127
1998/09/27	YANNI	0.074	0.094	0.056	0.027	0.093	0.084	0.040	0.030
1998/10/13	ZEB	0.206	0.185	0.055	0.049	0.271	0.250	0.049	0.042
1998/10/25	BABS	0.140	0.260	0.384	0.138	0.072	0.038	0.247	0.195
1999/06/04	MAGGIE	0.132	0.210	0.263	0.632	0.058	0.065	0.500	0.346
1999/08/19	SAM	0.025	0.033	0.036	0.058	0.017	0.017	0.064	0.040

表 5.2 (續 3) 歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最  
大暴潮位模擬值

年/月/日	颱風名稱	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
1999/10/04	DAN	0.173	0.271	0.369	0.167	0.087	0.039	0.276	0.222
2000/07/06	KAITAK	0.201	0.450	0.236	0.089	0.310	0.348	0.097	0.050
2000/08/21	BILIS	0.022	0.013	0.010	0.313	0.158	0.249	0.564	0.509
2000/08/27	PRAPIROON	0.149	0.191	0.083	0.029	0.094	0.061	0.043	0.045
2000/09/08	BOPHA	0.046	0.025	0.013	0.028	0.077	0.047	0.026	0.018
2000/10/23	YAGI	0.073	0.068	0.035	0.021	0.070	0.048	0.024	0.027
2000/10/29	XANGSANE	0.118	0.202	0.074	0.094	0.237	0.290	0.090	0.036
2000/11/06	BEBINCA	0.017	0.022	0.025	0.034	0.014	0.013	0.036	0.028
2001/05/11	CIMARON	0.021	0.015	0.010	0.027	0.028	0.038	0.029	0.021
2001/06/22	CHEBI	0.199	0.334	0.647	0.671	0.072	0.070	0.965	0.862
2001/07/03	UTOR	0.056	0.087	0.107	0.169	0.033	0.033	0.162	0.109
2001/07/10	TRAMI	0.011	0.029	0.091	0.205	0.017	0.031	0.314	0.191
2001/07/23	YUTU	0.038	0.052	0.052	0.092	0.022	0.017	0.085	0.060
2001/07/28	TORAJI	0.084	0.156	0.599	0.022	0.129	0.264	0.065	0.095
2001/09/06	NARI	0.654	0.466	0.222	0.224	0.546	0.178	0.214	0.105
2001/09/22	LEKIMA	0.019	0.012	0.021	0.041	0.041	0.101	0.138	0.201
2001/10/15	HAIYAN	0.082	0.078	0.036	0.025	0.086	0.057	0.028	0.027
2002/07/02	RAMMASUN	0.124	0.149	0.082	0.034	0.092	0.062	0.051	0.045
2002/07/09	NAKRI	0.138	0.126	0.701	0.177	0.080	0.079	0.390	0.418
2002/09/05	SINLAKU	0.192	0.283	0.169	0.044	0.108	0.067	0.051	0.065
2003/04/21	KUJIRA	0.028	0.025	0.015	0.028	0.028	0.033	0.024	0.021
2003/06/01	NANGKA	0.017	0.012	0.012	0.039	0.021	0.029	0.059	0.019
2003/06/16	SOUDELOR	0.123	0.117	0.058	0.022	0.102	0.079	0.040	0.035
2003/07/21	IMBUDO	0.024	0.032	0.036	0.051	0.020	0.022	0.057	0.037
2003/08/02	MORAKOT	0.077	0.134	0.241	0.185	0.034	0.044	0.345	0.254
2003/08/19	VAMCO	0.067	0.096	0.056	0.030	0.072	0.037	0.039	0.026
2003/08/21	KROVANH	0.014	0.017	0.016	0.028	0.014	0.016	0.030	0.023
2003/08/31	DUJUAN	0.142	0.225	0.281	0.644	0.067	0.074	0.451	0.335
2003/11/02	MELOR	0.024	0.020	0.024	0.045	0.031	0.058	0.045	0.031
2004/06/08	CONSON	0.044	0.035	0.027	0.055	0.062	0.076	0.065	0.029
2004/06/27	MINDULLE	0.170	0.533	0.368	0.036	0.159	0.347	0.036	0.058
2004/07/14	KOMPASU	0.024	0.034	0.041	0.098	0.015	0.018	0.091	0.051
2004/08/10	RANANIM	0.141	0.197	0.135	0.041	0.094	0.061	0.061	0.057
2004/08/23	AERE	0.649	1.069	0.461	0.048	0.195	0.097	0.111	0.171
2004/09/11	HAIMA	0.168	0.212	0.070	0.007	0.116	0.086	0.012	0.018

表 5.2 (續 4) 歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最  
大暴潮位模擬值表

年/月/日	颱風名稱	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
2004/09/26	MEARI	0.082	0.070	0.034	0.030	0.086	0.054	0.025	0.028
2004/10/23	NOCKTEN	0.514	0.960	0.465	0.054	0.712	0.292	0.069	0.100
2004/12/03	NANMADOL	0.046	0.039	0.040	0.397	0.058	0.087	0.284	0.153
2005/07/16	HAITANG	0.380	0.179	1.574	0.052	0.923	0.585	0.180	0.231
2005/08/03	MATSA	0.259	0.311	0.156	0.038	0.165	0.091	0.058	0.070
2005/08/11	SANVU	0.120	0.217	0.279	0.217	0.051	0.027	0.284	0.167
2005/08/30	TALIM	0.252	0.291	1.290	0.159	0.727	0.892	0.290	0.553
2005/09/09	KHANUN	0.221	0.268	0.150	0.040	0.146	0.087	0.057	0.069
2005/09/21	DAMREY	0.019	0.024	0.025	0.056	0.013	0.016	0.051	0.034
2005/09/30	LONGWANG	0.135	0.230	0.549	0.241	0.472	0.709	0.515	0.537
2006/05/16	CHANCHU	0.206	0.369	0.621	0.136	0.083	0.043	0.296	0.290
2006/07/07	EWINIAR	0.063	0.059	0.038	0.035	0.064	0.047	0.034	0.033
2006/07/12	BILIS	0.288	0.330	0.609	0.039	0.363	0.125	0.072	0.102
2006/07/23	KAEMI	0.133	0.216	0.312	0.364	0.095	0.163	0.724	0.673
2006/08/07	BOPHA	0.095	0.170	0.239	0.341	0.051	0.066	0.635	0.353
2006/08/09	SAOMAI	0.324	0.551	0.319	0.050	0.163	0.100	0.081	0.089
2006/09/14	SHANSHAN	0.126	0.130	0.060	0.037	0.142	0.110	0.037	0.048
2007/08/06	PABUK	0.078	0.109	0.144	0.599	0.045	0.055	0.441	0.272
2007/08/08	WUTIP	0.022	0.012	0.319	0.031	0.058	0.109	0.058	0.069
2007/08/16	SEPAT	0.058	0.012	0.007	0.110	0.243	0.440	0.149	0.243
2007/09/17	WIPHA	0.470	0.788	0.353	0.051	0.277	0.141	0.079	0.115
2007/10/04	KROSA	0.676	0.780	0.717	0.059	1.247	0.681	0.112	0.186
2007/11/26	MITAG	0.016	0.018	0.012	0.041	0.019	0.020	0.034	0.033
2008/07/16	KALMAEGI	0.159	0.223	0.229	0.029	0.370	0.234	0.046	0.075
2008/07/26	FUNGWONG	0.125	0.206	0.576	0.115	0.180	0.338	0.286	0.353
2008/08/19	NURI	0.044	0.057	0.070	0.127	0.028	0.034	0.118	0.077
2008/09/11	SINLAKU	0.587	1.008	0.765	0.063	0.918	0.350	0.039	0.134
2008/09/21	HAGUPIT	0.063	0.086	0.103	0.180	0.035	0.043	0.180	0.118
2008/09/26	JANGMI	0.539	0.728	0.572	0.060	1.031	0.524	0.088	0.169
2009/06/19	LINFA	0.173	0.335	0.392	0.174	0.081	0.038	0.285	0.218
2009/07/16	MOLAVE	0.063	0.092	0.109	0.198	0.029	0.027	0.214	0.123
2009/08/05	MORAKOT	0.113	0.330	0.506	0.032	0.247	0.593	0.057	0.096
2009/10/03	PARMA	0.021	0.023	0.010	0.072	0.021	0.025	0.070	0.049
2010/08/29	LIONROCK	0.076	0.122	0.175	0.350	0.041	0.030	0.482	0.260
2010/08/30	NAMTHEUN	0.169	0.360	0.218	0.036	0.059	0.036	0.069	0.074

表 5.2 (續 5) 歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬主要商港之最大暴潮位模擬值表

年/月/日	颱風名稱	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
2010/09/09	MERANTI	0.168	0.294	0.422	0.176	0.068	0.031	0.331	0.268
2010/09/17	FANAPI	0.141	0.194	0.370	0.322	0.419	0.486	0.734	0.519
2010/10/17	MEGI	0.168	0.308	0.403	0.338	0.078	0.053	0.418	0.268
2011/05/09	AERE	0.024	0.019	0.012	0.011	0.024	0.022	0.017	0.014
2011/05/25	SONGDA	0.097	0.066	0.046	0.029	0.100	0.099	0.035	0.038
2011/06/23	MEARI	0.075	0.075	0.060	0.022	0.059	0.047	0.047	0.030
2011/08/04	MUIFA	0.064	0.060	0.045	0.030	0.059	0.045	0.039	0.034
2011/08/27	NANMADOL	0.075	0.125	0.237	0.307	0.045	0.075	0.676	0.442
2012/06/19	TALIM	0.228	0.763	0.935	0.171	0.080	0.054	0.335	0.305
2012/06/28	DOKSURI	0.029	0.043	0.052	0.083	0.013	0.015	0.088	0.056
2012/07/30	SAOLA	0.342	0.466	0.218	0.042	0.494	0.482	0.037	0.129
2012/08/05	HAIKUI	0.102	0.120	0.071	0.031	0.073	0.046	0.036	0.037
2012/08/14	KAITAK	0.011	0.016	0.022	0.043	0.008	0.011	0.045	0.032
2012/08/21	TEMBIN	0.073	0.108	0.157	0.613	0.117	0.137	0.465	0.289
2012/09/25	JELAWAT	0.070	0.056	0.034	0.029	0.094	0.086	0.030	0.037
2013/07/12	SOULIK	0.945	0.855	0.842	0.068	0.520	0.205	0.128	0.124
2013/07/17	CIMARON	0.043	0.064	0.074	0.097	0.023	0.013	0.112	0.068
2013/08/20	TRAMI	0.263	0.431	0.379	0.053	0.139	0.076	0.112	0.177
2013/08/27	KONGREY	0.241	0.310	0.141	0.031	0.143	0.107	0.057	0.073
2013/09/19	USAGI	0.138	0.221	0.261	0.432	0.072	0.078	0.410	0.277
2013/10/04	FITOW	0.240	0.376	0.187	0.045	0.132	0.076	0.056	0.074

表 5.3 基隆港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
1996/07/30	HERB	強烈	2	1.130
2013/07/12	SOULIK	強烈	2	0.945
1994/08/06	DOUG	強烈	6	0.797
1990/08/17	YANCY	中度	2	0.714
2007/10/04	KROSA	強烈	2	0.676
2001/09/06	NARI	中度	特殊路徑	0.654
2004/08/23	AERE	中度	1	0.649
2008/09/11	SINLAKU	強烈	2	0.587
2008/09/26	JANGMI	強烈	2	0.539
1985/08/21	NELSON	中度	1	0.536
2004/10/23	NOCKTEN	中度	6	0.514



表 5.4 臺北港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
2004/08/23	AERE	中度	1	1.069
2008/09/11	SINLAKU	強烈	2	1.008
2004/10/23	NOCKTEN	中度	6	0.960
1994/08/06	DOUG	強烈	6	0.893
2013/07/12	SOULIK	強烈	2	0.855
1996/07/30	HERB	強烈	2	0.854
2007/09/17	WIPHA	強烈	2	0.788
2007/10/04	KROSA	強烈	2	0.780
2012/06/19	TALIM	輕度	9	0.763
1985/08/21	NELSON	中度	1	0.736
2008/09/26	JANGMI	強烈	2	0.728
1986/09/17	ABBY	強烈	3	0.721
1990/08/17	YANCY	中度	2	0.692
2006/08/09	SAOMAI	中度	0	0.551
1987/07/25	ALEX	中度	6	0.544
2004/06/27	MINDULLE	中度	6	0.533
1994/10/07	SETH	強烈	6	0.514

表 5.5 臺中港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
2005/07/16	HAITANG	強烈	3	1.574
2005/08/30	TALIM	強烈	3	1.290
1986/09/17	ABBY	強烈	3	1.159
1996/07/30	HERB	強烈	2	1.099
2012/06/19	TALIM	輕度	9	0.935
2013/07/12	SOULIK	強烈	2	0.842
1980/08/26	NORRIS	中度	2	0.815
1997/08/27	AMBER	中度	3	0.799
2008/09/11	SINLAKU	強烈	2	0.765
2007/10/04	KROSA	強烈	2	0.717
2002/07/09	NAKRI	輕度	9	0.701
1990/08/17	YANCY	中度	2	0.678
2001/06/22	CHEBI	中度	7	0.647
1983/07/23	WAYNE	強烈	5	0.644
2006/05/16	CHANCHU	中度	9	0.621
1980/09/15	PERCY	強烈	4	0.618
2006/07/12	BILIS	輕度	2	0.609
2001/07/28	TORAJI	中度	3	0.599
1994/08/31	GLADYS	中度	2	0.596
2008/07/26	FUNGWONG	中度	3	0.576
2008/09/26	JANGMI	強烈	2	0.572
2005/09/30	LONGWANG	強烈	3	0.549
1984/07/02	ALEX	中度	6	0.541
1990/06/21	OFELIA	中度	6	0.535
2009/08/05	MORAKOT	中度	3	0.506

表 5.6 高雄港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
1983/07/23	WAYNE	強烈	5	0.976
1987/09/07	GERALD	強烈	5	0.972
1980/09/15	PERCY	強烈	4	0.908
1991/09/22	NAT	強烈	特殊路徑	0.808
1990/05/18	MARIAN	中度	9	0.703
2001/06/22	CHEBI	中度	7	0.671
2003/08/31	DUJUAN	中度	5	0.644
1999/06/04	MAGGIE	中度	5	0.632
2012/08/21	TEMBIN	中度	特殊路徑	0.613
2007/08/06	PABUK	輕度	4	0.599

**表 5.7 蘇澳港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件**

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
2007/10/04	KROSA	強烈	2	1.247
2008/09/26	JANGMI	強烈	2	1.031
2005/07/16	HAITANG	強烈	3	0.923
2008/09/11	SINLAKU	強烈	2	0.918
1980/08/26	NORRIS	中度	2	0.847
2005/08/30	TALIM	強烈	3	0.727
2004/10/23	NOCKTEN	中度	6	0.712
1996/07/30	HERB	強烈	2	0.640
2001/09/06	NARI	中度	特殊路徑	0.546
2013/07/12	SOULIK	強烈	2	0.520
1994/08/31	GLADYS	中度	2	0.502

**表 5.8 花蓮港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件**

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
2005/08/30	TALIM	強烈	3	0.892
2005/09/30	LONGWANG	強烈	3	0.709
2007/10/04	KROSA	強烈	2	0.681
2009/08/05	MORAKOT	中度	3	0.593
2005/07/16	HAITANG	強烈	3	0.585
2008/09/26	JANGMI	強烈	2	0.524

**表 5.9 安平港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件**

年/月/日	名稱	近台強度	侵台路徑分類	最大暴潮位模擬值
1987/09/07	GERALD	強烈	5	0.966
2001/06/22	CHEBI	中度	7	0.965
1986/08/20	WAYNE	中度	特殊路徑	0.872
1983/07/23	WAYNE	強烈	5	0.825
1980/09/15	PERCY	強烈	4	0.750
2010/09/17	FANAPI	中度	4	0.734
2006/07/23	KAEMI	中度	3	0.724
2011/08/27	NANMADOL	強烈	4	0.676
2006/08/07	BOPHA	輕度	4	0.635
1982/07/27	ANDY	強烈	4	0.627
2000/08/21	BILIS	強烈	3	0.564
1990/05/18	MARIAN	中度	9	0.524
2005/09/30	LONGWANG	強烈	3	0.515
1999/06/04	MAGGIE	中度	5	0.500

**表 5.10 布袋港最大暴潮位模擬值超過 0.5 m 之侵臺颱風事件**

年/月/日	颱風名稱	強度類別	侵台路徑類別	最大暴潮位模擬值
1986/08/20	WAYNE	中度	特殊路徑	0.973
2001/06/22	CHEBI	中度	7	0.862
2006/07/23	KAEMI	中度	3	0.673
1983/07/23	WAYNE	強烈	5	0.629
1987/09/07	GERALD	強烈	5	0.611
2005/08/30	TALIM	強烈	3	0.553
2005/09/30	LONGWANG	強烈	3	0.537
1982/07/27	ANDY	強烈	4	0.527
1996/07/24	GLORIA	中度	7	0.522
2010/09/17	FANAPI	中度	4	0.519
1990/09/06	DOT	中度	3	0.510
2000/08/21	BILIS	強烈	3	0.509

## 5.4 主要商港暴潮位復現期分析

本章節瞭解主要商港歷史最大暴潮位實為本計畫颱風暴潮模擬主要目的之一，因此本計畫依據歷史侵臺颱風資料，利用前述模型颱風方法執行臺灣周圍海域暴潮模擬，並分析本計畫主要商港歷史最大暴潮位。

### 5.4.1 極端值分佈理論簡述

常見極值機率分布型態有常態分布機率函數、對數常態分布機率函數、極端值一型分布機率函數、對數皮爾遜三型分布機率函數以及皮爾遜三型分布機率函數等五種機率函數。本計畫將先利用卡方檢定及 95% 信賴度的 K-S 檢定方法，分別針對上述五種機率分布函數分別檢定七大商港之潮位年極值樣本，找出最適合之機率分布函數。再依周氏(1951)所提出之頻率分析一般式決定不同復現期距下之發生頻率量  $X_T$ ，其數學表示式為

$$X_T = \bar{X} + K_T S_X \quad (5-9)$$

其中

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5-10)$$

$$S_X = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (5-11)$$

式中  $\bar{X}$  為數列 X 之樣本平均值， $S_X$  為數列 X 之樣本標準偏差， $K_T$  為復現期距  $T$  年時之頻率因子。

由於不同的機率分布及不同的復現期距可決定不同的頻率因子  $K_T$ ，因此針對已知樣本找出適合之最佳機率分布後，即可由給定之復現期距  $T$  決定復現物理量  $X$ 。本計畫所選取的各種機率分布函數之頻率因子  $K_T$  計算方式分述如下：

### (1) 常態分布(Normal Distribution)

為對稱鐘形之連續分布，其累積機率分布為

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-z^2/2) dz \quad (5-12)$$

式中  $z = (X - \bar{X})/S_X$  為單位化變量， $\bar{X}$  為數列 X 之樣本平均值， $S_X$  為數列 X 之樣本標準偏差。常態分布之頻率因子

$$K_T = z \quad (5-13)$$

### (2) 對數常態分布(Lognormal Distribution)

令新變數  $y = \ln X$ ，若  $y$  符合上述常態分布，則可依常態分布之方法求得頻率因子  $K_T$  值；再依下列逆轉方式還原數列之對應值

$$X = e^y \quad (5-14)$$

### (3) 皮爾遜三型分布(Pearson Type III Distribution)

此為一具有  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三參數之 Gamma 型機率分布函數，令  $z = (X - \gamma)/\alpha$ ，則其累積機率表示如下：

$$P(z) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_{-\infty}^z z^{\beta-1} \exp(-z) dz \quad (5-15)$$

式中  $\Gamma(\cdot)$  為 Gamma 函數。其頻率因子  $K_T$  值計算如下：

$$K_T = z + (z^2 - 1) \frac{G_x}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{G_x}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{G_x}{6}\right)^3 + z \left(\frac{G_x}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{G_x}{6}\right)^5 \quad (5-16)$$

式中  $G_x$  為數列 X 之偏態係數(Coefficient of Skewness)。

### (4) 對數皮爾遜三型分布(Logpearson Type III Distribution)

令新變數  $X_l = \ln X$ ，若  $X_l$  符合上述皮爾遜三型分布，則可依上述(三)

之方法求得頻率因子  $K_T$  值；再依  $X=\exp(X_i)$  反轉方式求值。

### (5) 極端值 I 型分布(Gumbel's Extremal-Value Type I Distribution)

此為一具有  $\alpha$ 、 $\beta$  二參數之機率分布函數，令  $z=(X-\beta)/\alpha$ ，則其累積機率表示如下：

$$P(z)=\exp[-\exp(-z)] \quad (5-17)$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$  可由動差法推估得到  $\alpha=0.7797S_X$  及  $\beta=\bar{X}-0.45S_X$ ，其頻率因子  $K_T$  值計算如下：

$$K_T=-\left\{0.45+0.7797\ln\left[-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right]\right\} \quad (5-18)$$

一般而言，對於資料分布機率型態之確定需經由統計檢定或點繪機率圖紙等方式為之。為得到分析資料之最佳機率分布函數，本計畫採用最佳統計分布的判斷方法，即利用等機率間距卡方(Chi-square)檢定及 95% 信賴度的 K-S 檢定。由可接受之機率分布中以選取卡方值較小者為原則，若無法由卡方值決定者則改由較小 K-S 檢定差值擇取最適之機率分布。以下針對卡方檢定、K-S 檢定與最小值標準差做摘要敘述：

#### (一) 卡方檢定(Chi-Square Test)

卡方檢定係將樣本數分配成  $m$  組數，再決定各組之界限範圍(Class Limits)；計算出各組範圍界限中之樣本個數( $O_i$ )，然後與各組界限之理論期望發生次數( $E_i$ )，依據下式：

$$\chi_c^2=\sum_{i=1}^m(O_i-E_i)^2/E_i \quad (5-19)$$

式中  $E_i=n/m$ 。基本上，先求出觀測值與理論值之絕對差距的總和，此值具有  $m-1$  個自由度，再由  $\chi^2$  檢定表，判斷此值是否通過檢定。

#### (二) K-S 檢定(Kolmogorov-Smirnov Test)

K-S 檢定是應用觀測值的累積機率分布與理論值的累積機率分布間之最大偏差距  $D_{max}$  為檢定依據，其中

$$D_{max} = MAX \left[ |P_{ss}(X_i) - P_{st}(X_i)| \right] \quad (5-20)$$

上式中  $P_{ss}(X_i)$  為觀測值之累積機率分佈， $P_{st}(X_i)$  為理論值之累積機率分佈。於求出  $D_{max}$  值後，由 Kolmogorov-Smirnov 表，檢查是否通過。

### (三) 標準差(SE)

標準差值是考慮樣本中各觀測值變量與變量有相同累積機率時之理論值之誤差，定義為

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X'_i)^2}{n - m}} \quad (5-21)$$

式中  $X_i$  為第  $i$  個觀測值變量， $X'_i$  為與變量  $X_i$  具有相同累積機率時之理論值， $m$  為統計分布中之參數數目， $n$  為樣本數目。

## 5.4.2 最大暴潮位復現期距分析

本計畫依據歷年(1980 ~ 2013 年)侵臺颱風暴潮模擬之各港口最大暴潮位模擬值，如表 5.2 所列，按年份選取該年度最大值為暴潮位頻率分析之樣本，如表 5.11 所列，各港口暴潮位頻率分析資料之基本統計特性如表 5.12 所列。

在頻率分析樣本之最佳機率分布函數判斷上，本計畫採用卡方檢定、K-S 檢定及機率密合度(SE)第三項指標推行判斷；各港口暴潮位頻率分析樣本最適機率分布函數檢定結果分別如表 5.13 至 5.20 所示，其中基隆港、高雄港、安平港等港口暴潮位頻率分析樣本之最適合機率分布函數為對數皮爾遜三型分布，臺中港、蘇澳港、花蓮港及布袋港等港口暴潮位頻率分析樣本以對數常態分布函數為最適，臺北港暴潮位樣本最適之機率分布函數為極端值一型分布。

本計畫依據各港口最適之機率分布函數分別進行暴潮位頻率分



析，並推算各港口 2、5、10、20、25、50 及 100 年復現期距之暴潮位值，如表 5.21 所列。依據表 5.21 分析結果得知各港口 50 年復現期距之暴潮位值分別為：基隆港 1.25 m、臺北港 1.26 m、臺中港 1.44 m、高雄港 1.20 m、蘇澳港 1.22 m、花蓮港 0.85 m、安平港 1.03 m、及布袋港 0.97m。

表 5.11 主要商港年最大暴潮位頻率分析樣本

年份	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
1980	0.340	0.364	0.815	0.908	0.847	0.262	0.750	0.467
1981	0.271	0.364	0.281	0.389	0.354	0.254	0.281	0.127
1982	0.340	0.413	0.357	0.346	0.229	0.196	0.627	0.527
1983	0.277	0.476	0.644	0.976	0.118	0.091	0.825	0.629
1984	0.321	0.262	0.541	0.288	0.222	0.203	0.232	0.143
1985	0.536	0.736	0.398	0.184	0.199	0.123	0.201	0.138
1986	0.241	0.721	1.159	0.366	0.246	0.467	0.872	0.973
1987	0.331	0.544	0.340	0.972	0.456	0.249	0.966	0.611
1988	0.084	0.135	0.152	0.244	0.076	0.118	0.229	0.142
1989	0.247	0.435	0.178	0.083	0.318	0.381	0.081	0.060
1990	0.714	0.692	0.678	0.703	0.380	0.412	0.524	0.510
1991	0.333	0.356	0.330	0.808	0.174	0.088	0.485	0.278
1992	0.128	0.418	0.414	0.162	0.159	0.386	0.307	0.285
1993	0.119	0.183	0.227	0.224	0.091	0.063	0.292	0.187
1994	0.797	0.893	0.596	0.189	0.502	0.341	0.347	0.312
1995	0.127	0.217	0.276	0.377	0.088	0.110	0.357	0.258
1996	1.130	0.854	1.099	0.274	0.640	0.220	0.468	0.522
1997	0.187	0.312	0.799	0.093	0.189	0.412	0.185	0.188
1998	0.206	0.260	0.384	0.154	0.271	0.250	0.333	0.195
1999	0.173	0.271	0.369	0.632	0.087	0.065	0.500	0.346
2000	0.201	0.450	0.236	0.313	0.310	0.348	0.564	0.509
2001	0.654	0.466	0.647	0.671	0.546	0.264	0.965	0.862
2002	0.192	0.283	0.701	0.177	0.108	0.079	0.390	0.418
2003	0.142	0.225	0.281	0.644	0.102	0.079	0.451	0.335
2004	0.649	1.069	0.465	0.397	0.712	0.347	0.284	0.171
2005	0.380	0.311	1.574	0.241	0.923	0.892	0.515	0.553
2006	0.324	0.551	0.621	0.364	0.363	0.163	0.724	0.673
2007	0.676	0.788	0.717	0.599	1.247	0.681	0.441	0.272
2008	0.587	1.008	0.765	0.180	1.031	0.524	0.286	0.353
2009	0.173	0.335	0.506	0.198	0.247	0.593	0.285	0.218
2010	0.169	0.360	0.422	0.350	0.419	0.486	0.734	0.519
2011	0.097	0.125	0.237	0.307	0.100	0.099	0.676	0.442
2012	0.342	0.763	0.935	0.613	0.494	0.482	0.465	0.305
2013	0.945	0.855	0.842	0.432	0.520	0.205	0.410	0.277

**表 5.12 主要商港暴潮位頻率分析樣本之基本統計資料(unit: mm)**

樣本基本資料	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
最小值	84.0	125.0	152.0	83.0	76.0	63.0	81.0	60.0
最大值	1130.0	1069.0	1574.0	976.0	1247.0	892.0	966.0	973.0
平均值	365.6	485.1	558.4	407.5	375.5	292.1	472.1	376.6
標準偏差	259.5	259.3	316.1	253.5	294.3	196.4	230.1	213.8
偏歪係數	1.315	0.703	1.228	0.917	1.342	1.066	0.637	0.912
對數平均值	5.679	6.040	6.176	5.819	5.638	5.441	6.031	5.763
對數標準偏差	0.676	0.561	0.562	0.644	0.790	0.730	0.539	0.618
對數偏歪係數	0.181	-0.213	-0.054	-0.150	0.007	-0.235	-0.679	-0.481
低邊界值	24.7	58.8	39.3	53.8	59.5	57.8	75.4	62.9

**表 5.13 基隆港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	18.359	7.779	0.242	0.2047	270.51	102.73
Log Normal	4.92	7.779	0.1146	0.2047	132.25	51.662
Pearson type III	6.365	6.251	0.1546	0.2047	146.27	57.481
Log Pearson type III	4.471	6.251	0.1035	0.2047	135.78	49.137
Extreme type I	7.218	7.779	0.1739	0.2047	164.58	64.554
Summary : the best fitted probability is Log-Pearson III distribution						

**表 5.14 臺北港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	7.399	7.779	0.161	0.2047	133.38	69.842
Log Normal	8.285	7.779	0.1075	0.2047	151.96	53.229
Pearson type III	7.483	6.251	0.1172	0.2047	93.84	51.435
Log Pearson type III	8.452	6.251	0.1099	0.2047	109.43	48.775
Extreme type I	7.172	7.779	0.1113	0.2047	107.42	51.872
Summary : the best fitted probability is Extreme I distribution						

**表 5.15 臺中港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距	機率密合度 (SE)
Normal	6.422	7.779	0.1378	0.2047	414.14	102.628
Log Normal	3.27	7.779	0.0901	0.2047	173.78	45.156
Pearson type III	2.376	6.251	0.0755	0.2047	270.66	57.351
Log Pearson type III	1.895	6.251	0.0928	0.2047	192.45	47.913
Extreme type I	3.071	7.779	0.094	0.2047	285.12	60.927
Summary : the best fitted probability is Log-normal distribution						

**表 5.16 高雄港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	19.806	7.779	0.193	0.2047	163.88	81.335
2-parameter Log Normal	5.764	7.779	0.1085	0.2047	170.18	54.365
Pearson type III	6.474	6.251	0.1320	0.2047	131.55	55.486
Log Pearson type III	5.501	6.251	0.1102	0.2047	122.28	52.320
Extreme type I	6.352	7.779	0.1234	0.2047	137.60	55.717
Summary : the best fitted probability is Log-Pearson III distribution						

**表 5.17 蘇澳港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	20.136	7.779	0.1546	0.2047	311.47	112.418
Log Normal	2.996	7.779	0.0988	0.2047	119.41	38.626
Pearson type III	5.31	6.251	0.1156	0.2047	168.37	55.535
Log Pearson type III	3.128	6.251	0.1006	0.2047	119.09	39.223
Extreme type I	7.875	7.779	0.1261	0.2047	191.34	65.884
Summary : the best fitted probability is Log-normal distribution						

**表 5.18 花蓮港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	5.37	7.779	0.145	0.2047	226.1	60.896
Log Normal	6.285	7.779	0.1159	0.2047	63.59	31.333
Pearson type III	2.595	6.251	0.099	0.2047	146.5	35.143
Log Pearson type III	7.17	6.251	0.1254	0.2047	56.25	27.106
Extreme type I	2.742	7.779	0.1104	0.2047	145.92	36.315
Summary : the best fitted probability is Log Normal distribution						

**表 5.19 安平港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	3.666	7.779	0.1168	0.2047	129.42	52.771
Log Normal	5.947	7.779	0.0862	0.2047	192.88	43.7
Pearson type III	2.005	6.251	0.0781	0.2047	98.05	38.525
Log Pearson type III	1.259	6.251	0.1167	0.2047	86.14	34.36
Extreme type I	2.675	7.779	0.0792	0.2047	88.18	40.388
Summary : the best fitted probability is Log-pearson III distribution						

**表 5.20 布袋港暴潮位極端值機率密度函數適合度檢定結果**

機率密度函數類別	chi2 檢定值	chi2(90%) 臨界值	K-S 檢定值	K-S(90%) 臨界值	推測值 最大差距 (mm)	機率密合度 (SE)
Normal	8.7	7.779	0.132	0.2047	189.52	58.285
Log Normal	1.769	7.779	0.0998	0.2047	79.88	33.534
Pearson type III	3.073	6.251	0.0873	0.2047	113.54	36.838
Log Pearson type III	7.182	6.251	0.1108	0.2047	82.93	31.368
Extreme type I	0.589	7.779	0.0994	0.2047	109.28	36.703
Summary : the best fitted probability is Log-normal distribution						

**表 5.21 主要商港年最大暴潮位頻率分析結果(unit: m)**

復現期距 (年)	基隆港	臺北港	臺中港	高雄港	蘇澳港	花蓮港	安平港	布袋港
02	0.29	0.45	0.49	0.34	0.30	0.24	0.44	0.33
05	0.51	0.71	0.76	0.58	0.53	0.41	0.66	0.51
10	0.70	0.80	0.96	0.76	0.72	0.53	0.79	0.64
20	0.92	1.05	1.16	0.94	0.92	0.66	0.90	0.78
25	1.00	1.10	1.22	1.01	0.99	0.71	0.93	0.83
50	1.25	1.26	1.44	1.20	1.22	0.85	1.03	0.97
100	1.54	1.42	1.66	1.40	1.48	1.04	1.11	1.12



## 第六章 主要商港水位及流場模擬與研究

本章節主要針對四年期合作研究計畫「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」之各主要商港水位及流場模擬與研究內容進行說明，其中 6.1 節為前三年主要商港水動力模組之改善成果，包括基隆港、臺北港、臺中港、布袋港、安平港及高雄港。6.2 節與 6.3 節分別為本年度花蓮港及蘇澳港小尺度港區水動力模組之改善研究內容。

### 6.1 主要商港水動力模組改善成果

#### 6.1.1 基隆港

基隆港水動力模組主要依據 2010 年調整之基隆港水動力模擬子系統，配合 2011 年度之工作項目進行改善。基隆港水動力模組模擬範圍東起新北市瑞芳區鼻頭角海岸，西至新北市三芝區富貴角海岸，東西長約 43 公里；模式離岸邊界大致與基隆海岸平行，東側離岸距離約 20 公里，西側離岸距離約 17 公里，模式東側邊界鄰近龍洞潮位站，西側邊界鄰近麟山鼻潮位站。基隆港水動力模組數值計算格網係由 2610 個節點及 4745 個三角形元素構成，如圖 6.1 所示。模式之地形水深資料主要依據海軍測量局刊行之海軍水道圖圖號為 0352、0353A 與 04513 等水深資料建置得到，模式模擬範圍內之水深變化如圖 6.2 所示。

在海域開放邊界之水位邊界條件方面，依據所蒐集的潮位資料(基隆港、龍洞及麟山鼻潮位站)以 34 個分潮進行調和分析建立各分潮調和常數，預測每年 1 月 1 日零時至隔年 1 月 1 日零時模式各開放邊界節點之每小時水位變化資料建立模式水位邊界輸入檔。模式在執行時會依模擬時間由邊界水位檔案讀取該時段之邊界水位，由於邊界水位為每小時資料，因此模式新增時間內插功能，即每小時間之邊界水位值以線性內插方式得到。圖 6.3 所示為模式東、西兩側邊界水位變化之時間序列圖，其中東、西兩側水位邊界係分別龍洞及麟山鼻潮位調和分析(34 個分潮)預測值建立的。

本計畫選取基隆港外海水位及海流觀測資料與模式鄰近觀測點之節點模擬結果進行模式之驗證。由於模式模擬結果主要為天文潮流成份，而海流觀測資料除了天文潮流成份外，尚有其他成份流及觀測誤差存在，因此本計畫先針對海流觀測資料採逐月方式選取  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$  及  $S_2$  等四個主要分潮以調和分析方法得到觀測資料之天文潮流大小，再與基隆港水動力模組潮流預測模擬結果比較。如圖 6.4 所示為模式模擬預測基隆港 2011 年 3 月水位與潮流(東西向及南北向)之結果與觀測點天文潮流分析結果之比較，其中水位部分並未做調和分析，直接採用觀測資料與模式模擬結果比較。由驗證結果顯示模式最大流速發生時間與潮流最大流速發生時間約有 2~3 小時之延遲，大潮期間尤其顯著。整體而言，模式東西向及南北向的流速振幅與調和分析結果相當，模擬水位變化趨勢亦與觀測水位相近。

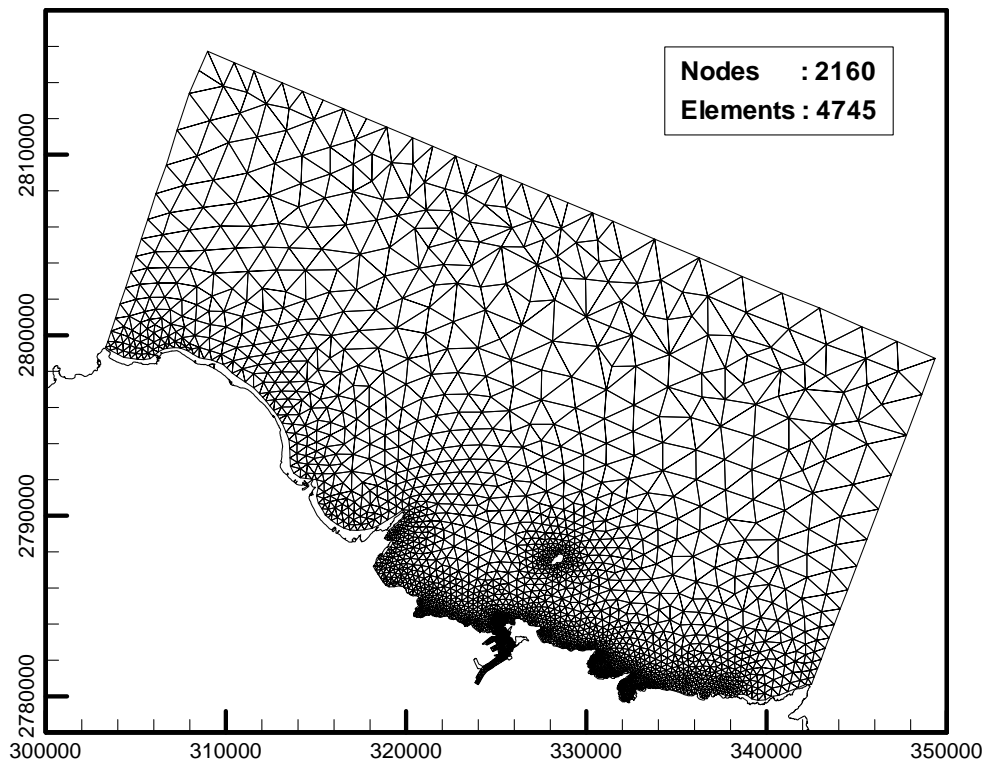


圖 6.1 基隆港水動力模組之有限元素格網分佈圖



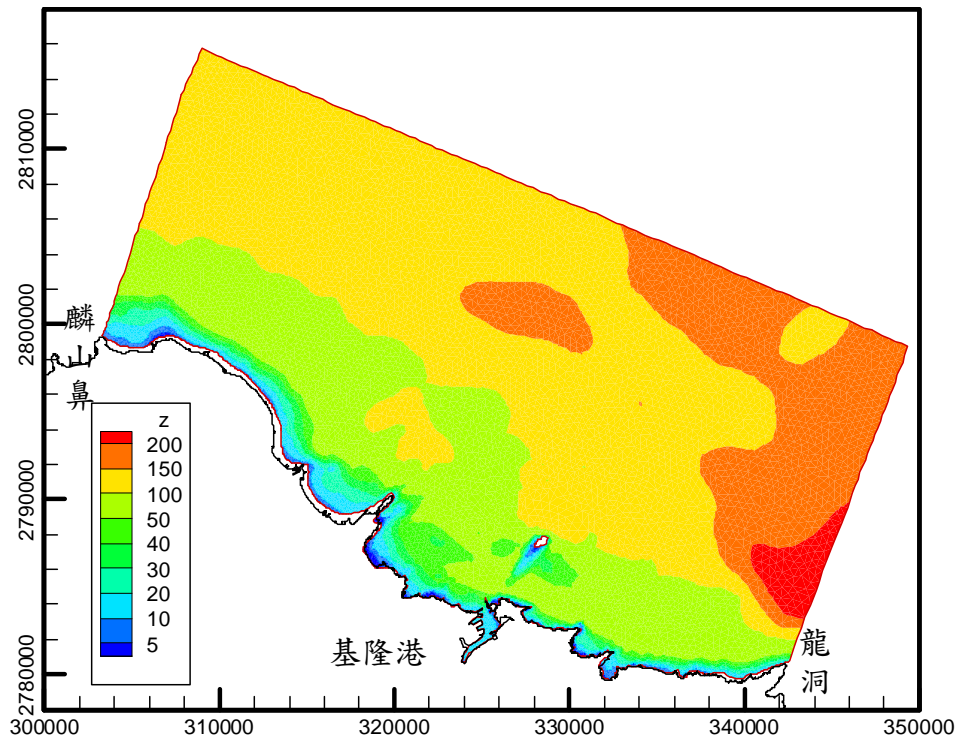


圖 6.2 基隆港水動力模組之地形水深分布圖

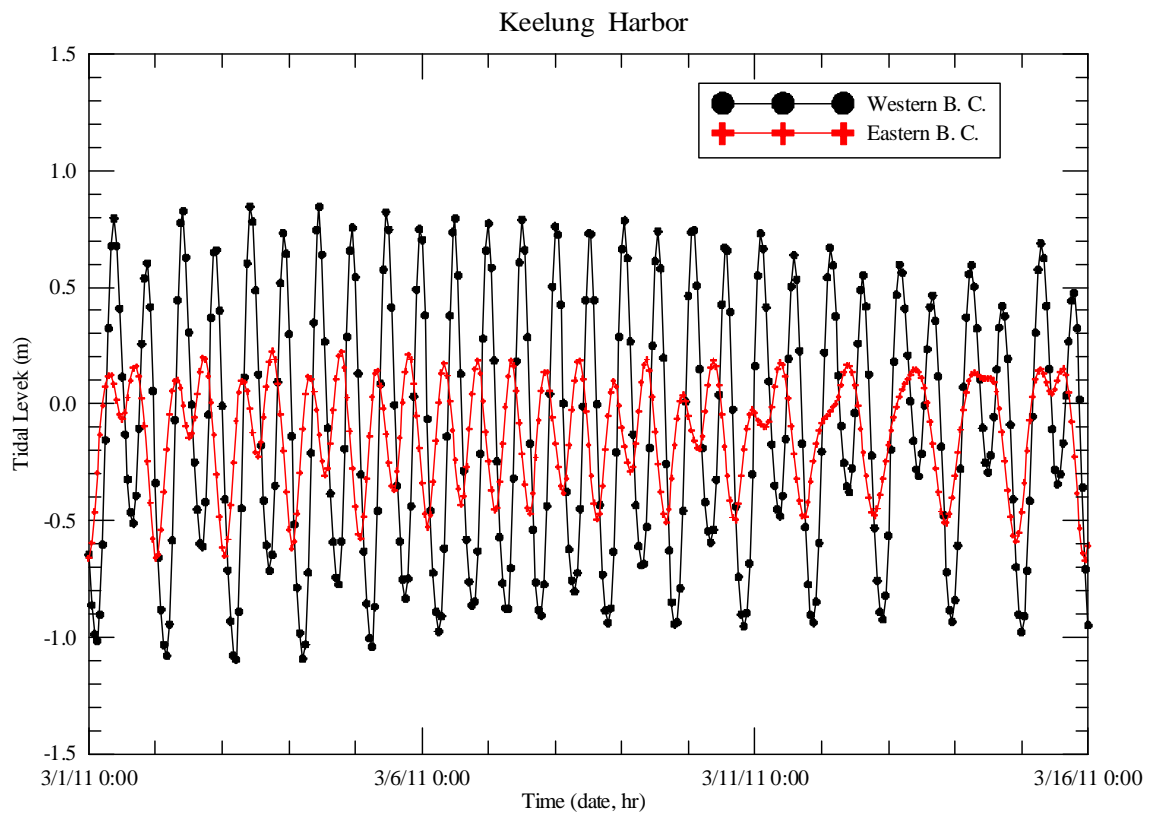


圖 6.3 基隆港水動力模式東、西開放邊界之水位邊界條件時序圖

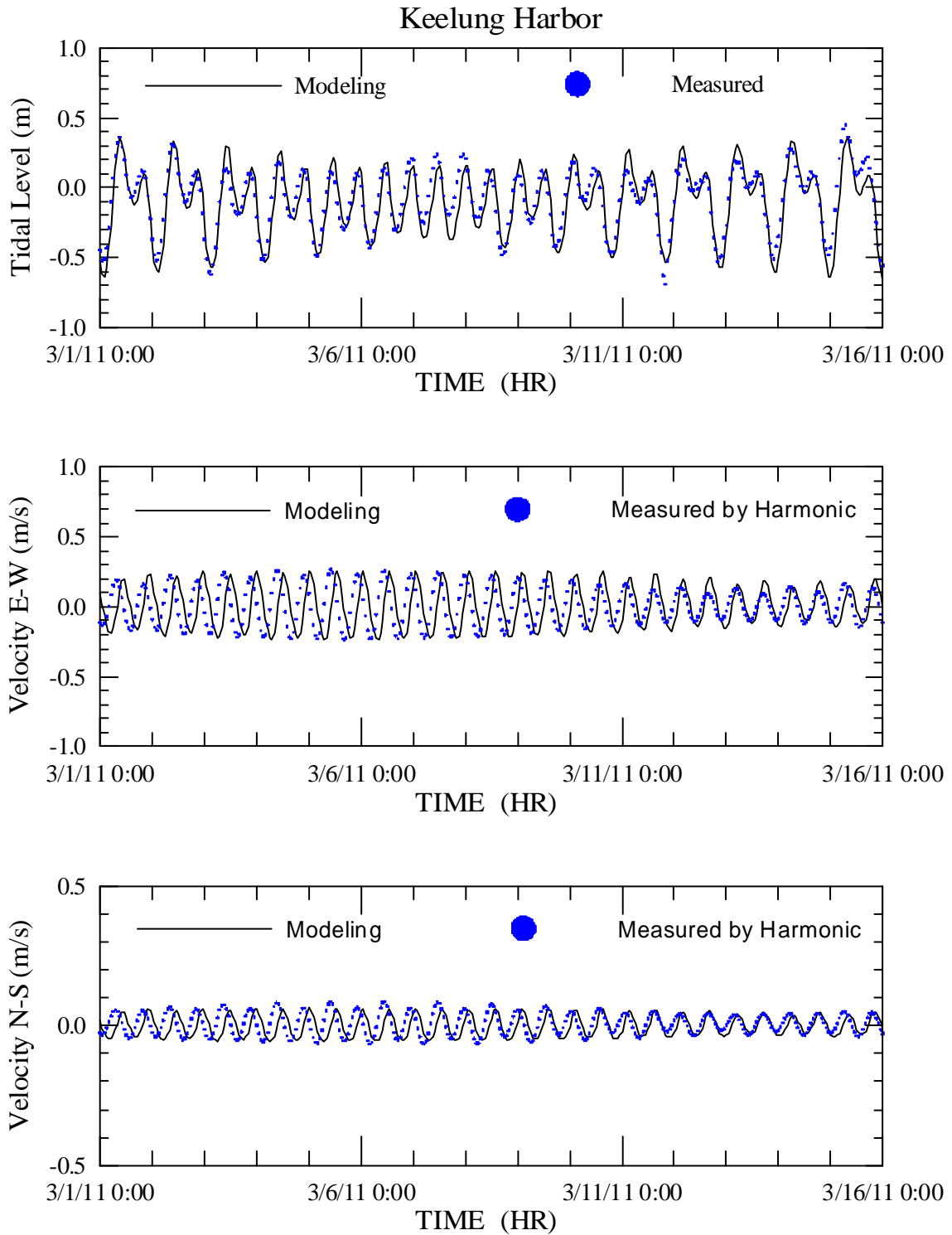


圖 6.4 基隆港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果之比較

### 6.1.2 臺北港

臺北港水動力模組主要針對 2009 年度建置之臺北港水動力模式進行修正，修正內容包括數值計算格網、模式邊界件及模式相關參數之率定。2009 年臺北港水動力模式之模擬範圍北起新北市三芝區麟山鼻海岸，南至桃園縣蘆竹鄉竹圍海岸，南北距離約為 25.5 公里，離岸方向則由近岸往外海延伸約 9 公里。由於臺北港外廓形狀相較於 2009 年模式初建時的形狀已有顯著改變，因此針對上述差異提出數值計算格網之修正，如圖 6.5 所示，圖中模式數值計算格網係由 1867 個節點及 3388 個三角形元素構成。圖 6.6 所示為 2010 年臺北港海域水深地形量測結果，模式之地形水深資料係由海軍測量局刊行之海軍水道圖圖號為 04512 與 04513 之水深資料及臺北港 2010 年 10 月水深量測資料內插得到。

本計畫利用 NAO.99b 模式計算臺北港水動力模組各開放邊界節點每小時水位變化資料做為本計畫臺北港水動力模組之邊界條件。圖 6.7 所示為臺北港水動力模組左、右開放邊界之水位邊界條件時序圖，顯示模式左、右兩側水位邊界潮汐型態相近似，但水位振幅差異相當大。

為驗證模式模擬結果與率定模式相關參數，本計畫選取臺北港外海觀測樁水位及海流觀測資料與模式鄰近觀測樁之節點模擬結果進行模式之驗證，其中臺北港外海觀測樁位置示意圖如圖 6.5 所示。由於本計畫水動力模式模擬之流場主要為天文潮流，海流觀測資料除了天文潮流成份外，尚有其他成份流及觀測誤差存在。同理本計畫先針對臺北港海流觀測資料採逐月方式選取  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$  及  $S_2$  等四個主要分潮以調和分析方法得到觀測資料之天文潮流大小，再與臺北港潮流流場模擬預測結果比較。圖 6.8 所示為模式模擬預測臺北港 2011 年 3 月水位與潮流(東西向及南北向)之結果與觀測樁天文潮流分析結果之比較，顯示模擬水位與觀測水位變化相當一致，模式模擬東西向流速振幅略小於觀測流速調和分析結果，南北向流速振幅則相當。整體而言，東西向及南北向流速的變化趨勢與調和分析結果一致，呈現良好的改善效果。

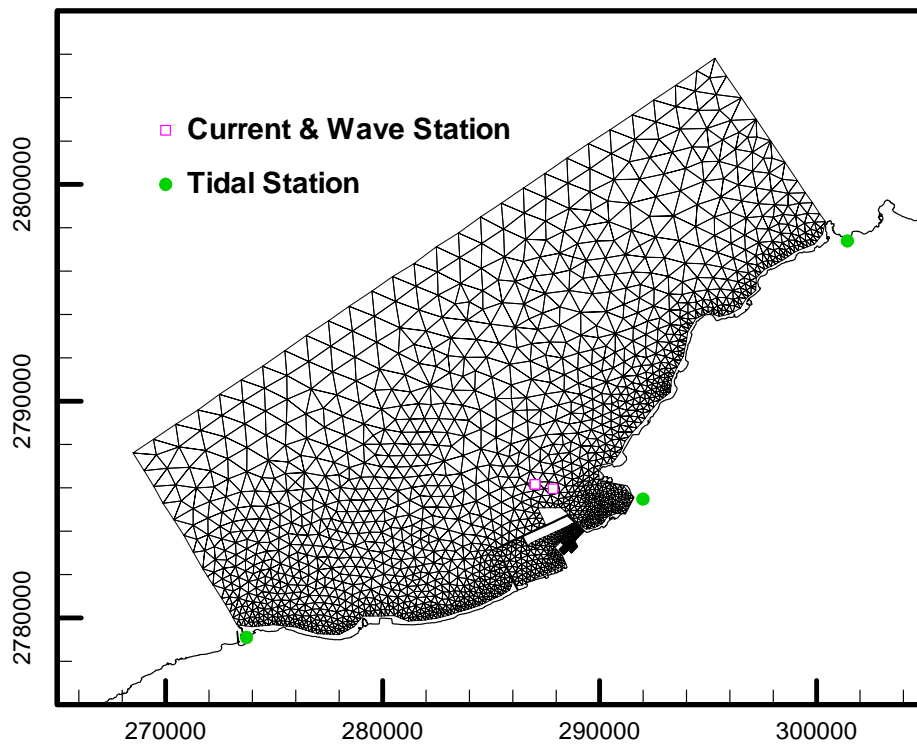


圖 6.5 臺北港水動力模式之有限元素細格網分佈圖

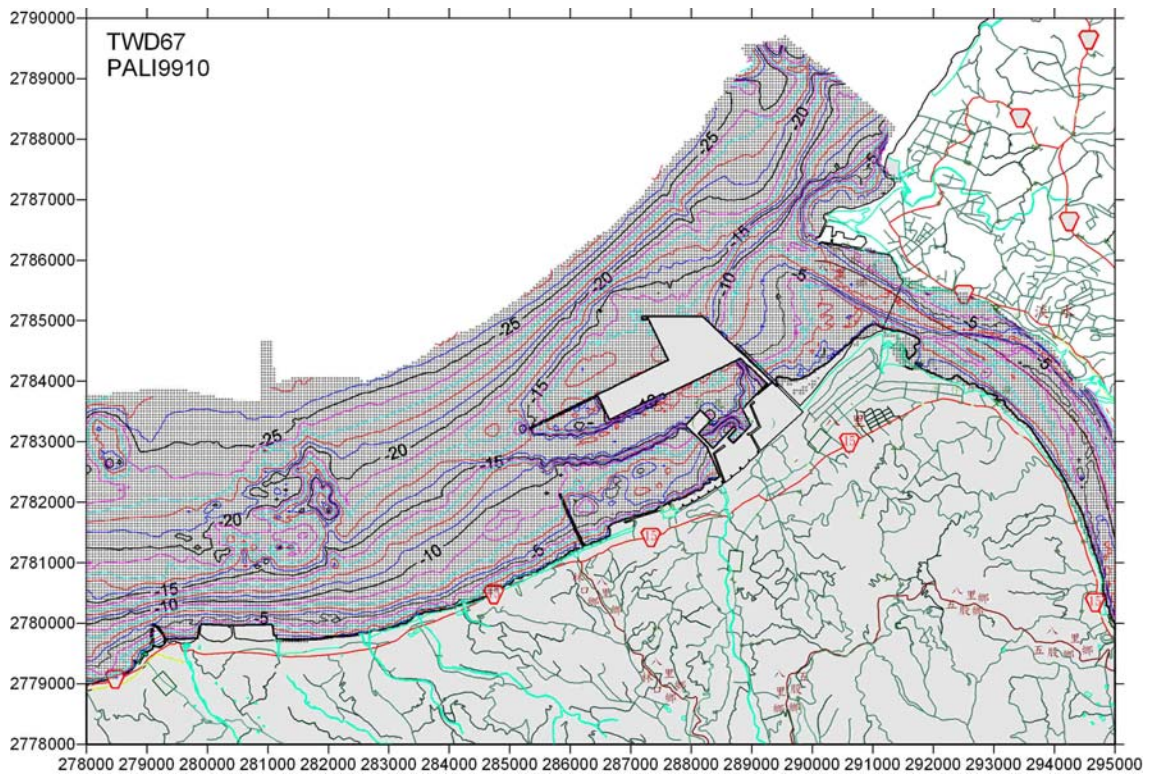


圖 6.6 臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖

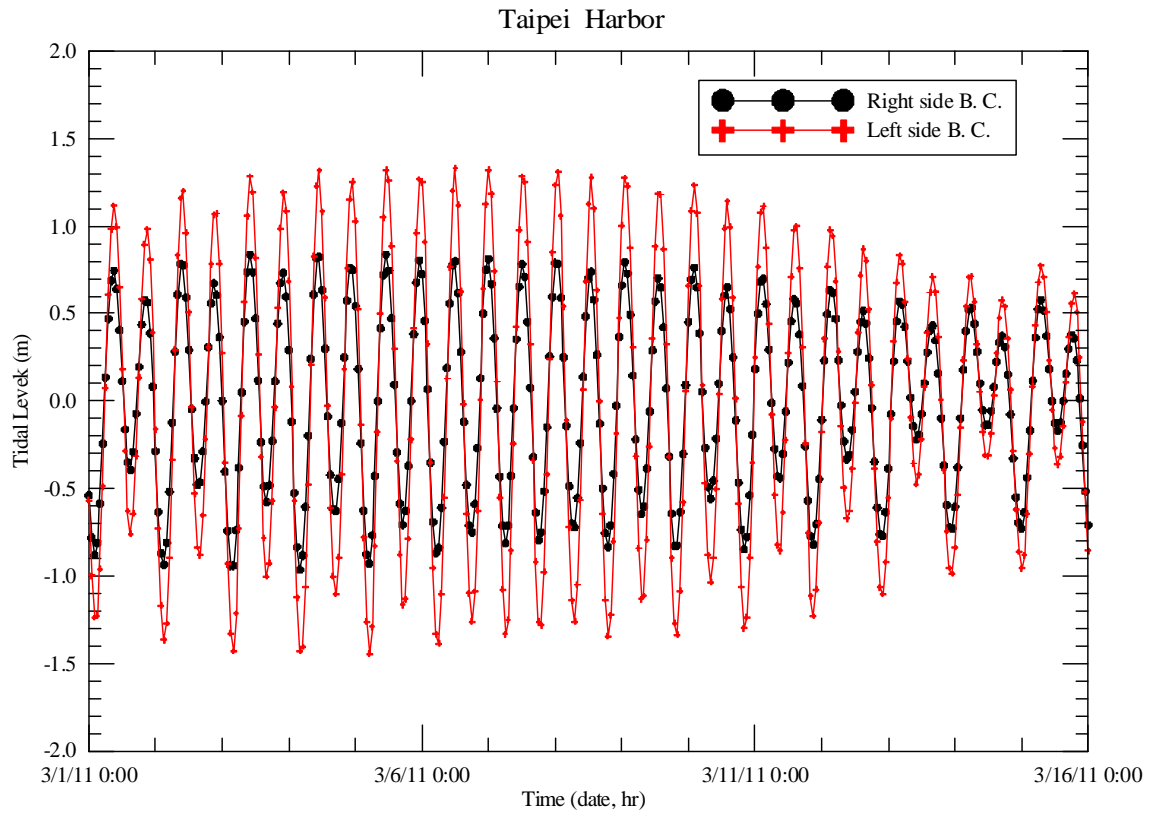


圖 6.7 臺北港水動力模式左、右開放邊界之水位邊界條件時序圖

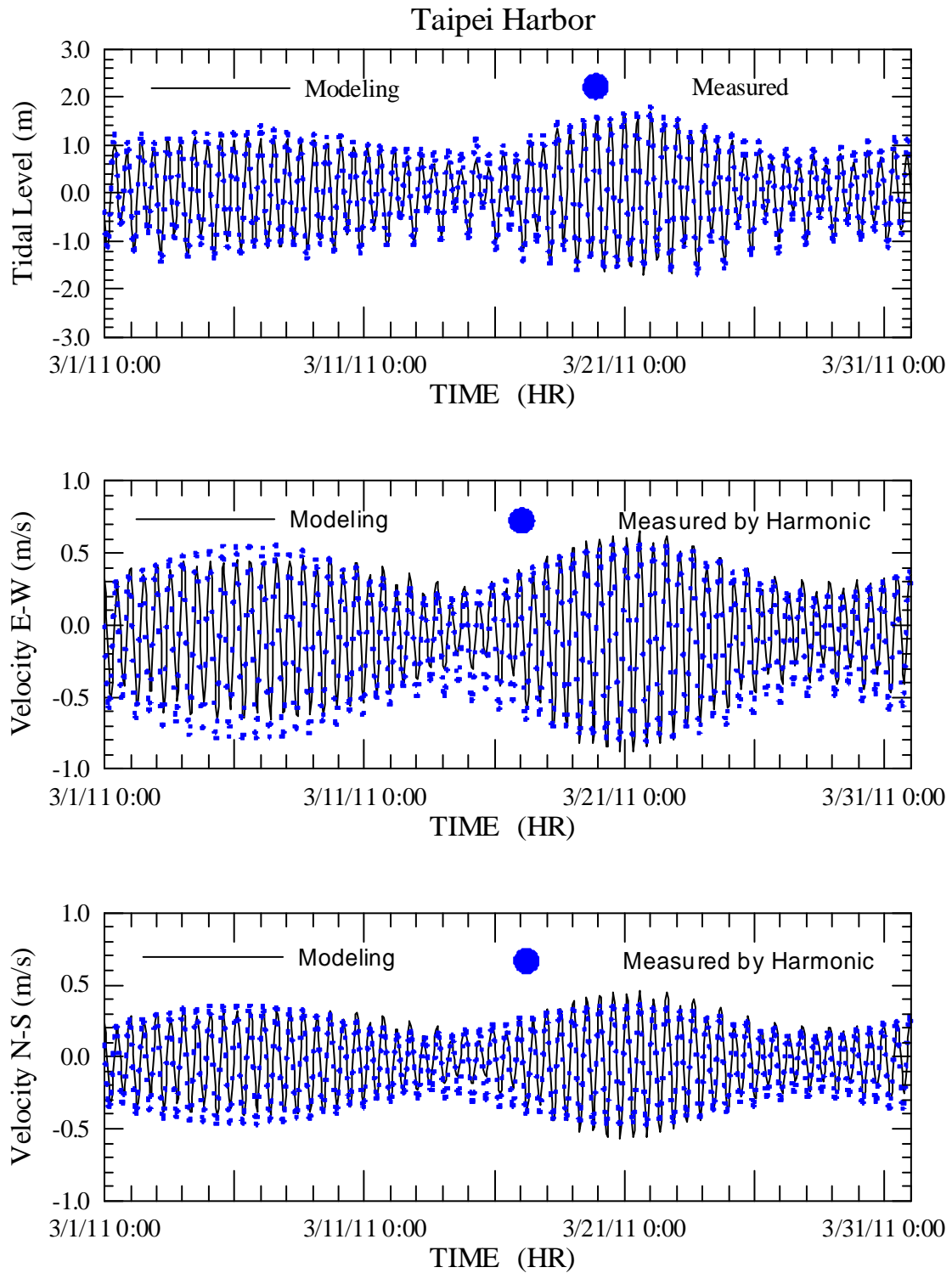


圖 6.8 臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析  
( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果之比較



### 6.1.3 臺中港

臺中港水動力模組主要依據 2009 年建置之臺中港水動力模擬子系統進行改善，並依據臺中港區第二期擴建工程及航道浚深拓寬工程完工後之港口及航道配置、臺中港區及其鄰近海域之地形水深資料選取適當之模式模擬範圍，模擬範圍北起苗栗縣大安鄉，南至彰化縣鹿港鎮。依據前述選取之模擬範圍配合中泊渠水域航道、碼頭及護岸配置建置流場數值模擬所需之模式三角形格網如圖 6.9 所示；其中數值網格則由 4809 個節點及 8983 個三角元素所構成，所建置的細網格(模式 dt 約在 2 秒)據測試結果已具足夠代表性，可計算得到穩定結果。模擬範圍內之地形水深如圖 6.10 所示。

由於模式模擬範圍內僅臺中港區內有潮位資料，因此本計畫選用 Matsumoto et al.(2000)所發展的 NAO.99b 模式建置模式之開放邊界條件，如圖 6.11 所示，為模式模擬範圍的南北開放邊界之水位邊界條件，在模式計算中南北開放邊界上的每個節點皆以此邊界條件代入，平行海岸之外海開放邊界上每個節點值則以南北邊界值取線性內插計算而得。由於潮汐在臺中港附近海域交會，因此模式南、北邊界之水位變化差異並不顯著。

為驗證模式模擬結果與率定模式相關參數，本計畫選取臺中港海流長期觀測資料與模式鄰近測點之節點模擬結果進行驗證。本計畫以臺中港海流觀測資料之調和分析結果預測東西向及南北向潮流流速再與本計畫同時段潮流流場模擬結果比較，如圖 6.12 所示，其中水位模擬結果與觀測資料間具有高度一致性，東西向流速大小及變化亦與天文潮流分析結果相符，南北向流速大小亦與天文潮流分析結果相當；但南北向流速之變化與天文潮流分析結果略有出入，其原因有部份為南北向流速潮流分析結果不佳所致，非全然是模式模擬上的問題。整體而言，模式驗證結果顯示本計畫針對臺中港域潮流流場之模擬結果具有高度之可信度。

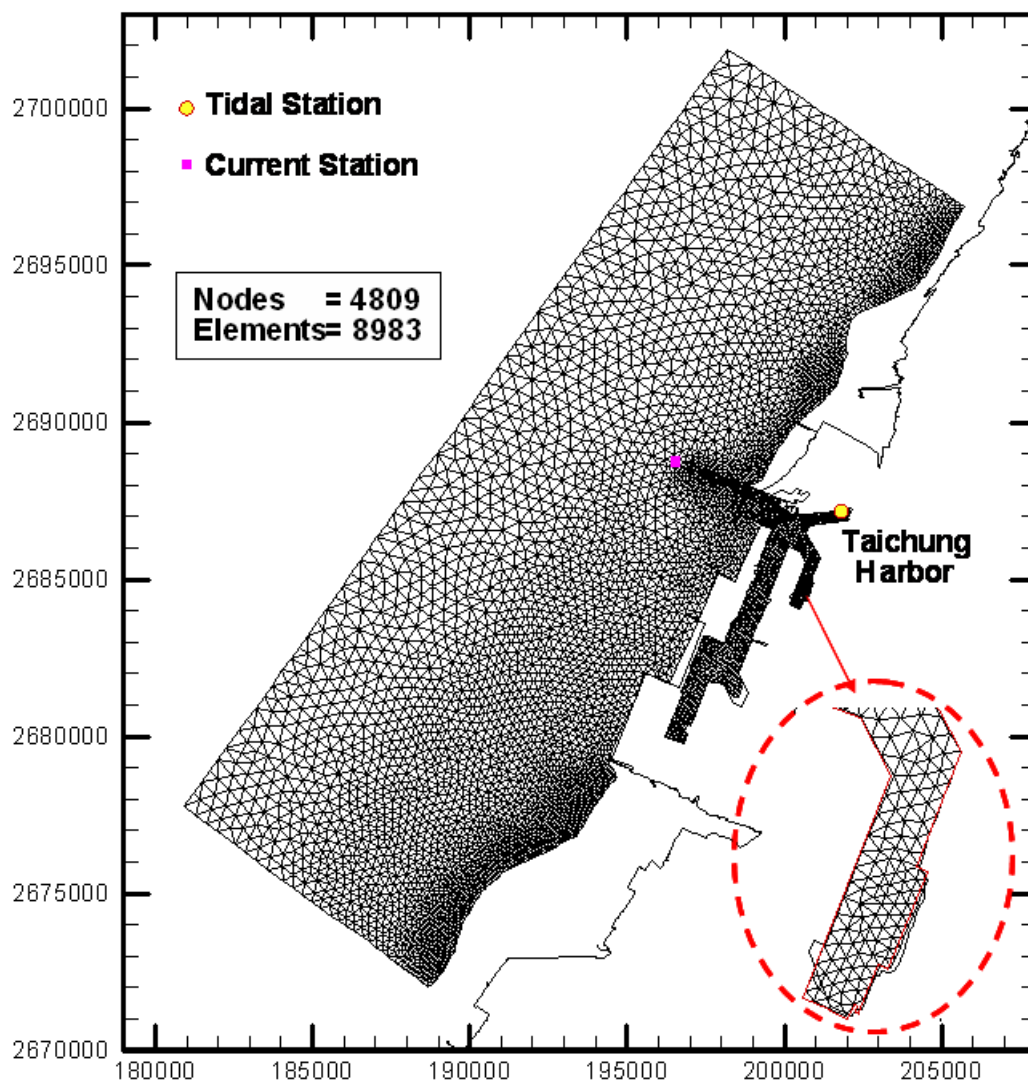


圖 6.9 臺中港區流場模擬範圍之有限元素格網分佈圖



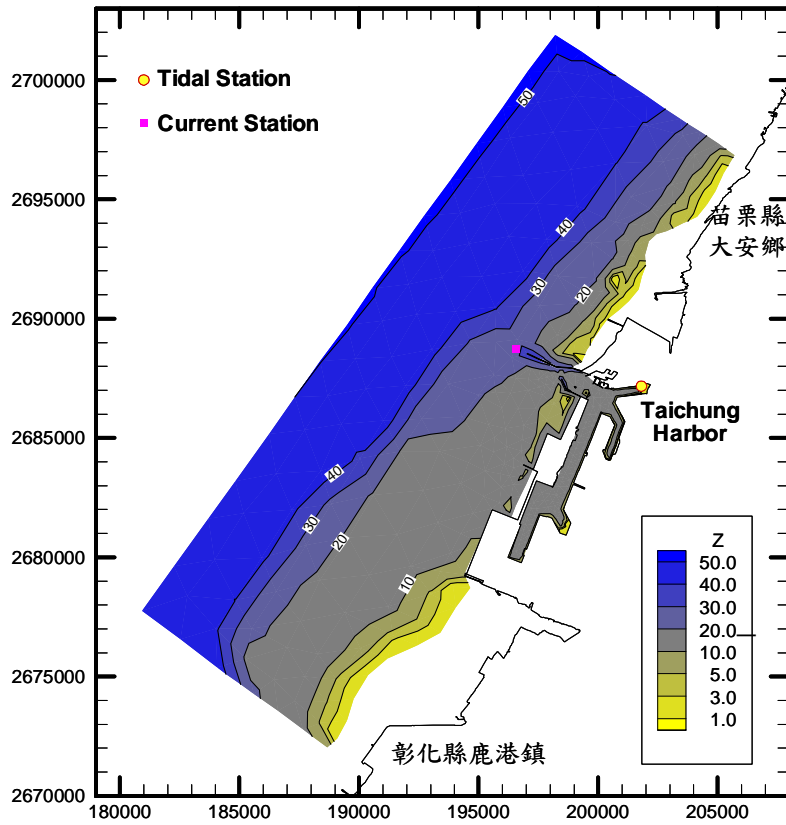


圖 6.10 臺中港區流場模擬範圍與水深分佈圖

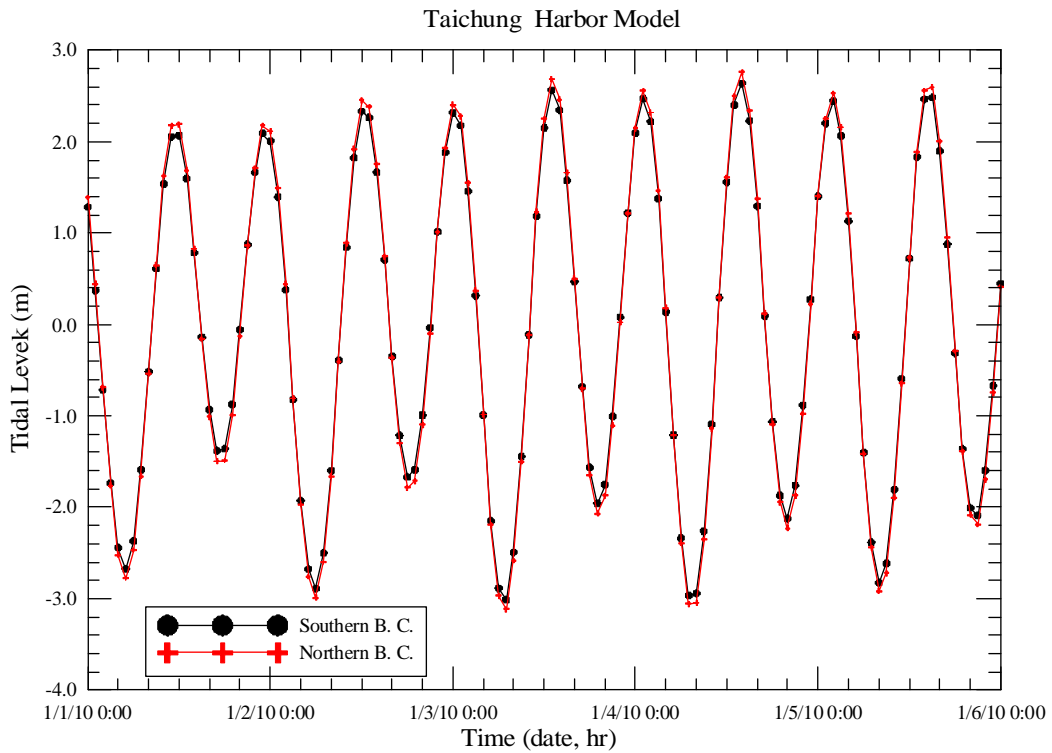


圖 6.11 臺中港水動力模式南、北開放邊界之水位邊界條件時序圖

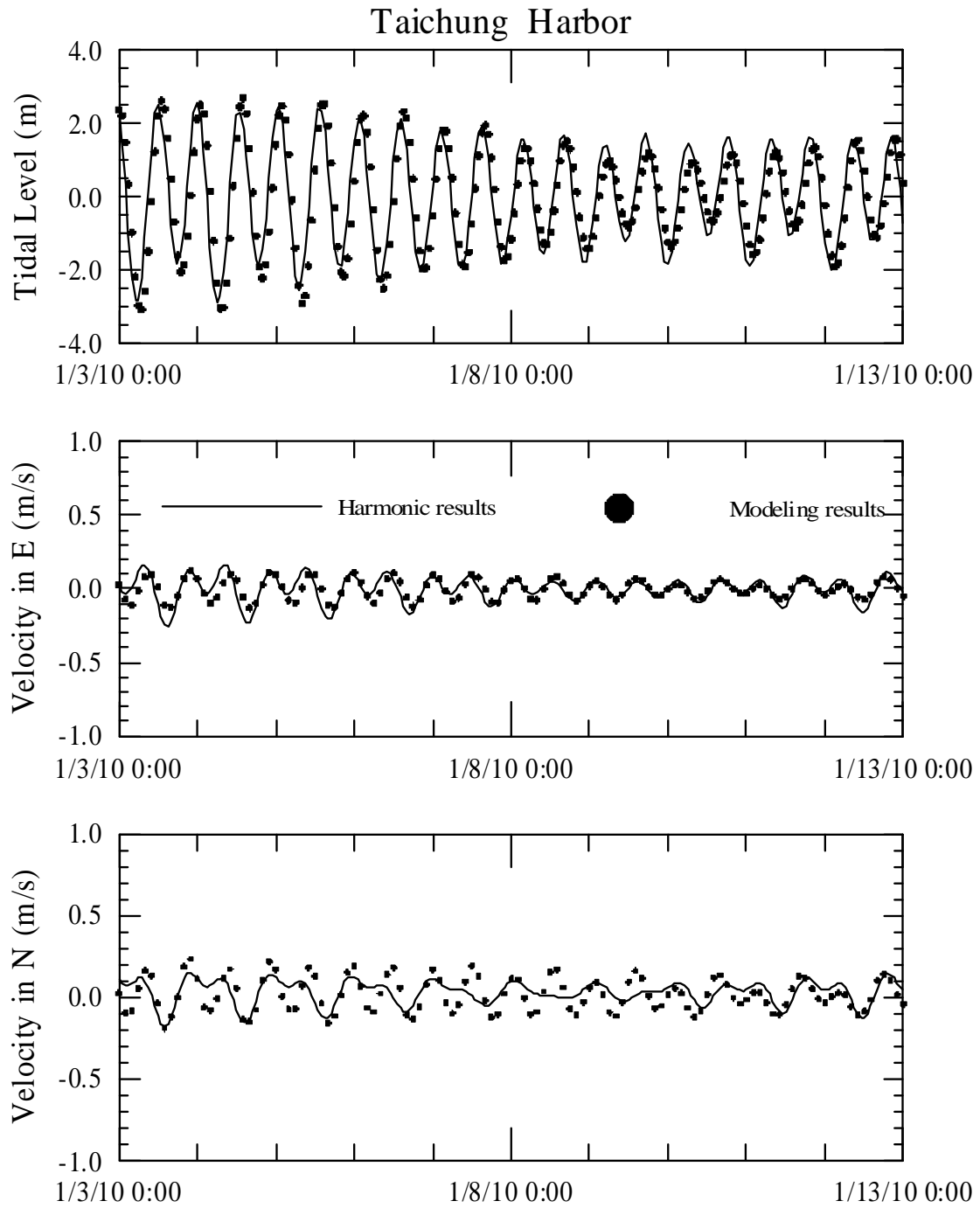


圖 6.12 臺中港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析結果之比較

#### 6.1.4 布袋港

布袋港水動力模組為依據布袋港區 1997 年配置情形，加上布袋港區及其鄰近海域之地形水深資料選取適當之模式模擬範圍，如圖 6.14 所示；模擬範圍北起雲林縣箔仔寮漁港，向西延伸約 25.5 公里，南至台南市將軍漁港，向西延伸約 17.6 公里，南北邊界相距約 44.7 公里。本計畫依據前述選取之模擬範圍建置流場數值模擬所需之模式三角形格網如圖 6.13 所示，其中數值網格則由 3457 個節點及 6519 個三角元素所構成，所建置的細網格(模式 dt 約在 2 秒)據測試結果已具足夠代表性，可計算得到穩定結果。

在模式模擬範圍的邊界上於箔仔寮漁港及將軍漁港港區內皆有潮位資料，因此本計畫採用上述兩漁港潮位觀測資料調和分析結果預測建置模式之開放邊界條件，如圖 6.15 所示，為模式模擬範圍的南北開放邊界之水位邊界條件，在模式計算中南北開放邊界上的每個節點水位值皆以此邊界條件代入，平行海岸之外海開放邊界上的每個節點水位值則以南北邊界的水位值取線性內插計算而得。由圖顯示北部邊界的水位變化較南部邊界大，但兩者相位則相當接近。

關於模式之驗證，本計畫先針對海流觀測資料採逐月方式選取  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$  及  $S_2$  等五個主要分潮以調和分析方法得到觀測資料之天文潮流大小，再與布袋港水動力模式潮流模擬計算結果進行比較。如圖 6.16 所示為模式模擬預測布袋港 2012 年 9 月水位與潮流(東西向及南北向)之結果與觀測點天文潮流調和分析結果之比較，其中水位部分並未做調和分析，在排除部分品質不佳之資料後直接採用觀測資料與模式模擬結果比較。由驗證結果顯示，水位觀測資料排除部分品質不佳之資料後與模式水位模擬結果相當吻合；潮流東西向分量與南北向分量比對結果顯示水動力模式模擬計算之東西向及南北向流速振幅皆小於調和分析結果，但其相位仍趨一致。由於布袋港鄰近海域有廣大的沙洲與淺灘地形，退潮時淺灘會露出水面之上，使得漲、退潮時段的陸地邊界會不一樣，在模擬上有其難度，本計畫在此問題的處理上目前以水深 2 m 處為數值模擬之固定邊界，與實際情況有些出入，

因此針對此邊界問題的處理仍留待後續改善。

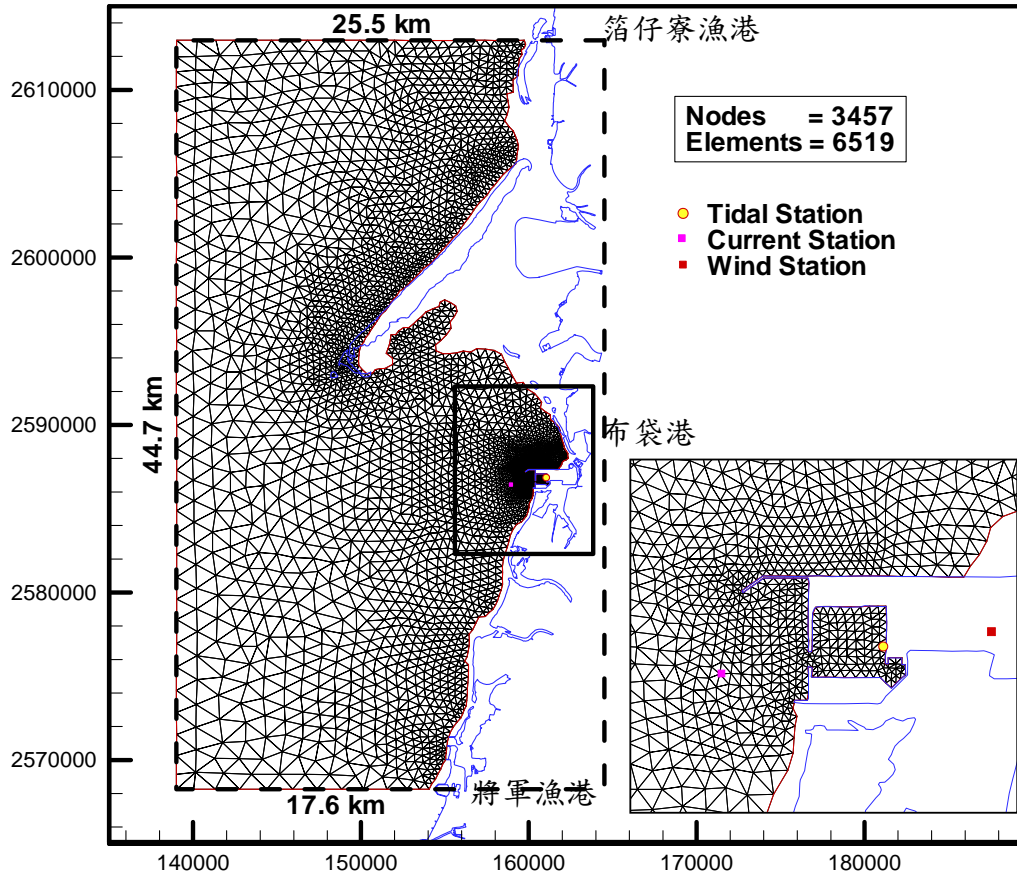


圖 6.13 布袋港區流場模擬範圍之有限元素格網分佈圖

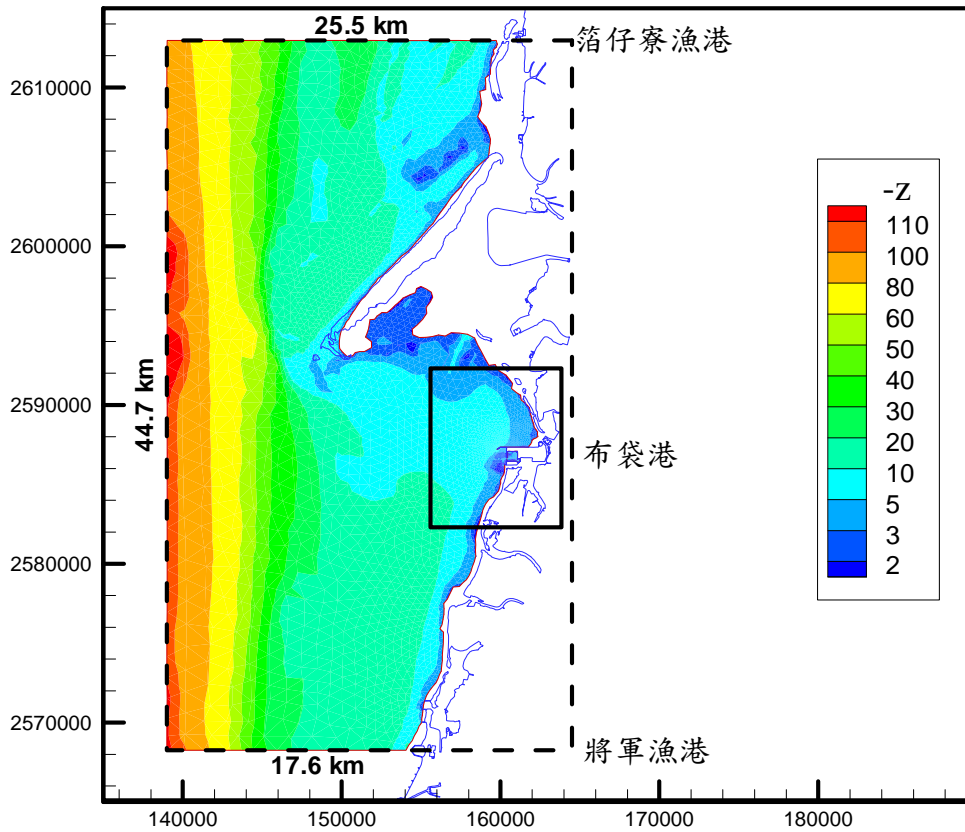


圖 6.14 布袋港區流場模擬範圍與水深分佈圖

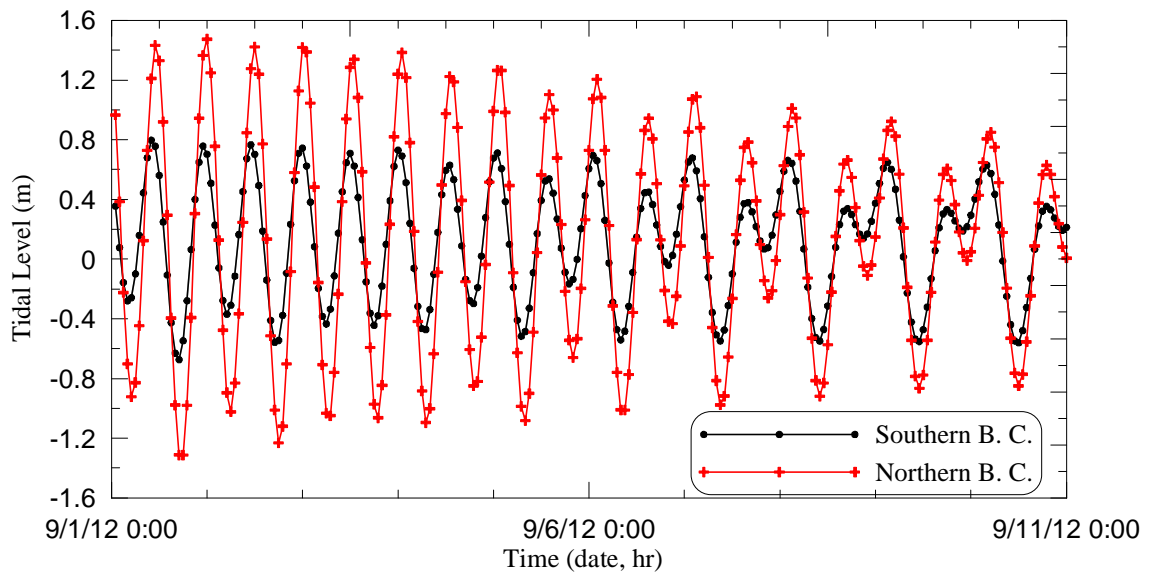


圖 6.15 布袋港水動力模式南、北開放邊界之水位邊界條件時序圖

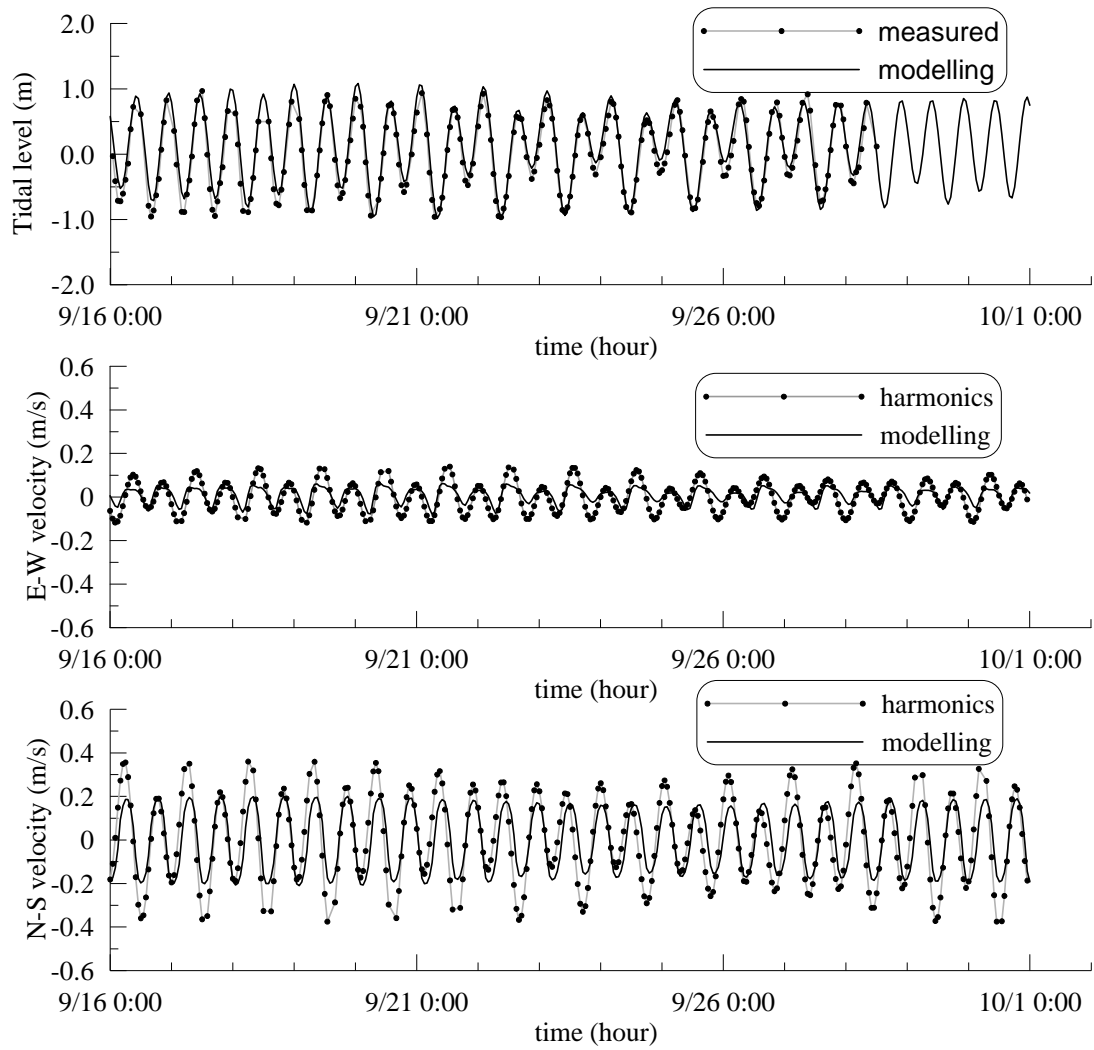


圖 6.16 布袋港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果之比較

### 6.1.5 安平港

安平港水動力模組係在前期已建置的安平港港區近岸水動力模組之基礎下進行相關修正與改善。基於安平漁港舊港口已於 2009 年 1 月完工通航後，現況潮流分別經由安平港港口及安平漁港舊港口進出安平港水域及安平漁港水域之特性，以及改善前期計畫安平港水動力模組並未含蓋安平漁港港內水域之缺失；本期計畫修正前述安平港區近岸水動力模組之模擬範圍，使其模擬範圍擴及安平港、安平漁港及其支航道水域，形成雙開口港池水域，如圖 6.17 所示，圖中有限元素網格係由 5630 個節點及 10538 個三角形元素組成。模式模擬範圍內之地形水深分佈如圖 6.18 所示。

由於前期計畫安平港水動力模式在處理南、北開放邊界間之離岸開放邊界之水位條件上，通常較易產生不符合現況之誤差，往往需藉由試誤法不斷地修正或調整，導致過程相當花費時間且不易得到較精確的模擬結果。因此，本期計畫針對小尺度水動力模組開放邊界條件修正為：採用本計畫中尺度臺灣周圍海域水動力模組天文潮模擬結果，利用內插方法產生安平港域小尺度水動力模組開放海域邊界之水位時序列資料，如圖 6.19 所示，作為模擬安平港域水位及流場之開放邊界條件。據此，本計畫小尺度水動力模組將與中尺度水動力模組具有實際的連結。

在模擬結果之驗證上，本計畫選取 2012 年 5 月份安平港港內水位觀測資料及港外海流觀測資料之潮流分析結果為依據，其中水位以及 EW 及 NS 方向速度驗證結果如圖 6.20 所示；驗證結果顯示本計畫安平港水動力模組流速模擬結果在 EW 方向速度振幅明顯略大於觀測資料調和分析之潮流振幅，NS 方向速度振幅則與觀測資料調和分析之潮流振幅相當，僅在大潮期間 NS 方向速度振幅之模擬結果有偏小的現象。整體而言，本年度安平港水動力模組之水位及流速模擬與驗證結果均較前期計畫驗證結果明顯地改善許多。

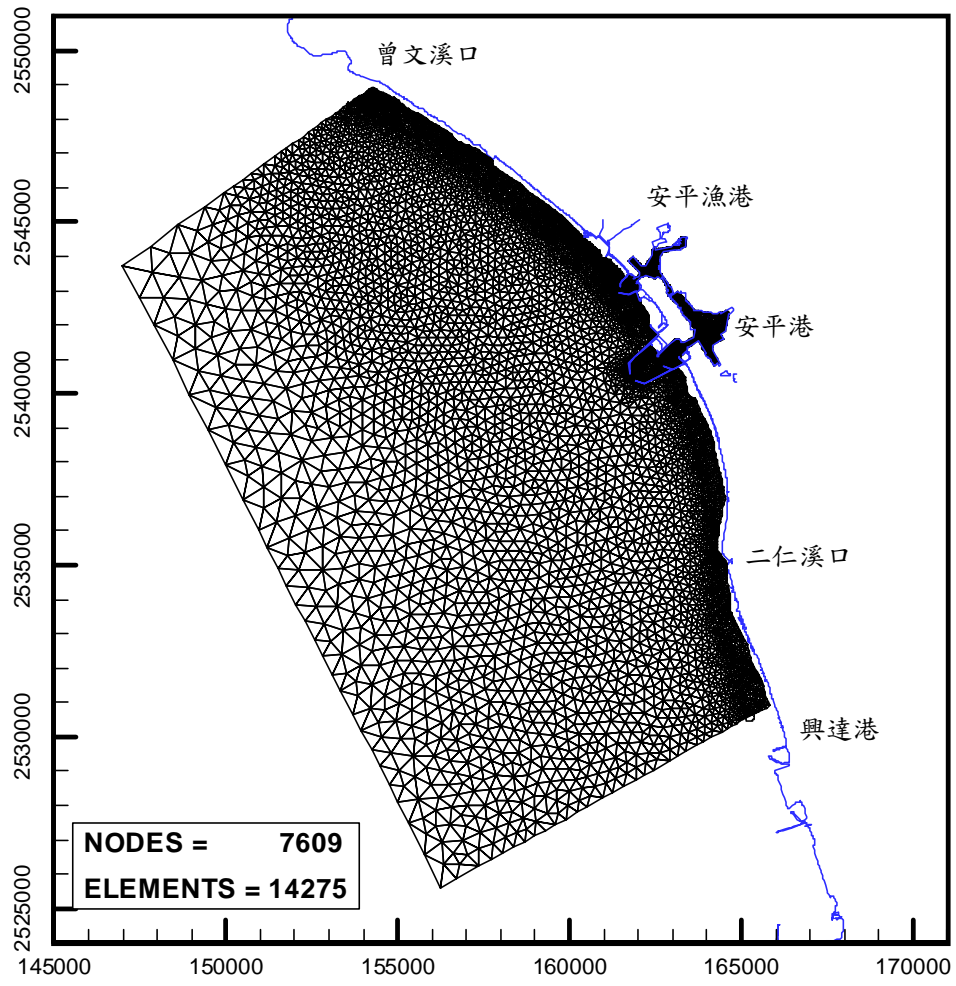


圖 6.17 安平港區近岸水動力模組之細網格三角形元素分佈圖



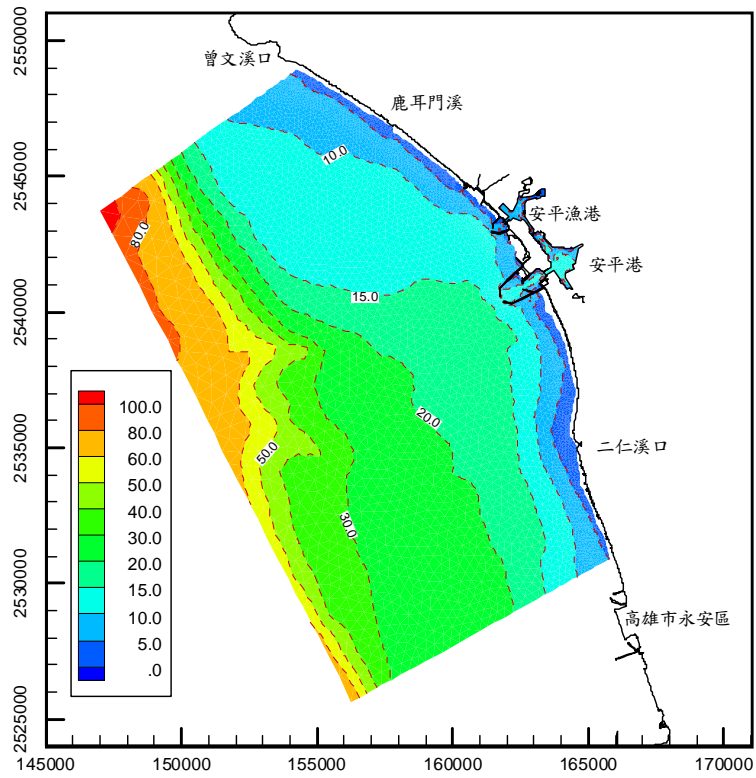


圖 6.18 安平港港區近岸水動力模組模擬範圍及水深分布圖

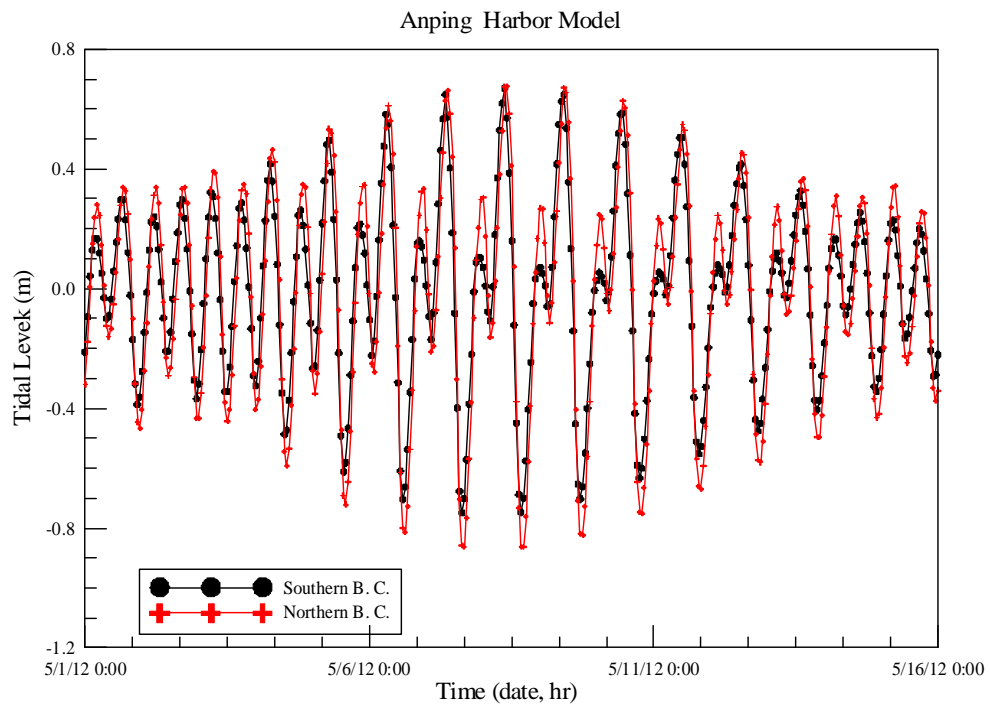


圖 6.19 本年度計畫安平港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位  
時序圖

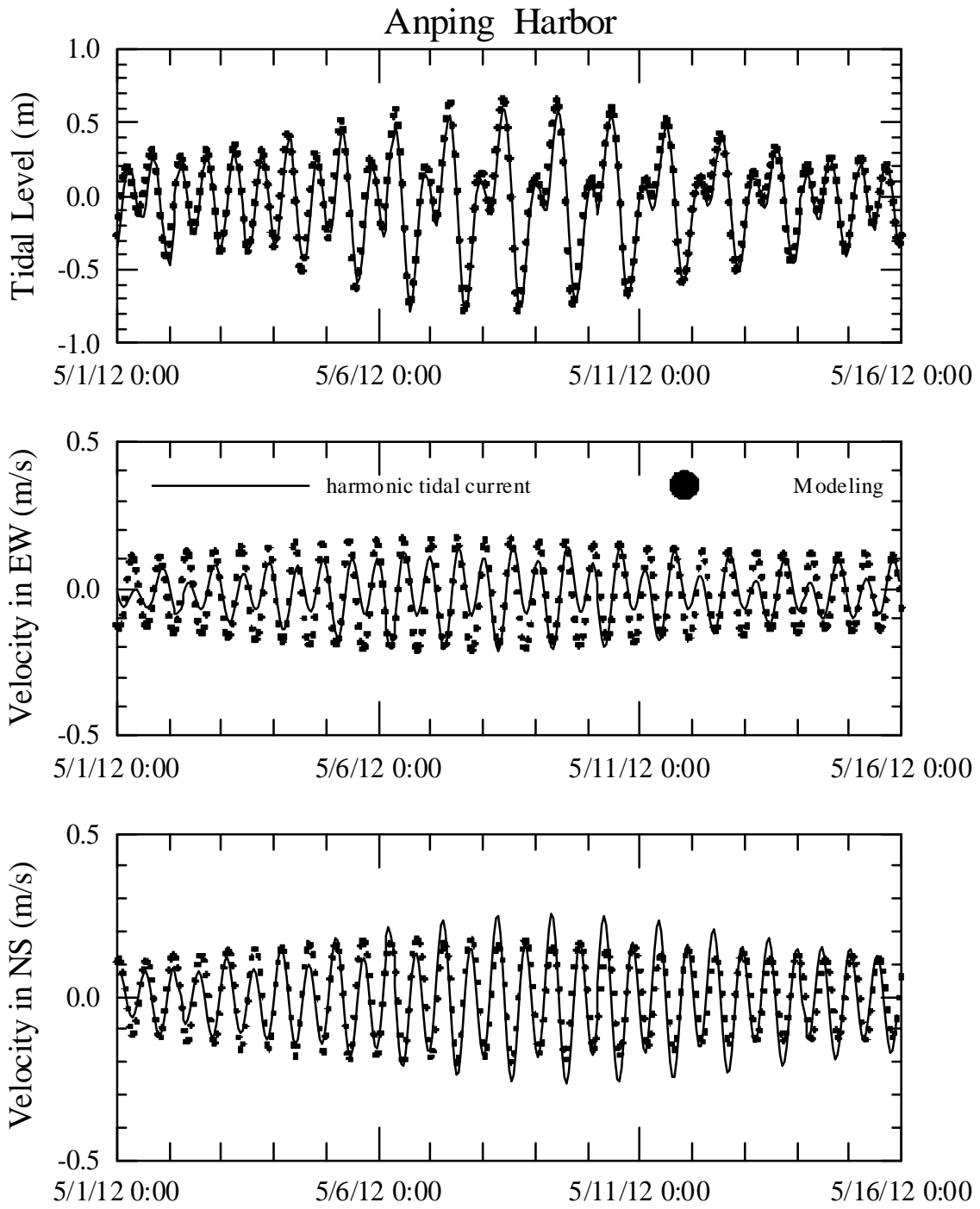


圖 6.20 安平港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分析  
 $(O_1、K_1、M_2、S_2)$ 結果比較圖

### 6.1.6 高雄港

基於高雄港海流觀測資料分析結果顯示高雄港外海流況潮流特性與臺灣西部海岸迥異，以及前期計畫高雄港流況模擬結果無法呈現出高雄港潮流特性等因素考量，本期計畫針對小尺度高雄港水動力模組模擬範圍提出修正方案。方案之一為將模式模擬範圍向南延伸至高屏溪口北岸，離岸方向之邊界則擴展至水深 150m 等水深線附近，如圖 6.22 所示；依據新的模擬範圍，本計畫修正的有限元素計算網格，如圖 6.21 所示。圖中有限元素網格係由 3499 個節點及 6513 個三角形元素構成的。

同前述安平港水動力模組之邊界條件設定方式，高雄港區水動力模組開放海域邊界之水位條件建置修正為：依據本計畫中尺度臺灣周圍海域水動力模組天文潮模擬結果產生高雄港小尺度水動力模組開放海域邊界節點之水位時序列資料，作為模式之開放邊界條件模擬高雄港海域水位及流場。然在模擬結果驗證過程中，由模擬結果得知直接採用上述水位邊界條件實無法模擬出高雄海域潮流流況特性。針對此一問題，本計畫提出應變之方案，即調整模擬範圍南邊界上水位邊界條件之相位及振幅，以達到高雄港潮流流況模擬結果能與觀測資料之潮流特性相符之目的。經修正後的南北開放邊界之水位時序列資料如圖 6.23 所示，圖中北開放邊界之水位資料代表由中尺度水動力模組模擬結果轉出之水位資料，南開放邊界之水位資料則為經由相位及振幅修正後的水位資料。

本計畫選取 2012 年 10 月份高雄港港內水位觀測資料以及港外海流觀測資料之潮流分析結果，作為高雄港水動力模組模擬結果驗證之依據，模式相關驗證結果如圖 6.24 所示；驗證結果顯示高雄港水位模擬結果大致上仍與觀測資料相當近似，僅在全日潮水位轉折變化階段仍有較明顯地誤差；在流速 EW 及 NS 方向分量比較上，速度振幅及相位變位模擬值與觀測資料之調和分析結果仍有顯著之誤差存在，但流向及相位變位的趨勢上已能夠反應出潮流漲潮流向往東南及退潮流向往西北之特性。

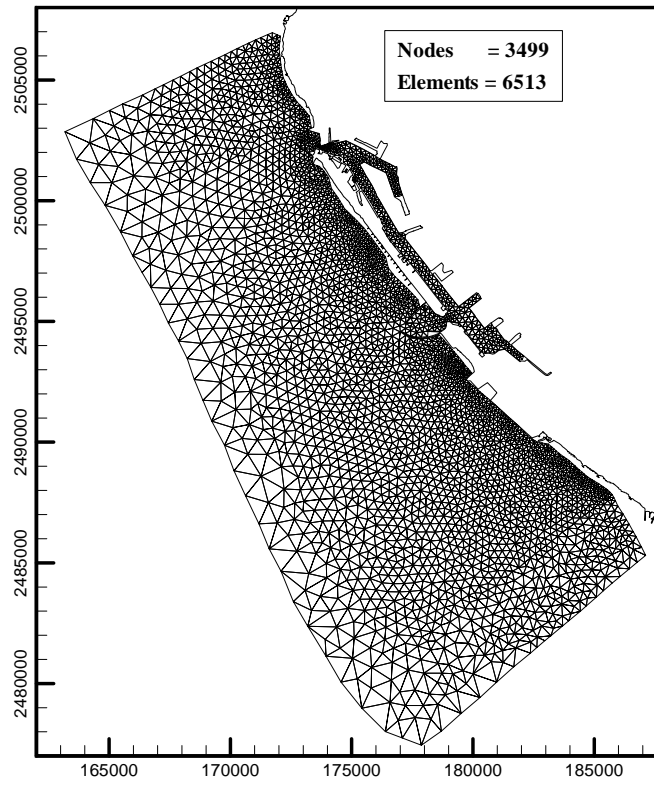


圖 6.21 高雄港水動力模組模擬範圍內有限元素網格圖

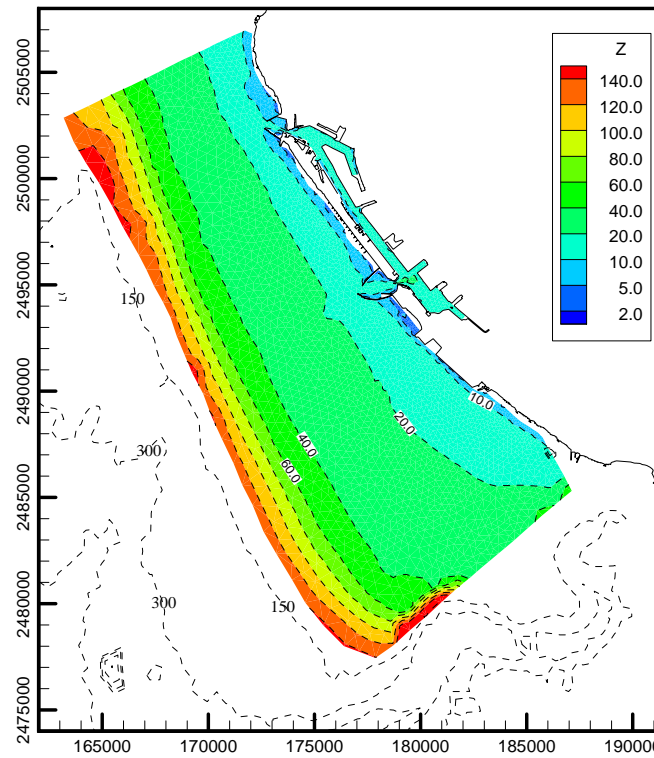


圖 6.22 高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖

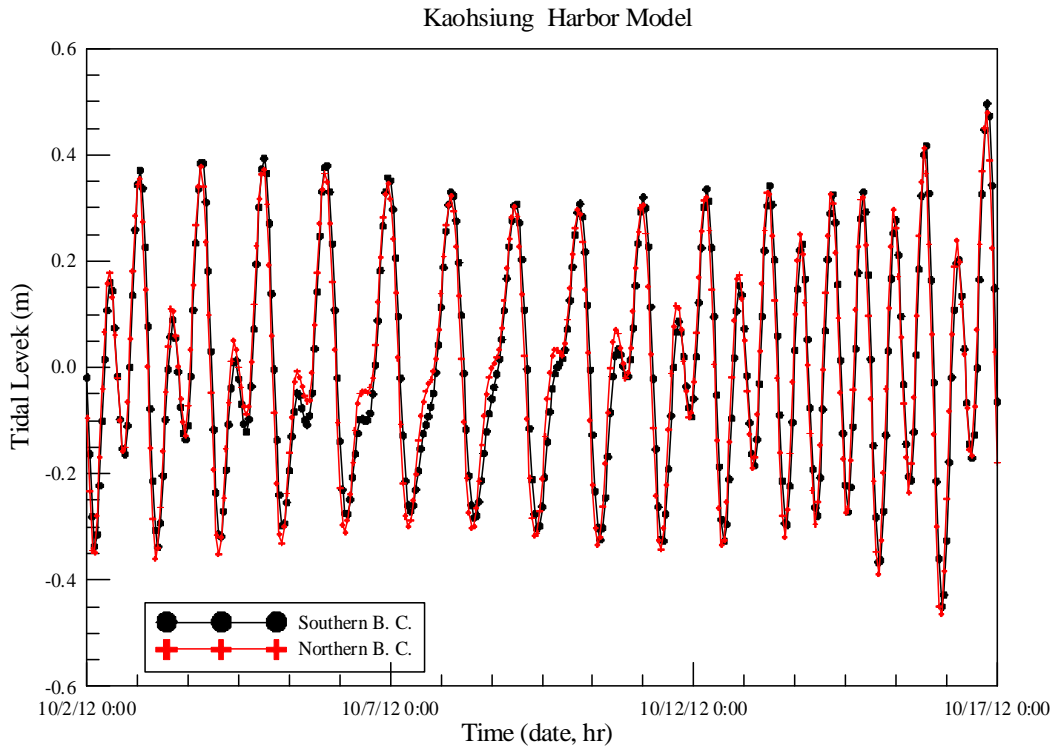


圖 6.23 高雄港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位時序圖

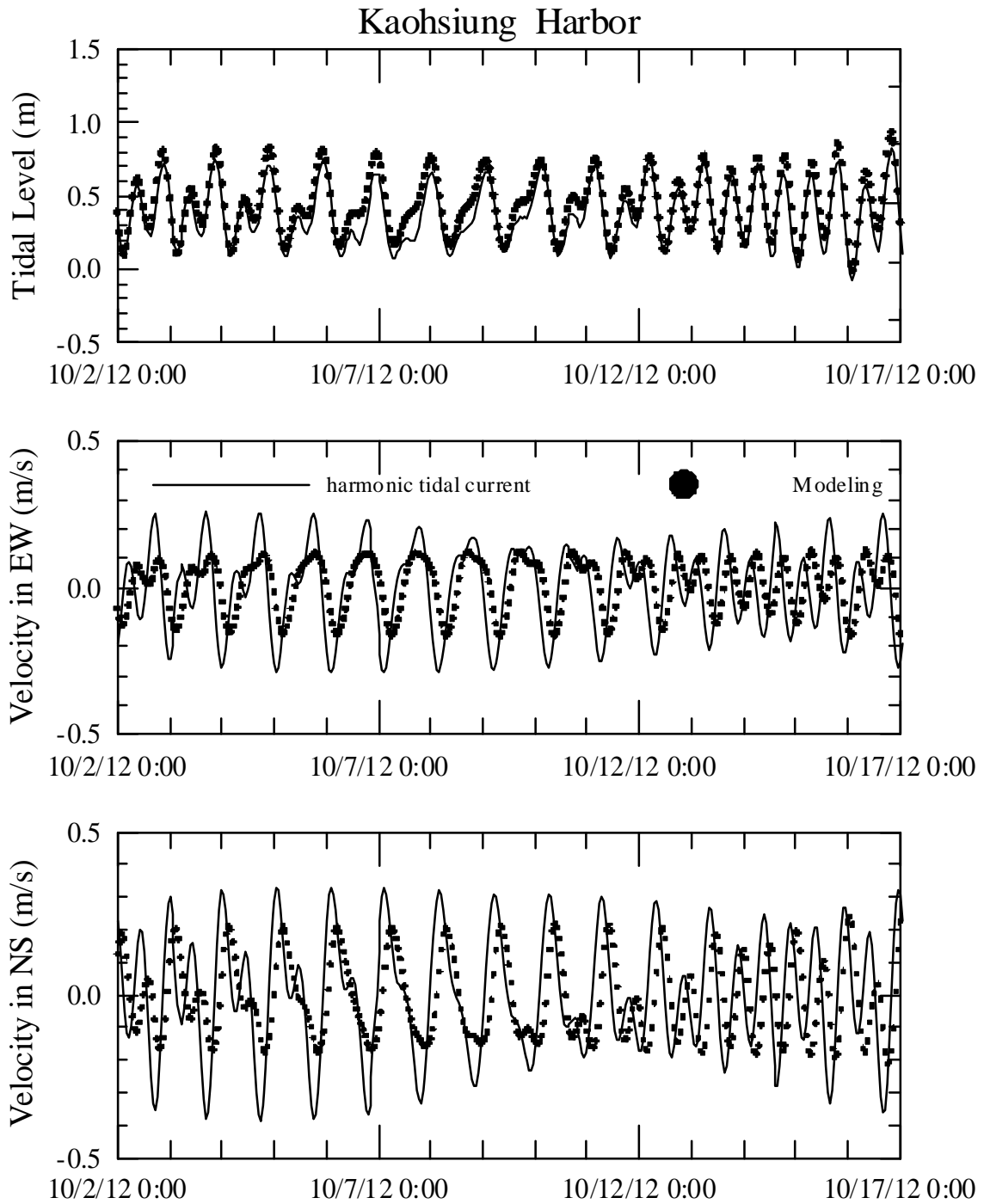


圖 6.24 高雄港水位與潮流模擬結果與海流觀測資料調和分析  
 $(O_1、K_1、N_2、M_2、S_2)$ 之 E-W 及 N-S 向速度分量比較圖

## 6.2 小尺度花蓮港區水動力模組改善研究

前期計畫「近岸海象數值模擬及預警系統之建立」(96 年~99 年)已規劃在 TaiCOMS 水位及流場架構下，針對各港區建置近岸水動力模組負責各港區近岸小尺度水位及流場模擬作業；並於 98 年度計畫分別針對各港區初步建置各港區近岸水動力模組，以及各港區近岸水位及流場模擬與驗證研究。本年度計畫係在前期已建置的花蓮港港區近岸水動力模組之基礎下進行相關修正與改善，內容包括水動力模組之模擬範圍及有限元素網格之修正、模式邊界條件之修正、模式相關參數率定與驗證、花蓮港港區近岸水位及流場現況模擬等工作。分述如下：

### 6.2.1 模擬範圍及有限元素網格之修正

圖 6.25 為本年度計畫花蓮港區近岸水動力模組之模擬範圍及地形水深分佈，圖中黑色粗實線為 98 年度計畫初步建置的花蓮港港區近岸水動力模組之模擬範圍。由圖顯示本年度計畫模擬範圍南、北邊界與前期計畫大致相同，北起花蓮縣新城鄉，南至花蓮縣壽豐鄉，南北邊界相距約 30 公里；外海離岸邊界以大約平行海岸線的方式向外延伸約 20 公里，相較於前期計畫的模擬範圍，新的模擬範圍較能凸顯地形在離岸方向的變化，以反應在模式的計算。

圖 6.26 所示為本年度計畫新建置的花蓮港港區近岸水動力模組之模擬範圍及模式三角形有限元素網格配置圖，圖中三角形有限元素數值計算網格係由 1653 個節點及 3014 個三角元素構成的。另外花蓮港港區內及港口附近之有限元素網格分布情形，如圖 6.27 所示，其中包括花蓮港潮汐及海流觀測站位置，將以此作為模式驗證輸出點位之參考。

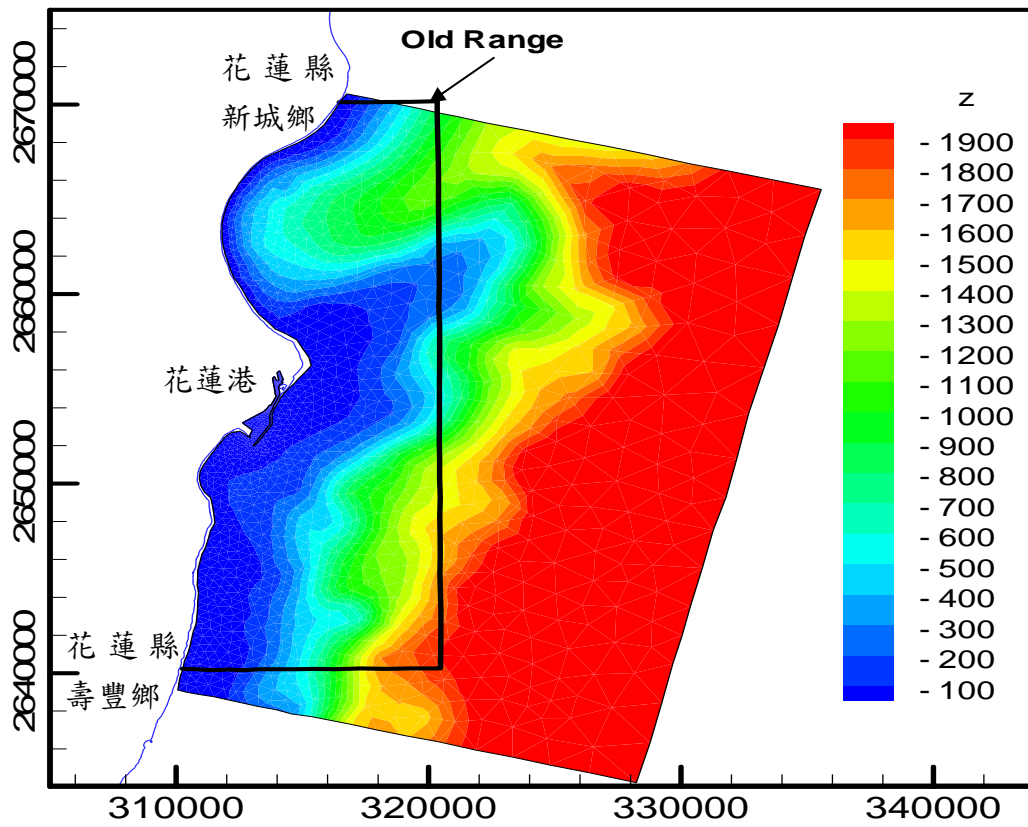


圖 6.25 花蓮港區近岸水動力模組之模擬範圍及地形水深分佈圖



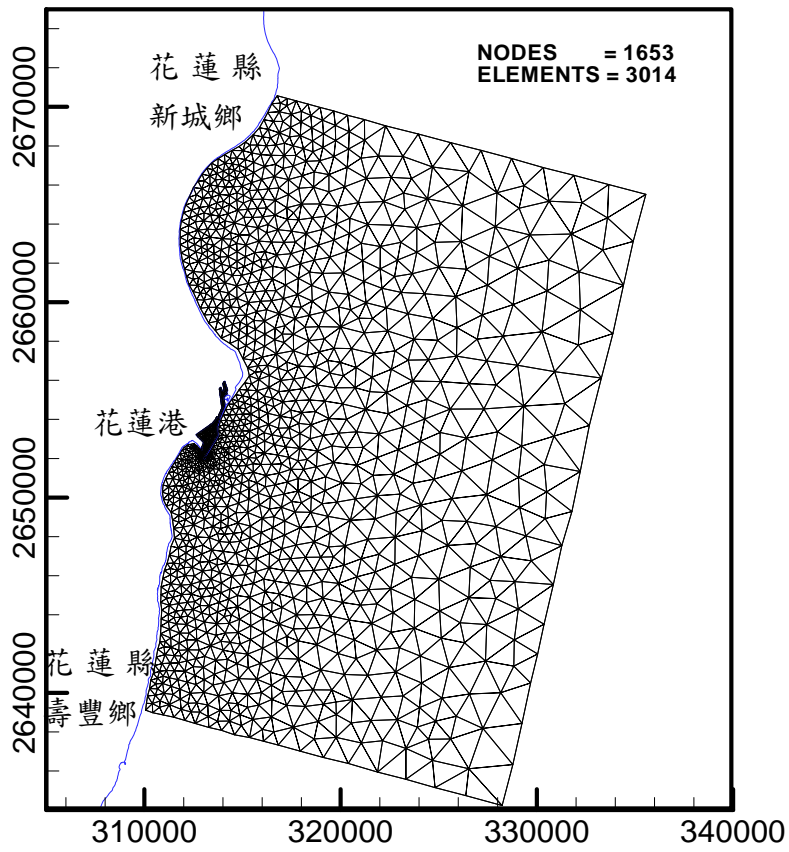


圖 6.26 花蓮港區近岸水動力模組之細網格三角形元素分佈圖

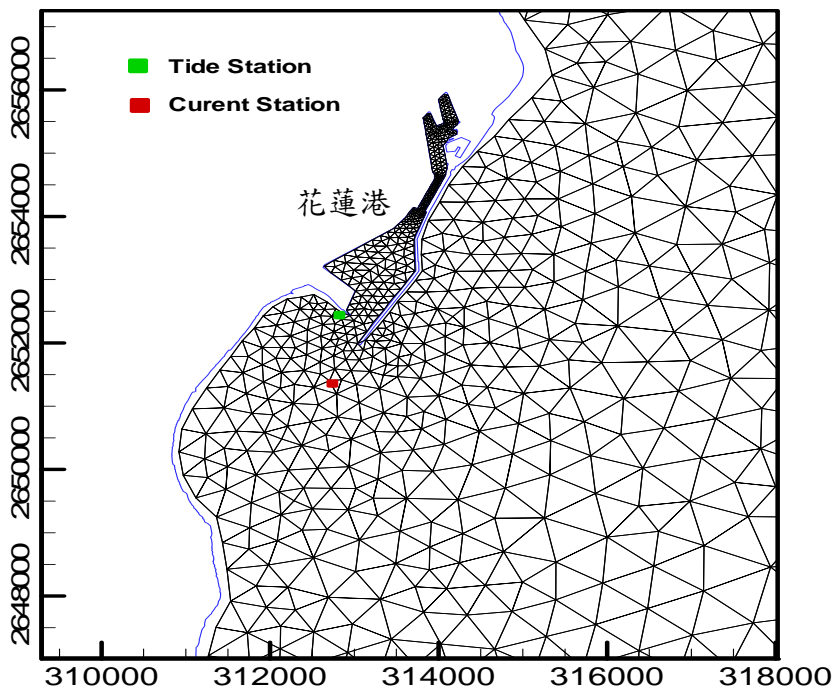


圖 6.27 花蓮港港域及港口附近細網格之三角形元素分佈圖

## 6.2.2 模式邊界條件修正

本計畫水動力數值模式之邊界型態分為海域(海洋)開放邊界及陸地邊界兩類型，其中陸地邊界之邊界條件選擇可區分為不滑動邊界條件(即假設邊界節點流速等於零)及滑動邊界條件(即假設邊界節點垂直方向流速為零)；至於，海域開放邊界則採用水位(或潮位)變化作為模式之開放邊界條件。

本研究採用上述滑動邊界條件作為花蓮港水動力模組之陸地邊界條件。另在開放邊界水位條件設定上，前期計畫先依據花蓮港及其鄰近潮位站(蘇澳港及石梯漁港)之潮汐資料，以及花蓮港口外海潮流觀測資料中，篩選出 2006 年 5 月 22 日至 2006 年 6 月 22 日之潮位及海流資料進行相關的資料分析。在水位調和分析上，選取  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$  及  $S_2$  等五個分潮進行各測站水位調和分析，依據蘇澳港及石梯漁港水位調和分析結果，利用線性內插方式建立各開放邊界節點上之潮汐分潮之振幅及相位差為模式開放邊界之水位邊界條件，模擬整個海域之水位及流場變化。圖 6.28 所示即為前期計畫花蓮港水動力模式數值計算網格之南、北邊界之水位變化時序列圖，結果顯示花蓮港水動力模式之南、北側邊界水位極為接近。

由於上述方法在處理南、北開放邊界間之離岸開放邊界(通常與海岸平行)之水位條件上，通常較易產生不符合現況之誤差，往往需藉由試誤法不斷地修正或調整，導致過程相當花費時間且不易得到較精確的模擬結果。由於模式模擬範圍內僅花蓮港區內有潮位紀錄，因此針對花蓮港小尺度水動力模組開放邊界條件修正為，本年度選用 Matsumoto et al.(2000)所發展的 NAO.99b 模式建置模式之開放邊界條件，如圖 6.29 所示，為模式模擬範圍的南北開放邊界之水位邊界條件，在模式計算中南北開放邊界上的每個節點皆以此邊界條件代入，平行海岸之外海開放邊界上每個節點值則以南北邊界值取線性內插計算而得。

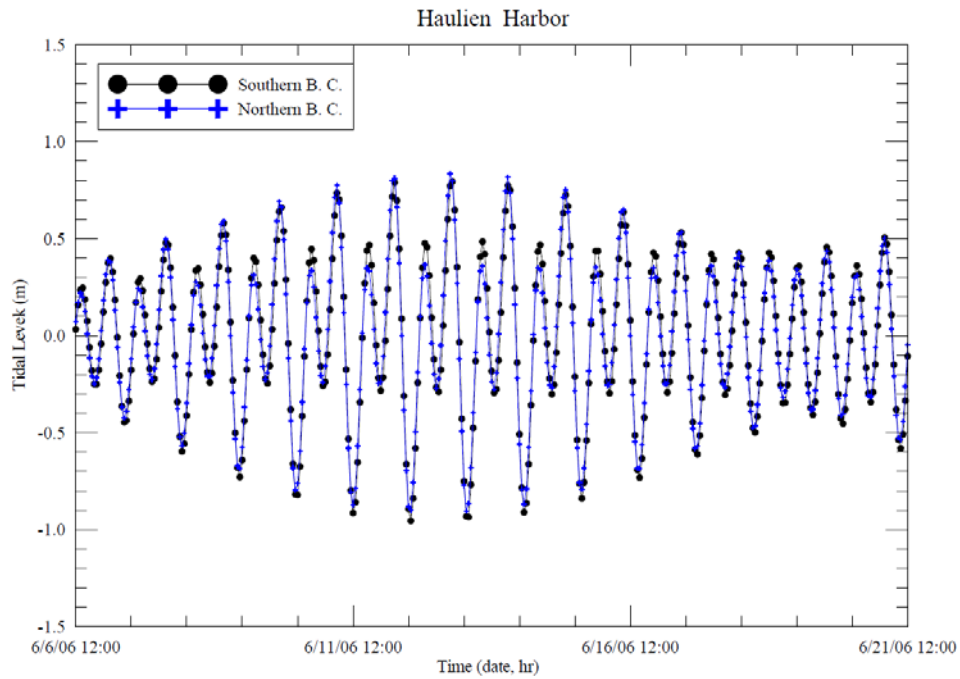


圖 6.28 前期計畫花蓮港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位  
 時序圖

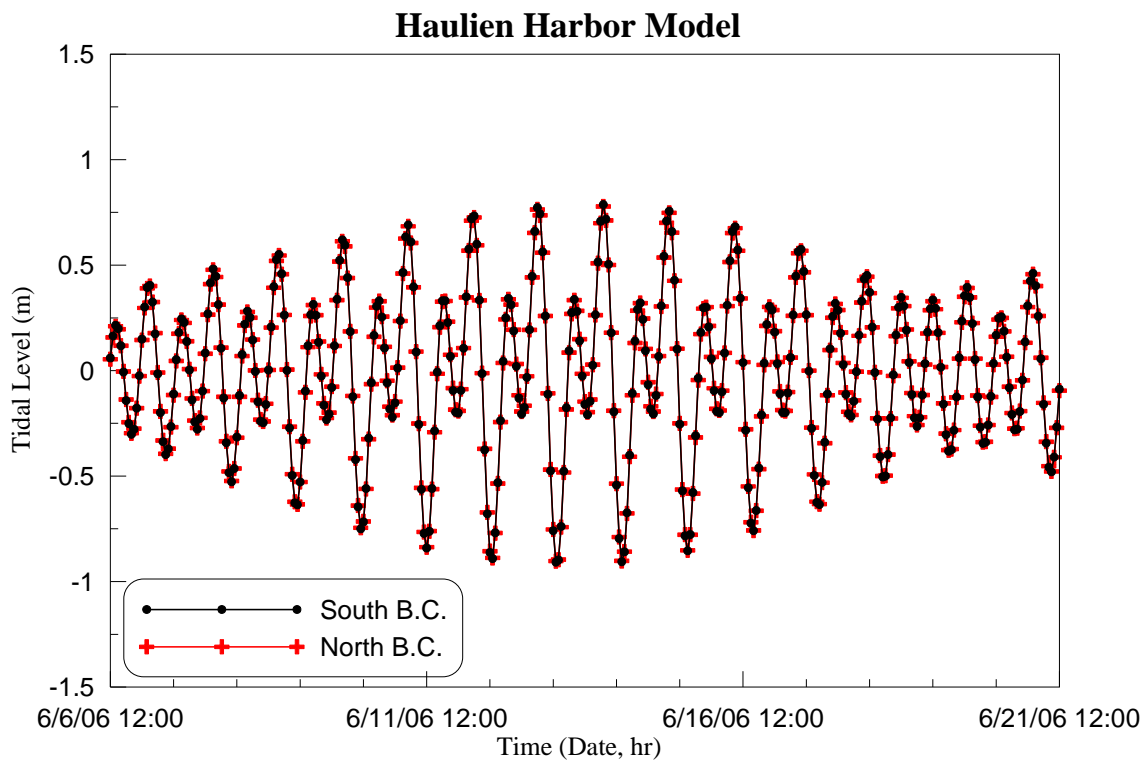


圖 6.29 本年度計畫花蓮港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位  
 時序圖

### 6.2.3 模式參數率定與驗證

由於水動力模式數值計算之穩定性除了與三角元素大小、節點水深大小及時間項差分之間距 $\Delta t$ 大小有關外，模式所使用的物理參數如渦動粘滯性係數及底床摩擦係數大小，以及模式模擬之起始條件等均會影響至模式計算之穩定性。因此相關參數值需進行率定與測試，經本年度花蓮港港區近岸水動力模組採用更新數值計算網格測試後，得知採用時間間距 $\Delta t$ 為 2.0 sec 仍可使模式穩定的運算。渦動粘滯性係數則參考(A2.32)式計算各元素代表性渦動粘滯性係數，式中採用的參數值分別為無因次係數  $a$  值為 0.02，代表性流速  $\bar{u}$  值為 0.1 m/s，代表性潮差  $\bar{\eta}$  值為 0.6m。至於，底床摩擦係數則隨水深而變，其值介於 0.010~0.020 之間。

在模擬結果之驗證上，為了與前期計畫驗證結果相較，本計畫選取 2006 年 6 月份花蓮港港內水位觀測資料及港外海流觀測資料之潮流分析結果為依據，其中水位與潮流 EW 及 NS 方向速度驗證結果如圖 6.30 所示；驗證結果顯示本計畫花蓮港水動力模組流速模擬結果在 EW 方向速度振幅明顯小於觀測資料調和分析之潮流振幅，NS 方向速度振幅則與觀測資料調和分析之潮流振幅相當。整體而言，本年度花蓮港水動力模組之水位及流速模擬與驗證結果均較前期計畫驗證結果，如圖 6.31 所示，在流速變化的相位較接近調和分析的結果。

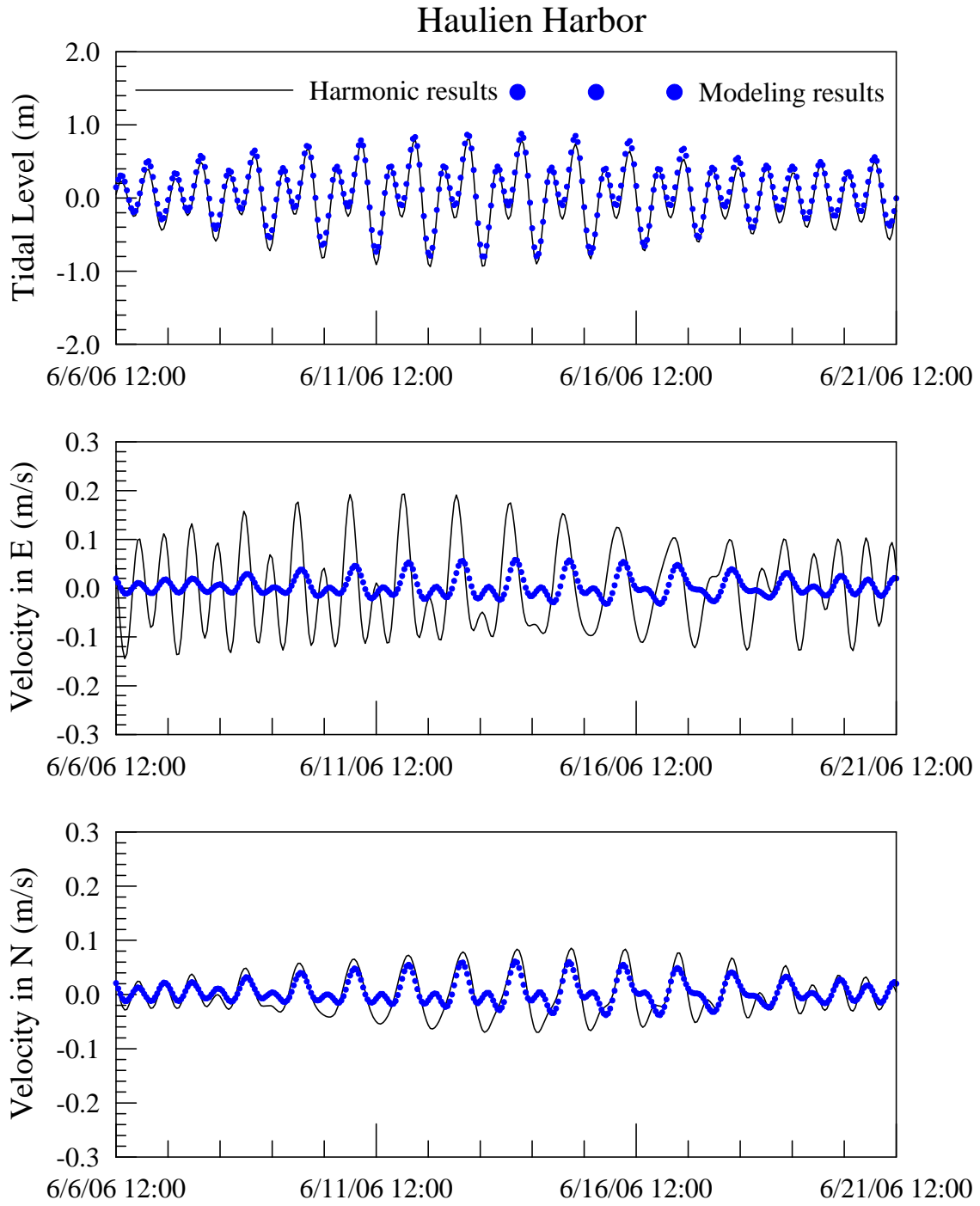


圖 6.30 花蓮港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分析  
 $(O_1、K_1、M_2、S_2)$ 結果比較圖

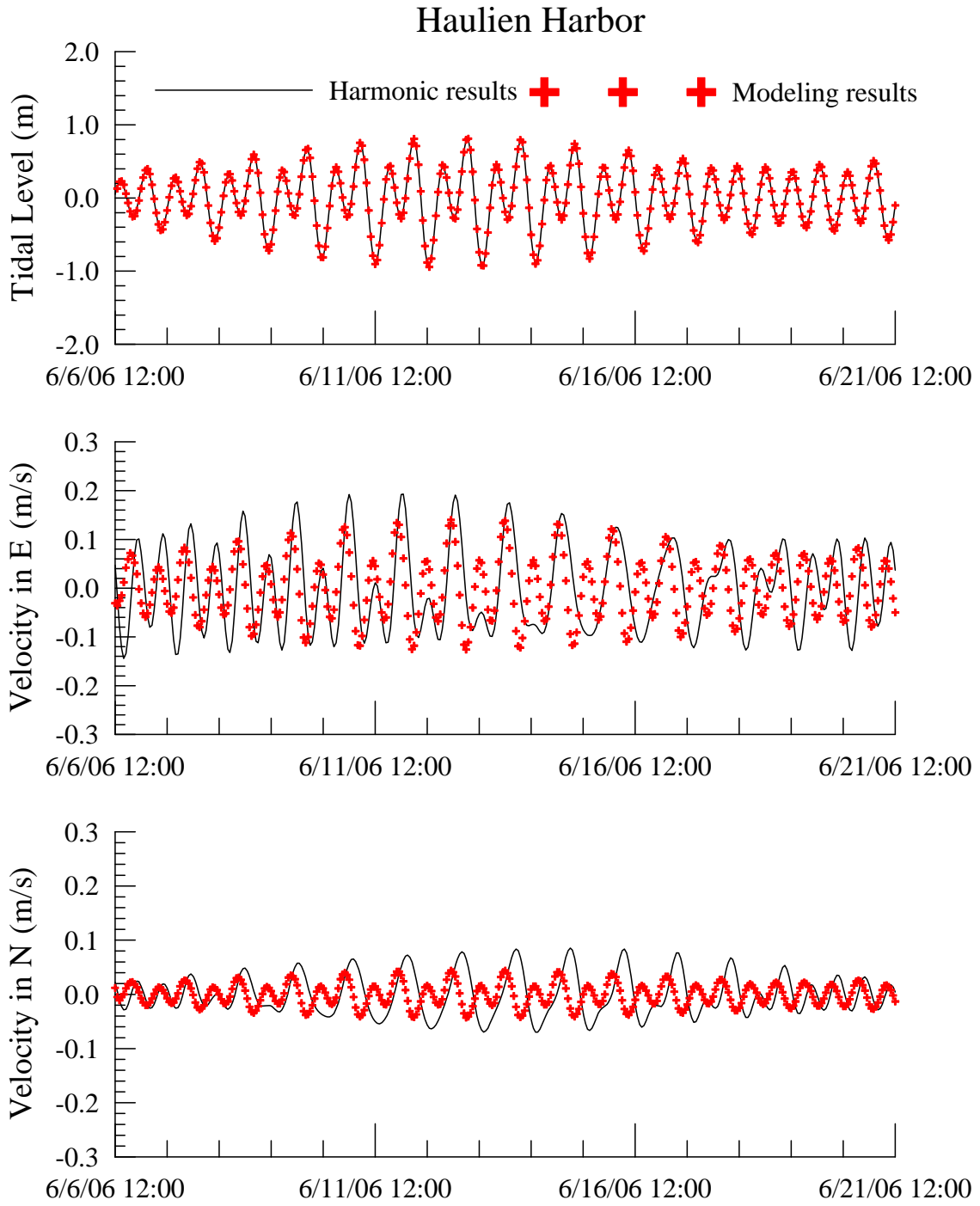


圖 6.31 前期計畫花蓮港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果比較圖

#### 6.2.4 花蓮港海域流場模擬結果

本計畫依據上述所建立之花蓮港水動力模式模擬花蓮港區附近海域的流場環境，如圖 6.32 所示，為 2006 年 6 月 14 日(農曆 5 月 19 日) 花蓮港區附近海域流況變化情形及相對應的潮汐水位，可提供後續流場模擬分析結果參考。

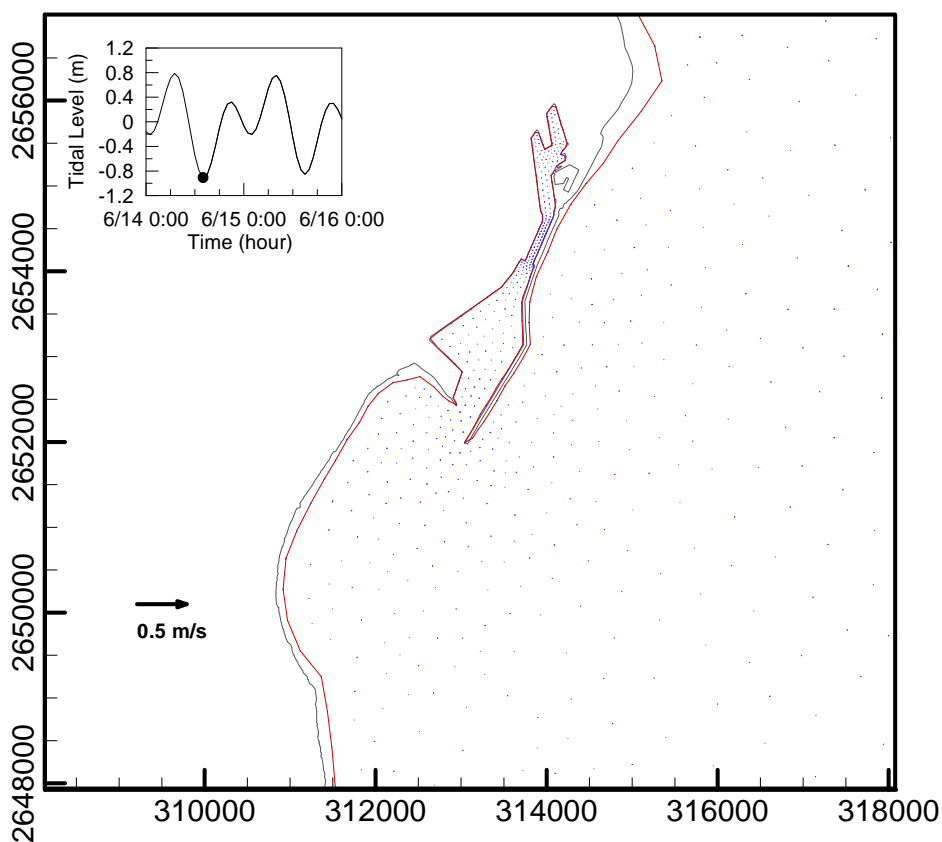


圖 6.32 花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/14 14:00)

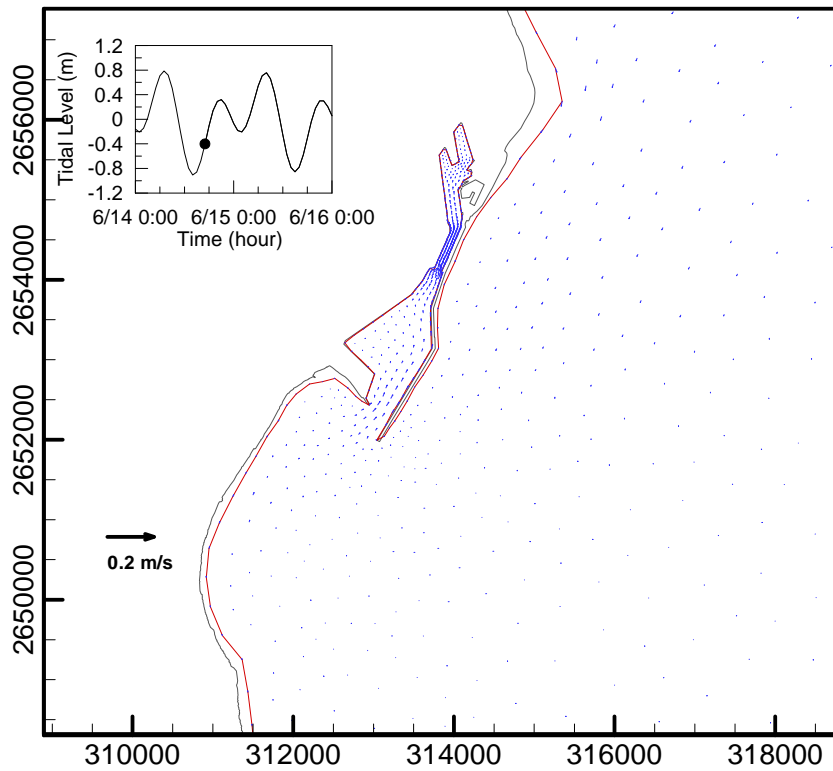


圖 6.32 (續 1)花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/14 17:00)

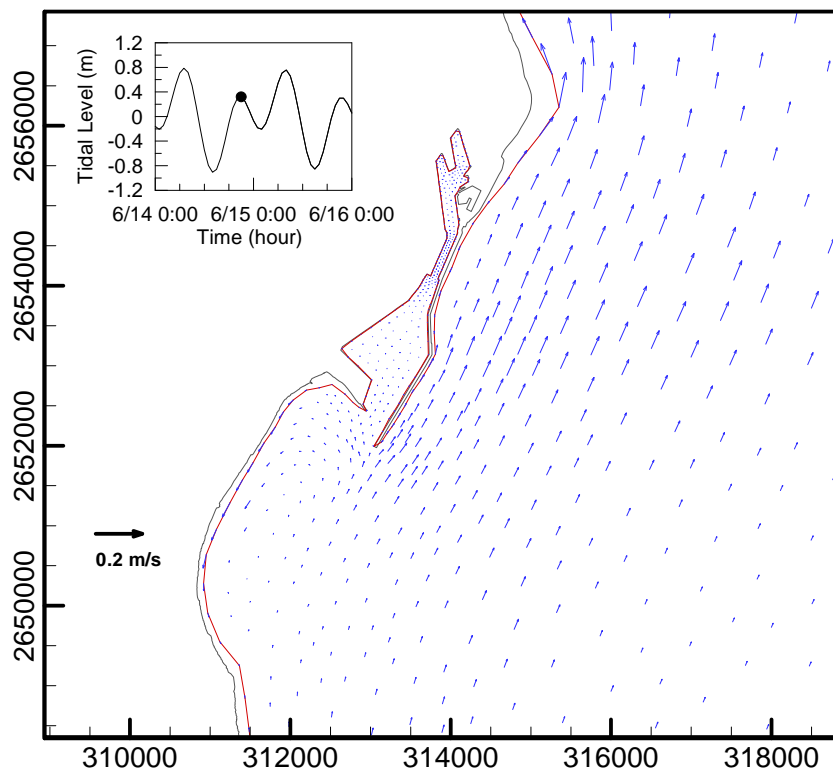


圖 6.32 (續 2)花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/14 21:00)



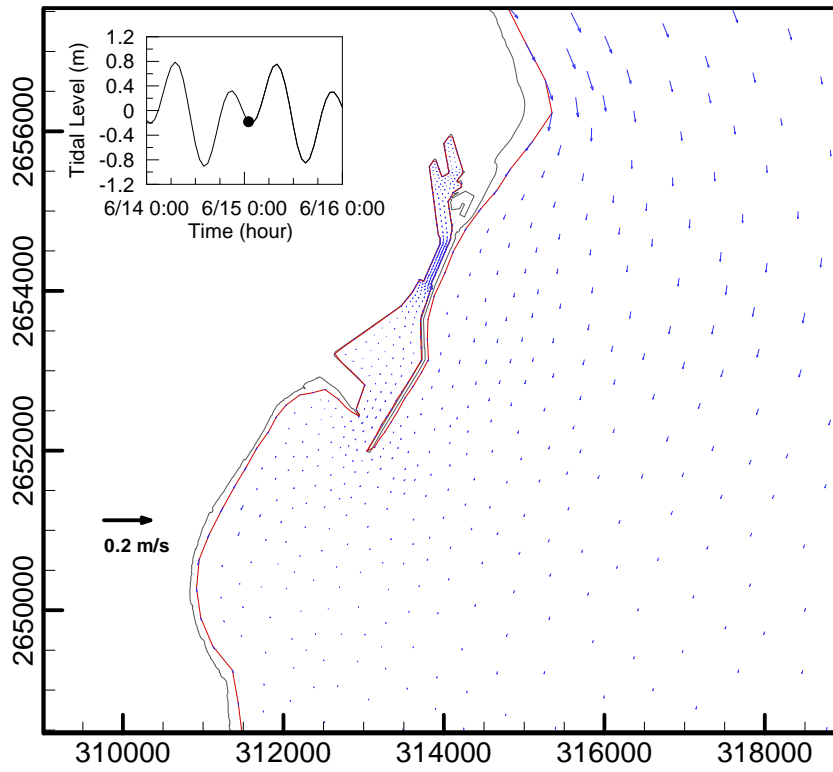


圖 6.32 (續 3)花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/15 01:00)

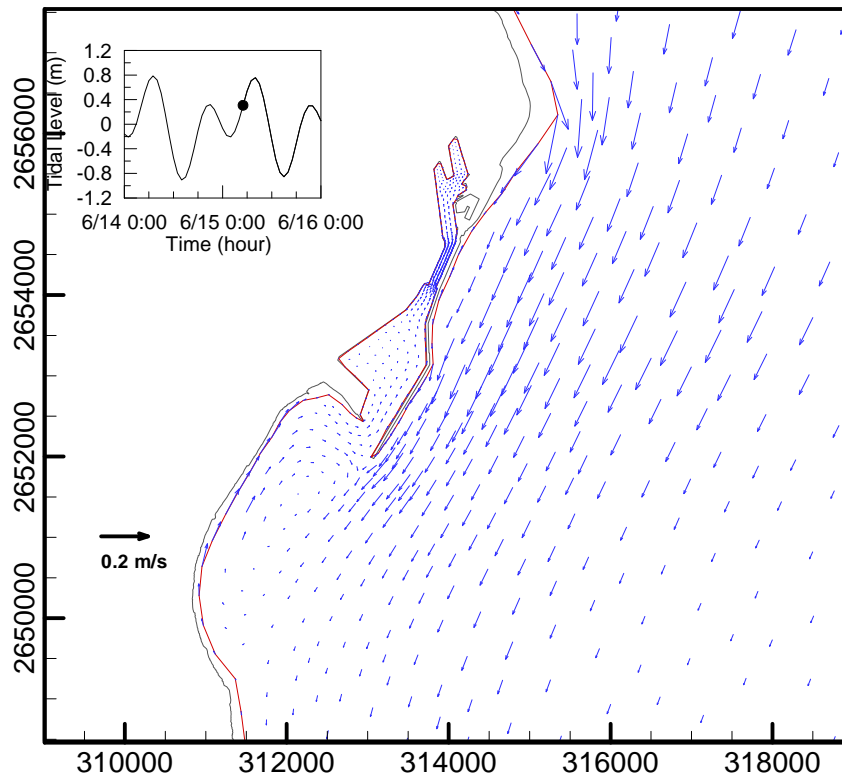


圖 6.32 (續 4)花蓮港流場模擬結果之流速向量圖 (2006/06/15 05:00)

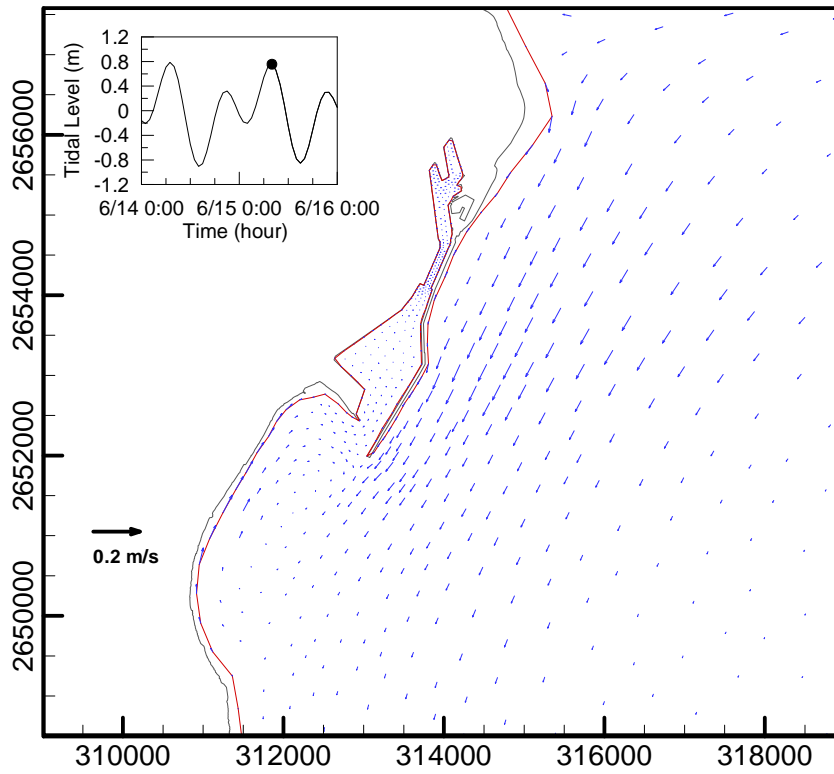


圖 6.32 (續 5) 花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/15 08:00)

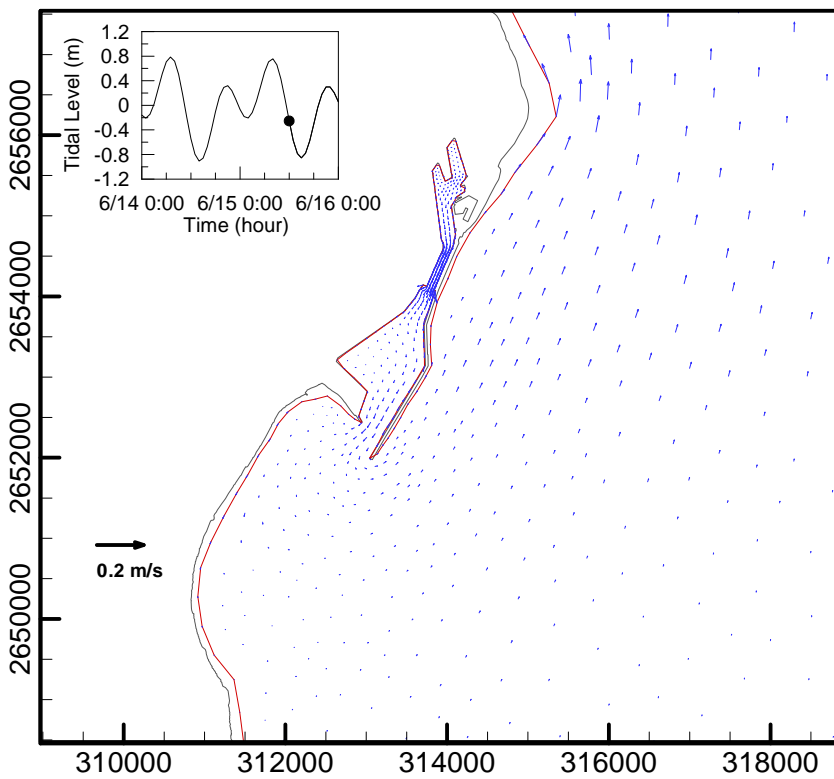


圖 6.32 (續 6) 花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/15 12:00)

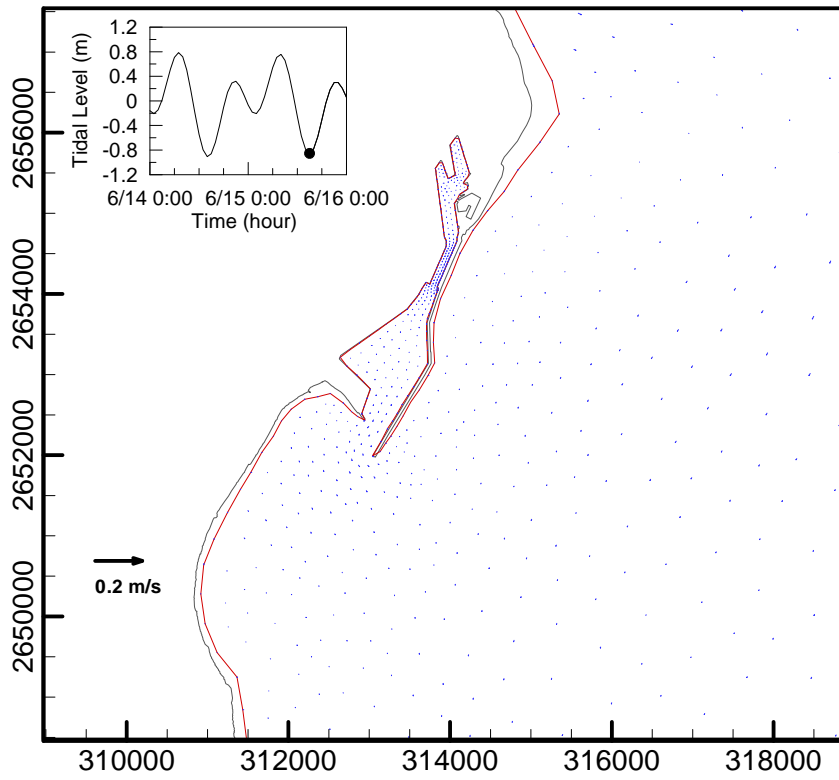


圖 6.32 (續 7)花蓮港流場模擬結果之流速向量圖(2006/06/15 15:00)

## 6.3 小尺度蘇澳港區水動力模組改善研究

同前述花蓮港區水動力模組說明，本計畫小尺度蘇澳港區水動力模組係前期計畫於 98 年度完成初步的小尺度蘇澳港區近岸水動力模組建置工作，其中蘇澳港區水動力模組之模擬範圍及有限元素網格配置如圖 6.33 所示，範圍北起宜蘭縣蘇澳鎮與五結鄉交界處附近，南至蘇澳鎮東澳里北邊；南北邊界相距約 12 km，離岸方向寬度約 4~7 km；圖中有限元素網格係由 1479 個節點及 2664 個三角形元素構成的。同樣地，針對蘇澳港區本年度計畫將依據前期計畫建置的蘇澳港港區近岸水動力模組進行相關修正與改善研究，本章節內容包括水動力模組之模擬範圍及地形水深知更新、有限元素格網之修正、模式邊界條件之修正、模式相關參數率定與驗證、蘇澳港港區近岸水位及流場模擬等工作。

### 6.3.1 模擬範圍及有限元素網格之修正

由於臺灣東部海岸地形較為陡峭，前期計畫蘇澳港水動力模式模擬範圍較小，可能無法反應近岸陡峭地形因素對潮流特性之影響，本年度計畫針對小尺度蘇澳港水動力模組模擬範圍提出修正方案，除了地形水深資料更新之外，模擬範圍亦擴大，如圖 6.34 所示，模擬範圍北起蘭縣壯圍鄉與五結鄉交界處，南至蘇澳鎮東澳里南邊；南北邊界相距約 25 km，離岸方向寬度約 20 km；圖中顯示外海地形等深線與海岸線並未平行，東南方有較深的陸棚地形。

依據新的模擬範圍，本計畫修正的有限元素計算網格，如圖 6.35 所示。圖中有限元素網格係由 2132 個節點及 3989 個三角形元素構成的，有限元素網格之水深資料則依據本年度蒐集的水深資料予以更新。另外蘇澳港港區內及港口附近之有限元素網格分布情形，如圖 6.36 所示，圖中亦標示蘇澳港潮汐及海流觀測站位置。

### 6.3.2 邊界條件修正

同前述本年度花蓮港水動力模組之邊界條件設定方式，以滑動邊

界條件作為蘇澳港水動力模組之陸地邊界條件；開放海域邊界之水位條件建置方式亦選用 Matsumoto et al.(2000)所發展的 NAO.99b 模式計算建置模式之開放邊界條件，如圖 6.37 所示，為模式模擬範圍的南、北邊海陸交界處開放邊界之水位邊界條件，圖中南、北邊界潮汐變化的相位差異不大，南邊邊界的變化振幅略大於北邊邊界。在模式計算中南、北開放邊界上的每個節點皆以此邊界條件代入，平行海岸之外海開放邊界上每個節點值則以南北邊界值取線性內插計算而得。

### 6.3.3 模式參數率定與驗證

經採用本年度蘇澳港區近岸水動力模組更新之有限元素網格測試後，得知模式之時間間距 $\Delta t$ 為 2.0 sec 可使模式穩定的運算。渦動粘滯性係數同樣參考(A2.32)式計算各元素代表性渦動粘滯性係數，式中採用的參數值分別為無因次係數  $a$  值為 0.02，代表性流速  $\bar{u}$  值為 0.2 m/s，代表性潮差  $\bar{\eta}$  值為 0.6m。有限元素網格之底床摩擦係數設定係隨水深而變，其值約介於 0.005~ 0.020 之間。

本年度計畫蘇澳港水動力模組模擬結果之驗證如圖 6.38 所示，其中潮位變化直接與觀測資料比對，潮流模擬結果則與觀測資料調和分析( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ )結果比對。驗證結果顯示蘇澳港水位模擬結果大致上仍與觀測資料相當近似；在流速 EW 及 NS 方向分量比較上，EW 方向流速振幅模擬值與觀測資料之調和分析結果相當，NS 方向流速振幅模擬值則小於觀測資料之調和分析結果，相位變位模擬值與觀測資料之調和分析結果仍存在約 1~2 小時差，但流向及相位變位的趨勢上已能夠反應出潮流漲潮及退潮之特性。

### 6.3.4 蘇澳港海域流場模擬結果

有關蘇澳港海域漲退時潮流變化情形，依據上述所建立之蘇澳港水動力模式模擬蘇澳港區附近海域的流場環境，如圖 6.39 所示，為 2006 年 5 月 26~27 日(農曆 4 月 29 日~5 月初一)蘇澳港區附近海域流況變化情形及相對應的潮汐水位，可提供後續流場模擬分析結果參考。

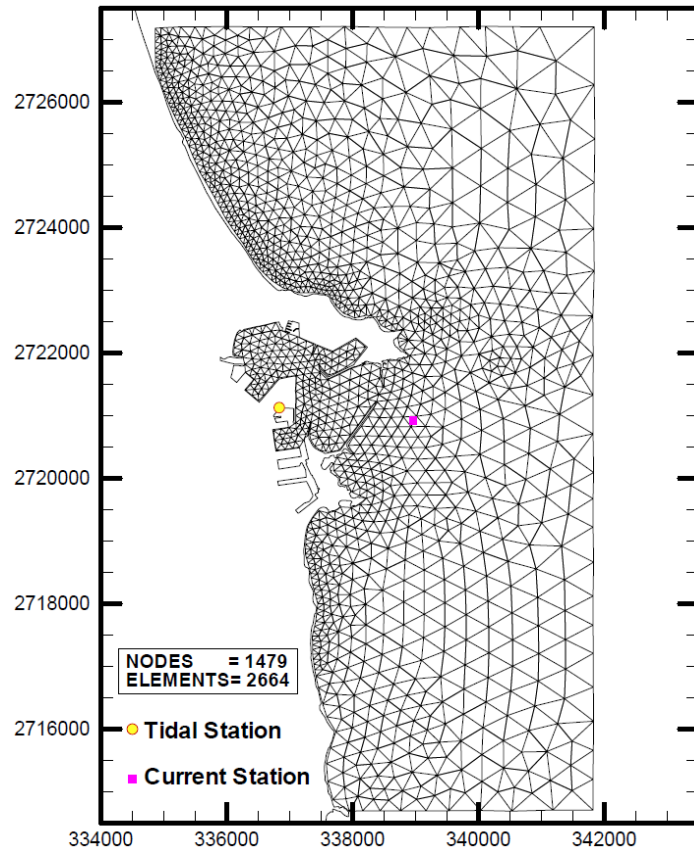


圖 6.33 蘇澳港水動力模式之有限元素格網分佈圖(98 年計畫)

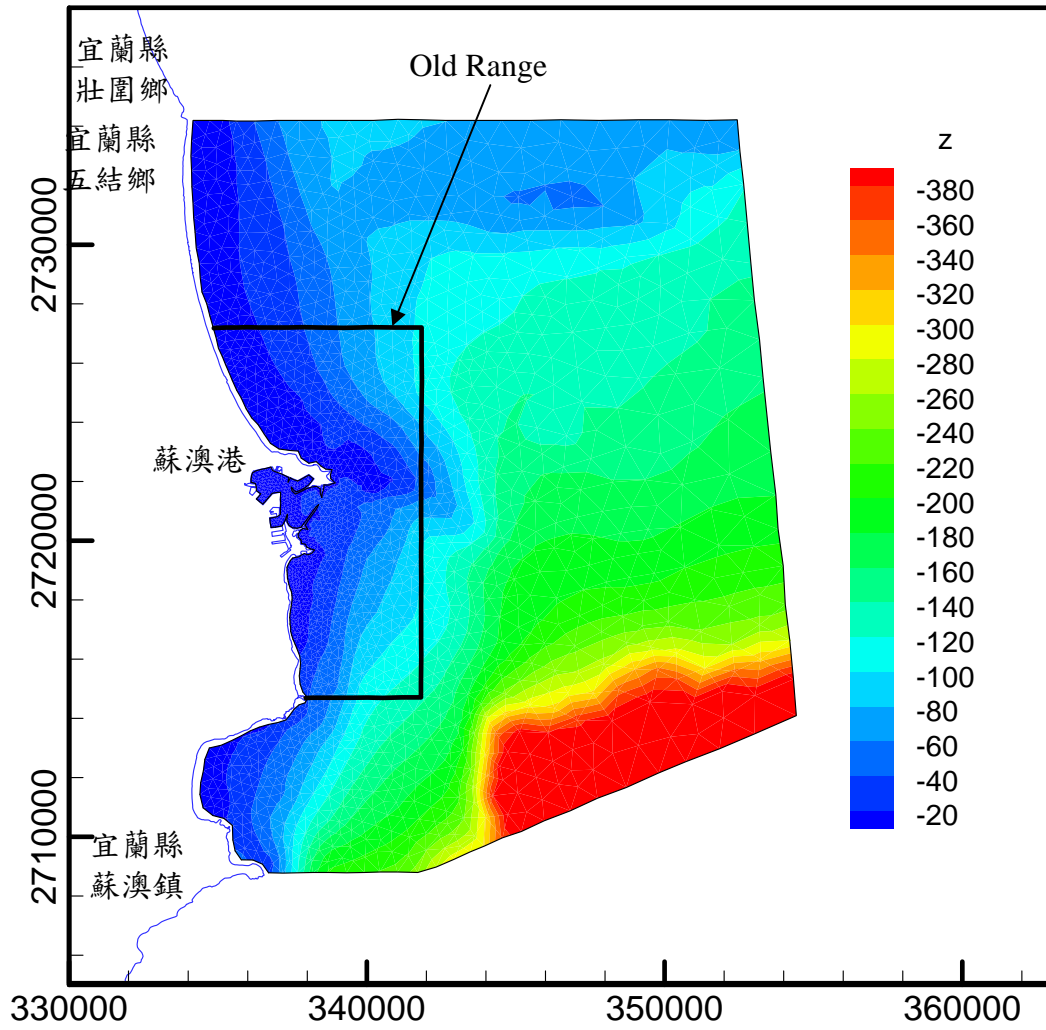


圖 6.34 蘇澳港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖

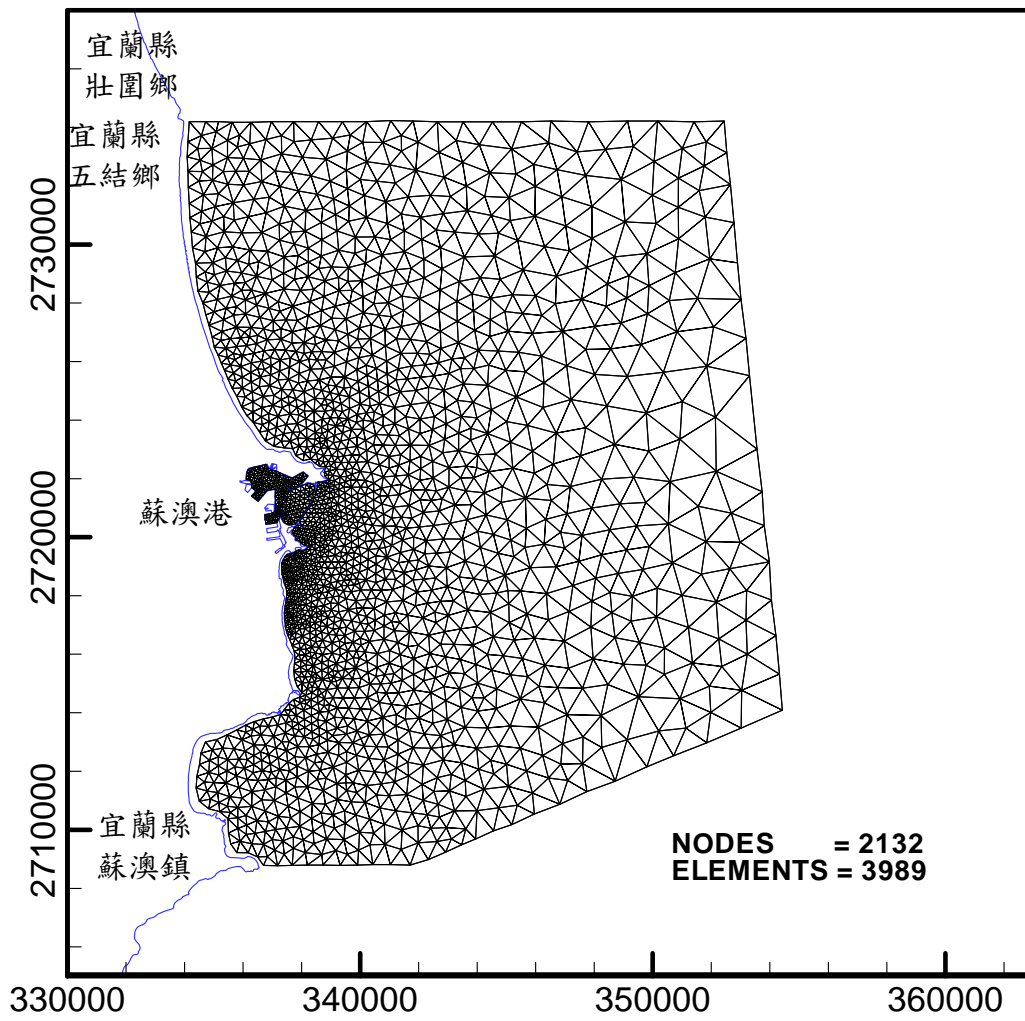


圖 6.35 蘇澳港水動力模組之模擬範圍及有限元素格網分佈圖



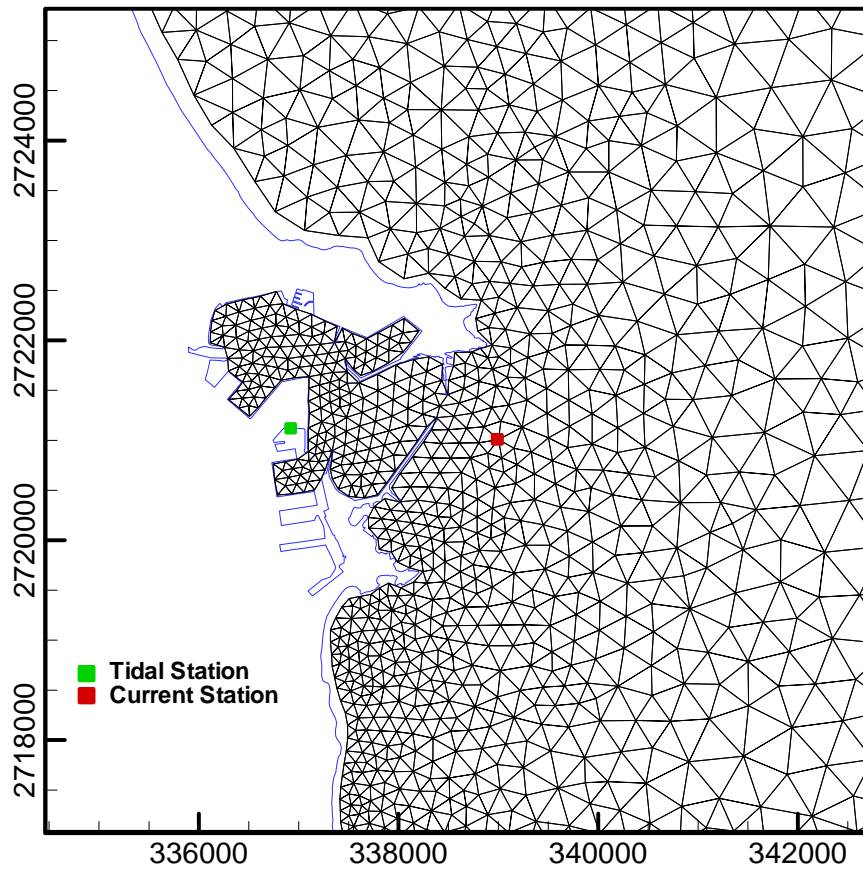


圖 6.36 蘇澳港港域及港口附近細網格之三角形元素分布圖

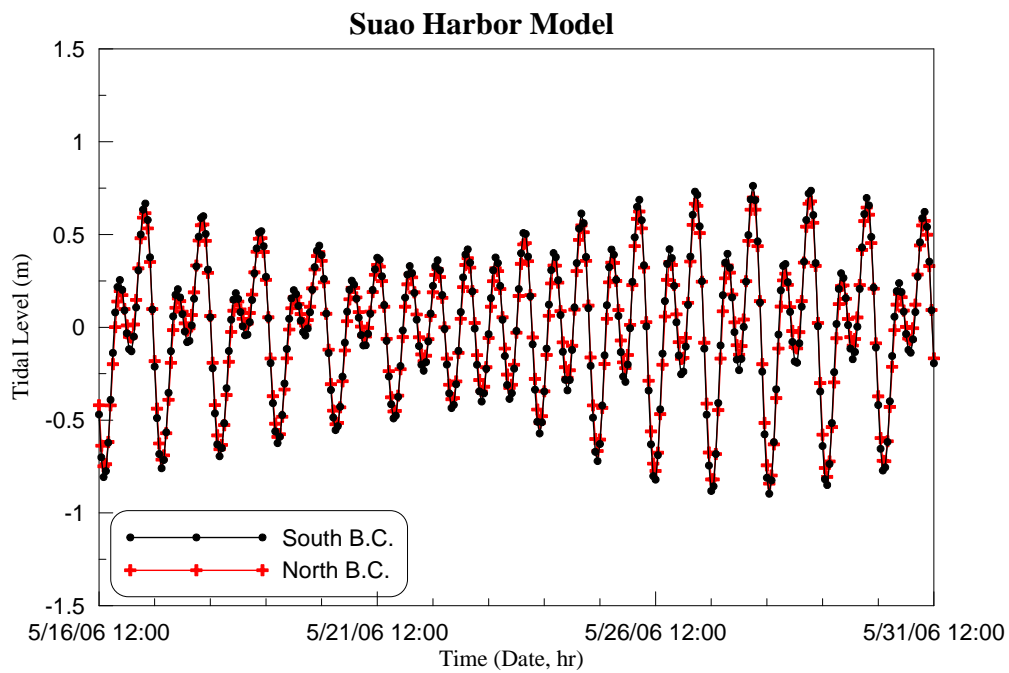


圖 6.37 蘇澳港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位時序圖

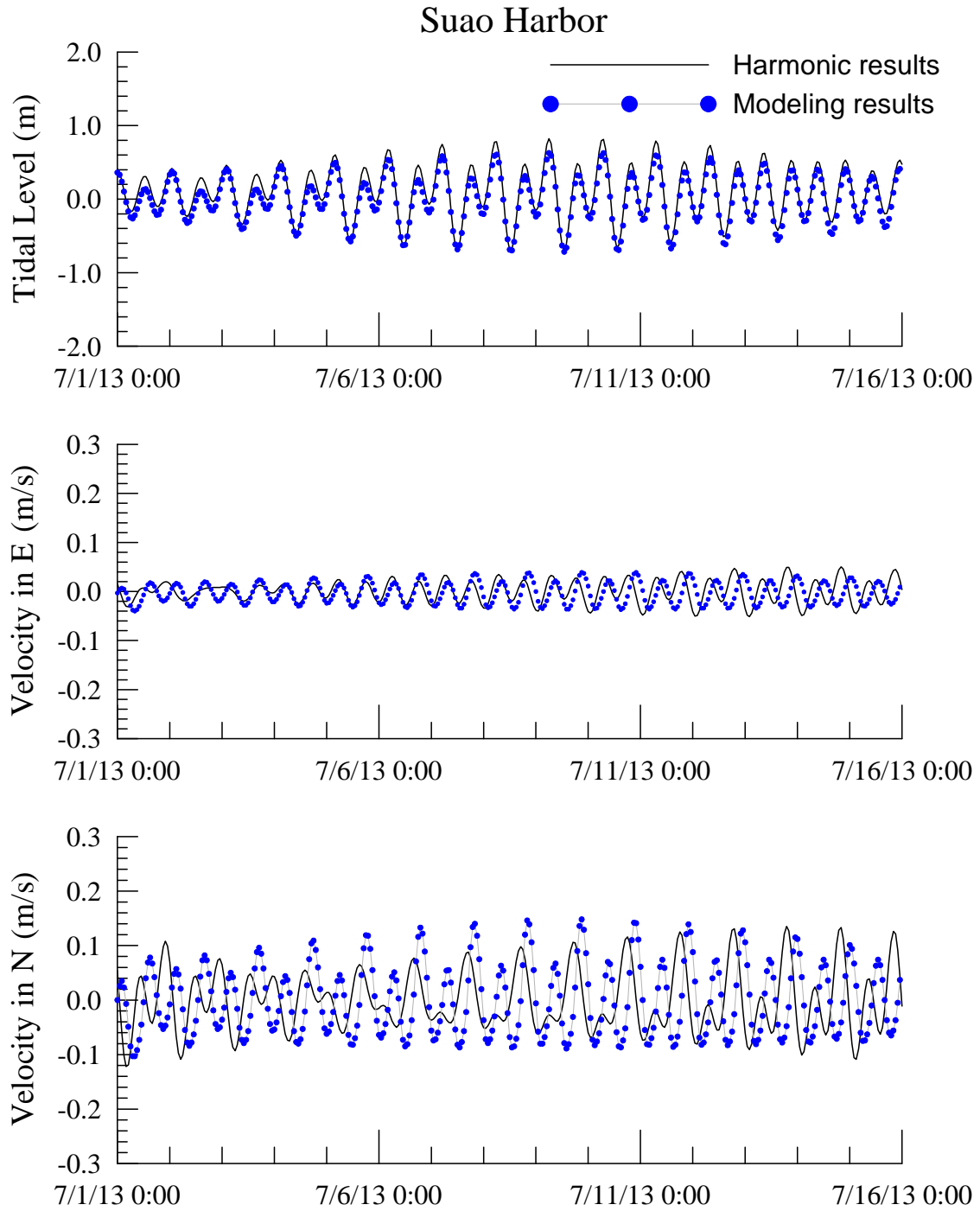


圖 6.38 蘇澳港水位與潮流模擬結果與海流觀測資料調和分析  
 $(O_1、K_1、N_2、M_2、S_2)$ 之 E-W 及 N-S 向速度分量比較圖

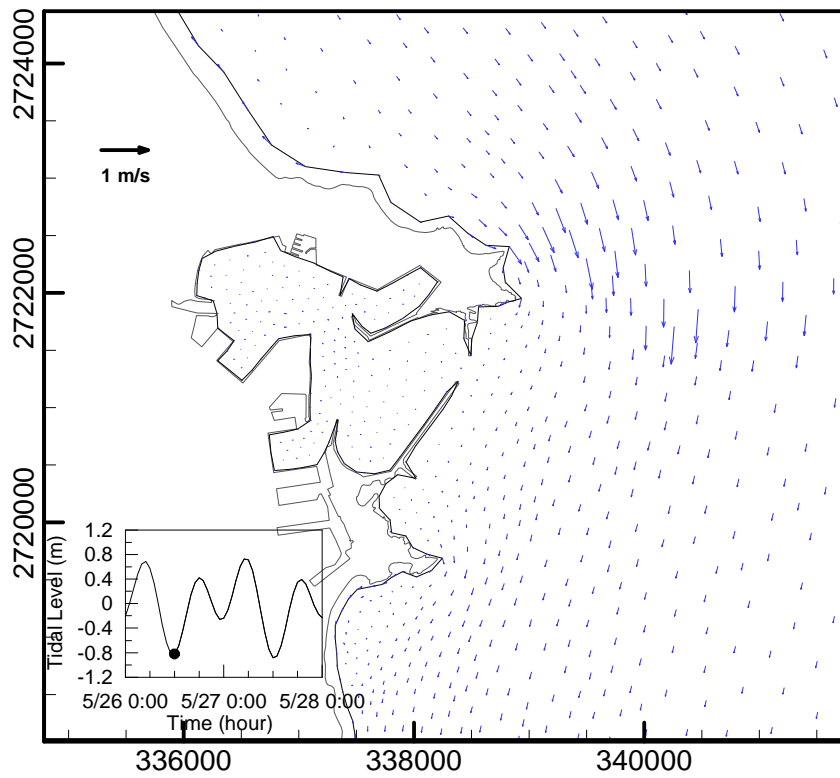


圖 6.39 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/26 12:00)

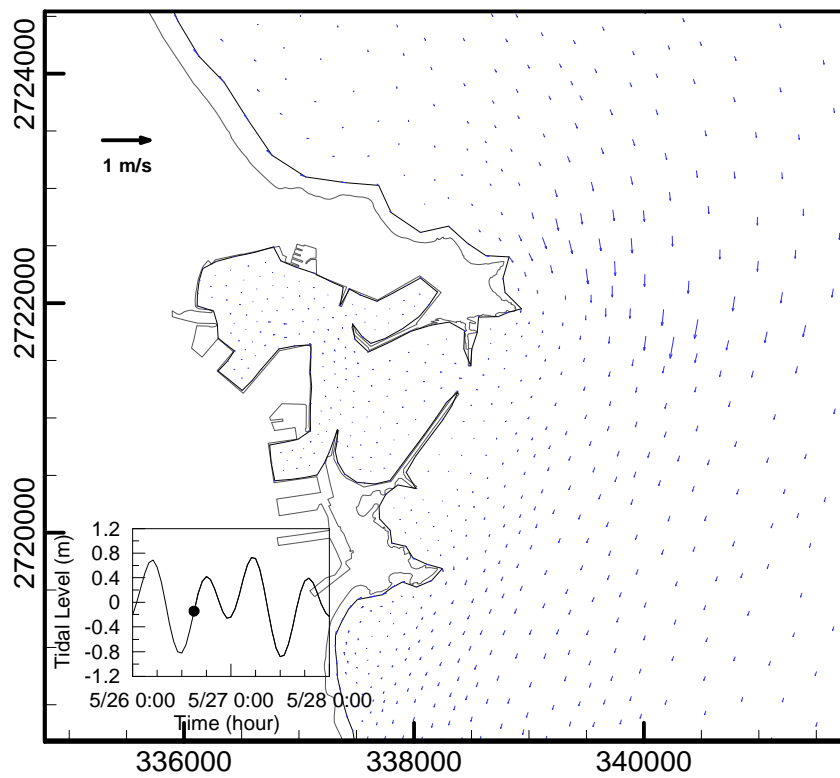


圖 6.39 (續 1) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/26 15:00)

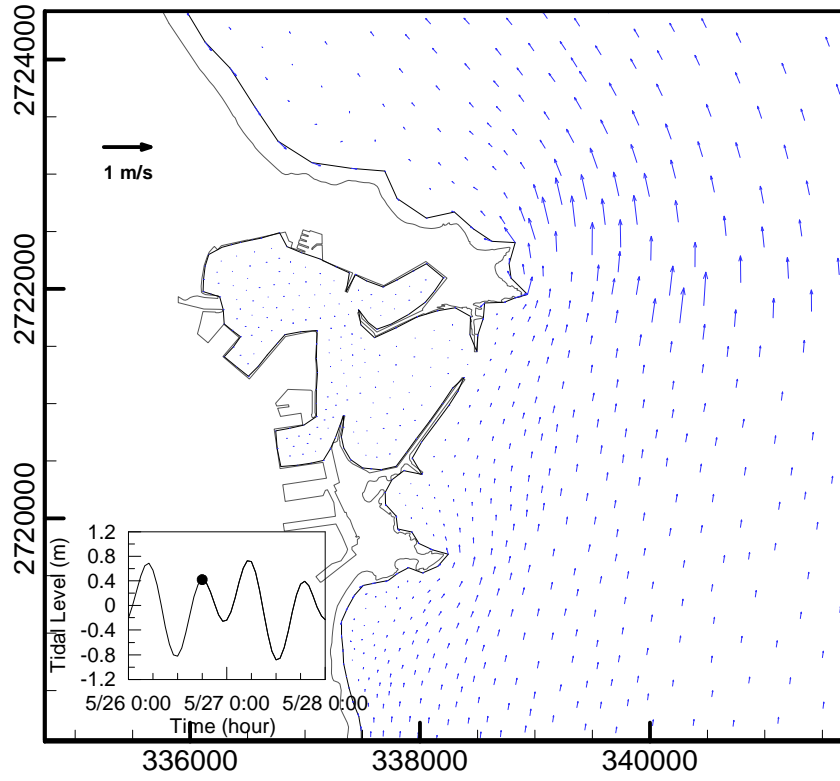


圖 6.39 (續 2) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/26 18:00)

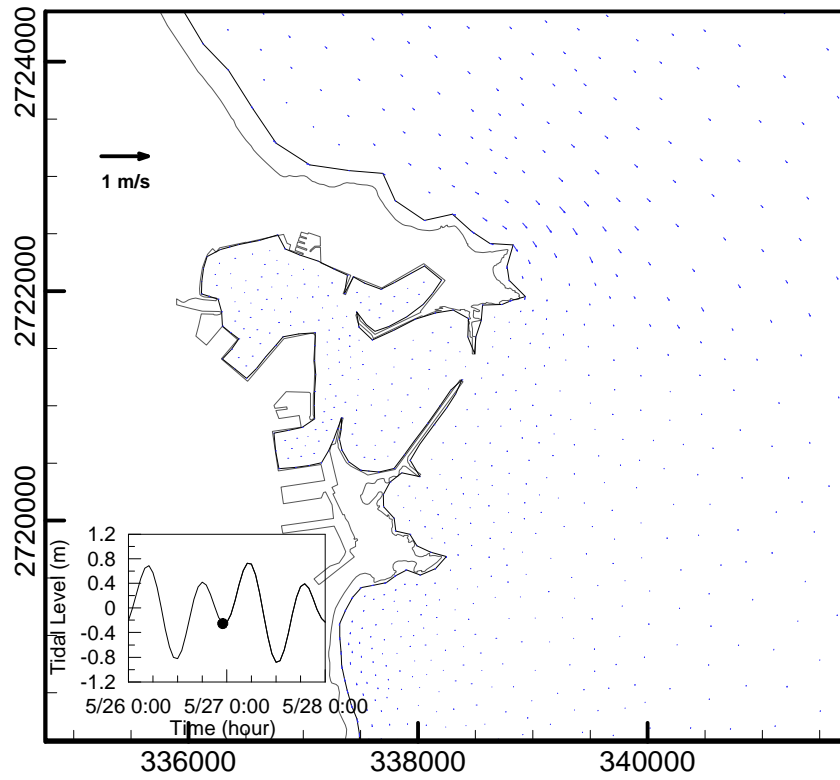


圖 6.39 (續 3) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/26 23:00)

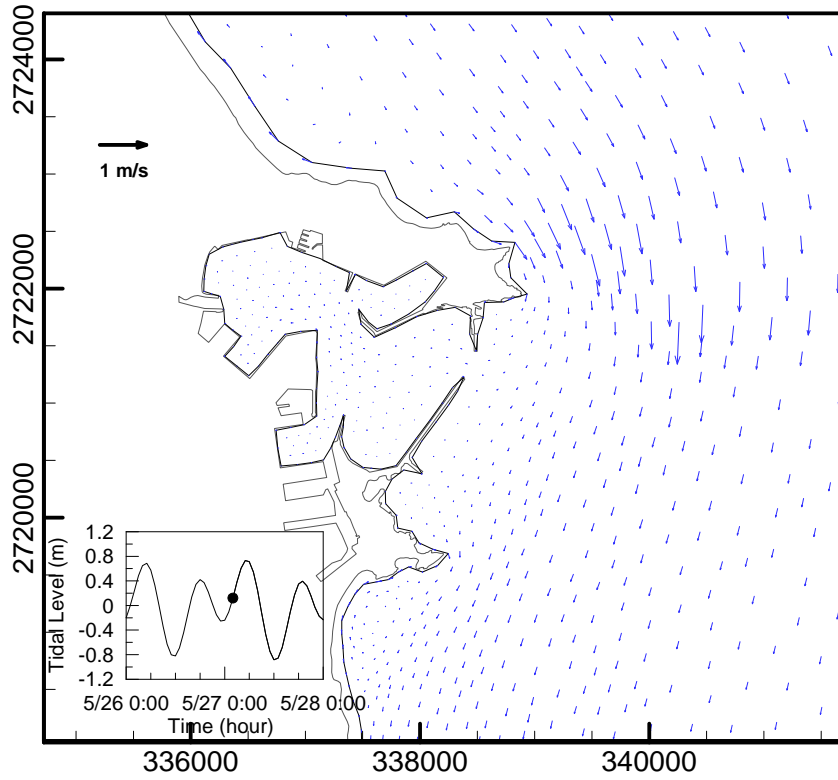


圖 6.39 (續 4) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/27 02:00)

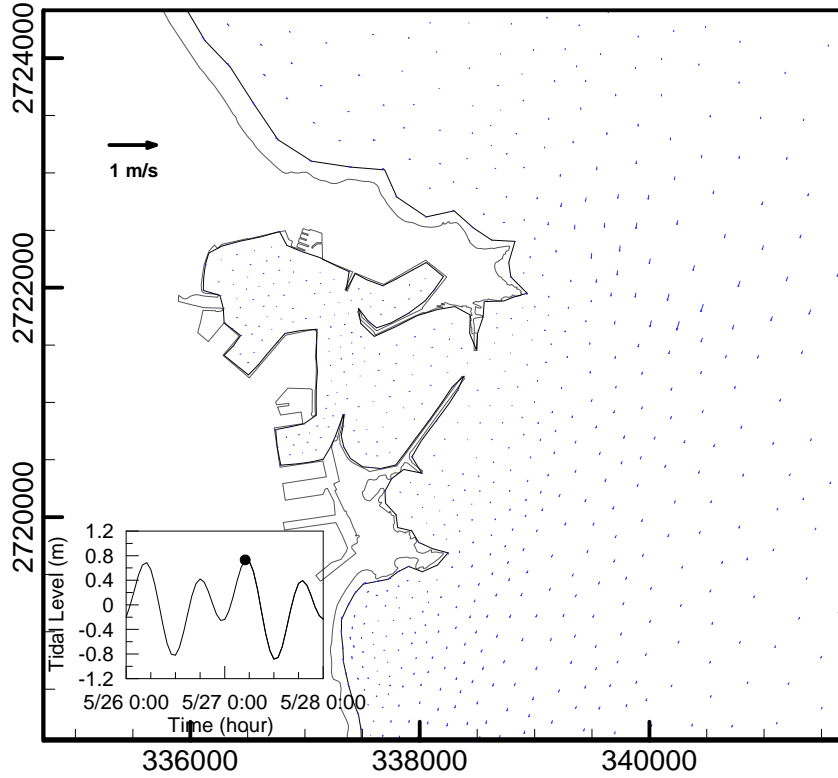


圖 6.39 (續 5) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/27 05:00)

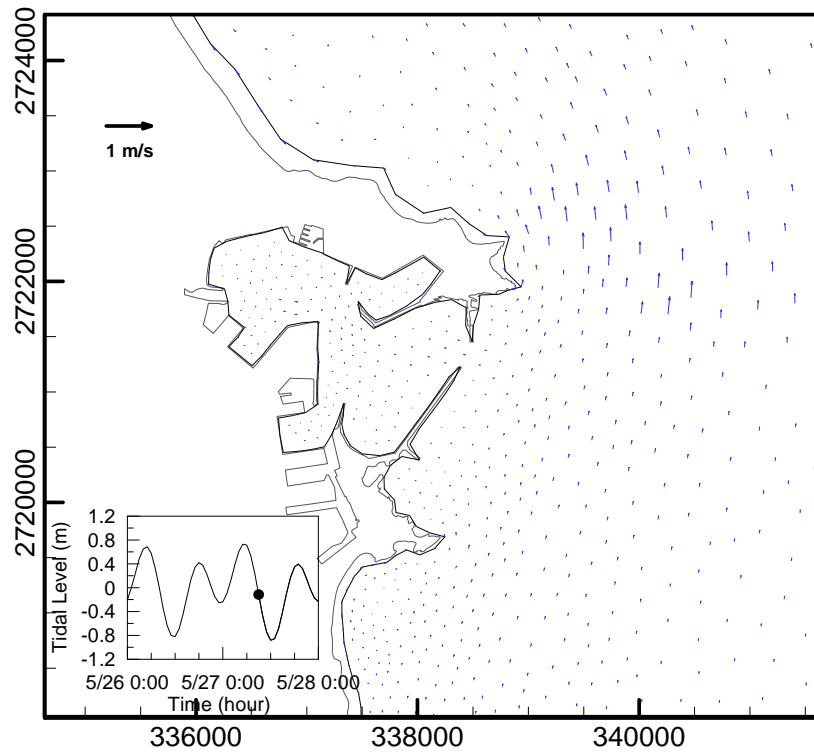


圖 6.39 (續 6) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/27 09:00)

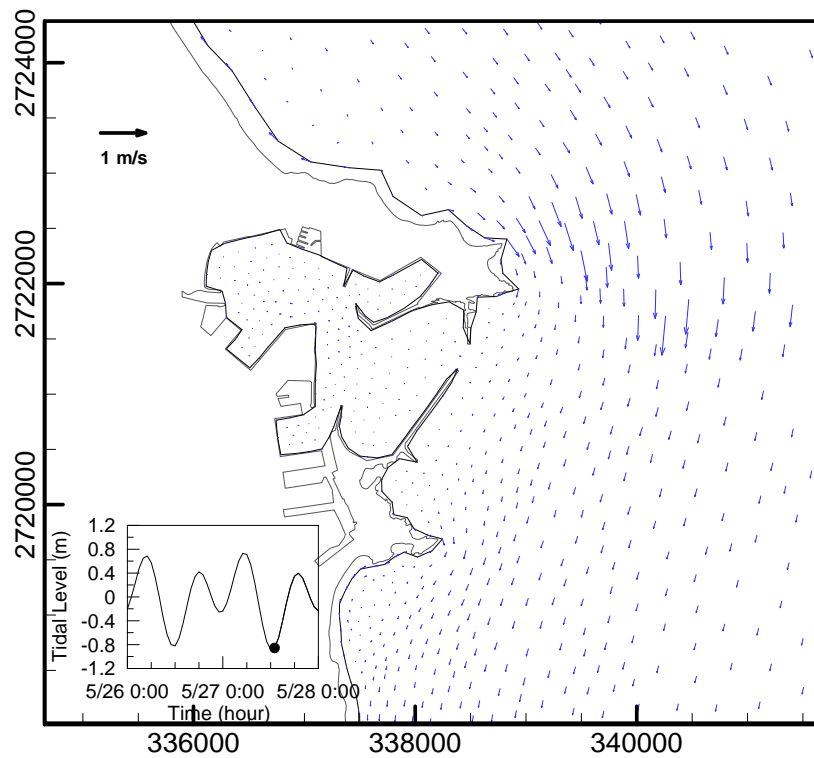


圖 6.39 (續 7) 蘇澳港流場模擬結果之流速向量圖(2006/05/27 13:00)

## 第七章 海象作業化預報成果評估

本章節為針對目前已作業化之海象預報模式於本年度計畫期間海象預報結果進行評估，該項工作由本研究團隊在港灣技術研究中心駐點人員所負責，每月進行各項作業化報表之印出作業。以下針對本年度(2014年)1月至10月主要商港海象作業化預報成果評估進行說明。

### 7.1 風場評估

風場預報包括 WRF 風場不同解析度 45 公里及 15 公里，分別為 WA01 與 WA02，本計畫將風場模式的預報值與觀測值之間的偏差進行統計分析以作為評估的標準。表 7.1 與表 7.2 分別為統計本年度 1~10 月國內各主要商港 WA01 預報風場風速與風向的偏差統計值，顯示 WA01 風場在東北季風期間(1~3 月及 10 月)臺中港的預報風場明顯小於觀測風速，其標準偏差較大達 6 m/s 以上，其餘各商港預報風速標準偏差多數在 2~3 m/s 之間；風向的偏差以 1 月時的臺中港、布袋港與安平港，以及 10 月時的基隆港、臺北港、臺中港、布袋港與安平港，其標準偏差較小介於 30~50 度之間。1~10 月期間以臺中港預報風向較佳，標準偏差皆在 60 度以下，花蓮港與蘇澳港預報風向較差，標準偏差多數介於 90~120 度之間。

表 7.3 與表 7.4 分別為統計本年度 1~10 月國內各主要商港 WA02 預報風場風速與風向的偏差統計值，與 WA01 預報結果相似，WA02 預報以 1~4 月期間臺中港的標準偏差較大，介於 5.0~6.7 m/s，其餘各商港預報風速標準偏差多數在 2.5 m/s 以下；風向預報的偏差亦以東北季風時期的臺中港較小，但隨季節轉向春季(4、5 月)，風向預報標準偏差較大，但皆在 60 度以下。整體而言，WA02 預報由於解析度較佳，其在風速與風向的預報成果較 WA01 預報為佳。

表 7.1 2014 年主要商港觀測及 WA01 預報風速偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	2.0	1.5	2.1	0.4	-1.3	-1.8	-6.1	2.8
	標準偏差	2.7	2.6	3.1	2.6	2.7	2.9	7.9	3.3
	最大偏差	7.1	5.9	9.8	-8.5	-9.6	-8.4	-16.1	7.5
2	平均偏差	2.1	1.3	1.7	0.0	-1.6	-2.4	-6.4	-1.4
	標準偏差	2.9	2.4	2.6	2.8	2.8	3.4	7.6	2.8
	最大偏差	7.8	7.3	6.6	-9.3	-8.6	-10.7	-14.9	-6.9
3	平均偏差	2.0	1.2	1.7	0.2	-0.9	-1.7	-4.8	-1.1
	標準偏差	2.6	2.3	2.4	2.8	2.8	3.0	6.8	2.7
	最大偏差	6.5	6.0	6.6	8.7	8.5	-9.7	-17.7	-8.6
4	平均偏差	1.5	1.2	1.0	-0.9	-1.3	-2.0	-4.7	-1.2
	標準偏差	2.3	2.7	2.2	2.9	2.4	3.0	5.9	2.7
	最大偏差	6.4	6.8	6.5	-11.1	-8.7	-9.6	-13.2	-9.0
5	平均偏差	1.3	2.6	1.4	0.4	0.5	-0.2	-2.6	-1.1
	標準偏差	2.2	3.4	2.3	2.4	2.2	1.9	3.8	3.0
	最大偏差	-6.8	8.3	7.9	7.3	-8.0	-11.5	-14.8	-10.3
6	平均偏差	0.3	2.2	1.5	1.1	0.8	0.3	-3.1	-1.8
	標準偏差	1.7	3.2	2.3	3.3	2.6	1.8	4.2	3.2
	最大偏差	5.6	11.1	6.4	11.8	11.8	6.4	-11.9	-10.1
7	平均偏差	0.7	2.3	2.1	0.6	0.6	-0.2	-2.5	-1.2
	標準偏差	2.0	3.6	3.4	3.0	2.9	2.4	3.8	2.8
	最大偏差	7.0	13.4	18.7	9.6	9.2	12.3	-17.3	-8.7
8	平均偏差	0.7	1.3	0.9	0.7	0.6	0.0	-1.9	-0.9
	標準偏差	1.8	2.9	1.9	2.9	2.6	1.7	3.0	2.4
	最大偏差	7.6	10.8	7.3	10.9	11.1	6.3	-12.9	-10.0
9	平均偏差	0.8	1.5	1.4	-0.2	0.3	-0.5	-2.5	1.2
	標準偏差	1.9	2.8	2.3	3.0	2.7	2.1	4.0	2.1
	最大偏差	9.4	21.4	12.8	12.7	11.3	-7.6	-15.4	9.9
10	平均偏差	0.8	3.1	4.1	0.0	0.3	-1.3	-5.9	2.0
	標準偏差	1.9	3.5	5.0	2.5	2.3	2.4	7.2	2.4
	最大偏差	6.2	7.5	10.9	-6.6	7.6	-6.4	-13.6	5.4

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：m/s。



表 7.2 2014 年主要商港觀測及 WA01 預報風向偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	39.8	89.6	78.2	64.5	30.3	30.9	24.3	50.3
	標準偏差	60.7	101.2	91.5	76.6	42.8	43.9	37.9	65.3
	最大偏差	179.9	179.8	179.7	179.3	166.4	177.7	175.0	179.3
2	平均偏差	41.7	73.8	76.6	65.6	43.2	44.1	32.0	54.7
	標準偏差	64.2	87.9	93.2	80.2	57.5	63.2	49.0	72.6
	最大偏差	180.0	179.6	179.8	177.2	179.9	179.8	177.7	179.9
3	平均偏差	40.0	77.2	90.1	81.9	46.7	46.2	35.4	74.6
	標準偏差	60.2	92.6	104.3	95.8	62.0	64.0	55.1	92.7
	最大偏差	179.3	177.1	179.5	179.0	179.3	179.7	179.9	179.8
4	平均偏差	46.1	83.6	104.3	85.3	51.1	43.9	29.5	59.4
	標準偏差	66.4	99.6	117.6	101.6	66.5	60.9	44.0	74.7
	最大偏差	179.6	180.0	179.7	179.9	177.6	177.9	177.7	179.5
5	平均偏差	63.6	97.3	103.4	73.1	49.4	39.3	37.9	89.0
	標準偏差	80.7	111.2	115.4	89.5	63.8	55.7	59.3	102.0
	最大偏差	178.3	179.8	179.8	179.9	178.6	179.2	179.9	179.9
6	平均偏差	62.8	74.4	74.3	57.6	46.7	36.2	25.2	79.4
	標準偏差	81.4	94.1	89.3	79.1	58.6	48.5	41.6	94.4
	最大偏差	179.7	179.8	179.3	179.0	178.1	174.8	179.4	180.0
7	平均偏差	48.3	51.8	81.6	59.0	57.7	45.7	34.7	41.1
	標準偏差	68.0	72.3	97.3	75.8	72.9	63.6	55.5	58.7
	最大偏差	179.2	179.2	179.6	179.5	179.8	179.8	179.9	178.4
8	平均偏差	62.3	59.7	98.8	73.7	56.2	44.3	31.0	48.3
	標準偏差	79.1	78.8	112.3	89.0	72.8	61.6	47.3	64.2
	最大偏差	179.9	179.2	179.9	179.8	179.9	179.4	174.4	178.6
9	平均偏差	46.3	74.5	110.2	66.8	60.7	59.7	35.6	38.3
	標準偏差	64.7	91.5	120.2	84.3	76.0	80.5	52.6	53.6
	最大偏差	179.5	179.8	179.7	178.9	179.8	179.1	179.6	177.9
10	平均偏差	23.9	73.7	93.9	75.8	35.9	35.0	19.1	28.8
	標準偏差	41.9	90.1	107.7	90.7	46.6	46.6	30.0	41.9
	最大偏差	173.7	179.8	179.8	179.6	171.9	176.8	160.6	177.5

[註]：偏差=預報值-觀測值，單位為度，偏差大小範圍為 0-180 度。

表 7.3 2014 年主要商港觀測及 WA02 預報風速偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	1.5	0.7	2.3	-1.0	-1.2	-1.5	-5.3	2.7
	標準偏差	2.5	2.0	3.4	2.4	2.3	2.6	6.7	3.2
	最大偏差	6.4	-5.5	9.6	-8.7	-7.2	-8.3	-16.9	7.7
2	平均偏差	1.4	1.0	1.8	-1.1	-1.5	-1.9	-5.5	-1.8
	標準偏差	2.5	2.4	3.0	2.5	2.4	2.9	6.6	3.2
	最大偏差	8.0	-6.7	7.7	-8.1	-8.1	-10.3	-13.2	-7.4
3	平均偏差	1.4	0.7	1.6	-1.0	-1.0	-1.5	-4.1	-1.2
	標準偏差	2.3	2.0	2.7	2.4	2.2	2.6	5.7	2.8
	最大偏差	6.5	6.8	7.8	-9.9	-11.2	-13.6	-14.3	-9.3
4	平均偏差	1.2	0.5	0.8	-1.5	-1.0	-1.6	-3.7	-1.2
	標準偏差	2.0	2.0	2.3	2.5	2.1	2.7	5.0	2.6
	最大偏差	6.6	7.1	8.2	-11.0	-10.0	-11.0	-11.6	-10.1
5	平均偏差	1.1	0.7	1.1	-0.6	0.6	0.0	-1.3	-0.6
	標準偏差	2.0	1.8	2.4	1.9	1.9	1.9	2.7	2.6
	最大偏差	-6.3	-7.4	11.1	-7.5	-6.4	-10.4	-8.1	-8.1
6	平均偏差	0.3	0.3	0.9	-0.9	-0.1	0.0	-1.7	-1.2
	標準偏差	1.7	2.1	2.4	2.1	2.0	1.7	2.9	2.6
	最大偏差	8.3	6.8	8.0	-6.9	-8.2	-5.8	-9.4	-9.0
7	平均偏差	0.6	0.8	1.6	-1.0	0.0	-0.6	-1.6	-0.8
	標準偏差	2.0	2.6	3.2	2.6	2.2	2.2	3.0	2.6
	最大偏差	6.9	9.8	23.8	-12.5	-11.9	-11.2	-14.9	10.2
8	平均偏差	0.7	0.1	0.3	-0.9	0.2	-0.4	-1.1	-0.3
	標準偏差	1.6	2.2	1.9	2.5	2.3	1.7	2.2	2.0
	最大偏差	5.8	6.3	7.0	-8.1	8.9	-6.4	-7.9	-9.4
9	平均偏差	1.0	0.0	0.5	-1.3	0.1	-0.6	-1.5	1.8
	標準偏差	2.0	2.1	2.0	2.4	2.0	1.9	3.1	2.4
	最大偏差	8.1	13.9	11.6	-8.2	11.3	-9.0	-13.2	11.6
10	平均偏差	1.0	1.4	3.4	-1.3	-0.5	-1.8	-3.0	2.6
	標準偏差	2.0	2.1	4.8	2.2	1.9	2.4	4.1	3.0
	最大偏差	5.8	6.4	11.1	-6.5	-7.0	-5.9	-9.8	8.5

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：m/s。

表 7.4 2014 年主要商港觀測及 WA02 預報風向偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	36.3	70.2	42.6	37.0	35.6	24.2	26.3	58.0
	標準偏差	56.4	83.8	58.0	51.0	42.2	35.6	44.1	73.8
	最大偏差	179.5	179.6	173.9	179.2	162.5	162.4	174.8	178.5
2	平均偏差	38.1	62.4	51.1	42.7	39.6	29.6	27.4	56.6
	標準偏差	60.8	78.6	69.4	57.9	50.1	44.5	42.8	72.8
	最大偏差	179.5	177.5	180.0	177.9	180.0	179.0	167.8	179.9
3	平均偏差	37.2	70.1	78.1	56.1	51.2	42.4	34.0	71.1
	標準偏差	57.7	86.7	94.0	73.4	63.6	62.1	53.9	87.5
	最大偏差	179.4	179.6	180.0	179.7	179.4	177.8	179.8	179.2
4	平均偏差	45.1	71.9	86.3	57.2	42.7	36.4	33.6	61.3
	標準偏差	65.2	89.5	100.3	74.8	54.6	51.5	53.6	76.9
	最大偏差	179.7	179.9	178.6	179.4	179.7	179.5	179.0	179.9
5	平均偏差	62.3	90.7	89.1	61.1	49.4	39.4	38.5	90.7
	標準偏差	79.7	104.6	102.1	78.3	64.2	58.3	61.3	104.3
	最大偏差	178.9	179.3	179.9	179.9	179.9	178.4	179.3	179.8
6	平均偏差	57.2	67.7	82.7	50.8	44.9	35.6	24.0	75.7
	標準偏差	75.9	86.2	98.8	69.3	55.8	49.4	41.6	92.9
	最大偏差	179.9	179.7	179.8	179.7	179.1	179.6	178.5	179.8
7	平均偏差	41.1	48.4	84.8	49.2	54.4	38.5	28.1	40.3
	標準偏差	59.3	70.6	99.5	66.7	68.9	54.7	46.3	58.4
	最大偏差	179.9	179.5	179.5	178.1	178.1	178.9	178.1	179.7
8	平均偏差	55.7	53.0	95.0	62.1	56.2	42.4	27.2	40.7
	標準偏差	73.0	72.0	107.9	79.4	72.2	60.4	40.8	56.8
	最大偏差	179.6	179.7	179.8	179.4	179.0	179.8	167.4	179.8
9	平均偏差	44.7	62.8	99.3	53.1	55.1	54.8	30.3	33.7
	標準偏差	62.0	81.5	110.5	72.2	70.3	74.4	47.2	49.2
	最大偏差	179.6	179.9	179.4	179.7	178.9	179.8	177.9	178.5
10	平均偏差	23.3	66.6	86.1	50.3	38.8	33.5	12.8	27.6
	標準偏差	40.5	86.1	99.8	68.0	54.0	43.9	25.6	40.7
	最大偏差	179.0	179.9	179.7	179.9	179.6	175.0	166.3	179.4

[註]：偏差=預報值-觀測值，單位為度，偏差大小範圍為 0-180 度。

## 7.2 風浪模擬成果評估

風浪模擬包括 SWAN 模式與 WAM 模式，相同於風場預報模式之方式，本計畫將風浪模式的預報值與觀測值之間的偏差進行統計分析以作為評估的標準。表 7.5 與表 7.7 分別為統計本年度(2014 年)1~10 月國內各主要商港 SWAN 模式預報示性波高、示性波向與示性週期的偏差統計值，表 7.5 顯示 SWAN 模式以南部的安平港、高雄港示性波高預報效果較佳，除了夏季的 6、7 月預報標準偏差較大介於 0.43~0.50m 之間，其餘月份均在 0.3 m 以下；北部的基隆港、臺北港及東部的花蓮港、蘇澳港在東北季風時期的 10 月示性波高預報標準偏差較大介於 0.65~0.82m 之間，春季時標準偏差則較小。示性波向則以東北季風時期(1~3 月及 10 月)北部的基隆港、臺北港的預報標準偏差較小，介於 21.7~37.9 度之間，其餘各商港預報示性波向標準偏差多介於 40~60 度之間。示性週期以冬季時(1、2 月)北部的基隆港與臺北港之預報較佳，標準偏差在 2 sec 以下，其餘時期各商港預報之標準偏差多在 2~4.5sec 之間。

表 7.8 與表 7.10 分別為統計本年度 1~10 月國內各主要商港 WAM 模式預報示性波高、示性波向與示性週期的偏差統計值，WAM 模式對於南部的高雄港示性波高預報值較佳，除了 6、7、9 月預報之標準偏差較大在 0.50~0.69m 之間，其餘月份均在 0.3 m 以下；其他各商港預報之標準偏差多在 0.3 m 以上，尤其以東北季風時期的 9、10 月示性波高預報標準偏差較大，介於 0.53~1.51m 之間。波向的預報則以東北季風時期(1 月及 10 月)北部的基隆港、臺北港與中部臺中港標準偏差較小，介於 13.8~40 度之間，春季時反而標準偏差較大；其餘預報示性波向之標準偏差多在 40 度以上。WAM 模式對於各商港示性週期的預報，其標準偏差多在 3 sec 以下。

表 7.5 2014 年主要商港觀測及 SWAN 預報示性波高偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	0.00	0.20	0.07	-	0.06	-	-	-0.18
	標準偏差	0.51	0.57	0.44	-	0.25	-	-	0.41
	最大偏差	-2.00	2.33	1.66	-	0.80	-	-	-1.26
2	平均偏差	-0.30	-0.09	-0.16	-	0.06	-	-	-0.36
	標準偏差	0.67	0.41	0.38	-	0.23	-	-	0.59
	最大偏差	2.51	-1.06	-2.53	-	0.79	-	-	-2.15
3	平均偏差	-0.12	-0.15	-0.17	-0.20	-	-	-	-0.22
	標準偏差	0.56	0.49	0.44	0.22	-	-	-	0.46
	最大偏差	2.07	1.36	1.98	-0.49	-	-	-	-1.75
4	平均偏差	0.04	-0.08	-0.10	-0.16	-	-	-	-0.04
	標準偏差	0.40	0.36	0.34	0.23	-	-	-	0.39
	最大偏差	-1.23	0.97	1.04	-0.47	-	-	-	-1.33
5	平均偏差	0.15	0.01	0.02	0.02	0.12	-	-	0.09
	標準偏差	0.34	0.30	0.30	0.19	0.20	-	-	0.33
	最大偏差	1.70	-1.12	1.43	0.65	0.84	-	-	2.46
6	平均偏差	0.16	0.10	0.16	-0.24	-0.17	-	0.23	0.10
	標準偏差	0.43	0.42	0.45	0.46	0.43	-	0.44	0.32
	最大偏差	2.52	2.34	2.70	-2.17	-2.19	-	-1.60	1.24
7	平均偏差	0.39	0.04	0.24	-0.22	-0.12	-	-	0.28
	標準偏差	0.79	1.04	0.90	0.49	0.50	-	-	0.64
	最大偏差	3.47	-6.45	3.67	2.59	3.53	-	-	3.27
8	平均偏差	0.38	0.31	0.18	-0.15	-0.07	-	0.01	0.21
	標準偏差	0.82	0.85	0.69	0.31	0.28	-	0.37	0.53
	最大偏差	2.63	2.98	2.04	1.31	1.74	-	-2.43	1.56
9	平均偏差	0.18	-0.20	-0.14	-0.32	-0.17	-	-0.31	-0.07
	標準偏差	0.43	0.68	0.57	0.54	0.39	-	0.63	0.46
	最大偏差	1.27	3.20	2.88	-2.29	-2.08	-	-3.32	-3.00
10	平均偏差	-0.11	-0.14	-0.04	-0.10	0.14	-	-0.17	-0.45
	標準偏差	0.77	0.82	0.65	0.22	0.24	-	0.38	0.80
	最大偏差	-3.57	-3.80	-3.24	1.00	0.79	-	1.73	-3.34

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位為 m。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.6 2014 年主要商港觀測及 SWAN 預報示性波向偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	22.0	45.4	38.4	-	43.1	-	-	23.4
	標準偏差	27.9	49.7	40.4	-	54.2	-	-	33.6
	最大偏差	142.7	138.4	77.3	-	178.7	-	-	166.7
2	平均偏差	16.3	44.5	37.4	-	45.7	-	-	19.5
	標準偏差	21.7	50.4	41.0	-	56.4	-	-	27.5
	最大偏差	167.9	139.5	91.4	-	174.2	-	-	176.4
3	平均偏差	25.1	33.1	28.7	63.9	-	-	-	26.7
	標準偏差	34.7	41.4	33.3	78.3	-	-	-	37.9
	最大偏差	163.6	178.9	116.9	152.1	-	-	-	177.2
4	平均偏差	153.8	36.1	29.1	38.1	-	-	-	23.5
	標準偏差	156.6	45.3	33.2	49.9	-	-	-	31.3
	最大偏差	179.9	173.4	89.4	139.1	-	-	-	171.4
5	平均偏差	45.0	33.4	30.1	36.8	41.6	-	-	30.4
	標準偏差	65.5	43.1	35.8	48.3	47.3	-	-	42.3
	最大偏差	179.9	176.7	174.2	174.8	170.2	-	-	171.4
6	平均偏差	26.7	35.9	25.5	22.3	40.2	-	56.3	24.4
	標準偏差	35.8	46.1	32.3	32.0	44.6	-	78.2	32.6
	最大偏差	121.4	176.6	94.0	122.2	125.3	-	179.5	133.5
7	平均偏差	37.8	36.2	33.5	29.7	29.2	-	-	50.2
	標準偏差	46.7	44.0	38.0	39.1	34.4	-	-	67.8
	最大偏差	161.0	135.9	131.8	140.8	127.0	-	-	179.7
8	平均偏差	43.4	31.9	32.9	26.8	29.9	-	55.9	39.1
	標準偏差	55.2	37.7	38.3	37.5	37.7	-	65.9	53.2
	最大偏差	175.4	115.1	82.8	151.0	171.2	-	169.9	178.2
9	平均偏差	34.2	48.8	39.1	29.9	23.8	-	37.2	41.2
	標準偏差	42.5	56.9	44.5	39.9	32.4	-	51.9	55.4
	最大偏差	175.5	150.9	125.6	151.5	151.8	-	170.7	178.3
10	平均偏差	19.1	74.6	41.6	33.6	16.1	-	9.0	24.2
	標準偏差	22.0	89.7	43.3	44.9	21.0	-	11.8	32.9
	最大偏差	51.8	179.8	93.8	145.5	76.9	-	40.4	171.1

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位為度，偏差大小範圍為 0-180 度。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.7 2014 年主要商港觀測及 SWAN 預報示性週期偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	-0.8	-1.6	-1.5	-	-3.5	-	-	-1.1
	標準偏差	1.5	2.1	2.0	-	3.9	-	-	1.9
	最大偏差	-5.8	-5.4	-4.7	-	-7.1	-	-	-5.0
2	平均偏差	-1.2	-1.8	-2.0	-	-3.0	-	-	-1.2
	標準偏差	1.9	2.3	2.4	-	3.4	-	-	1.8
	最大偏差	-5.2	-5.6	-5.7	-	-7.2	-	-	-5.8
3	平均偏差	-1.1	-2.4	-2.7	-3.1	-	-	-	-1.7
	標準偏差	1.8	2.9	3.1	3.7	-	-	-	2.4
	最大偏差	-7.6	-6.8	-7.2	-8.0	-	-	-	-6.1
4	平均偏差	-1.3	-2.5	-2.7	-1.4	-	-	-	-0.3
	標準偏差	2.2	3.2	3.3	2.1	-	-	-	1.9
	最大偏差	-7.5	-7.7	-7.6	-9.7	-	-	-	-7.2
5	平均偏差	-1.0	-1.5	-1.6	-0.8	-0.8	-	-	-0.1
	標準偏差	2.1	2.3	2.3	1.7	1.7	-	-	1.7
	最大偏差	-7.9	-8.9	-5.8	-9.2	-6.4	-	-	-6.5
6	平均偏差	-1.0	-1.0	-1.3	-1.1	-1.2	-	-2.0	0.3
	標準偏差	2.5	2.0	2.2	2.2	2.1	-	2.5	1.7
	最大偏差	-7.9	-5.8	6.1	-7.0	-8.0	-	-6.8	-6.5
7	平均偏差	-0.3	-1.7	-1.3	-1.9	-2.0	-	-	-0.1
	標準偏差	3.3	3.8	3.5	3.2	2.9	-	-	3.8
	最大偏差	11.0	-13.4	-14.1	-12.1	-7.7	-	-	12.5
8	平均偏差	-1.4	-1.7	-2.5	-1.2	-1.0	-	-0.3	0.0
	標準偏差	3.6	3.3	4.5	1.8	1.9	-	4.4	3.6
	最大偏差	-9.8	-9.9	-9.8	-9.5	5.9	-	-16.0	13.3
9	平均偏差	-1.7	-2.9	-3.2	-2.2	-2.0	-	-1.6	-0.6
	標準偏差	3.1	4.1	4.0	3.2	2.8	-	2.6	2.8
	最大偏差	-9.3	-9.4	-9.5	-10.8	-8.1	-	-9.4	8.8
10	平均偏差	-1.8	-2.0	-2.3	-2.2	-1.8	-	-1.1	-1.7
	標準偏差	3.1	3.5	3.6	3.2	2.5	-	2.0	2.8
	最大偏差	-9.2	-12.2	-11.1	-11.6	13.2	-	-10.0	-8.8

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：sec。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.8 2014 年主要商港觀測及 WAM 預報示性波高偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	-0.37	-0.16	-0.39	-	0.32	-	-	-0.38
	標準偏差	0.62	0.45	0.47	-	0.46	-	-	0.53
	最大偏差	-2.65	1.80	-1.49	-	1.19	-	-	-1.82
2	平均偏差	-0.67	-0.31	-0.46	-	0.26	-	-	-0.69
	標準偏差	1.02	0.42	0.53	-	0.39	-	-	0.87
	最大偏差	-2.78	-1.06	-2.53	-	1.21	-	-	-2.54
3	平均偏差	-0.30	-0.31	-0.42	-0.14	-	-	-	-0.37
	標準偏差	0.69	0.52	0.53	0.18	-	-	-	0.65
	最大偏差	-3.01	1.43	-1.46	-0.53	-	-	-	-2.62
4	平均偏差	-0.14	-0.15	-0.21	-0.15	-	-	-	-0.25
	標準偏差	0.41	0.32	0.31	0.22	-	-	-	0.45
	最大偏差	-1.59	-1.10	-1.08	-0.53	-	-	-	-1.65
5	平均偏差	0.14	0.17	0.12	-0.01	0.26	-	-	0.06
	標準偏差	0.35	0.36	0.30	0.18	0.41	-	-	0.35
	最大偏差	-2.73	1.81	1.50	0.70	2.43	-	-	-2.64
6	平均偏差	0.26	0.36	0.43	0.01	0.34	-	0.38	0.11
	標準偏差	0.46	0.65	0.73	0.56	0.75	-	0.56	0.35
	最大偏差	1.46	2.94	3.23	3.10	3.22	-	1.60	1.48
7	平均偏差	0.66	0.35	0.47	0.07	0.30	-	-	0.25
	標準偏差	1.12	0.98	1.01	0.50	0.72	-	-	0.54
	最大偏差	5.07	3.94	4.66	4.12	4.89	-	-	2.59
8	平均偏差	0.56	0.32	0.24	-0.21	-0.05	-	0.12	0.19
	標準偏差	1.00	0.87	0.90	0.31	0.26	-	0.39	0.40
	最大偏差	3.11	2.89	2.98	-1.07	-1.31	-	-2.51	1.69
9	平均偏差	0.32	0.36	0.46	0.01	0.39	-	-0.07	0.09
	標準偏差	0.86	1.42	1.47	0.69	1.02	-	0.71	1.03
	最大偏差	5.64	12.52	12.99	2.48	5.68	-	4.24	7.90
10	平均偏差	0.45	0.53	0.55	0.05	1.35	-	-0.18	-0.02
	標準偏差	1.02	1.04	0.96	0.29	1.51	-	0.54	0.53
	最大偏差	3.75	3.41	3.86	1.53	3.06	-	-1.87	2.20

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位為 m。

“-”：表示無觀測資料。



表 7.9 2014 年主要商港觀測及 WAM 預報示性波向偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	19.2	58.5	43.2	-	83.8	-	-	24.6
	標準偏差	26.3	61.8	45.5	-	88.1	-	-	33.6
	最大偏差	109.1	151.1	97.2	-	179.3	-	-	134.3
2	平均偏差	29.6	42.8	33.3	-	87.5	-	-	36.6
	標準偏差	39.7	45.5	36.5	-	92.6	-	-	52.7
	最大偏差	169.6	87.9	91.7	-	179.6	-	-	177.7
3	平均偏差	36.2	42.0	34.3	56.9	-	-	-	37.3
	標準偏差	52.7	46.8	39.7	65.3	-	-	-	51.0
	最大偏差	179.8	100.4	141.9	103.2	-	-	-	145.6
4	平均偏差	149.1	37.4	28.5	111.0	-	-	-	34.9
	標準偏差	153.4	42.9	33.9	116.4	-	-	-	50.0
	最大偏差	180.0	136.3	92.1	175.9	-	-	-	170.2
5	平均偏差	52.2	28.0	29.0	42.0	47.1	-	-	62.4
	標準偏差	69.9	35.0	34.4	60.7	55.7	-	-	74.0
	最大偏差	178.8	129.8	89.4	179.4	179.1	-	-	177.6
6	平均偏差	49.5	37.1	32.3	26.6	47.7	-	66.8	36.5
	標準偏差	63.6	45.4	37.6	47.0	57.6	-	85.5	47.5
	最大偏差	179.5	172.7	104.8	152.4	177.1	-	177.6	171.1
7	平均偏差	58.5	41.5	31.5	25.1	44.8	-	-	56.4
	標準偏差	67.5	54.2	36.6	37.4	53.8	-	-	72.2
	最大偏差	175.7	179.6	135.8	177.0	177.6	-	-	180.0
8	平均偏差	50.4	40.6	41.1	28.2	41.6	-	60.8	64.1
	標準偏差	63.8	52.7	49.7	40.1	57.4	-	68.5	78.4
	最大偏差	179.1	179.2	102.8	157.2	179.7	-	179.5	179.1
9	平均偏差	50.8	36.0	32.4	37.9	56.7	-	59.3	50.6
	標準偏差	67.0	42.1	36.7	47.0	64.0	-	82.6	66.5
	最大偏差	179.7	140.3	75.6	143.7	173.9	-	178.8	179.7
10	平均偏差	18.9	77.3	47.2	80.7	65.3	-	11.9	29.3
	標準偏差	23.8	88.7	50.0	90.2	66.6	-	13.8	40.0
	最大偏差	68.1	178.7	79.6	179.8	143.9	-	33.6	179.8

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位為度，偏差大小範圍為 0-180 度。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.10 2014 年主要商港觀測及 WAM 預報示性週期偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	-1.4	-2.2	-1.9	-	-1.2	-	-	-0.7
	標準偏差	1.8	2.5	2.3	-	2.2	-	-	1.4
	最大偏差	-6.5	-5.6	-5.3	-	-5.9	-	-	-4.3
2	平均偏差	-1.4	-2.0	-1.9	-	-0.7	-	-	-1.2
	標準偏差	1.8	2.3	2.2	-	2.0	-	-	1.9
	最大偏差	-5.7	-5.8	-6.0	-	-6.5	-	-	-5.6
3	平均偏差	-1.1	-2.0	-2.1	-2.4	-	-	-	-0.8
	標準偏差	1.7	2.3	2.4	3.2	-	-	-	1.6
	最大偏差	-7.8	-6.5	-6.2	-7.5	-	-	-	-5.4
4	平均偏差	-1.0	-1.9	-2.1	-0.2	-	-	-	0.0
	標準偏差	2.0	2.7	2.8	1.6	-	-	-	1.7
	最大偏差	-6.5	-6.8	-6.1	-8.1	-	-	-	-6.3
5	平均偏差	-0.7	-0.9	-1.0	-0.1	0.2	-	-	0.4
	標準偏差	1.6	1.9	1.9	1.6	1.1	-	-	1.5
	最大偏差	-6.6	-7.3	-6.5	-8.2	5.2	-	-	-6.4
6	平均偏差	-0.1	0.0	-0.3	0.1	0.4	-	-0.1	0.5
	標準偏差	1.6	1.5	1.7	1.4	1.1	-	1.9	1.6
	最大偏差	-5.7	6.7	-5.4	-7.0	3.6	-	6.1	6.5
7	平均偏差	1.0	-0.3	-0.1	0.2	0.2	-	-	1.7
	標準偏差	3.4	2.8	3.1	2.3	1.4	-	-	3.2
	最大偏差	14.2	-10.1	11.5	-13.1	6.7	-	-	13.8
8	平均偏差	0.2	-0.6	-1.5	-0.3	-0.1	-	0.8	1.0
	標準偏差	2.8	3.1	4.2	1.1	1.0	-	2.8	3.1
	最大偏差	9.8	-8.9	10.0	-7.6	-3.9	-	-14.9	12.0
9	平均偏差	-0.2	-1.1	-1.1	-0.3	0.4	-	0.0	-0.2
	標準偏差	2.9	2.8	2.8	2.3	2.6	-	2.1	2.0
	最大偏差	11.8	-7.2	-7.8	9.4	11.3	-	10.6	11.0
10	平均偏差	0.3	-0.9	-0.5	0.7	1.8	-	0.5	0.6
	標準偏差	2.3	2.3	2.0	2.5	2.6	-	2.1	1.8
	最大偏差	9.8	-9.2	-8.2	-10.7	15.4	-	9.2	-8.5

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：sec。

“-”：表示無觀測資料。

### 7.3 水位與流場模擬成果評估

目前已作業化的水動力模組分為中尺度模式及小尺度模式，中尺度模式包括除了布袋港以外的七個主要商港，小尺度模式則包括基隆港、臺北港、臺中港及布袋港，其中布袋港本年度無觀測資料可供作業化評估。在流場的評估方面，表 7.11 與表 7.12 分別為 2014 年 1~10 月主要商港觀測及中尺度預報流速與流向偏差之統計。中尺度預報流速以蘇澳港、花蓮港、高雄港及安平港較佳，標準偏差多數在 20cm/s 以下，基隆港預報流速標準偏差較大，介於 30.1~37.2cm/s 之間；預報流向以臺北港之標準偏差較小，介於 50~70 度之間，基隆港則介於 90~100 度之間，其餘各商港預報流向之標準偏差多在 100~110 度之間。表 7.13 與表 7.14 分別為本年度 1~10 月基隆港、臺北港、臺中港觀測及小尺度預報流速與流向偏差之統計值，顯示小尺度預報結果與中尺度相同。

在水位評估方面，表 7.15 與表 7.16 分別為本年度 1~10 月中尺度與小尺度預報水位偏差統計表，中尺度預報水位以臺北港及臺中港之標準偏差較大，介於 0.12~0.27m 之間，其餘各商港預報水位標準偏差多在 0.11m 以下。基隆港、臺北港、臺中港小尺度預報水位標準偏差則介於 0.09~0.23m 之間。

表 7.11 2014 年主要商港觀測及中尺度預報流速偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	15.3	3.3	-17.3	-	-4.1	-	-	-2.2
	標準偏差	35.0	14.2	20.3	-	16.6	-	-	21.6
	最大偏差	86.3	47.5	-76.4	-	41.6	-	-	-64.6
2	平均偏差	12.9	2.2	-17.4	-	-5.8	-	-	-2.2
	標準偏差	34.9	14.2	20.9	-	18.0	-	-	20.8
	最大偏差	-90.8	-53.0	-83.0	-	-62.8	-	-	-62.6
3	平均偏差	17.8	2.9	-16.1	-1.8	-	-	-	-2.6
	標準偏差	37.2	14.7	19.1	8.7	-	-	-	20.6
	最大偏差	-100.7	-60.5	-61.9	-17.6	-	-	-	-72.0
4	平均偏差	12.7	1.9	-16.0	-9.9	9.9	-	-	-2.3
	標準偏差	34.2	13.3	19.5	14.3	19.2	-	-	19.2
	最大偏差	-102.9	-50.0	-67.9	-45.3	36.5	-	-	-55.6
5	平均偏差	10.3	3.6	-15.8	-12.6	9.3	-	-	-2.0
	標準偏差	31.4	12.5	19.6	17.2	17.1	-	-	18.3
	最大偏差	-78.6	-49.5	-57.9	-53.5	40.8	-	-	-52.5
6	平均偏差	8.1	2.1	-26.2	-10.5	2.3	-	-28.8	-5.2
	標準偏差	30.1	13.1	31.4	15.3	16.1	-	33.3	24.4
	最大偏差	88.0	47.7	-81.7	-54.5	-66.7	-	-80.6	-99.1
7	平均偏差	9.9	1.2	-18.7	-18.1	-6.9	-	-	-6.6
	標準偏差	32.4	16.5	23.2	24.0	19.4	-	-	29.0
	最大偏差	76.3	72.3	-148.3	-79.8	-112.6	-	-	-118.3
8	平均偏差	19.7	0.9	-15.5	-20.8	-7.0	-	-31.0	3.8
	標準偏差	33.9	13.8	18.6	26.3	17.9	-	36.1	26.5
	最大偏差	89.5	-52.0	-67.5	-73.6	-55.1	-	-146.3	-112.8
9	平均偏差	19.1	3.1	-17.0	-22.5	-5.6	-	-20.1	-3.6
	標準偏差	33.4	14.8	21.2	28.5	17.4	-	24.7	28.8
	最大偏差	87.5	56.5	-73.6	-80.4	-99.8	-	-73.8	-102.7
10	平均偏差	9.6	1.9	-14.1	-16.5	-4.9	-	-25.9	-8.5
	標準偏差	33.9	13.3	17.3	21.1	15.5	-	31.3	28.4
	最大偏差	85.2	-38.7	-67.4	-66.9	-53.8	-	-70.7	-98.7

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：cm/sec。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.12 2014 年主要商港觀測及中尺度預報流向偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	81.6	97.0	86.4	-	89.4	-	-	30.7
	標準偏差	95.0	112.7	102.8	-	105.3	-	-	54.3
	最大偏差	179.8	179.9	179.9	-	179.3	-	-	180.0
2	平均偏差	83.6	98.3	85.8	-	90.4	-	-	34.4
	標準偏差	96.8	114.0	102.9	-	106.1	-	-	56.9
	最大偏差	179.5	180.0	179.8	-	179.7	-	-	176.1
3	平均偏差	83.1	96.6	89.6	82.6	-	-	-	31.8
	標準偏差	96.5	113.2	105.5	94.6	-	-	-	55.8
	最大偏差	180.0	180.0	179.5	175.2	-	-	-	179.5
4	平均偏差	79.4	95.7	99.0	83.6	84.4	-	-	27.7
	標準偏差	93.3	111.3	110.7	102.8	99.7	-	-	50.0
	最大偏差	179.6	179.8	180.0	179.9	165.6	-	-	178.9
5	平均偏差	81.8	95.2	98.3	99.0	72.8	-	-	33.5
	標準偏差	94.5	111.7	111.5	115.9	88.6	-	-	56.8
	最大偏差	178.6	179.9	180.0	179.8	179.5	-	-	179.9
6	平均偏差	81.5	91.2	95.9	95.3	58.9	-	64.0	43.9
	標準偏差	93.4	106.9	110.9	112.3	80.7	-	80.1	65.0
	最大偏差	179.9	179.8	180.0	179.8	179.4	-	179.5	179.9
7	平均偏差	81.1	89.6	96.0	87.5	44.1	-	-	47.4
	標準偏差	94.2	106.6	108.9	107.3	63.4	-	-	68.3
	最大偏差	179.7	179.9	179.9	179.6	179.3	-	-	177.5
8	平均偏差	78.1	91.3	89.7	92.9	45.2	-	71.5	49.6
	標準偏差	92.7	107.4	104.0	110.2	64.0	-	87.2	69.6
	最大偏差	179.7	179.8	180.0	179.7	179.6	-	179.9	179.4
9	平均偏差	73.9	89.4	101.7	97.4	44.0	-	69.6	41.2
	標準偏差	87.0	106.2	114.9	114.6	61.3	-	85.6	63.1
	最大偏差	179.8	180.0	180.0	179.9	174.3	-	180.0	177.6
10	平均偏差	78.5	96.8	85.0	84.0	56.6	-	43.2	37.5
	標準偏差	91.7	112.4	103.4	102.8	73.3	-	55.6	60.2
	最大偏差	178.9	180.0	179.9	179.7	179.8	-	178.3	177.0

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位為度，偏差大小範圍為 0-180 度。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.13 2014 年主要商港觀測及小尺度預報流速偏差統計表

月份	方法	基隆港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	15.3	-	-2.2
	標準偏差	35.0	-	21.6
	最大偏差	86.3	-	-64.6
2	平均偏差	12.9	-	-2.2
	標準偏差	34.9	-	20.8
	最大偏差	-90.8	-	-62.6
3	平均偏差	17.8	-	-2.6
	標準偏差	37.2	-	20.6
	最大偏差	-100.7	-	-72.0
4	平均偏差	12.7	-	-2.3
	標準偏差	34.2	-	19.2
	最大偏差	-102.9	-	-55.6
5	平均偏差	10.3	-	-2.0
	標準偏差	31.4	-	18.3
	最大偏差	-78.6	-	-52.5
6	平均偏差	8.1	-28.8	-5.2
	標準偏差	30.1	33.3	24.4
	最大偏差	88.0	-80.6	-99.1
7	平均偏差	9.9	-	-6.6
	標準偏差	32.4	-	29.0
	最大偏差	76.3	-	-118.3
8	平均偏差	19.7	-31.0	3.8
	標準偏差	33.9	36.1	26.5
	最大偏差	89.5	-146.3	-112.8
9	平均偏差	19.1	-20.1	-3.6
	標準偏差	33.4	24.7	28.8
	最大偏差	87.5	-73.8	-102.7
10	平均偏差	9.6	-25.9	-8.5
	標準偏差	33.9	31.3	28.4
	最大偏差	85.2	-70.7	-98.7

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：cm/sec。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.14 2014 年主要商港觀測及小尺度預報流向偏差統計表

月份	方法	基隆港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	81.6	-	30.7
	標準偏差	95.0	-	54.3
	最大偏差	179.8	-	180.0
2	平均偏差	83.6	-	34.4
	標準偏差	96.8	-	56.9
	最大偏差	179.5	-	176.1
3	平均偏差	83.1	-	31.8
	標準偏差	96.5	-	55.8
	最大偏差	180.0	-	179.5
4	平均偏差	79.4	-	27.7
	標準偏差	93.3	-	50.0
	最大偏差	179.6	-	178.9
5	平均偏差	81.8	-	33.5
	標準偏差	94.5	-	56.8
	最大偏差	178.6	-	179.9
6	平均偏差	81.5	64.0	43.9
	標準偏差	93.4	80.1	65.0
	最大偏差	179.9	179.5	179.9
7	平均偏差	81.1	-	47.4
	標準偏差	94.2	-	68.3
	最大偏差	179.7	-	177.5
8	平均偏差	78.1	71.5	49.6
	標準偏差	92.7	87.2	69.6
	最大偏差	179.7	179.9	179.4
9	平均偏差	73.9	69.6	41.2
	標準偏差	87.0	85.6	63.1
	最大偏差	179.8	180.0	177.6
10	平均偏差	78.5	43.2	37.5
	標準偏差	91.7	55.6	60.2
	最大偏差	178.9	178.3	177.0

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位為度，偏差大小範圍為 0-180 度。

“-”：表示無觀測資料。

表 7.15 2014 年主要商港觀測及中尺度預報水位偏差統計表

月份	方法	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	布袋港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-	-	0.04
	標準偏差	0.09	0.08	0.08	-	0.11	-	-	0.17
	最大偏差	-0.29	-0.23	0.21	-	0.30	-	-	0.44
2	平均偏差	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-	-	0.02
	標準偏差	0.09	0.11	0.12	-	0.11	-	-	0.16
	最大偏差	0.26	0.47	-0.39	-	-0.29	-	-	-0.38
3	平均偏差	0.00	0.00	0.00	-0.02	-	-	-	0.00
	標準偏差	0.09	0.09	0.09	0.06	-	-	-	0.15
	最大偏差	-0.36	0.26	-0.23	-0.13	-	-	-	-0.42
4	平均偏差	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	-	-	0.00
	標準偏差	0.07	0.07	0.06	0.07	0.09	-	-	0.12
	最大偏差	-0.21	0.18	-0.17	-0.20	0.17	-	-	-0.46
5	平均偏差	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	標準偏差	-	0.07	0.07	0.07	0.08	-	-	0.13
	最大偏差	-	-0.20	-0.23	-0.21	-0.28	-	-	-0.51
6	平均偏差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.02	-
	標準偏差	0.07	0.07	0.19	0.08	0.09	-	0.13	-
	最大偏差	-0.21	0.20	0.48	-0.28	-0.39	-	0.36	-
7	平均偏差	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
	標準偏差	0.08	0.09	0.12	0.08	0.08	-	-	0.13
	最大偏差	0.33	0.42	-0.51	0.31	0.37	-	-	0.40
8	平均偏差	0.00	0.00	-	-	0.00	-	-	0.00
	標準偏差	0.08	0.09	-	-	0.09	-	-	0.14
	最大偏差	0.23	0.25	-	-	-0.25	-	-	0.36
9	平均偏差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-0.01	0.00
	標準偏差	0.07	0.11	0.10	0.36	0.07	-	0.16	0.14
	最大偏差	0.30	0.49	0.33	0.86	-0.20	-	0.48	0.50
10	平均偏差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	-	0.00	-0.01
	標準偏差	0.11	0.11	0.11	0.09	0.10	-	0.27	0.20
	最大偏差	-0.48	-0.32	-0.29	0.23	0.25	-	-0.80	-0.64

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：m。

“-”：表示無觀測資料。



表 7.16 2014 年主要商港觀測及小尺度預報水位偏差統計表

月份	方法	基隆港	臺中港	臺北港
1	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.10	0.17	0.19
	最大偏差	-0.27	-0.55	0.44
2	平均偏差	0.00	0.00	0.01
	標準偏差	0.09	0.17	0.19
	最大偏差	-0.31	-0.47	-0.53
3	平均偏差	0.00	-0.01	0.02
	標準偏差	0.09	0.14	0.18
	最大偏差	-0.30	0.42	0.46
4	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.11	0.12	0.16
	最大偏差	-0.32	0.36	-0.40
5	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.13	0.13	0.15
	最大偏差	-0.36	-0.45	-0.46
6	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.12	0.12	0.22
	最大偏差	-0.36	0.32	-
7	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.10	0.11	0.17
	最大偏差	0.32	-0.44	-0.40
8	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.09	0.13	0.17
	最大偏差	0.30	0.36	0.38
9	平均偏差	0.00	-0.01	0.00
	標準偏差	0.19	0.12	0.18
	最大偏差	0.47	0.40	0.57
10	平均偏差	0.00	0.00	0.00
	標準偏差	0.18	0.22	0.23
	最大偏差	-0.47	-0.70	-0.74

[註]：偏差= 預報值-觀測值，單位：m。

“-”：表示無觀測資料。

## 第八章 結論與建議

本年度計畫為「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫規劃之四年合作研究計畫之第四年，目的除了針對現有海氣象數值預報系統進行維護確保系統運作，以及進行數值與實測資料的比較分析外，同時針對提昇海岸及港灣海域海象(波浪、潮位及海流)等模擬技術進行相關研究。綜整本年度研究及工作成果得到下列結論：

### 8.1 結論

1. 主要商港海象觀測資料特性：在潮汐特性上僅高雄港符合全日潮型，符合半日潮型者在西部海域分別有臺北港、臺中港及布袋港，東部海域花蓮港屬於半日潮型，其餘港口屬於混合潮型；潮差方面以臺中港平均潮差值最大約為 3.8m，臺北港次之約為 2.3m，高雄港平均潮差最小約為 0.52m。在海流特性上，各港海流平均流速值以臺北港最大約為 0.45m/s，臺中港次之約為 0.36m/s，蘇澳港平均流速值最小約為 0.16m/s；本計畫僅完成蘇澳港等四港口主要天文分潮流速分析，其中臺北港屬於典型的半日潮流，花蓮港全日潮流振幅明顯大於半日潮振幅，蘇澳港半日潮流振幅略大於全日潮振幅，基隆港  $M_2$  分潮振幅冬季海流資料顯著大於夏季海流資料；此外，蘇澳港及花蓮港海流資料均有非潮流之成份偏大現象。在波浪統計特性上，蘇澳港及花蓮港可歸屬於波浪能量較大之海域，且波浪週期平均值明顯大於其他港口，臺中港波浪週期平均值則明顯偏小；各港口波高小於 1.0m 所位比例分別為蘇澳港 29.78%、花蓮港 35.04%、基隆港 50.08%、臺北港 53.09%、臺中港 37.94%、高雄港 77.5% 及安平港 88.9%。
2. 本年度計畫海象模擬作業化系統使用的風(壓)場預報資料已更新為中央氣象局提供的 WRF 系統之 M00 模組風場資料，完成提昇作業化風場資料目標，更有助於未來達到提昇海象模擬資料品質目的。

3. 在風浪及波浪場模擬研究方面：本計畫除了完成大尺度風浪模組相關模擬結果改善研究，達到風浪模擬結果精進目的外；在中尺度風浪模擬方面，不僅將模擬範圍擴及金門、馬祖等離島海域，同時以平行化處理提昇風浪模擬效率及模擬品質。在小尺度及細尺度波浪模組方面，分別完成各港口模擬資料、範圍、網格精度、模擬結果校驗等相關更新研究工作；同時亦利用細尺度波浪模組針對各港口港池共振特性進行相關模擬與分析，並得到顯著的成果。
4. 本年度計畫利用已建置的中尺度臺灣周圍海域範圍水動力模組，針對歷年(1980~2013年)侵臺颱風資料，以模型颱風模擬移動風域之風壓場逐一執行臺灣周圍海域颱風暴潮模擬。依據各主要商港驗證點之數值模擬結果，以年極端值選樣方式針對各港口最大暴潮位模擬值進行統計回歸分析。依據各港口暴潮位頻率分析結果得知，各港口50年復現期之暴潮位值分別為：基隆港 1.25 m、臺北港 1.26 m、臺中港 1.44 m、高雄港 1.20 m、蘇澳港 1.22 m、花蓮港 0.85 m、安平港 1.03 m、及布袋港 0.97m。
5. 在小尺度水位及流場模擬方面：本計畫延續前三年基隆港、臺北港、臺中港、布袋港、高雄港及安平港等小尺度水動力模組改善之研究方法，本年度仍持續針對蘇澳港及花蓮港進行包括基本資料、模擬範圍、網格精度、參數率定及模擬結果校驗等，相關更新與改善研究工作。基本上，蘇澳港及花蓮港位於東部海域，觀測海流中潮流所佔的比例較小，導致小尺度流模擬大小與觀測海流大小仍有較大差距；但整體而言，本年度蘇澳港及花蓮港水位及流場模擬仍較前期計畫水位及流場模擬有其改善的地方及未來進一步努力的地方。
6. 在作業化成果評估方面：除完成2013年12月至2014年11月作業化成果評估報告外，同時完成本年度侵臺颱風哈吉貝、鳳凰及麥德姆颱風等颱風期間作業化成果評估報告。整體而言，依據各港口風場評估結果顯示 WA02 風場資料明顯優於 WA01 風場，各港預報風速與觀測值間標準偏差約在 2~3 m/s 之間，風向預報以臺中港表

現較佳，與觀測值間標準偏差小於 60 度；風浪模擬成果評估在波高方面以 SWAN 表現較佳，其中安平港、高雄港之示性波高預報模擬值除夏季 6、7 月份外，其餘月份與觀測值間標準偏差均在 0.3 m 以下；波向評估方面以東北季風期間基隆港、臺北港的預報模擬值與觀測值間標準偏差較小，約介於 21.7~37.9° 之間；波浪週期評估則以 WAM 模式整體表現較優。水位及流場模擬成果評估顯示，流速模擬以蘇澳港、花蓮港、高雄港及安平港表現較佳，水位模擬除臺北港及臺中港外，其餘各港口水位預報模擬值與觀測值間標準偏差約在 0.11m 以下。

## 8.2 建議

1. 本年度計畫已於計畫執行期間協助港研中心將作業化風(壓)場資料更新為中央氣象局第四代天氣數值預報系統之 WRF 風壓場資料，惟作業化系統資料轉換過程對於相關海象模擬模組模擬可能產生的影響仍需持續關注與研究，以確保海象模擬作業化系統能夠正常維運。
2. 有關中尺度臺灣周圍海域水動力模擬與小尺度動力模擬間整合問題未來仍需持續進行研究。
3. 有關海象模擬系統在作業化模擬時效可能遭遇的問題，除了尋求軟、硬體間可能的平衡點外，未來仍需由軟、硬體更新着手尋求適合解決方法。

## 參考文獻

1. Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M., “Energy loss and set-up due to breaking of random waves,” *Proc. 16th Int. Conf. Coastal engineering, ASCE*, 569-587 (1978).
2. Booij, N., *Gravity waves on water with non-uniform depth and current*, Report No 81-1, Department of Civil Engineering, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherland (1981).
3. Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., “The “SWAN” wave model for shallow water,” *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng.*, Orlando, 668-676 (1996).
4. Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Haagsma, IJ. G., “Comparing the secondgeneration HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model,” *5<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Melbourne, Florida, 215-222 (1998).
5. Booij, N., Haagsma, J.G., Holthuijsen, L.H., Kieftenburg, A. T. M. M., Ris, R. C., van der Westhuysen, A. J. and Zijlema, M., *SWAN Cycle III version 40.41 USER MANUAL*, Delft University of Technology (2004).
6. Dingemans, M. W., *Water wave propagation over uneven bottoms. Part 1 –linear wave propagation*, Advanced Series on Ocean Engineering, 13, World Scientific, 471p (1997).
7. Hasselmann, K. “On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping,” *Bound.-layer Meteor.*, 6, 1-2, 107-127 (1974).
8. Holthuijsen, L. H., Booij, N., Ris, R., Andorka Gal, J. H. and de Jong, J. C. M., “A verification of the third-generation wave model “SWAN” along the southern North Sea coast,” *Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES '97, ASCE*, 49-63 (1997).
9. Kirby, J. T., “Rational approximations in the parabolic equation method for water waves,” *Coastal Eng.*, Vol. 10, 355-378 (1986).

10. Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A., "A parabolic equation for combined refraction- diffraction of Stokes waves by mildly varying topography," *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, 219-232 (1983).
11. Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M. Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P. A. E. M., *Dynamics and modeling of Ocean Waves*. Cambridge Univ. Press, Cambridge UK (1994).
12. Liu, P. L.-F., S. Monserrat, M. Marcos, and A. B. Rabinovich, "Coupling between two inlets: Observation and modeling," *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 3069, (2003).
13. Mei, C. C., and M. Foda (1979), An analytical theory
14. Mei, C. C., *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, John Wiley, New York (1989).
15. Miles, J. W., "On the generation of surface waves by shear flows," *J. Fluid Mech.*, 3, 185-204 (1957).
16. Phillips, O. M., "On the generation of waves by turbulent wind," *J. Fluid Mech.*, 2, 417-445 (1957).
17. Radder, A. C., "On the parabolic equation method for water-wave propagation," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 95, 159-176 (1979).
18. WAMDI group, "The WAM model – a third generation ocean wave prediction model," *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810 (1988).
19. Whitham, G. B., *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York, 636 p (1974).
20. 李忠潘、陳陽益、邱永芳、許泰文、張憲國、薛憲文、王兆璋、劉景毅、于嘉順、蘇青和、陳冠宇、廖建明、劉正琪、錢維安、許友貞、余孟娟，規劃海象觀測網暴潮數值最佳網格化系統，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-92-H3BB002，中華民國93年3月。
21. 李忠潘、陳陽益、邱永芳、于嘉順、許泰文、王兆璋、張憲國、劉景毅、蘇青和、簡仲璟、薛憲文、廖建明、劉正琪、江朕榮、尤皓正、錢維安、許友貞、莊曜陽，近岸數值模擬系統之建立(I)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-93-H3DB001，中華民國93年11月。

22. 李忠潘、陳陽益、于嘉順、王兆璋、薛憲文、張憲國、林炤圭、劉正琪、許泰文、莊曜陽，近岸數值模擬系統之建立(II)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-94-H3DB001，中華民國94年11月。
23. 李忠潘、邱永芳、陳陽益、于嘉順、蘇青和、劉正琪、林炤圭、張憲國、王兆璋，近岸數值模擬系統之建立(III)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-95-H3DB001，中華民國95年11月。
24. 李忠潘、陳陽益、邱永芳、蘇青和、劉正琪、于嘉順、林炤圭、張憲國、薛憲文、王兆璋、陳明宗、李俊穎，近岸海象數值模擬及預警系統之建立(1/4)，交通部運輸研究所，MOTC-IOT-96-H3DB001，中華民國96年12月。
25. 江文山等，“鳳鼻頭漁港及週邊海域地形與波浪調查分析”，高雄市政府海洋局，中華民國97年。
26. 邱永芳、蘇青和、李忠潘、劉正琪、于嘉順、陳陽益、林炤圭、江朕榮、李俊穎、陳明宗，近岸海象數值模擬及預警系統之建立(2/4)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-97-H3DB001，中華民國98年3月。
27. 三普環境分析股份有限公司，“99年度高雄港洲際貨櫃中心環境監測計畫—海岸地形調查”，交通部高雄港務局，中華民國99年。
28. 林炤圭、劉正琪、邱永芳、蘇青和、陳明宗、李俊穎、林莉鳳，近岸海象數值模擬及預警系統之建立(3/4)-波浪部份，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-98-H3DB001a，中華民國99年5月。
29. 林炤圭、劉正琪、邱永芳、蘇青和、陳明宗、李俊穎、林莉鳳，近岸海象數值模擬及預警系統之建立(4/4)-波浪部份，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-98-H3DB001a，中華民國99年12月。

30. 歐善惠、許泰文、臧效義、方介群、廖建明，1999，「應用 SWAN 波浪模式推算臺灣附近海域颱風波浪之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，87 頁-95 頁。
31. 歐善惠、許泰文、臧效義、廖建明、方介群，2000，「應用 SWAN 模式於臺灣西部海岸之波浪預測」，第二屆國際海洋大氣會議論文集，台北，183 頁-188 頁。
32. 曾相茂，「臺灣國際港口海氣象觀測技術及資料分析」，海氣象觀測資料應用暨港灣結構物安全檢測作業研討會論文集，1-1 頁至 1-27 頁，2011 年。
33. 邱永芳、劉正琪、蘇青和、陳明宗、李俊穎、鄭博今、陳信宏，提昇海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究(1/4)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-100-H3DB005a，中華民國 101 年 3 月。
34. 劉正琪、邱永芳、李兆芳、蘇青和、陳明宗、李俊穎、涂力夫、鄭博今，提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究(1/2)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-102-H3DB001a，中華民國 103 年 3 月。
35. 吳蕙如、張庭槐、林宗翰、李淑玲，2014，「中央氣象局數值天氣預報作業控制系統現況介紹」，103 天氣分析與預報研討會論文集，A2-50。
36. 葉天降、滕春慈、黃麗玫、馮欽賜、張庭槐，2012，中央氣象局數值天氣預報作業系統(一)歷史演進。氣象學報，第 48 卷第 4 期，53-68。
37. 葉天降、馮欽賜、柳再明、陳得松、黃康寧、陳雯美、汪鳳如、洪景山，2012，中央氣象局數值天氣預報作業系統(二)預報模式概況。氣象學報，第 48 卷第 4 期 69-95。



## 附錄一 波浪模式基本理論介紹

臺灣環島海象預報系統(TaiCOMS)波浪模擬採用的波浪模式之基本理論介紹。

### 1.1 西太平洋範圍風浪模組之基本理論

對 TaiCOMS 而言，大尺度西太平洋範圍風浪模組是依據海洋波浪預測模式 WAM (WAVE Modeling) 為模式之基礎而建置的，目前 TaiCOMS 使用的版本係經由 WAMDI (The Wave Model Development and Implementation) Group (1988) 改良的模式。WAM 模式所使用的基本方程式為二維波浪能量平衡方程式，此方程式能夠描述方向波譜在時間及空間上的變化過程。這些變化過程包括風浪的生成、波能的消散、底床摩擦效應，以及波與波之間非線性交互作用。其波浪能量平衡方程式可表示為：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{C}_g F) = S \dots\dots\dots (1.1)$$

式中  $F = F(f, \theta, \vec{x}, t)$  為波浪能量密度譜(spectral density)， $f$  為波浪的頻率， $\theta$  定義為波浪的傳播方向， $\vec{x}$  為位置， $t$  為時間， $\vec{C}_g$  為波浪群速度(group velocity)， $S$  為源函數(source function)。

在大範圍波浪場計算時，因地球曲率會影響波浪的傳遞，因此常以球面座標系統( $\phi, \lambda$ )推導(1.1)式，得到下列描述二維波浪能量平衡方程式之球面座標表示式如下：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (C_\phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (C_\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta F) = S \dots\dots\dots (1.2)$$

式中  $\phi$  為緯度， $\lambda$  為經度， $C_\phi$ 、 $C_\lambda$  與  $C_\theta$  分別為波浪群速度  $\vec{C}_g$  在球面座標  $\phi$ 、 $\lambda$  軸及波浪傳播方向  $\theta$  之空間傳遞速率，其中：

$$C_\phi = \left| \vec{C}_g \right| \frac{\sin \theta}{R} \dots\dots\dots (1.3)$$

$$C_\lambda = \left| \vec{C}_g \right| \frac{\cos \theta}{R} \dots\dots\dots(1.4)$$

$$C_\theta = \frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial d} \left( \frac{\sin \theta}{\cos \phi} \frac{\partial d}{\partial \lambda} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial \phi} \right) / R \dots\dots\dots(1.5)$$

式中  $R$  為地球半徑(m)， $\omega$  為波浪角頻率， $k$  為波數(wave number)， $d$  為水深。

在 WAM 模式(cycle 4 及 cycle 5)中，源函數  $S$  可表示成

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} \dots\dots\dots(1.6)$$

式中源函數  $S_{in}$ 、 $S_{dis}$ 、 $S_{bot}$ 、 $S_{nl}$  分別代表風浪之成長項、能量消散項、底床摩擦項及波浪間非線性交互作用項。

在 WAM 模式中風浪成長項  $S_{in}$  之計算係採用 Snyder et al. (1981) 提出的無因次摩擦速度  $u_*$  經驗式，依據風浪生成之近似線性理論 (Janssen, 1989, 1991) 得知，風浪成長項  $S_{in}$  可表示如下：

$$S_{in} = \gamma \cdot F \dots\dots\dots(1.7)$$

式中  $\gamma$  為波能成長率，WAM 模式之波能成長率  $\gamma$  計算採用 Janssen (1989, 1991) 之經驗式，其結合了海表面摩擦速度與波齡來決定風浪的成長率，即

$$\gamma = \varepsilon \omega \beta (u_*/c)^2 \cos^2(\bar{\theta} - \theta_w), \quad |\bar{\theta} - \theta_w| < \pi/2 \dots\dots\dots(1.8)$$

式中  $\varepsilon$  為空氣與水之密度比率(=1.225×10<sup>-3</sup>)， $\beta$  為 Miles 常數(=1.2, Janssen 1991 或 Komen et al. 1994)， $u_*$  為風作用於海面之摩擦速度， $c$  為波速(或為波浪位相速度)， $\bar{\theta}$  為平均波向(指波浪傳播方向)， $\theta_w$  為平均風向。另依據 Janssen (1991) 之研究得知，Miles 常數  $\beta$  可由下列表示式計算得到

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4(\mu), \quad \mu \leq 1.0 \dots\dots\dots(1.9)$$

其中

$$\mu = \left( \frac{u_*}{\kappa} \right) \left( \frac{gz_0}{u_*^2} \right) \exp \left[ \left( \frac{\kappa}{u_*} \right) \frac{1}{\cos(\theta - \theta_w)} \right] \dots\dots\dots (1.10)$$

式中  $\kappa$  為 von Karman 常數(= 0.41)， $z_0$  海面粗糙長度(roughness length)， $g$  為重力加速度。

針對粗糙長度  $z_0$  之計算如下：

$$z_0 = \frac{\alpha\tau}{g} \dots\dots\dots (1.11)$$

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{\sqrt{1 - (\tau_w/\tau)}} \dots\dots\dots (1.12)$$

式中  $\alpha$  為與海面狀況有關的 Charnock 參數， $\tau$  為氣流通過海面波浪引起的運動應力(kinematic stress)， $\tau_w$  為重力波引起的波應力。其中運動應力  $\tau$  等於摩擦速度  $u_*$  之平方，其與海面上風速對數剖面及粗糙長度之關係如下

$$\tau = u_*^2 = \left( \frac{\kappa U(z_{obs})}{\ln(z_{obs}/z_0)} \right)^2 \dots\dots\dots (1.13)$$

式中  $z_{obs}$  為在波浪上方之平均高度；至於，波浪引起的波應力  $\tau_w$  之計算如下

$$\tau_w = 2\pi\epsilon^{-1}g \int df d\theta \cdot S_{in} \vec{k} \dots\dots\dots (1.14)$$

其中未知係數  $\hat{\alpha}$  建議採用 0.01。

在 WAM 模式中波浪之能量消散機制是依據 Hasselmann (1974) 所提出之準線性形式，其概念主要假設海面波浪的消散行為屬於平均衰減的，因此波浪能量消散項  $S_{dis}$  可表示成

$$S_{dis} = \gamma_{ds} \cdot F \dots\dots\dots (1.15)$$

其中

$$\gamma_{ds} = -C_{ds} \langle \omega \rangle \left[ \langle k \rangle^2 E \right]^2 \left[ \frac{k}{\langle k \rangle} + \left( \frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (1.16)$$

式中係數  $C_{ds} = 4.5$ ， $\omega = 2\pi f$ ，符號  $\langle \bullet \rangle$  代表對整個波浪之平均值，其中

$$E = \iint F(f, \theta) df \cdot d\theta \dots \dots \dots (1.17)$$

$$\langle \omega \rangle = E \left\{ \iint F(f, \theta) (2\pi f)^{-1} df \cdot d\theta \right\}^{-1} \dots \dots \dots (1.18)$$

$$\langle k \rangle = E \left\{ \iint F(f, \theta) k^{-1} df \cdot d\theta \right\}^{-1} \dots \dots \dots (1.19)$$

關於底床摩擦引起的能量損失項  $S_{bot}$ ，其計算如下：

$$S_{bot} = -C_{bot} \frac{k \tanh(kd)}{g \sinh^2(kd)} F \dots \dots \dots (1.20)$$

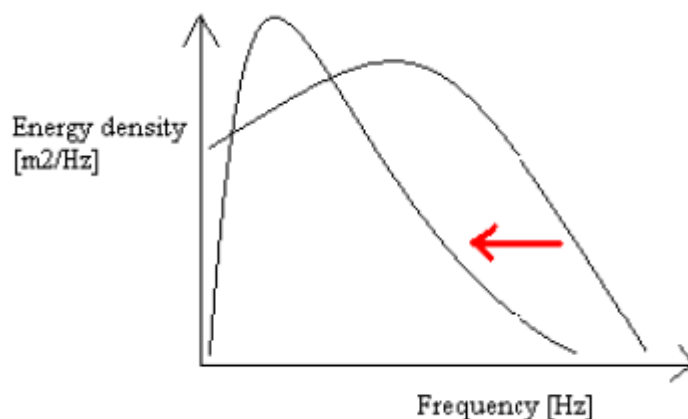
式中  $g$  為重力加速度， $k$  為波數， $d$  為水深， $C_{bot}$  為底床摩擦係數；在 WAM 模式中對於床摩擦係數  $C_{bot}$  值建議採用 Hasselmann 等人 (1973) 在湧浪的條件下以 JONSWAP 的實驗求得之底床摩擦係數  $C_{bot} = 0.038 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ 。

至於非線性交互作用項  $S_{nl}$  之計算則採用 Hasselmann (1963) 之四個波之波浪交互作用理論。即波譜的急劇成長是由波譜尖峰頻率從風獲得能量後再經由非線性作用使得波譜尖峰頻率的能量分別向高頻及低頻處傳遞，且隨著風速加大導致尖峰頻率向低頻移動的現象，如附圖 3.1 所示。當紛紜波浪中存在有四組波浪滿足下列共振(resonant)條件 (1.21a,b) 式時，則此四組波浪會產生能量之交換。

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \dots \dots \dots (1.21a)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \dots \dots \dots (1.21b)$$

有關非線性交互作用項  $S_{nl}$  計算之詳細說明可參考 Komen et al. (1994)。



附圖 1.1 波浪能量由高頻向低頻傳遞之示意圖

## 1.2 臺灣周圍海域範圍風浪模組之基本理論

TaiCOMS 中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組係採用荷蘭 Delft 技術大學發展的近海風浪模式 SWAN (Booij et al. 1996)作為模組建置之核心主體，目的在於利用 SWAN 風浪模式強大功能模擬臺灣近岸海域風浪場變化，藉以獲得更精確的近岸海域波浪資訊。SWAN 風浪模式不僅具有第三代風浪模式的特徵，且在能量成長與消散項的參數選擇上比其它模式更具彈性；SWAN 風浪模式可以計算波浪在時間及空間領域之傳遞、波與波之間非線性的交互作用、波浪受風之成長、碎波之能量消散、底床摩擦引起的能量損失、以及波浪受到海流及地形變化影響而產生的頻率位移、淺化與折射等物理過程。

總之，SWAN 風浪模式是一個利用風、海底底床及海流狀況獲得在海岸地區、湖泊或河口附近水域的合理預估的波浪參數的波浪數值模式，此數值模式基本上是依據波浪作用力平衡方程式(wave action balance equation)，如(1.22)式所示，以及源函數項等求解波浪作用力密度波譜(action density spectrum)， $N(\sigma, \theta)$ ，其中 $\sigma$ 為相對的波浪頻率； $\theta$ 為波浪方向角；因此 SWAN 本質上屬於第三代風浪預報模式。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{\bar{S}}{\sigma} \dots\dots\dots(1.22)$$

式中  $x, y$  為直角座標系統之座標軸， $c_x$  及  $c_y$  分別為波浪作用力在  $x$  及  $y$  空間之傳遞速度， $c_\theta$  代表波浪作用力在波向  $\theta$  空間之傳遞速度， $c_\sigma$  代表波浪作用力在波浪頻率  $\sigma$  空間之傳遞速度， $S$  代表波浪成長與消散之源函數項。其中

$$c_x = \frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta + U_x \dots\dots\dots(1.23)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta + U_y \dots\dots\dots(1.24)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \sin \theta \frac{\partial d}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial y} \right) + \left( \sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial y} \right) \quad (1.25)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + U_x \frac{\partial d}{\partial x} + U_y \frac{\partial d}{\partial y} \right) - C_g k \left( \cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} + \sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial y} \right) \quad (1.26)$$

式中  $C_g$  為波浪群速度， $U_x$  及  $U_y$  分別為水流速度在  $x$ -及  $y$ -軸方向分量， $k$  為波浪之波數， $d$  為水深。

於(1.22)式中第一項代表波浪作用力密度譜  $N(\sigma, \theta)$  隨時間之變化率；第二及第三項為波浪作用力密度譜  $N(\sigma, \theta)$  在平面空間上分別以  $c_x$  及  $c_y$  之速度在  $x$ -及  $y$ -軸方向傳遞；第四項代表波浪作用力密度譜  $N(\sigma, \theta)$  受到水深及流變化影響導致在相對頻率  $\sigma$ -軸上以  $c_\sigma$  的速度位移；第五項代表波浪作用力密度譜  $N(\sigma, \theta)$  因水深或流所引起的折射效應；等號右邊  $\bar{S}(\sigma, \theta)$  代表以能量密度表示之源函數項，其包含能量的生成、衰減、及非線性的波浪交互作用(有關各項源函數計算之詳細理論說明可參考 SWAN 使用手冊)。

在 SWAN 風浪數值模式中，主要是利用有限差分法來求解(1.22)式；在邊界條件處理上，SWAN 模式假定波浪能量遇到陸地邊界為完全消散，亦即無任何波浪能量反射；外海開放邊界條件則假設沒有任何波浪能量可以由開放邊界外進入計算領域，但允許波浪能量可以由開放邊界內自由離開計算領域。

### 1.3 近岸波浪折繞射模式之基本理論

Radder (1979) 依據線性緩坡方程式之理論基礎，將波浪場分離成向前之進行波與向後之進行波(忽略向後之散射波)等兩種成份波，發展出拋物線型緩坡波浪模式。相較於橢圓型緩坡方程式及雙曲線型緩坡方程式，拋物線型緩坡模式具有下列優點：(1) 模式下游端之邊界條件不再是必要的，(2) 具有高度數值運算效率。其缺點為受到垂直波向之橫向導數近似表示式之限制，波浪之傳播僅適用於給定波向之  $45^\circ$  範圍內。

Booij (1981) 採用 Lagrangian 求解方法發展出含波、流交互作用影響之拋物線型緩坡方程式，同時引入較多的項次代表側向導數之近似解，將拋物線波浪模式適用範圍提升至給定波向之  $60^\circ$  範圍內。Kirby and Dalrymple (1983) 先於 Booij (1981) 之模式中增加非線性修正項，使其可以處理弱非線性波浪及較強流速等問題。模式之基本控制方程如下：

$$(C_g + U_x)A_x + U_y A_y + i(\bar{k} - k)(C_g + U_x)A + \frac{\sigma}{2} \left\{ \left( \frac{C_g + U_x}{\sigma} \right)_{,x} + \left( \frac{U_y}{\sigma} \right)_{,y} \right\} A - \frac{i}{2\sigma} [(p - U_y^2)A_y]_{,y} - \sigma \frac{k^2}{2} D|A|^2 A = 0 \quad (1.27)$$

式中  $A(x, y)$  為複數型式之自由表面波形振幅， $A_x$  及  $A_y$  分別為  $x$  及  $y$  方向之振幅分量， $\sigma = \omega - kU$  為相對頻率(intrinsic frequency)， $\omega$  為波浪角頻率， $k(x, y)$  為波浪波數， $\bar{k}$  為參考波數(定義為沿  $y$  軸上波數之平均值)， $U$  為水流流速(此處通常為平均流)， $U_x$  及  $U_y$  分別為  $x$  及  $y$  方向之水流速度分量，參數  $p = CC_g$ ， $C$  為波浪之波速， $C_g$  為波浪群速度， $D$  為非線性影響項等於

$$D = \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh^4(kh)} \dots \dots \dots (1.28)$$

式中  $h$  為靜水深。Kirby (1986) 進一步依據 minimax 原則將 Booij 之近似解延伸以提升模式適用性之範圍，使得模式可以處理較大角度波浪傳播問題。因此，REF/DIF 模式之基本方程式如下：

$$\begin{aligned}
& (C_g + U_x)A_x - 2\Delta_1 U_y A_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U_x)A + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left( \frac{C_g + U_x}{\sigma} \right)_{,x} - \Delta_1 \sigma \left( \frac{U_y}{\sigma} \right)_{,y} \right\} A \\
& + i\Delta_3 \left[ (p - U_y^2) \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,y} - i\Delta_1 \left\{ \left[ U_x U_y \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,x} + \left[ U_x U_y \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,x} \right]_{,y} \right\} \\
& + i\sigma \frac{k^2}{2} D|A|^2 A + \frac{\nu}{2} A - \frac{b_1}{k} \left\{ \left[ (p - U_y^2) \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,yx} + 2i \left[ \sigma U_y \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,x} \right\} \\
& + b_1 \mathcal{G} \left\{ 2i\omega U_x \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,x} + 2i\sigma U_y \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,y} - 2U_x U_y \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,xy} + \left[ (p - U_y^2) \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,y} \right\} \\
& - \frac{i}{k} b_1 \left[ (\omega U_y)_{,y} + 3(\omega U_x)_{,x} \right] \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,x} - \Delta_2 \left[ \omega U_x \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{,x} + \frac{1}{2} \omega \left( \frac{A}{\sigma} \right) (U_x)_{,x} \right] \\
& + ik\omega U_x (a_0 - 1) \left( \frac{A}{\sigma} \right) = 0
\end{aligned} \tag{1.29}$$

式中

$$\mathcal{G} = \frac{k_{,x}}{k^2} + \frac{[k(p - U_x^2)]_{,x}}{2k^2(p - U_x^2)} \tag{1.30}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1, \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1, \quad \Delta_3 = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \tag{1.31}$$

上述各式中， $\nu$  為波浪消散因子，可依據能量消散特性給定不同的型式。而係數  $a_0$ ， $a_1$  及  $b_1$  可依據所考慮的波浪入射角度範圍利用 Minimax approximation 決定之，此處模式所採用的係數值分別為  $a_0 = 0.994733$ ， $a_1 = -0.890065$ ， $b_1 = -0.451641$ 。

當考慮波浪受到底床摩擦影響以及波浪碎波所產生的波能損失，模式採用具有消散項的線性緩坡方程式處理，即

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{i}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \nu A \tag{1.32}$$

式中  $i = \sqrt{-1}$ 。

有關波浪消散因子  $\nu$  之選取，模式提供了包括底床邊界摩擦引起的波浪能量消散，以及波浪碎波引起的波浪能量損失等，針對前者本計



畫選取模式中紊流底床邊界層觀念計算波能損失因子，即

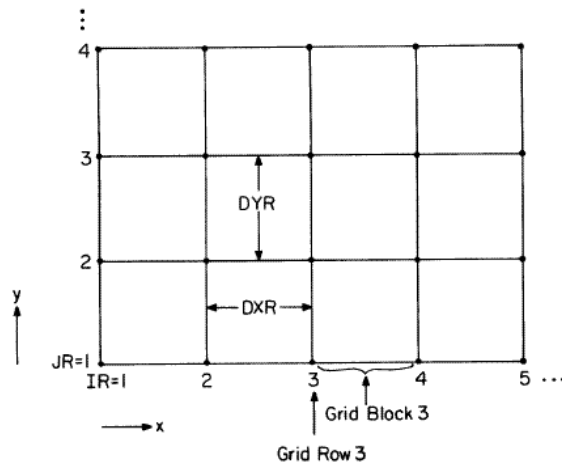
$$v = \frac{2\sigma k f |A| (1-i)}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)} \dots\dots\dots (1.33)$$

式中  $f=0.01$ ；至於碎波引起的波浪能量損失率則採用下列公式計算：

$$v = \frac{\psi C_g [1 - (\gamma h / 2 |A|)]}{h} \dots\dots\dots (1.34)$$

式中  $\psi$  及  $\gamma$  為經驗常數，在模式中分別設定為 0.017 及 0.4。

本計畫 REF/DIF-1 模式採用有限差分數值方法求解此一拋物線型方程式，亦即將計算領域分割成具  $\Delta x$  及  $\Delta y$  大小之矩形網格，並求解格點上之複數振幅  $A(x,y)$ ，振幅  $A$  所在之位置係以  $(i, j)$  表示而非以座標  $(x,y)$   $(x, y)$ ，如附圖 3.2 所示，惟模式計算所需之地形可以輸入具  $(x_i, y_j)$  座標，其中  $x_i = (i-1)\Delta x$ ， $y_j = (j-1)\Delta y$ 。



附圖 1.2 REF/DIF-1 數值計算網格座標系統示意圖

## 1.4 港域波浪模式之理論簡述

當波浪自外海傳播至港域時，受到水深地形變化以及海岸線、防波堤和港內岸壁等結構物之影響，波浪會產生繞射、折射及反射等現象。針對此一問題常見之求解方法是將整個問題的領域分為外海半無限領域和港池有限領域等兩個領域，如圖 3.8 所示；同時假設外海半無限領域為等水深，僅考慮港池有限領域則為緩變之不等深水域，且不考慮波浪的碎波現象。

如附圖 3.3 所示，所取之直角座標系統為 X 軸與海岸線重合，Y 軸向外海為正，Z 軸垂直紙面向上為正，Z=0 為靜水面。外海半無限領域及有限領域別以領域(I)及(II)稱之，領域(I)及領域(II)之相連邊界為半徑  $R_0$  之半圓，以  $B_1$  表示。領域(II)則包含了港池內及港外半徑  $R_0$  之半圓區內水域部分，其所包括的海岸邊界、防波堤邊界及港池岸壁邊界以  $B_2$  表示。假設領域(I)為等水深  $h_1$ ，領域(II)之水深變化為  $h_2(x, y)$ 。各領域內水位變化  $\eta_j(x, y, t)$  可表示成

$$\eta_j(x, y, t) = \zeta_j(x, y)e^{i\omega t}, \quad j=1,2 \dots\dots\dots(1.35)$$

式中  $\zeta_1(x, y)$  及  $\zeta_2(x, y)$  分別稱為領域(I)及領域(II)之波函數， $\omega$  為入射波之角頻率  $\omega = 2\pi/T$ ， $T$  為入射波之週期。所欲求解之波函數  $\zeta_j(x, y)$ ， $j=1,2$  分別滿足下列控制方程式：

在在領域(I)內

$$\nabla^2 \zeta_1 + k_1^2 \zeta_1 = 0 \dots\dots\dots(1.36)$$

在在領域(II)內

$$\nabla \cdot (C_2 C_{2g} \nabla \zeta_2) + (C_2 C_{2g} k_2^2 + i\omega\mu + iC_{2g}\omega\gamma_b)\zeta_2 = 0 \dots\dots\dots(1.37)$$

式中  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  為二維梯度運算子， $\mu$  為摩擦因子， $\gamma_b$  為波浪碎波之碎波參數， $k_1$  及  $k_2$  分別為波浪在領域(I)及(II)內之波數， $C_2$  為波浪在領域(II)內之波速(= $L_2/T$ )， $C_{2g}$  為群速度(= $\tilde{n}C_2$ )。其中  $\tilde{n}$  定義為

$$\tilde{n} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) \dots\dots\dots (1.38)$$

有關摩擦因子  $\mu$  之計算可採用 Dalrymple et al. (1984) 之表示式：

$$\mu = \frac{2n\omega}{k_2} \left( \frac{2C_r}{3\pi} \frac{\alpha k_2^2}{(2k_2 h_2 + \sinh 2k_2 h_2) \sinh k_2 h_2} \right) \dots\dots\dots (1.39)$$

式中， $a$  為波浪之振幅， $C_r$  為與雷諾數及底床粗糙度有關之摩擦係數。碎波參數  $\gamma_b$  可採用下列計算式

$$\gamma_b = \frac{\chi}{h_2} \left( 1 - \frac{\Gamma^2 h_2^2}{4a^2} \right) \dots\dots\dots (1.40)$$

式中  $\chi$  及  $\Gamma$  分別為經驗常數(其值可分別採用 0.15 及 0.4)。

在領域(I)及(II)之交接假想邊界( $B_1$ )上須滿足下列連續條件：

$$\zeta_1 = \zeta_2 \quad , \quad \text{在假想邊界 } B_1 \text{ 上} \dots\dots\dots (1.41a)$$

$$C_1 C_{1g} \frac{\partial \zeta_1}{\partial n} = -C_2 C_{2g} \frac{\partial \zeta_2}{\partial n} \quad , \quad \text{在假想邊界 } B_1 \text{ 上} \dots\dots\dots (1.41b)$$

此外，在一般海岸線或結構物邊界( $B_2$ )上須滿足下列部份反射邊界條件：

$$\nabla \zeta_2 \cdot \vec{n} = \partial \zeta_2 / \partial n = -i\alpha k_2 \zeta_2 \quad , \quad \text{在假想邊界 } B_2 \text{ 上} \dots\dots\dots (1.42)$$

式中  $\vec{n}$  表示邊界面上離開領域向外之單位法線向量， $\alpha$  為消能係數，其值與波浪入射角、相位及港池岸壁之反射係數有關， $\alpha=0$  時表示港池岸壁為完全反射之情況(即  $\partial \zeta_2 / \partial n = 0$ )，而  $\alpha=1$  則表示港池岸壁具有完全消能之作用。一般常用之計算式如下：

$$\alpha = \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \dots\dots\dots (1.43)$$

式中  $K_r$  為邊界之反射係數。

在領域(I)內波浪之波函數  $\zeta_1$  通常是由入射波  $\zeta_i$  及受到直線海岸線

影響產生的反射波  $\zeta_R$  及受到防波堤配置和港池開口影響而向外傳播之  
 散射波  $\zeta_S$  等構成的，因此  $\zeta_1$  可表示

$$\zeta_1 = \zeta_I + \zeta_R + \zeta_S \dots\dots\dots(1.44)$$

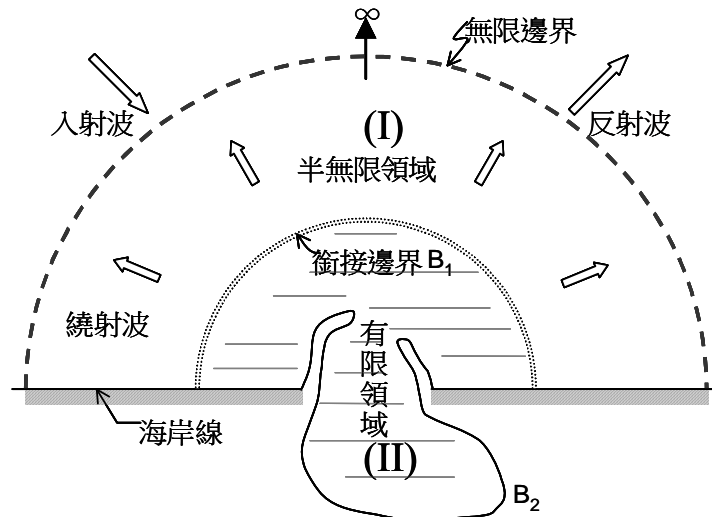
其中散射波  $\zeta_S$  係由港池開口往外海方向輻射出去，在無窮遠處滿足  
 波浪輻射條件：

$$\lim_{k_1 r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} + ik_1 \right) \zeta_S = 0 \dots\dots\dots(1.45)$$

假設入射波浪  $\eta^I(x, y, t)$  之振幅為  $A^I$ ，波長為  $L_1$ ，週波數為  $k_1$ ，波向  
 為與正 x 軸成  $\theta_0$  角度，其複數表示為：

$$\eta^I(x, y, t) = A^I e^{-i[k_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - \omega t]} \dots\dots\dots(1.46)$$

針對上述邊界值問題，一般常採用混合方法求解(Mei, 1989)，即對  
 於領域(I)使用理論解析法，領域(II)使用有限元素法合併求解(詳細求解  
 過程請參考 Mei, 1989，或李等, 2002)。



附圖 1.3 港域波浪模式計算領域示意圖

## 附錄二

### 水動力模式基本理論介紹

## 水動力控制方程式

假設水體為具有黏滯性之不可壓縮流體，並考慮地球自轉運動之影響，則描述二維平面流場之連續方程式及運動方程式可表示如下：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = Q_0 \dots\dots\dots (A2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(H^{-1}q_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(H^{-1}q_xq_y)}{\partial y} - fq_y \\ = -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^s - \tau_x^b) + \left( \frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial y} \right) \dots\dots (A2.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(H^{-1}q_xq_y)}{\partial x} + \frac{\partial(H^{-1}q_y^2)}{\partial y} + fq_x \\ = -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^s - \tau_y^b) + \left( \frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) \dots\dots (A2.3) \end{aligned}$$

其中

$$H = \int_{-h}^{\eta} dz = h + \eta \dots\dots\dots (A2.4a)$$

$$q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}H \dots\dots\dots (A2.4b)$$

$$q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}H \dots\dots\dots (A2.4c)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} u dz \dots\dots\dots (A2.4d)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} v dz \dots\dots\dots (A2.4e)$$

$$F_{ij} = E_{ij} (q_{j,i} + q_{i,j}) \quad i, j = x, y \dots\dots\dots (A2.4f)$$

$$\tau_i^b = C_f (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \frac{q_i}{H^2} \quad i = x, y \dots\dots\dots (A2.4g)$$

$$\tau_i^s = \rho_a C_d |U_{10}| U_i \quad i, j = x, y \dots \dots \dots (A2.4h)$$

此處

$h$  = 靜水深，

$\eta$  = 水位變化，

$u$  =  $x$  方向之水平流速，

$v$  =  $y$  方向之水平流速，

$Q_0$  = 以 Source 或 Sink 形式進出領域之流量，

$\rho_0$  = 流體平均密度，

$\rho_a$  = 空氣密度，

$p^s$  = 水面壓力，

$g$  = 重力常數，

$\tau_x^b$  =  $x$  方向之底床剪應力，

$\tau_y^b$  =  $y$  方向之底床剪應力，

$\tau_x^s$  =  $x$  方向之水面剪應力

$\tau_y^s$  =  $y$  方向之水面剪應力

$C_f$  = 底床摩擦係數，引用 Manning 公式可得  $C_f = \frac{n^2 g}{H^{1/3}}$ ，

$n$  = 曼寧係數，

$C_d$  = 風力係數，其值為  $C_d = (1.1 + 0.0536U_{10})10^{-3}$ ，

$U_{10}$  = 海面上10公尺處之風速

$E_{ij}$  = 渦動黏滯係數(Eddy coefficient)，

$f$  = 柯氏參數(Coriolis parameter)，等於  $2\omega \sin \phi$ ，

$\omega$  = 地球自轉之位相速度，

$\phi$  = 計算領域所在位置之緯度，

問題之初始條件為

$$\eta(x, y, t) = \eta_0(x, y) \quad \text{或} \quad H(x, y, t) = H_0(x, y) \dots\dots\dots (A2.5a)$$

$$q_x(x, y, t) = q_{x0}(x, y) \quad \text{及} \quad q_y(x, y, t) = q_{y0}(x, y) \dots\dots\dots (A2.5b)$$

式中  $\eta_0$ 、 $H_0$ 、 $q_{x0}$  及  $q_{y0}$  分別代表時間  $t = 0$  時之水位、水深及 x、y 方向流量。

問題之邊界條件則考慮流量邊界條件如下：

$$q_n = \alpha_{nx}q_x + \alpha_{ny}q_y = \hat{q}_n \dots\dots\dots (A2.6a)$$

$$q_s = -\alpha_{ny}q_x + \alpha_{nx}q_y = \hat{q}_s \dots\dots\dots (A2.6b)$$

或

$$q_x = \alpha_{nx}q_n - \alpha_{ny}q_s \dots\dots\dots (A2.7a)$$

$$q_y = \alpha_{nx}q_s + \alpha_{ny}q_n \dots\dots\dots (A2.7b)$$

式中  $\alpha_{nx}$  及  $\alpha_{ny}$  為方向導數，下標 n 及 s 分別表示法線及切線方向， $\hat{q}_n$  及  $\hat{q}_s$  表示給定之邊界條件。

此外，內應力項之邊界條件為

$$F_x = \alpha_{nx}F_{xx} + \alpha_{ny}F_{yx} = \hat{F}_x \dots\dots\dots (A2.8a)$$

$$F_y = \alpha_{nx}F_{xy} + \alpha_{ny}F_{yy} = \hat{F}_y \dots\dots\dots (A2.8b)$$

式中  $\hat{F}_x$  及  $\hat{F}_y$  表示給定之邊界條件。

### 有限元素法方程式

本計畫二維有限元素水動力模式係採用葛金斯加權殘差有限元素數值方法求解二維水動力系統控制方程式(A2.1)~(A2.3)式及其邊界值問題。依據 Stokes 理論(A2.1)~(A2.3)式可改寫成下列積分方程式：



$$\iint_A \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - Q_0 \right] \delta H \, dA = 0 \dots\dots\dots (A2.9)$$

$$\begin{aligned} & \iint_A \left[ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial (H^{-1} q_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial (H^{-1} q_y q_x)}{\partial y} - f q_y + \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} (P^s + \rho g \eta) \right] \delta q_x \, dA \\ & - \iint_A \left[ \frac{\tau_x^s - \tau_x^b}{\rho_0} \delta q_x - F_{xx} \frac{\partial (\delta q_x)}{\partial x} - F_{yx} \frac{\partial (\delta q_x)}{\partial y} \right] dA - \int_{\partial A} F'_x \delta q_x \, dL = 0 \end{aligned} \dots (A2.10)$$

$$\begin{aligned} & \iint_A \left[ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial (H^{-1} q_x q_y)}{\partial x} + \frac{\partial (H^{-1} q_y^2)}{\partial y} + f q_x + \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} (P^s + \rho g \eta) \right] \delta q_y \, dA \\ & - \iint_A \left[ \frac{\tau_y^s - \tau_y^b}{\rho_0} \delta q_y - F_{xy} \frac{\partial (\delta q_y)}{\partial x} - F_{yy} \frac{\partial (\delta q_y)}{\partial y} \right] dA - \int_{\partial A} F'_y \delta q_y \, dL = 0 \end{aligned} \dots (A2.11)$$

式中  $A$  代表計算領域， $\partial A$  代表計算領域  $A$  之邊界， $dA$  及  $dL$  分別代表面積分及線積分之微小單元， $\delta H$ 、 $\delta q_x$  及  $\delta q_y$  分別為權函數 (weighting function)， $F'_x$  及  $F'_y$  分別代表邊界上的內應力量。

常見求解上述積分方程式 (A2.9)~ (A2.11) 式之方法為有限元素近似法，即將計算領域分割成有限個次領域 (subdomain) 稱之為元素 (element)，各元素之間以節點 (nodes) 連接，節點上的未知數稱為自由度 (degree of freedom)。本計畫採用含有三個節點之三角形元素分割計算領域，在每個元素內上述物理量  $H$ 、 $q_x$  及  $q_y$  可以分別用線性內插函數 (或稱為形狀函數)  $N_j^e$  ( $j = 1, 2, 3$ ，對應於三角元素三個節點) 及節點上未知函數  $H_j^e$ 、 $q_{xj}^e$  及  $q_{yj}^e$  近似表示，即

$$H^e = N_1^e H_1^e + N_2^e H_2^e + N_3^e H_3^e = \{N^e\}^T \{H^e\} = \{H^e\}^T \{N^e\} \dots\dots\dots (A2.12)$$

$$q_x^e = N_1^e q_{x1}^e + N_2^e q_{x2}^e + N_3^e q_{x3}^e = \{N^e\}^T \{q_x^e\} = \{q_x^e\}^T \{N^e\} \dots\dots\dots (A2.13a)$$

$$q_y^e = N_1^e q_{y1}^e + N_2^e q_{y2}^e + N_3^e q_{y3}^e = \{N^e\}^T \{q_y^e\} = \{q_y^e\}^T \{N^e\} \dots\dots\dots (A2.13b)$$

上述表示式中  $\{H^e\}$ 、 $\{q_x^e\}$ 、 $\{q_y^e\}$  及  $\{N^e\}$  之轉置矩陣分別為

$$\{H^e\}^T = \{H_1^e, H_2^e, H_3^e\} \dots\dots\dots (A2.14a)$$

$$\{q_x^e\}^T = \{q_{x1}^e, q_{x2}^e, q_{x3}^e\} \dots\dots\dots (A2.14b)$$

$$\{q_y^e\}^T = \{q_{y1}^e, q_{y2}^e, q_{y3}^e\} \dots\dots\dots (A2.14c)$$

$$\{N^e\}^T = \{N_1^e, N_2^e, N_3^e\} \dots\dots\dots (A2.14d)$$

其中三角元素之線性內插函數  $N_j^e$  計算如下

$$N_j^e = (a_j + b_j x + c_j y) / 2\Delta^e, \quad j = 1, 2, 3 \dots\dots\dots (A2.15a)$$

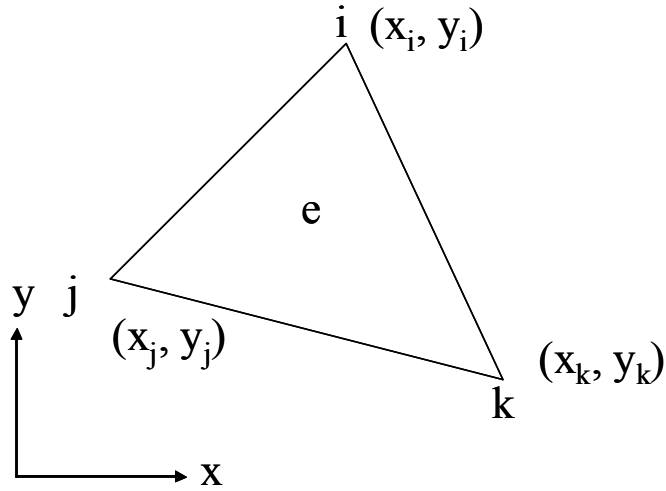
$$a_i = x_j^e y_k^e - x_k^e y_j^e \dots\dots\dots (A2.15b)$$

$$b_i = y_j^e - y_k^e \dots\dots\dots (A2.15c)$$

$$c_i = x_k^e - x_j^e \dots\dots\dots (A2.15d)$$

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} \dots\dots\dots (A2.15e)$$

式中  $(x_j^e, y_j^e)$  為三角元素節點  $j$  之座標(如附圖 2.1 所示), (A2.15e) 式代表座標之線性函數。



附圖 2.1 三角形元素座標定義

(A2.9)式各項積分式之計算說明如下：

$$\begin{aligned} \iint_A \frac{\partial H}{\partial t} \delta H \Gamma \Lambda &= \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\partial H}{\partial t} \delta H \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \{N^e\}^T \frac{\partial \{H^e\}}{\partial t} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [M_h^e] \frac{\partial \{H^e\}}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{A2.16a})$$

$$\begin{aligned} \iint_A \frac{\partial q_x}{\partial x} \delta H \Gamma \Lambda &= \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} \delta H \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial x} \{q_x^e\} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [G_x^e] \{q_x^e\} \end{aligned} \quad \dots (\text{A2.16b})$$

$$\begin{aligned} \iint_A \frac{\partial q_y}{\partial y} \delta H \Gamma \Lambda &= \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\partial q_y}{\partial y} \delta H \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial y} \{q_y^e\} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [G_y^e] \{q_y^e\} \end{aligned} \quad \dots (\text{A2.16c})$$

$$\begin{aligned} \iint_A Q_0 \delta H \Gamma \Lambda &= \sum_{e \in A} \iint_e (Q_0 \delta H) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \{N^e\}^T \{Q_0^e\} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [M_h^e] \{Q_0^e\} \end{aligned} \quad \dots (\text{A2.16d})$$

其中

$$[M_h^e] = \iint_e \{N^e\} \{N^e\}^T dA^e = \frac{\Delta^e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A2.17a)$$

$$[G_x^e] = \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial x} dA^e = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A2.17b)$$

$$[G_y^e] = \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial y} dA^e = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A2.17c)$$

將上述各項積分離散式代入積分方程式(A2.9)式，則(A2.9)式可簡化成

$$\sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \left\{ [M_h^e] \frac{\partial \{H^e\}}{\partial t} + [G_x^e] \{q_x^e\} + [G_y^e] \{q_y^e\} - [M_h^e] \{Q_0^e\} \right\} = 0 \dots (A2.18)$$

定義陣列 $\{\delta H\}$ 及 $\{H\}$ 分別為全部的 $\{\delta H^e\}$ 及 $\{H^e\}$ 結合後之整體陣列(global array)，陣列 $\{q\}$ 為 $\{q_x^e\}$ 及 $\{q_y^e\}$ 合併後之整體陣列，則(A2.18)式可結合成一矩陣方程式如下

$$\{\delta H\}^T \left\{ [M_h] \frac{\partial \{H\}}{\partial t} + [G_h] \{q\} + \{R_h\} \right\} = 0 \dots\dots\dots (A2.19)$$

式中整體矩陣 $[M_h]$ 、 $[G_h]$ 及 $\{H^e\}$ 分別為元素矩陣 $[M_h^e]$ 、 $[G_x^e]$ 與 $[G_y^e]$ 以及 $[M_h^e] \{Q_0^e\}$ 結合後之整體矩陣列，其中整體矩陣 $[M_h]$ 為一對稱矩陣。

由於陣列 $\{\delta H\}^T$ 為任意函數，故可得到

$$\left\{ [M_h] \frac{\partial \{H\}}{\partial t} + [G_h] \{q\} + \{R_h\} \right\} = 0 \dots\dots\dots (A2.20)$$

(A2.10)式各項積分式之計算說明如下：

$$\iint_A \left( \frac{\partial q_x}{\partial t} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\partial q_x}{\partial t} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T [M_h^e] \frac{\partial \{ q_x^e \}}{\partial t} \quad \text{..... (A2.21a)}$$

定義  $\hat{q}_{ij} = H^{-1} q_i q_j$  ,  $i, j = x, y$

$$\iint_A \left( \frac{\partial H^{-1} q_x^2}{\partial x} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\partial H^{-1} q_x^2}{\partial x} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T [G_x^e] \{ \hat{q}_{xx}^e \} \quad \text{(A2.21b)}$$

$$\iint_A \left( \frac{\partial H^{-1} q_x q_y}{\partial y} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\partial H^{-1} q_x q_y}{\partial y} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T [G_y^e] \{ \hat{q}_{yx}^e \} \quad \text{..... (A2.21c)}$$

$$\iint_A (f q_y \delta q_x) dA = \sum_{e \in A} \iint_e (f q_y \delta q_x) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T f [M_h^e] \{ q_y^e \} \quad \text{..... (A2.21d)}$$

$$\begin{aligned} \iint_A \left( \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p^s}{\partial x} \delta q_x \right) dA &= \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p^s}{\partial x} \delta q_x \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T [M_h^e] \{ H^e \} \frac{(b_1 p_1 + b_2 p_2 + b_3 p_3)}{2 \rho_0 \Delta^e} \quad \text{..... (A2.21e)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \iint_A \left( g H \frac{\partial \eta}{\partial x} \delta q_x \right) dA &= \sum_{e \in A} \iint_e \left( g H \frac{\partial \eta}{\partial x} \delta q_x \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T [M_h^e] \{ H^e \} \frac{g(b_1 \eta_1^e + b_2 \eta_2^e + b_3 \eta_3^e)}{2 \Delta^e} \quad \text{..... (A2.21f)} \end{aligned}$$

$$\iint_A \left( \frac{\tau_x^s}{\rho_0} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\tau_x^s}{\rho_0} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_x^{se} \} \quad \text{..... (A2.21g)}$$

$$\iint_A \left( \frac{\tau_x^b}{\rho_0} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left( \frac{\tau_x^b}{\rho_0} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_x^{be} \} \quad \text{..... (A2.21h)}$$

$$\iint_A \left( F_{xx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left( F_{xx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{E_{xx} \bar{H}}{12 \Delta^e} [M_{bb}^e] \{ \bar{u}^e \} \quad \text{(A2.21i)}$$

$$\begin{aligned} \iint_A \left( F_{yx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA &= \sum_{e \in A} \iint_e \left( F_{yx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{E_{yx} \bar{H}}{24 \Delta^e} \{ [M_{cb}^e] \{ \bar{v}^e \} + [M_{cc}^e] \{ \bar{u}^e \} \} \quad \text{..... (A2.21j)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\partial A} (F'_x \delta q_x) dL &= \sum_{\partial e \in \partial A} \int_{\partial e} (F'_x \delta q_x) dL^e = \sum_{\partial e \in \partial A} \{\delta q_x^e\}^T \int_{\partial e} \{N^e\} \{N^e\}^T \{F'_x\} dL^e \\ &= \sum_{\partial e \in \partial A} \{\delta q_x^e\}^T \frac{L^e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \{F'_x\} \end{aligned} \quad (\text{A2.21k})$$

其中  $\bar{H}^e = (H_1^e + H_2^e + H_3^e)$  ,  $(\bar{u}, \bar{v}) = H^{-1}(q_x, q_y)$

$$[M_{bb}^e] = \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ b_2 b_1 & b_2^2 & b_2 b_3 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A2.22a})$$

$$[M_{cb}^e] = \begin{bmatrix} c_1 b_1 & c_1 b_2 & c_1 b_3 \\ c_2 b_1 & c_2 b_2 & c_2 b_3 \\ c_3 b_1 & c_3 b_2 & c_3 b_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A2.22b})$$

$$[M_{cc}^e] = \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{A2.22c})$$

同理，(A2.11)式各項積分式之計算如下：

$$\iint_A \left( \frac{\partial q_y}{\partial t} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{\delta q_y^e\}^T [M_h^e] \frac{\partial \{q_y^e\}}{\partial t} \dots\dots\dots (\text{A2.23a})$$

$$\iint_A \left( \frac{\partial H^{-1} q_x q_y}{\partial x} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{\delta q_y^e\}^T [G_x^e] \{\hat{q}_{xy}^e\} \dots\dots\dots (\text{A2.23b})$$

$$\iint_A \left( \frac{\partial H^{-1} q_y^2}{\partial y} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{\delta q_y^e\}^T [G_y^e] \{\hat{q}_{yy}^e\} \dots\dots\dots (\text{A2.23c})$$

$$\iint_A (f q_x \delta q_y) dA = \sum_{e \in A} \{\delta q_y^e\}^T f [M_h^e] \{q_x^e\} \dots\dots\dots (\text{A2.23d})$$

$$\iint_A \left( \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p^S}{\partial y} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{\delta q_y^e\}^T [M_h^e] \{H^e\} \frac{(c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3)}{2 \rho_0 \Delta^e} \dots\dots (\text{A2.23e})$$

$$\iint_A \left( g H \frac{\partial \eta}{\partial y} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{\delta q_y^e\}^T [M_h^e] \{H^e\} \frac{g(c_1 \eta_1^e + c_2 \eta_2^e + c_3 \eta_3^e)}{2 \Delta^e} \dots\dots (\text{A2.23f})$$

$$\iint_A \left( \frac{\tau_y^s}{\rho_0} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_y^{se} \} \dots\dots\dots (A2.23g)$$

$$\iint_A \left( \frac{\tau_y^b}{\rho_0} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_y^{be} \} \dots\dots\dots (A2.23h)$$

$$\iint_A \left( F_{yx} \frac{\partial \delta q_y}{\partial y} \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{E_{xy} \bar{H}}{24 \Delta^e} \{ [M_{cb}^e] \{ \bar{u}^e \} + [M_{bb}^e] \{ \bar{v}^e \} \} \dots\dots\dots (A2.23i)$$

$$\iint_A \left( F_{yy} \frac{\partial \delta q_y}{\partial y} \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{E_{yy} \bar{H}}{12 \Delta^e} [M_{cc}^e] \{ \bar{v}^e \} \dots\dots\dots (A2.23j)$$

$$\int_{\partial A} (F_y' \delta q_y) dL = \sum_{\partial e \in \partial A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{L^e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \{ F_y'^e \} \dots\dots\dots (A2.23k)$$

將上述各項積分式分別代入(A2.10)式及(A2.11)式並且將其組合成一整體矩陣方程式如下：

$$[M_m] \frac{\partial \{q\}}{\partial t} + [G_m] \{q\} + [K_m] \{\eta\} + \{R_m\} = 0 \dots\dots\dots (A2.24)$$

以上推導得知透過有限元素空間座標積分可以將原積分方程式(A2.9)~(A2.11)離散化成求解一階時間項常微分方程組(A2.20)式及(A2.24)式。

一般而言，求解上述一階時間項常微分方程組(A2.20)式及(A2.24)式之方法甚多，原則上以求解方法之精確性、穩定性及效率為主要考量因素。本研究採用時間分離(split-time)之前項差分方法求解(A2.20)式及(A2.24)式，有關求解之程序說明如下：

先將一階時間項常微分方程組(A2.20)式及(A2.24)式重組成

$$[M_h] \frac{\partial \{H\}}{\partial t} = \{P_h\} \dots\dots\dots (A2.25)$$

$$[M_m] \frac{\partial \{q\}}{\partial t} = \{P_m\} \dots\dots\dots (A2.26)$$

式中陣列  $\{P_h\}$  及  $\{P_m\}$  之元素通常為  $H$ 、 $q$  及  $t$  之函數。

求解上時間項採用梯型法則計算且  $H$  及  $q$  分別在時間序列上交錯排列，即  $H$  及  $q$  分別在時間  $t_{n-\frac{1}{2}}$  及  $t_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 上求解，則(A2.25)式及(A2.26)式可改寫成

$$[M_h] \left\{ \{H\}_{n+\frac{1}{2}} - \{H\}_{n-\frac{1}{2}} \right\} = \Delta t \left\{ P_h \left( \{H\}_{n-\frac{1}{2}}, \{q\}_n, t_n \right) \right\} \dots\dots\dots (A2.27)$$

$$[M_m] \left\{ \{q\}_{n+1} - \{q\}_n \right\} = \Delta t \left\{ P_m \left( \{H\}_{n+\frac{1}{2}}, \{q\}_n, t_{n+\frac{1}{2}} \right) \right\} \dots\dots\dots (A2.28)$$

或

$$\{H\}_{n+\frac{1}{2}} = \{H\}_{n-\frac{1}{2}} + \Delta t [M_h]^{-1} \left\{ P_h \left( \{H\}_{n-\frac{1}{2}}, \{q\}_n, t_n \right) \right\} \dots\dots\dots (A2.29)$$

$$\{q\}_{n+1} = \{q\}_n + \Delta t [M_m]^{-1} \left\{ P_m \left( \{H\}_{n+\frac{1}{2}}, \{q\}_n, t_{n+\frac{1}{2}} \right) \right\} \dots\dots\dots (A2.30)$$

因此當初始條件  $\{H\}_{n-\frac{1}{2}}$  及  $\{q\}_n$  已知時，可由(A2.29)式直接求解  $\{H\}_{n+\frac{1}{2}}$ ，再由(A2.30)式求解  $\{q\}_{n+1}$ ，然後重複上述步驟連續求解。

依據 Connor and Wang (1974)研究結果指出上述求解方法之穩定性條件(stability condition)為

$$\Delta t < 1.5 \Delta t_{cr} = 1.5 \Delta s^* / U^* \dots\dots\dots (A2.31)$$

式中  $\Delta s^*$  為代表性網格大小， $U^* = \sqrt{2gH}$ 。

有關渦動粘滯性係數之決定，Connor and Wang (1974)提出下列經驗公式，亦即

$$E_{xx} \sim ag(\tilde{\eta}/\tilde{u})\tilde{x} \dots\dots\dots (A2.32)$$

式中  $E_{xx}$  為渦動粘滯性係數，其單位為  $m^2/s$ ， $a$  為無因次係數，其合理的範圍為 0.01~0.1 之間； $g$  為重力加速度， $\tilde{\eta}$  為潮汐代表性潮差， $\tilde{u}$  為潮流代表性流速， $\tilde{x}$  為三角元素代表性邊界。



## 第二部分

# 海嘯對港區及跨河橋梁之影響 風險評估研究



## 摘要

本研究計畫為「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫之分項子計畫，其目的為掌握可能造成大海嘯的斷層發生地震時，臺灣沿岸(港灣近岸港區為重點)之海嘯影響範圍與淹水潛勢，提供公路單位、航港局、港務公司及其分公司或觀光局，預先掌握對臺灣環島近岸地區可能發生之風險及因應措施。

海嘯會在沿海地區的引起巨大的破壞，而一個實用的海嘯預警系統的實施，將可減輕這毀滅性的災難。在 2004 年印度洋海嘯後，在印度洋周邊的國家已經建立海嘯預警系統。然而，最近發生的海嘯事件，如 2009 年美屬薩摩亞海嘯和 2010 年印尼海嘯及 2011 年東日本海嘯之案例也曝露一些問題存在於目前海嘯預警系統。此外，臺灣、呂宋島、馬尼拉海溝、琉球群島和東太平洋的周邊地區地震頻繁，因此建構適用的海嘯預警系統是對臺灣特別重要的意義。

目前國外發佈海嘯警報時，只提供地震規模，未能提供海嘯波高；故臺灣港務公司及各港務分公司皆無所依循。為爭取時效並提高海嘯數值模擬之精度，本研究建構海嘯速報系統以及蘇澳、花蓮兩港之子系統，使能自動擷取 USGS (United States Geological Survey) 網站來更新，再自動進行海嘯模擬。另一方面，本計劃利用機率之概念評估蘇澳港及花蓮港在未來 50 年及 100 年所可能遭受之海嘯風險，以及建立跨河橋梁之海嘯模式，以模擬海嘯受淺化效應溯升對其跨河橋梁之影響，其結果將對現有港灣結構物設計準則有所幫助。

本研究成果可提供臺灣港務公司及各港務分公司對海嘯來襲時能充分了解狀況，並適時安排最妥善的應變。

# ABSTRACT

A tsunami can induce huge damage in the coastal area. This devastating disaster will be mitigated if a practical tsunami warning system is implemented. After the Indian Ocean Tsunami of Dec. 2004, tsunami warning system has been established in counties around the Indian Ocean. However, recent tsunami events such as the Samoa tsunami of 2009 and the Indonesia tsunami of 2010 show that there are some problems in the present tsunami warning systems and/or processes. The huge Eastern Japan Tsunami of March 2011 also reminds us how serious the disaster can be. Besides, for the neighboring area of Taiwan, Ryukyu Islands, Manila trench, Luzon Island and the eastern Pacific Ocean all have frequent earthquakes and hence an applicable tsunami early warning system is of special importance to Taiwan.

In the existing tsunami warning system of the Pacific Ocean, only the scale of earthquake, instead of the tsunami wave height, is provided. The information is not useful for harbor companies. In order to accelerate the warning process, improve the accuracy of the tsunami, the original tsunami early warning system is improved and developed in this project. This system can automatically get the earthquake parameters of the United States Geological Society. Then, the tsunami warning system can automatically estimate the arrival time of the leading wave and the maximum wave height after these parameters are obtained. Furthermore, the estimation of tsunami risk in future 50, 100 year for Suao Harbor and Hualien Harbor are also determined in this project. Besides inundating the land, a tsunami can induce scour around bridge piers as it propagates upstream in a river. Pier Scouring due to tsunamis in the Kaoping River will also be investigated in the present study.

# 海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究

## 目 錄

摘 要 .....	I
目 錄 .....	III
圖 目 錄 .....	VIII
表 目 錄 .....	XVIII
第一章 緒論 .....	1-1
1.1 前言 .....	1-1
1.2 研究範圍與工作內容 .....	1-2
1.3 工作項目及預期成就 .....	1-2
1.4 前期成果 .....	1-4
第二章 海嘯資料蒐集 .....	2-1
2.1 環太平洋地震帶及海嘯災害概述 .....	2-1
2.2 臺灣鄰近海域之海嘯紀錄 .....	2-4
2.3 遠域海嘯紀錄 .....	2-10
2.4 海嘯之預警與溢淹潛勢圖之必要性 .....	2-12
第三章 海嘯速報系統之建置 .....	3-1
3.1 海嘯速報系統及海嘯預警系統 .....	3-1
3.2 海嘯數值模式介紹 .....	3-2
3.2.1 海嘯水動力數值模式 .....	3-3

3.2.2	海嘯數值模擬與巢狀網格.....	3-11
3.3	系統建構.....	3-14
3.3.1	地震資料來源與擷取.....	3-15
3.3.2	地震級數之轉換.....	3-19
3.3.3	斷層參數.....	3-24
3.3.4	斷層長寬及震源深度之設定.....	3-25
3.3.5	海嘯初始水位之生成.....	3-27
3.4	數值模擬進行海嘯預警之方式.....	3-30
3.4.1	傳統格林函數.....	3-31
3.4.2	互逆格林函數.....	3-35
3.4.3	系統介面說明.....	3-38
3.5	自動化操作說明及實例運作.....	3-41
第四章	模式精進及實例探討.....	4-1
4.1	精進系統數值模式之格林函數.....	4-1
4.2	蘇澳港域及花蓮港域海嘯預警子系統.....	4-3
4.2.1	蘇澳及花蓮港域之潛在海嘯波源區.....	4-3
4.2.2	海嘯預警子系統.....	4-5
4.2.3	點位設定.....	4-7
4.3	實例驗證.....	4-8
4.3.1	驗證方法-總體驗經驗模態分解法(EEMD).....	4-8
4.3.2	EEMD 法之應用—2010 智利海嘯事件之水位驗證....	4-9

4.3.3 海嘯速報系統之驗證—311 東日本海嘯事件 .....	4-17
4.4 系統實例操作 .....	4-24
4.5 系統作業化之運作情形 .....	4-26
第五章 海嘯災害風險評估 .....	5-1
5.1 前言 .....	5-1
5.2 海嘯地震發生次數期望值 .....	5-2
5.2.1 研究區域及地震資料 .....	5-2
5.2.2 海嘯發生條件 .....	5-6
5.3 蘇澳港之溢淹模擬 .....	5-8
5.3.1 數值地形 .....	5-8
5.3.2 蘇澳港之模擬結果 .....	5-11
5.3.3 溢淹機率 .....	5-16
5.3.4 蘇澳港之溢淹點位分佈及機率 .....	5-18
5.3.4.1 不同週期與入射波與溢淹機率 .....	5-26
5.3.5 海嘯地震且溢淹之機率 .....	5-27
5.4 花蓮港之溢淹模擬 .....	5-35
5.4.1 數值地形 .....	5-35
5.4.2 蘇澳港之模擬結果 .....	5-37
5.4.3 蘇澳港之溢淹點位分佈及機率 .....	5-41
5.4.4 海嘯地震且溢淹之機率 .....	5-49
第六章 海嘯對跨河橋梁之影響模擬分析 .....	6-1

6.1 前言 .....	6-1
6.2 高屏溪數值地形 .....	6-2
6.3 海嘯沿高屏溪口溯上模擬 .....	6-4
6.4 跨河橋梁受海嘯波之衝擊力分析 .....	6-9
6.4.1 雙園大橋及數值地形 .....	6-9
6.4.2 橋墩沖刷 .....	6-13
6.4.3 FLUIDITY 沉積物模擬 .....	6-20
6.4.3.1 模式設定 .....	6-20
6.4.3.2 模擬結果 .....	6-24
6.4.4 海嘯溯上引致作用力 .....	6-30
6.4.5 TRUCHAS 三維模擬 .....	6-34
6.4.5.1 模式設定 .....	6-36
6.4.5.2 模擬結果 .....	6-37
第七章 結論與建議 .....	7-1
7.1 結論 .....	7-1
7.2 建議 .....	7-2
參考文獻 .....	參-1
附錄一 互逆格林函數之驗證與應用 .....	附 1-1
附錄二 速算系統介面及操作說明 .....	附 2-1
附錄三 環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數 .....	附 3-1
附錄四 8 個主要商港地震舉規模與入射波關係 .....	附 4-1



附錄五 數值模式控制方程.....	附 5-1
附錄六 模擬橋墩墩柱受水流之壓力及沖刷結果.....	附 6-1

## 圖目錄

圖 2.1	環太平洋地震帶及海溝分佈.....	2-1
圖 2.2	1500-2014 年海嘯事件之地震規模分析.....	2-2
圖 2.3	1500-2014 年海嘯事件之震源深度分析.....	2-2
圖 2.4	蘇澳港之放大率及海嘯潛勢波源區.....	2-4
圖 2.5	花蓮港之放大率及海嘯潛勢波源區.....	2-5
圖 2.6	板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖.....	2-5
圖 2.7	1867 年基隆海嘯事件，雞籠頭沿海遭受海嘯之侵襲.....	2-7
圖 2.8	臺灣海嘯事件之震源分佈.....	2-9
圖 2.9	1960 年基隆遭受智利海嘯襲擊之紀錄.....	2-11
圖 2.10	921 大地震造成地表斷層上下錯動.....	2-12
圖 3.1	電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置.....	3-2
圖 3.2	交錯式有限差分網格.....	3-8
圖 3.3	移動邊界示意圖(a).....	3-10
圖 3.4	移動邊界示意圖(b).....	3-10
圖 3.5	巢狀網格示意圖.....	3-12
圖 3.6	模式計算區域水深地圖.....	3-13
圖 3.7	模式計算區域水深地形剖面圖.....	3-14
圖 3.8	與馬爾地夫水位之比對.....	3-14
圖 3.9	海嘯速報系統之規劃圖.....	3-15
圖 3.10	美國 USGS 資料庫.....	3-16

圖 3.11	中央氣象局網站之即時地震資料.....	3-17
圖 3.12	遠端擷取 USGS 地震資料格式.....	3-17
圖 3.13	日本防災科學技術研究所 F-net 即時地震資料.....	3-18
圖 3.14	目前完成之即時地震擷取系統介面.....	3-19
圖 3.15	(a) $M_S$ 規模轉換之 $M_W$ 規模之對應圖(b) $M_B$ 規模 轉換至 $M_W$ 規模之對應圖.....	3-24
圖 3.16	斷層參數示意圖.....	3-25
圖 3.17	(a)斷層幾何形狀及座標系統(b)斷層及映像斷層座標系統	3-28
圖 3.18	現行海嘯數值模式之模擬程序.....	3-31
圖 3.19	以基隆為例之格林函數所對應的初始水位.....	3-32
圖 3.20	傳統海嘯之模擬結果.....	3-35
圖 3.21	傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖.....	3-37
圖 3.22	傳海嘯模式所計算出之格林函數與互逆格林函數比較.....	3-37
圖 3.23	互逆格林函數與傳統海嘯模式之水位變化驗證.....	3-38
圖 3.24	GUI 程式設計環境.....	3-39
圖 3.25	視窗化操作系統之建立與排版.....	3-40
圖 3.26	視窗化介面之編譯完成圖.....	3-40
圖 3.27	(a)USGS 所公佈之地震參數(b)震央位址.....	3-42
圖 3.28	利用地震參數預估之結果及報告單(a)花蓮港(b)蘇澳港....	3-42
圖 4.1	視窗化系統之計算範圍圖.....	4-2
圖 4.2	單點格林函數數值資料在時間上之分布型態.....	4-2
圖 4.3	(a)單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分	

	為水域，藍色為陸域)(b)高雄港格林函數變更前後之水位 變化驗證.....	4-2
圖 4.4	台灣東北及東部外海之海底地形.....	4-4
圖 4.5	台灣東北外海沖繩海槽之分佈.....	4-4
圖 4.6	琉球海溝之分佈深分佈.....	4-5
圖 4.7	蘇澳港區之平面圖.....	4-6
圖 4.8	花蓮港區之平面圖.....	4-8
圖 4.9	(a)蘇澳港(b)花蓮港之預報點位.....	4-8
圖 4.10	交通部運輸研究所港研中心基隆港觀測站儀器安裝位置 .	4-10
圖 4.11	測站之實測水位.....	4-10
圖 4.12	分析用之實測水位資料.....	4-11
圖 4.13	經過濾潮汐後之水位.....	4-11
圖 4.14	由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6).....	4-12
圖 4.15	由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位 ....	4-12
圖 4.16	預報系統預測智利海嘯(Mw=8.6)於基隆港之預報結果.....	4-14
圖 4.17	預報系統計算結果(Mw=8.6)與實測資料之比較圖.....	4-14
圖 4.18	預報系統預測智利海嘯(Mw=8.8)於基隆港之預報結果.....	4-16
圖 4.19	預報系統計算結果(Mw=8.8)與實測資料之比較圖 .....	4-16
圖 4.20	海嘯速報系統之介面.....	4-18
圖 4.21	(a)USGS 日本 311 宮城海嘯參數(b)臺北港系統模擬水位(紅線) 與濾潮後的實測水位(藍線)比較.....	4-19
圖 4.22	以速算系統及新公佈之 0311 東日本海嘯之地震參數計算蘇澳	

	港之海嘯波到達時間及水位時序分佈 .....	4-21
圖 4.23	以速算系統及地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震 參數計算(a)基隆港(b)花蓮港(c)高雄港(d)安平港(e)布袋港(f) 台中港及(g)臺北港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日 本海嘯事件) .....	4-22
圖 4.24	以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地 震參數(地震矩規模 $M_w8.9$ )及新公佈之地震參數(地震矩規模 $M_w9.0$ )計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日 本海嘯事件) .....	4-23
圖 4.25	2002 年地震位址 .....	4-25
圖 4.26	2002 年地震斷層參數(資料來源：Harvard CMT) .....	4-25
圖 4.27	利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)蘇澳港 (b)花蓮港 .....	4-25
圖 4.28	利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)蘇澳港 (b)花蓮港 .....	4-26
圖 4.29	港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面 .....	4-27
圖 4.30	[近期海嘯查詢]之展示介面 .....	4-28
圖 4.31	[近期海嘯查詢]之查詢結果展示 .....	4-28
圖 4.32	水位歷線圖之展示介面 .....	4-29
圖 4.33	[歷史海嘯查詢]之查詢結果 .....	4-29
圖 4.34	水位歷線圖之文字資料 .....	4-30
圖 5.1	海嘯風險評估流程圖 .....	5-2

圖 5.2	(a)環太平洋地震數量分佈圖(b)太平洋區域之主要海溝分佈及劃分建議.....	5-3
圖 5.3	(a)本研究主要海溝分佈圖及名稱(b)本研究之假設震央點分佈.....	5-3
圖 5.4	USGS-NEIC 地震資料庫.....	5-4
圖 5.5	G-R 關係式之計算範例(東經 133 到 139 度,北緯 34 到 36 度)	5-6
圖 5.6	計算範例(東經 133 到 139 度,北緯 34 到 36 度)之淺層海源地震分佈.....	5-7
圖 5.7	NEIC 中環太平洋地震帶 126 區域點位之歷史地震資料.....	5-8
圖 5.8	臺灣 500m 解析度水深地形資料.....	5-9
圖 5.9	蘇澳港 5m 解析度數值地形檔.....	5-10
圖 5.10	蘇澳港整合海陸域後之數值地形檔.....	5-10
圖 5.11	蘇澳港整併港內實際地形之數值地形檔.....	5-11
圖 5.12	週期 20 分鐘波高 4m 高斯波.....	5-12
圖 5.13	蘇澳港之溢淹圖,入射波高(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-13
圖 5.14	溢淹機率簡示圖.....	5-18
圖 5.15	蘇澳港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-21
圖 5.16	蘇澳港各入射波高下對應之溢淹機率圖.....	5-22
圖 5.17	蘇澳港在各種地震矩規模下之最大波高分佈.....	5-23
圖 5.18	蘇澳港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈.....	5-24

圖 5.19	馬里亞納海溝假設之地震參數後的初始水位.....	5-25
圖 5.20	蘇澳港外海的預報水位.....	5-25
圖 5.21	臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果.....	5-27
圖 5.22(a)	50 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN).....	5-28
圖 5.22(b)	100 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN) .....	5-29
圖 5.23(a)	蘇澳港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP) .....	5-30
圖 5.23(b)	蘇澳港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP) .....	5-31
圖 5.24	蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖 (a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺 (d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-35
圖 5.25	花蓮港 5m 解析度數值地形檔.....	5-36
圖 5.26	花蓮港整合海陸域後之數值地形檔.....	5-37
圖 5.27	花蓮港整併港內實際地形帶入模式之數值地形檔.....	5-37
圖 5.28	花蓮港之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d) 3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-41
圖 5.29	花蓮港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺 (e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-45
圖 5.30	花蓮港各入射波高下對應之溢淹機率圖.....	5-46
圖 5.31	花蓮港在各種地震矩規模下之最大波高分佈.....	5-46
圖 5.32	花蓮港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈.....	5-47
圖 5.33	馬里亞納海溝假設之地震參數後的初始水位.....	5-48
圖 5.34	花蓮港外海的預報水位.....	5-48
圖 5.35	(a) 50 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN).....	5-49

圖 5.35	(b) 100 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN) .....	5-50
圖 5.36	(a)花蓮港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP) .....	5-51
圖 5.36	(b)花蓮港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP) .....	5-47
圖 5.37	花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b) 1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺 .....	5-55
圖 5.38	入射波高 6 公尺於港池中心之海嘯波水位時序圖.....	5-56
圖 6.1	模式第一層網格解析度 5 公尺之數值地形.....	6-2
圖 6.2	第 1 到 10 組橋墩附近之數值地形.....	6-3
圖 6.3	第 11 到 19 組橋墩附近之數值地形.....	6-4
圖 6.4	馬尼拉海溝 33 個子區塊分佈圖.....	6-4
圖 6.5	參考 Megawati et al. (2009)之地震參數建立初始水位 .....	6-6
圖 6.6(a)	模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第一層網格)..	6-6
圖 6.6(b)	模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第二層網格)..	6-7
圖 6.6(c)	模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第三層網格)..	6-7
圖 6.7	模擬三個小時期間河道水位高度分佈(a)50cm(b)3m .....	6-8
圖 6.8	結合 Google Earth 之溢淹圖 .....	6-8
圖 6.9	雙園大橋橋梁斷面圖 .....	6-9
圖 6.10	雙園大橋工程位置圖 .....	6-10
圖 6.11(a)	高屏溪數值地形及橋墩配置 .....	6-12
圖 6.11(b)	雙園大橋橋墩墩柱配置 .....	6-12
圖 6.12	馬蹄形渦流沖刷情形.....	6-13
圖 6.13	穩流、震盪流以及震盪流結合淨流之回歸數據值.....	6-14



- 圖 6.14 模式結果比較圖。(上圖)Rance (1980) 、(下圖)模式結果6-15
- 圖 6.15 19 組橋墩的侵蝕(紅色)與堆積(藍色)，由上至下各為入射鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的情況 ..... 6-16
- 圖 6.16 19 組橋墩在地形解析度 5 公尺(藍色)與 1 公尺(紅色)的侵蝕厚度，由上至下各為入射鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的情況..... 6-18
- 圖 6.17 19 組橋墩在地形解析度 5 公尺(藍色)與 1 公尺(紅色)的侵蝕厚度，由上至下各為入射鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的情況..... 6-18
- 圖 6.18 入射波高 10 公尺入射之模擬於地形解析度 5 公尺(左)與 1 公尺(右)模擬的高程變化(第 7 組橋墩)..... 6-19
- 圖 6.19 19 組橋墩附近地形的最大侵蝕(紅線)與最大堆積(藍線)隨時間的變化..... 6-19
- 圖 6.20 模式區域及網格配置。上圖為模式區域的俯視圖(距離西端 700 公尺的部分)，左下和右下圖為上圖紅色框框的俯視圖和水道中間的垂直剖面圖(垂直 8 層網格)..... 6-21
- 圖 6.21 COMCOT 模式中第 5 組橋墩附近的空間平均水位，a、b、c、d 各為入射波高 3m、4m、6m、10m 的模擬結果..... 6-22
- 圖 6.22 Fluidity 模式的底床載初始條件 ..... 6-23
- 圖 6.23 情境 3 模擬的橋墩附近水位變化。(橋墩附近長 80m、寬 80m 的區域) ..... 6-25
- 圖 6.24 (a)、(b) 為情境 3 在第 5 分鐘時，橋墩附近的水面 X、Y 分量

	流速，(c)、(d)為底部 X、Y 分量流速的水平剖面 .....	6-26
圖 6.25	(a)、(b) 為情境 3 在第 5 分鐘時，橋墩附近的表面 X、Z 分量 流速沿水道中央的垂直剖面，(c)、(d)為離底部 0.2 公尺的 X、 Z 分量流速水平剖面 .....	6-27
圖 6.26	情境 3 在第 5 分鐘的(a)底部剪應力和(b)底床載分佈 .....	6-27
圖 6.27	模擬 40 分鐘後的底床載分佈，情境 1 到 6 各對應於(a)~(f)	6-28
圖 6.28	情境 1、2、3、4 取西橋墩西南區(左)和東橋墩東區(右)的底床 載變化最大點位的時序列.....	6-30
圖 6.29	情境 1、2、5、6 取西橋墩西南區(左)和東橋墩東區(右)的底床 載變化最大點位的時序列.....	6-30
圖 6.30	墩柱受水流作用力之示意與流速與動壓力之關係.....	6-31
圖 6.31	計算壓力分佈之參數點位.....	6-32
圖 6.32(a)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱東面之最大總壓力紀錄	6-32
圖 6.32(b)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱西面之最大總壓力紀錄	6-33
圖 6.32 (c)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱南面之最大總壓力紀錄	6-33
圖 6.32 (d)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱北面之最大總壓力紀錄	6-34
圖 6.33	東日本 311 海嘯致使鐵路橋墩折損.....	6-35
圖 6.34	東日本 311 海嘯致使橋梁拖離橋墩.....	6-36
圖 6.35	橋梁模型 .....	6-37
圖 6.36	0.5 公尺之網格解析度.....	6-37
圖 6.37	模式設定之初始條件.....	6-39
圖 6.38	橋梁受壓力之三維模擬圖(T=5.8s).....	6-39

圖 6.39 模擬之剖面流速.....	6-40
圖 6.40 模擬之剖面壓力分佈圖.....	6-41
圖 6.41 橋面版迎水面壓力(T=5.8 秒至 6.4 秒).....	6-42
圖 6.42 橋面版下方受上舉力分佈圖(T=5.8 秒至 6.4 秒).....	6-43
圖 6.43 橋梁及橋墩所受側向力分佈圖(T=5.8 秒至 6.4 秒).....	6-44
圖 6.44 橋面版迎水面總作用力.....	6-45
圖 6.45 橋面版下方總上舉力.....	6-45
圖 6.46 橋梁及橋墩總側向力.....	6-45

## 表 目 錄

表 2.1	2004~2014 年間重大海嘯事件.....	2-3
表 2.2	臺灣地區西元 1500~2014 年之海嘯事件.....	2-8
表 2.3	2012~2014 年發生之海嘯事件.....	2-11
表 3.1	本研究所使用之斷層參數.....	3-13
表 3.2	本系統主要地震資料之網址及對應之資料提供範圍.....	3-18
表 3.3	(3.30)及(3.31)式迴歸係數之建議值.....	3-26
表 4.1	美國國家地震資訊中心發布最初發布之智利地震 FMT 解..	4-13
表 4.2	美國國家地震資訊中心修正的智利地震 FMT 解.....	4-15
表 5.1	各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值.....	5-6
表 5.2	海嘯地震發生次數期望值.....	5-7
表 5.3	蘇澳港各入射波高下對應之溢淹機率.....	5-22
表 5.4	不同週期波高 2 公尺溢淹臺北港之溢淹機率.....	5-26
表 5.5	花蓮港各入射波高下對應之溢淹機率.....	5-45
表 5.6	8 個主要商港各入射波高下對應之溢淹機率.....	5-57
表 6.1	馬尼拉海溝 33 個子斷層之斷層參數表.....	6-5
表 6.2	雙園大橋橋梁資料表.....	6-11
表 6.3	四種入射波情境在橋墩附近造成的地形變化極值.....	6-17
表 6.4	水和沉積物相關參數.....	6-23
表 6.5	USGS 沉積物粒徑特性計算表.....	6-24
表 6.6	6 個模擬的條件差異.....	6-25
表 6.7	橋墩附近特定區域的最大侵蝕與沉積厚度.....	6-29
表 6.8	不同入射水位及原始水位之模擬結果.....	6-39
表 6.9	不同入射水位於高屏溪模擬結果.....	6-46

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

本計畫配合交通部「交通政策白皮書-運輸」所揭櫫之「提供產業健全的物流環境」政策目標及「應用運輸科技，推動運輸智慧管理，加強資訊便民服務」與「檢討安全管理，加強運輸安全機制，全面維護運輸安全」之發展主軸及依據運輸資訊政策；一：建置資訊蒐集系統，發展標準作業環境，加速運輸資訊基礎建設及運輸安全政策。六：加強海上交通安全管理，進行法規與問題研究，促進海運安全等事項辦理。本研究屬交通部運輸研究所「海岸及道路災害防救科技發展」綱要計畫之分項計畫，「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫規劃四年合作研究計畫之第四年。

一個實用且有效之海嘯早期預警系統/程序能有效地減少海嘯對近岸地區所造成之傷亡。2004 年南亞海嘯造成的重大傷亡，使得印度洋周邊國家開始設置海嘯預警系統。但近年來之數起海嘯事件，證明了現行之海嘯預警系統/程序仍有問題需要改進。2009 年薩摩亞海嘯事件顯示近域海嘯之破壞力；2010 年下半年北印尼海嘯事件，則是曝露了海嘯預警系統後續管理及維護等問題；2011 年東日本海嘯事件，則民眾對於海嘯所引起之嚴重災情留下深刻的印象。因此，一個具實用性可在海嘯發生初期即快速計算出到達時間及波高之海嘯早期預警系統對於近岸地區以及港口是有幫助的。另外，來自於琉球群島、馬尼拉海溝、呂宋島以及太平洋東部之海嘯對臺灣地區而言是值得注意的。

目前國外發佈海嘯警報時，只提供地震規模，未能提供海嘯波高；故各港務分公司皆無所依循。為爭取時效並提高海嘯數值模擬之精度，本研究建構海嘯預警系統以及蘇澳港、花蓮港之子系統，使能自動於美國地質調查局（United States Geological Survey）之網站來更新地震資料，再自動進行海嘯模擬。本計劃利用機率之概念評估蘇澳港域及花蓮港域在未來 50 年及 100 年所可能遭受之海嘯風險，其結果將

對現有港灣結構物設計準則有所幫助；發展淹水潛勢分析與預警系統，提供溢淹模型與風險評估，據以提高港灣防災能力及建立民眾自救知識與緊急逃生用。另一方面，海嘯傳到近岸時，因受到地形淺化效應溯升，由河口逆流而上，對河川中的跨河橋梁造成沖刷情形，本計畫將建立跨河橋梁海嘯數值模式及橋墩週遭受海嘯衝擊時之沖刷數值模式，評估高屏溪跨河橋梁可能遭受的威脅，供運輸單位參考。

## 1.2 研究範圍與工作內容

本研究屬交通部運輸研究所「海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究(2/2)」二年合作研究計畫之第二年，本年度之主要目的為蒐集臺灣鄰近海域或遠區海域之可能發生海嘯隱沒帶、斷層等資料並進行分析、精進蘇澳港域及花蓮港域海嘯數值模式之格林函數、評估港區未來50年及100年之海嘯災害風險及高屏溪口跨河橋梁所受海嘯之衝擊力變化。本計畫將配合交通部「交通政策白皮書-運輸」所揭櫫之「提供產業健全的物流環境」政策目標及「應用運輸科技，推動運輸智慧管理，加強資訊便民服務」與「檢討安全管理，加強運輸安全機制，全面維護運輸安全」之發展主軸，進行相關配合研究。

## 1.3 工作項目及預期成就

本研究計有二年，第一年(102年)已完成工作項目包括(1)高雄港域及安平港域50年及100年之海嘯災害風險評估。(2)高雄港域及安平港域海嘯數值模式之格林函數精進。(3)高雄港域及安平港域海嘯影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。(4)初步發展海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時之數值模式及特性分析。本年度為第二年(103年)，預期完成的主要工作項目如下：

1. 自動擷取太平洋海嘯預警中心 (Pacific Tsunami Warning Center) 或是USGS 網站地震資料。
2. 蘇澳港域及花蓮港域 50年及100年之海嘯災害風險評估。
3. 精進蘇澳港域及花蓮港域海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響

可能範圍及危險程度之潛勢分析。

4. 模擬海嘯沿高屏溪口向上游傳遞之溯上距離、跨河橋梁橋墩附近水位變化、流速及衝擊力等特性。
5. 模擬海嘯沿高屏溪向上游傳遞時跨河橋梁橋墩週遭之沖刷特性。
6. 對於臺灣本島8個主要商港港域及高屏溪海嘯模擬成果進行教育訓練。

本研究計有二年，第一年(102年)已完成之成果、效益及其應用包括(1)高雄港域及安平港域海嘯之溢淹模型，及模擬計算受不同高度的海嘯侵襲時港區之影響範圍，提供公路單位、航港局、港務公司或觀光局，預先掌握對可能發生之風險及因應措施。

(2)海嘯在高雄港域及安平港域發生之機率及風險評估。

(3)模擬海嘯沿高屏溪口向上游傳遞特性。

本年度為第二年(103年)預期成果、效益及其應用如下：

#### (一)預期成果

1. 完整建立臺灣本島8個主要商港港域擴展到整個太平洋海盆之海嘯數值模式。
2. 完整建立臺灣本島8個主要商港港域海嘯之溢淹模型，模擬計算受不同高度的海嘯侵襲時港區之影響範圍。
3. 蒐集太平洋海盆週邊可能發生海嘯的隱沒帶已及歷史地震資料。
4. 定期擷取及時之地震資料，並寫入固定檔案，做為海嘯預警之輸入資料。
5. 建立跨河橋梁之海嘯數值模式。
6. 或得高屏溪跨河橋梁橋墩週遭受海嘯衝擊之特性。

#### (二)效益及應用

1. 能完整提供未來海嘯在臺灣本島8個主要商港港域發生之機率，做為港灣構造物設計基準之參考。
2. 建立海嘯模擬預警系統提供航港局、港務公司及其分公司參考。
3. 掌握可能造成大海嘯的斷層發生地震時，臺灣沿岸(港灣近岸港區為重點)之海嘯影響範圍與淹水潛勢，提供工路單位、航港局、港

務公司及其分公司或觀光局，預先掌握對臺灣環島近岸地區可能發生之風險及因應措施。

4. 提供未來海嘯發生時高屏溪跨河橋梁可能遭受的威脅，供公路單位參考。

## 1.4 前期成果

- (1)有鑑於近來太平洋區域發生多起重大之海嘯事件，且現今預報機制多依賴美日等國之資訊，為增進臺灣海嘯警報之可信度、減少假警報以及提供較充裕之預警時間及海嘯資訊，將近岸海嘯預警系統拓展至遠海域，並建立子系統已達到強化應變海嘯風險之能力。
- (2)完成精進安平港域及高雄港域海嘯數值模式之互逆格林函數資料庫並建立子系統，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。
- (3)計算結果為安平港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 9.84%，100 年為 19.43%；高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.55%，100 年為 1.09%。其分析結果安平港風險值高於高雄港，主要原因為安平港之地形大多為沙洲為主；而高雄港現有高程可抵擋大部份震源及地震矩規模所產生之波高，不至於產生溢淹，故其風險值甚低。
- (4)參考 Megawati et al.所建立之馬尼拉海溝的地震參數，第一波海嘯約 20 分鐘抵達高屏溪口，海嘯波沿高屏溪河道上溯約 9 公里遠，溯上高度最高水位有 3 公尺高，雙園大橋首當其衝；模擬潮汐為高潮位及低潮位兩種不同邊界之條件並對其溯上之水位無較大影響；當入射波高大於 3 公尺，其海嘯波才會沿高屏溪河道上溯至雙園大橋，其水流對橋墩、墩柱引致作用力，對橋墩受水流衝擊面(南面)之最大總壓力為 87.5kPa。橋墩之鄰近地形最高堆積為 0.21 公尺，最大侵蝕為 0.53 公尺。



## 第二章 海嘯資料蒐集

### 2.1 環太平洋地震帶及海嘯災害概述

環太平洋地震帶(又稱環太平洋帶、環太平洋火山帶或火環；(Circum-Pacific seismic zone)是一個圍繞太平洋經常發生地震和火山爆發的地區，全長40,000公里，呈馬蹄形，如圖2.1所示。環太平洋火山帶上有一連串海溝、列島和火山，板塊移動劇烈。其主要的國家及地區有：日本、臺灣、菲律賓、印尼、紐西蘭等。東岸由阿留申群島起，經北美、中美及南美，是一個環狀地帶。世界上約80%的震源深度小於70公里之地震、90%震源深度介於70公里和300公里間之地震和幾乎所有的震源深度大於300公里之地震都發生在這個地震帶上。

地震是海嘯成因之一，近年4起海嘯事件，南亞海嘯、薩摩亞海嘯、智利海嘯及2011年3月東日本海嘯即是由強烈之海底地震所引起之海嘯。利用美國NOAA之海嘯災難資料庫可大略看出海嘯事件之特性，檢索結果顯示自1500~2014年共有2349起海嘯事件，約13%是由火山活動或其他因素所造成，70%以上是由地震所引起的，即是大部分之海嘯事件仍舊是由地震活動所造成的，其中地震規模多在4以上，多半集中於5~8.9之區間。

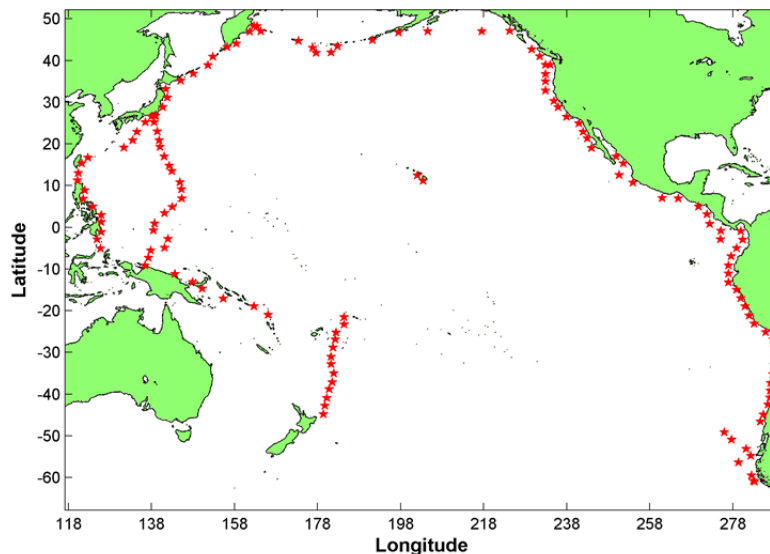


圖 2.1 環太平洋地震帶及海溝分佈(星點即是海溝位置)

圖2.2為海嘯事件中之地震規模分佈圖，92%之海嘯事件之地震規模均達6.0以上，與一般認知引起海嘯之地震所需規模相符，該圖同時也顯示超大地震的發生率甚小。在2349起海嘯事件，有1330起有紀錄震源強度，其中僅有815起有紀錄震源深度，震源深度90%均發生在60公里以內，如圖2.3。

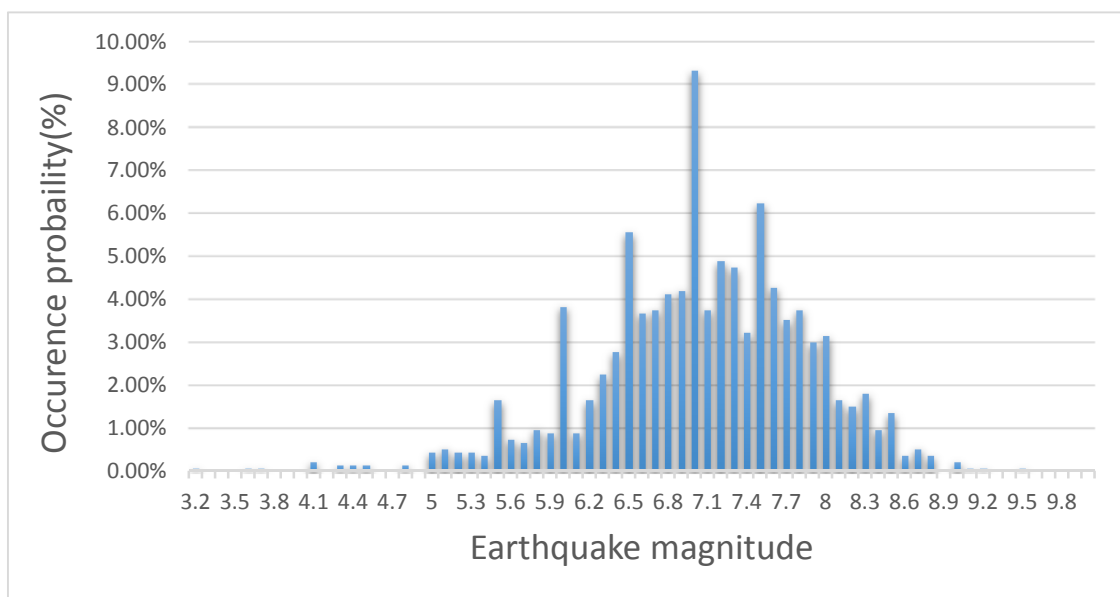


圖 2.2 1500-2014 年海嘯事件之地震規模分析

資料來源：美國 NGDC/WDS 之 Global Historical Tsunami Database.

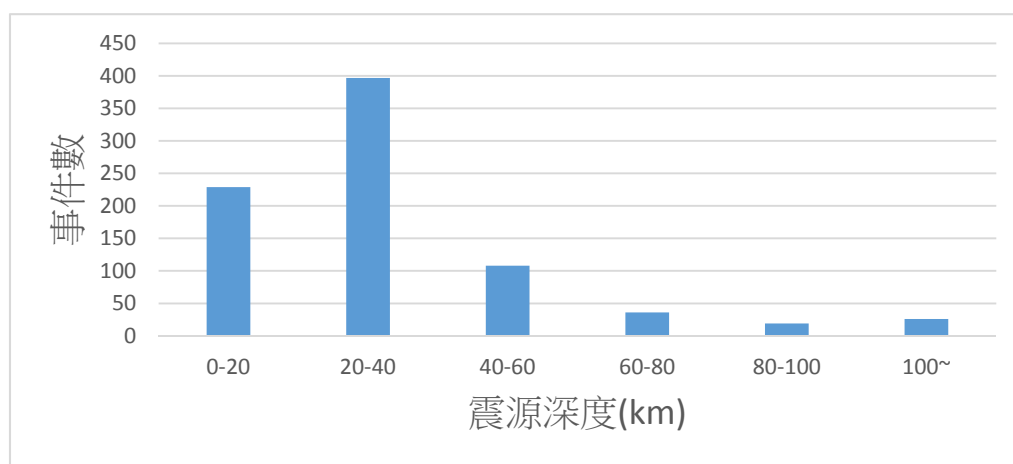


圖 2.3 1500-2014 年海嘯事件之震源深度分析

資料來源：美國 NGDC/WDS 之 Global Historical Tsunami Database.

由於海嘯波在大洋傳遞時不易察覺，加以早期對於海嘯並無具體概念，往往在近岸抬升之過程中，造成許多傷亡。自2004年南亞海嘯事件後，至2014年5月為止，較具規模之海嘯事件共9起，如表2.1所示。

**表2.1 2004~2014年間重大海嘯事件**

資料來源：美國 NGDC/WDS 之 Global Historical Tsunami Database.

Date	Country	Name	Max. wave height (m)	Death
2004/12/26(9.1)	Indonesia	Sumatra	50.9	226,898
2005/3/28(8.7)	Indonesia	Indonesia	3	10
2006/7/17(7.7)	Indonesia	Java	10	802
2007/4/1(8.1)	Solomon	Solomon	12.1	52
2007/4/21(6.2)	Chile	Chile	7.6	10
2009/9/29(8.0)	Samoa	Samoa	22.35	192
2010/2/27(8.8)	Chile	Chile	29	156
2010/10/25(7.8)	Indonesia	Sumatra	7	431
2011/3/11(9.0)	Japan	Honshu	38.9	15,854
2013/2/6(8.0)	Solomon	Solomon Islands		10

海嘯所造成之災害不同於其他天然災害，由於海嘯是整個水體被帶動且波長甚長，故能攜帶之水體通常會造成大範圍之溢淹，以2004年南亞海嘯東斯里蘭卡為例，可造成長度約2.5km之溢淹；薩摩亞海嘯也有此一現象產生。後續衍生之衛生、心理及重建問題亦是甚為棘手之問題。其次是海嘯波之速度，2011年3月11日東日本海嘯事件中，由現場實況及事後調查報告均顯示即使海嘯波已經造成溢淹，其殘餘速度仍足夠沖垮目前現有之結構物。因為海嘯具有強大破壞性但也具備高度不可預測性，故自南亞海嘯之後，印度洋周邊國家開始建立區域性海嘯預警系統；美日兩國也加強與周邊國家之資訊交流，但在薩摩亞海嘯事件中證明現有之海嘯預警系統/流程對於近域海嘯幾乎無事先預警之功能。日本先前所建立之海嘯預警系統及應變措施在這次的海嘯事件中有發揮其功效，有效降低傷亡之人數。

海嘯所造成之災害是全面性的，日本海嘯事件即是一個案例；海嘯震源區約位於伊豆小笠原海溝，日本東岸又屬於人口稠密區，沿岸

有核電廠等重要結構物，海嘯過後所引發之大火及核電廠冷卻失靈也造成了嚴重災情及難以收拾之復建作業；雖然當地雖建有號稱海上長城之防波堤，在海嘯來襲之時其原先預期的防禦功能因已超過設計值而無法抵擋海嘯來襲時之波高，雖有效降低海嘯流速及溢淹面積，但兩座防波堤也完全毀損，地形之效應使得海嘯最大溯升高度約達40公尺左右；在太平洋東岸之加州、墨西哥一帶也能感受本次海嘯之威力。

## 2.2 臺灣鄰近海域之海嘯紀錄

臺灣雖近數十年來並無顯著之海嘯災難案例發生，但根據歷史文獻紀錄，可信度甚高；西南地區之高雄(1781 年及1866年)及安平(1721 年)，東北地區之基隆(1867 年)均有相關海嘯災情之文字記載；近年來也有 1986 年花蓮海嘯事件，在花蓮港內有觀測到水位 2 公尺之變化(張等，1999)。東部沿岸各鄉鎮所面臨之主要海嘯震源區是來自於太平洋東岸之遠域海嘯，雖然東部外海地形陡峭，提供天然之保護條件；但花東外海卻是我國海底地震及海嘯事件最多之地區。根據互逆格林函數之放大率圖顯示，如圖2.4及圖2.5所示。

非天氣因素的海嘯發生成因甚多，例如強烈海底地震、海底火山爆發、海底邊坡滑動(landslide)或山崩、水下核爆；本研究僅探討由強烈海底較淺層地震所產生之海嘯，其生成機制如圖 2.6 所示(邱等，2005)。此種類型之海嘯之特點是通常地盤運動之垂直分量視同等於初始水位，海嘯波之能量不容易消散且能傳遞相當長之距離，而且具有方向性。

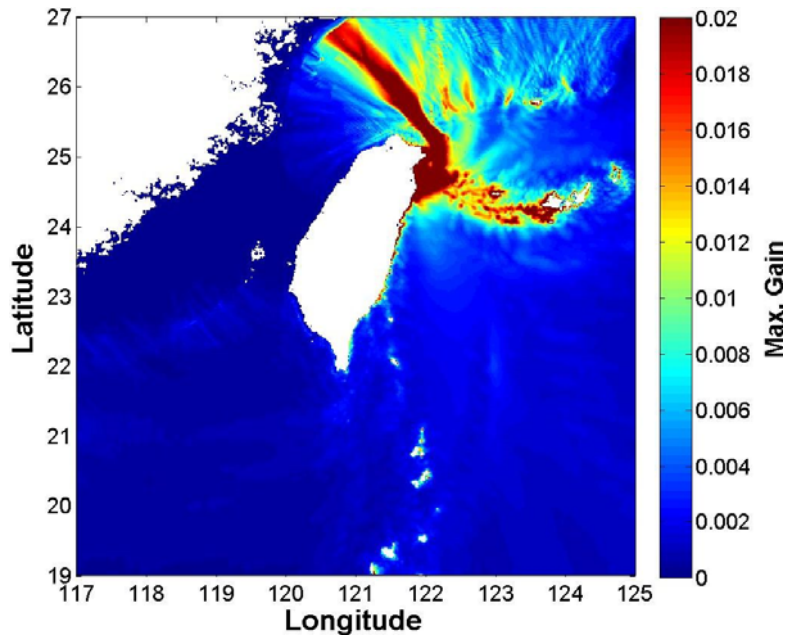


圖2.4 蘇澳港之放大率及海嘯潛勢波源區

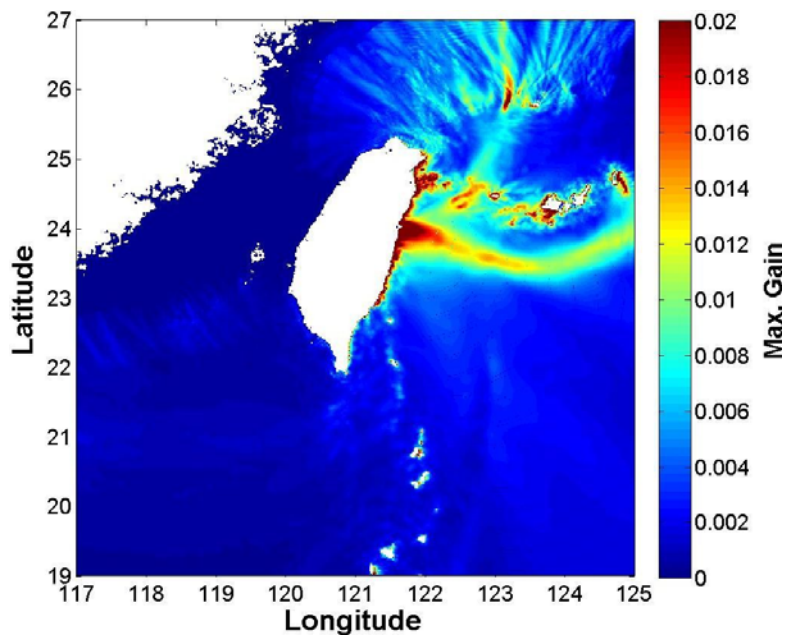


圖2.5 花蓮港之放大率及海嘯潛勢波源區



圖 2.6 板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖

(資料來源：邱等，2005)

我國位於環太平洋地震帶，早期也有海嘯紀錄；在這些紀錄中，以發生在臺南(1721年)、高雄(1781年及1866年)、基隆(1867年，如圖2.7)及安平(1661年)可信度較高(許明光、李起彤，1996)。以下摘錄歷史文件對古海嘯之文字記載(李昭興等，2006)：

(1)1661年(清順治17年，明永曆14年)1月8/9日~2月15日安平

「中國海嘯歷史年表」：「臺灣安平大海嘯。“海潮至，淹廬舍無算”」。

(2)1721年(清康熙59年)1月5日臺南

明清史料戊篇(第1本，21葉上)「去年(康熙五十九年，西元1721年1月5日)……因地震，海水冷漲，眾百姓合夥謝神唱戲」

(3)1781年(清乾隆46年)5月間(4月24日-6月21日)高雄

「臺灣采訪冊」(頁41)「祥異，地震」的記載。「(乾隆46年)鳳港西里有加藤港，多生加藤，可作澀，染工賴之，故名云。港有船通郡，往來潮汐無異。乾隆四十六年四、五月間，時甚晴霽，忽海水暴吼如雷，巨浪排空，水漲數十丈，近村人居被淹，皆攀援而上至尾，自分必死，不數刻，水暴退，人在竹上搖曳呼救，有強力者一躍至地，兼救他人，互相引援而下。間有牧地甚廣及附近田園句壑，悉是魚蝦，撥刺跳躍，十里內村民提籃契筒，往爭取焉。聞只淹斃一婦，婦素悍，事姑不孝，餘皆得全活。嗣聞是日有漁人獲兩籠，將歸，霎時間波濤暴起，二物竟趣，漁者乘筏從竹上過，遠望其家已成巨浸，至水汐時，茅屋數椽，已無有矣。」。

(4)1867年(清同治6年)12月18日基隆

「淡水廳志」，「(同治六年)冬十一月，地大震。……二十三日，雞籠頭、金包里沿海，山傾地裂，海水暴漲，屋宇傾壞，溺數百人。」。



圖 2.7 1867 年基隆海嘯事件，雞籠頭沿海遭受海嘯之侵襲

臺灣北部海域有琉球海溝，長期以來由於缺乏相關震災紀錄，故一般咸信不會發生大地震；日本學者經過 GPS 之檢測，發現琉球海溝有發生地震規模 8 之潛在危機；鄰近臺灣宜蘭海域之八重山群島、宮古島一帶，也被認為有發生海嘯之疑慮；臺灣西南海域之馬尼拉海溝，經美國地調所(Kirby et al., 2005)認為是下一個「海嘯危險區」，經過海嘯模擬顯示，馬尼拉海溝發生海嘯時，其海嘯波在 30-40 分鐘內即可到達恆春半島；加以西南海域地形較為平緩，有利於海嘯之溯上，此區人口密集，重要設施林立，若有海嘯引起之災情，其嚴重程度可見一般。

臺灣對於海嘯之相關史料或紀錄甚多，但因早期欠缺科學概念，故這些歷史紀錄目前有許多學者正利用不同科學方式驗證其可信度，但從歷史紀錄來看，有許多史料記載臺灣地區也曾發生災害性之海嘯，造成不小之傷亡。

近百年來，臺灣地區雖有海嘯事件發生，但均未對臺灣造成大規模之災害，加上海嘯發生機率較地震低，是故缺乏國內相關災害統計資料可供研究；根據美國 NGDC 之天然災害資料庫顯示臺灣地區自西元 1500~2014 年共有 22 起海嘯事件，詳見表 2.2 及圖 2.8 所示。花蓮海嘯事件，芮氏地震規模( $M_L$ )6.8，規模屬於近域海嘯，在花蓮港產生約 2 公尺之波高(張等，1999)，表 2.2 中最後一筆之海嘯紀錄即為 2006.12.26 屏東恆春海嘯，造成大約 0.6 公尺之水位變化，恆春半島陸地區域並未遭受產生太大之災情，但卻造成數條海底通訊電纜斷裂，



使得對外連絡通訊蒙受嚴重之損失，其災損金額亦相當可觀。

對於東北地區而言，最有名之古海嘯事件是為於現今石垣島之八重山海嘯(Yaeyama Tsunami)，雖然這起事件在琉球「球陽」以及宇佐美龍夫(1977年)之「日本被害地震總覽」有詳細之記載但在臺灣之文獻資料卻沒有類似之記錄。八重山海嘯發生在1771年4月24日早上8時(琉球國第二尚氏王朝尚穆王二十年，清朝乾隆三十六年，日本明和八年)發生現今琉球群島南方之石垣島，震央位於今日本沖繩縣八重山群島石垣島東南方40公里，該起海嘯是琉球歷史上最具有破壞力的海嘯之一，也被視為日本史上最具有破壞力的海嘯之一。這次地震引起超過80公尺高的海嘯襲擊琉球列島，總計傷亡人數約12000人；

表 2.2 臺灣地區西元 1500~2014 年之海嘯事件

Date						Tsunami Cause				Addl Tsu Info	Deposits	Tsunami Source Location			
						Val	Code	Earthquake Mag	Volcano			Country	Name	Latitude	Longitude
Year	Mo	Dy	Hr	Mn	Sec										
1661	1	8				2	1	6.0		*		TAIWAN	SOUTH CHINA SEA	23.000	120.100
1721						1	1	*		*		TAIWAN	TAIWAN	23.000	120.200
1754	4					3	1	6.0		*		TAIWAN	E. CHINA SEA	25.300	121.400
1782	5	22				2	1	7.0		*		TAIWAN	TAIWAN STRAIT	24.500	120.500
1792	8	9				2	1	6.0		*		TAIWAN	TAIWAN	23.600	120.500
1853	10	29				1	6		Vol	*		TAIWAN	E. TAIWAN-RYUKYU ISLANDS	24.000	121.830
1882	12	9				0	1	6.2		*		TAIWAN	SOUTH CHINA SEA	24.500	120.500
1903	9	7				1	1	*		*		TAIWAN	TAIWAN		
1917	5	6	12	19		4	1	5.8		*		TAIWAN	TAIWAN	23.200	121.600
1922	9	1	19	16	6.0	1	1	7.6		*		TAIWAN	TAIWAN	24.500	122.000
1951	10	22	5	43	1.0	4	1	7.3		*		TAIWAN	TAIWAN	23.800	121.700
1963	2	13	8	50	4.5	4	1	7.3		*		TAIWAN	E. TAIWAN-RYUKYU ISLANDS	24.400	122.100
1966	3	12	16	31	21.8	3	1	7.6		*		TAIWAN	E. TAIWAN-RYUKYU ISLANDS	24.100	122.600
1972	1	25	2	6	23.3	4	1	7.5		*		TAIWAN	E. TAIWAN	22.500	122.300
1978	7	23	14	42	36.9	3	1	7.4		*		TAIWAN	TAIWAN	22.282	121.512
1986	11	14	21	20	10.5	4	1	7.8		*		TAIWAN	TAIWAN	23.901	121.574
1990	12	13	19	50	17.8	4	1	6.3		*		TAIWAN	TAIWAN	23.722	121.627
1994	5	24	4	0	42.1	1	1	6.5		*		TAIWAN	TAIWAN	23.959	122.448
1998	5	3	23	30	21.9	4	1	7.5		*		TAIWAN	TAIWAN: SOUTHEAST OF	22.306	125.308
2001	12	18	4	2	58.2	4	1	6.8		*		TAIWAN	TAIWAN	23.954	122.734
2002	3	31	6	52	50.4	4	1	7.1		*		TAIWAN	TAIWAN	24.279	122.179
2006	12	26	12	26	21.4	4	1	7.0		*		TAIWAN	TAIWAN	21.799	120.547

資料來源：美國 NGDC/WDS 之 Global Historical Tsunami Database.



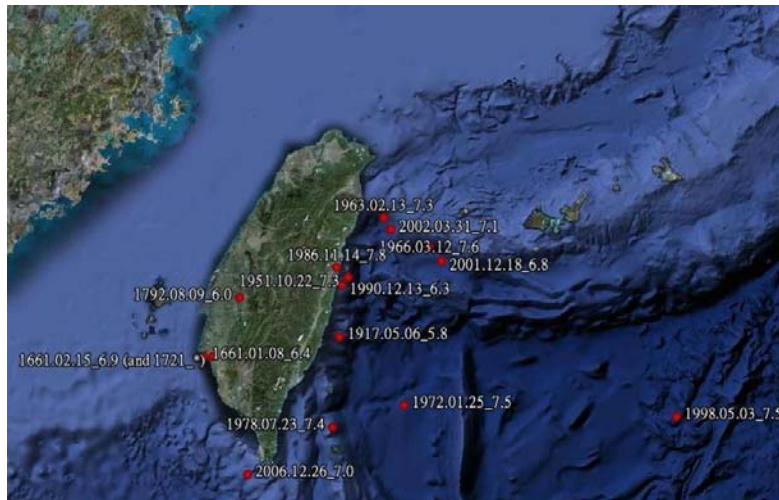


圖 2.8 臺灣海嘯事件之震源分佈

資料來源: 美國 NGDC/WDS 之 Global Historical Tsunami Database.

根據已知歷史文件記載，基隆於 1867 年發生過災難性海嘯；對於西南方而言，呂宋島、馬尼拉海溝是一個高風險之震源區域。東北方海域主要是在宜蘭龜山島附近海域、基隆外海之金山斷層及琉球海溝。蘭陽平原位於臺灣的東北部，外形為一個三角形向東開口的沖積盆地。由於沖繩海槽緊鄰在其東側，而且直觀上沖繩海槽與蘭陽平原間的地形特徵幾乎是相連接的，故研究認為蘭陽平原的構造成因應與沖繩海槽一致，即菲律賓海板塊沿著琉球弧溝系統向西北方向隱沒時，所引起沖繩海槽弧後張裂機制可往西延伸到蘭陽平原；其他的地質及地球物理觀測似乎也支持這一個模式(江，1976)。

臺灣西南方之馬尼拉海溝是研究海嘯學者認為是高風險之潛勢震源區。臺灣西南部與南部海域雖然較少活動斷層，地震頻率及規模均較少，但 2006 年兩起規模 6 以上之地震在此區產生，既有科學文獻也顯示臺灣西南海域有許多斷層帶。再加上位於臺灣南方的菲律賓與臺灣同屬於菲律賓海板塊與歐亞板塊的聚合帶，地震頻繁，呂宋島有許多活動斷層延伸至海域，大規模斷層活動可能引發海嘯，於數十分鐘至一小時即可到達臺灣西南部海域，衝擊臺灣南部及西南部海岸。地質文獻可以看出臺灣陸地斷層其實往南延伸至海底，故對某些海底斷層，可以從陸地露頭推測之性質(陳等，2007)。

## 2.3 遠域海嘯紀錄

遠域海嘯部分需注意由日本北海道一帶以及由東太平洋傳遞而來之海嘯。但為利於資料之蒐集，本研究將以範圍擴展至整個環太平洋地震帶，如此上述兩個遠域海嘯之波源區亦可包含在其中(陳等, 2011)。

在近幾年所發生之著名海嘯事件，當屬 2004 年南亞大海嘯、2009 年薩摩亞海嘯、2010 年海地及智利海嘯及 2011 年日本海嘯。南亞海嘯及日本海嘯對於當地造成相當慘重的災情及傷亡，其餘三起海嘯事件對於當地也產生不小之災情；1960 智利海嘯及南亞海嘯之案例證明了海嘯可傳遞相當遠的距離，對於遠海域的國家而言仍是不可輕忽；1960 年智利海嘯橫跨太平洋，連太平洋西岸之日本也遭受波及，基隆港約有 1.9 公尺之波高變化，所幸無具體之災情傳出，相關報導如圖 2.9 所示。2004 年南亞海嘯雖發生在印尼外海，海嘯波橫跨印度洋，2 小時後襲擊印度洋西岸各國，遠在 1600 公里外之斯里蘭卡也造成慘重之災情，此一案例也促成了印度洋周邊國家開始研擬海嘯預警作業；2011 年日本海嘯，對當地宮城縣、岩手縣沿海各地產生 5 至 15 公尺巨浪，日本受災地區約 400 平方公里，並造成多處火災災情，更影響沿海核能電廠安全，產生除了海嘯災情外的核災問題；東北沿岸地區各港口，如釜石港、仙臺港等地也蒙受不少之損失。

強烈之海底地震雖是發生海嘯之主因之一，但是否會引起具威脅性之海嘯仍需具備一定之條件；用 NOAA 之海嘯災害資料庫可搜尋到 2012 年至今總共發生 31 起小規模之海嘯，2013 年 2 月 6 日索羅門群島(Solomon Islands)造成 10 人死亡、15 受傷、588 房屋遭損毀，而其中 2012 年 10 月 28 日加拿大(Canada)所產生 12.98 公尺的最大波高及 2014 年 1 月 23 日智利(Chile)4.4 公尺最大波高，其震源深度分別為 14 公里及 20 公里，均屬極淺地震，如表 2.3。



圖 2.9 1960 年基隆遭受智利海嘯襲擊之紀錄

表 2.3 2012-2014 年發生之海嘯事件

Date					Tsunami Cause				Tsunami Source Location				Tsunami Parameters				Tsunami Effects					Photos								
Year	Mo	Dy	Hr	Mn	Sec	Val	Code	Earthquake Mag	Volcano	Addl Tsu Info	Deposits	Country	Name	Latitude	Longitude	Max Water Height	Num. of Runups	Magnitude	Abe	Iida	Tsu Int		Deaths Num	Injuries Num	Damage \$Mill	Houses Destroyed Num	Houses Damaged Num	Houses Debris Num		
2012	2	2	13	34	40.6	4	1	Z.0	*	*		VANUATU	VANUATU ISLANDS	-17.827	167.133	.08	1													
2012	3	14	9	8	35.1	4	1	6.9	*	*		JAPAN	HOKKAIDO ISLAND	40.887	144.944	.20	2													
2012	3	20	18	2	47.4	4	1	Z.4	*	*		MEXICO	S. MEXICO	16.493	-98.231	.20	2													
2012	4	11	8	38	36.7	4	1	8.6	*	*		INDONESIA	OFF W. COAST OF N SUMATRA	2.327	93.063	.20	20													
2012	4	11	10	43	10.8	4	1	8.2	*	*		INDONESIA	OFF W. COAST OF N SUMATRA	.802	92.463	.4	4													
2012	4	14	22	5	26.4	4	1	6.3	*	*		VANUATU	VANUATU ISLANDS	-18.972	168.741	.1	1													
2012	7	15				4	8		*	*		GREENLAND	ILULISSAT ICEFIORD	69.200	-51.300	.0	0													
2012	8	27	4	37	19.4	4	1	Z.3	*	*		EL SALVADOR	OFF THE COAST	12.139	-88.590	.36	11													
2012	8	31	12	47	33.3	4	1	Z.6	*	*		PHILIPPINES	PHILIPPINE ISLANDS	10.811	126.638	.15	17													
2012	9	5	14	42	7.8	4	1	Z.6	*	*		COSTA RICA	COSTA RICA	10.085	-85.315	.16	2													
2012	10	28	3	4	8.8	4	1	Z.7	*	*		CANADA	BRITISH COLUMBIA	52.788	-132.101	12.98	176													
2012	11	7	16	35	46.9	4	1	Z.3	*	*		GUATEMALA	GUATEMALA	13.988	-91.895	.35	5													
2012	12	7	8	18	23.1	4	1	Z.2	*	*		JAPAN	OFF EAST COAST OF HONSHU ISLAND	37.890	143.949	1.00	3													
2012	12	28				0	8		*	*		CHINA	ZHAOJUN BRIDGE, HUBEI PROVINCE	31.256	110.733	.0	0													
2013	1	5	8	58	19.3	4	1	Z.5	*	*		USA	SOUTHEASTERN ALASKA, AK	55.393	-134.652	1.50	8													
2013	2	6	1	12	25.8	4	1	Z.9	*	*		SOLOMON ISLANDS	SANTA CRUZ ISLANDS	-10.766	165.114	.129						10	1	15	1	2	588	3	478	3
2013	2	8	15	26	38.4	4	1	Z.0	*	*		SOLOMON ISLANDS	SANTA CRUZ ISLANDS	-10.928	166.018	.1	1													
2013	4	19	3	5	52.6	2	1	Z.2	*	*		RUSSIA	S. KURIL ISLANDS	46.221	150.788	.20	1													
2013	6	13				4	9		*	*		USA	NORTHWEST ATLANTIC OCEAN			.34														
2013	7	21	5	9	31.4	4	1	6.5	*	*		NEW ZEALAND	COOK STRAIT	-41.704	174.337	.07	2													
2013	8	16	2	31	7.0	4	1	6.5	*	*		NEW ZEALAND	WELLINGTON	-41.767	174.061	.2	2													
2013	9	24				4	5	*	*	*		PAKISTAN	OFF COAST GWADAR	25.180	62.260	.26	4													
2013	10	25	17	10	18.0	4	1	Z.1	*	*		JAPAN	E. COAST HONSHU ISLAND	37.149	144.679	.40	9													
2013	11	17	9	4	55.0	4	1	Z.8	*	*		ANTARCTICA	SCOTIA SEA	-60.296	-46.362	.15	2													
2014	3	16	21	16	30.0	4	1	6.7	*	*		CHILE	NORTHERN CHILE	-19.925	-70.628	.7														
2014	4	1	23	46	46.0	4	1	8.2	*	*		CHILE	NORTHERN CHILE	-19.642	-70.817	4.40	163										1			
2014	4	3	2	43	17.0	4	1	Z.6	*	*		CHILE	NORTHERN CHILE	-20.400	-70.135	.5														
2014	4	12	20	14	39.0	4	1	Z.6	*	*		SOLOMON ISLANDS	SOLOMON ISLANDS	-11.315	162.211	.6														
2014	4	13	12	36	18.0	4	1	Z.4	*	*		SOLOMON ISLANDS	SOLOMON ISLANDS	-11.451	162.069	.7														
2014	4	18	14	27	26.0	4	1	Z.2	*	*		MEXICO	GREYMOUTH	17.552	-100.816	.2														
2014	4	19	13	27	59.0	4	1	Z.5	*	*		PAPUA NEW GUINEA	SOLOMON SEA	-6.720	154.931	.1														

資料來源：美國 NGDC/WDS 之 Global Historical Tsunami Database.



## 2.4 海嘯之預警與溢淹潛勢圖之必要性

海底火山或山崩造成的海嘯十分罕見，因此本研究以探討斷層發生地震造成的海嘯為主。根據歷史資料，會產生海嘯的地震至少要 6.7 級以上，震源深度最多不超過 100 公里。地震時，斷層可能左右運動，也可能上下運動；目前一般的看法認為海底地震若是左右運動，對海水影響不大，但海底若是上下運動，可能引起海嘯。然而即使在斷層接近水平錯動的 2008 年海地地震，也有三位民眾因海嘯而死亡(Fritz 等人, 2012)；可見地震造成海嘯的可能性絕不能輕忽。

海嘯是海底地震、海底火山或海底山崩等作用造成的長週期波，小行星、彗星的撞擊也會產生海嘯；但一般以地震斷層運動造成的情形最常見。臺灣位於環太平洋地震帶，地震頻仍；較近的例子如 921 大地震，地表斷層上下運動(如圖 2.10)最大可達十公尺，同樣的斷層運動萬一發生在海上，將產生大海嘯，造成重大傷亡。因此吾人須正視臺灣可能的海嘯風險。



圖 2.10 921 大地震造成地表斷層上下錯動

## 第三章 海嘯速報系統之建置

### 3.1 海嘯速報系統及海嘯預警系統

自 2004 年南亞海嘯之後，各國有感於海嘯所帶來之天災，故開始致力研發或是佈置海嘯預警系統 (Tsunami warning system, 簡稱 TWS)。經由發布警報以避免生命與財產的損失。主要由兩個元件所構成，一個是偵測海嘯的感測器，另一個是即時發布警報以疏散沿海區域避難的通信基礎設施。海嘯預警系統有區分為國際性及地域性，前者最著名的即是美國太平洋海嘯預警中心(Pacific Tsunami Warning Center)，環太平洋地區之海嘯警報大多數即是由該單位發布警報通知鄰近諸國，我國中央氣象局即是接收該單位所傳來的訊息進行海嘯警報發布，例如 2011 年 3 月 11 日東日本海嘯事件、2012 年 8 月 31 日菲律賓東方疑似海嘯事件；該單位會隨時發送最新訊息給鄰近國家；另一個即是印度洋海嘯預警系統。

地域性之海嘯預警系統最著名的範例即是日本，日本在沿海一帶佈設大量之監測器，可偵測異常之水位變化；一但有海嘯之疑慮，隨即利用廣播系統通知沿岸民眾盡速依指定路線往指定地點進行疏散作業。我國中央氣象局為強化東部外海地震之偵測能力，在東部外海利用長達 45 公里之海底光纖電纜連接地震儀及壓力計即時監測海底地震及海嘯，即是所謂 Marine Cable Hosted Observatory(MACHO；簡稱媽祖計劃)，其佈放位置圖如圖 3.1 所示。

媽祖計劃是屬於電纜式海底地震儀觀測系統，主要元件有寬頻地震儀(Broadband Sensor)、加速型地震儀(Accelerometer)、海嘯壓力計(Pressure Gauge)及陸上機房設施。

由於海嘯預警系統建置所需成本高昂，其所量測之訊號也需進一步判讀，且須包含通報程序及系統；依此定義而言，本計劃所開發之系統是一種「海嘯速報系統/預報系統」，其主要目的在於在海嘯發生

初期即利用歷史參數或是即時地震參數計算各港口對應可能水位變化及到達時間，而後將資訊彙整至權責單位憑以進行後續程序；其優勢為在有限之成本及時效，可得出實用性甚高之海嘯初期評估資料。

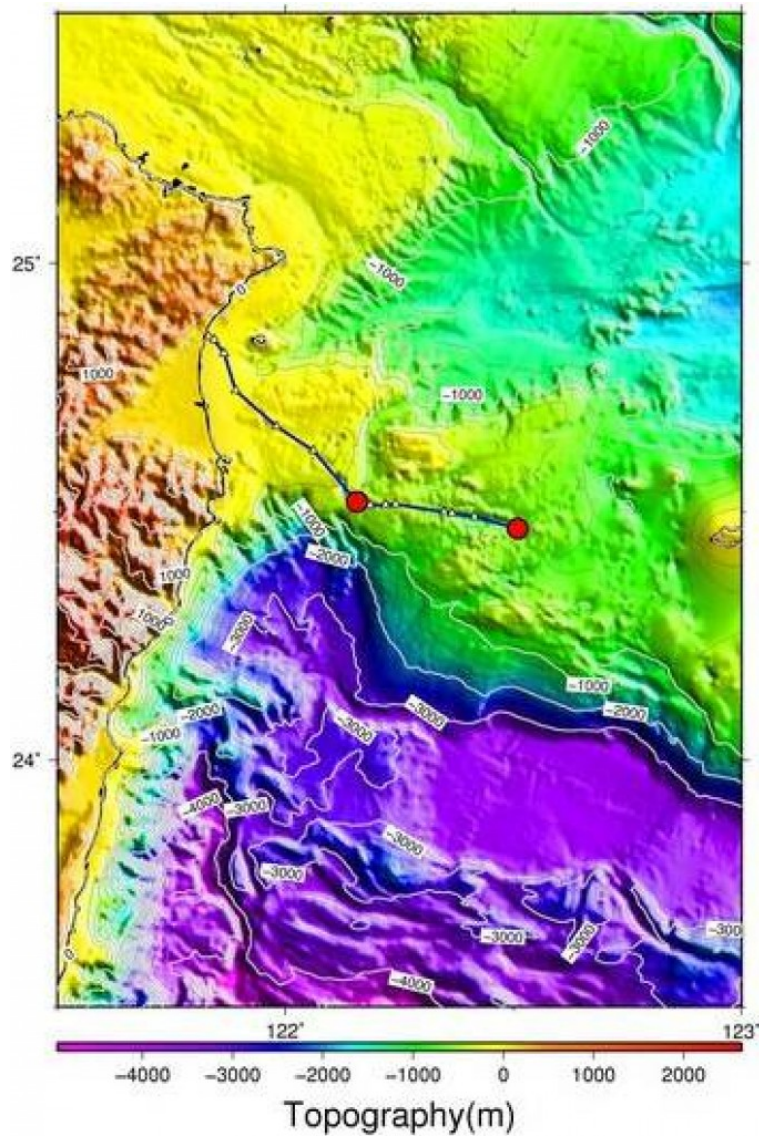


圖 3.1 電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置  
(臺灣東部外海長達 45 公里)

### 3.2 海嘯數值模式介紹

海嘯由於與強烈之海底地震有關，所以地震預測技術尚未進入實際應用階段，是以海嘯也無法事先進行預測作業；但海嘯波之速度遠

小於彈性波之波速；因此，海嘯相較於地震有更多之應變時間。海嘯模擬通常藉由海嘯數值模式在獲知地震訊息時進行運算，雖說海嘯有較多之應變時間，但依我國週遭之海嘯潛勢震源分布特性而言，近域海嘯在 20-30 分鐘即可到達陸地，應變時間略顯急迫；因此，若能以資料庫之概念製作海嘯波高資料庫，以期在海嘯發生初期即可利用資料庫得知各港口可能之水位變化及到達時間，可大幅地提高防災應變之時效性。要建置波高資料庫、溢淹模擬及機率分析必需借重海嘯數值模式。其速報精度及效率，依東日本海嘯之實例測試顯示，系統能於 1-2 分鐘之內完成單一點模擬。

### 3.2.1 海嘯水動力數值模式

數值模式以數值方式解析物理方程式，其解析能力主要由物理方程式所決定。依物理方程式的解析能力來分，海嘯水動力數值模式可簡單分為一維、二維與三維三種類型。早期海嘯模擬採用類似於海岸工程之射線(ray)法的一維海嘯模式；一維模式在電腦普及後，因較費人工，且對繞射、邊緣波等現象無法處理，現已無人使用。

三維海嘯水動力模式最為全面、完整，但也最複雜、耗時。所幸最常見的海嘯成因--地震，其引致海嘯的機制是由斷層錯動推動海水面的升降，從而引發重力波所致。此重力波之波速遠小於地震的彈性波，故可假設水面是瞬間抬升或陷落；此種抬升或陷落之初始條件很容易在二維海嘯水動力模式給定，因此海嘯之波源、傳播及溯上、溢淹皆可以二維海嘯模式加以模擬。根據學者研究 (Murty, 1979) 也證明海水的層化效應對海嘯的影響甚微。因此就海嘯傳播而言，模擬的方式僅限於二維模式；除非探討細部的流況或受力，才有採用三維模擬的必要。由於上述的因素，一般所謂海嘯模式皆指二維模式，而本文也只討論二維海嘯模式。

本計畫採用美國康乃爾大學土木與環境工程學系團隊發展出的 COrnell Multigrid COupled Tsunami model(COMCOT)模式作為主要模

擬工具(陳等, 2011; 陳等, 2012)。開發之初，經過智利海嘯、花蓮海嘯以及南亞海嘯之實例驗證，其成效尚稱滿意；其研究成果也常發表於國內外知名期刊，該模式也為國內其他相關學術單位所使用。故在臺灣地區海嘯實測資料缺乏情況之下，本計畫後續利用南亞海嘯之案例作為校正之用。

而 COMCOT 模式之基本理論是淺水方程組(shallow water equations)，由康乃爾大學劉立方教授領導建立(Liu 等人, 1998)，至今已進行多次改版。1 版到 1.4 版 之發展時間可上溯至 1993-2002，較新的 COMCOT 1.6 版發展時間則為 2003-2007；最新的 COMCOT 1.7 版發展時間由 2008 到現在。COMCOT 1.6 版與 1.7 版皆為康乃爾大學畢業生王曉民(Xia-ming Wang)博士發展與維護。我們研究團隊前期採用 COMCOT 1.6 版為基礎，加入 OpenMP 平行運算語法，檔案輸出由文字檔更動為 nc 檔(netcdf)；近期則採用 COMCOT 1.7 版(陳與陳, 2012; 陳等, 2013)。

除了 COMCOT 模式之外，日本東北大學的 TUNAMI(Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) 模式脫胎於 1991 開始的 TIME (Tsunami Inundation Modeling Exchange) 計畫，使用的機構遍佈全世界；NOAA 的 MOST (Method Of Splitting Tsunami) 模式也有不少使用者。模式之基本理論同樣是淺水方程組。在卡氏座標中非線性之淺水方程組可寫為：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \quad (3.1)$$

$$P_t + \left(\frac{P^2}{H}\right)_x + \left(\frac{PQ}{H}\right)_y + gH\eta_x - fQ + \tau_x H = 0 \quad (3.2)$$

$$Q_t + \left(\frac{PQ}{H}\right)_x + \left(\frac{Q^2}{H}\right)_y + gH\eta_y + fP + \tau_y H = 0 \quad (3.3)$$

式中  $t$  是時間， $\eta$  為自由表面之變動水位， $H$  為全水深， $P$  及  $Q$



分別為  $x$  與  $y$  方向之流量， $g$  為重力加速度， $f$  為科氏參數， $\tau_x$ 、 $\tau_y$  分別為  $x$  與  $y$  方向底部摩擦力。

除淺水方程組外，Boussinesq 方程式也是二維，但比淺水方程組多出了非靜水壓的頻散(nonhydrostatic dispersion)效應。惟 Boussinesq 方程式為解析頻散效應，引入高階微分項，容易造成數值不穩定。再者，如陳(2007)所述，一般使用於海嘯傳播模擬的網格尺度並無法顯示頻散效應，因此無論使用哪一種方程式結果都差不多；故在深海的粗網格架構下使用 Boussinesq 方程式意義不大。

至於溯上、溢淹的模擬，Synolakis & Skjelbreia(1993)曾證明採用靜水壓近似的淺水方程組模式可以描述表面波與海底地形交互作用之碎波、溯上過程中的波高變化；這是由於斜坡距離有限，在短暫的溯上過程中，非靜水壓效應引起的頻散不足以發揮影響。故在近岸的溯上模擬使用 Boussinesq 方程式也無重要意義，使用非線性之淺水方程組即足以描述其過程。而模擬在大洋中的傳遞，其科氏力及地球曲面效應不可忽略，由於在大洋中振幅很小，非線性行為不明顯，故於大洋傳遞時，可考慮用球面座標下之淺水方程式；但在近岸時，由於波高放大及底床摩擦，使得非線性效應增加，此時科氏力及地球曲面效應相對較小，故應採用直角座標下之淺水方程式。

另一方面，模式的校驗及率定也是一個重要的考量；海嘯模式與其他水動力模式比較下，可供驗證之實際案例及資料較為不足；特別是臺灣本島之海嘯資料及案例多屬歷史文件記載，鮮少科學紀錄。故若引用國外已經發展完成之海嘯模式，則可免除許多模式校正及驗證之工作。

COMCOT 數值模式是以程式語言Fortran 撰寫，模式中提供計算由斷層錯動產生的海床垂直位移量以及海嘯波傳播的計算。與其它相似之模式相較之下，擁有下列之特點：

- (1)使用巢狀網格系統(multi-grid nested system)計算，可保持遠域及近岸之計算速度與精確度。
- (2)可依計算區域，選擇使用球狀或直角座標系統計算。
- (3)可依計算區域，選擇使用線性或非線性方程式計算。
- (4)使用蛙跳法(leap-frog)及有限差分方法來解淺水方程式(shallow water equation)。
- (5)提供不同初始波形之方式：(例如地震、海底山崩、人工造波或起始水面資料檔等)。

球面座標下之淺水方程式可表示為：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right] = 0 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} - fQ \\ & = \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ \frac{h^3}{3R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left( \frac{P}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \cos \varphi \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + fP \\ & = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \frac{h^3}{3R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left( \frac{P}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \cos \varphi \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

上式中( $\psi$ ， $\varphi$ )表示在地球表面的經度及緯度；目前臺灣地區採用的是國際橫麥卡托二度分帶座標系統(UTM2)，以( $N$ ， $E$ )來表示， $N$ 為六位數， $E$ 為七位數，由(3.4)式至(3.6)式消去 $P$ 和 $Q$ ，且略去科氏力項，並假設水深為一常數，則可得到以 $\zeta$ 代表的關係式。

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{gh}{R^2 \cos^2 \varphi} \left[ \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} + \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right] \\
&= \frac{gh^3}{3R^4 \cos^4 \varphi} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \psi^4} + \frac{gh^3}{3R^4 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right\} \right] \\
&+ \frac{gh^3}{3R^4 \cos^3 \varphi} \left[ \frac{\partial^3}{\partial \psi^2 \partial \psi} \left( \cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) + \cos^2 \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} \right) \right\} \right]
\end{aligned} \tag{3.7}$$

COMCOT 中以交錯式顯性蛙跳法 (staggered explicit leap-frog scheme) 來處理線性淺水方程式，如圖3.2所示，利用前一時刻之體積流量及自由表面水位，用連續方程式計算網格  $(i, j)$  點在第  $n+1/2$  時刻之自由表面水位  $\zeta_{i,j}^{n+1/2}$ ，接著計算體積流量  $P_{i+1/2,j}^{n+1/2}$  及  $Q_{i,j+1/2}^{n+1/2}$ ，體積流量和水位是由不同的位置分別計算，基本上即是在網格中央計算水位，而在網格四周計算體積流量。波高及體積通量的計算是在不同的時間步上，利用物理量在空間上的交錯 (staggered) 方式來計算，可以減少誤差及增加數值穩定性。COMCOT 採用中央差分法，因此COMCOT具有二階的準確性及  $O((\Delta x)^2, (\Delta y)^2, (\Delta t)^2)$  的截斷誤差 (truncation error)。

其離散式為 (Liu et al., 1998)：

$$\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gH \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \tag{3.8}$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gH \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} = 0 \tag{3.9}$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \tag{3.10}$$

若近岸地區時，改採卡氏坐標系統，考慮底部摩擦作用之非線性淺水方程式可以下列各式表示之 (Liu et al., 1994)：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \tag{3.11}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}P + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{H}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{H}\right) + gH\frac{\partial\zeta}{\partial x} - fQ + \tau_x H = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{PQ}{H}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q^2}{H}\right) + gH\frac{\partial\zeta}{\partial y} + fP + \tau_y H = 0 \quad (3.13)$$

式中  $t$  是時間， $\zeta$  為自由表面之變動水位， $H$  為全水深， $P$  及  $Q$  分別為  $x$  與  $y$  方向之流量， $g$  為重力加速度， $f$  為科氏力參數， $\tau_x$ 、 $\tau_y$  分別為  $x$  與  $y$  方向底部摩擦力。

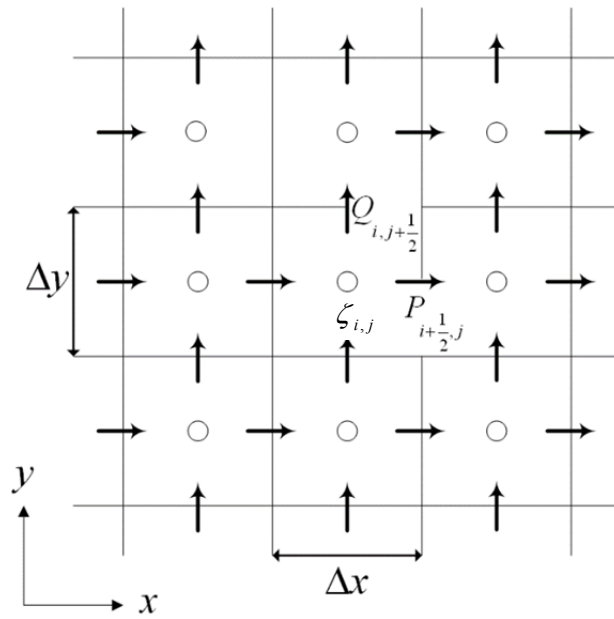


圖 3.2 交錯式有限差分網格

底部摩擦項可使用 Chezy 公式，

$$\tau_x = \frac{g}{C_f^2 H^3} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{g}{C_f^2 H^3} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3.14)$$

或曼寧公式

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{10/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{gn^2}{H^{10/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3.15)$$

(3.14)式中的 $C_f$ 表示 Chezy 公式的摩擦係數，而(3.15)式 $n$ 代表相對粗糙係數，與流動狀況及底部的表面粗糙度有關。

非線性方程式仍是採用蛙跳法為主，但此法對於對流項並不適用，故改採上風法(Upwind Scheme)處理，但精度僅達到空間網格大小的一階。

COMCOT 模式在近岸海陸(乾溼)交界處採用移動邊界條件；若波高足以進入陸地時，則容許海水進入陸地網格，則可模擬出長波於陸地上之溢淹範圍及溯上高度。移動邊界技巧可參考圖 4.10 及圖 4.11 所示，將沿岸地形以階梯形式表示之，在網格  $i-1$ 、 $i$  及  $i+1$  處計算全水深，而在  $i-1/2$ 、 $i+1/2$  及  $i+3/2$  處計算流量；圖中 MWL 表示平均海水面(mean water level)， $\zeta$  表示自由邊界之水位， $h$  為平均靜水位到陸地的高度；在乾陸地(dry land)的網格中，總水深  $H = h + \zeta$  是為負值，於有水溢淹的溼陸地 (wet land)網格總水深以正值表示，位於乾網格與溼網格之間的交界則定義為海岸線。由連續方程式計算出全區域的自由表面水位，在陸地網格點的自由表面水位永遠為零，因為在鄰近網格點處流量為零，在此過程中須判斷網格點之全水深是否足以使水移往鄰近的陸地網格(即為移動邊界)。動量方程式則更新在水域部分之流量。波由外海計算到近陸區域，於海岸線交界處時，即  $H_i > 0$  及  $H_{i+1} \leq 0$  的條件下，則開始進行移動邊界計算。

起始體積通量為零，利用連續方程式並配合移動邊界計算來找下個時間步長的波高，波高在乾的陸域網格中的值為 0，這是因為在鄰近的流量都為 0。原本在第  $i$  個網格點的總水深需上傳到第  $i+1/2$  個網格點，經由數值計算來決定總水深是否夠高足以溢淹到相鄰的乾陸域(dry land)網格，並調整海岸線位置。如果某一點網格在各方向的總水深為零或負值，則此網格視為乾網格 (dry cell)，如圖 3.3 中，第  $i$  個網格為溼陸域，其總水深為正值，第  $i+1$  個網格為乾陸域，其總水深為負值且體積通量為零，海岸線位於  $i$  與  $i+1$  之間，而賦予第  $i+1/2$  個網格點的體積通量為零。但在波高較高的例子中，如圖 3.4 所示，此時第

$i+1/2$  個網格點的體積通量為非零，海岸線也往陸地方向移動一個格點，而總水深由連續方程式中被更新。以下的計算為用來判斷海岸線是否該移動，而先決條件在總水深由連續方程式更新後，即可由下列方式判斷海岸線是否會移動。

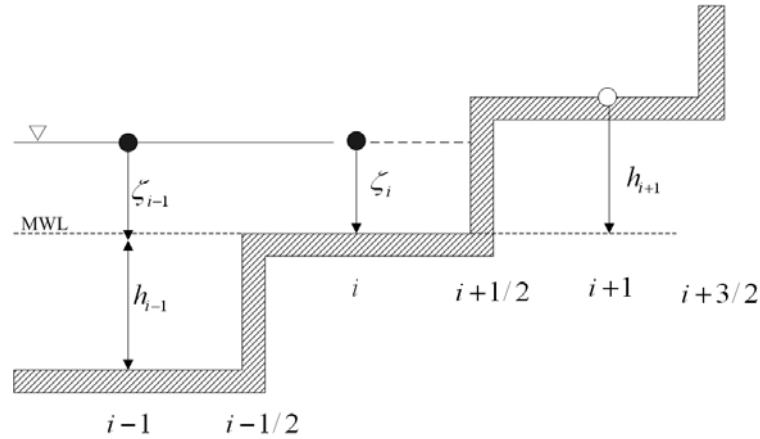


圖 3.3 移動邊界示意圖(a)

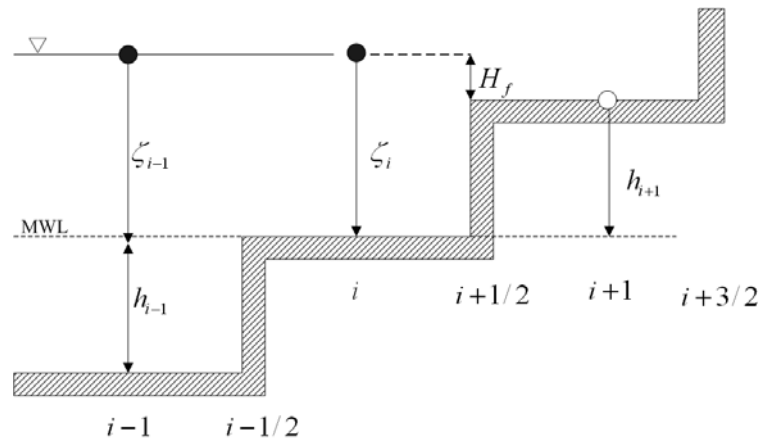


圖 3.4 移動邊界示意圖(b)

- (1) 若  $H_{i+1} \leq 0$  且  $h_{i+1} + \zeta_i \leq 0$ ，則海岸線保持不動，流量  $P_{i+1/2}$  亦為零。
- (2) 若  $H_{i+1} \leq 0$  且  $h_{i+1} + \zeta_i > 0$ ，則海岸線移往  $i+1$  和  $i+2$  之間，流量  $P_{i+1/2} > 0$  可能為非零值，但  $P_{i+3/2}$  仍為零，溢淹之深度  $H_f$  為  $h_{i+1} + \zeta_i$  和  $h_{i+1} + \zeta_{i+1}$  二者之較大者。

(3)若  $H_{i+1} > 0$ ，則海岸線移至  $i+1$  和  $i+2$  之間，流量  $P_{i+1/2} > 0$  可能為非零值，但  $P_{i+3/2}$  仍為零，溢淹深度  $H_f$  為  $h_{i+1} + \zeta_i$  和  $h_{i+1} + \zeta_{i+1}$  二者之較大者。

以上海岸線的移動過程中，不僅能滿足質量守衡，在移動邊界之處理亦能得到合理的結果。 $H$ 在模式內是兩個網格之平均值，一般出現在海陸地形交界處，在多起模擬案例中，目前尚未遇到剛好等於 0 的情形。為避免模式產生計算誤差，可考慮在模式加入條件式，設定  $H = 0$  時，給予一極小值。

本模式在上下左右四側的邊界設定皆為幅射邊界條件，波浪傳遞至此處時，必須予以適當的計算處理，以消除波浪在此邊界產生之反射現象。計算過程中，假設網格邊界上之水流方向，令流出計算區域時之水位為負值，代表下降；流入計算區域時之水位為正值，代表上升，根據此方法來控制平衡網格邊界上之水位流量，順利解決此開放邊界上的干擾現象。

### 3.2.2 海嘯數值模擬與巢狀網格

海嘯在大洋的波長尺度較大，其模擬可容許使用較粗的網格；因此如果模式計算的區域相當大，通常會將網格數減少，網格間距加大，以節省模式的運算時間。到了近海，水深變淺，海嘯的波長尺度下降，其模擬必須使用較細的網格。故一般在大洋使用較粗的網格，到近海增加網格數、網格間距縮小，到近岸再用更細的網格；如此一層套疊一層，近似鳥巢般的網格配置，稱為巢狀網格(nested grid)。在計算及運作上則是在模式內設定好巢狀網格，模式會將第一層網格的水位帶進第二層計算以此類推，而巢狀網格可以滿足大小區域之需求，在遠洋區域及近岸區域選用不同的網格大小進行海嘯的傳播模擬，藉此細部描述海嘯於小區域之溯上計算，也提高海嘯模式的效率。以下以圖 3.5 為例說明，模擬海嘯在大洋中傳遞時所使用的大網格，共包括了第一與第二區域，且第二區域的網格是在第一區域的網格之中。由於第一區域計算範圍大，其中考慮了地球曲面效應及科氏力造成的偏轉效

應，因此在此區域所使用之座標系統為球面座標系統，而模式的計算是依據球面座標之線性淺水方程組(3.4式至3.6式)。第二區域使用的網格系統則改為直角座標系統，使用直角座標之線性淺水方程組(3.12至3.14式)。然而，當模擬海嘯於近岸第三與第四區域溯上時，則必須考慮到近岸的非線性效應與海底底部摩擦項的影響，模式的計算改為使用非線性淺水方程組(3.1至3.3式)。上述處理過程可分別滿足海嘯在大洋中傳遞，以及在近岸地區溯上的兩種需求，其所計算之網格間距第一層為ETOPE解析度2分數值地形，第二層為海科中心解析度1分數值地形，第三層為海科中心解析度0.5分數值地形。

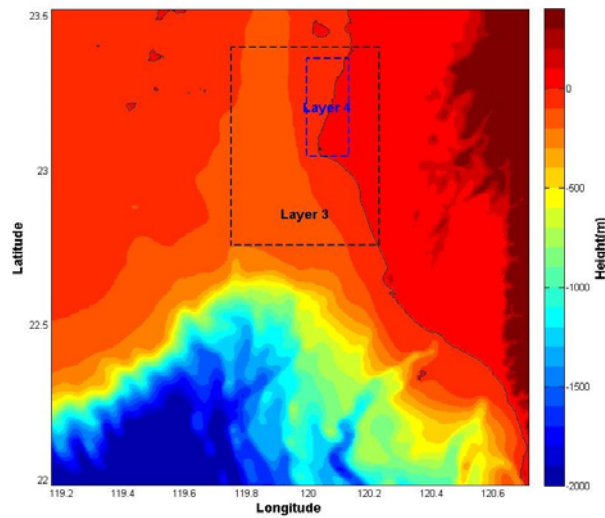


圖3.5 巢狀網格示意圖

模式的顯式數值積分必須滿足CFL(Courant, Friedrich, Levy)穩定條件，即物理速度小於等於數值訊號的傳播速度；對二維海嘯模式，此條件可表示為

$$\Delta t \leq \frac{\sqrt{2}}{c} \Delta x = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{gh_{\max}}} \Delta x \quad (3.16)$$

其中  $\Delta t$  為時間步長(time step)， $\Delta x$  為網格間距， $h_{\max}$  為各計算網格中最大水深值。由以上可知數值積分之最大容許時間步長隨網格間距而改變，最細的網格模擬最耗時。



本研究以2004年南亞海嘯作為進行模擬，其地震矩規模(Mw)為9.0，目的為驗證模式的可用性。由於蘇門達臘地震源區的海底地震板塊交界處以接近南北向的方式綿延一千多公里左右，因此模擬計算時，模式上共分成三段海底斷層(如表3.1所示)的方式來表示震源區域的海底斷層錯動。印度洋之地形資料來源為NOAA，如圖3.6、3.7所示。

模式中最重要之參數為斷層參數，本研究採用之參數如表3.1所列，並與馬爾地夫潮位站比對，與實測資料相比相當符合。如圖3.8所示。

表3.1 本研究所使用之斷層參數

Source parameters	Fault Plane 1	Fault Plane 2	Fault Plane 3
Fault depth	5 km	5 km	5 km
Length of fault plane	200 km	670 km	300 km
Width of fault plane	150 km	150 km	150 km
Strike/Dip/ Slip	300°/13°/90°	345°/13°/90°	365°/13°/90°
Dislocation	15 m	15 m	15 m

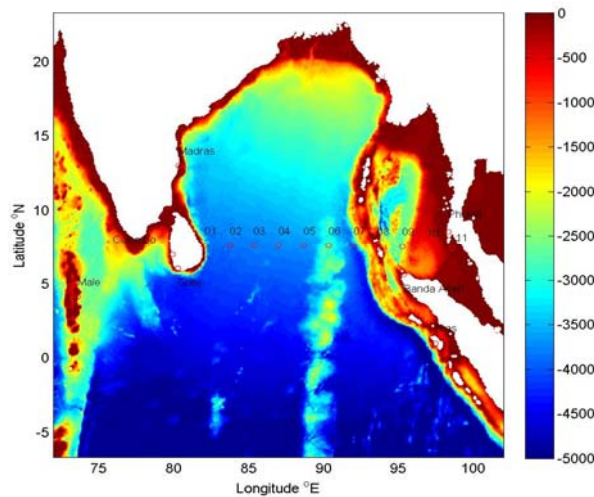


圖3.6 模式計算區域水深地形圖

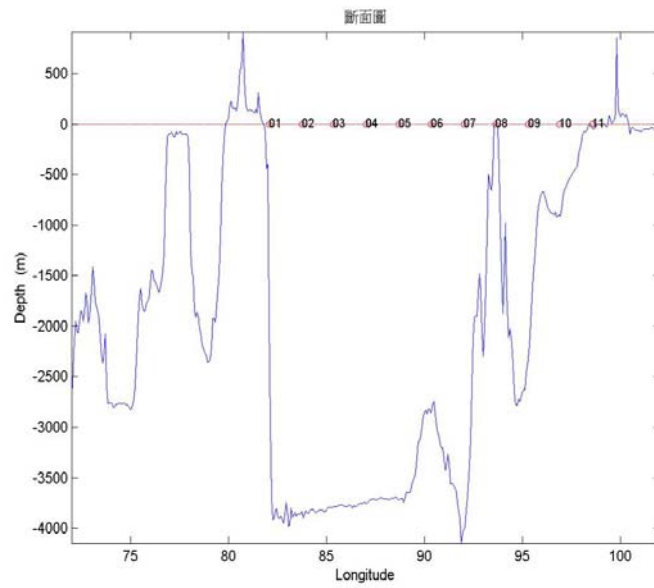


圖3.7 模式計算區域水深地形剖面圖

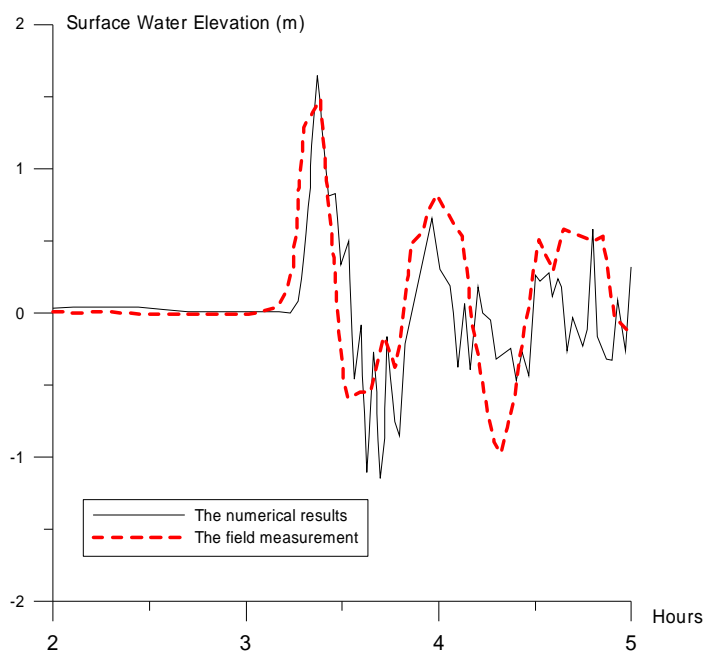


圖3.8 與馬爾地夫水位之比對

### 3.3 系統建構

本計劃海嘯波高資料庫之建置構想及初始概念，即是尋找一個方法能提高海嘯計算之效率，在遠/近域海嘯發生後，能夠快速掌握可能

之最大波高以及到達時間，提供給各港務分公司作為後續應變之作為之參考，並將各個港口之資料庫整合在單一操作界面之下，以方便使用者使用。其預警系統主要流程如圖 3.9 所示。本節將逐一介紹系統之建置方式。

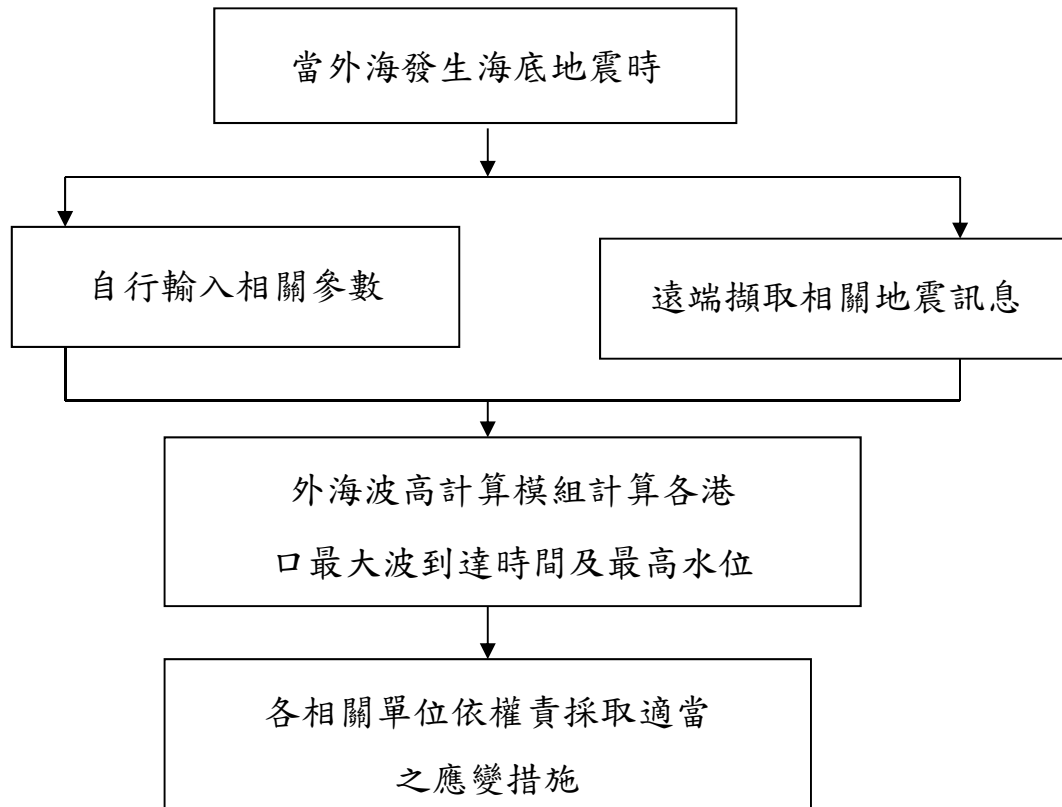


圖3.9 海嘯速報系統之規劃圖

### 3.3.1 地震資料來源與擷取

大多數的海嘯成因起源於海底地震，所以海嘯初始水位主要是計算斷層錯動推動海水面的升降；而斷層模式所需之參數均來自於地震資料，故本小節將說明地震資料來源及擷取方式。

本計劃地震資料來源採用 [United States Geological Survey\(USGS\)](http://www.usgs.gov)-National Earthquake Information Center(NEIC)中所記錄地震資料，地震紀錄期間為自 1973 至 2013 年，搜尋範圍為整個太平洋區域，如圖 3.10 所示。地震紀錄採用下限為 4.5，地形資料則採用 NOAA-ETOPO1 之

數值資料。

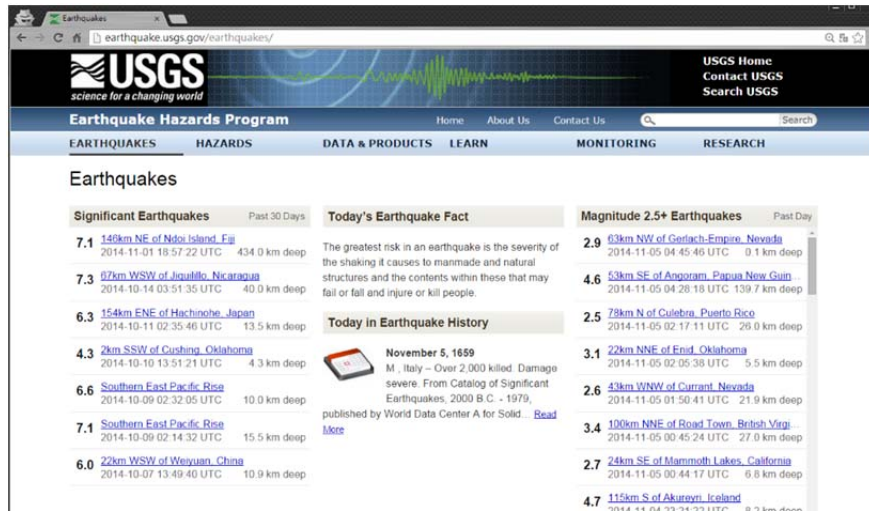


圖3.10 美國USGS資料庫

USGS-NEIC 資料庫不同於 Harvard-CMT，在 NEIC 資料庫中含有  $M_W$ 、 $M_B$ 、 $M_S$ ... 等不同地震規模的測值，可透過經驗式的轉換來彌補有些地震資料不足的情形。地震規模(earthquake magnitude)和地震震度(earthquake intensity)之表示略有不同。地震震度(earthquake intensity)是在地震儀發明之前，用來表示地震強度的指標。震度是指在發生地震時，人們所感受到震動大小的程度或者是物體受到地震震動所遭到的破壞程度，距離地震震央愈接近，其震度大小就愈大，破壞力也愈強；世界各國在使用地震強度分級上，會因環境、背景的差異，所訂定的標準也會不同；現今地震儀器已經能描述地震的加速度，所以震度亦可由加速度值來劃分。

USGS-NEIC 之地震資料庫範圍為全球，但其資料擷取約在地震發生後約 1 小時才可遠端擷取其參數，本計劃採用自動擷取方式擷取即時之資料，當有地震資料時，系統可自動擷取即時資料進行後續預報作業。對於震央發生在臺灣周邊海域恐有不及，因此在臺灣區附近(東經 119 度~123 度，北緯 21 度~26 度)採用中央氣象局之地震即時資料(<http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/CMT/quick/quick.html>，如圖 3.11 所示)，約在地震後 5 分鐘即可獲得相關訊息，而其他區域仍使用 NEIC 之資料。

擷取的方式為使用定時程式及Matlab裡面內附的Java套件，透過http的方式取得USGS(或F-net)的網頁資訊加以分析取得地震訊息，包括發生時間，震央以及震度等參數，如果發生時間較新且震央範圍在計劃範圍之內，便將該參數傳遞給系統做水位預報。其抓取後之格式，如圖3.12所示。

Quick CMT Reports:

[Recent Qcmt Distribution In Taiwan](#) [Subscribe Quick CMT](#)





Date	Time(UT)	Lat.	Lon.	Dep.	Mw	Strike	Dip	Slip	Misfit	CMT	Detail
2013-07-24	15:32:15.08	23.91	121.53	9.32 13	4.40	215 57	34 58	71 102	0.405		<a href="#">Trace</a> <a href="#">Map</a> <a href="#">Image</a> <a href="#">Solution</a>
2013-07-24	14:47:5.76	23.91	121.51	9.63 15	4.30	217 50	31 60	79 97	0.402		<a href="#">Trace</a> <a href="#">Map</a> <a href="#">Image</a> <a href="#">Solution</a>
2013-07-18	0:28:23.26	22.97	120.91	4.29 13	3.30	334 136	45 46	-77 -103	0.575		<a href="#">Trace</a> <a href="#">Map</a> <a href="#">Image</a> <a href="#">Solution</a>
2013-07-16	10:11:35.00	24.28	121.50	4.92 12	4.70	335 146	40 50	-83 -96	0.490		<a href="#">Trace</a> <a href="#">Map</a> <a href="#">Image</a> <a href="#">Solution</a>

圖3.11 中央氣象局網站之即時地震資料

```

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/neic_b000d65a_fmt.php
yr | mon | day | hr | min | sec | mw | lon | lat | dep | strike/dip/slip strike/dip/slip
2012 10 15 17 52 2.160000e+001 5.5 -90.866 14.147 68 253/9/37 127/85/97

```

圖3.12 遠端擷取USGS地震資料格式

目前計畫完成之即時地震擷取系統之資料來源為 USGS、CWB，並增設日本防災科學技術研究所(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention NIED)所提供之 F-net (Full Range Seismograph Network of Japan)，其範圍在東經 120 度到 156 度，北緯 20 度到 49 度，以供地震資料參考(圖 3.13)，三個主要之地震資訊來源及提供範圍如表 3.2 所示。圖 3.14 為目前完成之即時地震擷取系統介面。在此要特別說明的是，實務上在擷取地震資料時會設定地震矩規模的下限，超過此一下限之資料，系統才會擷取；此舉是考量到地震

必須有相當之強度才有發生海嘯之可能，此設定可避免過多之地震訊息所造成的誤解。而在地震初期或是通訊中斷而資訊不明時，作為系統之參考輸入條件；實務上，地震之震央無法事先預知，會造成海嘯初始水位預測之困難，也影響系統預估水位之準確度；因此，在此一情況下，採用附錄三依不同地震矩規模輸入建議之地震參數作為替代條件，雖與實際狀況有所差異，但不失為一可行之方法。

Origin Time(UT)	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Region	Var Red
2011/04/18.19.14	39.6 N	140.4 E	20 km	Mj 4.8	SOUTHERN AKITA PREF	79.82
2011/04/18.17.37	35.5 N	138.6 E	90 km	Mj 4.1	KANAGAWA PREF	70.58
2011/04/18.17.26	41.5 N	142.0 E	50 km	Mj 4.0	E.OFF AOMORI PREF	61.61
2011/04/18.08.16	35.4 N	136.3 E	40 km	Mj 3.5	SHIGA Gifu BORDER REGION	65.22
2011/04/18.02.08	37.1 N	140.7 E	20 km	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	77.38
2011/04/17.18.33	37.0 N	140.8 E	10 km	Mj 4.1	EASTERN FUKUSHIMA PREF	82.41
2011/04/17.18.09	35.8 N	140.1 E	80 km	Mj 4.4	NORTHERN CHIBA PREF	86.46
2011/04/17.15.47	37.1 N	141.3 E	30 km	Mj 4.8	E.OFF FUKUSHIMA PREF	80.43
2011/04/17.14.46	37.1 N	140.8 E	shallow	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	78.98
2011/04/17.12.51	37.1 N	140.7 E	10 km	Mj 4.6	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.32
2011/04/17.09.03	37.1 N	140.8 E	10 km	Mj 4.2	EASTERN FUKUSHIMA PREF	89.49
2011/04/17.06.49	35.9 N	140.5 E	40 km	Mj 4.7	SOUTHERN IBARAKI PREF	89.94
2011/04/17.05.38	37.0 N	140.7 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	86.88
2011/04/17.04.39	35.9 N	140.6 E	40 km	Mj 4.5	SOUTHERN IBARAKI PREF	88.09
2011/04/17.01.38	38.7 N	142.3 E	40 km	Mj 4.6	E.OFF MIYAGI PREF	86.76
2011/04/16.20.21	36.2 N	141.0 E	40 km	Mj 4.8	E.OFF IBARAKI PREF	79.14
2011/04/16.20.19	37.1 N	140.8 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	71.96
2011/04/16.19.17	37.0 N	138.7 E	10 km	Mj 3.5	MID.NIGATA PREF	76.37
2011/04/16.15.56	37.1 N	138.7 E	30 km	Mj 4.8	MID.NIGATA PREF	85.74
2011/04/16.13.40	24.0 N	122.8 E	20 km	Mj 4.6	NW.OFF ISHIGAKI/JMA JS	79.47
2011/04/16.04.20	37.8 N	141.6 E	50 km	Mj 4.4	E.OFF FUKUSHIMA PREF	89.52

圖3.13 日本防災科學技術研究所F-net即時地震資料

表3.2 本系統主要地震資料之網址及對應之資料提供範圍

	機構名稱	網址及資料提供範圍
美國	地質調查所(USGS)	<a href="http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/">http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/</a> 資料提供範圍：全球
臺灣	中央氣象局(CWB)	<a href="http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/">http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/</a> 資料提供範圍：東經 119~123 度，北緯 21~26 度
日本	防災科學技術研究所(NIED)	<a href="http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en">http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en</a> 資料提供範圍：東經 120~156 度，北緯 20~49 度





圖 3.14 目前完成之即時地震擷取系統介面

### 3.3.2 地震級數之轉換

一般地震報告中所指的地震規模(earthquake magnitude)是依據地震的威力大小，此和其釋放出的能量多寡有關，故每當有地震發生時，地震規模只有單一值，不會因為觀測的位置不同而產生不同的數值。我國常使用之芮氏地震規模(Richter magnitude scale)，亦稱為近震規模(local magnitude,  $M_L$ )，是在 1935 年為了研究美國加州地區發生的地震而制定，使用伍德-安德森扭力式地震儀(Wood-Anderson torsion seismometer)來測量。由於當初設計芮氏地震規模的限制，當芮氏地震規模大於某數值(約 7.5)以上時會有「飽和」現象，也就是計算出來的所有地震規模值都趨近相同。此外，觀測點距離震央超過約 600 公里以上時，芮氏地震規模的計算會產生極大誤差而不適用。於是地震學家發展出表面波規模(surface waves magnitude,  $M_S$ )和體波規模(body waves magnitude,  $M_B$ )來描述較遠距離的地震規模值，以地震波中特定波相的最大振幅來計算，但是這兩種計算規模的方法，對於大型地震也會有飽和的問題。

21 世紀初，地震學者採用更能直接反應地震破裂過程物理特性(如地層錯動的大小和地震的能量等)的表示方法即地震矩規模(Moment magnitude scale,  $M_w$ )來描述地震大小，地震矩規模的優點在於它不會發生飽和現象。亦即，大於某規模的所有地震之數值都相同的情況將不會發生。另外，此地震矩規模與震源的物理特性有較直接的聯繫。因此，地震矩規模已經取代芮氏地震規模成為全球地震學家估算大規模地震時最常用的尺度。以下為幾個常見的地震規模介紹：

(1)  $M_L$ ：芮氏地震規模(Richter magnitude)

此種地震規模的概念是由加州理工學院(Caltech)的 C. F. Richter 教授於 1935 年所提出的，稱為芮氏地震規模  $M_L$ ，或近震規模(Local magnitude)。芮氏地震規模是以地震儀所記錄到的地震波振幅為基礎。倘落地震震源大小一定時，距離震源愈遠震波的振幅就愈小；而當與震源的距離一定時，則震波的振幅與震源的大小成正相關。

芮氏地震規模之定義為：一標準扭力式之伍德-安得生(Wood-Anderson)式地震儀(自由週期 0.8 秒，倍率 2800 倍，阻尼常數 0.8)在距震央 100 公里處所記錄的最大振幅以微米( $\mu m$ )記的對數值。其公式為：

$$M_L = \log(A / A_0) = \log A - \log A_0 \quad (3.17)$$

$M_L$ ：芮氏(近震)地震規模。

$A$ ：伍德-安得生(Wood-Anderson)式地震儀在測站所觀測之最大幅。

$A_0$ ：標準地震( $M_L = 0$ )時，同式地震儀在該測站所記錄之最大振幅。

地震規模是一個統一的數值，地震本身的大小與測站位置無關。但是地震並非都發生在距離測站 100 公里處，也因此計算地震規模時，必須考慮離震央距離(即震央與測站之距離)。若考慮震央距的修正，則上式可以修正為：



$$M_L = \log(A) + 2.56 \log(\Delta) - 5.12 \quad (3.18)$$

其中  $A$  為地震記錄最大振幅，以微米 ( $\mu m$ ) 為單位， $\Delta$  為距震央的距離，以度為單位。

(2)  $M_S$ : 表面波規模(surface waves magnitude)

此為根據 Gutenberg 教授和 Richter 教授的研究所訂，因芮氏地震規模僅適用在離震央距離小於 600 公里的地震，而當距震央距離大於 600 公里時，以表面波來求地震規模較恰當。表面波規模是根據表面波之振幅( $A$ )及週期( $T$ )而定的，在定義中不指定使用何種儀器，僅選用週期 20 秒左右的最大水準地動合成振幅  $A$ (單位為  $\mu m$ )來定義  $M_S$ 。而在 1966 年蘇黎士國際地震學會上規定，除計算表面波規模( $M_S$ )時，應考慮其最大振幅之外，還須考慮週期、振幅以及距離函數(亦稱檢定函數)  $\sigma$ ，即

$$M_S = \log(A/T) + \sigma(\Delta) \quad (3.19)$$

$$\sigma(\Delta) = 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (3.20)$$

上兩式可以合為：

$$M_S = \log(A/T) + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (3.21)$$

對於週期 20 秒的表面波,上式可修正為：

$$M_S = \log(A_{20}) + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (3.22)$$

其中  $A_{20}$  為週期 20 秒的表面波之最大振幅，值得注意的是須考慮實際地動的振幅量，即由記錄中的最大振幅量，再除去儀器的放大倍率，得到真正的地動量。表面波規模其優點為任何儀器皆可使用，缺點則為較深的地震則無法定出表面波規模。

(3) $M_B$ ：體波規模(body waves magnitude)

此為 1945 年 Guttenburg 研究體波之振幅衰減曲線  $Q(\Delta)$ ，所定義出的遠地地震體波規模  $M_B$ 。此定義根據體波之振幅( $A$ )及週期( $T$ )其為：

$$M_B = \log(A/T) + Q(\Delta) \quad (3.23)$$

由以上的地震規模( $M_L$ 、 $M_S$ 、 $M_B$ )可用一個通式來表示之有

$$M = \log A + f(d, h) + C_S + C_R \quad (3.24)$$

其中  $M$  是規模， $A$  是除去儀器效應後所記錄到之地震波的真實振幅， $f(d, h)$  是一些計算關於震央距離及震源深度的函數； $C_S$ ， $C_R$  是測站(station)及區域(region)計算出的修正值。因所記錄的週期不夠長或是有儀器使用限制上的關係，所以以上的地震規模對於能量較大或深度較深的地震，無法完全定出其規模，也就是說上述對於規模較大的地震有所限制，無法表示出來。因此，發展出一地震矩之概念(Seismic Moment) 來輔助。

(4) $M_W$ ：地震矩規模(Moment magnitude scale)

地震矩規模是由 Kanamori 教授所發展出的。因為芮氏地震規模( $M_L$ )對於較大的地震有其界限且會受儀的器限制，故其對大地震無法正確描述，進而發展出由地震矩( $M_0$ )來計算地震規模的方法。

地震的主要原因為地層的錯動，錯動處稱之為斷層。地震震源本身之大小與造成地層錯動的作用力有著直接的相關。因此，總力矩為表示震源大小的一個很重要且直接的參數。而震源機制之總力矩稱為地震矩(Seismic Moment)，造成單一斷層之地震的地震矩可簡化為：

$$M_0 = \mu \times S \times \bar{D} \quad (3.25)$$

其中  $\mu$  為斷層上物質的剛硬係數(rigidity 或 shear modulus)， $S$  為斷層面積， $\bar{D}$  為斷層的平均滑動量，地震矩( $M_0$ )的單位為 dyne-cm(達因-公分)，一般地震的地震矩值約為 10<sup>12</sup>-10<sup>30</sup> dyne-cm。地震矩規模( $M_w$ )是根據地震矩( $M_0$ )所發展出的關係式為

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \quad (3.26)$$

即由計算所得的  $M_0$  得出其相對的  $M_w$ ，就可適當的描述出地震的大小，此對大地震無界限限制的現象。

本研究出現最多資料的是  $M_B$ (體波規模)，其他還有少數以  $M_w$ 、 $M_s$ 、 $M_L$  等者；另外，還有一個少見的單位 UK(在本研究不考慮此參數)。其本研究所採用之轉換公式為：Scordilis (2006)對地震規模轉換之經驗公式。

(1) $M_s$  轉換成  $M_w$  之迴歸公式(圖 3.15(a))：

$$\begin{aligned} M_w &= 0.67(\pm 0.005)M_s + 0.27(\pm 0.03) \\ 3.0 &\leq M_s \leq 6.1, \\ R^2 &= 0.77, \quad \sigma = 0.17, \quad n = 23,921 \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} M_w &= 0.99(\pm 0.02)M_s + 0.08(\pm 0.13) \\ 6.2 &\leq M_s \leq 8.2, \\ R^2 &= 0.81, \quad \sigma = 0.20, \quad n = 2,328 \end{aligned} \quad (3.28)$$

(2) $M_B$  轉換至  $M_w$  之迴歸公式(圖 3.15(b))

$$\begin{aligned} M_w &= 0.85(\pm 0.04)M_B + 1.03(\pm 0.23) \\ 3.5 &\leq M_B \leq 6.2, \\ R^2 &= 0.53, \quad \sigma = 0.29, \quad n = 39,784 \end{aligned} \quad (3.29)$$

雖然由相關系數  $R$  之  $R^2$  值顯示轉換公式間的相關性不很高、且僅在 6.2 以下適用。但在找到更好的經驗式之前，即在尚未找到相關性更高的經驗轉換公式之前，本計劃將以此作為轉換公式之用。

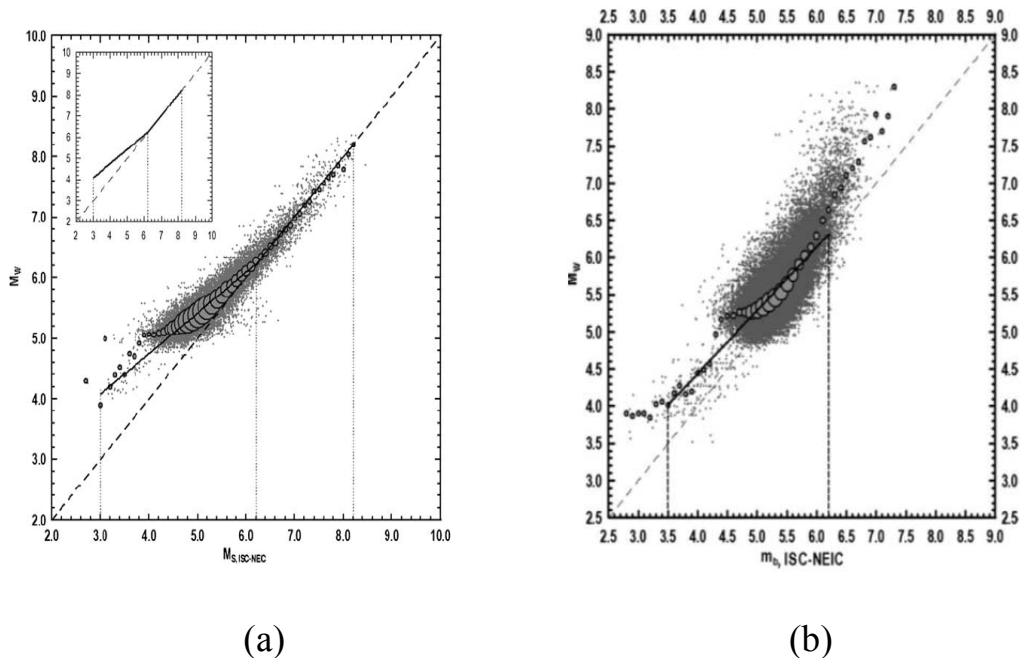


圖3.15 (a)  $M_S$  規模轉換之  $M_W$  規模之對應圖 (b)  $M_B$  規模轉換至  $M_W$

規模之對應圖 (Scordilis, 2006)

### 3.3.3 斷層參數

圖3.16即是斷層參數之示意圖；strike角( $0 \leq \theta \leq 360$ )表示斷層之走向方向，為正北方順時針至斷層走向之夾角；dip角( $0 < \delta < 90$ )為傾斜角度，即是水平面與斷層面間的夾角，斷層面傾角  $\delta$  與海嘯發生源擾動海水體積有關。slip角( $0 \leq \lambda \leq 180$ )表示斷層之滑動方向，代表斷層面上盤相對於下盤的滑動方向。

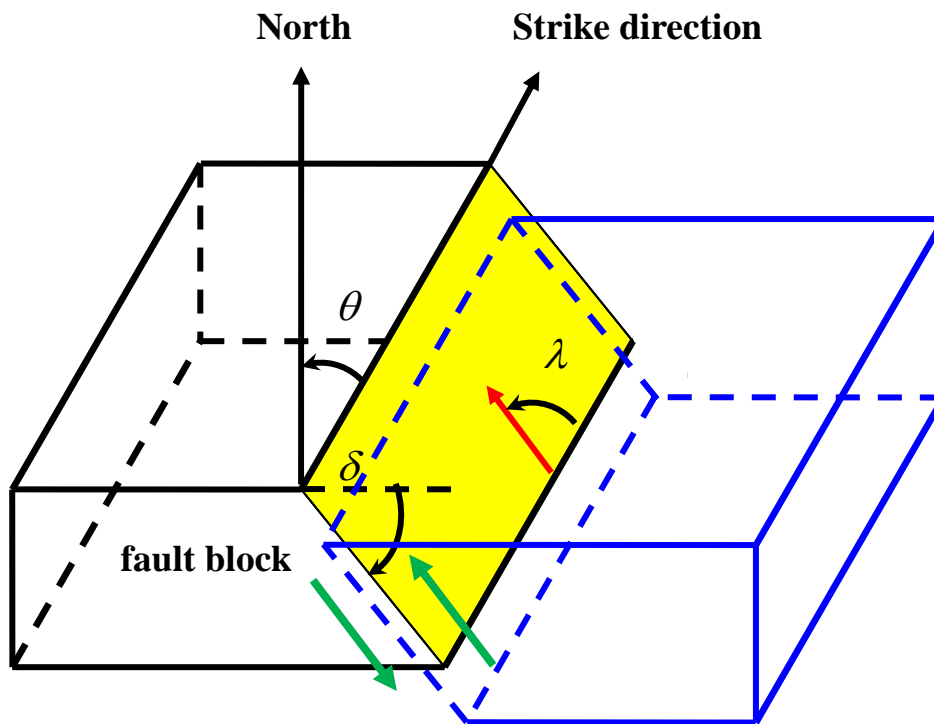


圖3.16 斷層參數示意圖

本項資訊在美國地調所 USGS 網站中

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>，可在地震發生後公佈原始之斷層參數，提供全球之地震訊息；一般斷層參數會有兩組解；至於哪一組解之正確性較高，則必須視事後進行比較驗證才能得知。

### 3.3.4 斷層長寬及震源深度之設定

利用資料庫匯整斷層參數之歷史資料雖可得到各個所需要之角度；但是以實務上而言，斷層之長度與寬度是未知，也就無法計算斷層平均滑移量；故本研究利用 Wells and Coppersmith (1994) 蒐集 1857-1993 年間可信度較高之 244 起地震事件所歸納出之經驗公式 (3.30) 式~(3.31) 式，計算地震規模下的長度( $L$ )及寬度( $W$ )。

$$\log(L)=a_1 + b_1 \times M_w \quad (3.30)$$

$$\log(W)=a_2 + b_2 \times M_w \quad (3.31)$$

$M_w$  為地震矩規模(Moment magnitude scale)； $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 及 $b_2$ 為迴歸係數，如表 3.3 所示，統計分析顯示其相關係數均在 0.81 以上，信賴區間為 95%；然後，再將斷層長度及寬度代入地震矩公式(3.32)及(3.33)式(Hanks et al, 1979)求得平均滑移量 $\bar{D}$ 。

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \quad (3.32)$$

$$M_0 = \mu W L \bar{D} \quad (3.33)$$

$M_0$ 是地震矩大小(Scalar moment of earthquake)， $\mu = 3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ 為剪力模數。得知斷層參數後即可利用彈性力學公式計算出海嘯初始水位。

表 3.3 (3.30)及(3.31)式迴歸係數之建議值

$a_1$	滑移走向 strike slip	-3.55	$b_1$	0.74
	逆斷層	-2.86		0.63
	正斷層	-2.01		0.50
	不分類	-3.22		0.69
$a_2$	滑移走向 strike slip	-0.76	$b_2$	0.27
	逆斷層	-1.61		0.41
	正斷層	-1.14		0.35
	不分類	-1.01		0.32

### 3.3.5 海嘯初始水位之生成

前小節已說明地震資料的來源、擷取、地震級數轉換，當斷層參數、斷層長度及滑移量均求得後，就可以利用斷層模式來生成海嘯波源區可能的初始水位。

由於大多數的海嘯成因起源於海底地震，所以一般海嘯數值模式之海嘯初始水位藉由海底斷層模式來驅動，基本上起始海水面的變動是利用海床位移量的計算來產生初始水位，假設海水為不可壓縮；當海床產生錯動，則垂直方向上的海水面也會產生瞬間的變動，亦即地震與海水面變動的發生視為同一時間。海床位移量是由走向滑距(strike-slip displacement)及傾向滑距(dip-slip displacement)所構成，本計劃使用的斷層模式是 Mansinha and Smylie(1971)的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)，主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。

簡單來說海床位移量是由走向滑距 (strike-slip displacement)及傾向滑距(dip-slip displacement)所構成，本研究所使用的斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。彈性錯移理論(elastic dislocation theory)，即斷層在j方向的錯動造成均質均向的彈性半空間所產生i方向的位移場 $\Delta u_j$ ，並對整個矩形斷層錯動範圍積分；其關係式為：

$$u_i = \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi} + \mu \left( \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] \nu_k dS \quad (3.34)$$

其中 $\nu_k$ 為 $\Sigma$ 向外的垂直向量、 $\lambda$ 與 $\mu$ 為拉梅常數(Lamé constants)、 $u_i^j$ 為受到破裂面 $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 上j方向單位應力作用而在地表 $(x_1, x_2, x_3)$ 於i方向上的位移。

假設一矩形斷層座標系統如圖3.17(a)所示，其中  $\xi$  方向代表斷層傾角的正下方，而走向滑距(strike-slip displacement)和傾向滑距(dip-slip displacement)可分別用 (3.36) 與 (3.37) 式表示，其涵蓋範圍為  $-L \leq \xi_1 \leq L$ ，以及  $d \leq \xi \leq D$ ：有

$$u_{is} = \mu U_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[ \left( \frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \theta - \left( \frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \theta \right] d\xi_1 d\xi \quad (3.35)$$

$$u_{id} = \mu U_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[ 2 \left( \sin \theta \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi} - \cos \theta \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi} \right) + \left( \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} \right) \right] d\xi_1 d\xi \quad (3.36)$$

其中， $\xi$  = 震源深度( $\sin \theta$ ) + 斷層寬度( $w$ )、 $\xi_1$  = 斷層長度/2、 $\xi_2 = \xi \times \cos \theta$ 、 $\xi_3 = \xi \times \sin \theta$ 。由於斷層面是位於地底下，為了計算地下錯動對地面上位移的關係，則須將斷層面作座標轉換，如下圖3.19(b)所示，並有

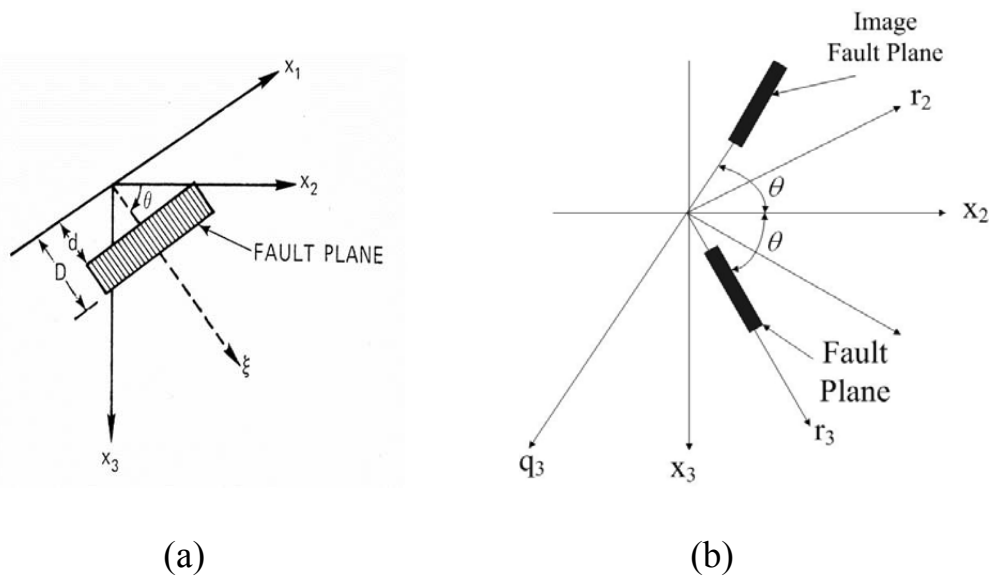


圖3.17 (a)斷層幾何形狀及座標系統(b)斷層及映像斷層座標系統



$$\begin{aligned}
R &= \left[ (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2 \right]^{1/2} \\
S &= \left[ (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2 \right]^{1/2} \\
r_2 &= x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, & r_3 &= x_2 \cos \theta - x_3 \sin \theta \\
q_2 &= x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, & q_3 &= -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta
\end{aligned} \tag{3.37}$$

其中， $R$ 和 $S$ 分別代表斷層面上的震源點 $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 至地表 $(x_1, x_2, x_3)$ 的距離，以及對映像斷層面上的震源點 $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 至地表 $(x_1, x_2, x_3)$ 的距離。 $r_2$ 、 $r_3$  及 $q_2$ 、 $q_3$  分別代表斷層面及映像面的垂直及向下傾斜之座標，由此可將 $R$ 和 $S$ 以新座標表示為：

$$\begin{aligned}
R &= \left[ (x_1 - \xi_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \xi)^2 \right]^{1/2} \\
S &= \left[ (x_1 - \xi_1)^2 + h^2 \right]^{1/2} = \left[ k^2 + (q_3 + \xi)^2 \right]^{1/2} \\
h &= \left[ q_2^2 + (q_3 + \xi)^2 \right]^{1/2} \\
k &= \left[ q_2^2 + (x_1 - \xi_1)^2 \right]^{1/2}
\end{aligned} \tag{3.38}$$

其中， $h$ 是 $S$ 在 $x_1 = 0$ 平面即地表切平面上的投影，而 $k$ 是在 $q_3 = 0$ 平面上的投影。最後經過座標轉換後，計算出斷層傾向滑距及走向滑距在地面上產生的垂直位移分量如下：

走向滑距(strike-slip displacement)在 $x_3$ 方向之位移量為：

$$\begin{aligned}
\frac{12\pi}{U_1} u_3 &= \cos \delta (a_1 + b_1 a_2 - b_2 a_4) + \frac{b_3}{R} + 2 \sin \delta \frac{b_4}{S} \\
&\quad - \frac{b_5}{R \exp(a_1)} + \frac{b_7 - b_8}{S \exp(a_2)} + \frac{b_{10} b_{11}}{S^3} - \frac{b_{12} b_{13}}{b_{14}}
\end{aligned} \tag{3.39}$$

傾向滑距(dip-slip displacement)在  $x_3$  方向之位移量則為：

$$\begin{aligned}
 \frac{12\pi}{U_1} u_3 = & \sin \delta (x_2 - \xi_2) \left[ \frac{2(x_3 - \xi_3)}{R \exp(a_5)} + \frac{4(x_3 - \xi_3)}{S \exp(a_6)} - 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \frac{S + \exp(a_6)}{S^3 (\exp(a_6))^2} \right] \\
 & - 3 \sin \delta \left[ 2 \tan^{-1} \left[ \frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{(h + x_3 + \xi_3)(S + h)} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 - \xi)}{r_2 R} \right] \right] \\
 & - 6 \sin \delta \tan^{-1} \left[ \frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 S} \right] + \cos \delta \left[ a_5 - a_6 - \frac{2(x_3 - \xi_3)^2}{R \exp(a_5)} \right] \\
 & - 4 \cos \delta \left[ \frac{x_3^2 + x_3 \xi_3 + \xi_3^2}{S \exp(a_6)} + \xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \frac{S + \exp(a_6)}{S^3 (\exp(a_6))^2} \right] \\
 & + 3x_3 \sin 2\delta \left[ \frac{2(q_3 + \xi)}{S \exp(a_6)} + \frac{(x_1 - \xi_1)}{S \exp(a_2)} + \frac{q_2 \cos 2\delta}{S \exp(a_6)} \right]
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

### 3.4 數值模擬進行海嘯預警之方式

海嘯預警必須在海底地震發生後提供是否有海嘯發生、是否有威脅性、海嘯何時抵達等資訊；如何得到這些資訊，則可分為事先算好的海嘯預報系統資料庫以及海嘯的實時(real time)模擬兩種方式。海嘯預報系統資料庫統整模擬結果成一資料庫，在海嘯發生時運用此資料庫預測海嘯的大小，節省海嘯數值模擬所需之時間，使海嘯警報得儘快發佈。海嘯的實時模擬則是俟取得地震資料後，利用斷層模式求得海嘯初始水位，再進行海嘯模擬。

海嘯模擬資料庫的構成又可細分為三種方法，即海嘯情境的數值模擬、格林函數法與互逆格林函數法。海嘯情境的資料庫是在地震發生後，搜尋資料庫中與此地震最接近的情境作為海嘯的預測情況。格林函數與互逆格林函數則是在地震發生後，利用斷層模式求得波源區各點的海嘯初始水位，再分別乘上相對應的格林函數或互逆格林函數來求得海嘯的大小。

現行之海嘯數值模式之模擬程序(如圖 3.18)及計算效率由於地震測報技術未得以進入應用階段以及計算方式之問題，故應用在海嘯測報及早期預警上仍有實際上之困難；由於不論是遠域或是近域海嘯，爭取應變時間、提升計算效率及獲取早期之海嘯資訊是目前海嘯模擬技術能進一步精進之項目。

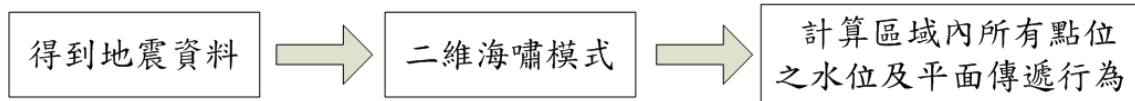


圖 3.18 現行海嘯數值模式之模擬程序

### 3.4.1 傳統格林函數

一般常見之海嘯數值模式是利用淺水方程式(shallow water equation)作為基礎，將(3.1)式至(3.3)式之非線性淺水方程組，經線性化後簡化而成以下線性淺水方程組：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \quad (3.41)$$

$$P_t + g d \eta_x = 0 \quad (3.42)$$

$$Q_t + g d \eta_y = 0 \quad (3.43)$$

其中 $\eta$ 為水面高， $P$ 與 $Q$ 為 $x$ 與 $y$ 方向的單位寬度質量通量， $d$ 為平均水深，而下標代表偏微分。

當海嘯發生後，輸入必要之參數即可模擬出計算區域內所有的傳遞行為及水位變化。由於海嘯波在大洋中之傳遞，波高相對於波長甚小，非線性效應可以忽略，所以可視為一個「線性系統」，據此計算出各點之水位時序列變化，即稱為「格林函數」(Green's function，以下以GF簡稱)，以數學方式解釋，即是格林函數可視為是線性淺水方程式之基本解；對線性淺水方程組的連續方程取時間微分，再對方程組的兩個動量方程分別取空間 $x$ 與 $y$ 的微分，可消去質量通量，從而簡化線

性淺水方程組成以下之方程：

$$\eta_t - g \left[ (d\eta_x)_x + (d\eta_y)_y \right] = 0 \quad (3.44)$$

故格林函數  $G_s^r = G(t, x_r, y_r, x_s, y_s)$  即以下方程之解

$$\eta_t - g \left[ (d\eta_x)_x + (d\eta_y)_y \right] = \delta(t, x - x_s, y - y_s) \quad (3.45)$$

對實際的海洋地形，此方程無解析解，只能以數值方式求解，故此格林函數為滿足相關邊界條件的數值解，與一般邊界積分法常見的無限域下解析形式之基本解稍有差異，可稱之為數值格林函數；而  $\delta$  函數亦須離散化，即於初始時間  $t=0$  時除  $(x_s, y_s)$  的初始水位為 1 之外，計算領域內之每一點的初始水位皆為零；而格林函數即為此單位初始水位引致的計算領域內每一點隨時間的震盪。此離散化  $\delta$  函數其形式為

$$\delta(t, x - x_s, y - y_s) = \begin{cases} 1 & \text{for } t = 0, x = x_s \text{ and } y = y_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.46)$$

圖 3.19 即為以基隆為例之格林函數所對應的初始水位。

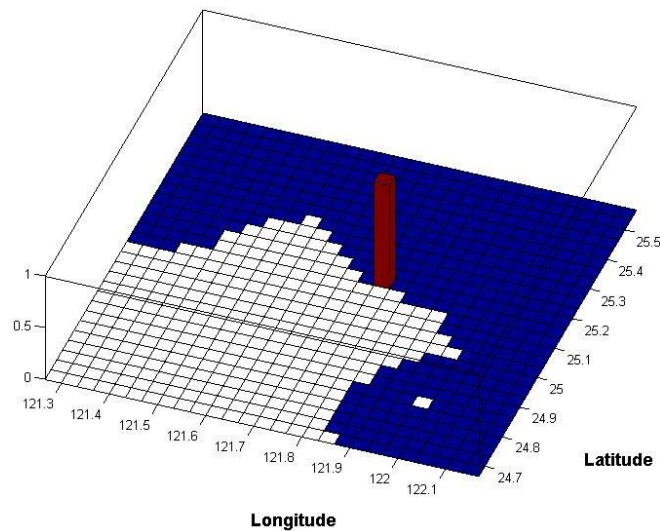


圖 3.19 以基隆為例之格林函數所對應的初始水位

若對所有波源區共 $N$ 個點的每個點 $s$ 予以編號 $1, 2, 3, \dots, N$ ，其對應之初始水位記為 $H^s$ ，則一海嘯事件須包含此 $N$ 個點的每個點造成的海嘯，而波源初始水位可以表為

$$\sum_{s=1}^N H^s \delta(t, x - x_s, y - y_s) \quad (3.47)$$

對每個點 $s$ 及其初始水位 $H^s$ 所引致的全域水位變化可以由下式求得

$$\eta_{tt}^s - g \left[ \left( d\eta_x^s \right)_x + \left( d\eta_y^s \right)_y \right] = H^s \delta(t, x - x_s, y - y_s) \quad (3.48)$$

其中下標代表偏微分， $\eta^s(t, x, y)$ 表示 $s$ 點的初始水位 $H^s$ 造成的計算區域水位變化。由(3.45)、(3.48)兩式可知，對 $r$ 點( $x = x_r, y = y_r$ )而言， $\eta^s$ 相對於格林函數 $G_s^r$ 之 $H^s$ 倍，即

$$\eta^s(t, x_r, y_r) = G_s^r \times H^s \quad (3.49)$$

將編號 $1, 2, 3, \dots, N$ 的每個點 $s$ 對應之方程式(3.49)相加總，即

$$\sum_{s=1}^N \eta_{tt}^s - \sum_{s=1}^N g \left[ \left( d\eta_x^s \right)_x + \left( d\eta_y^s \right)_y \right] = \sum_{s=1}^N H^s \delta(t, x - x_s, y - y_s) \quad (3.50)$$

連加符號 $\Sigma$ 與時、空之偏微分運算可以互換，故得

$$\left( \sum_{s=1}^N \eta^s \right)_{tt} - g \left[ \left( d \left( \sum_{s=1}^N \eta^s \right) \right)_x + \left( d \left( \sum_{s=1}^N \eta^s \right) \right)_y \right] = \sum_{s=1}^N H^s \delta(t, x - x_s, y - y_s) \quad (3.51)$$

此方程式左側為(3.44)式，右側則為海底地震錯動引起的初始水位變化(3.48)式，亦即引致海嘯的初始條件。因此(3.51)式的解

$$\eta(t, x, y) = \sum_{s=1}^N \eta^s \quad (3.52)$$

即為海底地震引起的海嘯。由以上(3.49)式可知，對 $r$ 點而言， $\eta^s$ 相對於格林函數 $G_s^r$ 之 $H^s$ 倍；故 $r$ 點的海嘯水位 $H^r$ 可表示為

$$H^r = \eta(t, x, y) = \sum_{s=1}^N \eta^s(t, x, y) = \sum_{s=1}^N G_s^r \times H^s \quad (3.53)$$

其中 $\eta^s$ 表示 $s$ 點的初始水位 $H^s$ 造成全區水位變化，但是海嘯快速預報只需要 $r$ 點的水位；所以格林函數 $G_s^r$ 對 $r$ 點而言只是一時間序列(time series)，利用此格林函數，事先計算完成並以資料庫方式儲存，即可進行海嘯快速預報(參見Wei等人, 2003; Sa´nchez & Cheung, 2007)。

大海嘯的波源區可能長達數百公里以上，海嘯可能的波源區更是涵蓋大多數海域，因此事先要算好的格林函數數目十分驚人，可能達百萬個以上。為減少格林函數的計算量及其儲存空間，有學者以減低波源區解析度的方式因應，此即所謂單位海嘯法(unit tsunami method)。目前中央氣象局即採用此法，可參見陳等人(2009)。格林函數或單位海嘯可在未確定初始水位前針對可能的波源區先行計算後並以資料庫方式儲存；當地震發生獲得地震參數後，利用斷層模式計算初始水位 $H^s$ ，與格林函數(或單位海嘯)相乘之後即可得到與海嘯模式一致之結果。與情境分析方式相比，以格林函數或單位海嘯建立單位振幅下之海嘯波高資料庫顯然更為經濟方便，且是在地震參數取得後再根據2.3節的斷層模式計算所得之海嘯初始水位 $H^s$ 所導得，因此不會被海嘯的情境分析所採用的地震斷層參數所限。

由此可知這種計算方式很難應用在海嘯早期預警，因為必須「事前」得知一個可能之震源才得以模擬後續之傳遞行為；這種限制使得海嘯數值模擬必須依賴地震之初始條件，但目前地震是無法進行預測，因此這種方式有其限制；另一方面，海嘯防災以海嘯波源之生成與近岸時之波高變化最為重要，在大洋中之傳遞行為雖對於學術研究具有重要價值，但對於災害防治提供之訊息有限，計算過程也耗費太多之時間與儲存空間。上述GF是代表一個已知波源對區域內各點所產生的水位時序列變化。若 $s$ 表示波源位置(source)，而 $r$ 則為接收位置(receiver，即是計算點位)，其GF即是由 $s$ 到 $r$ 而其逆向的GF代表以 $r$ 產生的單位波源振幅，在 $s$ 所造成的反應。格林函數的運用在傳統上觀察線

性系統中波源所造成的反應，而格林函數通常以波源振幅表示，如果區域內各點的格林函數已經求得，只要計算起始波源的水位與其格林函數的乘積後進行加總，便可知波源對各點所引起的水位變化。

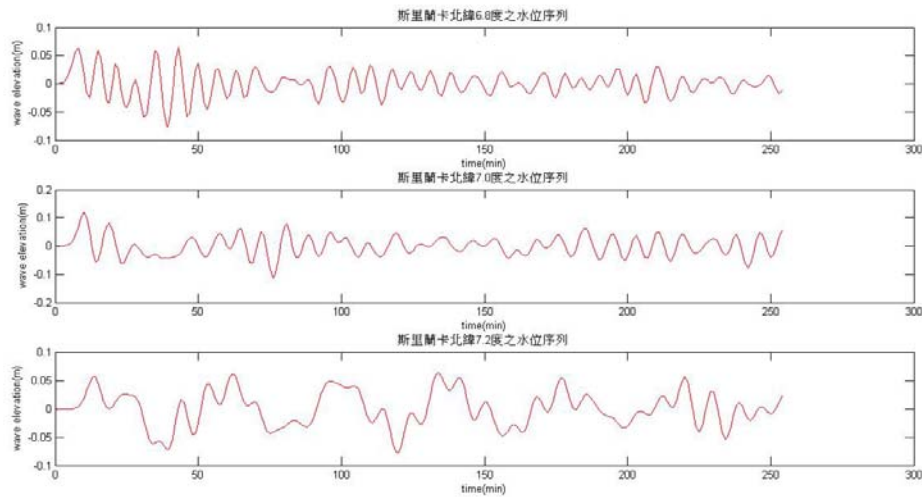


圖 3.20 傳統海嘯之模擬結果

### 3.4.2 互逆格林函數

傳統的格林函數和直接的海嘯模擬都可以給出全域的海嘯波分布；前者雖然較省時間，但耗費的計算量及儲存空間仍相當可觀，還可能發生計算區域未包括某次海嘯的波源區、亦或某次海嘯波源區的格林函數未事先計算等問題。另一方面，如果我們只需要某個位置的海嘯水位（如(3.54)式所示）而不是全域的海嘯分布，這些格林函數的計算量及儲存空間則顯得多餘。而線性系統之格林函數具有可逆性，這點就構成了互逆格林函數(reciprocal Green's function, RGF)之基本理論，其構想主要源自 Loomis (1979)與 Xu (2007)；這個方式主要用來利用線性系統中之可逆性來改進上述海嘯模擬之缺點，降低對地震斷層參數之依賴性及提高計算效率。儘管海嘯波靠近近岸時會呈現高度非線性變化，但在水深深於 50m 的海域，線性淺水方程式依舊能適用於

描述其傳播過程(Shuto, 1991)，故線性系統之可逆性仍可適用。故本計畫以互逆格林函數以提升目前海嘯模擬之計算效率。

Loomis(1979)觀察到 GF 及其互逆 GF 對於  $s$  和  $r$  是呈現對稱的形式，亦即相同的波源出現在  $s$  所造成對  $r$  的反應相當於出現在  $r$  所造成對  $s$  的反應，Loomis 所提的互逆特性可以提高計算各點 GF 的效益，只要計算  $s$  傳播後對所有  $r$  的 GF，等同於得知當任何  $r$  出現波源時對  $s$  造成的反應。

簡易之理論說明如下：為了解區域內任何  $s$  點發生海嘯時，其當地水位將對  $r$  點位置的造成多大的水位高度，故先計算所有  $r$  點對應  $s$  點的 GF。首先將某一時段內各  $r$  點的水位經(3.54)式正規化便是  $r$  點傳播至各點的 GF 值，又因波源振幅為 1m，所以模式計算後的水位值即為 GF 值。再根據 GF 的互逆性質， $r$  點對應  $s$  點的 GF 等同於  $s$  點對應  $r$  點的 GF(3.55)式。只要透過(3.56)式作簡單的乘積與加總就可到  $s$  點在海嘯發生後的該時段水位變化。

$$G_r^s = \frac{r\text{點水位}}{\text{波源}s\text{之初始水位}} \quad (3.54)$$

利用格林函數與互逆格林函數的互逆性

$$G_r^s = G_s^r \quad (3.55)$$

(3.53)式可改寫為

$$H^r = \eta(t, x, y) = \sum_{s=1}^N G_r^s \times H^s \quad (3.56)$$

以上由圖 3.21 說明其概念，對某一個接收點  $r$  而言，由於可能有許多未知震源，故用  $si$  來表示所有可能之震源，其 GF 即是由  $si$  到  $r$ 。由於格林函數具有可逆性，所以任一點  $si$  之單位振幅對  $r$  所造成之反應(即是格林函數)等於  $r$  之單位振幅對  $si$  所造成的反應；所以當海嘯發生時，僅需利用相關斷層參數得知起始水位後，做簡單之乘積加總後即可獲得與傳統海嘯模式運算後相同之結果。劉及陳(2008)即利用此一概



念用來快速預估高雄港受海嘯侵襲時之最大高度。Chen et al.(2009)亦利用互逆格林函數來建議海嘯感測器於臺灣北海岸之最佳佈放位址。

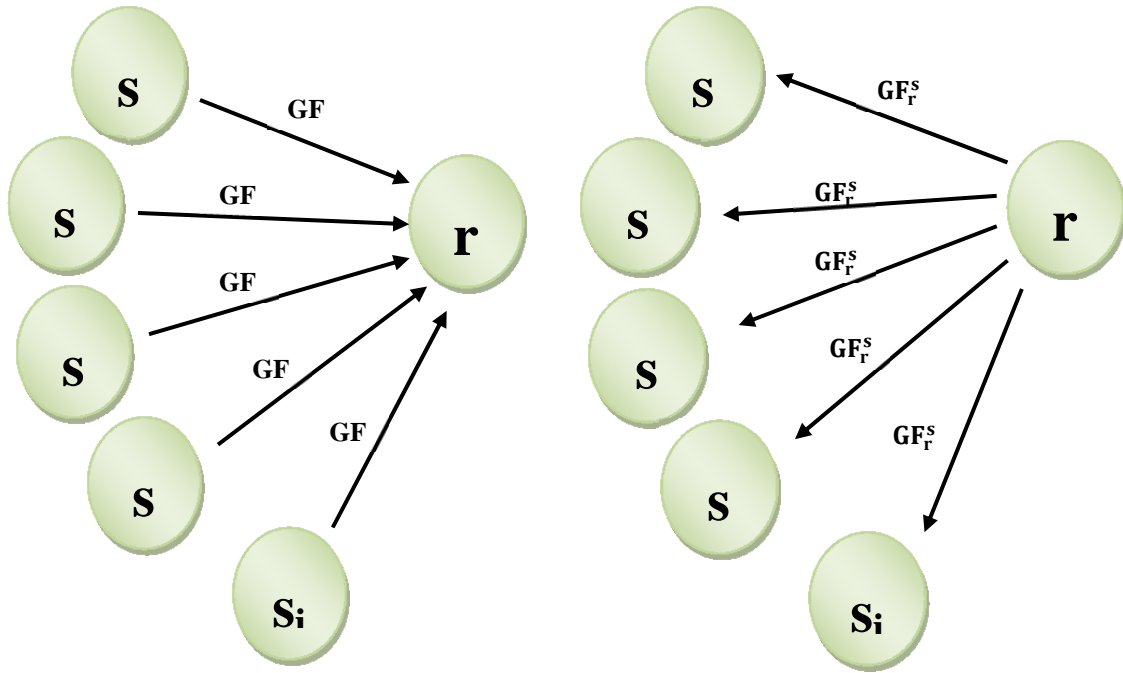


圖 3.21 傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖

亦即對一接收點  $r$ ，只要一個互逆格林函數 即可快速計算其水位變化，故能大量減少計算量及儲存空間。此觀念由 Loomis (1979)所提出，我們研究團隊則實際將它應用在海嘯預警(參見劉與陳, 2008)。(3.56)式經與直接的海嘯模擬相互驗證下，可發現兩者甚為符合，如圖 3.22、3.23 所示

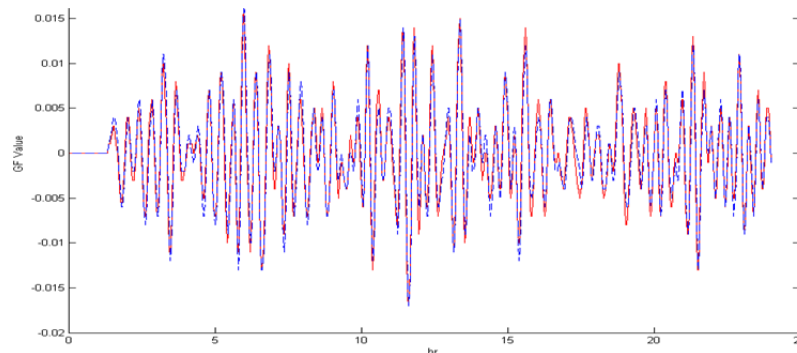


圖 3.22 海嘯模式所計算出之格林函數與互逆格林函數比較

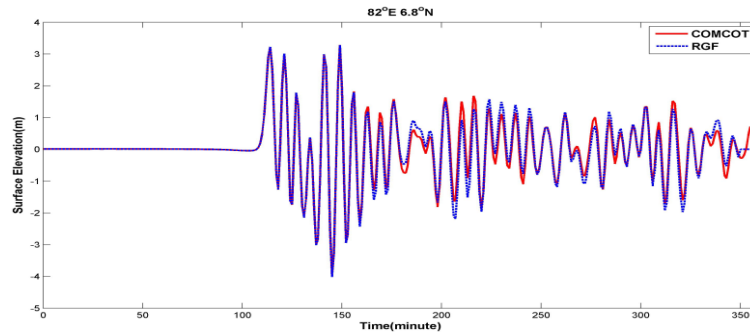


圖 3.23 互逆格林函數與直接的海嘯模擬之水位變化驗證

(3.56) 式唯一的未知是波源點之初始水位  $H^s$ ，該值可由地震相關網站上即時擷取相關參數後帶入斷層模式中計算即可得到。故利用互逆格林函數，由於水位基礎波形已經可以事前計算，可以資料庫之方式先行計算單位波高之時間序列變化資料，在海嘯發生後，即可初步了解最大波高及其到達時間，大幅度提升計算效率；由於僅儲存預報點位之時序列變化，因此也大幅度降低儲存空間之需求；這個優點也提供建置海嘯早期預警系統之有效方案。

格林函數之最適水深為 50m，但實際上受限於臺灣東西兩岸地形不同，東岸陡峭西岸平緩，且離陸地亦不能過遠；故實務上之點位選擇仍須配合當地地形條件。另一方面，(3.56)顯示預報水位之好壞與初始水位生成之精度有相當大之關係，海嘯初始水位之生成模式目前僅有由斷層運動所產生之海面擾動有明確且常用之公式可資引用，其餘目前仍在研究中；因此，(3.56)式目前並不適用在非斷層運動所引起之海嘯。互逆格林函數之應用及驗證案例，請詳見附錄一。

### 3.4.3 系統介面說明

本操作系統是由 Matlab 軟體所建構而成，該軟體提供了方便之數學運算指令及圖形繪製，更提供了內建之操作者介面設定程序；使用者本身不須安裝 Matlab 軟體，僅須下載編譯器等基本套件即可於個人電腦上執行查詢作業。本計畫利用 Matlab 內建的介面設計模組 GUIDE (Graphic User Interface Design Environment)，提供使用者一個設計「圖

形使用者介面」(Graphical User Interface, GUI) 的程式設計環境，建立近域之海嘯預警系統。它可以產生每一個控制物件的標準反應函式，使用者只要填入所需的指令或敘述。並利用滑鼠快速地拖曳出所需的介面物件及其大小；類似 VB 的物件導向概念。其基本建立程序如下：

- (1) 如圖 3.24 所示。在 Matlab 的命令視窗鍵入 'guide' 便可啟動，GUIDE 設計模組並選擇起始介面的面板。
- (2) 利用左列的物件選單將所需子面板及物件拖曳到面板並進行排版，在介面主程式內撰寫特定物件的介面互動程式。如圖 3.25 所示。
- (3) 上圖為編譯完成後的執行畫面，於左上方的面板輸入相關斷層參數(斷層長度、寬度、滑移量等)。或是選擇直接輸入地震矩規模自動產生斷層經驗參數。
- (4) 輸入完成後點選確定按鈕之後便會根據斷層參數計算起始波源，並於右上圖輸出波源的水位分佈。
- (5) 起始波源設定完成後，在預報時間長度的面板(左中)選擇水位預報時間。
- (6) 最後於左下角面板選擇預報地點進行水位預報。如圖 3.26 所示。

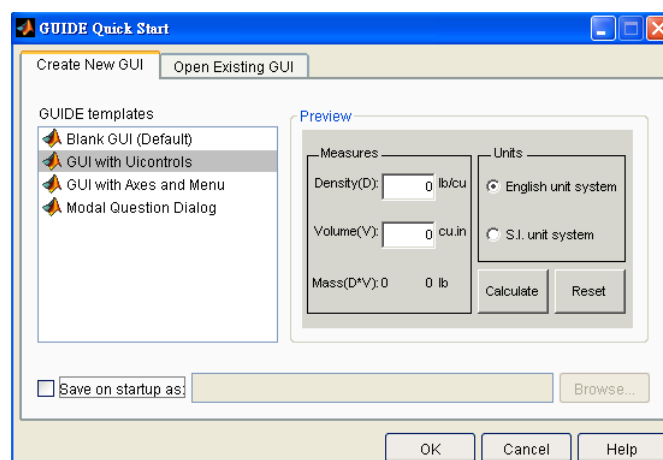


圖3.24 GUI程式設計環境

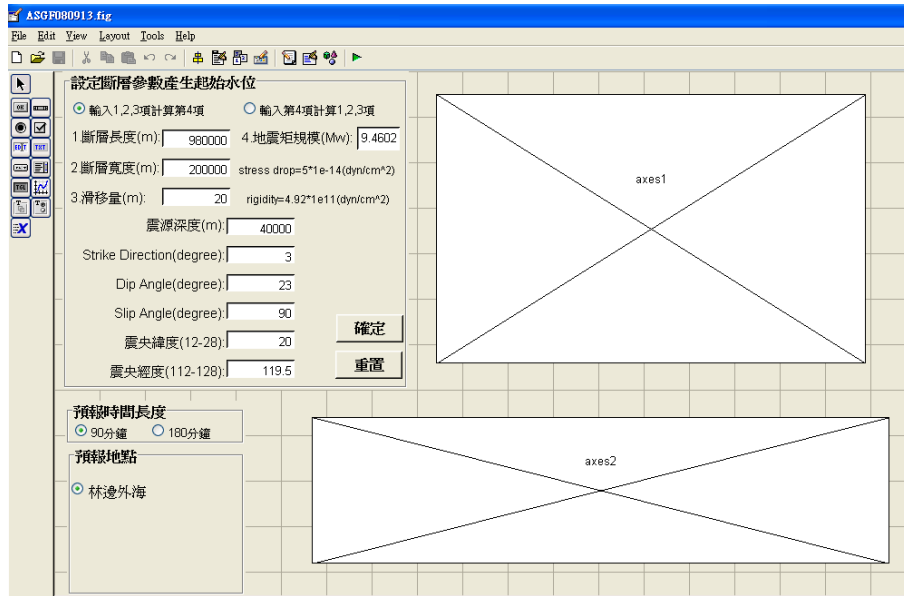
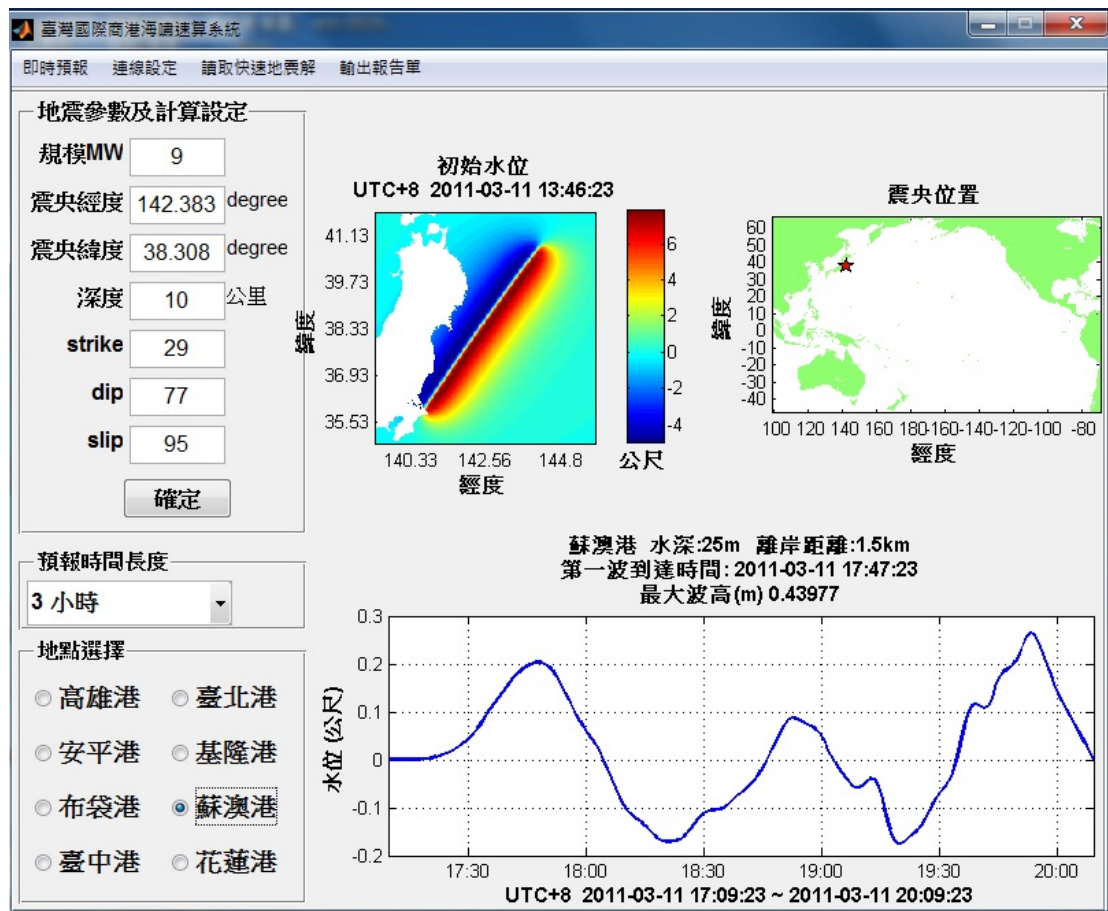


圖3.25 視窗化操作系統之建立與排版



### 圖3.26 視窗化介面之編譯完成圖

本系統之參數輸入方式是直接輸入地震矩規模，反算斷層長度、寬度及滑移量。就地震警報而言，得知地震矩規模較為容易也較為一般人所接受；斷層長度等資料由於海底斷層探測比較不易，故斷層尺度之換算通常也經由經驗公式得出，其他之斷層參數(例如走向等)可參考 Harvard CMT 等網站得知。

海嘯成因眾多，本系統目前僅適用於因海底地震所產生之海嘯；在計算效率方面，以恆春地震為例，若不考慮近岸波浪非線性之模擬，則使用傳統海嘯數值模式進行全區域模擬且進行後續資料處理則約需 1~2 天；使用本系統計算相同案例，由於已事先完成資料庫運算及建置，故僅需於地震發生初期得知海嘯初始水位即可進行運算以及圖形畫輸出，僅需數秒到數分鐘即可完成計算作業。要特別強調的是，本系統斷層參數並非由系統自動計算張量解，而是利用網路擷取；因此，取得斷層參數之時效仍然取決於美國 USGS 及其他擷取來源。詳盡之系統說明及操作方式請見附錄二。

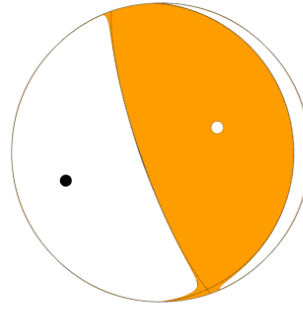
### 3.5 自動化操作說明及實例運作

目前本系統採用全自動作業模式，可開啟即時預報選項後，進行海嘯預警作業；茲以在 2014 年 4 月 2 日早上於智利)發生地震矩規模 8.2 之海底地震作為實際案例。

臺北時間 2014 年 4 月 2 日早上 07 點 46 分於智利(西經 70.769 度，南緯 19.61 度)發生地震矩規模 8.2 之海底地震，深度為 25 公里，距離我國約 18600 公里；地震參數及震央位址分別見圖 3.27(a)、(b)；系統於擷取 USGS 資料後進行蘇澳港、花蓮港之最大波高及到達時間之預估，並輸出預估報告單至指定目錄中以方便查閱，各港之輸出結果如圖 3.28(a)、(b)；預估結果顯示雖然地震矩規模已達海嘯發生要因之標準，且雖震源深度甚淺，但因所發生距離尚遠，我國並非位處主要傳遞路徑之上，因此對兩港並未造成任何威脅性。

Moment magnitude derived from a centroid moment tensor inversion of the W-phase, a very long period phase (~100 - 1000 s) arriving at the same time as the P-wave. W-phase solutions can be computed at both regional (~5 to ~20 degrees) and teleseismic (~30 to ~90 degrees) distances.

Moment 2.35e+21 N-m  
 Magnitude 8.2  
 Percent DC 98%  
 Depth 25.5 km  
 Updated 2014-05-29 23:32:12 UTC  
 Author us  
 Catalog us  
 Contributor us  
 Code us\_c000nzvd\_mww



Principal Axes

Axis	Value	Plunge	Azimuth
T	2.339	56°	66°
N	0.019	3°	161°
P	-2.358	34°	253°

Nodal Planes

Plane	Strike	Dip	Rake
NP1	161°	79°	87°
NP2	358°	12°	107°

(a)

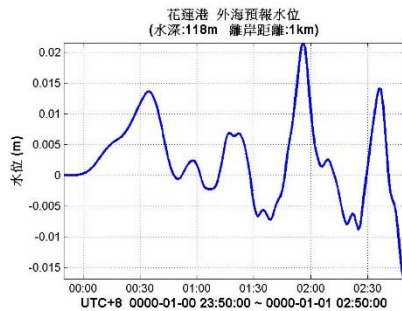


(b)

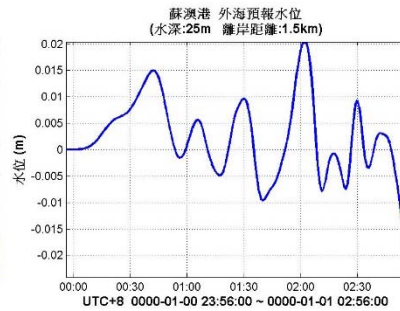
圖 3.27 (a)USGS 所公佈之地震參數(b)震央位址

地震解網址  
 地震發生時間 UTC+8 :  
 震央位置 緯度-19.61 經度-70.769  
 地震規模(MW): 8.2 地震深度(km): 25  
 Strike=161 Dip=79 Slip=87  
 第一波到達時間:0000-01-01 00:35:00  
 最大波高(m):0.038349

地震解網址  
 地震發生時間 UTC+8 :  
 震央位置 緯度-19.61 經度-70.769  
 地震規模(MW): 8.2 地震深度(km): 25  
 Strike=161 Dip=79 Slip=87  
 第一波到達時間:0000-01-01 00:42:00  
 最大波高(m):0.044524



(a)



(b)

圖 3.28 利用地震參數預估之結果及報告單 (a) 花蓮港 (b) 蘇澳港



## 第四章 模式精進及實例探討

### 4.1 精進系統數值模式之格林函數

本計畫已完成互逆格林函數之海嘯波高資料庫涵蓋範圍擴展至太平洋海盆地區，如圖 4.1。由於計算範圍涵蓋整個環太平洋地震帶且時間長度甚長，即使以較具效率之 nc 檔格式進行儲存，也需要數百 GB(Gigabyte)，故單港所需之硬碟空間甚大，對儲存空間需求甚高，故有必要進一步改良其儲存方式，同時也可進一步提升計算效率。

目前海嘯波高資料庫中有相當多零值之數值資料，以時間上來說則包含第一波到達時間之前以及預報時間之後，如圖 4.2 所示；以空間上來說，陸地及陸地上未流通之水域(例如湖)則是不必要之資料，如圖 4.3(a)所示。這些零值資料是造成資料庫龐大的原因。因此對於單一預報點而言，第一波到達時間之前之資料可省略不予儲存，待確定第一到達時間時即予用零補齊即可；因此，利用等值線之觀念可以得知每一預報點之第一波到達時間，這稱之為「時間索引」；當預報點之格林函數出現不為零時即定義到達時間。這種資料儲存概念可有效降低時間長度之資料儲存量，僅為原先容量之 1/4。

另一方面，非水域之空間點位也是會佔據大量之儲存空間，因此，本計劃將陸域之點位自資料庫中除去，可再降低約 10GB(Gigabyte)之容量；故時間及空間均作儲存方式及點位精進後，約可減少 80%之儲存空間，同時也提高約 30%之計算速率，系統約能於 1-2 分鐘之內完成單一點模擬。以高雄港為例，可由原 124GB(Gigabyte)降為 26GB(Gigabyte)，其水位時序列變化(圖 4.3(b))是一致的，故可說明本法之可行性，並可大幅度降低儲存空間之需求。減少了海嘯波高資料庫單筆檔案的容量大小，一方面資料庫所需硬碟空間減少，另一方面系統在讀取資料庫時能夠更加快速讀取完成用以後續計算；精進後結果與精進前結果一致，使系統能更加便利及完善。

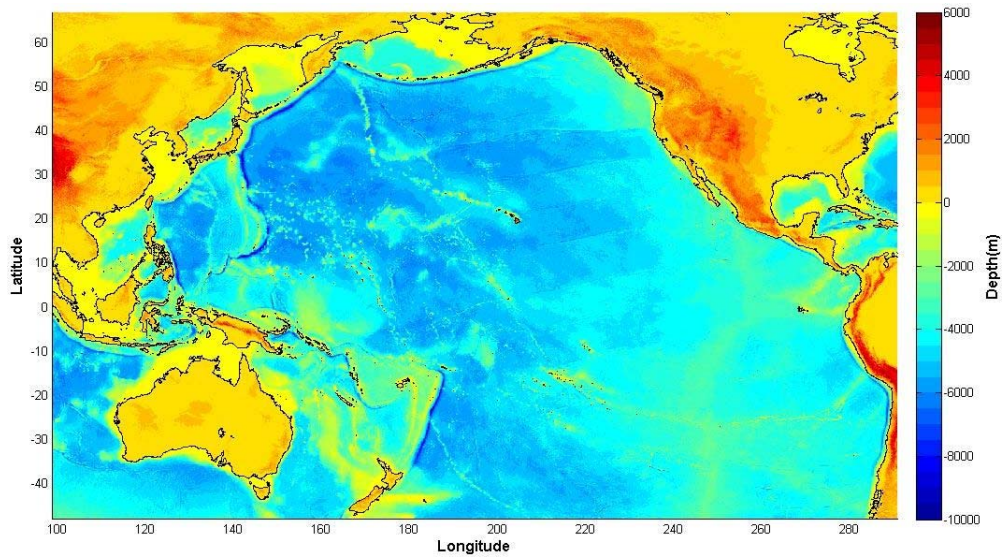


圖4.1 視窗化系統之計算範圍圖

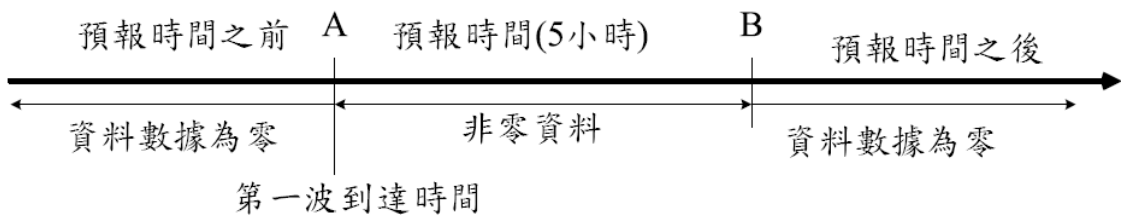


圖4.2 單點格林函數數值資料在時間上之分布型態

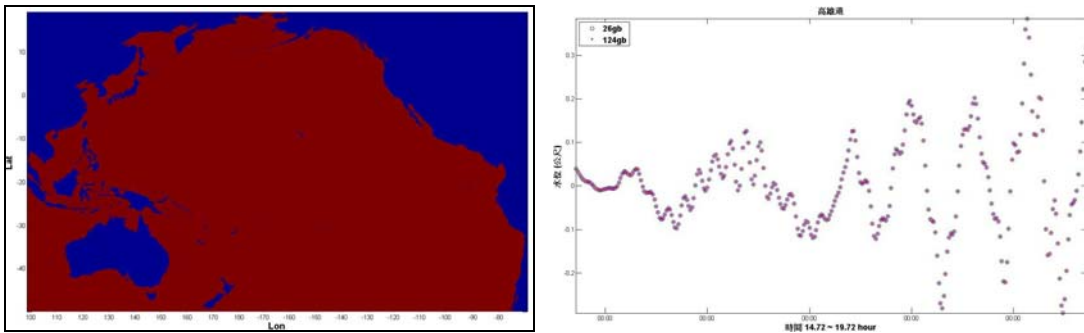


圖4.3 (a)單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分為水域，藍色為陸域)(b)高雄港格林函數變更前後之水位變化驗證



## 4.2 蘇澳港域及花蓮港域海嘯預警子系統

### 4.2.1 蘇澳及花蓮港域之潛在海嘯波源區

以互逆格林函數的最大絕對值來代表可能有影響該地之海嘯發生範圍及其危險程度，並稱此互逆格林函數的最大絕對值為最大放大率(max gain)(陳等，2010)。求出在範圍內每個點的最大放大率，可得其最大放大率分佈圖，放大率若很大，即相對波高值很大；以此方法訂出東部及東北部各港之潛在海嘯波源區，如圖 2.4、圖 2.5。東北方海域潛在震源之一是基隆外海之斷層以及未知之海底火山。圖 4.4 為臺灣東北海域之海底地形圖；若以琉球島弧為界，則位於琉球島弧上方稱為沖繩海槽(Okinawa Trough)，如圖 4.5 所示；在琉球島弧下方稱為琉球海溝(Ryukyu Trench)，如圖 4.6 所示。沖繩海槽位於日本和臺灣之間，經過東海大陸棚之邊緣進入琉球後，由於琉球海溝的岩石圈擴展而形成的弧後盆地，大部分深度均超過 1,000 公尺，最大深度為 2,716 公尺。仔細觀察沖繩海槽靠近龜山島部分較為平緩，對溯上之形成較為有利；同時，由於沖繩海槽以南深度較深，傳遞速度較快，故海嘯發生時，海嘯向南傳遞較快；東海大陸棚由於水深較淺，不利海嘯傳播，故往北方傳遞較慢；也因為水深突然變淺，故海嘯波會折射進行臺灣北部海域，但有一部份之能量因為反射而無法進入該區域。在此一區域內，最著名之海嘯事件即為八重山海嘯(Yaeyama Tsunami)。

琉球海溝(Ryukyu Trench)是太平洋主要海溝之一，位於日本南部和臺灣東北部，海溝沿著日本琉球群島東南側的菲律賓海往下伸延，長度 2,250 公里，最大深度 5,212 公尺；是由菲律賓板塊潛入歐亞大陸板塊所形成的板塊邊界。由於缺乏相關震災紀錄，琉球海溝長年以來被認為發生大地震之機率不高。然而近年學者研究發現(如名古屋大學田所敬一教授)，琉球海溝暗藏菲律賓板塊緊黏著歐亞板塊的固著區，判斷歐亞板塊不但黏著菲律賓板塊，兩者之間還有連動作用，恐有發生大地震之疑慮。Nakamura(2011)利用 GPS 量測琉球海溝之海床

位移情形也指出該區域不排除發生大海嘯之可能性。

另一方面，蘇澳港及花蓮港之海嘯模擬有助於防災應變措施之整體考量，使得防救災指揮作業時有明確之科學依據及模擬結果，在第一時間內利用簡單之系統提供具有可信度之資料是本期計畫之重點。

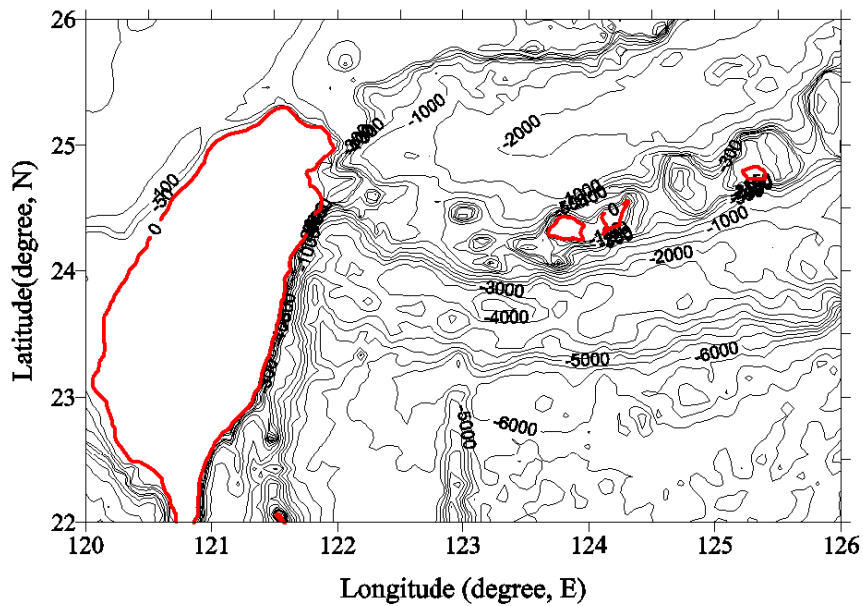


圖4.4 臺灣東北及東部外海之海底地形

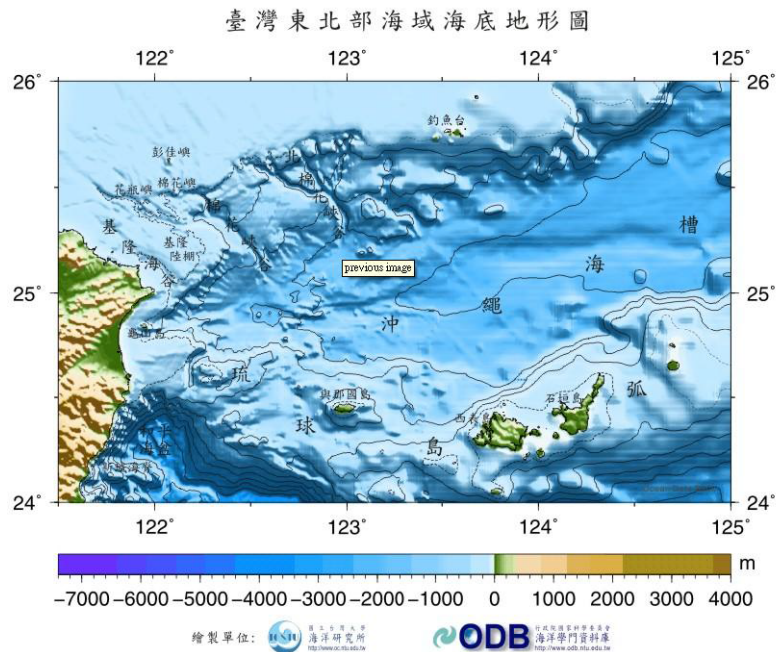


圖4.5 臺灣東北外海沖繩海槽之分佈(資料來源：國研院海科中心)

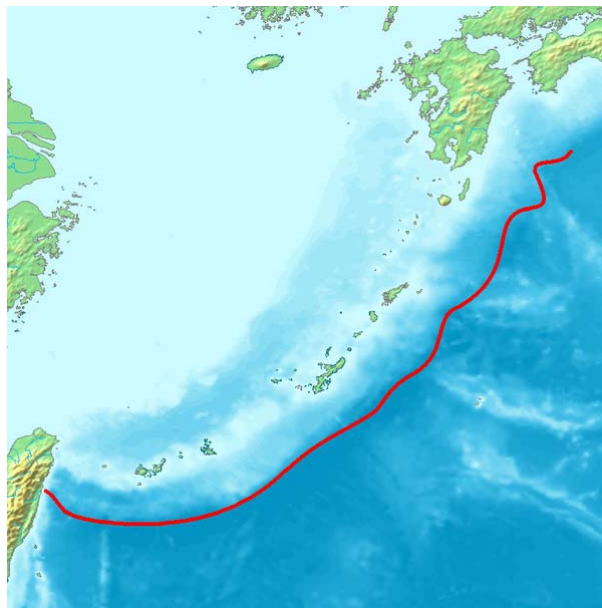


圖4.6 琉球海溝之分佈(資料來源：Google Earth)

#### 4.2.2 海嘯預警子系統

蘇澳港位於臺灣東北部，雄踞在蘭陽平原的蘇澳灣內，是一個地理形勢十分優良的海港，北距基隆港 50 海浬，南距花蓮港 40 海浬，蘇澳港商港水域面積 278.55 萬平方公尺，陸域面積 127.08 萬平方公尺。擁有 13 座碼頭，共長 2610 公尺。包括港勤船碼頭 1 座和營運碼頭 12 座（包括散雜貨碼頭 6 座、煤碼頭 1 座、油品碼頭 1 座、水泥碼頭 2 座、化學品碼頭 2 座）水深自 -7.5~-15 公尺，長度由 125 公尺至 300 公尺不等，可泊靠巴拿馬極限型船舶。進口以煤、燃油、對二甲苯、爐渣、鋼胚等，出口則以水泥、純對二甲苯酸、硫酸鉀等為大宗，其作業方式以船邊提貨（或裝貨）方式辦理為主。各項業務與日俱增，已邁向國際商港發展之型態。圖 4.7 為目前港區之平面圖。

花蓮港北距蘇澳港 40 海浬，位於北緯 23 度 59 分 11 秒、東經 121 度 37 分 35 秒，於花蓮市區東北方，東濱太平洋，西依美崙山。花蓮港係屬人工開鑿，東西兩防波堤左右環抱，開口西南，區分為內、外港，自外港往北經狹長航道而進入內港。水域外港面積 99.58 萬平方公尺，水深 -14~-16.5 公尺；水域內港面積 37.26 萬平方公尺，水深 -6.5~-10.5

公尺，合計 136.84 萬平方公尺，陸域面積 171.98 萬平方公尺，發展策略為配合東部水泥、礦(砂)石輸出、及石材之儲運，整備港埠基礎建設，進行相關港埠設施改造，發展觀光遊憩等港埠多元化業務，並推展兩岸客輪或國際郵輪進駐花蓮港。圖 4.8 為目前港區之平面圖。

由於兩港之特性不同，故本計劃也預定分別建置適用於兩個港口之子系統，潛勢震源區包含整個環太平洋地震帶，並使用前小節所述之方式減少資料庫所需之空間；預報時間長度為自第一波到達時間起算 5 小時；至於震源參數之連線設定，遠端資料來源仍是即時擷取美國 USGS 之地震即時資料，當有地震資料時，系統可自動擷取即時資料進行後續預報作業。

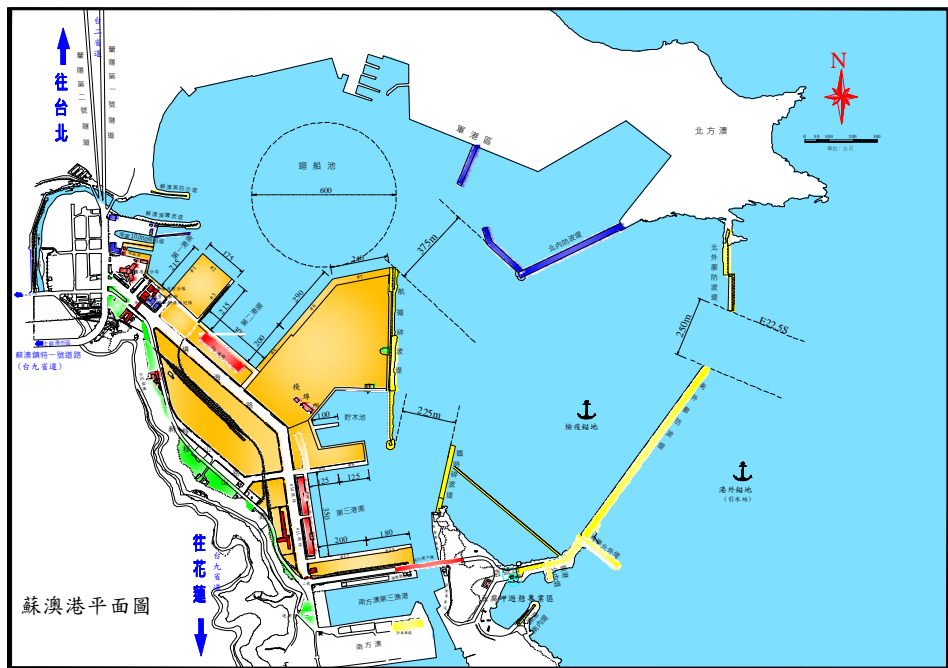




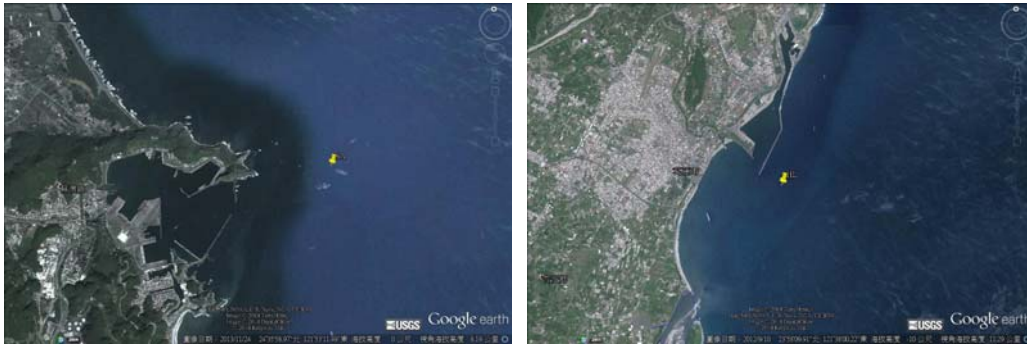
圖 4.8 花蓮港區之平面圖(資料來源：花蓮港務公司網頁)

#### 4.2.3 點位設定

互逆格林函數資料庫之建置，其預報點之位址需盡量滿足水深大於 50 公尺，但也不可離岸太遠；故實務上在配置預報點位時多盡可能接近岸邊，因此水深可能會較 50 公尺稍淺，但由於非線性效應並不強，故互逆格林函數仍然可以適用；蘇澳港之預報點位於東經 121.9 度，北緯 24.6 度，水深 25 公尺，離岸約 1.5 公里；花蓮港之預報點位於東經 121.633 度，北緯 23.9667 度，水深 118 公尺，離岸約 1 公里；如圖 4.9(a)(b) 所示。

另一方面，由於本研究所發展之海嘯模擬預警系統其基本概念及精神迥異於其他海嘯模式，操作介面與軟體設置適用於個人電腦。





(a)

(b)

圖 4.9 (a)蘇澳港(b)花蓮港之預報點位

## 4.3 實例驗證

### 4.3.1 驗證方法-總體經驗模態分解法(EEMD)

驗證之方法利用總體經驗模態分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, 簡稱 EEMD)的方式解析日本地震所引起海嘯傳達至臺北港外的水位觀測資料, 藉以了解海嘯到達時間以及海嘯高度。同時將美國國家地震資訊中心(U.S. ,National Earthquake Information Center)對日本地震估算的 FMT 解(Fast Moment Tensor solution)代入海嘯速報系統, 藉以計算臺北港附近海嘯的預報水位。最後比較海嘯速報系統產生的水位與 EEMD 解析出的海嘯水位兩者的差異。

傳統之經驗模態分解法(EEMD)會產生混模(mode mixing)問題, 即在同一個 IMF 裡會有不同尺度的訊號混雜, 或者是同一尺度的訊號出現在不同的 IMF。產生混模的主要原因是部分訊號在整段時序資料中呈現斷斷續續的分布, 而非連續性分布; 加以海面水位變化的資訊常是非線性(nonlinear)與非穩態(nonstationary), 所以不適合傅立葉系列的分析方法, 故本研究利用 EEMD 分析法。此方法能將原始訊號分解成多個本質模態函數(Intrinsic Mode Function, 簡稱 IMF)。EEMD 的基本作法就是把一組白噪序列(white noise series)加入目標訊號分解後可得到一組 IMF 分量, 再將多組不同白噪序列分別加入目標訊號分解出

各自的 IMF 分量組，分別將每個 IMF 分量組其相對應的 IMF 分量加總平均後求得一組 IMF 分量，此 IMF 組即為最終的結果。

#### 4.3.2 EEMD 法之應用—2010/02/27 智利海嘯事件之水位驗證

本節將說明利用交通部運輸研究所港灣研究中心在基隆港外所佈放之 ADCP 系統所量測到 2010 年智利海嘯之水位變化，與本系統所計算之結果作為驗證。

臺灣時間 2010 年 2 月 27 日下午 2 點 34 分於智利發生芮氏規模 8.8 之大地震，夏威夷太平洋海嘯警報中心即針對智利與秘魯沿岸發布最高層級海嘯警報，另環太平洋 53 個國家和地區，包括部分亞洲地沿岸區亦在警報範圍內。據太平洋海嘯警報中心的紀錄智利沿海地區出現數十公分至 2 米多的海嘯高度，美國及墨西哥東海岸、夏威夷都觀測到數十公分的海嘯高度。而日本氣象廳的沿岸觀測紀錄有 1 米多的海嘯高度。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心在基隆港東防波堤外水深 44m 處設置的剖面海流表面波浪與海流之監測系統 (Acoustic Wave and Current Profile system，簡稱 AWCP 系統)，設置地點如圖 4.10 所示。儀器設定的觀測頻率為 1Hz，紀錄每小時的第 10 至第 44 分鐘觀測水位及水分子運動速度。根據中央氣象局預測，海嘯波從智利外海約需經過 26 小時後抵達基隆，其時間為 2010 年 2 月 28 日下午四點多。故此研究取 2010 年 2 月 28 日的水位資料 (圖 4.11) 來進行驗證海嘯的水位高度。



圖 4.10 交通部運輸研究所港研中心基隆港觀測站儀器安裝位置

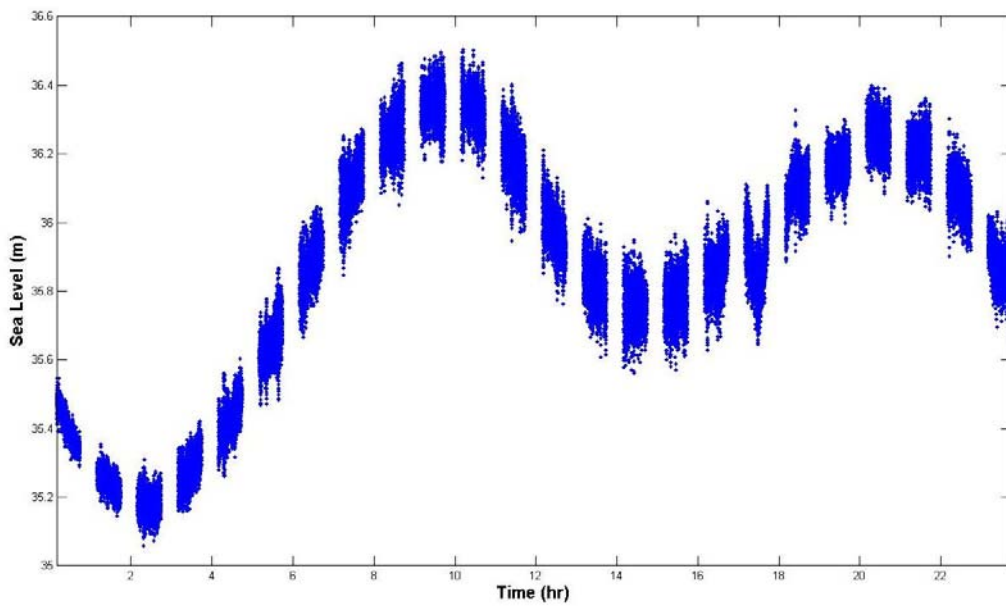


圖 4.11 測站之實測水位

本文使用國立中央大學數據分析方法研究中心所提供的EEMD分析程式，而加入的白噪組數設定為500組。海嘯波自太平洋傳至臺灣時，基隆港是由波谷先至；由水位資料(圖4.14)大略可看出第一波海嘯較明顯的波谷到達時間在2010年2月28日的下午5~6點之間，故取下午5點10~44分之水位來分析海嘯水位。由於海嘯波及潮汐同屬於長週期



波，若考慮海嘯的周期大於資料觀測的時間長度34分鐘，則EEMD分解水位所得的海嘯分量容易和長周期的潮汐分量的訊號一起被分到餘訊(residual signal)，故有必要先濾除潮汐訊號。

由圖4.14可知下午3~7點大致處於漲潮時期，為避開海嘯的影響，在此僅用下午3點10~44分和下午6點10~44分兩個時段的水位資料求取線性迴歸參數，藉以計算潮位(圖4.14之藍線)。將5點10~44分時段之水位扣除潮位後可得到濾潮後之水位(圖4.13)，以該水位進行EEMD分析，此時的餘訊便可代表海嘯的訊號。

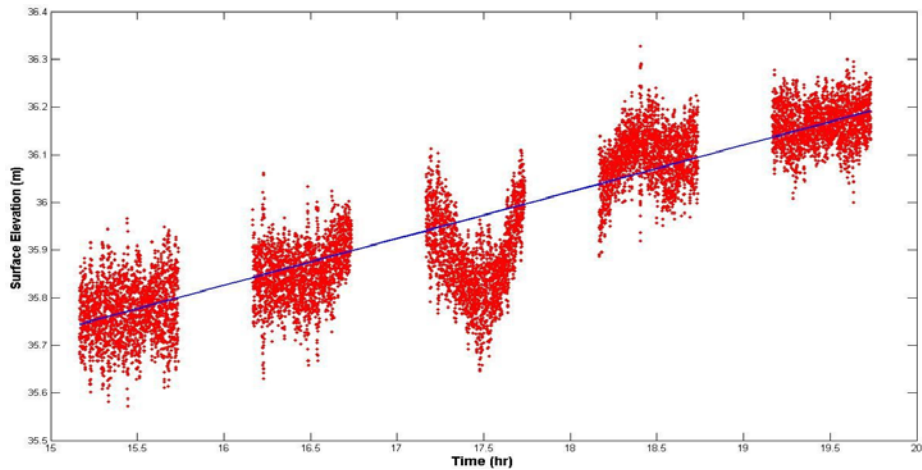


圖 4.12 分析用之實測水位資料

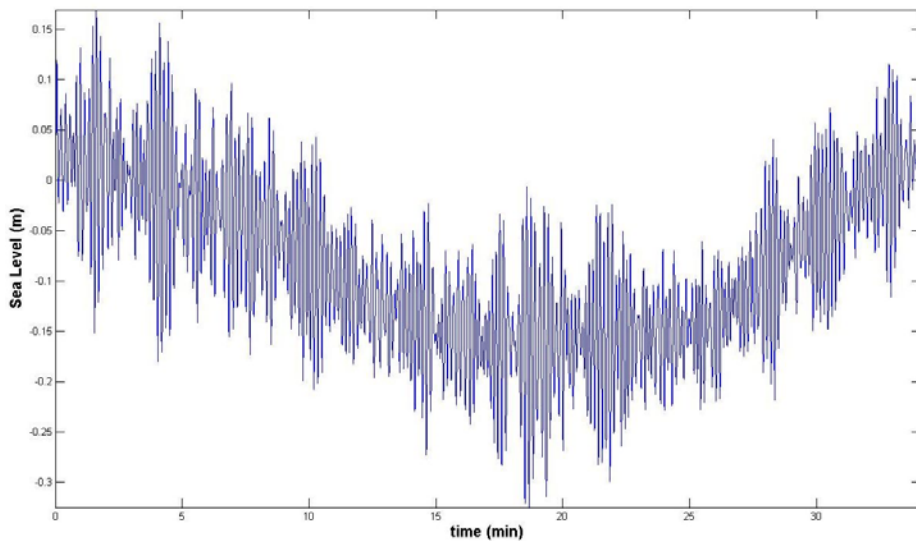


圖 4.13 經過濾潮汐後之水位

將濾潮後的水位經過 EEMD 分析的結果得到 8 個 IMF 分量和 1 個餘訊(C6、C7)，如圖 4.14 及圖 4.15 所示。由於海嘯屬於長周期的波動，故較高頻的 6 個 IMF 分量(C1 到 C6)應非海嘯的影響。另外低頻的兩個 IMF 分量 C7 和 C8，其周期約 20 分鐘，由於相位相近基本上可視為同一分量，兩者加乘的水位波高 2.8 公分，波谷 4.3 公分。與 C7、C8 相較起來，餘訊對水位的影響較大，其水位最大值 5 公分，最小值約-13.5 公分，基本上可視為海嘯造成的水位。

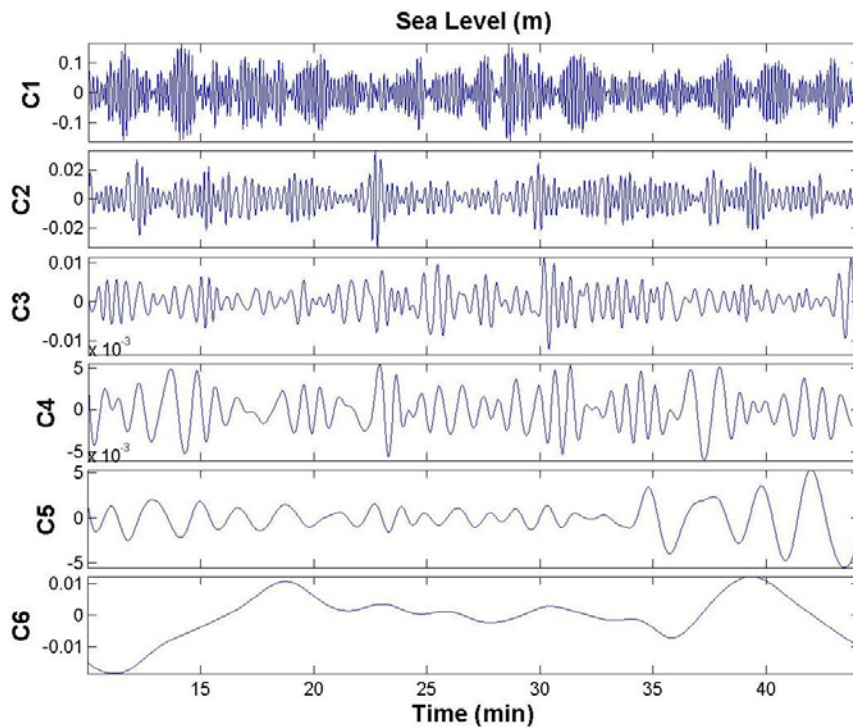


圖 4.14 由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6)

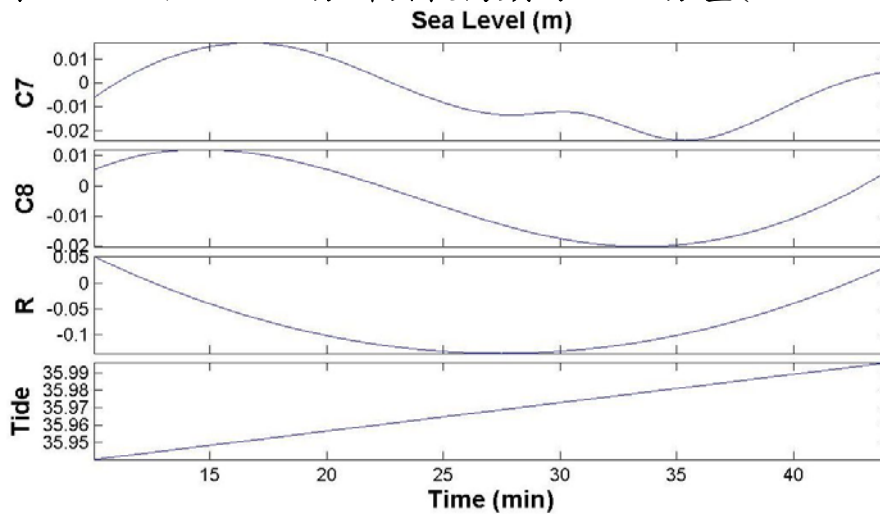


圖 4.15 由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位

本文利用海嘯預報系統產生的海嘯發生後水位與之前 EEMD 所分解的海嘯水位作比較。根據美國國家地震資訊中心發布最初發布的 FMT 解(表 4.1),輸入地震參數後,選擇預報時間長度為 5 小時(2010/2/28 13:34 至 18:34),預報地點為基隆港。輸入結果如圖 4.16,結果顯示海嘯第一波的波峰為 7.1 公分,波谷為 14.2 公分,取下午 5 點 10~44 分的預報系統水位與 EEMD 的海嘯餘訊,以及下午 5 點 1~35 分的水位作比較(圖 4.17),能清楚的了解波谷之水位相近,而預報時間比實際波谷到達時間先到 9 分鐘。

**表 4.1 美國國家地震資訊中心發布最初發布之智利地震 FMT 解**

```

USGS Centroid Moment Tensor Solution
10/02/27 06:34:09.75
BIO-BIO, CHILE
Epicenter: -35.988 -72.782
MW 8.6

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
10/02/27 06:35:27.29
Centroid: -35.757 -72.389
Depth 36 No. of sta:189
Moment Tensor; Scale 10**21 Nm
Mrr= 7.40 Mtt=-0.53
Mpp=-6.87 Mrt= 0.06
Mrp=-5.95 Mtp=-0.76
Principal axes:
T Val= 9.57 Plg=69 Azm= 84
N -0.48 3 183
P -9.08 19 274

Best Double Couple:Mo=9.3*10**21
NP1:Strike= 11 Dip=25 Slip= 98
NP2: 182 65 86

```

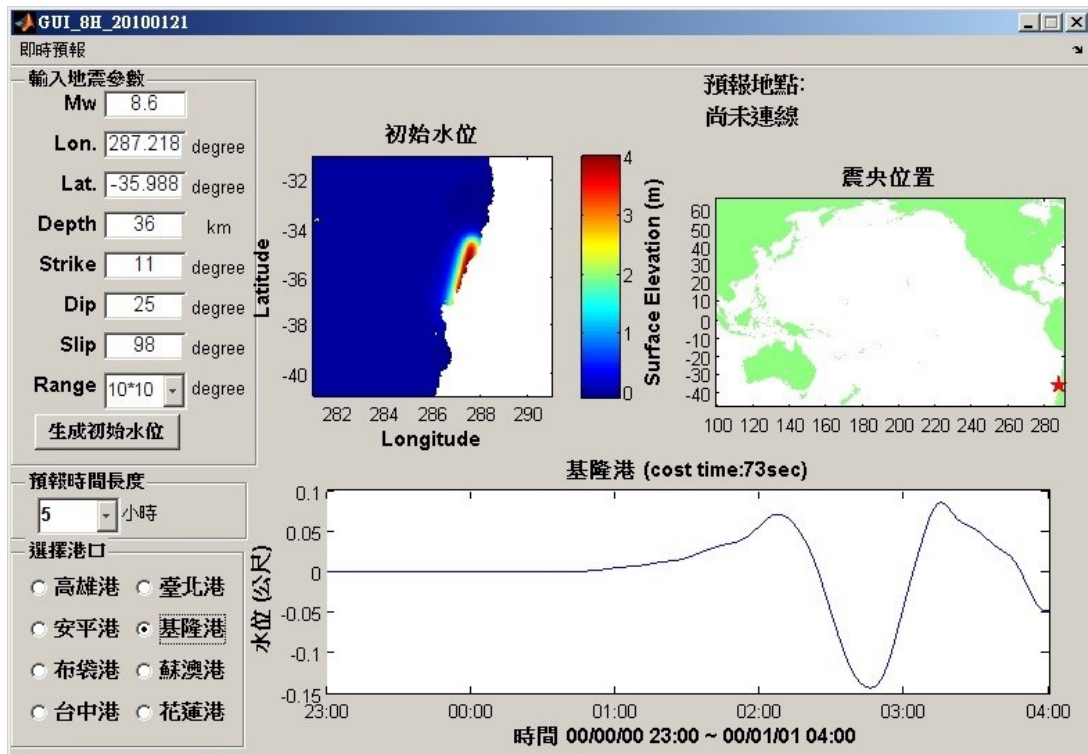


圖 4.16 預報系統預測智利海嘯(Mw=8.6)於基隆港之預報結果

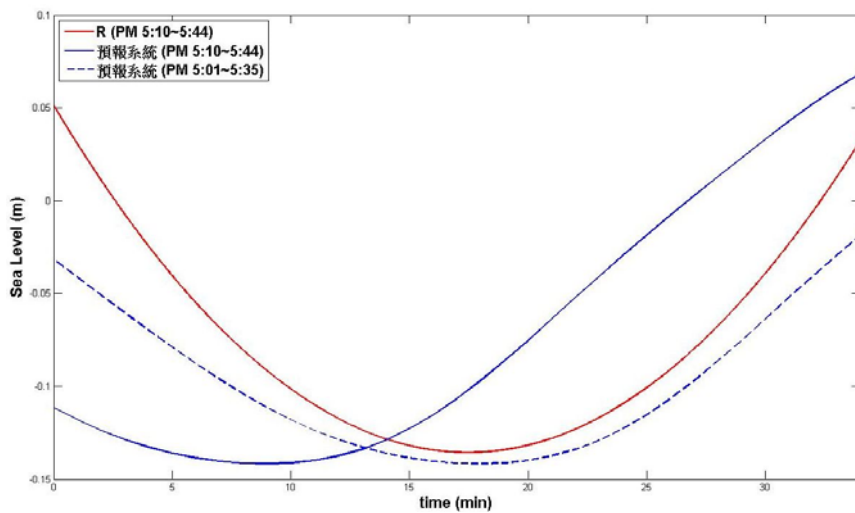


圖 4.17 預報系統計算結果(Mw=8.6)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

美國國家地震資訊中心事後將智利地震規模由 8.6 重新上修成 8.8，在此將修正後的 FMT 解(表 4.2)同樣帶入作計算(輸入如圖 4.18 所示)，結果顯示海嘯第一波的波峰由 7.1 公分增為 12.4 公分，波谷由 14.2 公分增為 27 公分，另外與下午 5 點 10~44 分海嘯餘訊水位的比較(圖 4.19)可看出波高相差 13 公分，而預報系統比海嘯餘訊的波谷到達時間先到 11 分鐘。

**表 4.2 美國國家地震資訊中心修正的智利地震 FMT 解**

```

10/02/27 06:34:08.34
OFFSHORE BIO-BIO, CHILE
Epicenter: -36.027 -72.834
MW 8.8

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
10/02/27 06:35:27.50
Centroid: -35.766 -72.473
Depth 30 No. of sta:187
Moment Tensor; Scale 10**22 Nm
Mrr= 1.13 Mtt=-0.06
Mpp=-1.07 Mrt= 0.09
Mrp=-1.43 Mtp=-0.12
Principal axes:
T Val= 1.84 Plg=63 Azm= 80
N -0.06 4 180
P -1.78 26 | 272

Best Double Couple:Mo=1.8*10**22
NP1:Strike= 14 Dip=19 Slip= 104
NP2: 179 71 85

```



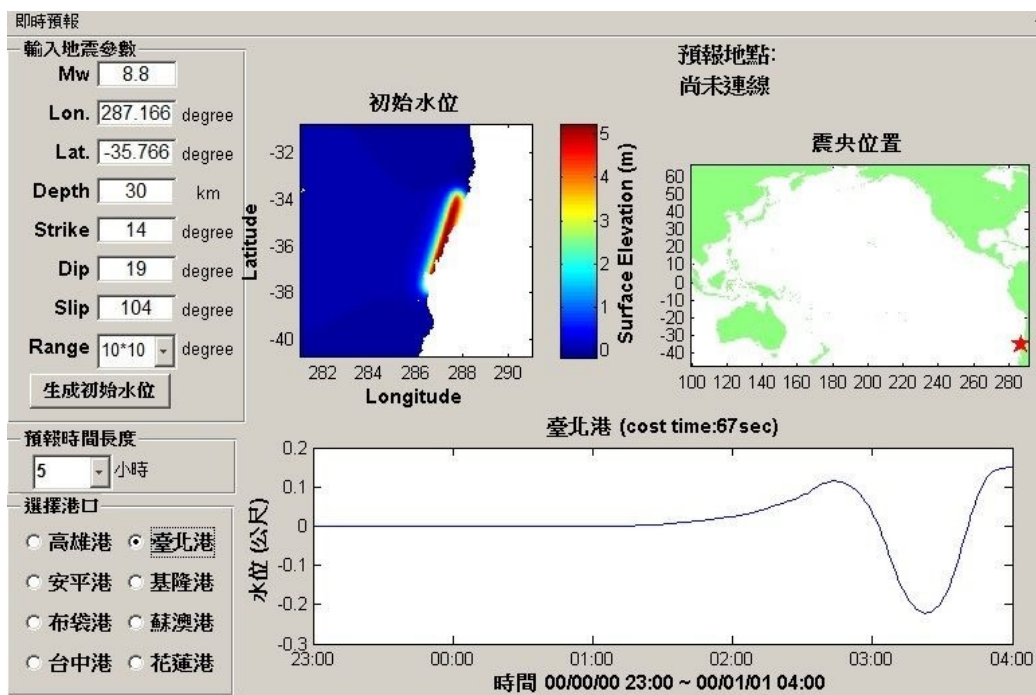


圖 4.18 預報系統預測智利海嘯(Mw=8.8)於臺北港之預報結果

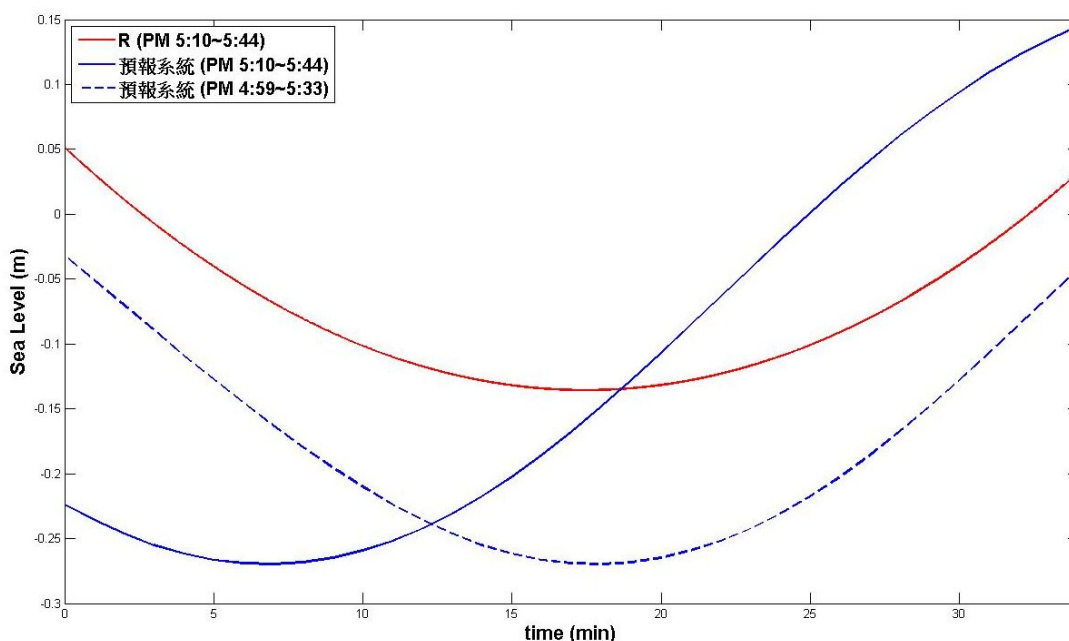


圖 4.19 預報系統計算結果(Mw=8.8)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

圖 4.19 中，可看出系統預測之水位較實測水位為高；而與圖 4.17 之結果比較下，顯然地震矩規模 8.6 之結果較為接近實測值；這是因為海嘯初始水位與地震矩規模成正相關，故在地震矩規模 8.8 時系統計算出之海嘯水位會較大。在防災角度而言，預測之水位高於實測水位，其結果雖偏向於保守，但也增加了安全性。

### 4.3.3 海嘯速報系統之驗證--2011/03/11 東日本海嘯事件

臺灣時間 2011 年 3 月 11 日下午 1 點 46 分於日本發生芮氏規模 9.0 之大地震，交通部運輸研究所港灣研究中心以本系統提供災防中心海嘯在臺灣各大港口的水位變化，得到相當好的結果。本節利用交通部運輸研究所港灣研究中心提供臺北港 2011 年日本海嘯之水位變化，與本系統所計算之結果比較驗證。

日本氣象廳針對 311 東日本地震地震波等相關資料進行詳細分析後，發現這次地震的震央區域長達 500 公里，寬度約有 200 公里，地震斷層的破壞持續 5 分鐘以上。此地震造成數公尺高的巨浪，將沿岸許多房屋、汽車，夾雜大量碎片和土石沖進內陸數公里。至少 20 國政府和許多太平洋島嶼都發布海嘯警報。受海嘯威脅的國家和地區擴及俄羅斯、印尼、中南美洲國家如瓜地馬拉、薩爾瓦多和哥斯大黎加，以及美國領土夏威夷。

本文使用的海嘯速報系統(圖 4.20)基本運作分為地震引起初始波源生成與互逆格林函數計算預報水位兩部分。前者利用美國國家地震資訊中心(NEIC)的 FMT 解代入 Mansinha and Smylie(1971)提出的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)，此斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量，藉以獲得地震引發的海嘯初始水位。

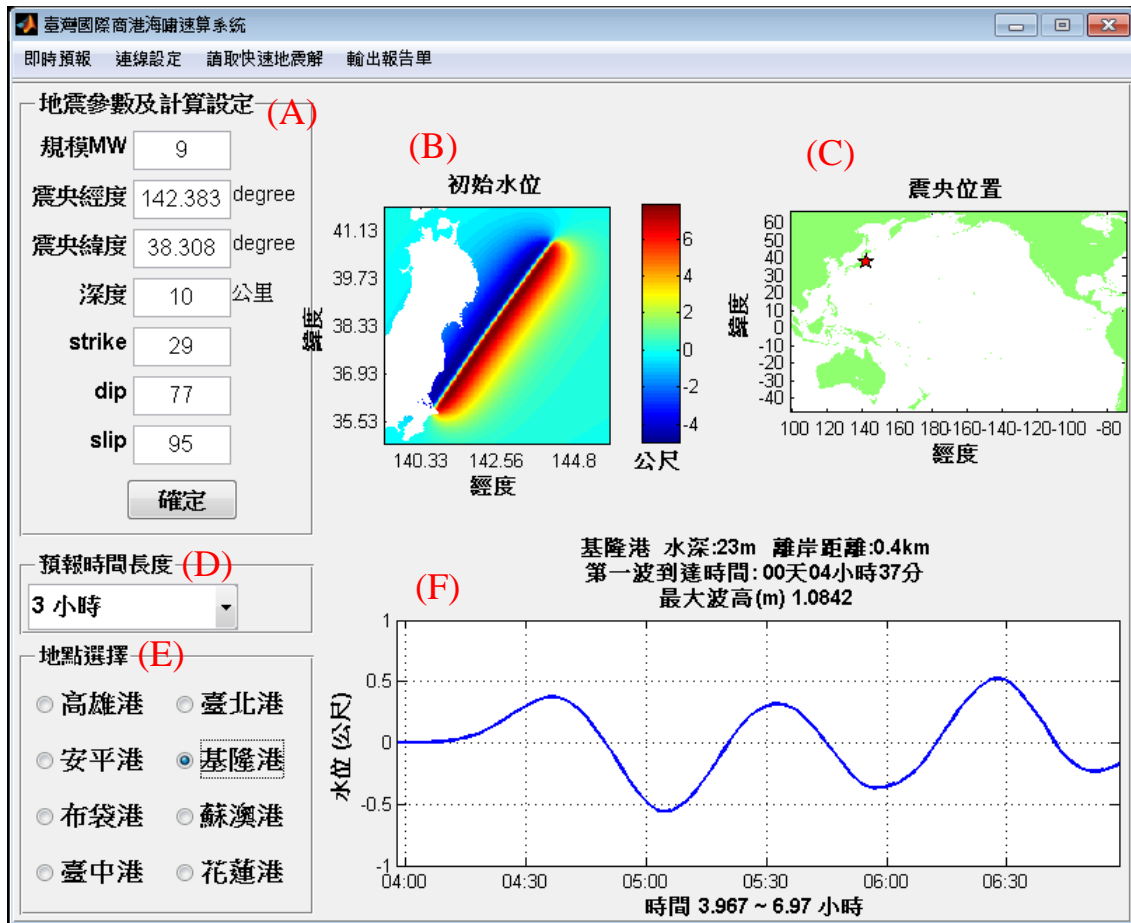


圖4.20 海嘯速報系統之介面

系統程序：

- (A)輸入地震解。
- (B)由經驗公式計算斷層長、寬及位移後，再代入斷層模式產生地震造成的初始水位。
- (C)同時標示震央位置。
- (D)選擇預報時間長度。
- (E)選擇模擬地點。
- (F)模擬海嘯抵達的水位結果。

使用 USGS 最新地震解帶入海嘯模擬預報系統中得到臺北港水位變化結果，與使用 EEMD 法濾潮後臺北港觀測水位資料比較，如圖 4.21(a)(b)。



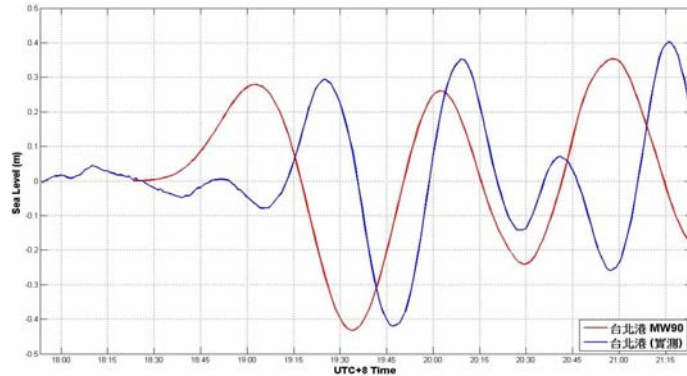
```

Epicenter: 38.308 142.383
MW 9.0

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
11/03/11 05:47:47.20
Centroid: 38.486 142.597
Depth 10 No. of sta: 151
Moment Tensor: Scale 10**22 Nm
  Mrr= 2.03 Mtt=-0.16
  Mpp=-1.87 Mrt= 2.06
  Mrp= 3.49 Mtp=-0.60
Principal axes:
  T Val= 4.57 Plg=58 Azm=306
  N -0.05 5 208
  P -4.52 32 115

Best Double Couple: Mo=4.5*10**22
NP1: Strike= 29 Dip=77 Slip= 95
NP2: 187 14 68

```



(a)

(b)

**圖4.21 (a)USGS日本311宮城海嘯參數(b)臺北港系統模擬水位(紅線)與濾潮後的實測水位(藍線)比較**

此系統計算水位時間約數秒鐘到數分鐘，模擬結果臺北港部分波高大約一致，到達時間約提前十幾分鐘。系統為求快速預報，計算格林函數使用線性淺水方程，地形使用 2 分解析度的數值地形，及簡單的初始水位產生方式，都是產生誤差的可能原因，但其結果在運算速度與預報功能上應符合實際需求。

此次東日本大震災地震引發海嘯襲擊日本東北地區南部(宮城、仙台、千葉、福島一帶)；地震發生後一小時，美國地質調查所(USGS)公佈相關地震參數後，臺灣國際商港海嘯速算系統(以下簡稱速算系統)計算出海嘯波到達臺灣各國際商港之抵達時間與水位變化，如圖 4.22 所示即為蘇澳港之抵達時間與水位變化。

速算系統計算出之水位變化與交通部運輸研究所港研中心現場觀測結果之比較則如圖 4.23；圖中紅線為系統之預估值，藍線是現場實測資料利用 EEMD 法濾潮後後得出。其中速算系統計算出之抵達時間大致正確，基隆、花蓮、高雄、安平以及蘇澳之海嘯波形與現場觀測

之波形相似，但有 15-20 分鐘的時間差。布袋港、臺中港及臺北港水位變化與現場觀測之波形相似度較差；由於三港皆位於臺灣海峽中間，此現象顯示臺灣海峽較淺的水深造成海嘯波變短，因此需要更準確的海底地形才能準確模擬。在海嘯高度的比較上，除臺灣海峽中間三港之波形相似度較差不予討論外，速算系統計算出之基隆港、花蓮港以及安平港水位變化較現場之海嘯高度大。反之，高雄港波高較現場觀測之波高小；圖 4.24 所示蘇澳港之海嘯波高則與現場觀測之波高相當。

之後，美國地質調查所上修地震矩規模至 9.0 並及修正地震參數，速算系統計算所得之海嘯高度差異不大，波形也大同小異，如圖 4.25 為蘇澳港之例子。美國地質調查所在地震發生後一小時才公佈相關地震參數，之後又陸續修正，如上修地震矩規模至 9.0，震源深度也由 24km 修正為 20km，再修正為 10km。這些困難顯示地震參數並不易確定。

由(3.16)式可以知道系統預測水位之準確性與正確的地震參數及水深地形解析度有關。所以驗證時所發生之誤差之檢討作業也必須從這兩點著手，但實務上這兩點並不容易做到。以預報之觀點及東日本海嘯事件案例而言，氣象局能提供近域地震的參數，惟其正確性與對時效之掌握都必須十分可靠。而目前除了美國地質調查所外，並無早期遠域地震參數之可靠來源；另一方面，本研究所使用之初始水位驅動模式是假設斷層是均勻錯動，而據日本學者研究顯示東日本海嘯之斷層運動式較為不均勻之錯動，錯動之模式及參數之正確性都會影響初始水位之準確度。而使用測站水位藉由水動力模式及逆推程序反算真實初始水位之具體方式及程序，目前仍在發展中。

由於臺灣海峽中段較淺，海嘯波自臺灣海峽北端進入時，模擬顯示其前導波之波長約為 1.2 度長，海嘯波高資料庫之水深地形解析度為 2min，故地形解析度/海嘯波長約為 1/36；雖然比值稍大，但仍具有一定的影響量。目前水深地形資料來源及解析度十分有限，日後若能提出更為精細之斷層驅動模式藉以提高海嘯初始波形之準確性以及獲得高解析度之海底地形，應有助於提高實測之準確度。

不過，站在「料敵從寬」的立場，速算系統計算出之水位變化與現場之海嘯高度有差異並不是太嚴重的缺失；缺乏即時的地震參數也可以使用近似值，取其結果較嚴重者即可。此次日本海嘯事件，太平洋海嘯預警中心發佈海嘯警報範圍包括臺灣；因此政府亦發佈海嘯警報。但是在實務上國外發佈海嘯警報常採用分級制度，將海嘯警報分為 1.馬上避難的海嘯警報(warning)、2.僅淨空沙灘與海岸地區的警戒勸阻(advisory)、以及 3.觀察中(watching)等三級。此次海嘯事件，根據速算系統計算出之水位變化，屬於警戒勸阻的範疇(波高 0.3m-1m)，應該淨空沙灘與海岸地區並加強警戒勸阻即可。

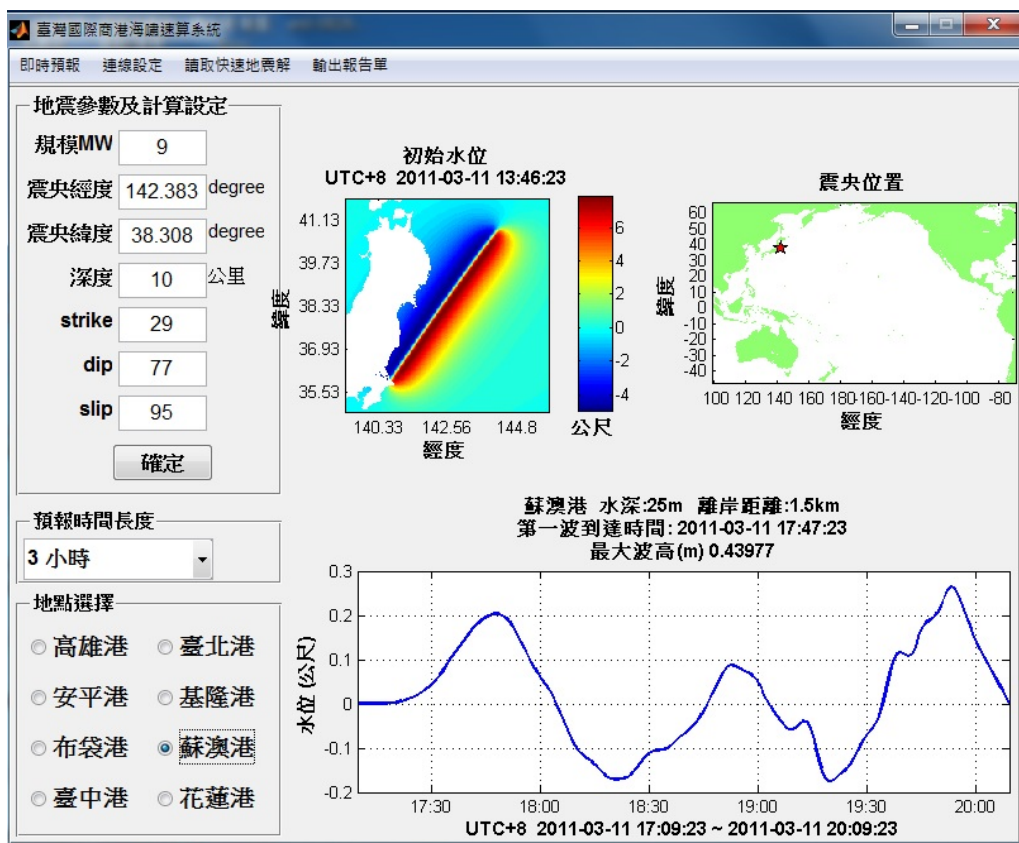
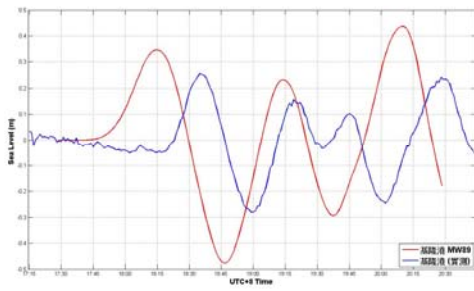
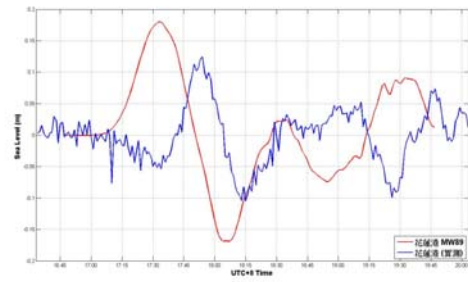


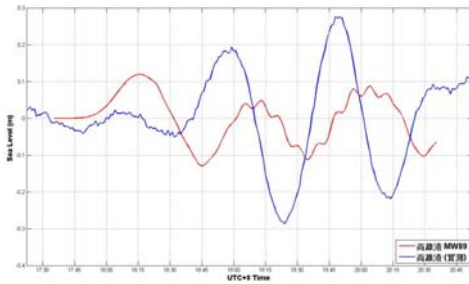
圖 4.22 以速算系統及新公佈之 0311 東日本海嘯之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈



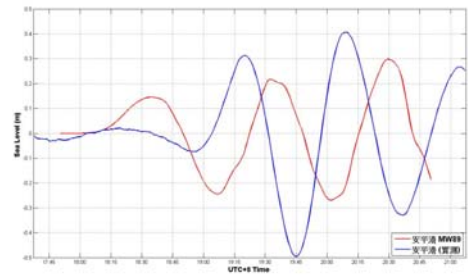
(a)



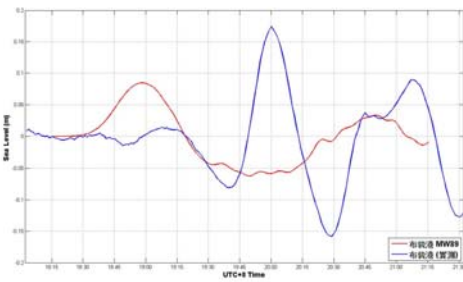
(b)



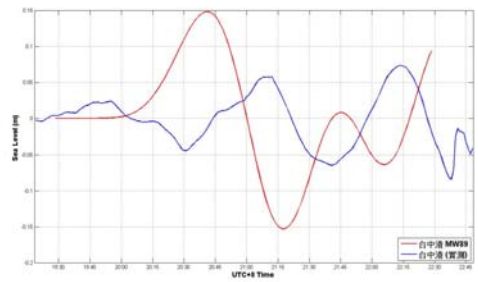
(c)



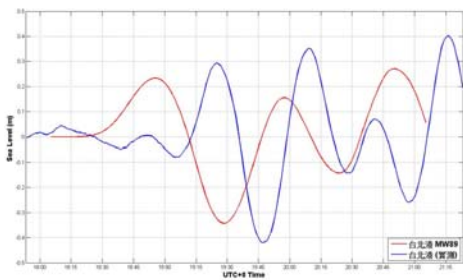
(d)



(e)

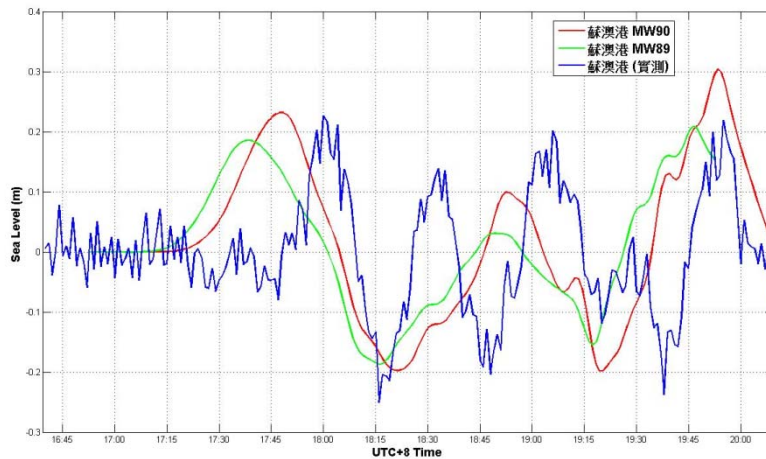


(f)



(g)

圖 4.23 以速算系統及地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數計算(a)基隆港(b)花蓮港(c)高雄港(d)安平港(e)布袋港(f)台中港及(g)臺北港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)



**圖 4.24** 以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模  $M_w8.9$ )及新公佈之地震參數(地震矩規模  $M_w9.0$ )計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)

海嘯波高的預測常有誤差。有的強震造成了海嘯，但波高卻又甚小，使原先發佈的警報成了假警報(false alarm)。例如 2010 年智利 8.8 強震後，太平洋沿岸國家，從夏威夷到紐西蘭、日本，接連發佈海嘯警報，各國忙著疏散民眾，沒想到成了假警報。久而久之，民眾戒心降低，因為以前的經驗，反而認為是假警報，或是認定自己居住的縣市不會有海嘯；倘若真有大海嘯來襲，生命損失更大。所以政府提供的資料越詳細，越能減少假警報的發生。如果大大小小的海嘯都一視同仁，民眾無法判斷，反而把所有警報都當作是假警報。

本次海嘯事件，氣象局只發佈海嘯抵達時間，但是實際上如圖 4.24 所示，海嘯並非只有一個波，最大波可能在第一個波過後一段時間才到來。氣象局可能尚未建立海嘯預報系統，故未能提供第一個波過後之水位變化，提供的資料不夠詳細。此外，臺灣各地海岸特性不同，對海嘯的地形放大效應也不同；海嘯預報系統應該分區發佈才合理。



## 4.4 系統實例操作

第二章及 4.2 節說明對蘇澳港及花蓮港最具威脅性之海嘯潛勢波源是來自太平洋東岸之遠域海嘯，根據文獻近年來(1986 年) 也有花蓮海嘯事件，在花蓮港內有觀測到水位 2 公尺之變化，而臺灣又位處環太平洋地震帶上，地震發生次數頻繁，且花東外海卻是我國海底地震及海嘯事件最多之地區；1986 年之海嘯事件其震源無相關之地震參數，故本節利用 2002 年 3 月 31 日位於臺灣東部約 38 公里發生一起地震矩規模 7.1 級之海底地震，實際模擬該起地震對蘇澳港及花蓮港之水位變化。

2002 年 3 月 31 日位於臺灣東方約 38 公里發生一起地震矩規模 7.1 級之海底地震，震央位址在北緯 24.19 度，東經 121.96 度，震源深度約 33 公里，震央位址與 Harvard CMT 之斷層資料參數如圖 4.25 及圖 4.26 所示。

### (1)第一組參數之結果(strike=292，dip=32，slip=121)

圖 4.27(a)(b)為系統計算之蘇澳港與花蓮港之預報水位，兩港之水位變化是波峰先至，其兩港均為第一波為最大波高；蘇澳港第一波約在地震發生後 9 分鐘後到達，其值約為 0.25 公尺；海嘯波約在地震發生後 5 分鐘後抵達花蓮港外，第一波為最大波高，其值約為 0.12 公尺。

### (2)第二組參數之結果(strike=77，dip=63，slip=72)

圖 4.28(a)(b)為系統計算第二組之蘇澳港與花蓮港之預報水位，兩港之水位變化均為波峰先至，其兩港均為第一波為最大波高；蘇澳港第一波約在地震發生後 10 分鐘後到達，其值約為 0.24 公尺；海嘯波約在地震發生後 4 分鐘後抵達花蓮港外，其波高值約為 0.13 公尺。兩組參數計算結果並無太大之差異，初步研判結果對蘇澳及花蓮港應無具體之影響。但較為注意的是海嘯波在地震發生後 5 至 10 分鐘就抵達，若地震規模再大或海嘯源緊鄰臺灣，事前的海嘯災防顯得格外重要。

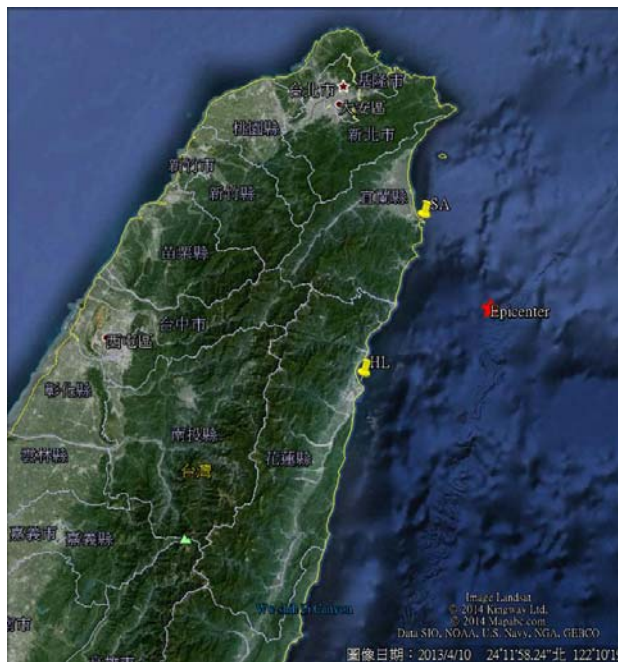


圖 4.25 2002 年地震位址

033102A TAIWAN REGION

Date: 2002/ 3/31 Centroid Time: 6:53: 0.0 GMT  
 Lat= 24.19 Lon= 121.96  
 Depth= 39.0 Half duration=10.1  
 Centroid time minus hypocenter time: 9.5  
 Moment Tensor: Expo=26 3.991 -4.829 0.838 2.864 1.252 0.326  
 Mw = 7.1 mb = 6.4 Ms = 7.4 Scalar Moment = 5.45e+26  
 Fault plane: strike=292 dip=32 slip=121  
 Fault plane: strike=77 dip=63 slip=72



圖 4.26 2002 年地震斷層參數(資料來源：Harvard CMT)

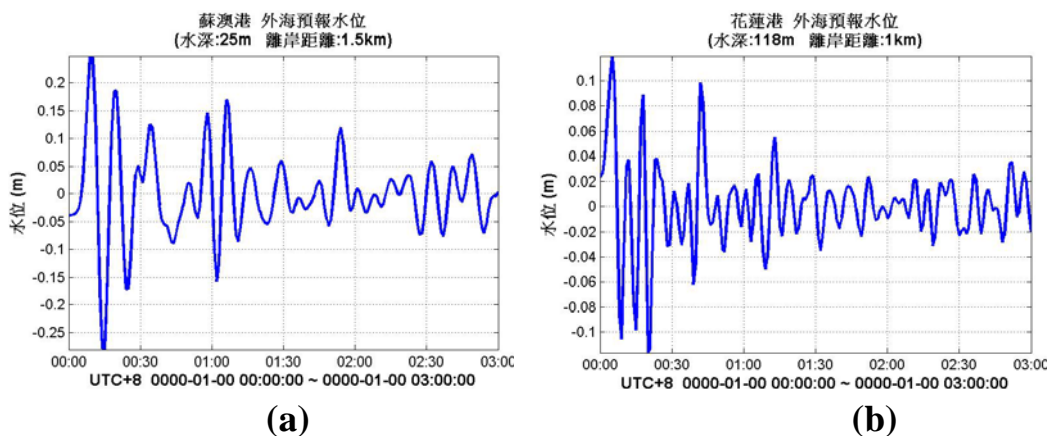


圖 4.27 利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)蘇澳港(b)花蓮港

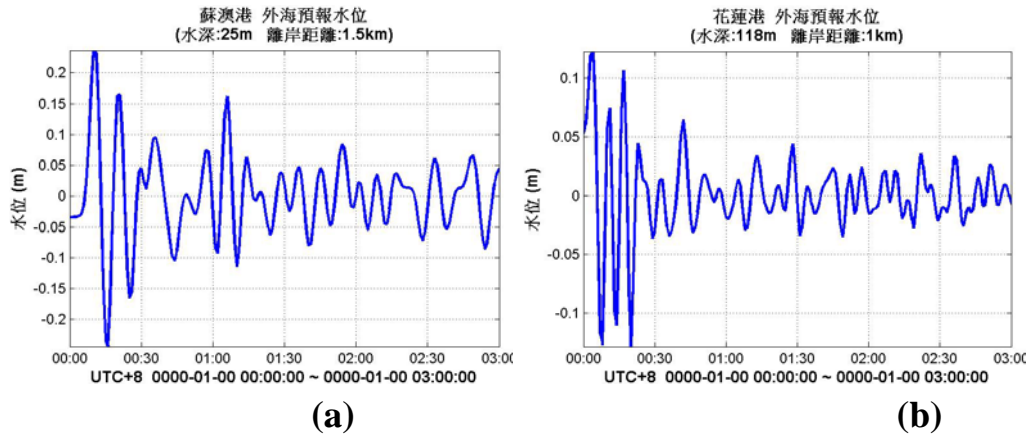


圖 4.28 利用系統及第二組參數所預估之外海水位(a)蘇澳港(b)花蓮港

#### 4.5 系統作業化之運作情形

本系統目前於港灣技術研究中心及中山大學均已架設完成，並提供即時運算，除定期軟硬體維護及更新外，其他時間均保持 24 小時全天候作業狀態；並設定地震矩規模之下限值，高於此一下限之地震發生時，即時擷取環太平洋地震區之地震訊息進行後續計算作業，並將書面預估資料依程序送達相關單位做後續災情研判及應變做為之參考；依東日本海嘯事件之測試，單一預報點可在獲知地震參數後 1-2 分鐘之內得到初步之水位歷時變化。

本系統除了進行上述之精進措施外，為使該系統適合一般民眾使用及查詢，本系統業已併入港灣技術研究中心之港灣環境資訊網並進行全自動化作業；港灣環境資訊網為一網頁版，可供查詢項目甚多，[海嘯模擬資訊]為其中一項查詢項目；該功能主要有三選擇可供選擇，分別為[近期海嘯查詢]、[歷史海嘯查詢]及[海嘯系統簡介]，如圖 4.29 所列。

[近期海嘯查詢]之功能為自動化擷取地震資訊後，隨即計算各港口之最大水位及到達時間，並於介面中顯示相關資訊(震央位址及地震參數資料)；右邊為與 Google-Earth 之整合(如圖 4.30)，使用者在所查詢之港口點兩下之後，隨即可顯示該港口可能之最大波高及到達時間(如圖 4.31)；若欲知更進一步之水位歷時變化，使用者可於[觀看水位歷線



圖]點取後，會自動展示系統之預估結果(如圖 4.32)。目前該系統所呈現之資料為本年 8 月 31 日晚間之菲律賓疑似海嘯事件。在此要特別說明的是：

- (1) 為避免過多不具威脅性之海嘯預報，海嘯訊息發佈條件設定為當波高大於等於 0.1 公尺或地震矩規模大於等於 7.0。
- (2) 由於斷層參數一般會有兩組解，至於海嘯是由哪一組解所造成的並無法在第一時間進行確認；因此，系統會展示由分別由兩組解所推估之水位。
- (3) 本系統每日定時擷取海嘯資訊，且依資料達到海嘯發佈條件時，於網頁呈現其海嘯相關訊息。

[歷史海嘯查詢]之功能為展示近期較具規模之海嘯事件預估結果，在介面上方可選擇查詢較大之海嘯事件及測站名稱；選擇完畢之後，介面會顯示海嘯事件之資訊、震央位址及水位歷線圖(如圖 4.33)；水位歷線圖之下方會提供每分鐘一筆之水位紀錄(如圖 4.34)。

[海嘯系統簡介]之功能為以文字方式簡短說明本系統所使用之海嘯模式以供使用者參考。



圖 4.29 港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面

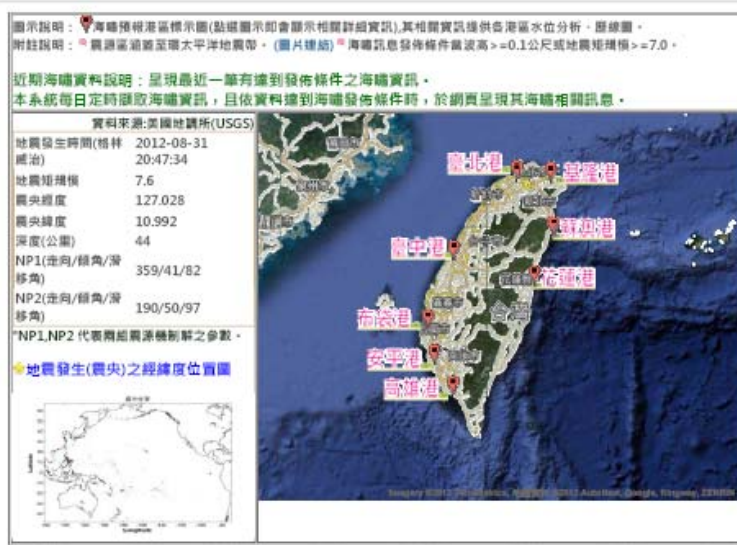


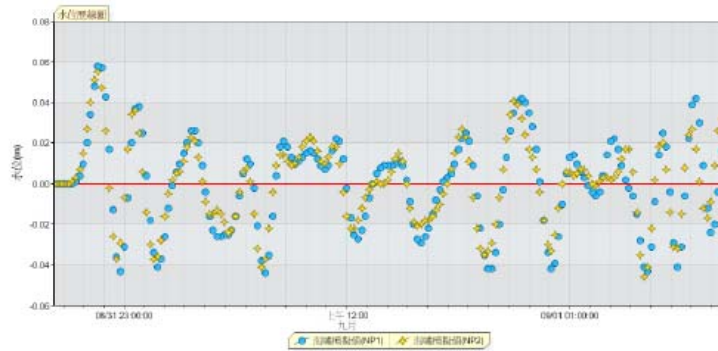
圖 4.30 [近期海嘯查詢]之展示介面



圖 4.31 [近期海嘯查詢]之查詢結果展示

回到上一頁 測站名稱: 花蓮港

地震發生時間(格林威治)	地震矩規模	深度(公里)	NP1(走向/傾角/滑移角)	NP2(走向/傾角/滑移角)
2012-08-31 20:47:34	7.6	44	359/41/82	190/50/97



水位歷線圖 資料表

時間	海嘯模擬解 (NP1) 潮位(公尺)	時間	海嘯模擬解 (NP2) 潮位(公尺)
2012-08-31 22:42:00	0	2012-08-31 22:41:00	0

圖 4.32 水位歷線圖之展示介面

歷史海嘯資料說明：當資料達到海嘯發佈訊息條件(波高>=0.1公尺或地震矩規模>=7.0)時，提供海嘯相關訊息給使用者查詢。

測站名稱: 基隆港 地震時間: 2012-08-31 20:47:34

資料來源: 美國地調所(USGS) 地震發生(震央)之經緯度位置圖

測站	NP1海嘯資訊			NP2海嘯資訊		
	第一波到壩時間(HH:MM)	第一波到壩時間(HH:MM)	第一波到壩時間(HH:MM)	第一波到壩時間(HH:MM)	第一波到壩時間(HH:MM)	第一波到壩時間(HH:MM)
基隆港	23:27	最大波高 (m) 0.081	23:26	最大波高 (m) 0.078		
地震發生時間(格林威治)	地震矩規模	深度(公里)	NP1(走向/傾角/滑移角)	NP2(走向/傾角/滑移角)		
2012-08-31 20:47:34	7.6	44	359/41/82	190/50/97		

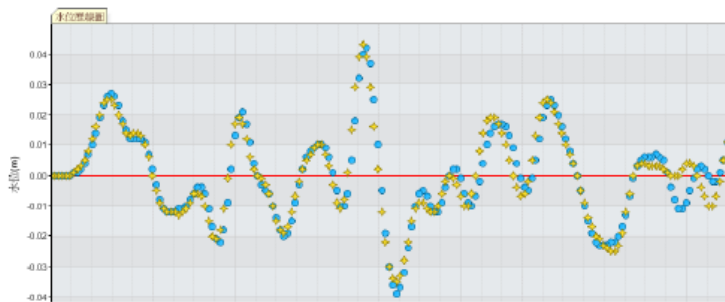


圖 4.33 [歷史海嘯查詢]之查詢結果

時間	海嘯模擬解 (NP1) 潮位(公尺)	時間	海嘯模擬解 (NP2) 潮位(公尺)
2012-08-31 23:12:00	0	2012-08-31 23:11:00	0
2012-08-31 23:13:00	0	2012-08-31 23:12:00	0
2012-08-31 23:14:00	0	2012-08-31 23:13:00	0
2012-08-31 23:15:00	0	2012-08-31 23:14:00	0
2012-08-31 23:16:00	0	2012-08-31 23:15:00	0
2012-08-31 23:17:00	0.001	2012-08-31 23:16:00	0
2012-08-31 23:18:00	0.001	2012-08-31 23:17:00	0.001
2012-08-31 23:19:00	0.002	2012-08-31 23:18:00	0.002

圖 4.34 水位歷線圖之文字資料

## 第五章 海嘯災害風險評估

### 5.1 前言

海嘯發生的主要原因為海底地震，雖然目前為止地震無法準確預測，地震發生後可能造成的災害評估技術也趨於成熟，災害風險為災害破壞損失及社會經濟的破壞影響有多大，而在此將可能發生災害的地區、脆弱度、社會因子等其他因子統稱為曝險度，評估地震引發海嘯其曝險度、破壞發生的機率、破壞的程度等，對於提升救災效率、降低生命財產損失，有明顯的幫助，也是在目前最可預期的成效。本系統所提供之資訊可於海嘯發生初期獲知可能之水位及其到達時間，供應變決策單位早期預判災情之用，溢淹潛勢圖之應用可以供防災單位提前疏散及後勤整備之用，亦可提供工程單位於資產之保險費用的估算參考。

本研究採用 Chen et al.(2011)所建議之評估流程：「引發海嘯之地震期望數 Tsunamigenic Earthquake expectation Number, TEN」，其方法由歷史地震紀錄推算未來可能發生的地震次數，配合海嘯的發生條件：海源(震央位置位於海洋)，且震源深度小於 30 公里之條件；以此條件推算未來可能發生海嘯的次數期望值。接著以「海嘯溢淹機率 Earthquake-induced Tsunami Inundation Probability, ETIP」Chen et al.(2014)，其方法使用二維海嘯模式計算若發生不同規模海嘯地震時，對於臺灣東南沿岸各鄉鎮所產生的最大波高，以及此波高以模式模擬對於陸地所產生的溢淹狀況，取溢淹高度 50 公分且離岸 50 公尺為溢淹點，再與模式模擬數值地形岸線點位長度作比值，定義為溢淹機率。綜合海嘯發生次數期望值，與發生海嘯地震所產生的溢淹機率，可得到研究區域發生不同規模海嘯地震且溢淹的機率，將不同區域、不同規模得到的機率加總，則可得到評估區域內發生海嘯且溢淹的機率值。以作為發生海嘯地震且溢淹的災害評估。整體之機率評估方式可寫為如(5.1)~(5.2)式所示：

$$\sum_i \sum_j TEN_j^i ETIP_j^i = \sum_i \sum_j EN_j^i P_{ocsh}^i ETIP_j^i \quad (5.1)$$

$$TEN_j^i = EN_j^i P_{ocsh}^i \quad (5.2)$$

式中， $EN_j^i$  代表子震源區  $i$  發生  $j$  地震級距主要地震次數的期望值， $P_{ocsh}^i$  則是指  $EN_j^i$  中發生震源深度小於 30 公里海底地震的機率。上標  $i$  代表子震源區之數目；下標  $j$  代表地震級距。圖 5.1 為此一概念之計算流程圖。

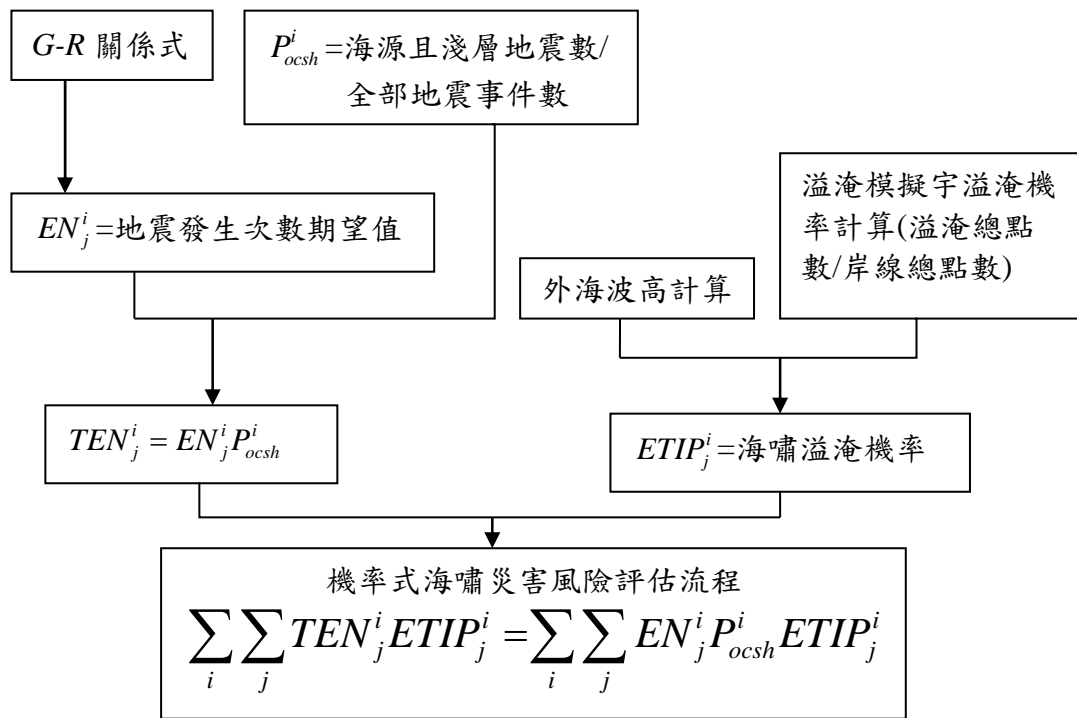


圖 5.1 海嘯風險評估流程圖

## 5.2 海嘯地震發生次數期望值

### 5.2.1 研究區域及地震資料

研究區域主要為環太平洋地震帶，全球有 80% 的地震發生在此，而歷史海嘯記錄則有 85% 發生在環太平洋地震帶的島弧-海溝地帶。環



太平洋地震帶幅員廣闊，主要地震發生地大抵分為中央地區之南北太平洋及各版塊之海溝、島弧；自 USGS 的 NEIC 資料庫中所擷取之地震資料(含陸源及海源地震)總數約為十餘萬筆，其數量主要分佈概況如圖 5.2(a)所示，可以發現位於太平洋中央海底盆地之數量較少；東西兩岸之海溝還是主要地震發生地。其次，由於各版塊及海溝地質條件各異，為便利後續海嘯模擬及溢淹機率計算，需將各海溝做適當之分塊，Gusiakov(2005)建議以各主要海溝做為分類之依據，如圖 5.2(b)所示。本研究之分類則如圖 5.3(a)所示。

根據上述之建議，本研究進一步以緯度 2 度為一單位，將各主要海溝做細部分區；主要目的為由於海溝一般甚長(例如馬尼拉海溝)，在選取可能震源及計算機率時，若將一海溝視為一整體，會減少可能之震源數。因此本研究依主要海溝分為數個大區域總共 126 個區域點位，圖 5.3(b)。

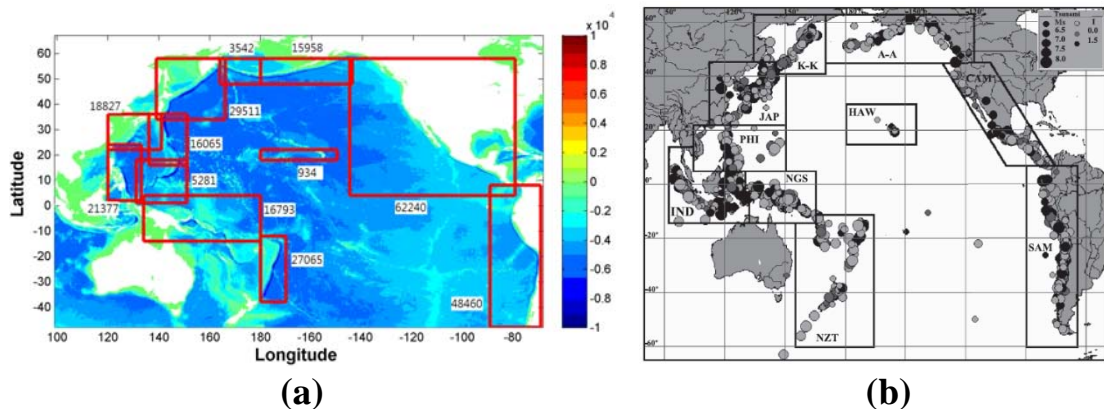


圖 5.2 (a)環太平洋地震數量分佈圖(b)太平洋區域之主要海溝分佈及劃分建議(Gusiakov, 2005)

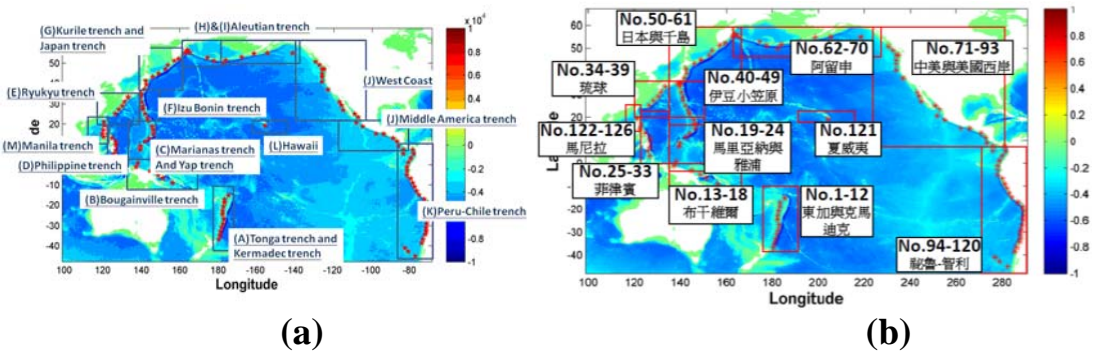


圖 5.3 (a)本研究主要海溝分佈圖及名稱(b)本研究之假設震央點分佈

風險評估首先須由蒐集地震之資料開始，計算地震發生之期望數；本研究依主要海溝分為數個大區域總共 126 個區域點位，由 NEIC 資料庫，取得歷史地震資料，並依區域範圍與歷史年份等條件挑選地震資料，如圖 5.4。美國地質調查所監測全球地震活動並發布地震消息，對於規模大於 3.5 的地震幾乎都已經使用地震矩規模( $M_w$ )來描述地震大小。因此在本研究主要以地震矩規模為挑選條件，若有其他地震規模則由先前章節介紹地震規模轉換經驗公式適當換算地震矩規模，以此條件取得記錄較完整之歷史地震資料(地震矩規模記錄、震源深度記錄、震央位置記錄等)。並利用地震資料庫其地震解平均計算出走向角(strike)與傾角(dip)，在此滑移角自訂為 90 度，但考慮較大規模海嘯在臺灣週遭斷層可能會出現不合理狀況，因此在規模 8.5 以上地震參數有重新考慮為 115 個區域點位，主要是在琉球海溝、菲律賓海溝與馬尼拉海溝考慮已知斷層狀況重新選取區預計算，以至於在規模 8.5、9 時點位較少；本研究所假設之震央位址及參數設定請見附錄三。

附錄三另外一個功用是在地震初期或是通訊中斷而資訊不明時，作為系統之參考輸入條件；實務上，地震之震央無法事先預知，會造成海嘯初始水位預測之困難，也影響系統預估水位之準確度；因此，在此一情況下，採用附錄三依不同地震矩規模輸入建議之地震參數作為替代條件，雖與實際狀況有所差異，但不失為一可行之方法；待取得表 4.2 中任一機構所公佈之地震參數後，系統可隨時修正相關之預測資訊。



圖 5.4 USGS-NEIC 地震資料庫



當一般區域震源可用指數規模分佈模式來表示，而此模式中之地震規模與再現頻率關係式 (Gutenberg and Richter, 1944)，稱為 G-R 關係式，其形式為：

$$\log(N) = a - bM \quad (5.3)$$

G-R 關係式中， $b$  值是地震危害分析中一個極為重要的參數，其表示地震在某一地震規模內的大地震與小地震間的比例關係。 $b$  值隨著研究區域內的地質分佈、構造、地溫與應力...等條件的不同而有所變化。此一回歸分析法，即是在一區域內對於地震規模  $\geq M_b$  (設定之地震下限) 而言的，式中  $M$  代表地震矩規模，並依小而大之順序排列，式中之  $N$  表示規模大於或是等於  $M$  之次數，在本研究中地震矩規模  $M$  的區間為 4.25、4.75、5.25、5.75、6.25、6.75、7.25、7.75、8.25、8.75、9.25 取各區間內累計數即為  $N$ ，而  $a$ 、 $b$  則為線性迴歸係數。以日本東側東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度為例，圖 5.5 藍點為各地震矩累計次數，35 年為過去地震次數記錄的時間長度，將此迴歸線上各點除以統計年時間長度 35 乘上評估年時間長度 50、100 再轉換回 G-R 關係式，則可得到圖 5.5 上未來 50 年及未來 100 年的迴歸係數與迴歸線，紅點線(50 年)及綠點線(100 年)，此迴歸線為評估未來 50 年及未來 100 年，可能發生之累計次數，進而可得到各地震矩規模區間的可能發生次數，如表 5.1 所示。

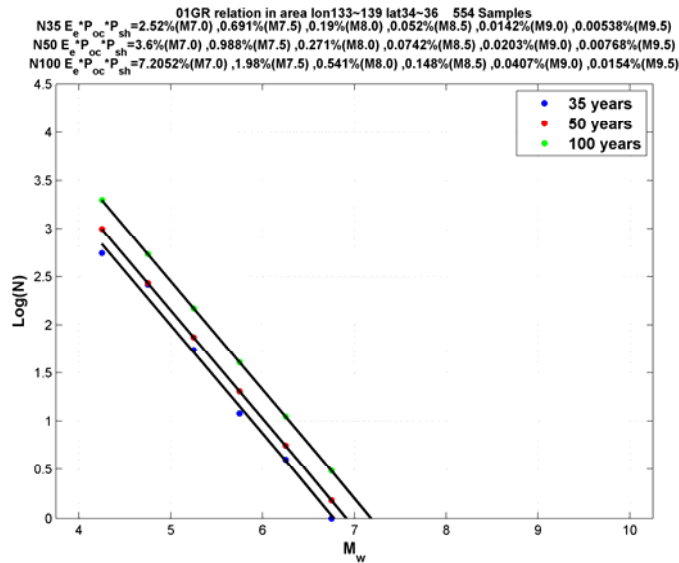


圖 5.5 G-R 關係式之計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)

表 5.1 各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值

M <sub>w</sub>	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	4.0552	1.1116	0.3047	0.0835	0.0228	0.0062
100 年	8.1099	2.2231	0.6094	0.1670	0.0457	0.0125

### 5.2.2 海嘯發生條件

由統計資料可以發現，海嘯之發生並不一定與強烈之海底地震有必然之關係；因此，海嘯的發生是一種條件機率(conditional probability)；在討論地震引發海嘯時，一般會引發海嘯的地震震源通常發生在較淺層的海底斷層；G-R 關係式求得地震發生次數期望值，再給與海嘯發生條件  $P_{ocsh}^i$ ，即是表示震央位置位於海洋且震源深度小於 30 公里才有引發海嘯之可能，以此方法求得在特定回歸期內可能發生海嘯次數之期望值。圖 5.6 為挑選海源地震，海源地震的定義為震央位置記錄在海洋，圖 5.6 中藍色方框點位置。接著在海源地震中挑選震源深度小於 30 公里條件下地震，圖 5.6 中紅色圈圈點位置。海源且極淺層數目除上統計總數，即可得海源且震源深度小於 30 公里比值。此區域地震資料總數為 702 筆，海源且震源深度在 30km 以內數為 83 筆，因此比值

$83/702=0.1182$ 。該值與表 5.1 各地震規模區間發生次數期望值相乘，即可得在未來 50 年及 100 年各地震矩規模區間發生由地震引發海嘯之可能發生次數，即是(5.2)式中的 TEN；如下表 5.2。

由 NEIC 資料庫中所記錄地震資料，地震紀錄期間為自 1973 至 2013 年，搜尋範圍為整個太平洋區域，地震紀錄採用下限為 4.25，如圖 5.7 所示。

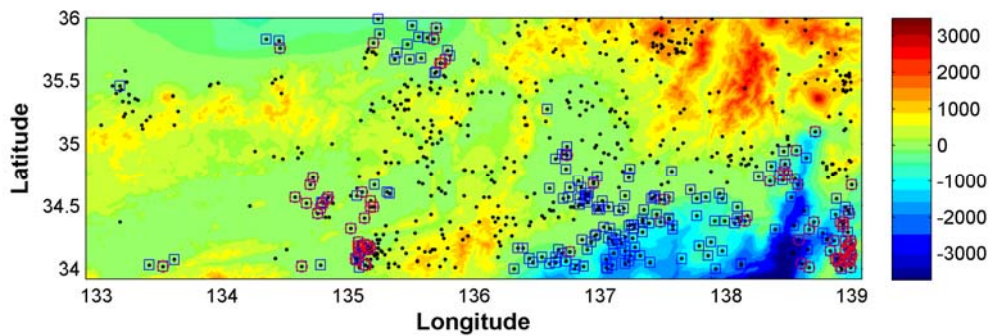


圖 5.6 計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)之淺層海源地震分佈

表 5.2 海嘯地震發生次數期望值

$M_w$	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	0.48	0.13	0.036	$9.86 \times 10^{-3}$	$2.69 \times 10^{-3}$	$7.33 \times 10^{-3}$
100 年	0.96	0.26	0.073	0.0197	$5.4 \times 10^{-3}$	$1.48 \times 10^{-3}$

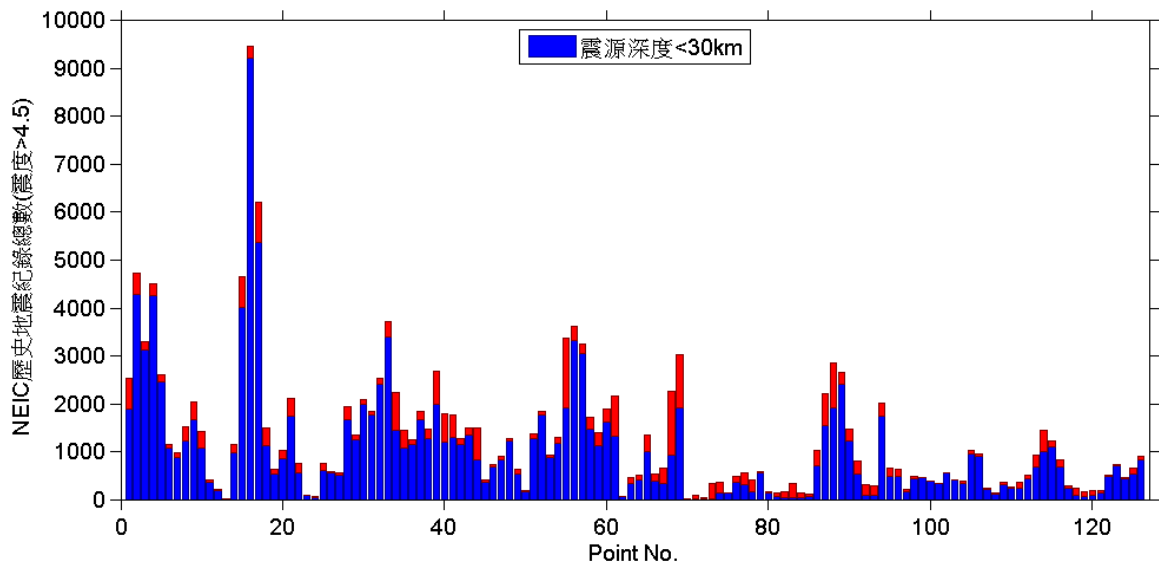


圖 5.7 NEIC 中環太平洋地震帶 126 區域點位之歷史地震資料

## 5.3 蘇澳港之溢淹模擬

### 5.3.1 數值地形

海域地形主要是採用海科中心網格間距為 500 公尺之水深資料 (TaiDBMV6)，如圖 5.8；除了 TaiDBMV6 外，港區之水深亦採用港研中心所提供之船測資料加以校正。陸域地形資料是由內政部地政司所提供之 5m×5m 之 DSM 數值地形資料，其中平面坐標採內政部 1997 臺灣大地基準 (TWD97)，高程坐標採內政部 2001 臺灣高程基準 (TWVD2001)。即是定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境下，並採用基隆潮位站(基隆平均海水面)1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得，即為中潮系統。每一網格點是一組 E、N、H 三個坐標值，組成右旋坐標系的三個 X、Y、Z 坐標(如 250000 2670000 123.0，坐標之間以一空格隔開)；遇到無法測製區及湖泊、水庫等水體區則以影像當時邊界線高度測製。無法測製區及水體區則依地形特徵資料檔格式加測並儲存記錄邊界線。海域水體部分以海岸線及圖幅邊界組成邊界線。陸域地形需轉成經緯度座標。5m×5m 數值地形資料之測繪在實務上實屬不易，雖然無法表示局部地區之建物構造特色與實際情況，但是此一解析度

已可做為溢淹圖資之用，圖 5.9 為蘇澳港之陸域數值地形。由於兩者解析度不同，在無其他較為精細海底地形之來源時，將海域地形以內插之方式製作成與陸域地形資料相同解析度之數值地形。圖 5.10 為海陸域整合後之數值地形檔。並將港研中心所提供之港內實測地形資料整併至數值地形圖 5.11。

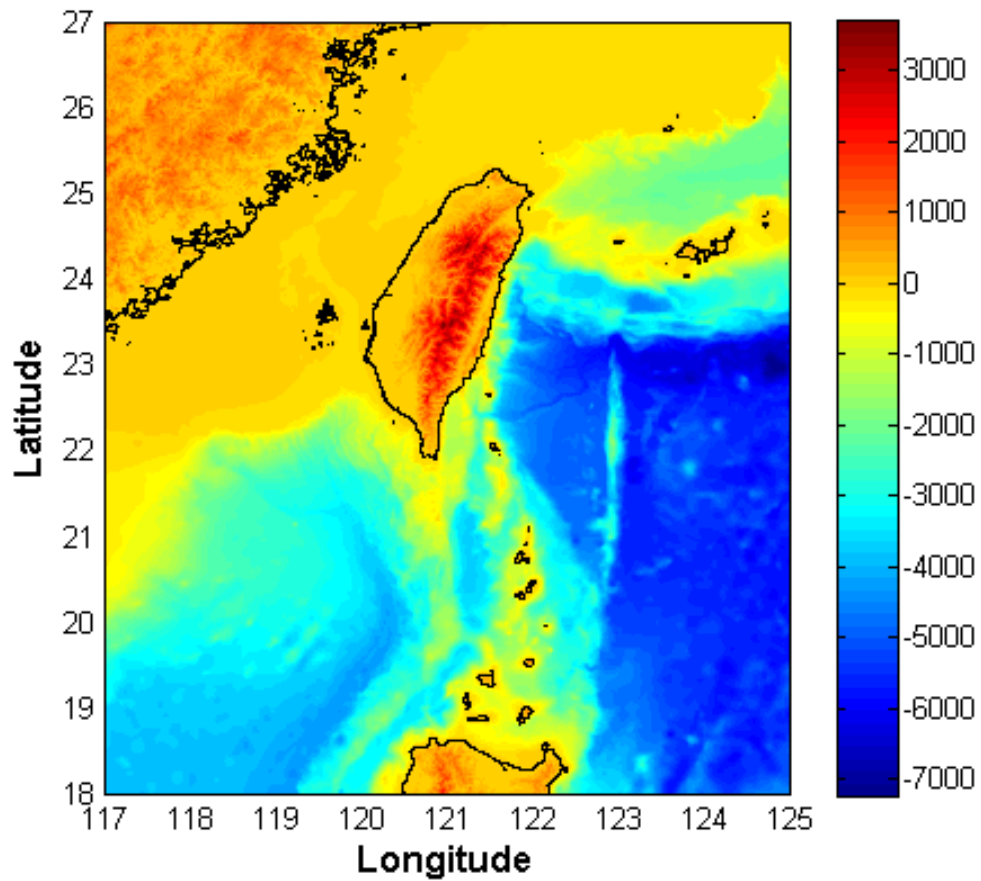


圖 5.8 臺灣 500m 解析度水深地形資料

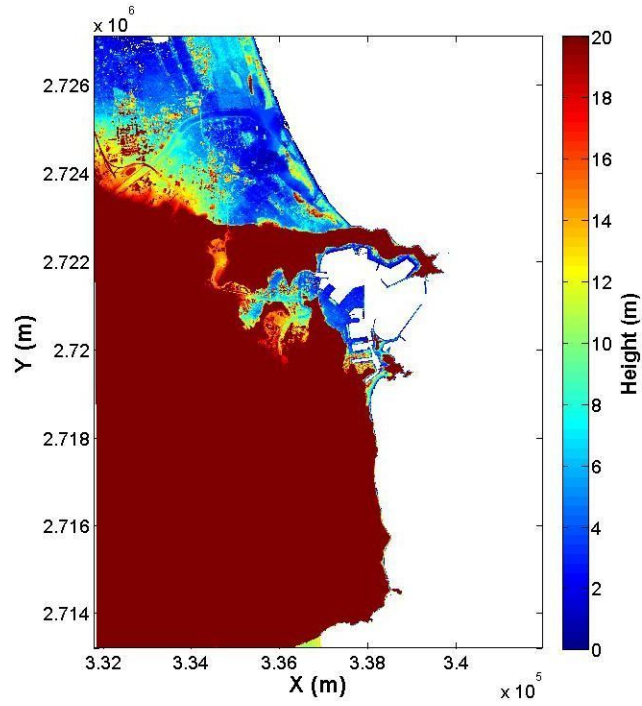


圖 5.9 蘇澳港 5m 解析度數值地形檔

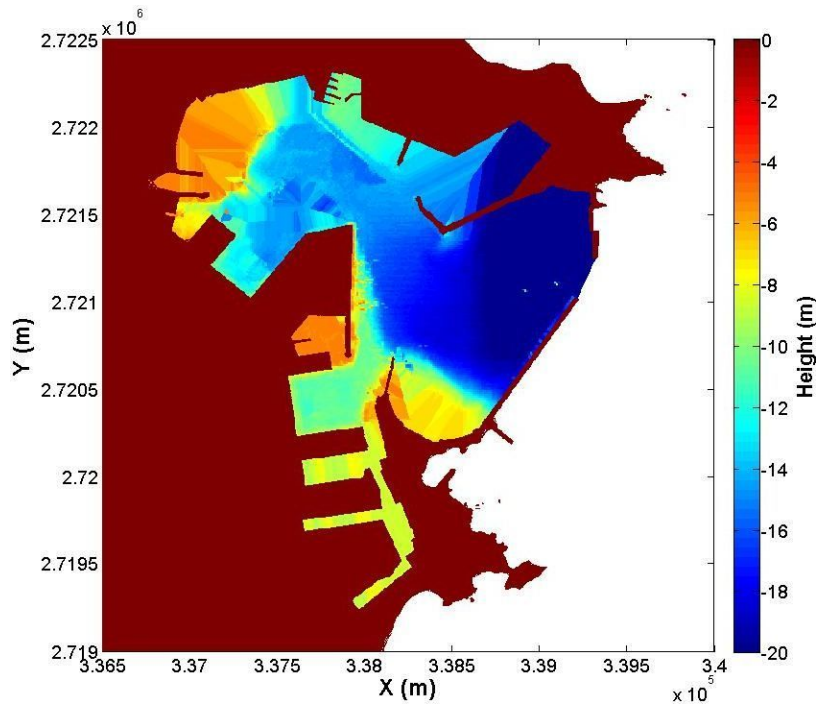


圖 5.10 蘇澳港整合海陸域後之數值地形檔



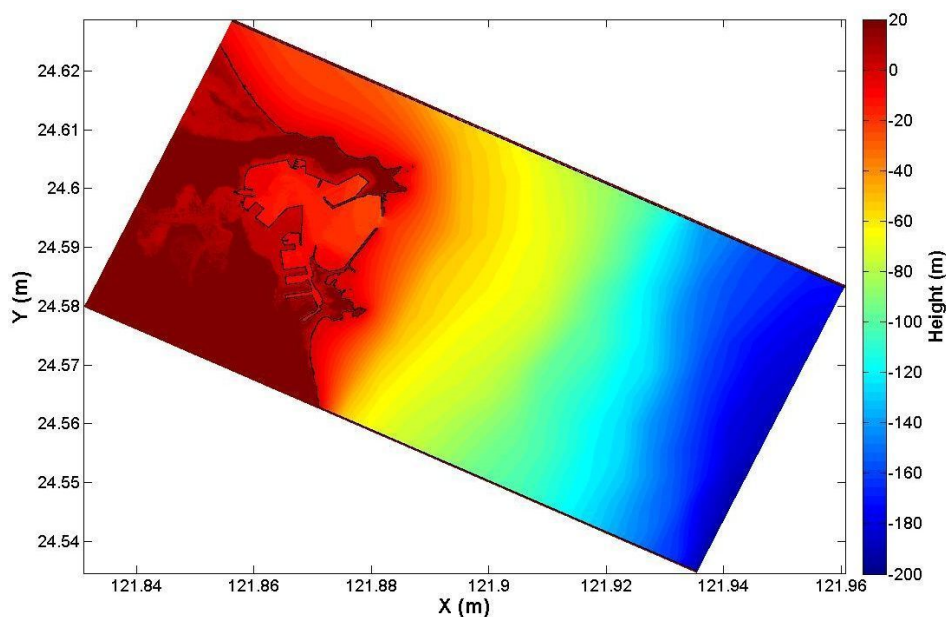


圖 5.11 蘇澳港整併港內實際地形之數值地形檔

### 5.3.2 蘇澳港之模擬結果

海嘯溢淹模擬最佳之方式就是確切得知發生一已知之震源或是一組斷層參數，得知初始水位高度後據以模擬海嘯之溢淹行為及特性。但實務上，上述之方法有其困難度：

- (1) 首先是震源位址，目前並無法準測預測地震之發生，故也就無法得知震央；其次，斷層參數之來源也極其有限，除了少數較為引人注目之斷層(例如琉球海溝)有較為嚴密之地球科學探測資料外，其餘甚少有較為詳盡之參數資料；故在有限之條件下以實際海嘯波形進行海嘯溢淹模擬有其實務上之困難。
- (2) 另一方面，目前也無法確知各個可能震源點所能產生之最大地震矩規模及海嘯波之來向。

由以上兩點可知，在許多必要條件均缺乏之情況下進行海嘯於近岸地區之數值模擬是相當不便的，加以防災需求宜作較為保守之推估；因此，利用單一波形及情境模擬方式來進行溢淹模擬除了可獲得較為保守之結果外，更可匯集成一資料庫，在實際海嘯事件發生時，得知

外海波高後，即可得知對應可能之海嘯資訊。

本研究使用 COMCOT 溢淹模式，以不同波高之高斯波模擬海嘯波垂直岸線入射(0.5m、1m、2m、3m、4m、6m、10m)；海嘯波為長週期之重力波，一般週期約為 15~30 分鐘，其所攜帶之水量遠大於季風所引起之短週期風浪，而孤立波之高度及寬度有一固定關係，故本研究稱之高斯波為說明其週期與波高的不同而定義，前期高雄港與安平港之模擬為採用之週期為約 20 分鐘，本計劃亦沿用此一週期；以安平港為例，海嘯波模擬採用之週期為約 20 分鐘，圖 5.12 為波高 4m 週期約 20 分鐘之高斯波，以此波形在模式地形邊界上入射，模擬此情境下陸地之溢淹狀況。而計劃中所設定之海嘯潛勢波源區為整個環太平洋地震帶。

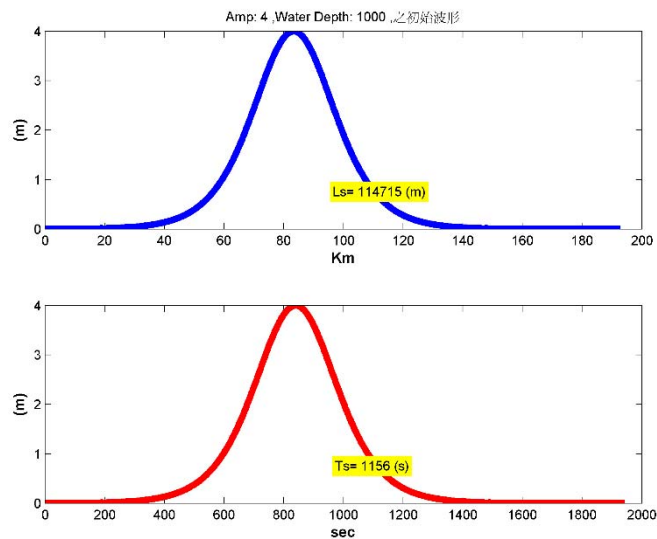
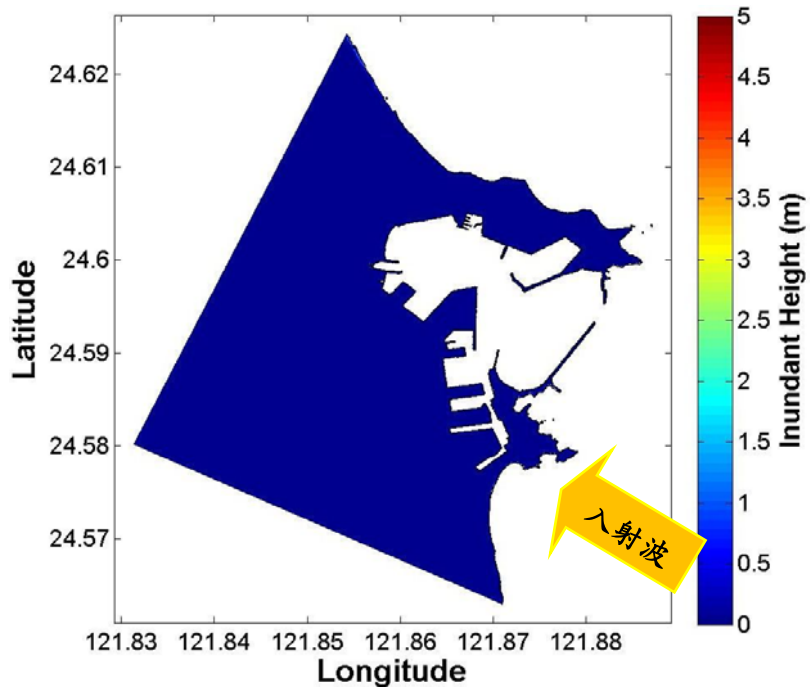


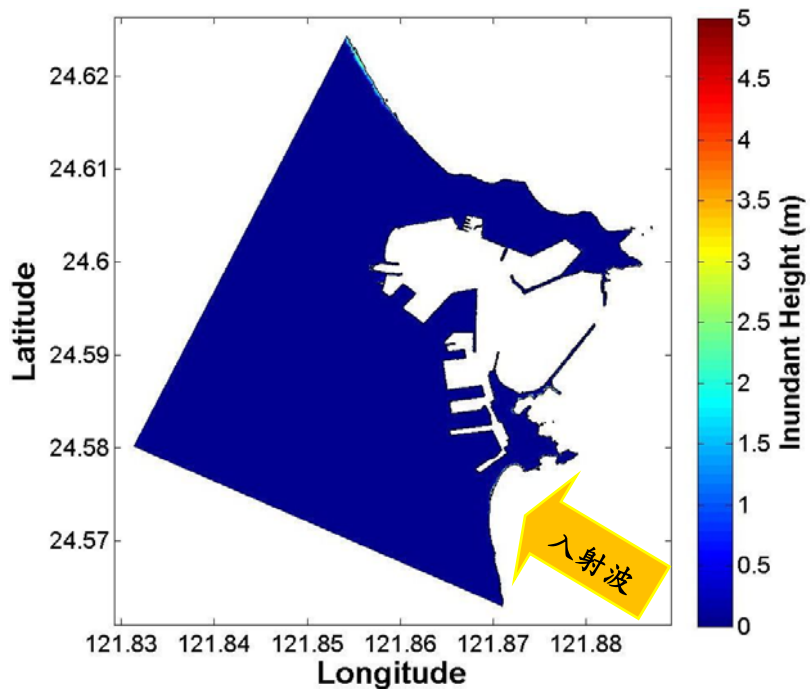
圖 5.12 週期 20 分鐘波高 4m 高斯波

圖 5.13(a)~(g)為蘇澳港在各種不同入射波高下之溢淹圖。在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 3 公尺以下，溢淹範圍侷限於內港區之下方，溢淹高程約為 1.5 公尺以下。3 公尺以上之波高時，溢淹範圍會逐漸向內陸擴大，在內港區上下之溢淹高程也會提高至 8 公尺左右(入射波高為 6 公尺以上時)。

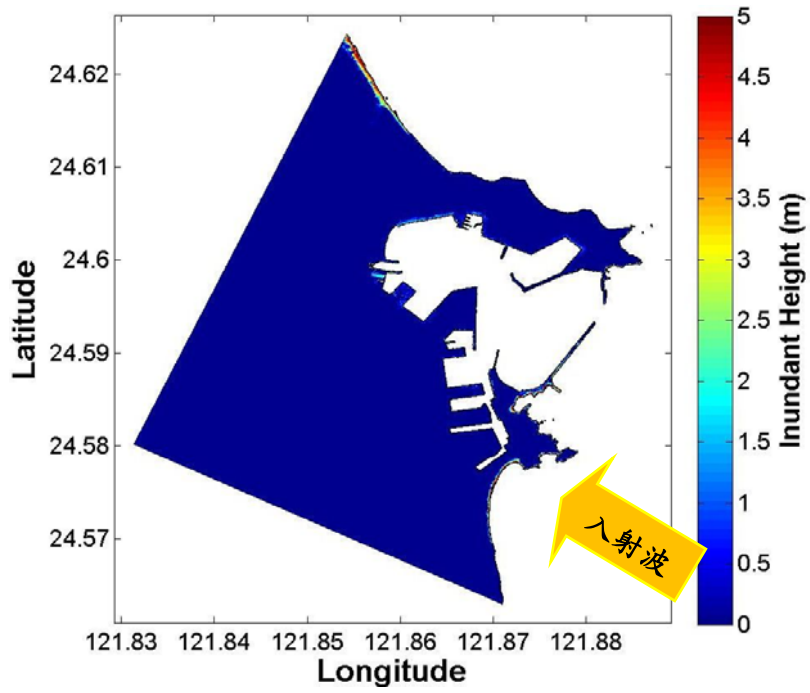




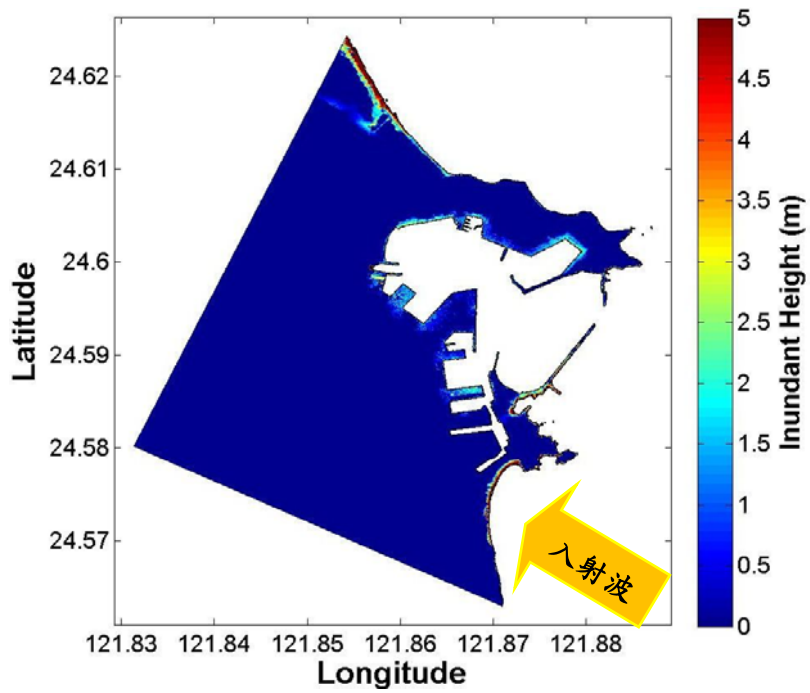
(a) 蘇澳港入射波高為 0.5 公尺之溢淹圖



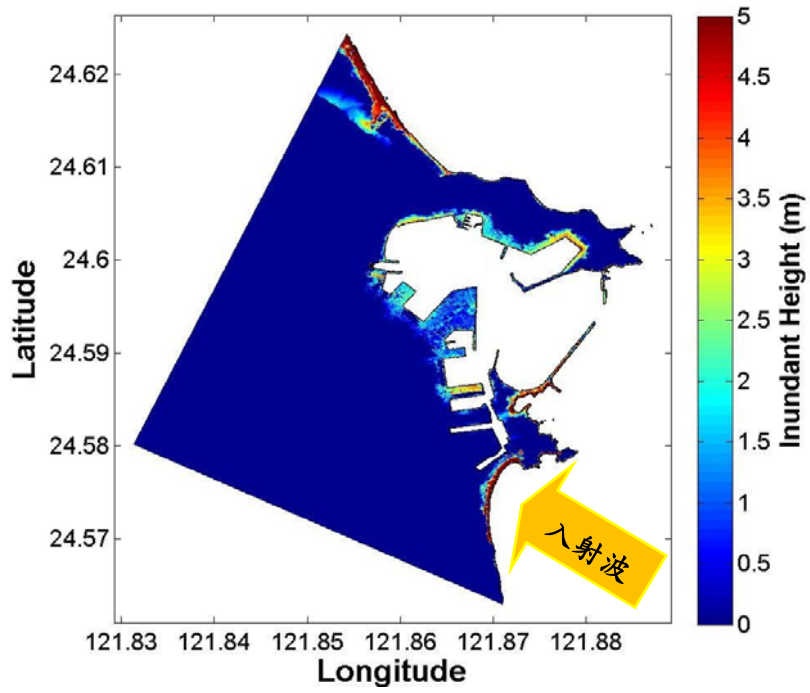
(b) 蘇澳港入射波高為 1 公尺之溢淹圖



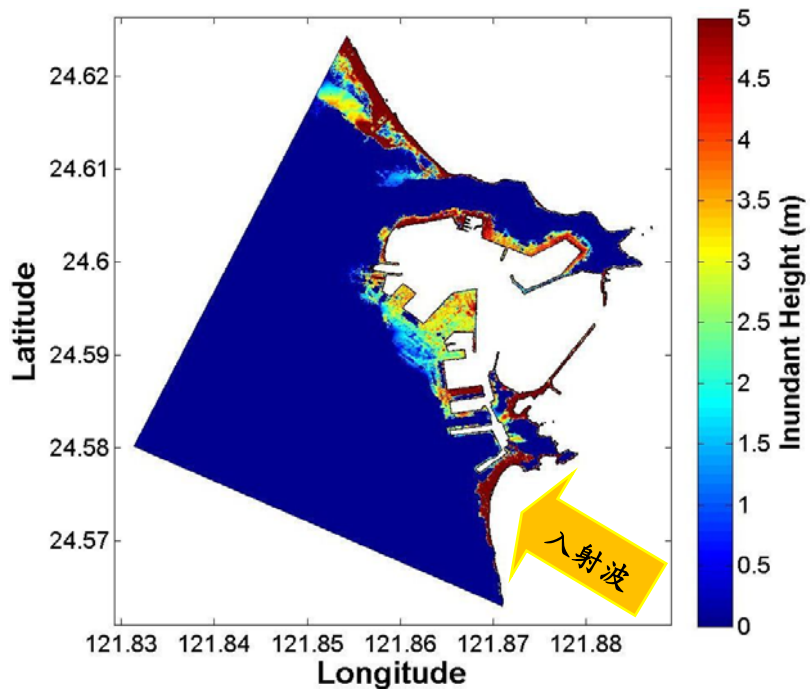
(c) 蘇澳港入射波高為 2 公尺之溢淹圖



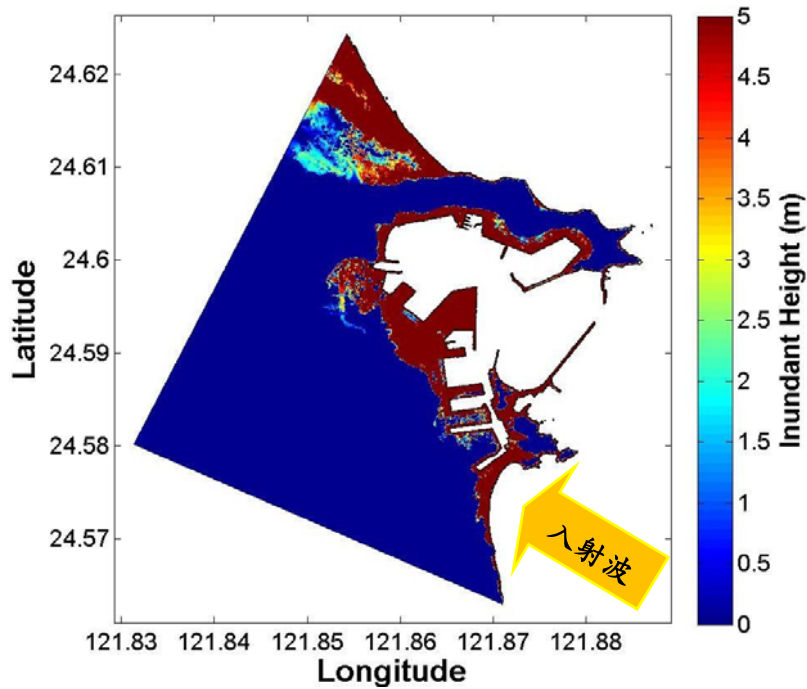
(d) 蘇澳港入射波高為 3 公尺之溢淹圖



(e) 蘇澳港入射波高為 4 公尺時之溢淹圖



(f) 蘇澳港入射波高為 6 公尺時之溢淹圖



(g) 蘇澳港入射波高為 10 公尺時之溢淹圖

圖 5.13 蘇澳港之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

### 5.3.3 溢淹機率

當大洋中發生海嘯時，對於近岸及內陸未必會造成災情，是否對陸域造成顯著影響端視最大波高與當地高程之關係。波高因緩坡地形而產生波高沿陸地方向急遽抬升之現象，稱為淺化效應(Shoaling effect)；對應之海嘯波高稱為溯上高度(Run-up height)。如果溯上高度小於當地陸地高程或是海岸保護結構物，就可能不造成溢淹；也可能是溯上波高僅在內陸小範圍內造成數公分之溢淹情況，造成些許的災情。因此，對內陸地區而言，是否會造成溢淹是一種條件機率也是一種危害度；常見之危害度或是或然率分析可用機率來表示，例如地震危害度分析或是氣象預報中之降雨機率等等。

本節所提出之海嘯溢淹機率(Tsunami induced inundation probability)，意指海嘯發生後所造成之陸地溢淹機率；若發生有如南亞

海嘯或是日本海嘯規模之海嘯時，海嘯所攜帶之水體及漂流物可長驅直入至內陸達數公里之遙。在此要特別說明的是，海嘯具有強大的動量，因此即使在海岸地區發生小規模之溯上或是溢淹，仍可能造成人命之損失。

由實務案例可以發現，即使外海的海嘯波高甚小，到達近岸時仍舊有可能越過堤防，惟小波高所造成之溢淹範圍及溢淹深度也較小；有鑑於此，本研究之海嘯溢淹機率(TIP)定義為當海嘯溢淹超過離岸50公尺，溢淹高度超過50公分時，即表示該處為發生溢淹。取50公尺是因為港區沿海地帶有較緩坡度之沿海沙灘或是礫灘地形，而在海堤地區若造成海水高過防波堤而溢淹，往往都會溢淹超過50公尺，因此本研究定義以50公尺為溢淹災害發生應當合適。由於目前為止並無類似之定義，依國內不同港區海岸特性可做適當之調整。

本研究定義溢淹條件為溢淹高度超過50公分，主要考量到海水溢淹陸地後要產生危害需要一定的溢淹高度與強度，因此在定義選取溢淹的條件下，以溢淹入陸地50公尺且溢淹高度超過50公分為溢淹條件。此兩條件與模式模擬地形的離岸50公尺岸線網格數長度比值，定義為溢淹機率，圖5.14 為溢淹機率定義之簡示圖：黑點為岸線，紅點為離岸50公尺線，藍點為水溢淹的點位，黃線為溢淹範圍線，此例紅點與藍點相疊的點位總計有3點，紅點總數為8點，因此溢淹機率為 $3/8=0.375$ 。本研究中溢淹機率之定義不採用面積之主因在於每個港區之面積均不一，有可能產生每個港區皆會得出相同之溢淹機率，會無法反映實際上海嘯之溢淹風險；而用海岸線作為溢淹機率之定義，主因是本研究認為此種方式較能反映出海嘯是否造成內陸溢淹仍須視當地高程而定之物理意義。

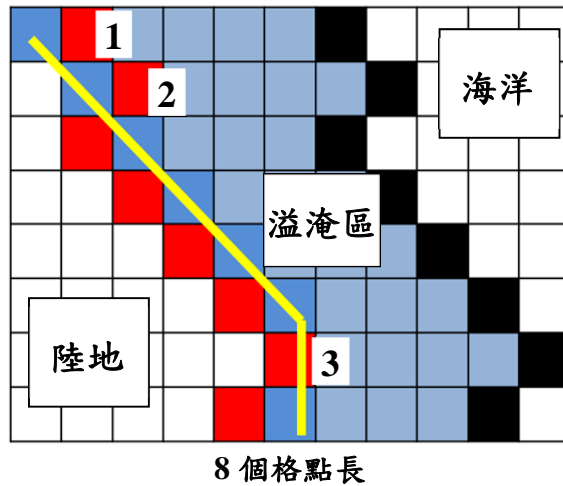
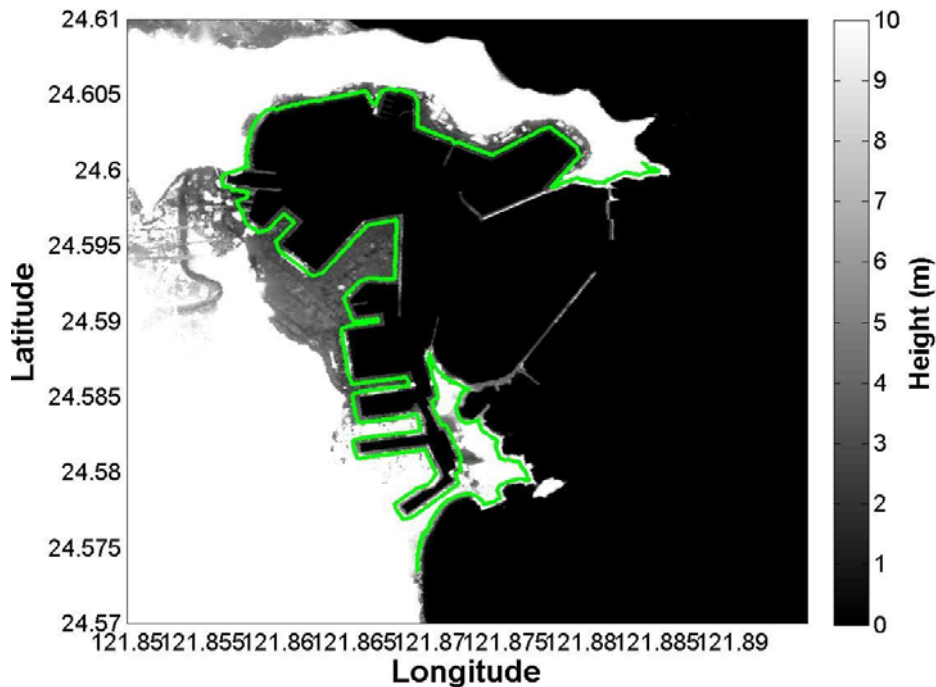


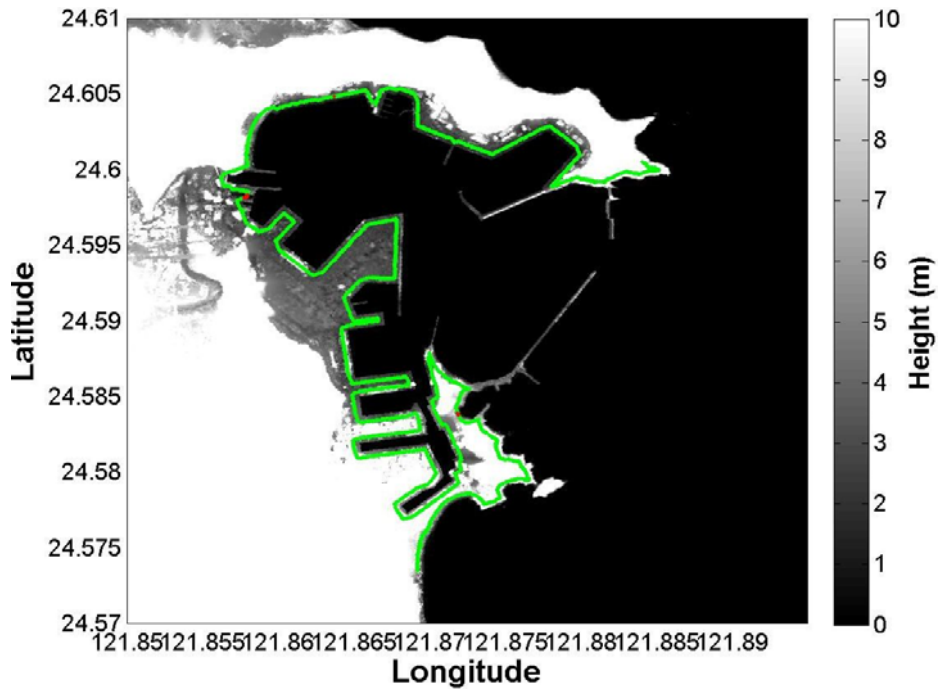
圖 5.14 溢淹機率簡示圖

### 5.3.4 蘇澳港之溢淹點位分佈及機率

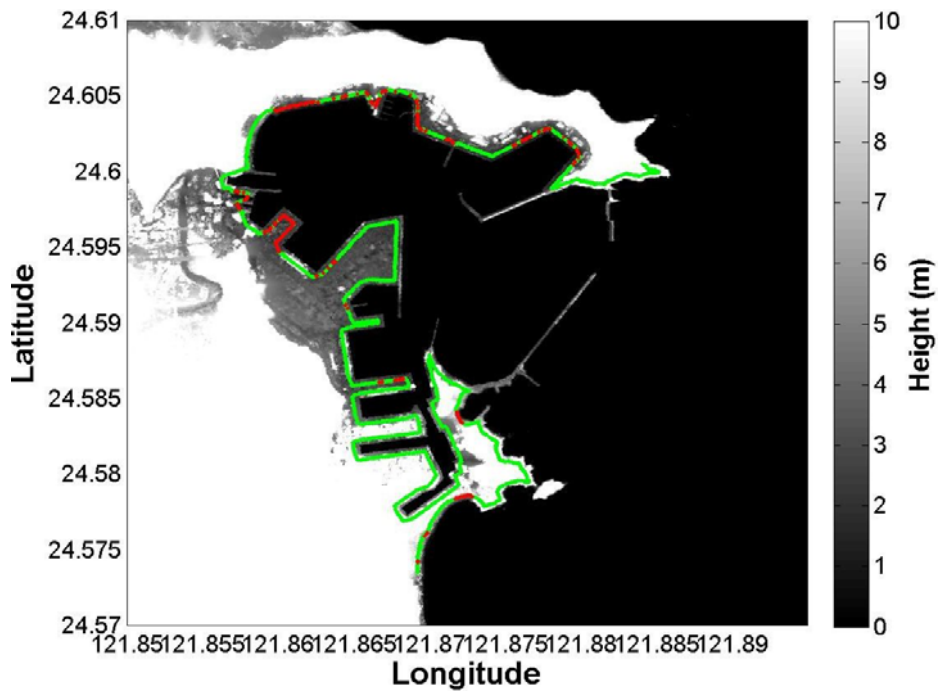
圖 5.15 為蘇澳港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位，綠色點位為表示離岸 50 公尺但高程未達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.3 及圖 5.16，入射波高只要大於 4 公尺就會有 50% 以上的溢淹機率。



(a) 蘇澳港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈

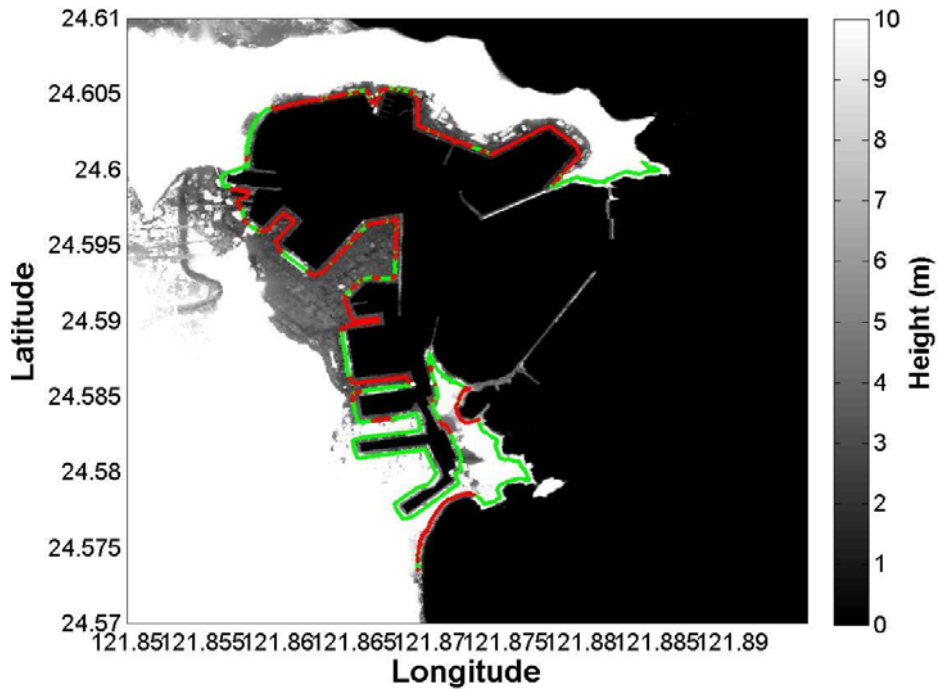


(b) 蘇澳港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈

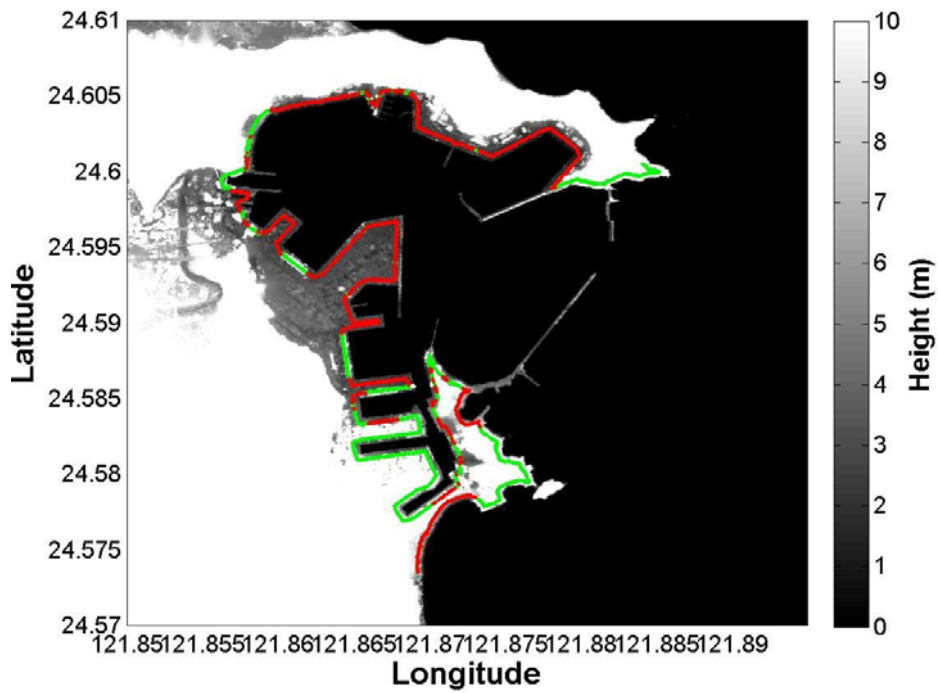


(c) 蘇澳港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



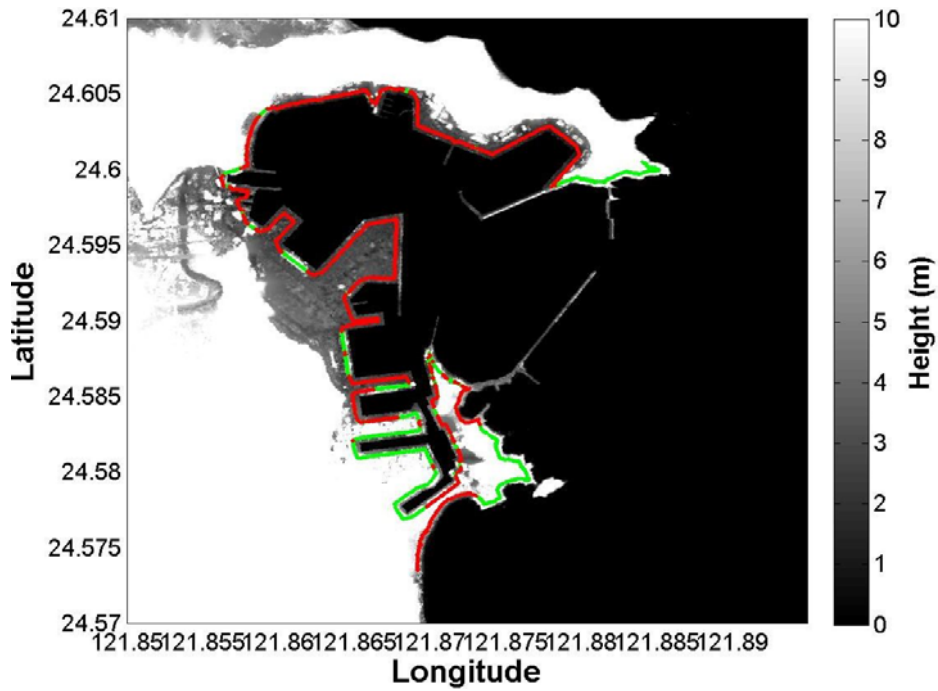


(d) 蘇澳港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈

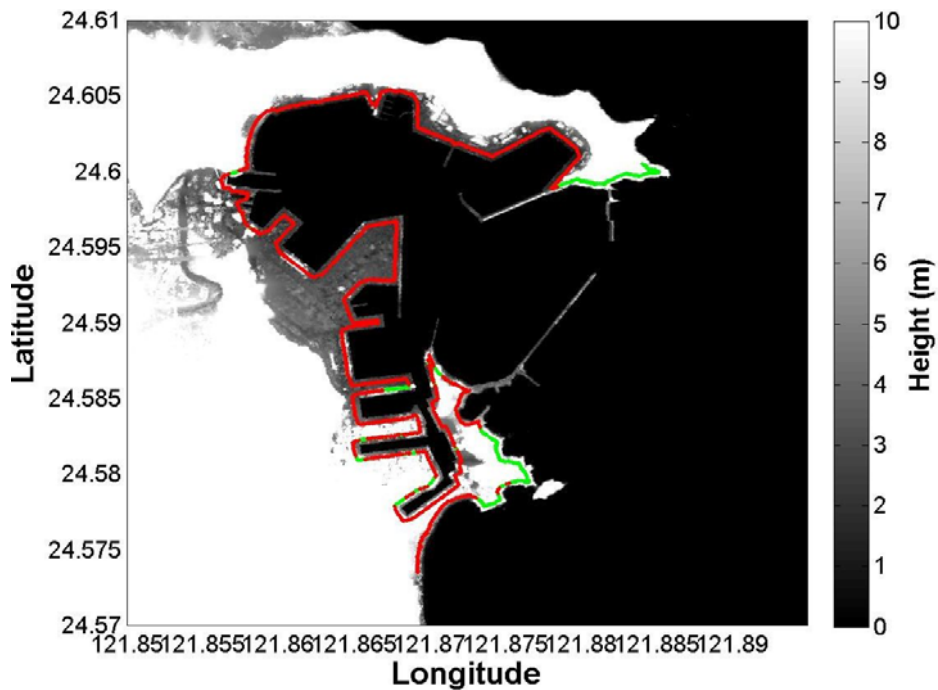


(e) 蘇澳港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈





(f) 蘇澳港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈



(g) 蘇澳港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.15 蘇澳港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

表 5.3 蘇澳港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	蘇澳港		
	離海 50 米的岸線點數	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
入射波波高(m)	2780		
0.5		0	0.00%
1		11	0.40%
2		346	12.45%
3		1174	42.23%
4		1503	54.06%
6		1780	64.03%
10		2289	82.34%

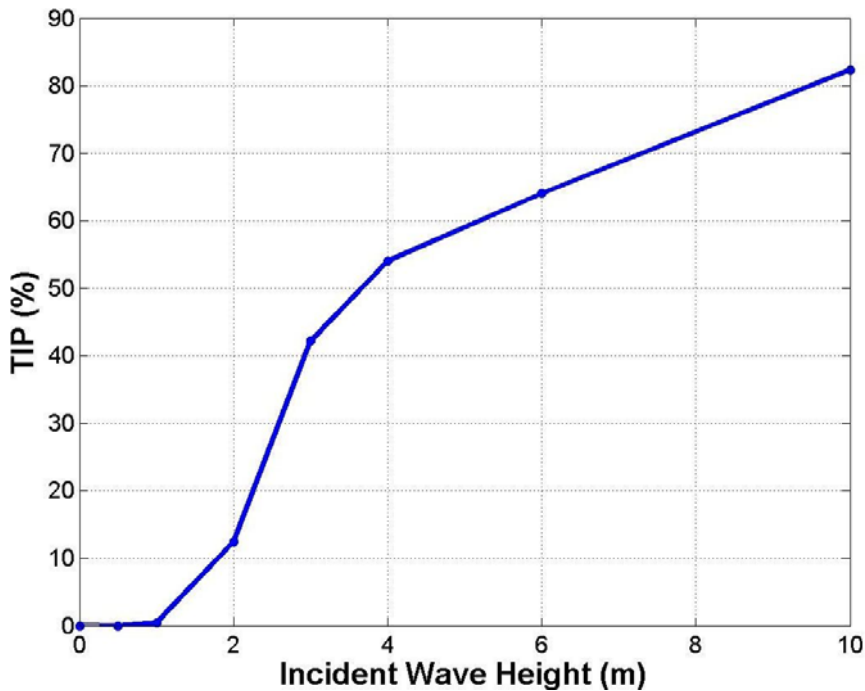


圖 5.16 蘇澳港各入射波高下對應之溢淹機率圖

蘇澳港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.17；蘇澳港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值未超過 7 公分；在地震矩規模 8.0 以上則最大波高可達 1.2 公尺；地震矩規模為 8.5 以上時，最大波高值超過 3 公尺；而分析結果顯示馬里亞納海溝、琉球海溝及伊豆小笠原海溝對蘇澳港口產生較大之外海波高，另亞普海溝及馬尼拉海溝地震矩規模 9.0 時亦對蘇澳港口產生較大之外海波高。

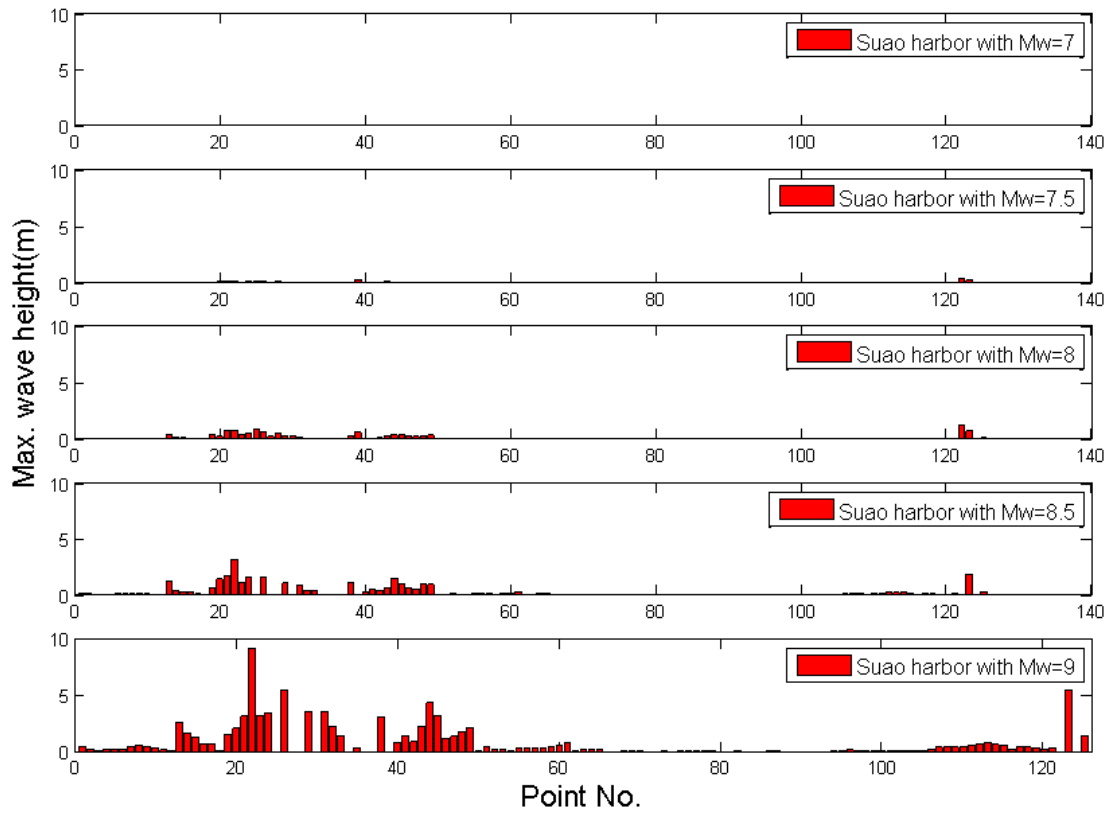


圖 5.17 蘇澳港在各種地震矩規模下之最大波高分佈

根據表 5.3 之計算結果，可以以內插方式計算本計算假設地震矩規模下及斷層參數所產生之最大波高對應之溢淹機率，其分佈如圖 5.18 所示。是否造成溢淹仍然要視外海波高及現地高程而定，由計算結果顯示，即使在地震矩規模超過 8.0 之情況下，造成溢淹範圍及機率相當高。

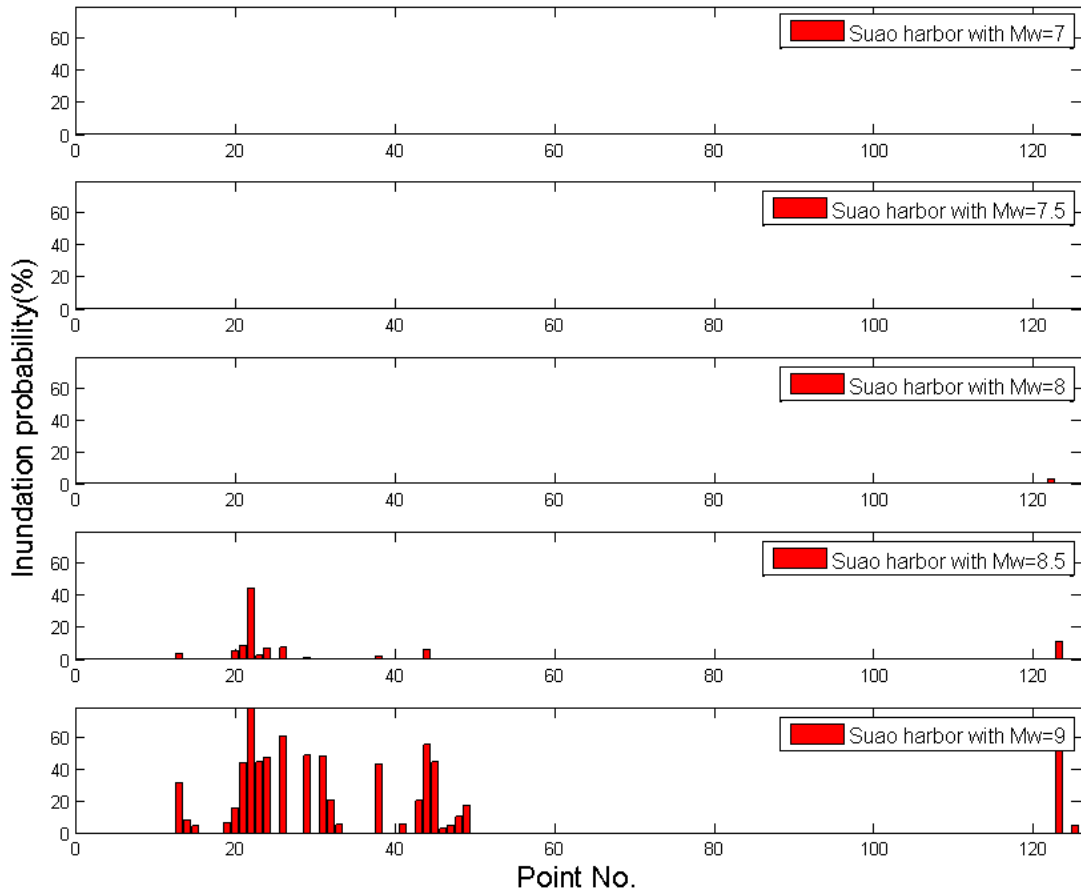


圖 5.18 蘇澳港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

而利用 5.2.1 小節的歷史地震資料資料庫其地震解平均計算出之地震參數，將地震參數依附錄三設定為震央位址 142.27 度，北緯 11.35 度(編號第 22 號點位)，利用此假設之參數計算出預測值，蘇澳港預測最大波高水位為 1.6 公尺。(圖 5.19、圖 5.20)

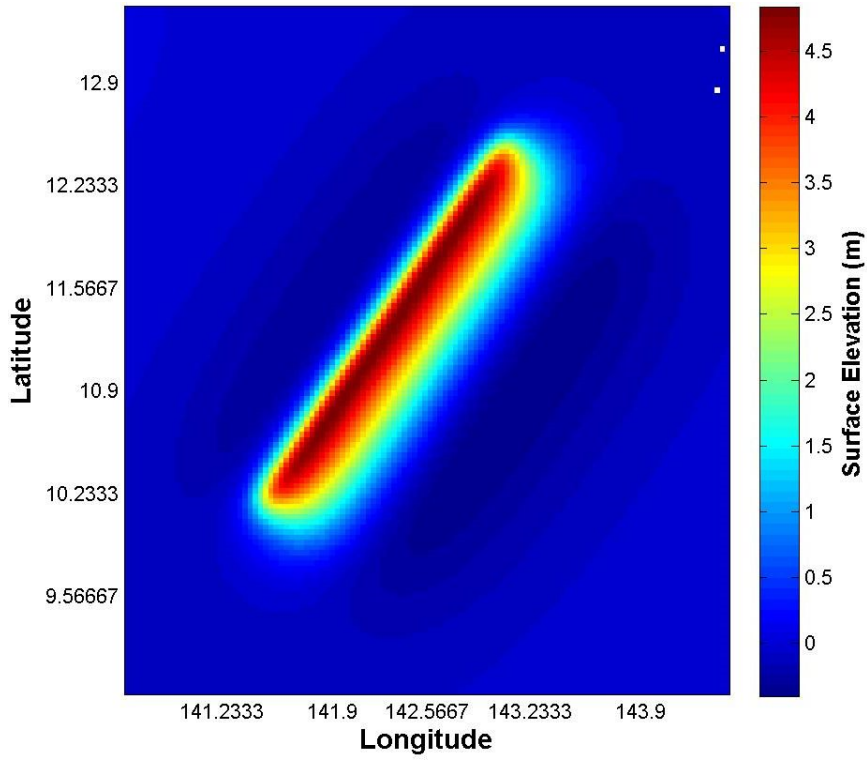


圖 5.19 馬里亞納海溝假設之地震參數後的初始水位

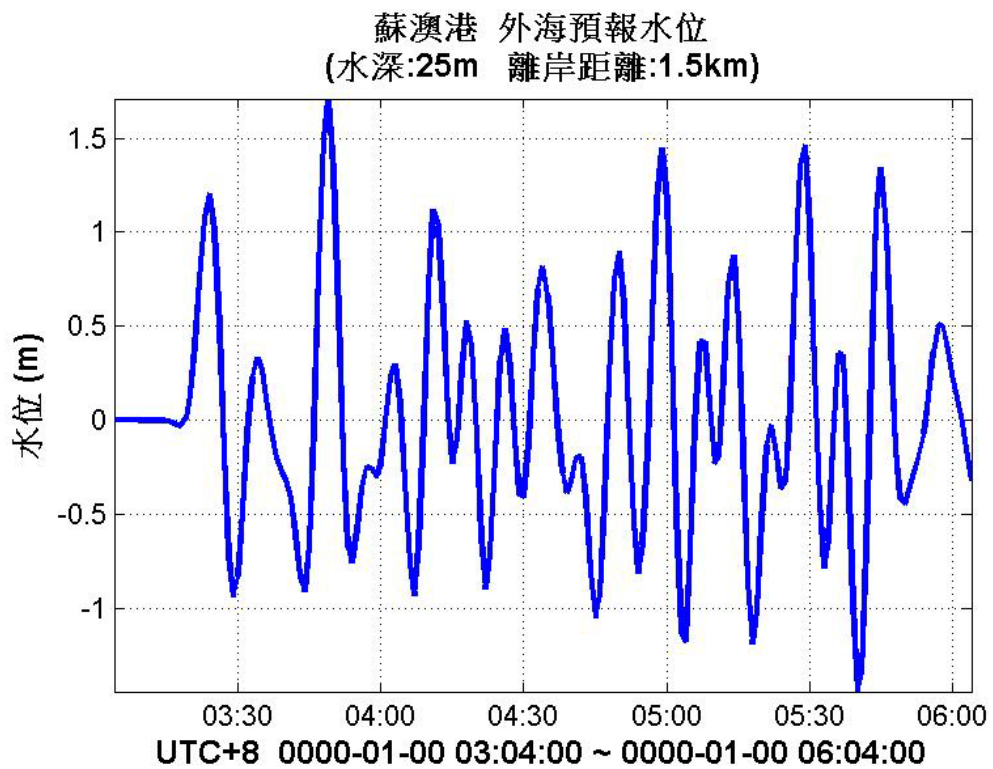


圖 5.20 蘇澳港外海的預報水位

#### 5.3.4.1 不同週期與入射波與溢淹機率

週期對於溢淹結果之影響已顯示於先前之成果報告中(陳等 2011); 在此節錄其內容以說明週期之影響。以臺北港為例，分別使用 10、20、30、40 分鐘週期之外海 2 公尺波高入射波，垂直入射臺北港比較不同週期之溢淹機率結果，分別計算結果為下表 5.4。一般常見海嘯波波長為 10 分鐘到 30 分鐘，但也可能長達 1 小時，從模擬的結果觀察 4 種週期的溢淹機率，由表 5.4 比較，其週期越長其溢淹機率有減小的趨勢，而原因為入射波與反射波互相影響關係，但差異度不大，目前所計算之溢淹機率使用 20 分鐘做為溢淹模擬之條件。圖 5.21 為分別計算臺北港在 2 公尺波高不同週期入射波溢淹圖。於目前的研究中，在固定週期的條件下，不同波形中以高斯波產生之溯上結果較為嚴重。

表 5.4 不同週期波高 2 公尺溢淹臺北港之溢淹機率

週期	10 分鐘	20 分鐘	30 分鐘	40 分鐘
溢淹機率	43.5%	43.05%	42.49%	40.4%

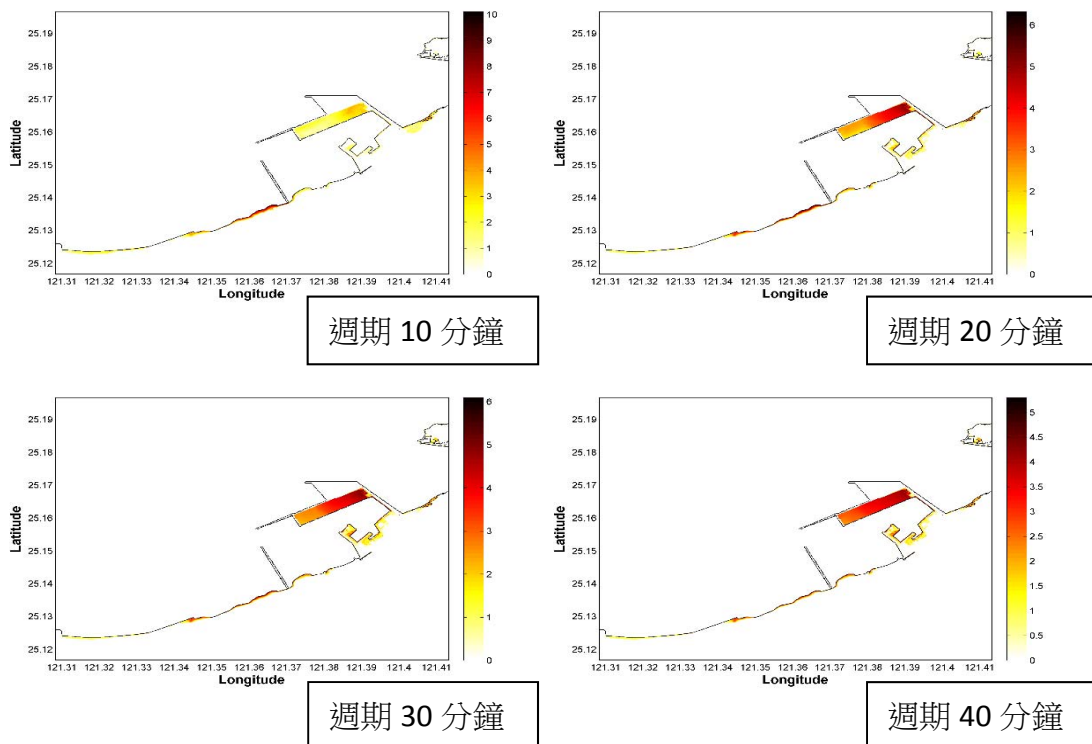


圖 5.21 臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果

### 5.3.5 海嘯地震且溢淹之機率

完成海嘯地震發生次數期望值之評估(圖 5.22(a)、(b))、海嘯對蘇澳港產生之水位變化及使用模式模擬不同程度波高溢淹各鄉鎮之狀況並定義溢淹機率後，最後將五個規模(7、7.5、8、8.5、9)海嘯地震次數期望值，乘上淺層海源地震機率及五個規模發生海嘯產生之溢淹機率，加總各分量即得蘇澳港未來 50 年及 100 年發生海嘯且溢淹之機率，如圖 5.23(a)、(b)；其統計上之意義即是「某個特定點位面對所有潛勢震源點在未來 50 年及 100 年間發生超過地震矩規模 7 之海嘯且溢淹之或然率」。評估結果為蘇澳港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.24%，100 年為 0.47%。本研究並結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖，圖 5.24。

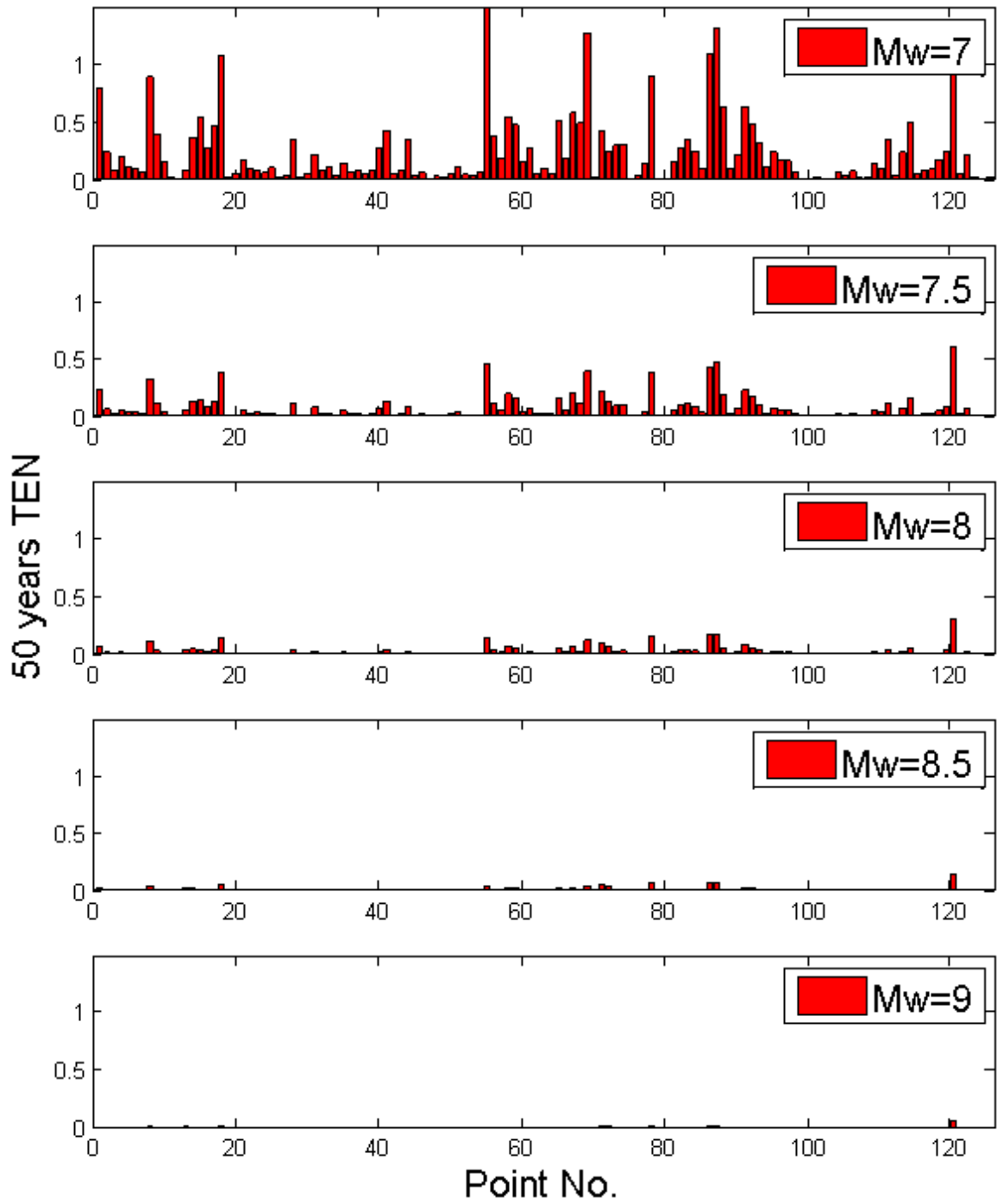


圖 5.22(a) 50 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)



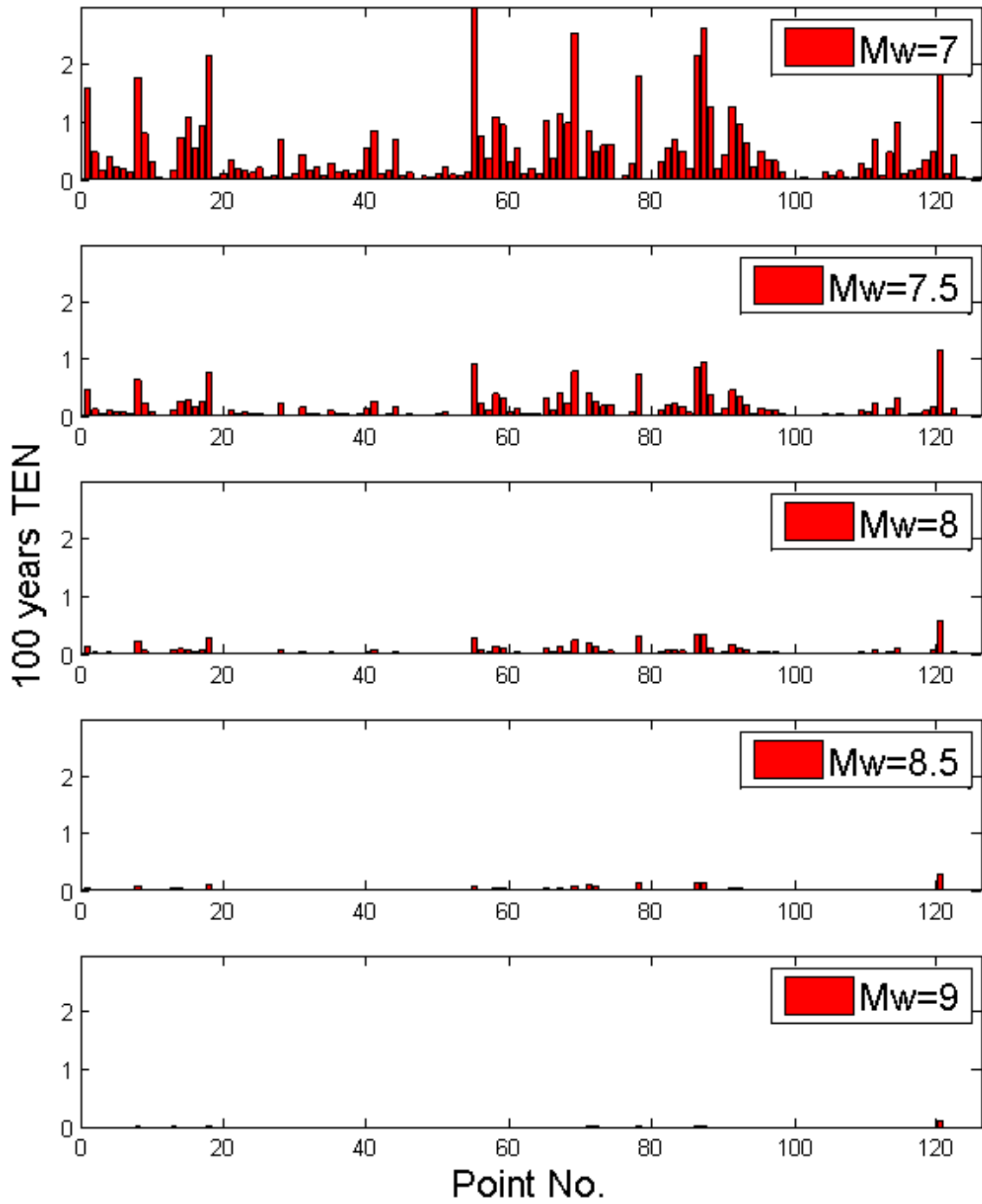


圖 5.22(b) 100 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

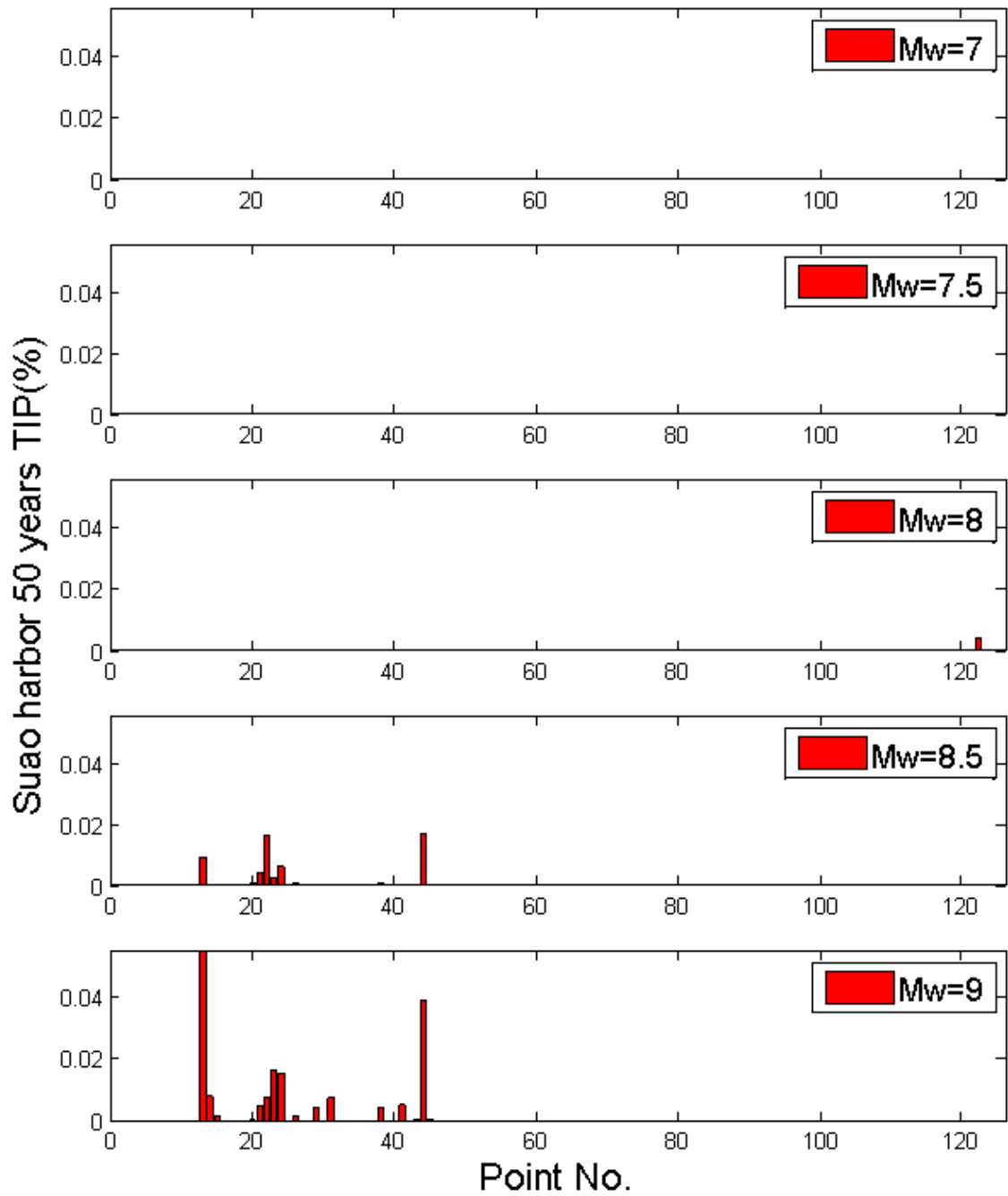


圖 5.23(a) 蘇澳港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

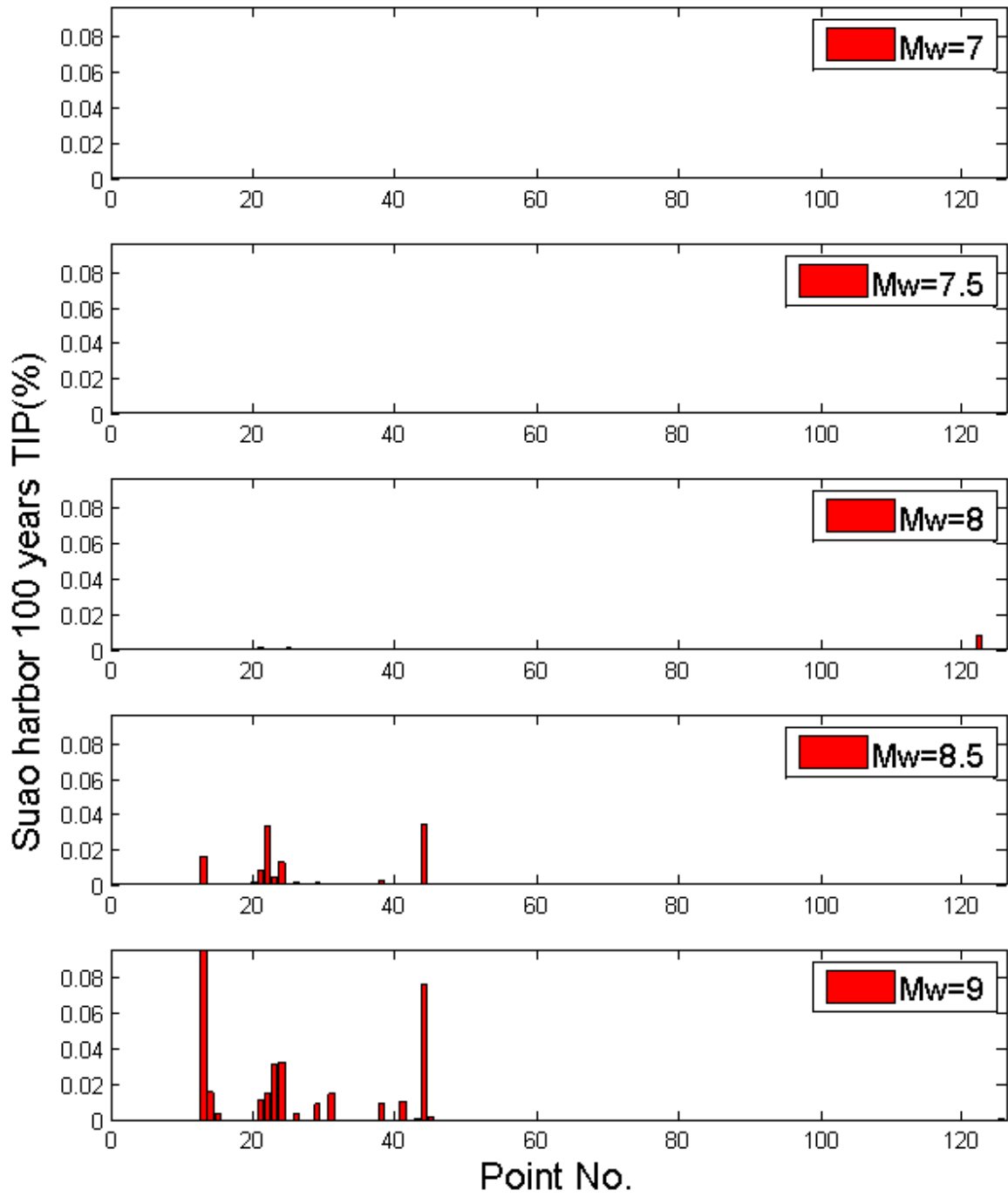
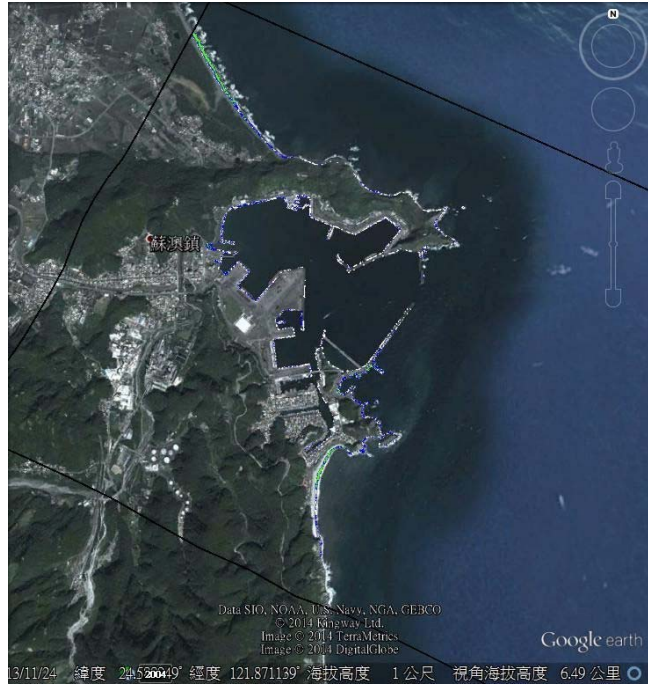
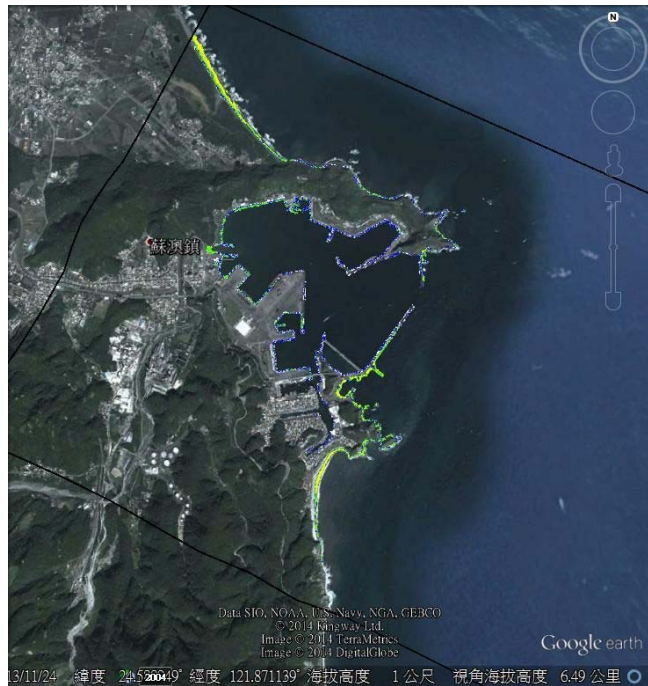


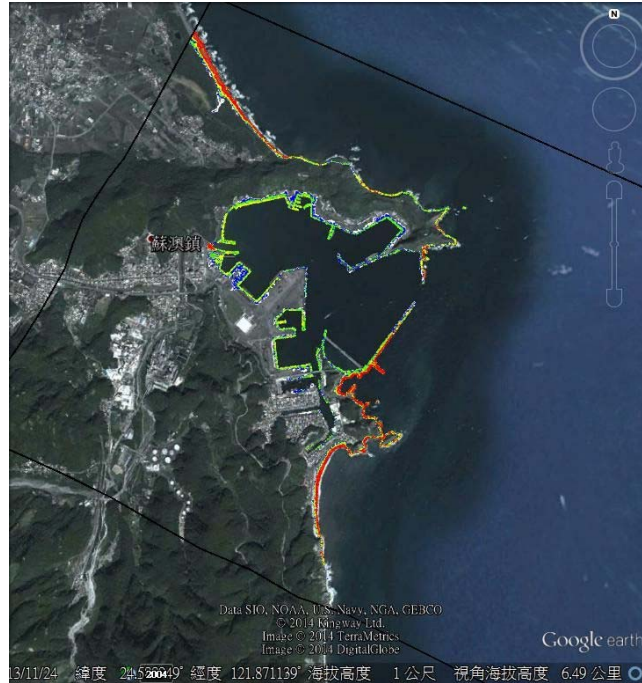
圖 5.23(b) 蘇澳港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)



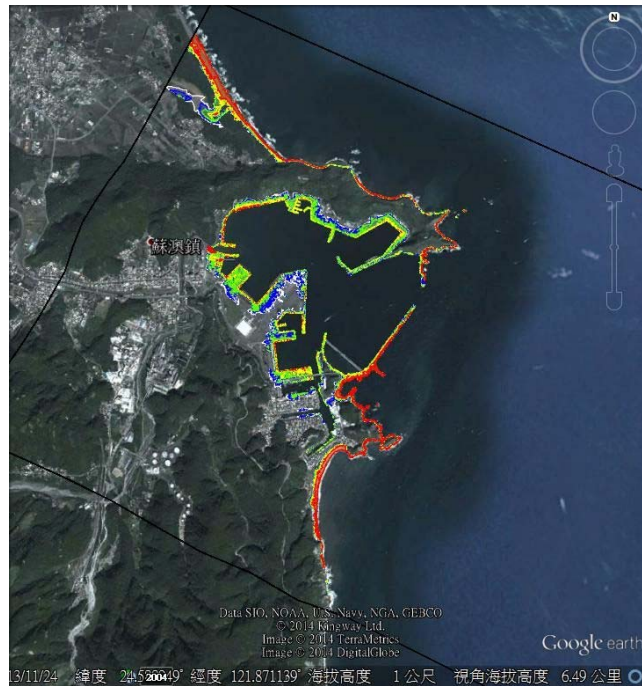
(a) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 0.5 公尺



(b) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 1 公尺



(c) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 2 公尺



(d) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 3 公尺





(e) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 4 公尺



(f) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 6 公尺



(g) 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 10 公尺

圖 5.24 蘇澳港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

## 5.4 花蓮港之溢淹模擬

### 5.4.1 數值地形

圖 5.25 為蘇澳港之陸域數值地形及港研中心所提供之港內實測地形資料。由於兩者解析度不同，在無其他較為精細海底地形之來源時，將海域地形以內插之方式製作成與陸域地形資料相同解析度之數值地形。圖 5.26 為海陸域整合後內插海科中心超過 80m 水深之數值地形檔，圖 5.27 為整合後帶入模式之數值地形。

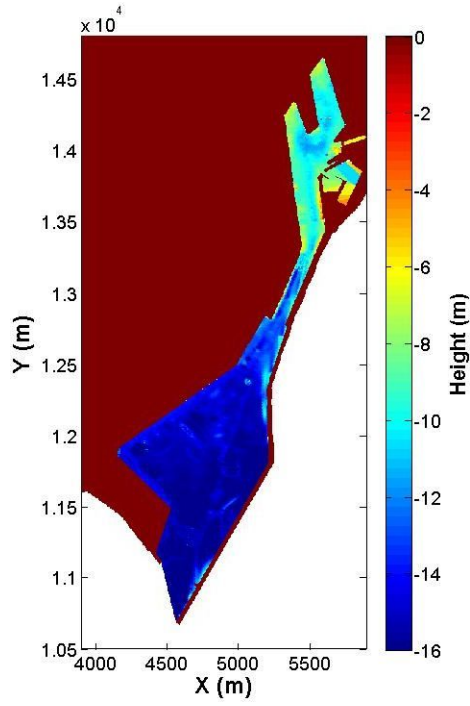


圖 5.25 花蓮港 5m 解析度數值地形檔

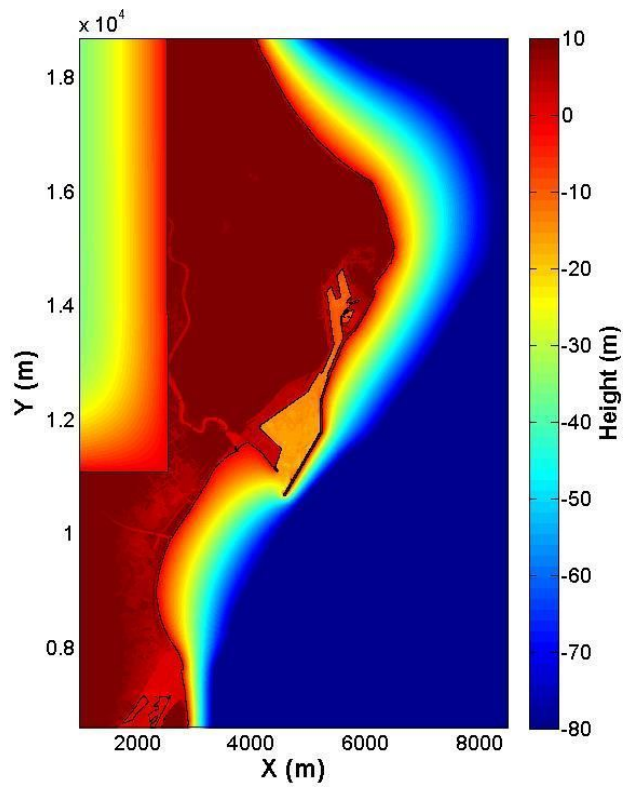


圖 5.26 花蓮港整合海陸域後之數值地形檔



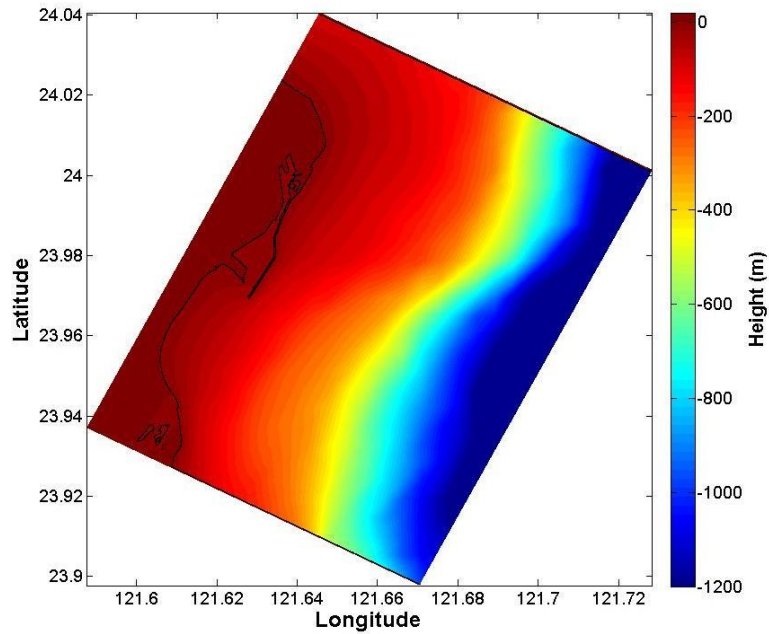
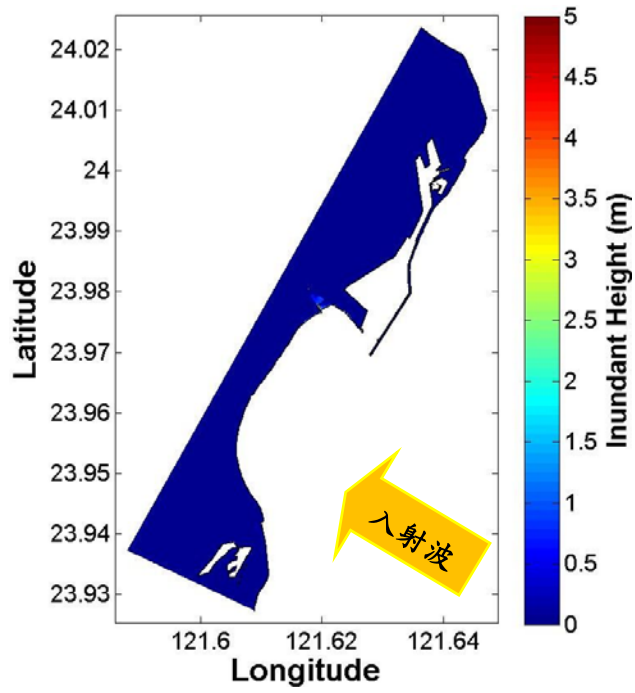


圖 5.27 花蓮港整併港內實際地形帶入模式之數值地形檔

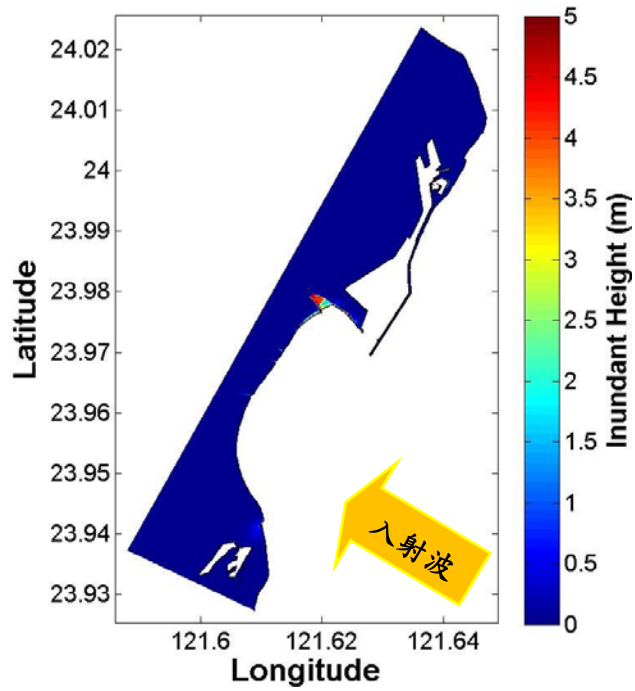
#### 5.4.2 花蓮港之模擬結果

同 5.3.2 小節使用 COMCOT 溢淹模式，以不同波高之高斯波模擬海嘯波垂直岸線入射(0.5m、1m、2m、3m、4m、6m、10m)；模擬此情境下陸地之溢淹狀況。而計劃中所設定之海嘯潛勢波源區為整個環太平洋地震帶。

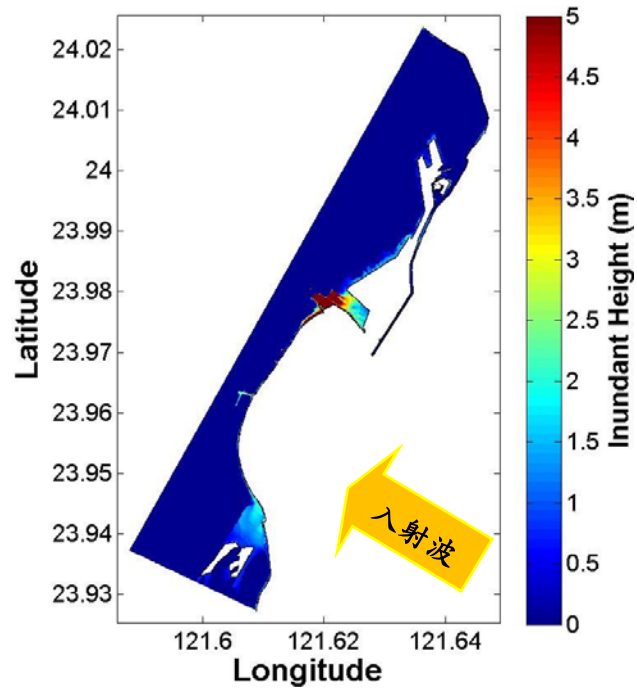
圖 5.28(a)~(g)為花蓮港在各種不同入射波高下之溢淹圖。在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 3 公尺以下，溢淹範圍侷限於內港區之下方，溢淹高程約為 1.5 公尺以下。3 公尺以上之波高時，溢淹範圍會逐漸向內陸擴大，在內港區上下之溢淹高程也會提高至 8 公尺左右(入射波高為 6 公尺以上時)。



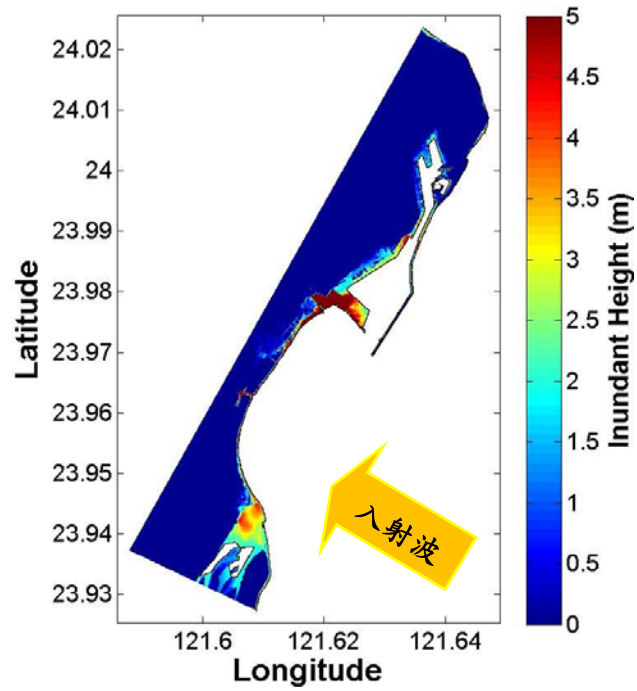
(a) 花蓮港入射波高為 0.5 公尺之溢淹圖



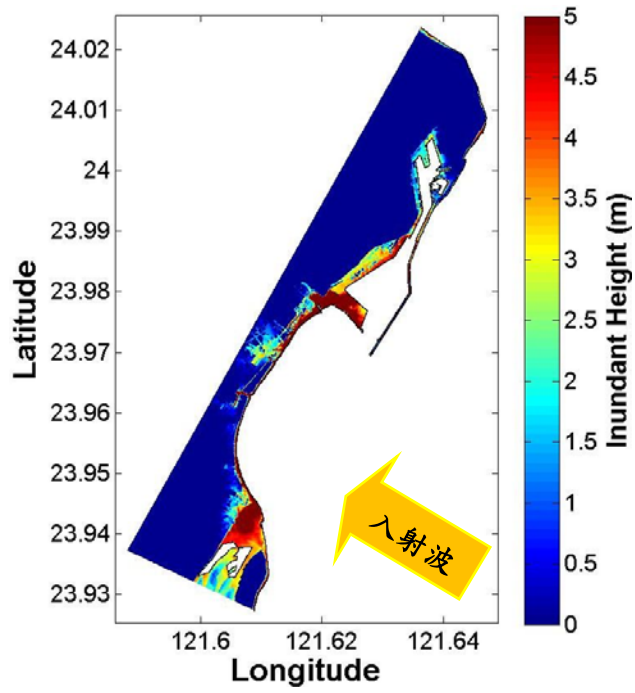
(b) 花蓮港入射波高為 1 公尺之溢淹圖



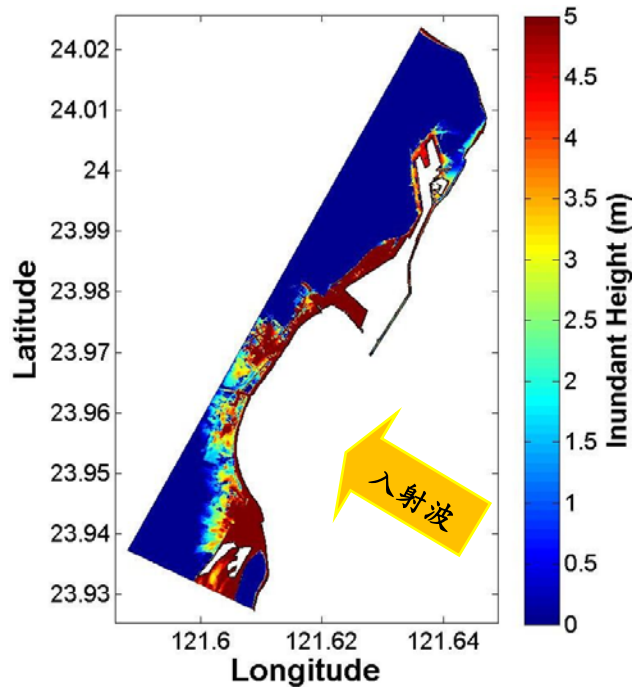
(c) 花蓮港入射波高為 2 公尺之溢淹圖



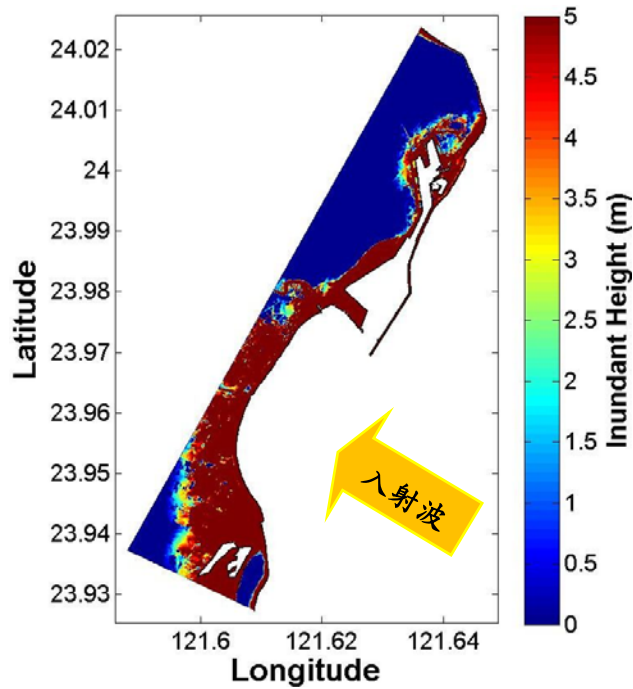
(d) 花蓮港入射波高為 3 公尺之溢淹圖



(e) 花蓮港入射波高為 4 公尺時之溢淹圖



(f) 花蓮港入射波高為 6 公尺時之溢淹圖

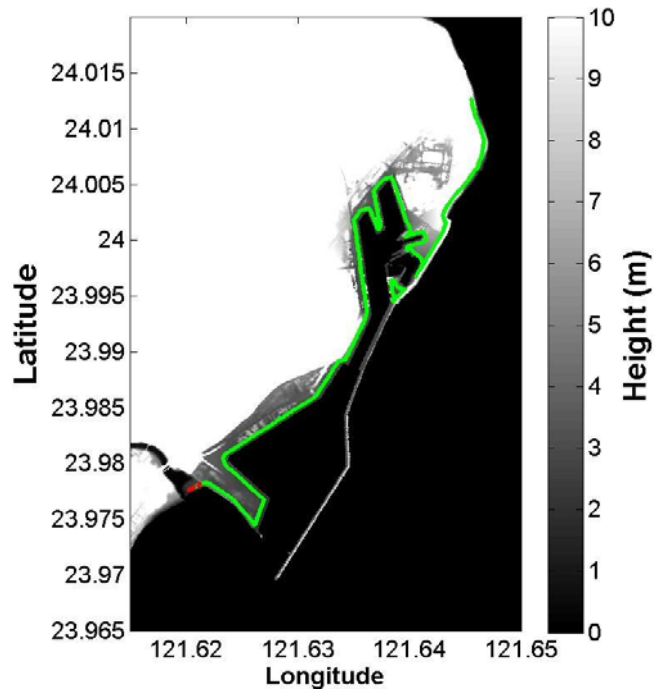


(g) 花蓮港入射波高為 10 公尺時之溢淹圖

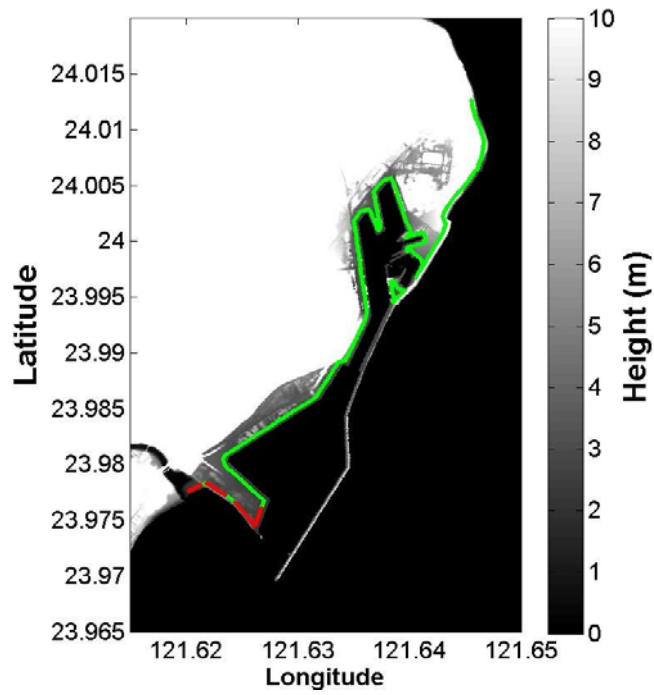
圖 5.28 花蓮港之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

#### 5.4.3 花蓮港之溢淹點位分佈及機率

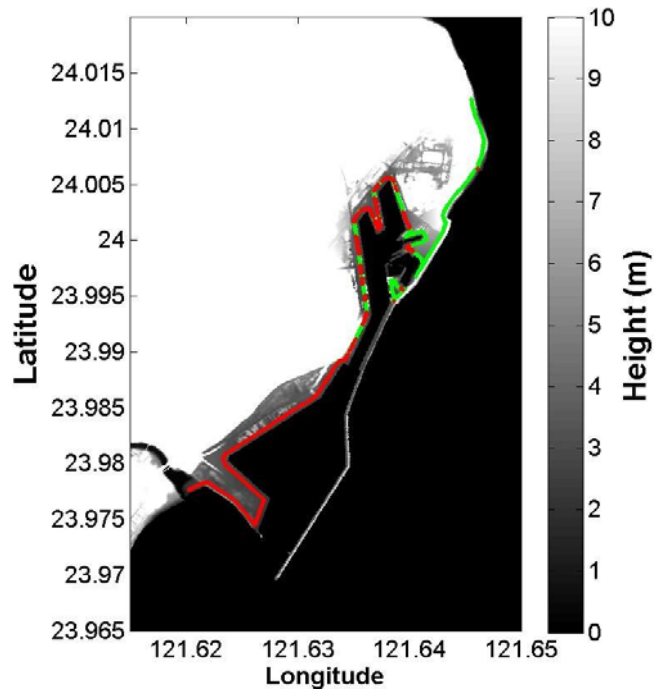
圖 5.29 為花蓮港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位，綠色點位為表示離岸 50 公尺但高程未達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.5 及圖 5.30，入射波高只要大於 2 公尺就會有 50%以上的溢淹機率。



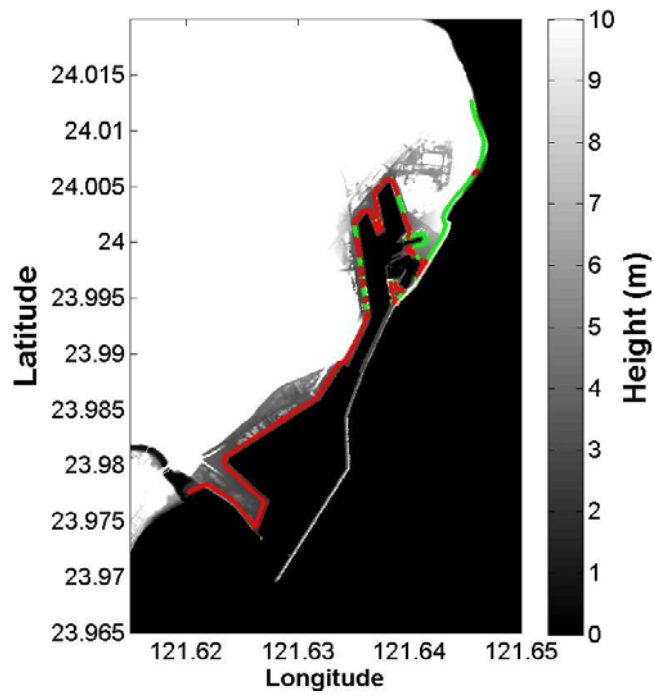
(a) 花蓮港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



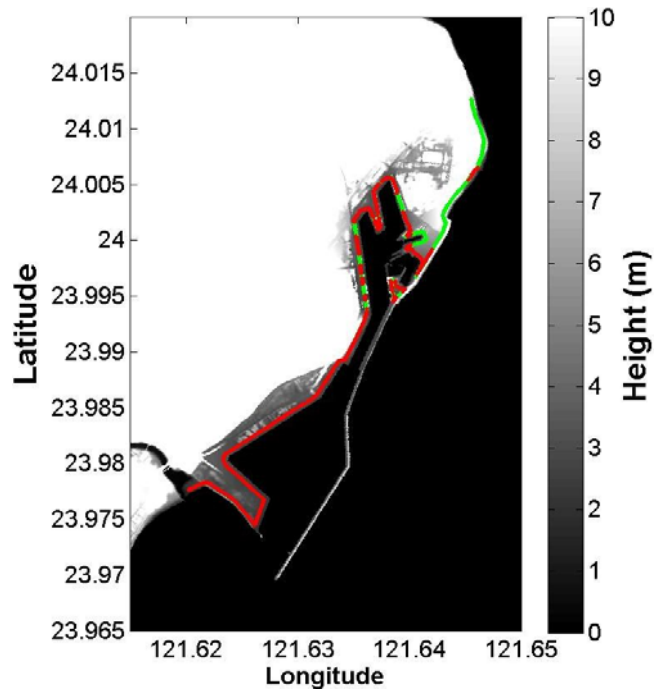
(b) 花蓮港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



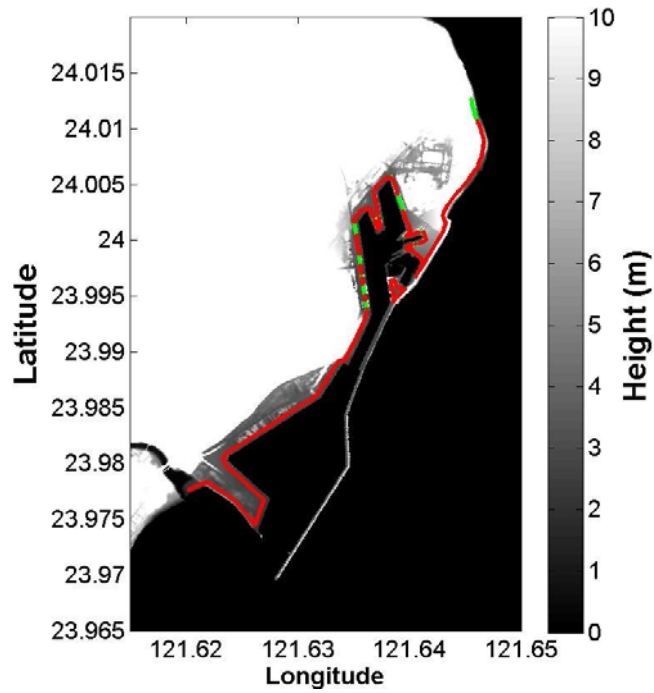
(c) 花蓮港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



(d) 花蓮港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈

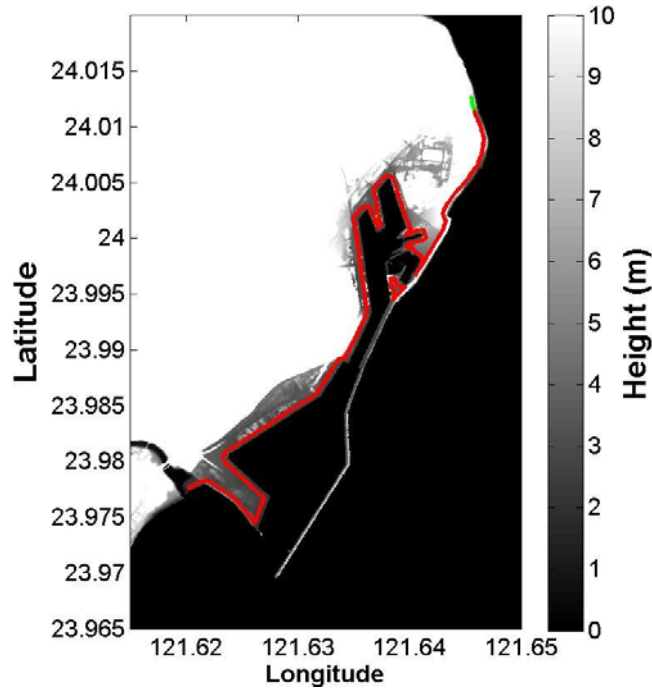


(e) 花蓮港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈



(f) 花蓮港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈





(g) 花蓮港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.29 花蓮港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

表 5.5 花蓮港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	花蓮港		
入射波波高(m)	離海 50 米的岸線點數	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
0.5	1681	15	0.89%
1		158	9.40%
2		915	54.43%
3		1086	64.60%
4		1162	69.13%
6		1509	89.77%
10		1645	97.86%

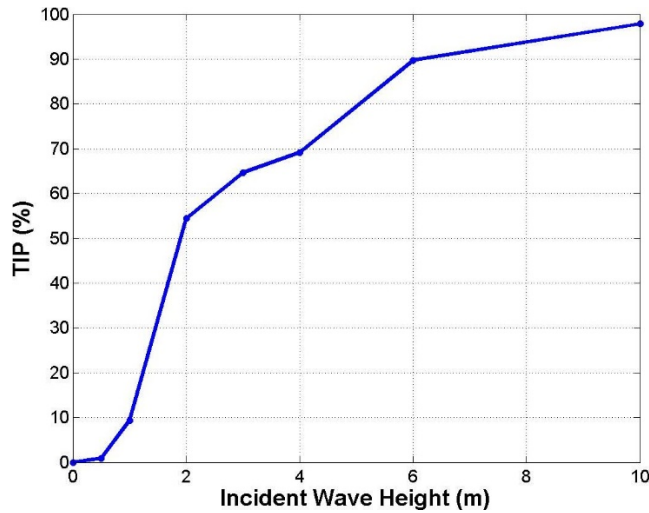


圖 5.30 花蓮港各入射波高下對應之溢淹機率圖

花蓮港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.31；花蓮港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值未超過 0.07 公尺；在地震矩規模 8.0 時則最大波高可達 0.64 公尺；地震矩規模為 8.5 時，最大波高可達 2 公尺；地震矩規模為 9.0 時，最大波高值超過 6 公尺；而分析結果顯示馬里亞納海溝、琉球海溝及伊豆小笠原海溝對花蓮港口產生較大之外海波高，另亞普海溝及馬尼拉海溝地震矩規模 9.0 時亦對花蓮港口產生較大之外海波高。

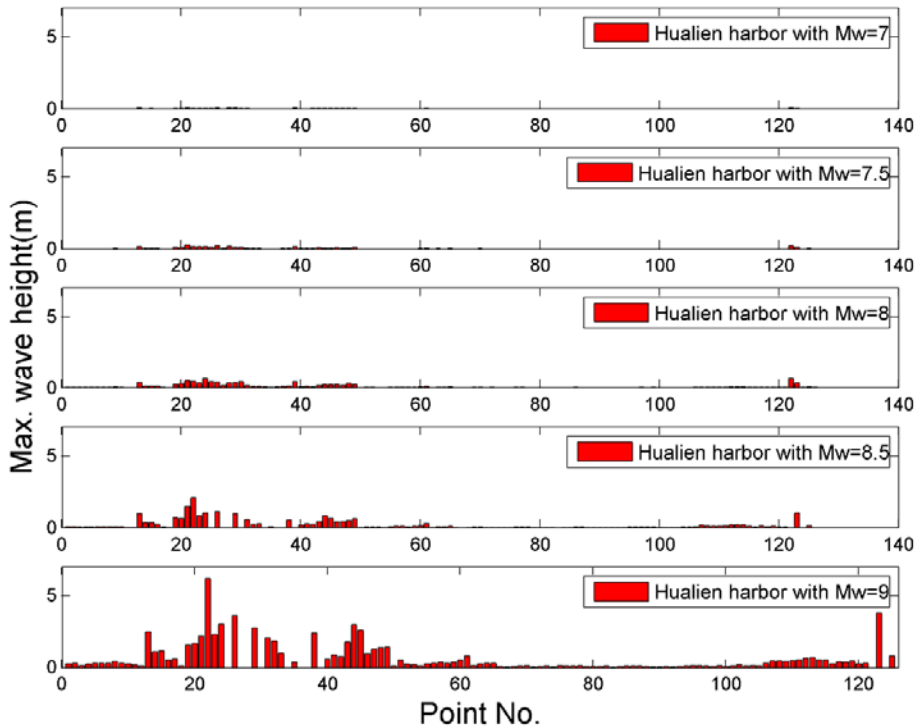


圖 5.31 花蓮港在各種地震矩規模下之最大波高分佈

根據表 5.5 之計算結果，可以以內插方式計算本計算假設地震矩規模下及斷層參數所產生之最大波高對應之溢淹機率，其分佈如圖 5.32 所示。是否造成溢淹仍然要視外海波高及現地高程而定，由計算結果顯示，即使在地震矩規模超過 8.0 之情況下，造成溢淹範圍及機率相當高。

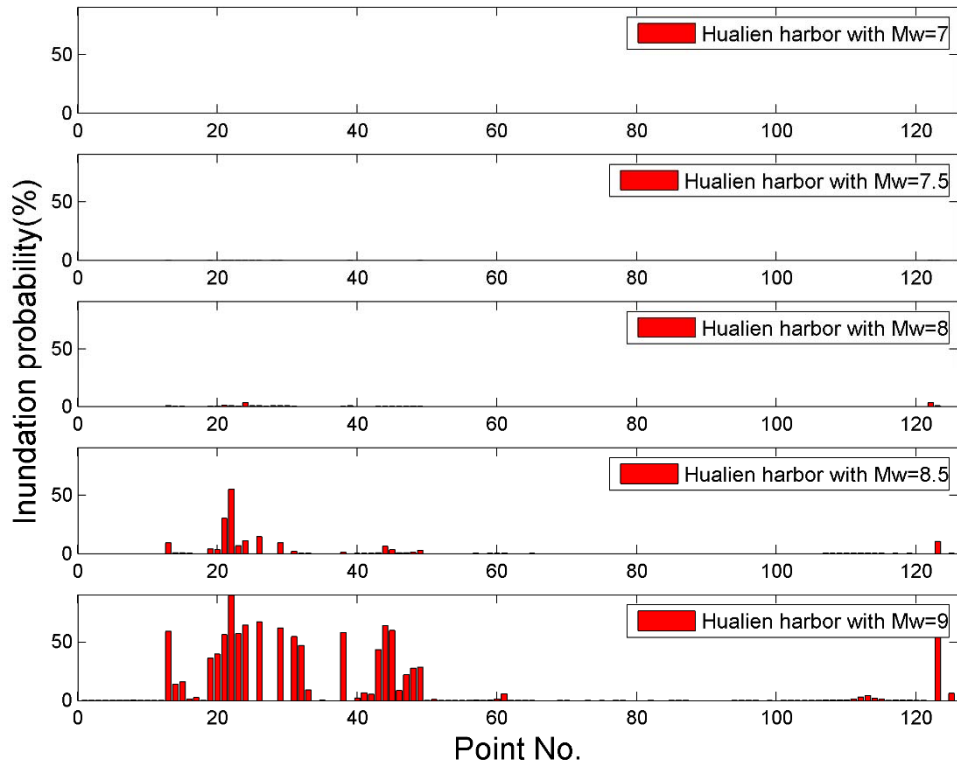


圖 5.32 花蓮港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

而利用 5.2.1 小節的歷史地震資料資料庫其地震解平均計算出之地震參數，將地震參數依附錄三設定為震央位址 142.27 度，北緯 11.35 度(編號第 22 號點位)，利用此假設之參數計算出預測值，花蓮港預測最大波高水位為 0.47 公尺。(圖 5.33、圖 5.34)

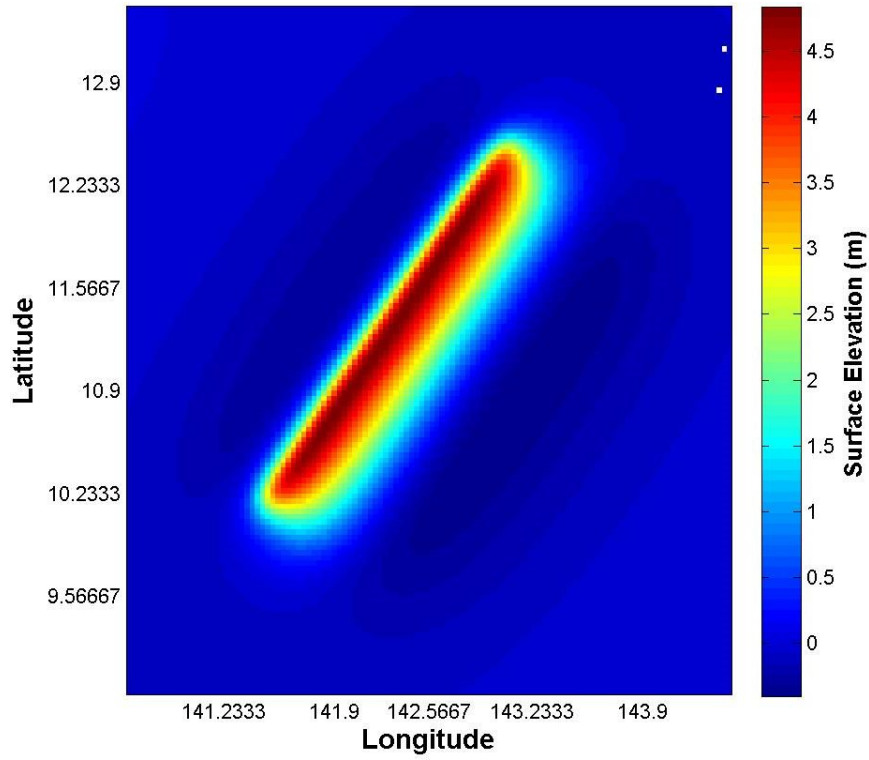


圖 5.33 馬里亞納海溝假設之地震參數後的初始水位

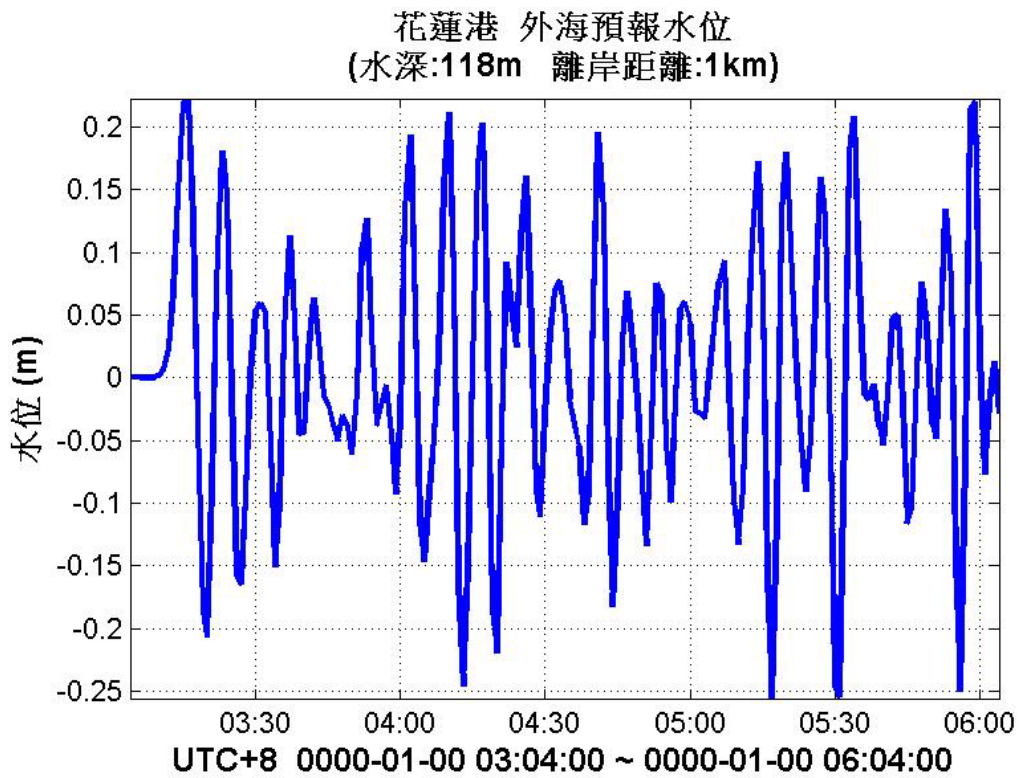


圖 5.34 花蓮港外海的預報水位

#### 5.4.4 海嘯地震且溢淹之機率

完成海嘯地震發生次數期望值之評估，如圖 5.35(a)、(b)、海嘯對花蓮港產生之水位變化及使用模式模擬不同程度波高溢淹各鄉鎮之狀況並定義溢淹機率後，最後將五個規模(7、7.5、8、8.5、9)海嘯地震次數期望值，乘上淺層海源地震機率及五個規模發生海嘯產生之溢淹機率，加總各分量即得花蓮港未來 50 年及 100 年發生海嘯且溢淹之機率，如圖 5.36(a)、(b)；其統計上之意義即是「某個特定点位面對所有潛勢震源點在未來 50 年及 100 年間發生超過地震矩規模 7 之海嘯且溢淹之或然率」。評估結果為花蓮港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.67%，100 年為 1.29%。以及結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖，圖 5.37。

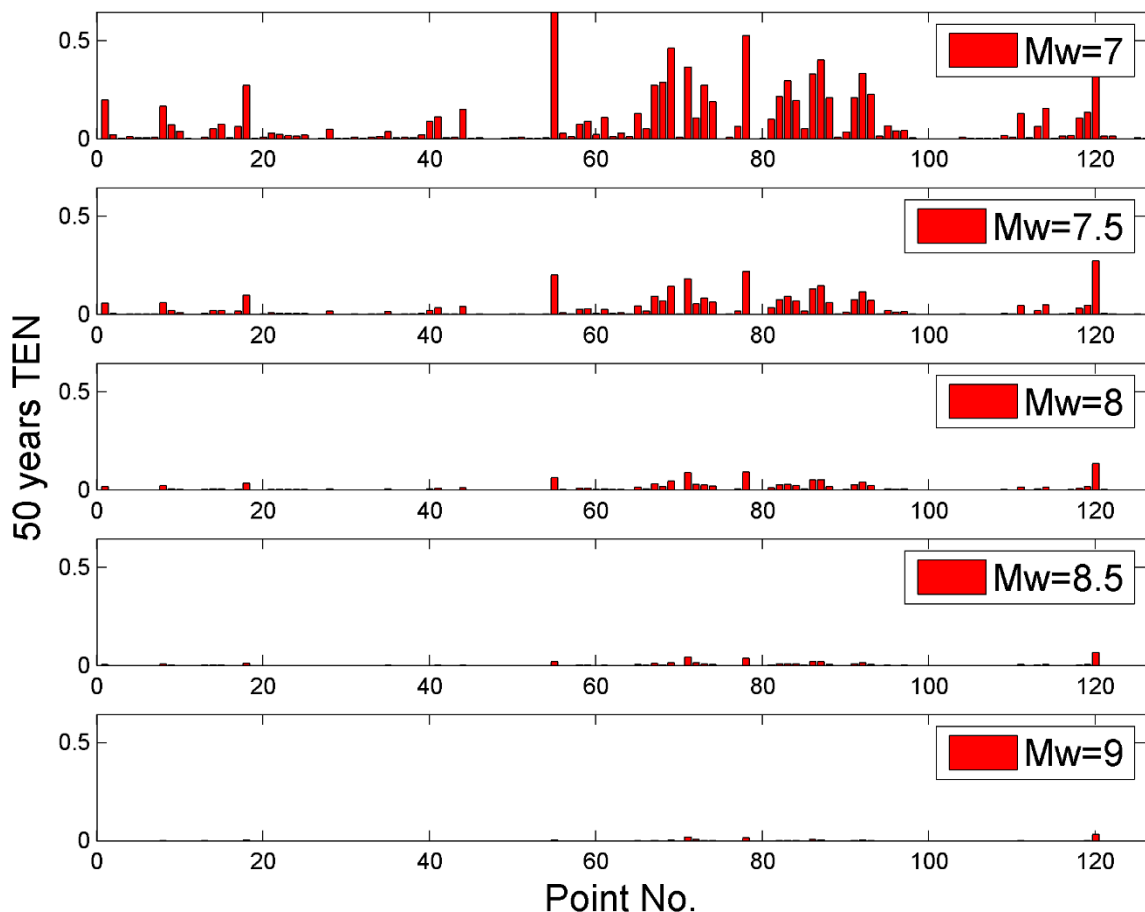


圖 5.35(a) 50 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

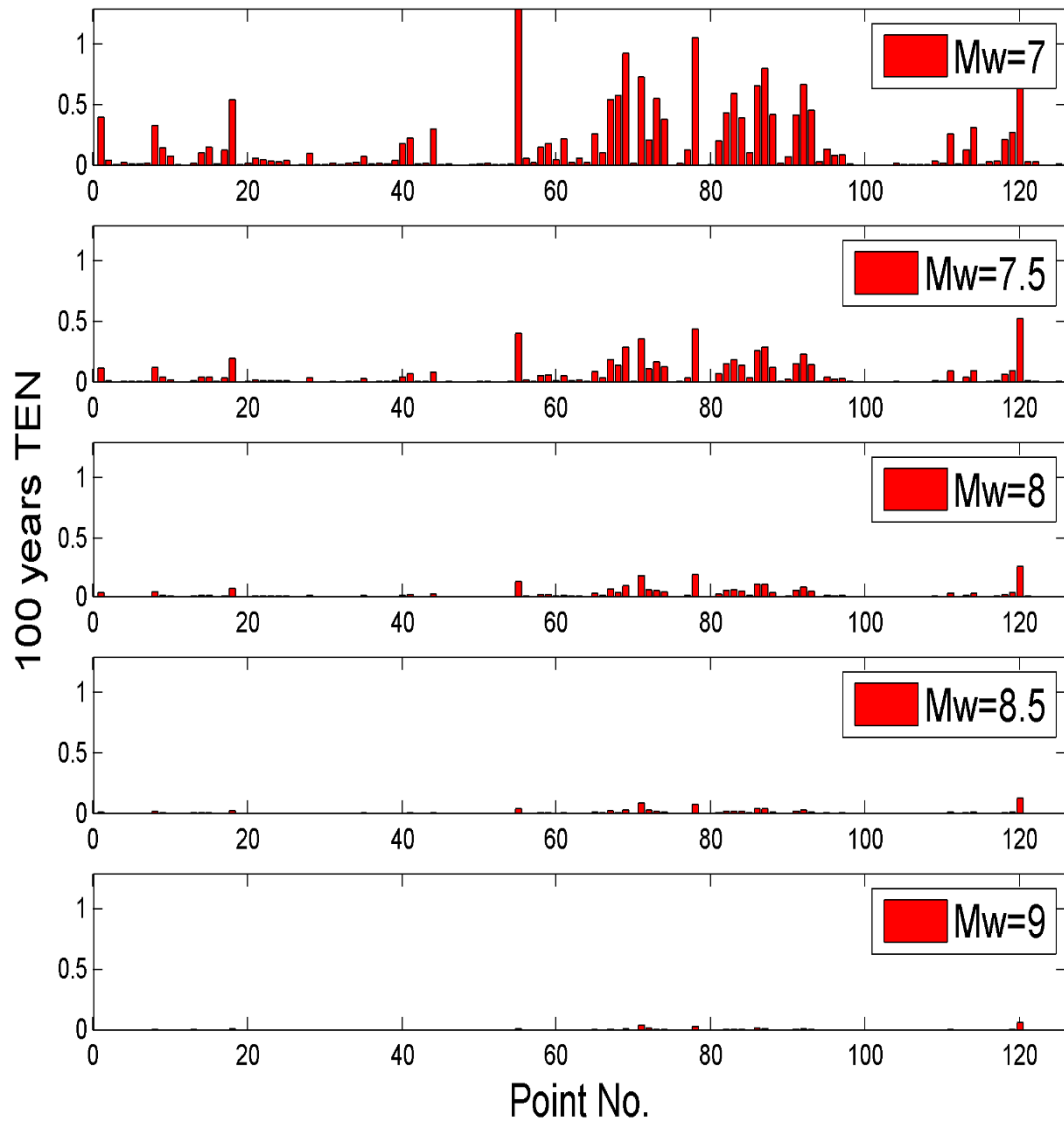


圖 5.35(b) 100 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

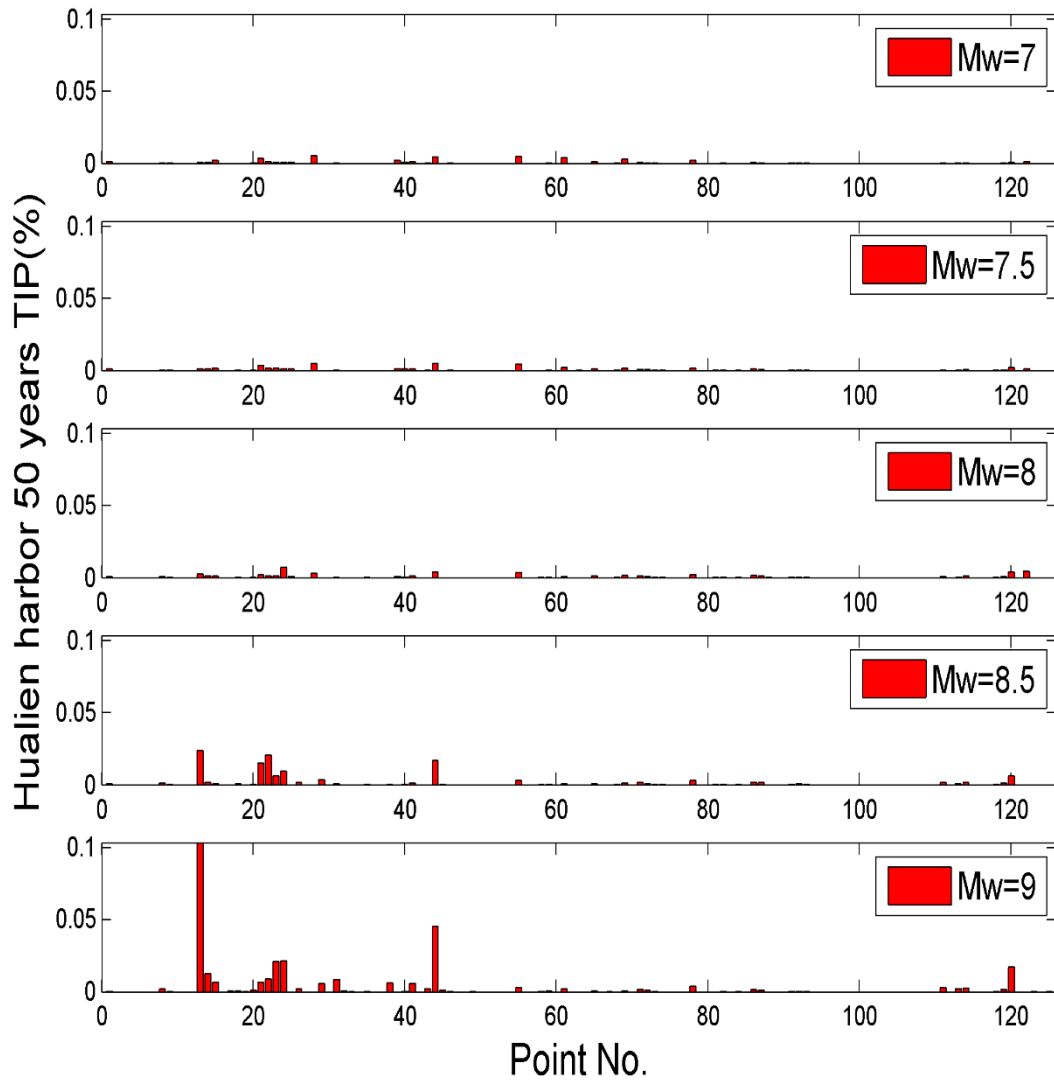


圖 5.36(a) 花蓮港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

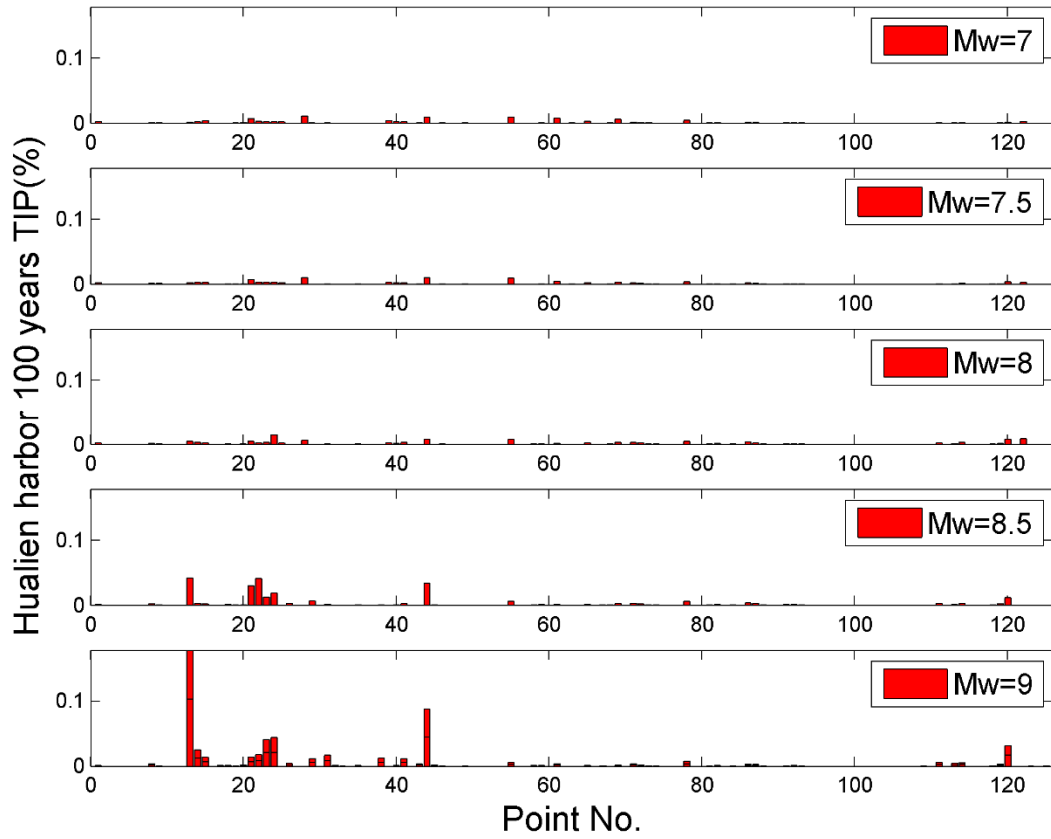
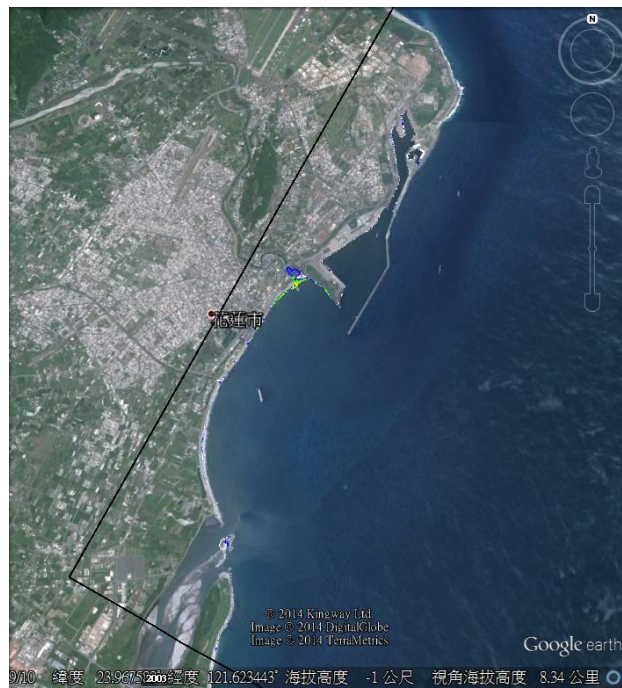
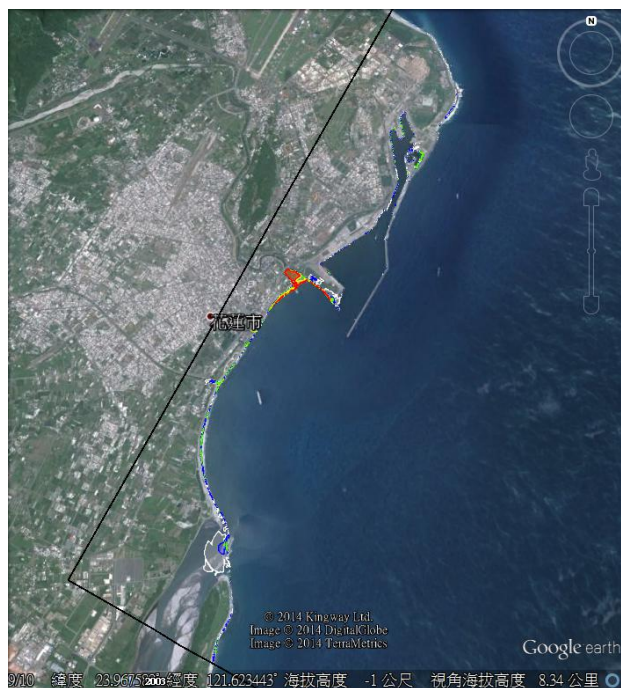


圖 5.36(b) 花蓮港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

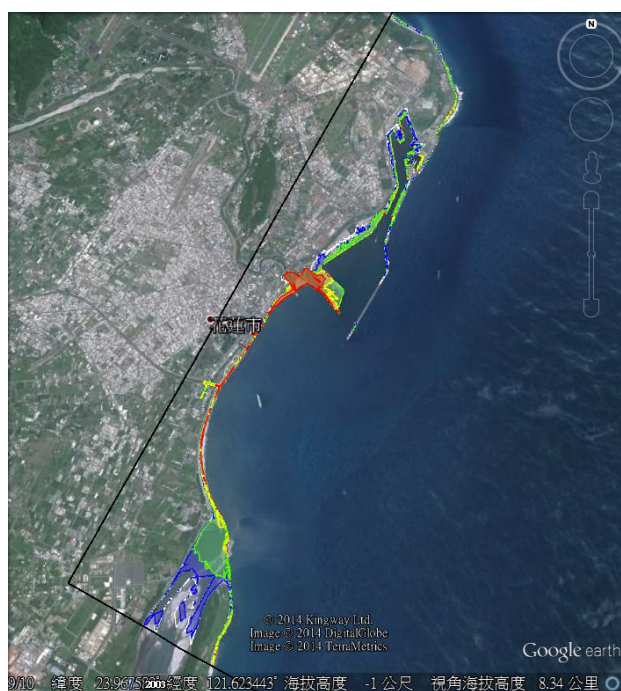


(a) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 0.5 公尺

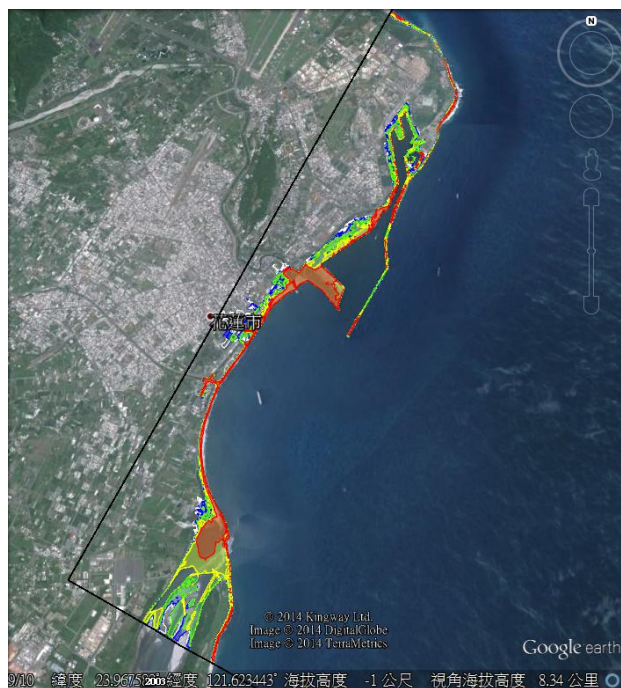




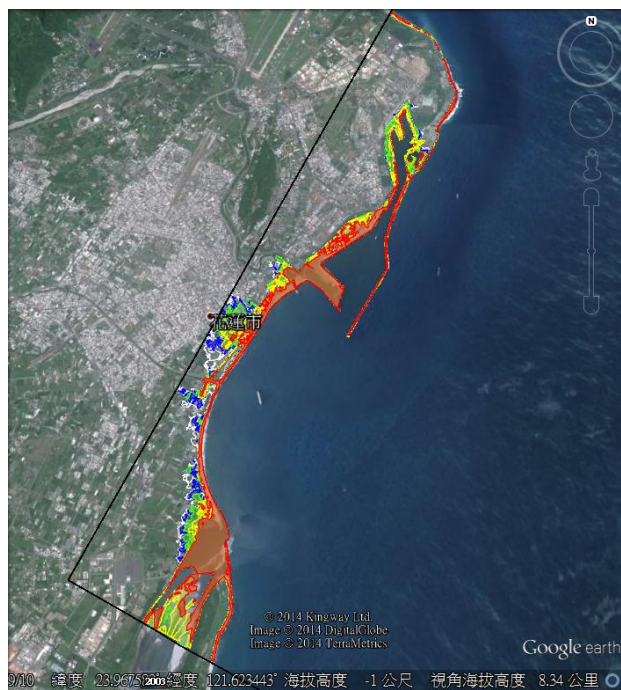
(b) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 1 公尺



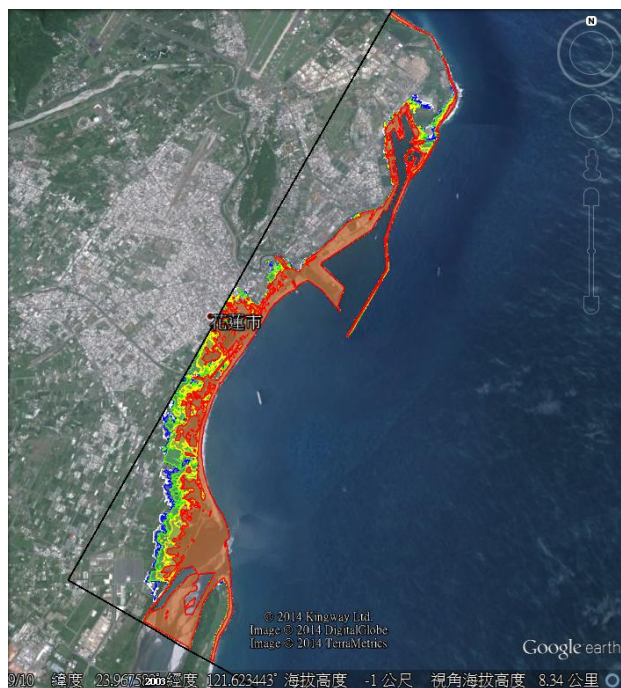
(c) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 2 公尺



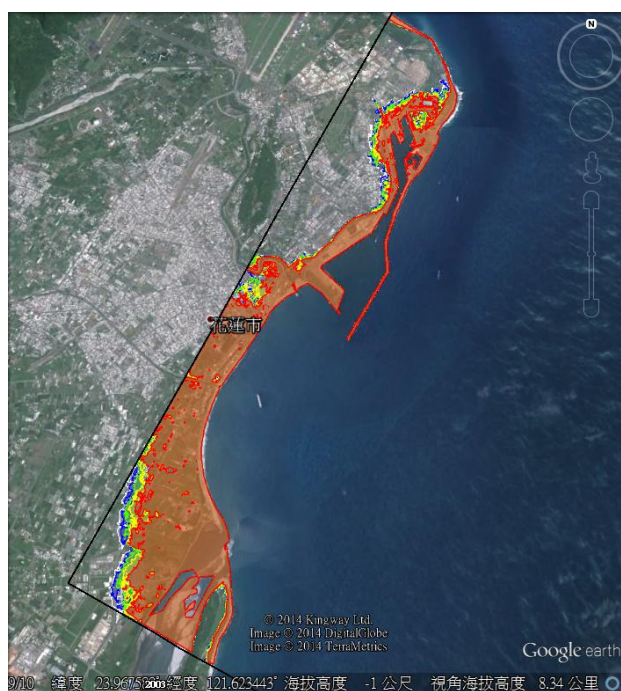
(d) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 3 公尺



(e) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 4 公尺



(f) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 6 公尺

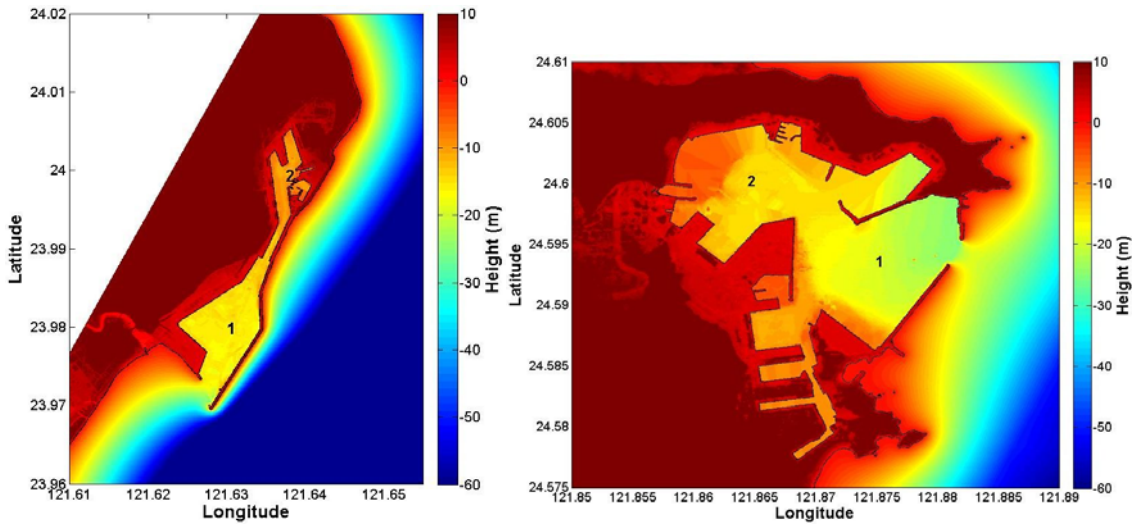


(g) 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 10 公尺

圖 5.37 花蓮港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

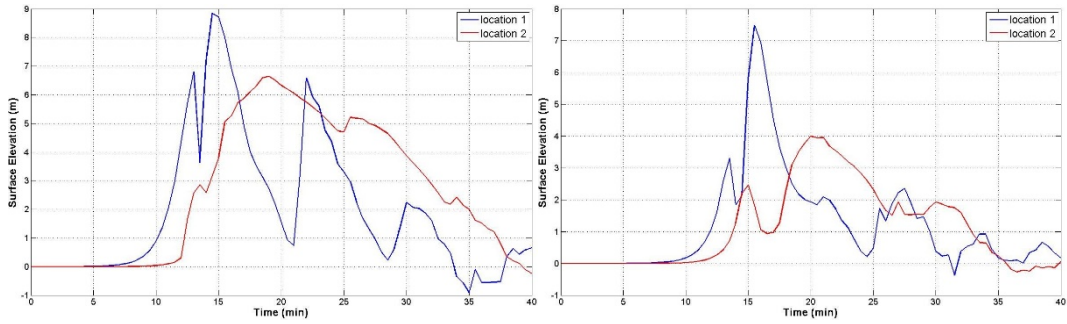


圖 5.38 為於花蓮港及蘇澳港中以入射波高 6 公尺之海嘯波水位時序圖。



(a) 花蓮港

(b) 蘇澳港



(a) 花蓮港

(b) 蘇澳港

圖 5.38 入射波高 6 公尺於港池中心之海嘯波水位時序圖

表 5.4 8 個主要商港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	臺北港		基隆港		臺中港		布袋港	
離海 50 米的岸線點數	2637		3829		10730		2422	
入射波波高 (m)	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
0.5	74	2.81%	9	0.24%	205	1.91%	14	0.58%
1	311	11.79%	64	1.67%	420	3.91%	20	0.83%
2	1133	42.97%	265	6.92%	2883	26.85%	415	17.13%
3	1845	69.97%	867	22.64%	2883	46.12%	415	24.32%
4	2165	82.10%	1416	36.98%	6377	59.39%	833	34.39%
6	2452	92.98%	2251	58.79%	8327	77.55%	1404	57.97%
10	2510	95.18%	3161	82.55%	10593	98.66%	2275	93.93%

地點	安平港		高雄港		花蓮港		蘇澳港	
離海 50 米的岸線點數	1725		4165		1681		2780	
入射波波高 (m)	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
0.5	447	25.91%	64	1.54%	15	0.89%	0	0.00%
1	1104	64.00%	192	4.61%	158	9.40%	11	0.40%
2	1477	85.62%	836	20.07%	915	54.43%	346	12.45%
3	1574	91.25%	2163	51.93%	1086	64.60%	1174	42.23%
4	1644	95.30%	3169	76.09%	1162	69.13%	1503	54.06%
6	1714	99.36%	3864	92.77%	1509	89.77%	1780	64.03%
10	1721	99.77%	3994	95.89%	1645	97.86%	2289	82.34%



## 第六章 海嘯對跨河橋梁之影響模擬分析

### 6.1 前言

海嘯與地震息息相關，但一般只有強烈之淺層地震方有引起海嘯之可能。根據中央氣象局所顯示的臺灣地區地震的歷史資料，其震央分佈如圖 2.8 所示。自 1900 年起至 2006 年，臺灣地區海底地震震央多半聚集於東部外海；陸地區域所產生最大地震為 1999 年集集大地震，規模 7.3；而海底地震則為 1910 與 1920 年分別發生在基隆外海與花蓮外海者，規模均為 8.3。臺灣西南部與南部海域雖然較少活動斷層，地震頻率及規模均較少，且由歷史紀錄顯示此地帶的斷層活動引發海嘯的機率甚低。但是位於臺灣南方的菲律賓，其與臺灣都是同位於菲律賓海洋板塊與歐亞板塊的聚合帶處，地震頻繁，呂宋島有許多活動斷層延伸至海域，其大規模斷層活動可能引發海嘯，於數十分鐘至一小時即可到達臺灣西南部海域，衝擊臺灣南部及西南部海岸。美國地質調查所認為馬尼拉海溝是南中國海及呂宋海峽一帶危險性被低估之震源區。另海嘯波傳遞至水深較淺的近岸時，受到淺化效應的影響，波高放大進而入侵沿岸地區造成溢淹；當海嘯波遇海陸交界上的河口地形，所攜帶的龐大水體除了會跨過河道溢淹至內陸外，也會隨著河道繼續逆流而上，在溪溯升過程中，會產生強烈水流，會對河道產生冲刷與淤積的現象，並對河川中的結構物（如橋梁、攔砂壩或堤防等）之基底造成冲刷，對其橋梁造成安全上之威脅。

前期研究以參考 Megawati et al. (2009)所建立之馬尼拉海溝的地震參數，其結果第一波海嘯約 20 分鐘抵達高屏溪口，海嘯波沿高屏溪河道上溯約 9 公里遠，溯上高度最高水位有 3 公尺高，雙園大橋首當其衝；並模擬潮汐為高潮位及低潮位兩種不同邊界之條件並對其溯上之水位無較大影響；當入射波高大於 3 公尺，其海嘯波才會沿高屏溪河道上溯至雙園大橋，其水流對橋墩、墩柱引致作用力，對橋墩受水流衝擊面(南面)之最大總壓力為 87.5kPa。橋墩之鄰近地形最高堆積為

0.21 公尺，最大侵蝕為 0.53 公尺。本研究延續前期模擬結果強化解析度來進一步探討海嘯對跨河橋梁之影響。

## 6.2 高屏溪數值地形

本研究延續上一年度的高屏溪雙園大橋的沉積物沖刷模擬，採用相同的地形資料(解析度 5 公尺的內政部陸地地形和解析度 500 公尺的海科中心海洋地形)和邊界入射條件(近海以鐘形波波高 3 公尺到 10 公尺的 4 種水位入射)。此次模擬的不同點是將原本的模式 5 公尺地形解析(圖 6.1)視為第一層網格，各別在 19 組橋墩附近配置 1 公尺解析度且地形高程相同的第二層網格(圖 6.2、圖 6.3)。目的在於透過解析度的強化來了解橋墩附近的掏刷變化。另外將模擬時間由 1 小時延長到 1.5 小時。

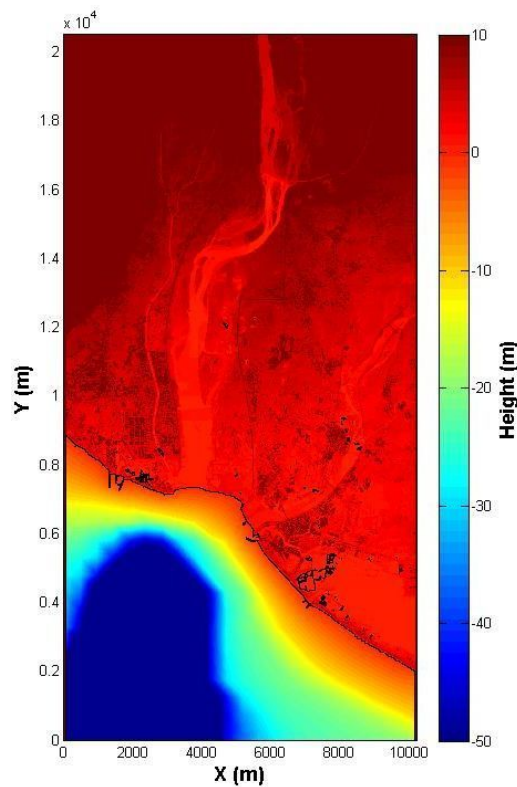


圖 6.1 模式第一層網格解析度 5 公尺之數值地形



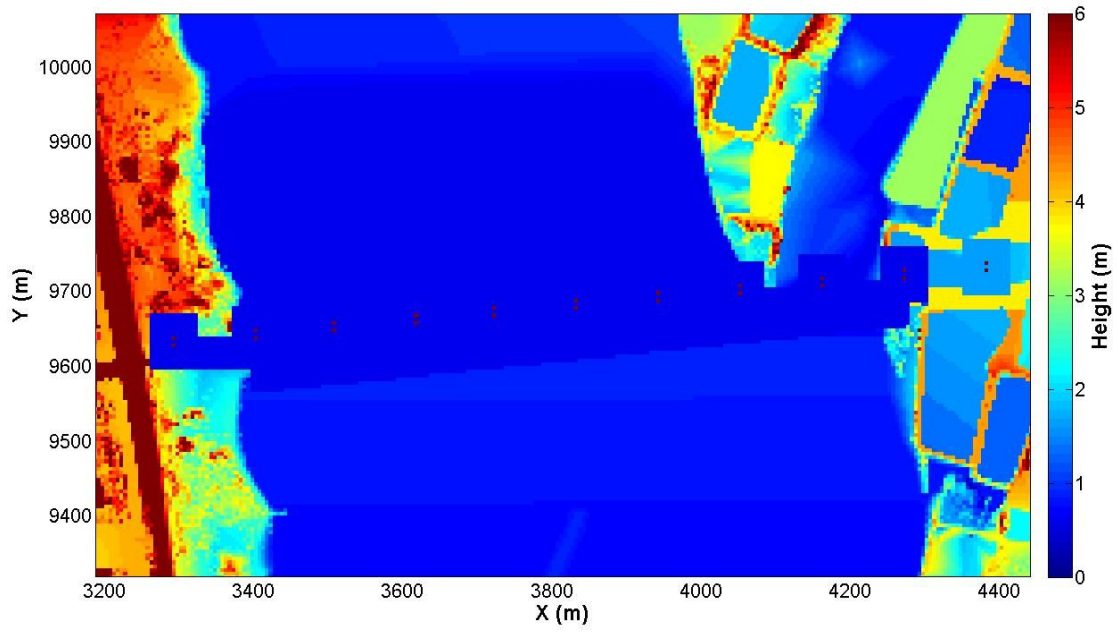


圖 6.2 第 1 到 10 組橋墩附近之數值地形

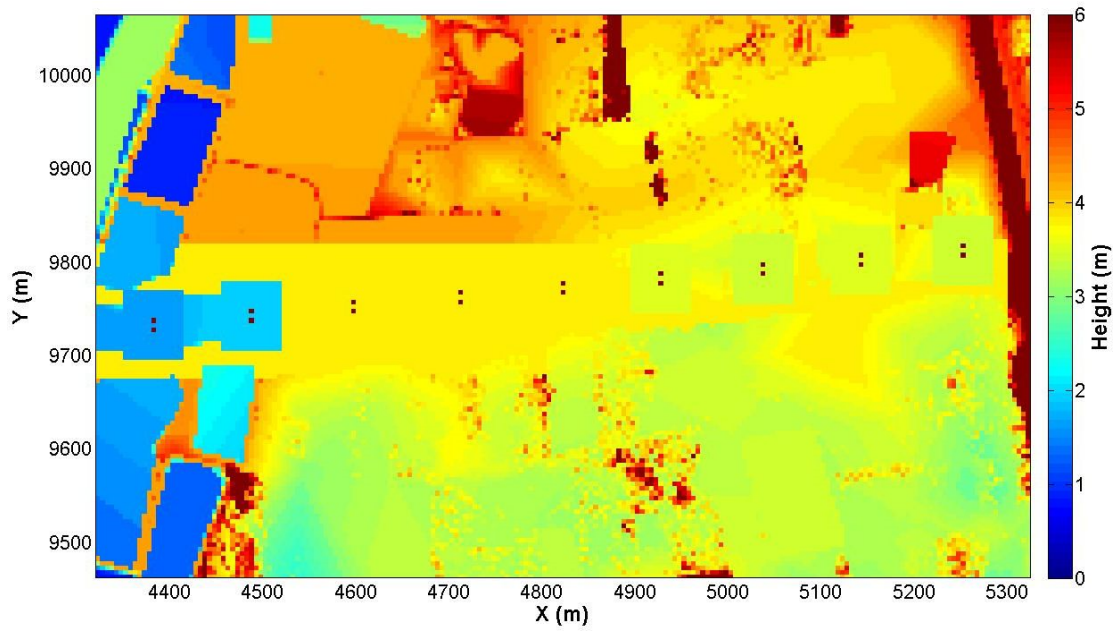


圖 6.3 第 11 到 19 組橋墩附近之數值地形

### 6.3 海嘯沿高屏溪口溯上模擬

參考 Megawati et al. (2009)所建立之馬尼拉海溝 33 個子區塊地震參數(圖 6.4、表 6.1)，將此地震參數帶入模式中建立馬尼拉海溝斷層帶所產生之初始水位(圖 6.5)。模擬結果第一波海嘯約 20 分鐘抵達高屏溪口，模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈如圖 6.6(a)~(c)，海嘯波沿高屏溪河道上溯約 9 公里遠，溯上高度最高水位有 3 公尺高(圖 6.7(a)~(b))，並將模擬結果與 Google Earth 地圖疊加製成溢淹地圖，要注意的為高屏溪為南北走向，其首當其衝的為雙園大橋(圖 6.8)。並整合及結合 Google Earth 地圖之溢淹潛勢圖，以利用 Google Earth 圖資系統顯示出學校及醫療等救災所需資源，有助於研判海嘯發生時之安全地點及避難路徑。(陳和陳，2012)

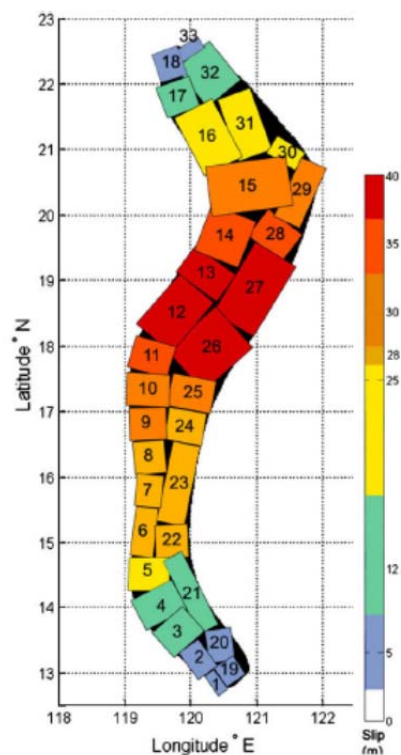


Fig. 5. The discretized model for computation of sea floor displacement.

圖 6.4 馬尼拉海溝 33 個子區塊分佈圖 Megawati et al. (2009)

**表 6.1 馬尼拉海溝 33 個子斷層之斷層參數表 Megawati et al. (2009)**

Depth (km)	Length (km)	Width (km)	Dislocation (m)	Epicenter (Longitude)	Epicenter (Latitude)	Moment Magnitude (Mw)
7.5	40.41	19.3	5	E120.4	N12.84	3.982091612
7.5	54.19	38.68	5	E120.12	N13.2	4.26833125
7.5	54.09	66.93	12	E119.8	N13.61	4.680026871
7.5	54	75.68	12	E119.52	N14.04	4.715118256
7.5	53.89	67.52	25	E119.36	N14.5	4.894001254
7.5	80.59	37.51	28	E119.28	N15.18	4.873138337
7.5	53.56	43.13	28	E119.34	N15.84	4.795266208
7.5	53.43	51.06	28	E119.38	N16.32	4.84343018
7.5	53.28	60.09	30	E119.36	N16.84	4.909739286
7.5	53.14	69.93	30	E119.36	N17.32	4.952885059
7.5	52.99	65.93	35	E119.4	N17.82	4.979644196
7.5	105.57	72.15	40	E119.76	N18.5	5.243972069
7.5	52.6	79.67	40	E120.24	N19.1	5.070974538
7.5	78.62	74.61	35	E120.52	N19.68	5.129679586
7.5	78.24	129.36	30	E120.6	N20.44	5.242980905
7.5	103.81	67.36	25	E120.28	N21.14	5.083135022
7.5	51.68	54.86	12	E119.8	N21.8	4.609253873
7.5	46.82	41.97	5	E119.68	N22.30	4.249641092
35	37.5	37.27	5	E120.6	N13.04	4.150987946
35	54.14	43.11	5	E120.42	N13.42	4.299458356
35	134.88	34.22	12	E120	N14.2	4.750353376
35	53.76	53.11	28	E119.72	N15	4.856609898
35	133.84	45.09	28	E119.8	N15.92	5.073296966
35	53.29	61.36	28	E119.92	N16.76	4.895873571
35	53.15	70.96	30	E120.4	N17.28	4.957172923
35	105.9	88.63	40	E120.3	N17.92	5.304438637
35	131.68	75.92	40	E120.96	N18.84	5.322704842
35	52.41	67.88	35	E121.26	N19.7	4.984896862
35	104.39	44.85	30	E121.66	N20.36	5.019775903
35	51.99	31.66	25	E121.44	N20.96	4.664327994
35	103.67	55.05	25	E120.8	N21.38	5.024314457
35	77.33	67.83	12	E120.24	N22.12	4.787381552
35	21.26	41.86	5	E120	N22.48	4.020302495

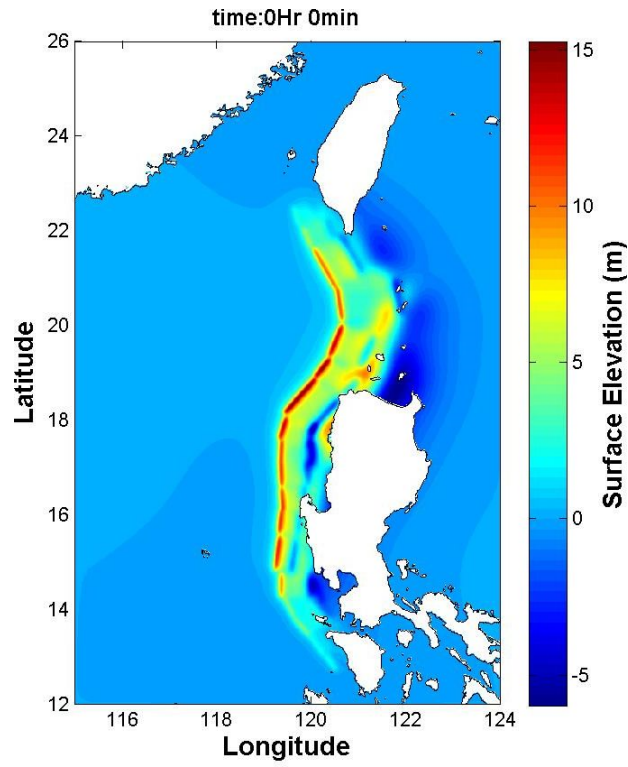


圖 6.5 參考 Megawati et al. (2009) 之地震參數建立初始水位

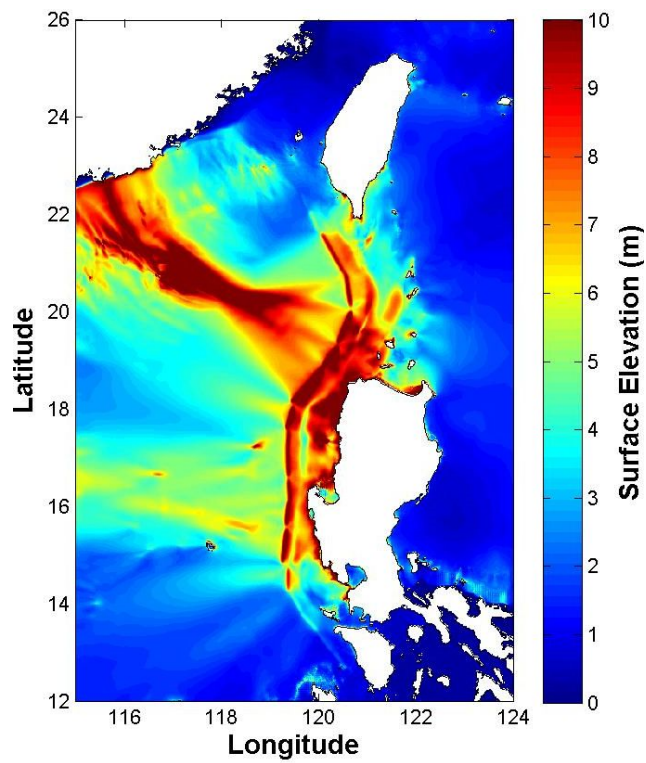


圖 6.6(a) 模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第一層網格)

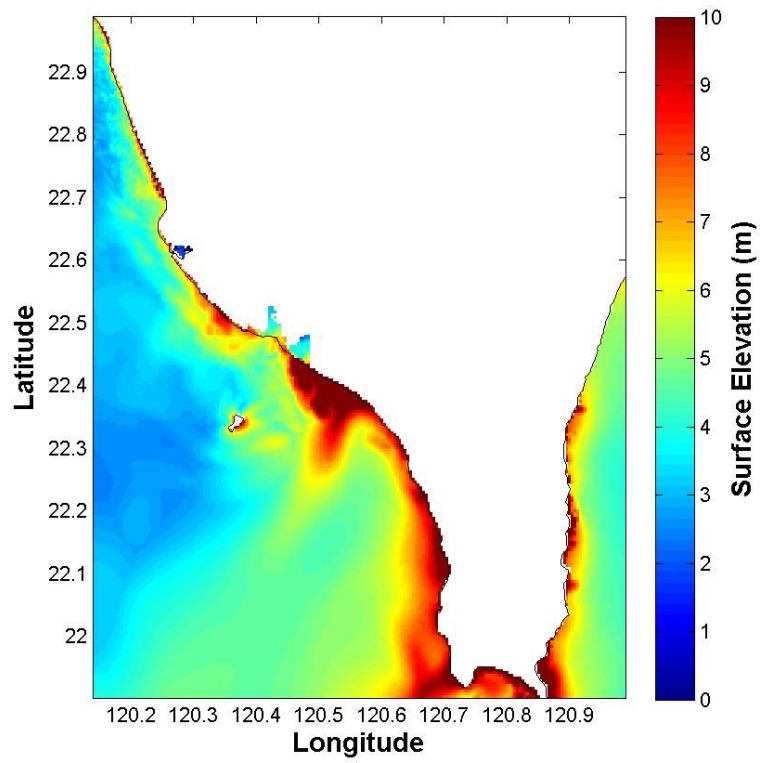


圖 6.6(b) 模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第二層網格)

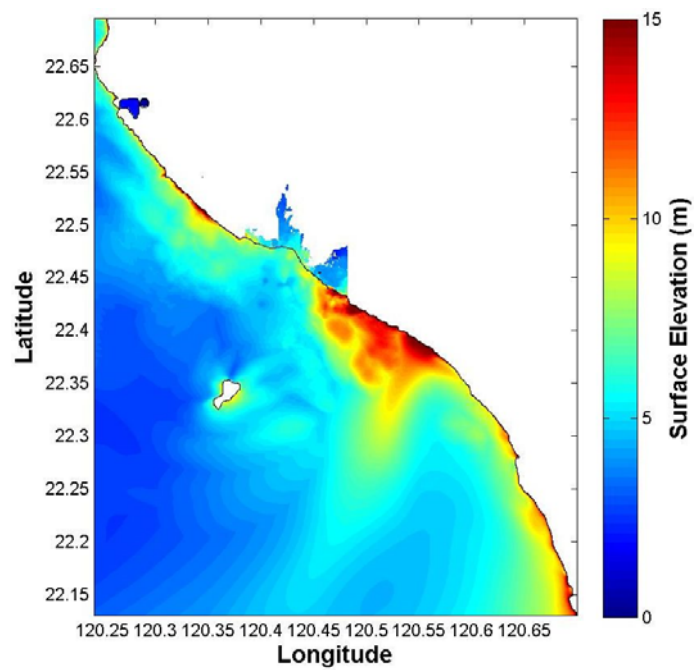
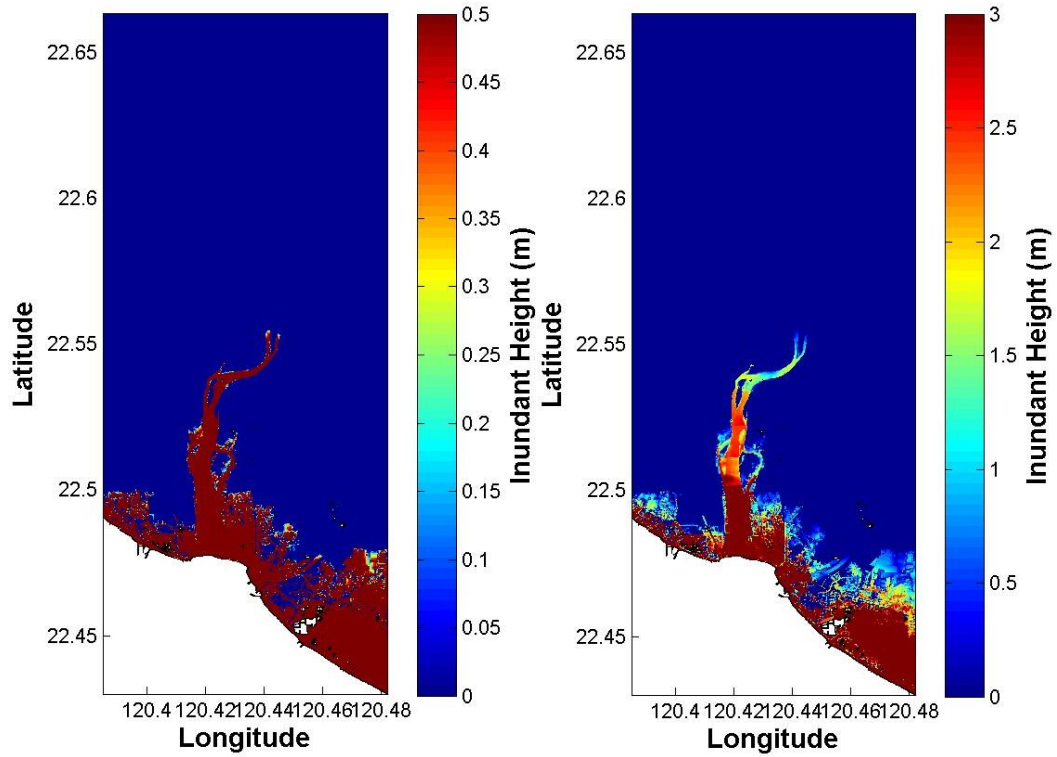


圖 6.6(c) 模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第三層網格)





(a)

(b)

圖 6.7 模擬三個小時期間河道水位高度分佈(a)50cm(b)3m

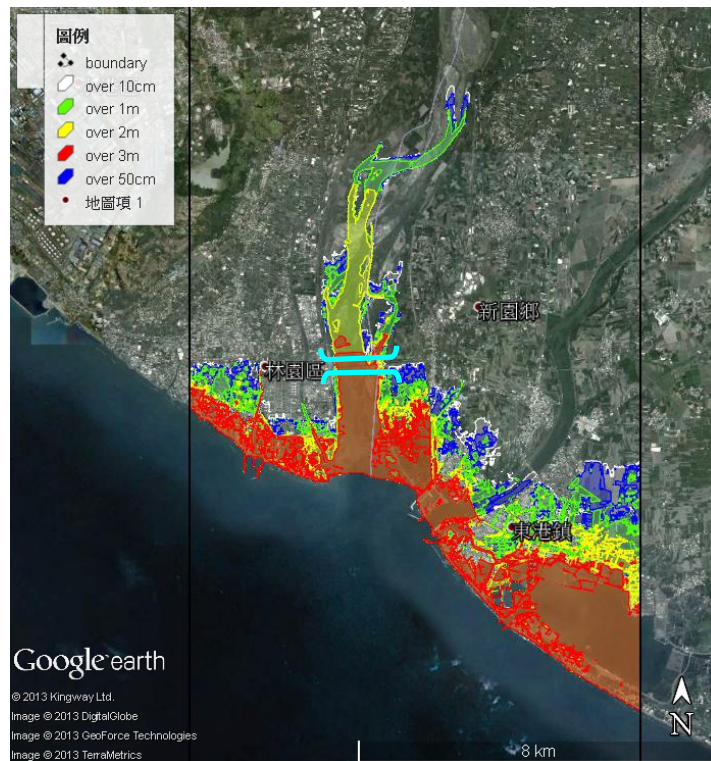


圖 6.8 結合 Google Earth 之溢淹圖

## 6.4 跨河橋梁受海嘯波之沖刷及衝擊力分析

### 6.4.1 雙園大橋及數值地形配置

雙園大橋，位於臺 17 線道上，橫跨高屏溪之橋梁，其聯絡高雄市林園區至屏東縣新園鄉兩地。取名「雙園大橋」，因兩端地名皆有「園」字。2009 年 8 月被中度颱風莫拉克引發的高屏溪洪水沖毀而無法通行。隨後由交通部公路總局辦理改建工程，主橋以大跨徑設計，主跨徑 96~120 公尺，墩柱由原舊橋 67 墩減少至 19 墩，以增加通水斷面，提高防洪能力，主橋全長 2178 公尺，於 2011 年 9 月 5 日完成上游側往高雄、林園方向之橋梁，先行啟用並以雙向單線方式通行，而下游側往新園、東港方向之橋梁亦已於 2011 年 12 月 23 日改建完成並全線通車。圖 6.9 為交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處之橋梁斷面圖，其橋墩寬度約 4.6 公尺，橋墩距約 6.7 公尺，圖 6.10 為工程位置圖及表 6.2 為橋梁資本資料表，做為模式模擬設定之參考依據。

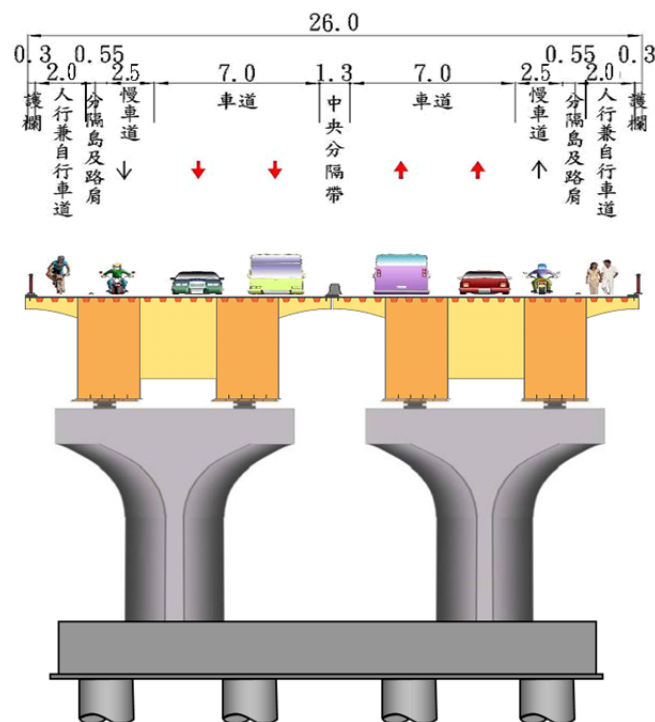


圖 6.9 雙園大橋橋梁斷面圖

資料來源：交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處

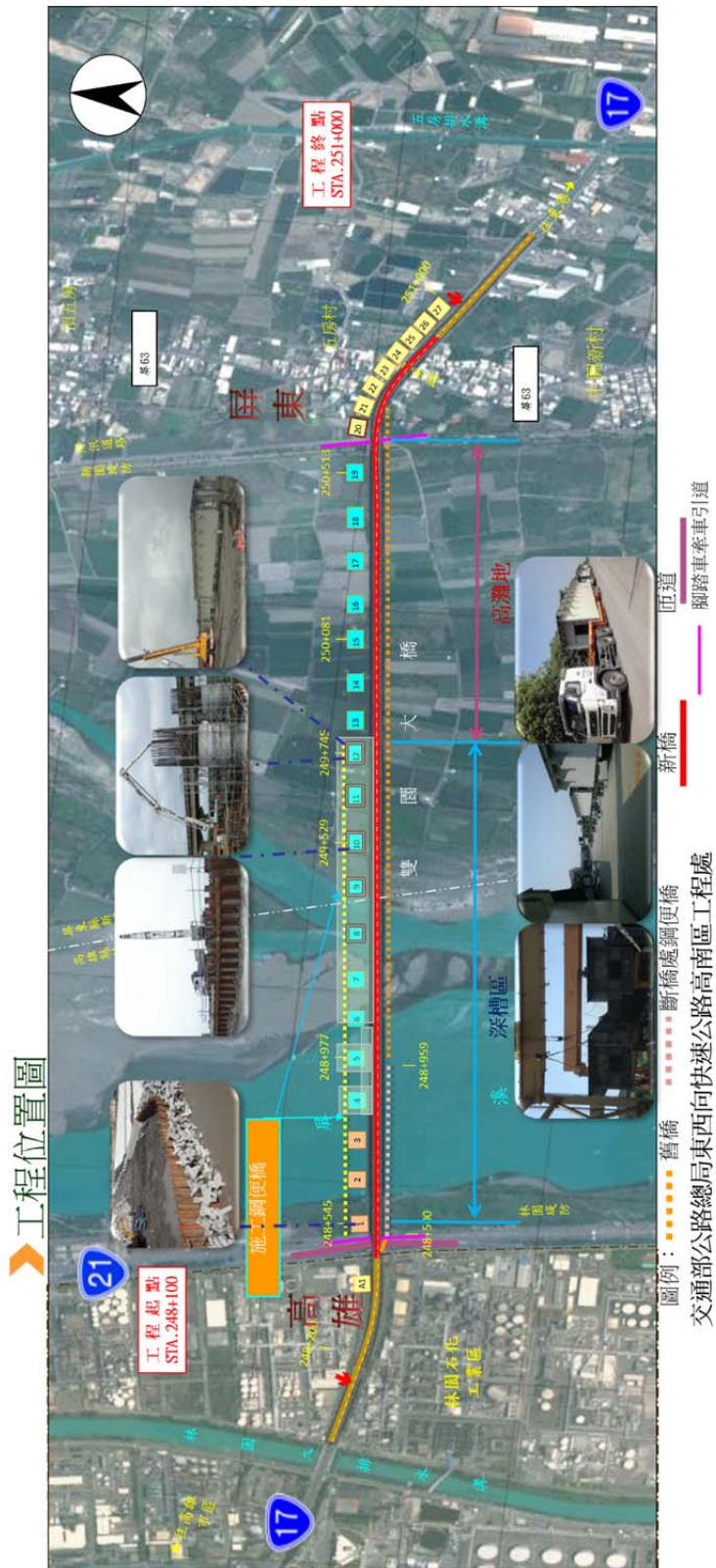


圖 6.10 雙園大橋工程位置圖

資料來源：交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處



表 6.2 雙園大橋橋梁資料表 資料來源：交通部公路總局

橋梁名稱	雙園大橋(新)	使用狀況	正常使用	設施種類	橋梁		
管理資料							
管理機關	交通部公路總局	養護工程處	公路總局第三區養護工程處	養護工程段	高雄工務段		
所在縣市	高雄市	所在區鄉	林園區	道路等級		路線	臺 17 線
橋頭里程	248K+800M	橋尾里程	251K+700M	竣工年月	100 年 12 月	最近維修年月	
設計單位	臺灣世曦工程顧問股份有限公司	監造單位	臺灣世曦工程顧問股份有限公司	施工單位		是否有做地點阻	否
檢測週期		跨越物體		改道長度		竣工圖說保存地點	工三處
參考地標						年平均每日交通量	24841
河川資料							
是否為跨河橋	是	跨越河川類別	中央管河川	河川管理單位	第七河川局	河川名稱	高屏溪
上游 500 公尺構造物	無						
下游 500 公尺構造物	無						
上游最近水位站	萬大大橋	計畫洪水位	5.93EL	計畫河寬	2100M		
計畫堤頂高程	7.43EL	設計河床高程	-5.32EL	設計橋梁出水高	2.76M		
幾何資料							
橋梁總長	2900M	A1 進橋版長度	5M	A2 進橋版長度	5M		
最大淨寬	26M	最小淨寬	20M	橋版頭影面積	71583M <sup>2</sup>		
總車道數	8	總橋孔數	28	最大跨距	120M		
跨距分配	105+2*120+96+3(96+2*120+96)+105+2*120+96+(26+30)+2(3*31)						
最高橋墩高度	11.66M	最低橋上淨高	橋上無跨越物 M	最低橋下淨高	4.76M		
橋頭 GPS 經度	120.414875	橋頭 GPS 緯度	22.49773888	橋尾 GPS 經度	120.43809166	橋尾 GPS 緯度	22.49888333
結構資料							
結構型式	梁式橋						
支撐端形式	簡支	主梁材質	鋼構造	主梁型式	合成梁	鋼構接合型式	螺旋釘
橫梁型式	無	橋面版材質	鋼構造	鋪面材質	瀝青混凝土(AC)	伸縮縫型式	齒型
支承型式	鑄鋼支承	橋臺型式	矮墩式	橋臺基礎型式	樁基礎	翼牆/擋土牆型式	懸臂式
橋墩材質	鋼筋混凝土	橋墩型式	單柱式	橋墩基礎型式	樁基礎	橋墩最淺基礎深度	1.8M
橋基保護工法	混凝土塊					橋墩最深基礎深度	-5.5M

參考交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處之工程位置圖之橋墩設置，於數值地形中加入 19 組橋墩，每組橋墩由兩支墩柱組成（圖 6.11(a)），並各別在 19 組橋墩附近配置 1 公尺解析度且地形高程相同的第二層網格（圖 6.2、圖 6.3），並設定橋墩高度為 9 公尺（圖 6.11(b)）。

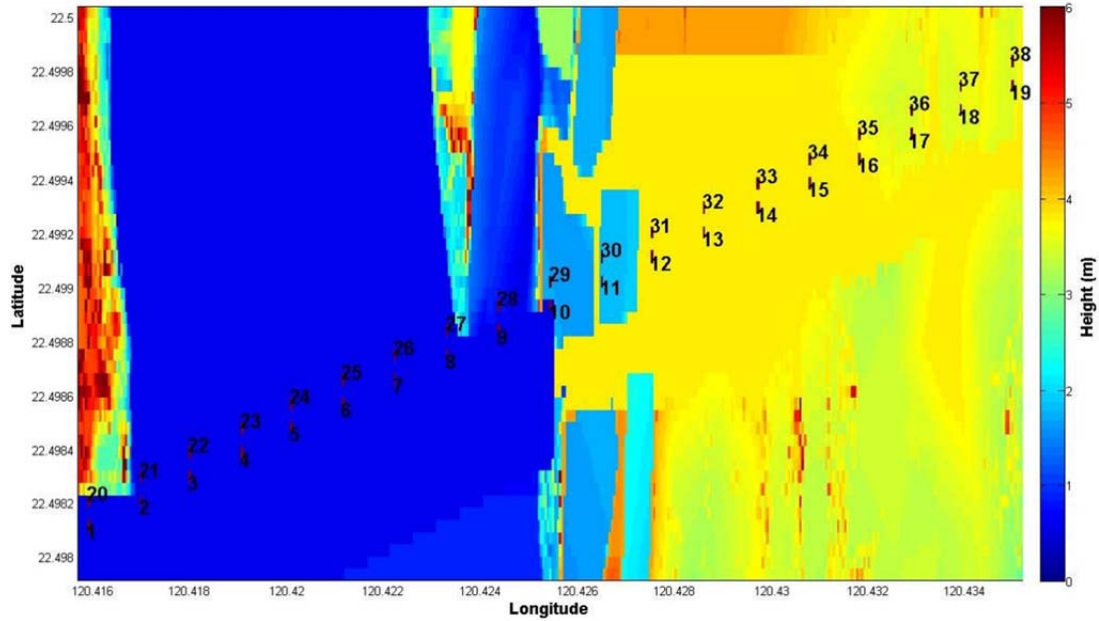


圖 6.11(a)高屏溪數值地形及橋墩配置

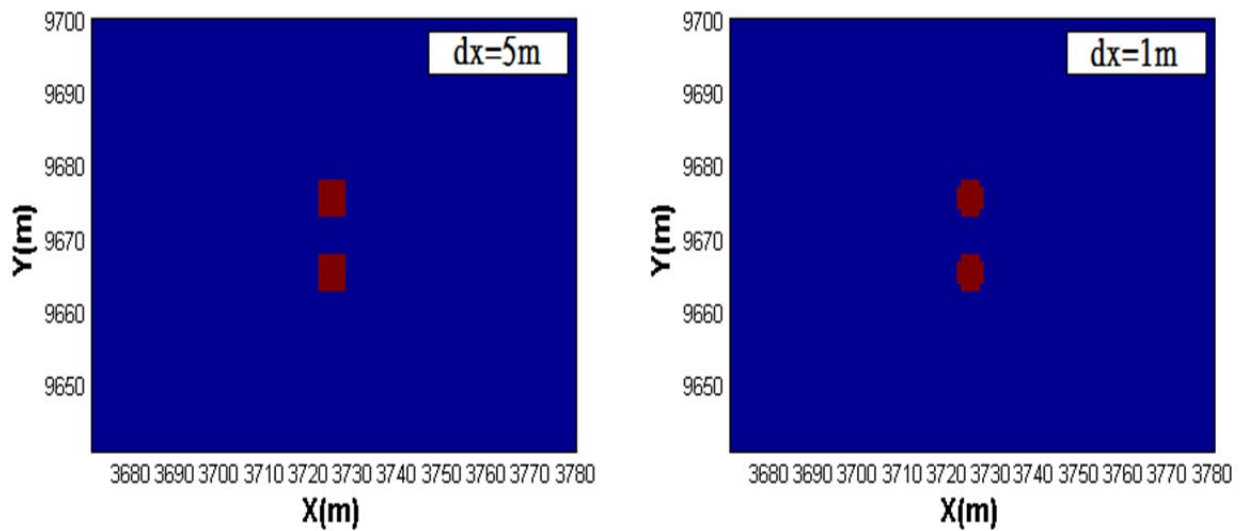


圖 6.11(b)雙園大橋橋墩墩柱配置

## 6.4.2 橋墩沖刷

本研究模式計算上將考慮高屏溪水域的沉積物的粒徑來對橋梁橋墩週遭的沖刷影響；當來自橋墩前方的水流因受到橋墩的阻擋，於橋墩迎水面會產生停滯現象，但由於後方水流的繼續推擠，會分別朝上下兩側轉移，朝上的水流在橋墩前產生擁水，朝下產生向下射流衝擊底床，於底床和橋墩之間形成渦流系統，此渦流系統稱為馬蹄形渦流系統 (horseshoe vortex system)。此渦流系統會對橋墩周圍底床產生淘刷作用形成沖刷坑，並隨時間而加深且擴大(圖 6.12)。

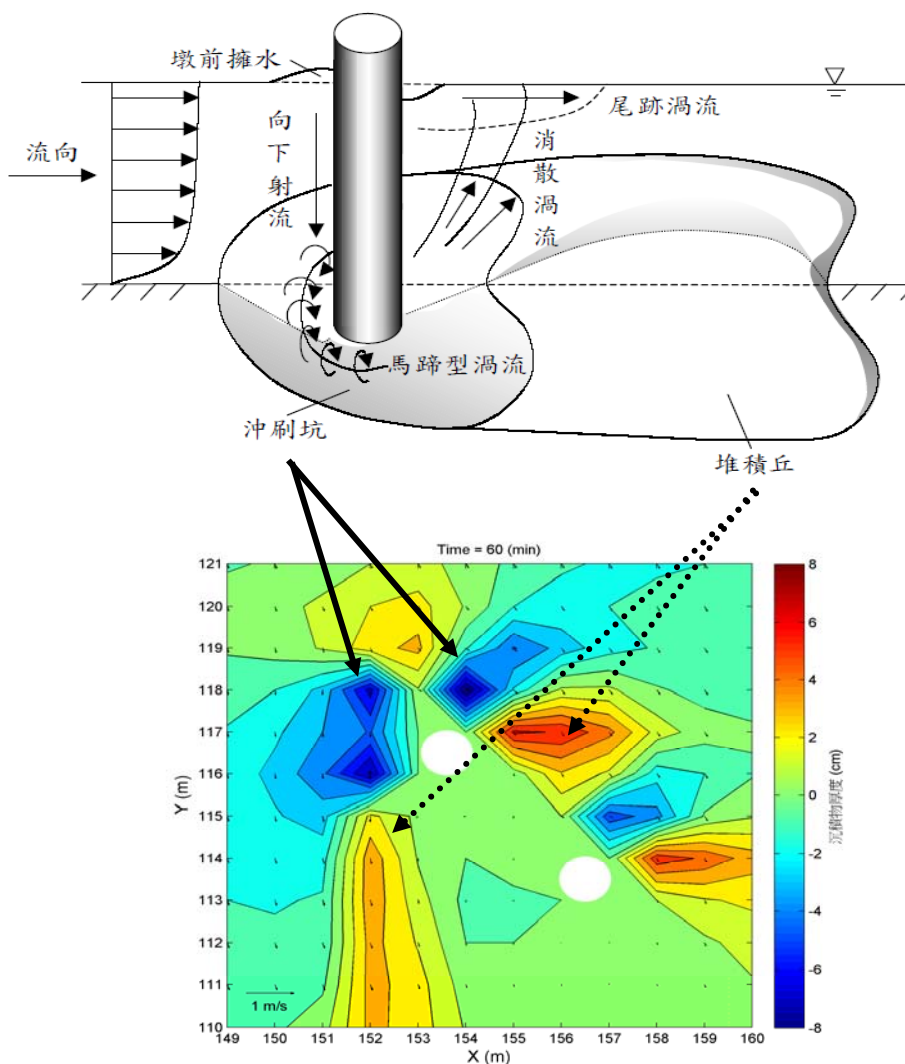


圖 6.12 馬蹄形渦流沖刷情形

而模式目前內建的沉積物模組控制方程式主要參考 Ribberink(1998)的底床沉積物傳輸公式(半經驗公式)所發展的二維模組。其模式形式如下式 6.1：

$$\begin{aligned}
 q_s &= \Phi_b \sqrt{\Delta g D_{50}^3} \\
 \Delta &= \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \\
 \Phi_b &= m(\theta - \theta_c)^n \\
 \theta &= \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD_{50}}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

其中  $q_s$ ：傳輸速率、 $\Delta$ ：相對密度、 $g$ ：重力加速度、 $D_{50}$ ：粒徑中值(median grain diameter)、 $\rho_s$ ：沙的密度、 $\rho$ ：水的密度、 $\theta$ ：Shields 參數、 $\theta_c$ ：Shields 參數臨界值、 $\tau_b$ ：底床剪應力；而(6.1)式中的 $\tau_b$ 值以模式計算所計算的摩擦力項 $\tau_x$ 、 $\tau_y$ 來代入。 $m$ 、 $n$ 為回歸係數，根據 Ribberink(1998)將穩流(steady flow)、震盪流(oscillatory flow)以及震盪流結合淨流(oscillatory flow with current)的三種實驗資料一起回歸的結果(圖 6.13)，沉積物模組採用的回歸值為  $m=11$  和  $n=1.65$ 。

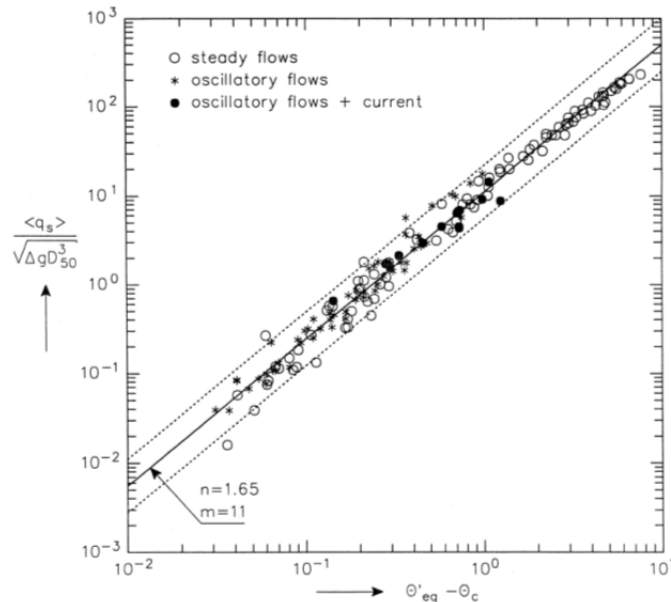


圖 6.13 穩流、震盪流以及震盪流結合淨流之回歸數據值  
(Ribberink,1998)

Rance 於 1980 年曾對於矩形的橋墩的沖刷情形進行探討，動力條件為水波加上水流，在位於矩形直角的附近有較為明顯的淘刷現象；而沉積物堆積位置部分，也都是發生在橋墩後方。橋墩局部淘刷深度方面，可由 Colorado State University equation (Richardson, Dillon, & McKnight, 1993)，即方程式(6.2)進行計算：

$$\frac{Y_{se}}{a} = 2K_1K_2K_3\left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.65} F_r^{0.43} \quad (6.2)$$

其中， $Y_{se}$  為局部沖刷深度， $Y_1$  為橋墩上游水深， $K_1$  為橋墩形狀修正係數，採用圓頭墩係數為 1， $K_2$  為橋墩與流向偏角修正係數，因圓頭墩係數為 1， $K_3$  為河床條件修正係數， $a$  為橋墩迎水面寬度， $F_r$  為橋墩上游福祿數，定義為：

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY_1}} \quad (6.3)$$

將各項參數值代入方程式(6.2)後，可求得局部淘刷深度。因此藉由模式可計算出最大淘刷深度。圖 6.14

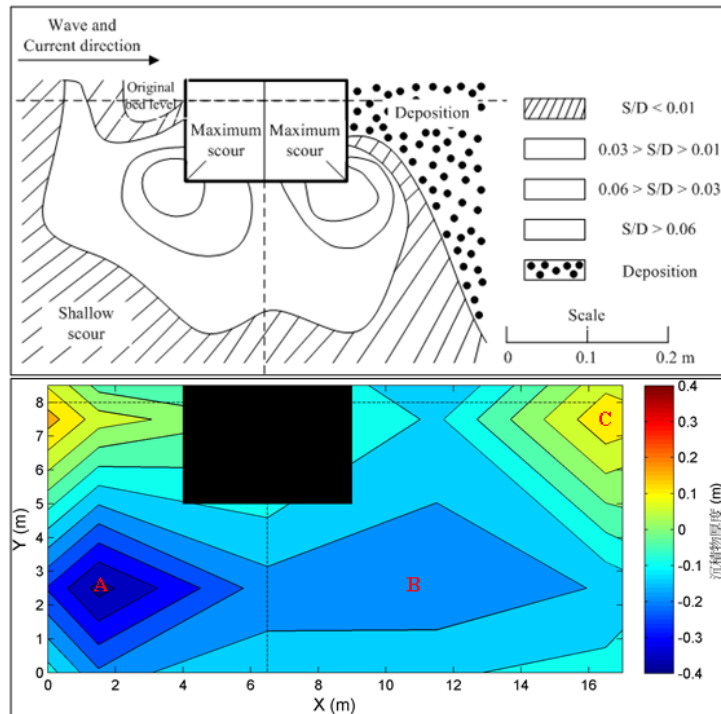


圖 6.14 模式結果比較圖。(上圖)Rance (1980)、(下圖)模式結果

將兩並聯之橋墩墩柱為一組如圖 6.11(a)，編號 1 及編號 20 墩柱為組號 1，依此類推，計算入射波高 3、4、6、10 公尺，從 4 種情境的沉積物模擬中，取出橋墩中心附近寬 21 公尺、長 31 公尺的地形區域內的地形變化極值，其結果如圖 6.15。共同的趨勢是最大侵蝕和最大堆積隨入射鐘形波波高的增加而增加，且每種情境的各橋墩附近的最大侵蝕皆大於最大堆積。因為地形高程較高的關係，第 11 組到第 19 組橋墩在較大波高的入射情境下，才會出現侵蝕和堆積。在 3 公尺入射的情境下，對第 1 到 10 組橋墩造成不到 5 公分的地形變化。在 4 公尺入射的情境中，第 1 到 11 組橋墩中最多只有 12 公分的地形變化。在 6 公尺入射的情境中，對第 1 到 12 組橋墩造成地形影響，其中以第 2 組橋墩的 62 公分侵蝕最多。而 10 公尺入射的情境則對全部橋墩皆有影響，其中 7 組橋墩(第 2、3、4、5、7 和 10 組)出現超過 1 公尺的侵蝕。詳細的資料如表 6.3。

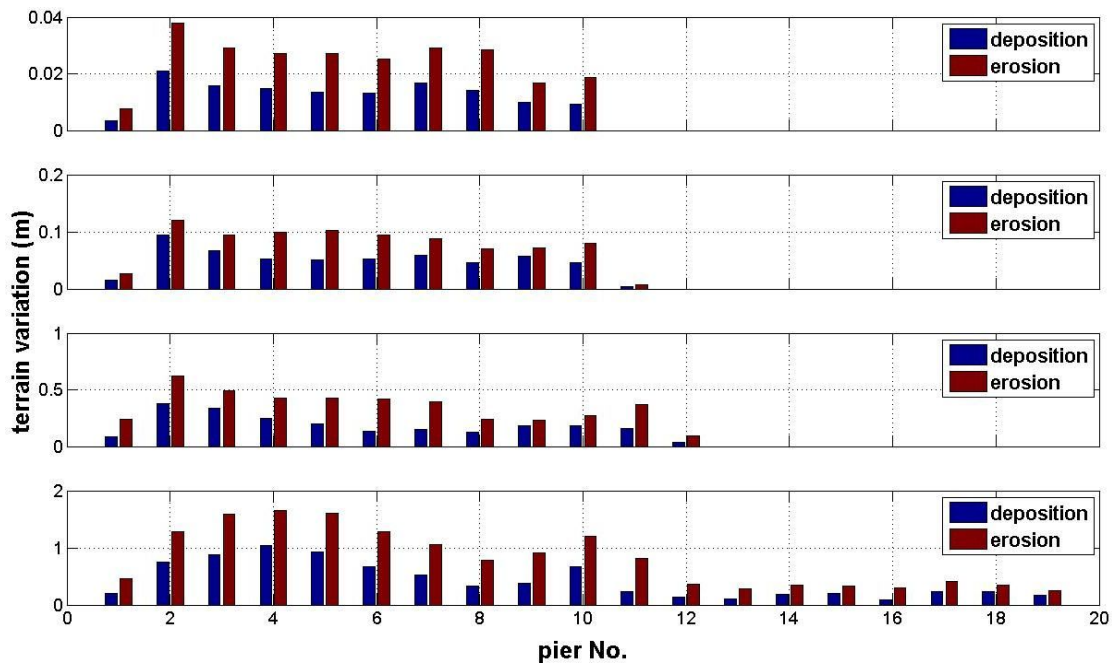


圖 6.15 19 組橋墩的侵蝕(紅色)與堆積(藍色)，由上至下各為入射鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的情況。

表 6.3 四種入射波情境在橋墩附近造成的地形變化極值。

		3m		4m		6m		10m	
		地形變化最小值(m)	地形變化最大值(m)	地形變化最小值(m)	地形變化最大值(m)	地形變化最小值(m)	地形變化最大值(m)	地形變化最小值(m)	地形變化最大值(m)
橋墩組編號	1	-0.008	0.003	-0.027	0.016	-0.240	0.087	-0.461	0.206
	2	-0.038	0.021	-0.121	0.095	-0.618	0.378	-1.284	0.751
	3	-0.029	0.016	-0.095	0.067	-0.492	0.338	-1.595	0.881
	4	-0.027	0.015	-0.099	0.052	-0.427	0.246	-1.652	1.041
	5	-0.027	0.013	-0.102	0.051	-0.426	0.196	-1.602	0.927
	6	-0.025	0.013	-0.095	0.052	-0.415	0.132	-1.283	0.674
	7	-0.029	0.017	-0.088	0.058	-0.397	0.150	-1.050	0.524
	8	-0.029	0.014	-0.070	0.046	-0.243	0.126	-0.780	0.329
	9	-0.017	0.010	-0.072	0.057	-0.232	0.182	-0.912	0.380
	10	-0.019	0.009	-0.079	0.046	-0.269	0.181	-1.199	0.669
	11	0.000	0.000	-0.008	0.004	-0.368	0.156	-0.813	0.230
	12	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.096	0.038	-0.363	0.142
	13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.288	0.108
	14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.346	0.186
	15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.324	0.195
	16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.295	0.093
	17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.410	0.226
	18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.344	0.238
	19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.255	0.164

橋墩附近 5 公尺與 1 公尺不同網格解析度的地形最大堆積厚度比較如圖 6.16，地形最大侵蝕厚度比較如圖 6.17。不論是侵蝕或是堆積，大致上 1 米網格的值皆比 5 米網格大兩倍以上。圖 6.18 為橋墩附近 5 米與 1 米的堆積和侵蝕分佈，大致的侵蝕和堆積型態類似，而 1 米網格則提供了較多的細節。圖 6.19 為 19 組橋墩附近地形的最大侵蝕(紅線)與堆積(藍線)隨時間的變化。從圖可知鐘形波波高 3、4、6 及 10 公尺的入射模擬中，其地形變化值發生改變的起始時間各在第 25 分鐘、



第 20 分鐘、第 15 分鐘和第 15 分鐘之後(紀錄的時間解析為 5 分鐘，基本上和第一波水體最先到達時間相同)，且 4 種情境的地形變化主要都發生在起始時間之後的 20 分鐘內，之後隨時間產生的改變不大。

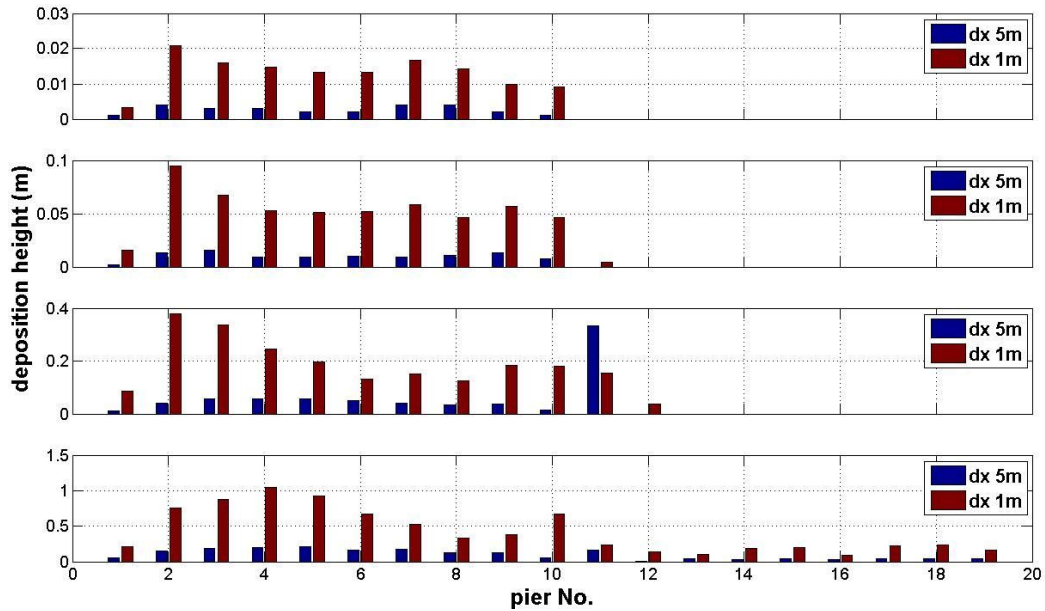


圖 6.16 19 組橋墩在地形解析度 5 公尺(藍色)與 1 公尺(紅色)的堆積厚度，由上至下各為入射鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的情況。

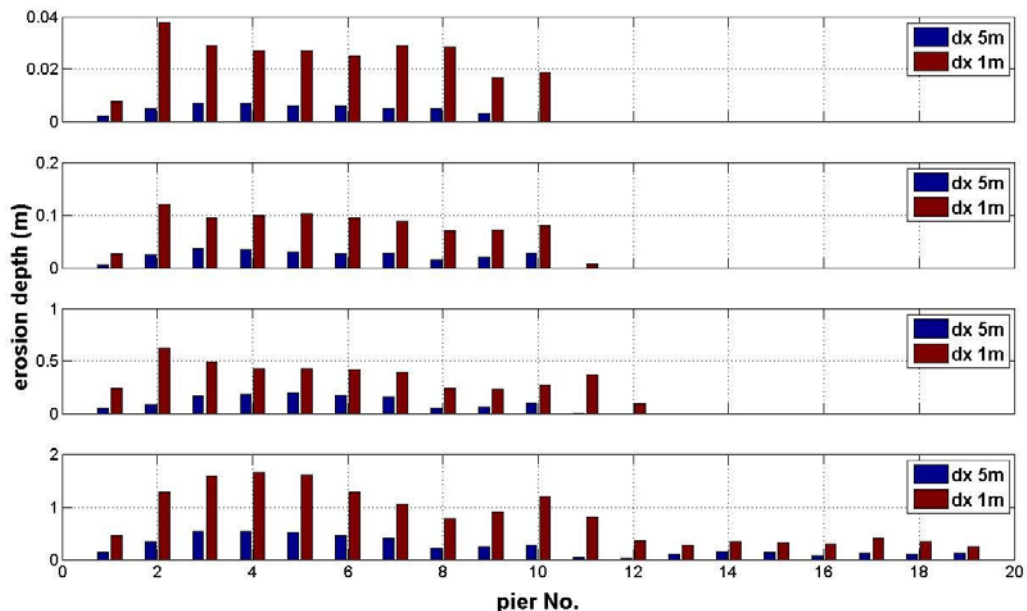


圖 6.17 19 組橋墩在地形解析度 5 公尺(藍色)與 1 公尺(紅色)的侵蝕厚度，由上至下各為入射鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的情況。



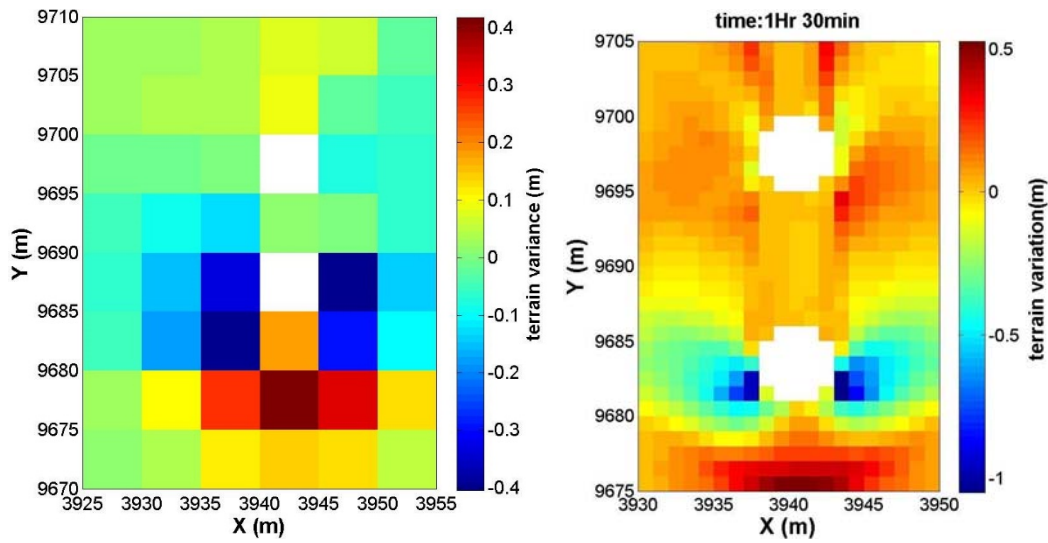


圖 6.18 入射波高 10 公尺入射之模擬於地形解析度 5 公尺(左)與 1 公尺(右)模擬的高程變化(第 7 組橋墩)。

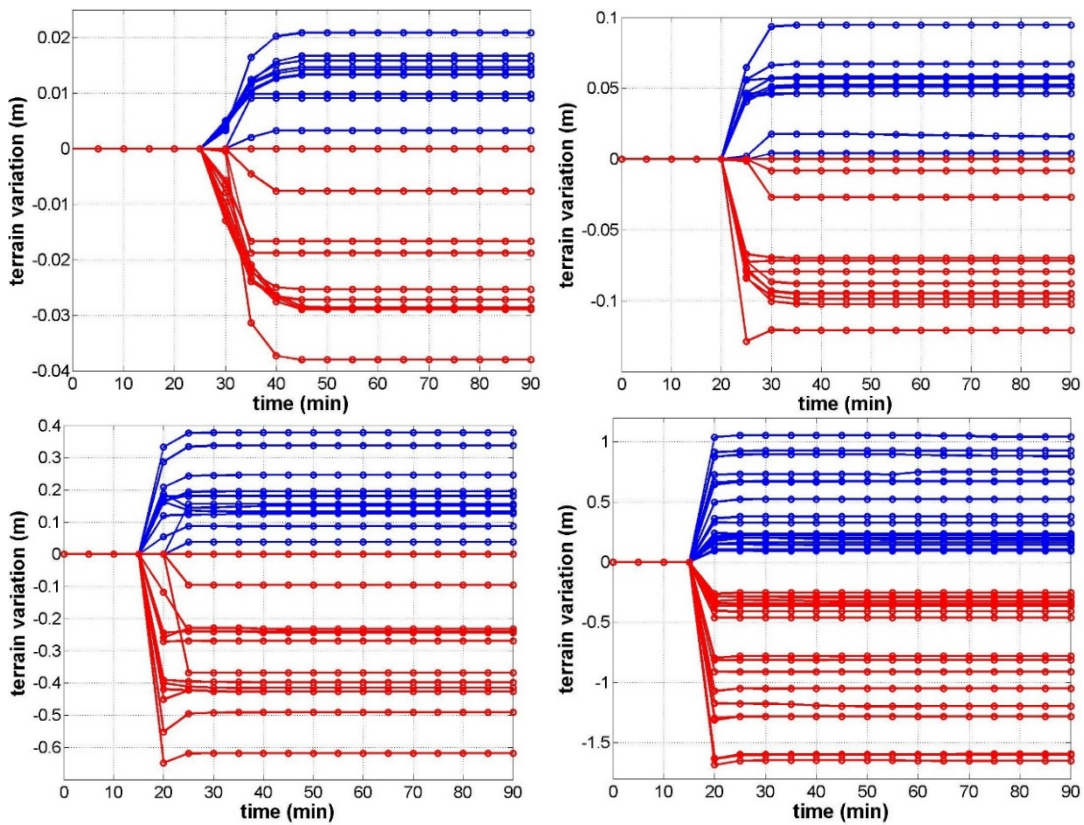


圖 6.19 19 組橋墩附近地形的最大侵蝕(紅線)與最大堆積(藍線)隨時間的變化。左上、右上、左下、右下各為 COMCOT 鐘形波波高 3、4、6 以及 10 公尺的模擬。

### 6.4.3 FLUIDITY 沉積物模擬

本研究另使用英國倫敦帝國理工學院 (Imperial College London) 的三維模式，該模式為英國倫敦帝國理工學院 (Imperial College London) 發展的流體數值模式 Fluidity，是一個開放性原始碼，多用途的多相流計算流體力學模式，能使用一維、二維或三維的非結構性有限元素網格來解析數值化的 Navier-Stokes 方程式，以其附加的場方程。移動式的有限元素法或控制體積能根據問題，隨著時間的變化來調整網格。它亦能混用有限元素和控制體積元素來解決問題。Fluidity 結合網格最佳化的資料庫，具備動力學的網格適應性，並且能使用 MPI 平行化處理。可應用的領域包括地球流體力學、計算流體力學、海洋模擬以及地函對流。

主要是要藉由 Fluidity 模式的沉積物功能，探討河流中的橋墩受到特定的水位溢淹時，對橋墩附近的底床沉積物所造成的影響。模擬方式以前述 COMCOT 模式所模擬的第 5 組橋墩附近平均水位當成特定的入射條件，取鐘形波造成的溢淹水體到達橋墩之後的 40 分鐘水位時序列，將其代入水道的西邊界。於模擬結束後，分析橋墩附近沉積物厚度的侵蝕和堆積狀況，並與 COMCOT 的沉積物結果作比較。其模式控制方程，請詳見附錄六。

#### 6.4.3.1 模式設定

模式的水平區域設定為長 30.5 公里、寬 80 公尺的東西向水道。水平方向網格使用有限元素的可變解析三角網格，其解析度變化範圍在西邊界和東邊界各為 50 公尺、5000 公尺，越往橋墩方向解析度越高，距離橋墩 4.2 米範圍內的解析度約 0.5 公尺。為了避免西邊界傳入的水位在到達東邊界後可能產生反射的干擾，橋墩與東邊界的長度距離約 30 公里。此設定在可變解析度的情況下，不至於對電腦計算量造成太大的負擔。另外在距離西邊界 500 公尺處的水道中間設置兩個圓心相距 13.2 公尺且直徑為 4.2 公尺的橋墩(圖 20)。

在垂直方向網格配置為 sigma 網格，網格解析隨能水深作等比例變化。為了比較不同水深所造成的影響，此處設定的垂直網格分成兩種。第一種為起始水深 3 米且垂直分層有 8 層，起始的解析度由表面向下各為 0.5、0.5、0.5、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 公尺。第二種為起始水深 1.5 米且垂直分層有 5 層，起始的解析度由表面向下各為 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 公尺。

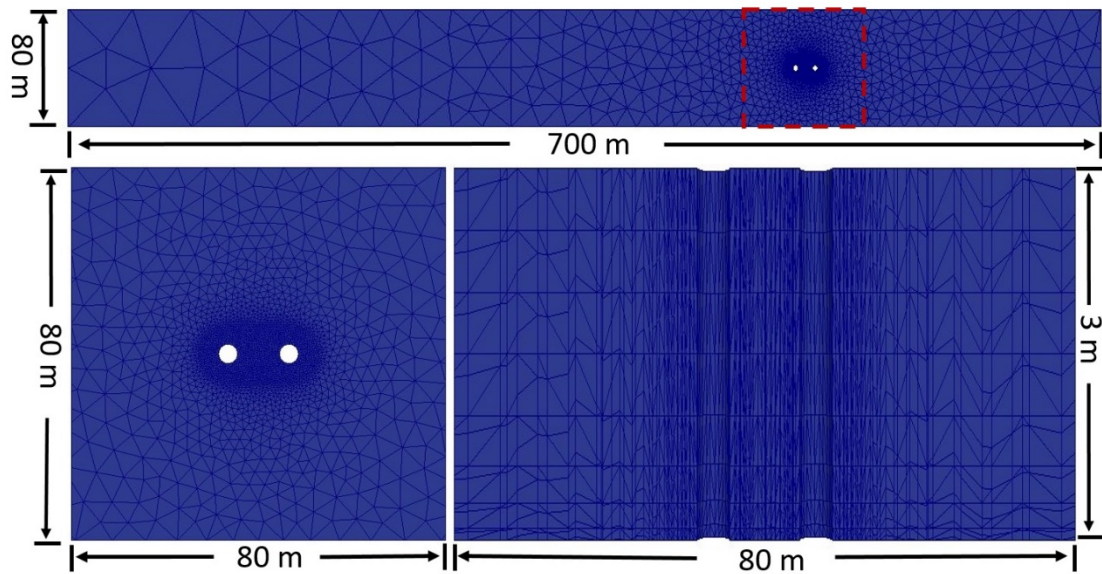


圖 6.20 模式區域及網格配置。上圖為模式區域的俯視圖(距離西端 700 公尺的部分)，左下和右下圖為上圖紅色框框的俯視圖和水道中間的垂直剖面圖(垂直 8 層網格)

本模擬的動力主要來自於西邊界的水位入射(壓力驅動)。圖 21 為西邊界隨時間代入的 COMCOT 模擬鐘形波波高 3m(a)、4m(a)、6m(c)、10m(d)入射時，在第 5 組橋墩附近所得的四種水位時序列，提供 Fluidity 作為水位邊界條件。在流速和懸浮沉積物的邊界設定如表 6.4。

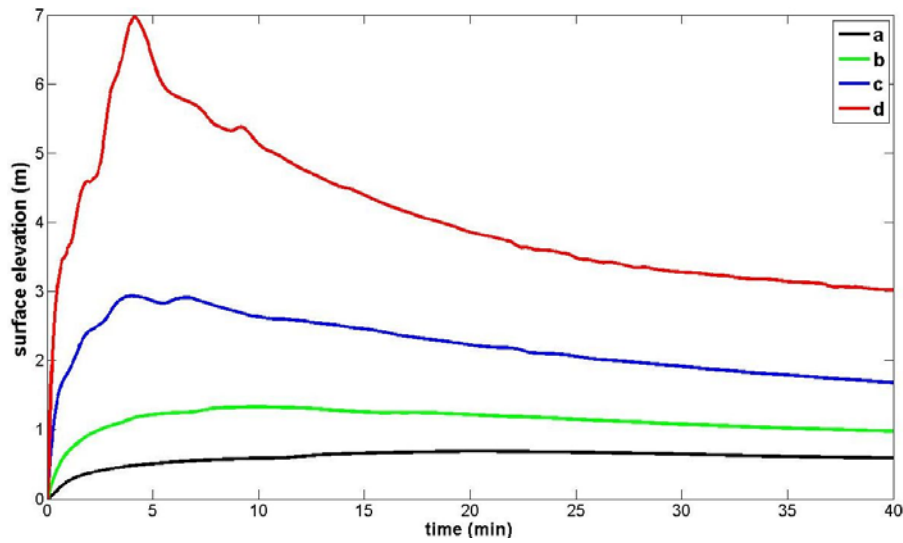


圖 6.21 COMCOT 模式中第 5 組橋墩附近的空間平均水位，a、b、c、d 各為入射鐘形波波高 3m、4m、6m、10m 的模擬結果

表 6.4 模式的流速和懸浮沉積物的邊界條件

模式邊界	流速邊界條件	懸浮沉積物邊界條件
西	Neumann	濃度 0
東	Neumann	濃度 0
南	自由滑動的牆	通量 0
北	自由滑動的牆	通量 0
表面	自由表面	通量 0
底部	橋墩西方 200 公尺以東設定曼寧係數 0.02	再懸浮
橋墩	不可滑動的牆	通量 0

沉積物的初始條件為在橋墩的西方 200 公尺以東的底部設定 1 公尺厚度的沉積物底床載 (bedload)，如圖 6.22。而懸浮載 (suspension load) 的初始值設定為 0。當沉積物因沉降作用通過底床表面時，模式會移除離開模擬區域內的沉積量，且將移除的量儲存在一個與區域分離的底床載。

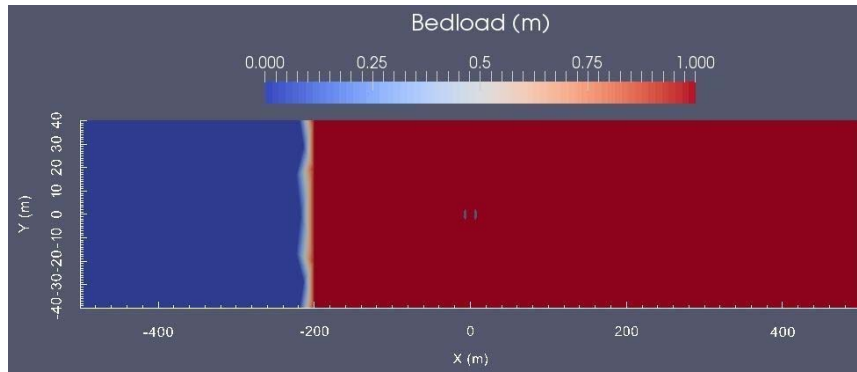


圖 6.22 Fluidity 模式的底床載初始條件

沉積物的侵蝕則是使用 Garcia and Parker (1991)的再懸浮公式。其侵蝕速率是受到底床的剪力速度、沉積物粒徑、以及粒徑的雷諾數等所影響。其數值方法請參見附錄五。沉積物的相關係數如表 2 所示。沉積物選用較為一般性的細沙(fine sand)粒徑、密度和孔隙率。另外利用 USGS 網頁所提供的試算表(表 6.6)計算自由沉降速度和動能黏滯係數，在此選用 Dietrich 經驗式的速度作為自由沉降速度。試算表網頁如下：

[http://woodshole.er.usgs.gov/staffpages/csherwood/sedx\\_equations/RunSedCalcs.html](http://woodshole.er.usgs.gov/staffpages/csherwood/sedx_equations/RunSedCalcs.html)

表 6.5 水和沉積物相關參數

水	
密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1000
動能黏滯係數 ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.00E-06
沉積物	
粒徑 (mm)	0.2
密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2650
自由沉降速度 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.022
動能黏滯係數 ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	9.00E-04
孔隙率	0.3



表 6.6 USGS 沉積物粒徑特性計算表

Input Parameters		
Grain size:	2.31	[phi]
Grain size:	0.20166043	[mm]
Grain density:	2650.0	[kg m-3]
(Fine sand)		
Powers roundness factor:	5.0	[ ]
Corey shape factor:	0.8	[ ]
Salinity:	0.0	[psu]
Temperature:	25.0	[deg C]
Depth:	3.00000000	[m]
Calculated Values		
Critical shear stress:	0.15130360	[N m-2]
Dietrich settling velocity:	-0.0223058	[m s-1]
Stokes settling velocity:	-0.0407382	[m s-1]
Gibbs settling velocity:	-0.0252682	[m s-1]
Water density:	997.061491	[kg m-3]
Kinematic viscosity:	8.98968312	[kg m-1 s-1] or [0.1*poise]
Dynamic viscosity:	9.01617723	[m2 s-1]
Not in Stokes range.		

#### 6.4.3.2 模擬結果

本研究利用進行 6 個不同條件的模擬，各對應於情境 1 到 6，如表 6.7。在此以情境 3 作為流況探討的例子。圖 6.23 為情境 3 在橋墩附近的水位模擬結果，時間由 0 到 300 秒期間，西橋墩西側(迎流面)的自由表面水位最大值從 0 公尺上升到約 3.7 公尺，經過 40 分鐘後下降到約 2 公尺。橋墩附近的水位差約從第 5 分鐘的 1.5 公尺下降到第 40 分鐘 0.5 公尺。

表 6.7 6 個模擬的條件差異

模擬情境	西邊界水位條件	起始水深 (m)
1	A	3
2	B	3
3	C	3
4	D	3
5	A	1.5
6	B	1.5

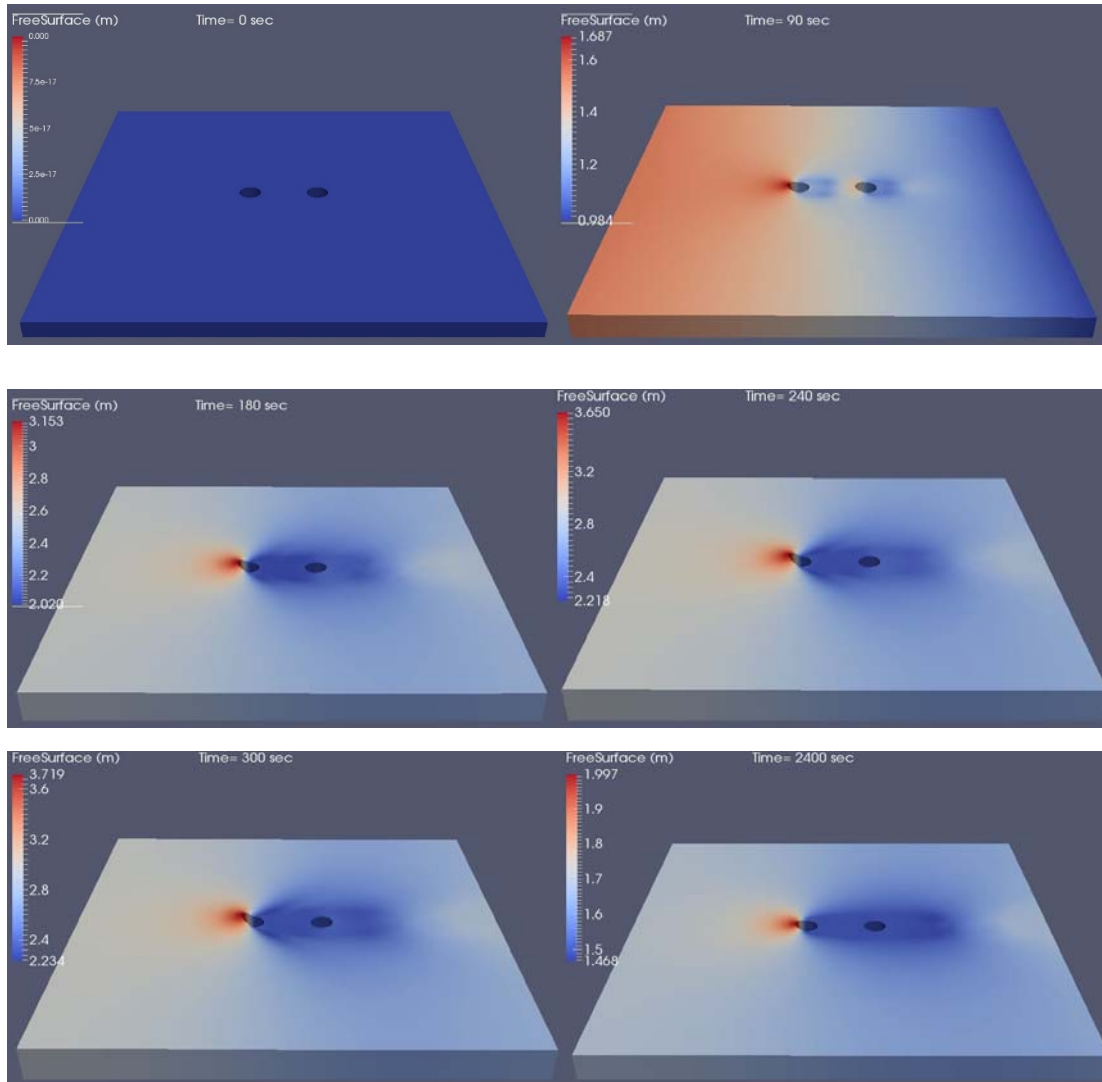


圖 6.23 情境 3 模擬的橋墩附近水位變化。(橋墩附近長 80m、寬 80m 的區域)

圖 6.24、6.25 和 6.26 各為情境 3 於第 5 分鐘在橋墩附近的流速和底床載空間分佈，圖 6.24(a)顯示橋墩的南北兩側表面和底部的 X 分量最大流速達到 5.2 m/s 和 4.4 m/s，而反流在表面則是出現在西橋墩以東的迎流面後方(最大約 2.5m/s)。圖 6.24(c)顯示西橋墩西側(迎流面)的底部反流，其最大值約 1.6m/s。從圖 6.25(b)的垂直剖面可知接進西橋墩西側的 Z 分量流速在上層流向往上，而中、下層流向往下。而圖 6.25(d)顯示西橋墩西、南、北兩側的 Z 分量流速在離底部 20 公分的流向往下。圖 6.26(a)為底床剪應力分佈，較大的值主要分布在西橋墩西南西方以及東橋墩的東北和東南方，因為底床剪應力為底床侵蝕動力，所以底床侵蝕區和較大的底床剪應力分布類似，主要的沉積區在東橋墩的東方(圖 6.26(b))。

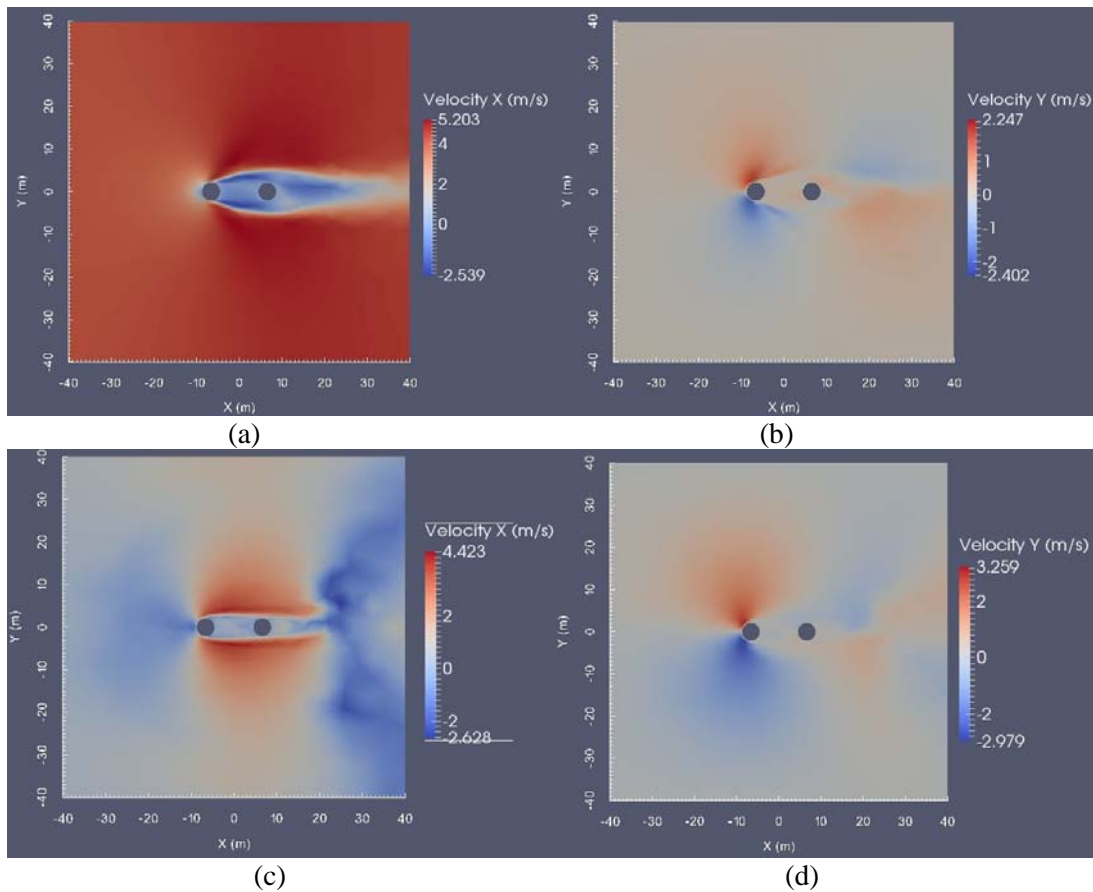


圖 6.24 (a)、(b) 為情境 3 在第 5 分鐘時，橋墩附近的水面 X、Y 分量流速，(c)、(d)為底部 X、Y 分量流速的水平剖面



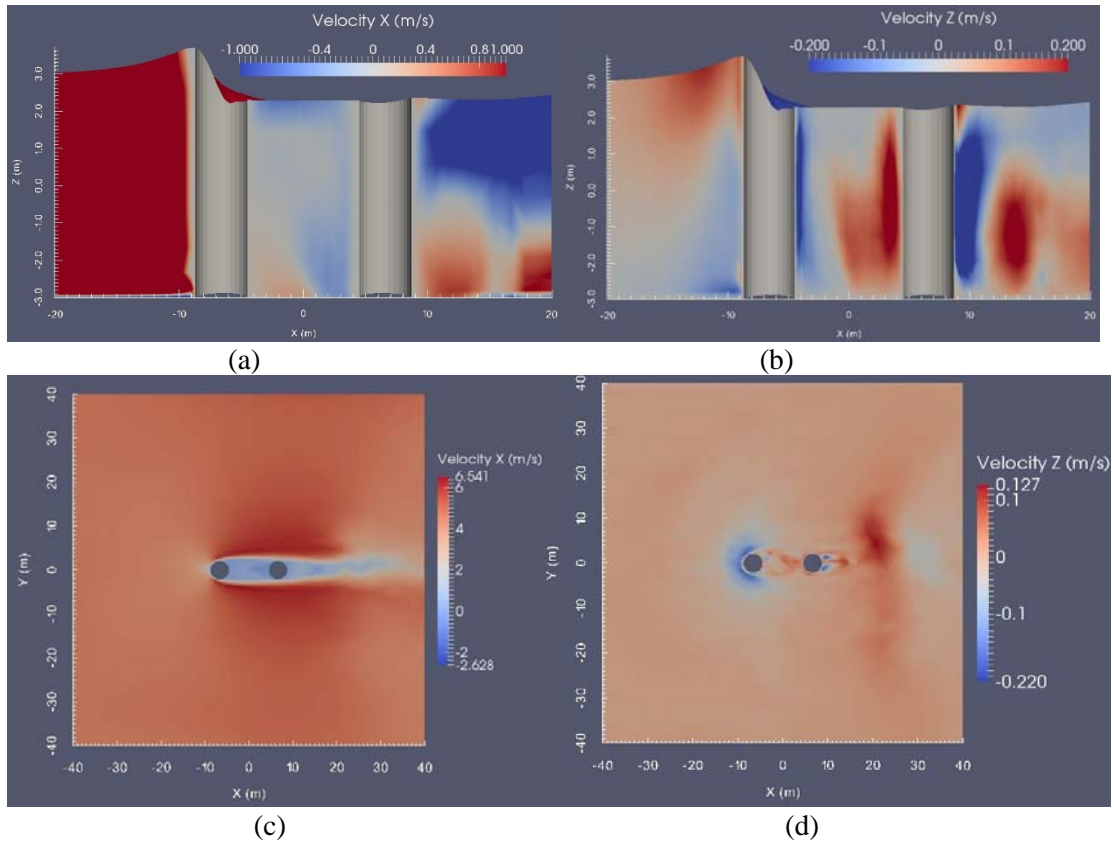


圖 6.25 (a)、(b) 為情境 3 在第 5 分鐘時，橋墩附近的表面 X、Z 分量流速沿水道中央的垂直剖面，(c)、(d) 為離底部 0.2 公尺的 X、Z 分量流速水平剖面

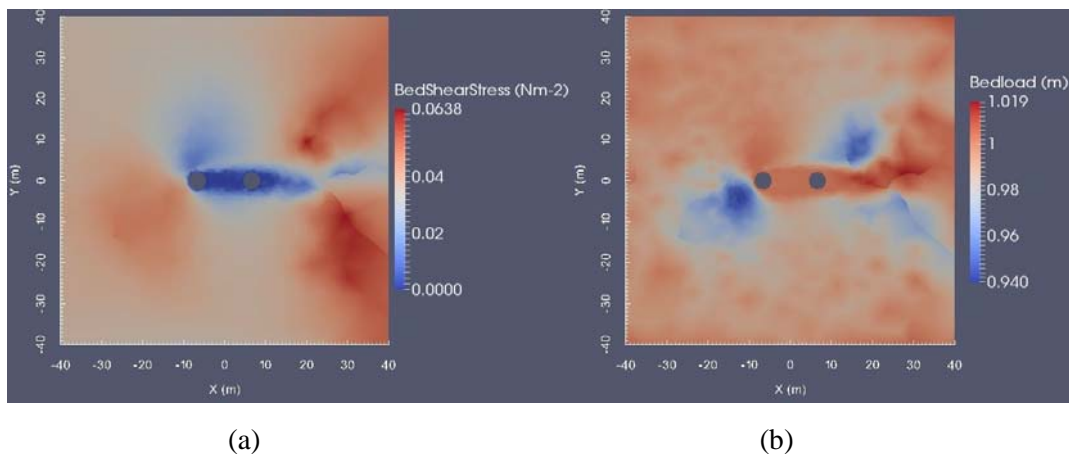


圖 6.26 情境 3 在第 5 分鐘的(a)底部剪應力和(b)底床載分佈。

以 6 種情境所得的最後結果在橋墩附近底床厚度如圖 6.27，6 種結

果的侵蝕沉積型態類似，大致上的差異只在侵蝕和沉積的厚度有所不同。主要的侵蝕區域分布在西橋墩的西南區，但隨邊界條件水位的增高，東橋墩的東北和東南區亦有侵蝕增強的趨勢。主要的沉積區域分布在東橋墩的東方。

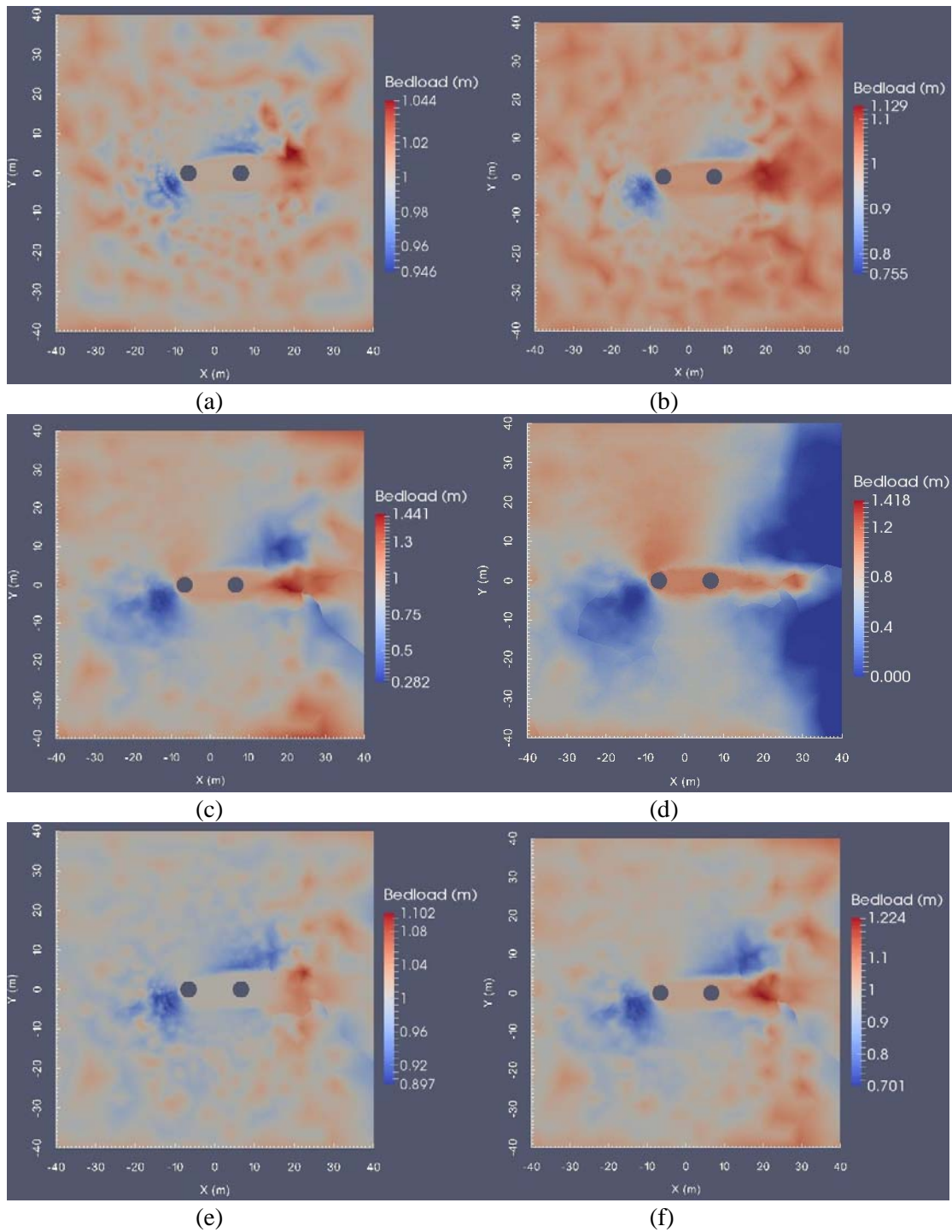


圖 6.27 模擬 40 分鐘後的底床載分佈，情境 1 到 6 各對應於(a)~(f)

表 6.8 列出西橋墩的西南區最大侵蝕值，以及東橋墩東區的最大沉積值。在情境 1 到 4 的最大侵蝕值為 0.054、0.234、0.718 和 1 公尺，最大沉積值為 0.044、0.129、0.437 和 0.163 公尺，大致上邊界傳入的水位越高所造成的侵蝕越大。在最嚴重的情境 4 之下，底床載的 1 公尺厚度於接近 40 分鐘時被完全侵蝕。最大沉積值亦隨邊界水位越高而越大，除了情境 4 之外。情境 4 在 X 座標 20 公尺以東的區域(圖 6.27(d))的底床載為 0，顯示有較大的侵蝕作用，該作用可能降低了東橋墩東區的最大沉積值，從圖 6.28 右圖顯示原本的沉積區約在第 13 分鐘以前主要為侵蝕作用，第 13 分鐘之後才轉為沉積作用。

當河道初始水位為 1.5 公尺的情境 5 和 6 所得到的最大侵蝕為 0.103 和 0.285 公尺，最大沉積為 0.091 和 0.219 公尺，其值皆大於初始水位 3 公尺的情境 1 和 2(表 6.7)，表示河道的初始水位較低時，可能會帶來更強的侵蝕和沉積作用。各從西橋墩西南區和東橋墩東區取出底床載變化最大的點位，其值的時間序列如圖 6.28 和圖 6.29。

**表 6.8 橋墩附近特定區域的最大侵蝕與沉積厚度**

	模擬情境	西橋墩西南區 最大侵蝕厚度(m)	東橋墩東區 最大沉積厚度(m)
FLUIDITY	1	0.054	0.044
	2	0.234	0.129
	3	0.718	0.437
	4	1.000	0.163
	5	0.103	0.091
	6	0.285	0.219

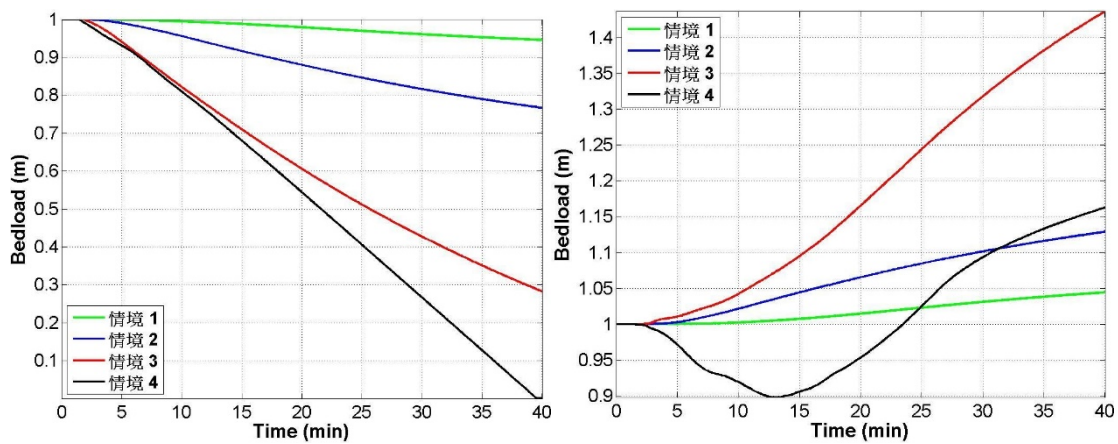


圖 6.28 情境 1、2、3、4 取西橋墩西南區(左)和東橋墩東區(右)的底床載變化最大點位的時序列。

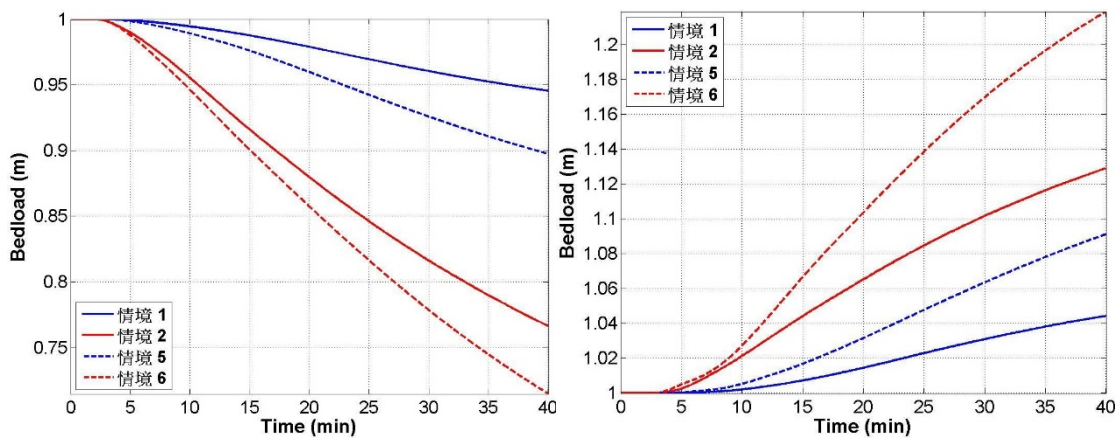


圖 6.29 情境 1、2、5、6 取西橋墩西南區(左)和東橋墩東區(右)的底床載變化最大點位的時序列

#### 6.4.4 海嘯溯上引致作用力

本節參考交通部頒布之「公路橋梁設計規範」(交通部，2009)之公路橋梁橋墩設計為設計準則，並以該規範的適用性，探討雙園大橋橋梁橋墩所受海嘯沿河道溯上所承受之水流壓力，根據「公路橋梁設計規範」採用之計算橋梁受水流作用力，如下式所示：

$$P_{avg} = 515K(V_{avg})^2 \quad (6.31)$$

式中  $P_{avg}$  = 平均流水壓力(Pa)

$V_{avg}$  = 平均水流速m/sec，以流量速率除於流水面積計算之。

$K$  = 水流作用力常數。平頭墩用1.4，圓頭墩用0.7，尖頭墩其角度為30°或小於30°者用0.5。本研究 $K$ 採用0.7。

最大流水壓  $P_{max}$  為上式計算得之平均流水壓力  $P_{avg}$  之兩倍。流水壓力以自水位面頂部為  $P_{max}$  變化到流線處為 0 之三角型方式分佈如圖 6.30。

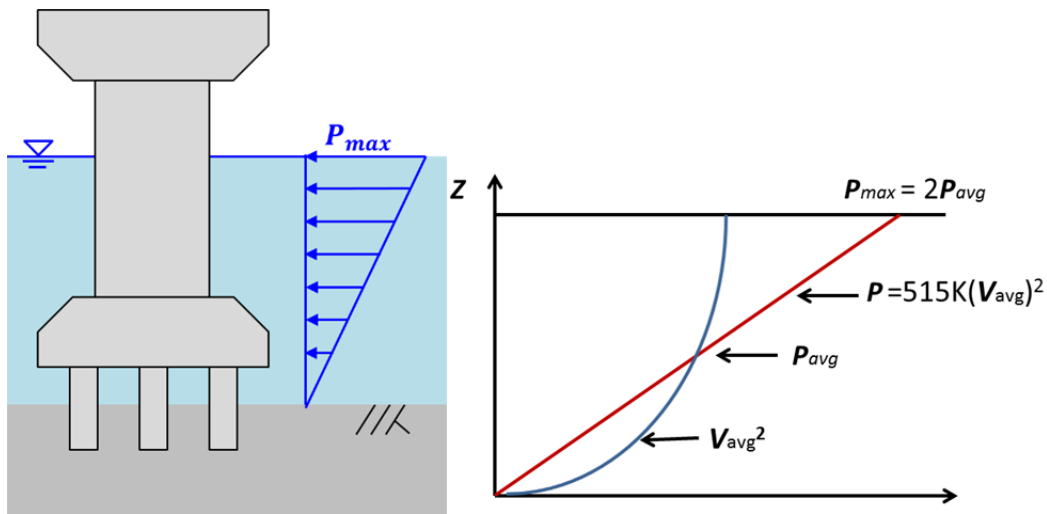


圖 6.30 墩柱受水流作用力之示意與流速與動壓力之關係

而靜壓力  $P_s = \rho gh$  式中  $\rho$  為水密度  $1000 \text{ kg/m}^3$ ， $g$  為重力加速度  $9.8 \text{ m/sec}^2$ ， $h$  為水深(m)，總壓( $P_T$ )=動壓( $P_d$ )+靜壓( $P_s$ )來表示水流於橋墩墩柱上之壓力分佈，其 COMCOT 模擬之水位、流速，便可計算靜壓力( $P_s$ )及動壓力( $P_d$ )，進而求得水流於橋墩與墩柱上之總壓力分佈，圖 6.31 說明模式之計算點位，黑色網格為橋墩，以橋墩墩柱南面的壓力計算來說，其  $Z_s$  的位置為計算靜壓力的水深，以  $V_s$  的位置為計算動態壓力的流速。

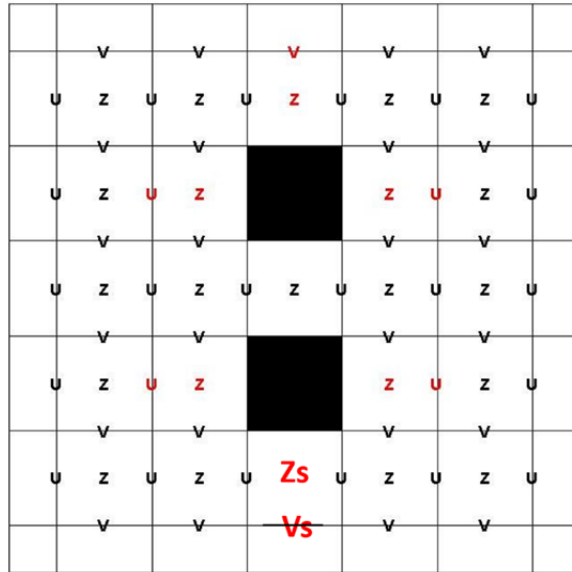


圖 6.31 計算壓力分佈之參數點位

計算結果分析，入射波高要大於三公尺，海嘯湧潮才會沿河道至雙園大橋，紀錄入射波高 3、4、6、10 公尺，其編號 1 至編號 38 橋墩墩柱各面向之最大靜壓力、最大平均動壓力及最大總壓力，圖 6.32(a)、(b)、(c)、(d)為最大總壓力紀錄，將最大總壓力列表於附錄六。

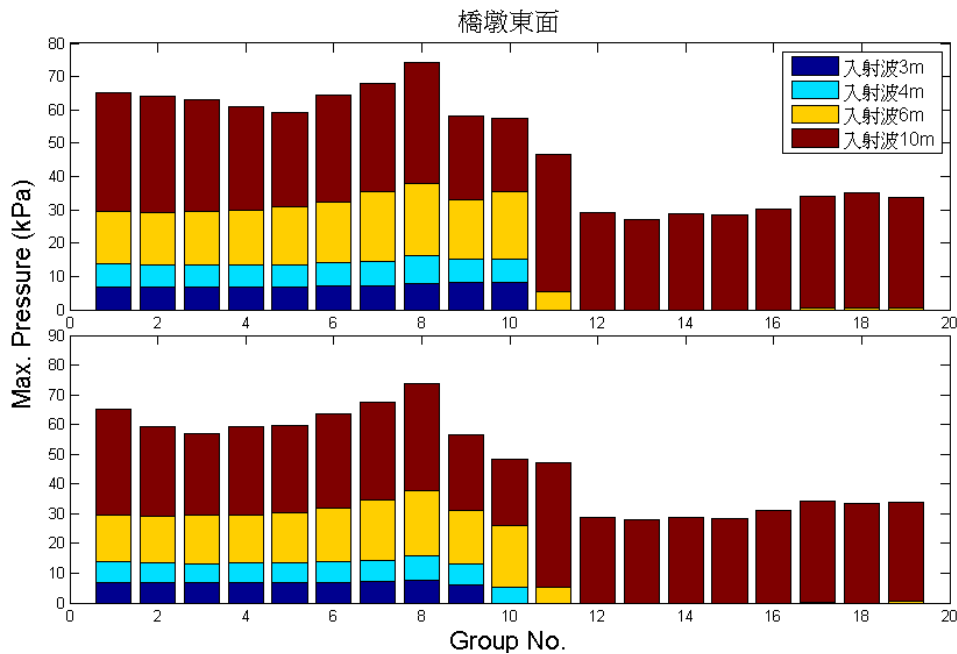


圖 6.32(a)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱東面之最大總壓力紀錄



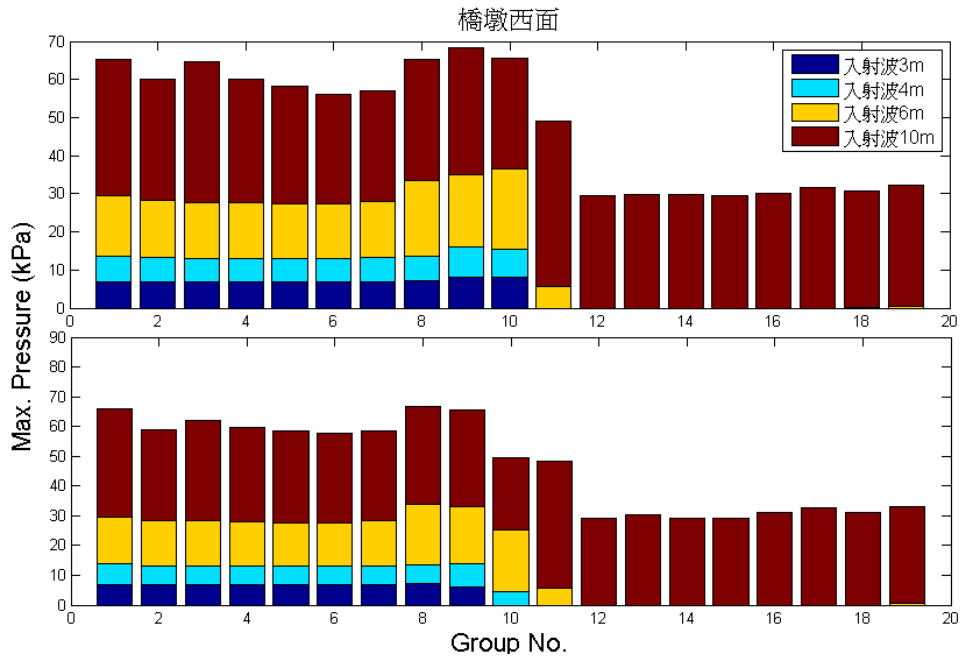


圖 6.32(b)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱西面之最大總壓力紀錄

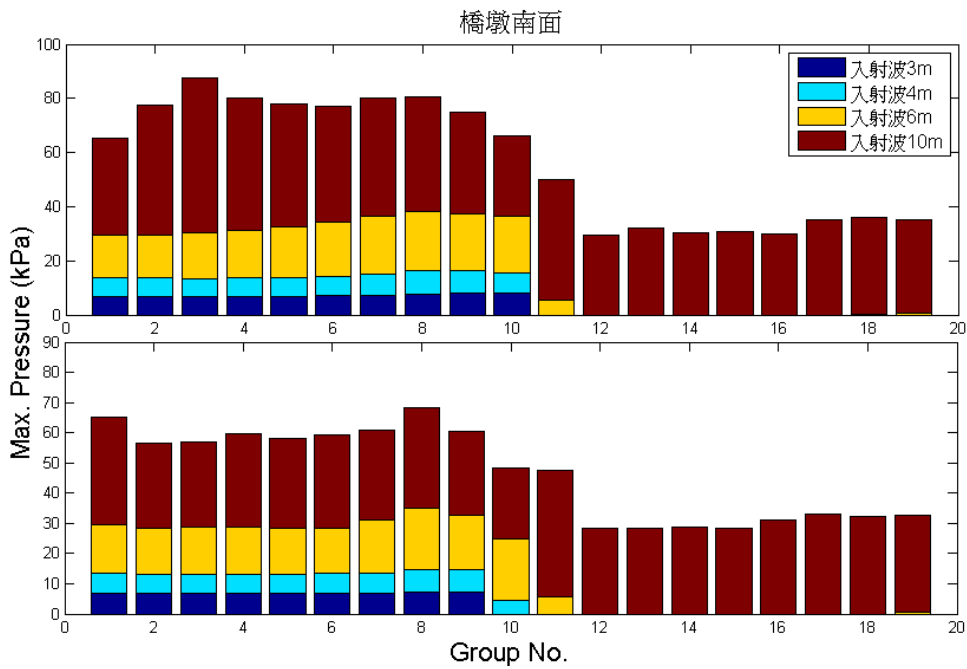


圖 6.32(c)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱南面之最大總壓力紀錄

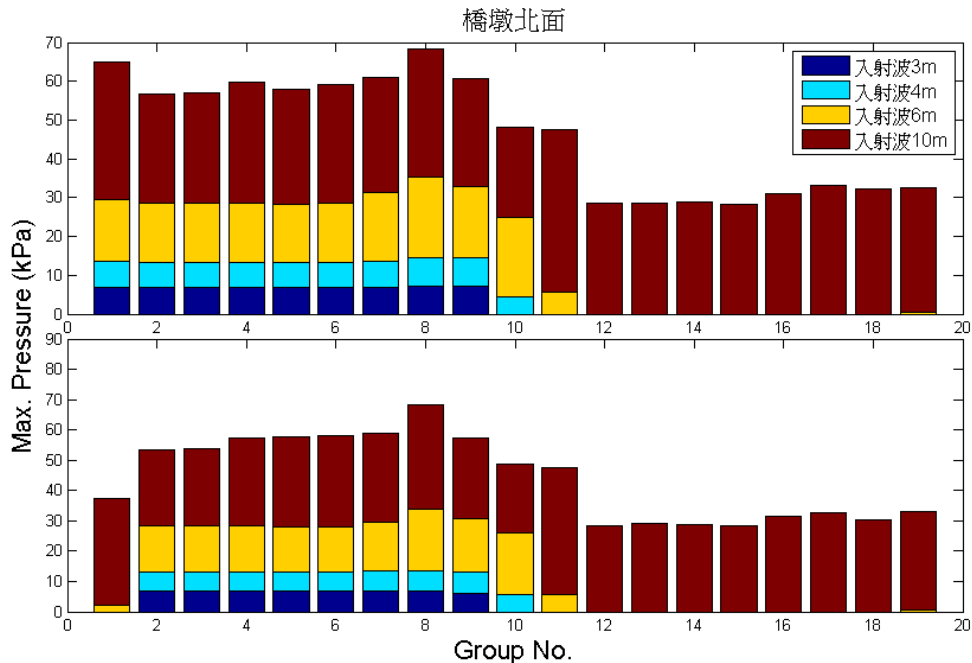


圖 6.32(d)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱北面之最大總壓力紀錄

#### 6.4.5 TRUCHAS 三維模擬

鑑於東日本海嘯，海嘯波傳至近岸時，受地形淺化效應而溯升，不僅對陸地造成溢淹，並攜帶龐大水體沿河口逆流而上，在溯升過程中，會產生強烈水流，對河道沖刷與淤積之現象，對跨河橋梁造成嚴重的衝擊及沖刷，對其橋梁造成安全上之威脅，而在東日本海嘯橋梁調查報告中(Chock, 2013)，有許多鐵路橋梁或公路橋梁倒塌主因不是沖刷致使橋樑裸落而損壞，而是其橋梁無法承受海嘯湧潮水流之側向力致使橋墩折損(圖 6.33)，或橋台受水流抬升及海嘯水體推移使橋面版脫離橋墩(圖 6.34)。

本研究使用 TRUCHAS 三維數值模式模擬及探討海嘯湧潮對橋墩及橋梁之衝擊力，對橋梁、橋面版、橋墩之水流側向力，並藉由模擬來觀察海嘯與橋梁互相作用下之壓力場及流場的變化。TRUCHAS 為美國 Los Alamos 國家實驗室(Los Alamos National Lab, LANL) 所發展的計算流體程式(CFD)，該模式早期使用由 Harlow and Welch (1965)發



展的標記網格法 (Marker and Cell, MAC) 描述自由液面，但因 Harlow and Welch (1965)自由液面邊界條件較為簡化，故流況複雜時，網格的邊界可能會因此而互相交錯，將會造成所求得的邊界不穩定，因此無法用於解決大振幅波動與碎波等問題。故後來 LANL 改為使用 Hirt and Nichols (1981)發展之流體體積法 Volume of Fluid (VOF)，該法為求解 VOF 方程式以得知下一時間步網格內流體之體積分率 (volume fraction) 分布狀況，藉此追蹤自由液面之運動。在網格的離散方面採用有限體積法 (Finite Volume Method, FVM)，而自由液面的追蹤則採前述的流體體積法 (Volume of Fluid method, VOF) (Hirt & Nichols, 1981)，其特色可以用來求解多相 (Multi-phase) 且不可壓縮之三維 Navier-Stokes equation (NSE)，TRUCHAS 模式使用 UNIX、LINUX 作業系統架構，加強模式運算時的穩定性，程式碼為使用 FORTRAN 撰寫，能支援 MPICH2 與 OPEN-MPI 平行化技術，以減少所需的計算時間。控制方程序參見附錄五。

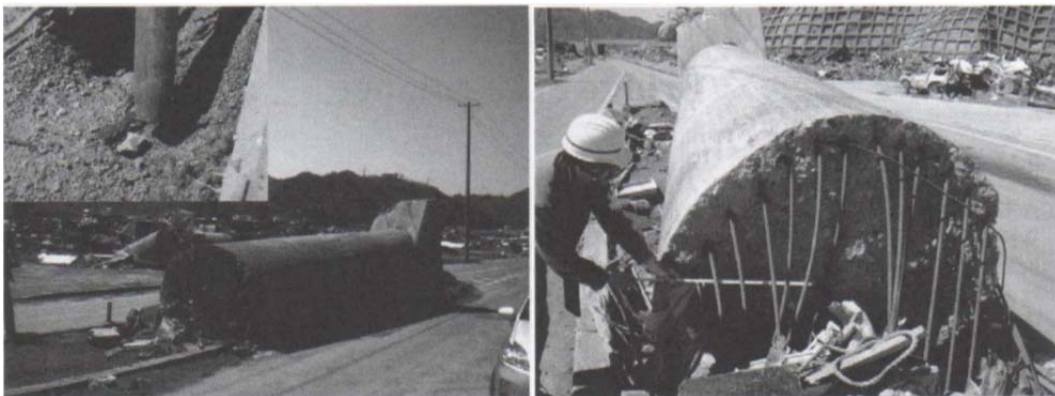


圖 6.33 東日本 311 海嘯致使鐵路橋墩折損 (資料來源：Chock, 2013)



圖 6.34 東日本 311 海嘯致使橋梁拖離橋墩 (資料來源：Chock, 2013)

#### 6.4.5.1 模式設定

模式區域以橋梁中心向下游延伸 80 公尺，向上游延伸 20 公尺，計總長 100 公尺，其模擬寬度為 120 公尺，採半域模擬來代表最大跨距 120 公尺，此可增加模擬時間長度；橋梁建模為參考圖 6.9 及表 6.2，橋梁寬度為 26 公尺，橋墩高度 9 公尺，橋面版高度 2 公尺如圖(6.35)，在將此模型轉換為模式的座標並使用模式內之幾何建立橋梁模型，網格為正交網格，網格數 120x200x40，網格解析度為 0.5 公尺(圖 6.36)；因 Truchas 尚無時序水位邊界模組，雖 COMCOT 至橋墩附近最大水位為 3 公尺高，以東日本海嘯許多橋梁受損為參考，故以重力塌陷法模擬入射水位 6 公尺、7 公尺、8 公尺、10 公尺，而重力塌陷法相似於潰壩，利用位能差來產生湧潮，並分別模擬原始河床無水位、有水位及上下游不同流速等 8 種不同情境，來探討水位多高其橋梁才會受影響。其下游向上游入射流速係參考 COMCOT 模式最大入射條件中第 5 組橋墩附近所模擬平均流速 6m/s 當此模式入射邊界條件，另河床在有水位情境下其上游向下游的入射流速為假定有流速及無流速，此模擬假設一 2m/s 向下游流，藉此模擬對橋梁橋墩週遭的三維流速與受力之影響。

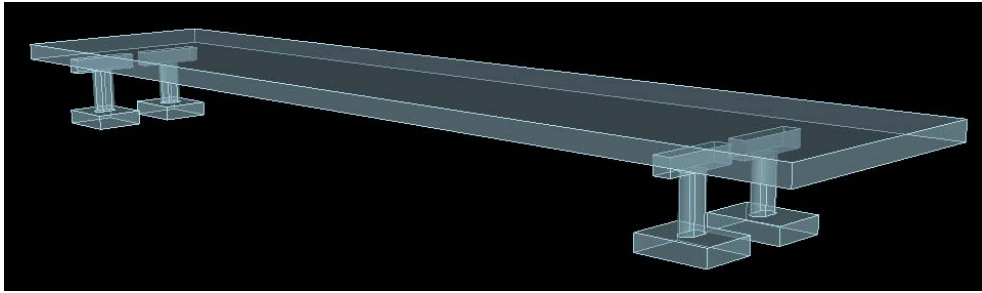


圖 6.35 橋梁模型

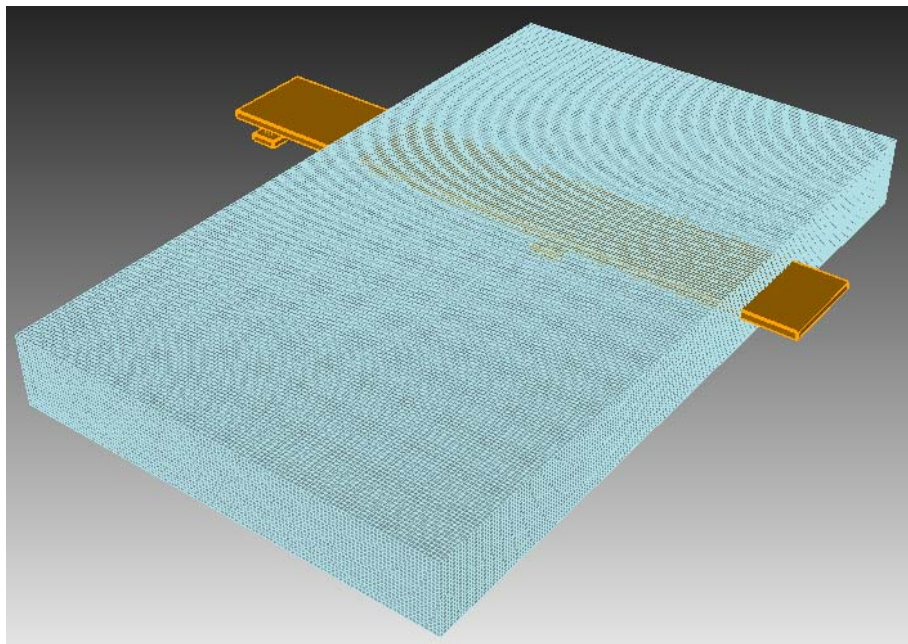


圖 6.36 0.5 公尺之網格解析度

#### 6.4.5.2 模擬結果

當模擬河川無水位時其水體對橋面版無衝擊之影響，而當河川有水位 2 公尺，入射水位小於 8 公尺後水體僅至橋面版下方，對橋面版無衝擊之影響，河川水位 3 公尺，入射水位大於 6 公尺對橋面版即有衝擊之影響，如表 6.8。以表 6.8 第 6 組模擬結果分析，於橋梁前方 50 公尺設定依 8 公尺之水體，以重力塌陷法方式湧向上游，網格下游邊界持續以 6m/s 流速流入，上游邊界 0 至 3 公尺高度邊界為 2m/s 向下游流入，上游邊界 3 至 20 公尺高度為開放邊界（壓力=0），網格兩側（YZ 面）邊界條件設定為 free-slip，網格底部為

no-slip，如圖 6.37。圖 6.38 為局部放大橋梁所受壓力分佈圖。觀察其流場與壓力場來做為討論之參考，圖 6.39 為剖面流速分布圖，色階為 Y 方向之流速速度，單位為 m/s。圖中黑色實線為水位面線，紅色為橋墩及橋梁，當水體塌陷後以湧潮方式向上游傳遞，並衝擊橋墩及橋面版，並形成碎波，流速最高達到 12m/s。圖 6.40 為 YZ 平面之壓力分布圖，單位為 Pa。圖中黑色實線為水位面線，紅色為橋墩及橋梁，當水體衝擊橋墩，時間 6.2 秒時，橋墩前方有較大的壓力。橋梁所受壓力其水體由下往上衝擊橋面版，於橋臺與橋面版接合處壓力為最大 120kpa，由模擬結果可知，水體衝擊橋梁結構時，橋梁結構所承受最大壓力之位置為橋墩及橋面版接合處，其後壓力最大值位置會逐漸轉移至橋墩底部。說明水體撞擊初期，受力以動壓為主，後期則轉變為靜壓力。將模擬結果作用於橋梁及橋墩上之作用力繪成剖面圖，圖 6.41 為橋面版側面(迎水面) 5.8 秒至 6.4 秒之作用力，因解析度為 0.5 公尺，橋面版位於模擬區域之 9 公尺至 11 公尺之高度，其作用力分佈以橋面版下緣受力較大，圖 6.42 為橋面版下側所受水體第 5.8 秒至 6.4 秒之作用力，當水體撞擊橋墩後因墩前擁水，作用力分佈集中於橋墩及橋面版接合處，隨著湧潮向前推進，第 6.2 秒作用力分佈集中於第二座橋墩及橋面版接合處，圖 6.43 為橋梁及橋墩所受側向力分佈圖，其中墩柱為圓形柱體，橋面版及橋墩為平頭形狀，垂直於入流方向，其所受作用力橋面版及橋墩較大於柱體。圖 6.44 為橋面版迎水面隨時間總作用力變化，圖 6.45 為橋面版下方總上舉力隨時間總作用力變化，圖 6.46 為橋梁及橋墩總側向力隨時間總作用力變化。

表 6.8 不同入射水位及原始水位之模擬結果

	入射水位	入射流速	原始水位	向下游流速	結果
1	6m	8m/s	0m	0m/s	水體無衝擊至橋面版
2	8m	8m/s	0m	0m/s	水體無衝擊至橋面版
3	12m	8m/s	0m	0m/s	水體無衝擊至橋面版
4	10m	8m/s	2m	2m/s	水體衝擊至橋面版
5	8m	8m/s	2m	2m/s	水體衝擊至橋面版下
6	8m	6m/s	3m	2m/s	水體衝擊至橋面版
7	7m	6m/s	3m	2m/s	水體衝擊至橋面版
8	6m	6m/s	3m	2m/s	水體衝擊至橋面版

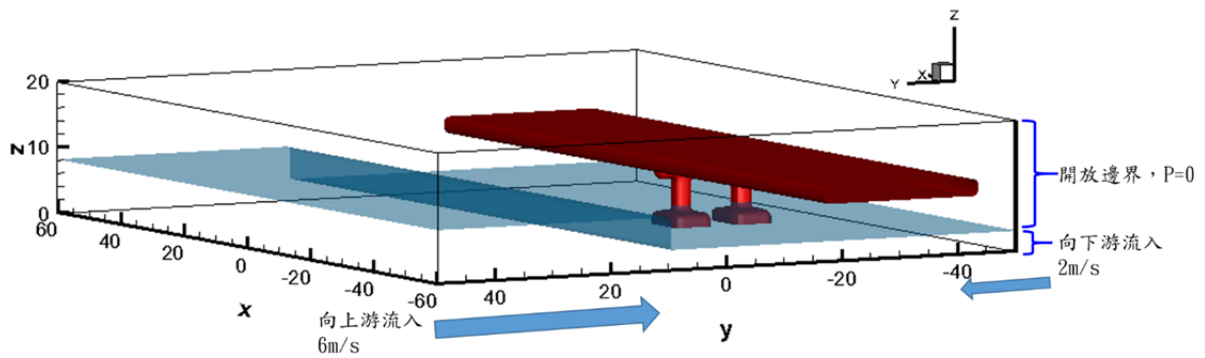


圖 6.37 模式設定之初始條件

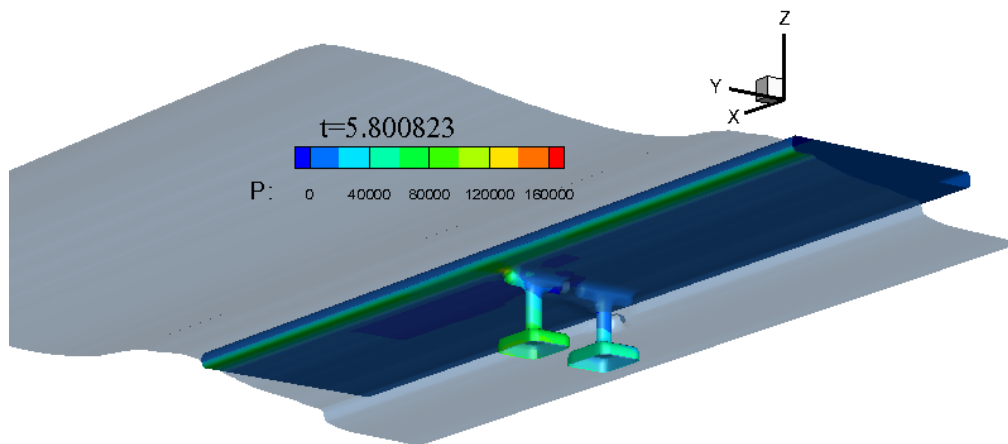


圖 6.38 橋梁受壓力之三維模擬圖(T=5.8s)



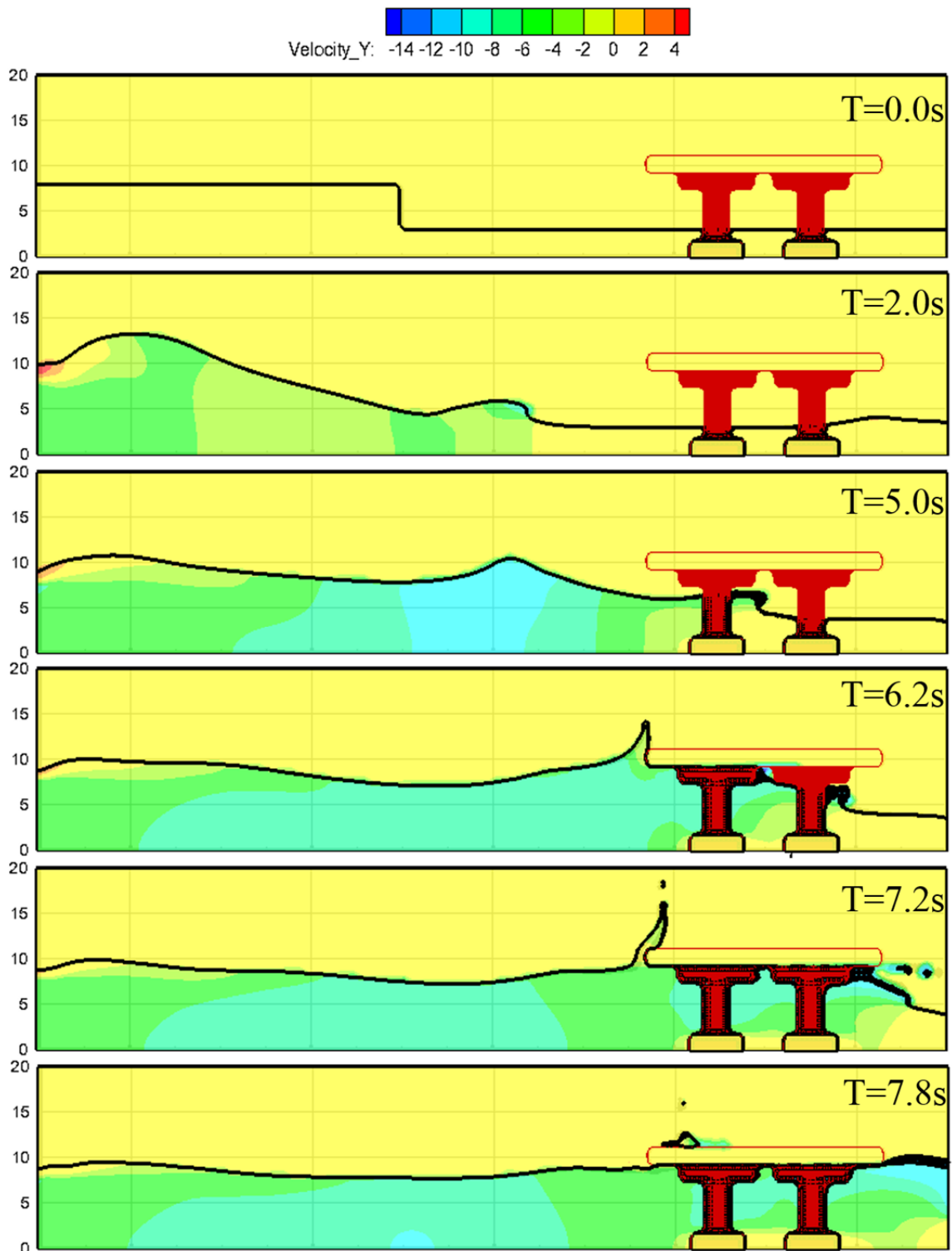


圖 6.39 模擬之剖面流速

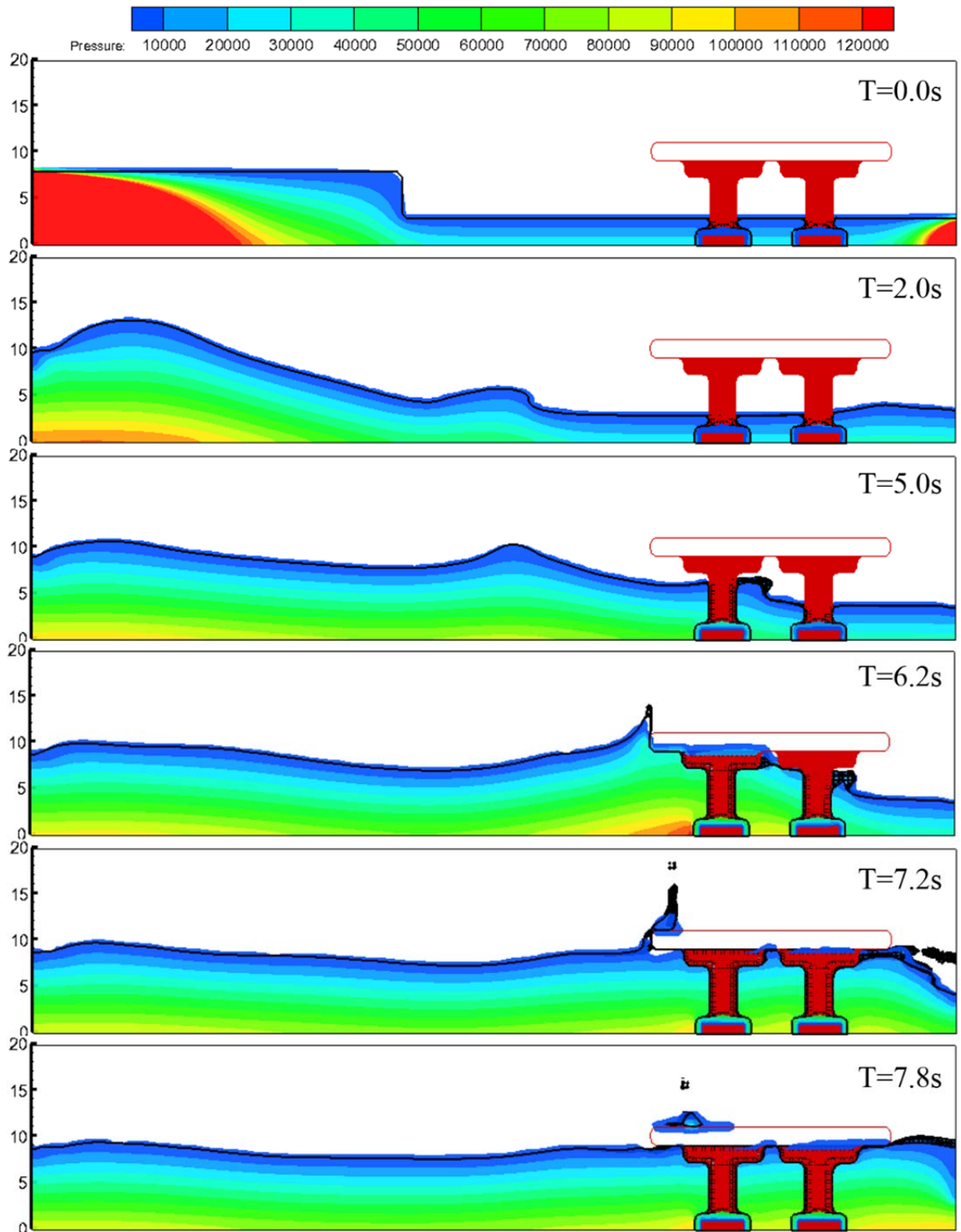


圖 6.40 模擬之剖面壓力分佈圖

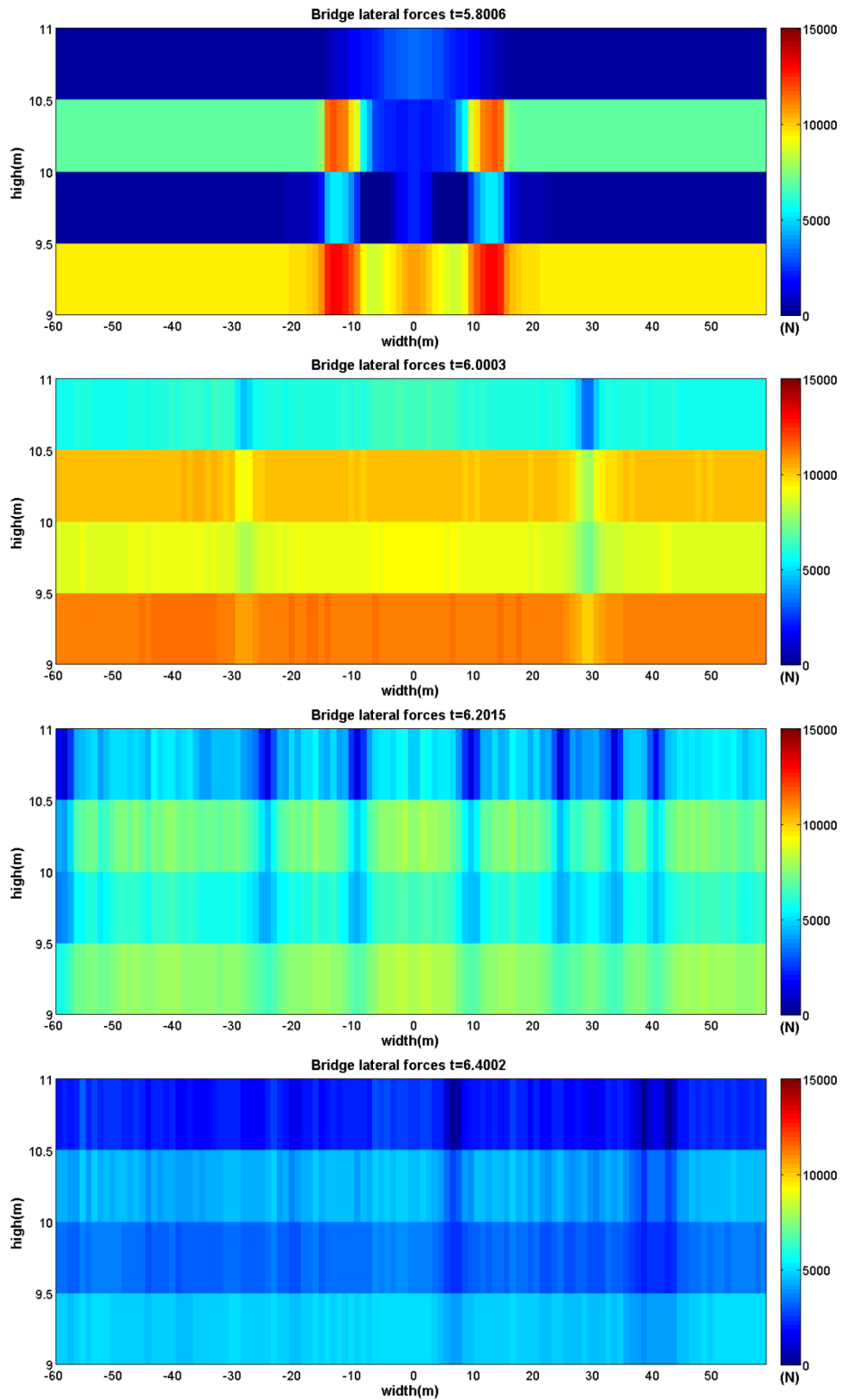


圖 6.41 橋面版迎水面壓力(T=5.8 秒至 6.4 秒)



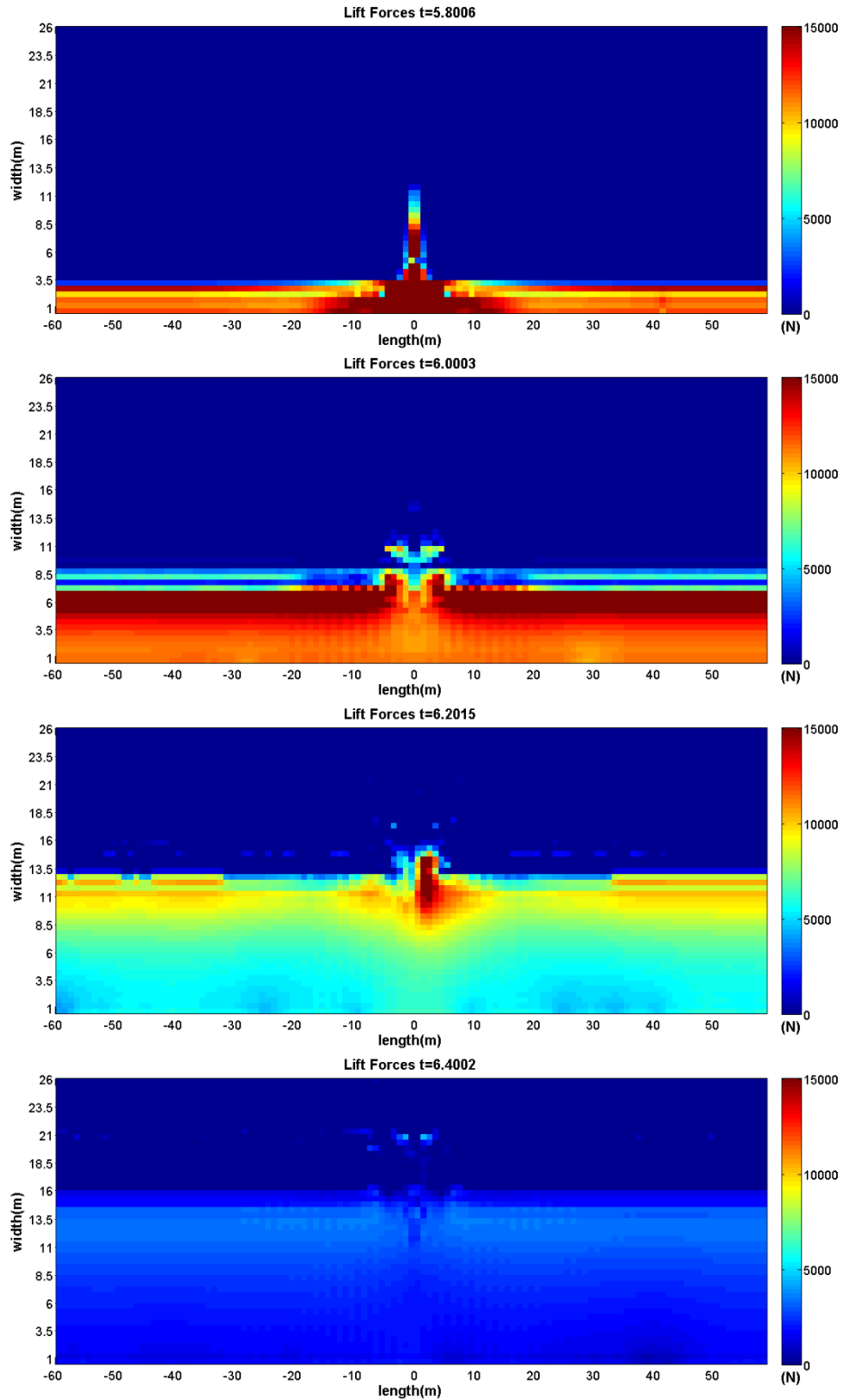


圖 6.42 橋面版下方受上舉力分佈圖(T=5.8 秒至 6.4 秒)

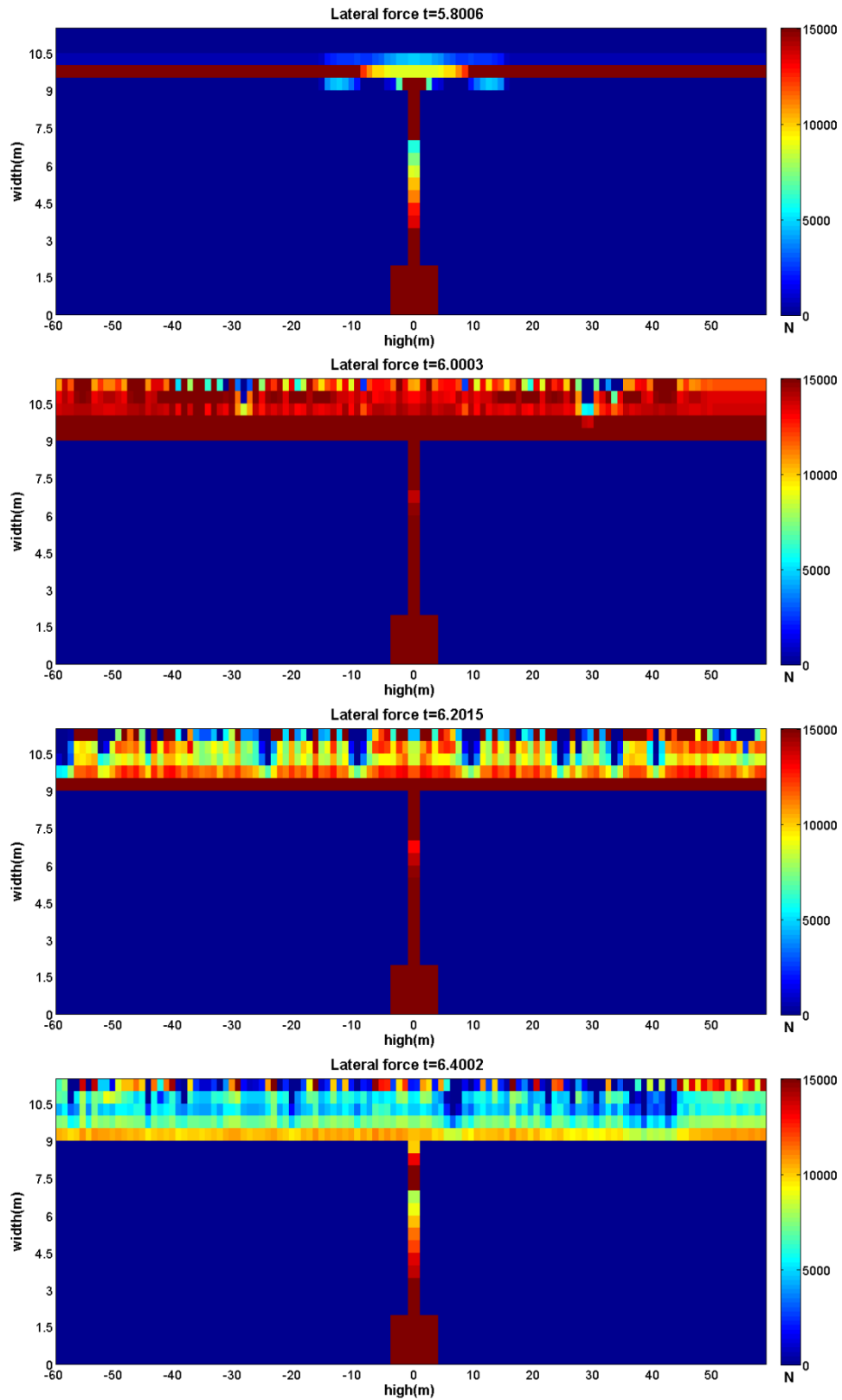


圖 6.43 橋梁及橋墩所受側向力分佈圖(T=5.8 秒至 6.4 秒)

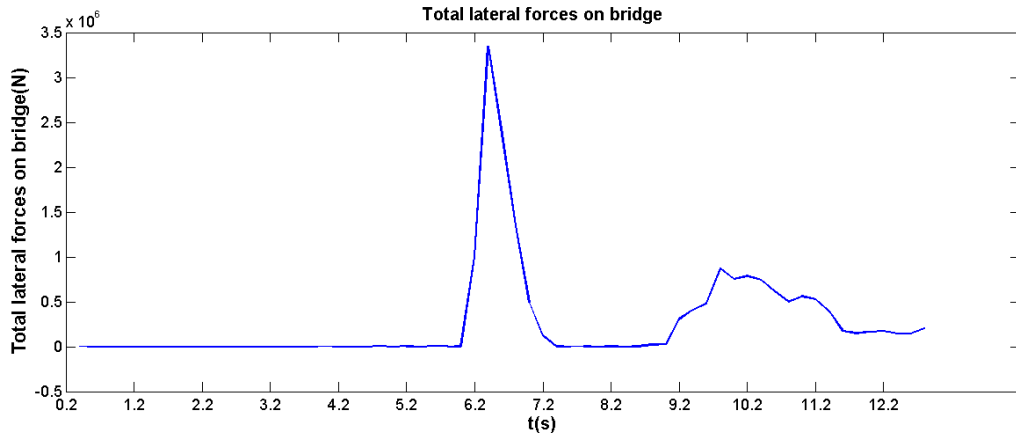


圖 6.44 橋面版迎水面總作用力

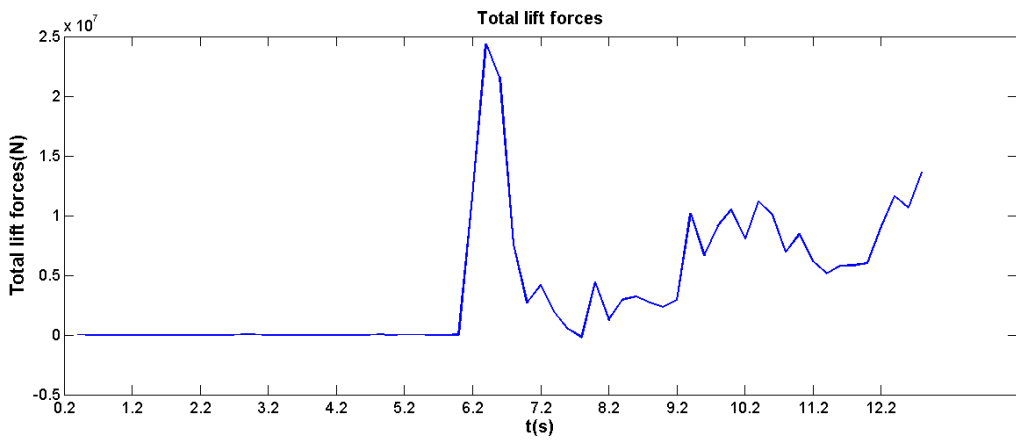


圖 6.45 橋面版下方總上舉力

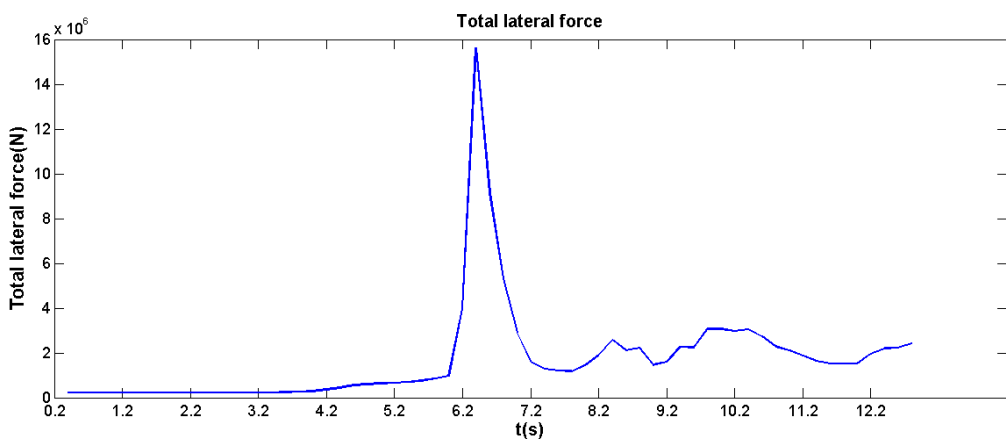


圖 6.46 橋梁及橋墩總側向力

表 6.9 不同入射水位於高屏溪模擬結果

入射 水位	溯上 距離	跨河橋梁 最大水位	COMCOT 沖刷大小		FLUDITY 沖刷大小	
			最大堆 積厚度	最大侵 蝕厚度	最大堆 積厚度	最大侵 蝕厚度
0.5m	0.48km	0m	0m	0m	0m	0m
1m	1.38 km	0m	0m	0m	0m	0m
2m	2.12 km	0m	0m	0m	0m	0m
3m	3.07 km	0.78m	0.013m	0.025 m	0.044m	0.054 m
4m	4.19 km	1.58m	0.052 m	0.095 m	0.129 m	0.234 m
6m	6.17 km	3.85m	0.132 m	0.415 m	0.437 m	0.718 m
10m	8.44 km	11.3373m	0.674 m	1.283 m	0.163 m	1.000 m

## 第七章 結論與建議

本研究探討海嘯模擬技術為主軸，經由前期成果、海嘯資料蒐集、海嘯速報系統之建置、海嘯數值模式精進及實例探討和海嘯災害風險評估，並加入海嘯沿河道溯上對跨河橋梁之模擬評估，整合前 3 年度 8 個主要商港分析成果，可供為臺灣港務公司及其各港務分公司之海嘯來襲應變參考。茲將本研究所獲致之結論與建議分成兩節來陳述。

### 7.1 結論

- (1)有鑑於近來太平洋區域發生多起重大之海嘯事件，且現今預報機制多依賴美日等鄰國之資訊，為增進臺灣海嘯警報之可信度、減少假警報以及提供較充裕之預警時間及海嘯資訊，將近岸海嘯預警系統拓展至遠海域，並建立子系統已達到強化應變海嘯風險之能力。已完成開發 8 個主要商港的海嘯速報系統/預報系統，在海嘯發生初期即利用歷史參數或是即時地震參數計算各港口對應可能水位變化及到達時間，而後將資訊彙整至權責單位憑以進行後續程序。
- (2)整合先前 3 個年度的成果，8 個主要商港在未來 50 年及 100 年海嘯災害風險評估，臺北港域評估結果分別為 2.79%與 5.59%；基隆港域評估結果分別為 3.25%與 6.49%，臺中港評估結果分別為 0.18%與 0.33%，布袋港評估結果分別為 0.1%與 0.2%，安平港評估結果分別為 9.84%與 19.43%；高雄港評估結果分別為 0.55%與 1.09%，蘇澳港評估結果分別為 0.24%與 0.47%；花蓮港評估結果分別為 0.67%與 1.29%。
- (3)以 COMCOT 分別模擬 0.5 公尺、1 公尺、2 公尺、3 公尺、4 公尺、6 公尺、10 公尺之入射波高，於高屏溪所溯上距離分別為 0.48 公里、1.38 公里、2.12 公里、3.07 公里、4.19 公里、6.17 公里、8.44 公里，其入射波大於 2.5 公尺，海嘯波會沿河道溯上至雙園大橋對其影響，入射波大於三公尺於雙園大橋之最大水位分別為 0.78 公尺、1.58 公

尺、3.85 公尺、11.3373 公尺。以 10 公尺入射波高且河川有水的情境下橋墩墩柱所承受最大總壓力為 87.585kpa，三維模式作用於橋臺與橋面版接合處最大動壓力為 120kpa。

(4)使用 COMCOT 以 4 種情境的沉積物模擬中共同的趨勢是最大侵蝕和最大堆積隨入射波波高增加而增加，且每種情境的各橋墩附近的最大侵蝕皆大於最大堆積。因為地形高程較高的關係，第 11 組到第 19 組橋墩在較大波高的入射情境下，才會出現侵蝕和堆積。在 3 公尺入射的情境下，對第 1 到 10 組橋墩造成不到 5 公分的地形變化。在 4 公尺入射的情境中，第 1 到 11 組橋墩中最多只有 12 公分的地形變化。在 6 公尺入射的情境中，對第 1 到 12 組橋墩造成地形影響，其中以第 2 組橋墩的 62 公分侵蝕最多。而 10 公尺入射的情境則對全部橋墩皆有影響，其中 7 組橋墩(第 2、3、4、5、7 和 10 組)出現超過 1 公尺的侵蝕。藉由英國倫敦帝國理工學院 (Imperial College London) 的三維模式 Fluidity 模式的沉積物功能，進行 6 個不同條件的模擬，探討河流中的橋墩受到特定的水位溢淹時，對橋墩附近的底床沉積物所造成的影響，在情境 1 到 4 的最大侵蝕值為 0.054、0.234、0.718 和 1 公尺，最大沉積值為 0.044、0.129、0.437 和 0.163 公尺，大致上邊界傳入的水位越高所造成的侵蝕越大。使用美國 Los Alamos 國家實驗室(Los Alamos National Lab, LANL) 所發展的計算流體程式 TRUCHAS 模擬海嘯湧潮對橋墩及橋梁之衝擊力，分別模擬原始河床無水位、有水位及上下游不同流速等 8 種不同情境，其結果為當原始河川有水位及水流時，其湧潮會因擁水而使橋面版受水體作用力影響，因 COMCOT 模擬結果至橋墩附近最大水位為 3 公尺高，對於雙園大橋影響以地形影響較大。

## 7.2 建議與後續研究方向

(1)目前已完成基隆、臺北、臺中、布袋、安平、高雄、蘇澳、花蓮港預警子系統與海嘯風險評估，及海嘯沿高屏溪口向上游高屏溪跨河

橋梁橋墩週遭受海嘯沖刷及衝擊之影響，建議擴展至沿海地區跨河公路橋，用以作為海嘯災防之參考評估。

- (2)本研究模擬海嘯波部分使用週期 20 分鐘之單一入射波，入射方向為正向入射，雖然可造成較大溢淹結果，但與實際海嘯波仍有落差，未來可針對入射波波形、數個連續的波、不同週期與入射方向等條件進行討論；並除了模擬海嘯波高變化外，另模擬流量、流速等結果，用以提供港灣結構物設計與結構物受海嘯侵襲承受度等，更詳盡的參考資訊。





## 參考文獻

1. 江新春(1976)，“宜蘭平原之震測”，礦業技術第 14 卷，第 6 期，pp.215-221。
2. 許明光、李起彤(1996)，「台灣及其臨近地區之海嘯」，台灣海洋學刊，第 35 期，第 1 號，pp.1-16。
3. 張國棟、許明光、Philip. L. F. Liu、S. B. Woo (1999)，「東台灣海嘯溢淹模擬」，第 21 屆海洋工程研討會論文集。
4. 邱永芳、王慶福、富田孝史(2005)，「海嘯發生與傳播特性之研究」，港灣報導，72 期，pp.13-22。
5. 李昭興、許明光、鄭文彬、蕭士俊、林欽隆、郭鎧紋、陳致宏(2006)，「我國東北角海嘯警報系統建立之初始研究」，中央氣象局研究報告。
6. 陳陽益、陳冠宇、陳文山、蘇青和、單誠基(2007)，「臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析(1/4)」，交通部運輸研究所。
7. 陳韻如(2007)，「屏東外海地震引發海嘯的數值模擬探討」，國立中央大學水文科學研究所碩士論文。
8. 劉俊志、陳冠宇(2008)，「以格林函數快速預報高雄港外海嘯高度」，中華民國第 30 屆海洋工程研討會。
9. 交通部(2009)，公路橋梁設計規範。
10. 莫拉克災害台 17 線 248k+100~251k+000 雙園大橋緊急改建工程竣工圖(2009)，交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處。
11. 陳伯飛、蕭乃祺、林伯佑 (2009)，利用單位海嘯模擬來建立臺灣海域近海海嘯預警系統,交通部中央氣象局研究成果報告。
12. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基(2011)，「臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析(4/4)」，交通部運輸研究所。

13. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎(2012) , 「提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(1/4)」, 交通部運輸研究所。
14. 陳冠宇、陳陽益(2012), 東北海岸海嘯溢淹潛勢圖製作之研究, 經濟部水利署合作研究計畫期末報告。
15. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎(2013), 提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(2/4), 交通部運輸研究所。
16. 陳冠宇(2013) 「海嘯預警與溢淹潛勢圖數值模擬之回顧與探討」, 海洋工程學刊, 第 13 卷, 第 1 期, 第 69-91 頁。
17. 陳譽宗(2012) , 「淺水數值模式在海嘯溢淹範圍與橋樑沖刷之應用」, 國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所碩士論文。
18. 柯永彥、邱俊翔、蔡煜青、陳正興(2012), 「受沖刷橋梁耐洪能力評估方法」, 國家地震工程研究中心報告(NCREE-12-020)。
19. 劉俊志、陳冠宇、邱永芳、蘇青和(2014) , 「模擬海嘯波對跨河橋梁附近沉積物之影響-以雙園大橋為例」, 中華民國第 36 屆海洋工程研討會。
20. 全球地震矩網頁 Global CMT <http://www.globalcmt.org/>.
21. 日本防災科學技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention(NIED) <http://www.bosai.go.jp/>
22. 中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/>.
23. 美國 NGDC 資料庫 <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml>.
24. 美國地調所 USGS 資料庫 <http://www.usgs.gov/>.
25. 美國地調所 USGS 國家地震訊息中心 NEIC 資料庫 <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>.
26. 台灣港務股份有限公司/高雄港務分公司 <http://www.khb.gov.tw/>
27. 台灣港務股份有限公司 / 台中港務分公司 <http://www.tchb.gov.tw/ch/Index.aspx>

28. Applied Modelling and Computation Group, Fluidity Manual, Version 4.1.11, Imperial College London.
29. Chen, G. Y. and C. C. Liu (2009), “Evaluating the Location of Tsunami Sensors: Methodology and Application to the Northeast Coast of Taiwan”, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 20(4), pp.563-571, doi: 10.3319/TAO.2008.08.04.01(T).
30. Chen, G. Y., C. C. Liu and C. H. Lin (2011), ”Probabilistic Forecast of Tsunami Inundation (PFTI) and Earthquake-induced Tsunami Inundation Probability (ETIP)—Algorithm and Application to the Southwest Coast of Taiwan”, *Tsunami Simulation for Impact Assessment*, pp.74-83.
31. Chen, G. Y., C. H. Lin and C. C. Liu (2012), “Quick Evaluation of Run-up Height and Inundation Area for Early Warning of Tsunami”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 6(1), 1250005, pp. 1-23.
32. Chen, G. Y., C. C. Liu, and C. C. Yao, (2013), “Forecast System for Offshore Water Surface Elevation With Inundation Map Integrated for Tsunami Early Warning”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, DOI: 10.1109/JOE.2013.2295948
33. Chen, G. Y., Y. F. Chiu, J. H. Lin, C. C. Lin, Y. W. Chang and C. J. Lien (2014), “Combining Tsunami Hazard and Vulnerability on the Assessment of Tsunami Inundation Probability in Taiwan”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 8(3), 1440003 DOI: 10.1142/S179343111440003X.
34. Chock, G., Robertson, I., Kriebel, D., Francis, M., and Nistor, I. (2013) “Bridge Performance. Tohoku, Japan, Earthquake and Tsunami of 2011”, *American Society of Civil Engineers*, pp. 163-178.
35. Fritz, H. M., J. V. Hillaire, E. Molière, Y. Wei and F. Mohammed (2012), “Twin tsunamis triggered by the 12 January 2010 Haiti

- earthquake”, *Journal of Pure Applied Geophysics*, pp. 1-12, doi:10.1007/s00024-012- 0479-3
36. Garcia, M. and Parker, G. (1991) “Entrainment of bed sediment into suspension”, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 117(4), 414-435.
  37. Gusiakov, V. K. (2005), “Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific”, *Marine Geology*, 215, pp.3-9.
  38. Gutenberg, B. and C. F. Richter (1944), “Frequency of earthquake in California”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, pp.185-188.
  39. Hanks, C. T. and H. Kanamori (1979), “A Moment Magnitude Scale”, *Journal of Geophysical Research*, 84(85), pp.2348-2350.
  40. Harlow, F. H. and Welch, J. E., 1965, “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with a free surface”, *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2182-2189, 1965.
  41. Hirt, C. W., Nichols, B. D. and Romero, N. C., “SOLA-a numerical solution algorithm for transient fluid flows”, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-582, pp. 1-50, 1975.
  42. Kirby, S., E. Geist, William H. K. Lee, David Scholl and Richard Blakely (2005), ”Tsunami Source Characterization for Western Pacific Subduction Zones: A Preliminary Report”, USGS Tsunami Subduction Source Working Group, pp.21.
  43. Liu, C. S., I. L. Huang and L. S. Teng (1997), “Structural features off Southwestern Taiwan”, *Marine Geology*, 137, 305-319.
  44. Liu, P. L. F., Y. S. Cho, S. B. Yoon and S. N. Seo (1994), “Numerical Simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii”, In *Recent development in tsunami*

- research, edited by M.I. El-Sabh, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp.99-115.
45. Liu, P. L. F., S. B. Woo and Y. S. Cho (1998), “Computer programs for tsunami propagation and inundation”, Cornell University.
  46. Lin, J. H., Y. F. Chen, C. C. Liu, G. Y. Chen, (2014), “Building a pre-calculated quick forecast system for tsunami runup height”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 8(3), 1440002 DOI: 10.1142/S1793431114400028
  47. Loomis, H. G. (1979), “Tsunami prediction using the reciprocal property of Green's functions”, *Marine Geology*, 2(1), pp.27-39.
  48. Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971), “The displacement fields of inclined faults”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), pp.1433-1440.
  49. Megawati, K., F. Shaw, K. Sieh, Z. H. Huang, T. R. Wu, Y. Lin, S. K. Tan and T. C. Pan (2009), “Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami”, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol.36, Issue 1, p.13 - 20. Elsevier
  50. Murty, T. S. (1979), “Seismic Sea Waves-Tsunamis”, Fishery Research Board of Canada.
  51. National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5PN93H7
  52. Nakamura, M.(2006), “Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation”, *Pureappl. geophys.*, 163, 41-54

53. Rance, P.C. (1980) , “The potential for scour around large objects. Scour Prevention In : Techniques Around Offshore Structures”, Society for Underwater Technology, London, pp.41-53.
54. Richardson J., Dillon, A., & McKnight, C. (1993) , “Space - The Final Chapter Why Physical Representations are not Semantic Intentions”, A Psychological Perspective, pp.169-191.
55. Ribberink, J.S. (1998), “Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows”, Journal of Coastal Engineering, Vol. 34, pp. 59-82.
56. Sa´nchez, A. and K. F. Cheung (2007), “Tsunami forecast using an adaptive inverse algorithm for the Peru-Chile source region”, Geophysical Research Letters, Vol. 34, pp. 15, L13605, doi:10.1029/2007GL030158.
57. Scordilis, E. M. (2006), “Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude”, Journal of Seismology, 10(2), pp.225-236.
58. Shuto, N. (1991), “Numerical Simulation of Tsunamis – Its Present and Near Future”, Natural Hazards 4, pp.171-191.
59. Synolakis, C. E. and E. J. Skjelbreia (1993), “The four zones in the evolution of solitary waves on plane beaches”, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 118(3), pp. 252-266.
60. The TELLURIDE Team, “Truchas physics and algorithms”, Version 2.7.0, 2013.
61. Wang, X. M. and P. L. F. Liu (2007), “Cornell Multigrid Coupled Tsunami model (COMCOT) User Manual”, Cornell University.

62. Wei, Y., K. F. Cheung, G. D. Curtis and C. S. McCreery (2003), “Inverse algorithm for tsunami forecast”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 129(2), pp. 60-69.
63. Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994), “New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84(4), pp. 974-1002.
64. Wu, Z. and N. E. Huang (2008), “Ensemble empirical mode decomposition: anoise assisted data analysis method”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 1(1), pp. 1-41.
65. Xu, Z. (2007), “The All-source Green's Function and its Applications to Tsunami”, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 26(1), pp. 59-69.





## 附錄一 互逆格林函數之驗證與應用

### ■ 以實例說明互逆格林函數的計算模式設定與驗證

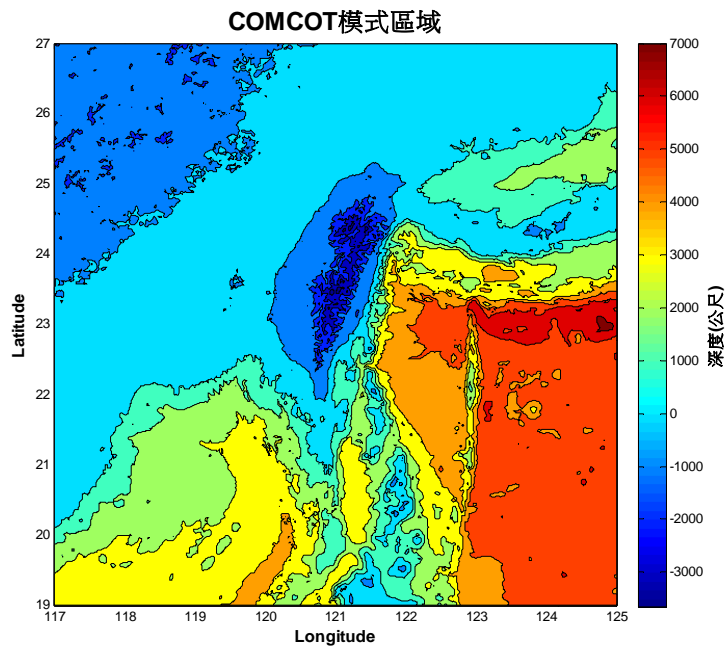
本計劃使用海嘯數值模式COMCOT (Liu et al., 1998)計算水位傳播，模式可選用的淺水方程式包含線性或非線性兩者；本案例採用線性淺水方程式用以描述海嘯波在海域深度超過 50m的變化，不考慮非線性及摩擦力的影響。模式區域範圍在東經 117° 至 125°，北緯 19° 至 27° (圖A1)，網格點 481\*481，解析度 1 分。以高雄為例，首先在高雄港外水深 50m的定點s(圖A2)，並且給予水位高度 1m當成波源振幅，經模式計算水位傳播 3 小時(圖A3-A5)，除s點之外，所有的點皆視為接收點r，而s點即為之後海嘯高度預報的水位點。

$$S_t + Q_x + R_y = 0 \quad (\text{A1})$$

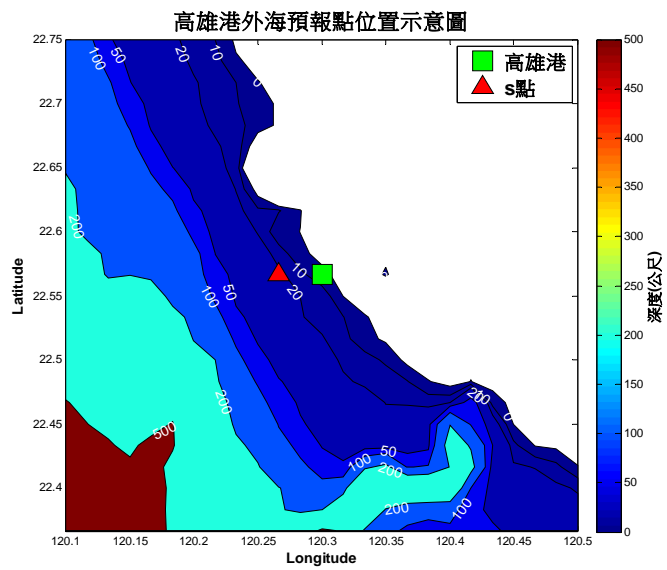
$$Q_t + g d S_x = 0 \quad (\text{A2})$$

$$R_t + g d S_y = 0 \quad (\text{A3})$$

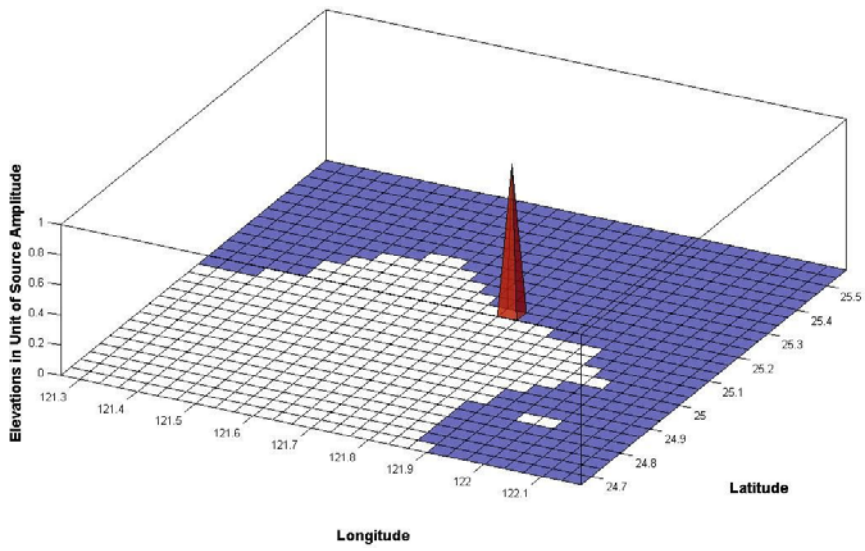
(A1)~(A3)式即是線性淺水方程式；其中 S 為水位高度，Q、R 各為 x、y 方向的流量，d 為總水深，g 為重力加速度。故對於接收點而言，其互逆格林函數值可事先建立資料庫，當地震發生時，僅需知道初始水位後，即可預測當地之實際水位。



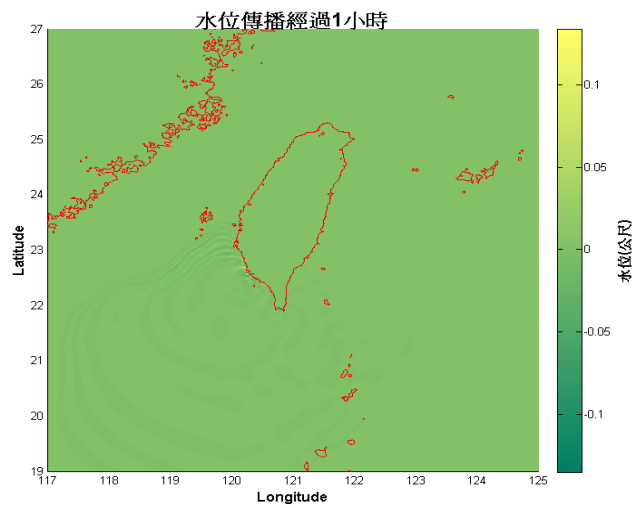
圖A1 互逆格林函數驗證之計算區域圖



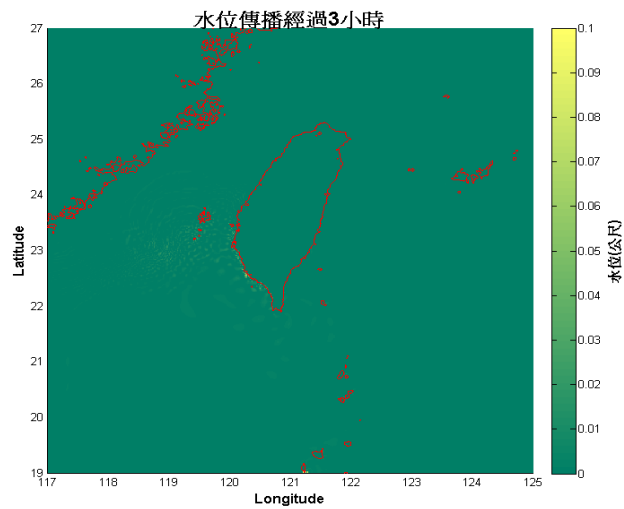
圖A2 海嘯高度預報點(r點)位置圖



圖A3 模式在r點設定1m初始水位



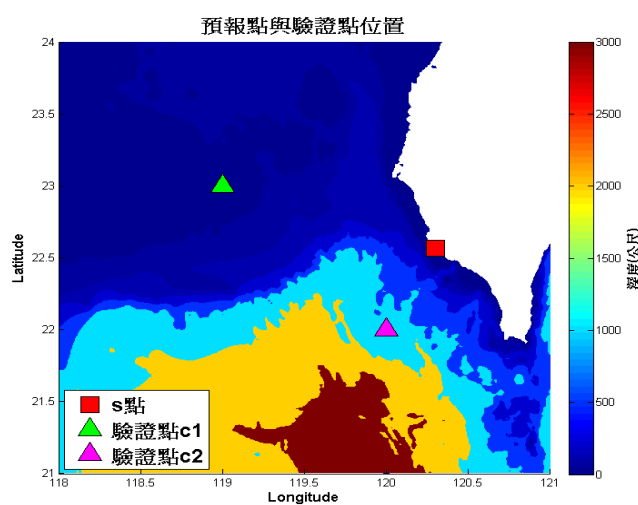
圖A4 r點初始水位傳播1小時後



圖A5 r點初始水位傳播3小時後

## ■ 互逆格林函數的驗證

為了驗證由模式所計算結果之正確性，在此選擇 s 點設置起始波源進行模式水位傳播，之後各別在 c1 與 c2 點(圖 A6)設置同樣波源進行傳播，由這三次模擬可得到 s、c1、c2 三點相互傳播的 GF (圖 A7)，基本上互傳的結果相一致，儘管由數值模式計算產生的誤差導致了微小差異。



圖A6 互逆GF驗證點的位置圖

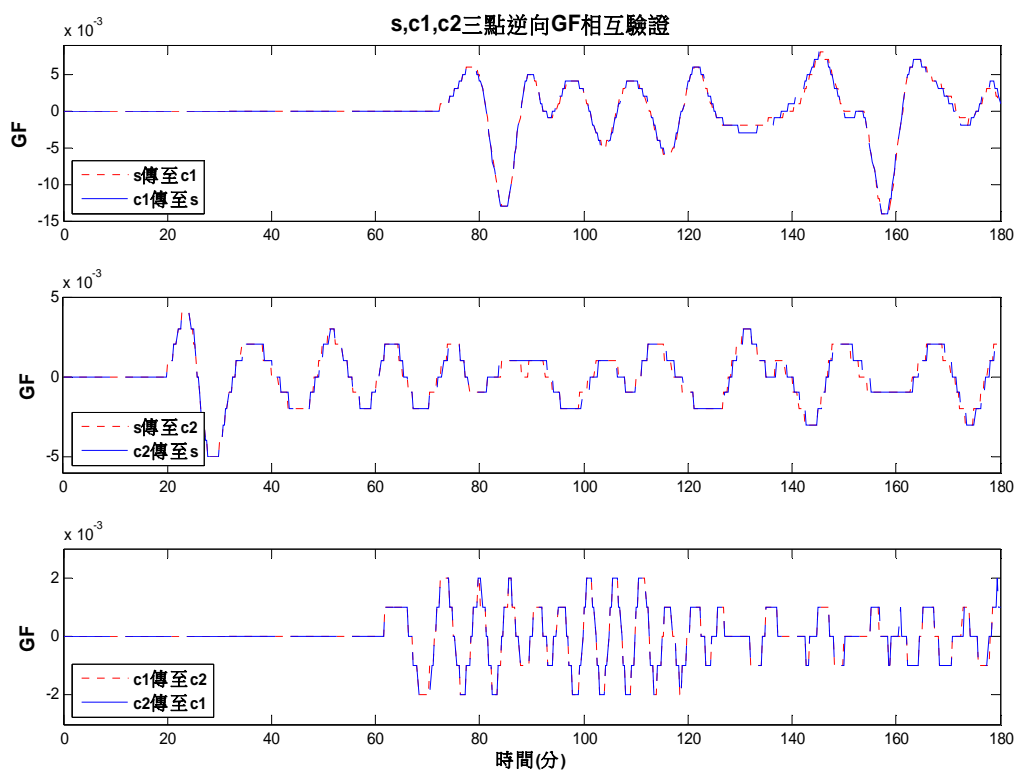


圖 A7 GF 與互逆 GF 一致性之驗證

另外，也利用南亞海嘯之案例，將互逆格林函數之結果與海嘯數值模式之結果比較，如圖 A8 所示。結果顯示，兩者甚為相符。在此必須強調的是，格林函數之概念雖可以提高海嘯模式計算效率等諸多優點，但不代表不需要海嘯數值模式；後續之海嘯早期預警系統資料庫之建立，仍舊依賴海嘯數值模式；此外，互逆格林函數之概念即是應用線性系統之可逆性，故在選擇接收點位時，就必須仔細考慮該點之水深是否符合線性之要求；如要計算港內之波高時，則必須使用其他方式加以估算。

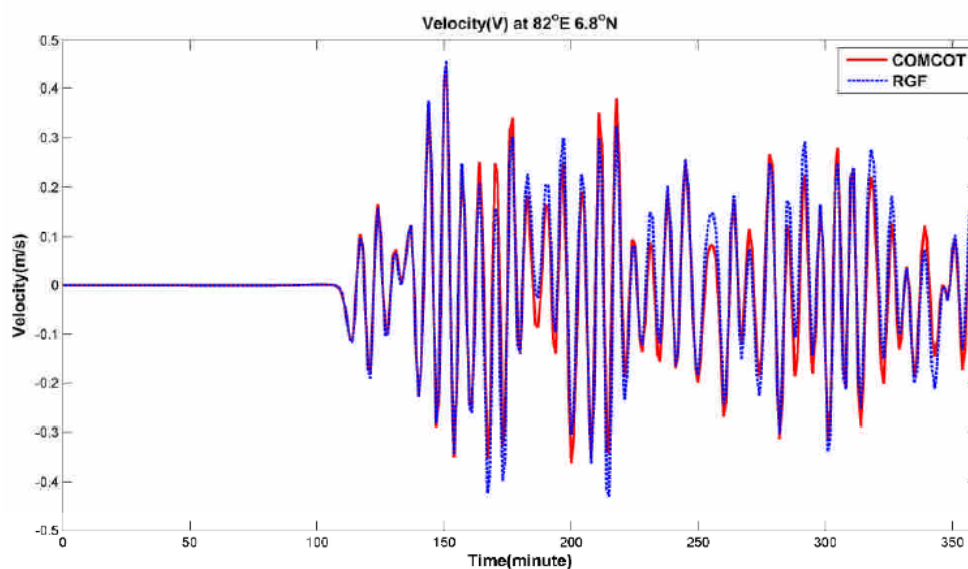


圖 A9 COMCOT 海嘯模式結果與互逆格林函數之比較  
(斯里蘭卡 東經 82 度 北緯 6.8 度)

## ■ 外海海嘯預報的格林函數應用(以高雄為例)

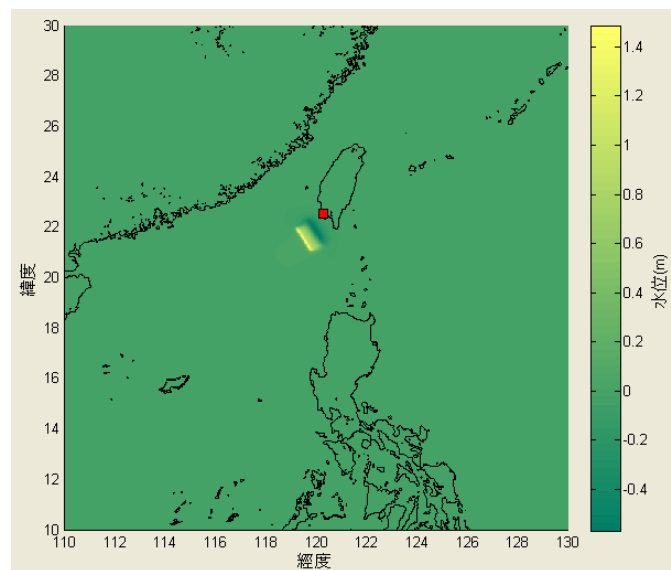
將波源區的所有格林函數乘上當地海床的垂直位移後相疊加，即可求出海嘯高度與到達時間。以下進行案例測試來了解發生海嘯對接收點r的水位影響，第一次試驗代入斷層模式所用的參數同陳(2007) 引用的 2006 年屏東大地震斷層參數，其參數來源為Harvard CMT世界地

震網，使用的地震規模為Kanamori(1977)提出的地震矩規模(moment magnitude, Mw)，因第二場地震對水位影響不大(陳, 2007)，所以僅採用第一場地震的斷層參數。案例假設震央在東經 119.5°、北緯 21.5° 發生地震矩規模高達 8 的海底地震所引發的海嘯，斷層參數如表A1。

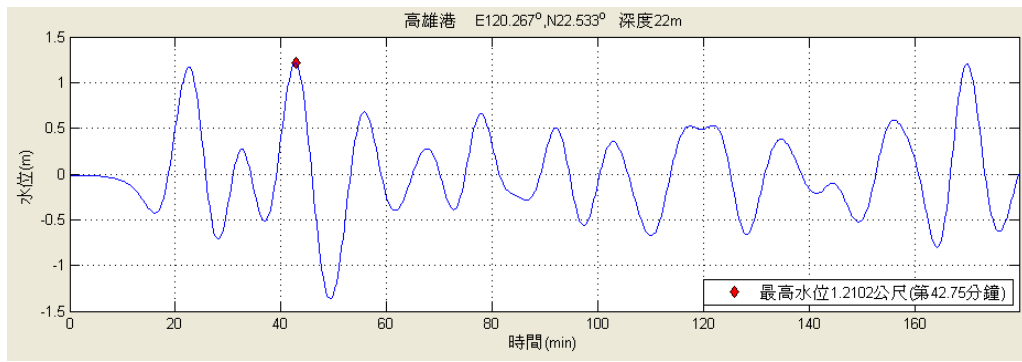
表A1 的參數代入斷層模式所得的海嘯起始水位如圖A10。經由互逆格林函數計算出的s點預報水位結果如圖A11。預報結果顯示在接收點r處受海嘯作用引起的水位最大值達 1.2102m(接近第 42 分)，對高雄港近岸有明顯之影響。

**表A1 互逆格林函數模擬案例之斷層參數表**

震央位置	東經 119.5° 北緯 21.5°
震源深度	5000mm
斷層長度	119735mm
斷層寬度	59867.4mm
平均滑移量	3.53mm
strike direction	329 度
dip angle	15 度
slip angle	110 度
地震矩規模	8.0



**圖A10 RGF測試案例在s點的海嘯起始高度**



圖A11 於高雄港接收點r的海嘯高度預報



## 附錄二 速算系統介面及操作說明

### 台灣國際商港海嘯速算系統

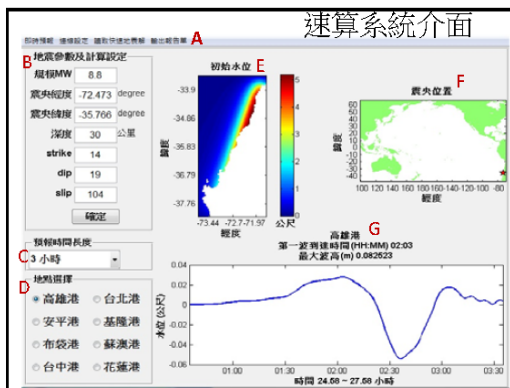
### 教學大綱

1. 速算系統介面介紹
2. 輸入地震參數操作示範
3. 即時預報設定介紹
4. 即時預報操作示範

### 目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1. 速算系統介面介紹
- 2. 輸入地震參數操作示範
- 3. 即時預報設定介紹
- 4. 即時預報操作示範

### 速算系統介面



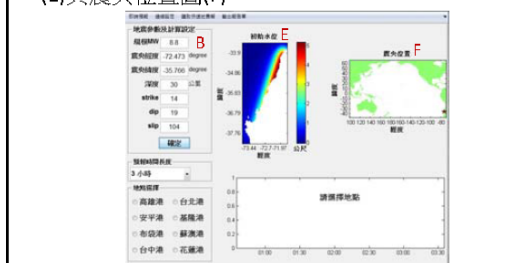
### 頂部選單(A) 即時預報 連線設定 讀取快速地震解 輸出報告單

- 即時預報：開啟(或關閉)即時預報。
- 連線設定：開啟連線設定介面(左下圖)。
- 讀取快速地震解：讀取即時預報儲存的地震參數檔(mat)輸入地震參數面板(B)。
- 輸出報告單：輸出地震訊息及水位圖的報告單。



### 地震參數面板(B)

- 手動輸入矩震級(MW)、震央位置、深度等地震參數，輸入後點擊**確定**來產生初始水位圖(E)與震央位置圖(F)。



### 地點選擇面板(D)

- 選擇地點後產生預報水位(G)。右下图以花蓮港為例。
- 預報時間長度(C)決定預報水位的時序序列，建議設定3小時。

### 初始水位(E)

- 地震發生時所引發的海面水位變化。顏色代表水位高度(m)。

### 預報水位(F)

- 3小時水位時序序列
- 第一波到達時間(HH:MM)
- 最大波高(m)

### 目前進度

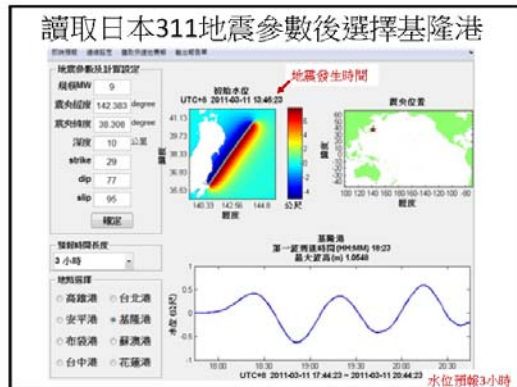
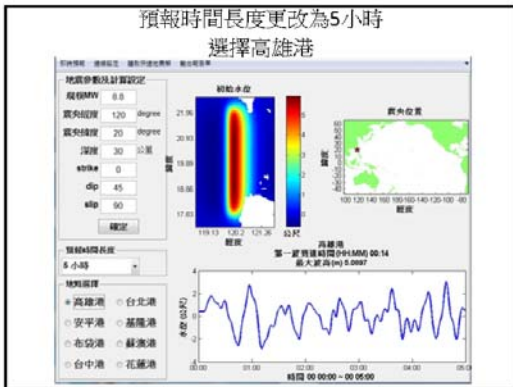
- 台灣國際商港海嘯速算系統

- 速算系統介面介紹
- 輸入地震參數操作示範
- 即時預報設定介紹
- 即時預報操作示範

- 地震參數面板輸入MW8.2、經度120、緯度20、深度30、strike/dip/slip 0/45/90 點擊確定後選擇高雄港。

### MW更改為8.8

點擊確定後選擇高雄港



- 目前進度
- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 速算系統介面介紹
  - 輸入地震參數操作示範
  - 即時預報設定介紹
  - 即時預報操作示範

連線設定畫面

A 連線設定

網站連線間隔(分): 1  
最低警報震度(MW): 7.8

B 地震解來源網頁

Fnet  
 USGS  
 CWB

C 即時預報檔案輸出

地震參數  
 報告單  
 預報水位  
 介面擷圖

點選主介面的頂部選單的連線設定進入本畫面。此處調整即時預報的相關設定。

連線設定面板(A)

- 網站連線間隔(分): 設定連線至地震解網站的時間間隔。
- 最低警報震度(MW): 當震度大於音效警告設定值, 就會出現警報視窗, 並發出音效, 音效將持續5分鐘, 關掉警報視窗可停止音效。

A 連線設定

網站連線間隔(分): 1  
最低警報震度(MW): 7.2

地震解來源網頁面板(B)

- Fnet(Full Range Seismograph Network of Japan)  
<http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/event/joho.php?LANG=en>
- USGS(U.S. Geological Survey)  
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/>
- Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS  
[http://bats.earth.sinica.edu.tw/Quick\\_CMT/cmtQ.html](http://bats.earth.sinica.edu.tw/Quick_CMT/cmtQ.html)  
 (中研院地科所寬頻地震網)

B 地震解來源網頁

Fnet  
 USGS  
 CWB

### 即時預報檔案輸出面板(C)

- 地震參數：將網頁擷取的地震參數輸出成文字檔與mat檔，後者提供頂部選單讀取快速地震解。
- 報告單：輸出地震訊息及預報水位的報告單(jpg)。
- 預報水位：將預報水位輸出成文字檔(txt)。
- 介面擷圖：將預報主介面輸出成圖檔(jpg)。



### 地震參數

[http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&call=yr | mon | day | hr | min | sec | mw | lon | lat | dep | strike/dip/slip strike/dip/slip](http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&call=yr%20mon%20day%20hr%20min%20sec%20mw%20lon%20lat%20dep%20strike%20dip%20slip%20strike%20dip%20slip)  
2011 09 05 13 36 00 4 141.5 37.5 65 22/75/78 241/19/128

**地震解網址**  
地震發生時間 UTC+8 :  
震央位置 緯度-35.766 經度-72.473  
地震規模(MW): 8.8 地震深度(km): 30  
Strike=14 Dip=19 Slip=104  
第一波到達時間:0000-01-01 02:03:00  
最大波高(m):0.082523

**報告單**  
(非即時預報)

**水位預報圖**

**地震解網址**  
地震發生時間 UTC+8 :  
震央位置 緯度-35.766 經度-72.473  
地震規模(MW): 8.8 地震深度(km): 30  
Strike=14 Dip=19 Slip=104  
第一波到達時間:0000-01-01 02:03:00  
最大波高(m):0.082523

- 地震解網址：記錄地震解參數來源網頁。
- Strike、dip、slip：走向、傾角、滑移角。
- 第一波到達時間：第一個波峰(或波谷)的到達時間，此例為地震發生後經過1分鐘抵達。
- 最大波高：於預報水位分析取的最大波高。

**地震解網址**  
[http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&call=yr | mon | day | hr | min | sec | mw | lon | lat | dep | strike/dip/slip strike/dip/slip](http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&call=yr%20mon%20day%20hr%20min%20sec%20mw%20lon%20lat%20dep%20strike%20dip%20slip%20strike%20dip%20slip)  
地震發生時間 UTC+8 : 2011-09-05 21:36:00  
震央位置 緯度37.5 經度141.5  
地震規模(MW): 4 地震深度(km): 65  
Strike=22 Dip=75 Slip=78  
第一波到達時間:2011-09-06 02:22:00  
最大波高(m):2.4514e-008

**報告單**  
(即時預報)

與非即時預報的報告單差別在**地震解網址**跟地震發生時間(UTC+8)的記錄。

**水位預報圖**

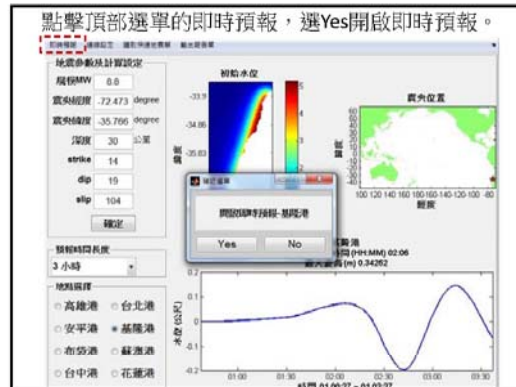
**預報水位輸出檔**

2011	3	11	17	52	23	0.001
2011	3	11	17	53	23	0.001
2011	3	11	17	54	23	0.001
2011	3	11	17	55	23	0.002
2011	3	11	17	56	23	0.003
2011	3	11	17	57	23	0.004
2011	3	11	17	58	23	0.005
2011	3	11	17	59	23	0.007
2011	3	11	18	0	23	0.009
2011	3	11	18	1	23	0.011
2011	3	11	18	2	23	0.014
2011	3	11	18	3	23	0.018
2011	3	11	18	4	23	0.023
2011	3	11	18	5	23	0.026
2011	3	11	18	6	23	0.032
2011	3	11	18	7	23	0.038
2011	3	11	18	8	23	0.046
2011	3	11	18	9	23	0.054
2011	3	11	18	10	23	0.061
2011	3	11	18	11	23	0.065
2011	3	11	18	12	23	0.076
2011	3	11	18	13	23	0.084
2011	3	11	18	14	23	0.092
2011	3	11	18	15	23	0.101
2011	3	11	18	16	23	0.110
2011	3	11	18	17	23	0.117
2011	3	11	18	18	23	0.124

七欄位依序為年、月、日、時、分、秒和水位(m)

## 目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1. 速算系統介面介紹
- 2. 輸入地震參數操作示範
- 3. 即時預報設定介紹
- 4. 即時預報操作示範



- 即時預報產生的檔案置於系統執行檔路徑的.\使用者名稱\output\地震事件目錄下。例如以下路徑  
.\tony\output\EQ20110907015500\_Mw51\_dep032\_Fnet
- 地震事件目錄名稱規則  
20110905054419：時間 yyyymmddHHMMSS  
Mw51：矩震級5.1      dep032：深度32km  
Fnet：地震解來源網頁



- Earthquake\_Parameter.mat <= 地震參數
- Earthquake\_Parameter.txt <= 地震參數
- KH\_NP1.txt <= 預報水位
- KH\_NP1\_Form.jpeg <= 報告單
- KH\_NP1\_GUI.jpeg <= 介面擷圖
- KH\_NP2.txt <= 預報水位
- KH\_NP2\_Form.jpeg <= 報告單
- KH\_NP2\_GUI.jpeg <= 介面擷圖

- C 即時預報檔案輸出**
- 地震參數
  - 報告單
  - 預報水位
  - 介面擷圖
- 每個地震有兩組節面(Nodal Plane)以NP1, NP2區分。節面有各自的走向/傾角/滑移角(strike/dip/slip)

## USGS Centroid Moment Solution

NORTHERN SUMATRA, INDONESIA

USGS網頁的地震解表單

11/09/05 17:55:11.46  
Epicenter: 2.996 97.986  
Mw 6.8

USGS CENTROID MOMENT TENSOR  
11/09/05 17:55:24.70  
Centroid: 2.545 97.848  
Depth 50 No. of sta: 115  
Moment Tensor: Scale 10<sup>19</sup> Nm  
Mcp=-0.45 Mct= 0.33  
Mpp= 0.12 Mst= 1.27  
Mrp=-1.53 Mtp=-0.31

Principal axes:

T Val= 2.08 Plg=38 Azm= 46

N -0.06 4 140

P -2.02 52 235

兩組strike/dip/slip

NP1 107/ 8/-122

NP2 320/83/-86



**NIED F-net** Earthquake Information

Origin Time(UTC) Latitude Longitude Depth Magnitude Region  
 2011/09/06 13:56 37.5 N 141.5 E 48 km M 4.2 E\_OFF\_FUKUSHIMA\_PREF

Focal Mechanism Solution Determined Automatically

Strike	Dip	Rake	M0	Depth	Magnitude	Var.Frac			
22	241	75	19	78	128	21e+15 Nm	65 km	Mw 4.0	75.03

兩組 strike/dip/slip  
 NP1 22/75/ 78  
 NP2 241/19/128  
 rake即為slip

F-net網頁的地震解表單

地震解表單

http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?LANG=en&nID=20110905133500&slip=

地震發生時間 UTC+8 : 2011-09-05 21:36:00  
 震央位置 緯度37.5 經度141.5  
 地震規模(MW): 4 地震深度(km): 65  
 Strike=22 Dip=75 Slip=78  
 第一波到站時間:2011-09-06 02:22:00  
 最大波高(m):2.4514e-008

地震解表單

http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?LANG=en&nID=20110905133500&slip=

地震發生時間 UTC+8 : 2011-09-05 21:36:00  
 震央位置 緯度37.5 經度141.5  
 地震規模(MW): 4 地震深度(km): 65  
 Strike=241 Dip=19 Slip=128  
 第一波到站時間:2011-09-06 02:22:00  
 最大波高(m):2.4741e-008

KH\_NP1\_Form.jpeg KH\_NP2\_Form.jpeg

地震參數及計算設定

震級: 4.2

震央經度: 141.5 degree  
 震央緯度: 37.5 degree  
 深度: 65 公里  
 strike: 22  
 dip: 75  
 slip: 78

預測時間長度: 3.0 小時

預測地點: 基隆港

即時預報中

KH\_NP1\_GUI.jpeg

再次點擊該項，可解除即時預報。

即時預報中

地震參數及計算設定

震級: 3.7

震央經度: 141.1 degree  
 震央緯度: 36.2 degree  
 深度: 20 公里  
 strike: 105  
 dip: 54  
 slip: -61

預測時間長度: 3.0 小時

預測地點: 基隆港

第一波到站時間: 2011-09-06 12:49  
 最大波高(m): 4.2064e-008

KH\_NP2\_GUI.jpeg

**注意事項**

- 螢幕解析度需在1024\*768以上。
- 如在windos xp系統執行即時預報，建議每兩天重新執行介面。

## 附錄三 環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數

(地震矩規模小於等於 8)

環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數(地震矩規模小於等於 8)							
規模小於等於 8 使用參數							
點位	地點	經度	緯度	深度(m)	strike	dip	slip
1	湯加海溝 克瑪迪克海溝	-174.54	-15.32	15000	-84	43.88649	90
2		-176.51	-17.24	15000	-74.2543	38.72711	90
3		-176.64	-18.92	15000	-51.0241	37.08086	90
4		-177.26	-20.88	15000	-77.9875	28.44976	90
5		-177.64	-23.04	15000	77.62623	28.81268	90
6		-177.72	-24.8	15000	54.95969	32.08721	90
7		-177	-27	15000	42.22768	35.43684	90
8		-177.43	-29.14	15000	36.77013	28.5233	90
9		-178.14	-30.84	15000	34.02716	31.6	90
10		-178.67	-32.93	15000	36.27189	27.72589	90
11		-179.15	-34.78	15000	33.4214	29.09804	90
12		-179.55	-36.87	15000	22.1959	35.27778	90
13	布干維爾海溝	138.36	0.7	15000	16	67.75	90
14		137.49	-1.18	15000	-34	43.15328	90
15		144.76	-3.2	15000	-24.8266	54.12878	90
16		148.95	-5.16	15000	-13.294	38.24032	90
17		151.29	-6.67	15000	-26.9695	36.68821	90
18		156.38	-9.12	15000	-21.4182	44.56311	90
19	馬里亞納海溝	146.28	17.08	15000	-56	36.80597	90
20		146.35	14.93	15000	-30	34.07895	90
21		144.07	12.86	15000	-22.584	38.57009	90
22		142.27	11.35	15000	33.67052	39.00909	90
23		139.85	8.92	15000	-10.7156	45.36364	90
24		139.53	7.2	15000	-3.77473	46.125	90
25	菲律賓海溝	121.23	19.28	15000	30.6111	39.11475	90
26		123	16.8	15000	20.93416	42.54054	90
27		122.68	14.81	15000	25.58782	45.61538	90
28		125	12.96	15000	158.7407	39.58442	90

29		127	10.91	15000	163.035	37.47368	90
30		127	9.31	15000	176.9124	35.12821	90
31		127	6.9	15000	-68.0583	39.84444	90
32		125.99	5.12	15000	78.12844	36.55519	90
33		126.83	2.92	15000	36.56601	36.54962	90
34	琉球海溝	139.07	34.62	15000	-12	45.49444	90
35		133.4038	33.13188	15000	163.3966	73.875	90
36		131.46	31.02878	15000	47.16612	69.82927	90
37		130.3494	28.92551	15000	47.13275	69.44928	90
38		128.5244	27.13333	15000	70.37409	71.30556	90
39		126.6147	25.13265	15000	38.39664	66.35294	90
40	伊豆小笠原海溝	139.95	34.71	15000	-12	39.03196	90
41		139.77	33.2	15000	68.5	40.08125	90
42		140.44	30.95	15000	15.32191	31.18487	90
43		140.92	28.82	15000	-0.5113	32.40244	90
44		141.1	27.3	15000	-8.75775	35.39744	90
45		142.11	25	15000	-25.4358	44.88	90
46		143.33	22.77	15000	-50.2585	30.36508	90
47		144	21.42	15000	-44.5816	41.10959	90
48		145.88	18.82	15000	-47.4296	37.07477	90
49		146.28	17.09	15000	-44.5816	36.80597	90
50	千島海溝 日本海溝	163.74	56.28	15000	-61	58.85185	90
51		162.75	54.93	15000	-73.5	40.19444	90
52		159.48	52	15000	81.77024	31.32948	90
53		157.25	51.16	15000	61.50597	29.33333	90
54		153.9	48.86	15000	47.00168	31.25287	90
55		152.67	46.86	15000	64.74577	35.29487	90
56		149.14	44.83	15000	62.32607	30.72664	90
57		146.08	43.16	15000	61.10713	32.17284	90
58		142.49	41.11	15000	58.34534	26.43128	90
59		142.88	39.06	15000	56.87765	26.23034	90
60		141.76	36.82	15000	51.58504	25.57143	90
61	140.15	34.74	15000	46.99059	37.56593	90	
62		164.46	56.2	15000	-61	70.94444	90
63		165.39	55.03	15000	71	59.57143	90



64	阿留申海溝	174.49	52.68	15000	88.40403	36.23881	90
65		177.9	51	15000	85.46259	29.91176	90
66		-154.41	55	15000	49	33.66071	90
67		-161.39	54.68	15000	40.5	28.14634	90
68		-167.66	52.91	15000	50.30824	30.11858	90
69		-176.1	51.37	15000	61.13007	27.47837	90
70		-177.68	49.88	15000	61.13007	27.47837	90
71	美國西岸及中美海溝	-141.36	55	15000	-88	70.28571	90
72		-127.41	49	15000	-55.114	40	90
73		-129.39	50.67	15000	-67.6916	75.27907	90
74		-124.91	47	15000	-50.932	75.8	90
75		-126	46.94	15000	-36.9641	50	90
76		-126	44.73	15000	-44.9768	54.69231	90
77		-126	43.01	15000	-61.8287	63.9	90
78		-126	40.72	15000	-80.8914	66.86567	90
79		-123	36.81	15000	-80.7721	59.5	90
80		-117	30.87	15000	-87.1168	56.6	90
81		-116	29.29	15000	-78.8788	71.54545	90
82		-115	27	15000	-68.8777	63.625	90
83		-109.06	24.96	15000	-85.4023	65.92	90
84		-107.33	23.29	15000	-76.9324	76.59259	90
85		-108.317	20.55	15000	-76.7153	56	90
86		-105	18.72	15000	-73.5823	54.52096	90
87		-98	15	15000	-82.6458	37.85321	90
88		-94.05	14.93	15000	86.71764	30.47511	90
89		-89.15	12.95	15000	-84.2209	31.42857	90
90		-87.12	11.15	15000	-78.5672	34.79747	90
91		-86.5	8.78	15000	-88.5435	46.68548	90
92		-83.85	7.16	15000	81.43292	69.36207	90
93		-83.9	5.08	15000	83.1608	77.48438	90
94	秘魯智利海溝	-79	7.01	15000	42	54.47945	90
95		-78.54	4.99	15000	-22.5	62.73043	90
96		-80.03	3.02	15000	53.3824	49.53226	90
97		-81.36	1.02	15000	75.42348	58.08163	90
98		-82	-1.2	15000	-67.6323	28.45902	90

99		-82	-3.08	15000	-73.4386	41.26866	90
100		-82	-5.23	15000	81.13619	33.68421	90
101		-80	-6.95	15000	51.72814	30.53333	90
102		-79	-9.07	15000	38.22244	32.85915	90
103		-78	-10.95	15000	58.62027	35.38095	90
104		-77	-13.14	15000	42.5585	31.82456	90
105		-75.76	-15.09	15000	71.84839	35.97638	90
106		-73.03	-17.12	15000	-89.4824	32.20408	90
107		-71.21	-18.95	15000	28.81873	32.14286	90
108		-70.76	-20.75	15000	13.60428	31.71429	90
109		-70.73	-23.08	15000	9.42305	22.63333	90
110		-70.9	-24.92	15000	15.02206	23.95122	90
111		-71.31	-27.2	15000	11.20131	25.83051	90
112		-71.8	-29.33	15000	-0.42917	30.86957	90
113		-71.92	-31.21	15000	-0.35287	28.37681	90
114		-71.98	-32.88	15000	-0.60149	27.64948	90
115		-72.43	-34.48	15000	-8.37442	27.325	90
116		-73.6	-36.89	15000	-7.20716	23.875	90
117		-74.34	-38.62	15000	-10.767	36.1	90
118		-83.01	-41.2	15000	-9.93414	59.13699	90
119		-81.27	-42.97	15000	-2.85874	49.43243	90
120		-77.75	-45.13	15000	-2.27616	64.89231	90
121	夏威夷	-155.5	19.16	15000	42.5	21.875	90
122	馬尼拉海溝	120.7568	20.9668	15000	-10.0829	39.89333	90
123		120.8642	19.27471	15000	22.9525	34.9902	90
124		120.4388	16.89667	15000	11.99269	41.54902	90
125		119.9961	15.06286	15000	-0.46894	40.46429	90
126		120.6027	13.47519	15000	0.599891	39.96104	90

(地震矩規模大於 8)

環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數(地震矩規模大於 8)							
規模大於 8 使用參數,因已知無如此大破裂面							
	地點	經度	緯度	深度(m)	strike	dip	slip
1	湯加海溝 克瑪迪克海溝	-174.54	-15.32	15000	-84	43.88649	90
2		-176.51	-17.24	15000	-74.2543	38.72711	90
3		-176.64	-18.92	15000	-51.0241	37.08086	90
4		-177.26	-20.88	15000	-77.9875	28.44976	90
5		-177.64	-23.04	15000	77.62623	28.81268	90
6		-177.72	-24.8	15000	54.95969	32.08721	90
7		-177	-27	15000	42.22768	35.43684	90
8		-177.43	-29.14	15000	36.77013	28.5233	90
9		-178.14	-30.84	15000	34.02716	31.6	90
10		-178.67	-32.93	15000	36.27189	27.72589	90
11		-179.15	-34.78	15000	33.4214	29.09804	90
12		-179.55	-36.87	15000	22.1959	35.27778	90
13	布干維爾海溝	138.36	0.7	15000	16	67.75	90
14		137.49	-1.18	15000	-34	43.15328	90
15		144.76	-3.2	15000	-24.8266	54.12878	90
16		148.95	-5.16	15000	-13.294	38.24032	90
17		151.29	-6.67	15000	-26.9695	36.68821	90
18		156.38	-9.12	15000	-21.4182	44.56311	90
19	馬里亞納海溝	146.28	17.08	15000	-56	36.80597	90
20		146.35	14.93	15000	-30	34.07895	90
21		144.07	12.86	15000	-22.584	38.57009	90
22		142.27	11.35	15000	33.67052	39.00909	90
23		139.85	8.92	15000	-10.7156	45.36364	90
24		139.53	7.2	15000	-3.77473	46.125	90
25	菲律賓海溝	123	16.8	15000	6.137199	40.36806	90
26		127	10.91	15000	165.5459	37.58696	90

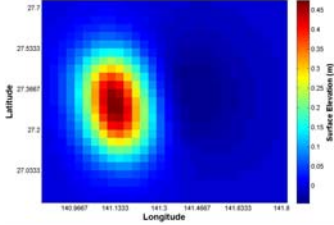
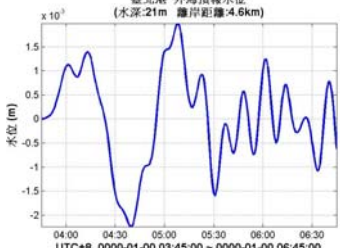
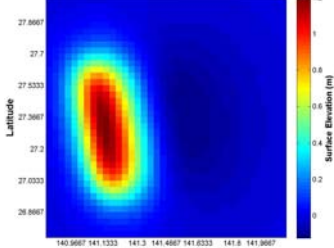
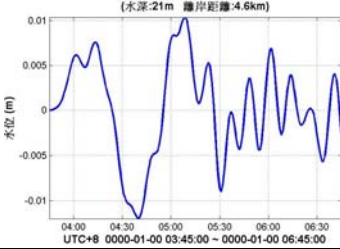
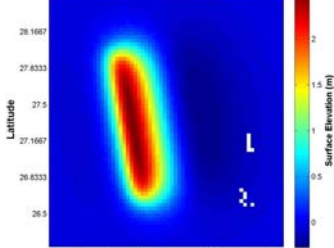
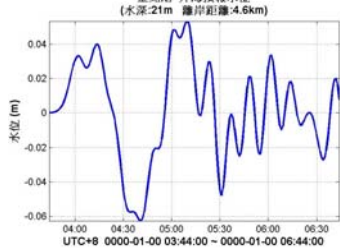
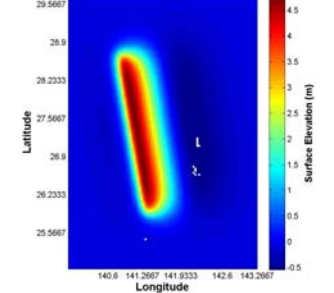
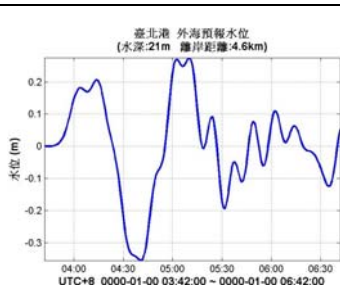
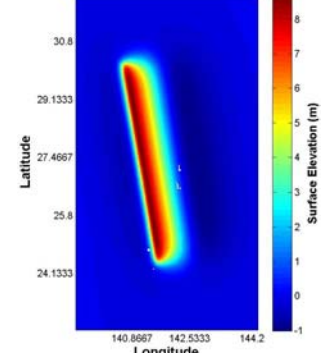
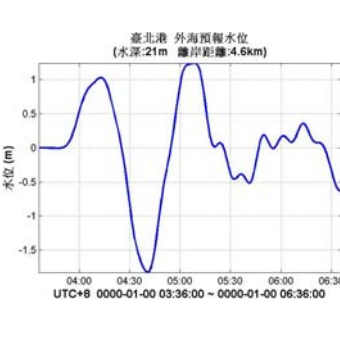
27		127	6.9	15000	-68.0583	39.84444	90
28		125.99	5.12	15000	78.12844	36.55519	90
29		126.83	2.92	15000	36.56601	36.54962	90
30	琉球海溝	134.2388	32.95372	15000	77.60519	73.19008	90
31		128.8532	27.57966	15000	52.24941	69.8255	90
32	伊豆小笠原海溝	139.95	34.71	15000	-12	39.03196	90
33		139.77	33.2	15000	68.5	40.08125	90
34		140.44	30.95	15000	15.32191	31.18487	90
35		140.92	28.82	15000	-0.5113	32.40244	90
36		141.1	27.3	15000	-8.75775	35.39744	90
37		142.11	25	15000	-25.4358	44.88	90
38		143.33	22.77	15000	-50.2585	30.36508	90
39		144	21.42	15000	-44.5816	41.10959	90
40		145.88	18.82	15000	-47.4296	37.07477	90
41		146.28	17.09	15000	-44.5816	36.80597	90
42	千島海溝 日本海溝	163.74	56.28	15000	-61	58.85185	90
43		162.75	54.93	15000	-73.5	40.19444	90
44		159.48	52	15000	81.77024	31.32948	90
45		157.25	51.16	15000	61.50597	29.33333	90
46		153.9	48.86	15000	47.00168	31.25287	90
47		152.67	46.86	15000	64.74577	35.29487	90
48		149.14	44.83	15000	62.32607	30.72664	90
49		146.08	43.16	15000	61.10713	32.17284	90
50		142.49	41.11	15000	58.34534	26.43128	90
51		142.88	39.06	15000	56.87765	26.23034	90
52		141.76	36.82	15000	51.58504	25.57143	90
53	140.15	34.74	15000	46.99059	37.56593	90	
54	阿留申海溝	164.46	56.2	15000	-61	70.94444	90
55		165.39	55.03	15000	71	59.57143	90
56		174.49	52.68	15000	88.40403	36.23881	90
57		177.9	51	15000	85.46259	29.91176	90

58		-154.41	55	15000	49	33.66071	90
59		-161.39	54.68	15000	40.5	28.14634	90
60		-167.66	52.91	15000	50.30824	30.11858	90
61		-176.1	51.37	15000	61.13007	27.47837	90
62		-177.68	49.88	15000	61.13007	27.47837	90
63	美國西岸與中美海溝	-141.36	55	15000	-88	70.28571	90
64		-127.41	49	15000	-55.114	40	90
65		-129.39	50.67	15000	-67.6916	75.27907	90
66		-124.91	47	15000	-50.932	75.8	90
67		-126	46.94	15000	-36.9641	50	90
68		-126	44.73	15000	-44.9768	54.69231	90
69		-126	43.01	15000	-61.8287	63.9	90
70		-126	40.72	15000	-80.8914	66.86567	90
71		-123	36.81	15000	-80.7721	59.5	90
72		-117	30.87	15000	-87.1168	56.6	90
73		-116	29.29	15000	-78.8788	71.54545	90
74		-115	27	15000	-68.8777	63.625	90
75		-109.06	24.96	15000	-85.4023	65.92	90
76		-107.33	23.29	15000	-76.9324	76.59259	90
77		-108.317	20.55	15000	-76.7153	56	90
78		-105	18.72	15000	-73.5823	54.52096	90
79		-98	15	15000	-82.6458	37.85321	90
80		-94.05	14.93	15000	86.71764	30.47511	90
81		-89.15	12.95	15000	-84.2209	31.42857	90
82		-87.12	11.15	15000	-78.5672	34.79747	90
83	-86.5	8.78	15000	-88.5435	46.68548	90	
84	-83.85	7.16	15000	81.43292	69.36207	90	
85	-83.9	5.08	15000	83.1608	77.48438	90	
86	秘魯智利海溝	-79	7.01	15000	42	54.47945	90
87		-78.54	4.99	15000	-22.5	62.73043	90
88		-80.03	3.02	15000	53.3824	49.53226	90
89		-81.36	1.02	15000	75.42348	58.08163	90
90		-82	-1.2	15000	-67.6323	28.45902	90
91		-82	-3.08	15000	-73.4386	41.26866	90
92		-82	-5.23	15000	81.13619	33.68421	90

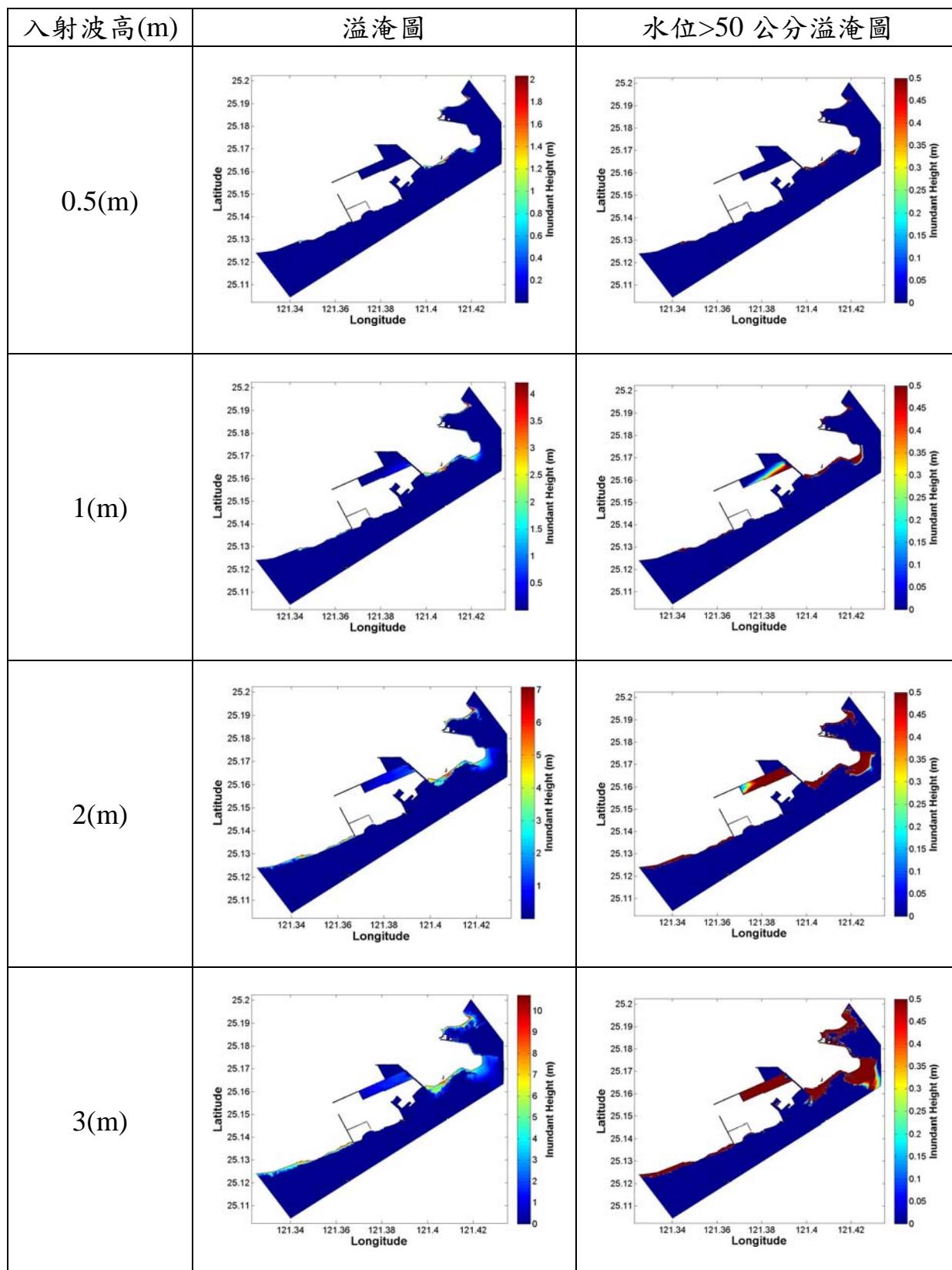
93		-80	-6.95	15000	51.72814	30.53333	90
94		-79	-9.07	15000	38.22244	32.85915	90
95		-78	-10.95	15000	58.62027	35.38095	90
96		-77	-13.14	15000	42.5585	31.82456	90
97		-75.76	-15.09	15000	71.84839	35.97638	90
98		-73.03	-17.12	15000	-89.4824	32.20408	90
99		-71.21	-18.95	15000	28.81873	32.14286	90
100		-70.76	-20.75	15000	13.60428	31.71429	90
101		-70.73	-23.08	15000	9.42305	22.63333	90
102		-70.9	-24.92	15000	15.02206	23.95122	90
103		-71.31	-27.2	15000	11.20131	25.83051	90
104		-71.8	-29.33	15000	-0.42917	30.86957	90
105		-71.92	-31.21	15000	-0.35287	28.37681	90
106		-71.98	-32.88	15000	-0.60149	27.64948	90
107		-72.43	-34.48	15000	-8.37442	27.325	90
108		-73.6	-36.89	15000	-7.20716	23.875	90
109		-74.34	-38.62	15000	-10.767	36.1	90
110		-83.01	-41.2	15000	-9.93414	59.13699	90
111		-81.27	-42.97	15000	-2.85874	49.43243	90
112		-77.75	-45.13	15000	-2.27616	64.89231	90
113	夏威夷	-155.5	19.16	15000	42.5	21.875	90
114	馬尼拉海溝	120.7337	19.29939	15000	15.72075	38.07018	90
115		120.3473	14.14368	15000	-7.46601	40.17293	90

# 附錄四 地震矩規模與水位關係及溢淹圖

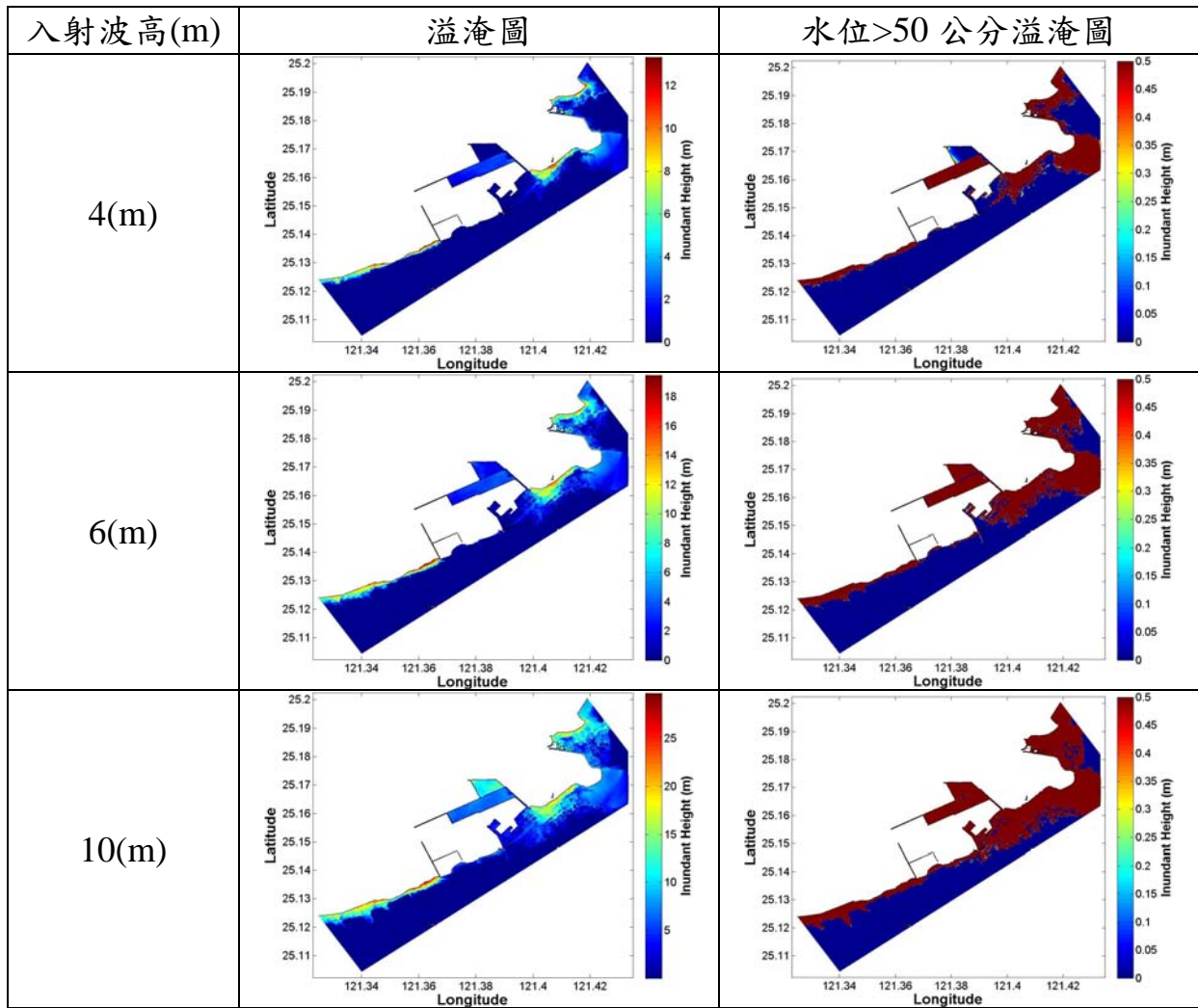
## 臺北港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.04		 <p>臺北港 外海預報水位 (水深:21m 離岸距離:4.6km) UTC+8 0000-01-00 03:45:00 ~ 0000-01-00 06:45:00</p>
Mw=7.5 Max. wave=0.15		 <p>臺北港 外海預報水位 (水深:21m 離岸距離:4.6km) UTC+8 0000-01-00 03:45:00 ~ 0000-01-00 06:45:00</p>
Mw=8.0 Max. wave=0.6		 <p>臺北港 外海預報水位 (水深:21m 離岸距離:4.6km) UTC+8 0000-01-00 03:44:00 ~ 0000-01-00 06:44:00</p>
Mw=8.5 Max. wave=2		 <p>臺北港 外海預報水位 (水深:21m 離岸距離:4.6km) UTC+8 0000-01-00 03:42:00 ~ 0000-01-00 06:42:00</p>
Mw=9.0 Max. wave=7		 <p>臺北港 外海預報水位 (水深:21m 離岸距離:4.6km) UTC+8 0000-01-00 03:36:00 ~ 0000-01-00 06:36:00</p>

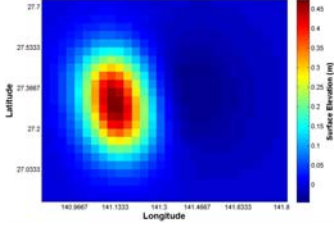
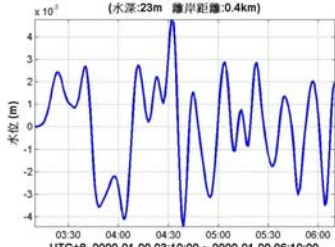
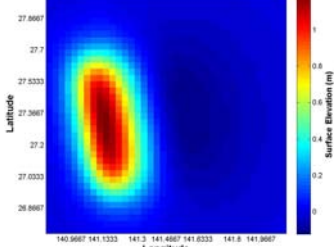
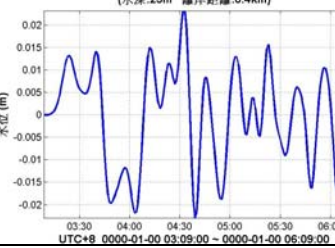
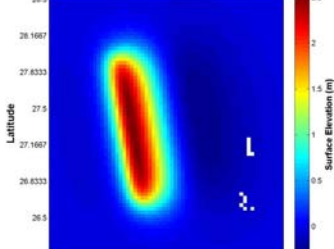
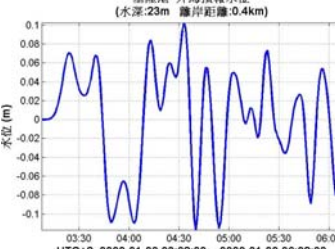
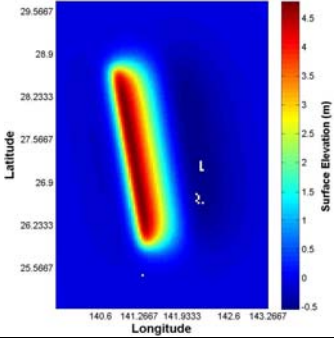
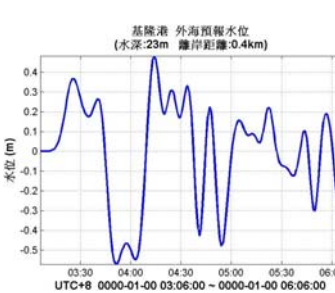
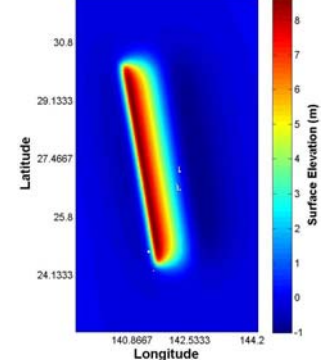
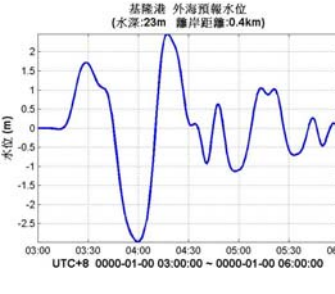
# 臺北港



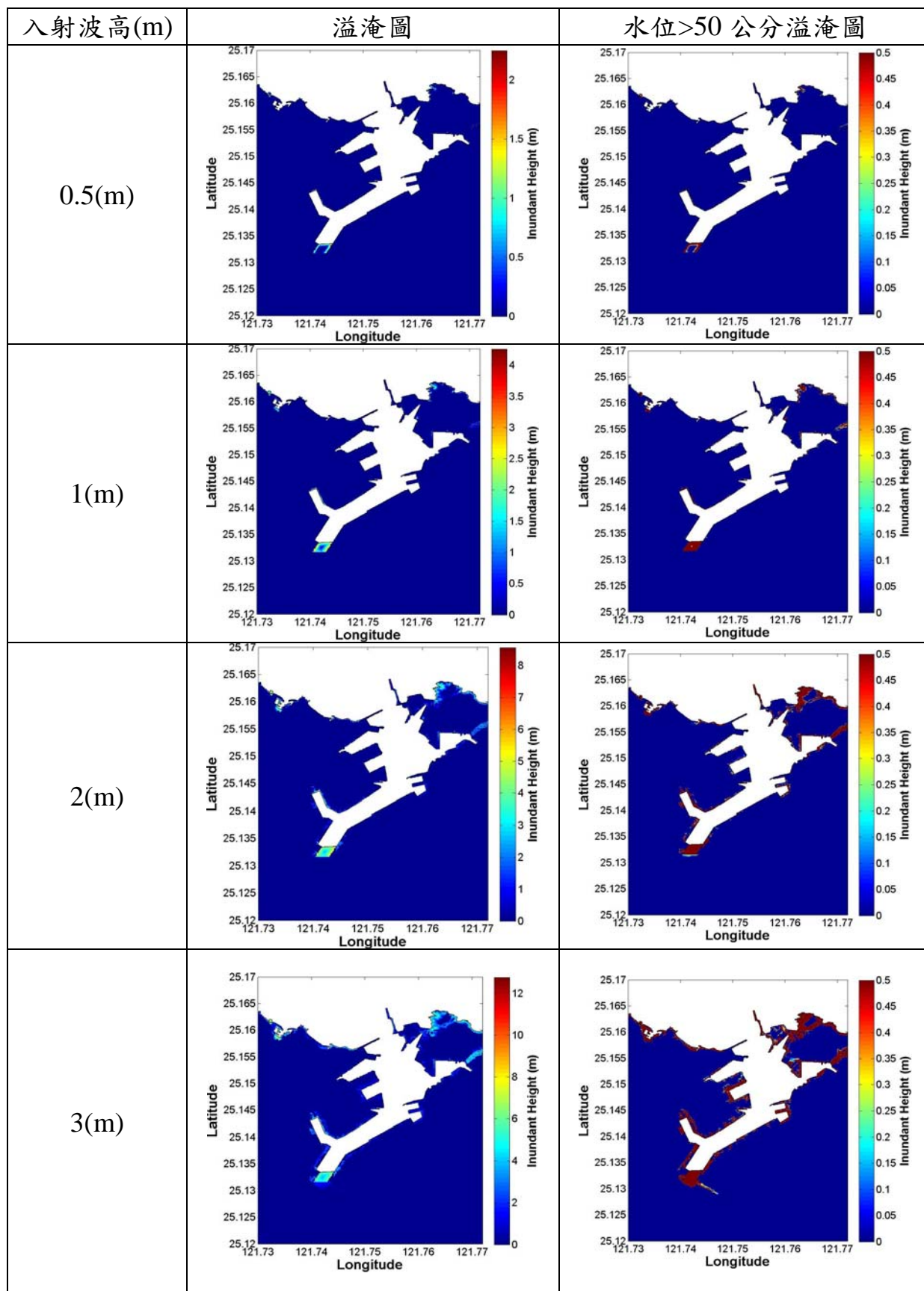


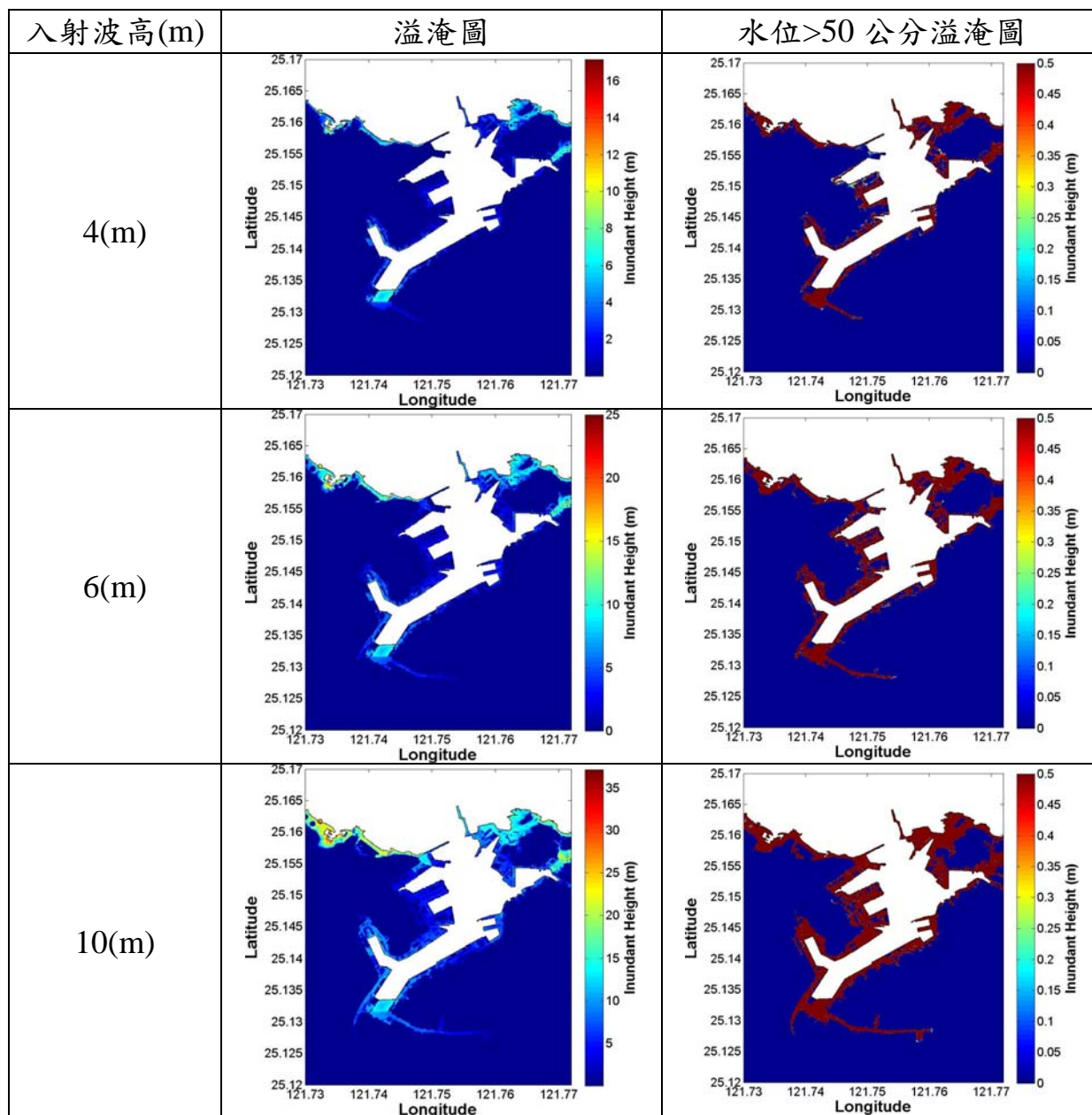


## 基隆港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
<p style="text-align: center;">Mw=7.0 Max. wave=0.04</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=7.5 Max. wave=0.15</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=8.0 Max. wave=0.6</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=8.5 Max. wave=2</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=9.0 Max. wave=7</p>		

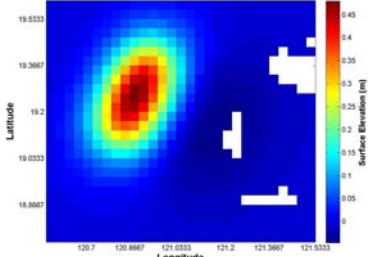
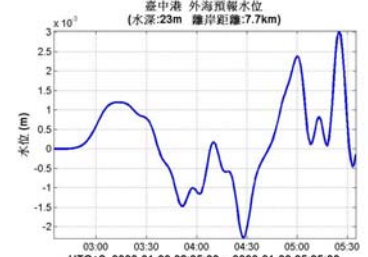
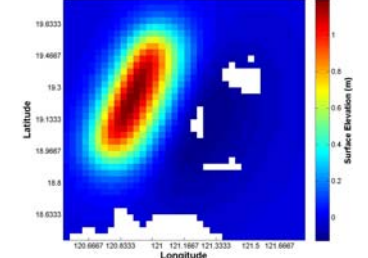
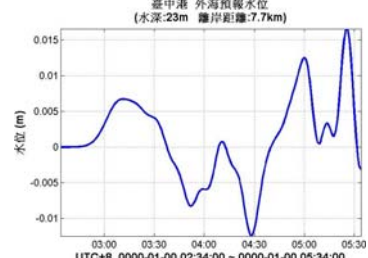
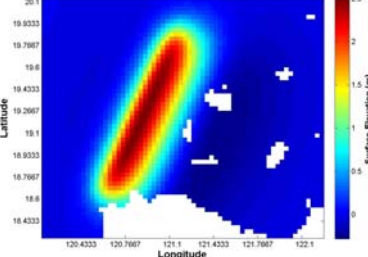
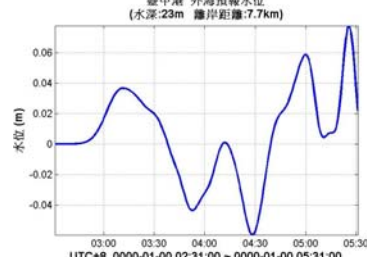
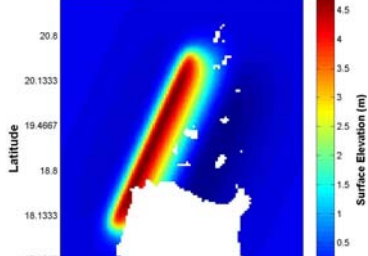
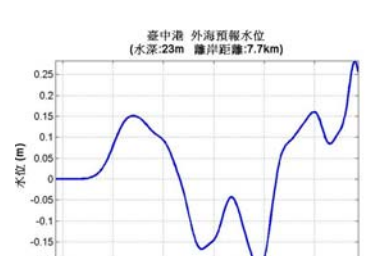
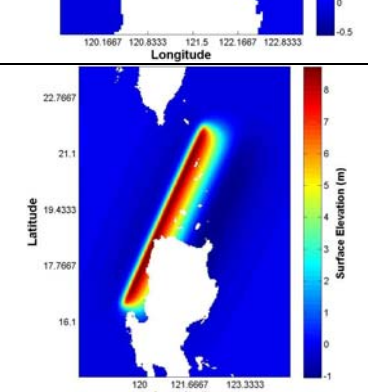
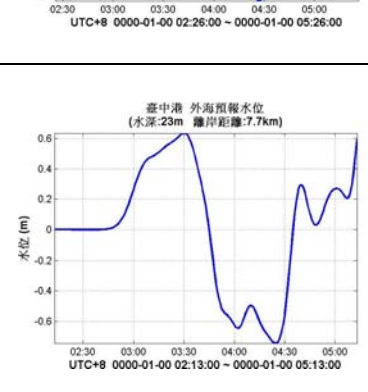
## 基隆港



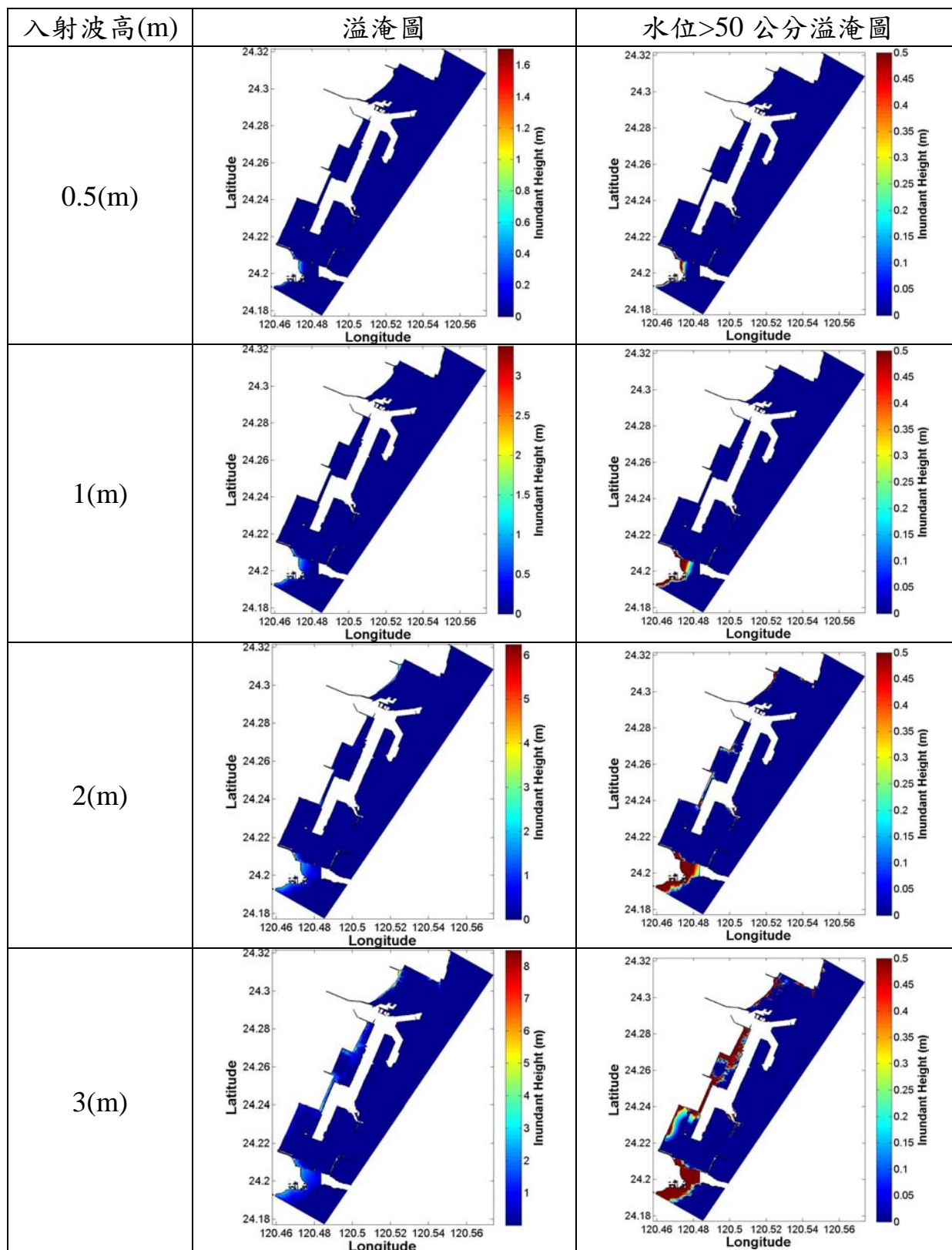


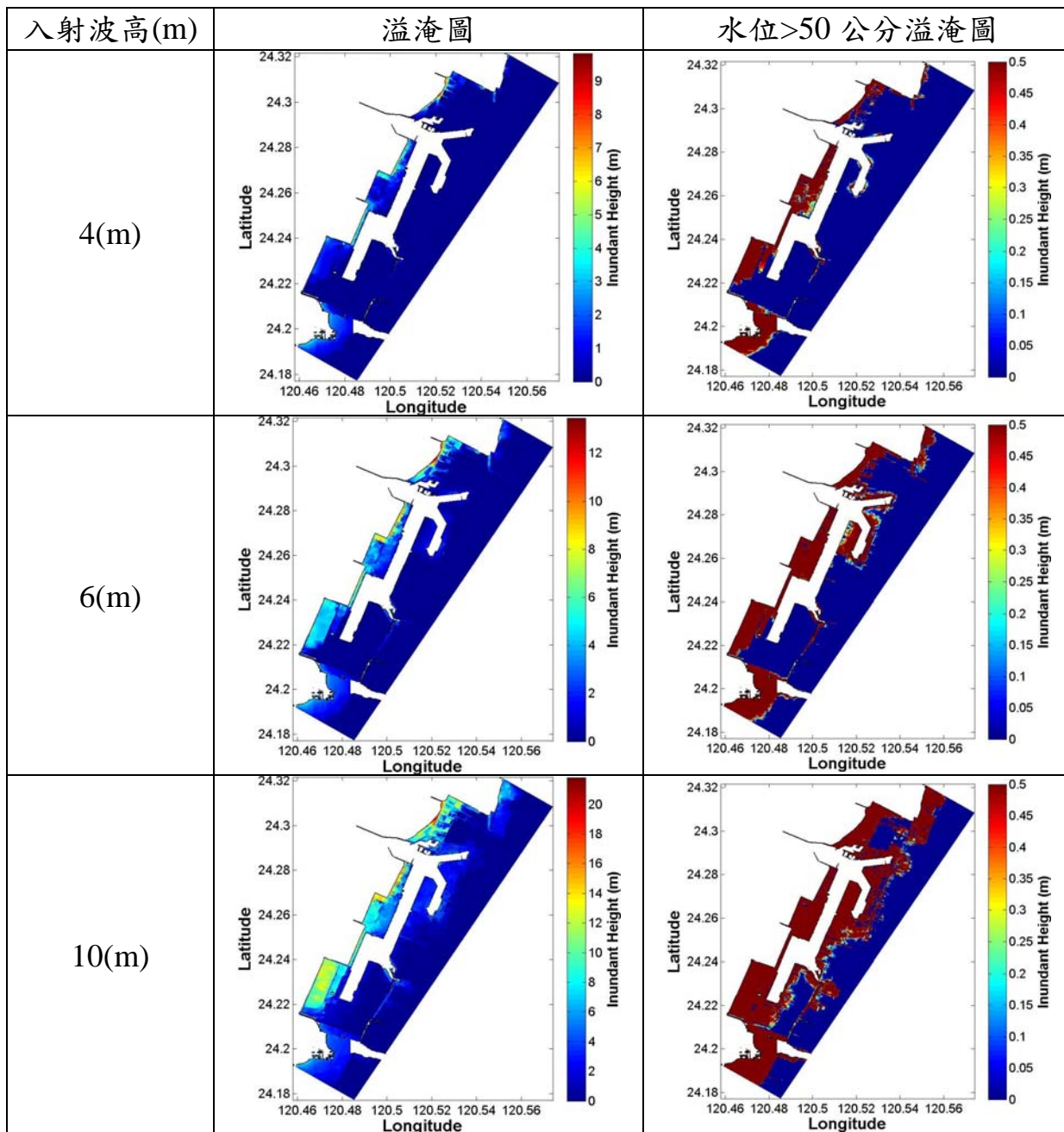


## 臺中港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
<p style="text-align: center;">Mw=7.0 Max. wave=0.04</p>		 <p style="text-align: center;">臺中港 外海預報水位 (水深:23m 離岸距離:7.7km) UTC+8 0000-01-00 02:35:00 ~ 0000-01-00 05:35:00</p>
<p style="text-align: center;">Mw=7.5 Max. wave=0.15</p>		 <p style="text-align: center;">臺中港 外海預報水位 (水深:23m 離岸距離:7.7km) UTC+8 0000-01-00 02:34:00 ~ 0000-01-00 05:34:00</p>
<p style="text-align: center;">Mw=8.0 Max. wave=0.6</p>		 <p style="text-align: center;">臺中港 外海預報水位 (水深:23m 離岸距離:7.7km) UTC+8 0000-01-00 02:31:00 ~ 0000-01-00 05:31:00</p>
<p style="text-align: center;">Mw=8.5 Max. wave=2</p>		 <p style="text-align: center;">臺中港 外海預報水位 (水深:23m 離岸距離:7.7km) UTC+8 0000-01-00 02:26:00 ~ 0000-01-00 05:26:00</p>
<p style="text-align: center;">Mw=9.0 Max. wave=7</p>		 <p style="text-align: center;">臺中港 外海預報水位 (水深:23m 離岸距離:7.7km) UTC+8 0000-01-00 02:13:00 ~ 0000-01-00 05:13:00</p>

# 臺中港



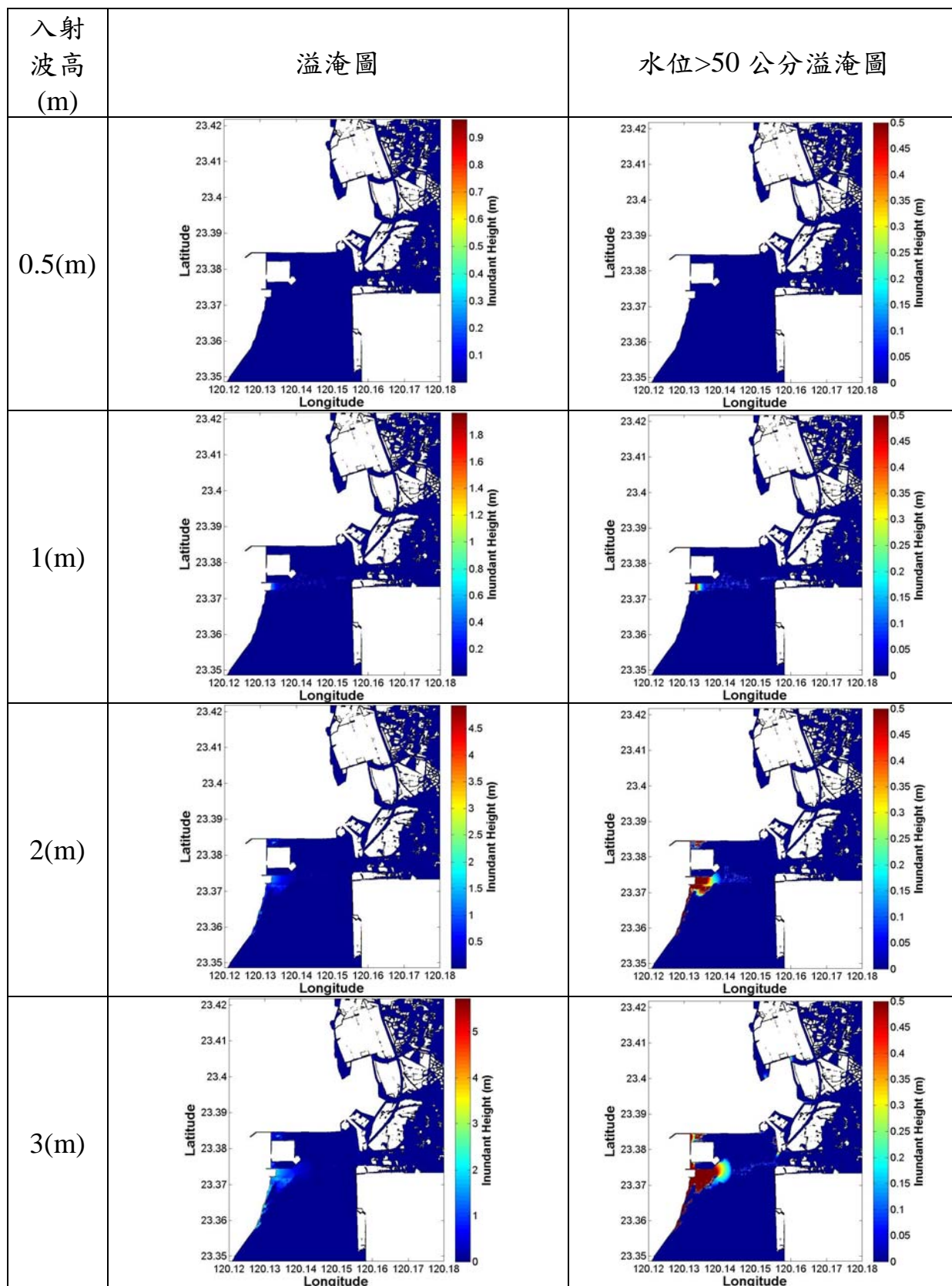


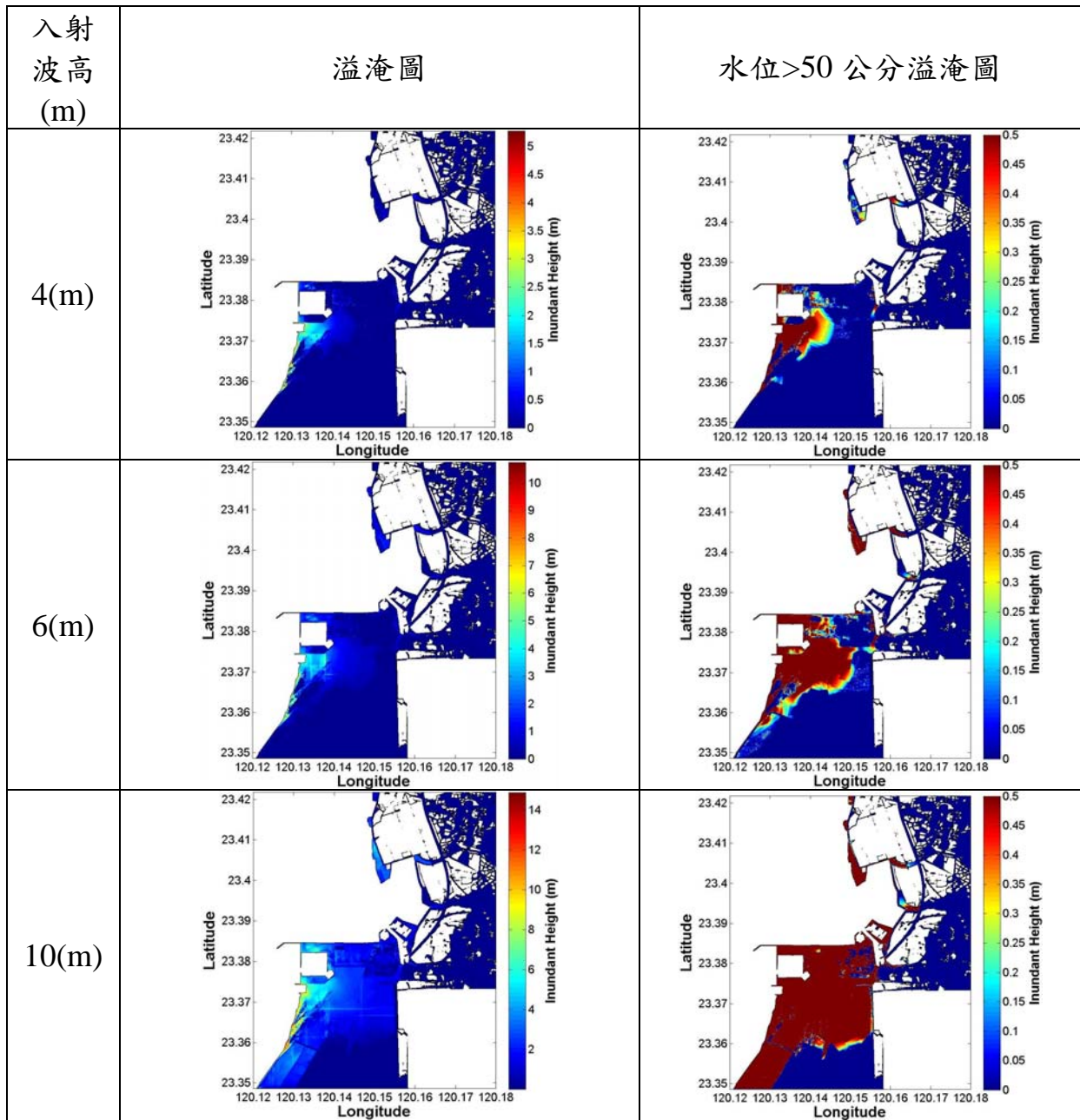
# 布袋港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.04		
Mw=7.5 Max. wave=0.15		
Mw=8.0 Max. wave=0.6		
Mw=8.5 Max. wave=2		
Mw=9.0 Max. wave=7		

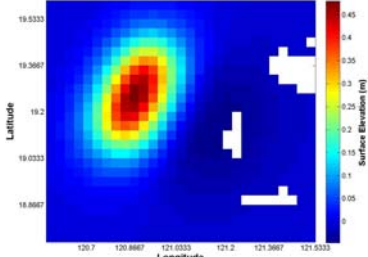
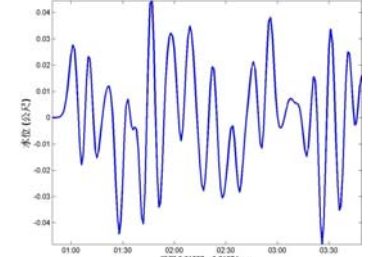
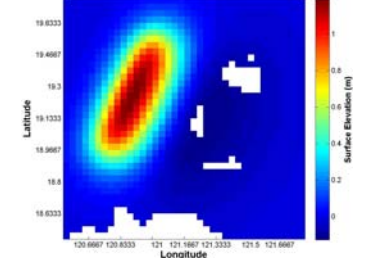
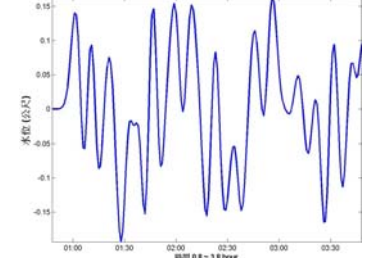
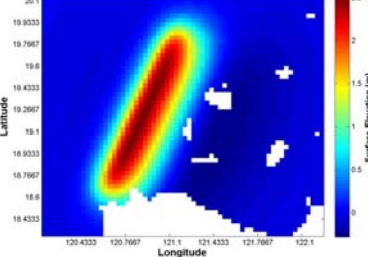
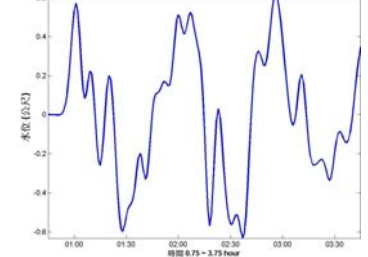
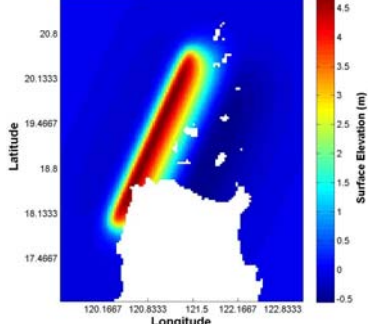
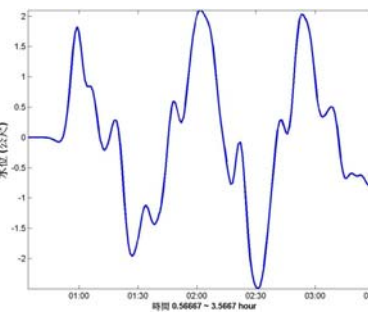
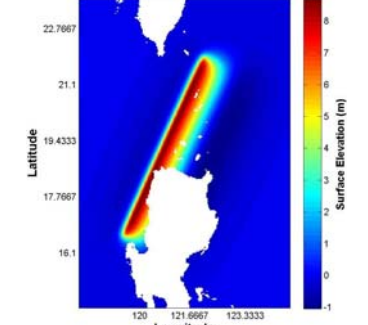
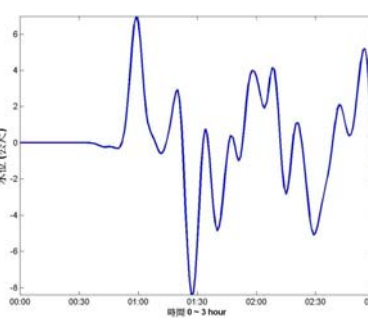


# 布袋港



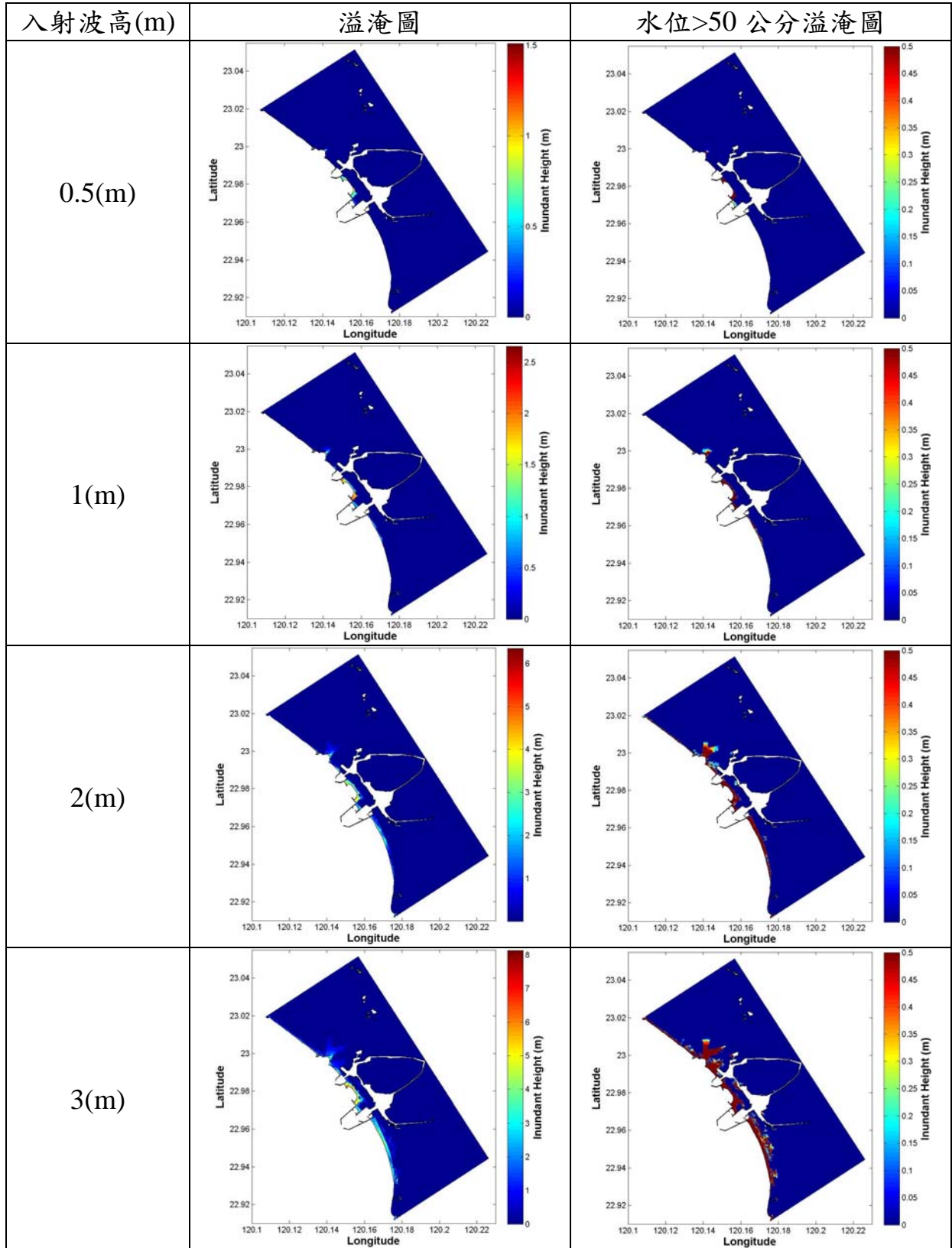


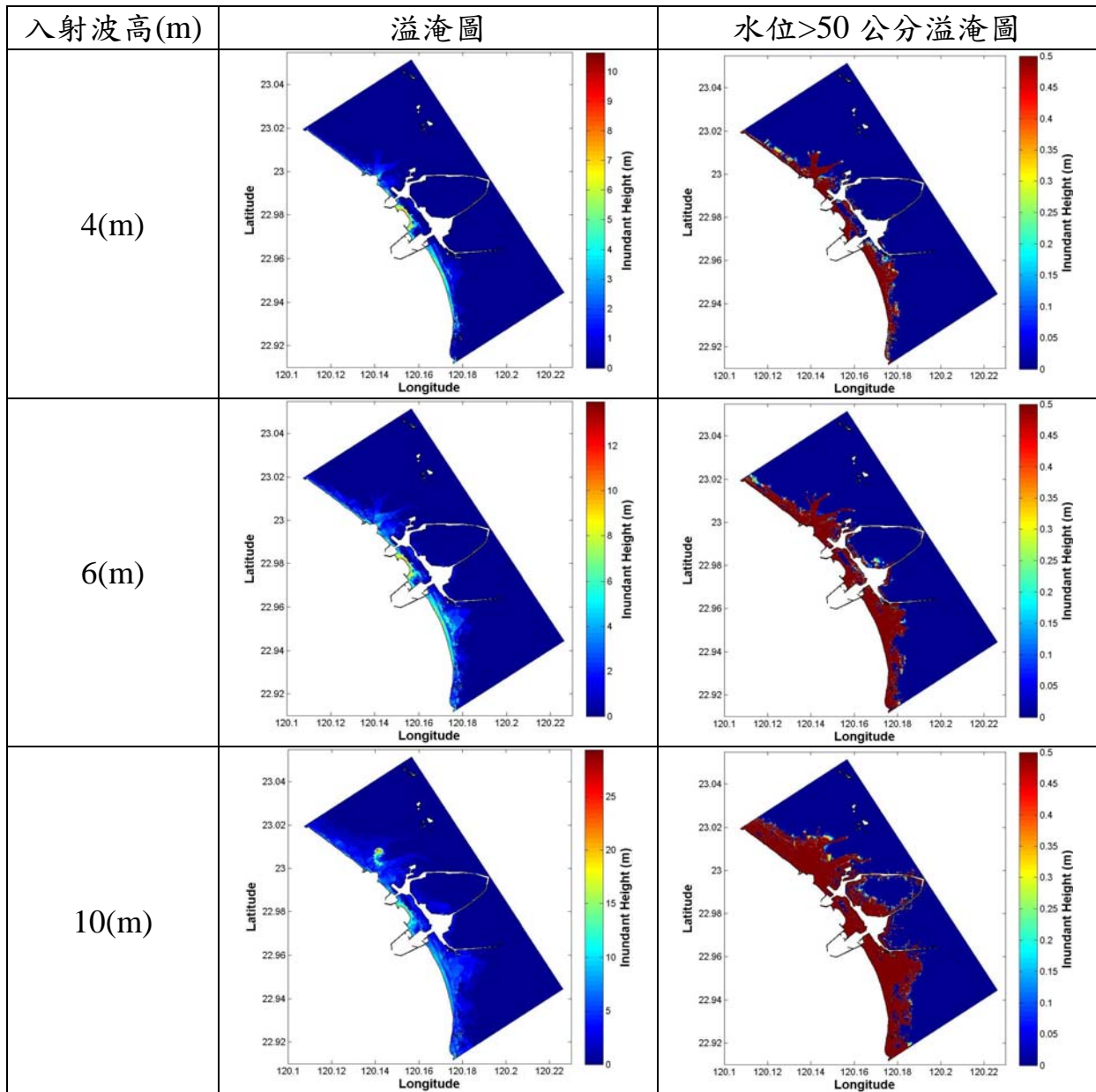
## 安平港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.04		
Mw=7.5 Max. wave=0.15		
Mw=8.0 Max. wave=0.6		
Mw=8.5 Max. wave=2		
Mw=9.0 Max. wave=7		



# 安平港

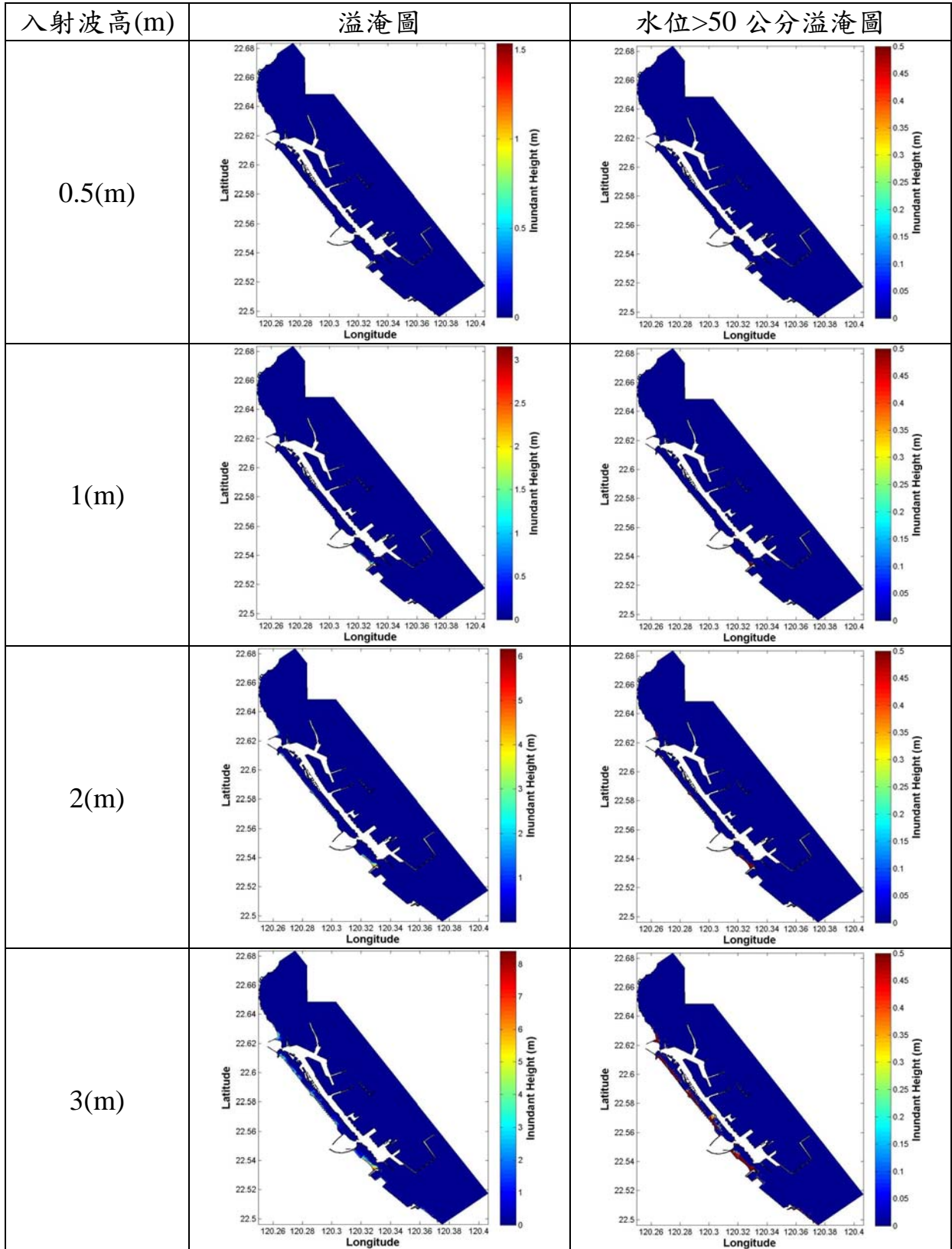




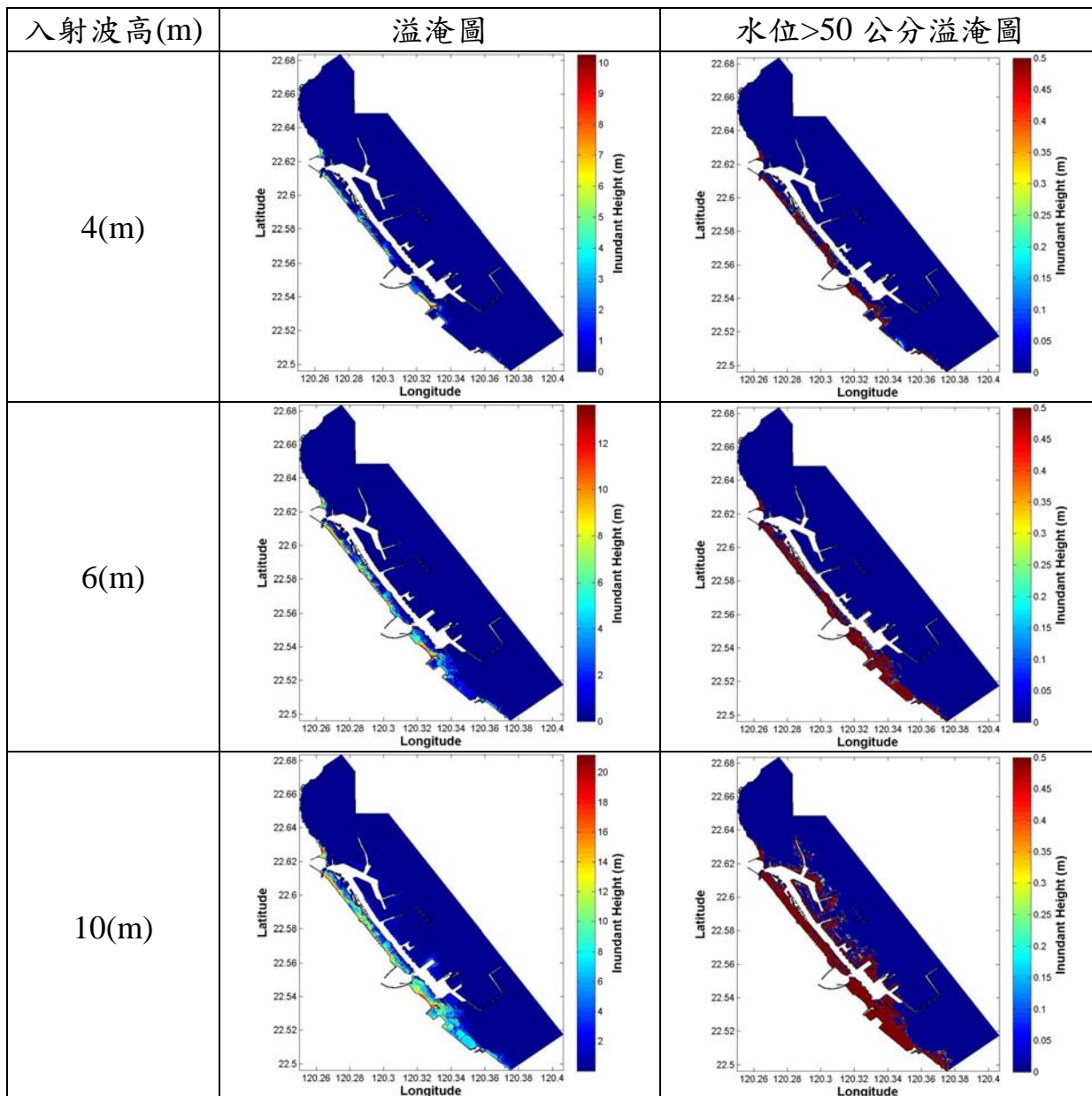
## 高雄港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
<p style="text-align: center;">Mw=7.0 Max. wave=0.48</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=7.5 Max. wave=0.18</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=8.0 Max. wave=0.61</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=8.5 Max. wave=1.8</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=9.0 Max. wave=7.2</p>		

# 高雄港

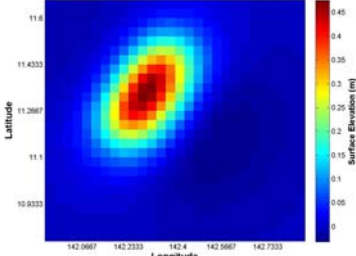
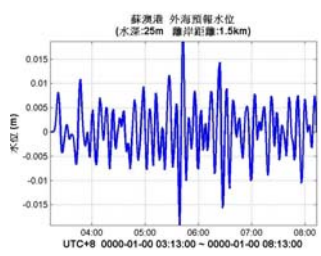
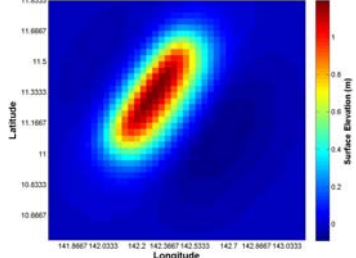
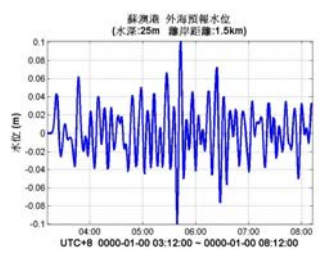
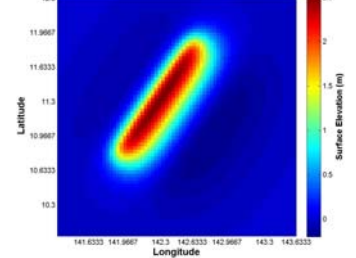
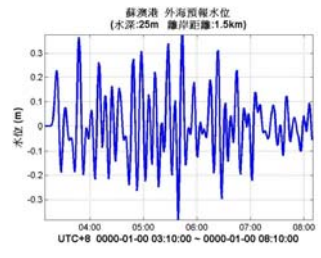
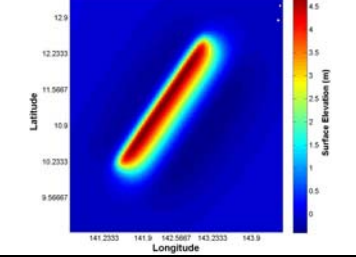
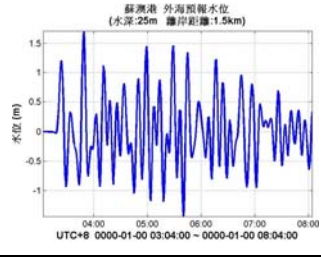
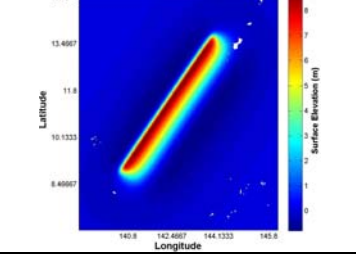
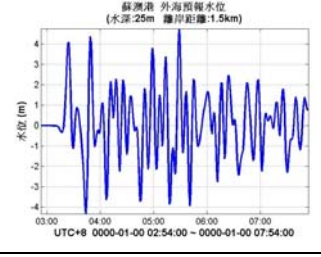




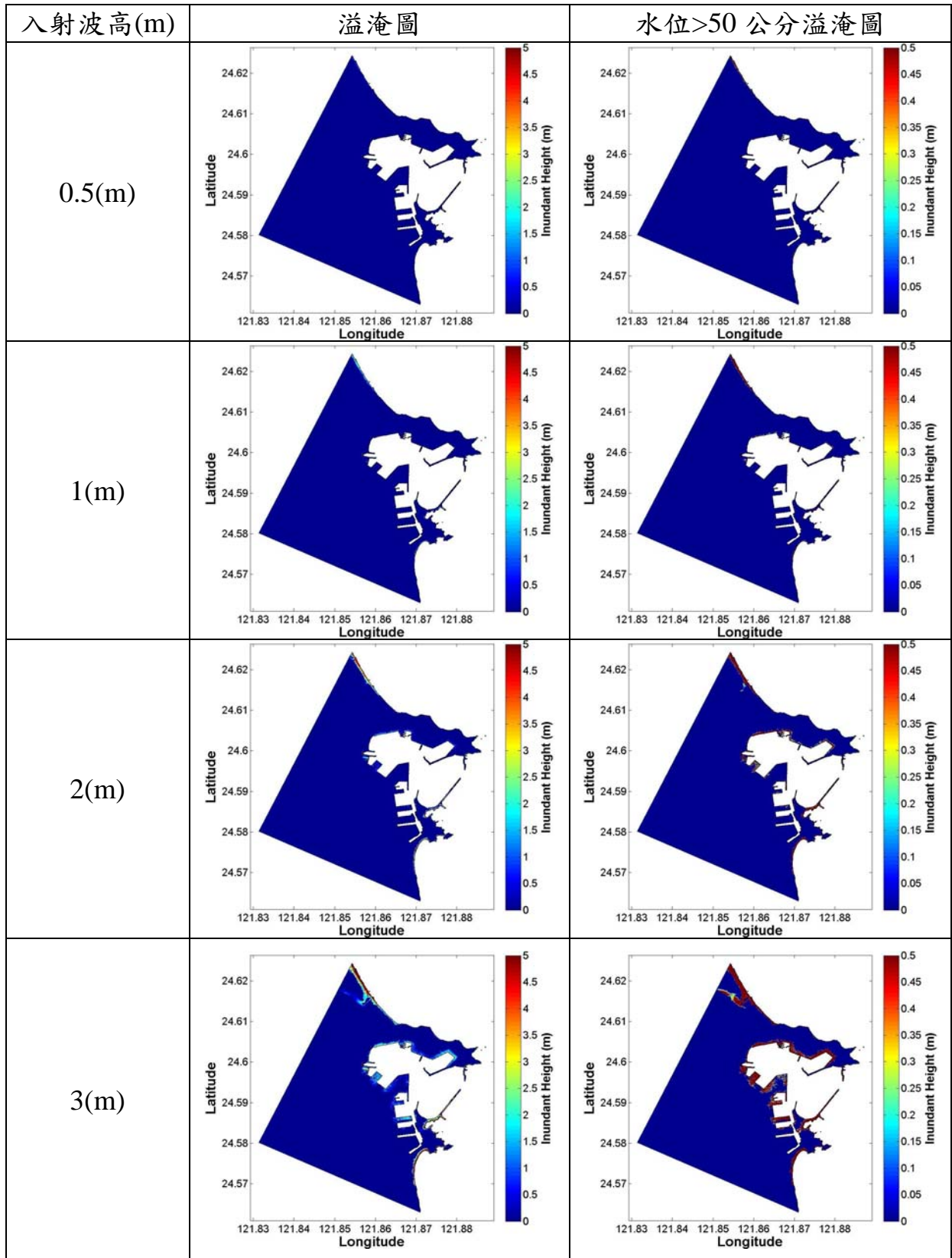


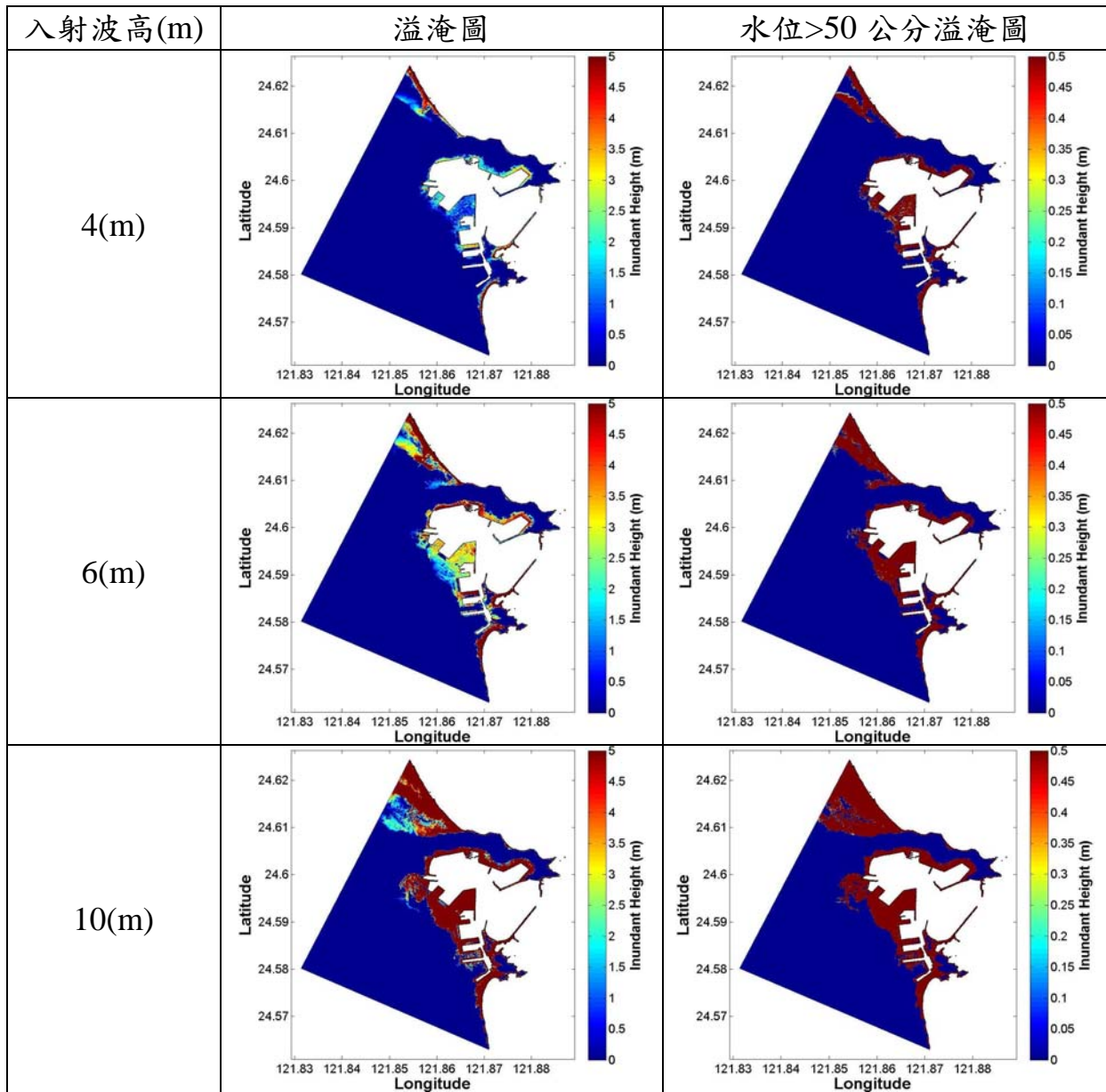


## 蘇澳港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
<p style="text-align: center;">Mw=7.0 Max. wave=0.04</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=7.5 Max. wave=0.15</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=8.0 Max. wave=0.6</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=8.5 Max. wave=2</p>		
<p style="text-align: center;">Mw=9.0 Max. wave=7</p>		

# 蘇澳港



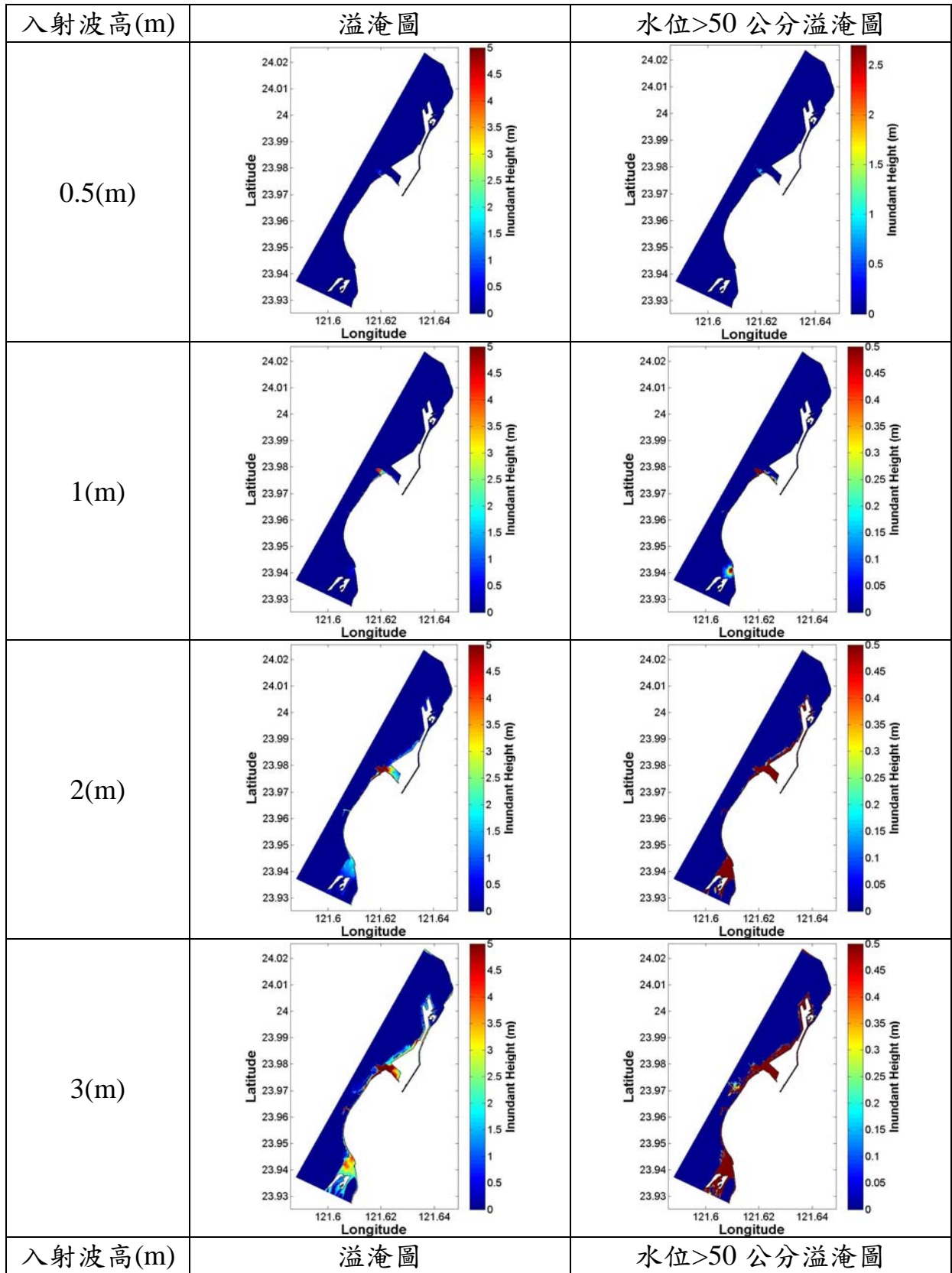


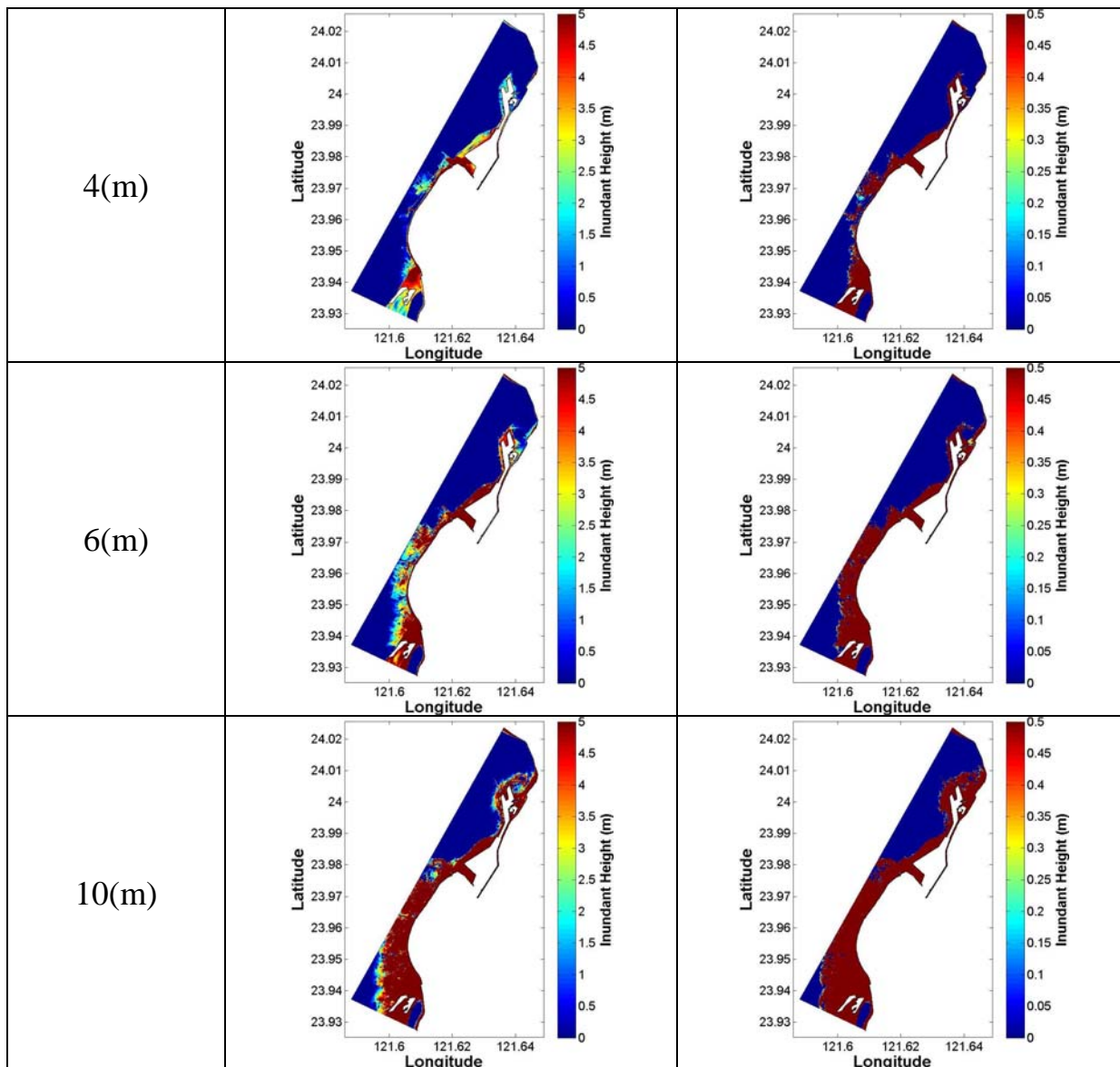
# 花蓮港

地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.48		
Mw=7.5 Max. wave=0.18		
Mw=8.0 Max. wave=0.61		
Mw=8.5 Max. wave=1.8		
Mw=9.0 Max. wave=7.2		

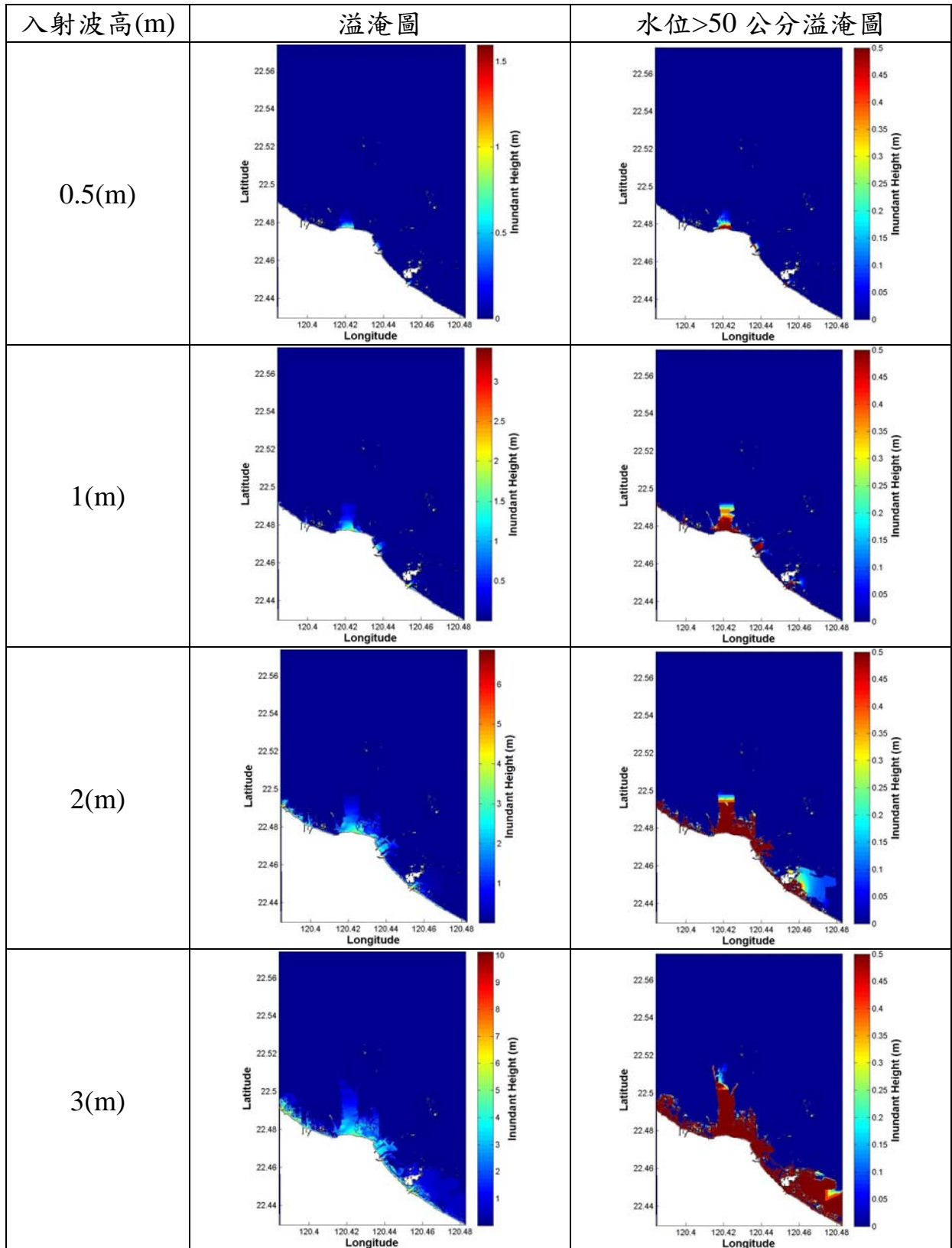


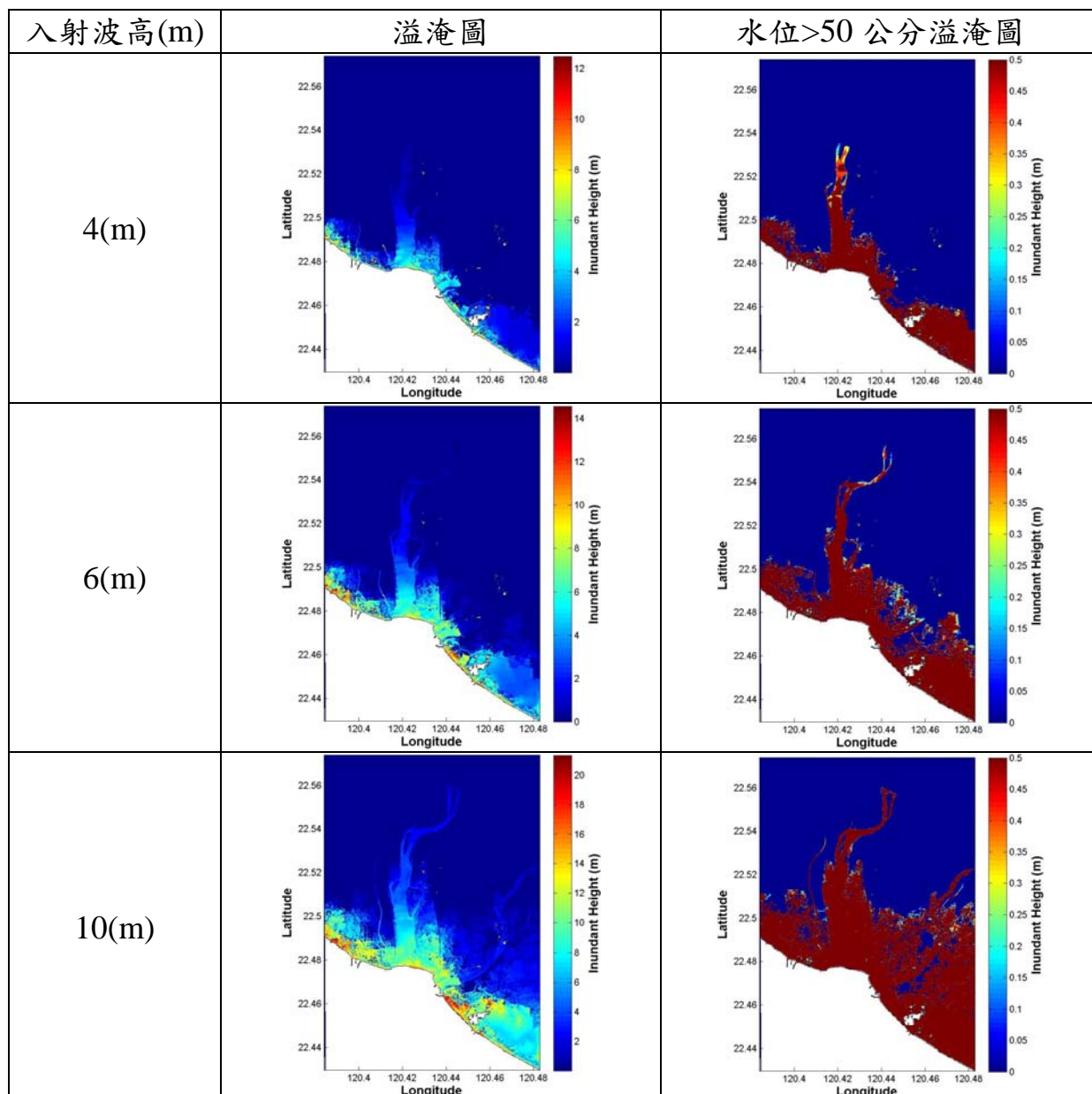
## 花蓮港





# 高屏溪







## 附錄五 數值模式控制方程

### ■ FLUIDITY 控制方程式

平流擴散方程式(Advection-Diffusion equation)，對純量場  $c$ (例如溫、鹽度)，一般的形式如下：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u}c = \nabla \cdot (\overline{\kappa} \nabla c) - \sigma c + F \quad (\text{B1})$$

其中  $\mathbf{u}=(u,v,w)^T$  為速度向量， $\overline{\kappa}$  為擴散係數(張量)， $\sigma$  為吸收係數( $-\sigma c$  項有時也被稱為瑞立或線性摩擦)， $F$  為來源或再反應項。

將 B1 式的平流項展開如下：

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}c) = \mathbf{u} \cdot \nabla(c) + (\nabla \cdot \mathbf{u})c \quad (\text{B2})$$

用來表示純量  $c$  在流場  $\mathbf{u}$  之下的傳播。在不可壓縮流體的情形下， $\nabla \cdot \mathbf{u}=0$ ，所以可以刪除 B2 式右邊第二項。然而這可能會導致該流速場在離散後無法正確的自由輻散，在這種情況下，應於離散的過程中將該項考慮進去。Fluidity 模式的平流項形式如下：

$$\mathbf{u} \cdot \nabla(c) + (\beta-1)(\nabla \cdot \mathbf{u})c \quad (\text{B3})$$

當  $\beta=1$  對應於方程式的守恆形式，而  $\beta=0$  則為不守恆。

其中於 B1 式的擴散項表示如下：

$$\nabla \cdot (\overline{\kappa} \nabla c) \quad (\text{B4})$$

代表純量  $c$  的混合作用，代表個別質點的布朗運動(Brownian Movement)引起的分子混合，或者是較大尺度的流體運動所造成的混合。在許多應用上，B4 式可以寫成比較簡單的形式。通常讓擴散係數等向化，令  $\overline{\kappa} = \text{diag}(\kappa, \kappa, \kappa)$  則擴散項可以改寫成下面的形式：

$$\nabla \cdot (\overline{\kappa} \nabla c) = \kappa \nabla \cdot \nabla c = \kappa \nabla^2 c = \kappa \Delta c \quad (\text{B5})$$

某些水平和垂直方向比例較高的動力學，在較薄的方向上，通常會使用一個較小的擴散係數，例如在大氣或海洋，我們可以選擇一個水平(渦流)擴散係數  $\kappa_H$ ，以及一個垂直(渦流)擴散係數  $\kappa_V$ ，則  $\overline{\kappa} = \text{diag}(\kappa_H, \kappa_H, \kappa_V)$ ，其中  $\kappa_H > \kappa_V$ 。在此情形下的擴散項能改寫成

$$\nabla \cdot (\overline{\kappa} \nabla c) = \kappa_H \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \kappa_V \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (\text{B6})$$

上式二階項的定義通常為拉普拉斯擴散(Laplacian diffusion)。

其中於B1式中的吸收項為  $-\sigma c$ ，其作用在於有減少  $c$  的規模(通常  $\sigma$  是正值，所以前面有減號)。有時候會被稱為雷利摩擦(Rayleigh friction)。而於B1式中最後一項  $F = \sum_i F_i$ ， $F_i$  包含一些來源項和反應項。通常來源項是時間、位置或是已知場的函數(另外有時候表示沉降時，其值為負值)。而反應項則是其他預測場(prognostic fields)的函數，通常應用在化學或生物學方面。

## ■ FLUIDITY 流體方程式(Fluid equations)

描述連續體的物理特性需著重在守恆方程式。當流體移動的時候，體積會隨著時間變形。如果  $\theta(\mathbf{x}, t)$  是流體之中某些變量的密度(例如溫度)，則在一個流體體積  $V(t)$  中，這些量隨時間變化如下：

$$\frac{d}{dt} \left[ \int_{V(t)} \theta(\mathbf{x}, t) \right] = \int_{V(t)} \left( \frac{D\theta}{Dt} + \theta \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \quad (\text{B7})$$

亦即為雷諾傳輸定律(Reynolds' Transport theorem.)。在 B7 式中  $\mathbf{x}=(x, y, z)^T$ ，且  $\mathbf{u}=(u, v, w)^T$  代表三維方向的位置和流速向量。物質微分(material derivative)的表示如下：

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \quad (\text{B8})$$

### ■ 質量守恆(Mass conservation)

令  $\theta=\rho$  代入 B8 式，且需注意物質沒有因為創造或是毀滅而造成 B8 式的等號左邊為 0 (右邊括號為 0，會積出不一定為 0 的常數)。當  $V(t)$  為一任意值，則  $\rho$  可視為體積密度，且滿足下式：

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (\text{B9})$$

或

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{B10})$$

其中  $\rho \mathbf{u}$  可稱為質量通量或是動量，而 B10 式被稱為連續方程式

### ■ 動量守恆 (Momentum conservation)

將流體的一個單位體積的動量以  $\rho \mathbf{u}$  來表示，首先考慮流體為理想流體，亦即忽略黏滯力和傳導性。則動量變化率以下式表示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) = \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \mathbf{u} \quad (\text{B11})$$

將 B10 式之連續方程式及尤拉方程式(Euler' s equation)所得的 B12 式代入 B11 式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (\text{B12})$$

可得

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) = -\nabla p - \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \quad (\text{B13})$$

B13 式的  $\mathbf{u} \mathbf{u}$  是一個張量，代表著兩個向量的積分，使用指標符號可以寫成  $u_i u_j$ 。令  $\overline{\overline{\Pi}} = p \mathbf{I} + \rho \mathbf{u} \mathbf{u}$ ，則 B13 式可寫成下式

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \overline{\overline{\Pi}} = 0 \quad (\text{B14})$$

此處的  $\overline{\overline{\Pi}}$  是一個對稱張量，被稱為動量通量密度張量 (momentum flux density tensor)。考慮到黏滯效應，運動方程式為了描述流體帶有黏滯性，要額外增加一些項。雖然連續方程式 (體積守恆) 適用於非黏滯性流體，同樣也適用於黏滯性流體。然而尤拉方程式 (B12 式) 與之後的 B14 式需要再調整。藉由將  $-\overline{\overline{\tau}}$  加入動量通量密度張量，則

$$\overline{\overline{\Pi}} = p \mathbf{I} + \rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \overline{\overline{\tau}} = -\overline{\overline{\sigma}} + \rho \mathbf{u} \mathbf{u} \quad (\text{B15})$$

在此  $\overline{\overline{\sigma}} = -p \mathbf{I} + \overline{\overline{\tau}}$ ，讓流體中的動量黏滯性傳輸可以加入計算。 $\overline{\overline{\sigma}}$  被稱為應力張量，能提供一部分非直接來自於流體質量的動量傳輸 (direct transfer of momentum)。 $\overline{\overline{\tau}}$  被稱為偏應力 (deviatoric) 或黏滯應力張量 (viscous stress tensor)。這些可能會被用到的張量和形式會在下小節作細部討論。因此最一般性的可壓縮黏滯流體的動量方程式可以寫成

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla \cdot \overline{\overline{\sigma}} + \rho F \quad (\text{B16})$$

其中  $F$  是每單位質量的體積力 (volume force) (例如重力或行星引力)。可壓縮方程式的守恆形式 (Compressible equations in conservative form) 使用上述的守恆公式，可以獲得以下可壓縮流體的逐點 (point-wise) 偏微分運動控制系統。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{B17a})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \overline{\boldsymbol{\sigma}}) = \rho F \quad (\text{B17b})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u} - \overline{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{q}) = \rho F \cdot \mathbf{u} \quad (\text{B17c})$$

其中  $E \equiv e + |\mathbf{u}|^2 / 2$  代表特定的總能量(其中  $e$  為內能)。B17a 式正是(B10) 連續方程式的守恆形式，而 B17b 式相當於 B16 式。

若將  $w \equiv e + p / \rho$  與  $E \equiv e + |\mathbf{u}|^2 / 2$  代入 B16 式，則可得到 B17 式。不可壓縮方程式的守恆形式從 B17 式展開後所推導得到的可壓縮方程式：

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{B18a})$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} - \nabla \cdot \overline{\boldsymbol{\sigma}} = \rho F \quad (\text{B18b})$$

$$\rho \frac{De}{Dt} - \overline{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (\text{B18c})$$

## ■ 沉積物公式

Fluidity 能模擬多種沉積物的濃度場。每一種沉積物場有相應的濃度  $c_i$ ，運作方式如同其他追蹤物質的場，除了它會受到沉降速度的影響。懸浮載的沉積物質量的守恆方程式如下：

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot [c_i (\mathbf{u} - \boldsymbol{\delta}_{j3} u_{si})] = \nabla \cdot [c_i (\overline{\kappa} \nabla c_i)] \quad (\text{B19})$$

吸收項和來源項從上述方程式被移除，該兩項只會發生在區域的邊界。每個沉積物場代表一個離散的沉積物型態，並有其特定的粒徑和密度。一個沉積物型態的分布可以透過設定多個沉積物場來表示。每

個沉積物場的密度和底床載場也須設定初值。底床載場紀錄了因沉積物的沉降而離開模式區域的量。其受阻沉降的速度(Hindered Sinking Velocity)，沉降速度對懸浮載濃度的影響計算被涵蓋在沉降速度場的診斷階段 (Sinking Velocity field diagnostic) 。Richardson and Zaki [1954] 用來計算受阻沉降的速度  $u_{si}$  (hindered sinking velocity)的方程式是建立在未受阻的沉降速度  $u_{s0}$  以及沉積物的總濃度  $c$  。

$$u_{si} = u_{s0}(1 - c)^{2.39} \quad (\text{B20})$$

沉積與侵蝕(Deposition and erosion) ，一個表面例如海底，可以被定義來讓沉積物沉降。一旦沉積物通過該表面，將會被系統移除，且被儲存在一個分離的底床載場。底層的侵蝕可以透過沉積物再懸浮的邊界條件來模擬。目前提供兩個載懸浮公式的選擇來計算底層受到侵蝕的沉積物量

### 1. Garcia's re-entrainment algorithm

沉積物的侵蝕速率是根據底床所受到水流的剪切速度(shear velocity) $u^*$ ，底床的粒徑分布，以及粒徑的雷諾數  $R_{p,i}$ 。沉積物 i-th 類別的無因次化侵蝕速率  $E_i$  以下式表示：

$$E_i = F_i \frac{AZ_i^5}{1 - AZ_i^5 / 0.3} \quad (\text{B21})$$

$$Z_i = \lambda_m \frac{u^*}{u_{si}} R_{p,i}^{0.6} \left( \frac{d_i}{d_{50}} \right)^{0.2} \quad (\text{B22})$$

其中  $F_i$  是相關底床沉積物的體積比例， $d_i$  是沉積物 i-th 類別的粒徑， $d_{50}$  是中值粒徑 (median diameter)。A 為常數  $1.3 \times 10^7$ 。另外剪力速度  $u^*$  和粒徑雷諾數  $R_{p,i}$  的定義如下：

$$u^* = \sqrt{\tau_b / \rho} \quad (\text{B23})$$

$$R_{p,i} = \sqrt{Rgd^3 / \nu}$$

$$R = \frac{\rho S_m - \rho}{\rho}$$
(B24)

其中  $\tau_b$  為底床剪應力， $\rho S_m$  為沉積物密度、 $\rho$  為水的密度。藉由乘上沉降速率  $u_{si}$ ，便可得到有因次的侵蝕通量如下：

$$E_m = u_{si} E_i$$
(B25)

## 2. Generic re-entrainment algorithm

當底床剪力大於臨界剪力的時候便會發生侵蝕，每個沉積物類別都有個別的剪力，可以自行設定或是選擇交由模式計算。在底床(侵蝕)表面上，侵蝕通量  $E_m$  以 Neumann 邊界條件的形式呈現。

$$E_m = E_{0m} (1 - \varphi) \frac{\tau_{sf} - \tau_{cm}}{\tau_{cm}}$$
(B26)

其中  $E_{0m}$  為沉積物類別  $m$  的底床侵蝕常數( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )， $\tau_{sf}$  為底床剪應力， $\varphi$  為底床孔隙率(通常為 0.3)，而  $\tau_{cm}$  為沉積物類別  $m$  的臨界的剪應力。臨界剪應力可自行設定或是由模式以下式自動計算：

$$\tau_{cm} = 0.041(s - 1)\rho g D$$
(B27)

其中  $s$  是沉積物的相對密度，即  $\frac{\rho S_m}{\rho}$ ，而  $D$  是沉積物粒徑(mm)。

### ■ TRUCHAS 控制方程式

其控制方程式在不可壓縮流的流場中，即流體之密度( $\rho$ )為一常數，

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (\text{B28})$$

而連續方程式(B29)及動量方程式(B30)，分別代表質量守恆與動量守恆，(Navier-Stokes equation)方程式如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{B29})$$

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tilde{\tau} + \rho\mathbf{g} \quad (\text{B30})$$

$\rho$  為有效密度， $\mathbf{u}$  為速度向量， $\tilde{\tau}$  為應力張量， $\mathbf{g}$  為重力向量， $p$  為壓力， $t$  為時間。其中  $\tilde{\tau}$  應力張量：

$$\tilde{\tau} = \mu(\nabla\mathbf{u} + \nabla^T\mathbf{u}) \quad (\text{B31})$$

$\mu$  為動力黏滯係數，而將(B32)式、(B33)式及(B34)式用張量的型式改寫如下：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{B32})$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (\text{B33})$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{B34})$$

上式中，下標  $i$ 、 $j = 1, 2, 3$  分別為  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向， $u_i$  是速度場在  $i$  方向的速度分量， $g_i$  為重力加速度在  $i$  方向的分量， $\tau_{ij}$  為流體的分子黏性應力張量。

模擬水體與結構物體之交互作用，利用 TRUCHAS 中所使用的流體體積法(Volume of fluid, VOF)求解多相流體之複雜自由液面。此方法以水體於網格中所佔之體積分率來區分流場之水體與氣體之交界面，



計算體積分率的變化以追蹤自由液面之運動，其中網格內部特性（速度、密度、壓力及黏滯性等）的計算，主要利用不可壓縮流之特性，與質量守恆定理，分別將不同流體依照不同的物理特性代入連續控制方程式，得到各流體之體積分率(volume fraction)。經由體積分率，可分別計算局部網格內不同流體分別所佔之百分比，以得知下一個時間步的網格內流體分布之狀況，藉此來追蹤自由液面之運動，避免了自由液面的複雜設定，並且可以應用在不同相位的流體接觸面。在所求的問題包含了多種(空氣、水、泥)以上的流體，在此是假設空氣、水、泥為不可互溶的，流場中第  $m$  種流體在網格中的密度為  $\rho_m$ ，根據質量守恆，可得到：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \rho_m) = 0 \quad (\text{B35})$$

$\rho_m$  能以體積分率( $f_m$ )及該流體密度( $\rho_m^0$ )表示：

$$\rho_m = \frac{M_m}{V} = \left( \frac{V_m}{V} \right) \cdot \left( \frac{M_m}{V_m} \right) = f_m \rho_m^0 \quad (\text{B36})$$

$$f_m = \frac{V_m}{V} \quad (\text{B37})$$

(B36)式與(B37)式中， $M_m$  為網格中第  $m$  種流體的質量， $V$  為網格體積， $V_m$  為網格內第  $m$  種流體的所占的體積。由於流體密度( $\rho_m^0$ )為一定值，故可將(B35)改寫成：

$$\frac{\partial f_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} f_m) = 0 \quad (\text{B38})$$

(B38)式即為流體體積分率之方程式，而網格內整體的密度可以體積分率

$(f_m)$ 表示為：

$$\rho = \sum_m f_m \rho_m^0 \tag{B39}$$

## 附錄六 海嘯模式橋墩墩柱受水流之壓力及沖刷結果

(橋墩墩柱東面、西面 1 小時內之最大壓力分佈)單位:kPa

柱號	最大總壓力(東面)				最大總壓力(西面)			
	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	6.948	6.948	6.948	6.948	6.950	13.696	29.447	65.258
2	6.902	6.902	6.902	6.902	6.895	13.185	28.171	60.212
3	6.919	6.919	6.919	6.919	6.884	13.073	27.628	64.708
4	6.945	6.945	6.945	6.945	6.906	13.062	27.564	60.214
5	6.971	6.971	6.971	6.971	6.928	13.065	27.310	58.244
6	7.008	7.008	7.008	7.008	6.949	13.100	27.353	56.126
7	7.193	7.193	7.193	7.193	6.969	13.191	28.027	57.056
8	7.868	7.868	7.868	7.868	7.067	13.621	33.398	65.191
9	8.098	8.098	8.098	8.098	8.148	16.053	35.074	68.437
10	8.182	8.182	8.182	8.182	8.137	15.359	36.478	65.610
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.729	48.994
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	29.361
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	29.810
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	29.823
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	29.504
16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	30.117
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.665
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.164	30.652
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.557	32.137
20	6.951	6.951	6.951	6.951	6.954	13.709	29.484	65.861
21	6.897	6.897	6.897	6.897	6.885	13.216	28.337	58.796
22	6.917	6.917	6.917	6.917	6.887	13.141	28.206	62.006
23	6.941	6.941	6.941	6.941	6.908	13.119	28.048	59.854
24	6.965	6.965	6.965	6.965	6.930	13.124	27.684	58.389
25	7.000	7.000	7.000	7.000	6.952	13.154	27.642	57.731
26	7.151	7.151	7.151	7.151	6.976	13.274	28.430	58.587
27	7.615	7.615	7.615	7.615	7.063	13.642	33.861	66.867
28	6.094	6.094	6.094	6.094	6.183	13.876	33.014	65.608
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.411	25.127	49.623
30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.621	48.435
31	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.963
32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	30.349
33	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	29.256
34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	29.203
35	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.300
36	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	32.591
37	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.197
38	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.504	32.905

(橋墩墩柱南面、北面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大總壓力(南面)				最大總壓力(北面)			
	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	6.945	13.689	29.429	65.147	6.951	13.695	29.467	65.020
2	6.932	13.616	29.522	77.334	6.895	13.289	28.522	56.715
3	6.936	13.528	30.409	87.585	6.901	13.208	28.687	56.999
4	6.962	13.542	31.114	79.915	6.923	13.190	28.638	59.773
5	6.984	13.866	32.386	78.147	6.944	13.256	28.241	58.036
6	7.018	14.200	34.316	76.958	6.966	13.369	28.541	59.139
7	7.207	15.199	36.256	80.113	7.010	13.640	31.209	60.875
8	7.676	16.197	38.166	80.696	7.163	14.501	35.179	68.389
9	8.195	16.450	37.406	75.030	7.141	14.520	32.797	60.651
10	8.156	15.354	36.480	66.300	0.000	4.384	25.016	48.134
11	0.000	0.000	5.517	49.888	0.000	0.000	5.601	47.628
12	0.000	0.000	0.000	29.580	0.000	0.000	0.000	28.448
13	0.000	0.000	0.000	32.082	0.000	0.000	0.000	28.531
14	0.000	0.000	0.000	30.384	0.000	0.000	0.000	28.772
15	0.000	0.000	0.000	30.846	0.000	0.000	0.000	28.315
16	0.000	0.000	0.000	29.907	0.000	0.000	0.000	31.171
17	0.000	0.000	0.000	35.161	0.000	0.000	0.000	33.137
18	0.000	0.000	0.433	35.968	0.000	0.000	0.000	32.167
19	0.000	0.000	0.597	35.107	0.000	0.000	0.512	32.703
20	6.951	13.695	29.467	65.020	0.000	0.000	2.160	37.383
21	6.895	13.289	28.522	56.715	6.878	13.175	28.234	53.287
22	6.901	13.208	28.687	56.999	6.890	13.134	28.406	53.985
23	6.923	13.190	28.638	59.773	6.911	13.127	28.288	57.426
24	6.944	13.256	28.241	58.036	6.934	13.171	27.941	57.568
25	6.966	13.369	28.541	59.139	6.957	13.212	27.927	57.945
26	7.010	13.640	31.209	60.875	6.989	13.405	29.553	58.802
27	7.163	14.501	35.179	68.389	7.034	13.551	33.898	68.147
28	7.141	14.520	32.797	60.651	6.086	13.280	30.778	57.145
29	0.000	4.384	25.016	48.134	0.000	5.503	26.072	48.692
30	0.000	0.000	5.601	47.628	0.000	0.000	5.548	47.363
31	0.000	0.000	0.000	28.448	0.000	0.000	0.000	28.287
32	0.000	0.000	0.000	28.531	0.000	0.000	0.000	29.164
33	0.000	0.000	0.000	28.772	0.000	0.000	0.000	28.680
34	0.000	0.000	0.000	28.315	0.000	0.000	0.000	28.336
35	0.000	0.000	0.000	31.171	0.000	0.000	0.000	31.404
36	0.000	0.000	0.000	33.137	0.000	0.000	0.000	32.824
37	0.000	0.000	0.000	32.167	0.000	0.000	0.000	30.405
38	0.000	0.000	0.512	32.703	0.000	0.000	0.506	33.016

(不同入射波高各組橋墩最大侵蝕及最大堆積) 單位:m

組號	墩柱號	最大侵蝕(地形下降)				最大堆積(地形上升)			
		入射波高度				入射波高度			
		3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	1、20	-0.008	-0.027	-0.240	-0.461	0.003	0.016	0.087	0.206
2	2、21	-0.038	-0.121	-0.618	-1.284	0.021	0.095	0.378	0.751
3	3、22	-0.029	-0.095	-0.492	-1.595	0.016	0.067	0.338	0.881
4	4、23	-0.027	-0.099	-0.427	-1.652	0.015	0.052	0.246	1.041
5	5、24	-0.027	-0.102	-0.426	-1.602	0.013	0.051	0.196	0.927
6	6、25	-0.025	-0.095	-0.415	-1.283	0.013	0.052	0.132	0.674
7	7、26	-0.029	-0.088	-0.397	-1.050	0.017	0.058	0.150	0.524
8	8、27	-0.029	-0.070	-0.243	-0.780	0.014	0.046	0.126	0.329
9	9、28	-0.017	-0.072	-0.232	-0.912	0.010	0.057	0.182	0.380
10	10、29	-0.019	-0.079	-0.269	-1.199	0.009	0.046	0.181	0.669
11	11、30	0.000	-0.008	-0.368	-0.813	0.000	0.004	0.156	0.230
12	12、31	0.000	0.000	-0.096	-0.363	0.000	0.000	0.038	0.142
13	13、32	0.000	0.000	0.000	-0.288	0.000	0.000	0.000	0.108
14	14、33	0.000	0.000	0.000	-0.346	0.000	0.000	0.000	0.186
15	15、34	0.000	0.000	0.000	-0.324	0.000	0.000	0.000	0.195
16	16、35	0.000	0.000	0.000	-0.295	0.000	0.000	0.000	0.093
17	17、36	0.000	0.000	0.000	-0.410	0.000	0.000	0.000	0.226
18	18、37	0.000	0.000	0.000	-0.344	0.000	0.000	0.000	0.238
19	19、38	0.000	0.000	0.000	-0.255	0.000	0.000	0.000	0.164

