

102

MOTC-IOT-102-H3DB001

整合臺灣海岸及港灣海氣地象 模擬技術之研究(3/4)



交通部運輸研究所

中華民國 102 年 12 月

102

MOTC-IOT-102-H3DB001

整合臺灣海岸及港灣海氣地象 模擬技術之研究(3/4)

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 102 年 12 月

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(3/4)

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
出版機關：交通部運輸研究所
地址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)
電話：(04) 26587176
出版年月：中華民國 102 年 12 月
印刷者：
版(刷)次冊數：初版一刷 冊

GPN： ISBN：***_***_**_****_* (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

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(3/4)			
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 102-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、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 102 年 01 月 至 102 年 12 月	
關鍵詞：預警系統、風浪預報、暴潮預報、流場預報、海嘯			
摘要： <p>臺灣四周環海，開發海洋資源、發展航運、從事港灣建設及規劃等均需長期可靠之海氣地象資料作為依據。而為了躋身國際先進的海洋國家，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措施亦是絕對必須的。我國除了戮力推動海岸生活圈的開發以外，也由於全球環境變遷所致，水災、風災、地震及海嘯等似乎都進入發生頻率高的時期，使得海岸災害的預警、防災與避災成為近年來必須列為政府首要施政方針之一。</p> <p>本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，並配合已推動多年的海氣象觀測，協助建置港灣環境資訊室，提供相關海象觀測推算與預測的資料，讓港灣管理單位、國內外船舶業者及有關人員即時獲得港灣海氣象資訊與港灣水理資訊進而維護臺灣水域出港操航安全、提昇船席機動調配及港埠運作效率。但由於臺灣附近水域的地形與環境複雜，現階段仍有諸多影響因子值得並需要持續進行研究與改善。</p> <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”。提供國內航運及國內各主要港口海域安全之風浪、暴潮、流場及海嘯等預警資訊。</p> <p>本年度研究針對海象模擬作業系統著手於第四代天氣預報系統WRF風壓場取代NFS風壓場資料，不僅可達到提昇預報風壓場資料精確性，亦有助改善作業系統海象模結果準確性。在港區小尺度近岸波浪場模擬方面，除了針對安平港進行小尺度網格改善外，偏重於中尺度網格風浪模擬結果與小尺度網格波浪場模擬條件銜接問題研究，以改善中尺度網格與小尺度網格場模擬之垂直整合問題。另在細尺度港域波浪模擬則著重於模式在雙開口港池波浪場模擬之應用研究，並針對安平港與安平漁港雙開口港池現況重建有限元素計算網格模擬波浪場變化情形。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
102 年 12 月	624		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 月 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(3/4)

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
第一部分 提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究	
第二部分 提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究	

第一部分

提昇海岸及港灣海域海象模擬 技術之研究

摘要

本年度計畫主要以高雄港域及安平港域為研究對象，分別針對波浪、水位及流場等海象作業化預報模擬技術改善進行相關研究，並分析高雄港域及安平港域波浪、水位及流場等海象模擬結果之特性，協助港灣技術研究中心建置高雄港域及安平港域海象模擬預警子系統、執行本年度 TaiCOMS 之預報模擬作業化成果評估以及作業系統之維護、軟硬體之更新測試等相關工作。

本年度研究針對海象模擬作業系統則著手於以第四代天氣象預報系統 WRF 風壓場資料取代目前 NFS 風壓場資料研究，預期不僅可達到提昇 TaiCOMS 數值預報風壓場資料精確性，亦可有助於未來改善作業系統海象(如風浪及暴潮)模結果準確性。在港區小尺度近岸波浪場模擬方面，除了針對安平港進行小尺度網格改善外，偏重於中尺度網格風浪模擬結果與小尺度網格波浪場模擬條件銜接問題研究，以改善目前中尺度網格風浪模擬與小尺度網格波浪場模擬之垂直整合問題。另在細尺度港域波浪模擬則著重於模式在雙開口港池波浪場模擬之應用研究，並針對安平港與安平漁港雙開口港池現況重建有限元素計算網格模擬波浪場變化情形。

在水位及流場模擬研究可分為中尺度有限元素網格之天文潮模擬以及含氣象潮(暴潮)之水位變化模擬研究，以及針對安平港區及高雄港區小尺度有限元素網格水位及流場模擬改善研究等兩部份。前者天文潮水位變化模擬經安平港及高雄港潮位驗證具有較佳的模擬預測值，但對於暴潮水位偏差模擬分析結果則仍需進一步改善；後者針對安平港海域水位及流場模擬結果較具改善成效，但針對高雄港海域潮流流況掌握仍有不足及需持續改進研究的空間。

ABSTRACT

The objects of the project in this year are mainly on Kaohsiung Harbor and Anping Harbor. The related jobs include improving techniques of operative forecasting on wave, water level and flow field, analyzing the characteristics of simulating marine meteorology, and assessing the operating results of forecasting of TaiCOMS and maintenance of operating system as well as updating of software and hardware.

The wind/pressure data from the forth-generation meteorology forecasting system “WRF” is investigated instead of “NFS”, which not only enhances the accuracy of forecasting wind/pressure data of TaiCOMS, but also improves the accuracy of the marine meteorology simulation results. In the small-scale nearshore wave study, in addition to improvement of small-scale mesh for Anping Harbor and Kaohsiung Harbor, the matching problem between the results of wind wave simulation of medium-scale mesh and the simulating condition of small-scale mesh is studied. In wave simulation of fine-scale harbor area, the resonance phenomenon of Anping Harbor with two openings is studied, and the wave models for both harbors of Kaohsiung Harbor are developed and used to simulate wave field.

Research of hydrodynamic simulation can be divided into astronomical tide simulation of medium-scale mesh with water level simulation including storm surge and improvement of water level and flow field simulation of small-scale mesh for Anping and Kaohsiung harbors. The former is verified to present better forecasting in water level simulation, but the simulating results of water level deviation arisen from storm surge need to be improved. The latter presents efficient improvement of simulation result for the sea area of Anping Harbor, but controlling of tidal flow situation of Kaohsiung Harbor is not enough and needs to keep improving.

提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究

目 錄

中文摘要表	I
英文摘要表	II
目 錄	III
表目錄	VI
圖目錄	IX
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 基本資料蒐集與分析	2-1
2.1 港區簡介	2-1
2.2 水深資料	2-4
2.3 潮汐資料	2-11
2.4 海流資料	2-24
2.5 波浪資料	2-35
2.6 風場	2-38
第三章 波浪模擬與探討	3-1
3.1 TaiCOMS 波浪模擬架構說明	3-1
3.2 風浪作業化模擬研究	3-22
3.3 港區近岸波浪場模擬研究	3-37

3.4 細尺度港域波浪場模擬研究.....	3-46
第四章 水動力(水位及流場)模擬與探討.....	4-1
4.1 水動力模式基本理論介紹.....	4-1
4.2 臺灣周圍海域暴潮模擬與探討.....	4-11
4.3 小尺度安平港區水動力模組改善研究.....	4-49
4.4 小尺度高雄港區水動力模組改善研究.....	4-65
第五章 海象作業化預報成果評估.....	5-1
5.1 風場評估.....	5-1
5.2 風浪模擬成果評估.....	5-4
5.3 水位模擬成果評估.....	5-9
5.4 流場模擬成果評估.....	5-10
5.5 颱風時期模擬成果評估.....	5-13
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2
參考文獻.....	參-1
附錄一 中央氣象局安平港及高雄港潮位觀測資料圖.....	附1-1
附錄二 安平港及高雄港潮位觀測資料與天文潮預測值之比較 ...	附2-1
附錄三 2012年安平港及高雄港海流觀測資料.....	附3-1
附錄四 2012年安平港及高雄港波浪觀測資料.....	附4-1
附錄五 2012年安平港及高雄港風速及風向觀測資料.....	附5-1
附錄六 2013年安平港預報風場與觀測比較圖.....	附6-1
附錄七 2013年高雄港預報風場與觀測比較圖.....	附7-1
附錄八 2013年安平港風浪模式與觀測之比較.....	附8-1

附錄九	2013年高雄港風浪模式與觀測之比較.....	附9-1
附錄十	2013年颱風時期安平港及高雄港模式預報風浪與觀測 值之比較.....	附10-1

表目錄

表2-1	安平港驗潮站2008～2010年潮汐資料調和分析成果表	.....2-15
表2-2	安平港潮位觀測資料與天文潮預測值誤差分析成果表	.....2-15
表2-3	高雄港驗潮站2010～2012年潮汐資料調和分析成果表	.....2-22
表2-4	高雄港潮位觀測資料與天文潮預測值誤差分析成果表	.....2-22
表2-5	安平港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-26
表2-5	(續)安平港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-26
表2-6	高雄港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-29
表2-6	(續1)高雄港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-29
表2-6	(續2)高雄港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-30
表2-6	(續3)高雄港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-30
表2-6	(續4)高雄港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-30
表2-6	(續5)高雄港海流觀測資料潮流調和分析成果表	.....2-31
表2-7	2012年安平港海域示性波高分布統計表	.....2-36
表2-8	2012年安平港海域平均波向分布統計表	.....2-37
表2-9	2012年高雄港海域示性波高分布統計表	.....2-37
表2-10	2012年高雄港海域平均波向分布統計表	.....2-37
表2-11	2012年侵臺颱風相關資訊	.....2-40
表2-12	歷年(1897～2012年)各月侵臺颱風之次數及頻率統計表	...2-40
表2-13	中央氣象局風場NFS風場資料格式	.....2-41
表2-14	中央氣象局風場WRF風場資料格式	.....2-41
表2-15	作業系統內輸出風場資料格式	.....2-42
表3-1	TaiCOMS各波浪數值模組之特性綜整表	.....3-5
表3-1	(續)TaiCOMS各波浪數值模組之特性綜整表	.....3-6
表5-1	2013年安平港與高雄港預報及觀測風場平均風速統計表	...5-2

表5-2	2013年安平港與高雄港預報及觀測風場最大風速風向統計表.....	5-3
表5-3	2013年安平港與高雄港預報及觀測風場主要風向百分比統計表.....	5-3
表5-4	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性波高平均值統計表.....	5-5
表5-5	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性波高最大值(方向、週期)統計表.....	5-6
表5-6	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性週期平均值統計表.....	5-6
表5-7	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性週期最大值(方向、波高)統計表.....	5-7
表5-8	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪主要波高(百分比)統計表.....	5-7
表5-9	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪主要週期(百分比)統計表.....	5-8
表5-10	2013年安平港與高雄港預報及觀測風浪主要波向(百分比)統計表.....	5-8
表5-11	2013年基隆及臺北港觀測1站及小尺度預報水位偏差統計表.....	5-9
表5-12	2013年基隆及臺北港觀測及小尺度預報流速偏差統計表.....	5-11
表5-13	2013年基隆及臺北港觀測及小尺度預報流向偏差統計表.....	5-12
表5-14	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及SWAN預報示性波高各種偏差統計表.....	5-14
表5-15	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及SWAN預報波向各種偏差統計表.....	5-15

表5-16	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及SWAN預報示 性週期各種偏差統計表.....	5-16
表5-17	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及WAM預報示 性波高各種偏差統計表.....	5-17
表5-18	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及WAM預報波 向各種偏差統計表.....	5-18
表5-19	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及WAM預報示 性週期各種偏差統計表.....	5-19
表5-20	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測1站及中尺度預 報水位偏差統計表.....	5-20
表5-21	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及中尺度預報流 速偏差統計表.....	5-21
表5-22	2013年颱風期間安平港與高雄港觀測及中尺度預報流 向偏差統計表.....	5-22

圖目錄

圖2.1	安平港港區規劃平面圖(下載自高雄港務安平分公司網站).....	2-2
圖2.2	安平漁港舊港口重建計畫開發範圍(摘自安平漁港舊港口重建計畫開發計畫變更環境影響差異分析報告).....	2-2
圖2.3	高雄港港區範圍平面圖(下載自高雄港務分公司資訊網站).....	2-3
圖2.4	安平港港區101年度水深測量點位分布圖.....	2-4
圖2.5	高雄港港區101年度水深測量點位分布圖.....	2-5
圖2.6	安平港及附近海域水深圖.....	2-6
圖2.7	安平港港區101年度水深調查之水深分布圖.....	2-7
圖2.8	安平港港區近岸水動力模組模擬範圍及水深分布圖.....	2-8
圖2.9	高雄港港區101年度水深調查之水深分布圖.....	2-9
圖2.9	(續)高雄港港區101年度水深調查之水深分布圖.....	2-10
圖2.10	高雄港港區近岸水動力模組模擬範圍及水深分布圖.....	2-11
圖2.11	本年度潮位資料蒐集相關潮位站位置示意圖.....	2-12
圖2.12	安平港潮位站代表性潮位逐月統計值之變化情形圖.....	2-16
圖2.13	安平港潮位頻譜分析結果與各分潮頻率對應關係圖.....	2-16
圖2.14	安平港潮位調和分析結果之分潮振幅大小分佈圖.....	2-17
圖2.15	安平港2012年潮位觀測資料之時序列圖.....	2-18
圖2.15	(續)安平港2012年潮位觀測資料之時序列圖.....	2-19
圖2.16	高雄港2010~2012年主要代表性潮位逐月統計值圖.....	2-23
圖2.17	高雄港潮位頻譜分析結果與各分潮頻率對應關係圖.....	2-23
圖2.18	高雄港潮位調和分析結果之分潮振幅大小分佈圖.....	2-24
圖2.19	港灣技術研究中心安平港港區海象資料測站位置示意圖.....	2-26

圖2.20	安平港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖 (2012/04/01~2012/05/20)	2-27
圖2.21	安平港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖 (2012/08/16~2012/09/26)	2-27
圖2.22	港灣技術研究中心高雄港區海象資料測站位置示意圖	2-28
圖2.23	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/01/01~1/31).....	2-31
圖2.24	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/02/01~02/29).....	2-32
圖2.25	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/03/01~03/31).....	2-32
圖2.26	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/05/01~05/31).....	2-33
圖2.27	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/09/05~09/30).....	2-33
圖2.28	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/10/01~10/31).....	2-34
圖2.29	高雄港海流觀測資料E-W及N-S方向速度能譜圖(資料 時間：2012/11/01~11/30).....	2-34
圖2.30	2012年中央氣象局發布侵臺颱風之行進路徑圖	2-42
圖2.31	侵襲臺灣之颱風路徑統計圖(1897~2012).....	2-43
圖2.32	中央氣象局風場NFS及WRF風場資料範圍圖	2-44
圖2.33	MC及WA02風場輸出範圍圖	2-44
圖2.34	WA03風場輸出範圍圖	2-45
圖3.1	大尺度西太平洋風浪模組之模擬範圍	3-7
圖3.2	中尺度臺灣近岸海域風浪模組之模擬範圍	3-7
圖3.3	國內七大港口地理位置及小尺度港區近岸波浪模組 模擬範圍	3-8

圖3.4	臺灣近岸海象數值模擬系統波浪模擬線上作業流程	3-9
圖3.5	TaiCOMS每日線上作業程式模擬時間示意圖	3-10
圖3.6	波浪能量由高頻向低頻傳遞之示意圖	3-14
圖3.7	REF/DIF-1數值計算網格座標系統示意圖	3-18
圖3.8	港域波浪模式計算領域示意圖	3-21
圖3.9	TaiCOMS波浪模擬大、中及小尺度網格模組關係示意圖	3-23
圖3.10	大尺度西太平洋範圍風浪模組之模式操作流程圖	3-30
圖3.11	大尺度網格風浪模擬結果之平均週期 T_m (圓圈)及 T_{m02} (三角形)與觀測波浪平均週期(圓點)之比較	3-30
圖3.12	大尺度西太平洋範圍風浪模組波譜模擬結果輸出點位示意圖	3-31
圖3.13	輕度颱風泰利侵臺期間大尺度網格分別以RC及MC風場模擬風浪之示性波高與觀測值比較圖	3-32
圖3.14	中度颱風蘇拉侵臺期間大尺度網格分別以RC及MC風場模擬風浪之示性波高與觀測值比較圖	3-32
圖3.14	(續)中度颱風蘇拉侵臺期間大尺度網格分別以RC及MC風場模擬風浪之示性波高與觀測值比較圖	3-33
圖3.15	中尺度臺灣周圍海域風浪模組更新後之模擬範圍圖	3-33
圖3.16	平行化處理下系統SWAN之運算時間與CPU數目關係圖	3-34
圖3.17	風浪波高模擬值與觀測值間絕對誤差值之逐時變化分布圖	3-34
圖3.18	波高模擬值與觀測值之絕對誤差與觀測值之比值逐時變化分布圖	3-35
圖3.19	波高模擬值與觀測值間絕對誤差與觀測值之比值日平均變化分布圖	3-35
圖3.20	波高模擬值與觀測值間標準偏差逐日變化分布圖	3-36

圖3.21	波高模擬值與觀測值間相關係數逐日變化分布圖.....	3-36
圖3.22	安平港小尺度港區近岸波浪模組之模擬範圍圖.....	3-39
圖3.23	安平港港區近岸波浪模組小尺度參考網格及地形水深 分布圖.....	3-40
圖3.24	本計畫安平港港區近岸波浪模組擴大模擬範圍圖.....	3-40
圖3.25	本計畫安平港新建小尺度參考網格及地形水深分布圖.....	3-41
圖3.26	安平港小尺度波浪場模擬結果，觀測點位O之波高模擬 值(縱座標)與觀測值(橫座標)之對應比較圖.....	3-41
圖3.27	波高條件校正之安平港波浪場模擬結果，觀測點位O 之波高模擬值(縱座標)與觀測值(橫座標)之對應比較 圖.....	3-42
圖3.28	安平港小尺度網格波浪場模擬結果之波高分布圖 ($H=2.45\text{m}$ ， $T=9.6\text{sec}$ ， $\theta=210^\circ$).....	3-42
圖3.29	安平港小尺度網格波浪場模擬結果之波高分布圖 ($H=1.96\text{m}$ ， $T=6.3\text{sec}$ ， $\theta=270^\circ$).....	3-43
圖3.30	安平港小尺度網格邊界與中尺度網格點之對應圖.....	3-43
圖3.31	高雄港小尺度港區近岸波浪模組之模擬範圍圖.....	3-45
圖3.32	高雄港小尺度網格之參考網格及地形水深分布圖.....	3-45
圖3.33	雙港口耦合問題及相關參數示意圖.....	3-48
圖3.34	本計畫雙港口波浪場數值計算有限元素網格配置圖.....	3-49
圖3.35	長矩形港池(#1)之波浪放大率與無因次參數(k_{l1})之關 係圖.....	3-49
圖3.36	短矩形港池(#2)之波浪放大率與無因次參數(k_{l1})之關 係圖.....	3-50
圖3.37	波浪週期600 sec波浪場模擬結果之波高分布情形圖.....	3-51
圖3.38	波浪週期320 sec波浪場模擬結果之波高分布情形圖.....	3-52
圖3.39	安平港區港域波浪模組之模擬範圍及水深分布情形圖.....	3-54

圖3.40	安平港區港域波浪模組更新後之模擬範圍圖.....	3-54
圖3.41	安平港區港域波浪模組更新後之粗網格配置及水深分布情形圖.....	3-55
圖3.42	安平港區港域波浪模擬結果之波高檢核點位置示意圖.....	3-57
圖3.43	安平港區港域波浪模擬結果之波高檢核點位置示意圖.....	3-58
圖3.44	安平港區港域波浪模擬結果之波高檢核點位置示意圖.....	3-58
圖3.45	安平港區港域波浪模擬結果之波高分布情形(週期20 sec).....	3-59
圖3.46	安平港區港域波浪模擬結果之波高分布情形(週期25 sec).....	3-60
圖3.47	安平港區港域波浪模擬結果之波高分布情形(週期30 sec).....	3-61
圖3.48	高雄港港區範圍影像圖.....	3-63
圖3.49	高雄港區港域波浪模組一港口及二港口模擬範圍圖.....	3-64
圖3.50	高雄港區一港口港域波浪模之粗網格配置圖.....	3-65
圖3.51	高雄港區二港口港域波浪模之粗網格配置圖.....	3-65
圖3.52	高雄港區一港口港域波浪模擬結果之波高KD值分布情形(波浪條件：週期10 sec，波向W).....	3-67
圖3.53	高雄港區二港口港域波浪模擬結果之波高KD值分布情形(波浪條件：週期10 sec，波向W).....	3-67
圖4.1	三角形元素座標定義.....	4-5
圖4.2	臺灣周圍海域暴潮模組之模擬範圍.....	4-13
圖4.3	臺灣周圍海域暴潮模組2012版網格三角形元素網格分布圖.....	4-14
圖4.4	臺灣周圍海域暴潮模組之地形水深分布圖.....	4-14
圖4.5	模式網格修正前安平至高雄海域間三角形元素分布圖.....	4-15
圖4.6	模式網格修正後安平至高雄海域間三角形元素分布圖.....	4-15

圖4.7	臺灣周圍海域暴潮模組有限元素網格更新後三角形元素分布圖	4-16
圖4.8	臺灣周圍海域暴潮模組採用的天文潮邊界條件時序圖	4-17
圖4.9	安平港區天文潮位模式模擬結果之比較圖	4-19
圖4.10	高雄港區天文潮位模式模擬結果之比較圖	4-20
圖4.11	安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-20
圖4.11	(續1)安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-21
圖4.11	(續2)安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-21
圖4.11	(續3)安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-22
圖4.12	高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-22
圖4.12	(續1)高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-23
圖4.12	(續2)高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-23
圖4.12	(續3)高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖	4-24
圖4.13	安平港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-24
圖4.13	(續1)安平港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-25
圖4.13	(續2)安平港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-25
圖4.13	(續3)安平港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-26
圖4.14	高雄港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-26
圖4.14	(續1)高雄港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-27
圖4.14	(續2)高雄港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-27
圖4.14	(續3)高雄港區天文潮位模擬值與TaiCOMS模擬值之比較圖	4-28

圖4.15	臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-28
圖4.15	(續1)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-29
圖4.15	(續2)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-29
圖4.15	(續3)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-30
圖4.15	(續4)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-30
圖4.15	(續5)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-31
圖4.15	(續6)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-31
圖4.15	(續7)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-32
圖4.15	(續8)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-32
圖4.15	(續9)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-33
圖4.15	(續10)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-33
圖4.15	(續11)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-34
圖4.15	(續12)臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖	4-34
圖4.16	TaiCOMS作業化MC風壓場之等壓線分布圖(2012年輕度颱風泰利)	4-37

圖4.16	(續)TaiCOMS作業化MC風壓場之等壓線分布圖(2012 年輕度颱風泰利)	4-37
圖4.17	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)	4-38
圖4.17	(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)	4-38
圖4.18	安平港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖	4-39
圖4.18	(續1)安平港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比 較圖	4-39
圖4.18	(續2)安平港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比 較圖	4-40
圖4.19	高雄港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖	4-40
圖4.19	(續1)高雄港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比 較圖	4-41
圖4.19	(續2)高雄港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比 較圖	4-41
圖4.20	安平港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化 之時序列圖	4-42
圖4.20	(續1)安平港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位 變化之時序列圖	4-42
圖4.20	(續2)安平港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位 變化之時序列圖	4-43
圖4.21	高雄港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化 之時序列圖	4-43
圖4.21	(續1)高雄港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位 變化之時序列圖	4-44
圖4.21	(續2)高雄港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位 變化之時序列圖	4-44

圖4.22	高雄港海域檢核點氣壓差預測值、氣象潮水位變化模擬值及觀測資料調和分析預測值之時序列圖.....	4-45
圖4.22	(續1)高雄港海域檢核點氣壓差預測值、氣象潮水位變化模擬值及觀測資料調和分析預測值之時序列圖	4-45
圖4.22	(續2)高雄港海域檢核點氣壓差預測值、氣象潮水位變化模擬值及觀測資料調和分析預測值之時序列圖	4-46
圖4.23	臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖	4-47
圖4.23	(續1)臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖	4-47
圖4.23	(續2)臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖	4-48
圖4.23	(續3)臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖	4-48
圖4.24	安平港區近岸水動力模組之模擬範圍及有限元素格網分佈圖(98年度計畫).....	4-50
圖4.25	安平港區近岸水動力模組之細網格三角形元素分佈圖	4-51
圖4.26	安平港港域及港口附近細網格之三角形元素分布圖.....	4-52
圖4.27	前期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	4-54
圖4.28	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	4-54
圖4.29	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	4-56
圖4.30	前期計畫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	4-57
圖4.31	安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 16:00)	4-58
圖4.31	(續1)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 17:00)	4-59

圖4.31	(續2)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 18:00)	4-59
圖4.31	(續3)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 1 9:00)	4-60
圖4.31	(續4)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 20:00)	4-60
圖4.31	(續5)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 22:00)	4-61
圖4.31	(續6)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 00:00)	4-61
圖4.31	(續7)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 02:00)	4-62
圖4.31	(續8)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 04:00)	4-62
圖4.31	(續9)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 06:00)	4-63
圖4.31	(續10)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 11:00)	4-63
圖4.31	(續11)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 13:00)	4-64
圖4.31	(續12)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 15:00)	4-64
圖4.31	(續13)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 17:00)	4-65
圖4.32	高雄港水動力模組之模擬範圍及有限元素格網分佈圖	4-68
圖4.33	高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖	4-68
圖4.34	高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖	4-69
圖4.35	高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖	4-69

圖4.36	高雄港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位時序圖	4-70
圖4.37	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	4-71
圖4.38	高雄港水位及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)之流速大小及流向比較圖	4-72
圖4.39	高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/17 20:00)	4-73
圖4.39	(續1)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/17 21:00)	4-73
圖4.39	(續2)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/17 23:00)	4-74
圖4.39	(續3)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 01:00)	4-74
圖4.39	(續4)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 03:00)	4-75
圖4.39	(續5)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 05:00)	4-75
圖4.39	(續6)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 07:00)	4-76
圖4.39	(續7)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 09:00)	4-76
圖4.39	(續8)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 11:00)	4-77
圖4.39	(續9)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 13:00)	4-77
圖4.39	(續10)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 15:00)	4-78
圖4.39	(續11)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 17:00)	4-78

圖4.39	(續12)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 19:00)	4-79
圖4.39	(續13)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 21:00)	4-79
圖5.1	2013年中度颱風蘇力侵臺路徑圖	5-23
圖5.2	2013年輕度颱風西馬隆侵臺路徑圖	5-23
圖5.3	2013年輕度颱風潭美侵臺路徑圖	5-23
圖5.4	2013年輕度颱風康芮侵臺路徑圖	5-23
圖5.5	2013年強烈颱風天兔侵臺路徑圖	5-23

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，自本年度(102 年)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」二年期(102 及 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

本年度研究範圍與對象主要針對高雄港域及安平港域進行海象模擬相關研究，並協助港研中心建立高雄港域及安平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

本年度計畫以高雄港域及安平港域為對象進行海象(波浪、水位及流場等)模擬相關研究，主要研究內容與工作項目如下：

1. 精進海象自動化預報模擬系統之預報精確度：針對高雄港域及安平港域，進行波浪、水位及流場等海象每日 72 小時作業化模擬(昨日、今日、明日)、即時作業化模擬等相關資訊之改善研究，並以颱風侵臺時期之颱風波浪及暴潮為研究重點。

2. 高雄港域及安平港域波浪、水位及流場等海象預報作業化成果評估：以港灣技術研究中心(或中央氣象局)現場觀測資料進行模擬結果之校驗及精度評估等工作。
3. 高雄港域及安平港域波浪、水位及流場等海象模擬結果之特性分析：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. 建立高雄港域及安平港域海象模擬預警系統：針對本系統辦理教育訓練，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，針對高雄港域及安平港域長期水位分析結果，檢核港口之設計水位。
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. 以上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。

1.3 報告內容架構

本報告主要內容及架構簡述如下：

1. 基本資料蒐集與分析

本報告第二章基本資料蒐集包括地形水深、潮位、海流、波浪及風場等，其中(a)地形水深資料主要以安平港區與高雄港區為對象，蒐集 101 年港區水深調查資料及其鄰近海域海軍大氣海洋局刊行的海圖資料；(b)潮位站資料蒐集包括龍洞、基隆港、麟山鼻、竹圍、外埔、臺中港、鹿港、箔仔寮、東石、將軍、安平港、永安、高雄港、東港及小琉球等潮位站之潮汐記錄，並針對將軍、安平港、永安、高雄港、東港及小琉球等潮位資料進行分析；(c)海流資料蒐

集以安平港區與高雄港區觀測資料為主，分別進行潮流調和析探討潮流特性；(d)波浪資料蒐集亦以安平港區與高雄港區觀測資料為主，分別進行波浪統計特性分析；(e)風場資料除了蒐集安平港區與高雄港區觀測資料以及颱風資料外，並針對中央氣象局提供的 NFS 及 WRF 風場資料進行差異性分析。

2. 波浪模擬與探討

本報告第三章係以安平港區及高雄港區為對象，說明本年度計畫波浪模擬之研究內容及成果，內容分為 TaiCOMS 波浪模擬架構說明(包含相關波浪模式介紹)、風浪作業化模擬研究、港區近岸波浪場模擬研究及細尺度港域波浪場模擬研究等四部份。

3. 水位及流場模擬與探討

本報告第四章係以安平港區及高雄港區為對象，說明本年度計畫水位及流場模擬之研究內容及成果，內容分為水動力模式基本理論介紹、臺灣周圍海域暴潮模擬與探討、小尺度安平港區水動力模組改善研究及小尺度高雄港區水動力模組改善研究等四部份呈現。

4. 海象模擬作業化成果評估

本報告第五章海象模擬作業化成果評估，主要以安平港區及高雄港區為對象，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、流場模擬成果評估及颱風時期模擬成果評估等。

5. 結論與建議

本報告第六章為本年度計畫研究成果之結論與建議。

第二章 基本資料蒐集與分析

本年度計畫以高雄港區及安平港區為主要研究對象，因此本章節基本資料(如水深、潮位、海流、波浪及風場等)蒐集與分析主要針對高雄港區及安平港區為之。

2.1 港區簡介

1. 安平港區

本計畫安平港係指安平國際商港港區，原為安平新港，闢建於民國 68 年，於民國 86 年 5 月 12 日經交通部公告為高雄港之輔助港，遂由國內商港升格為國際商港。安平港整體規劃之平面配置，如圖 2.1 所示，其中港域總面積約 477 公頃(包含水域 277 公頃及陸域 200 公頃)，規劃興建碼頭共 31 座，總長度約 5,657 公尺；港口主航道及迴船池水域規劃為水深負 12m，預估可供二萬噸級船舶進出。整體安平港港池水域北與安平漁港(原安平舊港)水域相連，東與台南運河相銜接(註：運河另一出口與安平舊港相通)，南與竹溪相通，顯示安平港港池水域不屬於封閉水域。

安平漁港又稱為安平舊港，舊港口航道原址位於安平港港口西北約 2.5 公里處，因航道淤積於民國 63 年封港。民國 89 年 12 月重新啟動安平漁港舊港口重建工程，並於民國 98 年 1 月完工通航；自此 2000 噸級以下漁船將直接由此港口進出，不必再繞道由安平港出海。安平漁港舊港口重建計畫係於舊航道原址重新開闢，計畫範圍如圖 2.2 所示，包括拓寬原航道寬度至 100 m，航道浚深至負 7 m，航道外海新建南、北防波堤至水深負 9 m 處，其中南、北防堤分別長約 745 m 及 545 m。安平漁港之遠洋漁港泊地共計 53.7 公頃，碼頭長度達 4,600 m，其中近海漁港區泊地有 20.4 公頃，碼頭水深-2 ~ -4 m；遠洋漁港區泊地 20.4 公頃，碼頭水深-5 ~ -7 m 不等。

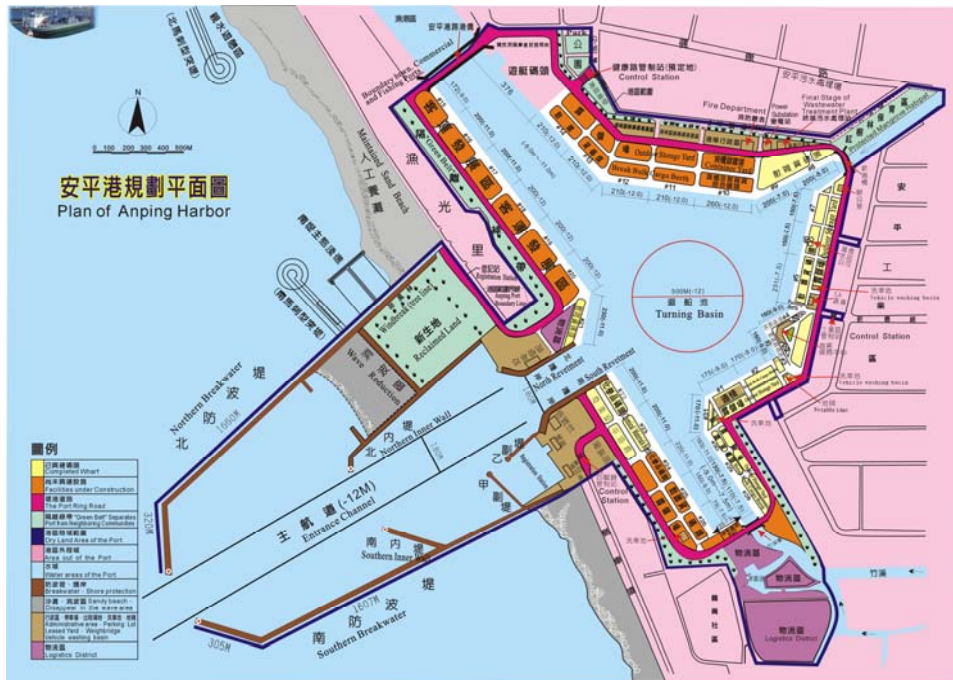


圖 2.1 安平港港區規劃平面圖(下載自高雄港務安平分公司網站)

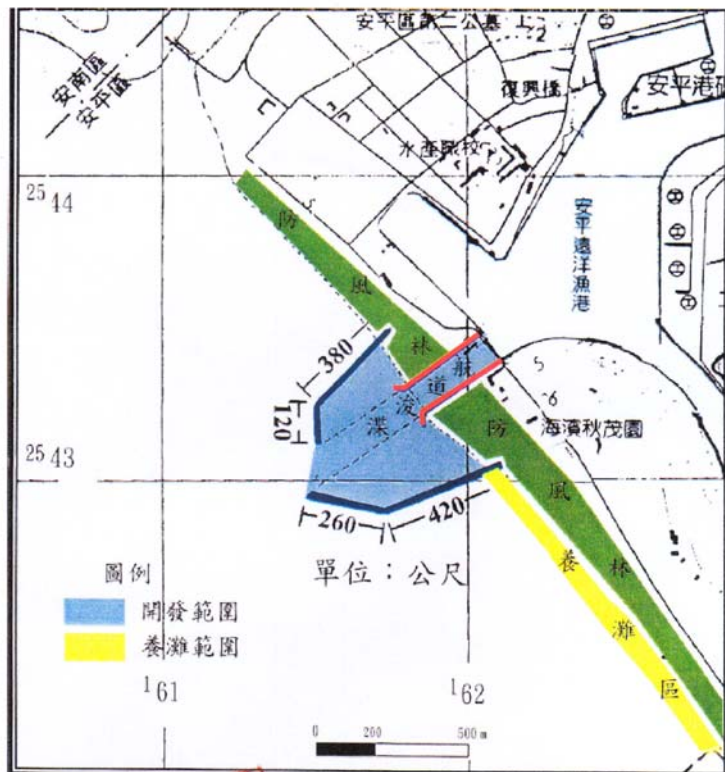


圖 2.2 安平漁港舊港口重建計畫開發範圍(摘自安平漁港舊港口重建計畫開發計畫變更環境影響差異分析報告)

2. 高雄港區

高雄港位於臺灣西南海岸，西隔臺灣海峽與大陸福建相望，南臨巴士海峽與菲律賓相對，地理位置優越；臨海有狹長旗后沙洲遮蔽，為臺灣本島西部海岸少見港灣形勢天成之天然良港。高雄港發展至今，其港區範圍緊鄰高雄市，橫跨高雄市 6 個行政區，如圖 2.3 所示，港區面積為 17,678 公頃，其中陸域面積 1,442 公頃，佔全港面積之 8.2%，水域面積 16,236 公頃，佔全港面積之 91.8%(資料來源維基百科)，為臺灣最大的國際商港及世界第十三大港口。第二港口開闢工程(民國 56~66 年)完工後，高雄港仍成為具有雙港口的國際港口，其中第一港口位於東經 $120^{\circ}15'25''$ ，北緯 $22^{\circ}37'01''$ (高雄港燈塔位置)；第二港口位於東經 $120^{\circ}18'26''$ ，北緯 $22^{\circ}33'21''$ (北岸信號臺位置)。



圖 2.3 高雄港港區範圍平面圖(下載自高雄港務分公司資訊網站)

目前高雄港的管理及營運係由中華民國國營之臺灣港務公司高雄港務分公司負責，以高雄港洲際貨櫃中心計畫為其未來的發展及重要建設的藍圖；其中第二期工程計畫已於民國 100 年 3 月 10 日奉行政院核定實施，並於民國 100 年 5 月 25 日舉辦動土儀式。藉由第二期工程計

畫之推動，將可解決高雄港舊港區石化油品儲運業者搬遷安置需求、建設最新現代化貨櫃中心吸引航商進駐及大型貨櫃船彎靠，以確立亞太地區貨櫃運輸樞紐港地位，奠立高雄港未來數十年之營運根基。同時，計畫完成後可藉由整體結構性調整舊港區使用機能，高雄港碼頭整併功能調整，發展親水遊憩，活化港區土地資源、促進區域發展，啟動港市再造動能，發展都會港灣。

2.2 水深資料

本年度水深資料蒐集新增內容包括高雄港區及安平港區 101 年度水深調查資料(由高雄港務分公司提供)，其水深測量範圍及測線軌跡分布情形如圖 2.4 及圖 2.5 所示；以及海軍大氣海洋局 101 年度刊行的安平港海圖(圖號 61001，比例尺為萬分之一)，如圖 2.6 所示。有關本計畫安平港區及高雄港區水深資料說明如下：

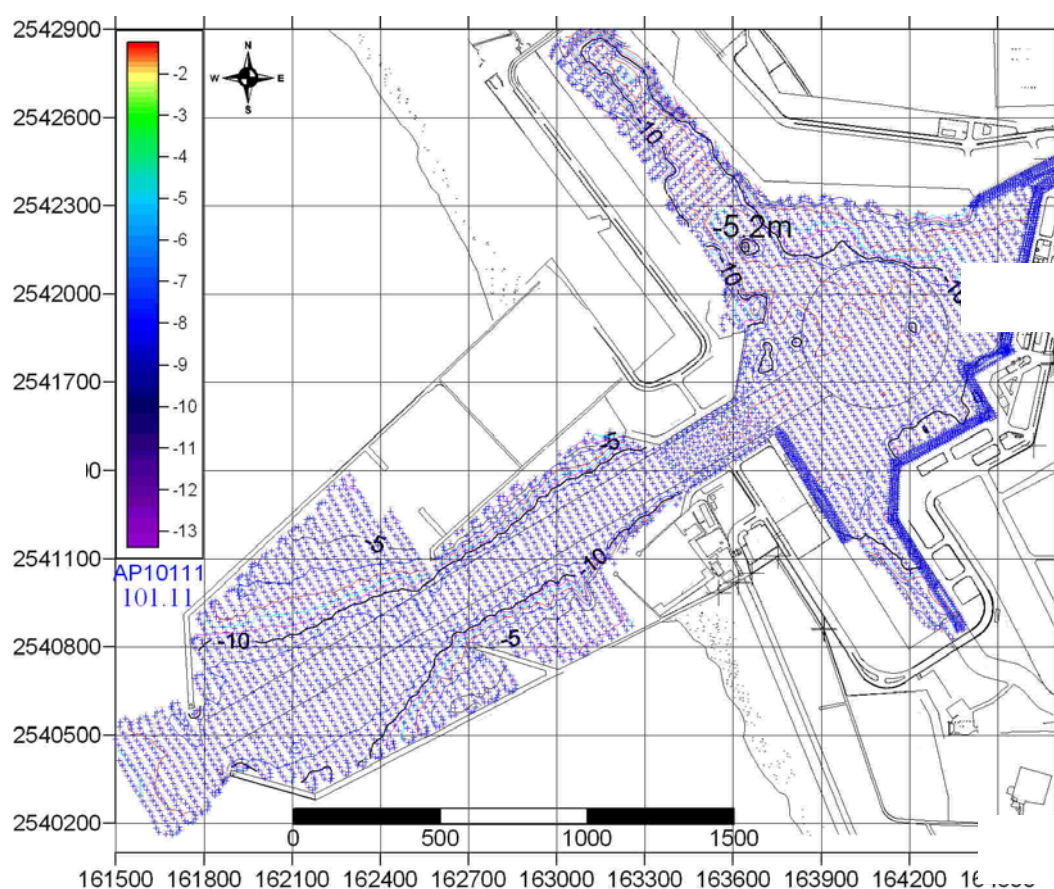


圖 2.4 安平港港區 101 年度水深測量點位分布圖

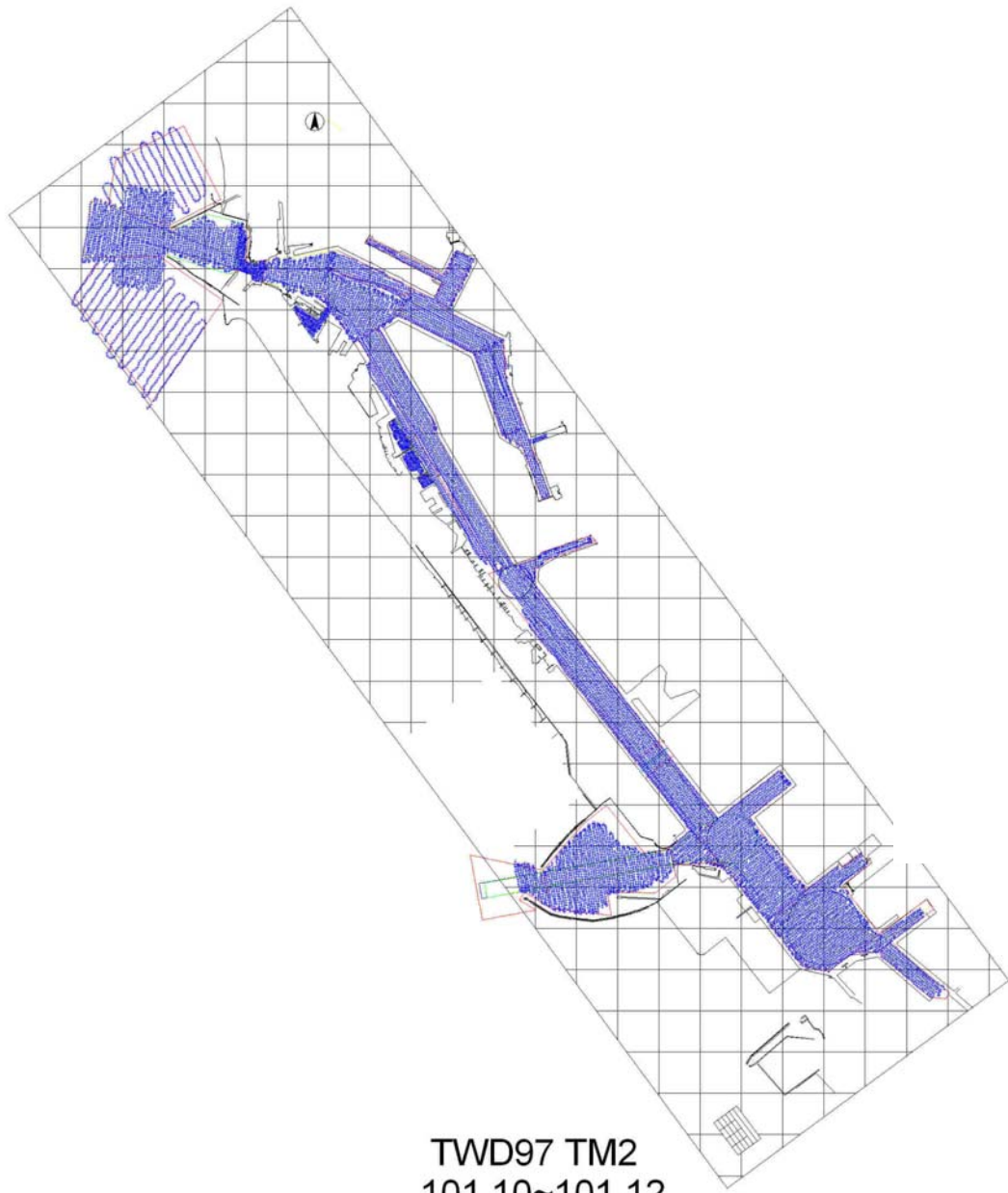


圖 2.5 高雄港港區 101 年度水深測量點位分布圖

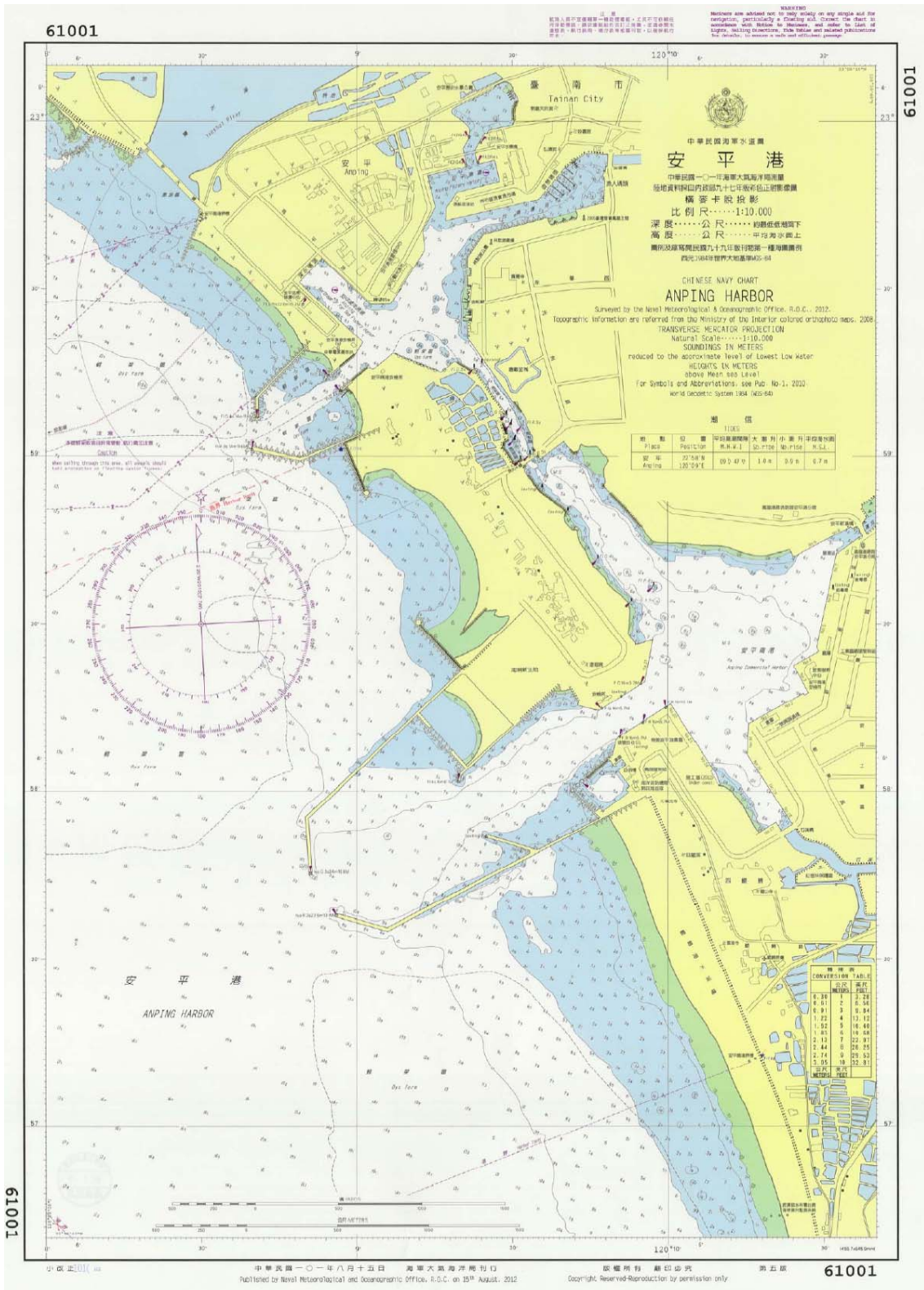


圖 2.6 安平港及附近海域水深圖

1. 安平港區水深資料

本計畫依據 101 年度安平港港區水深調查結果繪製等水深線分布圖，如圖 2.7 所示，顯示目前安平港港域大部份水域水深已疏濬至-10 m 至-13 m 之間。由於上述水深資料僅限於商港區水域，因此有關商港區以外水域(如安平漁港及支航道等)或鄰近海域水深資料，本研究另以海軍大氣海洋局刊行的海圖如前述圖號 61001(安平港)以及圖號 04505(高雄港至安平港)、圖號 04506(布袋泊地至安平港)等水深資料補足，作為本計畫 TaiCOMS 安平港區波浪模組及水動力模組水深資料更新之依據。其中安平港區水動力模組模擬範圍更新後，其水深分布情形，如圖 2.8 所示為本年度安平港區水動力模組模擬範圍更新後，其模擬範圍內等水深線之分布情形。

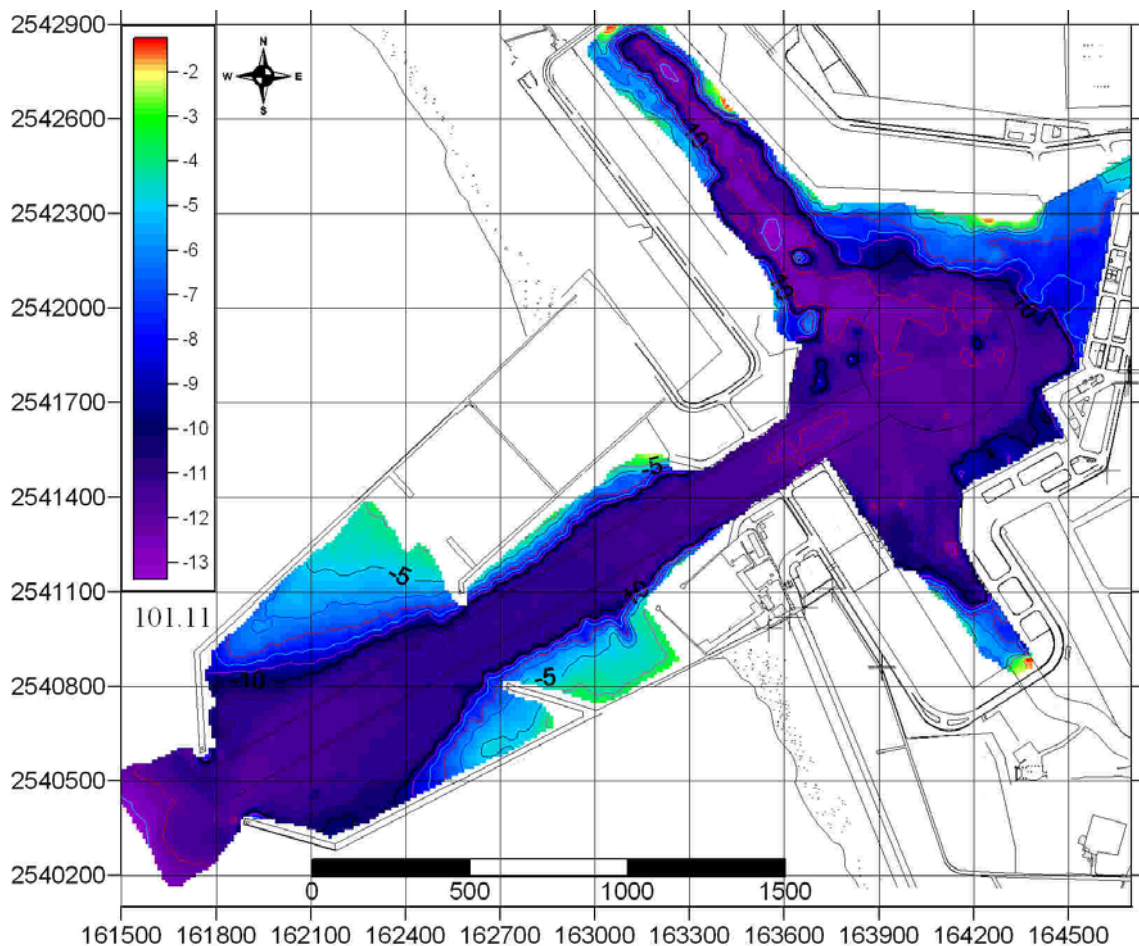


圖 2.7 安平港港區 101 年度水深調查之水深分布圖

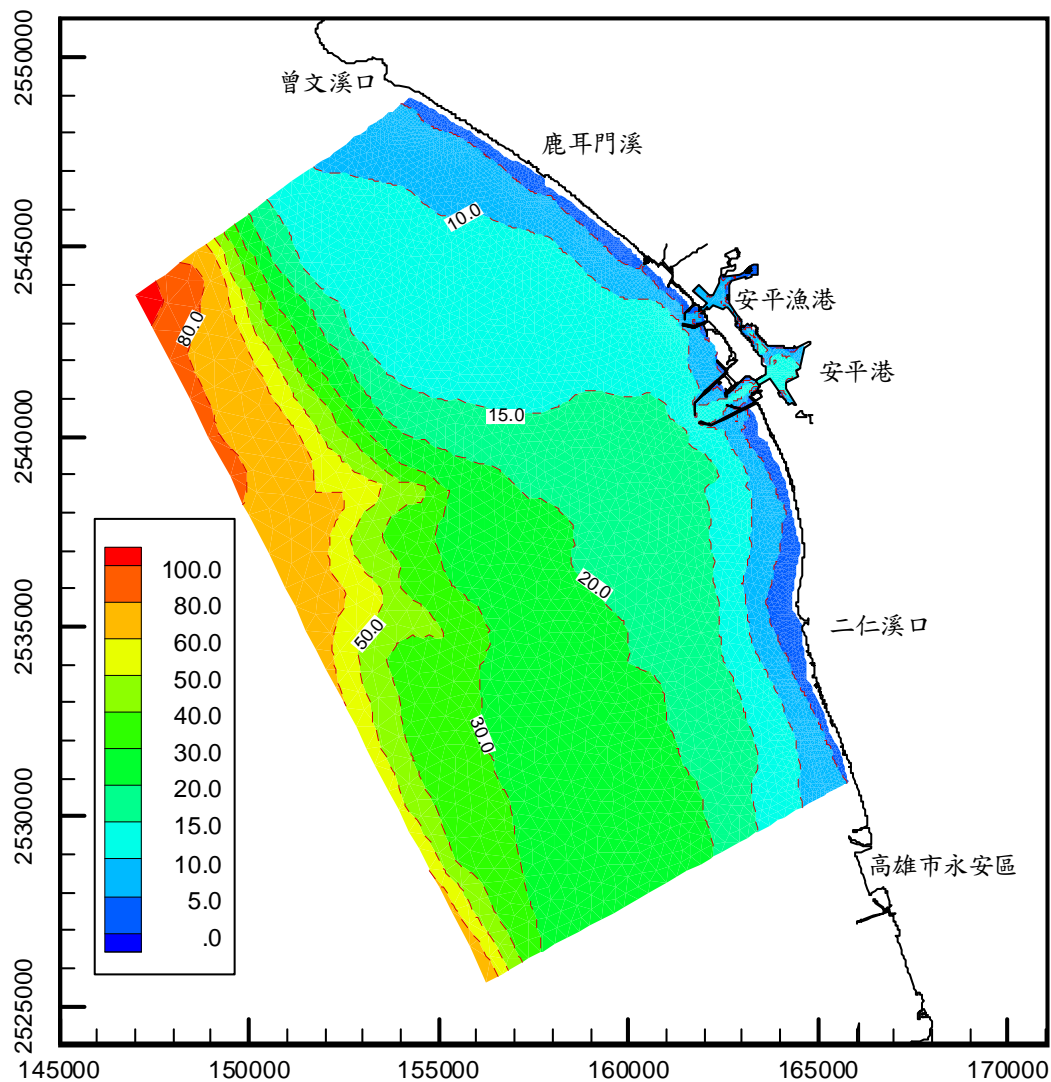


圖 2.8 安平港港區近岸水動力模組模擬範圍及水深分布圖

2. 高雄港區

本計畫依據高雄港 101 年度港區水深調查結果繪製港區水深分布情形，如圖 2.9 所示，顯示高雄港一港口航道水深約在-12 m 至-13 m 之間，二港口航道水深約在-17 m 以下，港內部份航道水域水深則可達到-20 m 以下。針對上述高雄港區水深測量範圍以外海域水深資料，本計畫除了選取海軍大氣海洋局刊行的海圖如圖號 04505(高雄港至安平港)及圖號 04504(枋寮泊地至高雄港)等水深資料，作為本計畫 TaiCOMS 高雄港區波浪模組及水動力模組水深資料更新之依據。本年度同時蒐

集近年來高雄港近岸海域水深調查資料，如民國 97 年鳳鼻頭漁港及週邊海域地形水深調查資料以及民國 99 年高雄港洲際貨櫃中心環境監測計畫之海域水深調查資料等。綜整上述水深調查資料及海圖水深資料，更新本計畫高雄港域近岸水動力模組之水深資料，如圖 2.10 所示。

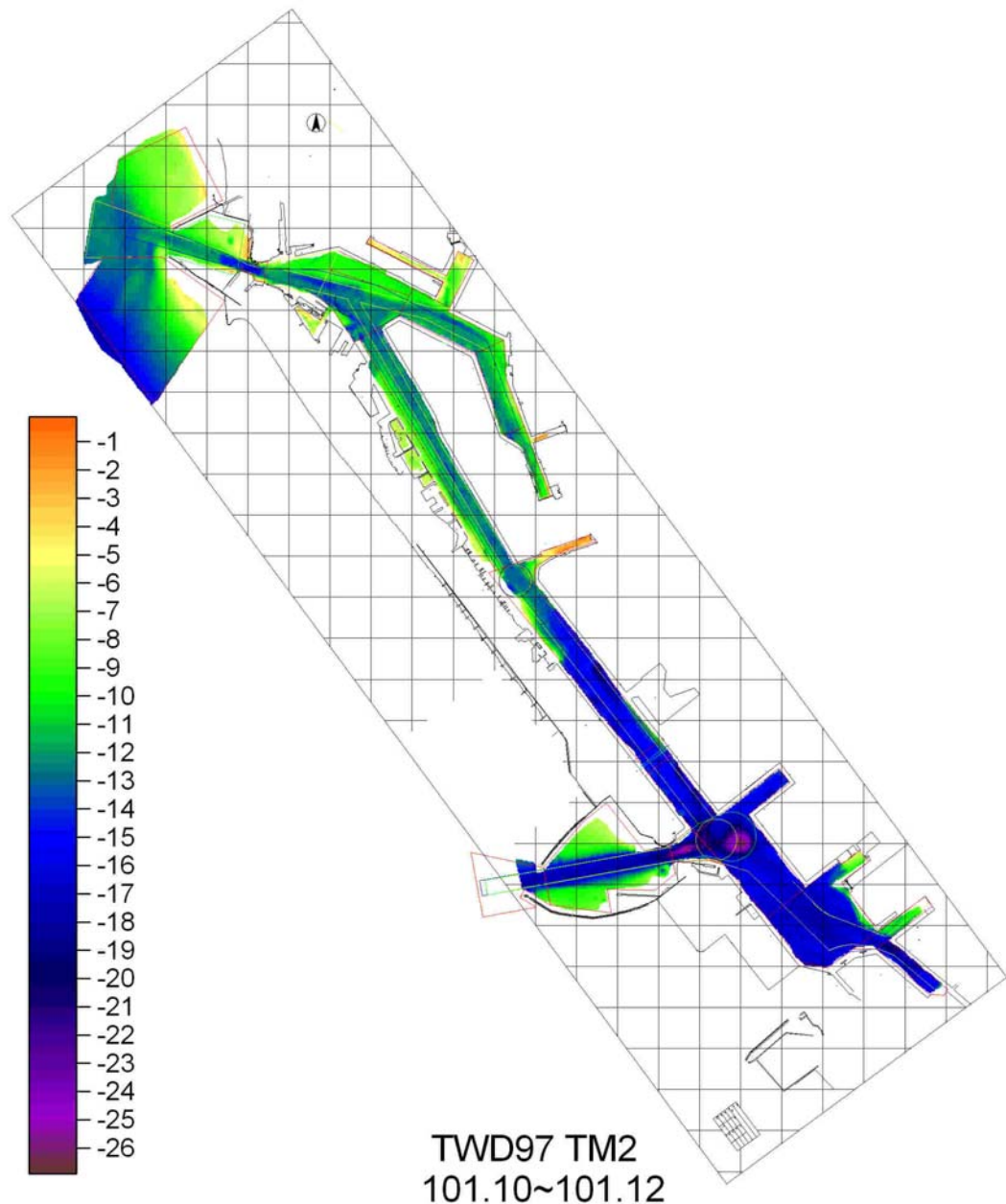


圖 2.9 高雄港港區 101 年度水深調查之水深分布圖

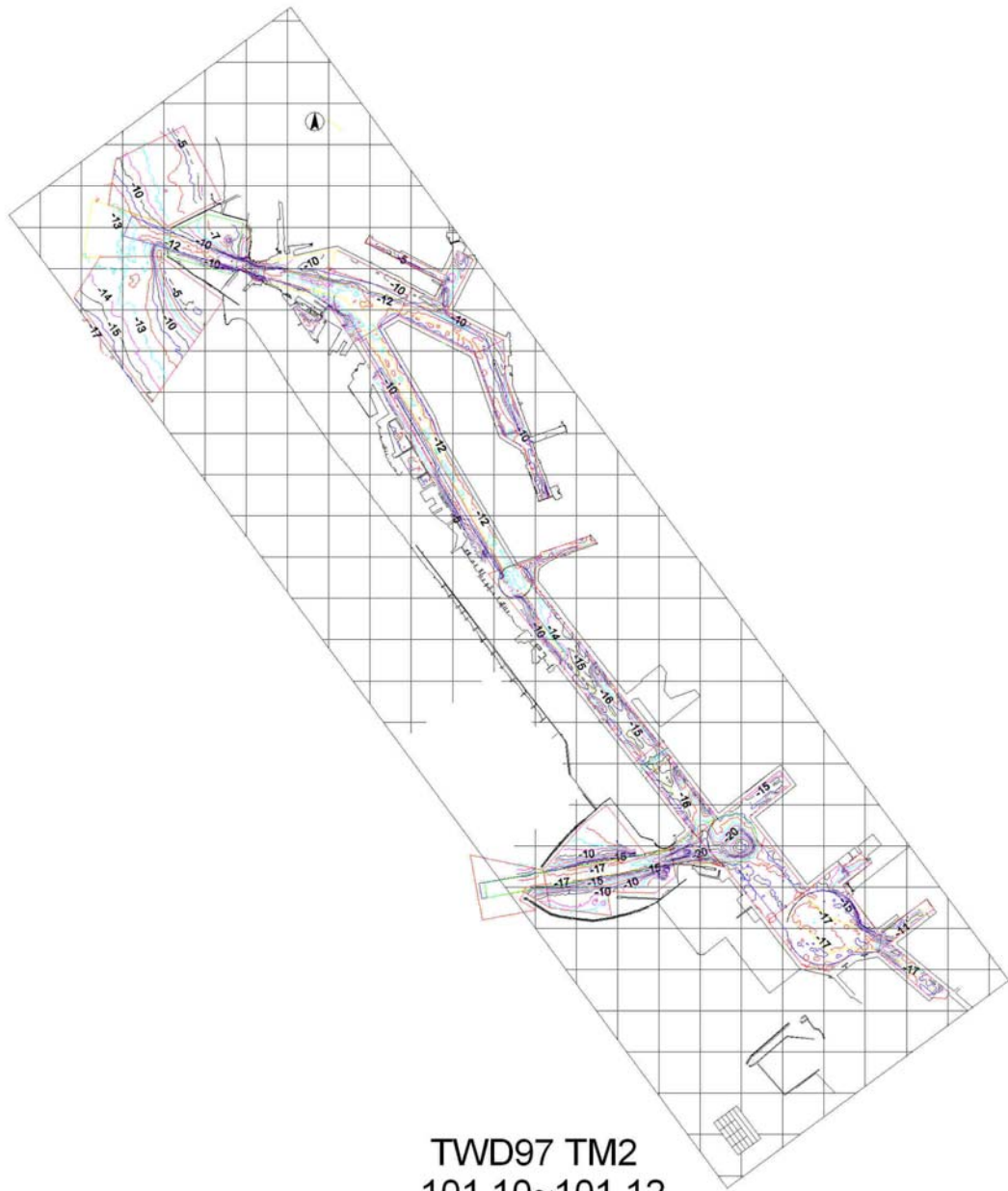


圖 2.9 (續)高雄港港區 101 年度水深調查之水深分布圖

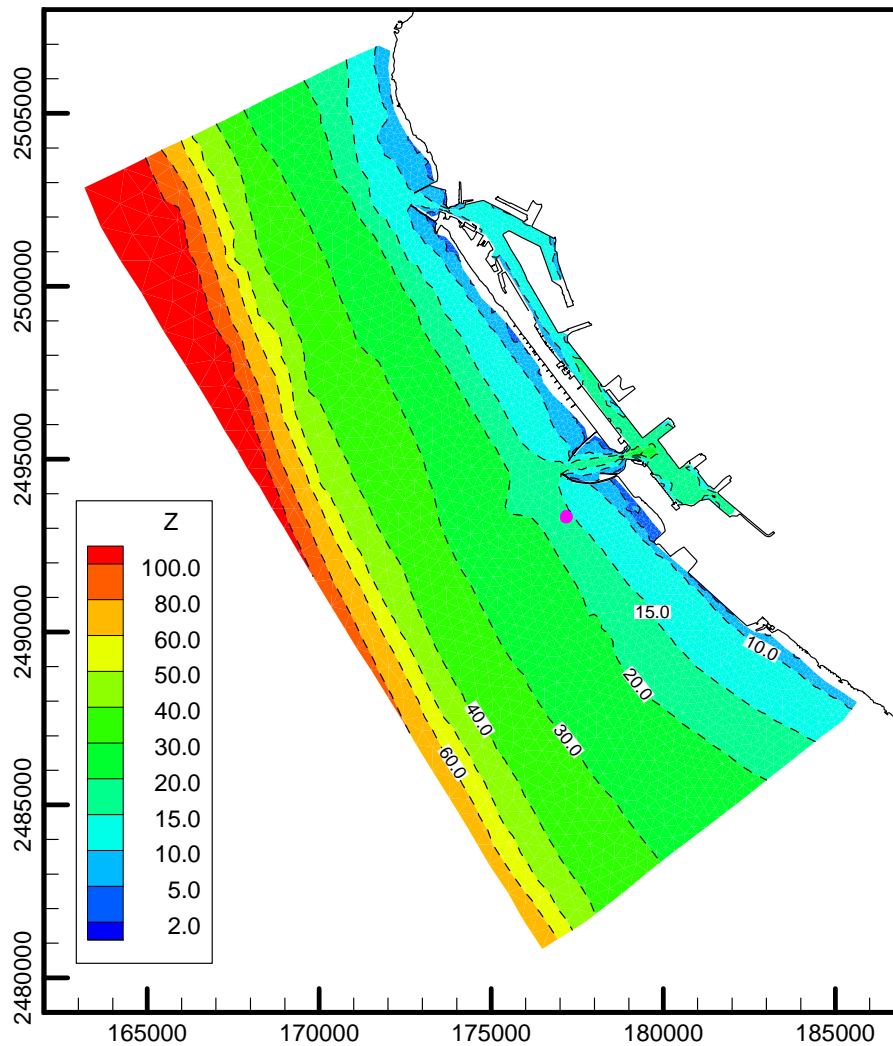


圖 2.10 高雄港港區近岸水動力模組模擬範圍及水深分布圖

2.3 潮汐資料

本計畫除了持續針對基隆港、臺北港、臺中港及布袋港等港口以及其鄰近潮位站(如龍洞、麟山鼻、竹圍、外埔、臺中港、箔仔寮、東石及將軍等)蒐集 2012 年中央氣象局潮汐逐時觀測資料外,同時針對本年度計畫主要港口高雄港區及安平港區,以及其鄰近之永安及東港等潮位站蒐集 2008~2012 年逐時潮汐觀測資料(如附錄一所示),上述各潮位站位置之示意圖如圖 2.11 所示。其中安平港潮位資料自 2010 年 7 月起高雄港務局安平港分局即停止安平港潮位觀測計畫,因此本計畫除了自中央氣象局蒐集的安平港潮位觀測資料(2008 年 1 月至 2010 年 6

月)進行潮汐資料分析外,同時蒐集港灣技術研究中心 2012 年安平港潮位觀測資料作為本計畫安平港水位模擬結果驗證之依據。有關各潮位站潮位特性分述如下：

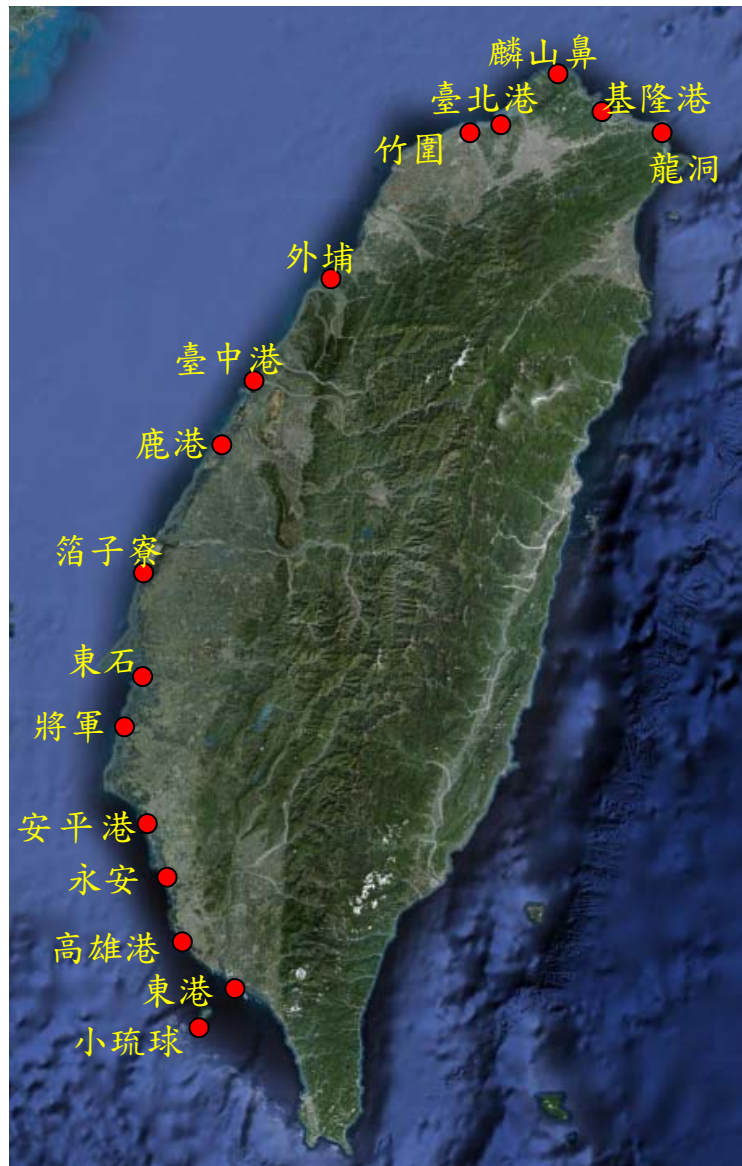


圖 2.11 本年度潮位資料蒐集相關潮位站位置示意圖

1. 安平港潮位

由安平港逐時潮位資料(詳見附圖 1.1)得知，安平港潮位觀測基準為低潮系統，除了部份月份無觀測資料外，有些月份潮位觀測資料呈現嚴重短缺現象(如 2008 年 2、6 月、2009 年 5、7、9 月以及 2010 年 4 月等)；此外，2010 年 5、6 月份潮位觀測基準有顯著偏移現象，因此安平港代表性潮位之逐月統計分析將排除上述問題資料之月份。本計畫安平港潮位逐月統計資料包括月之最高潮位(HHWL)、平均高潮位(MHWL)、平均潮位(MWL)、平均低潮位(MLWL)及最低潮位(LLWL)等代表性潮位，各代表性潮位之逐月變化情形，如圖 2.12 所示。由上述逐月統計分析結果本計畫得到安平港各代表性潮位(低潮系統)之平均值如下：

最高高潮位(H.H.W.L.)	E.L.+1.688 m
平均高潮位(M.H.W.L.)	E.L.+1.205 m
平均潮位(M.W.L.)	E.L.+0.886 m
平均低潮位(M.L.W.L.)	E.L. +0.577 m
最低低潮位(L.L.W.L.)	E.L. -0.174 m
最大潮位差	1.677 m
平均潮位差	0.629 m

為瞭解安平港潮汐變化特性，本計畫選取安平港潮位站 2008 年 1 月~2009 年 12 月潮位觀測資料進行天文潮調和分析，針對觀測資料補遺問題，本計畫採取逐步及重覆方式利用調和分析預測值補遺潮位資料，直至調和分析預測值與觀測值間整體殘差值不再顯著變化為止。經資料補遺後，安平港潮位資料之頻譜分析與調和分析所得各天文分潮能譜及振幅大小之分布情形分別如圖 2.13 及圖 2.14 所示，顯示本計畫安平港潮位頻譜分析與調和分析結果具有一致性。表 2-1 所列為本計

畫安平港潮位調和分析結果之天文潮分潮名稱及其角頻率、振幅大小及相位等資料，其中全日潮成份以 K_1 分潮振幅(0.204m)較大，其次為 O_1 分潮振幅(0.196m)；半日潮成份則以 M_2 分潮振幅(0.251m)為最大， S_2 分潮振幅(0.061)次之。同時，依據潮型判斷指標 $(O_1+K_1)/(M_2+S_2)$ 計算其振幅比，可得到安平港潮型判斷指標值約為 1.282，顯示安平港潮汐型態應屬於全日潮型。(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)。

安平港潮位觀測資料與天文潮調和分析預測值之比較結果，如附圖 2.1 所示，其中調和分析預測值與觀測值間誤差分析結果顯示二者最大誤差值為 0.329m，發生於 2008 年 7 月 28 日中度颱風侵臺期間。另以年度資料為基準，本計畫分別計算觀測值與預測值間均方根誤差(Rmsq)、標準偏差(Sd)以及相關係數值(R)如表 2-2 所示，結果顯示以 2008 年調和分析預測值與觀測資料之均方根誤差較小，且預測值與觀測值之相關性亦較高。

本計畫安平港 2012 年潮位觀測資料係由港灣技術研究中心提供的，如圖 2.15 所示，由於港灣技術研究中心提供的潮位資料均已經過扣除觀測資料之月平均值處理，因此本計畫圖 2.15 所示安平港 2012 年潮位資料僅具水位時序列變化特性。

表 2-1 安平港驗潮站 2008 ~ 2010 年潮汐資料調和分析成果表

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	0.0978	219.6818	M_2	28.98410416	0.2510	24.3355
S_{aa}	0.08213730	0.0355	217.8785	MKS_2	29.06624222	0.0013	72.7394
M_m	0.54437470	0.0085	128.4390	λ_2	29.45562553	0.0060	47.7742
M_{sf}	1.01589584	0.0105	162.7948	L_2	29.52847862	0.0102	13.8359
M_f	1.09803307	0.0035	15.3147	T_2	29.95893288	0.0045	288.5741
$2Q_1$	12.85428619	0.0051	268.6836	S_2	30.00000000	0.0609	304.4632
σ_1	12.92714024	0.0051	248.4228	R_2	30.04106712	0.0020	261.3815
Q_1	13.39866066	0.0409	41.9612	K_2	30.08213806	0.0201	94.7180
ρ_1	13.47151470	0.0067	2.0666	MSN_2	30.54437447	0.0018	22.7283
O_1	13.94303513	0.1962	183.8374	KJ_2	30.62651253	0.0018	192.2724
MP_1	14.02517319	0.0061	313.8269	$2SM_2$	31.01589584	0.0026	200.7849
M_1	14.49202538	0.0039	310.1962	MO_2	42.92713928	0.0010	308.7127
χ_1	14.56954765	0.0007	303.2814	M_3	43.47615814	0.0038	53.4389
π_1	14.91786480	0.0038	92.9153	SO_3	43.94303513	0.0009	129.0539
P_1	14.95893097	0.0592	114.7742	MK_3	44.02517319	0.0006	86.0203
S_1	15.00000000	0.0073	30.8994	SK_3	45.04106903	0.0009	143.9525
K_1	15.04106903	0.2042	95.8953	MN_4	57.42383194	0.0027	32.5017
ψ_1	15.08213520	0.0017	118.4262	M_4	57.96820831	0.0066	170.5979
ϕ_1	15.12320614	0.0026	284.6111	SN_4	58.43972778	0.0007	341.1517
θ_1	15.51258945	0.0012	292.2454	MS_4	58.98410416	0.0050	119.9279
J_1	15.58544350	0.0117	229.6035	MK_4	59.06624222	0.0022	257.6551
SO_1	16.05696487	0.0025	5.5843	S_4	60.00000000	0.0008	88.1311
OO_1	16.13910103	0.0053	187.6299	SK_4	60.08213806	0.0004	154.2852
OQ_2	27.34169579	0.0006	355.4602	$2MN_6$	86.40793610	0.0016	231.7148
MNS_2	27.42383385	0.0023	182.7453	M_6	86.95231628	0.0031	27.9329
$2N_2$	27.85935402	0.0002	254.8021	MSN_6	87.42383575	0.0007	114.5526
μ_2	27.96820450	0.0116	314.9510	$2MS_6$	87.96820831	0.0008	345.6634
N_2	28.43972969	0.0560	237.5824	$2MK_6$	88.05034637	0.0003	0.0466
ν_2	28.51258278	0.0140	230.9158	$2SM_6$	88.98410797	0.0010	231.4129
OP_2	28.90196609	0.0028	191.8840	MSK_6	89.06623840	0.0001	248.6679
平均潮位 = 0.9065m							
資料時間：2008/12/31 11:00:00							

表 2-2 安平港潮位觀測資料與天文潮預測值誤差分析成果表

年		平均值(m)	最大值(m)	均方根誤差(m)	標準偏差	相關係數
2008	預測值	0.90629	1.655	0.00501	0.07069	0.97067
	觀測值	0.93159	1.673			
2009	預測值	0.90691	1.684	0.00637	0.07956	0.96395
	觀測值	0.87729	1.688			

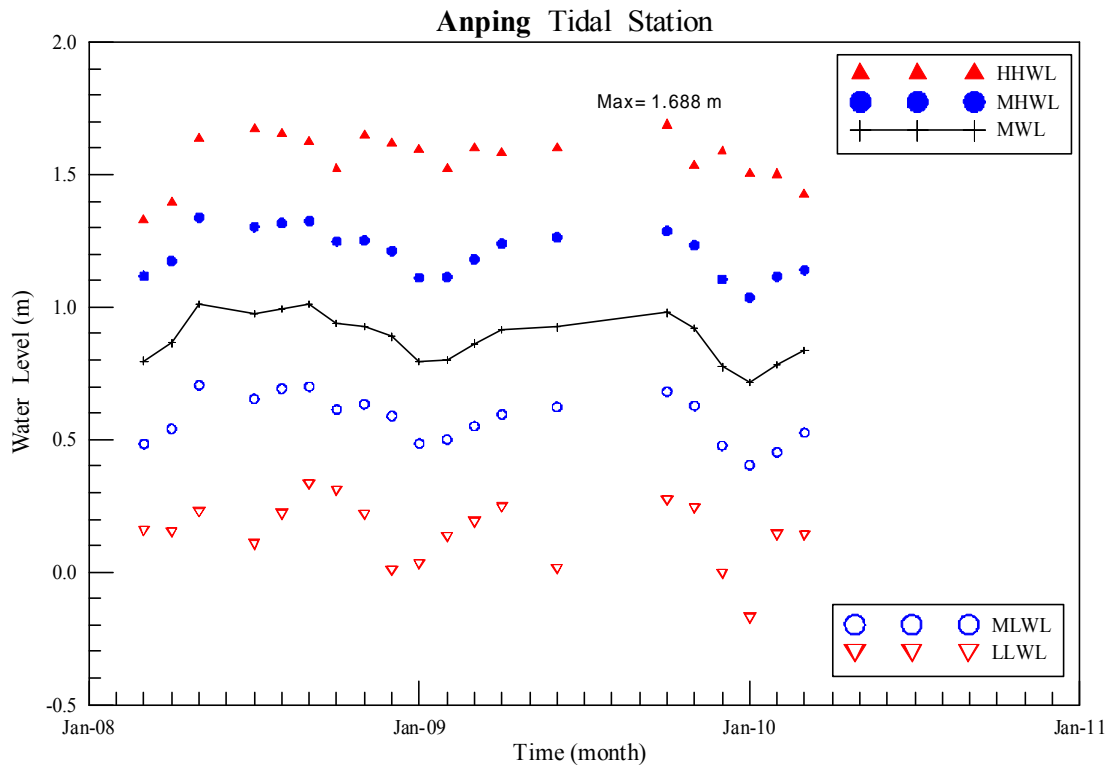


圖 2.12 安平港潮位站代表性潮位逐月統計值之變化情形圖

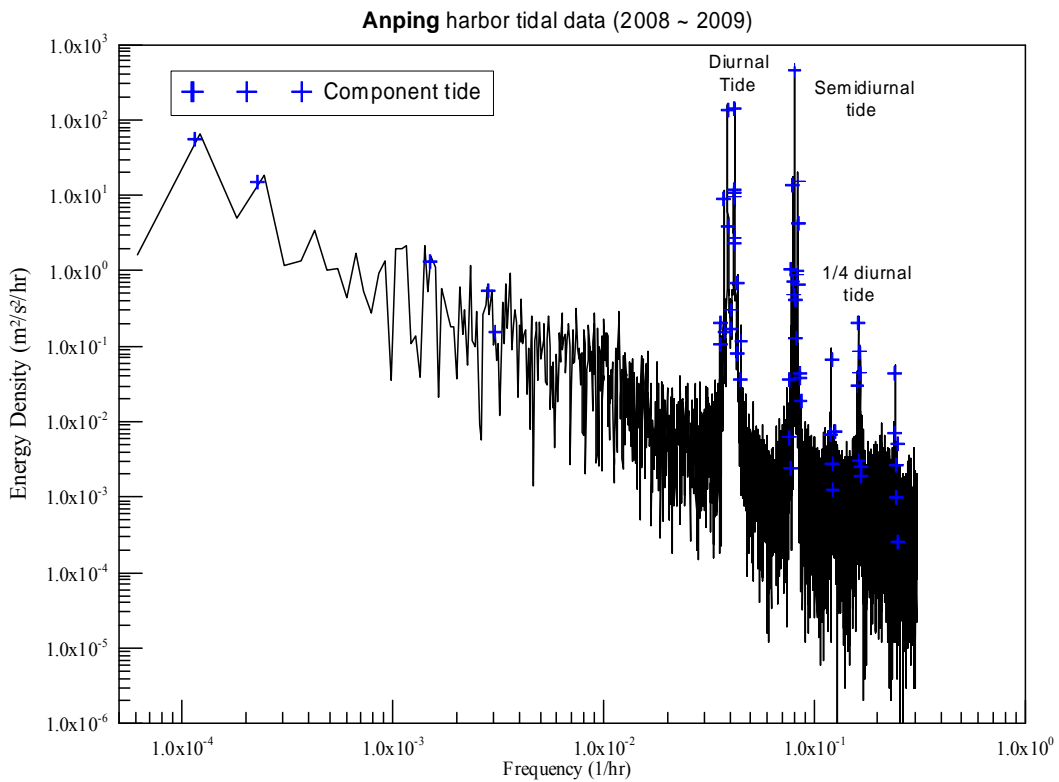


圖 2.13 安平港潮位頻譜分析結果與各分潮頻率對應關係圖

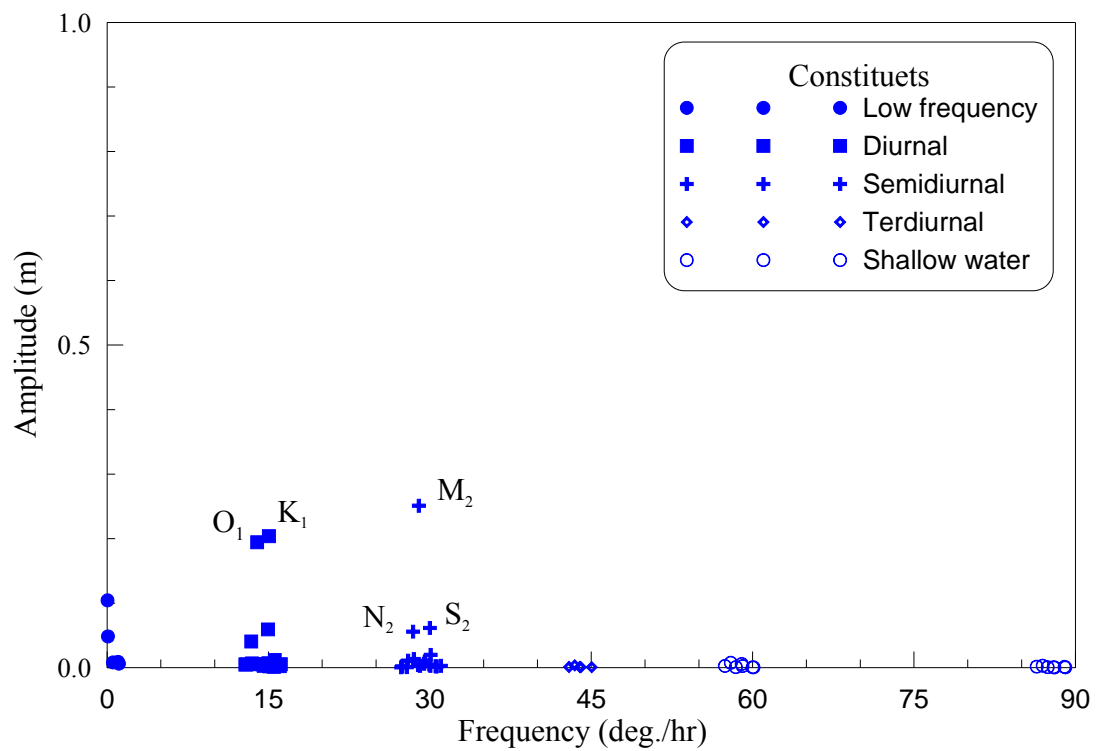


圖 2.14 安平港潮位調和分析結果之分潮振幅大小分佈圖

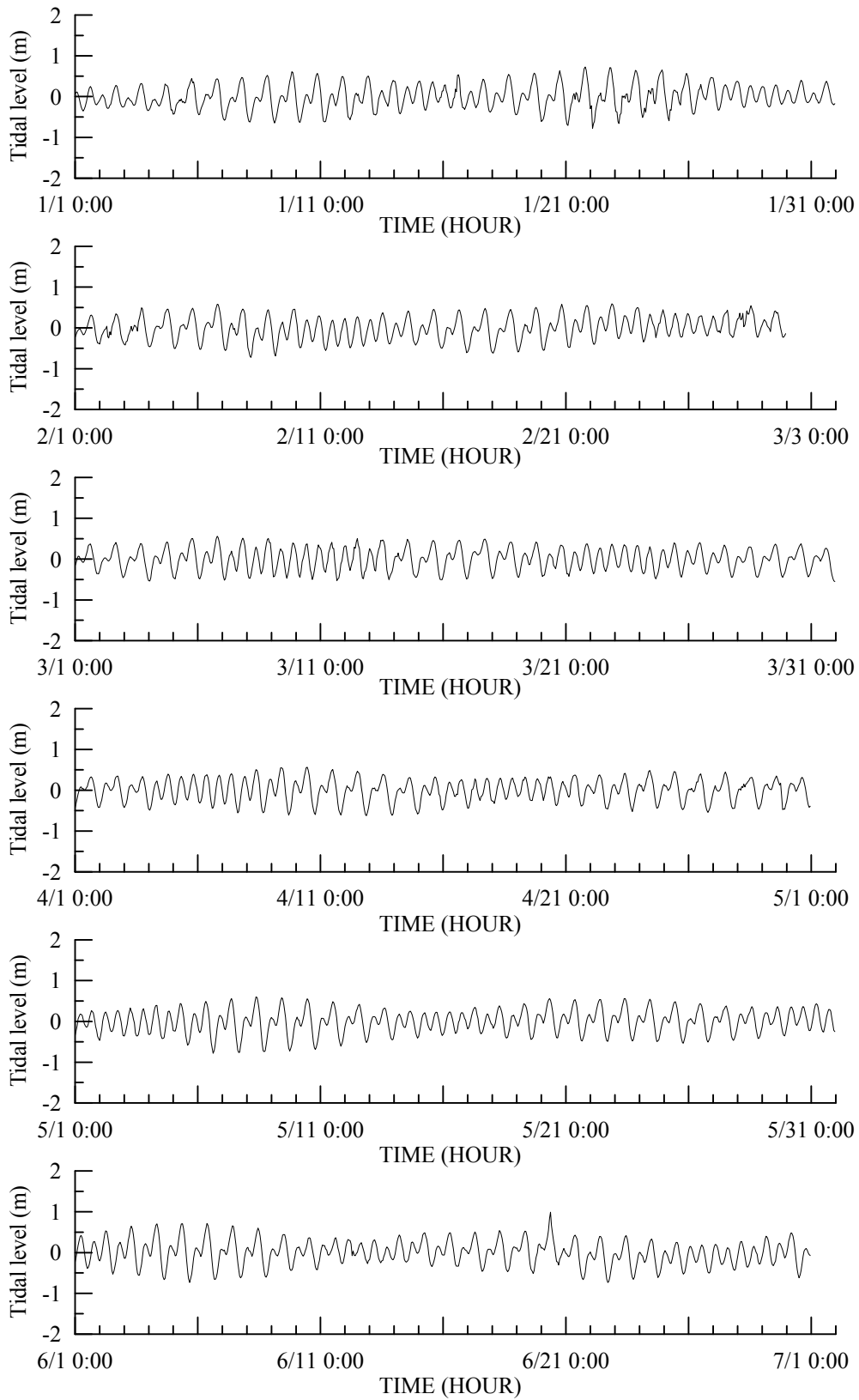


圖 2.15 安平港 2012 年潮位觀測資料之時序列圖

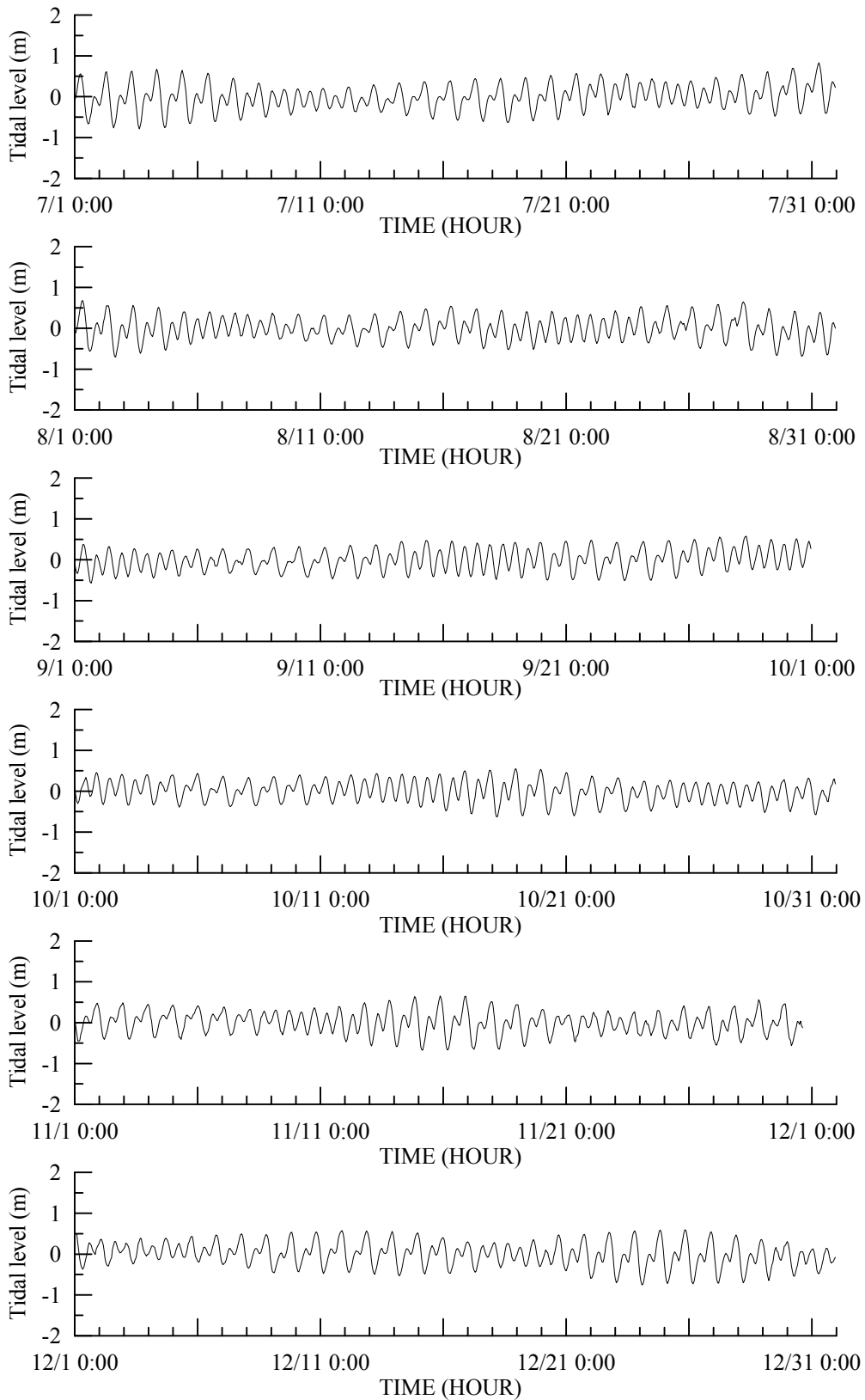


圖 2.15 (續)安平港 2012 年潮位觀測資料之時序列圖

2. 高雄港潮位

高雄港潮位逐時資料(詳見附圖 2.2)來自於內政部設置的測站，該測站座標為(22°36'52"N, 120°17'18"E)，潮位觀測基準面採用臺灣高程基準(TWVD2001)。為瞭解高雄港潮位特性，本計畫選取 2010 年 1 月至 2012 年 12 月潮位觀測資料，逐月統計其最高潮位、平均高潮位、平均潮位、平均低潮位及最低潮位等代表性潮位之月變化情形，如圖 2.16 所示；依據上述逐月統計分析結果得到本計畫高雄港各代表性潮位值如下：

最高高潮位(H.H.W.L.)	E.L.+1.174 m
平均高潮位(M.H.W.L.)	E.L.+0.457 m
平均潮位(M.W.L.)	E.L.+0.201 m
平均低潮位(M.L.W.L.)	E.L. -0.063 m
最低低潮位(L.L.W.L.)	E.L. -0.505 m
最大潮位差	1.366 m
平均潮位差	0.521 m

根據上述代表性潮位分析結果得知，2010~2012 年間高雄港觀測的最高潮位值為 E.L.+1.174 m 發生於 2012 年 8 月，平均潮差約 0.52m，最大潮位差約為 1.37m。

本計畫同樣選取高雄港 2010~2012 年潮位觀測資料進行天文潮調和分析，以瞭解高雄港潮汐變化特性；高雄港潮位資料補遺方法如安平港潮位資料補遺之述，以及高雄港潮位資料之頻譜分析與調和分析所得各天文分潮能譜及振幅大小之分布情形分別如圖 2.17 及圖 2.18 所示，得知高雄港潮位頻譜分析與調和分析結果具有一致性，其中天文潮各分潮之振幅及相位分析結果如表 2-3 所列。由高雄港潮位調和分析結果得知高雄港潮汐特性在全日潮成份上以 K_1 及 O_1 分潮為主，其振幅

大小分別約為 0.178 m 及 0.162 m，半日潮成份則以 M_2 分潮為主(振幅約為 0.188 m)，其次為 S_2 分潮(振幅約為 0.069 m)。高雄港潮汐之潮型判斷指標 $(O_1+K_1)/(M_2+S_2)$ 比值約為 1.322，顯示高雄港海域潮汐變化屬於全日潮型。

本計畫高雄港潮位觀測資料與天文潮調和分析預測值之比較結果，如附圖 2.2 所示，圖中最大誤差值為 0.343m，發生於 2012 年 8 月 1 日中度蘇拉颱風侵臺期間。以年度資料為基準，本計畫分別計算觀測值與預測值間之均方根誤差(Rmsq)、標準偏差(Sd)以及相關係數值(R)如表 2-4 所示，歷年資料分析結果顯示以 2009 年調和分析預測值與觀測資料之均方根誤差較小，且預測值與觀測值之相關性亦較高。

表 2-3 高雄港驗潮站 2010 ~ 2012 年潮汐資料調和分析成果表

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	0.1147	45.8371	M ₂	28.98410416	0.1880	300.3661
S _{aa}	0.08213730	0.0386	175.5698	MKS ₂	29.06624222	0.0020	131.2153
M _m	0.54437470	0.0044	343.0961	λ ₂	29.45562553	0.0021	91.5962
M _{sf}	1.01589584	0.0115	301.8601	L ₂	29.52847862	0.0042	250.0306
M _f	1.09803307	0.0081	132.2448	T ₂	29.95893288	0.0048	76.9097
2Q ₁	12.85428619	0.0034	327.9850	S ₂	30.00000000	0.0693	264.7275
σ ₁	12.92714024	0.0033	151.7079	R ₂	30.04106712	0.0019	118.3653
Q ₁	13.39866066	0.0320	55.7455	K ₂	30.08213806	0.0180	51.2911
ρ ₁	13.47151470	0.0061	241.4254	MSN ₂	30.54437447	0.0014	313.3220
O ₁	13.94303513	0.1625	147.9907	KJ ₂	30.62651253	0.0011	153.2099
MP ₁	14.02517319	0.0023	257.3627	2SM ₂	31.01589584	0.0003	220.5457
M ₁	14.49202538	0.0125	10.2787	MO ₂	42.92713928	0.0028	336.3810
χ ₁	14.56954765	0.0028	201.8810	M ₃	43.47615814	0.0038	154.5831
π ₁	14.91786480	0.0053	292.8929	SO ₃	43.94303513	0.0012	328.6207
P ₁	14.95893097	0.0569	127.1341	MK ₃	44.02517319	0.0012	220.2465
S ₁	15.00000000	0.0035	168.8674	SK ₃	45.04106903	0.0003	250.8000
K ₁	15.04106903	0.1777	103.4823	MN ₄	57.42383194	0.0010	19.5692
ψ ₁	15.08213520	0.0033	274.9314	M ₄	57.96820831	0.0020	100.3659
φ ₁	15.12320614	0.0008	226.6732	SN ₄	58.43972778	0.0006	351.9911
θ ₁	15.51258945	0.0019	11.1362	MS ₄	58.98410416	0.0020	88.8286
J ₁	15.58544350	0.0076	164.0551	MK ₄	59.06624222	0.0011	188.3637
SO ₁	16.05696487	0.0021	358.5420	S ₄	60.00000000	0.0003	148.8213
OO ₁	16.13910103	0.0019	221.5521	SK ₄	60.08213806	0.0006	219.1819
OQ ₂	27.34169579	0.0010	40.1198	2MN ₆	86.40793610	0.0020	162.5021
MNS ₂	27.42383385	0.0023	198.0703	M ₆	86.95231628	0.0032	255.9974
2N ₂	27.85935402	0.0010	134.3851	MSN ₆	87.42383575	0.0009	165.3578
μ ₂	27.96820450	0.0066	283.9491	2MS ₆	87.96820831	0.0030	271.0563
N ₂	28.43972969	0.0441	218.1297	2MK ₆	88.05034637	0.0007	68.9312
v ₂	28.51258278	0.0084	51.2308	2SM ₆	88.98410797	0.0003	266.9644
OP ₂	28.90196609	0.0068	211.9546	MSK ₆	89.06623840	0.0002	290.9814
平均潮位 = 0.2023m							
資料時間 : 2011/07/02 23:00:00							

表 2-4 高雄港潮位觀測資料與天文潮預測值誤差分析成果表

年		平均值(m)	最大值(m)	均方根誤差(m)	標準偏差	相關係數
2010	預測值	0.20214	0.954	0.00439	0.06119	0.97194
	觀測值	0.1788	0.948			
2011	預測值	0.20219	0.897	0.00342	0.05686	0.97450
	觀測值	0.19024	1.002			
2012	預測值	0.20222	0.922	0.00717	0.07500	0.95430
	觀測值	0.24151	1.174			

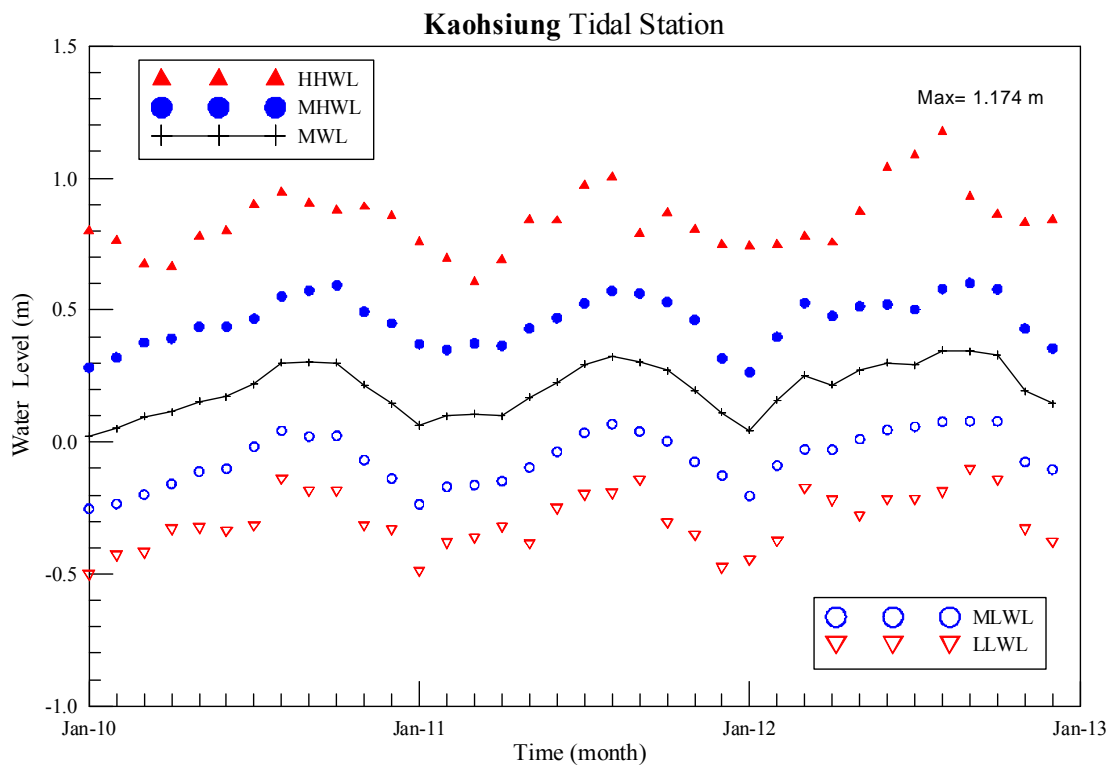


圖 2.16 高雄港 2010~2012 年主要代表性潮位逐月統計值圖

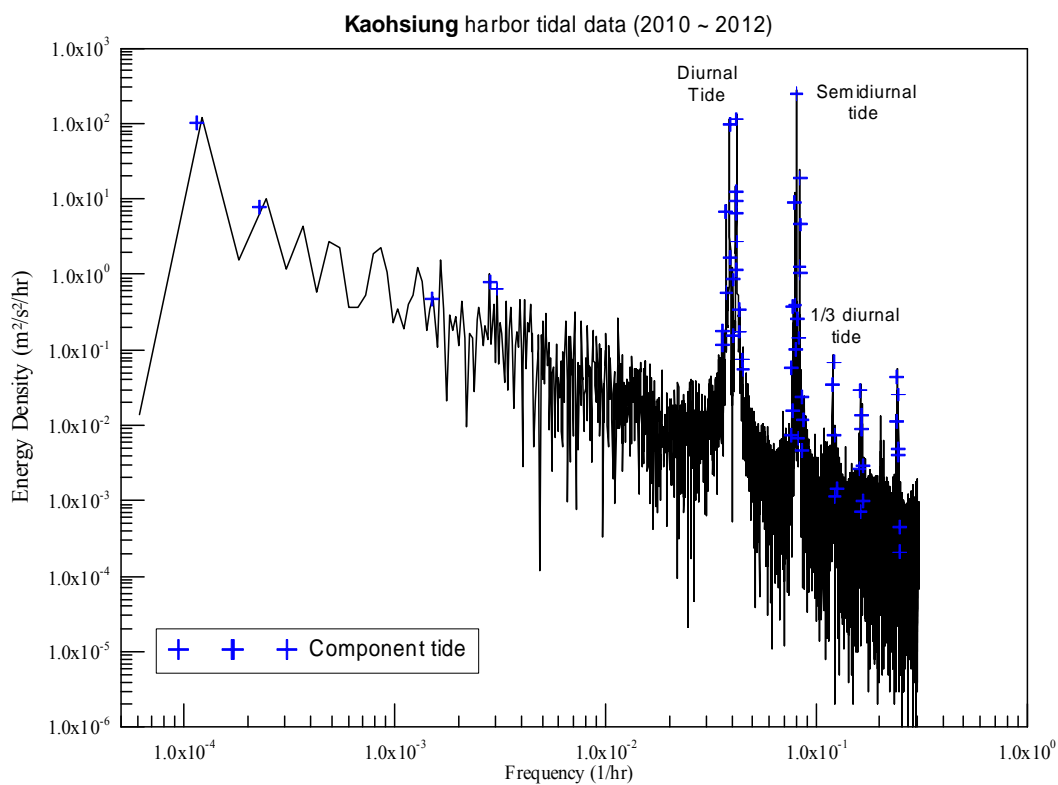


圖 2.17 高雄港潮位頻譜分析結果與各分潮頻率對應關係圖

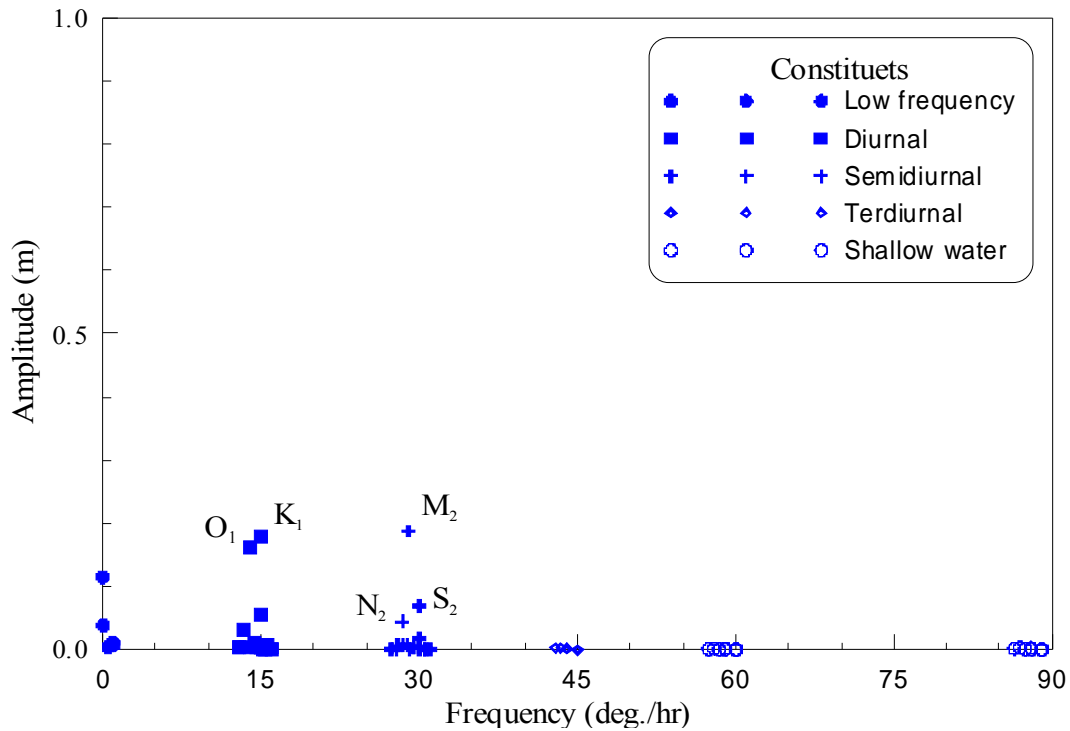


圖 2.18 高雄港潮位調和分析結果之分潮振幅大小分佈圖

2.4 海流資料

一般而言，海流觀測資料之主要組成成份包括恆流、潮流及區域性風吹流等，三者組成之強弱比率需視該海域之特性及季節而定。本研究潮流是指由潮汐漲退引起的海洋水體作週期性往復流動之現象，潮流之強弱不僅會隨著月齡不同而有所變化外，其流速大小及方向亦受到海底地形之影響，因此潮流現象會各地區不同而有不同的變化特性。本年度潮流資料分析除了延續上年度潮流資料分析方法，選取全日潮(O_1 、 K_1)及半日潮(M_2 、 S_2)等四個主要分潮針對觀測資料逐月進行調和分析，求取各分潮東西向及南北向之流速振幅及其相位角外，有關本年度蒐集之安平港及高雄港海流觀測資料相關分析結果說明如下：

1. 安平港潮流

安平港海域海流觀測站設置於安平港航道出口南側外海約 500 m 水深約 14 m 處，位置如圖 2.19 所示。本計畫整理 2011 年 12 月至 2012

年 11 月間安平港海流觀測資料(詳見附圖 3.1)，顯示安平港海流觀測資料於 5 月中旬中斷，直至 7 月中旬始恢復觀測；另在海流觀測資料檢核上，本計畫亦發現 1~3 月觀測資料流向變化有異常現象，致使南北向流速之月平均值約介於-0.17m/s~-0.26m/s；8 月份部份海流觀測資料有明顯受到侵臺颱風影響，如 8 月初中度颱風蘇拉及下旬中度颱風天秤等，分別有觀測到異常流速資料，其中最大流速觀測值為 1.056 m/sec，流向約為向西，正值中度颱風天秤位於臺灣西南部外海。

為瞭解安平港潮流特性，本計畫依據上述海流觀測資料分別選取 2012 年 4 月 1 日 0 時至 5 月 20 日 14 時共 1191 筆逐時觀測資料，以及 8 月 16 日 17 時至 9 月 26 日 17 時共 985 筆逐時觀測資料進行頻譜分析，結果如圖 2.20 與圖 2.21 所示，顯示安平港海流資料中潮流成份係以半日潮流為主，全日潮流為次之，因此本計畫依據上述頻譜分析結果選取全日潮(O_1 、 K_1)及半日潮(M_2 、 S_2)等四個主要分潮進行安平港潮流調和分析，如表 2-5 所列。另外，由頻譜分析結果得知，第二組觀測資料(08/16 ~ 09/26)其 E-W 方向之速度能譜分布在全日潮能量部份有出現異常狀，此一現象亦反映在潮流調和分析結果之中，如表 2-5(續)全日潮 K_1 在 E-W 方向之振幅顯著偏小。有鑑於此，本計畫選取第一組資料為後續安平港水動力模式模擬結果驗證之依據。

表 2-5 安平港海流觀測資料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 ₁	13.94303513	0.0151	0.723	0.0219	162.370
K ₁	15.04106903	0.0219	335.219	0.0309	132.820
M ₂	28.98410416	0.0986	245.026	0.1679	74.042
S ₂	30.00000000	0.0417	179.385	0.0574	3.874
平均流速		-0.0364 m/s		-0.0151 m/s	
觀測資料時間		2012/04/01 00:00 ~ 2012/05/20 14:00			
原點時間		2012/04/25 19:00			

表 2-5 (續)安平港海流觀測資料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 ₁	13.94303513	0.0169	170.634	0.0249	354.579
K ₁	15.04106903	0.0033*	235.579	0.0150	4.883
M ₂	28.98410416	0.1999	307.840	0.2535	146.934
S ₂	30.00000000	0.0643	228.196	0.0744	84.668
平均流速		-0.1227 m/s		-0.0521 m/s	
觀測資料時間		2012/08/16 00:00 ~ 2012/09/26 17:00			
原點時間		2012/09/06 05:00			



圖 2.19 港灣技術研究中心安平港港區海象資料測站位置示意圖

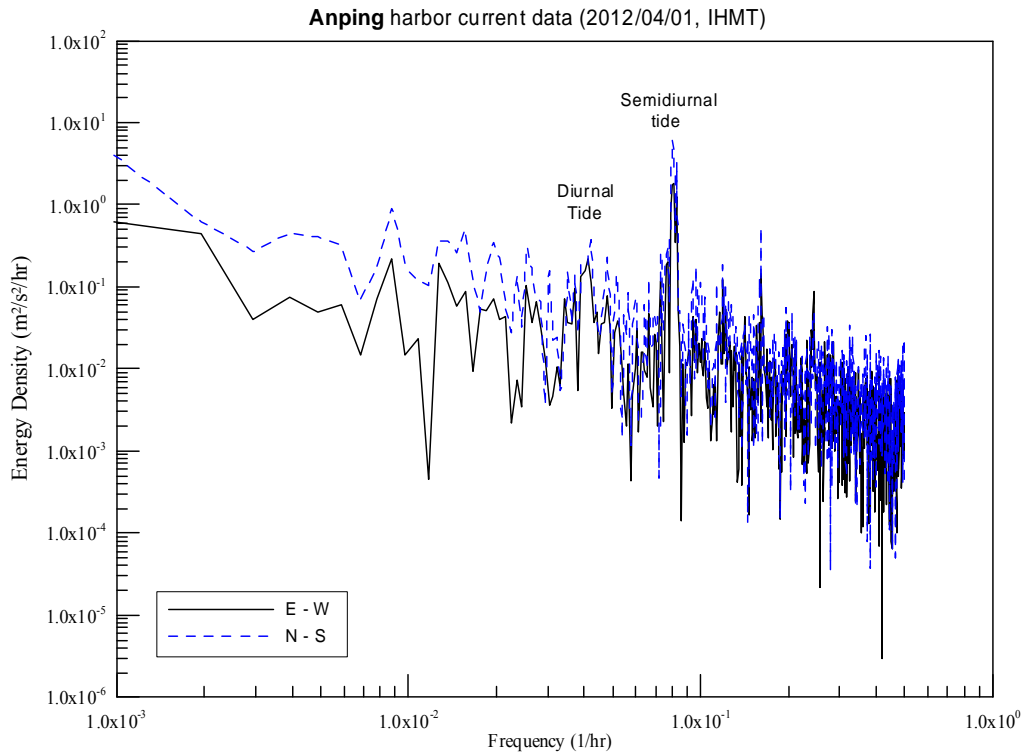


圖 2.20 安平港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(2012/04/01~2012/05/20)

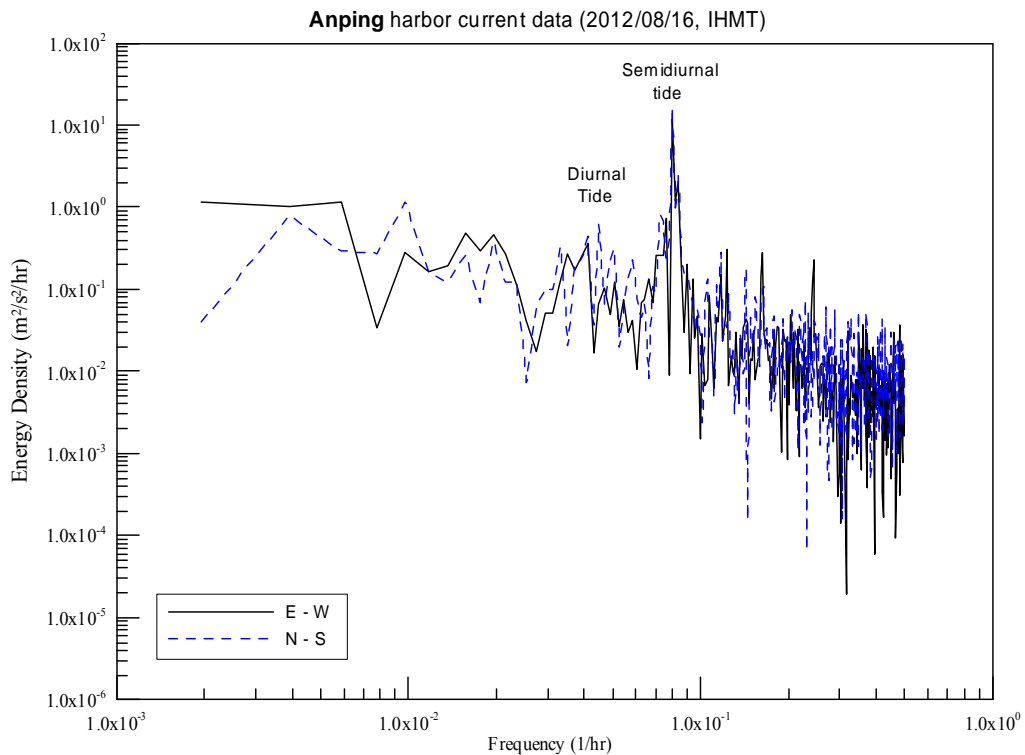
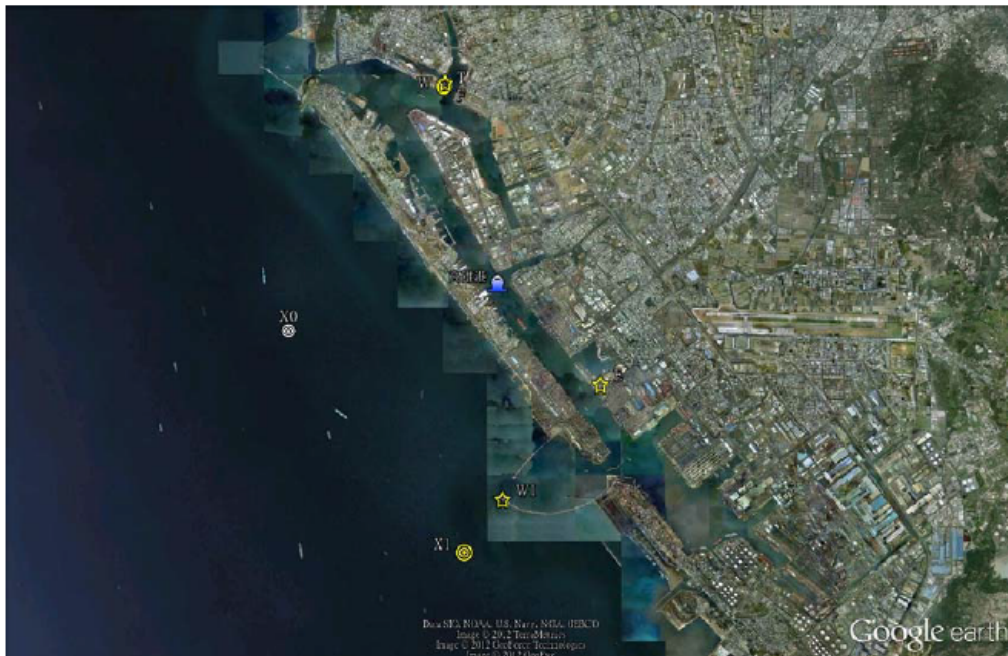


圖 2.21 安平港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(2012/08/16~2012/09/26)

2. 高雄港潮流

高雄港海域海流觀測站設置於二港口航道出口南南西側外海處(67二度分帶座標：E 176657.341, N 2493690.099)，位置如圖 2.22 所示。本計畫蒐集高雄港 2011 年 12 月至 2012 年 11 月間海流觀測資料(如附圖 3.2 所示)，上述海流觀測資料在中度颱風蘇拉侵臺後中斷(8 月 5 日)，直至 9 月初始恢復正常觀測，因此 2012 年影響臺灣南部海域甚鉅之中度颱風天秤侵臺期間高雄港海域缺乏海流觀測資料。就海流觀測資料而言，2012 年高雄港海流觀測最大流速觀測值為 1.469 m/sec，流向約為西北向(311.0 度)，發生於輕度颱風泰利警報期間。



☆風速儀 ◎潮位計 ⊗波流儀

圖 2.22 港灣技術研究中心高雄港區海象資料測站位置示意圖

在海流特性分析上，本年度計畫先針對每月海流觀測資料選取連續觀測達 512 筆以上之月觀測資料，分別進行 E-W 及 N-S 方向速度頻譜分析，如圖 2.23 至圖 2.29 所示分別為高雄港海流月觀測流速之分量能譜圖。由流速分量能譜分析結果得知高雄港外海潮流具有全日潮流能量分布大於半日潮流能量分布之特性，其中全日潮流成份分別以 K_1 、 O_1 日分潮為主，半日潮流則以 M_2 分潮為主， S_2 分潮次之。另就測

站 2012 年海流觀測資料而言，其 N-S 方向速度能量分布普遍大於 E-W 方向速度能量分布，亦即海流偏向以南北向流速為主。同時，本計畫依據上述海流頻譜分析結果選取主要分潮 K_1 、 O_1 、 M_2 及 S_2 等四個分潮進行潮流調和分析，如表 2-6 所列，藉以得到高雄港主要分潮流之 E-W 及 N-S 方向速度分量，作為後續本年度高雄港小尺度水動力模組模擬結果之驗證依據。

整體而言，高雄港海域因全日潮流能量大於半日潮流能量以及海域地形影響所致，港外潮流呈現出漲潮時自北向南流，退潮時自南向北流之現象。

表 2-6 高雄港海流觀測資料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_1	13.94303513	0.0307	193.907	0.0412	29.785
K_1	15.04106903	0.0777	358.881	0.1072	172.953
M_2	28.98410416	0.0116	154.381	0.0142	334.860
S_2	30.00000000	0.0107	66.395	0.0171	330.796
平均流速		-0.0116 m/s		-0.0724 m/s	
觀測資料時間		2012/01/01 01:00 ~ 2012/01/31 23:00			
原點時間		2012/01/16 12:00			

表 2-6 (續 1) 高雄港海流觀測資料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_1	13.94303513	0.0458	232.524	0.0627	80.096
K_1	15.04106903	0.0887	6.046	0.0974	176.362
M_2	28.98410416	0.0524	331.820	0.1000	142.309
S_2	30.00000000	0.0108	111.169	0.0251	1.540
平均流速		-0.1227 m/s		-0.1058 m/s	
觀測資料時間		2012/02/01 01:00 ~ 2012/02/29 23:00			
原點時間		2012/02/15 12:00			

表 2-6 (續 2) 高雄港海流觀測資料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 ₁	13.94303513	0.0426	231.099	0.1259	115.585
K ₁	15.04106903	0.0528	43.022	0.0528	141.294
M ₂	28.98410416	0.0611	312.081	0.1342	134.489
S ₂	30.00000000	0.0045	107.892	0.0924	318.814
平均流速		0.0529 m/s		-0.0909 m/s	
觀測資料時間		2012/03/01 01:00 ~ 2012/03/31 23:00			
原點時間		2012/03/16 12:00			

表 2-6 (續 3) 高雄港海流觀測資料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 ₁	13.94303513	0.0156	1.108	0.0725	200.208
K ₁	15.04106903	0.0515	96.735	0.1353	32.837
M ₂	28.98410416	0.0523	8.092	0.1369	184.974
S ₂	30.00000000	0.0270	15.978	0.0391	346.074
平均流速		0.0411 m/s		-0.0310 m/s	
觀測資料時間		2012/05/01 01:00 ~ 2012/05/31 23:00			
原點時間		2012/05/16 12:00			

表 2-6 (續 4) 高雄港海流觀測資料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 ₁	13.94303513	0.0616	20.519	0.1026	222.189
K ₁	15.04106903	0.0684	174.953	0.1037	6.889
M ₂	28.98410416	0.1259	313.716	0.2198	123.697
S ₂	30.00000000	0.0516	269.751	0.0963	97.288
平均流速		-0.0599 m/s		-0.0638 m/s	
觀測資料時間		2012/09/05 16:00 ~ 2012/09/30 23:00			
原點時間		2012/09/18 07:00			

表 2-6 (續 5)高雄港海流觀測資料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 ₁	13.94303513	0.0766	289.935	0.0961	131.437
K ₁	15.04106903	0.1362	54.784	0.1630	255.499
M ₂	28.98410416	0.1242	132.554	0.1666	311.488
S ₂	30.00000000	0.0452	126.328	0.0705	317.058
平均流速		0.0307 m/s		-0.1545 m/s	
觀測資料時間		2012/10/01 01:00 ~ 2012/10/31 23:00			
原點時間		2012/10/16 12:00			

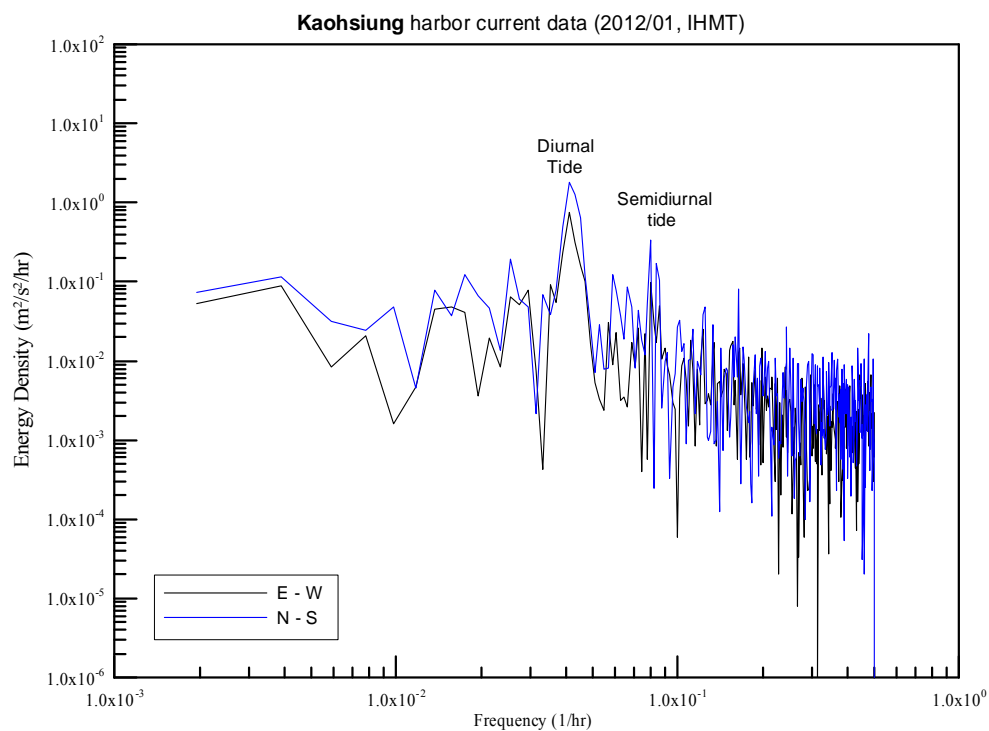


圖 2.23 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/01/01~1/31)

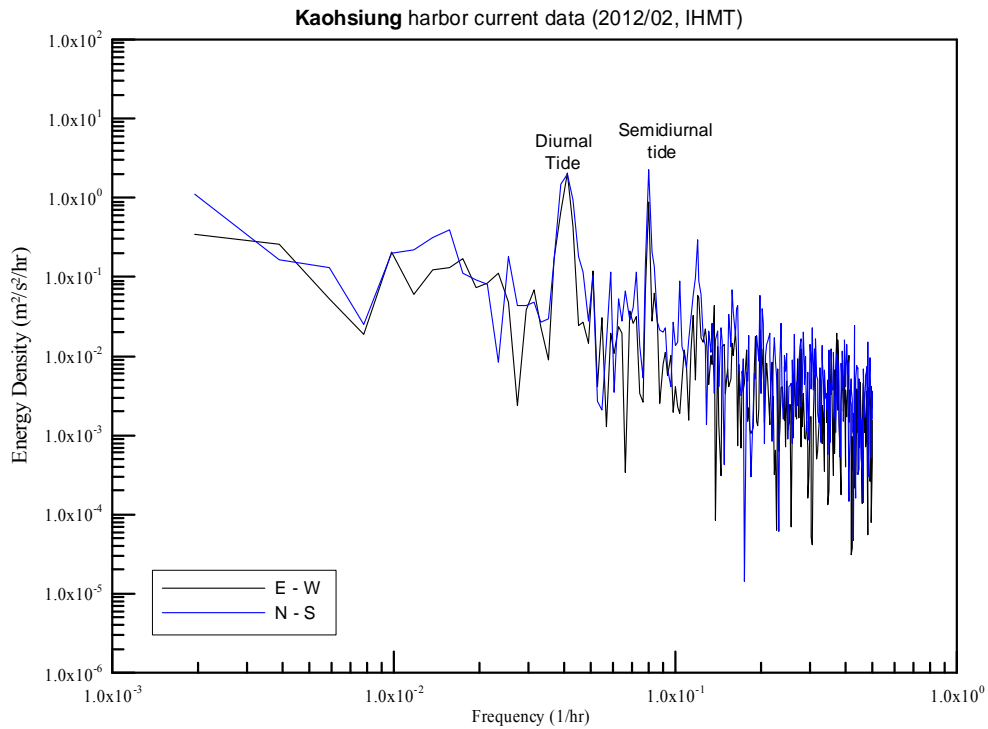


圖 2.24 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/02/01~02/29)

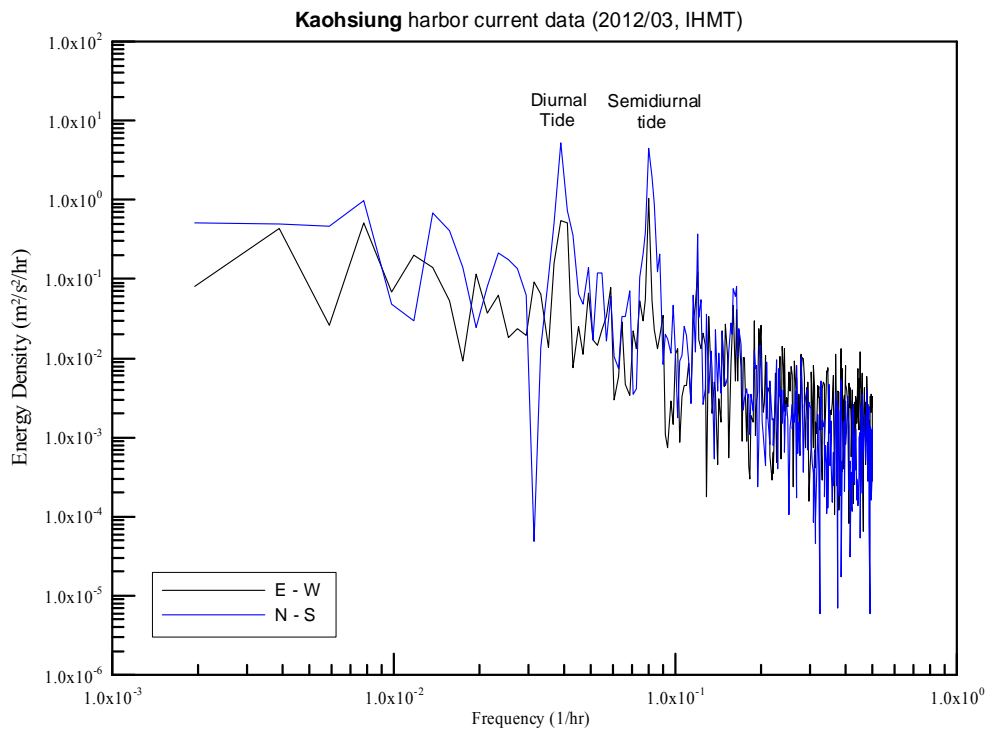


圖 2.25 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/03/01~03/31)

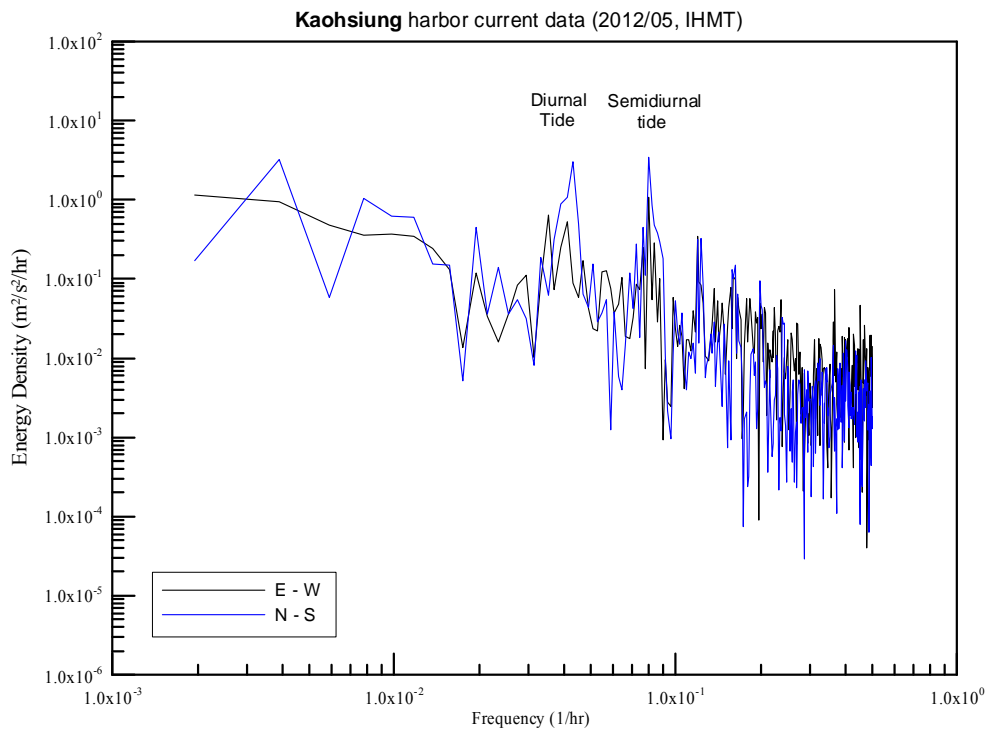


圖 2.26 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/05/01~05/31)

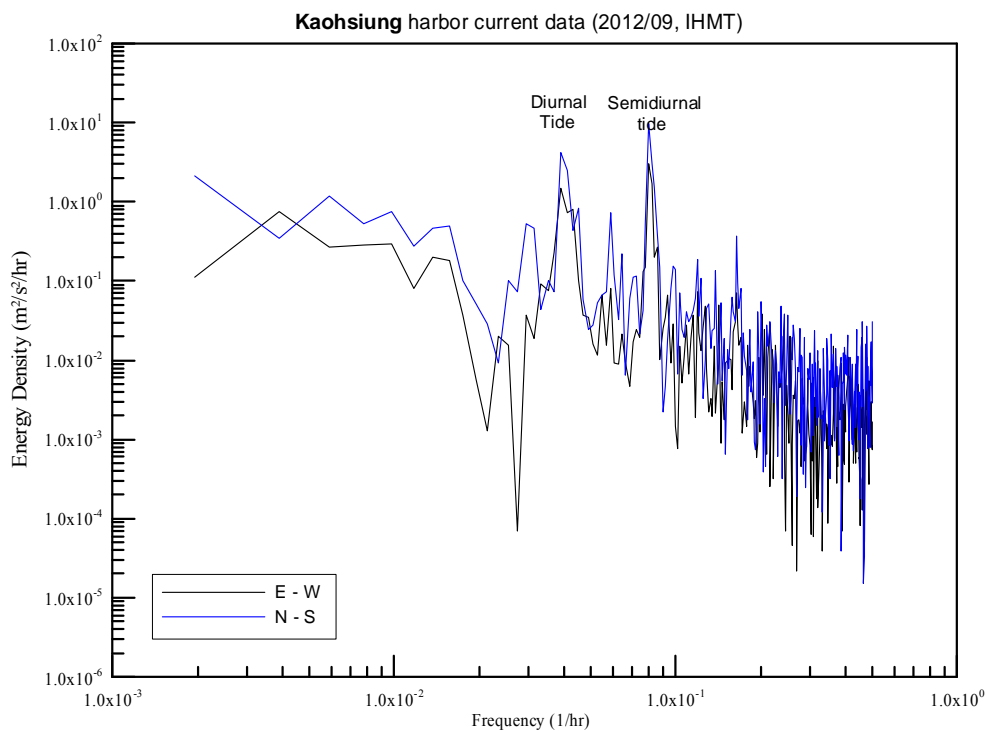


圖 2.27 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/09/05~09/30)

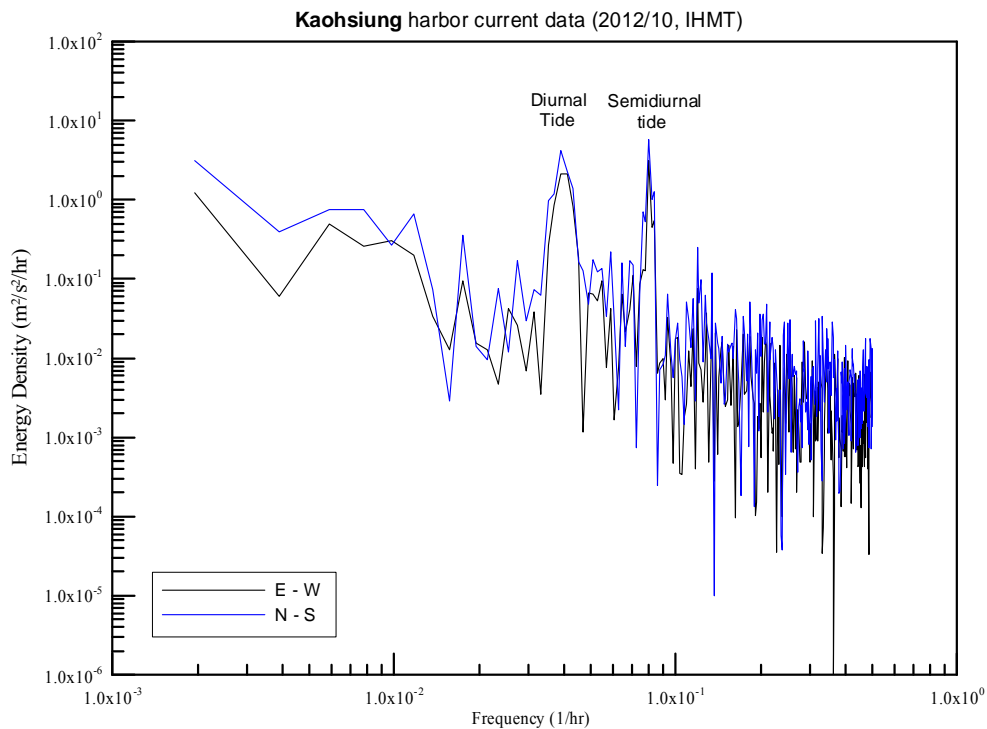


圖 2.28 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/10/01~10/31)

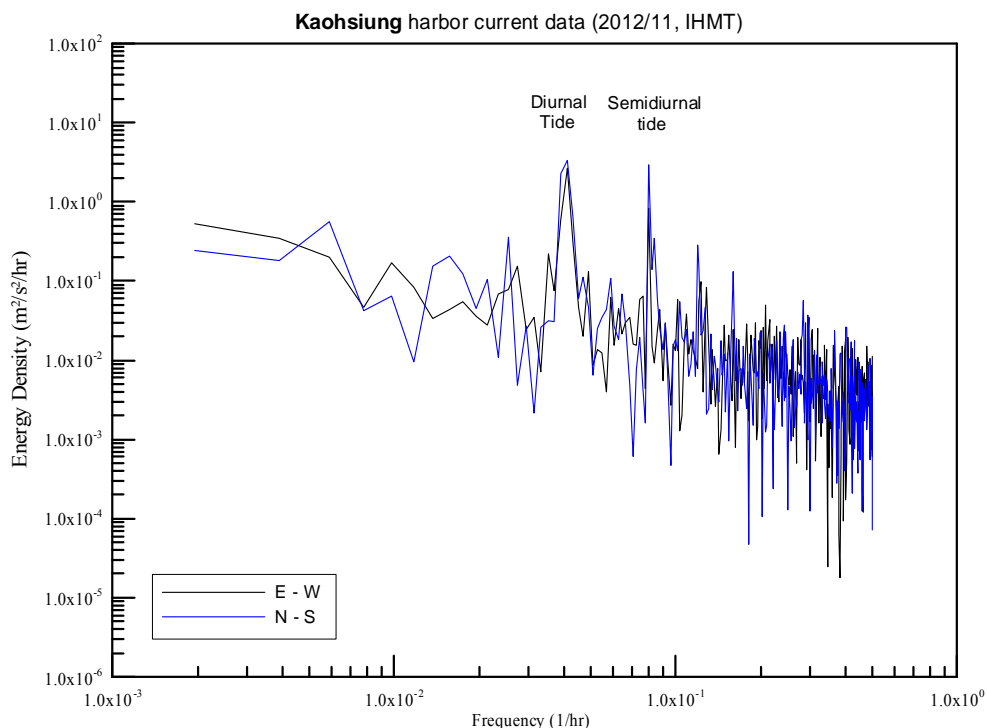


圖 2.29 高雄港海流觀測資料 E-W 及 N-S 方向速度能譜圖
(資料時間：2012/11/01~11/30)

2.5 波浪資料

1. 安平港

本計畫蒐集 2012 年(1~11 月)安平港逐時波浪觀測資料(如附圖 4.1 所示)，同海流觀測，安平港波浪觀測資料自 5 月 21 日 6 時起因故觀測中斷，直至 7 月 19 日 12 時始恢復正常觀測，期間經歷輕度颱風泰利警報發布(6/19~6/21)；以及 10 月及 11 月份觀測資料均有觀測資料中斷數日之現象，總計 2012 年 1 月至 11 月有效波浪觀測資料達 6179 筆。表 2-7 及表 2-8 所列分別為 2012 年安平港海域波浪觀測資料之示性波高分布範圍及平均波向分布範圍統計結果，顯示安平港海域示性波高分布以波高小於 0.5 m 及波高介於 0.5 m~1.0 m 為主要分布區間，前者約佔觀測資料數之 37.0% (波浪平均週期之平均值約為 6.35 sec)，後者約佔觀測資料數之 50.1% (波浪平均週期之平均值約為 6.42 sec)。此外，安平港 2012 年波浪觀測期間示性波高最大值為 4.05 m(平均週期為 11.8 sec、波向 233.1°)，發生於 7 月 23 日(註：非颱風警報發布期間且高雄港海域波浪觀測亦有相同現象，參考附圖 4.2 所示)；波浪觀測之平均週期最大值為 12.3 sec，分別發生於上述 7 月 23 日(波高為 3.67 m、波向 233.5°)及中度颱風天秤侵臺第二次警報期間(波高為 3.43 m、波向 231.8°)。整體而言，安平港 2012 年波浪觀測資料統計結果顯示波浪平均週期之平均值呈現出隨示性波高增大而遞增之趨勢，如表 2-7 所示。

此外，由表 2-8 所列安平港海域平均波向分布之統計結果顯示，波向分布主要集中於 SW 至 WNW 之間，約佔年度觀測資料之 87.4%。

2. 高雄港

本計畫蒐集 2012 年(1~11 月)高雄港外海波浪逐時觀測資料(如附圖 4.2 所示)，顯示 8 月 5 日 17 時起觀測資料因故中斷，直至 9 月 5 日 16 時始恢復正常觀測；惟該波浪觀測中斷期間分別經歷中度颱風海葵、輕度颱風啟德以及中度颱風天秤等侵臺颱風發布，未能有效觀測到颱風波浪至為可惜。本計畫統計 2012 年 1 月至 11 月有效波浪觀測資料共達 6737 筆，其示性波高分布範圍及平均波向分布範圍統計結果

分別如表 2-9 及表 2-10 所列；結果顯示 2012 年高雄港海域示性波高分布以波高 0.5 m ~ 1.0 m 為主要分布區間，約佔觀測資料數之 70.0%，該示性波高區間內波浪平均週期之平均值約為 6.48 sec。整體而言，2012 年波浪觀測期間示性波高最大值為 5.74 m(平均週期為 12.5 sec、波向 236.2°)，發生於輕度颱風泰利警報發布期間；波浪觀測之平均週期最大值為 16.0 sec(波高為 0.79 m、波向 166.7°)，發生於強烈颱風杰拉華侵臺期間，可視為颱風引起的長週期湧浪。整體而言，高雄海域波浪平均週期之平均值大致上呈現隨示性波高增大而遞增之趨勢，如表 2-9 所示，此與安平港海域波浪觀測資料統計趨勢一致。

同樣地，由表 2-10 所列高雄港海域平均波向分布之統計結果顯示，波向分布大部份集中於 SSW 至 WNW 之間，約佔 2012 年度觀測資料之 72.0%。

表 2-7 2012 年安平港海域示性波高分布統計表

波高範圍(m)	資料數目	週期平均值(sec)	百分率(%)
<0.5	2287	6.35	37.01
0.5~1.0	3097	6.42	50.07
1.0~1.5	406	7.37	6.57
1.5~2.0	243	8.33	3.93
2.0~2.5	75	8.98	1.21
2.5~3.0	33	9.93	0.53
3.0~3.5	30	10.64	0.49
3.5~4.0	10	10.98	0.16
≥4.0	1	11.80	0.02
合計/平均值	6179	6.613	100
觀測期間示性波高最大值為 4.050 m 觀測期間平均週期最大值為 12.30 sec 觀測期間示性波高平均值為 0.683 m			

表 2-8 2012 年安平港海域平均波向分布統計表

波向	資料數目	百分率(%)	波向	資料數目	百分率(%)
N	1	0.02	S	118	1.91
NNE	8	0.13	SSW	274	4.43
NE	20	0.32	SW	1245	20.15
ENE	55	0.89	WSW	1186	19.19
E	169	2.74	W	1551	25.10
ESE	32	0.52	WNW	1417	22.93
SE	12	0.19	NW	32	0.52
SSE	58	0.94	NNW	1	0.02

表 2-9 2012 年高雄港海域示性波高分布統計表

波高範圍(m)	資料數目	週期平均值(sec)	百分率(%)
<0.5	866	5.94	12.85
0.5~1.0	4716	6.48	70.00
1.0~1.5	724	6.99	10.75
1.5~2.0	205	8.56	3.04
2.0~2.5	115	8.80	1.71
2.5~3.0	67	9.72	0.99
3.0~3.5	16	11.33	0.24
3.5~4.0	9	12.24	0.13
4.0~4.5	4	12.57	0.06
4.5~5.0	5	11.92	0.07
≥5.0	10	13.00	0.15
合計/平均值	6737	6.637	100

觀測期間示性波高最大值為 5.740 m
 觀測期間平均週期最大值為 16.00 sec
 觀測期間示性波高平均值為 0.818 m

表 2-10 2012 年高雄港海域平均波向分布統計表

波向	資料數目	百分率(%)	波向	資料數目	百分率(%)
N	4	0.06	S	689	10.23
NNE	2	0.03	SSW	752	11.16
NE	1	0.01	SW	1043	15.48
ENE	2	0.03	WSW	897	13.31
E	4	0.06	W	917	13.61
ESE	16	0.24	WNW	1245	18.48
SE	145	2.15	NW	393	5.83
SSE	599	8.89	NNW	28	0.42

2.6 風場

本計畫除了持續蒐集中央氣象局(Central Weather Bureau)發布之颱風資訊及其相關統計資料外，針對風場資料蒐集包括 2012 年安平港及高雄港風速及風向港灣技術研究中心之觀測資料(如附圖 5.1 及附圖 5.2 所示)，以及由中央氣象局提供的風(氣壓)場數值預報資料等，其中後者為本計畫相關海象模擬之輸入資料。

1. 2012 年侵臺颱風

2012 年中央氣象局發布颱風警報之相關資訊，如表 2-11 所列，分別有輕度颱風泰利(6 月 19 日~6 月 21 日)、輕度颱風杜蘇芮(6 月 28 日~6 月 29 日)、中度颱風蘇拉(7 月 30 日~8 月 3 日)、中度颱風海葵(8 月 6 日~8 月 8 日)、輕度颱風啟德(8 月 14 日~8 月 15 日)、中度颱風天秤(8 月 21 日~8 月 25 日以及 8 月 26 日~8 月 28 日)、強烈颱風杰拉華(9 月 27 日~9 月 28 日)等七個，上述中央氣象局發布颱風警報之侵臺颱風移動路徑如圖 2.30 所示。其中輕度颱風泰利颱風中心雖未登陸臺灣，但因移動路徑沿臺灣海峽北上，故仍對臺灣西部海域造成一定程度之影響；中度颱風蘇拉及中度颱風天秤因颱風中心曾登陸臺灣造成較大的影響災害。

歷年(1897 ~ 2012 年)侵臺颱風頻率統計如表 2-12 所示，顯示自 1897 年至 2012 年間侵臺颱風總數為 407 次，其中侵臺颱風最早出現之月份為 4 月，最晚發生之月份為 12 月，各月份發生颱風侵臺次數以 8 月份最高，約佔總數之 30.2%；其次依序分別為 7 月及 9 月，分別佔總數之 24.1%及 22.9%。

在侵臺颱風路徑分類上，中央氣象局侵臺颱風分析資料庫系統將影響臺灣地區之颱風路徑劃分為十類，如圖 2.31 所示，相關說明如下：

第一類侵臺路徑為通過台灣北部海面向西或西北進行者，共 54 次佔 13.27%；第二類侵臺路徑為通過台灣北部向西或西北進行者，共 53 次佔 13.02%；第三類侵臺路徑為通過中部向西或西北進行者，共 47 次佔 11.55%；第四類侵臺路徑為通過台灣南部向西或西北進行者，共

42 次佔 10.32%；第五類侵臺路徑為通過台灣南部海面向西或西北進行者，共 72 次佔 17.69%；第六類侵臺路徑為沿東岸或東部海面上者，共 45 次佔 11.06%。第七類侵臺路徑為沿西岸或台灣海峽北上者，共 30 次佔 7.37%；第八類侵臺路徑為通過台灣南部海面向東或東北進行者，共 13 次佔 3.19%；第九類侵臺路徑為通過台灣南部向東或東北進行者，共 33 次佔 8.11%；第十類侵臺路徑為近海過境者(未移至 122° E)，共 18 次佔 4.42%。

2. 中央氣象局天氣預報數值風場

由於本計畫波浪及水位的預報皆會受到海面氣象條件的影響，特別是風速及氣壓的影響最大，因此港灣技術研究中心自 2004 年起透過合作關係由中央氣象局提供第三代數值天氣預報系統(簡稱 NFS)的數值預報風(氣壓)場資料，作為 TaiCOMS 作業化預報模擬的風(氣壓)場資料，及相關海象數值模式之風場、氣壓場輸入資料。

有鑑於中央氣象局天氣預報系統目前已發展至第四代數值天氣預報系統(簡稱 WRF)，因此本年度港灣技術研究中心再度透過合作關係由中央氣象局提供第四代數值天氣預報系統 WRF 之數值預報風(氣壓)場資料；此舉將可藉由提昇 TaiCOMS 作業化風(氣壓)場資料精確性，達到提昇海象模擬精度之目的。因此本年度主要工作為進行以 WRF 風(氣壓)場資料取代 NFS 風(氣壓)場資料為 TaiCOMS 作業化模擬風(氣壓)場之作業系統轉換測試。

NFS 及 WRF 風(氣壓)場資料格式分別整理如表 2-13 及表 2-14 所列，顯示在網格解析度上，NFS 及 WRF 風(氣壓)場資料同樣區分為解析度 45km、15km 及 5km 等大、中、小三層；在網格模擬範圍方面，除了 5km 解析度之網格資料 WA03 模擬範圍明顯大於 HC 外，其餘各層(45km 及 15km 解析度之網格) NFS 及 WRF 風(氣壓)場資料模擬範圍均相同，如圖 3.32 所示。

由於中央氣象局 NFS 及 WRF 風(氣壓)場資料網格座標系統與本計畫 TaiCOMS 使用的模式網格座標系統不同，因此必須透過內插方式將中央氣象局 NFS 及 WRF 風(氣壓)場資料轉換成 TaiCOMS 作業化網格

資料；有關本計畫針對 NFS 及 WRF 風(氣壓)場資料規劃輸出之資料範圍及格式對照如表 2-15 所列及參考圖 2.33 及圖 2.34 所示。

表 2-11 2012 年侵臺颱風相關資訊

中文名稱	英文名稱	警報期間	近臺強度	近臺颱風中心最低氣壓 (hPa)	近臺颱風中心最大風速 (m/s)	七級風暴風半徑 (km)	十級風暴風半徑 (km)
泰利	TALIM	6/19~6/21	輕度	985	25.0	150	--
杜蘇芮	DOKSURI	6/28~6/29	輕度	995	23.0	120	--
蘇拉	SAOLA	7/30~8/3	中度	960	38.0	220	80
海葵	HAIKUI	8/6~8/7	中度	960	35.0	180	50
啟德	KAI-TAK	8/14~8/15	輕度	995	20.0	150	--
天秤	TEMBIN	8/21~8/25	中度	945	45.0	180	50
天秤	TEMBIN	8/26~8/28	中度	965	35.0	180	50
杰拉華	JELAWAT	9/27~9/28	強烈	910	55.0	250	100

資料來源：中央氣象局網站

表 2-12 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 2-13 中央氣象局風場 NFS 風場資料格式

DMS FLAP	座標系統	DIMESION	RESOLUTION	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 2-14 中央氣象局風場 WRF 風場資料格式

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 2-15 作業系統內輸出風場資料格式

	模式	DIMENSION	模式格網	格點位置
風場 1	採用 NFS 之 RC 風場內插	307*211	1/6 度	底圖左下點(0N,99E) 右上點(35N,150E)
	採用 NFS 之 MC 風場內插	301*301	1/12 度	底圖左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
風場 2	採用 WRF 之 WA01 風場內插	101*71	1/2 度	底圖左下點(5N,100E) 右上點(40N,150E)
	採用 WRF 之 WA02 風場內插	145*154	1/6 度	底圖左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
	採用 WRF 之 WA03 風場內插	169*181	1/24 度	底圖左下點(20.5N,117.5E) 右上點(28N,124.5E)

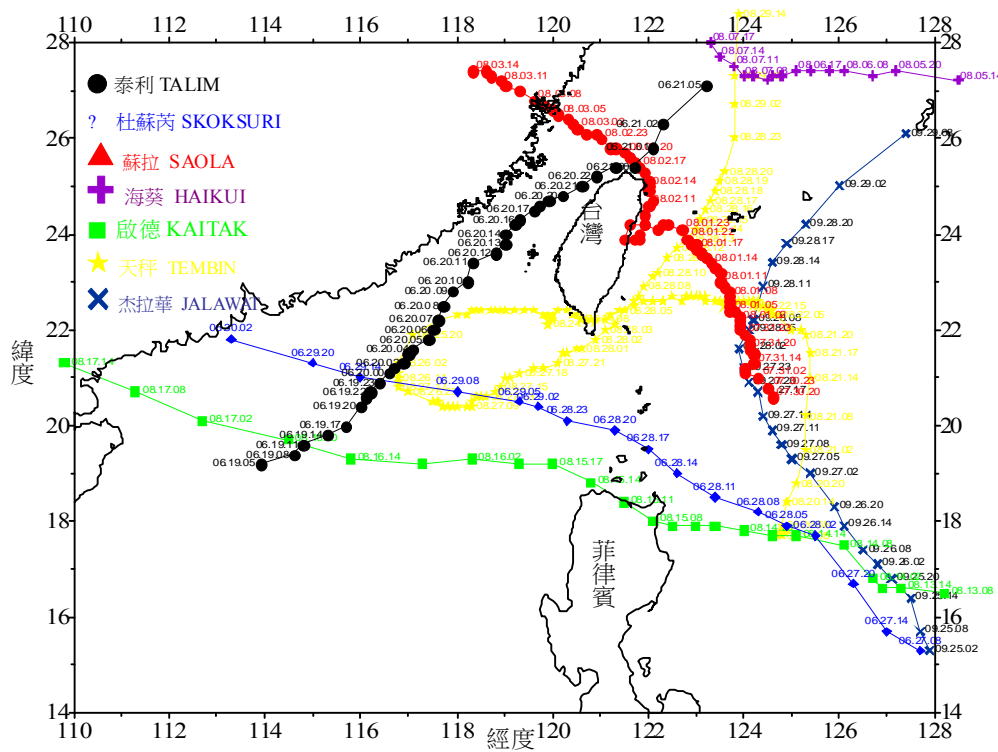


圖 2.30 2012 年中央氣象局發布侵臺颱風之行進路徑圖

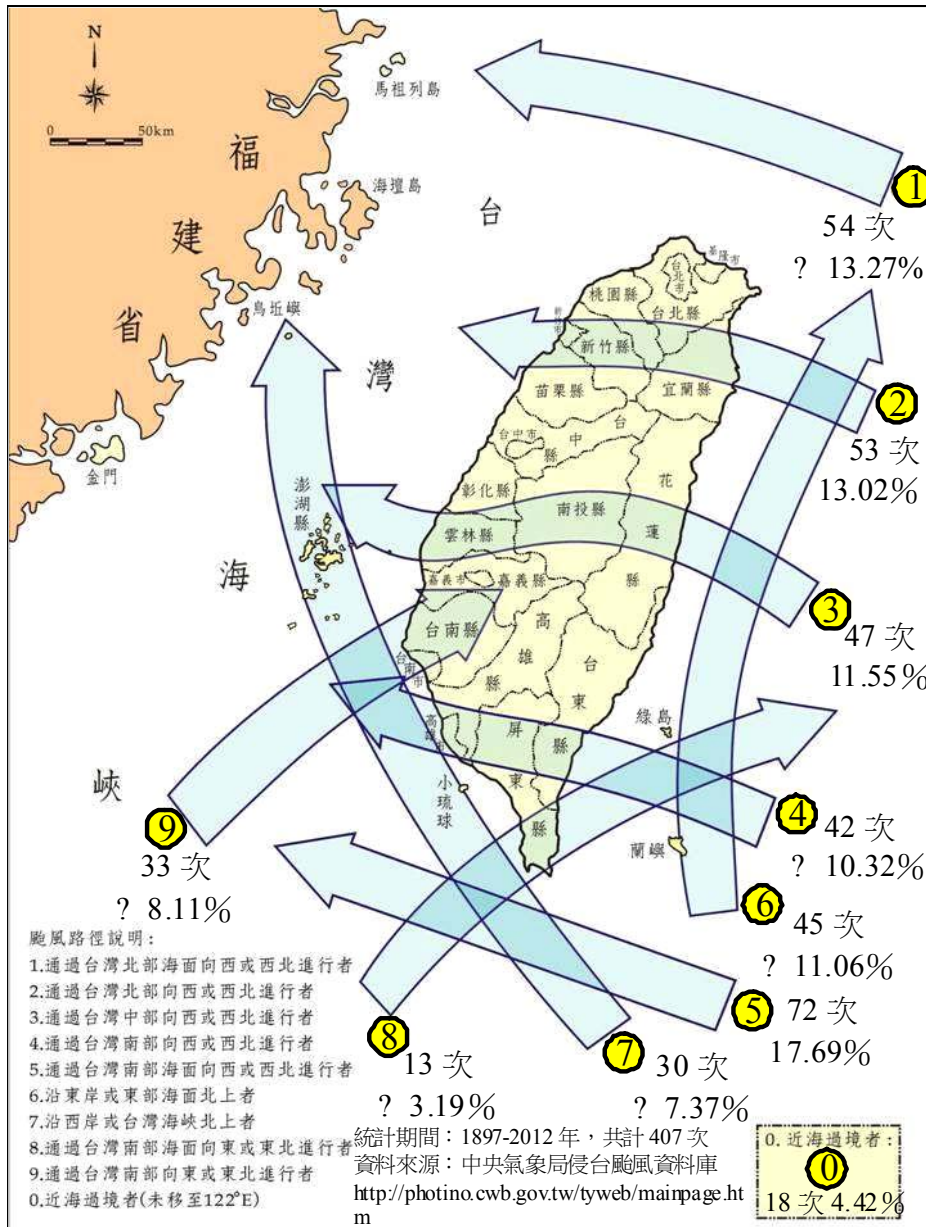


圖 2.31 侵襲臺灣之颱風路徑統計圖(1897~2012)

資料來源：中央氣象局網站

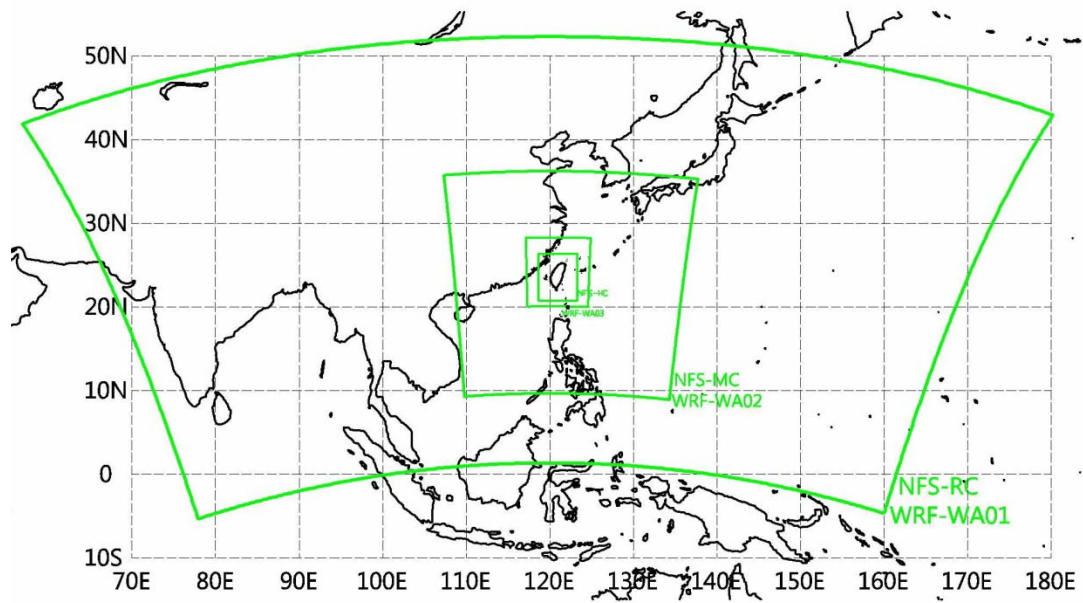


圖 2.32 中央氣象局風場 NFS 及 WRF 風場資料範圍圖

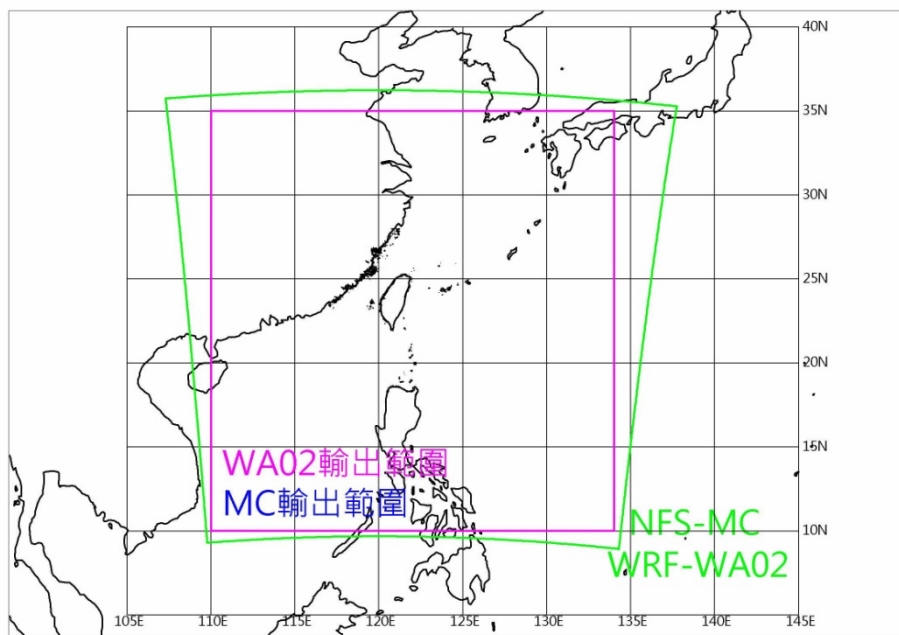


圖 2.33 MC 及 WA02 風場輸出範圍圖

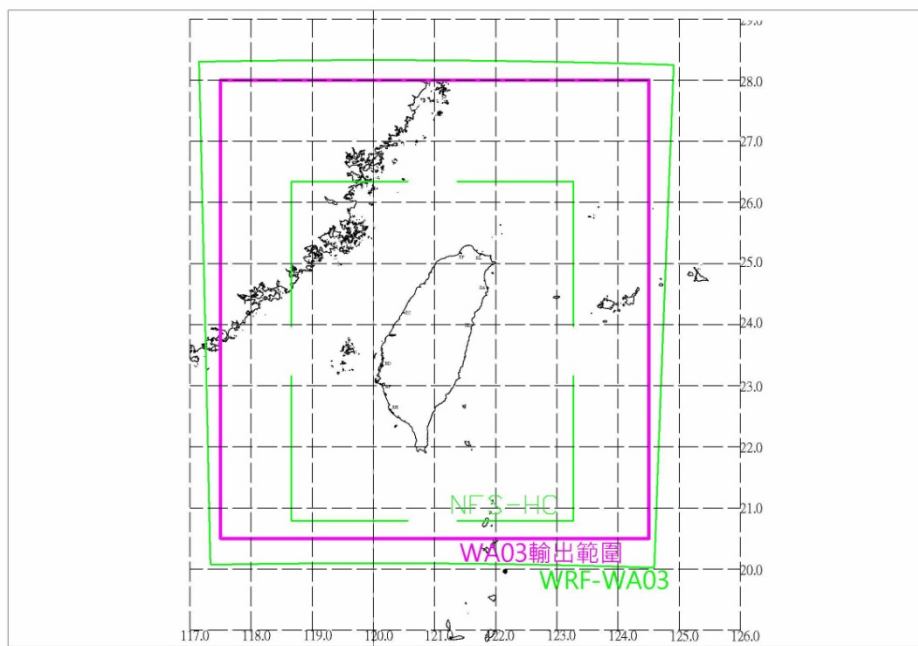


圖 2.34 WA03 風場輸出範圍圖

第三章 波浪模擬與探討

本章係以臺灣環島海象預報系統(TaiCOMS)波浪模擬架構已建置的作業化波浪模組，諸如大尺度西太平洋範圍風浪模組、中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組、小尺度港區近岸波浪模組等，以及各港區細尺度港域波浪模組等為計畫之研究主體，其中本年度小尺度網格及細尺度網格波浪場模擬之研究對象分別為安平港域及高雄港域。

3.1 TaiCOMS 波浪模擬架構說明

在 TaiCOMS 波浪場模擬架構下，依模擬範圍及網格尺度大小區分為大尺度西太平洋範圍風浪模組、中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組、七大商港小尺度港區近岸波浪模組以及七大商港細尺度港域波浪模組等四部份。其中大尺度西太平洋範圍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 3.1 所示)；中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組模擬範圍以臺灣本島為中心，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 3.2 所示)；七大商港小尺度港區近岸波浪模組則分別依據各港口港域大小及海岸地形水深變化狀況建置適當的模擬範圍，如圖 3.3 所示，其中各港口小尺度近岸波浪模組之數值計算網格解析度均為 10 m 間距之方格網格；至於細尺度港域波浪模組之模擬範圍則針對各港口外廓配置選取適當的假想半圓模擬邊界，其數值計算網格則採用隨港域水深變化建置的三角形元素網格，其中最小元素邊長可小至約 2 m 左右。

就各波浪模組之數值模式特性區分，大尺度西太平洋範圍風浪模組係採用海洋波浪預測模式 WAM (WAVE Modeling)為核心模式，中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組則選用荷蘭 Delft 大學所發展之近海風浪模式 SWAN (Simulating WAVes Nearshore)為模式之主體，前述二模式均屬為第三代波譜風浪模式，主要用於海面風浪之生成與減衰現象，故

主要輸入條件為海面風場資料。各港域小尺度港區近岸波浪模組則採用 Kirby 及 Dalrymple (1983) 所發展的波浪折繞射模式(REF/DIF)為基礎發展出適合各港口海岸特性之港區近岸波浪模擬模組，細尺度域波浪模組則採用能夠模擬港內波浪反射現象之有限元素港域波浪模式；此二模式均屬於建構於緩坡方程式(mild slope equation)基礎上之波浪模式，其中前者控制方程式屬於拋物線型緩坡方程式，後者控制方程式則為橢圓型緩坡方程式，故小尺度港區近岸波浪模組及細尺度域波浪模組之數值模式特性均屬於針對特定波浪條件(如波高、週期、波向等)模擬波浪向岸傳播過程之波高及波向變化。上述四種模式中除了有限元素港域波浪模式為研究團隊自行建置之程式碼外，其他如 WAM、SWAN 及 REF/DIF 均採用國際上公開之程式碼，經局部修正使其適用於 TaiCOMS 之作業環境。

在 TaiCOMS 波浪模擬功能區分上，大尺度西太平洋範圍風浪模組被設定為 TaiCOMS 波浪場模擬之最上層，它除了可以提供大域之風浪模擬結果(如波高、週期、波向分布)外，同時提供包括中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組模擬過程所需之邊界條件，以及國內七大港口外海之波浪條件如波高、週期、波向等；其中七大港口外海波向模擬資料因受到網格解析度限制往往與近岸波浪觀測資料有較大的誤差存在，故經由西太平洋範圍風浪模組模擬結果輸出的港口外海波向資料，對本計畫而言僅作為與臺灣周圍海域範圍風浪模組模擬結果或與觀測資料比對參考之用途。中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組則為 TaiCOMS 波浪場模擬之第二層，在波浪模擬過程中它除了依據大尺度西太平洋範圍風浪模組模擬結果作為模式之邊界條件外，並配合中域風場輸入資料模擬臺灣周圍海域風浪場變化；由於中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組除了具有較高解析度之計算網格外，由於模式本身亦具有模擬風浪折繞射功能，因此它可以提供臺灣近岸海域較精確的波浪場模擬結果，其中七大港口外海波向模擬值與各港口近岸波浪觀測資料之比對結果明顯優於前述西太平洋範圍風浪模組之比較結果。此外，中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組除了提供臺灣周圍近岸海域風浪場資訊外，亦提供國內七大港口外海之波浪條件如波高、週期、波向等，其

中國內七大港口外海之波浪條件將作為 TaiCOMS 各港口小尺度港區近岸波浪模組波場模擬之輸入條件。

在小尺度港區近岸波浪場模擬上，各港區近岸波浪模組主要是依據前述中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模式模擬結果提供國內七大港口外海波浪條件(波高、週期、波向等)，分別模擬基隆港、臺北港、臺中港、安平港、高雄港、花蓮港及蘇澳港等港域近岸波浪場變化情形。小尺度波浪模擬結果除了可提各港口外海每小時之近岸波浪場波高及波向之平面變化情形，同時可提供各港口附近或進港航道上之波高變化資訊。至於各港口細尺度港域波浪模組目前尚未納入 TaiCOMS 每日作業化流程中，主要考量在於細尺度港域波浪模式模擬時間較為費時，因此對於 TaiCOMS 而言細尺度港域波浪模組功能定位，主要針對颱風期間外海可能發生的大波浪條件進行港域波高變化模擬，藉以瞭解港內波浪靜穩狀況，評估是否可能影響船舶泊靠安全。

目前 TaiCOMS 每日海象作業化模擬會執行包含西太平洋範圍風浪模組、臺灣周圍海域範圍風浪模組及國內七大商港港域近岸波浪模組在內的大、中、小尺度模擬範圍之連續 72 小時波浪場模擬工作。目前 TaiCOMS 每日波浪作業化模擬流程，如圖 3.4 所示，各流程之作業環節說明如下：

目前 TaiCOMS 系統中海面風(氣壓)場資料係採用由中央氣象局提供非靜力區域預報模式(Nonhydrostatic Forecast System, 簡稱 NFS)每日 72 小時預報之數值資料，依 NFS 之數值資料含蓋 3 層不同範圍之巢狀網格，以臺灣為中心由最外層大域至最內層小域之水平網格間距分別為 45 km、15 km 及 5 km，如圖 2.32 所示。本計畫分別以大域 RC(或簡稱 RC)風(氣壓)場資料、中域 MC(或簡稱 MC)風(氣壓)場資料及小域 HC(或簡稱 HC)風(氣壓)場資料稱之。基於中央氣象局每日於 08:00 及 20:00 (相當於格林威治時間的 0:00 及 12:00)會下載由美國海洋及大氣總署提供的表面氣壓場，開始推算相關風場預報資料(RC、MC 及 HC)，並於每日 11:00 及 23:00 前上傳推算至 ftp 站供下載。因此 TaiCOMS 作業系統乃規劃以前一日 20:00 時中央氣象局預報氣象資料作為推算的

基準，並設定於每日 0 時及 12 時分別自中央氣象局 ftp 站下載前一日 20:00 時及當日 08:00 預報的風(壓)場數值資料；再於每日(以 D 日表示) 03:00 時開始解碼 D-1 日預報的風(壓)場數值資料，再經重整及內插方式產生大、中尺度風浪模組模擬範圍所需之每小時風場資料，如圖 2.33 所示，共 73 組資料。在每日作業化模擬更新的 73 組風場資料中，其前 24 小時風場代表 D-1 日 0 時至 23 時之風場。之後，系統會隨作業化流程依序進行大尺度西太平洋範圍風浪模擬、中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模擬以及各港區小尺度近岸波浪場模擬。目前 TaiCOMS 系統每日進行的風浪作業化模擬，係配合上述風場資料長度將各模組的模擬時間長度設定為 72 小時模擬，因此系統各波浪模組之模擬時間示意圖如圖 3.5 所示；其中前 24 小時屬於現報模擬，其現報結果將與各港口即時觀測系統資料比對，目的提供使用者判斷本次模擬作業結果之可信度；後 48 小時屬於預測模擬計算，內容上僅呈現各模式計算之結果，此部份結果因具有相當的不確性，故目的上僅提供港研中心或港勤參考之用途。

以上有關 TaiCOMS 波浪模擬系統下不同屬性(大、中、小及細尺度)之波浪數值模組、模擬範圍與解析度、相關應用的波浪模式、模擬輸入資料及輸出結果綜整如表 3-1 所列。

表 3-1 TaiCOMS 各波浪數值模組之特性綜整表

屬性	模組	模擬範圍/解析度	核心波浪模式	輸入	輸出
大尺度	西太平洋範圍風浪模組	東經：110°~134° 北緯：10°~35° 解析度：0.2°	海洋波浪預測模式 WAM	RC 風場(來源 NFS 預報之大域風場)	每日作業化模擬結果(72 小時平面波場資料、中尺度模組巢狀邊界風浪資料及各港區外海波浪資料)
中尺度	臺灣周圍海域範圍風浪模組	東經：119°~123° 北緯：10°~35° 解析度：0.04°	近海風浪模式 SWAN	MC 風場(來源 NFS 預報之中域風場) 巢狀邊界風浪條件(來源西太平洋範圍風浪模擬結果)	每日作業化模擬結果(72 小時平面波場資料及各港區外海波浪資料)
小尺度	基隆港港區近岸波浪模組	向離岸：6.2 km 沿海岸：7.3 km 解析度：10 m	波浪折繞射模式 REF/DIF	港區外海波浪條件(來源臺灣周圍海域範圍風浪模擬結果)	每日作業化模擬結果(72 小時平面波場資料及各港區波浪觀測點位波高及波向)
	臺北港港區近岸波浪模組	向離岸：8.0 km 沿海岸：13.0 km 解析度：10 m			
	臺中港港區近岸波浪模組	向離岸：10.0 km 沿海岸：19.0 km 解析度：10 m			
	安平港港區近岸波浪模組	向離岸：10.0 km 沿海岸：5.0 km 解析度：10 m			
	高雄港港區近岸波浪模組	向離岸：8.0 km 沿海岸：17.0 km 解析度：10 m			
	花蓮港港區近岸波浪模組	向離岸：3.2 km 沿海岸：8.0 km 解析度：10 m			
	蘇澳港港區近岸波浪模組	向離岸：6.0 km 沿海岸：8.0 km 解析度：10 m			

表 3-1 (續) TaiCOMS 各波浪數值模組之特性綜整表

屬性	模組	模擬範圍/解析度	核心波浪模式	輸入	輸出
細尺度	基隆港港域波浪模組	假想邊界半徑： 1000 m 元素數：59,694 節點數：30,679	有限元 素港域 波浪模 式	波高、週期、 波向	波高(或 KD 值)平 面分布資料
	臺北港港域波浪模組	假想邊界半徑： 3500 m 元素數：268,830 節點數：135,484			
	臺中港港域波浪模組	假想邊界半徑： 3500 m 元素數：327,611 節點數：166,214			
	安平港港域波浪模組	假想邊界半徑： 2000 m 元素數：100,728 節點數：51,159			
	花蓮港港域波浪模組	假想邊界半徑： 2200 m 元素數：130,169 節點數：258,117			
	蘇澳港港域波浪模組	假想邊界半徑： 826 m 元素數：70,797 節點數：36,436			

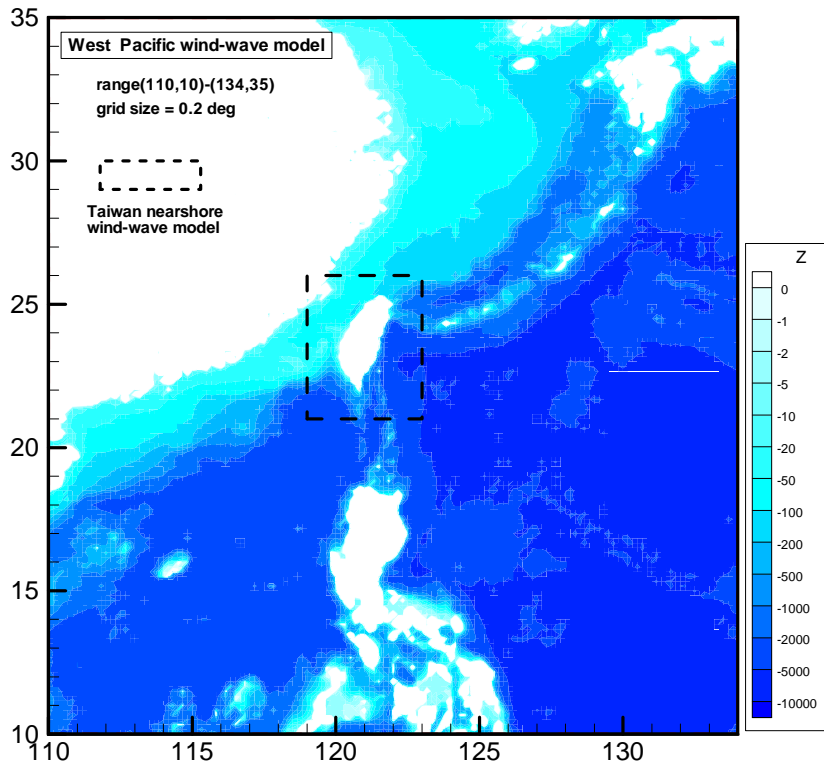


圖 3.1 大尺度西太平洋風浪模組之模擬範圍

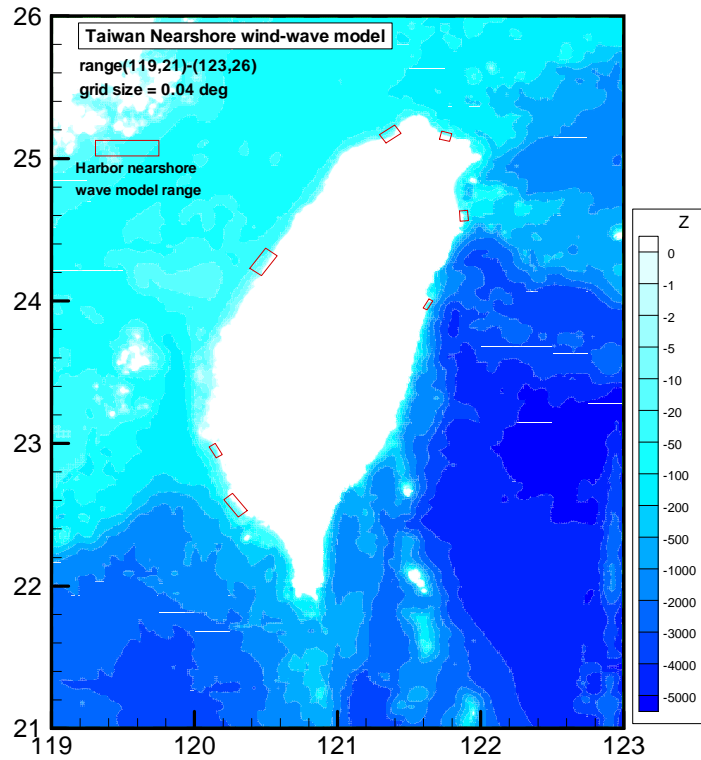


圖 3.2 中尺度臺灣近岸海域風浪模組之模擬範圍

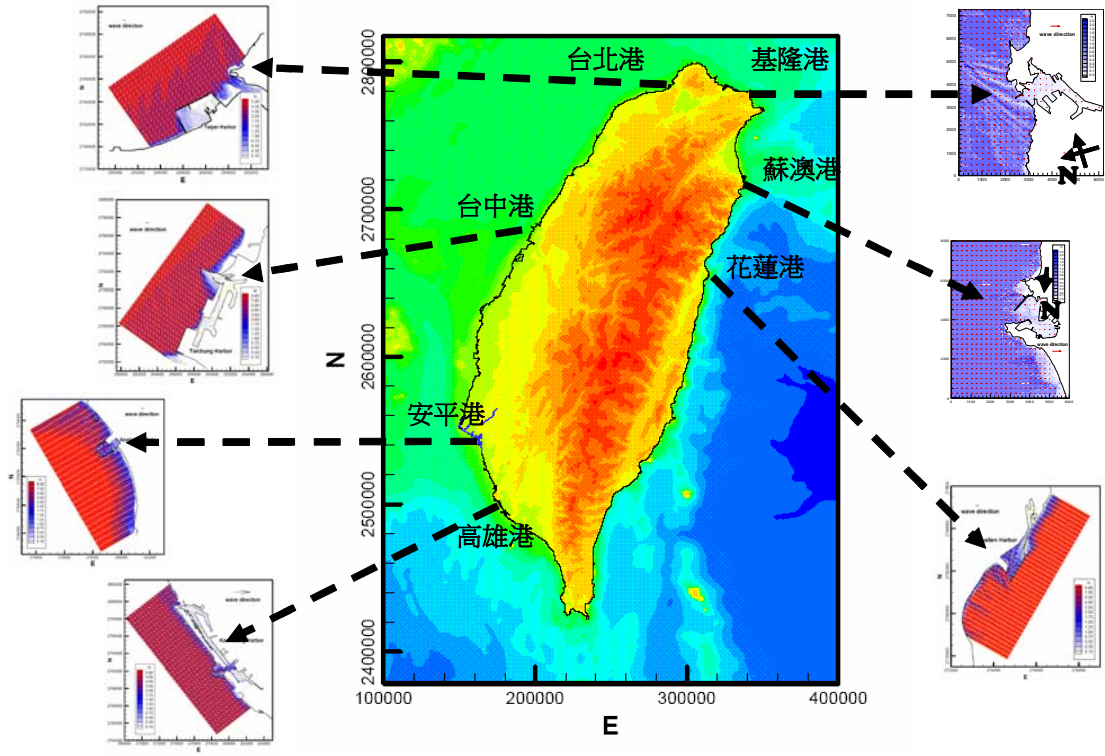


圖 3.3 國內七大港口地理位置及及小尺度港區近岸波浪模組模擬範圍

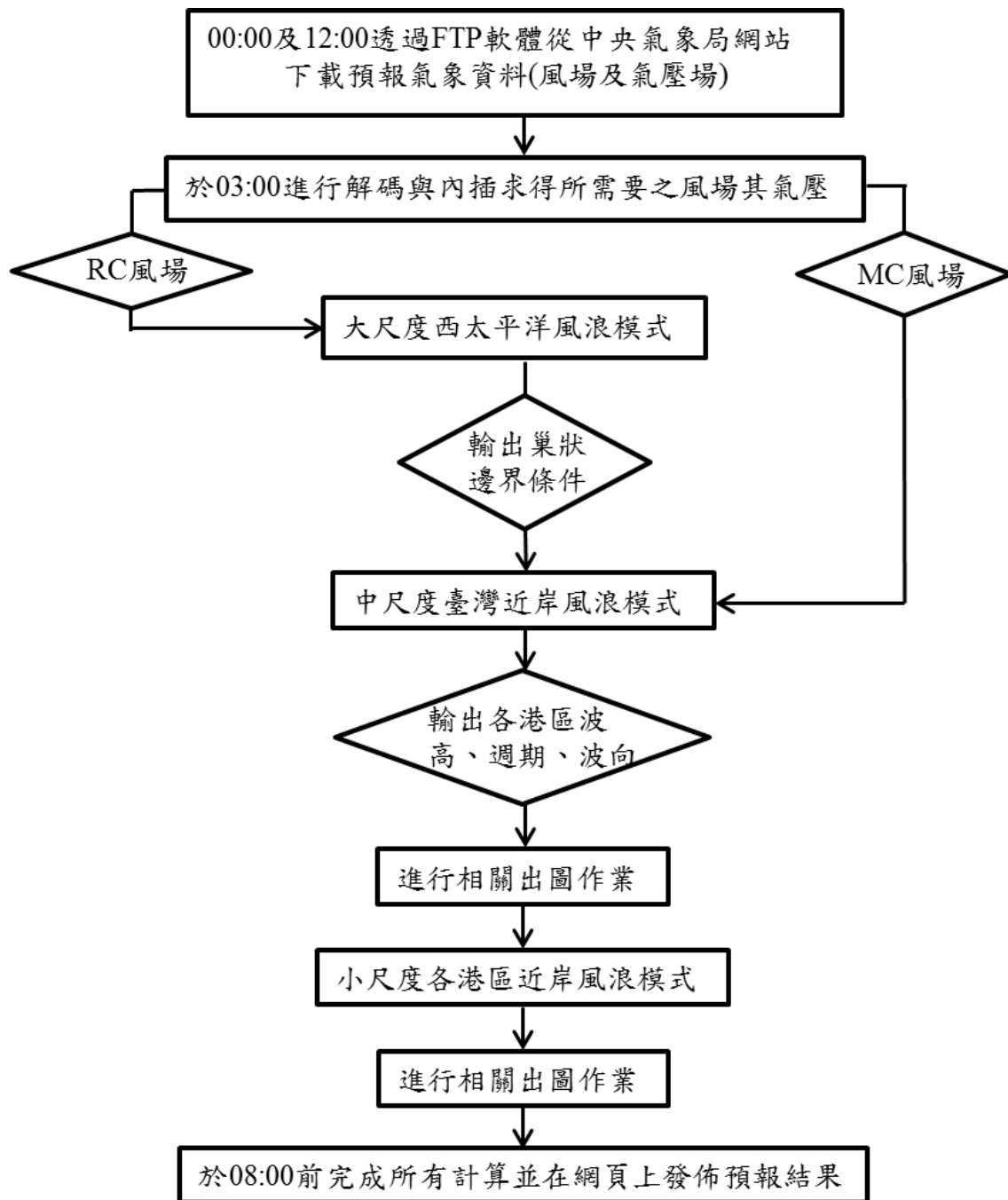


圖 3.4 臺灣近岸海象數值模擬系統波浪模擬線上作業流程

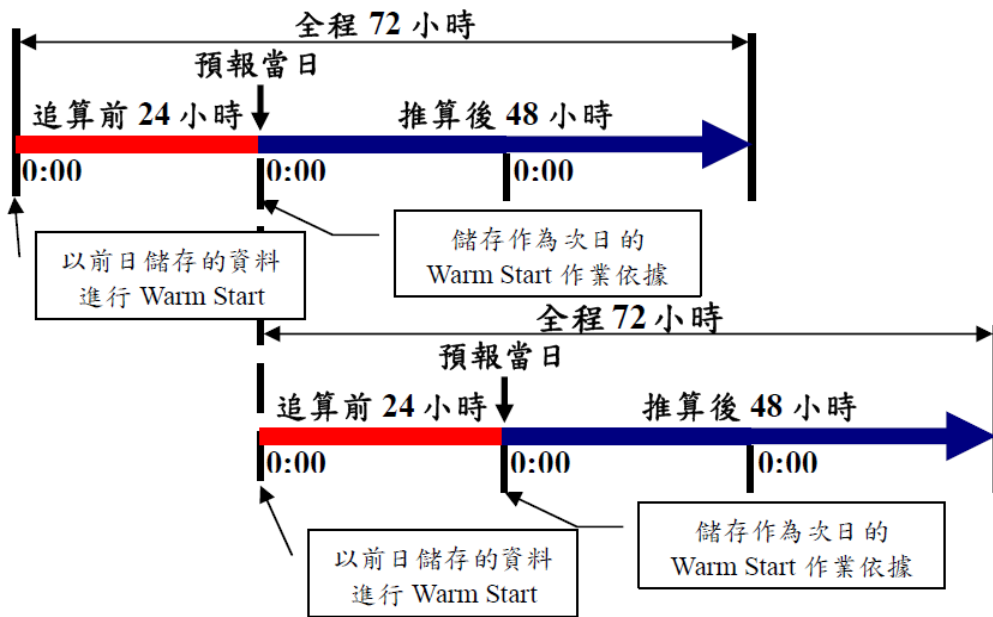


圖 3.5 TaiCOMS 每日線上作業程式模擬時間示意圖

3.1.1 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：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{C}_g F) = S \dots\dots\dots (3.1)$$

式中 $F = F(f, \theta, \bar{x}, t)$ 為波浪能量密度譜(spectral density)， f 為波浪的頻率， θ 定義為波浪的傳播方向， \bar{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(ϕ, λ)推導(3.1)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：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (C_\phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (C_\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta F) = S \dots\dots\dots (3.2)$$

式中 ϕ 為緯度， λ 為經度， C_ϕ 、 C_λ 與 C_θ 分別為波浪群速度 \vec{C}_g 在球面座標 ϕ 、 λ 軸及波浪傳播方向 θ 之空間傳遞速率，其中：

$$C_\phi = \left| \vec{C}_g \right| \frac{\sin \theta}{R} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$C_\lambda = \left| \vec{C}_g \right| \frac{\cos \theta}{R} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$C_\theta = \frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial d} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \phi} \frac{\partial d}{\partial \lambda} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial \phi} \right) / R \dots\dots\dots (3.5)$$

式中 R 為地球半徑(m)， ω 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

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} \dots\dots\dots (3.6)$$

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：

$$S_{in} = \gamma \cdot F \dots\dots\dots (3.7)$$

式中 γ 為波能成長率，WAM 模式之波能成長率 γ 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

$$\gamma = \varepsilon \omega \beta (u_*/c)^2 \cos^2(\bar{\theta} - \theta_w), \quad |\bar{\theta} - \theta_w| < \pi/2 \dots\dots\dots (3.8)$$

式中 ε 為空氣與水之密度比率(= 1.225×10^{-3})， β 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)， θ_w 為平均風向。另依據 Janssen (1991) 之研究得知，Miles 常數 β 可由下列表示式計算得到

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4(\mu) \quad , \quad \mu \leq 1.0 \dots\dots\dots(3.9)$$

其中

$$\mu = \left(\frac{u_*}{\kappa c} \right) \left(\frac{gz_0}{u_*^2} \right) \exp \left[\left(\frac{\kappa c}{u_*} \right) \frac{1}{\cos(\theta - \theta_w)} \right] \dots\dots\dots(3.10)$$

式中 κ 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：

$$z_0 = \frac{\alpha \tau}{g} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{\sqrt{1 - (\tau_w / \tau)}} \dots\dots\dots(3.12)$$

式中 α 為與海面狀況有關的 Charnock 參數， τ 為氣流通過海面波浪引起的運動應力(kinematic stress)， τ_w 為重力波引起的波應力。其中運動應力 τ 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

$$\tau = u_*^2 = \left(\frac{\kappa U(z_{obs})}{\ln(z_{obs} / z_0)} \right)^2 \dots\dots\dots(3.13)$$

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 τ_w 之計算如下

$$\tau_w = 2\pi \varepsilon^{-1} g \int df d\theta \cdot S_{in} \vec{k} \dots\dots\dots(3.14)$$

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

$$S_{dis} = \gamma_{ds} \cdot F \dots\dots\dots(3.15)$$

其中

$$\gamma_{ds} = -C_{ds} \langle \omega \rangle \left[\langle k \rangle^2 E \right]^2 \left[\frac{k}{\langle k \rangle} + \left(\frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(3.16)$$

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

$$E = \iint F(f, \theta) df \cdot d\theta \dots\dots\dots(3.17)$$

$$\langle \omega \rangle = E \left\{ \iint F(f, \theta) (2\pi f)^{-1} df \cdot d\theta \right\}^{-1} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$\langle k \rangle = E \left\{ \iint F(f, \theta) k^{-1} df \cdot d\theta \right\}^{-1} \dots\dots\dots(3.19)$$

關於底床摩擦引起的能量損失項 S_{bot} ，其計算如下：

$$S_{bot} = -C_{bot} \frac{k \tanh(kd)}{g \sinh^2(kd)} F \dots\dots\dots(3.20)$$

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，如圖 3.6 所示。當紛紜波浪中存在有四組波浪滿足下列共振(resonant)條件 (3.21a,b) 式時，則此四組波浪會產生能量之交換。

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \dots\dots\dots(3.21a)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \dots\dots\dots(3.21b)$$

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)。

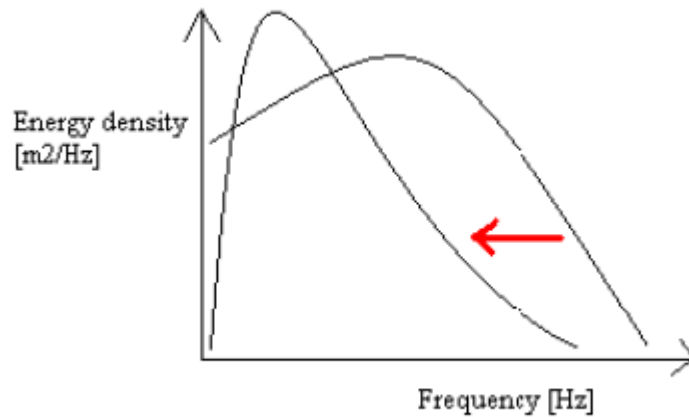


圖 3.6 波浪能量由高頻向低頻傳遞之示意圖

3.1.2 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(3.22)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 σ 為相對的波浪頻率; θ 為波浪方向角; 因此 SWAN 本質上屬於第三代風浪預報模式。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{\bar{S}}{\sigma} \dots\dots\dots(3.22)$$

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_θ 代表波浪作用力在波向 θ 空間之傳遞速度, c_σ 代表波浪作用力在波浪頻率 σ 空間之傳遞速度, S 代表波浪成長與消散之源函數項。其中

$$c_x = \frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta + U_x \dots\dots\dots(3.23)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta + U_y \dots\dots\dots(3.24)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} (\sin \theta \frac{\partial d}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial y}) + (\sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial y}) \quad (3.25)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} (\frac{\partial d}{\partial t} + U_x \frac{\partial d}{\partial x} + U_y \frac{\partial d}{\partial y}) - C_g k (\cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} + \sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial y}) \quad (3.26)$$

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(3.22)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 σ -軸上以 c_σ 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(3.22)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。

3.1.3 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° 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° 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：

$$\begin{aligned} & (C_g + U_x)A_x + U_y A_y + i(\bar{k} - k)(C_g + U_x)A + \frac{\sigma}{2} \left\{ \left(\frac{C_g + U_x}{\sigma} \right)_{,x} + \left(\frac{U_y}{\sigma} \right)_{,y} \right\} A \\ & - \frac{i}{2\sigma} [(p - U_y^2)A_y]_{,y} - \sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A = 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

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)， ω 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

$$D = \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh^4(kh)} \dots \dots \dots (3.28)$$

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：

$$\begin{aligned}
& (C_g + U_x)A_x - 2\Delta_1 U_y A_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U_x)A + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left(\frac{C_g + U_x}{\sigma} \right)_{,x} - \Delta_1 \sigma \left(\frac{U_y}{\sigma} \right)_{,y} \right\} A \\
& + i\Delta_3 \left[(p - U_y^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,y} - i\Delta_1 \left\{ \left[U_x U_y \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,x} + \left[U_x U_y \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,x} \right]_{,y} \right\} \\
& + i\sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{\nu}{2} A - \frac{b_1}{k} \left\{ \left[(p - U_y^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,yx} + 2i \left[\sigma U_y \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,x} \right\} \\
& + b_1 \mathcal{G} \left\{ 2i\omega U_x \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,x} + 2i\sigma U_y \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,y} - 2U_x U_y \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,xy} + \left[(p - U_y^2) \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,y} \right]_{,y} \right\} \\
& - \frac{i}{k} b_1 \left[(\omega U_y)_{,y} + 3(\omega U_x)_{,x} \right] \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,x} - \Delta_2 \left[\omega U_x \left(\frac{A}{\sigma} \right)_{,x} + \frac{1}{2} \omega \left(\frac{A}{\sigma} \right) (U_x)_{,x} \right] \\
& + ik\omega U_x (a_0 - 1) \left(\frac{A}{\sigma} \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.29}$$

式中

$$\mathcal{G} = \frac{k_{,x}}{k^2} + \frac{[k(p - U_x^2)]_{,x}}{2k^2(p - U_x^2)} \tag{3.30}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1, \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1, \quad \Delta_3 = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \tag{3.31}$$

上述各式中， ν 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

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{i}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \nu A \tag{3.32}$$

式中 $i = \sqrt{-1}$ 。

有關波浪消散因子 ν 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

$$\nu = \frac{2\sigma k f |A| (1-i)}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)} \dots\dots\dots (3.33)$$

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：

$$\nu = \frac{\psi C_g [1 - (\gamma h / 2 |A|)]}{h} \dots\dots\dots (3.34)$$

式中 ψ 及 γ 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 Δx 及 Δy 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) ，如圖 3.7 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 $x_i = (i-1)\Delta x$ ， $y_j = (j-1)\Delta y$ 。

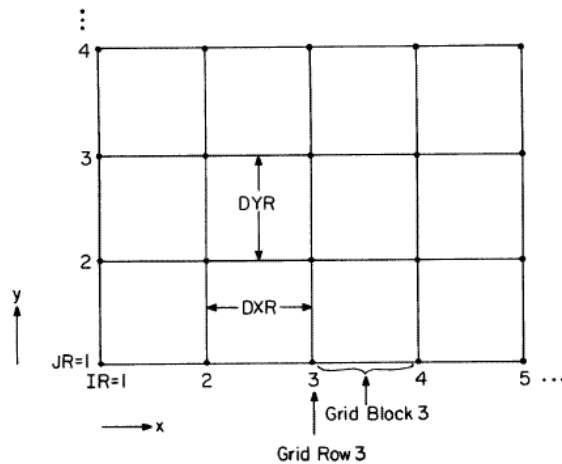


圖 3.7 REF/DIF-1 數值計算網格座標系統示意圖

3.1.4 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。

如圖 3.8 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

$$\eta_j(x,y,t) = \zeta_j(x,y)e^{i\omega t}, \quad j=1,2 \dots\dots\dots(3.35)$$

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， ω 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

$$\nabla^2 \zeta_1 + k_1^2 \zeta_1 = 0 \dots\dots\dots(3.36)$$

在在領域(II)內

$$\nabla \cdot (C_2 C_{2g} \nabla \zeta_2) + (C_2 C_{2g} k_2^2 + i\omega\mu + iC_{2g}\omega\gamma_b)\zeta_2 = 0 \dots\dots\dots(3.37)$$

式中 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為二維梯度運算子， μ 為摩擦因子， γ_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

$$\tilde{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_2 h_2}{\sinh(2k_2 h_2)} \right) \dots\dots\dots (3.38)$$

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

$$\mu = \frac{2n\omega}{k_2} \left(\frac{2C_r}{3\pi} \frac{\alpha k_2^2}{(2k_2 h_2 + \sinh 2k_2 h_2) \sinh k_2 h_2} \right) \dots\dots\dots (3.39)$$

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 γ_b 可採用下列計算式

$$\gamma_b = \frac{\chi}{h_2} \left(1 - \frac{\Gamma^2 h_2^2}{4a^2} \right) \dots\dots\dots (3.40)$$

式中 χ 及 Γ 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：

$$\zeta_1 = \zeta_2 \quad , \quad \text{在假想邊界 } B_1 \text{ 上} \dots\dots\dots (3.41a)$$

$$C_1 C_{1g} \frac{\partial \zeta_1}{\partial n} = -C_2 C_{2g} \frac{\partial \zeta_2}{\partial n} \quad , \quad \text{在假想邊界 } B_1 \text{ 上} \dots\dots\dots (3.41b)$$

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：

$$\nabla \zeta_2 \cdot \vec{n} = \partial \zeta_2 / \partial n = -i\alpha k_2 \zeta_2 \quad , \quad \text{在假想邊界 } B_2 \text{ 上} \dots\dots\dots (3.42)$$

式中 \vec{n} 表示邊界面上離開領域向外之單位法線向量， α 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：

$$\alpha = \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \dots\dots\dots (3.43)$$

式中 K_r 為邊界之反射係數。

在領域(I)內波浪之波函數 ζ_1 通常是由入射波 ζ_i 及受到直線海岸線

影響產生的反射波 ζ_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 ζ_S 等構成的，因此 ζ_1 可表示

$$\zeta_1 = \zeta_I + \zeta_R + \zeta_S \dots\dots\dots(3.44)$$

其中散射波 ζ_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：

$$\lim_{k_1 r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_1 \right) \zeta_S = 0 \dots\dots\dots(3.45)$$

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 θ_0 角度，其複數表示為：

$$\eta^I(x, y, t) = A^I e^{-i[k_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - \omega t]} \dots\dots\dots(3.46)$$

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)。

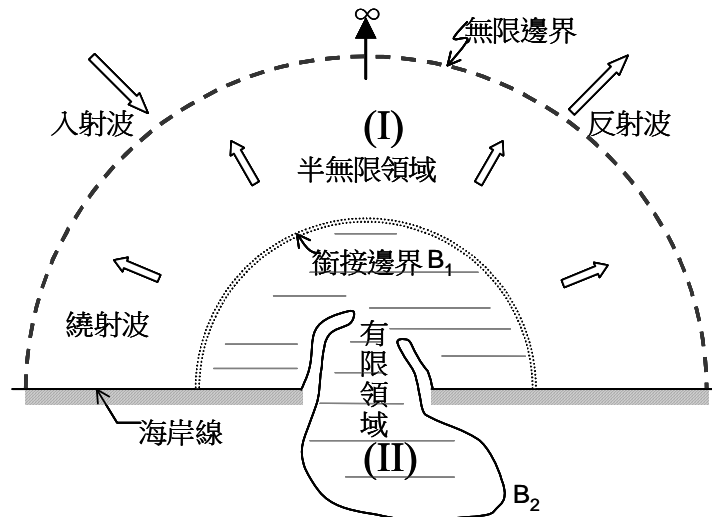


圖 3.8 港域波浪模式計算領域示意圖

3.2 風浪作業化模擬研究

本章節主要針對大尺度西太平洋範圍風浪模組及中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組作業化模擬結果進行研究成果說明，內容分為作業化預報流程探討、西太平洋範圍風浪模組改善成果以及臺灣周圍海域範圍風浪模組改善成果等三部份說明。

3.2.1 作業化預報流程探討

依據 TaiCOMS 波浪作業化模擬之每日作業流程規劃，如圖 3.4 所示，即系統每日波浪模擬流程始於大尺度西太平洋範圍風浪模組，藉由讀取 RC 風場每小時資料檔進行大尺度網格 72 小時風浪模擬(即始於 D-1 日零時至 D+2 日零時止)，並於模擬過程中儲存(輸出)每小時中尺度臺灣周圍海域範圍開放(海洋)邊界上網格點之風浪波譜資料；待大尺度西太平洋範圍風浪模組 72 小時預報模擬結束後，作業系統將接續執行中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組，並同時讀取每小時 MC 風場資料及由前述大尺度風浪模組產生的開放(海洋)邊界網格點之風浪波譜資料進行 72 小時中尺度網格風浪預報模擬；最後，再由作業系統依據中尺度網格風浪預報模擬結果產出各港區外海 72 小時之預報模擬波浪條件(包括示性波高 H_s 、平均週期 T 及平均波向等)，交由各港區近岸波浪模組執行 72 小時小尺度波浪場模擬。綜合上述波浪作業化模擬流程，其大尺度網格風浪模組、中尺度網格風浪模組及小尺度網格近岸波浪模組間作業化流程關係之簡單示意圖，如圖 3.9 所示。

除了上述波浪每日作業化模擬流程規劃外，並規劃大尺度網格及中尺度網格風浪模組每日模擬之起始條件，應採用前一日 72 小時預報模擬之第 24 小時輸出結果(即 D 日零時)為其起始輸入條件(此過程又稱為熱啟動)，以避免模式於模擬之初產生非預期之振盪結果過程。

經檢視目前運作中的 TaiCOMS 波浪作業化流程，仍可發現幾個流程待解決之問題，包括大尺度網格風浪模組與中尺度網格風浪模組間邊界波浪條件銜接問題，以及大尺度網格風浪模組與中尺度網格風浪

模組每日熱啟動接續問題等。針對上述問題，本計畫目前已針對大尺度網格風浪模組之熱啟動接續問題及大尺度網格風浪模組模擬過程輸出中尺度網格開放邊界波譜資料問題提出解決及改善成果。

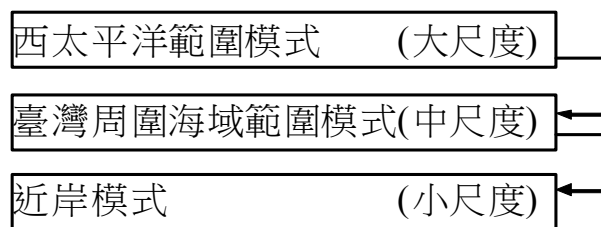


圖 3.9 TaiCOMS 波浪模擬大、中及小尺度網格模組關係示意圖

3.2.2 西太平洋範圍風浪模組改善成果

有關本計畫大尺度西太平洋範圍風浪模組之改善成果，簡述如下：

(1)模式模擬流程之修正：由於西太平洋範圍風浪模組採用 WAM Model 為其核心程式，因此程式包含了 PREPROC、PRESET、CHIEF 與後處理模組 PGRID 等四個模組，在西太平洋範圍風浪模組中各模組間相互關係如圖 3.10 所示，圖中顯示的主要資訊包括：1)當水深地形資料或網格資料改變時，風浪模擬流程將必需重新由 PREPROC 模組開始依序執行，2)PRESET 模組主要目的為產生初始條件資料檔(包括 blspanal、slatanal 及 lawianal 等)，提供主程式 CHIEF 模組讀取使用，因此當採取熱啟動模擬方式時，模擬流程將可以跳過 PRESET 模組；3)當以熱啟動方式模擬風浪場時，CHIEF 模組讀取的初始條件資料檔 blspanal、slatanal 及 lawianal 等必須改由前次模擬過程中儲存的 blspanal、slatanal 及 lawianal 檔取代。為使上述模擬流程能夠符合預報模擬時間 D-1 日零時至 D+2 日零時止之規劃，本計畫將原程式需於模擬終止始產生 blspanal、slatanal 及 lawianal 等儲存檔案之設定，修改為於每日模擬時間為 D 日零時即產出 blspanal、slatanal 及 lawianal 等儲存檔案，使其符合次日模擬起始時間之初始條件資料檔。另外，在每日 72 小時模擬過程中，主程式將會逐時產出中尺度網格開放邊界網格

之波譜資料檔(即圖中 CBO 部份)，提供中尺度網格風浪模擬所需之邊界條件。

(2)模式波浪參數輸出內容修正：一般風浪波譜模式其波浪相關參數之計算主要是採用模式模擬結果之波浪能量密度譜(方向波譜)計算其風浪之示性波高(H_s)、平均波向(θ_m)、平均週期(T_m)及譜峰週期(T_p)等主要參數值，其中平均週期在 WAM Model 程式中僅採用波浪能譜之負一階動差定義其平均週期。本計畫整理有關以波浪能量密度譜定義波浪參數之計算公式如下：

1. 波浪能量密度譜 $F(f, \theta)$ 之 n 階動差(moment)， M_n

$$M_n = \int f^n F(f, \theta) df \cdot d\theta \dots\dots\dots (3-47)$$

2. 波浪頻率譜 $E(f)$ ：為

$$E(f) = \int F(f, \theta) d\theta \dots\dots\dots (3-48)$$

3. 示性波高(significant wave height， H_s)：

$$H_s = 4\sqrt{E_0} = 4\sqrt{M_0} \quad , \quad \text{其中波浪總能量 } E_0 = M_0 \dots\dots\dots (3-49)$$

4. 平均週期(T_m 或 T_{-1})：模式採用-1 階動差與零階動差比值定義波浪之平均週期，即

$$T_m = M_{-1}/M_0 \dots\dots\dots (3-50)$$

5. 平均波向(θ_m)：定義為

$$\theta_m = \tan^{-1}(SF/CF) \dots\dots\dots (3-51)$$

式中

$$SF = \int \sin \theta \cdot F(f, \theta) df \cdot d\theta \dots\dots\dots (3-52)$$

$$CF = \int \cos \theta \cdot F(f, \theta) df \cdot d\theta \dots\dots\dots (3-53)$$

6. 譜峰週期(T_p)：以不連續波浪能譜 $E(f_i)$ 之最大能量頻寬(bin)之不連續頻率 f_p 定義波浪之譜峰週期，即

$$T_p = 1/f_p \dots\dots\dots (3-54)$$

有鑑於，目前港灣技術研究中心之波浪觀測資料其波浪平均週期 (T_{m02} 或 T_z) 是採用波浪觀測資料能譜之零階動差與 2 階動差比值之平方根定義，即

$$T_{m02} = \sqrt{M_0/M_2} \dots\dots\dots (3-55)$$

上述定義與本計畫西太平洋範圍風浪模式採用(3-50)式定義平均週期 T_m 不一致，其中以(3-50)式定義波浪平均週期(T_m 或 T_l)，其值經証實大於採用(3-55)式平均週期(T_z)計算值，此乃歷年西太平洋範圍風浪作業化模擬成果評估波浪平均週期普遍偏大之原因。

有關大尺度西太平洋範圍風浪模組本計畫針對模式執行程式輸出部份之改善成果簡述如下：

1. 增列模式平均週期之定義：本計畫於程式中增列平均週期 T_{m02} 計算選項，並証明模式模擬結果之平均週期 T_{m02} 值與觀測資料輸出之平均週期較為接近，如圖 3.11 所示，可以有效降低以往作業化成果評估結果大尺度網格風浪模擬結果之平均週期較觀測值過度高估之現象。
2. 增列模式譜峰週期 T_P 平滑化計算：本計畫於模式後處理程式中增加採用二次拋物線契合(fit)方法校正譜峰週期 T_{Pl} 值，藉以改善目前模式輸出之譜峰週期 T_{Pl} 值過度不連續狀。有關二次拋物線契合(fit)方法簡述如下：

設原譜峰頻率及能量為 f_p 及 E_p ，鄰近譜峰頻率 f_p 之上、下游頻率及能量分別為 f_u 、 E_u 及 f_d 、 E_d ，令

$$P = f_u + f_d \dots\dots\dots (3-56)$$

$$Q = (E_d - E_u)/(f_d - f_u) \dots\dots\dots (3-57)$$

$$R = f_d + f_p \dots\dots\dots (3-58)$$

$$T = (E_d - E_p)/(f_d - f_p) \dots\dots\dots (3-59)$$

$$A = (T - Q)/(R - P) \dots\dots\dots (3-60)$$

$$f'_p = \begin{cases} A & , \text{for } A \geq 0 \\ (-Q + P * A)/2A & , \text{for } A < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3-61)$$

3.增列模式模式模擬結果輸出點位：原作業化系統僅提供基隆港等 7 大商港大尺度網格風浪模擬結果至港灣資訊網查詢，本計畫進一步增列布袋港以及澎湖、金門及馬祖等離島海域在內共 11 個模式輸出點位，如圖 3.12 所示，提供港灣資訊網查詢大尺度網格風浪模擬結果。

(3)風浪模擬成果評估之提昇：本計畫除了針對模式主要參數進行模擬結果校驗外，同時針對大域 RC 風場資料及中域 MC 風場資料對大尺度網格風浪模擬結果之影響進行評估。整體評估結果顯示本計畫大尺度網格採用中域 MC 風場資料模擬風浪之結果較以往採用大域 RC 風場資料之模擬結果更接近目前港灣技術研究中心各港口波浪觀測資料，如圖 3.13 及圖 3.14 所示，因此建議修改 TaiCOMS 作業化流程以中域 MC 風場資料為大尺度西太平洋範圍風浪模組之輸入條件。

3.2.3 臺灣周圍海域範圍風浪模組

自從兩岸開放離島小三通之後，離島航運之經濟價值更顯重要，因此離島船舶航程之安全將是交通部未來議題之一。有鑑此，在提供較準確的波浪模擬資訊方面，本計畫中尺度網格風浪模擬之發展益顯其重要性。目前本計畫在中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組之研究尚處於摸索階段，因此有關中尺度網格風浪模擬仍以維持目前 TaiCOMS 已建置的模組運作為主，僅能著手於作業系統較枝節的改善包括模擬範圍之更動、模式水深資料更新以及採用多核心運算方式縮短作業化模擬時間等。相關成果簡述如下：

(1)擴大模擬範圍及更新水深資料：原 TaiCOMS 中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組之模擬範圍未含蓋金門與馬祖等離島地區，因此本計畫將中尺度網格模擬範圍擴及金門與馬祖等離島地區，如圖 3.15 所示。更新後的中尺度網格模擬範圍分別為東經 117°至 123°及北緯 21°至 27°含蓋之海域，同時增列金門與馬祖等海域風浪模擬結果至港灣資

訊網站展示。此外，因應中尺度網格模擬範圍之修正，本計畫同時以美國國家地球物理資料中心(National Geophysical Data Center, NGDC)最新公布的全球 1 弧分格網數值地形資料(Etopo1)取代原模式使用的全球 2 弧分格網數值地形資料(Etopo2)，藉以達到局部改善中尺度網格風浪模擬之目的。

(2)風浪模擬效率之提昇：本計畫配合港灣技術研究中心提昇 TaiCOMS 主機伺服器計畫，針對風浪模式(即 SWAN)採取多核心運算方式模擬中尺度網格風浪，有效地縮短目前中尺度網格 72 小時風浪模擬之作業化模擬時間。圖 3.16 所示為本計畫多核心運算之 cpu 數與模式運算時間之關係曲線，顯示採用多核心運算方式執行中尺度網格風浪模擬，其作業化模擬時間在 cpu 數達 12 顆以後即不再減少而呈現增加之現象，以及當 cpu 數達 8 顆以後作業化模擬時間縮短之趨勢明顯趨緩，代表採用過多核心其運算效益不再顯著提昇。

此外，針對中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組之研究，本計畫未來需要克服(解決)的問題尚包括：1)大、中尺度網格間相鄰海域邊界波浪模擬資料銜接設定問題，目前二者在相鄰海域邊界資料銜接設定上，採用由大尺度網格模擬結果輸出中尺度網格海域邊界之示性波高平均週期及平均波向等資料，再由中尺度網格風浪模式讀取並依據設定的波譜型式轉換成模式所需之波譜資料，此可能造成目前部份長週期波浪如湧浪等無法在中尺度網格風浪模擬結果呈現出之原因，因此如何將目前系統中尺度風浪模組之設定導正為直接讀取前述大尺度網格風浪模擬過產生的邊界波譜實為本計畫首要克服的問題。2)非定常狀態之風浪模擬，由於目前系統中尺度網格風浪模擬仍屬於定常狀態風浪模擬，因此如何將現有的設定狀況修正為非定常狀態風浪模擬亦是本計畫待解決之問題。3)在中尺度網格下建置適當的巢狀網格模擬各港域近岸風浪預報，此部份理論雖可行但技術執行面困難度較高，將為本計畫未來努力之長期目標。

3.2.4 風浪模擬結果評估之量化指標

為具體量化本計畫風浪模擬結果改善成效，本計畫選取風浪之波高為改善成效評估對象(標的)，同時針對模擬值與觀測值間之均方根誤差(rmsq)、標準偏差(SD)及相關係數(R)等可具體量化參數進行分析，以期選取較具代表性的量化參數及評估方法作為本計畫風浪模擬結果之改善成效評估依據。

本計畫以西太平洋範圍風浪模組模擬結果為例，選取 2012 年 7 月~9 月高雄港海域觀測資料為樣本，分別針對本計畫風浪模擬值以及目前 TaiCOMS 作業化預報模擬值進行相關量化參數分析，結果說明如下：

圖 3.17 所示分別為 2012 年 7 月本計畫風浪模擬值與波高觀測值間絕對誤差值(十字符號)及 TaiCOMS 作業化預報模擬值與波高觀測值間絕對誤差值(圓形符號)之逐時變化分布圖，由於一般風浪示性波高觀測值多數小於 1.0m(約佔八成以上)，颱風期間風浪觀測值則有可能出現 3.0 m 以上示性波高(小於百分之一)，因此對風浪模擬結果而言，絕對誤差值並不是良好的指標參數；有鑑於此，本計畫改採用絕對誤差/波高觀測值方式呈現模擬結果與觀測值間誤差關係，如圖 3.18 所示，如此將可藉由統計方式定義出可接受之模擬誤差比值門檻如 0.4 或 0.5，作為未來模式模擬成果之評估依據。

另外，針對每日作業模擬結果本計畫選取前 24 小模擬值與觀測值間絕對誤差與波高觀測值之比值資料進行日平均分析，如圖 3.19 所示，顯示 2012 年 7 月~9 月日平均有效樣本數共 60 個，其中 39 個樣本數(約佔 6 成 5)顯示本計畫 MC 風場模擬結果較 TaiCOMS 作業化預報以 RC 風場之模擬結果為佳。同樣地，針對每日作業模擬結果選取前 24 小模擬值與觀測值為樣本，逐日計算其標準偏差(SD)及相關係數(R)分別如圖 3.20 及圖 3.21 所示，由標準偏差(SD)逐日變化之趨勢及其變動幅度來看，顯示其適合作為評估模擬成果之指標參數；另由逐日相關係數變化結果得知本計畫以 MC 風場模擬風浪之結果與觀測值間較少出現負相關係數之現象，顯示以 MC 風場模擬風浪每日模擬結果與

觀測值間相關性普遍優於以 RC 風場模擬風浪之結果。由於風浪模擬結果與風場具有密切關係，因此上述逐日標準偏差及相關係數分析結果，亦可反映出 MC 風場及 RC 風場預報資料在鄰近海岸地區的差異性，對風浪之影響並非全然正面，導致解析度較高的 MC 風場有可能出現較差的模擬結果。

綜合上述分析結果，因風浪模擬結果以波高模擬值與風場關係最為密切，因此本計畫僅選取波高作為評估風浪模擬結果及改善成效之量化標的，以標準偏差作為模擬值與觀測值間誤差評估之量化參數，相關係數為評估模擬值與觀測值間變化趨勢之量化參數，亦即當模擬值與觀測值間標準偏差越小且相關係數越大時，代表模擬結果越佳。此外，由於標準偏差及相關係數計算與資料樣本數有關，因此為降低資料樣本數之影響，未來執行逐日模擬成果評估時，建議改採用每日作業化 72 小時模擬資料，並設定觀測資料樣本數至少 48 組才為之。

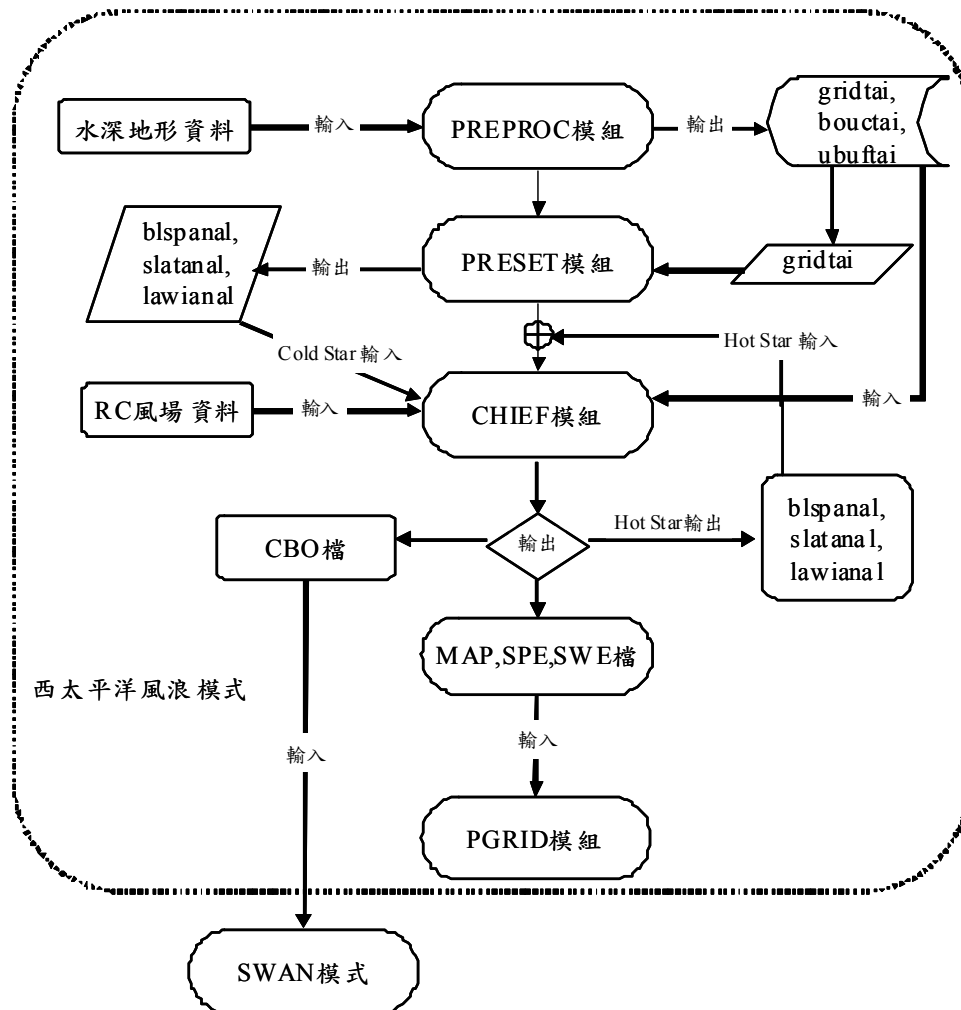


圖 3.10 大尺度西太平洋範圍風浪模組之模式操作流程圖

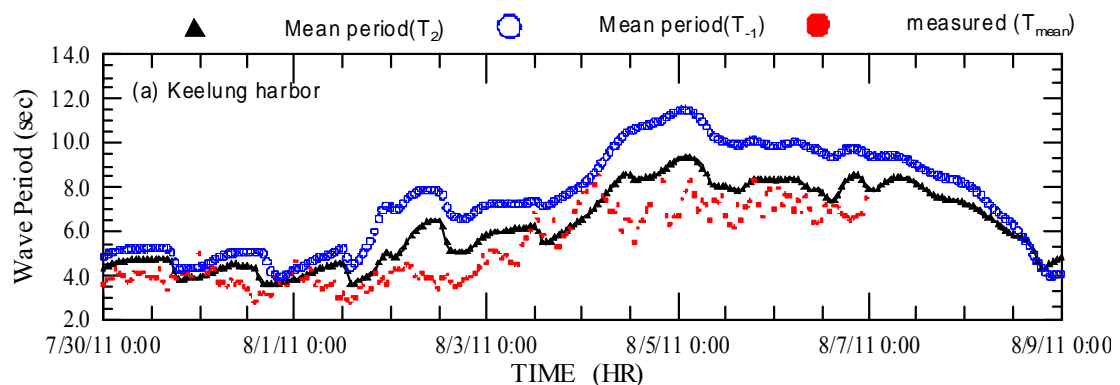


圖 3.11 大尺度網格風浪模擬結果之平均週期 T_m (圓圈)及 T_{m02} (三角形)與觀測波浪平均週期(圓點)之比較

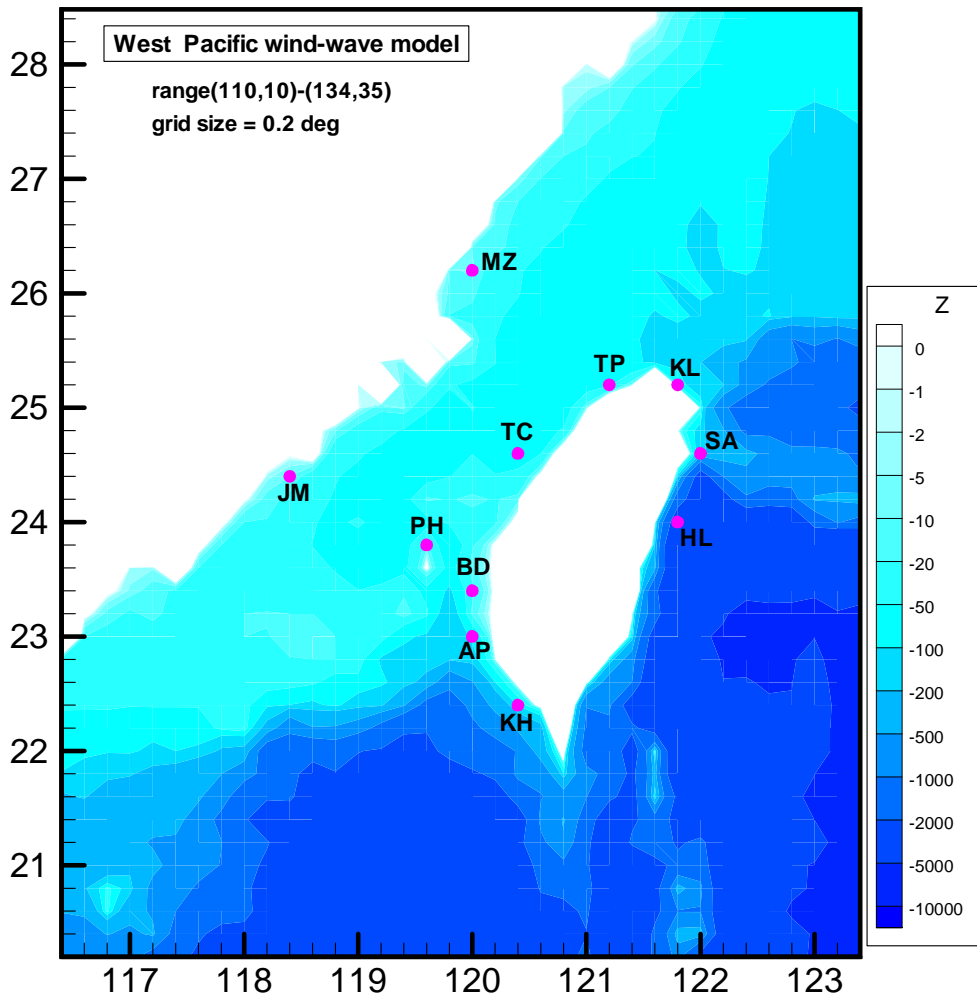


圖 3.12 大尺度西太平洋範圍風浪模組波譜模擬結果輸出點位示意圖

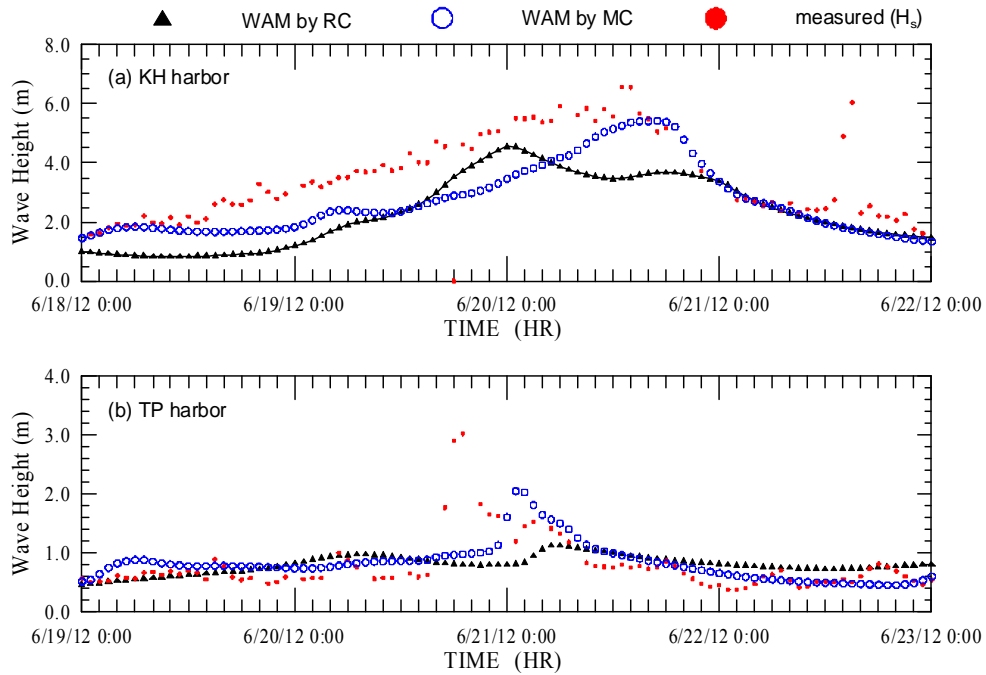


圖 3.13 輕度颱風泰利侵臺期間大尺度網格分別以 RC 及 MC 風場模擬風浪之示性波高與觀測值比較圖

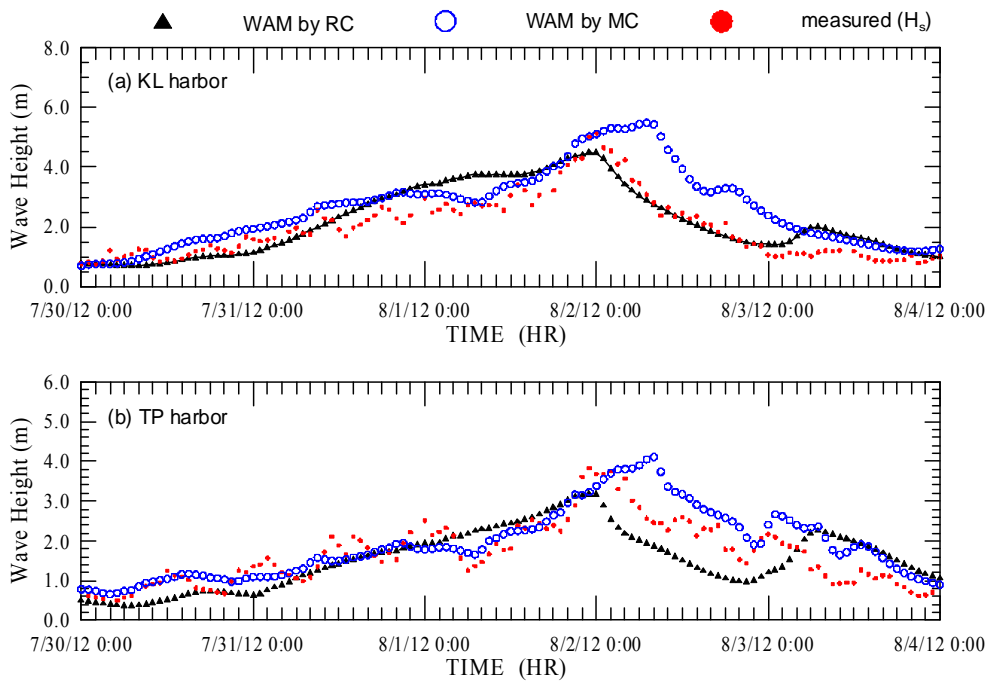


圖 3.14 中度颱風蘇拉侵臺期間大尺度網格分別以 RC 及 MC 風場模擬風浪之示性波高與觀測值比較圖

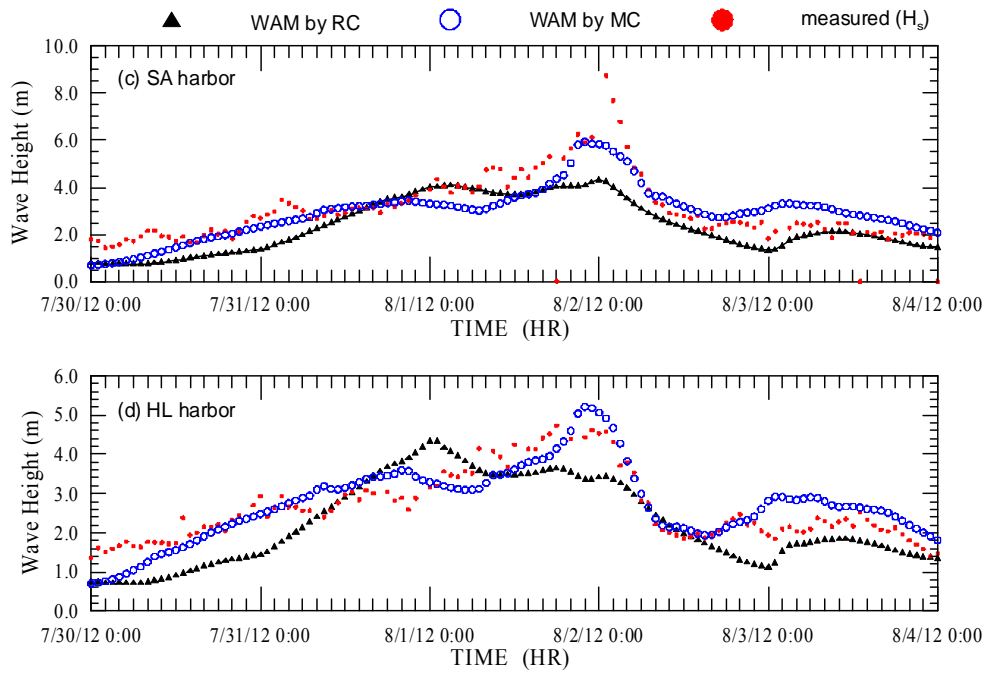


圖 3.14 (續) 中度颱風蘇拉侵臺期間大尺度網格分別以 RC 及 MC 風場
模擬風浪之示性波高與觀測值比較圖

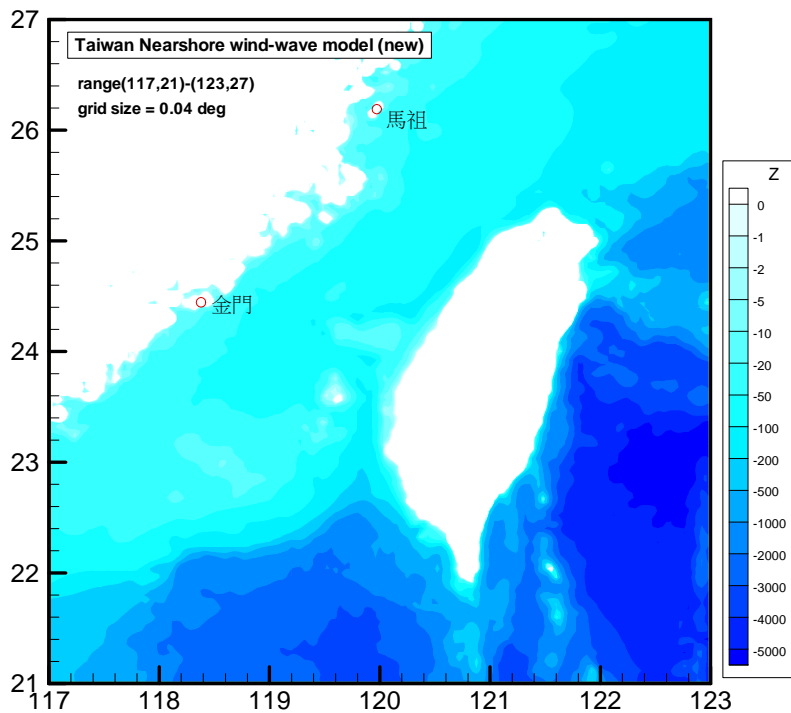


圖 3.15 中尺度臺灣周圍海域風浪模組更新後之模擬範圍圖

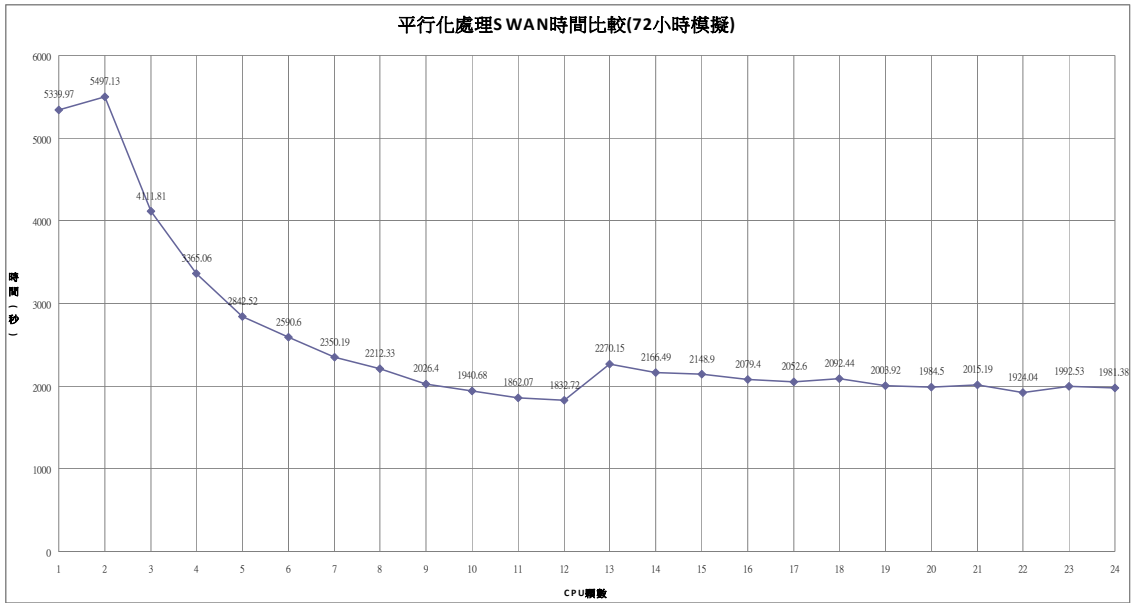


圖 3.16 平行化處理下系統 SWAN 之運算時間與 CPU 數目關係圖

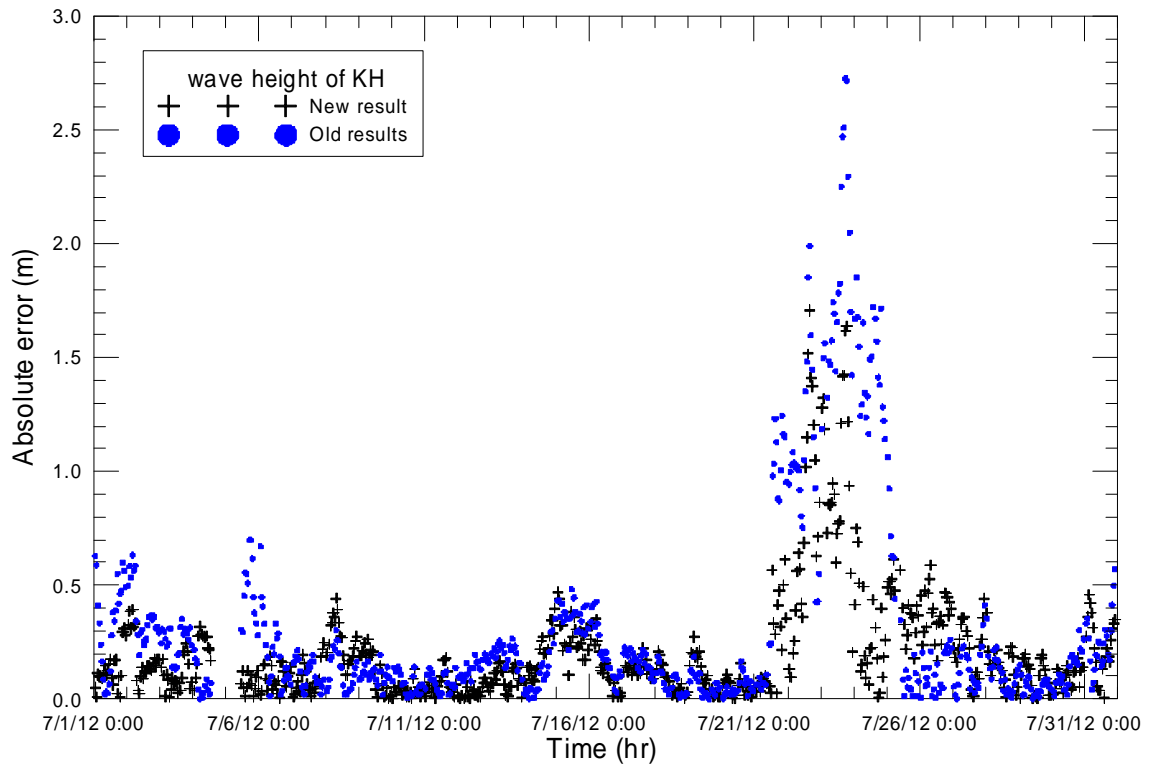


圖 3.17 風浪波高模擬值與觀測值間絕對誤差值之逐時變化分布圖

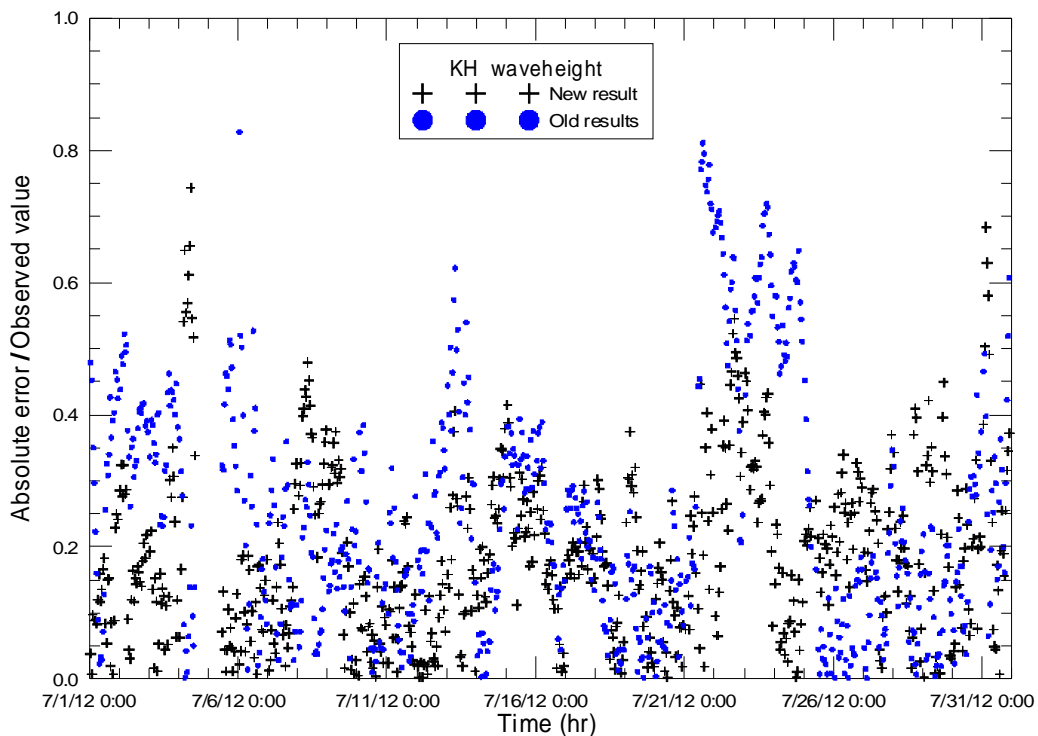


圖 3.18 波高模擬值與觀測值之絕對誤差與觀測值之比值逐時變化分布圖

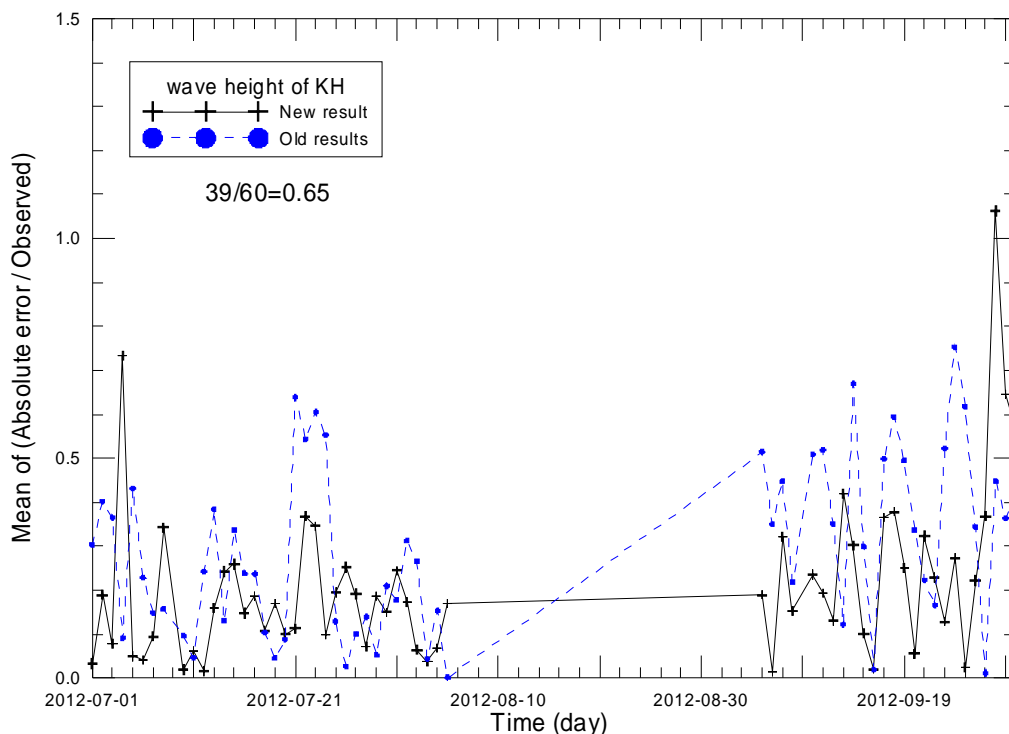


圖 3.19 波高模擬值與觀測值間絕對誤差與觀測值之比值日平均變化分布圖

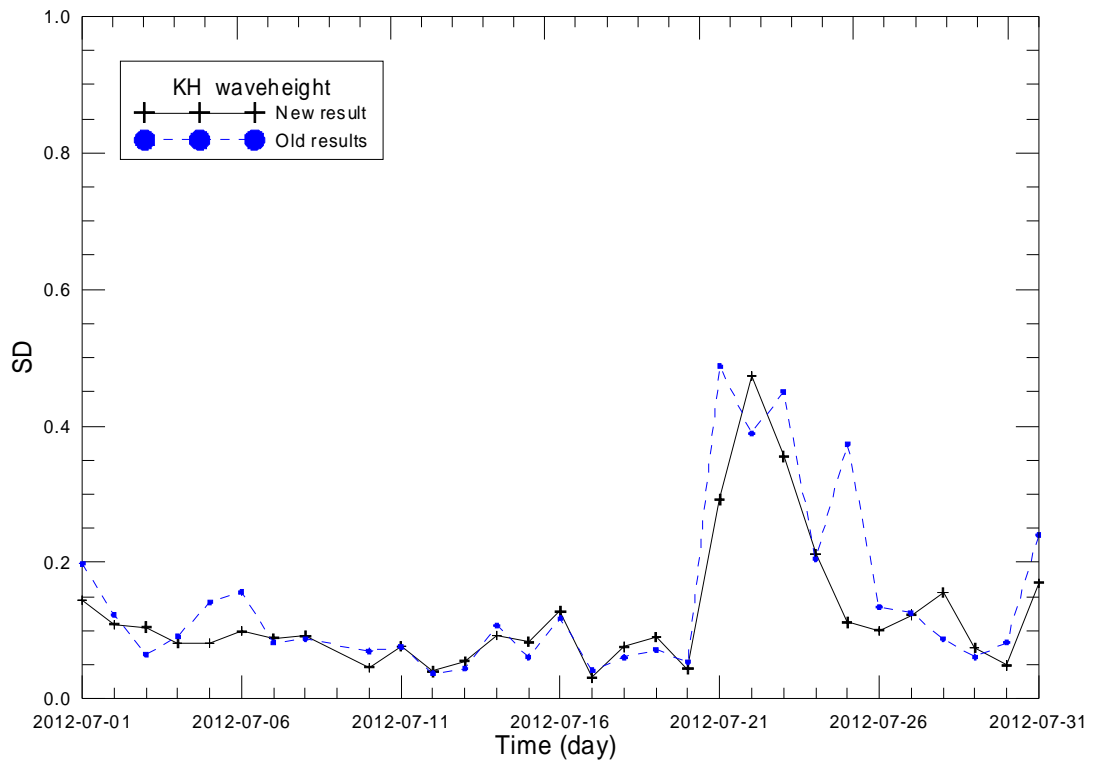


圖 3.20 波高模擬值與觀測值間標準偏差逐日變化分布圖

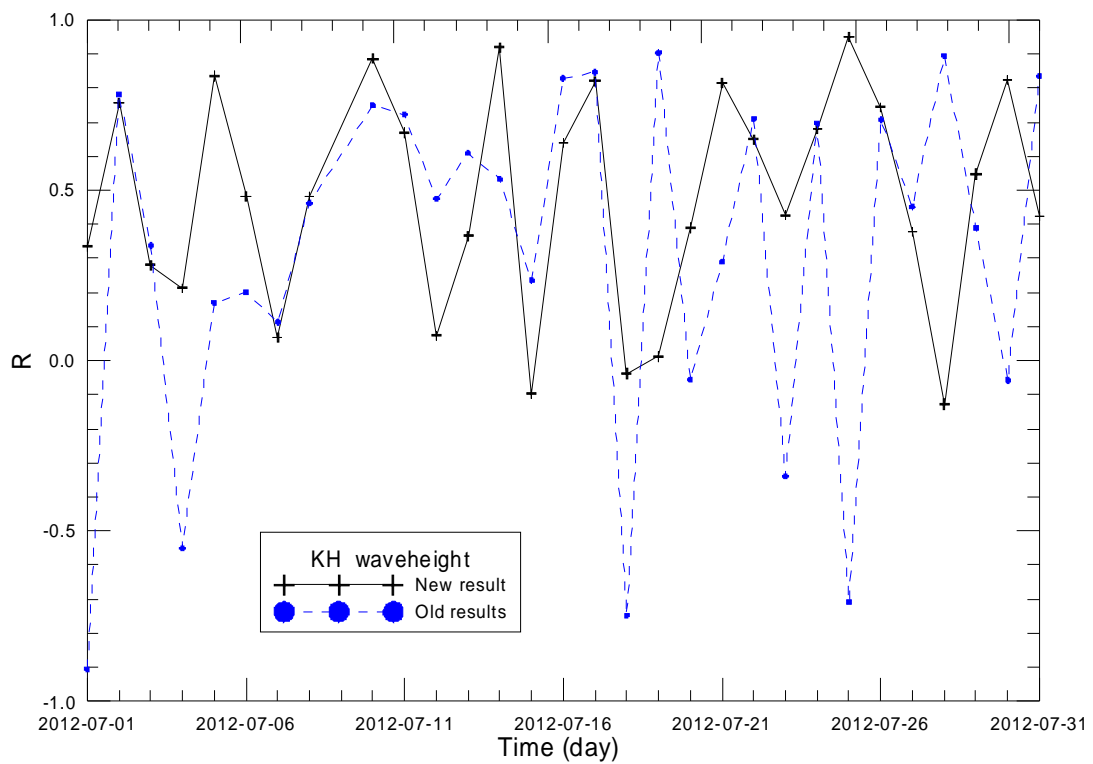


圖 3.21 波高模擬值與觀測值間相關係數逐日變化分布圖

3.3 港區近岸波浪場模擬研究

如 3.1 節所述，在 TaiCOMS 波浪場模擬架構下，小尺度港區近岸波浪場作業化模擬係以基隆港等七大商港港區為主；其目的為在中尺度網格風浪模擬之下，能夠針對各港區近岸海域模擬外海波浪向岸傳播過程之波場變化情形，藉以提供更詳細的波高分布資訊。同時在作業化模擬系統架構下，規劃出利用中尺度臺灣周圍海域風浪模組 72 小時作業化模擬預報資料，提供各港區近岸小尺度網格波浪場模擬所需的波浪條件(即波高週期及波向等)進行 72 小時波浪場作業化模擬，達成系統大、中、小尺度網格波浪模擬之垂直整合目標。

本年度計畫小尺度港區近岸波浪模組之研究係以安平港區及高雄港區為對象進行模組相關資料之更新與模擬研究。

3.3.1 安平港小尺度港區近岸波浪模組

目前安平港小尺度港區近岸波場模擬與建置工作係完成於 96 年度計畫，其模擬範圍在沿安平港域海岸線方向之距離為 10.0 km，離岸方向之距離為 5.0 km，如圖 3.22 所示，圖中顯示目前安平港港區小尺度近岸波模組模擬範圍僅及安平港港口海岸線附近，並未將安平港及安平漁港水域納入其模擬範圍之內。有關安平港港區近岸波模組採用的數值計算網格及其水深分布情形，如圖 3.23 所示，圖中參考網格之 x 軸向岸方向為正，y 軸沿海岸方向向上為正，網格間距為 10 m，格點陣列大小為 501×1001，其中參考網格原點之二度分帶座標(TW67)為 (162072.0, 2533583.0)，參考網格 x 軸與二度分帶座標軸之夾角為 60°。圖示點位 A ~ D 分別代表安平港港區近岸波浪模組模擬結果之輸出點位，其點位 A 代表港灣技術研究中心在安平港外海設置波浪觀測之位置(註：目前安平港外海波浪觀測位置已移至南防波堤外海附近，如圖 2.1 所示)。

針對上述安平港港區近岸波浪模組可能無法滿足現況港域條件等問題，本計畫具體研究內容包括：

(1)擴大小尺度網格模擬範圍：即將現有網格模擬範圍擴大至可將安平港及安平漁港等水域納入模擬範圍內，如圖 3.24 所示；圖中本年度更新後小尺度網格模擬範圍分別為沿海岸方向之距離增加至 14.0 km，離岸方向之距離向陸地及外海擴增為 10.4 km。

(2)更新及建置小尺度參考網格資料：因應模擬範圍擴大後，本計畫重新建置滿足安平港近岸海域波浪模擬需求之小尺度參考網格；經分別採取 20 m 及 10 m 等間距網格進行模擬測試後，本計畫選取 10 m 等間距建置之小尺度參考網格為安平港近岸港區波浪模組所用。同時針對新建置的小尺度參考網格，本計畫依據本年度蒐集的水深資料(如 2.2 所述)更新安平港小尺度參考網格之水深資料，如圖 3.25 所示。同前述圖中參考網格定義 x 軸向岸方向為正，y 軸沿海岸方向向上為正，網格間距為 10 m，格點陣列大小為 1401×1021，參考網格之原點座標(TW67)為(162072.0，2533583.0)，x 軸與二度分帶座標之 EW 方向座標軸夾角為 58.56°。圖示點位 A ~ D 及 O 代表安平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原在安平港外海設置波浪觀測之位置，點位 O 代表目前安平港外海波浪觀測位置。

(3)安平港區近岸波浪場模擬：本計畫針對 2012 年安平港外海波浪觀測資料，如附圖 4.1 所示，選取 5~8 月份觀測資料中波向介於 178° 至 300° 間波浪觀測資料進行小尺度網格波浪場模擬，並依據輸出點位 O 之模擬結果與波浪觀測資料比較，如圖 3.26 所示；顯示二者波高線性對應關係之決定係值為 0.925，此表示二者應具有高度的相關性，因此本計畫依據其對應之線性關係作為安平港小尺度網格波浪場模擬時波高輸入條件之校正係數。經由校正的波高輸入條件重新模擬安平港小尺度網格波浪場，可得到觀測點位 O 之波高模擬值與觀測值之對應關係如圖 3.27 所示，顯示仍有部份較大波高模擬條件之模擬結果與觀測值間仍存在較大的偏差。針對上述安平港小尺度網格波浪場模擬結果，本計畫選取兩組觀測波浪條件及其潮位觀測值之模擬結果，即 $H=2.45\text{m}$ ， $T=9.6\text{sec}$ ， $\theta=210^\circ$ (7 月 22 日 20 時，潮位 -0.123m) 及 $H=1.96\text{m}$ ，

$T=6.3\text{sec}$ ， $\theta=270^\circ$ （8月2日9時，潮位+0.548m），分別繪出其波場波高分布圖，如圖 3.28 及圖 3.29 所示；圖中帶有箭頭之向離岸方向曲線代表波浪傳播前進方向，沿海岸方向曲線代表等水深線。由波高分布情形得知波浪向岸傳播過程，受到海域地形變化的影響，出現局部區域波高變大的現象。

(4)安平港小尺度網格波場模擬作業化修正：在每日作業化模擬流程中，安平港小尺度網格波場模擬條件必需由中尺度網格風浪模擬結果提供，安平港外海每小時風浪模擬值包括示性波高、平均週期及平均波向等資料，系統始著手執行每日 72 小時波浪場模擬預報。有鑑於，以往作法僅以中尺度網格鄰近波浪觀測之格點模擬值為小尺度網格波浪場模擬條件。本年度研究除了以譜峰週期取代平均週期為模擬條件外，另外評估改以選取鄰近安平港小尺度網格外海邊界數個中尺度網格點，如圖 3.30 所示黑色圓點，取其風浪模擬值之平均值作為本計畫安平港小尺度網格波浪場模擬條件之可行性。

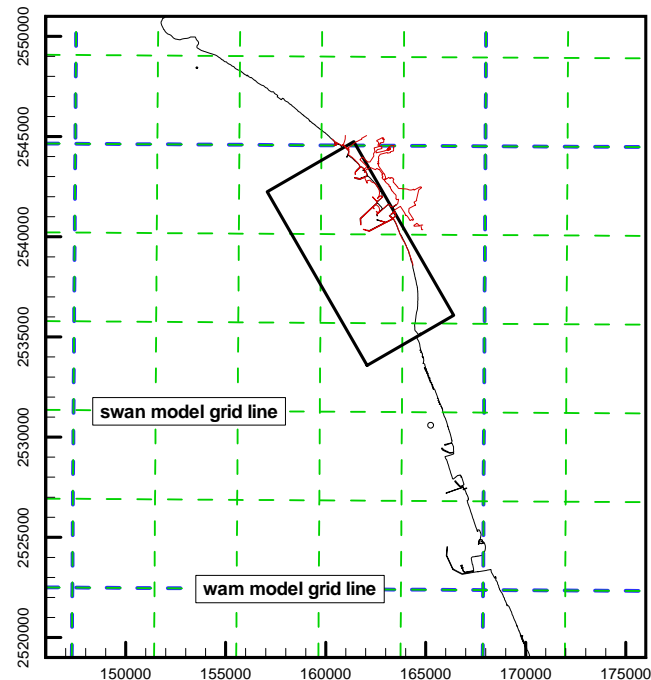


圖 3.22 安平港小尺度港區近岸波浪模組之模擬範圍圖

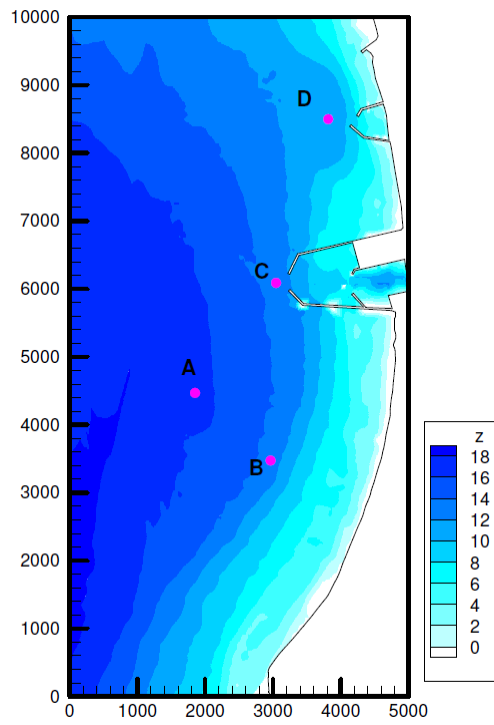


圖 3.23 安平港港區近岸波浪模組小尺度參考網格及地形水深分布圖

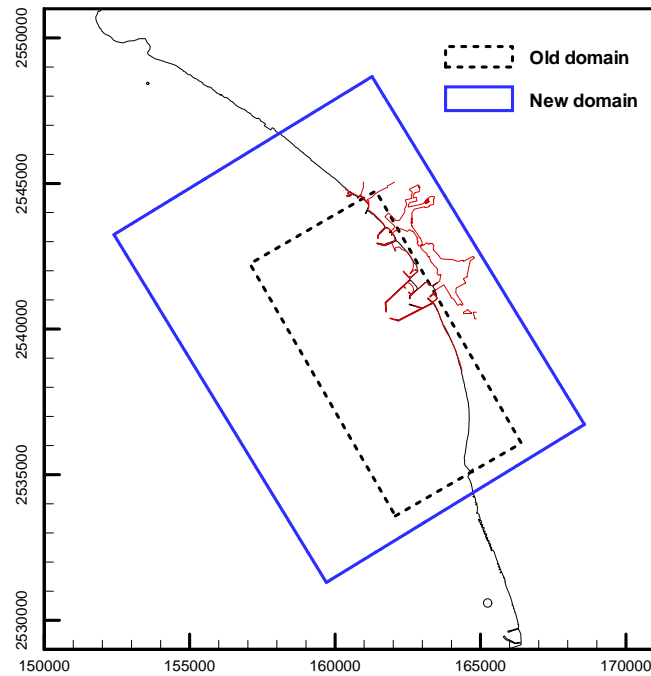


圖 3.24 本計畫安平港港區近岸波浪模組擴大模擬範圍圖

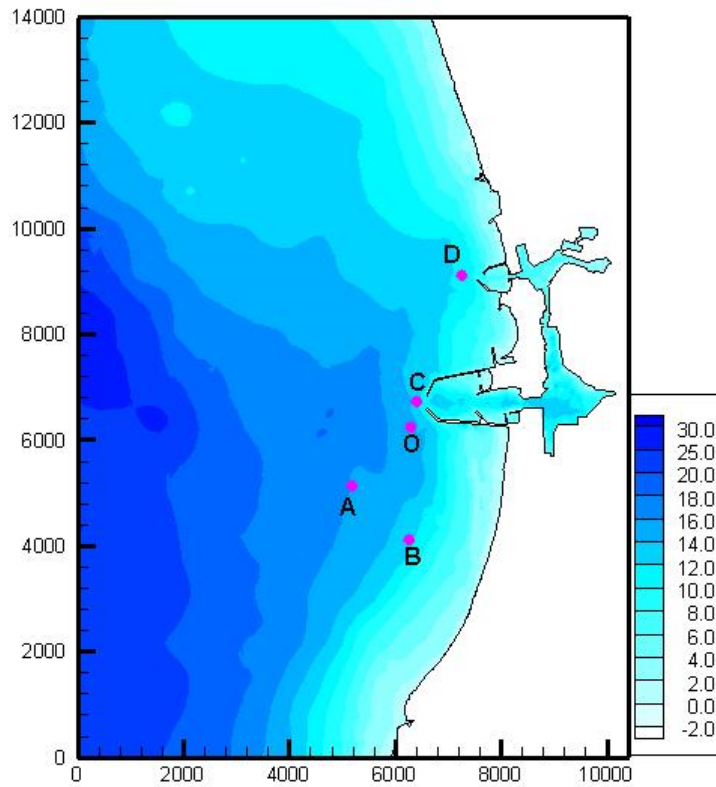


圖 3.25 本計畫安平港新建小尺度參考網格及地形水深分布圖

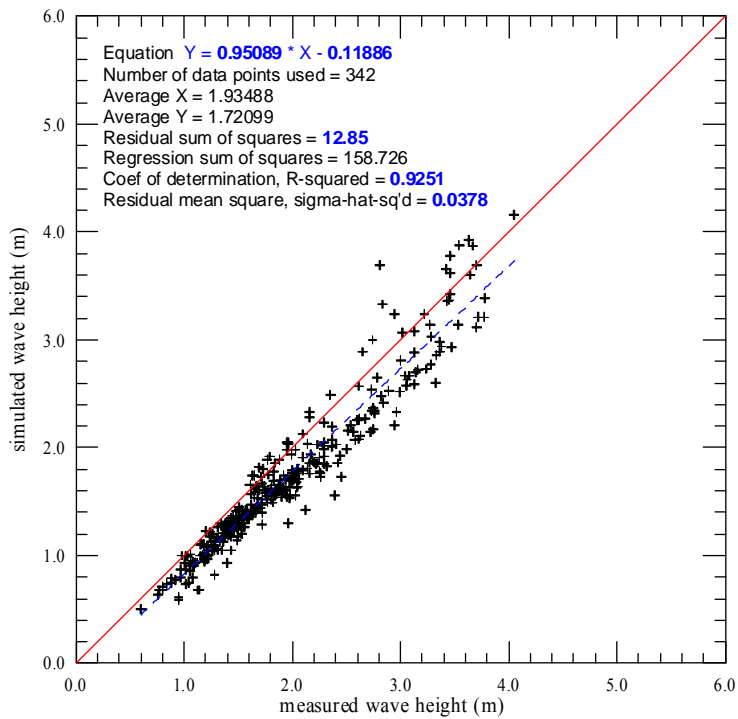


圖 3.26 安平港小尺度波浪場模擬結果，觀測點位 O 之波高模擬值 (縱座標)與觀測值(橫座標)之對應比較圖

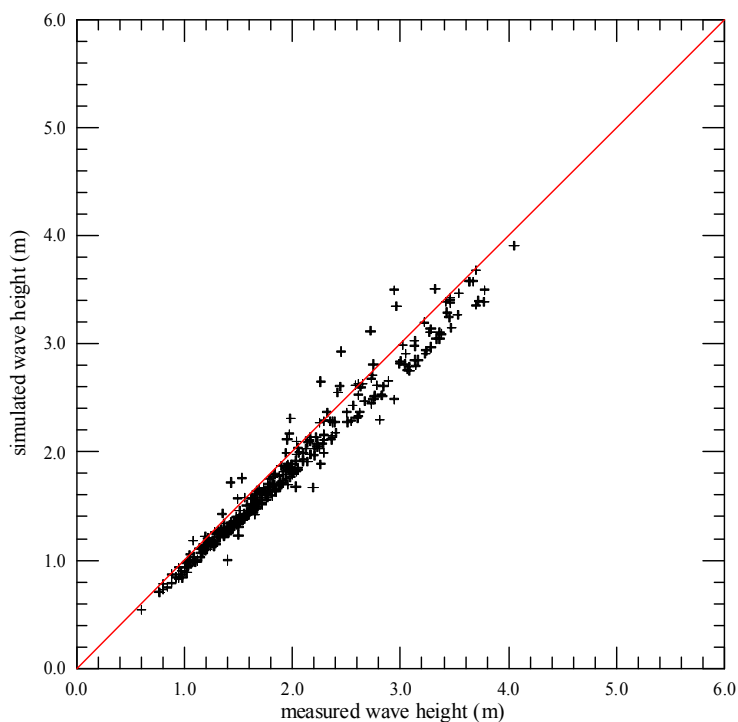


圖 3.27 波高條件校正之安平港波浪場模擬結果，觀測點位 O 之波高模擬值(縱座標)與觀測值(橫座標)之對應比較圖

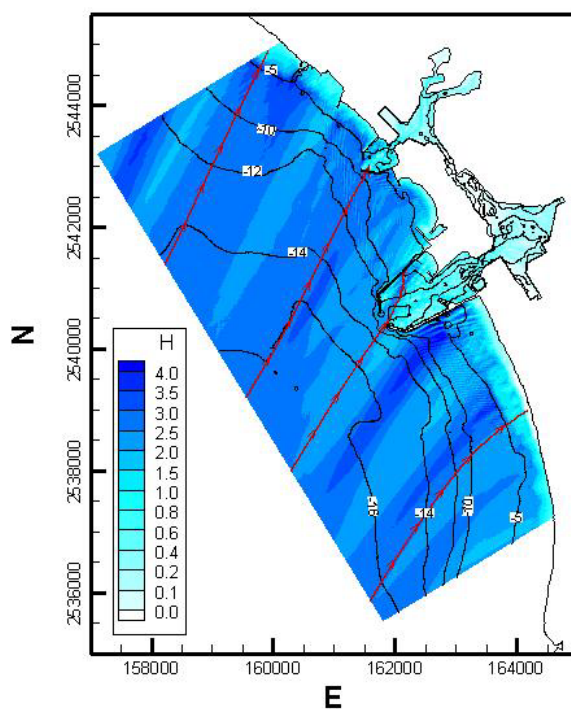


圖 3.28 安平港小尺度網格波浪場模擬結果之波高分布圖
($H=2.45\text{m}$, $T=9.6\text{sec}$, $\theta=210^\circ$)

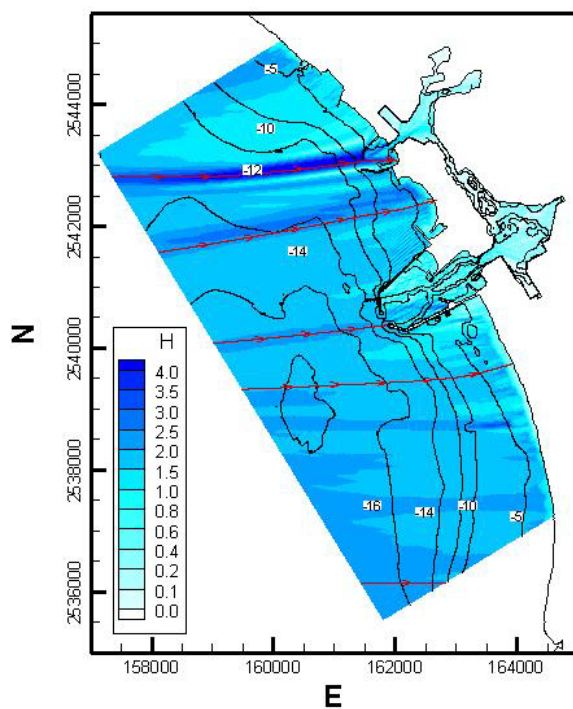


圖 3.29 安平港小尺度網格波浪場模擬結果之波高分布圖
($H=1.96\text{m}$, $T=6.3\text{sec}$, $\theta=270^\circ$)

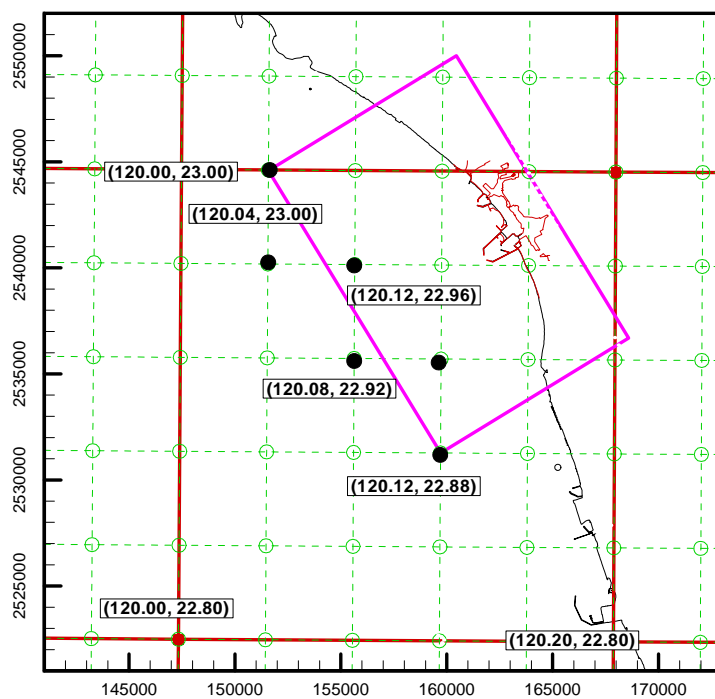


圖 3.30 安平港小尺度網格邊界與中尺度網格點之對應圖

3.3.2 高雄港小尺度港區近岸波浪模組

與前述安平港相同，本計畫高雄港小尺度港區近岸波場模擬與建置工作係於 96 年度計畫完成，其模擬範圍在沿高雄港域海岸線方向之距離為 17.0 km，離岸方向之距離為 8.0 km，如圖 3.31 所示，圖中高雄港小尺度參考網格原點之二度分帶座標(TW67)為(177877.0，2487555.0)，其 x 軸與二度分帶座標軸之夾角為 38.0°。小尺度網格之間距為 10m，網格點數目為 801×1701，如圖 3.32 所示，圖中點位 A~D 代表高雄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在高雄港外海設置波浪觀測之位置。

不同於前述安平港港區近岸波浪模組之研究，本計畫因高雄港港區近岸波浪模組在未變動小尺度網格之情況下，主要的改善研究內容僅局限於小尺度網格水深資料更新，以及增列潮位資料及譜峰週期(取代平均週期)為作業化模擬條件外；同樣地，本計畫亦針對鄰近高雄港小尺度網格外海邊界評估選取數個中尺度網格點，如圖 3.31 所示黑色圓點，取其風浪模擬值之平均值作為本計畫高雄港小尺度網格波浪場模擬條件之可行性。

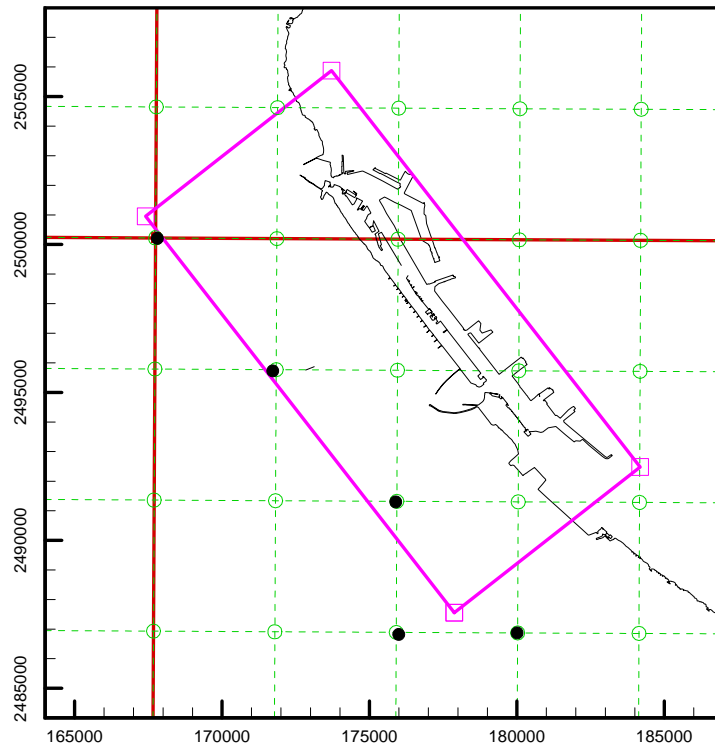


圖 3.31 高雄港小尺度港區近岸波浪模組之模擬範圍圖

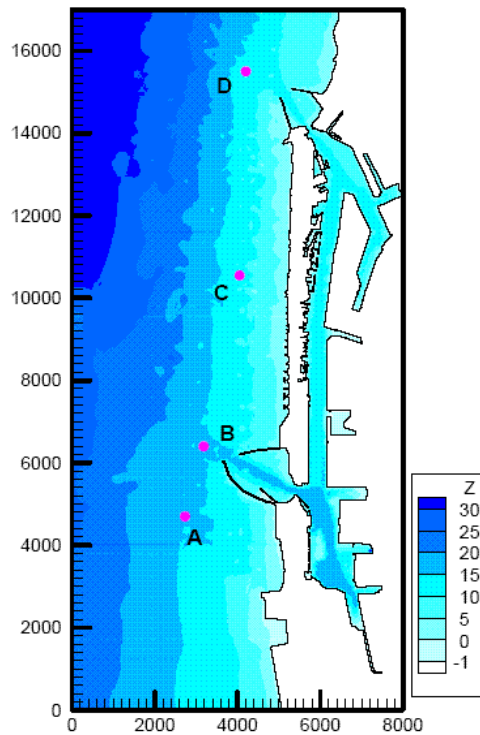


圖 3.32 高雄港小尺度網格之參考網格及地形水深分布圖

3.4 細尺度港域波浪場模擬研究

在 TaiCOMS 波浪模擬架構下，細尺度港域波浪模組主要用於颱風期間模擬各港口港內波浪狀況，藉以評估港域碼頭靜穩定狀況。本年度計畫研究內容，除了針對前期計畫「近岸海象數值模擬及預警系統之建立」(96 年~99 年)，已建置的安平港區及高雄港區港域波浪模組(單一港口數值計算網格)進行檢討外，另外，針對現有的港域模式是否適用於模擬具有雙開口港池，如安平港區及高雄港區等，之波浪場問題進行研究。

3.4.1 雙港口港池共振模擬驗證

為瞭解本計畫港域波浪模式理論(如 3.1.4 節所述)是否適用於模擬港池具有雙開口之波浪場，本計畫選取 Liu et al. (2003)雙港口耦合之理論解與本計畫港域波浪模式之數值模擬結果進行比較。圖 3.33 所示為 Liu et al. (2003)研究雙港口耦合問題之示意圖，圖中假設海岸線為一直線，相鄰兩矩形港池中心線間隔距離為 d ，兩矩形港池之長度分為 L_1 及 L_2 ，寬度分別為 $2b_1$ 及 $2b_2$ ， R 為本計畫港域波浪模式假想半圓邊界之半徑。在等水深條件下，各矩形港池末端波浪振幅放大率(amplification factor) \tilde{R} 之理論解如下：

$$\tilde{R}_j = \frac{U_j}{V_j} \quad , \quad j = 1, 2 \dots\dots\dots(3.62)$$

$$U_j = \cos(kl_m) + \frac{2kb_m}{\pi} \sin(kl_m) \ln\left(\frac{2\gamma kb_m}{\pi e}\right) - ikb_m \sin(kl_m) [1 - H_0^{(1)}(kd)] \dots\dots\dots(3.63)$$

$$V_j = \left[\cos(kl_j) + \frac{2kb_j}{\pi} \sin(kl_j) \ln\left(\frac{2\gamma kb_j}{\pi e}\right) - ikb_j \sin(kl_j) \right] \times \left[\cos(kl_m) + \frac{2kb_m}{\pi} \sin(kl_m) \ln\left(\frac{2\gamma kb_m}{\pi e}\right) - ikb_m \sin(kl_m) \right] \dots\dots\dots(3.64)$$

$$+ (kb_j)(kb_m) \sin(kl_j) \sin(kl_m) [H_0^{(1)}(kd)]^2$$

式中下標 $m = 1$ 或 2 ，但 $m \neq j$ ， k 為週波數， $H_0^{(1)}$ 為零階第一類漢克函數(Hankel function)， γ 為 Euler 常數($= 0.5772157\dots$)， $\ln(e) = 1$ 。

為驗證本計畫港域波浪模式數值計算結果之正確性，本計畫參考 Liu et al. (2003) 之計算案例：假設等水深條件為 5.5 m，考慮圖 3.33 所示相鄰兩個不同長度之矩形港池，其長度分別為 1000 m($=l_1$)及 500 m($=l_2$)，雙港口之間距 d 為 250 m，兩矩形港池寬度均為 100 m($=2b_1=2b_2$) 等。本計畫假設外海假想邊界半圓半徑 R_0 為 1000 m，據此建置三角形元素計算網格，如圖 3.34 所示，圖中有限元素計算網格係由 4654 個節點及 8994 個元素組成的。波浪模擬條件假設入射波波向為垂直海岸線(即正向入射之情況)，入射波振幅為 1.0 m，分別針對不同週期的波浪條件進行數值模擬。

一般探討港池共振問題大都採用港內波浪波高(或振幅)放大率與無因次參數 kl 之關係呈現， l 為港池特性長度；因此本計畫依據不同波浪週期模擬結果分別計算相鄰兩矩形港池末端中央節點之波高放大率($H/2H_0$ ， $H_0=2A^1$)與無因次參數 kl_1 之關係曲線， l_1 為長矩形港池之特性長度，如圖 3.35 及圖 3.36 所示。圖 3.35 所示為長矩形港池(#1)末端波浪放大率與無因次參數 kl_1 之關係曲線，圖中實線代表本計畫港域波浪模式之計算結果，圓形符號為理論解(Liu et al., 2003)之計算結果，顯示除了放大率變化曲線尖峰值發生位置略微偏移外，本計畫模式數值計算結果與理論解相當吻合；圖 3.36 所示為短矩形港池(#2)末端波浪放大率與無因次參數 kl_1 之關係曲線，顯示短矩形港池之模式數值計算結果與理論解計算結果間雖然存在有較顯著的誤差，但二者波浪放大率整體變化趨勢仍具有高度的一致性。

就各矩形港池波浪放大率之整體變化趨勢而言，本計畫港域波浪模式計算結果與理論解析解計算結果是具有高度一致性；但對於放大率曲線尖峰值發生的波浪條件而言，模式數值計算結果與理論解析解之間存在有一偏移現象，此一偏移現象在長度較短的港池內會較為突顯。

另外，有關相鄰雙港口耦合效應最顯著的現象應屬當入射波浪條

件接近或等於某一港口共振條件時，不僅會造成該港口波浪振幅放大率變大，同時會導致另一鄰近的港口波浪振幅放大率突然變小(出現極小值)。依據數值計算結果顯示上述模擬案例，長、短矩形港池之第零共振模組分別發生於波浪週期等於 600 sec 及 320 sec 附近，此時矩形港池內部及港口附近之波高(或振幅)分布情形分別如圖 3.37 及圖 3.38 所示。

由以上數值計算結果與理論解之比較顯示，本計畫港域波浪模式應能夠應用於模擬雙開口港池共振問題上。

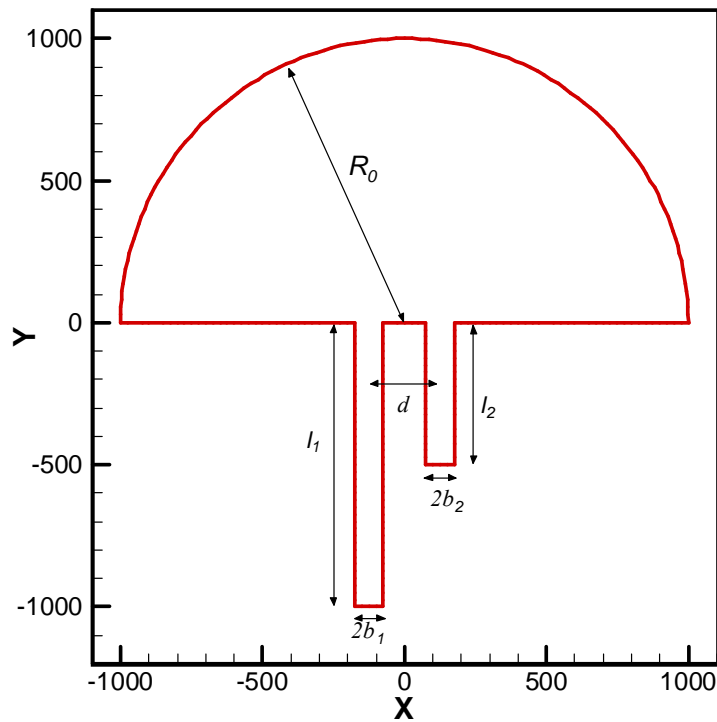


圖 3.33 雙港口耦合問題及相關參數示意圖

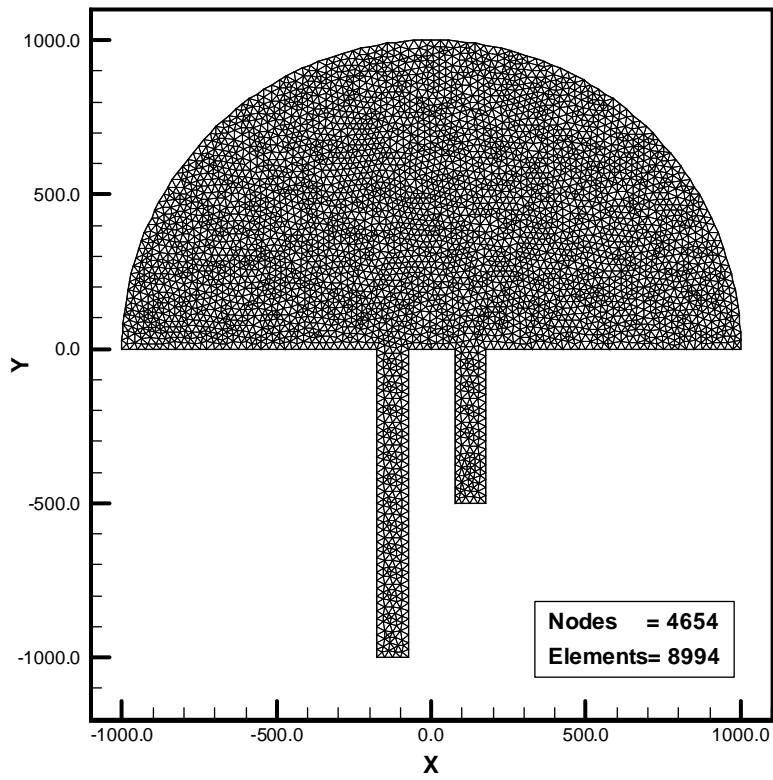


圖 3.34 本計畫雙港口波浪場數值計算有限元素網格配置圖

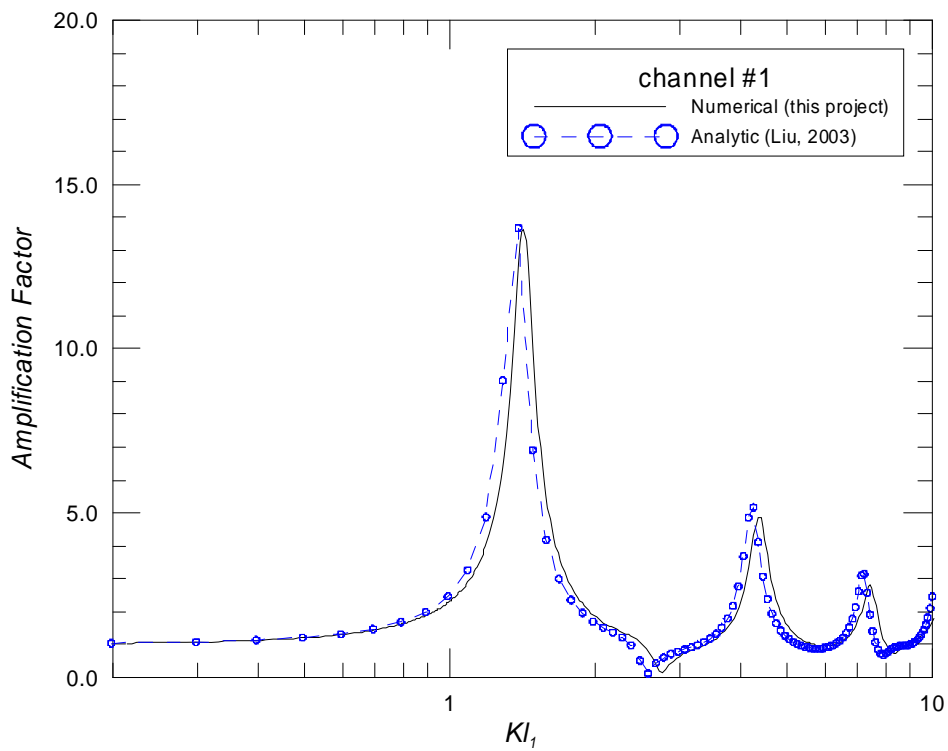


圖 3.35 長矩形港池(#1)之波浪放大率與無因次參數(kl_1)之關係圖

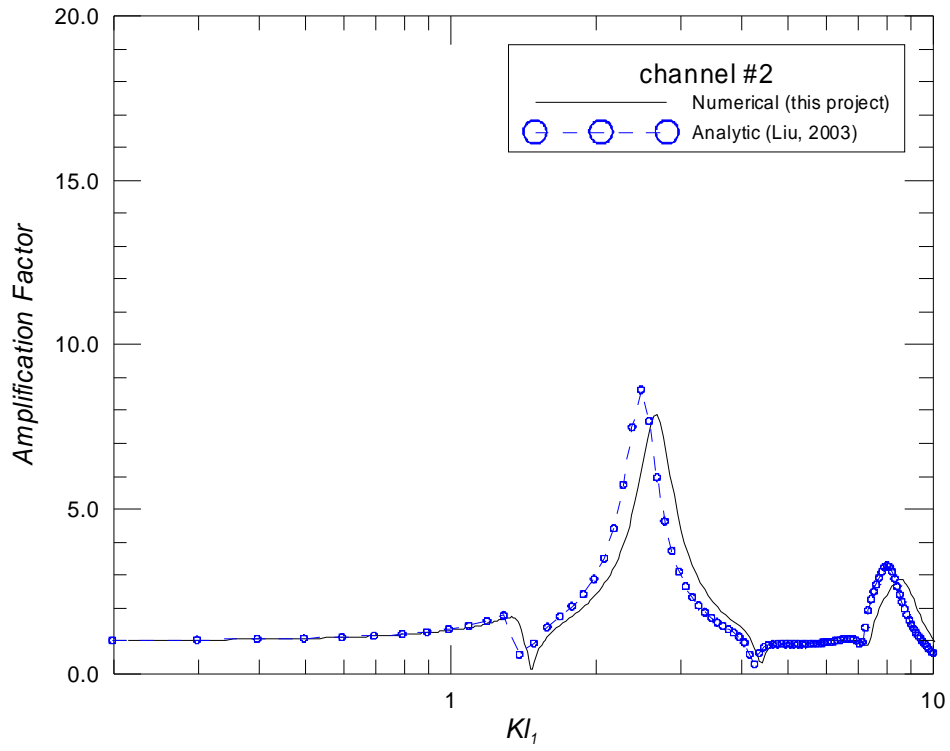


圖 3.36 短矩形港池(#2)之波浪放大率與無因次參數(kl_1)之關係圖

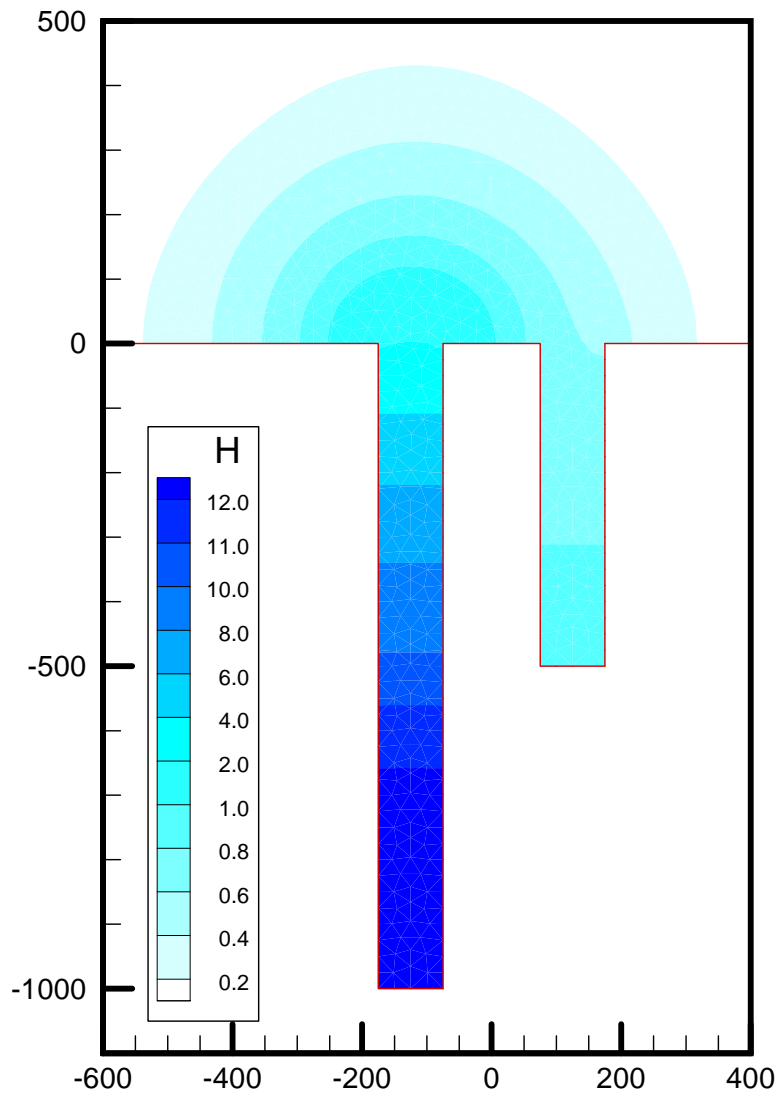


圖 3.37 波浪週期 600 sec 波浪場模擬結果之波高分布情形圖

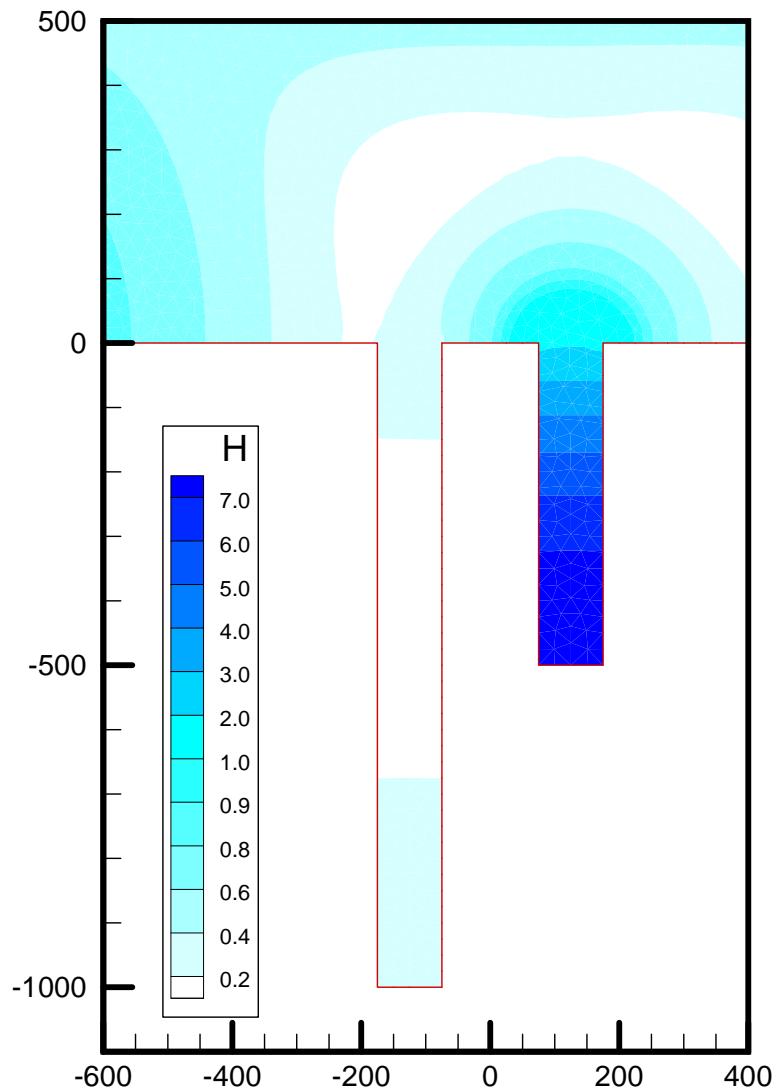


圖 3.38 波浪週期 320 sec 波浪場模擬結果之波高分布情形圖

3.4.2 安平港區細尺度港域波浪模組之建置

有鑑於前期計畫執行期間安平漁港舊港口重建工程尚未完工，因此安平港區港域波浪模組主要以安平港管轄水域為依據而建置，其波浪場模擬範圍如圖 3.39 所示，顯示既有的模擬範圍不僅港口外海域未納入安平漁港舊港口，且與安平港管轄水域相通之安平漁港水域亦未被考慮。

本年度計畫基於安平漁港舊港口已通航，以及外海波浪經由舊港口進入漁港內勢必會對目前的安平港水域造成某種程度的影響等考量，因此本計畫將針對安平(國際商)港水域、安平漁港水域以及重新開闢的舊港口航道設施研擬適當的波浪場模擬範圍，重新建置安平港港域波浪模組。本計畫初步研擬的安平港港域波浪模組模擬範圍如圖 3.40 所示，圖中外海假想邊界半徑為 2750 m，外海最大水深達為 17 m。本計畫初步建置的三角元素粗網格配置參考圖 3.41 所示，其中有限元素粗網格共計有 5440 個節點及 10002 個元素。本計畫安平港區港域波浪模組實際採用的波浪場計算網格配置有二：分別為由 44775 個節點及 86910 個元素所組成的細網格(I)以及由 107016 個節點及 210394 個元素組成的細網格(II)，前者適用於波浪週期 20 sec 以上的波浪條件，後者適用於波浪週期 10 sec 以上的波浪條件。

安平港區港域波浪模組之模式邊界型態除了港口防波堤結構體及船舶泊靠之碼頭區外，尚包括(1)沙灘海岸分布於港口外海岸及安平港北外防波堤與北內堤之間，(2)土堤結構邊界分布於安平港內兩側待建碼頭區域，(3)與運河及竹溪相通之邊界共三處。其中與運河及竹溪相通之邊界可視為完全透水邊界，假設反射率為 0；碼頭區則假設屬於全反射邊界，即反射率等於 1；沙灘海岸假設具有高度消波特性，因此假設邊界反射率等於 0.5；其餘防波堤結構及土堤結構等邊界分別假設具有不同程度之消波特性，其反射率約介於 0.6~0.8 之間。

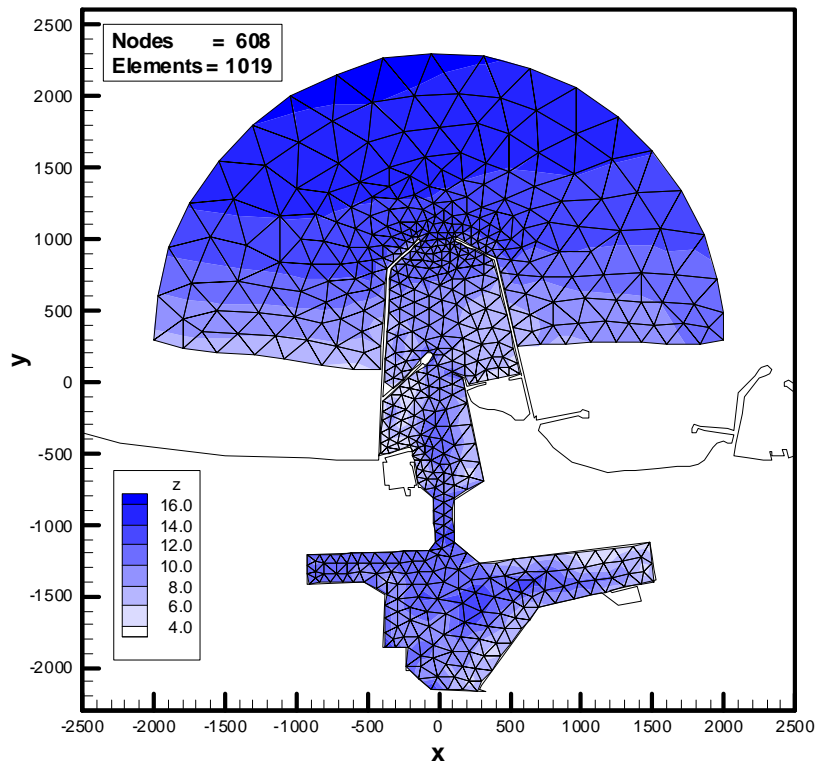


圖 3.39 安平港區港域波浪模組之模擬範圍及水深分布情形圖

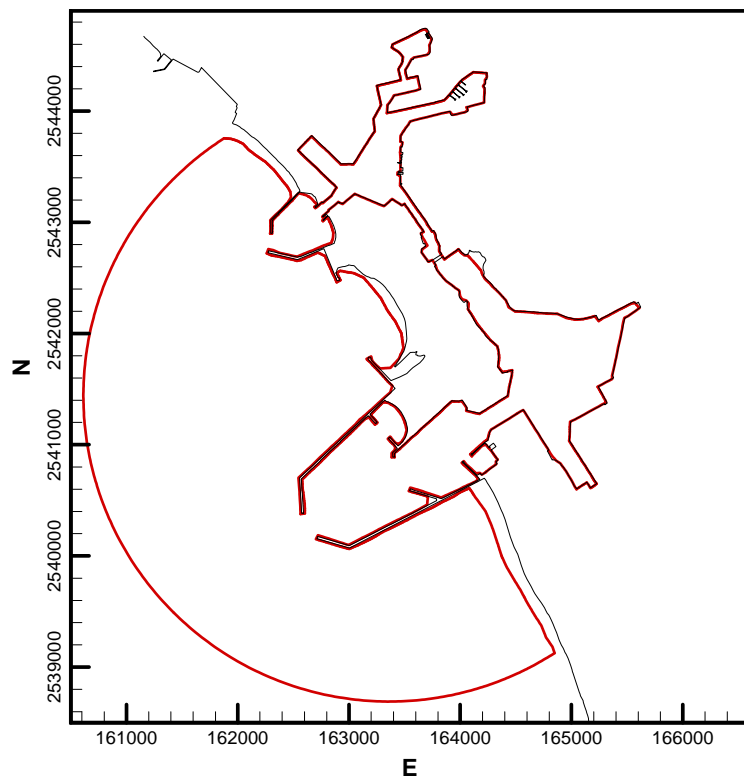


圖 3.40 安平港區港域波浪模組更新後之模擬範圍圖

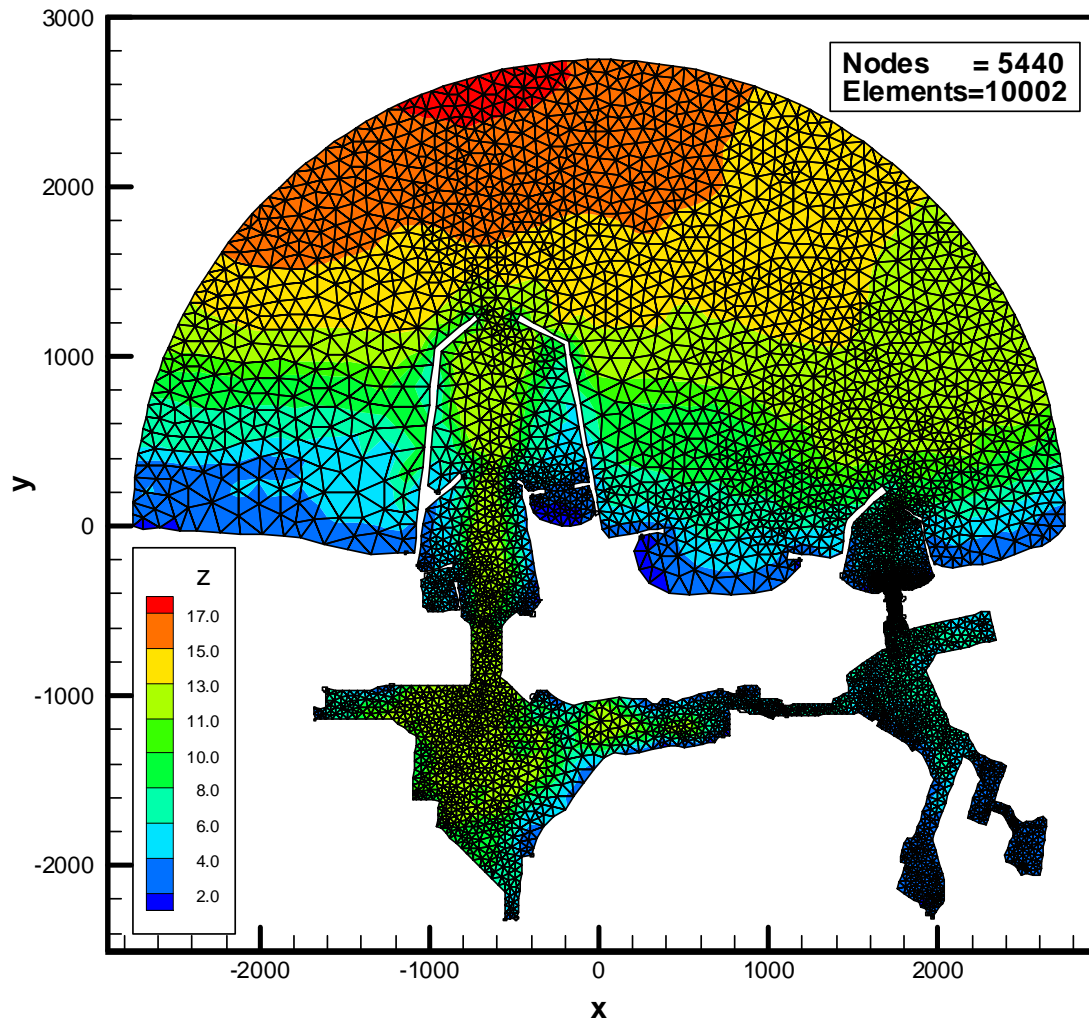


圖 3.41 安平港區港域波浪模組更新後之粗網格配置及水深分布情形圖

3.4.3 安平港區港域波浪場共振現象探討

為瞭解安平港與安平漁港重要水域可能發生共振現象之波浪週期，本計畫利用前述由 44775 個節點及 86910 個元素所組成的有限元素細網格(I)進行相關數值模擬工作。在波浪模擬條件上假設入射波振幅為 1.0，入射波波向考慮垂直入射港口之波向，波浪週期計算範圍介於 20 sec ~ 60min 之間共計 341 組。另在模式參數設定上，假設海岸線及港池岸壁反射係數 $K_r=1.0$ ，與運河及竹溪相連之邊界 $K_r=0$ ，底床摩擦係數 $\mu=0.001$ ，港池特性長度 l 為 4000 m。

針對港域波浪模擬結果，本計畫除了儲存含波高及相位二維平面資料供波浪場繪圖使用外，另針對安平港與安平漁港水域分別選取鄰近安平漁港舊港口之水景公園(A)、漁港區(B)、漁人碼頭區(C)、遊艇碼頭區(D)、以及鄰近安平商港港口之第四海巡隊停泊區(E)及客貨碼頭區(G)等水域，如圖 3.42 所示，計算其岸壁波高放大率與無因次參數 kl 之關係曲線，如圖 3.43 及圖 3.44 所示。

依據模擬結果得知：安平漁港水域之水景公園(A)、漁港區(B)及鄰近安平港港口之第四海巡隊泊區(E)因均屬較為封閉且形狀較規則之水域，故港池共振引起的波高放大率相當顯著；其中水景公園水域(A)出現顯著共振現象對應的外海波浪週期分別約為 350s、174s、116s 及 65.5s，漁港區水域(B)發生顯著波高放大率對應的外海波浪週期分別約為 350s、174s、116s 及 37.5s，顯示漁港區因緊鄰水景公園二者發生共振現象之波浪週期相關性甚高；至於，鄰近安平商港港口之第四海巡隊泊靠區(E)，其發生顯著港池共振現象對應的外海波浪週期分別約為 385s、220s、55.5s 及 41.5s 等週期，此結果與前述水景公園與漁港區發生共振現象之波浪週期有所差異。

此外，遊艇碼頭區(D)雖然屬於矩形規則形狀水域，但在面對可能發生共振影響之波浪週期如 340s、136s、131s 及 114s 等作用下，港池波高放大率最大值約在 2.0 左右(屬於近似全反射狀況)，未出現顯著放大效應，此可能與其水域開口直面對連接安平港水域之支航道有關。另在安平港客貨碼頭區(G)亦因面對的水域較為廣闊，且港池形狀較為不規則，故其波高放大率並無顯著放大的現象發生。上述針對局部水域波高放大率推論可能引起局部水域共振的波浪週期，基本上均屬於週期相當長之波浪，其發生於安平海域的機率應屬相當渺小。

整體安平港與安平漁港水域亦因港池形狀的不規則性，導致本計畫模式模擬週期範圍內僅出現整體港池水域發生近似全反射狀的波高分布，而未出現整體港池水域發生顯著共振現象之波高分布。

針對安平港域長週期波浪模擬結果之波高分布情形，本報告選取波浪週期 20 sec、25 sec 及 30 sec 之模擬結果分別繪出波高分布情形，如圖 3.45 至圖 3.47 所示。

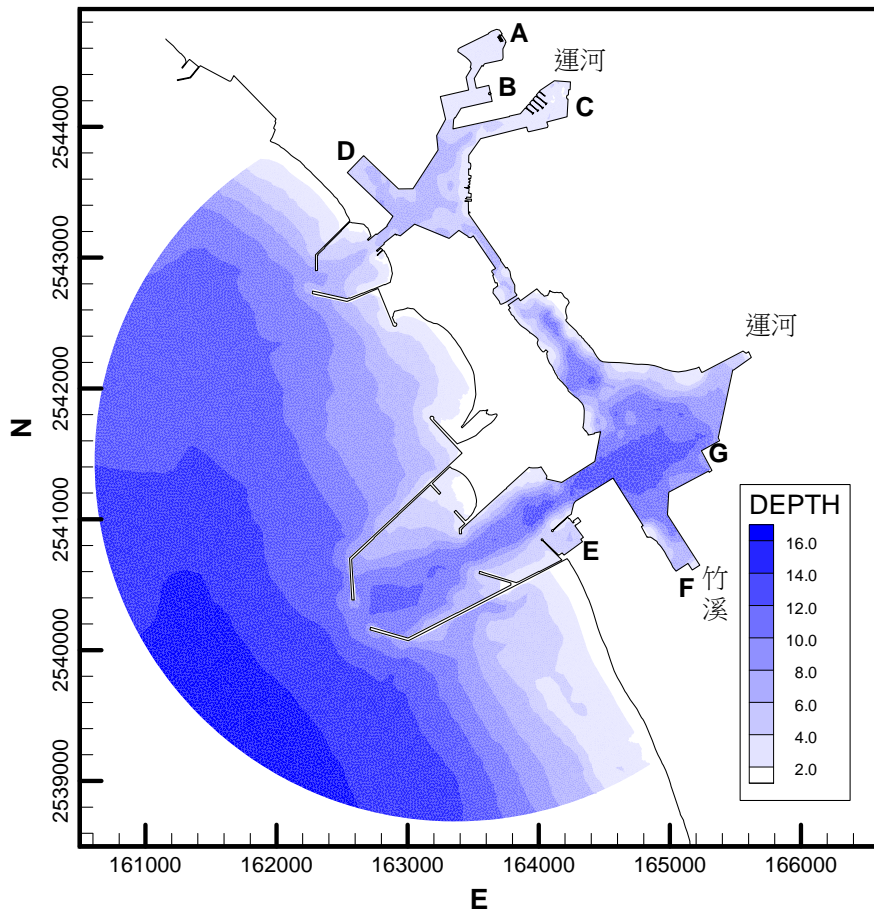


圖 3.42 安平港區港域波浪模擬結果之波高檢核點位置示意圖

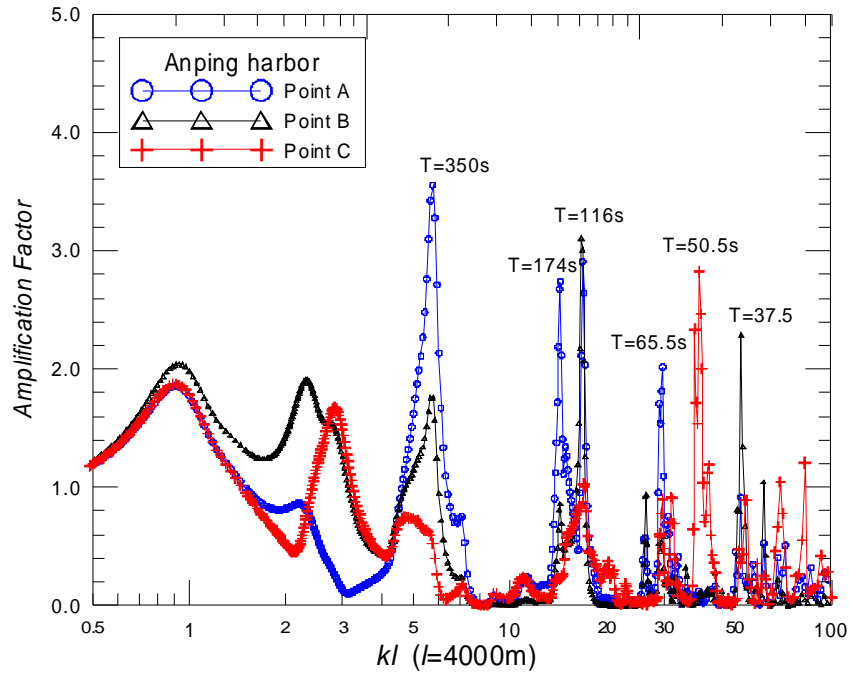


圖 3.43 安平港區港域波浪模擬結果之波高檢核點位置示意圖

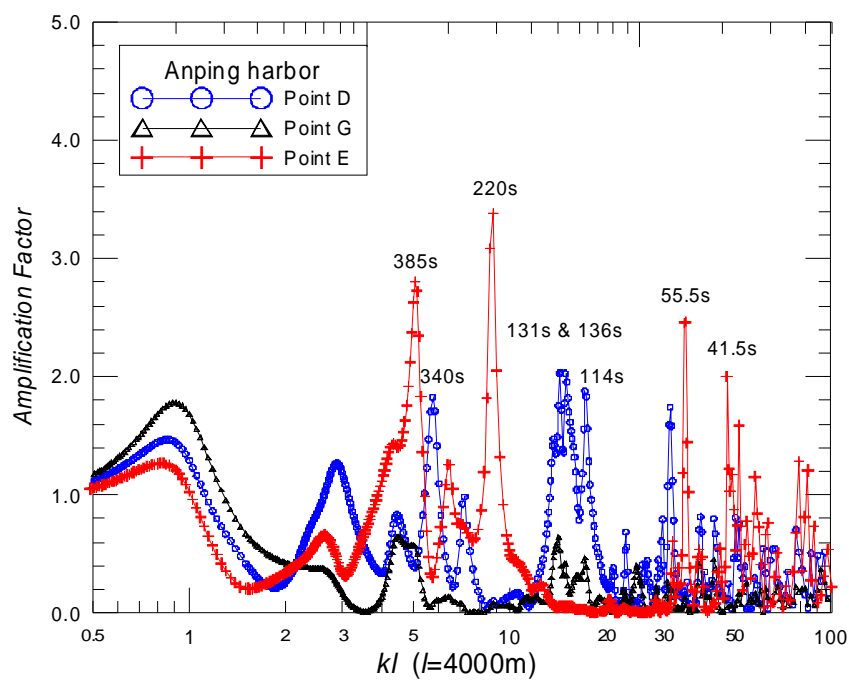


圖 3.44 安平港區港域波浪模擬結果之波高檢核點位置示意圖

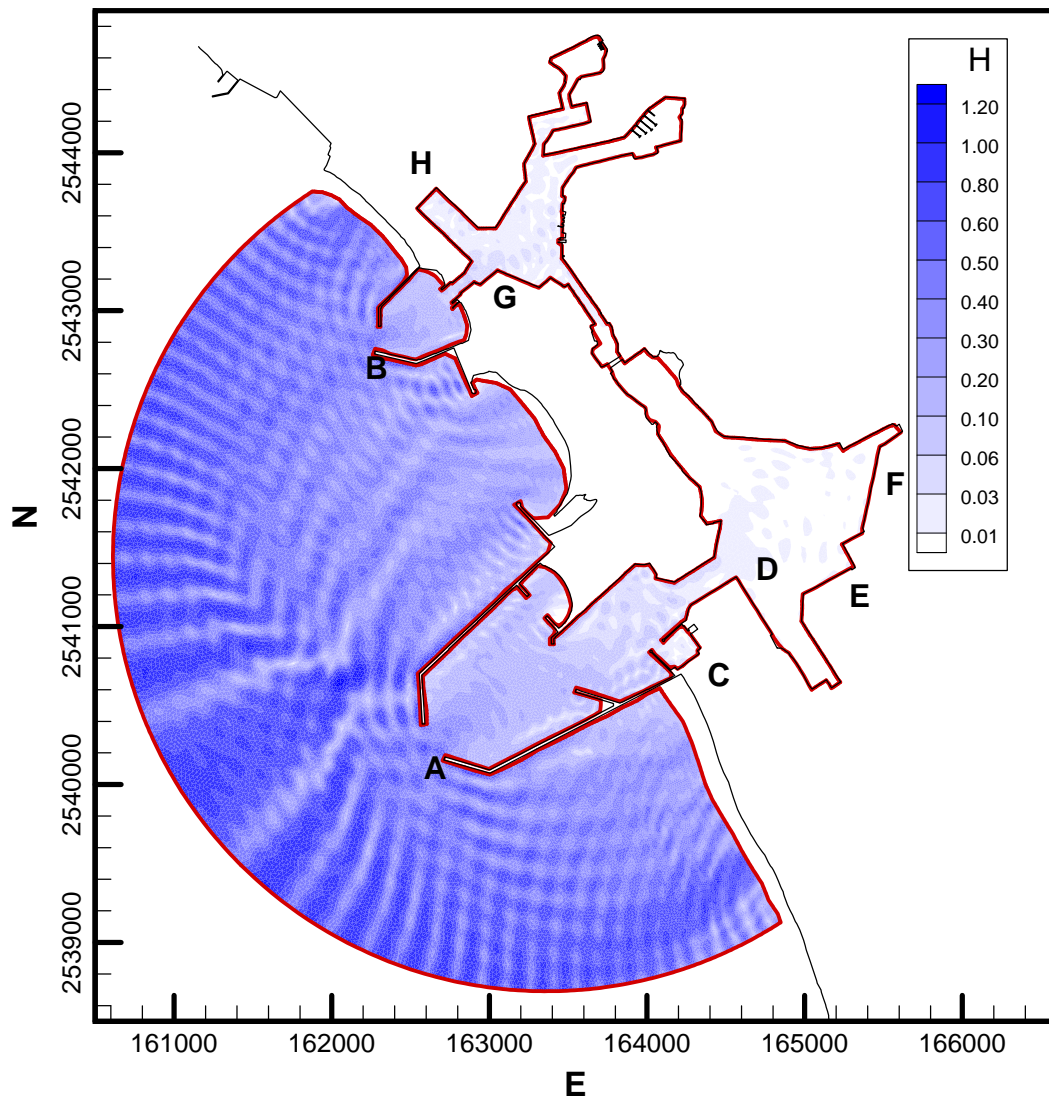


圖 3.45 安平港區港域波浪模擬結果之波高分布情形(週期 20 sec)

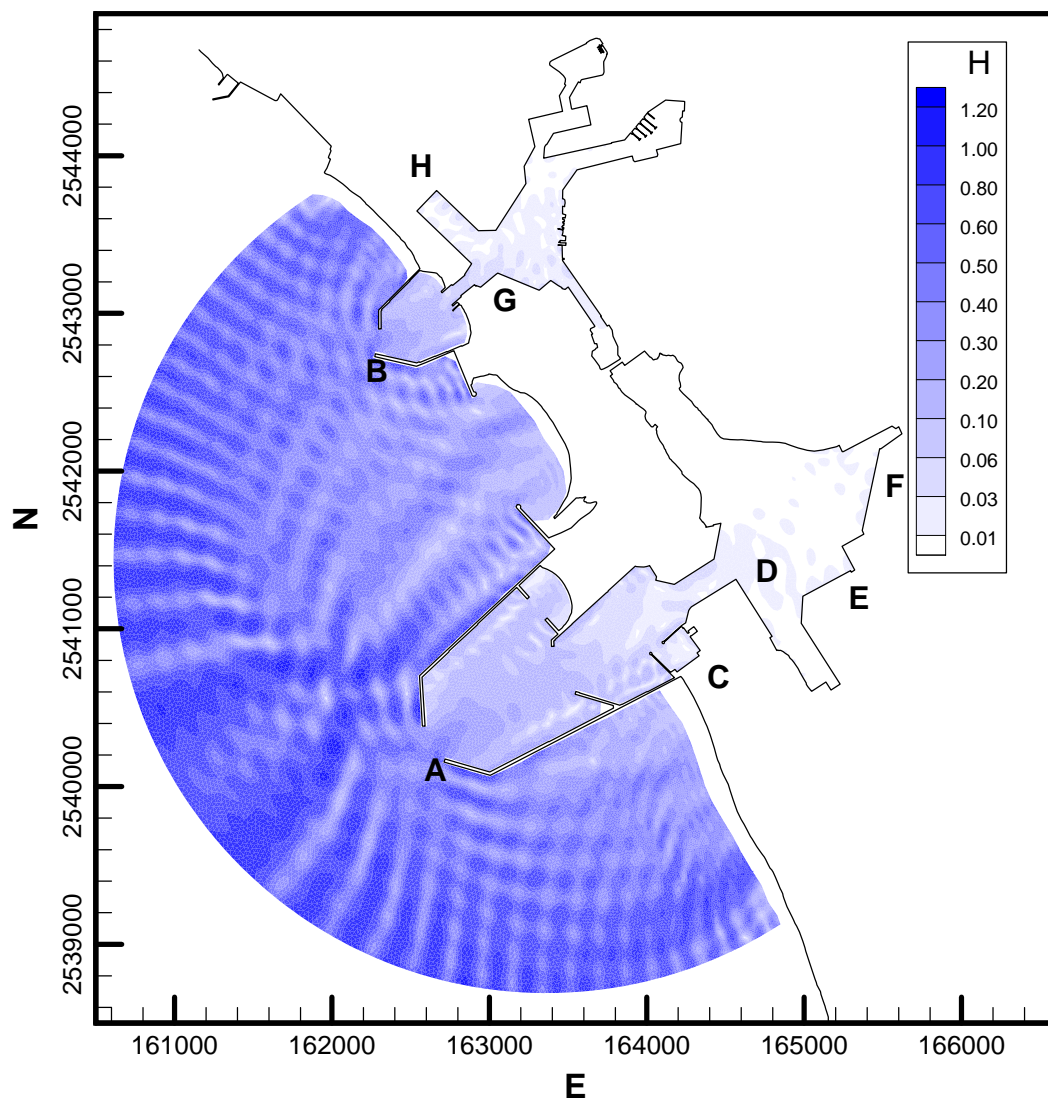


圖 3.46 安平港區港域波浪模擬結果之波高分布情形(週期 25 sec)

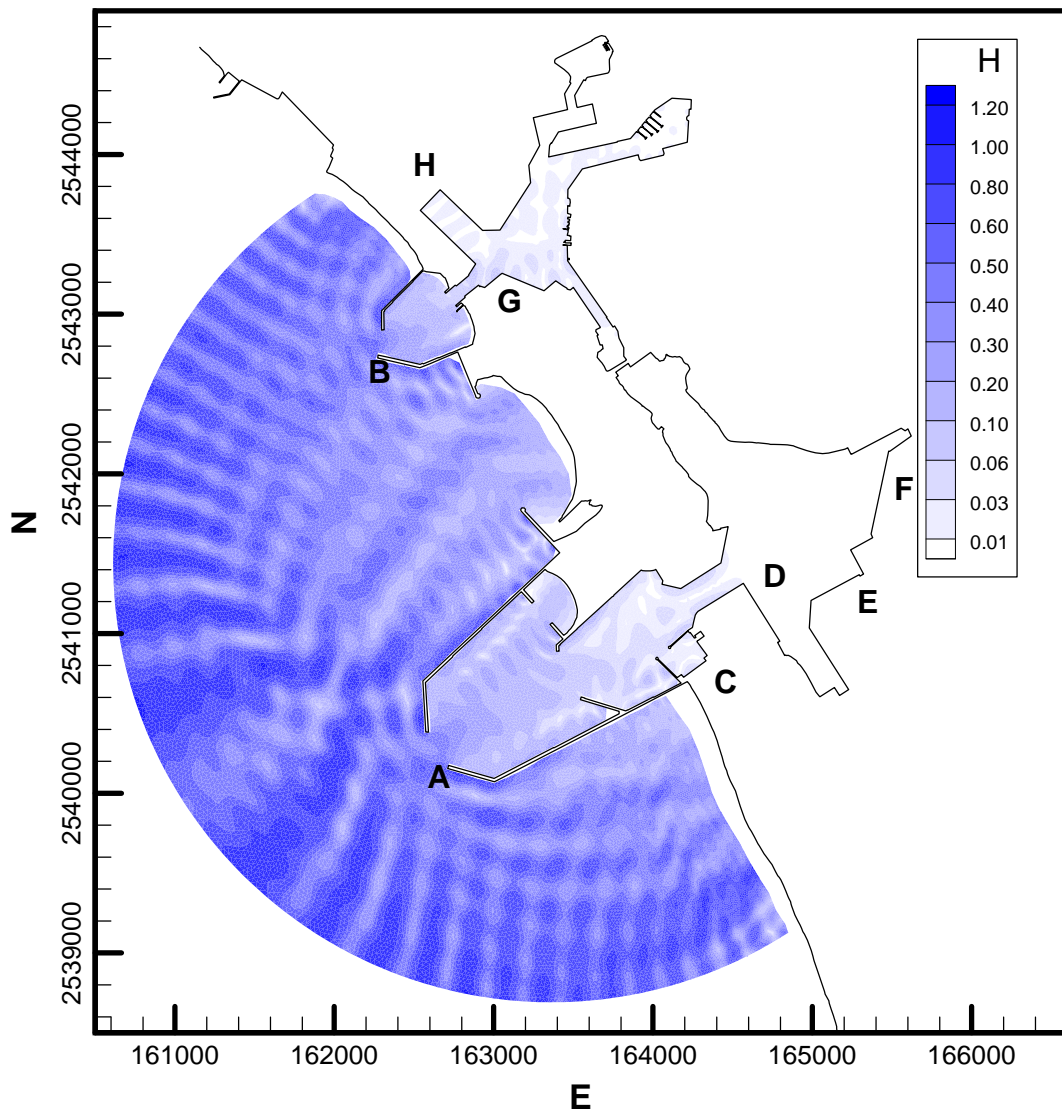


圖 3.47 安平港區港域波浪模擬結果之波高分布情形(週期 30 sec)

3.4.4 高雄港區細尺度港域波浪模組之建置

如圖 3.48 所示高雄港擁有兩個港口(一港口及二港口)供船舶進出，與前述安平港及安平漁港水域相似，唯高雄港兩港口相距長達 9km，遠大於安平港及安平漁港港口間距 2.5km，實不易採取與安平港細尺度港域波浪模組之建置方式，建置足以含蓋兩港口模擬範圍之細尺度有限元素網格。另依據 Liu et al. (2003)研究結果得知雙港口耦合效應會隨著相鄰兩港口之距離增加而降低，因此本計畫乃遵循以往作法將高雄港細尺度港域波浪模組分為一港口及二港口兩個模擬範圍，如

圖 3.49 所示，分別建置有限元素計算網格。其中一港口外海半圓有限領域之半徑為 2,000 m，外海半圓最大水深達為 15 m；二港口外海半圓有限領域之半徑為 2,800 m，外海半圓最大水深達為 18 m。

依據一港口及二港口模擬範圍，本計畫初步建置的三角形元素粗網格分別如圖 3.50 及圖 3.51 所示，其中一港口有限元素粗網格係由 3111 個節點及 5663 個三角形元素所組，二港口有限元素粗網格係由 1600 個節點及 2699 個三角形元素所組成。本計畫再依據粗網格及其水深資料進一步以波浪週期為 10 sec 條件產生滿足港域波浪模式精確度要求的有限元素細網格，其中一港口有限元素細網格共計有 64,838 個節點及 126,709 個三角形元素，二港口有限元素細網格共計有 109,157 個節點及 214,486 個三角形元素。

高雄港區港域波浪模組之模式邊界型態除了港口防波堤結構體及船舶泊靠之碼頭區外，尚包括沙灘海岸、礁岩海岸、與愛河及前鎮河相通之邊界以及假想港域邊界等。其中與愛河及前鎮河相通之邊界可視為完全透水邊界，假設反射率(K_r)為 0；另一港口及二港口港域模擬範圍與港區水域交界之假想邊界亦視為完全透水邊界，並假設其反射率為 0；碼頭區則假設屬於近似全反射邊界，假設反射率等於 0.99；沙灘海岸假設具有高度消波特性，因此假設邊界反射率等於 0.7；其餘防波堤結構及礁岩海岸等邊界分別假設具有不同程度之消波特性，其反射率約介於 0.85 ~ 0.9 之間。

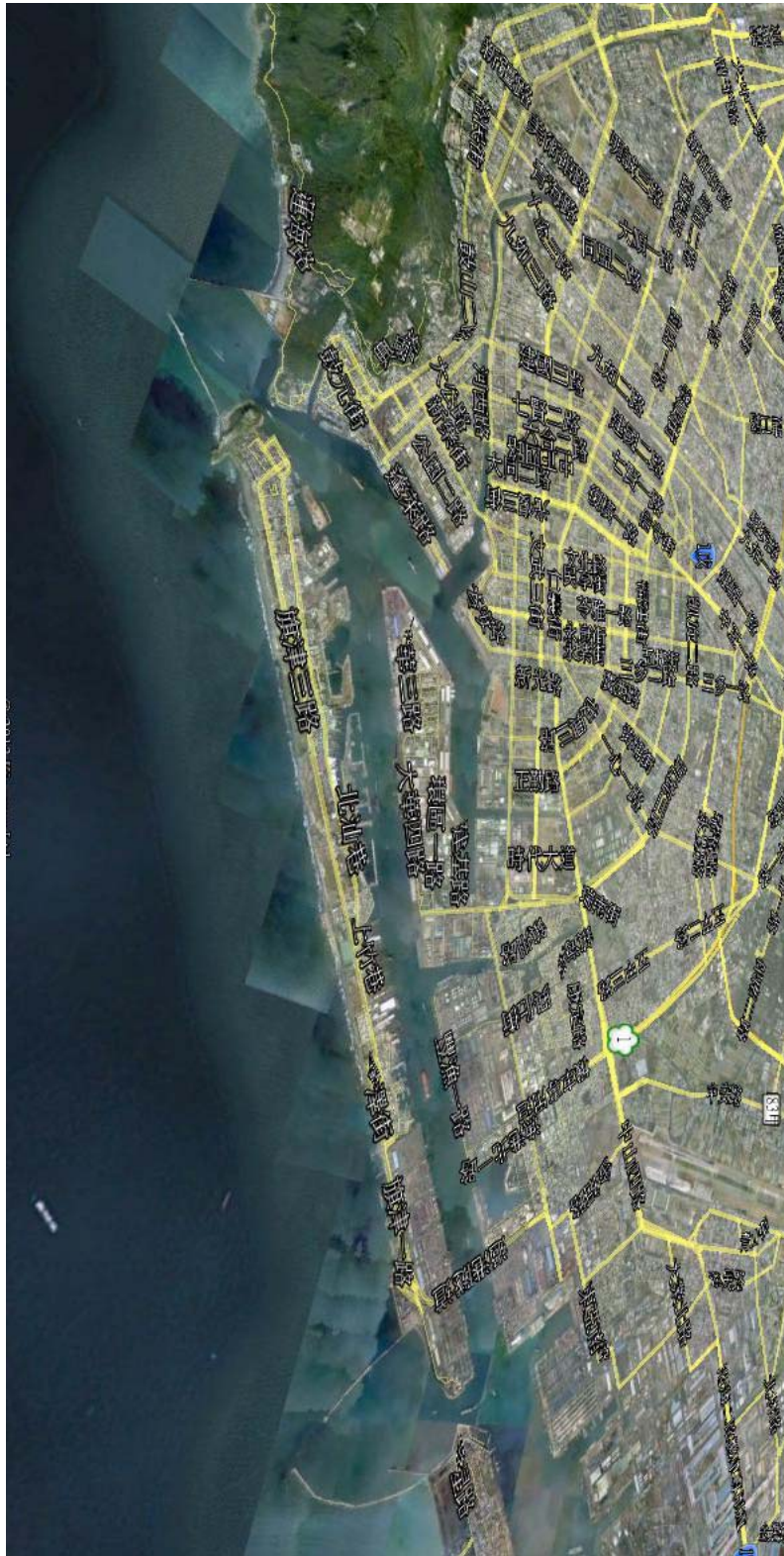


圖 3.48 高雄港港區範圍影像圖

資料來源：Google 地圖

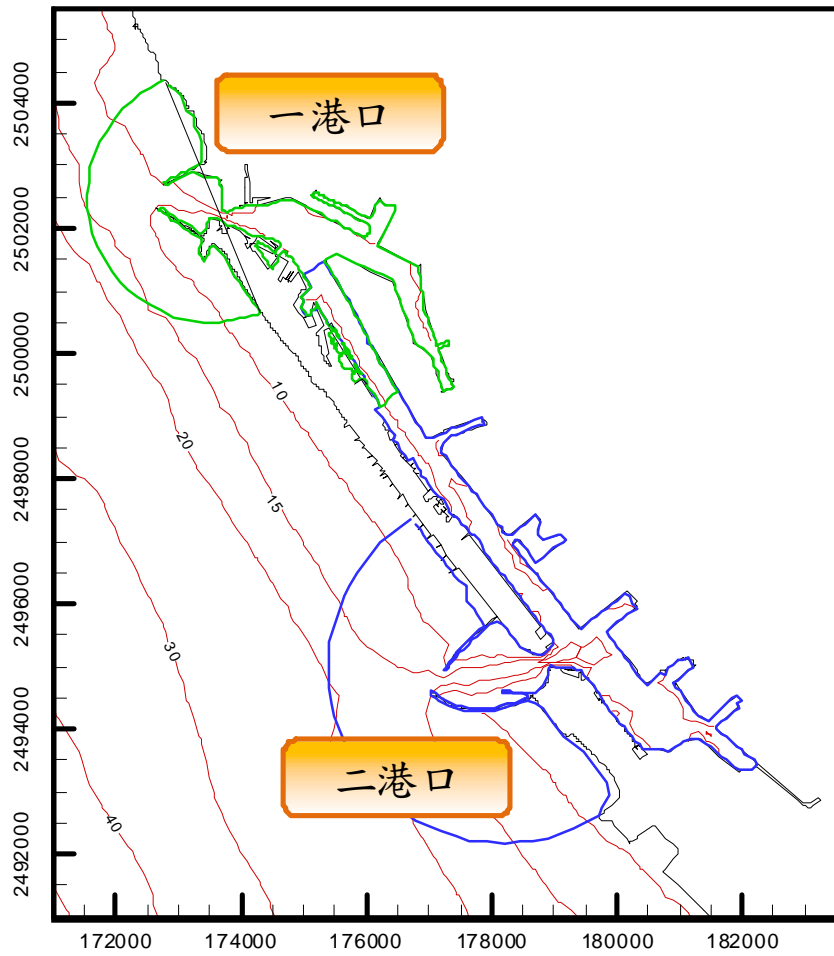


圖 3.49 高雄港區港域波浪模組一港口及二港口模擬範圍圖

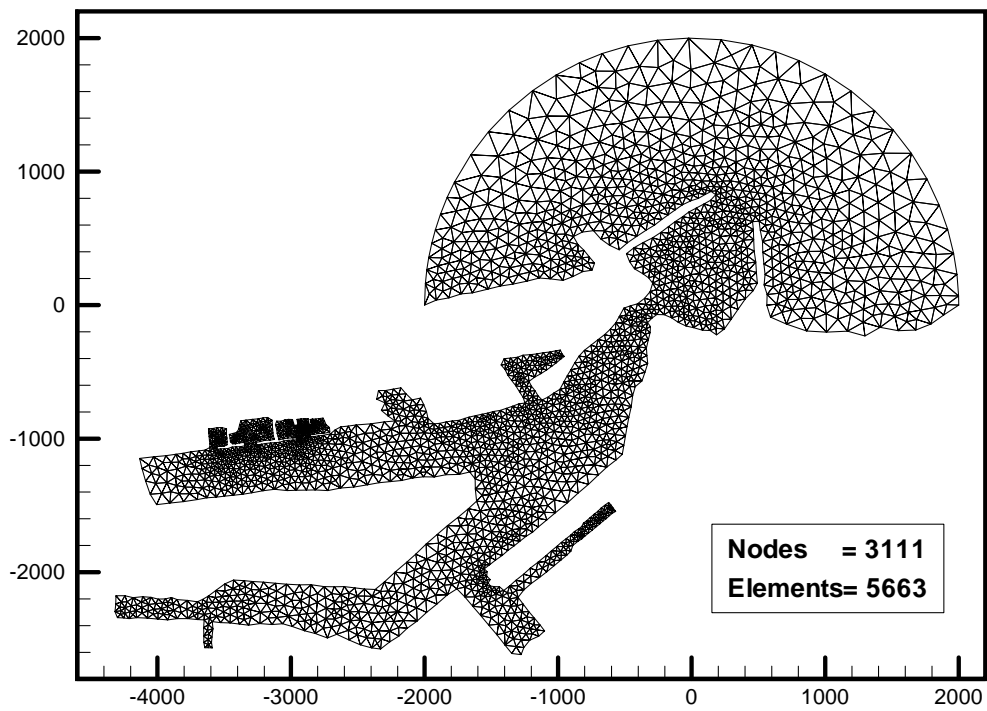


圖 3.50 高雄港區一港口港域波浪模之粗網格配置圖

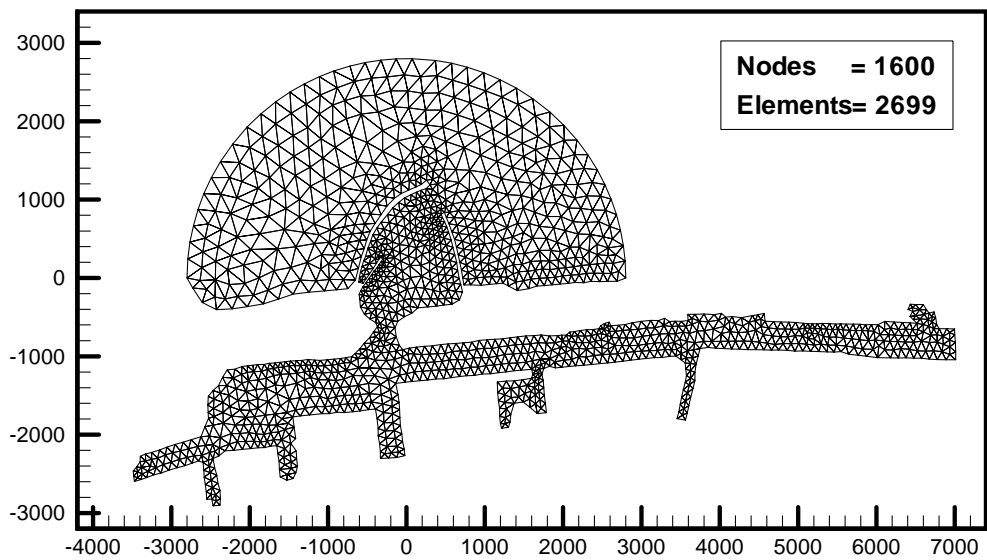


圖 3.51 高雄港區二港口港域波浪模之粗網格配置圖

3.4.5 高雄港區港域波浪場模擬結果

針對高雄港區細尺度港域波浪場模擬，本計畫參考以往作法，先依高雄港外海波浪觀測資料針對波浪週期及波向設定細尺度港域波浪模組模擬條件，分別執行高雄港區一港口及二港口港域波浪場模擬工作，並輸出每次模擬結果之港內波高與外海波高比值(即波高 KD 值)之分布結果，再將所模擬之結果存成資料庫，未來僅需由外海波浪條件即可查出港內任何位置上可能的波高值或繪出港內波高分布情形，展示於港灣資訊網站上。

依據高雄港 2012 年波浪觀測資料統計結果(參考表 2-9 及表 2-10)得知，觀測點波浪之波向主要分布於 SSE ~ NW 之間，約佔九成以上；因此針對高雄港區港域波浪場模擬，本計畫規畫波向模擬條件之波向變化間距為 22.5° ，範圍自 247.5° (SSE)至 315° (NW)共八個波向；週期模擬條件之間距為 0.1 sec，範圍為 9.0sec 至 17.0 sec 共 81 組條件。本計畫假設入射波高為 1.0 m，依據波向及週期組成的波浪場模擬條件共 648 組，分別模擬高雄港區一港口及二港口港域波浪場，並將模擬結果儲存成繪圖軟體 TECPLOT 之格式提供給港研中心建置臺中港域細尺度港域波浪場資料庫。圖 3.52 及圖 3.53 所示分別為波浪週期 10 sec 及波向 W(270°)模擬條件，一港口及二港口港域波浪場波高 KD 值分布情形。

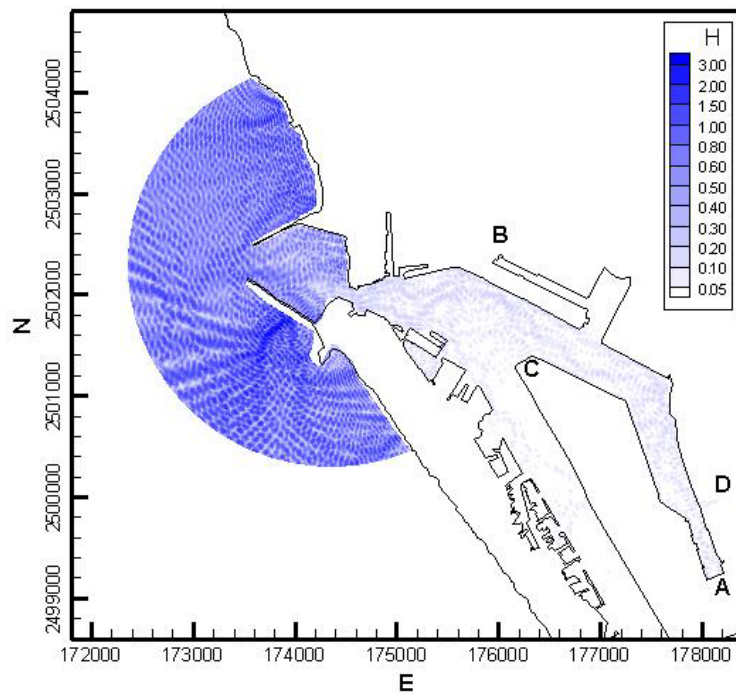


圖 3.52 高雄港區一港口港域波浪模擬結果之波高 KD 值分布情形
(波浪條件：週期 10 sec，波向 W)

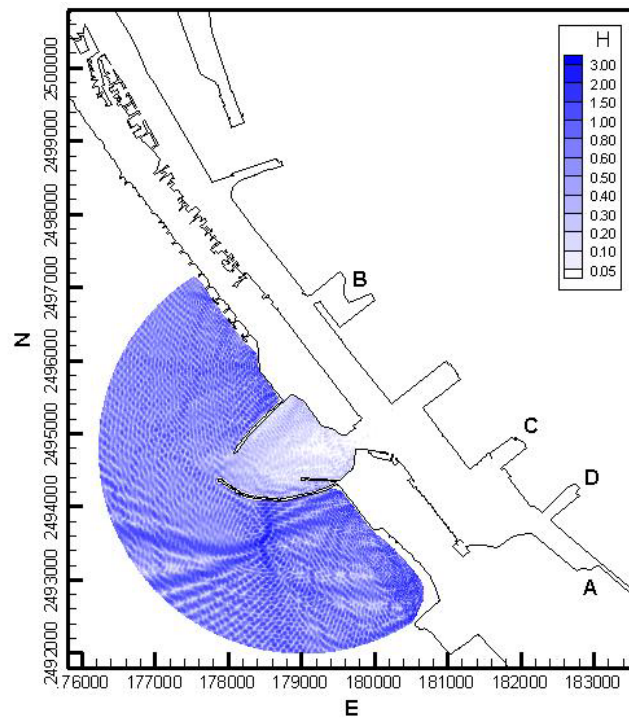


圖 3.53 高雄港區二港口港域波浪模擬結果之波高 KD 值分布情形
(波浪條件：週期 10 sec，波向 W)

第四章 水動力(水位及流場)模擬與探討

4.1 水動力模式基本理論介紹

4.1.1 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：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = Q_0 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(H^{-1}q_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(H^{-1}q_xq_y)}{\partial y} - fq_y \\ = -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^s - \tau_x^b) + \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial y} \right) \dots\dots (4.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(H^{-1}q_xq_y)}{\partial x} + \frac{\partial(H^{-1}q_y^2)}{\partial y} + fq_x \\ = -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^s - \tau_y^b) + \left(\frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) \dots\dots (4.3) \end{aligned}$$

其中

$$H = \int_{-h}^{\eta} dz = h + \eta \dots\dots\dots (4.4a)$$

$$q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}H \dots\dots\dots (4.4b)$$

$$q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}H \dots\dots\dots (4.4c)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} u dz \dots\dots\dots (4.4d)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} v dz \dots\dots\dots (4.4e)$$

$$F_{ij} = E_{ij}(q_{j,i} + q_{i,j}) \quad i, j = x, y \dots\dots\dots (4.4f)$$

$$\tau_i^b = C_f (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \frac{q_i}{H^2} \quad i = x, y \dots\dots\dots(4.4g)$$

$$\tau_i^s = \rho_a C_d |U_{10}| U_i \quad i, j = x, y \dots\dots\dots(4.4h)$$

此處

h = 靜水深，

η = 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，

ρ_0 = 流體平均密度，

ρ_a = 空氣密度，

p^s = 水面壓力，

g = 重力常數，

τ_x^b = x 方向之底床剪應力，

τ_y^b = y 方向之底床剪應力，

τ_x^s = x 方向之水面剪應力

τ_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 $2\omega \sin \phi$ ，

ω = 地球自轉之位相速度，

ϕ = 計算領域所在位置之緯度，

問題之初始條件為

$$\eta(x, y, t) = \eta_0(x, y) \quad \text{或} \quad H(x, y, t) = H_0(x, y) \dots\dots\dots (4.5a)$$

$$q_x(x, y, t) = q_{x0}(x, y) \quad \text{及} \quad q_y(x, y, t) = q_{y0}(x, y) \dots\dots\dots (4.5b)$$

式中 η_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：

$$q_n = \alpha_{nx}q_x + \alpha_{ny}q_y = \hat{q}_n \dots\dots\dots (4.6a)$$

$$q_s = -\alpha_{ny}q_x + \alpha_{nx}q_y = \hat{q}_s \dots\dots\dots (4.6b)$$

或

$$q_x = \alpha_{nx}q_n - \alpha_{ny}q_s \dots\dots\dots (4.7a)$$

$$q_y = \alpha_{nx}q_s + \alpha_{ny}q_n \dots\dots\dots (4.7b)$$

式中 α_{nx} 及 α_{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

$$F_x = \alpha_{nx}F_{xx} + \alpha_{ny}F_{yx} = \hat{F}_x \dots\dots\dots (4.8a)$$

$$F_y = \alpha_{nx}F_{xy} + \alpha_{ny}F_{yy} = \hat{F}_y \dots\dots\dots (4.8b)$$

式中 \hat{F}_x 及 \hat{F}_y 表示給定之邊界條件。

4.1.2 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(4.1)~(4.3)式及其邊界值問題。依據 Stokes 理論(4.1)~(4.3)式可改寫成下列積分方程式：

$$\iint_A \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - Q_0 \right] \delta H \, dA = 0 \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

$$\begin{aligned} & \iint_A \left[\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(H^{-1}q_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(H^{-1}q_yq_x)}{\partial y} - fq_y + \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x}(P^s + \rho g \eta) \right] \delta q_x \, dA \\ & - \iint_A \left[\frac{\tau_x^s - \tau_x^b}{\rho_0} \delta q_x - F_{xx} \frac{\partial(\delta q_x)}{\partial x} - F_{yx} \frac{\partial(\delta q_x)}{\partial y} \right] dA - \int_{\partial A} F'_x \delta q_x \, dL = 0 \quad \dots\dots(4.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \iint_A \left[\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(H^{-1}q_xq_y)}{\partial x} + \frac{\partial(H^{-1}q_y^2)}{\partial y} + fq_x + \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y}(P^s + \rho g \eta) \right] \delta q_y \, dA \\ & - \iint_A \left[\frac{\tau_y^s - \tau_y^b}{\rho_0} \delta q_y - F_{xy} \frac{\partial(\delta q_y)}{\partial x} - F_{yy} \frac{\partial(\delta q_y)}{\partial y} \right] dA - \int_{\partial A} F'_y \delta q_y \, dL = 0 \quad \dots\dots(4.11) \end{aligned}$$

式中 A 代表計算領域， ∂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， δH 、 δq_x 及 δq_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項。

常見求解上述積分方程式(4.9)~ (4.11)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

$$H^e = N_1^e H_1^e + N_2^e H_2^e + N_3^e H_3^e = \{N^e\}^T \{H^e\} = \{H^e\}^T \{N^e\} \quad \dots\dots\dots(4.12)$$

$$q_x^e = N_1^e q_{x1}^e + N_2^e q_{x2}^e + N_3^e q_{x3}^e = \{N^e\}^T \{q_x^e\} = \{q_x^e\}^T \{N^e\} \quad \dots\dots\dots(4.13a)$$

$$q_y^e = N_1^e q_{y1}^e + N_2^e q_{y2}^e + N_3^e q_{y3}^e = \{N^e\}^T \{q_y^e\} = \{q_y^e\}^T \{N^e\} \quad \dots\dots\dots(4.13b)$$

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

$$\{H^e\}^T = \{H_1^e, H_2^e, H_3^e\} \quad \dots\dots\dots(4.14a)$$

$$\{q_x^e\}^T = \{q_{x1}^e, q_{x2}^e, q_{x3}^e\} \dots\dots\dots(4.14b)$$

$$\{q_y^e\}^T = \{q_{y1}^e, q_{y2}^e, q_{y3}^e\} \dots\dots\dots(4.14c)$$

$$\{N^e\}^T = \{N_1^e, N_2^e, N_3^e\} \dots\dots\dots(4.14d)$$

其中三角元素之線性內插函數 N_j^e 計算如下

$$N_j^e = (a_j + b_j x + c_j y) / 2\Delta^e, \quad j = 1, 2, 3 \dots\dots\dots(4.15a)$$

$$a_i = x_j^e y_k^e - x_k^e y_j^e \dots\dots\dots(4.15b)$$

$$b_i = y_j^e - y_k^e \dots\dots\dots(4.15c)$$

$$c_i = x_k^e - x_j^e \dots\dots\dots(4.15d)$$

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} \dots\dots\dots(4.15e)$$

式中 (x_j^e, y_j^e) 為三角元素節點 j 之座標(如圖 4.1 所示), (4.15e)式代表座標之線性函數。

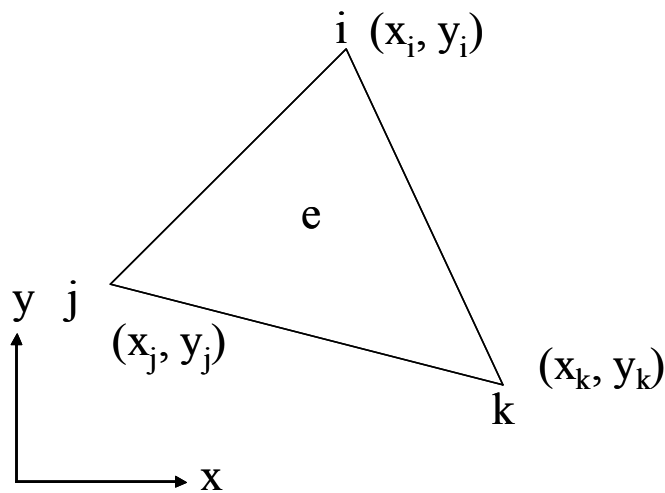


圖 4.1 三角形元素座標定義

(4.9)式各項積分式之計算說明如下：

$$\begin{aligned} \iint_A \frac{\partial H}{\partial t} \delta H \Gamma A &= \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\partial H}{\partial t} \delta H \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \{N^e\}^T \frac{\partial \{H^e\}}{\partial t} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [M_h^e] \frac{\partial \{H^e\}}{\partial t} \quad \dots (4.16a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \iint_A \frac{\partial q_x}{\partial x} \delta H \Gamma A &= \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \delta H \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial x} \{q_x^e\} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [G_x^e] \{q_x^e\} \quad \dots (4.16b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \iint_A \frac{\partial q_y}{\partial y} \delta H \Gamma A &= \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} \delta H \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial y} \{q_y^e\} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [G_y^e] \{q_y^e\} \quad \dots (4.16c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \iint_A Q_0 \delta H \Gamma A &= \sum_{e \in A} \iint_e (Q_0 \delta H) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \iint_e \{N^e\} \{N^e\}^T \{Q_0^e\} dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T [M_h^e] \{Q_0^e\} \quad \dots (4.16d) \end{aligned}$$

其中

$$[M_h^e] = \iint_e \{N^e\} \{N^e\}^T dA^e = \frac{\Delta^e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad \dots (4.17a)$$

$$[G_x^e] = \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial x} dA^e = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \quad \dots (4.17b)$$

$$[G_y^e] = \iint_e \{N^e\} \frac{\partial \{N^e\}^T}{\partial y} dA^e = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad \dots (4.17c)$$

將上述各項積分離散式代入積分方程式(4.9)式，則(4.9)式可簡化成

$$\sum_{e \in A} \{\delta H^e\}^T \left\{ [M_h^e] \frac{\partial \{H^e\}}{\partial t} + [G_x^e] \{q_x^e\} + [G_y^e] \{q_y^e\} - [M_h^e] \{Q_0^e\} \right\} = 0 \quad \dots (4.18)$$

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(4.18)式可結合成一矩陣方程式如下

$$\{\delta H\}^T \left\{ [M_h] \frac{\partial \{H\}}{\partial t} + [G_h] \{q\} + \{R_h\} \right\} = 0 \quad \dots (4.19)$$

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

$$\left\{ [M_h] \frac{\partial \{H\}}{\partial t} + [G_h] \{q\} + \{R_h\} \right\} = 0 \quad \dots (4.20)$$

(4.10)式各項積分式之計算說明如下：

$$\iint_A \left(\frac{\partial q_x}{\partial t} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\partial q_x}{\partial t} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta q_x^e\}^T [M_h^e] \frac{\partial \{q_x^e\}}{\partial t} \quad \dots (4.21a)$$

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

$$\iint_A \left(\frac{\partial H^{-1} q_x^2}{\partial x} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\partial H^{-1} q_x^2}{\partial x} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta q_x^e\}^T [G_x^e] \{\hat{q}_{xx}^e\} \quad \dots (4.21b)$$

$$\iint_A \left(\frac{\partial H^{-1} q_x q_y}{\partial y} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\partial H^{-1} q_x q_y}{\partial y} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta q_x^e\}^T [G_y^e] \{\hat{q}_{yx}^e\} \quad \dots (4.21c)$$

$$\iint_A (f q_y \delta q_x) dA = \sum_{e \in A} \iint_e (f q_y \delta q_x) dA^e = \sum_{e \in A} \{\delta q_x^e\}^T f [M_h^e] \{q_y^e\} \quad \dots (4.21d)$$

$$\begin{aligned} \iint_A \left(\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p^s}{\partial x} \delta q_x \right) dA &= \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p^s}{\partial x} \delta q_x \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{\delta q_x^e\}^T [M_h^e] \{H^e\} \frac{(b_1 p_1 + b_2 p_2 + b_3 p_3)}{2 \rho_0 \Delta^e} \quad \dots (4.21e) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \iint_A \left(gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \delta q_x \right) dA &= \sum_{e \in A} \iint_e \left(gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \delta q_x \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T [M_h^e] \{ H^e \} \frac{g(b_1 \eta_1^e + b_2 \eta_2^e + b_3 \eta_3^e)}{2\Delta^e} \dots\dots\dots (4.21f) \end{aligned}$$

$$\iint_A \left(\frac{\tau_x^s}{\rho_0} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\tau_x^s}{\rho_0} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_x^{se} \} \dots\dots\dots (4.21g)$$

$$\iint_A \left(\frac{\tau_x^b}{\rho_0} \delta q_x \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left(\frac{\tau_x^b}{\rho_0} \delta q_x \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_x^{be} \} \dots\dots\dots (4.21h)$$

$$\iint_A \left(F_{xx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA = \sum_{e \in A} \iint_e \left(F_{xx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA^e = \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{E_{xx} \bar{H}}{12\Delta^e} [M_{bb}^e] \{ \bar{u}^e \} \dots (4.21i)$$

$$\begin{aligned} \iint_A \left(F_{yx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA &= \sum_{e \in A} \iint_e \left(F_{yx} \frac{\partial \delta q_x}{\partial x} \right) dA^e \\ &= \sum_{e \in A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{E_{yx} \bar{H}}{24\Delta^e} \{ [M_{cb}^e] \{ \bar{v}^e \} + [M_{cc}^e] \{ \bar{u}^e \} \} \dots\dots\dots (4.21j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\partial A} (F'_x \delta q_x) dL &= \sum_{\partial e \in \partial A} \int_{\partial e} (F'_x \delta q_x) dL^e = \sum_{\partial e \in \partial A} \{ \delta q_x^e \}^T \int_{\partial e} \{ N^e \} \{ N^e \}^T \{ F'_x \} dL^e \\ &= \sum_{\partial e \in \partial A} \{ \delta q_x^e \}^T \frac{L^e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \{ F'_x \} \dots\dots\dots (4.21k) \end{aligned}$$

其中 $\bar{H}^e = (H_1^e + H_2^e + H_3^e)$, $(\bar{u}, \bar{v}) = H^{-1}(q_x, q_y)$

$$[M_{bb}^e] = \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ b_2 b_1 & b_2^2 & b_2 b_3 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.22a)$$

$$[M_{cb}^e] = \begin{bmatrix} c_1 b_1 & c_1 b_2 & c_1 b_3 \\ c_2 b_1 & c_2 b_2 & c_2 b_3 \\ c_3 b_1 & c_3 b_2 & c_3 b_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.22b)$$

$$[M_{cc}^e] = \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.22c)$$

同理，(4.11)式各項積分式之計算如下：

$$\iint_A \left(\frac{\partial q_y}{\partial t} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T [M_h^e] \frac{\partial \{ q_y^e \}}{\partial t} \dots\dots\dots (4.23a)$$

$$\iint_A \left(\frac{\partial H^{-1} q_x q_y}{\partial x} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T [G_x^e] \{ \hat{q}_{xy}^e \} \dots\dots\dots (4.23b)$$

$$\iint_A \left(\frac{\partial H^{-1} q_y^2}{\partial y} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T [G_y^e] \{ \hat{q}_{yy}^e \} \dots\dots\dots (4.23c)$$

$$\iint_A (f q_x \delta q_y) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T f [M_h^e] \{ q_x^e \} \dots\dots\dots (4.23d)$$

$$\iint_A \left(\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p^s}{\partial y} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T [M_h^e] \{ H^e \} \frac{(c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3)}{2 \rho_0 \Delta^e} \dots\dots\dots (4.23e)$$

$$\iint_A \left(g H \frac{\partial \eta}{\partial y} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T [M_h^e] \{ H^e \} \frac{g(c_1 \eta_1^e + c_2 \eta_2^e + c_3 \eta_3^e)}{2 \Delta^e} \dots\dots\dots (4.23f)$$

$$\iint_A \left(\frac{\tau_y^s}{\rho_0} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_y^{se} \} \dots\dots\dots (4.23g)$$

$$\iint_A \left(\frac{\tau_y^b}{\rho_0} \delta q_y \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{1}{\rho_0} [M_h^e] \{ \tau_y^{be} \} \dots\dots\dots (4.23h)$$

$$\iint_A \left(F_{yx} \frac{\partial \delta q_y}{\partial y} \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{E_{xy} \bar{H}}{24 \Delta^e} \{ [M_{cb}^e] \{ \bar{u}^e \} + [M_{bb}^e] \{ \bar{v}^e \} \} \dots\dots\dots (4.23i)$$

$$\iint_A \left(F_{yy} \frac{\partial \delta q_y}{\partial y} \right) dA = \sum_{e \in A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{E_{yy} \bar{H}}{12 \Delta^e} [M_{cc}^e] \{ \bar{v}^e \} \dots\dots\dots (4.23j)$$

$$\int_{\partial A} (F_y' \delta q_y) dL = \sum_{\partial e \in \partial A} \{ \delta q_y^e \}^T \frac{L^e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \{ F_y'^e \} \dots\dots\dots (4.23k)$$

將上述各項積分式分別代入(4.10)式及(4.11)式並且將其組合成一整體矩陣方程式如下：

$$[M_m] \frac{\partial \{ q \}}{\partial t} + [G_m] \{ q \} + [K_m] \{ \eta \} + \{ R_m \} = 0 \dots\dots\dots (4.24)$$

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(4.9)~(4.11)離散化成求解一階時間項常微分方程組(4.20)式及(4.24)式。

一般而言，求解上述一階時間項常微分方程組(4.20)式及(4.24)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(4.20)式及(4.24)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(4.20)式及(4.24)式重組成

$$[M_h] \frac{\partial \{H\}}{\partial t} = \{P_h\} \dots\dots\dots(4.25)$$

$$[M_m] \frac{\partial \{q\}}{\partial t} = \{P_m\} \dots\dots\dots(4.26)$$

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 $t_{n-1/2}$ 及 t_n (n = 1, 2, 3,....)上求解，則(4.25)式及(4.26)式可改寫成

$$[M_h] \left\{ \{H\}_{n+1/2} - \{H\}_{n-1/2} \right\} = \Delta t \left\{ P_h \left(\{H\}_{n-1/2}, \{q\}_n, t_n \right) \right\} \dots\dots\dots(4.27)$$

$$[M_m] \left\{ \{q\}_{n+1} - \{q\}_n \right\} = \Delta t \left\{ P_m \left(\{H\}_{n+1/2}, \{q\}_n, t_{n+1/2} \right) \right\} \dots\dots\dots(4.28)$$

或

$$\{H\}_{n+1/2} = \{H\}_{n-1/2} + \Delta t [M_h]^{-1} \left\{ P_h \left(\{H\}_{n-1/2}, \{q\}_n, t_n \right) \right\} \dots\dots\dots(4.29)$$

$$\{q\}_{n+1} = \{q\}_n + \Delta t [M_m]^{-1} \left\{ P_m \left(\{H\}_{n+1/2}, \{q\}_n, t_{n+1/2} \right) \right\} \dots\dots\dots(4.30)$$

因此當初始條件 $\{H\}_{n-1/2}$ 及 $\{q\}_n$ 已知時，可由(4.29)式直接求解 $\{H\}_{n+1/2}$ ，再由(4.30)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

$$\Delta t < 1.5 \Delta t_{cr} = 1.5 \Delta s^* / U^* \dots\dots\dots(4.31)$$

式中 Δs^* 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

$$E_{xx} \sim ag(\tilde{\eta}/\tilde{u})\tilde{x} \dots\dots\dots(4.32)$$

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。

4.2 臺灣周圍海域暴潮模擬與探討

基於各港區小尺度近岸水動力模組模擬結果無法反映因氣壓變化引起的氣象潮或颱風引起的暴潮等水位變化現象，因此研究團隊乃於 101 年度計畫規劃建置包含臺灣周圍海域模擬範圍(如圖 4.2 所示)的中尺度有限元素計算網格(如圖 4.3 所示)，並依據中央氣象局有限區域模式(NFS)預報之數值風速及氣壓場資料(如第二層 MC 風壓場)，配合前述有限元素水動力模式建置新的中尺度臺灣周圍海域範圍暴潮模組，模擬颱風期間臺灣周圍海域暴潮變化現象。本年度計畫將延續 101 年度計畫研究成果，除了針對臺灣周圍海域範圍暴潮模組之計算網格、邊界條件及模式參數率定等進行研究外，同時針對天文潮及暴潮等水位變化現象分別進行數值模擬，並探討颱風侵襲期間安平港域與高雄港域可能發生的暴潮水位偏差。

4.2.1 有限元素網格之修正

如圖 4.2 所示本計畫臺灣周圍海域暴潮模組之模擬範圍係以東經 116.5°及 125°經線為模式之東、西邊界，以北緯 21°及 26.5°為模式之南、北邊界。數值計算網格之座標系統採用六度分帶投影座標系統，101 年度計畫初步建置的有限元素計算網格如圖 4.3 所示，圖中有限元素網格係由 6528 個節點及 12514 個三角形元素所組成。模式採用的水深資料係由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)所組成的，如圖 4.4 所示，圖中模式最大水深超過 9000 m，最小水深則小於 10.0 m。

針對中尺度臺灣周圍海域暴潮模組之數值計算網格改善研究，因本年度計畫主要研究對象為安平港及高雄港，故本計畫乃以鄰近安平港域及高雄港域之海岸為本年度優先改善目標。其中圖 4.5 所示為上年度計畫建置的數值計算網格(如圖 4.3 所示)在安平港海域至高雄港海域間三角形元素之配置情形，顯示除了在安平港北側海域三角形元素配置情形與海岸線現況略有出入外，另在網格解析度上，模式鄰近海岸線之海域元素大小仍有改善之需求。因此本年度計畫乃針對上述三角形元素配置及大小修正問題，選取的數值計算網格修正及改善的範圍如圖 4.5 粗虛線之標示範圍；網格更新後三角形元素之配置情形，如圖 4.6 所示，其中安平港港口與高雄港港口附近元素大小之精度約可提昇至 1~2 km 左右。因此，本年度計畫重新產生的臺灣周圍海域暴潮模組有限元素計算網格(稱之為 2013 版網格)係由 6695 個節點及 12813 個三角形元素組成，如圖 4.7 所示。

4.2.2 邊界條件及初始條件

本計畫臺灣周圍海域暴潮模組模式之陸地邊界採用滑動邊界條件(即邊界節點垂直方向的流速等於零)，海域開放邊界則採用水位條件為模式之開放邊界條件。模式開放邊界條件之水位條件設定型態有二：(1)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，模式開放邊界條件之水位值可由邊界上輸入氣壓差推估其水位變化量為

$$\eta = \eta_a(t) = \frac{\Delta P(t)}{\rho g} \dots\dots\dots(4.33)$$

(2)當模式模擬對象包含天文潮及氣象潮引起的水位變化時，模式開放邊界條件之水位值除了考慮上述氣壓差引起的水位抬昇(如 4.33 式)外，尚需考慮天文潮通過開放邊界時海面之水位變化量。

基於中尺度臺灣周圍海域暴潮模組其海域開放邊界並無潮汐觀測資料可供利用，因此本計畫採用 Matsumoto et al.(2000)發展的天文潮區域模式 NAO.99Jb(其網格間距為 1/12 度)，建置中尺度臺灣周圍海域暴潮模組開放邊界之天文潮水位資料。如圖 4.8 所示分別為本計畫臺灣周

圍海域暴潮模組以 NAO.99Jb 模式計算開放邊界上四個角落節點(參考圖 4.3 所示)每小時天文潮水位變化之資料，顯示在模式開放邊界鄰近大陸海岸處天文潮屬於半日潮型，在模式太平洋海上開放邊界處天文潮水位變化屬於混合潮型，另在模式西南角落開放邊界處天文潮位變化則呈現全日潮型態。

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。

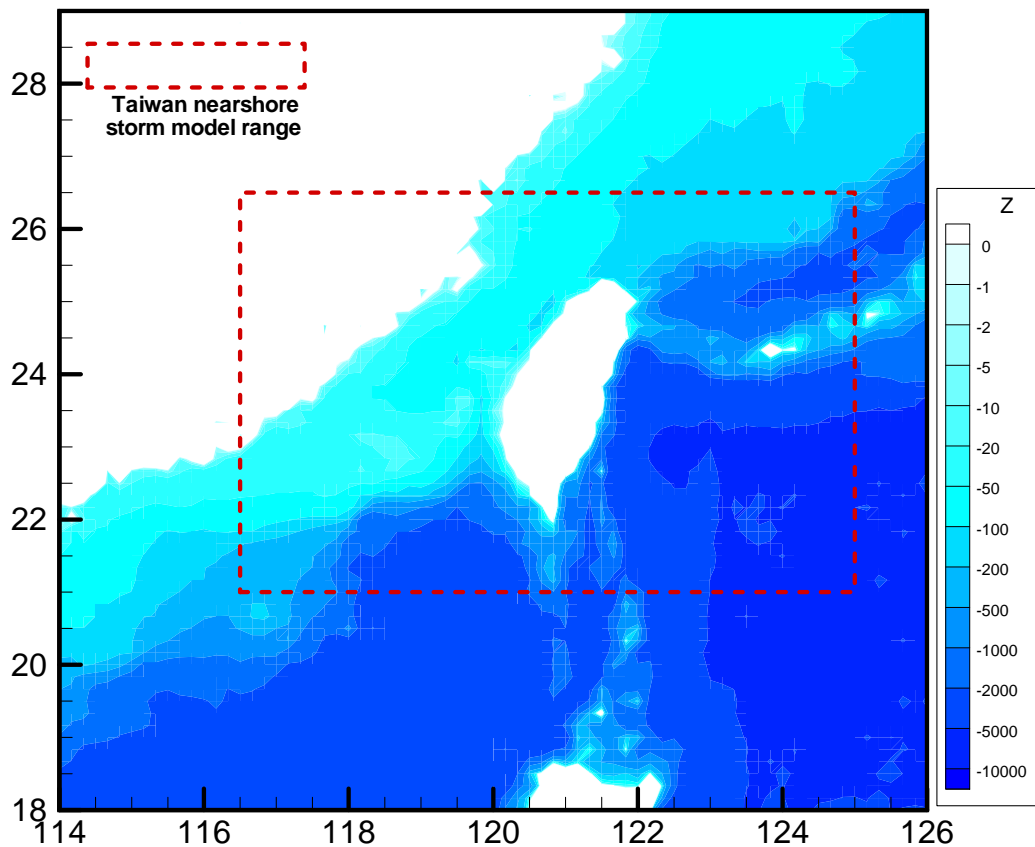


圖 4.2 臺灣周圍海域暴潮模組之模擬範圍

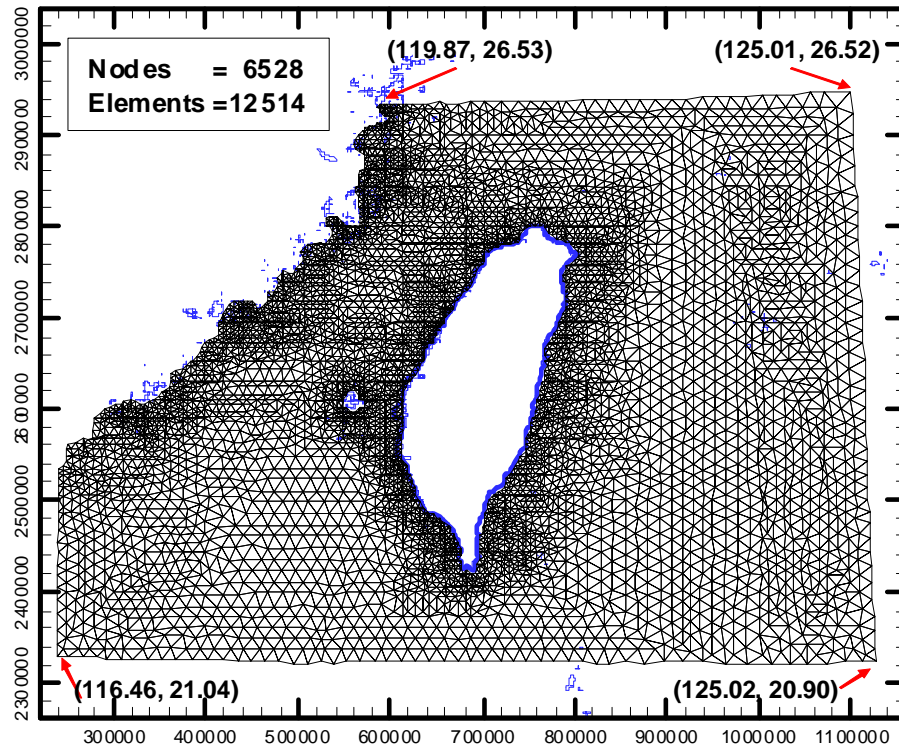


圖 4.3 臺灣周圍海域暴潮模組 2012 版網格三角形元素網格分布圖

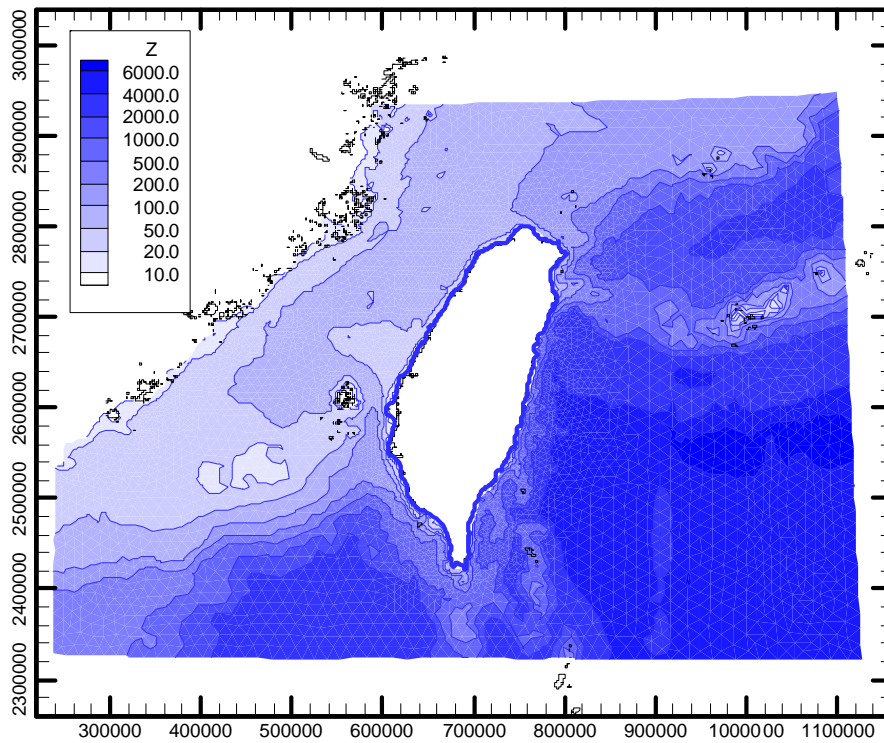


圖 4.4 臺灣周圍海域暴潮模組之地形水深分布圖

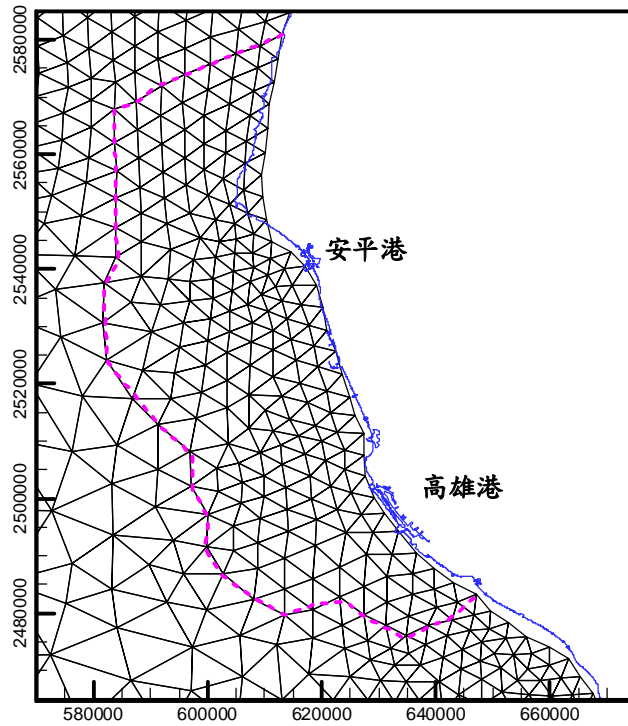


圖 4.5 模式網格修正前安平至高雄海域間三角形元素分布圖

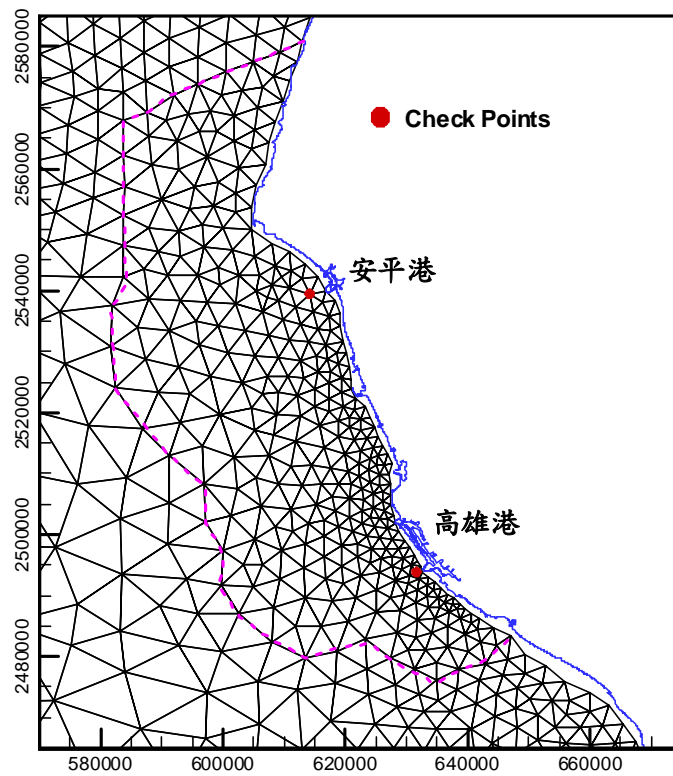


圖 4.6 模式網格修正後安平至高雄海域間三角形元素分布圖

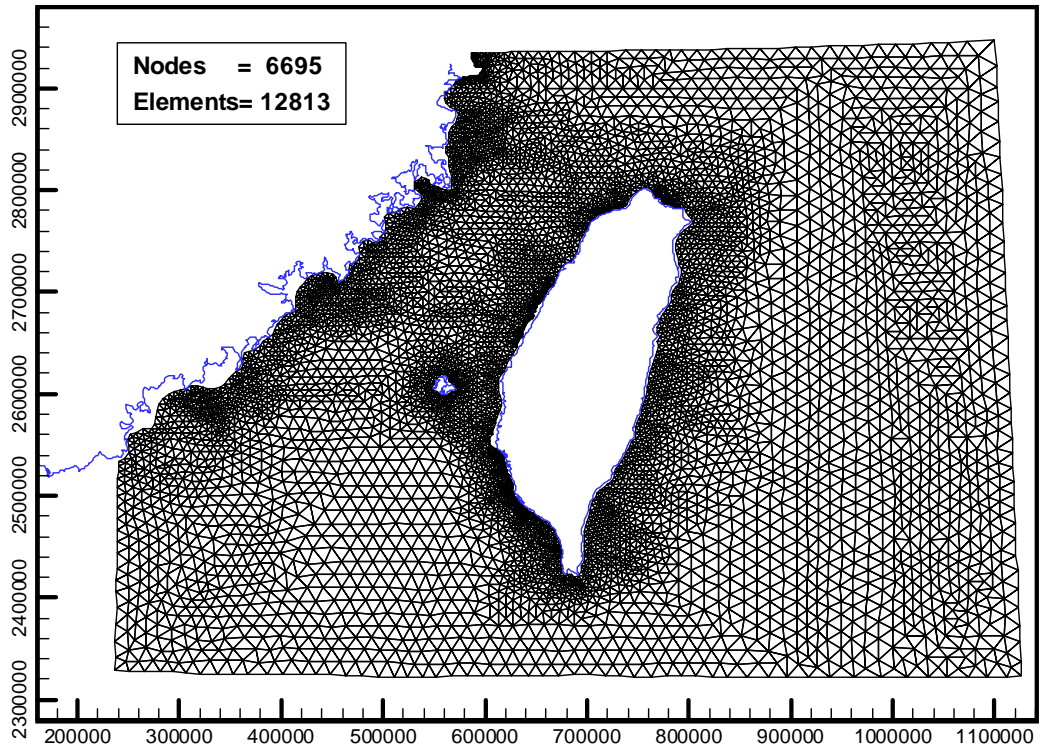


圖 4.7 臺灣周圍海域暴潮模組有限元素網格更新後三角形元素分布圖

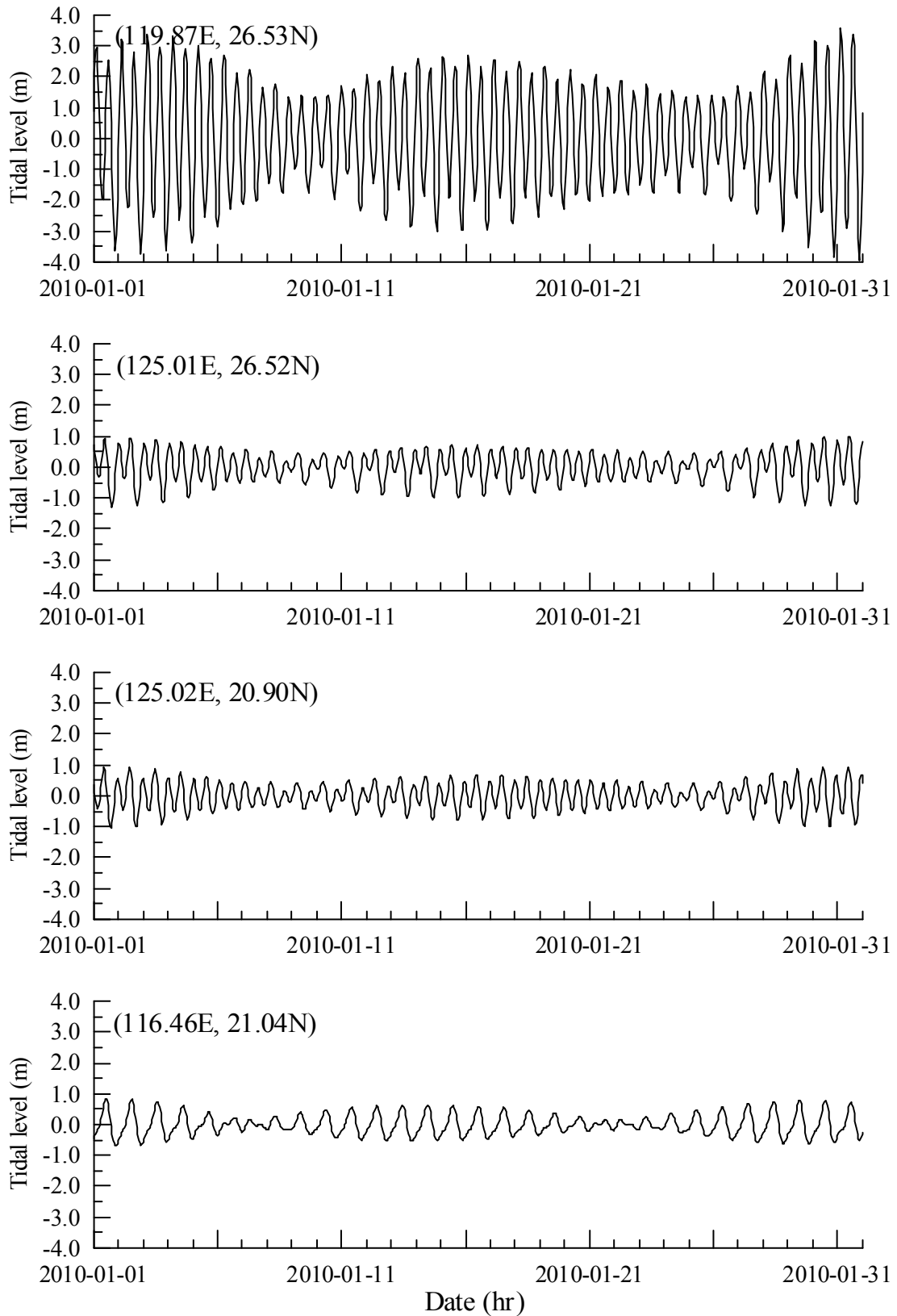


圖 4.8 臺灣周圍海域暴潮模組採用的天文潮邊界條件時序圖

4.2.3 模式物理參數率定

模式相關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，上述參數之率定值本計畫依據 101 年度臺灣周圍海域暴潮模組之模式參數率定結果說明如后。模式採用的時間間距 $\Delta t = 2.0 \text{ sec}$ 且滿足(4.31)式，模式選取曼寧係數 $n = 0.022$ 計算底床摩擦係數值(惟部份元素之底床摩擦係數值則視模擬結果另以假設值修正)；渦動粘滯性係數本計畫利用上述(4.32)式選取無因次係數 $a = 0.025$ ，代表性潮差 $\bar{\eta} = 1.20 \text{ m}$ ，潮流代表性流速為 0.5 m/s ，計算各個元素代表性的渦動粘滯係數值。

4.2.4 天文潮位模擬結果驗証

本計畫依據上述更新之臺灣周圍海域暴潮模組進行臺灣周圍海域天文潮模擬與驗証，並選取安平港區及高雄港區天文潮位模擬結果分別與港區潮汐水位觀測資料及 TaiCOMS 中尺度天文潮模式作業化模擬結果進行比較。相關比較結果說明如下：

(1) 臺灣周圍海域暴潮模組更新前、後版本模擬結果之比較：本研究選取安平港區及高雄港區天文潮位模擬結果進行比較，如圖 4.9 及圖 4.10 所示；顯示中尺度水動力模組更新前(2012 年版)安平港區天文潮位模擬結果有明顯偏大之現象，高雄港區天文潮位模擬結果則無明顯的偏差現象。

(2) 臺灣周圍海域暴潮模組更新後版本模擬結果與觀測資料之比較，如圖 4.11 及圖 4.12 所示；整體而言，本年度安平港區及高雄港區天文潮水位模擬值與觀測資料之間，就變化趨勢而言，二者具有高度的一致性，僅部份(或少數)時段出現模擬值與觀測值不一致現象，其中以高雄港水位比較結果之誤差較為明顯。

(3) 臺灣周圍海域暴潮模組更新後版本與現況 TaiCOMS 作業化模擬結果之比較，如圖 4.13 及圖 4.14 所示，顯示二者模擬結果有顯著的差異存在。探其差異原因除了網格解析度因素外，另一因素可能是現況 TaiCOMS 中尺度水動力模組作業化模擬結果包含了數值風壓場引起

的水位變化量，而本計畫上述天文潮模擬結果尚未考慮數值風壓場引起的水位變化量。

本計畫陸續完成 2012 年 1 月至 2013 年 12 月中尺度臺灣周圍海域天文潮水位模擬，並將每小時整點之模擬結果儲存成檔案，供本計畫後續有關數值模擬結果分析及應用之需。此外，本計畫選取時間 2012 年 8 月 2 日零時至 12 時之逐時模擬結果(相當於大潮期間)繪出等水位分布情形，如圖 4.15 所示，由逐時等水位分布變化情形可顯示出天文潮潮波同時由臺灣本島南北兩端分別沿著西南及西北部海岸往臺灣海峽傳播之特性。

有關本計畫中尺度臺灣周圍海域天文潮水位模擬結果之應用，包括提供各港口潮時預測資訊以及各港口小尺度水動力模組所需水位邊界條件等。

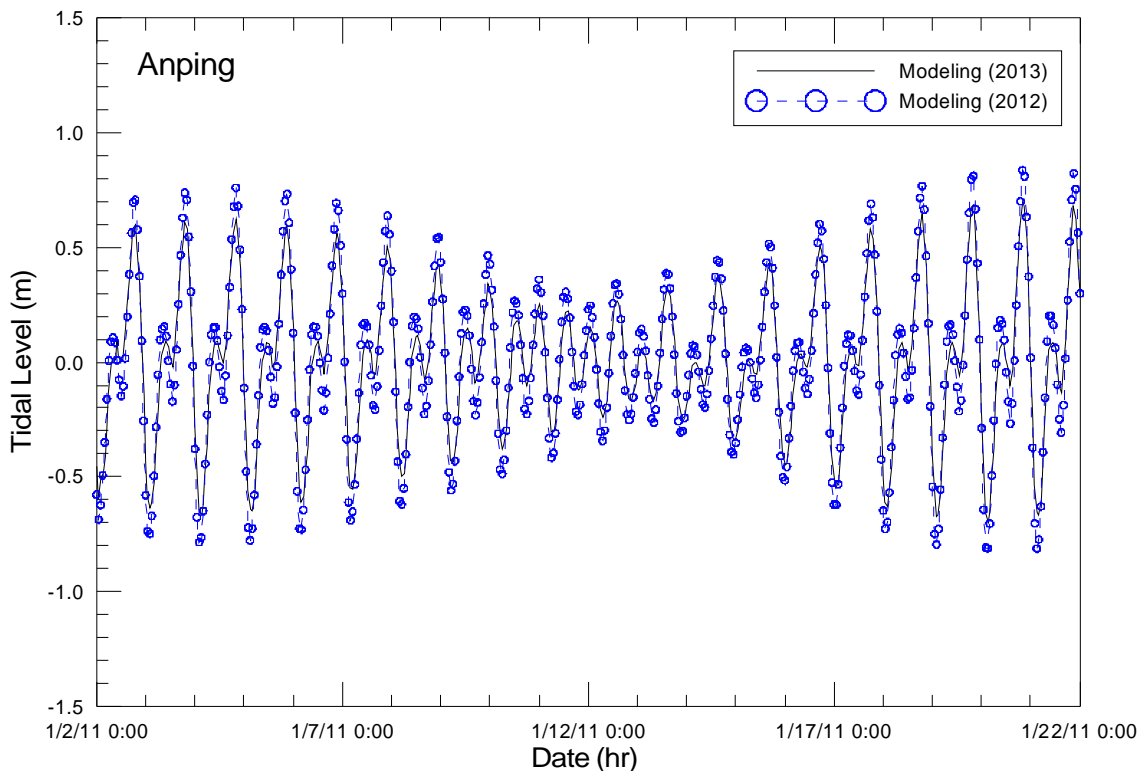


圖 4.9 安平港區天文潮位模式模擬結果之比較圖

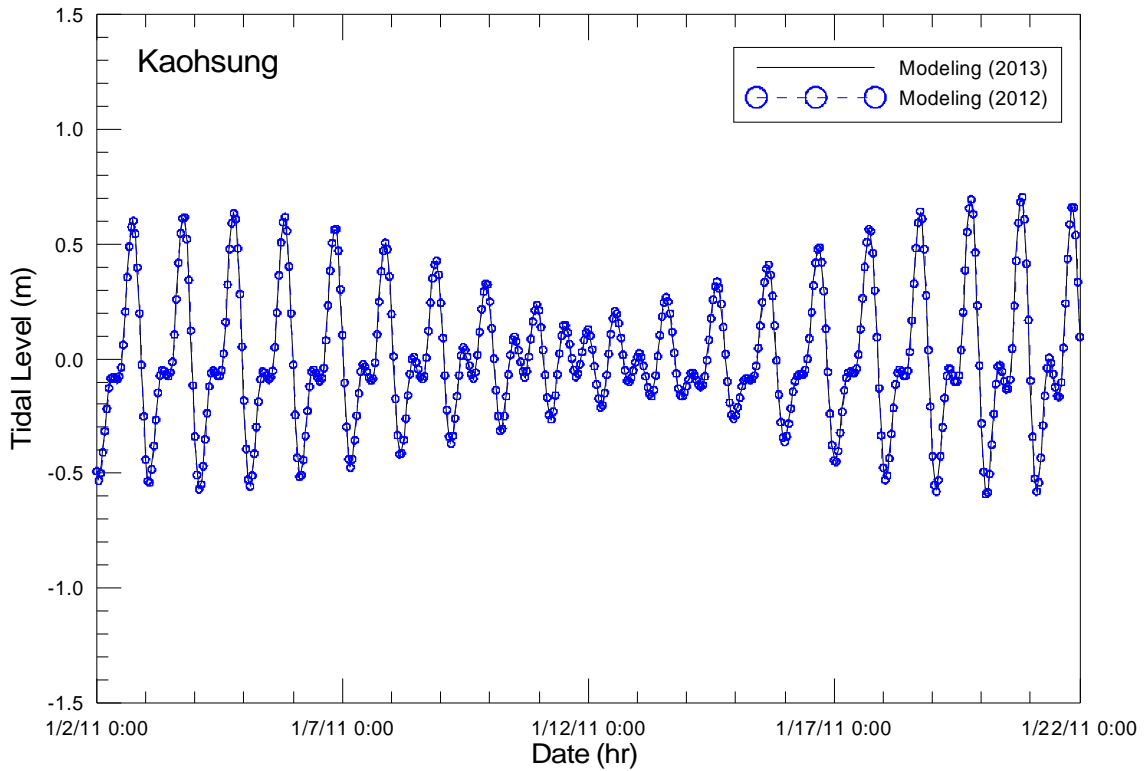


圖 4.10 高雄港區天文潮位模式模擬結果之比較圖

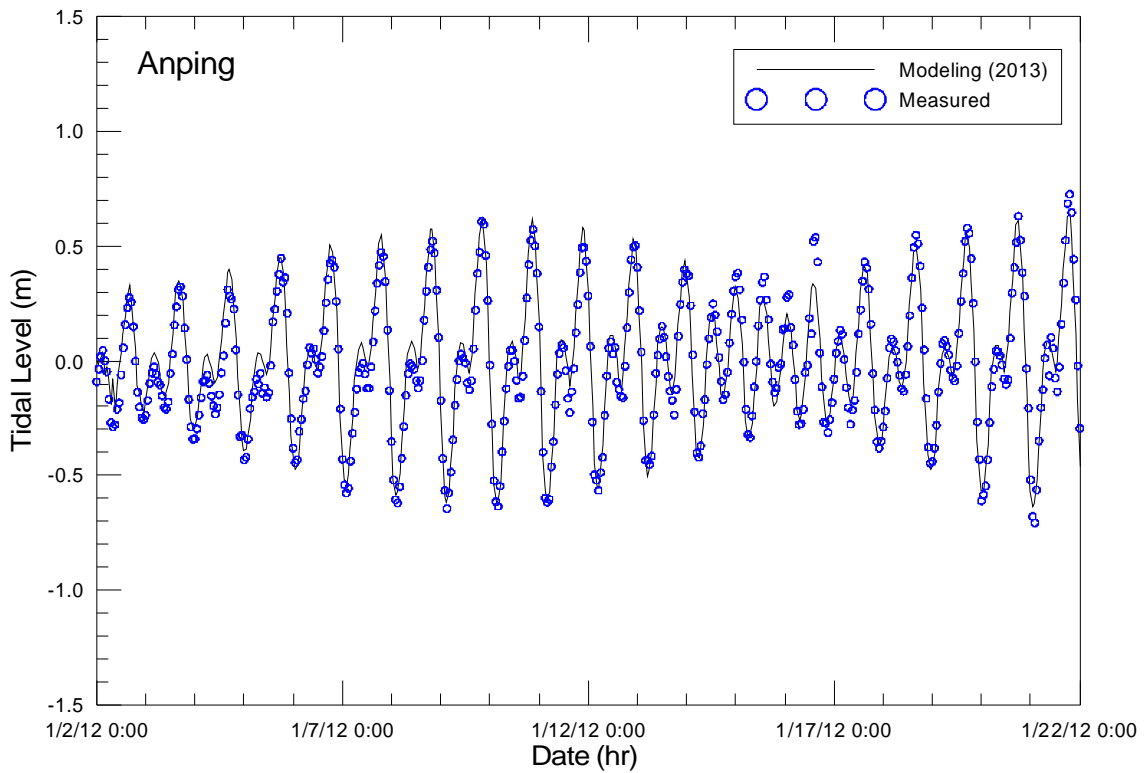


圖 4.11 安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

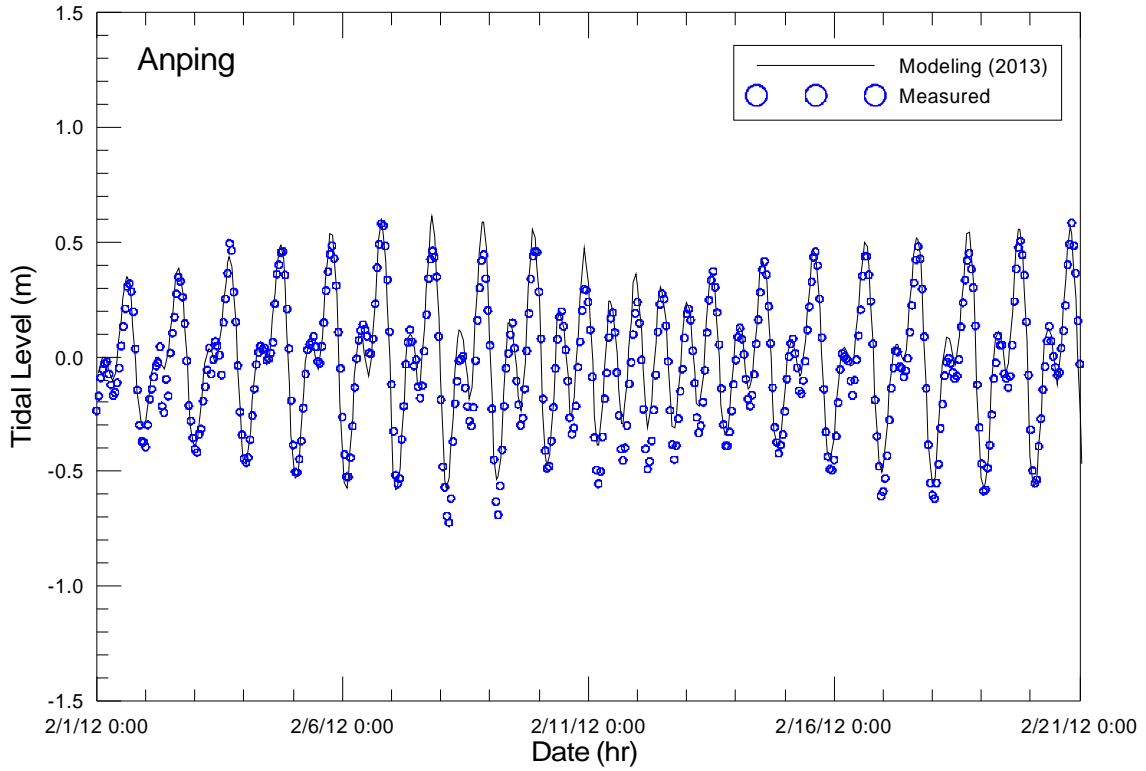


圖 4.11 (續 1)安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

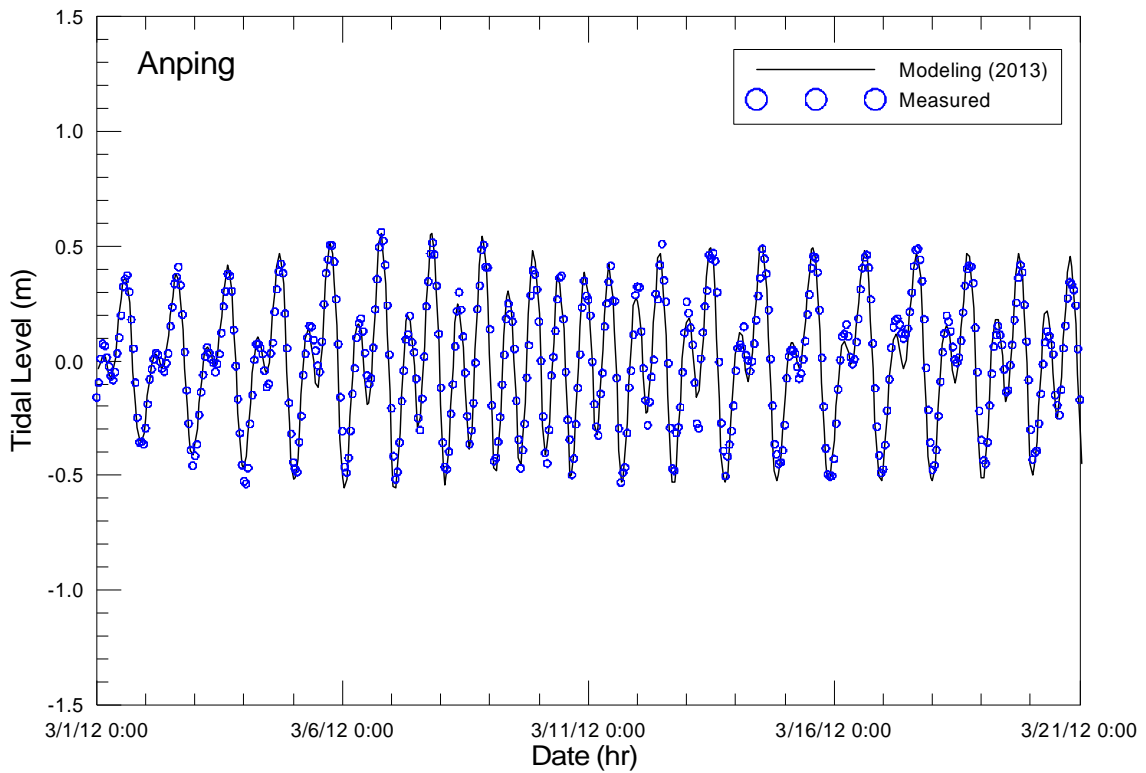


圖 4.11 (續 2)安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

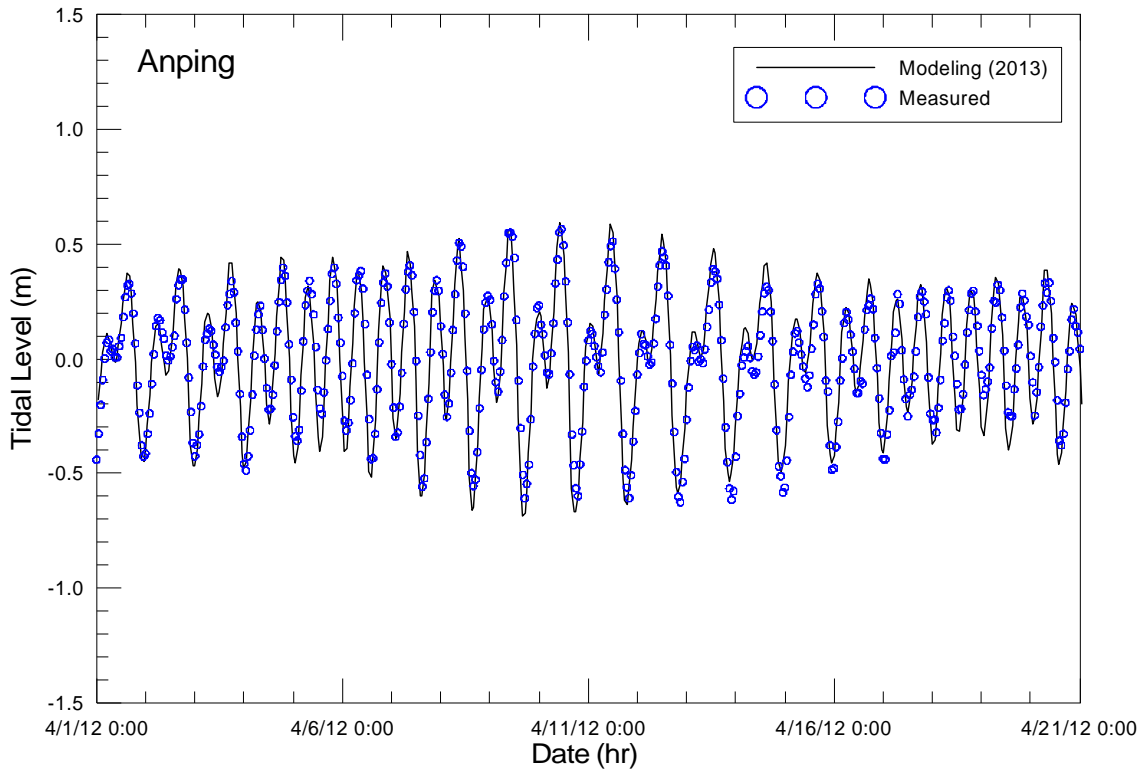


圖 4.11 (續 3)安平港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

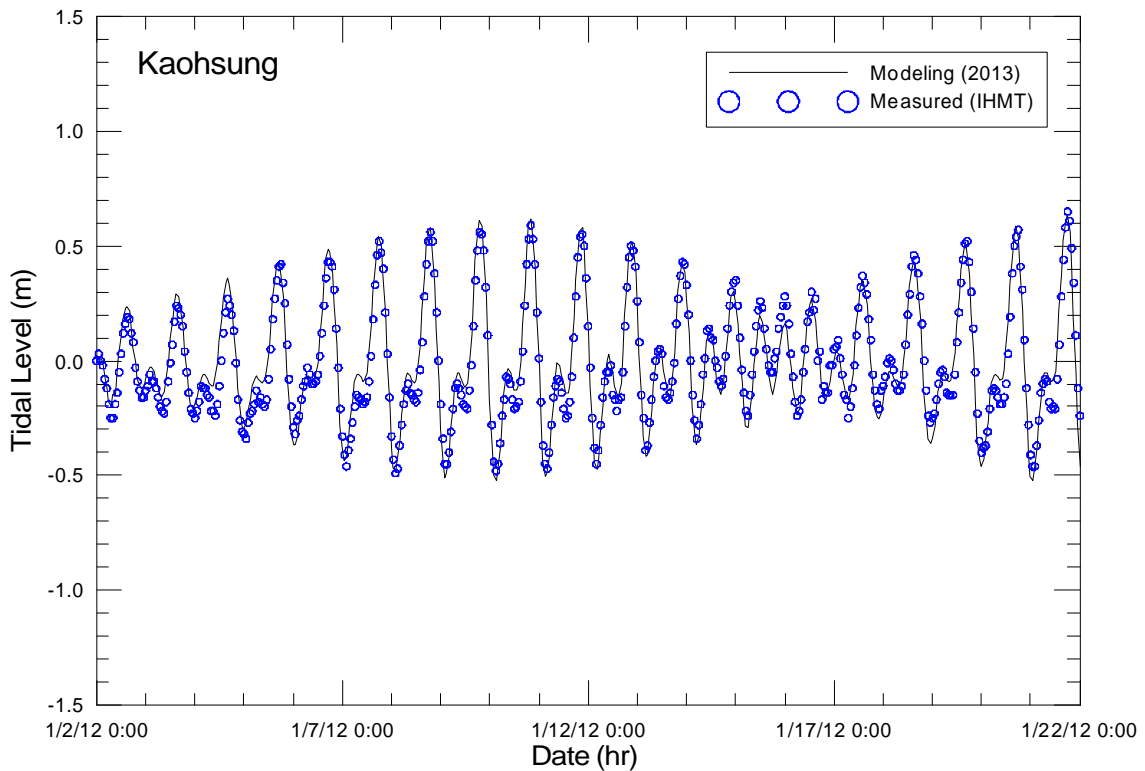


圖 4.12 高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

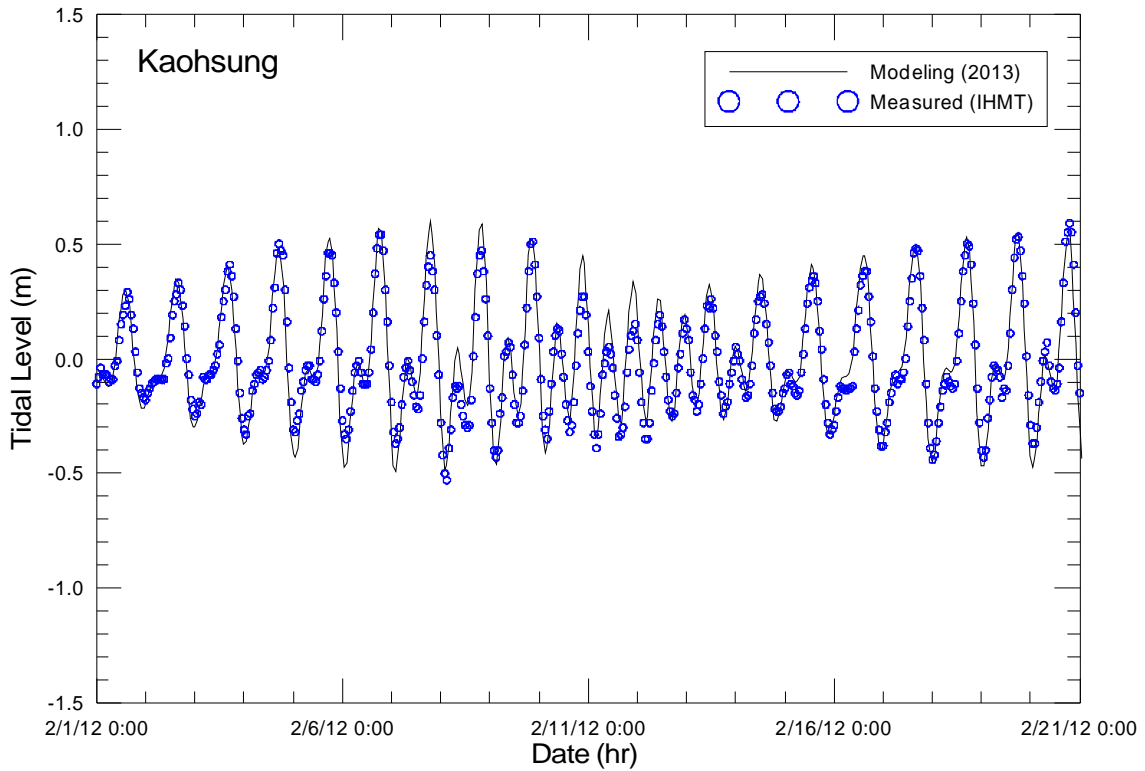


圖 4.12 (續 1)高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

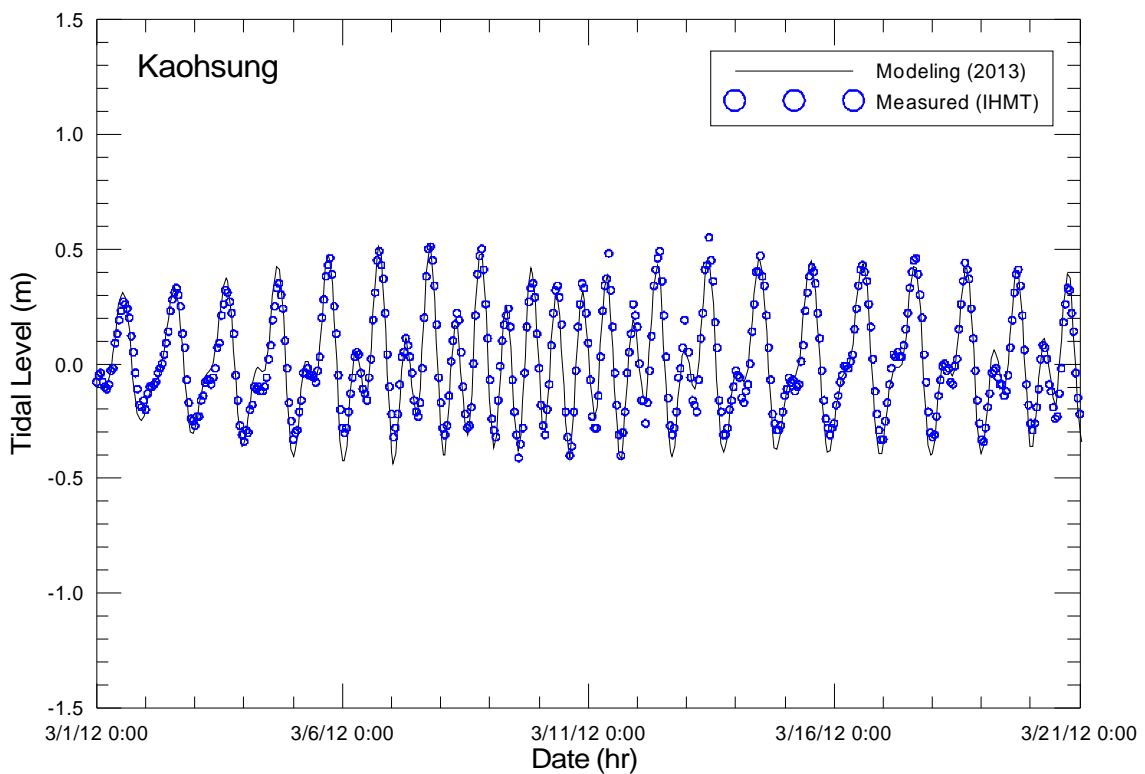


圖 4.12 (續 2)高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

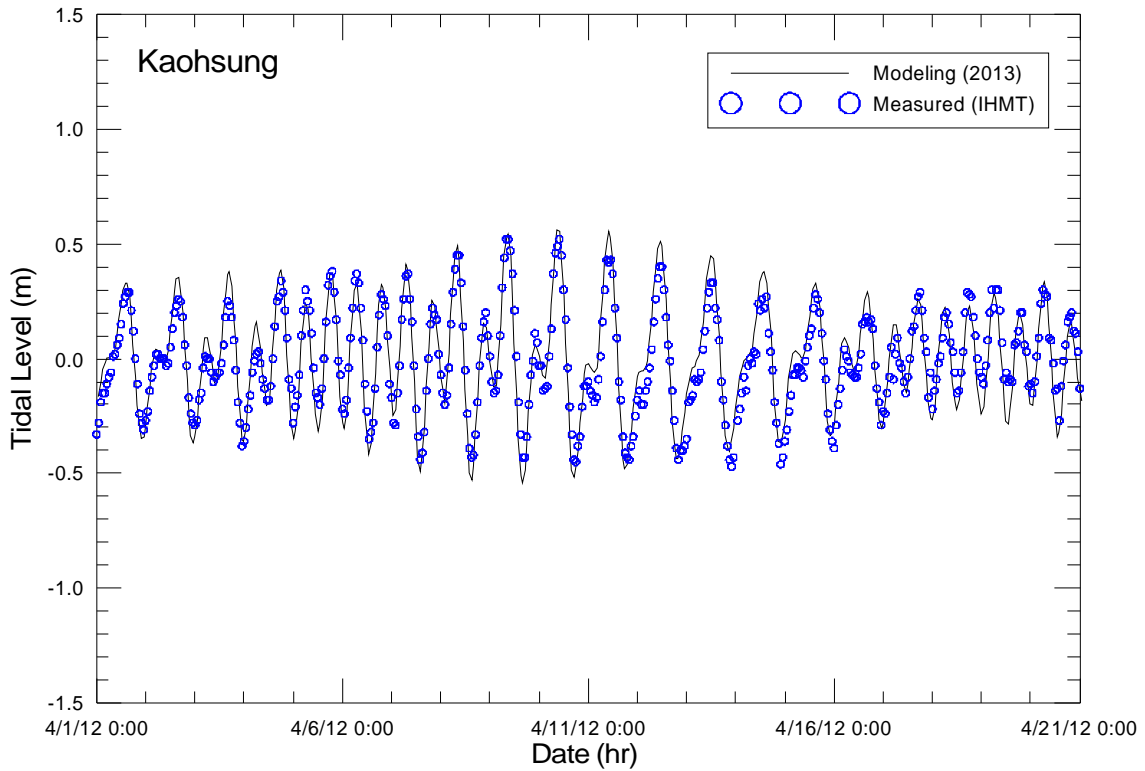


圖 4.12 (續 3)高雄港區天文潮位模擬結果與觀測資料之比較圖

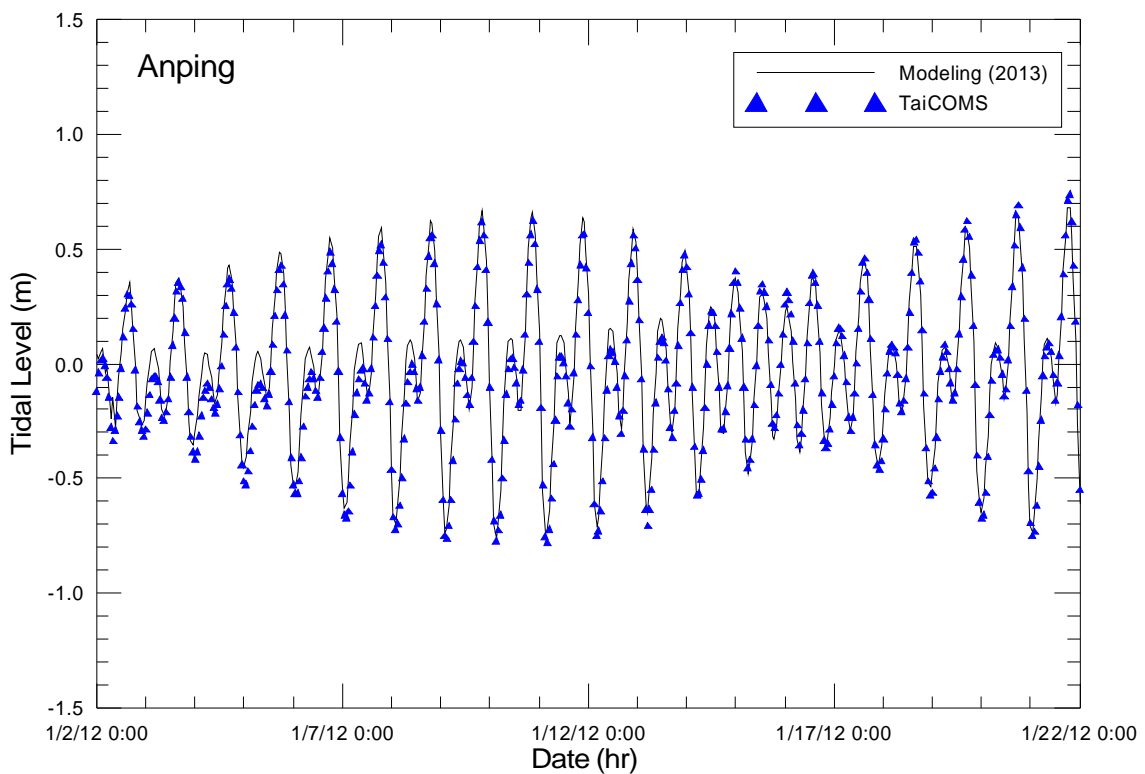


圖 4.13 安平港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

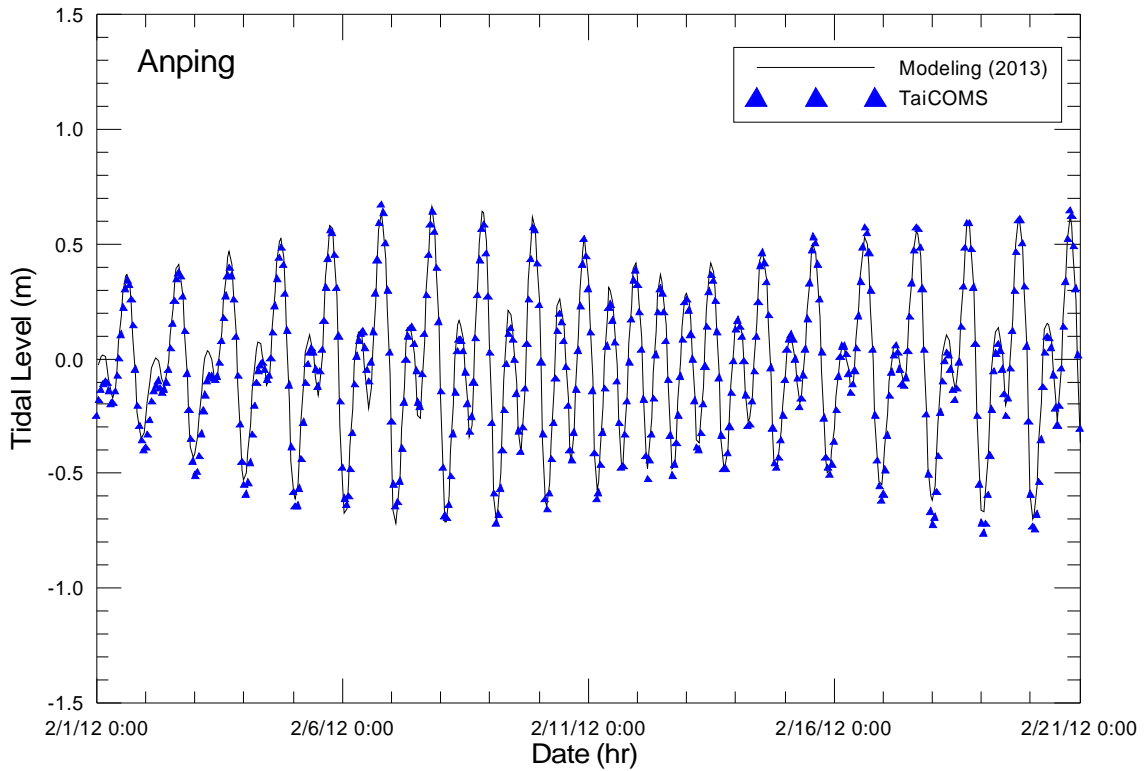


圖 4.13 (續 1)安平港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

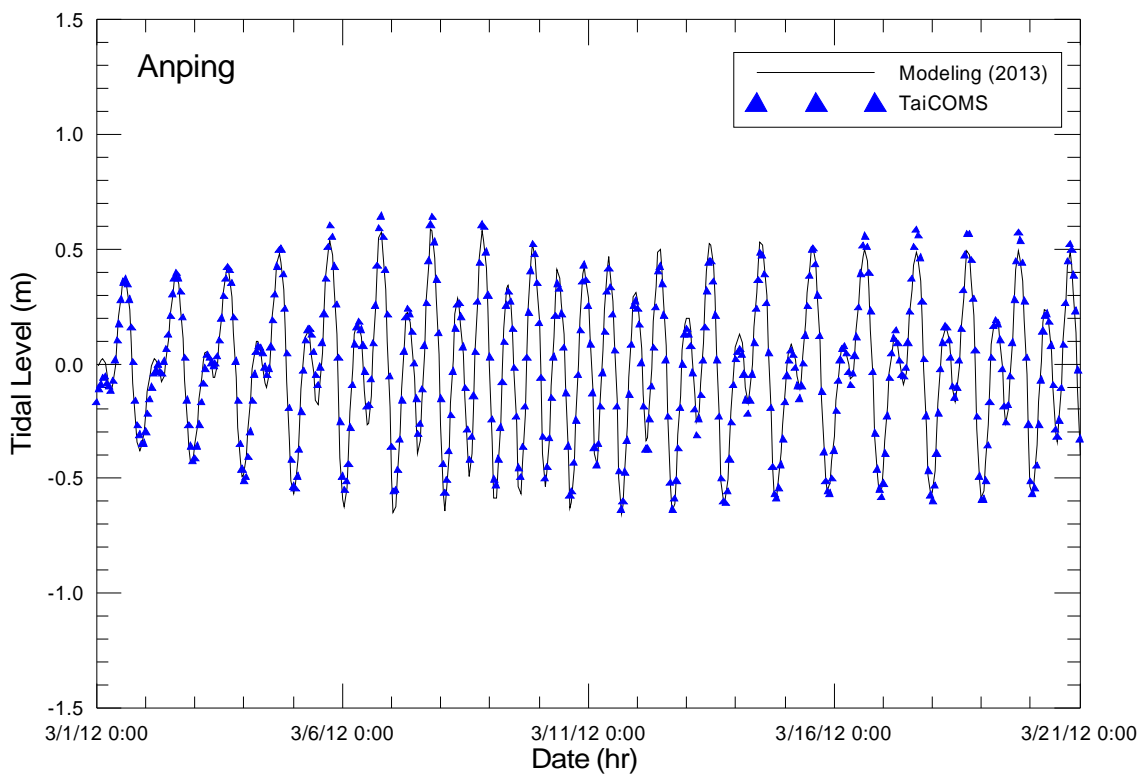


圖 4.13 (續 2)安平港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

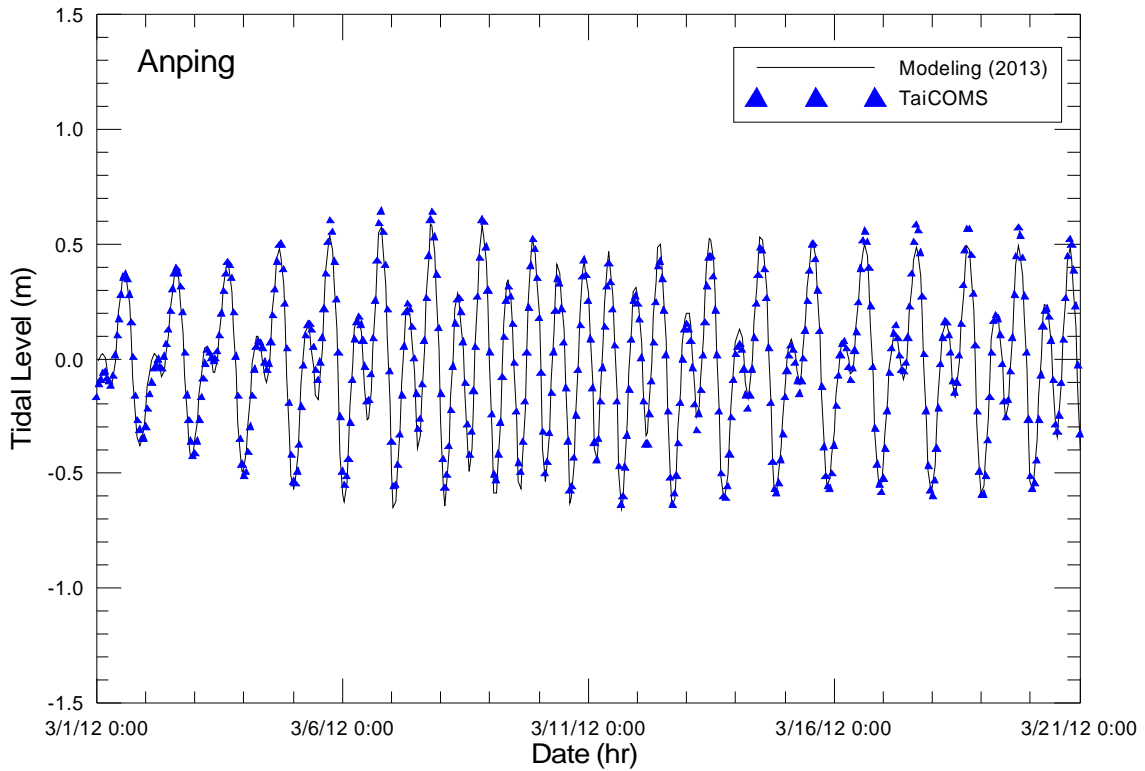


圖 4.13 (續 3)安平港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

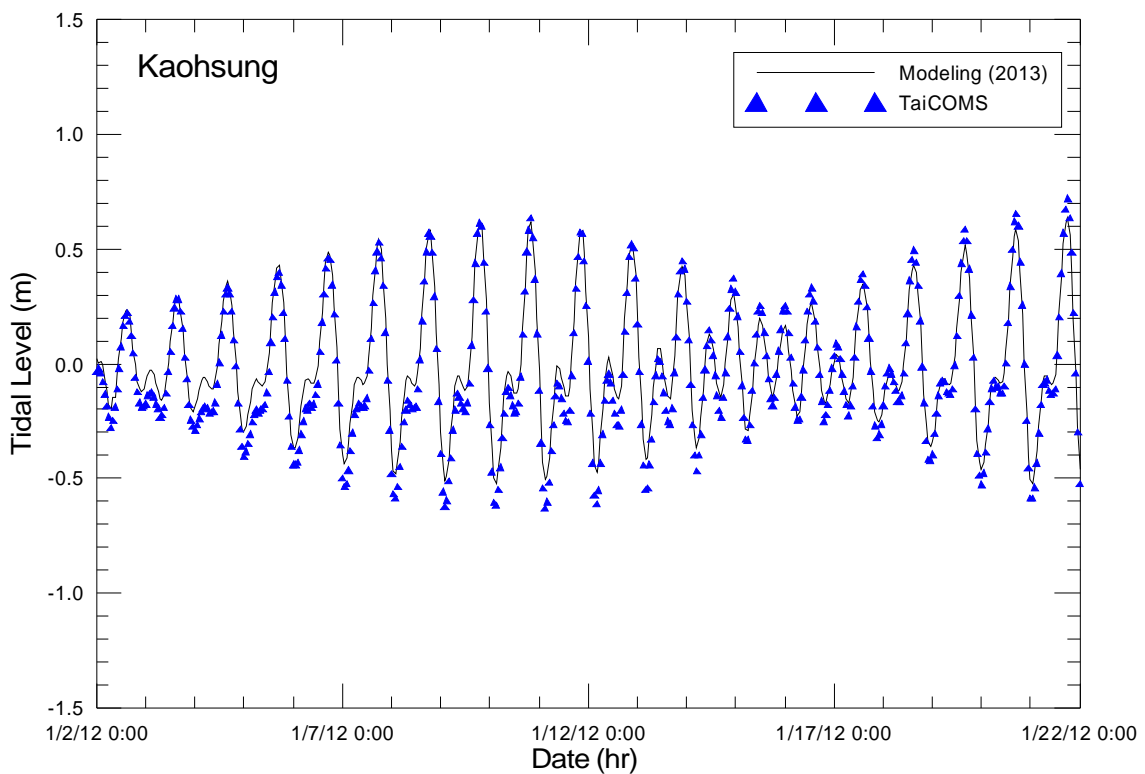


圖 4.14 高雄港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

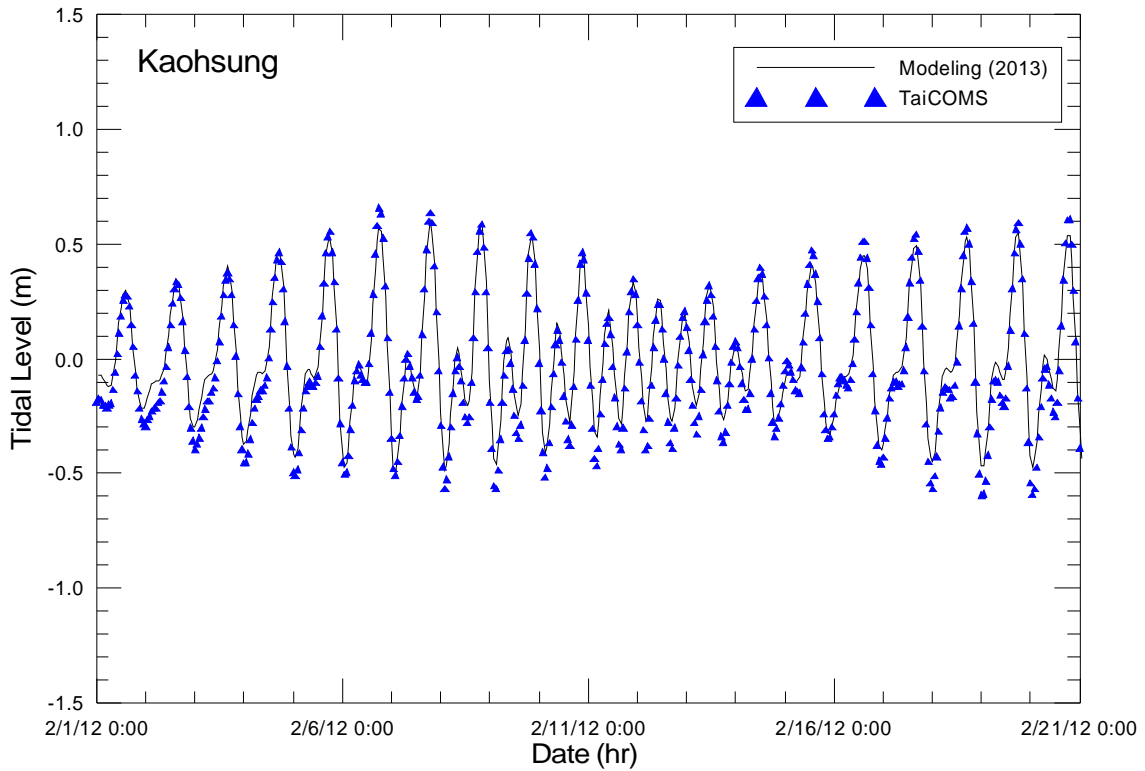


圖 4.14 (續 1)高雄港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

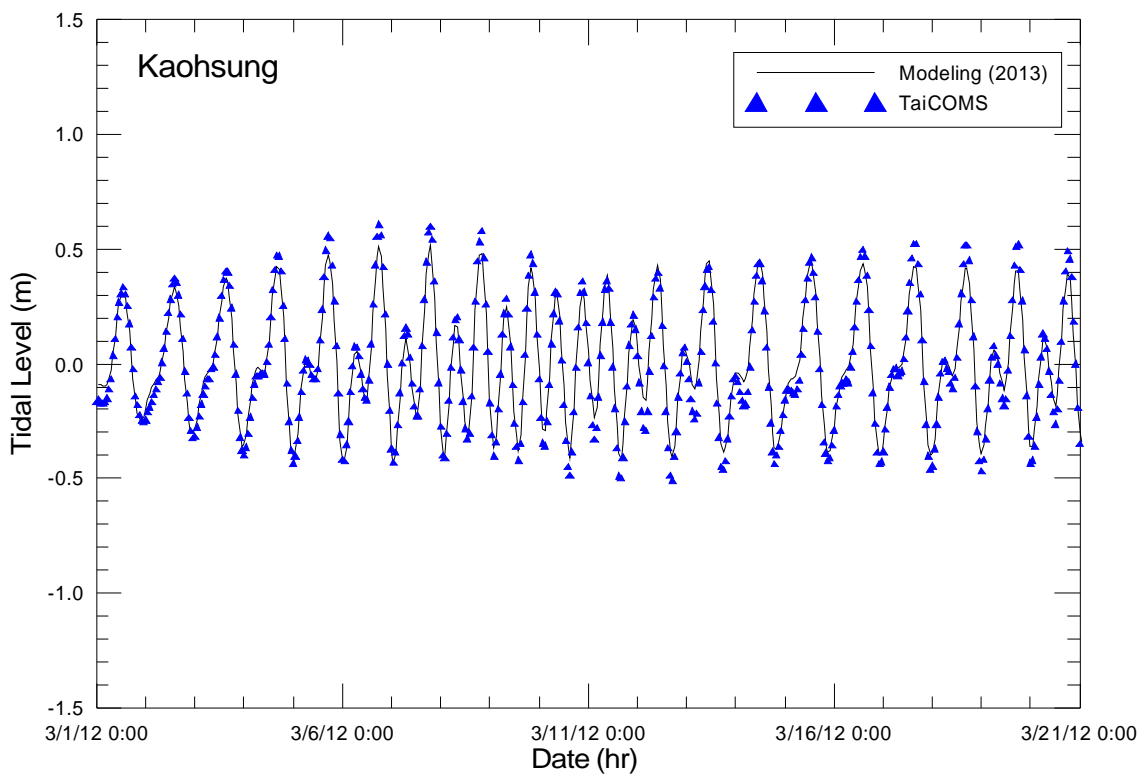


圖 4.14 (續 2)高雄港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

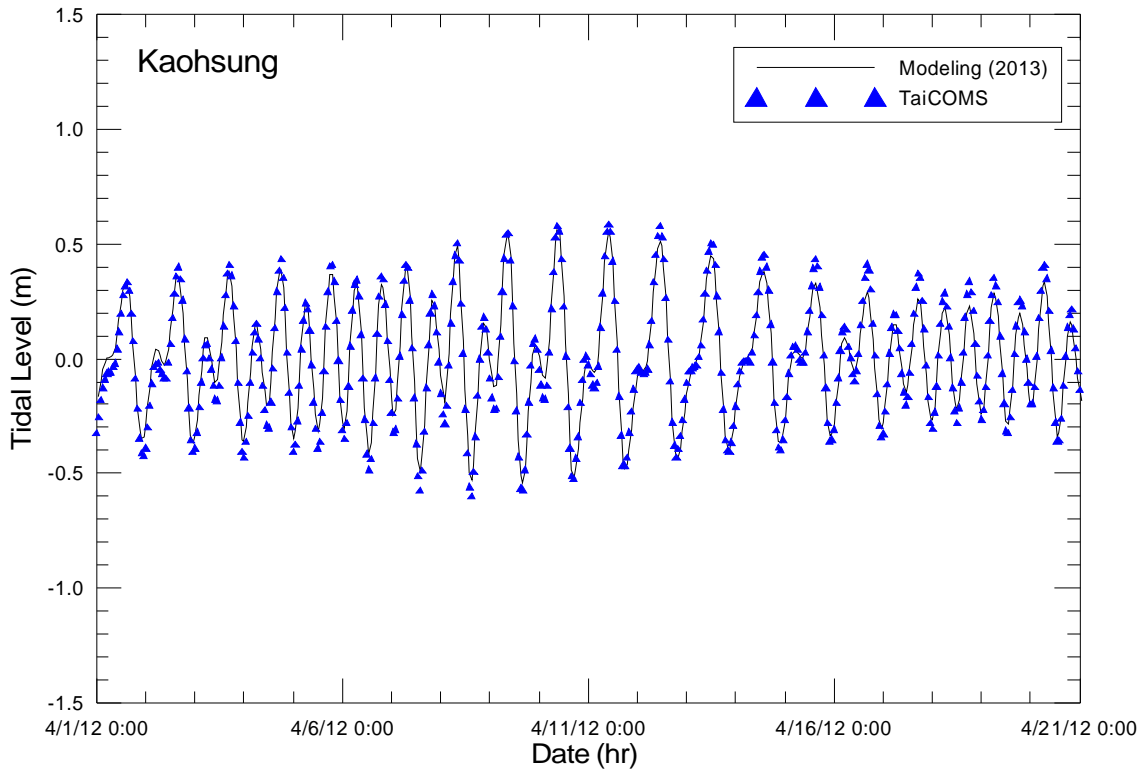


圖 4.14 (續 3)高雄港區天文潮位模擬值與 TaiCOMS 模擬值之比較圖

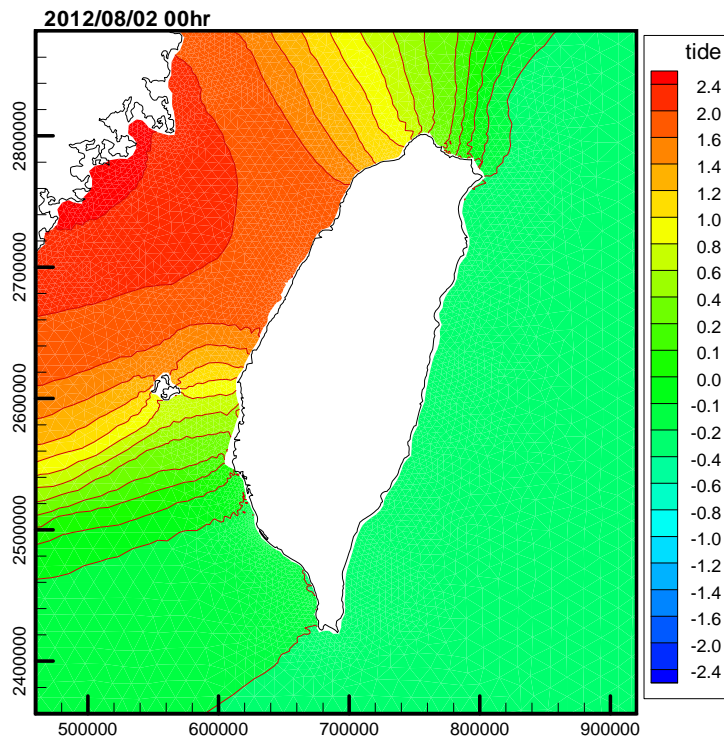


圖 4.15 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

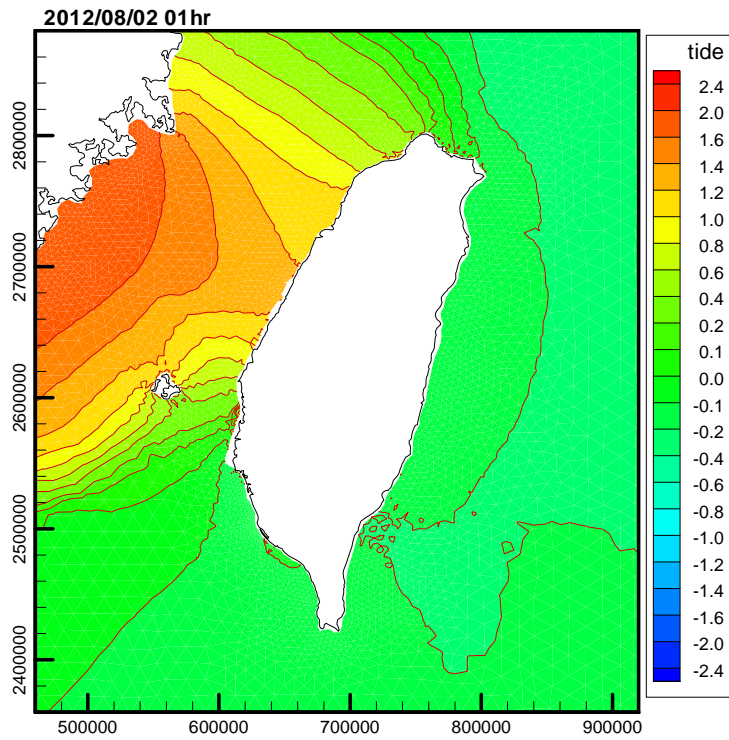


圖 4.15 (續 1) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

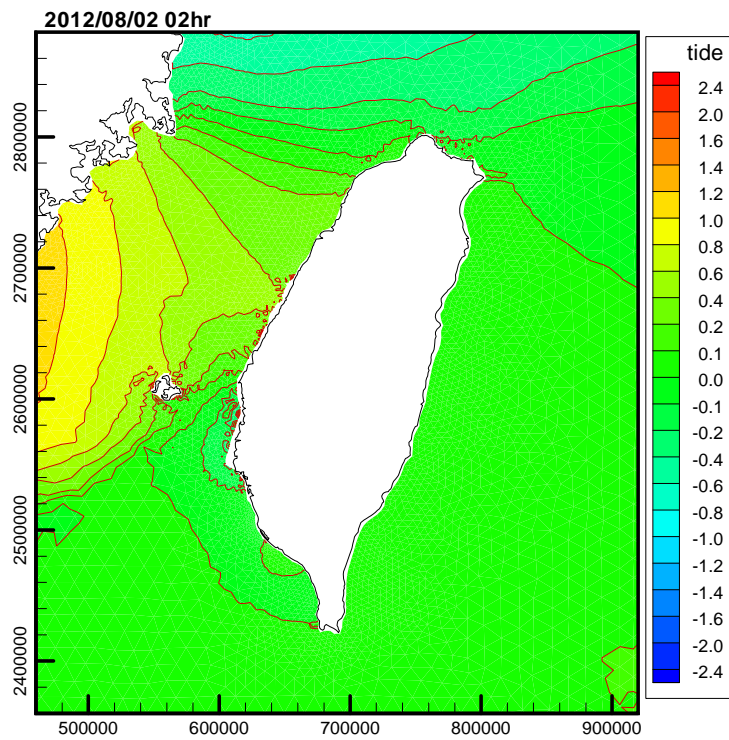


圖 4.15 (續 2) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

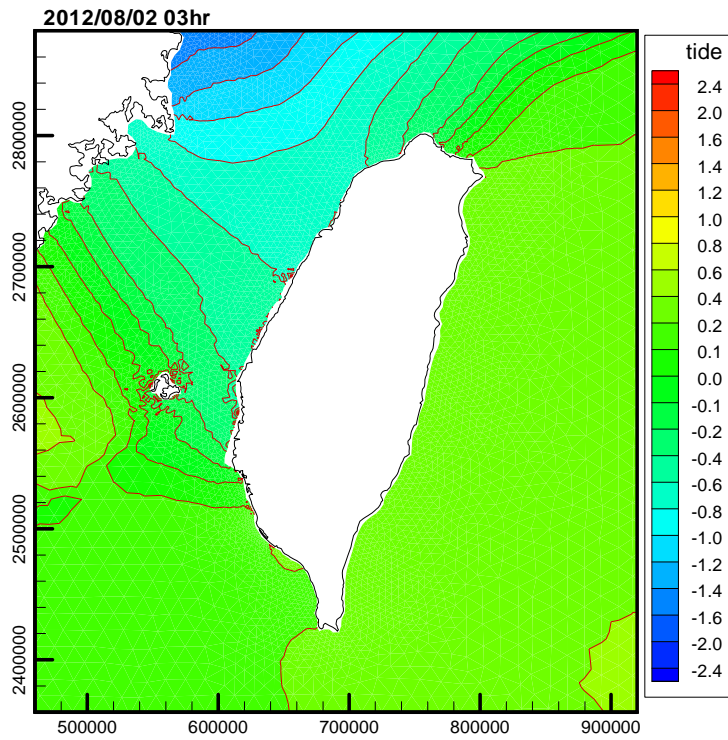


圖 4.15 (續 3) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

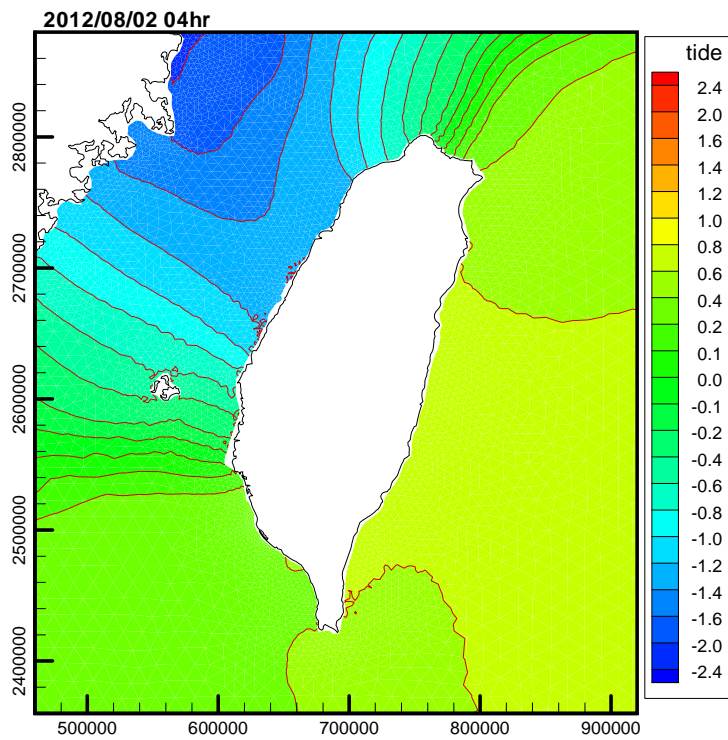


圖 4.15 (續 4) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

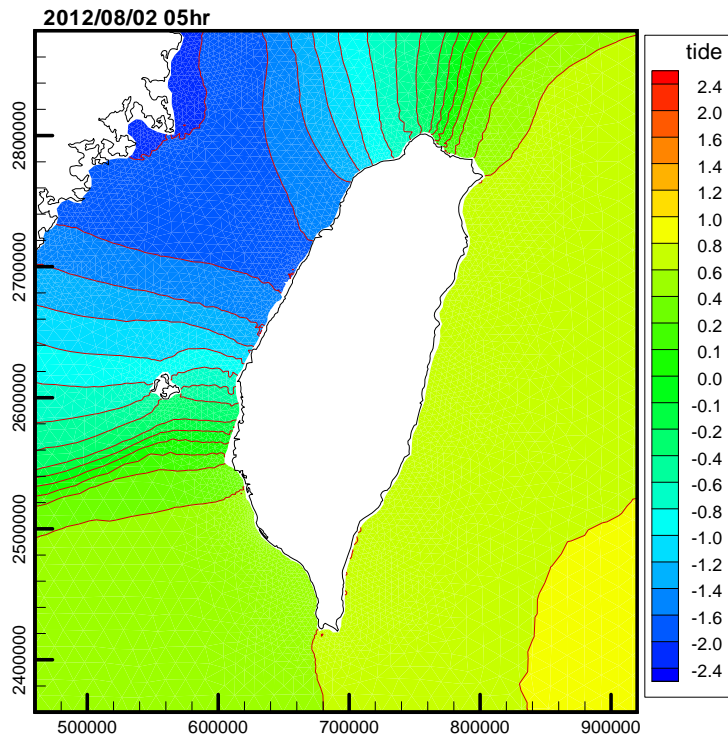


圖 4.15 (續 5) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

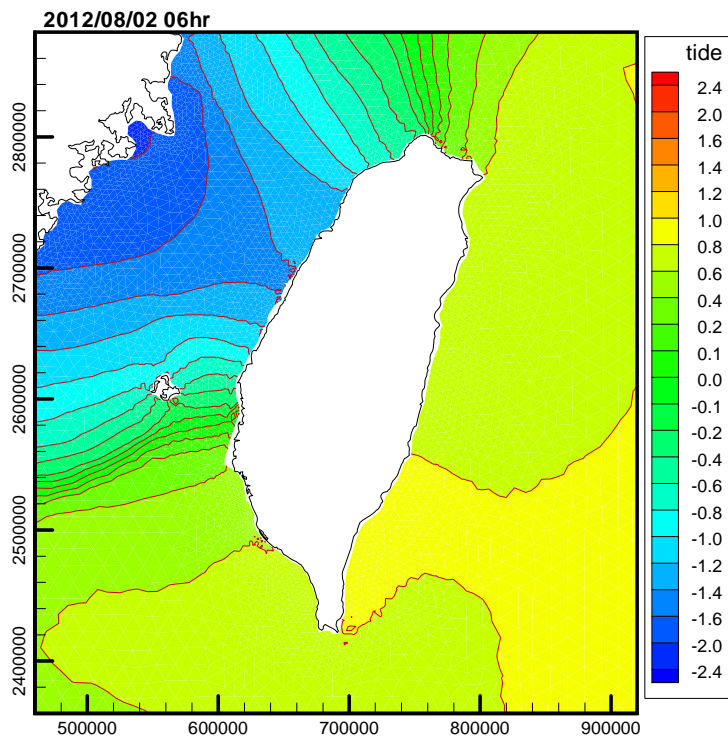


圖 4.15 (續 6) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

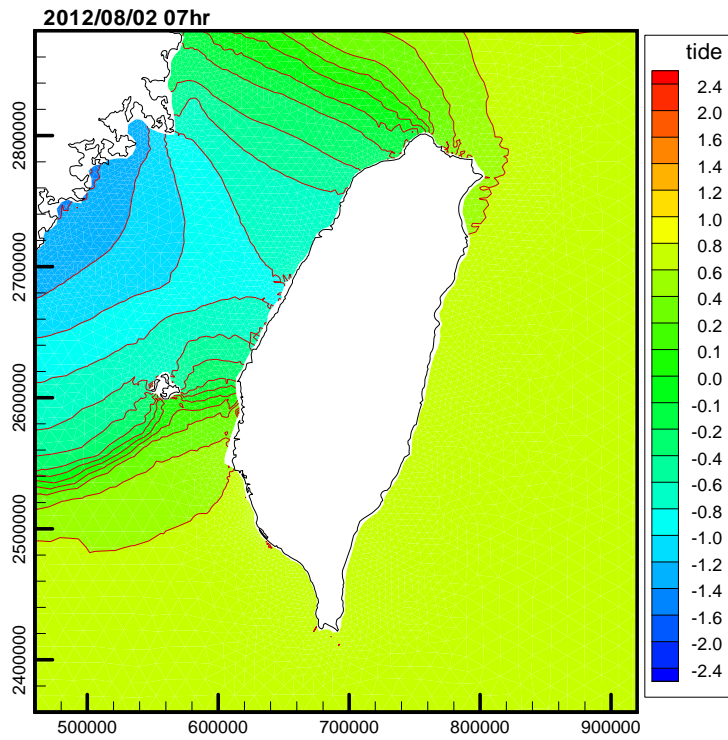


圖 4.15 (續 7) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

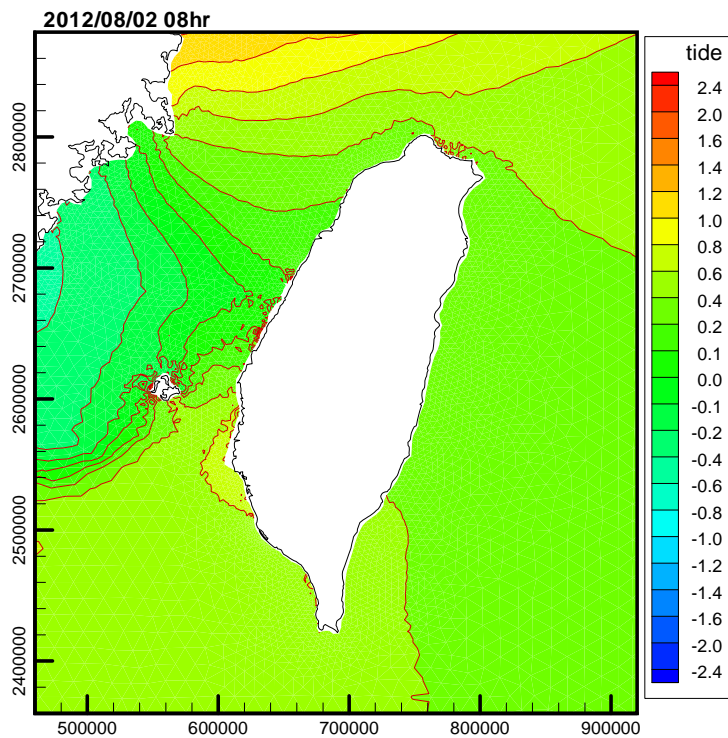


圖 4.15 (續 8) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

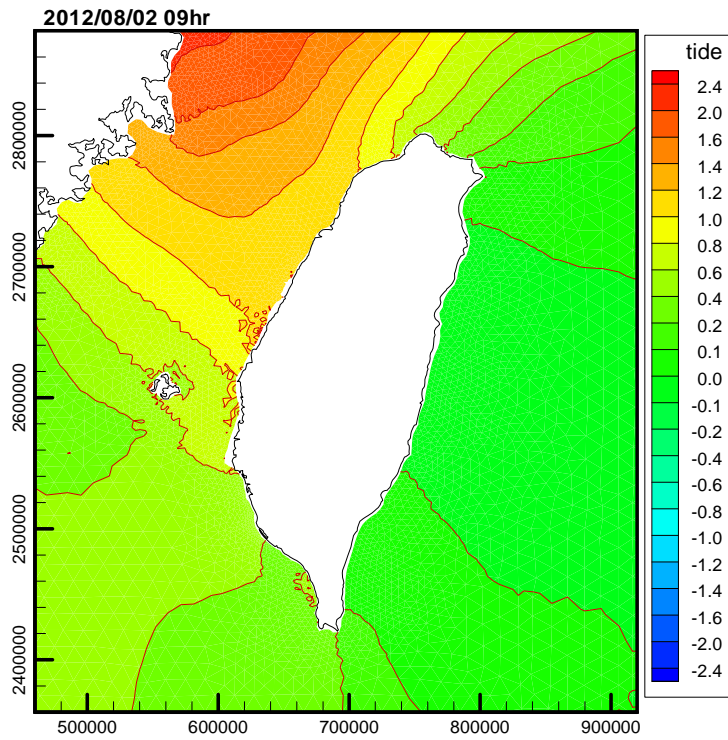


圖 4.15 (續 9) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

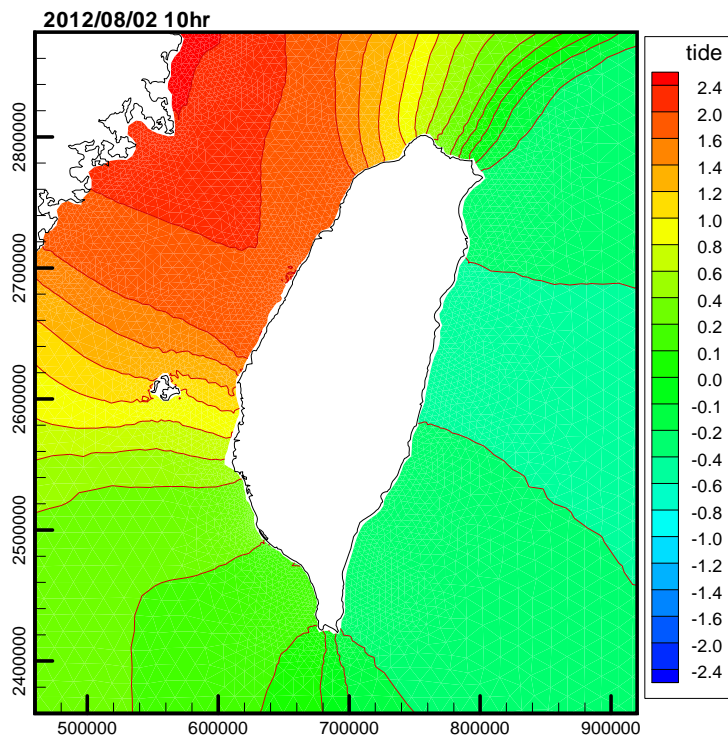


圖 4.15 (續 10) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

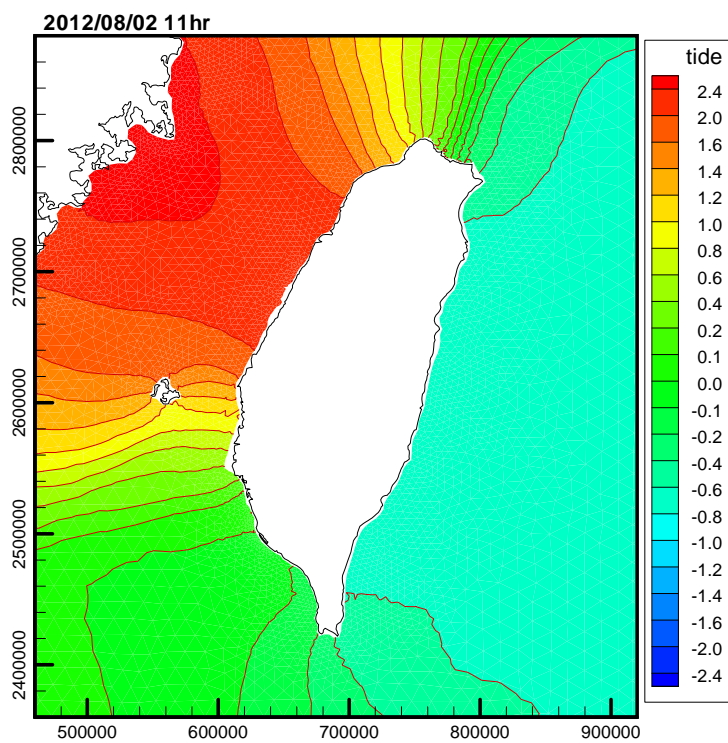


圖 4.15 (續 11) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

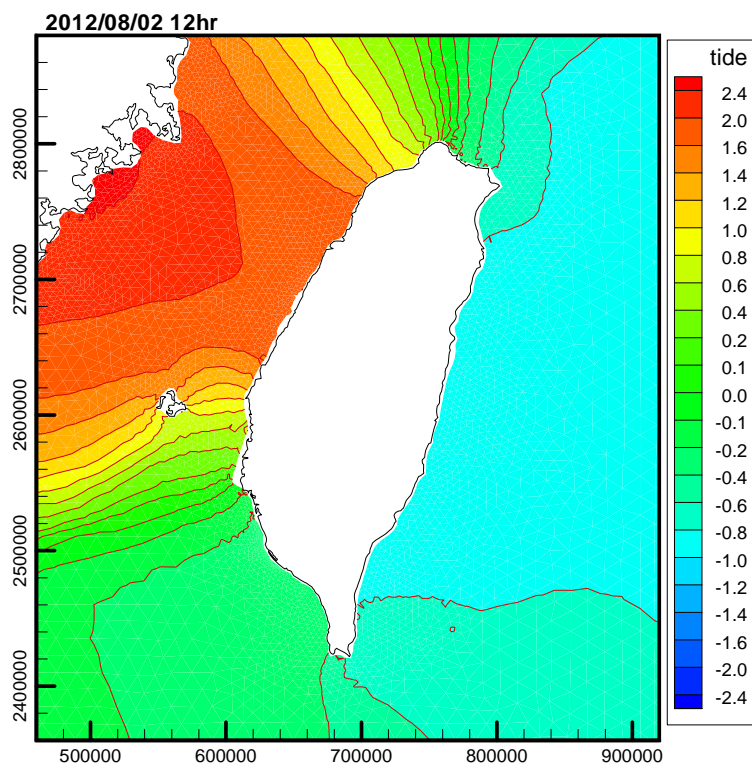


圖 4.15 (續 12) 臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬結果之等水位分布圖

4.2.5 颱風期間水位模擬結果

颱風實為威脅臺灣陸地及其周圍海域最嚴重之自然災害，每當颱風侵襲臺灣地區時，其挾帶的強風及豪雨不僅威脅陸地上人民生命及財產安全外，在臺灣周圍海域海面上伴隨颱風引起的風場及氣壓場變化更會對廣大海域之波浪、海流及水位等產生巨大影響，進而危及臺灣周圍海面航行安全及影響各港口之營運。因此有關颱風暴潮模擬長期為本計畫重要課題之一。

由於颱風期間發生的暴潮水位變化同屬於因氣壓變化及風場引起的水位變化(或稱為氣象潮)，因此本年度計畫參考 TaiCOMS 及其作業化需求，規劃利用中央氣象局提供的 NFS 模式之數值預報風壓場資料(如 MC 風壓場)，以及前述利用 NAO.99Jb 模式建置模式開放邊界節點之水位資料(天文潮)，分別為本計畫中尺度臺灣周圍海域暴潮模組之表面邊界條件及開放邊界條件之輸入資料，藉以模擬臺灣周圍海域含天文潮及氣象潮效應之水位變化。

針對中央氣象局提供的 NFS 模式之數值預報風壓場資料，本計畫選取第二層網格之風壓場數值預報資料(簡稱 MC 風壓場)為中尺度臺灣周圍海域暴潮模組表面邊界條件建置之依據。由於 TaiCOMS 作業系統已自動將下載的 NFS 模式之 MC 風壓場資料內插成經緯度網格座標之風壓場資料檔，故在應用上前述風壓場資料必需經前置作業以內插方式轉換儲存成中尺度有限元素網格節點座標之風壓場資料檔，始能為本計畫建置的暴潮模組使用。經前置處理作業後，與 TaiCOMS 作業系統之 MC 風壓場資料與本計畫有限元素網格風壓場資料之等壓線分布如圖 4.16 及圖 4.17 所示，顯示二者等壓線分布是一致的，證明本計畫有限元素網格風壓場資料前置處理無誤。

本計畫選取 2012 年 6 ~ 8 月份 MC 風壓場資料進行數值模擬，並針對安平港海域及高雄港海域分別選取有限元素網格節點 No.1937 及 No.1924 為模式輸出模擬結果之檢核點(參考圖 4.6 所示)。圖 4.18 及圖 4.19 所示分別為安平港海域及高雄港海域檢核點水位模擬結果(菱形)與前述僅考慮天文潮變化之水位模擬結果(圓形)比較圖，圖中十字

形符號代表前者與後者(即僅考慮天文潮變化)模擬值之差值，同時本計畫定義此一差值為由數值預報之氣壓及風場效應引起的氣象潮成份。模擬結果顯示 6~8 月份在低氣壓效應下，考慮氣象潮之水位模擬值普遍高於天文潮變化之水位模擬值。針對氣壓差值(相對於標準大氣壓值)與本計畫氣象潮水位模擬值關係，本計畫分別選取模式安平港海域及高雄港海域檢核點之氣壓差值及氣象潮模擬值比較其時序列變化趨勢，如圖 4.20 及圖 4.21 所示，顯示整體變化趨勢上二者具有高度的一致性。

針對上述水位模擬之氣象潮分析結果，本計畫選取高雄海域檢核點之分析值與高雄港潮位觀測資料與天文潮調和分析(2010 年 1 月至 2012 年 12 月)之差值進行比較，如圖 4.22 所示，結果顯示在非颱風期間二者變化趨勢上尚屬一致，其中偏差較大的部份原因可能歸因於觀測誤差以及調和分析誤差所致；致於颱風期間發生顯著誤差原因除了模式採用的數值預測風壓場資料與現況誤差已存在因素所致外，尚包括模式檢核點在近岸海域內明顯受到向、離岸風之影響，但潮位觀測點位於港內封閉水域致觀測值受到向、離岸風之影響並不顯著等因素。

在颱風期間暴潮偏差最大值分析結果比較上，得知在輕度颱風泰利侵臺期間(06/19~21)高雄港海域檢核點最大偏差模擬值為 0.155m(19 日 14 時)，潮位觀測值分析結果為 0.266m(20 日 11 時)，另安平港海域檢核點最大偏差模擬值為 0.158m(19 日 14 時)；中度颱風蘇拉侵臺期間(07/30~08/03)高雄港海域檢核點最大偏差模擬值為 0.241m(2 日 1 時)，潮位觀測值分析結果為 0.343m(1 日 10 時)，另安平港海域檢核點最大偏差模擬值為 0.245m(1 日 2 時)；此外，中度颱風天秤侵臺期間(08/21~08/28)高雄港海域檢核點最大偏差模擬值為 0.283m(27 日 17 時)，潮位觀測值分析結果為 0.187m(27 日 18 時)，另安平港海域檢核點最大偏差模擬值為 0.30m(27 日 17 時)。至於，模式模擬結果之暴潮水位偏差分布情形，本計畫選取輕度颱風泰利水位偏差分析結果為例，繪製等水位偏差分析情形如圖 4.23 所示，顯示模式在西南海域及其邊界附近呈現出不合理的現象，然此問題發生原因及其改善研究將是本計畫模式未來改善之首要。

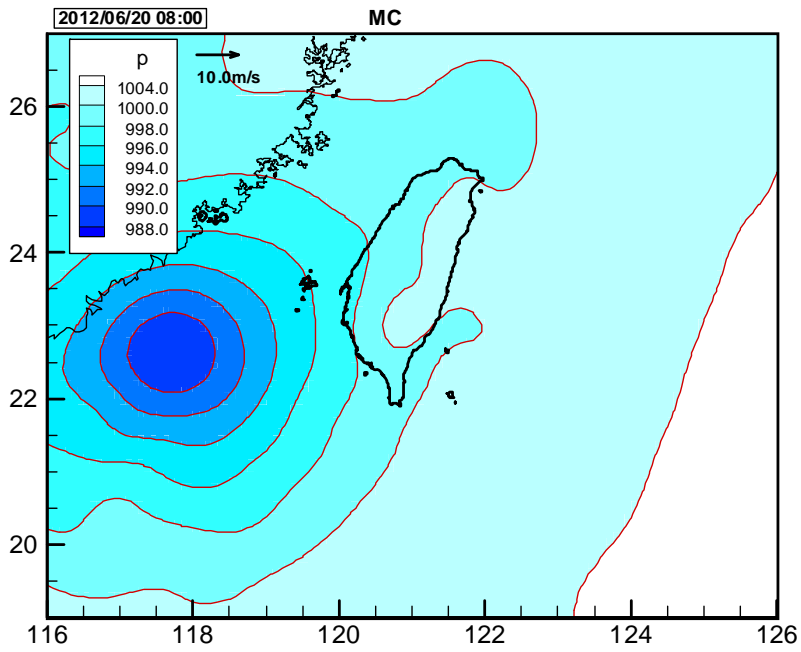


圖 4.16 TaiCOMS 作業化 MC 風壓場之等壓線分布圖
(2012 年輕度颱風泰利)

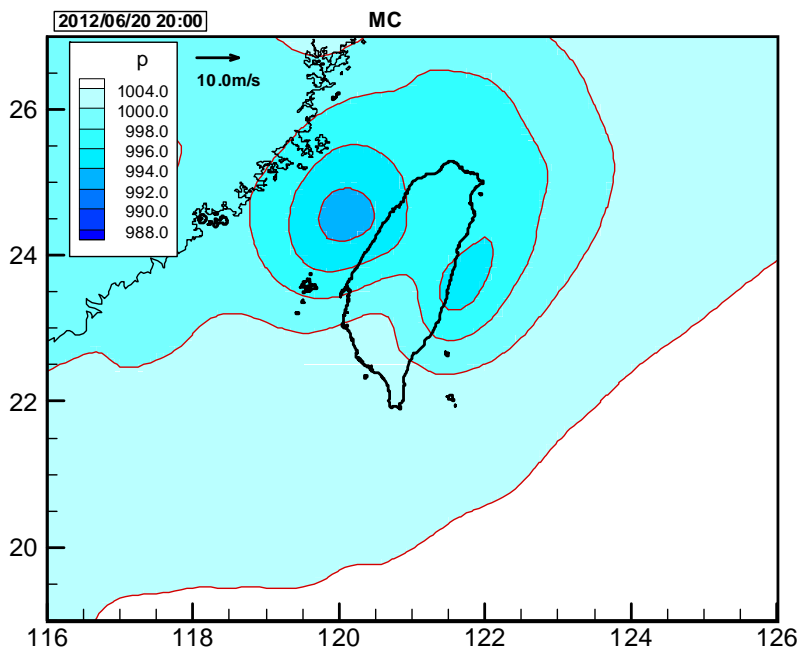


圖 4.16 (續) TaiCOMS 作業化 MC 風壓場之等壓線分布圖
(2012 年輕度颱風泰利)

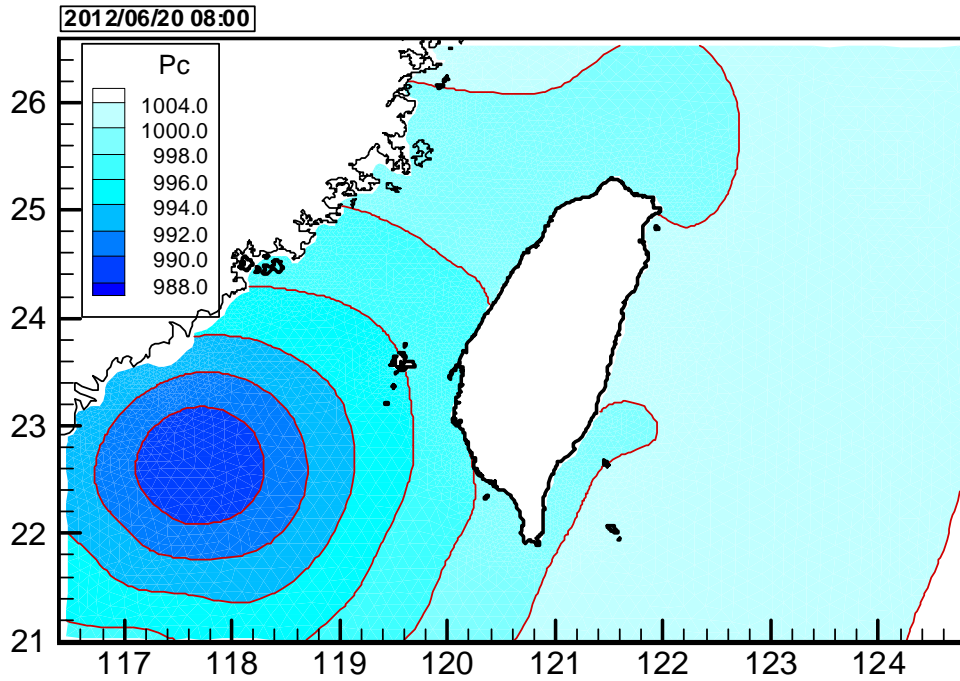


圖 4.17 本計畫有限元素網格風壓場之等壓線分布圖
(2012 年輕度颱風泰利)

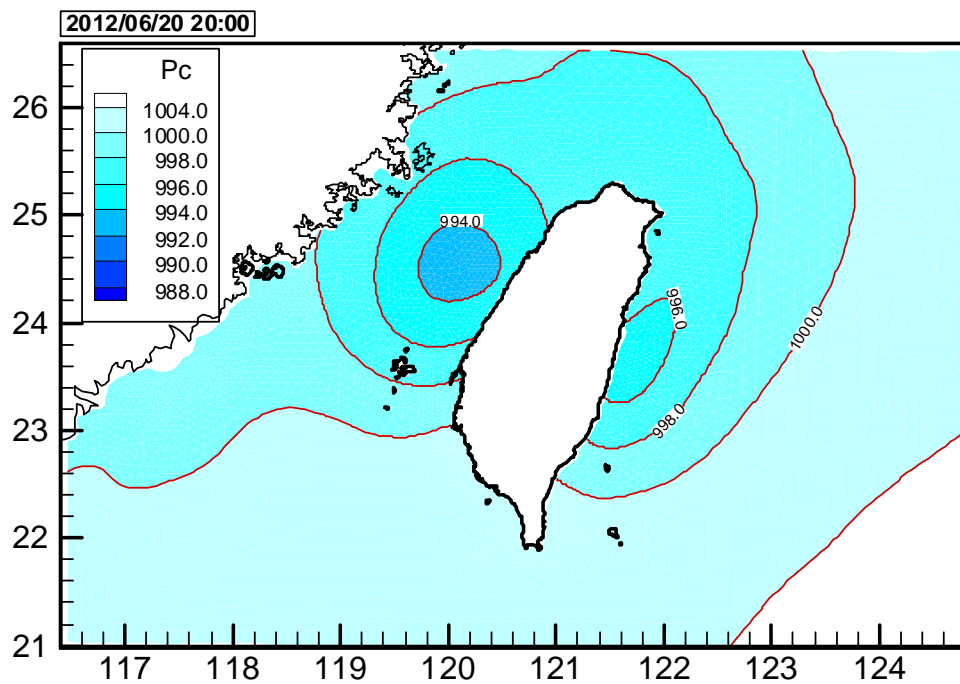


圖 4.17 (續)本計畫有限元素網格風壓場之等壓線分布圖
(2012 年輕度颱風泰利)

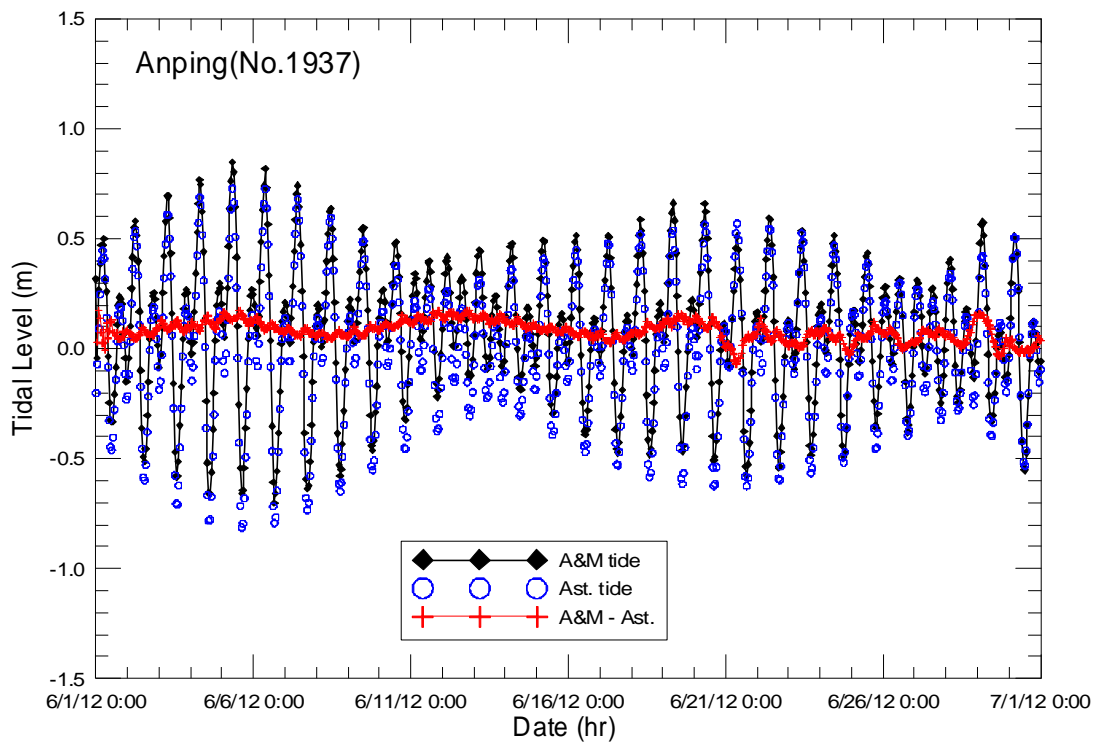


圖 4.18 安平港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖

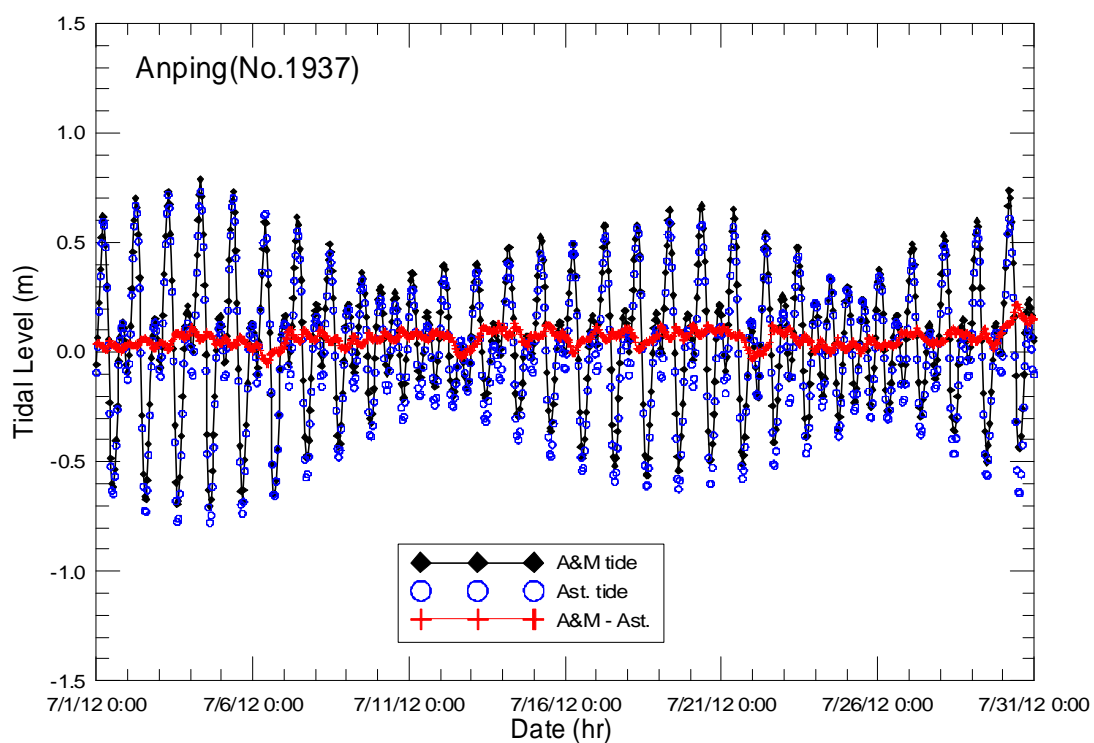


圖 4.18 (續 1) 安平港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖

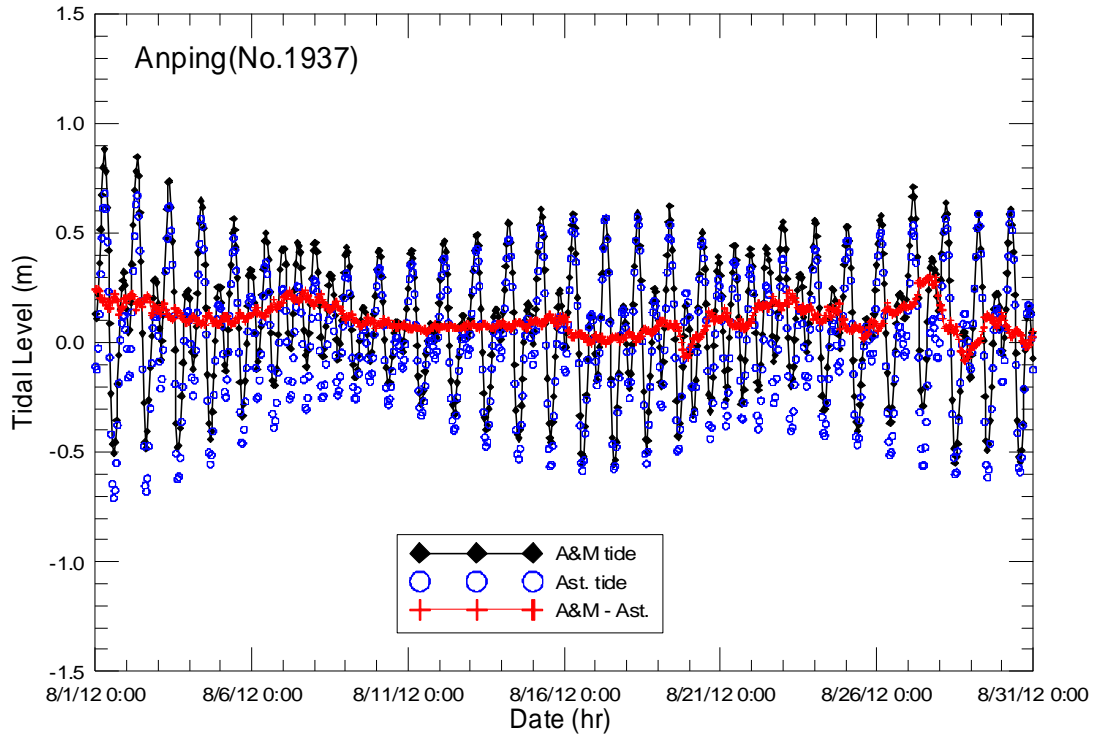


圖 4.18 (續 2)安平港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖

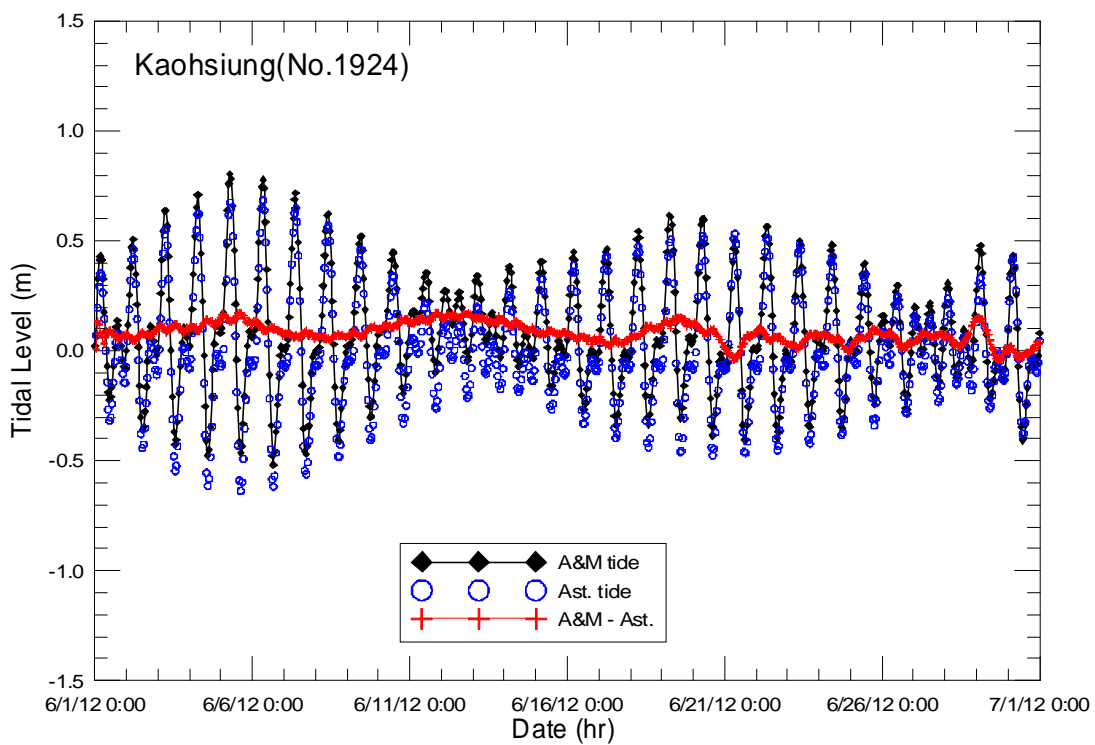


圖 4.19 高雄港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖

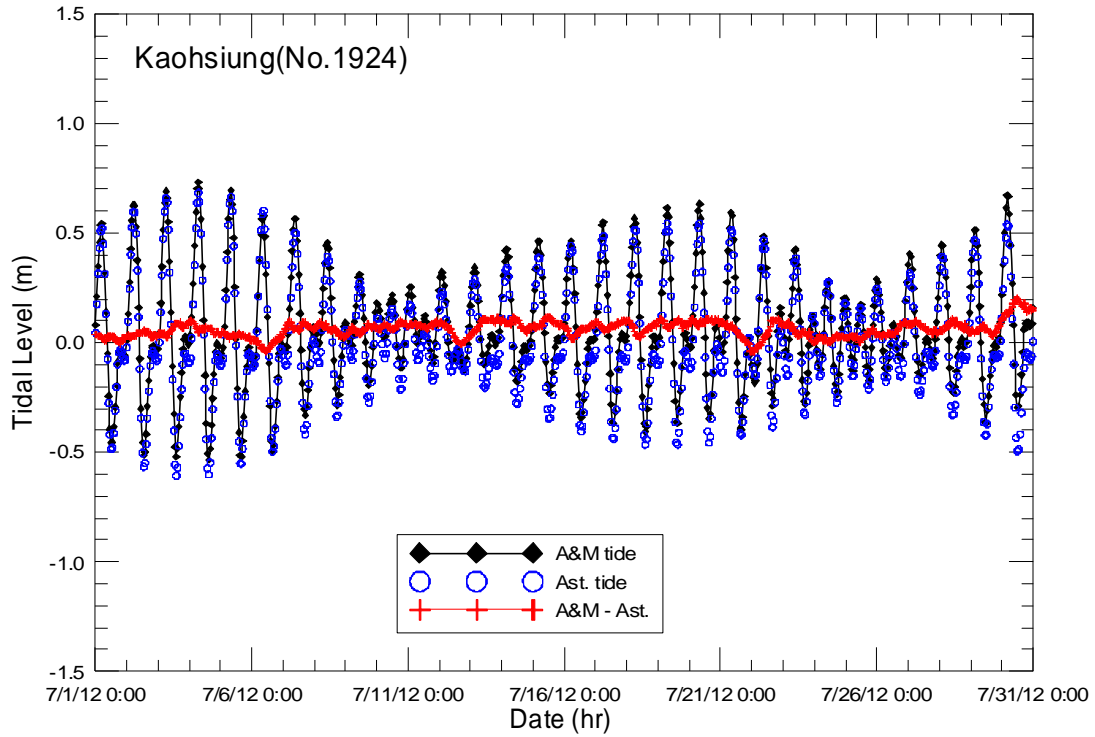


圖 4.19 (續 1)高雄港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖

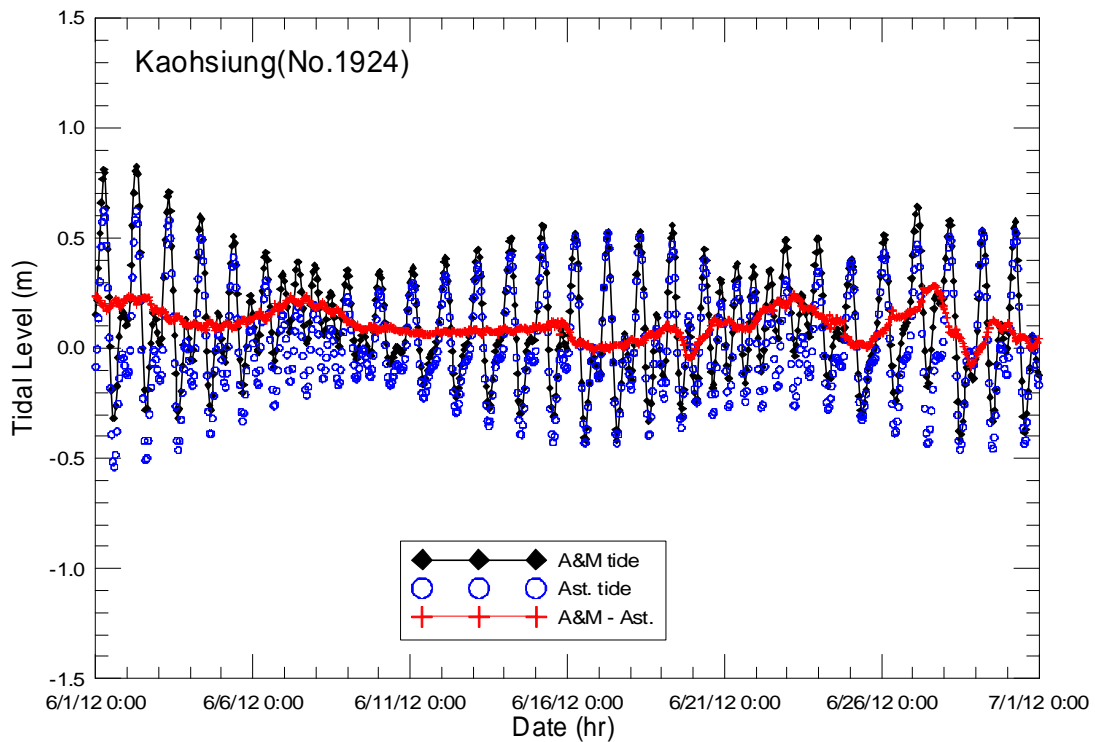


圖 4.19 (續 2)高雄港海域有、無氣象潮效應之水位模擬結果比較圖

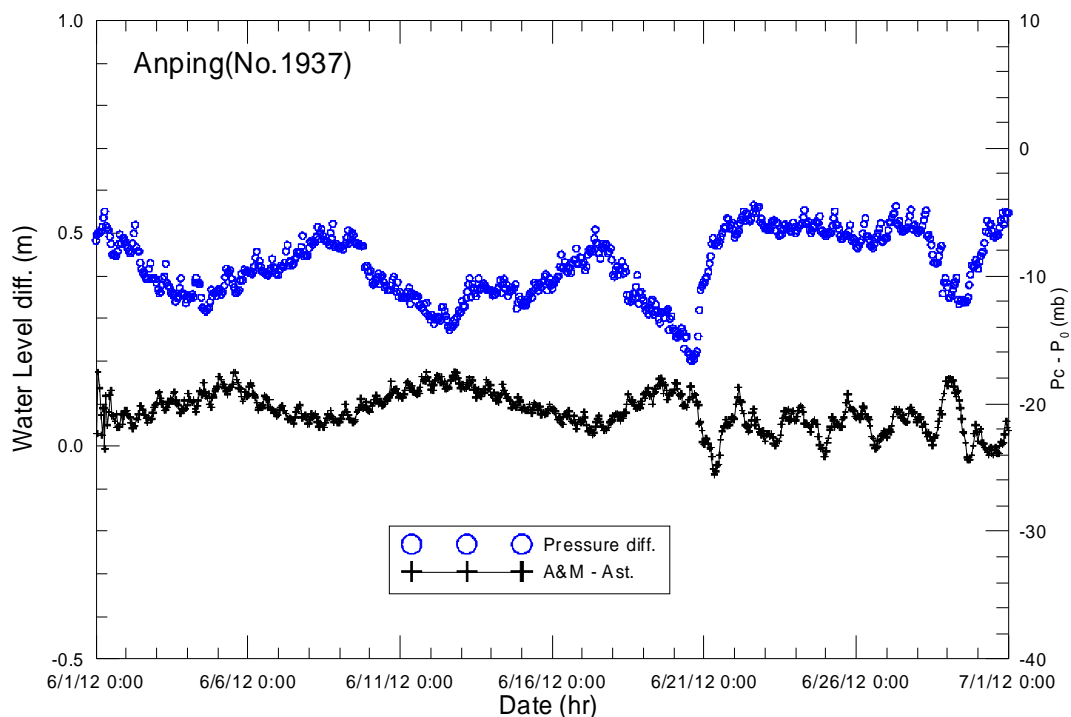


圖 4.20 安平港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化之時序列圖

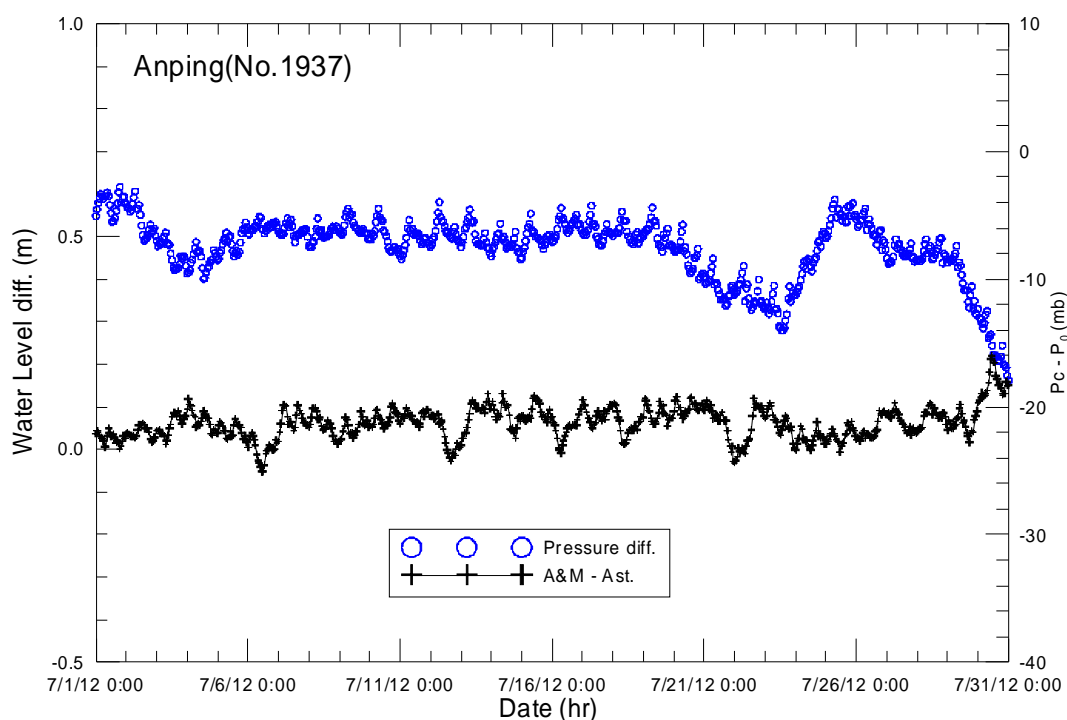


圖 4.20 (續 1) 安平港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化之時序列圖

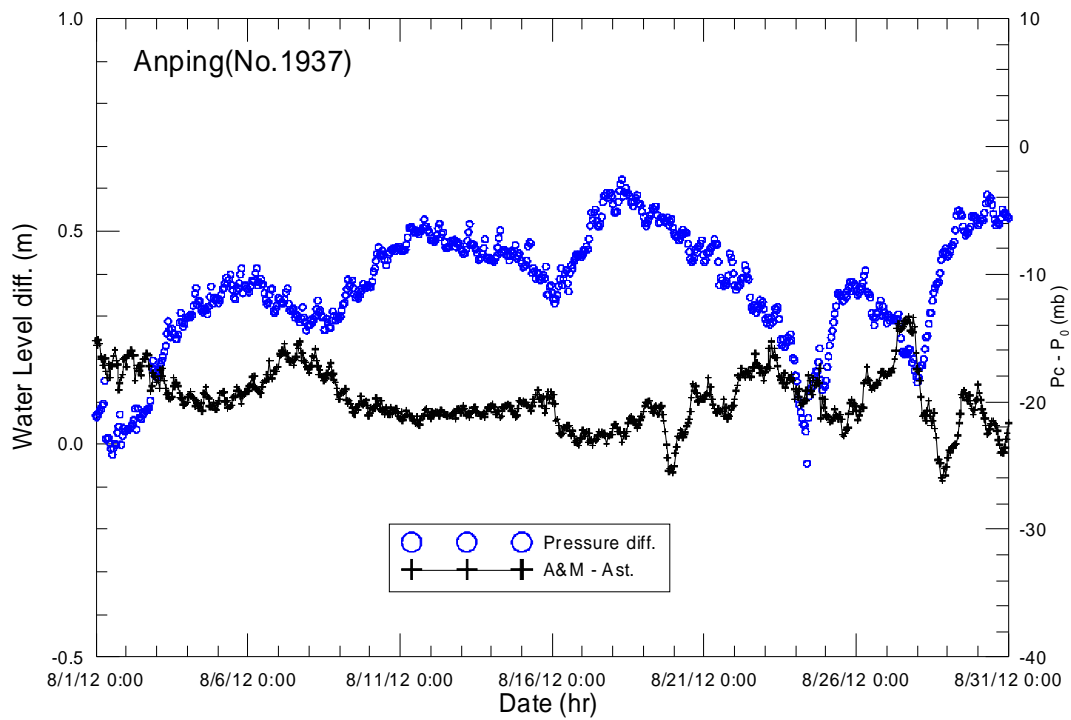


圖 4.20 (續 2)安平港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化之時序列圖

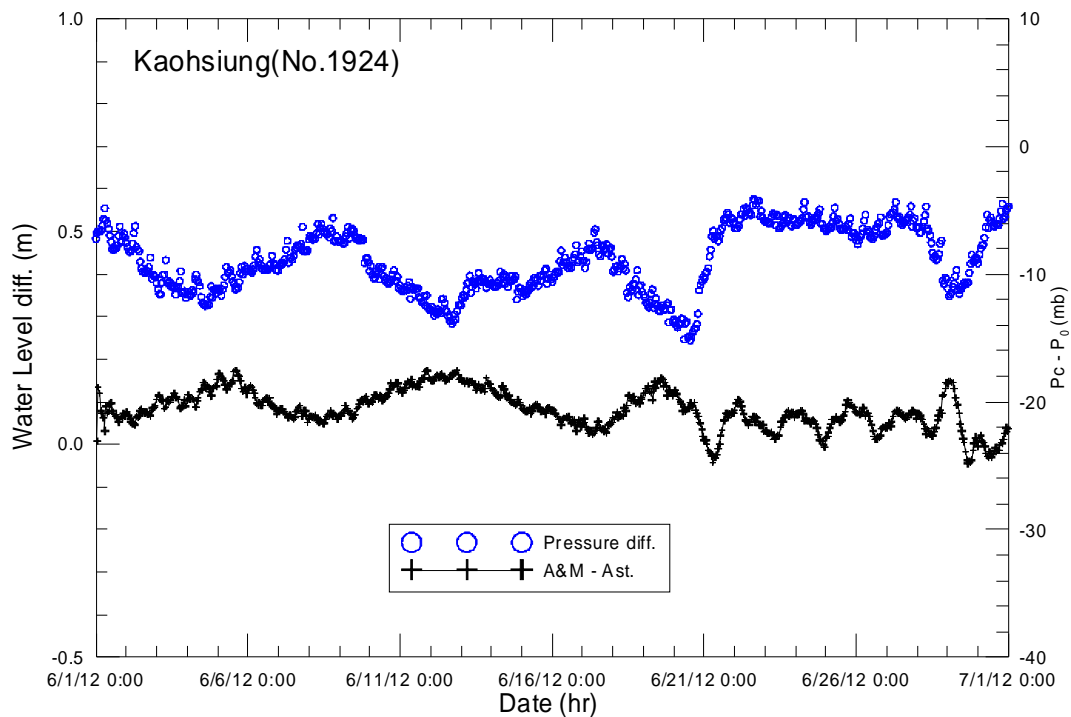


圖 4.21 高雄港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化之時序列圖

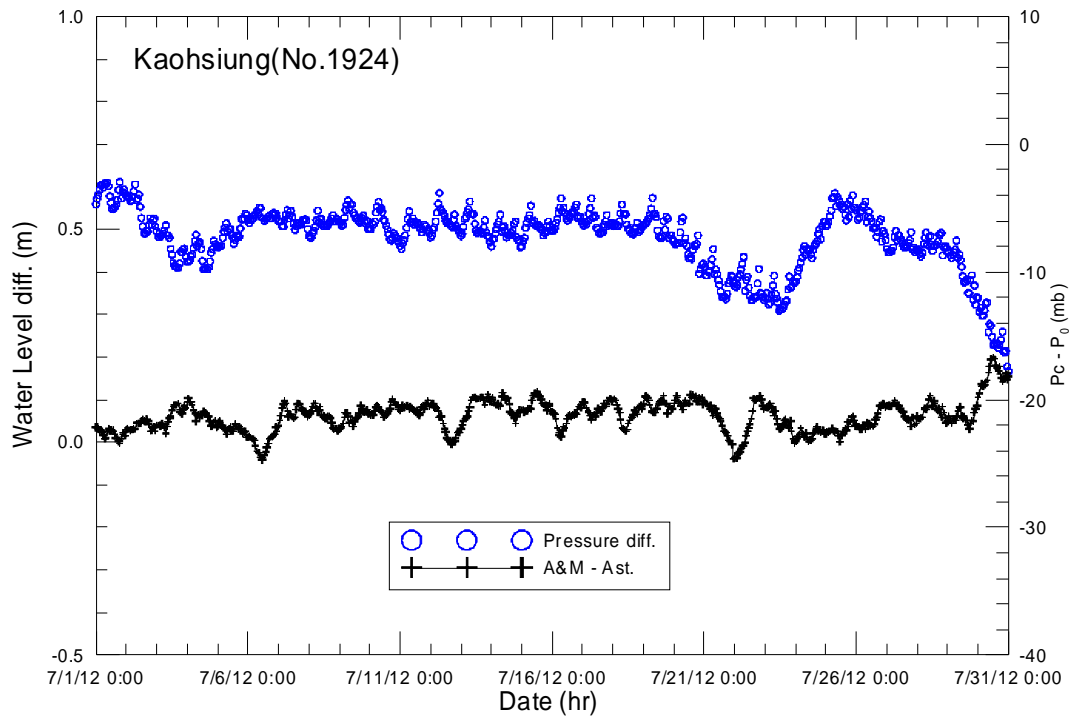


圖 4.21 (續 1)高雄港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化之時序列圖

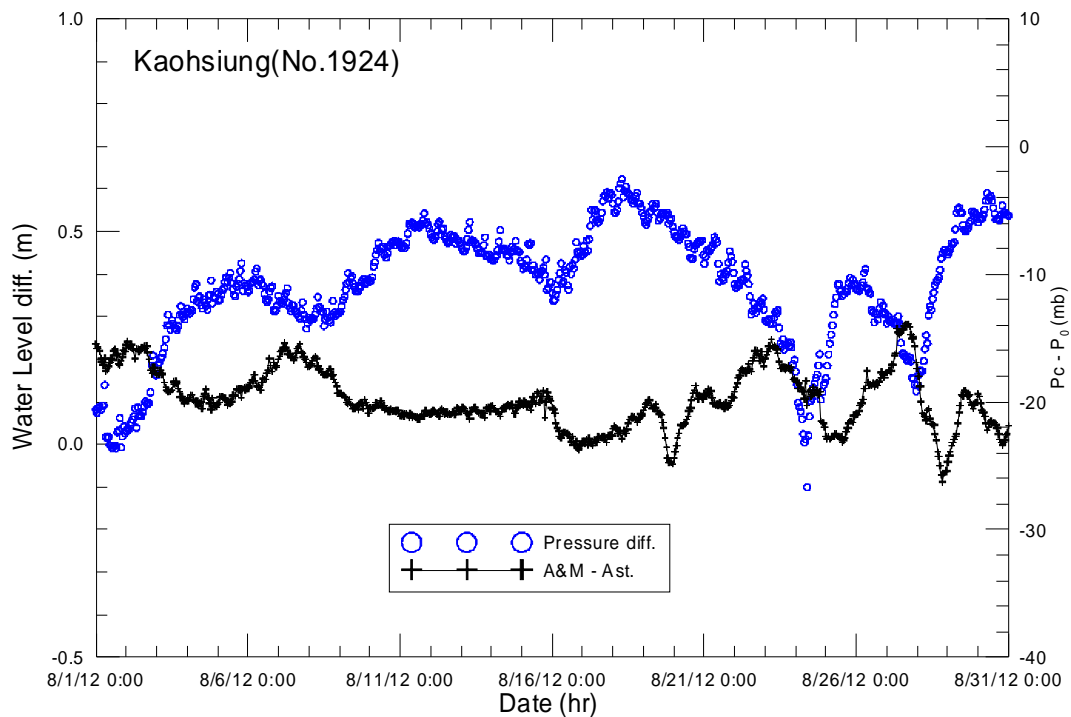


圖 4.21 (續 2)高雄港海域檢核點氣壓差變化與模式氣象潮水位變化之時序列圖

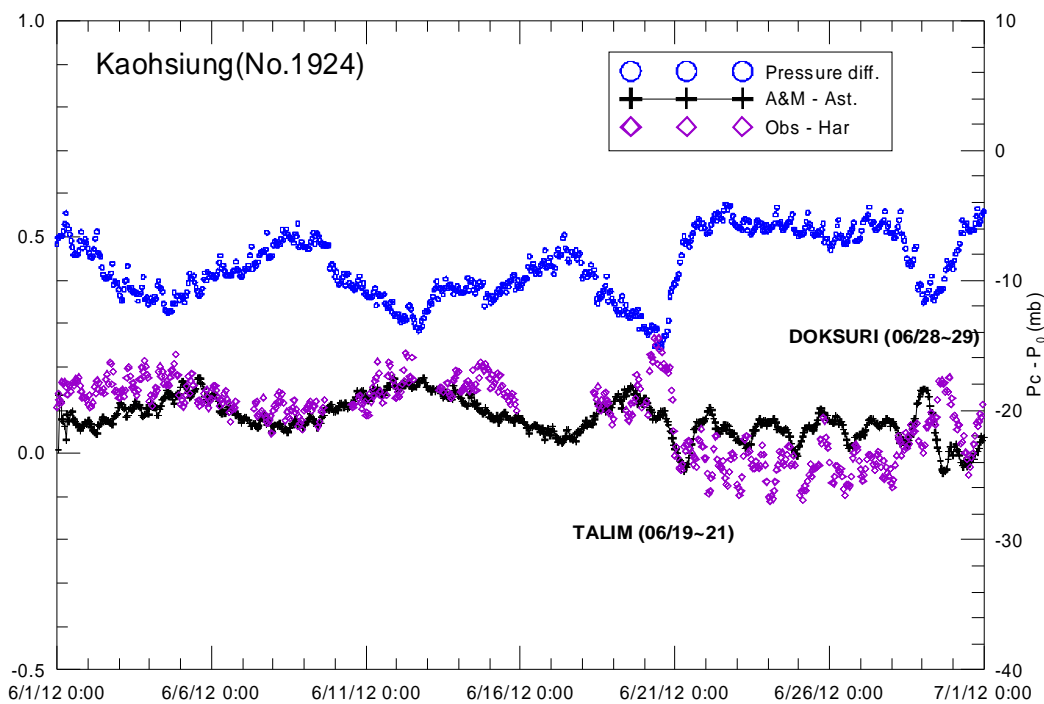


圖 4.22 高雄港海域檢核點氣壓差預測值、氣象潮水位變化模擬值及觀測資料調和分析預測值之時序列圖

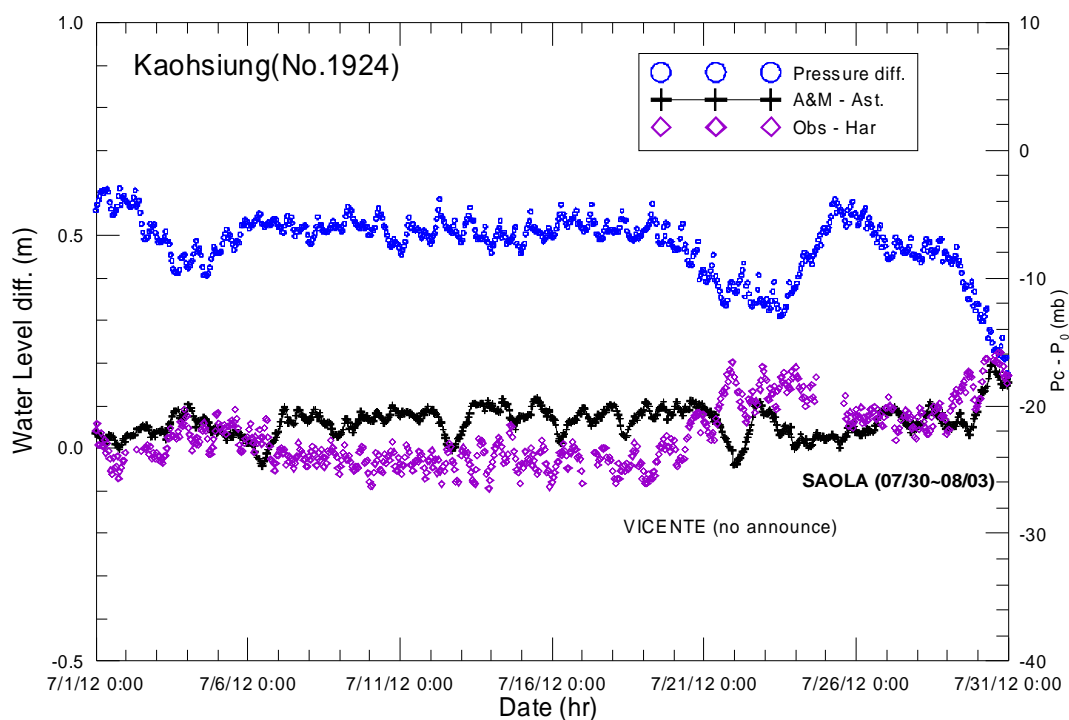


圖 4.22 (續 1)高雄港海域檢核點氣壓差預測值、氣象潮水位變化模擬值及觀測資料調和分析預測值之時序列圖

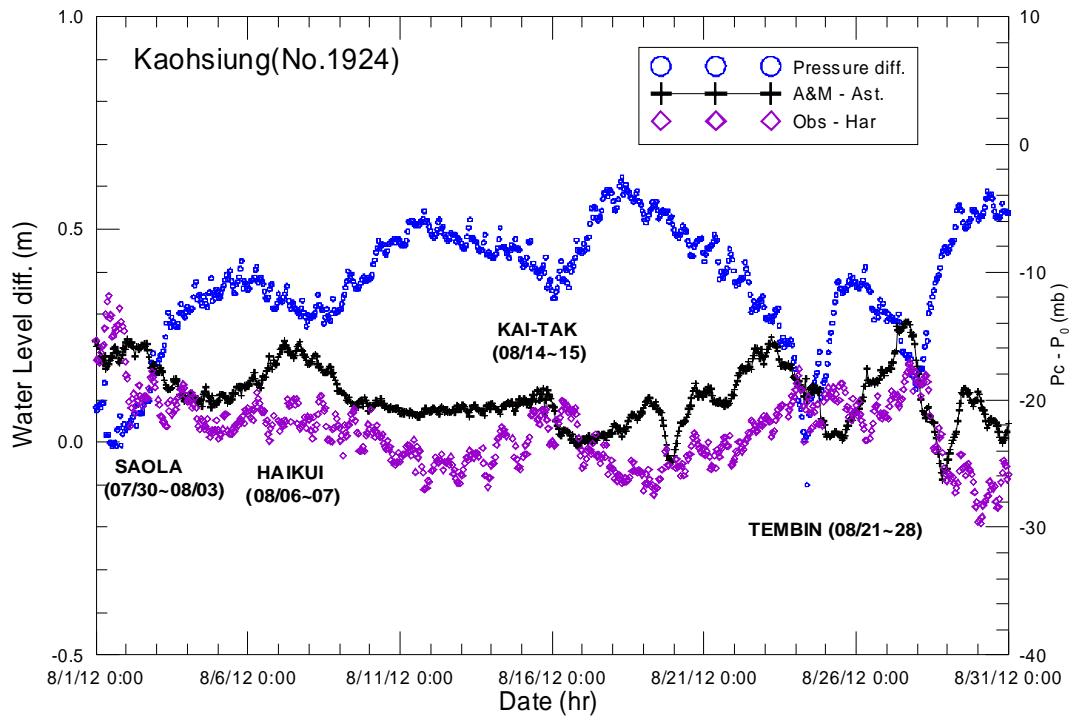


圖 4.22 (續 2)高雄港海域檢核點氣壓差預測值、氣象潮水位變化模擬值及觀測資料調和分析預測值之時序列圖

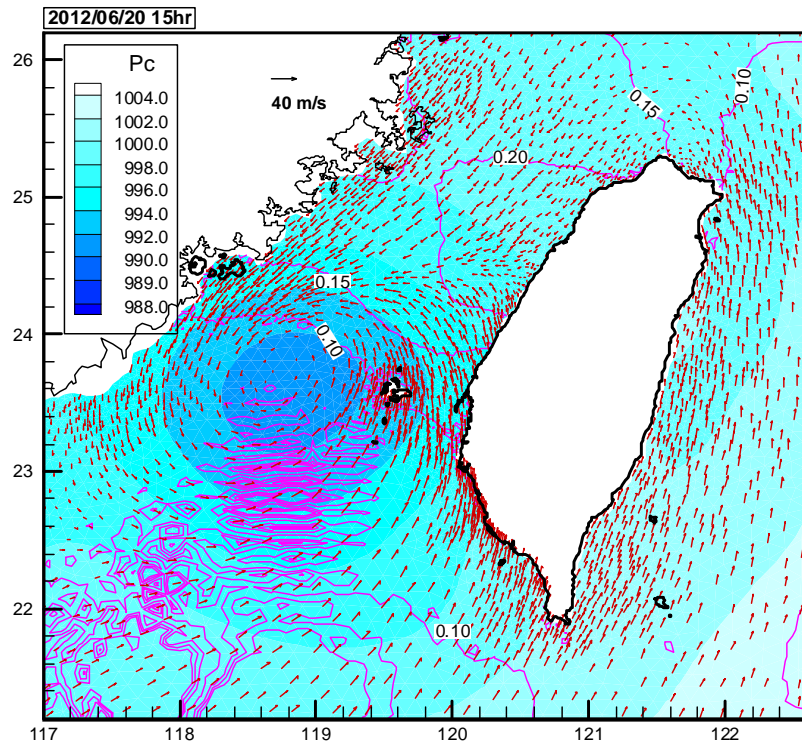


圖 4.23 臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖

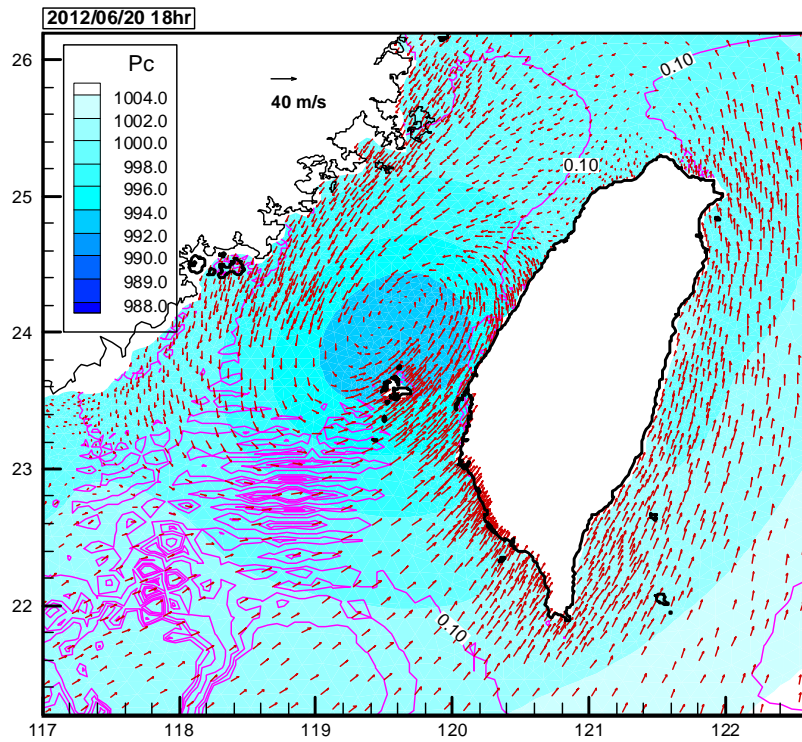


圖 4.23 (續 1) 臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖

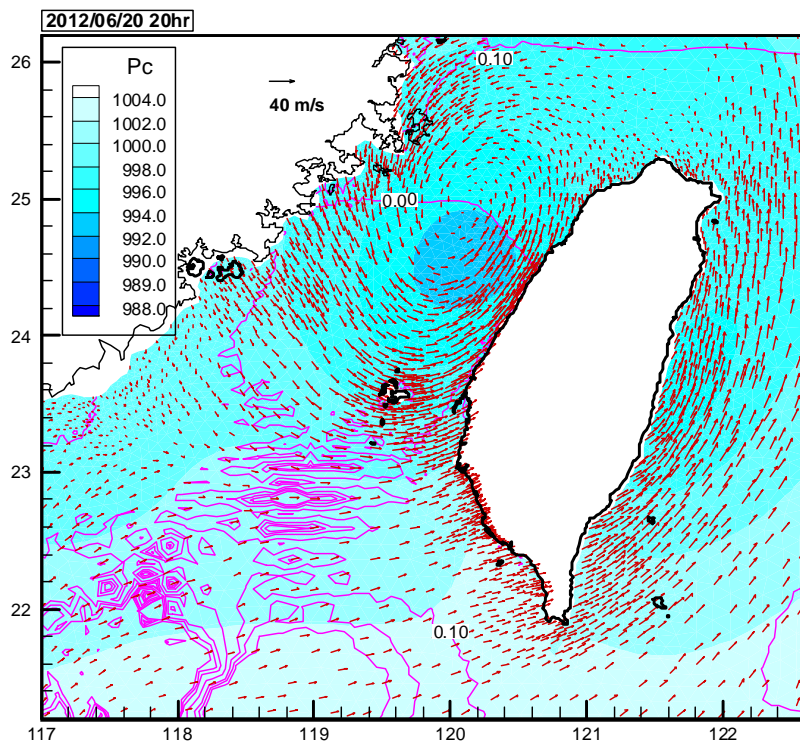


圖 4.23 (續 2) 臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖

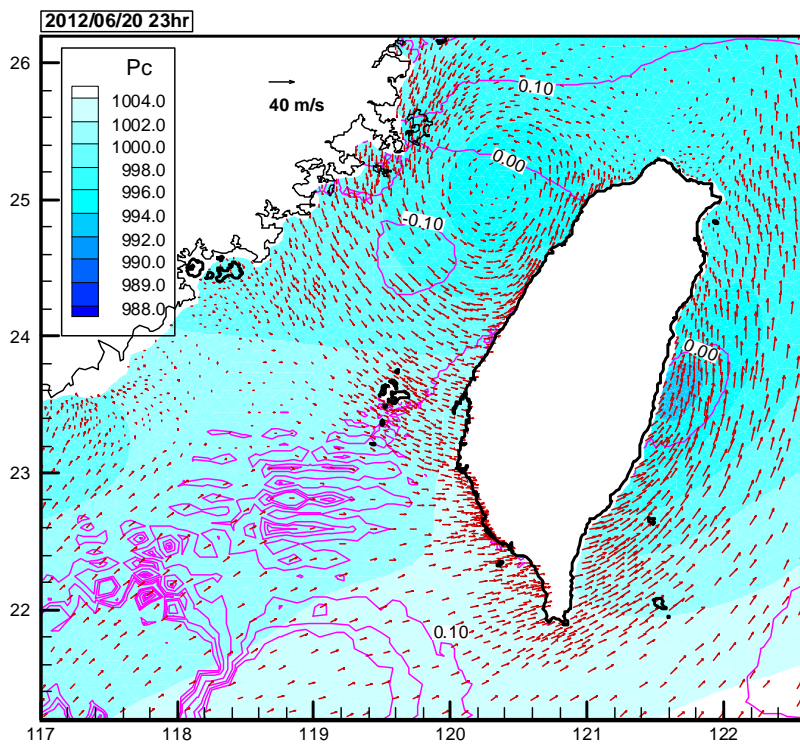


圖 4.23 (續 3) 臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之水位偏差分布圖

4.3 小尺度安平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，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、安平港港區近岸水位及流場現況模擬等工作。分述如下：

4.3.1 模擬範圍及有限元素網格之修正

圖 4.24 所示為 98 年度計畫初步建置的安平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，顯示原安平港港區近岸水動力模組模擬範圍僅考慮安平港港口以外海域，其範圍北起曾文溪出海口南岸，向西南延伸至高雄市茄萣區興達漁港北側，南北向離岸邊界相距約 20 公里；圖中三角形有限元素數值計算網格係由 4092 個節點及 7715 個三角元素構成的。

本計畫基於安平漁港舊港口已於 98 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港港內水域之缺失；本年度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 4.25 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，其中安平港港區內及港口附近之有限元素網格分布情形，如圖 4.26 所示。

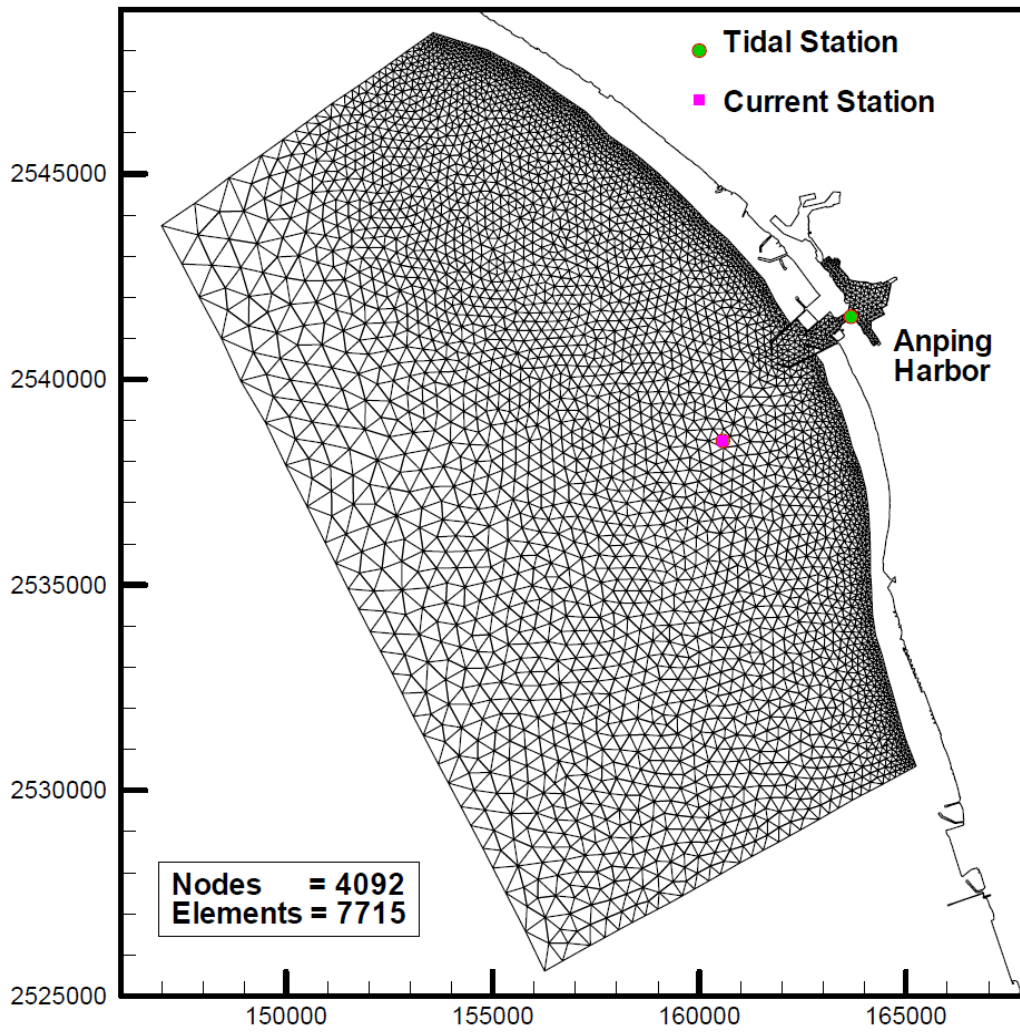


圖 4.24 安平港區近岸水動力模組之模擬範圍及有限元素格網分佈圖
(98 年度計畫)

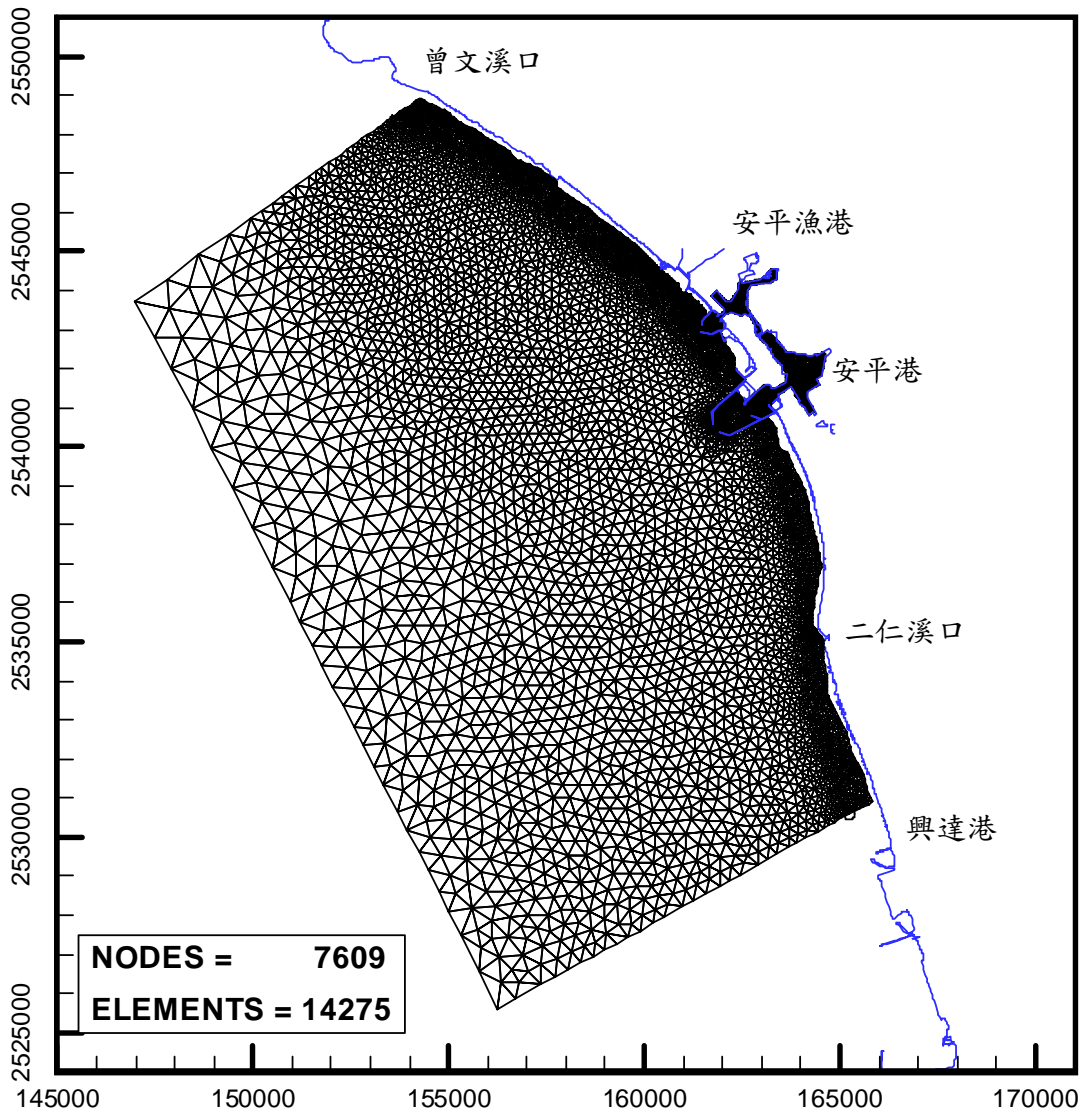


圖 4.25 安平港區近岸水動力模組之細網格三角形元素分佈圖

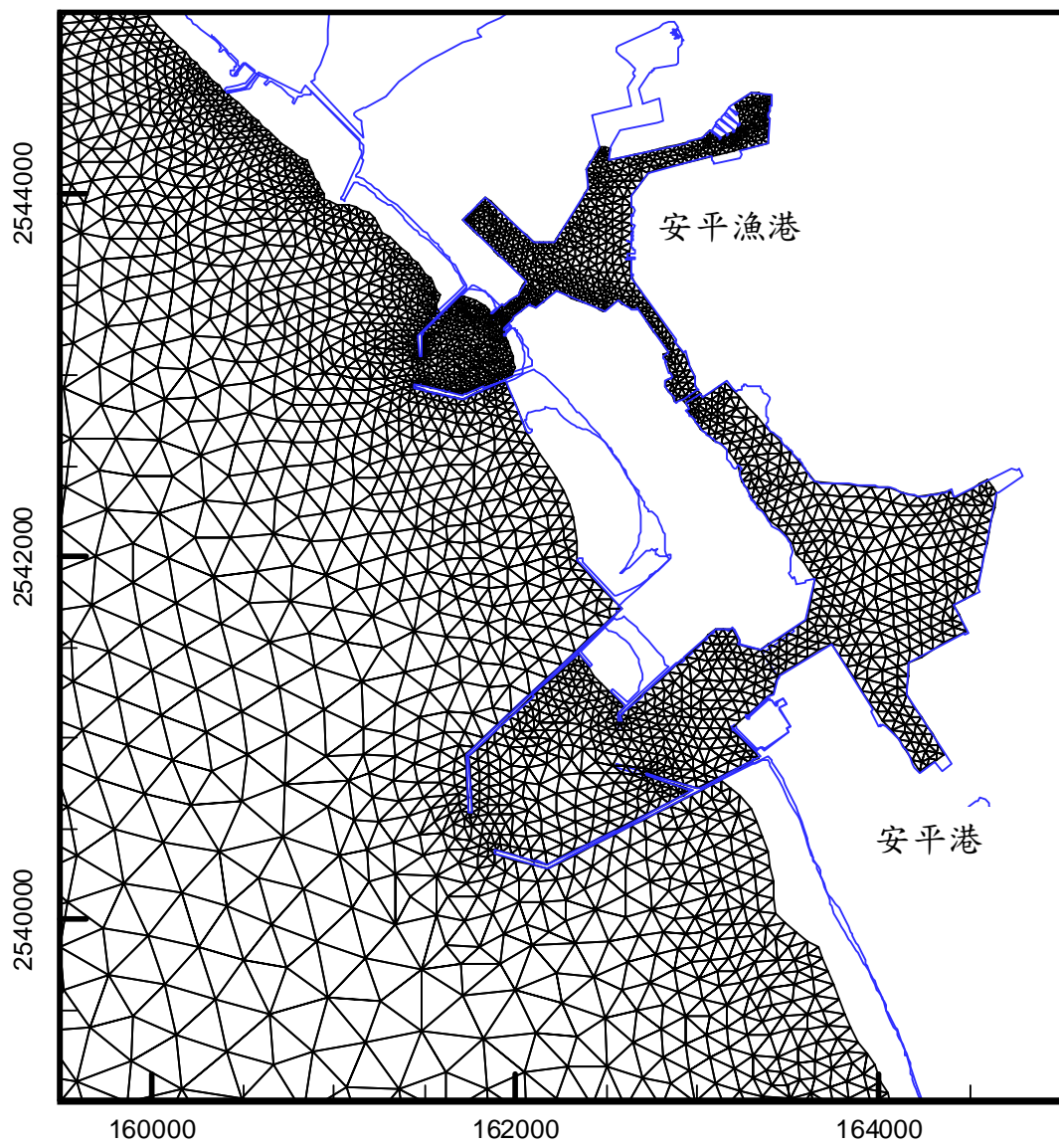


圖 4.26 安平港港域及港口附近細網格之三角形元素分布圖

4.3.2 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安平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，前期計畫依據鄰近模式南、北開放邊界之永安潮位站(位於 LNG 港內)及將軍潮位站(位於將軍漁港內)潮位觀測資料，利用潮位調和分析方法選取 O_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 及 S_2 等五個主要分潮之調和常數(即振幅及相位差)，配合線性內差方式推估模式開放邊界上各節點之分潮振幅及相位差，再由模式於模擬過程中組合成開放邊界節點之水位值作為模式之邊界條件，模擬整個海域之水位及流場變化。如圖 4.27 所示即為前期計畫安平港水動力模組，南、北開放邊界鄰近海岸開放邊界節點採用的水位邊界條件。

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。因此，本年度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 4.28 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。

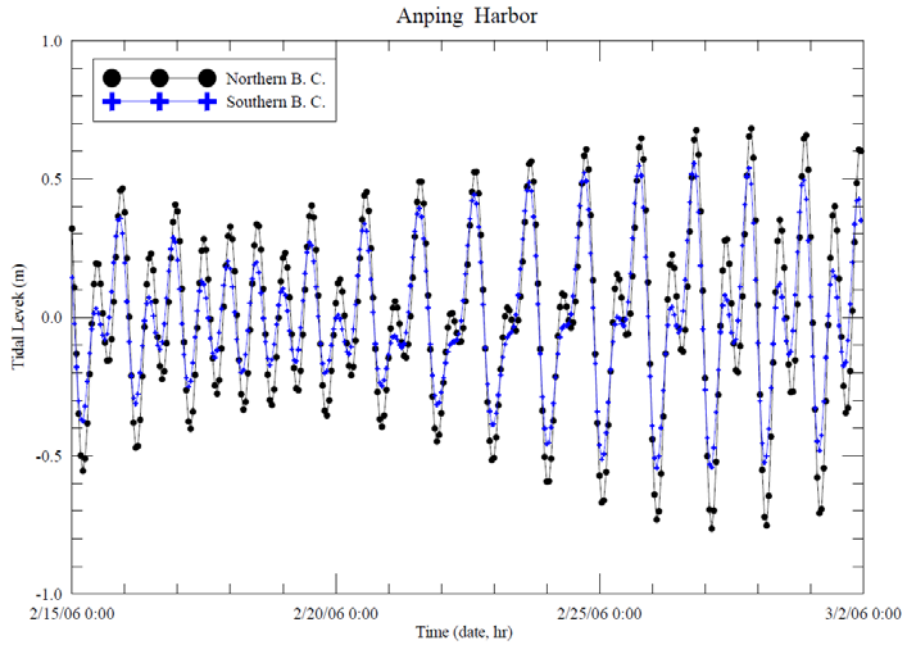


圖 4.27 前期計畫安平港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位
 時序圖

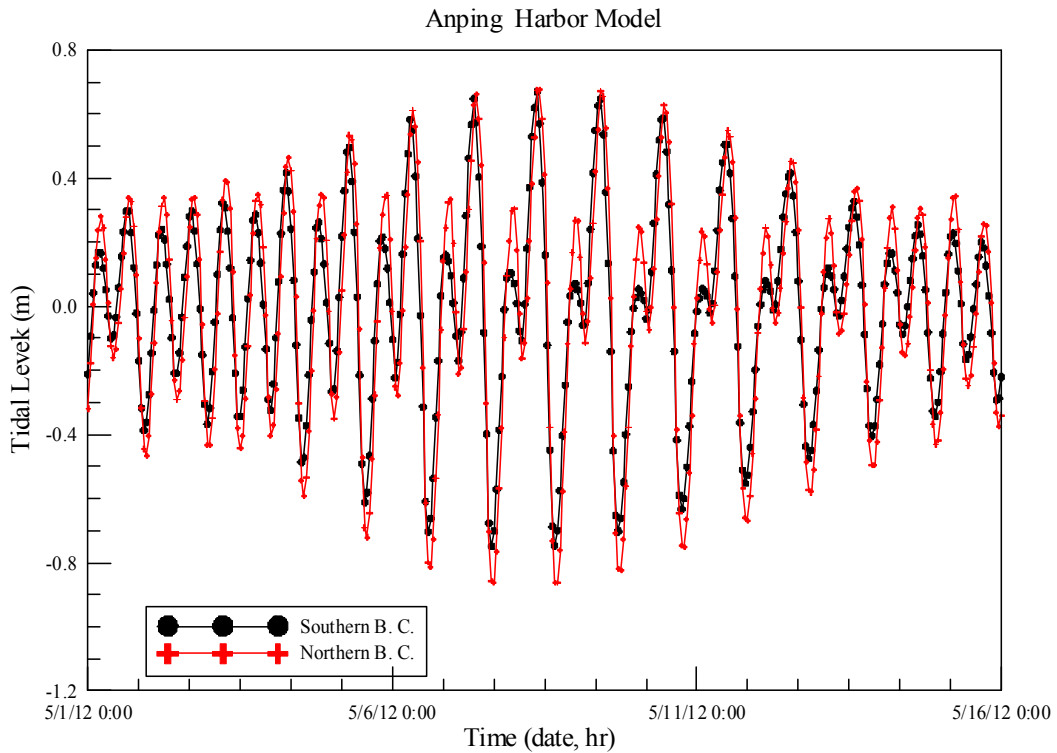


圖 4.28 本年度計畫安平港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位
 時序圖

4.3.3 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 Δt 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，經本年度安平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 Δt 為 2.0 sec 仍可使模式穩定的運算。渦動粘滯性係數則參考(4.32)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 0.4 m/s，代表性潮差 $\bar{\eta}$ 值為 0.5m。至於，底床摩擦係數則隨水深而變，其值介於 0.004~0.020 之間。

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 4.29 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，如圖 4.30 所示，明顯地改善許多。

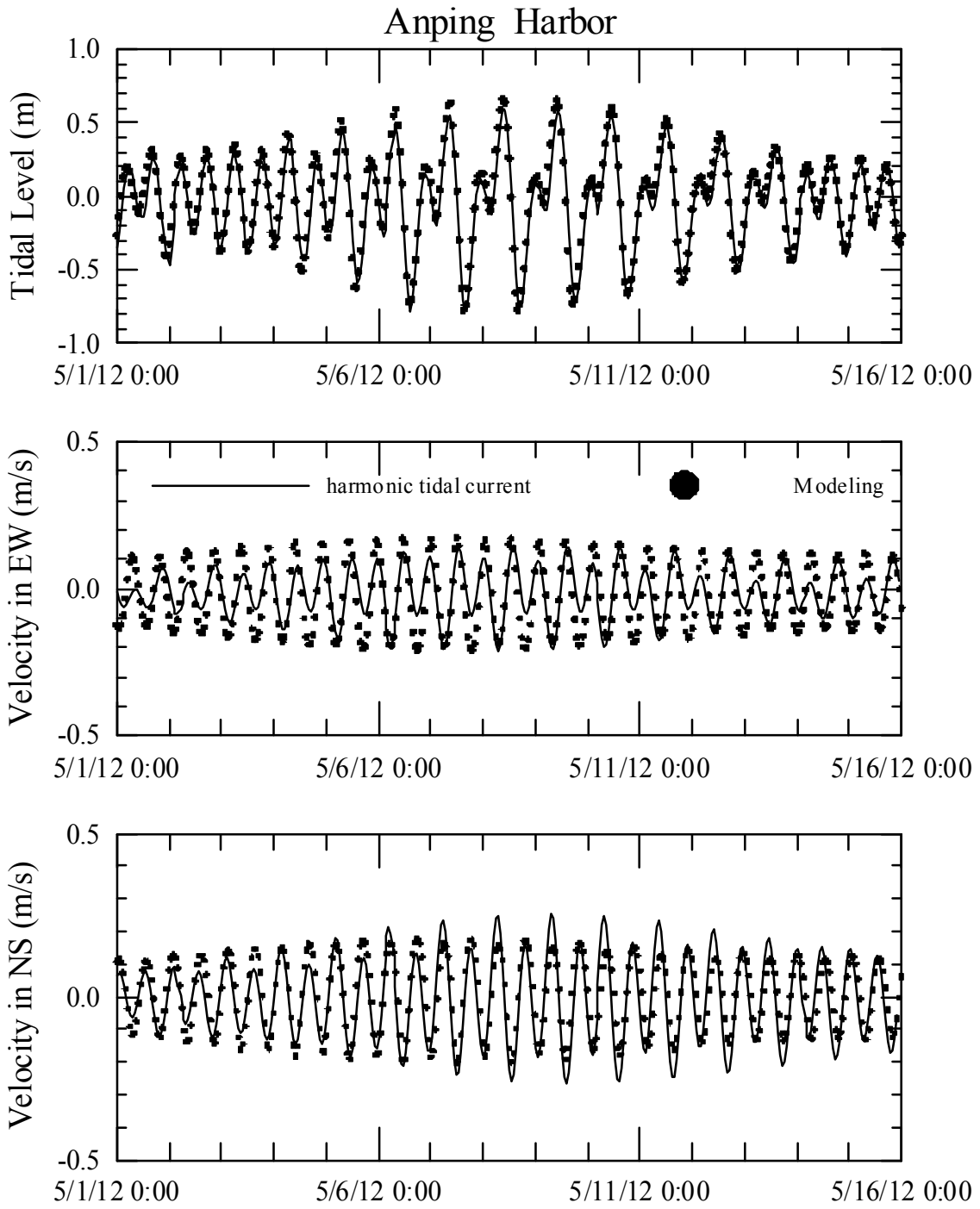


圖 4.29 安平港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分析
 $(O_1、K_1、M_2、S_2)$ 結果比較圖

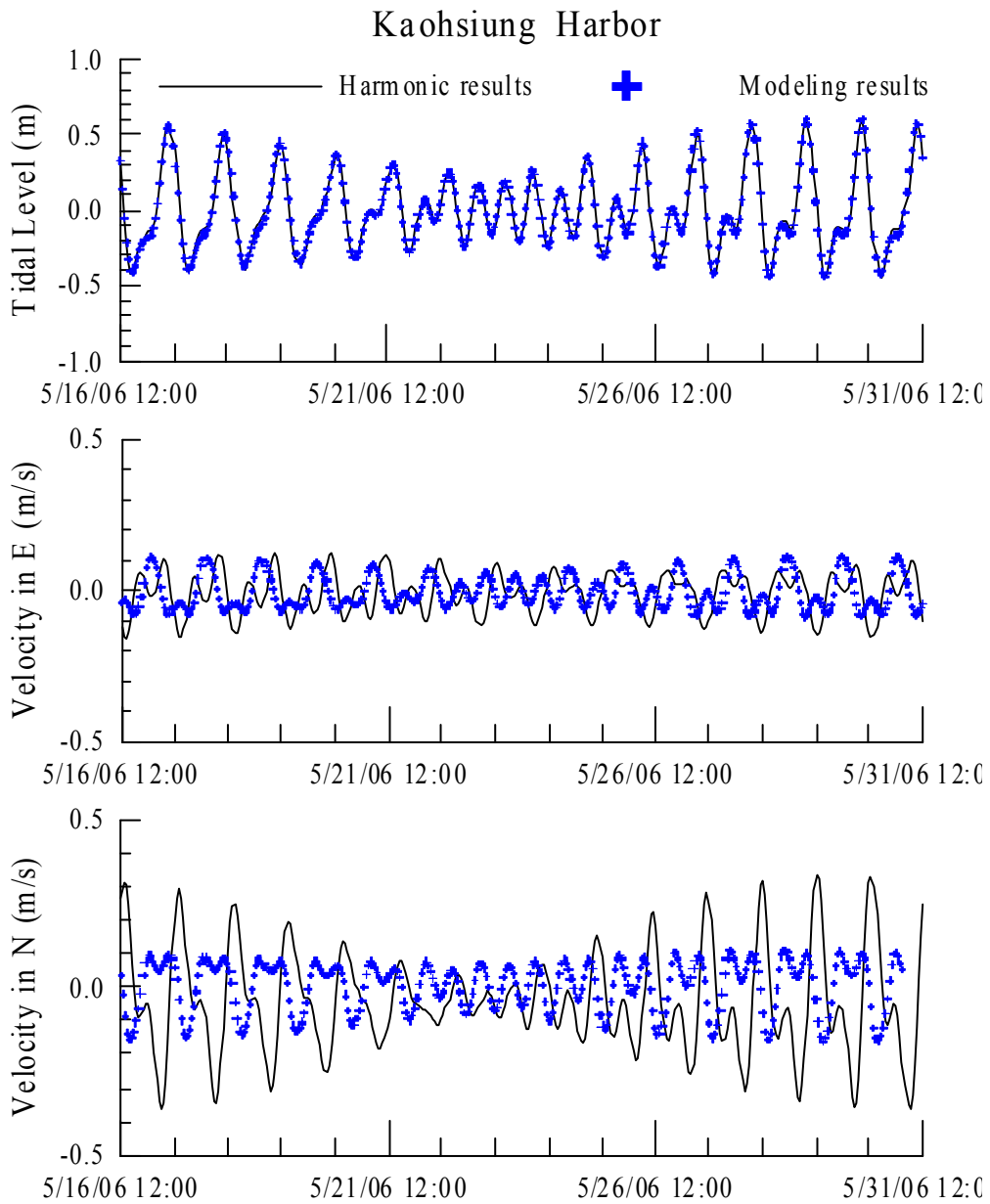


圖 4.30 前期計畫安平港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料之調和分析(O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2)結果比較圖

4.3.4 安平港海域流場模擬結果

本計畫依據上述所建立之安平港水動力模式模擬安平港區附近海域的流場環境，模式模擬時間始於 2012 年 1 月 2 日零時至 2013 年 1 月 1 日零時止，並逐時儲存全部計算網格之水位及流場資料，提供後續模擬結果分析使用。有關安平港區附近海域流況變化情形，如圖 4.31 所示。

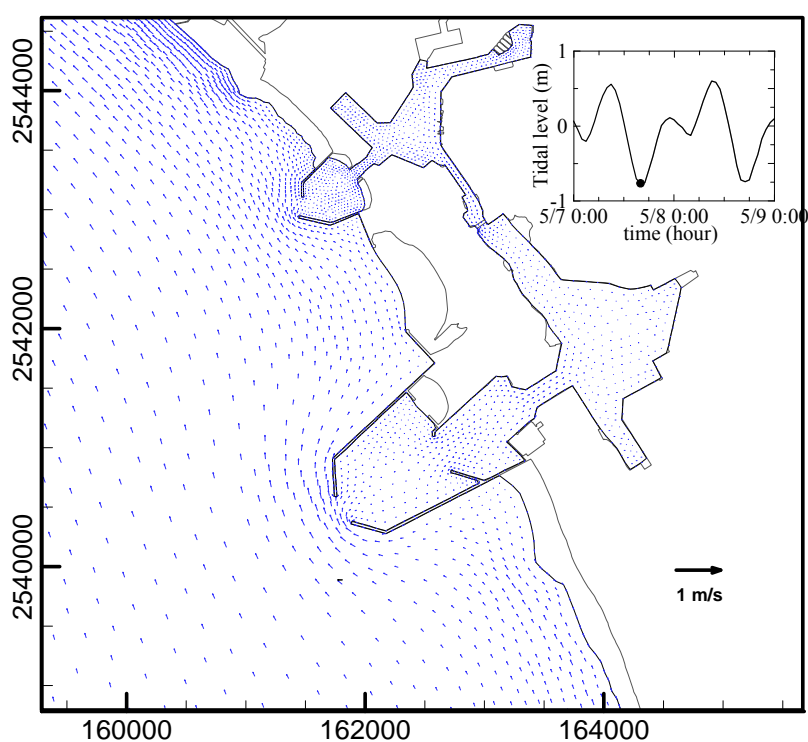


圖 4.31 安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 16:00)

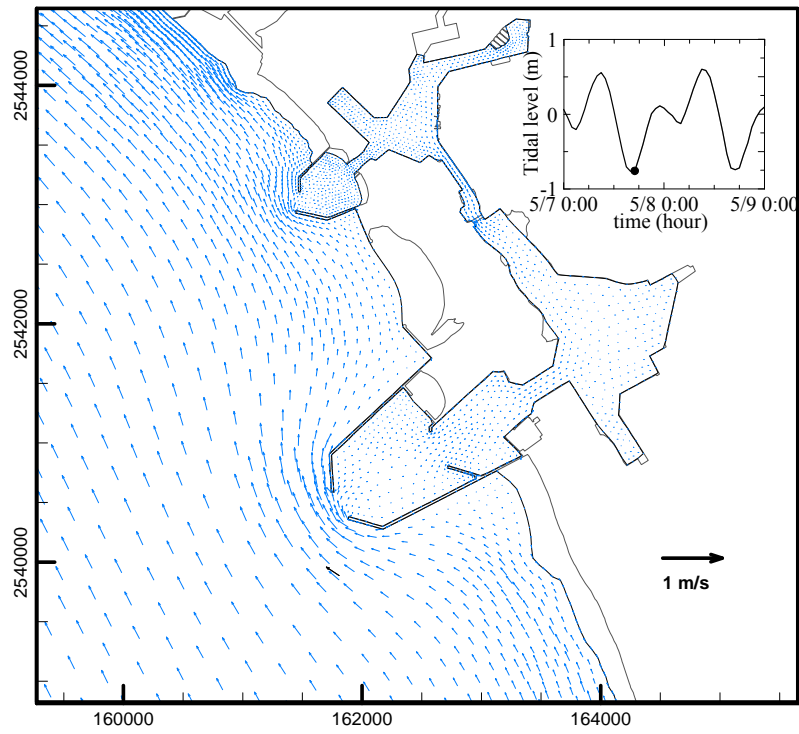


圖 4.31 (續 1)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 17:00)

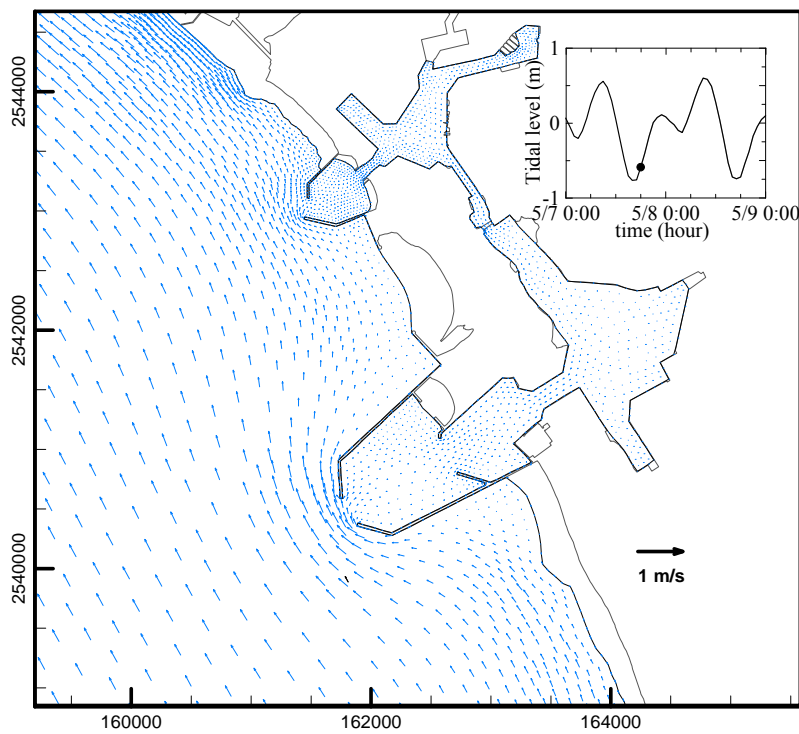


圖 4.31 (續 2)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 18:00)

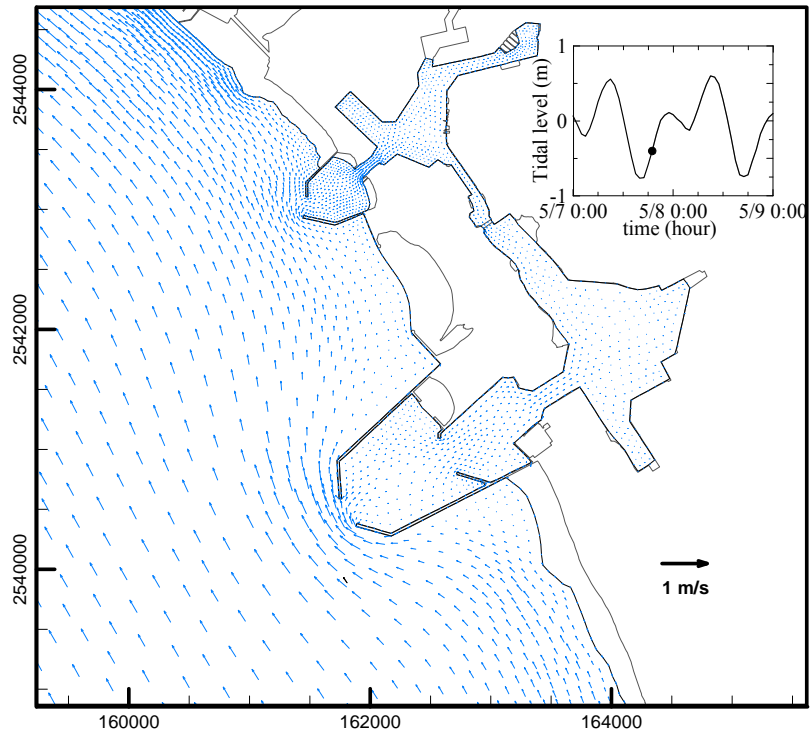


圖 4.31 (續 3)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 19:00)

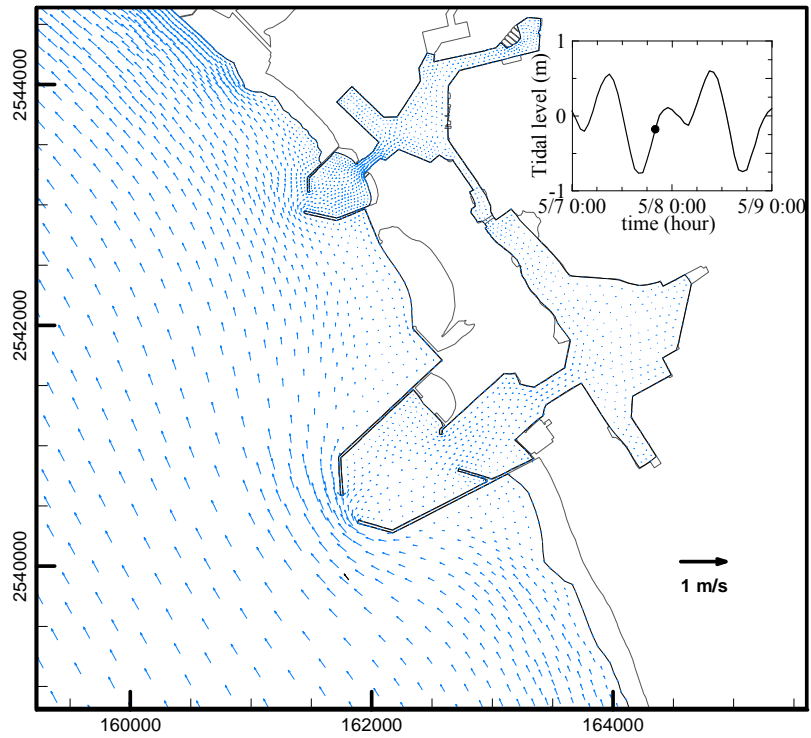


圖 4.31 (續 4)安平港流場模擬結果之流速向量圖 (2012/05/07 20:00)

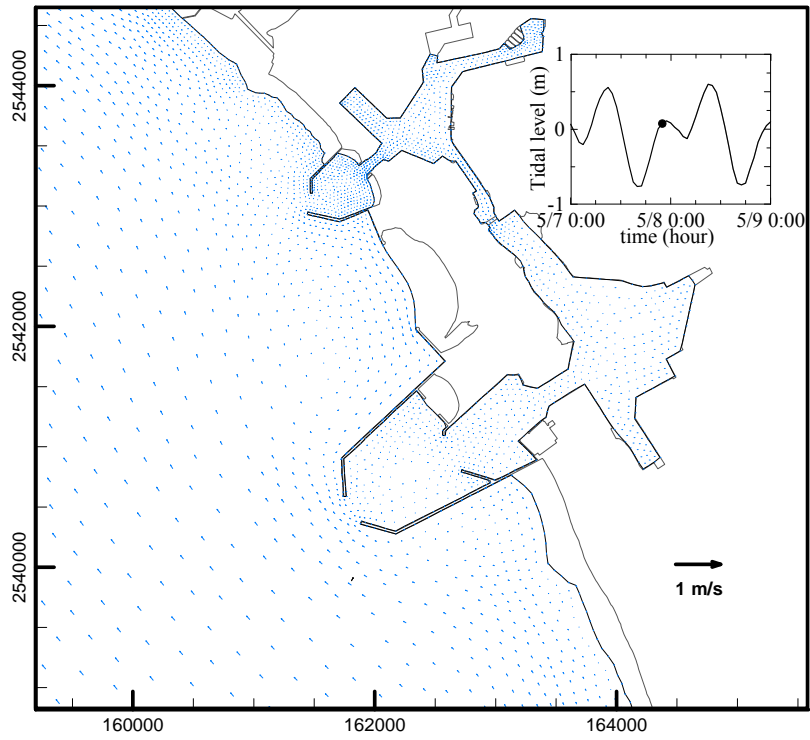


圖 4.31 (續 5)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/07 22:00)

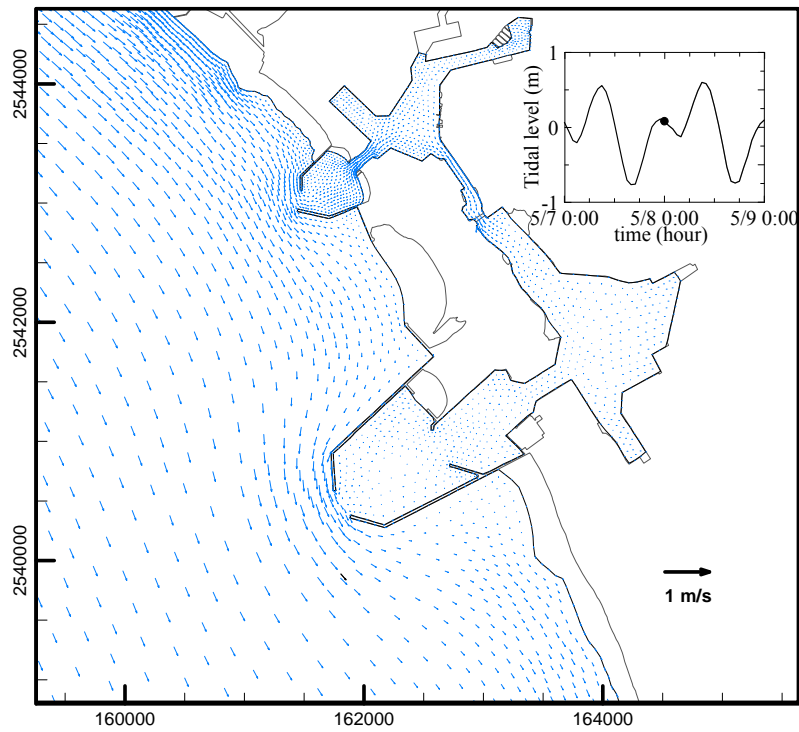


圖 4.31 (續 6)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 00:00)

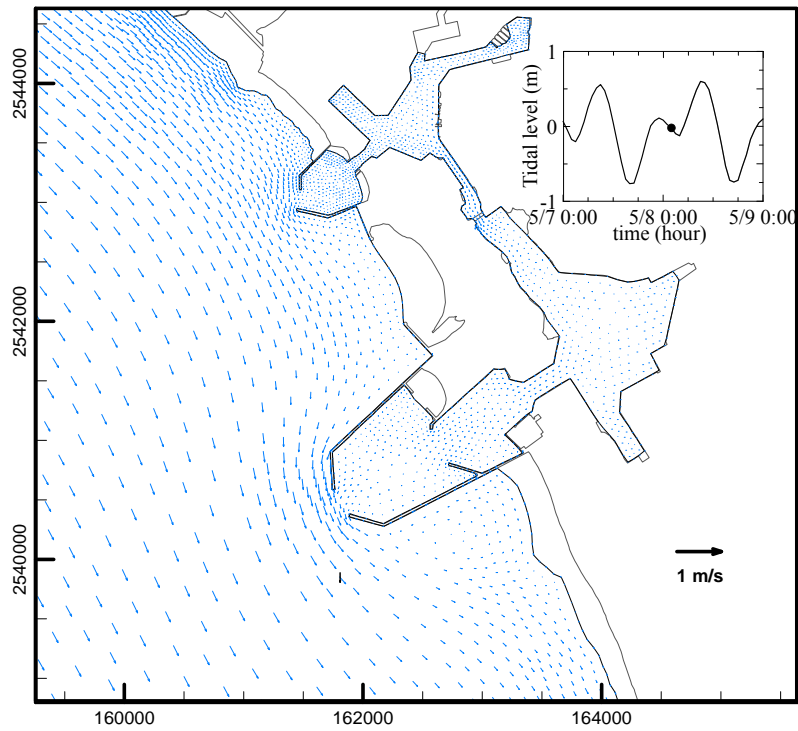


圖 4.31 (續 7)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 02:00)

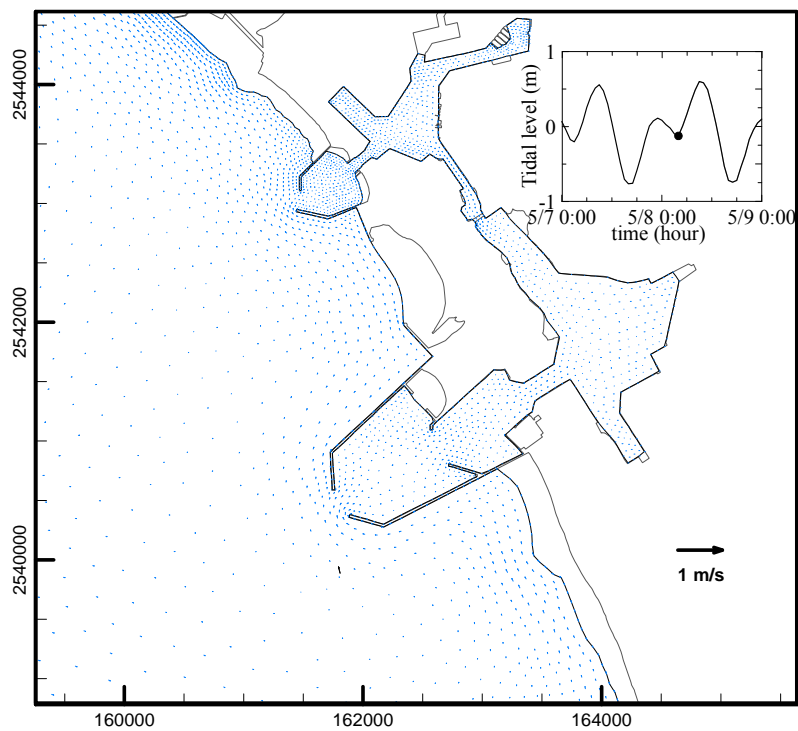


圖 4.31 (續 8)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 04:00)

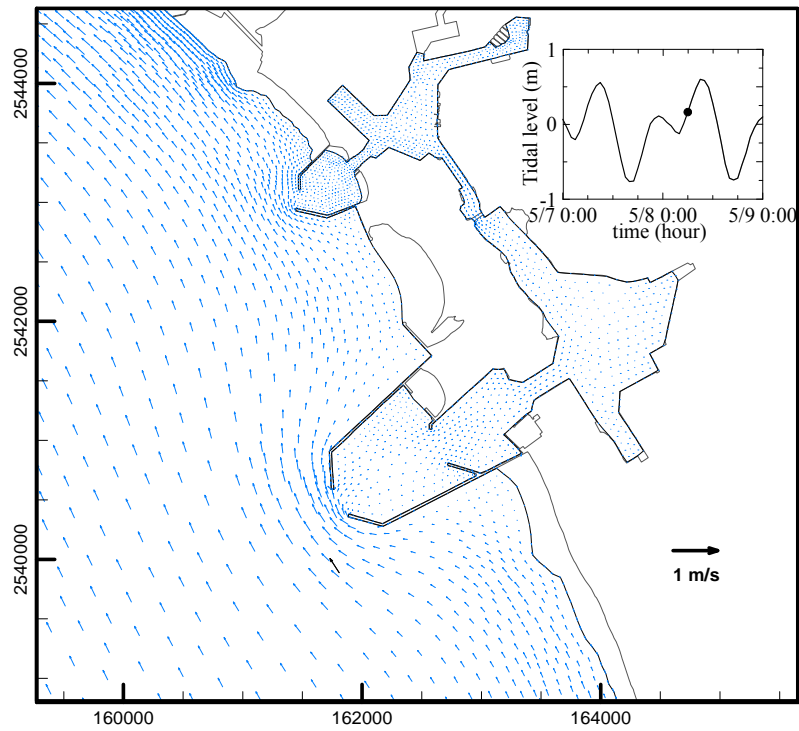


圖 4.31 (續 9)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 06:00)

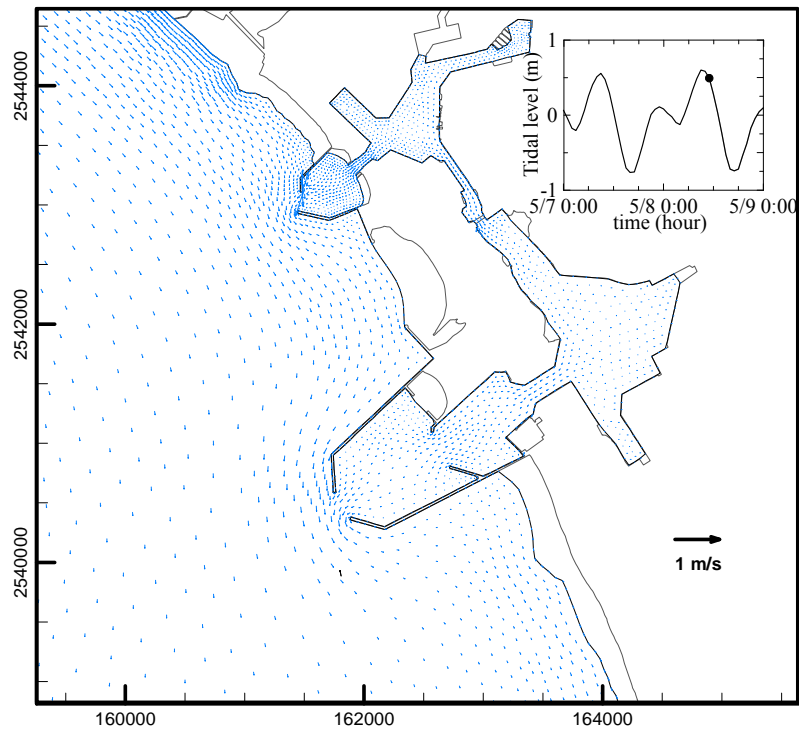


圖 4.31 (續 10)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 11:00)

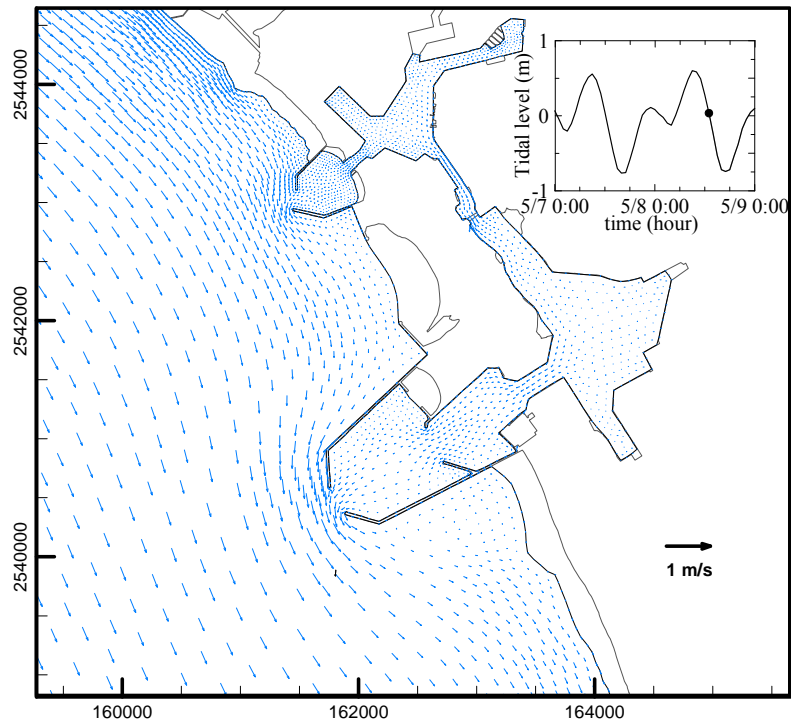


圖 4.31 (續 11)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 13:00)

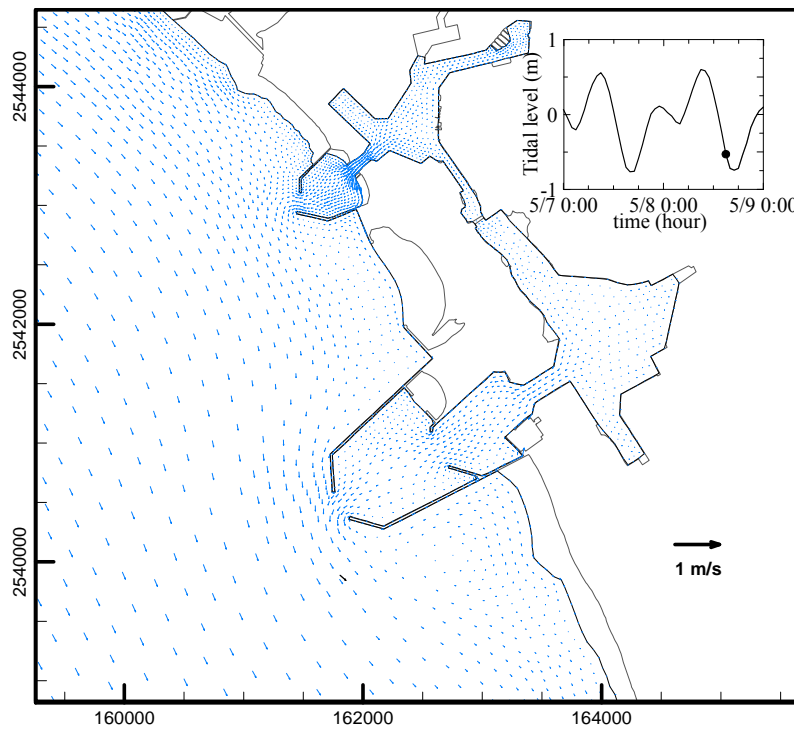


圖 4.31 (續 12)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 15:00)

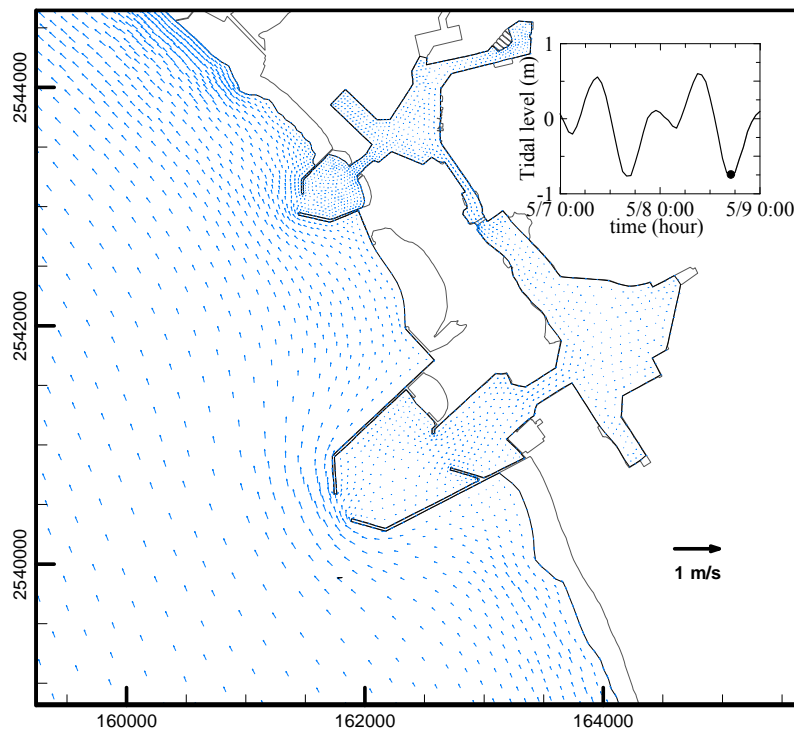


圖 4.31 (續 13)安平港流場模擬結果之流速向量圖(2012/05/08 17:00)

4.4 小尺度高雄港區水動力模組改善研究

同前述安平港區水動力模組說明，本計畫小尺度高雄港區水動力模組係前期計畫於98年度完成初步的小尺度高雄港區近岸水動力模組建置工作，其中高雄港區水動力模組之模擬範圍及有限元素網格配置如圖 4.32 所示，範圍北起高雄市梓官區，南至高雄市林園區海岸；沿海岸方向長約 26 km，離岸方向寬度約 11 km；圖中有限元素網格係由 3201 個節點及 5917 個三角形元素構成的，網格水深資料之分布情形如圖 4.33 所示。同樣地，針對高雄港區本年度計畫將依據前期計畫建置的高雄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有限元素格網之修正及水深資料更新、模式邊界條件之修正、模式相關參數率定與驗證、高雄港港區近岸水位及流場模擬等工作。

4.4.1 有限元素網格修正及水深資料更新

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，本年度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 4.34 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 4.35 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，有限元素網格之水深資料則依據本報告 2.2 節蒐集的水深資料予以更新。

4.4.2 邊界條件修正

同前述本年度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，本計畫提出暫時應變之方案，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 4.36 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本計畫經由相位及振幅修正後的水位資料。

4.4.3 模式參數率定與驗證

經採用本年度高雄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 Δt 為 2.0 sec 可使模式穩定的運算。渦動粘滯性係數同樣參考(4.32)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 0.5 m/s，代表性潮差 \bar{h} 值為 0.5m。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 0.003~0.018 之間。

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，作為本年度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 4.37 及圖 4.38 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西北之特性。

4.4.4 高雄港海域流場模擬結果

有關高雄港海域漲退時潮流變化情形，如圖 4.39 所示；由流況變化得知大致有符合觀測資料漲潮往東南向及退潮往西北之流況特性，但因高雄港水動力模組仍有有待進一步研究與校驗，因此本年度計畫高雄港海域流況模擬並未如同安平港水動力模組進行長時間流況模擬與分析。

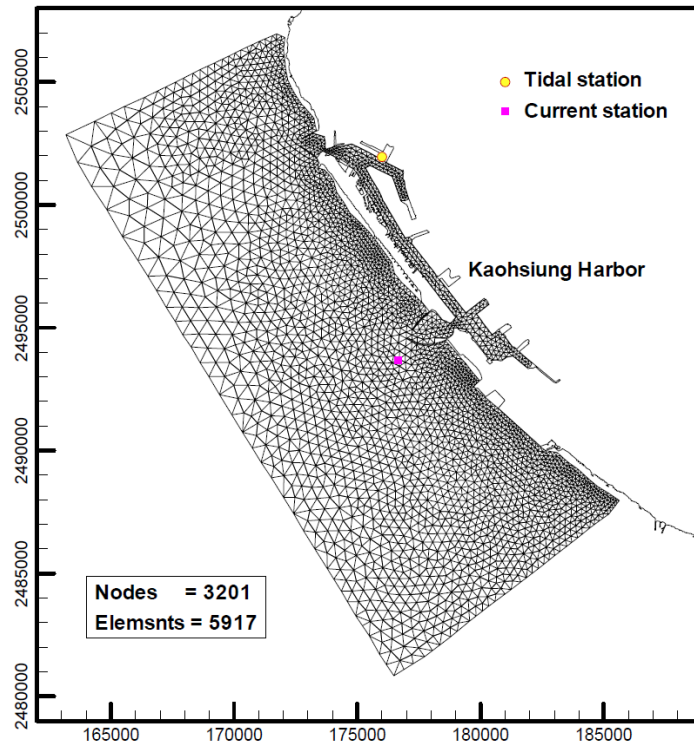


圖 4.32 高雄港水動力模組之模擬範圍及有限元素格網分佈圖

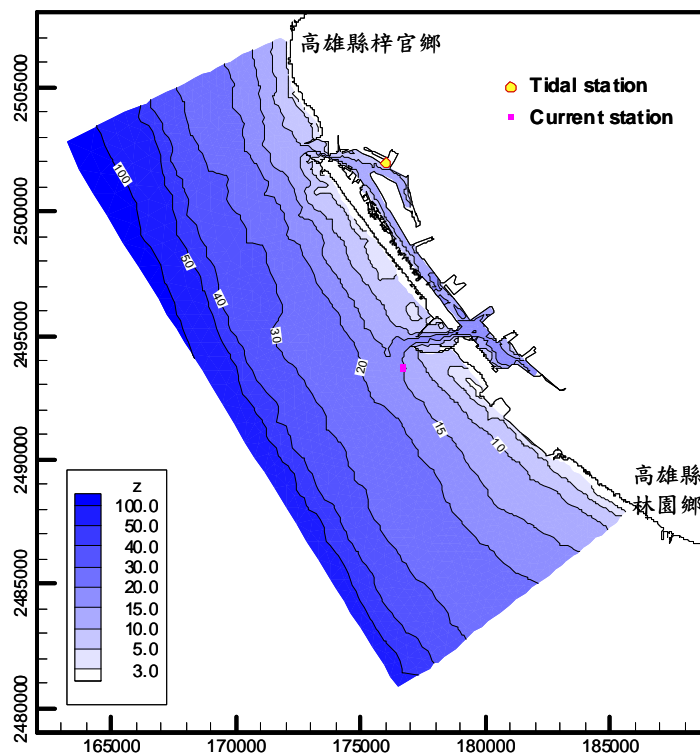


圖 4.33 高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖

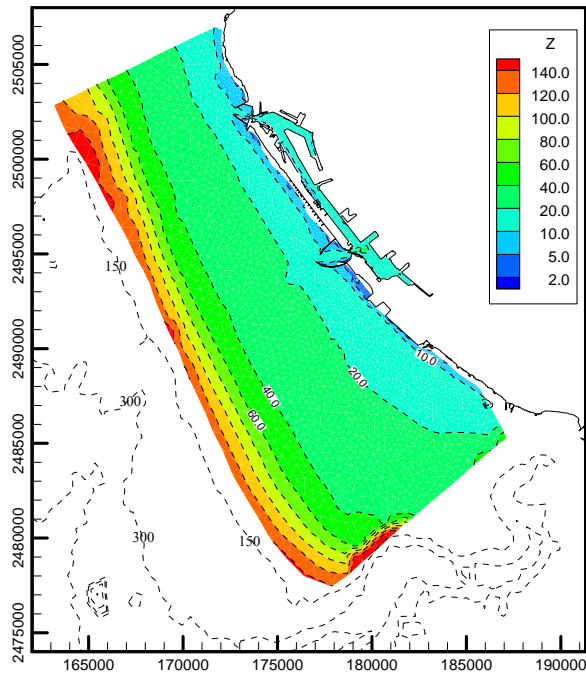


圖 4.34 高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖

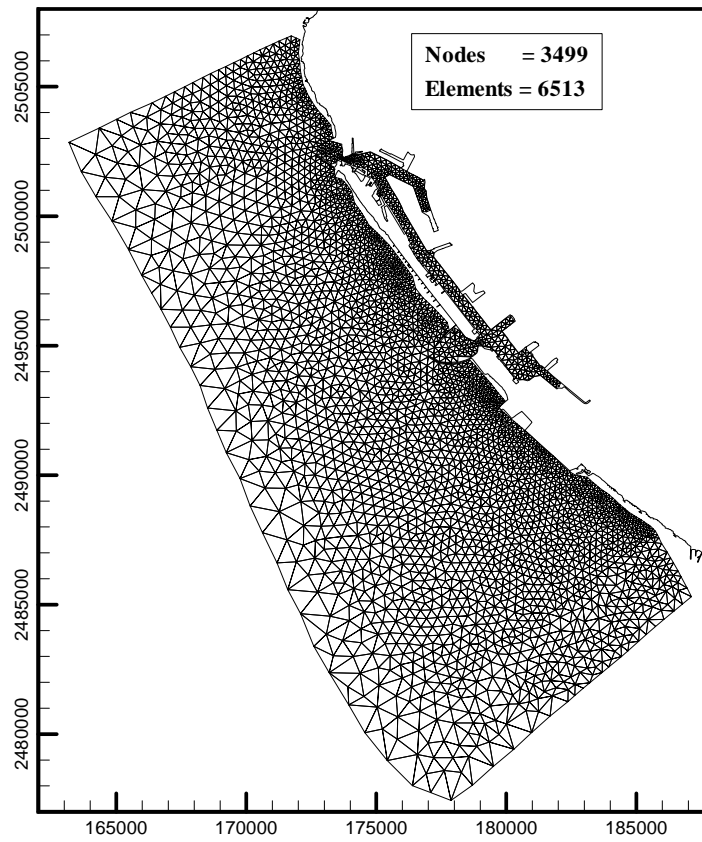


圖 4.35 高雄港水動力模組模擬範圍內等水深線分布圖

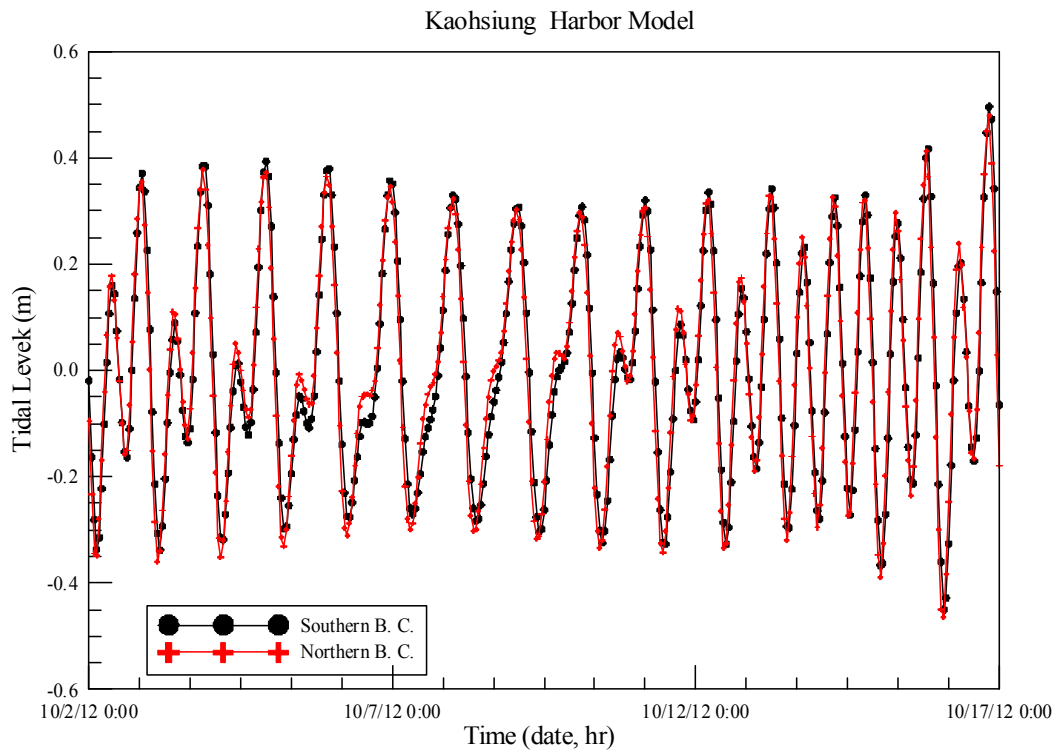


圖 4.36 高雄港水動力模組南、北開放邊界近岸節點之水位時序圖

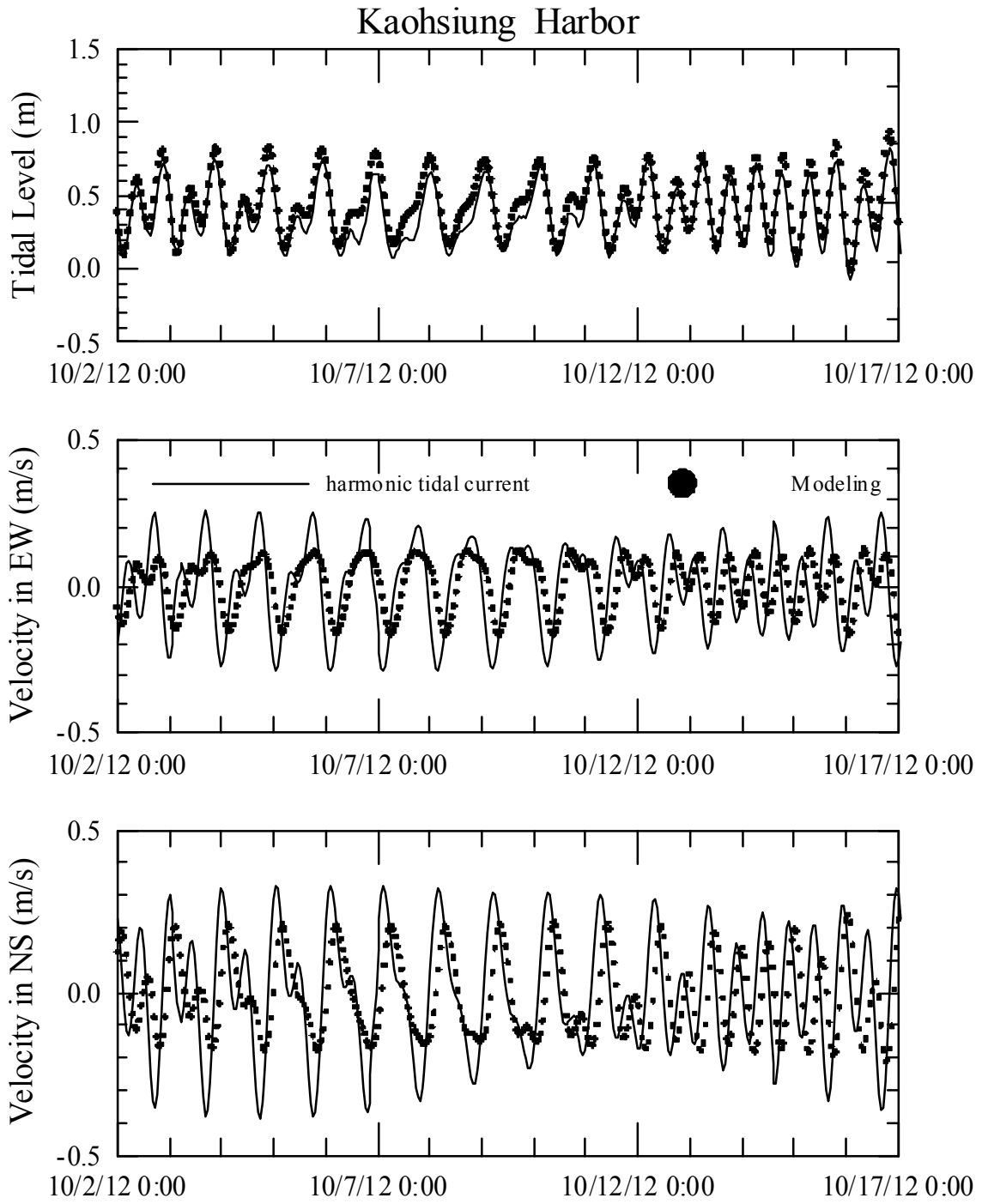


圖 4.37 高雄港水位與潮流模擬結果與海流觀測資料調和分析
 $(O_1、K_1、N_2、M_2、S_2)$ 之 E-W 及 N-S 向速度分量比較圖

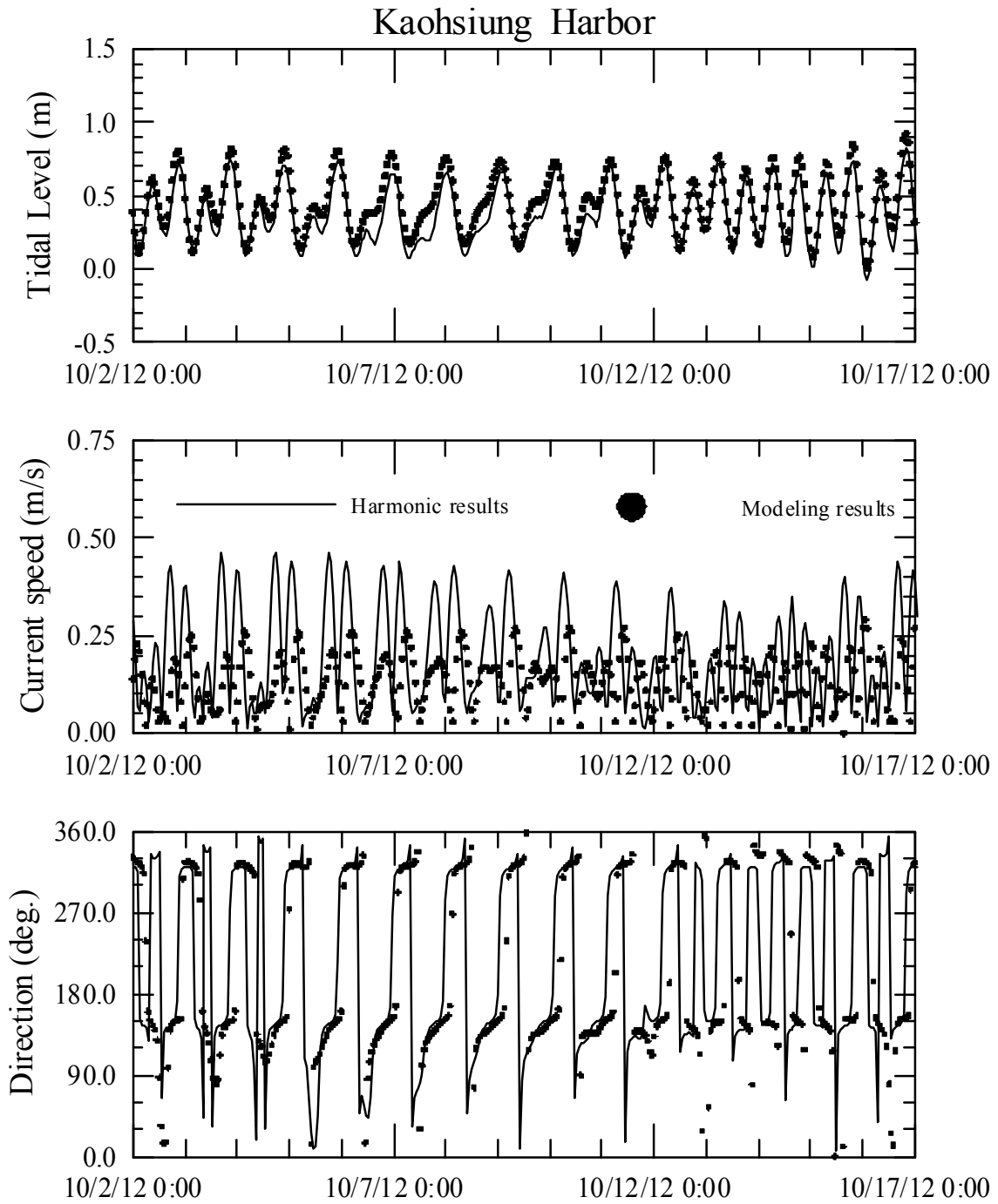


圖 4.38 高雄港水位及潮流模擬結果與海流觀測資料調和分析
 $(O_1、K_1、N_2、M_2、S_2)$ 之流速大小及流向比較圖

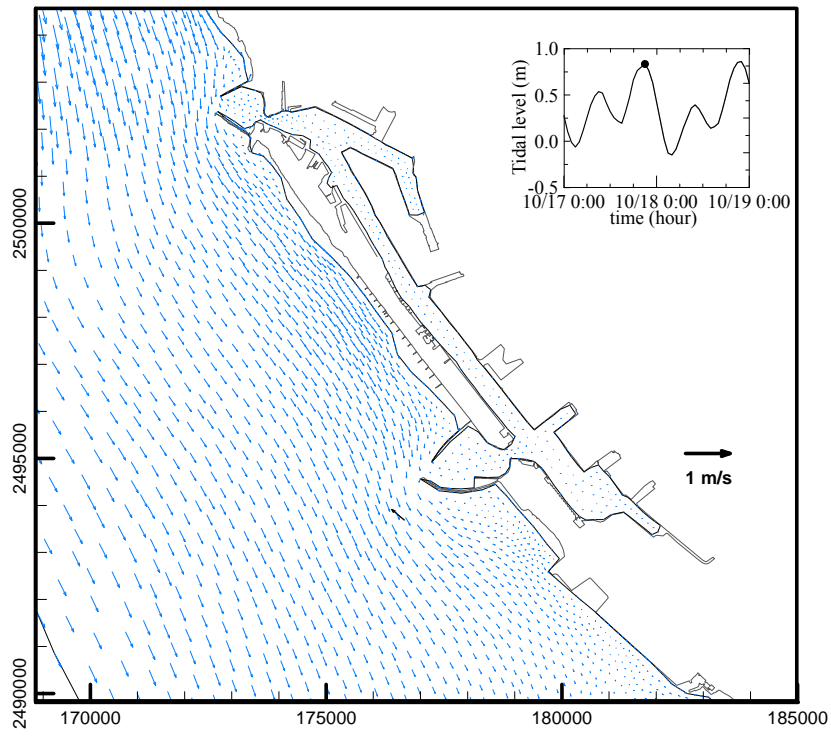


圖 4.39 高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/17 20:00)

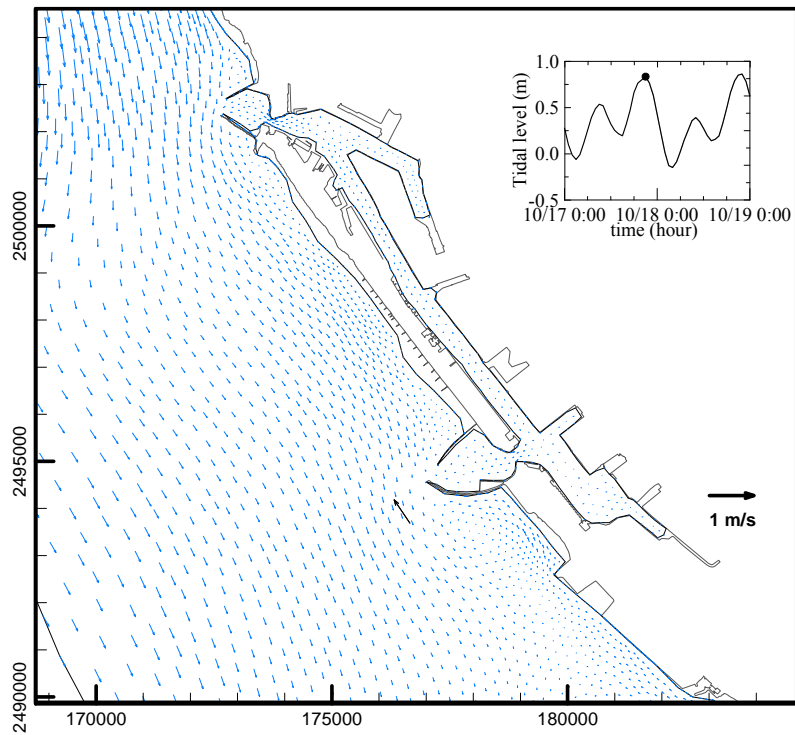


圖 4.39 (續 1)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/17 21:00)

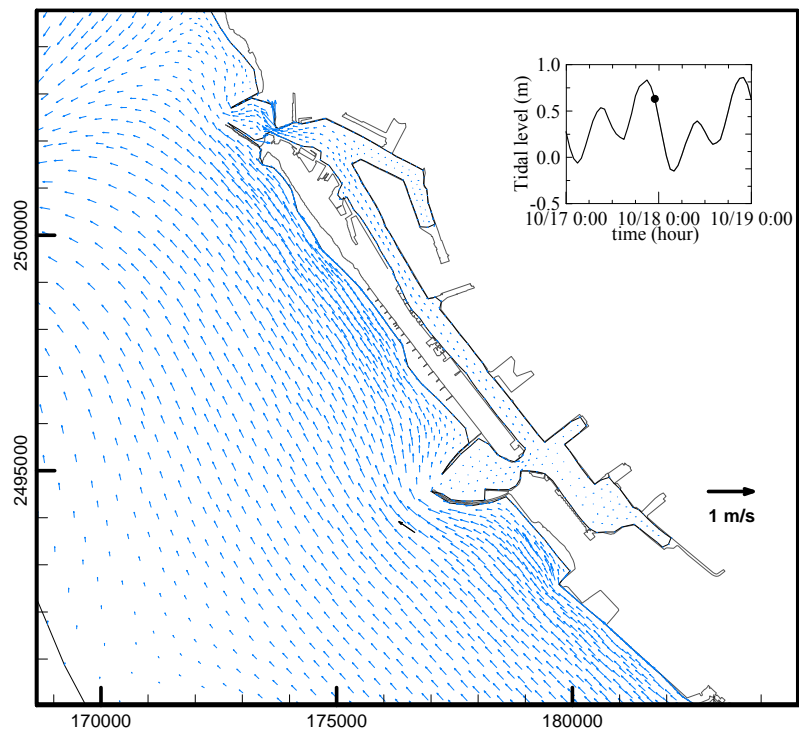


圖 4.39 (續 2)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/17 23:00)

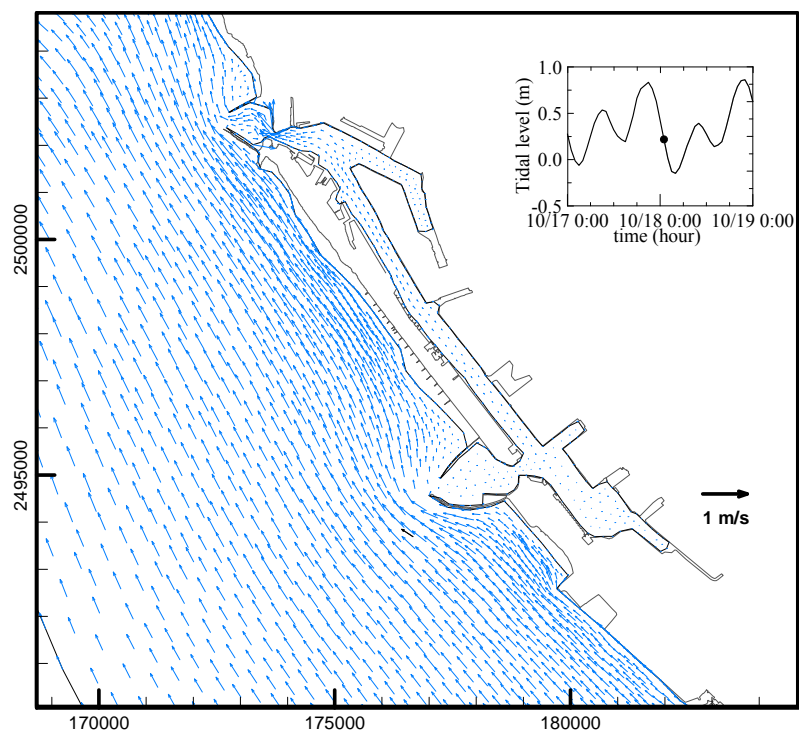


圖 4.39 (續 3)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 01:00)

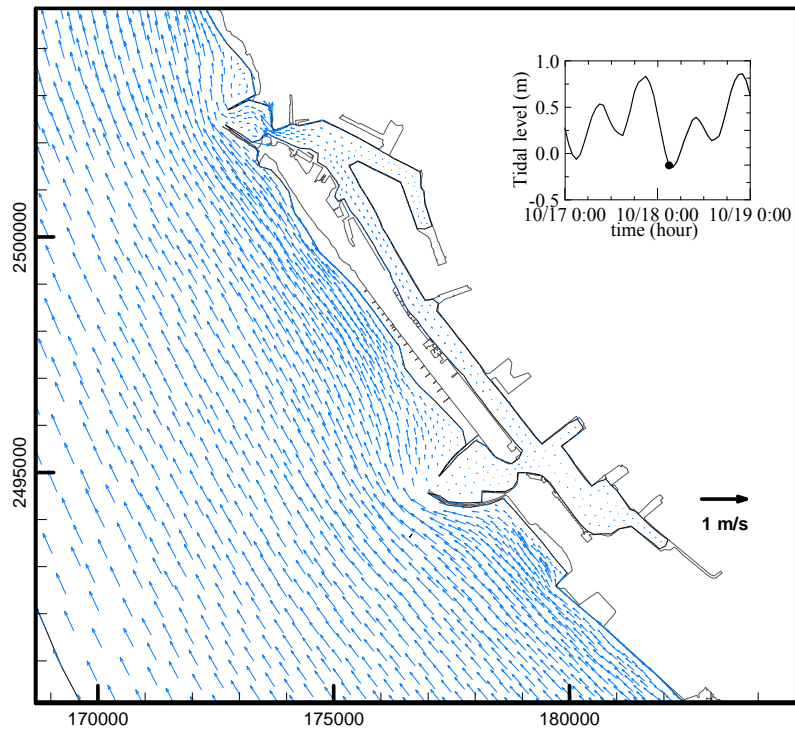


圖 4.39 (續 4)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 03:00)

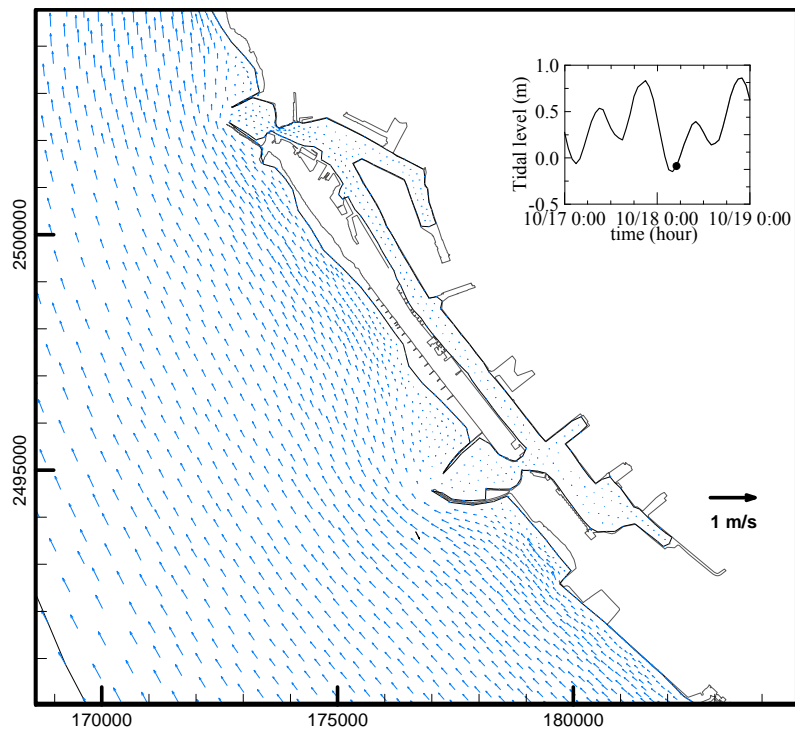


圖 4.39 (續 5)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 05:00)

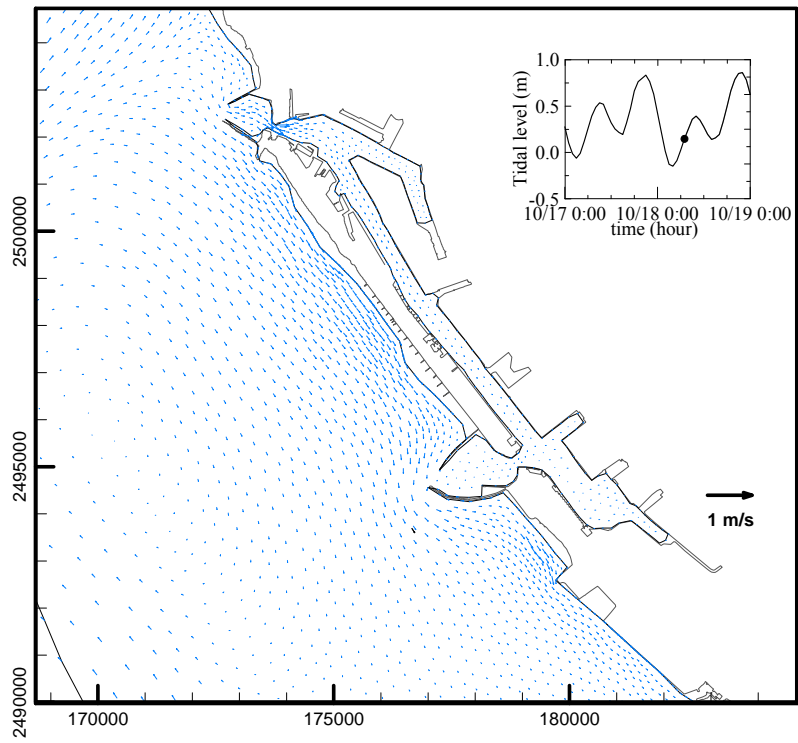


圖 4.39 (續 6)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 07:00)

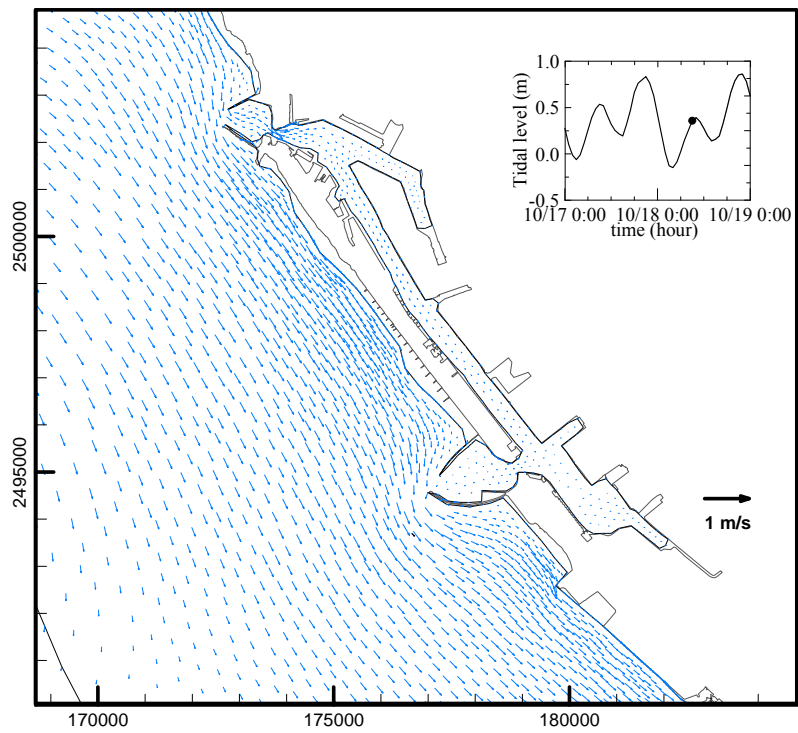


圖 4.39 (續 7)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 09:00)

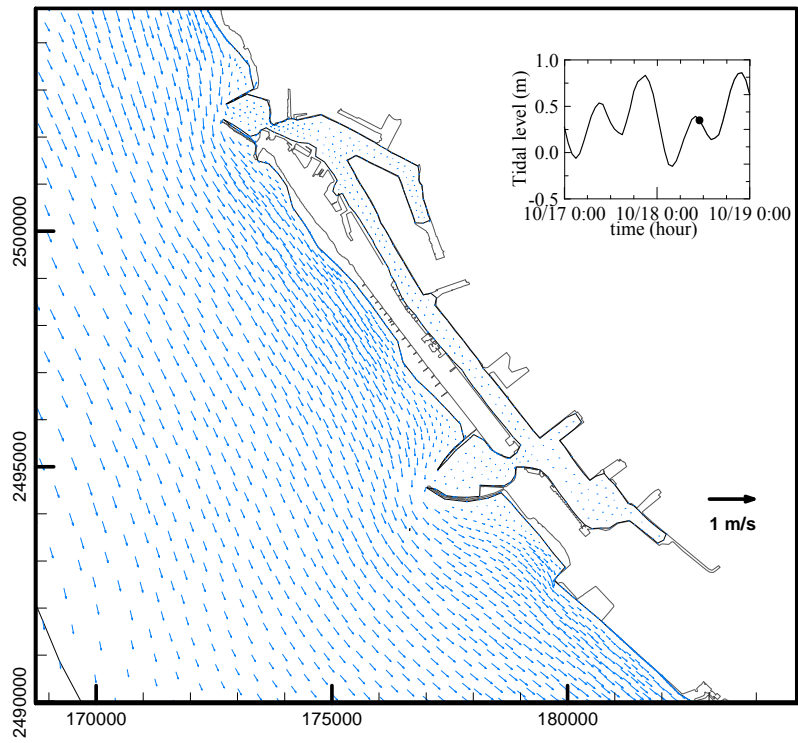


圖 4.39 (續 8)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 11:00)

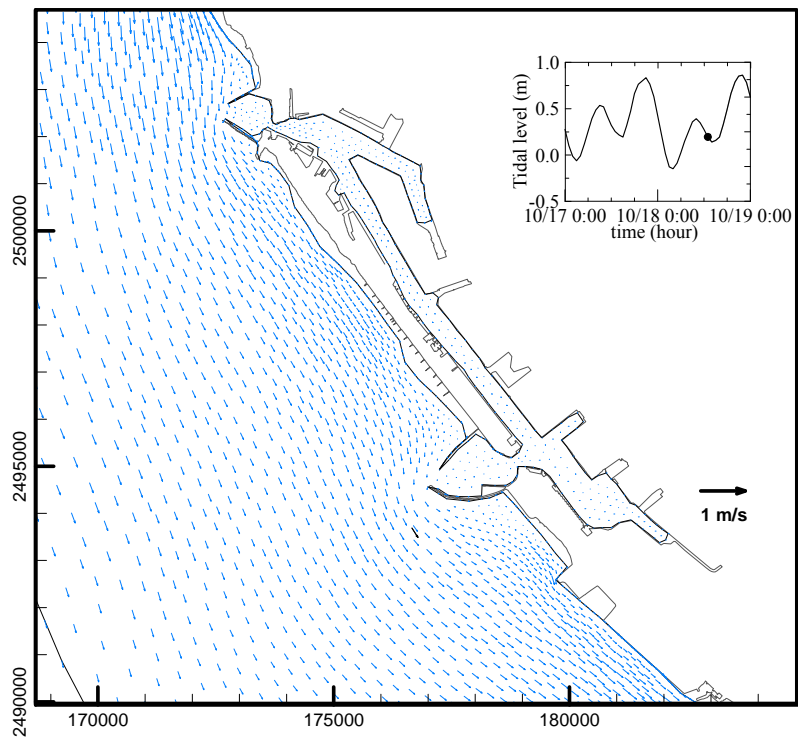


圖 4.39 (續 9)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 13:00)

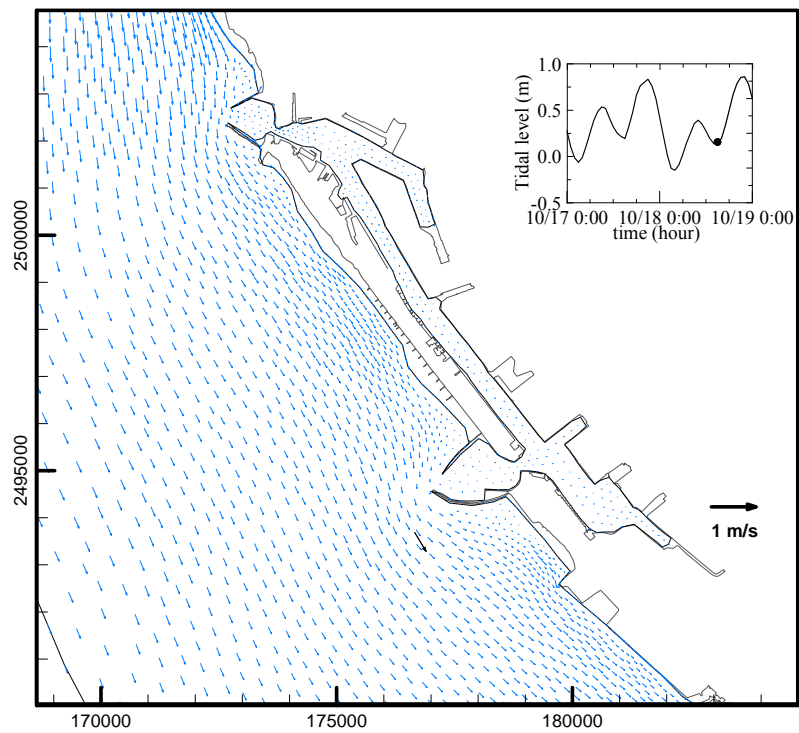


圖 4.39 (續 10)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 15:00)

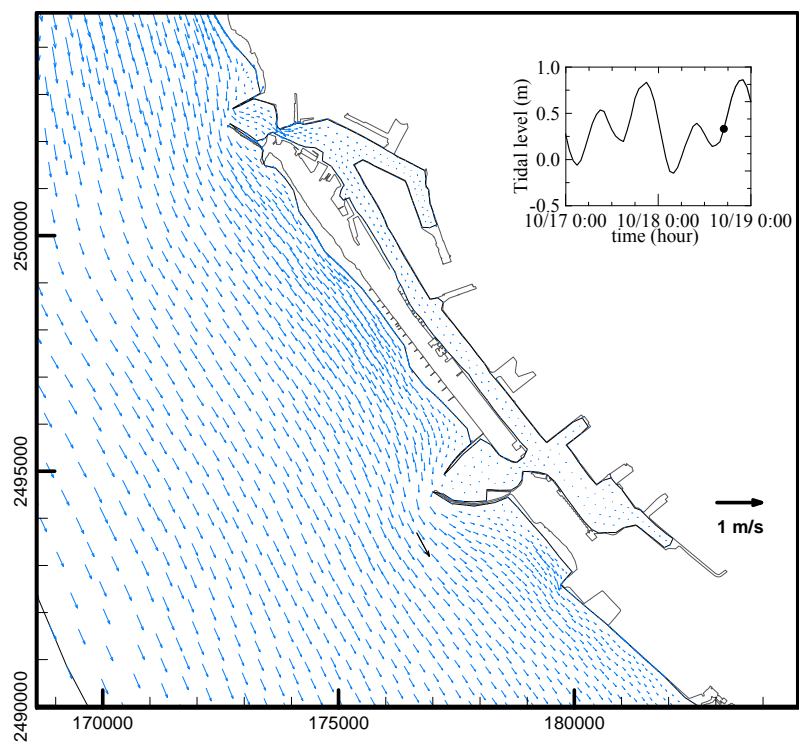


圖 4.39 (續 11)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 17:00)

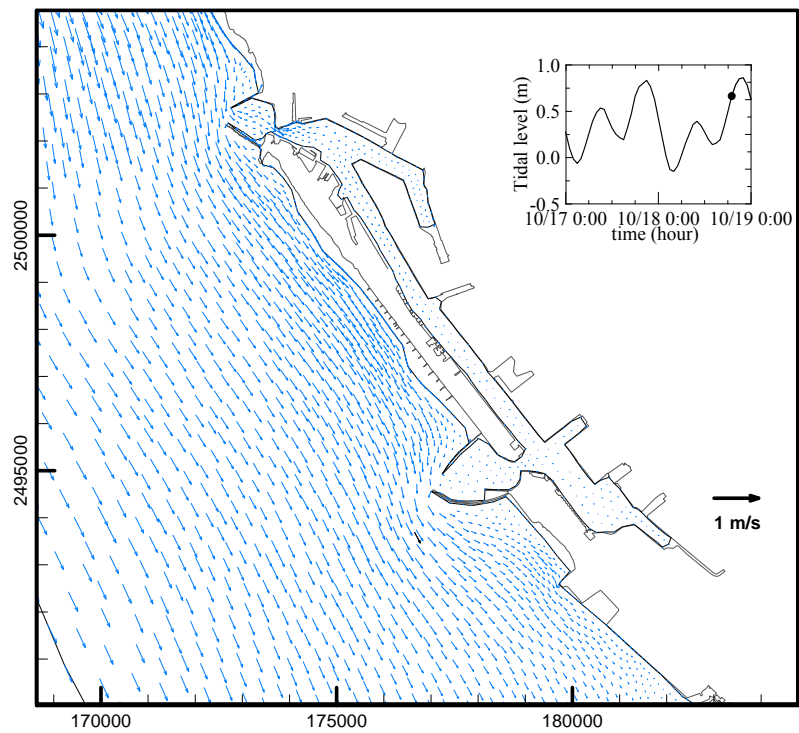


圖 4.39 (續 12)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 19:00)

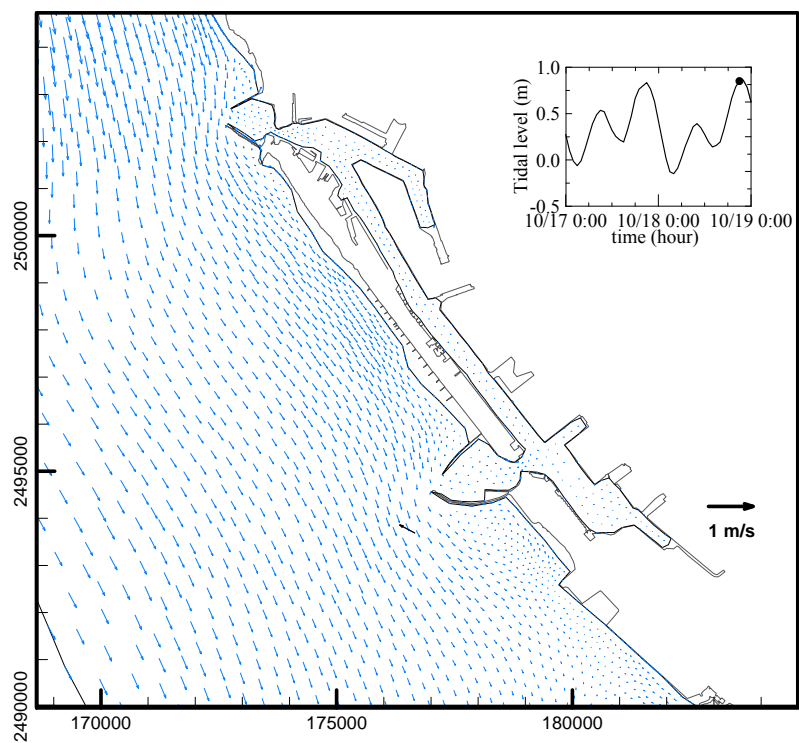


圖 4.39 (續 13)高雄港流場模擬結果之流速向量圖(2012/10/18 21:00)

第五章 海象作業化預報成果評估

本章節首先針對本年度計畫海域安平港及高雄港之風場進行評估說明，接著評估本年度安平港與高雄港之風浪模式預報成果，以及已作業化的小尺度基隆港與臺北港水動力模式。由於臺灣本島季風盛行，其中以夏季季風(每年6月至8月)與冬季季風(每年10月至翌年3月)較為明顯，因此評估期間以兩個季風時期為主。最後，針對本年度颱風期間之風浪、水位及流場預報成果另進行評估說明。

5.1 風場評估

風場預報包括 MC 風場與 RC 風場，本年度安平港冬季季風期間(1月至3月)與夏季季風期間(6月至8月)MC 及 RC 預報風場與觀測風場資料之時序列圖如附錄六所示，高雄港冬季季風期間與夏季季風期間 MC 及 RC 預報風場與觀測風場資料之時序列圖如附錄七所示。統計今年度季風期間安平港與高雄港每月預報風場及觀測風場平均風速、最大風速以及主要風向所占百分比分別列如表 5-1 至表 5-3 所示。由表 5-1 顯示安平港冬季季風期間觀測平均風速介於 5.1~7.1 m/s 之間，MC 及 RC 風場平均風速則介於 3.5~5.2 m/s 之間，且皆有逐月減小之趨勢；夏季季風期間觀測及預報平均風速較為接近，介於 3.5~4.8 m/s 之間。高雄港冬季季風與夏季季風期間所觀測之平均風速差異不大，MC 預報風場之平均風速有偏小的情形。

表 5-2 顯示安平港冬季季風期間觀測及預報最大風速以偏北向為多，介於 8.1~15.9 m/s 之間，其中以 RC 預報風場之風速較小；夏季季風期間觀測及預報最大風速則以偏南或偏西方向為多，介於 7.5~12.7 m/s 之間。高雄港季風期間預報的最大風速皆明顯小於觀測的最大風速，最大風速所發生的方向除了 8 月之外，其他月份較不一致。

表 5-3 顯示安平港冬季季風期間觀測及預報主要風向多集中在 N~E 向之間，夏季季風期間觀測及預報主要風向則集中在 S~W 向之間。高雄港冬季季風期間觀測主要風向多集中在 W~N 向之間，預報

風場主要風向則集中在 N~E 向之間；夏季季風期間觀測及預報風場主要風向則集中在 S~W 向與 E~S 向之間。

表 5-1 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風場平均風速統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	7.1	5.2
	MC 風場	5.2	4.0
	RC 風場	5.2	5.6
2	OBS	6.1	5.2
	MC 風場	4.4	3.5
	RC 風場	4.3	4.9
3	OBS	5.1	4.6
	MC 風場	3.8	3.1
	RC 風場	3.5	3.9
6	OBS	3.5	4.2
	MC 風場	3.5	3.7
	RC 風場	4.2	4.4
7	OBS	3.5	5.5
	MC 風場	4.5	4.8
	RC 風場	4.8	5.1
8	OBS	5.4	5.5
	MC 風場	4.2	4.3
	RC 風場	4.6	4.8

OBS：觀測資料

單位：m/s

表 5-2 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風場最大風速風向統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	15.9 NE	15.4 NNW
	MC 風場	12.6 N	11.1 N
	RC 風場	12.3 N	11.8 N
2	OBS	12.4 NE	12.8 NW
	MC 風場	10.4 NNE	7.8 N
	RC 風場	8.8 NNE	9.8 E
3	OBS	13.0 NE	15.2 N
	MC 風場	10.1 N	8.2 SSE
	RC 風場	8.1 NNE	8.9 E
6	OBS	7.5 SW	14.7 S
	MC 風場	9.2 SSE	9.8 SE
	RC 風場	9.2 SE	9.2 SE
7	OBS	10.8 SW	17.9 NW
	MC 風場	12.2 N	11.6 SE
	RC 風場	12.7 NNW	13.7 ESE
8	OBS	10.4 WNW	18.5 W
	MC 風場	12.2 W	12.8 W
	RC 風場	11.4 SW	11.1 E

單位：m/s

表 5-3 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風場主要風向百分比統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	N~E(97%)	W~N(71%)
	MC 風場	N~E(75%)	N~E(67%)
	RC 風場	N~E(86%)	N~E(84%)
2	OBS	N~E(87%)	W~N(75%)
	MC 風場	N~E(51%)	N~E(43%)
	RC 風場	N~E(66%)	N~E(63%)
3	OBS	N~E(63%)	W~N(65%)
	MC 風場	N~E(43%)	N~E(46%)
	RC 風場	N~E(45%)	N~E(45%)
6	OBS	S~W(35%)	W~N(37%)
	MC 風場	S~W(41%)	E~S(38%)
	RC 風場	S~W(53%)	S~W(49%)
7	OBS	N~E(28%)	E~S(38%)
	MC 風場	S~W(41%)	E~S(52%)
	RC 風場	E~S(55%)	E~S(66%)
8	OBS	N~E(60%)	E~S(29%)
	MC 風場	S~W(44%)	S~W(39%)
	RC 風場	S~W(47%)	S~W(41%)

5.2 風浪模擬成果評估

風浪模擬包括 SWAN 模式與 WAM 模式，本年度安平港冬季季風期間與夏季季風期間 SWAN 模式及 WAM 模式預報波浪與觀測波浪資料之比較如附錄八所示，高雄港冬季季風期間與夏季季風期間 SWAN 模式及 WAM 模式預報波浪與觀測波浪資料之比較如附錄九所示。統計今年度季風期間安平港與高雄港每月模式預報風浪及觀測波浪之示性波高平均值與最大值、示性週期平均值與最大值、主要波高分佈百分比、主要週期分佈百分比以及主要波向分佈百分比分別列如表 5-4 至表 5-10 所示。安平港冬季季風期間觀測與模式之示性波高平均值差異不大，介於 0.4~0.7 m 之間；夏季季風期間觀測之示性波高平均值則較大，尤以 8 月差異較大。高雄港冬季季風期間觀測之示性波高平均值(0.6~0.9 m)則較模式(0.4~0.6 m)為大；夏季季風期間高雄港無觀測資料，SWAN 與 WAM 模式預報結果相近，介於 0.7~1.0 m 之間。安平港及高雄港冬季季風期間觀測與模式之示性波高最大值差異不大，夏季季風期間可能受到颱風影響，安平港觀測之示性波高最大值明顯偏大。

安平港及高雄港冬季季風期間示性週期之平均值較短，其中以 WAM 模式預報之示性週期平均值較觀測值為大；夏季季風期間示性週期之平均值較長，而以 SWAN 模式預報之示性週期平均值較觀測值略小。在示性週期之最大值方面，安平港及高雄港冬季季風期間 SWAN 模式預報結果偏小；夏季季風期間安平港觀測之示性週期最大值較模式預報為大。

波高分佈方面，冬季季風期間安平港及高雄港觀測波高多集中在 0.5~1 m 之間，模式預報則多小於 0.5 m；夏季季風期間波高多分佈在 0.5~1 m 之間，8 月安平港觀測波高較大，多分佈在 1~5 m 之間，佔 55%。兩個港季風期間預報與觀測風浪週期多小於 6 sec，但 8 月安平港觀測波浪週期則多集中在 8~10 sec 之間，佔 48%。冬季季風期間安平港及高雄港觀測及 SWAN 模式之主要波向多集中在 W~N 之間，安

平港 WAM 模式之主要波向則集中在 N~E 之間，高雄港 WAM 模式之主要波向集中在 E~S 之間。夏季季風期間兩個港模式預報與觀測之主要風向則一致集中在 S~W 之間。

表 5-4 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性波高平均值統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	0.6	0.8
	SWAN 模式	0.6	0.6
	WAM 模式	0.7	0.5
2	OBS	0.6	0.9
	SWAN 模式	0.5	0.5
	WAM 模式	0.7	0.5
3	OBS	0.5	0.6
	SWAN 模式	0.4	0.4
	WAM 模式	0.6	0.4
6	OBS	0.8	--
	SWAN 模式	0.6	0.7
	WAM 模式	0.8	0.8
7	OBS	0.9	--
	SWAN 模式	0.7	0.7
	WAM 模式	0.7	0.7
8	OBS	1.4	--
	SWAN 模式	0.9	1.0
	WAM 模式	0.9	0.9

單位：m

**表 5-5 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性波高最大值
(方向、週期)統計表**

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	1.1 (WNW, 1s)	1.4 (WNW, 4s)
	SWAN 模式	1.4 (NNW, 3s)	1.4 (NW, 3s)
	WAM 模式	1.8 (N, 6s)	1.2 (N, 5s)
2	OBS	1.4 (S, 4s)	1.4 (SSE, 3s)
	SWAN 模式	1.3 (NNW, 3s)	1.2 (NW, 4s)
	WAM 模式	1.5 (N, 7s)	0.9 (ESE, 4s)
3	OBS	1.2 (SSW, 4s)	1.3 (SSE, 3s)
	SWAN 模式	1.2 (NW, 3s)	1.0 (NW, 3s)
	WAM 模式	1.8 (N, 7s)	0.9 (NNW, 5s)
6	OBS	2.5 (S, 4s)	--
	SWAN 模式	1.5 (SW, 4s)	1.7 (SW, 4s)
	WAM 模式	2.2 (SW, 7s)	2.1 (SW, 7s)
7	OBS	3.0 (WSW, 7s)	--
	SWAN 模式	2.0 (SW, 7s)	2.1 (W, 6s)
	WAM 模式	1.8 (WSW, 6s)	1.6 (WSW, 6s)
8	OBS	4.3 (SW, 8s)	--
	SWAN 模式	2.4 (SW, 8s)	2.5 (SW, 8s)
	WAM 模式	2.5 (SSW, 8s)	2.5 (SSW, 8s)

單位：m

表 5-6 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性週期平均值統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	3	3
	SWAN 模式	2	3
	WAM 模式	5	4
2	OBS	3	3
	SWAN 模式	2	3
	WAM 模式	5	4
3	OBS	2	3
	SWAN 模式	2	2
	WAM 模式	5	4
6	OBS	4	--
	SWAN 模式	3	3
	WAM 模式	5	5
7	OBS	6	--
	SWAN 模式	4	5
	WAM 模式	6	6
8	OBS	8	--
	SWAN 模式	6	6
	WAM 模式	7	7

單位：sec

**表 5-7 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪示性週期最大值
(方向、波高)統計表**

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	5 (WNW, 0.6m)	5 (SW, 0.7m)
	SWAN 模式	3 (NNW, 1.4m)	3 (NW, 1.1m)
	WAM 模式	6 (N, 1.4m)	5 (SE, 0.4m)
2	OBS	5 (W, 0.6m)	5 (S, 0.7m)
	SWAN 模式	3 (S, 0.4m)	3 (NW, 1.0m)
	WAM 模式	7 (N, 1.4m)	6 (NNW, 0.5m)
3	OBS	4 (S, 0.4m)	5 (SSW, 0.3m)
	SWAN 模式	3 (NW, 1.2m)	3 (WNW, 1.0m)
	WAM 模式	7 (N, 1.7m)	6 (NNW, 0.6m)
6	OBS	6 (SW, 2.2m)	--
	SWAN 模式	4 (SW, 1.2m)	4 (SW, 1.4m)
	WAM 模式	7 (SW, 1.7m)	7 (SW, 1.7m)
7	OBS	11 (S, 0.6m)	--
	SWAN 模式	7 (S, 1.0m)	6 (SW, 2.0m)
	WAM 模式	8 (SE, 0.6m)	8 (SE, 0.8m)
8	OBS	13 (SSW, 0.5m)	--
	SWAN 模式	11 (SSW, 1.8m)	11 (SSW, 2.1m)
	WAM 模式	10 (S, 1.1m)	10 (S, 1.1m)

單位：sec

**表 5-8 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪主要波高(百分比)
統計表**

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	0.5~1m (68%)	0.5~1m (90%)
	SWAN 模式	<0.5m (49%)	<0.5m (49%)
	WAM 模式	0.5~1m (57%)	<0.5m (60%)
2	OBS	0.5~1m (64%)	0.5~1m (80%)
	SWAN 模式	<0.5m (53%)	<0.5m (50%)
	WAM 模式	0.5~1m (56%)	<0.5m (50%)
3	OBS	<0.5m (61%)	0.5~1m (69%)
	SWAN 模式	<0.5m (72%)	<0.5m (71%)
	WAM 模式	<0.5m (48%)	<0.5m (73%)
6	OBS	0.5~1m (48%)	--
	SWAN 模式	<0.5m (44%)	0.5~1m (47%)
	WAM 模式	0.5~1m (38%)	0.5~1m (38%)
7	OBS	0.5~1m (48%)	--
	SWAN 模式	0.5~1m (48%)	0.5~1m (51%)
	WAM 模式	0.5~1m (72%)	0.5~1m (70%)
8	OBS	1~5m (55%)	--
	SWAN 模式	0.5~1m (52%)	1~5m (42%)
	WAM 模式	0.5~1m (51%)	0.5~1m (43%)

表 5-9 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪主要週期(百分比)
統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	<6s (99%)	<6s (99%)
	SWAN 模式	<6s (99%)	<6s (99%)
	WAM 模式	<6s (90%)	<6s (99%)
2	OBS	<6s (99%)	<6s (99%)
	SWAN 模式	<6s (99%)	<6s (99%)
	WAM 模式	<6s (87%)	<6s (98%)
3	OBS	<6s (99%)	<6s (99%)
	SWAN 模式	<6s (99%)	<6s (99%)
	WAM 模式	<6s (86%)	<6s (99%)
6	OBS	<6s (97%)	--
	SWAN 模式	<6s (99%)	<6s (99%)
	WAM 模式	<6s (88%)	<6s (87%)
7	OBS	<6s (44%)	--
	SWAN 模式	<6s (83%)	<6s (80%)
	WAM 模式	<6s (50%)	6~8s (50%)
8	OBS	8~10s (48%)	--
	SWAN 模式	<6s (55%)	<6s (49%)
	WAM 模式	6~8s (58%)	6~8s (59%)

表 5-10 2013 年安平港與高雄港預報及觀測風浪主要波向(百分比)
統計表

2013 年月份	資料來源	安平港	高雄港
1	OBS	W~N (82%)	W~N (59%)
	SWAN 模式	W~N (81%)	W~N (68%)
	WAM 模式	N~E (74%)	N~E (46%)
2	OBS	W~N (63%)	W~N (44%)
	SWAN 模式	W~N (67%)	W~N (52%)
	WAM 模式	N~E (57%)	E~S (59%)
3	OBS	W~N (53%)	W~N (51%)
	SWAN 模式	W~N (51%)	W~N (44%)
	WAM 模式	N~E (47%)	E~S (50%)
6	OBS	S~W (83%)	--
	SWAN 模式	S~W (83%)	S~W (71%)
	WAM 模式	S~W (73%)	S~W (79%)
7	OBS	S~W (83%)	--
	SWAN 模式	S~W (87%)	S~W (48%)
	WAM 模式	S~W (73%)	S~W (66%)
8	OBS	S~W (92%)	--
	SWAN 模式	S~W (87%)	S~W (76%)
	WAM 模式	S~W (86%)	S~W (80%)

5.3 水位模擬成果評估

目前已作業化的小尺度水動力模式包括基隆港及臺北港水動力模式，本節針對此二港今年度水位模擬作業化成果進行評估說明。冬季季風期間基隆港模式預報水位標準偏差最小為 0.10 m，最大偏差為 -0.91 m；夏季季風期間模式預報水位標準偏差最小為 0.09 m，最大偏差為 -0.30 m。臺北港冬季季風期間模式預報水位標準偏差最小為 0.21 m，最大偏差為 -1.15 m。

表 5-11 2013 年基隆及臺北港觀測 1 站及小尺度預報水位偏差統計表

2013 年月份	方法	基隆港	臺北港
1	平均偏差	-.02	-.02
	標準偏差	.27	.21
	最大偏差	-.91	.42
2	平均偏差	.00	--
	標準偏差	.10	--
	最大偏差	.27	--
3	平均偏差	.00	-.03
	標準偏差	.12	.47
	最大偏差	.39	-1.15
6	平均偏差	.00	.00
	標準偏差	.10	(1.09)
	最大偏差	-.30	(-2.57)
7	平均偏差	.00	.00
	標準偏差	.09	(1.61)
	最大偏差	.25	(-3.22)
8	平均偏差	.00	.00
	標準偏差	.09	(4.24)
	最大偏差	.29	(-9.72)

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

單位：m

5.4 流場模擬成果評估

潮流模擬亦針對已作業化之小尺度基隆港及臺北港水動力模式進行流場模擬成果評估說明。今年度冬季季風及夏季季風期間基隆港與臺北港觀測及小尺度預報流速與流向偏差統計分別如表 5-12 與表 5-13 所示。冬季季風期間基隆港模式預報流速標準偏差最小為 20.0 cm/s，最大偏差為-96.0 cm/s，平均比值為 0.8；夏季季風期間模式預報流速標準偏差最小為 14.9 cm/s，最大偏差為-81.4 cm/s，平均比值介於 1.0~1.3 之間。臺北港冬季季風期間模式預報流速標準偏差最小為 21.5 cm/s，最大偏差為-58.4 cm/s，平均比值為 0.9；夏季季風期間模式預報流速標準偏差最小為 22.4 cm/s，最大偏差為-101.5 cm/s。

基隆港冬季季風期間模式預報流向標準偏差最小為 74.4 度，最大偏差為 179.9 度；夏季季風期間模式預報流向標準偏差最小為 69.8 度，最大偏差為 180 度。臺北港冬季季風期間模式預報流向標準偏差最小為 29.6 度，最大偏差為 179.9 度；臺北港夏季季風期間模式預報流向標準偏差最小為 11.0 度，最大偏差為 179.9 度。

表 5-12 2013 年基隆及臺北港觀測及小尺度預報流速偏差統計表

2013 年月份	方法	基隆港	臺北港
1	平均偏差	-13.3	-12.8
	標準偏差	21.4	22.6
	最大偏差	-81.4	-58.4
	平均比值	.8	.9
2	平均偏差	-13.5	-15.7
	標準偏差	21.2	24.2
	最大偏差	-69.3	-51.9
	平均比值	.8	.9
3	平均偏差	-12.7	-13.2
	標準偏差	20.0	21.5
	最大偏差	-96.0	-54.1
	平均比值	.8	.9
6	平均偏差	-7.8	-15.3
	標準偏差	16.6	33.0
	最大偏差	-62.2	-101.5
	平均比值	1.0	1.1
7	平均偏差	-4.0	-10.5
	標準偏差	14.9	43.8
	最大偏差	-81.4	-53.1
	平均比值	1.3	2.0
8	平均偏差	-5.9	-12.9
	標準偏差	15.5	22.4
	最大偏差	-60.4	-89.4
	平均比值	1.1	.9

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

單位：cm/sec

表 5-13 2013 年基隆及臺北港觀測及小尺度預報流向偏差統計表

2013 年月份	方法	基隆港	臺北港
1	平均偏差	53.7	35.0
	標準偏差	77.5	54.1
	最大偏差	179.9	176.6
2	平均偏差	51.2	16.3
	標準偏差	74.4	29.6
	最大偏差	179.8	113.4
3	平均偏差	50.7	21.8
	標準偏差	74.5	45.4
	最大偏差	179.7	179.9
6	平均偏差	52.1	41.2
	標準偏差	69.8	63.9
	最大偏差	179.9	179.9
7	平均偏差	63.1	10.3
	標準偏差	77.6	11.0
	最大偏差	180.0	14.3
8	平均偏差	56.1	27.9
	標準偏差	73.4	50.3
	最大偏差	179.8	179.5

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

偏差大小範圍為 0-180 度

單位：度

5.5 颱風時期模擬成果評估

本年度至 9 月底止計有 5 個颱風侵襲臺灣本島或附近海域，分別為蘇力、西馬隆、潭美、康芮及天兔，其侵臺路徑分別如圖 5.1 至圖 5.2 所示。每個颱風影響時期預報風浪、潮位及流場與觀測資料之時序列比較圖蒐錄於附錄十。統計每個颱風時期風浪、潮位及流場之模式預報與觀測值之間的各種偏差如表 5-14 至表 5-22 所示。由於此期間高雄港波浪及海流皆無觀測資料，故僅有水位觀測資料可供評估。由統計結果得知，SWAN 模式在安平港的示性波高預報以西馬隆颱風時期的標準偏差最小，為 0.43 m，平均比值為 0.87，最大偏差發生在潭美颱風時期，為 -3.51 m，此時期之標準偏差亦最大為 1.07 m。SWAN 模式預報波向則以潭美颱風時期標準偏差最小，為 22.6 度，而以西馬隆颱風時期的標準偏差與最大偏差最大，分別為 35.5 度與 111.1 度。示性週期則以蘇力颱風時期標準偏差最小，為 0.6 sec，平均比值為 1.0。WAM 模式預報安平港示性波高以西馬隆颱風時期的標準偏差最小，為 0.47 m；預報波向則以康芮颱風時期的標準偏差 29.2 度為最小；預報示性週期亦以西馬隆颱風時期的標準偏差 1.0 sec 為最小，平均比值為 1.0。

由於安平港及高雄港小尺度水動力模式尚未作業化，因此以中尺度水動力模式作業化預報成果做說明。模式預報水位在安平港以康芮颱風時期的標準偏差 0.13 m 為最小，此期間最大偏差為 -0.22 m；模式預報水位在高雄港亦以康芮颱風時期的標準偏差 0.05 m 為最小，此期間最大偏差僅 0.11 m。安平港模式預報流速以西馬隆颱風時期的標準偏差 11.1 cm/ sec 為最小，此時期最大偏差為 22.2 cm/ sec；安平港模式預報流向以潭美颱風時期的標準偏差 58.2 度為最小，康芮颱風時期的標準偏差 81.4 度為最大。

表 5-14 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及 SWAN 預報示性波高
各種偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	-.09	--
	標準偏差	.60	--
	最大偏差	-1.55	--
	平均比值	1.17	--
西馬隆	平均偏差	-.24	--
	標準偏差	.43	--
	最大偏差	-1.06	--
	平均比值	.87	--
潭美	平均偏差	-.62	--
	標準偏差	1.07	--
	最大偏差	-3.51	--
	平均比值	.76	--
康芮	平均偏差	-.40	--
	標準偏差	.69	--
	最大偏差	-2.08	--
	平均比值	.78	--
天兔	平均偏差	.10	--
	標準偏差	.99	--
	最大偏差	2.60	--
	平均比值	1.42	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

比值 = 預報值 / 觀測值

單位：m

表 5-15 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及 SWAN 預報波向各種
偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	24.5	--
	標準偏差	29.8	--
	最大偏差	85.5	--
西馬隆	平均偏差	23.6	--
	標準偏差	35.5	--
	最大偏差	111.1	--
潭美	平均偏差	18.9	--
	標準偏差	22.6	--
	最大偏差	39.6	--
康芮	平均偏差	19.0	--
	標準偏差	22.9	--
	最大偏差	57.9	--
天兔	平均偏差	26.7	--
	標準偏差	34.7	--
	最大偏差	104.9	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

偏差大小範圍為 0-180 度

單位：度

表 5-16 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及 SWAN 預報示性週期
各種偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	-1	--
	標準偏差	.6	--
	最大偏差	-2.0	--
	平均比值	1.0	--
西馬隆	平均偏差	-1.6	--
	標準偏差	1.7	--
	最大偏差	-2.6	--
	平均比值	.7	--
潭美	平均偏差	-2.0	--
	標準偏差	2.5	--
	最大偏差	-5.5	--
	平均比值	.8	--
康芮	平均偏差	-2.8	--
	標準偏差	3.0	--
	最大偏差	-5.0	--
	平均比值	.6	--
天兔	平均偏差	-3.2	--
	標準偏差	3.6	--
	最大偏差	-5.7	--
	平均比值	.6	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

比值 = 預報值 / 觀測值

單位：s

表 5-17 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及 WAM 預報示性波高
各種偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	-.40	--
	標準偏差	.55	--
	最大偏差	-1.25	--
	平均比值	.70	--
西馬隆	平均偏差	-.37	--
	標準偏差	.47	--
	最大偏差	-.99	--
	平均比值	.66	--
潭美	平均偏差	-.54	--
	標準偏差	.95	--
	最大偏差	-2.22	--
	平均比值	.83	--
康芮	平均偏差	-.73	--
	標準偏差	1.04	--
	最大偏差	-2.70	--
	平均比值	.56	--
天兔	平均偏差	.96	--
	標準偏差	2.06	--
	最大偏差	4.58	--
	平均比值	2.47	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

比值 = 預報值 / 觀測值

單位：m

表 5-18 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及 WAM 預報波向各種
偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	26.0	--
	標準偏差	35.3	--
	最大偏差	101.7	--
西馬隆	平均偏差	56.2	--
	標準偏差	60.1	--
	最大偏差	113.8	--
潭美	平均偏差	33.3	--
	標準偏差	35.5	--
	最大偏差	54.2	--
康芮	平均偏差	26.8	--
	標準偏差	29.2	--
	最大偏差	61.5	--
天兔	平均偏差	97.4	--
	標準偏差	100.5	--
	最大偏差	176.6	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

偏差大小範圍為 0-180 度

單位：度

表 5-19 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及 WAM 預報示性週期
各種偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	.9	--
	標準偏差	1.1	--
	最大偏差	2.5	--
	平均比值	1.3	--
西馬隆	平均偏差	.3	--
	標準偏差	1.0	--
	最大偏差	1.8	--
	平均比值	1.1	--
潭美	平均偏差	-.7	--
	標準偏差	1.1	--
	最大偏差	-2.2	--
	平均比值	.9	--
康芮	平均偏差	-1.0	--
	標準偏差	1.2	--
	最大偏差	-2.2	--
	平均比值	.9	--
天兔	平均偏差	-1.4	--
	標準偏差	2.0	--
	最大偏差	-4.7	--
	平均比值	.9	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

比值 = 預報值 / 觀測值

單位：s

表 5-20 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測 1 站及中尺度預報水位
偏差統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	.04	.04
	標準偏差	.16	.12
	最大偏差	.34	.26
西馬隆	平均偏差	.01	.02
	標準偏差	.15	.07
	最大偏差	-.27	.16
潭美	平均偏差	.08	.09
	標準偏差	.19	.13
	最大偏差	.40	.30
康芮	平均偏差	.02	.01
	標準偏差	.13	.05
	最大偏差	-.22	.11
天兔	平均偏差	.13	.11
	標準偏差	.22	.16
	最大偏差	.46	.38

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

單位：m

表 5-21 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及中尺度預報流速偏差
統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	-9.2	--
	標準偏差	21.1	--
	最大偏差	-73.4	--
	平均比值	.9	--
西馬隆	平均偏差	3.2	--
	標準偏差	11.1	--
	最大偏差	22.2	--
	平均比值	2.0	--
潭美	平均偏差	-4.8	--
	標準偏差	23.3	--
	最大偏差	-66.0	--
	平均比值	1.4	--
康芮	平均偏差	-8.1	--
	標準偏差	24.3	--
	最大偏差	-65.3	--
	平均比值	1.5	--
天兔	平均偏差	-4.2	--
	標準偏差	34.6	--
	最大偏差	-122.7	--
	平均比值	1.6	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

比值 = 預報值 / 觀測值

單位：cm/s

表 5-22 2013 年颱風期間安平港與高雄港觀測及中尺度預報流向偏差
統計表

颱風名稱	方法	安平港	高雄港
蘇力	平均偏差	47.3	--
	標準偏差	60.8	--
	最大偏差	151.1	--
西馬隆	平均偏差	54.8	--
	標準偏差	77.7	--
	最大偏差	164.6	--
潭美	平均偏差	40.1	--
	標準偏差	58.2	--
	最大偏差	179.9	--
康芮	平均偏差	61.7	--
	標準偏差	81.4	--
	最大偏差	160.0	--
天兔	平均偏差	49.7	--
	標準偏差	69.3	--
	最大偏差	174.1	--

[註]：偏差 = 預報值 - 觀測值

偏差大小範圍為 0-180 度

單位：度

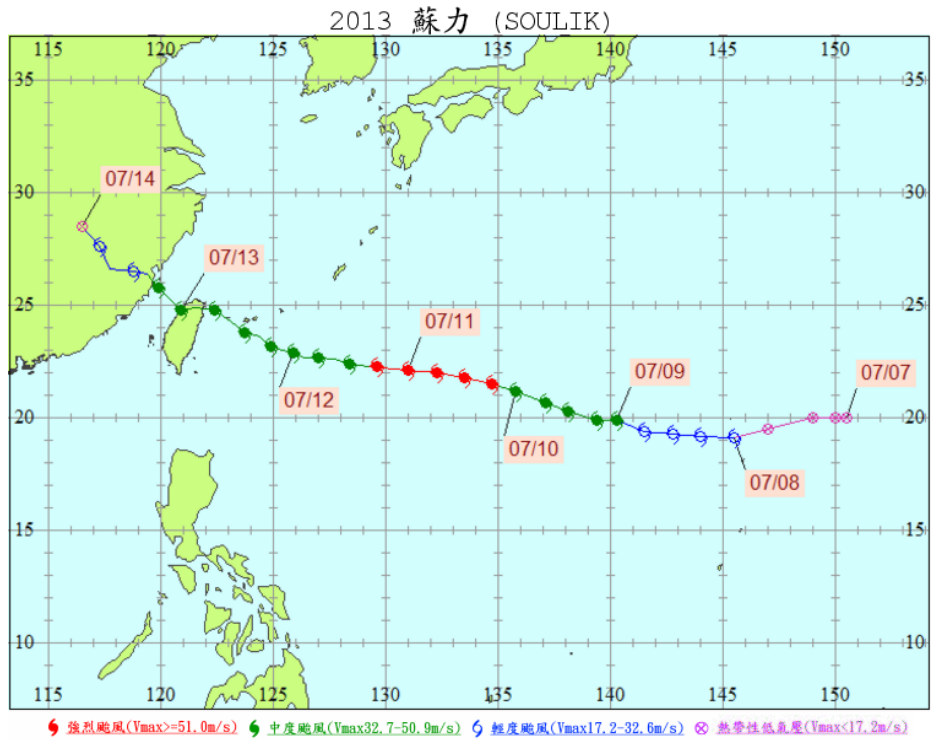


圖 5.1 2013 年中度颱風蘇力侵臺路徑圖

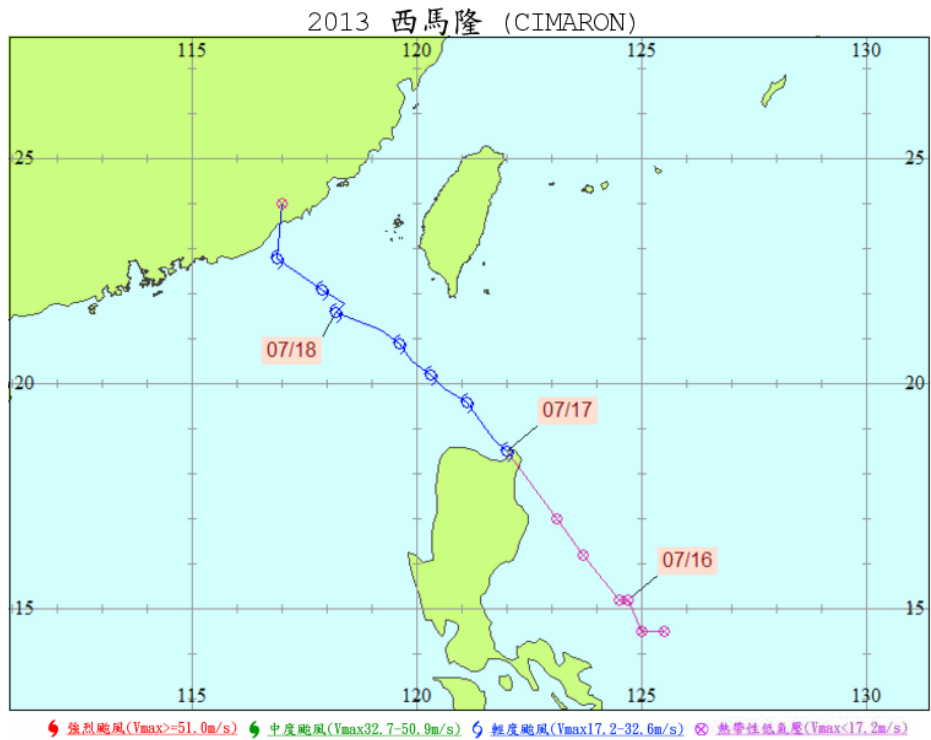


圖 5.2 2013 年輕度颱風西馬隆侵臺路徑圖

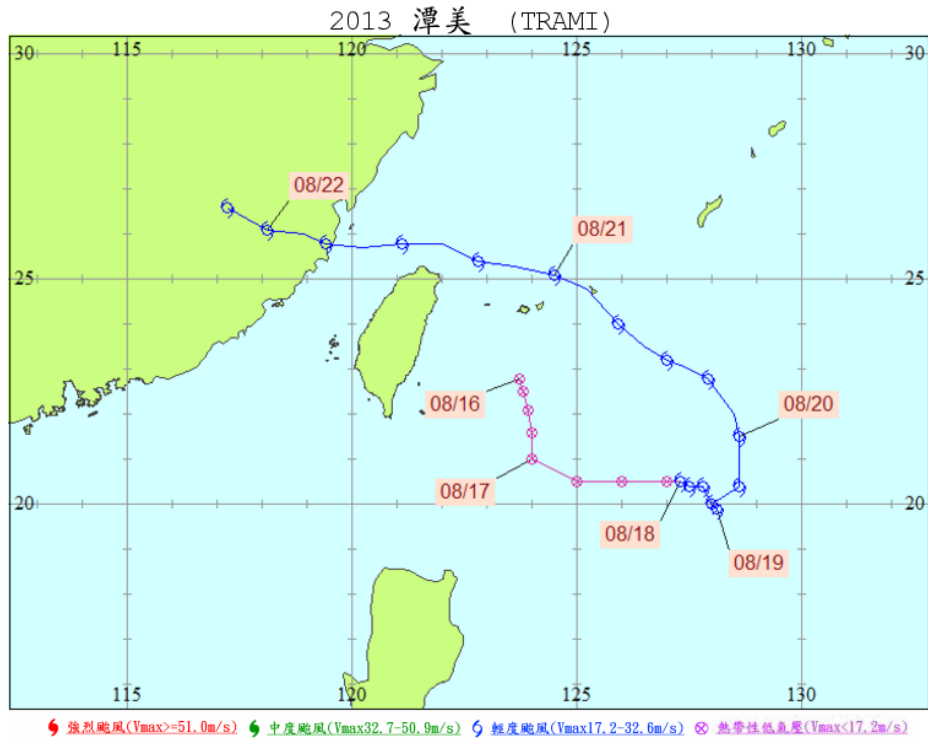


圖 5.3 2013 年輕度颱風潭美侵臺路徑圖

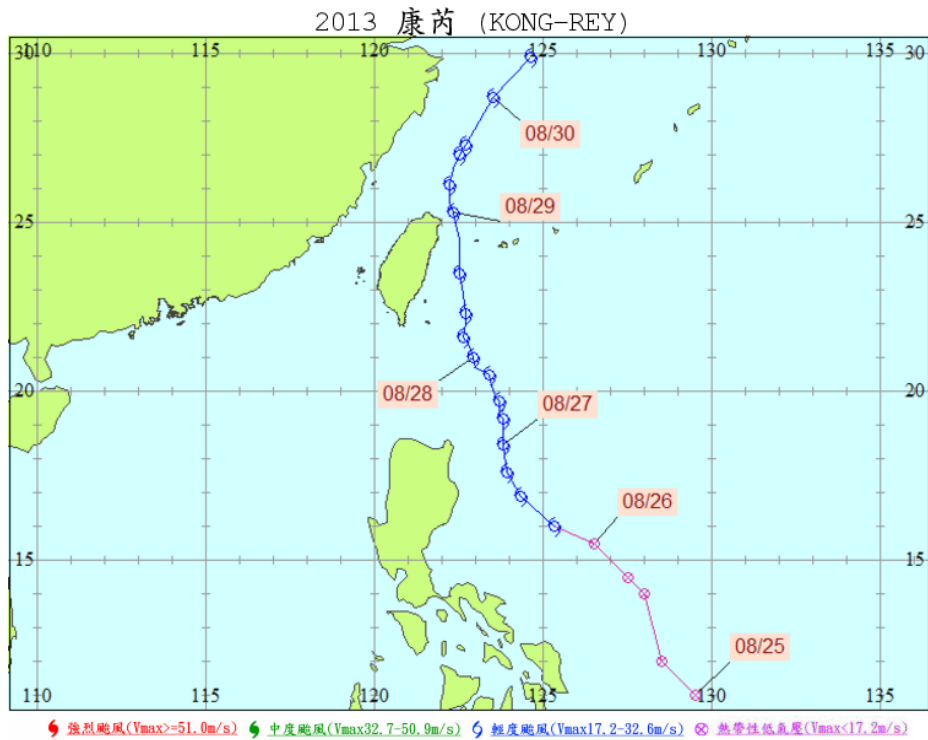


圖 5.4 2013 年輕度颱風康芮侵臺路徑圖

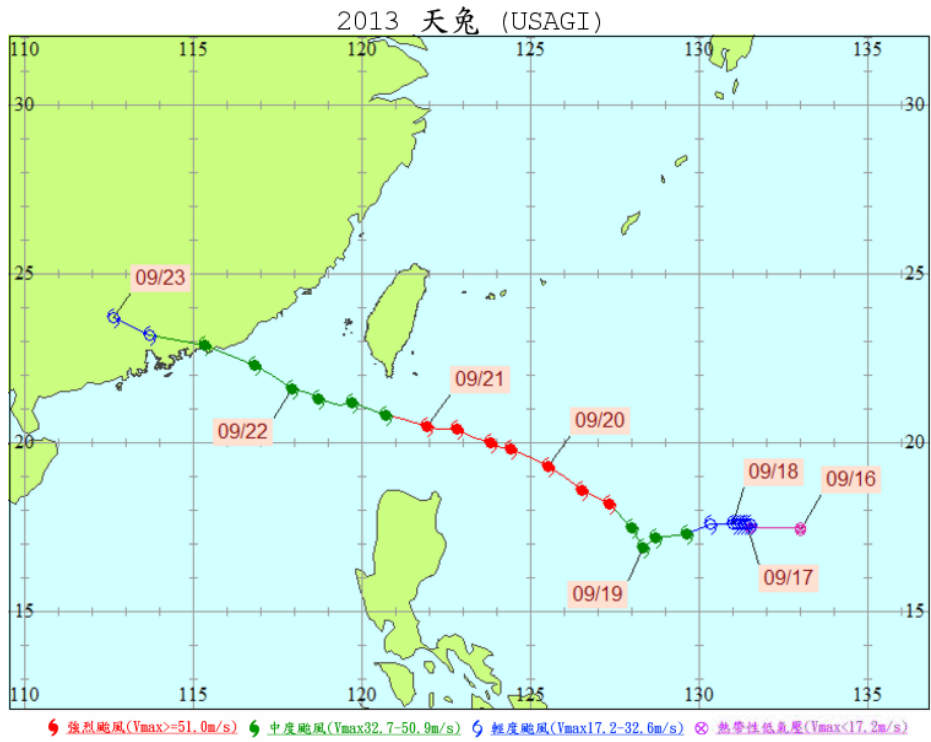


圖 5.5 2013 年強烈颱風天兔侵臺路徑圖

第六章 結論與建議

本年度計畫為「提昇海岸及港灣海域海象模擬技術之研究」二期合作計畫之第一年，本計畫以提昇臺灣周圍海岸及港灣海域海象(波浪、水位及海流)模擬技術為研究目的。本年度計畫以安平港區及高雄港區為研究對象，進行包括波浪、水位及流場等海象模擬研究。依據本報告研究及工作成果綜整得到下列結論及建議事項：

6.1 結論

1. 在基本資料蒐集方面，本計畫蒐集安平港區及高雄港區 2012 年水深調查資料、2008 年~2012 年潮位觀測資料以及 2012 年海流、波浪及風速風向等觀測資料，提供本計畫相關海象模擬資料更新及驗證之需。另外，在作業化系統之數值預報風壓場資料方面，除了持續接收 NFS 風壓場資料外，亦同時接收 WRF 風壓場資料進行作業化系統數值預報風壓場資料更新相關研究工作。
2. 在風浪作業化模擬方面，本計畫大尺度西太平洋範圍風浪模組具體改善內容包括：在作業化模擬流程修正使其更能符合 TaiCOMS 之設計規劃預報流程；在模擬技術成果方面包括風場資料更新(如以 MC 風場取代 RC 風場)以及風浪模擬結果之波向、週期及波高等呈現均有實質改善成效；在風浪模擬資訊提供方面除了原七大商港外，增加布袋港及澎湖、金門及馬祖等離島海域風浪模擬資訊至港灣資訊網供外界查詢等；此外，本計畫亦配合港灣技術研究中心硬體設備更新，針對中尺度臺灣周圍海域範圍風浪模組採行多核心平行化處理，顯著提昇中尺度網格風浪模擬效率，縮短 72 小時模擬預報時間。
3. 在港區小尺度及細尺度網格波浪模擬研究上，本計畫除了針對安平港及高雄港小尺度網格波浪場模擬進行必要的資料更新研究外，更針對安平港進行細尺度網格改善研究，使其能符合現況同時模擬安平港與安平漁港水域之波浪場。

4. 在臺灣周圍海域暴潮模組建置研究方面，本年度分別針對天文潮引起的水位變化及含氣象潮效應之天文潮水位變化進行模擬結果驗證與分析；其中天文潮水位變化模擬結果均能夠與高雄港及安平港潮位變化相符，證明中尺度有限元素網格之水位模擬結果能符合計畫需求；另在氣象潮水位變化分析結果得知，氣象潮水位變化趨勢與氣壓差值變化趨勢具有高度相關性，但二者相關性之決定係數值約為 0.45，顯示模式模擬結果而言風場效應引起的水位變化亦居重要的影響地位。
5. 在小尺度網格水動力模組研究上，本計畫分別針對安平港區近岸水動力模組及高雄港區近岸水動力模組進行必要的更新研究，內容除了針對模式主要的物理參數率定外，同時對開放邊界之水位資料改採用中尺度有限元素網格天文潮水位模擬結果進行小尺度有限元素網格水位及流場模擬；經由模擬結果驗證得知，安平港小尺度有限元素網格水位及流場模擬結果具有顯著改善成效，但高雄港小尺度有限元素網格水位及流場模擬結果則改善成效有限。

6.2 建議

1. 本年度新增中央氣象局第四代天氣數值預報系統之 WRF 風壓場資料，除了有助於提昇作業化系統風壓場資料精確性外，在作業化系統資料轉換過程對於可能涉及相關海象模擬模組模擬範圍之修正問題，建議後續研究宜做整體性評估考量。
2. 本年度臺灣周圍海域暴潮模組建置研究雖然已能夠提供較精確的臺灣周圍海域天文潮水位變化模擬值，但對於氣象潮的模擬，特別是颱風期間暴潮模擬，仍有部份模擬技術問題需持續研究改善與驗證。
3. 本年度針對安平港及高雄港小尺度水動力模組開放邊界條件與中尺度有限元素網格水位模擬值進行相銜接研究，初步研究結果僅在安平港水位及流場模擬上具有較顯著改善成效，因此後續仍需針對

其他港域再進行研究，才能進一步評估本計畫臺灣周圍海域暴潮模組模擬結果之應用範圍。

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,” *5th 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。

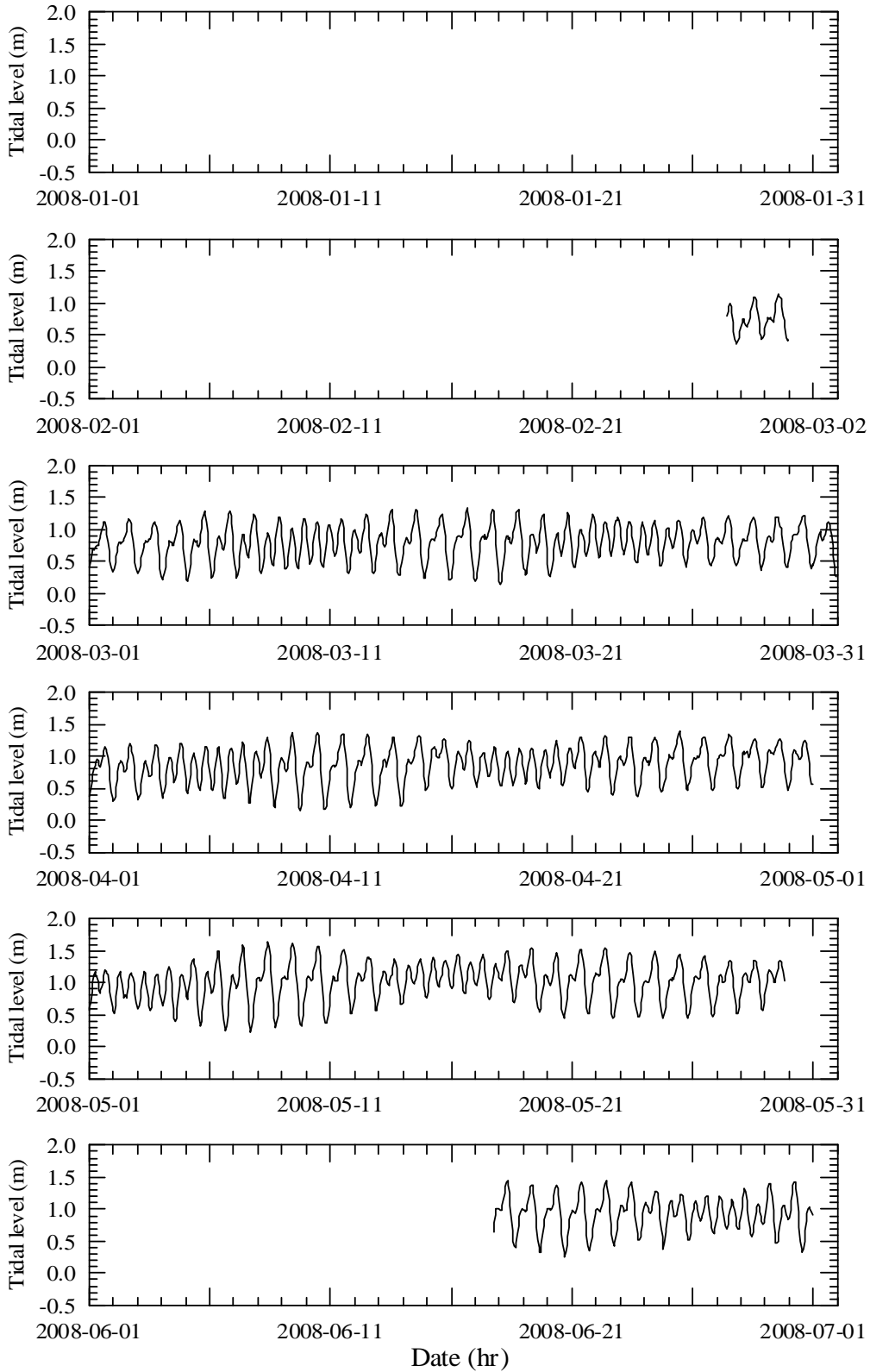
22. 李忠潘、陳陽益、于嘉順、王兆璋、薛憲文、張憲國、林炤圭、劉正琪、許泰文、莊曜陽，近岸數值模擬系統之建立(II)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-94-H3DB001，中華民國94年11月。
23. 李忠潘、邱永芳、陳陽益、于嘉順、蘇青和、劉正琪、林炤圭、張憲國、王兆璋，近岸數值模擬系統之建立(III)，交通部運輸研究所合作研究計畫報告，MOTC-IOT-95-H3DB001，中華民國95年11月。
24. 李忠潘、陳陽益、邱永芳、蘇青和、劉正琪、于嘉順、林炤圭、張憲國、薛憲文、王兆璋、陳明宗、李俊穎，近岸海象數值模擬及預警系統之建立(1/4)，交通部運輸研究所，MOTC-IOT-96-H3DB001，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。

附錄一

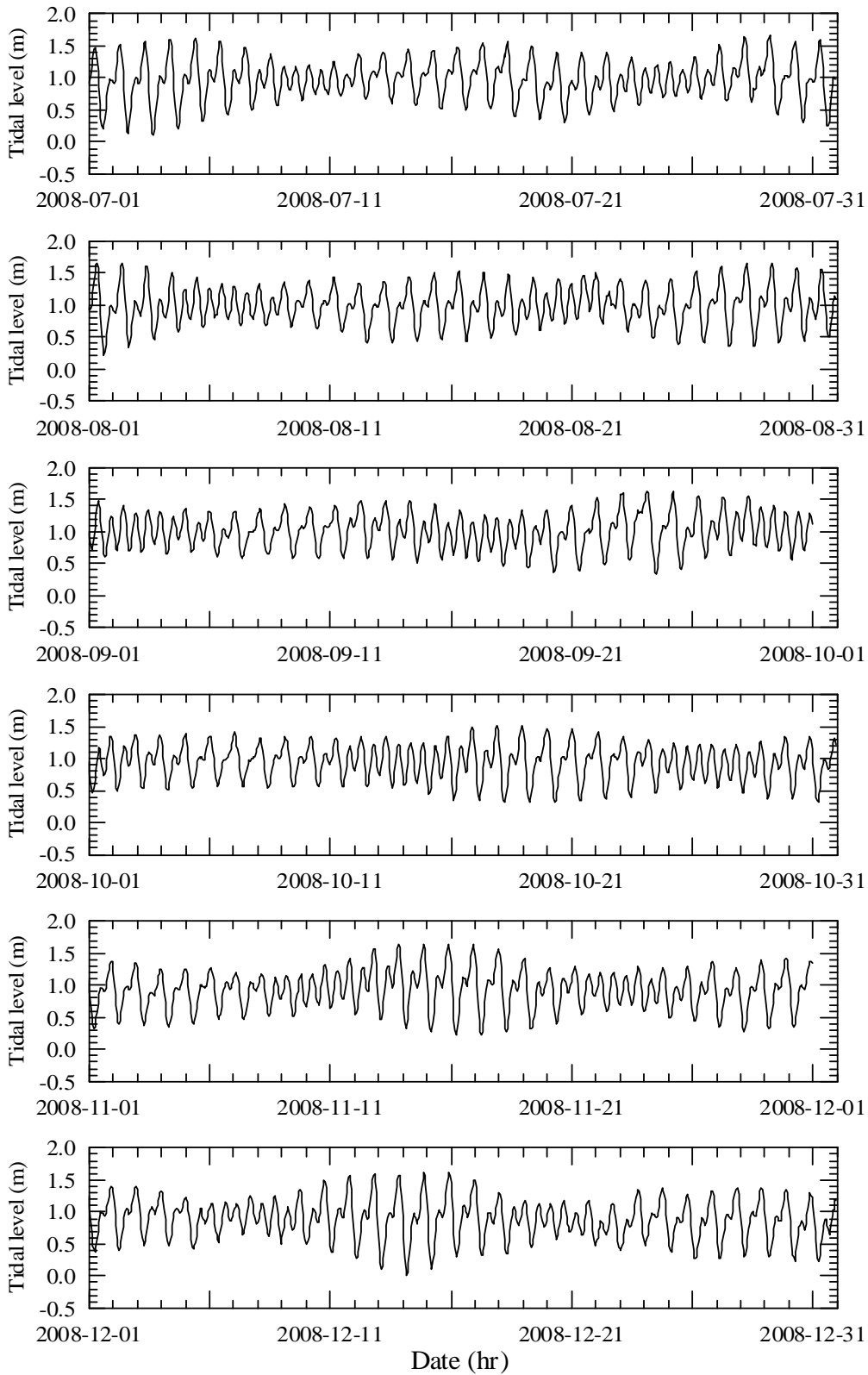
中央氣象局安平港及高雄港潮位觀測資料圖

Anping Harbor Tidal Station



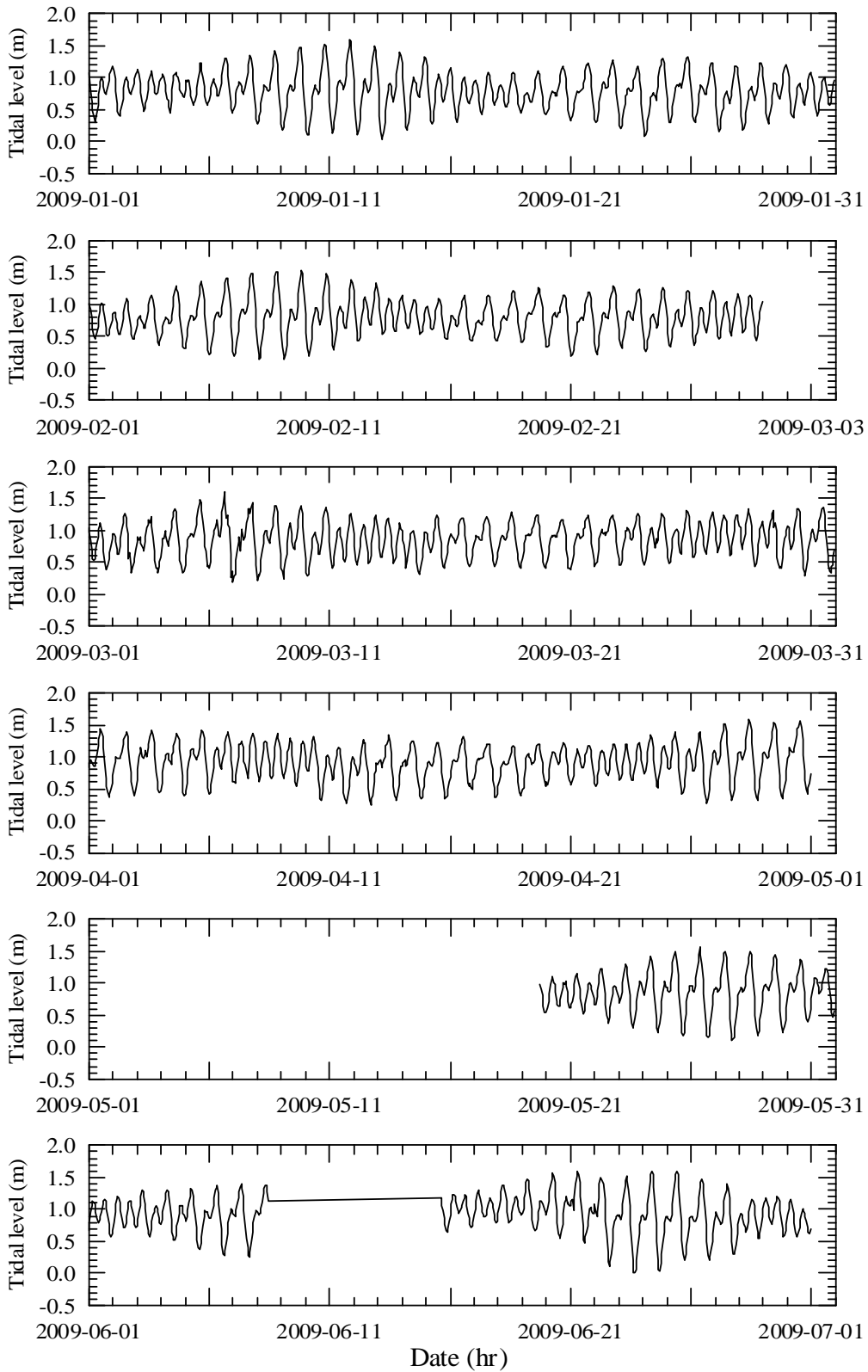
附圖 1.1 安平港潮位觀測資料(2008 年 1 ~ 6 月)

Anping Harbor Tidal Station



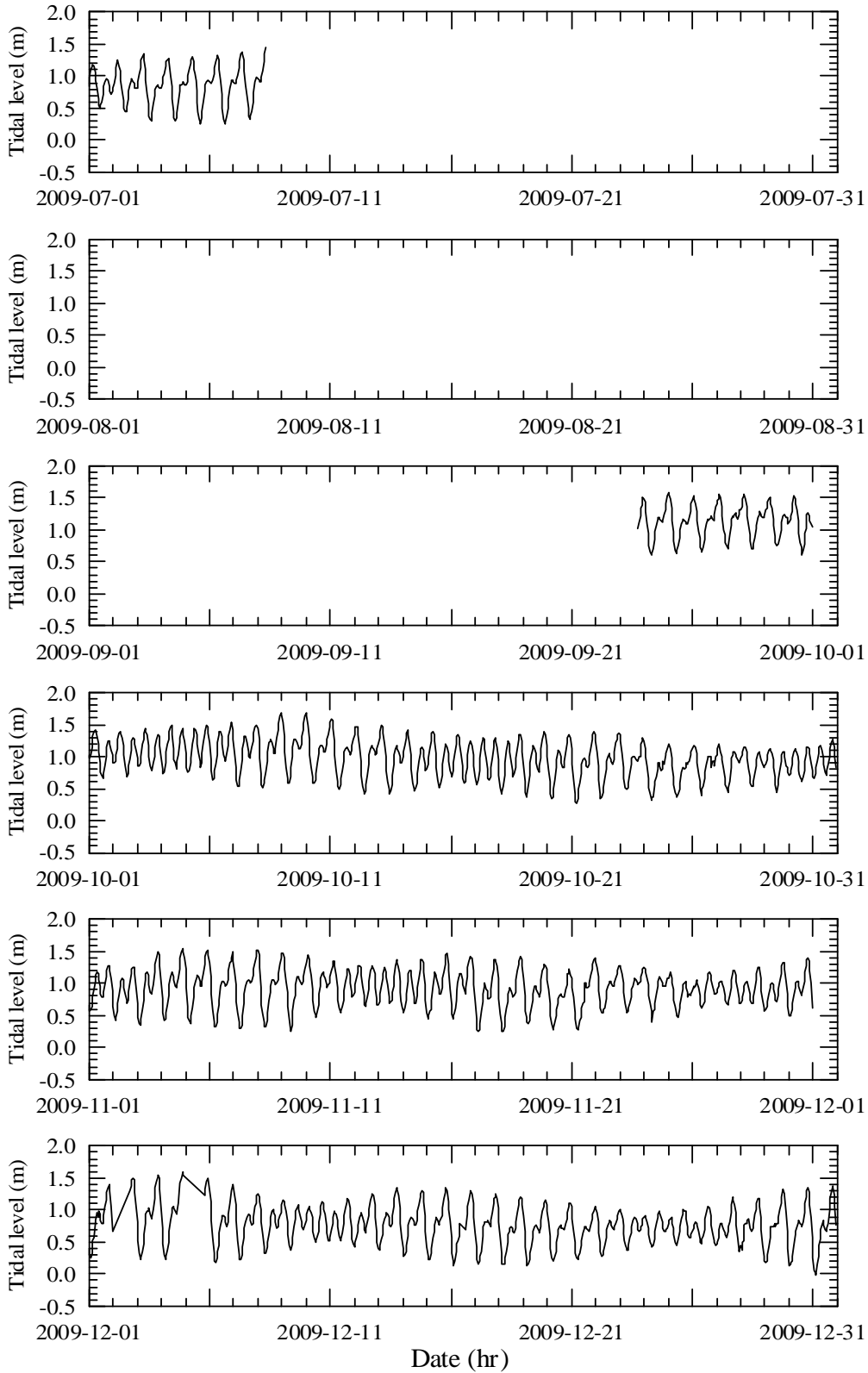
附圖 1.1 (續 1)安平港潮位觀測資料(2008 年 7 ~ 12 月)

Anping Harbor Tidal Station



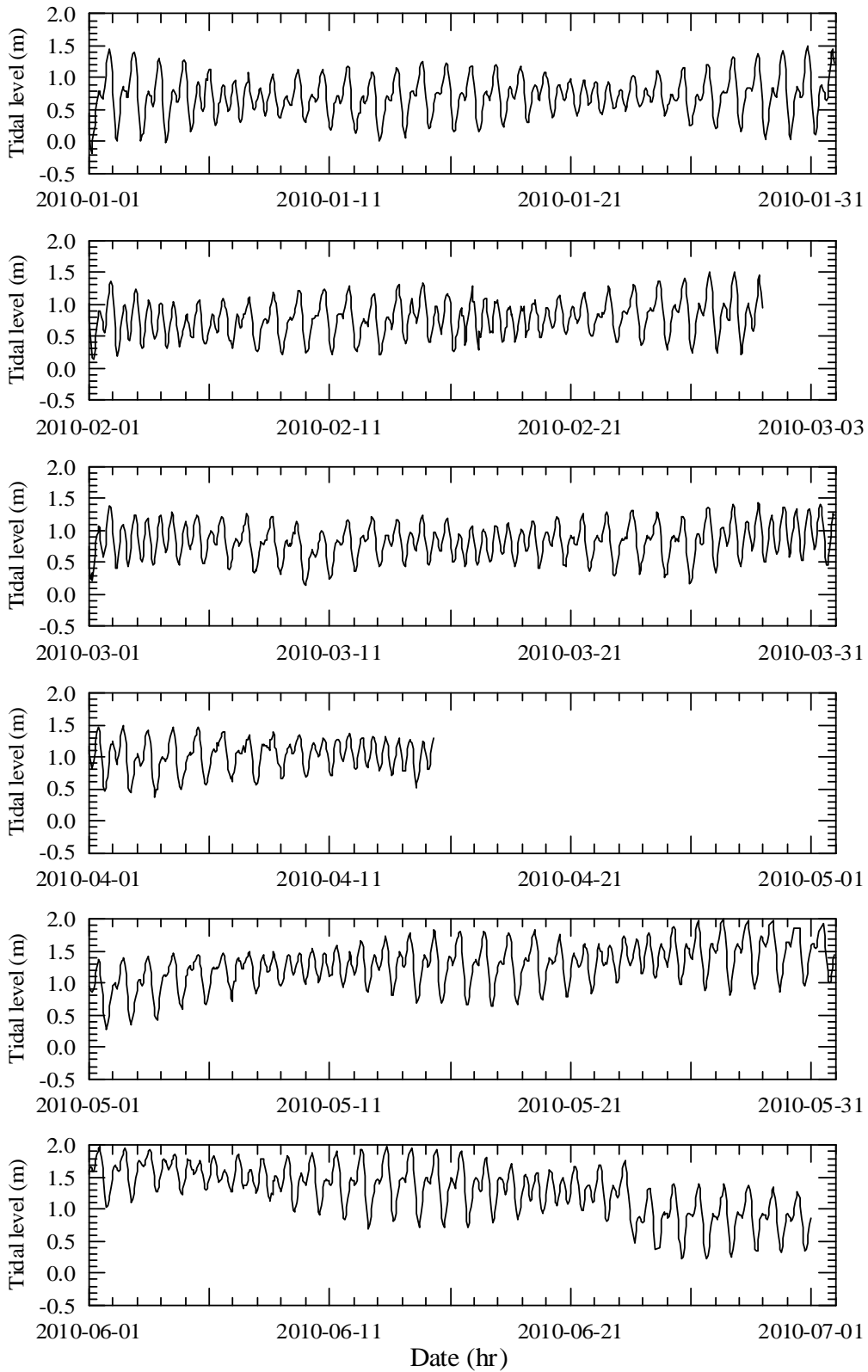
附圖 1.1 (續 2)安平港潮位觀測資料(2009 年 1 ~ 6 月)

Anping Harbor Tidal Station



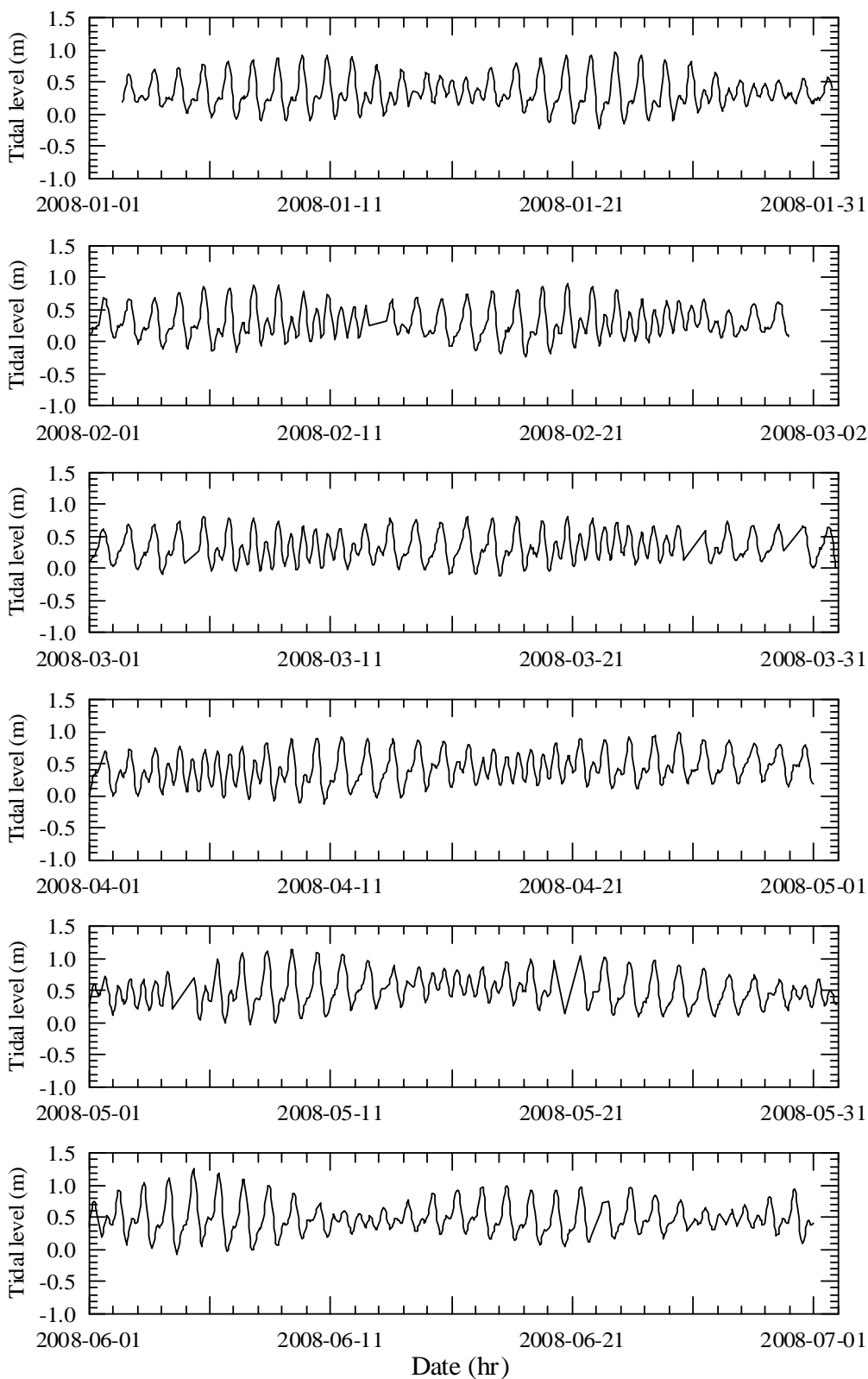
附圖 1.1 (續 3)安平港潮位觀測資料(2009 年 7 ~ 12 月)

Anping Harbor Tidal Station



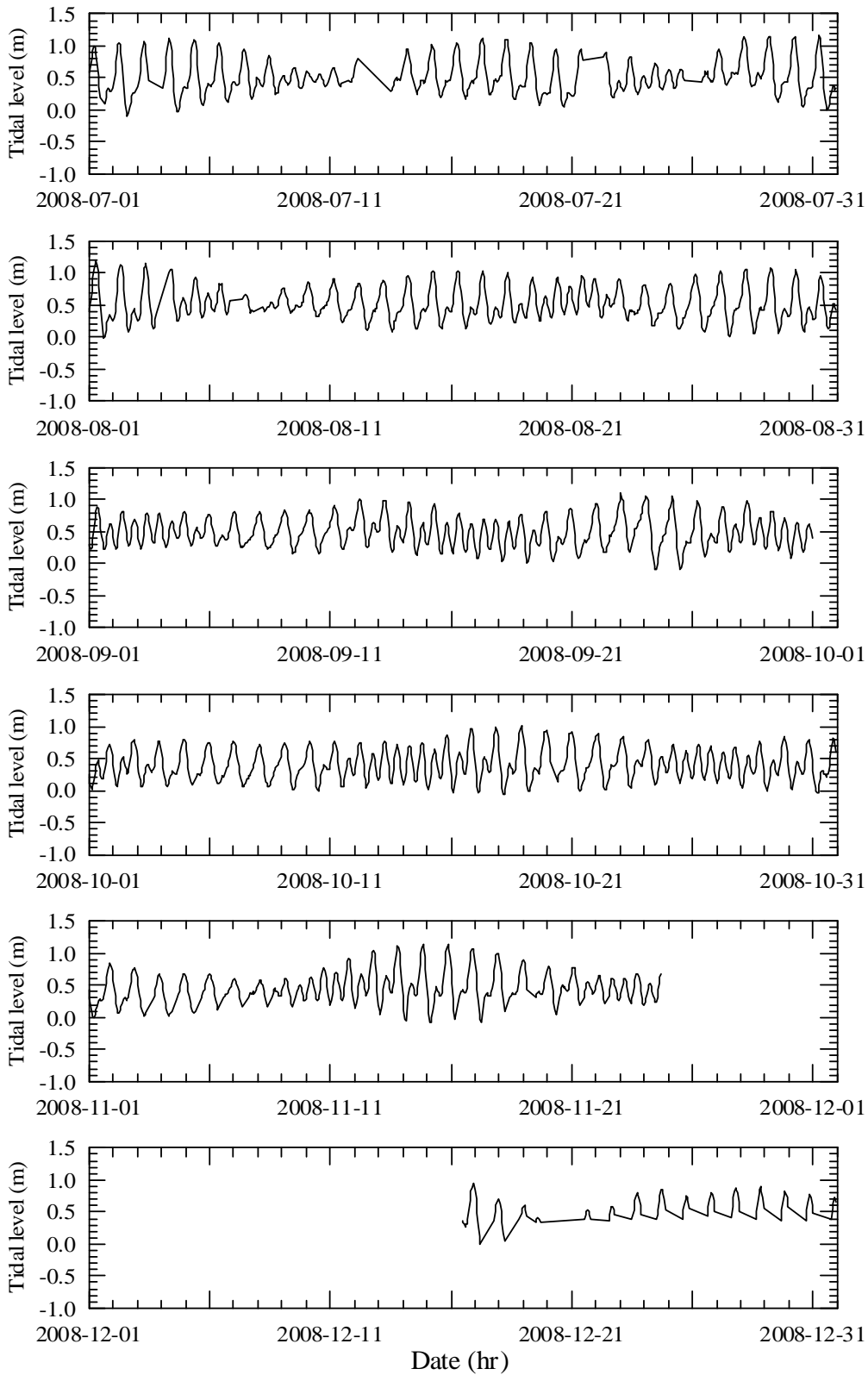
附圖 1.1 (續 4)安平港潮位觀測資料(2010 年 1 ~ 6 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



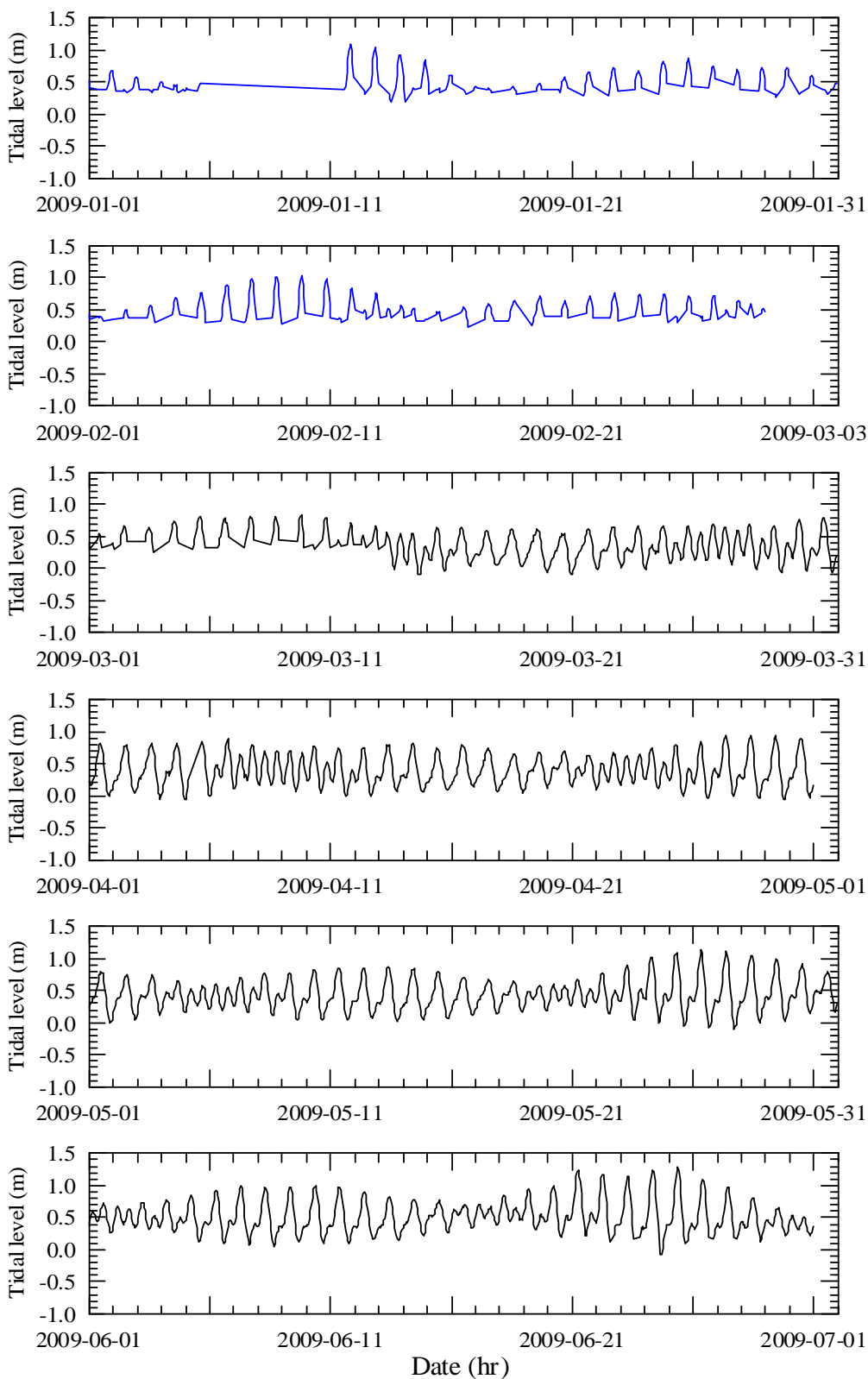
附圖 1.2 高雄港潮位觀測資料(2008 年 1 ~ 6 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



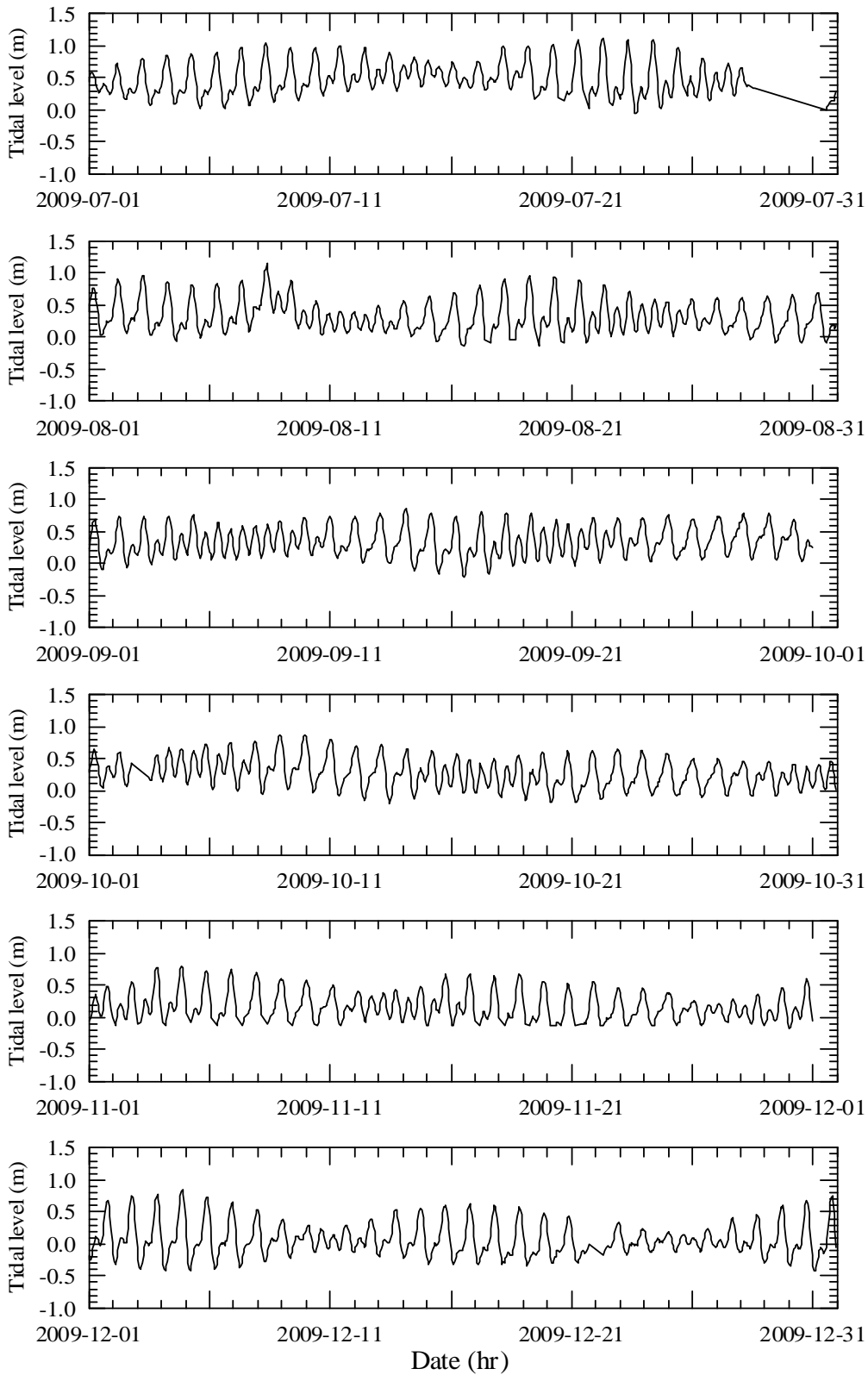
附圖 1.2 (續 1)高雄港潮位觀測資料(2008 年 7 ~ 12 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



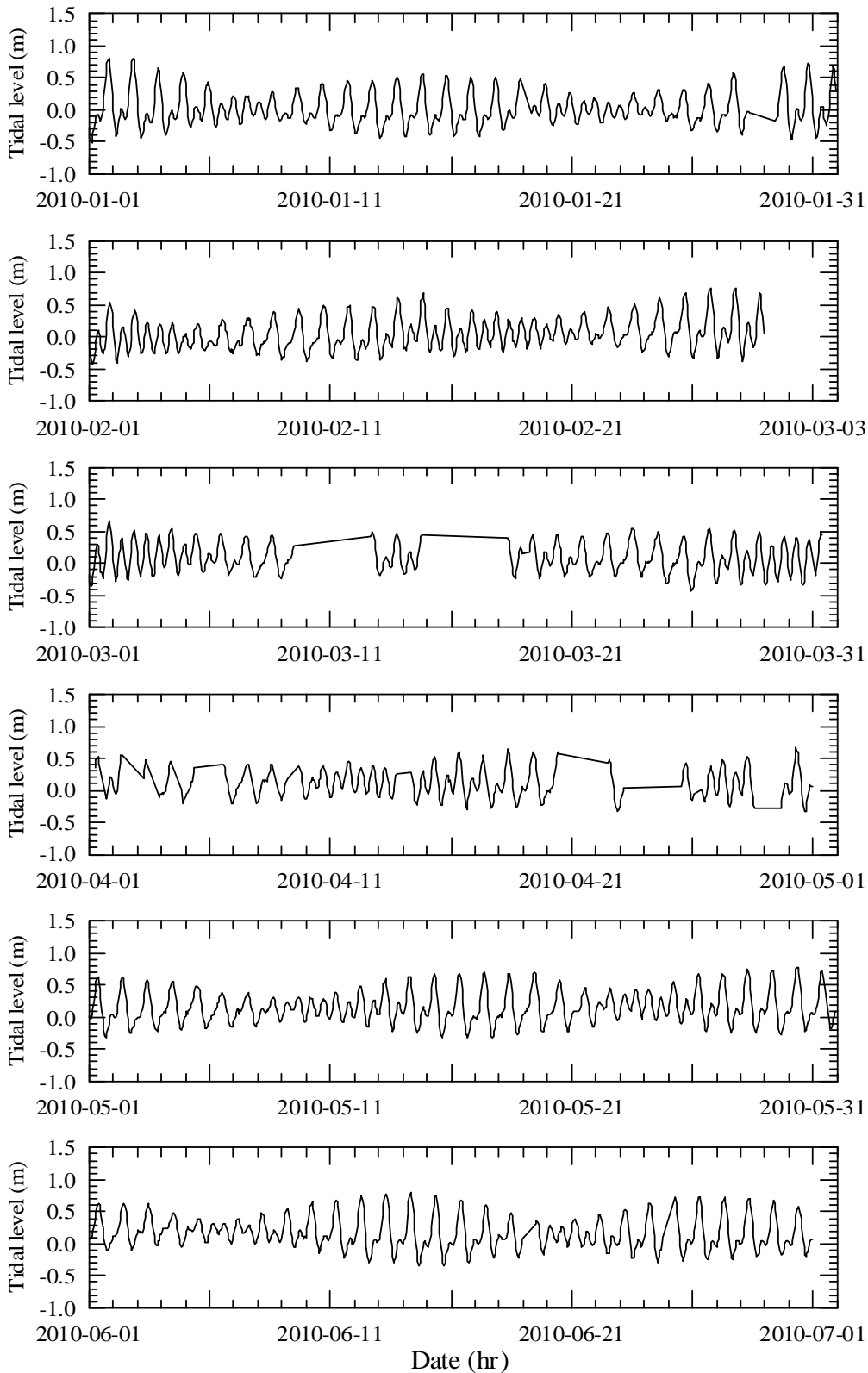
附圖 1.2 (續 2)高雄港潮位觀測資料(2009 年 1 ~ 6 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



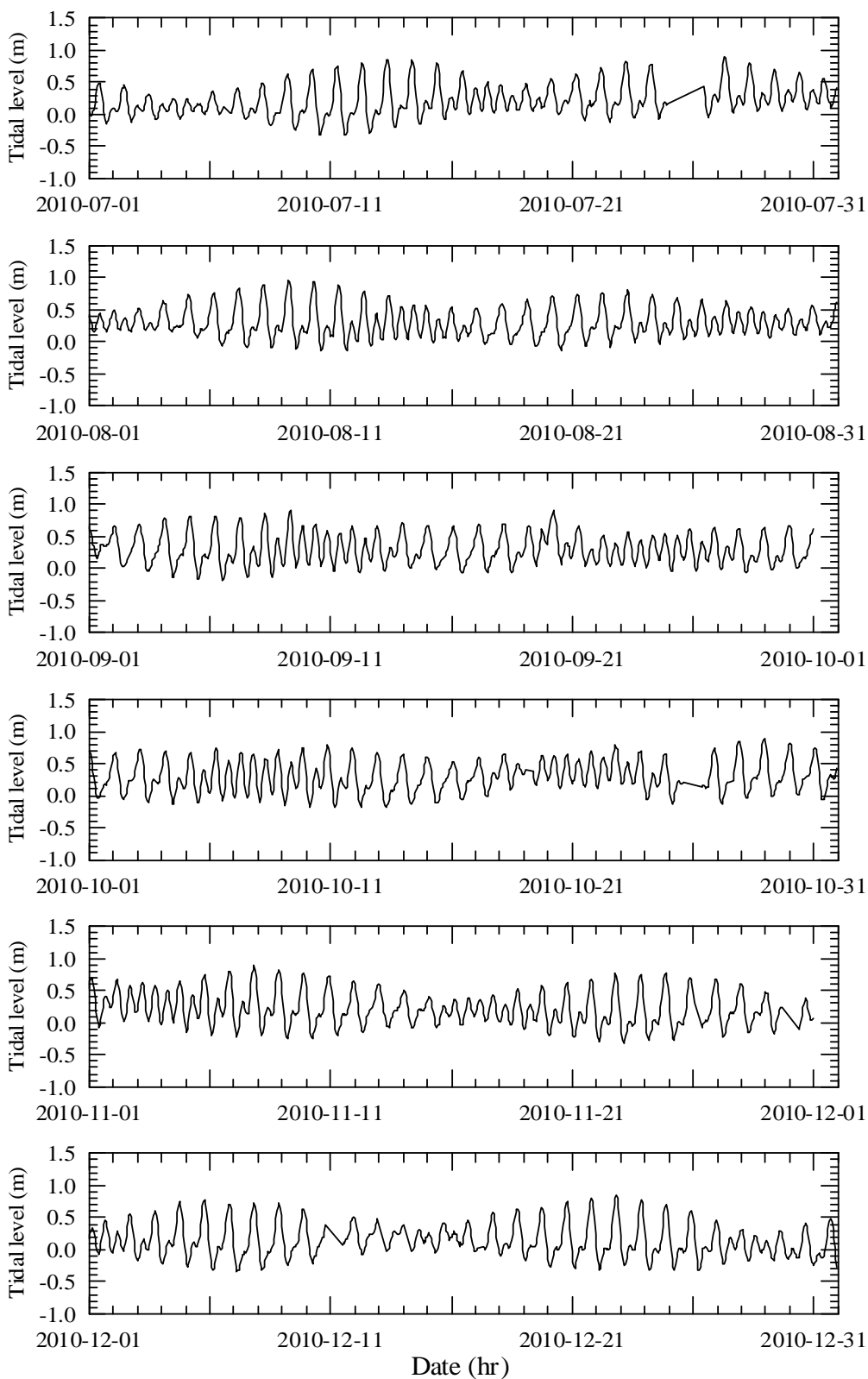
附圖 1.2 (續 3)高雄港潮位觀測資料(2009 年 7 ~ 12 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



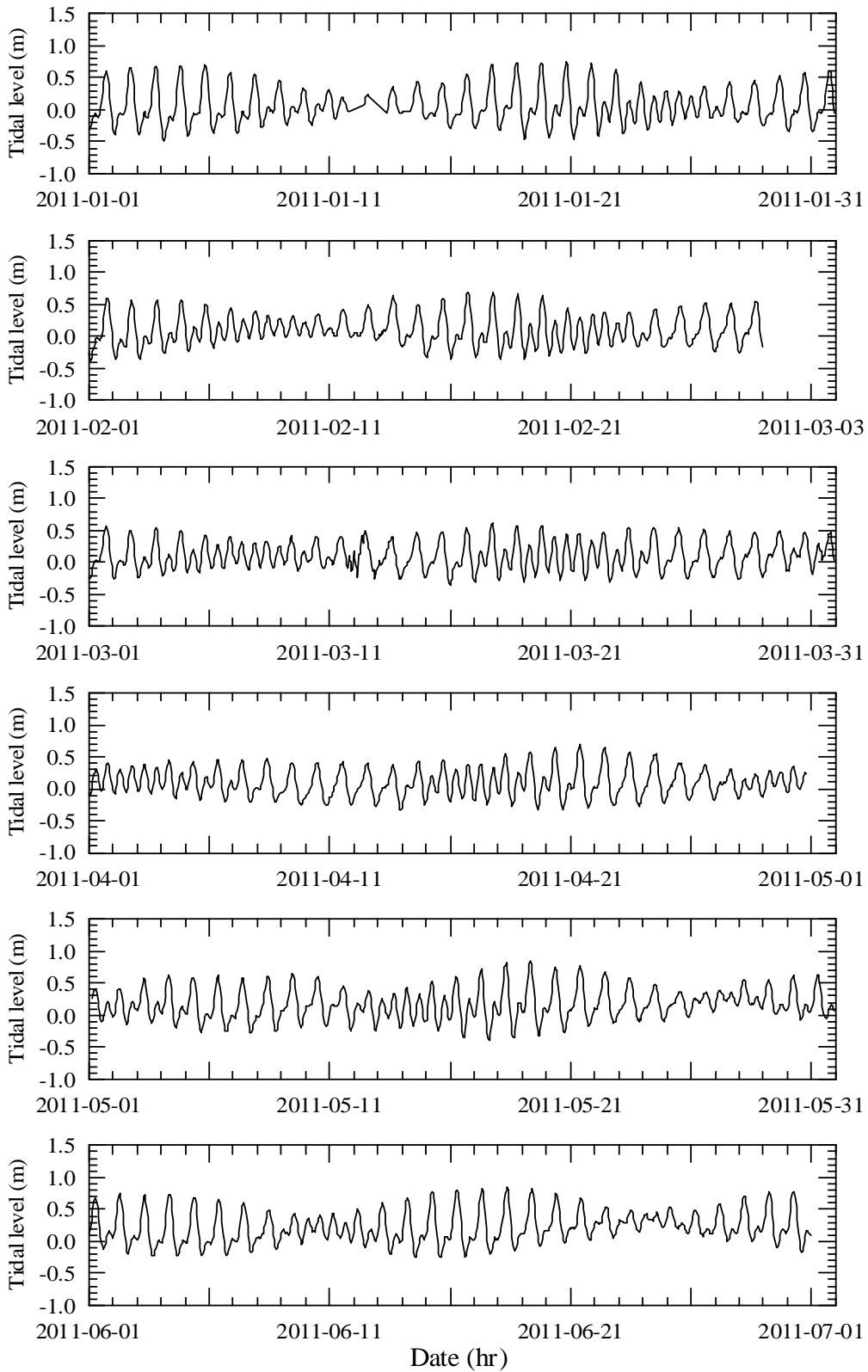
附圖 1.2 (續 4)高雄港潮位觀測資料(2010 年 1 ~ 6 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



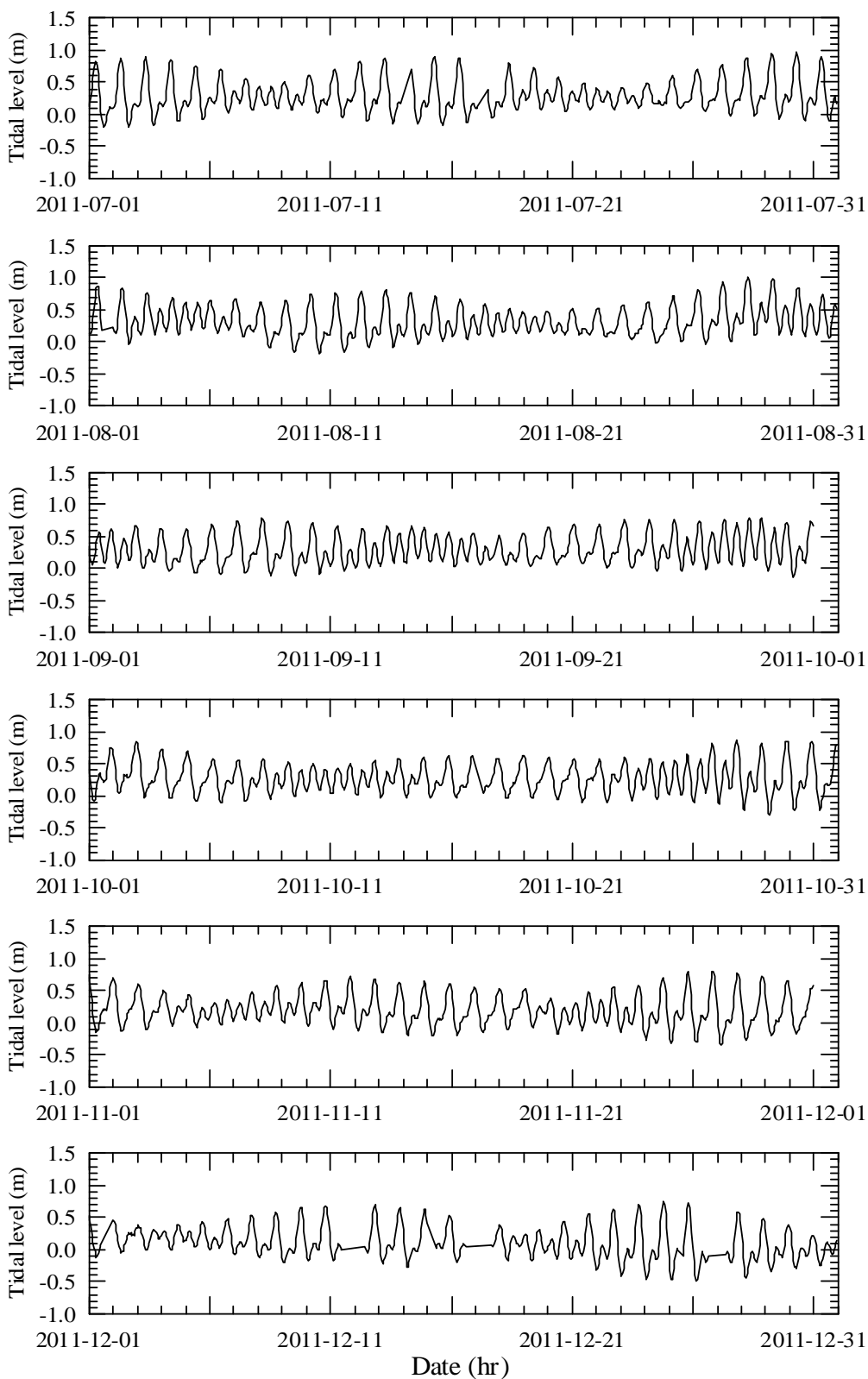
附圖 1.2 (續 5)高雄港潮位觀測資料(2010 年 7 ~ 12 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



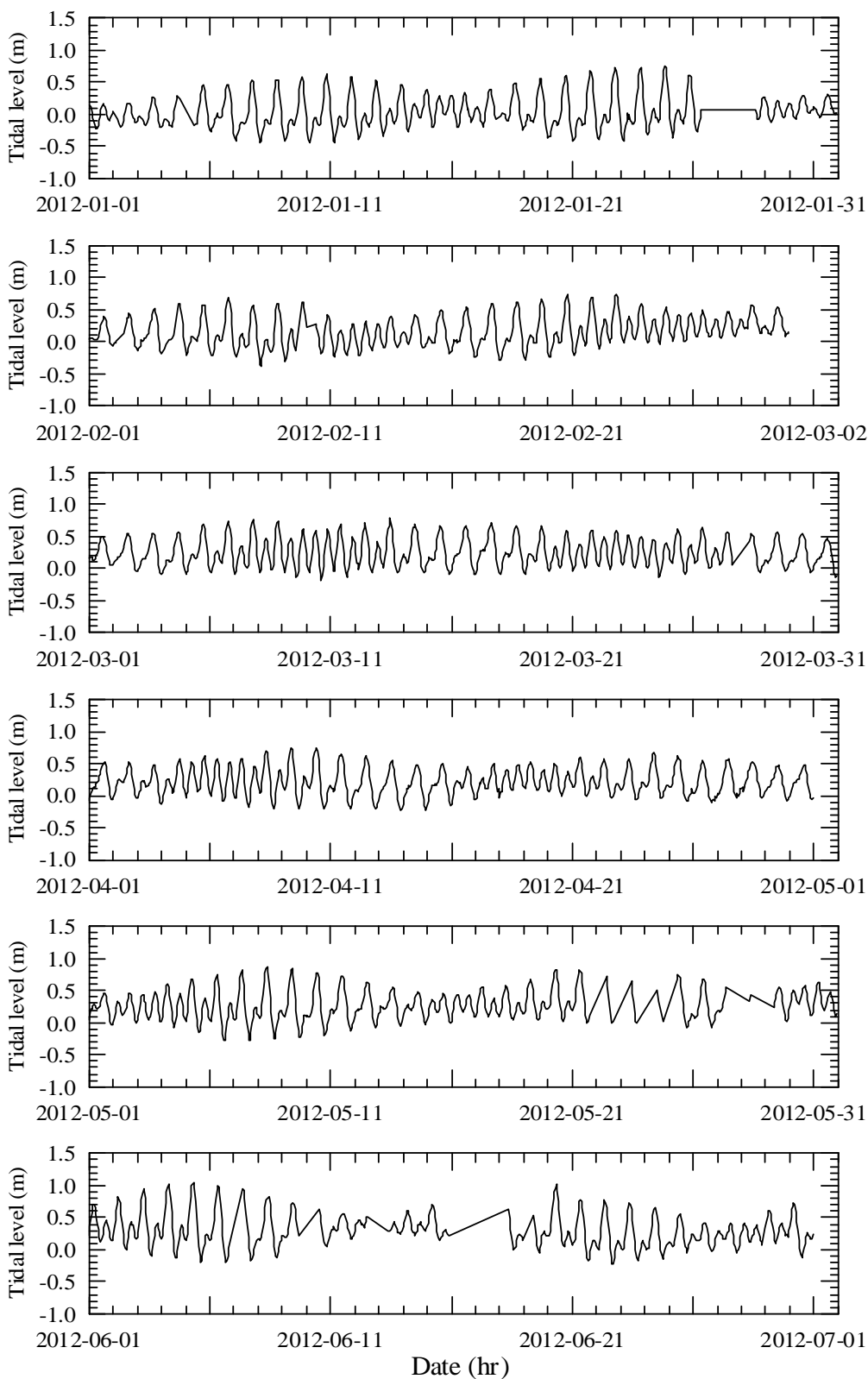
附圖 1.2 (續 6)高雄港潮位觀測資料(2011 年 1 ~ 6 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



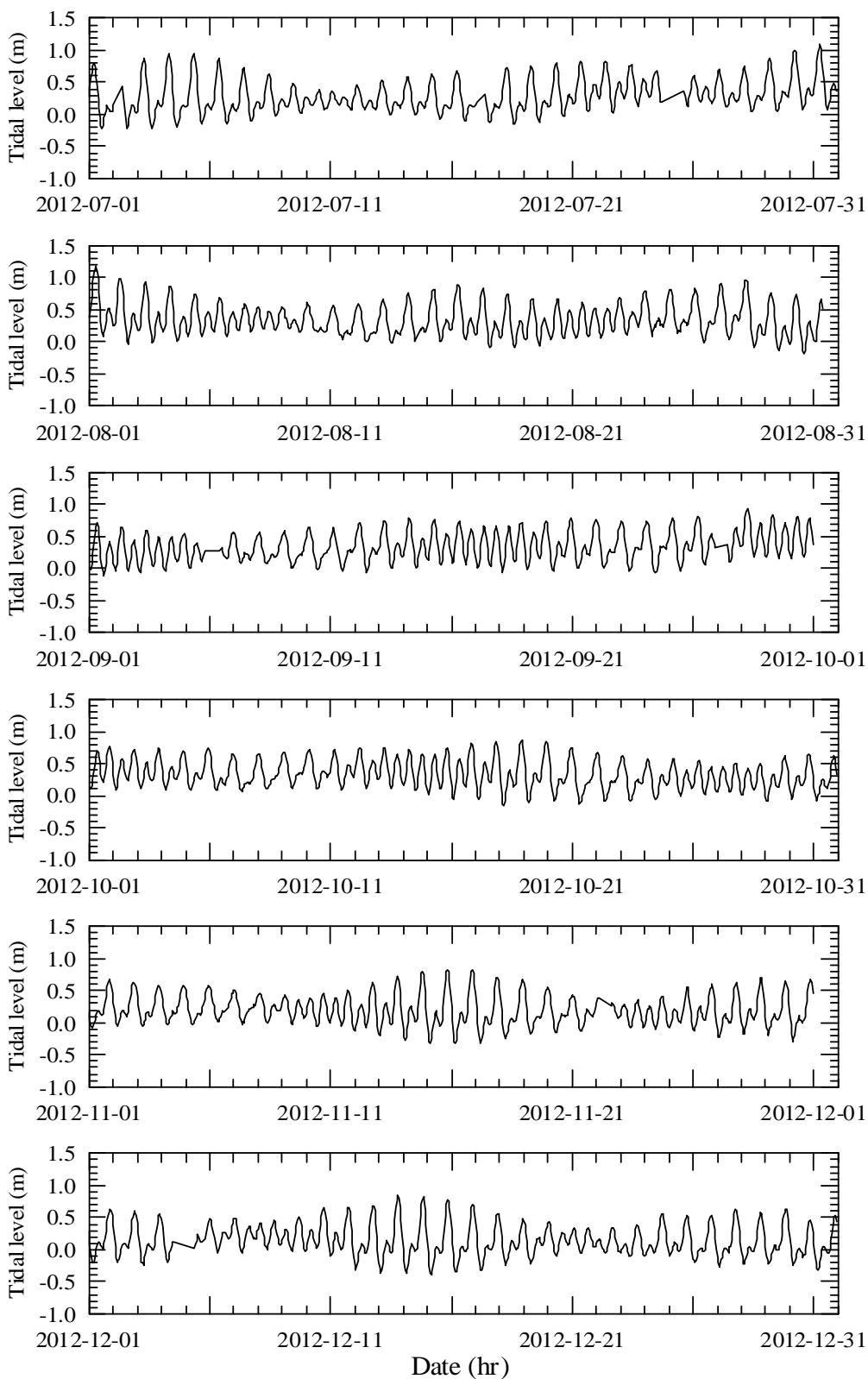
附圖 1.2 (續 7)高雄港潮位觀測資料(2011 年 7 ~ 12 月)

Kaohsiung Harbor Tidal Station



附圖 1.2 (續 8)高雄港潮位觀測資料(2012 年 1 ~ 6 月)

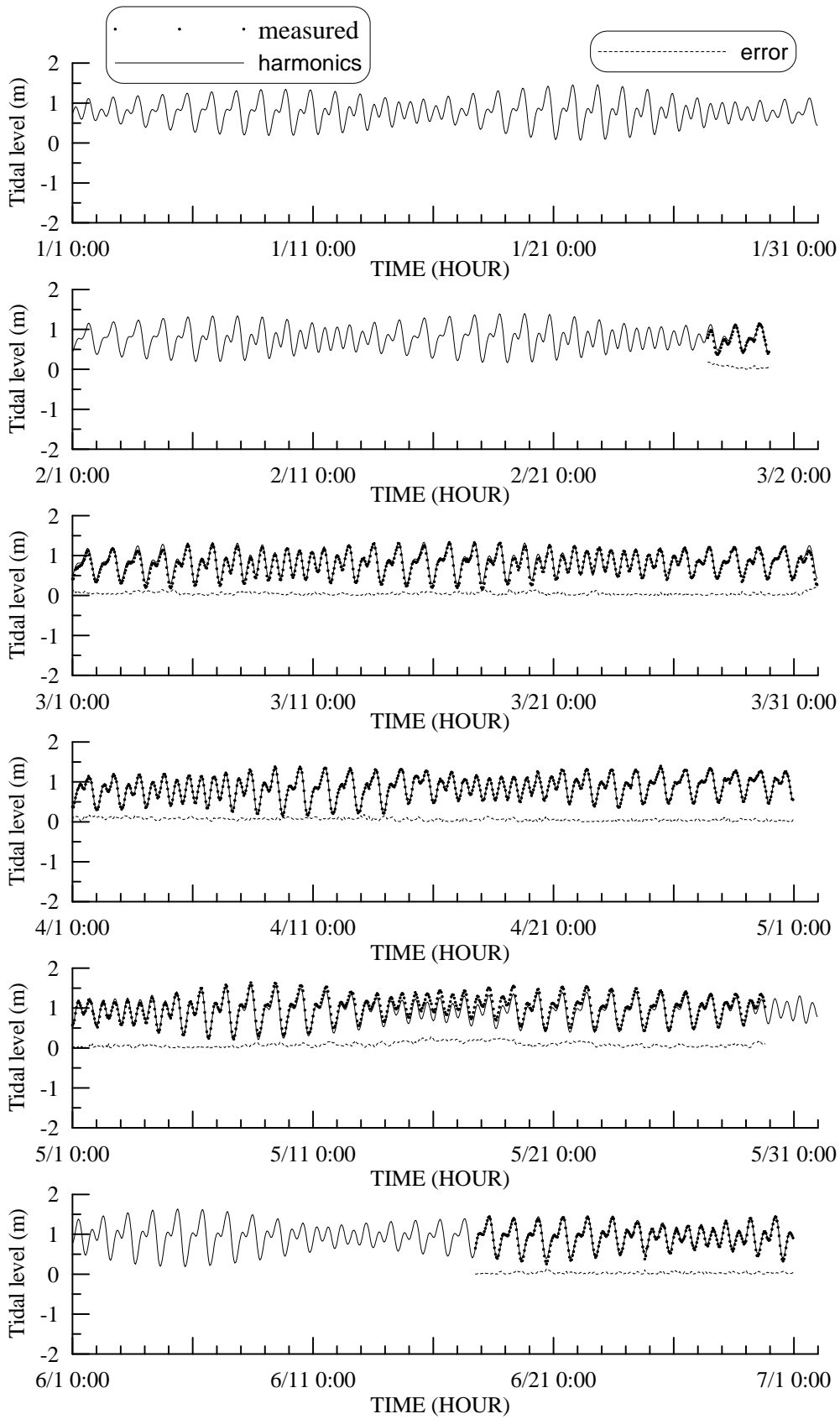
Kaohsiung Harbor Tidal Station



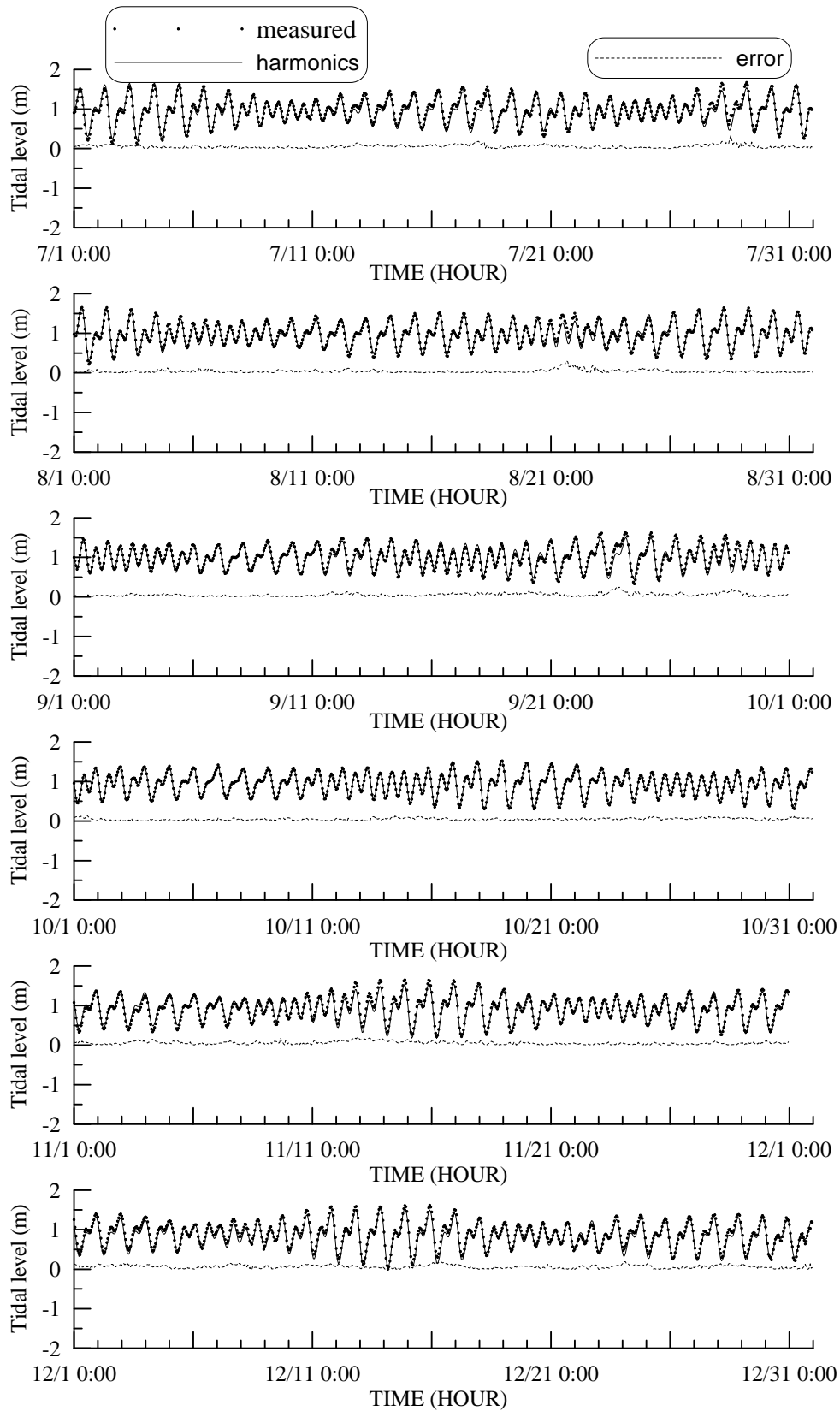
附圖 1.2 (續 9)高雄港潮位觀測資料(2012 年 7 ~ 12 月)

附錄二

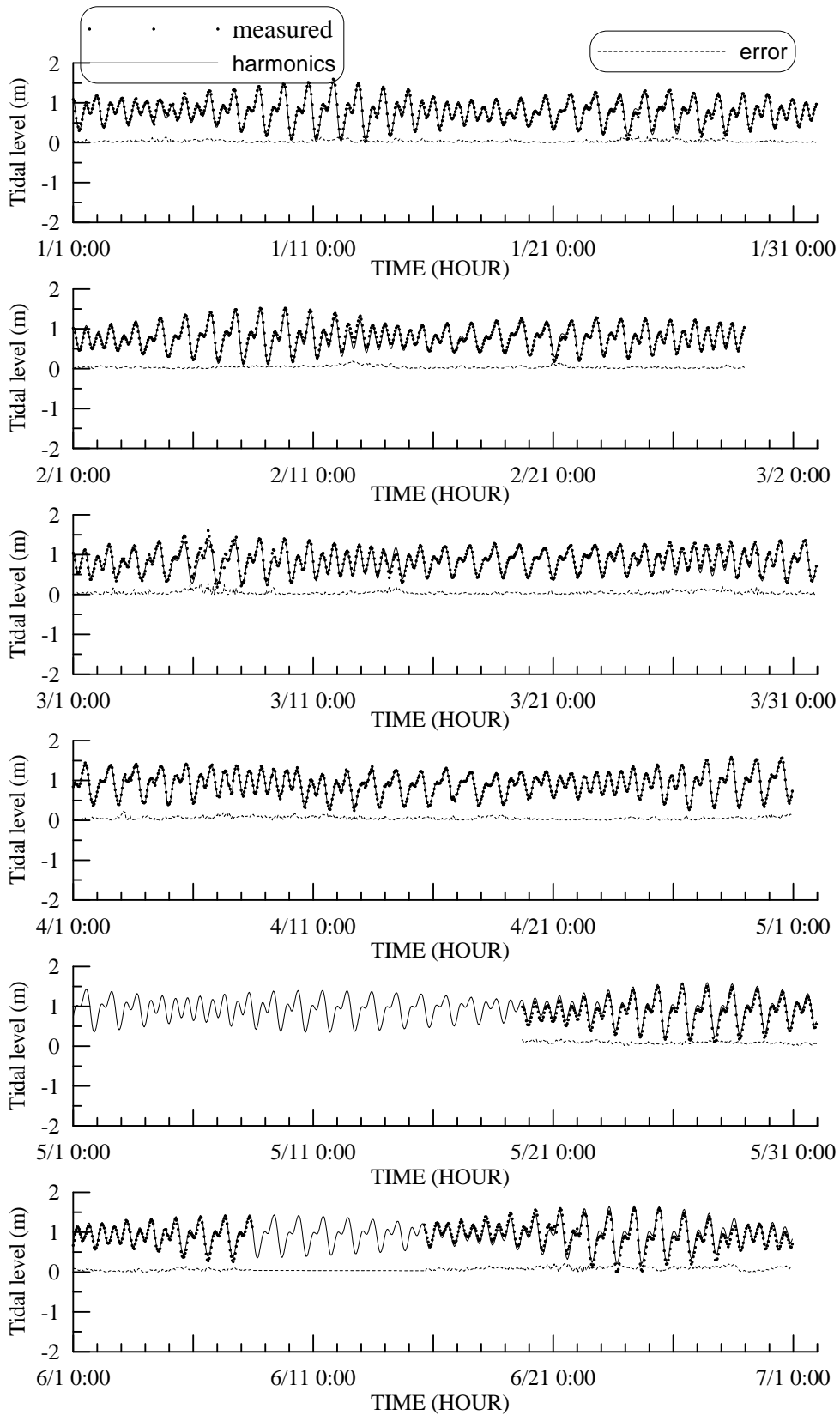
安平港及高雄港潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



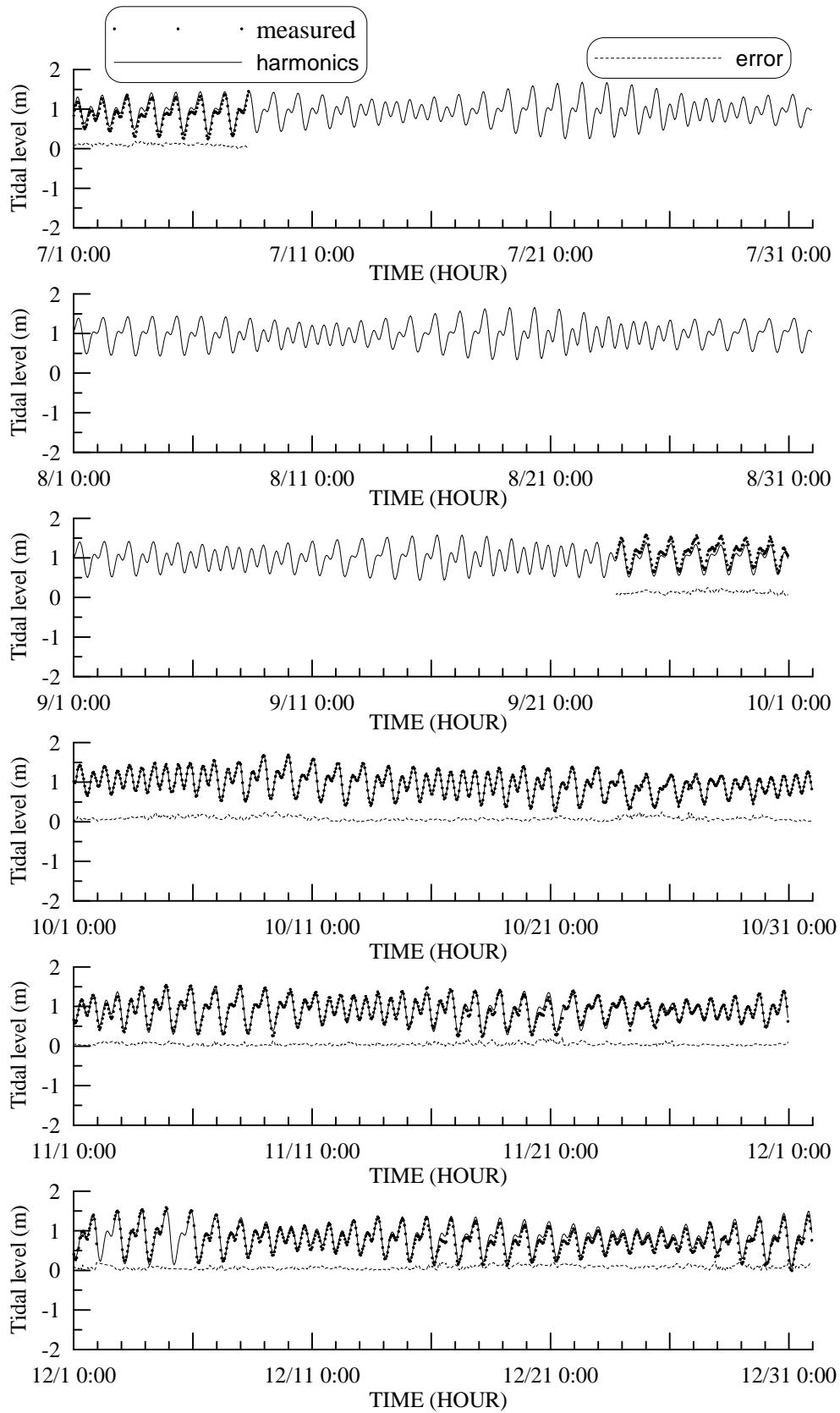
附圖 2.1 安平港 2008 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



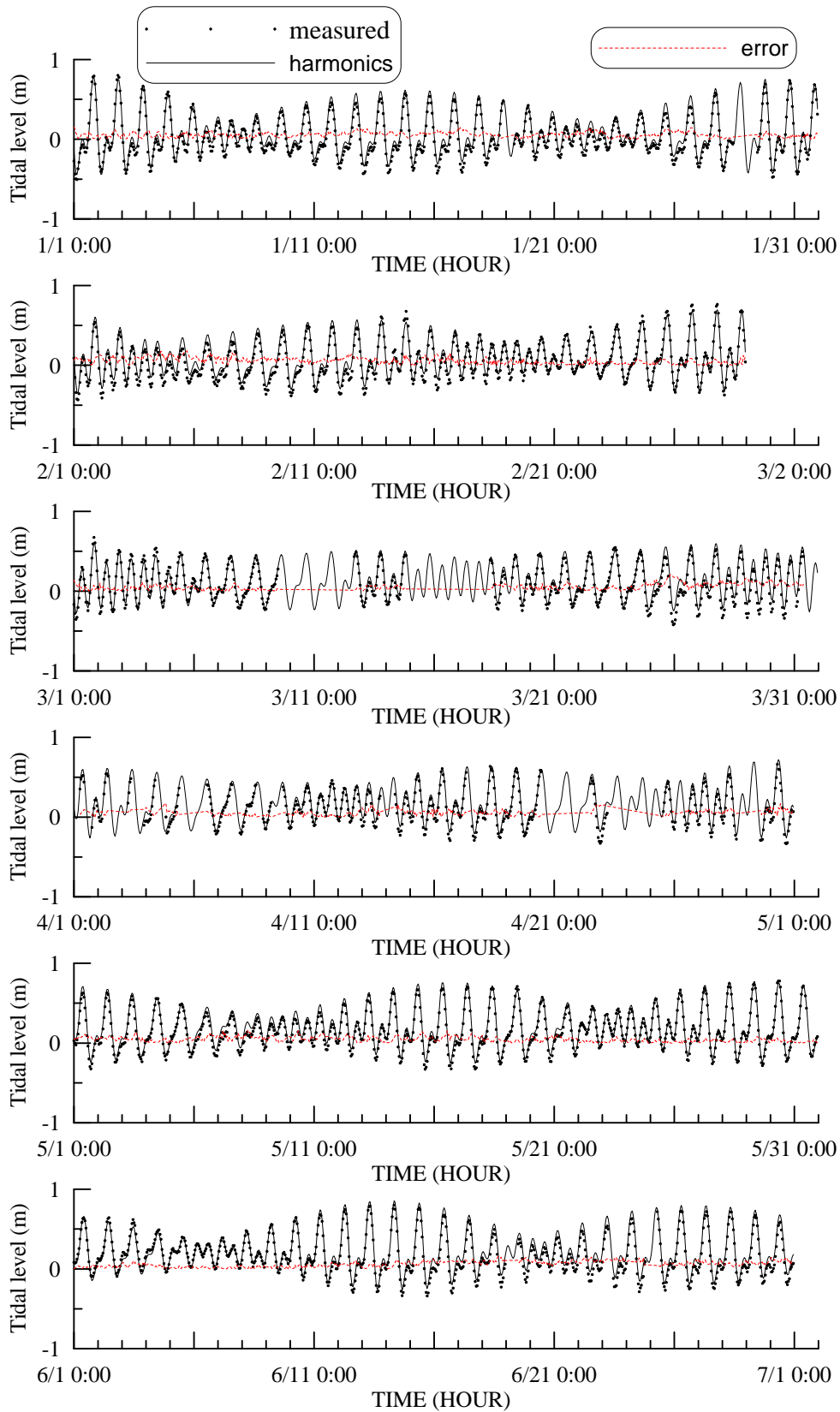
附圖 2.1 (續)安平港 2008 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



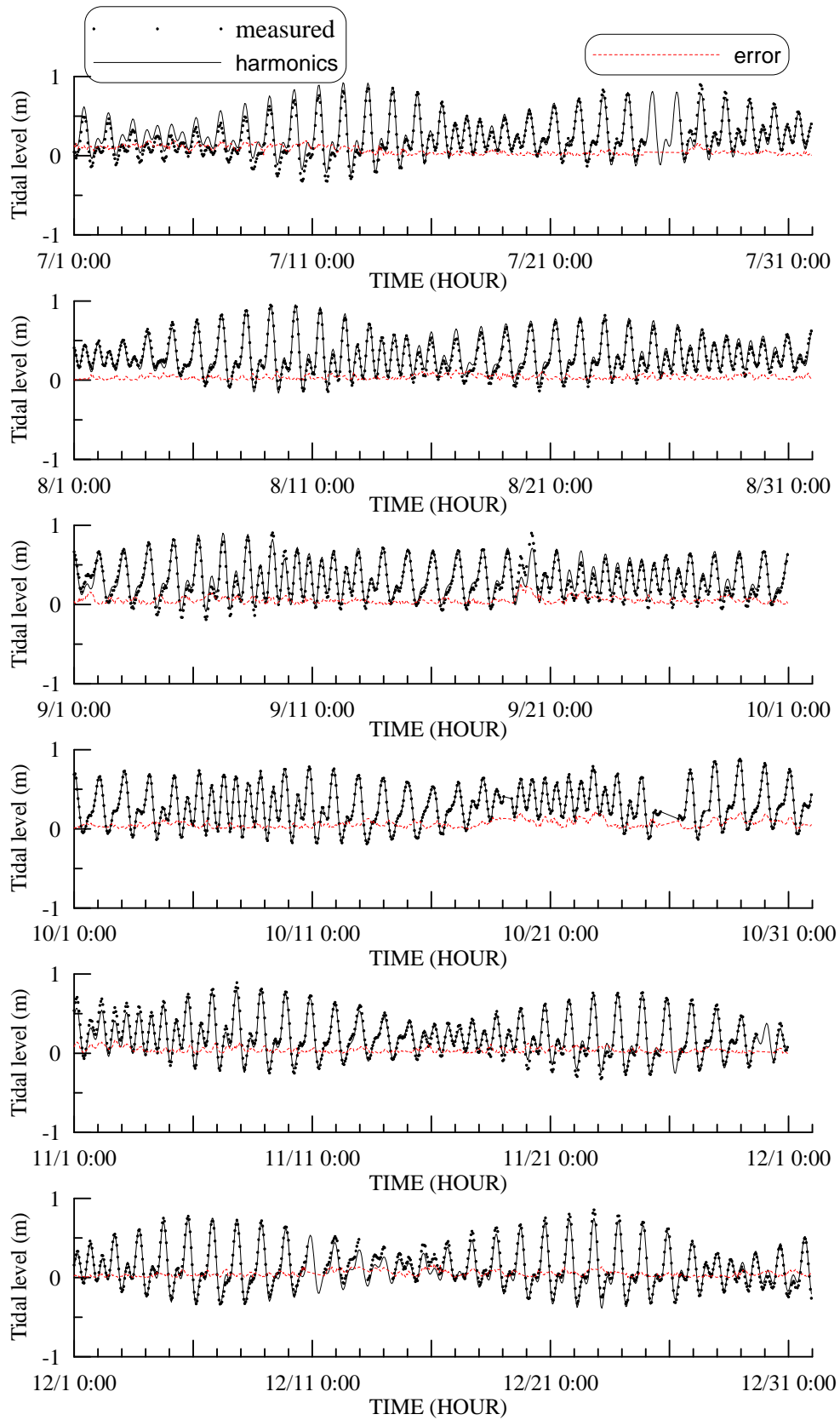
附圖 2.2 安平港 2009 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



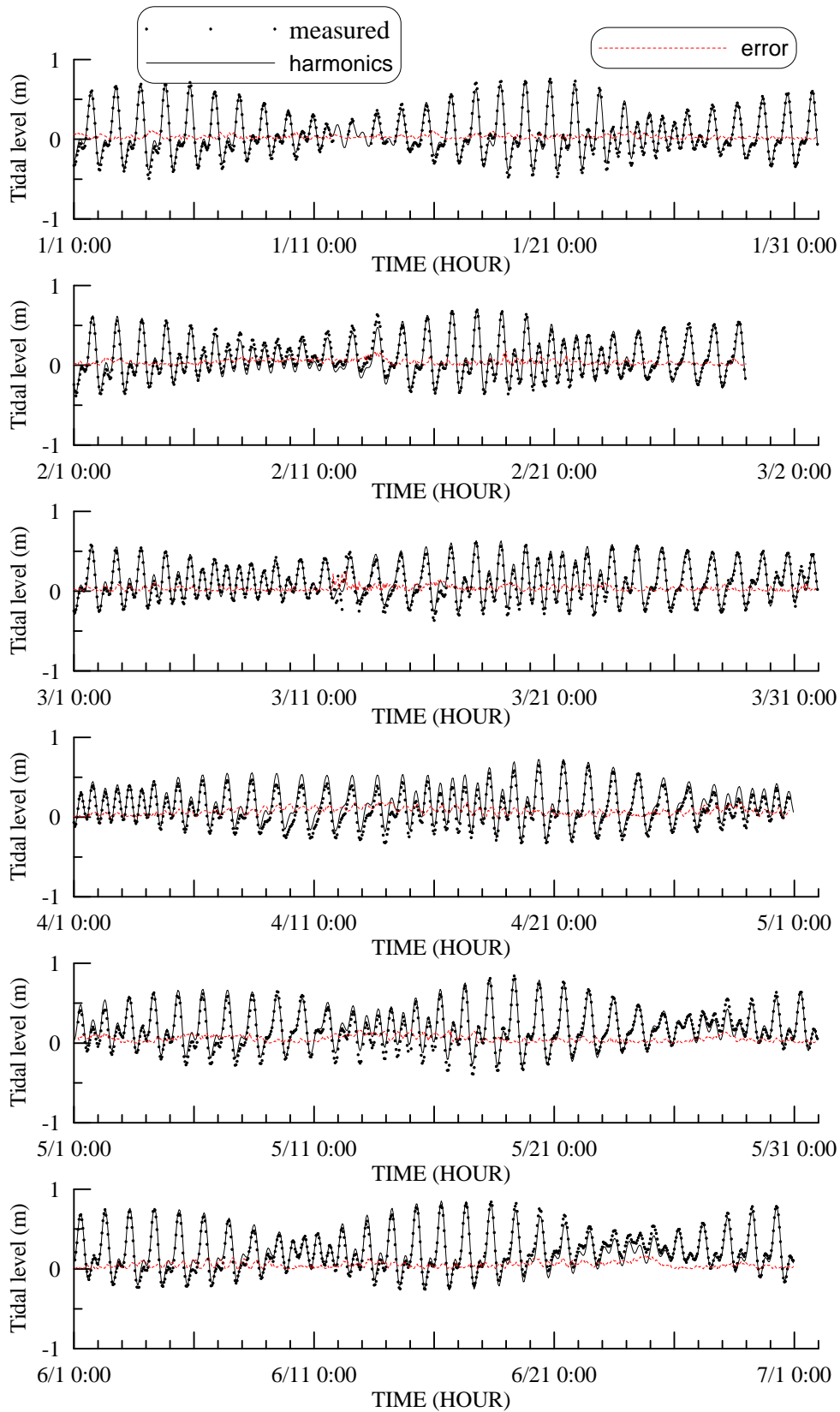
附圖 2.2 (續)安平港 2009 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



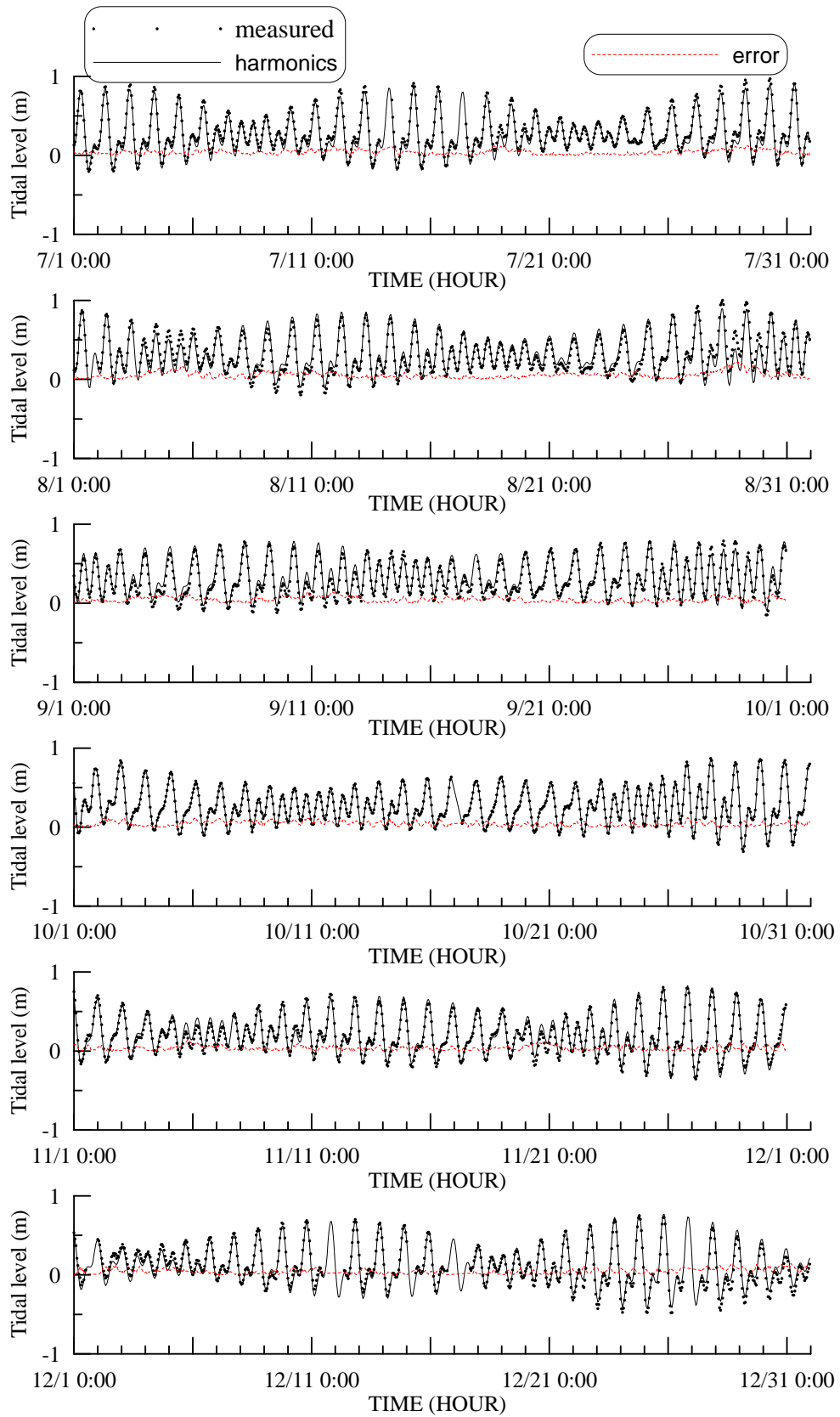
附圖 2.3 高雄港 2010 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



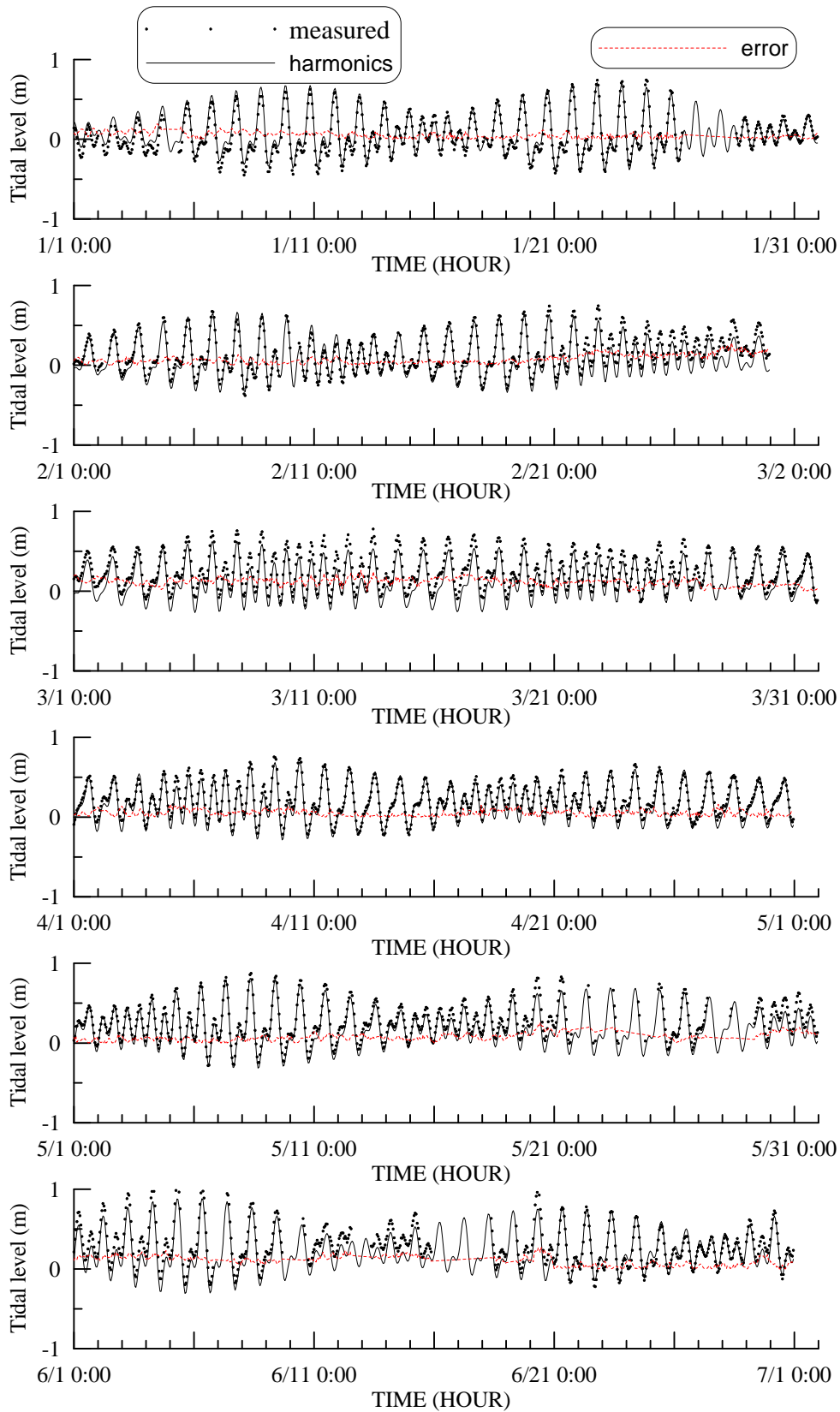
附圖 2.3 (續)高雄港 2010 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



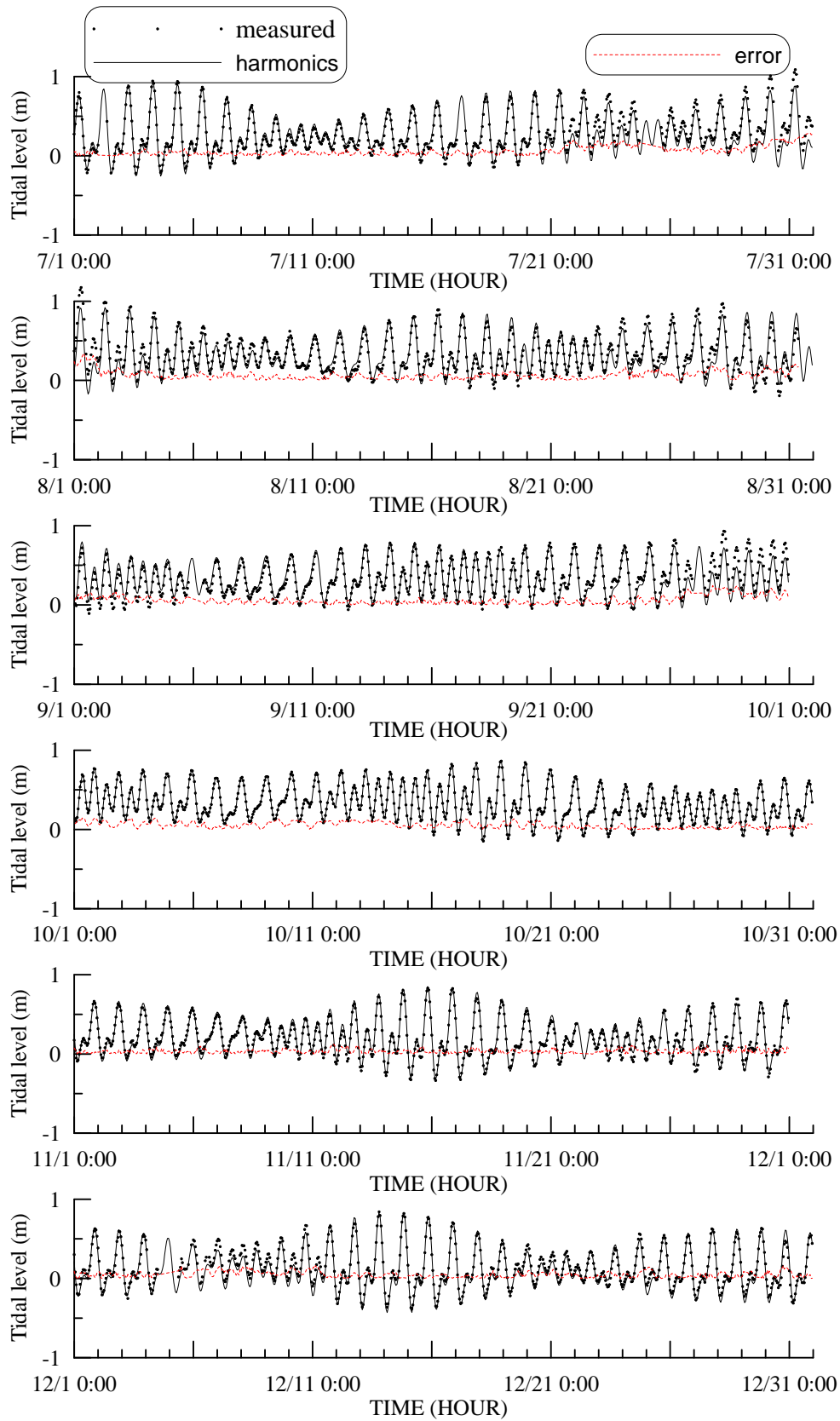
附圖 2.4 高雄港 2011 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



附圖 2.4 (續)高雄港 2011 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較



附圖 2.5 高雄港 2012 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較

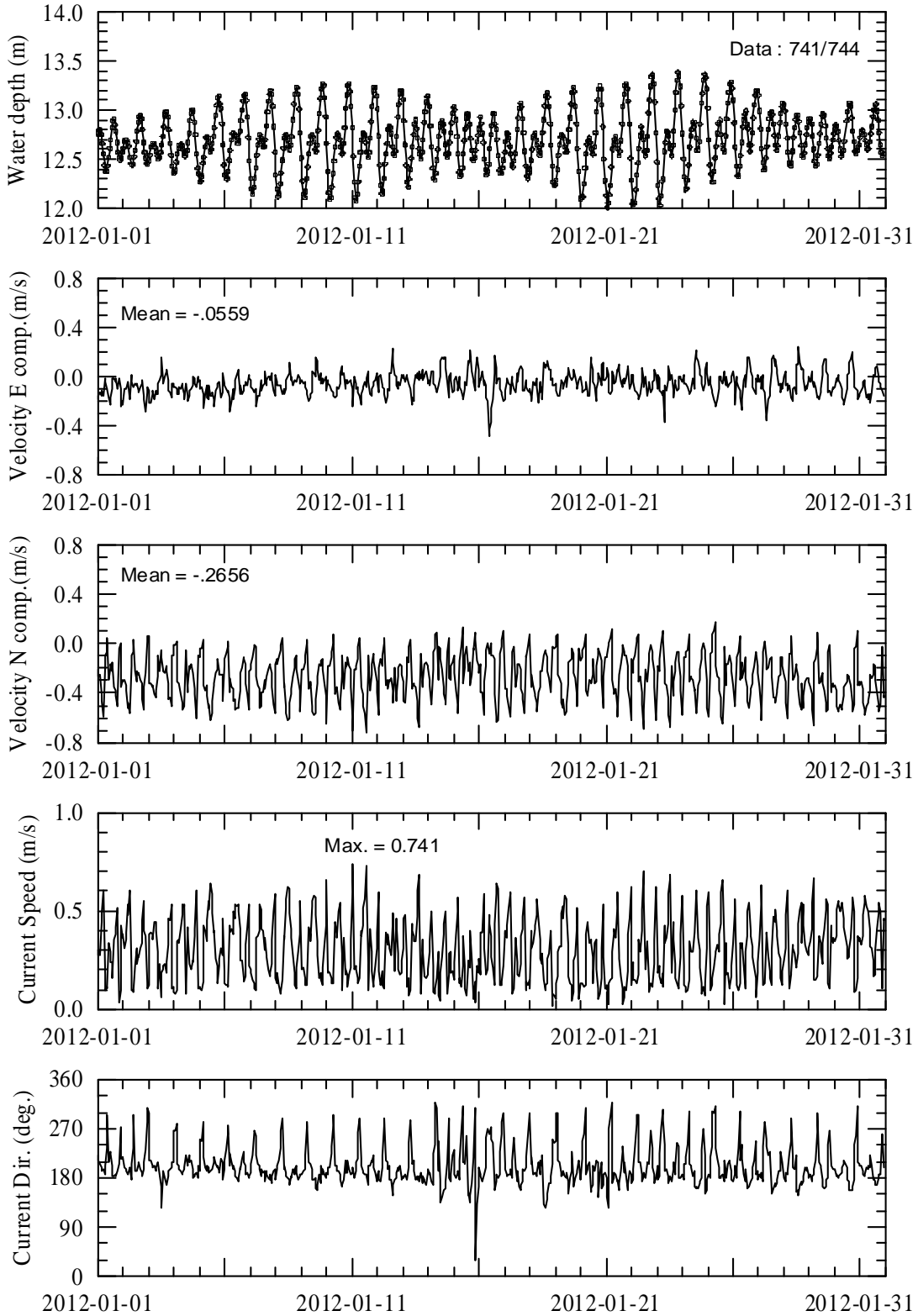


附圖 2.5 (續)高雄港 2012 年潮位觀測資料與天文潮預測值之比較

附錄三

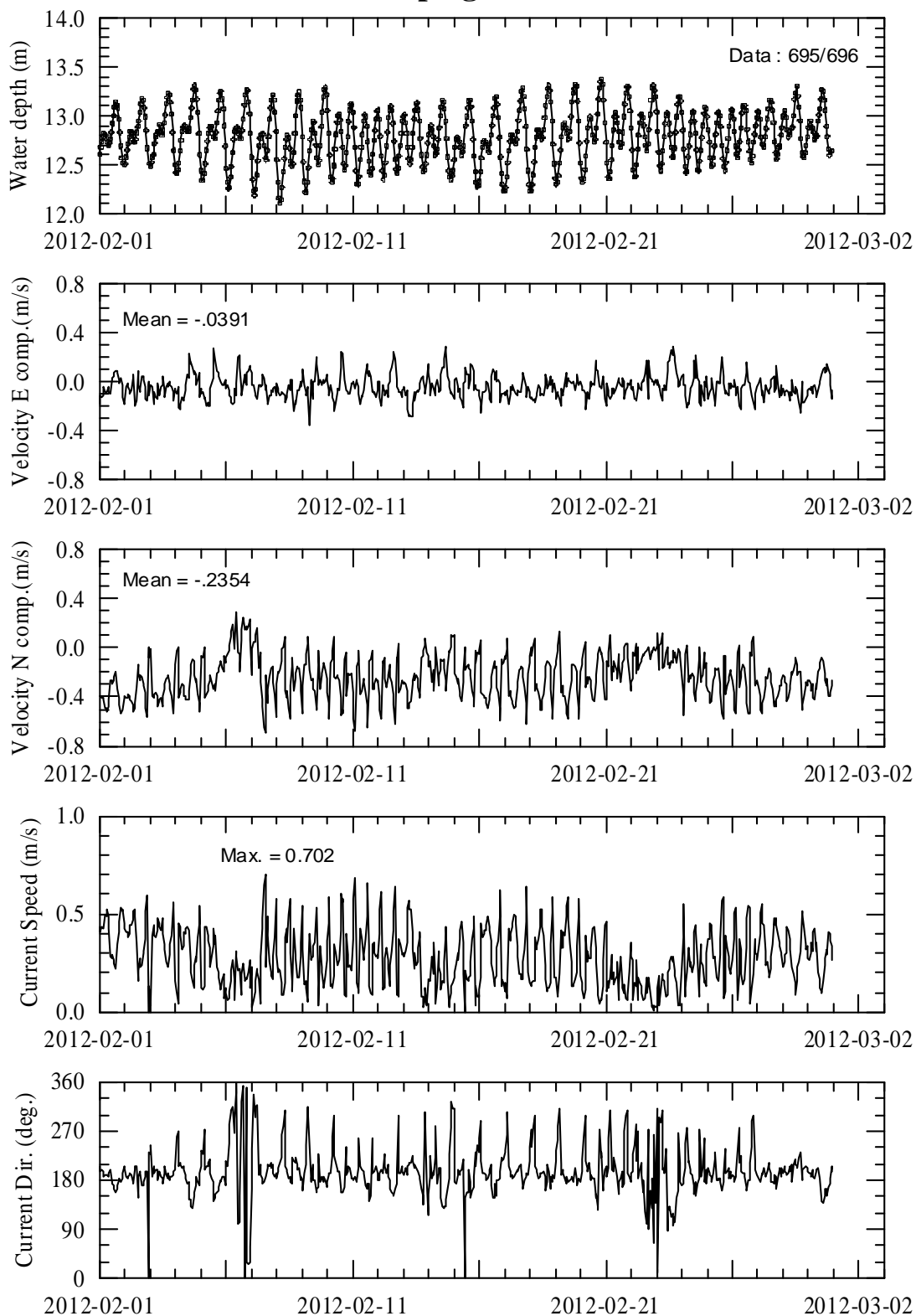
2012 年安平港及高雄港海流觀測資料

Anping Harbor



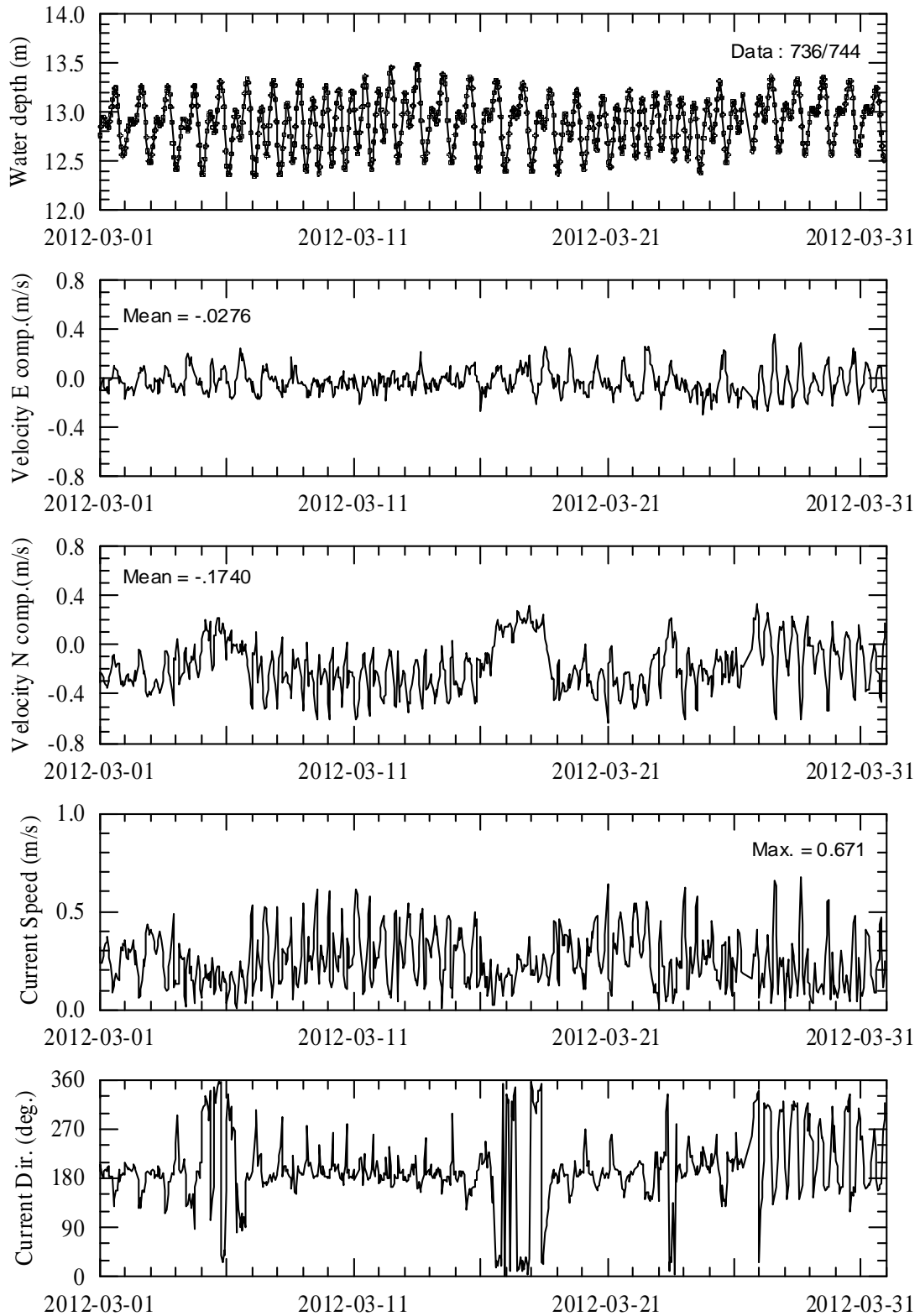
附圖 3.1 安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



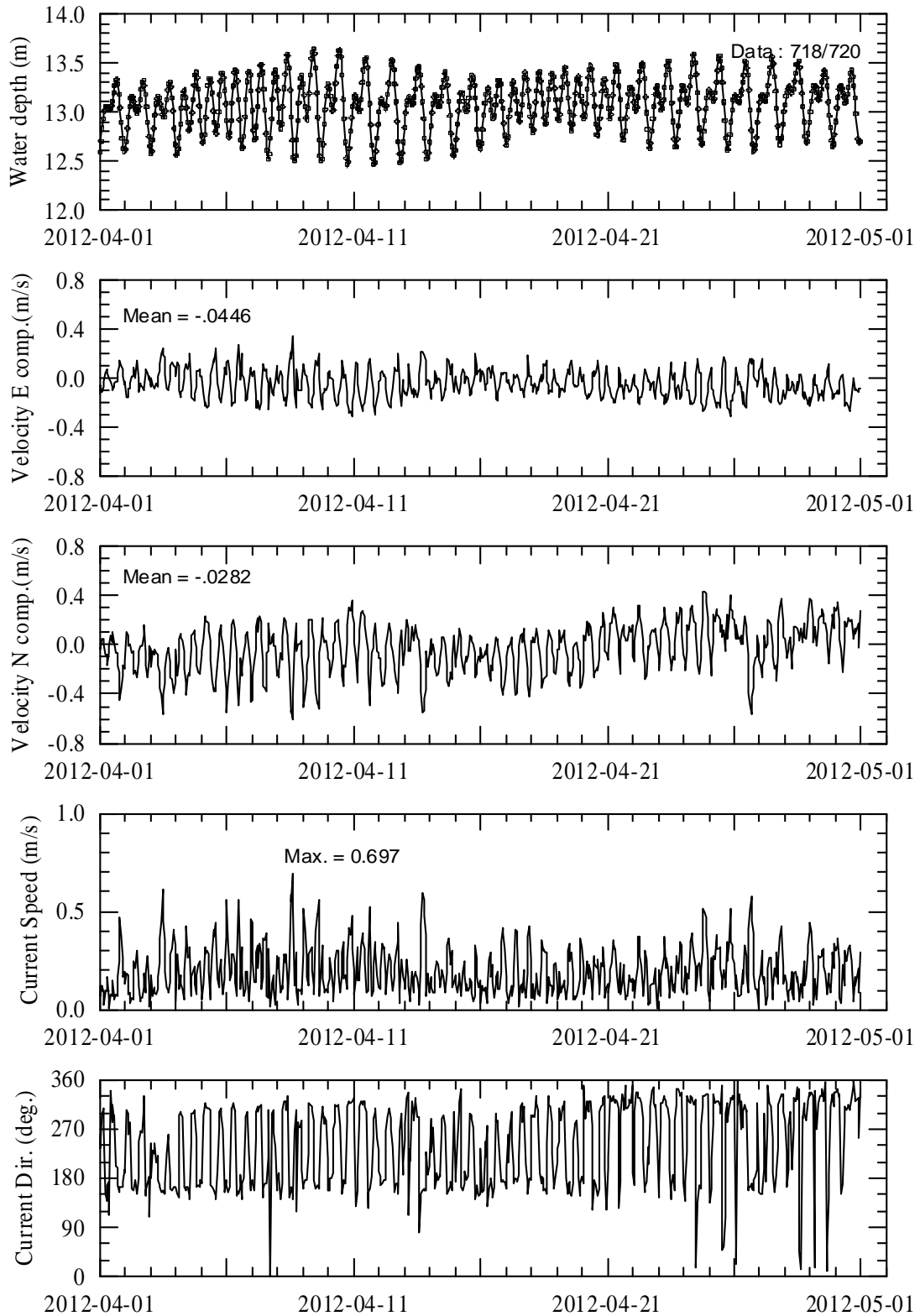
附圖 3.1 (續 1)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



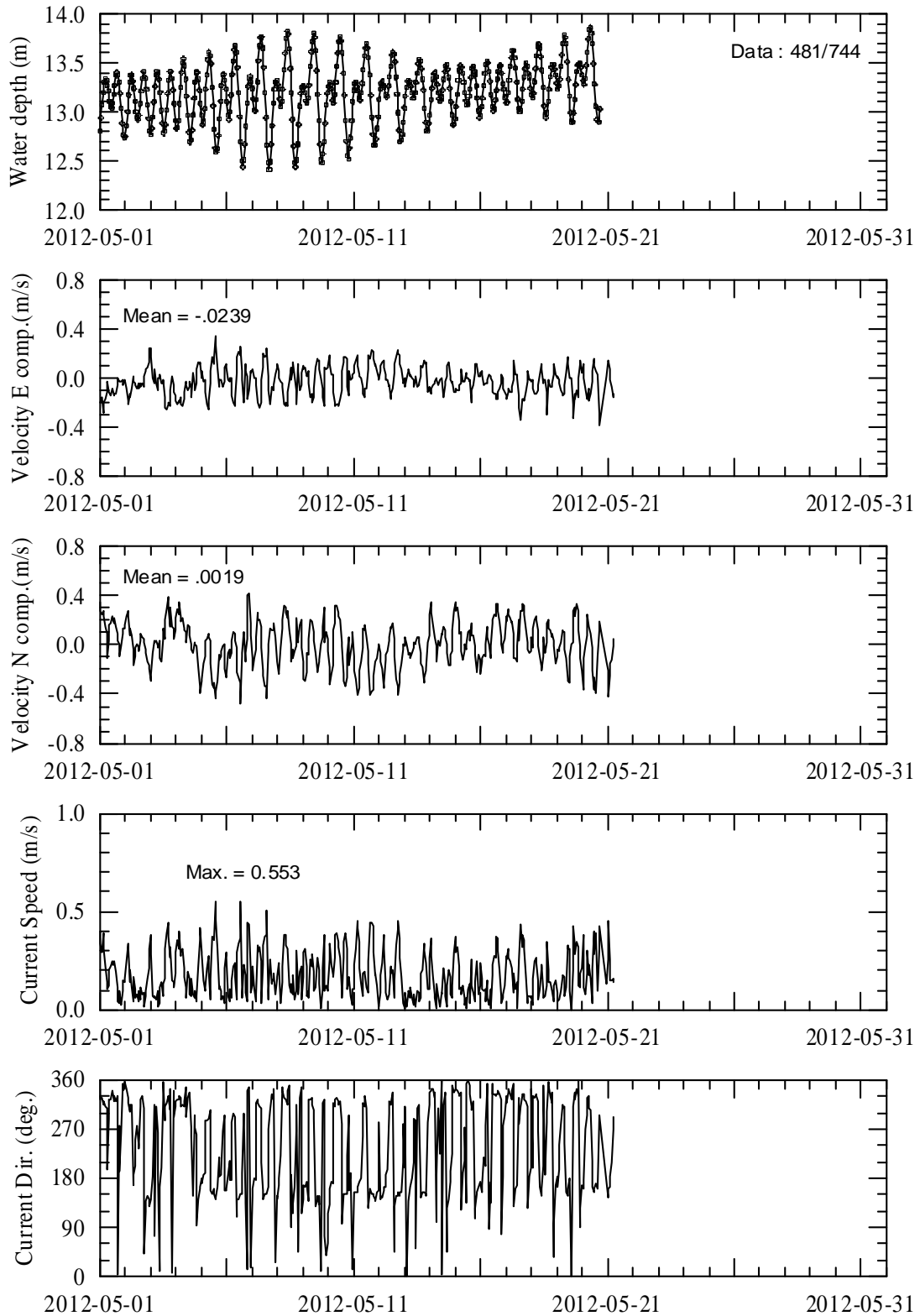
附圖 3.1 (續 2)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



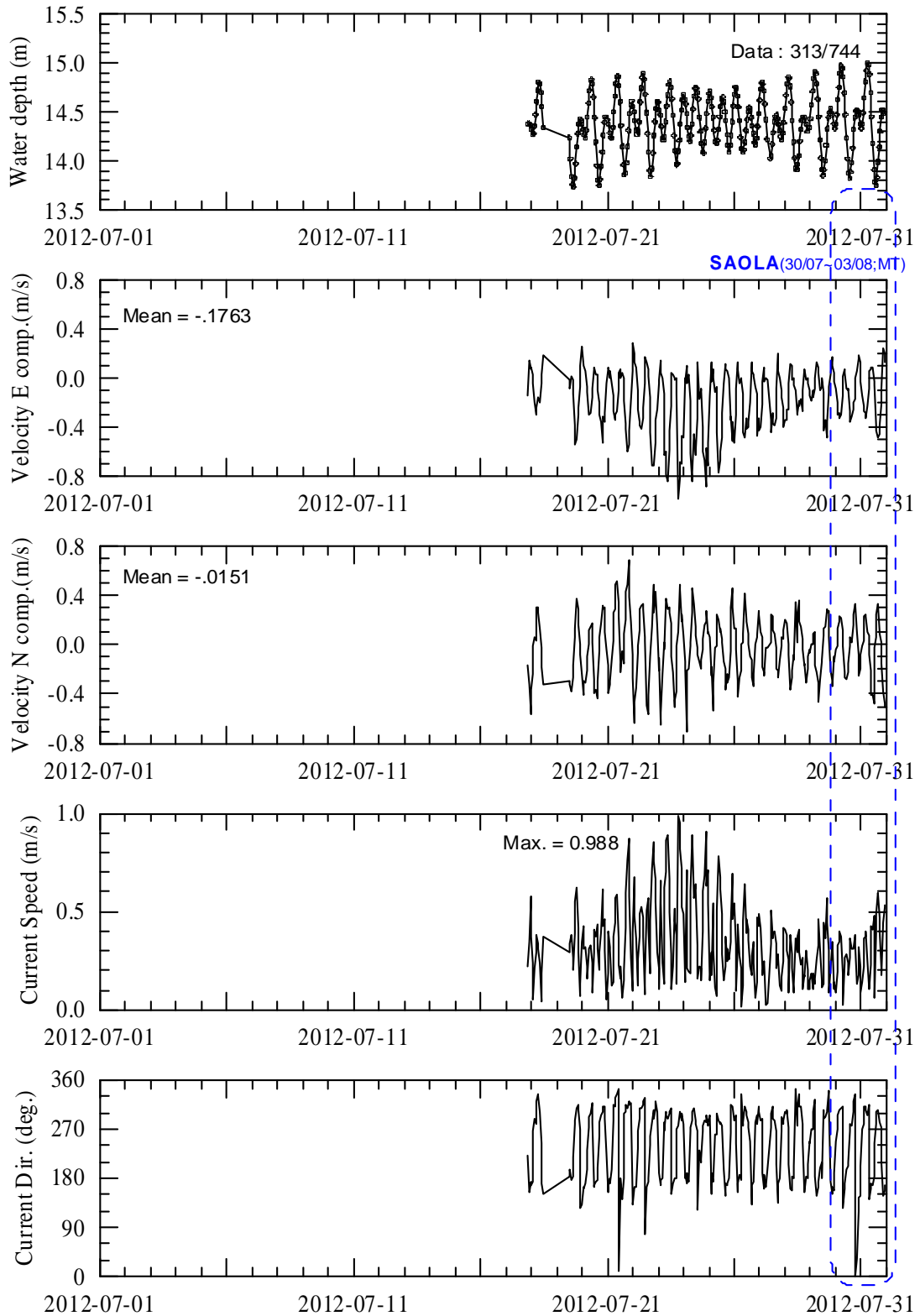
附圖 3.1 (續 3)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



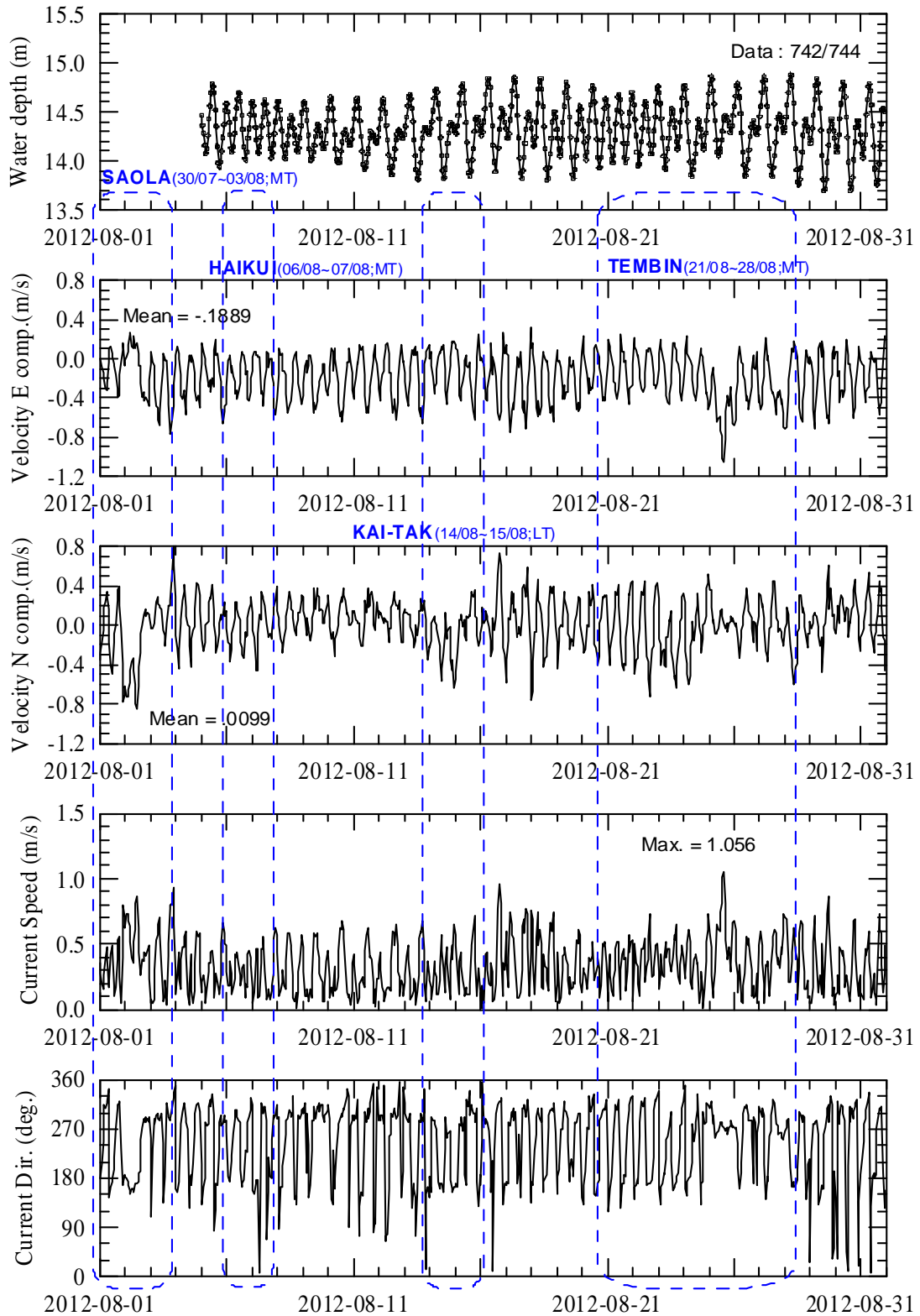
附圖 3.1 (續 4)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



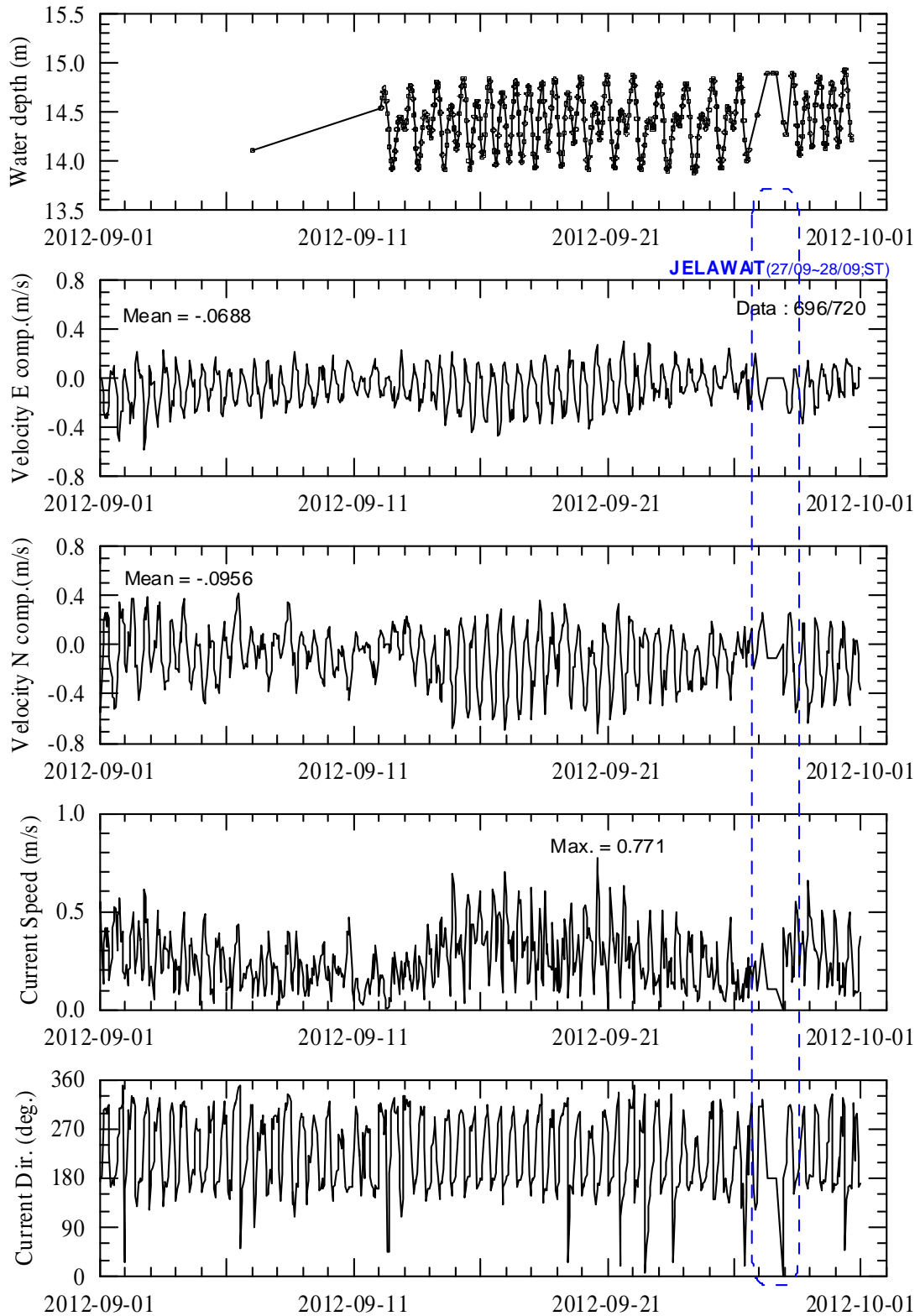
附圖 3.1 (續 5)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



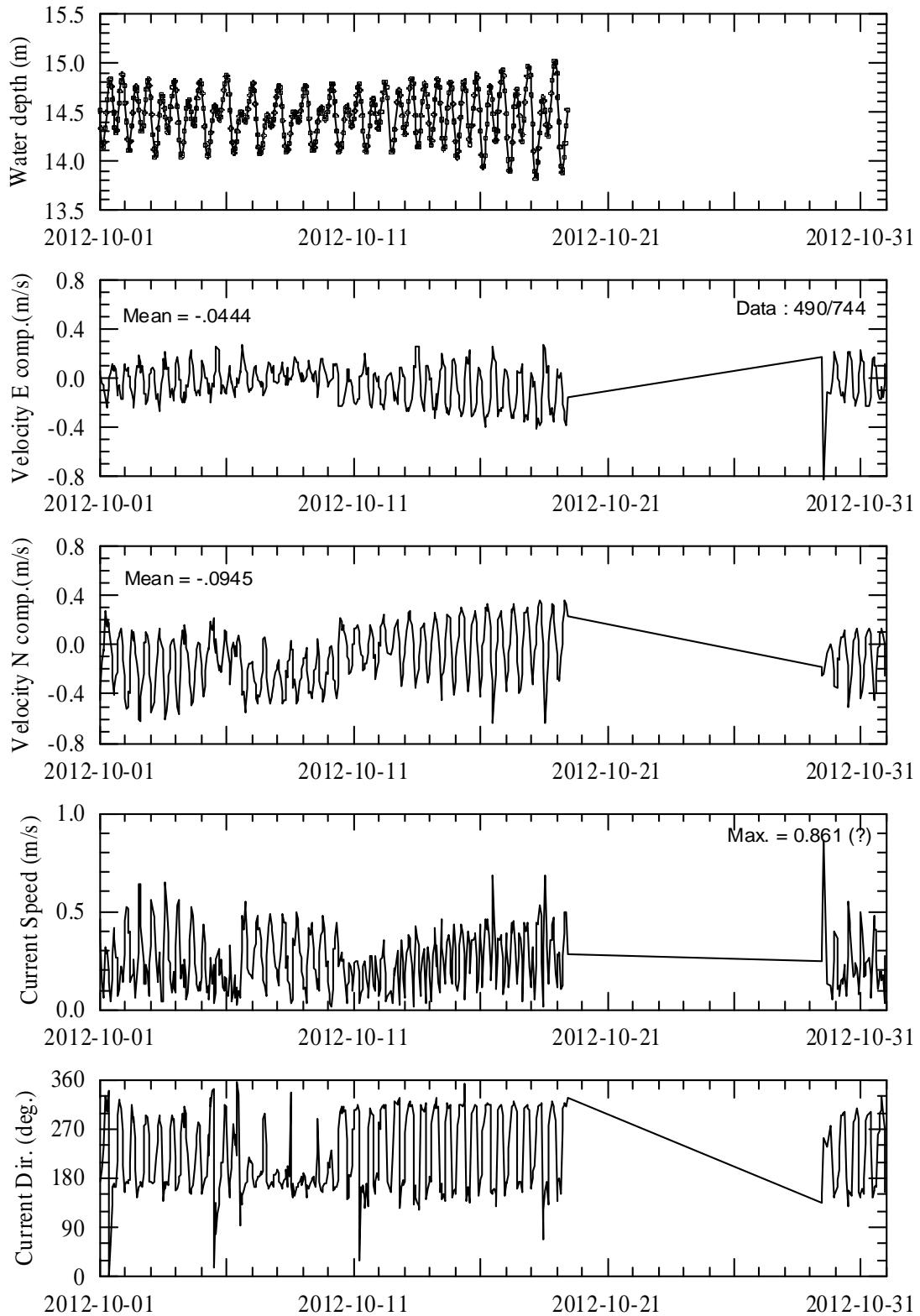
附圖 3.1 (續 6)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



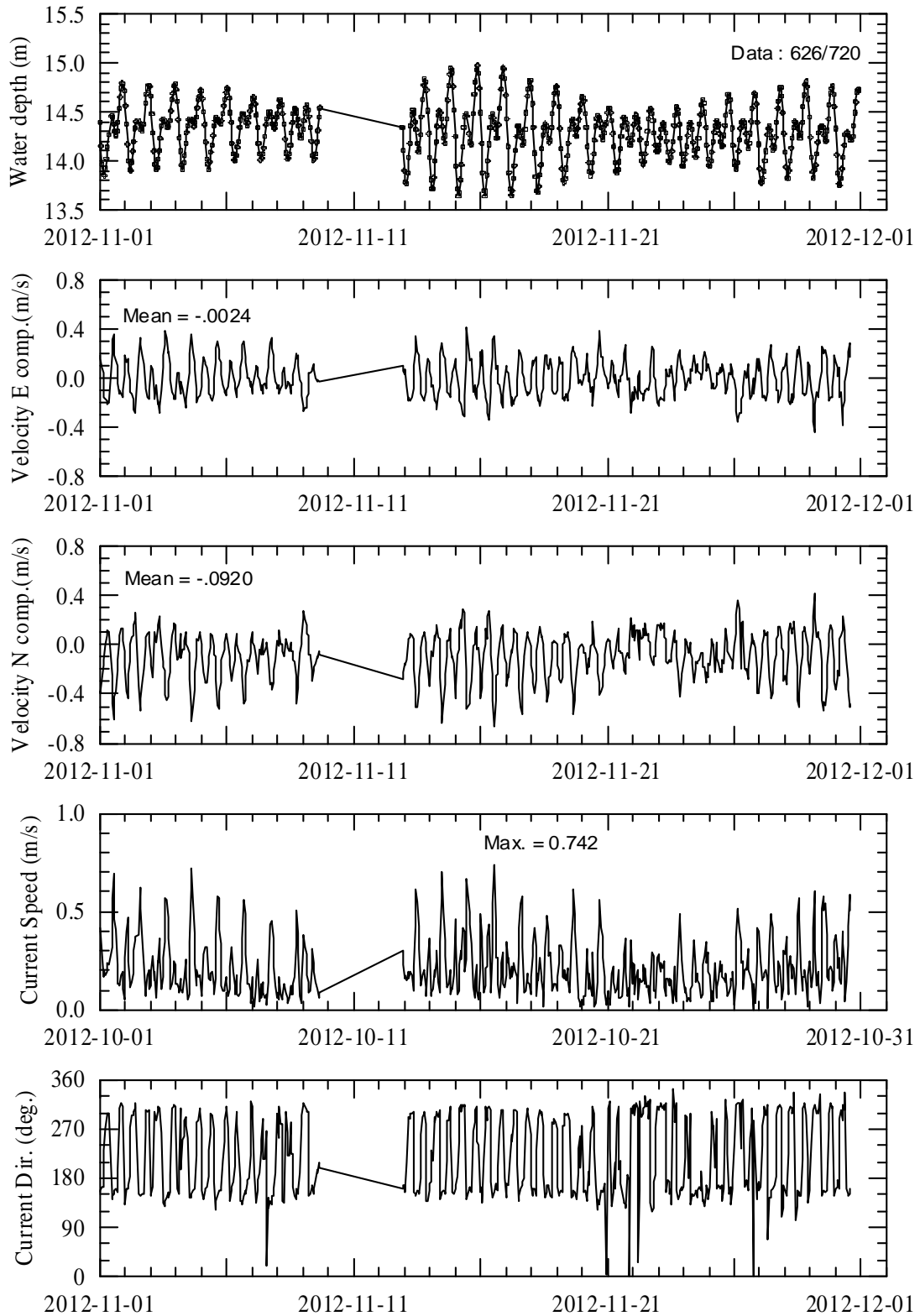
附圖 3.1 (續 7)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



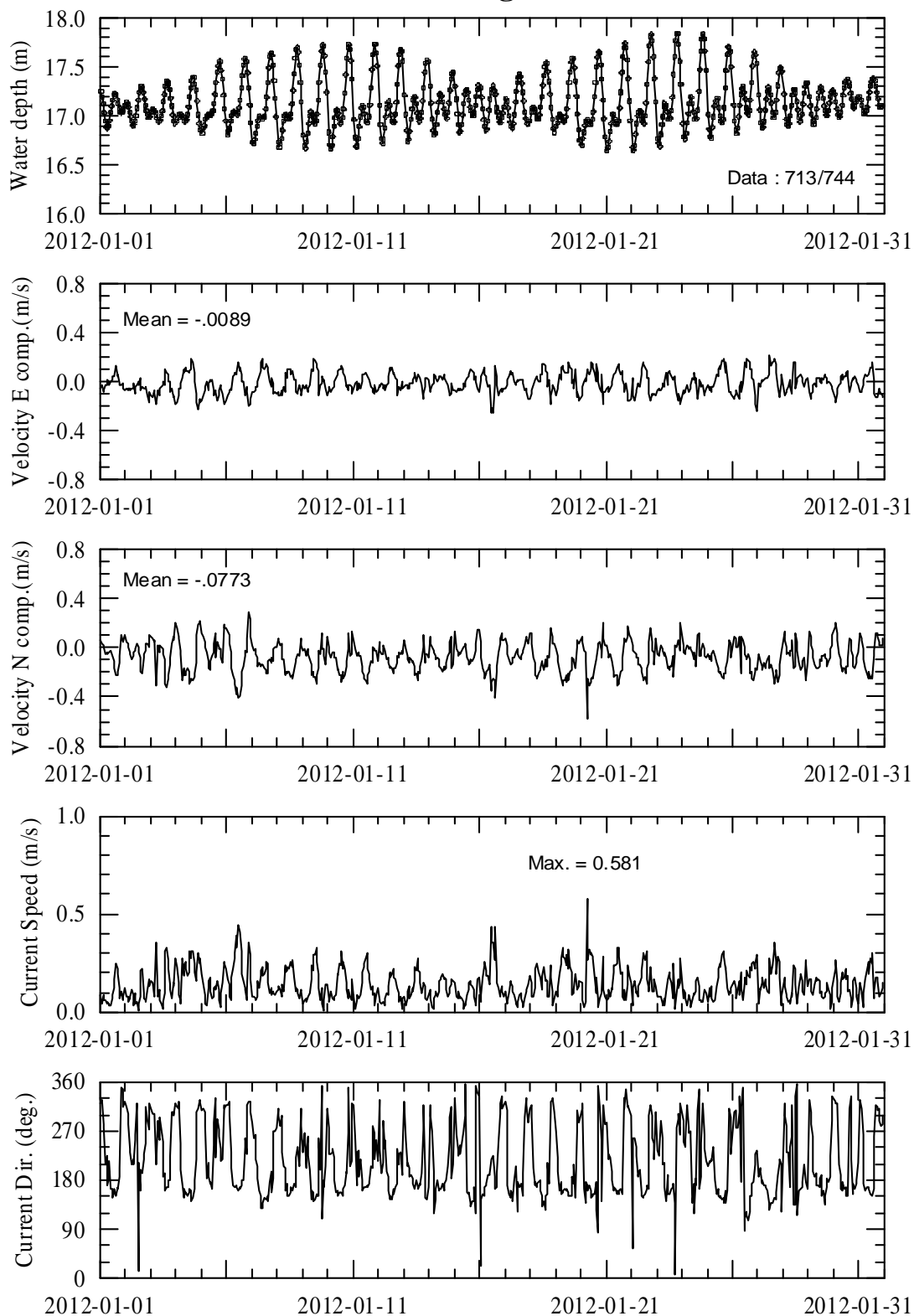
附圖 3.1 (續 8)安平港區海流觀測資料時序列圖

Anping Harbor



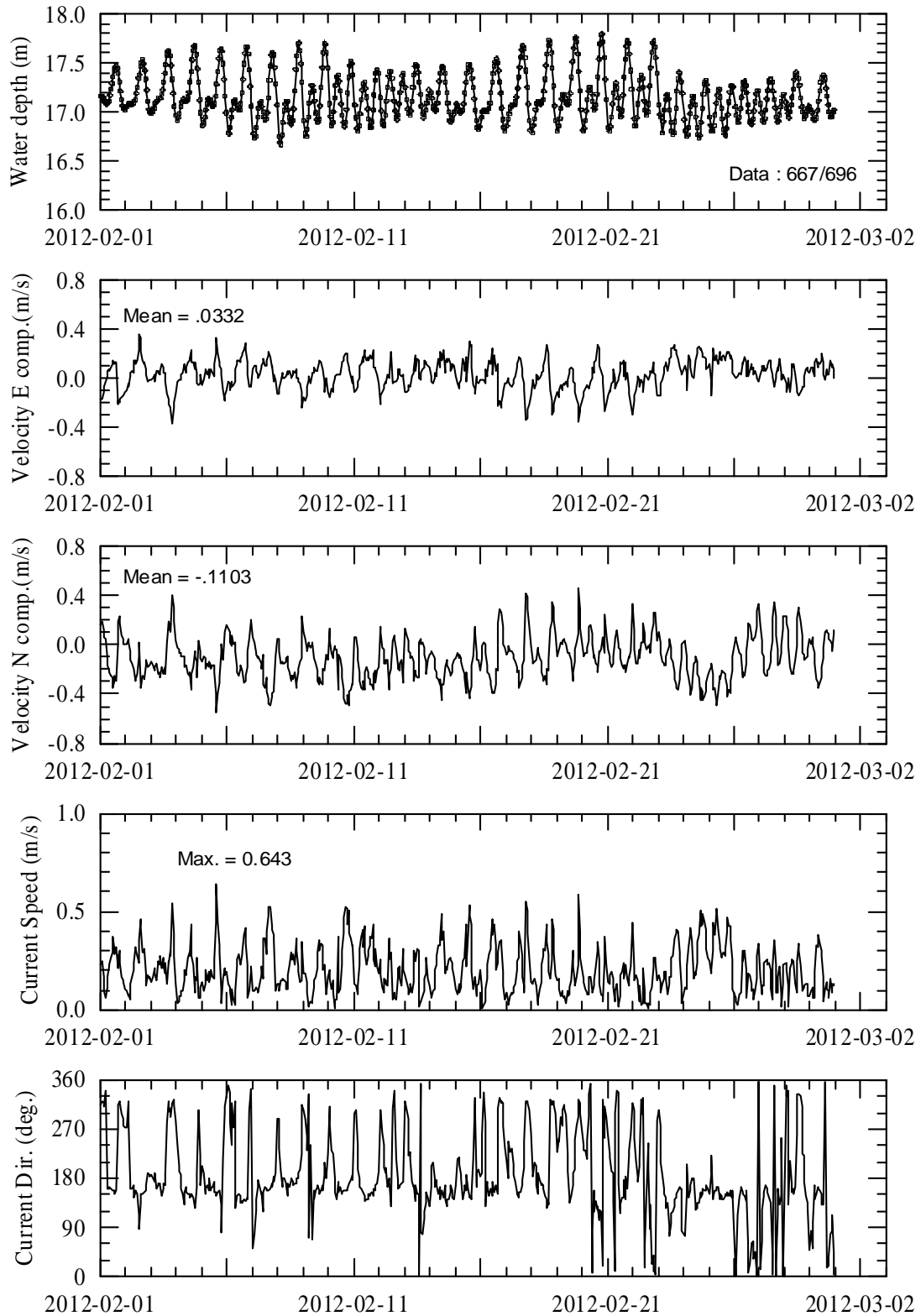
附圖 3.1 (續 9)安平港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



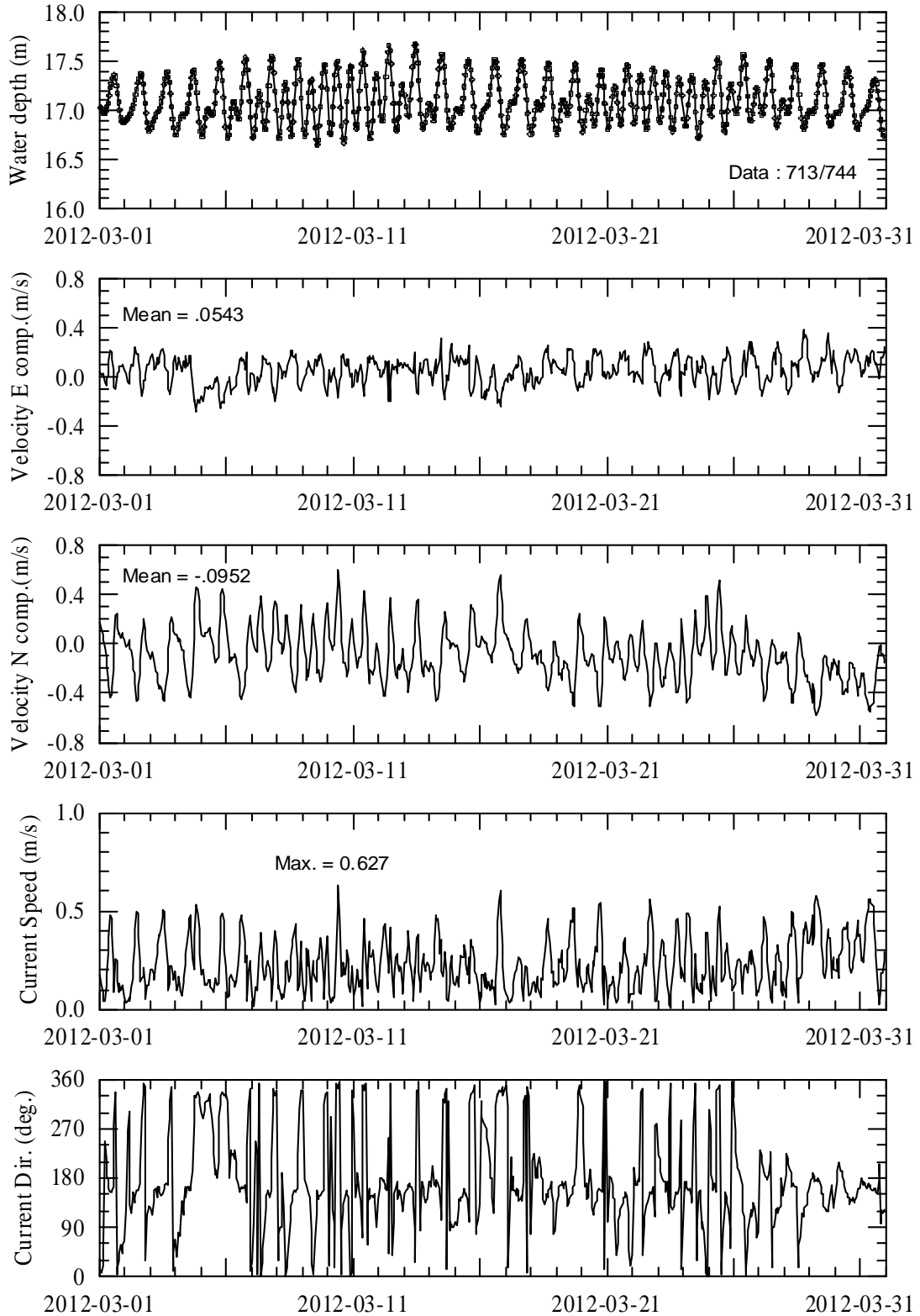
附圖 3.2 高雄港海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



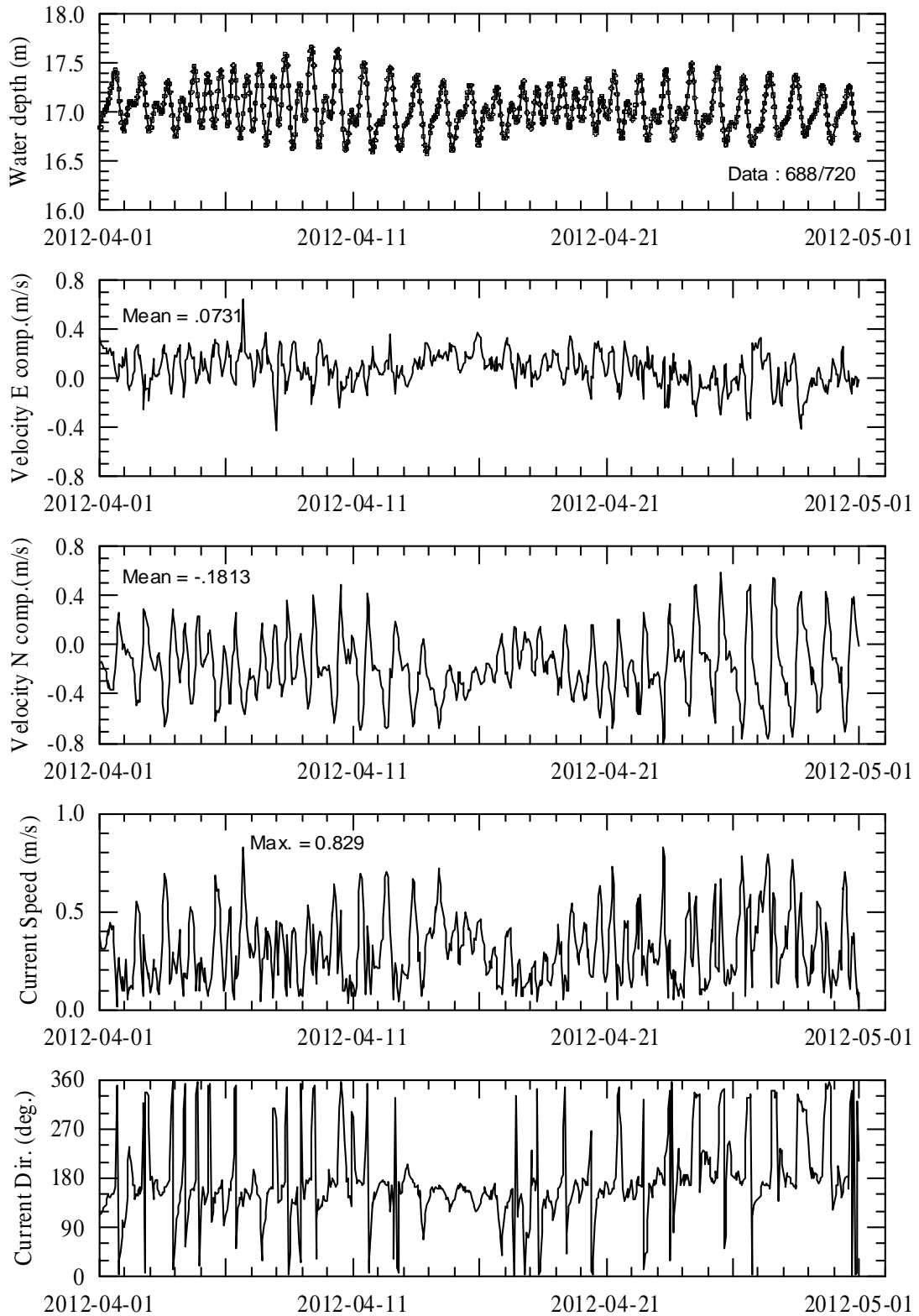
附圖 3.2 (續 1)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



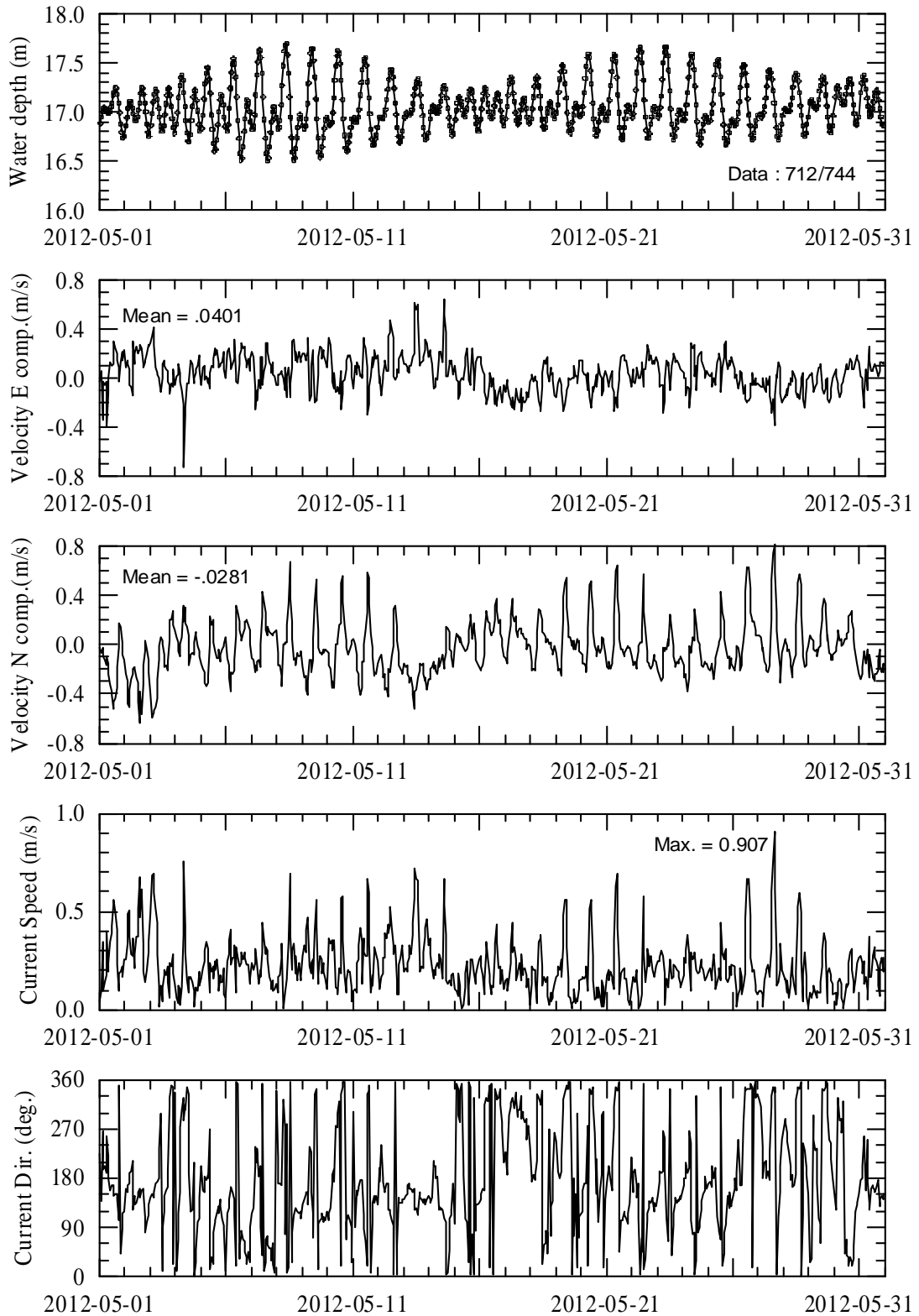
附圖 3.2 (續 2)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



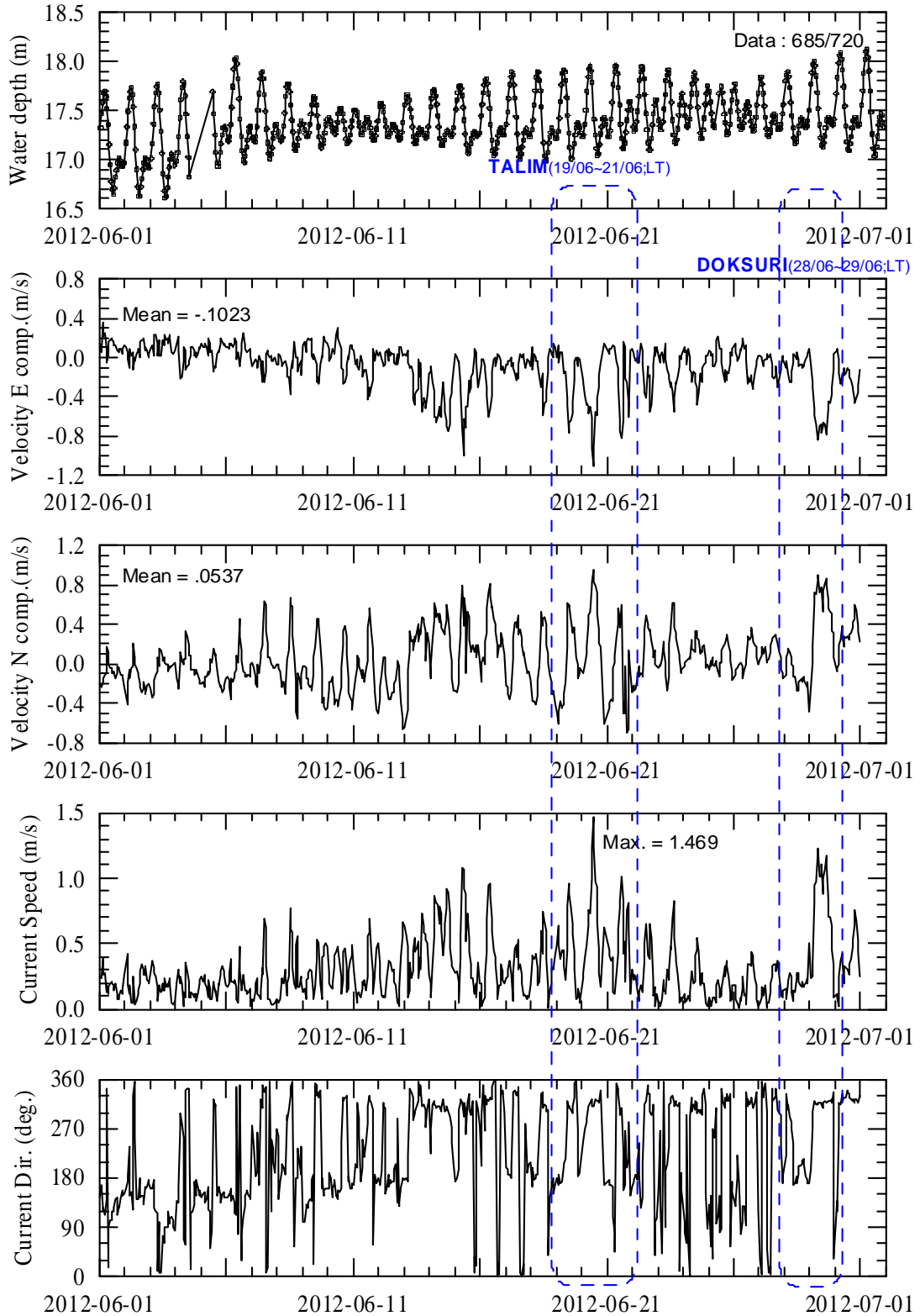
附圖 3.2 (續 3)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



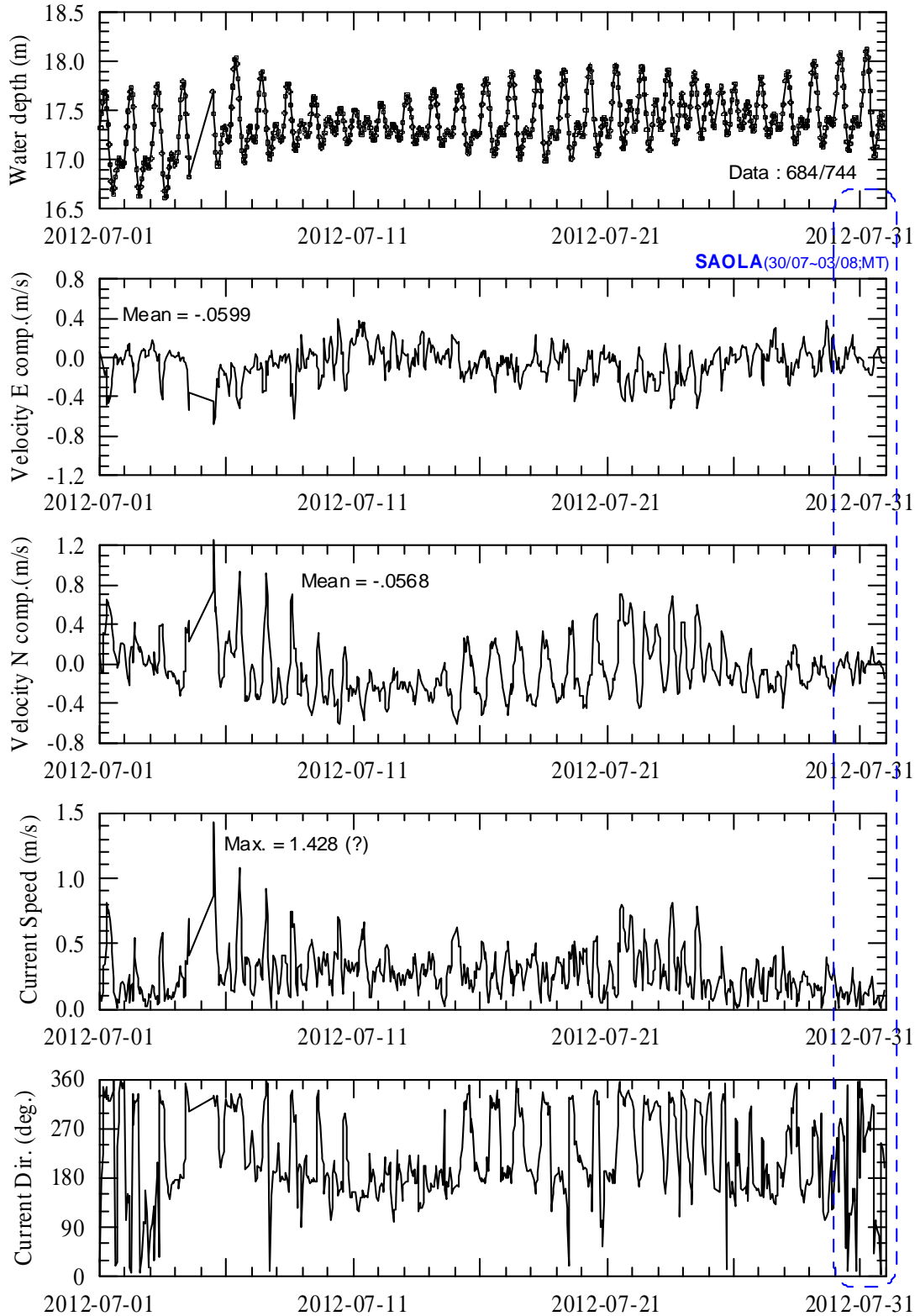
附圖 3.2 (續 4)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



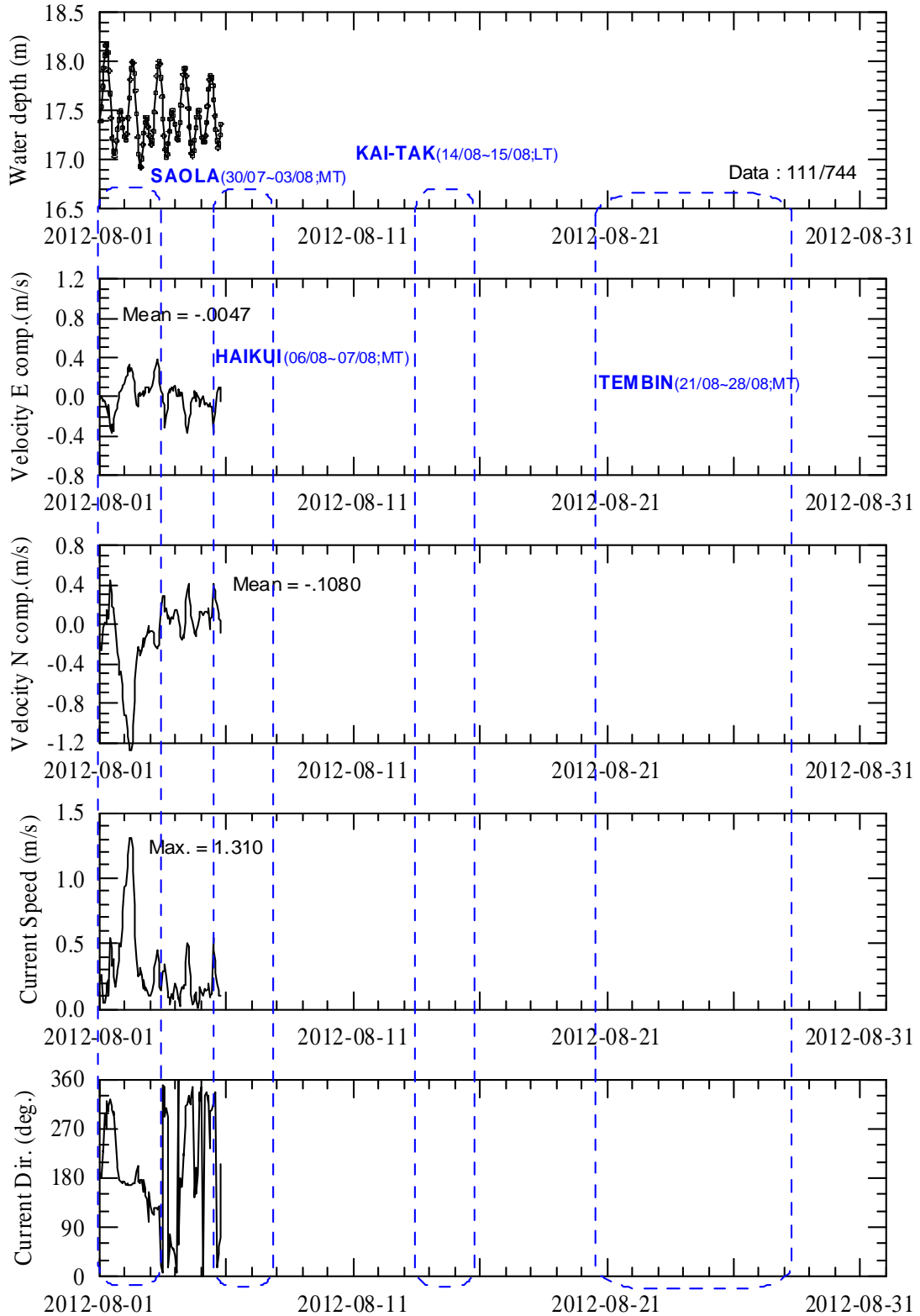
附圖 3.2 (續 5)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



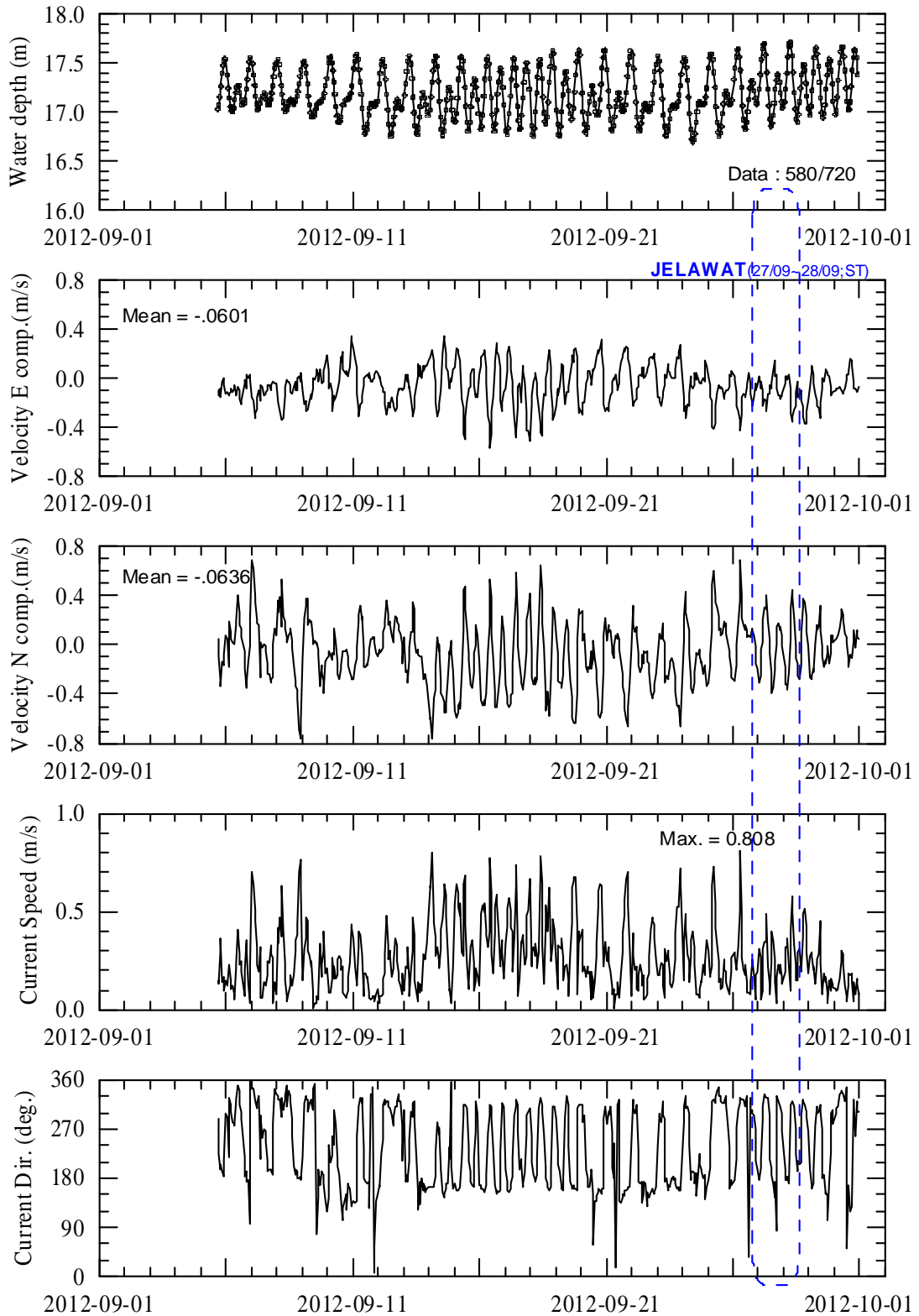
附圖 3.2 (續 6)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsiung Harbor



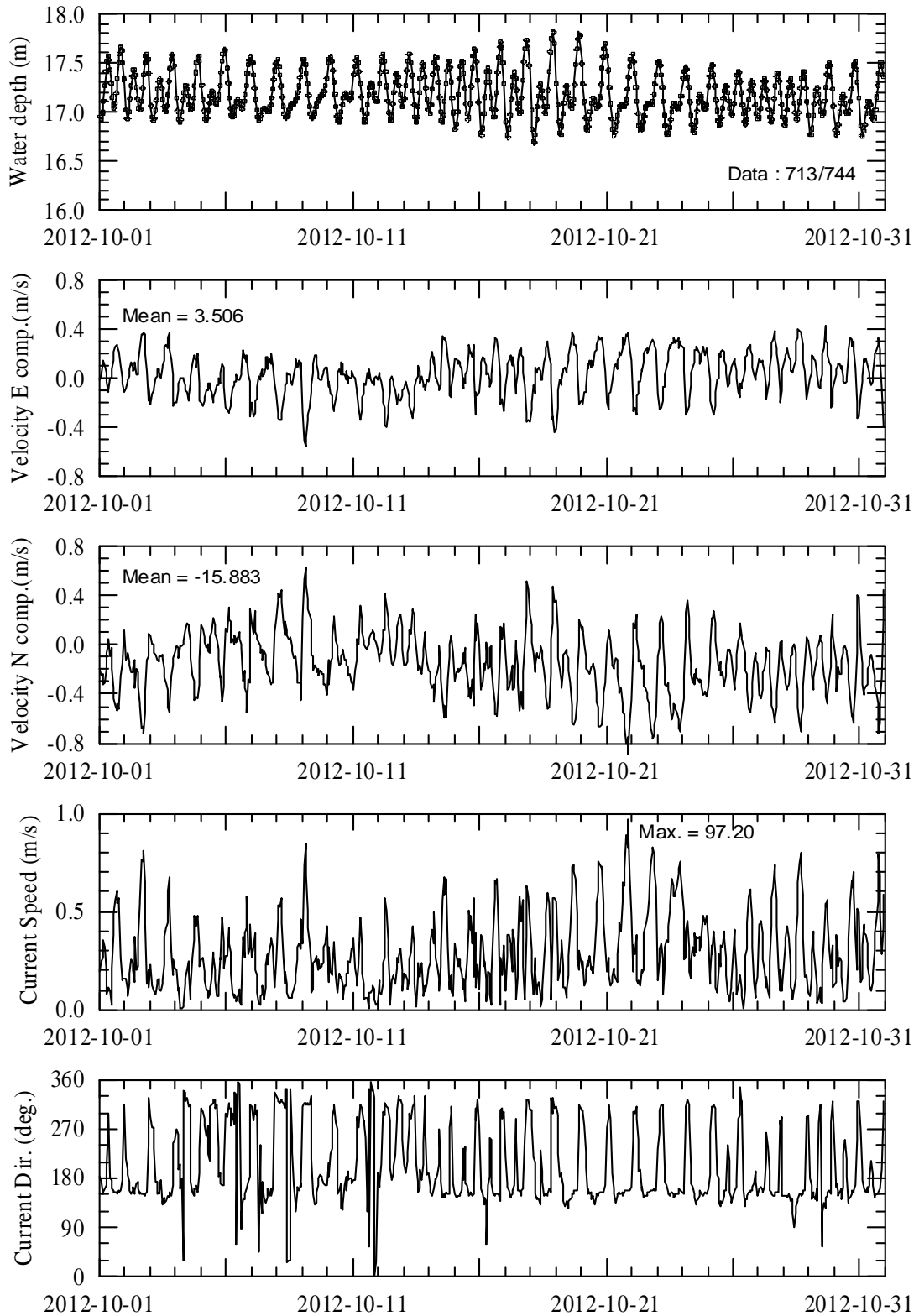
附圖 3.2 (續 7)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



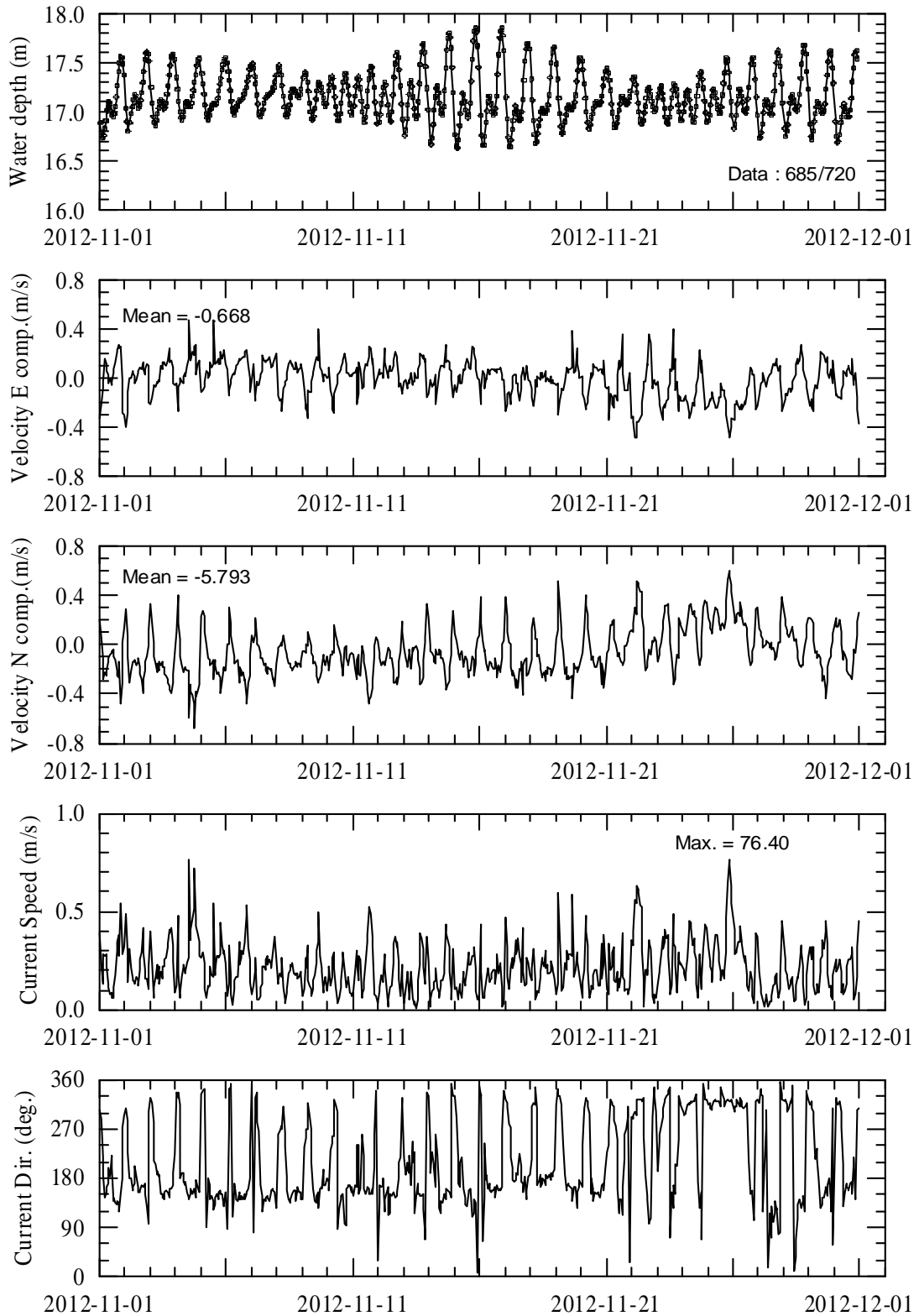
附圖 3.2 (續 8)高雄港區海流觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



附圖 3.2 (續 9)高雄港區海流觀測資料時序列圖

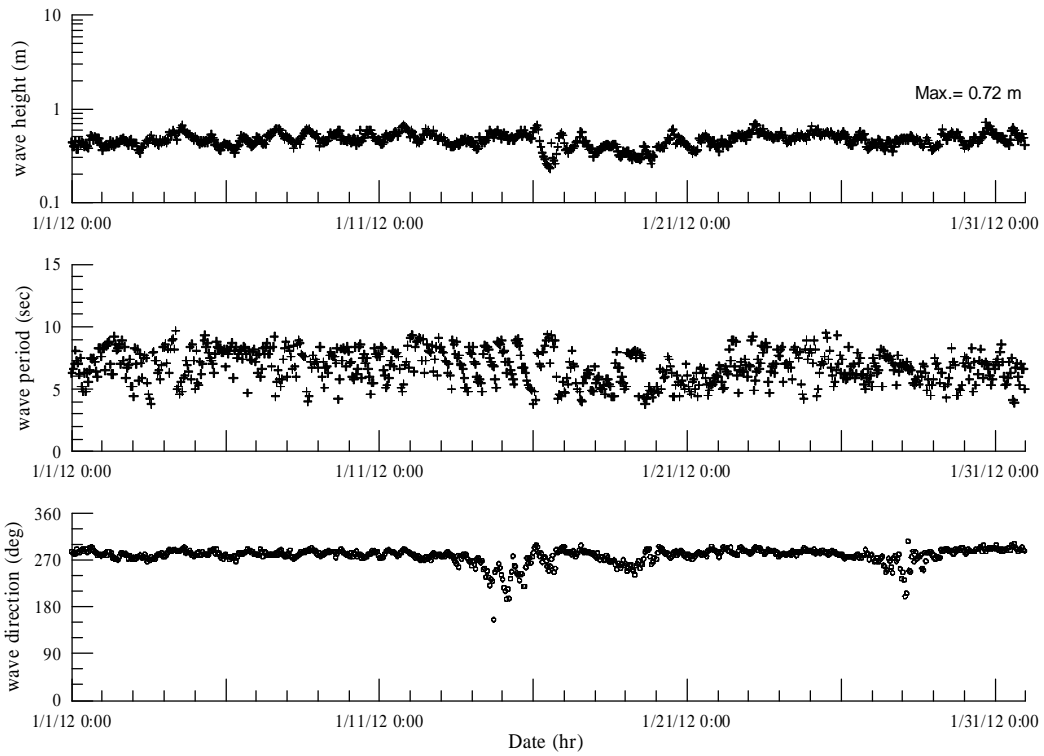
Kaohsung Harbor



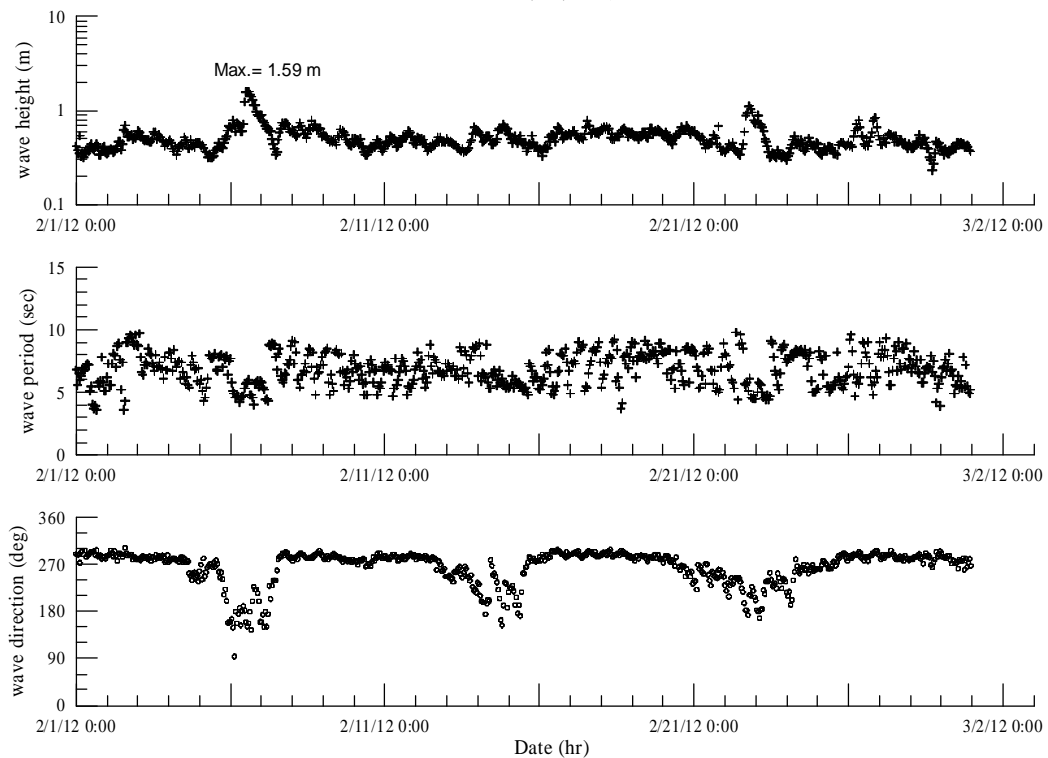
附圖 3.2 (續 10)高雄港區海流觀測資料時序列圖

附錄四

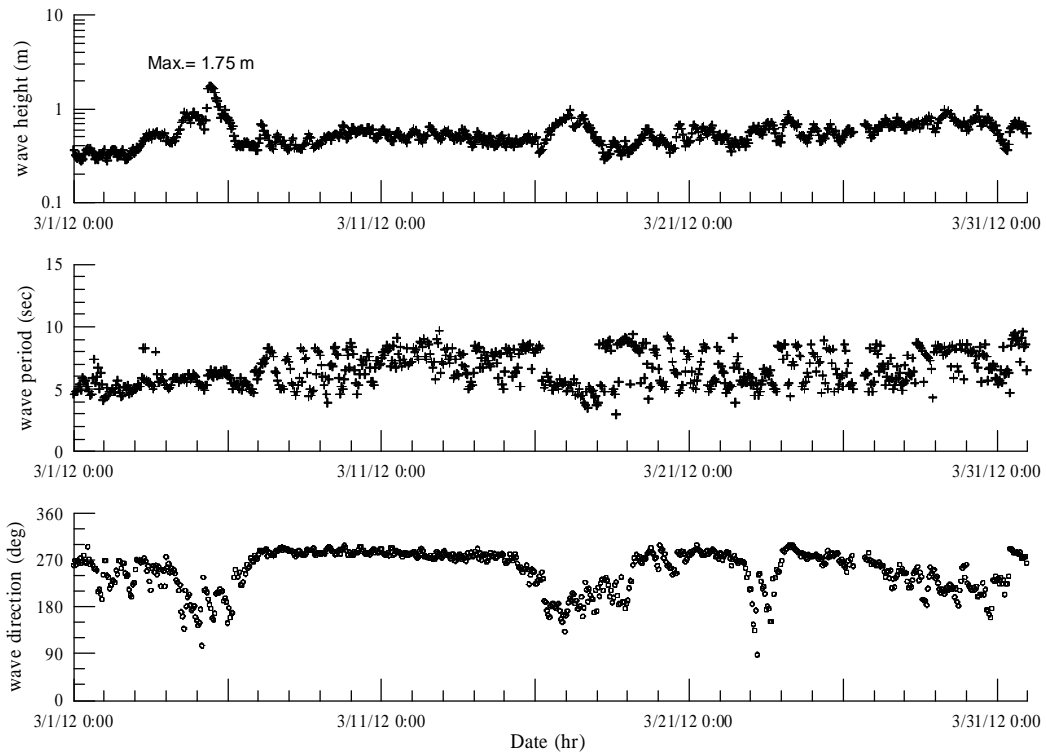
2012 年安平港及高雄港波浪觀測資料



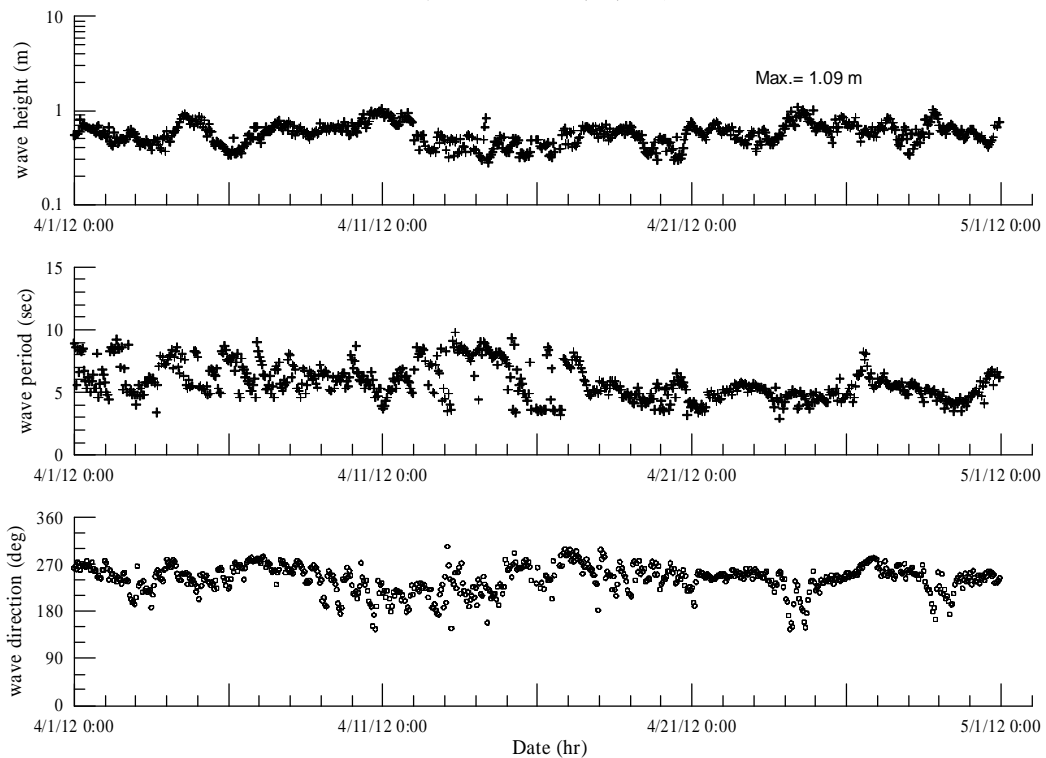
附圖 4.1 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



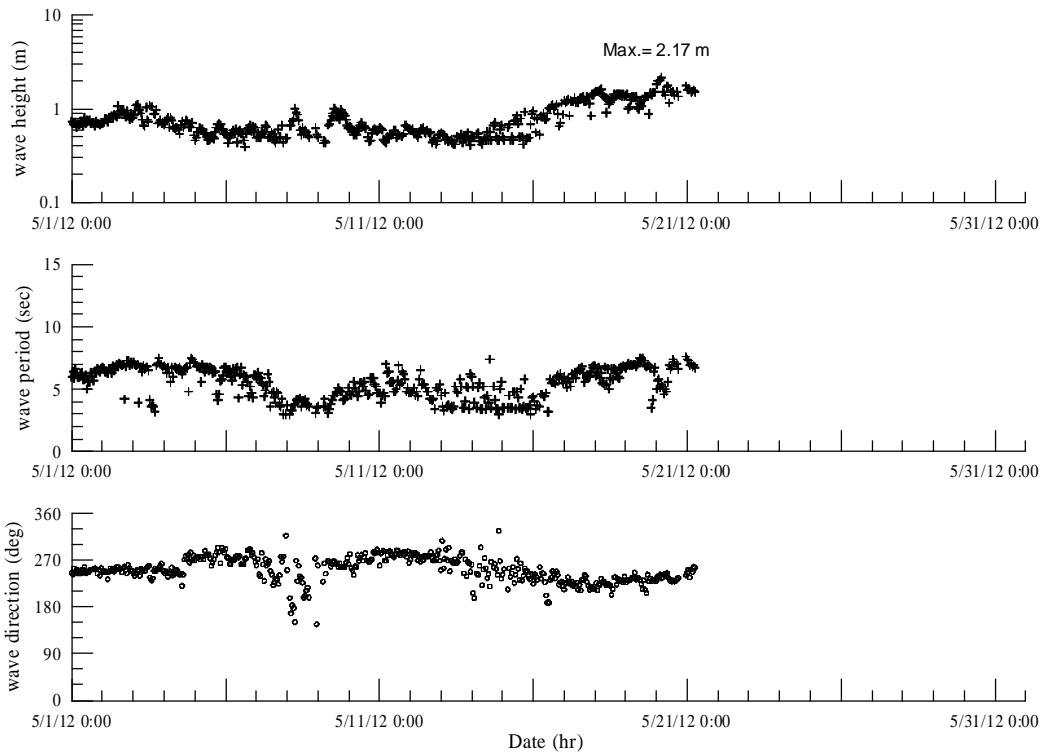
附圖 4.1 (續 1) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



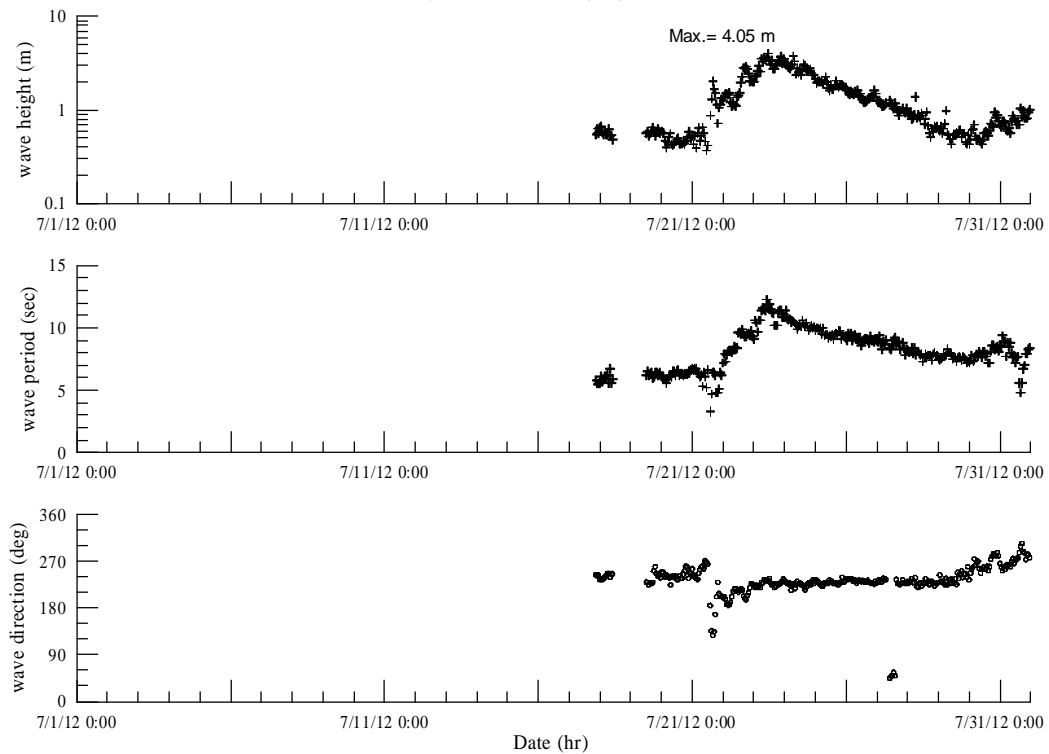
附圖 4.1 (續 2) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



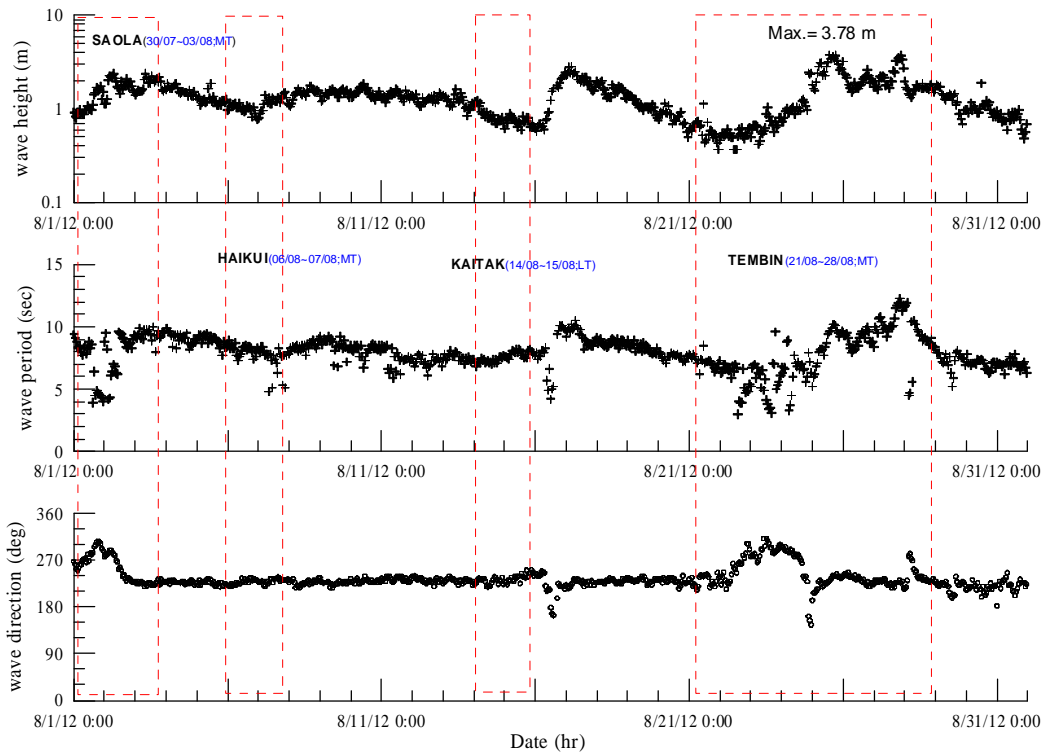
附圖 4.1 (續 3) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



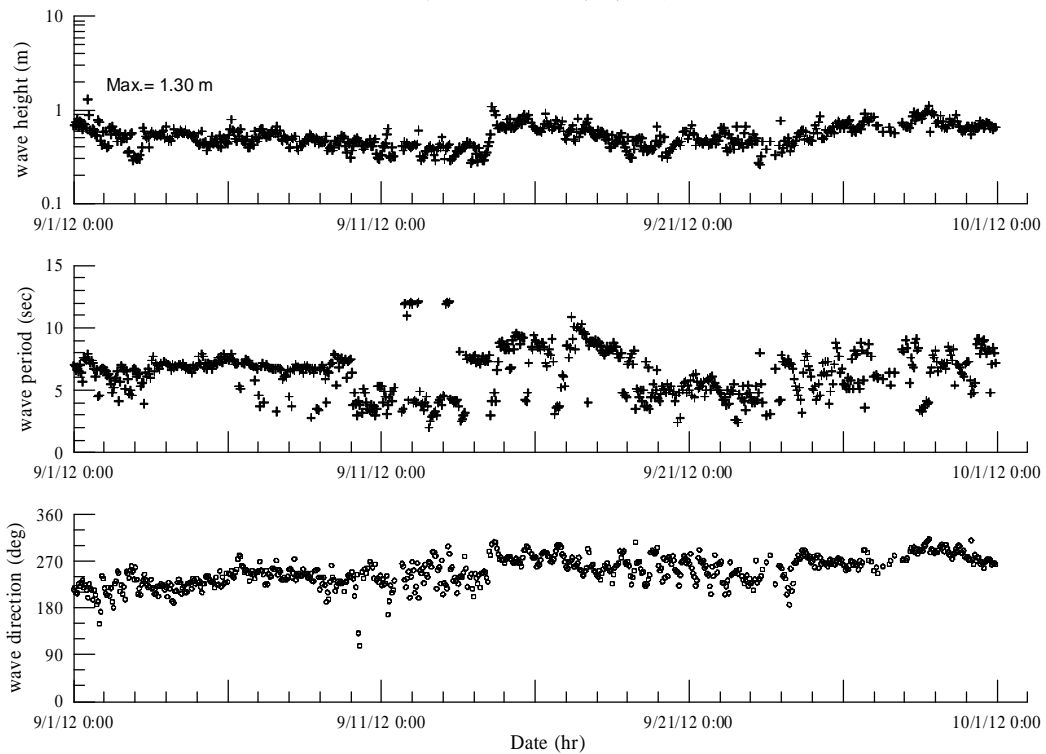
附圖 4.1 (續 4) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



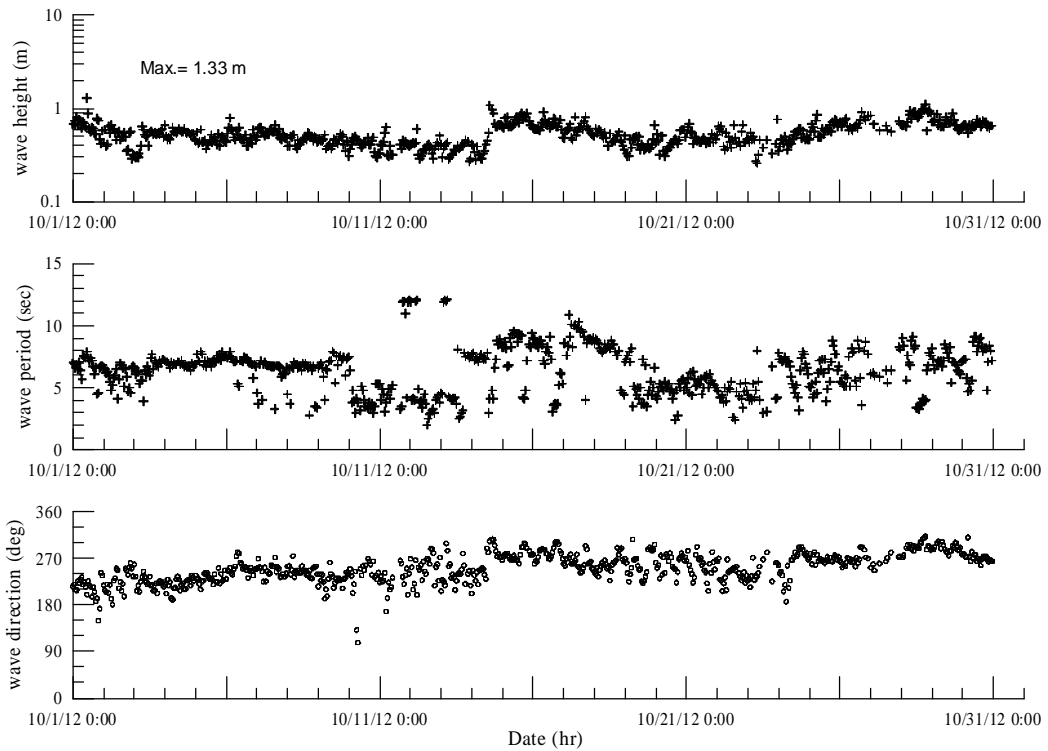
附圖 4.1 (續 5) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



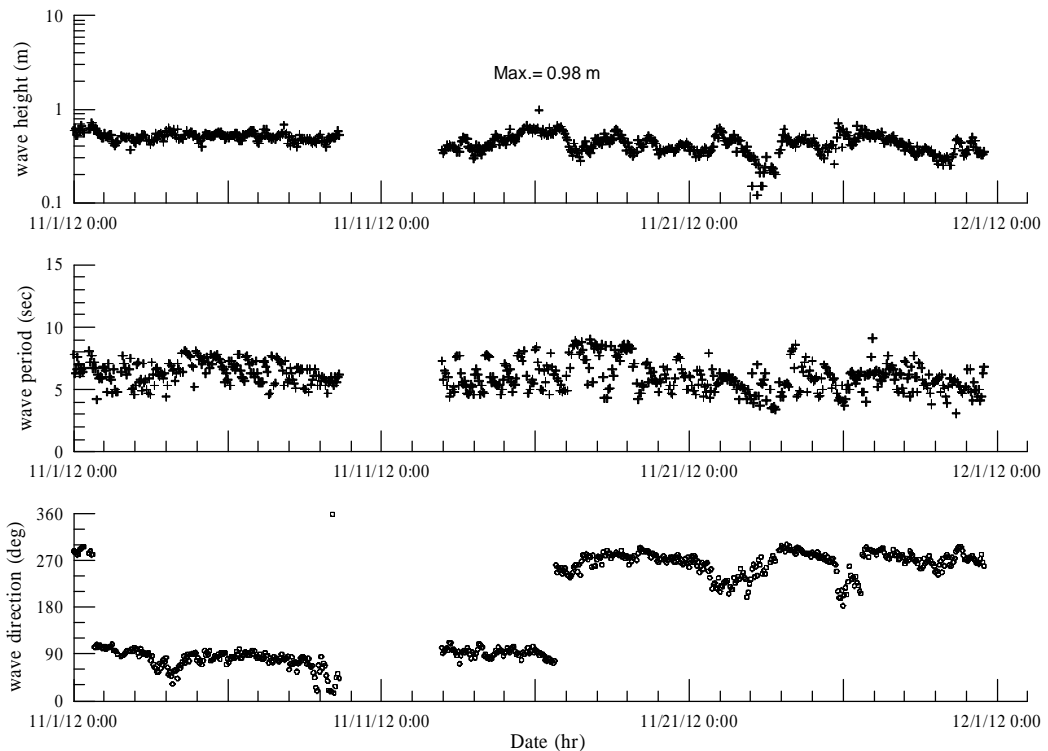
附圖 4.1 (續 6) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



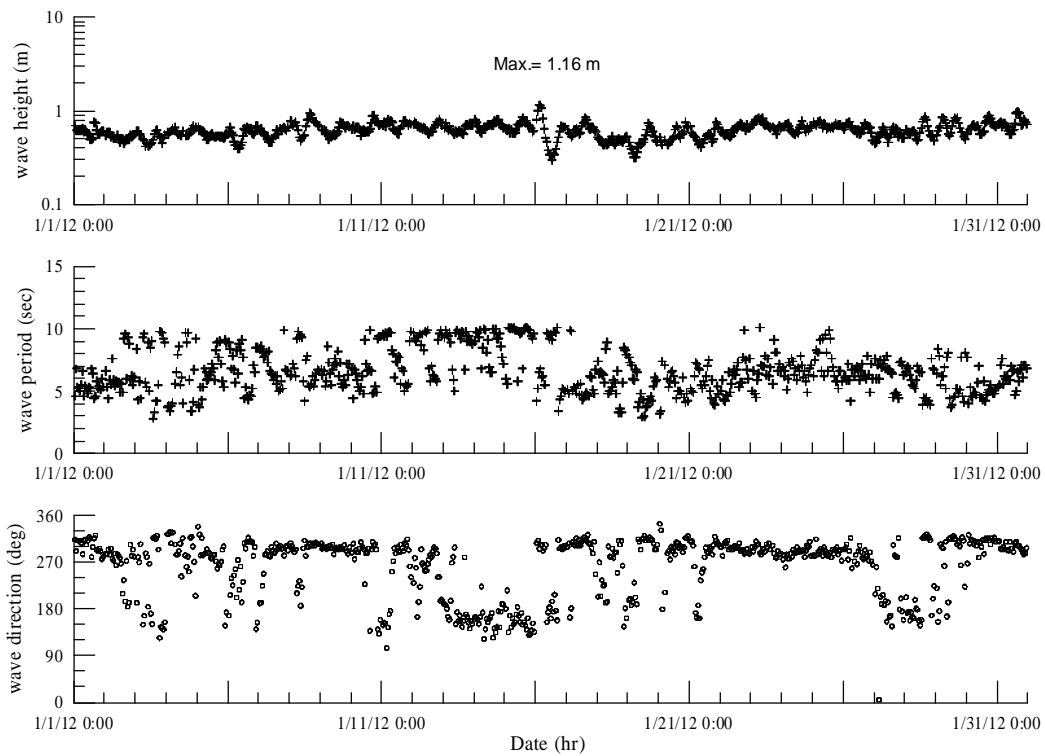
附圖 4.1 (續 7) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



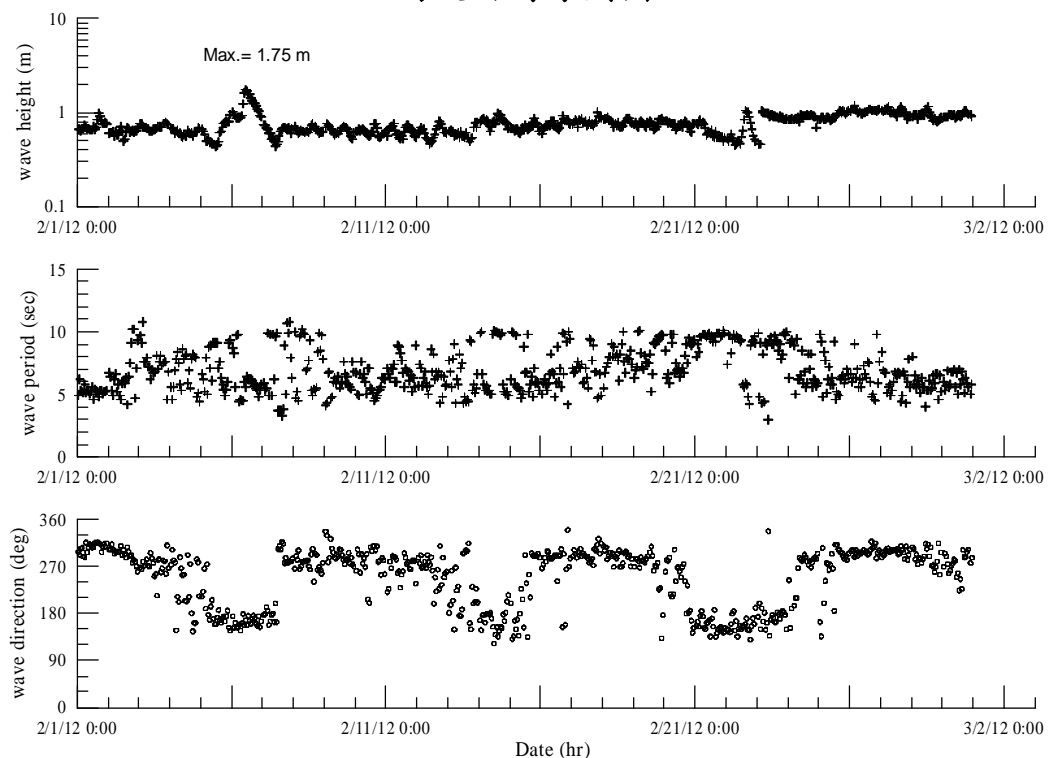
附圖 4.1 (續 8) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



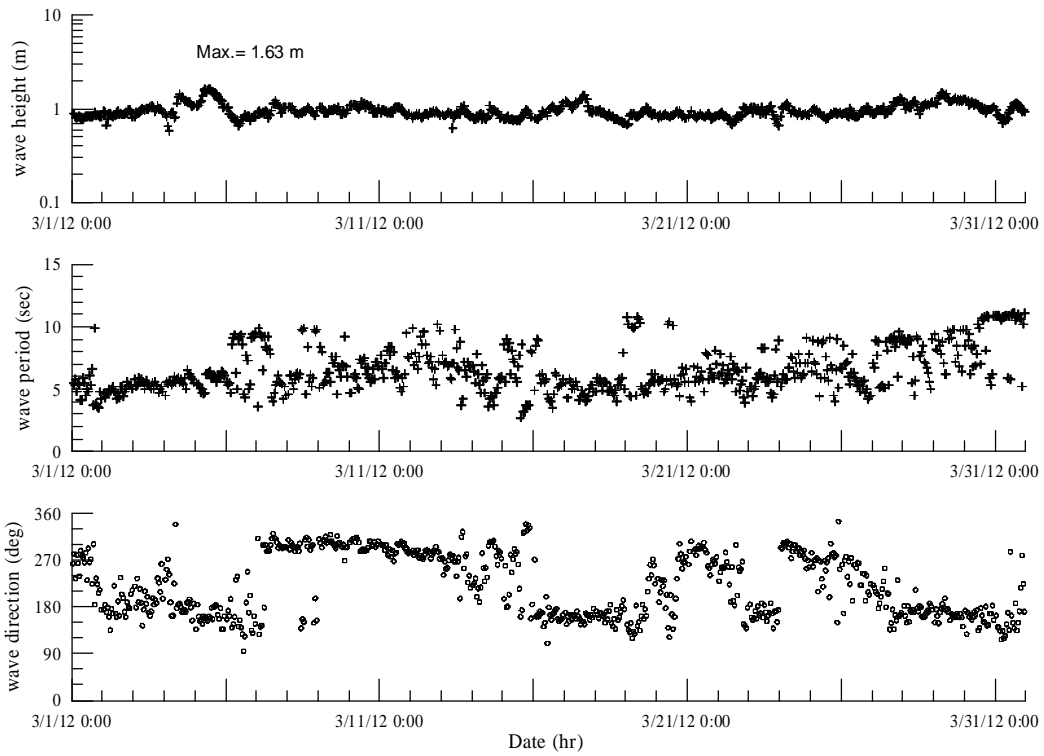
附圖 4.1 (續 9) 2012 年安平港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



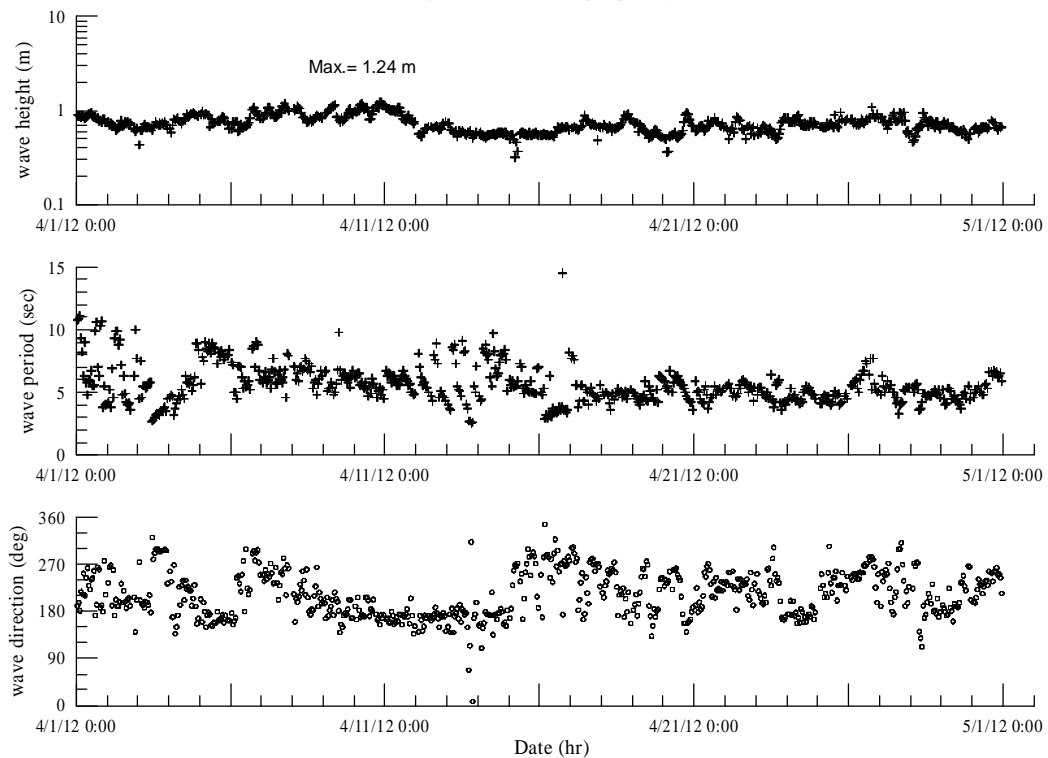
附圖 4.2 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



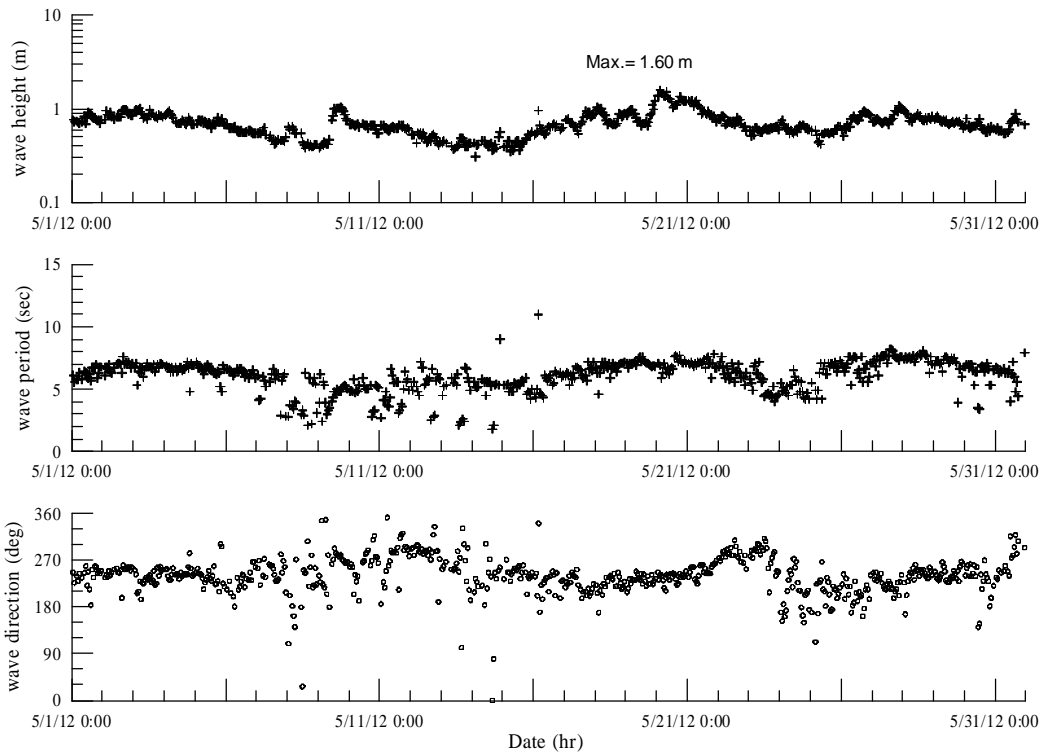
附圖 4.2 (續 1) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



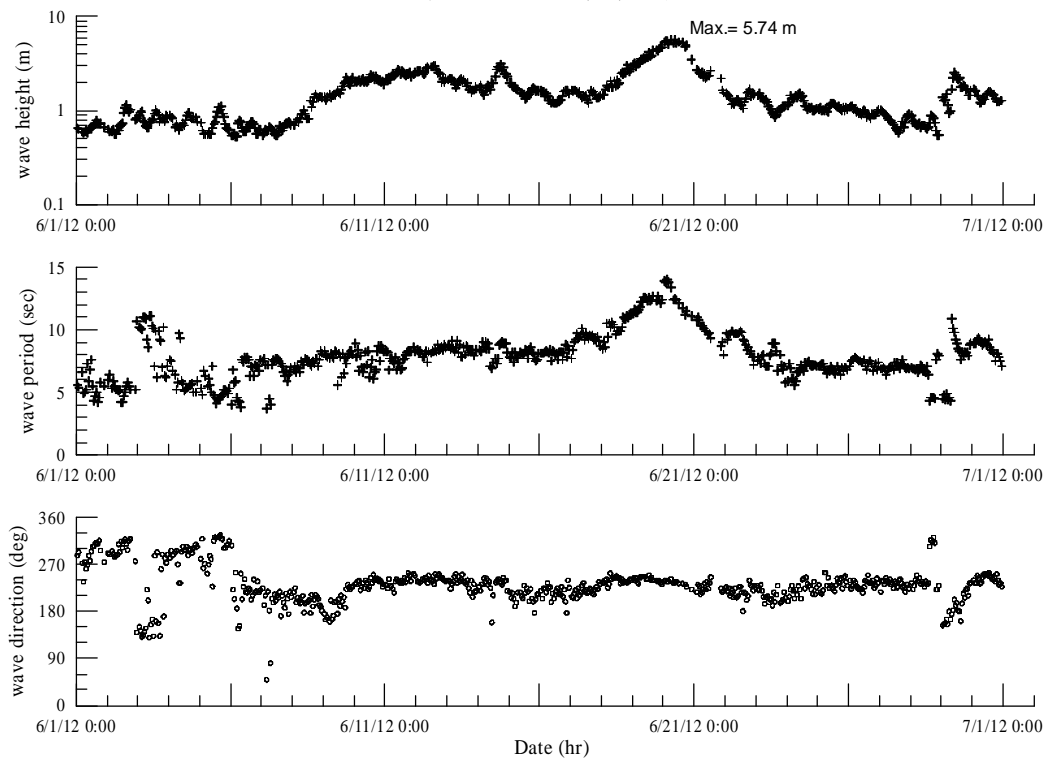
附圖 4.2 (續 2) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



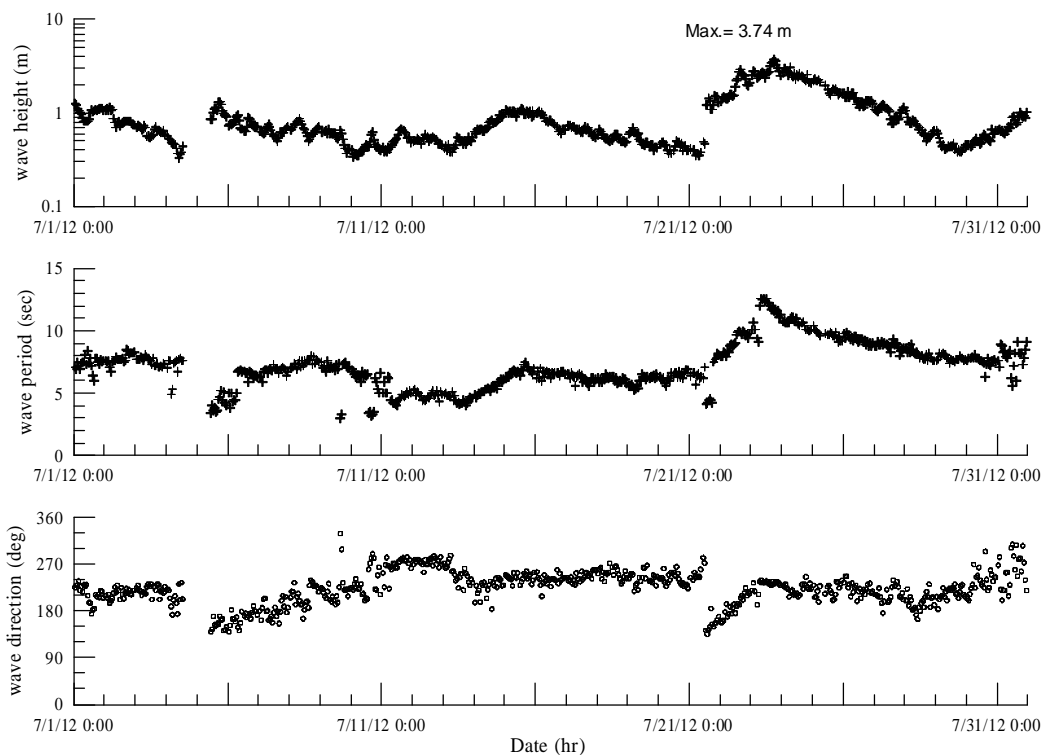
附圖 4.2 (續 3) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



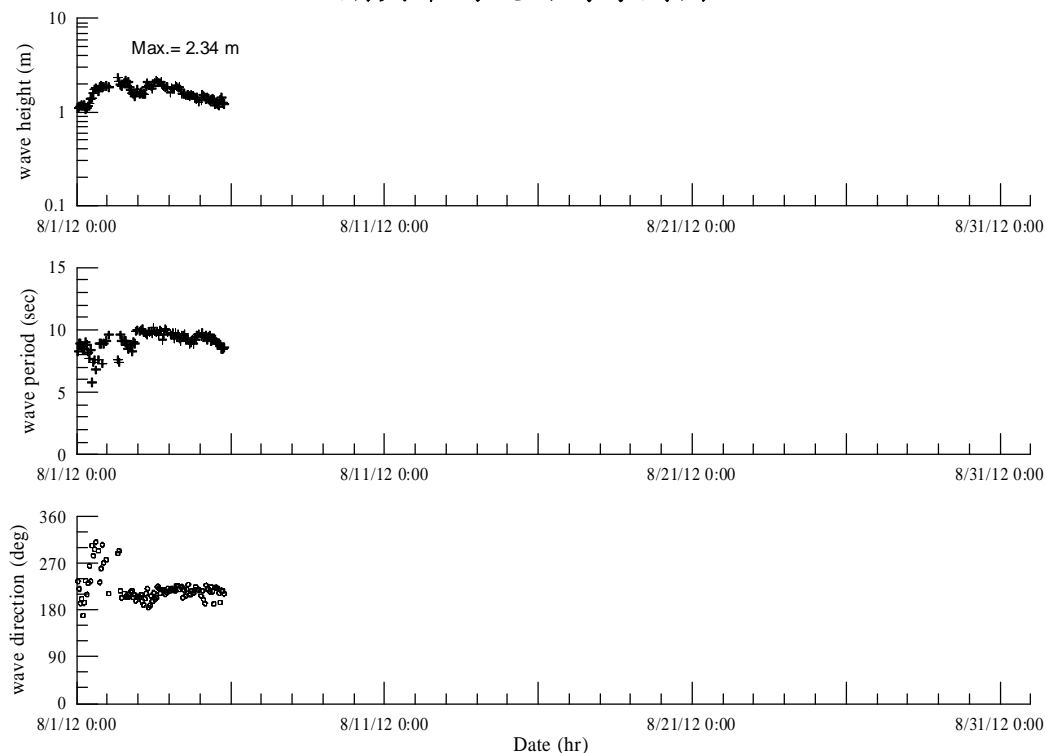
附圖 4.2 (續 4) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



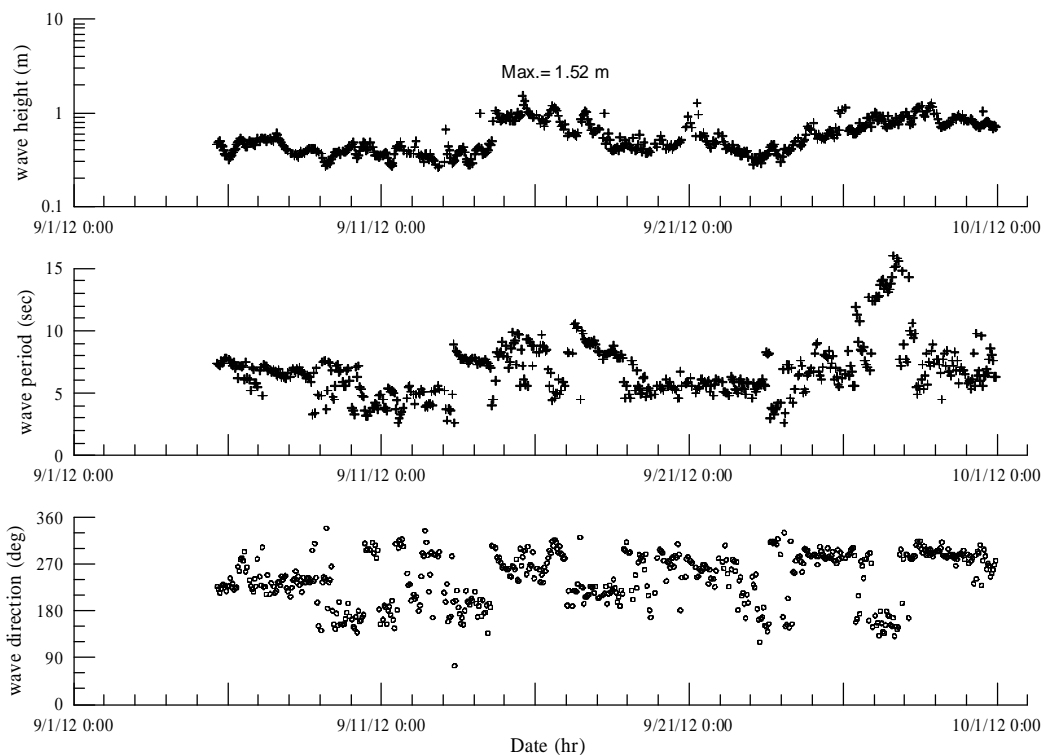
附圖 4.2 (續 5) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



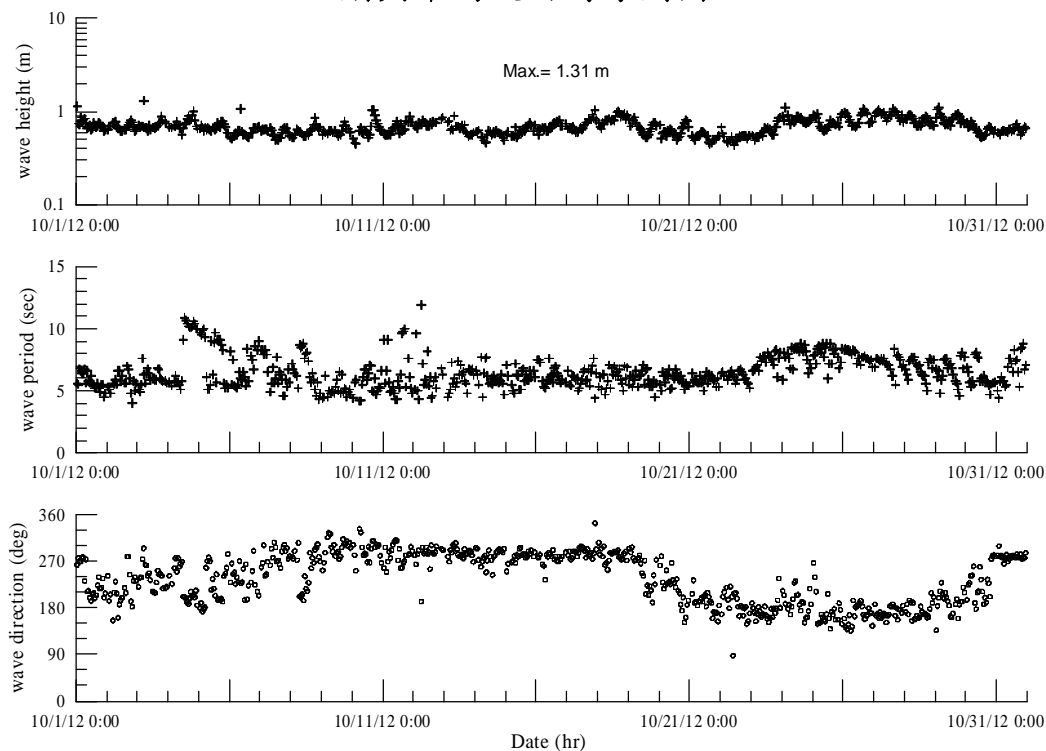
附圖 4.2 (續 6) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



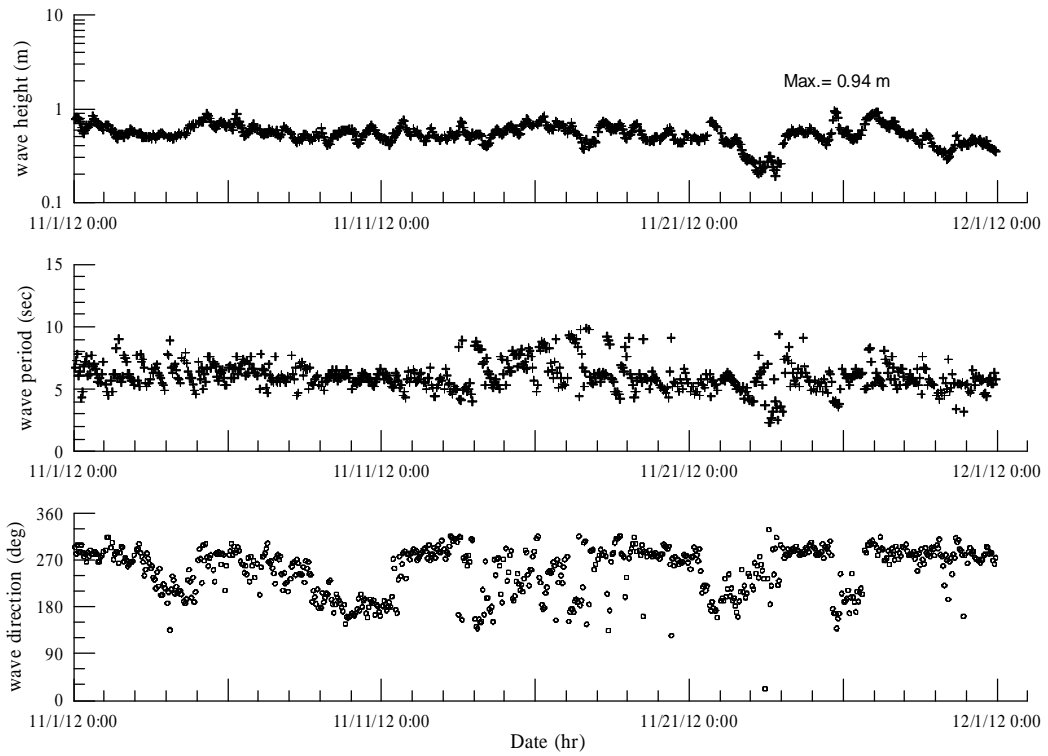
附圖 4.2 (續 7) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



附圖 4.2 (續 8) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖



附圖 4.2 (續 9) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖

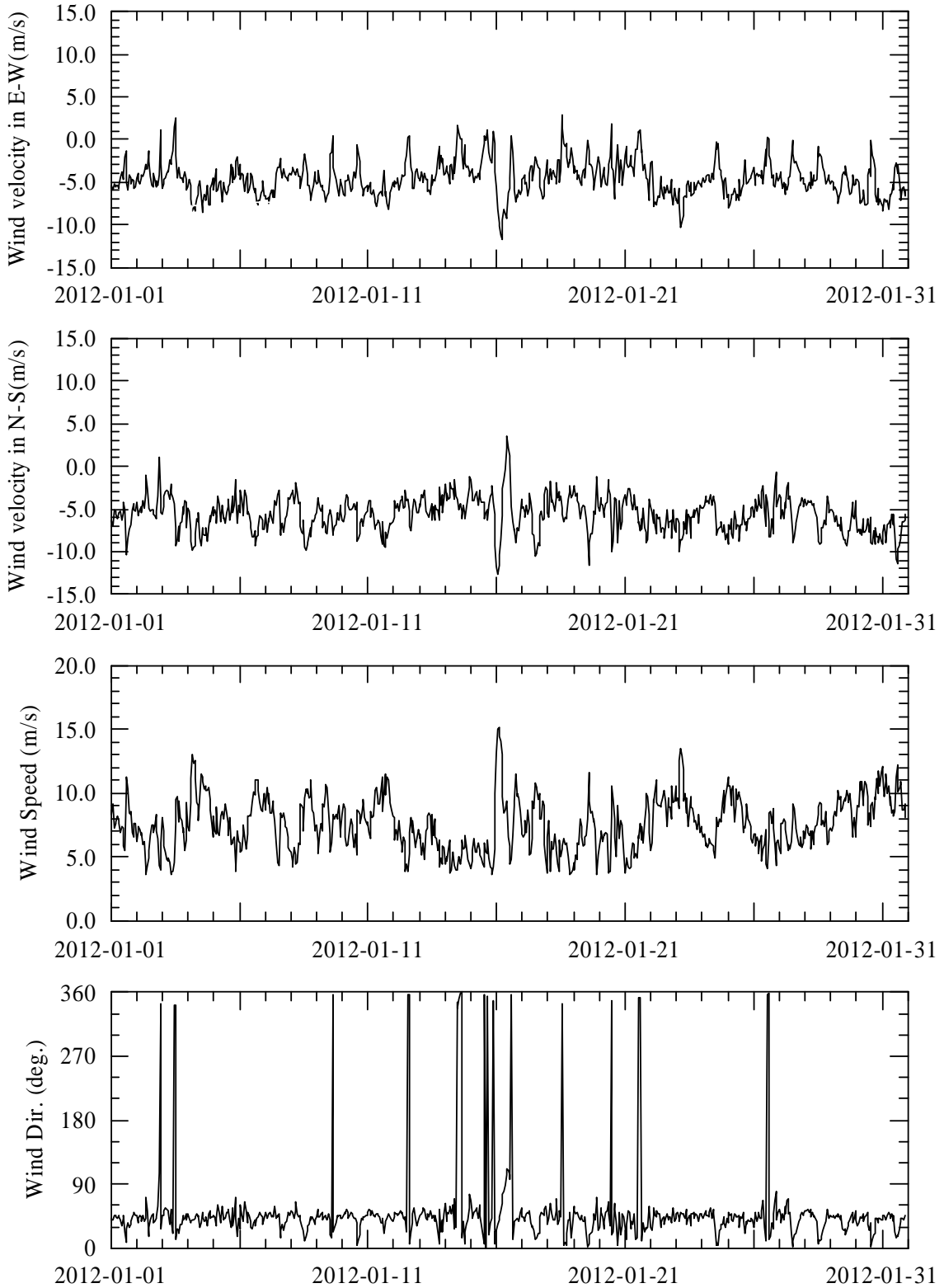


附圖 4.2 (續 10) 2012 年高雄港外海波浪觀測資料之示性波高、平均週期與平均波向時序列圖

附錄五

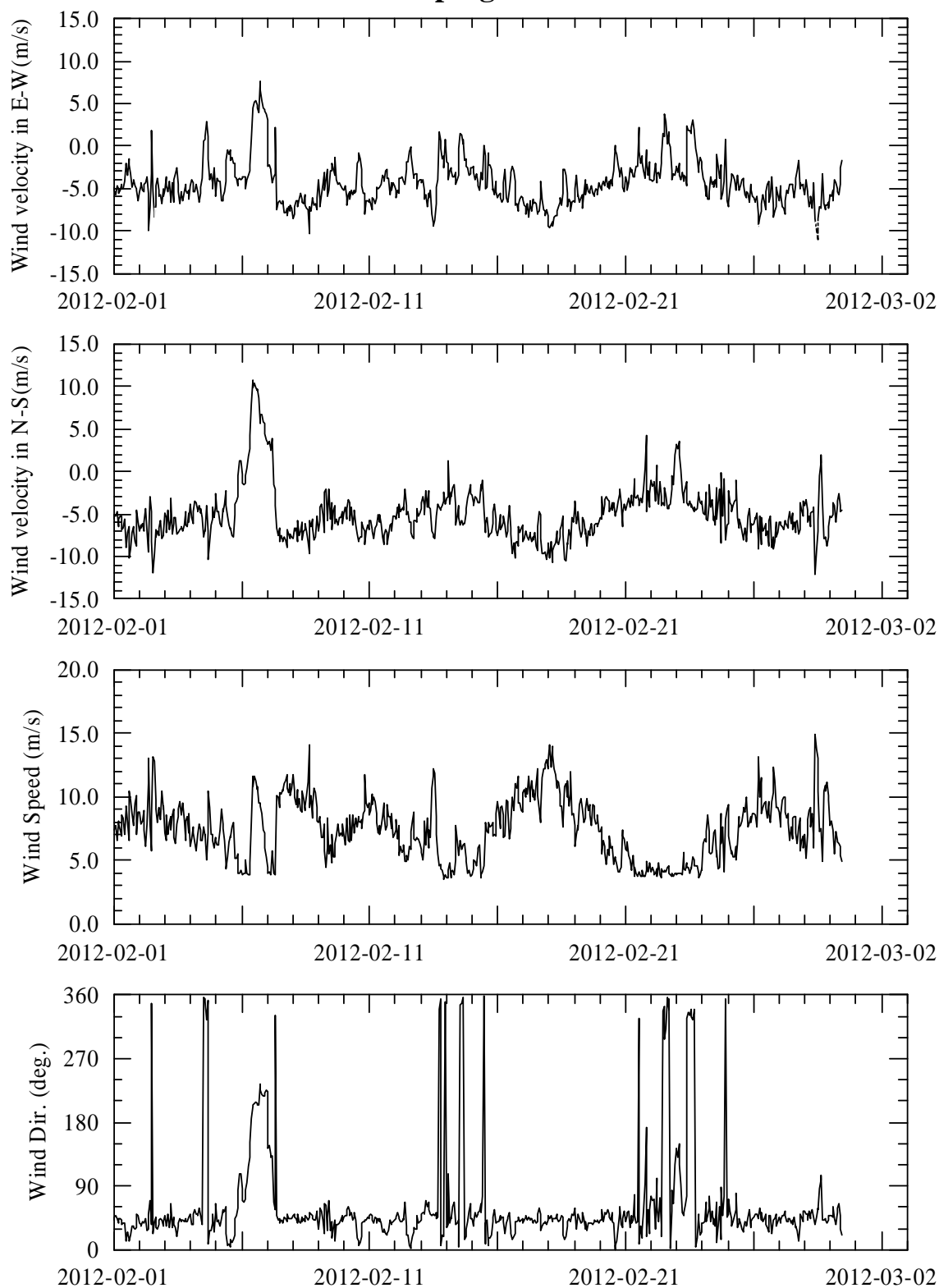
2012 年安平港及高雄港風速及風向觀測資料

Anping Harbor



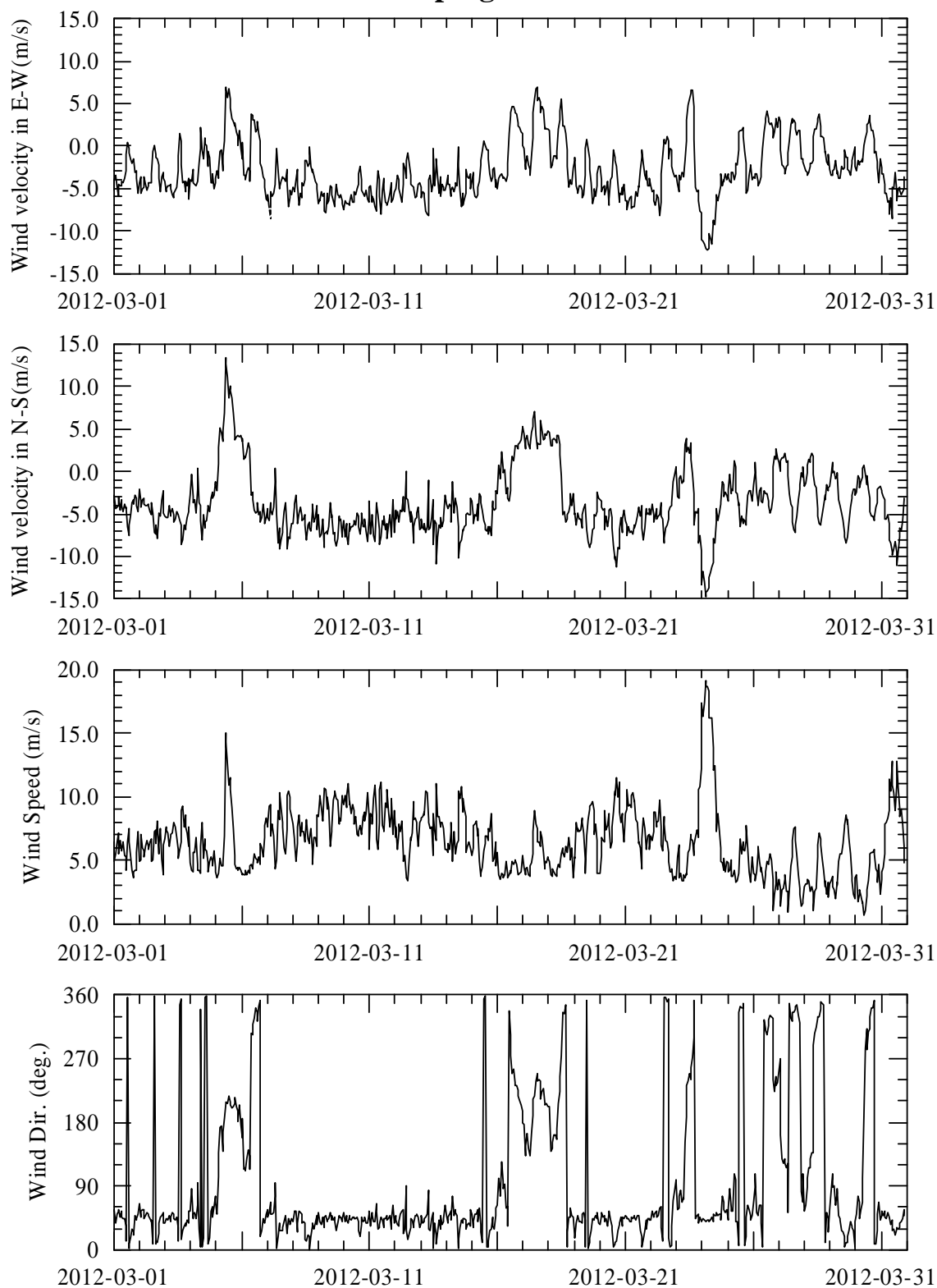
附圖 5.1 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Anping Harbor



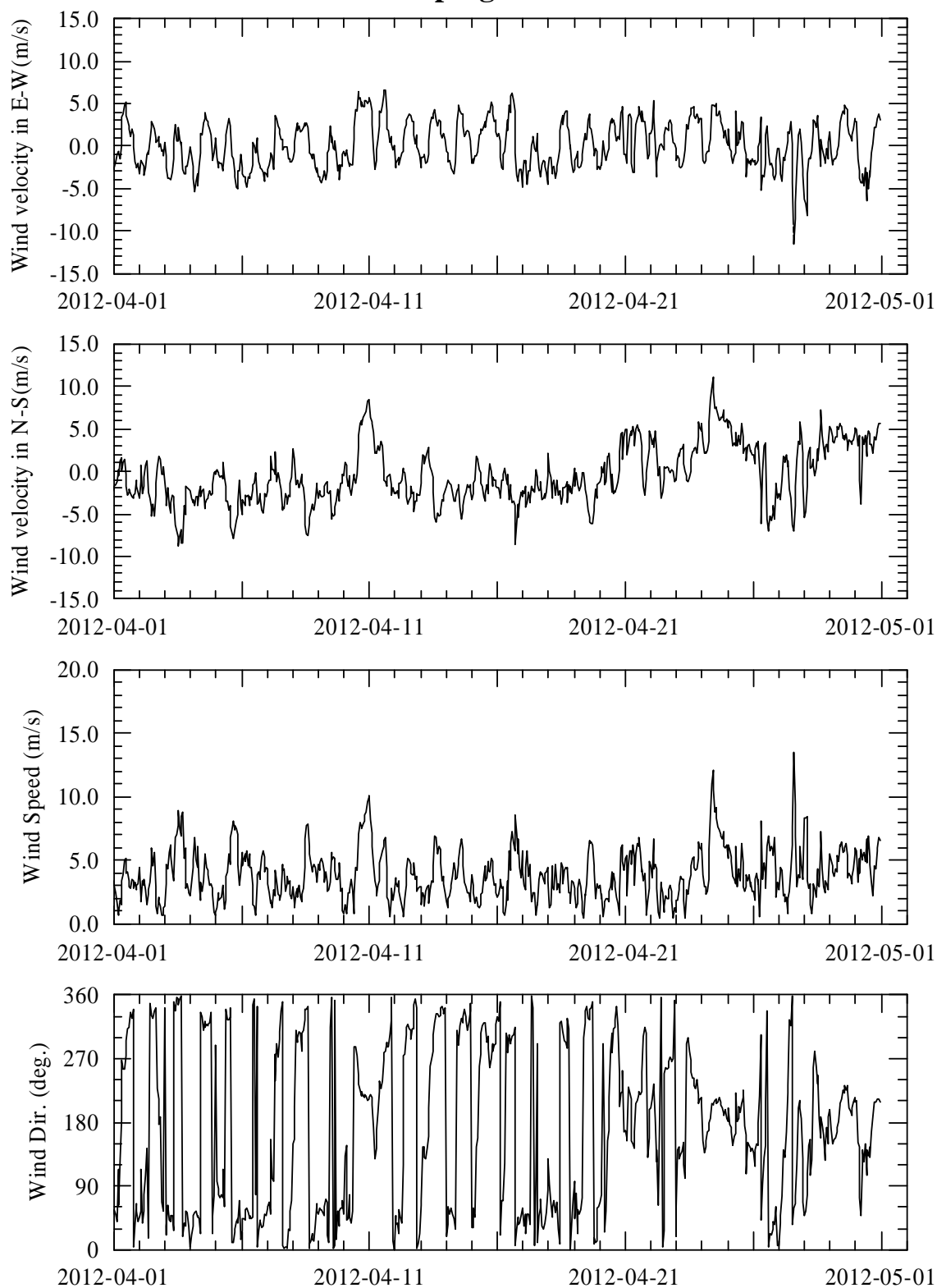
附圖 5.1 (續 1) 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖圖

Anping Harbor



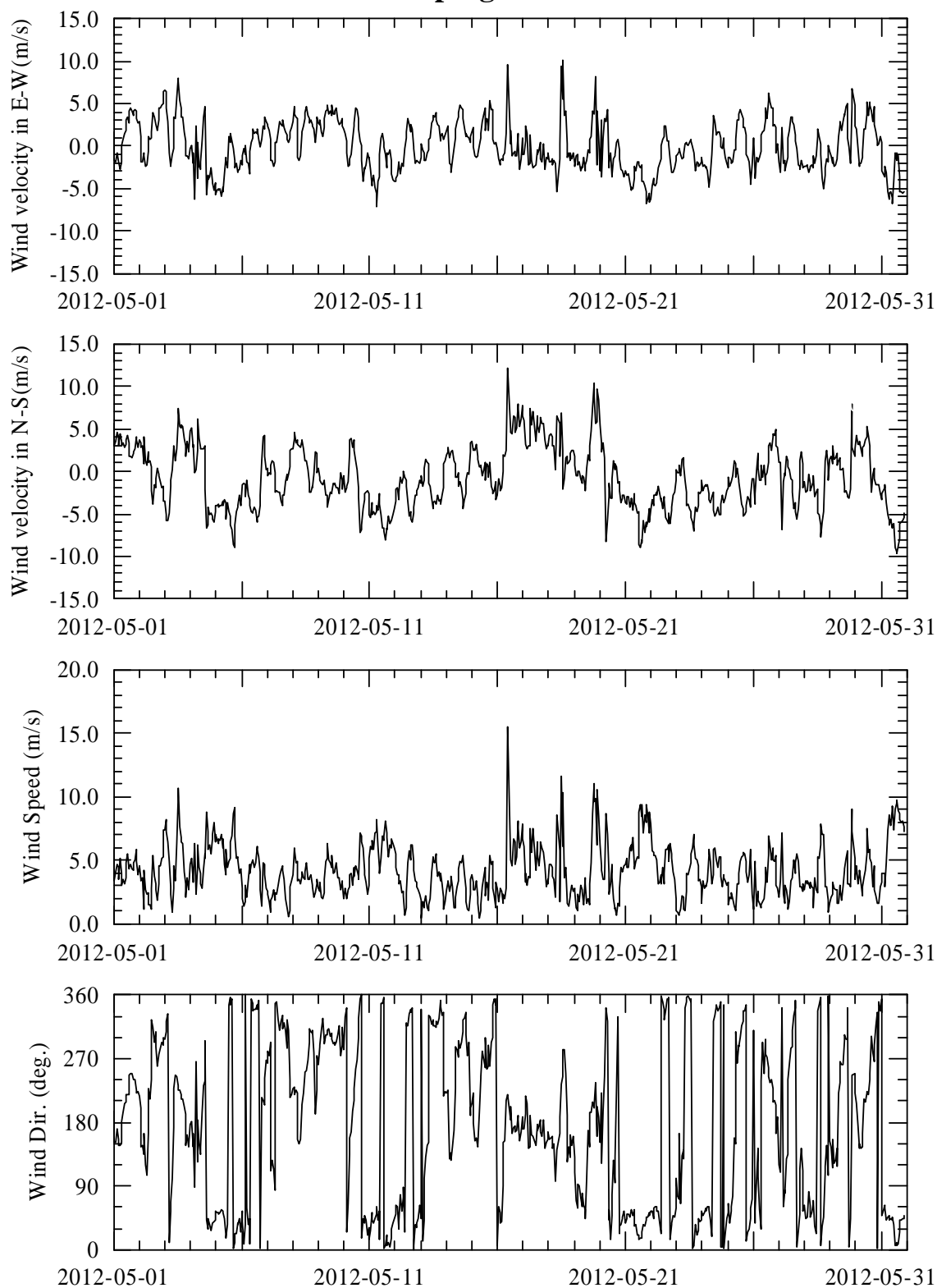
附圖 5.1 (續 2) 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Anping Harbor



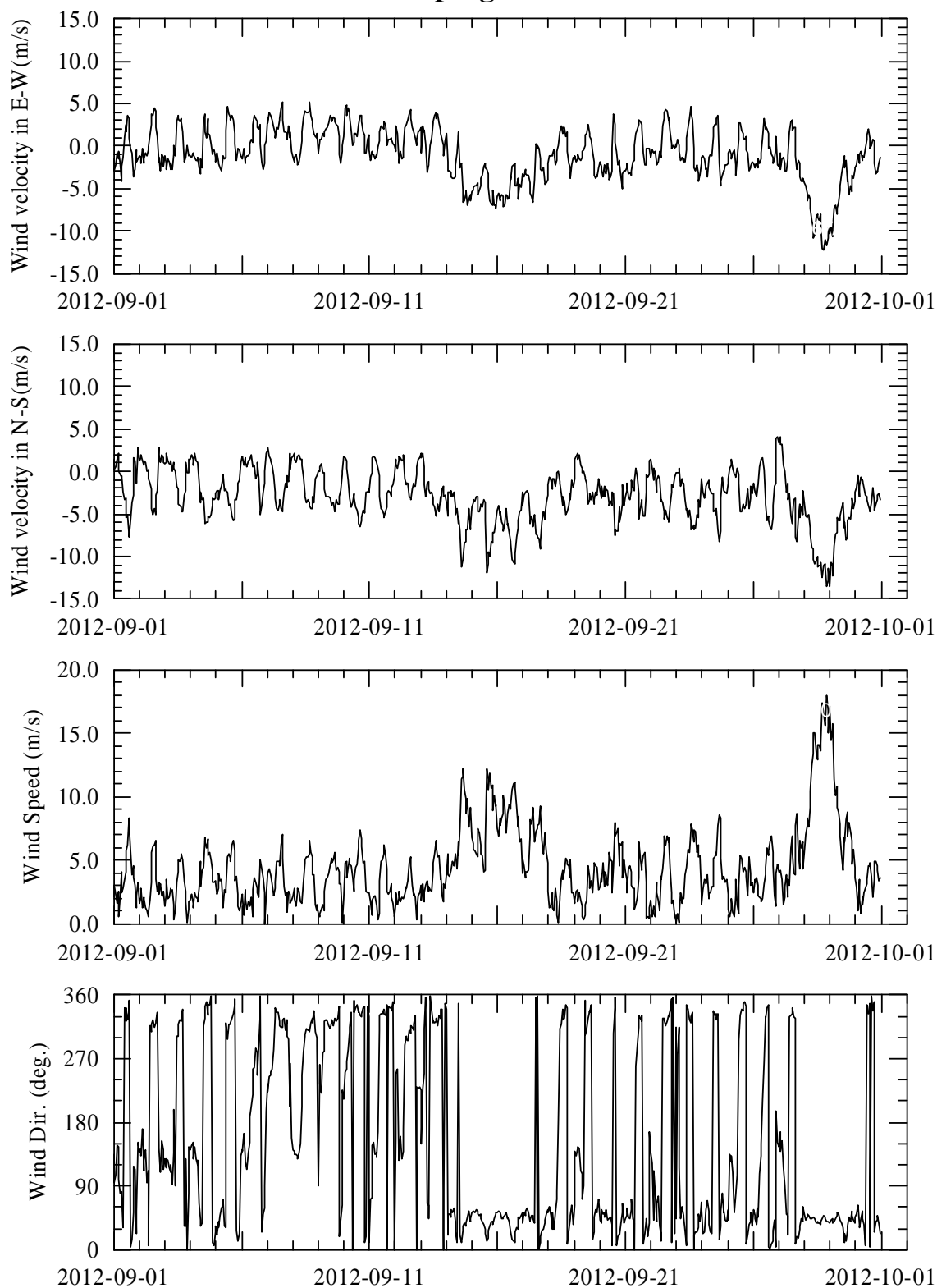
附圖 5.1 (續 3) 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Anping Harbor



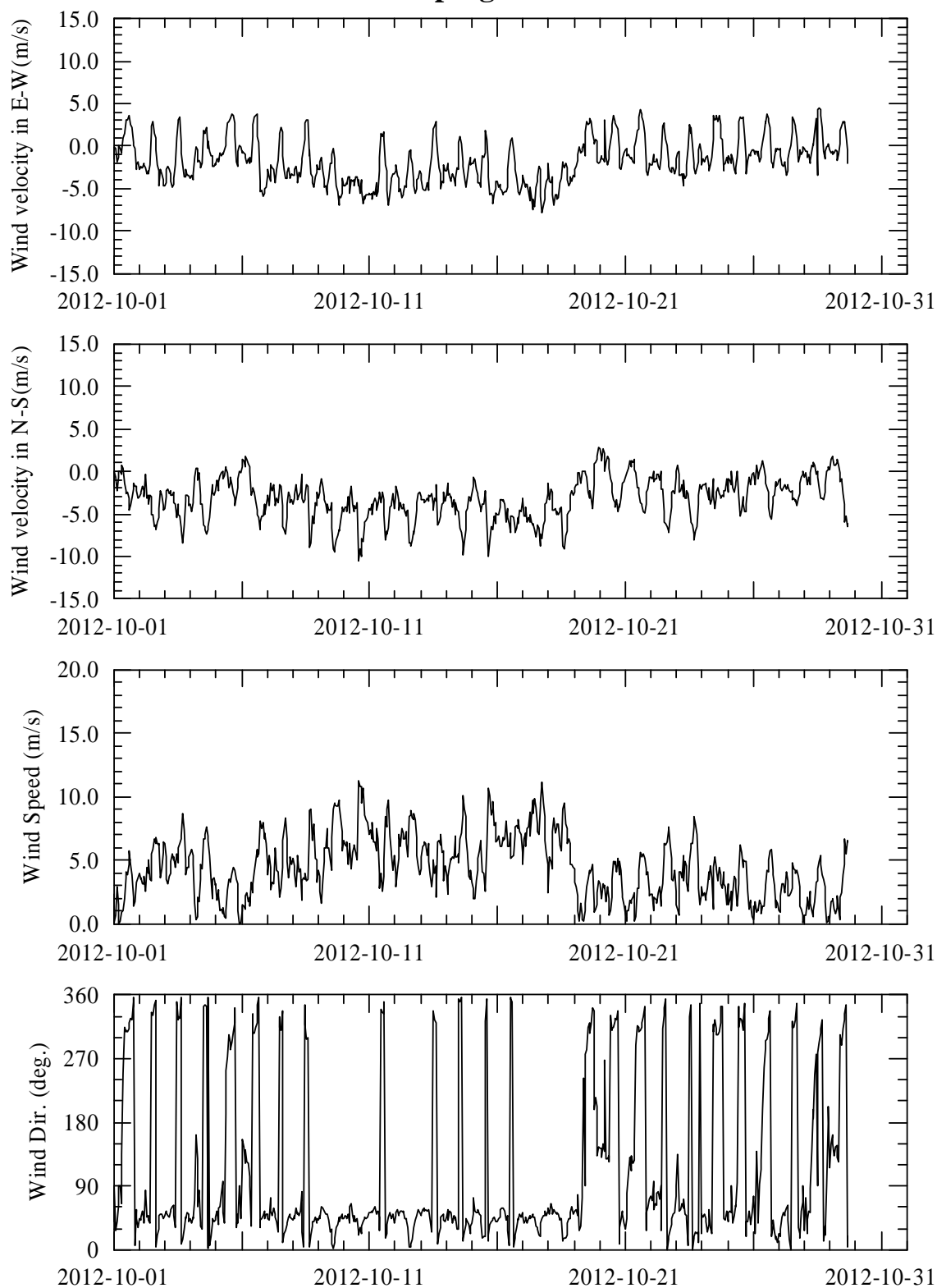
附圖 5.1 (續 4) 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Anping Harbor



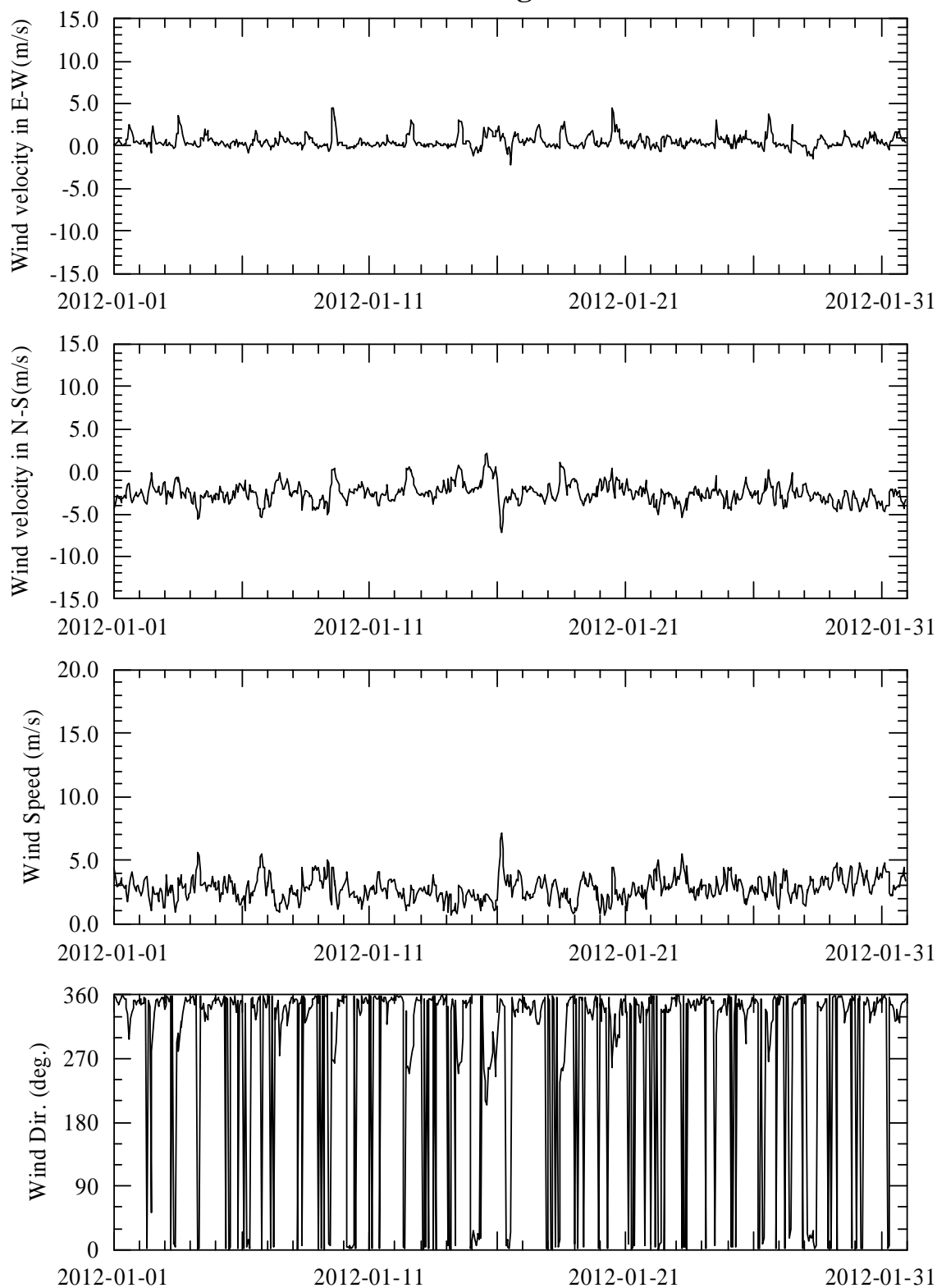
附圖 5.1 (續 5) 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Anping Harbor



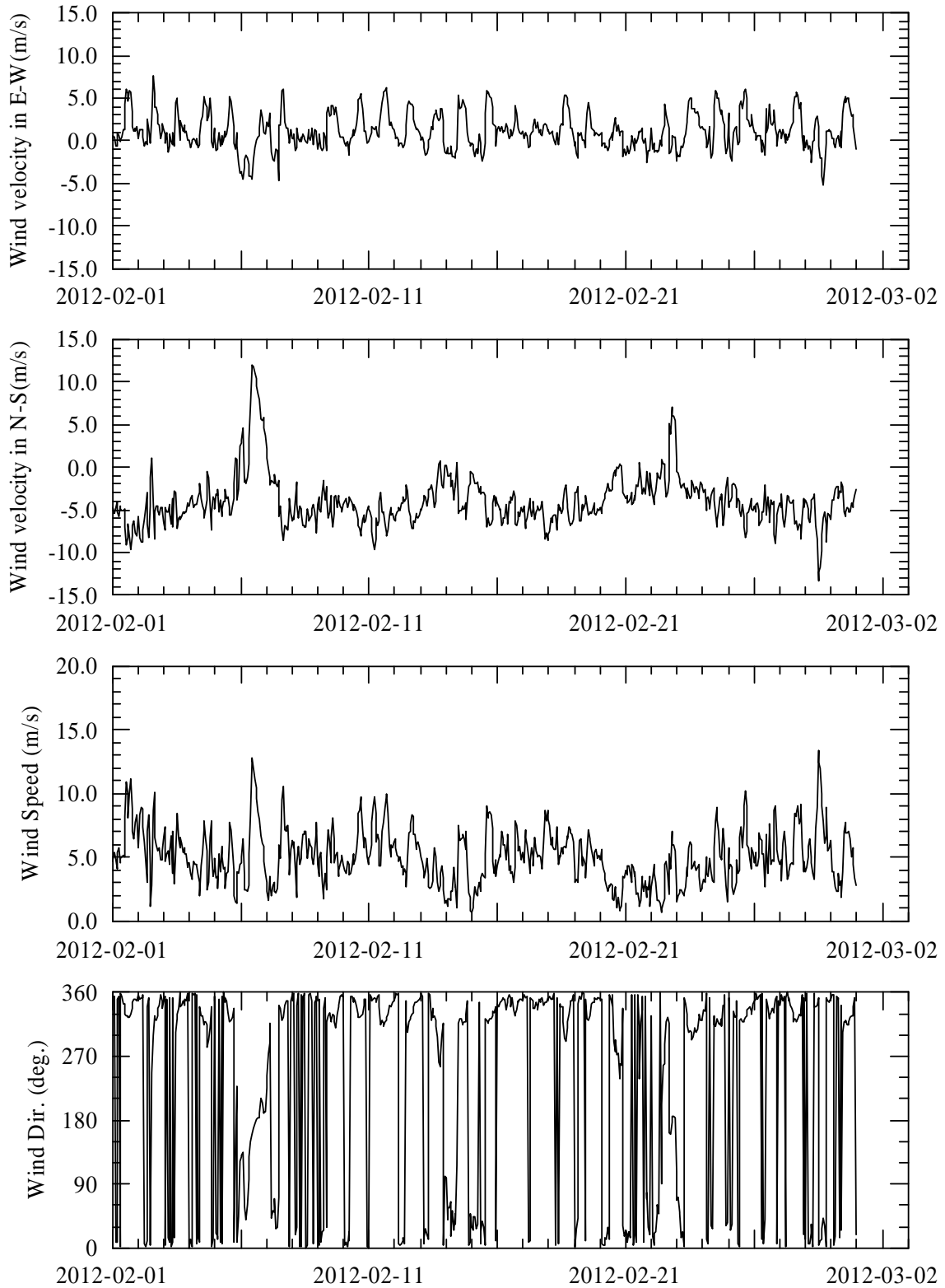
附圖 5.1 (續 6) 2012 年安平港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



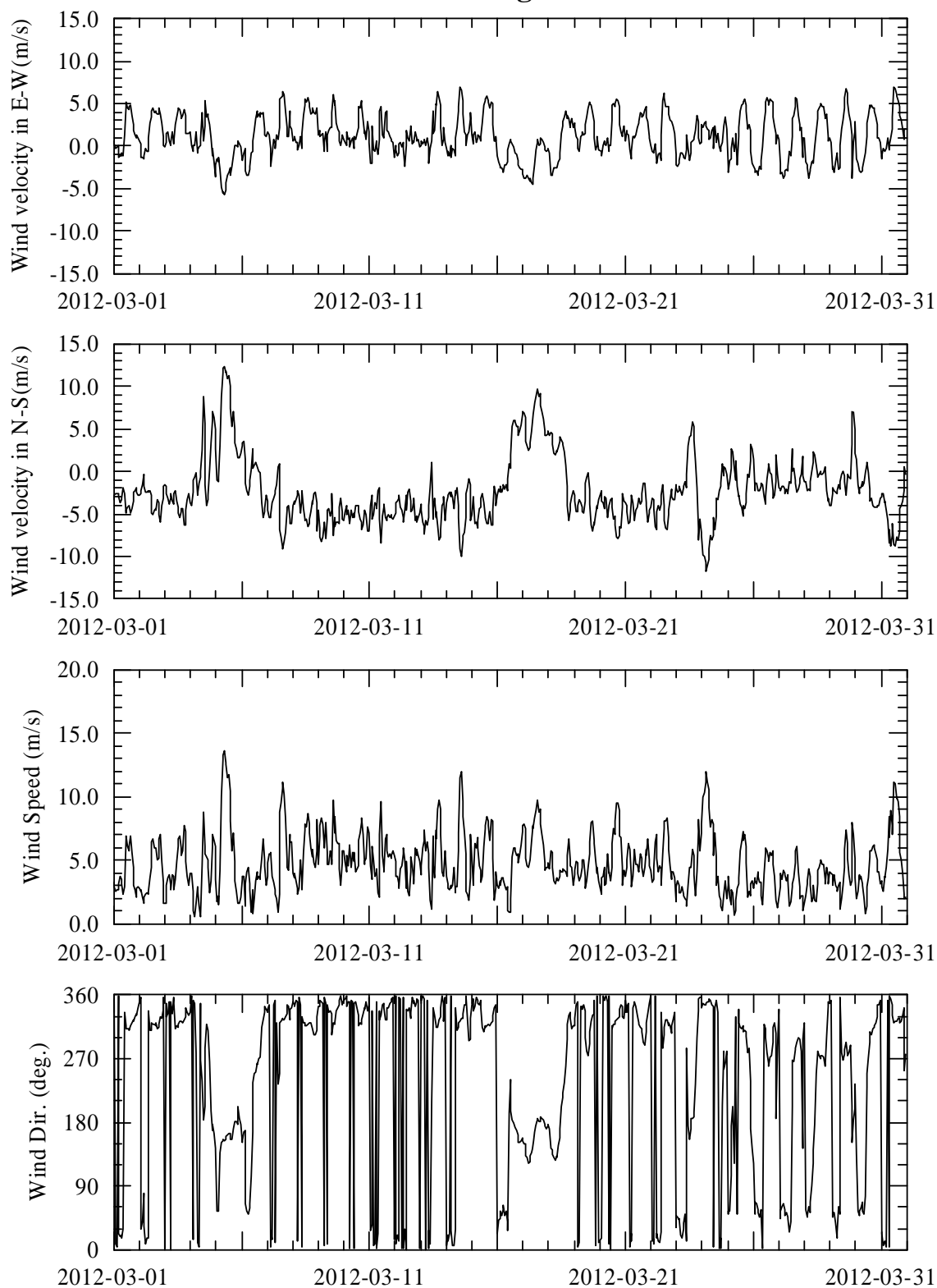
附圖 5.2 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



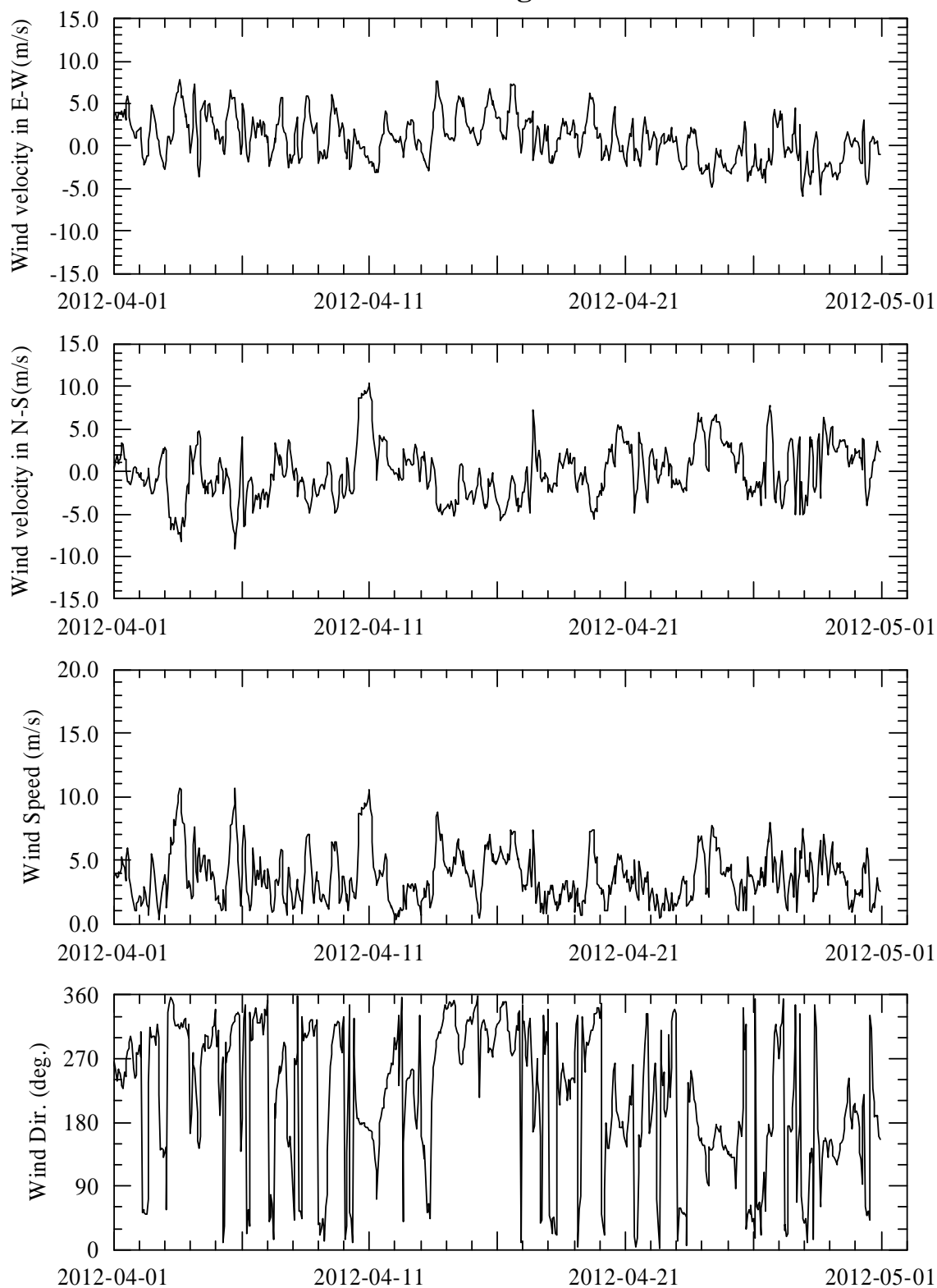
附圖 5.2 (續 1) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



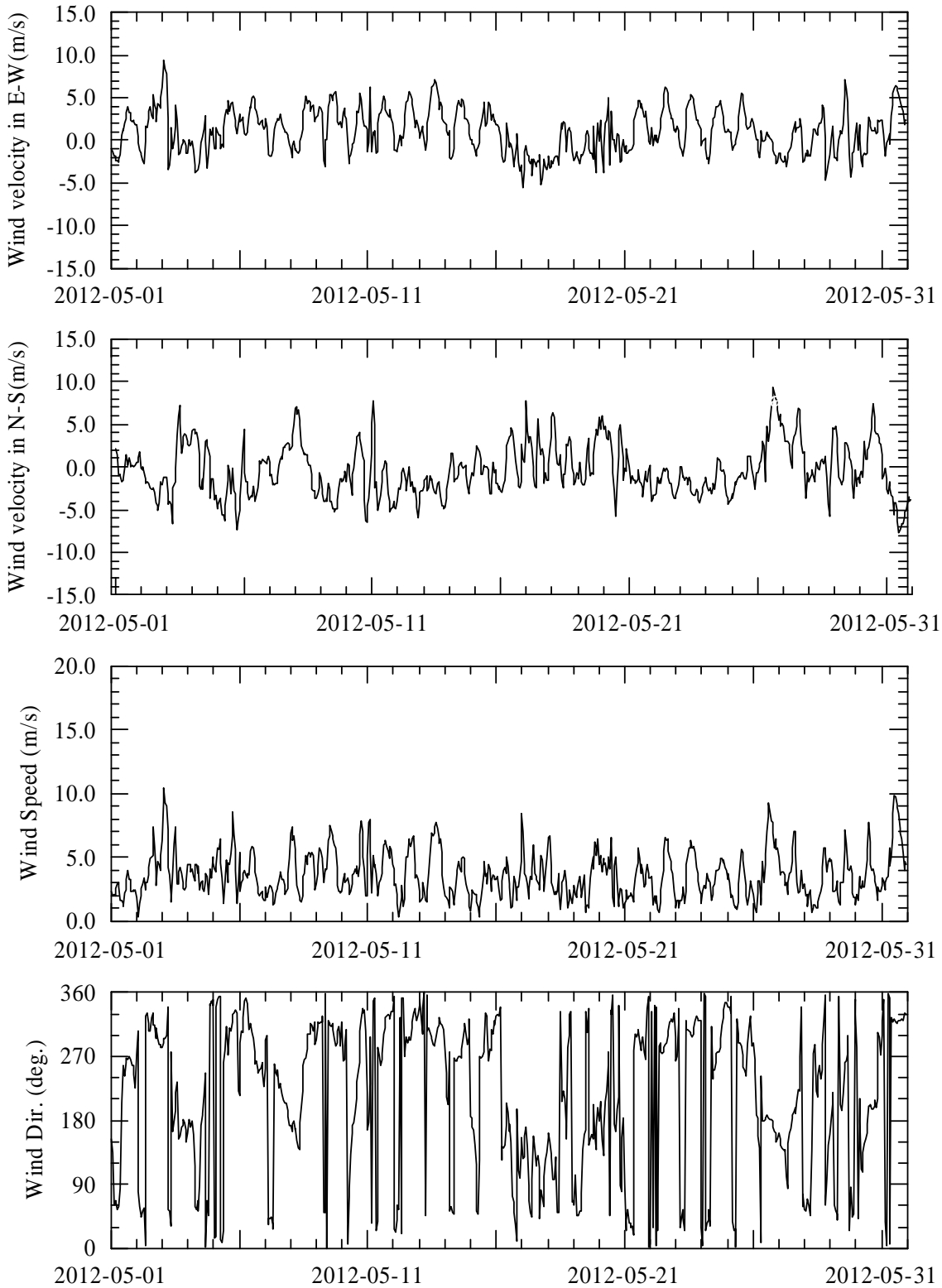
附圖 5.2 (續 2) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



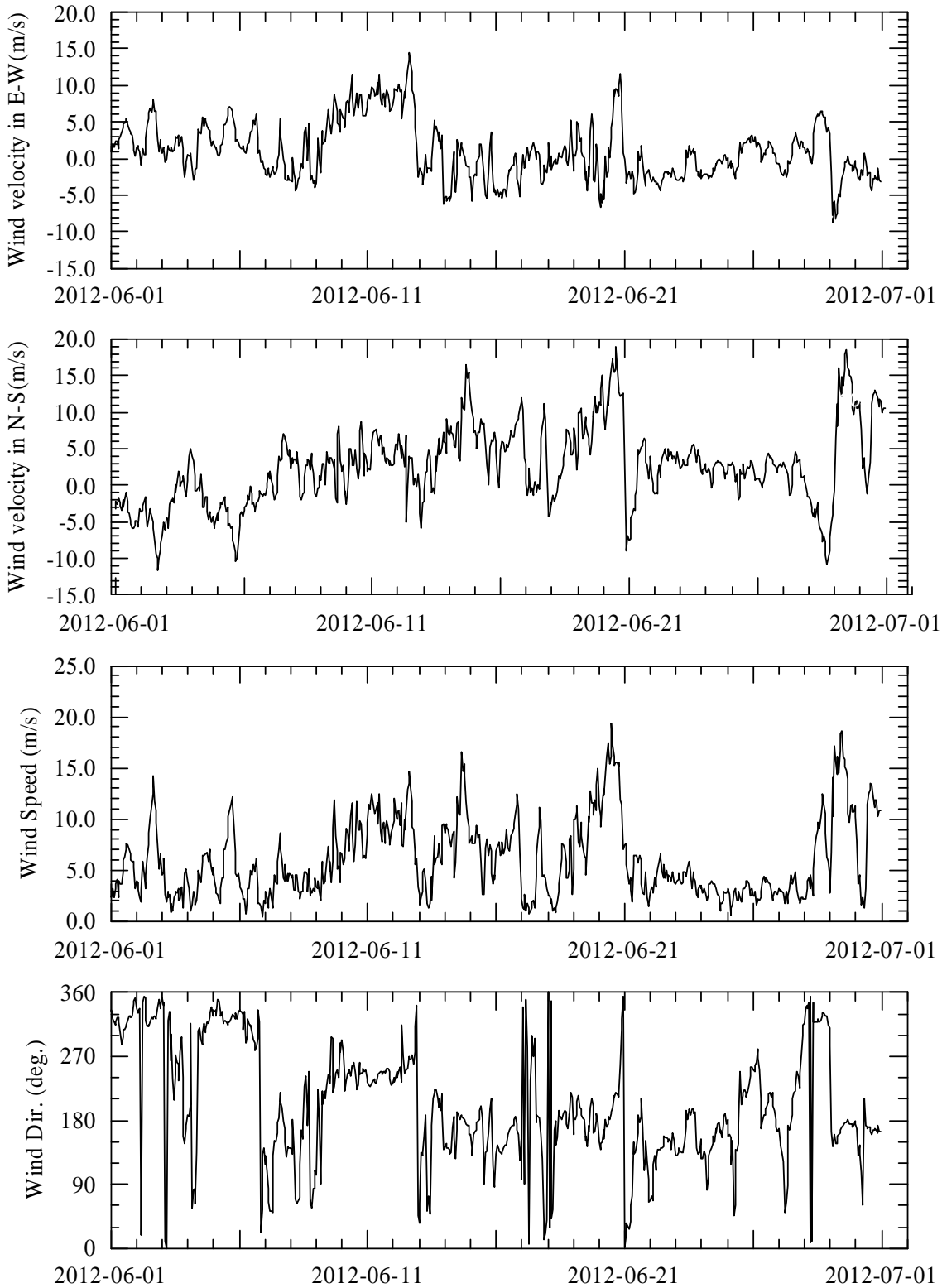
附圖 5.2 (續 3) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



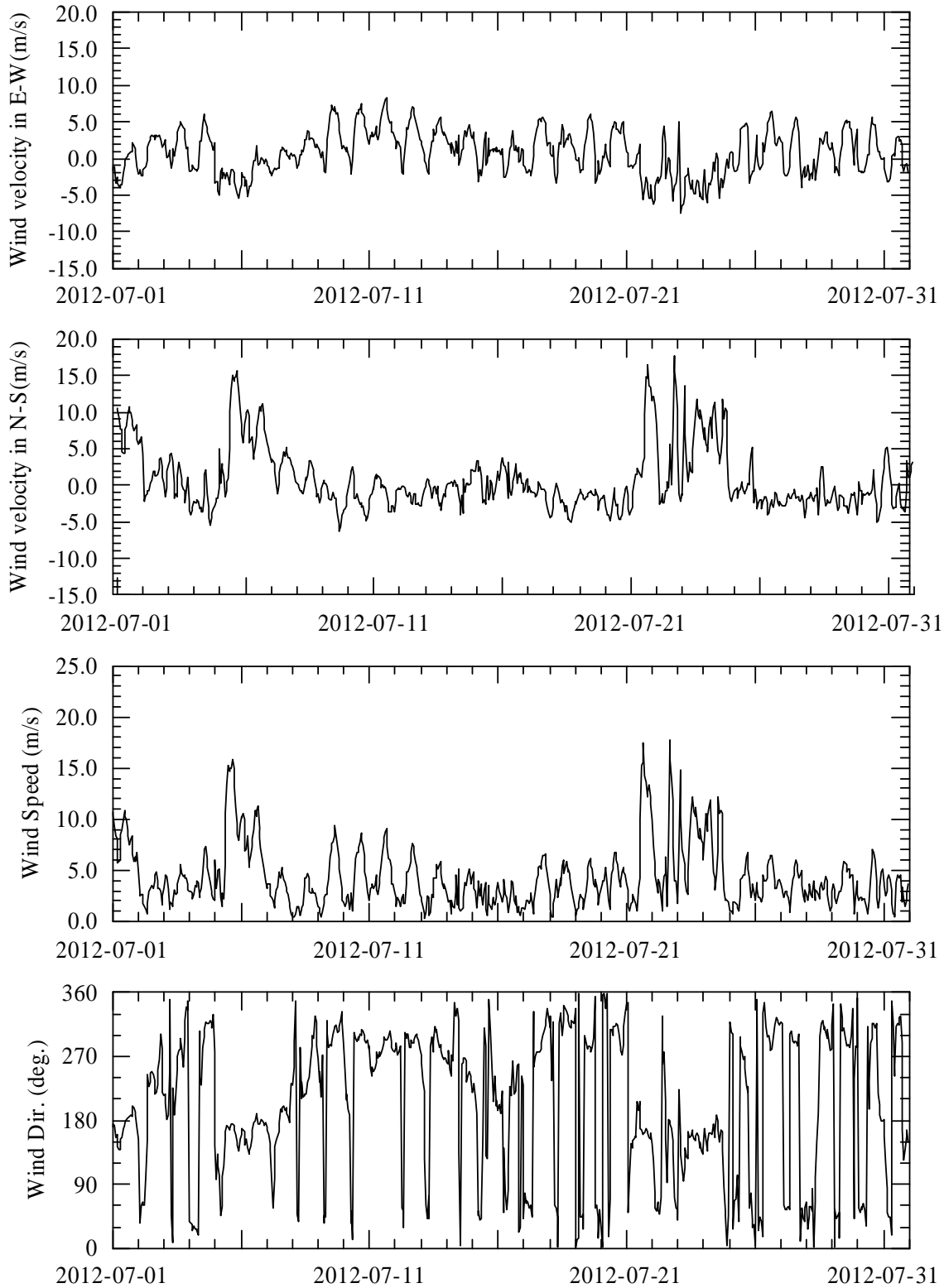
附圖 5.2 (續 4) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsiung Harbor



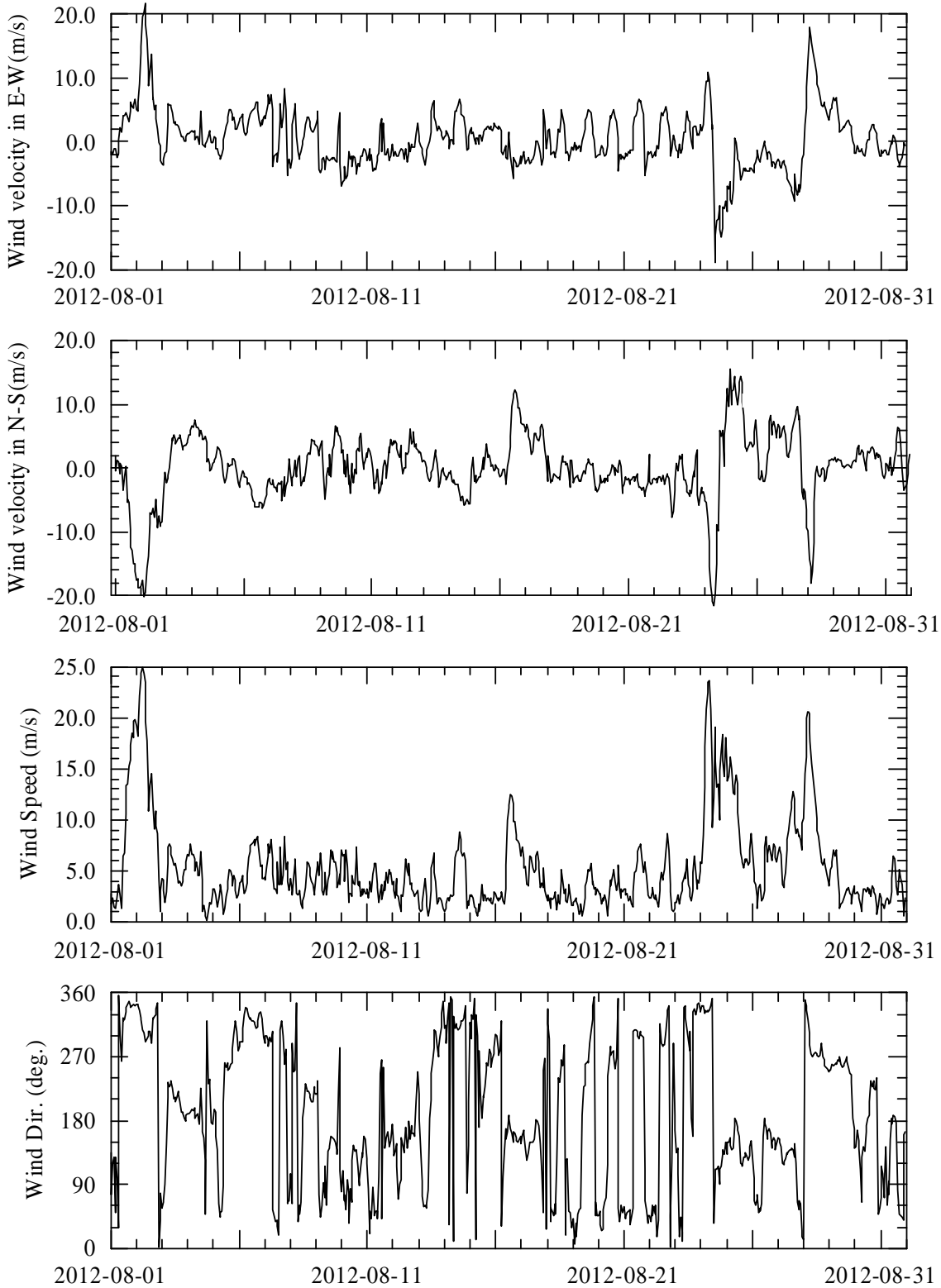
附圖 5.2 (續 5) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsiung Harbor



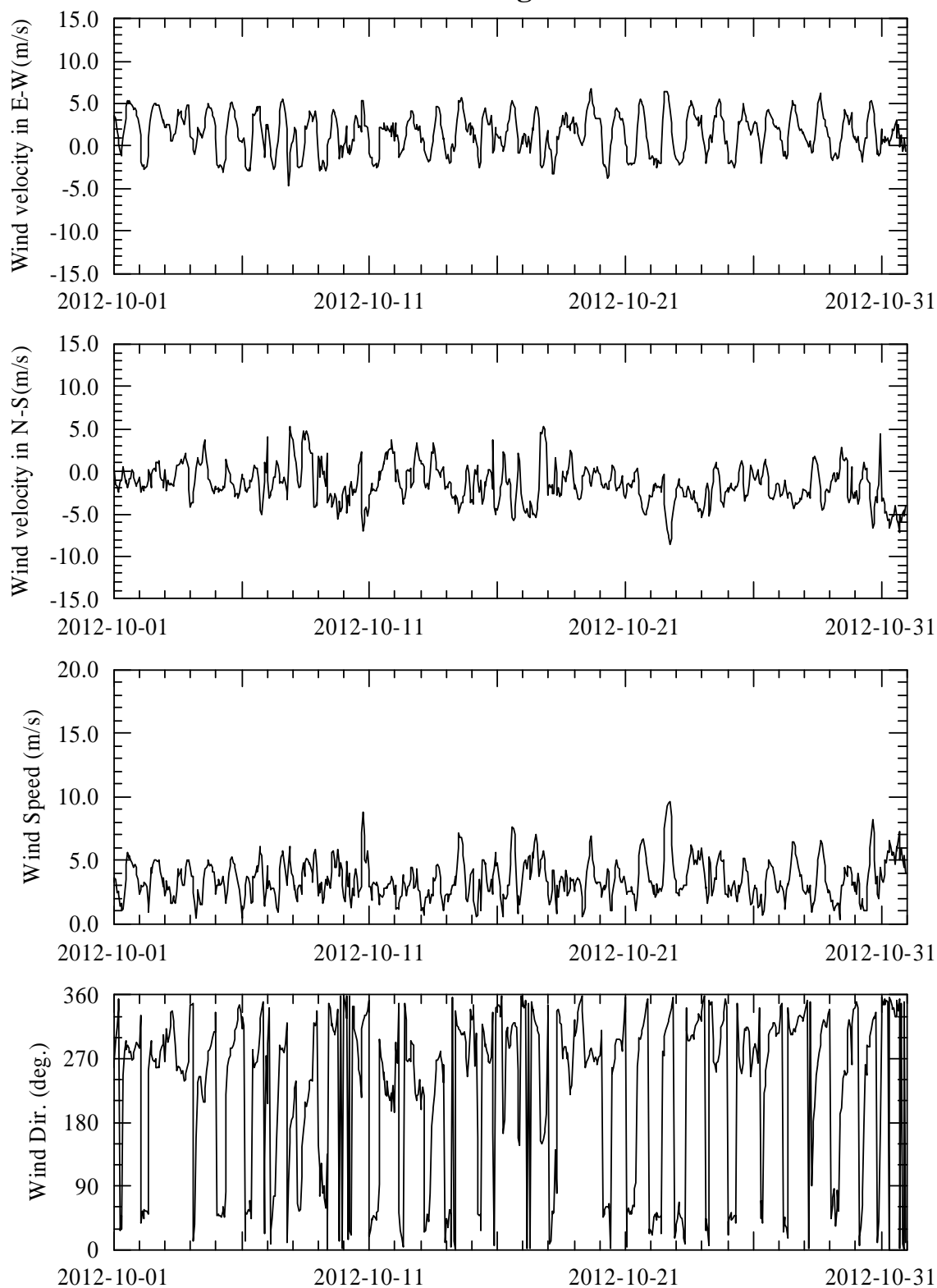
附圖 5.2 (續 6) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

Kaohsung Harbor



附圖 5.2 (續 7) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

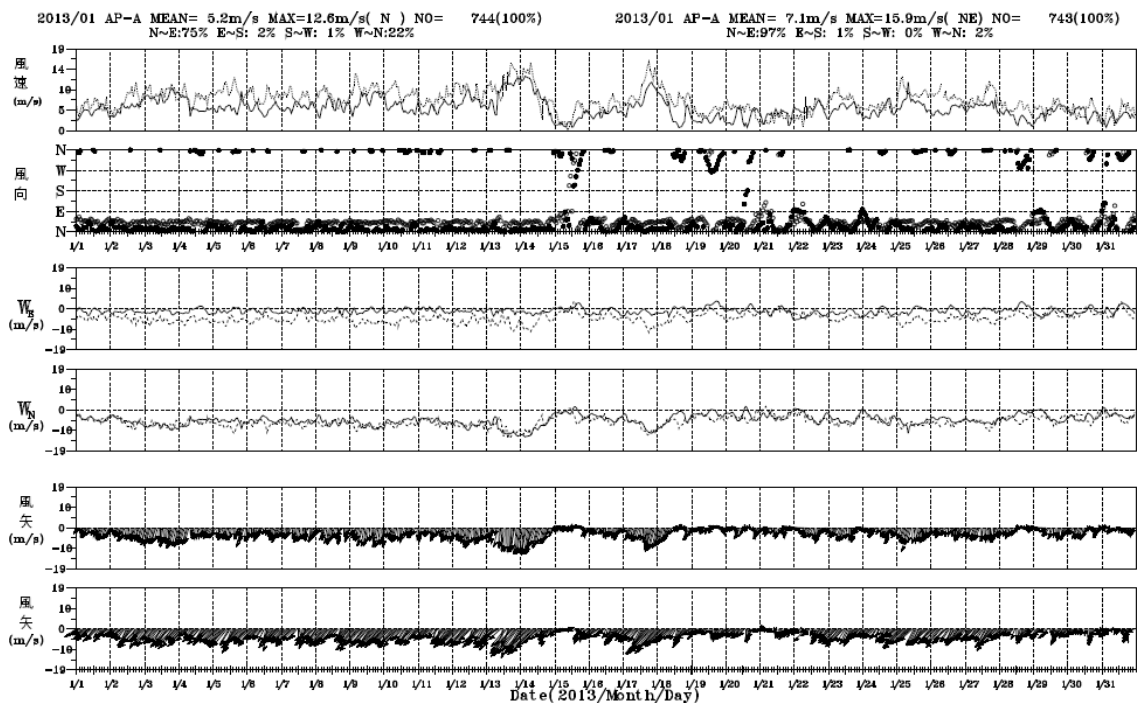
Kaohsung Harbor



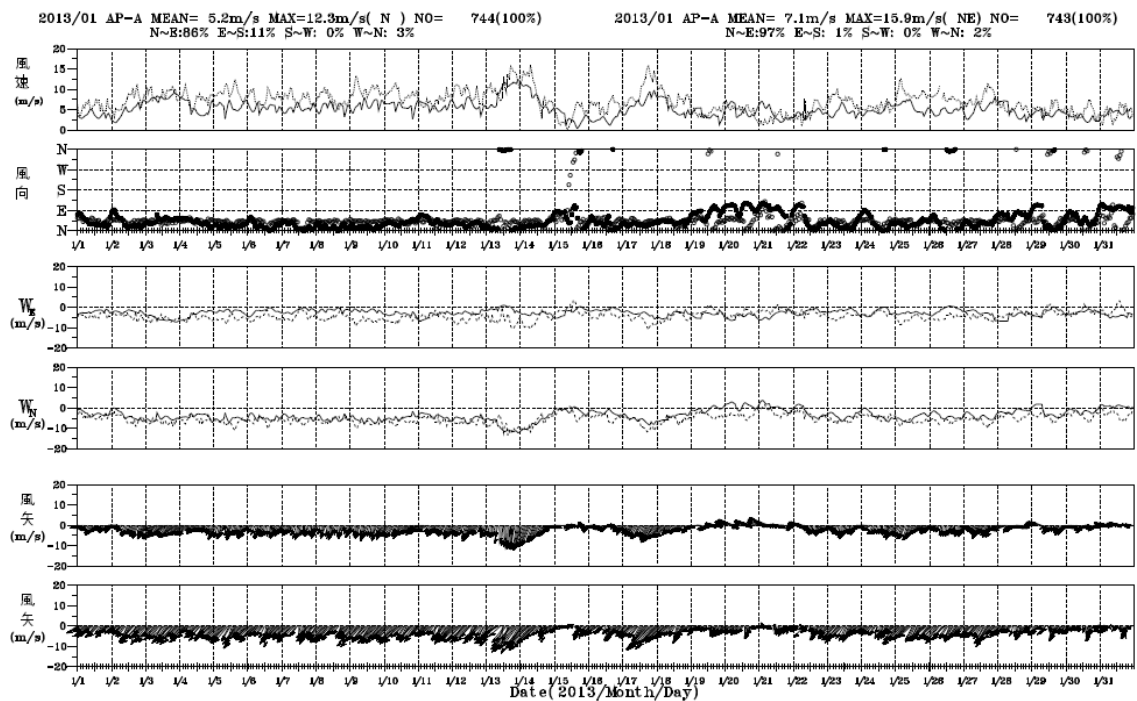
附圖 5.2 (續 8) 2012 年高雄港風速分量(E-W 及 N-S 向)、風速大小及風向觀測資料時序列圖

附錄六

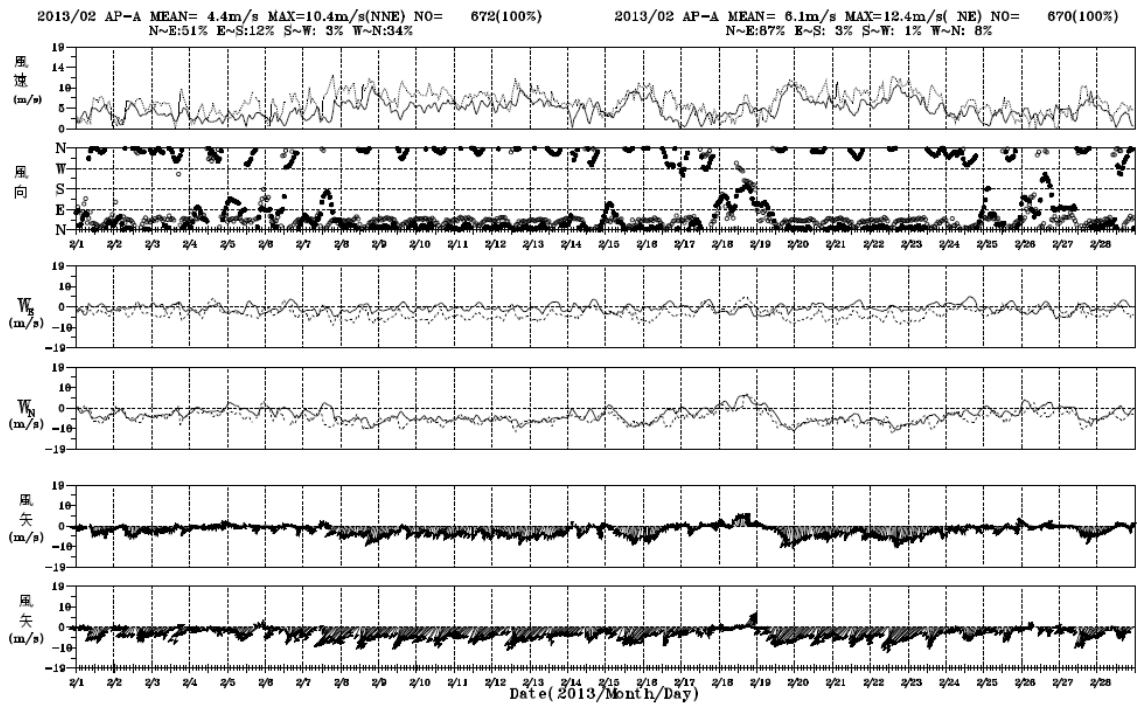
2013 年安平港預報風場與觀測比較圖



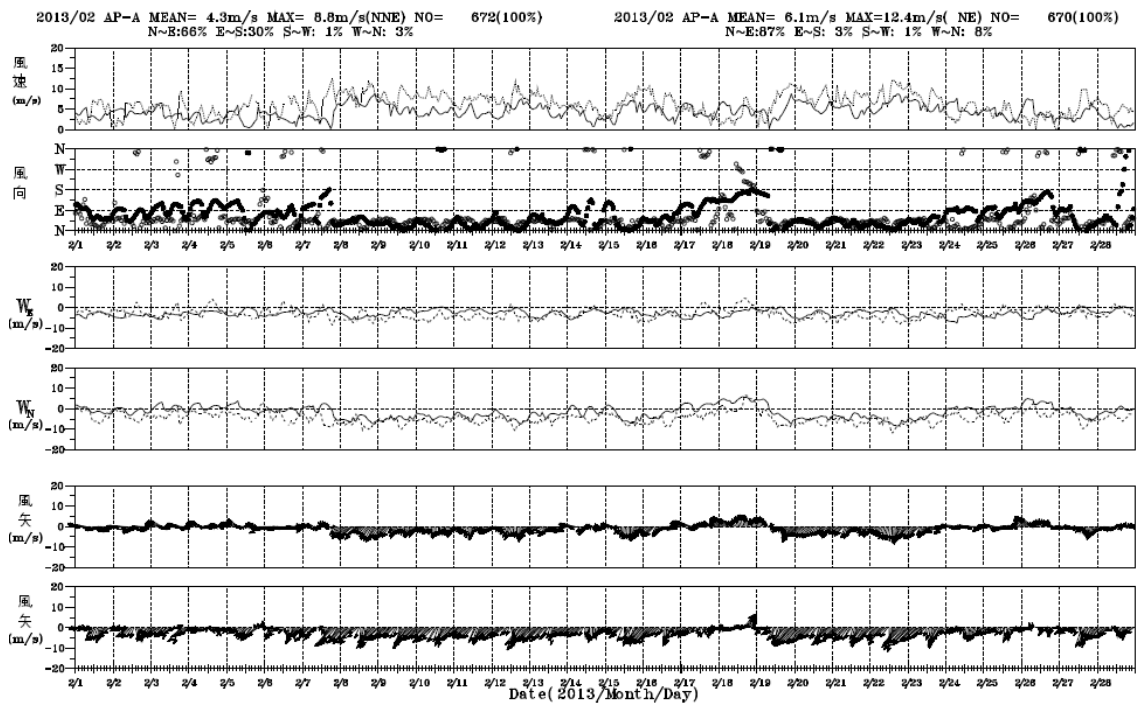
附圖 6.1 2013 年 1 月安平港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



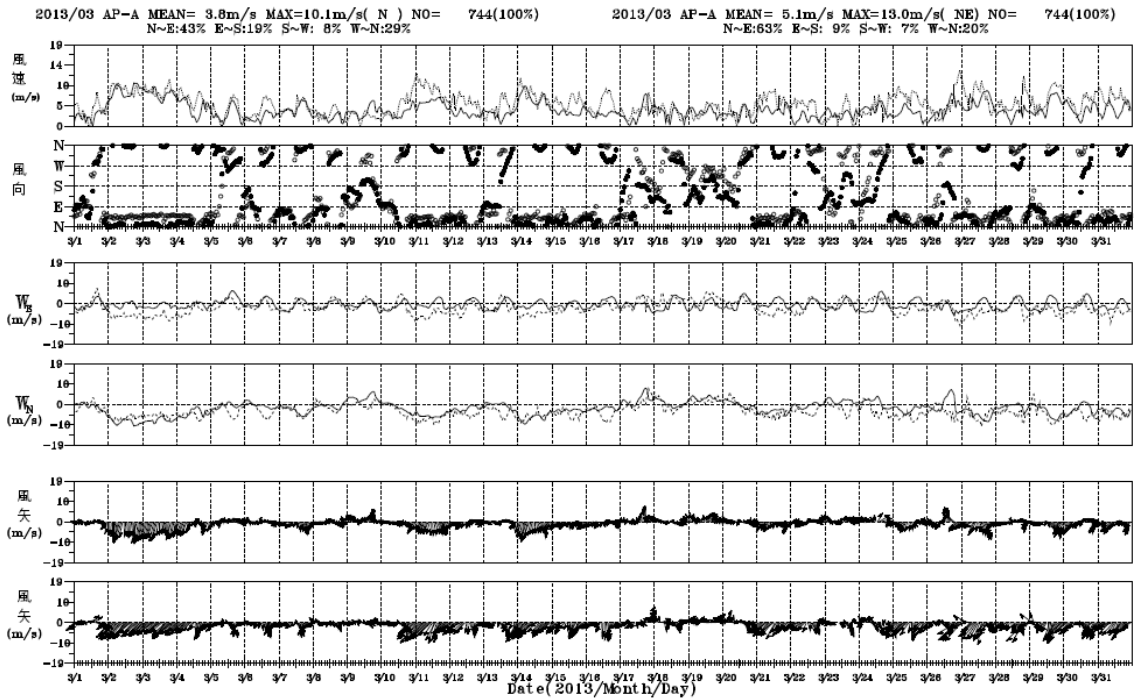
附圖 6.2 2013 年 1 月安平港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



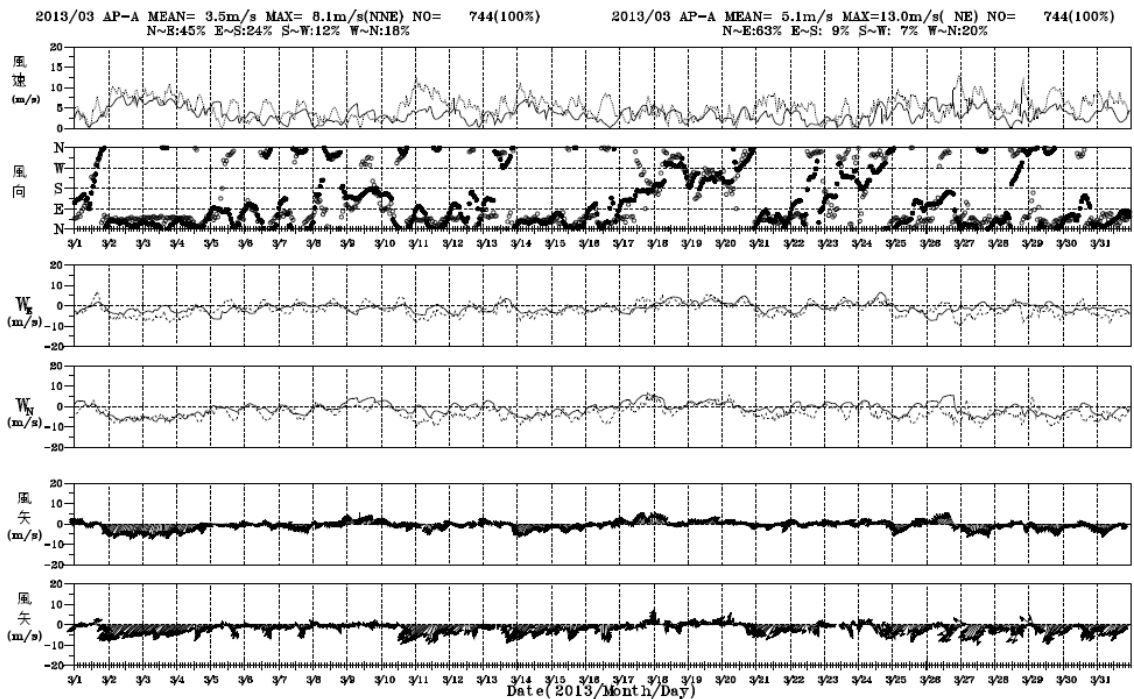
附圖 6.3 2013 年 2 月安平港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



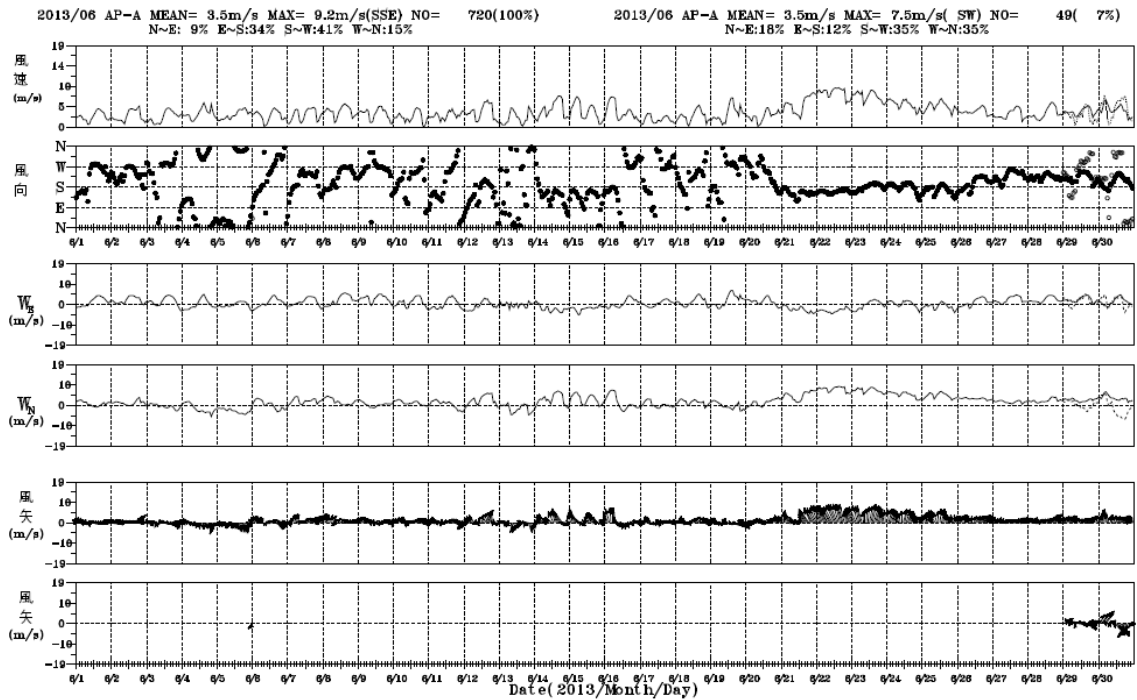
附圖 6.4 2013 年 2 月安平港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



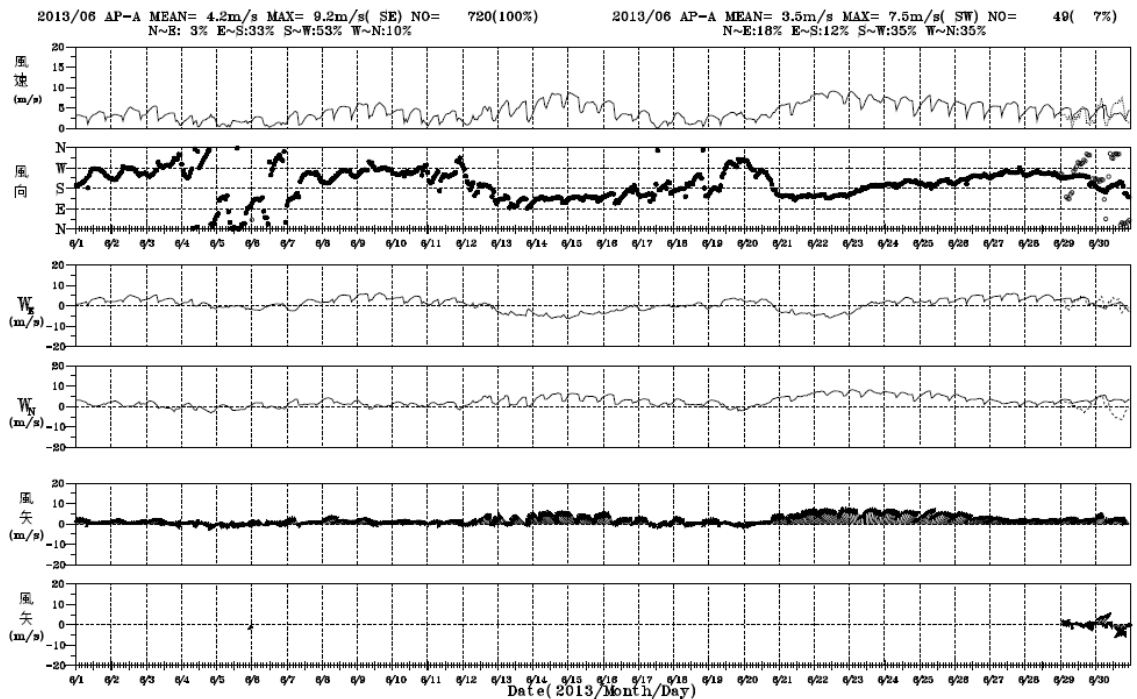
附圖 6.5 2013 年 3 月安平港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



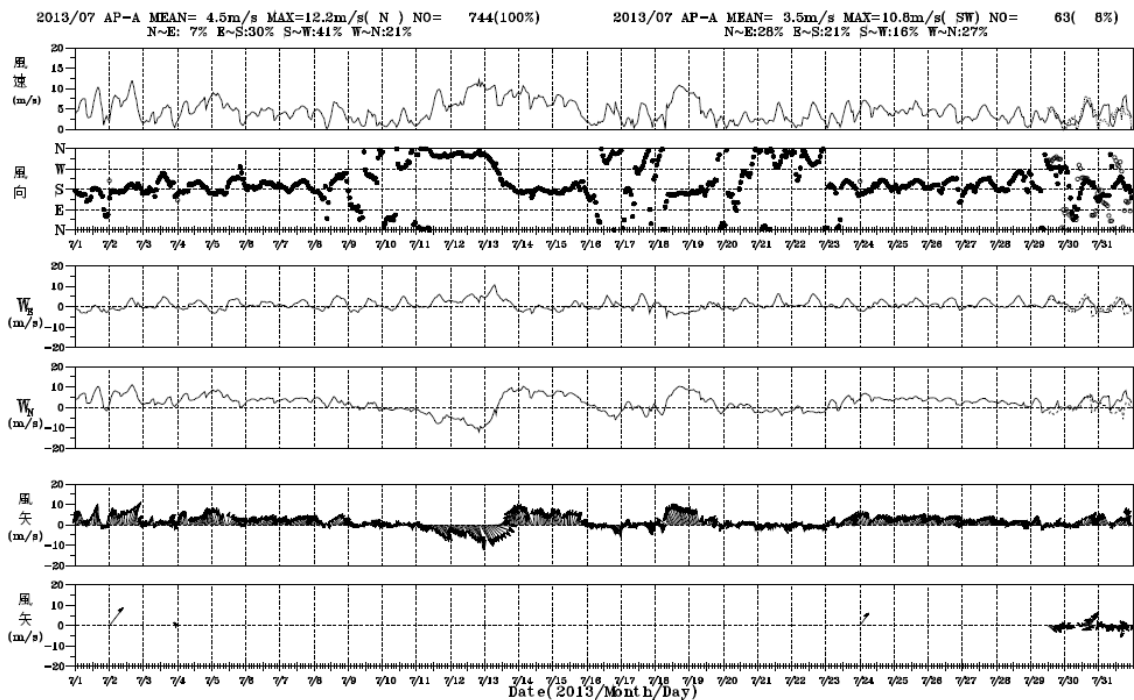
附圖 6.6 2013 年 3 月安平港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



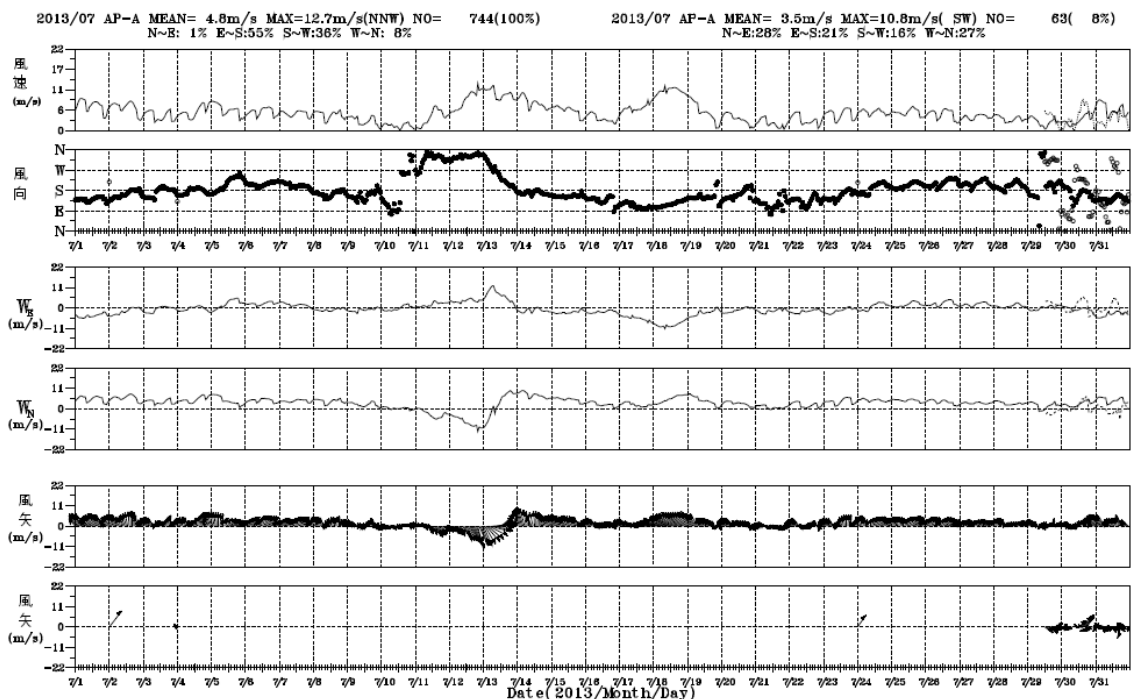
附圖 6.7 2013 年 6 月安平港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



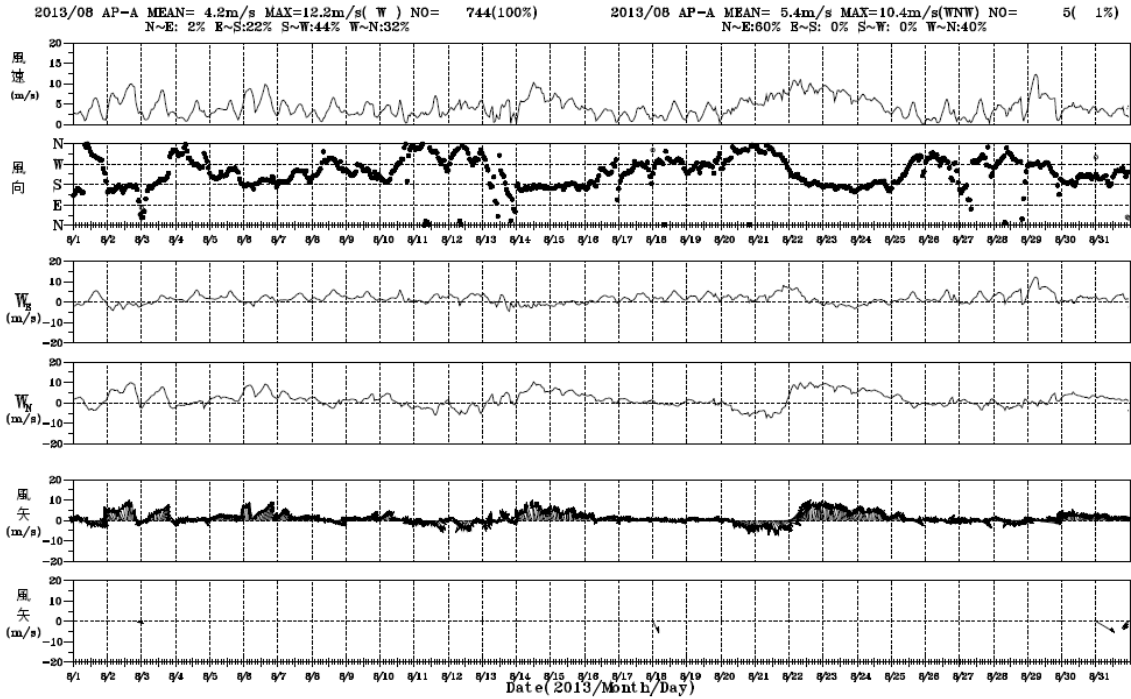
附圖 6.8 2013 年 6 月安平港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



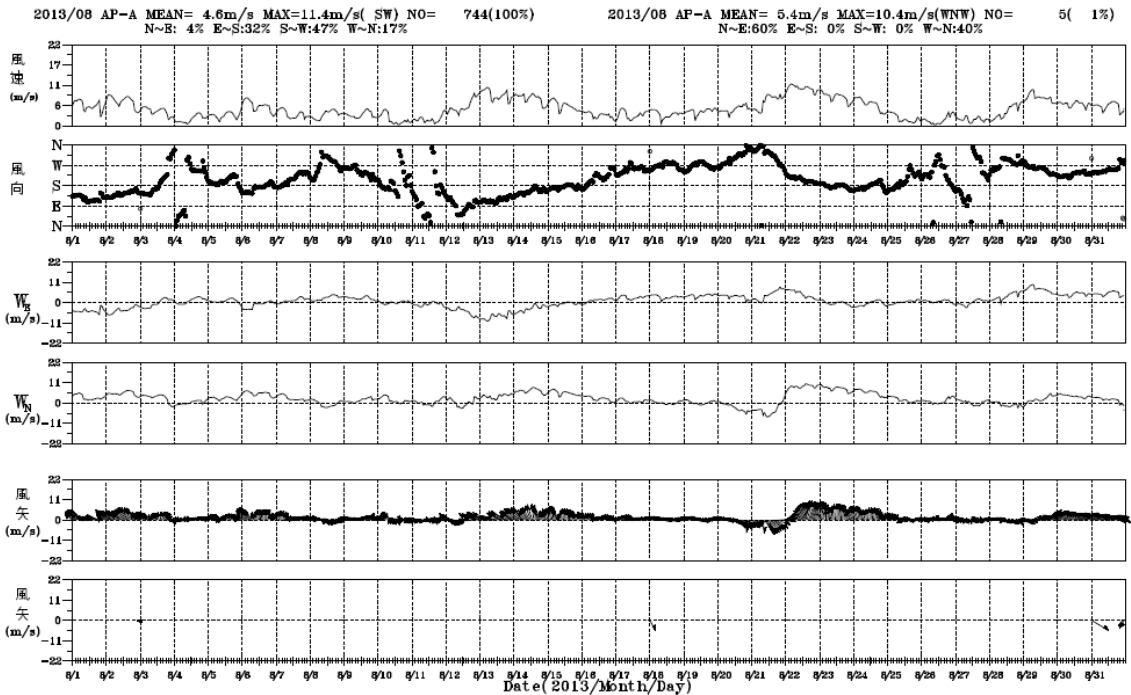
附圖 6.9 2013 年 7 月安平港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



附圖 6.10 2013 年 7 月安平港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



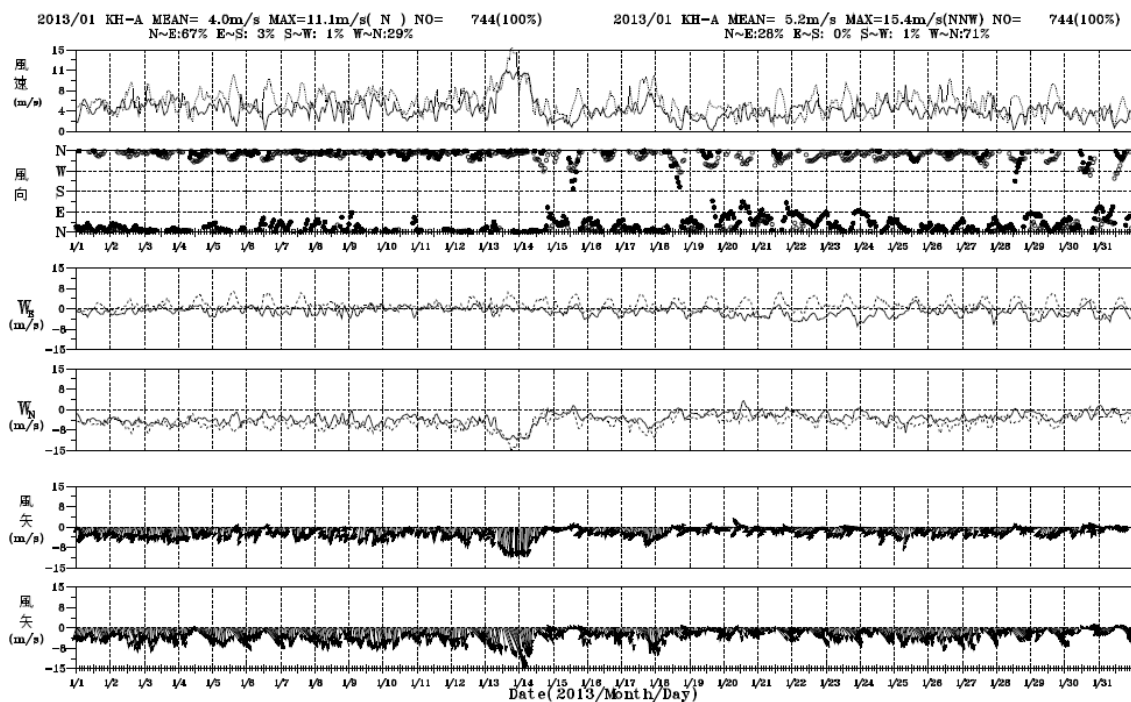
附圖 6.11 2013 年 8 月安平港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



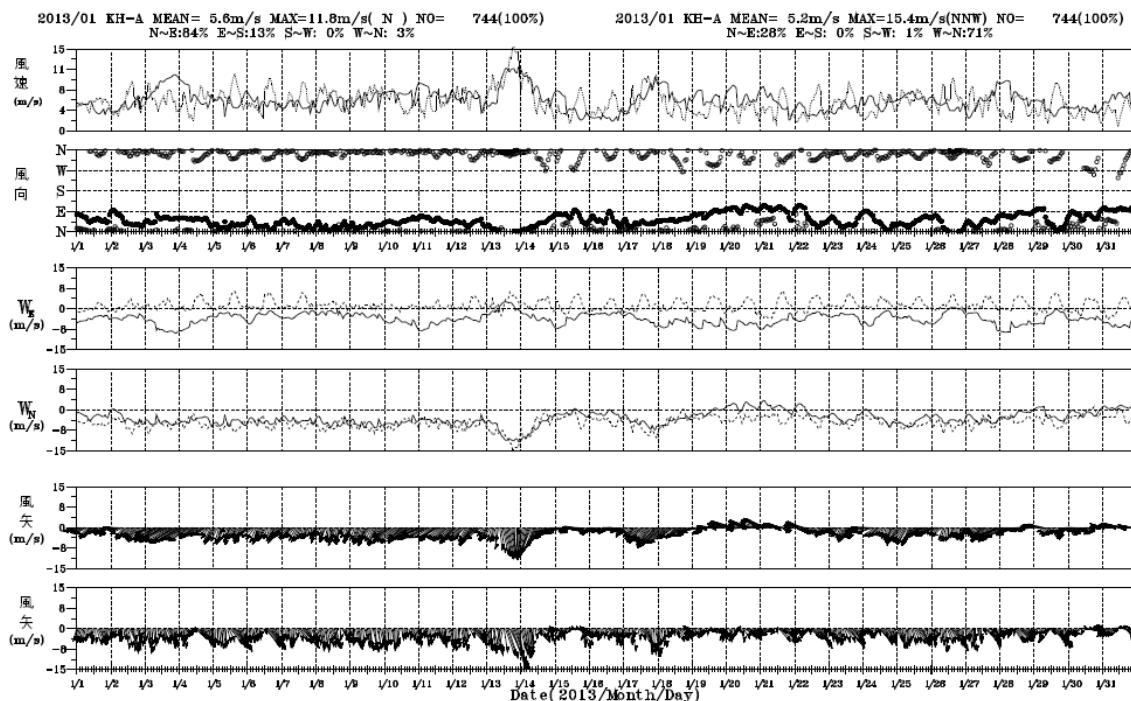
附圖 6.12 2013 年 8 月安平港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)

附錄七

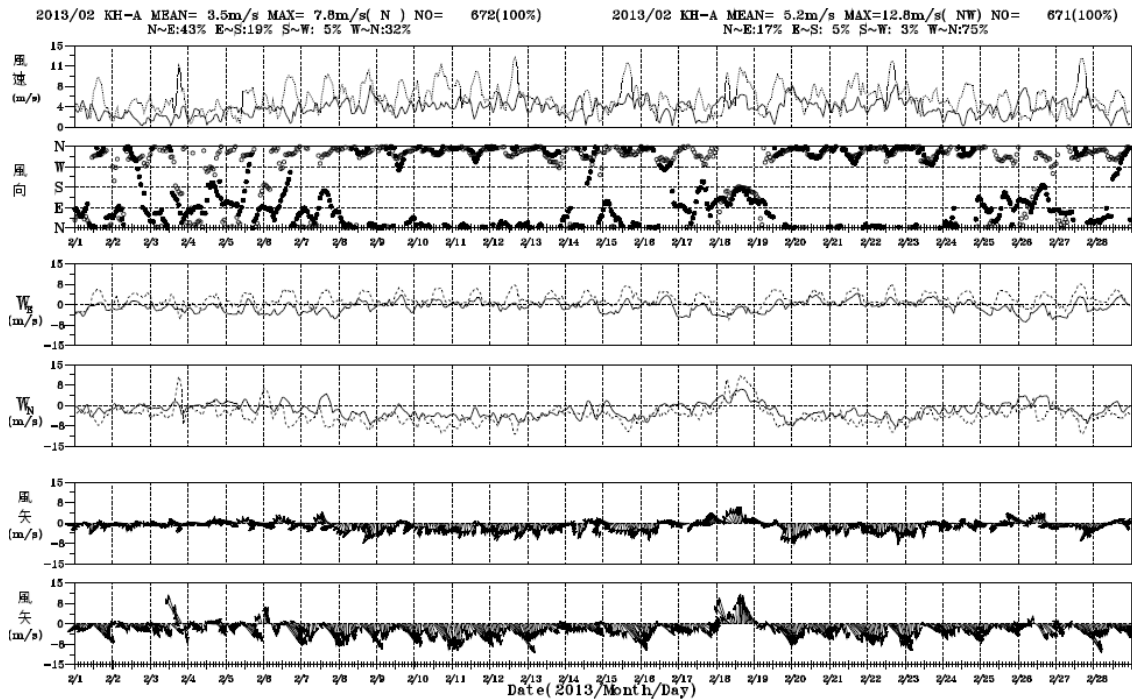
2013 年高雄港預報風場與觀測比較圖



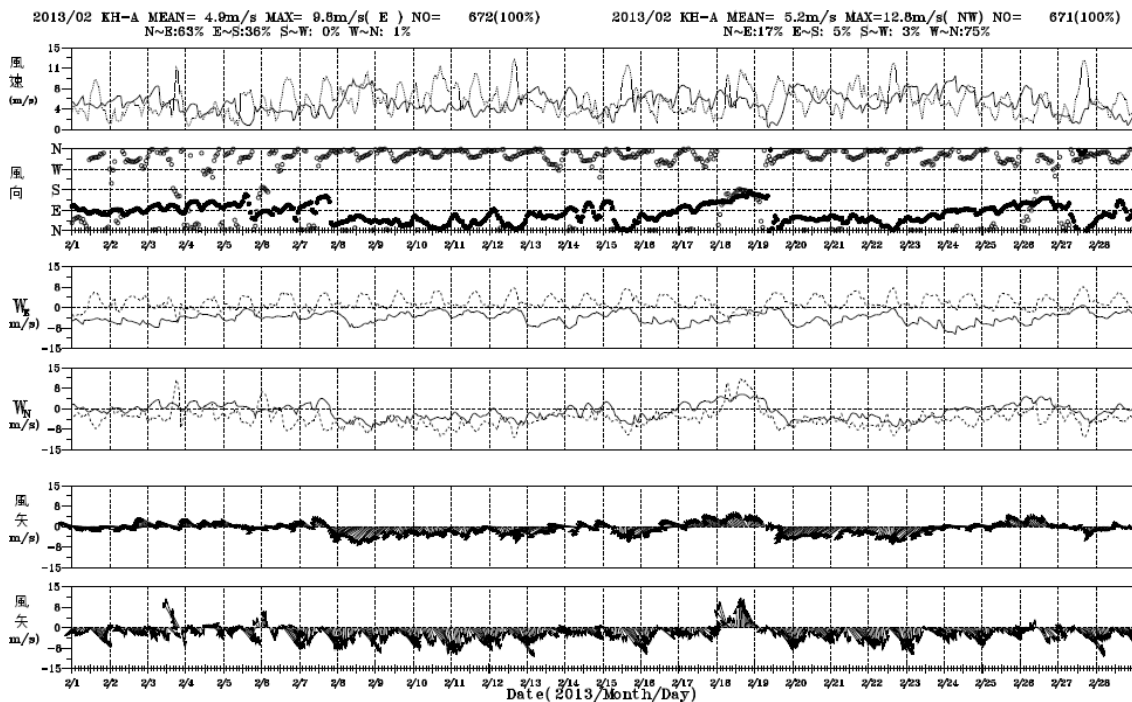
附圖 7.1 2013 年 1 月高雄港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



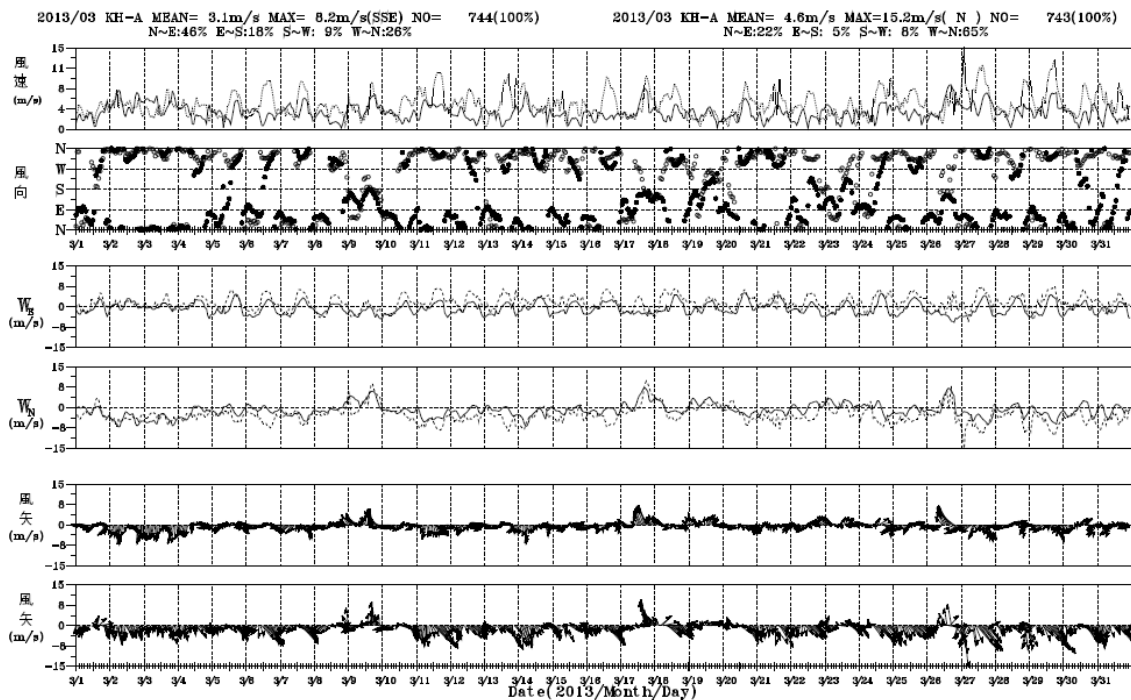
附圖 7.2 2013 年 1 月高雄港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



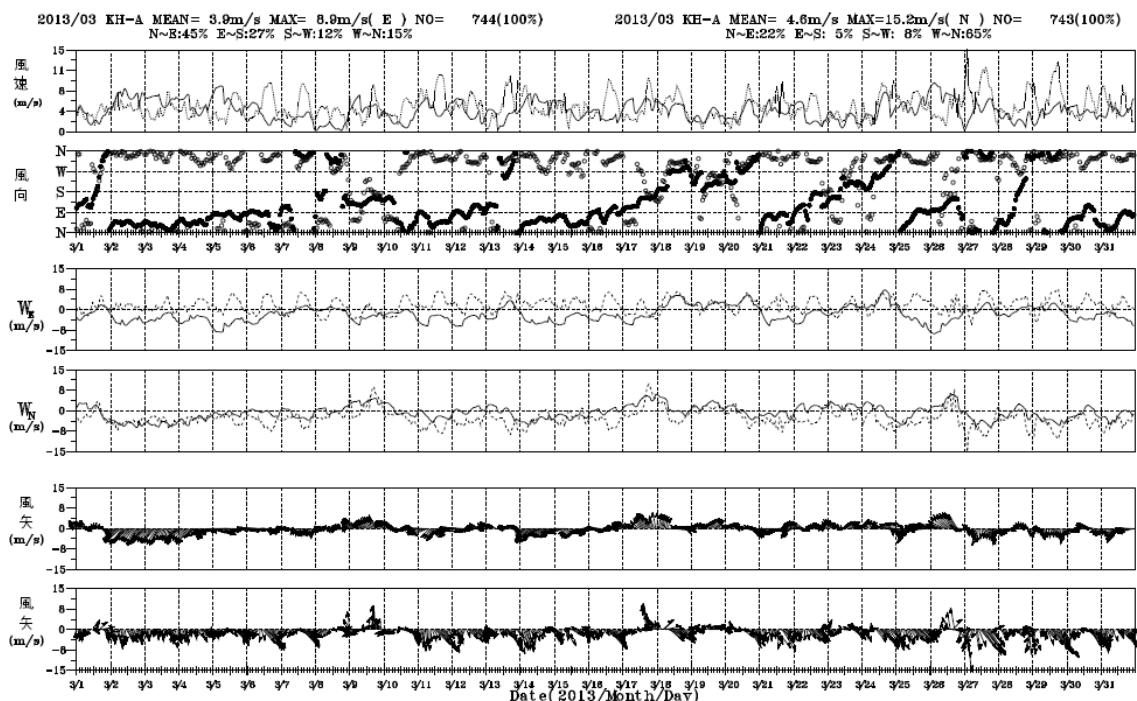
附圖 7.3 2013 年 2 月高雄港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



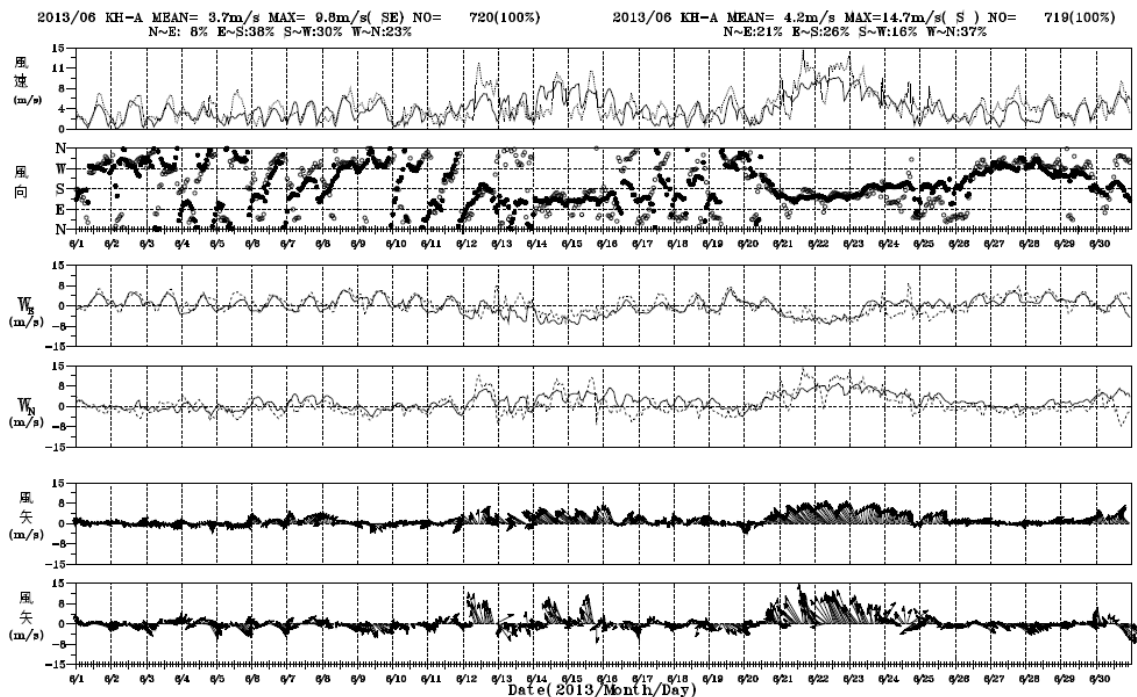
附圖 7.4 2013 年 2 月高雄港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



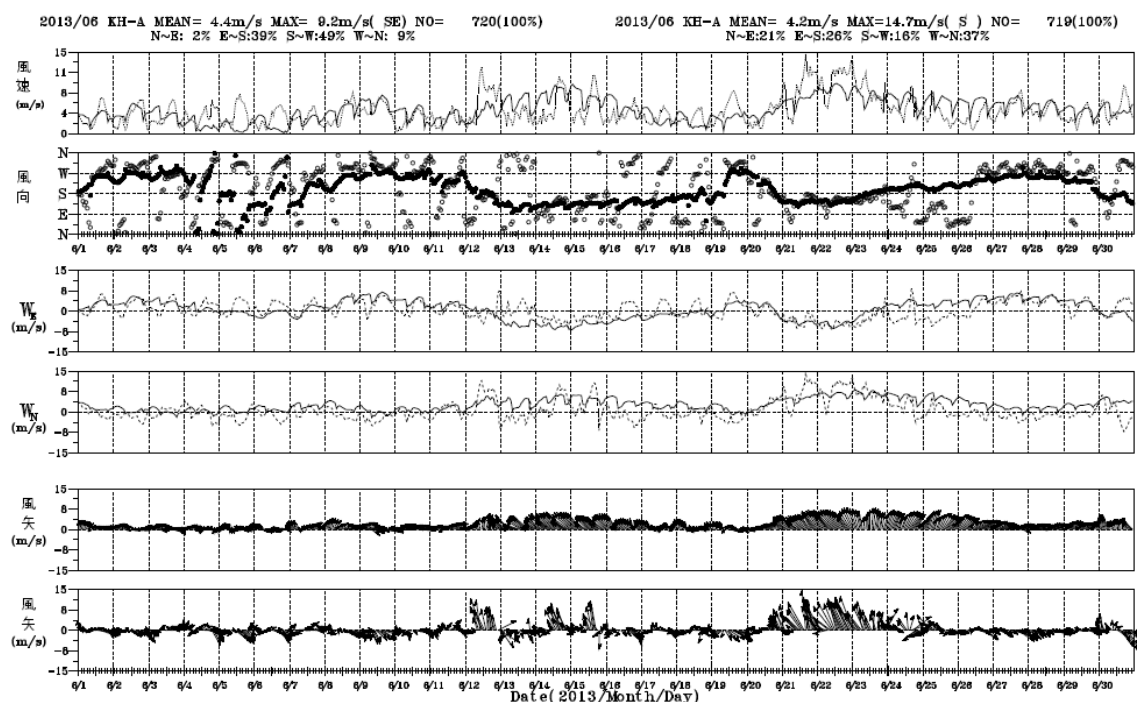
附圖 7.5 2013 年 3 月高雄港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



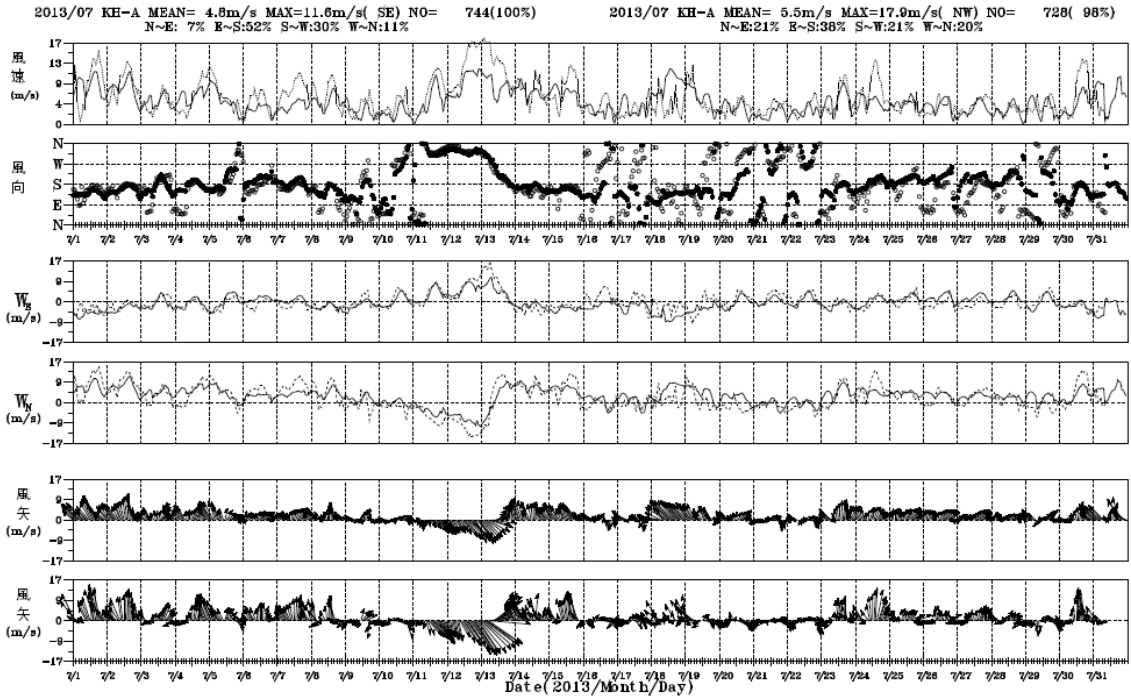
附圖 7.6 2013 年 3 月高雄港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



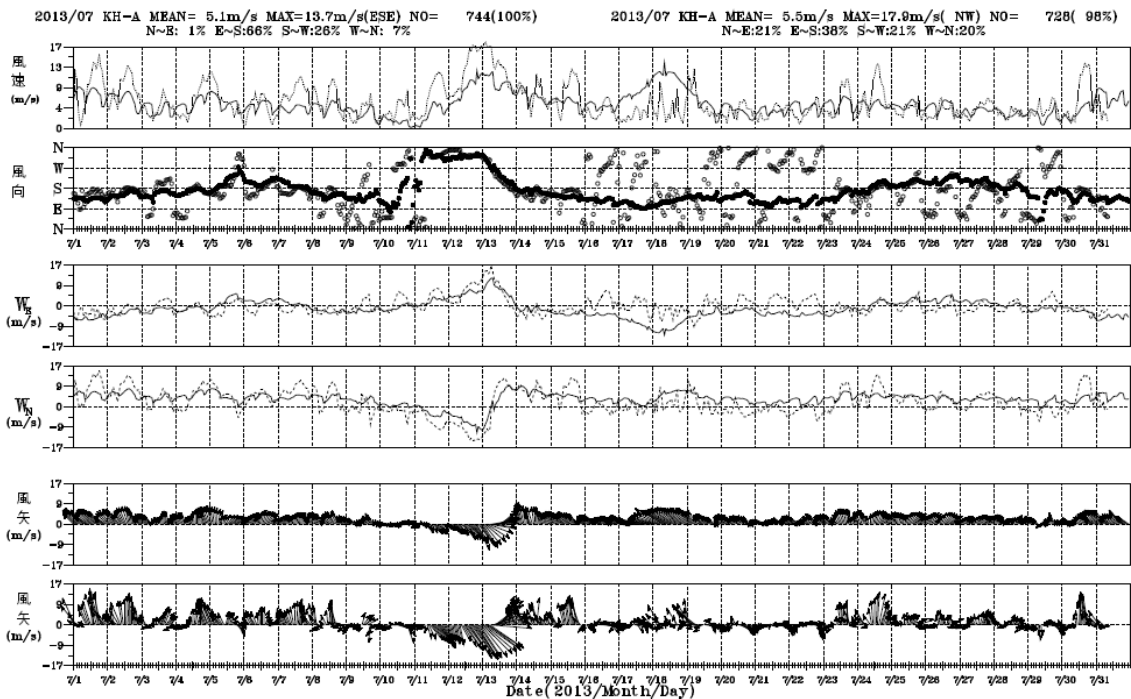
附圖 7.7 2013 年 6 月高雄港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



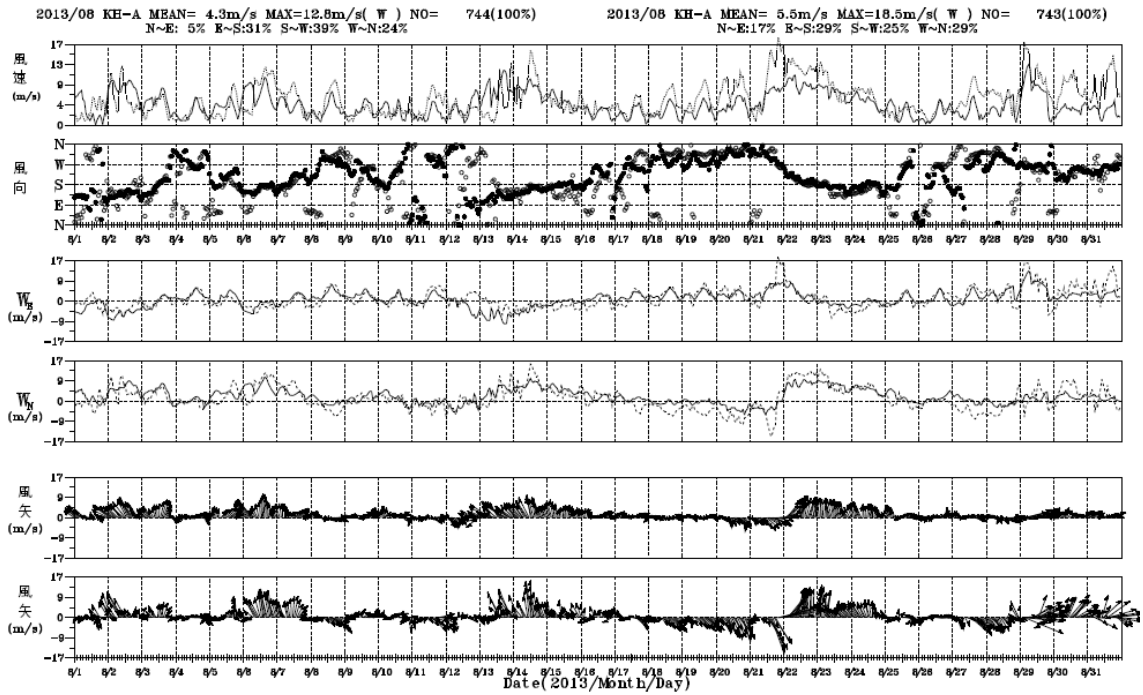
附圖 7.8 2013 年 6 月高雄港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



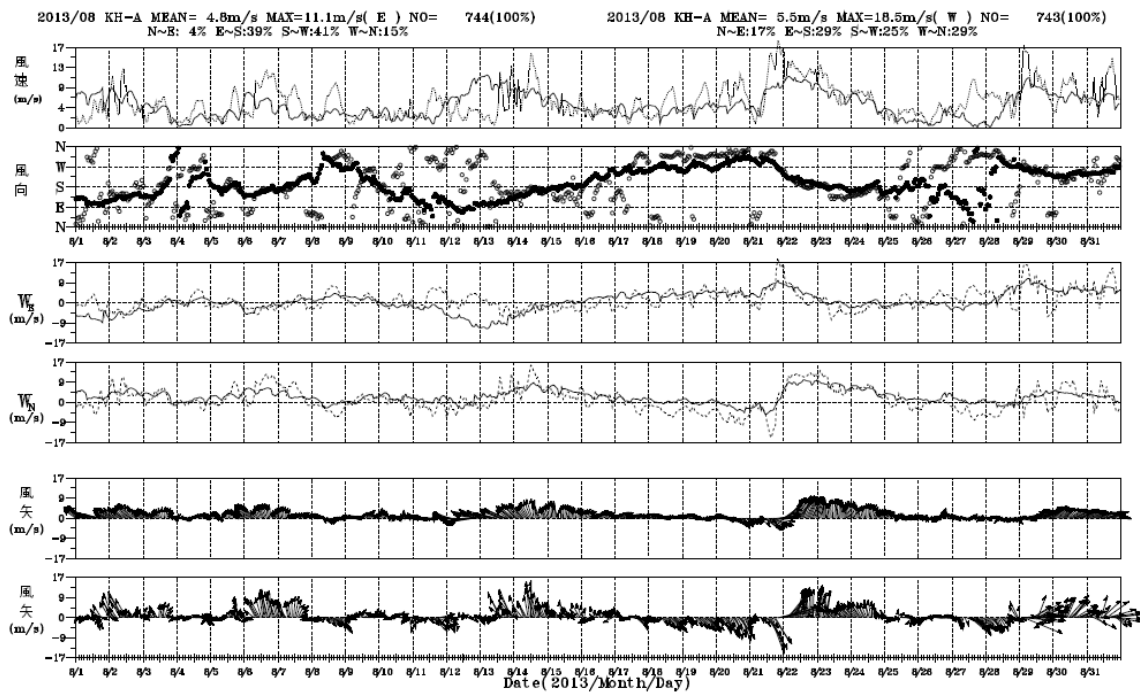
附圖 7.9 2013 年 7 月高雄港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



附圖 7.10 2013 年 7 月高雄港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)



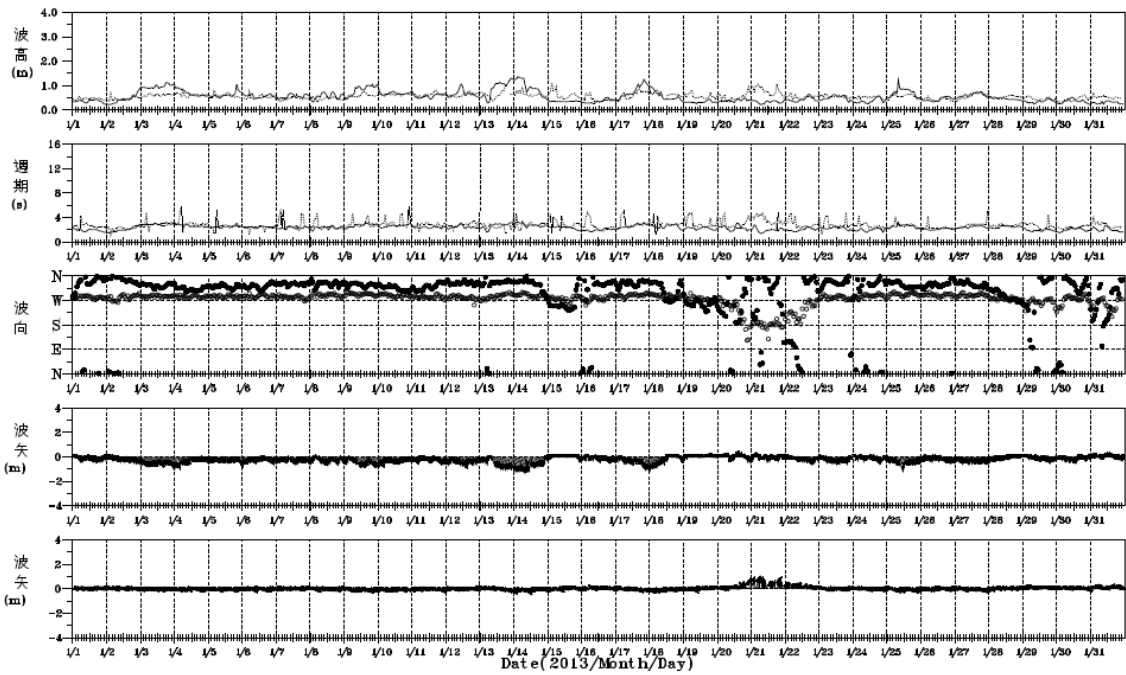
附圖 7.11 2013 年 8 月高雄港 MC 風場與觀測比較圖(實線：MC)



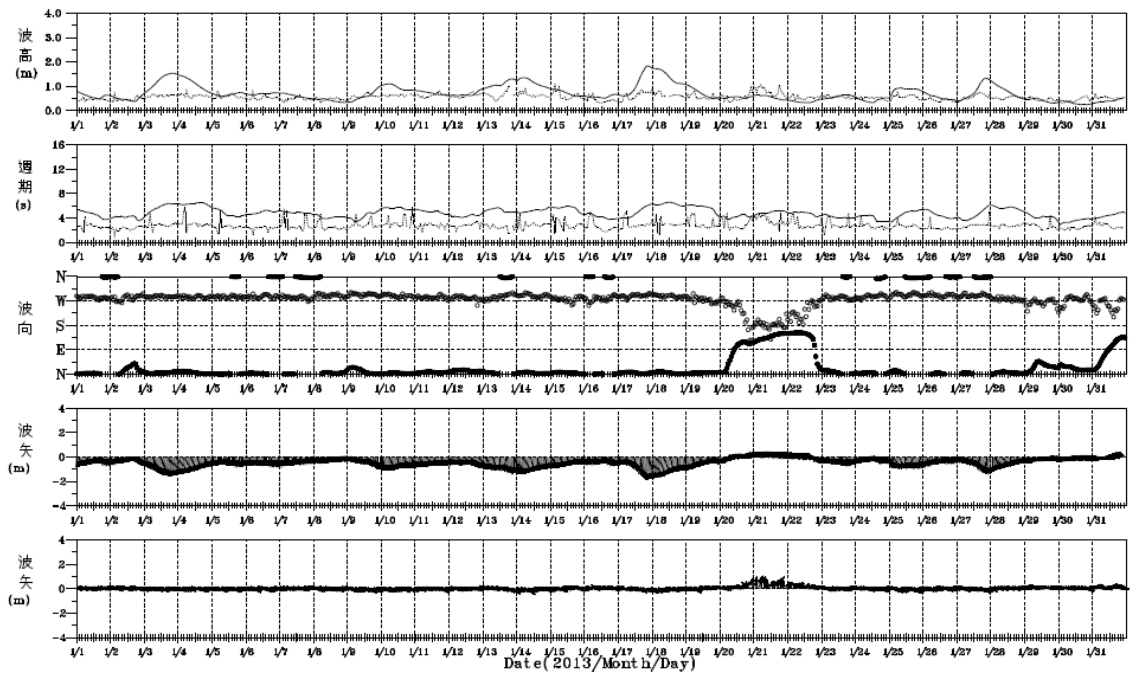
附圖 7.12 2013 年 8 月高雄港 RC 風場與觀測比較圖(實線：RC)

附錄八

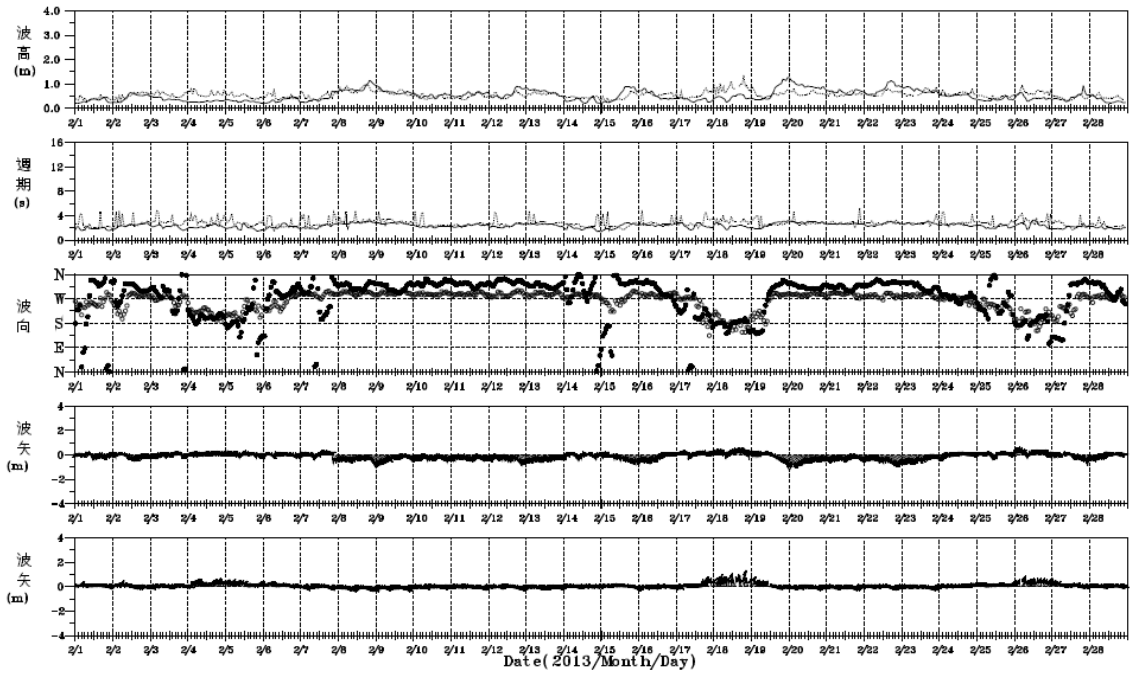
2013 年安平港風浪模式與觀測之比較



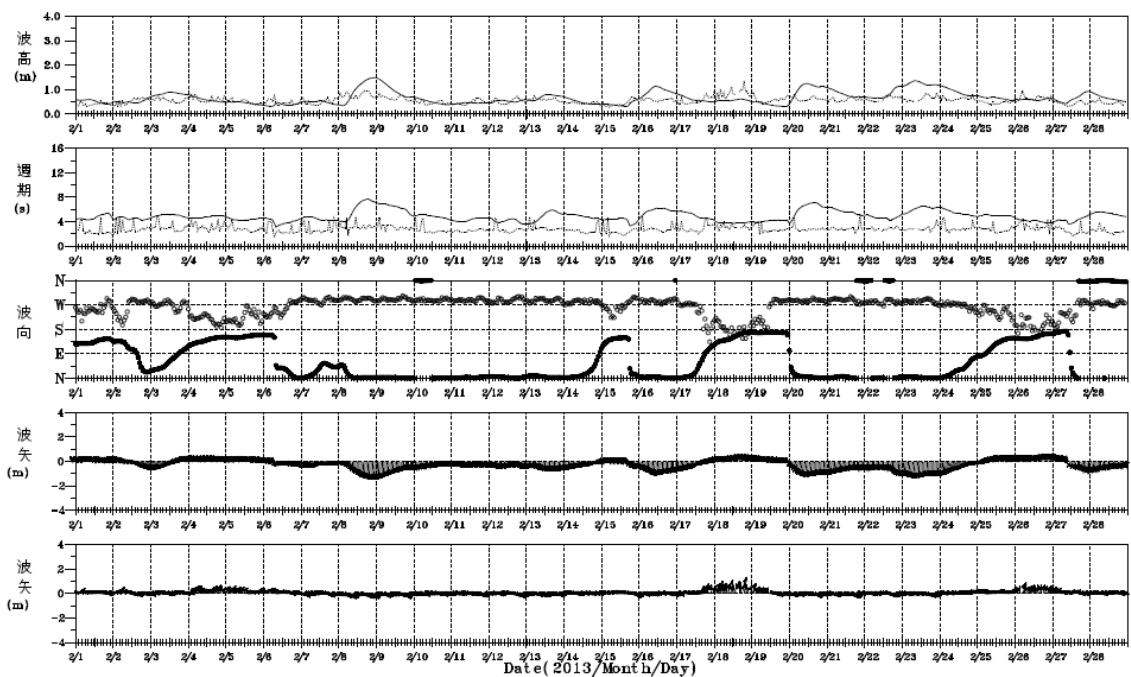
附圖 8.1 2013 年 1 月安平港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



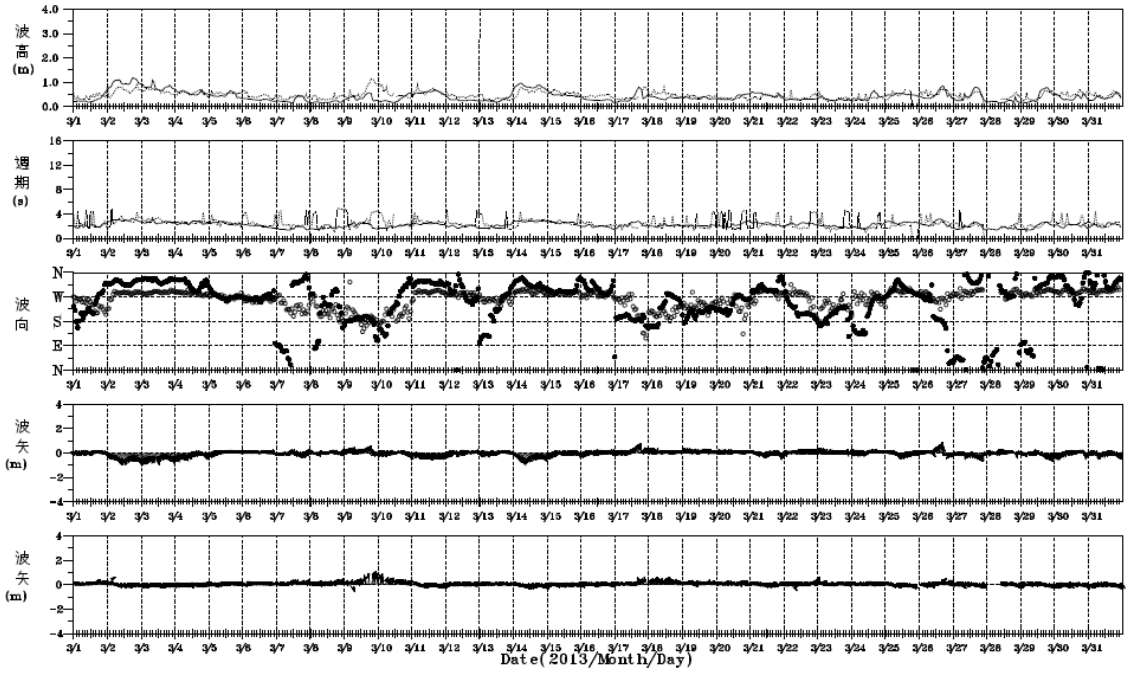
附圖 8.2 2013 年 1 月安平港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



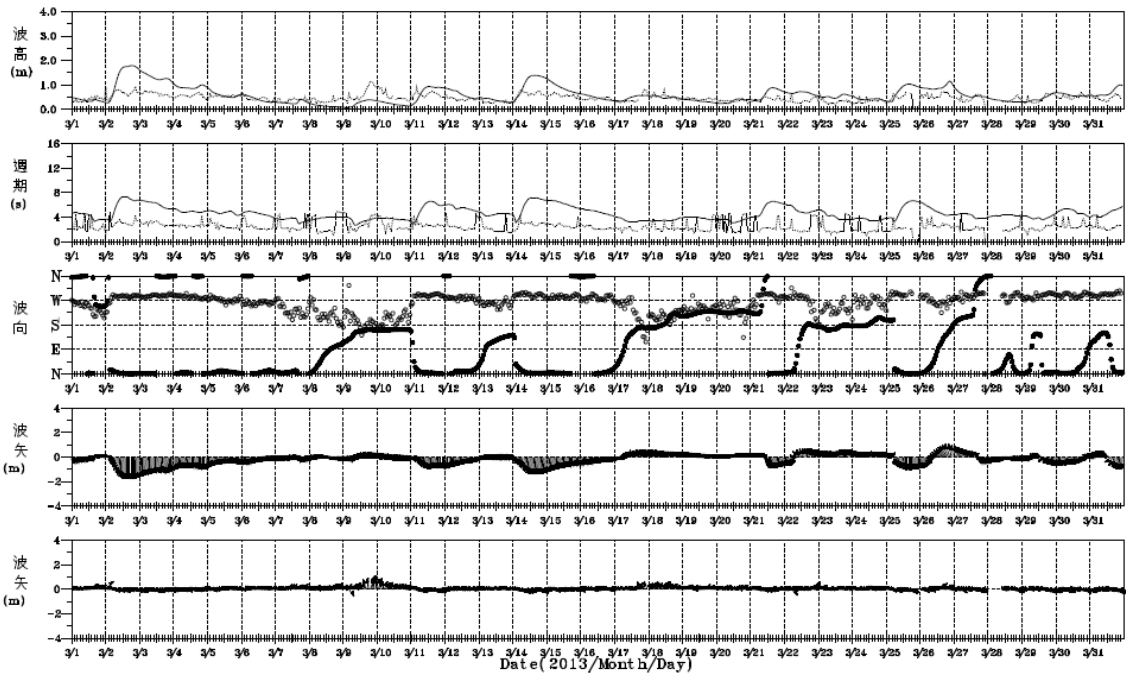
附圖 8.3 2013 年 2 月安平港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



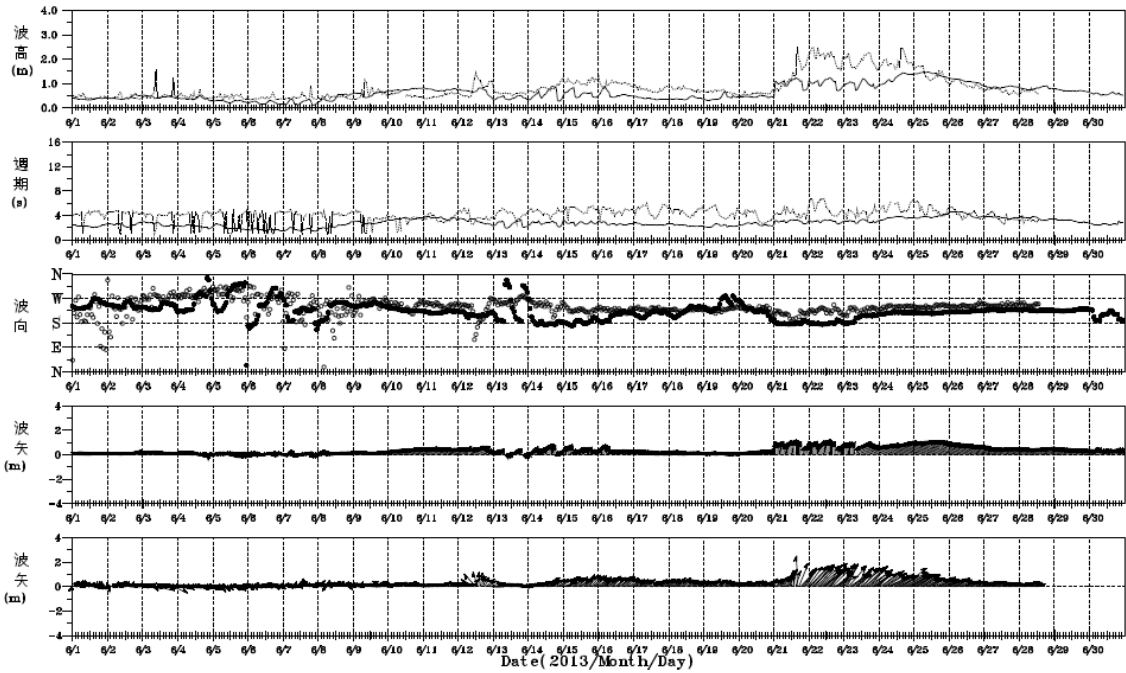
附圖 8.4 2013 年 2 月安平港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



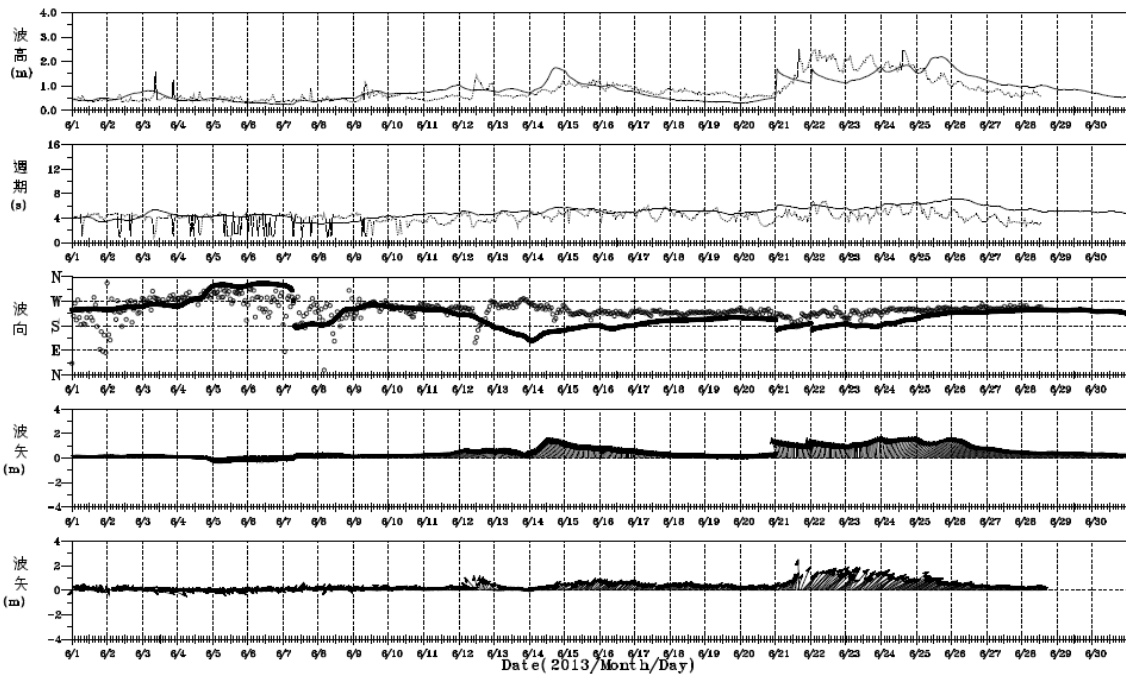
附圖 8.5 2013 年 3 月安平港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



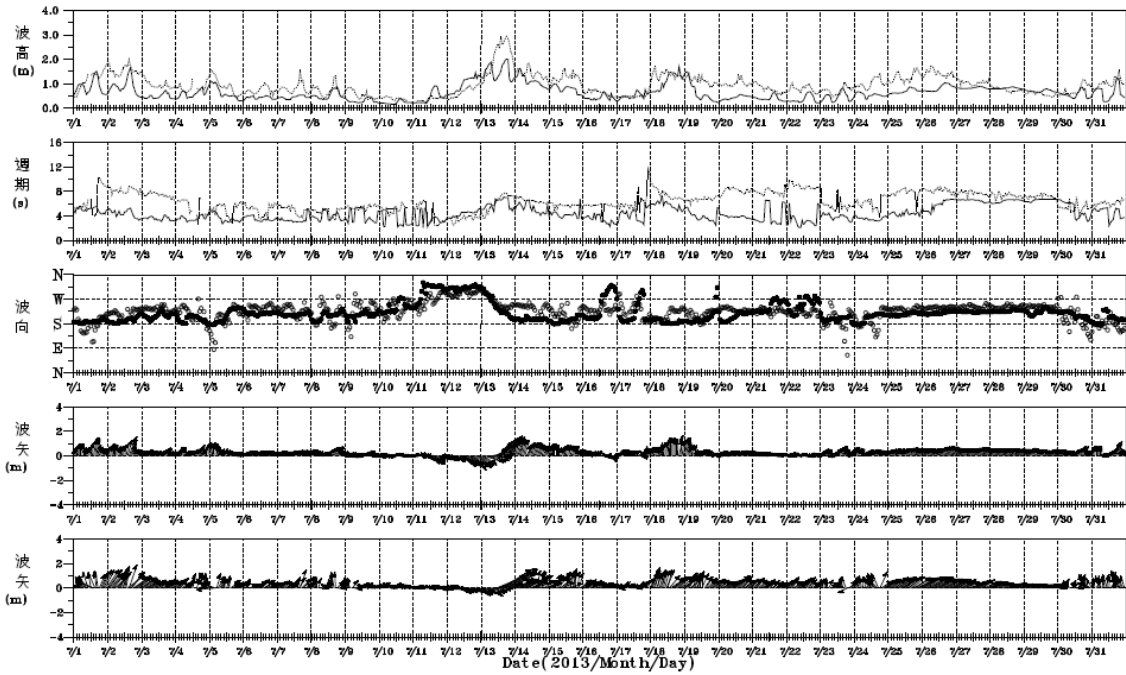
附圖 8.6 2013 年 3 月安平港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



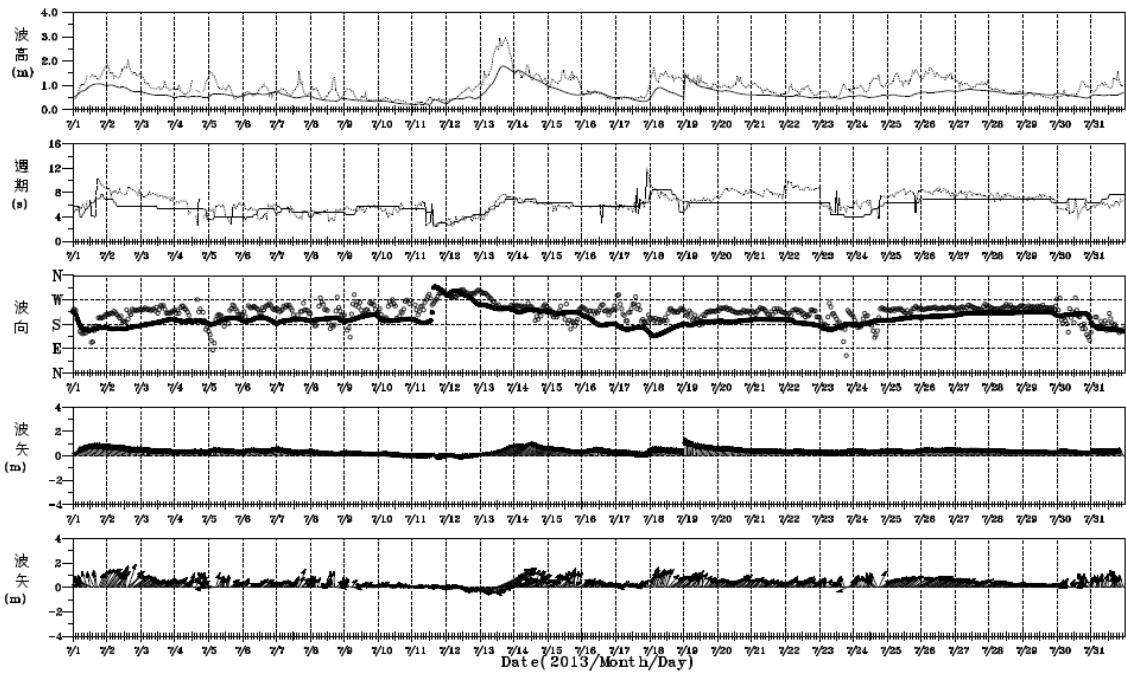
附圖 8.7 2013 年 6 月安平港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



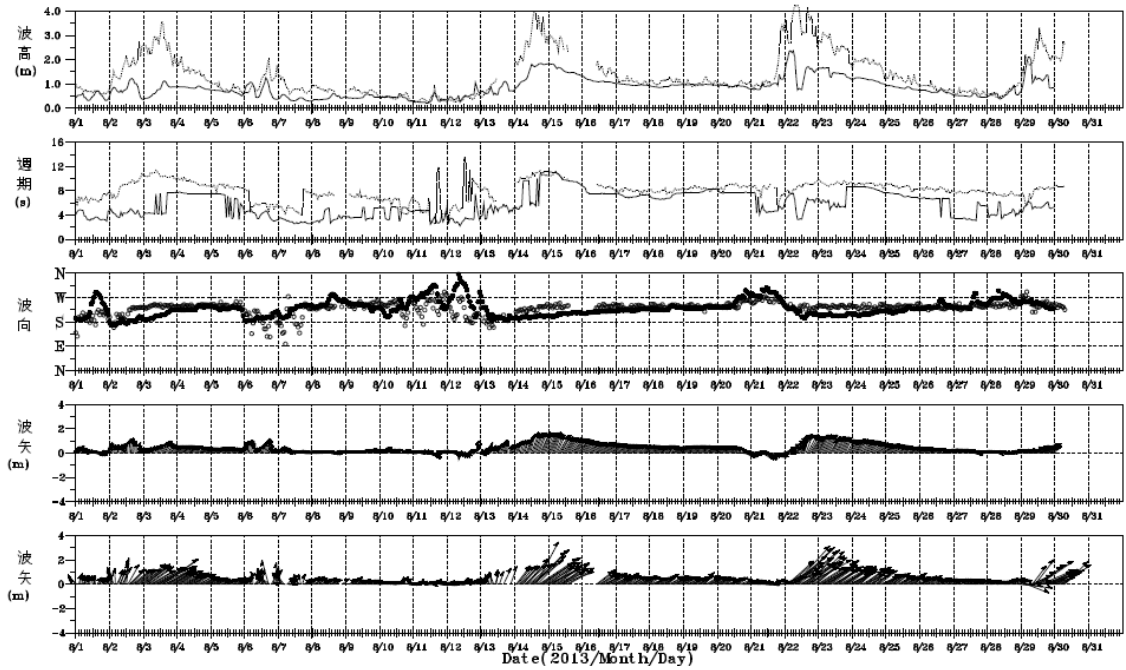
附圖 8.8 2013 年 6 月安平港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



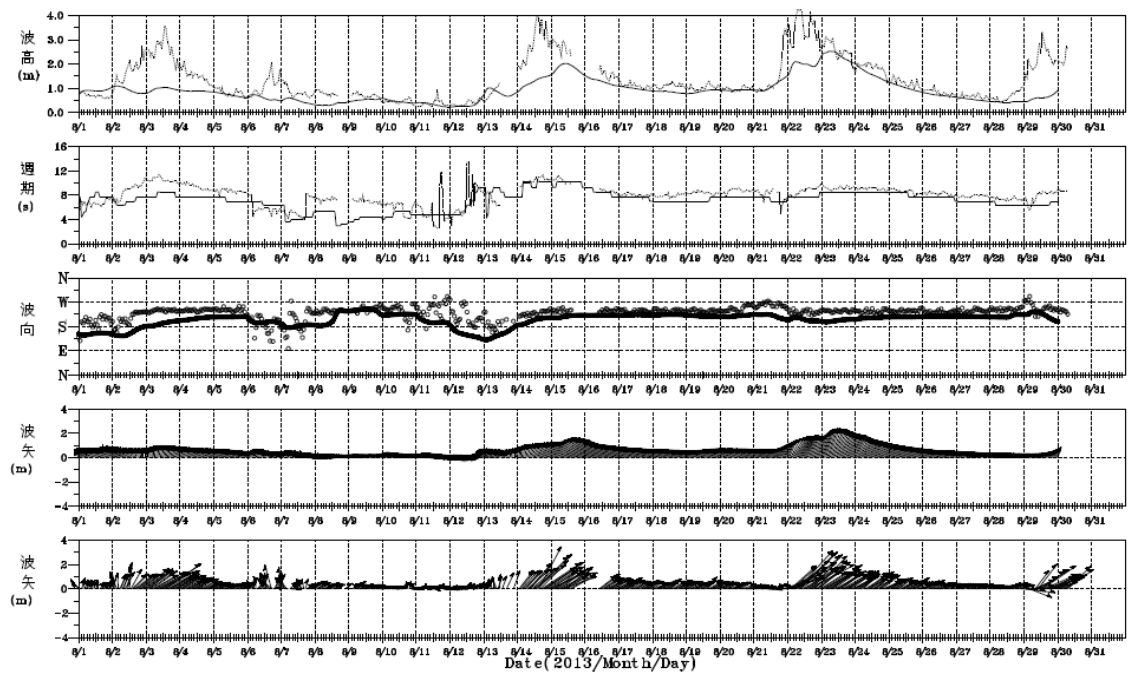
附圖 8.9 2013 年 7 月安平港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



附圖 8.10 2013 年 7 月安平港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



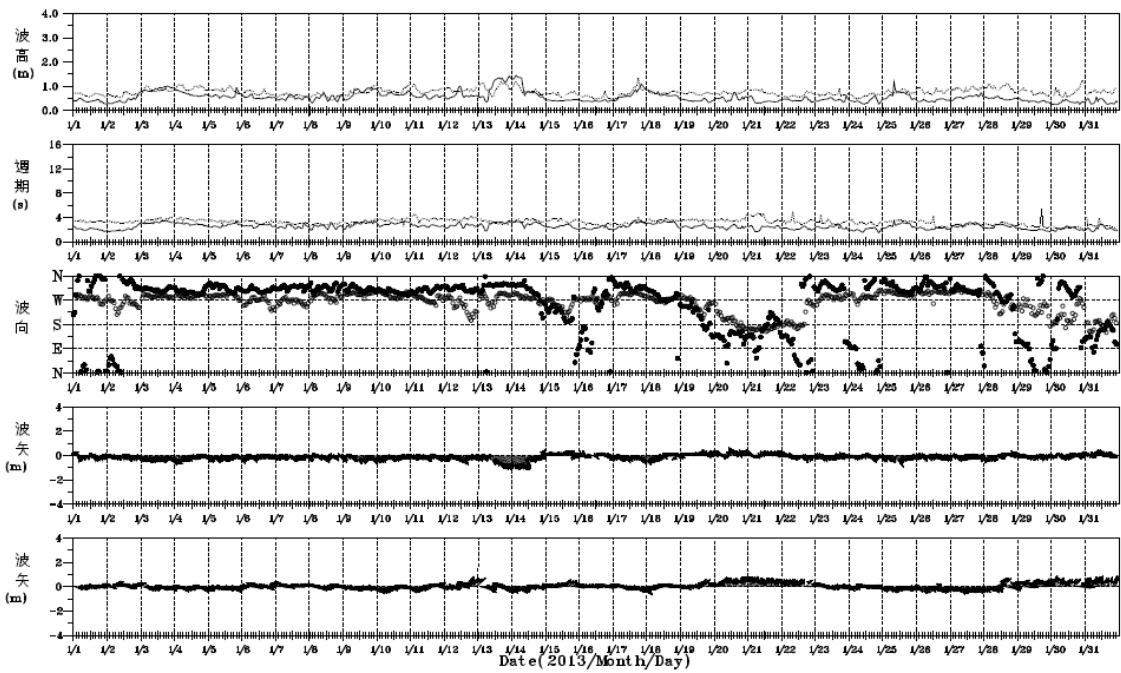
附圖 8.11 2013 年 8 月安平港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



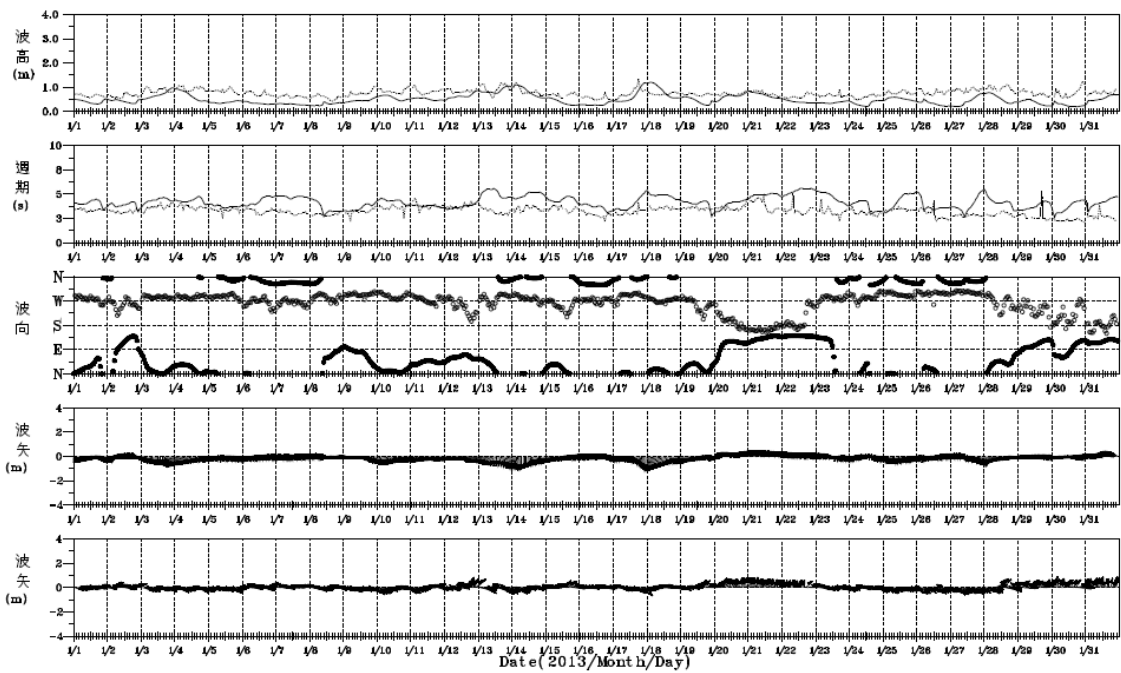
附圖 8.12 2013 年 8 月安平港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)

附錄九

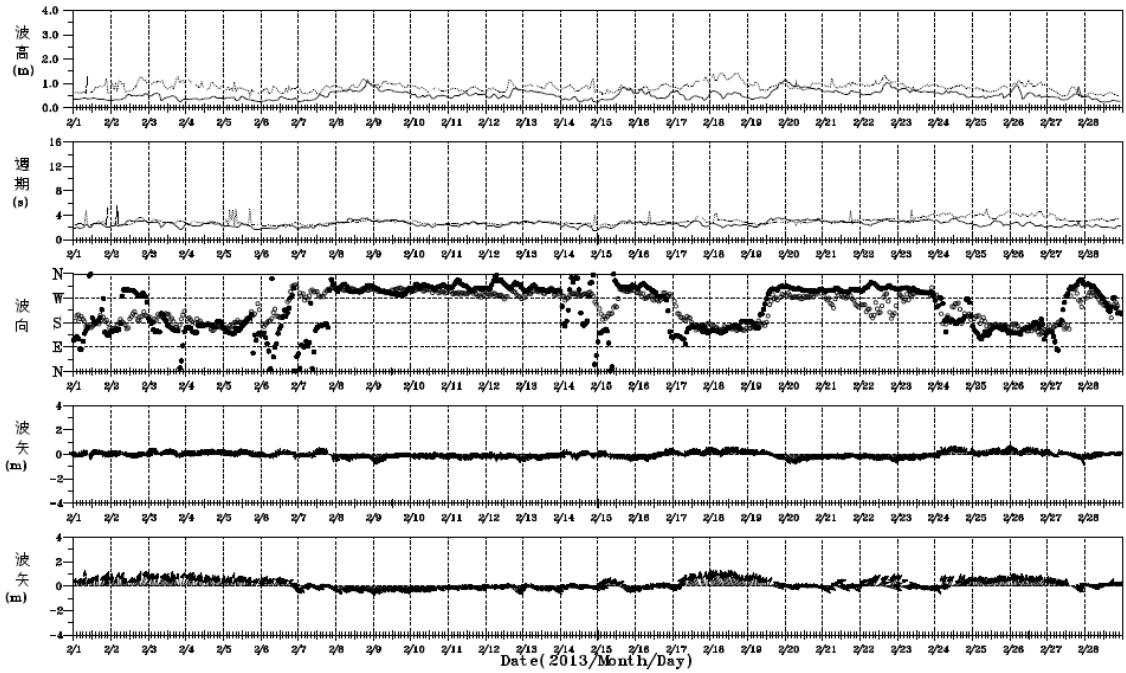
2013 年高雄港風浪模式與觀測之比較



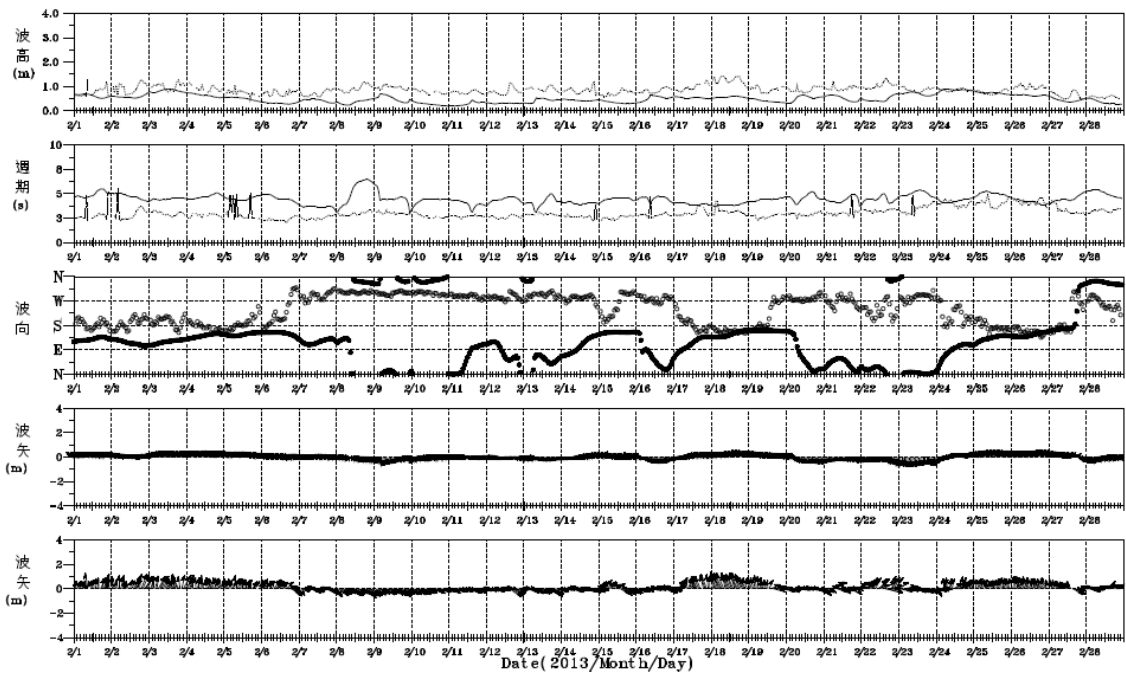
附圖 9.1 2013 年 1 月高雄港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



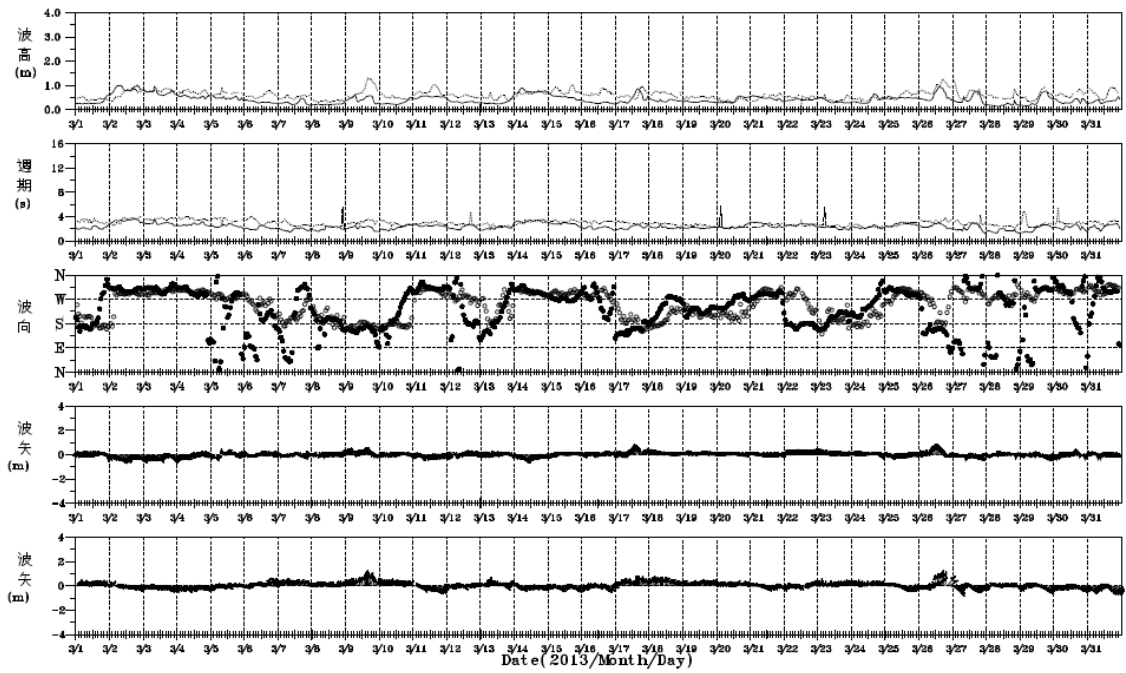
附圖 9.2 2013 年 1 月高雄港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



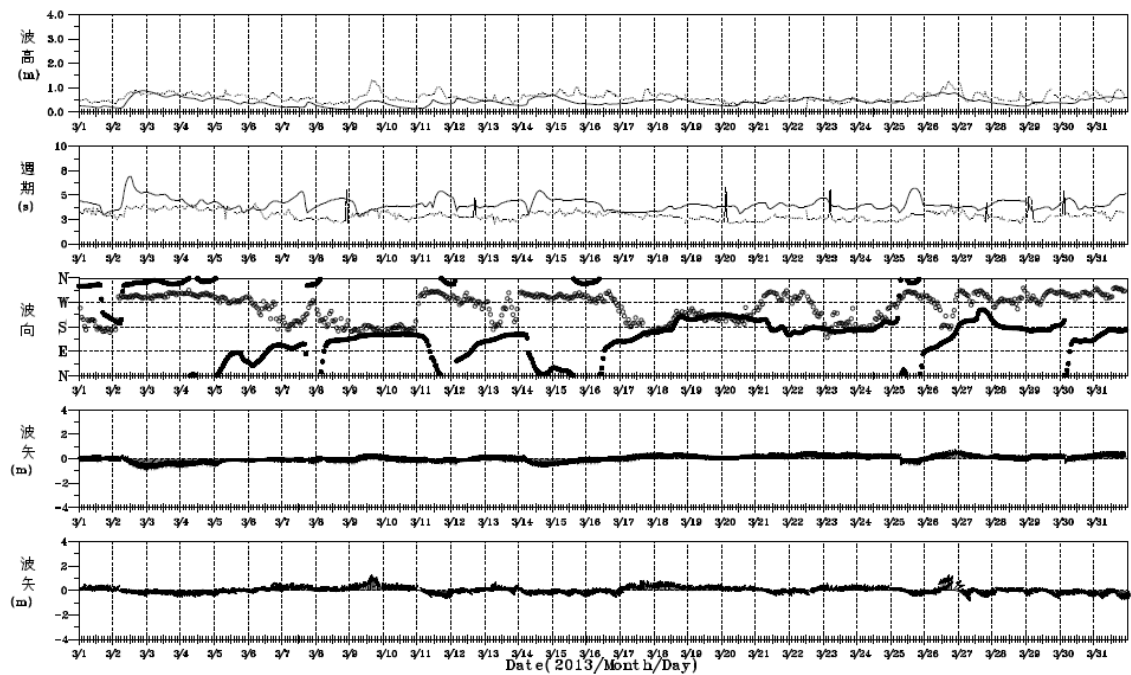
附圖 9.3 2013 年 2 月高雄港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



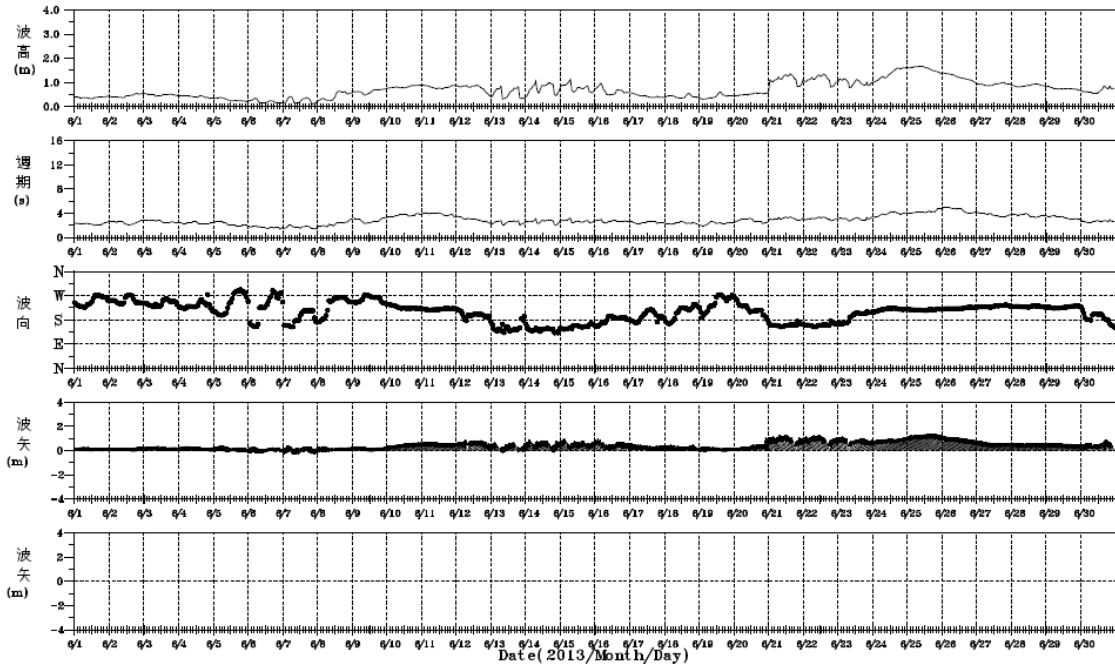
附圖 9.4 2013 年 2 月高雄港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



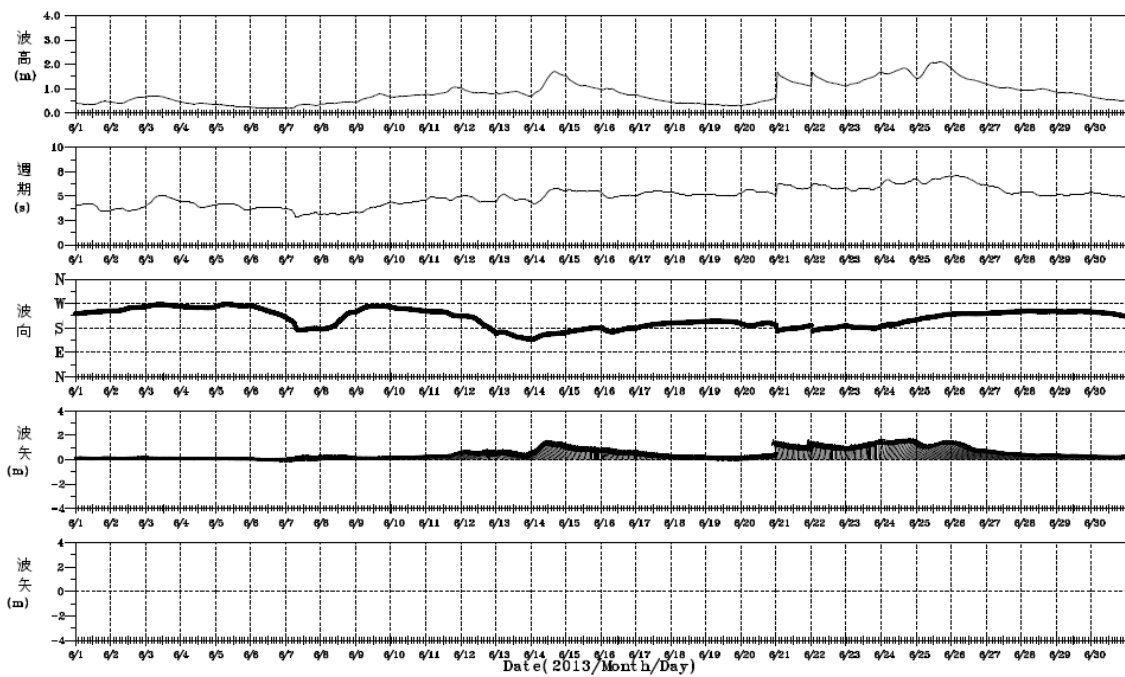
附圖 9.5 2013 年 3 月高雄港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



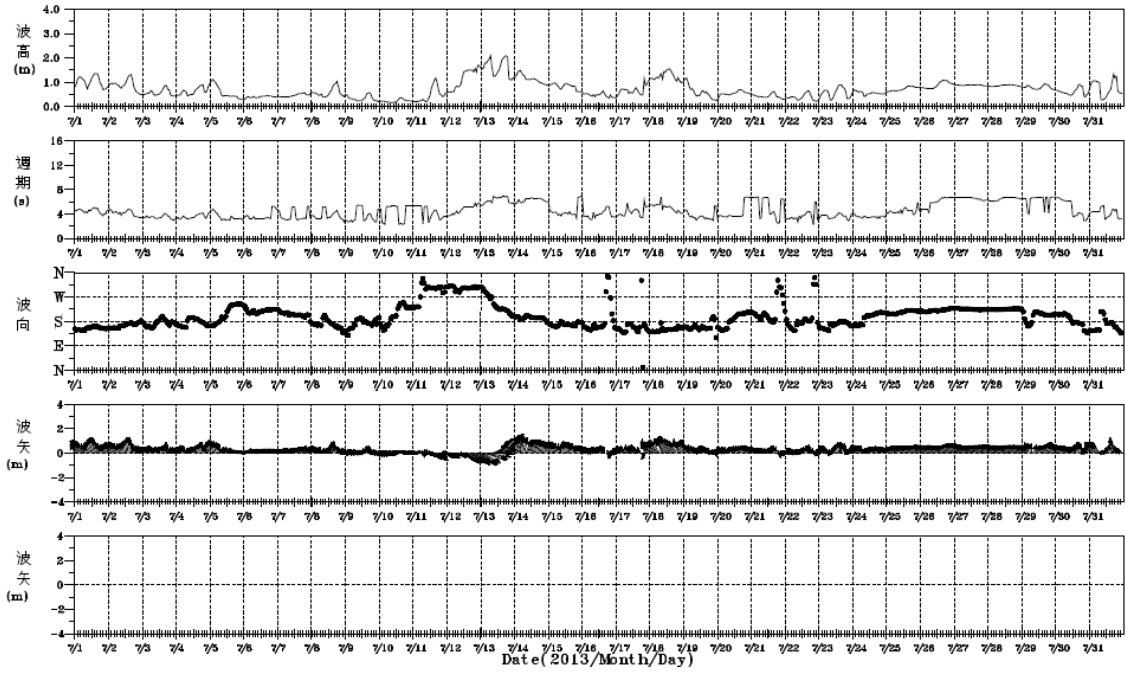
附圖 9.6 2013 年 3 月高雄港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



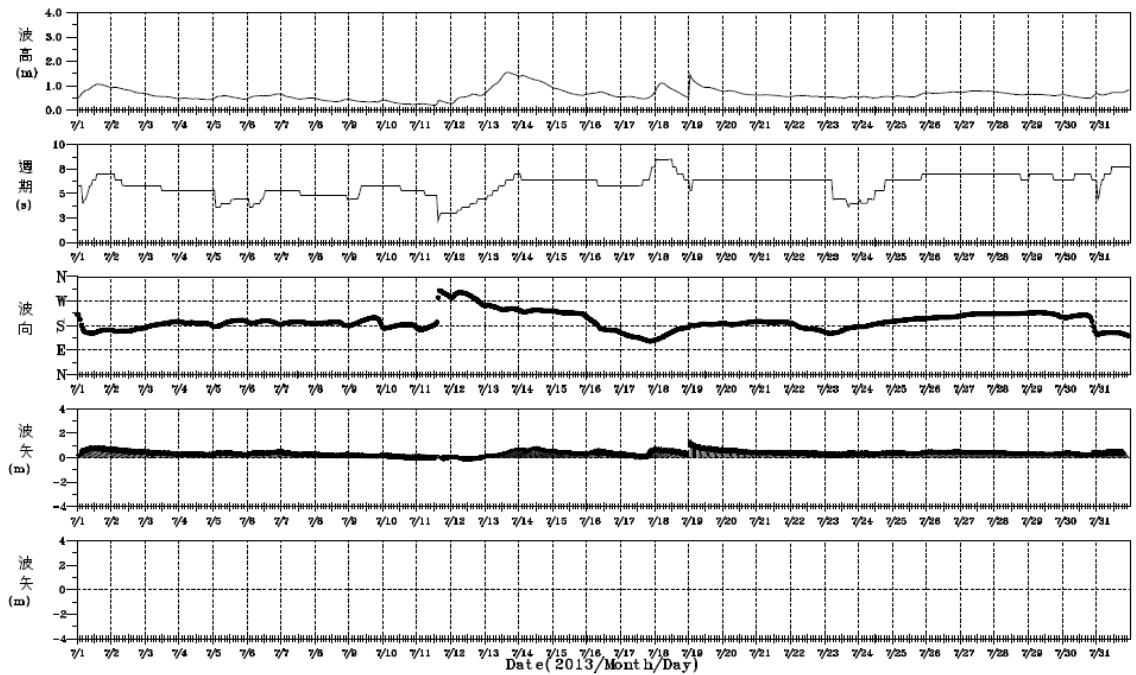
附圖 9.7 2013 年 6 月高雄港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



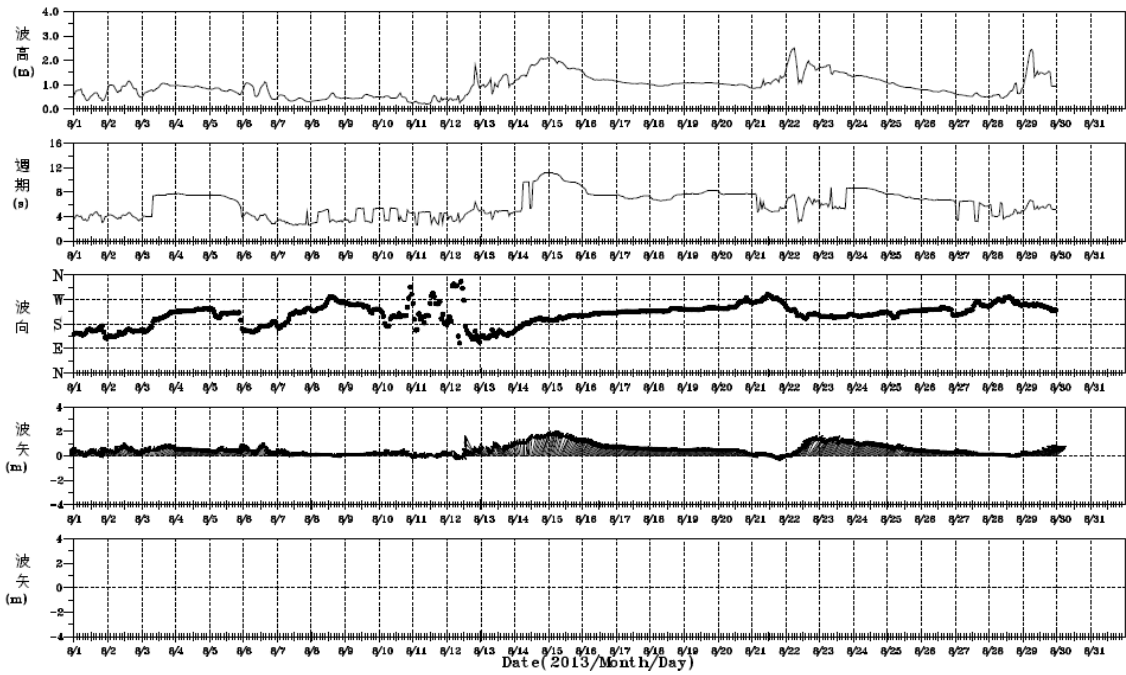
附圖 9.8 2013 年 6 月高雄港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



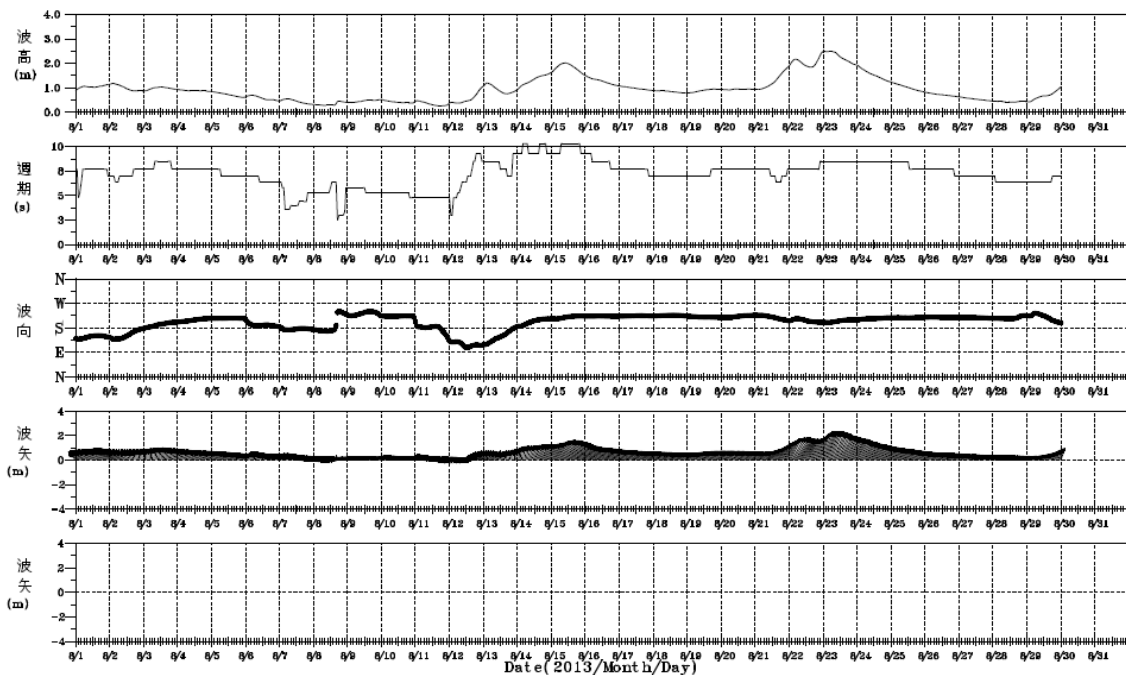
附圖 9.9 2013 年 7 月高雄港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



附圖 9.10 2013 年 7 月高雄港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)



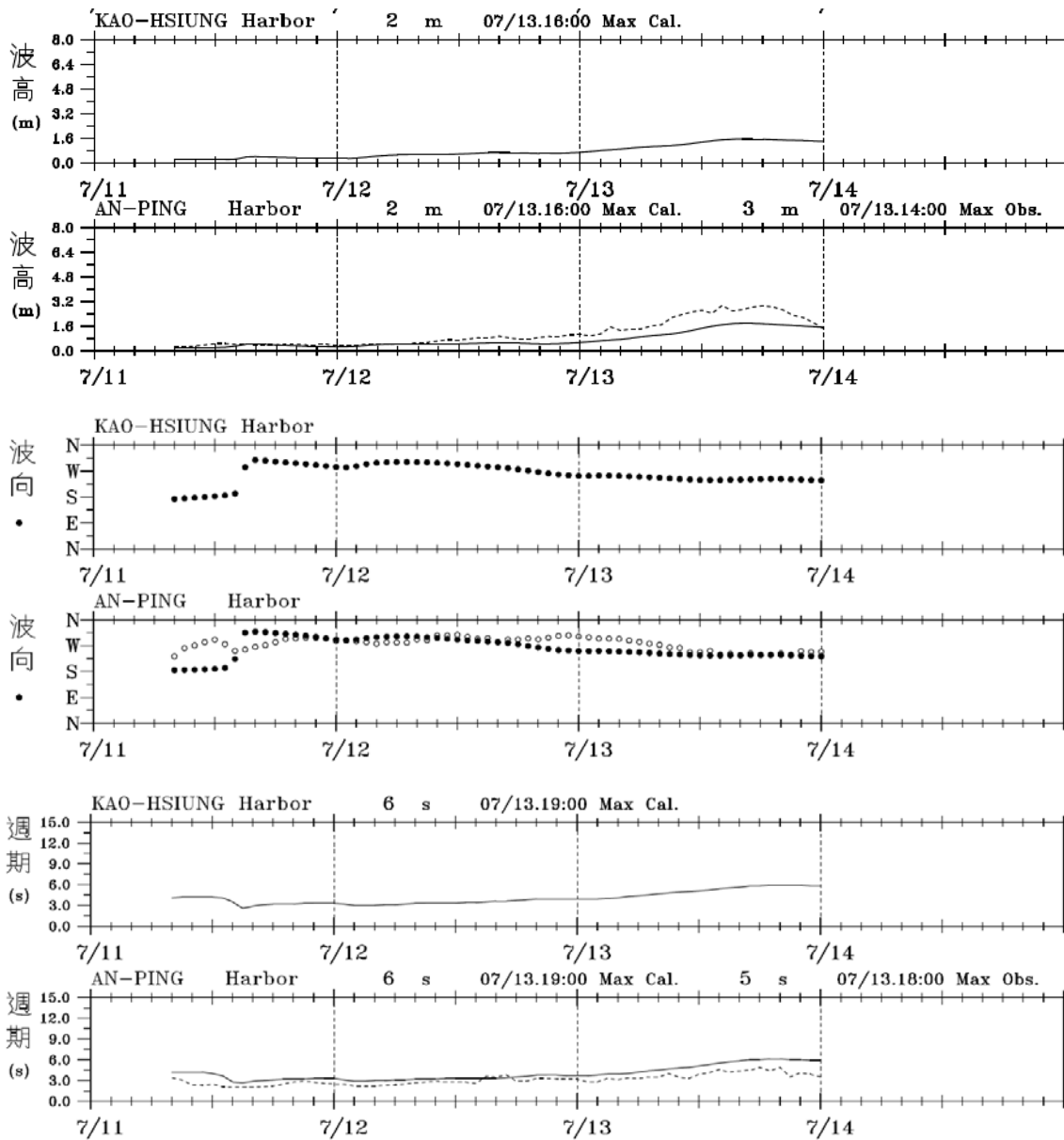
附圖 9.11 2013 年 8 月高雄港 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



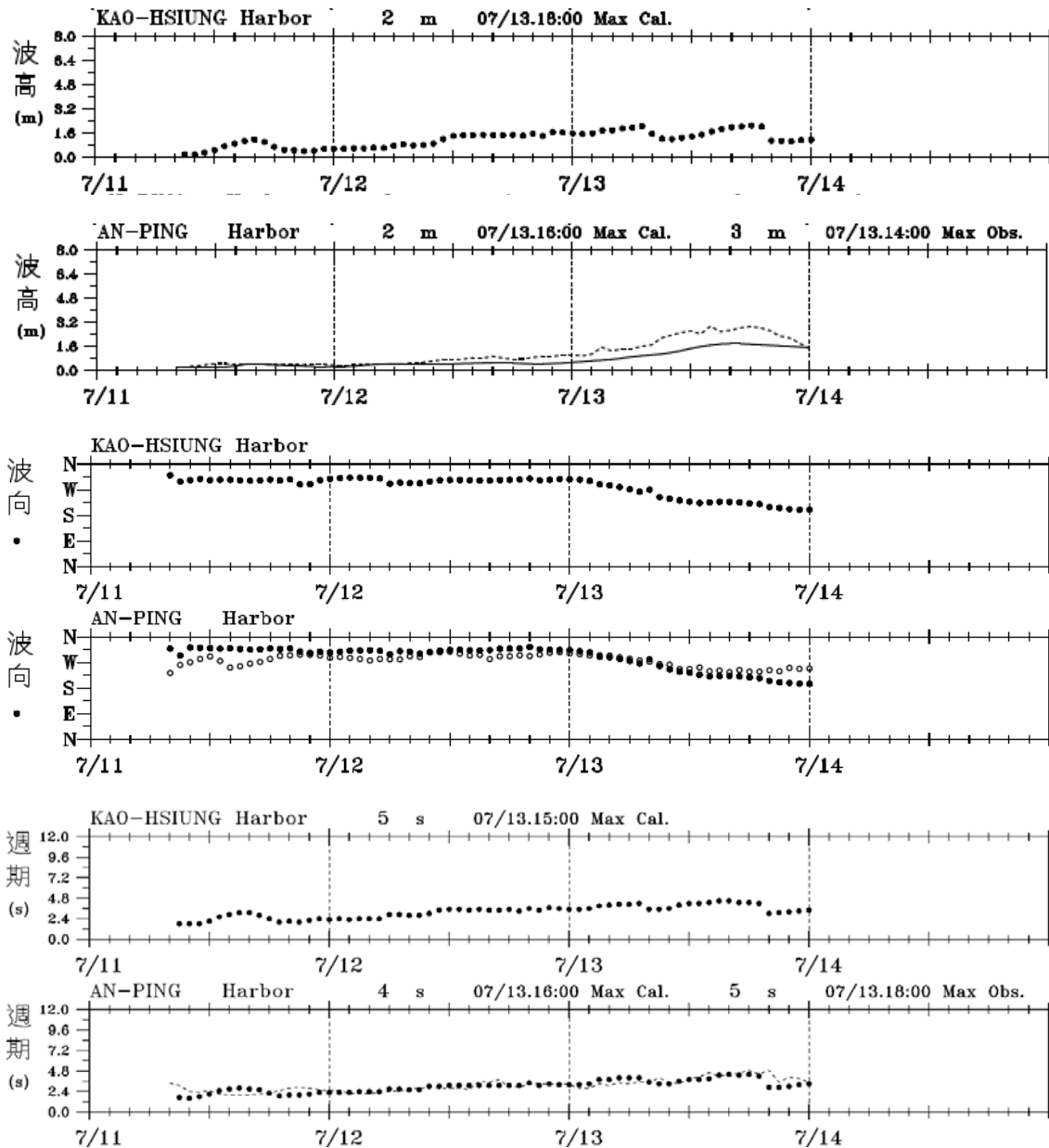
附圖 9.12 2013 年 8 月高雄港 WAM 波浪與觀測比較(實線：WAM)

附錄十

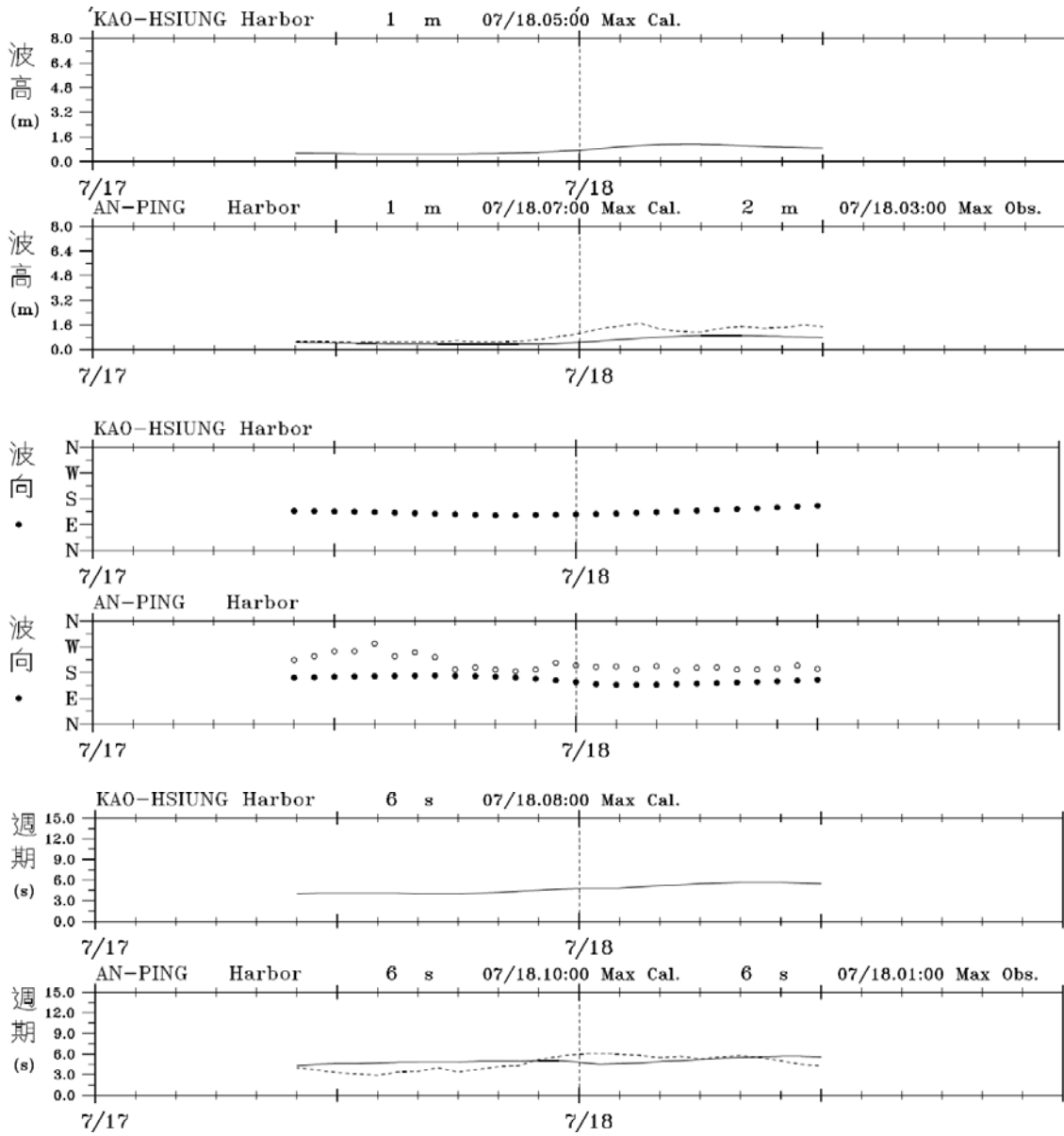
2013 年颱風時期安平港及高雄港模式預報風浪與 觀測值之比較



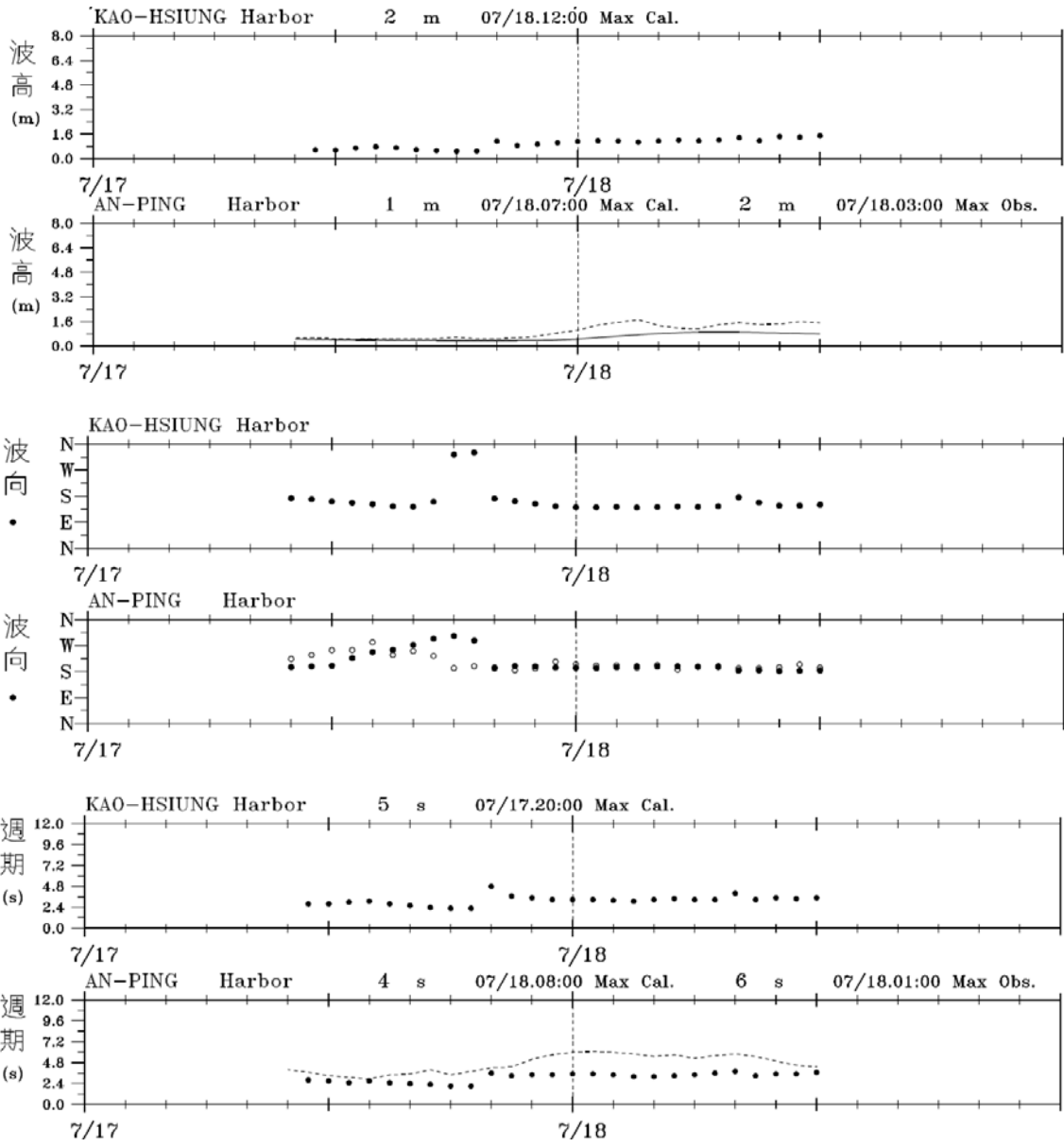
附圖 10.1 蘇力颱風 WAM 波浪與觀測比較(實點：WAM)



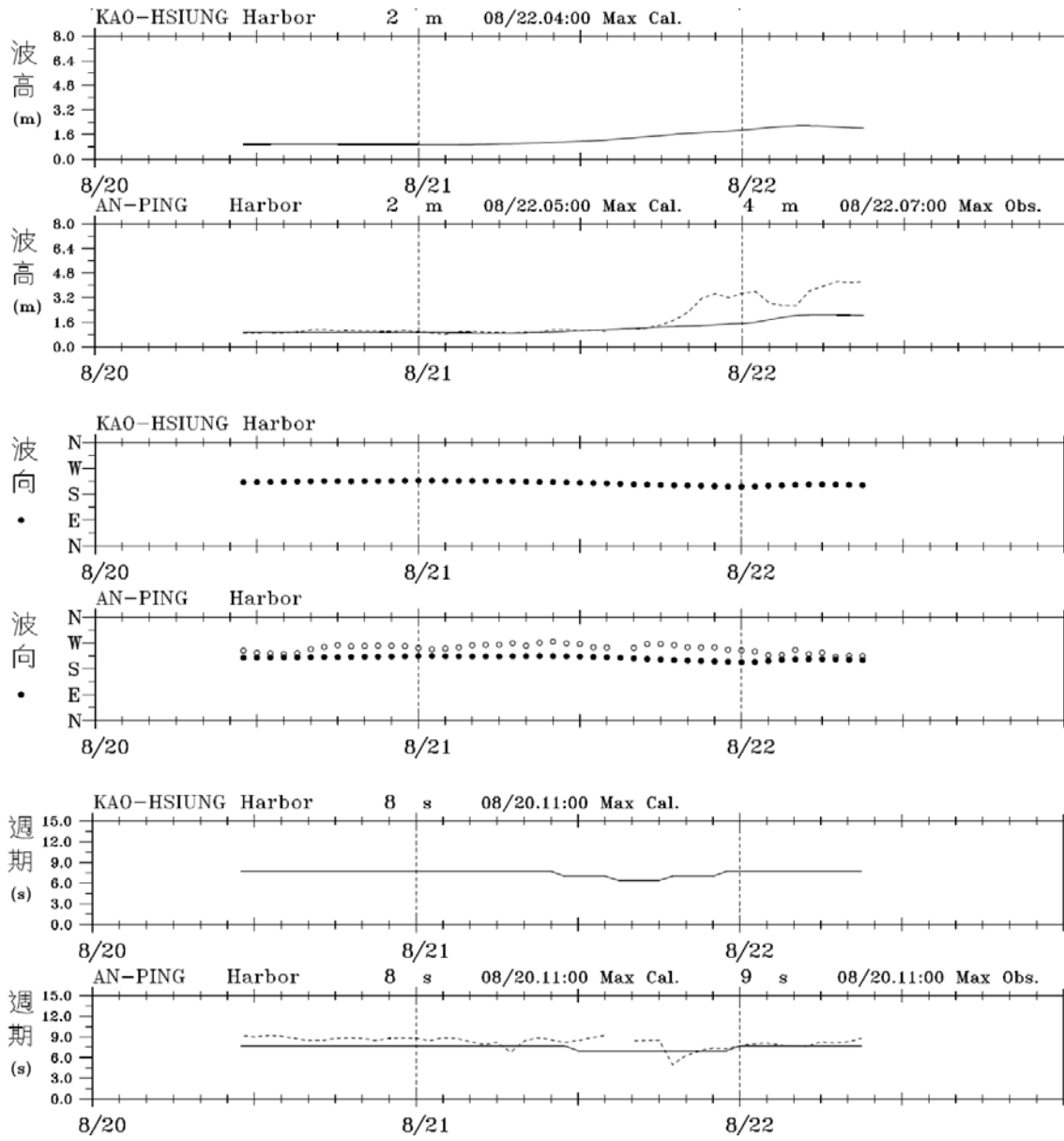
附圖 10.2 蘇力颱風 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



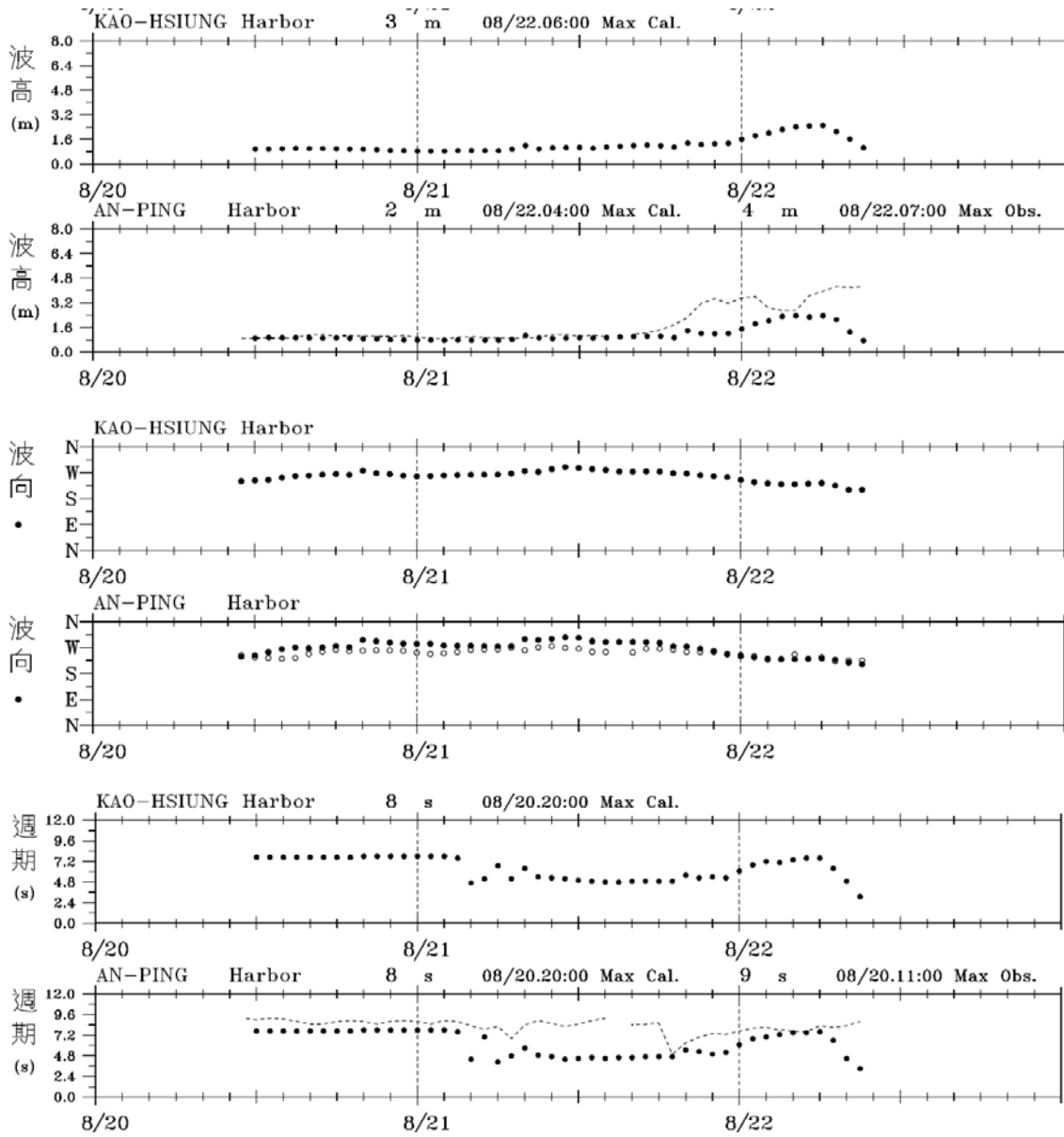
附圖 10.3 西馬隆颱風 WAM 波浪與觀測比較(實點：WAM)



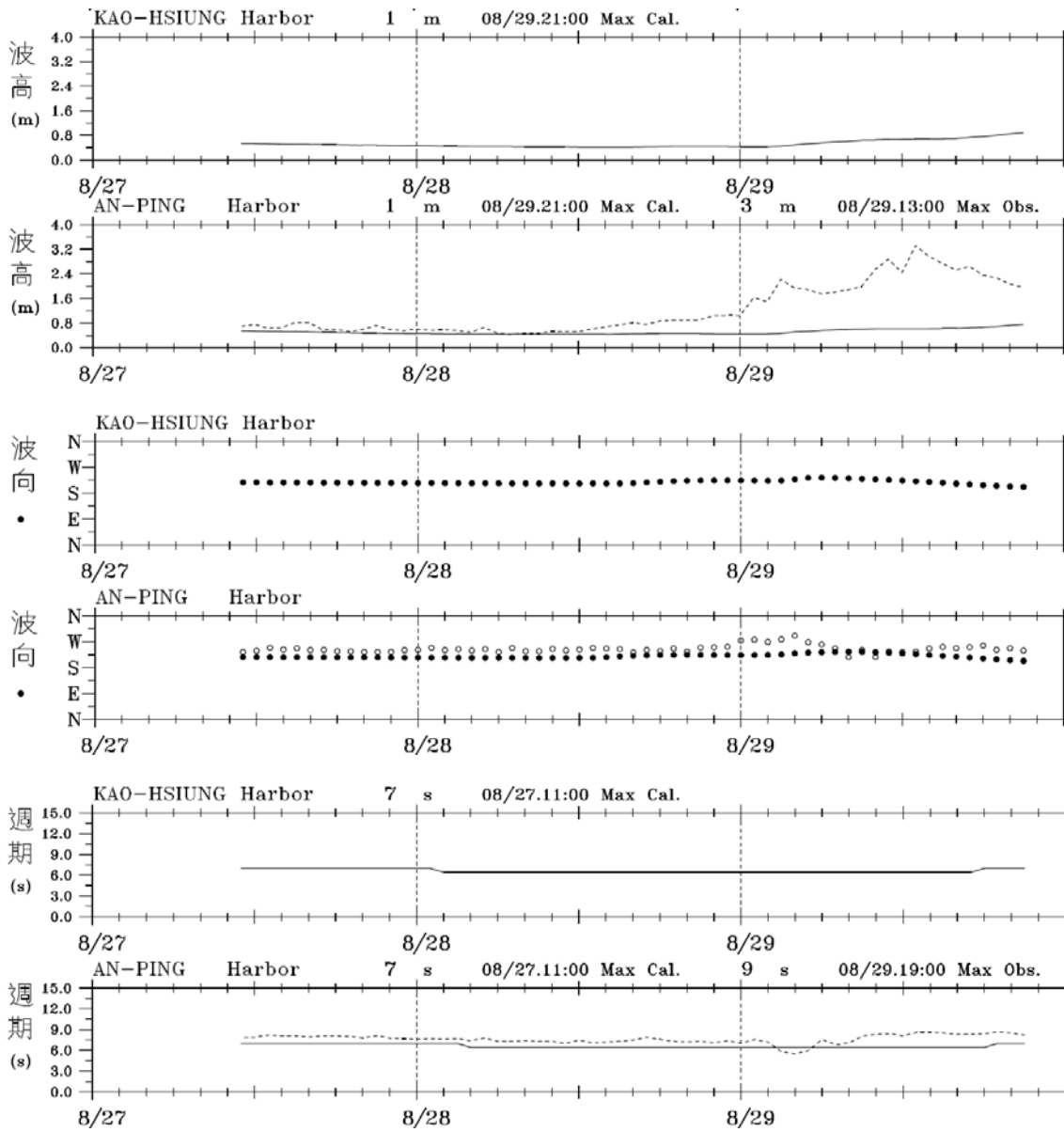
附圖 10.4 西馬隆颱風 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



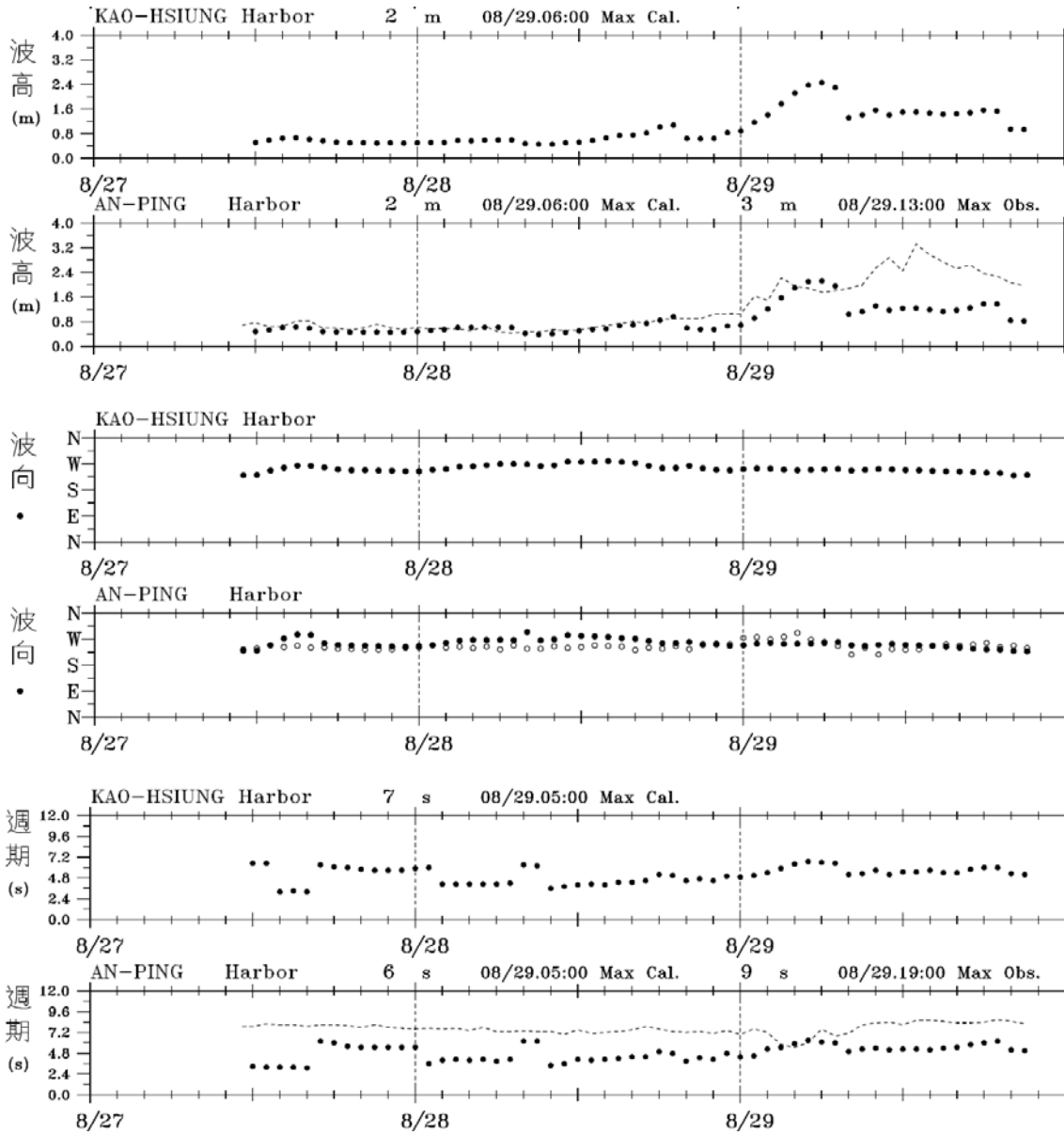
附圖 10.5 潭美颱風 WAM 波浪與觀測比較(實點：WAM)



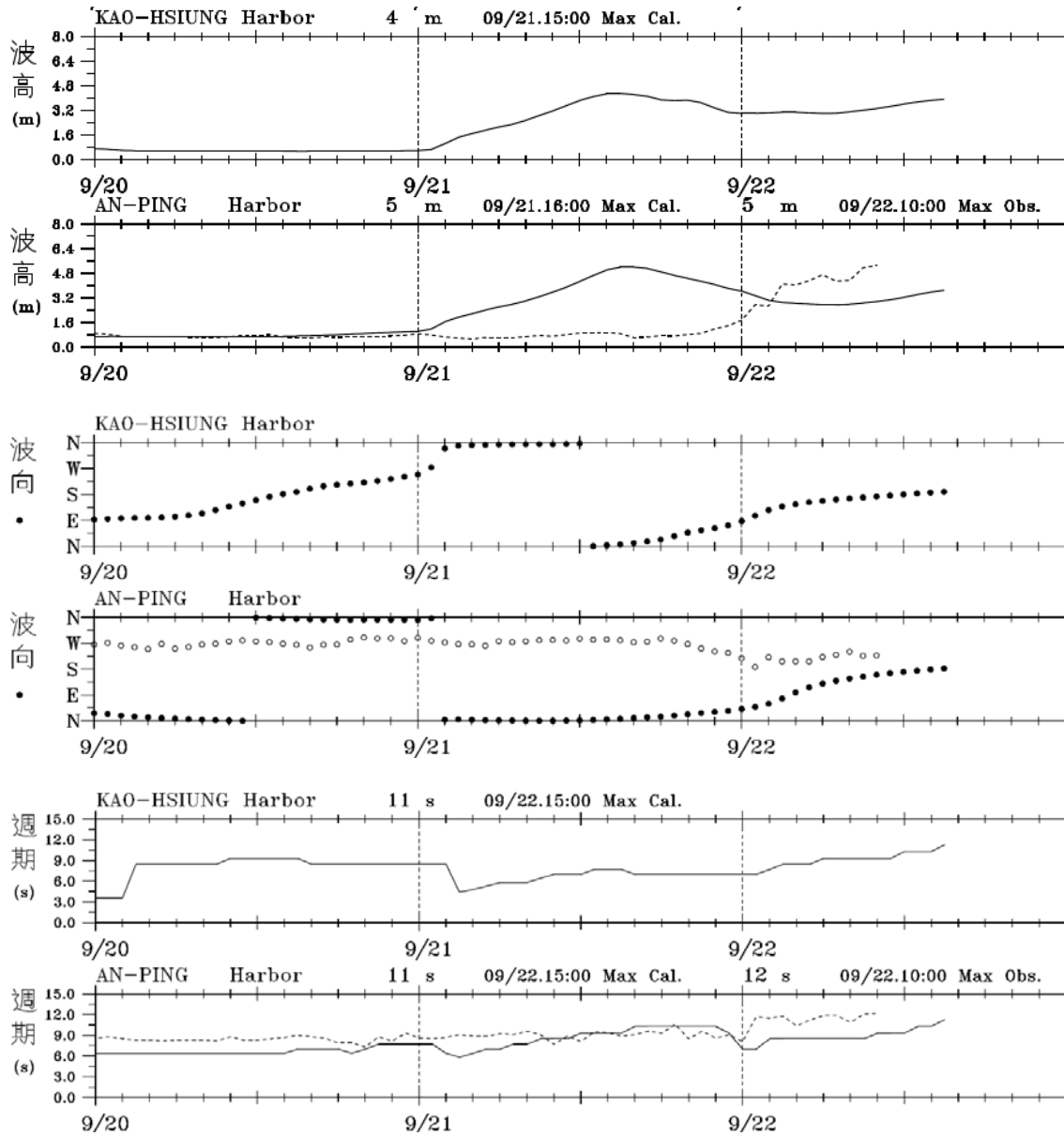
附圖 10.6 潭美颱風 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



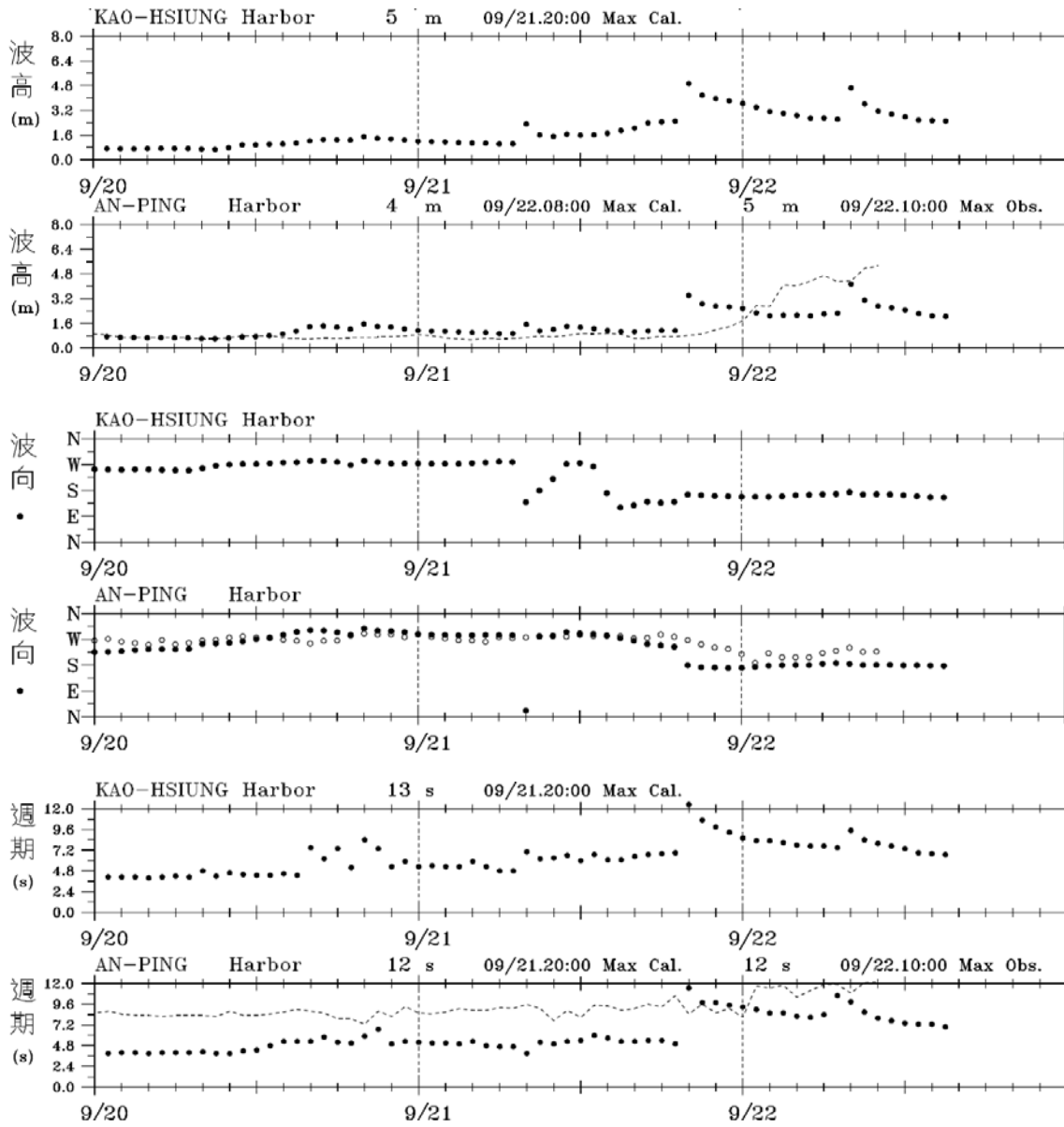
附圖 10.7 康芮颱風 WAM 波浪與觀測比較(實點：WAM)



附圖 10.8 康芮颱風 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)



附圖 10.9 天兔颱風 WAM 波浪與觀測比較(實點：WAM)



附圖 10.10 天兔颱風 SWAN 波浪與觀測比較(實點：SWAN)

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

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高雄、安平兩港之子系統，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高雄港及安平港在未來 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 approximate scale, 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 Kaohsiung Harbor and Anping 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 Gaoping 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

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖 目 錄	VII
表 目 錄	XVII
第一章 緒論	
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	1-3
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	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 海嘯之風險	2-11
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	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	精進系統數值模式之格林函數.....	4-1
4.2	高雄港域及安平港域海嘯預警子系統.....	4-3
4.2.1	高雄及安平港域之潛在海嘯波源區.....	4-3
4.2.2	海嘯預警子系統.....	4-3
4.2.3	點位設定.....	4-6
4.3	實例驗證	
4.3.1	驗證方法-總體驗經驗模態分解法(EEMD).....	4-6

4.3.2	EEMD 法之應用—2010 智利海嘯事件之水位驗證	4-7
4.3.3	海嘯速報系統之驗證—311 東日本海嘯事件	4-16
4.4	系統實例操作	4-23
4.5	系統作業化之運作情形	4-25
第五章	海嘯災害風險評估	
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	安平港之溢淹模擬	5-8
5.3.1	數值地形	5-8
5.3.2	安平港之模擬結果	5-11
5.3.3	溢淹機率	5-16
5.3.4	安平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	高雄港之溢淹模擬	5-35
5.4.1	數值地形	5-35
5.4.2	高雄港之模擬結果	5-37
5.4.3	高雄港之溢淹點位分佈及機率	5-41
5.4.4	高雄海嘯地震且溢淹之機率	5-41

第六章 海嘯對跨河橋梁之影響模擬分析	
6.1 前言	6-1
6.2 高屏溪數值地形	6-2
6.3 馬尼拉海溝地震參數	6-5
6.4 海嘯沿高屏溪口溯上模擬	6-11
6.5 潮汐模擬分析	6-15
6.6 跨河橋梁受海嘯波之衝擊力分析	6-19
6.6.1 雙園大橋及數值地形	6-19
6.6.2 海嘯溯上引致作用力	6-23
6.6.3 橋墩沖刷	6-26
第七章 結論與建議	
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 地震矩規模與入射波關係	附 4-1
附錄五 模擬橋墩墩柱受水流之壓力及沖刷結果	附 5-1

圖目錄

圖 2.1	環太平洋地震帶及海溝分佈.....	2-1
圖 2.2	1500-2013 年海嘯事件之地震規模分析.....	2-2
圖 2.3	1500-2013 年海嘯事件之震源深度分析.....	2-2
圖 2.4	高雄港之放大率及海嘯潛勢波源區.....	2-4
圖 2.5	安平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.....	2-6
圖 2.7	1867 年基隆海嘯事件，雞籠頭沿海遭受海嘯之侵襲.....	2-6
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.....	3-20
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	利用第一組參數所預估之結果及報告單(a)蘇澳港(b)花蓮港 (c)安平港(d)高雄港.....	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	高雄港區之平面圖.....	4-4
圖 4.5	安平港區之平面圖.....	4-5
圖 4.6	臺灣周圍及南海之水深分佈.....	4-5
圖 4.7	(a)高雄港(b)安平港之預報點位.....	4-6
圖 4.8	交通部運輸研究所港灣中心基隆港觀測站儀器安裝位置...	4-8
圖 4.9	測站之實測水位.....	4-8
圖 4.10	分析用之實測水位資料.....	4-9
圖 4.11	經過濾潮汐後之水位.....	4-10
圖 4.12	由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6)	4-11
圖 4.13	由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位....	4-11
圖 4.14	預報系統預測智利海嘯(Mw=8.6)於基隆港之預報結果....	4-13
圖 4.15	預報系統計算結果(Mw=8.6)與實測資料之比較圖.....	4-13
圖 4.16	預報系統預測智利海嘯(Mw=8.8)於基隆港之預報結果....	4-15
圖 4.17	預報系統計算結果(Mw=8.8)與實測資料之比較圖.....	4-15
圖 4.18	海嘯速報系統之介面.....	4-17
圖 4.19	(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.....	4-18
圖 4.20	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.....	4-20

圖 4.21	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)臺中港及(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)	4-21
圖 4.22	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 Mw8.9)及新公佈之地震參數(地震矩規模 Mw9.0)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)	4-22
圖 4.23	1994 年地震位址.....	4-24
圖 4.24	1994 年地震斷層參數.....	4-24
圖 4.25	利用系統及第一組參數所預估之外海水位 (a)高雄港(b)安平港.....	4-24
圖 4.26	利用系統及第二組參數所預估之外海水位 (a)高雄港(b) 安平港.....	4-25
圖 4.27	港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面.....	4-26
圖 4.28	[近期海嘯查詢]之展示介面.....	4-27
圖 4.29	[近期海嘯查詢]之查詢結果展示.....	4-27
圖 4.30	水位歷線圖之展示介面.....	4-28
圖 4.31	[歷史海嘯查詢]之查詢結果.....	4-28
圖 4.32	水位歷線圖之文字資料.....	4-29
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.....	5-5
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	安平港 5m 解析度數值地形檔.....	5-10
圖 5.10	安平港整合海陸域後之數值地形檔.....	5-10
圖 5.11	安平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 孤立波.....	5-12
圖 5.13	安平港之溢淹圖，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	安平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	安平港各入射波高下對應之溢淹機率圖.....	5-22
圖 5.17	安平港在各種地震矩規模下之最大波高分佈.....	5-23
圖 5.18	安平港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈.....	5-24

圖 5.19	馬尼拉海溝假設之地震參數後的初始水位.....	5-25
圖 5.20	安平港外海的預報水位.....	5-25
圖 5.21	臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果.....	5-25
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)	安平港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)	5-30
圖 5.23(b)	安平港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)	5-31
圖 5.24	安平港結合 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	高雄港 5m 解析度數值地形檔.....	5-36
圖 5.26	高雄港整合海陸域後之數值地形檔.....	5-36
圖 5.27	高雄港之溢淹圖，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.....	5-40
圖 5.28	高雄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.....	5-44
圖 5.29	高雄港各入射波高下對應之溢淹機率圖.....	5-45
圖 5.30	高雄港在各種地震矩規模下之最大波高分佈.....	5-46
圖 5.31	高雄港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈.....	5-47
圖 5.32	馬尼拉海溝假設之地震參數後的初始水位.....	5-48
圖 5.33	高雄港外海的預報水位.....	5-48
圖 5.34(a1)	高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)	5-49
圖 5.34(a2)	高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)	5-50

圖 5.34(b1)高雄港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP).....	5-49
圖 5.34(b1)高雄港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP).....	5-50
圖 5.35 高雄港結合 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	5-54
圖 6.1 海科中心解析度 1 分之數值地形.....	6-3
圖 6.2 海科中心解析度 0.25 分之數值地形.....	6-3
圖 6.3 海科中心解析度 0.03125 分之數值地形.....	6-4
圖 6.4a 海科中心解析度 0.004 分之數值地形	6-4
圖 6.4b 內政部 5 公尺陸地地形(DSM)	6-5
圖 6.5 臺灣本島海域附近之斷層分佈圖	6-6
圖 6.6 臺灣西南海域附近之斷層分佈圖	6-7
圖 6.7 呂宋島之地理位置圖.....	6-7
圖 6.8 呂宋島地區 1619 年-1997 年之地震紀錄	6-8
圖 6.9 馬尼拉海溝 33 個子區塊分佈圖.....	6-9
圖 6.10 參考 Megawati et al. (2009)之地震參數建立初始水位	6-11
圖 6.11(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)	6-12
圖 6.11(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)	6-12
圖 6.11(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)	6-13
圖 6.12 模擬三個小時期間河道水位高度分佈(a)50cm(b)3m	6-13
圖 6.13(a)結合 Google Earth 之溢淹圖.....	6-14
圖 6.13(b)結合 Google Earth 之河道溢淹圖.....	6-14
圖 6.14 利用 Google Earth 之疊加圖層選擇圖資	6-15

圖 6.15	交通部氣象局東港潮位統計資料.....	6-16
圖 6.16(a)	COMCOT 模擬全日週期潮汐之入射水位	6-16
圖 6.16(b)	COMCOT 模擬半日週期潮汐之入射水位	6-16
圖 6.16(c)	高屏溪全日週期潮汐最大溢淹水位	6-17
圖 6.16(d)	高屏溪半日週期潮汐最大溢淹水位	6-17
圖 6.17	高屏溪之地形及紀錄點位.....	6-18
圖 6.18	模擬高屏溪全日潮之水位紀錄.....	6-18
圖 6.19	模擬高屏溪半日潮之水位紀錄.....	6-18
圖 6.20	雙園大橋橋梁斷面圖.....	6-20
圖 6.21	雙園大橋工程位置圖.....	6-21
圖 6.22(a)	高屏溪數值地形及橋墩配置	6-22
圖 6.22(b)	高屏溪數值地形及橋墩配置	6-22
圖 6.23	雙園大橋橋墩墩柱配置.....	6-23
圖 6.24	墩柱受水流作用力之示意與流速與動壓力之關係.....	6-24
圖 6.24	計算壓力分佈之參數點位.....	6-24
圖 6.26(a)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱東面之最大總壓力紀錄	6-25
圖 6.26(b)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱西面之最大總壓力紀錄	6-25
圖 6.26(c)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱南面之最大總壓力紀錄	6-26
圖 6.26(d)	入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱北面之最大總壓力紀錄	6-26
圖 6.27	馬蹄形渦流沖刷情形.....	6-27
圖 6.28	穩流、震盪流以及震盪流結合淨流之回歸數據值.....	6-28
圖 6.29	模式結果比較圖。(上圖)Rance (1980)、(下圖)模式結果	6-29

圖 6.30	第 11 組及第 4 組橋墩之沖刷模擬.....	6-30
圖 6.31(a)	入射波 3 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度.....	6-31
圖 6.31(b)	入射波 4 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度.....	6-31
圖 6.31(c)	入射波 6 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度.....	6-31
圖 6.31(d)	入射波 10 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度.....	6-31

表 目 錄

表 2.1	2004~2013 年間重大海嘯事件.....	2-3
表 2.2	臺灣地區西元 1500~2013 年之海嘯事件.....	2-8
表 2.3	2012~2013 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..	4-12
表 4.2	美國國家地震資訊中心修正的智利地震 FMT 解.....	4-14
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	安平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 公尺溢淹台北港之溢淹機率.....	5-26
表 5.5	高雄港各入射波高下對應之溢淹機率.....	5-45
表 6.1	馬尼拉海溝 33 個子斷層之斷層參數表.....	6-10
表 6.2	不同入射波最高堆積及最大侵蝕.....	6-31

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。本期計畫工作內容屬交通部運輸研究所「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫規劃二年合作研究計畫之第一年。

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，本研究後續將建構海嘯預警系統以及高雄、安平兩港之子系統，使能自動美國地質調查局（United States Geological Survey）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高雄港及安平港在未來 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，對河川中的跨河橋樑造成沖刷情形，本計畫將建立跨河橋樑海嘯數值模式及橋墩週遭受海嘯衝擊時之沖刷數值模式，評估高屏溪跨河橋樑可能遭受的威脅，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樑之影響風險評估研究(1/2)」計畫規劃二年合作研究計畫之第一年，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(如馬尼拉海溝)等資料並進行分析、精進高雄港域及安平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樑所受海嘯之衝擊力變化。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

- 1.自動擷取美國地質調查局(United States Geological Survey)地震資料。
- 2.高雄港域及安平港域未來50年及100年之海嘯災害風險評估。
- 3.精進高雄港域及安平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.建立高雄港域及安平港域海嘯模擬預警系統並進行教育訓練。
- 5.模擬無潮汐影響的狀況下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑所受之衝擊力。
- 6.模擬無潮汐影響的狀況下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑橋墩週遭之沖刷。
- 7.模擬潮汐影響下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑所受之衝擊

力變化。

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。
- (2) 完成海嘯模擬預警即時地震資料擷取系統，並增加日本防災科學技術研究所(NIED)所提供之 F-net 即時地震資料庫，以供與 USGS 與 CWB 資料庫結果比較
- (3) 101 年度計畫精進臺中港域及布袋港域海嘯數值模式之格林函數，減少系統檔案大小並增進系統運算速度；並與港灣環境資料庫進行整合以達海嘯資訊系統自動化之建置。
- (4) 臺中港域及布袋港域計算結果，布袋港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.1%，100 年為 0.2%；臺中港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率為 0.18%，100 年為 0.36%。分析結果遠小於基隆港及臺北港之風險值，主要是因為臺中港及布袋港現有之高程可抵擋大部份震源及地震矩規模所產生之波高；也就是雖然部份震源雖對臺中港及布袋港之外海產生較大之波高，但因為高程之影響不至於產生溢淹，故其風險值甚低。

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，近年四起海嘯事件，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1500~2013年共有2259起海嘯事件，約10%是由火山活動或其他因素所造成，50%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。

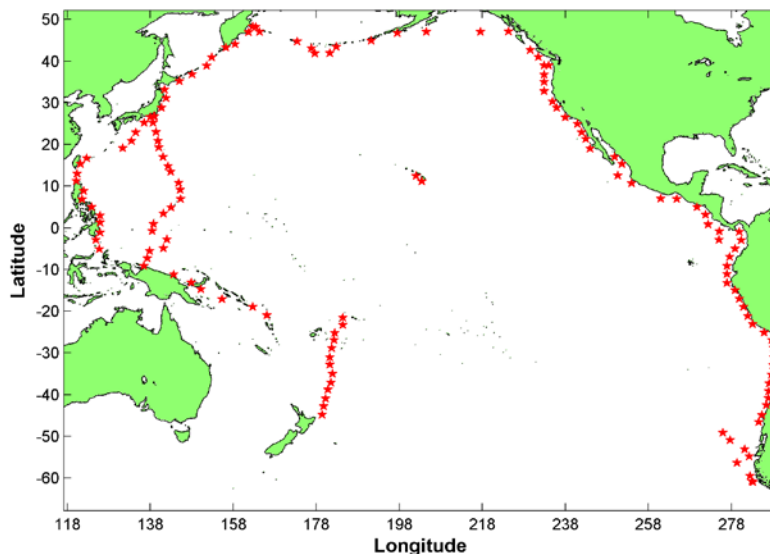


圖 2.1 環太平洋地震帶及海溝分佈(紅點即是海溝位置)

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1157起樣本數中，僅有764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。

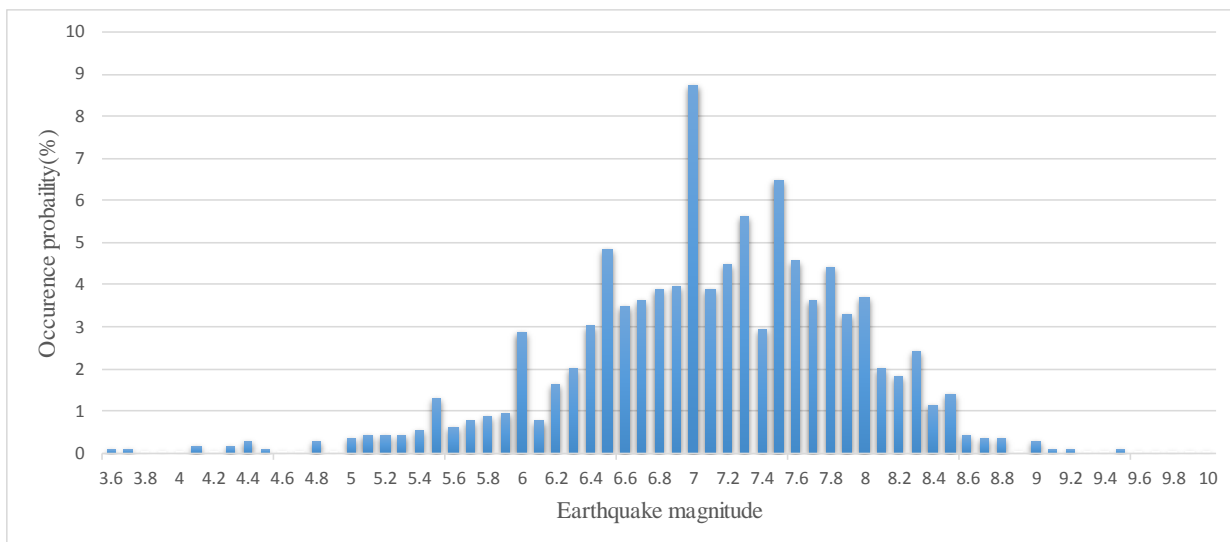


圖 2.2 1500-2013 年海嘯事件之地震規模分析

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

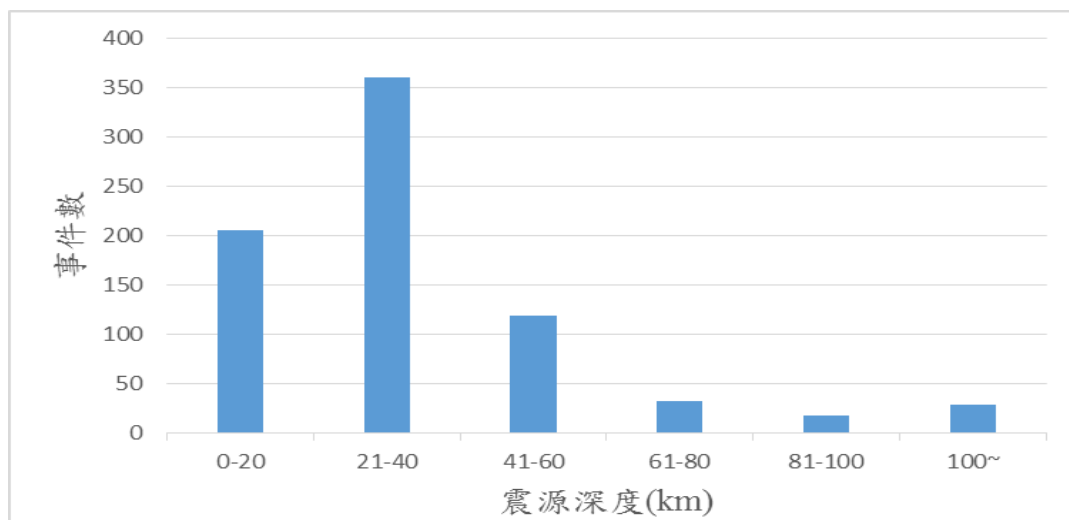


圖 2.3 1500-2013 年海嘯事件之震源深度分析

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard 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2013年5月為止，較具規模之海嘯事件共九起，如表2.1所示。

表2.1 2004~2013年間重大海嘯事件

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard 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，其殘餘速度仍足夠衝跨目前現有之結構物。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

根據既有歷史文獻紀錄，高雄及安平兩地曾有疑似海嘯之紀錄，可信度甚高；依海底地形而言，西南外海地形較緩有利於海嘯等長坡溯上發展；依海嘯淺勢波源而言，西南外海之海底斷層系統連接馬尼拉海溝，此一區域被地質學者認為是海嘯之高風險區域。根據互逆格林函數之放大率圖顯示，對高雄港及安平港威脅性最大的是來自於發生西南外海以及連接馬尼拉海溝的海底斷層系統；如圖2.4及圖2.5所示。

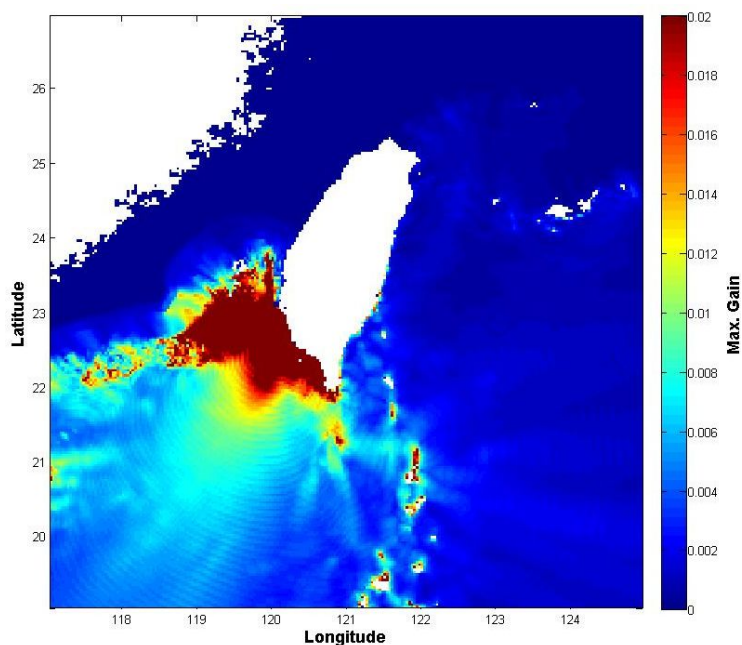


圖2.4 高雄港之放大率及海嘯潛勢波源區

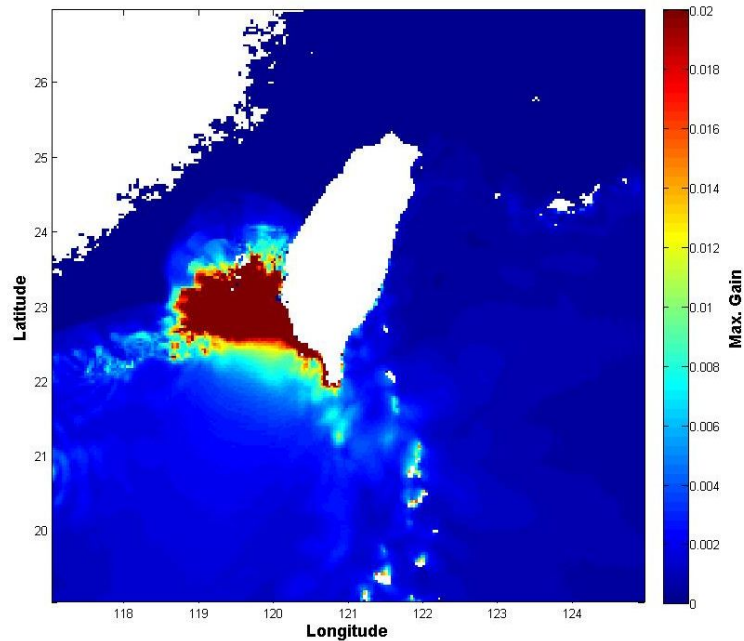


圖2.5 安平港之放大率及海嘯潛勢波源區

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。

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 2.6)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，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。」。

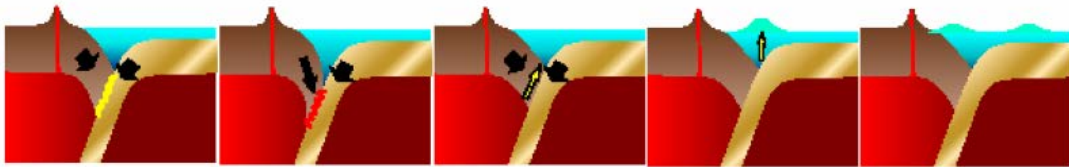


圖 2.6 板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖

(資料來源：邱等，2005)



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 1500~2013 年共有 19 起海嘯事件，詳見表 2.2 及圖 2.8 所示。花蓮海嘯事件屬於近域海嘯，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。

表 2.2 臺灣地區西元 1500~2013 年之海嘯事件

發生時間	地震規模	國家	震央位址	
			緯度	經度
1661.1.8	6.4	臺灣	23.0	120.1
1661.2.15	6.0	臺灣	23.0	120.2
1721		臺灣	23.0	120.2
1792.8.9	6.0	臺灣	23.6	120.5
1853.10.29		臺灣		
1903.9.7		臺灣		
1917.5.6	5.8	臺灣	23.2	121.6
1922.9.1	7.6	臺灣	24.5	122.0
1951.10.22	7.3	臺灣	23.8	121.7
1963.2.13	7.3	臺灣	24.4	122.1
1966.3.12	7.6	臺灣	24.1	122.6
1972.1.25	7.5	臺灣	22.5	122.3
1978.7.23	7.4	臺灣	22.282	121.512
1986.11.14	7.8	臺灣	23.901	121.574
1990.12.13	6.3	臺灣	23.722	121.627
1998.5.3	7.5	臺灣	22.306	125.308
2001.12.18	6.8	臺灣	23.954	122.734
2002.3.31	7.1	臺灣	24.279	122.179
2006.12.26	7.0	臺灣	21.799	120.547

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database.

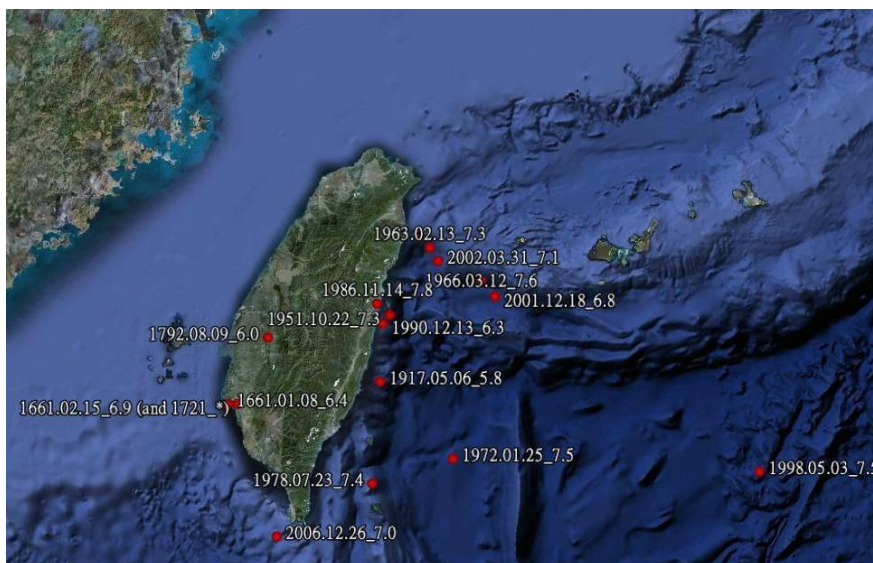


圖 2.8 臺灣海嘯事件之震源分佈

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard 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、仙臺灣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本年度至今總共發生 10 起小規模之海嘯，可發現其最大波高約在 0.08~0.2m 之間，因此對鄰近區域並無產生顯著之災情，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 2012-2013 年發生之海嘯事件

Date						Tsunami Cause					Tsunami Source Location				Tsunami Parameters					
						Val	Code	Earthquake Mag	Volcano	Addl Tsu Info					Deposits	Country	Name	Latitude	Longitude	Max Water Height	Num. of Runups	Magnitude	Abe	Iida	Tsu Int
2012	2	2	13	34	40.6	4	1	7.0		*		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	7.4		*		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			
2012	4	11	10	43	10.8	4	1	8.2		*		INDONESIA	OFF W. COAST OF N SUMATRA	.802	92.463		4			
2012	4	14	22	5	26.4	4	1	6.3		*		VANUATU	VANUATU ISLANDS	-18.972	168.741		1			
2012	7	15				4	8			*		GREENLAND	ILULISSAT ICEFJORD	69.200	-51.300		0			
2012	8	27	4	37	19.4	4	1	7.3		*		EL SALVADOR	OFF THE COAST	12.139	-88.590	.36	11			
2012	8	31	12	47	33.3	4	1	7.6		*		PHILIPPINES	PHILIPPINE ISLANDS	10.811	126.638	.15	17			
2012	9	5	14	42	7.8	4	1	7.6		*		COSTA RICA	COSTA RICA	10.085	-85.315	.16	2			
2012	10	28	3	4	8.8	4	1	7.7		*		CANADA	BRITISH COLUMBIA	52.788	-132.101	.76	110			
2012	11	7	16	35	46.9	4	1	7.3		*		GUATEMALA	GUATEMALA	13.988	-91.895		6			
2012	12	7	8	18	24.0	4	1	7.3		*		JAPAN	OFF EAST COAST OF HONSHU ISLAND	37.889	144.090		3			
2012	12	28				0	8			*		CHINA	ZHAOJUN BRIDGE, HUBEI PROVINCE	31.256	110.733		0			
2013	1	5	8	58	19.0	4	1	7.5		*		USA	SOUTHEASTERN ALASKA, AK	55.368	-134.621		8			
2013	2	6	1	12	27.0	4	1	8.0		*		SOLOMON ISLANDS	SANTA CRUZ ISLANDS	-10.738	165.138		122			
2013	2	8	15	26	39.0	4	1	7.0		*		SOLOMON ISLANDS	SANTA CRUZ ISLANDS	-10.910	165.964		1			
2013	4	19	3	5	53.0	2	1	7.2		*		RUSSIA	S. KURIL ISLANDS	46.182	150.796	.20	1			

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

2.4 海嘯之風險

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。

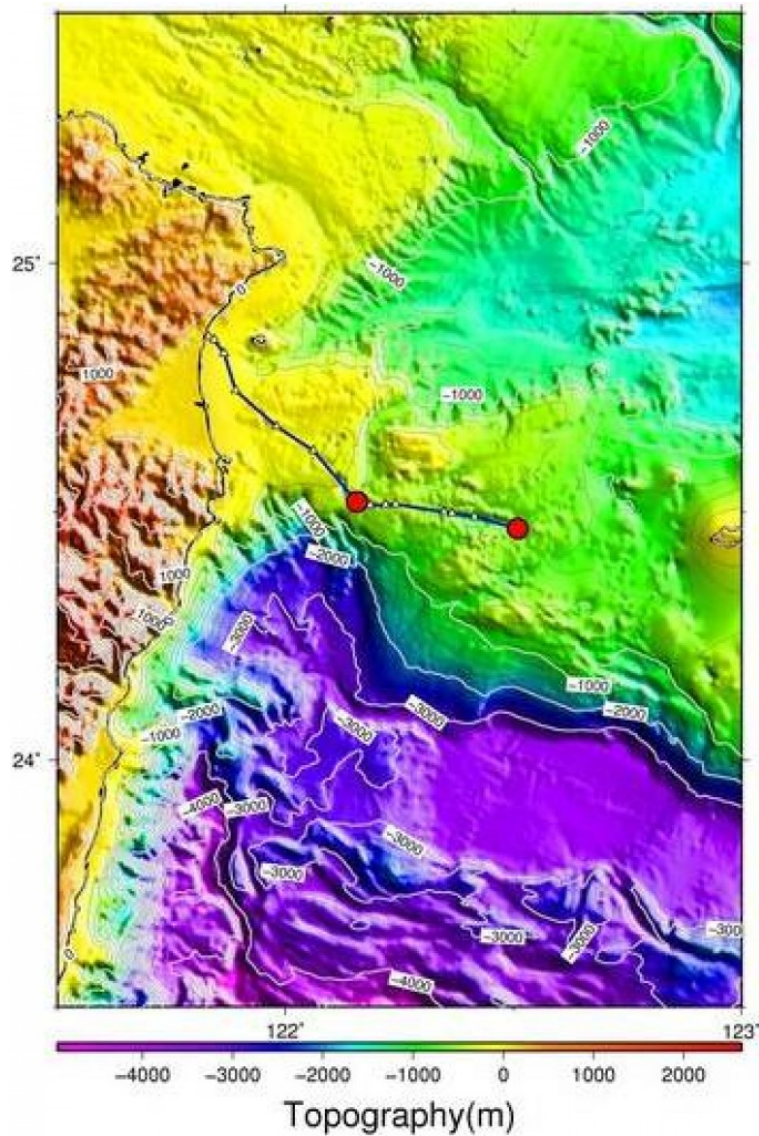


圖 3.1 電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置
(臺灣東部外海長達 45 公里)

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， η 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， $f = 2\omega \sin \Phi$ 為科氏參數 (ω 為地球自轉角速度， Φ 為緯度)， τ_x 、 τ_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(dispersion)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(ψ , φ)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 ζ 代表的關係式。

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{gh}{R^2 \cos^2 \varphi} \left[\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} + \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right] \\
&= \frac{gh^3}{3R^4 \cos^4 \varphi} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \psi^4} + \frac{gh^3}{3R^4 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right\} \right] \\
&+ \frac{gh^3}{3R^4 \cos^3 \varphi} \left[\frac{\partial^3}{\partial \psi^2 \partial \psi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) + \cos^2 \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} \right) \right\} \right]
\end{aligned} \quad (3.7)$$

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)：

$$\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gH \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gH \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (3.10)$$

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)：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} P + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fQ + \tau_x H = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fP + \tau_y H = 0 \quad (3.13)$$

式中 t 是時間， ζ 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， τ_x 、 τ_y 分別為 x 與 y 方向底部摩擦力。

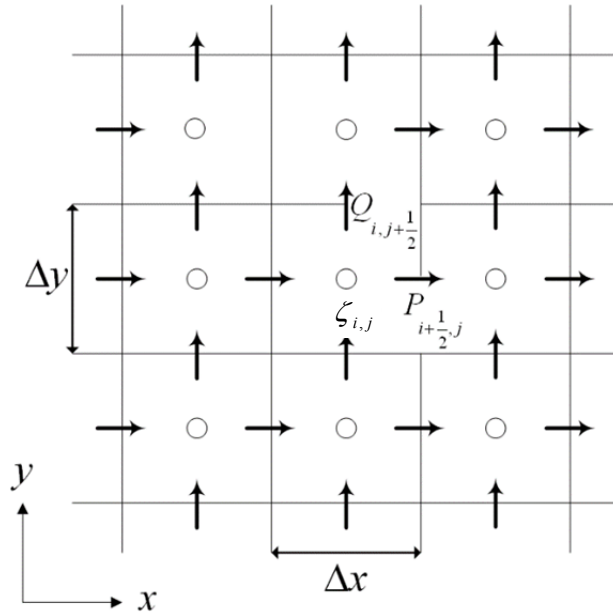


圖 3.2 交錯式有限差分網格

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)， ζ 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。

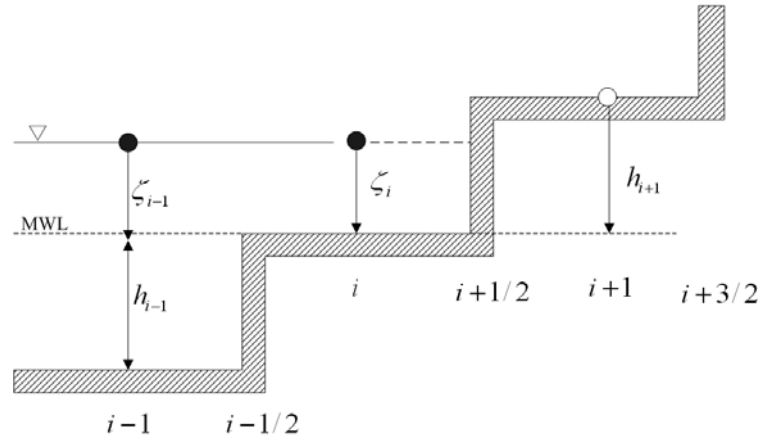


圖 3.3 移動邊界示意圖(a)

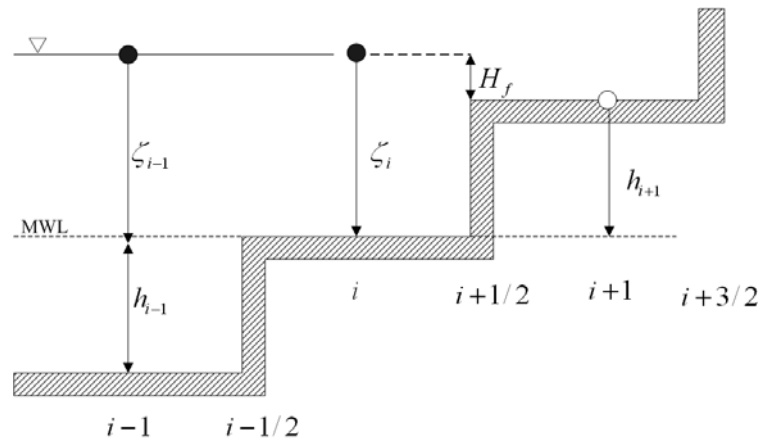


圖 3.4 移動邊界示意圖(b)

- (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 multicell 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。

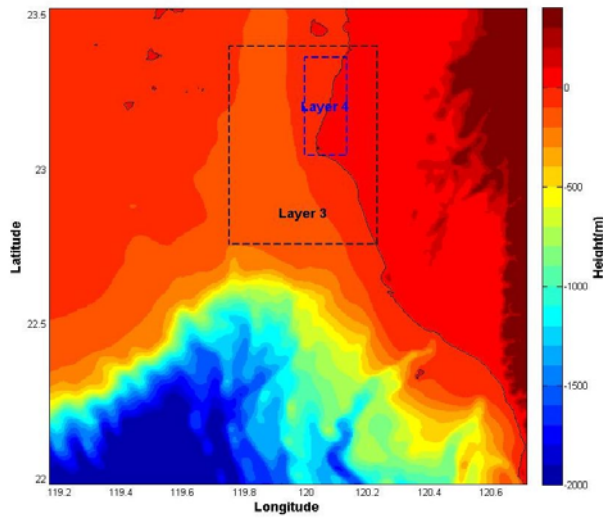


圖3.5 巢狀網格示意圖

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 Δt 為時間步長(time step)， Δx 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

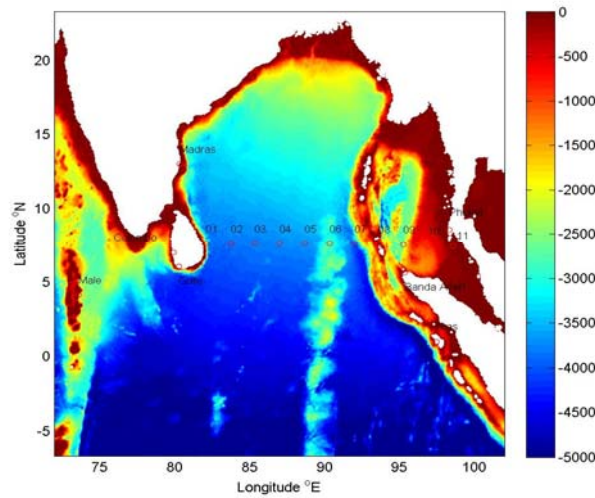


圖3.6 模式計算區域水深地形圖

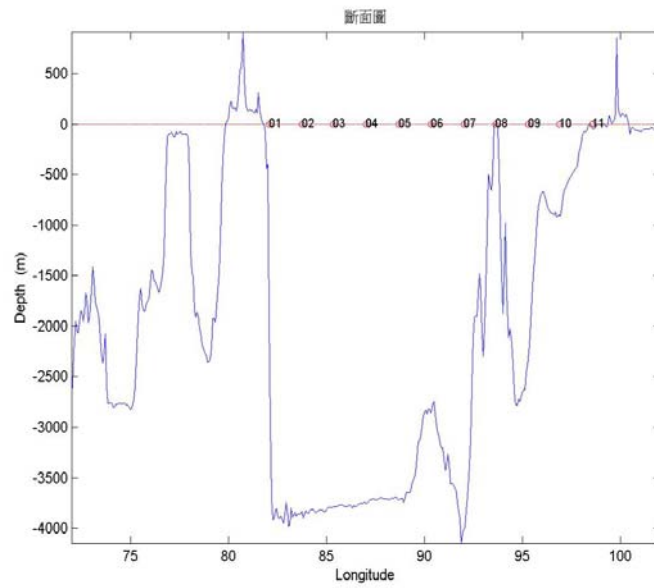


圖3.7 模式計算區域水深地形剖面圖

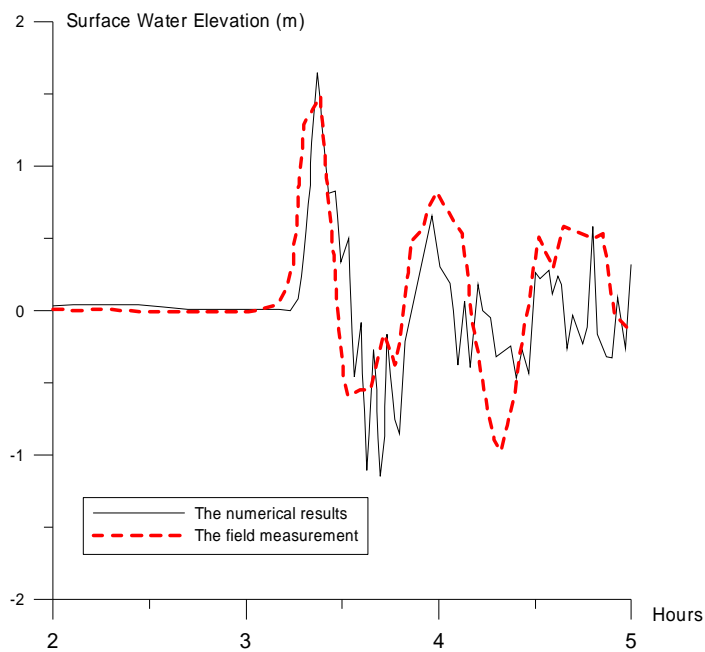


圖3.8 與馬爾地夫水位之比對

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。

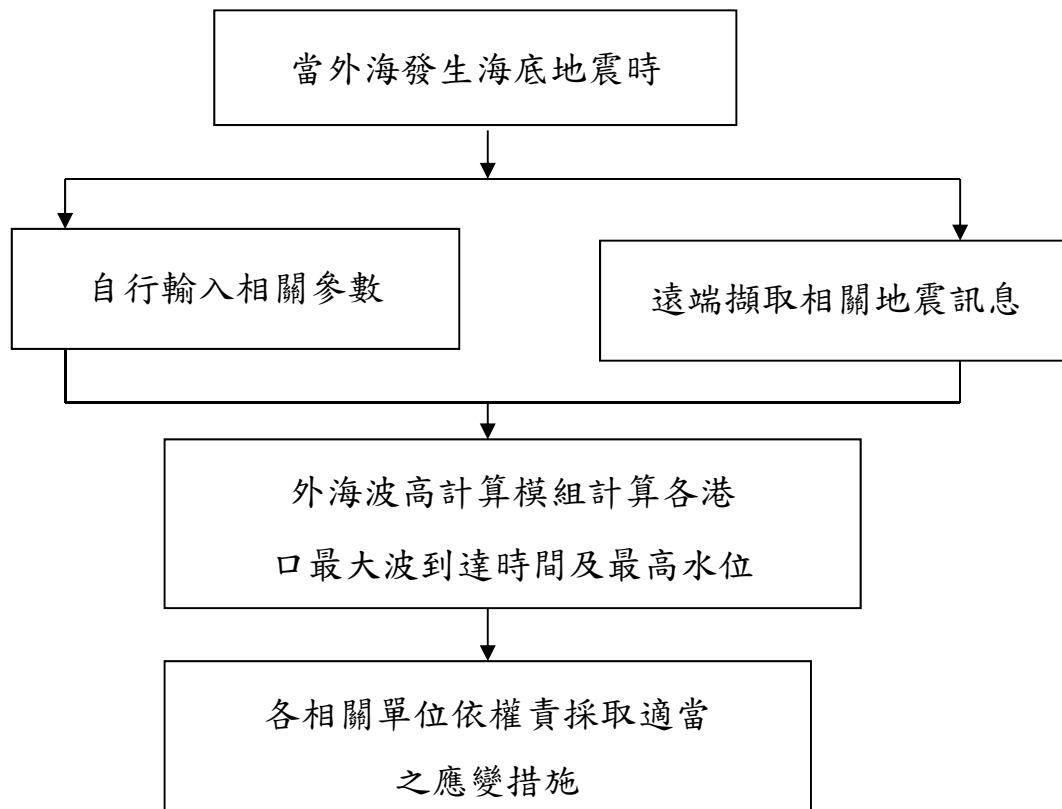


圖3.9 海嘯速報系統之規劃圖

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 Cqmt Distribution In Taiwan

[Subscribe Quick CMT](#)

Date	Time(UT)	Lat.	Lon.	Dep.	Mw	Strike	Dip	Slip	Misfit	CMT	Detail
2010-11-10	9:36:58.70	22.87	121.26	18.00 18	3.70	216 344	39 63	135 60	0.504		Trace Map Image Solution
2010-11-09	18:30:52.90	24.55	121.82	9.80 12	3.70	96 6	71 89	1 161	0.581		Trace Map Image Solution
2010-11-08	13: 1:21.30	23.22	120.41	19.90 17	4.50	337 218	42 67	37 126	0.584		Trace Map Image Solution
2010-11-06	0:22: 6.50	24.04	121.93	57.30 59	3.40	127 27	64 69	23 152	0.651		Trace Map Image Solution
2010-11-04	18:22:25.50	22.05	121.61	42.20 44	3.60	257 11	33 75	153 60	0.712		Trace Map Image Solution

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
2011/04/18.1914	39.6 N	140.4 E	20 km	Mj 4.8	SOUTHERN AKITA PREF	79.82
2011/04/18.1737	35.5 N	139.6 E	90 km	Mj 4.1	KANAGAWA PREF	70.58
2011/04/18.1726	41.5 N	142.0 E	50 km	Mj 4.0	E.OFF AOMORI PREF	81.61
2011/04/18.0816	35.4 N	136.8 E	40 km	Mj 3.5	SHIGA GIEU BORDER REGION	85.22
2011/04/18.0208	37.1 N	140.7 E	20 km	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	77.38
2011/04/17.1833	37.0 N	140.8 E	10 km	Mj 4.1	EASTERN FUKUSHIMA PREF	82.41
2011/04/17.1809	35.9 N	140.1 E	80 km	Mj 4.4	NORTHERN CHIBA PREF	86.46
2011/04/17.1547	37.1 N	141.3 E	30 km	Mj 4.8	E.OFF FUKUSHIMA PREF	80.43
2011/04/17.1446	37.1 N	140.8 E	shallow	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	73.98
2011/04/17.1251	37.1 N	140.7 E	10 km	Mj 4.6	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.82
2011/04/17.0803	37.1 N	140.8 E	10 km	Mj 4.2	EASTERN FUKUSHIMA PREF	89.40
2011/04/17.0649	35.9 N	140.5 E	40 km	Mj 4.7	SOUTHERN IBARAKI PREF	89.94
2011/04/17.0538	37.0 N	140.7 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.88
2011/04/17.0439	35.9 N	140.6 E	40 km	Mj 4.5	SOUTHERN IBARAKI PREF	88.09
2011/04/17.0138	38.7 N	142.3 E	40 km	Mj 4.6	E.OFF MIYAGI PREF	85.75
2011/04/16.2021	36.2 N	141.0 E	40 km	Mj 4.8	E.OFF IBARAKI PREF	79.14
2011/04/16.2019	37.1 N	140.9 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	71.98
2011/04/16.1917	37.0 N	138.7 E	10 km	Mj 3.5	MID NIGATA PREF	75.37
2011/04/16.1556	37.1 N	138.7 E	30 km	Mj 4.8	MID NIGATA PREF	85.74
2011/04/16.1340	24.0 N	122.8 E	20 km	Mj 4.6	NW OFF ISHIGAKIJIMA IS	79.47
2011/04/16.0420	37.6 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)	該網站於 10 月後網只已更改為 http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/ 資料提供範圍：全球
臺灣	中央氣象局(CWB)	地震解提供來源為台灣寬頻地震網 (Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS) http://bats.earth.sinica.edu.tw/ 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)	http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en 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(μm)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 (μm) 為單位， Δ 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 Guttenburg 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 μm) 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) σ ，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：

$$M_S = \log(A20) + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (3.22)$$

其中 $A20$ 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 μ 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 10¹²-10³⁰ 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。

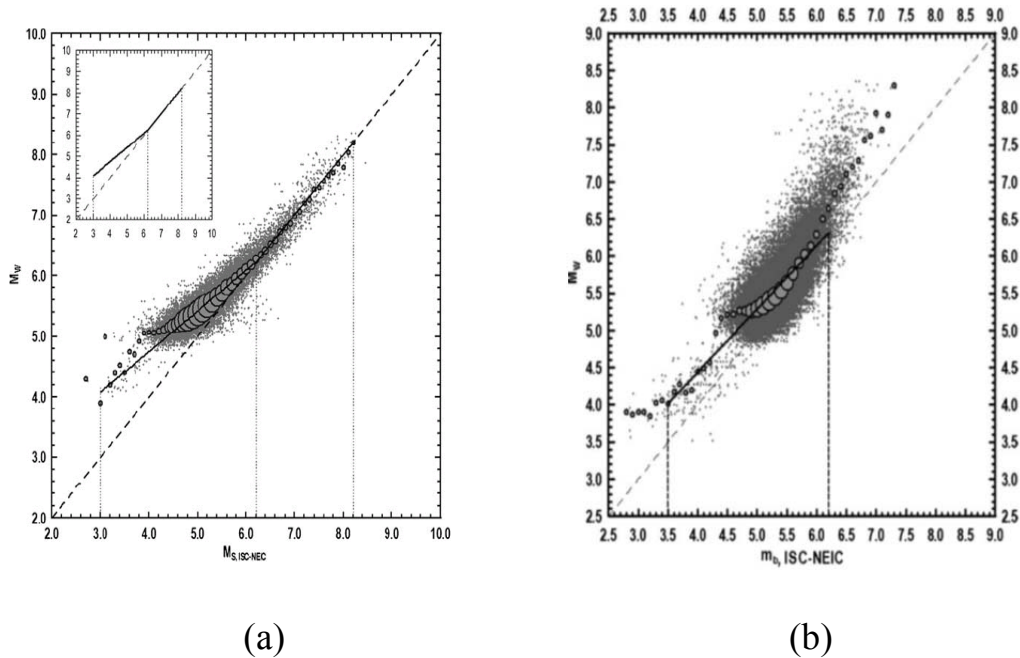


圖3.15 (a) M_S 規模轉換之 M_W 規模之對應圖 (b) M_B 規模轉換至 M_W

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 δ 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。

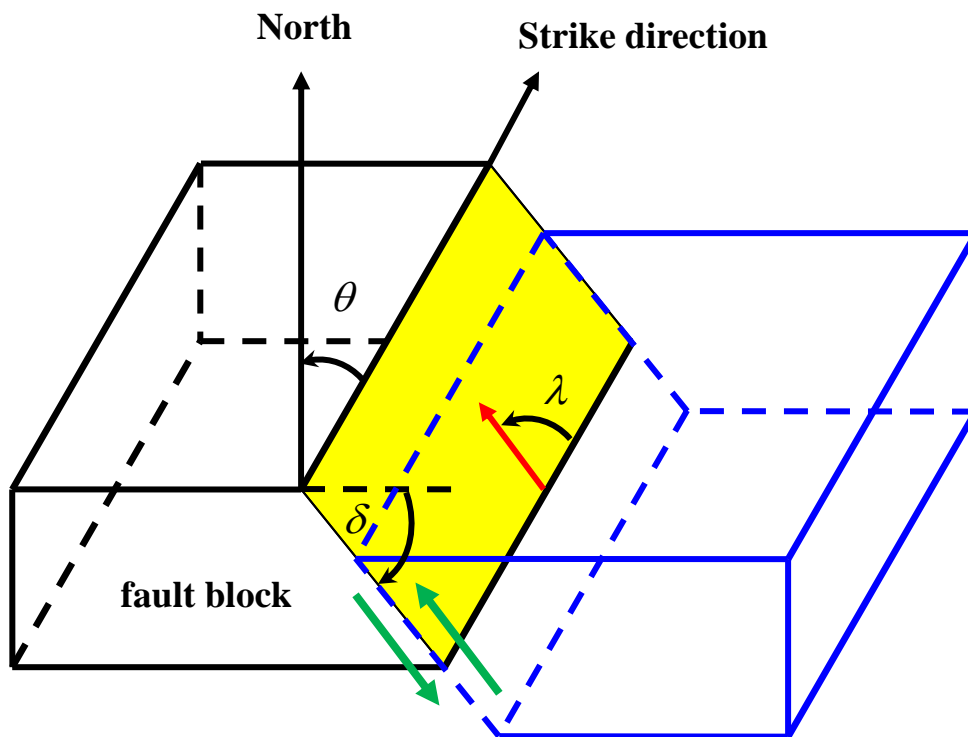


圖3.16 斷層參數示意圖

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 D 。

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \quad (3.32)$$

$$M_0 = \mu WDL \quad (3.33)$$

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 Δu_j ，並對整個矩形斷層錯動範圍積分；其關係式為：

$$u_i = \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k dS \quad (3.34)$$

其中 v_k 為 Σ 向外的垂直向量、 λ 與 μ 為拉梅常數(Lamé constants)、 u_i^j 為受到破裂面 (ξ_1, ξ_2, ξ_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 ξ 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

$$u_{is} = \mu U_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \theta - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \theta \right] d\xi_1 d\xi \quad (3.35)$$

$$u_{id} = \mu U \int_d^D \int_{-L}^L \left[2 \left(\sin \theta \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi} - \cos \theta \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} \right) \right] d\xi_1 d\xi \quad (3.36)$$

其中， ξ = 震源深度($\sin \theta$) + 斷層寬度(w)、 ξ_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

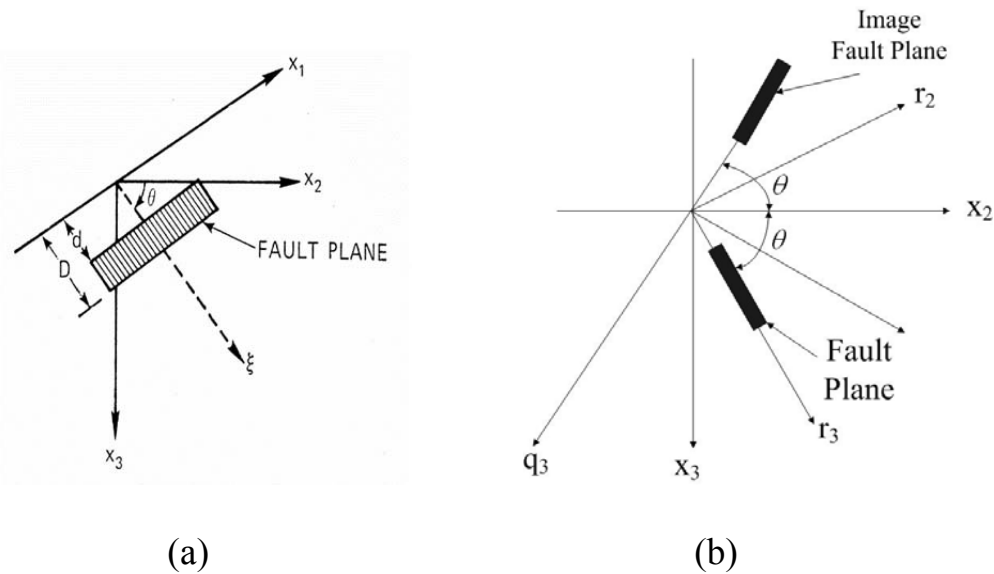


圖3.17 (a)斷層幾何形狀及座標系統(b)斷層及映像斷層座標系統

$$\begin{aligned}
R &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2 \right]^{1/2} \\
S &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2 \right]^{1/2} \\
r_2 &= x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, \quad r_3 = x_2 \cos \theta - x_3 \sin \theta \\
q_2 &= x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, \quad q_3 = -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta
\end{aligned} \tag{3.37}$$

其中， R 和 S 分別代表斷層面上的震源點 (ξ_1, ξ_2, ξ_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 (ξ_1, ξ_2, ξ_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：

$$\begin{aligned}
\frac{12\pi}{U_1} u_3 = & \sin \delta (x_2 - \xi_2) \left[\frac{2(x_3 - \xi_3)}{R \exp(a_5)} + \frac{4(x_3 - \xi_3)}{S \exp(a_6)} - 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \frac{S + \exp(a_6)}{S^3 (\exp(a_6))^2} \right] \\
& - 3 \sin \delta \left[2 \tan^{-1} \left[\frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{(h + x_3 + \xi_3)(S + h)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 - \xi)}{r_2 R} \right] \right] \\
& - 6 \sin \delta \tan^{-1} \left[\frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 S} \right] + \cos \delta \left[a_5 - a_6 - \frac{2(x_3 - \xi_3)^2}{R \exp(a_5)} \right] \\
& - 4 \cos \delta \left[\frac{x_3^2 + x_3 \xi_3 + \xi_3^2}{S \exp(a_6)} + \xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)^2 \frac{S + \exp(a_6)}{S^3 (\exp(a_6))^2} \right] \\
& + 3x_3 \sin 2\delta \left[\frac{2(q_3 + \xi)}{S \exp(a_6)} + \frac{(x_1 - \xi_1)}{S \exp(a_2)} + \frac{q_2 \cos 2\delta}{S \exp(a_6)} \right]
\end{aligned} \tag{3.40}$$

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。

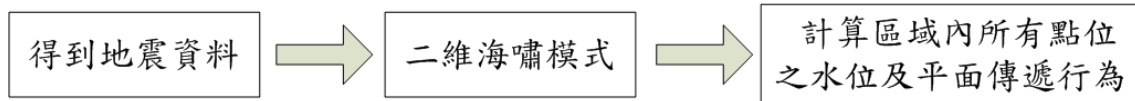


圖 3.18 現行海嘯數值模式之模擬程序

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：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \quad (3.41)$$

$$P_t + gd\eta_x = 0 \quad (3.42)$$

$$Q_t + gd\eta_y = 0 \quad (3.43)$$

其中 η 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為以下之方程：

$$\eta_u - g \left[(d\eta_x)_x + (d\eta_y)_y \right] = 0 \quad (3.44)$$

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

$$\eta_u - g \left[(d\eta_x)_x + (d\eta_y)_y \right] = \delta(t, x - x_s; y - y_s) \quad (3.45)$$

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 δ 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 δ 函數其形式為

$$\tilde{\delta}(t, x - x_s; y - y_s) = \begin{cases} 1 & \text{for } t=0, x = x_s \text{ and } y = y_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.46)$$

圖 3.19 即為以基隆為例之格林函數所對應的初始水位。

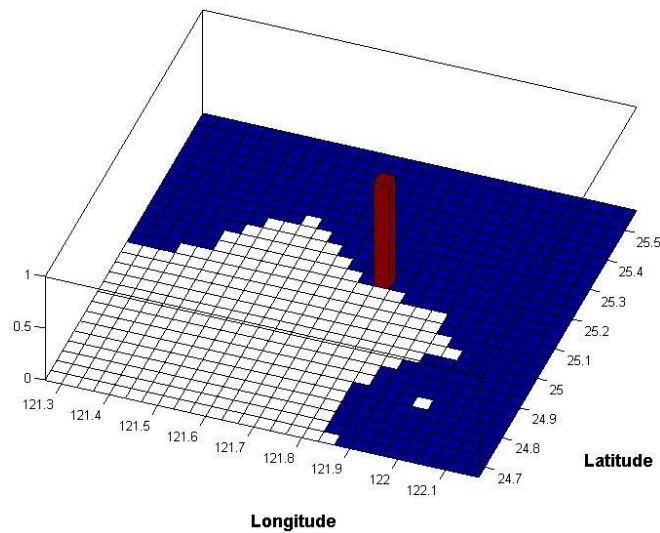


圖 3.19 以基隆為例之格林函數所對應的初始水位

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

$$\sum_{s=1}^N H^s \tilde{\delta}(t, x - x_s; y - y_s) \quad (3.47)$$

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

$$\eta^s_{tt} - g \left[\left(d\eta^s_x \right)_x + \left(d\eta^s_y \right)_y \right] = H^s \tilde{\delta}(t, x - x_s; y - y_s) \quad (3.48)$$

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， η^s 相對於格林函數 G^r_s 之 H^s 倍，即

$$\eta^s(t, x_r, y_r) = G^r_s \times H^s \quad (3.49)$$

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

$$\sum_{s=1}^N \eta^s_{tt} - \sum_{s=1}^N g \left[\left(d\eta^s_x \right)_x + \left(d\eta^s_y \right)_y \right] = \sum_{s=1}^N H^s \tilde{\delta}(t, x - x_s; y - y_s) \quad (3.50)$$

連加符號 Σ 與時、空之偏微分運算可以互換，故得

$$\left(\sum_{s=1}^N \eta^s \right)_{tt} - g \left[\left(d \left(\sum_{s=1}^N \eta^s \right) \right)_x + \left(d \left(\sum_{s=1}^N \eta^s \right) \right)_y \right] = \sum_{s=1}^N H^s \tilde{\delta}(t, x - x_s; y - y_s) \quad (3.51)$$

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， η^s 相對於格林函數 G^r_s 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 η^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。

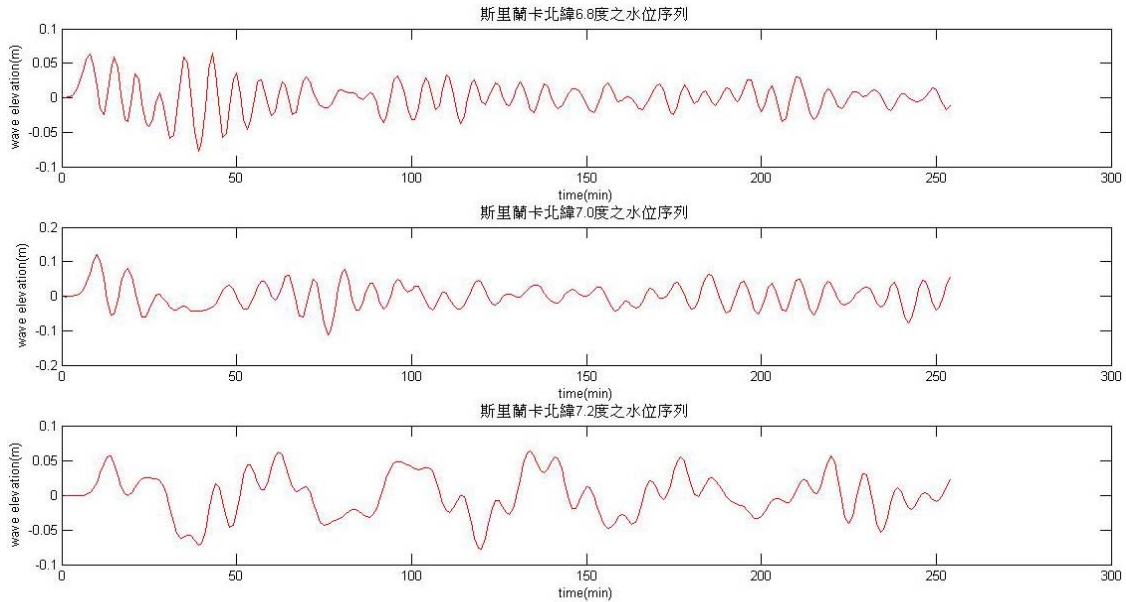


圖 3.20 傳統海嘯之模擬結果

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、抑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。

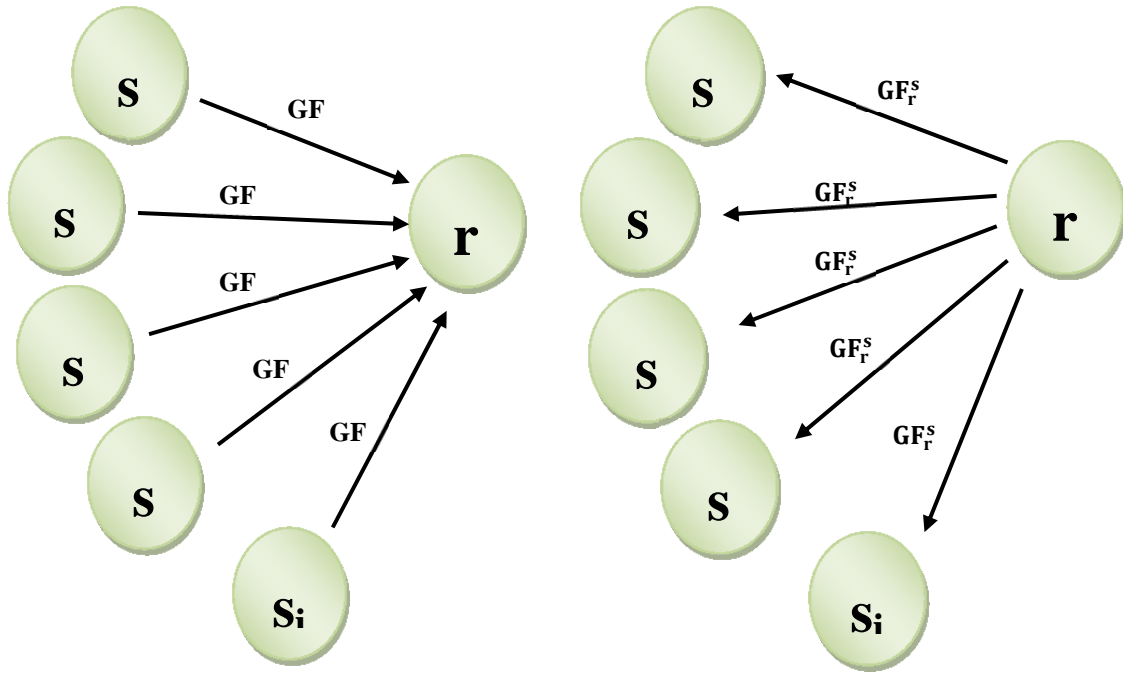


圖 3.21 傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖

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

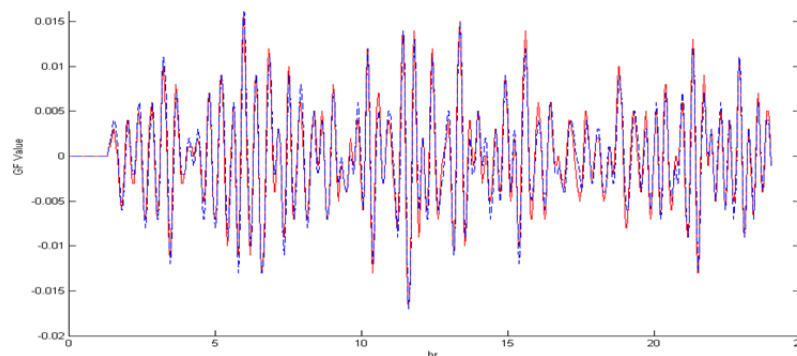


圖 3.22 海嘯模式所計算出之格林函數與互逆格林函數比較

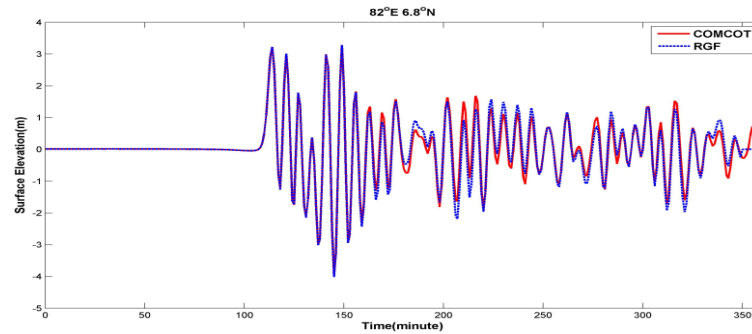


圖 3.23 互逆格林函數與直接的海嘯模擬之水位變化驗證

(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。

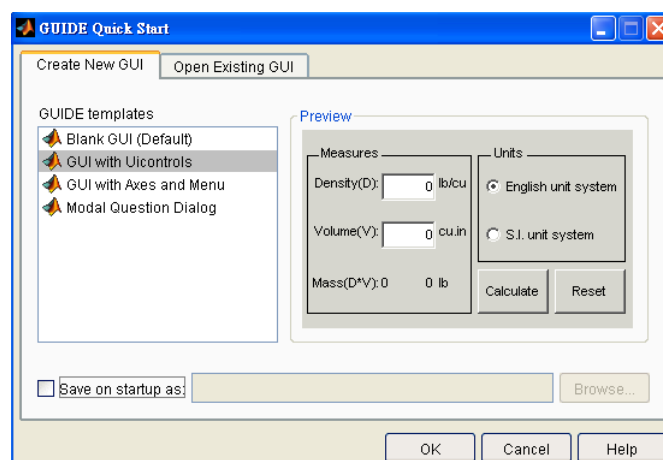


圖3.24 GUI程式設計環境

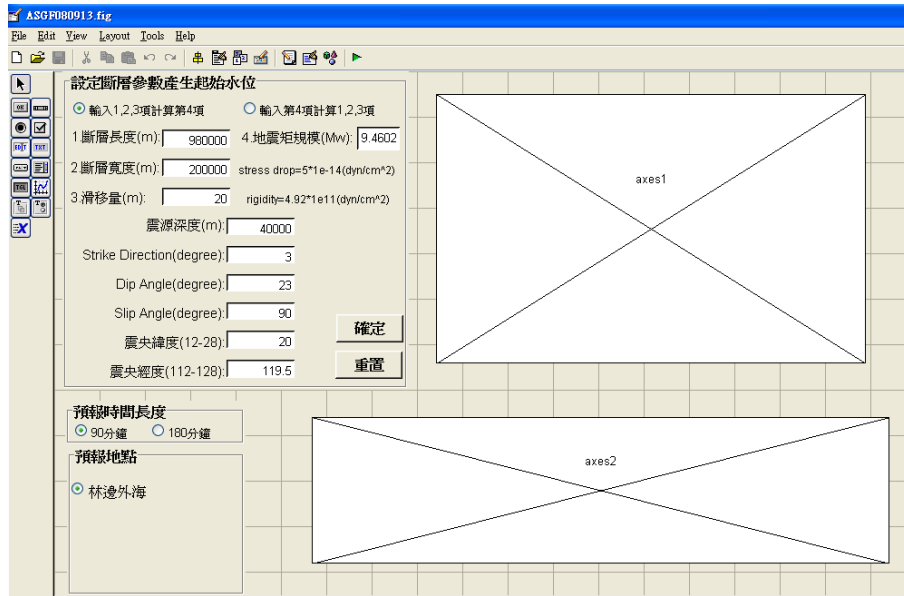


圖3.25 視窗化操作系統之建立與排版

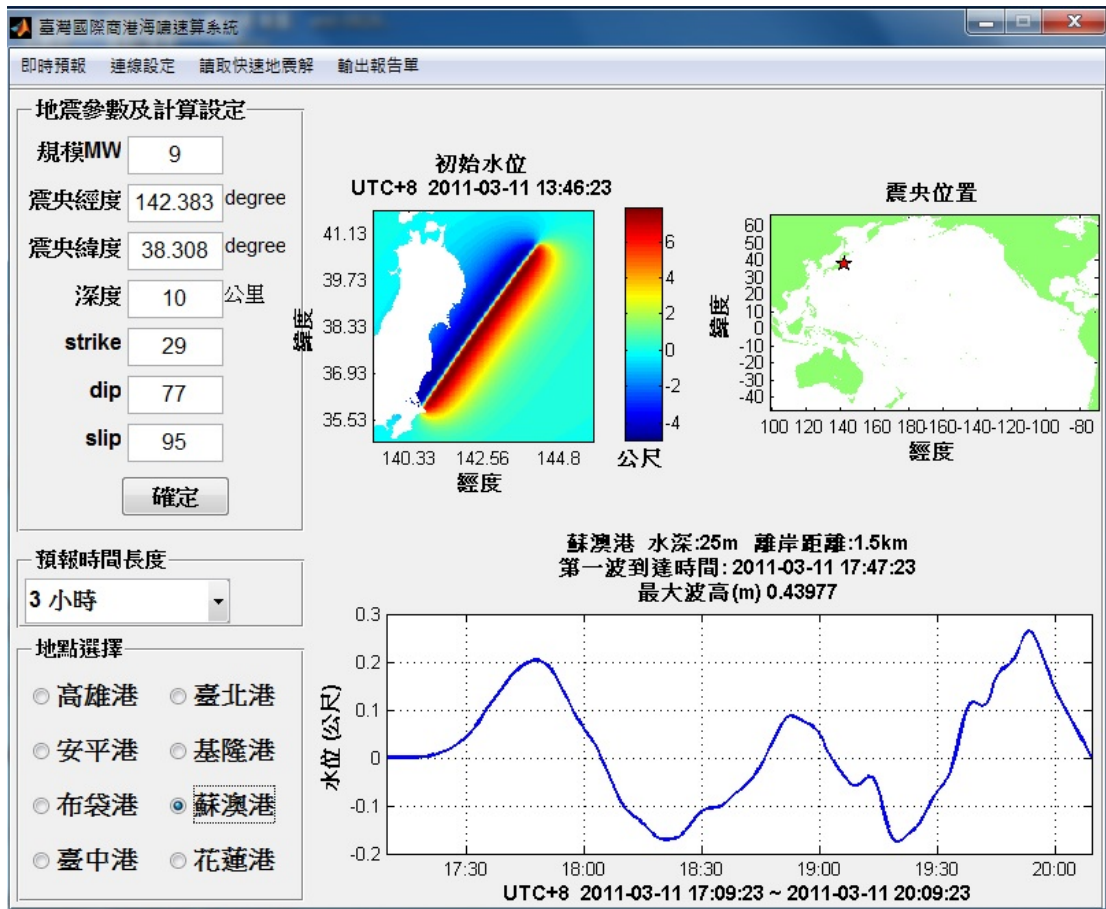


圖3.25 視窗化介面之編譯完成圖

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 HarvardCMT 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 2013 年 2 月 6 日早上於聖克魯斯群島(索羅門群島東南端的火山島)發生地震矩規模 8.0 之海底地震作為實際案例。

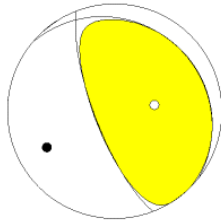
臺北時間 2013 年 2 月 6 日早上 09 點 12 分於聖克魯斯群島(東經 165.088 度，南緯 11.051 度)發生地震矩規模 8.0 之海底地震，深度為 15 公里，距離我國約 6000 公里；地震參數及震央位址分別見圖 3.27(a)(b)；系統於擷取 USGS 資料後進行蘇澳港、花蓮港、安平港及高雄港之最大波高及到達時間之預估，並輸出預估報告單至指定目錄中以便查閱，各港之輸出結果如圖 3.28(a~d)；預估結果顯示雖然地震矩規模已達海嘯發生要因之標準，且雖震源深度甚淺、但因所發生之斷層走向為西北-東南走向，且距離尚遠，我國並非位處主要傳遞路徑

之上，因此對四港並未造成任何威脅性。

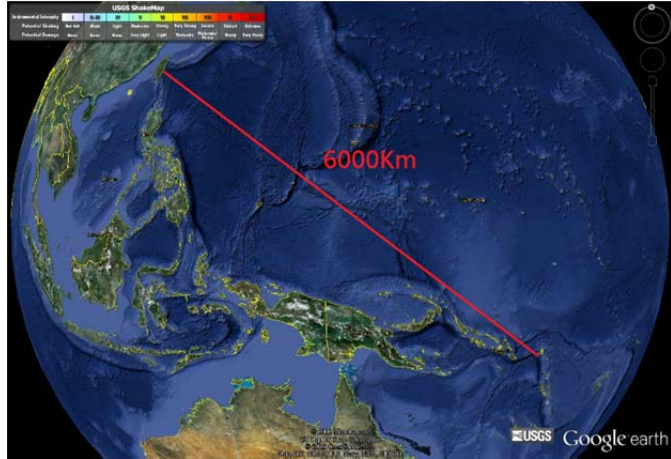
USGS WPhase Moment Solution

SANTA CRUZ ISLANDS

13/ 2/ 6 1:12:23.00
 Epicenter: -10.751 165.088
 MW 8.0
 USGS/WPHASE CENTROID MOMENT TENSOR
 13/ 2/ 6 1:12:23.00
 Centroid: -11.051 165.088
 Depth 15 No. of sta:112
 Moment Tensor: Scale $10^{*}20$ Nm
 Mrr= 6.03 Mtt=-2.19
 Mpp=-3.84 Mrt= 3.02
 Mrp=-9.42 Mtp= 2.96
 Principal axes:
 T Val= 11.81 Plg=59 Azm= 81
 N = -0.44 8 336
 P =-11.37 29 242
 Best Double Couple:Mo=1.2*10**21
 NP1:Strike=309 Dip=17 Slip= 61
 NP2: 159 75 99



(a)

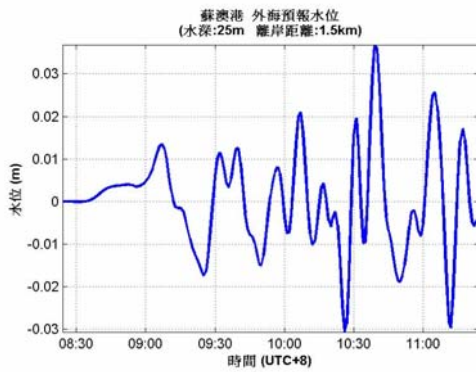


(b)

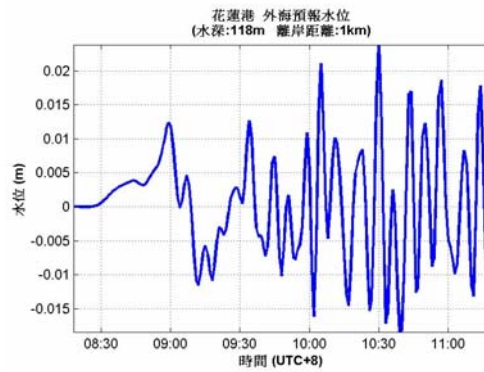
圖 3.27 (a)USGS 所公佈之地震參數(b)震央位址

地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度-10.751 經度165.088
 地震規模(MW): 8 地震深度(km): 15
 Strike=309 Dip=17 Slip=61
 第一波到達時間:0000-01-00 09:07:00
 最大波高(m):0.067436

地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度-10.751 經度165.088
 地震規模(MW): 8 地震深度(km): 15
 Strike=309 Dip=17 Slip=61
 第一波到達時間:0000-01-00 08:59:00
 最大波高(m):0.040971



(a)

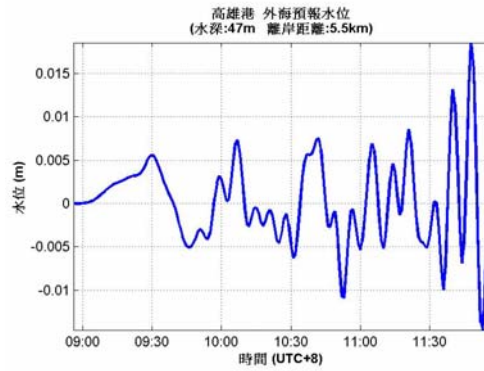
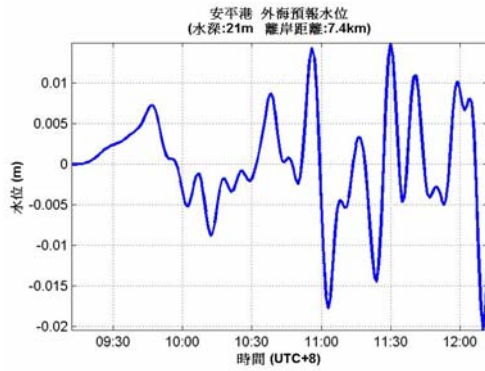


(b)

圖 3.28 利用第一組參數所預估之結果及報告單(a)蘇澳港(b)花蓮港

地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度-10.751 經度165.088
 地震規模(MW): 8 地震深度(km): 15
 Strike=309 Dip=17 Slip=61
 第一波到達時間:0000-01-00 09:47:00
 最大波高(m):0.030677

地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度-10.751 經度165.088
 地震規模(MW): 8 地震深度(km): 15
 Strike=309 Dip=17 Slip=61
 第一波到達時間:0000-01-00 09:30:00
 最大波高(m):0.033107



(c)

(d)

圖 3.28 利用第一組參數所預估之結果及報告單 (c)安平港(d)高雄港

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，本計畫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。

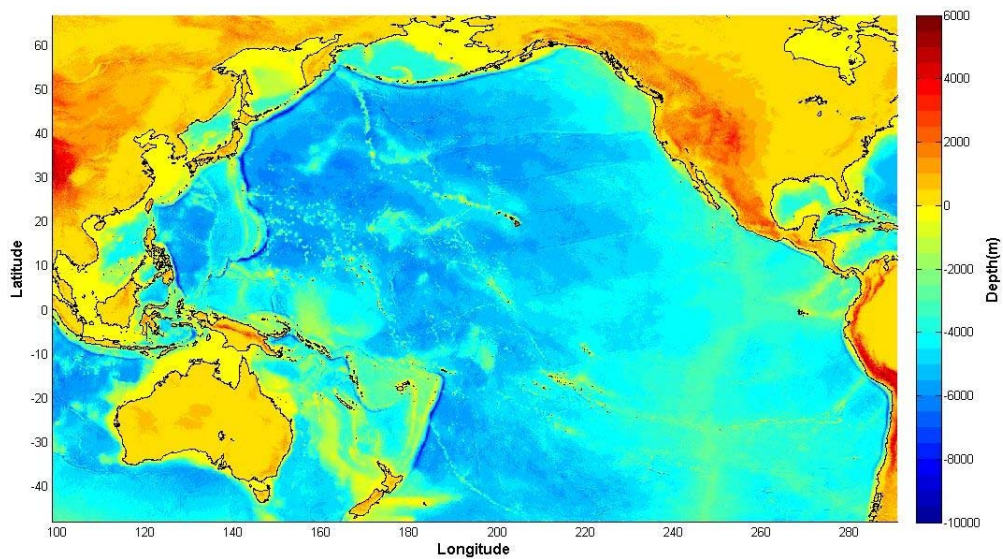


圖4.1 視窗化系統之計算範圍圖

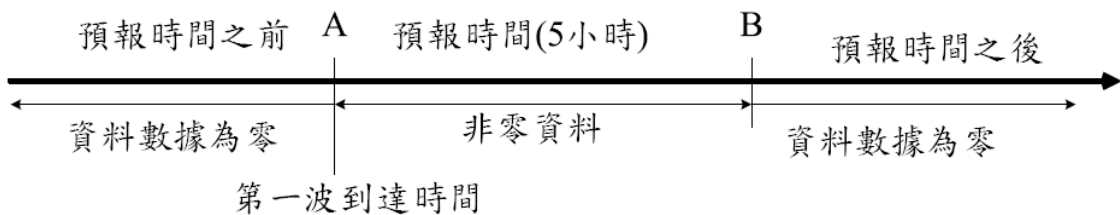


圖4.2 單點格林函數數值資料在時間上之分布型態

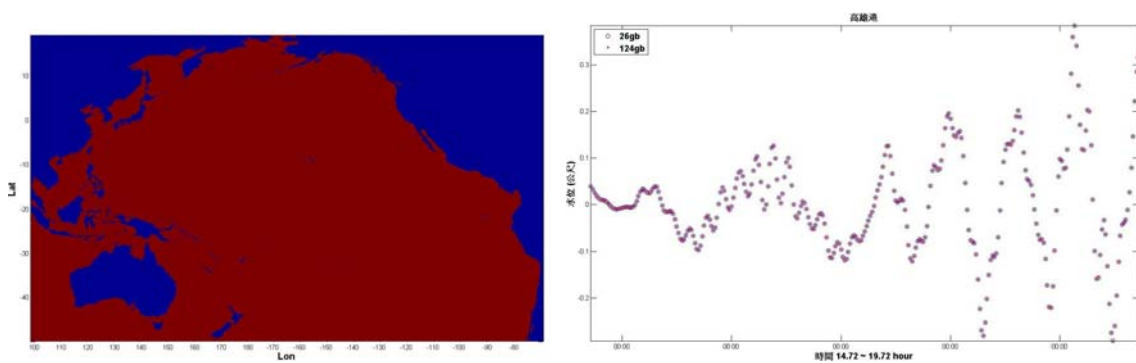


圖4.3 (a)單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分為水域，藍色為陸域)(b)高雄港格林函數變更前後之水位變化驗證

4.2 高雄港域及安平港域海嘯預警子系統

4.2.1 高雄及安平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；以此方法訂出南部各港之潛在海嘯波源區，如圖 2.4、圖 2.5。圖中顯示發生在連接馬尼拉海溝及西南外海之海底斷層系統對高雄港、安平港威脅性最大，根據歷史上的文獻紀載，臺灣西南部地區皆有疑似海嘯侵襲的記述(1661 年、1721 年、1792 年於臺南、1866 年於高雄及 1781 年於屏東)，若在西南方海域足以引發海嘯之地震，將造成嚴重損失，高雄港更為國際商港，因此，就防災考量而言，也不能排除海嘯之可能性。

另一方面，高雄港及安平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。

4.2.2 海嘯預警子系統

高雄港位於臺灣西南部沿海，腹地廣大，地處臺灣海峽與巴士海峽航道交匯之要衝，是歐、美、亞海運必經之道，為臺灣進出口貨物之首要門戶與集散中心。高雄港共有兩個港口，第一港口位於東經 120°15'25"，北緯 22°37'01"；第二港口位於東經 120°18'26"，北緯 22°33'21"。亦即以旗後山上之燈塔為中心劃圈，半徑 3.22 公里範圍內之水域而言。港口北側有高雄山聳立，海拔約 350 公尺，形成天然之屏障，港口南側約 48 公尺處有旗後山對峙。港口居於兩山之間，水道狹窄，寬僅 105 公尺，主要部分之水深，退潮時平均 10 公尺，有時達到約 14 公尺，將來計畫拓建到 150 公尺寬。港口外之航道，寬 180 公尺，長 1045 公尺，水深約 7.5 公尺，可通行吃水約 7.5 公尺之船舶，將來計畫擴建為寬 300 公尺，長 1710 公尺，水深 11 公尺。中華民國政府正推

動發展高雄港為亞太海運轉運中心、全球運籌中心及自由貿易港區。
圖 4.4 為目前港區之平面圖。

安平港南距高雄港約 40 公里，北距臺中港約 140 公里，為臺南地區之門戶，港內有完善良好之港埠設施及旅客服務中心，開發完成後，港區總面積達 445 公頃，陸域面積 180 公頃，水域面積 265 公頃，航道水深 11.5 公尺，可進泊 2 萬噸貨輪，碼頭總數為 32 座，總長度約 5566 公尺，貨物裝卸能量可達 1 千 600 百萬公噸。安平港為高雄港的輔助港，安平港由國內商港升格為國際商港。圖 4.5 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4.4 高雄港區之平面圖(資料來源：高雄港務公司網頁)

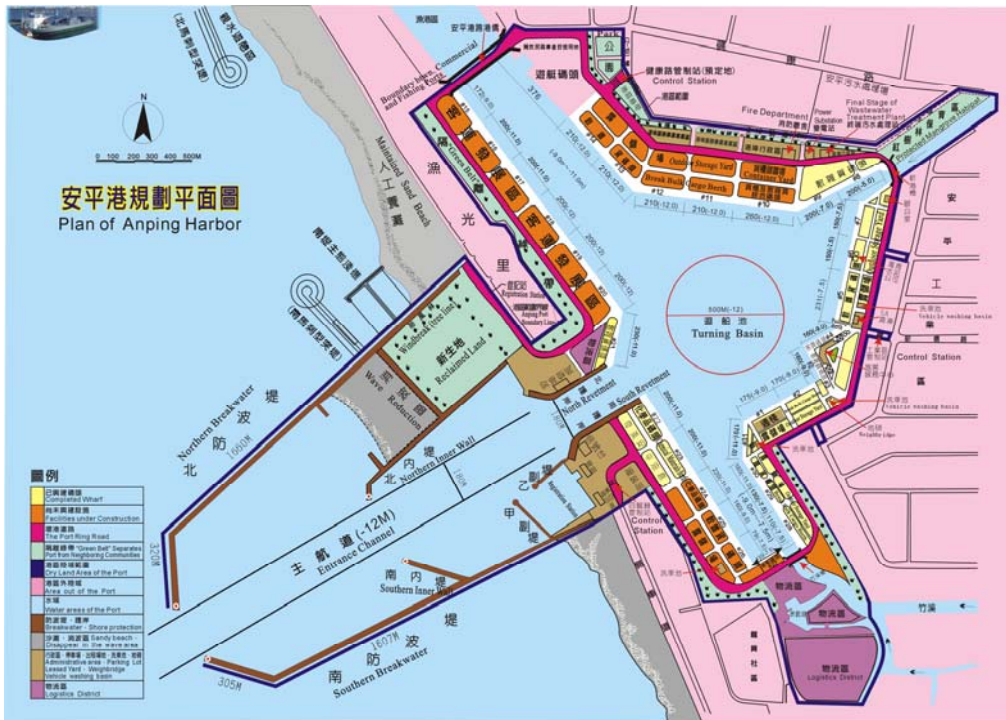


圖4.5 安平港區之平面圖(資料來源：高雄港務公司網頁)

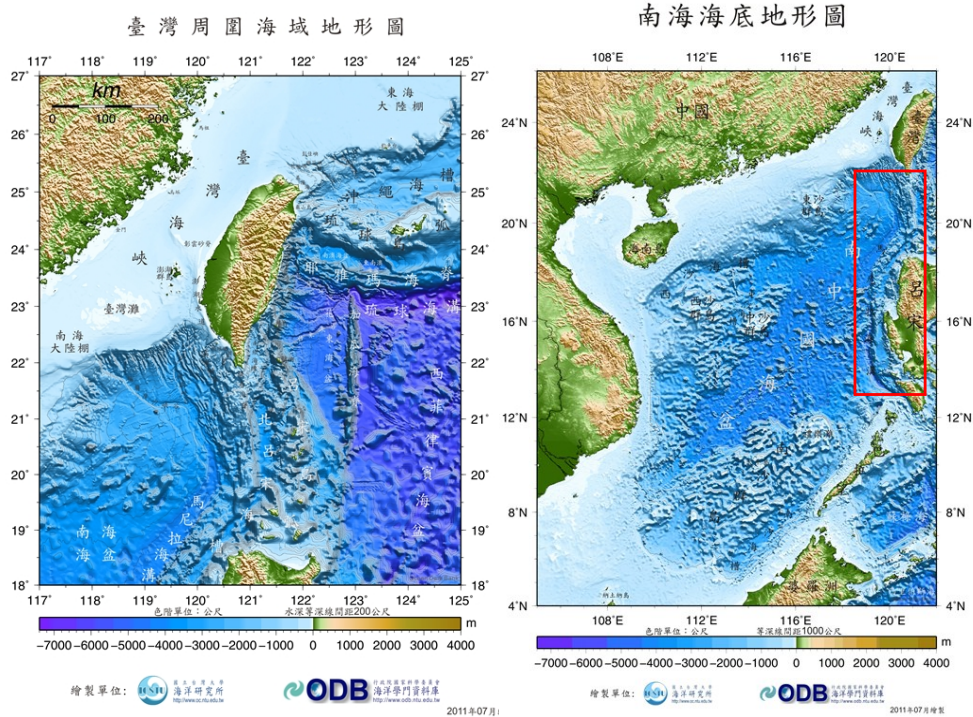


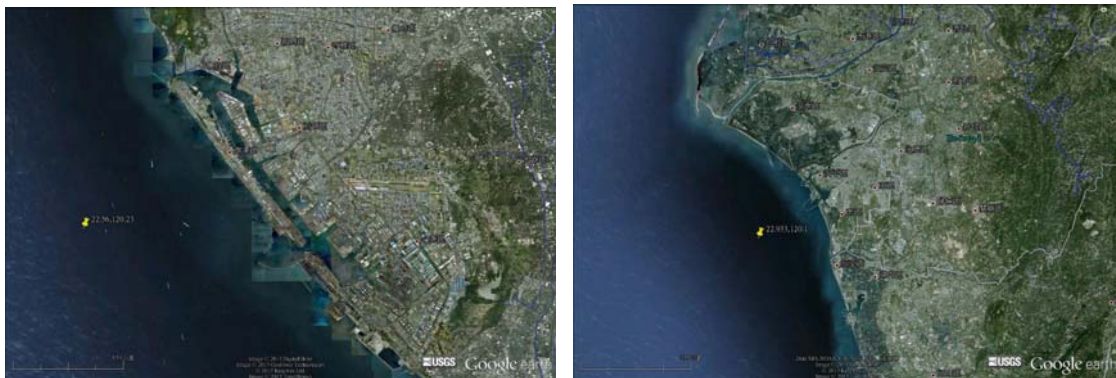
圖4.6 臺灣周圍及南海之水深分佈(紅色框：馬尼拉海溝)

圖片來源：行政院國家科學委員會海洋學門資料庫

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；高雄港之預報點位位於東經 120.23 度，北緯 22.57 度，水深 47 公尺，離岸約 5.5 公里；安平港之預報點位位於東經 120.1 度，北緯 22.93 度，水深 21 公尺，離岸約 7.4 公里；如圖 4.7(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 4.7 (a)高雄港(b)安平港之預報點位

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潮汐之監測系統(Acoustic Wave and

Current Profile system，簡稱AWCP系統)，設置地點如圖4.8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4.9)來進行驗證海嘯的水位高度。



圖 4.8 交通部運輸研究所港研中心基隆港觀測站儀器安裝位置

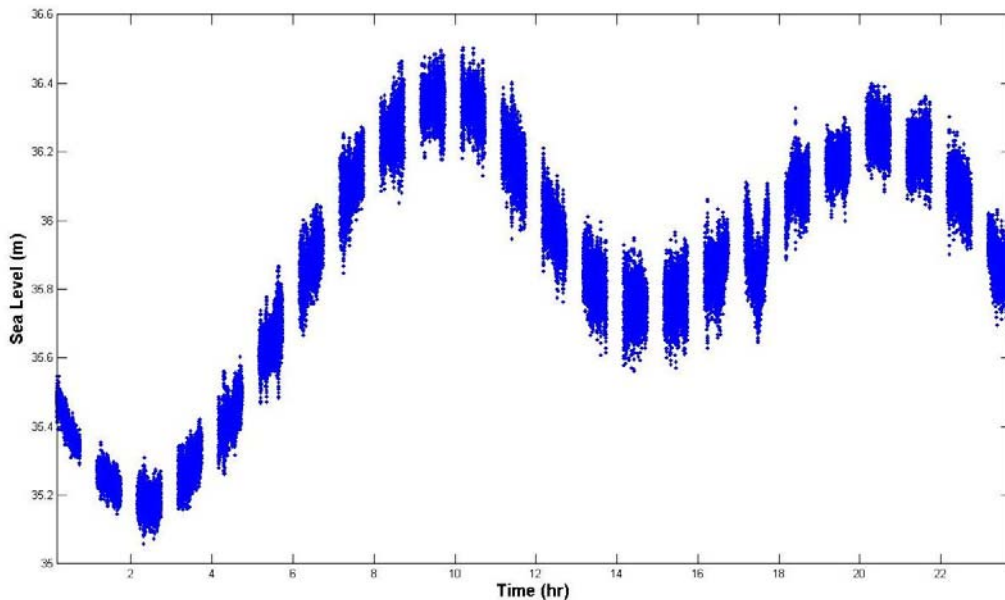


圖 4.9 測站之實測水位

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4.10)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4.10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線性迴歸參數，藉以計算潮位(圖4.10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4.11)，以該水位進行EEMD分析，此時的餘訊便可代表海嘯的訊號。

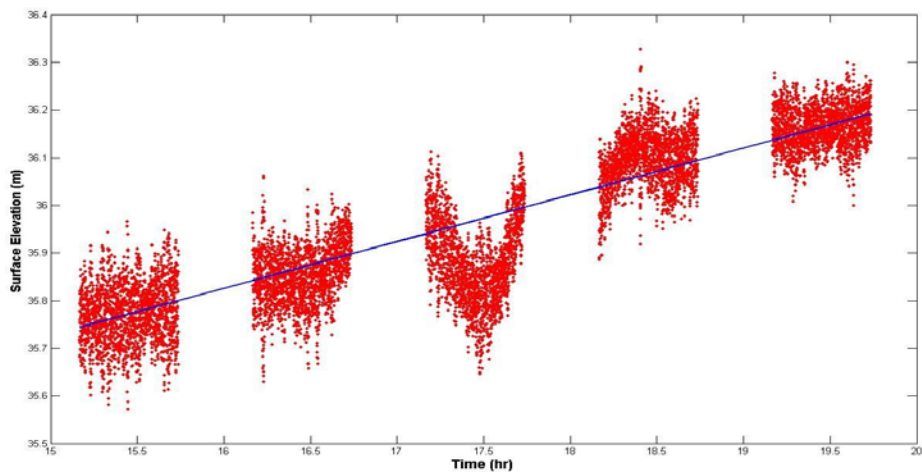


圖 4.10 分析用之實測水位資料

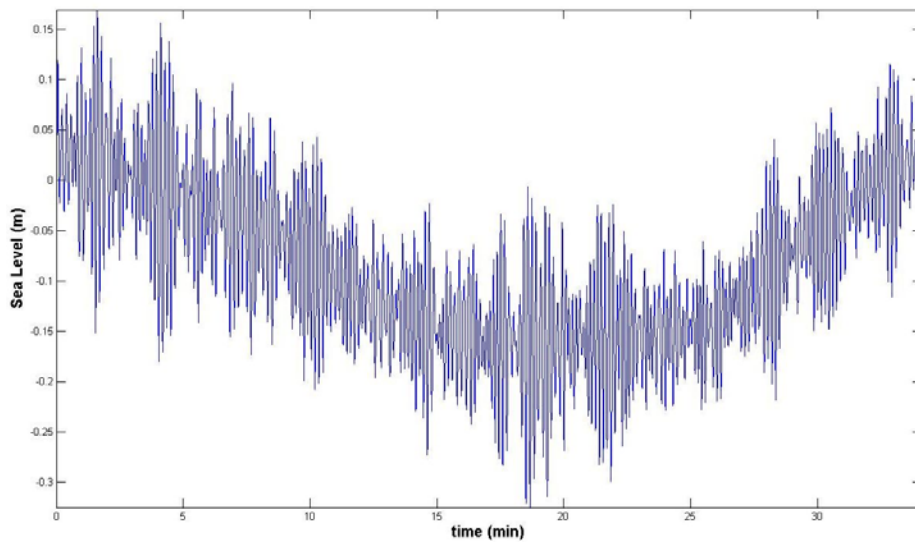


圖 4.11 經過濾潮汐後之水位

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 4.12 及圖 4.13 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。

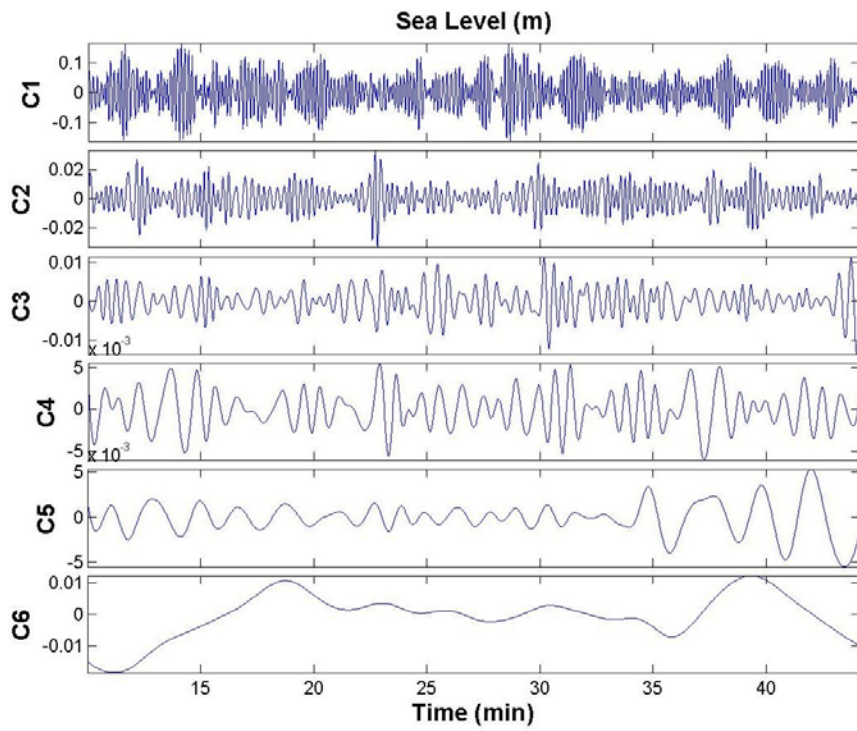


圖 4.12 由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6)

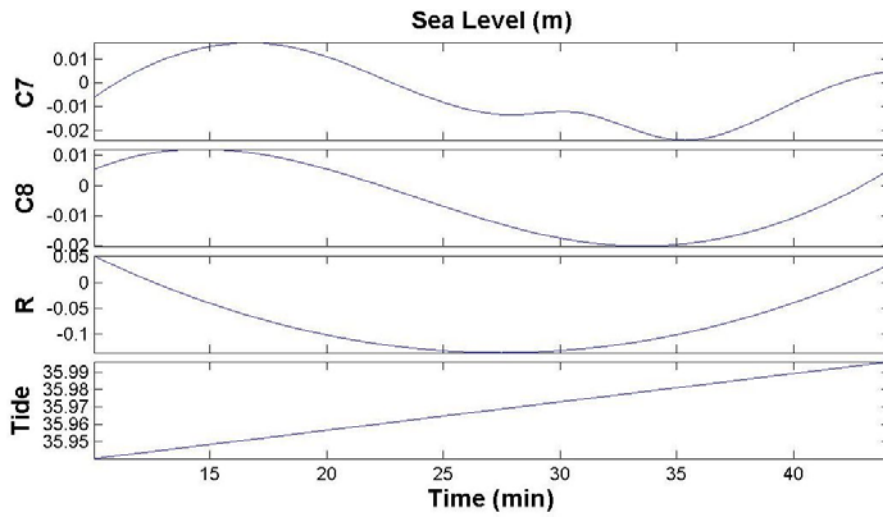


圖 4.13 由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位

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 4.14,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 4.15),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

```

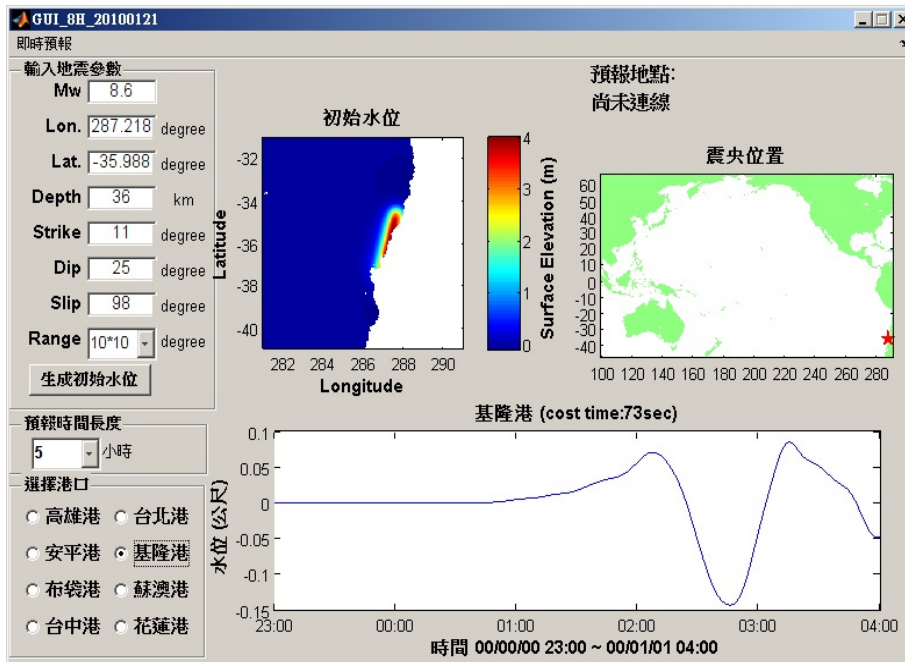


圖 4.14 預報系統預測智利海嘯(Mw=8.6)於基隆港之預報結果

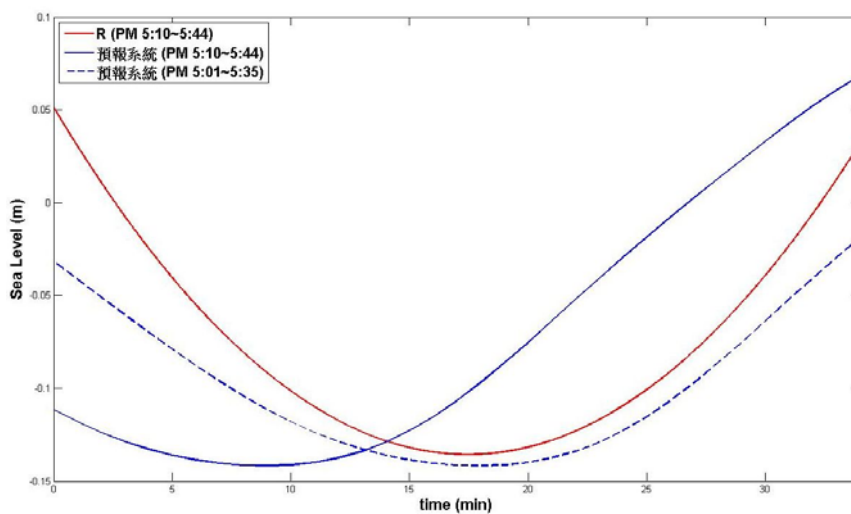


圖 4.15 預報系統計算結果(Mw=8.6)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

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 4.16 所示，單機輸入參數所產生之結果，其結果為輸入參數後所產生之時間水位。)，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 4.17)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

```

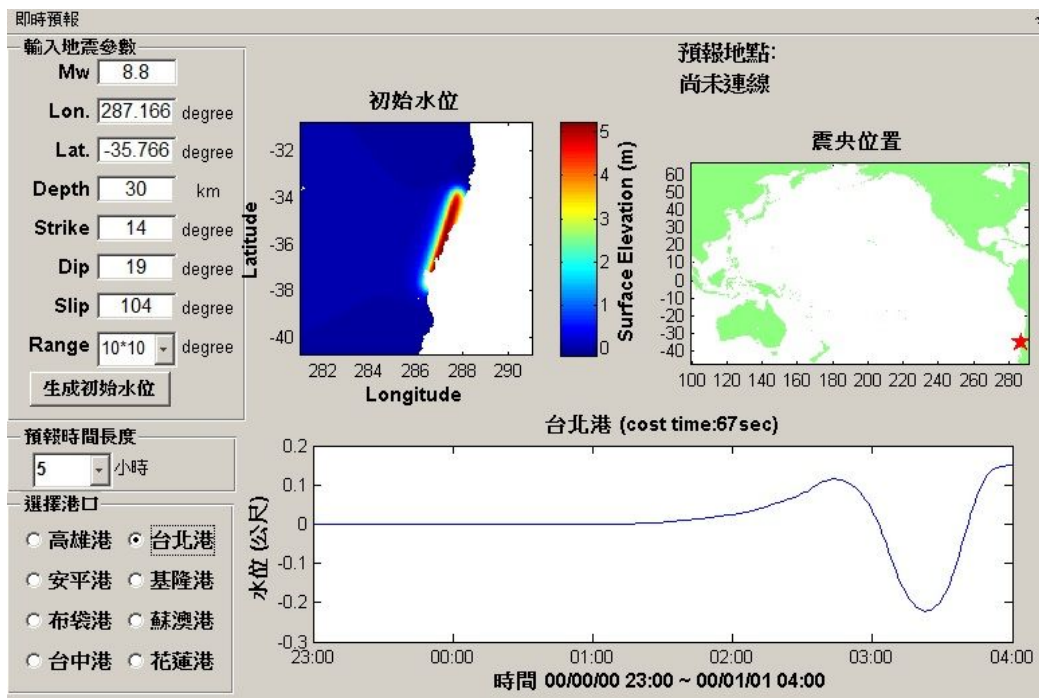



圖 4.16 預報系統預測智利海嘯(Mw=8.8)於基隆港之預報結果

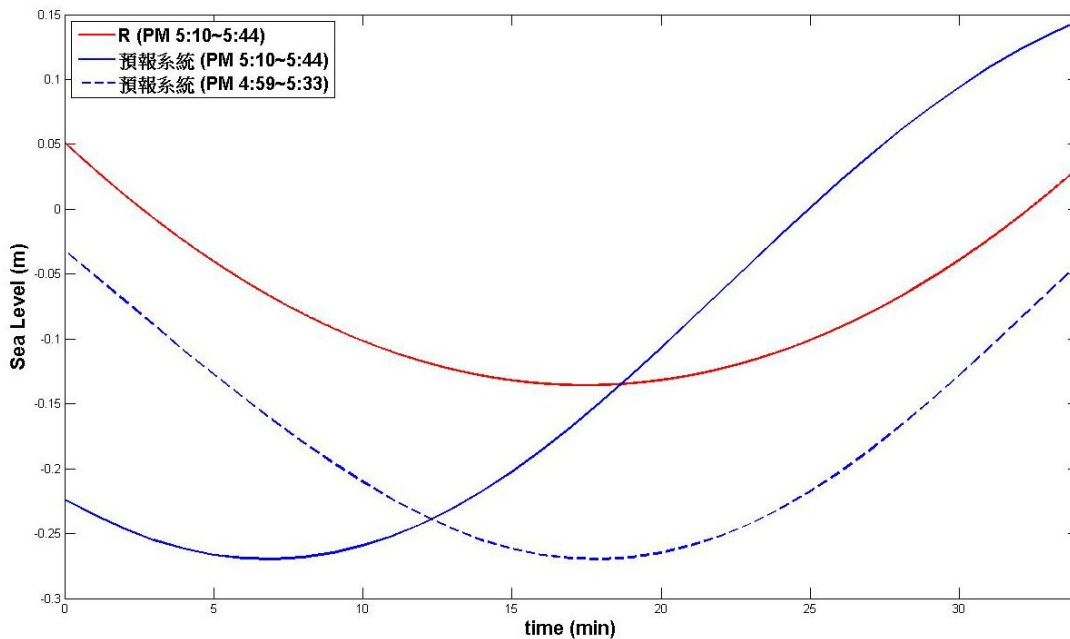


圖 4.17 預報系統計算結果(Mw=8.8)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

圖 4.17 中，可看出系統預測之水位較實測水位為高；而與圖 4.15 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 4.18)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。

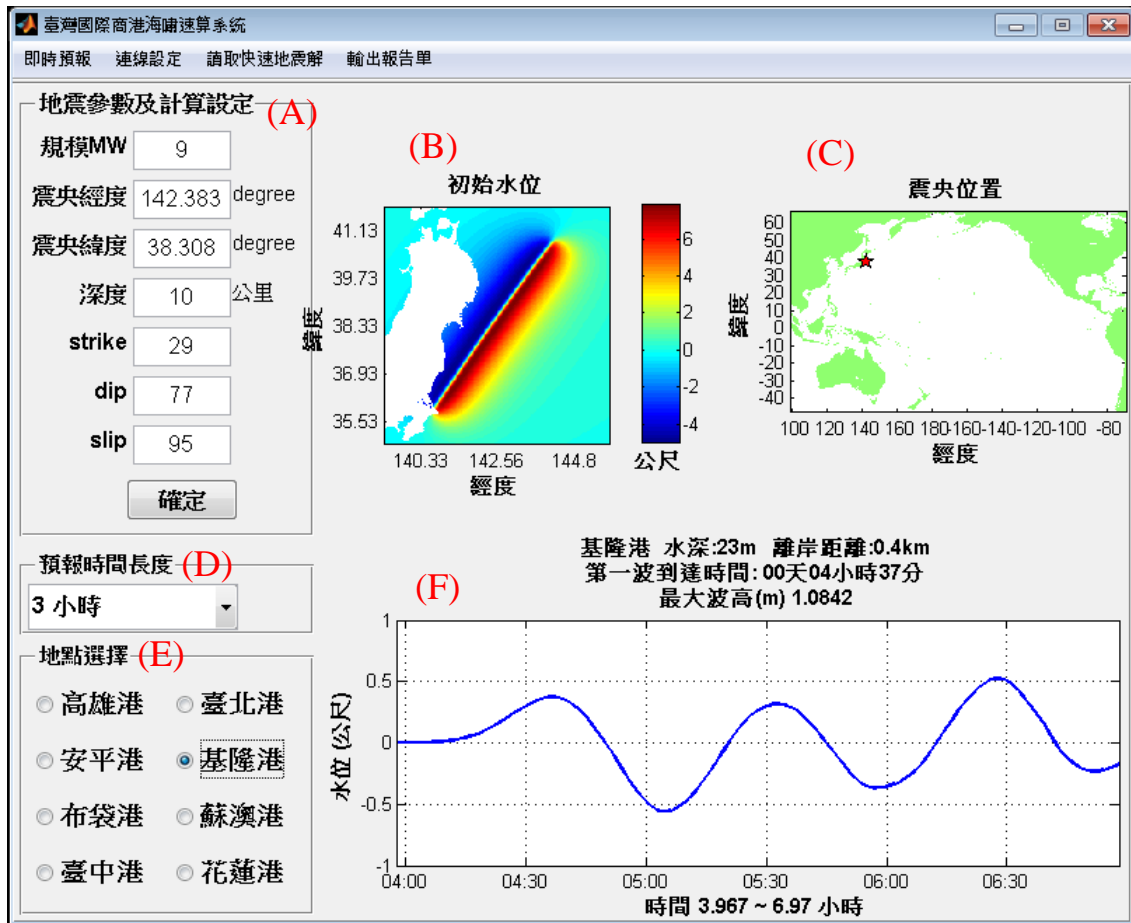


圖4.18 海嘯速報系統之介面

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 4.19(a)(b)。

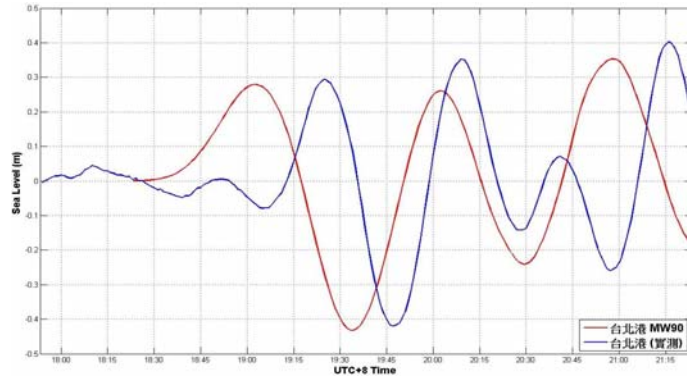
```

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4.19 (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 4.20 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 4.21；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 4.12 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 4.22 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。

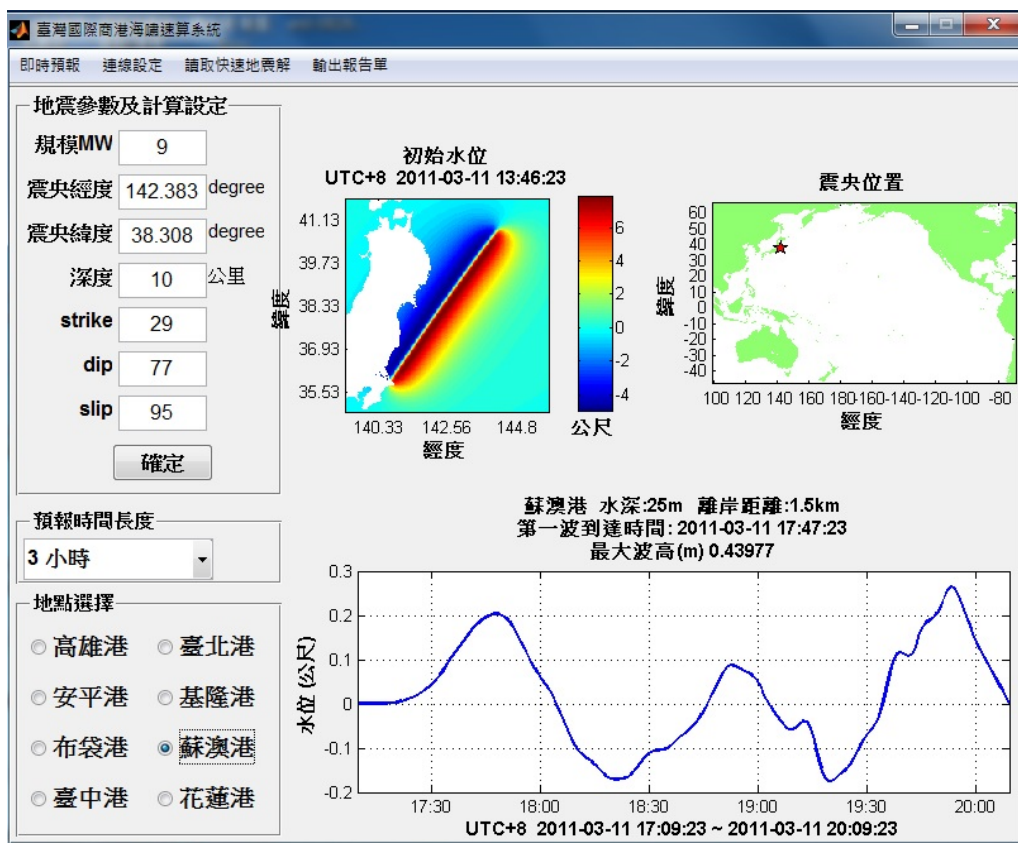
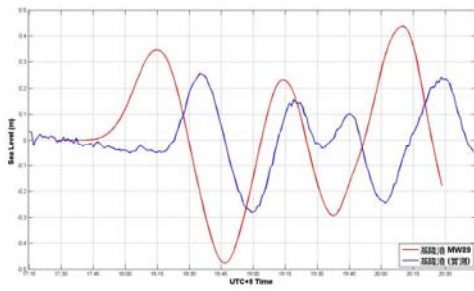
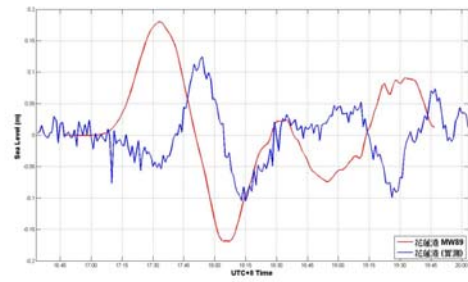


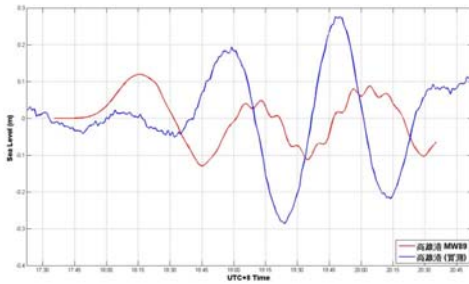
圖 4.20 以速算系統及新公佈之 0311 東日本海嘯之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈



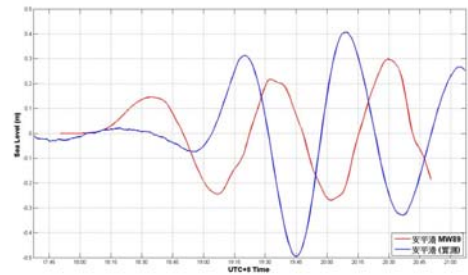
(a)



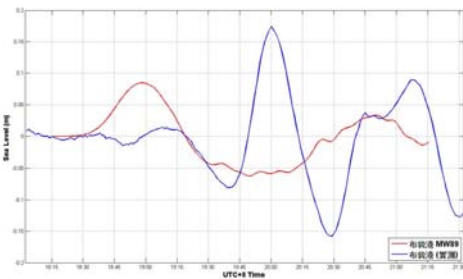
(b)



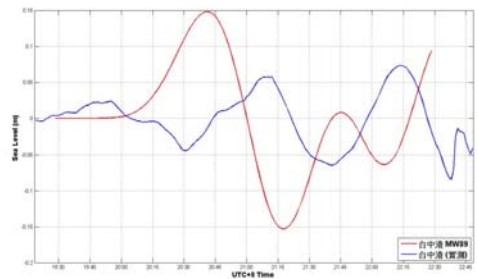
(c)



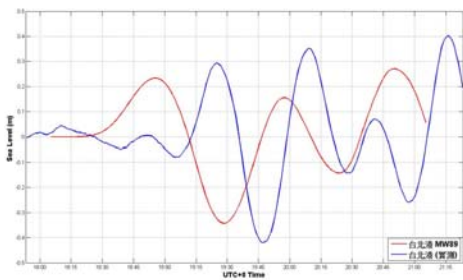
(d)



(e)



(f)



(g)

圖 4.21 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)

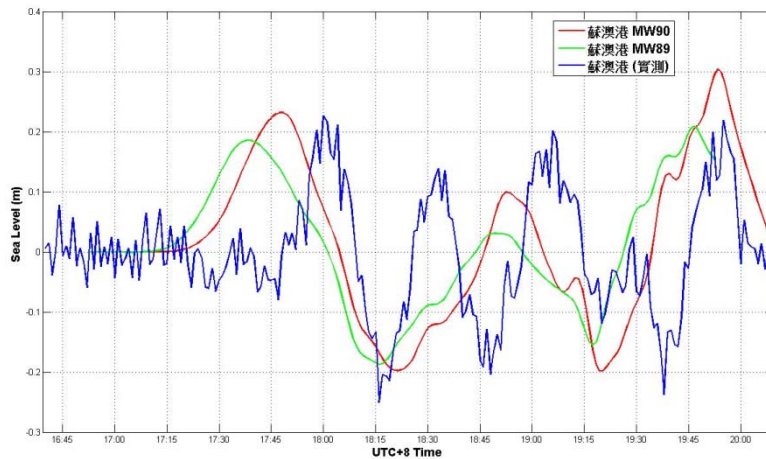


圖 4.22 以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模 $M_w8.9$)及新公佈之地震參數(地震矩規模 $M_w9.0$)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)

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 4.22 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

第二章說明對高雄港及安平港最具威脅性之海嘯潛勢波源是來自馬尼拉海溝及西南外海之海底斷層系統，而臺灣又位處環太平洋地震帶上，地震發生次數頻繁，且西南方的馬尼拉海溝是學界目前公認對臺灣西南沿岸最具威脅性之震源區；故本節利用 1994 年 9 月 16 日位於臺灣西南方 150 公里發生一起地震矩規模 6.8 級之海底地震，實際模擬該起地震對高雄港及安平港之水位變化。

1994 年 9 月 16 日位於臺灣西南方 150 公里發生一起地震矩規模 6.8 級之海底地震，震央位址在北緯 22.48 度，東經 118.72 度，震源深度約 15 公里，震央位址與 Harvard CMT 之斷層資料參數如圖 4.23 及圖 4.24 所示。

(1) 第一組參數之結果(strike=256, dip=35, slip=-116)

圖 4.25(a)(b)為系統計算之高雄港與安平港之預報水位，由圖可知，兩港之水位變化是波谷先至，第一波也非最大波高；高雄港第一波約在地震發生後 41 分鐘後到達，最大波高約一小時後出現，其值約為 0.023 公尺；海嘯波約在地震發生後 53 分鐘後抵達安平港外，最大波高約一小時半才會產生，其值約為 0.032 公尺。兩港之第一波到達時間相差約 10 分鐘，應是臺灣海峽水深較淺，海嘯波傳遞速度較慢。

(2) 第二組參數之結果(strike=107, dip=59, slip=-73)

圖 4.26(a)(b)為系統計算第二組之高雄港與安平港之預報水位，由圖可知，兩港之水位變化是波谷先至，第一波為最大波高；高雄港第一波約在地震發生後 37 分鐘後到達，其值約為 0.023 公尺；海嘯波約在地震發生後 50 分鐘後抵達安平港外，最大波高約 50 分鐘後產生，其值約為 0.024 公分。兩組參數計算結果並無太大之差異，初步研判結果對安平及高雄港應無具體之影響。但較為注意的是海嘯波在地震發生後 37 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。

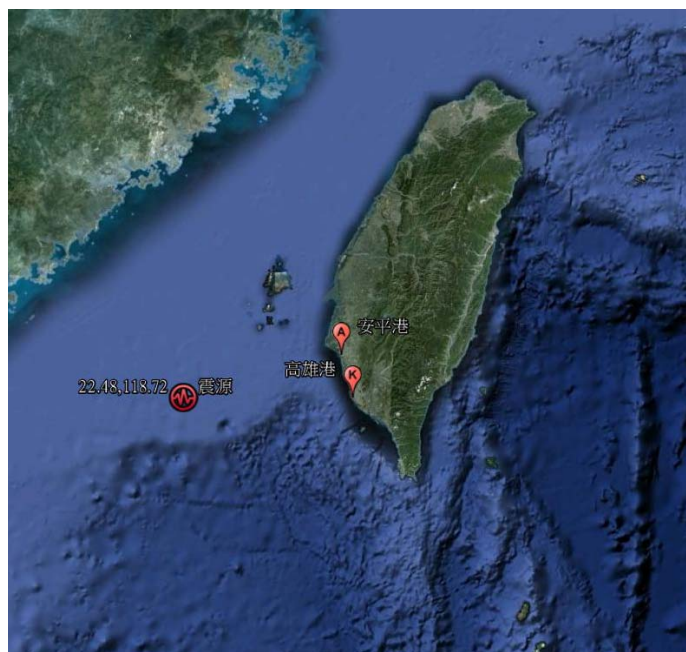


圖 4.23 1994 年地震位址

091694A TAIWAN REGION

Date: 1994/ 9/16 Centroid Time: 6:20:23.1 GMT
 Lat= 22.48 Lon= 118.72
 Depth= 15.0 Half duration= 5.4
 Centroid time minus hypocenter time: 4.8
 Moment Tensor: Expo=26 -1.061 1.146 -0.085 -0.476 0.341 -0.028
 Mw = 6.7 mb = 6.5 Ms = 6.7 Scalar Moment = 1.25e+26
 Fault plane: strike=256 dip=35 slip=-116
 Fault plane: strike=107 dip=59 slip=-73

圖 4.24 1994 年地震斷層參數(資料來源：Harvard CMT)

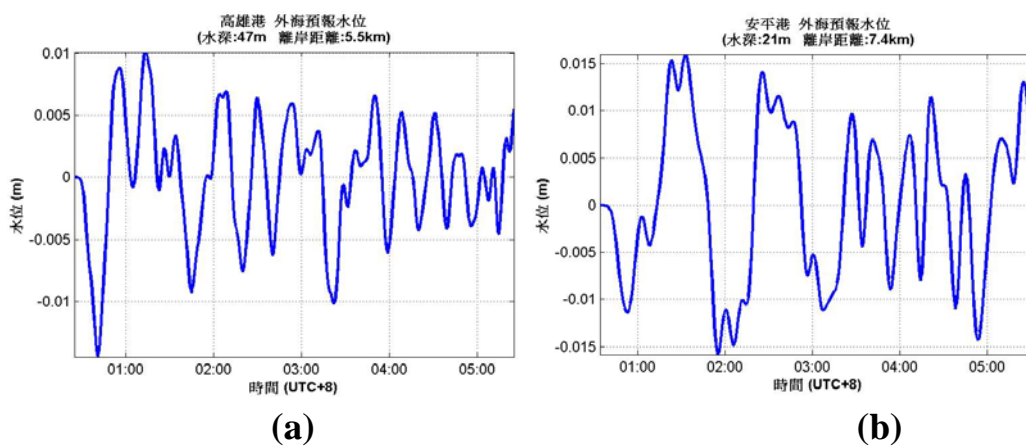


圖 4.25 利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)高雄港(b)安平港

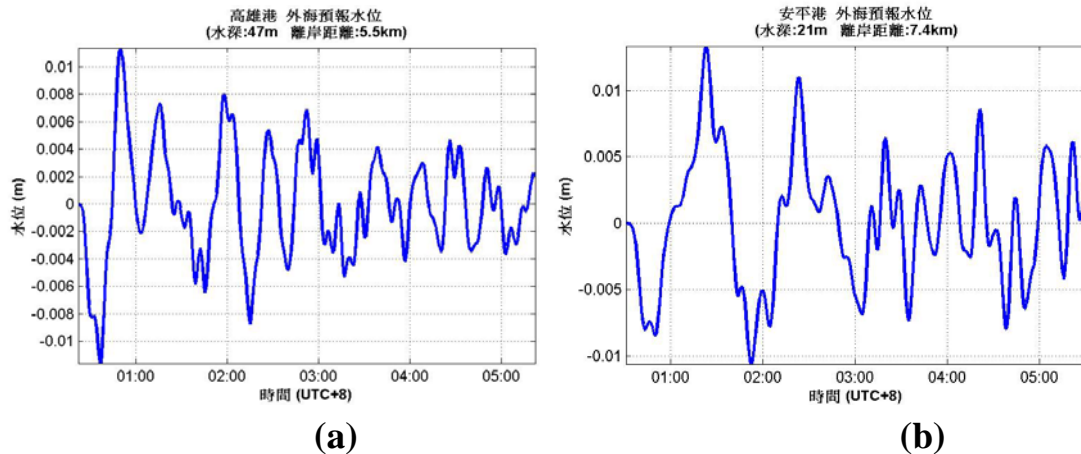


圖 4.26 利用系統及第二組參數所預估之外海水位(a)高雄港(b)安平港

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，高於此一下限值之地震發生時，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 4.27 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 4.28)，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 4.29)；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 4.30)。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 4.31)；水位歷線圖之下方會提供每分鐘一筆之水位紀錄(如圖 4.32)。

[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 4.27 港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面

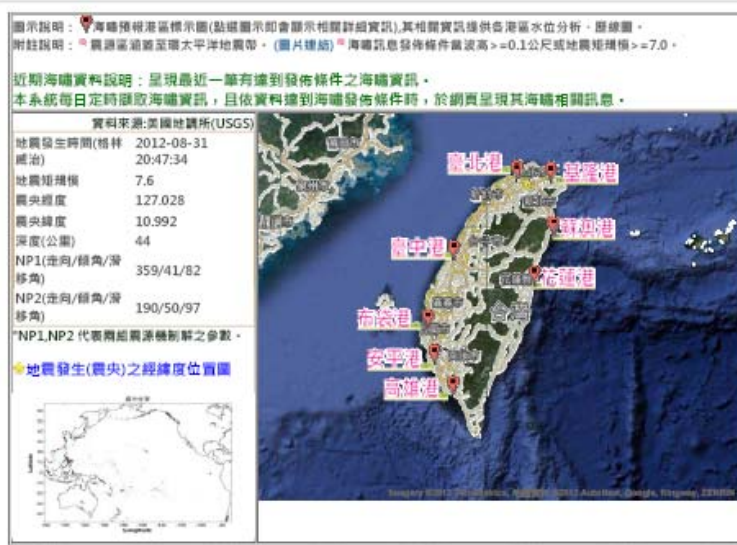


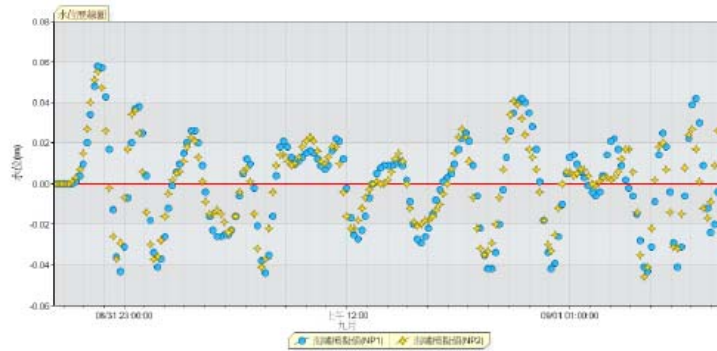
圖 4.28 [近期海嘯查詢]之展示介面



圖 4.29 [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 4.30 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		
	第一波到壠時間(HH:MM)	第一波到壠時間(HH:MM)	第一波到壠時間(HH:MM)	第一波到壠時間(HH:MM)	第一波到壠時間(HH:MM)	第一波到壠時間(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		

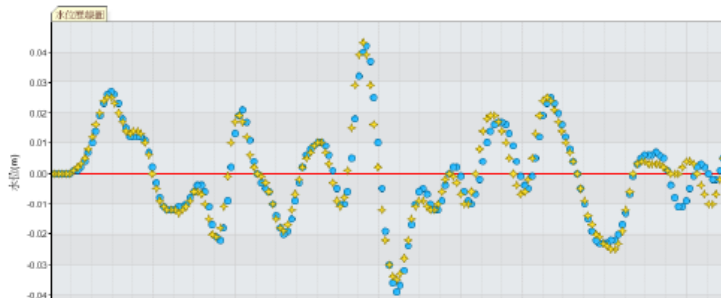
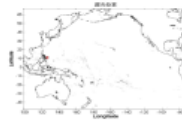


圖 4.31 [歷史海嘯查詢]之查詢結果

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 4.32 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_j」，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。接著提出「海嘯溢淹機率 Tsunami Inundation Probability, TIP_j」，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：

$$\sum_i \sum_j TEN_j^i TIP_j^i = \sum_i \sum_j EN_j^i P_{ocsh}^i TIP_j^i \quad (5.1)$$

$$TEN_j^i = EN_j^i P_{ocsh}^i \quad (5.2)$$

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。

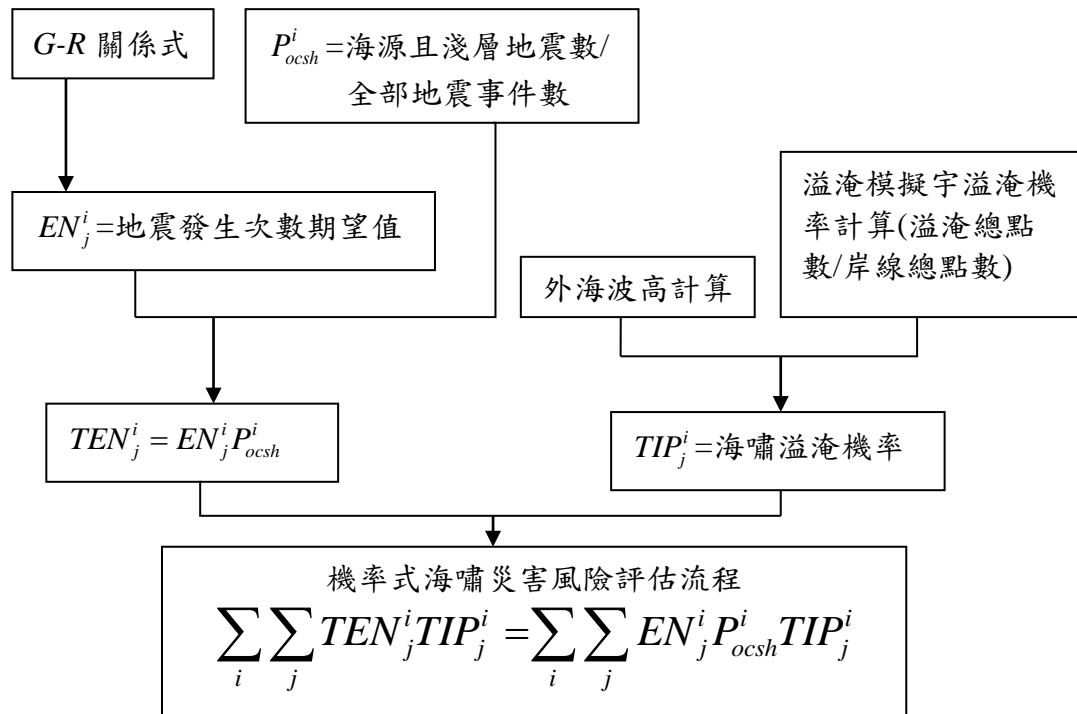


圖 5.1 海嘯風險評估流程圖

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)。

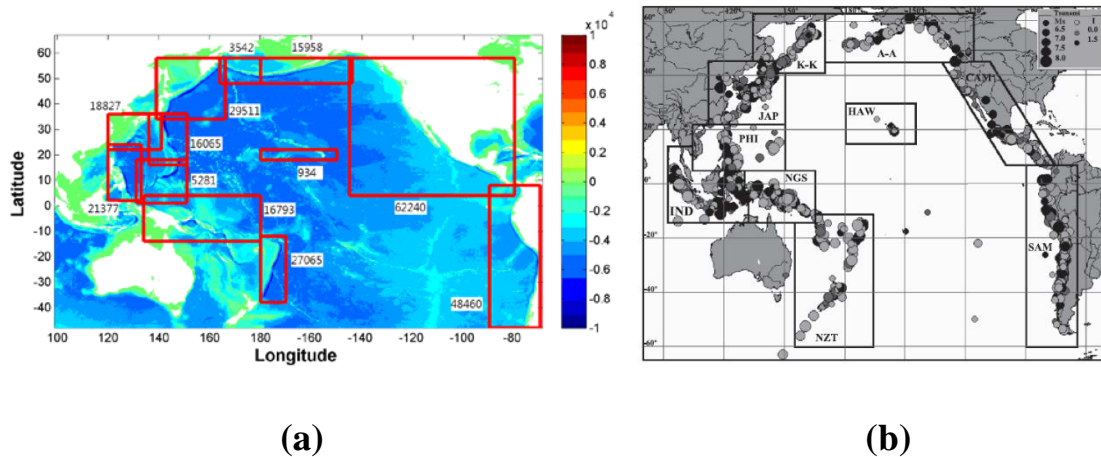


圖 5.2 (a)環太平洋地震數量分佈圖(b)太平洋區域之主要海溝分佈及劃分建議(Gusiakov, 2005)

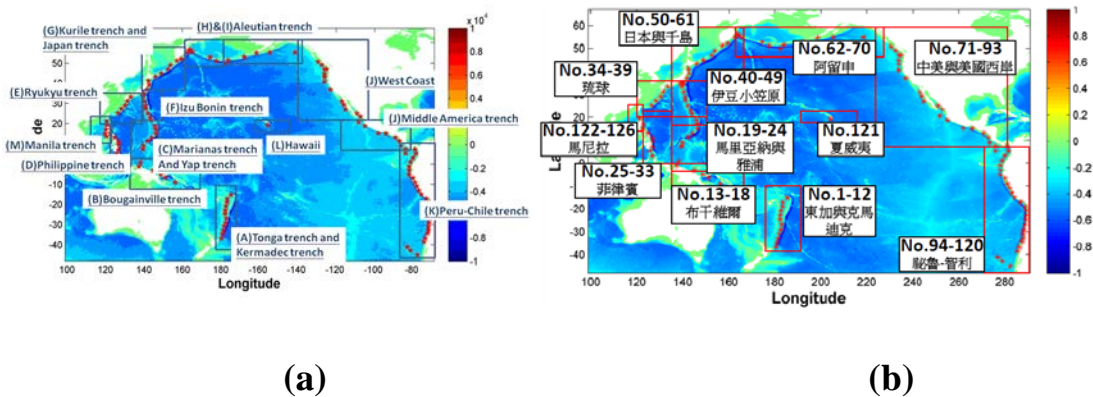


圖 5.3 (a)本研究主要海溝分佈圖及名稱(b)本研究之假設震央點分佈

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，將此回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 年的回歸係數與回歸線，紅點線(50 年)及綠點線(100 年)，此回歸線為評估未來 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。

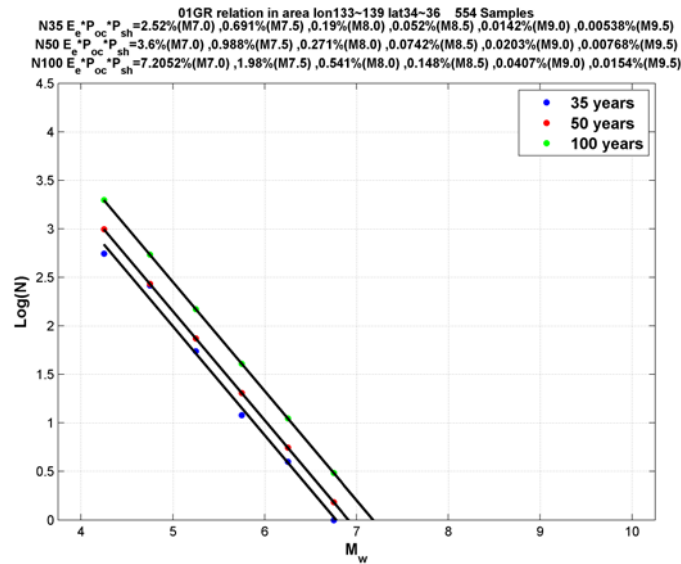


圖 5.5 G-R 關係式之計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)

表 5.1 各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值

M _w	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。

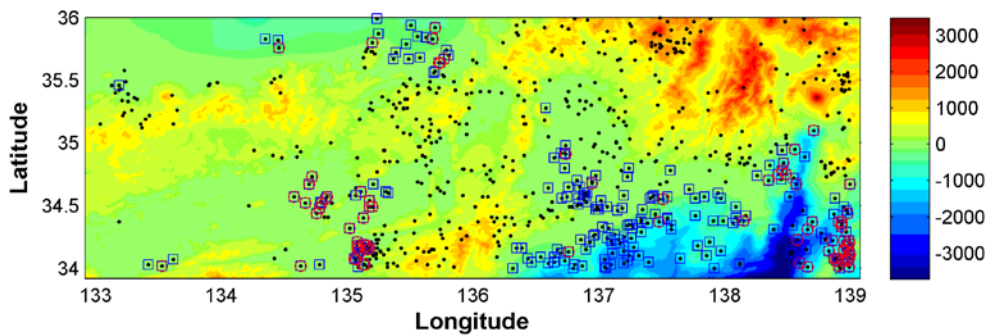


圖 5.6 計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)之淺層海源地震分佈

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	9.86×10^{-3}	2.69×10^{-3}	7.33×10^{-3}
100 年	0.96	0.26	0.073	0.0197	5.4×10^{-3}	1.48×10^{-3}

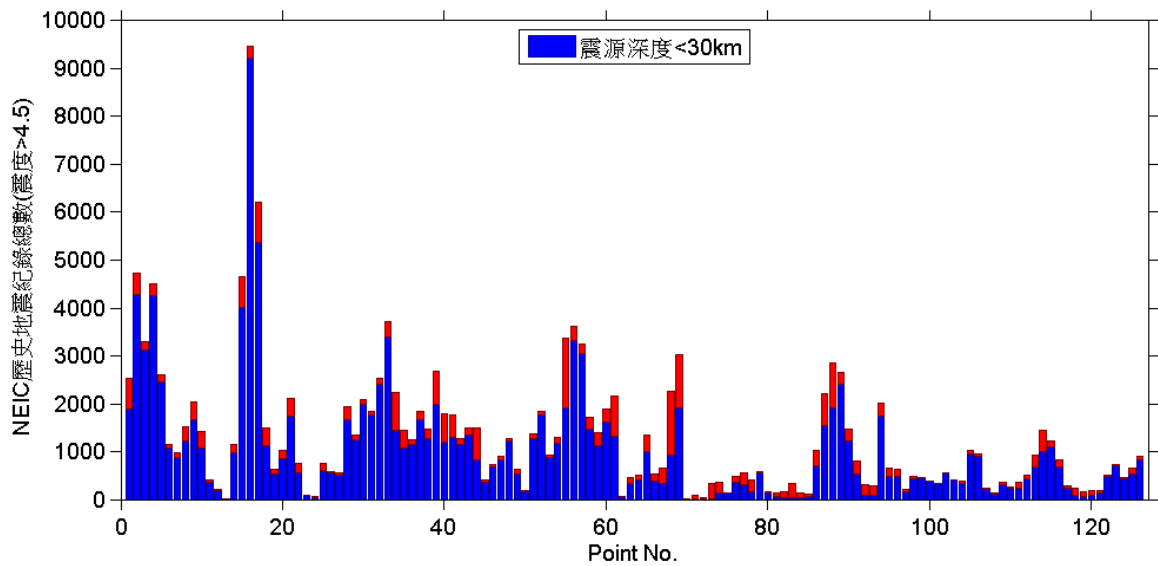


圖 5.7 NEIC 中環太平洋地震帶 126 區域點位之歷史地震資料

5.3 安平港之溢淹模擬

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 為安平港之陸域數值地形。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。

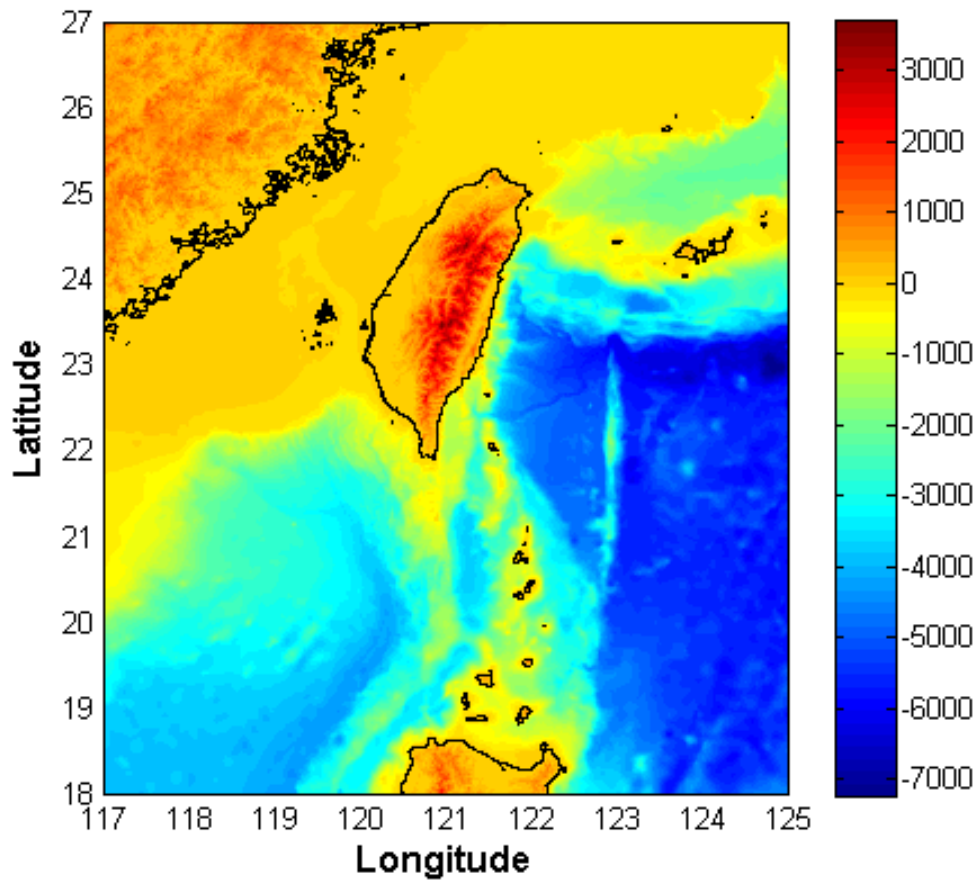


圖 5.8 臺灣 500m 解析度水深地形資料

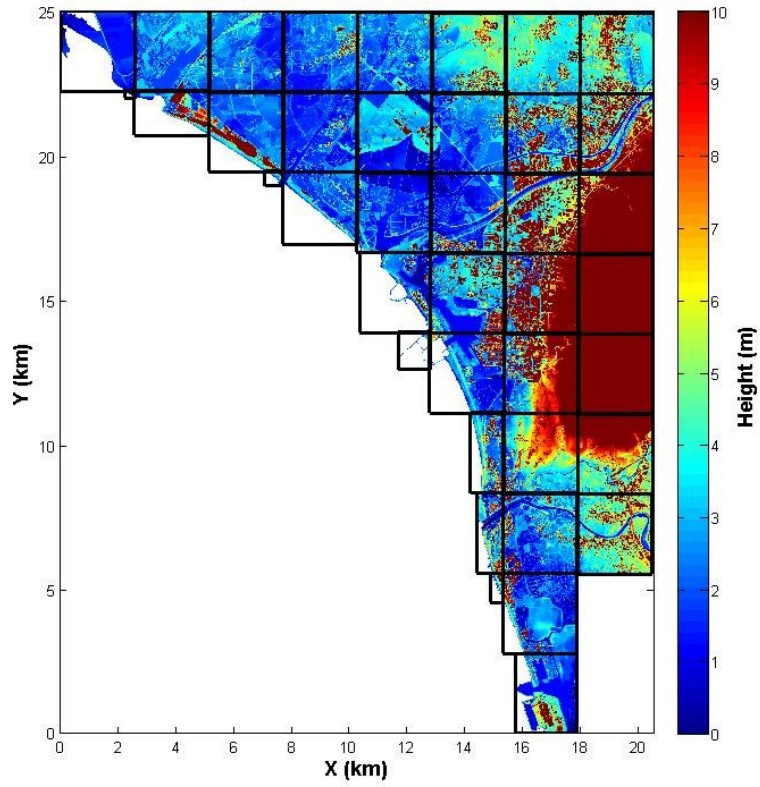


圖 5.9 安平港 5m 解析度數值地形檔

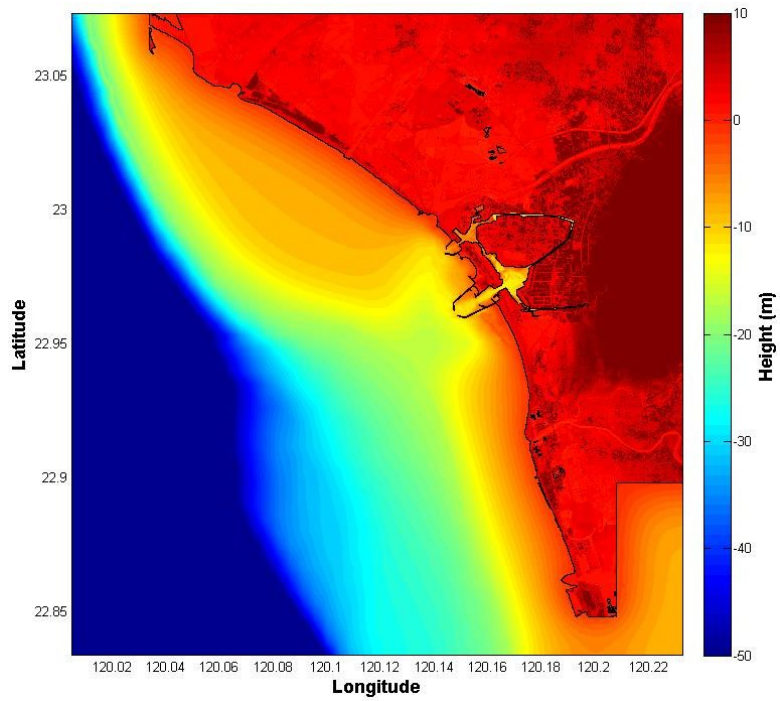


圖 5.10 安平港整合海陸域後之數值地形檔

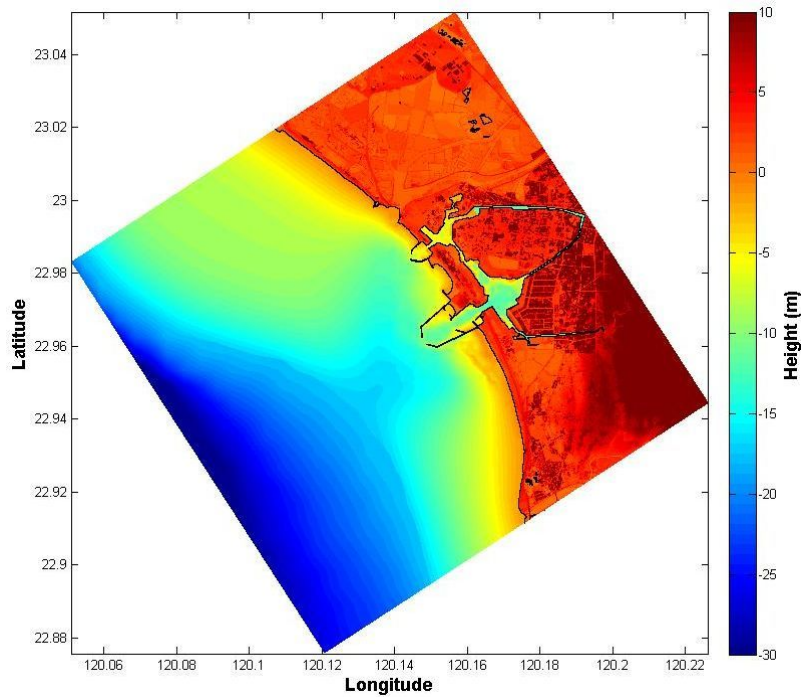


圖 5.11 安平港整併港內實際地形之數值地形檔

5.3.2 安平港之模擬結果

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(例如馬尼拉海溝)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，故本研究所稱之高斯波為說明其週期與波高的不同而定義，前期臺中港與布袋港之模擬為採用之週期為 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 20 分鐘，圖 5.12 為波高 4m 週期 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。

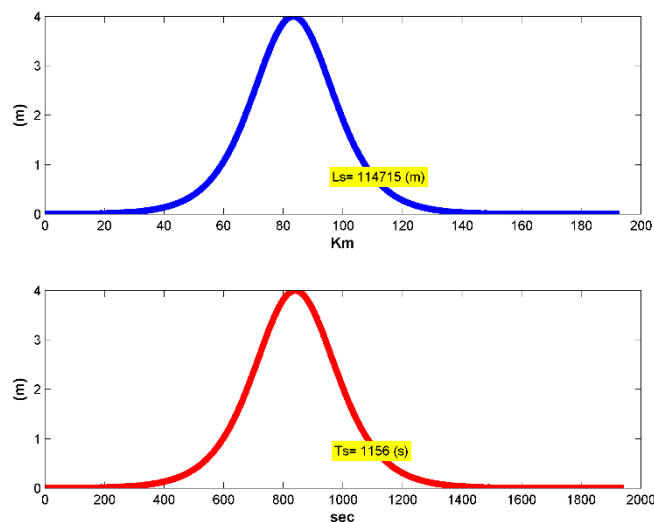
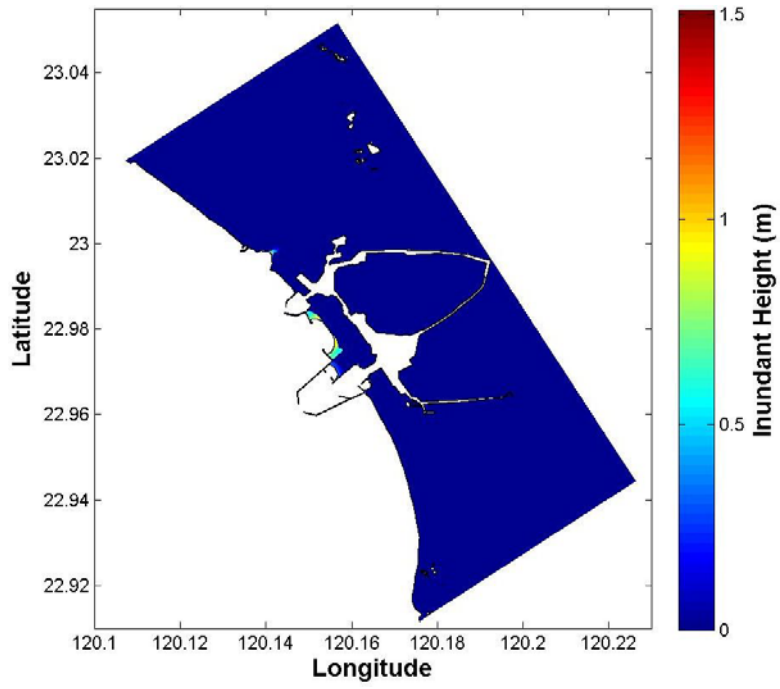
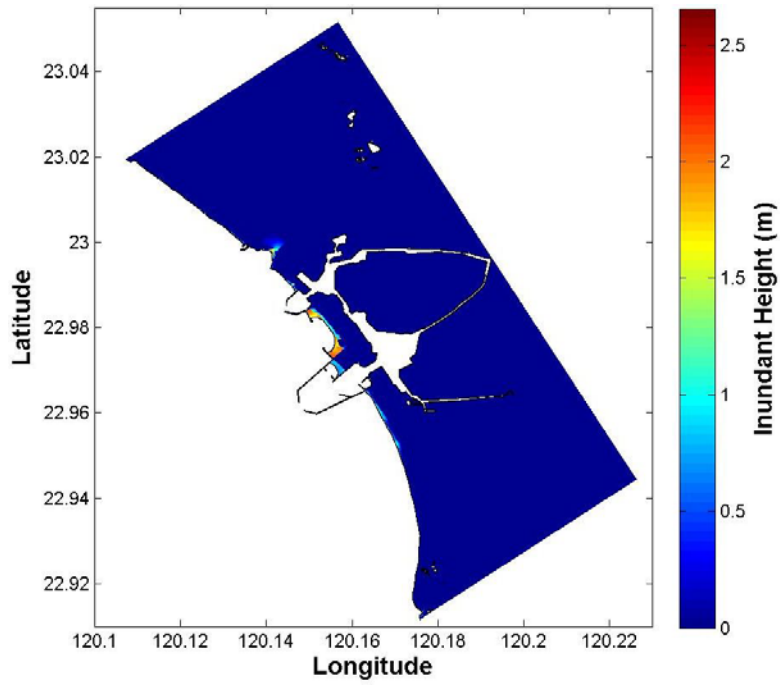


圖 5.12 週期 20 分鐘波高 4m 高斯波

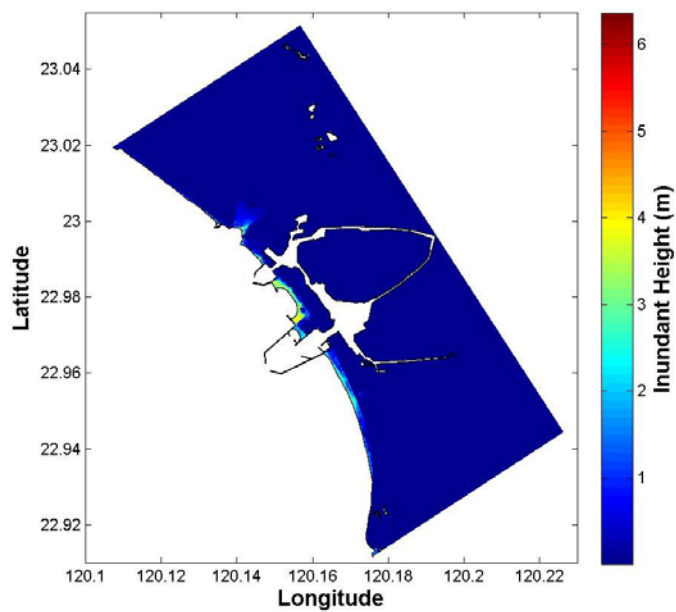
圖 5.13(a)~(g)為安平港在各種不同入射波高下之溢淹圖。在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 3 公尺以下，溢淹範圍侷限於內港區之下方，溢淹高程約為 1.5 公尺以下。3 公尺以上之波高時，溢淹範圍會逐漸向內陸擴大，在內港區上下之溢淹高程也會提高至 8 公尺左右(入射波高為 6 公尺以上時)。



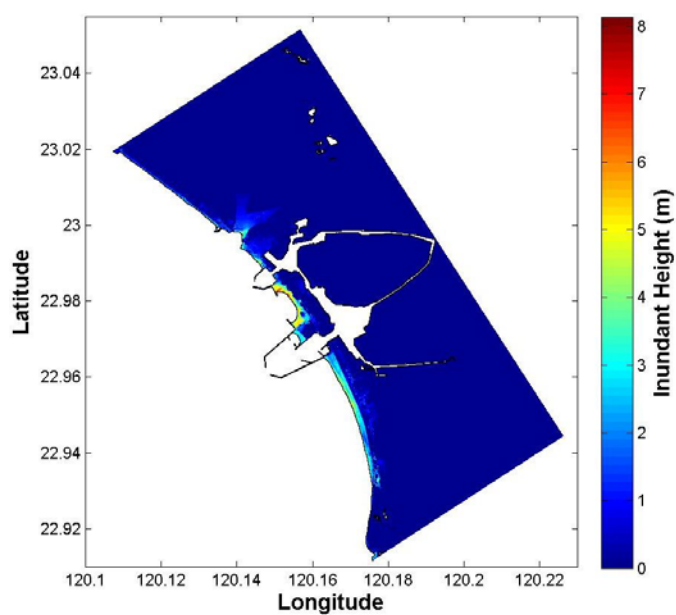
(a) 安平港入射波高為 0.5 公尺之溢淹圖



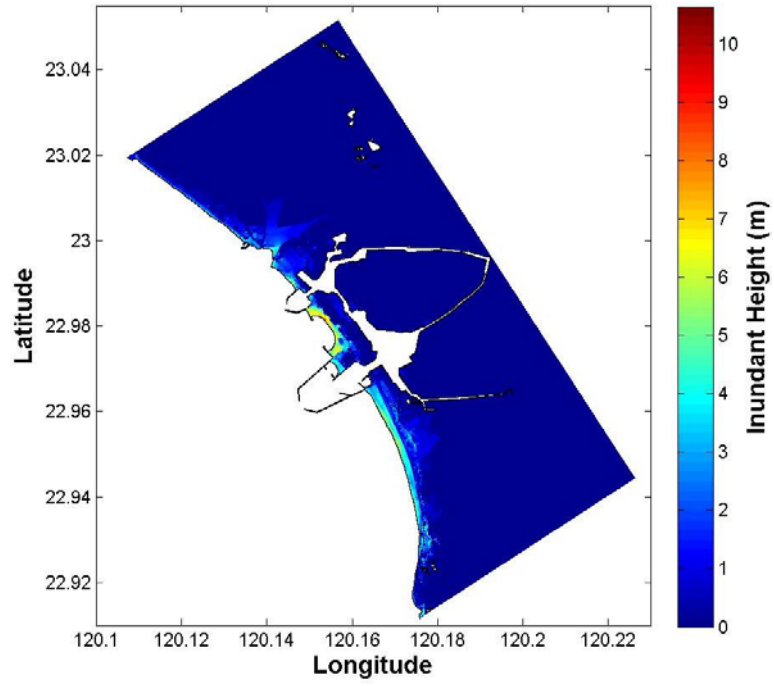
(b) 安平港入射波高為 1 公尺之溢淹圖



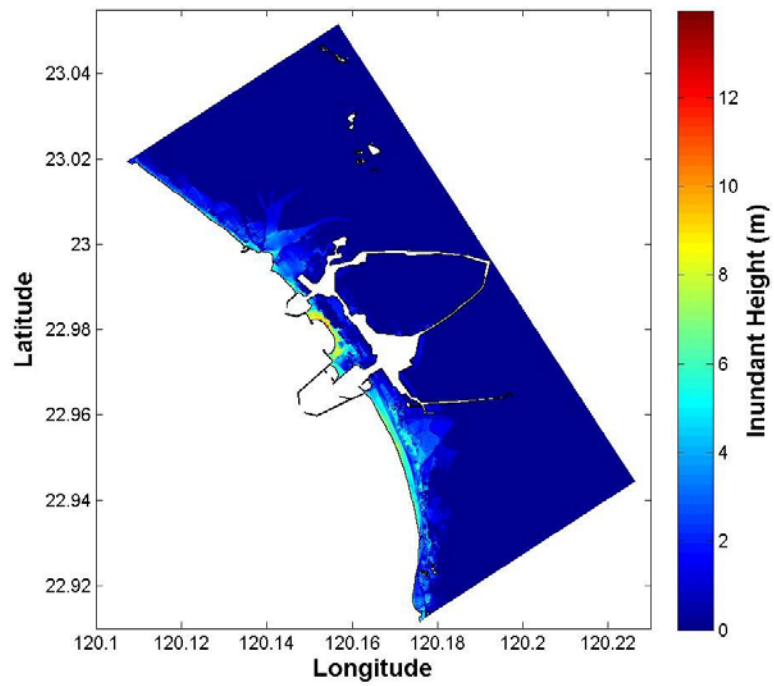
(c) 安平港入射波高為 2 公尺之溢淹圖



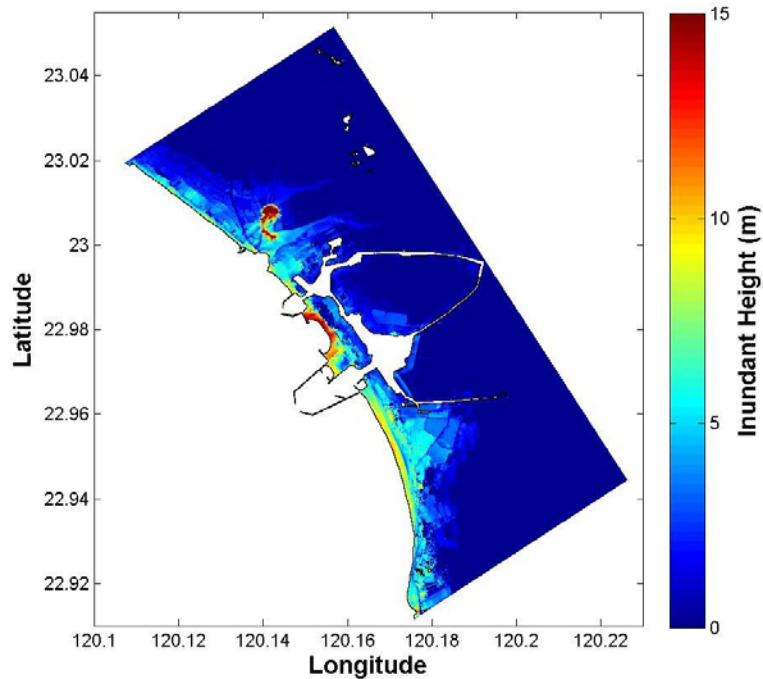
(d) 安平港入射波高為 3 公尺之溢淹圖



(e) 安平港入射波高為 4 公尺時之溢淹圖



(f) 安平港入射波高為 6 公尺時之溢淹圖



(g) 安平港入射波高為 10 公尺時之溢淹圖

圖 5.13 安平港之溢淹圖，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。

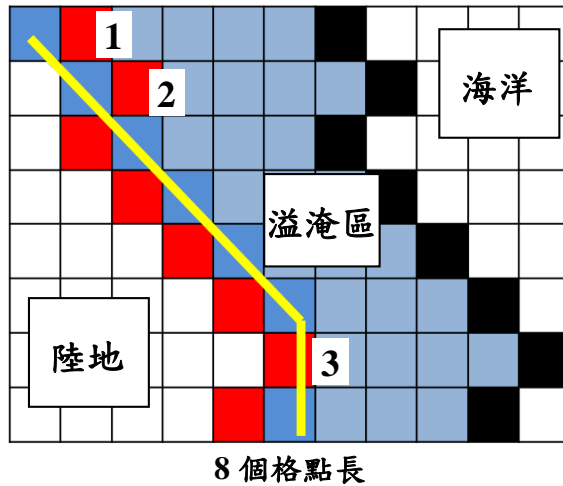
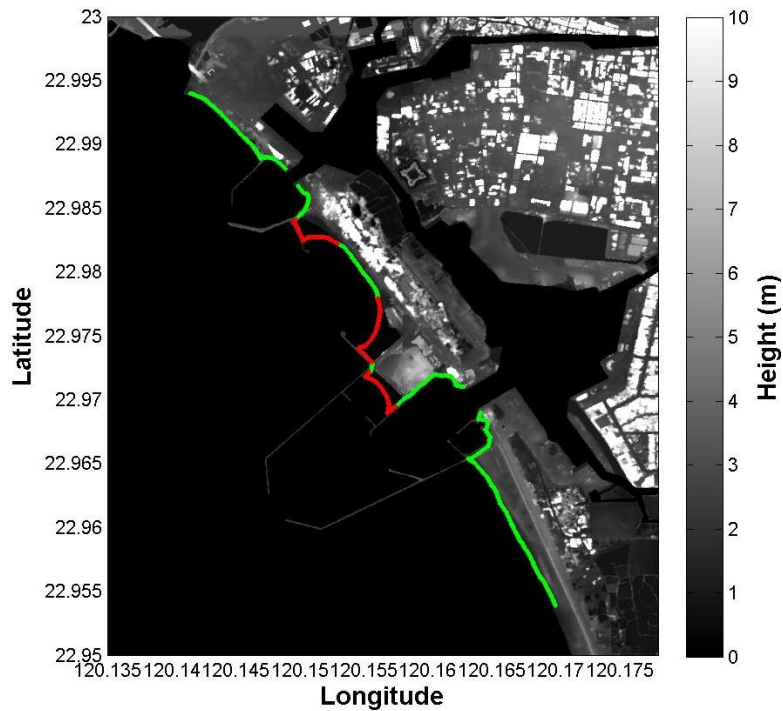


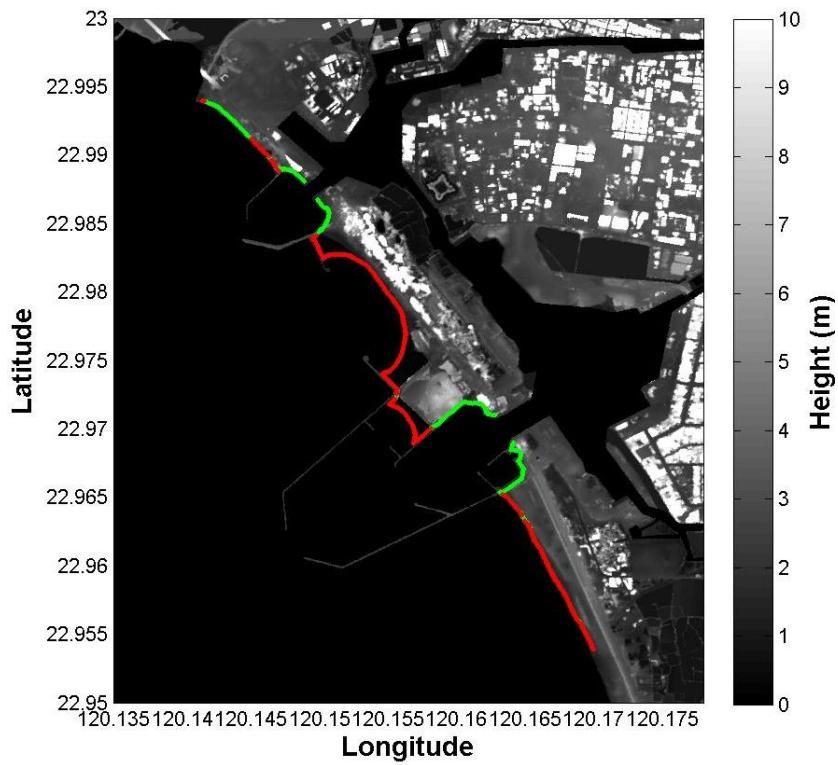
圖 5.14 溢淹機率簡示圖

5.3.4 安平港之溢淹點位分佈及機率

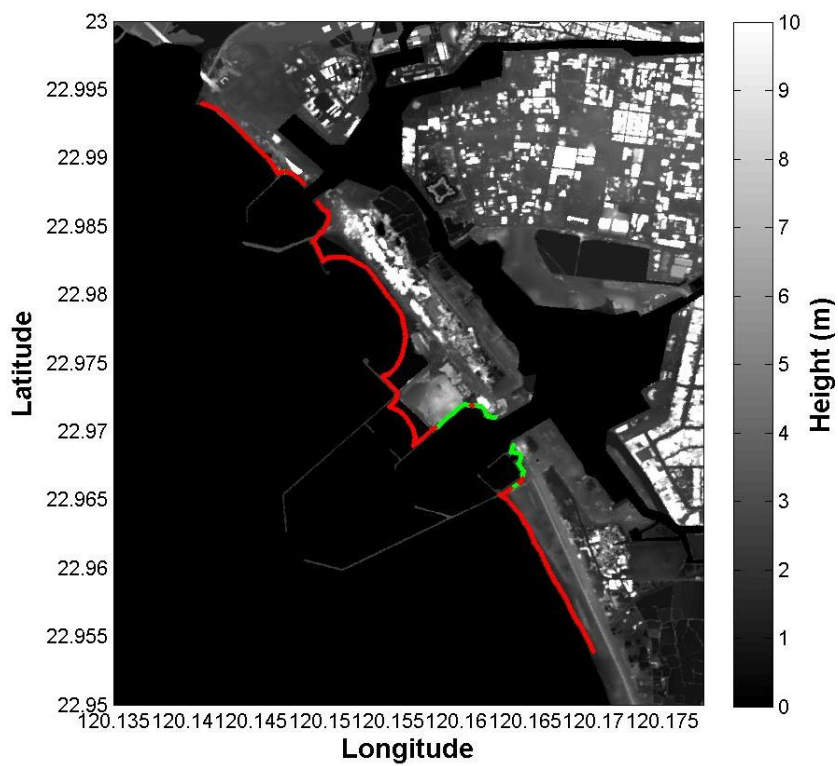
圖 5.15 為安平港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位，綠色點位為表示離岸 50 公尺但高程未達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.3 及圖 5.16，入射波高只要大於 1 公尺就會有 60% 以上的溢淹機率。



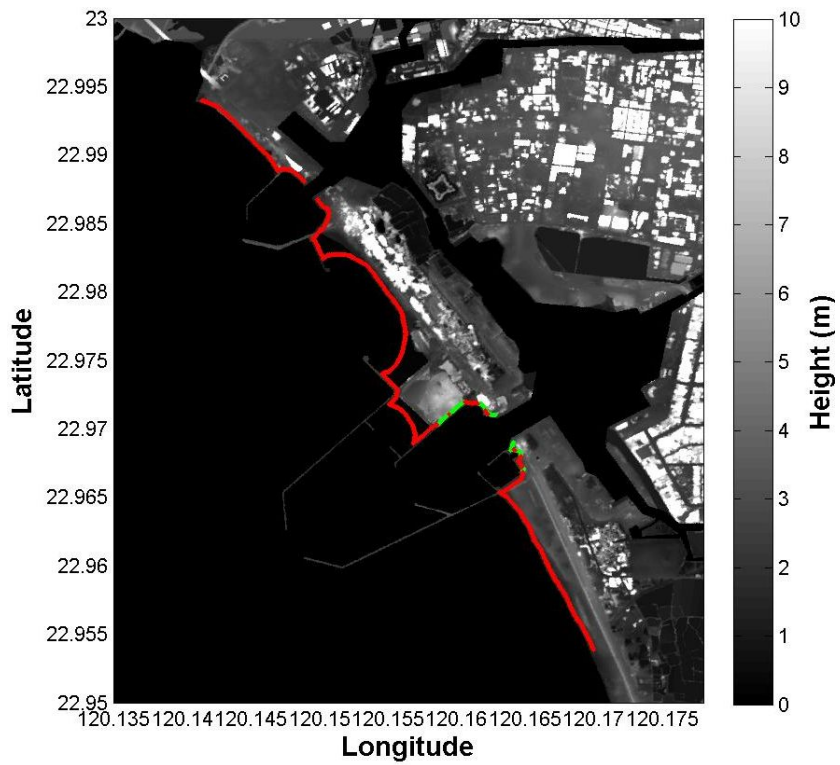
(a) 安平港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



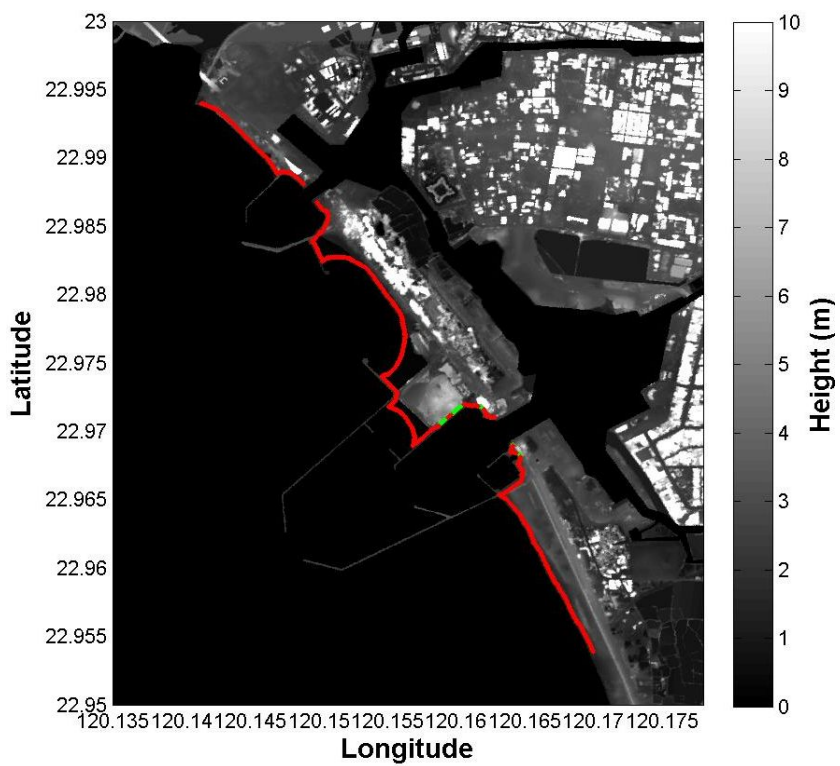
(b) 安平港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



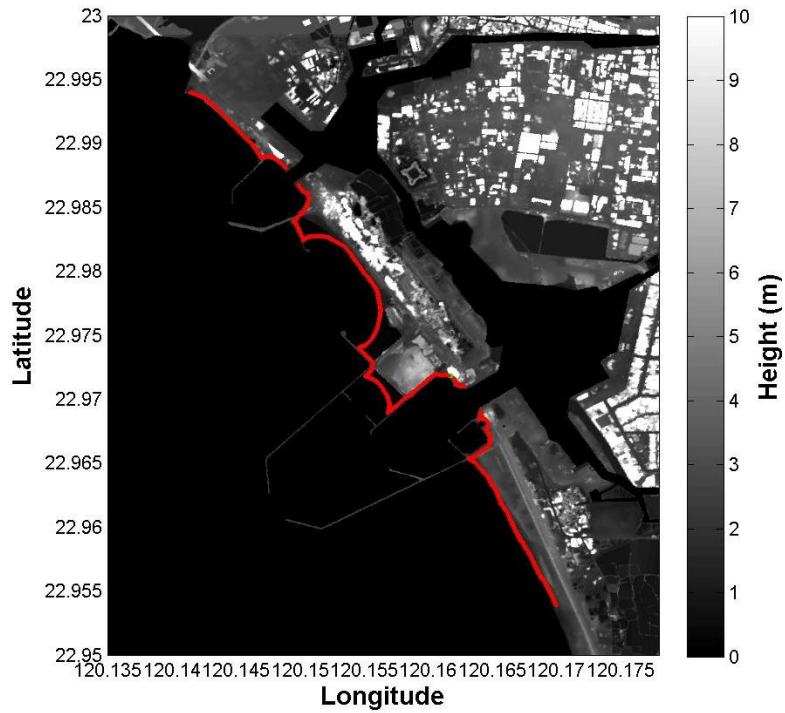
(c) 安平港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



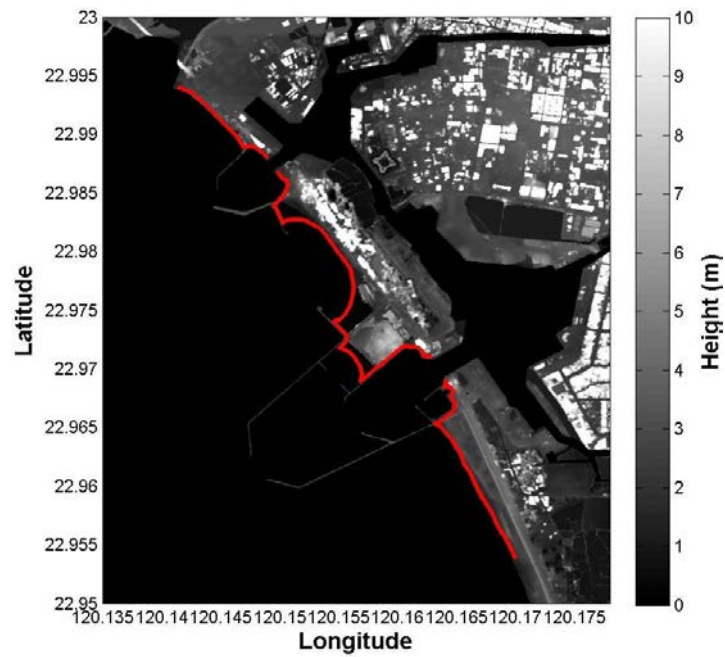
(d) 安平港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈



(e) 安平港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈



(f) 安平港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈



(g) 安平港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.15 安平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 安平港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	安平港			
	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	1725	447	25.91%
	1		1104	64.00%
	2		1477	85.62%
	3		1574	91.25%
	4		1644	95.30%
	6		1714	99.36%
	10		1721	99.77%

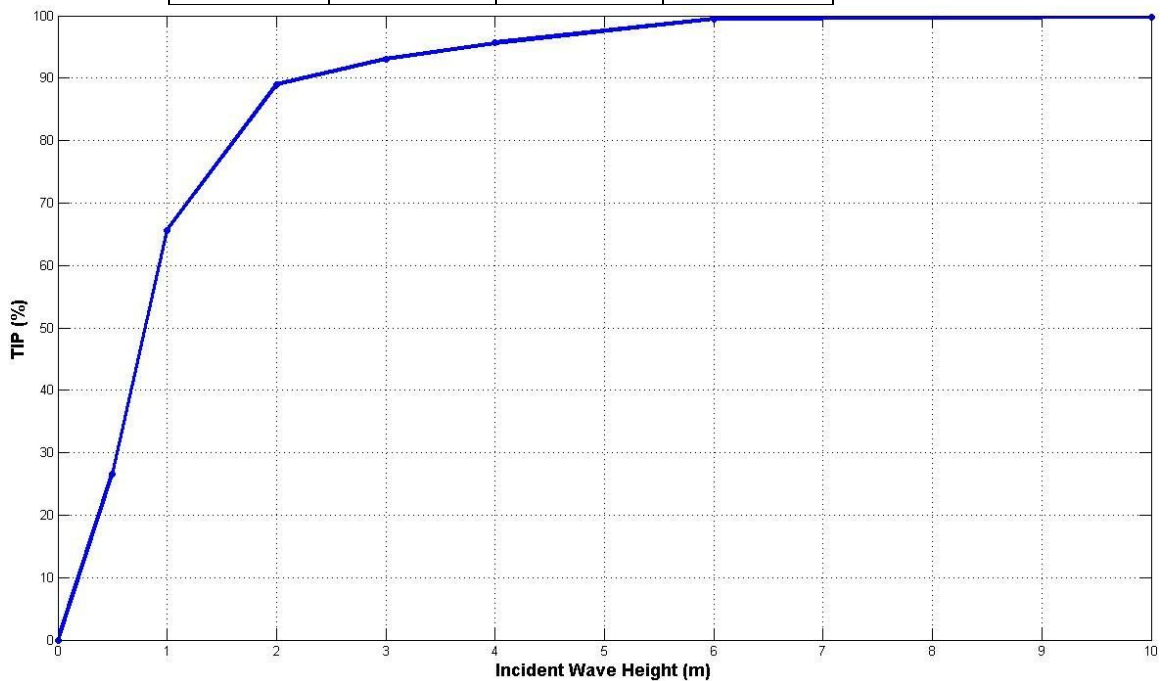


圖 5.16 安平港各入射波高下對應之溢淹機率圖

安平港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.17；安平港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值未超過 15 公分；在地震矩規模 8.0 以上則最大波高可達 2 公尺；地震矩規模為 8.5 以上時，

最大波高值超過 4 公尺；而分析結果顯示馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)會對安平港口產生較大之外海波高。

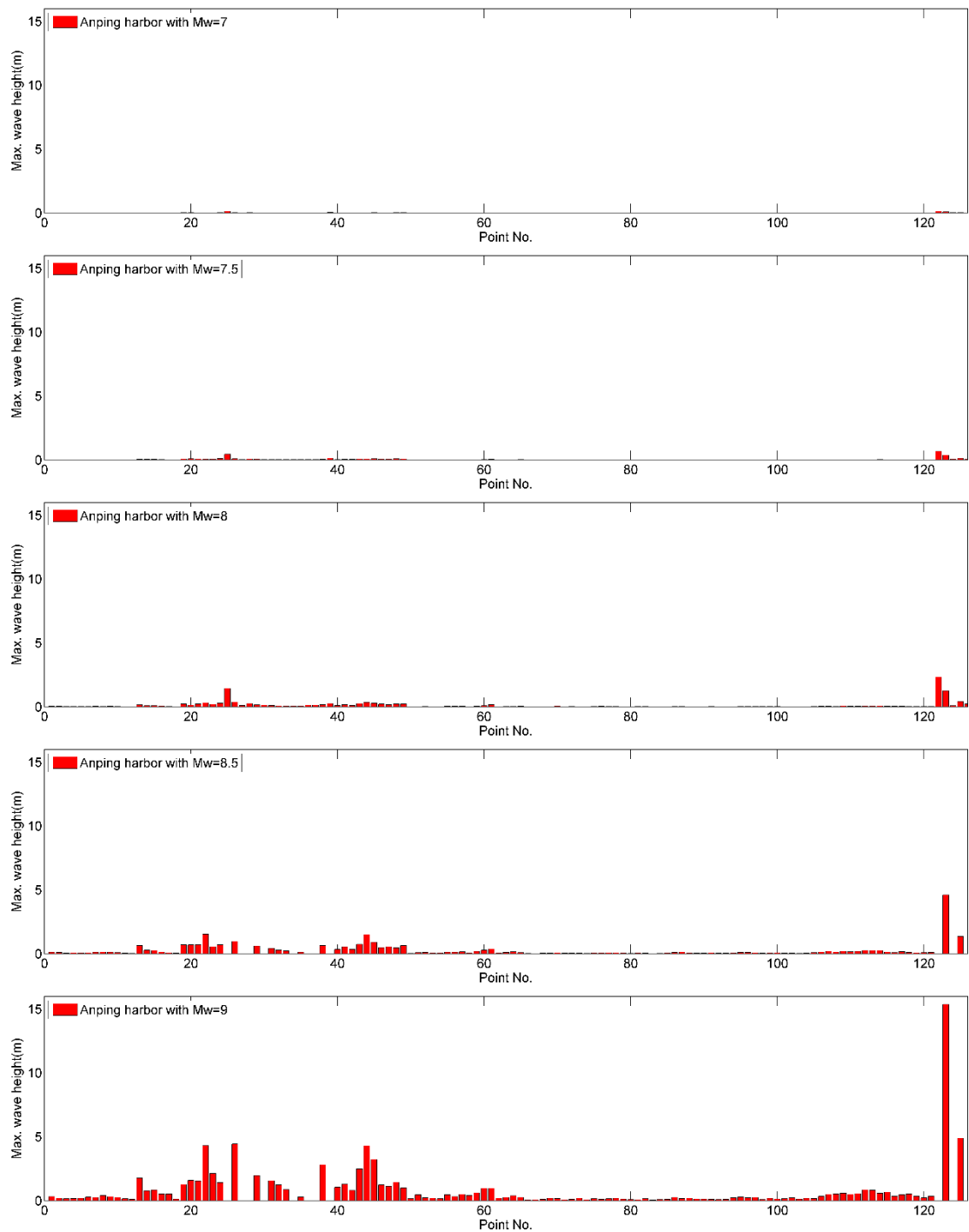


圖 5.17 安平港在各種地震矩規模下之最大波高分佈

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。

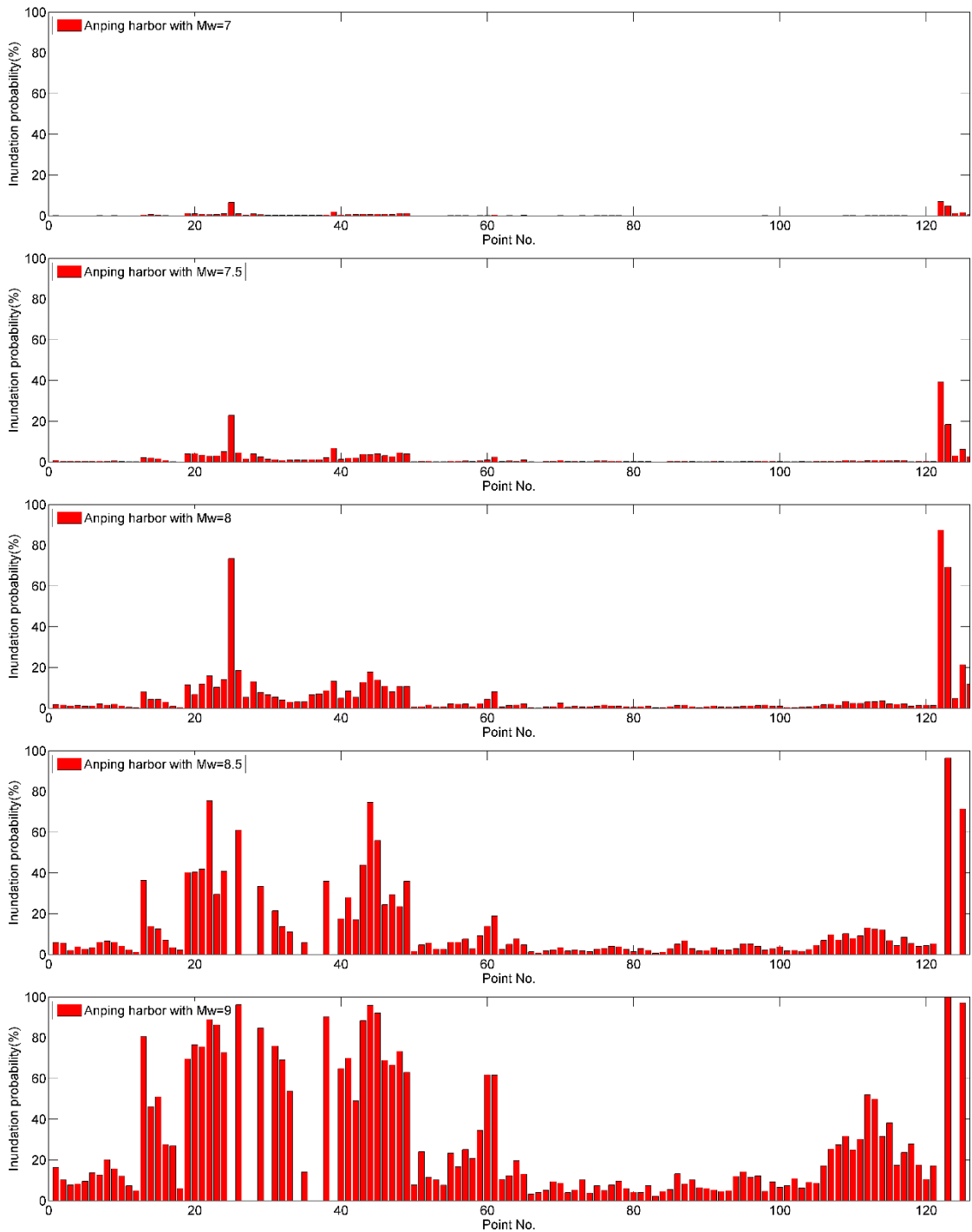


圖 5.18 安平港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

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 120.8642 度，北緯

19.27471 度(編號 123)，利用此假設之參數計算出預測值，安平港預測最大波高水位為 0.6 公尺。(圖 5.19、圖 5.20)

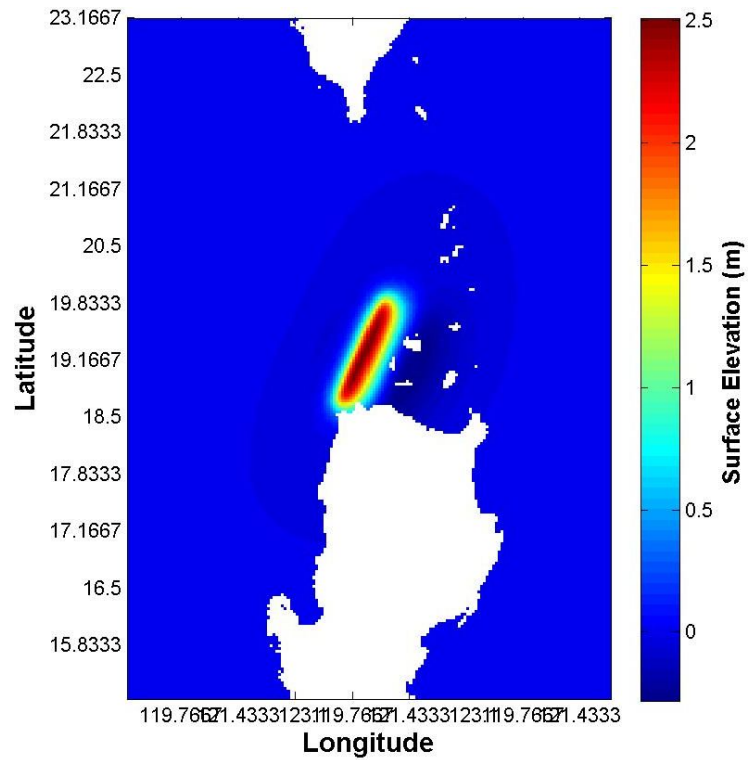


圖 5.19 馬尼拉海溝假設之地震參數後的初始水位

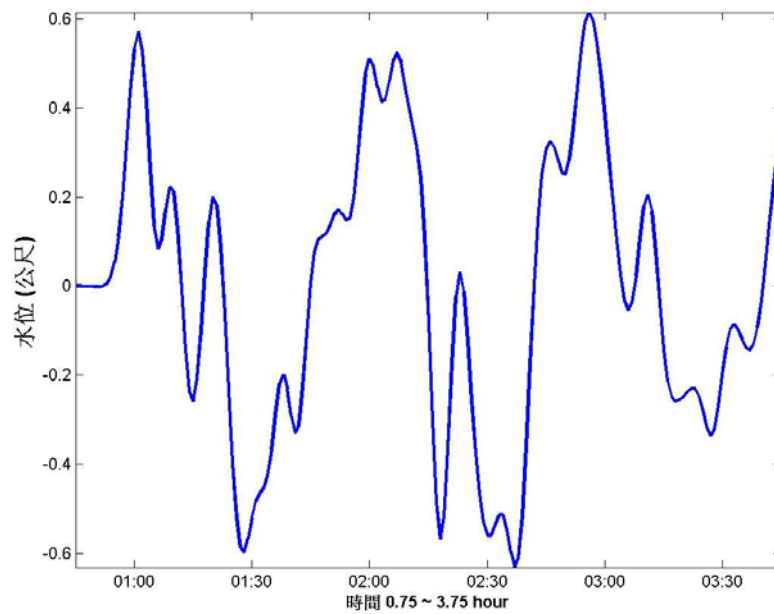


圖 5.20 安平港外海的預報水位

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%

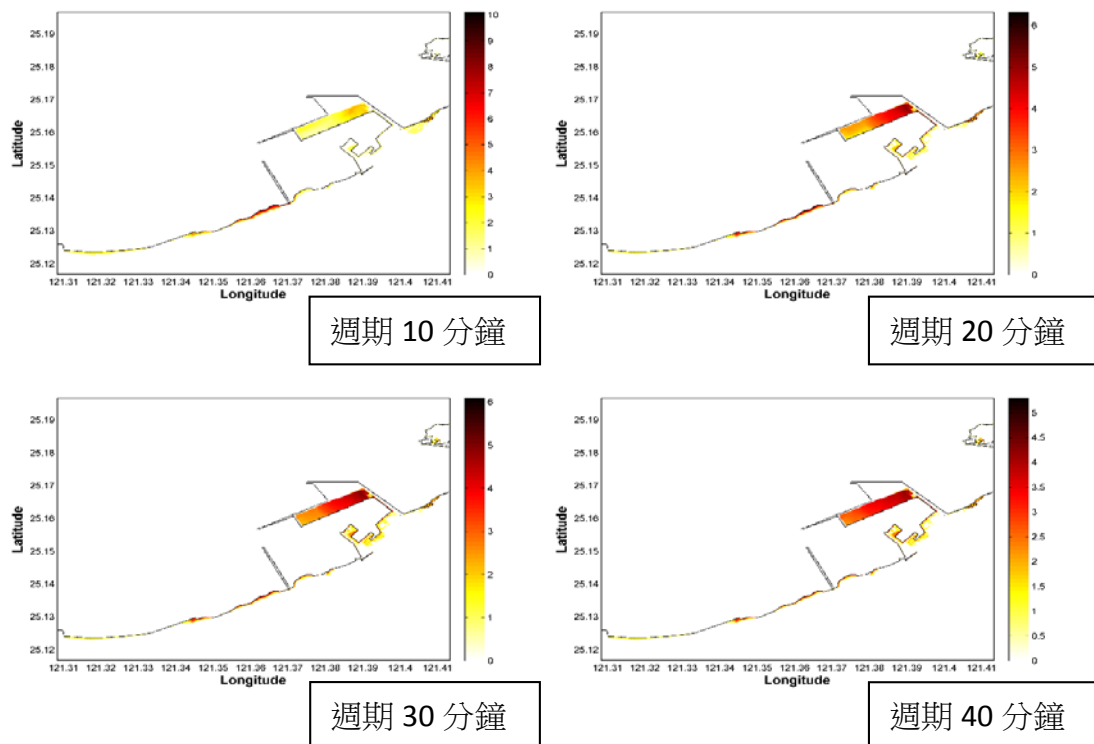


圖 5.21 臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果

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))、海嘯對安平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，加總各分量即得安平港未來 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%。本研究並結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖，圖 5.24。

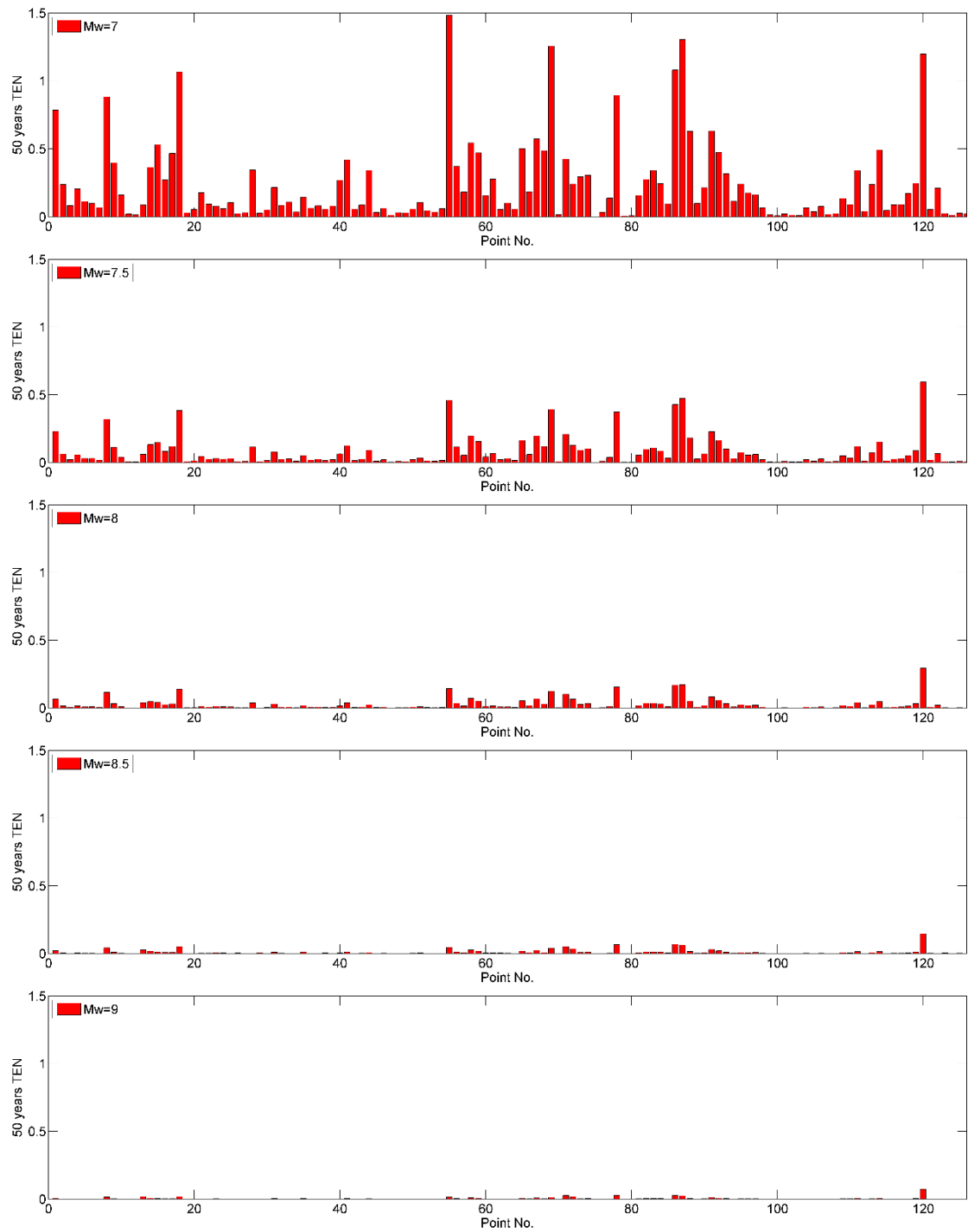


圖 5.22(a) 50 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

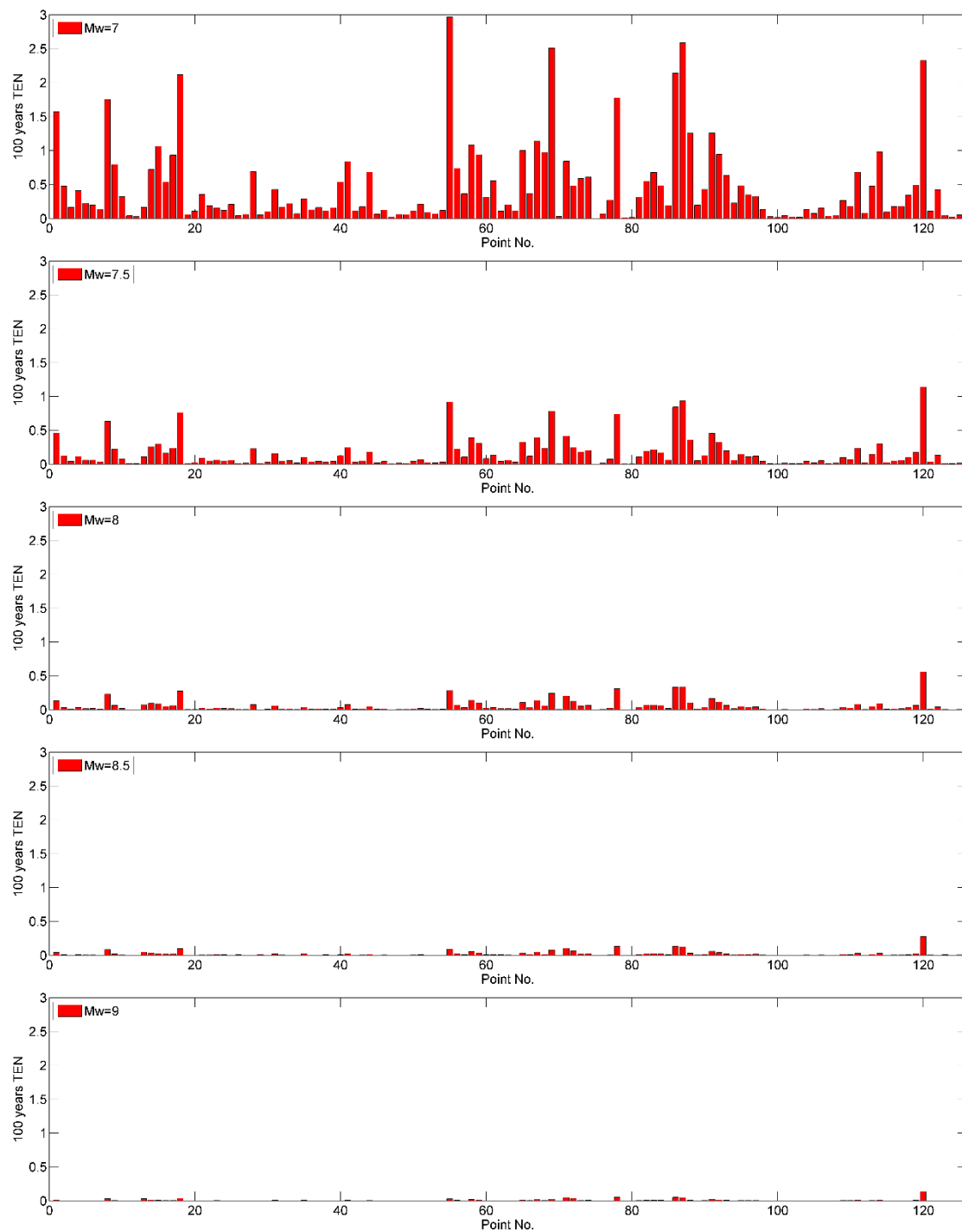


圖 5.22(b) 100 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

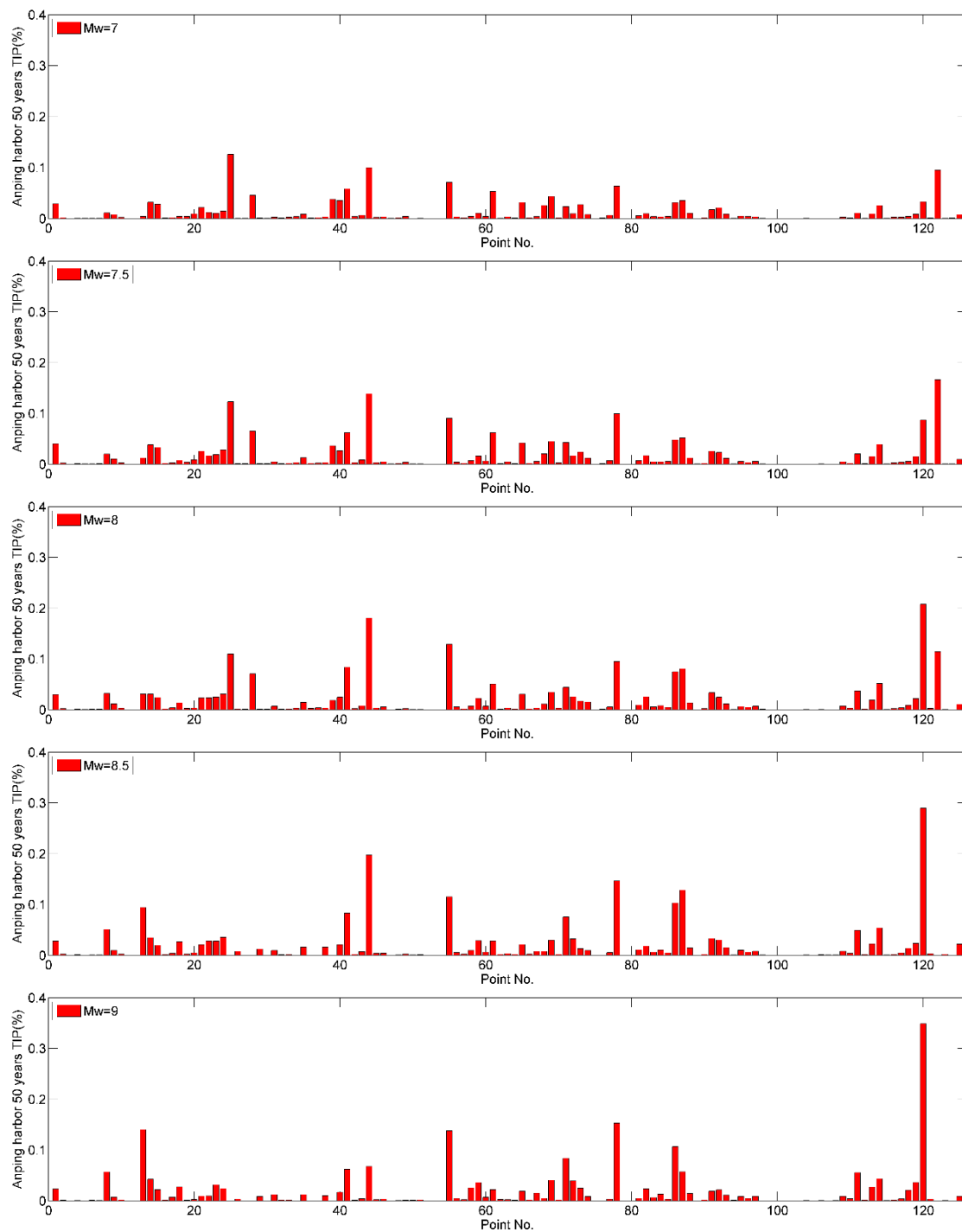


圖 5.23(a) 安平港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

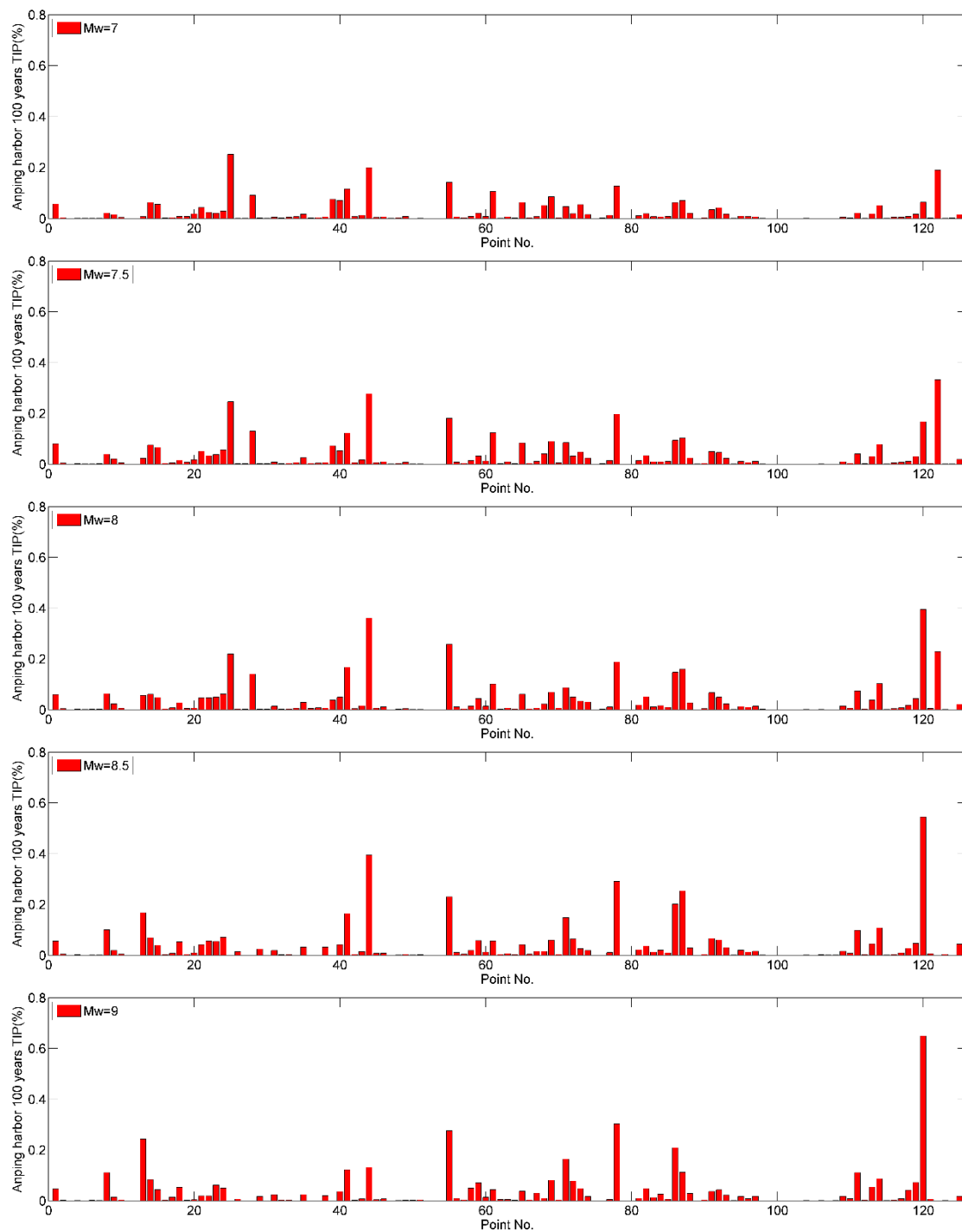
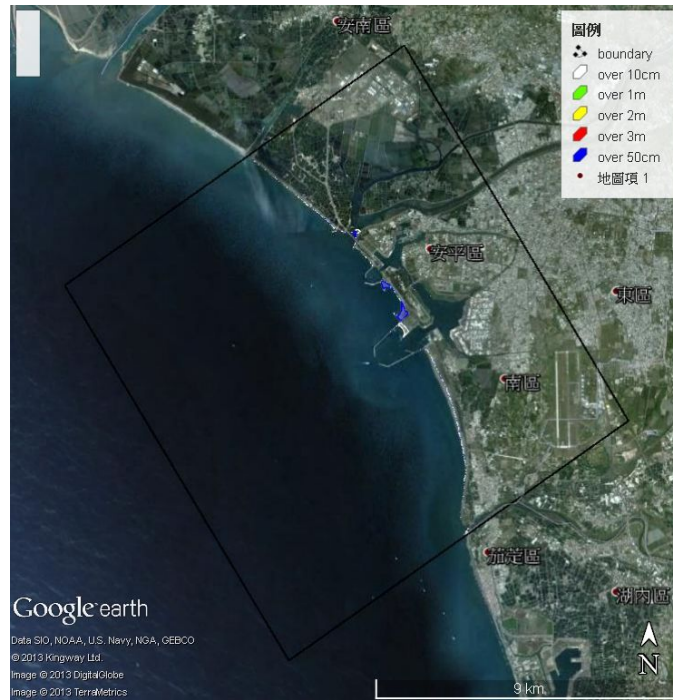
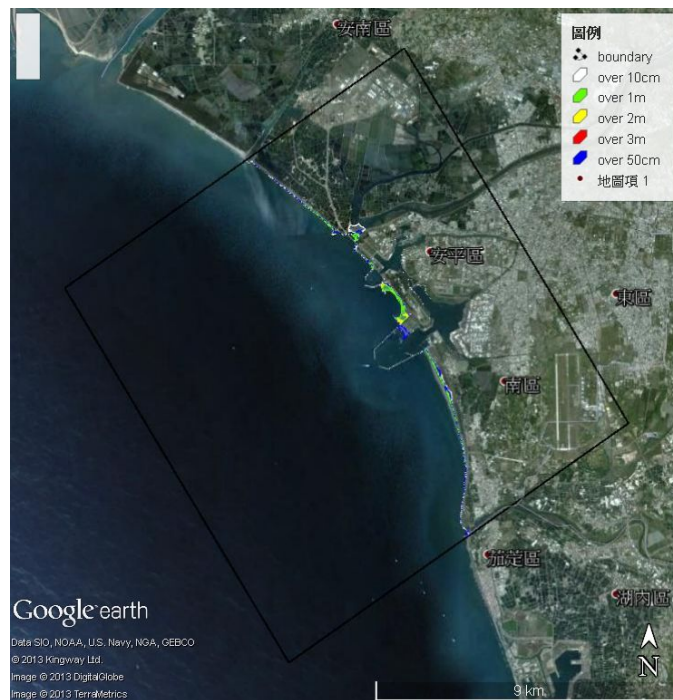


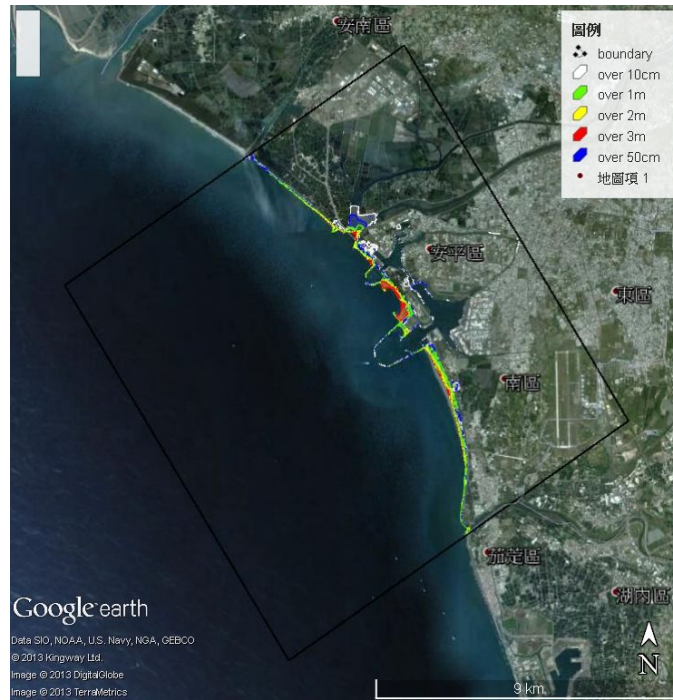
圖 5.23(b) 安平港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)



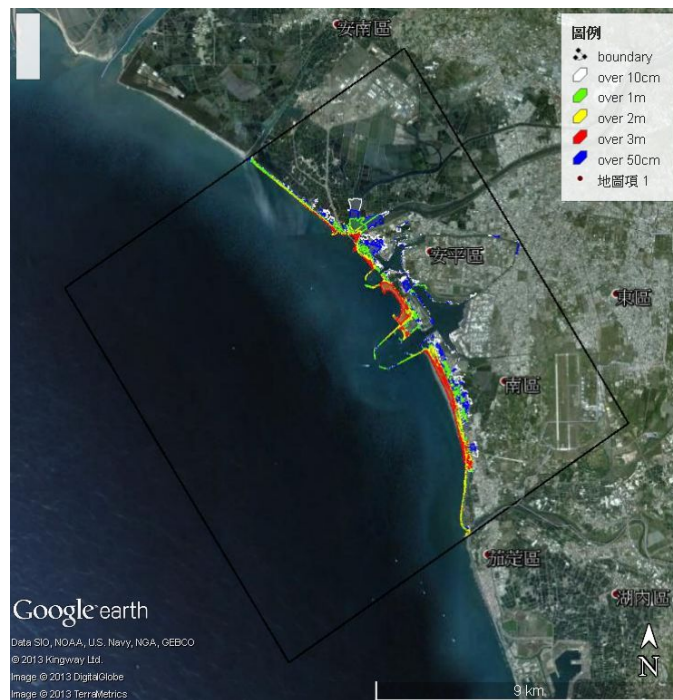
(a) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 0.5 公尺



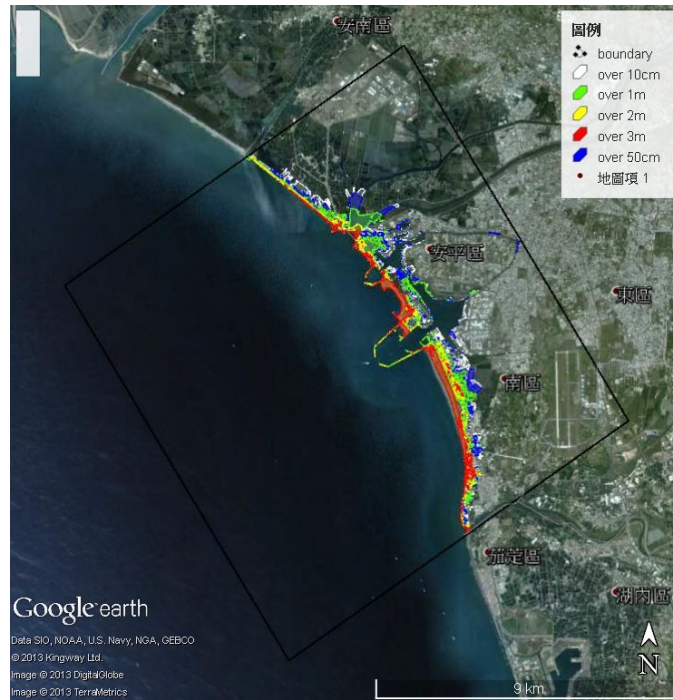
(b) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 1 公尺



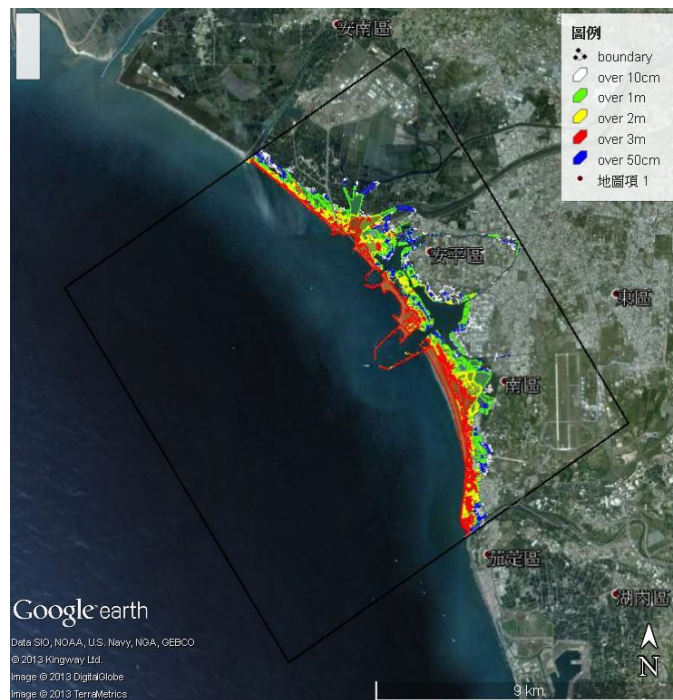
(c) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 2 公尺



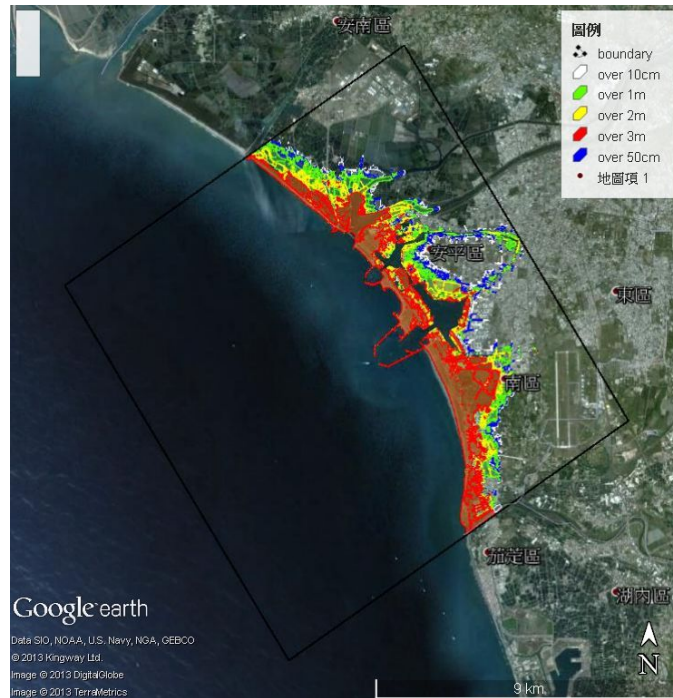
(d) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 3 公尺



(e) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 4 公尺



(f) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 6 公尺



(g) 安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 10 公尺

圖 5.24 安平港結合 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 高雄港之溢淹模擬

5.4.1 數值地形

圖 5.25 為高雄港之陸域數值地形。海域地形則採用海科中心網格間距為 500 公尺之水深資料，並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 為海陸域整合後之數值地形檔。

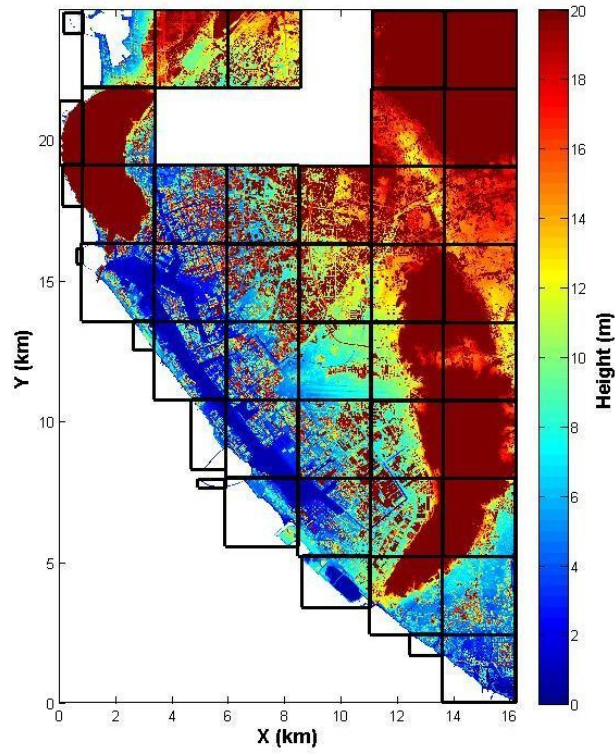


圖 5.25 高雄港 5m 解析度數值地形檔

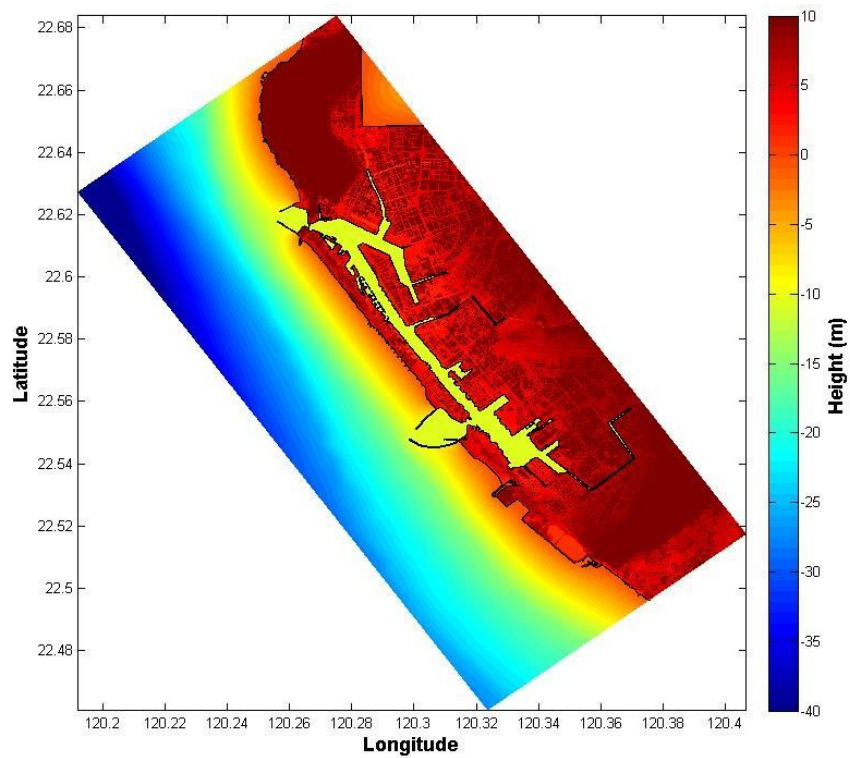
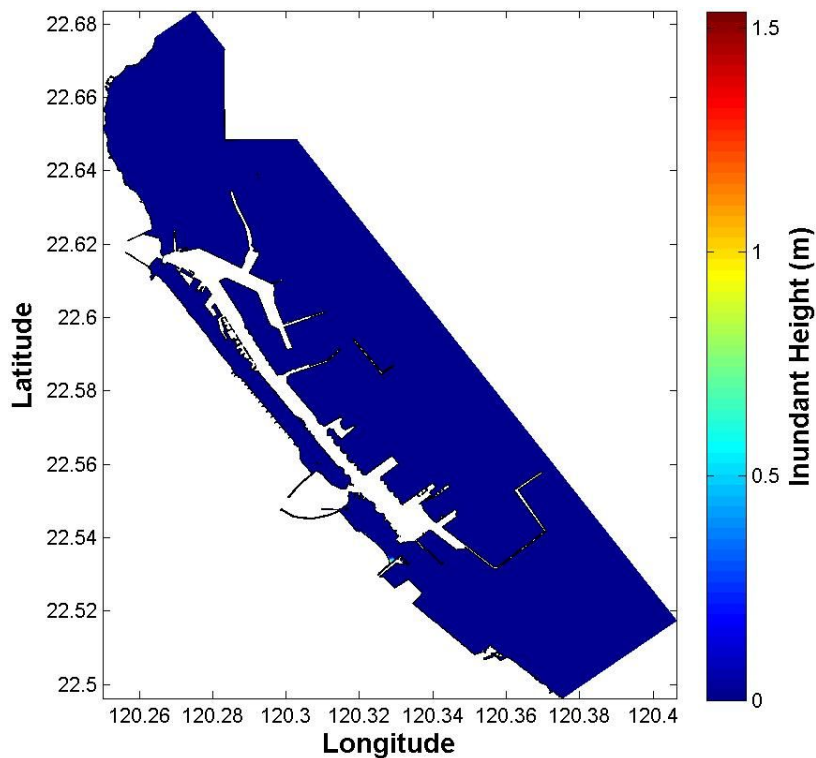


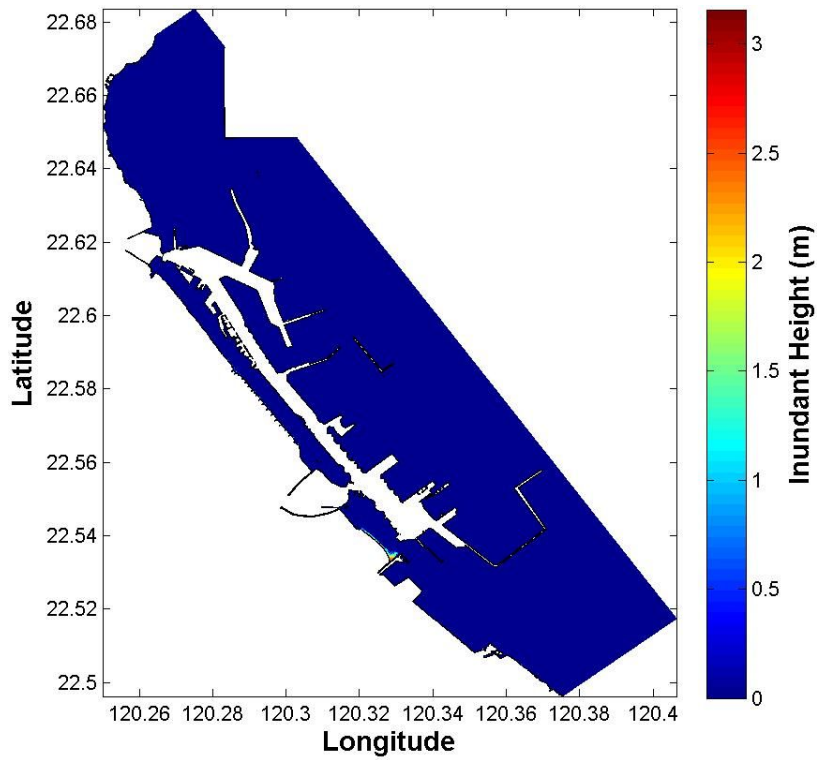
圖 5.26 高雄港整合海陸域後之數值地形檔

5.4.2 高雄港之模擬結果

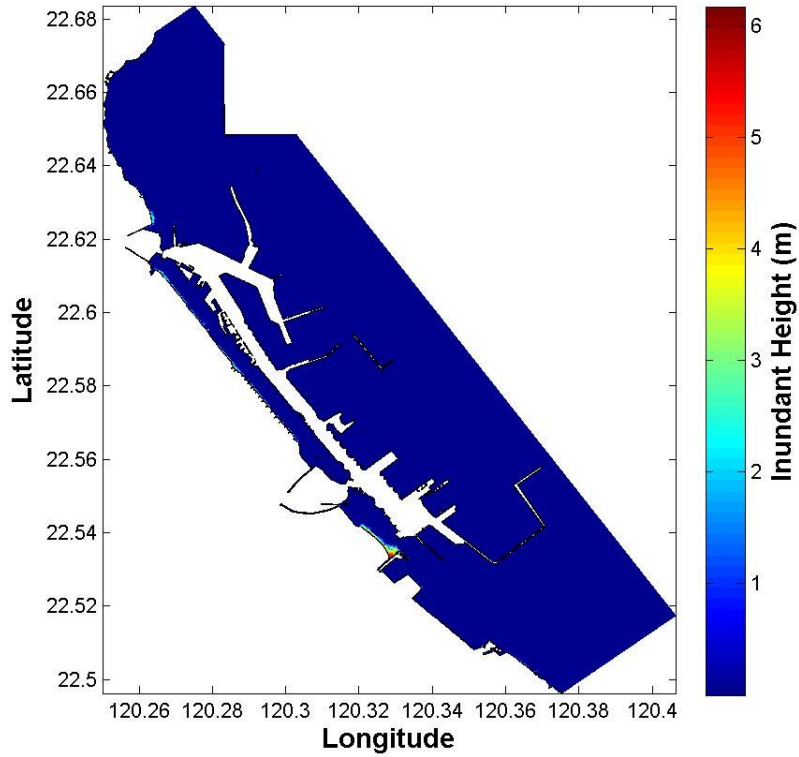
海嘯波模擬採用 5.3.2 小節所述之方式(如圖 5.12)為入射波，以此波形在模式地形邊界上入射，模擬此情境下陸地之溢淹狀況。圖 5.27(a)~(g)為高雄港在各種不同高斯波入射波高下之溢淹圖。在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 2 公尺以下，溢淹範圍侷限於旗津堤外之沙洲。當 3 公尺之入射波高時，旗津區汕頭已有 50 公分的溢淹高程，而入射波高超過 4 公尺時，旗津區市區已有大範圍超過 50 公分的溢淹高程；在港內上下之溢淹高程也會提高至 6 公尺左右(入射波高為 6 公尺以上時)。



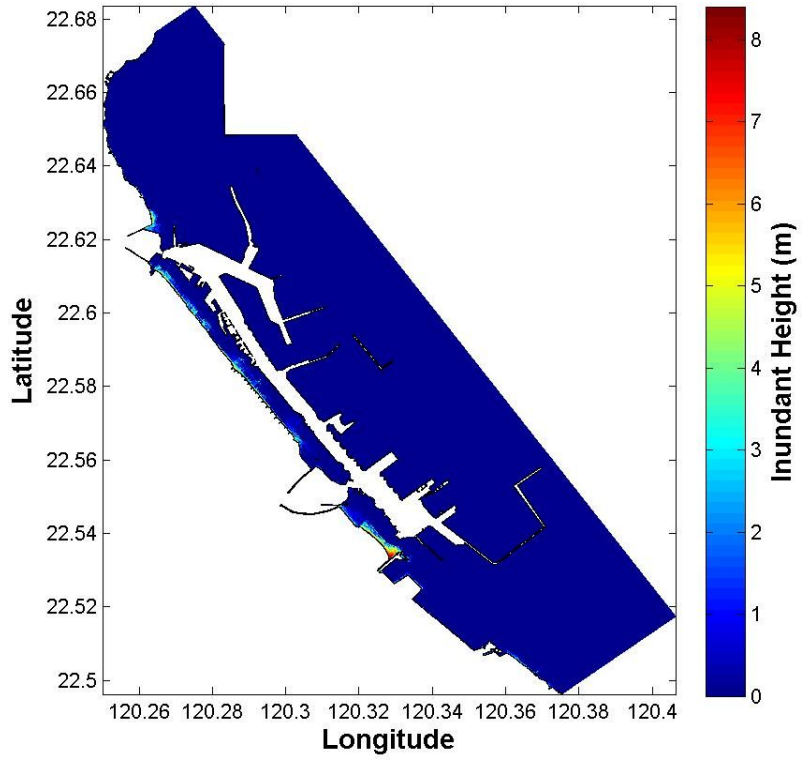
(a) 高雄港入射波高為 0.5 公尺之溢淹圖



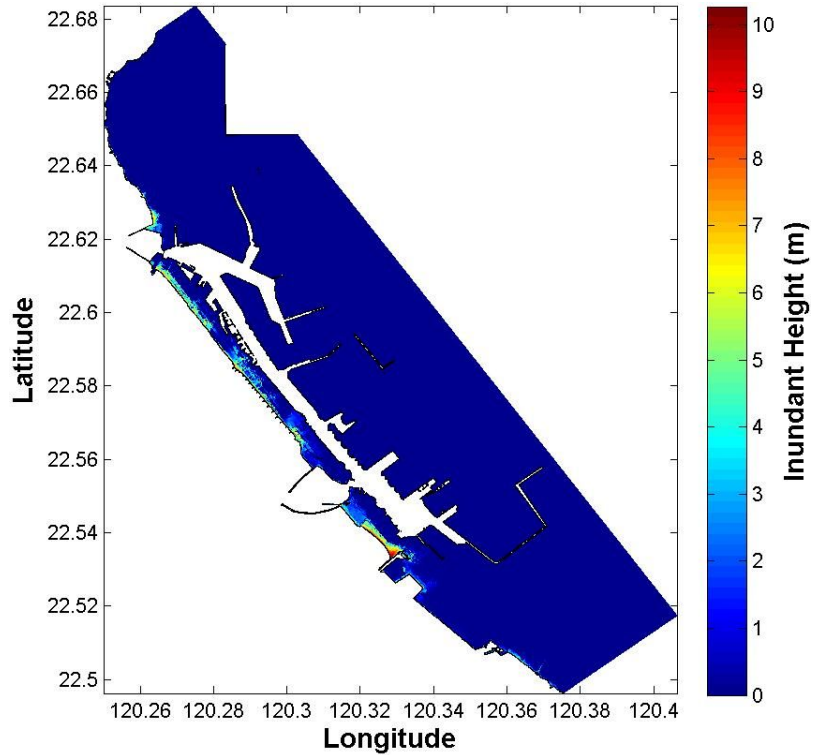
(b) 高雄港入射波高為 1 公尺之溢淹圖



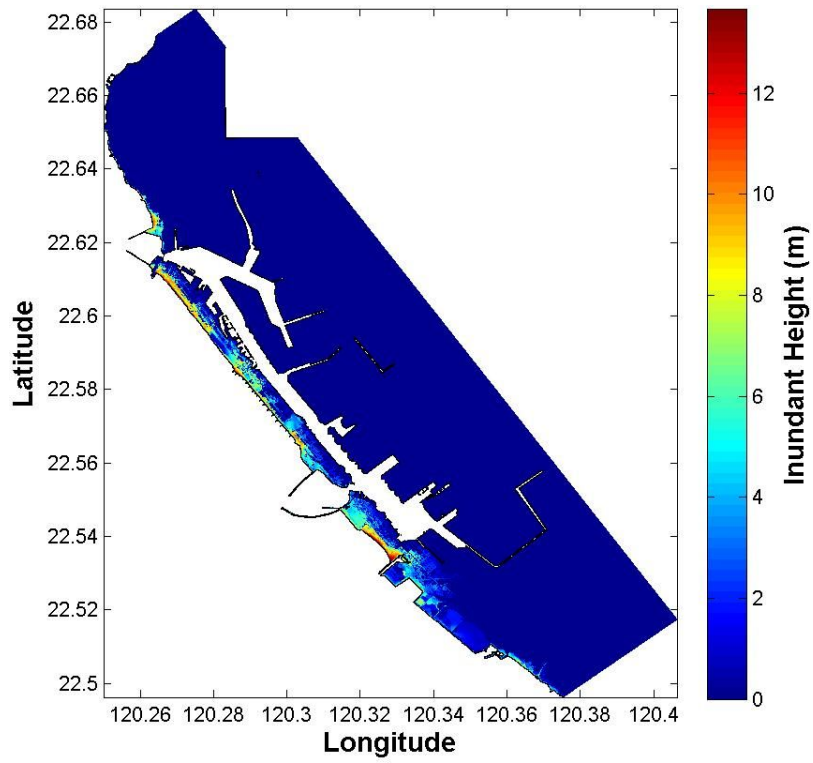
(c) 高雄港入射波高為 2 公尺之溢淹圖



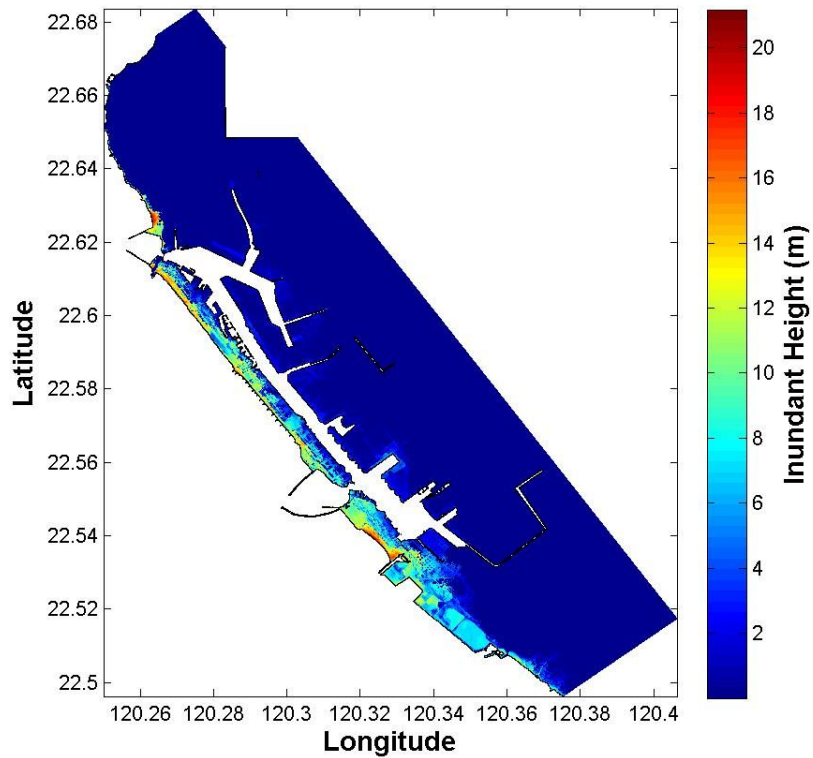
(d) 高雄港入射波高為 3 公尺之溢淹圖



(e) 高雄港入射波高為 4 公尺時之溢淹圖



(f) 高雄港入射波高為 6 公尺時之溢淹圖

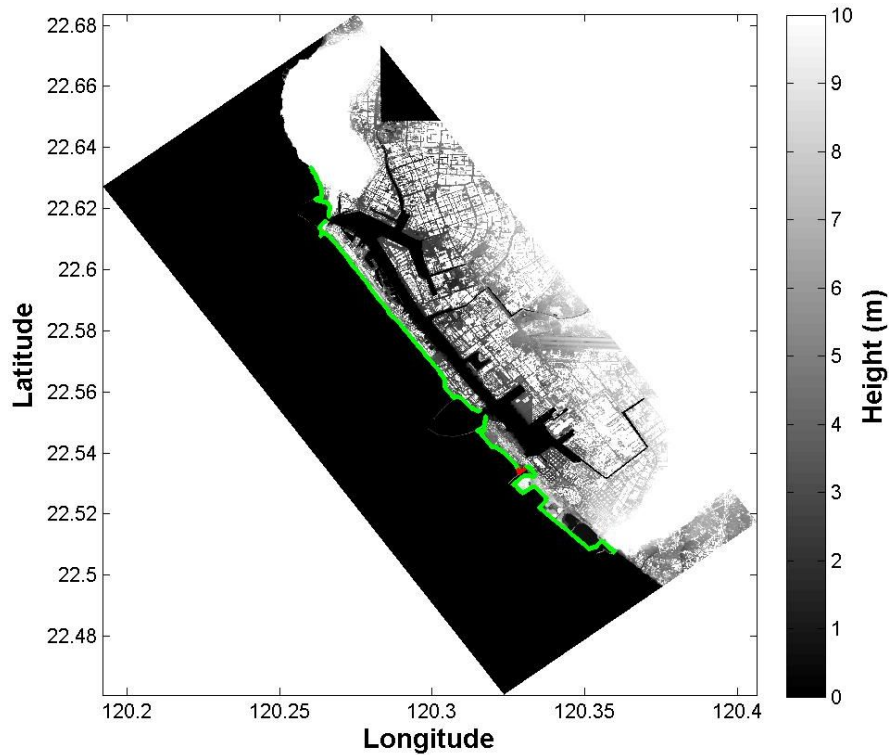


(g) 高雄港入射波高為 10 公尺時之溢淹圖

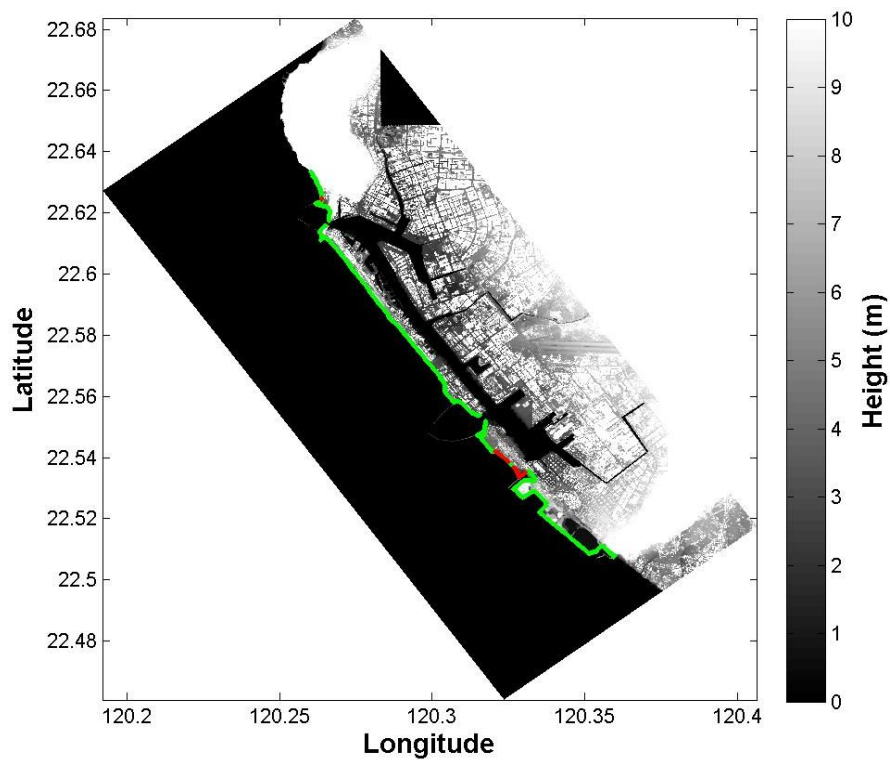
圖 5.27 高雄港之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

5.4.3 高雄港之溢淹點位分佈及機率

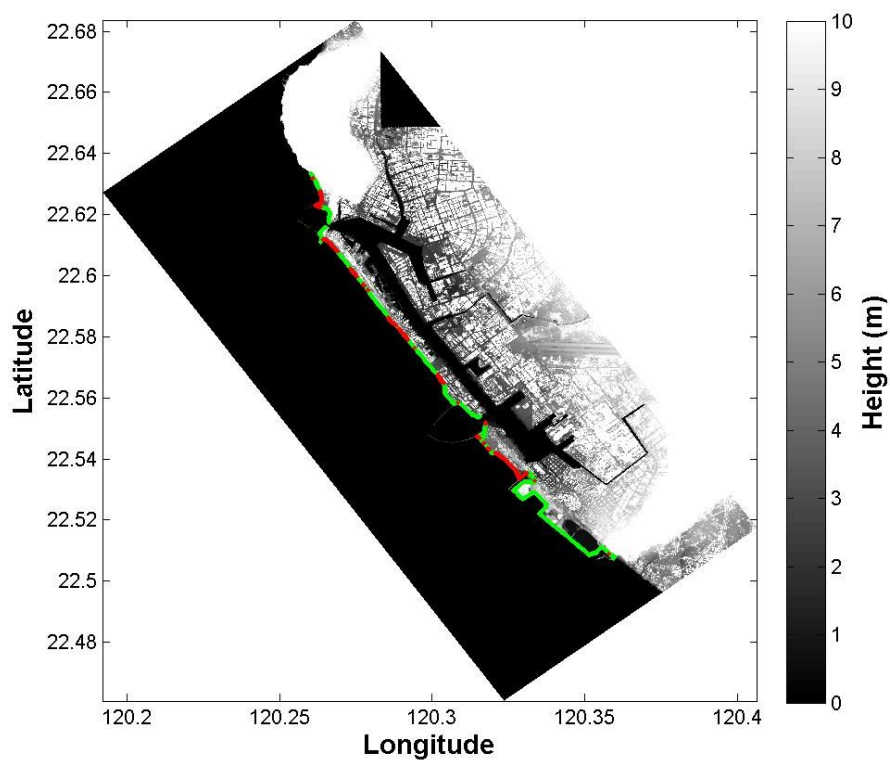
圖 5.28 為高雄港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.5 及圖 5.29，入射波高只要大於 3 公尺就會有 50% 以上的溢淹機率。



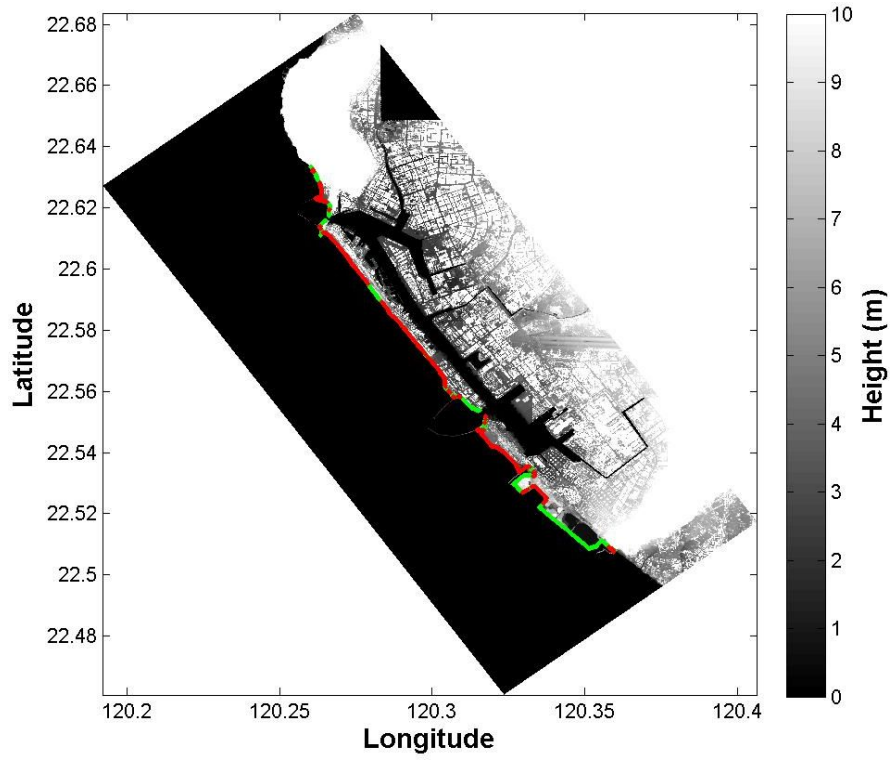
(a) 高雄港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



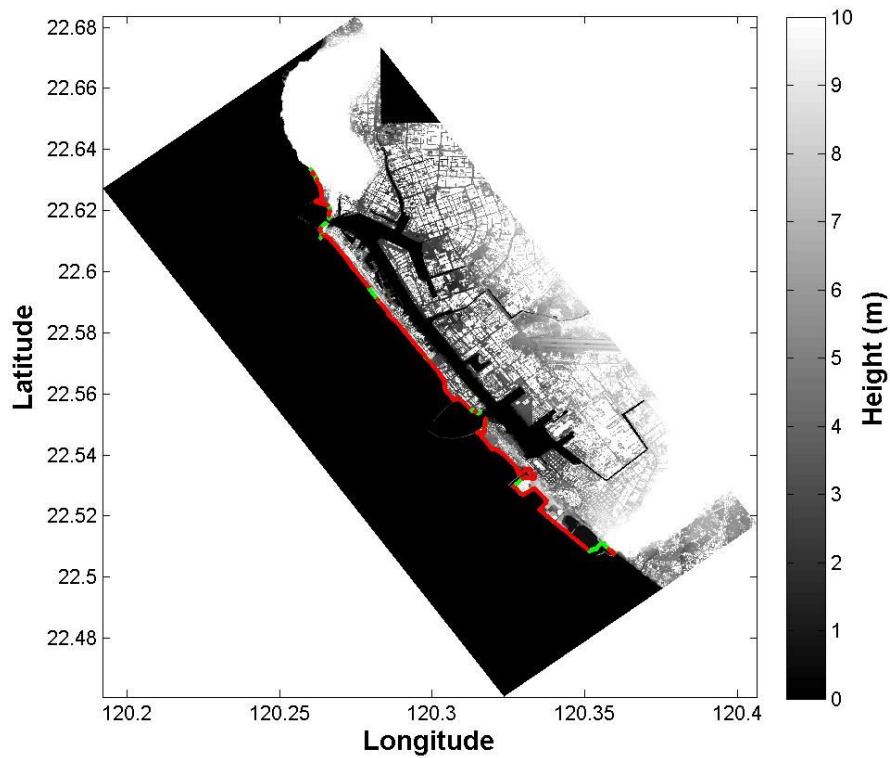
(b) 高雄港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



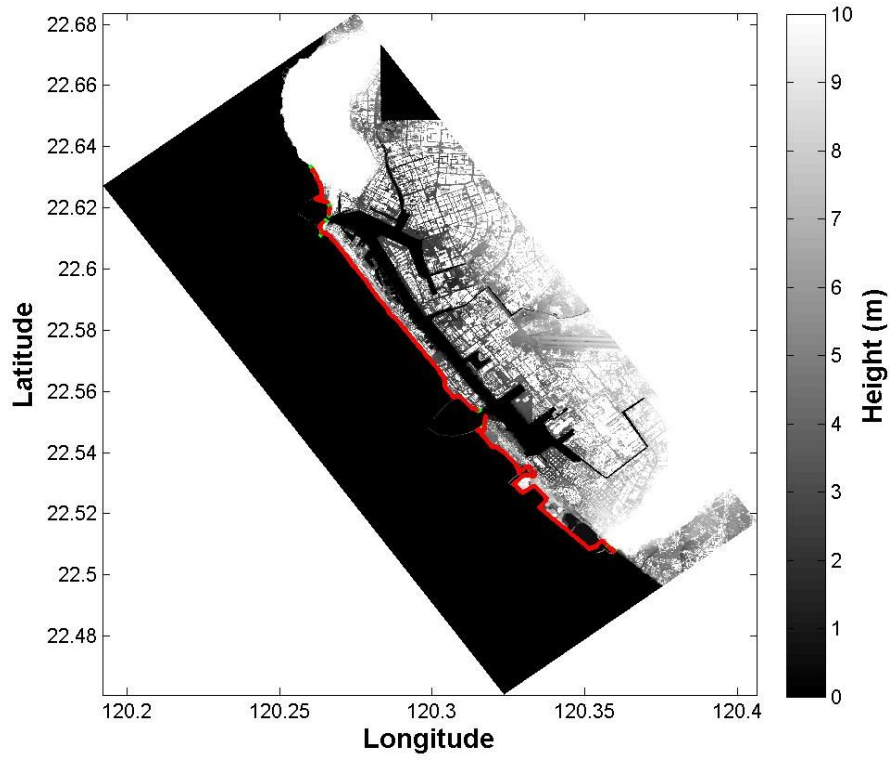
(c) 高雄港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



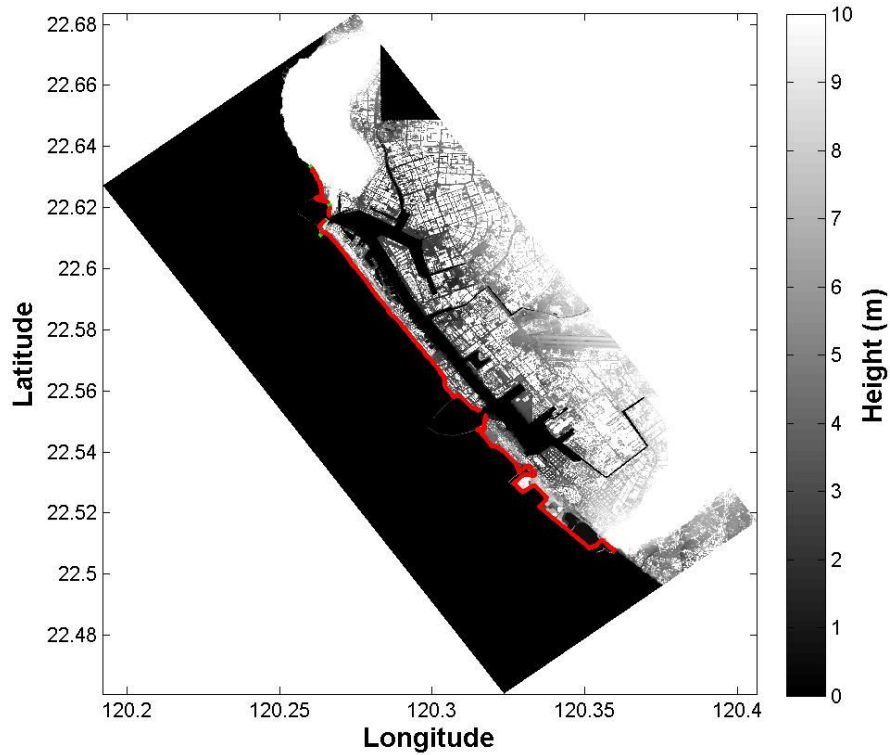
(d) 高雄港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈



(e) 高雄港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈



(f) 高雄港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈



(g) 高雄港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.28 高雄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 高雄港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	高雄港		
	離海 50 米的岸線點數	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
0.5	4165	64	1.54%
1		192	4.61%
2		836	20.07%
3		2163	51.93%
4		3169	76.09%
6		3864	92.77%
10		3994	95.89%

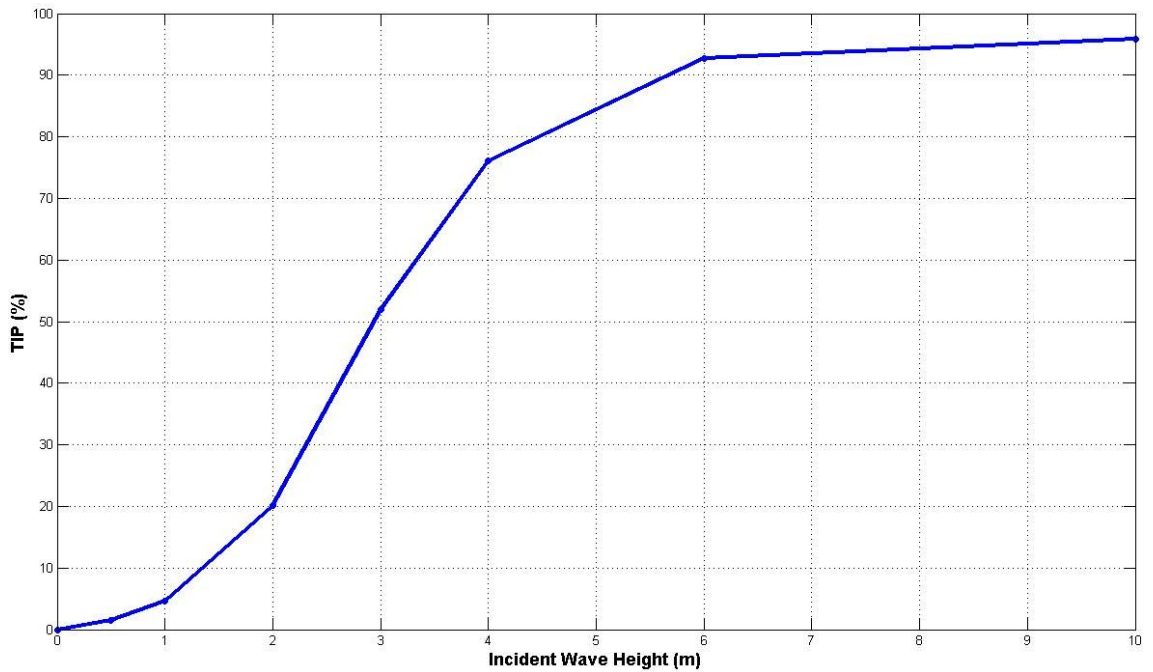


圖 5.29 高雄港各入射波高下對應之溢淹機率圖

高雄港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.30；高雄港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值未超過 15 公分；在地震矩規模 8.0 以上則最大波高可達 1.5 公尺；地震矩規模為 8.5 以上時，最大波高值超過 3 公尺；而分析結果顯示馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)會對高雄港口產生較大之外海波高。

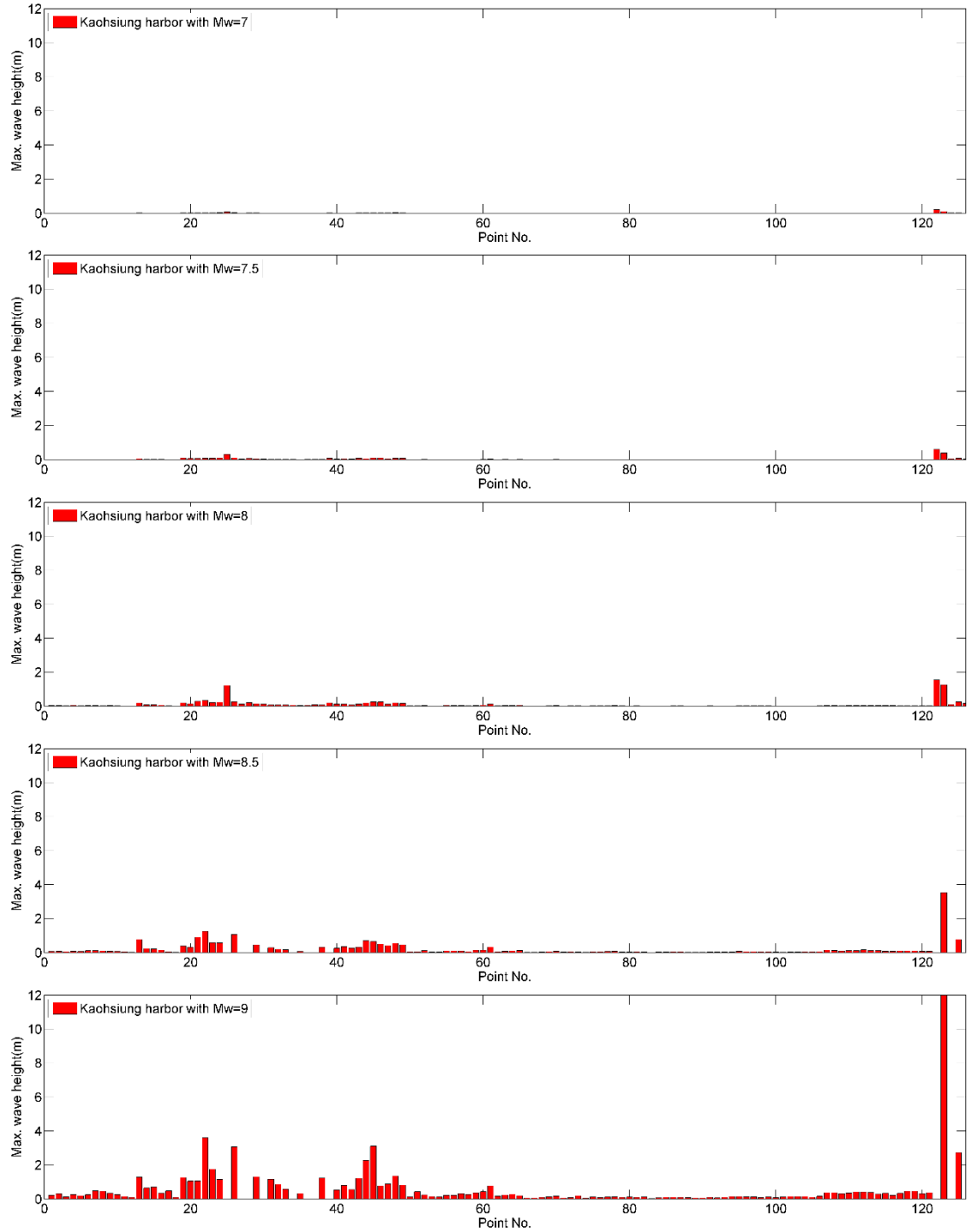


圖 5.30 高雄港在各種地震矩規模下之最大波高分佈

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 5.31 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，即使在馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)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。

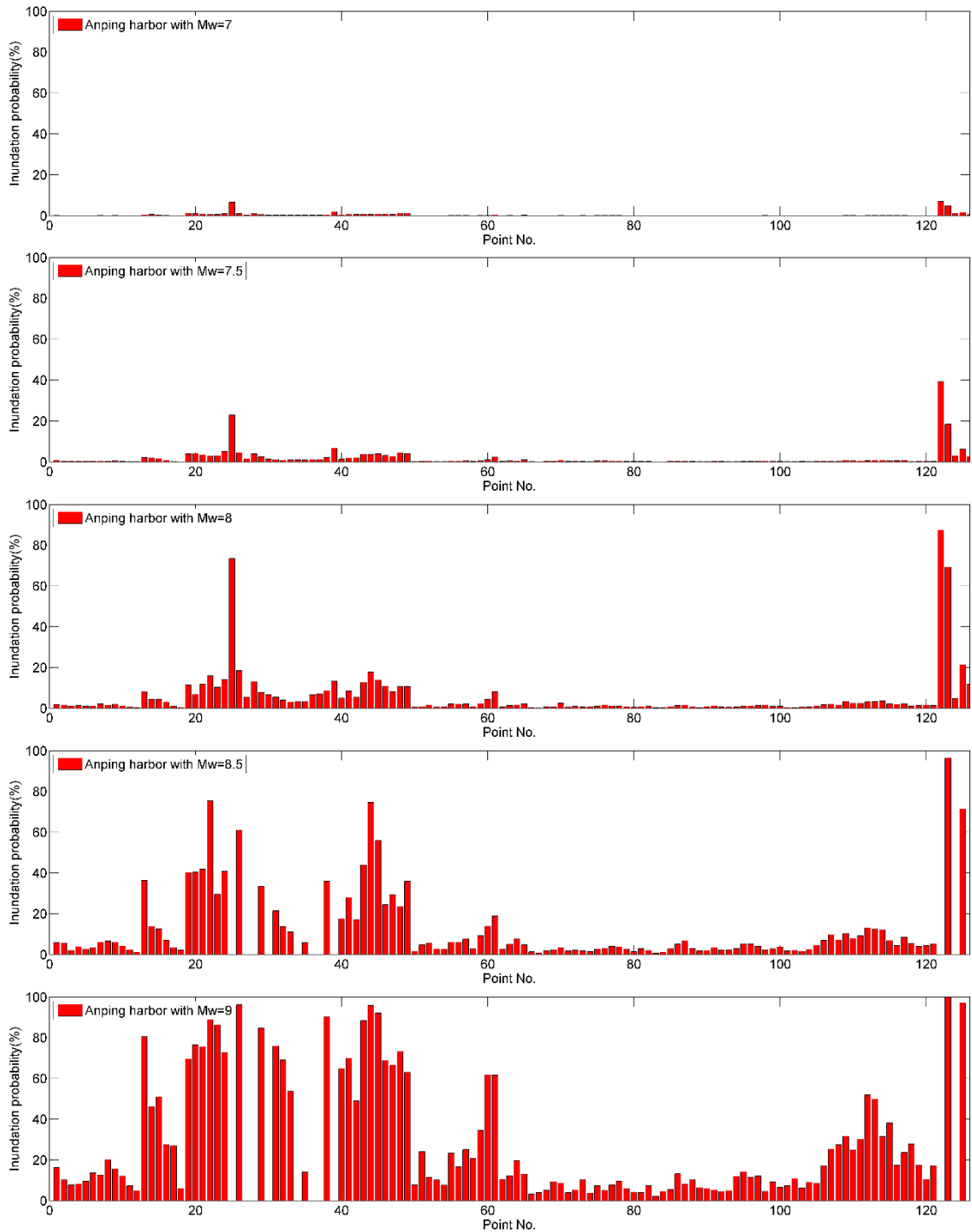


圖 5.31 高雄港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

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(地震矩規模大於 8)設定為震央位址 120.7337 度，北緯 19.29939 度(編號 114)，利用此假設之參數計算出預測值，高雄港預測最大波高水位超過 8 公尺。(圖 5.32、圖 5.33)

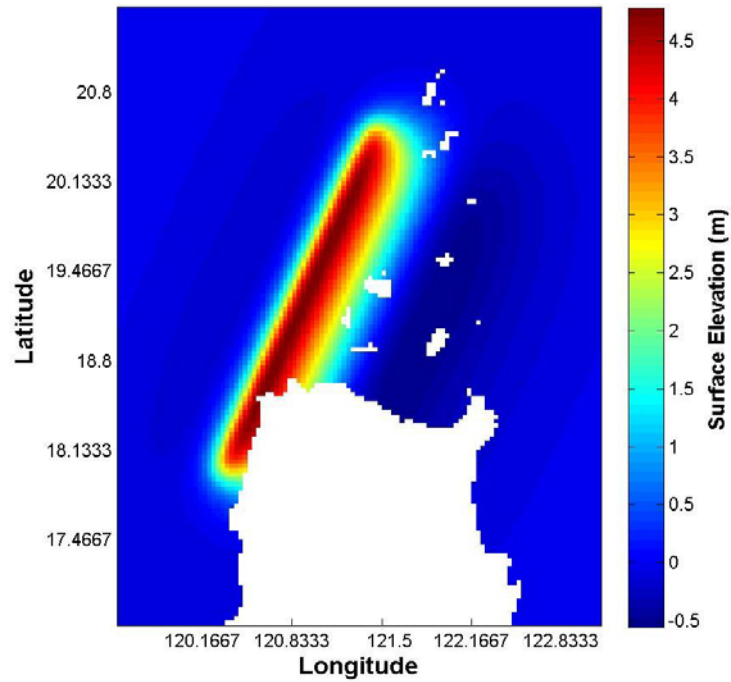


圖 5.32 馬尼拉海溝假設之地震參數後的初始水位

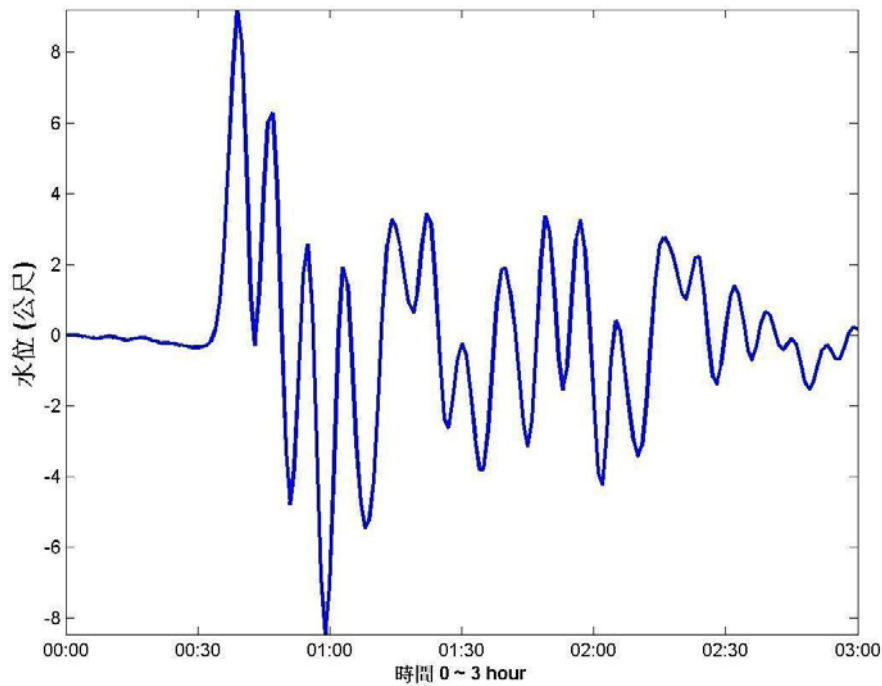


圖 5.33 高雄港外海的預報水位

5.4.4 高雄海嘯地震且溢淹之機率

根據 5.3.5 小節所評估之 50 年及 100 年海嘯地震發生次數的期望值(TEN)與海嘯對高雄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(圖 5.22(a)、(b))，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，加總各分量即得高雄港未來 50 年及 100 年發生海嘯且溢淹之機率，如圖 5.34(a1)(a2))、(b1)(b2)；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」。評估結果為高雄港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.55%，100 年為 1.09%。本研究並結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖，圖 5.35。

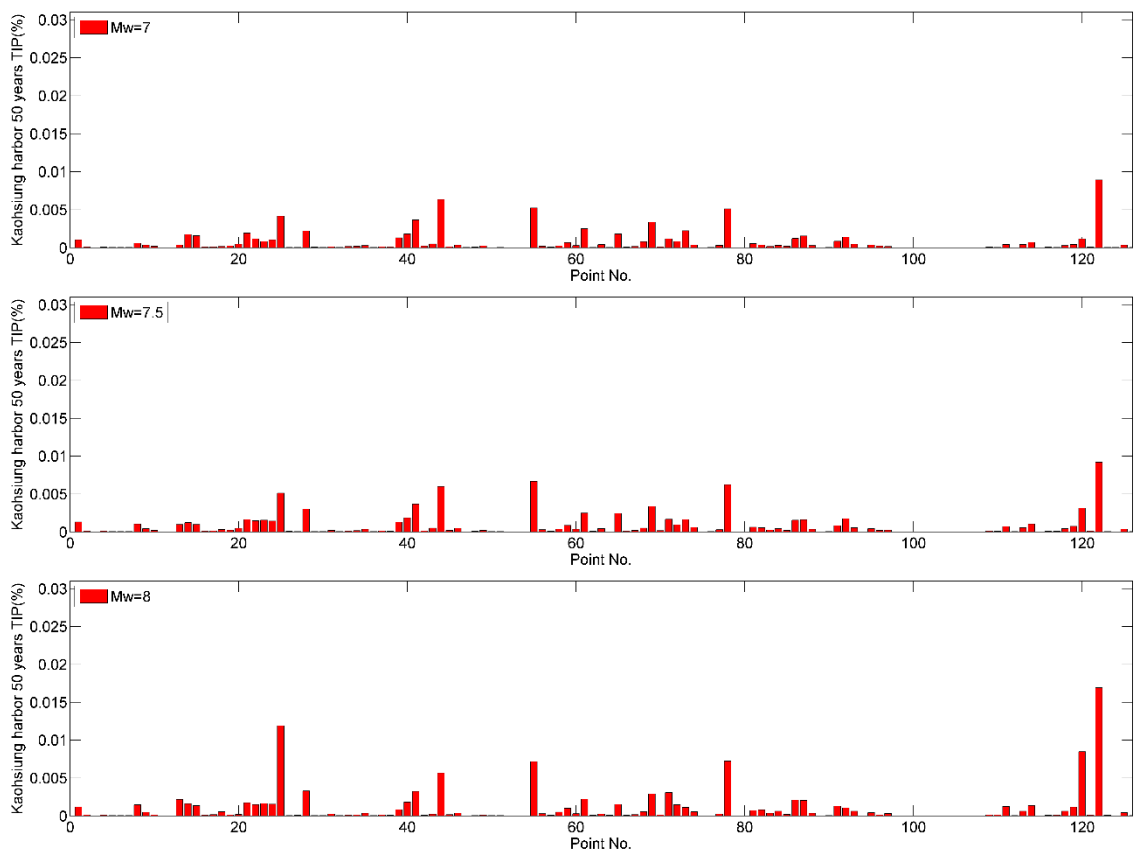


圖 5.34(a1) 高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

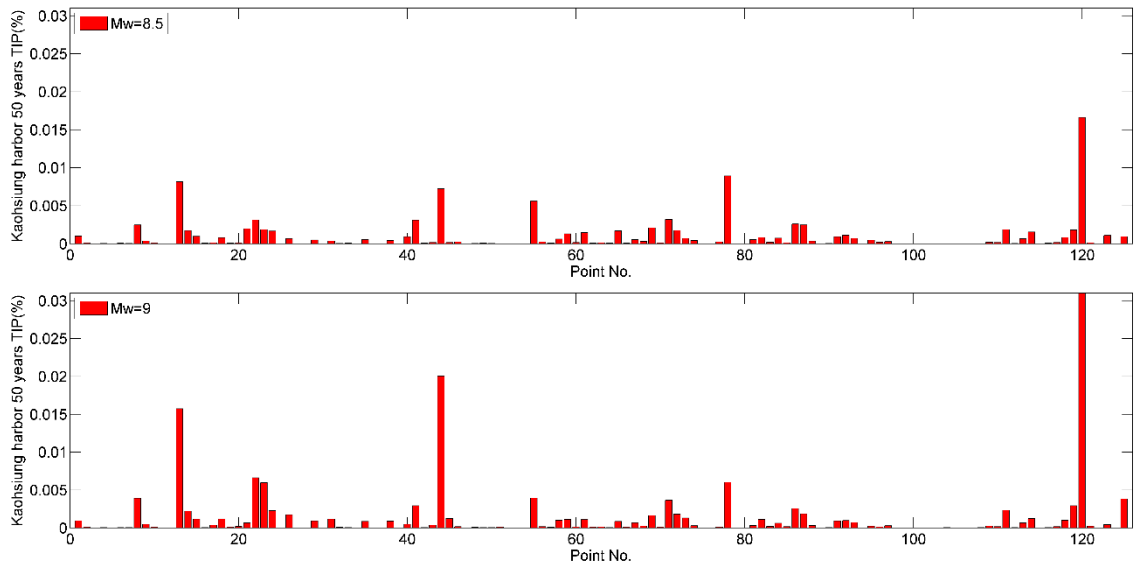


圖 5.34(a2) 高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

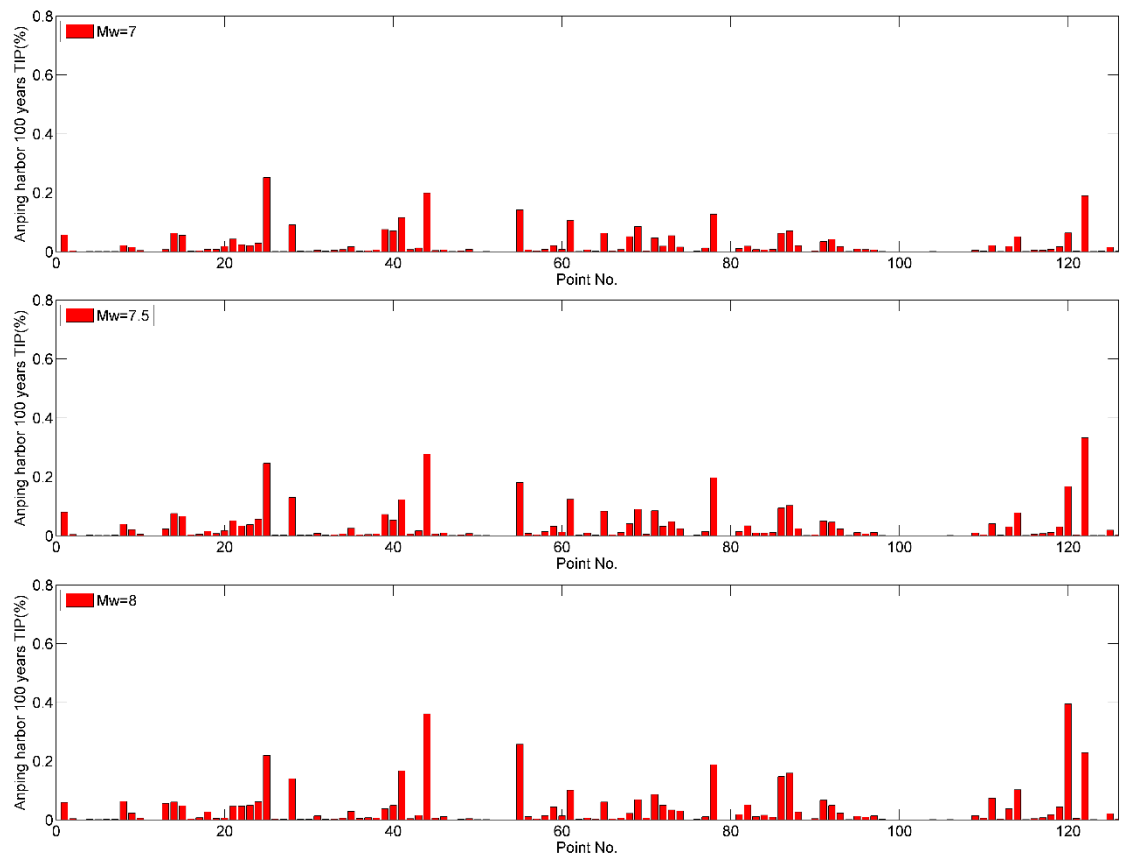


圖 5.34(b1) 高雄港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

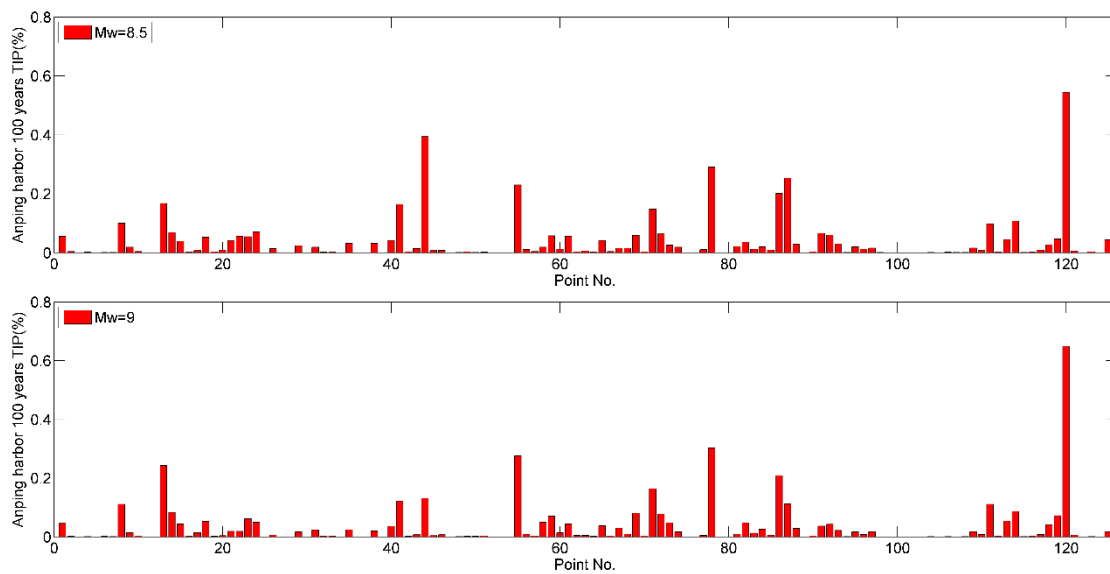
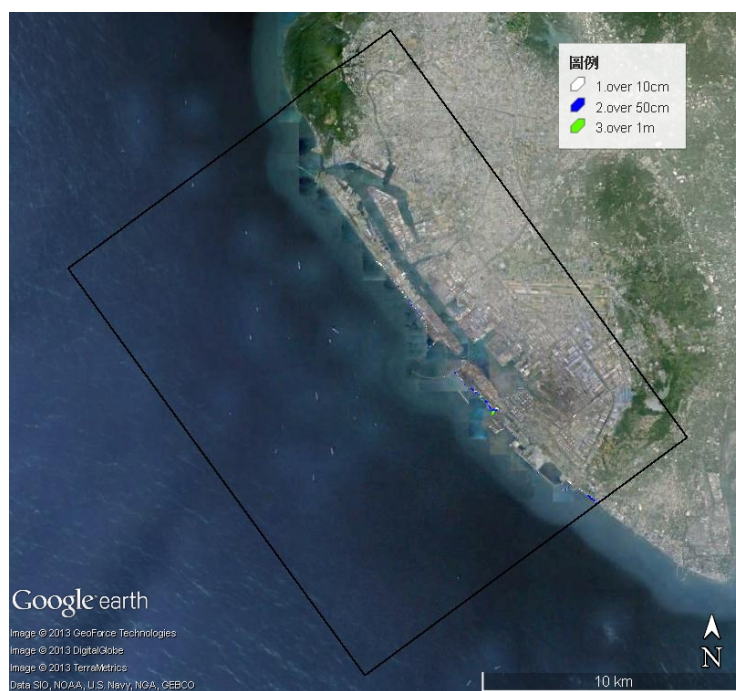
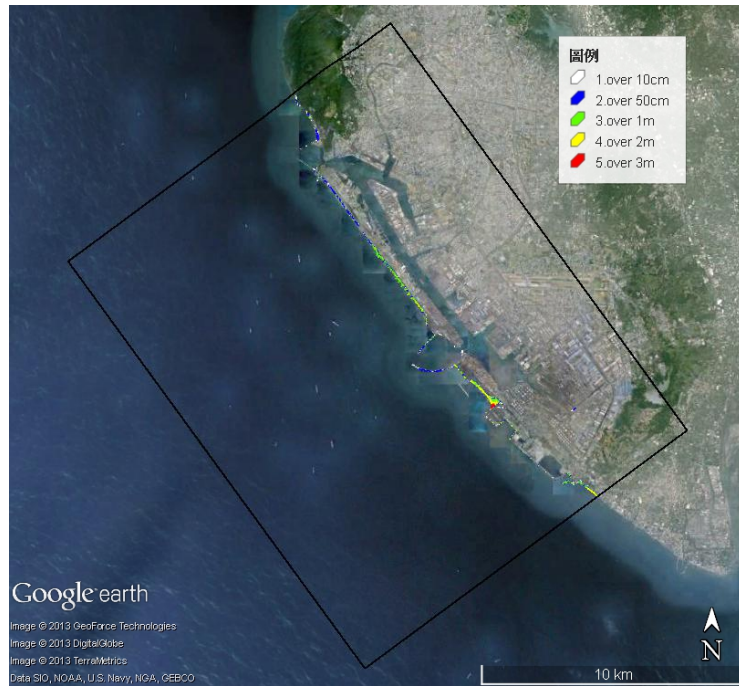


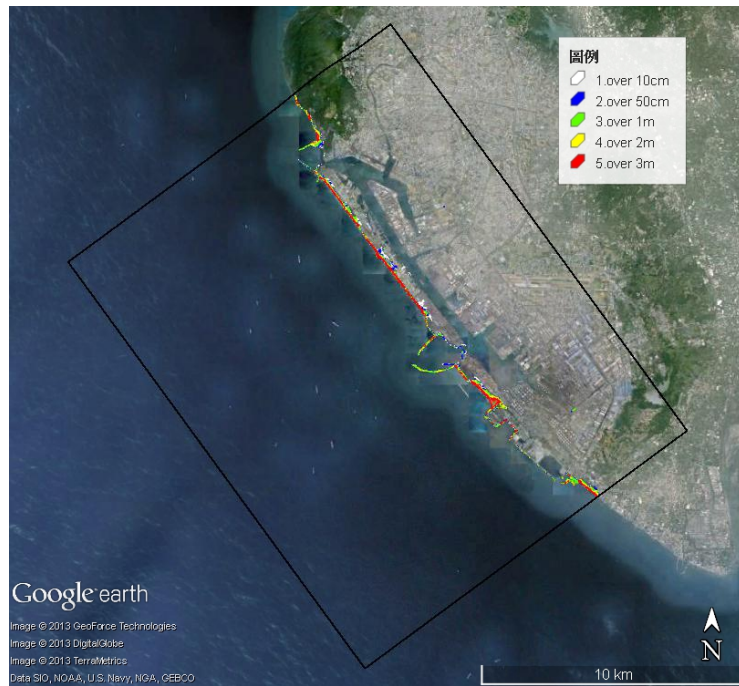
圖 5.34(b2) 高雄港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)



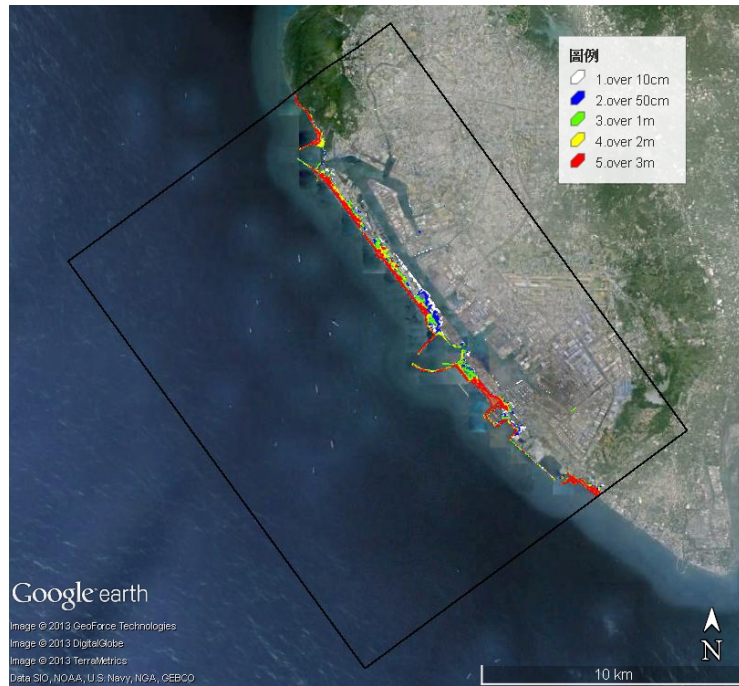
(a) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 0.5 公尺



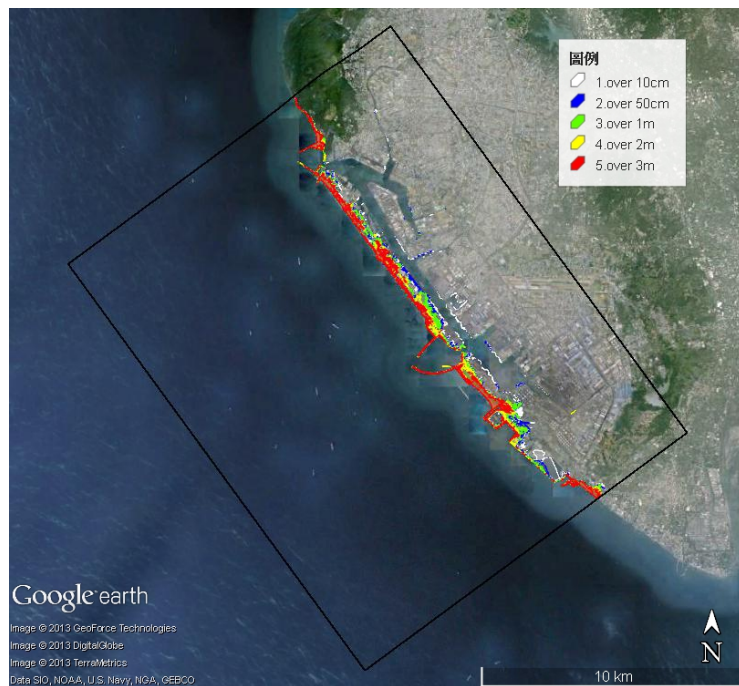
(b) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 1 公尺



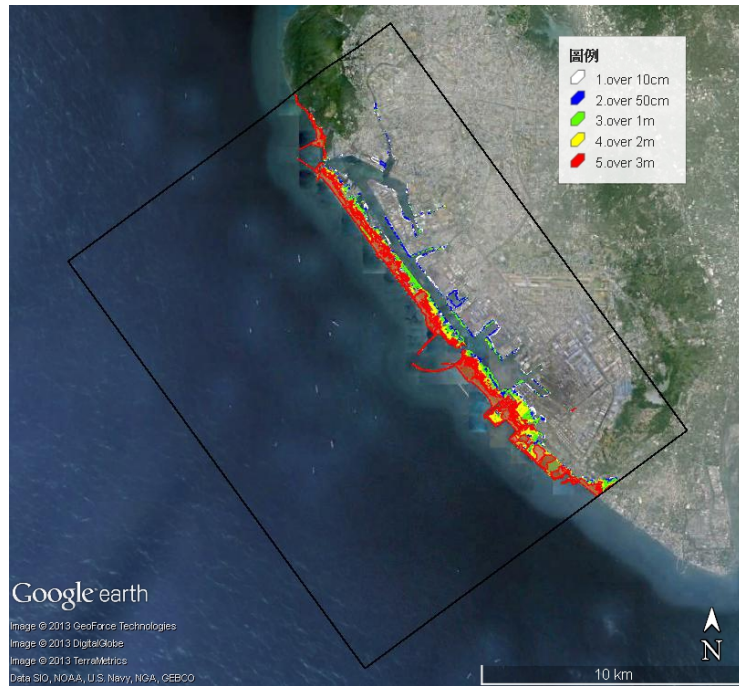
(c) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 2 公尺



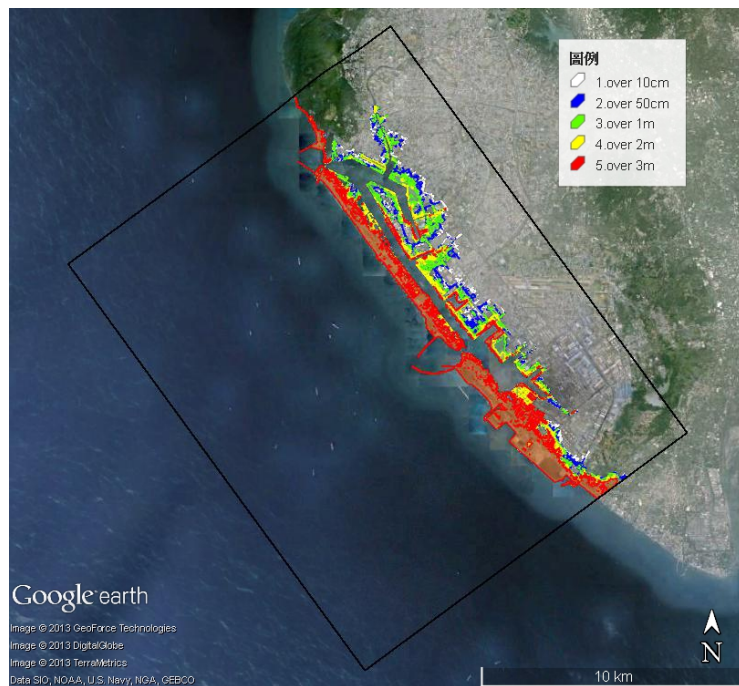
(d) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 3 公尺



(e) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 4 公尺



(f) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 6 公尺



(g) 高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 10 公尺

圖 5.35 高雄港結合 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

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。根據中央氣象局及消防署所顯示的臺灣地區地震的歷史資料，其震央分佈如圖 2.7 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，亦因此本研究將此地區列為主要海嘯產生波源區及主要地震搜尋範圍帶。

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，會對河道產生沖刷與淤積的現象，並對河川中的結構物（如橋梁、攔砂壩或堤防等）之基底造成沖刷，對其橋梁造成安全上之威脅。本研究以模擬之結果探討溢淹範圍及溯上距離，並模擬有無潮汐影響的狀況，探討海嘯對跨河橋梁之影響。

6.2 高屏溪數值地形

當進行大區域模擬時，為了縮減模式運算時間，以減少網格數降低解析度；而若要觀察海嘯波於近岸之細微情形，則勢必增加網格數提高解析度。因此，模擬上採用巢狀網格，於大區域中使用低解析度的資料，部分區域套疊高解析度資料計算，兼顧此兩種需求。計算海嘯波於大洋中之傳播情形，隨著愈接近重點觀察區域，調整第二、三層網格大小增加解析度，計算上考慮了地球曲面效應、頻散效應和科氏力，選用線性淺水方程式及球座標系統；當波傳遞至河口，觀察海嘯波溯上情形，則需考慮近岸的非線性效應及海底底部摩擦之影響，故模式計算上則改使用非線性淺水方程式及卡式座標系統。此網格系統，可依需求調整網格大小、選用不同的淺水方程式（線性或非線性）及座標系統（球座標或卡式座標），增加海嘯模式之效率。本研究使用四層網格來模擬海嘯之傳遞，第一層網格為東經 115° 至 124° 、北緯 12° 至 26° ，ETOPE 解析度 1 分之數值地形(圖 6.1)；第二層網格為東經 118° 至 121° 、北緯 20° 至 23° ，海科中心解析度 0.25 分之數值地形(圖 6.2)；第三層網格為東經 120° 至 121.7° 、北緯 22.1° 至 22.7° ，海科中心解析度 0.03125 分之數值地形(圖 6.3)；第四層網格為東經 120.3844° 至 121.4824° 、北緯 22.4166° 至 22.6637° ，海科中心之海底地形及內政部 5 公尺陸地地形(DSM)之數值地形，解析度為 0.004 分(圖 6.4a、6.4b)。前三層使用線性淺水方程式、而第四層則使用非線性淺水方程式。期中內政部地形為臺灣水準點之高程採用正高系統；同時高程基準係定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，並採用基隆驗潮站 1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得，並命名為 2001 臺灣高程基準 (TaiWan Vertical Datum 2001, 簡稱 TWVD 2001)。而海科中心深度資料為利用儀器的聲波回波測定海面到海底所得到的距離。之後的潮位校正為使用最接近當航次之中央氣象局潮位站潮位資料，代表量測時之水位高程，以修正水深測值之水深面至基隆港平均潮位。而目前中央氣象局各潮位觀測站尚未統一修正為同一基準。所以兩者的高程系統和基準不一致。

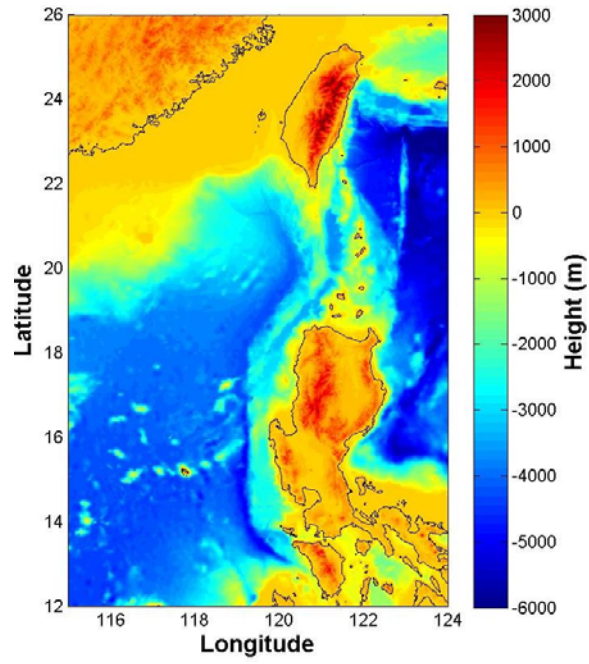


圖 6.1 海科中心解析度 1 分之數值地形

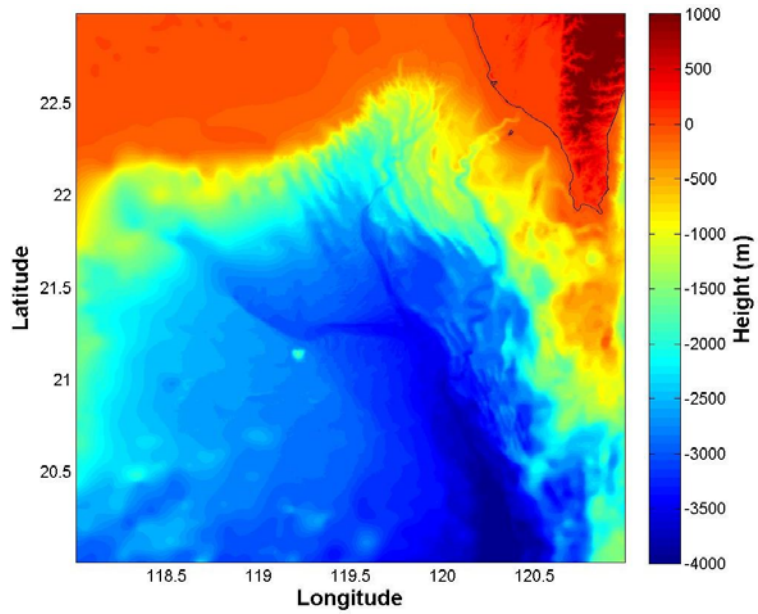


圖 6.2 海科中心解析度 0.25 分之數值地形

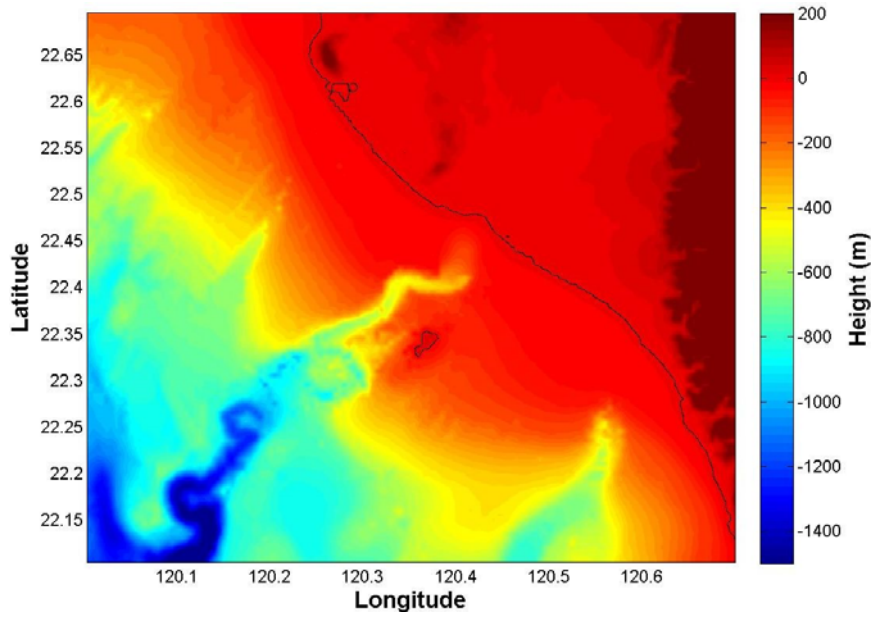


圖 6.3 海科中心解析度 0.03125 分之數值地形

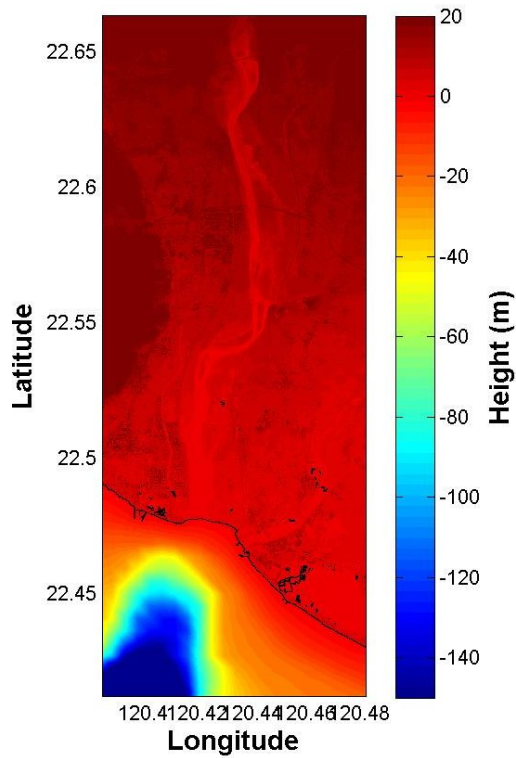


圖 6.4a 海科中心解析度 0.004 分之數值地形

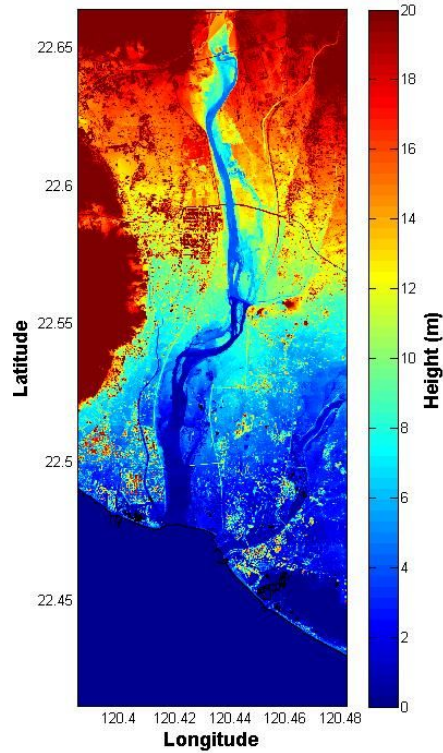


圖 6.4b 內政部 5 公尺陸地地形(DSM)

6.3 馬尼拉溝地震參數

臺灣附近雖然有很多海嘯及地震的波源區，例如日本及南太平洋海域，但皆距離臺灣甚遠，均屬遠域海嘯；且臺灣地理位置特殊，而不在海嘯傳遞的主要方向上；因此，對臺灣本島尤其是西南海域而言，波源區之遠近是一個影響的主要因子；離臺灣最近之波源區自是馬尼拉海溝。圖 6.5 為臺灣本島海域附近之斷層系統圖(Liu 等.1997)，圖 6.6 為臺灣西南海域附近之斷層分佈。臺灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海洋板塊之交接地帶上，是經由造山運動擠壓而成。地質上，臺灣南部至菲律賓呂宋島西方為呂宋島弧，馬尼拉海溝即在呂宋島之西方，為一隱沒帶系統，也是臺灣南端主要隱沒帶系統；它除南北兩段外，大抵為南北分佈；其最南端位於北緯 13 度的民多羅海峽(Mindoro Strait)，而沿著呂宋島的西側一路向北延伸，至臺灣南部海域到大約北緯 21.5 度附近。

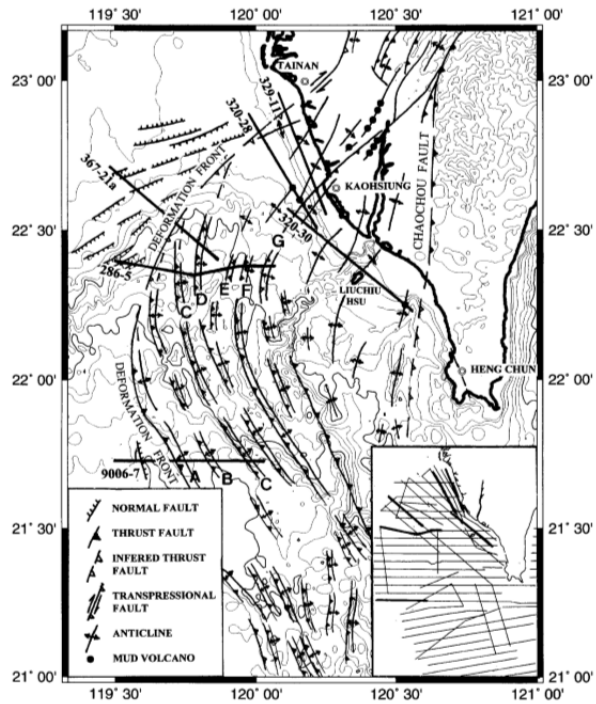


圖 6.6 臺灣西南海域附近之斷層分佈圖(取自 Liu 等.1997)

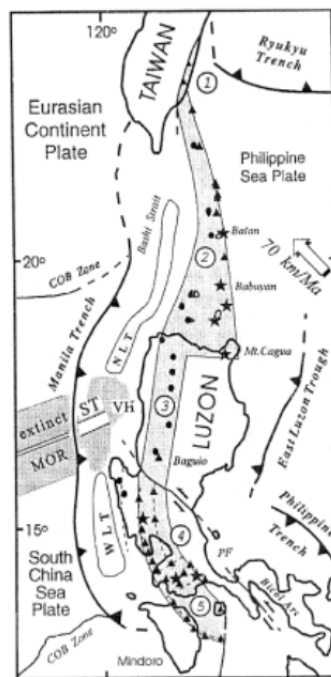


圖 6.7 呂宋島之地理位置圖(取自 Bautista et al. (2001))

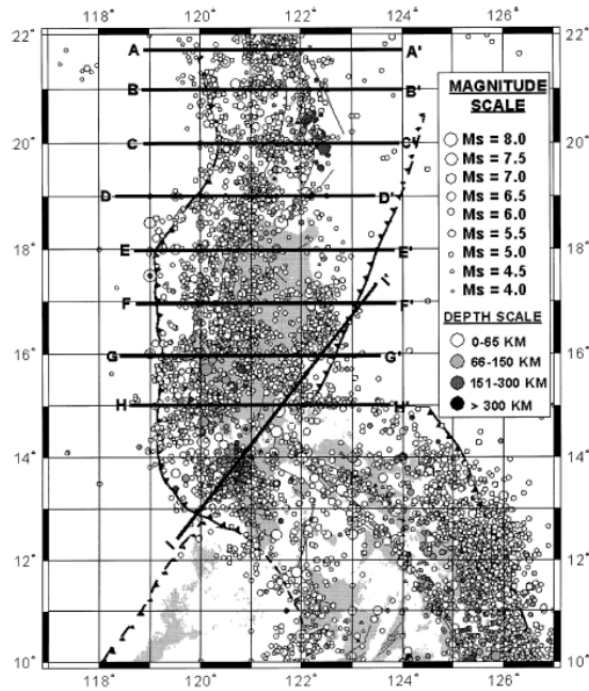


圖 6.8 呂宋島地區 1619 年-1997 年之地震紀錄

(取自 Bautista et al. (2001))

由圖 6.8 觀察可知，地震發生區域主要分佈於呂宋島東南端的東呂宋海槽與菲律賓海溝，以及西北端之馬尼拉海溝北端部分；如有海嘯產生，則由於呂宋島西南端面向太平洋，長軸方向有較大的出口可供給能量傳遞及消散；但是馬尼拉海溝面向南中國海，能量消散範圍小，且與臺灣南端之斷層帶有連帶關係，又加以此區海嘯與地震紀錄頗多，故此一區域發生海嘯之潛勢不容忽視。

Megawati et al. (2009)將馬尼拉海溝分為 33 段子區塊，如圖 6.9 所示。其中編號 15~18 之子斷層較為靠近臺灣。依該圖可將馬尼拉海溝分成 33 個子斷層帶，各子區塊之斷層參數表如表 6.1 所示。

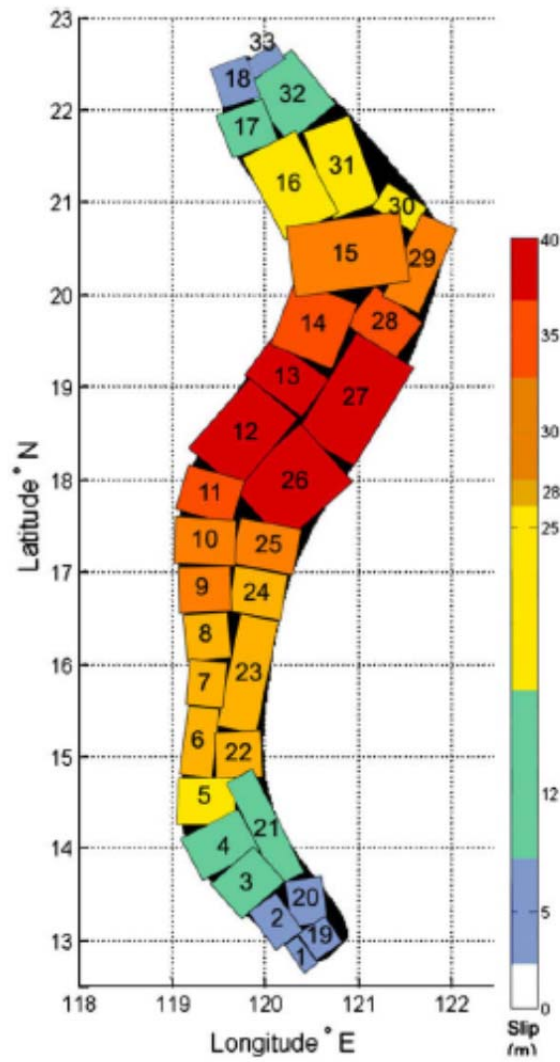


Fig. 5. The discretized model for computation of seafloor displacement.

圖 6.9 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

6.4 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 6.9、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 6.10)。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 6.11(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 6.12(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 6.13(a)、(b))。但模擬結果內政部的河道地形與 Google Earth 2013 版本不太相符。其整合及結合 Google Earth 地圖之溢淹潛勢圖，並利用 Google Earth 圖資系統顯示出學校及醫療等救災所需資源(圖 6.14)，有助於研判海嘯發生時之安全地點及避難路徑。(陳和陳，2012)

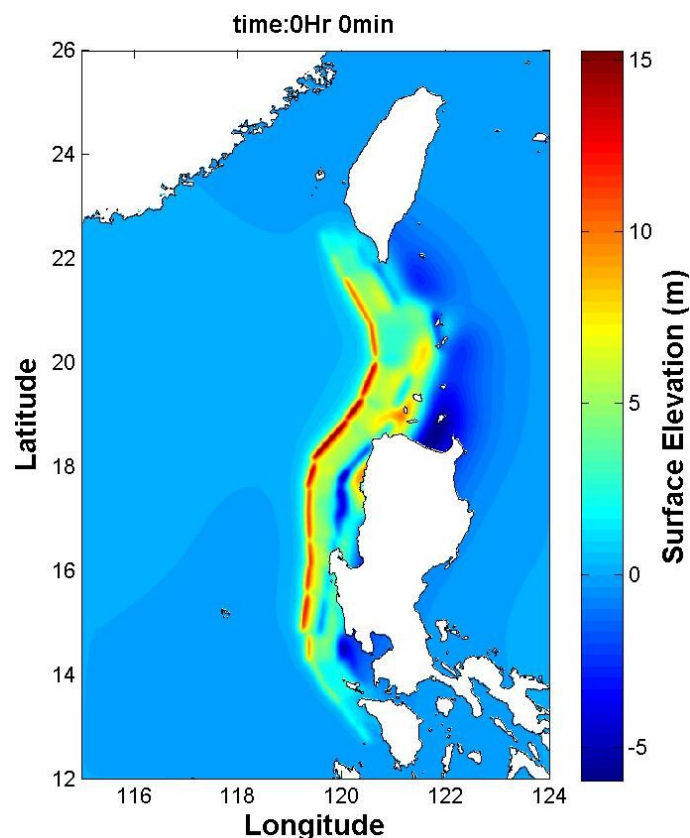


圖 6.10 參考 Megawati et al. (2009) 之地震參數建立初始水位

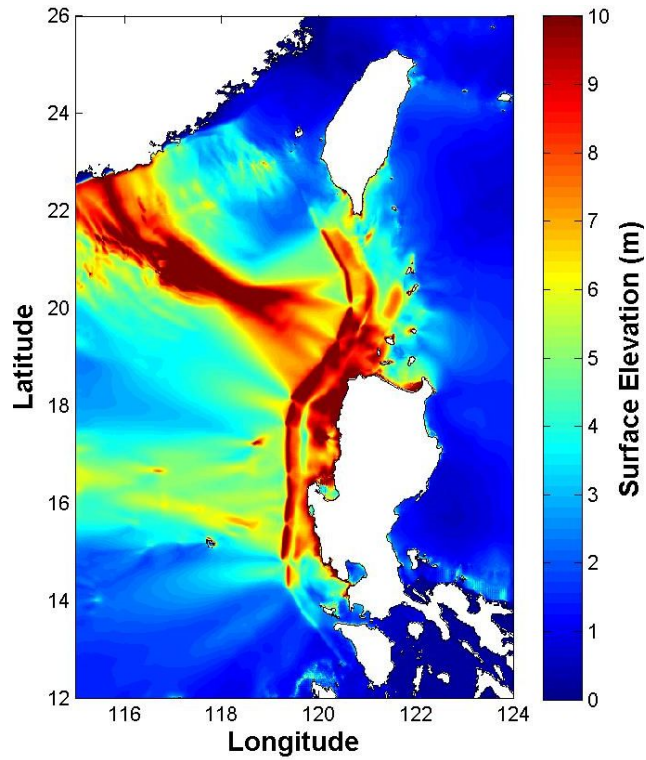


圖 6.11(a) 模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第一層網格)

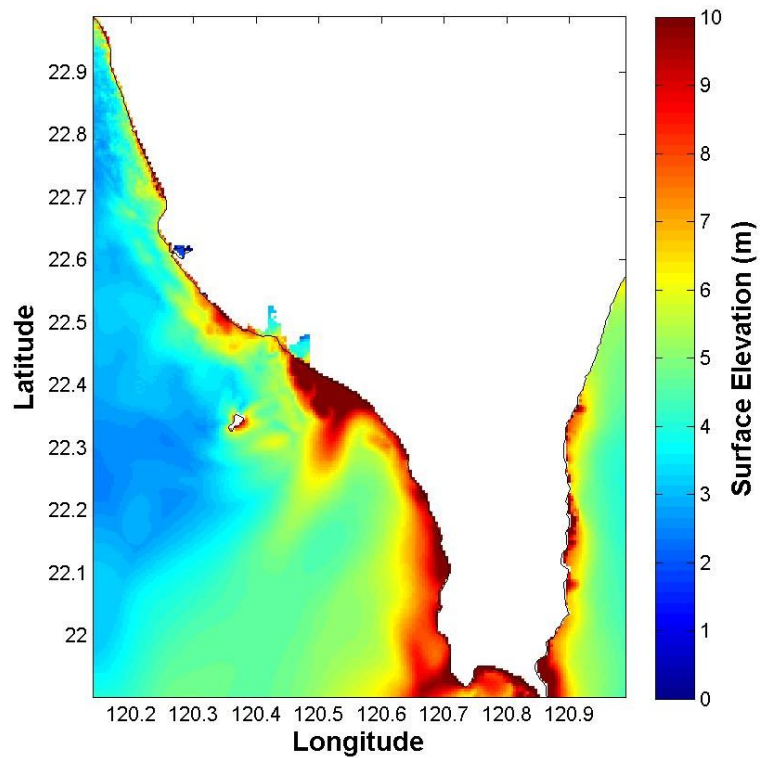


圖 6.11(b) 模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第二層網格)

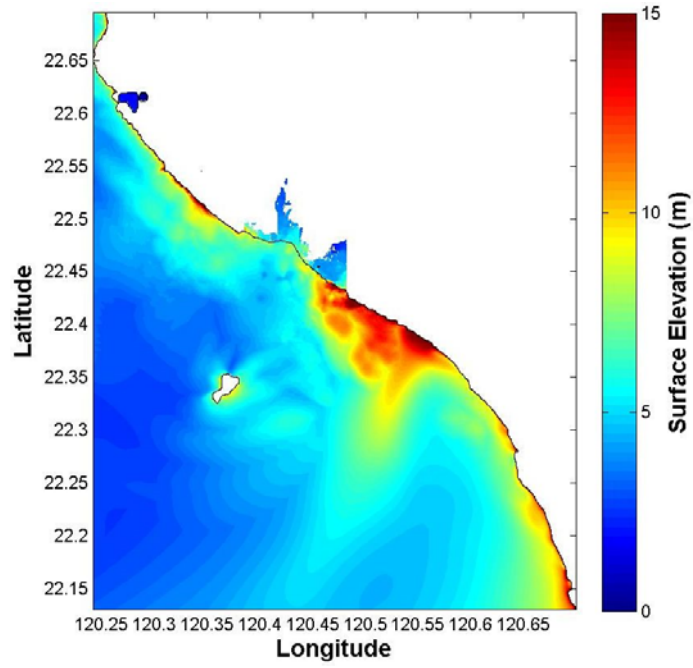


圖 6.11(c) 模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第三層網格)

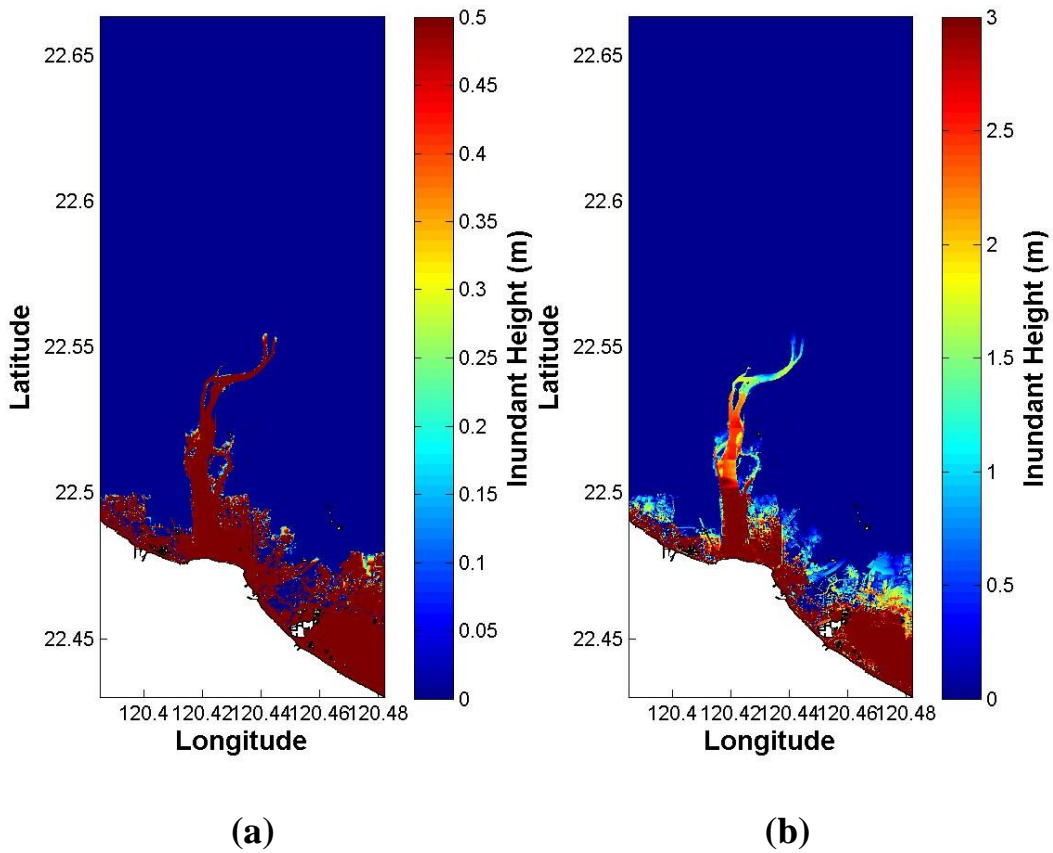


圖 6.12 模擬三個小時期間河道水位高度分佈(a)50cm(b)3m

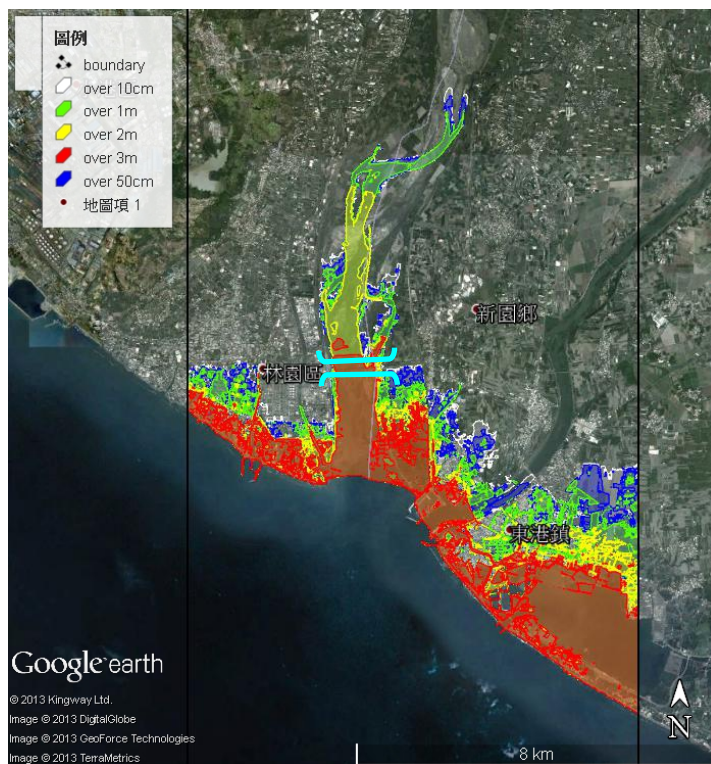


圖 6.13(a) 結合 Google Earth 之溢淹圖

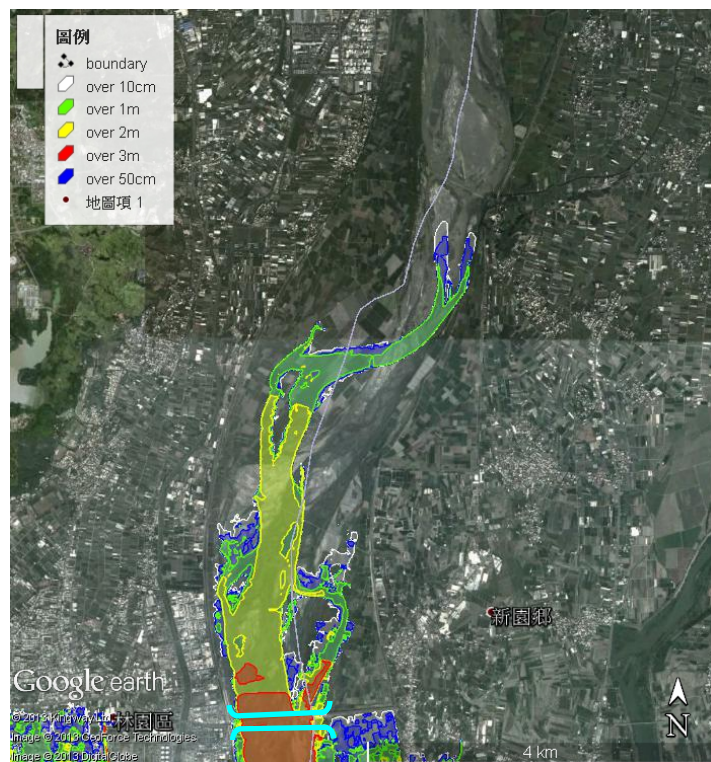


圖 6.13(b) 結合 Google Earth 之河道溢淹圖

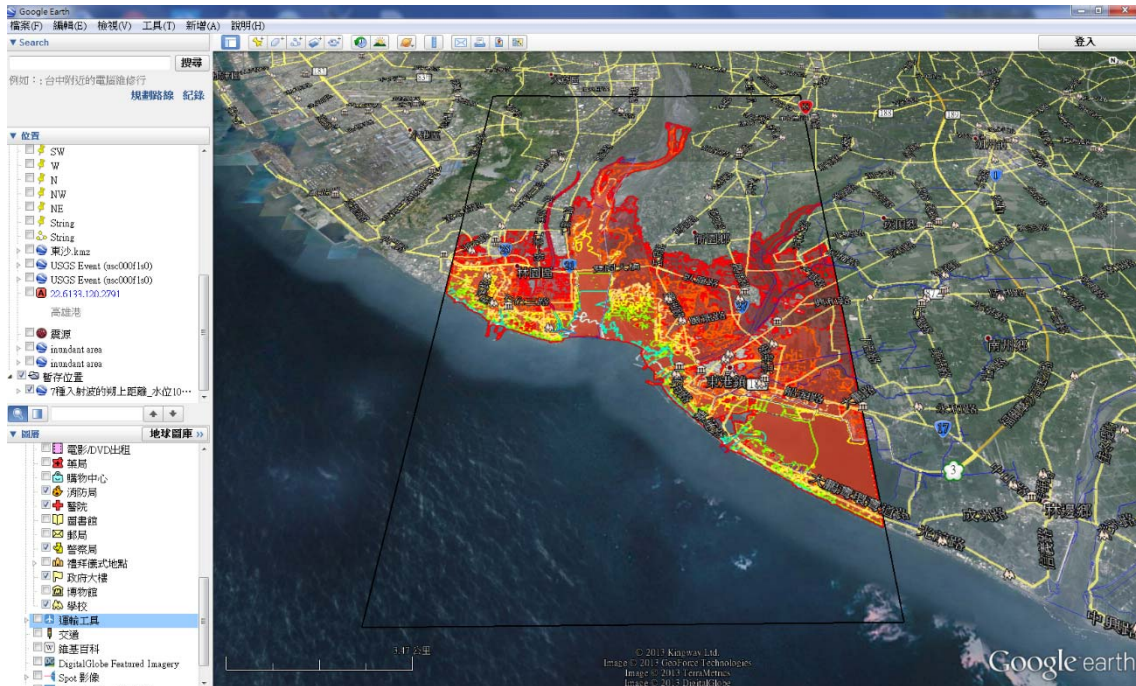


圖 6.14 利用 Google Earth 之疊加圖層選擇圖資

6.5 潮汐模擬分析

考慮潮汐水位是否影響海嘯沿高屏溪向上游傳遞，本研究利用交通部氣象局之潮位統計資料(圖 6.15)，取東港 2003 年至 2012 年潮位統計之年平均潮位水位，大潮平均高潮位為 0.843 公尺，大潮平均低潮位為 -0.138 公尺，並以 COMCOT 模式模擬全日週期及半日週期的潮汐五天(圖 6.16(a)、(b))，其模擬邊界條件為南方邊界入射。將高屏溪設立 P1 至 P9 九個點位以紀錄潮汐影響的河川水位，其中 P1 為東港潮位站位置，P8 為雙園大橋附近(圖 6.17)，圖 6.18 為模擬全日潮其九個點位之水位紀錄，圖 6.19 為模擬半日潮其九個點位之水位紀錄，而雙園大橋(P8 點位)並無受到潮汐之影響。

- 氣候
- 氣候統計
 - 每日雨量
 - 每月氣象
 - 月平均
 - 30天觀測
 - 潮位統計
 - 波浪統計
 - 海溫統計
 - 氣候監測
 - 農業氣象
 - 氣候話題
 - 臺灣氣候
 - 監測紀要
 - 短期氣候預測
 - 研習與推廣
 - 主題報導

首頁 > 氣候 > 氣候統計 > 潮位統計

請選擇測站: 東港

海水位資料國際交流

東港每月潮位統計表 (2003-2012)

月份	最高高潮位 暴潮位(m)	最高天文潮 (m)	大潮平均 高潮位(m)	平均高潮位 (m)	平均潮位 (m)	平均低潮位 (m)	大潮平均 低潮位(m)	最低天文潮 (m)	最低低潮位 (m)
1	1.202	1.06	0.759	0.471	0.193	-0.09	-0.239	-0.4	-0.486
2	1.091	0.96	0.697	0.497	0.219	-0.069	-0.168	-0.34	-0.469
3	0.989	0.87	0.661	0.565	0.256	-0.045	-0.099	-0.25	-0.573
4	1.021	0.96	0.706	0.59	0.273	-0.027	-0.102	-0.24	-0.358
5	1.204	1.09	0.841	0.635	0.326	0.02	-0.127	-0.27	-0.362
6	1.288	1.18	0.958	0.666	0.362	0.043	-0.151	-0.31	-0.306
7	1.383	1.21	0.982	0.66	0.39	0.088	-0.1	-0.29	-0.334
8	1.565	1.21	1.019	0.738	0.433	0.105	0.003	-0.22	-0.391
9	1.16	1.11	0.895	0.75	0.422	0.081	0.022	-0.13	-0.311
10	1.172	1.07	0.865	0.719	0.389	0.05	-0.031	-0.23	-0.272
11	1.234	1.09	0.869	0.631	0.306	-0.021	-0.149	-0.32	-0.347
12	1.198	1.1	0.853	0.531	0.238	-0.058	-0.248	-0.39	-0.494
全年	1.565	1.21	0.843	0.613	0.288	-0.005	-0.138	-0.4	-0.573

圖 6.15 交通部氣象局東港潮位統計資料

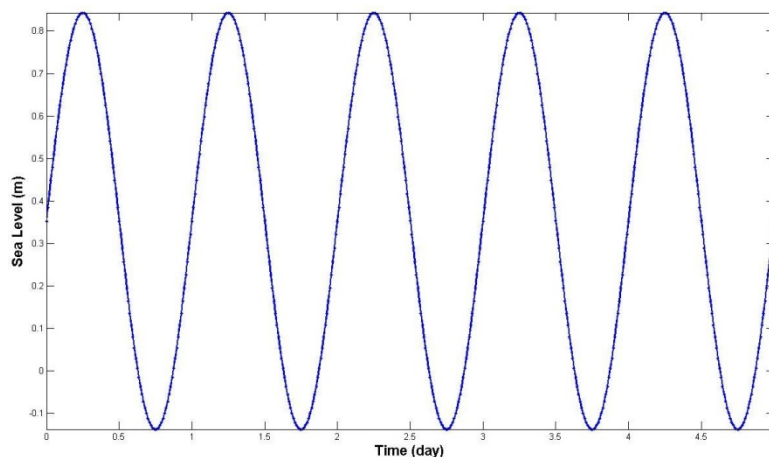


圖 6.16(a) COMCOT 模擬全日週期潮汐之入射水位

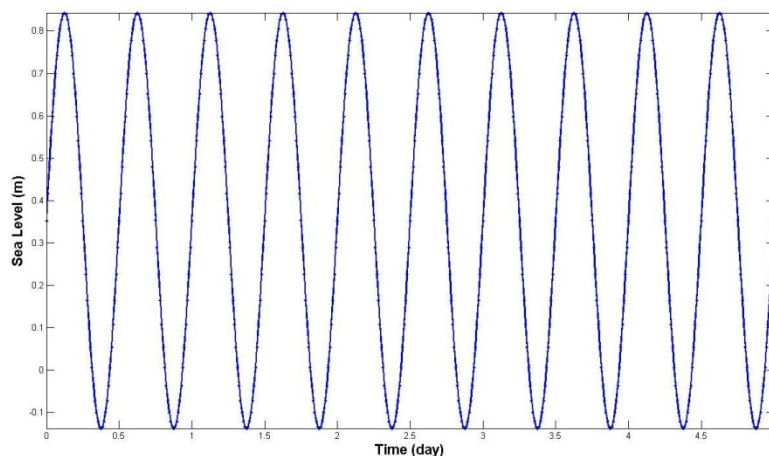


圖 6.16(b) COMCOT 模擬半日週期潮汐之入射水位

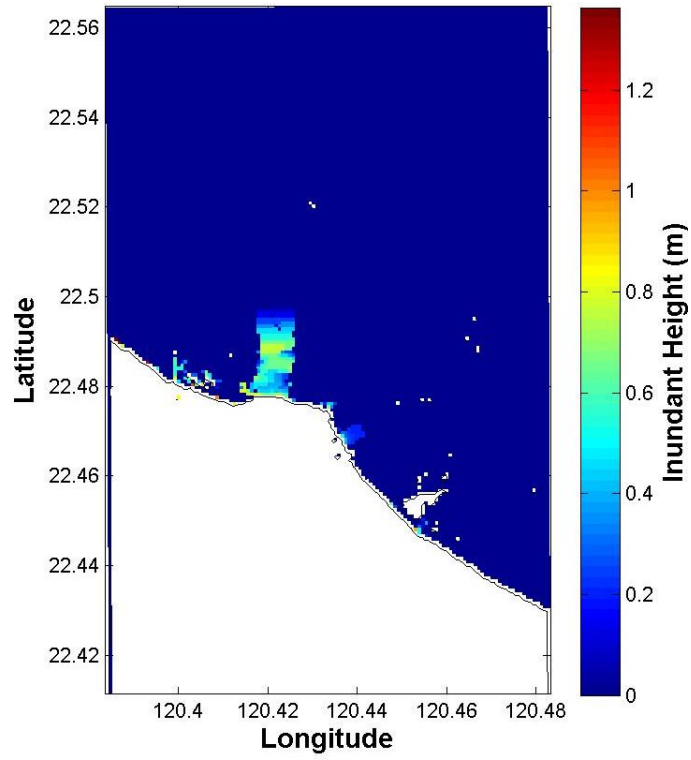


圖 6.16(c) 高屏溪全日週期潮汐最大溢淹水位

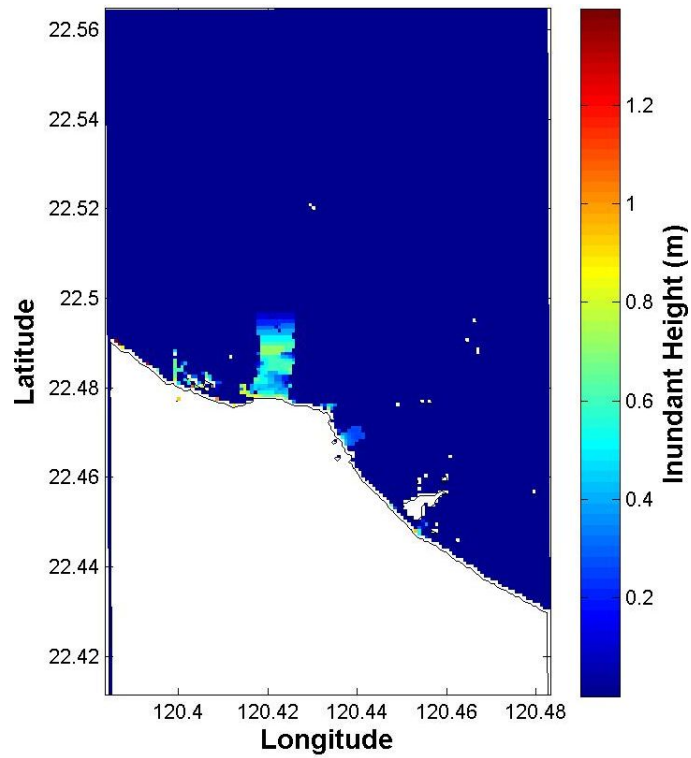


圖 6.16(d) 高屏溪半日週期潮汐最大溢淹水位

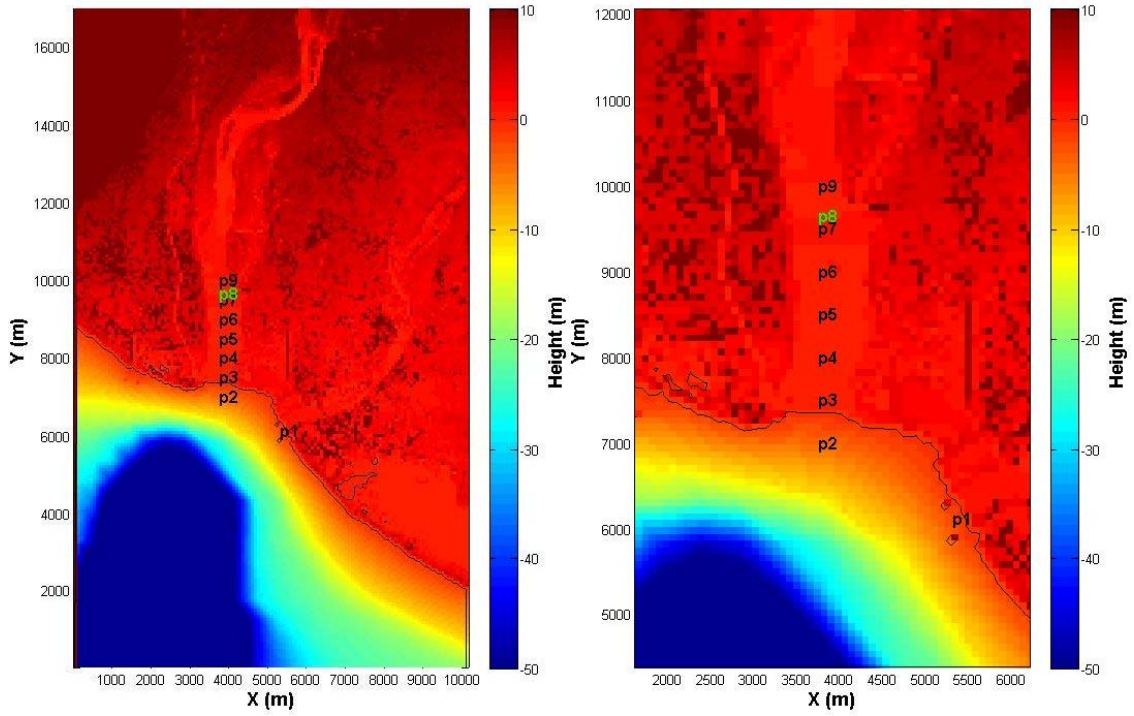


圖 6.17 高屏溪之地形及紀錄點位

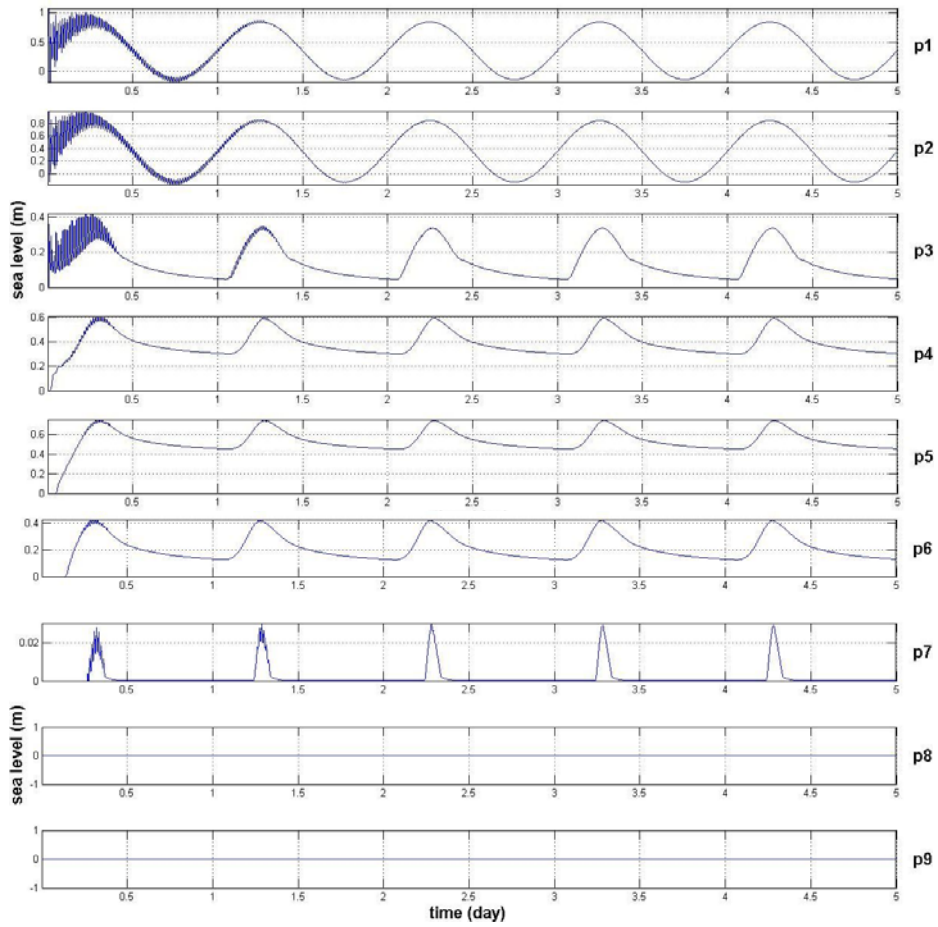


圖 6.18 模擬高屏溪全日潮之水位紀錄

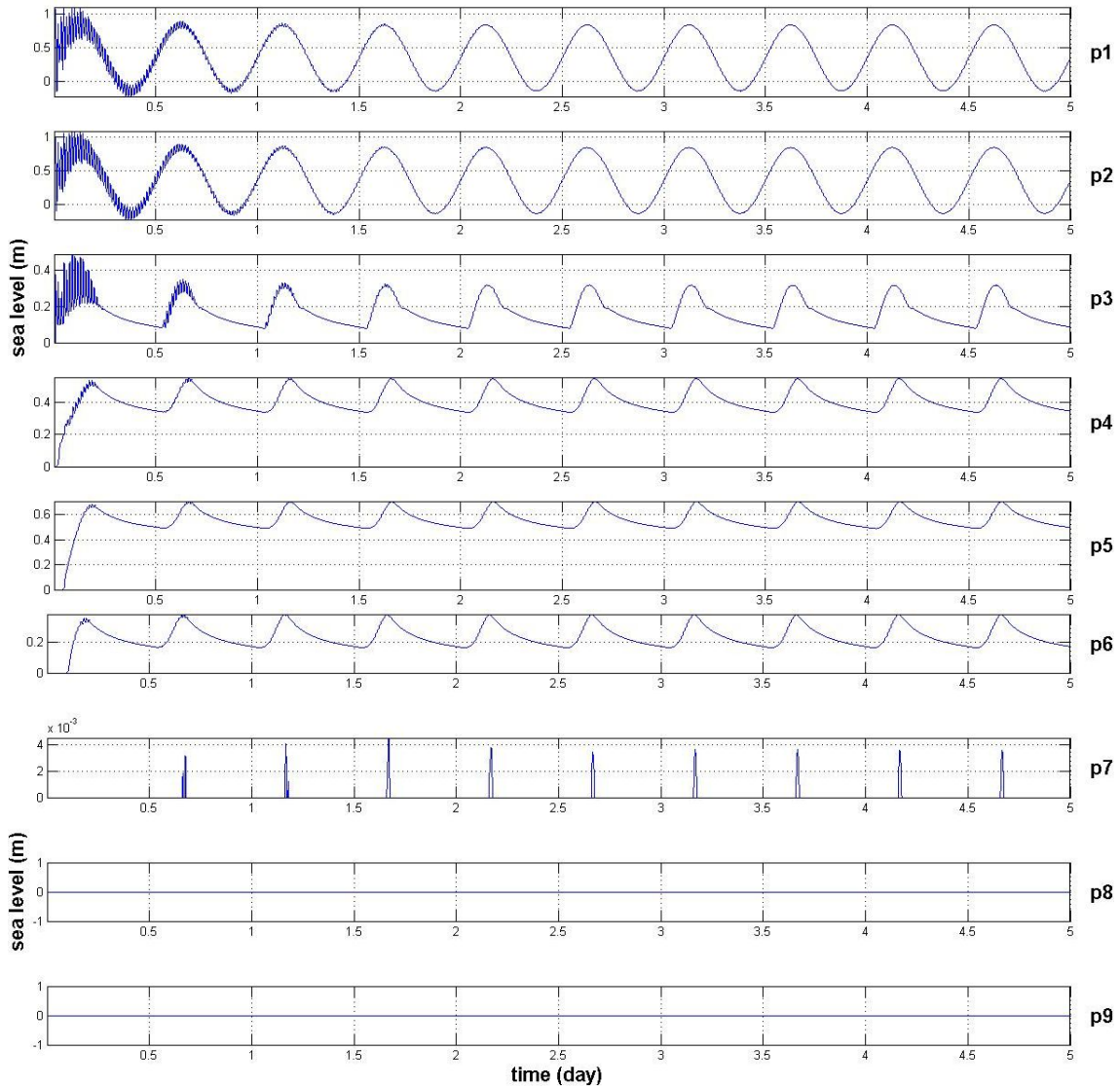


圖 6.19 模擬高屏溪半日潮之水位紀錄

6.6 跨河橋梁受海嘯波之衝擊力分析

6.6.1 雙園大橋及數值地形

雙園大橋，位於台 17 線道上，橫跨高屏溪之橋樑，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 6.20 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 6.21 為工程位置圖，做為模式模擬設定之參考依據。

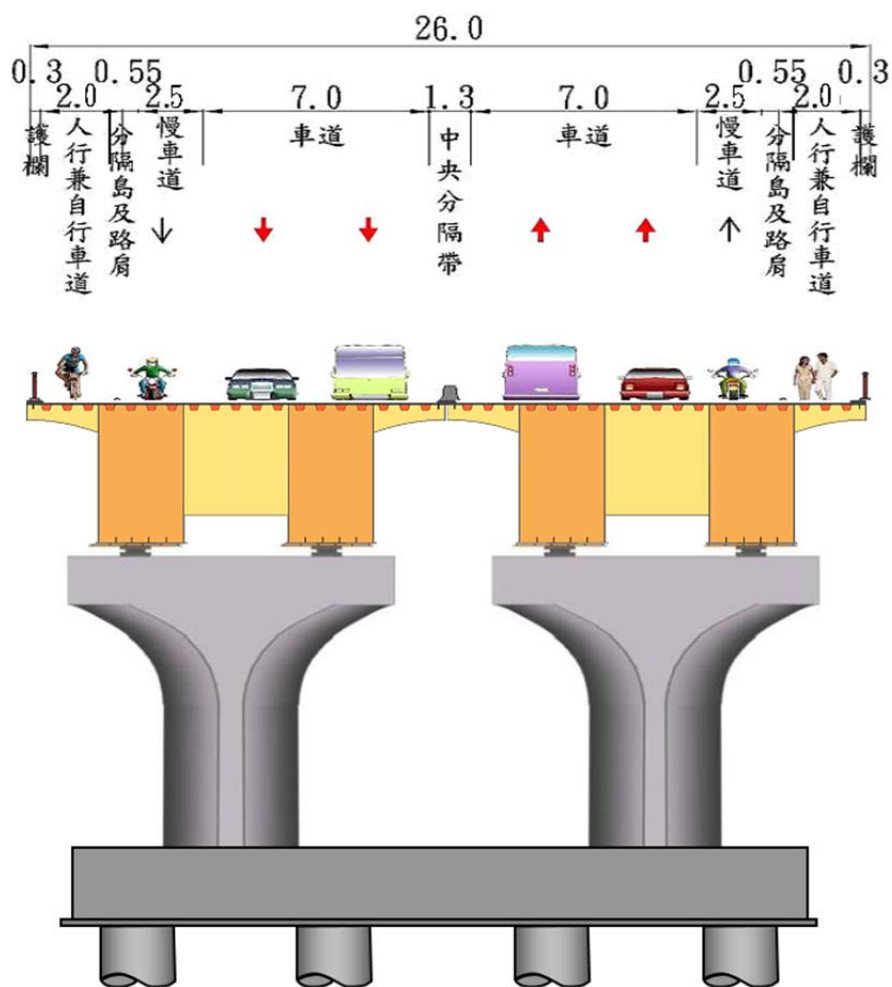


圖 6.20 雙園大橋橋梁斷面圖

資料來源：交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處

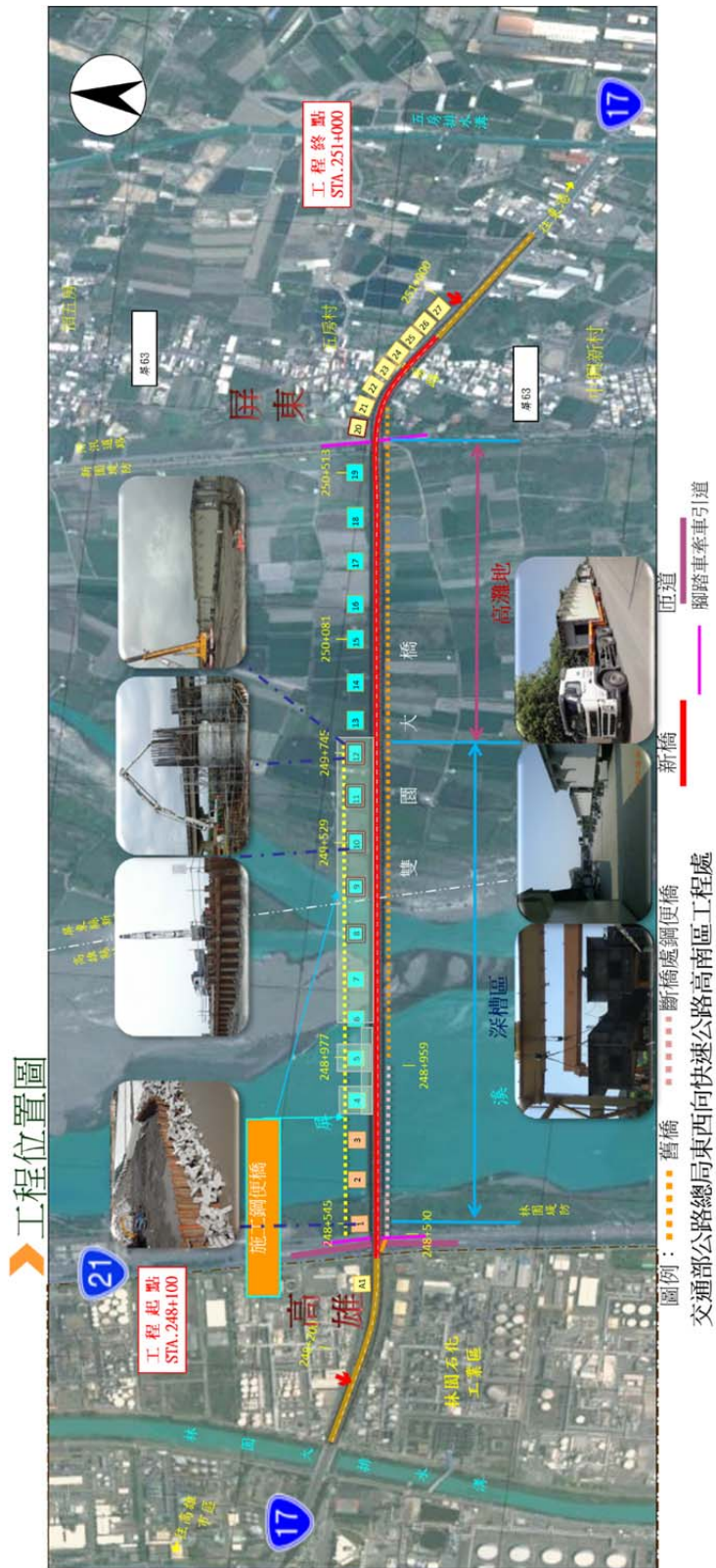


圖 6.21 雙園大橋工程位置圖

資料來源：交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處

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 座橋墩，每座橋墩由兩支墩柱組成(圖 6.22(a)、(b))，其地形解析度為 5 公尺，並設定橋墩高度為 9 公尺(圖 6.23)，紅色區域為橋墩位置。

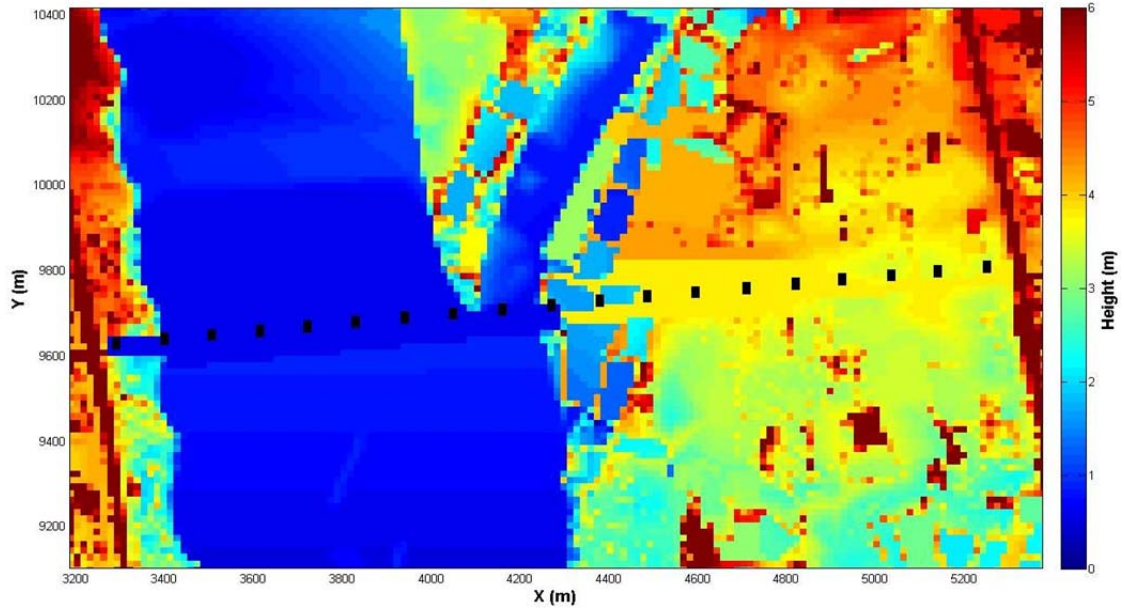


圖 6.22(a) 高屏溪數值地形及橋墩配置

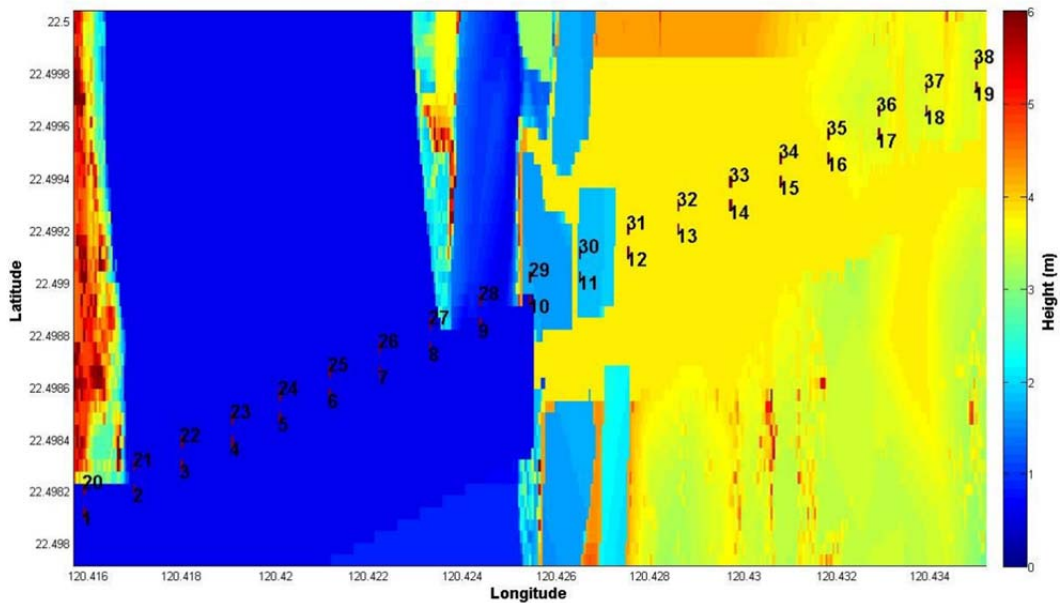


圖 6.22(b) 高屏溪數值地形及橋墩配置

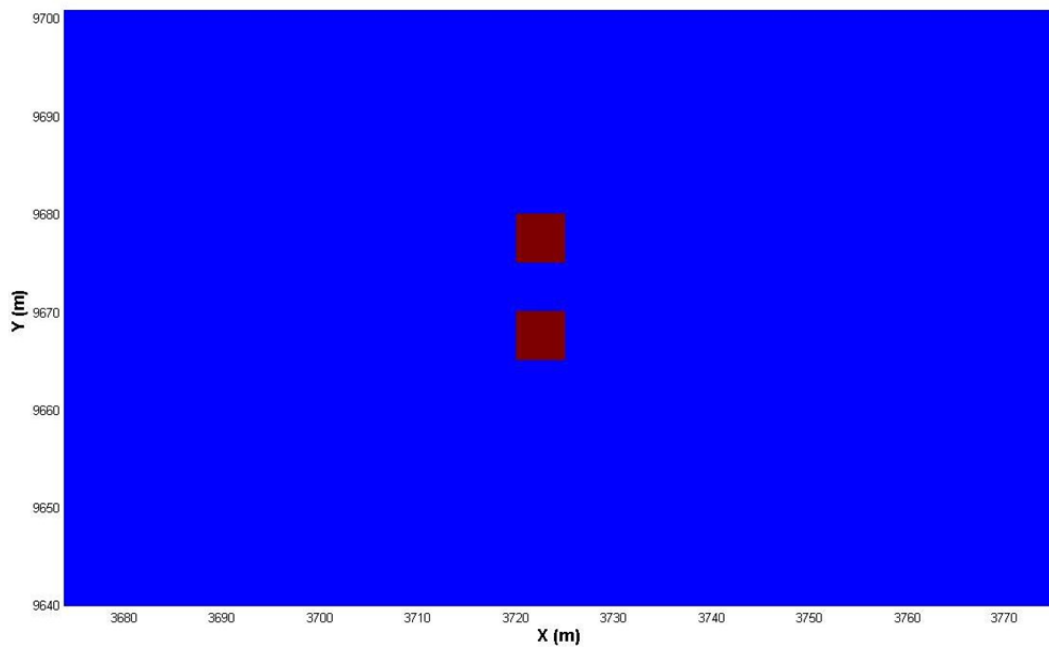


圖 6.23 雙園大橋橋墩墩柱配置

6.6.2 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：

$$P_{avg} = 515K(V_{avg})^2 \quad (6.1)$$

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 6.24。

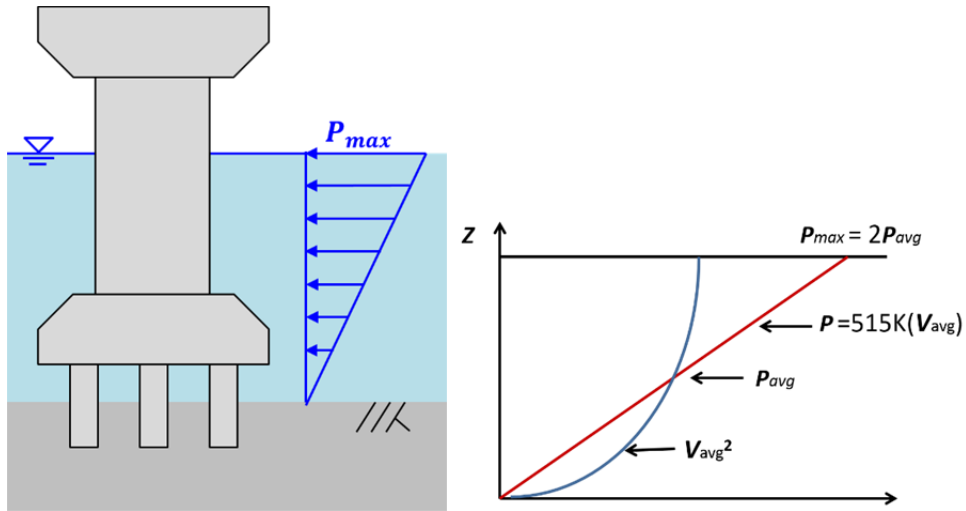


圖 6.24 墩柱受水流作用力之示意與流速與動壓力之關係

而靜壓力 $P_s = \rho gh$ 式中 ρ 為水密度 1000 kg/m^3 ， g 為重力加速度 9.8 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 6.25 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。

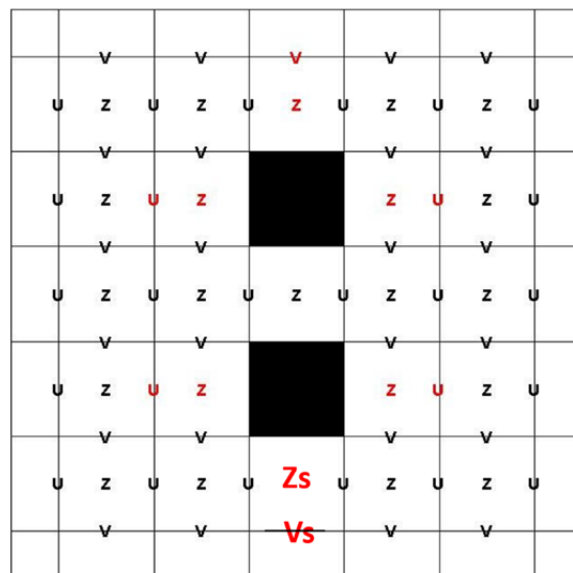


圖 6.25 計算壓力分佈之參數點位

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 6.26(a)、(b)、(c)、(d)為最大總壓力紀錄，將最大靜壓力、最大平均動壓力及最大總壓力列表於附錄五，供相關單位參考。

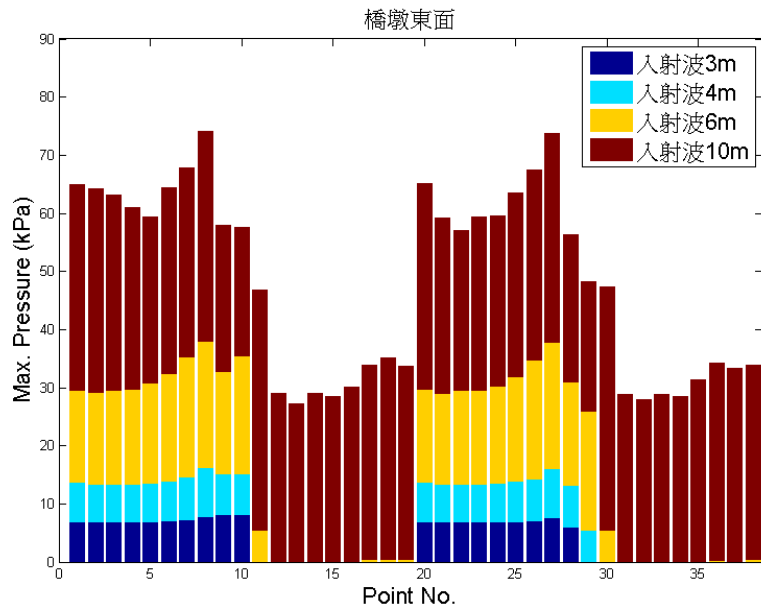


圖 6.26(a)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱東面之最大總壓力紀錄

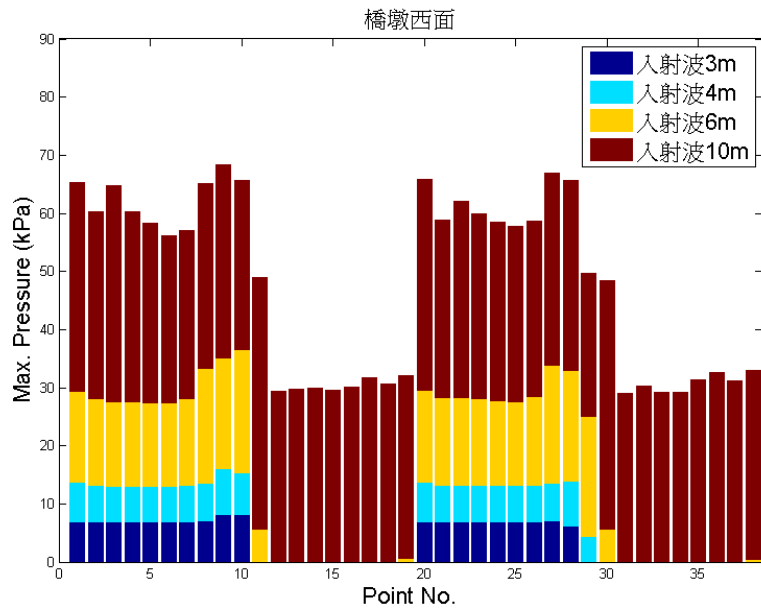


圖 6.26(b)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱西面之最大總壓力紀錄

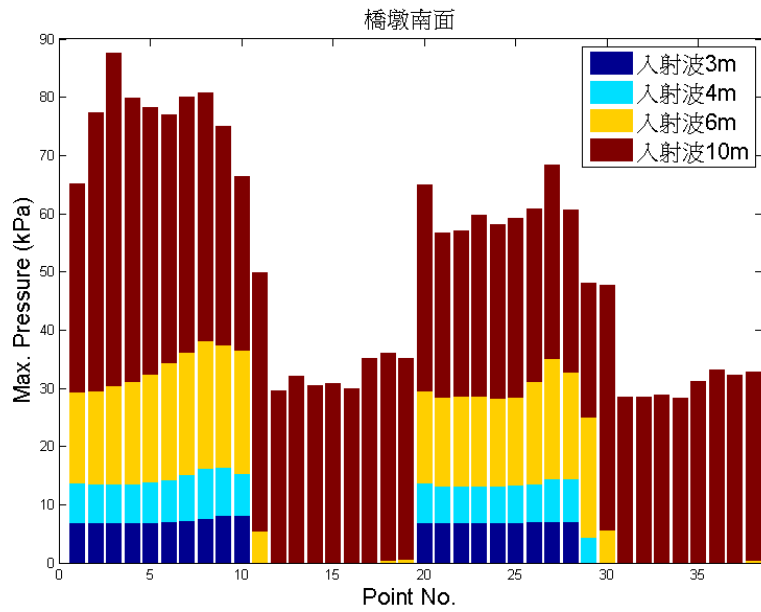


圖 6.26(c)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱南面之最大總壓力紀錄

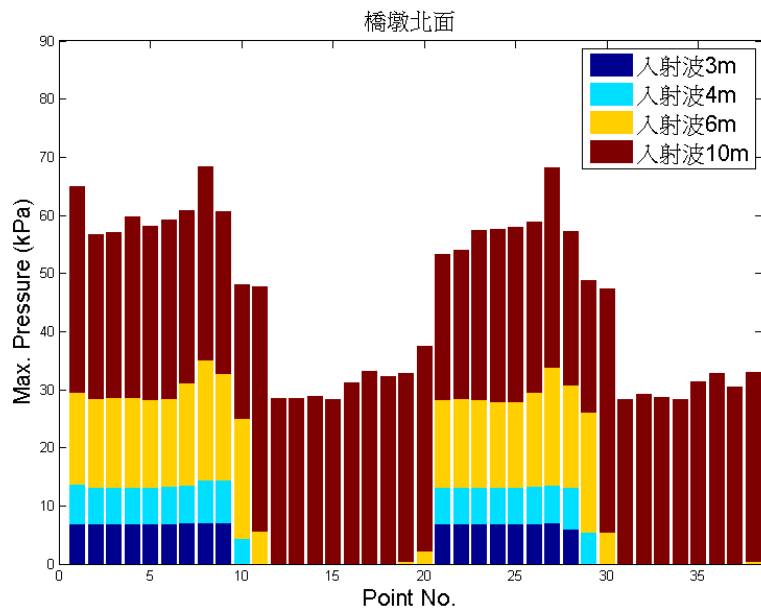


圖 6.26(d)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱北面之最大總壓力紀錄

6.6.3 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樑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 6.27)。

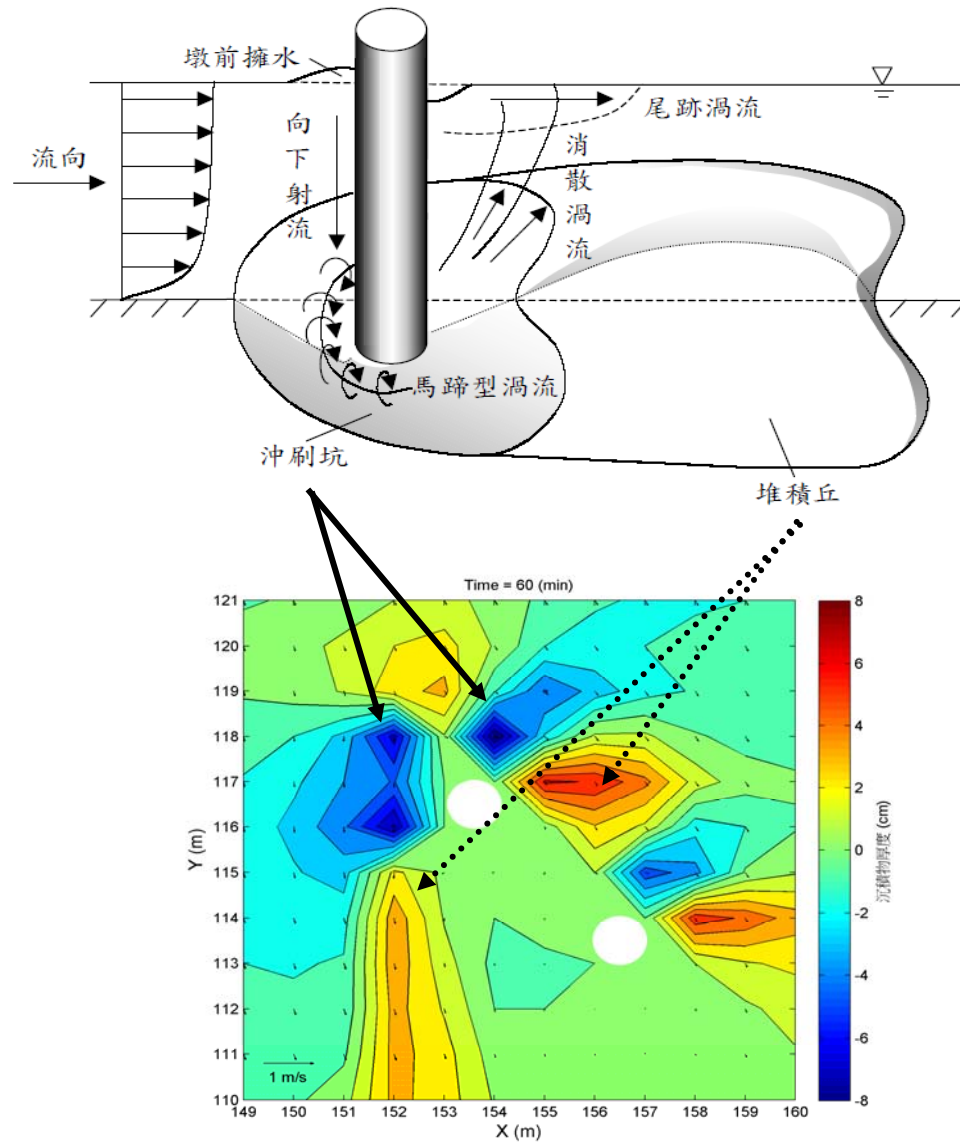


圖 6.27 馬蹄形渦流沖刷情形

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 6.2 :

$$\begin{aligned}
 q_s &= \Phi_b \sqrt{\Delta g D_{50}^3} \\
 \Delta &= \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \\
 \Phi_b &= m(\theta - \theta_c)^n \\
 \theta &= \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD_{50}}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

其中 q_s : 傳輸速率、 Δ : 相對密度、 g : 重力加速度、 D_{50} : 粒徑中值(median grain diameter)、 ρ_s : 沙的密度、 ρ : 水的密度、 θ : Shields 參數、 θ_c : Shields 參數臨界值、 τ_b : 底床剪應力；而(19)式中的 τ_b 值以模式計算所計算的摩擦力項 τ_x 、 τ_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 6.28)，沉積物模組採用的回歸值為 $m=11$ 和 $n=1.65$ 。

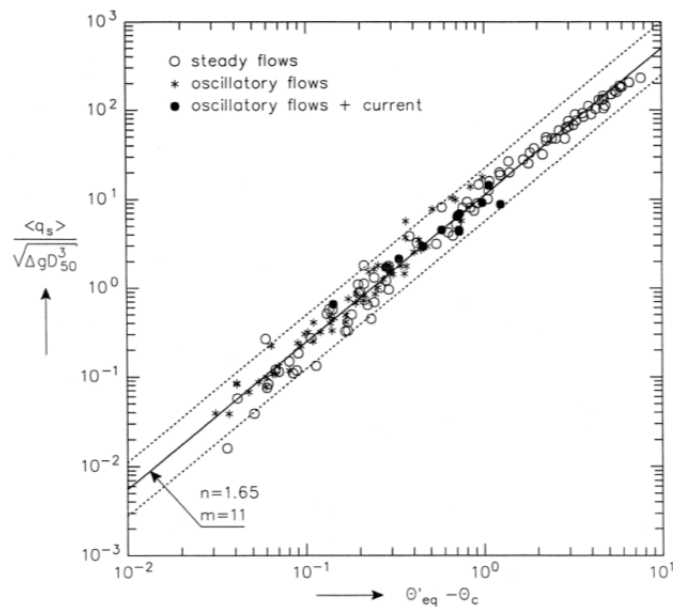


圖 6.28 穩流、震盪流以及震盪流結合淨流之回歸數據值

(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(6.3)進行計算：

$$\frac{Y_{se}}{a} = 2K_1K_2K_3\left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.65}F_r^{0.43} \quad (6.3)$$

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， K_2 為橋墩與流向偏角修正係數， 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：

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY_1}} \quad (6.4)$$

將各項參數值代入方程式(6.3)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 6.29

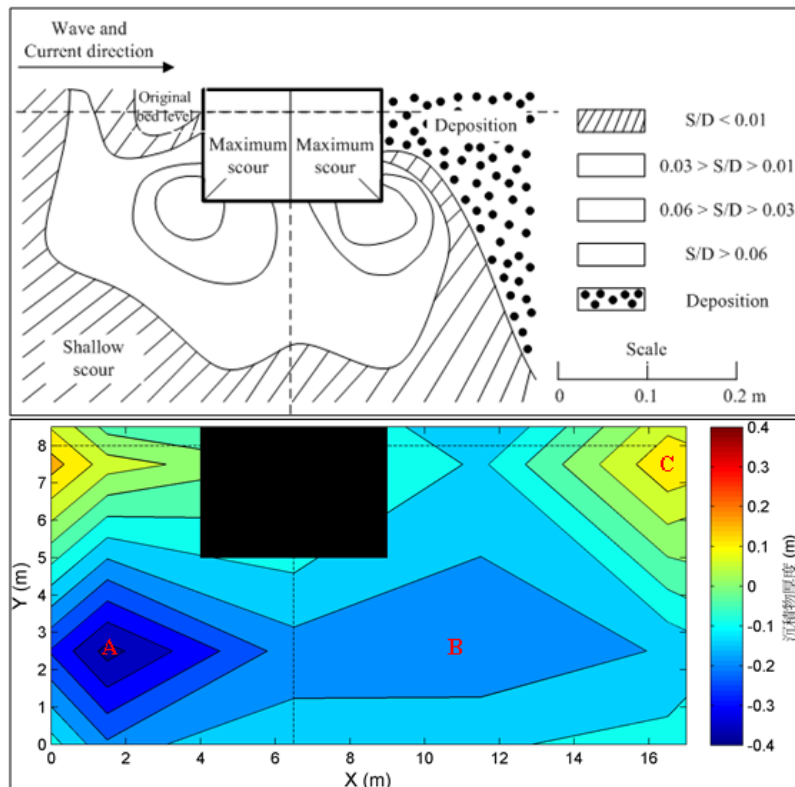


圖 6.29 模式結果比較圖。(上圖)Rance (1980)、(下圖)模式結果

將兩並聯之橋墩墩柱為一組如圖 6.22，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，取橋墩鄰近一格之格點其最大值(最大堆積)及最小值(最大侵蝕)如圖 6.30，圖中白色區域為橋墩，色階分別代表地形上升及地形下降，計算結果分析整段橋梁之最大堆積及最大侵蝕如表 6.2，其不同入射波高度(3、4、6、10 公尺)之各橋墩組最大堆積及侵蝕如圖 6.31(a)、(b)、(c)、(d)。入射波高 6 米的情況，水位主要由橋墩的西側傳入，而西側有較高的地形，在水體傳入的短時間，容易形成較大的水位差，進而出現較強的流量進行侵蝕作用。而入射波高 10 米的情況則主要由橋墩的南側傳入，南側的地形相對東側較為平坦。不易因地形的因素形成較大的水位高低差。亦即當橋墩附近為平坦地形的時候(第 2 到 7 組)，10 米產生的堆積量會大於 6 米。如果附近地形變化較大的情況下，可能產生如此例相反的結果。

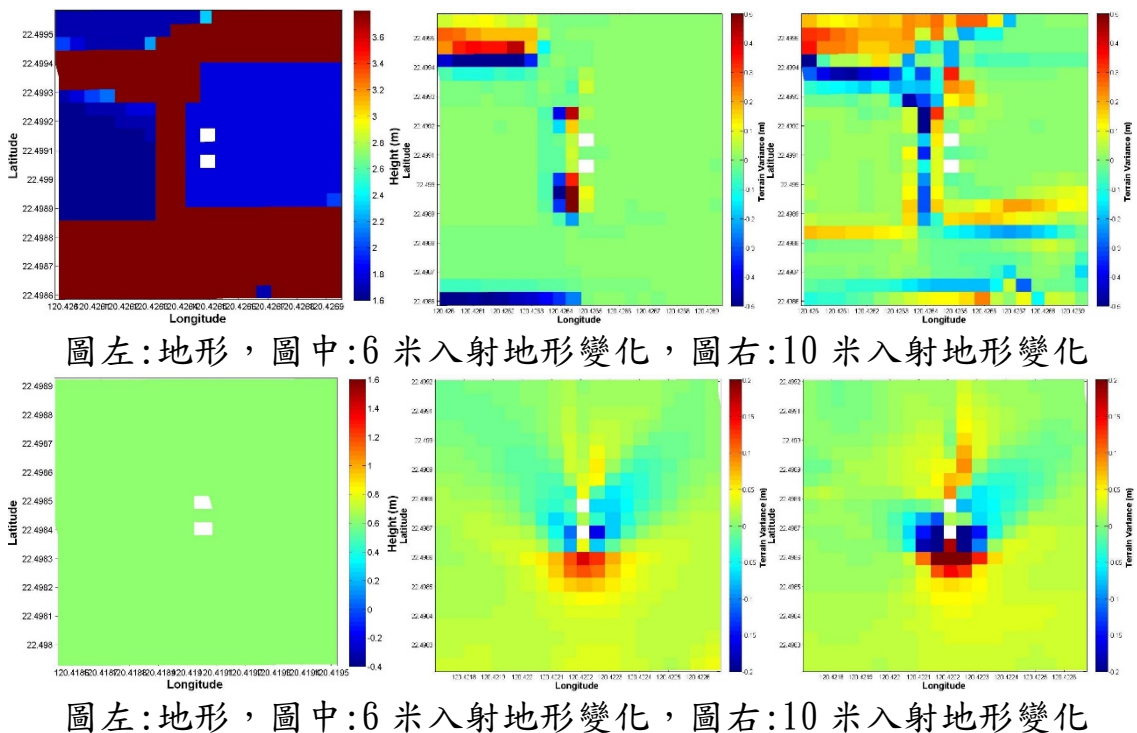


圖 6.30 (上圖)第 11 組橋墩之沖刷模擬
(下圖)第 4 組橋墩之沖刷模擬

表 6.2 不同入射波最高堆積及最大侵蝕

入射波高度	3 公尺	4 公尺	6 公尺	10 公尺
最大堆積(m)	0.0043 (第 8 組)	0.0162 (第 3 組)	0.3326 (第 11 組)	0.2067 (第 5 組)
最大侵蝕(m)	-0.0071 (第 3 組)	-0.0363 (第 3 組)	-0.1991 (第 5 組)	-0.5389 (第 3 組)

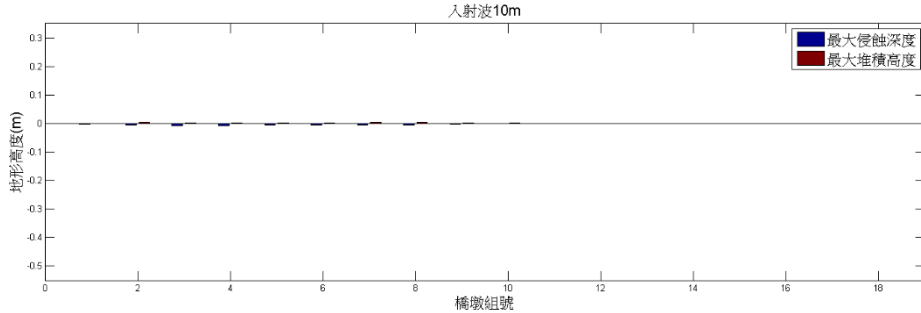


圖 6.31(a)入射波 3 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

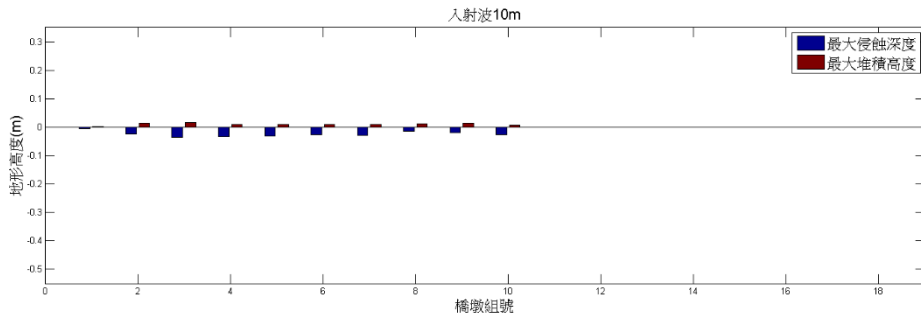


圖 6.31(b)入射波 4 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

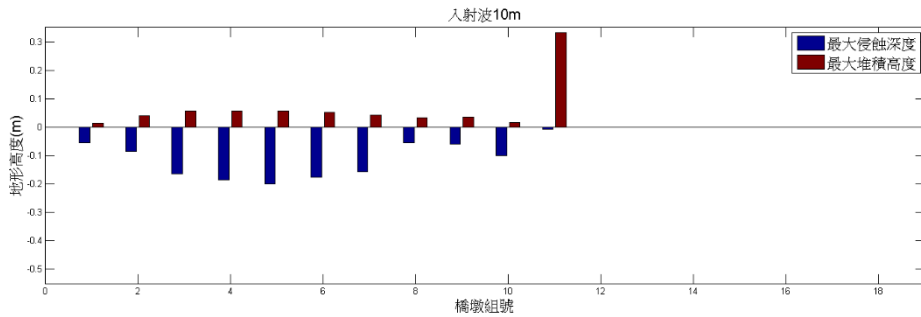


圖 6.31(c)入射波 6 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

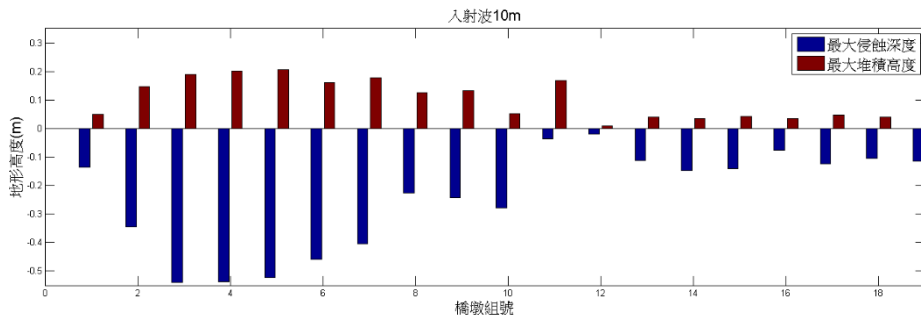


圖 6.31(d)入射波 10 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

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，得到部分成果，可供為臺灣港務公司及臺中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。
2. 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。

7.2 建議

1. 蘇澳港域及花蓮港域 50 年及 100 年之海嘯災害風險評估。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 建立對於臺灣本島 8 個主要商港港域及高屏溪海嘯模擬成果進行教育訓練。

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。
17. 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)。
18. 全球地震矩網頁 Global CMT <http://www.globalcmt.org/>.
19. 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/>
20. 中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/>.
21. 美國 NGDC 資料庫 <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml>.
22. 美國地調所 USGS 資料庫 <http://www.usgs.gov/>.
23. 美國地調所 USGS 國家地震訊息中心 NEIC 資料庫 <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>.
24. 台灣港務股份有限公司/高雄港務分公司 <http://www.khb.gov.tw/>
25. 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>
26. 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).

27. 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.
28. 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
29. Gusiakov, V. K. (2005), "Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific," *Marine Geology*, 215, pp.3-9.
30. Gutenberg, B. and C. F. Richter (1944), "Frequency of earthquake in California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, pp.185-188.
31. Hanks, C. T. and H. Kanamori (1979), "A Moment Magnitude Scale," *Journal of Geophysical Research*, 84(85), pp.2348-2350.
32. 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.
33. Liu, C. S., I. L. Huang and L. S. Teng (1997), "Structral features off Southwestern Taiwan," *Marine Geology*, 137, 305-319.
34. 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.

35. Liu, P. L. F., S. B. Woo and Y. S. Cho (1998), Computer programs for tsunami propagation and inundation., Cornell University.
36. Loomis, H. G. (1979), "Tsunami prediction using the reciprocal property of Green's functions," *Marine Geology*, 2(1), pp.27-39.
37. 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.
38. 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
39. Murty, T. S. (1979), *Seismic Sea Waves-Tsunamis*, Fishery Research Board of Canada.
40. 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.
41. Richardson J., Dillon, A., & McKnight, C. (1993) , *Space - The Final Chapter Why Physical Representations are not Semantic Intentions. A Psychological Perspective*, pp.169-191.
42. Ribberink, J.S. (1998), *Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows*. *Journal of Coastal Engineering*, Vol. 34, pp. 59-82.
43. 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.
44. Scordilis, E. M. (2006), "Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude," *Journal of Seismology*, 10(2), pp.225-236.
 45. Shuto, N. (1991), "Numerical Simulation of Tsunamis – Its Present and Near Future," *Natural Hazards* 4, pp.171-191.
 46. 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.
 47. Wang, X. M. and P. L. F. Liu (2007), *Cornell Multigrid Coupled Tsunami model COMCOT) User Manual*, Cornell University.
 48. 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.
 49. 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.
 50. 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.
 51. 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

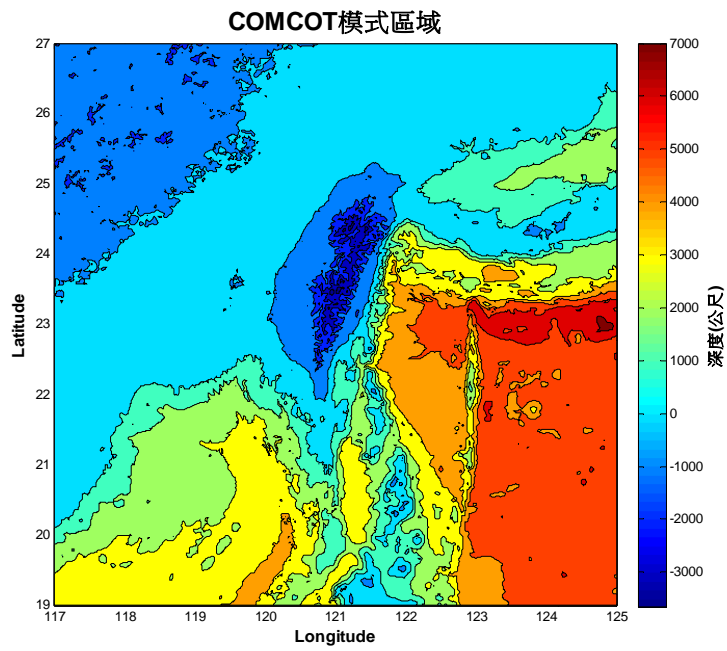
本計劃使用海嘯數值模式COMCOT (Liu et al., 1998)計算水位傳播，模式可選用的淺水方程式包含線性或非線性兩者；本案例採用線性淺水方程式用以描述海嘯波在海域深度超過 50m的變化，不考慮非線性及摩擦力的影響。模式區域範圍在東經 117° 至 125°，北緯 19° 至 27° (圖A1)，網格點 481*481，解析度 1 分。以高雄為例，首先在高雄港外水深 50m的定點s(圖A2)，並且給予水位高度 1m當成波源振幅，經模式計算水位傳播 3 小時(圖A3-A5)，除s點之外，所有的點皆視為接收點r，而s點即為之後海嘯高度預報的水位點。

$$S_t + Q_x + R_y = 0 \quad (\text{A1})$$

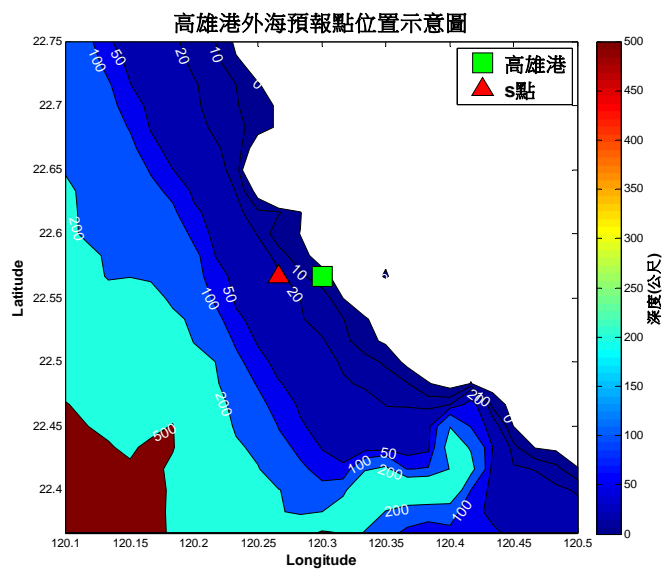
$$Q_t + g d S_x = 0 \quad (\text{A2})$$

$$R_t + g d S_y = 0 \quad (\text{A3})$$

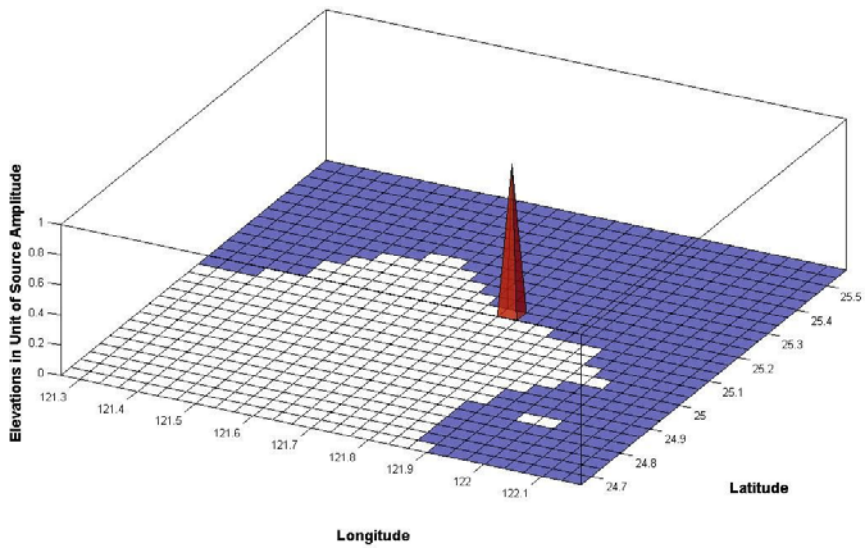
(A1)~(A3)式即是線性淺水方程式；其中 S 為水位高度，Q、R 各為 x、y 方向的流量，d 為總水深，g 為重力加速度。故對於接收點而言，其互逆格林函數值可事先建立資料庫，當地震發生時，僅需知道初始水位後，即可預測當地之實際水位。



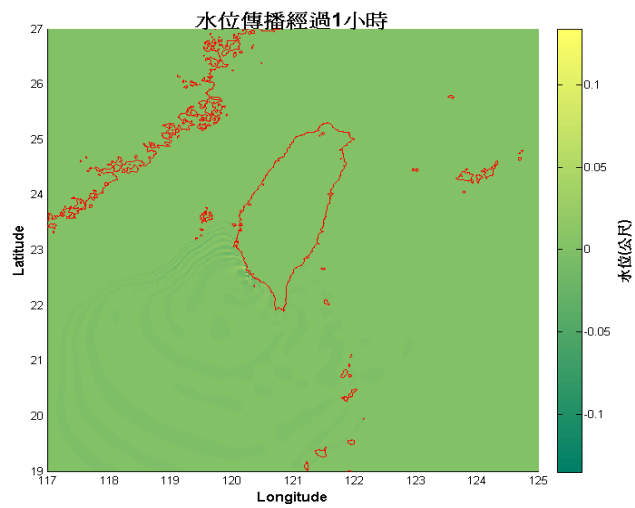
圖A1 互逆格林函數驗證之計算區域圖



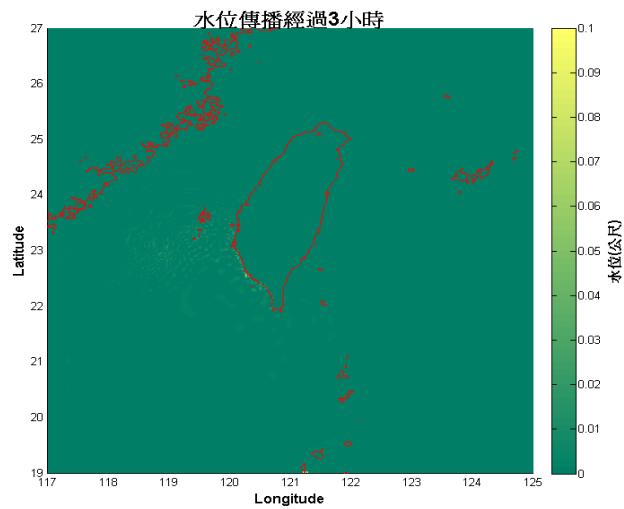
圖A2 海嘯高度預報點(r點)位置圖



圖A3 模式在r點設定1m初始水位



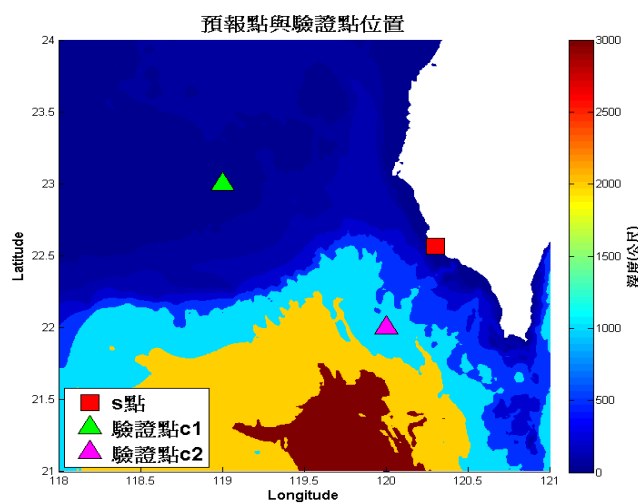
圖A4 r點初始水位傳播1小時後



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

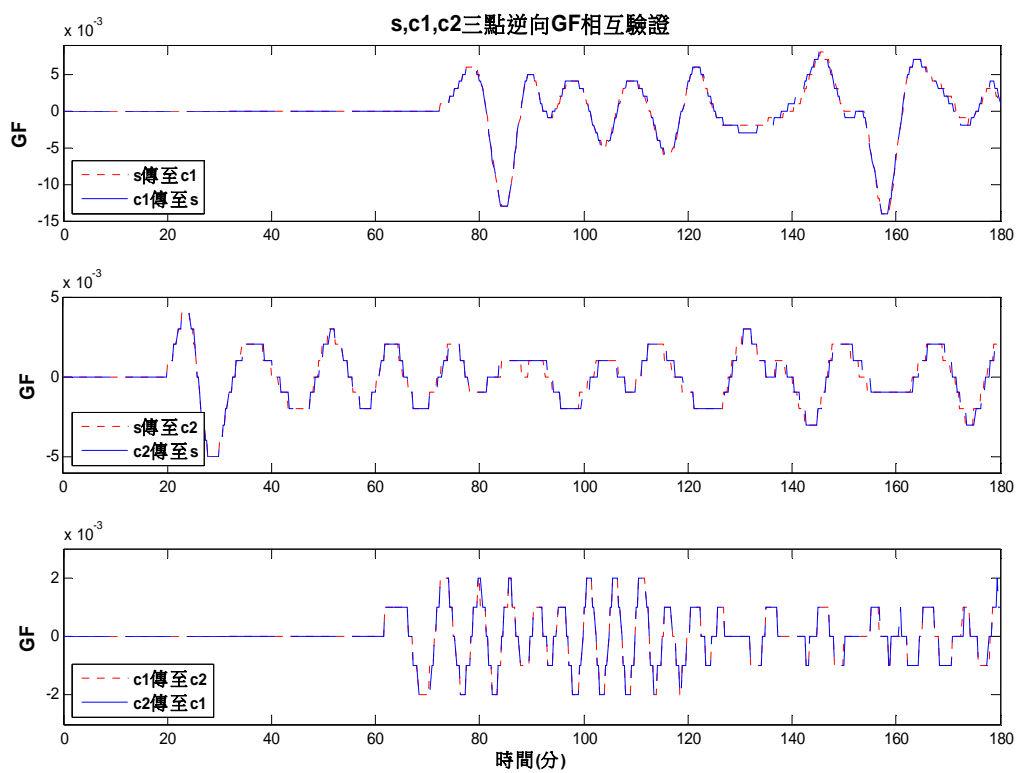


圖 A7 GF 與互逆 GF 一致性之驗證

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。

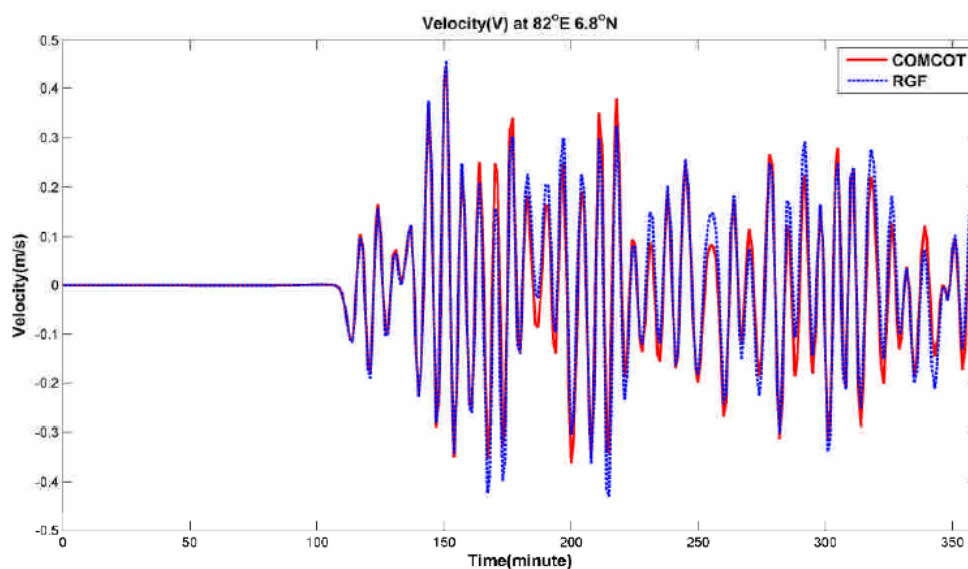


圖 A9 COMCOT 海嘯模式結果與互逆格林函數之比較
(斯里蘭卡 東經 82 度 北緯 6.8 度)

■ 外海海嘯預報的格林函數應用(以高雄為例)

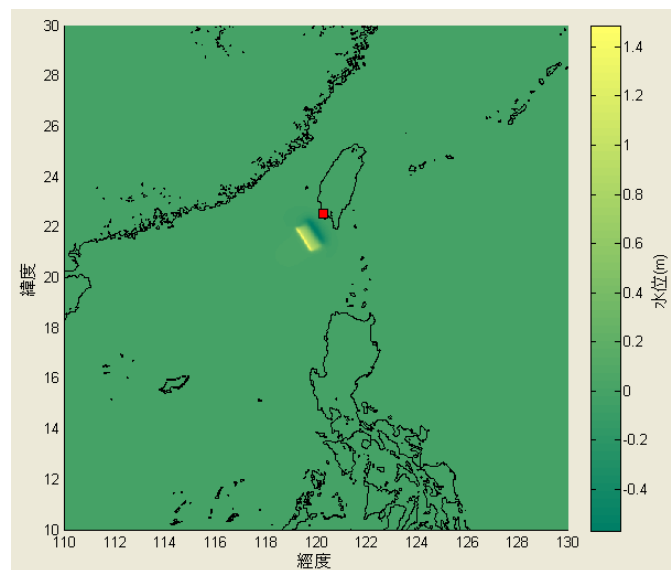
將波源區的所有格林函數乘上當地海床的垂直位移後相疊加，即可求出海嘯高度與到達時間。以下進行案例測試來了解發生海嘯對接收點r的水位影響，第一次試驗代入斷層模式所用的參數同陳(2007) 引用的 2006 年屏東大地震斷層參數，其參數來源為Harvard CMT世界地

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。

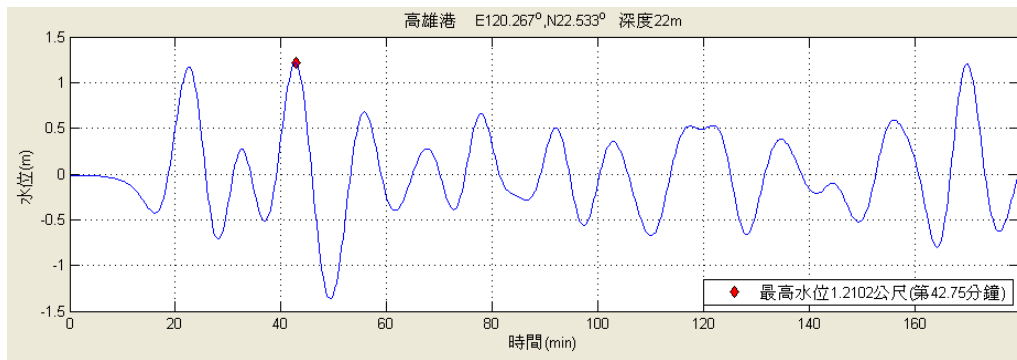
表A1 的參數代入斷層模式所得的海嘯起始水位如圖A10。經由互逆格林函數計算出的s點預報水位結果如圖A11。預報結果顯示在接收點r處受海嘯作用引起的水位最大值達 1.2102m(接近第 42 分)，對高雄港近岸有明顯之影響。

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

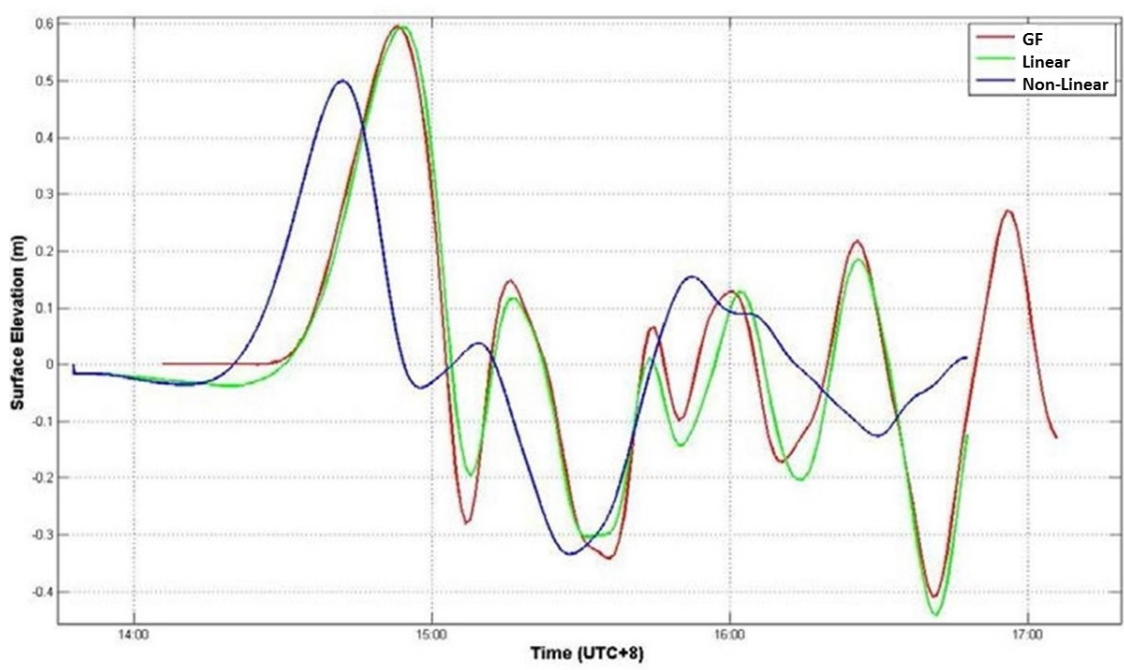


圖A11 於高雄港接收點r的海嘯高度預報

■ 以虛擬震源驗證互逆格林函數、COMCOT 線性模式與非線性模式之差異(以台中港為例)

在本節中，我們在台中港外海虛擬一個地震矩規模 $M_w 7.5$ ，深度為 10km 之海底地震，虛擬震央位址為東經 119.7 度，緯度 24.8 度，斷層參數 strike/dip/slip 分別為 30/45/90，利用互逆格林函數、COMCOT 線性模式及非線性模式再次比較三者在水位時序列上之變化；至於空間之傳播行為則因互逆格林函數與傳統海嘯模擬之計算程序相反，因此並無法比較三者之間之差異。

圖 A12 為互逆格林函數、COMCOT 線性模式及非線性模式在台中港預報點位之水位變化；由圖可以知道互逆格林函數及線性模式相當吻合，非線性模式則是相位約略早於前二者之結果，其波高亦較線性模式為低。



圖A12 格林函數、COMCOT線性模式及非線性模式在台中港預報點位之水位變化

附錄二 速算系統介面及操作說明

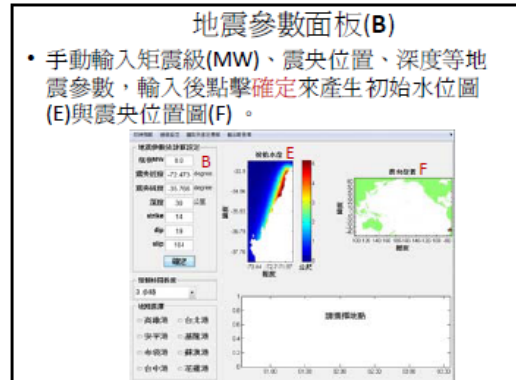
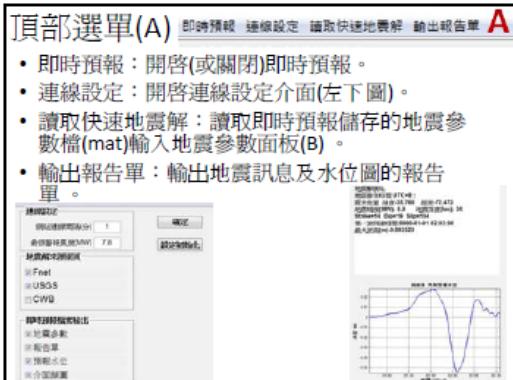
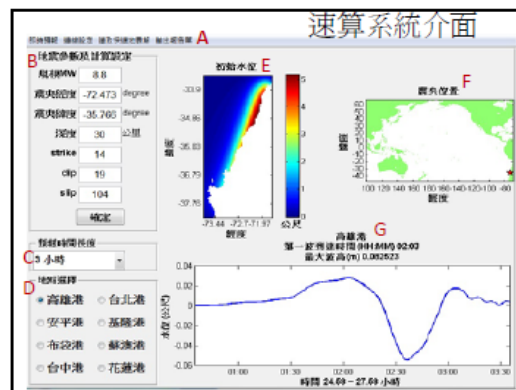
台灣國際商港海嘯速算系統

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



地點選擇面板(D)

- 選擇地點後產生預報水位(G)。右下圖以花蓮港為例。
- 預報時間長度(C)決定預報水位的時序列，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)

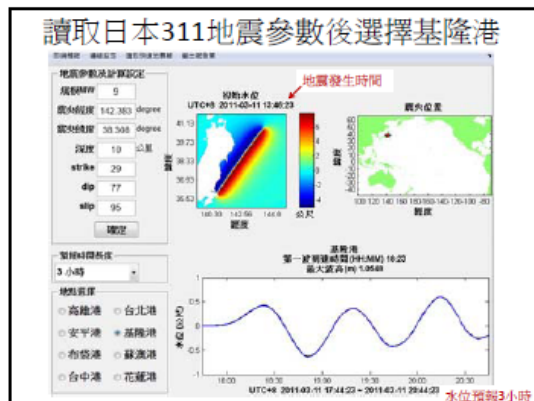
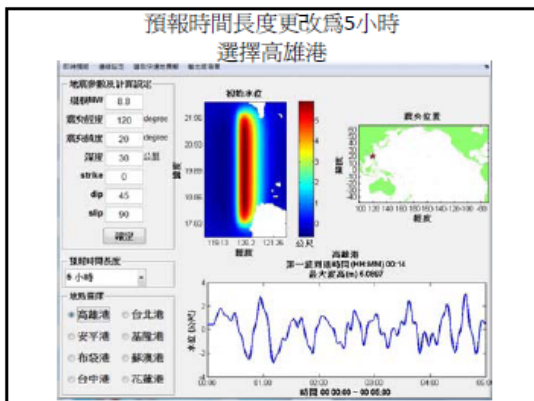
目前進度

- 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
 - 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

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/eqarchives/fm/>
- CWB(Central Weather Bureau)
台灣寬頻地震網資訊系統
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>

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

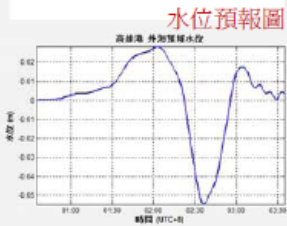
<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmat.php?LANG=en&ID=20110905133500&all=yr|mon|day|hr|min|sec|mw|lon|lat|dep|strike/dip/slip|strike/dip/slip>
 2011 09 05 13 35 00 4 141.5 39.5 65 22/75/78 241/19/128

報告單 (非即時預報)

訊息欄

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

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

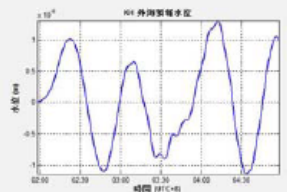
- 地震解網址：記錄地震解參數來源網頁。
- Strike、dip、slip：走向、傾角、滑移角。
- 第一波到達時間：第一個波峰(或波谷)的到達時間，此例為地震發生後經過1分鐘抵達。
- 最大波高：於預報水位分析取的最大波高。

報告單 (即時預報)

地震解網址
<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmat.php?LANG=en&ID=20110905133500&all>
 地震發生時間 UTC+8 :2011-09-05 21:38:00
 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=19
 第一波到達時間:2011-09-06 02:22:00
 最大波高(m):2.4514e-008

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	9	11	17	52	23	0.001
2011	9	11	17	53	23	0.001
2011	9	11	17	54	23	0.001
2011	9	11	17	55	23	0.002
2011	9	11	17	56	23	0.003
2011	9	11	17	57	23	0.004
2011	9	11	17	58	23	0.005
2011	9	11	17	59	23	0.007
2011	9	11	18	0	23	0.009
2011	9	11	18	1	23	0.011
2011	9	11	18	2	23	0.014
2011	9	11	18	3	23	0.018
2011	9	11	18	4	23	0.021
2011	9	11	18	5	23	0.026
2011	9	11	18	6	23	0.032
2011	9	11	18	7	23	0.038
2011	9	11	18	8	23	0.046
2011	9	11	18	9	23	0.054
2011	9	11	18	10	23	0.061
2011	9	11	18	11	23	0.069
2011	9	11	18	12	23	0.076
2011	9	11	18	13	23	0.084
2011	9	11	18	14	23	0.092
2011	9	11	18	15	23	0.101
2011	9	11	18	16	23	0.110
2011	9	11	18	17	23	0.117
2011	9	11	18	18	23	0.124

七欄位依序為年、月、日、時、分、秒和水位(m)

連線設定

網站連線間隔(分) H

最低警報震度(MW)

地震解凍來源網頁

Fnet

USGS

CWB

即時預報檔案輸出

地震參數

報告單

預報水位

介面顯示圖

確定

設定初始化

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

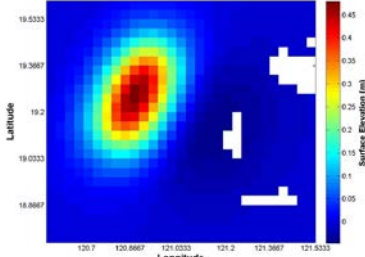
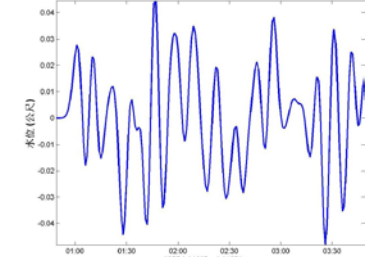
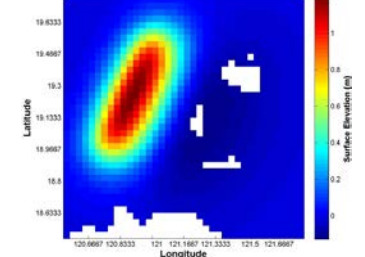
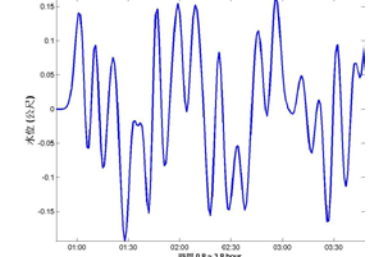
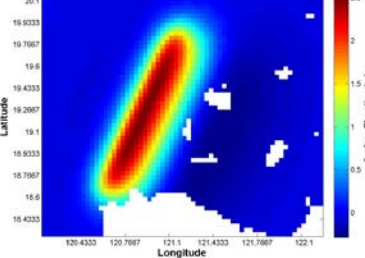
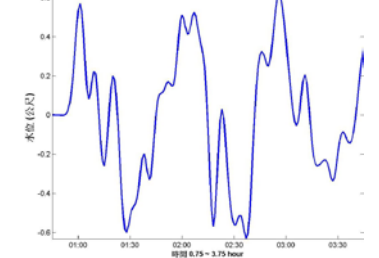
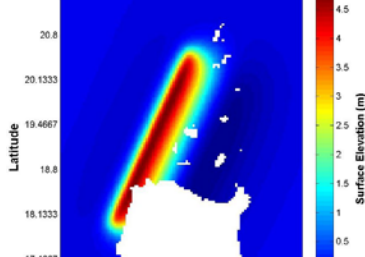
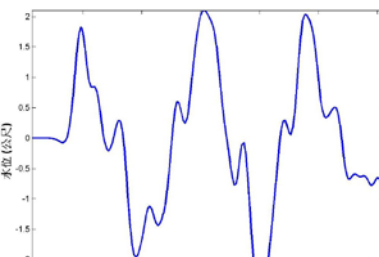
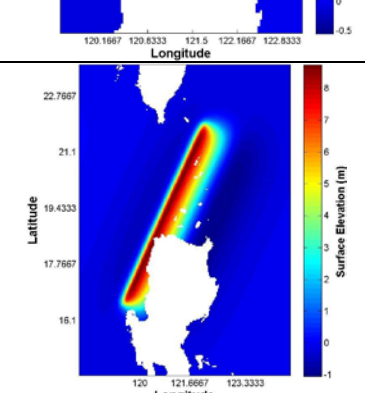
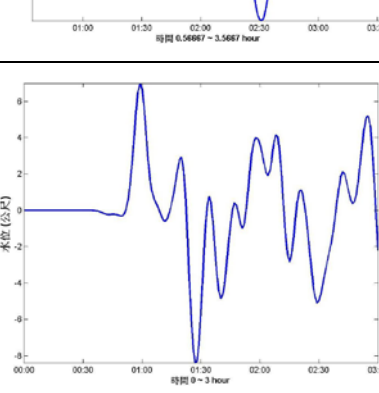
27		127	6.9	15000	-68.0583	39.84444	90
28		125.99	5.12	15000	78.12844	36.55519	90
29		126.83	2.92	15000	36.56601	36.54962	90
30	琉球海溝	134.2388	32.95372	15000	77.60519	73.19008	90
31		128.8532	27.57966	15000	52.24941	69.8255	90
32		139.95	34.71	15000	-12	39.03196	90
33		139.77	33.2	15000	68.5	40.08125	90
34	伊豆小笠原海溝	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 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	

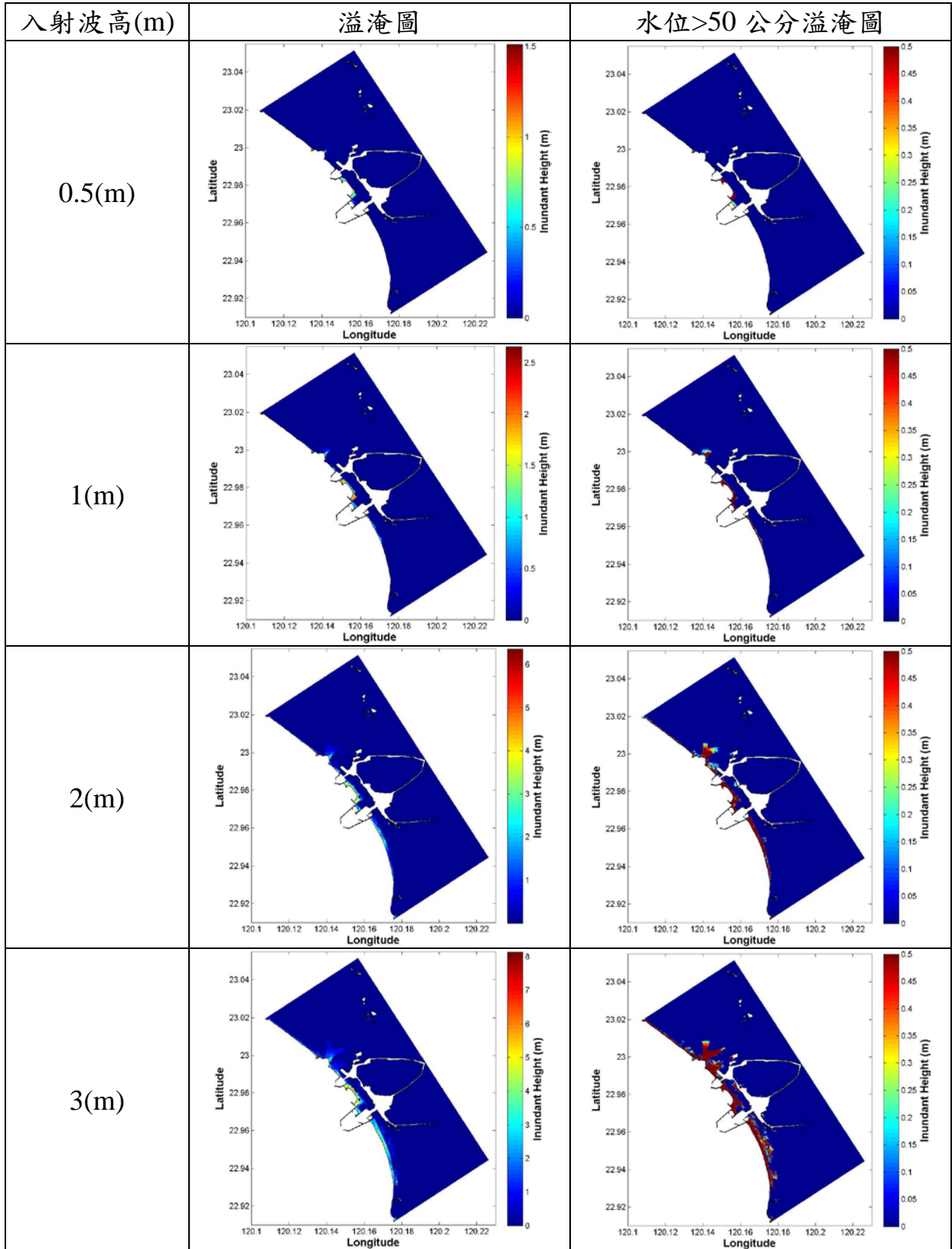
93		-80	-6.95	15000	51.72814	30.53333	90
94		-79	-9.07	15000	38.22244	32.85915	90
95		-78	-10.95	15000	58.62027	35.38095	90
96		-77	-13.14	15000	42.5585	31.82456	90
97		-75.76	-15.09	15000	71.84839	35.97638	90
98		-73.03	-17.12	15000	-89.4824	32.20408	90
99		-71.21	-18.95	15000	28.81873	32.14286	90
100		-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	馬尼拉海溝	120.3473	14.14368	15000	-7.46601	40.17293	90

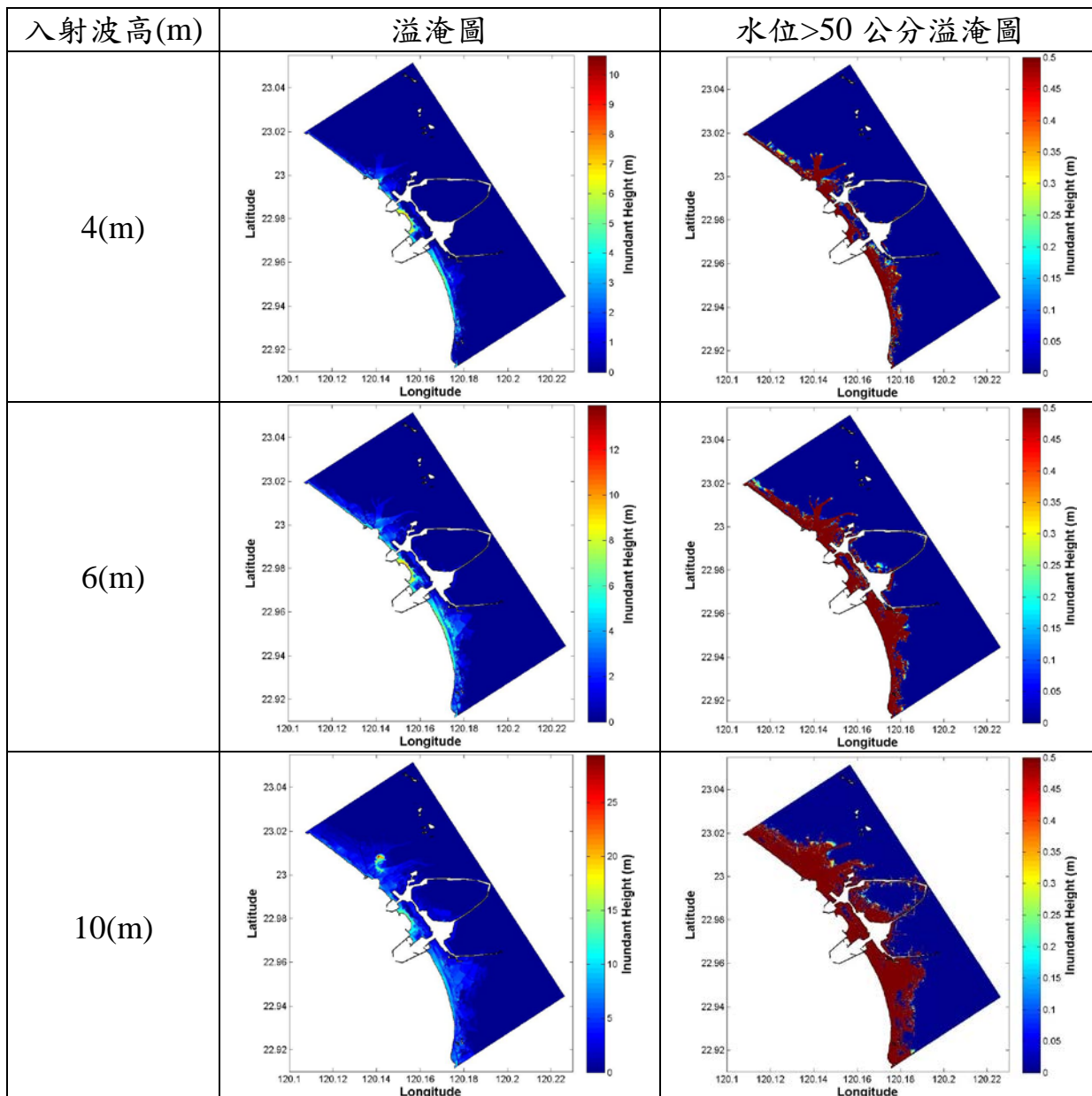
附錄四 地震矩規模與水位關係及溢淹圖

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

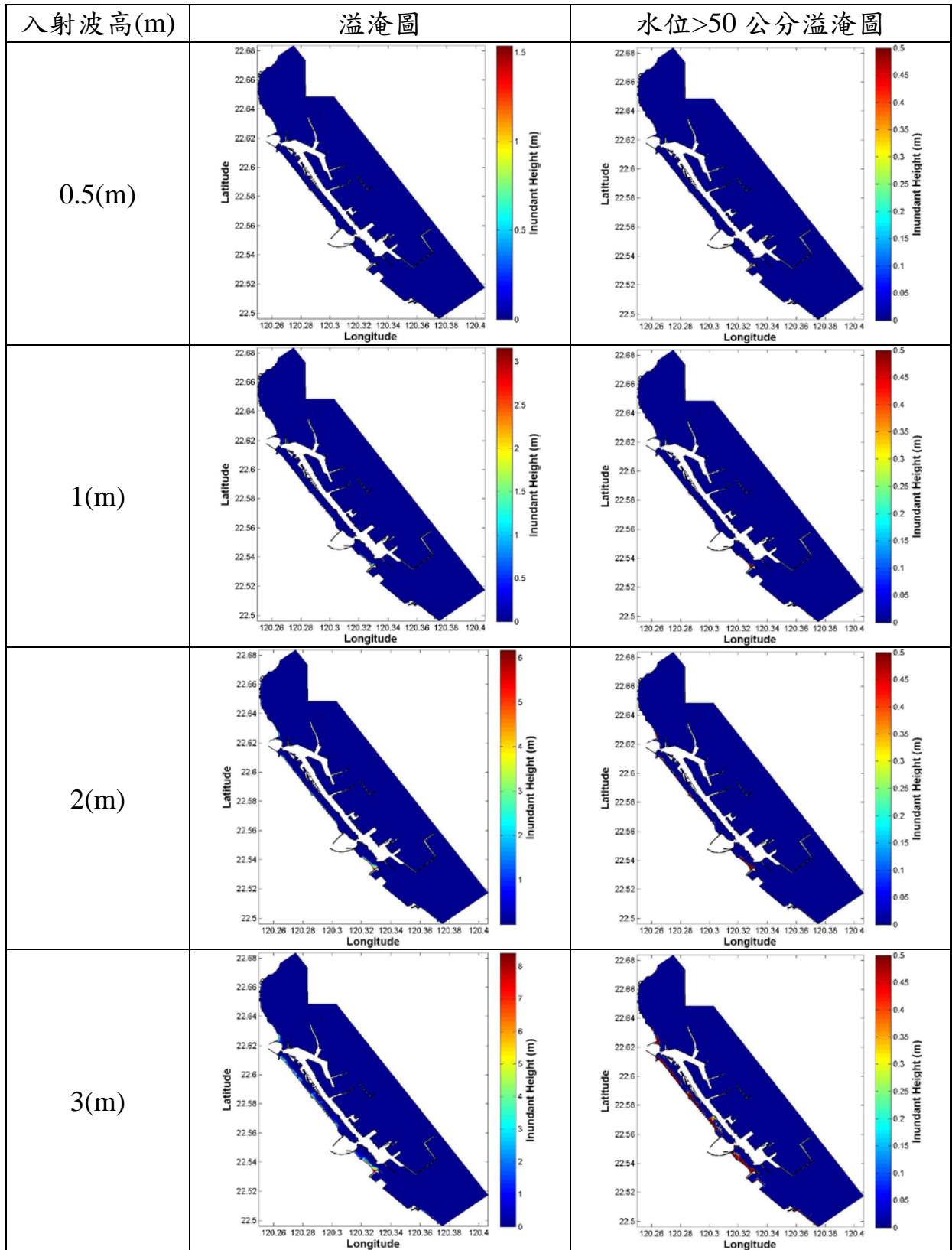


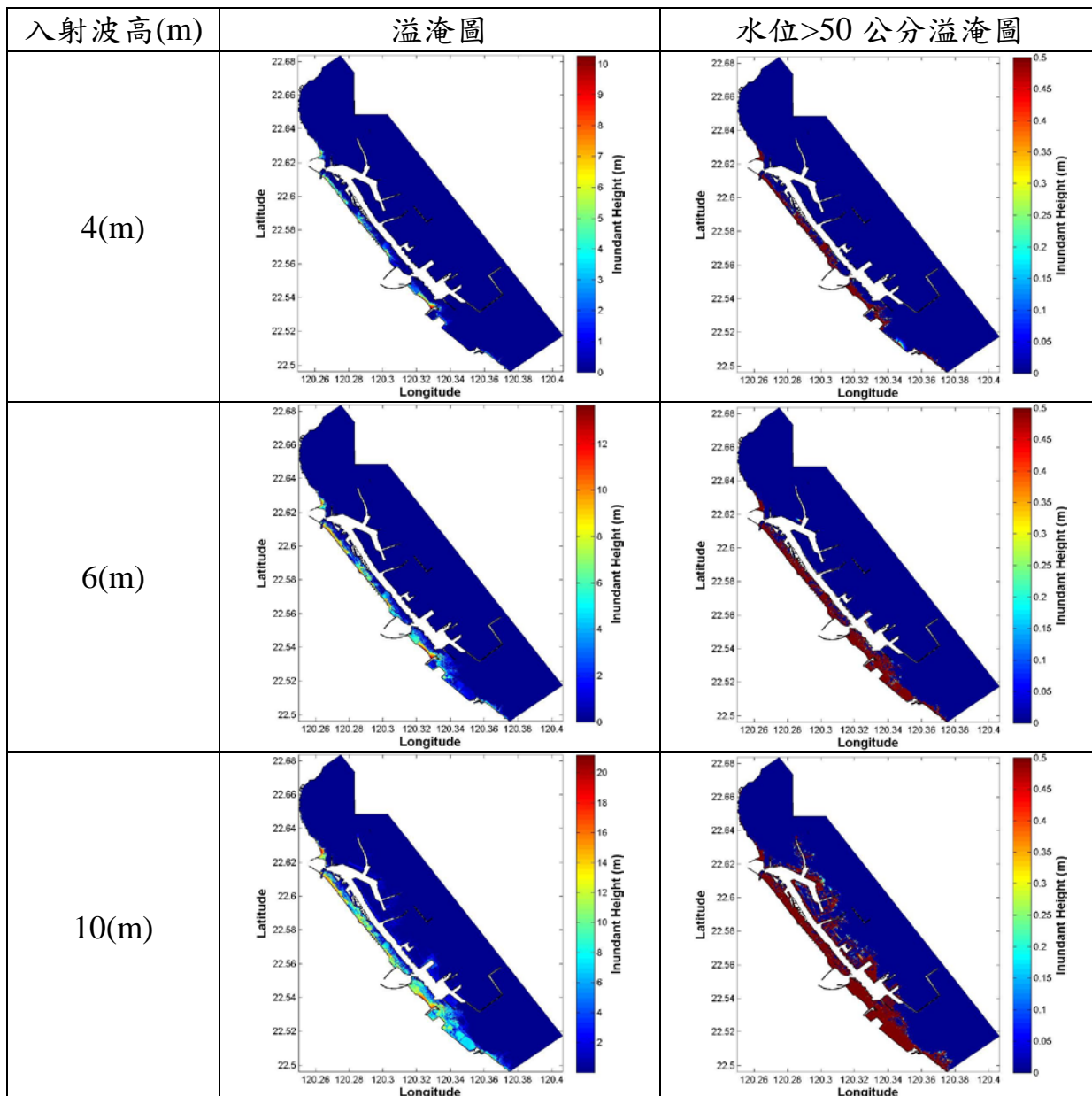


高雄港

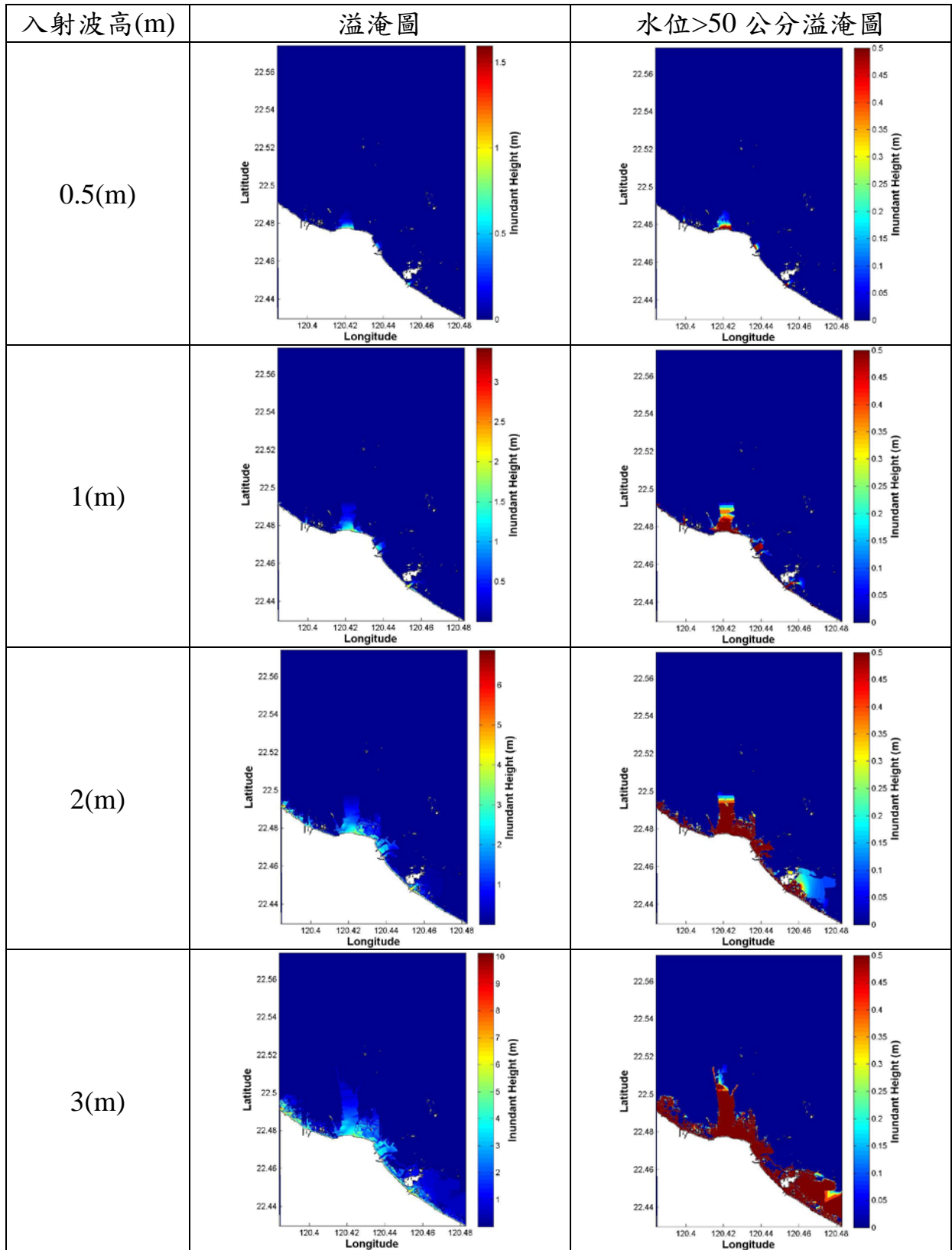
地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.048		
Mw=7.5 Max. wave=0.18		
Mw=8.0 Max. wave=0.61		
Mw=8.5 Max. wave=1.8		
Mw=9.0 Max. wave=7.2		

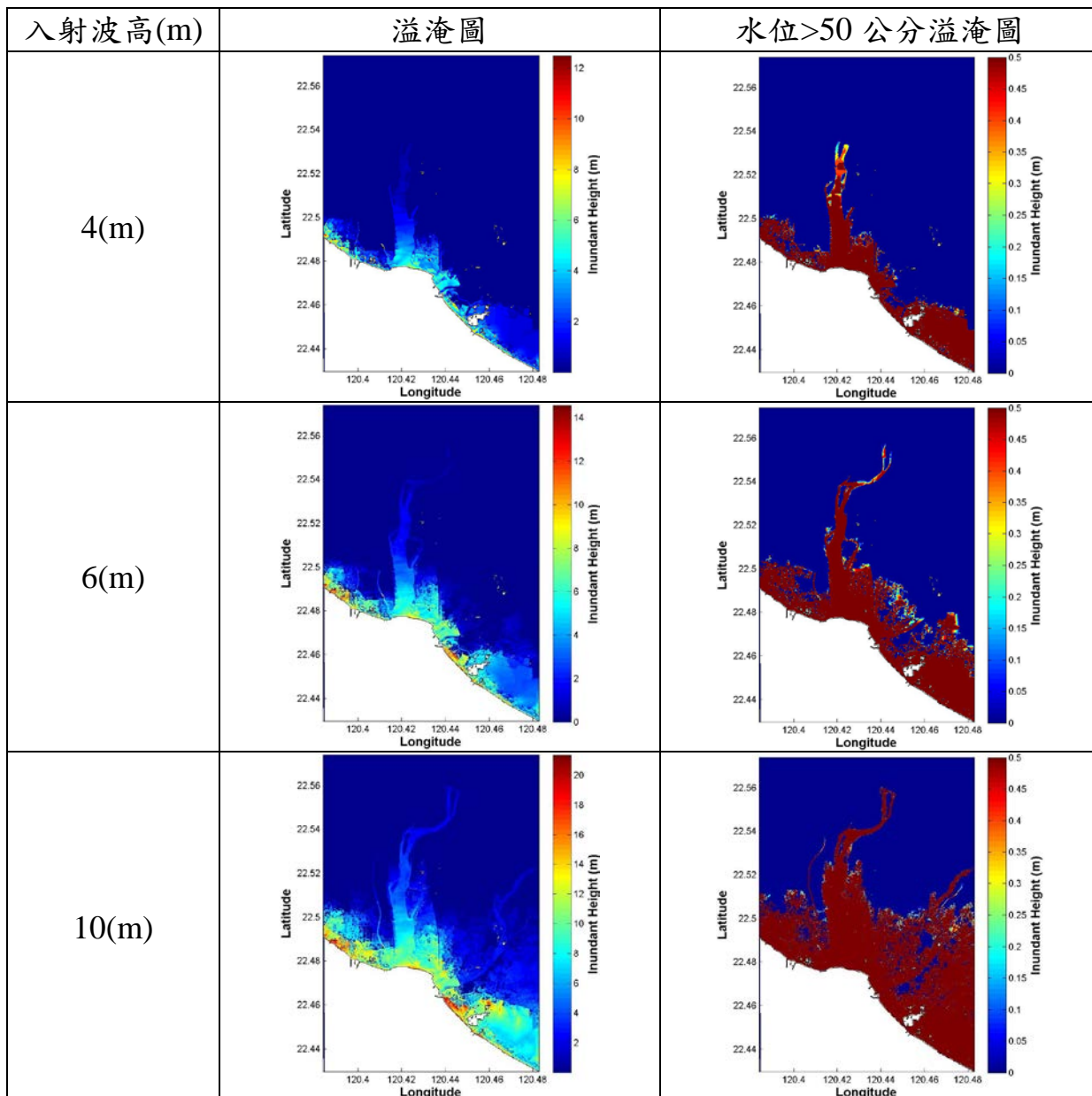
高雄港





高屏溪





附錄五 模擬橋墩墩柱受水流之壓力及沖刷結果

(橋墩墩柱東面 1 小時內之最大壓力分佈)單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	6.948	13.700	29.545	65.012	0.094	0.220	0.974	4.240	6.948	13.700	29.545	65.012
2	6.902	13.434	29.246	64.266	0.016	0.115	0.372	1.167	6.902	13.434	29.246	64.266
3	6.919	13.328	29.622	63.124	0.005	0.017	0.104	0.707	6.919	13.328	29.622	63.124
4	6.945	13.453	29.784	60.935	0.002	0.008	0.067	0.191	6.945	13.453	29.784	60.935
5	6.971	13.613	30.775	59.285	0.003	0.016	0.103	0.451	6.971	13.613	30.775	59.285
6	7.008	13.987	32.395	64.440	0.003	0.013	0.140	0.215	7.008	13.987	32.395	64.440
7	7.193	14.604	35.327	67.858	0.007	0.022	0.113	0.326	7.193	14.604	35.327	67.858
8	7.868	16.344	38.035	74.153	0.035	0.053	0.144	1.050	7.868	16.344	38.035	74.153
9	8.098	15.223	32.848	58.008	0.020	0.071	0.128	0.634	8.098	15.223	32.848	58.008
10	8.182	15.173	35.507	57.495	0.000	0.034	0.422	1.151	8.182	15.173	35.507	57.495
11	0.000	0.000	5.493	46.802	0.000	0.000	0.061	0.589	0.000	0.000	5.493	46.802
12	0.000	0.000	0.000	29.057	0.000	0.000	0.000	0.217	0.000	0.000	0.000	29.057
13	0.000	0.000	0.000	27.207	0.000	0.000	0.000	0.176	0.000	0.000	0.000	27.207
14	0.000	0.000	0.000	28.962	0.000	0.000	0.000	0.251	0.000	0.000	0.000	28.962
15	0.000	0.000	0.000	28.424	0.000	0.000	0.000	0.215	0.000	0.000	0.000	28.424
16	0.000	0.000	0.000	30.058	0.000	0.000	0.000	0.467	0.000	0.000	0.000	30.058
17	0.000	0.000	0.403	33.948	0.000	0.000	0.009	0.102	0.000	0.000	0.403	33.948
18	0.000	0.000	0.462	35.118	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000	0.000	0.462	35.118
19	0.000	0.000	0.524	33.689	0.000	0.000	0.000	0.171	0.000	0.000	0.524	33.689
20	6.951	13.727	29.686	65.143	0.093	0.215	1.683	7.577	6.951	13.727	29.686	65.143
21	6.897	13.353	29.008	59.117	0.010	0.089	0.322	0.937	6.897	13.353	29.008	59.117
22	6.917	13.300	29.555	57.027	0.003	0.010	0.078	0.528	6.917	13.300	29.555	57.027
23	6.941	13.411	29.598	59.450	0.002	0.005	0.024	0.143	6.941	13.411	29.598	59.450
24	6.965	13.512	30.180	59.559	0.002	0.006	0.027	0.152	6.965	13.512	30.180	59.559
25	7.000	13.856	31.858	63.418	0.003	0.009	0.034	0.168	7.000	13.856	31.858	63.418
26	7.151	14.303	34.801	67.447	0.008	0.020	0.056	0.108	7.151	14.303	34.801	67.447
27	7.615	15.994	37.823	73.807	0.054	0.258	0.427	0.394	7.615	15.994	37.823	73.807
28	6.094	13.214	30.962	56.357	0.015	0.033	0.052	0.331	6.094	13.214	30.962	56.357
29	0.000	5.458	25.916	48.257	0.000	0.041	0.329	1.151	0.000	5.458	25.916	48.257
30	0.000	0.000	5.466	47.267	0.000	0.000	0.035	0.357	0.000	0.000	5.466	47.267
31	0.000	0.000	0.000	28.870	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	0.000	0.000	28.870
32	0.000	0.000	0.000	27.991	0.000	0.000	0.000	0.072	0.000	0.000	0.000	27.991
33	0.000	0.000	0.000	28.884	0.000	0.000	0.000	0.177	0.000	0.000	0.000	28.884
34	0.000	0.000	0.000	28.388	0.000	0.000	0.000	0.096	0.000	0.000	0.000	28.388
35	0.000	0.000	0.000	31.275	0.000	0.000	0.000	0.234	0.000	0.000	0.000	31.275
36	0.000	0.000	0.187	34.138	0.000	0.000	0.006	0.103	0.000	0.000	0.187	34.138
37	0.000	0.000	0.000	33.352	0.000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.000	33.352
38	0.000	0.000	0.505	33.899	0.000	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.505	33.899

(橋墩墩柱西面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	6.950	13.696	29.447	65.258	0.029	0.050	0.352	2.051	6.950	13.696	29.447	65.258
2	6.895	13.185	28.171	60.212	0.032	0.165	0.613	1.766	6.895	13.185	28.171	60.212
3	6.884	13.073	27.628	64.708	0.011	0.062	0.357	1.336	6.884	13.073	27.628	64.708
4	6.906	13.062	27.564	60.214	0.004	0.036	0.201	1.116	6.906	13.062	27.564	60.214
5	6.928	13.065	27.310	58.244	0.004	0.020	0.164	1.202	6.928	13.065	27.310	58.244
6	6.949	13.100	27.353	56.126	0.006	0.025	0.126	1.206	6.949	13.100	27.353	56.126
7	6.969	13.191	28.027	57.056	0.013	0.043	0.161	0.761	6.969	13.191	28.027	57.056
8	7.067	13.621	33.398	65.191	0.025	0.084	0.132	1.004	7.067	13.621	33.398	65.191
9	8.148	16.053	35.074	68.437	0.017	0.020	0.099	0.319	8.148	16.053	35.074	68.437
10	8.137	15.359	36.478	65.610	0.068	0.199	0.425	1.929	8.137	15.359	36.478	65.610
11	0.000	0.000	5.729	48.994	0.000	0.000	1.979	3.121	0.000	0.000	5.729	48.994
12	0.000	0.000	0.000	29.361	0.000	0.000	0.000	0.619	0.000	0.000	0.000	29.361
13	0.000	0.000	0.000	29.810	0.000	0.000	0.000	0.205	0.000	0.000	0.000	29.810
14	0.000	0.000	0.000	29.823	0.000	0.000	0.000	0.514	0.000	0.000	0.000	29.823
15	0.000	0.000	0.000	29.504	0.000	0.000	0.000	0.204	0.000	0.000	0.000	29.504
16	0.000	0.000	0.000	30.117	0.000	0.000	0.000	0.477	0.000	0.000	0.000	30.117
17	0.000	0.000	0.000	31.665	0.000	0.000	0.000	0.264	0.000	0.000	0.000	31.665
18	0.000	0.000	0.164	30.652	0.000	0.000	0.007	0.253	0.000	0.000	0.164	30.652
19	0.000	0.000	0.557	32.137	0.000	0.000	0.000	0.161	0.000	0.000	0.557	32.137
20	6.954	13.709	29.484	65.861	0.027	0.175	0.849	0.859	6.954	13.709	29.484	65.861
21	6.885	13.216	28.337	58.796	0.003	0.028	0.214	0.902	6.885	13.216	28.337	58.796
22	6.887	13.141	28.206	62.006	0.001	0.013	0.146	0.856	6.887	13.141	28.206	62.006
23	6.908	13.119	28.048	59.854	0.001	0.006	0.063	0.411	6.908	13.119	28.048	59.854
24	6.930	13.124	27.684	58.389	0.001	0.004	0.022	0.391	6.930	13.124	27.684	58.389
25	6.952	13.154	27.642	57.731	0.001	0.004	0.023	0.554	6.952	13.154	27.642	57.731
26	6.976	13.274	28.430	58.587	0.003	0.008	0.038	0.410	6.976	13.274	28.430	58.587
27	7.063	13.642	33.861	66.867	0.012	0.045	0.060	0.291	7.063	13.642	33.861	66.867
28	6.183	13.876	33.014	65.608	0.013	0.087	0.088	0.082	6.183	13.876	33.014	65.608
29	0.000	4.411	25.127	49.623	0.000	0.004	0.005	0.706	0.000	4.411	25.127	49.623
30	0.000	0.000	5.621	48.435	0.000	0.000	1.815	3.560	0.000	0.000	5.621	48.435
31	0.000	0.000	0.000	28.963	0.000	0.000	0.000	1.087	0.000	0.000	0.000	28.963
32	0.000	0.000	0.000	30.349	0.000	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	30.349
33	0.000	0.000	0.000	29.256	0.000	0.000	0.000	0.211	0.000	0.000	0.000	29.256
34	0.000	0.000	0.000	29.203	0.000	0.000	0.000	0.145	0.000	0.000	0.000	29.203
35	0.000	0.000	0.000	31.300	0.000	0.000	0.000	0.398	0.000	0.000	0.000	31.300
36	0.000	0.000	0.000	32.591	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	0.000	0.000	32.591
37	0.000	0.000	0.000	31.197	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	31.197
38	0.000	0.000	0.504	32.905	0.000	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	0.504	32.905

(橋墩墩柱南面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	6.945	13.689	29.429	65.147	0.002	0.019	0.407	1.780	6.945	13.689	29.429	65.147
2	6.932	13.616	29.522	77.334	0.269	1.026	4.743	23.654	6.932	13.616	29.522	77.334
3	6.936	13.528	30.409	87.585	0.253	1.289	6.950	21.528	6.936	13.528	30.409	87.585
4	6.962	13.542	31.114	79.915	0.286	1.186	6.660	21.034	6.962	13.542	31.114	79.915
5	6.984	13.866	32.386	78.147	0.287	1.331	6.437	21.812	6.984	13.866	32.386	78.147
6	7.018	14.200	34.316	76.958	0.296	1.489	9.049	19.357	7.018	14.200	34.316	76.958
7	7.207	15.199	36.256	80.041	0.288	1.418	7.825	40.057	7.207	15.199	36.256	80.113
8	7.676	16.197	38.166	80.696	0.291	1.486	5.374	28.335	7.676	16.197	38.166	80.696
9	8.195	16.450	37.406	75.030	0.327	1.920	3.843	24.851	8.195	16.450	37.406	75.030
10	8.156	15.354	36.480	66.300	0.011	0.022	0.267	3.826	8.156	15.354	36.480	66.300
11	0.000	0.000	5.517	49.888	0.000	0.000	0.013	0.482	0.000	0.000	5.517	49.888
12	0.000	0.000	0.000	29.580	0.000	0.000	0.000	0.258	0.000	0.000	0.000	29.580
13	0.000	0.000	0.000	32.082	0.000	0.000	0.000	4.279	0.000	0.000	0.000	32.082
14	0.000	0.000	0.000	30.384	0.000	0.000	0.000	3.268	0.000	0.000	0.000	30.384
15	0.000	0.000	0.000	30.846	0.000	0.000	0.000	1.977	0.000	0.000	0.000	30.846
16	0.000	0.000	0.000	29.907	0.000	0.000	0.000	0.960	0.000	0.000	0.000	29.907
17	0.000	0.000	0.000	35.161	0.000	0.000	0.000	3.796	0.000	0.000	0.000	35.161
18	0.000	0.000	0.433	35.968	0.000	0.000	0.002	3.318	0.000	0.000	0.433	35.968
19	0.000	0.000	0.597	35.107	0.000	0.000	0.026	9.617	0.000	0.000	0.597	35.107
20	6.951	13.695	29.467	65.020	0.000	0.000	0.000	0.000	6.951	13.695	29.467	65.020
21	6.895	13.289	28.522	56.715	0.000	0.000	0.000	0.000	6.895	13.289	28.522	56.715
22	6.901	13.208	28.687	56.999	0.000	0.000	0.000	0.000	6.901	13.208	28.687	56.999
23	6.923	13.190	28.638	59.773	0.000	0.000	0.000	0.000	6.923	13.190	28.638	59.773
24	6.944	13.256	28.241	58.036	0.000	0.000	0.000	0.000	6.944	13.256	28.241	58.036
25	6.966	13.369	28.541	59.139	0.000	0.000	0.000	0.000	6.966	13.369	28.541	59.139
26	7.010	13.640	31.209	60.875	0.000	0.000	0.000	0.000	7.010	13.640	31.209	60.875
27	7.163	14.501	35.179	68.389	0.000	0.000	0.000	0.000	7.163	14.501	35.179	68.389
28	7.141	14.520	32.797	60.651	0.000	0.000	0.000	0.000	7.141	14.520	32.797	60.651
29	0.000	4.384	25.016	48.134	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.384	25.016	48.134
30	0.000	0.000	5.601	47.628	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.601	47.628
31	0.000	0.000	0.000	28.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.448
32	0.000	0.000	0.000	28.531	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.531
33	0.000	0.000	0.000	28.772	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.772
34	0.000	0.000	0.000	28.315	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.315
35	0.000	0.000	0.000	31.171	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.171
36	0.000	0.000	0.000	33.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	33.137
37	0.000	0.000	0.000	32.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	32.167
38	0.000	0.000	0.512	32.703	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.512	32.703

(橋墩墩柱北面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	6.951	13.695	29.467	65.020	0.000	0.000	0.000	0.000	6.951	13.695	29.467	65.020
2	6.895	13.289	28.522	56.715	0.000	0.000	0.000	0.000	6.895	13.289	28.522	56.715
3	6.901	13.208	28.687	56.999	0.000	0.000	0.000	0.000	6.901	13.208	28.687	56.999
4	6.923	13.190	28.638	59.773	0.000	0.000	0.000	0.000	6.923	13.190	28.638	59.773
5	6.944	13.256	28.241	58.036	0.000	0.000	0.000	0.000	6.944	13.256	28.241	58.036
6	6.966	13.369	28.541	59.139	0.000	0.000	0.000	0.000	6.966	13.369	28.541	59.139
7	7.010	13.640	31.209	60.875	0.000	0.000	0.000	0.000	7.010	13.640	31.209	60.875
8	7.163	14.501	35.179	68.389	0.000	0.000	0.000	0.000	7.163	14.501	35.179	68.389
9	7.141	14.520	32.797	60.651	0.000	0.000	0.000	0.000	7.141	14.520	32.797	60.651
10	0.000	4.384	25.016	48.134	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.384	25.016	48.134
11	0.000	0.000	5.601	47.628	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.601	47.628
12	0.000	0.000	0.000	28.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.448
13	0.000	0.000	0.000	28.531	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.531
14	0.000	0.000	0.000	28.772	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.772
15	0.000	0.000	0.000	28.315	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.315
16	0.000	0.000	0.000	31.171	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.171
17	0.000	0.000	0.000	33.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	33.137
18	0.000	0.000	0.000	32.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	32.167
19	0.000	0.000	0.512	32.703	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.512	32.703
20	0.000	0.000	2.160	37.383	0.000	0.000	0.000	2.444	0.000	0.000	2.160	37.383
21	6.878	13.175	28.234	53.287	0.041	0.246	1.629	14.810	6.878	13.175	28.234	53.287
22	6.890	13.134	28.406	53.985	0.043	0.192	1.041	11.835	6.890	13.134	28.406	53.985
23	6.911	13.127	28.288	57.426	0.044	0.143	0.694	5.182	6.911	13.127	28.288	57.426
24	6.934	13.171	27.941	57.568	0.041	0.135	0.585	6.927	6.934	13.171	27.941	57.568
25	6.957	13.212	27.927	57.945	0.044	0.135	0.572	9.679	6.957	13.212	27.927	57.945
26	6.989	13.405	29.553	58.802	0.042	0.141	0.506	3.305	6.989	13.405	29.553	58.802
27	7.034	13.551	33.898	68.147	0.102	0.599	3.133	26.408	7.034	13.551	33.898	68.147
28	6.086	13.280	30.778	57.145	0.020	0.292	0.602	3.088	6.086	13.280	30.778	57.145
29	0.000	5.503	26.072	48.692	0.000	0.031	0.382	2.576	0.000	5.503	26.072	48.692
30	0.000	0.000	5.548	47.363	0.000	0.000	0.019	0.279	0.000	0.000	5.548	47.363
31	0.000	0.000	0.000	28.287	0.000	0.000	0.000	0.313	0.000	0.000	0.000	28.287
32	0.000	0.000	0.000	29.164	0.000	0.000	0.000	0.764	0.000	0.000	0.000	29.164
33	0.000	0.000	0.000	28.680	0.000	0.000	0.000	1.034	0.000	0.000	0.000	28.680
34	0.000	0.000	0.000	28.336	0.000	0.000	0.000	0.515	0.000	0.000	0.000	28.336
35	0.000	0.000	0.000	31.404	0.000	0.000	0.000	1.160	0.000	0.000	0.000	31.404
36	0.000	0.000	0.000	32.824	0.000	0.000	0.000	0.980	0.000	0.000	0.000	32.824
37	0.000	0.000	0.000	30.405	0.000	0.000	0.000	0.671	0.000	0.000	0.000	30.405
38	0.000	0.000	0.506	33.016	0.000	0.000	0.034	0.929	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	-0.0017	-0.0055	-0.0538	-0.1363	0.0005	0.0017	0.0132	0.0494
2	2、21	-0.0054	-0.0246	-0.0861	-0.3439	0.0039	0.0131	0.0409	0.1477
3	3、22	-0.0071	-0.0363	-0.1638	-0.5389	0.0032	0.0162	0.0568	0.1905
4	4、23	-0.0067	-0.0338	-0.1865	-0.5363	0.0026	0.0090	0.0565	0.2014
5	5、24	-0.0061	-0.0300	-0.1991	-0.5236	0.0022	0.0093	0.0560	0.2067
6	6、25	-0.0057	-0.0266	-0.1757	-0.4594	0.0021	0.0102	0.0521	0.1605
7	7、26	-0.0052	-0.0292	-0.1576	-0.4043	0.0035	0.0094	0.0422	0.1767
8	8、27	-0.0053	-0.0151	-0.0558	-0.2251	0.0043	0.0107	0.0332	0.1246
9	9、28	-0.0026	-0.0198	-0.0607	-0.2417	0.0016	0.0134	0.0355	0.1316
10	10、29	0.0000	-0.0276	-0.0989	-0.2772	0.0010	0.0079	0.0157	0.0510
11	11、30	0.0000	0.0000	-0.0066	-0.0368	0.0000	0.0000	0.3326	0.1689
12	12、31	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0202	0.0000	0.0000	0.0000	0.0098
13	13、32	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0413
14	14、33	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1480	0.0000	0.0000	0.0000	0.0349
15	15、34	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1397	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437
16	16、35	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0764	0.0000	0.0000	0.0000	0.0347
17	17、36	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1244	0.0000	0.0000	0.0000	0.0463
18	18、37	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0412
19	19、38	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0398

