

110-057-7C79

MOTC-IOT-109- H1C002

# 公路土壤邊坡與擋土支撐監測 系統精進及預警系統測試



交通部運輸研究所

中華民國 110 年 2 月



110-057-7C79

MOTC-IOT-109- H1C002

# 公路土壤邊坡與擋土支撐監測 系統精進及預警系統測試

著者：曾文傑、賴瑞應、黃安斌、張文忠

交通部運輸研究所

中華民國 110 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試

/曾文傑等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，民

000.00

面；公分

ISBN 978-986-531-252-7 (平裝)

1.公路管理 2.運輸系統

557

106014987

公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試

著者：曾文傑、賴瑞應

出版機關：交通部運輸研究所

地址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網址：[www.iot.gov.tw](http://www.iot.gov.tw) (中文版>數位典藏>本所出版品)

電話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 110 年 2 月

印刷者：OOOOOOOOO

版(刷)次冊數：初版一刷 000 冊

書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：000 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組·電話：(02)2349-6789

國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號·電話：(02)2518-0207

五南文化廣場：400002 臺中市區中山路 6 號·電話：(04)2226-0330

GPN：1011000170 ISBN：978-986-531-252-7 (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分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試  
交通部運輸研究所

## 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：公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-252-7（平裝）	政府出版品統一編號 1011000170	運輸研究所出版品編號 110-057-7C79	計畫編號 109- H1C002
本所主辦單位：港研中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：賴瑞應 研究人員：曾文傑 聯絡電話：04-26587172 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：黃安斌 研究人員：張文忠、張弘杰、吳博巧、陳宜昕 地址：台南市東區大學路1號 聯絡電話：06-2080172		研究期間 自 109年2月 至 109年12月
關鍵詞：邊坡破壞、無線監測模組、水力力學耦合分析、依時預警系統、物聯網			
<p>摘要：</p> <p>本計畫針對公路土壤邊坡可能遭遇之土層滑動破壞，進行解析法分析並搭配無線土層反應監測模組，測試發展適用於土層之解析法依時預警模式，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性。研究依滑動面發生於飽和土層之飽和層滑動及非飽和土層之淺層滑動，淺層滑動為延續前期研究成果，持續進行現地監測與模式測試，並精進現有模組；飽和層滑動以結合具嚴謹力學及通用性之解析法邊坡穩定分析及量測表層土層反應之無線監測模組，利用建立之場址水文與地質模型進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析，並加入擋土支撐系統土壤結構互制效應，預測擋土邊坡依時性反應，作為無線土層與結構反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，以發展場址客製化具依時特性之公路土壤邊坡擋土支撐滑動預警架構。所開發之監測模組以廣為應用於物聯網之微機電感測系統，結合無線通訊與雲端儲存顯示技術，整合具無線通訊功能且可監測地表傾角、土中分層濕度、溫度及孔隙水壓之監測模組，形成分佈式土層滑動感測網路，作為相關防災作為啟動之參據。</p> <p>成果效益與應用情形：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.考慮崩積土層水力力學耦合解析法推論，加入邊坡土壤與支撐系統互制分析，發展具依時特性之公路土壤邊坡降雨滑動監測及預警技術，以利災害管理。</li> <li>2.利用伴隨物聯網興起之電子系統整合優勢，發展現地無線土層與支撐系統監測模組，應用於降雨引致地質災害監測與預警。</li> <li>3.研究成果提供交通部、公路總局與臺灣鐵路管理局之養護與工務單位應用參考。</li> </ol>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
110年2月	244	200	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。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS  
INSTITUTE OF TRANSPORTATION  
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

Publication Name: Advances in Monitoring System and Early Warning System Testing of Highway Soil Slope and Earth Support			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-252-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011000170	IOT SERIAL NUMBER 110-057-7C79	PROJECT NUMBER 109- H1C002
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jui-Ying Lai PROJECT STAFF: Wen-Jier Tseng PHONE: +886-4-26587172 FAX: +886-4-26564418			PROJECT PERIOD FROM February 2020 TO December 2020
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation TY PRINCIPAL INVESTIGATOR: An-Bin Huang CO-PROJECT INVESTIGATOR: Wen-Jong Chang ADDRESS: No.1, University Road, Tainan City 701, Taiwan (R.O.C) PHONE:+886-6-2757575~63128			
KEY WORDS: slope failure ; wireless sensing module ; coupled hydro-mechanical analysis ; time-dependent warning system ; Internet-of-things			
Abstract :  The analytical method, collocated with wireless soil response sensing module, is used in this program to analyze and test and develop an analytical method time-dependent warning early system applicable to the soil layer aiming at the soil layer sliding damage that may happen to the slope road soil to supplement the existing early warning mode with rainfall monitoring as an indicator to improve the accuracy and timeliness of early warning. The research is based on the sliding of saturated zone in a saturated soil layer and shallow sliding in a layer of unsaturated soil. The shallow sliding is the continuation of the previous research results, which proceeds with in-situ monitoring and model-based testing, as well as advancing the existing modules; sliding of saturated zone combines the rigorous dynamics and universal analytical method of slope stability to analyze and measure the wireless sensing module of the surface soil response, using the set-up site hydrological and geological model to carry out hydro-mechanical coupling numerical analysis of slope sliding, including earth support system soil structure interaction effect, predicting the earth support real-time slope response as a basis for the deployment of wireless soil and structural response sensing modules and the establishment of warning value to develop site-customized slope road soil earth support sliding warning structure with real time slope road soil earth support sliding warning structure. The developed sensing module combines the micro-electro-mechanical sensing system widely used in the Internet-of-Things with wireless communication and cloud storage display technology, integrating sensing module which has the properties of wireless communication, able to monitor the earth surface inclination angle, layered soil moisture, temperature and pore water pressure to form a distributed soil layer sliding sensing network for related disaster prevention reference. Results, Benefits and Application: 1. Considering the inference of colluvial layer coupled hydro-mechanical analysis method, adding the interaction analysis of slope soil and support system, developing time-dependent road soil slope rainfall sliding monitoring and early warning technology to assist in disaster management. 2. Taking advantage of the integration of the rising electronic systems which accompany the Internet-of-Things, developing in-situ wireless soil layer and support system sensing modules to apply them to the monitoring and early warning of geological disasters caused by rainfall. 3. The research results provide the Ministry of Transportation and Communications, maintenance and construction agencies of the Directorate General of Highways and the Taiwan Railway with reference for the application thereto.			
DATE OF PUBLICATION February 2021	NUMBER OF PAGES 244	PRICE 200	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統 精進及預警系統測試

## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
目錄 .....	III
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XV
第一章 計畫概要 .....	1-1
1.1 研究計畫之背景、目的及重要性 .....	1-1
1.1.1 計畫背景 .....	1-1
1.1.2 計畫目的 .....	1-3
1.2 研究範圍與對象 .....	1-6
1.3 研究內容與項目 .....	1-7
1.4 預期成果、效益及應用 .....	1-9
第二章 研究方法及進行步驟 .....	2-1
2.1 研究方法 .....	2-1
2.2 國內外有關本計畫之研究情況 .....	2-4
2.2.1 解析法邊坡分析 .....	2-4
2.2.2 邊坡監測預警 .....	2-9
2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警 .....	2-11
2.3.1 非飽和土層入滲分析與入滲試驗 .....	2-11

2.3.2	淺層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論.....	2-16
2.3.3	飽和層滑動無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論.....	2-19
2.3.4	二維水力力學耦合數值分析.....	2-20
2.3.5	邊坡依時預警架構.....	2-24
2.4	邊坡擋土系統變形分析與預警.....	2-29
第三章	無線土層即時監測系統.....	3-1
3.1	系統架構.....	3-1
3.2	土層水文與運動反應量測.....	3-2
3.3	土層無線監測模組組成.....	3-7
3.4	潛在滑動邊坡無線監測模組.....	3-12
3.4.1	淺層模組系統硬體架構.....	3-12
3.4.2	飽和土層滑動邊坡無線監測模組.....	3-14
3.4.3	無線監測模組價格與耐用性評估.....	3-15
第四章	淺層滑動場址監測成果.....	4-1
4.1	甲仙攔河堰聯外道路西側邊坡.....	4-1
4.2	甲仙場址監測資料.....	4-2
4.2.1	甲仙測站體積含水量監測結果.....	4-4
4.2.2	甲仙測站傾斜儀監測結果.....	4-9
4.3	阿里山五彎仔場址及監測資料.....	4-10
4.3.1	五彎仔場址土層含水量監測資料.....	4-14
4.3.2	五彎仔場址傾斜監測資料.....	4-14
4.3.3	五彎仔場址水位監測資料.....	4-14
第五章	飽和土層場址監測成果及時間域水壓推估.....	5-1
5.1	時間域孔隙水壓推估模式.....	5-2

5.1.1	一維 FDM 入滲控制方程式 .....	5-2
5.1.2	一維 FDM 入滲數值模型 .....	5-3
5.2	台 20 線監測場址 .....	5-7
5.2.1	台 20 線場址背景資料與監測配置 .....	5-7
5.2.2	台 20 線地下水位監測 .....	5-11
5.2.3	表層體積含水量與傾斜儀 .....	5-16
5.2.4	台 20 線水壓推估模式擬合成果 .....	5-18
5.3	南市道 175 線監測場址監測資料 .....	5-24
5.3.1	南市道 175 線場址背景資料與監測配置 .....	5-24
5.3.2	南市道 175 線地下水位與地表傾角監測 .....	5-30
5.3.3	南市道 175 線表層體積含水量監測與擋土系統傾角監測 .....	5-34
第六章	邊坡擋土系統變形分析與預警 .....	6-1
6.1	邊坡擋土系統數值分析架構 .....	6-2
6.1.1	總體滑動分析 .....	6-2
6.1.2	局部擋土系統分析 .....	6-5
6.2	台 20 線 52k 邊坡穩定性分析 .....	6-12
6.2.1	台 20 線 52k 總體滑動分析 .....	6-12
6.2.2	台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位變化分析 .....	6-16
6.2.3	台 20 線 52k 局部擋土系統降雨入滲穩定分析 .....	6-21
6.2.4	台 20 線 52k 場址警戒值訂定 .....	6-26
6.2.5	數值分析初步驗證 .....	6-27
6.3	南市道 175 線 25k 邊坡穩定性分析 .....	6-29
6.3.1	南市道 175 線 25k 總體滑動分析 .....	6-29
6.3.2	南市道 175 線 25k 局部擋土系統地下水位穩定分析 .....	6-32

6.3.3	南市道 175 線 25k 局部擋土系統降雨入滲穩定分析...	6-37
6.3.4	南市道 175 線 25k 場址警戒值訂定.....	6-42
6.3.5	南市道 175 線數值分析成果比較.....	6-42
第七章 即時監測平台與自動預警通知系統.....		7-1
7.1	邊坡擋土即時監測平台 .....	7-1
7.1.1	ThingSpeak 平台簡介.....	7-1
7.1.2	雲端顯示平台架構.....	7-2
7.1.3	平台功能簡介.....	7-4
7.2	自動預警通知系統.....	7-9
7.2.1	自動預警通知觸發 .....	7-9
7.2.2	使用者之資料通知設定.....	7-10
第八章 結論與建議.....		8-1
8.1	結論 .....	8-1
8.2	建議.....	8-2
8.3	預期效益與應用情形.....	8-3
參考文獻.....		參-1
附錄一 審查意見處理情形表.....		附錄 1-1
附錄二 各期工作會議記錄.....		附錄 2-1
附錄三 期末簡報.....		附錄 3-1

## 圖目錄

圖 2.1 飽和土層依時邊坡預警系統架構圖.....	2-2
圖 2.2 邊坡破壞有效應力路徑變化(Cascini et al.,2010) .....	2-6
圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖(Huang et al.,2012) .....	2-7
圖 2.4 典型粗顆粒土壤入滲分析結果(Collins and Znidarcic,2004) .....	2-8
圖 2.5 典型細顆粒土壤入滲分析結果(Collins and Znidarcic,2004) .....	2-8
圖 2.6 地表邊坡預警監測系統(Uchimura et al.,2008) .....	2-10
圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995) .....	2-12
圖 2.8 典型細顆粒土壤土壤基質吸力-滲透係數曲線(Fredlund,1995) .....	2-13
圖 2.9 非飽和滲流分析結果比較.....	2-14
圖 2.10 室內砂柱入滲試驗配置(Freeze and Banner, 1970) .....	2-15
圖 2.11 垂直入滲補注地下水流試驗結果(Freeze and Banner, 1970) ..	2-16
圖 2.12 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....	2-17
圖 2.13 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖.....	2-19
圖 2.14 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar,1995) .....	2-20
圖 2.15 數值分析模型.....	2-23
圖 2.16 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....	2-23
圖 2.17 同一剖面不同深度孔隙水壓歷時.....	2-24
圖 2.18 預測地表運動歷時.....	2-25
圖 2.19 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....	2-25
圖 2.20 深度 0.75m 體積含水量變化及依時預警概念 .....	2-26
圖 2.21 甲仙上邊坡深度 1.5m 體積含水量變化依時預警概念 .....	2-27

圖 2.22 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....	2-27
圖 2.23 地下水位深度與牆頂位移量.....	2-30
圖 3.1 淺層滑動模組系統架構示意圖.....	3-2
圖 3.2 電容式土壤水份計.....	3-3
圖 3.3 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖.....	3-4
圖 3.4 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較.....	3-5
圖 3.5 傾斜儀類比電壓比例輸出標定.....	3-5
圖 3.6 雨量計器示值校正.....	3-6
圖 3.7 邊坡無線監測系統運作示意圖.....	3-7
圖 3.8 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖.....	3-11
圖 3.9 土層監測模組外構.....	3-13
圖 3.10 防水電子盒內部配置.....	3-13
圖 3.11 液位計實體與校正結果.....	3-15
圖 4.1 監測模組相對位置圖.....	4-1
圖 4.2 監測站點周遭環境.....	4-2
圖 4.3 Thingspeak 即時顯示情況.....	4-3
圖 4.4 Node0 體積含水量量測結果.....	4-5
圖 4.5 Node1 體積含水量量測結果.....	4-6
圖 4.6 Node2 體積含水量量測結果.....	4-7
圖 4.7 Node3 體積含水量量測結果.....	4-8
圖 4.8 甲仙測站地表傾斜角監測結果.....	4-9
圖 4.9 傾斜角量測方向.....	4-10
圖 4.10 五彎仔邊坡空照圖(Google Earth).....	4-11

圖 4.11 ID02 體積含水量量測結果.....	4-15
圖 4.12 ID03 體積含水量量測結果 .....	4-15
圖 4.13 ID02 傾斜監測結果.....	4-16
圖 4.14 ID03 傾斜監測結果.....	4-16
圖 4.15 ID04 傾斜監測結果.....	4-17
圖 4.16 ID04 水位監測結果.....	4-17
圖 5.1 一維 FDM 入滲數值模型 .....	5-4
圖 5.2 擬合室內入滲試驗依時壓力水頭變化成果.....	5-6
圖 5.3 FDM 模型與室內砂柱試驗依時水位變化比較.....	5-7
圖 5.4 場址位置圖 .....	5-8
圖 5.5 監測儀器配置圖 .....	5-10
圖 5.6 監測剖面示意圖 .....	5-10
圖 5.7 ID02 地下水位監測數據.....	5-11
圖 5.8 ID05 地下水位監測數據.....	5-12
圖 5.9 降雨特徵參數定義示意圖 .....	5-13
圖 5.10 累積雨量與岩層水位上升高度關係圖.....	5-14
圖 5.11 崩積層雨量門檻延時與對數累積雨量關係圖.....	5-14
圖 5.12 累積雨量與地下水位高度關係圖.....	5-15
圖 5.13 崩積層地下水位上升速率與體積含水量關係圖.....	5-15
圖 5.14 ID 05 體積含水量監測數據 .....	5-16
圖 5.15 各測站傾斜角監測數據.....	5-17
圖 5.16 場址崩積層地下含水層水位觀測結果(2018 年 7 月至 12 月) .....	5-18
圖 5.17 深層場址 event A 一維垂直入滲 FDM 模型.....	5-20

圖 5.18 降雨事件下短期水位模擬成果(Event A).....	5-22
圖 5.19 無限邊坡下場址坡體依時安全係數評估結果(以 Event A 為例) .....	5-23
圖 5.20 南市道 175 線場址地理位置圖.....	5-24
圖 5.21 南市道 175 線滑動塊體與監測點分佈圖(青山工程 2019)....	5-25
圖 5.22 南市道 175 線地質剖面圖(青山工程 2019).....	5-26
圖 5.23 南市道 175 線場址監測模組配置.....	5-27
圖 5.24 南市道 175 線場址監測模組現場架設圖(1/2).....	5-28
圖 5.25 南市道 175 線場址監測模組現場架設圖(2/2).....	5-29
圖 5.26 南市道 175 線場址地下水位監測成果.....	5-31
圖 5.27 南市道 175 線上邊坡地表傾角監測成果.....	5-32
圖 5.28 ID3 累積雨量與岩層水位上升高度關係圖 .....	5-32
圖 5.29 ID4 累積雨量與岩層水位上升高度關係圖 .....	5-33
圖 5.30 ID2 崩積層雨量門檻延時與對數累積雨量關係圖 .....	5-33
圖 5.31 ID2 累積雨量與崩積層水位上升高度關係圖 .....	5-34
圖 5.32 南市道 175 線下邊坡含水量計監測成果.....	5-35
圖 5.33 南市道 175 牆頂(ID5)傾角監測結果.....	5-36
圖 5.34 南市道 175 擋土柱頂(ID6)傾角監測結果.....	5-37
圖 5.35 南市道 175 牆底(ID7)傾角監測結果.....	5-38
圖 6.1 邊坡擋土系統數值分析流程圖 .....	6-3
圖 6.2 總體滑動分析幾何示意圖 .....	6-4
圖 6.3 局部擋土系統分析地下水位幾何建立示意圖.....	6-7
圖 6.4 降雨入滲分析-飽和度與位移圖:(上)6 小時，(下)24 小時.....	6-10
圖 6.5 降雨入滲分析滑動面(a)0 小時(b)6 小時(c) 24 小時 .....	6-11

圖 6.6 降雨入滲分析最終破壞位移圖 .....	6-12
圖 6.7 台 20 線 52k 邊坡及擋土系統剖面圖 .....	6-13
圖 6.8 台 20 線牆體與地錨示意圖(台 20 線護坡排水改善工程竣工圖 2013) .....	6-13
圖 6.9 台 20 線總體滑動數值模型 .....	6-14
圖 6.10 台 20 線 52k 總體滑動分析結果 (a)擋土牆水深 1 m (b)擋土牆水 深 10 m (c)擋土牆+10 ton 地錨系統水深 1m(d)擋土牆+10ton 地錨 系統水深 10m(e)擋土牆+50ton 地錨系統水深 1m(f)擋土牆+50 ton 地錨系統水深 10m .....	6-15
圖 6.11 台 20 線局部擋土系統模型模擬 .....	6-16
圖 6.12 台 20 線局部擋土牆系統地下水位分析結果(a)地下水位與 FS (b) 地錨強度折減與 FS (c)低水位(10m)滑動面示意圖 (d)高水位(2m) 滑動面示意圖 .....	6-17
圖 6.13 台 20 線局部擋土系統地下水位分析-位移圖: (a)牆體位移; (b) 路面位移; (c)牆頂傾角 .....	6-18
圖 6.14 台 20 線局部擋土系統地下水位分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分 布(b)地錨軸力(c)1 號樁彎矩分布(d)2 號樁彎矩分布 .....	6-19
圖 6.15 台 20 線局部擋土系統地下水位分析-逐步破壞圖(a)牆體位移(b) 路面沉陷(c)牆頂傾角 .....	6-20
圖 6.16 台 20 線局部擋土系統地下水位引致破壞位移圖 .....	6-21
圖 6.17 台 20 線分層含水量率定紀錄 .....	6-21
圖 6.18 台 20 線水力參數率定結果 .....	6-22
圖 6.19 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲分析結果(a)安全係數(b)滑動 面 .....	6-23
圖 6.20 下邊坡整治後局部擋土牆系統降雨入滲分析結果(a)安全係數(b) 滑動面 .....	6-23

圖 6.21 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲地錨強度折減分析 (a)安全係數(b)滑動面.....	6-24
圖 6.22 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分布(b)地錨軸力(c)1 號樁彎矩分布(d)2 號樁彎矩分布 .....	6-25
圖 6.23 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲引致位移圖.....	6-26
圖 6.24 台 20 線 A-A'剖面傾斜管量測資料(改自青山工程 2019).....	6-28
圖 6.25 市道 175 牆體與地錨配置圖(青山工程 2019).....	6-30
圖 6.26 市道 175 線總體滑動分析結果(a)擋土牆水深 2m(b)擋土牆水深 12m(c)擋土牆+10 噸地錨水深 2m(d)擋土牆+10 噸地錨水深 12m(e)擋土牆+50 噸地錨水深 2m(f)擋土牆+50 噸地錨水深 12m .....	6-31
圖 6.27 市道 175 線局部擋土系統模擬模型.....	6-32
圖 6.28 市道 175 線局部擋土牆系統地下水位分析結果(a)地下水位與 FS (b)地錨強度折減與 FS(c)低水位滑動面圖(d)高水位滑動面圖 .....	6-33
圖 6.29 南市道 175 線局部擋土系統地下水位分析-位移圖(a)牆體位移 (b)路面沉陷(c)牆頂傾角.....	6-34
圖 6.30 市道 175 線局部擋土系統地下水位分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分布(b)地錨軸力(c)排樁彎矩分布 .....	6-35
圖 6.31 市道 175 線局部擋土系統地下水位分析-逐步破壞圖(a)牆體位移 (b)路面沉陷 .....	6-36
圖 6.32 市道 175 線局部擋土系統地下水位引致破壞位移圖.....	6-36
圖 6.33 市道 175 線局部擋土牆系統降雨入滲分析結果(a)安全係數(b)滑動面.....	6-37
圖 6.34 市道 175 線局部擋土牆系統降雨入滲分析-位移圖(a)牆體位移 (b)路面沉陷(c)牆頂傾角.....	6-38

圖 6.35 南市道 175 線局部擋土系統降雨入滲分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分布(b)地錨軸力(c)排樁彎矩分布 .....	6-39
圖 6.36 市道 175 線降雨入滲地錨強度折減分析結果(a)安全係數(b)滑動面 .....	6-40
圖 6.37 市道 175 線降雨入滲地錨強度折減破壞位移圖 .....	6-40
圖 6.38 南市道 175 線局部擋土系統降雨入滲分析(地錨極限強度 10 噸)-逐步破壞圖(a)牆體位移(b)路面沉陷(c)牆頂傾角 .....	6-41
圖 6.39 南市道 175 線場址地質剖面與傾斜管量測資料(青山工程, 2019) .....	6-43
圖 7.1 ThingSpeak 雲端即時顯示平台 .....	7-2
圖 7.2 即時監測平台架構圖 .....	7-3
圖 7.3 身分驗證系統 .....	7-4
圖 7.4 即時監測平台主頁面 .....	7-6
圖 7.5 即時資訊-監測儀器狀態 .....	7-6
圖 7.6 即時資訊-雨量 .....	7-6
圖 7.7 即時資訊-地下水位 .....	7-7
圖 7.8 即時資訊-傾角變化 .....	7-7
圖 7.9 即時資訊-傾角變化資料下載頁面 .....	7-8
圖 7.10 使用者管理頁面 .....	7-8
圖 7.11 即時監測平台警戒值管理 .....	7-9
圖 7.12 傾角管理值達到警戒值 .....	7-10
圖 7.13 自動預警通知郵件 .....	7-10
圖 7.14 資料通知設定 .....	7-11



## 表目錄

表 1-1 運輸研究所歷年與本計畫相關研究案列表 .....	1-4
表 4-1 模組資訊表 .....	4-12
表 5-1 一維地下水補注擬合輸入參數 .....	5-5
表 5-2 台 20 線 52k 測站配置表 .....	5-9
表 5-3 場址短降雨延時之有效水位上升事件整理 .....	5-19
表 5-4 Event A 最佳擬合參數 .....	5-21
表 5-5 南市道 175 線場址模組配置總表 .....	5-27
表 6-1 地層材料參數 .....	6-4
表 6-2 擋土系統結構元素參數 .....	6-5
表 6-3 總體滑動分析成果 .....	6-6
表 6-4 局部擋土系統分析-地下水位引致 .....	6-8
表 6-5 台 20 線場址警戒值整理 .....	6-27
表 6-6 南市道 175 線土層室內試驗結果(青山工程 2019) .....	6-29
表 6-7 南市道 175 線場址警戒值整理 .....	6-42



# 第一章 緒論

## 1.1 研究計畫之背景、目的及重要性

### 1.1.1 計畫背景

山區道路因降雨引致之邊坡破壞具有一定之延時與前期徵兆，使得此類災害之預警較為可行且易發揮成效。現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，其準確性與過往案例取得資料有絕對關聯性，隨著極端氣候發生頻率與強度增高，其準確性需時常進行滾動式修正，本研究以解析法分析並搭配無線土層反應監測模組，針對公路土壤邊坡可能遭遇降雨引致之土層滑動破壞，發展適用於崩積土層之解析法依時預警模式，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提升預警之準確度與時效性，利於相關單位對此類災害預警及管理之決策參考。

現有公路邊坡預警系統主要為沿用坡地治理常用之降雨做為預警依據，以降雨特徵做為指標(交通部運輸研究所, 2014)，少數案例已引進 CCD 攝影機、雨量計、GPS、地震儀 (交通部運輸研究所, 2011)與地表運動及土層滑動監測(廖瑞堂等, 2008)，但並未將地形、地質特徵與場址入滲行為一併考量。而現有公路養護單位所用之時雨量及累積雨量警戒共有「預警」、「警戒」及「行動」3 個等級，因降雨為地滑發生之間接指標，警戒值多由過往案例統計而得，缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下之極端降雨破壞類型，而多數高風險邊坡場址多已設置擋土支撐系統，針對個別擋土支撐場址滑動，缺乏類似降雨指標之經驗法預警，此類預警系統常流於過於保守及無法提供反應時間，而以大區域降雨做為指標時，無法考慮場址實際降雨。整體而言，經驗法因簡單且資料較易取得，因此廣為使用且具有一定之準確性，但因其具有相當不確定性，導致應用與特定場址時其準確度常有不足，作為區域防災預警尚為可行，但對重要交通區段預警減災策略擬定常有不足之處。

解析法為以嚴謹的力學概念為基礎，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、地質材料力學行為及土壤-擋土系統互制之影響，探討邊坡滑動機制發生原因、過程與影響範圍，其流程具有通用性與客觀性，且成果具有場址客製化之特性，但此類分析需有詳細現地調查，土層資料與擋土系統設計圖等，且其分析過程複雜，因此相關研究較少，但其對於改善預警精度、建立依時預警模式、與減災設施規劃等具有前瞻性。

現今對邊坡預警之趨勢為整合考慮地形、地質材料特性之場址破壞機制分析，搭配即時監測相關引致滑動之土層物理量與地層運動之預警系統，此類預警技術包含兩部分，其一藉由地質探勘與地形測量，建立場址地質模型並據以進行解析法分析，預測其滑動機制、範圍及不同階段警戒值；其二佈設監測硬體於反應敏感之位置，進行即時土層監測並發佈警報。目前以數值方法進行崩塌機制分析已有相當進展，但是現地土層邊坡預警監測系統仍有價格昂貴、佈設不易及維護困難等瓶頸，因此發展具備無線土層與支撐系統監測之模組化系統，對於推廣以解析法為依據之公路邊坡降雨崩塌預警系統具重要關鍵。

本計畫延續前期「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發」及「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」研究成果，擴充至道路邊坡擋土系統破壞預測與預警，結合考慮土層入滲及力學反應之土壤邊坡滑動解析法，及土壤結構互制分析，建立以嚴謹水力及力學原理及具代表性現地材料參數為基礎之邊坡與擋土系統分析架構，並以運研所已發展之土層無線監測模組為基礎，監測土層變形、入滲、水壓及牆體變位等資料，測試以即時場址無線感測資料搭配雲端運算之依時預警系統雛形，以利相關權責單位對此類災害預防及災後管理之決策參考，研發基於力學理論，可依場址幾何與材料特性分析，建立客製化之監測預警系統。

### 1.1.2 計畫目的

本計畫係依據行政院「104年災害防救白皮書」課題七：「建立潛在大規模崩塌防災警戒機制」，結合具相當經驗與基礎之技術研發，擴大災害防救科技研發與技術支援能量，強化資訊綜整與分析研判機制，將研發能量由「技術支援」提升至「政策支持」，使政府面臨災害防救重大決策時，能夠及時獲得正確資訊。而108年度「海洋及交通運輸防災技術研發計畫」研商會議中確定本年度計畫目標，針對公路邊坡與擋土系統因降雨引致之土層滑動與擋土系統破壞，進行解析法分析並搭配無線土層及支撐系統土壤結構互制反應之監測模組，研發測試適用於土層邊坡與擋土系統之解析法依時預警模式，以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性。

因不同滑動類型其機制與反應不同，可監測之預警指標亦不同，本計畫以運研所發展中之土層無線監測模組，建立場址土層水文及力學無線感測網路，發展降雨引致深土層崩塌之土層監測預警模式之雛形。計畫結合嚴謹力學概念為基礎之解析法與邊坡無線土層監測模組，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、材料力學行為之影響，發展場址客製化淺層與深土層公路邊坡降雨崩塌預警系統，利用建立之場址地質模型進行水力力學耦合(coupled hydro-mechanical)邊坡滑動分析，探討崩塌機制發生原因、過程與影響範圍，預測邊坡依時性反應，除作為表層土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據外，因可預測邊坡之滑動面、滑動歷時等，故預警精度、正確性、滑動時間及滑動體積皆可評估，可用來改善預警精度、建立依時預警模式與減災設施規劃等。

本年度(109年)計畫為延續前期「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發」、106年「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」、107年「公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發」及108年「公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」研究成果，各年度研究成果彙整如表1-1所列：

表 1-1 運輸研究所歷年與本計畫相關研究案列表

年度	案名	研究目的	實驗場域	研究成果
104	公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)	開發軟硬體技術	無	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 淺層滑動依時分析架構</li> <li>● 硬體元件組裝整合</li> </ul>
105	公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)	淺層滑動分析、模組現地測試	甲仙攔河堰	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現地無線監測模組性能測試</li> <li>● 結合場址數值分析成果，提出客製化依時預警架構</li> </ul>
106	公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發	深層滑動分析發展、深層模組研發整合	甲仙攔河堰、阿里山五彎仔	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 深層滑動潛勢場址水力力學耦合解析法分析技術</li> <li>● 研發土壤深層滑動之無線監測模組</li> </ul>
107	公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發	深層滑動分析精進、深層模組現地測試	甲仙攔河堰、阿里山五彎仔、台 20 線 52k	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 精進無線感測網路模組，增加雲端監看功能</li> <li>● 建立降雨特徵對地下水水位變化模式</li> <li>● 飽和層滑動極限平衡理論推導</li> </ul>
108	公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升	系統線地整合測試、擴充擋土支撐系統分析	甲仙攔河堰、阿里山五彎仔、台 20 線 52k	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 相關量測元件更新或修復</li> <li>● 提出擋土牆體反應與地下水水位為指標之預警值</li> <li>● 個別場址之雲端顯示與管理平台</li> </ul>

109 年度針對前期發展之公路土壤邊坡崩塌監測無線感測網路模組進行維護並持續精進及功能擴充，由前期進行之公路土壤邊坡淺層崩塌無線感測網路模組延伸至土壤飽和土層滑動監測，尤其針對公路土壤邊坡可能遭遇到破壞面位於飽和土層之滑動崩塌解析技術，而為因應邊坡飽和土層滑動場址多已整治，因此 108 年度起於水力力學耦合分析之邊坡穩定架構中，加入擋土設施之互制反應，並搭配之擋土系統監測系統與對應之預警指標，並已有初步成果。

本研究長期目標為利用不同複雜程度之解析法，建立以嚴謹力學原理及具代表性現地材料參數為基礎之分析架構，結合運研所發展中之土層無線監測模組為基礎，研發與解析法搭配之無線感測飽和土層滑動與擋土系統反應監測模組，建立場址土層水文、力學及支撐系統反應無線感測網路，研發降雨引致土層崩塌與支撐牆體損壞之監測預警模式與架構，以利災害預防及災後管理之決策參考。

運研所現有淺層滑動無線感測網路模組為依據淺層滑動特性所研發，具有經濟、低成本、快速安裝與無線傳輸等特性，但因飽和土層滑動機制與淺層不同，飽和土層滑動破壞，其場址具有坡角小於土壤有效摩擦角、土層厚度大於數公尺且現場地下水系發達或入滲速率快之條件，因此其監測之物理量與淺層滑動有所不同，本研究以運研所發展之表層無線監測模組為基礎，加入開孔水位量測，108 年度起並開始研發測試現地擋土系統監測模組，結合飽和土層滑動之機制與土壤結構互制分析，建立場址孔隙水壓及力學反應無線感測網路，發展降雨引致飽和土層崩塌之監測預警模式之雛形。因研發技術基於力學理論，可依場址幾何與材料特性分析，建立以地下水位、地表傾斜及牆體傾角為指標之客製化之監測預警系統。

本研究整體計畫執行之連貫性包括：

1. 針對前期發展之公路土壤邊坡崩塌監測無線感測網路模組持續精進，並擴充於擋土支撐系統監測。

2. 前期進行之公路土壤邊坡崩塌無線感測網路模組發展，已涵蓋以飽和地下水位為分界，水位上下的破壞機制不同，並依不同破壞機制選定預警指標，本研究所發展之監測配置設計將可使用於表層與飽和土層滑動之公路土壤邊坡。
3. 不同土層邊坡滑動及擋土支撐系統損壞之型態不同，其監測標的與指標亦應有所差異，本研究監測儀器保有快速安裝與無線傳輸等特性，計畫除持續精進監測模組穩定性外，並將邊坡擋土支撐系統納入監測與分析架構，以符合現地概況並貼近實務應用。

## 1.2 研究範圍與對象

本年度(109年)計畫除淺層滑動監測站維護外，並針對滑動面發生於飽和土層之飽和土層滑動解析與支撐牆體系統監測進行精進，飽和土層滑動其力學平衡因地下水位上升及滲流影響，使其孔隙水壓與下滑力增加，引致土壤強度降低導致邊坡滑動。解析法分析將以前期針對淺層滑動所發展之無限邊坡極限平衡與二維邊坡因降雨入滲引致破壞之數值模式，進一步考慮降雨引致之地下水水力反應，考慮滑動面於飽和區，進行土層有效應力分析，發展具飽合土層層滑動潛勢場址之水力力學耦合分析技術，評估其滑動面、滑動歷時及水力反應，作為監測量測物理量選定與預警模式之依據。擋土支撐系統分析將考慮水力力學耦合效應下土壤結構互制行為，分析支撐系統於破壞前土體水力條件與對應之牆體變形，以作為預警監測之指標與相關警戒值擬定。

運研所港研中心已於甲仙攔河堰西側通達道路邊坡進行數年淺層滑動監測雲端即時站，108年起於阿里山公路五彎仔增設淺層滑動測站，其採用廣為應用於物聯網(Internet of Things, IoT)之微機電系統(Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角及土中分層含水量之監測模組，形成分布式表層土壤感測網路，並於108年完成將廣域通訊系統由3G更新為4G

，109 年度以監測資料精進雲端整合預警平台。107 年度開始利用此模組之架構，加入降雨引致飽和土層滑動之指標物理量，量測值包括地表傾斜、現地雨量監測、入滲速率、地下孔隙水壓等，研發適用於土壤邊坡飽和土層滑動且具低成本易安裝特點之無線監測模組，108 年飽和土層監測站並增加崩積層開孔式孔隙水壓監測，及擋土牆傾角監測。109 年度除進行原有測站維護外，持續精進地下水壓依時預測模式，並新增一高潛勢山區道路擋土系統監測，精進前期擋土系統監測與預警技術。

### 1.3 研究內容與項目

本計畫著眼於落實應用解析法邊坡與支撐系統結構體反應分析及對應之分佈式監測技術之研發，以提供降雨地層入滲及滲流量對實際土中水壓與支撐結構反應，做為邊坡穩定與擋土支撐系統分析即時更新參數，達到現地依時預警功能。本年度計畫工作項目條列如下：

1. 針對運研所已架設之公路土壤邊坡淺層崩塌監測無線感測網路模組 2 處場址，持續進行監測與現地測試，並精進現有模組資料分析模式。
2. 針對運研所現有潛在飽和層滑動監測場址，持續進行監測與資料分析，發展地下孔隙水壓升降與降雨特徵之推估模式，增加擋土支撐系統監測與穩定分析，整合於依時預警模式。
3. 精進雲端依時預警系統架構，包括量測資料更新儲存、雲端穩定性分析，場址客製化依時預警模式及相關警報通知等功能。
4. 參考科技部科技計畫績效管考平台，就本計畫成果之特性，選填合適績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究成果及重大突破。

針對 109 年度研究之內容與項目說明如下：

1. 現有淺層崩塌場址持續觀測與資料分析模式精進：目前運研所已建置甲仙攔河堰通達道路邊坡及阿里山公路五彎仔路段邊坡兩處淺層滑動觀測場址，此兩場址為本研究團隊協助建置，各年度工作事項如下：
  - (1) 108 年度完成系統精進廣域 4G 網路更新。
  - (2) 109 年度持續對測站進行硬體維護，且另對觀測資料分析進行精進，主要為入滲速率及依時預警校正，並據以提出滾動修正預警值。
2. 深層滑動場址持續監測與資料分析精進：運研所於 107 年度於台 20 線 52k 佈設飽和土層滑動監測場址，利用原有公路局五工處 60 m 鑽孔及成大李德河教授之 40 m 鑽孔作為深層開孔水位觀測井，並於道路上邊坡鑽設孔底位於崩積層底部之約 15 m 之開孔水位觀測井，各年度工作事項如下：
  - (1) 108 年度因此路段進行整治而有部分儀器先行拆除。
  - (2) 109 年度將原有系統復原並持續觀測，另以水位觀測與雨量監測結果，建立飽和層孔隙水壓升降與降雨特徵之關聯，建立時間域孔隙水壓推估模式，結合邊坡極限平衡分析，達到依時預警之目的。此外並將於南市道 175 線之潛在飽和土層滑動引致之擋土支撐系統損壞之場址，新增監測場址，進行邊坡土體及擋土支撐互制反應觀測與分析，結合水力力學耦合解析法，建構並測試邊坡牆體依時預警系統。
3. 精進雲端依時預警系統架構：本團隊於 108 年協助運研所建立雲端整合系統，以 Python 為架構撰寫將現有測站整合之程式，並以雲端虛擬主機進行運行，現有功能包括量測資料即時顯示、資料更新備份、模組狀態警示及分層管理權限等功能，109 年度擴充雲端穩定分析計算結果於客製化依時預警模式，達到依時警告通知之功能。
4. 飽和層滑動場址傳統極限平衡及有效應力數值分析反算與驗證：研

究團隊於 107 年度已推導以孔隙水壓比為指標之無限邊坡極限平衡方程式，並建構二維有效應力邊坡數值分析，109 年度以現地觀測成果，進行土壤參數反算及分析模式驗證，同時將現地擋土系統亦列入分析考量，以利現地應用。

5. 科技計畫績效管考平台填寫：包括學術成就，技術創新及社會影響三個面項。

## 1.4 預期成果、效益及應用

本研究之核心為開發可快速佈設且具依時特性之公路土壤邊坡地表監測破壞預警技術，研究成果提供交通部、公路總局、養護工程處及各工務段等單位，做為相關防災啟動之參據。預期完成之成果與效益包括如下：

預期成果：

1. 建立以嚴謹力學概念及考慮現地材料參數為基礎之解析法土壤邊坡滑動分析架構，並將擋土支撐土壤結構互制效應加入分析，以此建立公路土壤邊坡滑動預警模式。
2. 引入物聯網及大數據分析，針對山區公路不同土壤邊坡滑動現象，結合資料感測、分析研判、數據傳輸功能，研發與分析整合之之邊坡無線監測網路。
3. 發展解析法客製化之公路土壤邊坡滑動與支撐系統穩定性監測與預警技術，提升預警準確度。

## 第二章 研究方法及進行步驟

### 2.1 研究方法

本計畫與現有公路邊坡預警系統主要差異為考慮土壤淺層與飽和土層破壞機制不同，並將土壤與擋土支撐互制作用一併考慮，發展以土層水力反應、地表位移、牆體傾斜及牆後水位為指標之預警模式，研發搭配之崩積層邊坡無線監測模組，監測系統具有快速佈設與單價便宜之特點，克服傳統土中監測安裝費時與設備昂貴之限制。監測模組以物聯網常用之軟硬體，採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤濕度、孔隙水壓、雨量特徵、牆體傾斜等功能之監測模組，於數個邊坡反應靈敏之處佈設，形成分佈式表層土層反應感測網路。由於此類電子產品大量生產因此可大幅降低成本，且監測點位選定與分佈式監測感測模組反應詮釋一併考量，監測之結果亦可回饋解析與數值分析模式，此架構可做為開發快速佈設且具依時特性之公路邊坡破壞預警技術，及相關防災啟動之準據。

本計畫針對之破壞類型為包括滑動面位於非飽和土層之淺層滑動及滑動面位於飽和土層之飽和土層滑動，計畫結合考慮水力力學耦合之土層邊坡穩定分析及現地無線監測模組開發，整合此二主軸，發展具依時特性之公路土壤邊坡預警系統。

淺層滑動依時預警架構詳見前期報告(運研所,2017)，而較常見飽和土層依時預警架構流程如圖 2.1 所示，整體流程包括以解析與數值法為基礎之水力力學耦合分析，建立場址具依時特性之地表運動量(位移與傾角)、土層土壤水力反應與支撐系統變位等，結合本計畫研發之無線監測模組研發，即時監測土層力學與水力反應及支撐系統變化，修正水力力學耦合分析成果，並依修正結果推估滑動發生時間、滑動土體幾何性質與牆體變位，作為具依時特性之場址客製化預警系統。

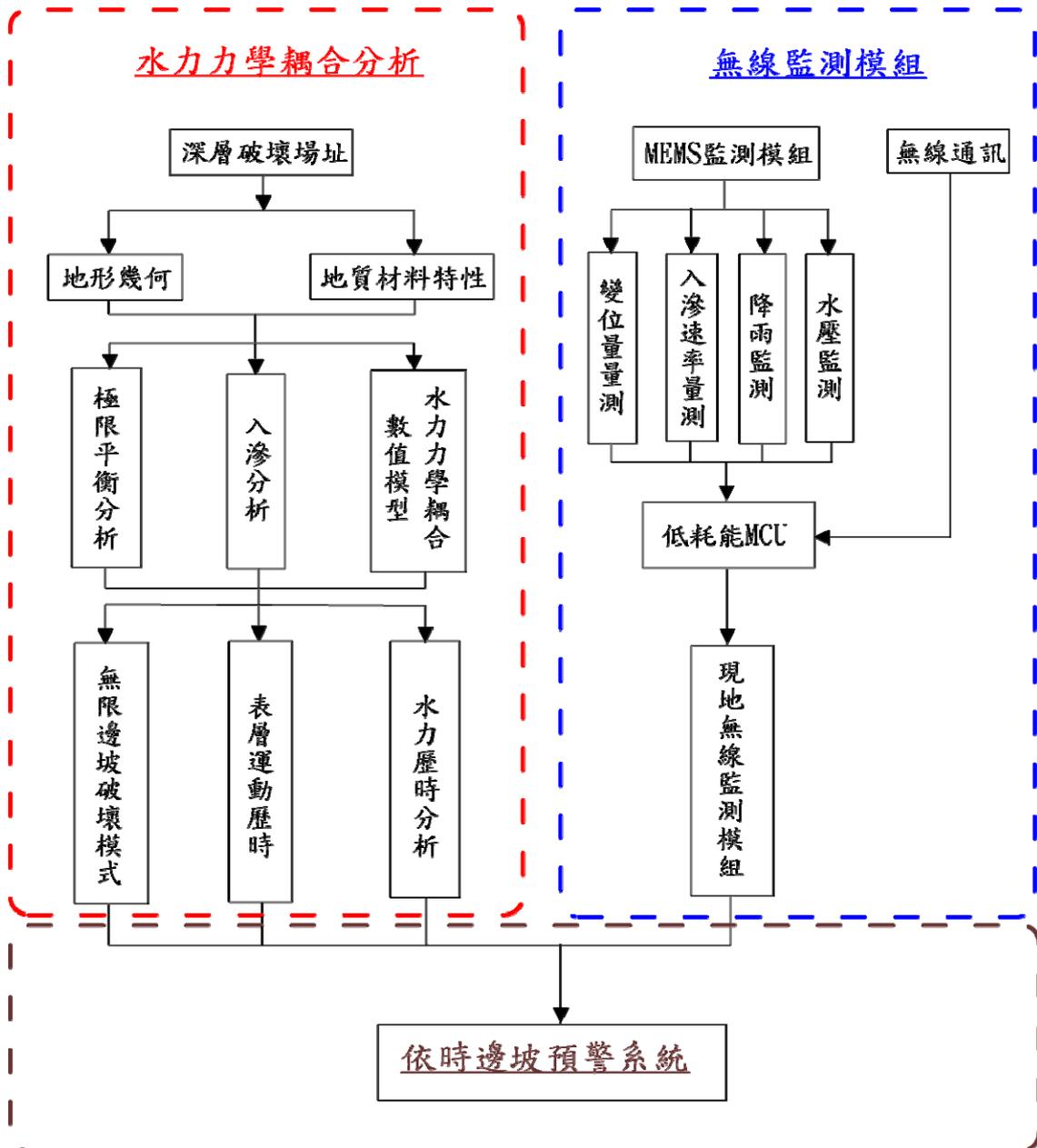


圖 2.1飽和土層依時邊坡預警系統架構圖

水力力學耦合分析包括考慮非飽合土壤中入滲及飽和區孔隙水壓變化特點，考慮水力邊界條件，求解 Richard's equation，以模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低及下滑力增加，考慮無限平衡分析即可進行與 Collins and Znidarcic(2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測若破壞其可能破壞之時間，此解析成果準確度有賴於入土層滲速率及土壤抗剪強度推估可靠度。臨界破壞深度與破壞包絡線分

析無法推估地表土層運動量，而地表特定位置之運動量推估有賴於複雜之數值模擬，本研究以假設現地合理之邊界與初始條件，相關假設於第五章及第六章說明，包含水力與力學邊界與初始條件，進行考慮入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果即時更新土壤有效應力及土壤勁度與強度，進行二維土層時域有效應力分析，以推估滑動土體於地表傾角歷時。

由於解析法邊坡穩定分析中輸入參數具有不確定性，因此須以現地監測結果反饋進行模式修正與調整，鑒於雨量預警具一定不確定性，而現有邊坡土層監測系統佈設費時且維護不易，因此本計畫以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤含水量、入滲速率、孔隙水壓力及降雨之監測模組，形成分佈式表層土壤無線感測網路。

淺層滑動監測架構中，入滲速率由不同深度之土中含水量變化，利用入滲引起含水量增加而改變土壤介電係數之特性，量測含水量剖面並據以推估入滲速率，所推估之入滲速率將用於考慮入滲之極限平衡分析，以推估其可能破壞時間，降雨前基質吸力由含水量結果及土壤特徵曲線推估，並作為數值分析之初始含水量依據。由水力力學耦合分析，可預測地表監測點之地表傾角與位移歷時，由監測之地表傾角與位移量可及時修正數值分析結果，並據以推估滑動之可能時間，作為依時預警之依據。

運研所 106 年度研究已完成飽和土層土壤無限邊坡分析架構，建立水力力學耦合分析架構，進行簡易表層邊坡無線監測模組之研發測試，選定阿里山公路五彎仔段進行測試場址，但此場址因陸續完成深層排水井整治，其常時地下水位低於地表下 40m，因此短期內再滑動之機率大幅降低，因此 107 年度起另於台 20 線 52k+150 處另設一監測場址，進行淺層入滲及崩積土層孔隙水壓即時監測，並於此場址設置雨量計，並完成此場址二維水力力學耦合穩定分析，但以二維水力力學耦合計算分析飽和土層破壞有下列侷限：

- (1) 無限邊坡中平行滲流之影響不可忽略；
- (2) 現地垂直入滲非為增加孔隙水壓之唯一因子；
- (3) 地下水需考慮整體集水區降雨與入滲特性；
- (4) 土壤非均質與強度不確定性

因此 107 年度起提出以長期水位觀測資料，建立場址地下水位升降與降雨前土壤狀態及降雨特徵關聯，搭配非耦合邊坡穩定分析，108 年度擴充監測擋土支撐系統反應及傾角預警值建立，109 年度將持續觀測並以現地觀測資料進行驗證測試，並新增飽和土層滑動場址，以完備飽和土層滑動依時預警。

## 2.2 國內外有關本計畫之研究情況

### 2.2.1 解析法邊坡分析

美國交通研究委員會(TRB,1996)依邊坡破壞之材料種類及運動方式，將邊坡崩塌型態分類，依照滑動材料可區分為岩層(rock)、岩屑(debris)及土壤(soil)，而根據崩塌運動類型，區分為墜落(fall)、傾覆(toppling)、滑移(slide)、側移(spreads)及流動(flow)等五種基本類型。Kurahashi (2008)分析 1990~2004 年期間日本 1310 個公路崩塌災點，發現約有 90%的崩塌災害是因為降雨造成的，且 80%是表層破壞造成的崩塌。

多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲除增加土坡的下滑力，同時會改變材料特性，在非飽和邊坡會因基質吸力減少使剪力強度下降，飽和土層則會增加其孔隙水壓力，使強度降低，因此水和土壤之耦合特性在邊坡穩定問題中是不可或缺的。經驗指出絕大部分因降雨而導致之崩積層坡地崩塌屬於淺層破壞(Cascini et al.2010)，破壞面深度約在 0.5 至 3m 之間，覆土壓力在 5 至 55kPa 之間。Cascini et al.(2010)歸納前人的研究，將此類淺層邊坡崩塌分析分成破

壞 (failure)，破壞後 (post-failure) 與擴散 (propagation) 三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。

Cascini et al.(2010)使用現地應力路徑 (field stress path) 的架構，將邊坡破壞後的行為分成地滑 (slide)，地滑變流動 (slide to flow) 與流動型地滑 (flow slide) 如圖 2.2 所示。其中之剪應力  $q$  定義為：

$$q = \left[ \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

而平均有效應力  $p'$  定義為：
$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (2.2)$$

$F_d$  代表地層內之驅動力， $F_r$  為抵抗力， $\delta$  為地層移動量。受到降雨入滲或地層內泉水之影響使得應力路徑往破壞線接近，當  $F_d$  與  $F_r$  相等時即發生邊坡破壞，但破壞發生後是否產生流動型地滑則取決於地層力學性質、地下水壓變化以及破壞時排水狀況的特性。大部分地滑式邊坡破壞屬於圖 2.2b 所示，破壞時  $q$  保持定值。圖 2.2c 為當邊坡破壞時產生應力轉移 (stress transfer) 或漸進式破壞使得破壞區之  $q$  增加。圖 2.2d 則發生於鬆土中，破壞發生後剪力破壞變成不排水應變軟化而流動 (Anderson and Sitar,1995)。

Huang et al.(2012)以光纖改測技術進行阿里山公路五彎仔段分層水壓即時量測，其於 2009 年莫拉克颱風期間之觀測結果如圖 2.3 所示，分層地下水位因降雨顯著增加，應力路徑隨孔隙水壓增加而接近土壤有效摩擦角  $40^\circ$  之無限邊坡破壞包絡線。Collins and Znidarcic(2004)提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，所以降雨對邊坡穩定在不考慮邊界毛細現象之情況下沒有影響。對於基質吸力降不顯著之粗顆粒土壤，其入滲行為(如圖 2.4 所示)因其非飽和與飽和狀態下滲透係數差異不大，反應與細顆粒顯著不同，其邊坡坡角( $\beta$ )小於土壤有效摩擦角，其滑動發生於正孔隙水壓處(圖 2.4 之 D 點)，此為飽和土層滑動之類型，本研究中無限邊坡飽和土層滑動以相近之概念進行推導。

但對非飽和細顆粒土壤邊坡而言，滲透對邊坡穩定有顯著的影響

，孔隙水壓在邊坡內部會隨著水向下入滲而改變，因此在分析凝聚性

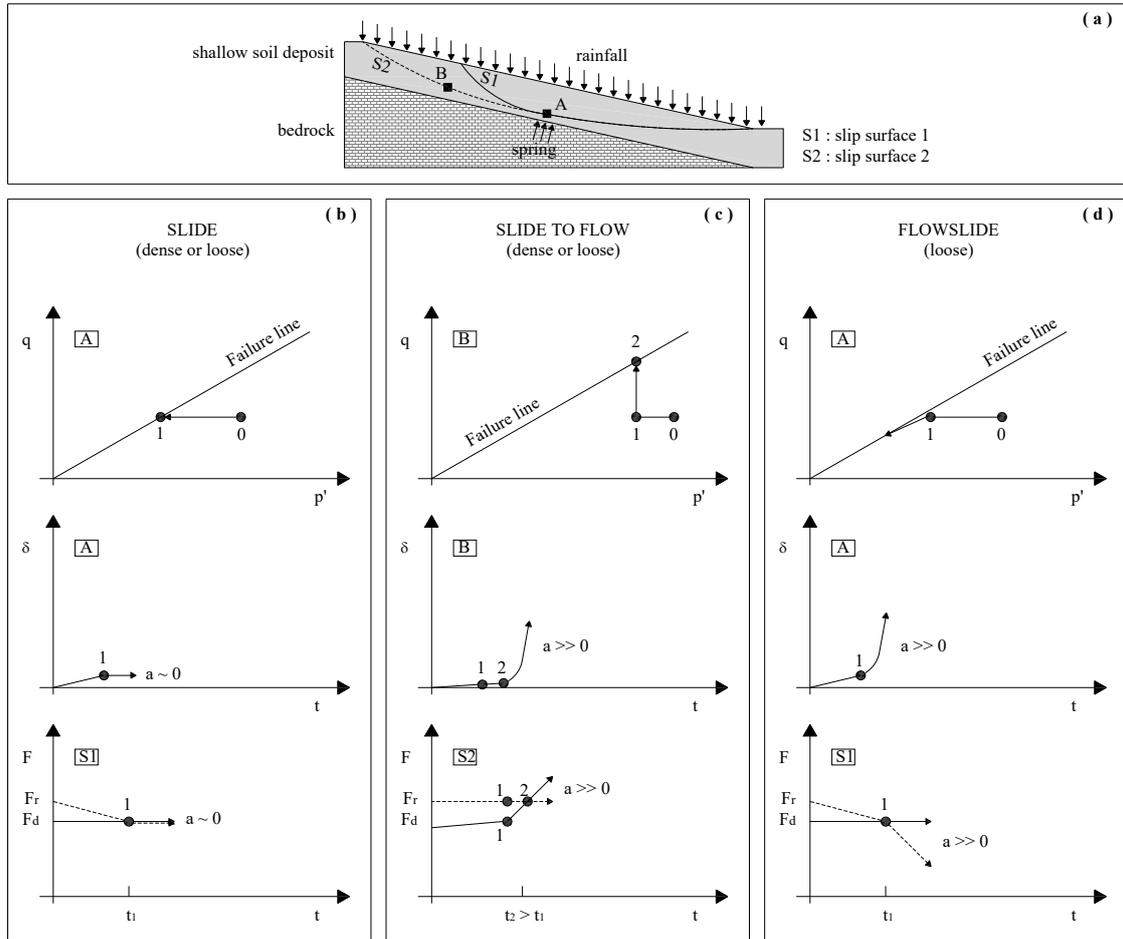


圖 2.2 邊坡破壞有效應力路徑變化(Cascini et al., 2010)

非飽和土壤邊坡穩定性時，須將非飽和土壤之剪力強度和基質吸力影響及滲流力列入考慮。Collins and Znidarcic (2004)以無限邊坡極限平衡分析，結合非飽和土壤之衍伸莫爾-庫倫破壞準則(Fredlund et al.,1978)，推估無限邊坡破壞之臨界深度( $d_{cr}$ )，考慮滲流力發展，將臨界深度表示為壓力水頭和土壤特性參數的函數，定義出土層壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係之穩定包絡線(圖 2.5)，此可做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。對無法滿足無限邊坡條件之案例，則進行考慮飽和與非飽和土壤特性之二維水力學耦合穩定分析，於進行滲流分析時同時進行力學分析，於暫態滲流分析過程中同步進行非線性大變形模擬計算，力學計算中考慮非飽和土壤基質吸力改變對有效應力之影響，

更新土壤彈性參數及強度，模擬邊坡土層因降雨引致之破壞過程。

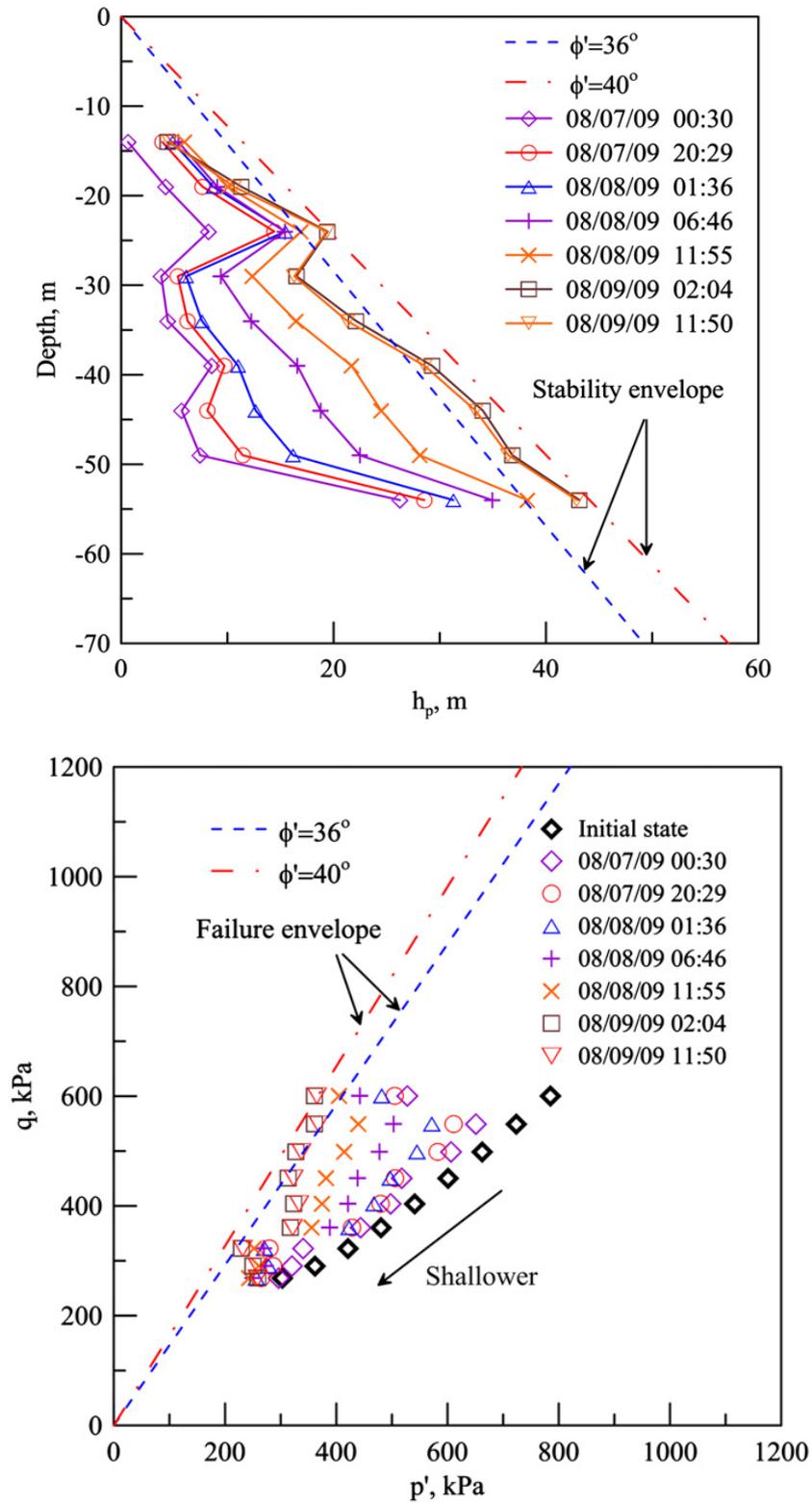


圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)

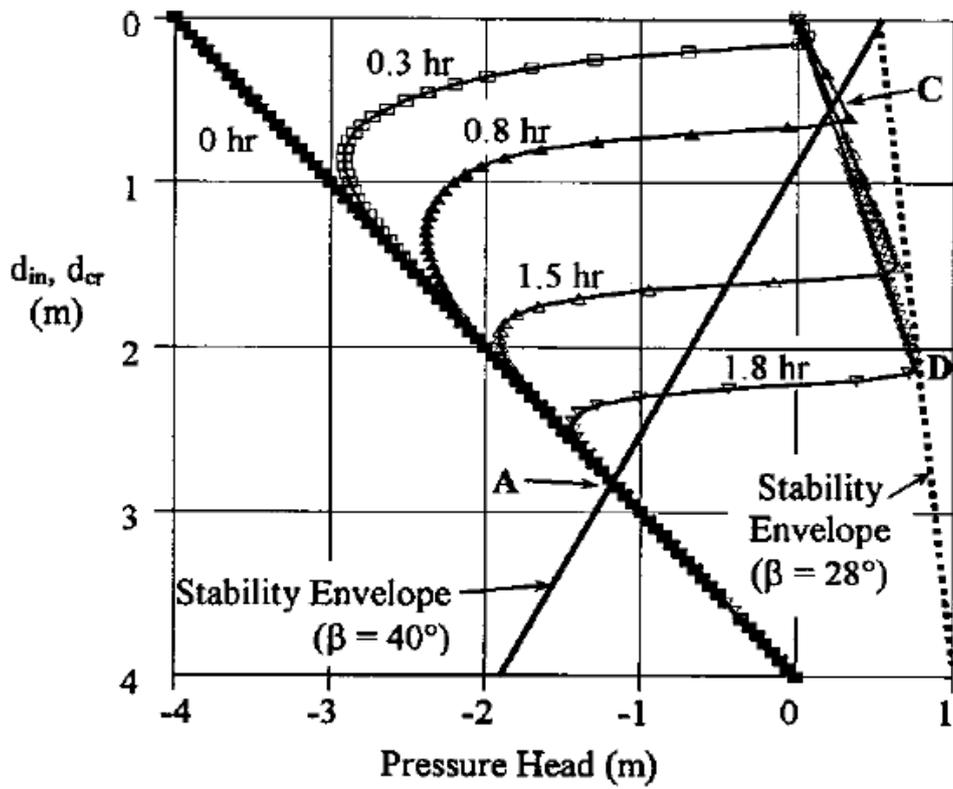


圖 2.4 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

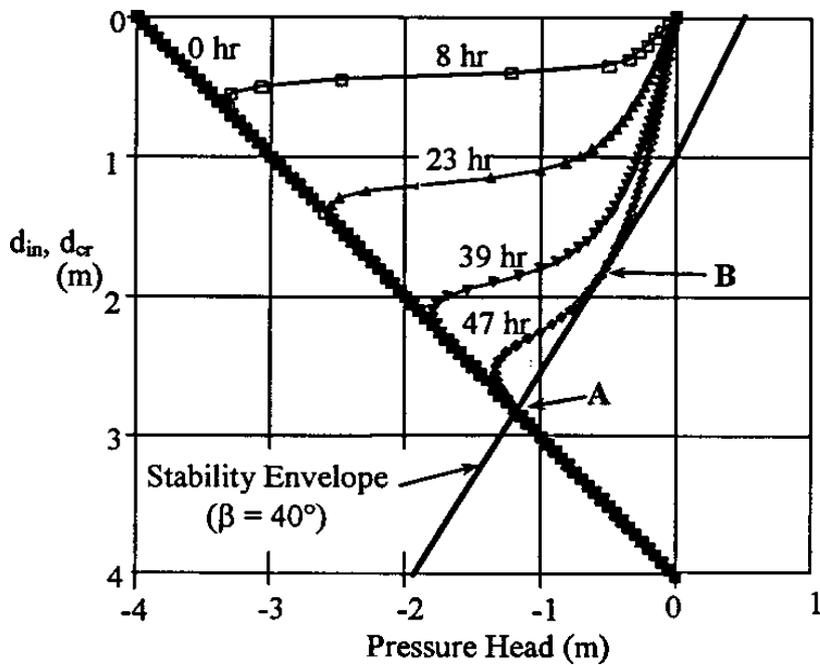


圖 2.5 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

## 2.2.2 邊坡監測預警

目前國內外所採用之道路邊坡監測系統(儀器)種類繁多，常見之監測儀器可分為：(1)土中位移監測，(2)地表位移監測，(3)水壓或地下水位監測，(4)雨量監測，(5)土壓監測，(6)擋土結構監測等，可依據邊坡之可能破壞模式及風險性之不同進行分級，對於風險性較低或較穩定之邊坡，選擇簡易及較經濟之監測系統加以監測，對於風險性較高或較不穩定之邊坡，則需選擇較完整之監測系統(運研所, 2013)。黃安斌等(2002)應用光纖感測(Fiber Optic Sensor,FOS)和時域反射法(Time Domain Reflectometry,TDR)使用上孔(Up-hole)電子儀器，透過多點式的光纖光柵感測器配合應變管之原理進行自動化，長時間、連續性地層變形監測，研究則研發完成包括地層錯動、水位監測、線性伸張以及雨量計等之監測儀器系統。

黃安斌等(2002)認為道路邊坡之安全監測涉及三個環節：(1)確保安全監測所得之物理量為合宜之參考物理量；(2)妥善進行監測所得物理量之詮釋；與(3)訂定合宜之預警基準應用於管理層次。結合參考物理量、物理量之詮釋及預警基準，道路防災管理方能落實。依運研所(2011)研究指出，道路邊坡之監測系統可概分為人工記讀系統以及自動化系統，自動化系統其組成包括：(1)感測單元；(2)資料擷取單元；(3)資料傳輸單元；(4)資料儲存、展現或分析單元；以及(5)電源供應等五個單元。其中感測單元感測現地物理量(如位移)或環境條件(如雨量)之變化，由資料擷取系統收集、記錄、篩選、判讀並經由資料傳輸單元送達遠端之資料儲存單元儲存、展現或分析資料，並可發送現地警報通知相關人員。

Uchimura et al.(2008)發展一簡易邊坡預警監測系統，其僅監測表面位移傾角及坡面含水量變化，系統配置如圖 2.6 所示，藉由無線網路可將地表運動與含水量變化傳送至監控中心，配合邊坡破壞前會有一顯著轉動之特性，可進行必要之預警，此系統已布設於多個場址，為現今具有較多應用案例之系統，國內則有張達德等(2013)以傾度儀結合 Zigbee 無線傳輸，於國道三號 3.1K 進行無線網路邊坡預警監測，但其

系統監測至破壞之時間不一，並無安裝位置之建議，對於非圓弧破壞其地表傾度並不顯著，且預警準則為經驗法則，缺乏嚴謹力學分析，仍有相當改善空間。李秉乾(2004)透過現地實測的結果，指出山區道路邊坡監測系統在整體架構上，以監測路段現地資料的接收及整合為主要目的。

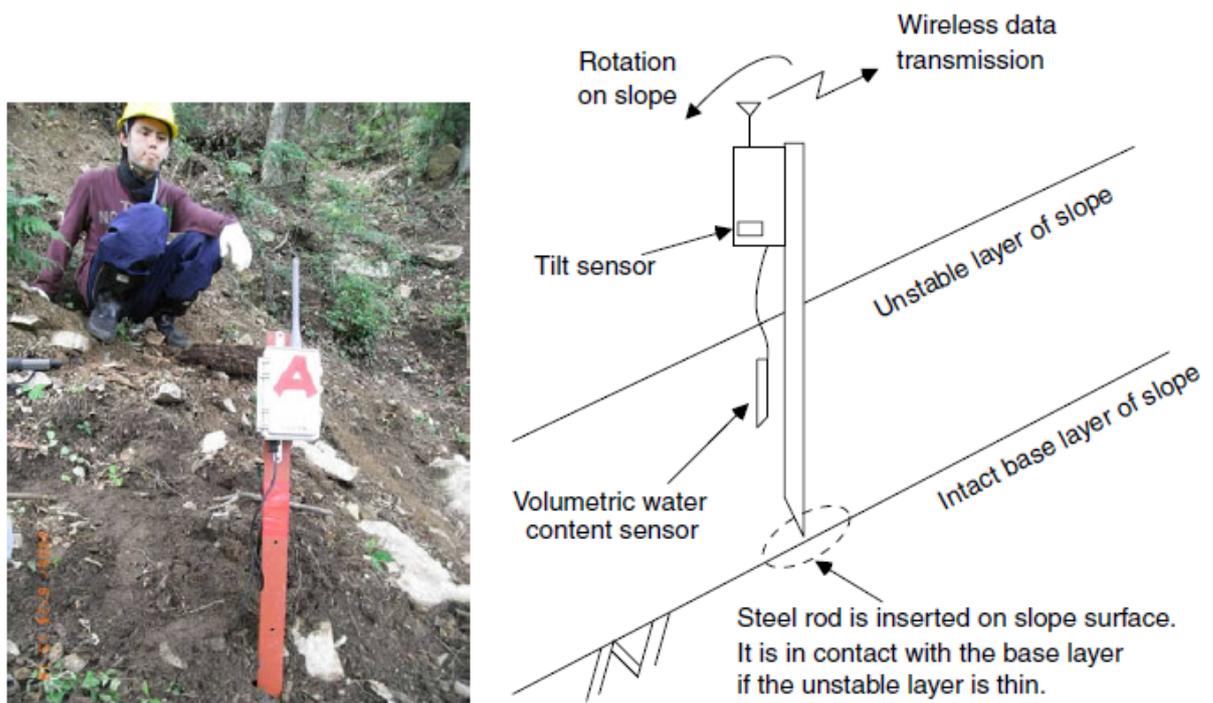


圖 2.6 地表邊坡預警監測系統(Uchimura et al., 2008)

現今物聯網為無線感測加上控制之功能，其中無線感測為重要之部分。為充分利用臺灣於高科技產業之優勢，陳志芳等(2017)及 Chou et al.(2017)採用廣為應用之微機電系統(MEMS)感測器，發展可監測地表傾角(tilting)、淺層土壤濕度(soil moisture)以推估土壤基質吸力 (matric suction)之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分布式無線感測器網路，由於其元件可大量生產，可大幅降低成本，現有研究之長期目標為建立模組化低成本、快速安裝之分布式無線邊坡即時感測網路，以利於推廣。張文忠等(2019)以運研所邊坡感測模組為基礎，擴充其應用於飽和土層破壞監測，並加入支撐牆體傾角監測，發展對應之依時預警架構。

由於監測點位選定與分佈式無線感測器網路反應詮釋與滑動機制相關，為增進預警系統之準確度，監測網路佈設前進行地質模型建立及邊坡滑動與牆體互制數值分析，此結果可用於監測模組佈設，而監測之結果亦可回饋數值分析模式，本計畫結合無線分佈式表層感測系統與解析成果，建立可快速佈設且具依時特性之公路邊坡破壞預警系統，以此流程建立客製化場址不同階段預警值，做為相關防災作為啟動之準據。

## 2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警

道路土壤邊坡依其機制可分為淺層與飽和層滑動，二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，本研究以解析法整合地形、地質材料及水文特性之場址破壞機制分析，搭配水力力學耦合試驗了解降雨對土壤應力狀態之影響程度，以探討邊坡滑動機制，並作為依時預警系統之理論架構。

### 2.3.1 非飽和土層入滲分析與入滲試驗

實務上考慮滲透情形下的邊坡穩定分析，大多利用提高地下水位以模擬降雨入滲過程中孔隙水壓增加的現象，但孔隙水壓的變化受到土壤本身的滲透特性控制而有不同的反應。因非飽和土壤之基質吸力及飽和土層滲流力之變化和孔隙水壓在邊坡內的分布有密切關係，為得到孔隙水壓分布隨滲透的變化情形，需了解非飽和土壤水力特性及入滲之水力學機制。

非飽和土壤滲透係數隨基質吸力降低而增加，而非飽和土層基質吸力則與土壤飽和度(或含水量)改變而改變，其關係曲線稱之為土壤含水量特徵曲線(soil-water characteristic curve, SWCC)，含水量通常以體積含水量( $\theta$ )(土中孔隙水體積與總體積之比值)表示，亦可用重量含水量( $\omega$ )或飽和度( $S_r$ )表示，典型的土壤含水量特徵曲線如圖 2.7。非飽和土壤因基質吸力改變，在吸水(wetting)及排水(drying)的過程中會產生遲

滯效應，即在相同基質吸力下吸水曲線(wetting curve)上的含水量會低於排水曲線(drying curve)上的含水量，原因是排水後土壤顆粒排列變緊密，且在非飽和土壤中，滲透係數亦會受基質吸力的影響，稱為基質吸力-滲透係數曲線，典型細顆粒土壤基質吸力-滲透係數曲線如圖 2.8 所示。

假設水在非飽和土中的流動滿足達西定律，且非飽和土壤之滲透係數為土壤含水量的函數，土中水流動控制方程式可依質量守衡原理推導，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的暫態地下水流控制方程式，Freeze and Cherry (1979)假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在均質、均向土壤內之三維流體流動之控制方程式可以 Richard's equation 表示，以總水頭的形式表示為：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h_p) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h_p) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta(h_p)}{\partial t} \quad (2.3)$$

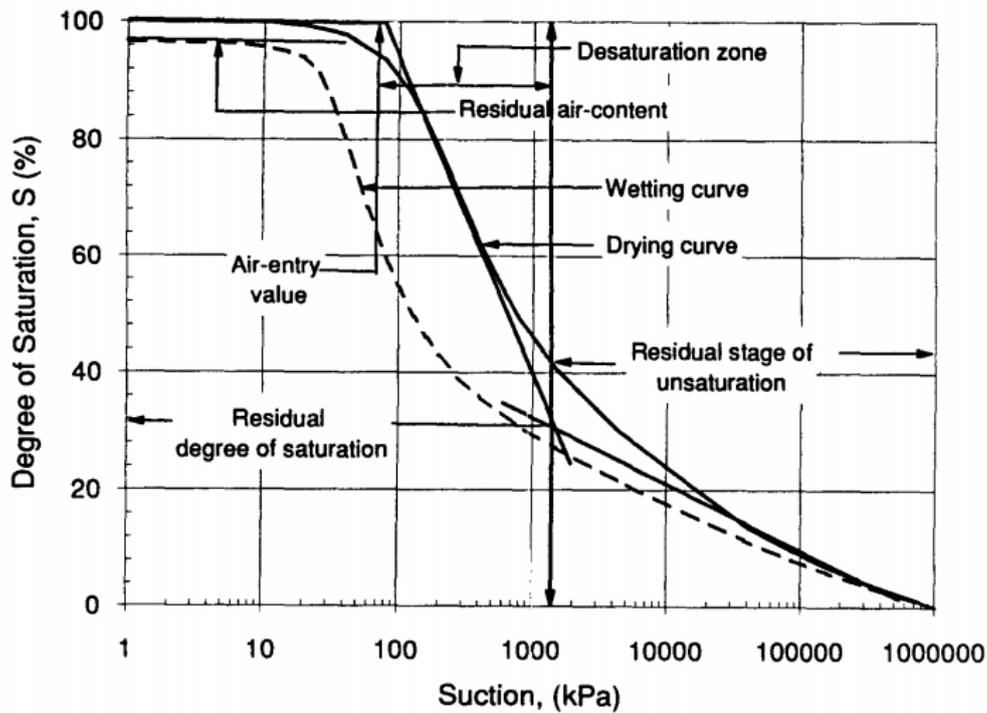


圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)

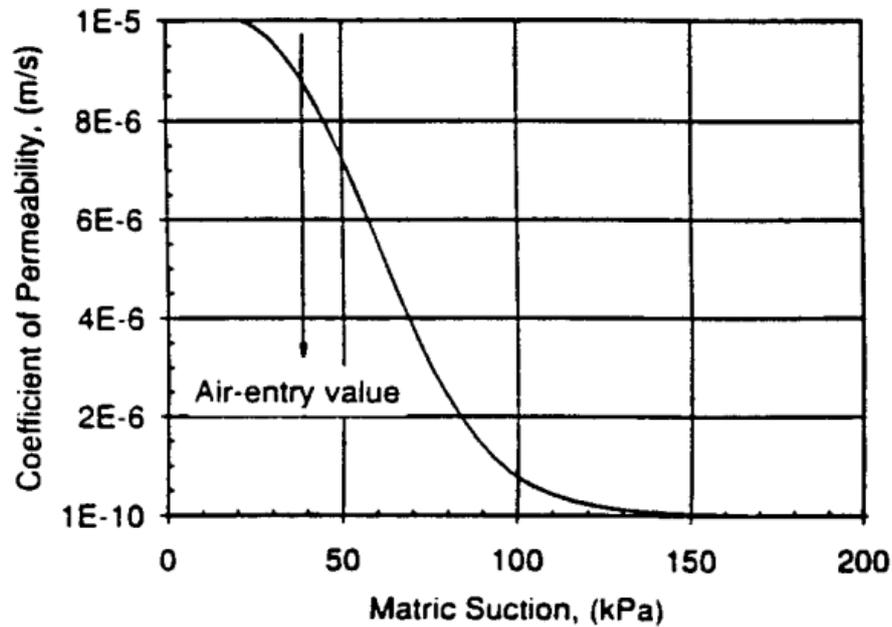


圖 2.8 典型細顆粒土壤土壤基質吸力-滲透係數曲線 (Fredlund, 1995)

式中  $h$ =總水頭； $\theta$ =體積含水量； $h_p$ =壓力水頭； $k$ =土壤滲透係數(為壓力水頭之函數)，給定初始及邊界條件，可計算土壤內總水頭(或壓力水頭)隨時間之變化，此控制方程式適用於飽和及非飽和土層。

自然邊坡中，若降雨大於入滲率，無法入滲之降雨會沿著邊坡表面流動形成逕流，使邊坡表面之壓力水頭為零，故降雨入滲分析時表面邊界條件非為入滲率控制，而是以壓力水頭控制。滲流使非飽和之土柱隨時間飽和，使細顆粒土壤的基質吸力減少，並使其剪力強度下降。考慮一維入滲下均質土體，根據質量守恆且土壤和水均不可壓縮，為簡化計算，假設土壤滲透係數  $k$  不隨深度改變(即  $\partial k(h_p)/\partial z = 0$ )，可得鉛垂向之一維 Richard's equation：

$$M(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial z} \right] \quad (2.4)$$

其中  $z$  為深度(地表為零且向下為正)； $h_p$ =壓力水頭； $k$ =土壤滲透係數(為壓力水頭之函數)，可由土水特性曲線決定； $M$ =孔隙水含容能力。以

Crank-Nicolson 有限差分法，滿足可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距水流不會超過一個網格距離，將式(2.4)改寫為差分形式：

$$M(h_p) \frac{h_{p,j}^{n+1} - h_{p,j}^n}{\Delta t} = \frac{k_{j+\frac{1}{2}} \left[ (h_{p,j+1}^{n+1} - h_{p,j}^{n+1}) + (h_{p,j+1}^n - h_{p,j}^n) \right]}{2\Delta z^2} - \frac{k_{j-\frac{1}{2}} \left[ (h_{p,j}^{n+1} - h_{p,j-1}^{n+1}) + (h_{p,j}^n - h_{p,j-1}^n) \right]}{2\Delta z^2} \quad (2.5)$$

為驗證一維分析模式之可靠度，以邊界條件和 Collins and Znidarcic (2004)相同，上邊界之使用壓力水頭為 0，下邊界條件為排水邊界，地下水位在 4m 處，基質吸力分佈為靜基質吸力分布，使用「典型」細顆粒土壤之土水特性曲線，解得之滲流分析結果和 Collins and Znidarcic (2004)以二維數值程式 SEEP/W 之結果比較如圖 2.9，可以發現趨勢大致上相同，但數值上有差異，可能是因為 SEEP/W 係利用有限元素法進行二維分析，而本計畫考慮後續推廣，以一維有限差分數值方法進行分析。

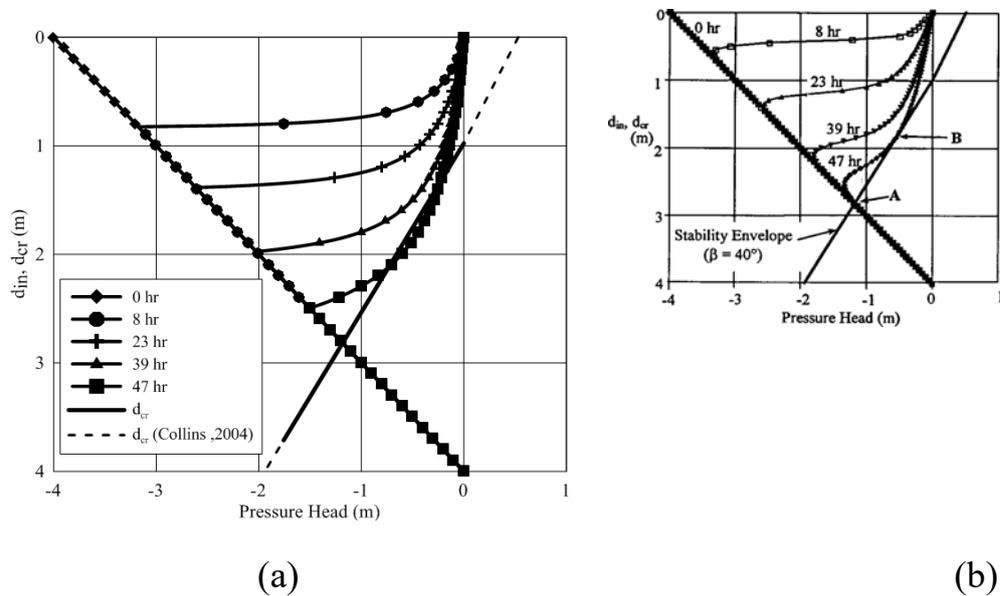


圖 2.9 非飽和滲流分析結果比較: (a)1D 有限差分(b) 2D 有限元素 (Collins and Znidarcic, 2004)

Freeze and Banner (1970)以室內砂柱入滲試驗模擬一地下水系統受垂直入滲補注之情況，其室內砂柱入滲試驗配置如圖 2.10 所示，具備分層張力計並可於砂柱試體底、頂部進行水流控制，由頂部進行水源供給，模擬地下降雨產生入滲行為，而底部閥門可進行排水作業，用以模擬水位下降行為，圖 2.11 為入滲補助試驗結果，其砂柱底部排水邊界滲漏常數設定為  $Q = -0.1 \text{ cm/min}$  之流速，頂部入滲邊界以一補注速率  $R = 0.2 \text{ cm/min}$  進行垂直入滲，圖中黑色實線為試驗結果，結果顯示，在頂部開始入滲後 12 min.左右，砂柱試體水位開始抬升，而各深度之壓力水頭也有逐漸增加之趨勢。後續將以 Freeze and Banner (1970)室內入滲試驗結果驗證時間域孔隙水壓推估模式，其試驗底、頂部之邊界符合本研究飽和土層滑動水力耦合入滲分析架構之需求，頂部為一入滲邊界，可依降雨強度進行調整，而底部為排水邊界，用以模擬地下水滲漏情況。

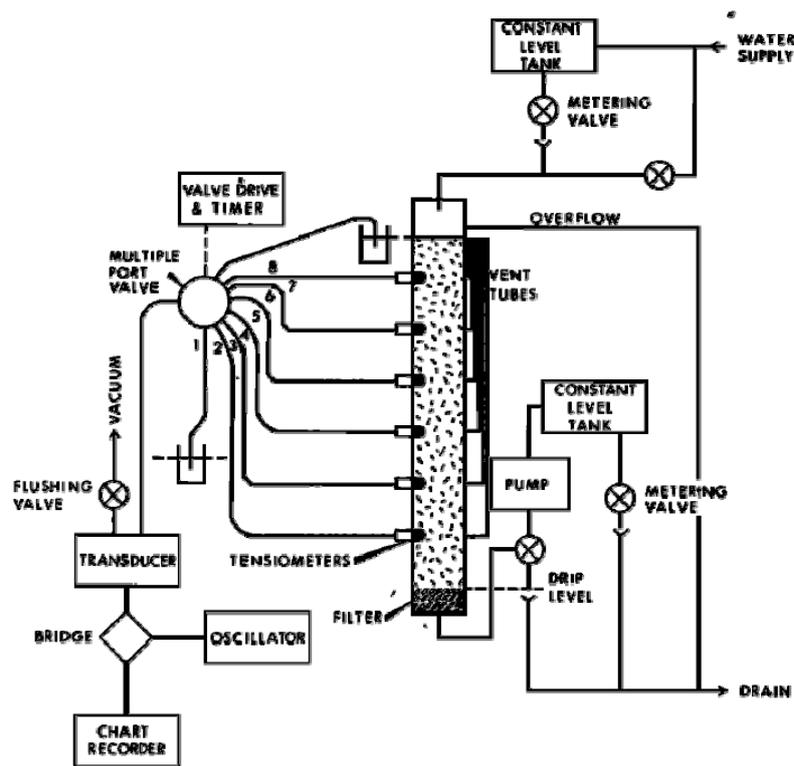


圖 2.10 室內砂柱入滲試驗配置 (Freeze and Banner, 1970)

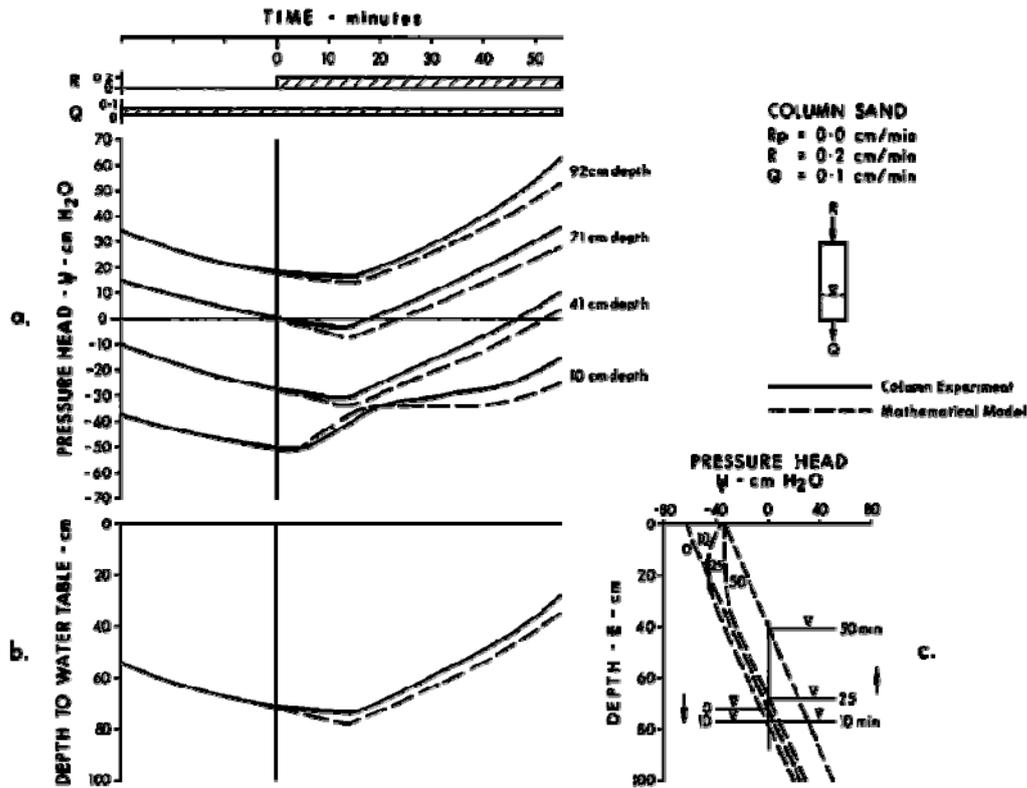


圖 2.11 垂直入滲補注地下水流試驗結果 (Freeze and Banner, 1970)

### 2.3.2 淺層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

參考 Collins and Znidarcic(2004)降雨下之無限邊坡穩定分析概念，推導無限邊坡之水力力學耦合穩定分析，考慮一坡角為  $\beta$  之無限長邊坡(如圖 2.12)，地下水位面位於  $d_w$  處， $W$  為自重， $N$  及  $S$  分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力， $d_{in}$  為入滲深度，假設邊坡破壞會發生在臨界深度  $d_{cr}$  處。切片內飽和部分( $z \leq d_{in}$ )以有效應力進行分析，土壤單位重為飽和單位重  $\gamma_s$ ，在土壤飽和部分會產生滲流，平行向滲流平行坡面，水力梯度為  $i_h = \sin \beta$ ，垂直向滲流由入滲造成，水力梯度  $i_v = 1$ ；切片內非飽和部分( $z > d_{in}$ )以總應力分析，土壤單位重為總體單位重  $\gamma_t$ ，其基質吸力之大小隨深度改變，即  $h_c = d_w - z$ 。

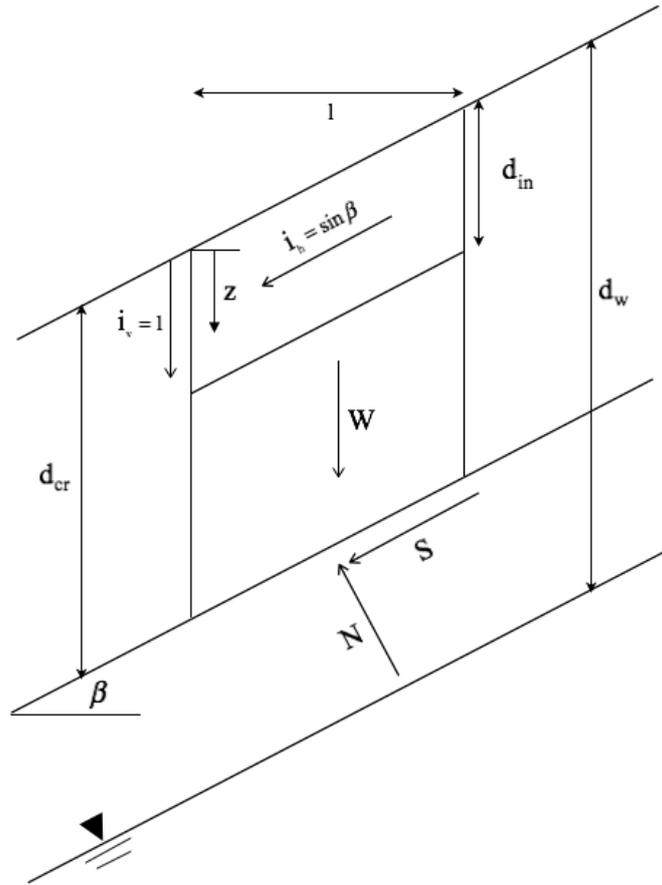


圖 2.12 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

滑動面上之正向應力及剪應力，如式(2.6a)及(2.6b)：

$$\sigma = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos^2 \beta \quad (2.6a)$$

$$\tau = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (2.6b)$$

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

$$\tau_f = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.7)$$

可推導臨界滑動深度  $d_{cr}$  為：

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in} - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} \quad (2.8)$$

式中  $c_t$  為非飽和土壤視凝聚力，由  $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c \tan \phi^b$ 、 $h_c = d_w - d_{cr}$ ，可將式(2.8)改寫為：

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr} \\ &= \frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \underbrace{\left( \frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲流}} - \underbrace{\frac{\gamma_w \cdot d_{in}}{\gamma_t} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'}}_{\text{水平滲流}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

考慮淺層滑動情形，不考慮水平滲流的影響並忽略入滲對土壤單位重的改變，所對應之安全係數(FS)為：

$$FS = \frac{c_t + \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.10)$$

當  $z = d_{cr}$  時  $FS = 1.0$ ，則式(2.10)可轉換為：

$$1 - \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot d_{cr} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (2.11)$$

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.12)$$

由  $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b$ ，可將式(2.12)改寫為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.13)$$

式(2.13)為非飽和邊坡穩定包絡線(stability envelope)公式，其基質吸力隨深度的分布  $h_c(z)$  可由 1-D 滲流分析解得，並代入式(2.13)進行迭代計算得到滑動面深度  $d_{cr}$ ，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

### 2.3.3 飽和層滑動無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

傳統無限邊坡飽和層滑動分析，以圖 2.13 所示符號，其安全係數為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \left( \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w r_u}{\gamma_{sat}} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.14)$$

式中  $r_u = \frac{h_w}{d_{cr}}$  為孔隙水壓比， $h_w$  為地下水位上升之總水頭高，包含靜水壓力與滲流引致之孔隙水壓。不考慮平行滲流時( $r_u = 1.0$ )，則式(2.14)可簡化為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma \tan \beta} \quad (2.15)$$

式中  $\gamma'$  為滑動面土壤浸水單位重。考慮平行滲流時，則  $r_u$  大於 1，造成安全係數降低直至破壞，其應力變化如圖 2.14 所示(Anderson and Sitar, 1995)。

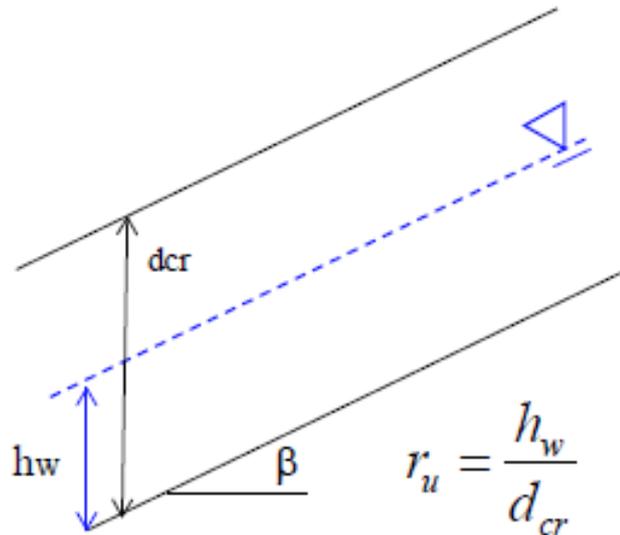


圖 2.13 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖

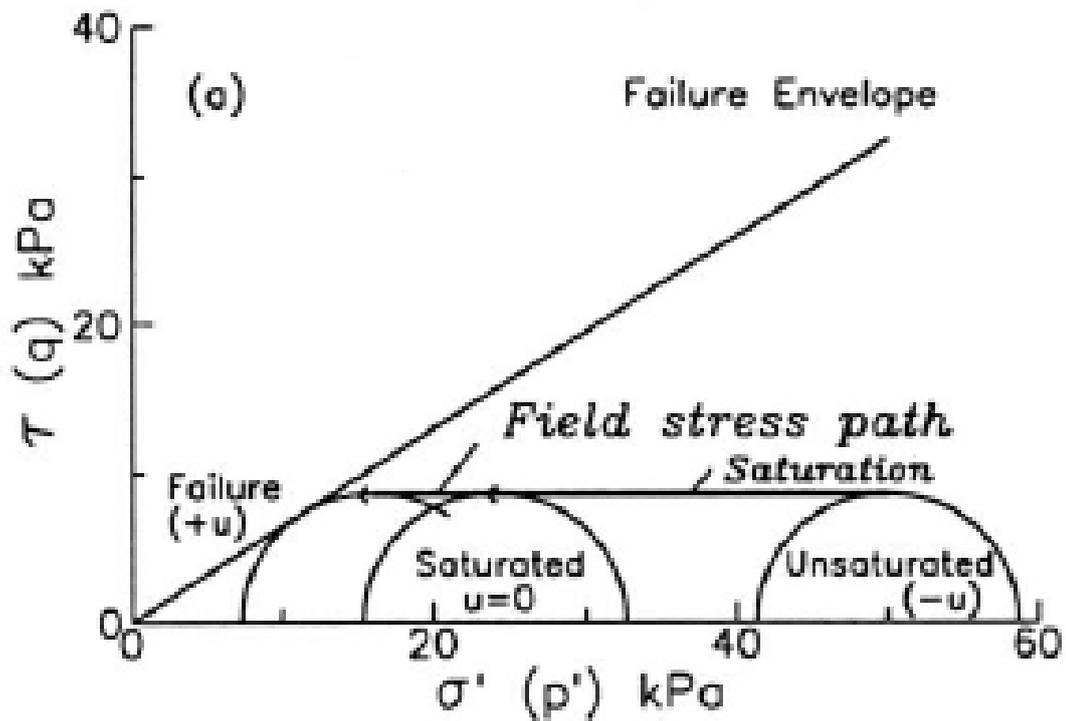


圖 2.14 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995)

此外由式(2.9)，若忽略基質吸力、基質吸力摩擦角與垂直滲流影響，將入滲轉換為孔隙水壓力，則式(2.9)中則其破壞模式即為飽和土層滑動，相同架構可建立具依時特性之滑動機制。

整體而言，臨界滑動面土壤孔隙水壓力對飽和土層無限邊坡穩定具有重大之影響，因此掌握孔隙水壓變化可有效推估現地邊坡穩定性並作為依時預警之指標。因 $r_u$ 為時間之函數，若由量測資料進行統計分析，或以整體集水區水文解析，建立孔隙水壓比與降雨特徵之關聯，建立 $r_u$ 預警值，結合現地水壓監測及飽和土層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論，可作為飽和土層依時預警之架構。

#### 2.3.4 二維水力力學耦合數值分析

由於無限邊坡分析僅適用於一維案例，且無法得到位移分佈、大小與方向及時間歷時，不利於監測點決定及位移量預測，因此前期研究引入結合土中入滲分析及飽和土層非線性有效應力分析，利用相同

的網格，於進行滲流分析時，將孔隙水壓傳遞給相同網格之土壤進行力學分析，入滲分析之結果可用於更新飽和土壤之彈性及強度，此程序可近似模擬水力力學耦合分析。

為進行初始非飽和土層水力力學耦合分析，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)進行初始為非飽和入滲轉換至飽和滲流分析狀態之模擬，並開啟力學分析功能，於暫態入滲分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且力學計算中考慮土壤孔隙水壓力改變對有效應力之影響，更新土壤彈性參數及強度，模擬初始非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程。進行分析時以修正之 Mohr-Coulomb 彈塑性組構模式，考慮其剪力強度( $\tau^{\max}$ )為：

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w (u_a - u_w) \tan \phi + c' \quad (2.16)$$

式中  $S_w$  為水之飽和度，基質吸力( $u_a - u_w$ )以  $P_c$  代表，其與水飽和度之關係以 van Genuchten (1980)建議之關係式表示如下：

$$P_c(S_w) = P_0 (S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \quad (2.17)$$

式中  $a$  為土壤常數， $S_e$  為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (2.18)$$

式中  $S_r$  為土壤殘餘飽和度，低於此值土壤水力與力學特性不再變化； $P_0$  為參考基質吸力，其值為：

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \quad (2.19)$$

式中  $\rho_w$  為水之密度， $\alpha$  為土壤常數。非飽和滲透係數以常用之 van Genuchten (1980) 建議之關係式表示，其與相對飽和度之關係為：

$$k_r = S_e \left[ 1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \quad (2.20)$$

式中  $k_r$  為相對滲透係數，不同飽和度滲透係數  $k(S_e)$  與飽和滲透係數  $k_{sat}$  為： $k(S_e) = k_r * k_{sat}$  (2.21)

分析時採用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為垂直不透水滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，設定初始基質吸力，初始飽和度為滑動土層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

甲仙監測場址二維維水力力學耦合分析其網格如圖 2.15 所示，其力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 2.16 所示，第一階段水由地表以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolation)。不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，同一剖面但不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 2.17 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動，其地表位移與傾角歷時如圖 2.18 所示，與不同深度達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，可預測於持續降雨入滲下於產生滑動時間，滑動時時土層均達到飽和，且地表開始有顯著傾角變化，因滑動面由淺層轉為深層，傾角為先正(順時針)後負，深層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

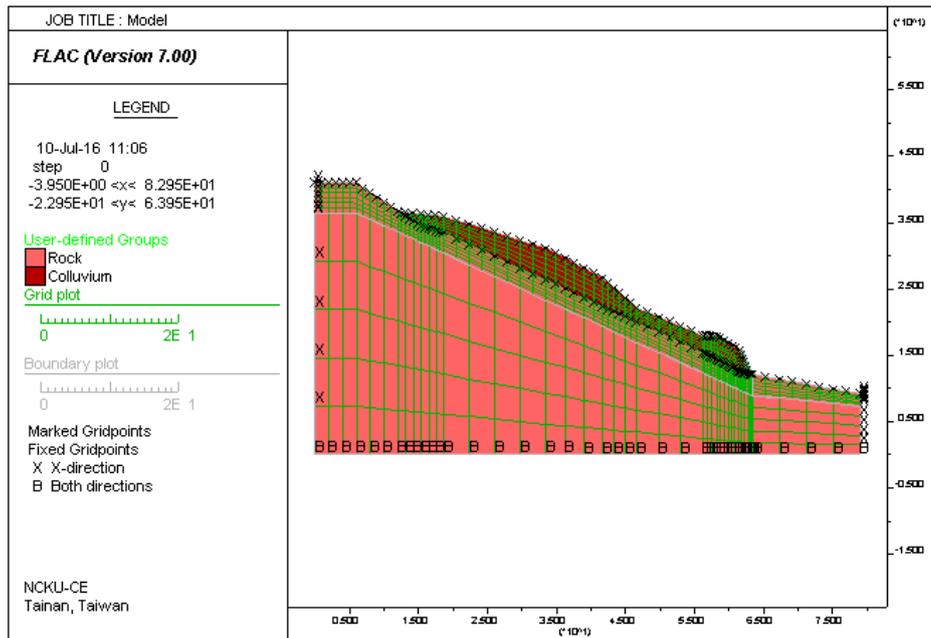


圖 2.15 數值分析模型



圖 2.16 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量

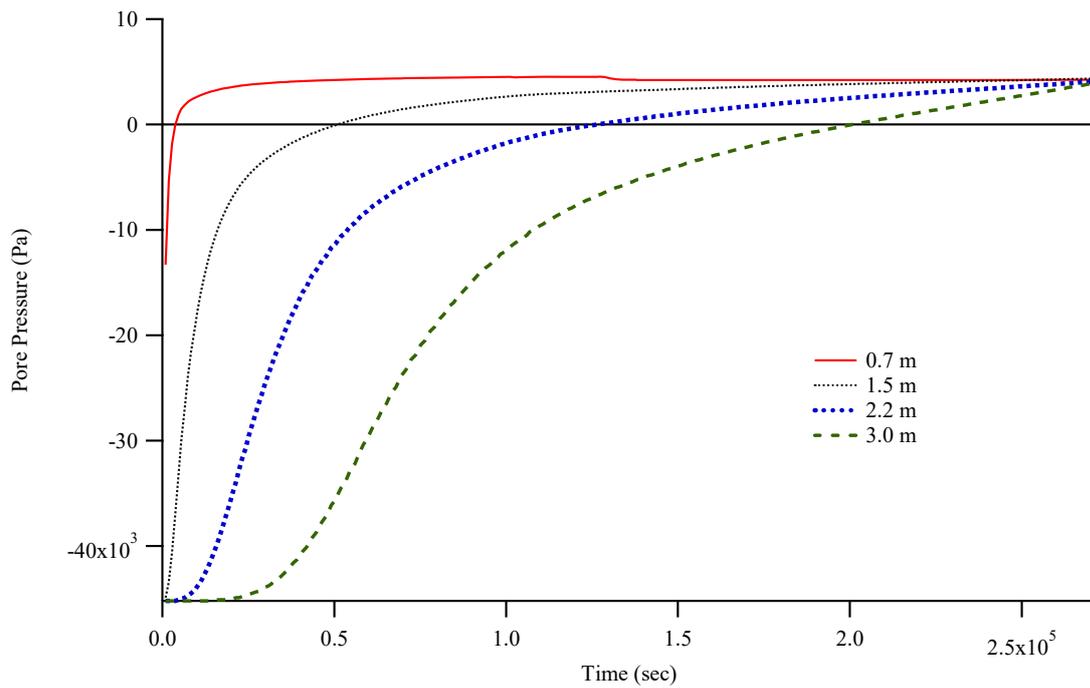


圖 2.17 同一剖面不同深度孔隙水壓歷時

### 2.3.5 邊坡依時預警架構

依時性邊坡預警系統可分為無限邊坡及二維水力力學分析，無限邊坡之依時預警以分析結果為例，若不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 2.19 所示，可推估破壞發生於地表飽和入滲開始後累積 42 小時，滑動面深度為 1.5m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果或 VG model 推估，在 0.75m 深度於破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.20 所示，由破壞時間(42hr)往前推算可決定不同時間所對應之體積含水量，若以破壞前 24 小時為預警時間，則所對應之體積含水量為 0.22，可由現地於 0.75m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.18 推估。

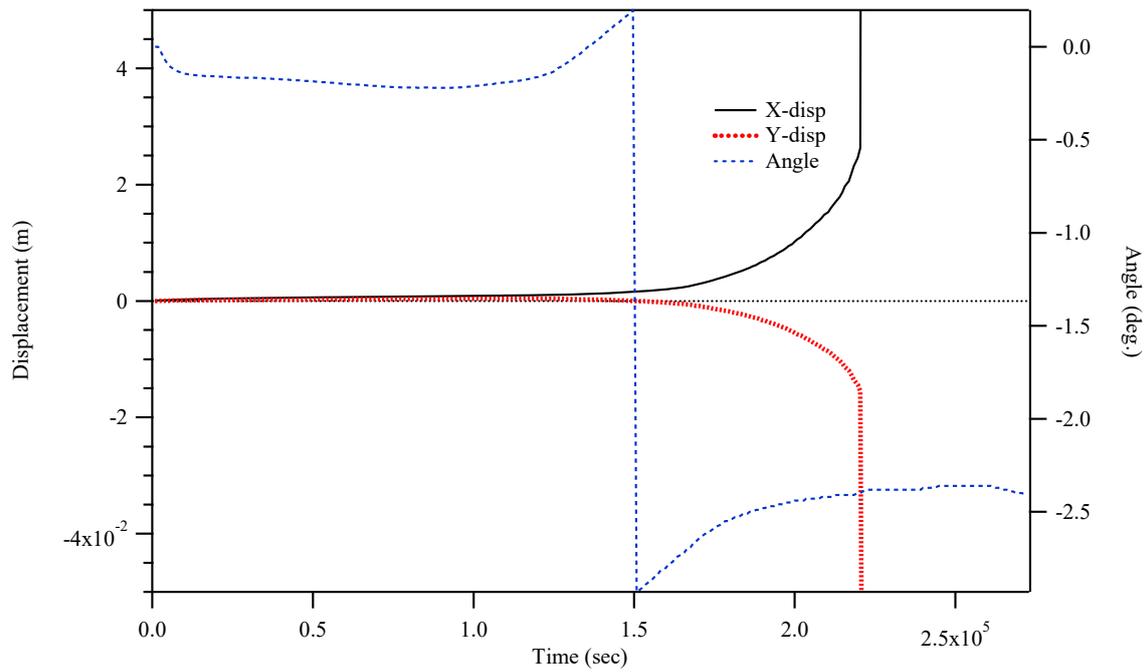


圖 2.18 預測地表運動歷時

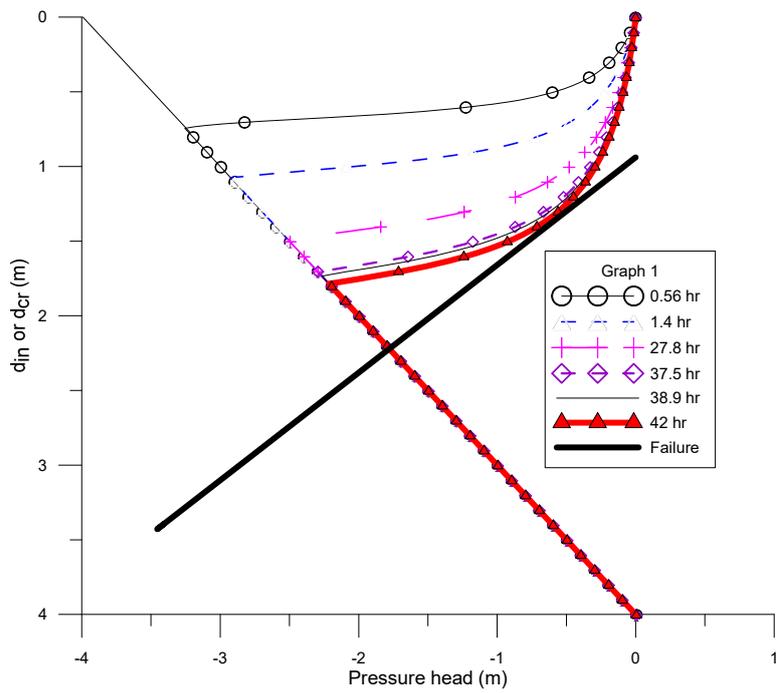


圖 2.19 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

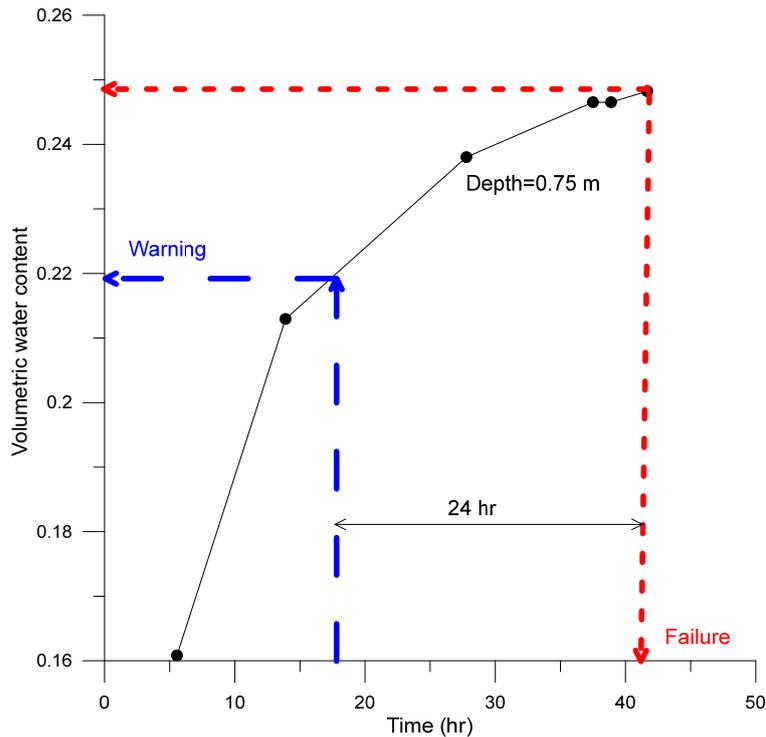


圖 2.20 深度 0.75m 體積含水量變化及依時預警概念

而二維案例以甲仙場址上邊坡為例，由 VG model 可推估其體積含水量變化，深度 1.5m 處含水量歷時如圖 2.21 所示，推估破壞時間為 61 小時，因此往前推算 24 小時所對應之體積含水量為 0.52，因此時已接近飽和，此數值較不可靠，此乃因所選場址土層厚度僅約 2.5m，且地下水位位於土層底部，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但地表傾度觀測結果如圖 2.22 所示，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，因此此類邊坡較適宜以地表傾角作為訂定依時預警之物理量。

由無限邊坡與二維分析結果顯示非飽和水力分析中滲透係數對破壞時間預測具有重要影響，但是此類參數求取不易，且會受降雨前地下水位或基質吸力大小之影響，因此相當複雜，而解決途徑之一為於降雨時進行現地監測水分變化，由其表層入滲流況推估，並可據以更新破壞時間推估曲線，精進以即時監測分層含水量作為警戒之用。

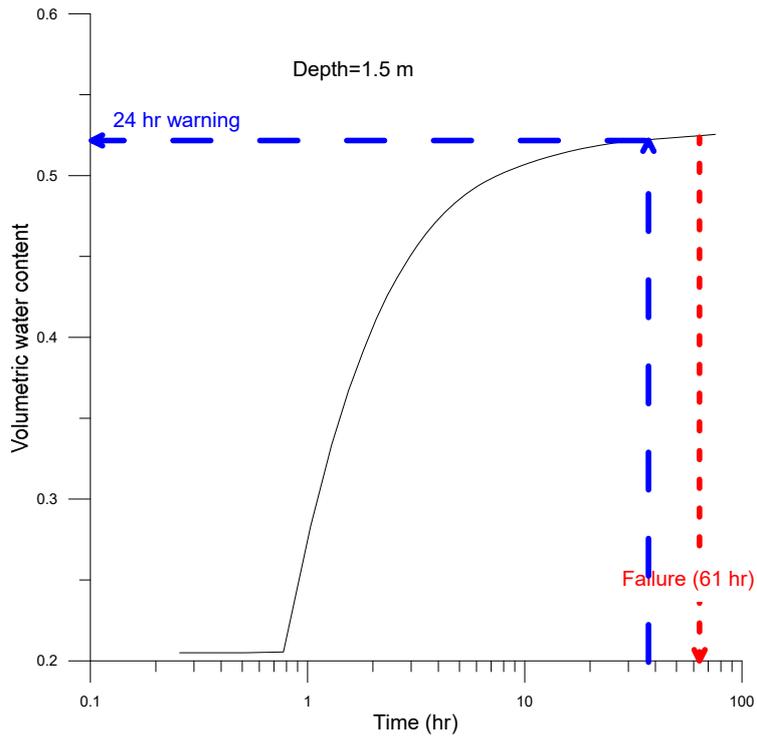


圖 2.21 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念

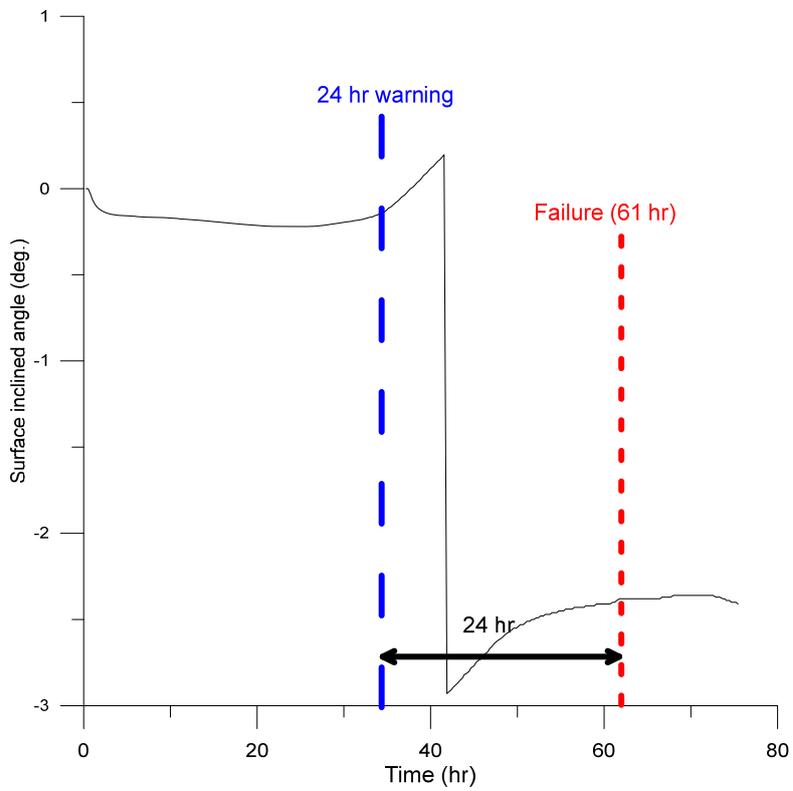


圖 2.22 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念

若現地符合無限邊坡條件，則可由現地土層參數及量測推估之滲透係數推估滑動深度及滑動之時間。若現地須進行二維分析，則由初期以合理假設之參數進行耦合分析，求得地表傾角與運動量分佈，作為無線監測模組安裝位置之依據，安裝時依滑動面選取包括最大運動及無顯著反應處，由初期無顯著破壞之監測值可先進行模式修正，雨季時由即時表層入滲及運動量據以修正依時預警歷時曲線及滑動面位置，相關不同階段之門檻值可由管理單位需求進行後續制定。由相關耦合分析結果顯示，以表層入滲行為與表層運動量監測推估破壞過程理論上可行，相關表層無線監測模組可依此成果進行硬體規劃，相關理論於模型與數值分析均已得到驗證，此架構應具一定之可信度。

應用於飽和土層滑動依時預警時須進行適度修正，針對一維無限邊坡飽和土層滑動，其滑動面仍以極限平衡分析，但滑動面深度與時間則與滑動面所在孔隙水壓變化及入滲後飽和土層滲流力大小有關，式(2.9)中之平行滲流力項須加以考慮，即飽和土層中除靜水壓力外尚須考慮原有飽和土層滲流引致之超額孔隙水壓力之影響，基質吸力效應則可忽略不計。而二維分析則需假設孔隙水壓上升條件或是包含上游邊坡入滲至飽和土層之影響，相關入滲分析與非飽和入滲相同。

因孔隙水壓力與深層邊坡穩定具學理之關聯，因此連結孔隙水壓變化與降雨特徵為改善現有純以降雨為指標之預警之關鍵，相關方法包括：(1)進行集水區降雨入滲分析及(2)以長期觀測迴歸孔隙水壓與降雨參數(如降雨強度、累積降雨量、降雨分布及延時等)關聯性，長期目標為轉換為以降雨觀測，準確轉換為地下水位升降，免除現地地下水位即時觀測需求。本計畫 107 年度以降雨入滲分析為主，108 年起以所發展之監測模組進行長期監測，進行場址水位升降與降雨特徵之統計分析，嘗試建立地下水壓升降依時預測模式，109 年度精進地下水壓升降依時預測模式，包括學理分析及觀測資料迴歸統計分析，結合極限平衡分析或二維數值分析，建立場址客製化以孔隙水壓為指標之依時預警模式，搭配雲端間測，達到依時預警之功能。

## 2.4 邊坡擋土系統變形分析與預警

為因應多數公路邊坡多有不同程度整治，108 年度起擴充原有土壤邊坡分析，將擋土支撐系統加入，並以現地資料進行初步驗證。109 年度擋土系統分析以二維土壤結構互制分析進行，並考慮水力與力學邊界，達到依時變位與結構穩定預測。經由前項考慮土壤結構互制反應之水力力學耦合分析成果，並搭配擋土結構反應即時量測，可進一步擴充現有原僅考慮土壤反應之解析方法與預警模式，做為具擋土支撐系統之邊坡依時預警分析與警示技術，將計畫由基礎研究發展導向實際應用層面。

為簡化擋土支撐系統變位分析，108 年計畫以基於基樁 p-y 曲線相同概念之 PYWALL 軟體，進行不同背填水位變化下彈性牆體傾角，並建議以牆頂傾角及背填水位為預警指標之預警架構，為進行驗證所需，現有飽和層滑動監測場址增加擋土牆頂兩方向傾角量測，以作為比對驗證。PYWALL 軟體之理論有別於傳統之極限平衡理論之分析，此軟體之最大優勢為考慮結構物與土壤互制關係，以非線性之土壤行為與材料性質模擬擋土設施行為，因此於分析柔性擋土牆時，相較於傳統分析將整體擋土設施視為一剛性旋轉體之方式，可得到牆體變形行為(Ensoft, 2019)。分析擋土結構物時包含真實土壤狀況與結構物本身之相關細節。因此合理的分析與設計必須包含非線性土壤-阻力-位移之關係、樁間距、結構體性質等，PYWALL 透過樑柱模型來考慮樁土互制行為，軟體內也可以加入不同支撐系統或載重來分析擋土牆之行為。

以台 20 線 52k 場址整治前狀況進行測試，探討地下水位上升對於擋土設施位移量之影響，因此假設牆後之地下水位上升至下游坡面，取其為深度 7.3 公尺處，背填土側之地下水位由深度 7 公尺，以 0.5 公尺之幅度逐漸上升，直到背填土側之地下水位上升至頂端，即為深度 0 公尺處，可得到隨著地下水位上升，牆體位移量逐漸增大，當背填土側之地下水位上升至頂端時，牆頂之位移量達到 14 公分左右。取模擬

之擋土牆頂部之水平位移量與擋土牆向下 1 公尺處之水平位移量，以兩者位移差值計算旋轉角，計算出不同地下水位深度時之擋土牆頂部旋轉角如圖 2.23 所示。參考現有國內外規範於不同土壤下主動破壞旋轉角，訂定此場址之預警之旋轉角度為  $0.3^{\circ}\sim 0.35^{\circ}$ ，並可以圖 2.21 訂定對應之預警背填水位，此支撐牆體背填土側之地下水位上升至距離土側頂端 2.9 公尺到 4 公尺時，進入預警之範圍。

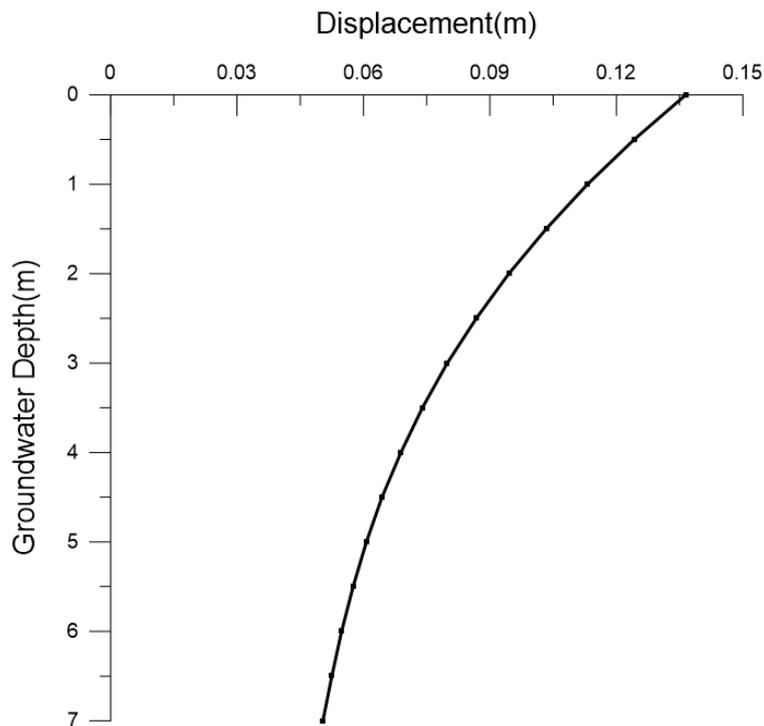


圖 2.23 地下水深度與牆頂位移量

限於 PYWALL 為極限平衡分析架構，無法將依時特性及水力力學耦合分析加以考慮，109 年度新增以前期 FLAC 土層水力力學耦合分析成果，加入代表不同支撐系統元件之結構元素，以介面元素作為土壤與結構元素間應力與變位傳遞之連結，模擬依時土壤結構互制行為，精進擋土支撐系統預警模式之準確度與應用性。

## 第三章 無線土層即時監測系統

### 3.1 系統架構

本計畫主軸之一為發展無線土層監測模組，廣佈於具崩坍潛勢之邊坡表層，模組間以無線傳輸方式於場址形成區域監測網絡，並將各測站監測資料傳至伺服器主機，由遠端人員對邊坡水文及運動行為進行預判，可降低對人力物力之需求。研究採用發展日臻成熟之微機電系統感測元件搭配客製化感測器及無線網路通訊功能，可實時監測地表傾角、土壤表層含水量、降雨量及地下水位之監測模組，形成分佈式土層監測網路，做為後續發展依時邊坡滑動預警系統之即時量測指標。

無線土層監測系統係由微控制器(Micro Controller Unit, MCU)結合各感測器以及無線傳輸模組，裝設於待測地點並透過無線傳輸將各感測器之量測資料。無線土層監測系統主要組成包括微控制器、感測原件(sensor)及通訊單元，並以韌體進行整合，另外還包括附屬之模組外構及電源系統。本研究採用 Wemos lolin32 作為系統之微控制器，搭配各式感測原件，如：觀測入滲速率之土壤分層含水量計、地表傾角之高精度傾斜儀(Tiltmeter)、地下水位之壓力式液位計(Liquid Level Transducer)及區域降水量之雨量計等，組成客製化監測模組，並以運用低功耗廣域網 (Low Power Wide Area Network, LPWAN)技術之 LoRa 通訊協定建立感測模組間與接收端通訊，形成區域監測網路，並經由接收端連接 4G 無線網路，達到遠端監測之功能。

淺層滑動模組系統架構示意圖如圖 3.1 所示，無線土層監測系統包含兩種型態，分別為客戶端與伺服器端，客戶端即為監測模組，將量測之現地資訊發送給伺服器端，透過 4G 無線通訊模組將資訊上傳至雲端，系統同時備有記憶卡備份現地資料，達到對邊坡即時自動監測目的。飽和層滑動及擋土系統分析模組與淺層模組相近，但感測器不同。

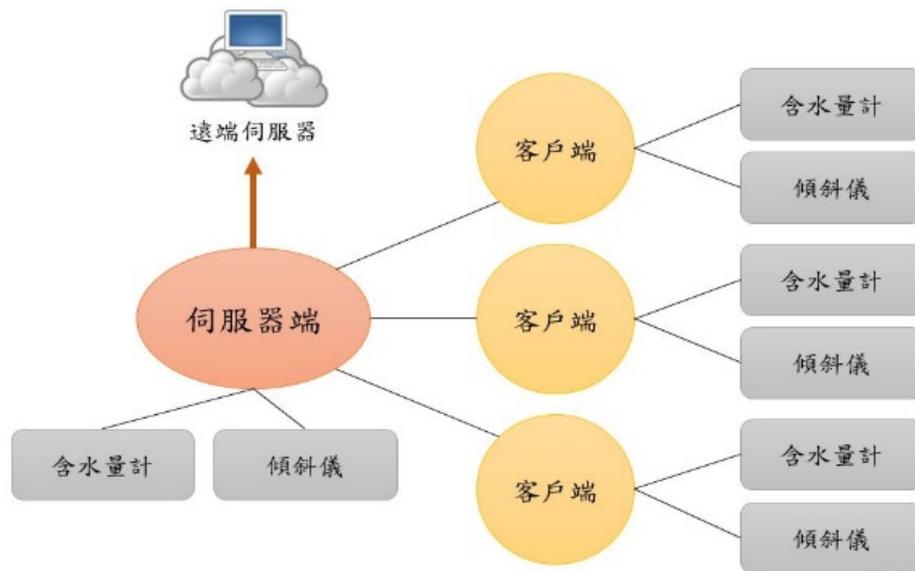


圖 3.1 淺層滑動模組系統架構示意圖

### 3.2 土層水文與運動反應量測

本計畫前期已開發適用於因降雨造成之土層邊坡滑移且具有即時、無線、自動化特點之邊坡土層監測模組，所整合之感測器種類與功能如下：

1. 電容式含水量計：量測周圍環境電容變化，透過感測器內嵌之類比數位轉換晶片(Analog to Digital Converter, ADC)進行數位輸出，間接測得非飽和土壤之體積含水量或經換算為飽和度。
2. 傾斜儀：量測單軸向傾斜量變化，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，提供單軸上兩方向高精度、靈敏度之傾斜角量測。
3. 液位計：以電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位，以高精度 ADC 模組與 MCU 連結。
4. 雨量計(Rain Gauge)：用於量測降雨，依操作方式可分為非自記式雨量計與自計式雨量計，又依量測方式可分為虹吸式雨量計、秤重式雨量計、傾斗式雨量計等，本計畫研發具雲端傳輸

功能之傾斗式雨量計。

本計畫採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式土壤水份計(圖 3.2)，其具有低成本、高解析度與高重複性等優勢，工作電壓 3.3V~5V，工作溫度 0~85°C，並採用 I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit)通訊界面與微控制器與周邊設備整合。I<sup>2</sup>C 是內部整合電路的稱呼，是一種串列通訊匯流排，具有可多組元件串聯、連接線數量少等優勢。



圖 3.2 電容式土壤水份計

圖 3.3 為含水量計數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖，試驗土壤為邊坡現地取得之粉土質土壤，土壤體積飽和度為在控制體積含水量下，固定土水比例求得，圖中可見此含水量計具備足夠之重複性與一致性。透過多組電容感測裝設於探棒表面，即可同時監測探棒長度內土層不同深度之含水量，亦可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。

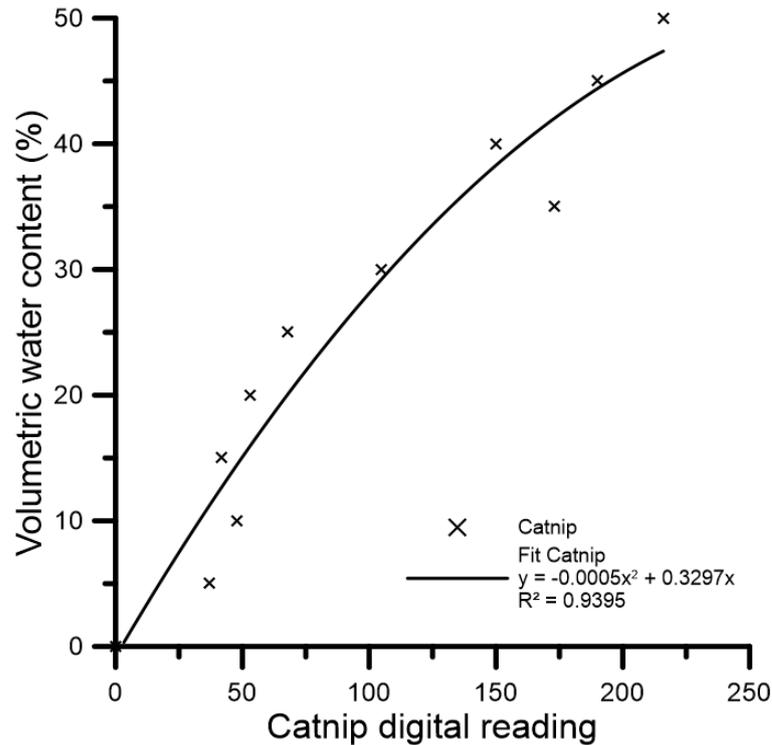


圖 3.3 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖

本計畫使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA103T，量測單軸向傾斜量變化，採差分量測 (Differential measurement) 原理補償雜訊及誤差。大部分的雜訊來源對於同樣的感測原件有相同的影響程度，透過單軸上兩方向之輸出經差分處理移除誤差，可有效降低一般量測雜訊干擾，提昇長期穩定性及減低溫度影響。

傾斜儀支援比例類比電壓與數位 SPI (Serial Peripheral Interface Bus) 輸出，提供單軸上兩方向高精度、靈敏度之傾斜角量測。量測範圍±15 度，標稱解析度可達 0.001 度(10Hz BW 類比輸出)。圖 3.4 為以 16-bit ADC 模組讀取類比輸出與直接數位輸出之訊號解析度比較，顯示類比輸出解析度與穩定性較高，故本計畫以 16-bit ADC 模組，以確保解析度達 0.05 度以下，因傾斜儀為輔助觀測且採用長期趨勢為判讀依據，0.05 度尚可接受。SCA103T 類比電壓比例輸出標定如圖 3.5 所示，顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性及解析度。

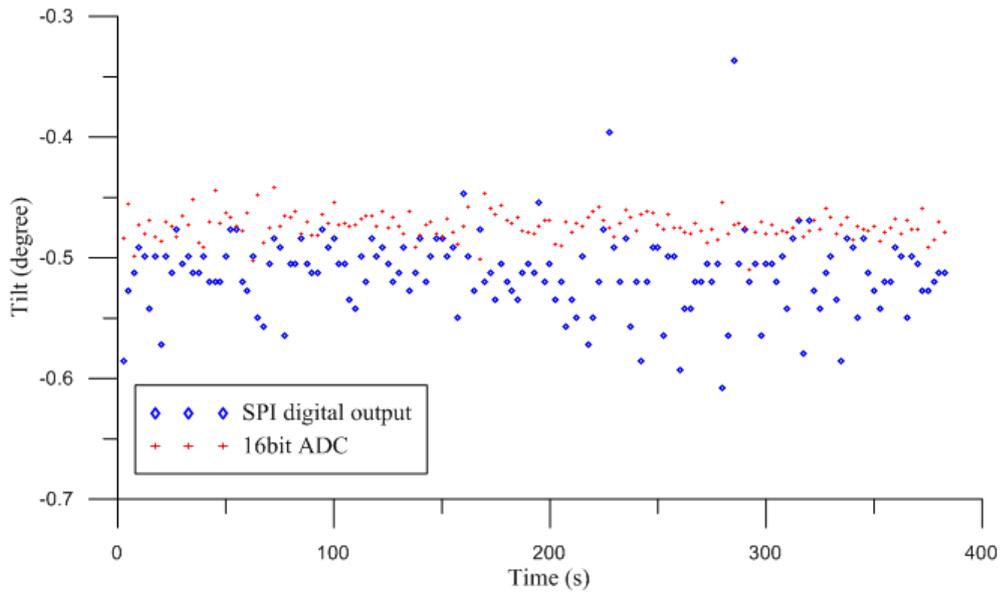


圖 3.4 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較

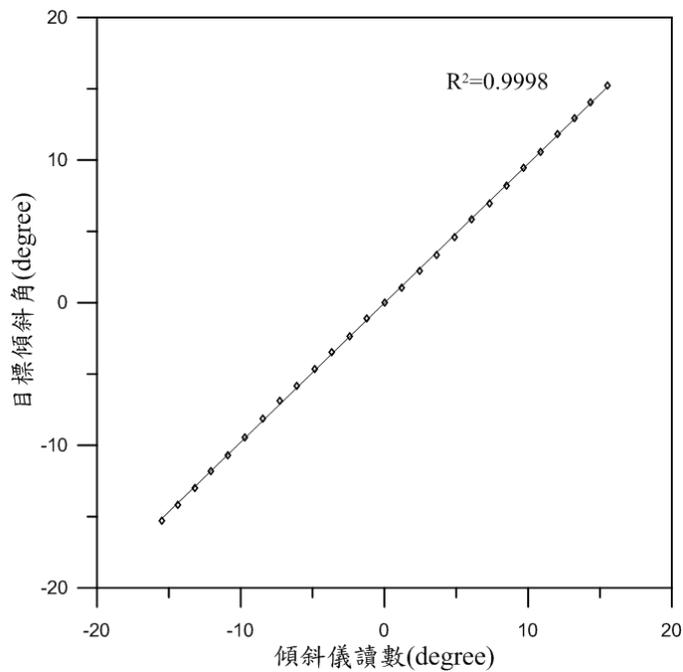


圖 3.5 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

現有飽和土層滑動監測模組之地下水位量測，採用放置於開孔水位觀測井搭配沉水式液位計量測，其具備有以下幾點特色，包含：(1) 內置微型信號處理電路，可進行遠程傳輸；(2) 抗干擾強，長期穩定性好；(3) 防結露，防雷擊設計；(4) 採 316 不銹鋼隔離膜片具堅固密封、高可靠、高精度等特點。此感測器液位計工作電壓為 24V，與模組輸

入電壓不同，故需以升壓晶片將輸入電壓變壓以供液位計使用，其輸出為類比電壓，因此感測模組需整合類比-數位轉換器使用，本研究以 16-bit 之 ADC 模組，確保水位解析度達 1cm 以下。

前期計畫採用標準雙傾斗式雨量計，搭配微控制器組成自計式雨量計，其原理為利用傾斗計算降雨量，雨水經由口徑 200mm 的承雨口流入傾斗，到達一定雨量時，傾斗傾倒且同時帶動磁簧開關並產生脈衝信號(pulse)，利用微控器讀取高低電位變化計算傾斗傾到次數，搭配微控制器組成自計式雨量計。採用之雙傾斗雨量計解析度為 0.2mm，因解析度較高對降雨量觀測較為敏銳，對降雨強度較大之降雨所產生之系統性誤差則經由室內試驗對記錄器示值加以修正，其結果如圖 3.6，室內試驗室利用體積量測儀記錄十分鐘內通過雨量計之總流量，控制流量大小可模擬不同的降雨強度，本試驗最大十分鐘雨量為 94mm/10min，大約為 564mm/hr，根據 WMO 建議檢驗範圍至少達 500mm/hr，可滿足氣候變遷下的極端降雨事件。

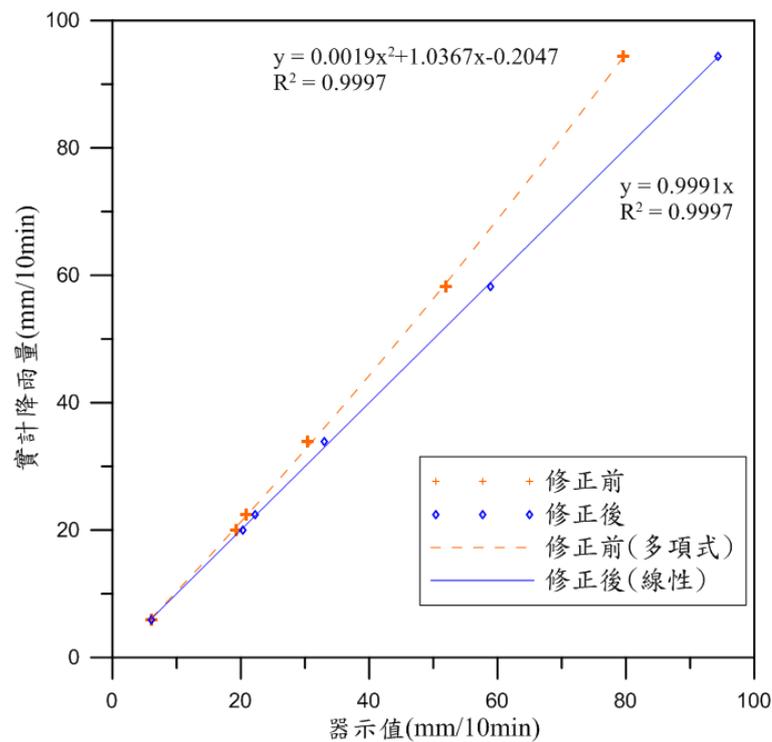


圖 3.6 雨量計器示值校正

### 3.3 土層無線監測模組組成

本研究使用之無線傳輸模組、數據計錄模組、即時時間模組、感測器以及微控制器，以可插拔方式配置於客製化電路板上，以便於維護，並連同電源供應模組放置於防水耐候之電子盒中，其下方可連結分佈式土壤水分計。透過客戶端與伺服器端建構之區域無線網路，以及感測器擷取之數據，可進行即時邊坡監測，其系統運作示意圖如圖 3.7 所示，無線土層監測系統之部分包括：(1)微控制器(2)無線傳輸模組(3)時鐘與數據儲存模組及(4)感測器等，除感測器外各部分說明如下。

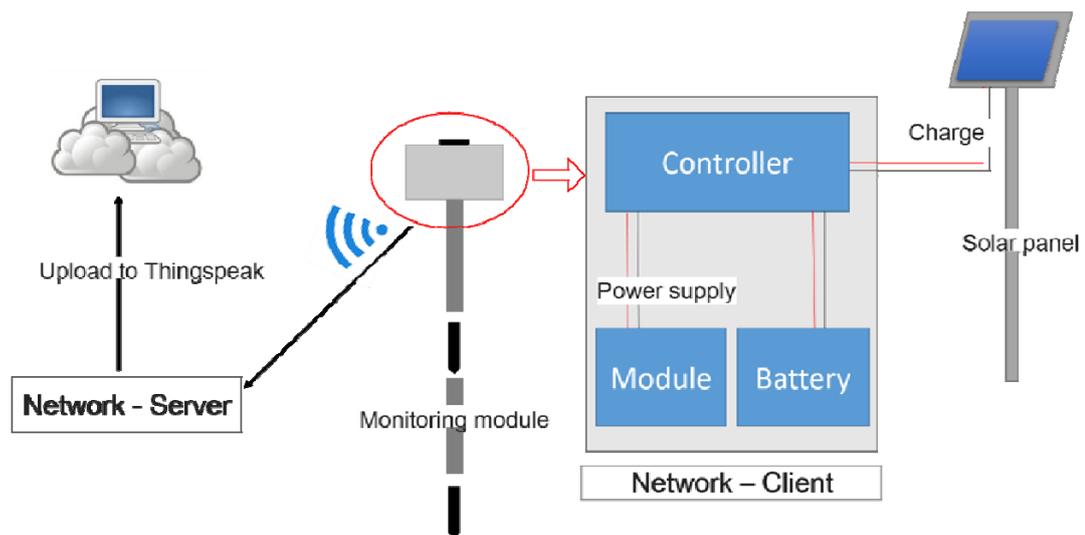


圖 3.7 邊坡無線監測系統運作示意圖

#### 1. 微處理器

微控制器(MCU)，又稱單晶片微電腦(Single-chip Microcomputer)，是把中央處理器、記憶體、定時/計數器 (timer/counter)、各種輸入輸出介面等都整合在一塊積體電路晶片上的微型電腦。基於開放原始碼之開發平台，允許使用者發展符合特殊需求的模組，整合 SPI、UART、I<sup>2</sup>C 及 GPIO 等通訊介面，建構易於輸入/輸出之開發板。

微控制器可將程式邏輯帶入監測架構中，藉由簡易之迴圈、布林參數可將監測架構升級為智慧化感測，使用者可自行設定擷取頻率或寫入特定觸發條件讓微控制器進行特定動作，作為智慧型無線感測模

組之基礎，MCU 之選擇可基於接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於智慧型無線模組中可比喻為大腦，進行所有電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作。

與開源(open-source)架構 Arduino 相容之 MCU，可透過整合開發環境(Integrated Development Environment, IDE)進行韌體撰寫，IDE 為一整合文字編譯器(Editor)、編譯器(Compiler)、連結器(Linker)及除錯器(Debugger)之軟體，使用與 C 語言和 C++相仿的程式語言，可與開發板透過電腦以 USB 介面連結，即可編寫及燒錄韌體以設定執行程序，降低開發門檻，同時增加監測模組功能客製化的彈性。

坊間開發版產品眾多，為符合無線土層監測系統之需求，本研究採用 Wemos lolin32 開發板，其搭載 ESP32 晶片，240MHz 雙核微控制器，運算數度高達 600 DMIPS，內建 16MB 程式設計空間，且具 34 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPI (Serial Peripheral Interface Bus)介面、一組 I<sup>2</sup>C 介面，I<sup>2</sup>C 支援單一匯流排，最多可與 112 個結點通訊，足以應付多組模組間數位資料傳輸，以及 12 支接腳可做為類比訊號接腳，可滿足基本監測模組的功能需求。

## 2. 無線傳輸模組

無線傳輸模組包括區域網路(Local network) 及廣域網路(Global network)，本計畫以 LoRa 數位無線電形成區域網路，將監測資料傳遞至現地之伺服器(server)或無線閘道(gateway)，再以 4G 技術將資料上傳至雲端平台。

前期計畫以 LoRa 無線傳輸模組作為伺服器端與客戶端之間互相傳輸資訊之區域網路模組，LoRa 為英文 Long Range 的縮寫，為低功耗廣域網路(Low Power Wide Area Network, LPWAN)通信技術的一種，在 LPWAN 產生之前，使用者只能在遠距離以及低功耗兩者之間做取捨，而 LoRa 無線技術的出現，改變了關於傳輸距離與功耗的折衷考慮方式，不僅可以實現遠距離傳輸，並且同時兼具低功耗、低成本的優點。LoRa 屬於專有技術，由 Semtech Corporation 所有並申請專

利，在 ISM 頻段中操作。ISM 頻率的分配和法規要求隨區域而有所不同。兩個最常見的頻率分別為歐洲採用的 868MHz，以及北美的 915MHz。其他區域，則有不同的要求。LoRa 擴頻技術使數據傳輸距離加長，且具有功率密度集中，抗干擾能力強的優勢。模組具有軟體前向糾錯演算法，其編碼效率較高，糾錯能力強，在突發干擾的情況下，能主動糾正被干擾的資料封包，大大提高可靠性和傳輸距離。而資料壓縮功能有概率減小傳輸時間，減小受干擾的概率，提高可靠性和傳輸效率，綜合上述各項特點，故選擇該模組作為本次計劃資料區域無線傳輸之工具。

研究採用基於 SEMTECH 公司 SX1276 射頻晶片的無線串口模組，採用透明傳輸方式，工作頻段介於 NCC 開放之 900 至 931MHz 之間，可選擇與他人不同之頻段進行資料傳輸，以減少干擾。使用 LoRa 擴頻技術，TTL 邏輯電壓準位資料傳輸，相容 3.3V 與 5V 的電壓。此外，該模組可藉由控制腳位 M0 及 M1 之高低電位變化使其進入省電模式，如此便可減少無線感測模組之耗電量。

為將感測網路蒐集到之現地數據上傳至雲端平台，伺服器端之土層監測模組搭載 3G/4G 模組—SIM5320E，以連結場址資訊與後台人員形成廣域網路。SIM5320E 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM (Subscriber Identity Module)卡作為用戶身分識別。SIM5320E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。

### 3. 時鐘、數據儲存及資料擷取模組

為提供監測資料儲存安全以提供數據分析的完整性，模組使用 SD 卡數據紀錄模組 (Data logger) 備份土層監測資料，當無線傳輸模組因故斷訊時，仍可藉由 SD 卡備份檔案紀錄現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站即時時間、節點編號、土層分層溫度、含水量、傾斜角度與地下水位高程，皆可依照所需格式進行編排後輸出，

大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。此 SD 卡數據計錄模組附含一即時時鐘(Real-time clock, RTC)，具低功耗且提供年、月、日、時、分、秒資訊，與微控制器透過 I2C 序列傳輸位址與時間資訊。其備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電能切換至備用電源以確保時間正常計讀。

由於微控板之 ADC 解析度為 10-bit，不足以應付本研究之精度需求，故以外接之 ADC 模組整合感測器，本研究使用基於 ADS1115 晶片之資料擷取卡，使用 I2C 介面與微控板通訊，每秒最高可處理 860 個資料點，解析度達 16-bit，以符合量測之需求。

#### 4. 雲端伺服平台

物聯網的興起使各領域累積數據量急劇攀升，開發商也因應推出各種 IoT 資訊平台以滿足資料儲存與顯示的需求。Thingspeak 為 2010 年 IoBridge 開發，用以整合物聯網應用之開源平台，除了開放程式碼供使用者作專案應用外，也開放一定量之資料讀寫功能讓使用者免費使用，並透過 API(Application Programming Interface)作資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，本計畫延續前期成果，以 Thingspeak 作為現地監測資料之雲端即時顯示與儲存平台。

圖 3.8 為 Thingspeak 雲端即時顯示頁面，Field1 至 Field7 依序顯示該測站之節點編號、傾斜角、淺層土壤體積含水量、淺層土壤溫度、深層土壤體積含水量、深層土壤溫度、水位以及模組電壓，游標移至資料點上即可獲知該監測值及其量測時間，用以展示及時監測成果，而平台也提供歷史資料輸出功能，其副檔名為 csv 格式，可用 Excel 直接開啟。

自 108 年起本計畫另完成以 Python 架構建置雲端顯示與警示系統，其資料來源為定時更新儲存於 Thingspeak 之監測資料，比對所設定之相關門檻值，作為發布警戒並主動通知相關人員，系統詳第七章介紹。



圖 3.8 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖

### 3.4 潛在滑動邊坡無線監測模組

本計畫前期計畫於 105 年完成土層滑動監測模組雛形，106 年完成前一代模組精進與優化，107 年更新至現有架構，108 年更新廣域網路為 4G，現有淺層滑動邊坡無線監測模組架構說明如下：

#### 3.4.1 淺層模組系統硬體架構

土層監測模組依其具備之硬體與功能分成客戶端(client)及伺服器端(server)，客戶端於 LoRa 建構之無線網路中負責對伺服器端發送量測資料，量測資料皆已透過微處理器進行校正係數之率定，其發送之量測資料包括土壤分層含水量、溫度以及土層監測模組之傾斜角，並附上節點編號供伺服器端辨識訊號來源。為避免因不可抗力之因素斷訊，致使與伺服器端之連線中斷，客戶端同時備有 SD 紀錄卡作監測數據紀錄，確保數據分析之完整性。

伺服器端於 LoRa 建構之無線網路中負責接收客戶端發送之監測資料，因配有 4G 無線通訊模組，具有和遠端伺服器連線之功能，其微處理器根據接收到之資料格式將其拆解並儲存於變數後，視使用者所需可儲存於紀錄卡，並將監測數據根據節點編號上傳至遠端伺服器，為遠端人員和現地監測情況之溝通橋樑。

土層監測模組外構設計(圖 3.9)可分為三部分，各部件詳述如下：

- (1) 核心防水盒:內含土層監測模組，18650 鋰電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒，其內部配置如圖 3.10。
- (2) 土壤水份計外構: 可裝設一只土壤水份計之桿件外構如圖 3.9，並可透過 PVC 管依需求數量進行串聯，以延伸至預計裝設之土層深度。本研究以兩組土壤水份計作串聯，並延伸至地下深度分別為 20~25 公分以及 60~75 公分。



圖 3.9 土層監測模組外構

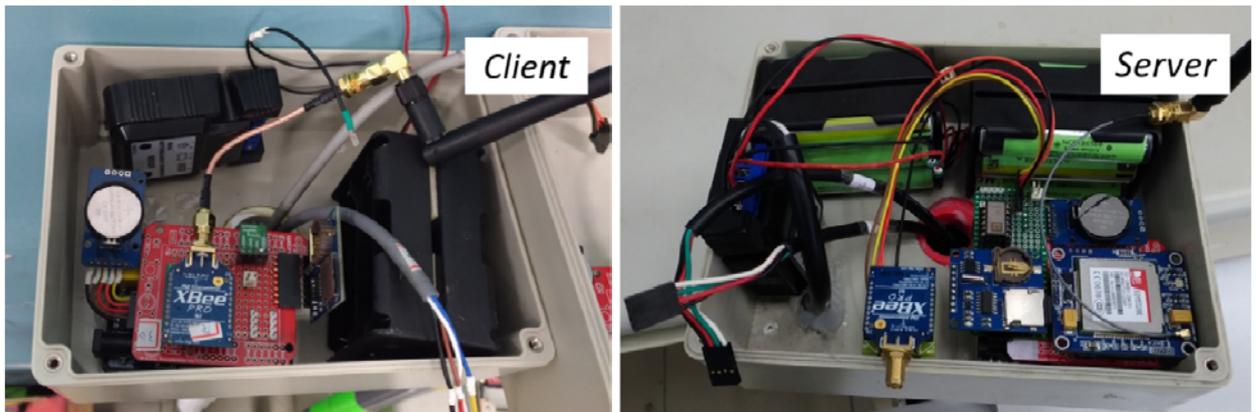


圖 3.10 防水電子盒內部配置

- (3) 太陽能板支架: 本研究採用 10W 太陽能板以提升模組續航力，並可視土層監測模組之耗電情況作太陽能板輸出功率的增減。

核心防水盒係以市售電子防水盒加工而成，上下蓋具有 O 型環與溝槽，使其以螺絲旋緊後具有防水功能，防水盒下方開孔並透過 3D 列印之底座與 PVC 管黏合以連接下方土壤水份計外構。核心防水盒開孔以裝設 LoRa 及 4G 頻段專用之耐候型天線，透過 SMA 接頭與無線傳輸模組連結，並以矽膠封填天線與盒間縫隙。土層監測模組、鋰電池組以及供電控制器則依空間配置固定於盒內。

土壤水份計外構將水分計之感測區塊暴露於外，直接接觸待測土

壤以量測土壤體積含水量，土壤水份計之接線處與元件位置則置入後方空間，並以電子封裝膠封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐候型外披覆 4 芯電子訊號線，殼層以 3D 列印製作以降低成本。

由於邊坡滑移多發生於長歷時、高強度之降雨期間，為使監測系統獨立運作達到現地長期監控的成果，本研究使用太陽能控制統搭配 18650 鋰電池組作為土層監測系統之電源系統。以太陽能電源控制器，搭配 10W 太陽能板。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。模組使用 18650 鋰電池，額定電壓 3.7V 容量最高達 3400mAh，為目前市售能量密度最高之充電式鋰電池，其高電壓輸出使其易於串接以提供微處理器之輸入電壓。土層監測模組依照現場系統空間配置可搭載 6~12 顆鋰電池，高電容量使監測模組於颱風、梅雨季時仍得以維持系統運作至少 5 日。

#### 3.4.2 飽和土層滑動邊坡無線監測模組

飽和土層滑動中孔隙水壓力變化為滑動預測之重要指標，孔隙水壓中因入滲及滲流所造成之超額孔隙水壓為觸發深層滑動之物理量，其可以開孔式地下水位代表總水頭，扣除位置水頭後可求得壓力水頭。107 年經公路局五工處同意，選定台 20 線 52k+150 處為監測場址，108 年因場址下邊坡進行整治工程，路面同步進行維護，因此 108 年 5 月起之下邊坡監測系統及 60 m 深水位監測必須暫停監測，原安裝之擋土牆傾角監測亦一併暫停，109 年度因整治工程已完成，已於計畫簽約後儘速恢復相關監測。

飽和土層滑動監測模組以物聯網之架構進行研發，由微控板(MCU) 搭配數位類比擷取卡(AD board)可連接傳統電子式感測器，配合 4G 模組將監測資料送入雲端，突破常用有線監測之模式，並允許使用者透過雲端即時查看監測資料，此監測架構連結各式感測器形成局部(Local) 或全域(Global)監測網路，提供管理者或工程師由即時監測數據(real time monitoring)進行決策。運研所現有深層滑動監測模組為利用淺層監

測模組加入電子式液位計，並搭配相關之電壓與類比數位轉換模組。採用國產之沉水式液位計(liquid level transducer)，此感測計為類比輸出，因此感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)，此計畫以16-bit 之 A/D converter 模組，以確保解析度達1cm 以下，室內校正結果如圖 3.11 所示，現有模組中使用之液位計實驗室校正結果顯示其線性度佳，而現地超過一年之觀測顯示系統穩定性佳，符合現地長期即時監測之目的。

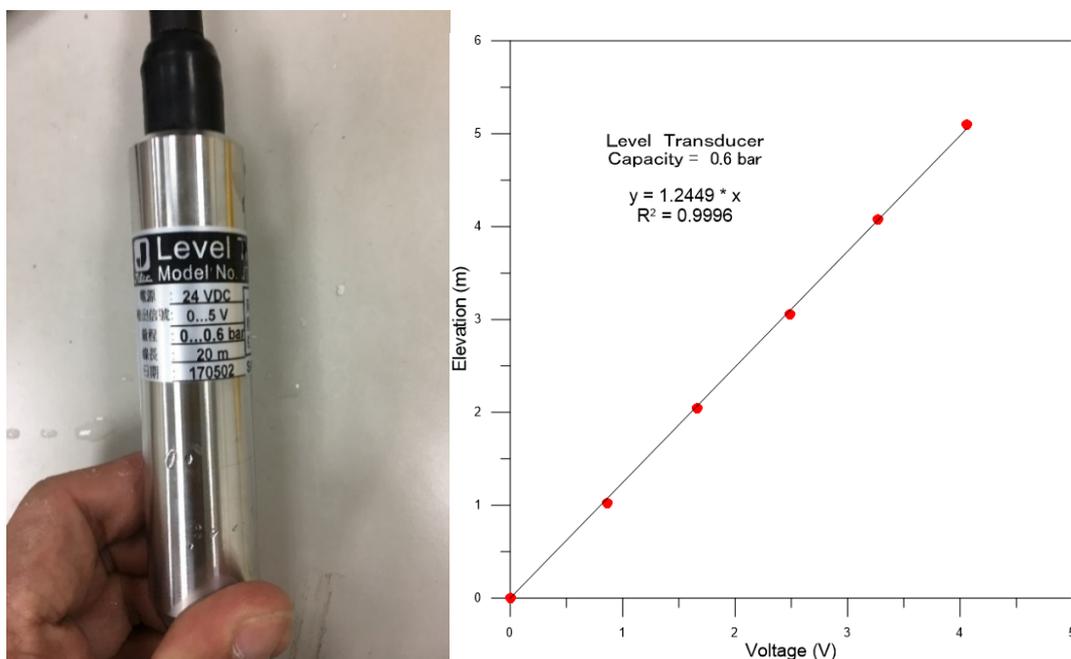


圖 3.11 液位計實體與校正結果

### 3.4.3 無線監測模組價格與耐用性評估

現有無線監測模組歷經多次更新精進，及為配合延伸功能需求，其規劃已遠出乎原規劃短期、簡易且具拋棄性質之規劃，雖然因 IoT 興起使得相關零組件可便宜取得，但系統整合、測試及耗能增加等因素使得其單價已遠超過原先預估，現有模組硬體價格已超過萬元，其中通訊模組、傳統感測器及電源供應所需太陽能板及鋰電池為最大宗，但相比於市場現用監測系統，多僅有單一功能，其安裝整合所費成本仍遠高於本計畫之模組。

現有模組雖可大部滿足所須精度及要求，但淺層模組耐久性仍有改善空間，其中水份計因須至於土中，其外露感測面易受土體變形彎折而損壞，且因其原設計為置於地表，相關電路與組件並無防水功能，因此耐用性較低，其中阿里山五彎仔模組即因地表變動劇烈及水位長期接近地表而極易損壞，原有設計因水份計採串聯 I<sup>2</sup>C 協定與 MCU 連結，因此單一模組損壞會影響其他 I<sup>2</sup>C 匯流排元件如傾斜儀，導致相關功能失效，本年度已部分更換原有水份計，改以具類比輸出之電容水份計感測，以避免連鎖失效並提高精度，初步測試新版本水份量測符合需求，但目前因時效較短，耐久性仍待進一步測試。安裝於現地的儀器較容易故障，建議定期校正保養，以確保量測資料之準確性。

## 第四章 淺層滑動場址監測成果

### 4.1 甲仙攔河堰聯外道路西側邊坡

甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地曾於民國 94 年 9 月受泰利風災連續豪雨影響，聯外道路邊坡發生數次崩坍而阻斷交通，道路上、下邊坡擋土牆亦形成多處裂縫，而 98 年莫拉克颱風期間又導致邊坡再次坍塌。99 年 3 月 4 日發生規模 6.4 甲仙地震，事後邊坡傾斜儀量測結果顯示邊坡有滑動現象，最大位移達 155mm，滑動崩塌潛勢甚高，根據「甲仙攔河堰第一次安全評估」於上邊坡埋設四處傾斜儀之量測資料顯示，上邊坡之潛在滑動面約位於地表下 1.5 至 4.8 m 之崩積層或岩土界面。

本研究總計於甲仙攔河堰西側邊坡裝設四支土層監測模組，包括一組伺服器端(Node ID = 0)以及三組客戶端(Node ID = 1~3)，並以 4G 無線網路進行資料回傳。相對位置如圖 4.1 所示，圖 4.2 為各監測站點周遭環境以及邊坡上之相對位置。

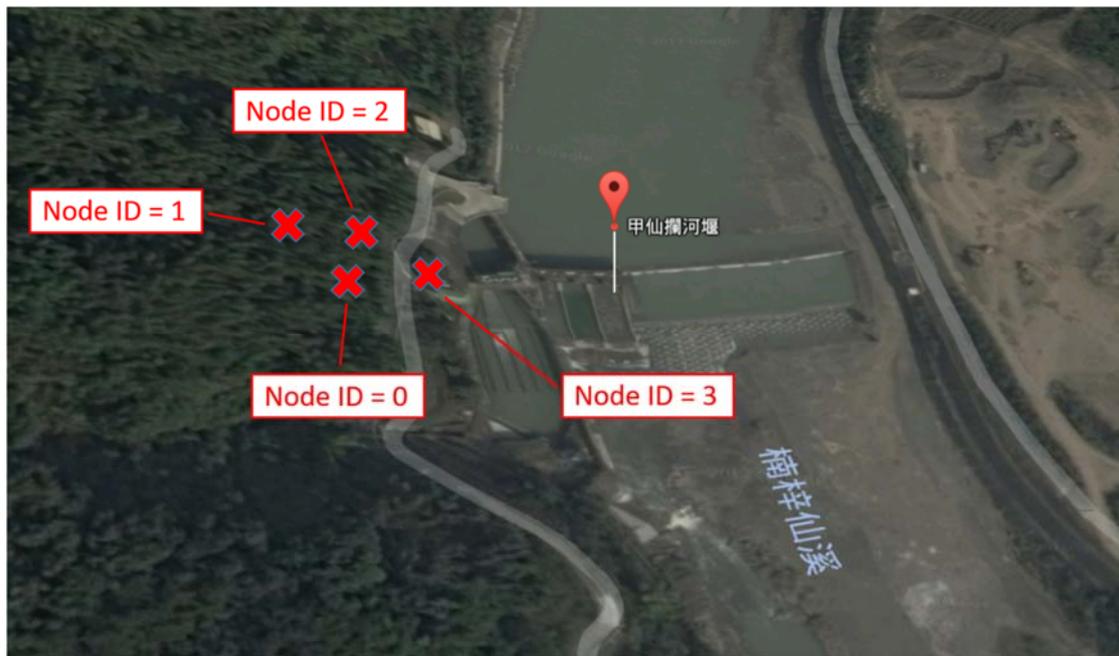


圖 4.1 監測模組相對位置圖

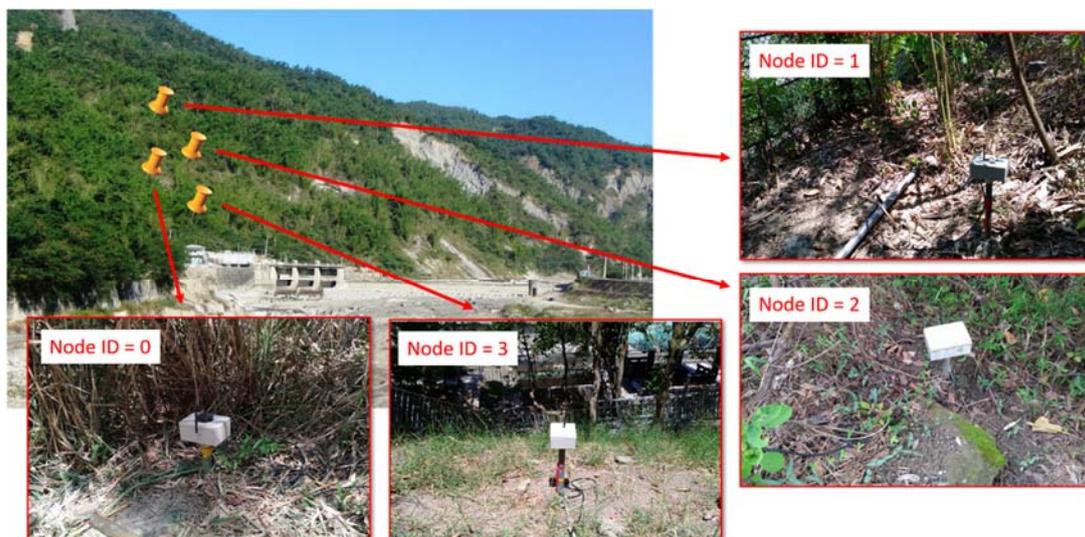


圖 4.2 監測站點周遭環境

## 4.2 甲仙場址監測資料

原有甲仙場址之土層監測模組系統於 106 年 5 月安裝完畢，並於 107 年 2 月升級更新優化之模組，108 年 2 月進行通訊模組優化，目前仍持續穩定上傳監測資料至 Thingspeak 伺服器。期間歷經數次集中且長歷時之降雨事件，過程中顯示降雨事件並不影響本研究無線傳輸系統之穩定性，同時在雨季長時間日照不足的情況下，太陽能電源系統也足以支撐土層監測模組持續運行，證明系統之可行性與耐久性。圖 4.3 以 Node ID=3 之 Thingspeak 頁面為例顯示場址即時資訊，Field1 至 Field6 依序顯示該測站之節點編號、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量以及傾斜角，游標移至資料點上即可獲知該監測值以及發生時刻，可用以監測甲仙淺層邊坡水文及運動情況之依時性的反應。以下展示現地監測期間體積含水量計以及傾斜移之量測成果。

# node3

Channel ID: 266961  
Author: nckusms  
Access: Private

Private View Public View Channel Settings API Keys Data Import / Export

Add Visualizations Data Export

MATLAB Analysis MATLAB Visualiz

## Channel Stats

Created: [about a month ago](#)  
Updated: [3 minutes ago](#)  
Last entry: [3 minutes ago](#)  
Entries: 172



圖 4.3 Thingspeak 即時顯示情況

#### 4.2.1 甲仙測站體積含水量監測結果

由於邊坡滑移多起因於高強度長延時之降雨，因此本研究之監測資料以雨量監測作為土層體積含水量比較之標的。雨量資料來源為中央氣象局之雨量監測結果，與本研究監測場址最近之測站為甲仙測站，其位於高雄市甲仙國中操場後方山丘。

圖 4.4~圖 4.7 分別為 Node ID0~3 自 108/01/01 至 109/10/18 期間之體積含水量監測資料，期間 109 年 5 月因 4G 模組老化而資料斷續，經更換後已恢復正常。圖中 X 軸為時間，Y 軸為土壤體積含水量(%)，同時與甲仙雨量站之每小時累積雨量(mm)做對比，土壤分層水份監測結果可得下列成果：

- (1) 土壤水份計感測值對於降雨事件之反應相當明顯，而深層水份計之感測值反應時間略晚於淺層含水量計，其間差異為土層入滲時間差導致。從降雨發生至含水量抵達峰值之歷時甚短，可及時反應降雨事件的影響。
- (2) 在降雨事件發生後，含水量皆會在乾季時逐步降回降雨前之穩定值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測用途。
- (3) 藉由已完成之基本物性試驗得知甲仙現地地表土壤之孔隙比為 0.6，可推算其飽和時之土壤體積含水量為 38%。圖中顯示 Node ID0、Node ID1 與 Node ID2 之深層含水量計始終處於飽和狀態，而淺層含水量計於降雨時迅速接近飽和狀態。
- (4) Node ID3 之含水量計反應較為異常，其淺層含水量始終高於深層含水量，且深層含水量對於降雨事件之影響更大也更迅速，可能相較於其他監測點位皆位於甲仙聯外道路之上邊坡，Node ID3 則位於聯外道路之下邊坡，可能有路基、擋土牆等結構物影響地表下土層分布。另外由聯外道路旁之擋土牆透水孔流量甚大顯示，道路旁邊坡土層長期處於飽和狀態也有可能影響下邊坡之地下水分布。

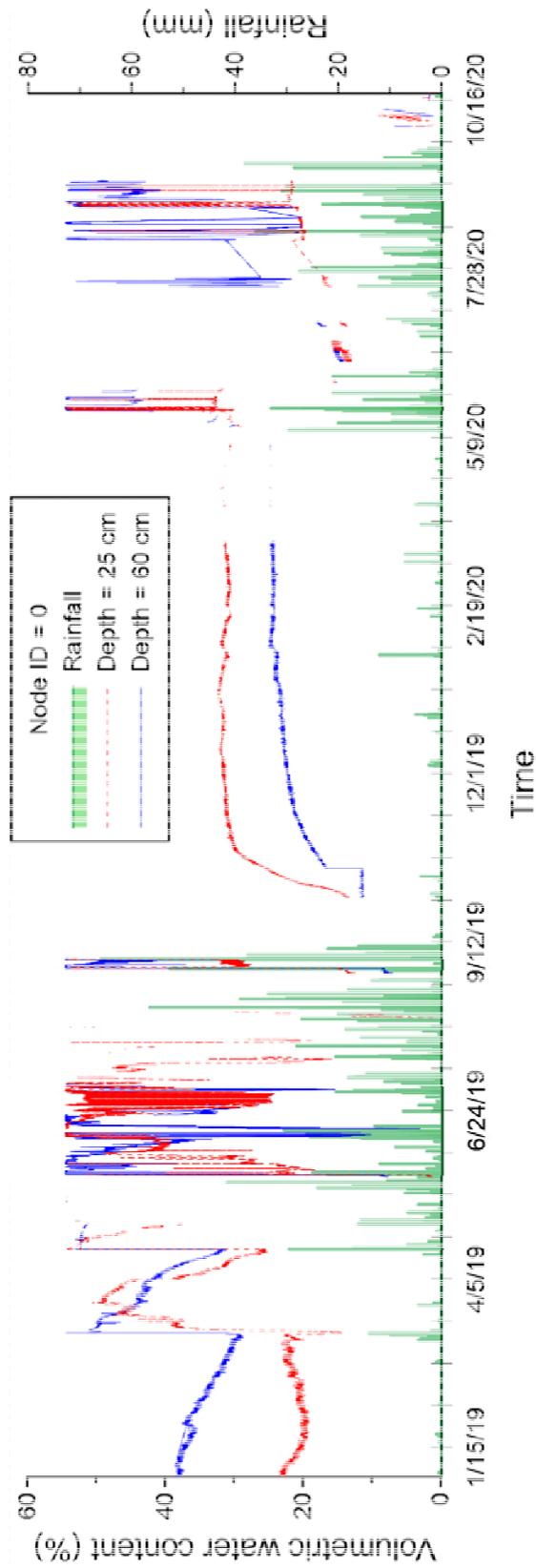


圖 4.4 Node0 體積含水量量測結果

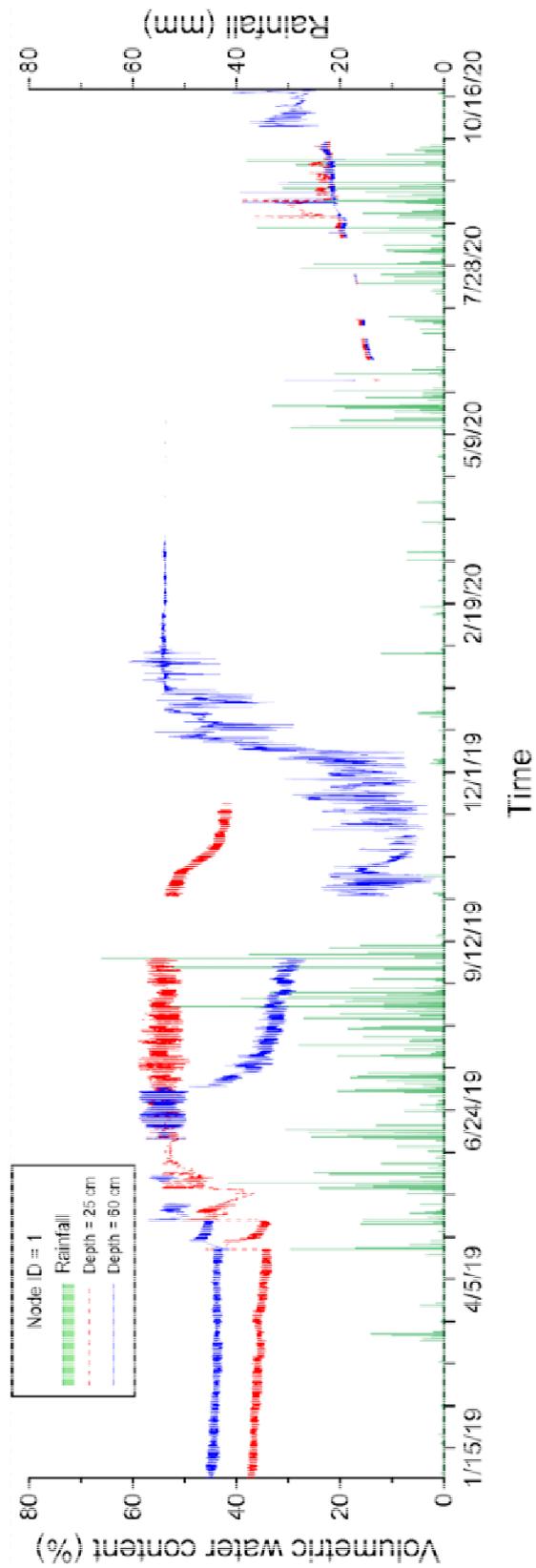


圖 4.5 Node1 體積含水量量測結果

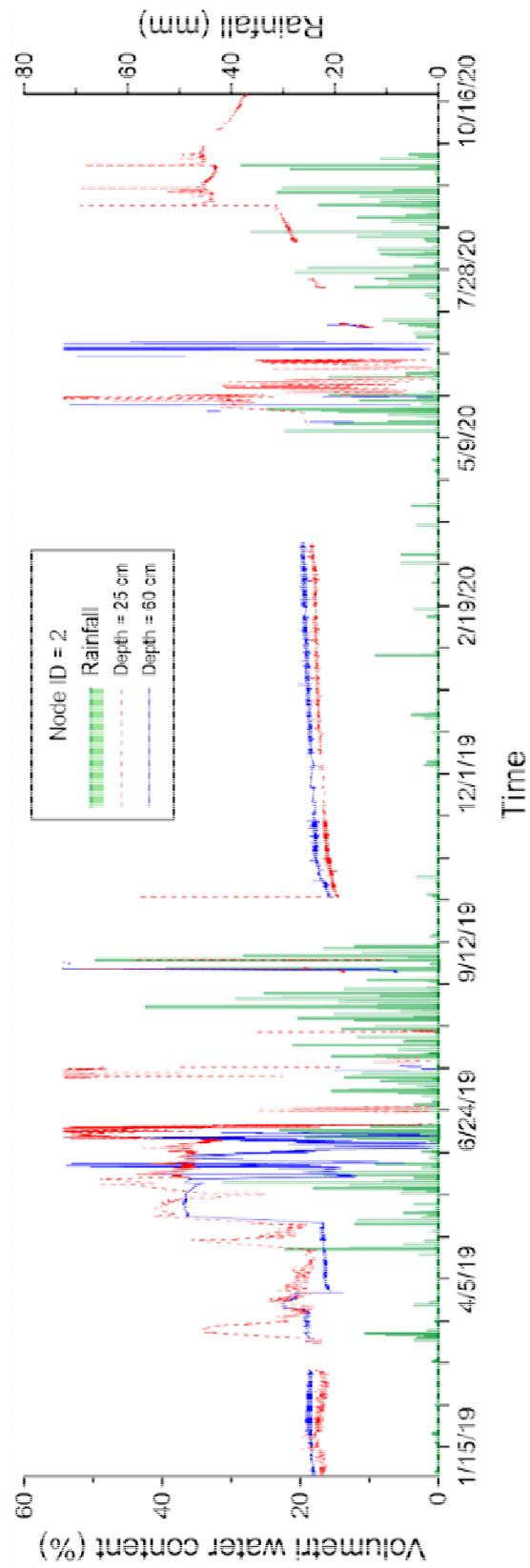


圖 4.6 Node2 體積含水量量測結果

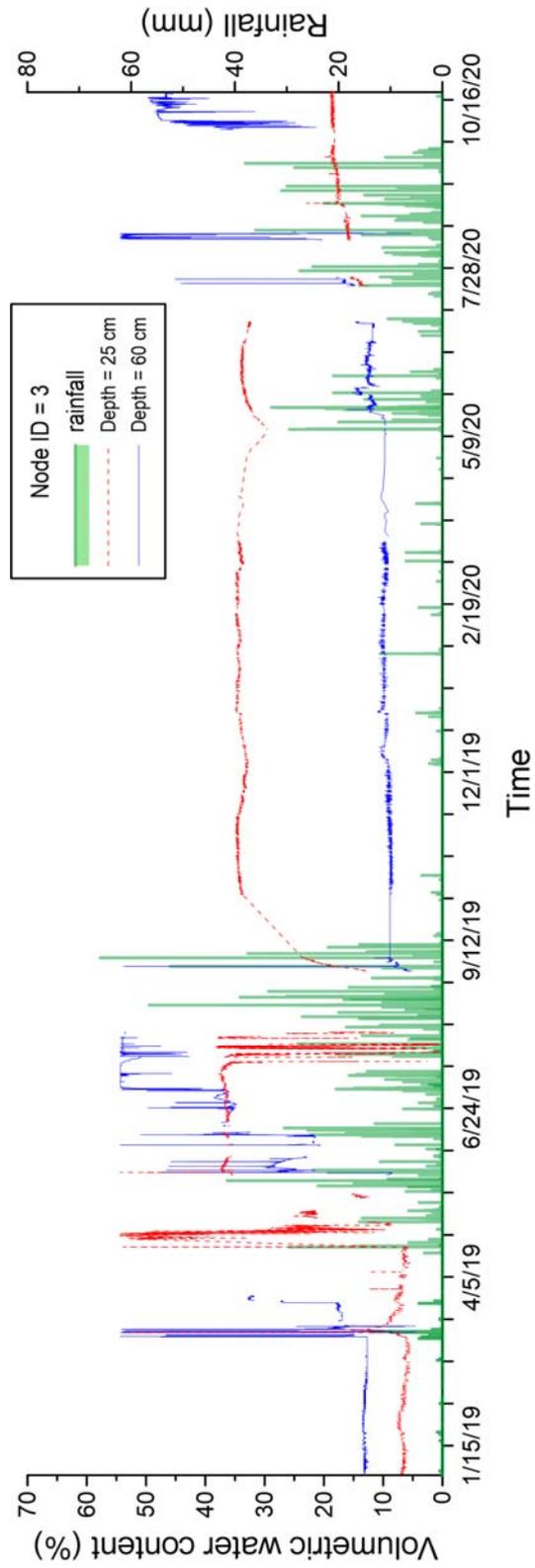


圖 4.7 Node3 體積含水量量測結果

#### 4.2.2 甲仙測站傾斜儀監測結果

圖 4.8 為自 108 年 1 月起各監測模組測得之傾斜角變化，傾斜角方向之數值意義如圖 4.9 所示，結果顯示 108 年度至今甲仙邊坡之各測站於觀測期間內約於 1~2 度微幅的傾斜，其方向同邊坡走向，數值雖有變動，但多為儀器更換未歸零之值，對單一降雨事件，無顯著增加，且為表土局部滑動引致，但傾斜角變化幅度不大且無持續增加，無淺層邊坡破壞跡象，符合現地邊坡狀態。

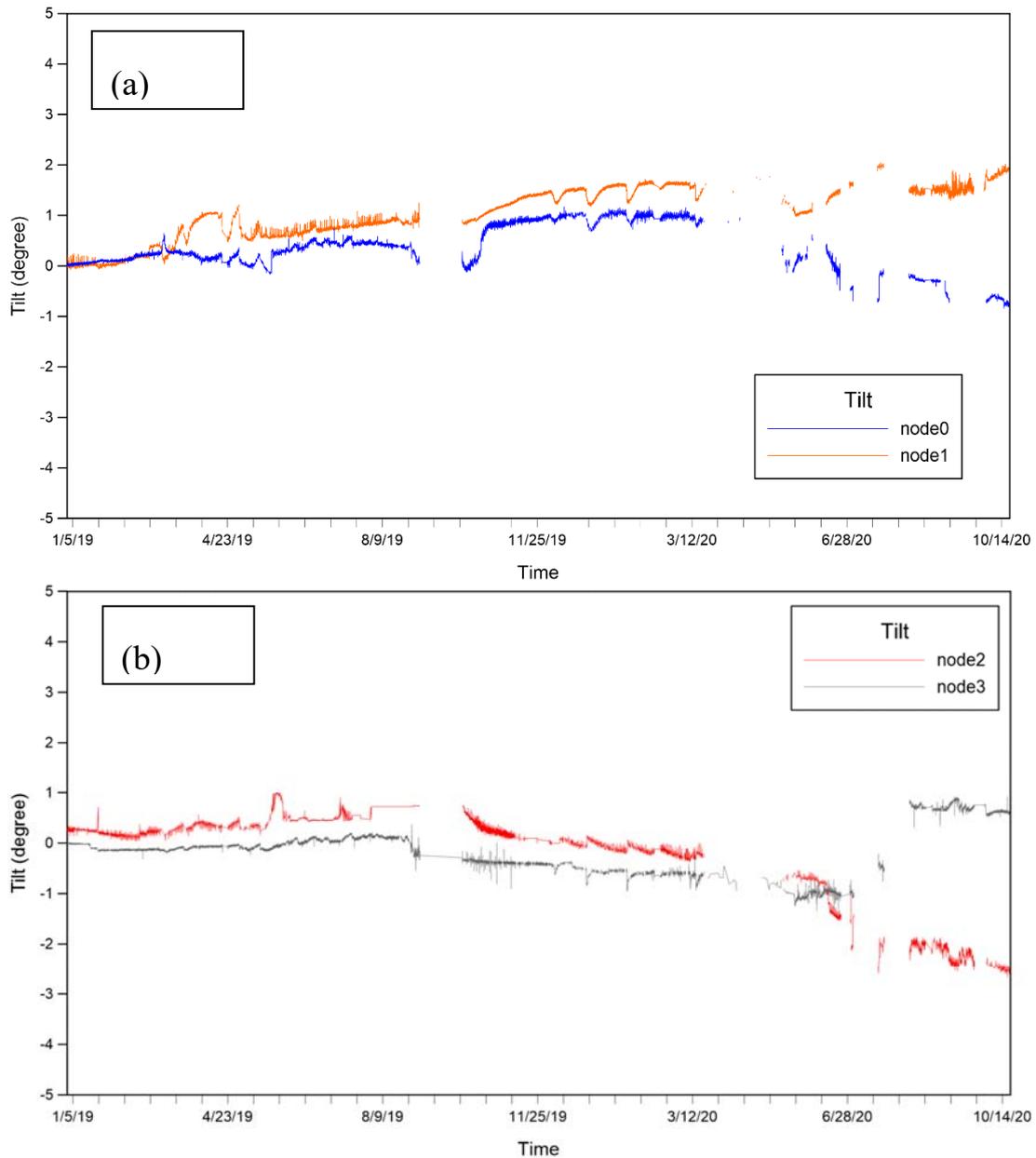


圖 4.8 甲仙測站地表傾斜角監測結果

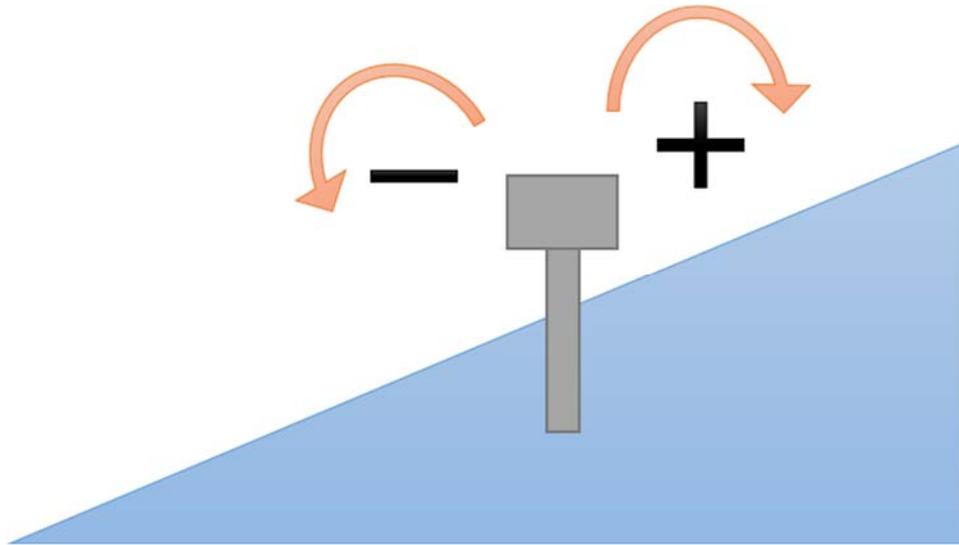


圖 4.9 傾斜角量測方向

### 4.3 阿里山五彎仔場址及監測資料

108 年度經工作會議討論，因原西湖休息站邊坡測站較不符合研究破壞類型，且設備多已損壞，決定撤除西湖休息站場址，並於阿里山五彎仔崩塌增設新淺層滑動監測場址，系統於 108/06/18 正式上線，場址位於臺 18 線五彎仔路段(里程 42K+400 至 46K+100 之間)，如圖 4.10 所示。

五彎仔地滑區，佔地約 50 公頃，是一古老之崩塌地，該地區長年來邊坡滑移嚴重，里程 45k+840 路段在民國 92 年 6 月 26 日發生了自民國 85 年賀伯風災以來，最嚴重的邊坡滑動路基崩踏陷落災害，估計路基流失長度約 150 公尺。此場址具有地形測量、地質鑽探、地質調查、邊坡監測、地球物理探測、地下水位量測、既有擋土設施調查等工作及邊坡穩定分析成果，皆有相關資料可供參考。



圖 4.10 五彎仔邊坡空照圖(Google Earth)

監測系統設計上由監測模組、太陽能系統及資料接收端三部分組成，監測模組上配置多點電子式含水量計、高精密度電子式傾斜儀、液位計、無線傳輸模組及微控制器，為各種微機電感測元件之整合，量測各深度土壤含水量及地表傾斜量，並將資料以無線傳輸方式傳出。太陽能系統用於供給監測模組電力，使系統不斷電長期監測。五彎仔場址共安裝 4 支監測模組，模組配置如圖 4.10 所示，各模組資訊如表 4-1 所列，ID01 為雨量計，ID02 及 ID03 為安裝於崩積陡坡之分層水分及地表傾斜儀，ID04 主要為地下水位監測。第一及二批安裝設備因現地滑動掩埋及人為移動而僅餘雨量計，ID2 於 109/05/16 水份計損壞後，研究團隊於 109/09/16 重新安裝，ID3 於 109/09/16 水份計損壞。

表 4-1 模組資訊表

序號	感測器	現場照片
ID01	雨量計	 A photograph showing a rain gauge station in a field. The rain gauge is a white cylindrical device mounted on a white metal stand. To its right, there is a solar panel mounted on a white metal frame. The ground is a mix of dirt and small rocks, and the background shows a grassy field with some trees in the distance.
ID02	含水量計、 傾斜儀	 A photograph of a slope covered in dark, loose soil or ash. A red circle highlights a small, white, rectangular sensor embedded in the soil. A red arrow points from this circle to a larger, detailed inset photograph on the right, which shows the sensor more clearly. The sensor is a small, white, rectangular device with a flat top surface. The background shows a grassy slope and some trees in the distance.

<p>ID03</p>	<p>含水量計、 傾斜儀</p>	
<p>ID04</p>	<p>傾斜儀、 液位計(孔口 高程 702 m)</p>	

#### 4.3.1 五彎仔場址土層含水量監測資料

圖 4.11~12 分別為 ID02 及 ID03 於 109/5/7 至 109/10/18 之體積含水量隨降雨之變化，所用之雨量資料為 ID01 之讀數，安裝完成後感測器對降雨皆有反應，此區土壤含水量高，此與地表可見少量逕流水吻合，所以含水量讀多數偏高，且含水量不易消散，導致經過較大降雨時地表均產生滑動而將模組掩埋，其破壞機制與淺層滑動不盡相符，目前 ID02 可正常運作，ID03 已被掩埋損壞，建議重新規劃監測系統及分析模式。

#### 4.3.2 五彎仔場址傾斜監測資料

圖 4.13~15 為 ID02 至 ID04 之監測傾斜量變化結果。ID02 於 109/05/12 起產生持續傾角變化，並於 109/05/16 掩埋失效，ID03 於 108/11/01 至 109/09/16 觀測結果於雨季後傾角變化大，109/09/16 現地勘查後多受土砂覆蓋影響。ID04 位於舊路擋土牆體頂背填土，現地觀測有輕微沖蝕，因此其傾角有輕微增加。109/05/11 現場勘查顯示，表層土體有顯著滑動的痕跡，現地地貌顯著改變，顯示此區具有極高的破壞潛勢。此場址因地表變動劇烈，且現地破壞機制與研究選定之淺層及飽和土層滑動不同，後續建議依前期審查建議，量測道路邊緣邊坡，並引入擋土設施監測與預警。

#### 4.3.3 五彎仔場址水位監測資料

圖 4.16 為至 109/05/06~109/10/18 止 ID04 水位監測結果，此孔位孔口高程為 702 m，梅雨季前水位位在地表下 24 公尺，2020 年 7 月梅雨使水位最高上升約 10 m，於一周後下降約 5m，目前水位約在高程 694 m (水深 8m)。

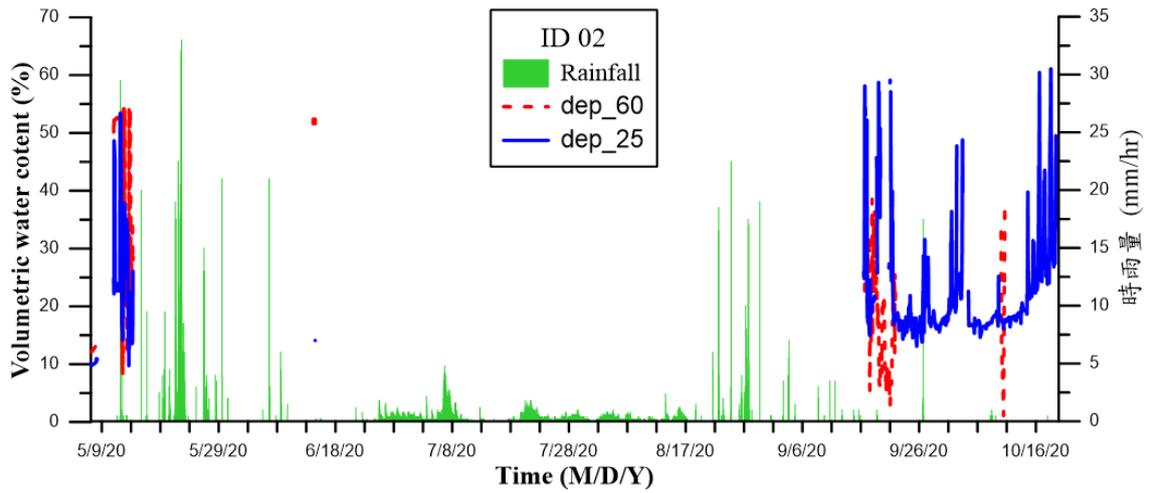


圖 4.11 ID02 體積含水量量測結果

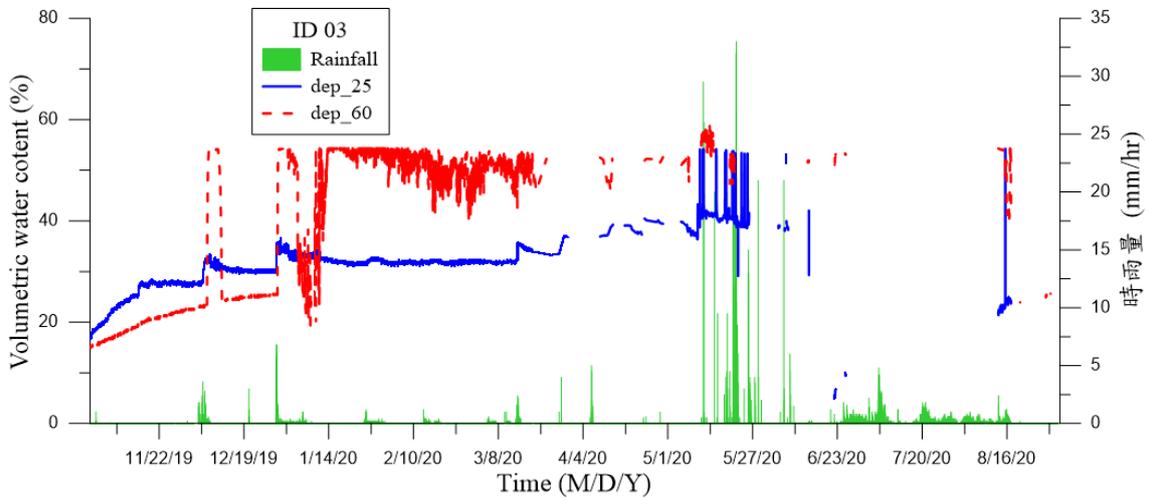


圖 4.12 ID03 體積含水量量測結果

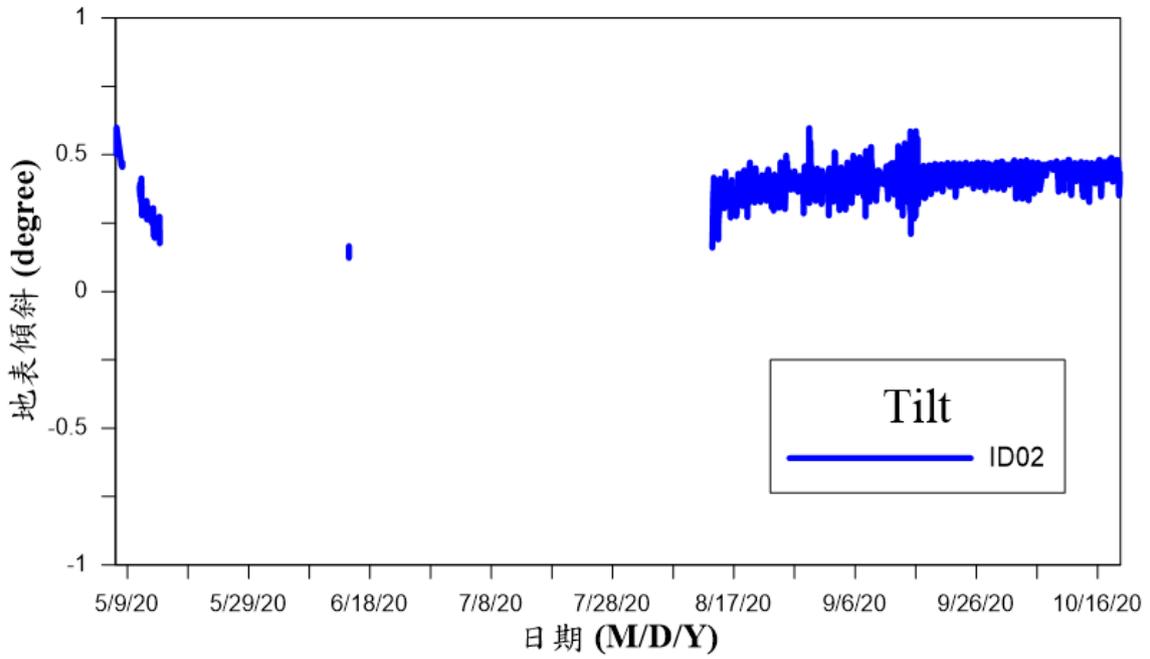


圖 4.13 ID02 傾斜監測結果

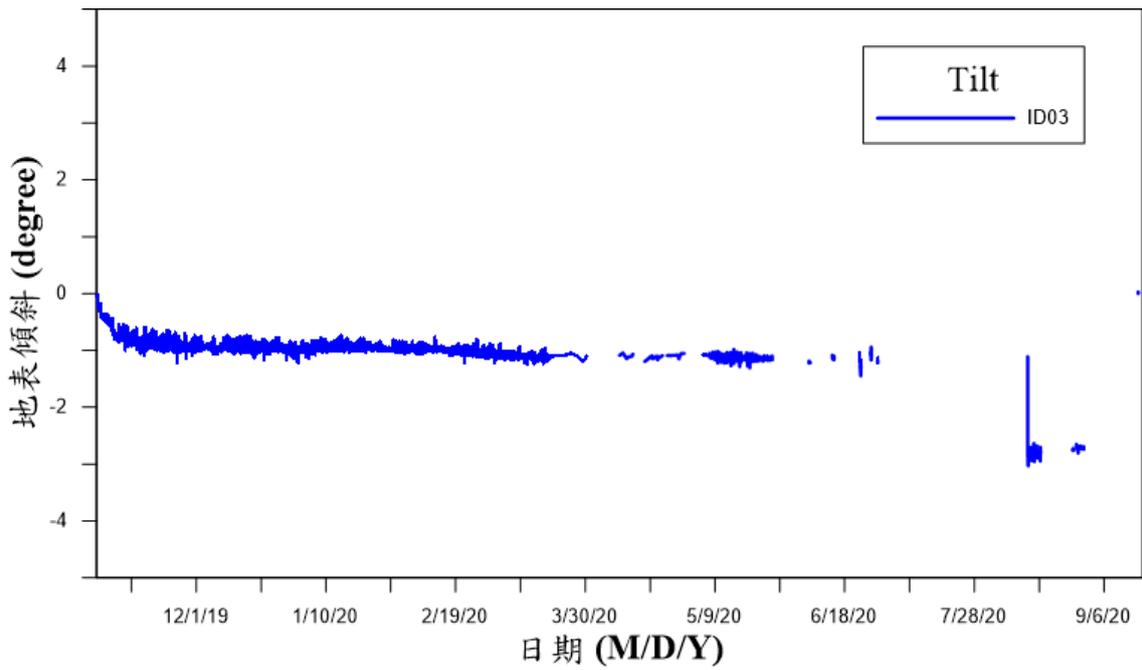


圖 4.14 ID03 傾斜監測結果

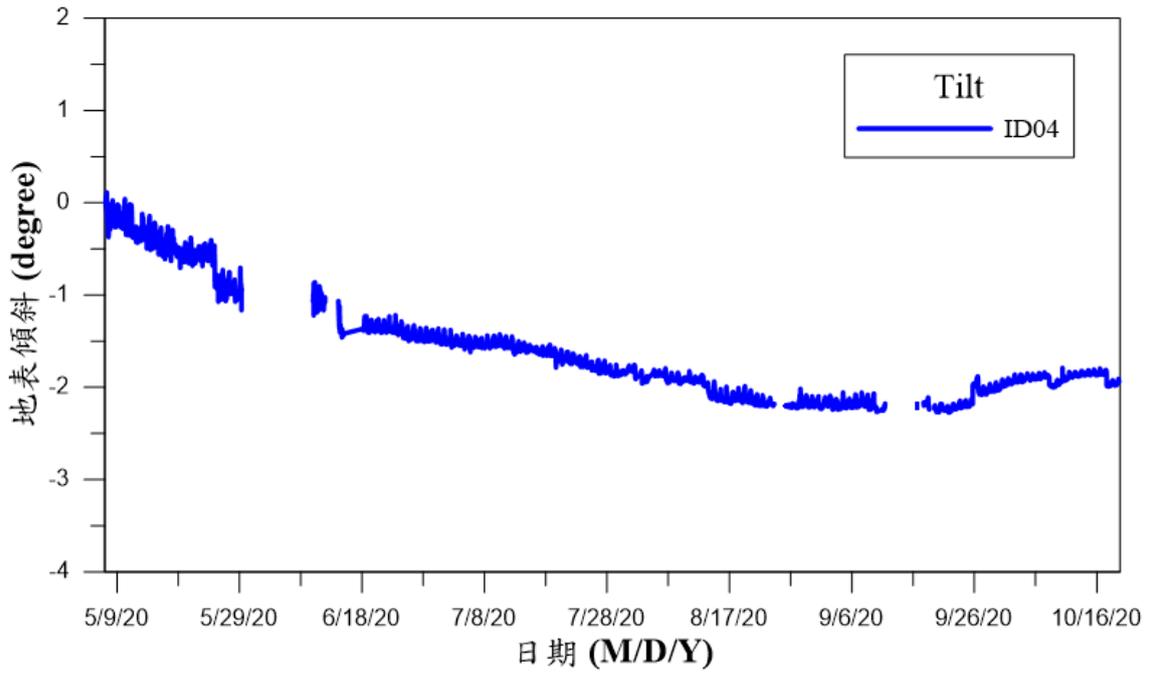


圖 4.15 ID04 傾斜監測結果

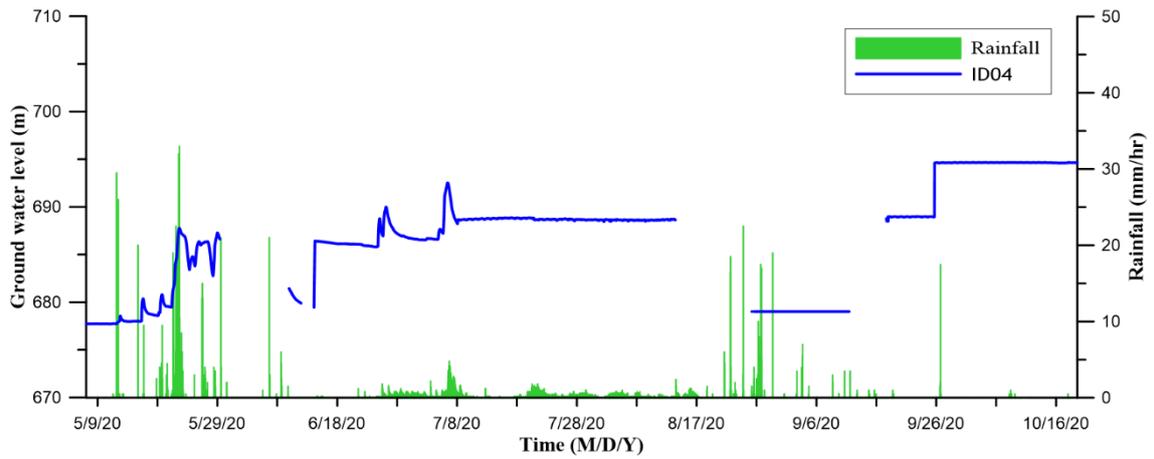


圖 4.16 ID04 水位監測結果

## 第五章 飽和土層場址監測成果及時間域水壓推估

本研究飽和土層破壞定義為破壞面發生於飽和土層，其力學平衡因地下水位上升使其孔隙水壓增加導致土壤強度與勁度降低，平行滲流使下滑驅動力增加，引致邊坡滑動，為進行本研究之系統測試與現地監測，飽和土層滑動候選場址須符合下列條件：(1)現地需具有厚層軟弱土壤；(2)坡角小於土壤有效摩擦角；(3)地下水位高或入滲速率快及(4)臨界破壞面為位於飽和土層之深層破壞。

飽和土層土壤邊坡破壞雖為台灣常見之災害類型，但進行解析法分析需有一定解析度之地形幾何與詳盡之地質材料參數資料，此類資料並不見於現有資料庫，107 年經公路局五工處同意，選定台 20 線 52k+150 處為監測場址，108 年因場址下邊坡進行整治工程，路面同步進行維護，因此 108 年 5 月起之下邊坡監測系統及 60 m 深水位監測必須暫停監測，原安裝之擋土牆傾角監測亦一併暫停，109 年度配合整治工程完成，於 4 月起再恢復相關監測。

因台 20 線 52k 場址剛完成整治，其滑動潛勢已大幅降低，因此其主要研究目標轉為崩積層水壓上升模式推估與擋土支撐系統監測模組耐久測試，為驗證擋土支撐系統分析模式與測試預警系統，有必要新增一適宜之場址。109 年度選定台南市市道 175 線 50k+500 地滑區為新增監測場址，並於 109 年 2 月安裝與台 20 線 52k+150 相近之系統，監測崩積層水位變化與牆體傾角，同時於 109 年度完成水力力學耦合邊坡及擋土系統數值分析，建立依時預警門檻值，並與雲端整合平台整合，進行主動通知測試。

飽和土層地下水位為預警之重要指標，其時間域預測為進行所需依時預警之關鍵課題之一，且因長期水位升降監測之鑽探成本與長期即時監測技術較高，因此發展以降雨觀測推估時間域水位升降加入為本年度課題。

## 5.1 時間域孔隙水壓推估模式

對於潛在飽和土層破壞場址，其關鍵在於掌握長期降雨導致地下水壓上升之行為，降雨過程中，垂直入滲水與上游滲流水對地下水層進行補助將引起孔隙水壓增加，當飽和土層之有效應力、剪力強度將下降與驅動力增加至臨界值時(安全係數 $FS \leq 1$ )，產生飽和土層滑動破壞。而水力力學耦合分析包括考慮非飽合土壤中入滲之及飽和區孔隙水壓變化特點，考慮水力邊界條件，求解 Richard's equation，以模擬入滲與滲流行為。

本研究嘗試發展一時間域孔隙水壓推估模式，以運研所長期於台 20 線監測之水位觀測與雨量成果，建立飽和層孔隙水壓升降與降雨特徵之推估模式。水壓推估模式以有限差分方法(FDM)求解入滲控制方程式，可求得不同時階下壓力水頭隨深度之變化關係，建立單孔監測水位井之一維 FDM 入滲模型，配合過往物聯網監測蒐集形成之大數據，擬合校正符合場址孔隙水壓依時變化行為之數值模型。

以歷史雨量作為模型輸入值，並以歷史水位觀測值作為輸出值率定模型相關水利參數，此作法可統合三維地形滲流影響、不同土層非飽和性質與均質性等效應，建立簡化一維土層入滲模型，後續可以實時降雨特徵(rainfall pattern)作為簡化入滲模型新輸入值，推估台 20 線或幾何及材料相近崩積層時間域上之孔隙水壓變化，推估模式可將時間因子帶入穩定性分析中，配合傳統極限平衡理論或二維數值模型評估邊坡穩定性，達成發展依時預警之目的。

### 5.1.1 一維FDM入滲控制方程式

假設水在非飽和土中的流動滿足達西定律，且非飽和土壤之滲透係數為土壤含水量的函數，土中水流動支控制方程式可依質量守衡原理推導，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的暫態地下水流控制方程式。鉛垂向之一維 Richard's equation(式 2.4)為偏微分方程式，並無唯一解，因此需透過數學方式來求得近似解。

研究選擇以有限差分方法(finite difference method, FDM)來求解入滲控制方程式。依照時間、空間下內插點之選擇，有限差分方法可分為顯性方法(explicit method)、隱性方法(implicit method)與克蘭克-尼科爾森方法(Crank-Nicolson method)，其差異主要在於求解下一時階( $j = 0, j+1\dots$ )之解時所引用之內插點。克蘭克-尼科爾森方法主要綜合顯性與隱性之方法，以前、後時階( $j=j, j+1$ )之內插點( $i=i-1, i, i+1$ )求解聯立方程式，時階為  $j=j+1/2$  下之解，雖然在數據計算量較大，但數值求解穩定且精確，將式 2.4 之流體於孔隙流動控制方程式改寫為克蘭克-尼科爾森方法，則如式 5.1 所式：

$$C_i^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left[ k_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \left( \frac{h_{i+1}^{j+\frac{1}{2}} - h_i^{j+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) - k_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \left( \frac{h_i^{j+\frac{1}{2}} - h_{i-1}^{j+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) \right] \quad (5.1)$$

其數值方法之誤差與時間間格( $\Delta t$ )、空間間格( $\Delta z$ )大小有關，而透過邊界條件與數值模型之聯立方程式形成之矩陣，可代表非飽和土層與飽和土層之狀態，其解可以數值線性代數方法三對角矩陣運算(tridiagonal matrix algorithm)求解出各有限差分節點於不同時階下之壓力水頭變化  $h_p(z, t)$ ，其中壓力水頭為零對應之深度即為地下水位面位置。

### 5.1.2 一維FDM入滲數值模型

建立之一維 FDM 入滲數值模型如圖 5.1 所示，一維 FDM 入滲模型同時包含非飽和與飽和土層，而地下水位面(WT)為一浮動邊界，將由初始水頭分佈、上邊界降雨特徵  $I(t)$ 與下邊界滲漏量  $Q$  決定下一時階下壓力水頭分佈，即可推估飽和層孔隙水壓於時間域之依時反應。對於一均質土層，垂直方向以地下水位面分隔為非飽和與飽和土層，其切分為  $N$  個等大差分網格(grid)，模型上部邊界(upper boundary)為一入滲邊界，用以模擬降雨情況，以降雨強度(rainfall intensity)作為輸入參數，而降雨強度依時變化則為降雨特徵。並透過非飽和土層之 SWCC 轉換為對應之負壓力水頭值(即基質吸力)，將諾伊曼邊界條件轉換為狄利克雷邊

界條件，上述作法除可簡化滲流模型複雜度，而對於降雨強度大於或等於飽和滲透係數時，壓力水頭皆以飽和滲透係數做為代表。下方邊界 (basal boundary) 為一滲漏邊界，模擬地下水從數值模型中之流出量，其流出量僅與時間有關。

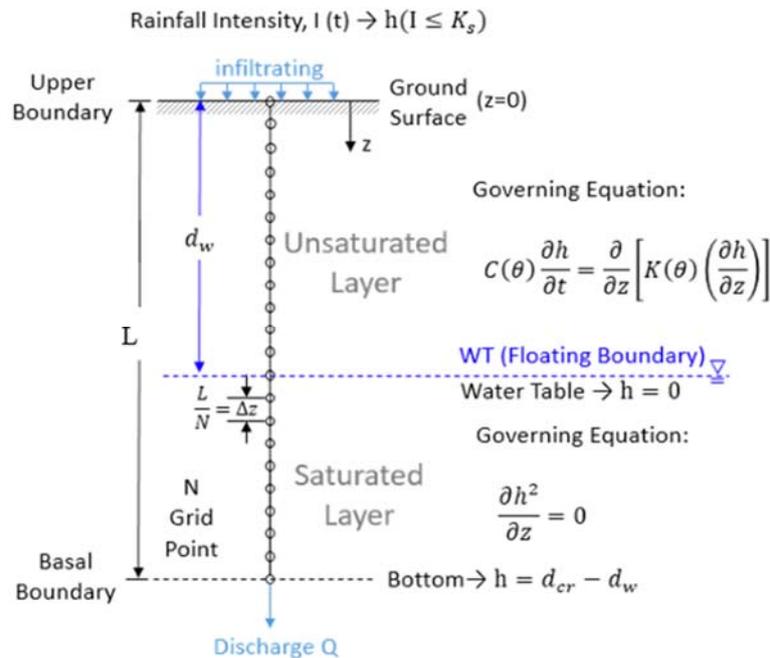


圖5.1 一維FDM入滲數值模型

模型中非飽和土層之土水特徵曲線採用 VG 模式進行描述，而飽和土層中，比儲水參數  $C(\theta)$  為零與滲透係數為飽和滲透係數  $k_s$ 。在土層初始狀態、邊界條件下，可模擬各時階(time step)下壓力水頭變化  $h(z, t)$ ，此處為簡化入滲分析，假設非飽和與飽和土層內壓力水頭隨深度呈線性增加，綜合前述之有限差分方法、非飽和土水特性描述、初始與邊界條件設定進行時間域上孔隙水壓推估分析，此處整理一維 FDM 入滲模型之基礎假設：

1. 土層為均質材料並依據地下水位面分隔為非飽和土層與飽和土層，且僅考慮一維垂直方向降雨入滲行為。
2. 土層內初始壓力水頭隨深度增加呈線性分布。
3. 降雨發生時，時雨量為一均佈降雨(uniform rainfall)，且地

表面土壤滲透性( $k_r$ ) 與降雨強度(Intensity,  $I$ )立即達成平衡；而土壤瞬時可最大可吸收之雨量以飽和滲透係數作為分界，超過時將產生地表逕流。

4. 降雨事件過後之表層土壤體積含水量隨時間增加而遞減，以模擬表層體積含水量逐漸趨於乾燥之特性，此地表蒸發常數為一時間常數。
5. 短期內地下水層滲漏量為一時間常數。

為驗證研究發展之一維入滲模型，研究以Freeze and Banner (1970)室內砂柱入滲試驗結果進行擬合比較。其試驗砂之非飽和VG模式特徵參數擬合結果與頂、底部水利邊界條件整理如表5-1所示，VG模式SWCC參數擬合基於Freeze and Banner (1970)壓力鍋試驗提供之基質吸力與體積含水量之關係。

**表5-1 一維地下水補注擬合輸入參數**

飽和體積含水量 $\theta_s$	0.35
殘餘體積含水量 $\theta_r$	0.07
VG 參數 $\alpha$	0.027
VG 參數 $n$	2.61
飽和滲透係 $k_s$ (cm/sec)	0.0125
補助速率 $R$ (cm/min)	0.2
洩降速率 $Q$ (cm/min)	0.1

頂部入滲邊界補助速率( $R$ )為0.2 cm/min，經過SWCC對應模型頂部為基質吸力為-30 cm，而模型底部則每分鐘扣除0.1cm高之水量。各時階下壓力水頭變化之模擬成果如圖5.2所示，過程中保持表層基質吸力於-30 cm處，時間 $t=0$ 分鐘時，設定初始水位於深度72cm處，並依照前述之初始條件設定壓力水頭為線性關係並隨深度增加， $t=10$ 分鐘時，此時入滲深度約為30cm，而水位下降至深度73.66 cm處， $t=25$ 分鐘時，入滲範圍已影響至飽和土層部分，此時水位上升至深度65.05cm處，並且於 $t=50$ 分鐘時，壓力水頭幾乎回復至線性關係，水位於深度32.07cm處。

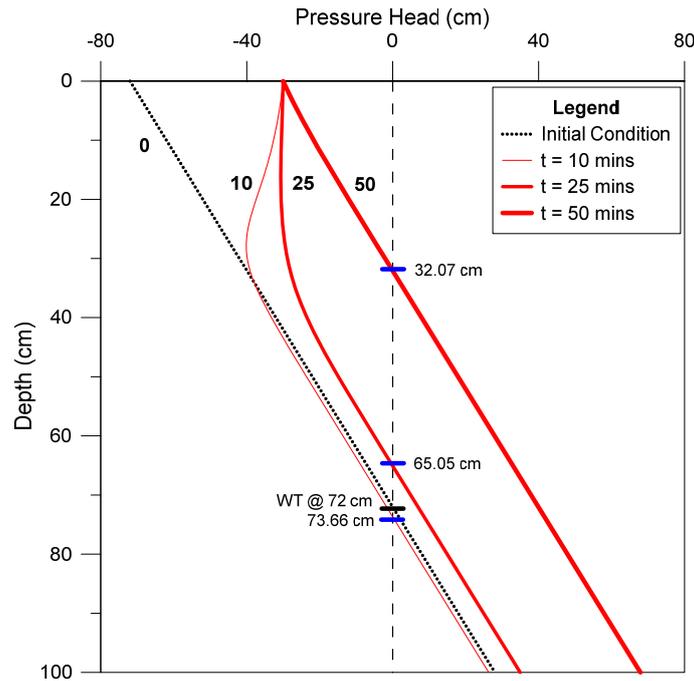


圖5.2 擬合室內入滲試驗依時壓力水頭變化成果

擬合之水位隨時間變化關係比較如圖 5.3 所示，Freeze and Banner (1970) 實驗結果顯示砂柱內水位約於入滲 12 分鐘後開始上升，擬合結果(FDM)與此時間點接近，擬合結果顯示入滲 45 分鐘後，因 FDM 模型上部邊界壓力水頭固定為 -30 cm，致使水位上升幅度開始趨緩，然而整體水位變化趨勢相較於 Freeze and Banner (1970) 數值模型更貼近於實驗結果。

水位上升結果呈現非線性行為主要與一維 FDM 入滲模型中非飽和土層參數為 VG 模式有關，且非線性行為較符合實際地下水層水位變化趨勢。透過上述實際室內入滲實驗擬合成果可驗證一維 FDM 入滲模型之可行性，後續可透過實際雨量監測作為輸入邊界，模擬未來水位升降，以現場監測數據進行模型率定，將可避免錯誤土層相關參數假設造成之水位預測誤差。後續以台 20 線 52k 場址之崩積層監測數據進行水壓上升模式推估分析，詳見 5.2.3 小節。

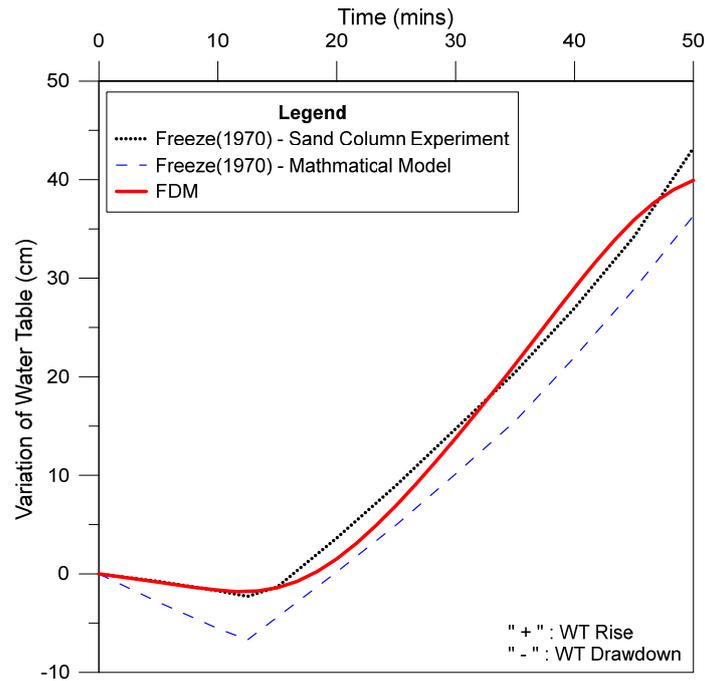


圖 5.3 FDM模型與室內砂柱試驗依時水位變化比較

## 5.2 台 20 線監測場址

### 5.2.1 台20線場址背景資料與監測配置

107 年計畫已於台 20 線 52k+150 處安裝飽和土層滑動監測場址，地理位置如圖 5.4 所示，場址位於南化水庫東南方，道路邊坡朝東北傾斜，此路段長期以來每逢豪大雨，時常會發生邊坡崩塌、路基流失及道路下陷等情形，嚴重時甚至造成道路中斷，影響交通，危及用路人之安全，亦造成經濟上的重大損失，里程 52k+80~240 路段下邊坡於 99 年莫拉克颱風期間，發生嚴重崩塌，造成西行線車道交通中斷，而 100 年，該路段針對莫拉克風災緊及補強後，至 107 年該路段仍持續下陷變形，邊坡尚處於不穩定之情形。



圖 5.4 場址位置圖

根據青山工程顧問公司(2017)於此處進行之鑽探調查報告，鄰近監測邊坡之地質狀態可概分為三種，分別說明如下：

1. 崩積層：本層為覆蓋邊坡之最表層，主要由土壤、岩屑及大小不一之崩積岩塊組成。本研究區域道路上下邊坡之崩積層厚度大多在 10 公尺內。
2. 岩層：本路段岩盤上部多為厚層砂岩，下部則多為深灰色頁岩與灰白色細粒砂岩所組成之互層。
3. 破碎帶：因所在區域鄰近數個斷層及皺褶作用影響，受大地應力作用較劇烈，使本場址之地質較為破碎，產生相當發達之節理與剪裂帶。

本場址鄰近地區歷年降雨狀況系參考鄰近之甲仙雨量站與北寮雨量站，統計 102 年至 106 年月平均降雨量資料，年平均降雨量分別為 2925.4 mm 與 2280.8 mm，佔全年總雨量 89.3 %及 87.5 %，降雨受到梅雨季節與夏季颱風影響，多集中於每年 5 至 9 月期間，而 10 月至翌年

4 月期間，降雨量則明顯較少。根據過往降雨記錄，乾季期間雖有數場連續降雨，但水位無上升趨勢，顯示該區域之地下水位變動存在一門檻值，當累積降雨量或降雨延時超越此值，地下水位才開始變動。

本場址舊有之水位井為量測位於深層砂岩與破碎帶間之拘限含水層，107 年計畫另新鑽兩孔深度僅達崩積層底部之水位孔，以觀測位於崩積層之自由含水層之水位變化兩孔深度皆為 11m，並於此場址設置雨量計。107 年度起陸續於台 20 線 52k+150 處裝設六組無線監測模組與一組伺服器端。

各監測點之配置與現況如表 5-2 所列，位置配置圖與剖面示意圖如圖 5.5 與圖 5.6 所示，ID 01 測站為雨量計，原裝設於道路下邊坡，108 年因下邊坡整治移至道路旁；ID02 與 ID04 測站分別位於道路上下邊坡，ID02 與 ID04 測站之液位計裝設深度皆約 35m，為量測位於破碎帶與砂岩間的拘限含水層水位，108 年 5 月起 ID04 因路面整修移除；ID 03 與 ID05 測站分別位於道路下邊坡與上邊坡，為本計畫新增孔位，ID 03 與 ID05 測站之液位計深度皆約 11m，量測位於崩積層之自由含水層，108 年 5 月 ID03 因進行下邊坡整治工程已撤除；109 年 2 月起新增 ID06，量測牆體法向與切向傾角，位於擋土牆頂。

表 5-2 台 20 線 52k 測站配置表

ID	配置	水位孔深度	水位孔高程	現況
01	雨量計	無	無	正常
02	液位計	40 m	292 m	正常
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281 m	移除
04	液位計	60 m	286 m	移除
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292 m	正常
06	雙向牆體傾角	無	無	正常

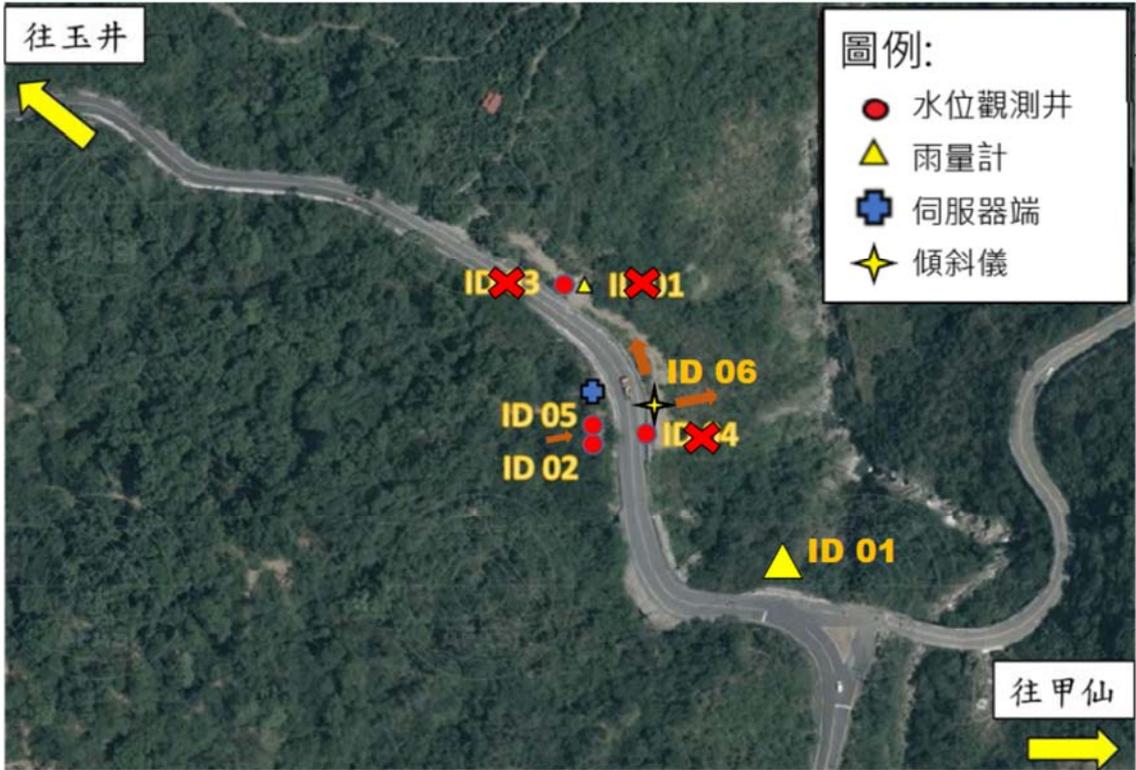


圖 5.5 監測儀器配置圖

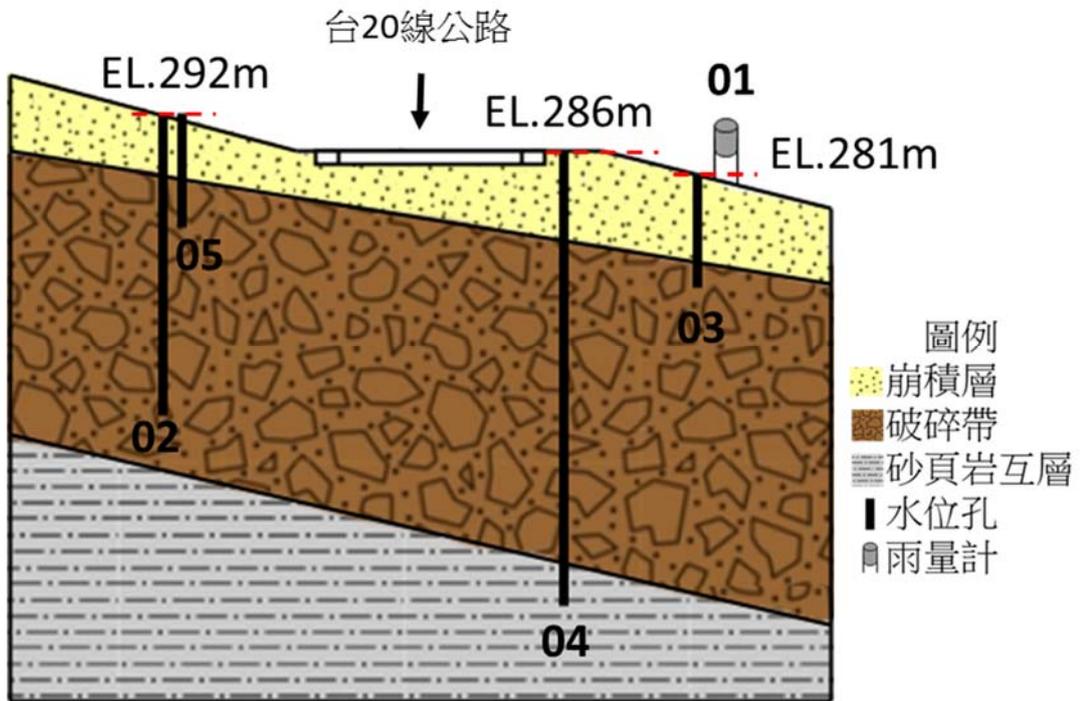


圖 5.6 監測剖面示意圖

## 5.2.2 台20線地下水位監測

圖 5.7 及 5.8 為台 20 線 52k+150 路段之岩層及崩積層地下水位監測圖，ID 02 監測值於乾季為水位較低狀態，偶有降雨，但降雨量或降雨延時未達其入滲門檻值，水位並無變化，而梅雨季期間，長時降雨使孔內水位升高。ID05 測站於梅雨季期間水位迅速上升，顯示上邊坡之崩積層內有自由地下水層且水位極易快速上升，極可能發生因地下水位上升，孔隙水壓增加使土壤強度降低，導致邊坡滑動。

圖 5.9 為進行降雨特徵與水位上升統計分析各項參數定義示意圖，定義開始降雨至地下水位開始變動間的累積雨量為地下水位上升之降雨門檻值，其時間為雨量門檻延時，地下水位上升速率為水位上升高度除最高水位時間減水位開始上升時間，最高水位累積雨量指開始降雨到最高水位之間的累積雨量。根據國家災害防救科技中心定義降雨延時 6 小時以內為短延時降雨，6 小時以上為長延時降雨。

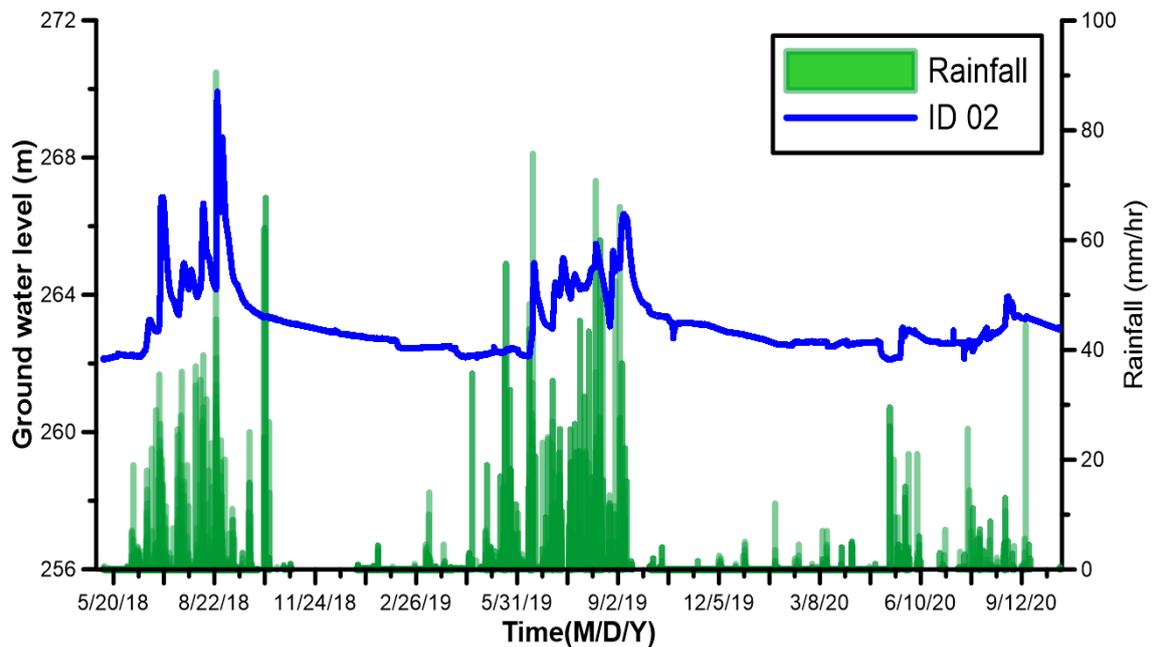


圖 5.7 ID02 地下水位監測數據

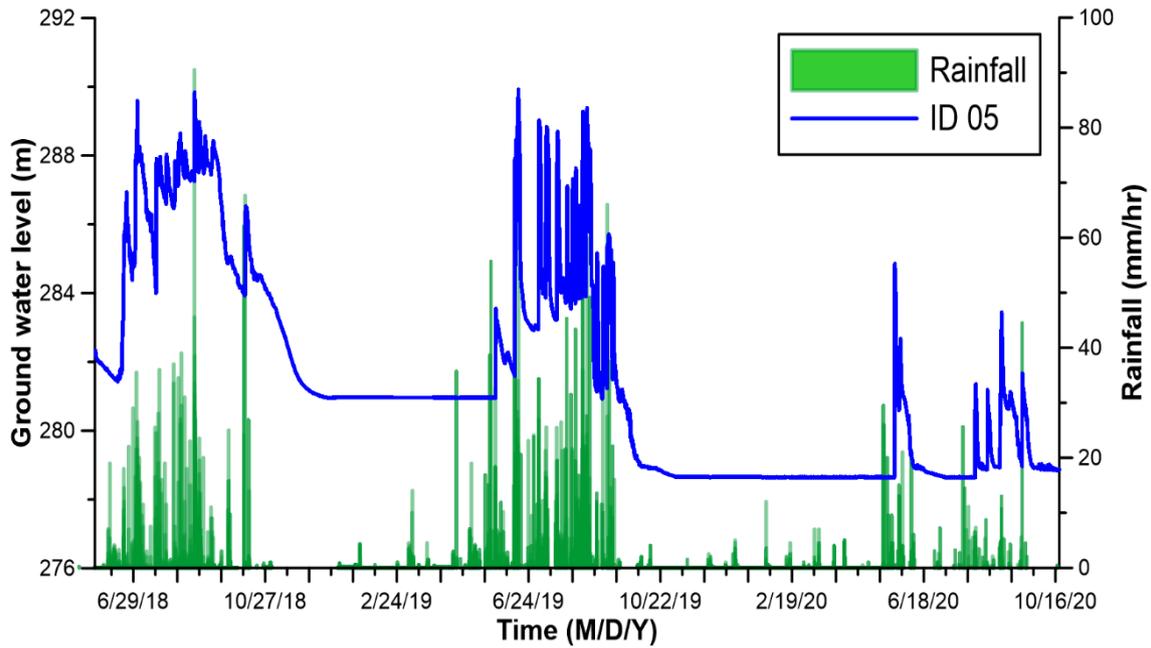


圖 5.8 ID05 地下水位監測數據

ID 02 監測結果顯示岩層地下水位變動受累積雨量影響，現有監測結果顯示水位於累積雨量達 10.5mm 時開始上升，圖 5.10 為累積雨量與岩層水位上升高度關係，趨勢顯示累積雨量越大，水位上升越多，但仍有數個降雨事件落在 95 %信賴區間外，如圖中事件一之數據與其他數據關聯性較低，推測因事件一發生前，前期降雨使土層飽和度上升，使事件一之降雨能快速滲入地下水層，提升地下水水位高度，此外現有資料顯示，岩層累積雨量與水位上升高度關聯性不明確，兩數值間有其他因素影響，此為後續可精進之處。但因本場址主要滑動面為崩積層與岩盤交界，受 ID 02 及 ID 04 之量測水位成果影響不高，不致顯著影響計畫進行。

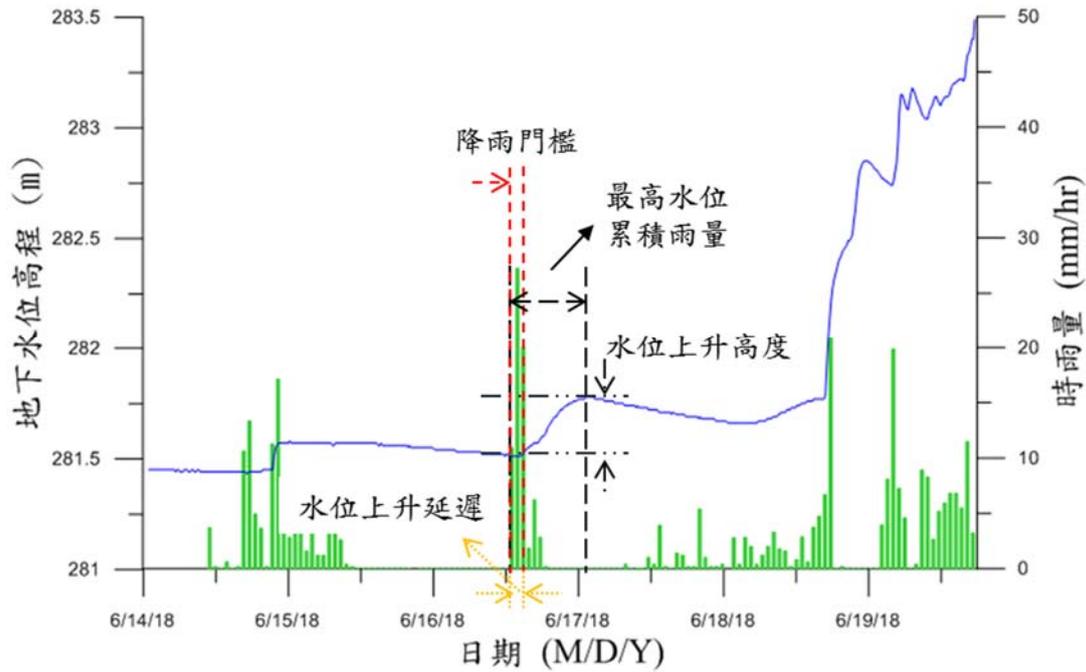


圖 5.9 降雨特徵參數定義示意圖

崩積層水位於短延時降雨達 10mm 時水位開始上升，隨著降雨延時增長，觸發地下水水位開始上升之所需累積雨量減少，延時越長，所需累積雨量越少，如圖 5.11 所示，可以此特性推估降雨開始後水位開始上升時間。圖 5.12 顯示累積雨量影響崩積層地下水水位上升高度，累積雨量越多，上升高度越高，以此可推估崩積層降雨後水位上升高度。

雨季水位上升速率亦與土層體積含水量有關，因非飽和滲透係數小於飽和滲透係數，土壤越接近飽和時，水力傳導越快，地表土層含水量越高，降雨越容易補充地下水層，水位越容易升高。圖 5.13 為分析崩積層地下水水位上升速率與體積含水量之關係，結果成高度正相關，顯示地表的體積含水量對地下水水位上升速率有極大的影響，含水量越多上升速率越大。

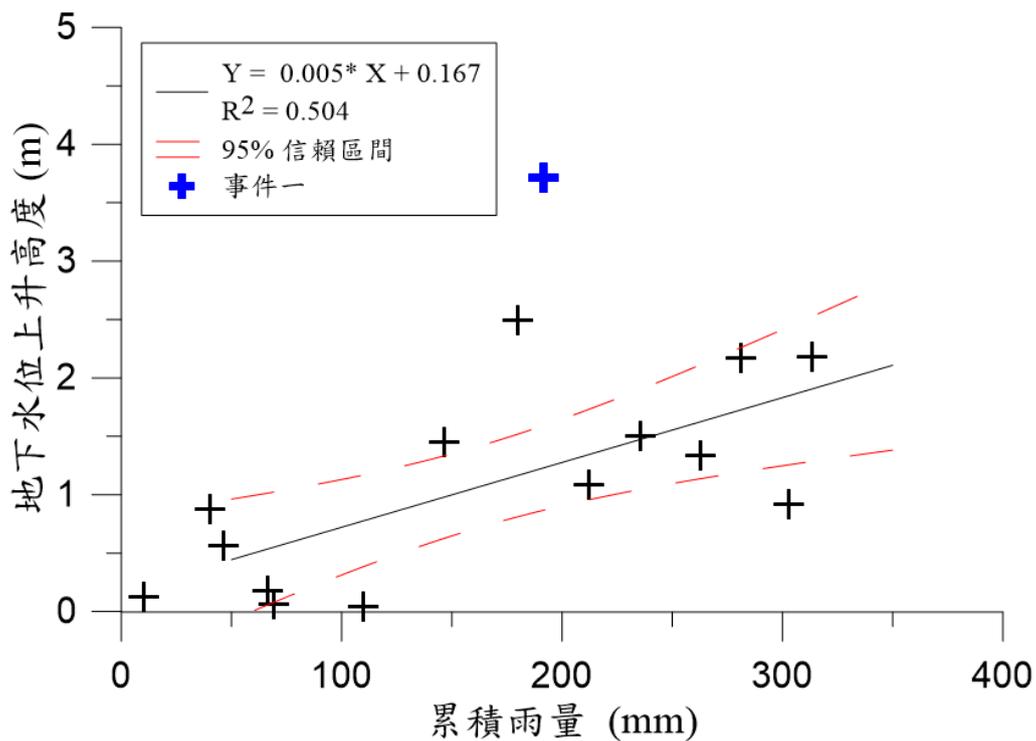


圖 5.10 累積雨量與岩層水位上升高度關係圖

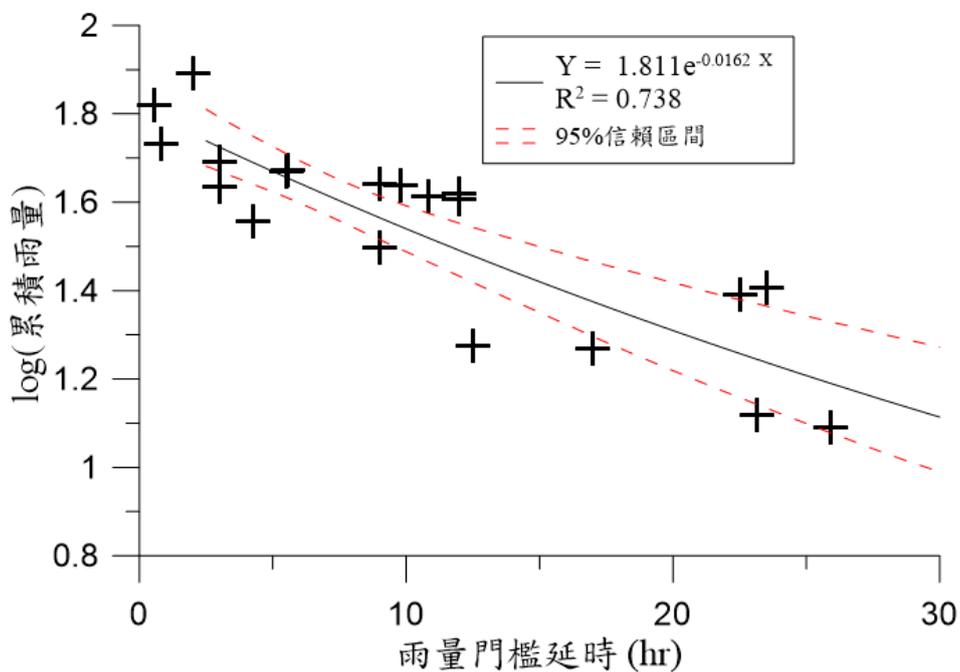


圖 5.11 崩積層雨量門檻延時與對數累積雨量關係圖

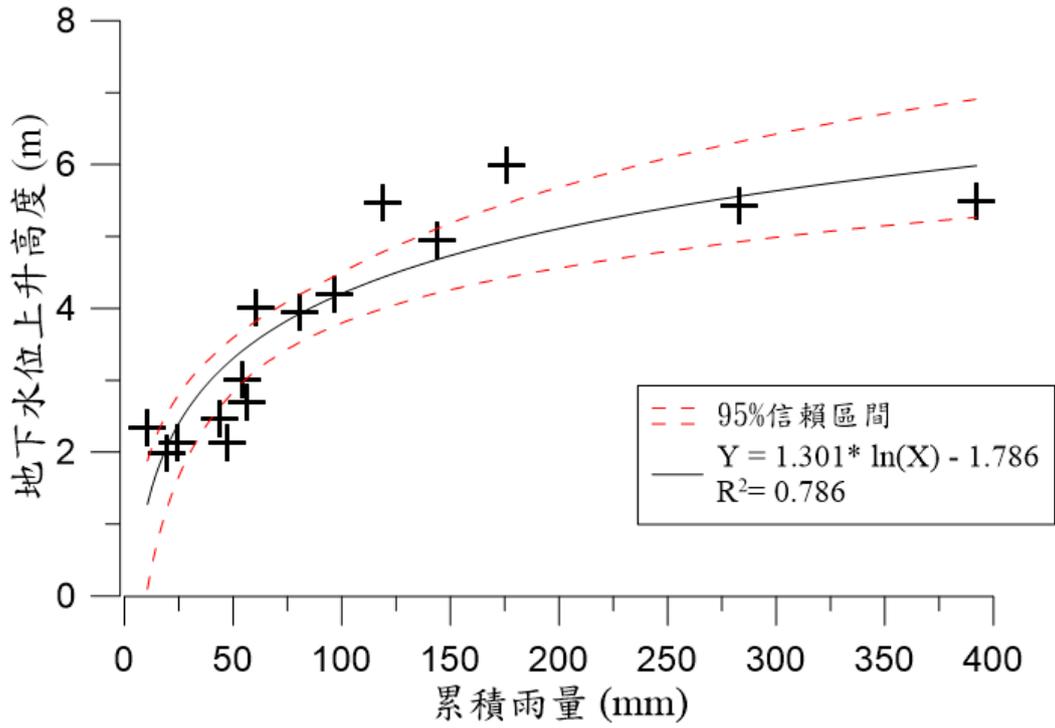


圖 5.12 累積雨量與地下水位高度關係圖

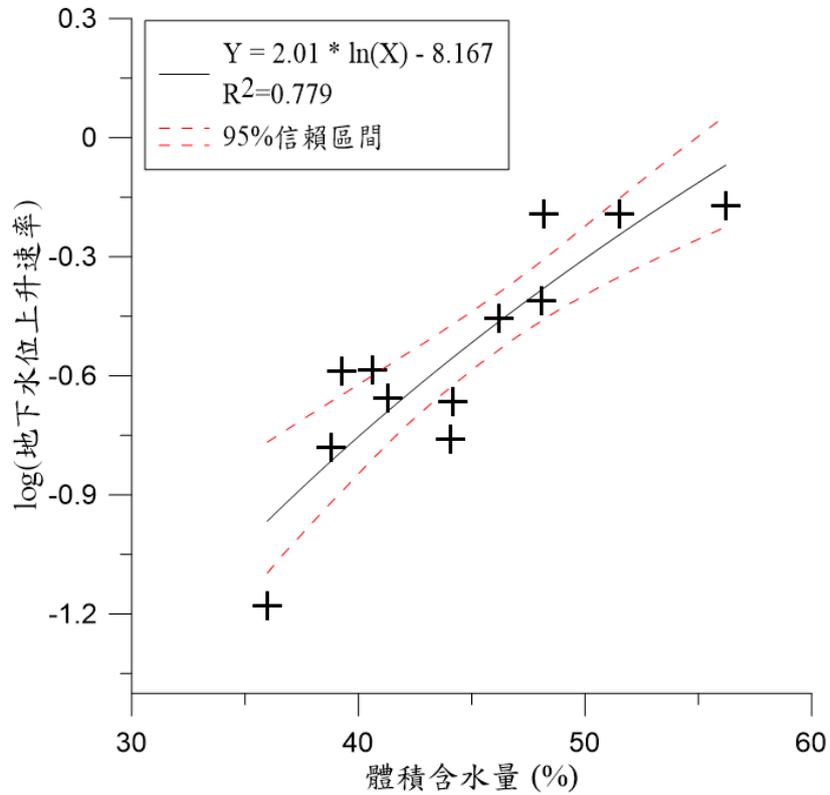


圖 5.13 崩積層地下水位上升速率與體積含水量關係圖

### 5.2.3 表層體積含水量與傾斜儀

破壞本場址原裝設 ID03 及 ID05 2 組含水量監測模組，因應台 20 線道路下邊坡整治，ID03 含水量與傾斜於 108/04/15 暫停監測。圖 5.14 為 ID05 測站含水量監測結果，感測器對降雨事件反應敏感，在降雨事件後逐步降低；圖 5.15 為 ID05 及 ID06 傾斜儀監測結果，顯示 ID05 傾斜儀於監測初期間有極微幅的滑移，108 年有 0.25 度上下震盪讀數，因其位於蛇籠擋土牆上方，蛇籠局部有部分輕微變形，顯示表層傾斜儀可反應擋土設施之變化，109 年監測顯示 10 月雨季後有約 0.5 度之傾角增加，而 109 年 2 月新裝於新設擋土牆之雙傾斜儀 ID06 監測結果顯示，至 109/10/19 垂直牆面之傾斜值有微幅的上升約 0.2 度，而水平牆面之傾斜值於監測期間無顯著變化。

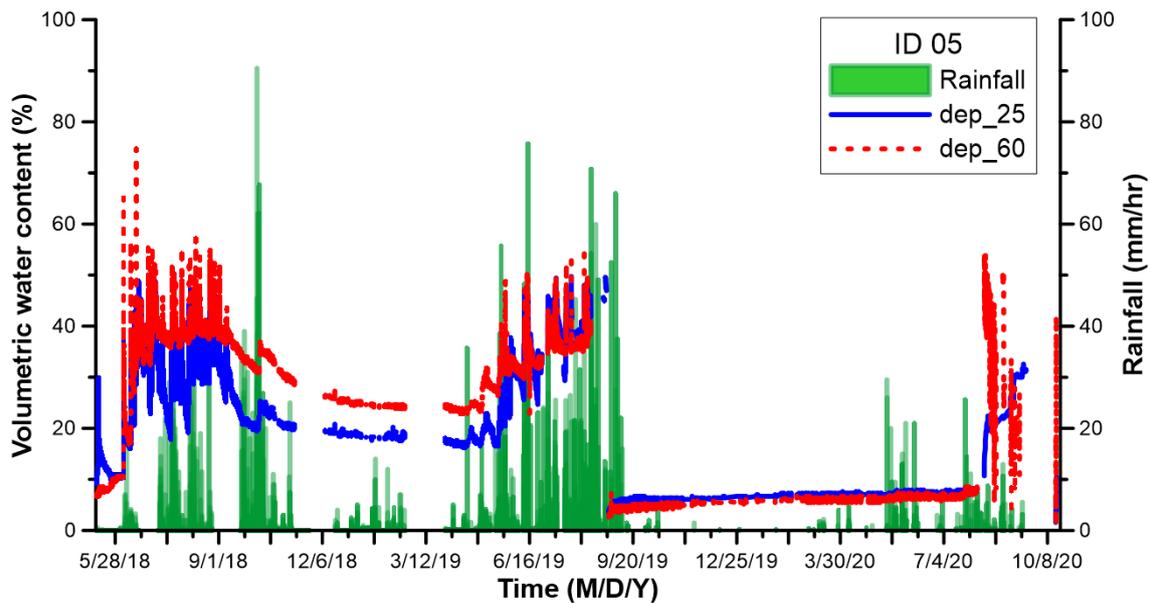


圖 5.14 ID 05 體積含水量監測數據

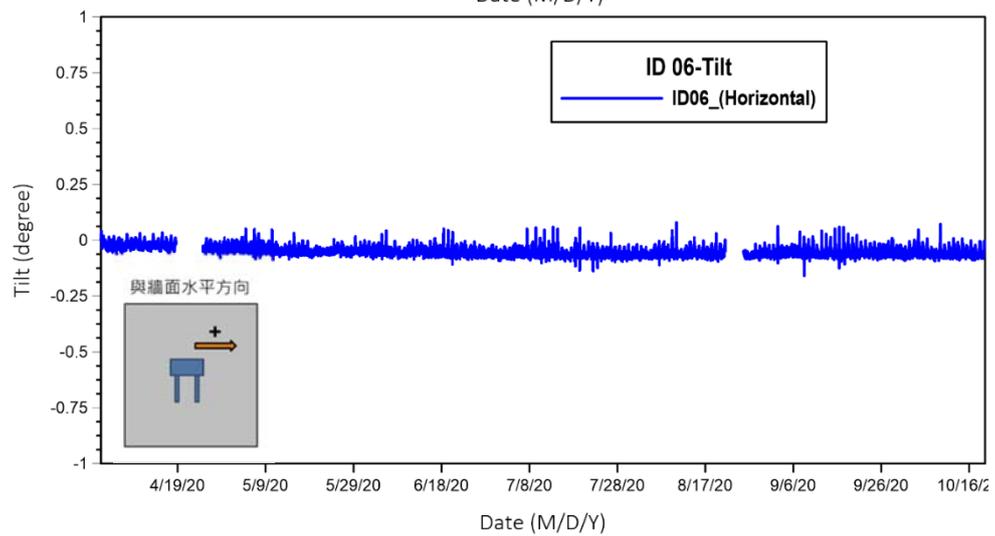
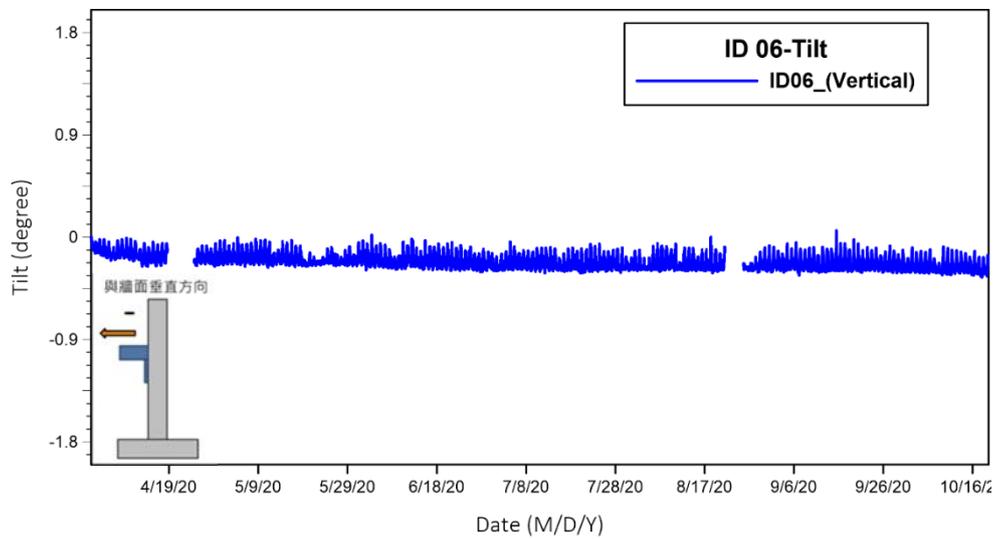
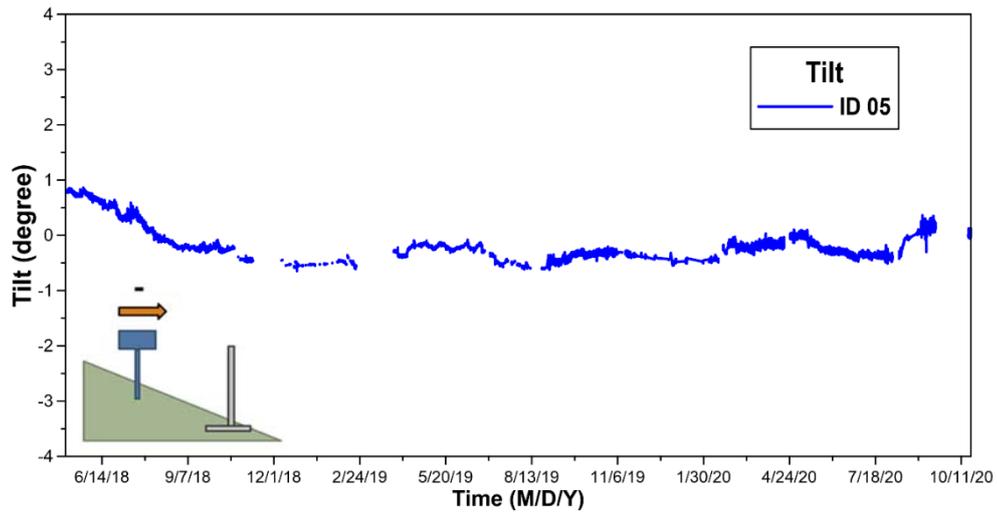


圖 5.15 各測站傾斜角監測數據

#### 5.2.4 台20線水壓推估模式擬合成果

本計畫飽和土層土壤邊坡共有台 20 線 52k+150 處與台南市市道 175 線 50K+500 地滑區兩處場址，但考量市道 175 線為 109 年 2 月裝設，截至 109 年 10 月尚無颱風侵台或強降雨事件，降雨量少的情況下，市道 175 線地下孔隙水壓上升幅度有限，因此選擇以台 20 線 52k+150 處邊坡之雨量與水位監測成果來應用 5.1 節建立之時間域孔隙水壓推估模式來評估台 20 線崩積層依時水力反應。

擬合主要採用台 20 線場址 107 年 7 月至 10 月之雨量與 ID 05 水位井觀測資料進行一維入滲數值模型率定，主要降雨事件發生於夏季，而 11、12 月無明顯降雨事件，期間可歸納出共 14 場降雨事件。並選定期間五場有效水位抬升事件(event A to E)來率定數值模型，如圖 5.16 所示，五場短降雨延時水位抬升事件整理如表 5.3 所示(相關降雨特徵定義請參考圖 5.9)。其中 2018/8/13 至 2018/9/18 因現場雨量計故障，因此期間雨量資料採用鄰近甲仙雨量站資料作為替代。

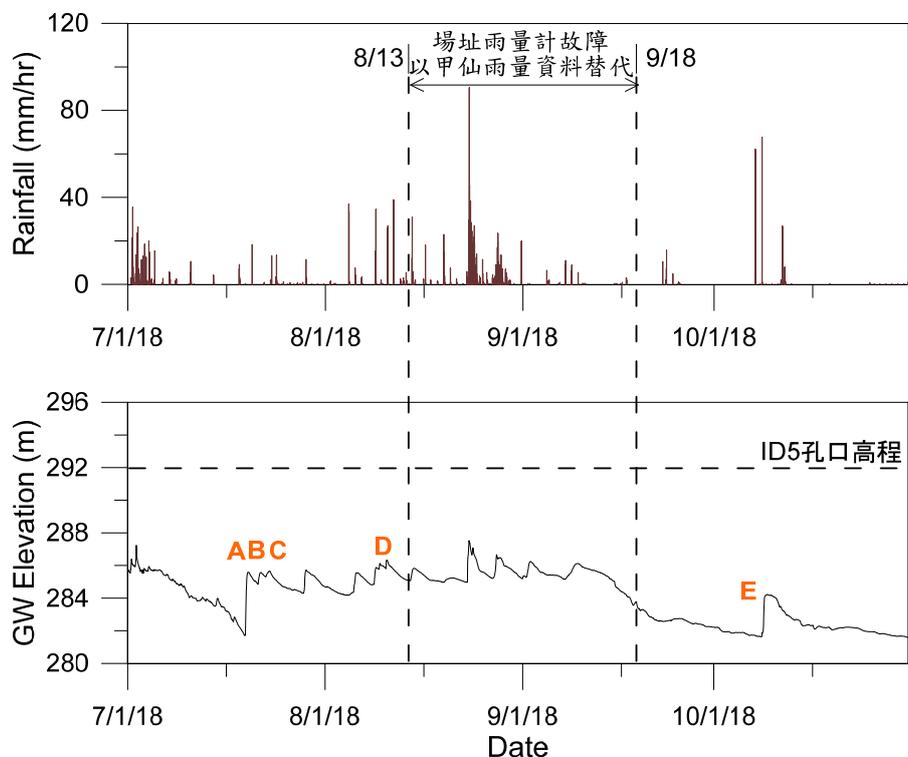


圖5.16 場址崩積層地下含水層水位觀測結果(2018年7月至12月)

表 5-3 場址短降雨延時之有效水位上升事件整理

有效降雨事件 (event)	A	B	C	D	E
降雨開始時間 $t_0$	2018/7/18 11:00	2018/7/20 12:00	2018/7/22 09:00	2018/8/9 17:00	2018/10/7 11:00
水位上升時間 $t_1$	2018/7/19 11:00	2018/7/21 11:00	2018/7/22 16:00	2018/8/10 13:00	2018/10/8 13:00
最高水位時間 $t_2$	2018/7/19 21:00	2018/7/21 23:00	2018/7/23 7:00	2018/8/10 16:00	2018/10/9 8:00
降雨延時 (hr)	5	1	2	4	5
門檻累積雨量 (mm)	23.45	18.37	1.8	4	87.66
最高水位累積雨量 (mm)	23.85	18.37	1.8	4	156.55
延遲時間 (hr)	24	23	7	20	26
降雨發生時之高程 $h_0$ (m)	282.66	285.28	285.56	286.03	281.72
水位上升時之高程 $h_1$ (m)	281.71	284.85	285.30	285.80	281.64
水位最高時之高程 $h_2$ (m)	285.59	285.57	285.65	286.34	284.22
水位上升高度 $h_2 - h_1$ (m)	3.88	0.72	0.35	0.54	2.58
水位上升時間 (hr)	10	12	15	3	19
水位上升速率 (m/hr)	0.39	0.06	0.02	0.18	0.14

對於崩積層複雜性與變異性大的特性而言，現場單一土壤取樣並進行室內實驗取得之相關水利參數將無法良好代表場址水力反應，因此，研究採現場監測大數據結果配合深層一維垂直入滲模型進行率定，以率定場址數值模型整體土層之非飽和特徵曲線參數，主要採用雨場簡易與明確、短降雨延時、水位上升前處於下降等特性。

Event A一維垂直入滲FDM模型如圖5.17所示，地表面節點編號為 $i=1$ 代表實際高程為292 m，考量各有效降雨事件最低水位高程約為281.5 m，模型底部設置於高程280 m處，以保留模型入滲與滲漏致使水位變化時，保留足夠之模型空間，其節點編號為 $i=N+1$ ，依據試誤法模型將分割為60等份( $N=60$ )，其節點間隔( $\Delta z$ )為20 cm，並以時階( $\Delta t$ )為4 sec之間隔進行有限差分，此配置可達最佳運算效率並且不影響模擬結果。而Event A最佳擬合參數整理如表5-4所示，擬合求得之VG模式SWCC參數為一擬參數(pseudo parameters)，為統整三維地形影響、崩積層均質性不佳、土層非飽和性質等效應之結果。

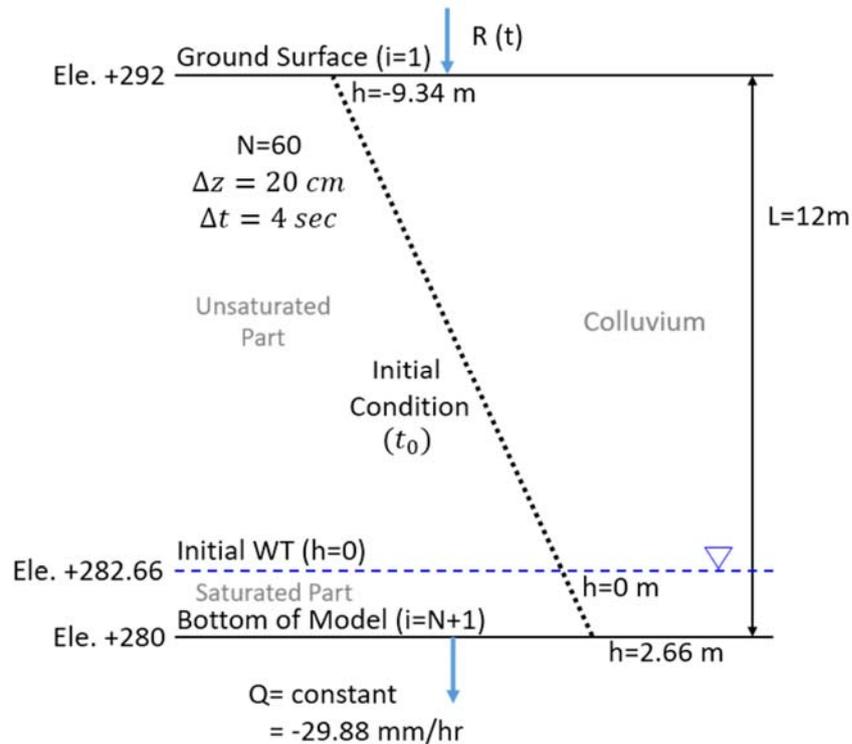


圖 5.17 深層場址 event A 一維垂直入滲 FDM 模型

表5-4 Event A最佳擬合參數

擬合參數	Event A
飽和體積含水量 $\theta_s$	0.48
殘餘體積含水量 $\theta_r$	0.08
飽和滲透係數 $k_s$ (cm/sec)	$2.43 \times 10^{-4}$
VG 模式 $\alpha$	0.00123
VG 模式 $n$	10.5
蒸發常數 $C_{eva}$ (cm/sec)	$2.40 \times 10^{-3}$
滲漏常數 $Q$ (cm/sec)	$8.0 \times 10^{-4}$

降雨事件(Event A)下短期水位模擬成果請參考圖5.18，在水位上升前(時間 $t_0 \rightarrow t_1$ )，地下水位變化僅由滲漏量 $Q$ 控制， $Q$ 值之計算由降雨開始前(時間 $t_0$ 前)之平均地下水位升降速率決定，由擬合結果顯示此區段與實際水位變化無太大差異，說明研究假設短期地下水層滲漏量 $Q$ 為定值之可行性。而水位開始上升至最高水位區段(時間 $t_1 \rightarrow t_2$ )，為降雨垂直入滲水開始補助地下水層並引致地下孔隙水壓上升，且垂直入滲之補助量需大於地下水層滲漏量，此段行為主要受非飽和土層厚度、特性與降雨特徵影響，擬合結果與實際水位上升行為差異不大，於最高水位( $h_2$ )時，擬合與實際水位差異為0.07 m，並且最高水位時間( $t_2$ )預測差距在1小時內。而時間 $t_2$ 後，地下水層持續滲漏並且水位開始下降，而滲漏量 $Q$ 與水位上升前大致相同，驗證模型底部滲漏邊界於短期水位升降過程中為定值之假設。

於此小節中呈現時間域孔隙水壓推估模式僅為單一開孔式水位井之擬合成果，但其分析架構是基於入滲解析解進行發展，因此可通用至其他具備歷史水位與雨量資料之邊坡場址，擬合符合場址孔隙水壓升降與降雨特徵關係之一維入滲數值模型。對於一具備多孔水位井之潛在滑動邊坡，各別水位井之擬合可用於評估真實降雨情況下，坡體內上、中、下段之地下水壓抬升行為，建構二維地下水壓依時剖面變化。

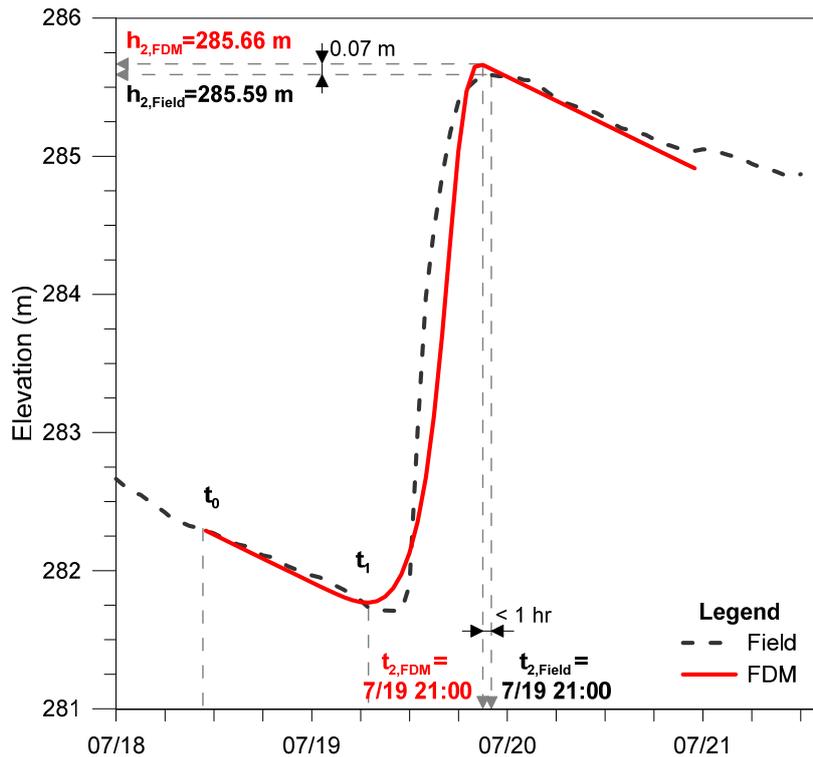


圖5.18 降雨事件下短期水位模擬成果(Event A)

所得率定後之台20線一維入滲數值模型可用於推估不同降雨特徵下，時間域上孔隙水壓依時反應，對於降雨引致飽和土層滑動破壞之類型，降雨事件開始後，需特定時間才能由地表入滲與上游水位補注至地下水層，降雨開始到孔隙水壓抬升至臨界狀態(破壞)所需時間差可作為預警時間，研究發展之時間域孔隙水壓推估模式，可於現地雨量監測值回傳降雨特徵後，即時完成滾動分析推估未來坡體地下孔隙水壓變化，如此，可爭取到孔隙水壓達臨界值前之預警時間發布警報，以利相關單位進行防災反應。

此處，將所得之孔隙水壓依時反應結合傳統無限邊坡深層滑動分析，其安全係數之計算如式2.14所示，對於同一邊坡場址而言，其邊坡剪力強度參數不變，其坡體安全係數變化關鍵在於孔隙水壓比( $\gamma_u = h_w / d_{cr}$ )，其中 $h_w$ 可改為一依時因子，即未來特定時間區間內之孔隙水壓反應 $h_w(t)$ ，可由時間域孔隙水壓推估模式輸入降雨特徵求得，並以極限平衡評估未來特定時間內的安全係數變化，則台20線場址坡體依時安全係數評估結果如圖5.19所示，圖中以

event A依時水位結果作為範例，可預測坡體對應之安全係數變化，依時水位預測為未來60小時水位變化，最高水位將發生於目前時間後33.6小時，最高水位為285.67 m，對應之安全係數為1.04。

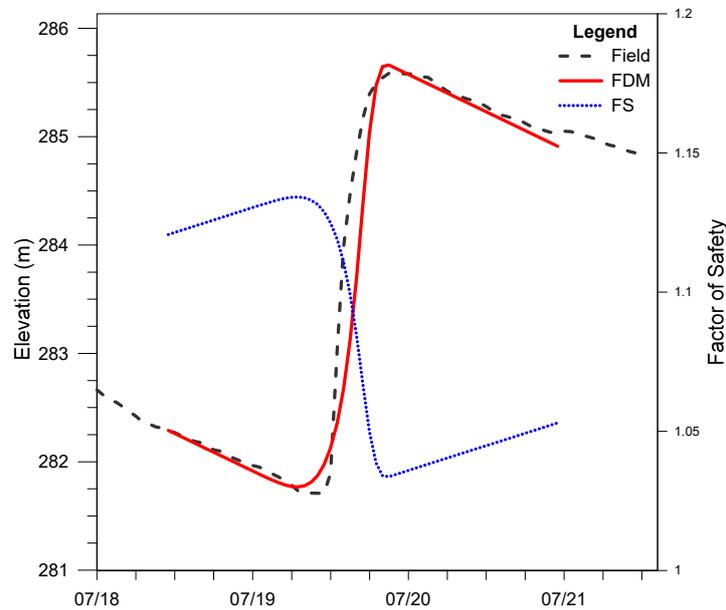


圖5.19 無限邊坡下場址坡體依時安全係數評估結果  
(以Event A為例)

對於重要保全對象邊坡，甚至可整合二維數值模型，進一步提供坡體變形、變位移動之特性。但考量研究中僅以單一開孔式水位井進行水位抬升分析，此處僅考量一無限邊坡下安全係數之計算。傳統極限平衡分析或二維數值模型雖可完整呈現坡體整體安全係數變化，但對於深層邊坡破壞致災因子(地下水壓變化)僅能以特定水位進行一次性分析，或是以一均佈降雨(uniform rainfall)施加於數值模型坡面上，探討持續入滲造成之坡體應力應變關係，上述方式無法帶入真實降雨模式(rainfall pattern)與實際地下水壓依時變化。對於台20線52k處場址而言，每場降雨事件開始至引發水位開始抬升之所需時間約在24小時左右，透過已率定模型，在降雨事件發生時，可立即評估水位抬升引致邊坡安全係數小於1之降雨事件，並提前預知水位抬升至最高點所需時間，如此，可爭取足夠預警時間，讓相關責成單位進行疏散、禁行等措施。

## 5.3 南市道 175 線監測場址監測資料

### 5.3.1 南市道175線場址背景資料與監測配置

監測場址二位於南市道 175 線 50k+500 處，為往來六甲區與楠西區主要路線，其地理位置如圖 5.20 所示，該路段自民國 75 年起，每逢颱風豪雨，常造成路面下陷、附近民宅及產業道路開裂，嚴重影響用路人安全。於民國 95 年，此路段受颱風影響，道路下邊坡擋土設施有裂縫及路面下陷等情形。



圖 5.20 南市道 175 線場址地理位置圖

此場址具長期災損及地質調查資料，最近之資料為 106~107 年完成之地滑調查及邊坡監測(青山公司，2019)，具有詳細背景鑽探資料、可用鑽孔孔位及監測資料，其滑動塊體與可用孔位如圖 5.21 所示。根據鑽探報告，此區域地層由上而下可分為三層，分別為崩積層、風化泥岩層與泥岩層，崩積層厚度約為 2~10 米，為風化土壤、岩屑及大小不一岩塊組成；風化泥岩層厚度約 5~25 米，多有裂隙及銹染情形，可能為地下水流通或補注流徑；底部為泥岩層，以粉砂質泥岩與砂質泥岩為主，其岩芯破碎，膠結程度及透水性較差。地質剖面圖如圖 5.22 所示。其中崩積層及風化岩層覆蓋於泥岩層上方厚度約 2~25m，透水性較佳，地表水易入滲軟化下方泥岩層，不利於邊坡穩定性，且此場址已有含地錨之擋土牆，符合本計畫需求。

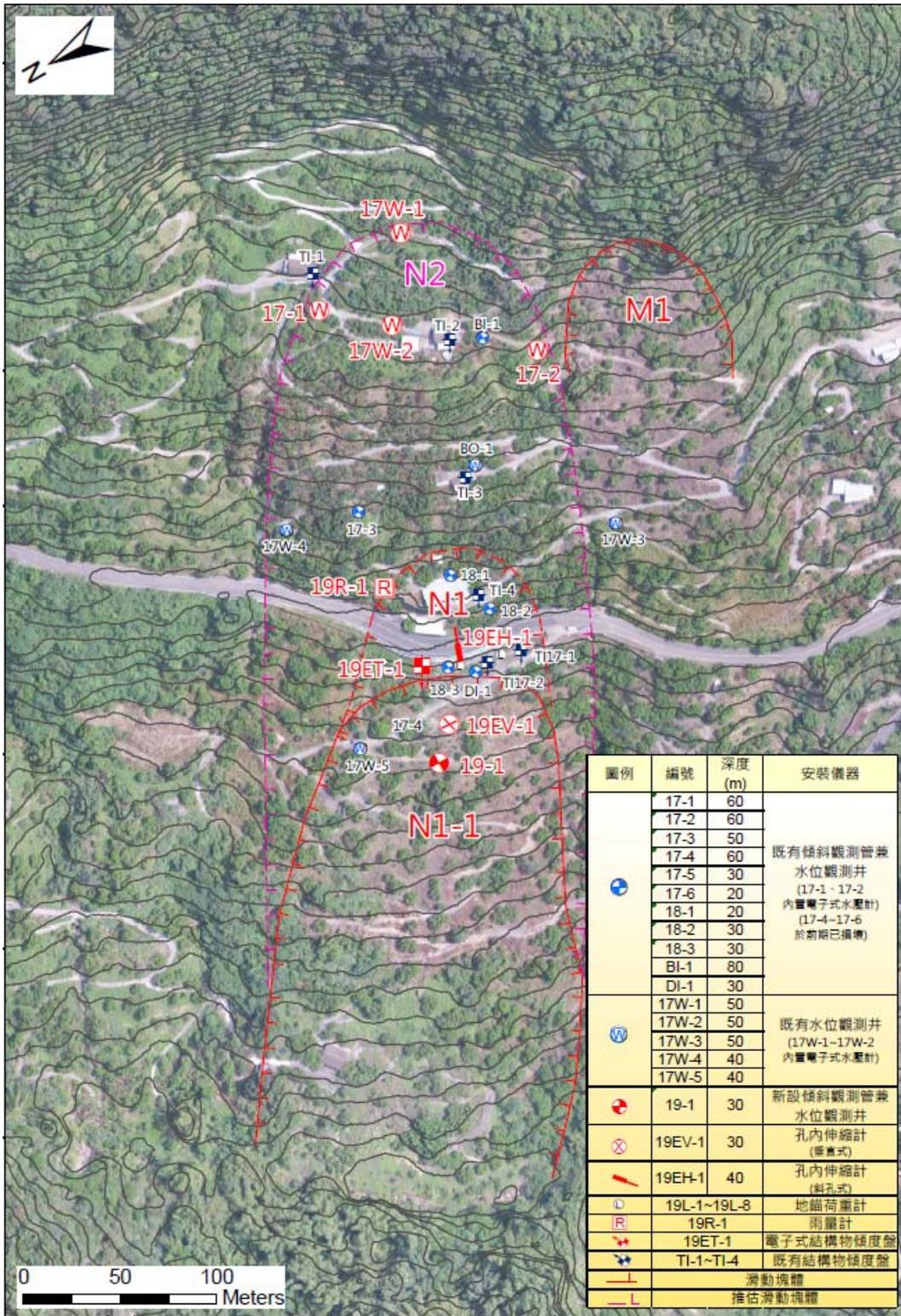


圖 5.21 南市道 175 線滑動塊體與監測點分佈圖(青山工程, 2019)

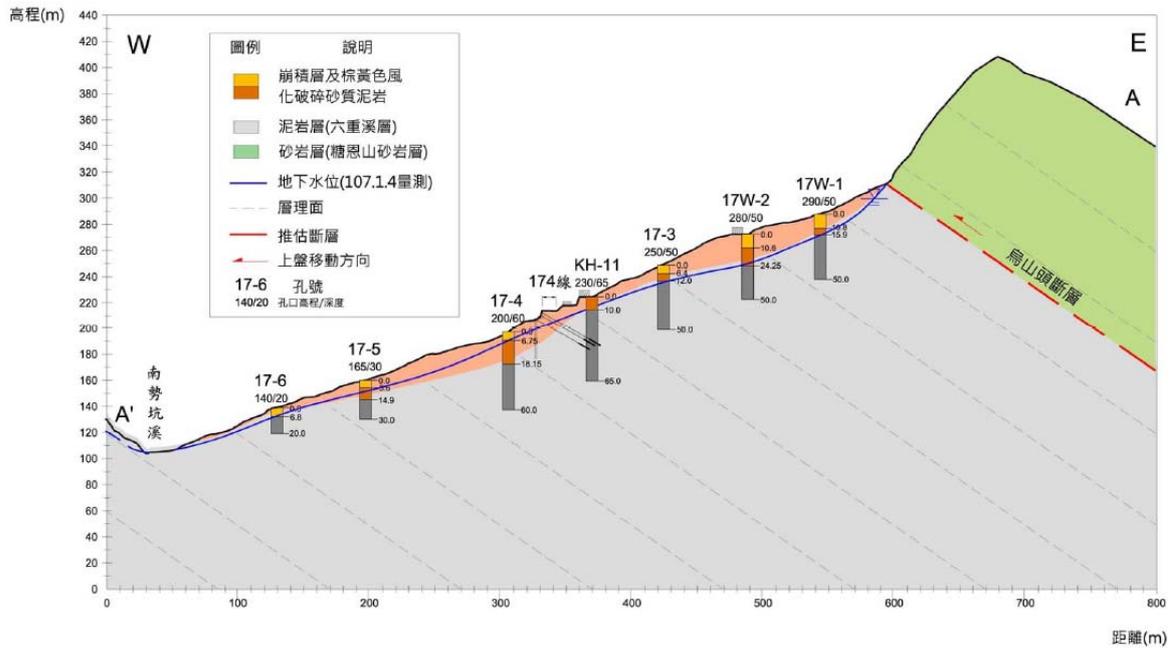


圖 5.22 南市道 175 線地質剖面圖(青山工程 2019)

本場址監測有兩主要標的，一為飽和土層整體滑動監測，主要為現地崩積層整體滑動，二為擋土結構系統監測，相關配置依此目的配置，包含地下水位面、擋土牆雙向傾斜儀評估擋土牆安全性、土壤分層水分計用以評估降雨入滲速率與雨量計量測現場實際降雨量，本計畫於 109 年 2 月於現地安裝總計九組客戶端監測模組與一伺服器模組，配置如圖 5.23 所示，箭頭所示為傾角量測正向，各監測模組編號與內含感測器如表 5-5 所示。

雨量筒(ID0)設置於 175 道路與通往下邊坡小徑交界，此處空曠可避免障礙物影響雨量計讀數；水位計(ID2、ID3)設計於上邊坡，水位井深度分別為 20 米與 30 米，主要用以量測上邊坡地下水位，且 ID3 設有單向傾度儀，可量測上邊坡淺層土壤滑動傾向；水位計(ID4)設置於擋土牆基礎與基樁一起建造之傾斜管，鑽孔深度 30 米，儀器架設於擋土牆底部並配有單向傾斜儀，可評估擋土牆底部傾斜方向，現場架設現況如圖 5.24 所示。



圖 5.23 南市道 175 線場址監測模組配置

表 5-5 南市道 175 線場址模組配置總表

ID	內含感測器	水位孔深度(m)	水位孔高程(m)	架設位置
0	雨量計	-	-	路旁
2	水位計+傾斜儀	20	197	上邊坡
3	水位計+傾斜儀	30	190	上邊坡
4	水位計+傾斜儀	30	178	擋土牆基礎
5	雙向傾斜儀	-		路旁擋土牆
6	雙向傾斜儀	-		路旁擋土牆
7	雙向傾斜儀	-		路旁擋土牆
8	含水量計	-		下邊坡
9	含水量計	-		下邊坡

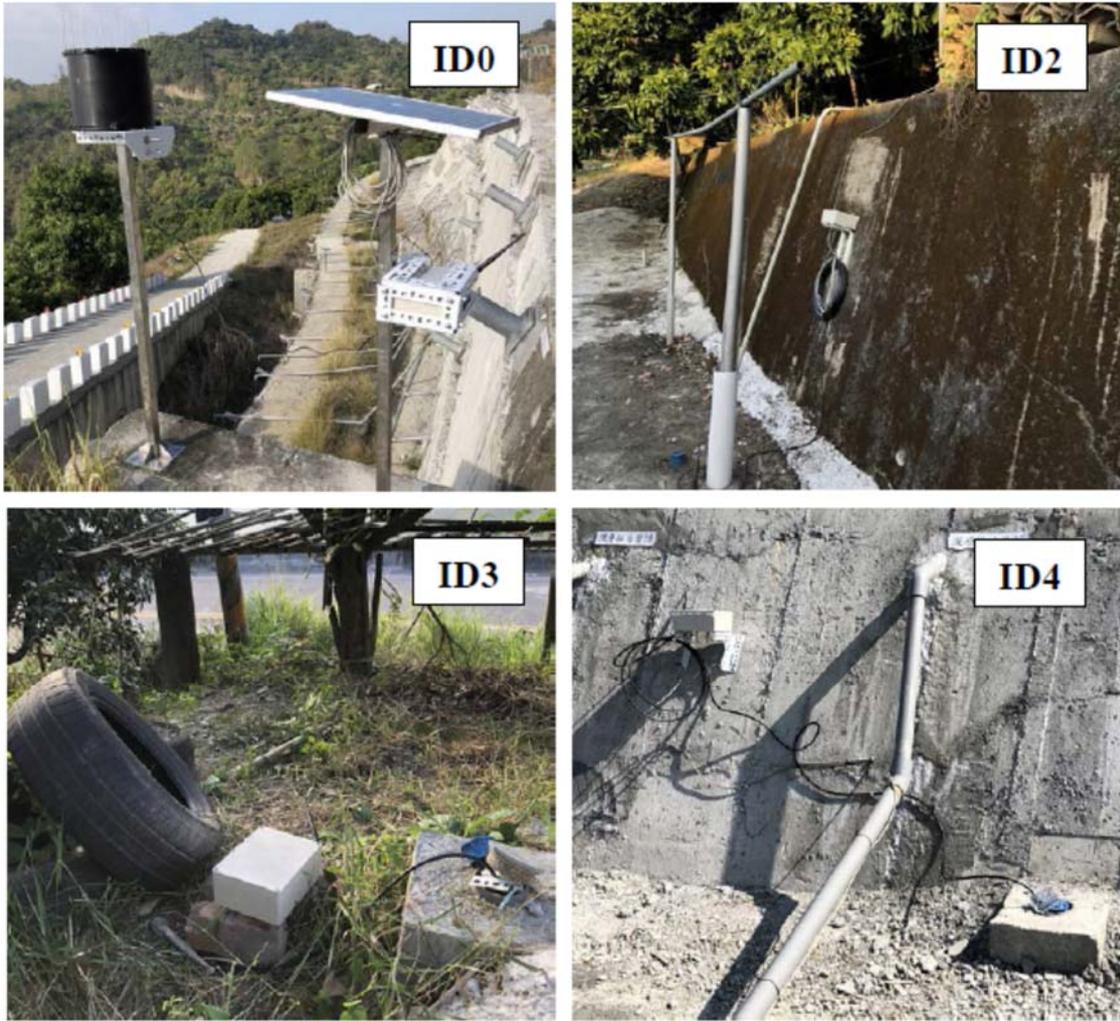


圖 5.24 南市道 175 線場址監測模組現場架設圖(1/2)

雙向傾斜儀(ID5、ID6、ID7)架設於擋土牆上，主要量測擋土牆位移情形，其中 ID5 架設於擋土牆頂部，ID6 位於牆底擋土柱頂端，ID7 架設於擋土牆底部；分層含水量計(ID8、ID9)設置於下邊坡整治區外原地表，量測現地土層入滲情形。各監測模組皆選擇於附近光照良好區域架設，讓太陽能板能供應模組回充電量，ID5~9 及伺服端現場架設安裝照片如圖 5.25 所示。



圖 5.25 南市道 175 線場址監測模組現場架設圖(2/2)

### 5.3.2 南市道175線地下水位與地表傾角監測

南市道 175 線場址由裝設初期至今為止約八個月，此場址尚未有顯著降雨事件，於 5 月中有幾場短期強降雨，ID2 與 ID4 水位有同樣上升趨勢，ID3 在此事件無此現象，於後續檢查中發現模組因居民除草剪斷電源故障，修復後又於 9 月中因居民整地，模組損壞，現已修復，地下水水位監測結果如圖 5.26 所示，推估 ID2 因深度僅 20 m，與 ID3 及 ID4 井深 30 m 相較較淺，應為崩積層及風化泥岩層組成之非拘限含水層，ID3 及 ID4 所量為底部泥岩層之拘限含水層，因此後續分析將以此劃分。上邊坡表層土壤傾角如圖 5.27 所示，ID3 因位於果園且地表疏鬆且監測期間居民整地，因此變化較大，模組修復後並無顯著地表傾角發生。

考慮個別降雨事件監測成果，ID03、4 監測結果顯示岩層地下水位變動受累積雨量影響，現有監測結果顯示水位於累積雨量達 20.1 mm 及 18.2 mm 時開始上升，圖 5.28 及圖 5.29 為累積雨量與岩層水位上升高度關係，趨勢顯示累積雨量越大，水位上升越多，以現有資料顯示，岩層累積雨量與水位上升高度關聯性較低，兩數值間受其他因素影響。

位於 ID2 之崩積層水位於短延時降雨達 10.5 mm 時水位開始上升，隨著降雨延時增長，觸發地下水位開始上升之所需累積雨量減少，延時越長，所需累積雨量越少，如圖 5.30 所示，可以此特性推估降雨開始後水位開始上升時間。圖 5.31 顯示累積雨量影響崩積層地下水位上升高度，累積雨量越多，上升高度越高，以此可推估崩積層降雨後水位上升高度。

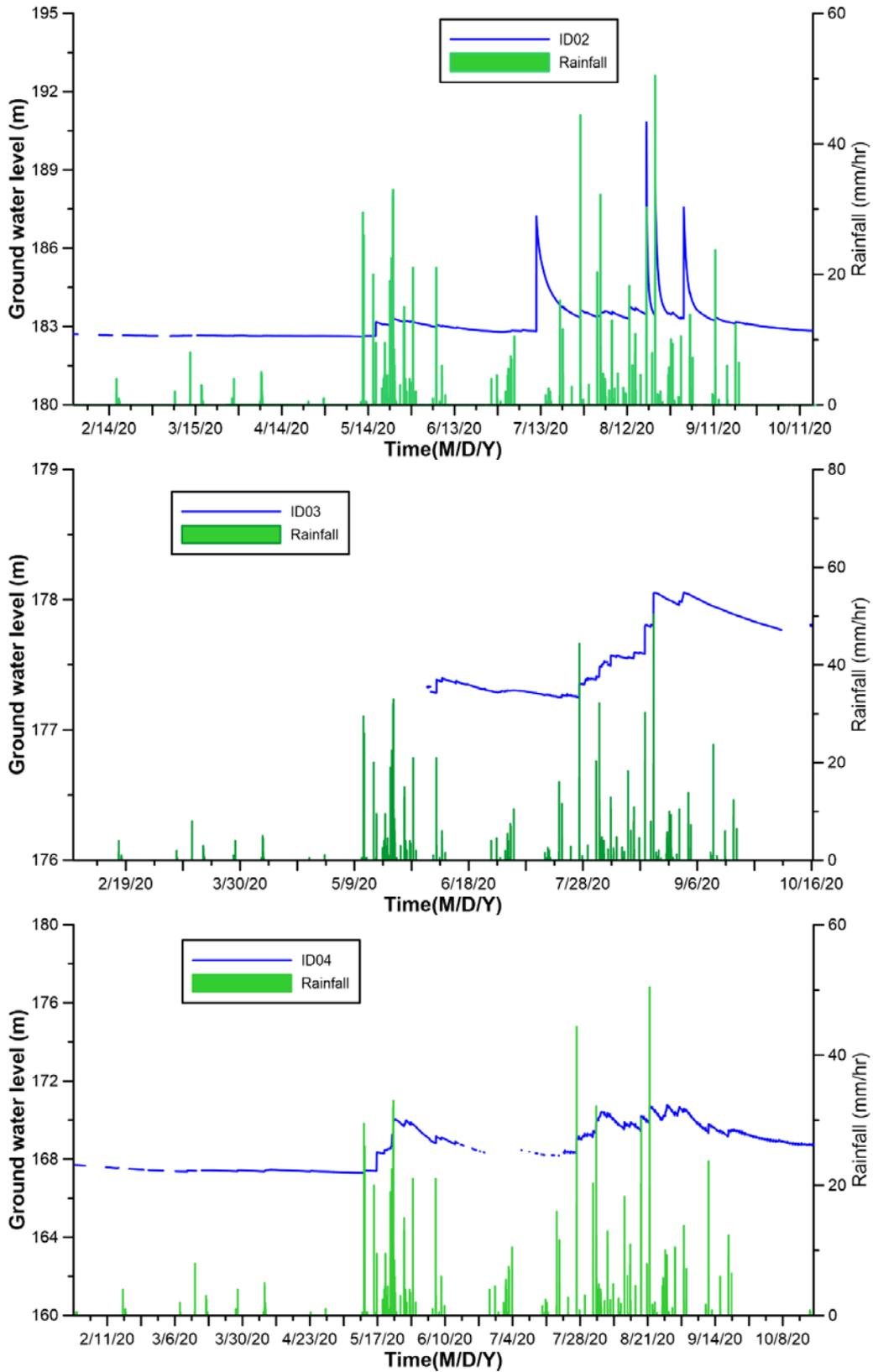


圖 5.26 南市道 175 線場址地下水位監測成果

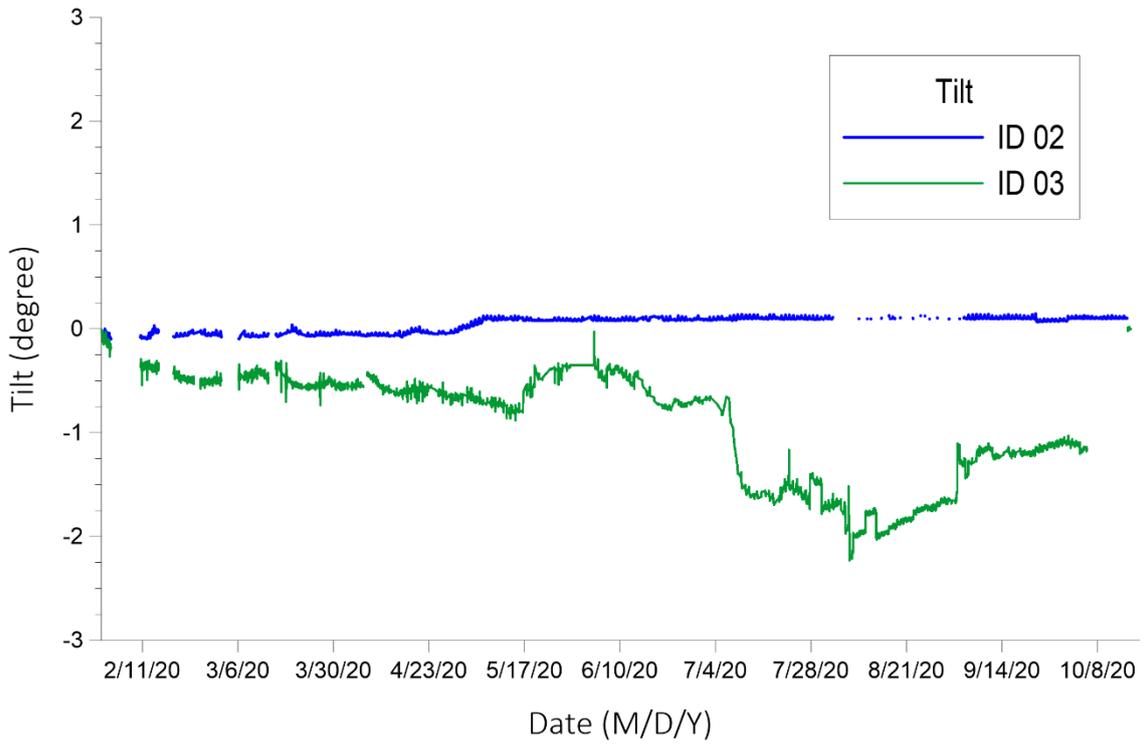


圖 5.27 南市道 175 線上邊坡地表傾角監測成果

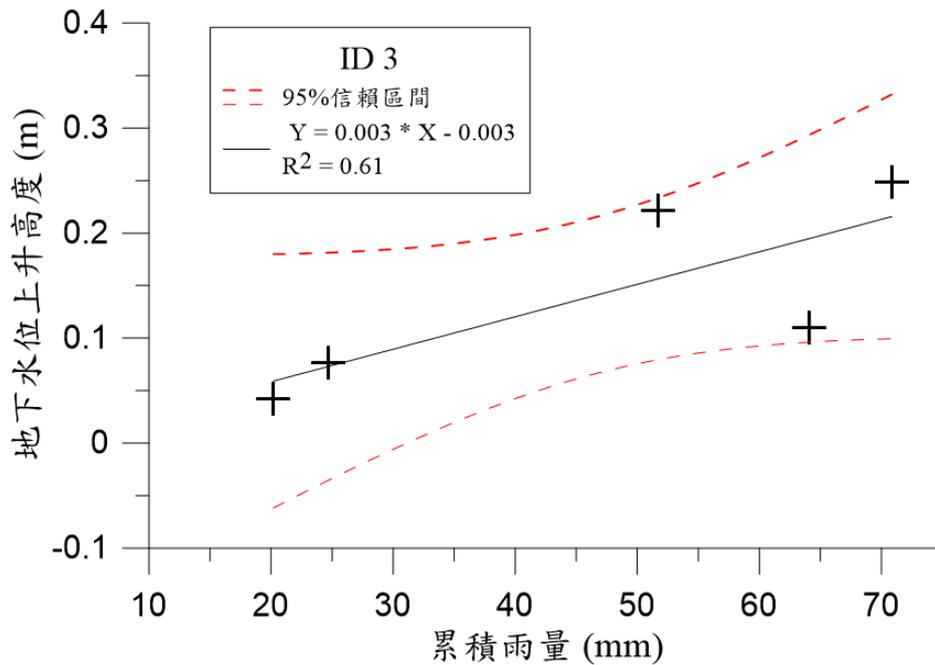


圖 5.28 ID3 累積雨量與岩層水位上升高度關係圖

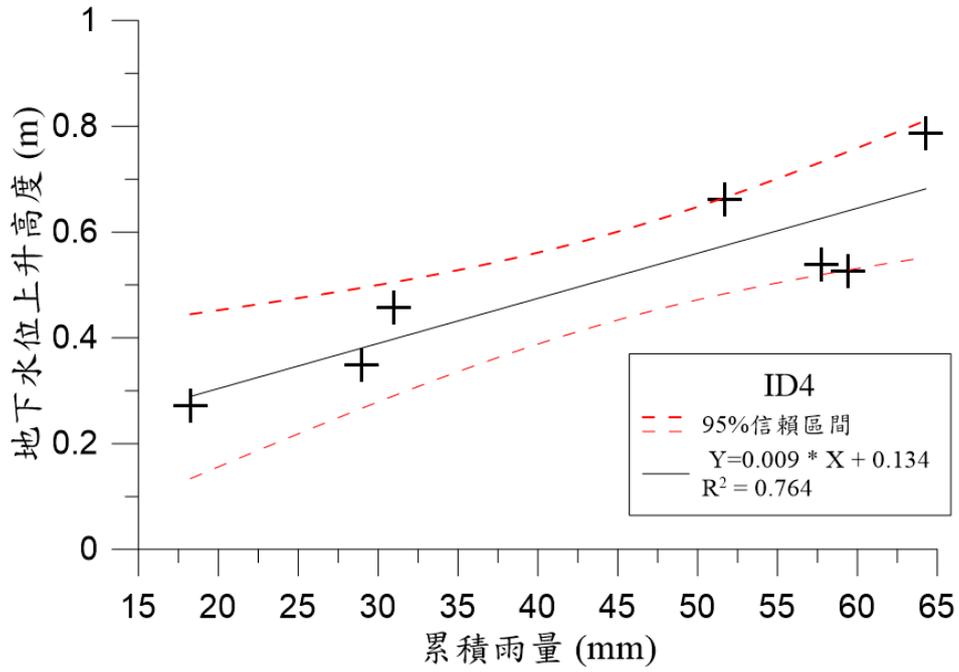


圖 5.29 ID4 累積雨量與岩層水位上升高度關係圖

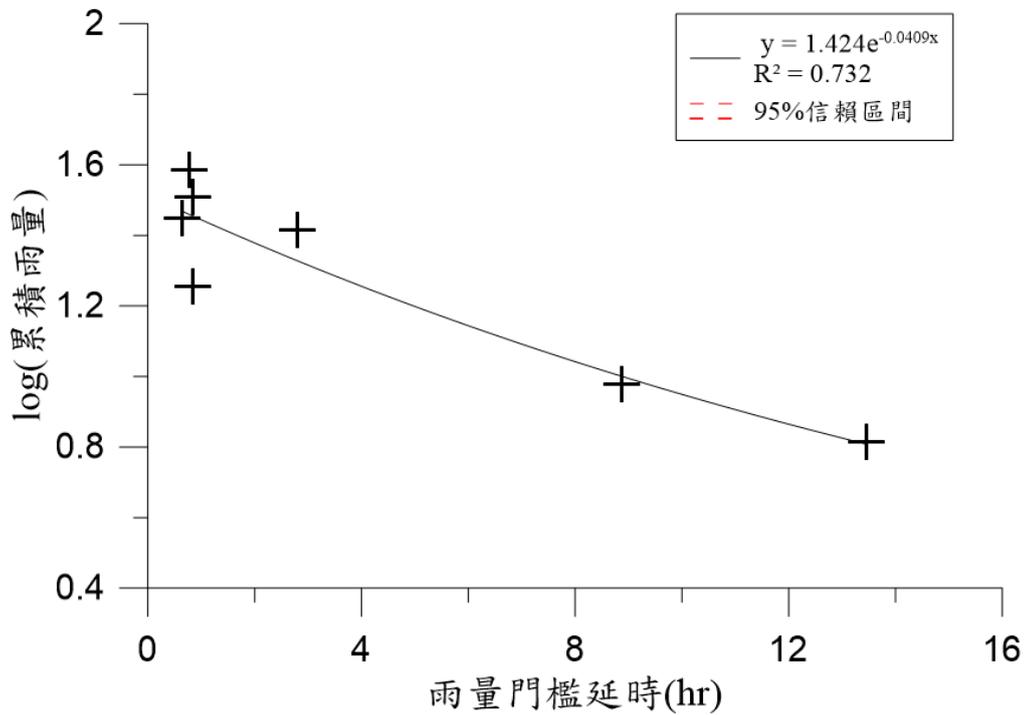


圖 5.30 ID2 崩積層雨量門檻延時與對數累積雨量關係圖

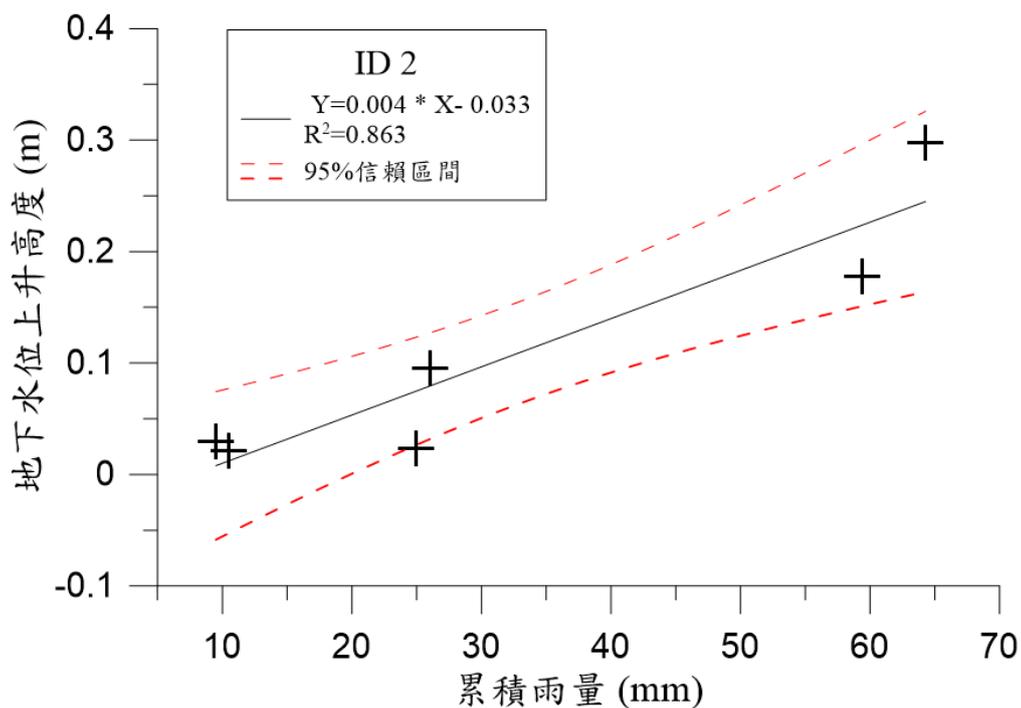


圖 5.31 ID2 累積雨量與崩積層水位上升高度關係圖

### 5.3.3 南市道175線表層體積含水量監測與擋土系統傾角監測

下邊坡未整治原地表分層含水量(ID8 及 ID9)量測成果如圖 5.32 所示，於裝設至今因無經過雨季，量測值在 10~20%浮動，淺層含水量較易受降雨與日照影響。

本計畫於此場址裝設三組雙向牆體傾斜儀，監測牆頂(ID5)、牆底(ID7)及擋土柱頂(ID6)之傾角變化，擋土牆傾角量測量測之垂直向(法向)以背離牆體方向為正，水平向(切向)以面向牆體順時針方向為正，ID5~7 監測成果如圖 5.33~5.35 所示，牆體於今年初至今無明顯變化。

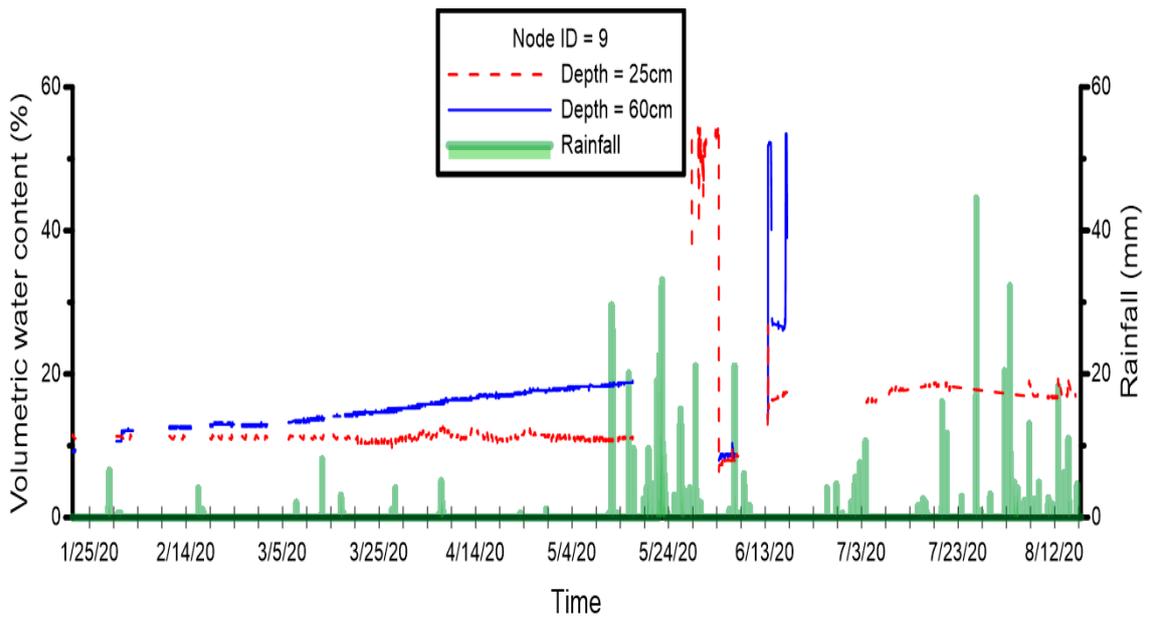
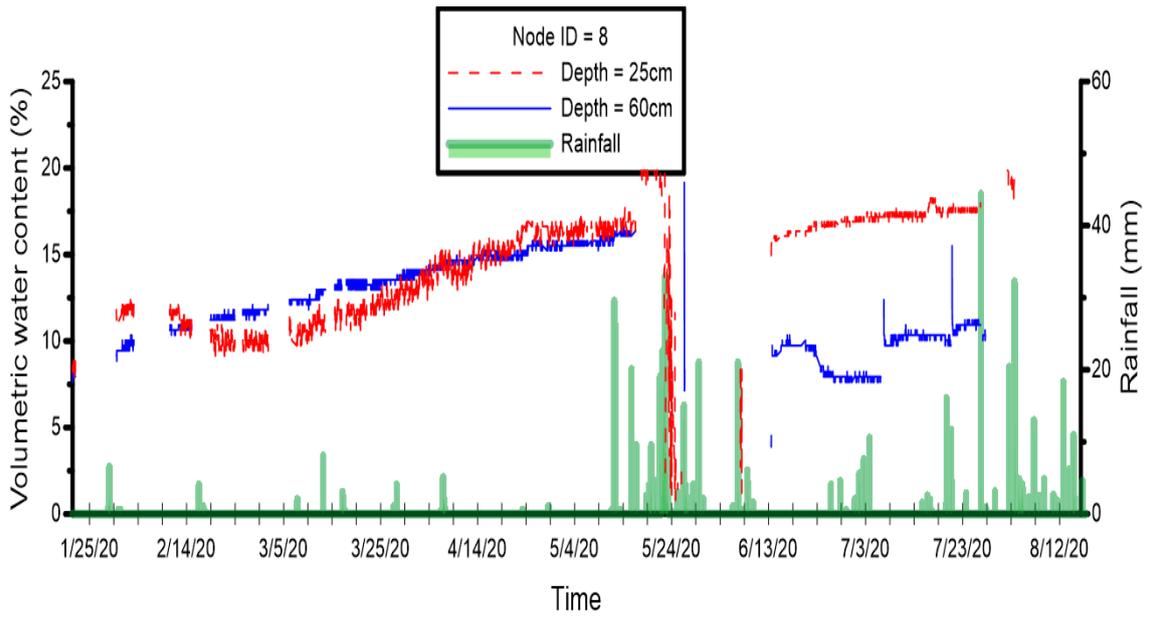


圖 5.32 南市道 175 線下邊坡含水量計監測成果

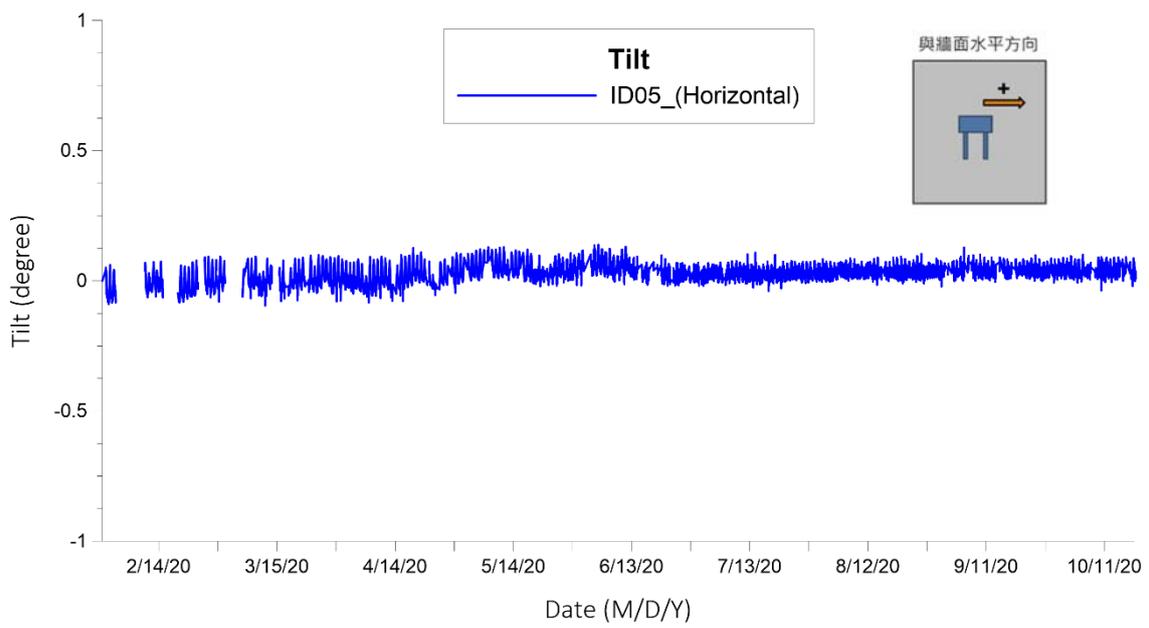
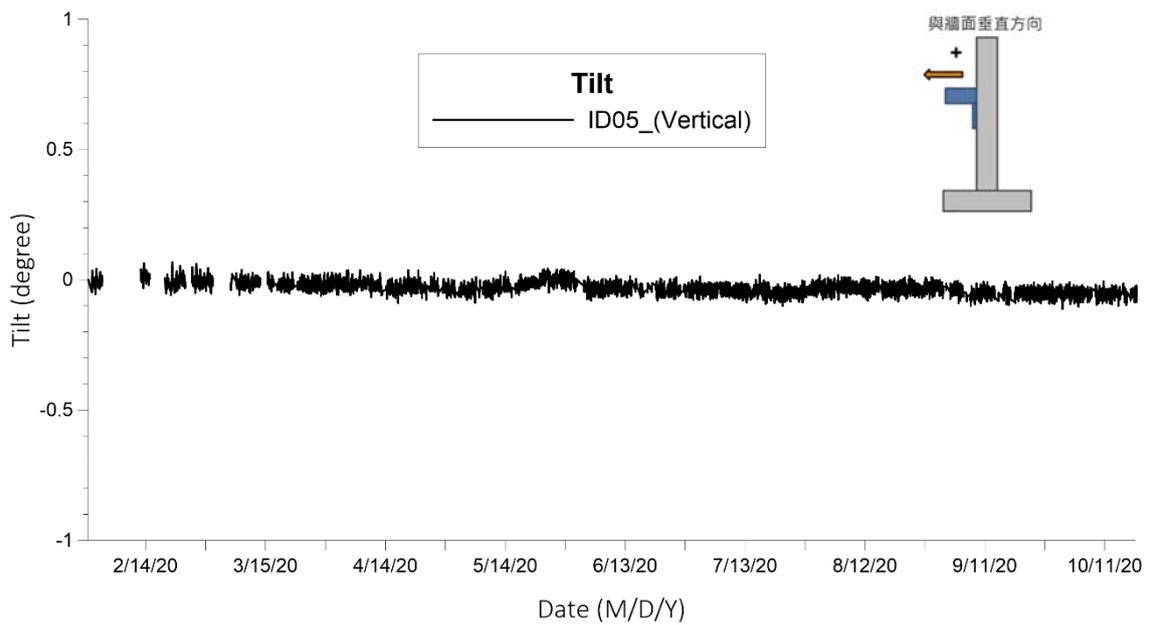


圖 5.33 南市道 175 線牆頂(ID5)傾角監測成果

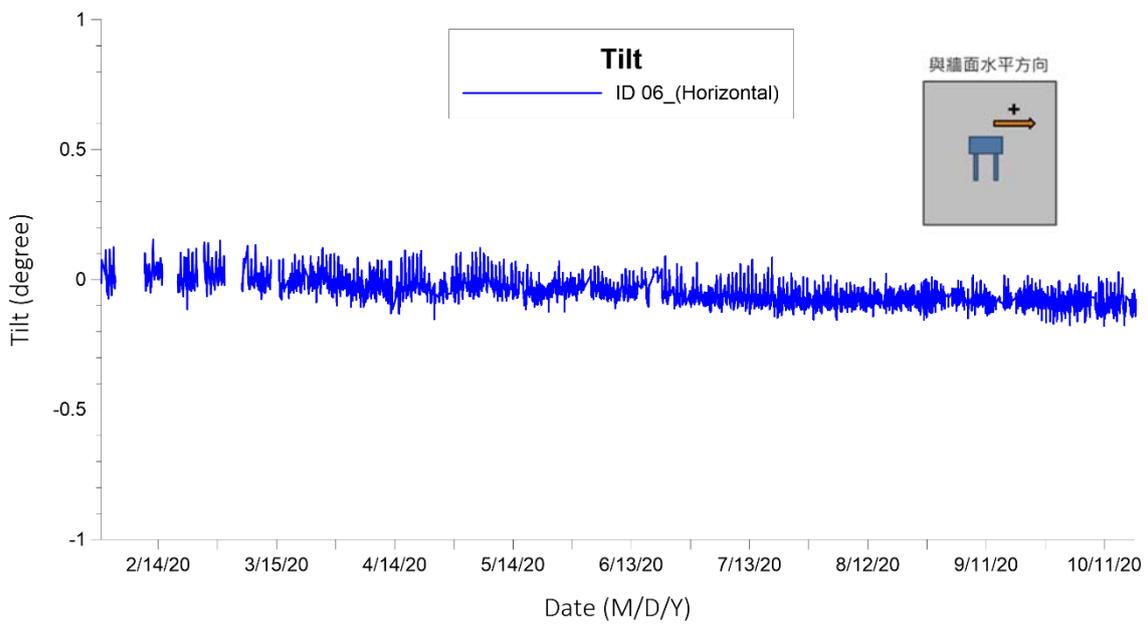
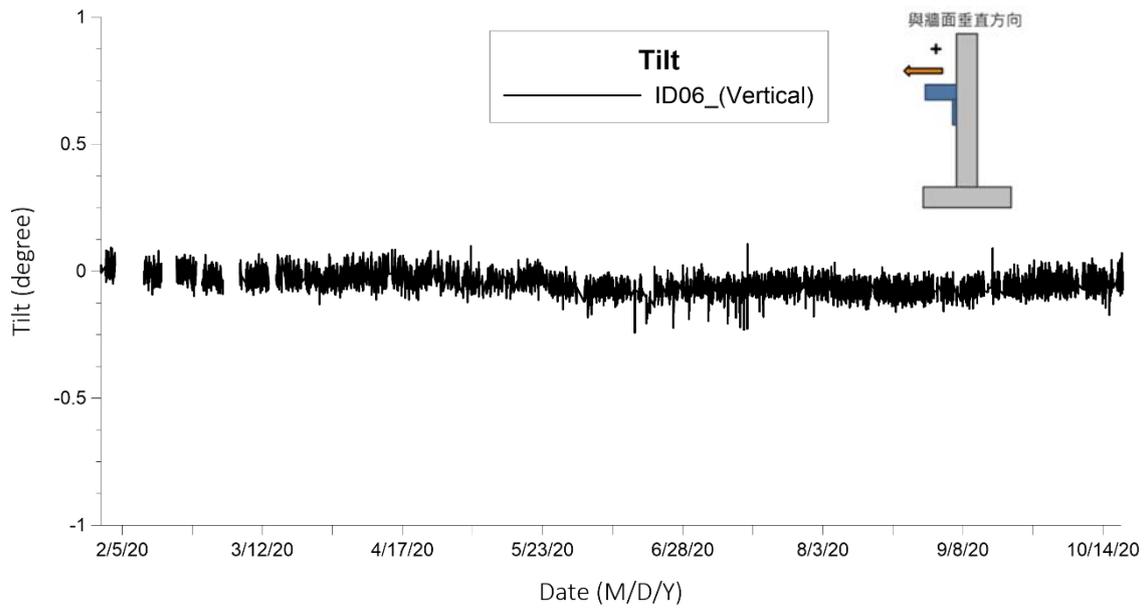


圖 5.34 南市道 175 線擋土柱頂(ID6)傾角監測成果

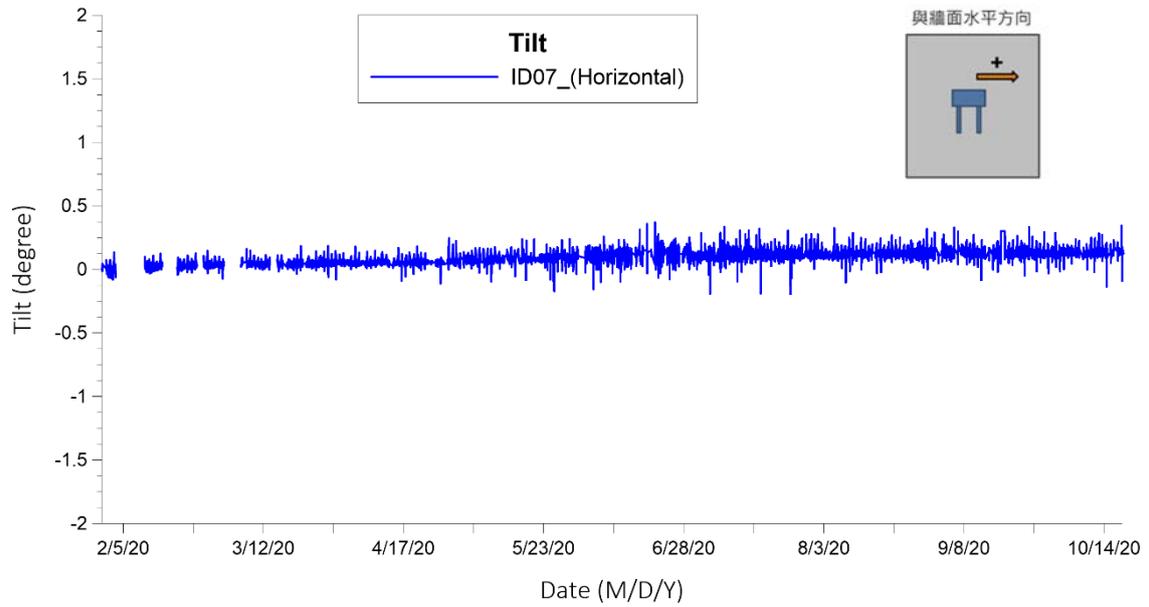
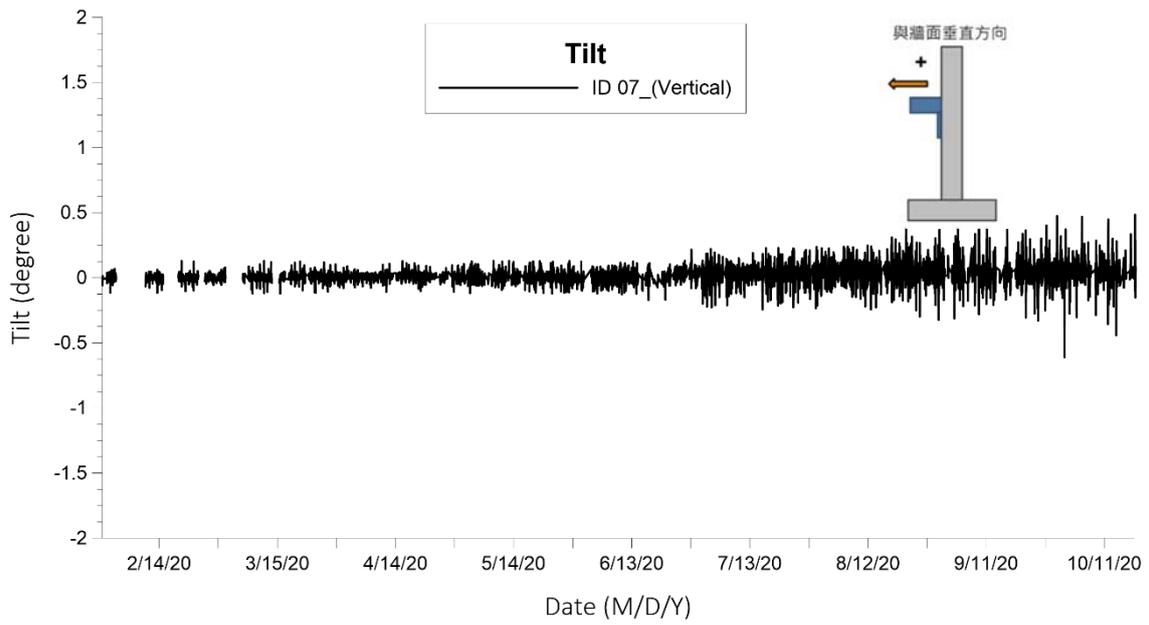


圖 5.35 南市道 175 線牆底(ID7)傾角監測成果

## 第六章 邊坡擋土系統變形分析與預警

本計畫前期已發展淺層及深層滑動之極限平衡分析及二維數值分析，109 年度以監測資料更新精進分析，並據以修正相關警戒值。而為因應多數公路邊坡多有不同程度整治，108 年度起擴充原有土壤邊坡分析，將擋土支撐系統加入，並嘗試以現地資料進行驗證。

擋土系統分析以二維土壤結構互制分析進行，並考慮水力與力學邊界，進行變位與結構反應預測。經由前項考慮土壤結構互制反應之水力力學耦合分析成果，並搭配擋土結構反應即時量測，可進一步擴充現有原僅考慮土壤反應之解析方法與預警模式，做為具擋土支撐系統之邊坡依時預警分析與警示技術，將計畫由研究導向漸次轉為實際應用層面。

為簡化擋土支撐系統變位分析，108 年度以基於基樁 p-y 曲線相同概念之 PYWALL 軟體，進行不同背填水位變化下彈性牆體傾角，並建議以牆頂傾角及背填水位為預警指標之預警架構，為進行驗證所需，現有深層滑動監測場址增加擋土牆頂兩向傾角量測，作為後續驗證及未來警戒指標。限於 PYWALL 為極限平衡分析架構，無法將依時特性及水力力學耦合分析加以考慮，109 年度以前期 FLAC 土層水力力學耦合分析成果，加入代表不同支撐系統元件之結構元素，並以介面元素作為土壤與結構元素間應力與變位傳遞之連結，模擬依時土壤結構互制行為，精進擋土支撐系統預警模式之準確度與應用性。

土壤結構互制分析除須具土壤元素外，需考慮結構及其與土壤互制作用，本計畫以結構元素結合介面元素，FLAC 內建七種結構元素：樑 (Beam)、襯砌 (Liner)、繩索 (Cable)、樁 (Pile)、岩栓 (Rockbolt)、條狀 (Strip) 和支撐 (Support) 元素，本研究採用樑元素代表擋土牆。樑元素為二維線彈性元素，每個節點擁有三個自由度：x、y 方向位移與旋轉角，可與其他結構元素或網格格點相連接，常用來代表需抵抗彎矩之結構，在結構節點上可施加水平力、垂直力和力矩，FLAC 模擬時

至少需設定樑元素的截面積尺寸、二次慣性矩及彈性模數作為運算條件。樑元素與土壤網格互制關係可透過介面元素模擬結構與土壤之間剪力方向與垂直方向應力應變行為。

介面元素在 FLAC 中用來連結網格與網格或網格與結構元素，兩個平面間主要透過正向與剪力方向的彈簧 ( $k_n$ 、 $k_s$ ) 模擬相互作用力與位移之關係，在應用上可表示為大地材料的節理、層理、斷層、基礎與土壤的交界面、滑動或碰撞物體的接觸面。介面元素以庫倫滑動 (Coulomb sliding) 及拉伸分離理論 (tensile separation) 來定義，其參數包括介面的摩擦角、凝聚力、剪脹角、正向與剪力方向勁度及拉力強度，依照使用者的需求代入不同條件設定介面性質進行模擬。

## 6.1 邊坡擋土系統數值分析架構

近代設計之擋土牆形式通常為複合型式，除了牆體本身，常結合止滑樁、格柵、地錨等型式混和使用，不易以傳統邊坡穩定分析程式分析。本計畫以套裝軟體 FLAC 2D 分別對邊坡擋土系統之總體滑動與局部擋土系統進行分析，分析架構如圖 6.1 所示，目的建立完整分析流程，分析結果選定預警指標及數值，作為預警門檻值訂定依據。

### 6.1.1 總體滑動分析

總體滑動分析主要探討飽和層土壤因地下水位上升，引致孔隙水壓增加、剪力強度下降，進而使邊坡不穩定，FLAC 在無設置水力模擬條件下為總應力分析，地下水位上升對邊坡影響在總應力分析中為土體單位重變化，FLAC 程式中使用 FISH 語言撰寫相關函數模擬此物理現象。

分析程序以坡度 30 度、坡長 100 公尺、崩積層厚度 10 公尺、擋土牆高 6 公尺、壁體角度 90 度、擋土結構物打設一 20 米止滑樁與一 30 米地錨之簡易邊坡進行分析程序說明。

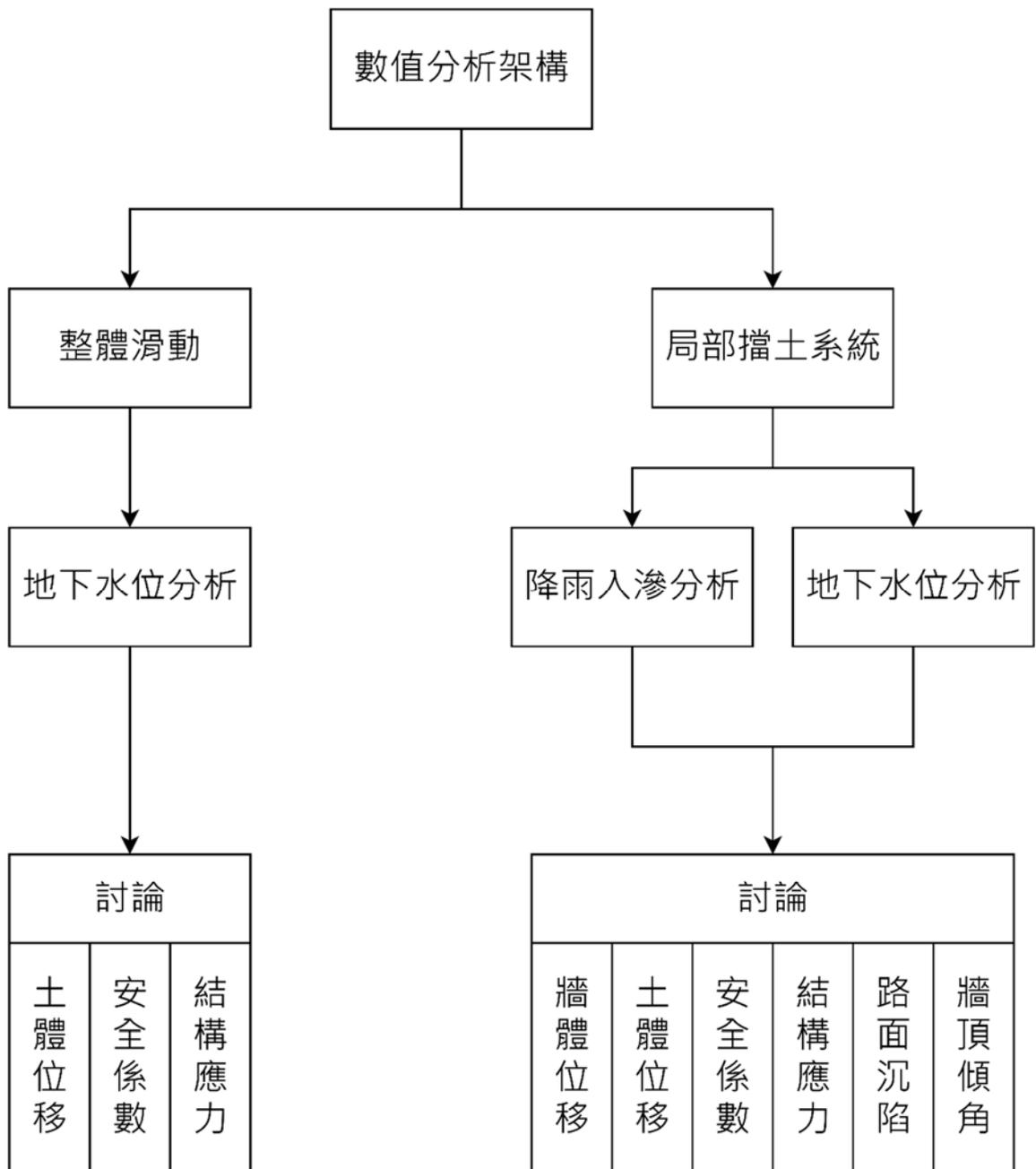


圖 6.1 邊坡擋土系統數值分析流程圖

分析主要分為兩個階段，分別為初始條件之靜態平衡及分階段水位上升之水利條件設置，依程序可分為五步驟：(1)建立網格模型與地層幾何條件如圖 6.2；(2)設定材料參數如表 6-1；(3)加入結構元素及設定相關參數如表 6-2；(4)進行初始力學平衡；(5)分階段設置水位面並進行安全係數分析，此處以平行坡面之地下水深 10m、5m 進行模擬與比較。最後依需求將結果進行輸出。

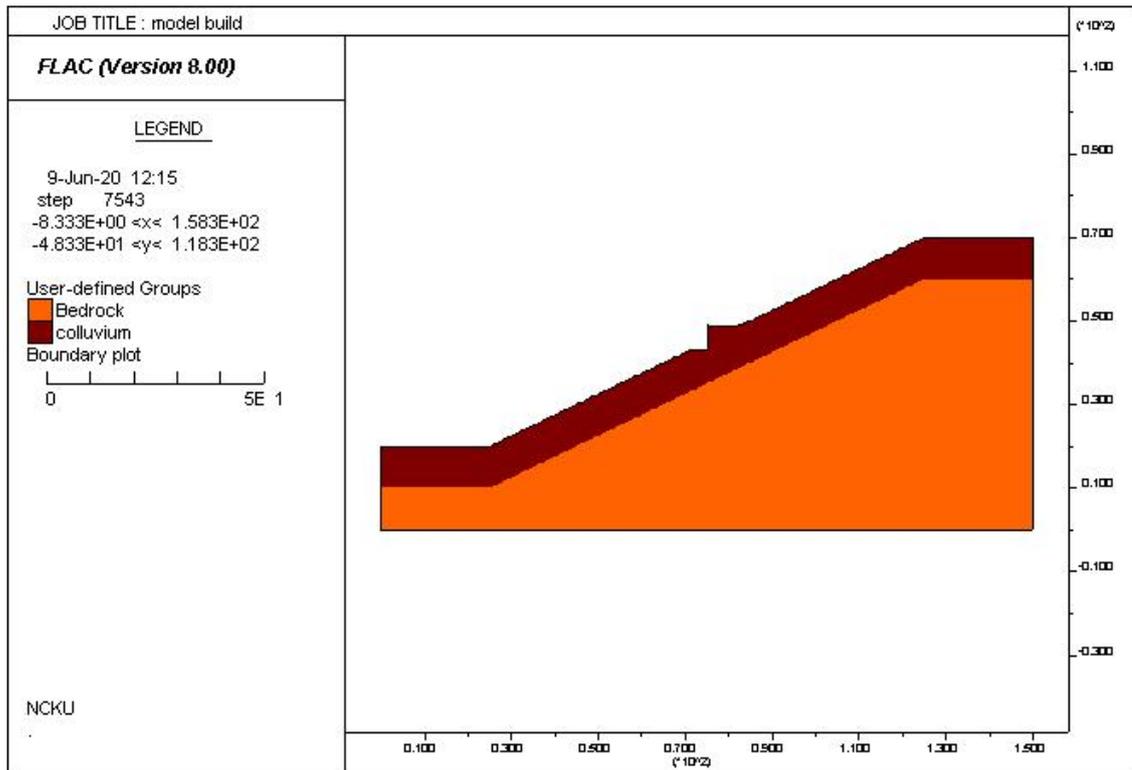


圖 6.2 總體滑動分析幾何示意圖

表 6-1 地層材料參數

地層分類	單位重 $\gamma$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	c (kPa)	$\phi$ ( $^\circ$ )
岩層	2200	100	30
崩積層	2000	3	32

表 6-2 擋土系統結構元素參數

擋土牆	彈性係數(Gpa)	截面積(m <sup>2</sup> )		慣性矩(m <sup>4</sup> )	
	20	1		1e-2	
止滑樁	彈性係數(Gpa)	半徑(m)		間距(m)	
	8	0.5		1	
地錨	彈性係數(Gpa)	截面 積(m <sup>2</sup> )	極限強 度(ton)	預力 (ton)	間距 (m)
	200	0.5	50	50	1

分析結果以安全係數等值線圖評估滑動潛勢較大區域，另外，為評估擋土結構物強度對整體邊坡穩定性的影響，進行地錨極限強度折減至 5ton 之分析模擬，與原始強度比較，結果如表 6-3 所示。

結果顯示，地下水位較高情形，安全係數較低；地錨極限強度較大之安全係數較極限強度折減之情況高；以滑動區塊進行比較，地錨極限強度 50ton、地下水位深度 10m 情形，因地錨作用，擋土牆附近安全係數較上、下邊坡之安全係數高，但當地錨強度折減與地下水位上升則滑動區域改為整體。

### 6.1.2 局部擋土系統分析

局部擋土系統分析依破壞機制中水壓力不同，分為地下水位與降雨入滲引致牆體破壞分析，分析流程如下：

#### 1. 地下水位引致牆體不穩定分析

局部擋土系統地下水位分析與總體滑動分析相同，目的探討地下水位上升引致之邊坡安全性問題，差別在於將模型邊界縮小，進一步探討局部土壤結構互制反應。以坡度 30 度、崩積層厚度 10m、擋土牆高 6m、壁體角度 90 度、擋土結構物打設一 20m 止滑樁與一 30m 地錨之簡易邊坡進行分析，其分析程序與總體滑動分析程序相同，分為五步驟：(1)建立網格模型與地層幾何條件；(2)設定材料參數；(3)加入結構元素及設定相關參數，此處使用之材料參數與結構元素參數與總體滑動分

析相同，模型建立完成如圖 6.3；(4)進行初始力學平衡；(5)分階段設置水位面並進行安全係數分析，最後依需求將結果進行輸出，此處地下水水位深度假設平行坡面，並以 10m、5m 進行分析比較。

分析結果以剪應變等值線圖表示坡體最臨界(critical)滑動面輪廓，因坡體於破壞過程中，土體滑動為累積變形行為，因此以剪應變表達滑動潛勢，其結果如表 6-4 所示。顯示當地下水水位深度由 10m 上升至 2m 時，安全係數由 1.47 降低至 0.71；臨界滑動面在地下水水位深度 10m 下為淺層滑動，當地下水水位深度上升至 5m 以上時，則轉為深層滑動。

表 6-3 總體滑動分析成果

	岩錨強度 50 ton	岩錨強度 5 ton
水深 5 m		
水深 10 m		

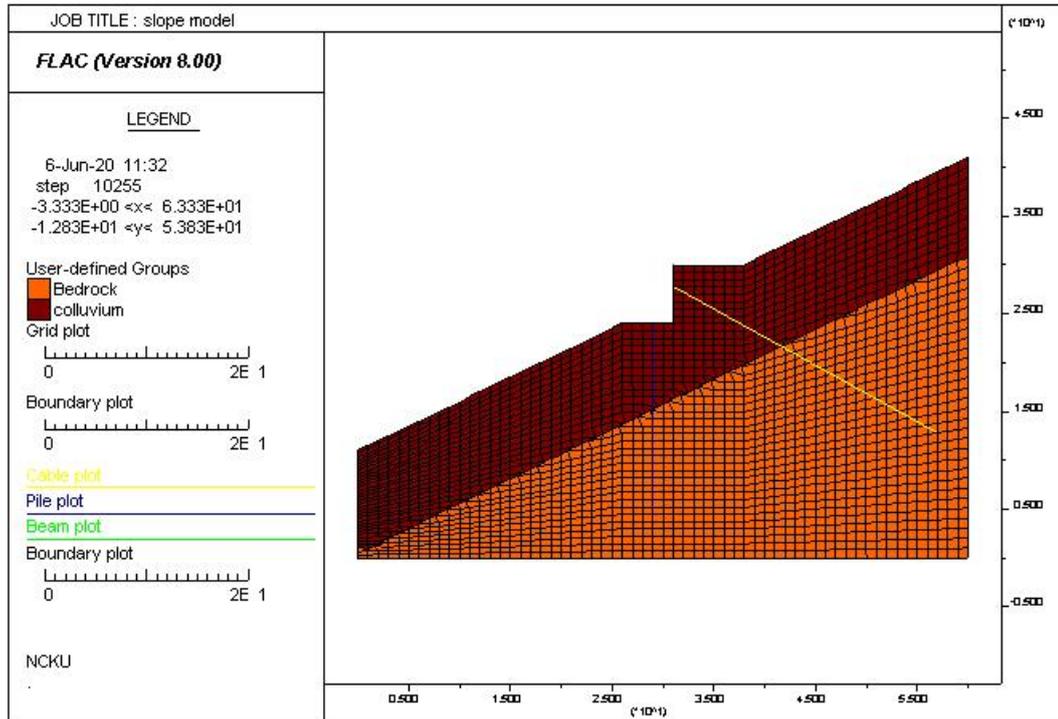
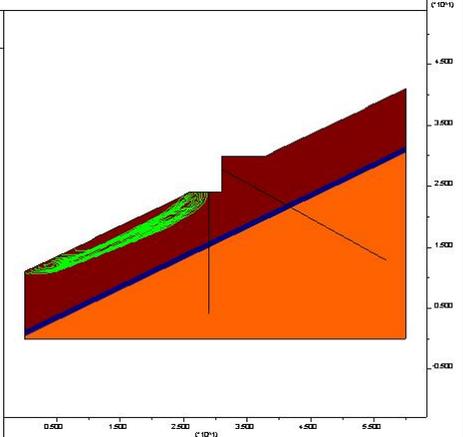
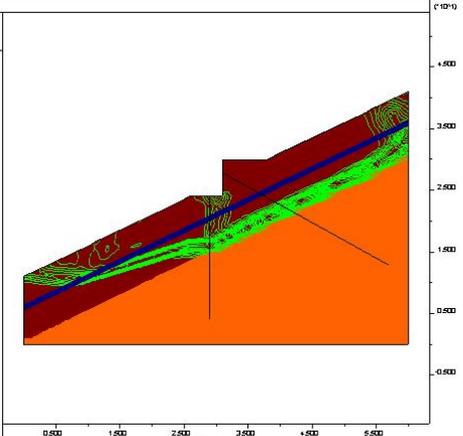
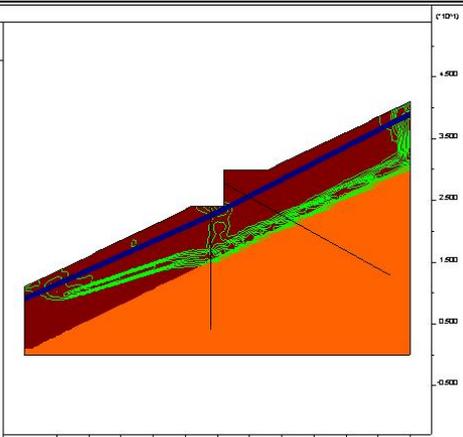


圖 6.3 局部擋土系統分析地下水位幾何建立示意圖

為探討此破壞機制對擋土系統與背填土側影響，進行在不同水力條件下力學平衡模擬，並輸出穩定後相應節點位移情形，在安全係數小於 1 的情形下(如地下水位深度 2m)，因為無法達到穩定狀態，便以逐漸滑動位移情形觀察破壞情形，輔以最終破壞位移圖檢核，觀測牆體與背填土側位移情形可用以探討不同破壞機制。

為檢核結構體受力情形，由於擋土牆體與止滑樁通常以混凝土材料建造，極限強度為抗拉強度控制，結構彎矩為檢核的物理量，是以輸出擋土牆牆身與止滑樁樁身結構元素之彎矩作圖；地錨之安全性通常以軸力作檢核標準，故記錄不同情形下地錨軸力變化。計算結構系統不同結構物的受力狀態可用以評估受力最大區域與結構體可能破壞位置另外為評估擋土結構物強度對坡體穩定性之影響，針對安全係數接近 1 之情行，對地錨極限強度做折減並觀測其安全係數變化。

表 6-4 局部擋土系統分析-地下水位引致

	剪應變等值線圖	FS
水深 10m	<p>JOB TITLE : water depth:10m</p> <p>FLAC (Version 8.00)</p> <p>LEGEND</p> <p>6-Jun-20 11:32 step 49039 -3.333E+00 &lt;&lt;&lt; 6.333E+01 -1.283E+01 &lt;=&lt; 5.383E+01</p> <p>Factor of Safety 1.47</p> <p>User-defined Groups</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bedrock</li> <li>colluvium</li> </ul> <p>Max. shear strain-rate</p> <p>Contour interval= 2.50E-06</p> <p>Minimum: 0.00E+00</p> <p>Maximum: 3.00E-05</p> <p>Boundary plot</p> <p>0 2E 1</p> <p>Water Table</p> <p>Cable plot</p> <p>Pile plot</p> <p>Beam plot</p> <p>Boundary plot</p> <p>0 2E 1</p> <p>NCKU</p> 	1.47
水深 5m	<p>JOB TITLE : water depth:5m</p> <p>FLAC (Version 8.00)</p> <p>LEGEND</p> <p>6-Jun-20 11:32 step 31765 -3.333E+00 &lt;&lt;&lt; 6.333E+01 -1.283E+01 &lt;=&lt; 5.383E+01</p> <p>Factor of Safety 1.14</p> <p>User-defined Groups</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bedrock</li> <li>colluvium</li> </ul> <p>Max. shear strain-rate</p> <p>Contour interval= 1.00E-06</p> <p>Minimum: 0.00E+00</p> <p>Maximum: 1.70E-07</p> <p>Boundary plot</p> <p>0 2E 1</p> <p>Water Table</p> <p>Cable plot</p> <p>Pile plot</p> <p>Beam plot</p> <p>Boundary plot</p> <p>0 2E 1</p> <p>NCKU</p> 	1.14
水深 2m	<p>JOB TITLE : water depth:2m</p> <p>FLAC (Version 8.00)</p> <p>LEGEND</p> <p>6-Jun-20 11:32 step 68817 -3.333E+00 &lt;&lt;&lt; 6.333E+01 -1.283E+01 &lt;=&lt; 5.383E+01</p> <p>Factor of Safety 0.71</p> <p>User-defined Groups</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bedrock</li> <li>colluvium</li> </ul> <p>Max. shear strain-rate</p> <p>Contour interval= 2.50E-08</p> <p>Minimum: 0.00E+00</p> <p>Maximum: 2.75E-07</p> <p>Boundary plot</p> <p>0 2E 1</p> <p>Water Table</p> <p>Cable plot</p> <p>Pile plot</p> <p>Beam plot</p> <p>Boundary plot</p> <p>0 2E 1</p> <p>NCKU</p> 	0.71

## 2. 降雨入滲引致牆體不穩定分析

局部擋土系統降雨入滲分析主要探討淺層土壤因降雨入滲，使非飽和土壤基質吸力下降，導致剪力強度降低而讓坡體穩定性降低。為模擬此物理現象，使用 FLAC 提供之” TP flow” 兩相滲流模式進行分析，除了可以模擬基質吸力降低現象也可用以模擬土層滲透係數隨飽和度變化而有所不同的現象。此處一樣以坡度 30 度、崩積層厚度 10m、擋土牆高 6m、壁體角度 90 度、擋土結構物打設一 20m 止滑樁與一 30m 地錨之簡易邊坡進行分析，其模型網格邊界與局部擋土系統地下水位分析相同，不同處在於水利條件的設置。分析程序分為五步驟：(1)建立網格模型與地層幾何條件；(2)設定材料參數與非飽和土壤水文參數，此處使用之材料參數與總體滑動相同；(3)加入結構元素及設定相關參數，此處使用之結構元素參數與總體滑動分析相同；(4)關閉入滲模式並進行初始力學平衡；(5)開啟入滲模式，進行水力力學耦合分析，最後依需求將結果輸出。

分析時以底部為滲流邊界，坡頂表面設為飽和狀態並固定其孔隙水壓為 0，設定初始基質吸力與飽和度，以此狀態進行水力力學耦合模擬，此處以入滲 224 小時為例進行分析，並記錄入滲時間 6、24 小時模型飽和度與位移情形進行比較，結果如圖 6.4 所示，模型飽和度分布由表層逐漸向下傳遞，牆體頂部出現橫向位移，當入滲時間達 24 小時，浸潤深度達牆底區域。

為探討不同降雨延時情況之臨界破壞面與安全係數變化，在水力力學耦合分析結束後進行安全係數分析，並將結果以剪應變等值線性圖表示，結果如圖 6.5 所示。結果顯示，邊坡在降雨情形下安全係數在 0、6、24 小時情況下有逐漸下降趨勢；觀測臨界滑動面，可以發現在降雨入滲後，表層土壤強度下降使臨界滑動面由深層改為淺層，但滑動面對擋土系統無甚大影響。

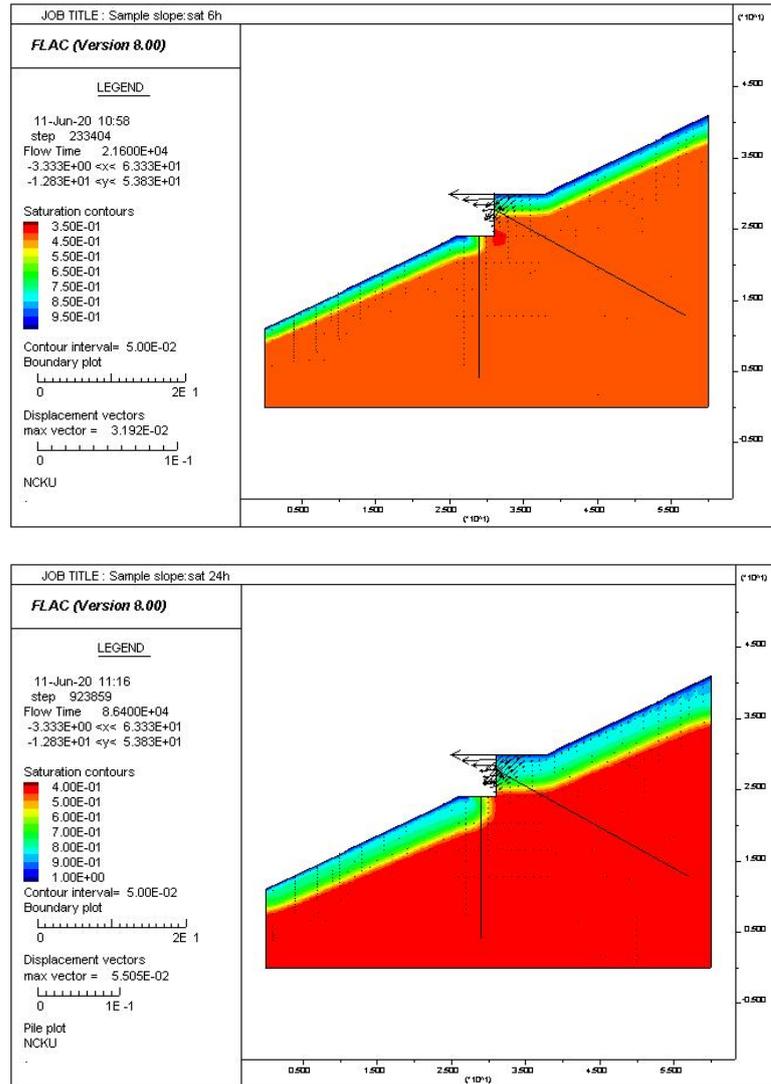


圖 6.4 降雨入滲分析-飽和度與位移圖:(上)6 小時，(下)24 小時

降雨入滲分析與地下水位分析相同，輸出節點位移用以評估破壞機制，輸出牆體與樁身彎矩判斷受力位置，紀錄地錨軸力以評估受力情形。為評估擋土結構物強度對坡體穩定性之影響，針對安全係數接近 1 之情行，對地錨極限強度做折減並觀測其安全係數變化。

在降雨延時並折減地錨極限強度使安全係數小於 1 時，擋土系統處於不穩定狀態，為評估其破壞型式，以逐漸滑動位移情形觀察破壞情形，輔以最終破壞位移圖檢核(如圖 6.6)，綜合判斷其破壞機制。

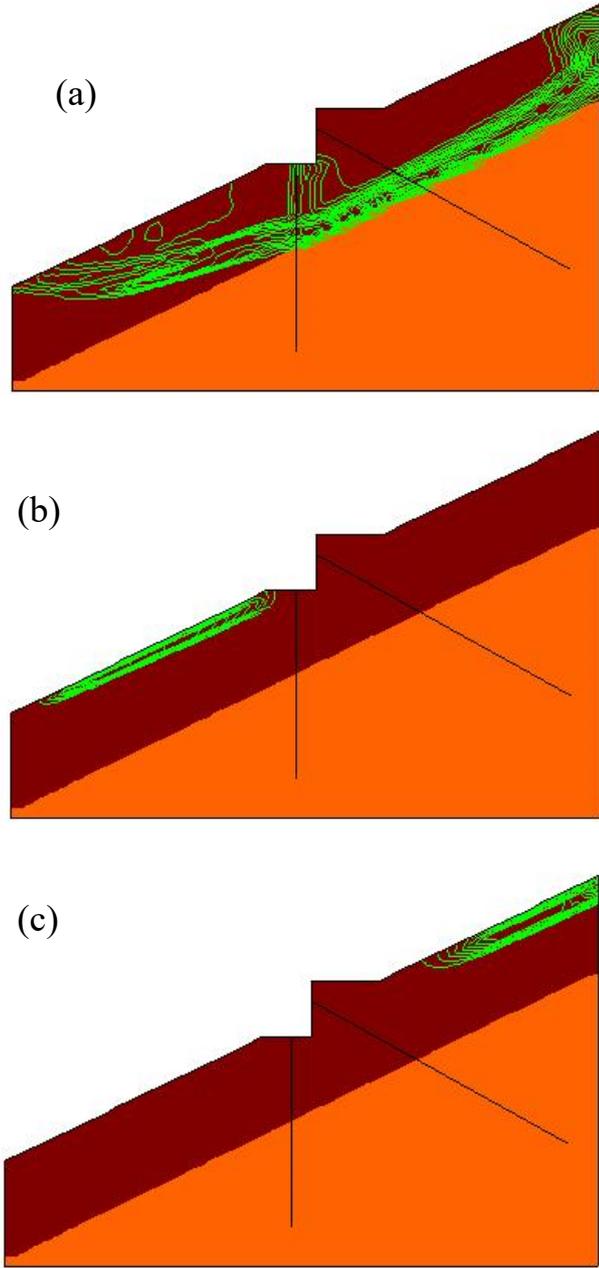


圖 6.5 降雨入滲分析滑動面 (a) 0 小時 (b) 6 小時 (c) 24 小時

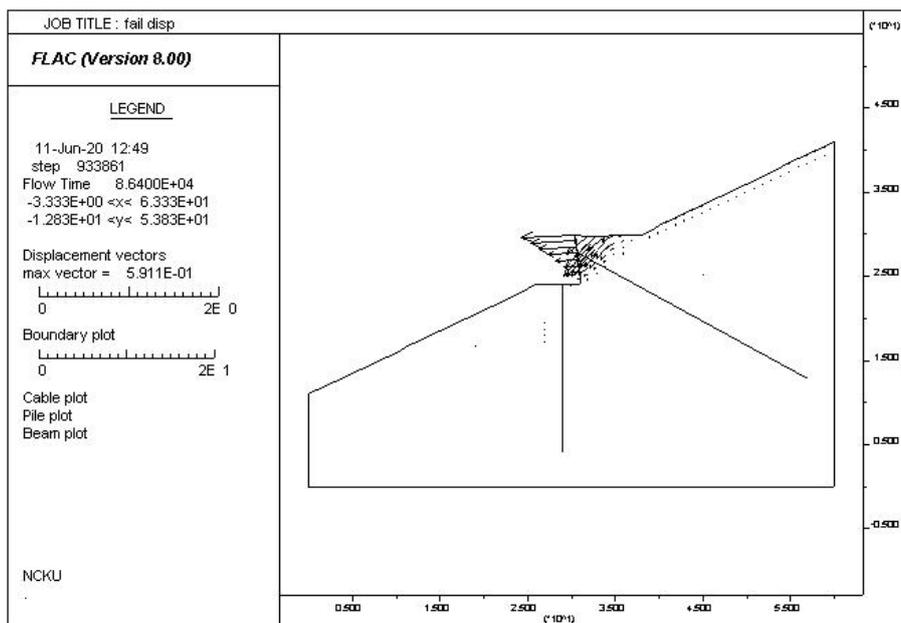


圖 6.6 降雨入滲分析最終破壞位移圖

## 6.2 台 20 線 52k 邊坡穩定性分析

邊坡穩定性分析流程依循 6.1 節建立之流程，分為總體滑動分析、局部擋土牆系統地下水位分析、局部擋土牆系統降雨入滲三種。

### 6.2.1 台 20 線 52k 總體滑動分析

總體滑動分析其地形幾何參考圖 6.7 剖面地形幾何；力學參數由於無完整室內實驗報告，此處參考倪勝火(2013)於距離本場址約 45 公里處非飽和邊坡監測，以 FLAC 進行邊坡穩定性分析中崩積層採用之參數，凝聚力 17.6kPa 與摩擦角 26 度；擋土結構物設計與參數參考竣工圖(圖 6.8)，本路段擋土牆高約 10 米，基礎設有兩止滑樁，牆背設有四地錨，在本分析中忽略集水管所帶來的影響；模型建立完成後如圖 6.9 所示。

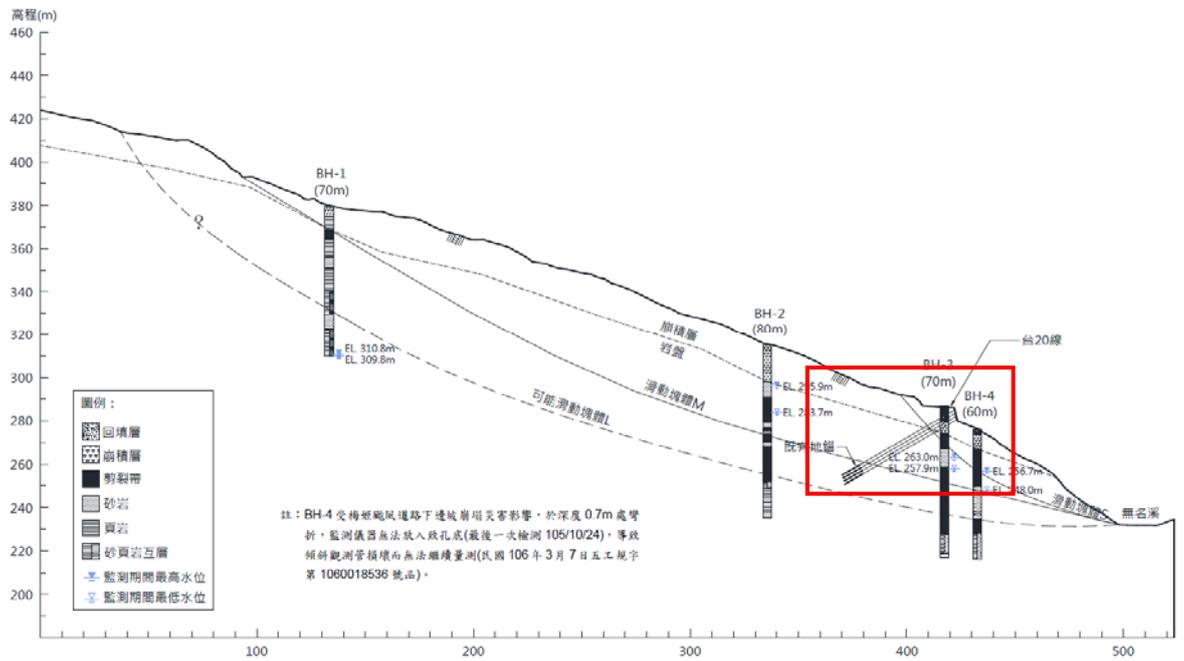


圖 6.7 台 20 線 52k 邊坡及擋土系統剖面圖

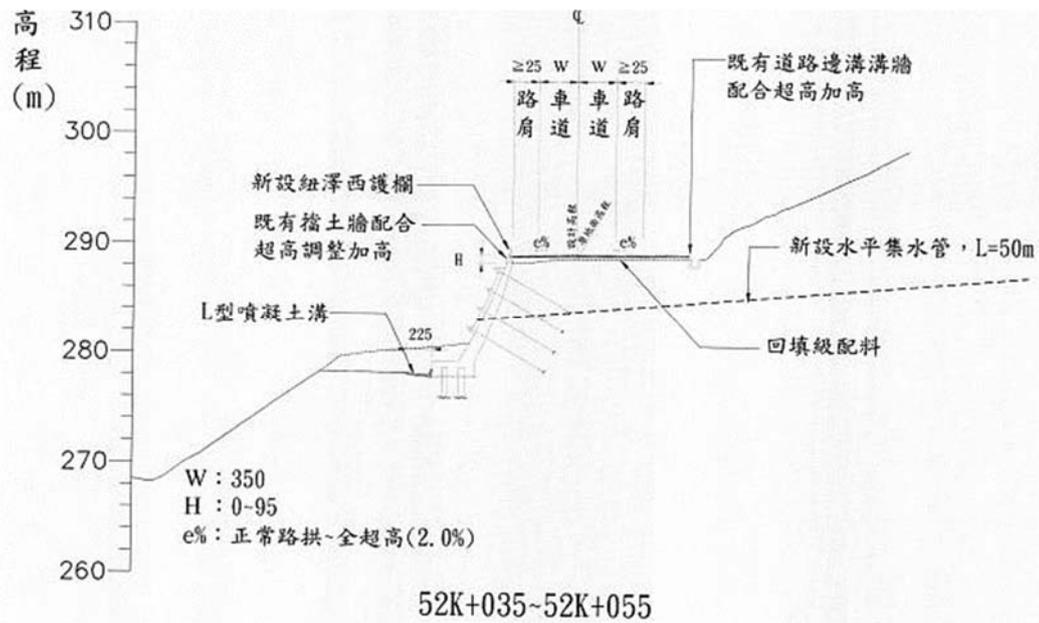


圖 6.8 台 20 線牆體與地錨示意圖  
(台 20 線護坡排水改善工程竣工圖 2013)

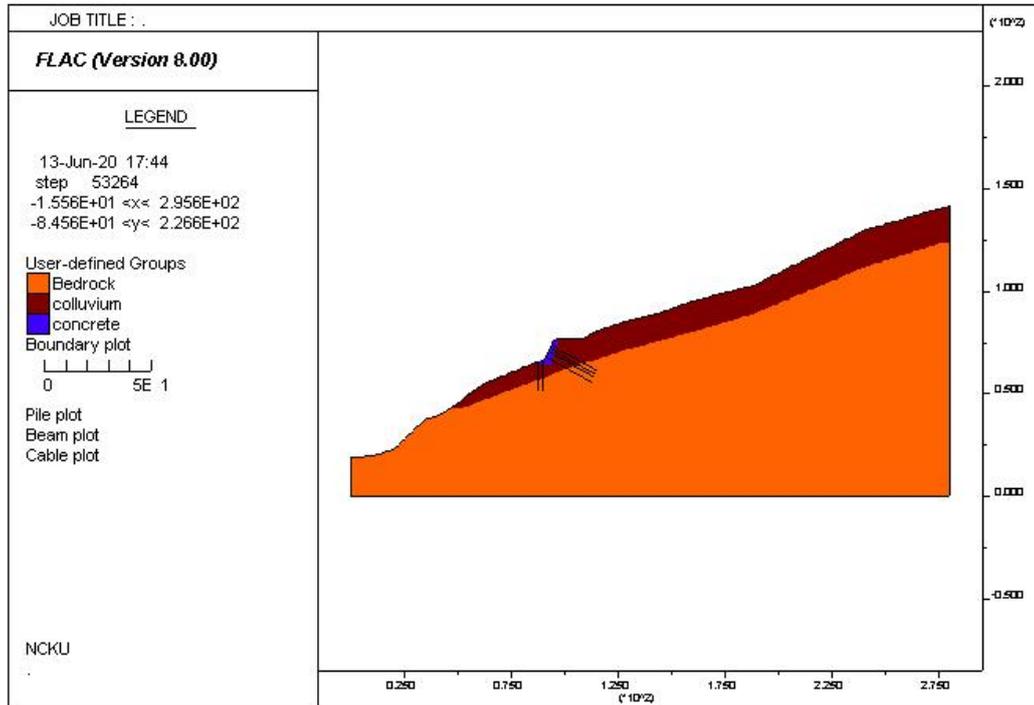
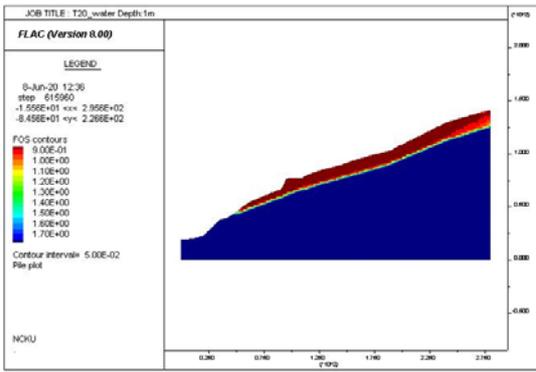


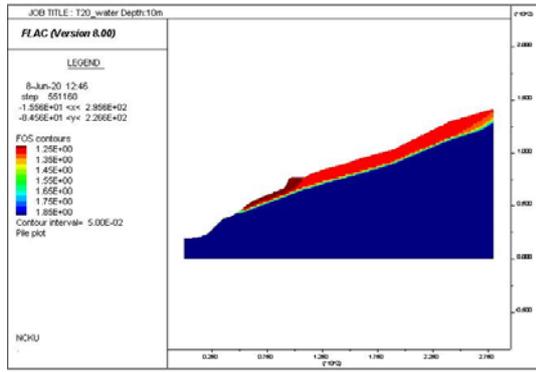
圖 6.9 台 20 線總體滑動數值模型

分析中以地下水位與地錨極限強度為變數，為結合現地監測資訊，水位選用 ID5 孔口地下水位深度為代表，此處挑選地下水位 10m 與地下水 1m 進行解說，分析結果如圖 6.10 所示，由上到下三組案例分別為：(1)僅考慮擋土牆(2)擋土牆加入極限強度 10 噸地錨與兩排止滑樁擋土系統(3)擋土牆加入 50 噸極限強度地錨與兩排止滑樁擋土系統。其中(3)為竣工圖設計目標。結果顯示於地下水位較深時，僅有擋土牆的案例中安全係數最小部分為道路至下邊坡地層出露部分，地下水位上升則滑動區域向上延伸至上部邊坡且安全係數小於 1。

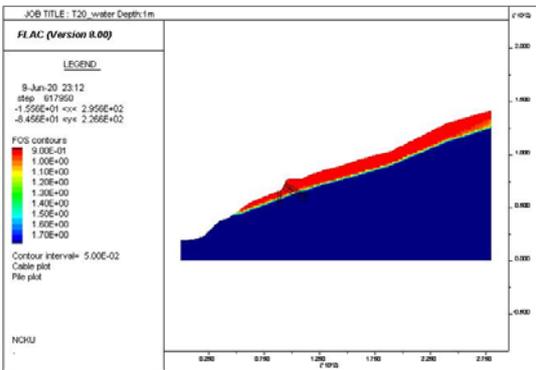
於加入極限強度 10 噸地錨與止滑樁案例中，地下水位深度 10m 案例滑動區域改善了擋土系統附近之穩定性，但於地下水位上升時穩定性的改善不甚明顯；在地錨極限強度 50 噸案例中，地下水位深度較深之情形其穩定性有明顯改善，擋土牆系統周圍較上部與下部邊坡更為安全，地下水位上升時，擋土系統穩定了周圍區域，使其比上部邊坡更為穩定。



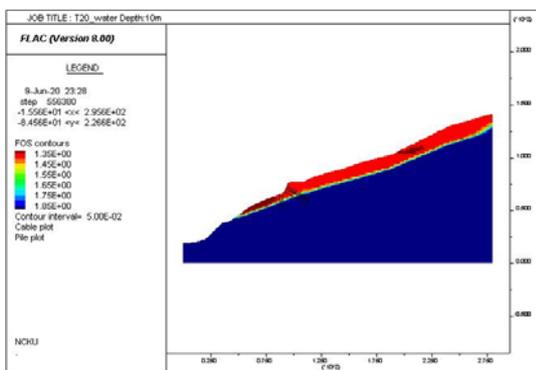
(a)



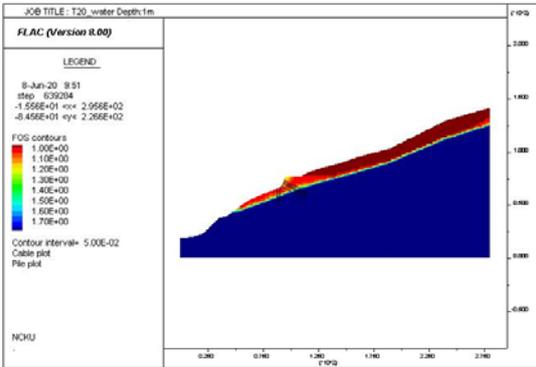
(b)



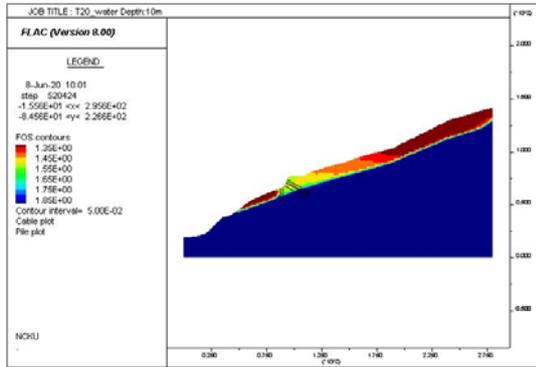
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 6.10 台 20 線 52k 總體滑動分析結果(a)擋土牆水深 1m(b)擋土牆水深 10m(c)擋土牆+10ton 地錨系統水深 1m(d)擋土牆+10ton 地錨系統水深 10m(e)擋土牆+50ton 地錨系統水深 1m(f)擋土牆+50ton 地錨系統水深 10m

## 6.2.2 台20線52k局部擋土系統地下水位變化分析

局部擋土牆地下水位分析地型參考圖 6.6 窗選區域之剖面地形幾何，力學參數與結構物參數與總體滑動分析相同，模型建立完成後如圖 6.11 所示。

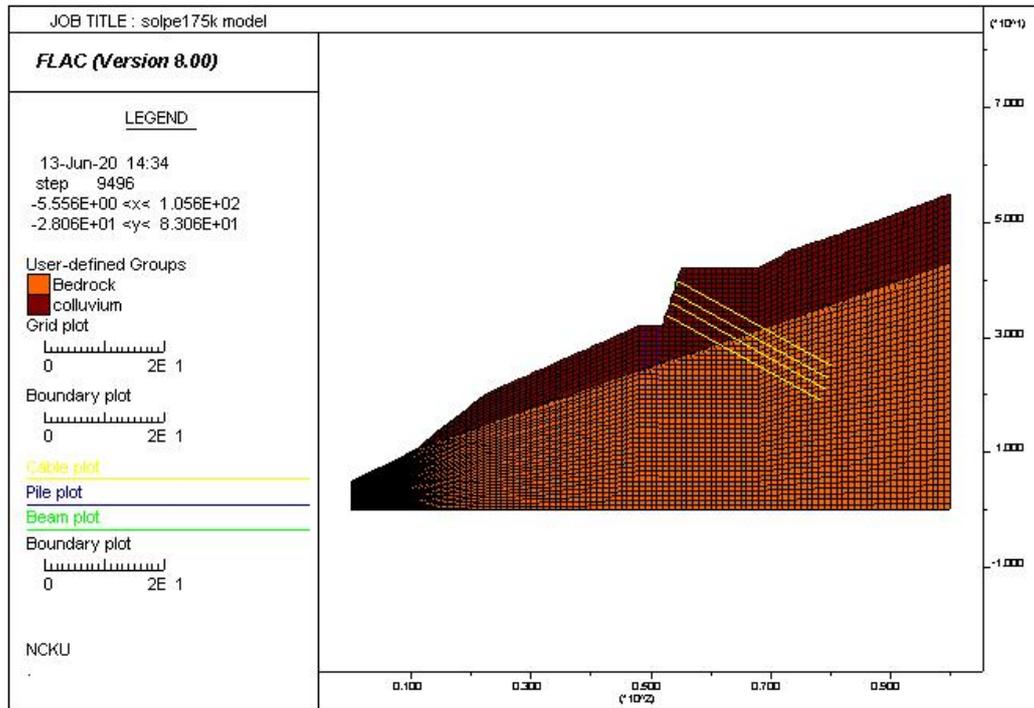
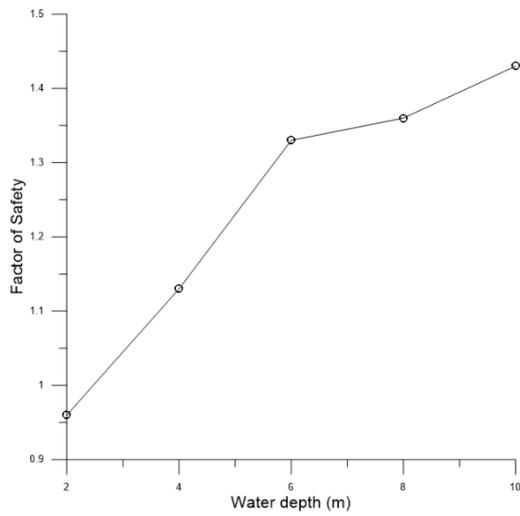
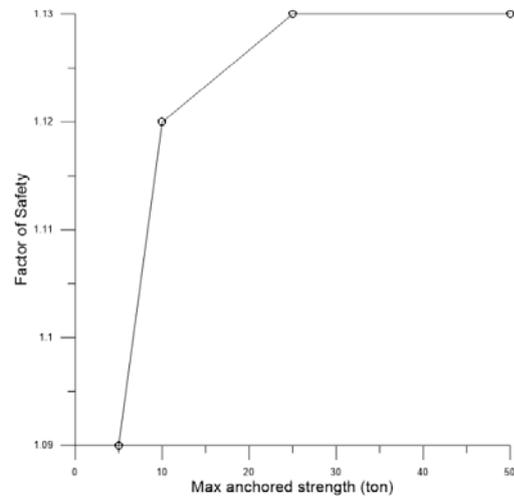


圖 6.11 台 20 線局部擋土系統模型模擬

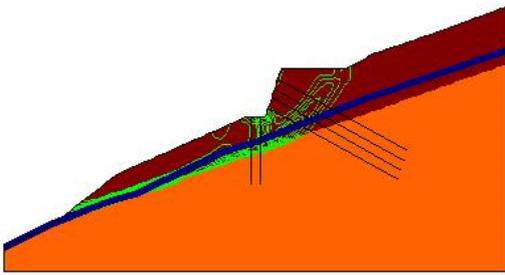
分析以地下水位為變數，並以 ID5 位置水位深度作為代表，分析結果整理如圖 6.12(a)所示，水位深度在 10m 時安全係數為 1.4，當地下水位逐漸上升至深度 2m，安全係數降為 0.96；以剪應變等值線圖(圖 6.12 (c) & (d))判斷臨界滑動面，結果顯示於地下水位較深時(10m)滑動面為道路至下邊坡土層出露區域，當地下水位上升，其滑動面延伸至上部邊坡且安全係數降低。挑選地下水位 4m 情形進行地錨極限強度折減分析，結果如圖 6.12(b)所示，當地錨極限強度折減至 10ton 時安全係數開始有下降傾向，於地錨極限強度為 5 ton 時安全係數為 1.09，仍未小於 1.0。



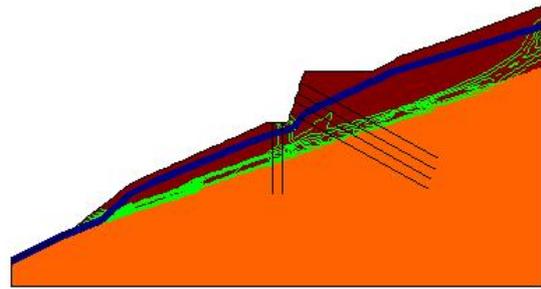
(a)



(b)



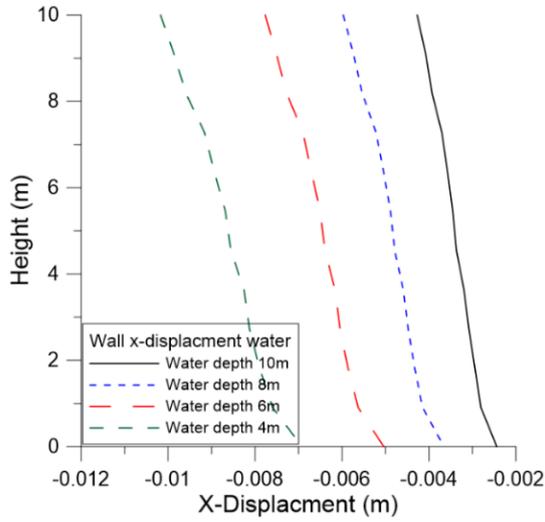
(c)



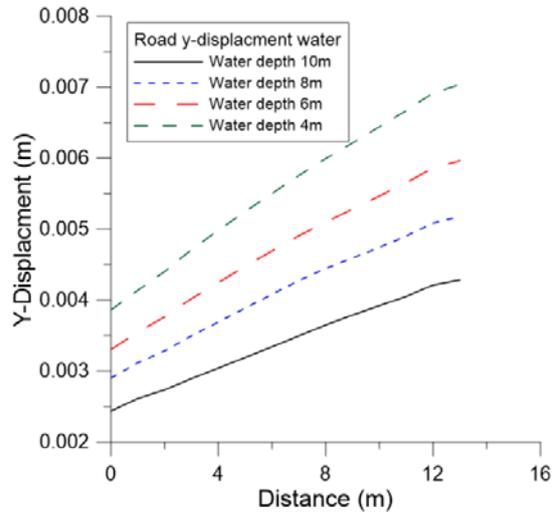
(d)

圖 6.12 台 20 線局部擋土牆系統地下水位分析結果 (a)地下水位與 FS (b)地錨強度折減與 FS (c)低水位(10m)滑動面示意圖 (d)高水位(2m)滑動面示意圖

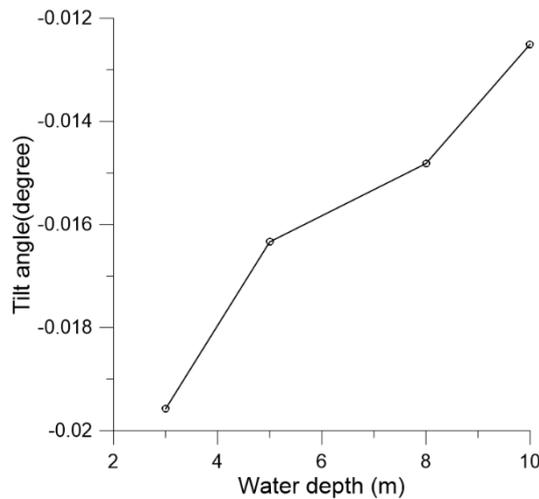
於安全係數大於 1 之情形進行力學平衡，擋土牆與路面位移如圖 6.13(a)及(b)所示，於地下水位低於 4m 情形下，牆體與路面位移量不大，最大位移處為牆頂約 1cm；計算牆頂傾角(圖 6.13(c))，其傾斜方向為逆時針，且隨地下水位上升有變大趨勢但因位移量不大，傾角值亦無明顯增加，最大約 0.024 度。



(a)



(b)



(c)

圖 6.13 台 20 線局部擋土系統地下水位分析-位移圖: (a)牆體位移; (b)路面位移; (c)牆頂傾角

牆體彎矩與地錨軸力變化如圖 6.14(a)及(b)所示，牆體彎矩於不同地下水位情形下幾乎沒有變化，與初始平衡狀態相同；地錨從上到下分別為 1 號至 4 號，結果顯示當地下水位上升，地錨所受軸力逐漸增加、下部地錨軸力大於上部地錨，軸力值皆約落在 8 至 9 噸；止滑樁彎矩

變化如圖 6.14(c)及(d)所示，其中 1 號止滑樁為左側 2 號為右側，當地下水位上升，止滑樁所受彎矩增加，左右兩止滑樁有相同受力情形，最大受力區域在崩積層與岩盤交界處。

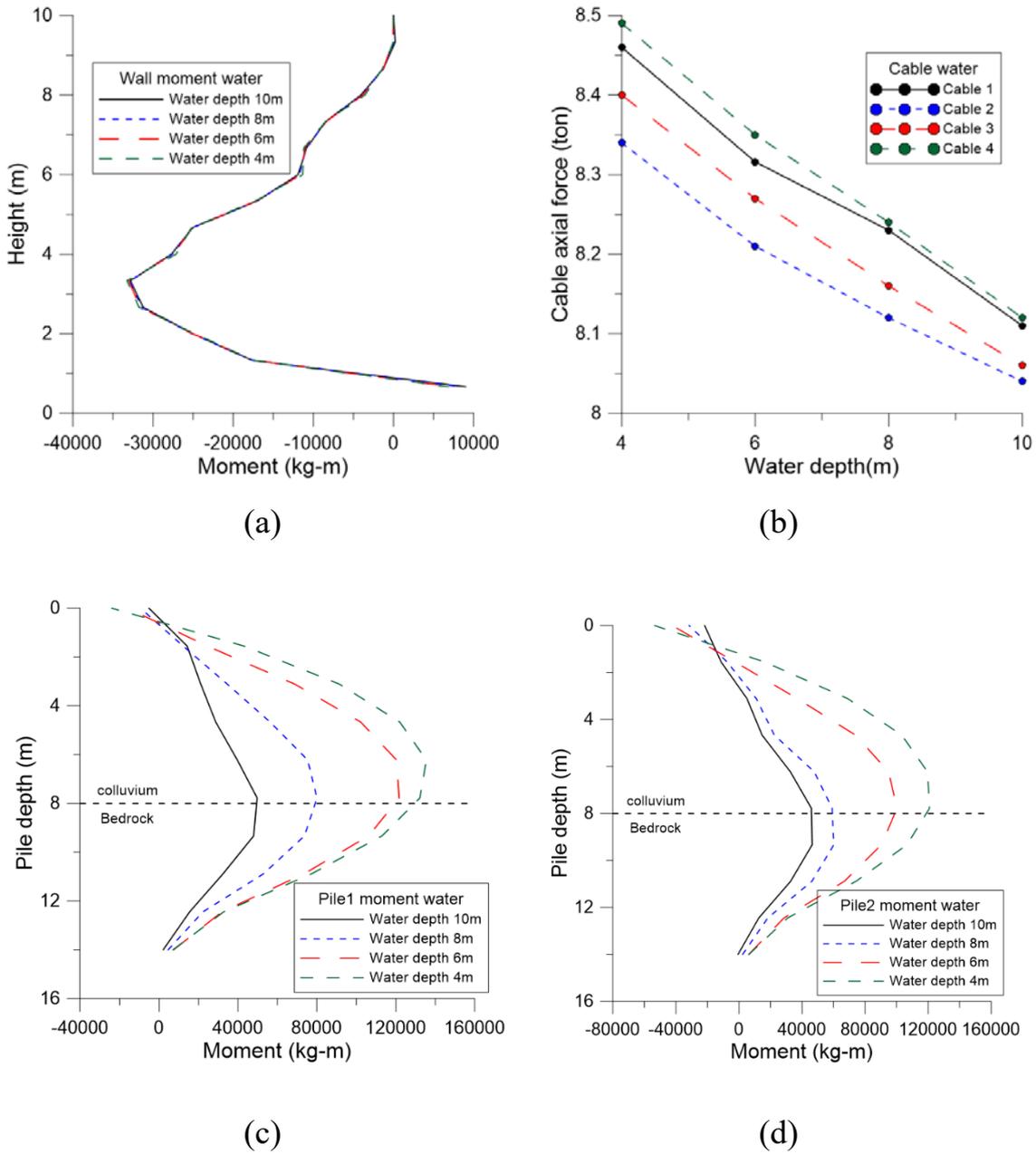
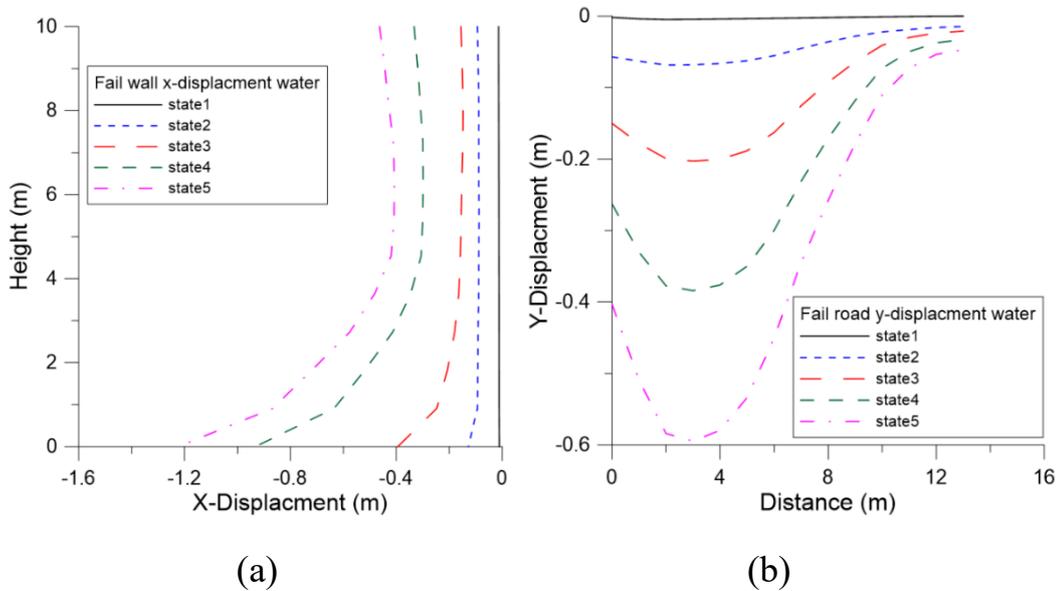


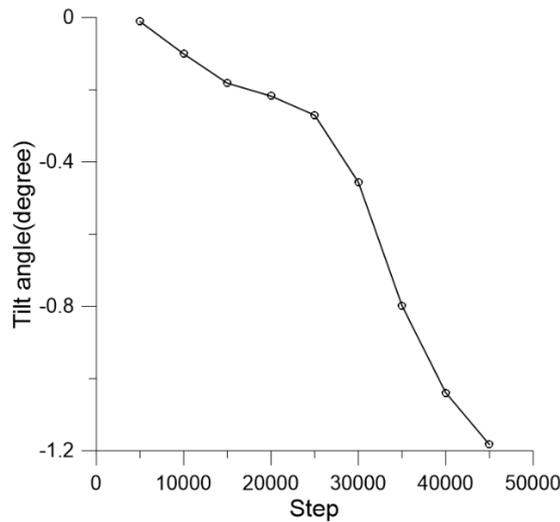
圖 6.14 台 20 線局部擋土系統地下水位分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分布 (b)地錨軸力 (c)1 號樁彎矩分布 (d)2 號樁彎矩分布

於安全係數小於 1 之地下水位 2m 情形，處於力學無法平衡狀態，模型網格持續變形，挑選不同時階的網格可評估模型逐步破壞的過程，如圖 6.15 所示，從網格位移情形判斷，擋土牆系統破壞初始為整體之平行滑移，逐漸地擋土牆下部位移比上部增加的快；路面沉陷最大位移處在路面接近擋土牆 2 到 3m 處，最終位移圖為圖 6.16，此滑動機制應為下部邊坡滑動，帶動擋土系統向下整體滑動導致破壞。



(a)

(b)



(c)

圖 6.15 台 20 線局部擋土系統地下水位分析-逐步破壞圖(a)牆體位移  
(b)路面沉陷(c)牆頂傾角

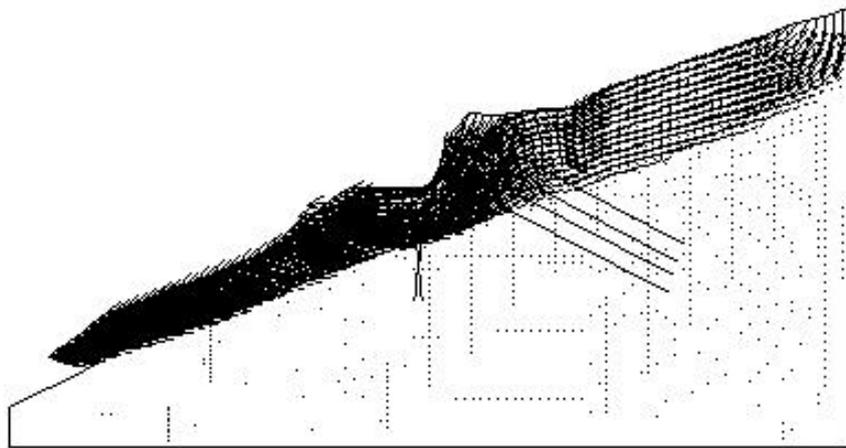


圖 6.16 台 20 線局部擋土系統地下水位引致破壞位移圖

### 6.2.3 台20線52k局部擋土系統降雨入滲穩定分析

局部擋土牆降雨入滲分析模型網格、力學參數、結構物參數與地下水位分析相同；水文參數以 107 年 8 月份一降雨事件進行模型率定，監測數據(圖 6.17)顯示，深度 25 公分與 60 公分處含水量變化之時間差約為 1.5 小時，模型飽和度變化模擬如圖 6.18，地下深度 1m 與 2m 飽和度上升 0.1 的時間差約 4.12 小時，假設土層垂直入滲速度為線性，深度相差 35 公分之飽和度變化時間差為 1.44 小時，與現地量測之 1.5 小時相距不遠，率定結果為崩積層飽和滲透係數輸入值： $3 \times 10^{-9}$  (m/s)。

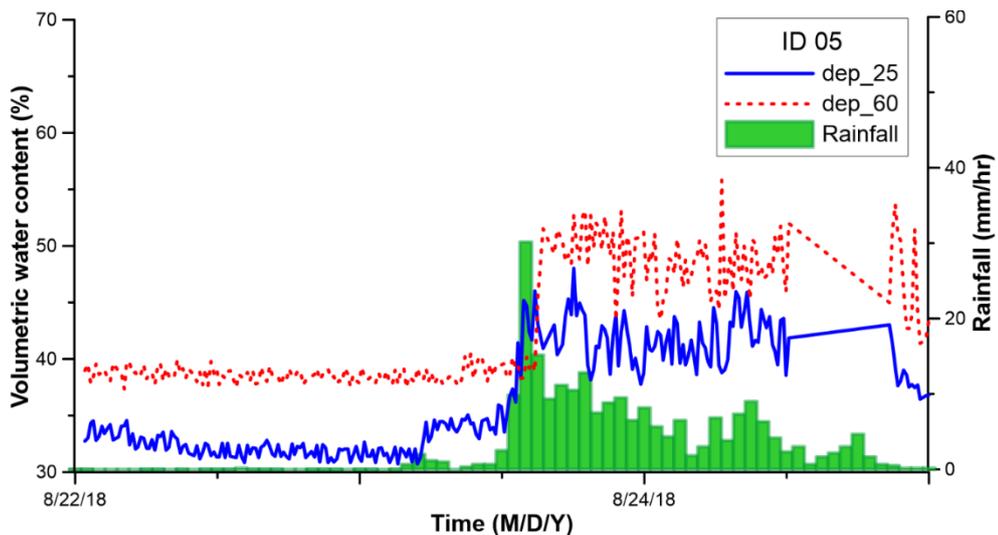
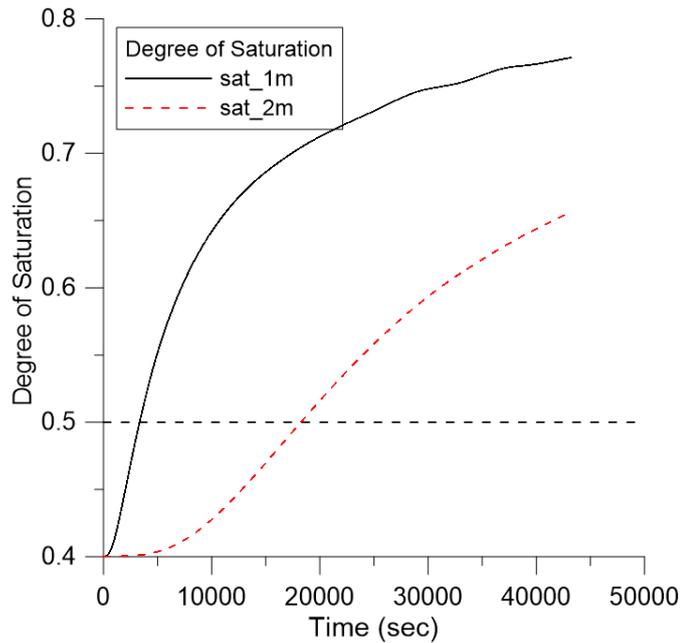


圖 6.17 台 20 線分層含水量率定紀錄



**圖 6.18 台 20 線水力參數率定結果**

以降雨時間為變數，分析結果整理如圖 6.19(a)所示，當持續降雨入滲至 72 小時安全係數降為 1，有滑動可能，臨界滑動面為下邊坡表層(圖 6.19(b))，但此滑動面過於局部，若在此處滑動對邊坡與擋土系統影響不大，為探討降雨入滲對擋土牆區域影響，假設下邊坡出露部分已妥善整治，在下邊坡區域以高強度材料模擬，使滑動面不從此處破壞再進行分析，結果如圖 6.20，在降雨入滲持續 72 小時，安全係數為 1.41，代表降雨入滲對整體邊坡與擋土牆系統危害程度不高，臨界滑動面為下邊坡淺層部分延伸至路面區域，以下分析皆以鞏固下邊坡地層出露處後進行模擬。

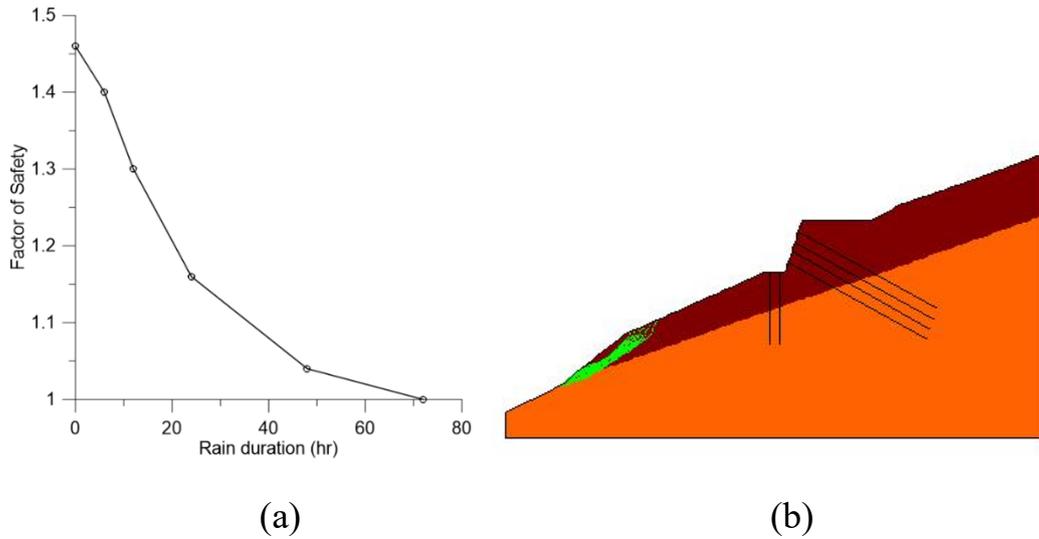


圖 6.19 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲分析結果(a)安全係數(b)滑動面

挑選降雨入滲 48 小時案例進行地錨強度折減分析，結果如圖 6.21(a)所示，當地錨極限強度折減至 10 噸時安全係數開始有顯著變化，當極限強度減至 5 噸時安全係數為 1.30，臨界滑動面從下邊坡向路面延伸改為擋土牆系統局部破壞(圖 6.21(b))。計算牆頂傾斜角，結果顯示，隨降雨入滲時間增加，牆頂傾斜為逆時針，且有降雨延時增加傾向，但因位移量不大，傾斜角量值也不大。

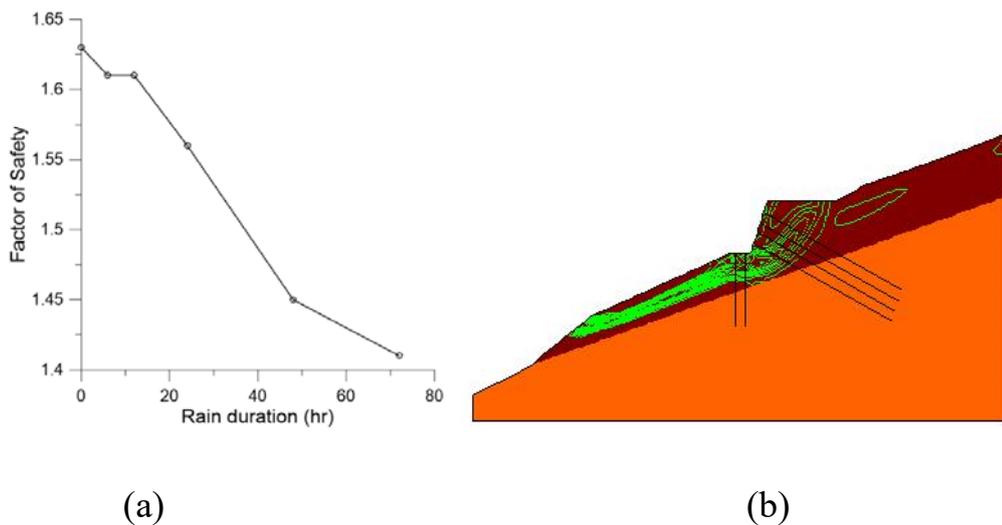


圖 6.20 下邊坡整治後局部擋土牆系統降雨入滲分析結果(a)安全係數 (b)滑動面

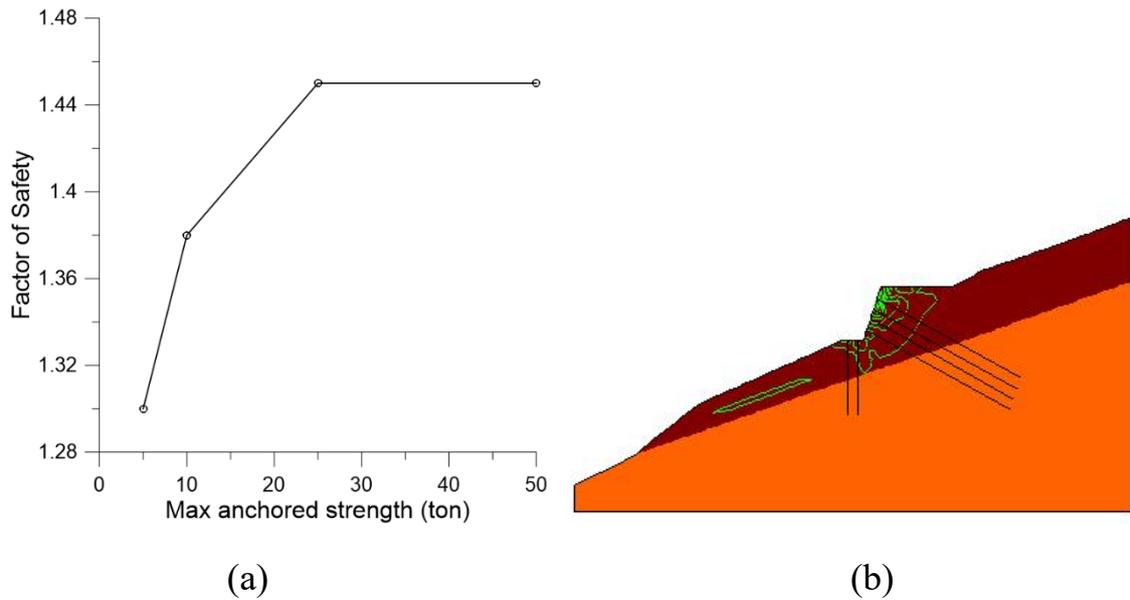


圖 6.21 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲地錨強度折減分析 (a)安全係數(b)滑動面

牆體彎矩與地錨軸力變化如圖 6.22(a)及(b)所示，牆體彎矩在不同降雨入滲延時情況下，離牆頂處 2 至 4m 區域有些許變化，但對整體彎矩分佈影響不大，整體而言與初始平衡狀態一致；地錨從上到下分別為 1 號至 4 號，結果顯示隨降雨延時增加，地錨所受軸力逐漸增加、上部地錨軸力大於下部地錨，軸力值皆約落在 8 至 9 噸；止滑樁彎矩變化如圖 6.22(c)與(d)所示，其中 1 號止滑樁為左側 2 號為右側，止滑樁在降雨入滲下受力情形顯得複雜，但總體而言樁身具隨降雨延時增加而受力增加的趨勢。

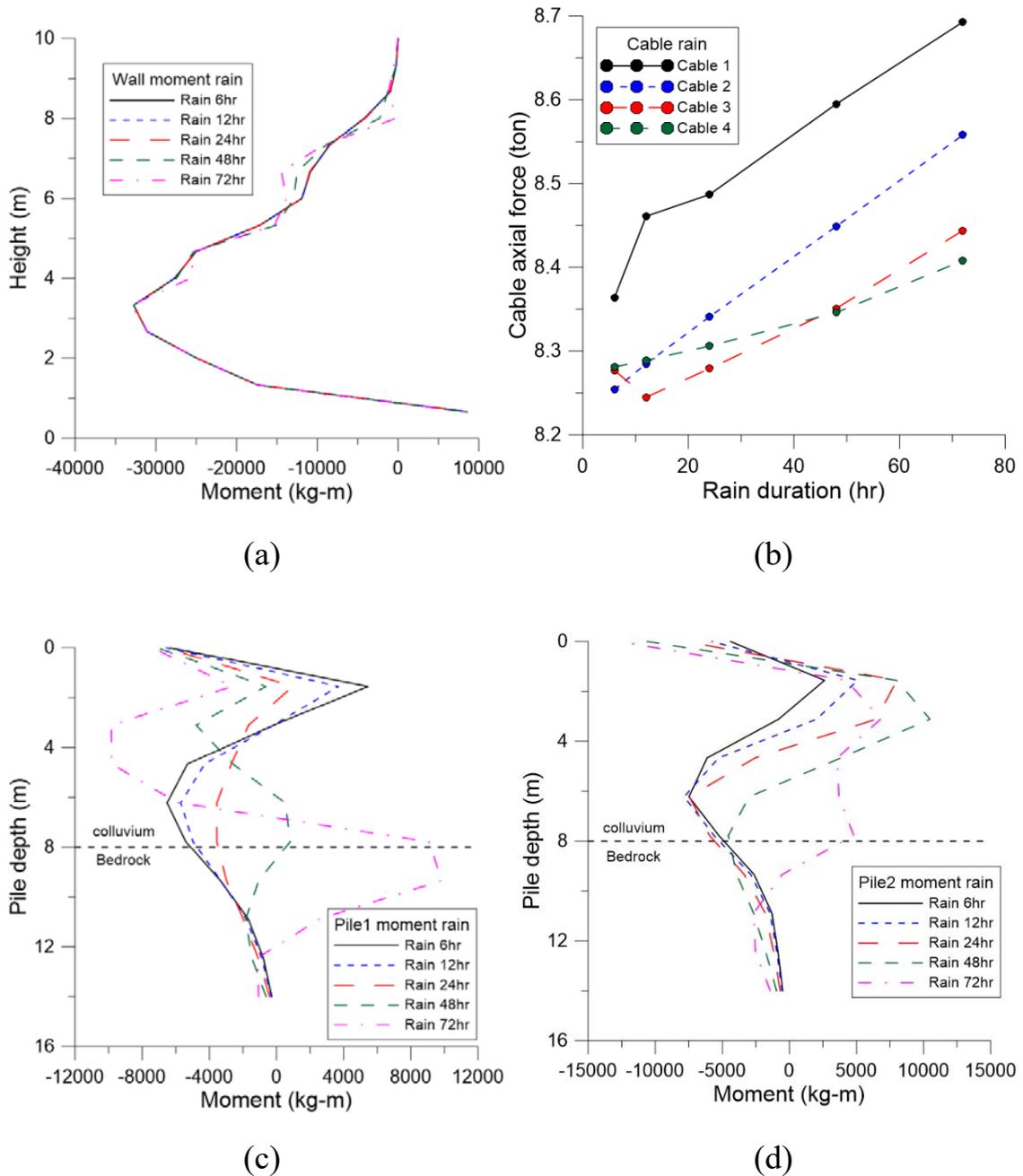


圖 6.22 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分布 (b)地錨軸力 (c)1 號樁彎矩分布 (d)2 號樁彎矩分布

由於以上分析皆無安全係數小於 1.0 狀態，無法以網格逐漸變形之量測判斷其可能破壞情形，此處以 FLAC 內建之”solve fos”指令，判斷可能破壞情形之最終位移狀態(圖 6.23)，此滑動機制應為下部淺層邊坡

滑動，帶著擋土系統向下移動，與地下水位分析不同處在於前者滑動面為崩積層及岩盤交界處，降雨入滲則為淺層。

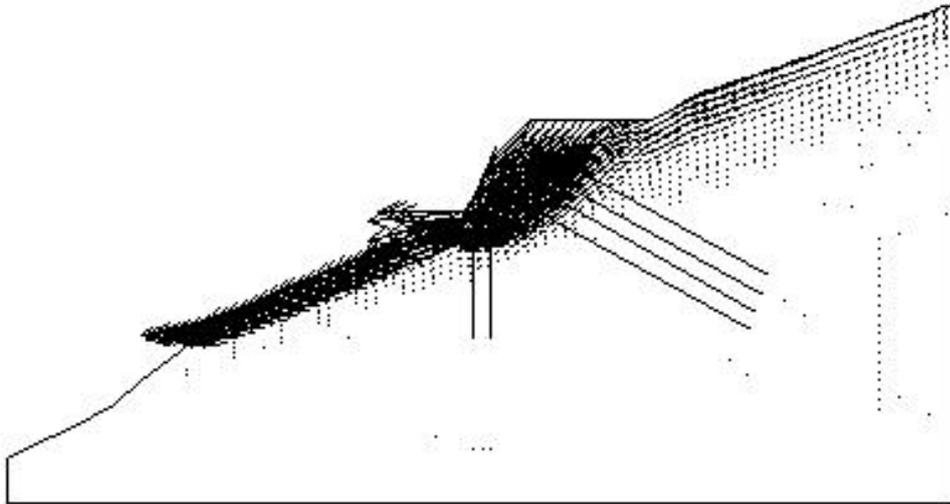


圖 6.23 台 20 線局部擋土牆系統降雨入滲引致位移圖

#### 6.2.4 台20線52k場址警戒值訂定

本架構將門檻值依距破壞時間長短，建議分為預警值、警戒值及行動值，場址之預警門檻值配合監測可分為地下水位與擋土牆頂傾角，地下水位為預警值及警戒值，牆頂傾角為行動值，根據上一節之邊坡穩定分析，本研究以局部擋土牆地下水位分析中安全係數 1.1 狀態之地下水位作為系統建議預警值，安全係數 1.0 狀態之地下水位為建議滑動警戒值，牆頂傾角為建議行動值。

在台 20 線之局部擋土牆地下水位分析中，在地錨強度沒有折減情形下，安全係數 1.1 情形為地下水位深度 3.65 米，安全係數 1.0 則為水位深度 2.5 米，故地下水位預警值為 3.65 米、警戒值為 2.5 米。

由於分析中安全係數大於 1.0 狀態之擋土牆位移極小，導致牆頂傾角無法作為預警、警戒值使用，因此以安全係數小於 1.0 狀態逐步破壞分析之牆頂傾角漸變值訂定牆頂傾角參考行動值，當地下水位到達警戒值時再以牆頂傾角行動值輔助判斷擋土牆狀態。本場址之牆頂傾角

參考行動值以局部擋土牆地下水位 2 米狀態分析做為訂定標準，如圖 6.15(c)所示，可發現擋土牆傾角變化可發為兩階段，當牆頂傾角達到 0.27 度開始，傾角增加變快，擋土邊坡恐達破壞之臨界點，因此以傾角 0.27 度作為本場址擋土牆牆頂傾角參考行動值，如表 6-5 台 20 線場址警戒值整理。

表 6-5 台 20 線場址警戒值整理

預警值	警戒值	行動值
地下水位 3.65 米	地下水位 2.5 米	牆頂傾角 0.27 度

### 6.2.5 數值分析初步驗證

為提高分析結果之可信度與確認結果之正確性，以下針對(1)數值分析之臨界滑動面與現場監測之可能滑動區域、(2)本研究訂定之場址警戒指標與前人訂定之場址警戒指標進行比較。

#### (1)場址滑動面

數值模擬之總體滑動分析結果，台 20 線場址的臨界滑動面為崩積層及岩盤交界處，局部擋土系統分析中控制破壞之地下水位分析裡，低水位情形之滑動面為道路靠近上邊坡區域至下邊坡地層出露處，當水位上升，滑動面逐漸向上邊坡延伸。

根據青山工程對台 20 線場址之鑽探報告與土層傾斜管量測(圖 6.24)，BH-2 孔深度 58 米有一滑動面，深度 17 米以上位移量增多，BH-3 孔於地下 14~20 米之間有明顯之變位轉折點，於邊坡下方 BH-4 孔接近地表處之位移量明顯較大，深度 17 米左右有一明顯之位移轉折點，利用上述結果，將場址可能滑動塊體分為 S、M、L 三種滑動塊體，其中滑動塊體 S 為傾斜管位移最顯著區塊，此滑動區域為道路靠近上邊坡區域至下邊坡河床位置。

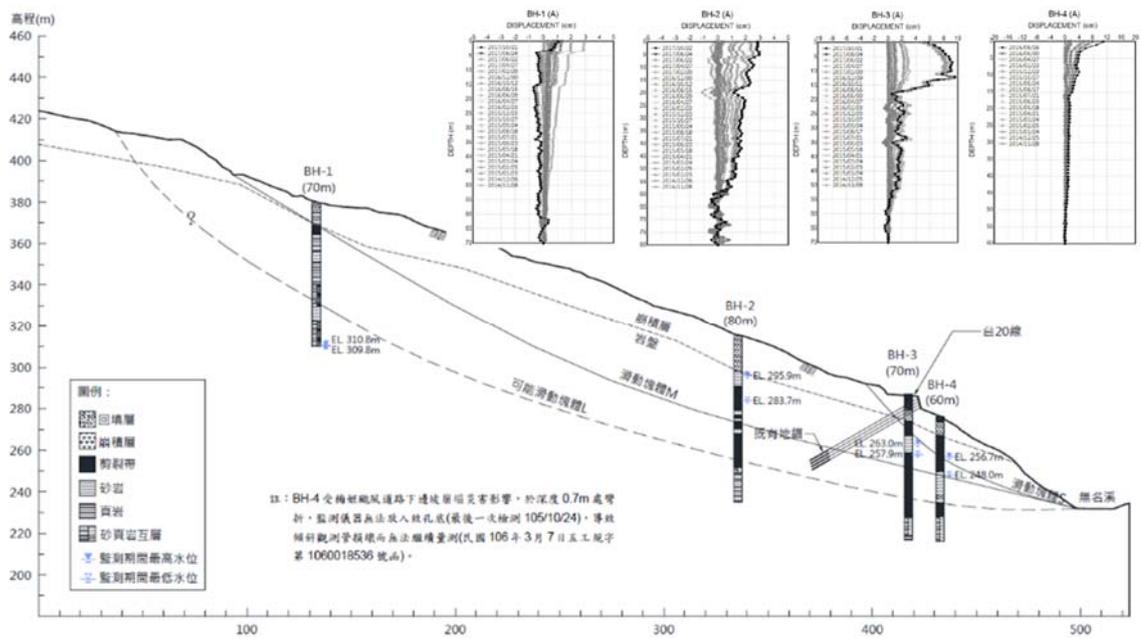


圖 6.24 台 20 線 A-A'剖面傾斜管量測資料  
(改自青山工程，2019)

比較數值分析結果與現場傾斜管監測判斷之滑動面，局部擋土系統分析之低水位情形在道路上邊坡區域滑動面，與現地量測之滑動塊體 S 一致，但於下邊坡滑動區域數值分析結果為地層出露處，現地監測為河床區域，考慮現地量測評估滑動塊體方法為數個傾斜管位移區域進行連線，而傾斜管設置點於道路附近，僅有道路上方約五米位置與下方約二十米位置，於更下方位置之滑動面是以假設方法評估而可信度較低，若只考慮設有傾斜管區域之滑動面則與數值分析結果趨於一致。

## (2)警戒指標

本計畫訂定之警戒指標結果預警值為地下水位深度 3.65 米、警戒值：2.5 米、行動值為牆頂傾角 0.27 度。參考青山工程對此場址監測之預警指標，地下水位注意值：較常時水位上升 4 米、警戒值：較常時水位上升 6 米、行動值：較常時水位上升 8 米；結構物傾度注意值：每月變化 200 秒/月、警戒值：每月變化 500 秒/月。

由於青山工程對結構物監測位置不是以牆頂傾角作為考慮，且預警指標為變化量而非固定值，所以無法進行比較，此處針對地下水位預警指標進行討論。本計畫對於地下水位訂定之預警指標為固定值，而青山工程使用之警戒指標為變化量，若將兩者進行比較須知常時地下水位深度。本研究對此場址監測結果，ID5 位置地下水位深度常時水位約為 10 米(圖 5.7)，以此為基礎進行計算、比較，青山工程之地下水位預警指標經換算後，注意值地下水位深度 6m、警戒值 4m、行動值 2m，與本研究訂定之預警值 3.65m、警戒值 2.5m，差異有限，但現有門檻值缺乏學理計算。

### 6.3 南市道 175 線 25k 邊坡穩定性分析

南市道 175 線 25k 場址邊坡穩定性分析流程依循 6.1 節建立之流程，分為總體滑動分析、局部擋土牆系統地下水位分析、局部擋土牆系統降雨入滲穩定分析三類。

#### 6.3.1 南市道175線25k總體滑動分析

南市道 175 線 25k 總體滑動分析其地形幾何參考圖 5.15 地形剖面圖幾何；土層力學參數使用青山工程於此處所做之室內試驗數據(表 6-6)；擋土結構物參考第一期整治工程斷面圖(圖 6.25)，本路段擋土牆高約 12 米，基礎設有一排樁一地錨，牆背設有兩地錨，在本分析中忽略水平排水管之影響。

表 6-6 南市道 175 線土層室內試驗結果(青山工程 2019)

地層	單位重	凝聚力	摩擦角
崩積層	19.1	0	27
風化岩層	21.2	0.3	28
泥岩層	21.6	1.95	25.3

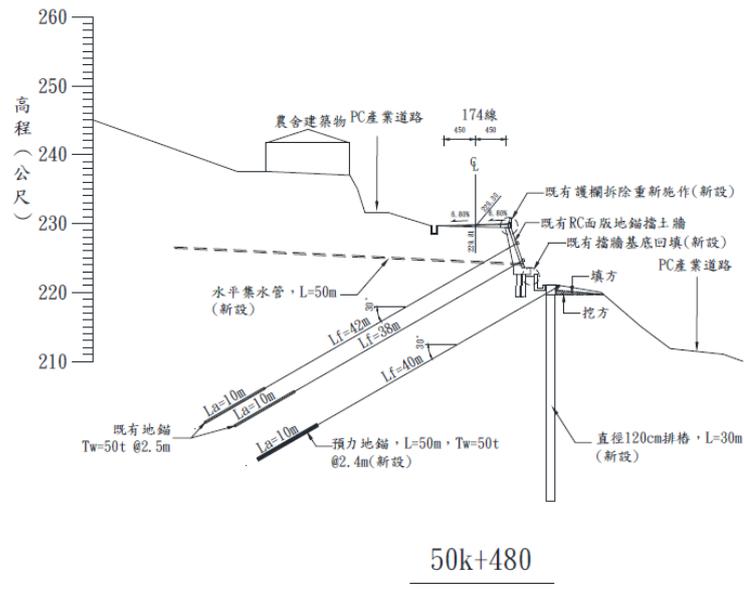
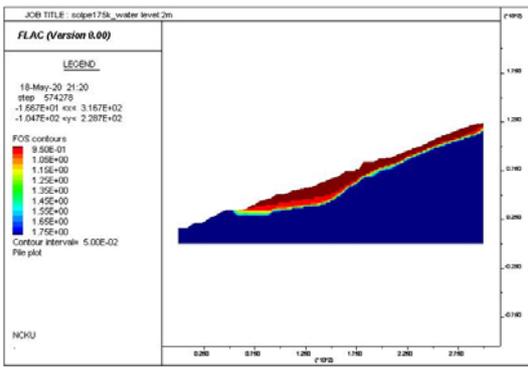


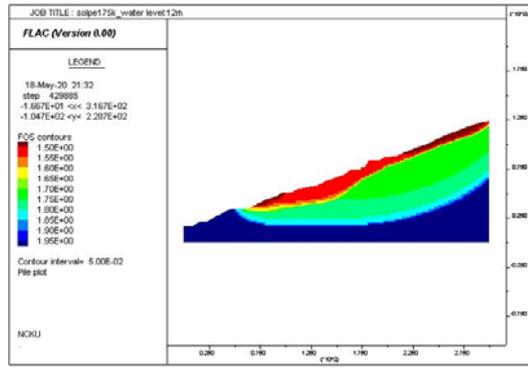
圖 6.25 市道 175 牆體與地錨配置圖 (青山工程 2019)

分析以地下水位與地錨極限強度為變數，為結合現地監測，水位選用上邊坡測 ID3 位置地下水位深度為代表，以地下水位深度 12m 與深度 2m 進行說明，分析結果如圖 6.26 所示，由上到下三組案例分別為：(1)僅有擋土牆；(2)擋土牆加入極限強度 10 噸地錨與排樁擋土系統；(3)擋土牆加入 50 噸極限強度地錨與排樁擋土系統。

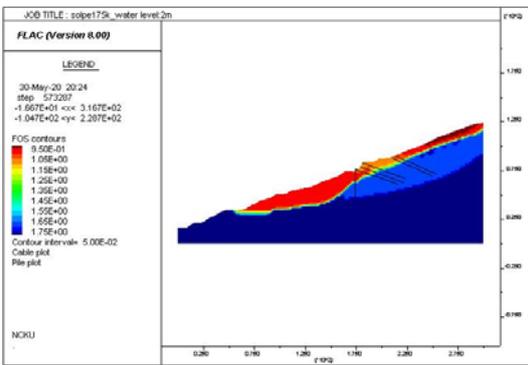
結果顯示，於地下水位較深時，僅有擋土牆的案例中安全係數最小部分為道路上邊坡區域，地下水位上升時則滑動區域改為整體滑動，且安全係數小於 1；於加入地錨與排樁案例中，無論是極限強度 50 噸或 10 噸地錨案例，在地下水位深度 12m 時擋土系統附近之穩定性皆有一定程度改善，當地下水位上升至 2m 時，極限強度 10 噸地錨與 50 噸地錨案例滑動面有所差異，強度 50 噸地錨擋土系統穩固了道路周圍，臨界滑動面為下邊坡，但強度 10 噸地錨之臨界滑動面有由下邊坡向上延伸趨勢。



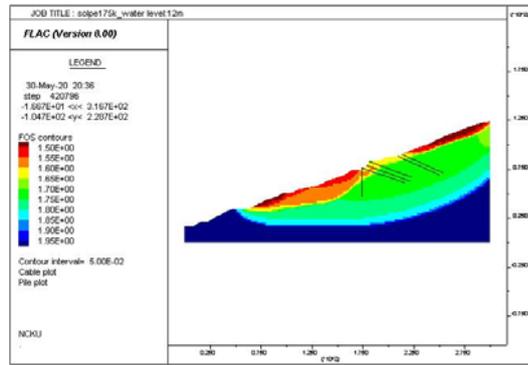
(a)擋土牆水深 2m



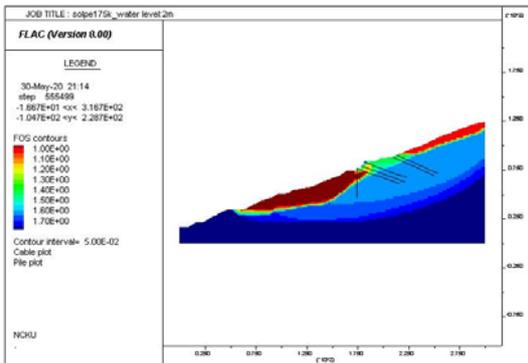
(b)擋土牆水深 12m



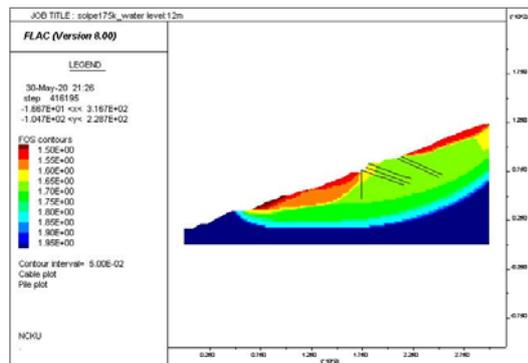
(c)擋土牆+10 噸地錨水深 2m



(d)擋土牆+10 噸地錨水深 12m



(e)擋土牆+50 噸地錨水深 2m



(f)擋土牆+50 噸地錨水深 12m

圖 6.26 市道 175 線總體滑動分析結果

### 6.3.2 南市道175線25k局部擋土系統地下水位穩定分析

局部擋土牆地下水位對穩定影響分析，模擬範圍為擋土系統周圍，為簡化分析，因崩積層與風化岩層力學參數相異不大，此處皆當作崩積層分析，結構物參數則與總體滑動分析相同，模型建立完成後如圖 6.27 所示。

分析中以地下水位為變數，並以 ID3 位置水位深度作為代表。分析結果整理如圖 6.28(a)所示，水位深度在 15m 時安全係數為 1.65，當地下水位深度上升至 2m，安全係數為 0.72，在此狀態已破壞；以剪應變等值線圖判斷臨界滑動面，結果顯示，該區域之滑動面皆為深層滑動。挑選地下水位 4m 情形進行地錨強度折減分析，結果如圖 6.28(b)所示，地錨強度對此案例影響相當敏感，當地錨極限強度降為 10 噸，其安全係數在 4m 水位深度下即小於 1.0。

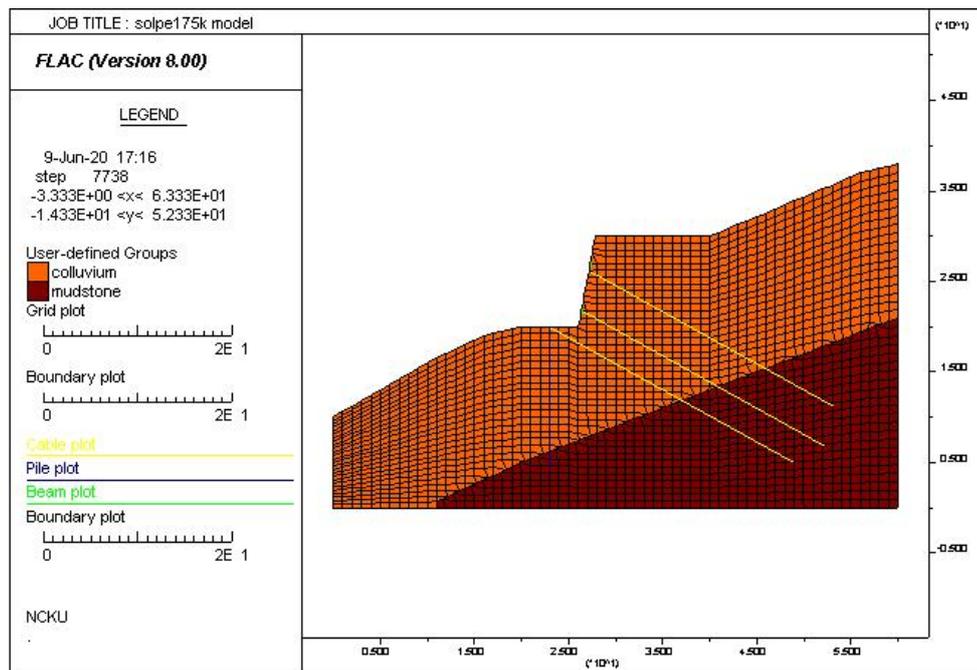
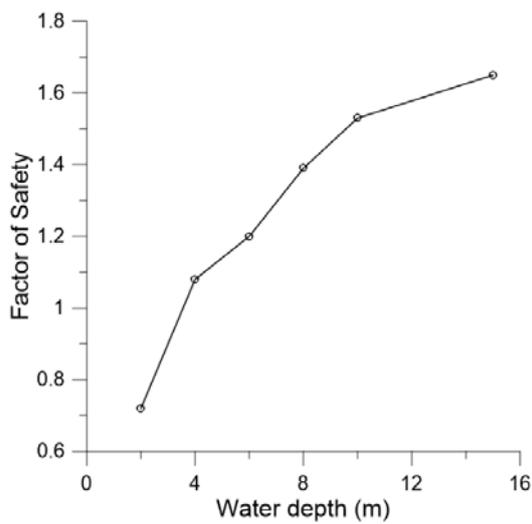
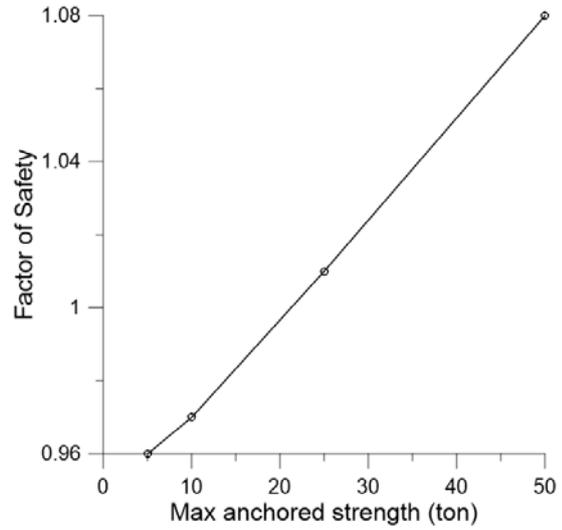


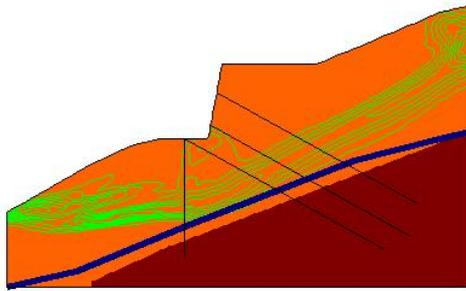
圖 6.27 市道 175 線局部擋土系統模擬模型



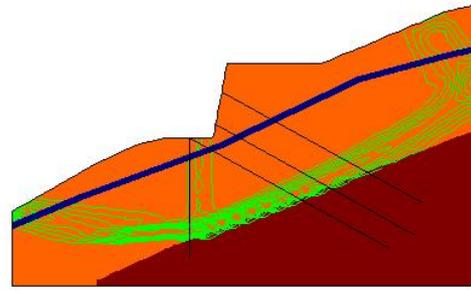
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 6.28 市道 175 線局部擋土牆系統地下水位分析結果 (a)地下水位與 FS (b)地錨強度折減與 FS (c)低水位滑動面圖 (d)高水位滑動面圖

以安全係數大於 1 之情形進行力學平衡，擋土牆與路面位移如圖 6.29(a)及(b)所示，牆體與路面皆為整體位移，在地下水位深度 6m 開始位移增加，至地下水位深度 4m 止，牆體位移量最大為 2 至 3cm，路面為 1cm 左右；計算牆頂傾角(圖 6.29(c))，當地下水位上升時傾斜方向為逆順時針，但由於破壞為整體滑動，傾角值並不大( $<0.08$  度)。

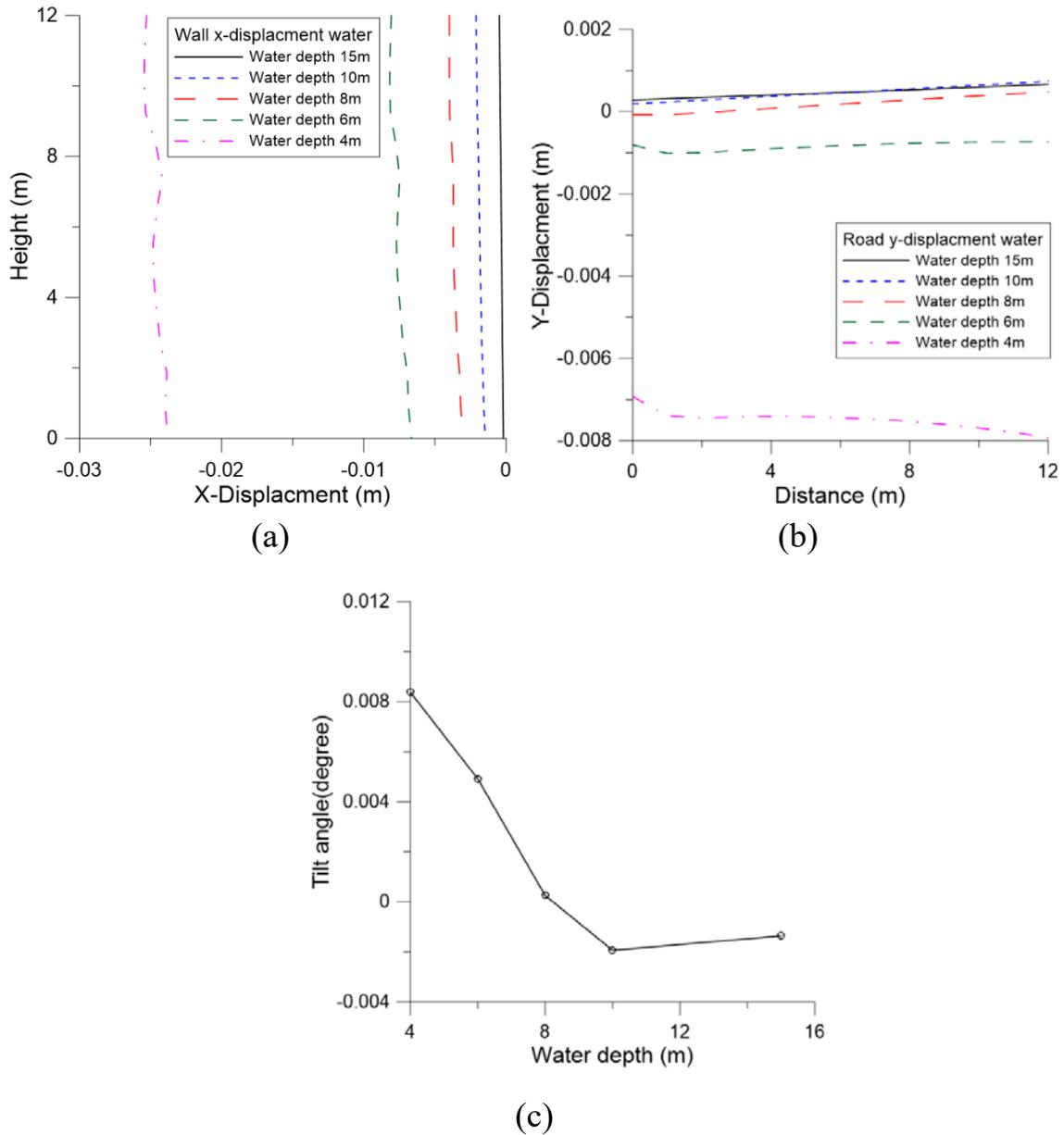


圖 6.29 南市道 175 線局部擋土系統地下水位分析-位移圖 (a)牆體位移 (b)路面沉陷 (c)牆頂傾角

牆體彎矩與地錨軸力變化如圖 6.30 所示，牆體彎矩於不同地下水位情形下幾乎沒有變化，與初始平衡狀態相同；地錨從上到下分別為 1 號至 3 號，結果顯示當地下水位上升至 8m，地錨所受軸力有劇烈增加趨勢，到地下水位 4m，所受軸力最大者達 21 噸；排樁彎矩變化顯示，當地下水位上升，排樁所受彎矩增加，最大受力區域於地下水位低時為

崩積層與岩層交界處，水位上升時，最大受力區域向上移動至崩積層中間。

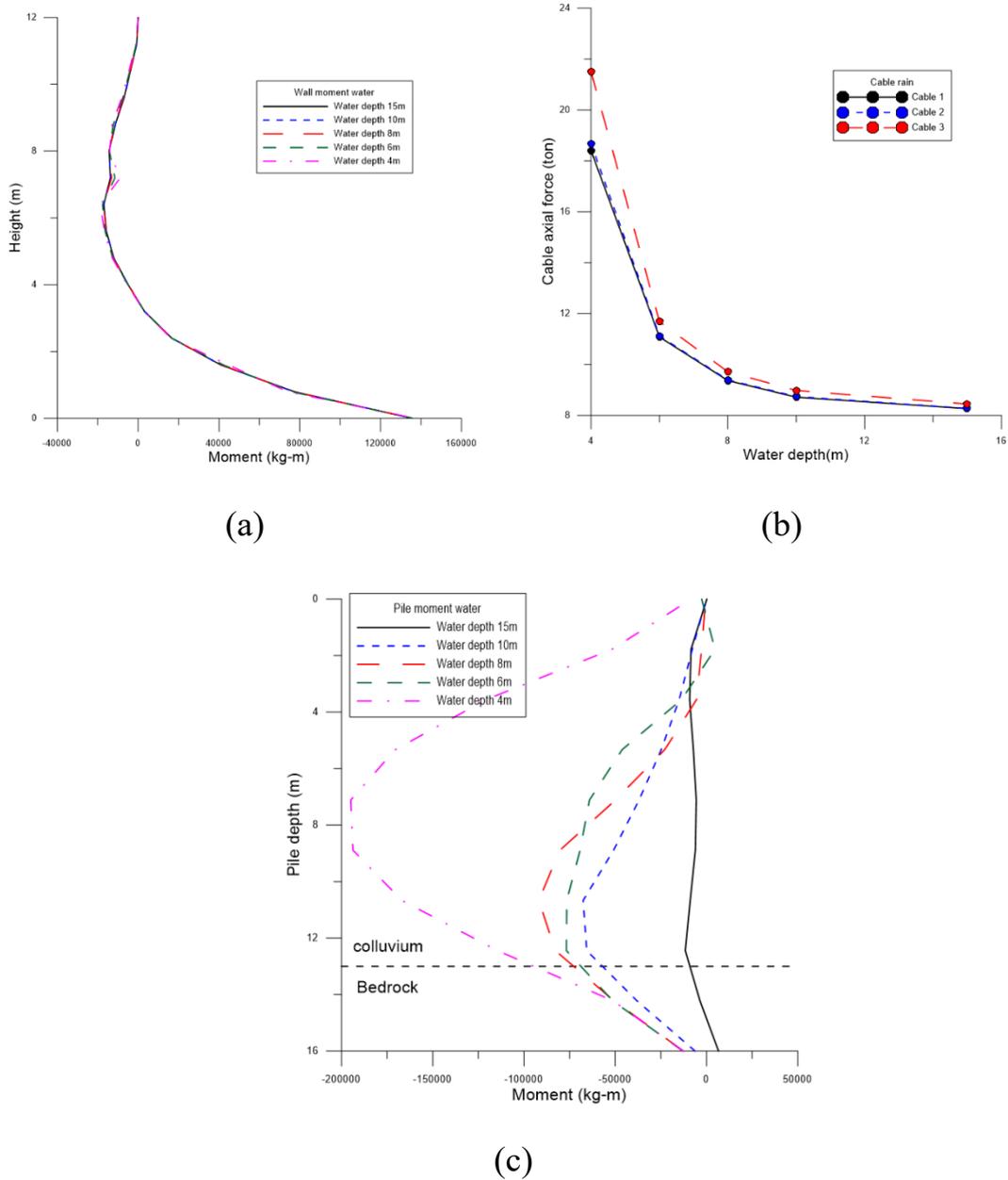


圖 6.30 市道 175 線局部擋土系統地下水位分析-結構受力圖(a)牆體彎矩分布 (b)地錨軸力 (c)排樁彎矩分布

於安全係數小於 1 之地下水位 2m 情形，處於力學無法平衡狀態，模型網格持續變形，挑選不同時階的網格可評估模型逐步破壞的過程，如圖 6.31 所示，從網格位移情形判斷，擋土牆系統破壞為整體平行滑

動；路面沉陷則由擋土牆側向外緣漸增，最終位移圖為圖 6.32，此滑動機制應為邊坡之整體滑動導致。

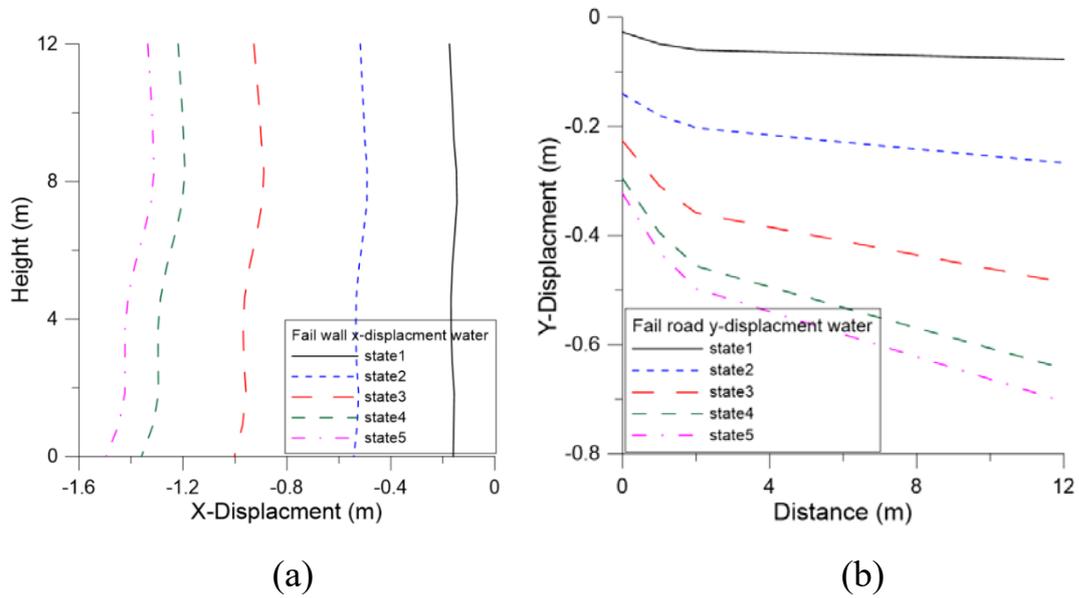


圖 6.31 市道 175 線局部擋土系統地下水位分析-逐步破壞圖(a)牆體位移(b)路面沉陷

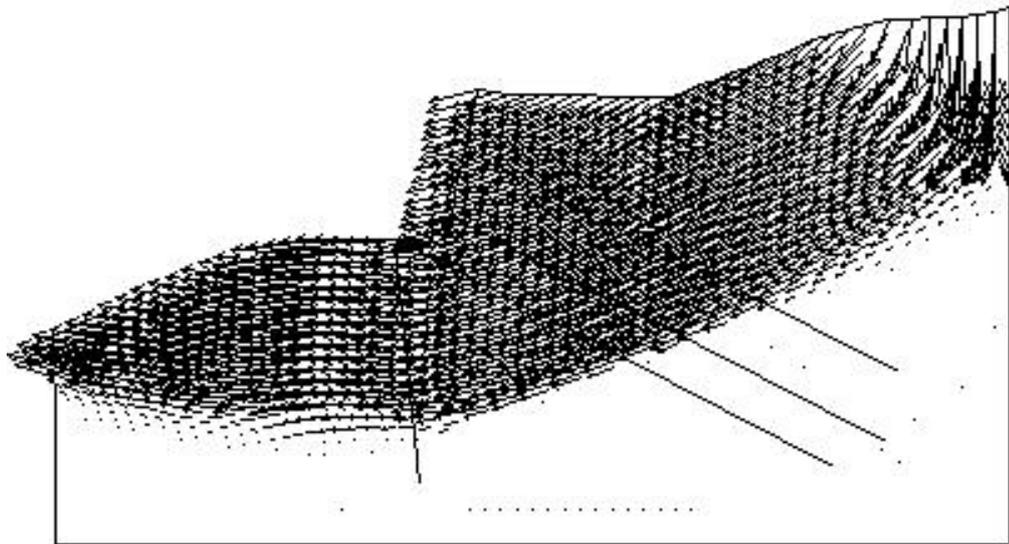


圖 6.32 市道 175 線局部擋土系統地下水位引致破壞位移圖

### 6.3.3 南市道175線25k局部擋土系統降雨入滲穩定分析

局部擋土牆降雨入滲分析模型網格、力學參數、結構物參數與地下水位分析相同；水文參數由於本場址監測儀器架設至今，尚未經過雨季，因此無可用以率定之資料，此處使用前述場址一之水文參數進行模擬，由於此二場址相距不遠，應有一定參考價值。選用之崩積層飽和滲透係數輸入值為 $3 \times 10^{-9}$  (m/s)。

本分析以降雨時間為變數，分析結果整理如圖 6.33(a)所示，在降雨入滲持續 72 小時，安全係數為 1.32，代表降雨入滲對整體邊坡與擋土牆系統危害程度不高，觀察不同降雨延時之臨界滑動面(圖 6.33(b))，當降雨延時達 6 小時開始，臨界滑動面產生於下邊坡表層。

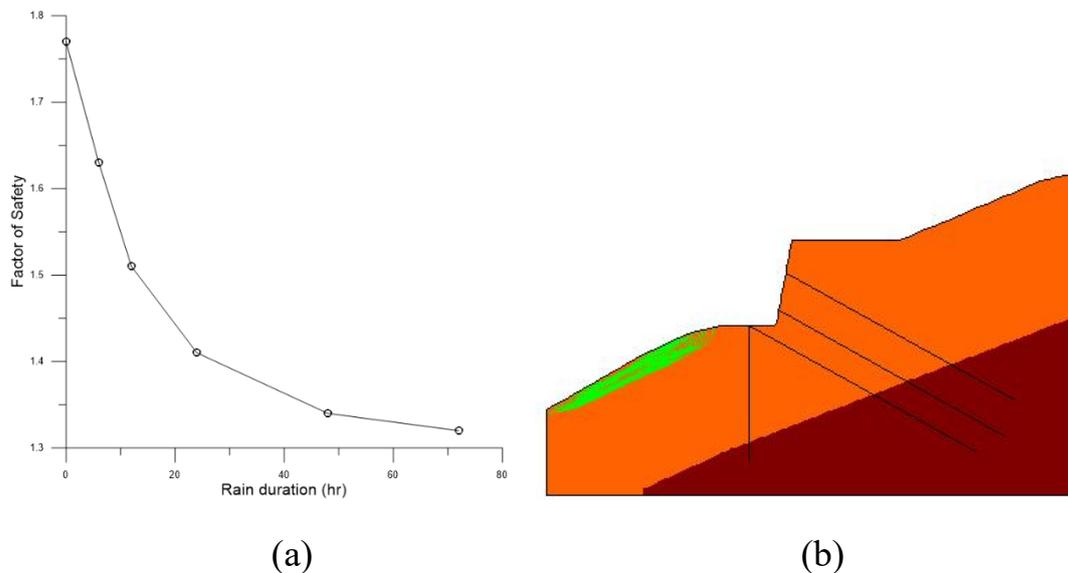


圖 6.33 市道 175 線局部擋土牆系統降雨入滲分析結果(a)安全係數(b)滑動面

擋土牆與路面位移如圖 6.34(a)及(b)所示，當降雨入滲持續，擋土牆頂部有向外位移趨勢，最大值到達 6cm；路面沉陷位置為離擋土牆 2m 區域；計算牆頂傾斜角(圖 6.34(c))，結果顯示，隨降雨入滲時間增加，牆頂傾斜為逆時針，且有降雨延時增加傾向，當延時達 72 小時，

傾斜角為 0.8 度，雖有相當位移，此時安全係數依然大於 1.0，路面沉陷小於 1cm，應不會對用路人有太大危害。

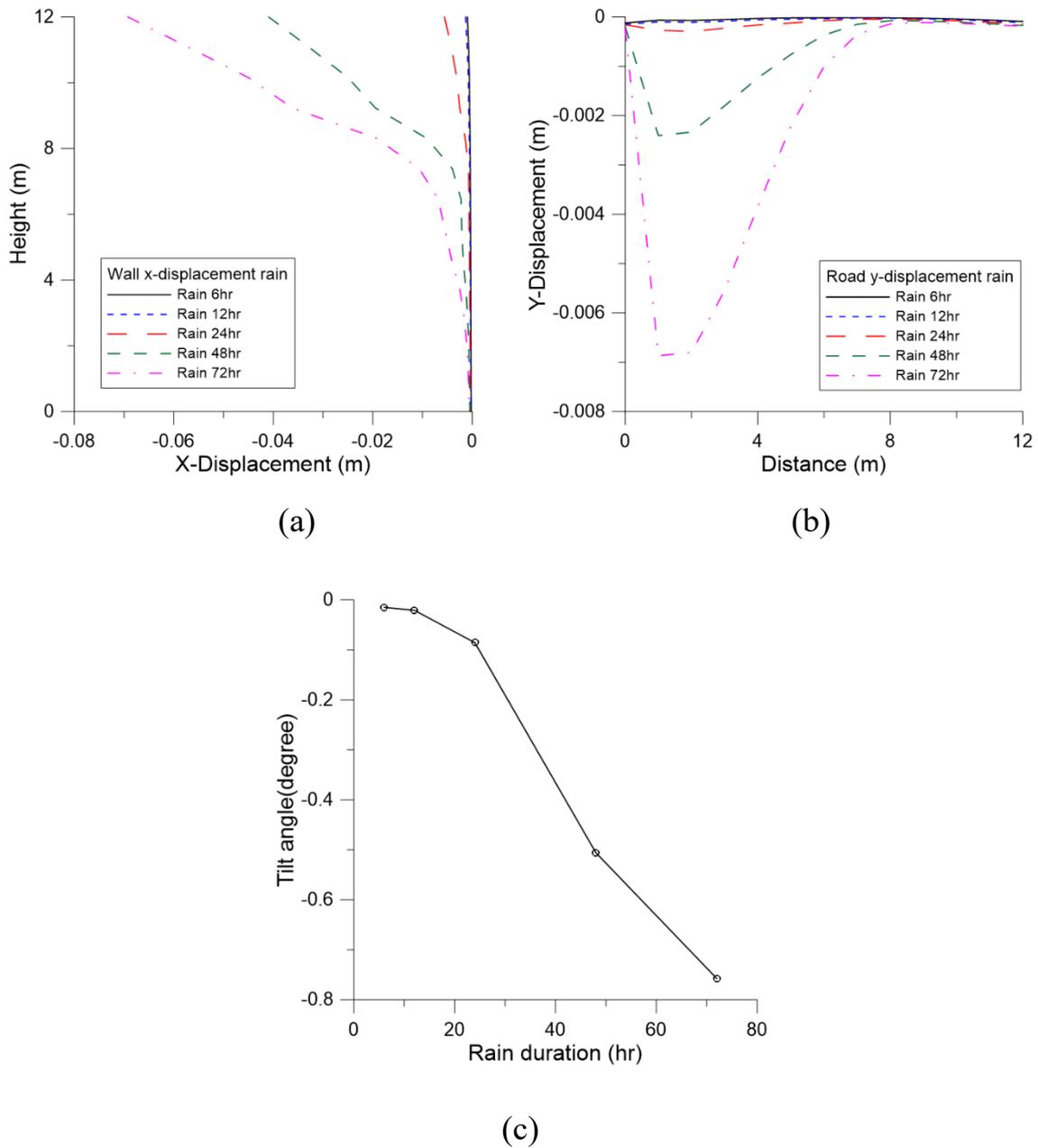
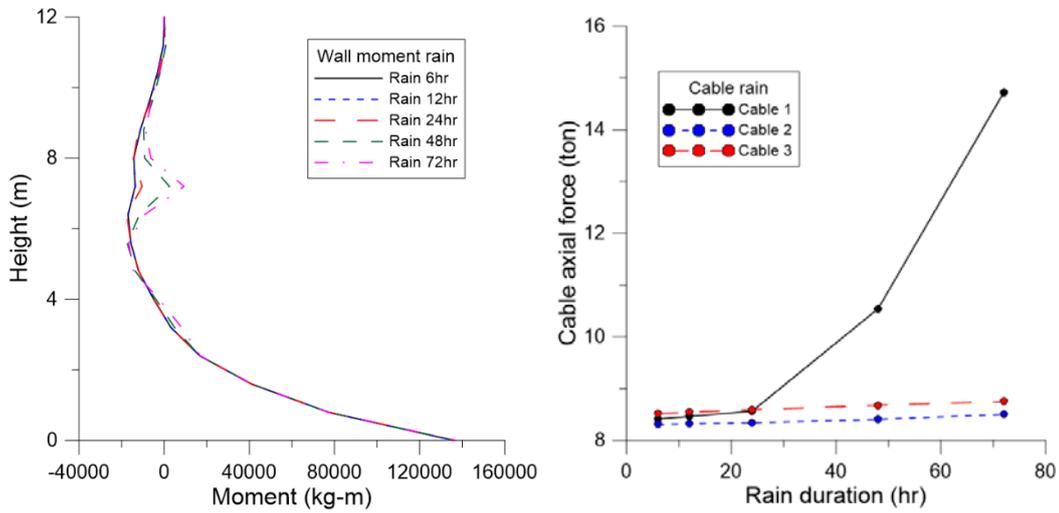


圖 6.34 市道 175 線局部擋土牆系統降雨入滲分析-位移圖 (a)牆體位移 (b)路面沉陷 (c)牆頂傾角

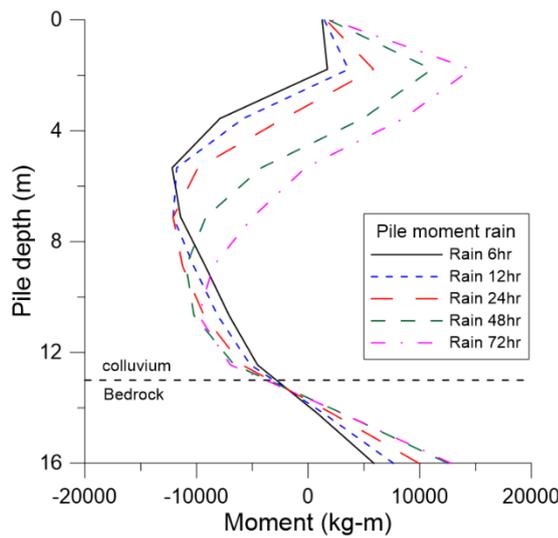
牆體彎矩與地錨軸力變化如圖 6.35(a)及(b)所示，牆體彎矩在不同降雨入滲延時情況下，離牆頂處 4m 區域有些許變化，但對整體彎矩分佈影響不大，整體而言與初始平衡狀態一致；地錨從上到下分別為 1 號

至 3 號，結果顯示隨降雨延時增加，地錨所受軸力逐漸增加，且在於 48 小時後，1 號地錨急遽上升，最大值達 14 噸；排樁彎矩變化如圖 6.35(c)所示，在降雨入滲情況，地表下 2m 處受力逐漸增加，深度 6m 處受力減少，但最大受力值無明顯增加。



(a)

(b)



(c)

圖 6.35 南市道 175 線局部擋土系統降雨入滲分析-結構受力圖 (a)牆體彎矩分布 (b)地錨軸力 (c)排樁彎矩分布

以降雨入滲 72 小時案例進行地錨強度折減分析，結果如圖 6.36 所示，當地錨極限強度折減至 10 噸時安全係數即小於 1.0，地錨極限強度對此狀態有相當敏感性，此時滑動面從下邊坡表層改為擋土牆背之局部滑動，以位移場(圖 6.37)觀察，推估破壞處於 1 號地錨以上區域。

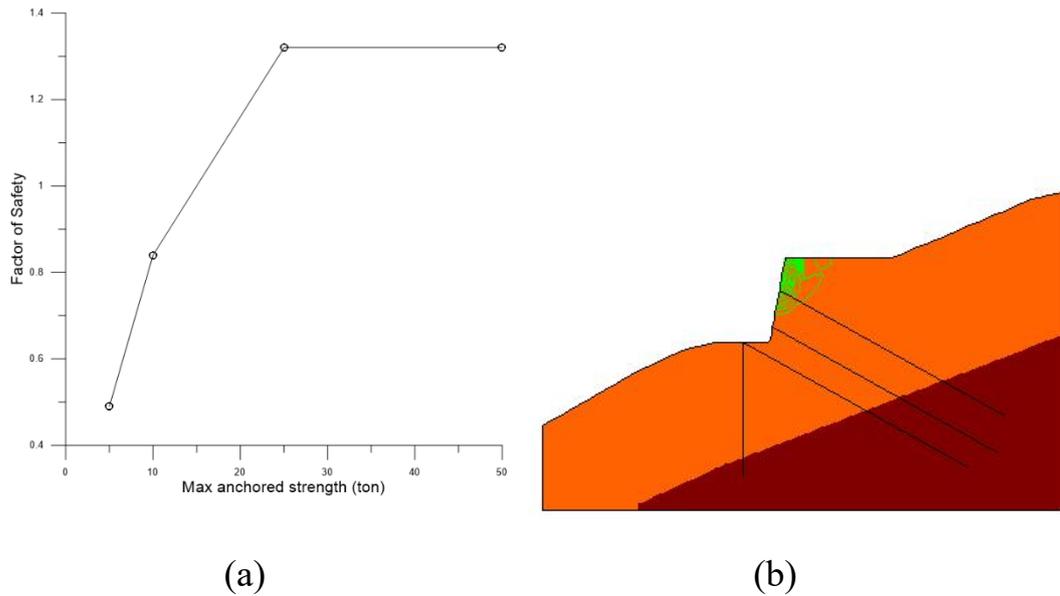


圖 6.36 市道 175 線降雨入滲地錨強度折減分析結果(a)安全係數(b)滑動面

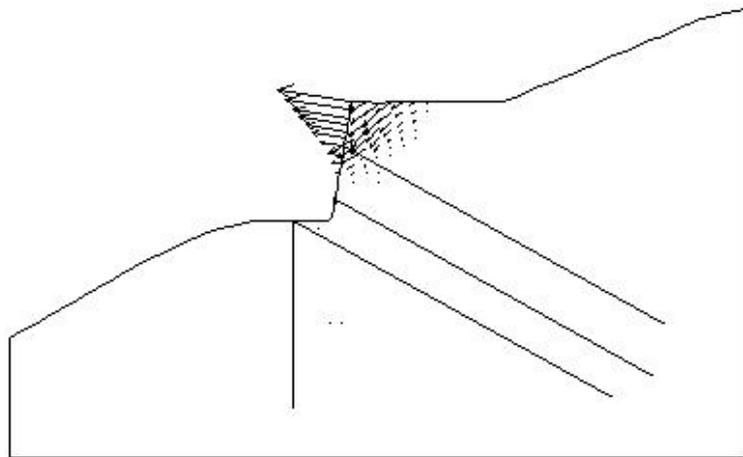


圖 6.37 市道 175 線降雨入滲地錨強度折減破壞位移圖

於降雨入滲 72 小時、地錨極限強度 10 噸以下狀態安全係數小於 1.0，處於力學無法平衡狀態，模型網格持續變形，挑選並記錄不同階段的網格可評估模型逐步破壞的過程，如圖 6.38 所示，從網格位移情形判斷，擋土牆系統上部逐漸變形且位移速度逐漸增加；路面沉陷則集中在擋土牆側六 6m 內區域，此破壞機制應為降雨入滲且地錨強度不足導致擋土牆牆體結構破壞。

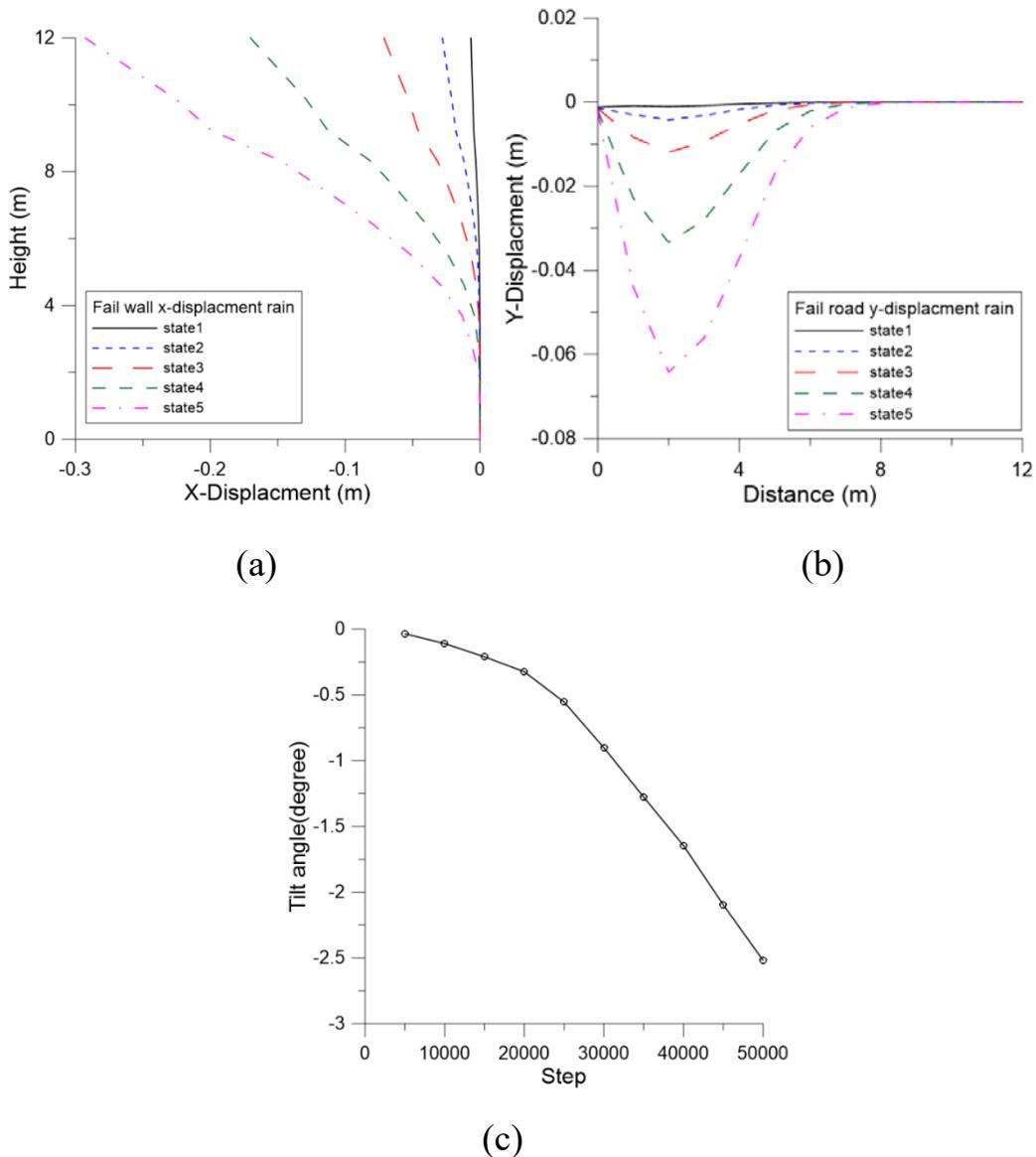


圖 6.38 南市道 175 線局部擋土系統降雨入滲分析(地錨極限強度 10 噸)-逐步破壞圖 (a)牆體位移 (b)路面沉陷 (c)牆頂傾角

### 6.3.4 南市道175線25k場址警戒值訂定

以台 20 線 52k+150 場址相同之門檻值定義，以局部擋土牆地下水位分析中安全係數 1.1 狀態之地下水位作為預警值，安全係數 1.0 狀態之地下水位作為警戒值，擋土牆傾角為行動值。南市道 175 場址之局部擋土牆地下水位分析中，在地錨強度沒有折減情形下，安全係數 1.1 情形為地下水位深度 4.3m，安全係數 1.0 則為水位深度 3.5m，故地下水位預警值為 4.3m、警戒值為 3.5m。

由於分析中安全係數大於 1.0 狀態之擋土牆位移極小，導致牆頂傾角無法作為預警、警戒值使用，因此以安全係數小於 1.0 狀態逐步破壞分析之牆頂傾角漸變值訂定牆頂傾角行動值，以當地下水位到達警戒值時再以牆頂傾角行動值輔助判斷擋土牆狀態。本場址之牆頂傾角行動值以局部擋土牆降雨入滲分析之地錨強度 10 噸狀態作為訂定標準，如圖 6.37(c)所示，可發現擋土牆傾角變化可發為兩階段，當牆頂傾角達到 0.5 度開始，傾角增加變快，擋土邊坡恐達破壞之臨界點，因此以傾角 0.5 度作為本場址牆頂傾角行動值，如表 6-7 南市道 175 線場址警戒值整理。

表 6-7 南市道 175 線場址警戒值整理

預警值	警戒值	行動值
地下水位深度 4.3 米	地下水位深度 3.5 米	牆頂傾角 0.5 度

### 6.3.5 南市道175線數值分析成果比較

為提高分析結果之可信度與確認結果之正確性，以下針對(1)數值分析之臨界滑動面與現場監測之可能滑動區域、(2)本研究訂定之場址警戒指標與前人訂定之場址警戒指標進行比較。

### (1)場址滑動面

數值模擬之總體滑動分析結果，南市道 175 線場址的臨界滑動面為上部邊坡與下部邊坡崩積層與岩層交界兩滑動塊體；於局部擋土系統分析中控制破壞之地下水位分析裡，低水位與高水位情形之滑動方式皆為崩積層整體平行滑動。

根據青山工程對南市道 175 線場址之鑽探報告與土層傾斜管量測(圖 6.39)，道路下邊坡側傾斜管位移量明顯較大，17-4 孔之滑動深度約為 20.5m，17-5 孔之滑動深度約為 15m，而 17-6 孔滑動深度約為 9.5m。由上述結果，可將場址可能滑動塊體分為 N1、N1-1、N2 三種滑動塊體，其中滑動塊體 N1 為傾斜管位移最顯著區塊，此滑動區域為道路上邊坡區域延伸至下邊坡之崩積層整體。

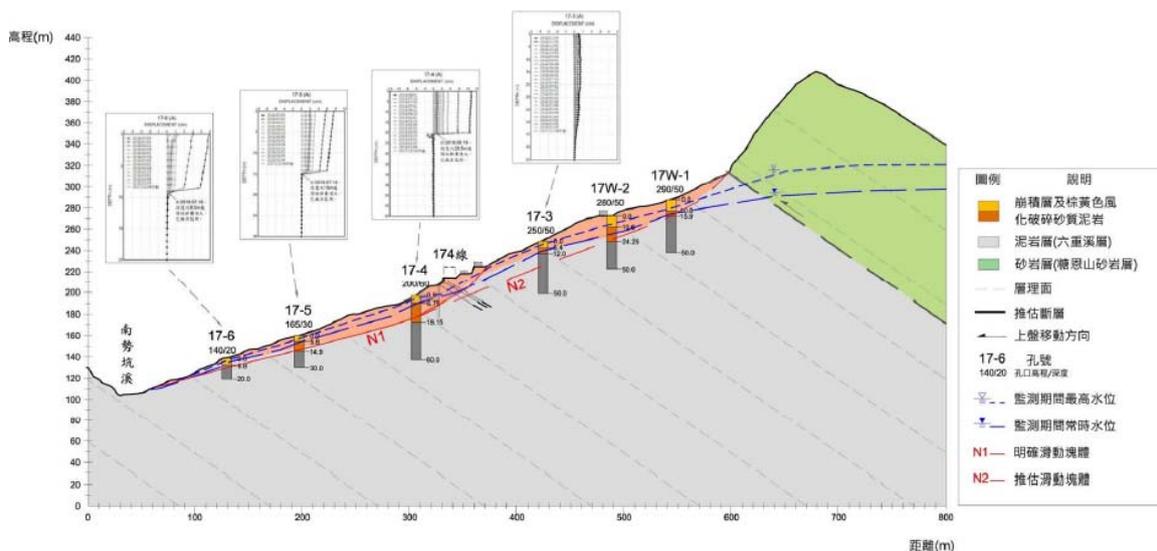


圖 6.39 南市道 175 線場址地質剖面與傾斜管量測資料(青山工程，2019)

比較數值分析結果與現場傾斜管監測判斷之滑動面，數值分析與監測結果一致，皆為整體崩積層滑動，另外，由監測數據可發現下邊坡擋土排樁區域有持續滑動、沉陷之現象，數值分析之總體滑動分析結果(圖 6.26)，當穩固道路區域，下部邊坡依然為一可能滑動塊體，此可能為現地下邊坡區域持續沉陷的原因。

## (2) 警戒指標

本計畫訂定之警戒指標結果建議預警值為地下水位深度 4.3m、建議警戒值 3.5m、建議行動值為牆頂傾角 0.5 度。參考青山工程對此場址監測之預警指標，地下水位注意值：較常時水位上升 2m、警戒值較常時水位上升 5m；結構物傾度因無監測而沒警戒指標故此處不進行比較。

本計畫對於地下水位訂定之預警指標為固定值，而青山工程使用之警戒指標為水位變化量，若將兩者進行比較須知常時地下水位深度。本研究對此場址監測結果，ID3 位置地下水位深度常時水位約為 12m，以此為基礎進行比較，青山工程之地下水位預警指標經換算後，注意值地下水位深度 10m、警戒值 7m，與本研究訂定之預警值 4.3m、警戒值 3.5m 相比，目前管理單位使用之預警值因缺乏相關分析而較保守。

## 第七章 即時監測平台與自動預警通知系統

物聯網監測概念可分為感知層、網路層、應用層，即時雲端監測平台為網路層最終資料匯流處，監測平台可供使用者查看監測數據或進行後續分析應用，目前雲端平台有許多中型態可供選擇，如自設網路伺服器主機(web server)或純雲端平台(cloud platform)，其主要差別在於是否存在個人主機於研究者使用環境中。

目前市面上有許多網路伺服器服務平台，如 Google Cloud Platform、ThingSpeak 等網路平台，本研究除了使用 ThingSpeak 作為 TCP (Transmission Control Protocol)網路伺服器，另外撰寫一雲端顯示網頁架設置於中華電信 hicloud 虛擬主機中，目的為架設可自訂顯示介面之監測平台，且具有備份資料之功能，下列各小節中介紹 ThingSpeak 平台與自行撰寫之雲端顯示網頁中之各功能。

### 7.1 邊坡擋土即時監測平台

#### 7.1.1 ThingSpeak平台簡介

ThingSpeak 為 Matlab 公司旗下開發的一個開源物聯網應用程式平台，其免費提供雲端資料儲存及分析應用，透過他提供之 API 服務 (Application Programming Interface)，可以很容易將感測器收集的資料傳到雲端資料庫。

閘道器與 ThingSpeak 平台主要採用超文本傳輸協定(Hyper Text Transfer Protocol,HTTP)，由監測現場之閘道器發出請求(Request)給作為網路伺服器(Sercer)之雲端平台，伺服器會響應並建立連線通道，兩者以 TCP 連線，並於指定序列埠(port)進行資料傳輸。HTTP 通訊協定通常使用 GET 與 POST 進行連線請求，當使用 GET 進行連線時，會將表單資訊附加在網址(uniform resource locator,URL)後方，而以 POST 進行連線則會將表單內各欄位及其內容放置於 HTML HEADER 內一起傳

輸至 URL 地址，較為保密，ThingSpeak 可採用 GET 或 POST 進行資料傳輸。

上傳至 ThingSpeak 之數據會儲存於雲端資料庫中，並以圖示顯示於雲端網頁中(圖 7.1)，簡易之顯示介面可清楚展示各監測物理量變化趨勢，使用者可進入頻道進行資料上傳、下載等動作。

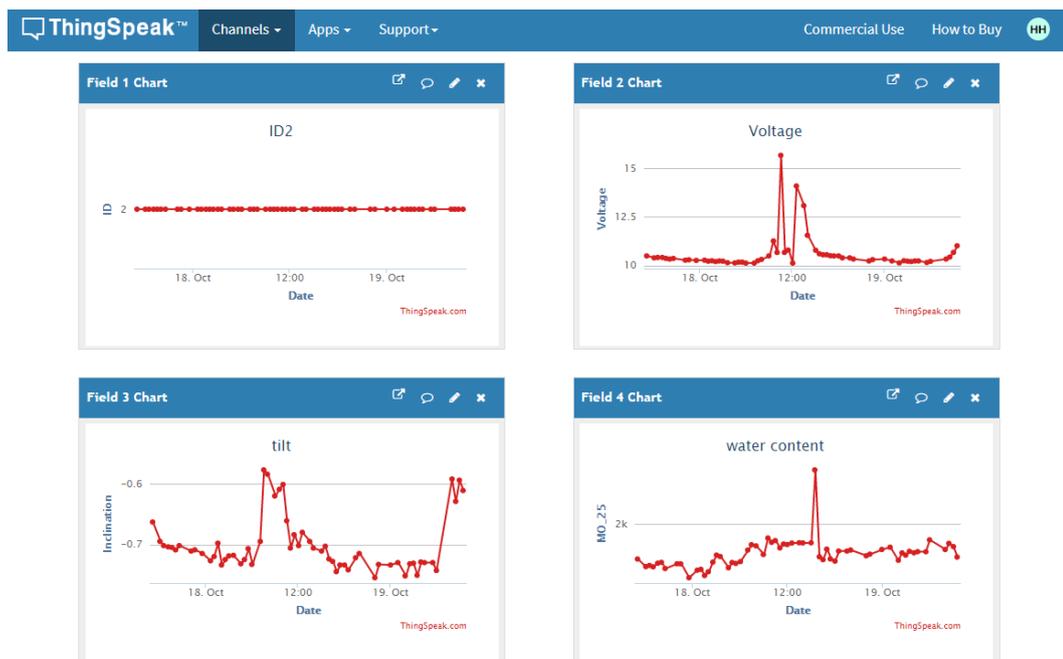


圖 7.1 ThingSpeak 雲端即時顯示平台

### 7.1.2 雲端顯示平台架構

即時監測平台為雲端伺服器平台的延伸運用，目的讓使用者可以在物聯網上更方便、快速了解監測場址的各項資訊，故而視覺化、直覺式的平台為本次設計初衷。本研究使用的是 Flask 網頁框架，Flask 是一種基於 Python 撰寫的輕量型網頁框架，其輕量型特性可以讓開發者專注在網站邏輯開發，此外，Flask 保留了擴增的彈性，可以加入表單、資料下載、身分驗證等各項功能，使網站設計得以完善。

平台架構示意圖如圖 7.2 所示，此平台整合了 IoT 資訊平台資訊、衛星影像、與該場址之預警值，提供使用者一個完整的現地監測與預警

值資訊，並將網站架設於個人伺服器中。具體執行步驟如下：

1. 設定場址之基本資訊：於個人伺服器中設定場址感測器編號、種類、讀取 API、經緯度、預警值等後續程式使用的基本參數。
2. 於個人伺服器中建立資料庫：在個人伺服器中建立一數據資料庫可以達到備份資料、快速提取數據的目的。本系統使用 Microsoft Access 為數據庫程式，Access 程式可以快速建立數據庫框架，並通過 ODBC(Open Database Connectivity)達到資料庫存取。
3. 即時更新伺服器資料庫：即時監測平台需即時更新資料庫數據。本研究使用 Python 撰寫一網路爬蟲，抓取 IoT 平台監測數據，即時同步個人伺服器資料庫。
4. 提取資料庫數據，展示於監測平台：利用數據庫的監測數據、與場址之預警值進行分析，並將分析結果視覺化、表格化展示於監測平台。進入監測平台首頁為身分驗證系統，如圖 7.2 所示，使用者欲使用此平台必須先註冊帳戶，並待管理者開通後即可使用，系統管理者可依需求定義帳戶為訪客、計畫成員、系統管理者三種權限，使用不同權限帳戶登入監測平台，可使用功能有依權限而有所不同。

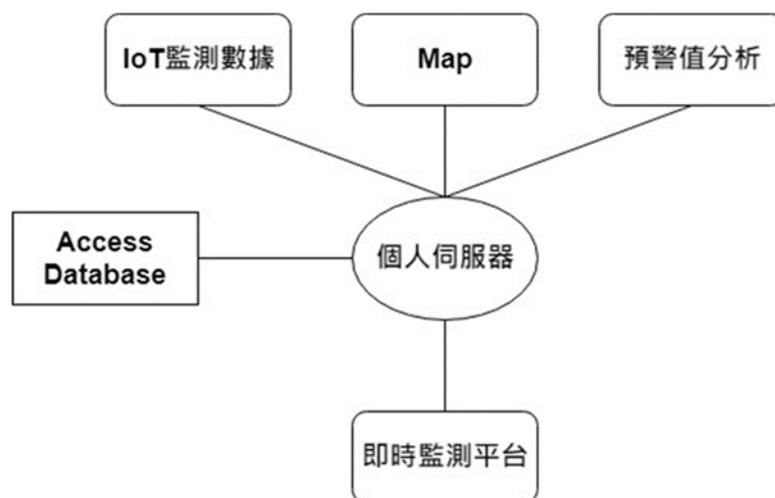


圖 7.2 即時監測平台架構圖

### 7.1.3 平台功能簡介

#### 1. 身分驗證系統

進入監測平台首頁為身分驗證系統，如圖 7.3 所示，使用者欲使用此平台必須先註冊帳戶，並待管理者開通後即可使用，系統管理者可依需求定義帳戶為訪客、計畫成員、系統管理者三種權限，使用不同權限帳戶登入監測平台，可使用功能有依權限而有所不同。

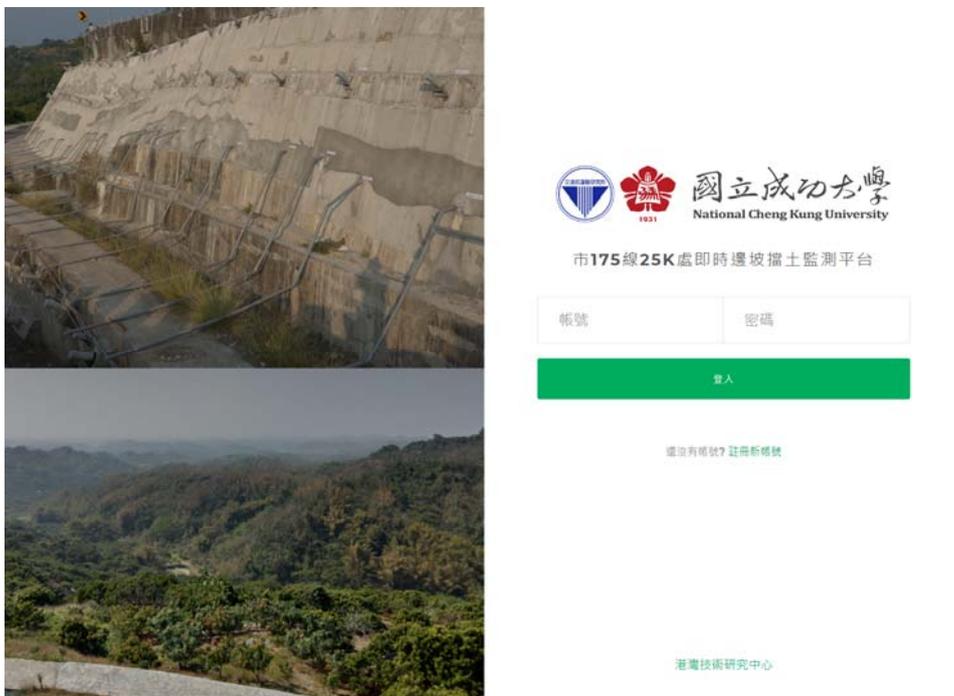


圖 7.3 身分驗證系統

#### 2. 即時監測平台頁面

完成身分驗證功能後，將進入即時監測平台頁面，如圖 7.4 所示，依不同權限帳戶登入可使用功能有些許不同。訪客權限僅可使用「即時資訊」欄位功能，計畫成員可額外使用「資料下載」欄位功能，系統管理者權限則可使用包含「使用者權限」欄位等全部功能，以下將一一介紹各欄位功能。

「即時資訊」頁面由上至下，包含：

- (1) 監測儀器分部：左側欄為場址衛星影像圖，監測儀器分佈、配置、編號標註其上。右側欄為外掛 Mapbox 可縮放式地圖，縮小後可了解場址地理位置。
- (2) 監測儀器狀態：如圖 7.5 所示，此表格顯示各模組狀態，顯示資訊有：編號、最後上傳時間、電池狀態、運轉狀態、感測器配置、與管理值判定。
- (3) 雨量資訊：如圖 7.6 所示，左側欄為場址監測雨量圖，最多可顯示過去 72 小時資訊。右側欄為過去 24 小時雨量資訊的詳細資料，0-10 為該小時 0 分至 10 分雨量，10-20 為該小時 10 分至 20 分雨量，以此類推。
- (4) 地下水位資訊：如圖 7.7 所示，左側圖表顯示場址量測點之地下水位變化，最多可顯示 100 筆資訊。右側表格提供監測點之水位高程、深度與警戒值資訊。
- (5) 傾角資訊：如圖 7.8 所示，上方表格顯示所有監測傾角資訊，包含量測值、累積角變量、與警戒值資訊。下方兩欄位分別為：邊坡監測傾角變化圖與擋土牆監測傾角變化圖，選擇欲顯示儀器編號後將顯示傾角隨時間變化圖，最多可顯示 1000 筆資訊。

「資料下載」頁面可下載監測之原始資料，如圖 7.9 所示，選擇欲下載之日期區間與 Channel ID 後，點選下載，原始檔案將以.csv 格式儲存於個人電腦。

「使用者管理」頁面可管理監測平台使用者之權限，使用方法如圖 7.10 所示，選擇欲改變權限之帳戶、更改後權限、開通狀態、是否通知，確定後使用者權限即更改。



圖 7.4 即時監測平台主頁面

監測儀器狀態

儀器編號	時間	運作狀態	註解	水位管理值判定	傾角1管理值判定	傾角2管理值判定
ID0	2020-10-19 10:27:52	正常	雨量計	-	-	-
ID2	2020-10-19 10:29:48	正常	地下水水位	正常	正常	-
ID3	2020-10-19 10:30:41	正常	地下水水位	正常	正常	-
ID4	2020-10-19 10:31:35	正常	地下水水位	正常	正常	-
ID5	2020-10-19 10:32:28	正常	傾斜儀	-	正常	正常
ID6	2020-10-19 10:33:22	正常	傾斜儀	-	正常	正常
ID7	2020-10-19 10:34:15	正常	傾斜儀	-	正常	正常
ID8	2020-10-19 10:35:11	正常	分層含水量	-	-	-
ID9	2020-10-19 10:36:05	正常	分層含水量	-	-	-

圖 7.5 即時資訊-監測儀器狀態

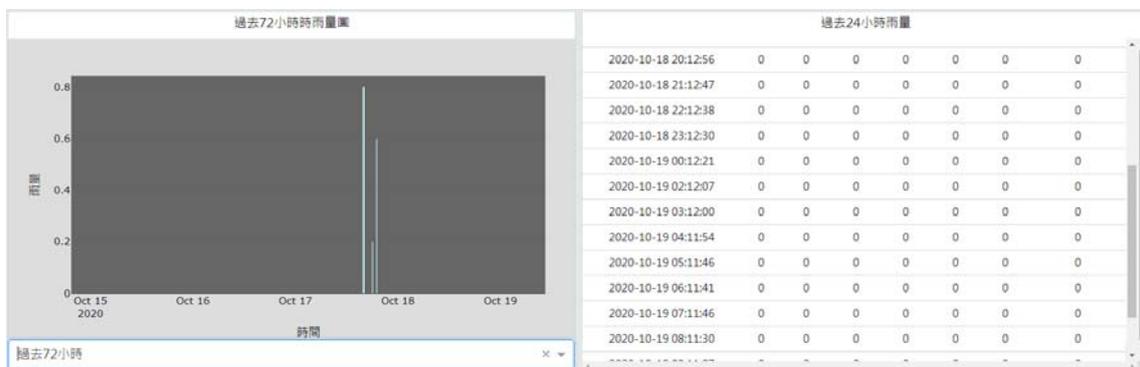


圖 7.6 即時資訊-雨量

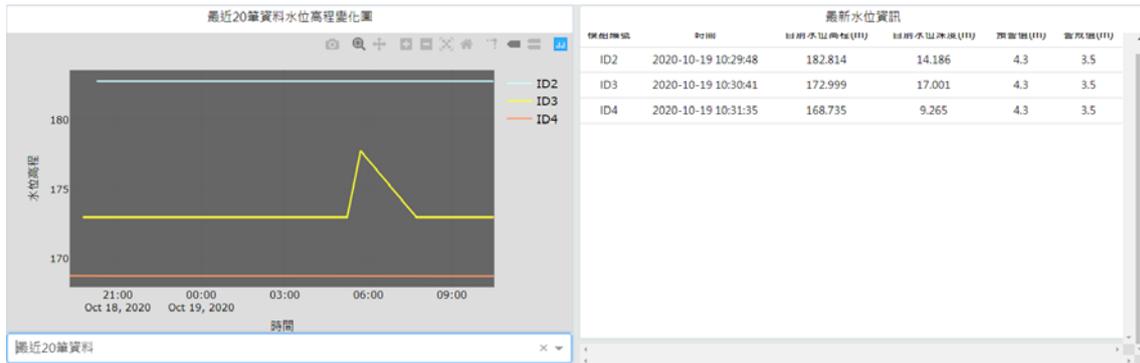


圖 7.7 即時資訊-地下水位

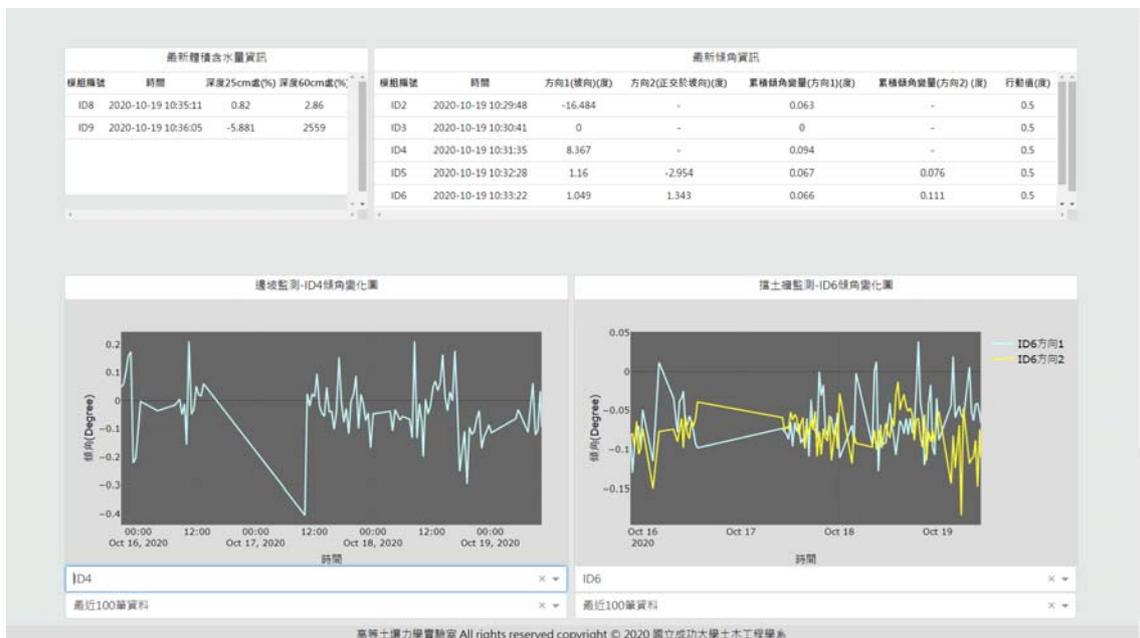


圖 7.8 即時資訊-傾角變化



圖 7.9 即時資訊-傾角變化資料下載頁面



圖 7.10 使用者管理頁面

### 3. 監測平台警戒值管理

因應不同場址、不同理論，將分析出不同的警戒值。本平台警戒值設定如圖 7.11 所示，於資料夾中 Channel\_list 檔案更改初始值、警戒值後儲存即可更改警戒值設定。

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	欄組	Channel ID	Read API Keys	資料點數	Channel Name	預警值(傾角)	行動值(傾角)	預警值(水位)	警戒值(水位)	N座標	E座標	電池電壓(最大)	電池電壓(最小)	速率	傾角1初始值	傾角2初始值
1	雨量計	947770	RW7X8WQV7/EASYOR	100	ID947770	-	0.5	4.3	3.5	23.205422	120.461235	12.6	9.6	300	0	0
2	地下水位	947777	CZPC55P1CL1THIO	100	ID947777	-	0.5	4.3	3.5	23.20523	120.46224	16	9.6	197	-16.421	0
3	地下水位	947779	WUQYMN2Q7NWL3FBP	100	ID947779	-	0.5	4.3	3.5	23.20578	120.46155	12.6	9.6	190	0	0
4	地下水位	947780	QOH5R2WLIULM9GHU	100	ID947780	-	0.5	4.3	3.5	23.20595	120.46142	12.6	9.6	178	8.461	0
5	傾斜儀	947783	8U3N6N4BQ5RQDNK	100	ID947783	-	0.5	4.3	3.5	23.20592	120.46143	12.6	9.6	292	1.227	-3.03
6	傾斜儀	947786	YC6F1356CIUBNOQN	100	ID947786	-	0.5	4.3	3.5	23.20594	120.46139	12.6	9.6	292	1.115	1.454
7	傾斜儀	947797	FEMA2DQPH7AK0VZQ	100	ID947797	-	0.5	4.3	3.5	23.20551	120.46128	12.6	9.6	292	6.05	-3.055
8	分層食水量	947798	UEJAZ55FCAZ1S94	100	ID947798	-	0.5	4.3	3.5	23.206104	120.461088	12.6	9.6	292	0.01	0
9	分層食水量	947799	P2M0VFEM6QQ68ND4	100	ID947799	-	0.5	4.3	3.5	23.20599	120.460874	12.6	9.6	292	0.01	0

圖 7.11 即時監測平台警戒值管理

## 7.2 自動預警通知系統

自動預警通知平台引用 Python 內自帶之 email 和 smtplib 模組撰寫。其中 email 模組使用其包含之 Multipurpose Internet Mail Extensions 子套件，用來定義傳送之電子郵件格式標準，使其符合網路上傳輸之格式。而 smtplib 模組主要用來設定 Gmail 之 SMTP 伺服器，藉此將郵件發送給資料通知為開啟狀態之監測平台使用者。

### 7.2.1 自動預警通知觸發

當地下水管理值達到預警值、警戒值，或傾角管理值達到行動值時，即時監測平台上之管理值判定將會顯示並且變色，如圖 7.12。同時觸發自動預警通知，並且發送信件至資料通知狀態為開啟之監測平台使用者註冊信箱，如圖 7.13。

監測儀器狀態						
模組編號	時間	儀器狀態	註解	水位管理值判定	傾角1管理值判定	傾角2管理值判定
ID0	2020-10-15 17:26:42	正常	雨量計	-	-	-
ID2	2020-10-15 17:57:05	正常	地下水位	正常	已達行動值	-
ID3	2020-10-15 17:57:59	正常	地下水位	正常	已達行動值	-
ID4	2020-10-15 17:58:52	正常	地下水位	正常	正常	-
ID5	2020-10-15 17:59:46	正常	傾斜儀	-	正常	正常
ID6	2020-10-15 18:00:39	正常	傾斜儀	-	正常	正常
ID7	2020-10-15 18:01:33	正常	傾斜儀	-	正常	正常
ID8	2020-10-15 18:02:28	正常	分層含水量	-	-	-
ID9	2020-10-15 18:03:22	正常	分層含水量	-	-	-

圖 7.12 傾角管理值達到警戒值

市道175即時邊坡擋土監測平台預警通知 收件匣 x



**ihmtmonitor@gmail.com**

寄給 n66081202、我

Channel ID 模組 傾角1管理值判定

2 ID3 地下水位 已達行動值

3 ID4 地下水位 已達行動值

回覆
回覆所有人
轉寄

圖 7.13 自動預警通知郵件

### 7.2.2 使用者之資料通知設定

由「使用者管理」頁面中之資料通知設定可設定使用者之資料通知功能為開啟或關閉，方法如圖 7.14 所示，設定完畢按確定後即可更改，且可由資料通知狀態列得知各個使用者資料通知為開啟或關閉。



圖 7.14 資料通知設定

## 第八章 結論與建議

本年度計畫著眼於落實應用解析法邊坡與支撐系統結構體反應分析及對應之分佈式監測技術之研發，以提供降雨地層入滲及滲流量對實際土中水壓與支撐結構反應，做為邊坡穩定與擋土支撐系統分析即時更新參數，達到分析標準化、場址預警客製化之現地依時預警功能。工作項目包括：淺層滑動耦合分析預警系統更新、現有淺層滑動監測場址維護與模組精進、水位變化與降雨特徵關聯分析、深層滑動場址極限平衡分析反算與驗證、擋土系統水力力學耦合分析驗證、精進雲端依時預警系統架構，並新增設南市道 175 線監測場址。

本研究分析的各邊坡場址建議預警值、警戒值及行動值，目前僅止於理論分析的結果，後續還需要降雨事件來驗證相關數值的可靠度，且相關數值之訂定應由權管單位去核定。

### 8.1 結論

本年度計畫執行結論摘要如下：

1. 淺層滑動耦合分析預警系統更新：因本年度無顯著降雨事件，且無滑動發生，相關建議預警值暫不更新。
2. 現有淺層滑動監測場址維護與模組精進：針對現有兩處淺層滑動監測場址，完成相關量測電子元件檢測與修復，並持續進行監測與資料彙整。
3. 水位變化與降雨特徵關聯分析：本年度已將新增降雨事件加入分析，據以更新資料並同時進行驗證。另外嘗試發展一維 FDM 入滲數值模型可用於推估時間域孔隙水壓變化，並以歷年雨量與水位監測數據進行模型率定，所得依時水壓變化結果有利於後續飽和土層滑動預警模式精進。

4. 深層滑動場址極限平衡分析反算與驗證： 本年已完成整治後深層滑動場址極限平衡分析，並以雨季資料進行反算與驗證。
5. 擋土系統水力力學耦合分析驗證： 本年度已完成台 20 線及南市道 175 線兩飽和土層滑動場址 FLAC 擋土系統耦合分析，並以雨季資料進行反算與驗證將，提出擋土牆體反應與地下水位為指標之建議預警值以供相關單位使用參考。
6. 精進雲端依時預警系統架構：本年度完成雲端系統預警通知功能，當監測指標如地下水位、傾角值觸發相關設定門檻時，將同步於監測平台顯示並寄發電子郵件至使用者註冊信箱。

## 8.2 建議

針對本計畫提出下列建議：

1. 由於場址選定不易，且須滿足研究之要求與其他單位之配合，台 20 線場址於本年度 3 月完成整治，後續已恢復相關監測，但場址處於穩定狀態，雖增設南市道 175 場址，但今年雨季降雨事件偏低，系統實際應用仍需更多案例進行測試。
2. 本年度增設南市道 175 場址，因降雨事件相對較少，雨量與水位監測資料有限，後續建議若有延續計畫，可延長監測期程，並更新此場址時間域水壓推估模式。
3. 本計畫後續建議以長期觀測之場址降雨特徵與滑動層水位統計或解析結果，取代現地地下水位觀測需求，以利於長期維護，利於養護單位推廣。
4. 本計畫研發目標為流程標準化場址預警客製化，後續建議分析可進一步簡化，現地觀測可進一步精簡，降低觀測點數量與傳輸需求。

### 8.3 預期效益與應用情形

1. 本計畫考慮崩積土層水力力學耦合解析法推論，加入邊坡土壤與支撐系統互制分析，並以現地即時監測物理量為指標，發展具依時特性之公路土壤邊坡降雨滑動監測及預警技術，輔助現有以經驗法為依據之預警模式準確度，以利災害管理。
2. 利用伴隨物聯網興起之電子系統整合優勢，發展現地無線土層與支撐系統監測模組，應用於降雨引致地質災害監測與預警。
3. 開發可快速佈設且具依時特性之公路土壤邊坡地表監測預警技術，研究成果提供交通部、公路總局、養護工程處及各工務段等單位，做為相關防災啟動之參考。

## 參考文獻

1. 廖瑞堂、徐振煌、陳昭維 (2008), 「自動化監測系統於山坡地防災之應用」, 土木水利, 第 35 卷, 第 2 期, 第 45-53 頁。
2. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙(2002), 先進邊坡監測系統之研發」, 中國土木水利學會會刊, 第二十九卷第二期, 第 65-78 頁。
3. 邱永芳、黃安斌、饒正、李瑞庭、陳志芳、何彥德(2011), 全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(4/4), 交通部運輸研究所。
4. 張達德、蔡育秀、李宏徹、楊凱鈞(2013), 「無線感測網路應用於邊坡穩定即時監測系統的研究」, 第十五屆大地工程學術研討會。
5. 謝明志、張道光、黃敏郎、曾志民(2013), 「山區道路易致災路段調查評估、風險分析及監測預警管制技術之研發(1/4)」, 交通部運輸研究所。
6. 謝明志、張道光、黃敏郎、曾志民(2014), 「山區道路易致災路段調查評估、風險分析及監測預警管制技術之研發(2/4)」, 交通部運輸研究所。
7. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯 (2017), 公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2), 交通部運輸研究所。
8. 謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、洪芯琦、邱心彥(2018), 公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發, 交通部運輸研究所。
9. 謝明志、曾文傑、張文忠、黃安斌、周仕勳、洪芯琦、邱心彥、吳博巧(2019), 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升, 交通部運輸研究所。

10. 青山工程(2019)，106 年度臺南市政府工務局第二工務大隊委託市道 174 線 50K+500 地滑調查及邊坡監測等評估服務工作成果報告，臺南市政府工務局。
11. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp. 544-552.
12. Cascini, L., Cuomo, S., Pastor M, and Giuseppe Sorbino, G. (2010). "Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp. 85-98.
13. Chou, S. H., Chang, W.J., Chen, J. F. (2017). Development of wireless monitoring modules for highway slope. 2nd JSCE-CICHE Joint Workshop, Tokyo. Japan.
14. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, pp. 362–372.
15. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), pp.313-321.
16. Freeze, R. A. and Banner, J. (1970). "The mechanism of natural groundwater recharge and discharge 2 – laboratory column experiments and field measurements." *Water Resources Research*, 6(1), 138-155.
17. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y., 2012, Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides Through Pore Pressure Profile Measurements, *Soils and Foundations*, Vol. 52, No.4, pp.737-747.
18. Kurahashi, T., Yajima, Y., & Sasaki, Y. (2008). "Landslide disasters and hazard maps along national highways in Japan. ", In: *The 2nd East Asia Landslides Symposium*, Seoul, Korea, May 22–23, 2008.
19. Uchimura T, Towhata I, Wang L, Seko I (2008) Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. In: *Proc. of the First World*

Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, pp 611–614

20. Varnes, D. J. (1978). “Slope movement types and processes.”, In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.,pp. 11-33.
21. van Genuchten M. (1980). “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” Journal of Soil Science Society of America, 44, pp. 892–898.

## 附錄一

### 審查意見處理情形表

**交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)  
期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試

合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<b>一、蘇苗彬 委員</b>		
1. 本案已延續數年，且納入了數學現地監測的評估，有相當的成果，對將來之推廣很有助益。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理。
2. 整體平台及雲端符合現代化應用，可持續努力，將新的科技應用更廣泛，應特別注意其可靠度與穩定性。	感謝委員肯定，團隊將持續努力優化模組硬體，提升可靠度與穩定性。	同意於後續研究，提升模組硬體之可靠度與穩定性。
3. 相關監測的成果務必檢討監測儀器的精度，解析度及量測範圍，應與監測的對象如邊坡面、結構物等相匹配，以利將來應用的選擇。	現有設備為研究現地測試目的，原有考量為淺層滑動應用，後續延伸至飽和層與擋土牆監測，現有成果已簡化為地下水位及牆體傾斜，分階段預警，初期可符合需求。	依處理情形辦理。
4. 傾斜監測如第 4-17 頁，應特別注意量測結果的跳動及長期變化顯示不同的現象，應能分辨，以利後續應用。	4-17 頁 ID04 傾斜模組目的為地下水位監測，原模組為暫時固定，因此有較大變動，此模組傾斜監測無太大意義，後續將移除。	ID04 傾斜模組同意移除。
5. 第 5-8 頁的崩積層雨量門檻延時與累積雨量的關係圖看來，相關性不高( $R^2$ 偏低)，顯示假設可能要做調整，後續應可再檢討。	將以對數值進行分析，若相關性不高將於預測模式中移除。	依處理情形辦理。
6. 第 5-19 頁南市道 175 的地下水監測 ID03 的變化不太合理，第 6-28 頁中所述地下水上升至 2m，FS=0.72，估計可能破壞，應改為已經破壞。	ID03 於 5 月中損壞更換，現地檢測顯示現有模組正常，但現地水位高，可能水位監測井濾層阻塞或其他原因，將持續觀察。P6-28 文字依建議修改。	請持續觀察 ID03 的變化，以維持模組正常運作。

<b>二、高邦基 委員</b>		
1. 依行政院 104 年災害防救災白皮書，本案研發防救災科技係為公路管理單位防救災決策參考，爰建議本案建置監測系統指標，宜儘可能予以友善化，以利基層操作人員有標準作業程序可以依循。	本研究將邊坡破壞分為淺層及飽和層滑動，淺層滑動指標為非飽和土中含水量，飽和層滑動為地下水位，相關系統已整合為單一雲端平台，使用者無需進行系統建構期間複雜分析與大量監測資料，後續將提供主動通知功能，基層操作人員僅需遵循簡易標準作業程序。	依處理情形辦理。
2. 因場址氣候因素，致監測資料收集不全，恐影響本案監測成果驗證，宜妥予因應。	本研究不同破壞模式已有多個場址，相關警戒值決定已利用力學分析進行，若無法得到直接驗證，將可以間接成果驗證。	同意於後續研究，若無法得到直接驗證，將以間接成果驗證。
3. 本案辦理地質探勘及地形測量之執行方式及成果，請補充說明。	本計畫限於經費不進行地質探勘及地形測量，相關資料均由場址業管單位提供。	依處理情形辦理。
4. 不同之擋土支撐系統對於本案建置監測之方式，監測指標或設備是否會有不同？請補充說明因應方式(例如必要之客製化)。	本計畫擋土支撐系統監測方式均為地下水位及牆體傾斜，預警數值為場址客製化，因採嚴謹力學分析，分析方法與流程具一致性，不同場址若有設計資料，均可分析建立客製化預警指標。	依處理情形辦理。
5. 監測指標(警戒值、行動值)於邊坡及擋土支撐系統，請於報告書明確說明。	將於期末報告加強補充。	依處理情形辦理。
<b>三、陳嘉盈 委員</b>		
1. 邊坡穩定分析論述與架構相當清楚。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理。
2. 第 4-10 頁阿里山五彎仔路段經過大坍滑後整治，除大幅度改線，也利用深井重力排水方式長期降低地下水位，目前試驗場址為先前大型坍	本年度計畫限於經費及監測點位不易，因此無法變更，但將持續依建議找尋台 18 線既有擋土設施，作為後續監測與分析使用。	同意於後續研究，找尋台 18 線既有擋土設施，作為後續監測與分析使用。

<p>滑區崩積土層，位於整治區域排水匯集區，地表含水量偏高，地層仍不穩定，故監測儀器容易被掩蓋遺失及受損，建議後續計畫場址選在緊鄰台 18 線，以利比對台 18 線既有擋土設施穩定性與安全性，及提供台 18 線遇劇烈天氣是否辦理封閉管制決策參考。</p>		
<p>3. 第 6-2 頁總體滑動分析，由於一般道路邊坡擋土牆考量壁體施工安全及穩定，壁體角度都有一斜度角，甚少為 90 度，數值分析架構採用壁體 90 度分析，建議配合現地擋土牆坡度修正並加註 30 公尺地錨布設角度，以便跟現地較一致。</p>	<p>所使用擋土牆模型為依竣工圖簡化，將依委員建議調整模型，考量垂直擋土牆幾何對變形分析影響有限，現有預警值將先暫用，相關建議將於期末報告更新。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>4. 第 P6-12 頁台 20 線 52K+150 及第 P6-27 頁市道 175 線 50K+480 總體滑動分析，因現地地下水常年造成地層滑動，故復建工程增設水平盲管排水，分析模型忽略該集水管所帶來影響，與實際上滲流水可由水平盲管快速排除，地下水位應在水平管以下，就不會上升至深度 2 公尺處，建議增加有設水平集水管模式分析及其影響，以便跟實地較一致。</p>	<p>因採用地下水位為預警指標，水平盲管排水可加速排水，但並不影響邊坡與擋土支撐穩定性分析結果，因本研究暫不考慮依時分析，現地排水速率對分析應無影響。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>5. 第 P5-3 頁第三段第 1 行破碎「待」間，應為破碎「帶」間。第四段第 5 行「倘」限水層，應為「拘」限水層。</p>	<p>已修正。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>

四、賴瑞應 委員		
1. 報告第 2-16 頁相關符號如 $C_t$ 未說明，另外，式 2.10 缺 $\tan\psi'$ ，請再確認。	2-16 頁 $C_t$ 為視凝聚力，已修正；式 2.10 已檢核。	依處理情形辦理。
2. 報告第 2-28 頁提到參考現有國內外規範於不同土壤下主動破壞旋轉角訂定此場址之預警之旋轉角度為 0.3。 ~0.35°，此論述有點奇怪，因本研究主張客製化的去建置各場址的邊坡與擋土牆預警系統，主要是依據場址之地質參數及結構來分析各場址的邊坡或擋土牆的穩定性，以提供預警值供管理單位應用，若參考規範訂定預警之旋轉角度是否又回到經驗法則的方法。另外，背填土側之地下水位上升至距離土側頂端 2.9 公尺到 4 公尺時，進入預警範圍，建議文字是否可以修正為上升至距離土側頂端 4 公尺時，進入預警，上升至 2.9 公尺內是否就要警戒或採取行動，請確認。	此為前期成果，本年度已利用土壤結構互制分析更新客製化警戒值。詳第六章成果。	依處理情形辦理。
3. 報告第 3-2 頁圖 3.1 系統架構示意圖，僅顯示系統有含水量計及傾斜儀，似乎缺少液位計及雨量計，請確認。	此為淺層滑動模組架構圖，飽和層滑動及擋土系統分析模組與淺層模組相近，但感測器不同，相關建議將於期末報告修正及補充說明。	依處理情形辦理。

<p>4. 本計畫之最初目標之一為研發簡易安裝及便宜的監測模組，以利未來能大量應用於坡地之防災監測，此目標初步已達成也已應用於現地，但模組之穩定性及可靠度似乎還有待加強，未來是否還會持續精進。</p>	<p>埋置於土層內感測器穩定性及可靠度有改善空間，此乃受限於感測器原設計及價格，此與其原有短期拋棄式觀念差異不大，但地下水位及牆體傾角穩定性與可靠度可符合長期需求，後續將程序精進模組耐久性。</p>	<p>同意於後續研究，持續精進模組之耐久性。</p>
<p>5. 報告第 4-17 頁圖 4.15 ID04 傾斜監測結果顯示，似乎有一段時間中斷，請說明。</p>	<p>此為伺服模組故障待料期間。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>6. 報告第 5-11 頁圖 5.12 各測站傾斜角監測數據顯示一開始傾角值為 0.6 度，為何最初安裝後的傾角值未歸零。另外，第 5-20 頁圖 5.21 南市道 175 線下邊坡水份計監測成果顯示，2020 年 5 月以後之監測數據斷斷續續，請說明。</p>	<p>因現地安裝初始角度無法水平，後續將於雲端顯示進行初始值歸零。南市道 175 線下邊坡水份計監測為感測器因土層位移損壞，下邊坡水分監測非本場址重要物理量。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p><b>五、港研中心第一科曾文傑研究員</b></p>		
<p>1. 計畫執行至今已順利完成現有淺層滑動耦合分析預警系統更新、深層滑動場址監測與資料分析精進，並新增南市道 175 線飽和層滑動與擋土支撐系統監測場址上線，整體工作符合預定進度，感謝黃老師團隊的努力付出。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>2. 報告封面計畫編號”MOTC-IOT-109-H1C002“ 請刪除”MOTC-“。</p>	<p>已更正。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>3. 第 3-12 頁，倒數第 4 行”圖 2.23”是否為”圖 3.2”請檢視。</p>	<p>已更正為圖 3.9</p>	<p>依處理情形辦理。</p>

4. 第 5-8 頁，圖 5.7 將台 20 線 52K 監測站之累積雨量與岩層地下水位上升高度做回歸，只有 10 筆資料，建議加入所有監測資料做回歸分析。	此為 10 場有效降雨事件，本年度將更新降雨事件數量。	依處理情形辦理。
5. 第 5-12 頁，第 7 行” .....圖 5.29”，並無其對應圖，建議刪除。	已刪除。	依處理情形辦理。
6. 第 5-18 頁，”5.2.2...含水量監測”請修改為”5.2.3...含水量監測”； ”5.2.3...傾角監測”請修改為”5.2.4...傾角監測”。	已更正章節編號。	依處理情形辦理。
7. 第 6-12 頁第 2 行及 6-26 頁，”邊坡穩定分析流程依循第四章建立之流程”，第四章是否為圖 6.1;另第 6-12 頁第 5 行，圖 6.6 應改為圖 6.7，第六章有多處圖號及編排錯誤，請全面檢視修改。	更正為 6.1 節建立之流程，6-12 頁第 5 行，圖 6.6 應改為圖 6.7... 擋土結構物設計與參數參考竣工圖(圖 6.8)... 模型建立完成後如圖 6.9 所示。	依處理情形辦理。
8. 報告書中第 7-1 頁期中報告完成的工作項目未提及”淺層滑動耦合分析預警系統更新”此工作項目，請增加；另第 3 行”深層滑動場址維護與擴充”並無此項目，請刪除。	已。因期中前僅有 5 月梅雨資料，且無滑動發生，淺層滑動耦合分析預警值暫不更新。	同意報告書第 7-1 頁完成的工作項目之補充及刪除。
<b>六、陳天賜 委員</b>		
1. 淺層及深層滑動之傾斜、雨量、地下水位及含水量等儀器量測之監測資料，經伺服器收集後，傳送至雲端上進行數據分析，最後歸納後，為何只採用地下水位資料當量測結果，請說明。	採用地下水位為針對飽和土層滑動場址，淺層滑動預警指標為土中水分，不同破壞機制預警指標不同。	依處理情形辦理。
2. 有關門檻預警值、警戒值、行	相關數值為依據現有鑽探與地	同意相關理論上的

<p>動值所對應安全係數，經數據分析及數值模擬都需相當程度的驗證，理論上的驗證如何訂出？在預警值上應該有討論空間，但警戒值、行動值應該非常明確訂出門檻，請從理論上說明是如何訂出門檻值。</p>	<p>質調查資料進行嚴謹力學分析而得，邊坡及擋土系統反應與大地工程認知相符，應具一定可信度，相關理論將於期末報告加強論述，現地驗證需靠監測資料，場址若未破壞，僅可進行間接檢核。</p>	<p>驗證，於期末報告加強論述。</p>
<p>3. 請教與會的公路總局前輩，本研究計畫需發展、精進到什麼程度，才能符合貴局實務上的需求，才会有興趣去做大規模的布設使用本系統。</p>	<p>感謝各位先進提供意見，團隊將以建議目標持續進行硬體與分析架構精進。所發展系統為客製化，初期恐無法大規模佈設。</p>	<p>同意後續目標持續進行硬體與分析架構精進，以符合公路總局實務上的需求。</p>
<p>4. 在工程管理方面，目前公路總局有一定的做法，而本所發展的邊坡滑動監測系統如何提高資料正確性、驗證方法及精進相關分析學理，並加強實用性、友善度，以達計畫預期目的。最重要的是研究成果可提供公路總局使用，協助解決相關問題。</p>	<p>謹遵辦理，並以此作為精進之目標。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試

合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫單位審查意見
<b>一、蘇苗彬 委員</b>		
1. 本案引進新式設備，並於現場實施測試，有充分之成果後，供後續推廣應用。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理。
2. 第 3-5 頁的傾斜儀測試，短時間跳動達 0.1 度以上，不符解析度與可靠度的需求，後續應可再加強。	第 3-5 頁之圖 3-4 中紅點為本計畫所使用之 16-bit ADC 模組測試結果，解析度達 0.05 度以下，應可符合解析度與可靠度的需求，而短時間跳動達 0.1 度以上為原有採用感測器內建數位輸出模組測試結果，僅作為比較使用。	依處理情形辦理。
3. 第 3-6 頁的雨量計校正是否符合氣象局的標準。	簡化雨量計校正，做為高強度降雨校正係數決定之用，且僅用於監測場址，校正之器示值符合氣象局規範要求之相對器差 3%~3%間，且降雨特性與鄰近氣象局監測成果相近。	同意後續簡化雨量計校正，以符合氣象局規範要求之相對器差。
4. 第 3-15 頁的液位計水壓力共有 5m，是否符合現場的需要，5m 即為其可用範圍	報告中使用之液位計量測範圍為 0 至 0.6 bar(0-6m)，率定成果線性度極佳，另有 10 bar、20 bar 之水壓計可供現場狀況進行調配。	依處理情形辦理。
5. 第 4-9 頁傾斜變化已很大，是否現地有其他觀測可以佐證現地的變化，水位記錄亦不太正常。	說明詳見修正版 4-9 頁，甲仙邊坡之各測站於觀測期間內約於 1~2 度微幅的傾斜，其方向同邊坡走向，數值雖有變動，但多為儀器更換未歸零之值，對單一降雨事件，無顯著增加，且為表土局部滑動引致，但傾斜角變化幅	依處理情形辦理。

	度不大且無持續增加，無淺層邊坡破壞跡象，符合現地邊坡狀態；本場址無水位觀測；五彎仔水位因水位低於液位計，因此非現地水位。	
6. 第 5-32 頁地表傾斜變化很大，是否現地已損壞。分析累積雨量與水位上升應注意兩者之間有時間延遲，數據沒有代表性。	第 5-32 頁 ID3 地表傾斜變化為現地受居民整地種植所影響，模組未損壞但監測值因人為因素變動。圖 5.30 為延遲影響，因資料以個別降雨事件進行分析，暫未考慮降雨與水位同步時間影響，若將延遲效應加入，應可合理推估時間域累積降雨與水位上升模式，現有觀測資料將用於擬合水壓推估模式。	同意以現有觀測資料進行擬合水壓推估模式。
7. 第 6-21 頁，圖 6.17 的含水量率定跳動很大，是否有代表性。	因現地含水量量測成果採入滲速率概念與數值模型進行率定，因此以一定時間之平均值計算，現場入滲 35cm 所需時間為 1.5 小時與數值模式，所設定入滲 100cm 所需 4.12 小時一致。	依處理情形辦理。
8. 第 6-27 頁的監測指標是否有模型代表性或模式分析，如警戒指標 500 秒/月是否太大。	警戒指標 500 秒/月為原有設計單位建議值，其依據並未說明，本研究之警戒值為依據數值分析結果，且有合理依據。	同意以本研究數值分析結果，為制定警戒值依據。
<b>二、高邦基 委員</b>		
1. 本次期末報告已明確敘明建置飽和土層及結合擋土支撐系統破壞監測之預警、警戒及行動值，整本報告內容充實，所建立模組具學理依據，值得肯定及推廣其概念。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理。
2. 部分期中報告本人之審查意見，建議予以再口頭補充說明。	已於審查會中補充，因場址氣候因素，致監測資料收集不全，無法得到直接驗證，因此以有限觀測水位及擋土支撐未損壞，間接	同意以觀測水位及擋土支撐未損壞，間接驗證門檻值合宜性。

	驗證門檻值合宜性。	
3. 擋土牆場址監測警戒值訂定使用安全係數採小於 1.0 予以訂定，是否符合道路養護實務需要，可再思考。	現有門檻值為依據分析結果擬定，因現地具即時觀測值，可適度調降考量不確定性之安全係數，後續可與養護單位商討搭配觀測值進行滾動修正。	依處理情形辦理。
4. 因受研究期間雨季較少影響，本案建置監測預警模式後續乃宜持續觀察追蹤模組之穩定性及正確性。	團隊將會持續追蹤模組之穩定性及正確性，以便後續精進預警分析。	同意持續追蹤模組之穩定性及正確性，精進預警分析。
<b>三、呂正安 委員</b>		
1. 本研究延續前期成果，結合理論公式推導、現地監測、分析等，內容豐富而嚴謹，有利公路預警建置參考。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理。
2. 本年度再將擋土系統涉及地下水、土壤與結構互制、地錨作用、破壞型式...等分析納入，且提供預警技術，對公路災害精準管理決策有所助益。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理。
3. 本研究著重在土壤邊坡受雨入滲之預警技術建置，因公路邊坡之種類多樣，如細粒、粗粒、有夾層、完整岩坡、破碎岩坡、崩積型...，建議於篇頭定義適用之土壤邊坡特性，以供類似案例參考應用。	感謝委員建議，本研究主要考慮非弱面控制之崩積層，已於第一章說明，因採解析法分析，不同土壤類型以水力及力學參數代表。	依處理情形辦理。
4. 本研究設定供公路總局等相關機關後續應用作為公路封閉預警管理決策，建議提供佈設監測設備之原則及對應之經費，供日後推動之參考。	現有系統為研發階段，目標為程序標準化，門檻值場址客製化，較適用於高敏感重要場址，相關標準與推廣將建議後續計畫納入。	依處理情形辦理。

<p>5. 本研究之提升監測預警精確與時效性，係建構在實務監測入滲之雨量所引致之孔隙水壓變化而最終觸發土層滑動破壞。以普及推廣為目標，若能應用研究之精神，掌握地形地質特性及適度建立入滲模型分析，建立毋須監測即可供預警決策。如此，則可類似目前之雨情監看決策，實務操作上較無安裝監測系統所需經費之礙。</p>	<p>本研究包含考量降雨特徵之水位推估模式建立，其目的與委員建議相同，目標為以場址降雨觀測取代水位量測，以降低維護成本。</p>	<p>同意後續研究，以場址降雨觀測取代水位量測。</p>
<p>6. 台 8 線中橫公路德基至大禹嶺有相關不同類型邊坡可作為後續應用場域，如 79k 佳陽、95.8k 梨山、109.5k 大禹嶺等，若有需要進一步驗證本研究預警方式，可洽公路總局第二區養護工程處。</p>	<p>感謝委員提供資訊，將提供業管單位後續相關計畫研擬參考。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>7. 第 1-1 頁，第二段及第三段部分文字重複，因降雨為地滑發生之間接指標，...</p>	<p>謹遵辦理，文字重複之段落已修正。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>8. 第 1-3、1-4 頁，建議部分說明或觀念一致者，彙整後系統性敘述，減少重複敘述之情形，提升閱讀性。如第一段：提高預警之準確與時效性，第四段亦有相同文字。另第五段，廉價一詞，建議修為文後所提經濟、低成本等。</p>	<p>謹遵辦理，文字重複之段落已更改，第五段，廉價一詞，修正為經濟、低成本。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>9. 第 1-6~1-8 頁，建議內容可稍加精減，研究內容及項目說明之分項（1~5）說明中，可採條列式說明辦理項目，如第 2 點中，可將前期</p>	<p>謹遵辦理，已條列式整理及將「：」統一採全型。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>

<p>108年作為以(1)、本年度之相關作為列為(2)、(3)...。另「:」半、全型皆有，建議統一採全型。</p>		
<p>10. 第2-3頁，上半部，本研究以假設合理之邊界與初始條件。建議補充假設邊界及初始條件之方式。</p>	<p>謹遵辦理，已補充”相關假設於第五章及第六章說明，包含水力與力學邊界與初始條件”，詳P2-3。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>11. 第2-7頁，圖2.3列出8/7/09~8/9/09之水頭及深度關係變化，列出兩條stability envelope。建議補充降雨歷程，供了解水量、入滲、水頭之相關關係。另請補充D-hp曲線中，數值超過stability envelope之意義。</p>	<p>此為前人研究文獻引用，相關資料可參考文獻出處，不宜逕行修改，兩條stability envelope如圖示為對應不同地層摩擦角(36及40度)。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>12. 第5-7頁，描述台20線場址部分，建議補充現地照片供參。另道路下「線」，應為下陷。</p>	<p>謹遵辦理，已修正為”下陷”</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p><b>四、陳嘉盈 委員</b></p>		
<p>1. 利用公式解析及現地監測儀器資料判讀，合理律定預警值、警戒值及行動值，可供道路養護單位作為汛期防災減災道路是否封閉管理，本計畫有理論依據作為研究成果值得肯定。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p>2. 利用理論公式解析推導及現地檢測儀器數據與相互驗證，若同一場址都有兩組以上監測儀器，就量測資料可相互比較驗證更為完整。</p>	<p>感謝委員寶貴建議，現階段為研發測試階段，且感測器埋設需遷就現地條件，後續標準化階段將建議採多組配置。</p>	<p>同意後續計畫制定監測配置標準化。</p>
<p>3. 因受野外檢測儀器容易發生故障，原有阿里山五彎仔場</p>	<p>阿里山五彎仔場址因水位接近地表，且淺層地表變動頻繁，因</p>	<p>五彎仔場址，非淺層或飽和層滑動類</p>

<p>址 ID2 水份計 109.5.16 損壞到 109.9.16 才重新安裝，ID3 水份計 109.9.16 損壞，可能就没再修復，因本研究既定位在即時監測系統，研究團隊應派有專人監看收集監測資料，如有異常應能即時發現即時處理，建議爾後儀器若有故障應早日修復，較為合理也讓研究資料更為充足。</p>	<p>此模組維護不易，本年度因疫情導致元件採購有所延遲，因此有部分中斷，團隊爾後會改善修繕情況，提高整體資料完整性，但此場址因破壞機制特殊，非淺層或飽和層滑動類型，歷次工作會議建議廢除。</p>	<p>型，應找尋合適替代場域，作為後續監測與分析使用。</p>
<p>4. 同一場址若有兩組檢測儀器量測成果圖，建議在座標軸能一致，才能比較其監測成果有同質性或差異性，如 P4-5、P4-6 與 P4-7 成果圖橫座標軸相同，就可比較相同場址不同位置顯示的差異程度。P4-8 橫座標軸就跟其他組不一致，要比較就有困難。如 P4-15 圖 4.11 與圖 4.12 橫座標軸也不一致，圖 4.13 與圖 4.14 橫座標軸也不一致，要比對同場址不同位置地表傾斜狀況有無差異就有困難。</p>	<p>謹遵辦理，成果圖之坐標軸修正以已期末報告修訂版修正，其中有些成果圖因裝設時程差異，故座標軸無法一致，如五彎仔 ID3。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>
<p><b>五、賴瑞應 委員</b></p>		
<p>1. 本計畫已執行多年之研發及系統精進，雖於報告 1-3 頁計畫目的有針對歷年之研發成果做說明，但還是不太容易清楚各年期之成果及差異，建議能針對本計畫相關的歷年研究成果及系統精進項目之差異，以表格呈現，以利瞭解各年期之成果差異。為何只採用地下水位資料當量測</p>	<p>謹遵辦理，新增表 1-1 運輸研究所歷年與本計畫相關研究案列表，採用地下水位為飽和層滑動預警為基於耦合分析。</p>	<p>依處理情形辦理。</p>

結果，請說明。		
2. 本計畫以破壞面位於未飽和土層為淺層破壞，破壞面位於飽和層為深層破壞，建議以表格方式說明兩種破壞模式的定義、分析方法、現地監測設備及設備佈設之差異，以清楚明瞭兩者間之差異。	因內容較多，機制不意列表，因此以文字說明，其差異表徵為滑動面位於飽和或非飽和層，但機制與飽和及非飽和土壤水力及力學特性有關，量測亦依機制不同而有所差異。	同意以文字加強說明，淺層破壞及深層破壞差異。
3. 由過去的現地監測經驗顯示，現地監測設備之維護不易，常常發生設備異常之情況，雖經過這幾年之系統精進已獲得相當程度之改善，然而還是不能確保各監測場址的系統能持續保持運作，爰此，後續如果能分析出降雨資料與土層體積含水量或地下水位升降之關聯性，或許就可以免除監測設備的維護，而最終回歸以降雨相關資料來做相關防災預警。	感謝委員提醒，此為計畫長期努力目標。	依處理情形辦理。
4. 因本研究分析的各邊坡場址預警值、警戒值及行動值，目前僅止於理論分析的結果，後續還需要降雨事件來驗證相關數值的可靠度，且相關數值之訂定應由權管單位去核定，爰此，報告之預警值、警戒值及行動值等名詞，建議改為參考之預警值、參考之警戒值及參考之行動值較為適宜。	謹遵辦理，已將相關文字增補於結論開頭(P8-1)	依處理情形辦理
5. 結論部分有提到完成兩飽和土層場址 FLAC 擋土系統耦合分析，並以雨季資料進行	謹遵辦理，已修正明確說明此兩場址。	依處理情形辦理

反算與驗證，提出牆體反應與地下水位為指標之預警值可供相關單位使用。建議明確說明是台 20 線及南市道 175 線。		
6. 對於建議部分，建議說明本研究後續該如何完備目前建立之監測系統及驗證所研發之依時特性公路土壤邊坡降雨滑動監測及預警技術，以利推廣於公路總局、高公局及縣市政府之高風險或重要路段之邊坡防災應用。	謹遵辦理，已增加於 8.2 節	依處理情形辦理
<b>六、張道光 委員</b>		
1. 有關報告書內容編排已編列至小節，例如 1.1、1.1.1，建議目錄部分也請對應編列至小節。	謹遵辦理，已將目錄編排至小節。	依處理情形辦理
2. 報告請補充各期之工作會議紀錄。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
3. 第五章的頁碼格式大小不一致，請檢視修正。	謹遵辦理，已修正頁碼為統一大小及格式	依處理情形辦理
<b>七、本所港研中心曾文傑研究員</b>		
1. 計畫執行至今已順利完成所有工作項目，並新增南市道 175 線飽和層滑動與擋土支撐系統監測場址上線，整體工作符合預定進度，感謝成大基金會黃老師團隊的努力付出。	感謝委員肯定。	依處理情形辦理
2. 本計畫已完成解析法入滲孔隙水壓推估模式初步測試，後續可進一步探討其應用及進行更多案例測試。	感謝委員提供意見，團隊將以建議目標持續精進分析及深入發展其應用。	同意後續研究，進一步精進分析及深入發展其應用。

3. 監測場址展示平台，臺南市市道 175 線場址 ID3 液位計發現故障，請儘速了解原因，並完成後續維修。	已修護完成，原因為斷電功能之電子零件損壞，更換後系統已穩定。	依處理情形辦理
4. 本計畫有設置淺層及深層場址，建議歸納綜整過去現地感測元件及模組硬體的相關資料、損壞原因，以及歷年研究成果及系統精進項目之差異，以表格呈現，以利後續相關研究汲取經驗，並精進相關感測元件的設計、製作與維護。	謹遵辦理，已補充表 1-1 及 3.4.3 節	依處理情形辦理
5. 本計畫每月舉辦之各期工作會議記錄、各期審查意見與回覆及期末簡報，請列於報告書後面。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
6. 報告書中有部分誤植處，例如第 5-2 頁，第 8 行"Richard's equation"，請修改為"Richard's equation"	謹遵辦理，已修改"Richard's equation"。	依處理情形辦理
7. 第 5-3 頁，倒數第 12 行"壓力水頭為零對應之深度及為..."，請修改為"壓力水頭為零對應之深度即為....."。	謹遵辦理，已修改為"壓力水頭為零對應之深度即為"。	依處理情形辦理
8. 第 5-6 頁，倒數第 2 行"台 20 台 50K"，請修改為"台 20 線 50K"。	謹遵辦理，已修改為"台 20 線"。	依處理情形辦理
9. 第 5-12 頁，倒數第 4 行"影響雨量雨水位"，請修改為"影響雨量與水位"；第 5-13 頁，倒數第 5 行"小與"，請修改為"小於"。	謹遵辦理，已修改為小於。	依處理情形辦理
10. 第 5-19 頁，表 5-3 延遲時間 E"25"，應改為"26"；另第 5-22 頁，倒數第 11 行，語意不	謹遵辦理，已修改。	依處理情形辦理

清請修改。		
11. 第 6-16 頁，倒數第 6 行”水位較深時(10)”，請修改為”水位較深時(10m)”；第 6-21 頁，倒數第 4 行”圖 6.19”，請修改為”圖 6.18”；第 6-24 頁，第 1 行(b)滑動面，請移至上一頁。	謹遵辦理，已修改為”10m”及將第 1 行(b)滑動面，移至上一頁。	依處理情形辦理
12. 第 7-3 頁，(1)、(2)、(3)、(4)，請修改為”1、2、3、4”，另倒數第 4 行”圖 3.20”，請修改為”圖 7.3。”	謹遵辦理，已修改標號及圖標。	依處理情形辦理
<b>八、本所陳天賜副所長</b>		
1. 安裝於現地的儀器較容易故障，建議定期校正保養，以確保量測資料之準確性。	謹遵辦理，相關故障檢討、對策及建議已增補於 3.4.3 節。	同意增補相關儀器故障檢討、對策及建議。
2. 本計畫有關警戒值、預警值、行動值都是屬理論推導，後續撰寫報告時建議用「參考」或「建議」等用詞，讓公總在參考本案資料時，能瞭解其意義與限制條件。	謹遵辦理，已於結論增補”本研究分析的各邊坡場址預警值、警戒值及行動值，目前僅止於理論分析的結果，後續還需要降雨事件來驗證相關數值的可靠度，且相關數值之訂定應由權管單位去核定。	同意於結論增補”各邊坡場址門檻值，目前僅止於理論分析的結果，後續相關數值之訂定應由權管單位去核定。
3. 目前公路總局以雨量建置預警參考，不知各項基準值是如何訂定的？本研究後續能否研究降雨量的時間序列與地下水位等指標的關連性，繼而提出以降雨量觀測為指標的警戒值、預警值、行動值供公總等單位參考，或許其採行機會較高，此亦可作為本研究之階段性成果。	公路總局以雨量建置預警應為長期觀測與案例統計分析而得，以場址觀測及理論模式擬合降雨量的時間序列與地下水位的關連為本計畫長期努力目標，希冀將水位轉換為場址降雨參數，以簡化觀測維護及利於推廣，此建議已增列於 8.2 建議事項。	同意後續計畫將水位轉換為場址降雨參數，以簡化觀測維護及利於推廣。

## 附錄二

### 各期工作會議紀錄

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進與預警系統測試研究」3 月份工作會議
- 二、時間：109 年 3 月 26 日（星期四）下午 2 時 00 分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室
- 四、主持人：蔡代理主任立宏(柯科長正龍代理) 紀錄：曾文傑
- 五、出（列）席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：
  - (一)工作進度說明：
    - (1)原有場址現況與更新監測記錄。
    - (2)新設場址儀器佈設與進度說明。
  - (二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：
    - (1)台 18 線場址更改監測配置原則。
    - (2)台 20 線 52k 場址整治後現況更新及監測調整。
- 七、結論：
  - (一)台 18 線場址 ID4 地下水位監測因與研究關聯性較小，且維護不易，同意研究團隊建議予以移除，ID2 進行修復。
  - (二)台 20 線 52K 場址竣工圖將聯繫公路總局第五區養護工程處，商請提供並知會其計畫需持續監測之需求。
  - (三)請合作團隊依據工作計畫書規劃期程，進行後續研究工作。
- 八、散會：下午 3 時 30 分

簽到表

會議名稱：會議名稱：「IOT-109-HIDC002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進與預警系統測試研究」工作會議

時間：109年3月26日（星期四）下午14時00分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

單位	簽名
本所港研中心	柯正龍 曾文傑
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基金會	張文忠

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進與預警系統測試研究」4 月份工作會議
- 二、時間：109 年 4 月 27 日（星期一）下午 2 時 00 分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室
- 四、主持人：蔡代理主任立宏(賴科長瑞應代理) 紀錄：曾文傑
- 五、出（列）席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：
  - (一)工作進度說明：
    - (1)現有場址現況、更新與近期監測記錄。
    - (2)新設台南市市道 175 場址運作說明。
    - (3)淺層滑動耦合分析預警系統更新構想。
  - (二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：
    - (1)擋土支撐系統分析架構與進度討論。
- 七、結論：
  - (一)台 18 線場址部分監測元件之採購，受新冠肺炎疫情影響，廠商未能如期交貨，已暫用備品代替，請合作團隊於 5 月上旬恢復上線。
  - (二)台 20 線 52K 場址擋土支撐系統已依設計圖先行分析，請於取得竣工圖後，再次分析更新。
  - (三)請合作團隊依計畫預定期程，進行後續研究工作。
- 八、散會：下午 3 時 10 分

簽到表

會議名稱：會議名稱：「IOT-109-H1DC002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系

統精進與預警系統測試研究」工作會議

時間：109年4月27日（星期一）下午2時00分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

單位	簽名
本所港研中心	柯正龍 曾文傑
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基金會	黃昭斌 張文忠

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」5 月份工作會議
- 二、時間：109 年 5 月 29 日（星期五）下午 2 時 00 分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室
- 四、主持人：蔡主任立宏(賴科長瑞應代理) 紀錄：曾文傑
- 五、出（列）席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：

### (一)工作進度說明：

- (1)現有場址現況、更新與近期監測記錄。
- (2)109 年新設台南市市道 175 線場址運作及預警分析成果說明。
- (3)具擋土支撐之道路邊坡耦合分析及預警值更新進展。

### (二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (1)擋土支撐系統分析架構與進度討論。

### 七、結論：

- (一)台 20 線 52K 場址以設計圖進行擋土支撐系統分析，竣工圖主要為邊坡整治，於現有分析影響有限，後續取得核定局部竣工圖再檢核更新。
- (二)依合約請研究團隊於 6/29 前提送期中報告，並依運研所出版品格式編排。
- (三)請合作團隊依計畫預定期程，進行後續研究工作。

### 八、散會：下午 3 時 15 分

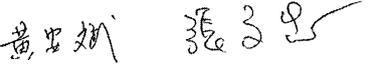
簽到表

會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及  
預警系統測試」5月份工作會議

時間：109年5月29日（星期五）下午2時00分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

主持人：蔡主任立宏 

單位	簽名
本所港研中心	
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基 金會	

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試研究」合作研究案 6 月份工作會議

二、時間：109 年 6 月 24 日（星期三）下午 2 時

三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室

四、主持人：蔡主任立宏(賴科長瑞應代理) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

(一)工作進度說明：

(1)現有場址現況、更新與近期監測記錄。

(2)109 年新設南市道 175 線場址運作及監測成果說明。

(3)台 20 線 52k 擋土支撐耦合分析及預警值更新進展。

(二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(1)淺層滑動監測模組水份計耐用性討論。

(2)擋土支撐系統預警架構與期中報告進度討論。

(3)南市道 175 線 25k 場址後續維護討論。

七、結論：

(一)電容式水份計原用途為表土量測，本計畫應用於潛在滑動土體埋設，感測電路易受潮或受壓損壞，請團隊持續加強兼顧準確性與耐用性改善。

(二)依現有擋土系統分析成果，初步提出預警值以牆後地下水位為指標，行動值以牆體傾角為指標，可做為此計畫後續研發重點。

(三)依合約規定請研究團隊於 6/29 前提送期中報告，並依運研所出版品格式編排。

(四)請合作團隊依計畫預定期程，進行後續研究工作。

八、散會：下午 3 時 30 分

簽到表

會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系

統精進及預警系統測試」合作研究案 6 月份工作會議

時間：109 年 6 月 24 日（星期三）下午 2 時 00 分

地點：港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室

主持人：蔡主任立宏 賴謙德 代

單位	簽名
本所港研中心	<u>賴謙德</u> <u>曾文傑</u>
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基 金會	<u>黃中斌</u> <u>張文忠</u>

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」合作研究案 8 月份工作會議

二、時間：109 年 8 月 27 日（星期四）下午 3 時

三、地點：本所港研中心 5 樓第二會議室

四、主持人：蔡主任立宏(賴科長瑞應代理) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

(一)工作進度說明：

(1)現有場址現況、維修與近期監測記錄。

(2)雲端系統預警及主動通知功能研發進度。

(3)南市道 175 線擋土支撐耦合分析及預警值更新進展。

(二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(1)淺層滑動監測模組水份計耐用性及防水密封成效討論。

(2)場址維修 SOP 研擬及模組故障主動通知邏輯研商。

七、結論：

(一)因水份計埋置土中，單一元件損壞會影響模組運作，因此需研擬相關替代解決方案，並研擬場址感測模組維護作業流程。

(二)考量氣候變遷導致溫度漸增，元件耐溫及防水需補強，以提高耐用性，可尋求其他量測專業單位如國研院儀科中心之專業建議。

(三)後續研究應強調長期監測重點可將降雨特徵轉換為水位上升，結合現有預警方法，後續可簡化監測系統並保留重要預警特徵。

(四)請合作研究團隊於下次(9月)工作會議前，提供期中報告修正後電子檔，以供本所確認報告格式是否符合本所的格式，以避免後續定稿報告不符本所格式而需本所花時間修改。

八、散會：下午 3 時 30 分

簽到表

會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系

統精進及預警系統測試」合作研究案 8 月份工作會議

時間：109 年 8 月 27 日（星期四）下午 3 時

地點：港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室（視訊會議）

主持人：蔡主任立宏 賴沛堯 代

單位	簽名
本所港研中心	<u>賴沛堯</u> <u>曾文傑</u>
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基 金會	<u>張文忠</u>

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」合作研究案 9 月份工作會議

二、時間：109 年 9 月 28 日（星期一）下午 2 時

三、地點：本所港研中心 5 樓第二會議室

四、主持人：蔡主任立宏(賴科長瑞應代) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

(一)工作進度說明：

(1)現有監測站監測資料更新與整理

(2)台七甲線及各監測站維護更新

(3)雲端平台主動通知功能進展

(二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(1)依分析所訂各監測站不同階段成果，做為門檻值之檢討與文字修正。

(2)模組妥善率及損害原因探討。

七、結論：

(一)各邊坡監測場址的滑動破壞預警值及行動值訂定，牽涉各公路養護單位的權責，本計畫僅以目前理論分析成果訂定之，在無充分的降雨事件驗證下，似不宜貿然訂定各邊坡場址預警值及行動值，建議後續計畫執行，以研究立場提供場址監測數據予相關之公路養護單位做為防災決策之參據，若達到可能致災的門檻值時，給予相關單位預警通知即可。

(二)過去現地感測元件及模組硬體的損壞原因，建議歸納綜整，以利後續相關研究汲取經驗，精進相關感測元件的設計、製作與維護。

(三)期末報告格式請確認是否符合本所格式，並依規定期程繳交。

八、散會：下午 3 時

簽到表

會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進  
及預警系統測試」合作研究案 9 月份工作會議

時間：109 年 9 月 28 日（星期一）下午 2 時

地點：本所港研中心 5 樓第二會議室

主持人：蔡主任立宏 賴沛尊代

單位	簽名
本所港研中心	<u>賴沛尊</u> <u>曾文傑</u>
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基 金會	<u>張文忠</u> <u>黃愷</u>

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」資訊服務案 10 月份工作會議

二、時間：109 年 10 月 28 日（星期三）下午 2 時

三、地點：本所港研中心 5 樓第二會議室

四、主持人：蔡主任立宏(賴科長瑞應代理) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

(一)工作進度說明：

(1)現有監測站監測資料更新與整理

(2)更新與驗證滑動面地下水位與降雨特徵推估模式

(3)測試調整雲端依時預警系統中主動通知功能

(二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：

(1)崩積層地下水位變化與降雨特徵統計模式調整

(2)時間域一維垂直非飽和入滲孔隙水壓推估模式架構

七、結論：

(一)臺南市道 175 線 ID3 液位計故障，請盡速了解原因，並完成後續維修。

(二)解析法入滲孔隙水壓推估模式初步測試符合現地資料，後續可進一步探討其應用及進行更多案例測試。

(三)相關警戒門檻值因計畫研究屬性，請於定稿時註明其客製化及測試性質。

(四)請合作團隊依計畫預定期程，進行後續研究工作。

八、散會：下午 3 時

簽到表

會議名稱：「IOT-109-H1C002 公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進  
及預警系統測試」合作研究案 10 月份工作會議

時間：109 年 10 月 28 日（星期三）下午 2 時

地點：本所港研中心 5 樓第二會議室

主持人：蔡主任立宏 賴瑞傳 代

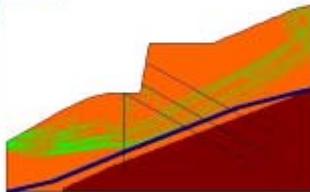
單位	簽名
本所港研中心	<u>賴瑞傳</u> <u>曾文傑</u>
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基 金會	<u>張文忠</u> <u>周仕勳</u> <u>黃中敏</u>

附錄三

期末簡報

# 公路土壤邊坡與擋土支撐監測 系統精進及預警系統測試

## 期末簡報



委託單位：交通部運輸研究所  
投標單位：財團法人成大研究發展基金會  
研究團隊：黃安斌、張文忠

## Outline

- ◆ 109 年計畫摘要
- ◆ 現有監測模組精進與監測成果
- ◆ 精進雲端依時預警系統架構
- ◆ 飽和層滑動與擋土支撐系統監測場址
- ◆ 時間域孔隙水壓推估模式
- ◆ 擋土系統水力力學耦合分析
- ◆ 結論與建議

## 109年研究內容與項目

---

- 現有兩處淺層滑動場址持續觀測與精進
  - 甲仙攔河堰坡及阿里山公路五彎仔
  - 精進現有淺層滑動模組資料分析模式→滾動修正預警值
- 精進雲端依時預警系統架構:
  - 精進模組間通訊、電源及量測可靠度
  - 增建雲端主動預警通知
- 飽和土層滑動場址持續觀測與精進
  - 台20線52k及新增南市道175線50.5k兩處場址
  - 解析解下時間域水壓推估模式建立
- 驗證飽和土層滑動水力力學耦合分析技術:
  - 以現地觀測成果，進行土壤參數反算及分析模式驗證
  - 將現地擋土系統列入監測與分析

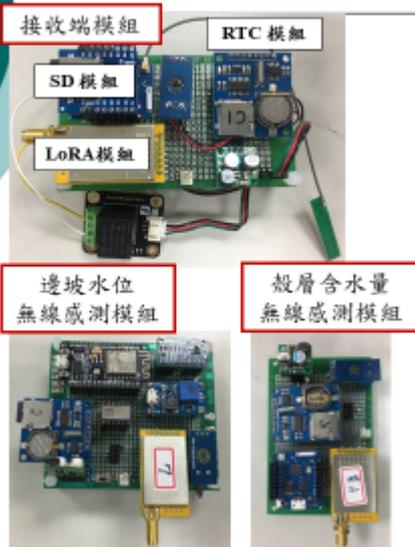
## 潛在滑動邊坡監測模組精進

---

- 雨季前完成模組維修與更新
- LoRa喚醒之功能:由具備4G模組之伺服端喚醒
- 增加電源管理及節電效能:傳統液位計及雨量計進行節電設計
- 雲端平台功能擴充:將依時預警模式加入雲端平台，並擴充主動通知功能

## IoT土層無線監測模組特色

### ◆ 模組硬體配置：



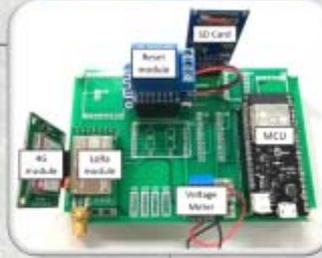
### ❖ 模組特色：

1. 可編程微型微控板(MCU)，達成智慧化量測控制。
2. 模組化特性可擴充感測器與無線模組進行串聯(LoRa、NB-IoT)。
3. 可與不同感測器進行串聯，達成**萬物聯網概念**。(研究以殼層體積含水量、邊坡水位與傾角變位進行長期監測)
4. **獨立電源系統**配合智慧電源管理，克服野外電源問題，模組不受制電源影響佈設。
5. 相較於傳統監測系統具**輕量化**，且**性價比優異**。



## 監測系統模組

### 伺服器端



微控制器

LoRa

SD card

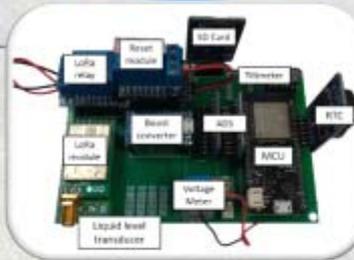
4G-module

定時斷電



## 監測系統模組

### 客戶端



感測器

液位計

傾度儀

雨量計

含水量計

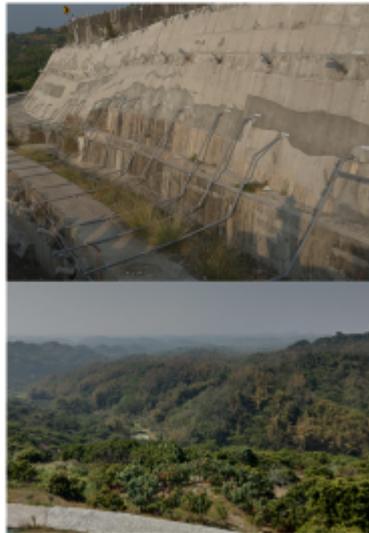


## 模組故障原因及對策

- 水份計因與土壤直接接觸，最易損壞且影響其他元件運作→ 已更換感測元件並採並聯連接，隔離損壞元件
- 日照影響電子元件及電路板耐久性→ 以太陽能板避免模組防水盒直曬
- 防水盒滲漏→ 更換液體防水膠及調整電線角度
- 電池續電力遞減→ 定期更換



# 即時監測及預警平台



國立成功大學  
 National Cheng Hsing University  
 市175線25K區即時邊坡擋土監測平台

帳號:  密碼:

請洽系統管理員 222-8111

臺灣技術研究中心

11

# 自動預警通知系統



雲端平台監測值即時顯示

編號	日期	讀數	單位	警報狀態	警報原因	警報接收者
01	2015-03-17 20:40	2.8	mm	正常	-	-
02	2015-03-17 21:00	2.8	mm	正常	-	-
03	2015-03-17 21:20	2.8	mm	正常	正常	正常
04	2015-03-17 21:40	2.8	mm	正常	-	-
05	2015-03-17 22:00	2.8	mm	正常	-	-
06	2015-03-18 00:00	2.8	mm	正常	-	-
07	2015-03-18 02:00	2.8	mm	正常	-	-
08	2015-03-18 04:00	2.8	mm	正常	-	-
09	2015-03-18 06:00	2.8	mm	正常	-	-

觸發預警值  
發送E-mail



市道175即時邊坡擋土監測平台預警通知

ihmtmonitor@gmail.com

Channel ID 欄位 值與1管理值判定

2 ID3 地下水位 已觸行動值

3 ID4 地下水位 已觸行動值

可由User list  
指定  
訊息接收者

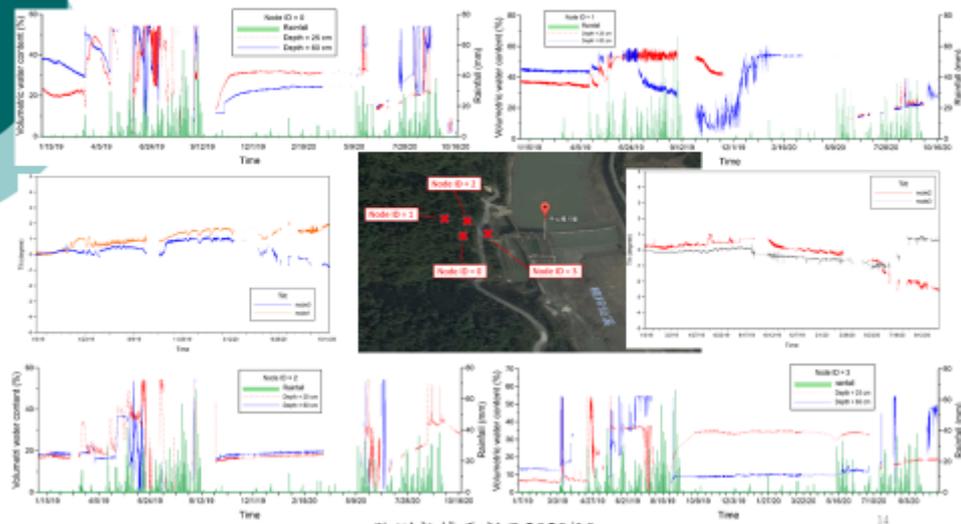
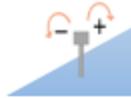
12

## 甲仙攔河堰通達道路邊坡監測配置圖



12

## 監測數據—含水量計與地表傾角



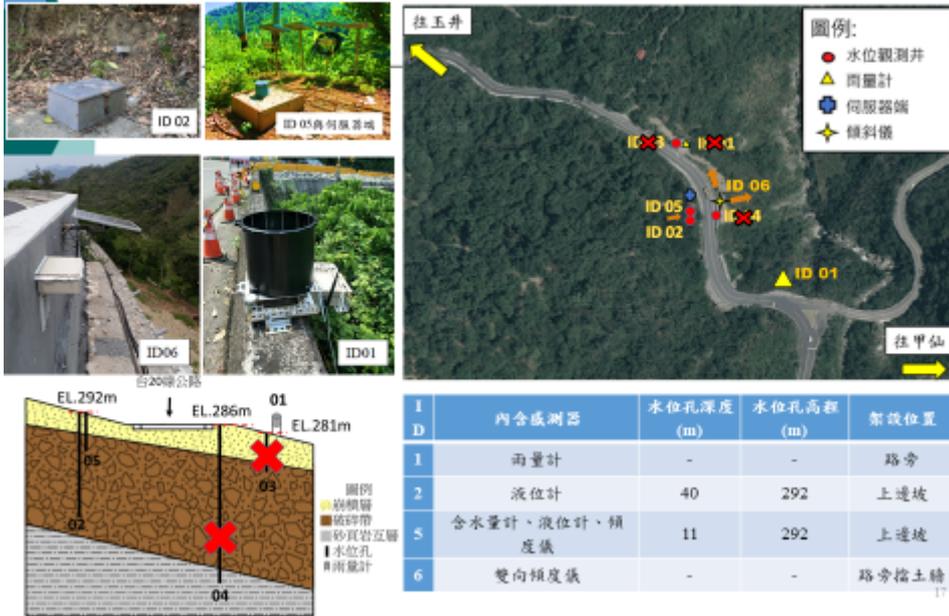
## 台18線阿里山五彎仔監測區域圖



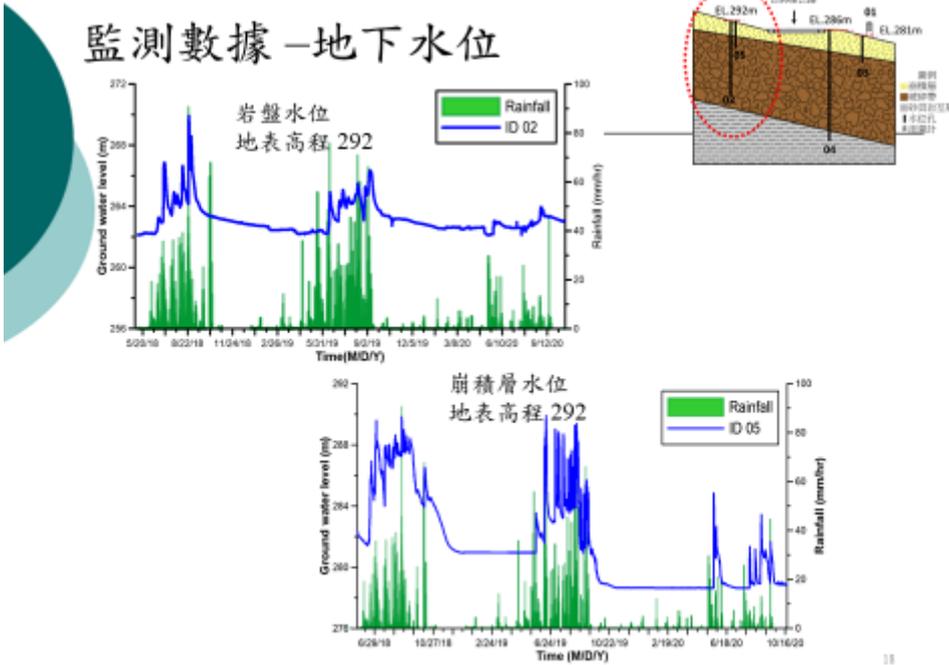
## 飽和層滑動場址監測目的

- 發展時間域地下水位變化與降雨特徵推估模式
- 導入邊坡擋土支撐系統時域分析及監測模組
- 建立極限平衡及二維耦合深土層邊坡穩定分析流程
- 提出含擋土支撐反應之場址客製化依時預警

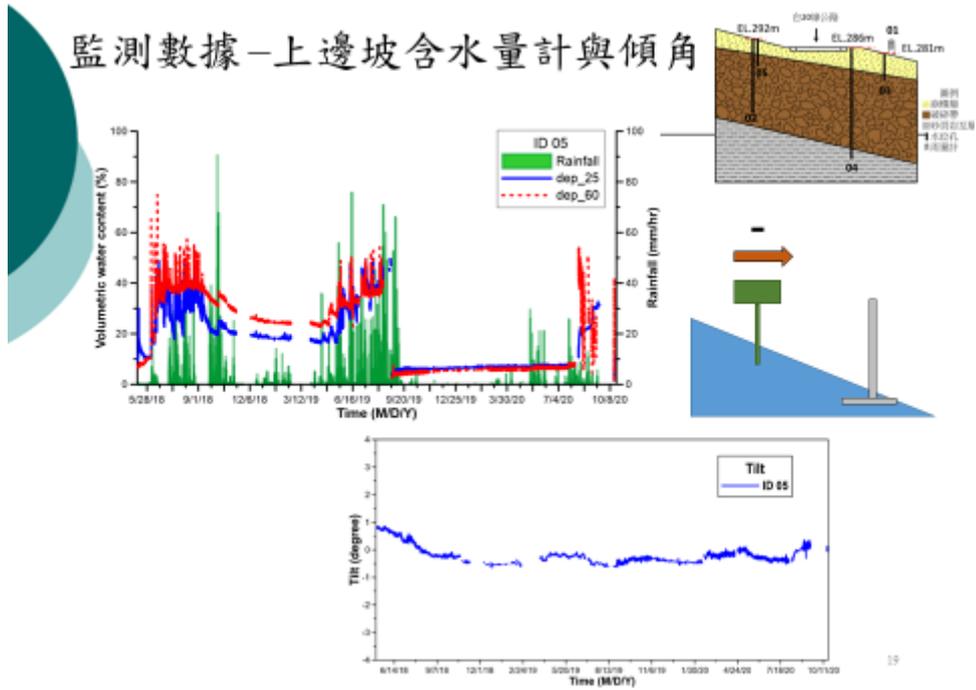
# 台20線52k監測站配置圖



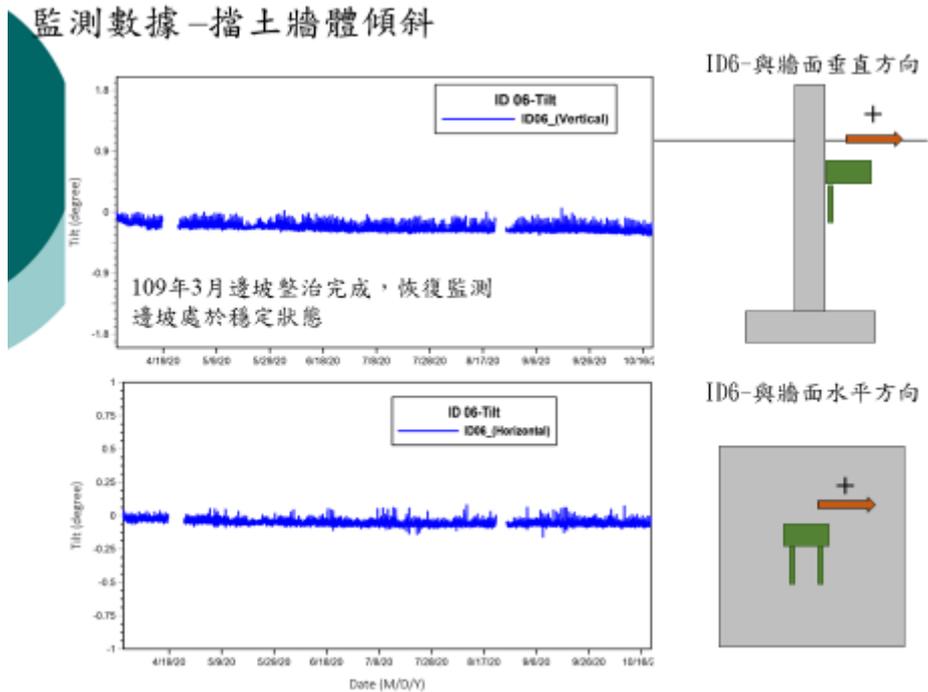
## 監測數據 - 地下水位



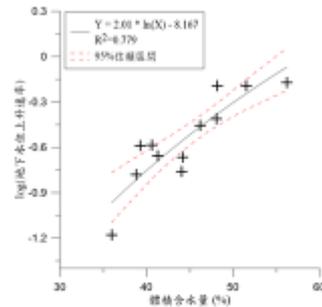
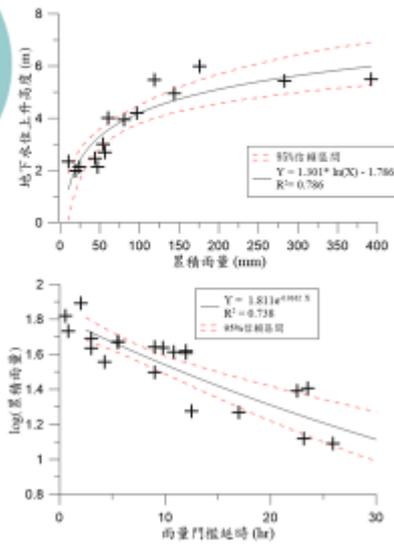
### 監測數據-上邊坡含水量計與傾角



### 監測數據-擋土牆體傾斜



## 台20線52k場址 崩積層地下水位變化與降雨特徵推估模式



- 累積雨量越大，水位上升越多
- 累積雨量超過150mm時，水位上升幅度縮小，此為地表逕流效應（孔隙水壓變化，與實際土體入滲量有關）
- 表層體積含水量愈高，地下水位上升速率愈快



## 109年新增飽和層監測場址: 南市道 175線50k+500場址 場址介紹

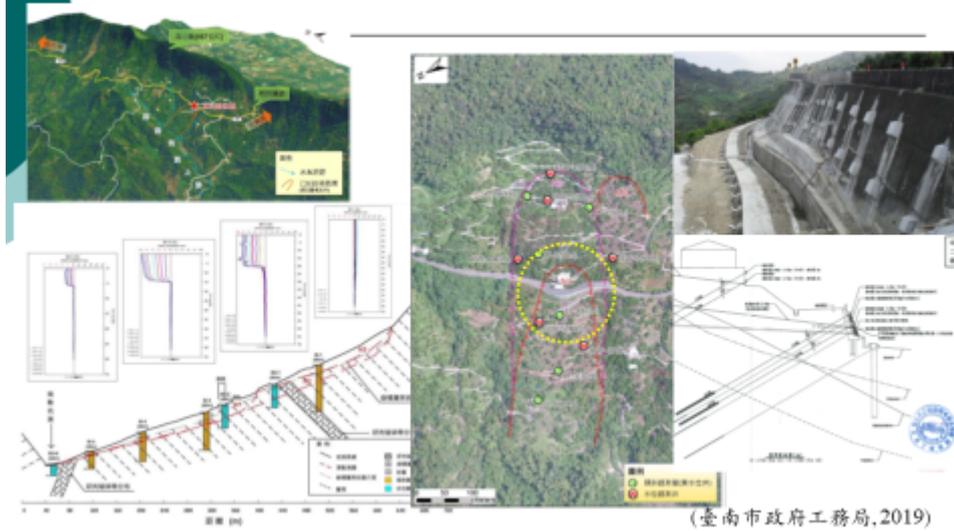
地理位置



破壞歷史



## 南市道175線50K+500地滑區滑動機制

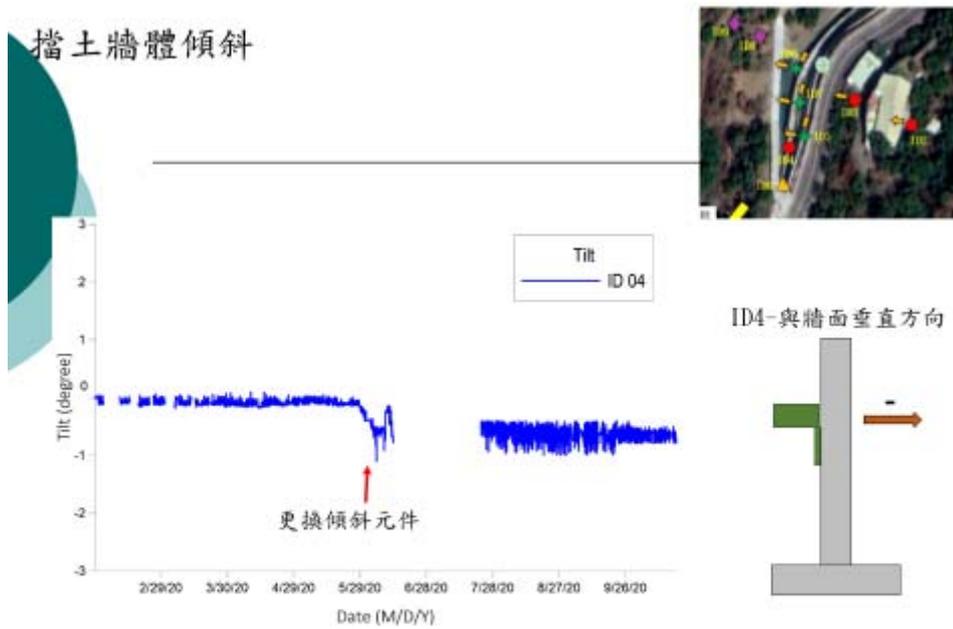
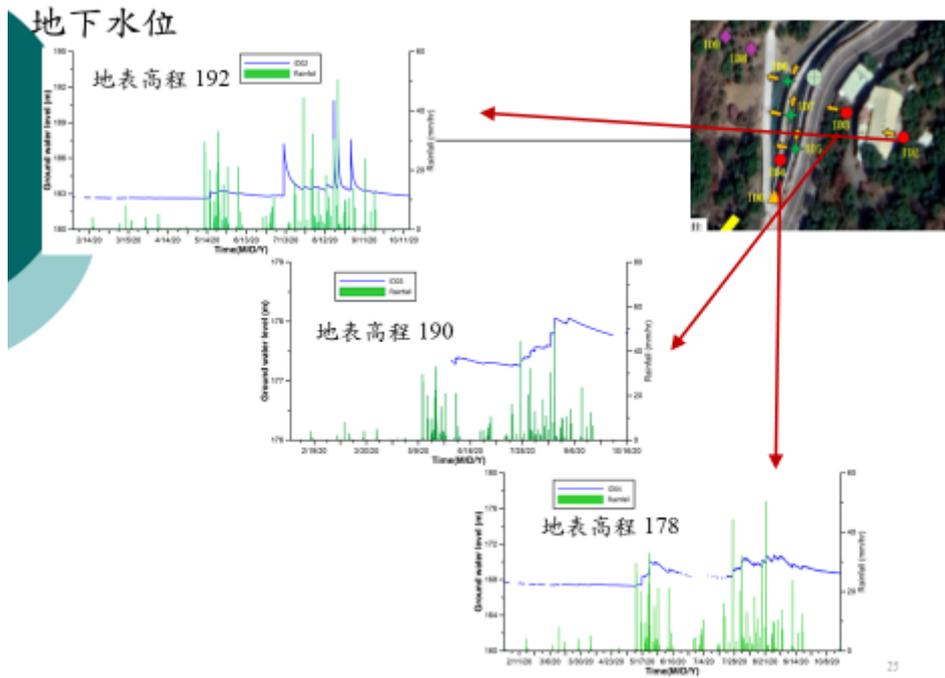


23

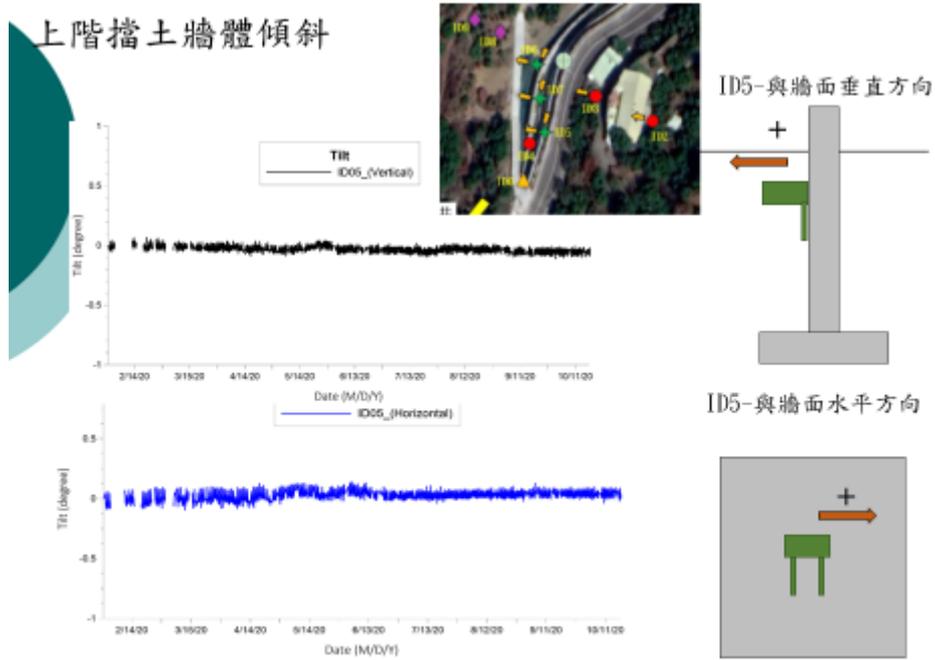
## 南市道175線場址監測系統配置



ID	內含感測器	水位孔深度(m)	水位孔高程(m)	設置位置
0	雨量計	-	-	路旁
2	水位計+傾斜儀	20	197	上邊坡
3	水位計+傾斜儀	30	190	上邊坡
4	水位計+傾斜儀	30	178	擋土牆基礎
5	雙向傾斜儀	-	-	上層擋土牆
6	雙向傾斜儀	-	-	下層擋土柱
7	雙向傾斜儀	-	-	中層擋土牆
8	含水量計	-	-	下邊坡
9	含水量計	-	-	下邊坡

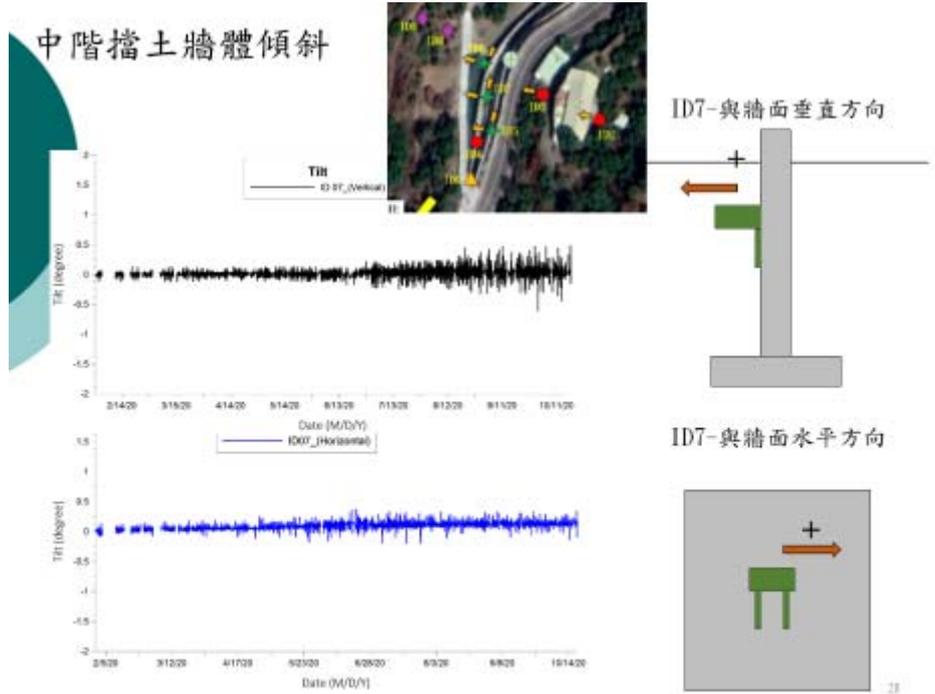


### 上階擋土牆體傾斜

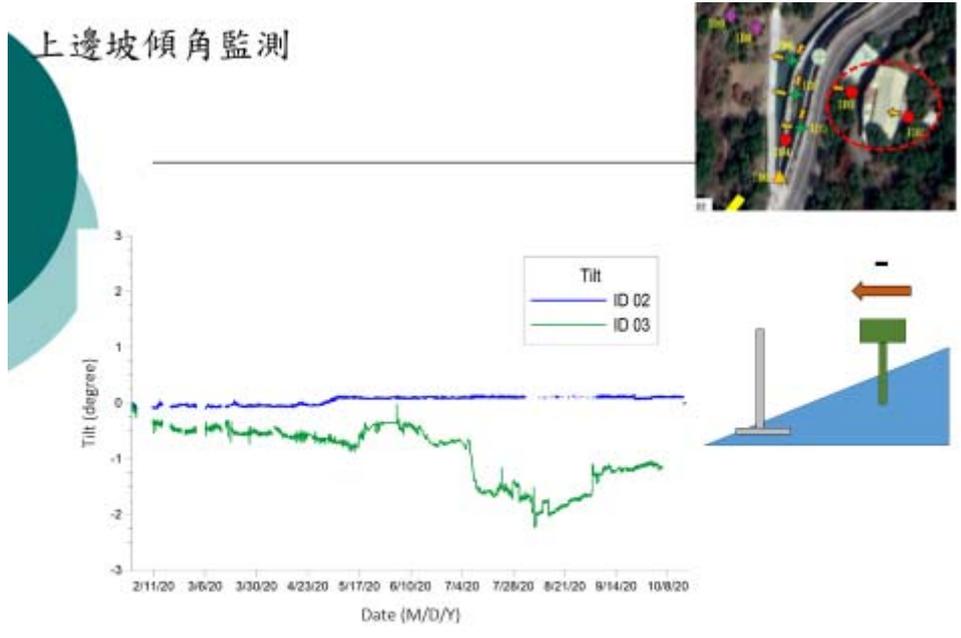
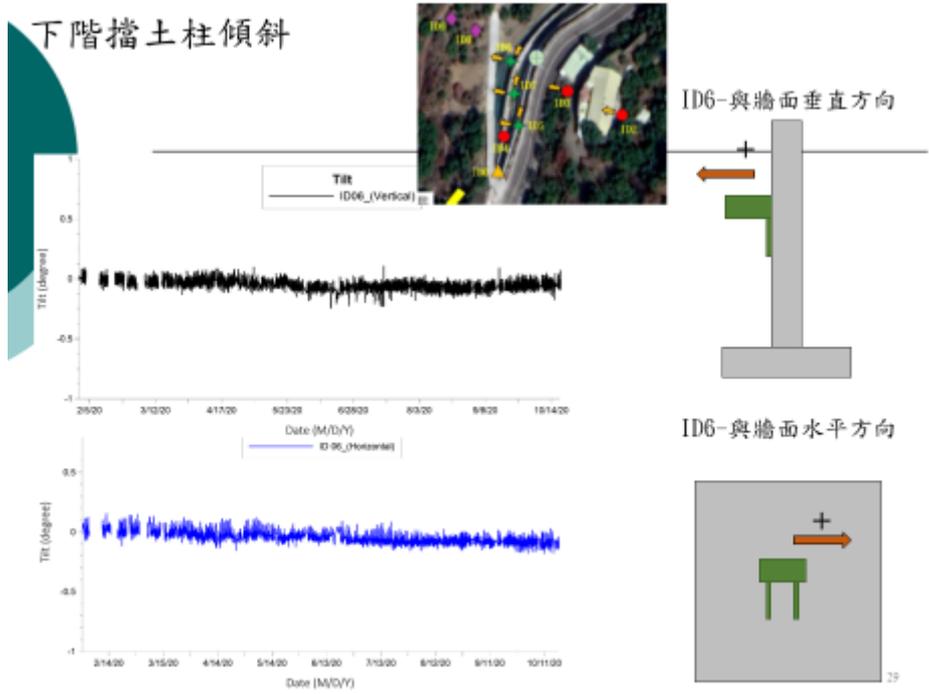


27

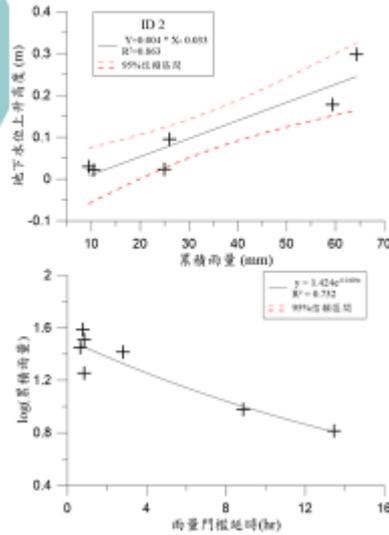
### 中階擋土牆體傾斜



28



# 南市道175線50.5k場址 崩積層地下水位變化與降雨特徵推估模式

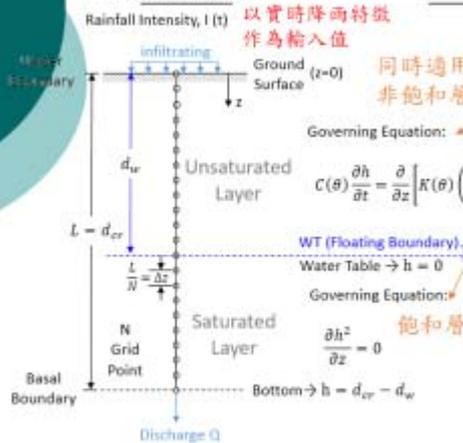


- 場址為本年度增設，且無顯著降雨事件
- 地下水位變化與降雨特徵相關性，仍有待長期監測資料驗證

基於非飽和入滲模擬基礎加入飽和層  
並設定符合實際水力行為之上/下邊界

## 解析解下時間域孔隙水壓推估模式

### ➢ FDM數值模型



### ➢ 孔隙材料流動控制方程式(1D Richard's eq.)

in FDM form:

$$C_i^{t+\Delta t} \frac{h_i^{t+\Delta t} - h_i^t}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left[ K_{i+1/2}^{t+\Delta t} \left( \frac{h_{i+1}^{t+\Delta t} - h_i^{t+\Delta t}}{\Delta z} \right) - K_{i-1/2}^{t+\Delta t} \left( \frac{h_i^{t+\Delta t} - h_{i-1}^{t+\Delta t}}{\Delta z} \right) \right]$$

Governing Equation:  $C(\theta) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right]$

• 假設:

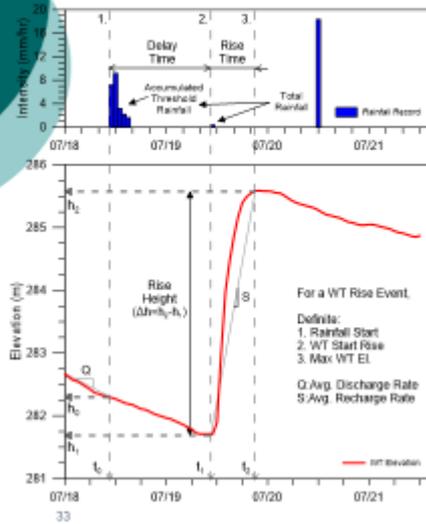
1. 土層為均質材料，且僅考慮一維垂直方向降雨入滲行為
2. 初始壓力水頭隨深度呈線性分佈
3. 降雨最大入滲速率等於飽和滲透係數(大於即發生地表逕流)
4. 降雨事件後，表層土壤體積含水量隨時間增加而遞減
5. 短期內地下水滲漏量Q為一時間常數

Van Genuchten (1980):

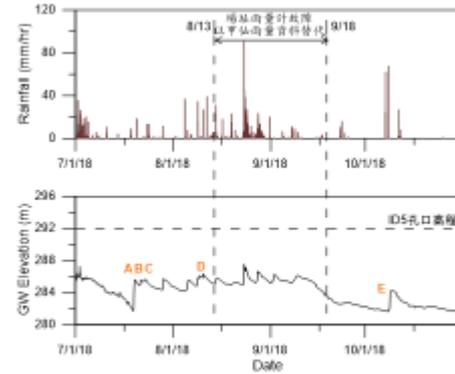
$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + |\alpha h|^n \right]^m} \quad k(h) = k_s S_e^{0.5} + \left[ 1 - \left( 1 - S_e \frac{1}{w} \right)^m \right]^2$$

# 監測數據與地下水位抬升事件定義

降雨地下水位抬升事件定義



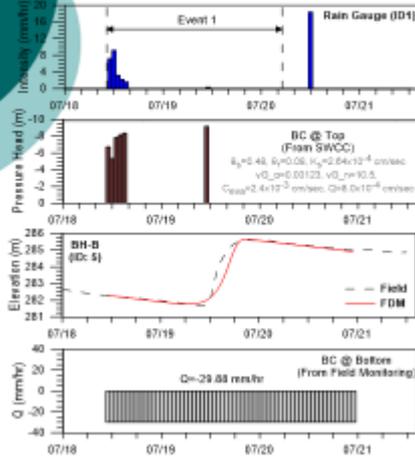
2018年7月至10月雨量與崩積層自由含水層水位變化



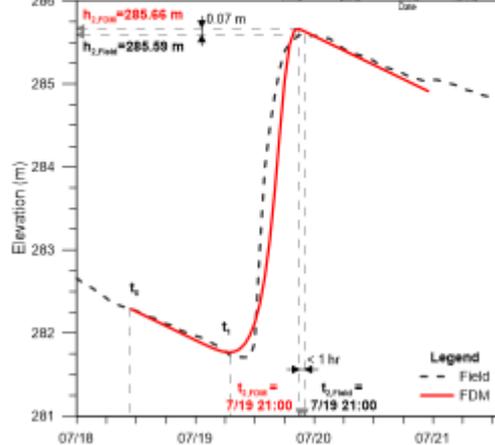
共有14地下水水位抬升事件，以Event A準定FDM模型

# 單孔水位井擬合成果

水力邊界條件

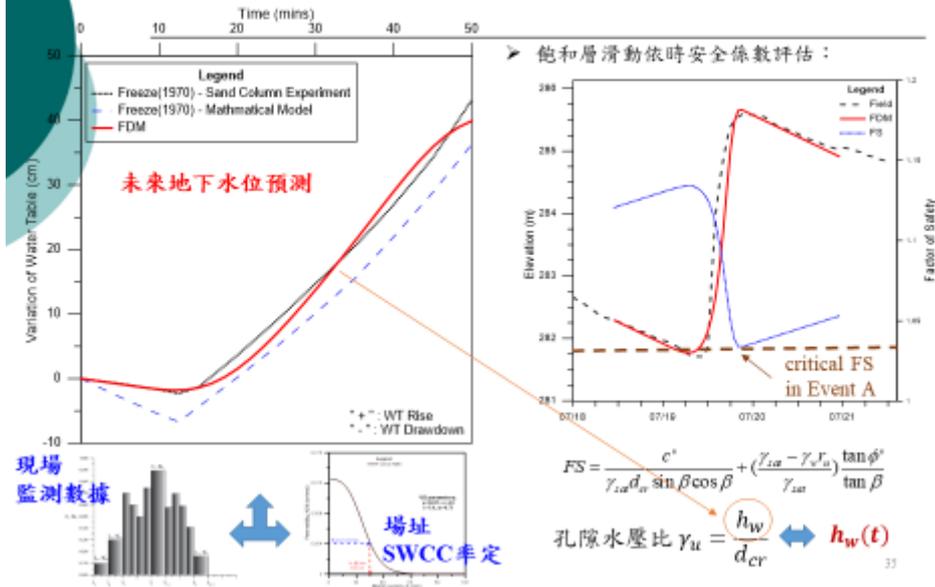


Event A FDM擬合成果

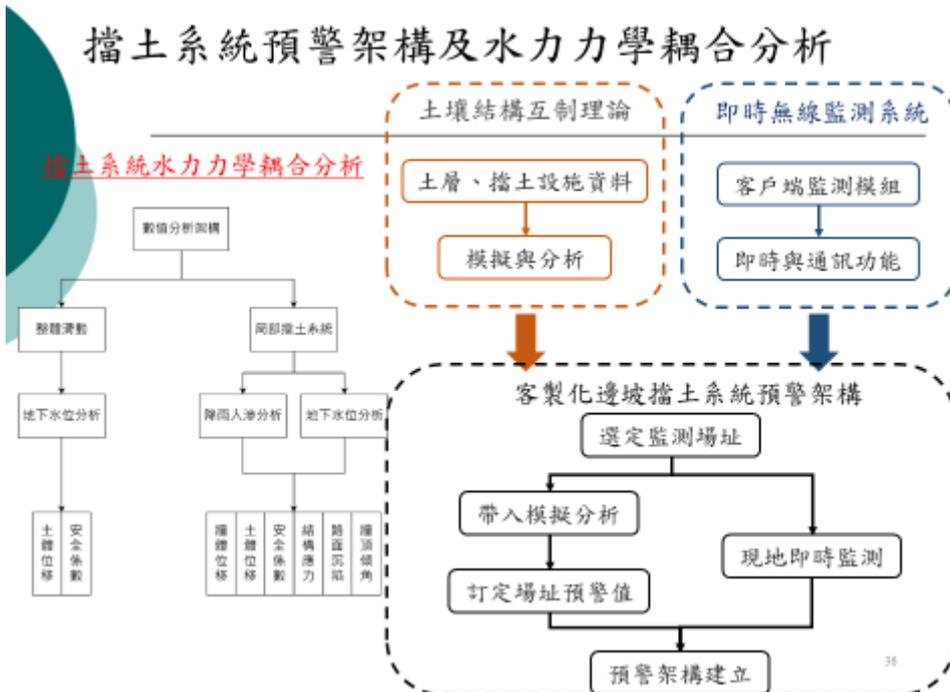


$k_2 = 2.64 \times 10^{-4} \cong 9.5 \text{ mm/hr}$  → 當降雨強度大於 $k_2$ 將產生地表逕流，此時地表水頭為零。 34

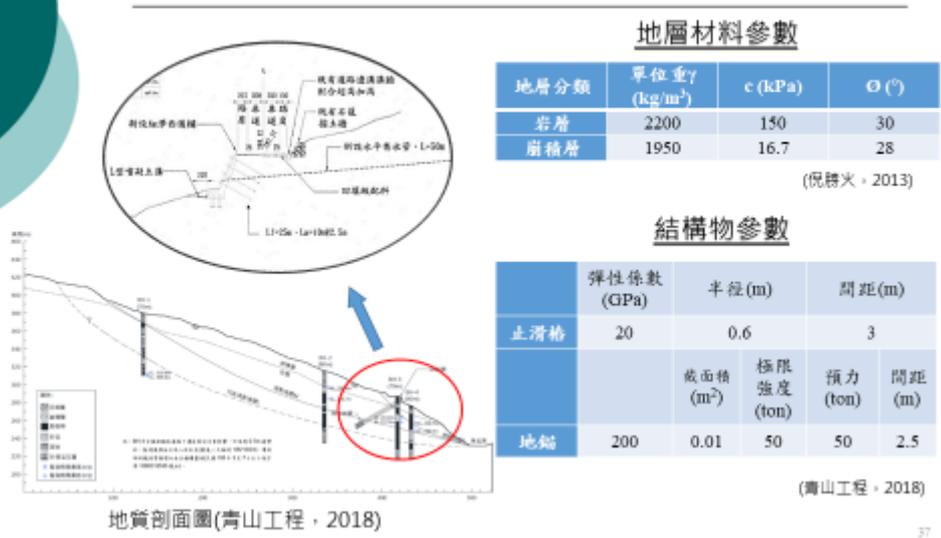
## 飽和層滑動依時預警架構



## 擋土系統預警架構及水力力學耦合分析



# 台20線52k場址幾何與材料參數



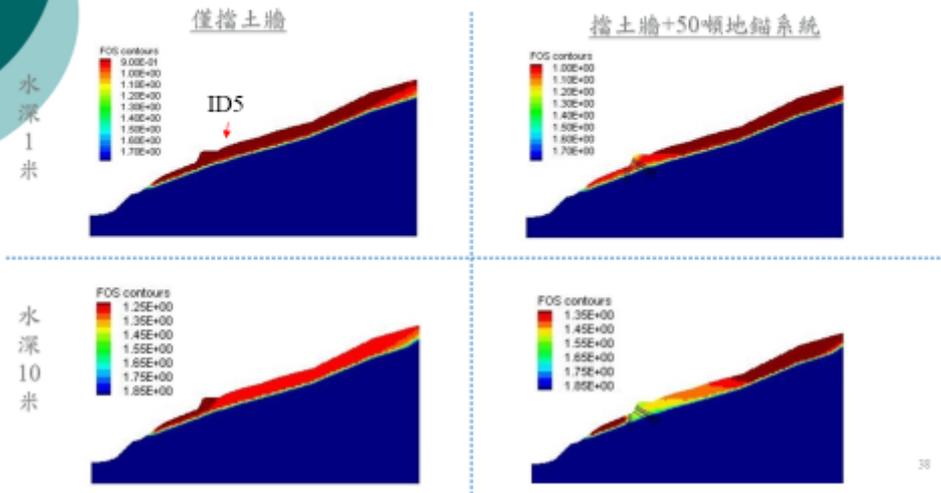
37

# 台20線邊坡擋土系統數值分析架構:總體滑動分析



**目的**

探討飽和土層因地下水壓上升，引致邊坡不穩定時，整體邊坡可能滑動區域。  
分析變數：地下水位面、擋土結構物參數



38

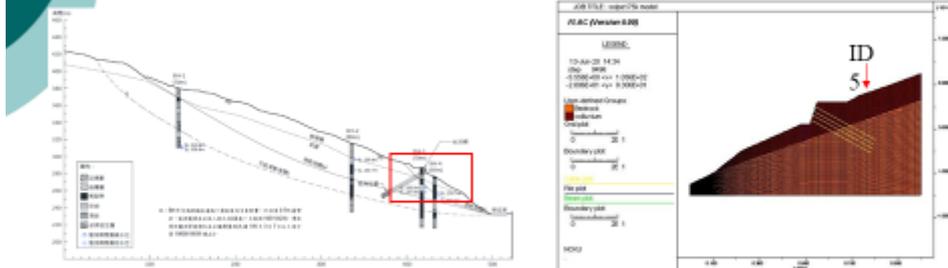
## 邊坡擋土系統數值分析架構



### 局部擋土系統穩定分析-地下水位

#### 目的

探討深層土壤因地下水位上升，引致擋土結構物區域不穩定時，臨界滑動面之安全係數、擋土結構物之位移情形與受力。  
分析變數：地下水位面、擋土結構物參數



#### 分析變數

- ▶ 地下水位：10、8、6、4、2 (m)
- ▶ 地錨極限強度：50、25、10、5 (ton)

39

## 邊坡擋土系統數值分析架構

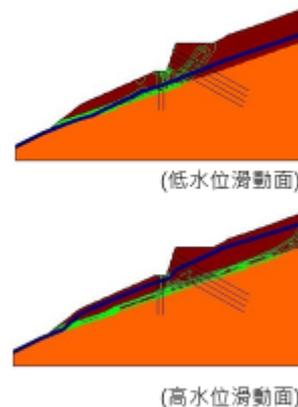
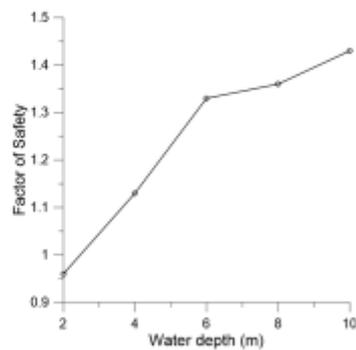


### 局部擋土系統穩定分析 -地下水位

#### 分析結果

- ▶ 以剪應變率(shear strain rate)等值線圖表示臨界滑動面輪廓

#### 設計條件分析



破壞型式：深層滑動  
並於水位上升，滑動面向上延伸

40

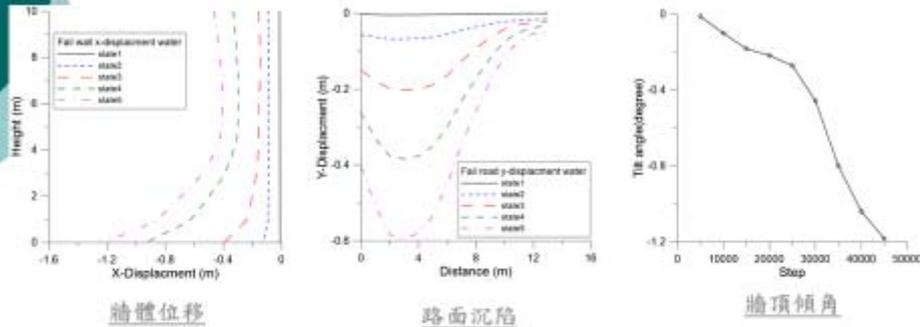


### 邊坡擋土系統數值分析架構

### 破壞狀態-位移發展

局部擋土系統穩定分析  
地下水位

安全係數小於1.0狀態(水位深度2米)→紀錄逐漸滑動網格評估破壞模式

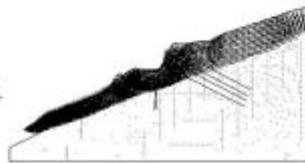


牆體位移

路面沉降

牆頂傾角

破壞位移圖



41

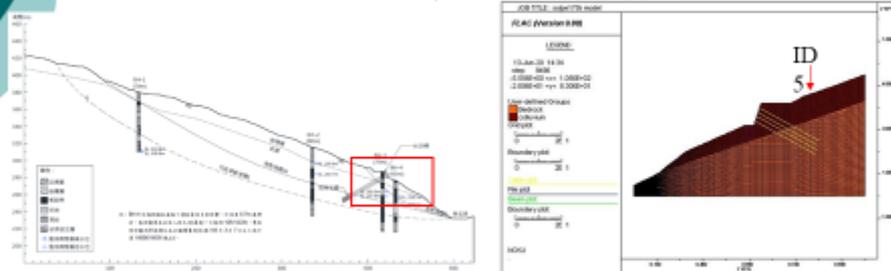
### 邊坡擋土系統數值分析架構

局部擋土系統穩定分析-降雨入滲



#### 目的

探討淺層土壤因降雨入滲，引致擋土結構物區域不穩定時，  
臨界滑動面之安全係數、擋土結構物之位移情形與受力。  
分析變數：降雨入滲延時、擋土結構物參數



#### 分析變數

- 降雨延時：6、12、24、48、72 (hr)
- 地錨極限強度：50、25、10、5 (ton)

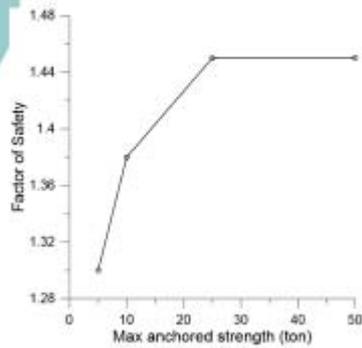
42

## 邊坡擋土系統數值分析架構

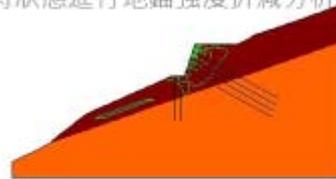
局部擋土系統穩定分析  
降雨入滲

### 地錨折減分析

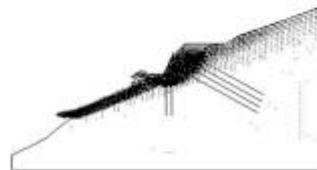
以安全係數最接近1.0之降雨入滲72小時狀態進行地錨強度折減分析



安全係數



臨界滑動面



破壞位移圖

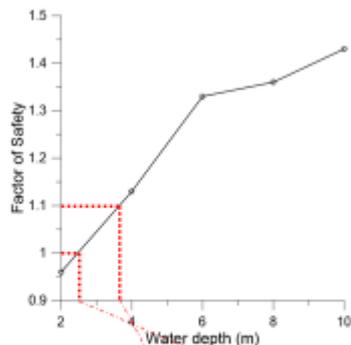


43

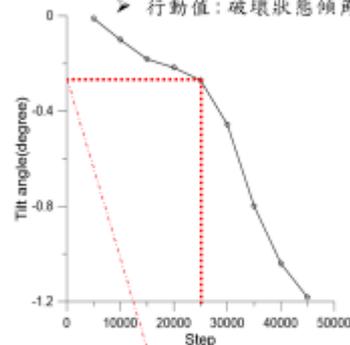
## 邊坡擋土系統數值分析架構: 場址警戒值訂定

### 警戒值訂定

- ▶ 預警值: 安全係數1.1對應水位
- ▶ 警戒值: 安全係數1.0對應水位
- ▶ 行動值: 破壞狀態傾角漸變檢核



地下水水位分析結果



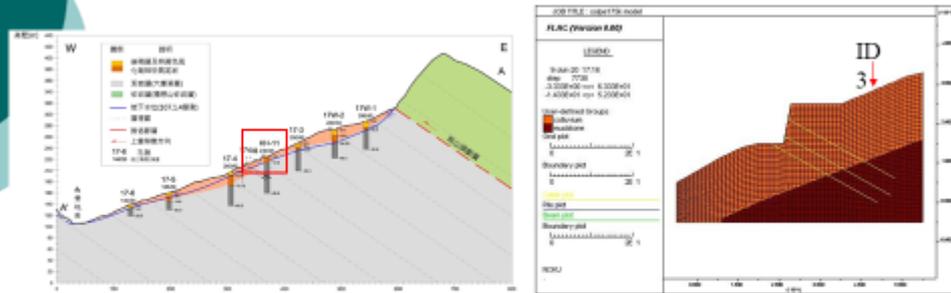
地下水水位2米，破壞時繪頂傾角漸變圖

預警值	警戒值	行動值
地下水水位3.65米	地下水水位2.50米	繪頂傾角0.27度

44



# 南市道175線場址: 局部擋土系統分析



## 分析變數

- 地下水位：16、10、8、6、4、2 (m)
- 降雨延時：6、12、24、48、72 (hr)
- 地錨極限強度：50、25、10、5 (ton)

47

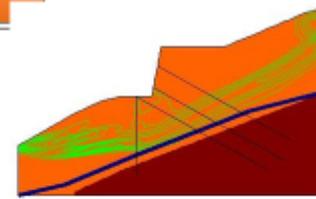
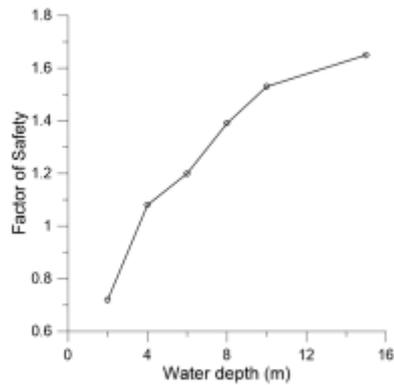
# 南市道175線場址地下水位引致不穩定分析



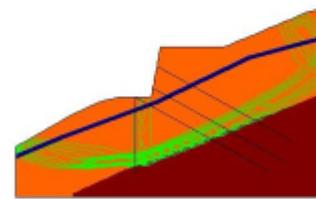
## 分析結果

滑動面

設計條件分析



(低水位滑動面)



(高水位滑動面)

破壞型式：深層滑動

48

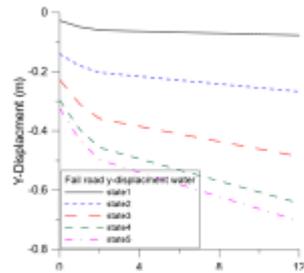
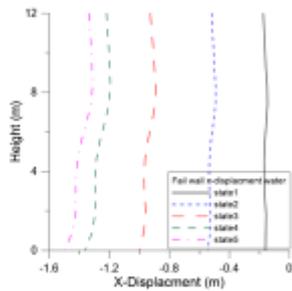
## 南市道175線場址地下水位引致不穩定分析



### 破壞狀態-位移發展

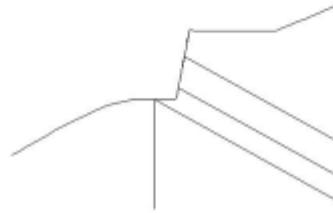
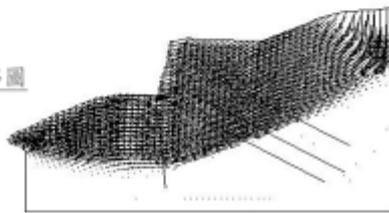
➢ 地下水位深度2米狀態 (FS < 1.0)

繪體位移



路面沉陷

破壞位移圖



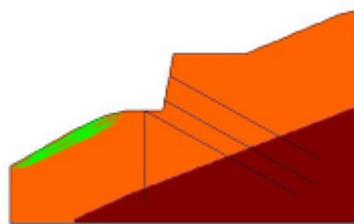
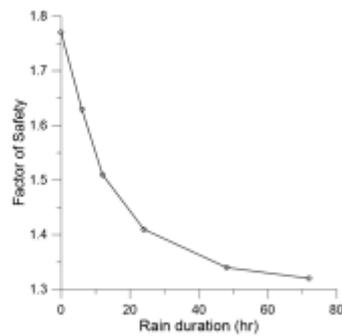
## 南市道175線場址降雨入滲穩定分析



### 降雨入滲分析結果

➢ 以台20現場址之水文參數進行分析

設計條件分析



滑動面

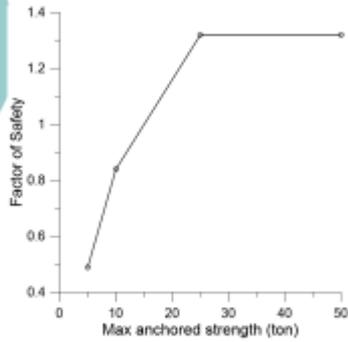
破壞型式：淺層滑動

# 南市道175線場址降雨入滲穩定分析

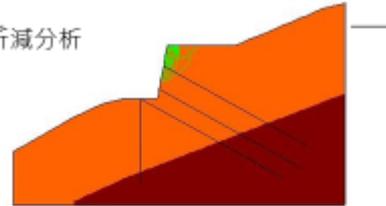


## 地錨折減分析

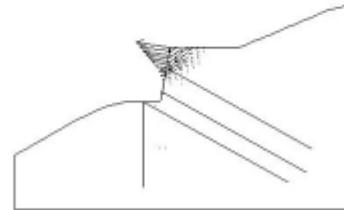
以降雨入滲72小時狀態進行地錨強度折減分析



安全係數



臨界滑動面



破壞位移圖

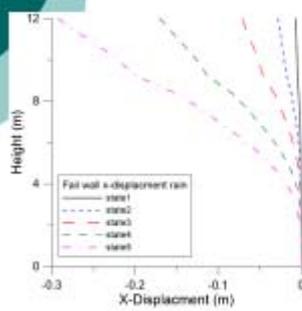
破壞型式：局部破壞

51

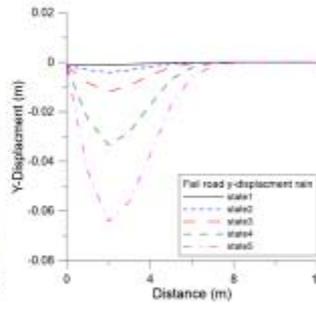
# 南市道175線場址 降雨入滲穩定分析

## 破壞狀態-位移發展

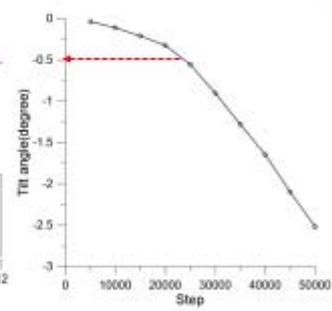
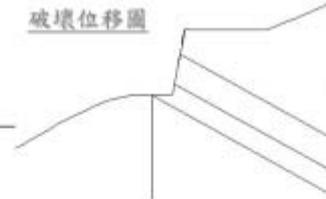
破壞位移圖



牆體位移



路面沉陷



牆頂傾角

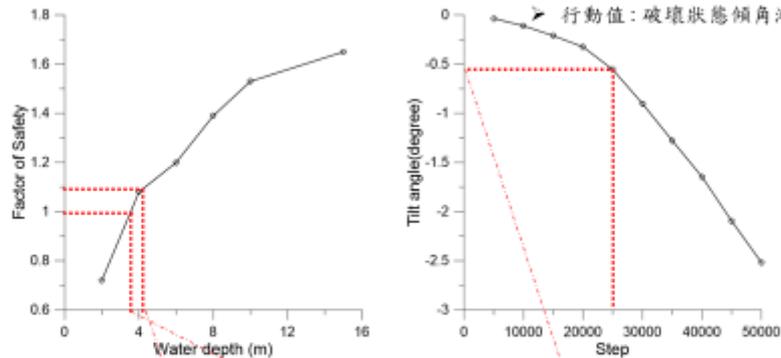
52

## 南市道175線場址警戒值訂定



### 警戒值訂定

- ▶ 預警值：安全係數1.1對應水位
- ▶ 警戒值：安全係數1.0對應水位
- ▶ 行動值：破壞狀態傾角漸變檢核



地下水位分析結果

降雨入滲72地錨強度折減  
破壞時牆頂傾角漸變圖

預警值	警戒值	行動值
地下水位深度4.3米	地下水位深度3.5米	牆頂傾角0.5度

53

## 擋土支撐系統分析彙整



1. 針對本研究分析之兩處飽和層滑動場址，破壞因素為地下水位上升，降雨入滲僅對對擋土系統周圍表層影響較大。
2. 考慮土壤結構互制效應，場址三階段客製化預警門檻為：
  - 台20線預警值：水深3.65米、警戒值：水深2.50米、行動值：傾角0.27度。
  - 南市道175線預警值：水深4.30米、警戒值：水深3.50米、行動值：傾角0.5度。
3. 就現有兩處場址，邊坡擋土系統僅能穩定鄰近道路區域穩定性。

54

## 結語

### ▶ 本年度計畫完成項目：

- 淺層滑動耦合分析預警系統更新
- 現有淺層滑動監測場址維護與模組精進
- 水位變化與降雨特徵關聯分析
- 深層滑動場址極限平衡分析反算與驗證
- 擋土系統水力學耦合分析驗證
- 精進雲端依時預警系統架構

### ▶ 建議

- ✓ 場址相關建議預警值為學術研究成果，現階段不宜作為官方預警值，且使用時須有正確理解。
- ✓ 場址選定不易，台20線場址本年度完成整治，處於穩定狀態，雖增設南市道175場址，但雨季降雨事件偏低，系統實際應用仍需更多案例進行測試，後續計畫若有延續，可延長監測期程，更新此場址時間域水壓推估模式。
- ✓ 雲端平台預警訊息目前以E-mail作為主要自動訊息推撥方式，後續可持續朝使用者友善之目的，整合更多通訊程式如LINE、FB等主流手機APP，並依使用者等級進行預警推撥訊息分類。

33

簡報完畢，敬請指教

34