

111-018-7D02

IOT-110- H1C003

公路邊坡場址客製化依時預警 系統精進與維護



交通部運輸研究所

中華民國 111 年 3 月

111-018-7D02

IOT-110- H1C003

公路邊坡場址客製化依時預警 系統精進與維護

著者:周仕勳、賴瑞應、曾文傑、張文忠、黃安斌

交通部運輸研究所

中華民國 111 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護
/ 周仕勳, 賴瑞應, 曾文傑, 張文忠, 黃安斌
著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究
所, 民 111. 03
面 ; 公分
ISBN 978-986-531-370-8(平裝)

1. CST: 公路管理 2. CST: 運輸系統

557

111000741

公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護

著 者：周仕勳、賴瑞應、曾文傑、張文忠、黃安斌

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 (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 111 年 3 月

印 刷 者：000000000

版(刷)次冊數：初版一刷 60 冊

書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：300 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 臺中市中區中山路 6 號・電話：(04)2226-0330

GPN：1011100137 ISBN：978-986-531-370-8 (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。

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：公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號 110- H1C003
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：04-26587120 傳真號碼：04-26571329	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：周仕勳 研究人員：張文忠、黃安斌、吳博巧、陳宜昕、蔡承學 地址：臺南市東區大學路1號 聯絡電話：06-2080172	研究期間 自 110 年 3 月 至 110 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>本計畫延續前期對公路邊坡與擋土系統因降雨引致之滑動破壞研究，進行解析法分析，並搭配無線土層與結構反應監測模組，精進適用於土層邊坡之客製化公路土壤邊坡滑動預警架構，適用對象依滑動機制，區分為淺層崩塌及飽和土層滑動，並以體積含水量與地下水壓作為預警，指標於分析架構中具依時特性。</p> <p>本(110)年度持續現地監測與預測模式測試，應用場域包含甲仙攔河堰通達道路邊坡、台 20 線 50.7k、台 20 線 52k 與南市道 175 線 25.5k，共 4 處。針對運研所發展之邊坡無線監測系統進行精進，包含模組無線傳輸與耗電優化，進一步提升監測硬體省電與穩定性；雲端平台方面，基於使用者友善化方向，開發虛擬儀表與擴充主動通知功能，結合社群 APP 軟體，輔助公路養護單位於風險路段管理自動發布預警訊息。且彙整歷年公路土壤邊坡監測長期研究成果與實務執行經驗，歸納降雨觸發公路邊坡與擋土系統滑動之客製化依時預警系統標準流程，包含破壞分析、依時水力耦合分析與無線監測選用原則。</p> <p>研究成果效益及應用：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 成功監測淺層崩塌事件，驗證淺層水力耦合分析架構，成果預計投稿國際期刊。 2. 發展之解析架構可提高預警準確與時效性，作為智慧雲端化邊坡安全管理系統之監測先導。 3. 標準流程可供邊坡養護單位客製化依時預警系統之參據，應用於高風險場址。 			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
111 年 3 月	300	350	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。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密條件：<input type="checkbox"/>年 <input type="checkbox"/>月 <input type="checkbox"/>日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，<input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
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**

TITLE: Maintenance and improvement of the customized time-dependent warning system for highway slopes			
ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER 110- H1C003
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jui-Ying Lai PROJECT STAFF: Wen-Chieh, Tseng PHONE: (04) 26587120 FAX: (04) 26571329			PROJECT PERIOD FROM March 2021 TO December 2021
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation TY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Shih-Hsun Chou CO-PROJECT INVESTIGATOR: Wen-Jong Chang & An-Bin Huang, Po-Chiao Wu, Yi-Hsin Chen, Cheng-Hsueh Tsai ADDRESS: No.1, University Road, Tainan City 701, Taiwan (R.O.C) PHONE: 886-06-2080172			
KEY WORDS: SLOPE FAILURE; WIRELESS SENSING MODULE; COUPLED HYDRO-MECHANICAL ANALYSIS; TIME-DEPENDENT WARNING SYSTEM; INTERNET-OF-THINGS			
ABSTRACT: <p>The project is a continuation of the previous study on rainfall-induced sliding on highway slopes and retaining system. Analytic method was employed, coupled with wireless strata & structure responses monitoring module to improve on the applicability of a customized early-warning framework for highway slope slide to soil slopes. The scope of application is categorized, by slide mechanisms, in shallow failures and saturated landslides. Volumetric water content and groundwater variation are adopted as the time-dependent warning index.</p> <p>On-site monitoring and prediction model testing continued in this year in the applied fields including the slope of the access road to Jiaxian Weir, 50.7K and 52K on Route Tai-20, and 25.5K on Tainan City Route 175. the wireless monitoring module for slopes developed by IOT was improved, including optimization of transmission and power consumption; power consumption and stability of the monitoring hardware were further improved. Regarding Cloud platform, in line with the user-friendly concept, virtual instruments and active notification function were developed, which, working with social networking App, assists the highway maintaining taskforces in automatically issuing early warning messages. In addition, we summarized the historical, long-term research results and practical implementation experience of highway soil slope monitoring, and the standard operating procedure of the customized time-dependent early warning system for the sliding of the highway slope and the retaining system triggered by rainfall, including failure mode analysis, time-dependent hydro-mechanical coupling analysis, and selection principle of wireless monitoring.</p> <p>Benefits and applications of research results:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Successfully monitored shallow slope failure events, verified the shallow hydro-mechanical coupling analysis framework, with the outcomes expected to be submitted to the international journals. 2. The developed analytical framework can improve the accuracy and timeliness of early warning and serve as the monitoring leader of the intelligent Cloud-based slope safety management systems. 3. The standard operating procedure can be used as a reference for the customized time-dependent early warning system at highway maintenance units and applied in high-risk sites. 			
PUBLICATION DATE	NUMBER OF PAGES	PRICE	ACCESSIBILITY
March 2022	300	350	Publications of confidentiality are not disclosed. For ordinary publications, any public agency, organization of public welfare or school can contact the Institute for free access, and any person or private group can purchase at set prices.
CLASSIFICATION: <input type="checkbox"/> Restricted access <input type="checkbox"/> Secret <input type="checkbox"/> Top secret <input type="checkbox"/> Absolute secret (Condition of declassification/restriction removal: <input type="checkbox"/> To declassify on [date] <input type="checkbox"/> To declassify upon publication <input type="checkbox"/> To declassify when attachments are removed for filing <input type="checkbox"/> To declassify upon finishing of job or meeting <input type="checkbox"/> Declassification to be decided <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED			
Remarks: Conclusions and recommendations of this study are not necessarily the view of the Ministry of Transportation and Communications.			

公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護

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 緒論	1-1
1.1 研究計畫之背景、目的及重要性	1-1
1.2 研究範圍與對象	1-4
1.3 研究內容與項目	1-6
1.4 預期成果、效益及應用	1-8
1.5 邊坡依時預警系統發展歷程	1-9
第二章 研究方法與文獻回顧	2-1
2.1 研究方法	2-1
2.2 國內外重要參考文獻	2-4
2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警	2-10
第三章 無線土層監測系統架構與精進	3-1
3.1 無線監測系統架構與演進	3-1
3.2 土層水文與運動反應量測	3-8

3.3 土層無線監測模組組成.....	3-13
3.4 邊坡與擋土系統無線監測模組.....	3-18
3.5 網頁式雲端整合即時監測平台.....	3-25
3.6 模組無線傳輸與模組耗電優化.....	3-32
第四章 淺層滑動場址監測成果.....	4-1
4.1 甲仙邊坡場址說明.....	4-2
4.2 甲仙場址監測資料.....	4-3
4.3 台 20 線 50.7k 邊坡場址及監測資料.....	4-8
4.4 台 20 線 50.7k 邊坡淺層崩塌監測成果.....	4-15
第五章 飽和土層滑動監測場址監測成果.....	5-1
5.1 台 20 線 52k 場址監測資料.....	5-3
5.2 南市道 175 線 25.5k 監測場址監測資料.....	5-8
5.3 水位與降雨特徵關聯分析精進.....	5-20
第六章 公路邊坡依時預警系統標準流程.....	6-1
6.1 土壤邊坡破壞模式分析.....	6-3
6.2 依時水力力學耦合分析.....	6-5
6.3 無線感測模組選用原則.....	6-50
第七章 結論與建議.....	7-1
7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-2
7.3 預期效益與應用情形.....	7-3

參考文獻.....	參-1
附錄一 期中審查意見處理情形表.....	附 1-1
附錄二 期末審查意見處理情形表.....	附 2-1
附錄三 台 20 線 52k 雲端監測平台操作說明.....	附 3-1
附錄四 期末報告簡報資料.....	附 4-1

圖目錄

圖 1.1 曾文工務段系統推廣說明會情形(110 年 8 月 31 日拍攝).....	1-14
圖 1.2 增設台 20 線道路下邊坡土壤表層傾斜儀一組.....	1-14
圖 2.1 客製化依時預警系統精進研究流程圖.....	2-2
圖 2.2 邊坡破壞有效應力路徑變化.....	2-6
圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖.....	2-7
圖 2.4 典型土壤入滲分析結果.....	2-7
圖 2.5 地表邊坡預警監測系統.....	2-9
圖 2.6 典型的土壤含水量特徵曲線.....	2-11
圖 2.7 非飽和滲流分析結果比較.....	2-13
圖 2.8 垂直入滲補注地下水流試驗結果.....	2-14
圖 2.9 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....	2-15
圖 2.10 飽和層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖.....	2-17
圖 2.11 飽和層無限邊坡滑動應力狀態.....	2-18
圖 2.12 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....	2-19
圖 2.13 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念.....	2-20
圖 2.14 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念.....	2-20
圖 2.15 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....	2-21
圖 3.1 系統架構示意圖.....	3-2
圖 3.2 開源之嵌入式硬體控制平台.....	3-3
圖 3.3 運研所土層無線監測系統初期(104 至 105 年度)電子模組.....	3-4
圖 3.4 前期圖形化使用者界面 GUI.....	3-4

圖 3.5 運研所土層無線監測系統中期(106 至 107 年度)電子模組.....	3-5
圖 3.6 雲端資料庫即時顯示頁面.....	3-6
圖 3.7 運研所現行土層無線監測系統電子模組.....	3-7
圖 3.8 新式類比輸出土壤電容水份計.....	3-9
圖 3.9 新式類比輸出土壤電容水份計校正結果.....	3-10
圖 3.10 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較.....	3-11
圖 3.11 傾斜儀類比電壓比例輸出標定.....	3-11
圖 3.12 雨量計器示值校正.....	3-13
圖 3.13 邊坡無線監測系統運作示意圖.....	3-14
圖 3.14 中華電信 IOT 大平台雲端資料庫顯示頁面.....	3-18
圖 3.15 中華電信 IOT 大平台專案資料庫頁面.....	3-18
圖 3.16 土層監測模組外構.....	3-20
圖 3.17 防水電子盒內部配置.....	3-20
圖 3.18 液位計實體與校正結果.....	3-22
圖 3.19 擋土牆傾斜儀架設示意.....	3-23
圖 3.20 簡易雨量筒架設示意.....	3-24
圖 3.21 場址雨量計與鄰近測站同一降雨事件之降雨強度比較.....	3-24
圖 3.22 雲端即時監測平台頁面.....	3-25
圖 3.23 雲端即時監測平台架構示意圖.....	3-26
圖 3.24 雲端平台即時顯示資訊精進架構說明(1/2).....	3-28
圖 3.25 雲端平台即時顯示資訊精進架構說明(2/2).....	3-28
圖 3.26 自動化預警訊息發佈運作架構.....	3-29
圖 3.27 自動化預警訊息發佈至 LINE 通訊群組.....	3-30

圖 3.28	hicloud CaaS 虛擬主機排程開、關機設定頁面.....	3-31
圖 3.29	Window shell 開機時啟動之 StartUp 功能設定頁面.....	3-32
圖 3.30	網頁式雲端平台後端程式自動重啟示意.....	3-32
圖 3.31	4G/LTE 無線網路模組 (Sim-7500SA).....	3-34
圖 3.32	LoRa 無線電模組.....	3-35
圖 3.33	伺服器端主動式資料蒐集流程.....	3-36
圖 3.34	LoRa 無線電模組資料傳送架構.....	3-38
圖 4.1	甲仙場址監測模組相對位置圖.....	4-2
圖 4.2	甲仙場址監測站點周遭環境.....	4-3
圖 4.3	甲仙場址 Node0 體積含水量量測結果.....	4-4
圖 4.4	甲仙場址 Node1 體積含水量量測結果.....	4-5
圖 4.5	甲仙場址 Node2 體積含水量量測結果.....	4-5
圖 4.6	甲仙場址 Node3 體積含水量量測結果.....	4-6
圖 4.7	甲仙場址地表傾斜角監測結果.....	4-7
圖 4.8	土壤表層傾斜角量測方向.....	4-7
圖 4.9	新設台 20 線 50.7k 監測場址相對位置.....	4-8
圖 4.10	台 20 線 50.7k 邊坡土樣.....	4-9
圖 4.11	台 20 線 50.7k 邊坡 110 年 4 月地貌(1/2).....	4-10
圖 4.12	台 20 線 50.7k 邊坡 110 年 4 月地貌(2/2).....	4-10
圖 4.13	台 20 線 50.7k 邊坡監測點配置說明.....	4-11
圖 4.14	台 20 線 50.7k 邊坡各監測模組完工照.....	4-12
圖 4.15	台 20 線 50.7k ID1 體積含水量變化.....	4-13
圖 4.16	台 20 線 50.7k ID2 體積含水量變化.....	4-13

圖 4.17 台 20 線 50.7k ID3 體積含水量變化	4-14
圖 4.18 台 20 線 50.7k ID1 邊坡地表傾角變化	4-14
圖 4.19 台 20 線 50.7k ID2 邊坡地表傾角變化	4-14
圖 4.20 台 20 線 50.7k ID3 邊坡地表傾角變化	4-15
圖 4.21 台 20 線 50.7k 邊坡 4/14 邊坡現況.....	4-16
圖 4.22 台 20 線 50.7k 邊坡 6/7 邊坡現況(6/5 發生崩塌).....	4-17
圖 4.23 台 20 線鄰近 50.7k 邊坡未改善區域崩塌現象.....	4-17
圖 4.24 台 20 線 50.7k 原傾倒之重力式擋土牆滲水狀況	4-18
圖 4.25 台 20 線 50.7k ID2 模組崩塌後狀況	4-19
圖 4.26 台 20 線 50.7k ID3 模組崩塌後狀況	4-20
圖 4.27 台 20 線 50.7k ID1 模組 6/7 狀況	4-21
圖 4.28 台 20 線 52k 雨量計模組 6 月份監測數據.....	4-22
圖 4.29 台 20 線 50.7k ID2 6/5 崩塌事件監測成果	4-24
圖 4.30 台 20 線 50.7k ID3 6/5 崩塌事件監測成果	4-26
圖 4.31 台 20 線 50.7k 2021/10/15 邊坡整治現況	4-27
圖 5.1 台 20 線 52k 場址位置圖	5-3
圖 5.2 台 20 線 52k 監測儀器配置圖	5-5
圖 5.3 台 20 線 52k ID02 地下水位監測數據	5-6
圖 5.4 台 20 線 52k ID05 地下水位監測數據	5-6
圖 5.5 台 20 線 52k ID02 傾斜角監測數據(道路上邊坡).....	5-7
圖 5.6 台 20 線 52k ID03 傾斜角監測數據(道路下邊坡).....	5-7
圖 5.7 台 20 線 52k ID6 擋土牆垂直方向傾角監測數據	5-8
圖 5.8 台 20 線 52k ID6 擋土牆水平方向傾角監測數據	5-8

圖 5.9 南市道 175 線 25.5k 場址地理位置圖.....	5-9
圖 5.10 南市道 175 線 25.5k 滑動塊體與監測點分佈圖.....	5-10
圖 5.11 南市道 175 線 25.5k 地質剖面圖.....	5-10
圖 5.12 南市道 175 線 25.5k 場址監測模組配置.....	5-11
圖 5.13 南市道 175 線 25.5k 場址監測模組現場架設圖(1/2).....	5-13
圖 5.14 南市道 175 線 25.5k 場址監測模組現場架設圖(2/2).....	5-14
圖 5.15 南市道 175 線 25.5k 場址 ID2 地下水位監測成果.....	5-15
圖 5.16 南市道 175 線 25.5k 場址 ID3 地下水位監測成果.....	5-16
圖 5.17 南市道 175 線 25.5k 場址 ID4 地下水位監測成果.....	5-16
圖 5.18 南市道 175 線 25.5k 上邊坡土壤表層傾角監測成果.....	5-17
圖 5.19 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID5)垂直牆體之傾角監測成果.....	5-17
圖 5.20 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID5)水平傾角監測成果.....	5-18
圖 5.21 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID6)垂直牆體之傾角監測成果.....	5-18
圖 5.22 南市道 175 線 25.5k 擋土柱頂(ID6)水平傾角監測成果.....	5-19
圖 5.23 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID7) 垂直牆體之傾角監測成果.....	5-19
圖 5.24 南市道 175 線 25.5k 牆底(ID7)水平傾角監測成果.....	5-20
圖 5.25 台 20 線 52k 場址累積雨量與岩層水位上升高度關係圖.....	5-21
圖 5.26 台 20 線 52k 場址崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖 ..	5-21
圖 5.27 台 20 線 52k 場址累積雨量與地下水位高度關係.....	5-22
圖 6.1 公路邊坡依時預警標準分析架構流程圖.....	6-2
圖 6.2 淺層崩塌與飽和層滑動塊體示意圖.....	6-4
圖 6.3 淺層水力耦合分析流程.....	6-6
圖 6.4 不同土壤之典型 SWCC 曲線.....	6-7

圖 6.5 Fredlund and Xing (1994)典型粉土 SWCC 擬合成果	6-11
圖 6.6 台 20 線 50.7k 一維非飽和入滲 FDM 模型	6-12
圖 6.7 台 20 線 50.7k 一維非飽和入滲分析成果.....	6-12
圖 6.8 台 20 線 50.7k 淺層水力耦合分析成果.....	6-14
圖 6.9 台 20 線 50.7k 體積含水量依時預警曲線應用說明 (25 公分處)	6-15
圖 6.10 台 20 線 50.7k 體積含水量依時預警曲線應用說明 (60 公分處)	6-16
圖 6.11 台 20 線 50.7k 淺層崩塌依時預警流程	6-17
圖 6.12 土壤類型對淺層崩塌水力耦合分析之影響.....	6-19
圖 6.13 坡角 β 對淺層崩塌耦合分析之影響.....	6-20
圖 6.14 基質吸力摩擦角 ϕ^b 對淺層崩塌耦合分析之影響.....	6-21
圖 6.15 飽和層水力耦合分析流程.....	6-23
圖 6.16 降雨特徵參數定義示意圖.....	6-24
圖 6.17 一維 FDM 入滲數值模型.....	6-26
圖 6.18 邊坡擋土系統數值分析流程圖.....	6-29
圖 6.19 台 20 線 52k 地下含水層水位觀測結果(2018 年 7 月至 12 月)	6-31
圖 6.20 台 20 線 52k 場址降雨事件下短期水位模擬成果(Event A)..	6-32
圖 6.21 台 20 線 52k 場址 2021 年 6 月份降雨事件.....	6-33
圖 6.22 2021 年 6 月份降雨事件擬合 FDM 模型水力邊界條件.....	6-33
圖 6.23 台 20 線 52k 場址 2021 年 6 月份降雨事件短期水位模擬成果	6-34
圖 6.24 台 20 線 52k 邊坡及擋土系統剖面圖.....	6-35
圖 6.25 台 20 線牆體與地錨示意圖.....	6-36

圖 6.26 台 20 線 52k 總體滑動數值模型.....	6-36
圖 6.27 台 20 線 52k 總體滑動分析結果.....	6-38
圖 6.28 台 20 線 52k 局部擋土系統模型模擬.....	6-39
圖 6.29 台 20 線 52k 局部擋土牆系統地下水位分析結果	6-39
圖 6.30 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位分析-位移圖	6-40
圖 6.31 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位分析-結構受力圖	6-41
圖 6.32 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位分析-逐步破壞圖	6-42
圖 6.33 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位引致破壞位移圖	6-43
圖 6.34 台 20 線 52k 分層含水量率定紀錄.....	6-43
圖 6.35 台 20 線 52k 水力參數率定結果.....	6-44
圖 6.36 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲分析結果	6-45
圖 6.37 台 20 線 52k 下邊坡整治後局部擋土牆系統降雨入滲分析結果	6-45
圖 6.38 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲地錨強度折減分析	6-45
圖 6.39 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲分析-結構受力圖	6-46
圖 6.40 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲引致位移圖	6-47
圖 6.41 時間域水壓推估模式獨立 exe 執行檔	6-49
圖 6.42 台 20 線 50.7k 邊坡依時安全係數計算示意圖.....	6-49
圖 6.43 公路邊坡依時預警系統無線感測模組選用原則.....	6-51
圖 6.44 110 年南市道 175 線 25.5k 現場進行災害復建工程施工照...	6-55
圖 6.45 南市道 175 線 25.5k 場址 ID3 監測模組遭人為破壞	6-56

表目錄

表 1-1 運輸研究所歷年與本計畫相關研究案列表	1-13
表 3-1 無線網路模組睡眠模式指令與耗電數據	3-34
表 4-1 淺層滑動場址 110 年度設備故障排除彙整表	4-1
表 4-2 台 20 線 50.7k 邊坡土樣阿太堡試驗結果	4-9
表 5-1 飽和土層場址 110 年度設備故障排除彙整表	5-2
表 5-2 台 20 線 52k 測站配置表	5-5
表 5-3 南市道 175 線 25.5k 場址模組配置總表	5-12
表 6-1 典型 SWCC 之 VG 擬合參數(基於 Fredlund and Xing, 1994)	6-9
表 6-2 台 20 線 50.7k 淺層水力耦合分析參數彙整	6-13
表 6-3 地層材料參數.....	6-29
表 6-4 擋土系統結構元素參數	6-30
表 6-5 Event A 最佳擬合參數	6-31
表 6-6 台 20 線 52k 場址警示監測指標整理	6-48
表 6-7 計畫歷年無線電通訊模組比較	6-53

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高度關聯性，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。本計畫以解析法分析並搭配無線土層與擋土結構反應監測模組，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，提高預警之準確與時效性，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，交通部運輸研究所(以下簡稱運研所，2014)^[10]以降雨特徵做為指標，少數案例已引進 CCD 攝影機、雨量計、GPS、地震儀 (運研所，2011)^[8]與地表運動及土層滑動監測(廖瑞堂等，2008)^[18]，但並未將地形、地質特徵與場址入滲行為一併考量。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，無法良好涵蓋氣候變遷造成極端降雨之邊坡破壞類型。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。整體而言，經驗法因具相當不確定性，且缺乏考慮邊坡場址及擋土系統差異，無法完全滿足重要路段預警減災策略擬定之需求。

以大區域降雨做為指標時，因雨量為破壞發生之間接指標，坡體內孔隙水壓累積或入滲造成表層土壤體積含水量上升之依時特性，受土

壤材料、地形幾何、邊坡水文特性與排水設施等因子影響，導致此類預警系統於部分高風險場址應用時，常流於保守或無法提供反應時間。整體而言，經驗法因簡單且資料較易取得，因此廣為使用，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，做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，且所得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，其一為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；其二為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模組化系統，對於推廣解析法為依據之公路邊坡降雨崩塌預警系統為重要關鍵。

本計畫針對公路因降雨觸發土層與擋土系統之滑動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，研發測試適用於邊坡土層與擋土系統之解析法依時預警模式。依多年計畫執行與實務應用經驗擬定標準流程，客製化高風險場址監測與對應警戒值，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式。依據上述，可歸納不同公路邊坡與擋土系統之客製化依時預警系統的標準

流程，包含場址破壞機制初步分析、降雨行為下邊坡依時穩定性分析，土層無線監測架構選用及主動通知內容，成果可供相關權責單位建立潛在滑動場址之依時預警系統，增進高風險、高關注場址預警之準確與時效性。

1.1.2 計畫目的

計畫係依據行政院(2015)^[2]災害防救白皮書之課題七：「建立潛在大規模崩塌防災警戒機制」，結合具有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。

降雨觸發破壞之評估方法，可概分為經驗法與解析法兩種。但經驗法因缺乏嚴謹之力學概念，具有相當不確定性，且無法考慮擋土支撐系統效應，導致其應用有所限制，急需發展輔助方法。解析法以嚴謹力學概念為基礎，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、材料力學行為及擋土支撐土壤結構互制之影響，探討破壞機制，藉以改善預警精度，於建立依時預警模式與減災設施規劃等有其必要，本計畫因採用依時水力力學耦合分析，並結合擋土支撐系統土壤結構互制分析，預測邊坡之滑動面及水力歷時反應，故預警精度、正確性、滑動時間及滑動位置皆可評估。利用不同複雜程度之解析法，建立以嚴謹力學概念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，提高預警之準確與時效性，以利災害預防及災後管理之決策參考。

前期進行之公路土壤邊坡崩塌無線感測網路模組發展，以地下水位面為分界，滑動面於水位面上、下之破壞機制不同，並依不同破壞機制選定預警指標。計畫發展之監測配置設計，可使用於邊坡表層與飽和土層滑動之公路土壤邊坡及擋土支撐系統。另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，

運研所現有土層滑動無線感測網路模組，係依據滑動特性所研發，具有低成本、安裝快速與無線化傳輸等特性，納入邊坡擋土支撐系統之監測與分析架構，可建立符合現地概況並貼近實務應用之依時預警系統。

本計畫整體執行之連貫性包括：

1. 不同土壤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。針對前期發展之公路土壤邊坡崩塌與擋土系統破壞監測無線感測網路模組，持續精進與穩定性驗證。
2. 前期無線感測網路模組，已涵蓋滑動面位於地下水位上、下之破壞機制，依不同降雨觸發坡體力學破壞行為，選定合適預警指標，本研究所發展之監測配置設計可應用於降雨觸發淺層與飽和土層公路土壤邊坡滑動預警。
3. 前期發展之飽和土層時間域水壓推估模式，係以現場監測大數據進行邊坡土層水利參數反算，已初步驗證模式可行性。本期計畫整合時間域水壓推估模式於水力力學耦合數值分析中，同步於雲端呈現分析成果。
4. 本期計畫彙整前期研究成果，擬定典型邊坡與擋土支撐類型之依時預警系統，建立所需之標準流程架構，以利計畫成果後續推廣應用。

1.2 研究範圍與對象

本(110)年度計畫除維護淺層崩塌與飽和土層監測場外，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穩定分析進行精進。飽和土層滑動，其力學平衡受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，致使邊坡滑動。解析法以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。前期發展之時間域水壓推估模式，已初步進行地下水壓估算驗證，以邊坡場址現地量測降雨特徵，推估特定時間之地下水壓變化，為依時性預警架構之關鍵。考慮滑動面發展於飽和土層區，進行坡體有效應力分析，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、水力反應歷時及水力反應，做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反應指標，以做為預警監測之指標與對應警戒值擬定。

本計畫發展之預警技術與傳統雨量預警之主要差異，為帶入時間因子，預警值、警戒值與行動值對應滑動破壞發生前之依時門檻值。預警值對應滑動發生前期徵兆，在降雨行為持續下，才會進一步到達警戒值；警戒值之訂定，則對照坡體安全係數抵達設定值，如交通部(2015)^[1]頒佈之公路邊坡工程設計規範，規定當坡體處於高水位狀態時，其安全係數(factor of safety, FS)應大於等於 1.2，則坡體穩定性，逼近設計極限平衡分析時的臨界狀態；而行動值的發佈，對應為監測場址滑動破壞產生，業管單位需進行相關封路或撤離保全對象程序。考量各場址特性不同，因此，各門檻值對應之行動做為將有所差異，建議由各路段業管單位會同專家學者一同進行研擬。

本計畫監測場域共為 4 處，淺層場址分別為 2016 年設置之甲仙攔河堰西側通達道路邊坡，與 2021 年新設台 20 線 50.7k 非飽和監測場址，取代原阿里山公路五彎仔場址。飽和土層場址分別為 2018 年度設置之台 20 線 52k 處邊坡，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，與 2020 年新增南市道 175 線 25.5k 監測場址，完成水力力學耦合具擋土支撐系統依時反應分析。本年度除進行原有測站維護外，持續精進時間域水壓推估模式，並以歷年累積之大數據驗證時間域水壓推估模式，精進前期擋土系統監測與預警技術；依據歷年研究成果，擬定標準流程架構，應用於具相同降雨觸發破壞機制之潛在高風險場址，標準流程架構包含初步破壞分析程序、依

時水力力學耦合分析程序與監測架構選用建議。

1.3 研究內容與項目

本計畫著眼於落實發展公路邊坡場址客製化依時預警架構，依時預警系統依降雨引致土壤邊坡破壞機制，可區分為公路土壤邊坡淺層崩塌與飽和土層滑動場址。持續精進與維護應用解析法邊坡與支撐系統牆體反應分析，及對應之分佈式監測技術之研發，提供降雨地層入滲及滲流量對實際水壓與支撐結構分佈反應，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。110 年度主要工作項目條列如下：

1. 針對運研所已設立之公路土壤邊坡淺層崩塌與飽和土層滑動監測無線感測網路模組場址，持續進行監測與資料分析，並滾動修正現有模組資料分析模式。
2. 針對現有潛在飽和層滑動監測場址處，發展地下孔隙水壓升降與降雨特徵推估模式，進行擋土支撐系統監測與穩定分析，據以建立標準化分析與監測配置流程，整合於依時預警模式，以利後續推廣應用。
3. 彙整現有場址監測成果，提出依時預警系統標準流程架構，精進雲端依時預警系統架構，包括量測資料更新儲存、雲端穩定性分析比對，場址客製化依時預警模式及相關警報通知等功能，並應用於雲端系統示範場址。
4. 提出標準流程以應用於潛在滑動高風險案例場址，並建立現有場址長期滾動更新及系統維護標準程序。

工作項目包含現有淺層與飽和土層監測場維護(請參考章節 Ch4 與 Ch5 之監測成果)、模組無線傳輸與模組耗電優化(Ch3.6 模組無線傳輸與模組耗電優化)、飽和層場址孔隙水壓推估模式精進(Ch6.2.4 場址崩積層時間域水壓推估模式驗證)、雲端虛擬儀表功能開發與主動通知擴充(Ch3.5 網頁式雲端整合即時監測平台)、水位與降雨特徵關聯分析精

進(Ch5.3 水位與降雨特徵關聯分析成果)、時間域水壓推估模式與二維水力耦合數值分析整合(Ch6.2.4 應用案例)、雲端整合平台精進與穩定度測試與公路邊坡依時預警系統標準流程架構研擬(Ch6 公路邊坡依時預警系統標準流程)。

針對各工作項目內容，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台 20 線 50.7k 路段邊坡兩處淺層滑動觀測場址，110 年度完成類比式水份計更換，並於 110 年 6 月成功監測淺層崩塌事件，可驗證淺層水力耦合分析架構。
2. 飽和土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，利用原有公路總局第五區養護工程處深層開孔水位觀測井，並道路上邊坡鑽設孔底位於崩積層底部之約 12m 之開孔水位觀測井。109 年度新增一潛在因飽和土層滑動引致之擋土支撐系統損壞之場址(南市道 175 線 25.5k)。對於飽和土層滑動場址，其預警關鍵在於地下水壓依時變化，110 年度除對測站進行硬體維護外，將以監測大數據率定時兩場址之時間域水壓推估模式，並整合進二維水力力學耦合數值模型中，完善飽和土層滑動場址依時預警架構。
3. 精進雲端依時預警系統架構: 108 年運研所建立雲端整合系統架構，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，110 年度持續精進雲端穩定分析計算功能，結合客製化依時預警穩定分析模式，達到主動式預警通知之功能，而主動通知功能除原有電子郵件通知，並拓展至常用手機 APP 群組訊息。
4. 公路邊坡與擋土系統之客製化依時預警系統的標準流程架構: 本年度整合公路土壤邊坡監測長期研究成果與實務執行經驗，歸納不同降雨觸發公路邊坡與擋土系統滑動之客製化依時預警系統標準流程

，如淺層崩塌與飽和層滑動場址之初步破壞分析、降雨行為時邊坡依時穩定性分析與土層無線監測架構選用，成果可供相關權責單位建立潛在滑動場址客製化依時預警系統，增進高風險、高關注場址預警之準確與時效性。

1.4 預期成果、效益及應用

本計畫核心為開發可快速佈設且具依時特性之客製化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、公路總局及其養護工程處、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幾何及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，提出分析流程標準化，建立公路土壤邊坡高風險場址客製化滑動預警模式。
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，組合資料感測、分析研判、數據傳輸功能，研發與分析結合之邊坡無線監測網路。
3. 發展解析法場址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。
4. 提出現地邊坡與擋土設施無線監測模組佈設要點與裝設標準流程，建立長期滾動更新及系統維護標準程序。

預期效應與應用:

1. 本計畫針對土層邊坡進行解析法推論，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，發展現地無線土層監測模組，應用於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與支撐系統穩定性之監測預警技術，計畫成果提供交通部、公路總局及其養護工程處、工務段等單位，做為相關防災啟動之參據。

1.5 邊坡依時預警系統發展歷程

運研所發展之公路土壤邊坡依時預警系統，係彙整系列計畫成果，針對降雨引致之土壤邊坡滑動為應用對象，發展監測邊坡土體水力變化與擋土系統之監測硬體，基於解析架構評估坡體內水力耦合反應，客製化各場址邊坡依時預警系統。110 年度計畫為延續前期 104 年度「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)」^[11]、105 年度「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)」^[12]、106 年度「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」^[13]、107 年度「公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發」^[14]、108 年度「公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」^[15]、109 年度「公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」^[16]研究成果，各年度研究成果彙整如表 1-1 所列。

系列計畫執行初期(104 至 105 年度)，以淺層崩塌為主要研究目標，發展淺層滑動依時解析架構，探討淺層體積含水量變化與邊坡土體之穩定關係；並嘗試開發監測相關軟硬體技術，率先導入，廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電(micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，量測淺層土壤體積含水量變化。此階段監測資料無線傳輸距離約在 100 公尺以內，且須於鄰近監測場域配置個人電腦(personal computer, PC)，用以接收回傳感測資料，對於實際感測端配置與方位有一定程度之侷限。

系列計畫執行中期(106 至 107 年度)，進一部以飽和層滑動(深層滑動)做為研究目標，發展飽和層滑動水力耦合解析架構，探討邊坡地下

水壓(即地下水位)與邊坡土體之穩定性分析。此階段開始導入手機使用之無線網路模組，基於 GPRS 無線訊號(2G 網路)，開發現場資料蒐集模組(gateway)，用以取代現場 PC，並上傳感測資料於雲端資料庫(cloud database)，此時期，初步具備物聯網(internet of things, IoT)雛形。物聯網感測架構，主要由感測層、網路層與應用層構成，計畫發展之監測系統，以具無線網路通訊功能，且可監測土壤表層傾角、土中分層含水量、地下水壓與現場雨量之監測模組為特點，形成分佈式感測網路層。而資料傳遞之網路層，由現場無線化回傳感測資料之無線電技術與上傳雲端資料庫之無線網際網路通訊技術組成，採用的無線電通訊模組，歷經 NRF、Xbee 與 LoRa 等通訊技術，對於計畫主要以野外山區道路做為應用場域，其中以 LoRa 技術就通訊距離、穩定性與耗電性表現為最佳；而無線網際網路之通訊技術則經歷 2G、3G 無線網路訊號退場，目前以 4G 網路為主。應用層部分則包含客製化雲端平台，可整合即時監測資料，依據解析法架構比對場址最新水力反應，供路段養護單位決策之依據。

系列計畫於 108 至 109 年度執行期間時，考量現存道路邊坡多為以整治之邊坡，因此，基於前期基礎，開始導入擋土支撐系統分析，總合探討擋土結構與邊坡之互制作用，初期以 PYWALL 軟體，探討不同背填地下水位變化下彈性牆體傾角，後續以 FLAC 數值軟體，建構二維數值水力耦合分析架構，針對計畫飽和土層示範場址進行客製化分析，提出以擋土牆體反應與地下水位為指標之預警值；在無線監測部分，開發應用於監測擋土牆傾角變化模組，形成完整之邊坡監測架構，對於飽和層滑動依時預警系統，以兩階段之水位深度做為預警與警戒值，並以擋土系統傾角顯著變化做為最後行動值，簡化路段養護單位使用系統之流程。

彙整系列計畫成果，目前運研所發展之土層無線感測模組，已涵蓋公路土壤邊坡淺層崩塌、飽和土層滑動與現地擋土系統監測等目的，可確保滑動土層與擋土系統相關物理量指標之即時感測，供使用者於雲端進行即時查詢。本年度除進行原有測站維護外，持續精進電子

模組軟硬體技術，而雲端整合平台，則進行使用者友善化之，精進整體平台操作與顯示，以貼近目前盛行使用之社群通訊軟體輔助相關路段養護單位使用系統。另外，本年度研擬之標準流程架構，可提供各單位評估風險場址架設相似系統之參據，標準流程架構包含場址適用對象分類與說明，判別淺層崩塌或飽和土層滑動潛在場址，以進行依時水力力學耦合相關分析流程，並選用合適於場址之感測器與相關配置。本年度成果做為系列計畫之總結，完整說明運研所發展之公路邊坡依時預警系統，成果可供相關權責單位建立類似之依時預警系統。

運研所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)110年8月31日於公路總局第五區養護工程處曾文工務段舉辦系統推廣說明會，圖 1.1 為當日辦理情形，針對其所屬台 20 線 52k 與 50.7k 場址，進行監測成果、客製化預警系統與雲端平台進行說明，會後提供場址雲端平臺之相關操作說明(請參閱附錄四)。相關回饋意見，條列整理如下：

1. 感謝港研中心於段內管轄路段，執行相關創新計畫，成果對於公路邊坡安全管理有莫大幫助。
2. 目前台 20 線 52k 於道路下邊坡土體有開裂之跡象，惠請依據長期監測成果給予建議，確認土體開裂變化與道路安全之關係。
3. 港研中心依據解析架構發展之分析流程，所需分析參數、流程與資料分析，對於現場工程師入門較為困難，建議增加採用簡易燈號輔助使用。
4. 目前以眾多物理量變化反應道路邊坡現況，包含淺層土壤含水量、地下水高程、降雨量與擋土系統傾角變位等指標，建議可於現場架設攝影機，整合於雲端平台，做為邊坡實際狀況比對之依據。
5. 轄區內高風險路段也有委外架設相關監測系統，而各單位研發系統眾多，熟悉不同系統操作，對於現場工程師為一種負擔。

不同系統是否有整合之可能性，或提供標準使用範例。

有關於台 20 線 52k 道路下邊坡土體開裂監測問題，本計畫 110 年 9 月 11 日已新增一組道路下邊坡傾斜儀(圖 1.2)，用以監測張力裂縫處開裂與降雨關係，並整合呈現於雲端平台，而本年度雲端平台之精進版本可做為樣板。考量現場工程師對於解析法架構之入門不易，雲端平台採警示燈號搭配預警成果，可參閱附錄三。

表 1-1 運研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"> ● 淺層滑動依時分析架構 ● 硬體元件組裝整合
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"> ● 現地無線監測模組性能測試 ● 結合場址數值分析成果，提出客製化依時預警架構
106	公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發	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"> ● 深層滑動潛勢場址水力學耦合解析法分析技術 ● 研發土壤深層滑動之無線監測模組
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"> ● 精進無線感測網路模組，增加雲端監看功能 ● 建立降雨特徵對地下水位變化模式 ● 推導飽和層滑動極限平衡理論
108	公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升	系統現地整合測試、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"> ● 提出擋土牆體反應與地下水位為指標之預警值 ● 建立個別場址之雲端顯示與管理平台
109	公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試	邊坡與擋土系統穩定分析精進、雲端平台測試	甲仙攔河堰、阿里山五彎仔、台 20 線 52k、南市道 175 25.5k	<ul style="list-style-type: none"> ● 建立二維數值水力耦合分析技術 ● 擬定依時預警系統標準化分析流程
110	公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護	現有監測場維護、邊坡與擋土系統穩定分析精進、雲端平台精進、擬定標準分析流程	甲仙攔河堰、台 20 線 50.7k、台 20 線 52k、南市道 175 25.5k	<ul style="list-style-type: none"> ● 成功監測淺層崩塌事件，成果預計投稿國際期刊 ● 導入解析架構，做為智慧雲端化邊坡安全管理系統先導 ● 建立標準流程，可供公路養護單位設立客製化依時預警系統之參據

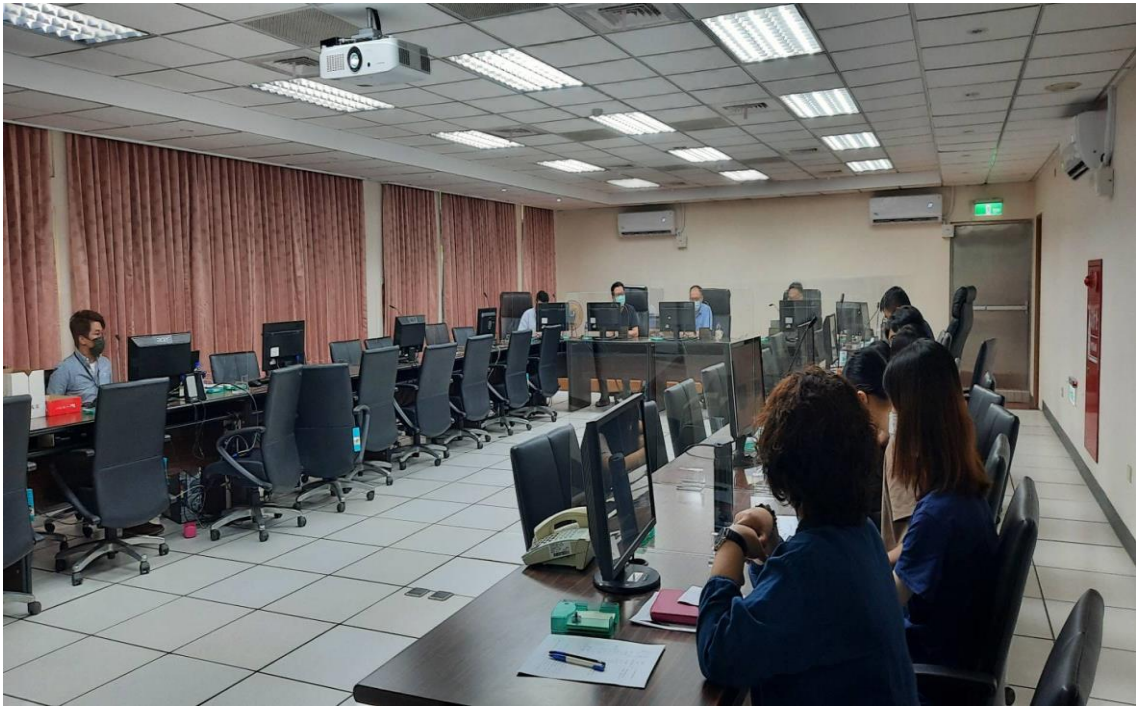


圖 1.1 曾文工務段系統推廣說明會情形(110 年 8 月 31 日拍攝)



圖 1.2 增設台 20 線道路下邊坡土壤表層傾斜儀一組

第二章 研究方法與文獻回顧

2.1 研究方法

計畫發展基於邊坡破壞機制，進行力學與滲流相關之解析分析，並一併考慮土壤與擋土支撐互制作用，建構以土層水力反應、地表位移、牆體傾斜及牆後地下水位為指標之預警模式。研發之邊坡無線監測模組，具有佈設快速與低成本之特點，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，可監測邊坡安全相關物理量指標，於邊坡數個反應靈敏之處佈設，形成分佈式土層反應感測網路。由於此類電子元件大量生產，可大幅降低硬體成本。監測點位選定與分佈式監測感測模組反應詮釋可一併考量，監測結果亦可回饋解析與數值分析模式，此類流程可做為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。

本計畫延續前期研究成果，針對之破壞類型為包括滑動面位於非飽和土層之淺層崩塌及滑動面位於飽和水位面下之飽和土層滑動，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。淺層崩塌依時預警架構，詳見前期報告(運研所, 2015)^[11]，飽和層滑動監測預警架構，詳見前期報告(運研所, 2017)^[13]，並於運研所(2020)^[16]計畫帶入擋土支撐系統監測與土壤結構互制分析。綜合上述計畫經驗，本期計畫研究主軸可依序分為飽和層滑動水力力學耦合分析精進、物聯網感測架構精進與依時預警系統建立標準流程擬定，計畫研究流程如圖 2.1 所示。

依時水力耦合分析包括考慮非飽和土壤中入滲及飽和土壤孔隙水壓變化特點，於指定水力邊界條件下，求解 Richard's equation，模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低及下滑力增加。於淺層崩塌進行非

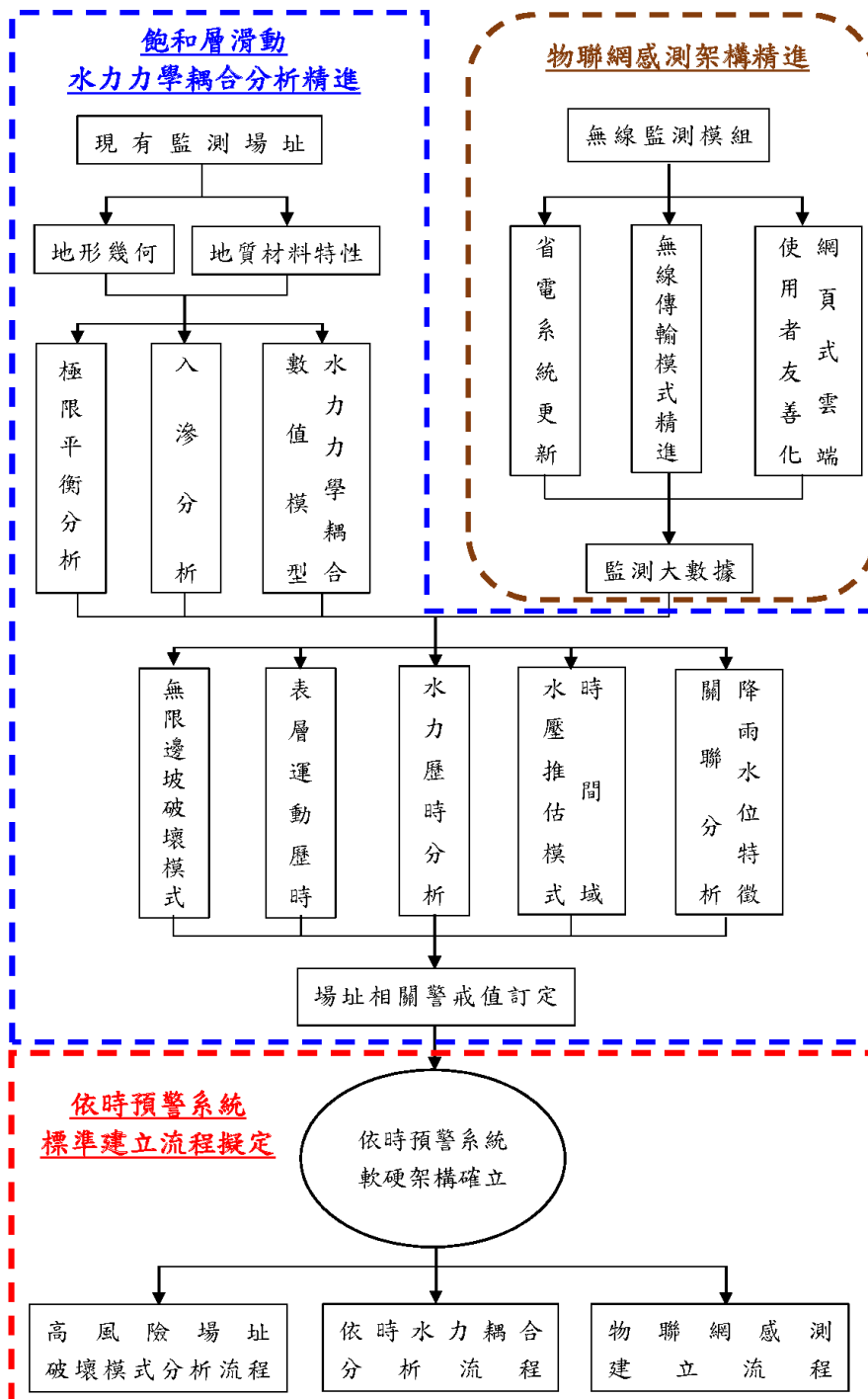


圖 2.1 客製化依時預警系統精進研究流程圖

飽和入滲分析結合極限平衡分析，可進行如 Collins and Znidarcic (2004)^[21]臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測可能破壞之時間，此為初步之解析成果，其準確度有賴於入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需進行複雜之數值模擬。

前期完成二維邊坡擋土系統數值分析，主要應用於具擋土支撐系統之飽和層滑動邊坡，用於探討監測場址於降雨行為下邊坡整體滑動與局部擋土互制作用及穩定性分析，在假設合理邊界與初始條件，進行入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果可更新土壤有效應力及土壤勁度與強度變化，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。而飽和層滑動主要以時間域水壓推估模式，進行不同時間下的地下水壓抬升預測，結合無限邊坡極限平衡分析或二維數值模型，可評估降雨事件下安全係數變化，而水壓推估模式之準確性，則有賴雨量與關鍵土層之水壓監測大數據，透過監測數據反算土層具代表性之土水參數，可用於估算依時地下水壓變化。

由於解析法邊坡穩定分析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，鑒於以雨量為預警指標具一定不確定性，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、孔隙水壓力及降雨特徵之監測模組，形成分佈式表層土壤無線感測網路。

經多年測試經驗，目前無線監測模組常遇之問題，為現地模組充電效率不佳，其解決方式有二，一為增加整體電池或太陽能板配置大小，二為降低整體耗電量，在考量推廣此計畫成果之前提下，須針對無線監測模組省電模式進行更新，以內置微控單元之優勢，進一步縮減不必要的耗電量，在程式運行時，僅開啟必要電子模組之電源，並且精進資料無線電傳輸模式。目前電池與太陽能板的成本約佔整體成本 60% 左右，在無線監測模組整體耗電量下降的情況下，將有進一步降低預警系統硬體建設成本之可能，利於預警系統推廣。而整合前期計畫邊坡監測經驗，在依時預警系統、軟硬體架構確立(解析法水力耦合分析、物聯網感測架構)的情況下，可歸納不同公路邊坡與擋土系統

之客製化依時預警系統，包括淺層崩塌與飽和層滑動場址之初步破壞分析、降雨持續下邊坡依時穩定性分析與土層無線監測架構選用，成果可供相關權責單位建立場址客製化依時預警系統，增進高風險高關注場址預警之準確與時效性。

2.2 國內外重要參考文獻

2.2.1 解析法邊坡分析

美國交通研究委員會(TRB, 1996)^[31]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)^[29]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。對於邊坡破壞而言，常區分為淺層崩塌與深層破壞，Santacana et al. (2003)^[30]以 GIS 探討西班牙地區潛在淺層崩塌分佈，其中認為淺層崩塌屬小規模的弧型滑動，其崩塌量體、破壞深度 D 為 2 公尺以內、平均坡長 L 為 70 公尺與深長比 D/L 應小於 0.1，崩塌型態屬平面滑動及土泥流動，且大部分坡體材料屬於崩積層(colluvium)；Zêzere et al. (2005)^[34]統計葡萄牙地區不同降雨引致淺層崩塌與深層崩塌案例，指出淺層崩塌常由短期強降雨影起，深層崩塌則由長期持續性降雨引起，在其 61.6 平方公里的研究區域中，淺層崩塌占總破壞案例 58.9%，其平均破壞深度在 1 至 3 公尺左右，平均滑動量體約在 286 立方公尺，相較於深層崩塌量體達 34,843 立方公尺差距甚大。

多數邊坡穩定問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲行為，除增加土坡的下滑力，同時會減弱材料強度，在非飽和邊坡會因基質吸力減少使剪力強度下降，所以水和土壤之耦合特性在邊坡穩定問題中是不可或缺的。過往研究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)^[20]，破壞面深度約在 0.5 至 3 m 之間，覆土壓力在 5 至 55 kPa 之間，其歸納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)^[20] 使用現地應力路徑 (field stress path) 的框架，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 (flowslide) 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：

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (2.2)$$

其中 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 分別為 3 維空間之軸向正向應力，大部分地滑式邊坡破壞屬於圖 2.2b 所示，破壞時 q 保持常數。圖 2.2c 的狀況是當高層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)^[19]。

Huang et al. (2012)^[28] 以光纖感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° 之無限邊坡破壞包絡線。Collins and Znidarcic (2004)^[21] 提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，所以在不考慮邊界毛細現象之情況下，降雨對邊坡穩定沒有影響。對於基質吸力下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)，此為深層滑動之類型之一，無限邊坡飽和土層滑動以相近之概念進行推導。

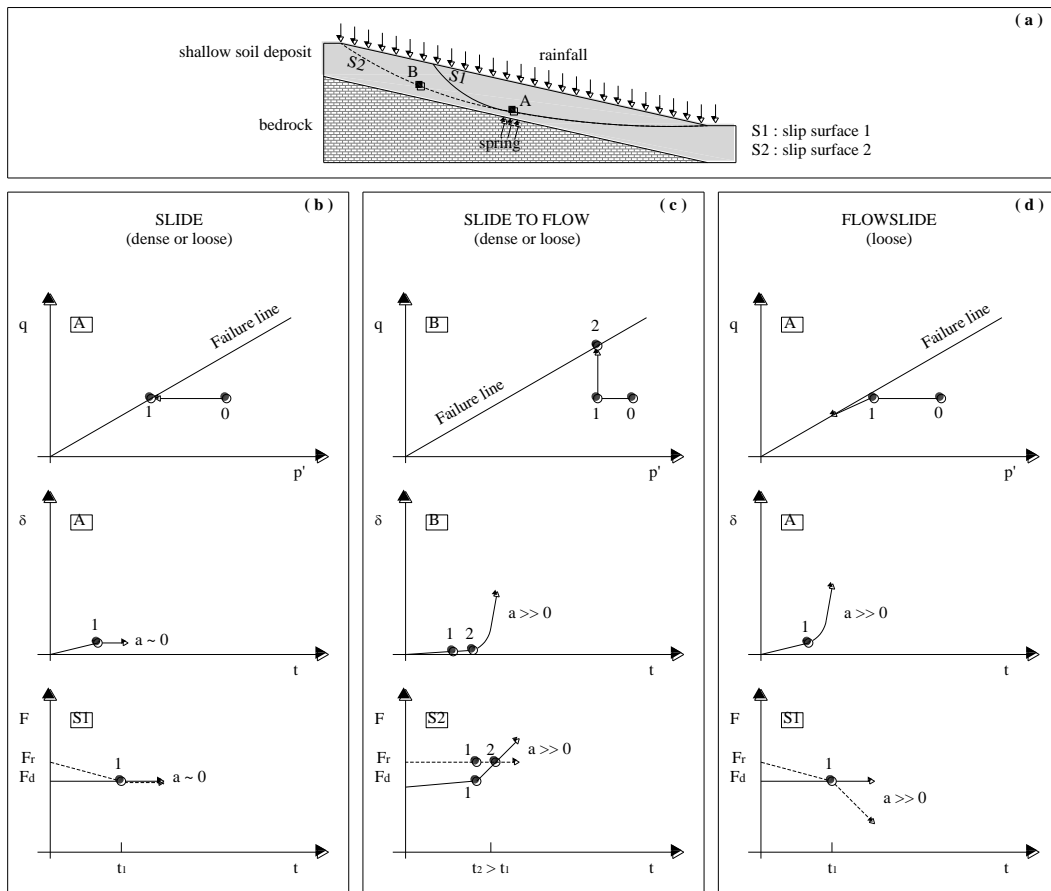


圖 2.2 邊坡破壞有效應力路徑變化(Cascini et al., 2010)

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)^[21]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)^[22]，得到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，考慮土層內之壓力水頭變化，可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 2.4)，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。

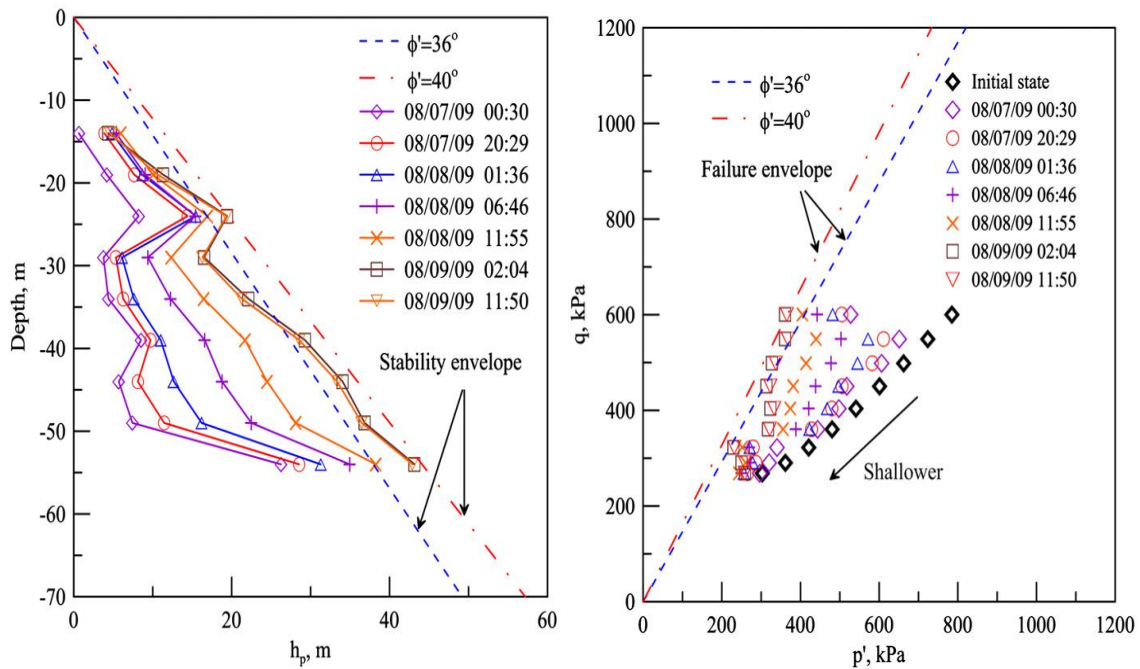


圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)

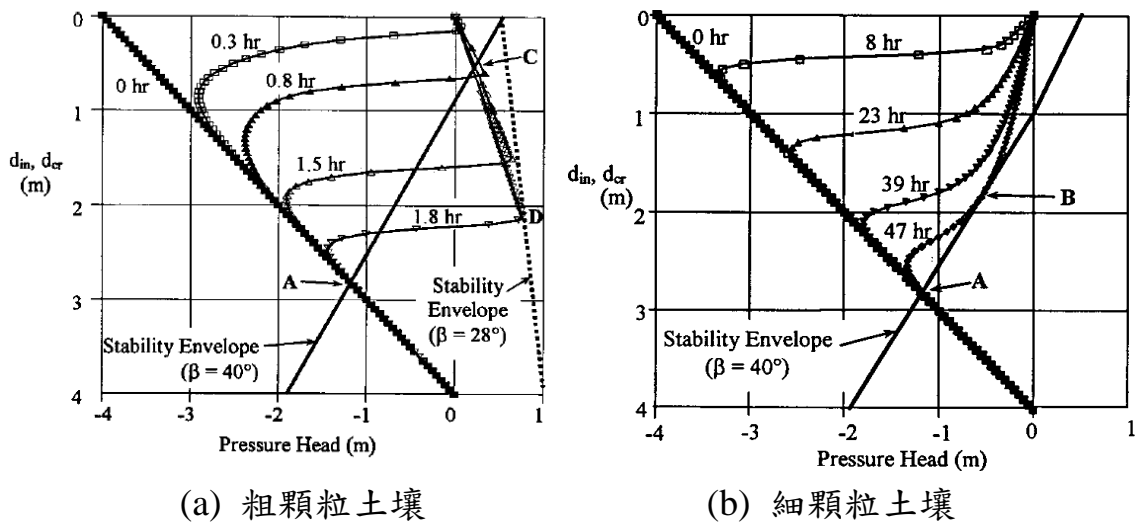


圖 2.4 典型土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

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)^[9]。黃安斌等 (2002)^[17]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。

依運研所(2011)^[8]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)^[32]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 2.5 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)^[7]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，此類系統並無安裝位置之建議，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。

現今物聯網(Internet to Things, IoT)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，運研所(2015)^[11]採用廣為應用之微機電系統 (micro-electro-mechanical system, 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之監測單元

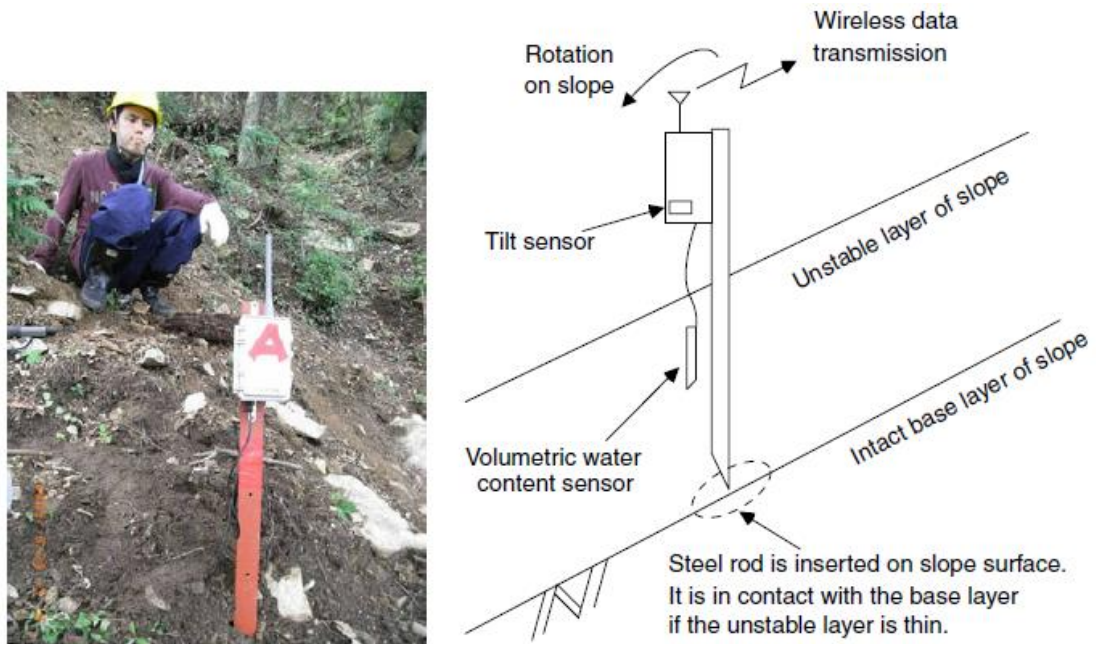


圖 2.5 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

，並以低耗電之無線網路連接，形成分布式無線感測器網路，由於其可大量生產，可大幅降低成本，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。運研所(2019)^[15]以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。運研所(2020)^[16]以水力力學耦合數值分析進行複合擋土結構物穩定性分析，搭配雲端監測水位及牆體傾角，建立場址客製化預警、警戒及行動值。

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，將進行地質模型建立及邊坡滑動與牆體互制數值分析，此結果將用於監測模組佈設，而監測之結果亦將回饋數值分析模式，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、警戒與行動值，做為相關公路防災做為擬訂之參據。

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崩塌與飽和層滑動，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，本計畫以解析法整合地形、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，並做為依時預警系統之理論架構。

2.3.1 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，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(θ)(土中孔隙水體積與總體積之比值)表示，亦可用重量含水量(ω)或飽和度(S_r)表示，典型的土壤含水量特徵曲線如圖 2.6。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。

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

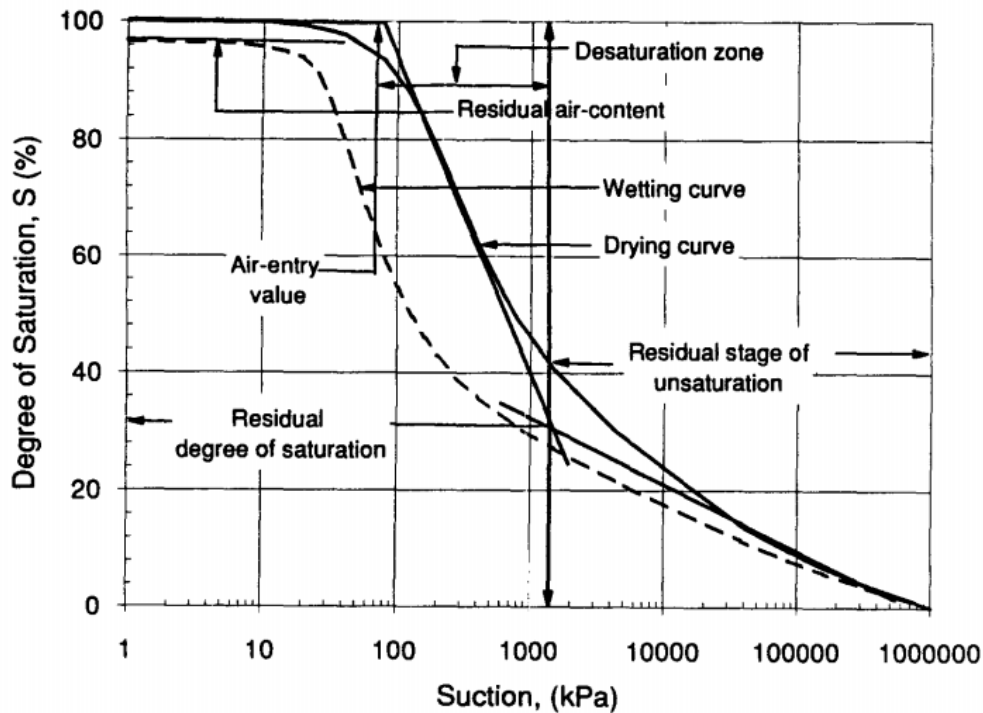


圖 2.6 典型的土壤含水量特徵曲線
(Fredlund and Rahardjo, 1993)

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)^[26] 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：

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

式中 h =總水頭； θ =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。

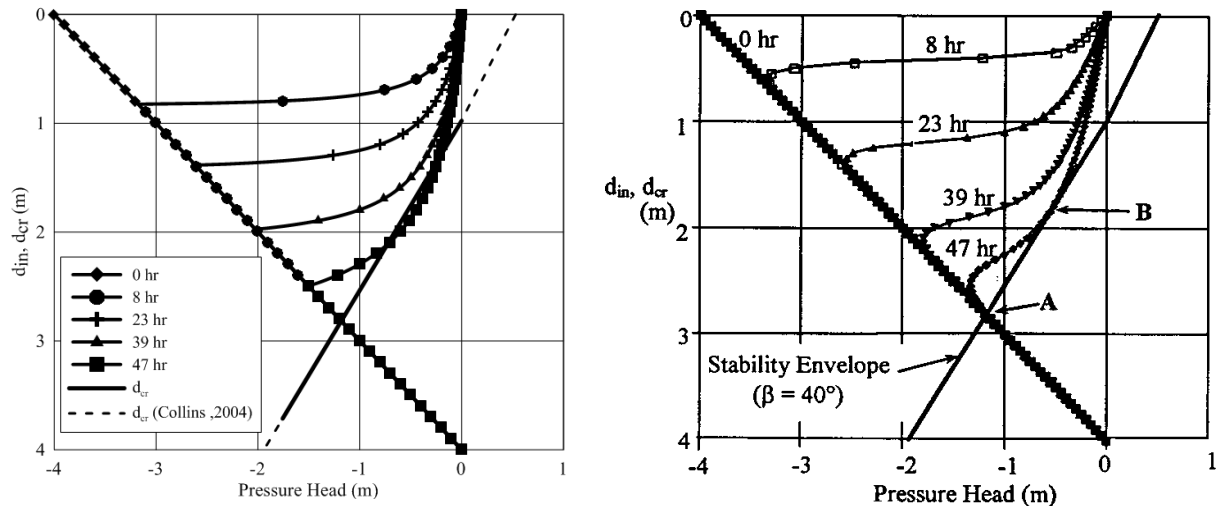
考慮一維入滲下均質土體，根據質量守恆且土壤和水均不可壓縮，為簡化計算，假設土壤滲透係數 k 不隨深度改變(即 $\partial k(h_p)/\partial z = 0$)，可得鉛垂向之一維 Richard's equation：

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

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)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可將式(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) [21]相同，上邊界之使用壓力水頭為零，下邊界條件為排水邊界，地下水位在 4 公尺處，基質吸力分佈為靜基質吸力分布，使用「典型」細顆粒土壤之水土特性曲線，解得之滲流分析結果和 Collins and Znidarcic (2004) [21]以二維數值程式 SEEP/W 之結果比較如圖 2.7，可以發現趨勢大致上相同，但數值上有差異，可能是因 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。



(a) 1D 有限差分 (b) 2D 有限元素 (Collins and Znidarcic, 2004)

圖 2.7 非飽和滲流分析結果比較

Freeze and Banner (1970)^[25]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，以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，而底部閘門可進行排水作業，用以模擬水位下降行為，圖 2.8 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。

前述室內入滲試驗結果可用以驗證時間域孔隙水壓推估模式，其試驗底、頂部之邊界符合本計畫飽和土層滑動水力耦合入滲分析架構之需求，模型為單一土層且由地下水位面分隔為非飽和與飽和土層，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，其滲漏量為一時間因子，依現場量測結果代入模型。透過現場監測數據之水力反應可代入模型上、下水力邊界條件，求得地下水位(即孔隙水壓)之依時變化。

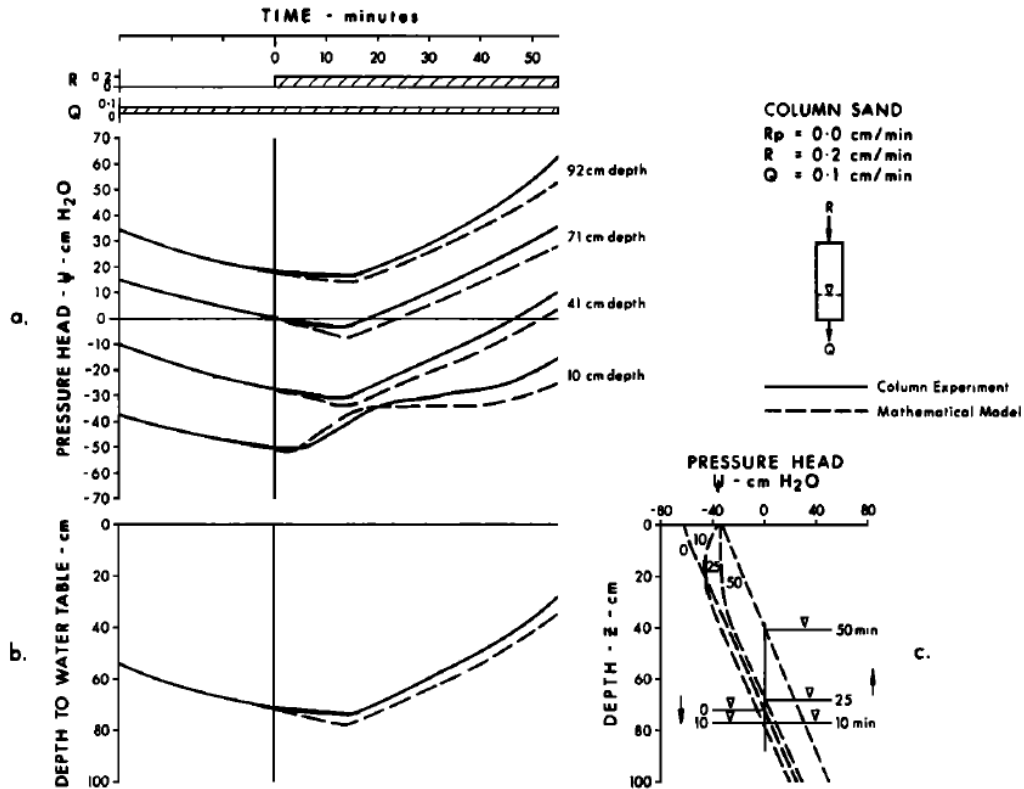


圖 2.8 垂直入滲補注地下水流試驗結果 (Freeze and Banner, 1970)

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)^[21]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 β 之無限長邊坡(如圖 2.9)，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 γ_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 γ_t ，其基質吸力之大小隨深度改變，即 $h_c = d_w - z$ 。

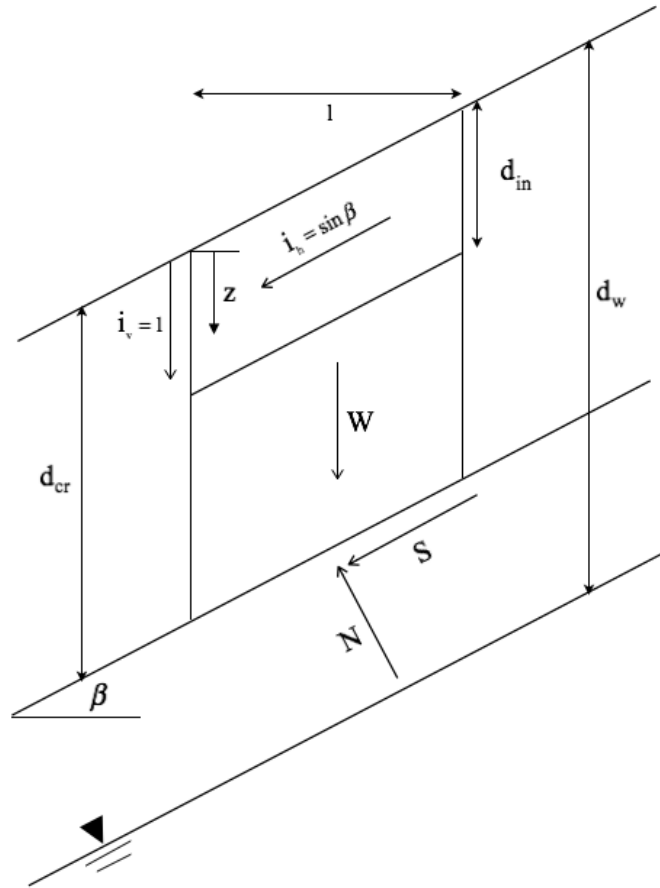


圖 2.9 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

滑動面上之正向應力及剪應力，如式(2.6a)、(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(extended Mohr-Coulomb criteria)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：

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

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：

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

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，稱為具依時特性之淺層滑動機制。

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 2.10 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 γ' 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 2.11 所示(Anderson and Sitar, 1995)^[19]。

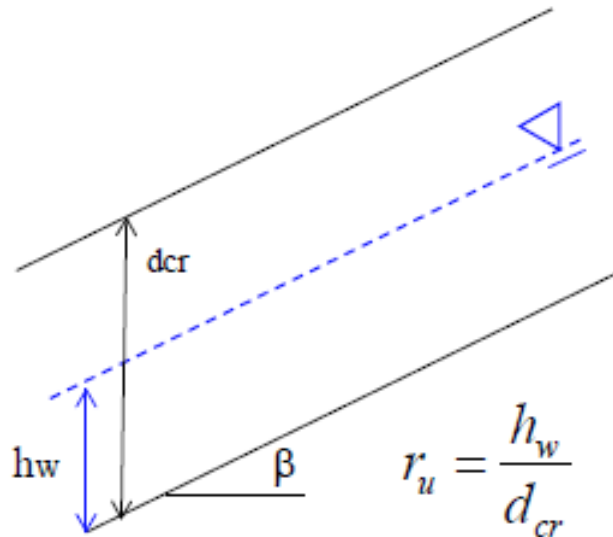


圖 2.10 飽和層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖

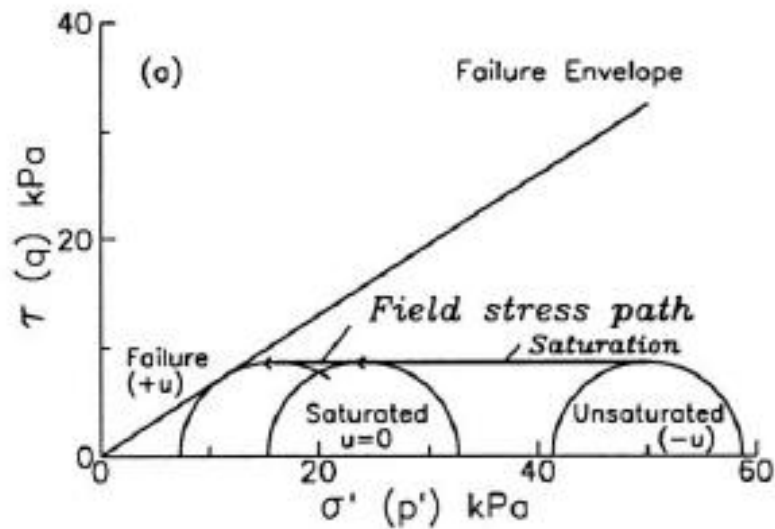


圖 2.11 飽和層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995)

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做為依時預警之指標。因 γ_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 γ_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，可做為飽和土層依時預警之架構。

2.3.4 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 2.12 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 1.5 m，基質吸力與體積含水量之關係，可由實驗結果或 VG model (van Genuchten, 1980)^[33]推估，在 0.75 m 深度於破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.13 所示，由破壞時間(42 hr)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 0.75 m 量測之含水量做為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.13 推估。

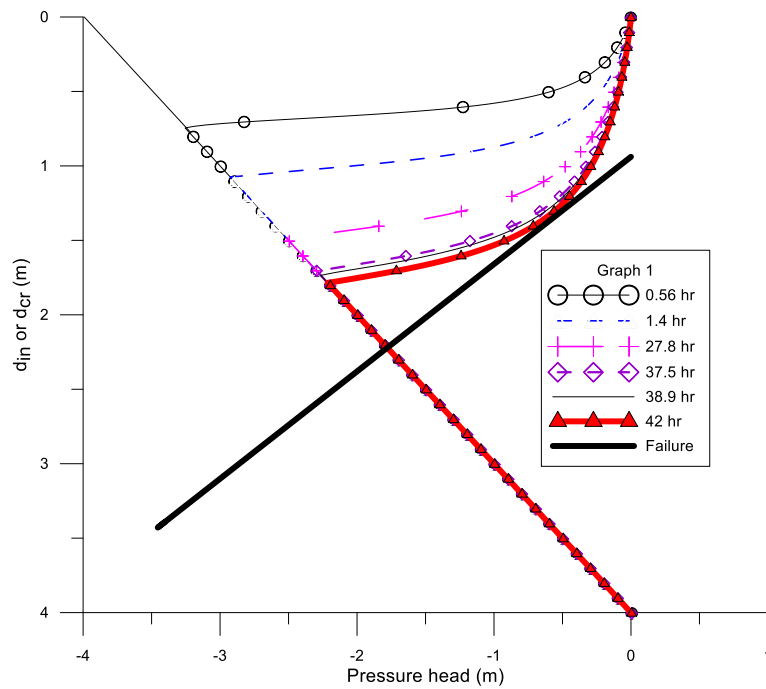


圖 2.12 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線 (運研所，2015)

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 1.5 m 處含水量歷時如圖 2.14 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 2.5 m，且地下水位於土層底部，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 2.15 所示，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，此類邊坡較適宜以地表傾角做為訂定依時預警之物理量。

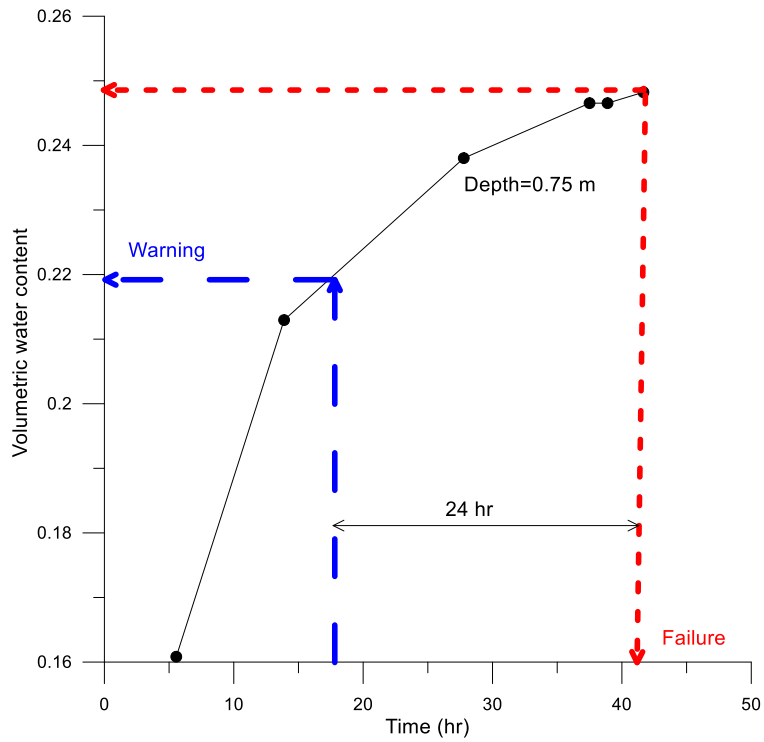


圖 2.13 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念(運研所，2015)

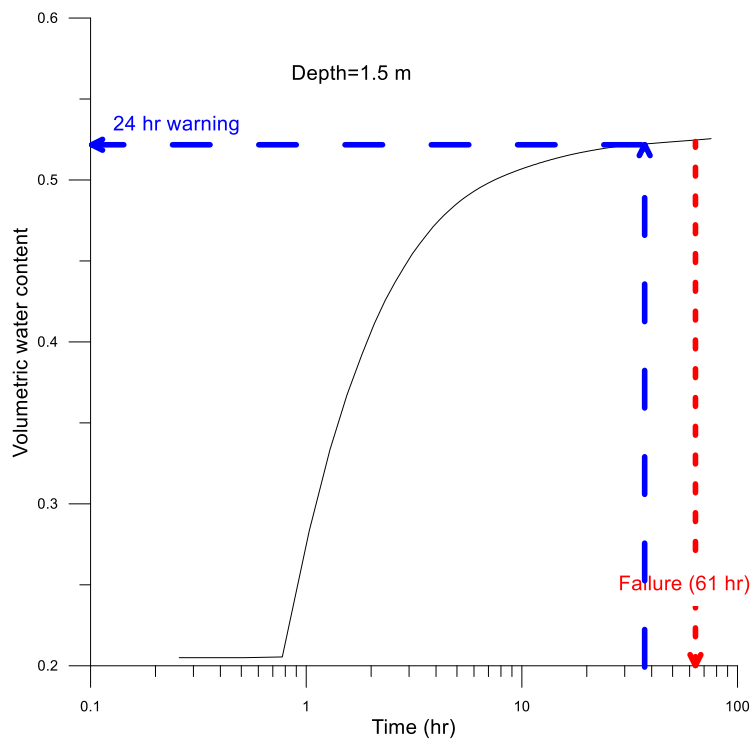


圖 2.14 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念 (運研所，2015)

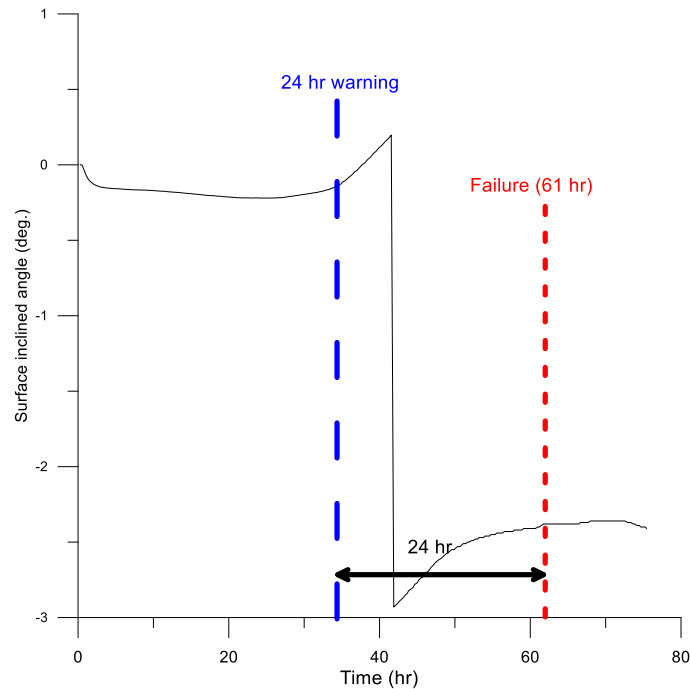


圖 2.15 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念 (運研所，2015)

由無限邊坡與二維分析結果顯示非飽和水力分析中之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，此有賴即時監測分層含水量可靠度提升。

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，做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)中之平行滲流力效應須加以考慮，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。

因孔隙水壓力與飽和土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，本計畫 2018 年度以降雨入滲分析為主，2019 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，2020 年已初步完成台 20 線 52 公里處飽和土層滑動場址之地下水壓升降依時預測模式，本(110)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，搭配雲端監測，達到依時預警之功能。

第三章 無線土層監測系統架構與精進

3.1 無線監測系統架構與演進

3.1.1 無線監測系統架構

由前期成果發展之無線土層監測模組，可廣佈於具降雨崩塌潛勢之邊坡場址，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、地下水位及擋土支撐系統傾角變位之監測模組，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，裝設於各待測地點，並透過無線傳輸方式將各感測器量測資料回傳雲端。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。本計畫採用 Wemos Lolin32 做為系統之微控制器，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。

現行監測系統架構示意圖，如圖 3.1 所示，無線土層監測系統包含兩種型態，分別為代表現場各項感測項目之客戶端與伺服器端，客戶端即為監測模組(物聯網中之感測端，client)，將量測之現地資訊發送給伺服器端(資料閘道器，gateway)，透過 4G 無線通訊模組將資訊上傳

至雲端資料庫(database)，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。伺服器端與客戶端之差異，僅在於是否配置4G無線網路模組，而伺服器端需額外進行雲端資料上拋網路作業，其餘微處理器MCU等相關電子元件皆相同，可依實際現場監測需求，客製化電子監測模組。

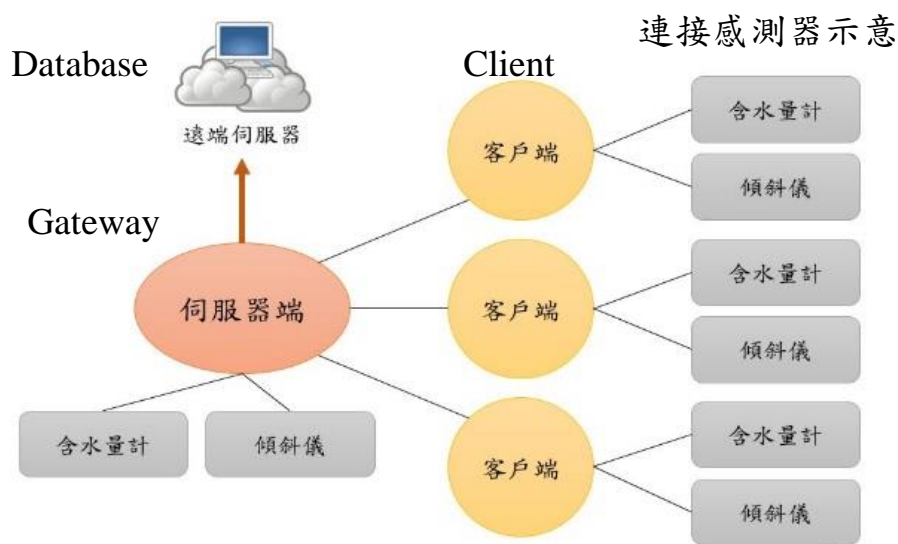


圖 3.1 系統架構示意圖

3.1.2 監測系統發展歷程

系列計畫執行初期(104 至 105 年度)，為首度嘗試進行邊坡預警系統相關的水力力學解析解架構與相關監測軟硬體之自主發展，現場監測系統部分，初期以「拋棄式模組」為概念，以製造單價相對低廉、運作穩定與佈設迅速之目的進行研發，期望降低公路潛在破壞邊坡場址佈設監測系統之成本，利於降低邊坡相關災害發生時，危害保全對象之生命財產安全。因此，導入 MEMS 元件與開源之嵌入式硬體控制平台 Arduino(圖 3.2)，以廣為應用於手機消費系統、醫療器材之相關大量製造的便宜電子元件來開發相關軟硬體技術。圖 3.3 為運研所土層無線監測系統初期監測電子模組之原型，分為發射端與接收端模組，兩者以無線射頻(radio frequency, 簡稱 RF)傳輸技術衍生之 NRF24L01 作為來進行數位資料傳送作業，此階段無線傳輸距離約在 100 公尺以內，且其無線訊號發射具有指向性，發射端與接收端兩者之天線方位要調

整再一定範圍內，因此，並須於鄰近監測場址場域配置一個人電腦主機，搭配以 Microsoft Visual Studio 開發之圖形化使用者介面(如圖 3.4)，接收回傳之感測資料並儲存，此階段對於邊坡現場感測端安裝位置有一定程度之侷限，需考量接模組安裝位置、方位與接收端主機之合適架設建物，並且感測資料須人工至現場回收，無法提供即時觀看功能。另外發射端與接收端之微控單元採用 Arduino Uno 之開發版，相較計畫現行之土層無線模組 Wemos Lolin32 其耗電量、串接儀器數目與省電模式皆有一定之差距，初期容易遭遇現場電池耗盡之問題。

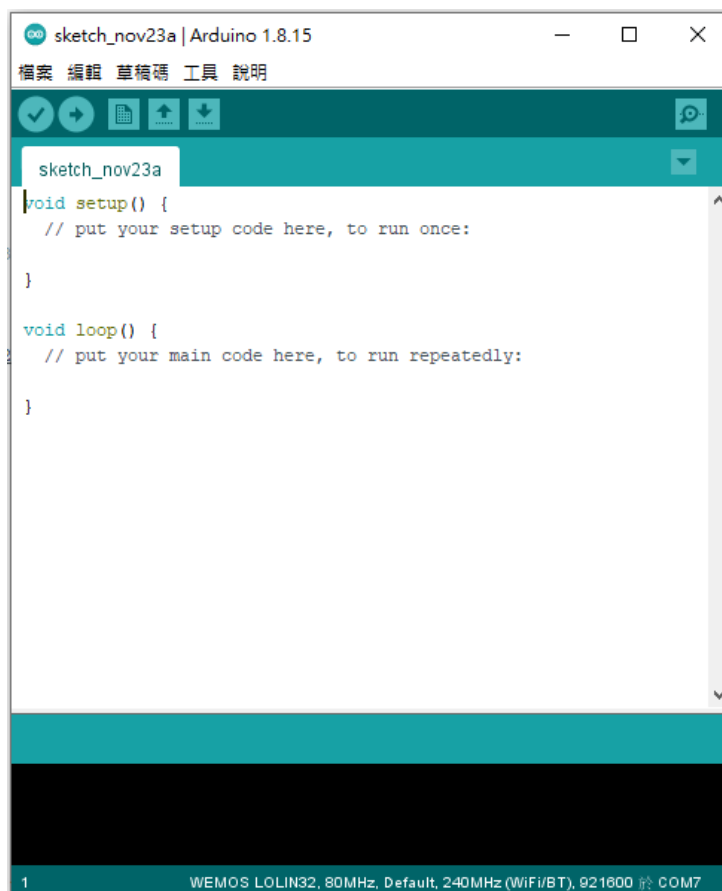
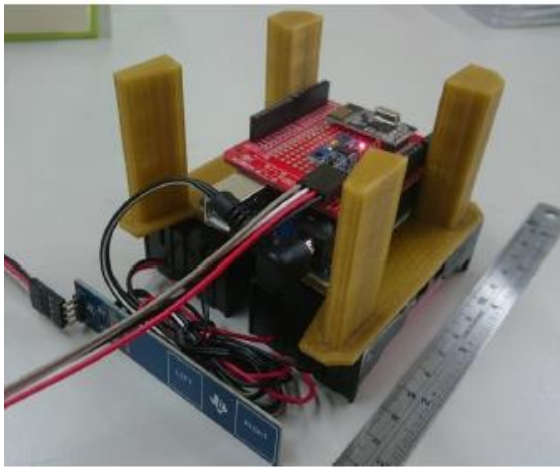


圖 3.2 開源之嵌入式硬體控制平台(Arduino)



(a)發射端模組



(b)接收端模組

圖 3.3 運研所土層無線監測系統初期(104 至 105 年度)電子模組

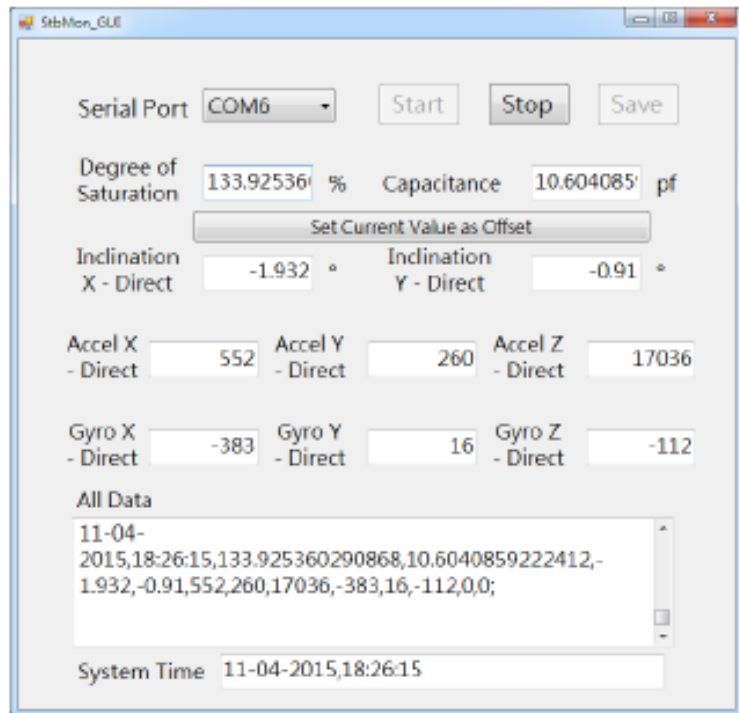
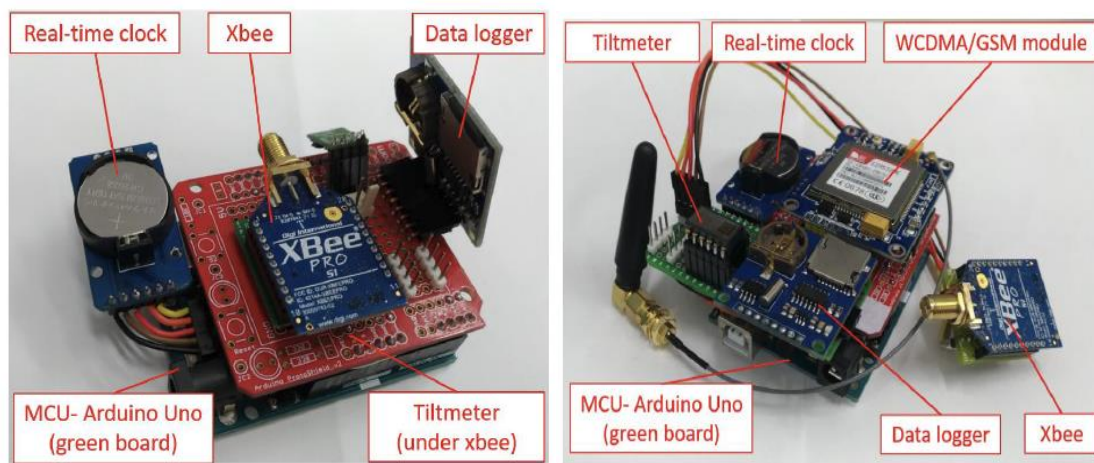


圖 3.4 前期圖形化使用者界面 GUI

系列計畫中期(106 至 107 年度)開始以飽和層滑動(深層滑動)作為研究目標，基於考量邊坡現場通常無法架設個人主機，因此，開始導入手機無線網路模組，並與接收端模組進行整合，直接以 2G 或 3G 無線網路訊號回傳監測數據至雲端資料庫(cloud database)，此階段接收端

可免除個人電腦架設，直接以微控單元控制現場數據回收與資料上傳流程，此時接收端類似於轉接現場數據至雲端之角色。對於物聯網(IoT)感測架構之定義，主要由感測層、網路層與應用層三者構成，而此階段初步具備物聯網感測架構之雛形，圖 3.5 為運研所土層無線監測系統中期監測電子模組之原型，分為感測端模組(client)與資料閘道器(gateway)，現場資料之區域無線傳輸則改用基於 Zigbee 架構下發展的 Xbee 無線電通訊技術，以應用在山區道路邊坡之情景，其通訊距離約在 300 公尺以內，且針對初期 NRF 無線電模組之指向性問題也有所改善，於現場監測佈設系統更具彈性。目前市面上有眾多雲端資料庫平台，如 Google Cloud Platform、Amazon RDS、ThingSpeak 等平台，監測系統於此階段採用 ThingSpeak.com 做為雲端資料儲存平台，直接由現場 Gateway 與 ThingSpeak 平台進行連線並上傳資料，其為 Matlab 公司旗下開發應用平台之一，其目的為支持物聯網嵌入式系統之資料串流，並提供雲端 Matlab 進行運算分析，目前提供非商業用途之免費版本，圖 3.6 為此階段土層無線監測系統資料之即時頁面顯示狀況。



(a)感測端模組(Client)

(b)資料閘道器(Gateway)

圖 3.5 運研所土層無線監測系統中期(106 至 107 年度)電子模組

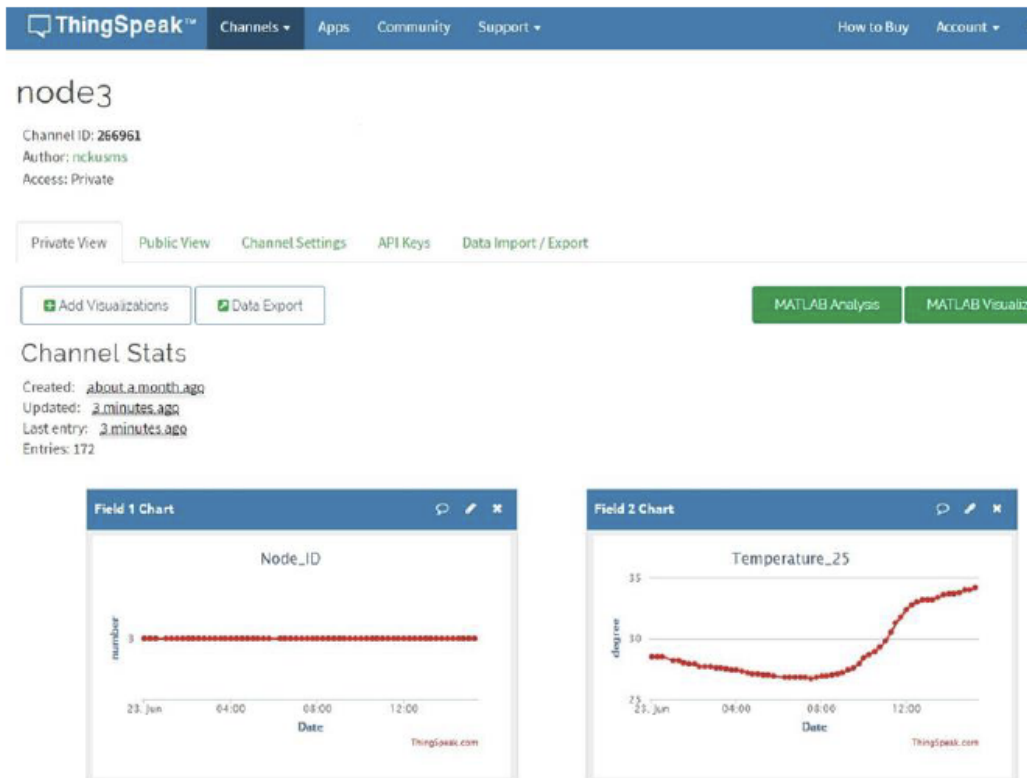
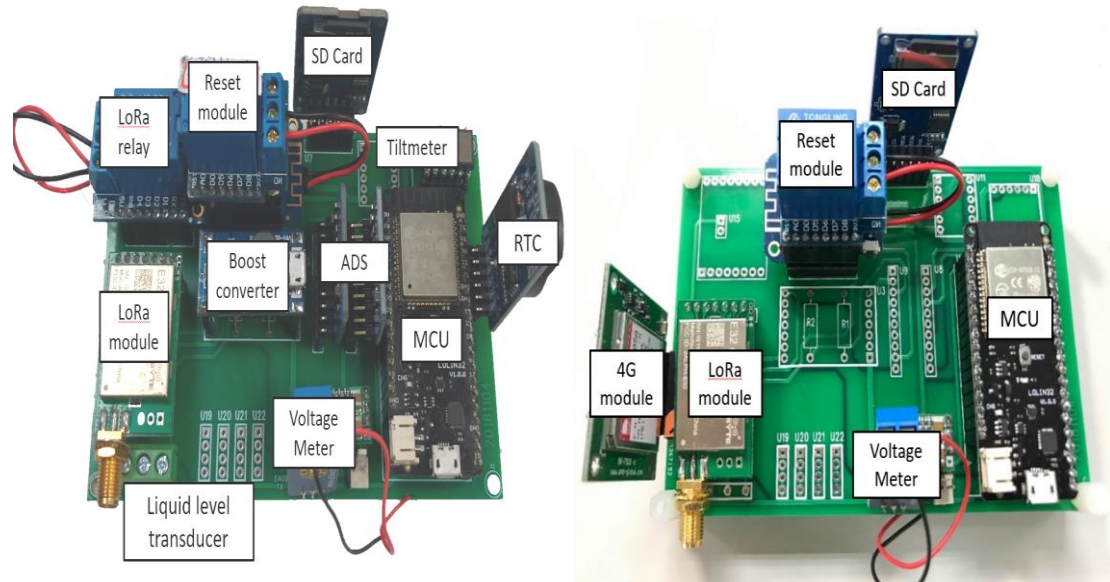


圖 3.6 雲端資料庫即時顯示頁面(ThingSpeak.com)

系列計畫於 108 至 109 年度執行期間，則考量現存道路邊坡多為以整治之邊坡，因此，基於前期成果，開始導入擋土支撐系統分析，完整探討擋土結構與邊坡之互制作用，與其對指標參數如地下水位之影響。圖 3.7 為現行運研所無線土層監測系統電子模組，主要採用 Wemos Lolin32 做為系統微控單元，搭配各式感測原件，如：含水量計、高精度傾斜儀、壓力式液位計及雨量筒，組成客製化監測模組，並以低功耗無線電技術 LoRa，於監測模組間傳遞感測資料，經現地測試，無線傳輸距離最遠可達 2 公里左右，最終感測資料由 gateway 連接 4G 無線網路，並上傳資料至雲端，達到遠端監測之功能。此階段運研所土層無線監測模組之發展已趨於完整，微控單元更改為基於 ESP32 晶片之 Lolin32，就系統之穩定性、省電性與串接裝置數量皆有明顯提升，採用印刷電路板(PCB)來串接各項電子模組，如 SD 儲存卡模組、RTC 時鐘與定時斷電器等硬體，可針對可能損壞之電子模組直接進行插拔更換，無須更換整組感測端或資料閘道器之電子模組，並且增加電池

電壓監測功能，可提供維護人員初步故障原因判讀，方便於現場進行相關維護作業。



(a)感測端模組(Client)

(b)資料閘道器(Gateway)

圖 3.7 運研所現行土層無線監測系統電子模組

監測系統軟硬體歷經多年計畫成果，發展為可客製化具無線網路通訊功能且可監測土壤表層傾角、土中分層含水量、地下水壓與現場雨量之監測模組，形成分佈式感測網路層。而資料傳遞之網路層，以現場無線回傳感測資料之無線電技術與上傳雲端之無線網際網路組成，採用之無線電通訊模組歷經 NRF、Xbee 與 LoRa 等通訊技術，對於本計畫之應用場域主要設定為野外山區道路，在傳輸距離、傳輸耗電量、睡眠模式之支援、模組使用難易度與電子模組單價，以 LoRa 技術就通訊距離、穩定性與耗電性之表現為最佳，因此建議後續類似場域應用時，可直接考量使用此項 LoRa 通訊架構；而無線網際網路之通訊技術則經歷 2G、3G 無線網路訊號退場，目前以 4G 網路為主。至於整合之無線土層監測模組的電子模組原型，除去感測器部分之成本可在一萬元以內，對照初期以「拋棄式模組」為概念，仍符合研發之目標。

經歷前期系列計畫研究成果，目前運研所土層無線感測模組已涵

蓋公路土壤邊坡淺層崩塌、飽和土層滑動監測與現地擋土系統監測模組，可確保滑動土層與擋土系統相關監測指標之即時感測，並提供使用者於雲端進行即時查詢。本(110)年度除進行原有測站維護外，持續精進電子模組軟硬體技術，而雲端整合平台，則朝向使用者友善化之方向進行精進整體平台操作與顯示，並以貼近目前盛行使用之通訊軟體輔助相關路段養護單位使用系統，以下就感測器、相關電子模組組成與雲端應用層精進項目進行說明。

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，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。

計畫前期採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式土壤水份計來監測場址表層土壤入滲行為，此水分計採用 I²C (inter-integrated circuit) 通訊界面與微控制器與周邊設備整合，但經多年期現地測試發現其 I²C 在野外環境溫、濕度反覆變化下，有機率產生 I²C 位址重置之現象，使無線土層監測模組 I²C 通訊部分相關之硬體如 RTC、類比擷取卡等零

件產生癱瘓，使模組運作失效。因此，本年度計畫之體積含水量監測改採 DFRobot 設計之電容式土壤水份計(SEN0193)，如圖 3.8 所示，其擷取訊號採用類比電壓，在體積含水量越大的情況下，輸出訊號電壓越小。計畫各監測場址已於 110 年度 4 月完成土壤水份計之更換，結果顯示，可增加無線土層監測模組水分相關感測運作之穩定性。



圖 3.8 新式類比輸出土壤電容水份計

圖 3.9 為新式類比輸出土壤電容水份計類比輸出電壓與土壤體積飽和度之關係圖，校正過程以標準砂進行定體積之體積含水量校正，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。

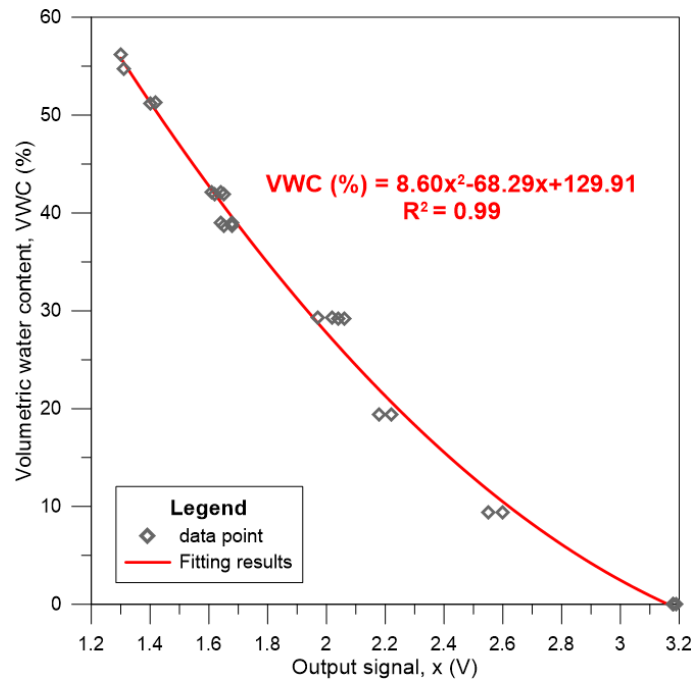


圖 3.9 新式類比輸出土壤電容水份計校正結果

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 3.10 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 3.11 所示，顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性及解析度。

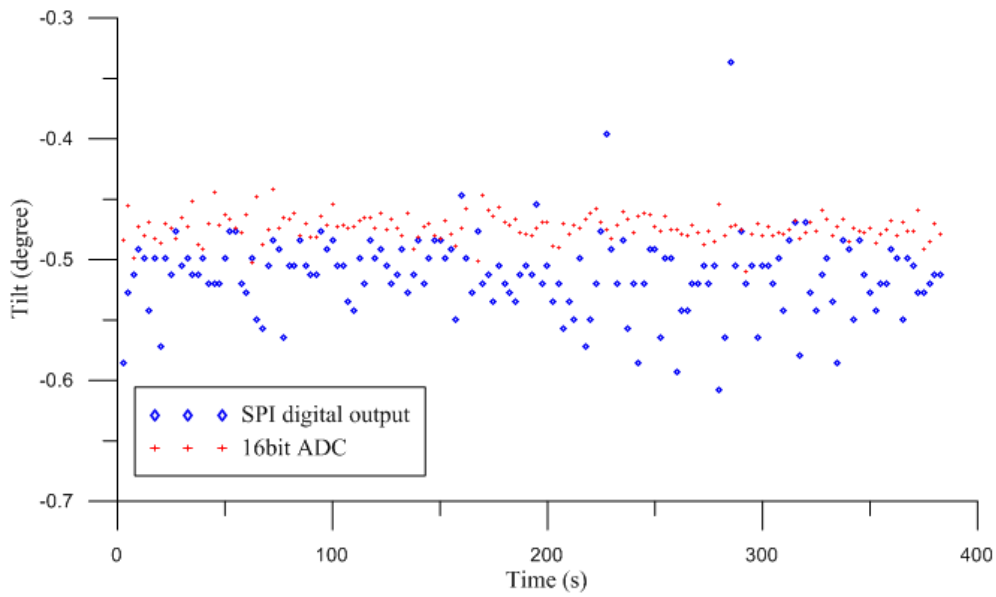


圖 3.10 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較

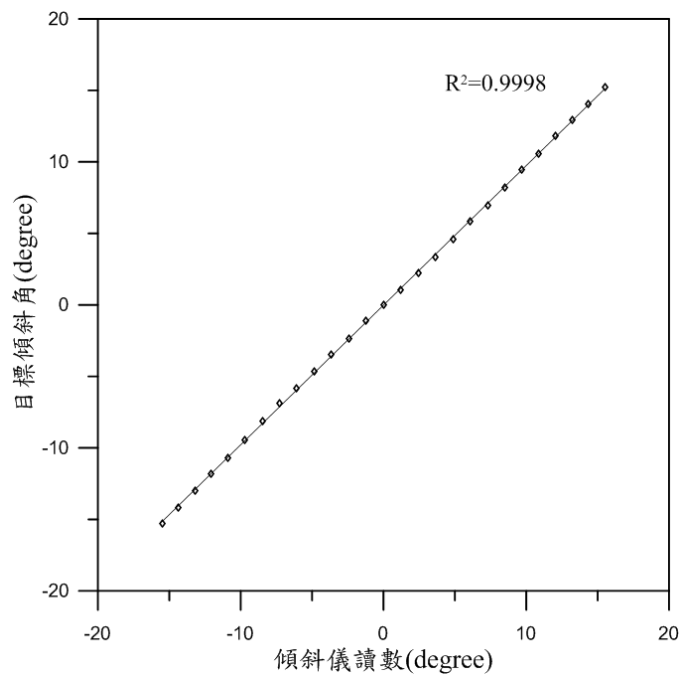


圖 3.11 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

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，本計畫以 16-bit 之 ADC 模組，確保水位解析度達 1 cm 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 200 mm 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 0.2 mm，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 3.12，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 94 mm/10min，大約為 564 mm/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。計畫中雨量監測模組之開發屬簡易式雨量站概念，並非做為法定計測設備，室內校正以體積應變儀率定水流流量，以模擬特定降雨強度，迴歸結果以決定係數(R^2 值)來代表校正數據與迴歸模式之殘差，而 R^2 達 0.99 可說明校正迴歸線之代表性。

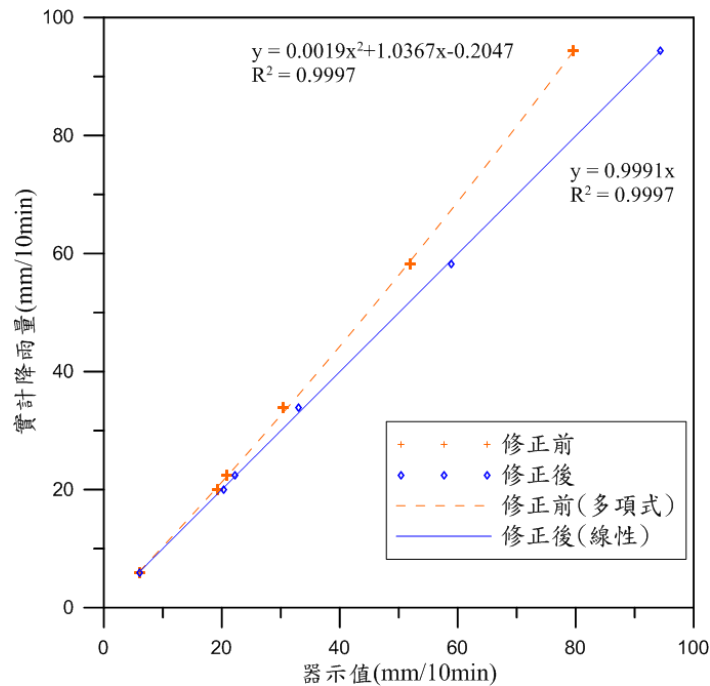


圖 3.12 雨量計器示值校正

3.3 土層無線監測模組組成

本計畫使用之無線傳輸模組、數據記錄模組、實時時間模組、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 3.13 所示，無線土層監測系統之部分包括：(1)微控單元、(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。

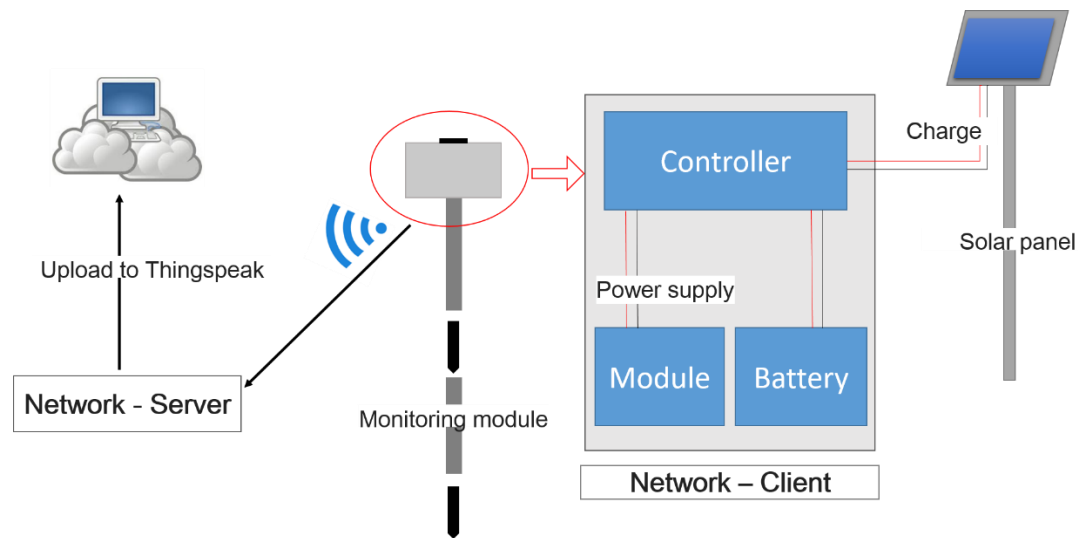


圖 3.13 邊坡無線監測系統運作示意圖

1. 微控單元

微控單元(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、I²C 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，做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。

採用與開源(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，本計畫採用 Wemos lolin32 開發板，其搭載 ESP32 晶片，240 MHz 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 介面、一組 I²C 介面，I²C 支援單一匯流排，最多可與 112 個結點通訊，足以符合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 無線傳輸模組做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 868 MHz，以及北美的 915 MHz。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，故選擇該模組做為本次計畫資料區域無線傳輸之工具。

計畫採用基於 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 931 MHz 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 4G 模組—SIM-7500SA，以連結場址資訊與後台人員形成廣域網路。SIM-7500SA 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)卡做為用戶身分識別。SIM-7500SA 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做紀錄，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，不足以應付本計畫之精度需求，故以外接之 ADC 模組整合感測器，本計畫使用基於 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-bits，以符合量測之需求。

4. 雲端資料庫(Database)

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做專案應用外，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)做資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，本計畫前期成果以此平台做為主要雲端資料庫，考量此開發商為外商且數據中心位於國外，因此，本(110)年度計畫已轉移雲端資料儲存位置至本土開發商中華電信發展之 IOT 智慧聯網大平台。

圖 3.14 為中華電信因應物聯網感測業務蓬勃之需求開發之雲端資料庫平台，可由專案、設備與感測器三個項目進行回傳感測資料存儲，專案對應至不同監測場址，設備對應現場無線感測網路電子模組，並依模組不同感測物理量，儲存該測站之節點編號、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匯出功能，其副檔名為 csv 格式，可用 Excel 直接開啟。本年度已完成 4 處現有監測站現場監測模組之上傳雲端軟體更新，並建置中華電信 IOT 平台對應之專案，包含甲仙測站、台 20 線 50.7k、52k 測站與南市道 175 線測站，各場址目前皆正常運作中並回傳感測資料至雲端資料庫中，各專案彙整如圖 3.15 所示。



圖 3.14 中華電信 IOT 大平台雲端資料庫顯示頁面



圖 3.15 中華電信 IOT 大平台專案資料庫頁面

3.4 邊坡與擋土系統無線監測模組

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，110 年更換土壤水分計型號。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(gateway)，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、表層土層傾斜變化與模組鋰電池電壓，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 紀錄卡做監測數據紀錄，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 3.16)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 3.17。
2. 土壤水份計外構: 可裝設多組土壤水份計之桿件外構如圖 3.16，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。本計畫以兩組土壤水份計做串聯，並延伸至地下深度分別為 20~25 公分以及 60~75 公分。
3. 太陽能板支架: 本計畫採用 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做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。



圖 3.16 土層監測模組外構

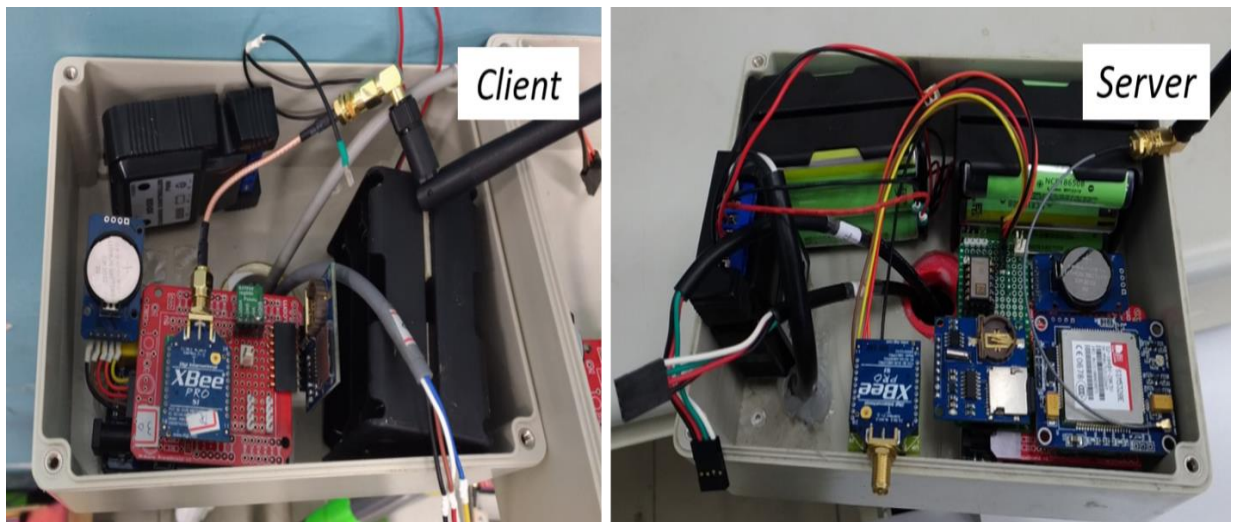


圖 3.17 防水電子盒內部配置

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 列印製做以大幅降低成本。

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，本計畫使用太陽能控制統搭配 18650 鋰電池組做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 3400 mAh，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。飽和土層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(ADC)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-bits

之 A/D converter 模組，以確保解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 3.18 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。

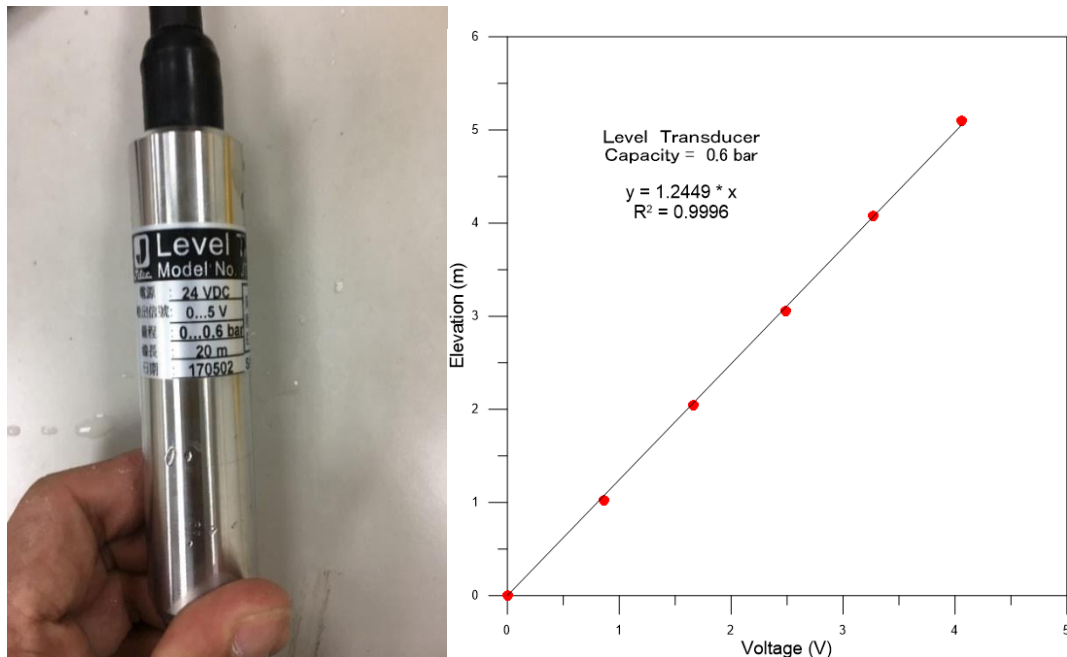


圖 3.18 液位計實體與校正結果

3.4.3 擋土牆無線傾斜儀

擋土牆傾斜儀為結合微控單元、SD 儲存裝置、傾斜晶片與無線通訊模組之感測端電子模組，原型機之尺寸為組為 6 x 5 x 4 cm，與鋰電池模組、太陽能控制器共同至於防水盒內部(配置如圖 3.17 所示)，與太陽能充電整合之實體雲端傾斜儀如圖 3.19 所示，此架構可獨立運作並持續偵測結構物變形行為，為具備擋土支撐系統道路邊坡之重要監測指標。雙向傾斜儀(ID6)設置於 A-A' 剖面道路擋土牆外緣上部，主要量測擋土牆頂之位移變化。



圖 3.19 擋土牆傾斜儀架設示意

3.4.4 簡易式雨量站

簡易雨量站整合模組現場之安裝配置，如圖 3.20 所示，以 10-20W 太陽能板後掛防水外盒並內置電子模組，雨量筒計數器採有線方式連接置電子模組中，自組角鋼支架敲擊入土層內並可校正水平；傳統雨量計因成本、維護考量，區域雨量採用同一測站成果進行代表，透過本計畫雲端雨量計架構可提供現場監測場址最真實之降雨量，可避免因地形、坡面方向不同造成降雨量之差異，洪芯琦(2018)^[5]比較台 20 線 52 公里處雨量計模組與鄰近測站氣象站(甲仙測站)之降雨紀錄，如圖 3.21，在同一降雨事件下，監測邊坡現場降雨起、始時間與降雨趨勢相近，但瞬時峰值有所不同，對於評估降雨引致土壤邊坡破壞行為，現場真實降雨量將影響評估坡體入滲行為之準確性，因此，本計畫提出以淺層土壤體積含水量與飽和層地下水壓，做為相關警示指標並發展相關監測架構，計畫發展之水力耦合分析架構，主要針對於降雨引致之邊坡破壞做為計畫目標，現場架設雨量站將可幫助提升監測可靠度，反應實際場址降雨事件，並提升後續應用預警系統之準確度。

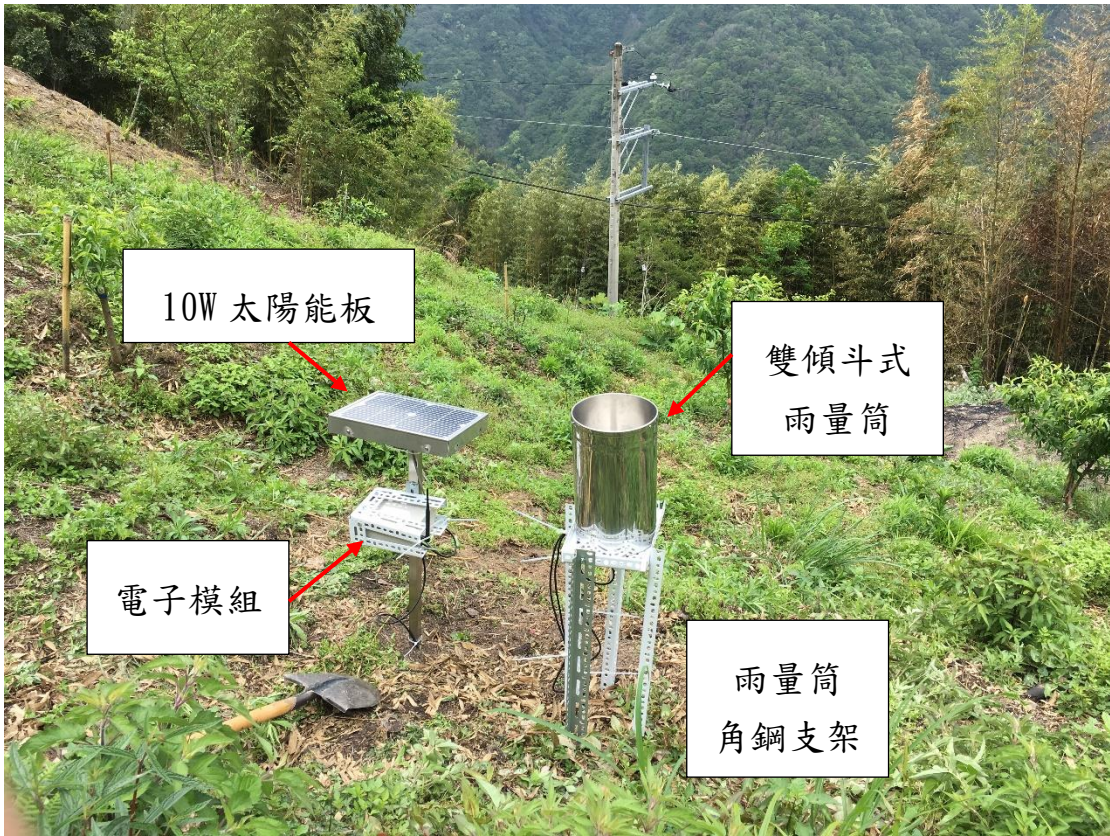


圖 3.20 簡易雨量筒架設示意

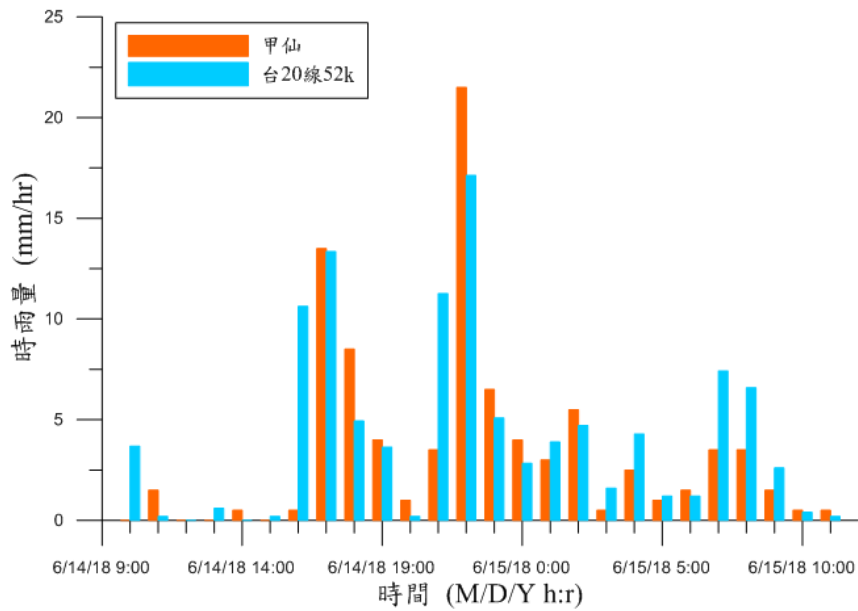


圖 3.21 場址雨量計與鄰近測站同一降雨事件之降雨強度比較 (洪芯琦, 2018)

3.5 網頁式雲端整合即時監測平台

前期成果，建立具顯示、儲存及預警功能之雲端監測顯示平台，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、直覺式的平台為設計初衷。計畫使用的是 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(基本登入頁面如圖 3.22 所示)。平台架構示意圖如圖 3.23 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或虛擬伺服器主機中。



圖 3.22 雲端即時監測平台頁面

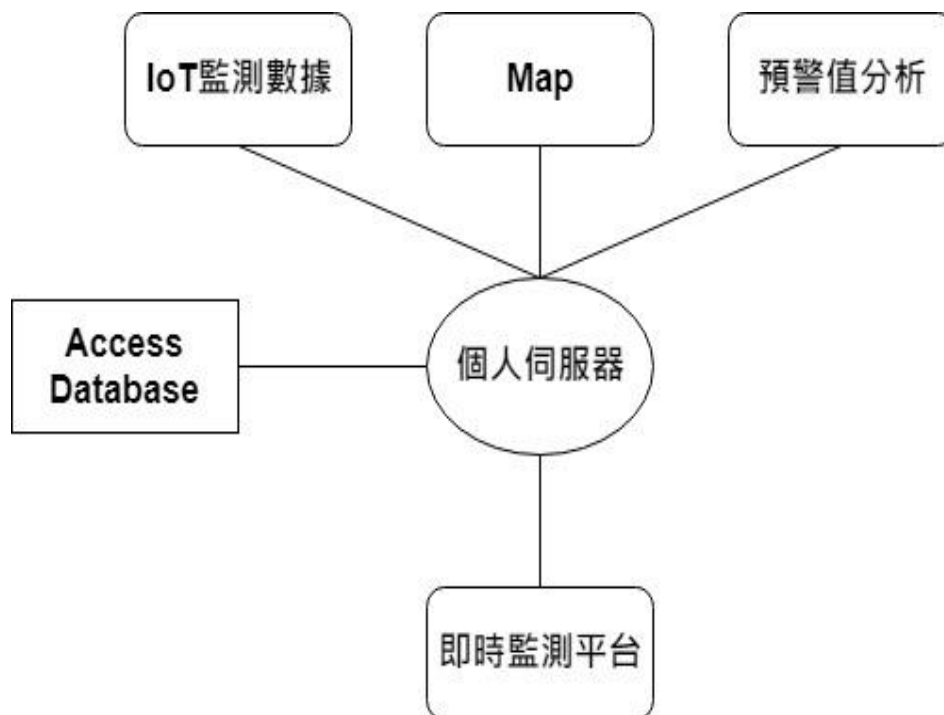


圖 3.23 雲端即時監測平台架構示意圖

平台具體執行步驟如下：

(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。本計畫使用 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、表格化展示於平台。

運研所開發之網頁式雲端平台已於前期計畫進行初步測試，系統已

可達初步警戒值預警通知之目的，但為更符合使用者友善之設計觀點，使平台界面更合乎使用者需求，本年度朝使用者友善化方向精進。導入 Python DASH DAQ 套件，其具高效能的資料結構和簡單又有效的物件導向方法，且屬開源軟體，相較於 C++ 或 Java 更加容易入門，透過模組導入完成如網頁設計、爬蟲程式、互動式圖形介面與數學運算功能，本計畫即透過 Python 進行客製化網頁式雲端開發，進行各感測項目資料介接與儲存，並進行 HTML 架構下，圖形化介面設計，呈現即時監測值、計算之預警值與對應警戒燈號變化狀態。

圖 3.24 為台 20 線 52k 測站之整合平台即時資訊頁面重新設計之成果，主要分為現場監測配置圖、模組狀態、警示燈號、資料即時統計與簡化圖表顯示等項目，監測配置圖主要說明場址現有模組編號與相對位置，模組狀態則配合各模組之最後更新時間、運轉狀態與註解模組之監測標的，目前設定若模組更新時間與當前時間間隔大於 12 小時，則運轉狀態會由正常轉變為異常，讓使用者由面板確認各感測模組是否正常回傳監測資料。另外，以 DASHDAQ 套件分別設置 LED 燈號與相關重要數值顯示器(Indicator)，分別以地下水位深度設定預警值與警戒值，而擋土牆之累計傾角變化則做為行動值，水位燈號依據水位深度達預警值顯示橘燈、水位達警戒值顯示紅燈，而傾角若達行動值時，則變換為紅燈，平台之使用者可以簡單透過顯示燈號進行對應措施。最後以 24 小時累積雨量、最新地下水位深度與擋土牆累積傾角變化值，配合顯示器以數值方式呈現，除警示燈號外，也透過平台運算功能提供有關邊坡目前重要參數之數值。而圖 3.25 為前期發展之圖表展示功能進行簡化處理，分別對應雨量、地下水位與傾角變化欄位，提供使用者於平台上，直接進行歷史資料變化趨勢之確認，可自行指定對應監測標的的模組編號與顯示資料筆數。而原有資料下載與使用者權限管理，則進行保留，提供給業管單位介接現場原始監測數據與單位管理使用人員之功能。



圖 3.24 雲端平台即時顯示資訊精進架構說明(1/2)



圖 3.25 雲端平台即時顯示資訊精進架構說明(2/2)

本(110)年度擴充平台警示訊息主動通知功能，前期主要以電子郵件進行訊息通知，但考量目前社群軟體 APP 較貼近實際使用情境，因此，平台進行 Python 程式進行 HTTP request 連線之開發，可結合社群軟體 LINE notify 之功能，主動發動警示通知至 LINE 群組。自動化預警訊息發佈將有助於相關人員管理與通知，雲端平台建立簡易觸發事件設定(react event)，可依監測值數值大小、頻道狀態(有無數據點回傳、模組位置等)進行固定頻率之檢查，測試頻率可設置為每 10、30、60 分鐘或於每次最新數據點上傳時進行檢測，範例中以台 20 線崩積層地下水深度超越設定門檻值時，做為事件觸發條件，詳細自動化預警訊息發佈流程如圖 3.26 所示，觸發後將啟動雲端平台基於 Python 撰寫的功能 ThingHTTP，進行 HTTP Request 連線程序至網路網頁觸發整合平台 (IFTTT)指定網址進行訊息觸發，IFTTT 平台支援社群軟體如臉書、LINE、Gmail 或 SMS 簡訊發佈，使用者將可接收即時分析與預警訊息。



圖 3.26 自動化預警訊息發佈運做架構

以台 20 線 52k 飽和土層監測場址為例，當地下水位管理值達到預警值、警戒值，或傾角管理值達到行動值時，平台將主動發佈預警通知訊息(格式如圖 3.27 所示)，包含監測地點、目前狀態與對應門檻值以及目前感測值，110 年度整合淺層崩塌與飽和土層滑動預警架構，以關鍵燈號的方式簡化現場人員操作平台之複雜性，另外，模組運轉狀態判別整合於於網頁式雲端平台內，電子模組養護之行動依據。其中淺層崩塌與飽和土層滑動類型之門檻值訂定流程，可參考第六章「公路邊坡依時預警系統標準流程」，並以現存之場址做為應用範例，相關成果請參考第七章「應用範例」，訂定之門檻值於水力耦合解析架構

中，主要考量降雨入滲行為與破壞機制之極限平衡分析或二維數值分析，具依時特性，可提供現場人員反應時間。

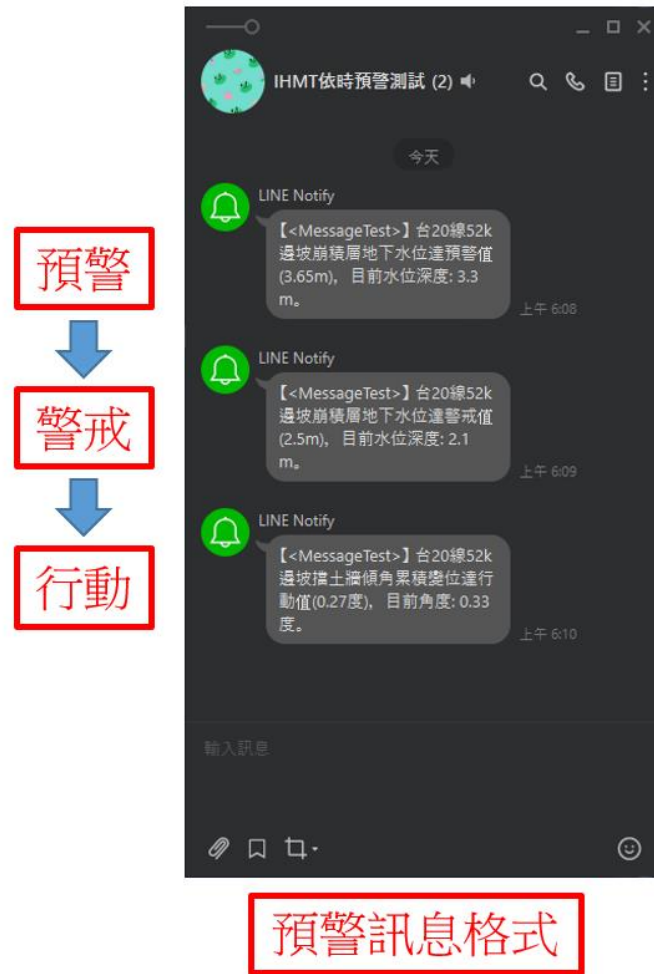


圖 3.27 自動化預警訊息發佈至 LINE 通訊群組

目前 Python 開發之網頁式雲端整合即時監測平台程式，主要架設於中華電信 hcloud 遠端機房之 CaaS 虛擬 Windows Server 主機中，其透過虛擬化伺服器（Virtual Machine, VM）技術，把本來一台實體伺服器，分成許多虛擬主機給不使用者進行操作，而這些 VM 又可以完整利用原來實體伺服器的運算能力，不用擔心被別人搶光而造成速度緩慢，因此，VM 比傳統多人共享一台的伺服器，可以提供更多操作彈性與便利性，整體效能也相對更好。企業租用雲運算 VM 的租金，是採用以小時計費的標準，再根據實際租用時間長度來計算，與事先購買

實體伺服器相比，可以省下大量的成本以及支出，且可將相關資安問題，交由專業電信商進行維護。

惟前期使用經驗上，發現 Python 程式隨運行時間增加而逐步緩慢或是不定期產生程式關閉之情況。因此，本年度為提升網頁平台運行之穩定度，除針對原有系統平台程式進行檢視，另外，整合 hicloud CaaS 主機排程開、關機之功能(如圖 3.28)，於每週日凌晨設定關閉虛擬主機 10 分鐘，其後自動開啟虛擬主機，並以 Window shell 提供之 StartUp 功能，可開啟「啟動」資料夾(如圖 3.29)，並放入指定 Python 程式後，將可於開機後，自動啟動對應之網頁式雲端平台，供相關使用者操作，確保系統持續運作並提供依時預警服務，經目前運轉測試結果，雲端平台可保持良好運作(如圖 3.30)。

新增排程:雲伺服器開機

1 選擇服務 2 設定時間 3 確認

排程類型*
 一次性 週期性

設定時間*
 每分 開始時間 0 : 0
 每時
 每日
 每週
 每月
 每年
 自訂

星期日 星期一 星期二 星期三
 星期四 星期五 星期六

排程結束時間*
 永遠不要
 於 2021-08-25 17 : 37

上一步 下一步

圖 3.28 hicloud CaaS 虛擬主機排程開、關機設定頁面

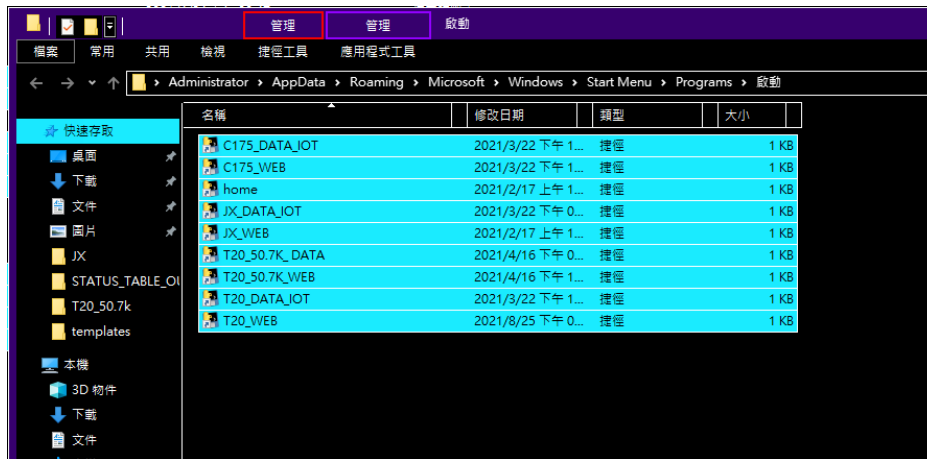


圖 3.29 Window shell 開機時啟動之 StartUp 功能設定頁面

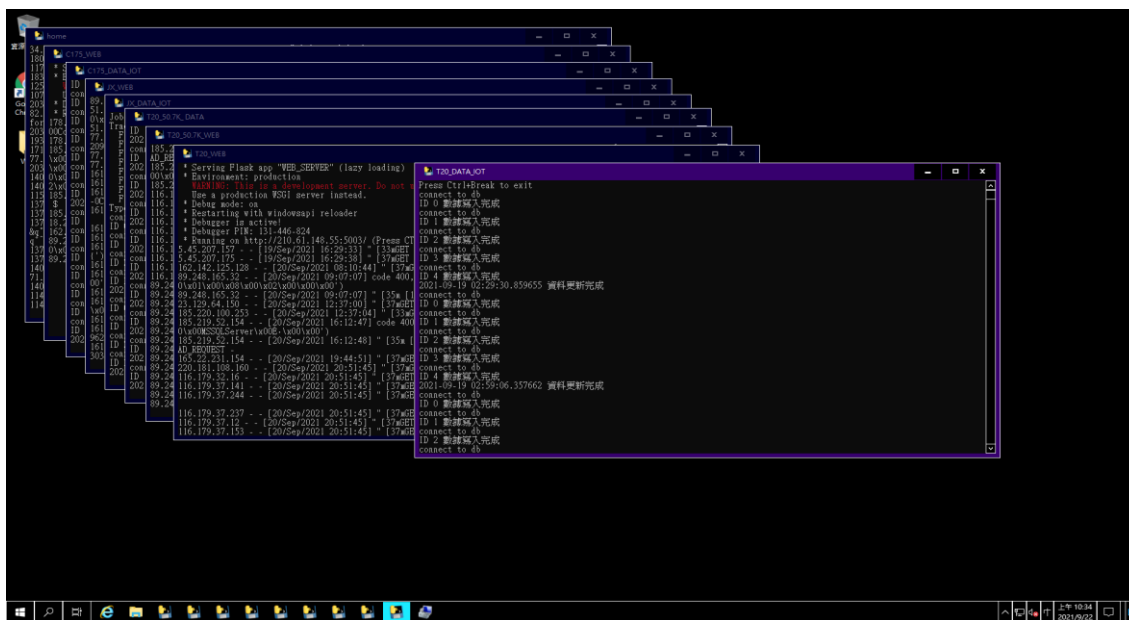


圖 3.30 網頁式雲端平台後端程式自動重啟示意

3.6 模組無線傳輸與模組耗電優化

依據前期計畫執行經驗，目前無線監測模組常遇之問題為現地模組充電效率不佳，而監測模組充電效率不佳的主要原因為太陽能板設置地點、樹林和結構物等遮蔽有關。其解決方式有二，一為增加整體電池或太陽能板配置大小，二為進一步降低整體耗電量，在考量推廣

此計畫成果之前提下，本(110)年度針對無線監測模組省電模式進行精進，以無線土層監測模組內置微控單元之優勢，進一步關閉不必要的電子模組以降低耗電量，在程式運行時，僅開啟必要電子模組之電源，並且精進資料無線電傳輸模式。目前電池與太陽能板的成本約佔整體監測模組成本 60 % 左右，在無線監測模組整體耗電量下降的情況下，將有進一步降低預警系統硬體建設成本之可能，利於後續成果推廣。以下就無線網路模組與 LoRa 無線電模組耗電優化方式進行說明：

3.6.1 4G/LTE 無線網路模組耗電優化

目前土層無線監測模組所使用之無線網際網路模組，近似於手機模組，可裝置 SIM 卡 (subscriber identity module) 並與電信商建構之無線網路進行連線，可進行通話、簡訊、網際網路連線等基本手機可用功能，且配置 GPS 功能，開發商為簡化使用者負擔，採用 AT command 進行模組操作，工程師已將相關撥打通話、發簡訊、TCP/IP 網路通訊協議編程為單一指令，使用者不需要完全瞭解相關 IT 資訊原理，既可完成無線網路模組之操作。

現場監測資料由微控單元透過 UART 介面操做無線網路模組進行上傳作業，由前述可知，IoT 模組歷經 2G (Sim-900)、3G (Sim-5320e) 至 4G (Sim-7500SA, 圖 3.31) 無線訊號或 NB-IoT (Sim-7000G) 等無線網路模組之更替。根據無線網路模組 AT command 使用說明，微控單元 (MCU) 可以由 UART 通訊界面以 AT+CSCLK 來進行網路模組睡眠模式之操作，其睡眠模式近似於手機使用的飛航模式，將會進一步關閉模組不需要的功能，以減少元件整體耗電情況，其睡眠模式的操作指令與對應模式的瞬時耗電數據整理如表 3-1 所示。前期計畫發展之無線模組的伺服器端 (server) 於現場資料蒐集後，主要使用 AT+CIPSEND 指令連接遠端伺服器上傳監測資料，當無線網路模組處於資料上傳模式時，其瞬時耗電經實驗室儀器測定約為 130.0 mA (於 5V 工作電壓下)，當監測數據上傳程序完成後，模組將回復為待機模式，此時仍保持 4G 網路連通，可隨時進入資料上傳程序，其待機狀態下，耗電數據約為 13.7 mA，而當 MCU 完成所有資料程序後，無線網路模組則常時保持

於待機模式下。



圖 3.31 4G/LTE 無線網路模組 (Sim-7500SA)

表 3-1 無線網路模組睡眠模式指令與耗電數據

模組 AT 指令	進入模式	瞬時耗電數據
AT+CSCLK = 1	睡眠模式	1.6 mA
AT+CSCLK = 0 (配合 DTR 腳位電阻 上拉)	待機模式 (4G 網路連通)	13.7 mA
AT+CIPSEND	資料上傳模式	130.0 mA

綜合上述，本(110)年度新增無線網路模組之睡眠模式控制，以 AT+CSCLK 指令進行控制，監測現場之伺服器端將於完成所有無線資料蒐集與上傳程序後，由 MCU 通過 UART 通訊界面給於網路模組 AT+CSCLK=1 指令，使模組進入睡眠模式，此時網路模組瞬時耗電數據為 1.6 mA，當 MCU 結束睡眠模式，再次傳送 AT+CSCLK=0 指令並配合 DTR 腳位電阻上拉，使無線網路模組回復至待機狀態並連通 4G 網路。在考慮現場資料擷取週期約為 30 分鐘/每筆的情況下，資料上傳遠端伺服器程序約為 1 分鐘左右，相較於前期保持常時待機模式的情

況下，在剩餘擷取週期之 29 分鐘內，可相對節省約 88 % 的電量 (12.1mA/13.7mA)。

無線網路模組主要配置於現場資料閘道器(gateway)中，其總運作時間，除考量電子元件耗電性外，仍需考量電池總電量與現場配置感測端數目。以台 20 線 52k 場址為例，鋰電池常態配置 12 顆，且現場設置 5 組感測端模組，在無額外太陽能回充電源之情況下，原配置可提供電子模組持續運作約 5 日，而透過啟用無線網路模組睡眠模式，可提升至約 8 日。伺服端模組於常時狀態下，控制內部所有電子元件耗電降低，提高整體系統穩定性與降低耗電，更符合野外監測需求與解決現場充電效率不足之問題。

3.6.2 LoRa 無線電模組耗電優化

為降低土層無線監測模組整體耗電量，對於伺服端可以精進之部分，為增加無線網路模組睡眠模式控制，而對於現場客戶端(client)之部分為更新現場 LoRa 無線電模組之喚醒模式(圖 3.32 為模組實體照片)。由於計畫使用之微控單元(MCU)屬於單工系統(single task system)，微控單元於同一時間內僅能執行一項工作命令，在研究初期時，閘道器與感測端間之資料傳輸屬於被動式傳輸(passive transition method)，此類架構須全程維持閘道器開機狀態並等待各感測端傳輸資料，而感測端互相依據各自模組上時鐘模組進行時間排程，並依序傳輸資料至閘道器，但在感測端時間出現誤差(time error)時，資料將互相干擾、排擠，而出現資料點消失之情況，且閘道器全程開機的情況下，對於電力系統將是一大考驗。



圖 3.32 LoRa 無線電模組

對於主動式資料傳輸(active transition method)而言，在區域監測網路中，由閘道器對所有感測端模組進行統一控制，如圖 3.33 所示，為目前主要採用之智慧感測流程，稱做主動對話式資料傳輸(active communication data transition)，由閘道器統一喚醒各感測端，並依照節點順序，依序取回各模組感測資料，閘道器與感測端之間之溝通為雙向(bi-direction)，並於全區資料傳輸完成後，閘道器將統一各感測端進入睡眠模式後並自行自入睡眠模式，設定之定時喚醒功能將於指定時間區段後喚醒閘道器重複上述運程序，透過主動控制方式將可避免資料互相排擠，在模組處於睡眠模式時，瞬時電流將小於 1 mA，透過長時間睡眠模式節省模組電池電力；主動式架構也可依據不同模組進行不同監測頻率監測，如設定分層含水量感測監測週期為 15 分鐘，而雨量計監測週期為 1 小時等。

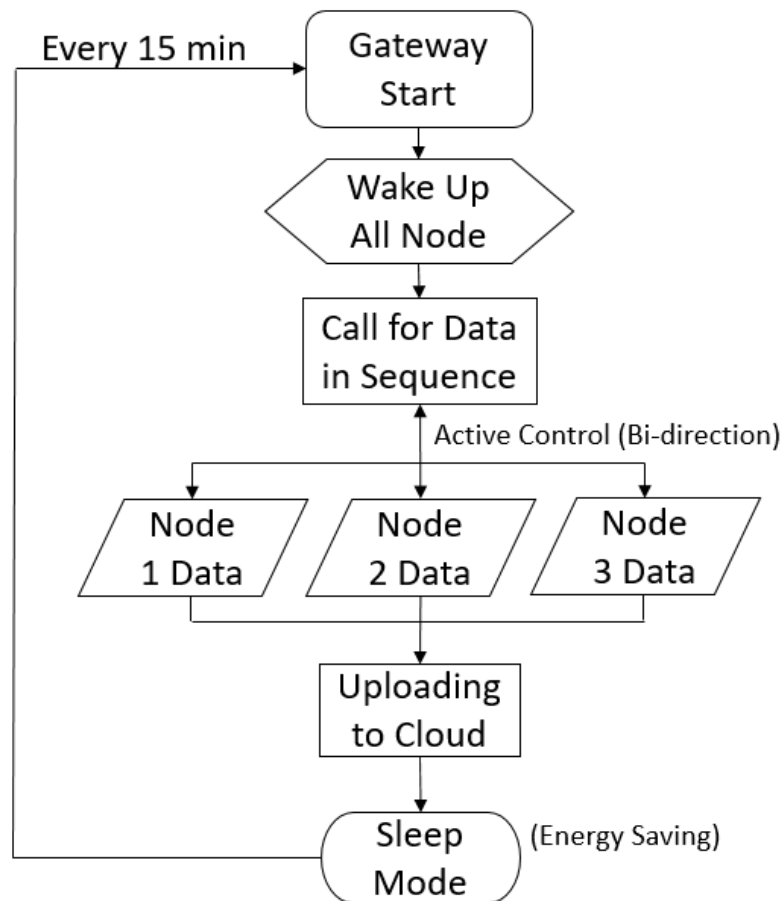
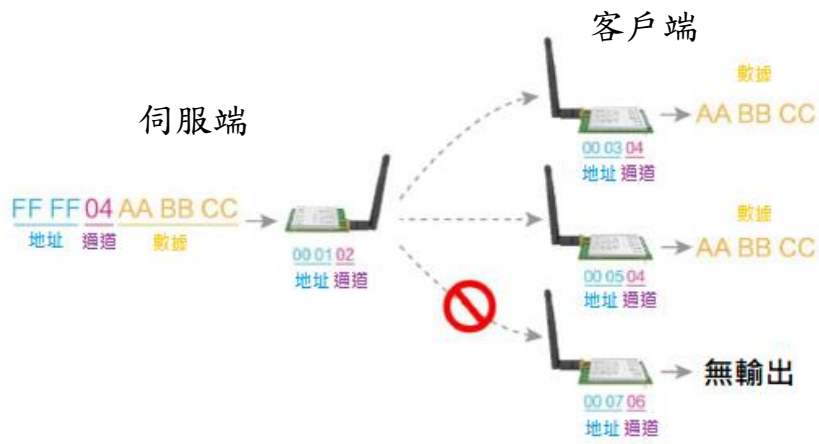


圖 3.33 伺服端主動式資料蒐集流程

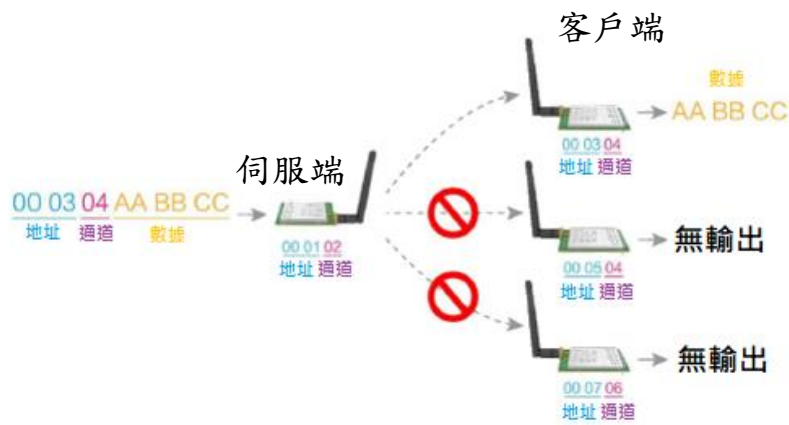
圖 3.34 為 LoRa 無線電模組資料傳遞架構，為進一步節省客戶端(感測點電子模組)之電量，本(110)年度導入 LoRa 無線電模組之定點喚醒功能。在原有主動式資料蒐集流程下，當伺服端喚醒監測場域，僅設定 LoRa 模組為廣播模式，在可接受到無線電波的範圍內，相同通道之模組皆可接受到相同的數據，如圖 3.34(a)，當伺服端向指定通道 04 發出 AA BB CC (16 進位制)的數據時，在客戶端一側僅有相同通道之 LoRa 模組可以接收到指定數據 AA BB CC，在同一監測場域內，如通道 06 則無數據輸出，此為前期計畫使用之資料傳遞模式，伺服端進行統一操作，喚醒場域內所有感測模組，並依序進行回收數據與上傳雲端作業，因此在伺服端上傳某一監測節點數據時，其餘模組需要耗費額外的電力，等待伺服端依序收回資料。

圖 3.34(b)為單點喚醒模式架構，當伺服端送出無線電資料時，須滿足相同通道與地址兩條件，才能接收到數據，如圖(b)中雖然同為通道 04，但伺服器端指定接收地址為 03 時，僅有一客戶端滿足條件，輸出 16 進位制資料 AA BB CC。因此，透過上述模組操作特性，可精進主動式資料蒐集流程，在流程不變的情況下，設定不同感測端的地址，使伺服端可依序喚醒感測模組，可節省原額外等待的電力，使各客戶端模組進一步節省電力。

依據系列計畫研究成果發展之無線土層監測模組，可廣佈於具降雨崩塌潛勢之邊坡場址，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。而即時監測系統搭配合適之解析方法為現今邊坡穩定安全監測之趨勢，隨著監測儀器自動化記讀與傳輸設備與技術進步，重要監測資訊傳輸與呈現益顯重要，道路邊坡安全監測亦應逐步邁向智慧化，以自動化監測、即時呈現與主動提出警訊為目標。計畫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、地下水水位及擋土支撐系統傾角變位之監測模組，形成分佈式土層監測網路，可做為後續發展類似監測系統之範例。



(a) 廣播模式(指定通道)



(b) 定點喚醒模式(指定通道與地址)

圖 3.34 LoRa 無線電模組資料傳送架構

第四章 淺層滑動場址監測成果

現有淺層滑動監測場址分別為甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地(以下簡稱甲仙場址)與台 20 線 50.7k 邊坡，而前期阿里山五彎仔監測場址經 110 年度 3 月份工作會議決議撤站，目前甲仙場址與臺 20 線 50.7k 處場址之監測系統仍持續運作中，淺層崩塌場址維護狀況彙整如表 4-1 所示，

表 4-1 淺層滑動場址 110 年度設備故障排除彙整表

故障排除時間	場址	故障(施工)原因	排除方法	備註
4/2	甲仙 & 台 20 線 50.7k	更換類比式水份計	分層含水量計外構更換	正常運作
5/27	台 20 線 50.7k	ID1 水份計感測異常	分層含水量計外構更換	回復正常運作
6/7	台 20 線 50.7k	ID2 & ID3 位置發生崩塌	現場勘查	暫停監測
7/28	甲仙	Node2 ADC 電壓轉換模組異常	電子元件更換	回復正常運作
8/17	甲仙	Node1 電池耗盡	更換電池	回復正常運作
10/15	台 20 線 50.7k	4G 網路模組異常	電子元件更換	回復正常運作

4.1 甲仙邊坡場址說明

甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地曾於 2005 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 2009 年莫拉克颱風期間又導致邊坡再次坍塌。2010 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 155 公厘，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 公尺之崩積層或岩土界面。

本計畫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。

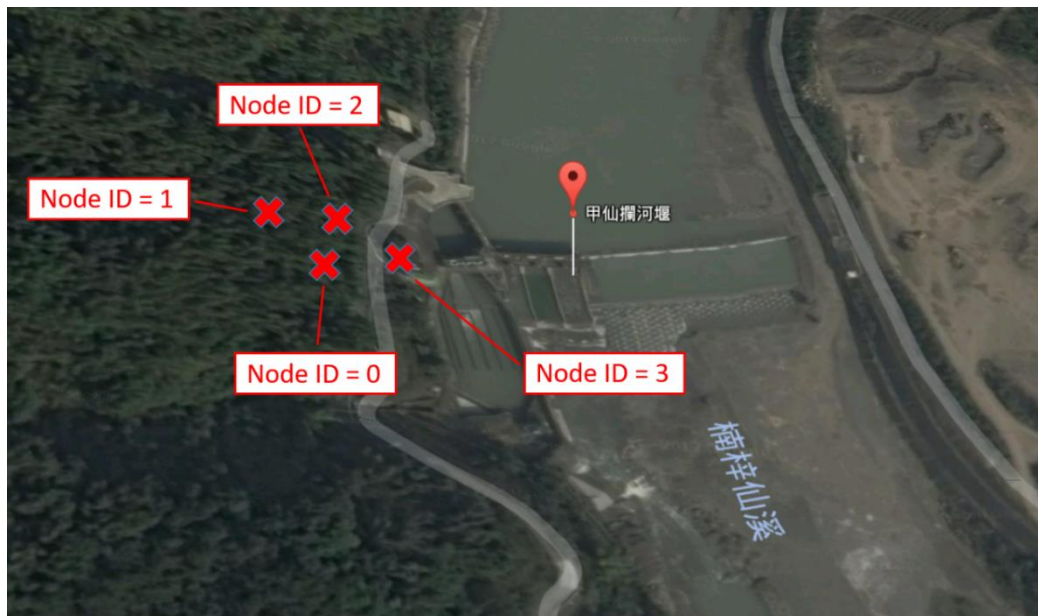


圖 4.1 甲仙場址監測模組相對位置圖

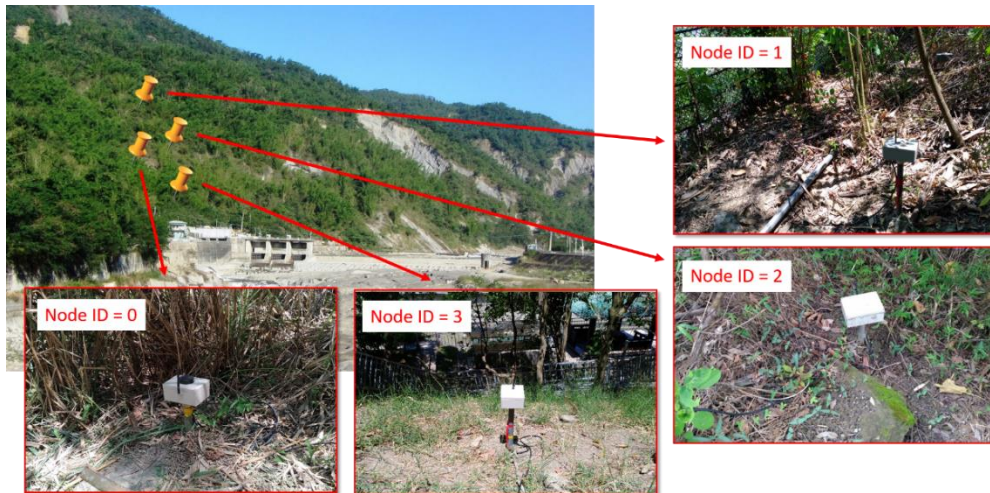


圖 4.2 甲仙場址監測站點周遭環境

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 年安裝完畢，並於 107 年升級更新優化之模組，108 年進行優化，而 110 年月 3 月前採用之雲端監資料庫為 Thingspeak 伺服器。在考量資料安全性與本土場商雲端資料庫日趨成熟的前提下，110 年度資料庫全部採用本土電信商中華電信開發之 IoT 大平台提供的雲端資料儲存功能(詳見第三章)。監測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計畫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。以下彙整本期現地監測期間體積含水量計以及傾斜移之量測成果：

4.2.1 甲仙場址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，本計畫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，與本計畫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 4.3 至圖 4.6 分別為 Node0~Node3 自 2020 年 1 月至 2021 年 11 月期間之體積含水量監測資料，2021 年 4 至 5 月期間因更換水分計模組且處於旱季因此讀數接近零，110 年 6 月開始有明顯降雨事件，可顯示模組正常運作中。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. 新型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。

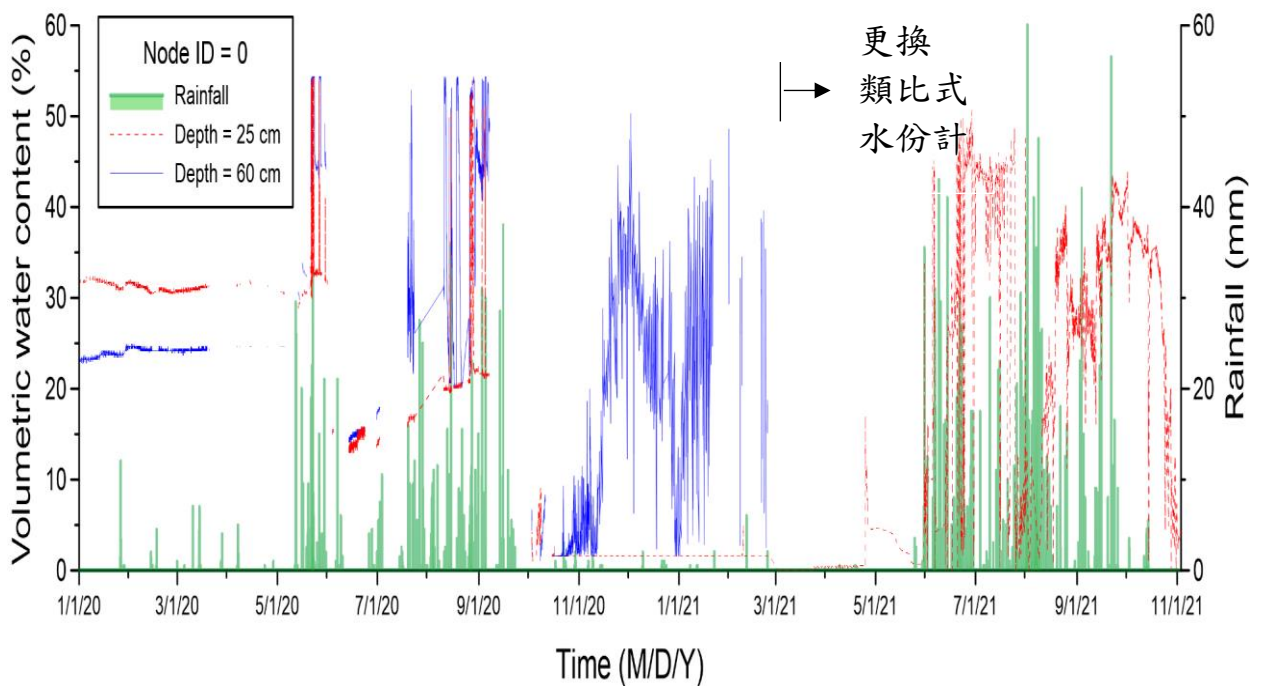


圖 4.3 甲仙場址 Node0 體積含水量量測結果

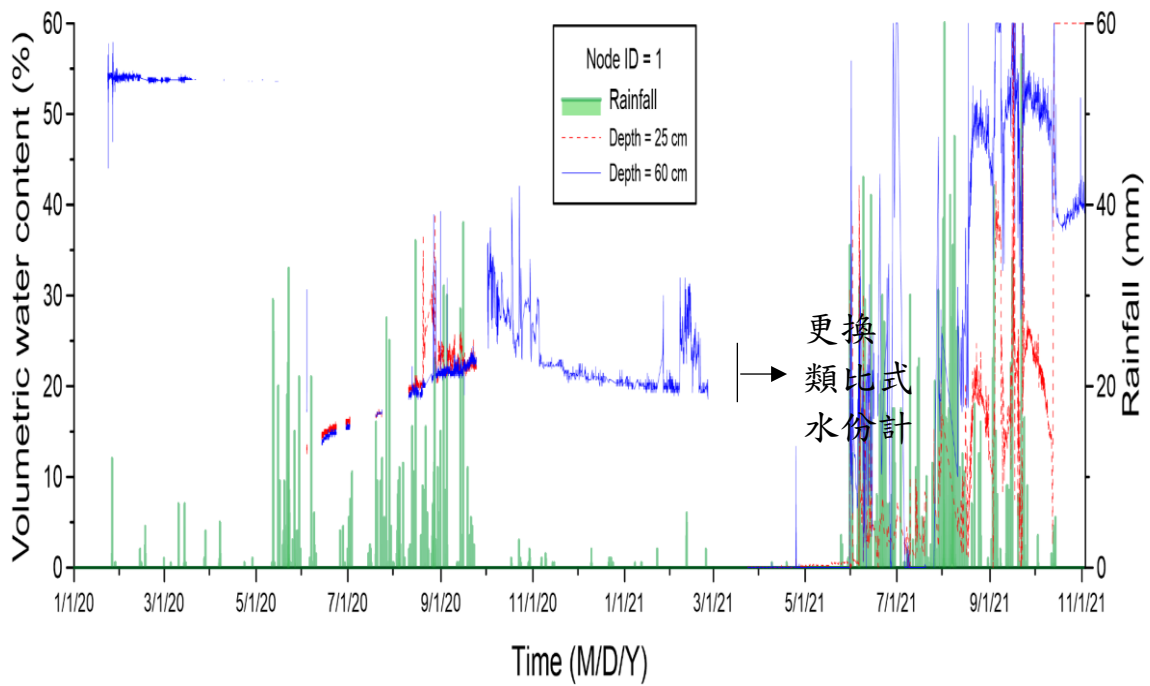


圖 4.4 甲仙場址 Node1 體積含水量量測結果

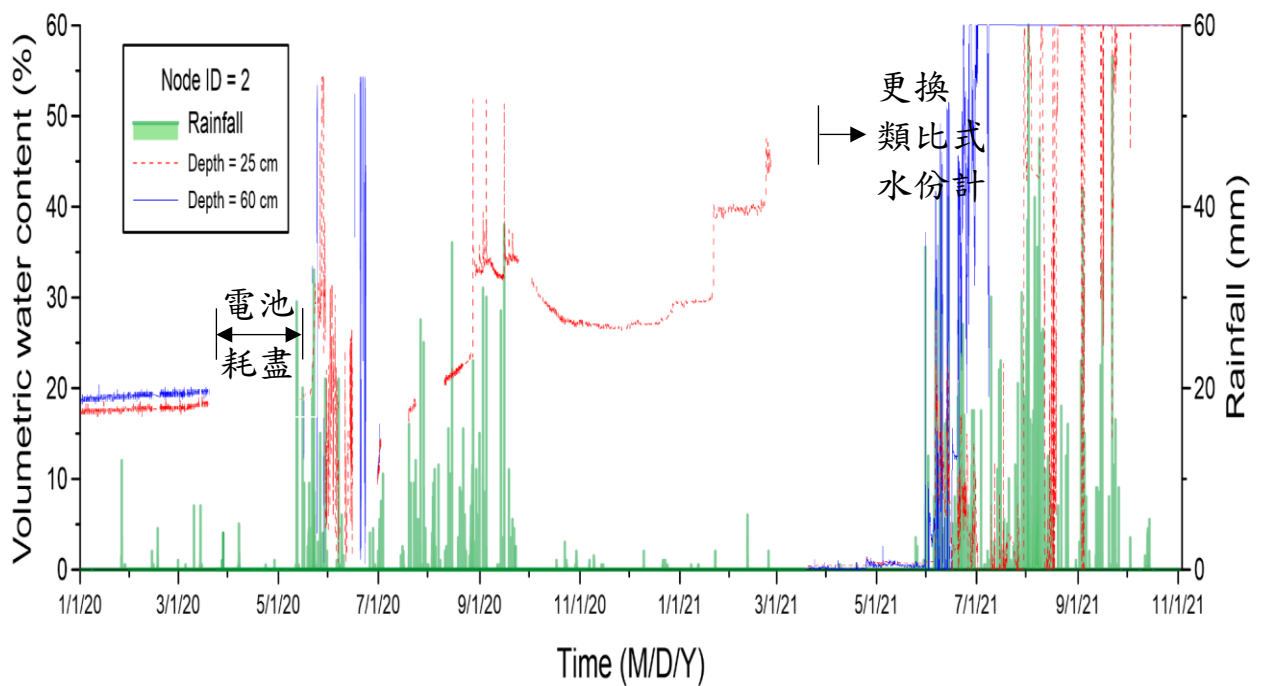


圖 4.5 甲仙場址 Node2 體積含水量量測結果

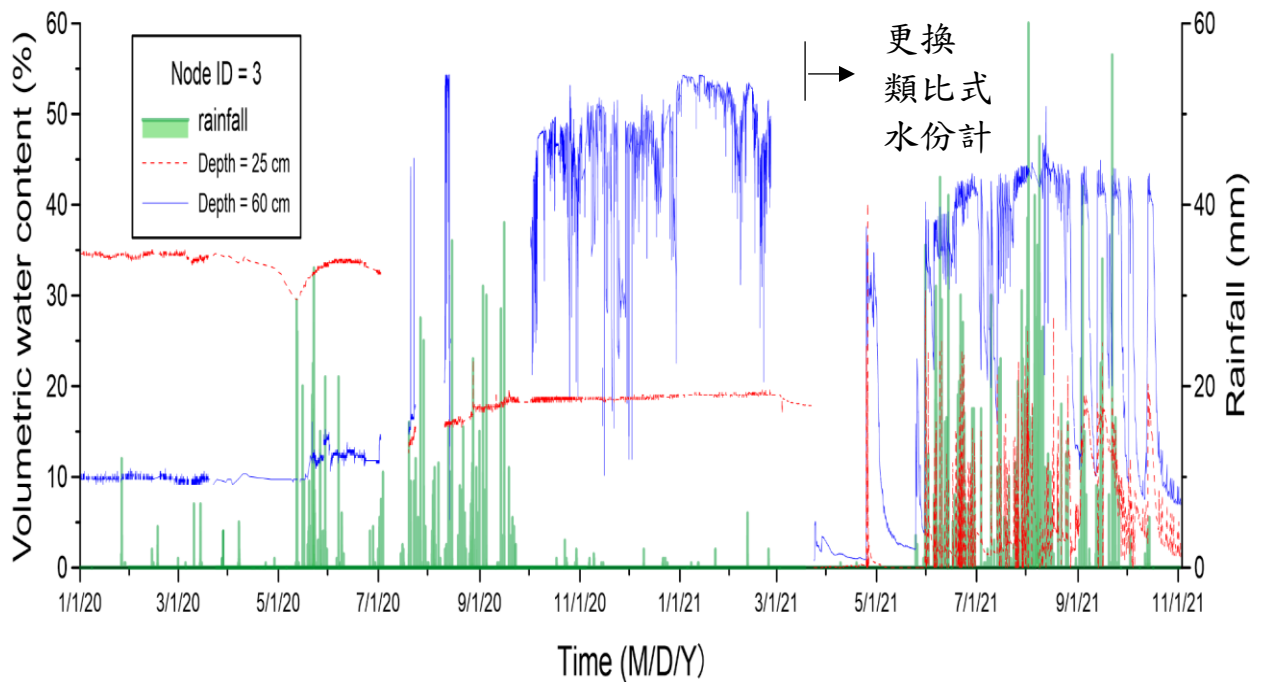


圖 4.6 甲仙場址 Node3 體積含水量量測結果

4.2.2 甲仙場址傾斜儀監測結果

圖 4.7 為自 2021 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 4.8 所示，結果顯示 2021 年度至今，甲仙場址邊坡之各測站於觀測期間內有 1~2 度微幅的傾斜，其方向同邊坡走向，而場址傾斜監測主要反應土壤表層變形行為，非屬擋土系統，量測位置距擋土牆仍有一定距離，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，符合現地邊坡勘查結果。而 Node2 於 5 月中至 6 月量測數據區段波動，經現場勘查結果，場址無明顯破壞現象，應為電子模組類比數位轉換器異常所致。

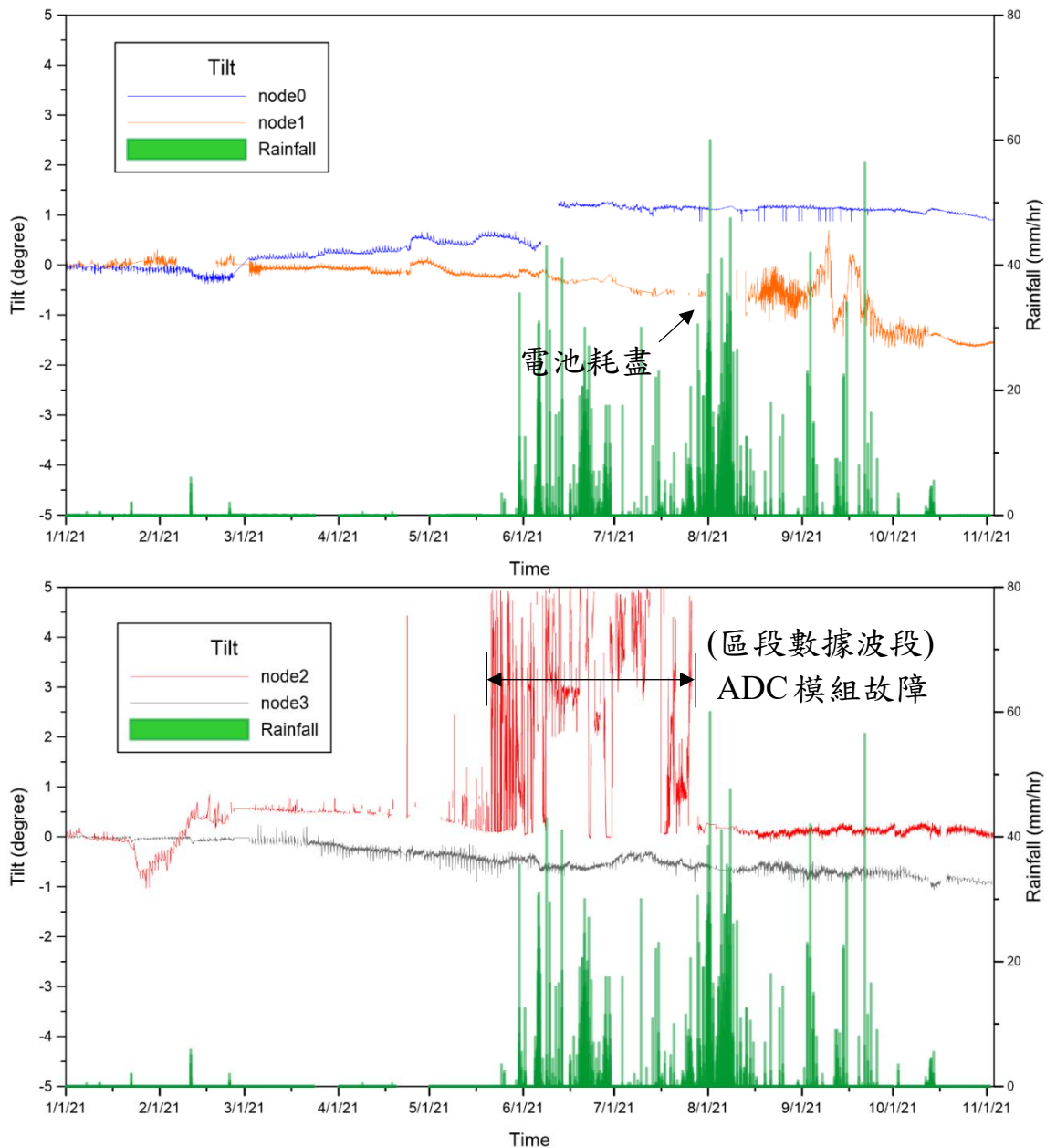


圖 4.7 甲仙場址地表傾斜角監測結果

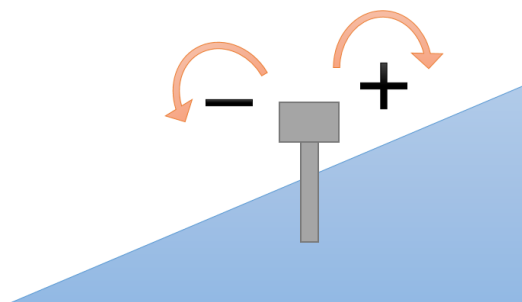


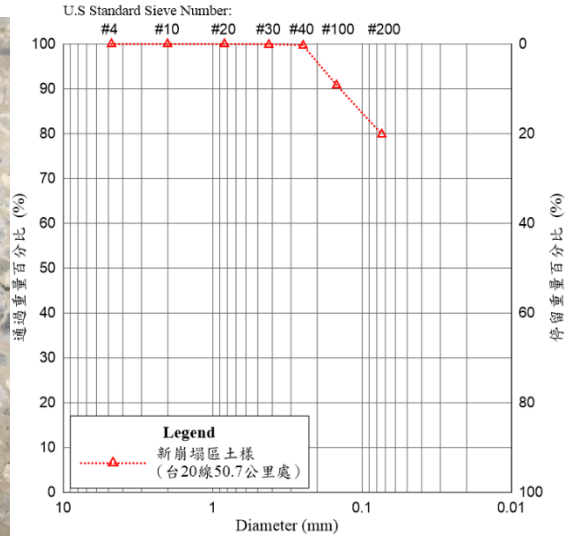
圖 4.8 土壤表層傾斜角量測方向

4.3 台 20 線 50.7k 邊坡場址及監測資料

本年度計畫經 3 月份工作會議決議，原阿里山五彎仔測站較不符合目前計畫需求，決定撤除測站，並新增台 20 線 50.7k 邊坡做為淺層非飽和崩塌行為監測點，此處場址與計畫內飽和層滑動監測場址相近(台 20 線 52k)，如圖 4.9 所示。台 20 線主要橫跨臺南、高雄與臺東三縣市，50.7k 位於臺南南化至高雄甲仙路段，下邊坡處有一無名溪橫跨連接至南化水庫，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，兩場址雖然距離僅 1 公里左右，但邊坡破壞機制明顯不同。50.7k 處道路上邊坡坡角約在 45~55 度左右，現場取回之土樣如圖 4.10 所示，可發現在乾燥狀態下，土樣自立性極高，濕土單位重約為 18.3 kN/m^3 ，依篩分析結果其土壤顆粒組成約 80% 為細粒料土壤(通過#200 篩)與 20% 的砂，阿太堡試驗結果整理如表 4-2 所示，現地土壤塑性限度為 25.4% 與液性限度為 33.0%，其塑性指數為 7.6%，其統一土壤分類為低塑性粉土(ML)。



圖 4.9 新設台 20 線 50.7k 監測場址相對位置



(a) 現地土樣照片

(b) 篩分析結果

圖 4.10 台 20 線 50.7k 邊坡土樣

表 4-2 台 20 線 50.7k 邊坡土樣阿太堡試驗結果

PL (%)	LL (%)	PI (%)
25.4	33.0	7.6

場址平均坡角大於土壤之摩擦角，但仍可保持高度自立性，此額外剪力強度由土壤基質吸力提供，但在雨季降雨行為下，基質吸力將隨土層體積含水量上升而下降，直至臨界狀態(FS=1)，此時產生淺層崩塌，因此，可初步推論此處場域其邊坡符合計畫定義之淺層非飽和崩塌行為。圖 4.11 為 50.7k 邊坡 110 年 4 月之地貌，場址曾經歷崩塌事件，業管單位於破壞後初步移除阻擋道路之土方，如圖 4.12(a)為原重力式擋土牆傾倒，土壤移除後坡角約為 55 度左右，如圖 4.12(b)，因 109 年全年無持續性強降雨，在無觸發崩塌的降雨因子下，50.7k 邊坡處於相對穩定狀態。



圖 4.11 台 20 線 50.7k 邊坡 110 年 4 月地貌(1/2)



(a) 擋土牆傾倒

(b) 牆背土方移除與削坡

圖 4.12 台 20 線 50.7k 邊坡 110 年 4 月地貌(2/2)

考量崩積層土壤降雨入滲反應為主要監測目標，且此場址短期監測目的為監測降雨引致之非飽和邊坡崩塌行為，因此，現場共安裝 3 組分層體積含水量計，以不同深度的體積含水量變化與邊坡表層傾度變化為監測標的，面向邊坡由左至右，以 ID1 至 ID3 進行編號，ID1 同時設定為伺服器端，以無線方式定時蒐集 ID2 與 ID3 監測數據，並上傳至中華電信雲端資料庫，如圖 4.13 所示。此區段於降雨下多次產生邊坡崩塌，ID2 與 ID3 主要安裝於未整治崩塌區域，而 ID1 主要安裝於完成改善工程之穩定區域，以確保崩塌行為觸發時，可持續回收監測資料，現場監測系統於 2021/4/14 完成安裝並上線回傳資料，各監測模組施工完成照片，整理如圖 4.14 所示。

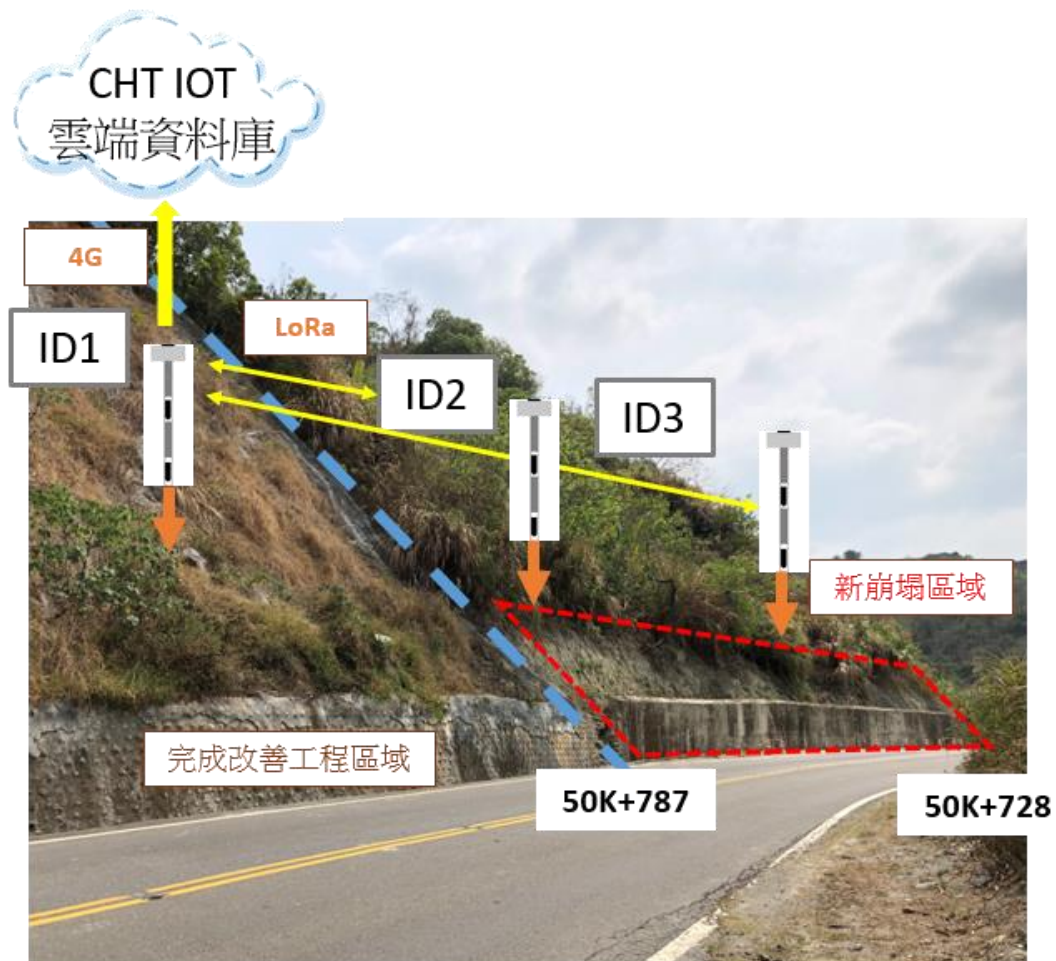


圖 4.13 台 20 線 50.7k 邊坡監測點配置說明



(a) ID1(安裝於型框植生中間處)



(b) ID2(削坡面上)



(c) ID3(原生坡面上)

圖 4.14 台 20 線 50.7k 邊坡各監測模組完工照

此處彙整台 20 線 50.7k 場址各監測模組資料，由 2021 年 4 月至 10 月份監測成果，其中 ID2 與 ID3 經歷 2021/06/05 強降雨事件後邊坡觸發崩塌，模組於 2021/06/07 損壞數據中斷；相關淺層崩塌監測成果與

水力力學耦合分析比較於第 6 章詳細說明。圖中雨量資料使用鄰近飽和層監測場址台 20 線 52k 雨量計進行整理，用以比對降雨入滲行為。圖 4.15 至圖 4.17 為邊坡降雨下不同深度體積含水量變化關係，可說明體積含水量隨降雨入滲增加，且隨降雨事件過後，體積含水量隨時間逐漸下降，顯示模組正常運作。圖 4.18 至圖 4.20 為安裝於分層含水量模組防水盒內，傾斜晶片反應之傾角變化，其位置接近於地表面，可以反應邊坡表層土壤變位反應。計畫分層含水量計係採人工鑽孔進行模組安裝，ID1 主要安裝於邊坡改善區域之型框植生中間處(參考圖 4-14(a))，此位置坡角大，無適當之立足處，因此人工開孔時，不易施力與控制開孔大小，造成安裝孔位過度擴孔，因此，ID1 於 110 年 9 月前的傾斜監測成果有明顯之傾斜變化增量，但現場勘查並無對應跡象，模組於 10 月重新鑽孔安裝施工後，傾角已無增加之趨勢。

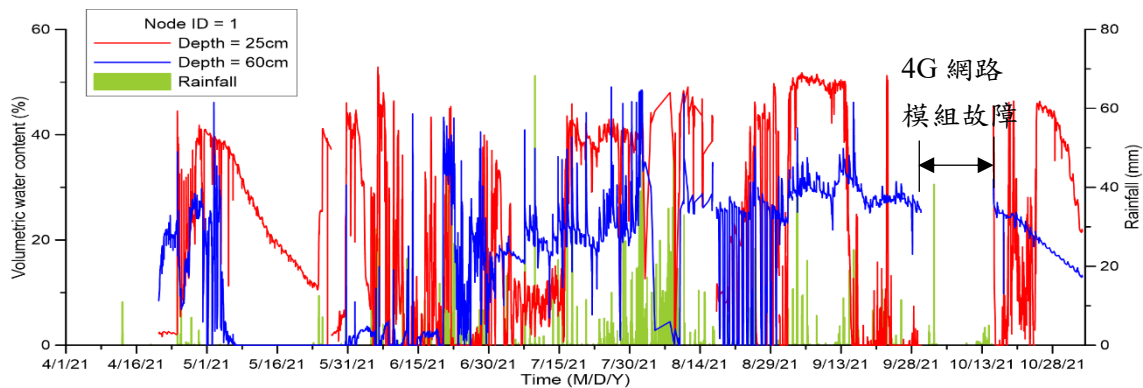


圖 4.15 台 20 線 50.7k ID1 體積含水量變化

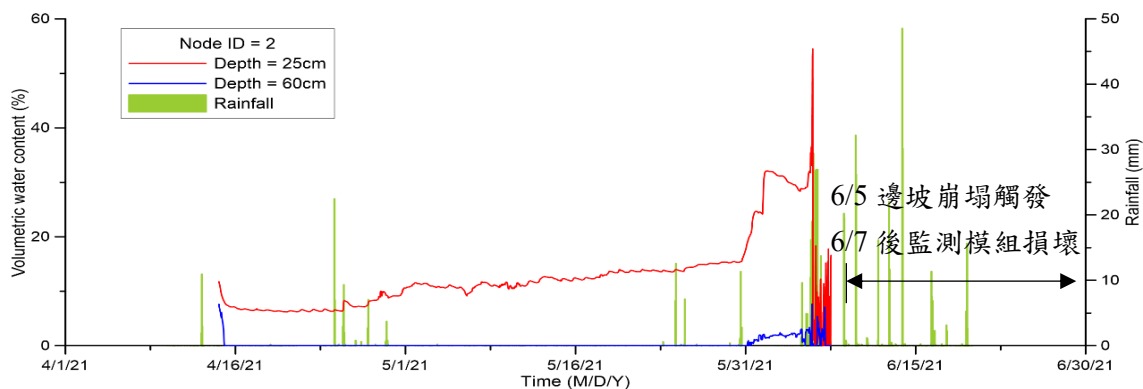


圖 4.16 台 20 線 50.7k ID2 體積含水量變化

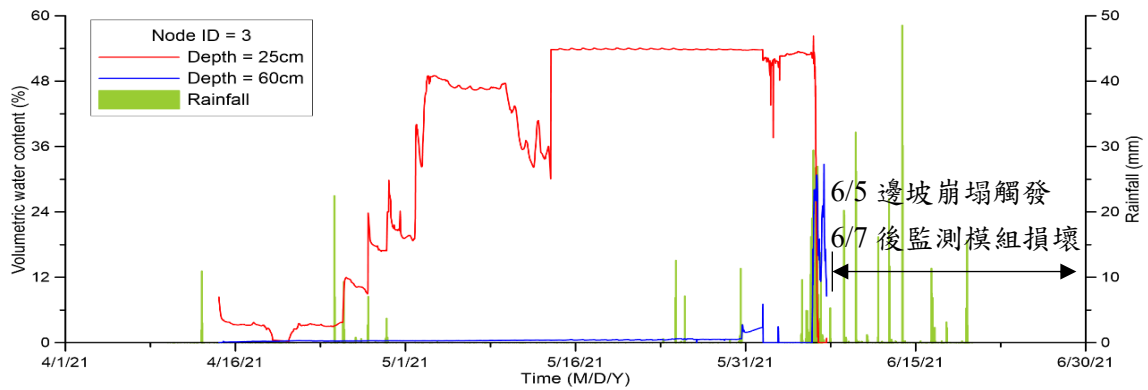


圖 4.17 台 20 線 50.7k ID3 體積含水量變化

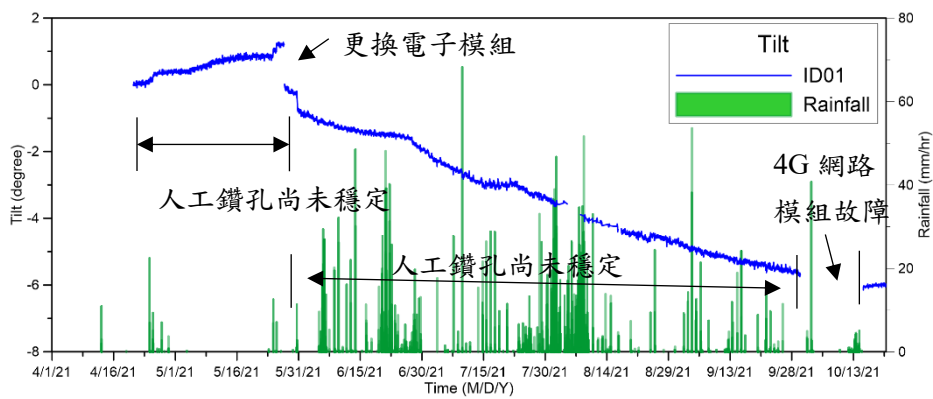


圖 4.18 台 20 線 50.7k ID1 邊坡地表傾角變化

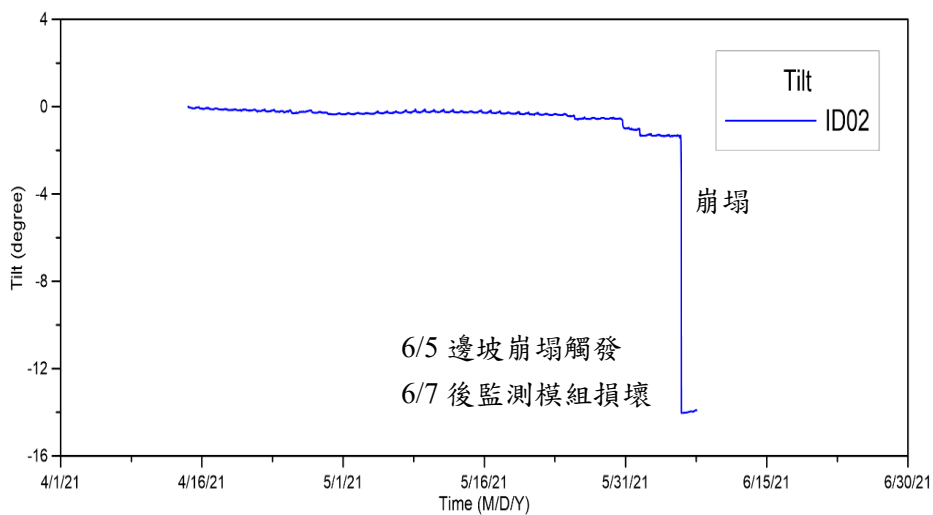


圖 4.19 台 20 線 50.7k ID2 邊坡地表傾角變化

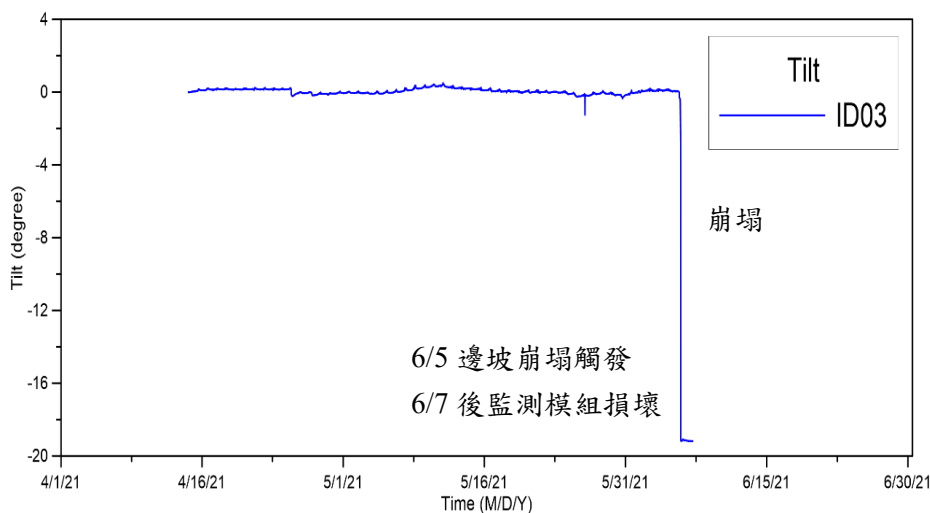


圖 4.20 台 20 線 50.7k ID3 邊坡地表傾角變化

4.4 台 20 線 50.7k 邊坡淺層崩塌監測成果

4.4.1 現地勘查成果

本章節主要說明此次計畫於量測到台 20 線 50.7k 淺層非飽和崩塌事件，崩塌事件發生於 2021/06/05 晚上，分別以現場勘查結果、監測數據破壞時序說明與淺層水力力學耦合分析，來分析此次崩塌事件，成果可驗證淺層水力耦合依時預警架構，做為後續此處邊坡或同類型邊坡之依時預警依據。

台 20 線 50.7k 道路上邊坡場址平均坡角大於土壤之摩擦角，但仍可保持高度自立性，此額外剪力強度主要由土壤基質吸力提供，但在雨季降雨行為下，基質吸力將隨土層體積含水量上升而下降，直至臨界狀態(FS=1)，此時產生淺層崩塌，因此，可初步推論此處場域其邊坡符合計畫定義之淺層非飽和崩塌行為。圖 4.21 為 2021/04/14 於 50.7k 邊坡拍攝之照片，場址曾經歷崩塌事件，業管單位於破壞後初步移除阻擋道路之土方，土壤削坡後，靠擋土牆側之坡角約為 55 度左右，而其原生邊坡約在 45 度左右，均大於土壤摩擦角，而其原有重力式擋土牆於前次崩塌發生時，已產生傾倒與開裂狀態。因 109 年全年無持續性強降

雨，在無觸發崩塌的降雨因子下，50.7k 邊坡應處於臨界穩定狀態，且尚未完成相關改善工程，因此，適用於本計畫發展之淺層崩塌監測研究使用。



圖 4.21 台 20 線 50.7k 邊坡 4/14 邊坡現況

圖 4.22 為台 20 線 50.7k 邊坡場址於 2021/06/07 拍攝之照片，可發現原土層削坡後至傾斜擋土牆被之通道，再次被崩塌之土石淹沒，屬土層淺層崩塌之跡象。圖 4.23 為鄰近 50.7 處場址約 200 公尺處拍攝之表土沖刷流失照片，可說明此區段之高度不穩定性，降雨事件需具備長延時與足夠之降雨強度，此區段若不整治情況下，可能再次發生類似之崩塌事件。圖 4.24 為台 20 線 50.7k 傾倒重力式擋土牆滲水狀況，可說明崩塌之土體，此時處於趨近飽和狀態，因此，臨近原破壞擋土牆之土壤塊體持續滲水。



圖 4.22 台 20 線 50.7k 邊坡 6/7 邊坡現況(6/5 發生崩塌)



圖 4.23 台 20 線鄰近 50.7k 邊坡未改善區域崩塌現象



圖 4.24 台 20 線 50.7k 原傾倒重力式擋土牆滲水狀況

此次明顯發生崩塌區段主要位於 ID2 與 ID3 的新崩塌區域(請參考圖 4.13 的現場監測配置)，圖 4.25 為 ID2 於此次崩塌事件發生後，ID2 監測模組之狀態(照片拍攝於 2021/06/07)，可觀察到 ID2 模組防水盒發生明顯之傾倒(內置有傾斜晶片)，原設置之太陽能板被埋置於崩塌土石中。於現場取出 ID2 外構之 PVC 管後，可發現 PVC 管於第二節體積含水量計的上方(60 公分深度)，產生明顯的彎折，因此，可推測 ID2 位置之崩塌深度約為 45~60 公分左右，另外，經由現場觀察，ID2 模組原地表下 45 公分處為風化程度較低之岩盤，此次崩塌為沿坡面逐漸產生沖蝕溝，漸進帶走岩盤以上之崩積土樣。

圖 4.26 為此次崩塌事件發生後，ID3 監測模組之狀態(照片拍攝於 2021/06/07)，ID3 模組相較於 ID2 模組設置於原生邊坡，而太陽能板設置於電子模組上方(參考圖 4.14)，由現場照片可觀察出，ID3 模組隨崩塌土石被淹沒，而太陽能板更隨土石崩塌向擋土牆背側移動水平距離約 6 公尺左右。圖 4.26 右下方為 ID2 與 ID3 監測模組外購 PVC 管之比對，相較於 ID2 之 PVC 管，ID3 模組外構保持完整，並無受到剪動產生變形，因此，可推論其破壞深度約為 45~60 公分。圖 4.27 為 ID1

於 2021/06/07 之現況，可說明完成改善區域不受此次降雨事件影響整體穩定性。



圖 4.25 台 20 線 50.7k ID2 模組崩塌後狀況



圖 4.26 台 20 線 50.7k ID3 模組崩塌後狀況



圖 4.27 台 20 線 50.7k ID1 模組 6/7 狀況

4.4.2 系統監測成果說明

本節主要彙整此次 2021/06/05 淺層崩塌事件監測成果，圖 4.28 為鄰近台 20 線 52k 建置之雨量計模組 6 月區間監測數據，可以歸納此次 110 年 6 月 5 日造成 50.7k 崩塌之降雨事件，其累積雨量約為 317 公厘，總降雨延時在 50 小時左右，依據中央氣象局分類，歸納於大雨至豪雨等級之降雨事件。此次降雨事件符合降雨事件需具備長延時與足夠之降雨強度，產生地表入滲行為，而入滲致使非飽和土層體積含水量上升、基質吸力與剪力強度下降，隨降雨行為下，浸潤面逐漸往地表下延伸，直至邊坡穩定之臨界狀態。

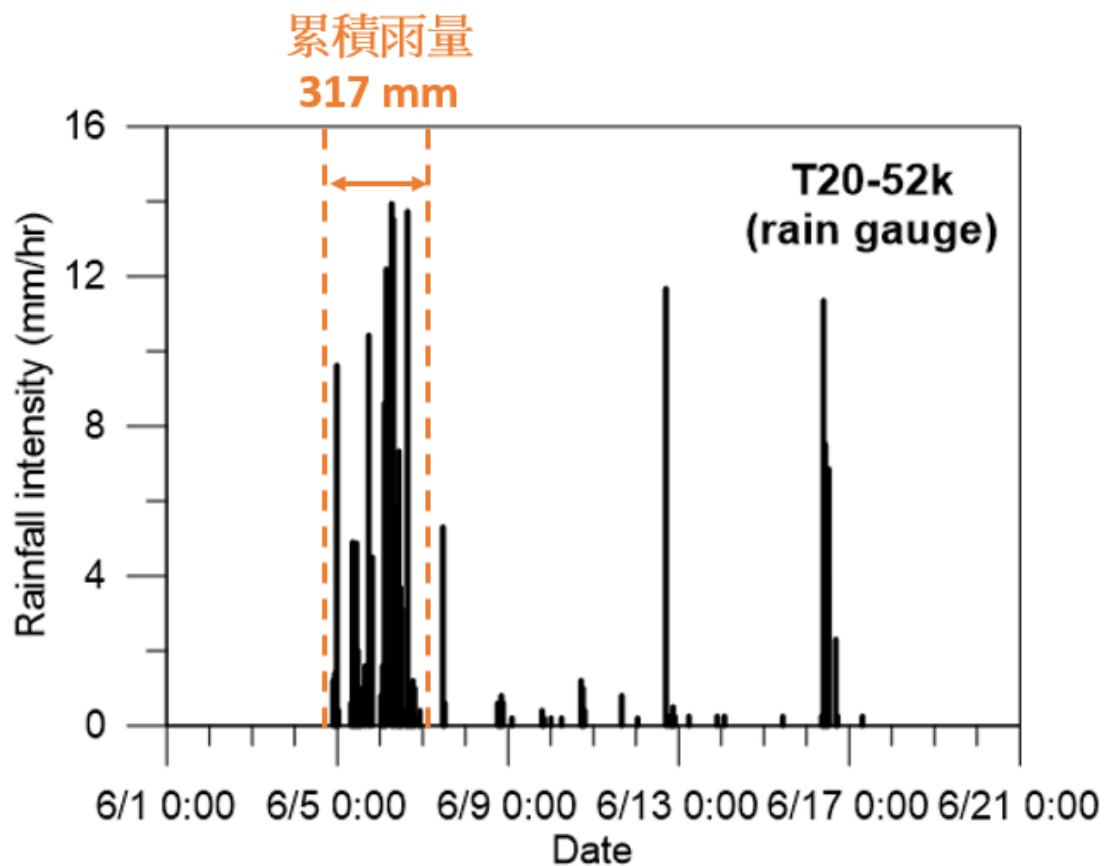


圖 4.28 台 20 線 52k 雨量計模組 6 月份監測數據

圖 4.29 為 ID2 此次崩塌事件各監測物理量之依時反應，分別為地表傾斜晶片量測之傾角變化、距地表下 25 公分處之體積含水量變化與距地表下 60 公分處之體積含水量變化，並對應各時間下之降雨特徵變化。對於 ID2 之監測成果而言，降雨事件開始(2021/06/04, 21:39)至邊坡表層土壤出現明顯傾角變化時間約為 24 小時，累積雨量約為 97.3 公厘，以地表傾角依時變化率明顯上升時，定義為邊坡破壞時間，則 ID2 位置破壞時間約發生於 2021/06/05, 22:09，以下依物理量變化時序開始說明：

1. 在降雨事件開始約 19 小時後(2021/06/05, 17:10)，地表下 25 公分處之體積含水量開始抬升，說明入滲浸潤面抵達 25 公分處。
2. 崩積層表層土壤傾角變化速率開始上升(發生於 2021/06/05, 20:39)，此時邊坡表層土壤崩塌啟動，開始產生變形行為。
3. 崩積層表層土壤傾角變化速率持續上升且抵達最大變化值，此時累積發生傾角變化約 12 度(發生於 2021/06/05, 22:09)，此時定義邊坡為破壞產生。
4. 同時 ID2 模組深度 25 公分體積含水量計量測到最大體積含水量(發生於 2021/06/05, 22:09)，此時深度 25 公分以上之土層處於飽和狀態，緊接體積含水量開始下降，表示深度 25 公分處土壤開始流失，可判別此處破壞為地表下 0 至 25 公分處一同產生崩塌/沖蝕行為。
5. ID2 模組深度 60 公分體積含水量計於整個崩塌過程中，體積含水量無明顯變化，可說明在浸潤面抵達 60 公分前，此處邊坡即產生破壞行為，因此無明顯數值抬升。(此現象可呼應圖 6.5 之破壞深度約為 45 公分處，做為破壞深度判別之佐證)。
6. ID2 模組於場址於崩塌事件產生後，持續回傳監測數據至 6/7 中午 12 時，此時為人員至現場勘查時間，說明模組設計具備足夠之韌性，於崩塌後仍可反應場址最新依時水力反應。

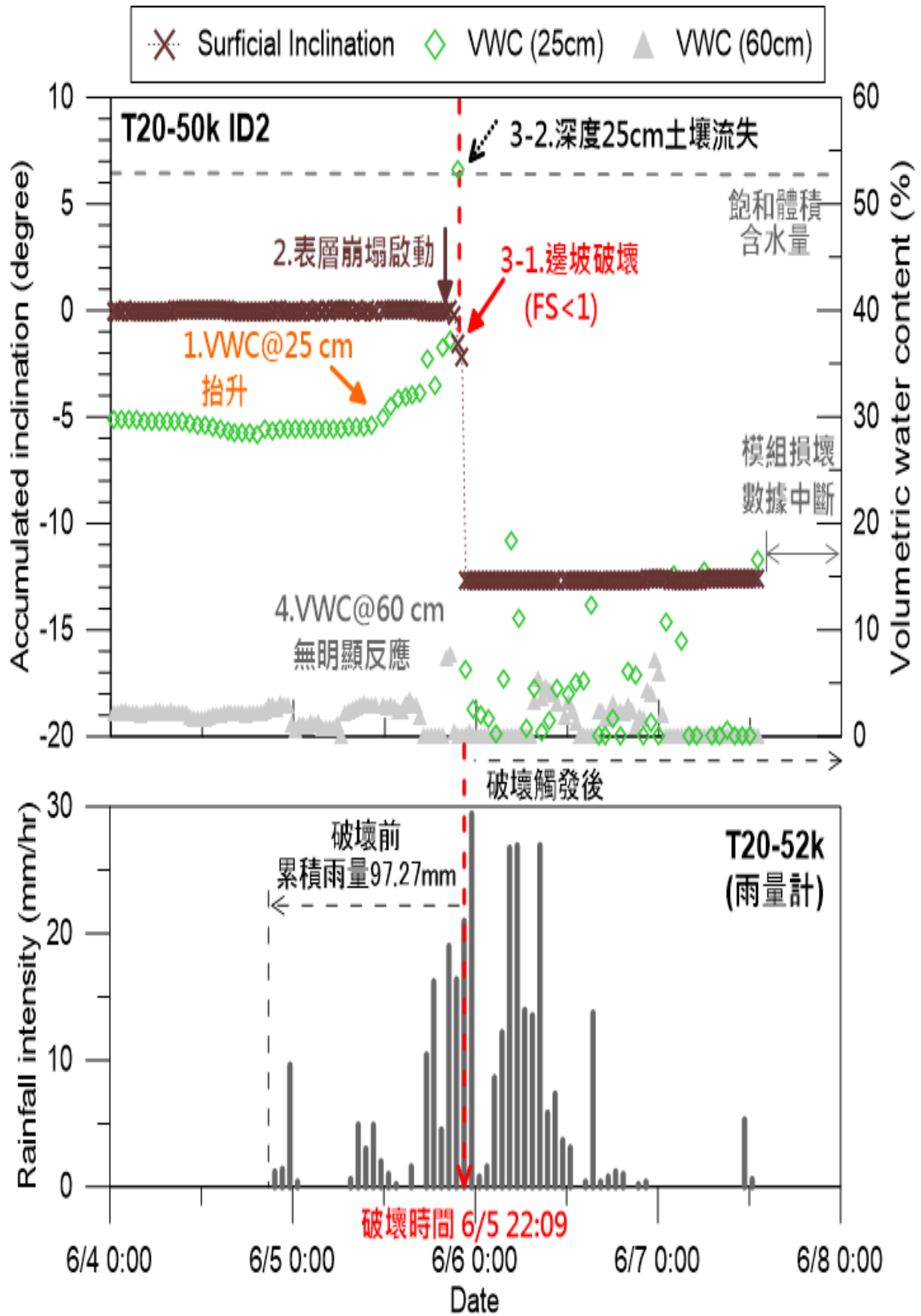


圖 4.29 台 20 線 50.7k ID2 6/5 崩塌事件監測成果

圖 4.30 為 ID3 此次崩塌事件各監測物理量之依時反應，同樣為地表傾斜晶片量測之傾角變化、距地表下 25 公分處之體積含水量變化與距地表下 60 公分處之體積含水量變化，並對應各時間下之降雨特徵變化。對於 ID3 之監測成果而言，降雨事件開始(2021/06/04, 21:39)至邊坡表層土壤出現明顯傾角變化時間約為 23 小時，累積雨量約為 80.9 公厘，以地表傾角依時變化率明顯上升時，定義為邊坡破壞時間，則 ID3 位置破壞時間約發生於 2021/06/05, 20:39，以下依物理量變化時序開始說明：

1. 崩積層表層土壤傾角變化速率開始上升(發生於 2021/06/05, 16:41)，此時邊坡表層土壤崩塌啟動，開始產生變形行為。
2. ID3 模組深度 60 公分體積含水量於 2021/06/05, 20:39 開始抬升，顯示此時浸潤面抵達 60 公分處。
3. 崩積層表層土壤傾角變化速率持續上升且抵達最大變化值，此時累積發生傾角變化約 19 度(發生於 2021/06/05 20:39)，此時定義邊坡為破壞產生。
4. ID3 模組深度 25 公分體積含水量原受前期降雨影響，體積含水量保持為最大值，但於 2021/06/06, 2:08 時，此時體積含水量開始明顯產生下降，在降雨事件持續的狀況下，可推論為深度 25 公分處之土壤開始流失，致使量測值下降。
5. ID3 模組深度 60 公分體積含水量於 2021/06/05, 20:39 開始抬升後，在 2021/06/06, 7:36 抬升至 30%後開始下降，在降雨持續下，推論為深度 60 公分處土壤開始流失，使量測值下降。
6. 模組於崩塌後持續回傳監測模組至 2021/06/07, 3:29，推測數據中斷原因為太陽能電線因土石崩塌運移後被扯出於防水盒，導致內部電子模組泡水。

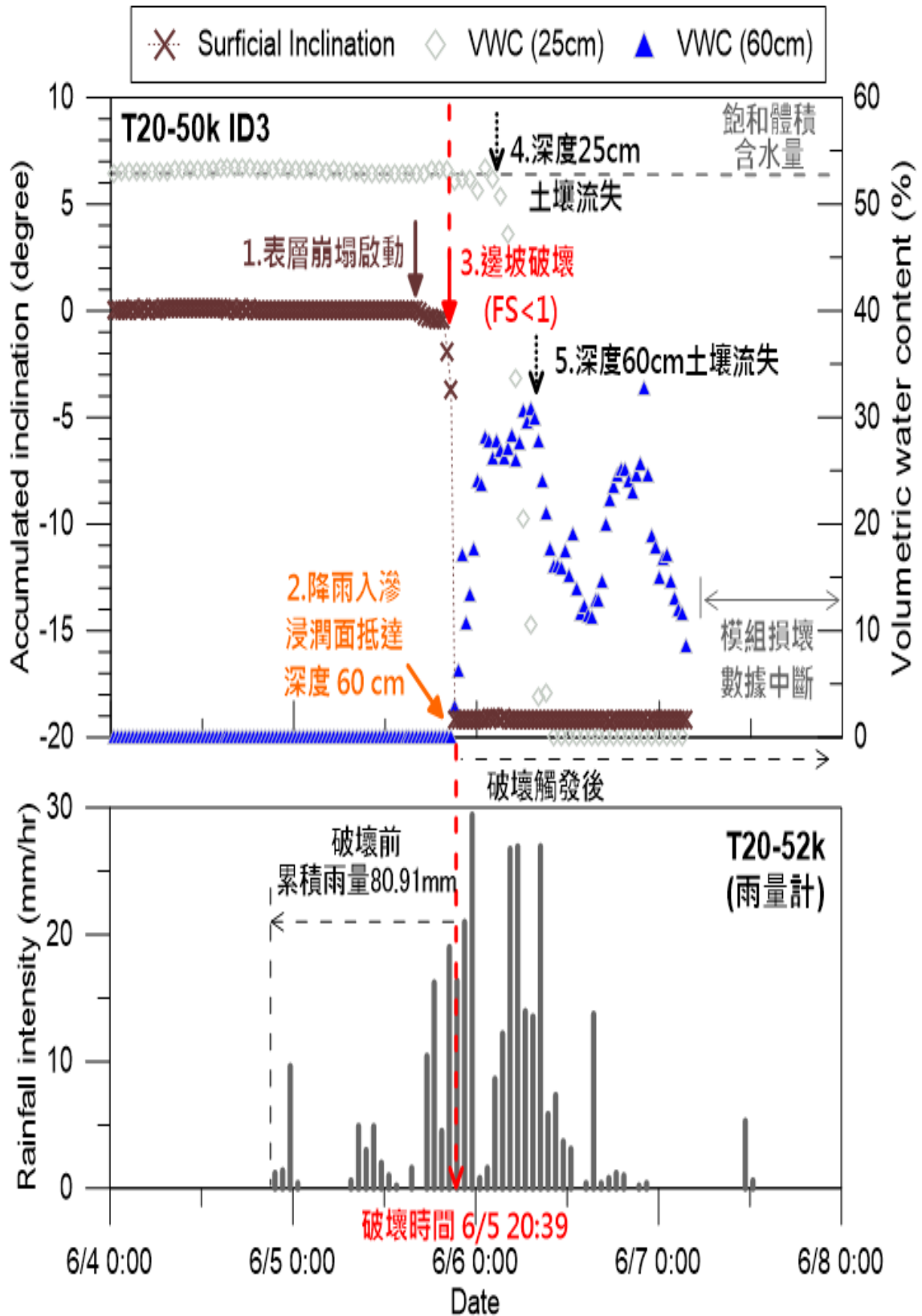


圖 4.30 台 20 線 50.7k ID3 6/5 崩塌事件監測成果

綜合以上，ID2 與 ID3 監測數據與實際勘查成果，兩者成果一致，且監測模組可以完整監測到崩塌前、觸發崩塌以及崩塌後邊坡之依時反應，可驗證淺層邊坡崩塌係因降雨入滲，致使非飽和土層體積含水量上升、基質吸力與剪力強度下降，在降雨具備長延時與足夠之降雨強度，浸潤面逐漸往地表下延伸，直至邊坡穩定之臨界狀態(FS=1)，產生淺層邊坡滑崩塌，而體積含水量之監測可做為此類邊坡崩塌類型之依時預的重要監測標的。圖 4.31 為 2021/10/15 於現場進行 ID1 維護時拍攝之崩塌處現況，主要採用格樑護坡、坡面截水溝與石籠進行擋土支撐，如目前 ID1 所在區域之整治工法，對於同一地點之維護，其土壤類型與可能之入滲行為仍會相近，建議後續於整治工程完工後，回復 ID2 或 ID3 之監測位置，可做為擋土系統是否良好發揮功效之依據，避免下一次同類型災害。



圖 4.31 台 20 線 50.7k 2021/10/15 邊坡整治現況

第五章 飽和土層滑動監測場址監測成果

本計畫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，為進行本計畫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)臨界破壞面為飽和土層之深層破壞。

本計畫預警系統應用對象之一，為飽和土層土壤邊坡破壞，此雖為臺灣常見之災害類型，但進行解析法分析，需有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米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，於同年4月起恢復相關監測。

因台20線52k場址完成改善工程，其滑動潛勢已大幅降低，因此其主要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。前期計畫選定台南市市道175線25.5k地滑區為新增監測場址，並於109年2月安裝與台20線52k相近之系統，監測崩積層水位變化與牆體傾角，前期已完成南市道175場址25.5k相關水力力學耦合邊坡及擋土系統數值分析。目前台20線52k與南市道175線25.5k場址之監測系統仍持續運作中，各飽和土層場址於本計畫執行期間維護狀況，彙整如表5-1所示。本章呈現更新各飽和土層滑動監測場址相關監測資料與分析地下水位上升與降雨特徵關係至110年10月。

表 5-1 飽和土層場址 110 年度設備故障排除彙整表

故障排除時間 (月/日)	場址	故障(施工)原因	排除方法	備註
3/2	台 20 線 52k	伺服端停機	電池更換	回復正常運作
3/23	台 20 線 52k	ID02 電池耗盡	電池更換	回復正常運作
4/7-6/1	南市道 175 線 25.5k	ID03 附近 進行復建工程	ID03 電子模 組暫時移除	暫停 ID03 監測
6/2&6/9	南市道 175 線 25.5k	伺服端停機	電子模組 更換	回復正常運作
6/17	南市道 175 線 25.5k	ID03 太陽能電線遭 人破壞	重新串接 電線	回復正常運作
8/17	南市道 175 線 25.5k	ID03 電池耗盡	電池更換	回復正常運作
9/10	台 20 線 52k	ID02 模組停機	電子模組 更換	回復正常運作
10/13	南市道 175 線 25.5k	ID04 液位計遭移出 水位井	重新置入水 位井	回復運作

5.1 台 20 線 52k 場址監測資料

5.1.1 台20線52k場址背景資料與監測配置

107 年計畫已於台 20 線 52k 處安裝飽和土層滑動監測場址，地理位置如圖 5.1 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 52.08k 至 52.24k 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，100 年該路段針對莫拉克風災緊急補強後，至 109 年完成整治前該路段仍持續下陷，邊坡處於不穩定之情形。



圖 5.1 台 20 線 52k 場址位置圖

根據青山工程顧問公司(2017)^[3]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: 區域鄰近數個斷層及皺褶作用影響，受大地應力作用劇烈，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為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 12 m，並於此場址設置雨量計。107 年度起陸續於台 20 線 52k 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 5.2 所示，ID 01 測站為雨量計，原裝設於道路下邊坡，108 年因下整治移至道路旁；ID 02 與 ID 04 測站分別位於道路上下邊坡，ID 02 與 ID 04 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 ID 04 因路面整修移除；ID 03 與 ID 05 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 ID 05 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 ID 03 因進行下邊坡整治工程已撤除；109 年 2 月起新增 ID 06，量測牆體法向與切向傾角，位於擋土牆頂。110 年 9 月新增道路下邊坡傾斜儀用以監測其道路下方變化，並編號為 ID 03。

表 5-2 台 20 線 52k 測站配置表

編號	配置	水位孔深度	水位孔高程	現況
ID 01	雨量計	無	無	正常
ID 02	液位計、傾斜儀	40 m	292 m	正常
ID 03	傾斜儀	無	無	正常
ID 04	液位計	60 m	286 m	移除
ID 05	液位計	11 m	292 m	正常
ID 06	雙向擋土牆 傾斜儀	無	無	正常

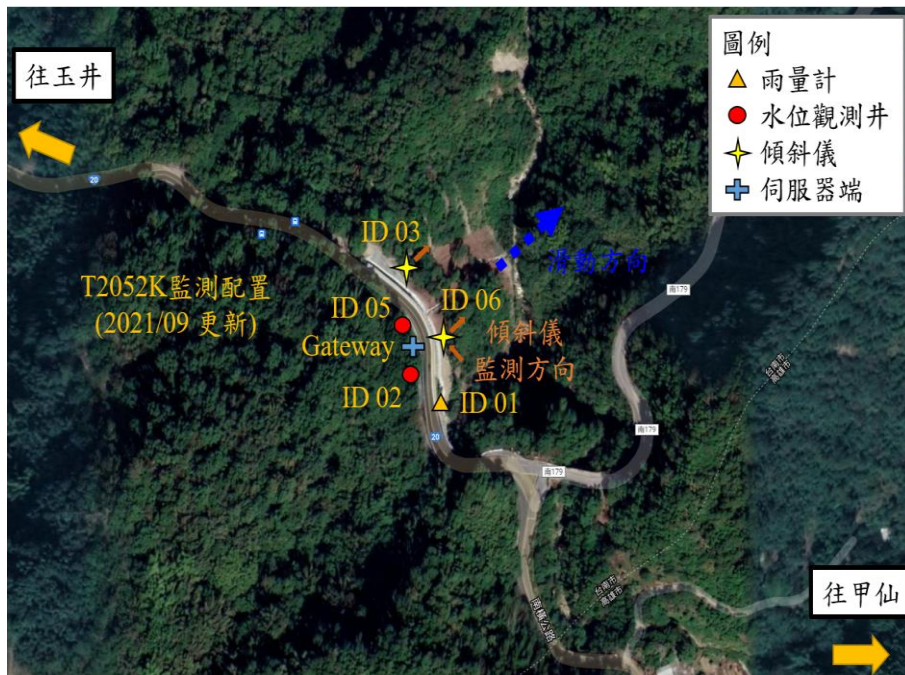


圖 5.2 台 20 線 52k 監測儀器配置圖

5.1.2 台 20 線 52k 地下水位監測成果

圖 5.3 及圖 5.4 為台 20 線 52k 邊坡 109 年 1 月 1 日至 100 年 10 月 10 日之地下水位監測圖，ID2 監測目標為岩層及 ID5 為崩積層內自由含水層之水位變化，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。

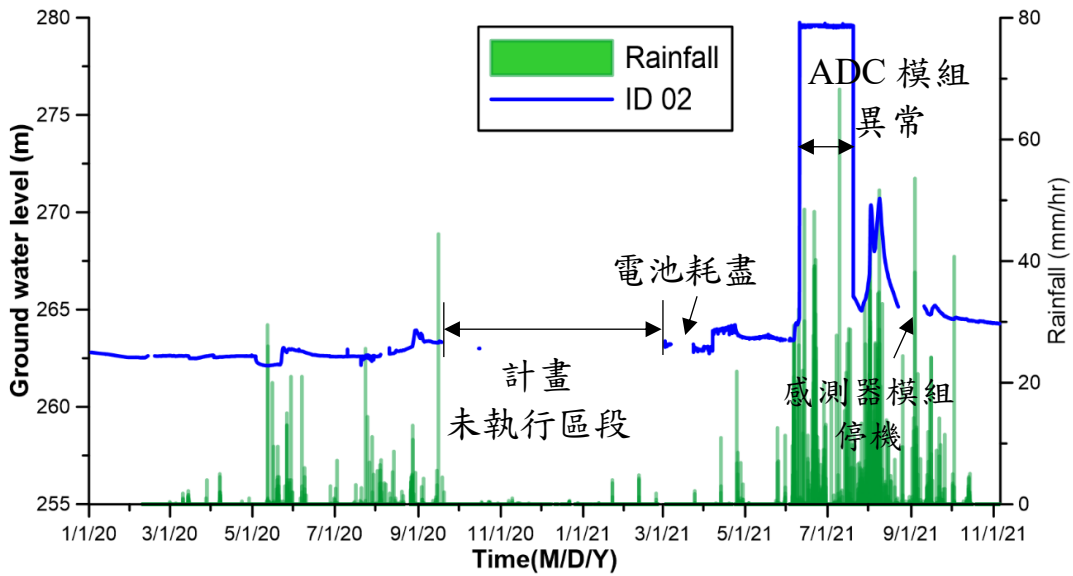


圖 5.3 台 20 線 52k ID02 地下水位監測數據

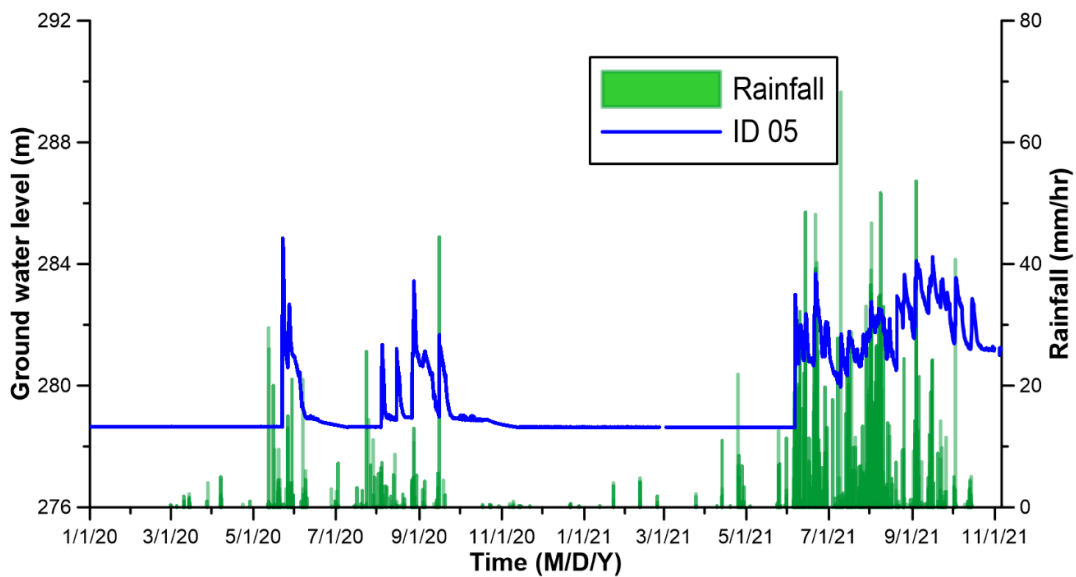


圖 5.4 台 20 線 52k ID05 地下水位監測數據

5.1.3 台20線52k崩積層表土層與擋土牆傾斜變化

圖 5.5 與圖 5.6 分別為台 20 線 52k 處道路上、下邊坡為土層表層傾角變化，ID02 於 110 年有 0.5 度上下變化之讀數，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，目前於觀測期間有 1 度內的微幅傾斜，其方向同坡走向。而 ID03 裝設於 110 年 9 月，仍需長期監測成果驗證張力裂縫變化。圖 5.7 與圖 5.8 為 109 年 2 月新裝於新設擋土牆之雙傾斜儀 ID06 監測結果顯示，數據由 110 年 1 月起至 1 至 10 月監測成果繪製，截至目前監測成果，垂直與水平牆面之傾斜值於監測期間無顯著變化。

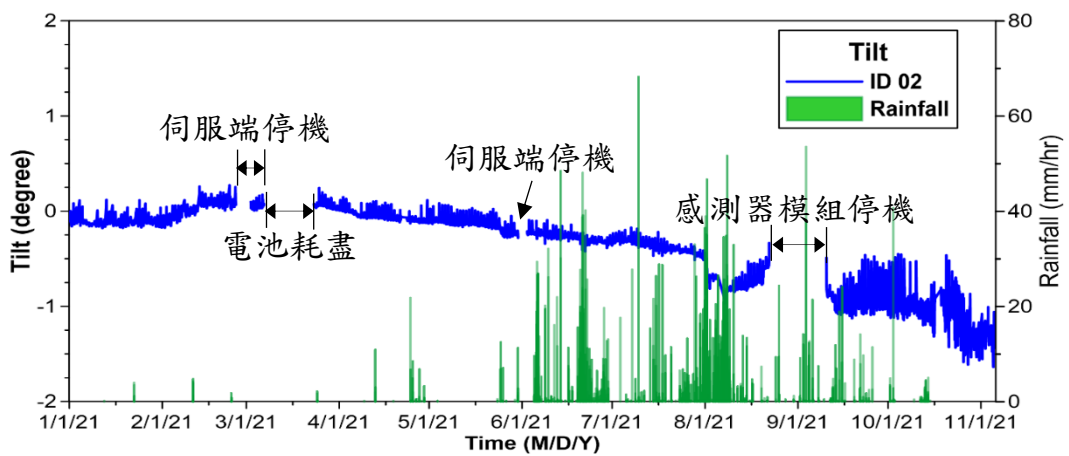


圖 5.5 台 20 線 52k ID02 傾斜角監測數據(道路上邊坡)

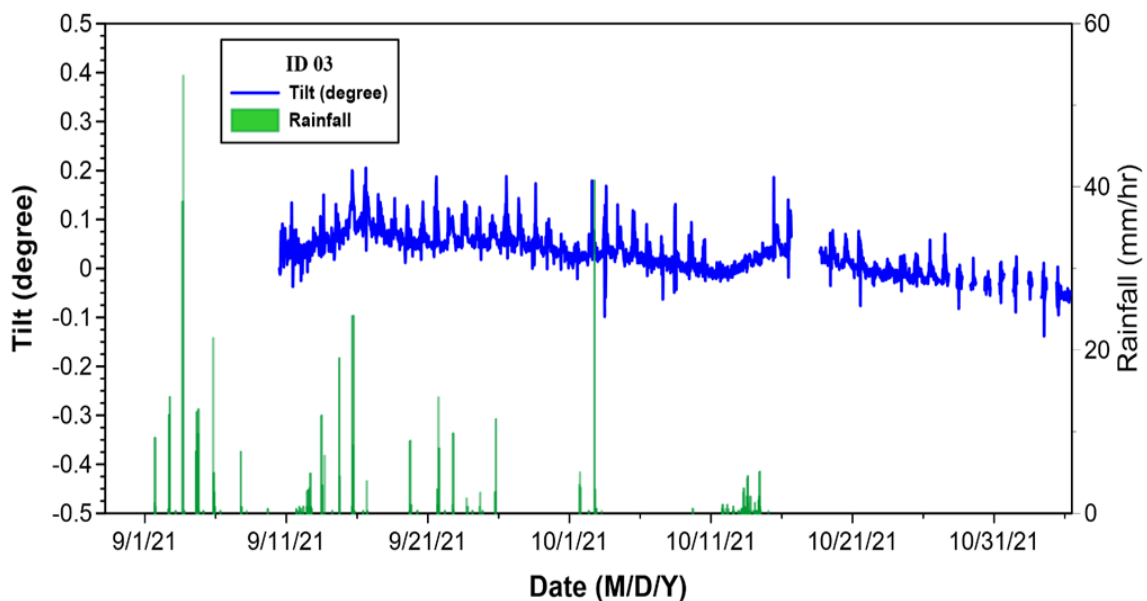


圖 5.6 台 20 線 52k ID03 傾斜角監測數據(道路下邊坡)

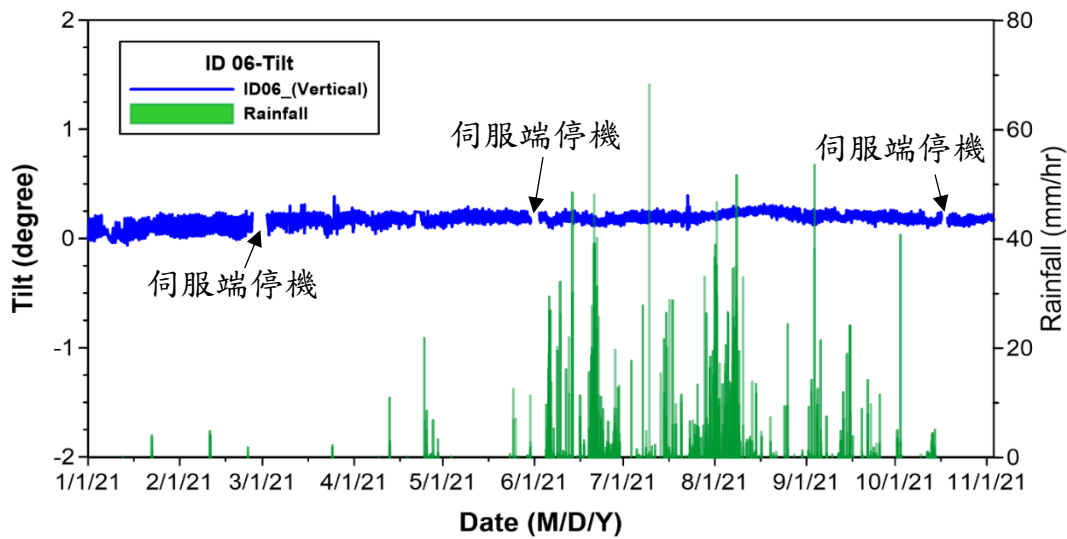


圖 5.7 台 20 線 52k ID6 擋土牆垂直方向傾角監測數據

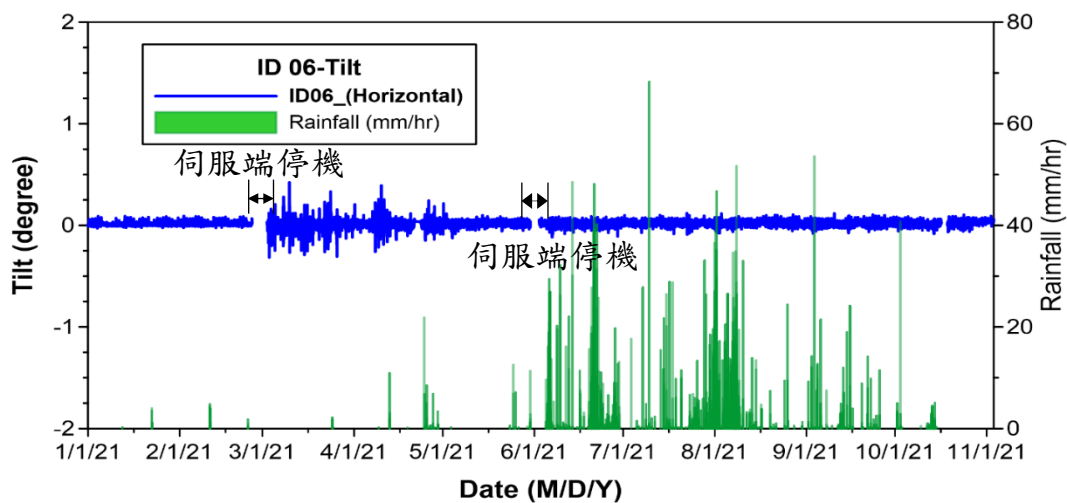


圖 5.8 台 20 線 52k ID6 擋土牆水平方向傾角監測數據

5.2 南市道 175 線 25.5k 監測場址監測資料

5.2.1 南市道175線25.5k場址背景資料與監測配置

監測場址二位於南市道 175 線 25.5k 處，為往來臺南市六甲區與楠西區主要路線，其地理位置如圖 5.9 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 5.9 南市道 175 線 25.5k 場址地理位置圖

此場址持續有災損及地質調查資料，最近之資料為 106 至 107 年完成之地滑調查及邊坡監測(青山公司 2019)^[4]，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 5.10 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 2~10m，為風化土壤、岩屑及大小不一岩塊組成；風化泥岩層厚度約 5~25m，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 5.11 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。

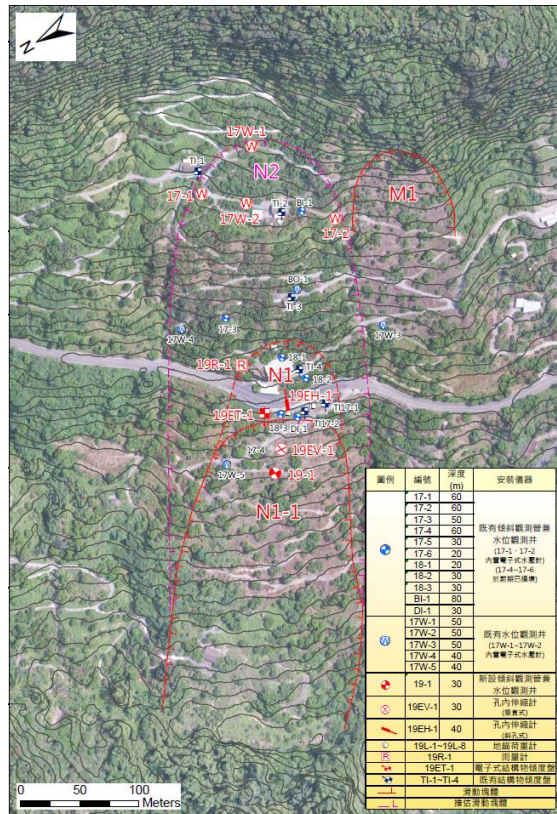


圖 5.10 南市道 175 線 25.5k 滑動塊體與監測點分佈圖 (青山工程, 2019)

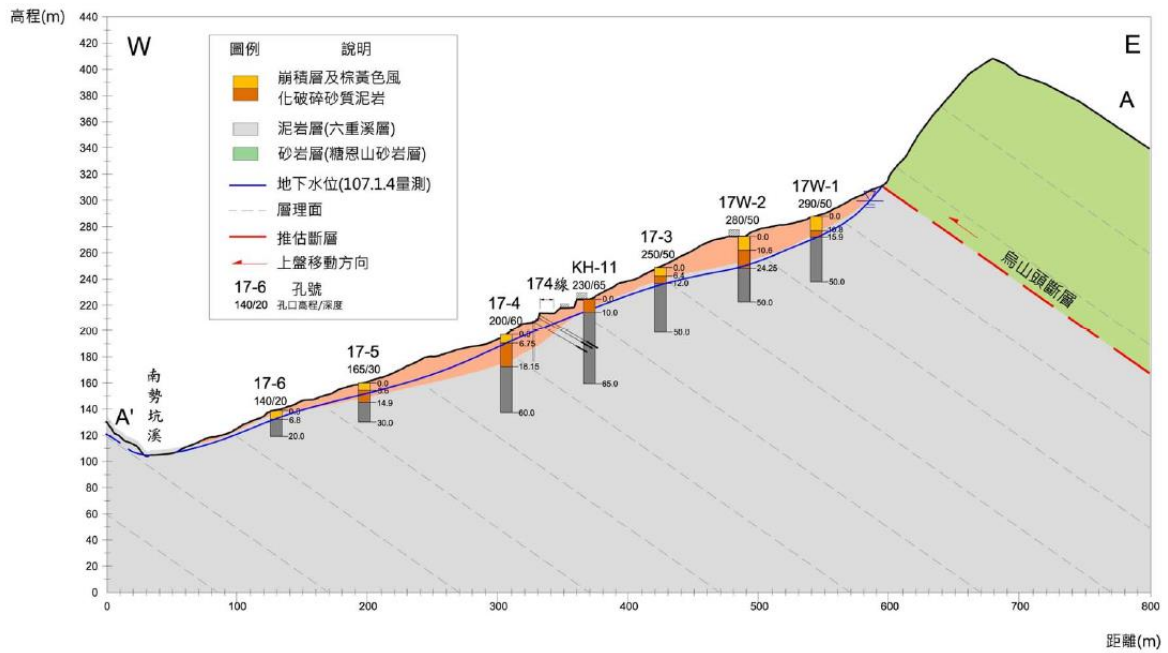


圖 5.11 南市道 175 線 25.5k 地質剖面圖(青山工程, 2019)

本場址監測有兩主要目的，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，依此目的相關配置，包含地下水水位面、擋土牆雙向傾斜儀評估擋土牆安全性、土壤分層水分計評估降雨入滲速率與雨量計量測現場實際降雨量，前期計畫 109 年 2 月於現地安裝總計 9 組客戶端監測模組與一伺服器模組，其配置如圖 5.12 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 5-3 所示。

雨量筒(ID0)設置於 175 線道路 25.5k 處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 20m 與 30m，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，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 5.13 所示。

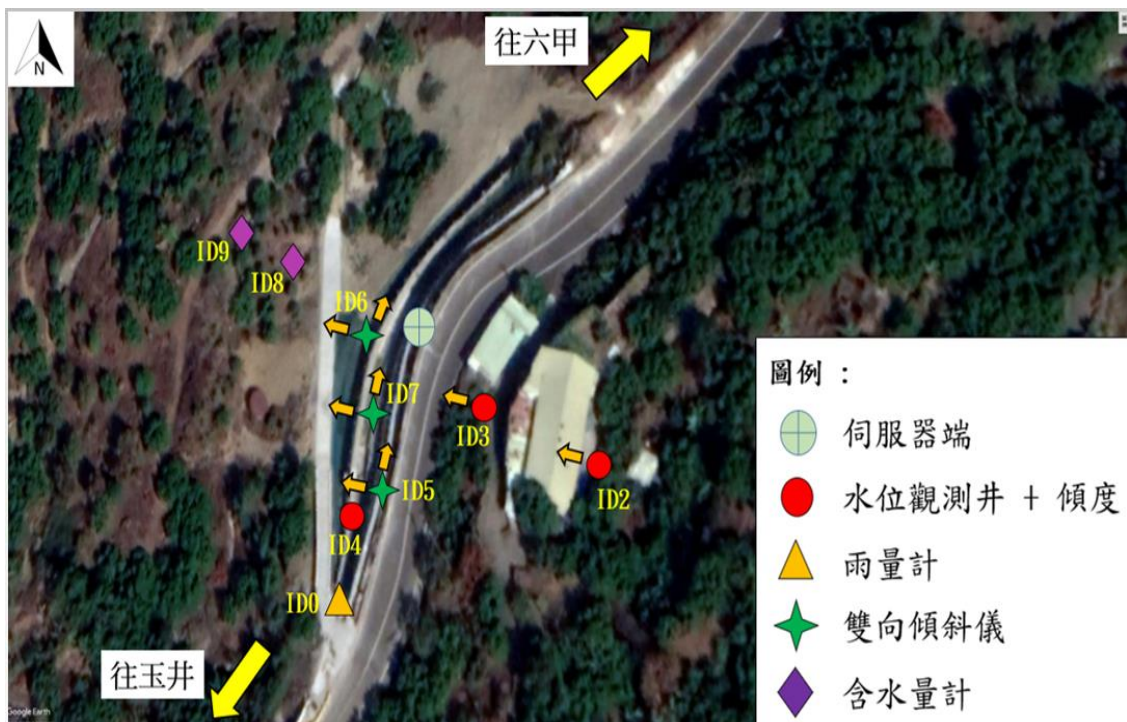


圖 5.12 南市道 175 線 25.5k 場址監測模組配置

表 5-3 南市道 175 線 25.5k 場址模組配置總表

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

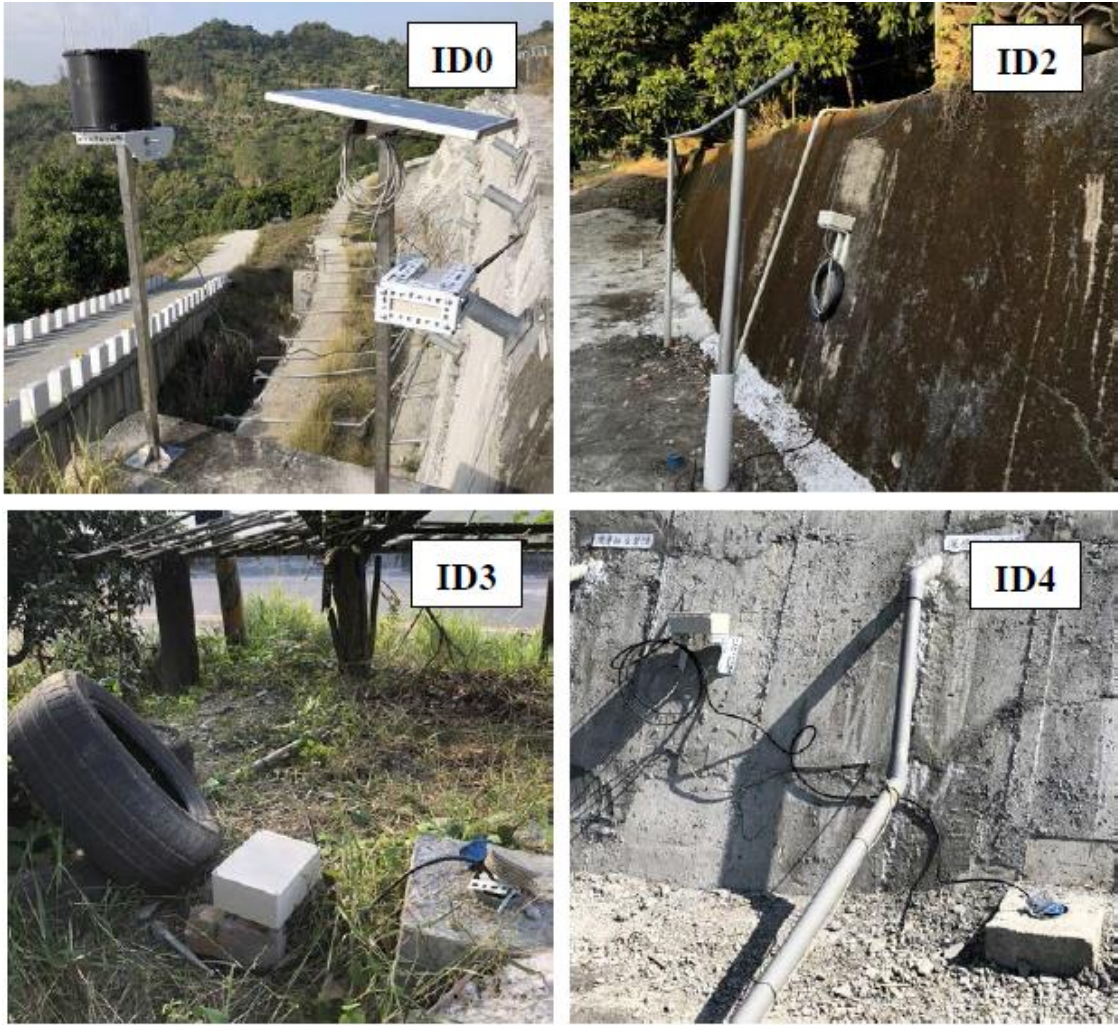


圖 5.13 南市道 175 線 25.5k 場址監測模組現場架設圖(1/2)

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 5.14 所示。



圖 5.14 南市道 175 線 25.5k 場址監測模組現場架設圖(2/2)

5.2.2 南市道175線地下水位與土層地表傾角監測

南市道 175 線 25.5k 場址由裝設初期至 110 年 10 月份，因去年 10 月至今年 5 月，場址未有顯著降雨事件，於 109 年 5 月中有幾場短期強降雨，ID2、ID3 與 ID4 水位有同樣上升趨勢，而 ID3 於 110 年 3 月底因場址進行復建工程，電子模組受工程進行干擾，曾陸續中斷，因此暫停監測，而五月底完工後，已恢復 ID3 地下水位監測功能，場址各模組地下水位監測結果，如圖 5.15 至圖 5.17 所示。推估 ID2 因深度僅 20 m，與 ID3 及 ID4 井深 30m 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 5.18 所示，ID3 因場址進行復建工程，電子模組受工程進行干擾，出現 1 度左右之傾角變化，此為人為干擾，扣除此段監測區間，ID2 與 ID3 目前並無顯著土層地表傾角發生。

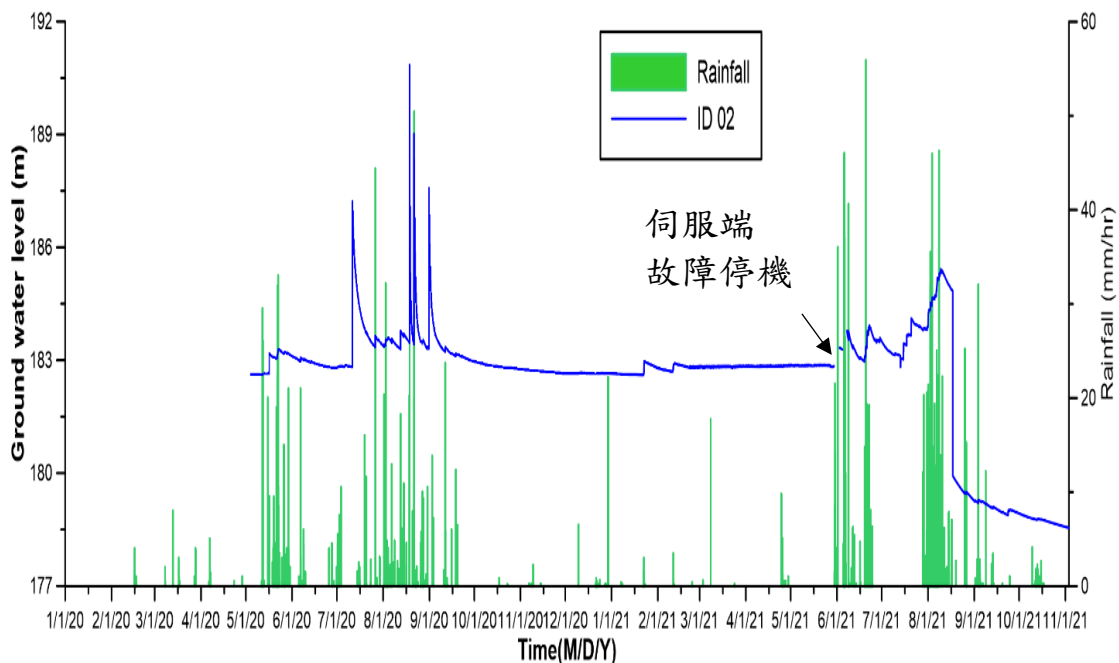


圖 5.15 南市道 175 線 25.5k 場址 ID2 地下水位監測成果

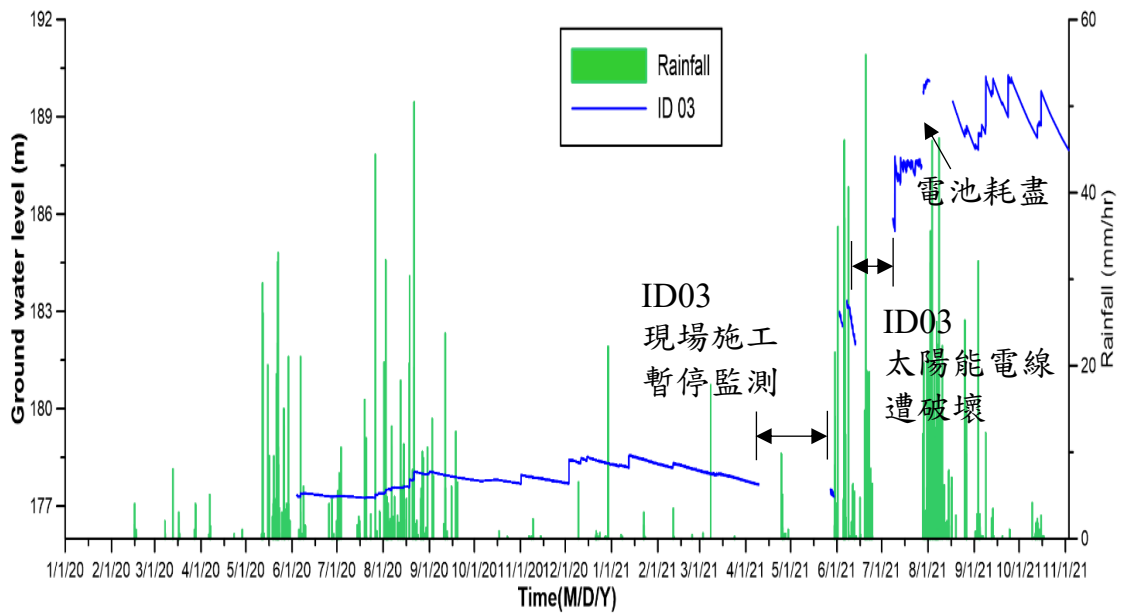


圖 5.16 南市道 175 線 25.5k 場址 ID3 地下水位監測成果

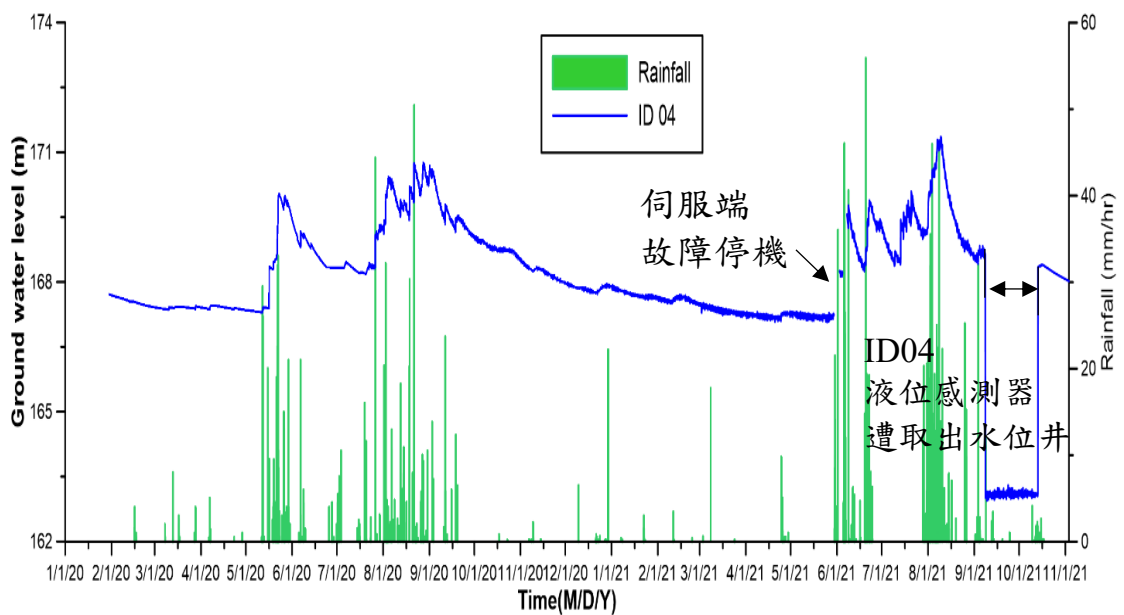


圖 5.17 南市道 175 線 25.5k 場址 ID4 地下水位監測成果

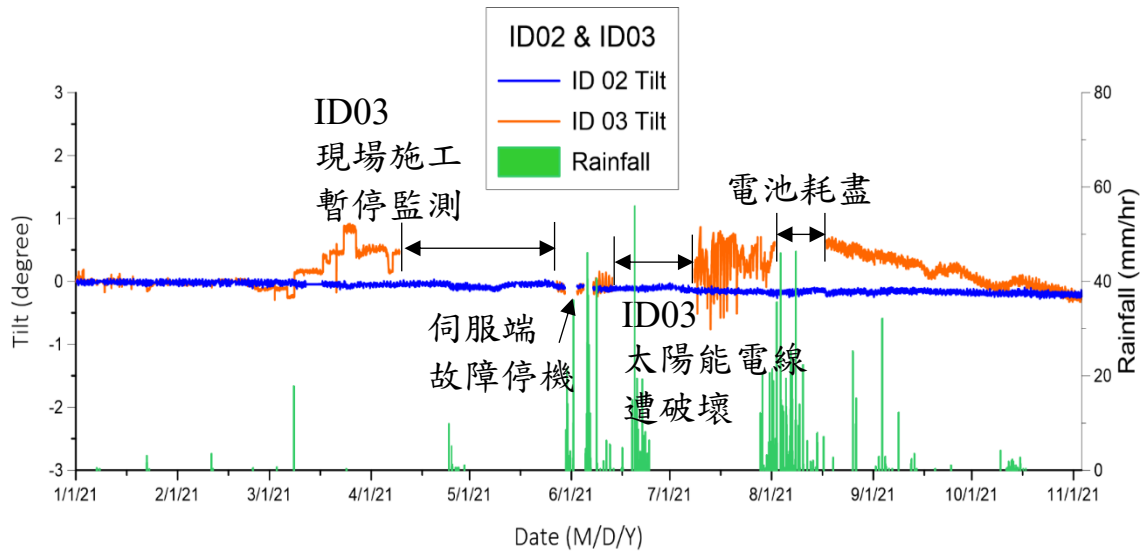


圖 5.18 南市道 175 線 25.5k 上邊坡土壤表層傾角監測成果

5.2.3 南市道175線擋土系統傾角監測

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(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 5.19 至圖 5.24 所示，牆體於 110 年初至今無明顯變化。

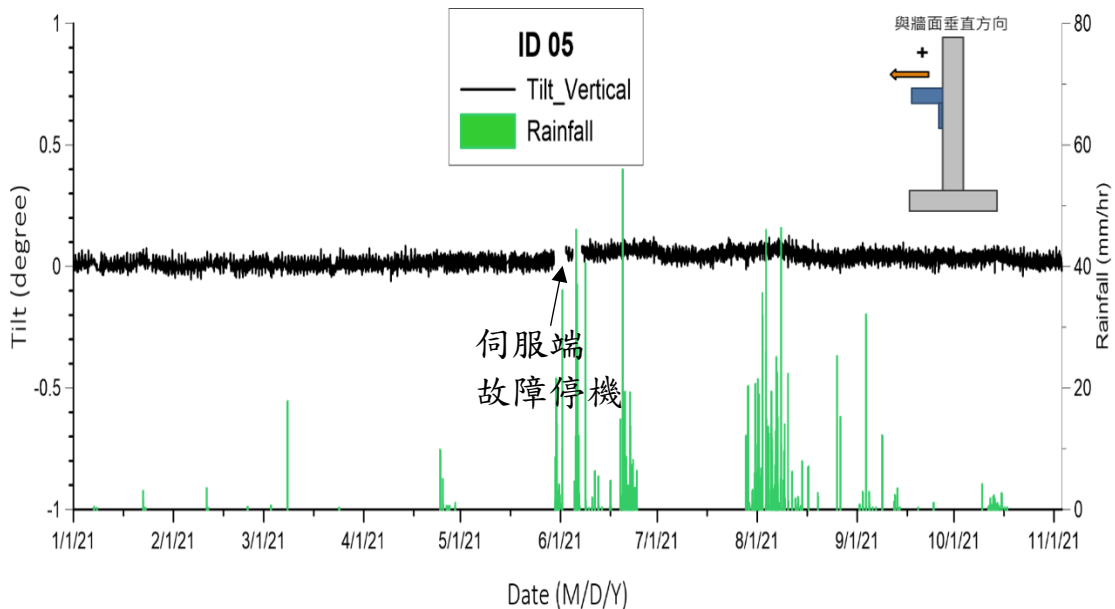


圖 5.19 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID5)垂直牆體之傾角監測成果

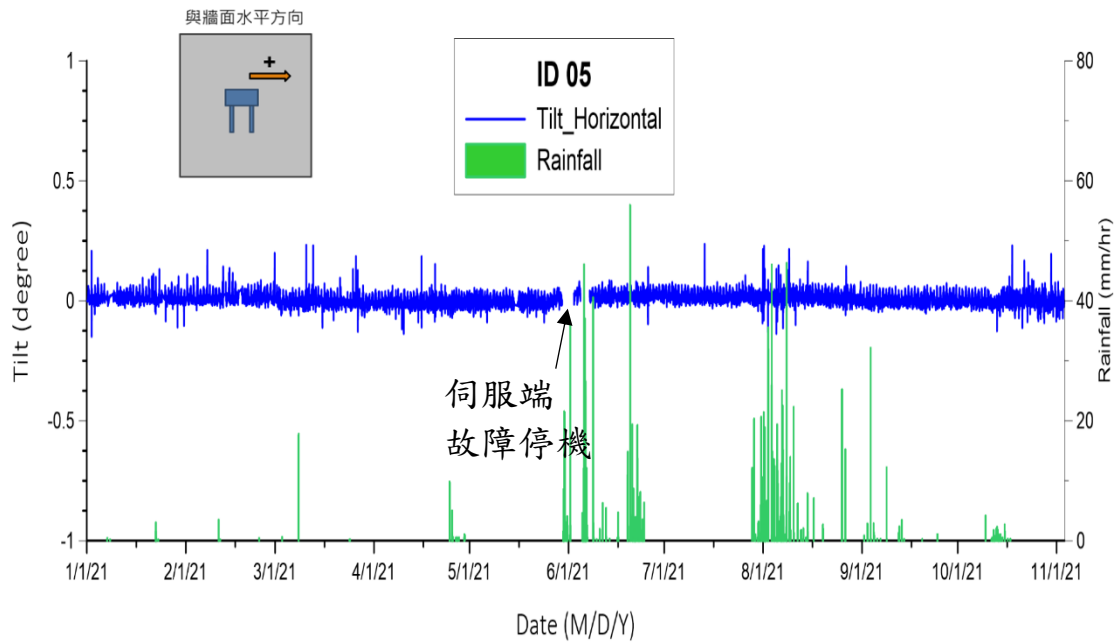


圖 5.20 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID5)水平傾角監測成果

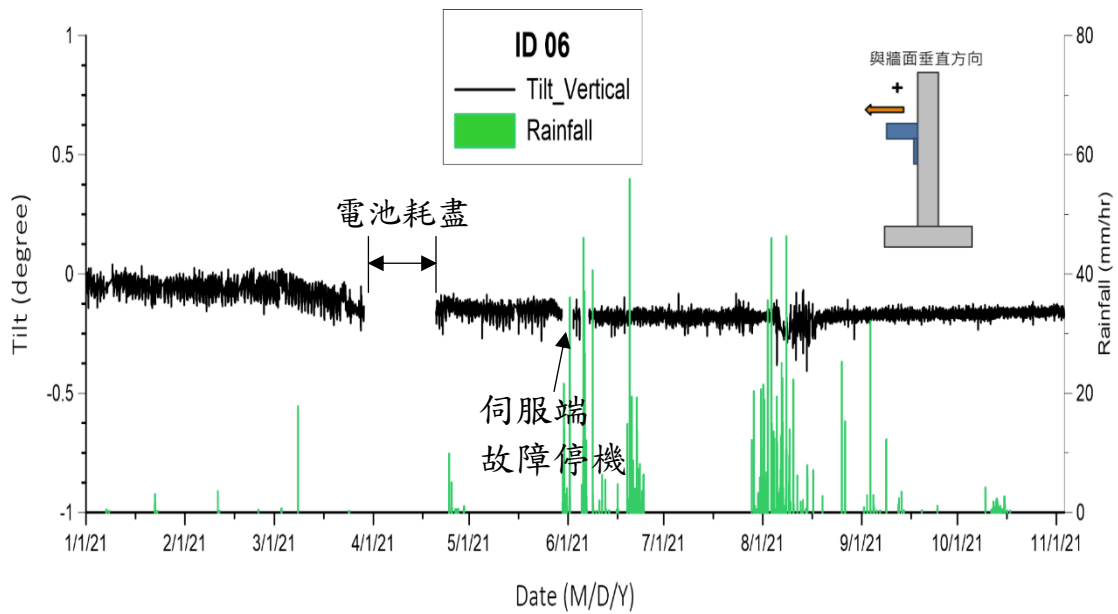


圖 5.21 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID6)垂直牆體之傾角監測成果

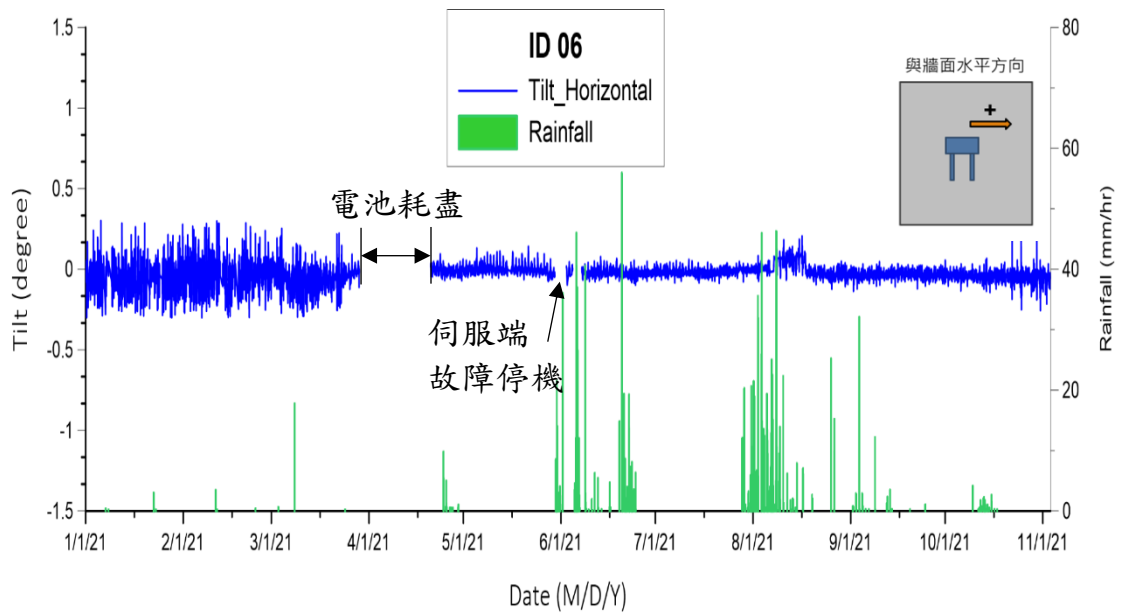


圖 5.22 南市道 175 線 25.5k 擋土柱頂(ID6)水平傾角監測成果

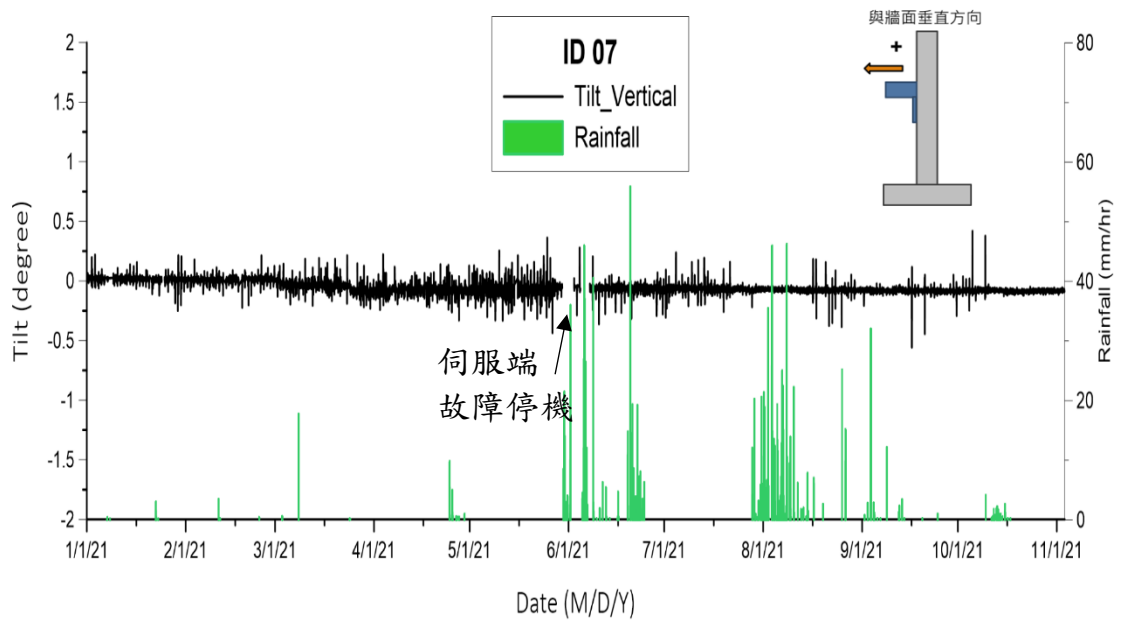


圖 5.23 南市道 175 線 25.5k 牆頂(ID7)垂直牆體之傾角監測成果

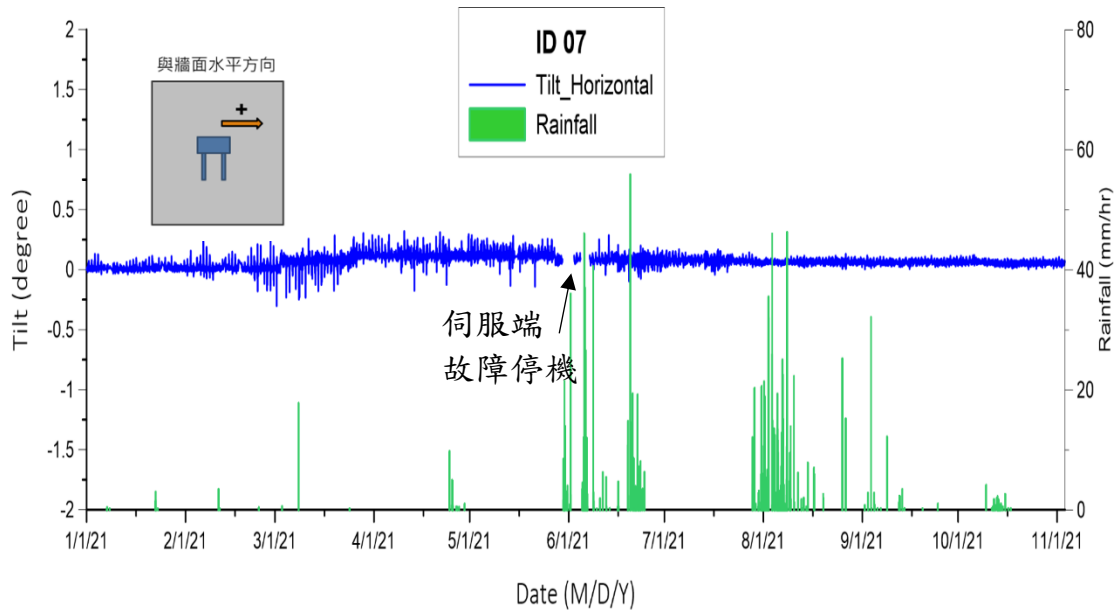


圖 5.24 南市道 175 線 25.5k 牆底(ID7)水平傾角監測成果

5.3 水位與降雨特徵關聯分析精進

台 20 線 52k 場址 ID02 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 70 mm 時開始上升，圖 5.25 至圖 5.27 中紅色資料點為 110 年新增資料點，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，部分圖中降雨事件數據與其他數據關聯性較低，主因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。推測因降雨事件發生前，前期降雨使土層飽和度上升，使事件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。

崩積層水位於短延時降雨達 60 mm 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 5.26 所示，可以此特性推估降雨開始後水位開始

上升時間。圖 5.27 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。

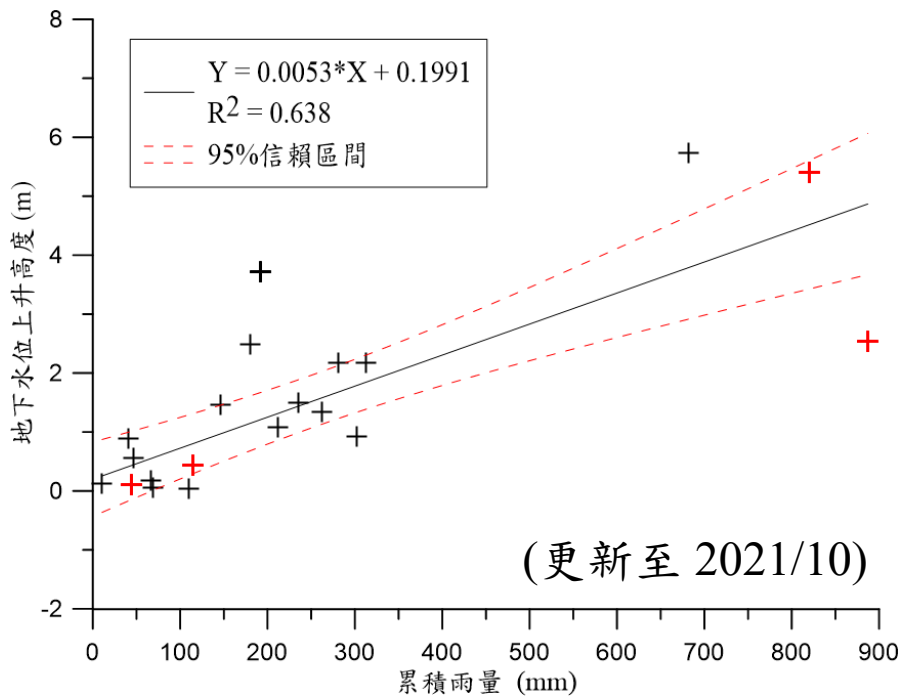


圖 5.25 台 20 線 52k 場址累積雨量與岩層水位上升高度關係圖

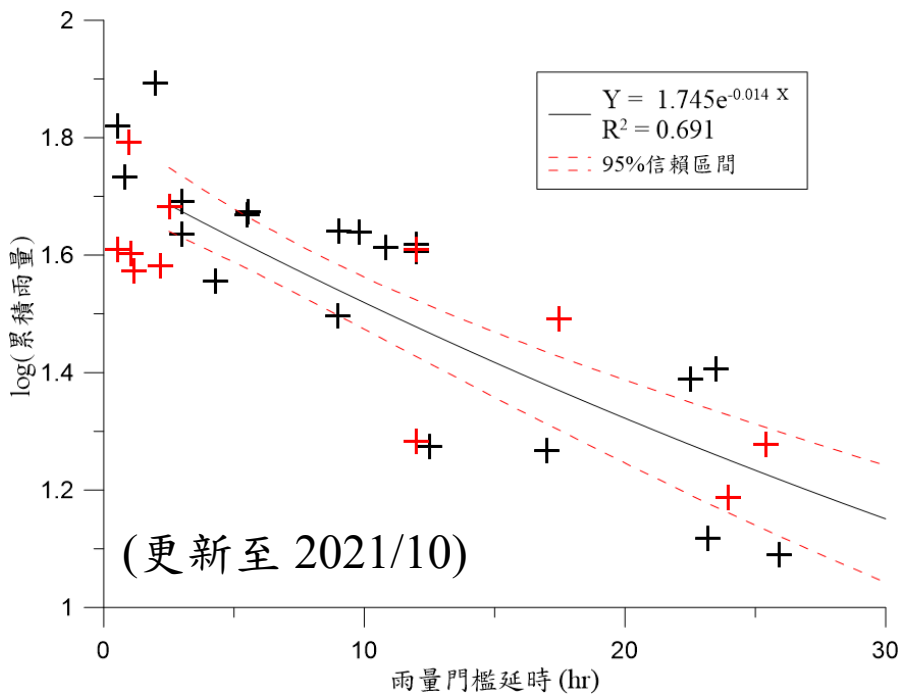


圖 5.26 台 20 線 52k 場址崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖

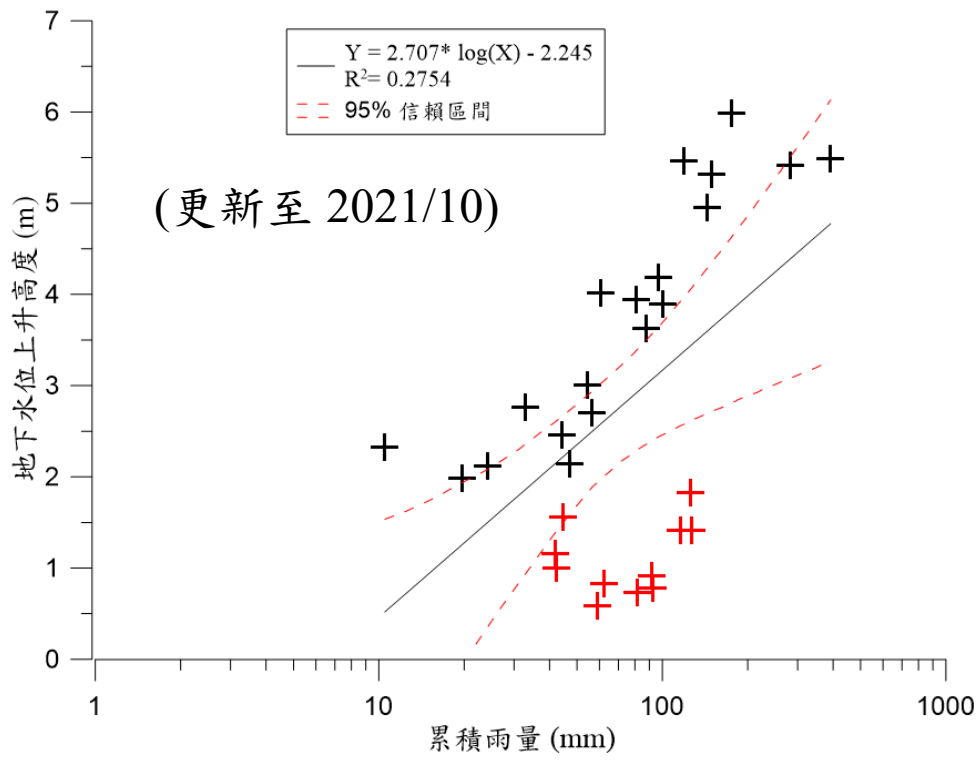


圖 5.27 台 20 線 52k 場址累積雨量與地下水位高度關係

第六章 公路邊坡依時預警系統標準流程

現今對邊坡預警趨勢，以整合考慮地形、地質材料特性之場址破壞機制之解析分析為主，搭配即時監測系統，可反應相關引致滑動之土層物理量與地層運動，此類預警技術，包含兩部分，第一，以地質探勘與地形測量，建立場址地質模型，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；其二為佈設監測硬體，於邊坡水力反應敏感位置，進行即時土層監測，並發佈預警警報。

本計畫發展之公路邊坡依時預警系統，主要應用於降雨引致之土壤邊坡破壞，破壞機制不同，應依不同破壞機制，選定合適預警指標。不同土層邊坡滑動及擋土支撐系統損壞之型態不同，其監測指標，亦應有所差異，運研所現有土層滑動無線感測網路模組為依據滑動特性所研發，具有低成本、安裝快速與無線化傳輸等特性，並納入邊坡擋土支撐系統之監測與分析架構，可建立符合現地概況，並貼近實務應用之依時預警系統。可客製化邊坡無線監測模組，應用於淺層崩塌、飽和土層滑動或具擋土支撐系統之公路土壤邊坡類型。

本章彙整 104 年至 109 年之計畫成果(參考表 1-1)，研擬公路邊坡依時預警系統之標準分析流程，如圖 6.1 所示，主要可分為三個階段，依序分別為土壤邊坡破壞模式分析(階段一)、依時水力力學耦合分析(階段二)與無線感測模組選用(階段三)。首先，依據現場踏勘與土層部分性質調查結果，選擇合適土壤邊坡破壞模式，依破壞機制不同，本計畫定義淺層崩塌與飽和層滑動兩種應用對象，分析土壤邊坡於降雨行為之入滲行為，與其引致剪力強度與驅動力變化，定義出關鍵指標物理量。淺層崩塌以特定深度之體積含水量為代表，飽和層崩塌則考慮地下水深度與安全係數之關係，並搭配合適之無線監測架構與感測器。標準分析流程可供公路邊坡養護單位，客製化高風險高關注土壤邊坡場址之依時預警系統，增進邊坡預警準確與時效性。

公路邊坡依時預警系統標準建立流程

階段一

各階段重要參數

破壞模式分析
土壤邊坡

1. 統一土壤分類(USCS)
2. 坡角(β)
3. 剪力強度(c' 、 ϕ')
4. 滑動深度



階段二

依時耦合水分分析

1. 土壤剪力強度參數(c' 、 ϕ')
2. 非飽和特徵(SWCC、 ϕ^b)
3. 土層厚度與分佈
4. 擋土支撐系統參數



階段三

無線感測模組選用

1. 合適監測目標
2. 無線網路訊號
2. 安裝位置與照度
3. 太陽能板瓦數

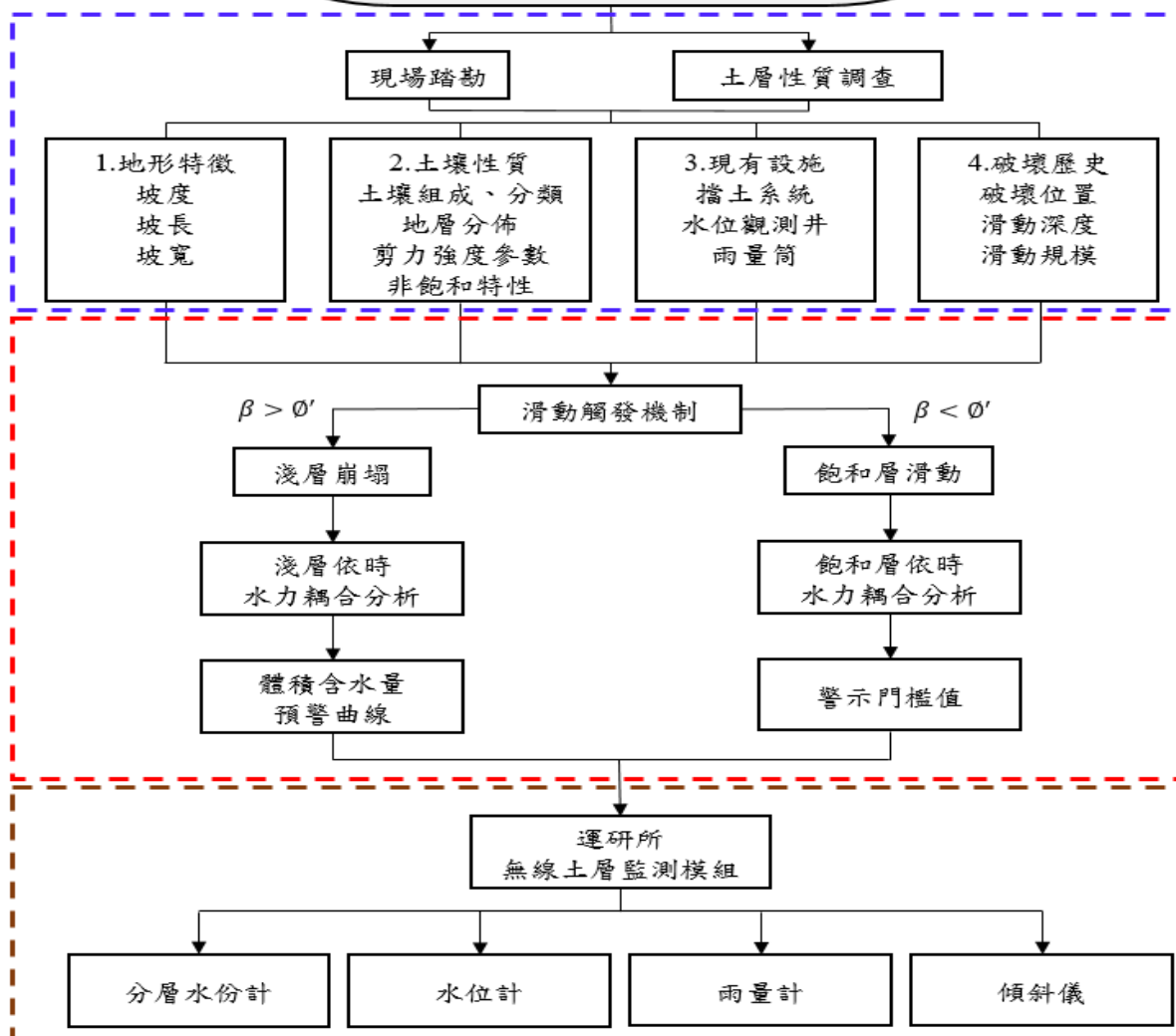


圖 6.1 公路邊坡依時預警標準分析架構流程圖

6.1 土壤邊坡破壞模式分析

目前深淺層破壞於國際間尚無統一之分類方法，而前人各項定義不一定適用於各邊坡場址，公路邊坡依其滑動深度可分為淺層與深層滑動，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。運研所系列計畫基於解析法概念探討降雨引致土壤邊坡破壞機制，以破壞面位於地下水水位面以上之非飽和軟弱土層之破壞行為定義為淺層崩塌，其破壞原因在於降雨入滲降低非飽和土層基質吸力，進而使滑動坡體剪力強度下降至臨界值產生滑動。而飽和土層滑動之破壞面主要發生於飽和面以下，主因於地下水壓升高，造成有效應力下降與剪應力增加，進而產生滑動，兩者滑動塊體如圖 6.2 之示意圖，其中 ϕ' 為土壤有效摩擦角、 d_w 為地下水水位深度， d_{cr} 為破壞面深度，並參考交通部(2015)^[1]部頒規範，坡高(H)為設計考量之坡趾至坡頂之高程差；坡角為邊坡(β)的斜度，常以坡高除以在水平面上的投影長度，以角度或百分比表示。適用本流程適用之邊坡為土壤為主要坡體材料構成之坡面，包含自然邊坡以及經由人工挖填形成的坡面，本流程之應用場址須符合下列條件：

1. 現地需為軟弱土層，為陡坡地形，破壞面為非飽和土層之淺層破壞，定義為淺層崩塌($\beta > \phi'$ ，坡角大於土壤有效摩擦角)。
2. 現地需具有厚層軟弱土壤，地下水位高或入滲速率快，臨界破壞面為飽和土層之飽和層破壞，定義為飽和層滑動($\beta < \phi'$ ，坡角小於土壤有效摩擦角)。
3. 具有相關幾何、水文及地質參數，並儘可能有現地監測資料參考。
4. 須為鄰近道路之邊坡，且具高破壞潛勢或有破壞歷史。
5. 鄰近具有通訊網路訊號，以進行雲端資料傳輸。

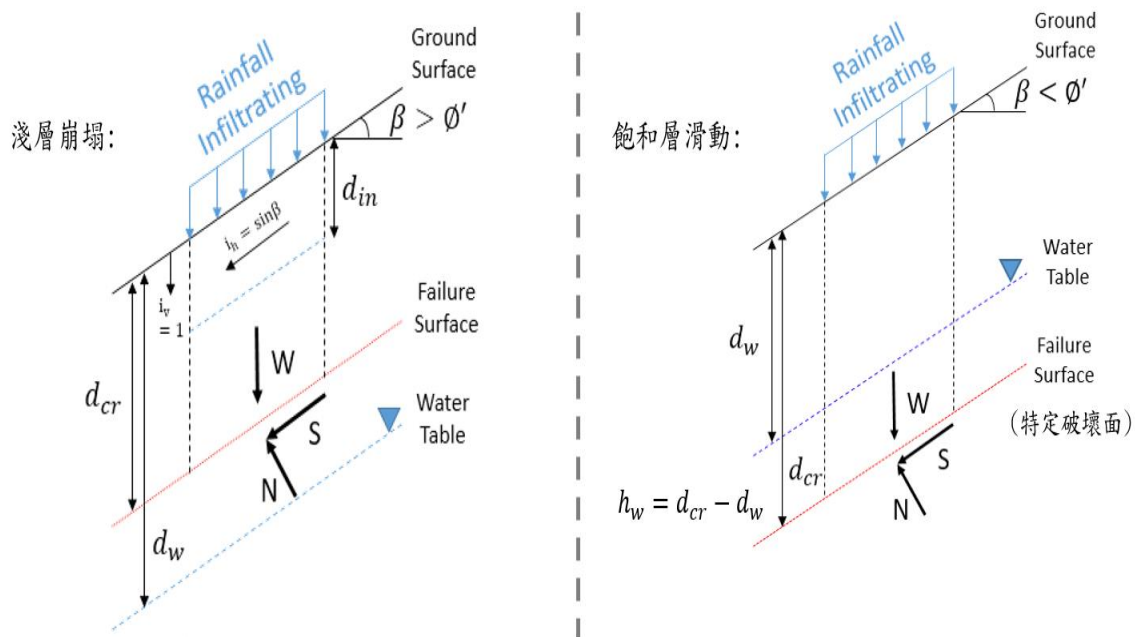


圖 6.2 淺層崩塌與飽和層滑動塊體示意圖

依據交通部(2015)^[1]公路邊坡工程設計規範，大地工程調查工作，其目的在於獲得工址地質與地工資訊，針對所需地工參數進行試驗與評估。坡地之地質條件及水文狀況，較一般平地地區變異性大，為避免潛在影響因子未能全盤掌握，導致開發風險增加，應進行周詳之調查規劃。調查應考慮工程特性、地質特性與邊坡特性，以有效獲得與邊坡工程設計施工有關之地形、地質、水文等資訊。邊坡調查的範圍、位置、項目、數量、方法以及調查預算編列，應考慮邊坡類別、邊坡破壞類型、邊坡風險程度，其調查範圍原則上應涵蓋整體邊坡之可能影響範圍。

總結以上，應就邊坡地形幾何特徵、土壤性質、現有擋土設施與破壞歷史四大項目進行掌握。工址調查的方法眾多，包括基本資料蒐集、遙測影像判釋、地表地質調查、地球物理探測、鑽探或其他開挖調查；為獲得設計參數，常於鑽探或開挖調查過程進行現地試驗，或取樣進行室內試驗。各種調查方法間常可互補，所有調查資料應進行綜合解釋，不宜過度依賴單一方法之調查結果決定工址地質與地工特性。現地需為軟弱土層，為陡坡地形，破壞面為非飽和土層之淺層破壞，定義為淺層崩塌($\beta > \phi'$)。而現地需具有厚層軟弱土壤，地下水位高或入滲速率

快，臨界破壞面為飽和土層之飽和層破壞，定義為飽和層滑動($\beta < \phi'$)。後續依照邊坡類型分別進行依時水力力學耦合分析。

6.2 依時水力力學耦合分析

公路邊坡不同之破壞形式，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，本計畫以較常見之淺層降雨崩塌為研究對象，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，接著搭配水力力學耦合試驗深入了解降雨對土壤應力狀態之影響程度，以探討降雨引致邊坡滑動之機制，作為依時預警系統之理論架構。水力力學耦合分析包括考慮降雨入滲非飽和土壤中其非線性滲透特性之特點，導入水力邊界條件，求解 Richard's equation，以模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低。計畫以假設合理之邊界與初始條件，進行考慮入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果更新非飽和土壤有效應力、土壤勁度與強度，進行二維非飽和土層時域有效應力分析，推估滑動土體於地表位移與傾角歷時，並最後訂定預警、警戒與行動門檻值。以下分為淺層崩塌與飽和層滑動之依時水力耦合分析進行說明。

6.2.1 淺層崩塌依時水力耦合分析

淺層崩塌依時水力耦合分析流程，整理如圖 6.3 所示，淺層崩塌屬於坡角大於土壤摩擦角之類型，此類邊坡常時處於穩定狀態，但在降雨強度與延時符合之條件下，雨水入滲使坡體部分非飽和土壤之基質吸力喪失，致使坡體失穩。對於潛在淺層崩塌邊坡，因其崩塌深度與破壞量體皆明顯小於飽和層滑動，其改善工程，大多以蛇籠護坡、型框植生與排水工程等簡易工法進行改善。因此，建議以天然無支撐之天然土坡進行分析即可。整體分析流程包含入滲行為分析與極限平衡分析，入滲行為分析應用於淺層崩塌類型時，主要進行一維非飽和入滲分析，另外，依據本所(2016)^[12]考量衍生莫爾庫倫破壞準則與極限平衡，可計算不同深度下對應之臨界基質吸力(h_c)，求得淺層邊坡穩定包絡線。

綜合考量入滲曲線依時變化與邊坡穩定包絡線交點，可評估之臨界破壞深度 d_{cr} 與所需入滲時間，淺層依時預警依照不同深度之依時體積含水量變化門檻值進行反應。以下就入滲分析與邊坡穩定包絡線進行說明：

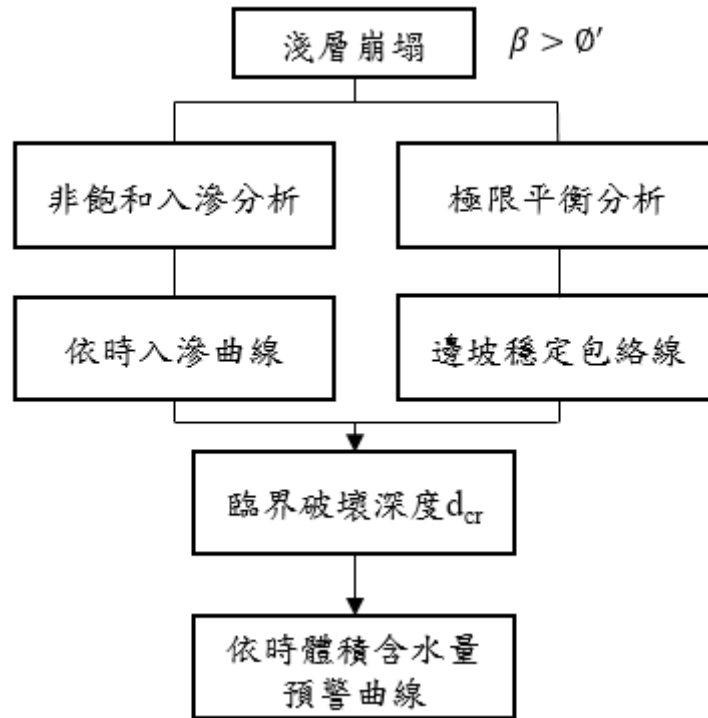


圖 6.3 淺層水力耦合分析流程

1. 非飽和入滲分析

實務上考慮滲透情形下的邊坡穩定分析，大部份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佈有密切關係，為得到孔隙水壓分佈隨滲透變化情形，需了解其水力機制，一維滲流分析應用於淺層崩塌時，主要考量降雨引起之垂直非飽和入滲變化。

假設水在非飽和土中的流動滿足達西定律，但和飽和土中滲流的不同為非飽和土之滲透係數為土壤含水量的函數，稱為基質吸力-滲透

係數曲線，圖 6.4 為典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Fredlund and Xing, 1994)^[24]，而土壤含水量與孔隙水壓力的關係稱為土壤 - 水分特性曲線，因此非飽和滲流中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動支控制方程式可依質量守衡的原理來推導建立，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的地下水流控制方程式，Freeze and Cherry(1979)^[26] 假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在一均質、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，以第二章式 2.3 總水頭的形式表示。

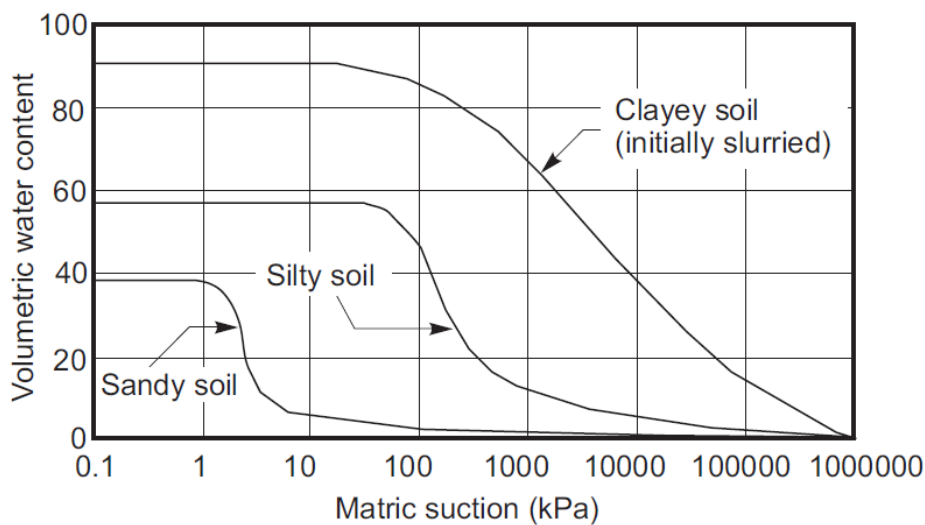


圖 6.4 不同土壤之典型 SWCC 曲線 (Fredlund and Xing, 1994)

在自然邊坡中，若入滲率大於飽和滲透係數(k_{sat})，無法入滲之降雨會沿著邊坡表面流動，使邊坡表面之壓力水頭為零，故分析中上邊界之邊界條件並非以入滲率控制，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，使其剪力強度下降。考慮一維入滲下分析，對於一均質土體，根據質量守恆且土壤和水均不可壓縮，為了簡化計算，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 方程式如第二章之式 2.4。

由於 Richard 方程式為偏微分方程式，須給定一邊界條件(boundary condition, BC)求解壓力水頭在時間與空間中之變化關係，並以數值方法(numerical method)求得近似解，常見為有限元素方法或有限差分方

法。

計畫中主要以有限差分方法求解一維 Richard 方程式，基於 Crank-Nicolson 有限差分法，以求解深度之 $1/200$ 為 Δz ， Δt 則以 Hills 等人所建議的 Δt 限制式， $\Delta t \leq \Delta z/|V|$ ， $V=Q/(\theta(0, t)-\theta_i)$ ，即數值計算之可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可改寫如第二章式 2.5 之差分形式：

而非飽和土層之比儲水參數 $M(h_p)$ 與滲透性 $k(h_p)$ 主要隨土壤類型、顆粒大小等因素不同(即 SWCC)。目前數值分析較常使用之模式為 van Genuchten (1980)^[33] 提出之 VG 模式，以三擬合參數 α 、 m 、 n 來描述土壤含水量特徵曲線，本計畫亦以 VG 模式進行滲流分析，其經驗公式，如式 6.1 至式 6.3：

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m} \quad (6.1)$$

$$S_e(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6.2)$$

$$k(h) = k_s S_e^{0.5} + \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \quad (6.3)$$

其中 h 為基質吸力(F/L^2)， α 為經驗迴歸常數，單位為 $1/L$ ， n 為經驗常數，用以描述土壤含水量特徵曲線之形狀， m 為經驗常數，和 n 之關係為 $m=1-1/n$ ， θ 為土壤體積含水量， θ_s 與 θ_r 分別為土壤飽和與殘餘體積含水量， S_e 為土壤有效含水量， $k(h)$ 為土壤非飽和滲透係數，與基質吸力質大小有關。

基於 Fredlund and Xing (1994)^[24] 提出的不同類型土壤典型土水特徵曲線，以 VG 模式可反算典型土壤 SWCC 於 VG 模式下的三參數之變化，使用 Matlab 配合最小平方法，成果整理如表 6-1 所示。後續進

行非飽和入滲分析時，可依據現地統一土壤分類(USCS)結果進行對應 SWCC 曲線選取使用。Fredlund and Xing (1994)^[24]主要提出砂土質、粉土質與黏土質土壤之體積含水量變化與基質吸力關係，其粒徑由粗至細主要影響土壤孔隙大小，即可能產生之基質吸力大小，對於砂質土壤，其基質吸力變化範圍為 0 至 10^2 kPa，黏土則為 0 至 10^5 kPa，而一般來說由於基質吸力並不會無限上升，且土壤處於過於乾燥之狀態下，更可能產生龜裂，致使入滲係數上升，考慮孔隙水於負 1 大氣壓時開始蒸發（穴蝕現象, cavitation），因此，建議基質吸力分析範圍建議在 100 kPa 以內即可。其中 α 通常為土壤進氣值之倒數，當土壤偏向黏土類型時， α 越低， n 值也是一樣之趨勢。在應用於水力耦合分析流程中，SWCC 若無法以現地土樣進行壓力鍋試驗，求取體積含水量與基質吸力關係時，則可依據統一土壤分類結果，並以表 6-1 選用合適之 VG 模式 SWCC 參數。

表 6-1 典型 SWCC 之 VG 擬合參數(基於 Fredlund and Xing, 1994)

土壤類型	粒徑大小	飽和 體積含水量 θ_s	殘餘 體積含水量 θ_r	α	n
砂土質土壤	粗	0.38	0.02	0.103	5.05
粉土質土壤	↓	0.56	0.02	0.032	1.65
黏土質土壤	細	0.91	0.02	0.018	1.26

2. 極限平衡分析

邊坡穩定包絡線部分，則參考 Collins and Znidarcic (2004)^[21]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 β 之無限長邊坡(如第二章圖 2.9)，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 γ_s ，在土壤飽和部分會產生滲流，水平向滲流平行坡面，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 γ_t ，其基質吸力之大小隨深度改變，即 $h_c = d_w - z$ 。

考量無限邊坡塊體正向應力 σ 與剪應力 τ ，以第二章式(2.6a)、(2.6b) 並代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則(式 2.7)，可推導臨界破壞深度 d_{cr} 為：

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

若不考慮水平滲流的影響，並忽略入滲對土壤單位重的改變，可將式(2.9)改寫為(2.13)：

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

式(2.13)中基質吸力隨深度的分佈 $h_c(z)$ 可由 1-D 滲流分析解得，並代入式(2.13)進行迭代計算得到 d_{cr} ，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡崩塌之基礎，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。後續可依入滲與穩定包絡線交點，求取淺層崩塌之臨界破壞深度 d_{cr} 與所需入滲時間，淺層依時預警主要依照不同深度之依時體積含水量變化門檻值進行反應，相關分析，以臺 20 線 50.7k 場址為例。

6.2.2 淺層崩塌水力耦合分析應用(以台20線50.7k場址為例)

依現場取樣，以台 20 線 50.7k 場址道路上邊坡土樣之粒徑分布曲線如圖 4.10，場址土壤組成主要為細顆粒土壤，通過#200 篩之比例為 80%，統一土壤分類(USCS)為 ML 土壤。依據表 6-1，此處以粉土質土

壤(silty soil)之典型曲線作為台 20 線 50.7k 土壤的代表 SWCC，並以 VG 模式進行詮釋，其 SWCC 擬合成果如圖 6.5 所示，VG 模式參數為 $\theta_s = 0.56$ 、 $\theta_r = 0.02$ 、 $\alpha = 0.032$ 、 $n = 1.65$ ，後續以此最佳參數代表 50.7k 淺層場址非飽和特徵曲線，以計算入滲行為下，對應體積含水量與基質吸力之關係。

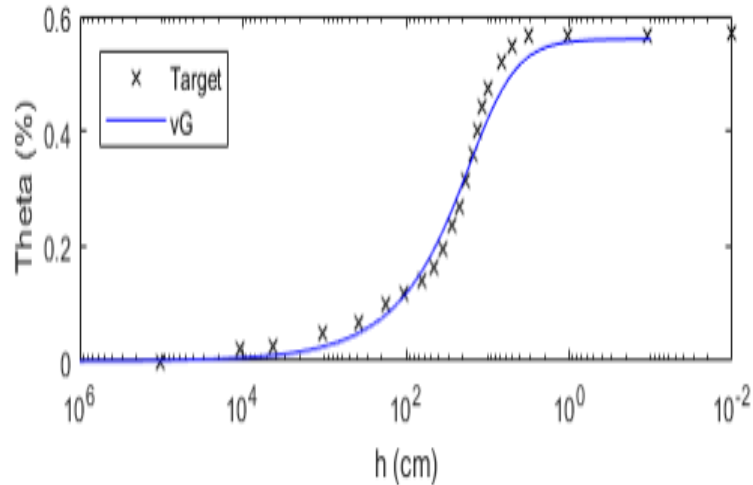


圖 6.5 Fredlund and Xing (1994) 典型粉土 SWCC 擬合成果

接著進行一維非飽和入滲模擬，模型如圖 6.6 所示，此處設定一厚度為 4m 之非飽和土層，假設地下水位面位於模型底部，且入滲過程中保持不動，入滲由模型頂部產生，並設定地表壓力水頭為零(即降雨過程中 $h=0$ ，地表為飽和狀態)，所得入滲分析成果如圖 6.7 所示，依據分析結果，台 20 線 50.7k 淺層場址，在一持續性強降雨下，邊坡將於入滲時間 12 小時後，浸潤面抵達約深度 60 公分處，成果分別繪製 24 小時、36 小時、48 小時、60 小時與 72 小時之入滲深度與基質吸入變化關係。

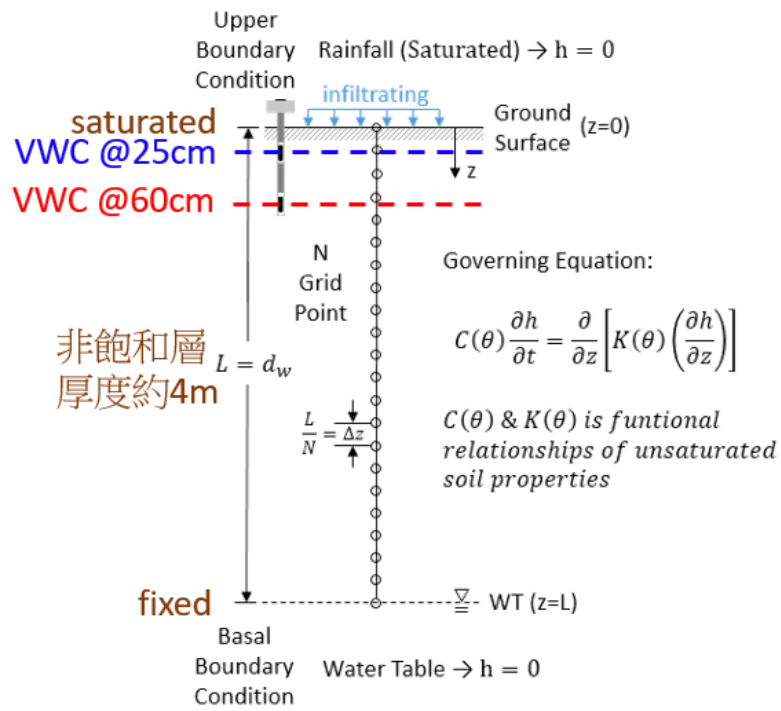


圖 6.6 台 20 線 50.7k 一維非飽和入滲 FDM 模型

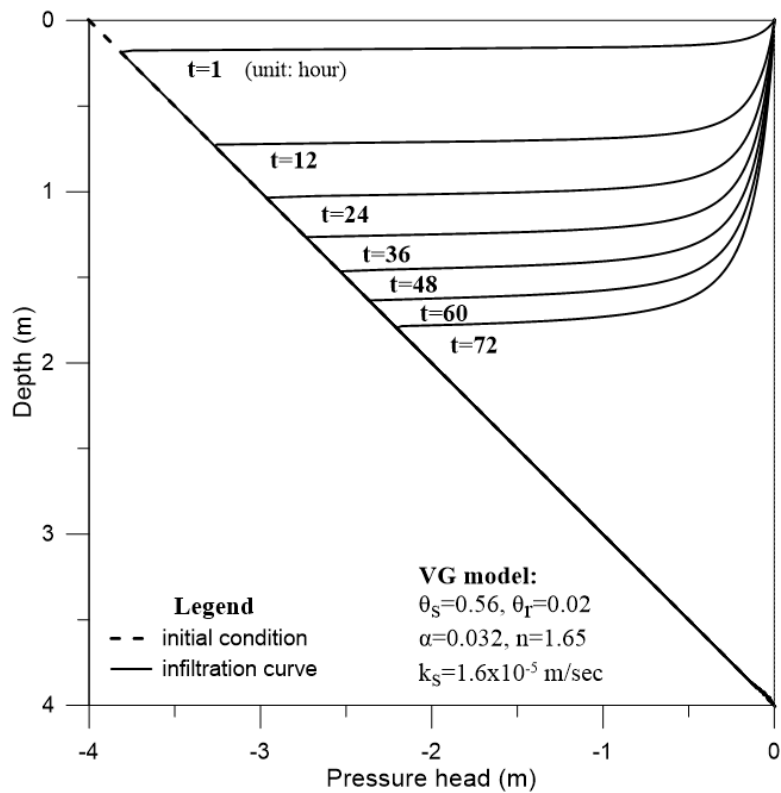


圖 6.7 台 20 線 50.7k 一維非飽和入滲分析成果

台 20 線 50.7k 邊坡場址所用耦合分析參數整理如表 6-2 所示，以一坡角 β 為 45 度，且地下水位 d_w 處於深度 4 公尺處之淺層邊坡進行分析，土壤剪力強度參數凝聚力 c' 為 1.6 kPa、有效摩擦角 ϕ' 為 26 度與基質吸力摩擦角 ϕ^b 為 6.8 度，飽和滲透係數 k_s 為 1.6×10^{-5} m/sec 與飽和單位重為 18.3 kN/m^3 進行淺層水力耦合分析，結果如圖 6.8 所示。依據分析結果，50.7k 淺層場址在一持續性強降雨下(降雨事件不中斷)，邊坡將於入滲時間 12 小時後觸碰到穩定包絡線，其臨界破壞深度為 56 公分。依據 4.4 節淺層崩塌事件監測成果，現場破壞深度約為 45 公分至 60 公分，與預測值 0.56 公尺相近，誤差為 2 維尺度效應；依耦合分析以連續降雨事件進行模擬，預測最快破壞時間為 12 小時，而現場從降雨事件開始至邊坡崩塌約為 24 小時，扣除時雨量小於 0.2 公厘之時間，有效降雨延時約 14 小時，與模型預測之 12 小時接近，可驗證淺層耦合分析可靠性。

表 6-2 台 20 線 50.7k 淺層水力耦合分析參數彙整

d_w	(m)	4
β	(deg)	45
c'	(kPa)	1.6
ϕ'	(deg)	26
ϕ^b	(deg)	6.8
k_s	(m/sec)	1.6×10^{-5}
γ_s	(kN/m^3)	18.3
LL	(%)	33
PI	(%)	7.6
USCS	(-)	ML

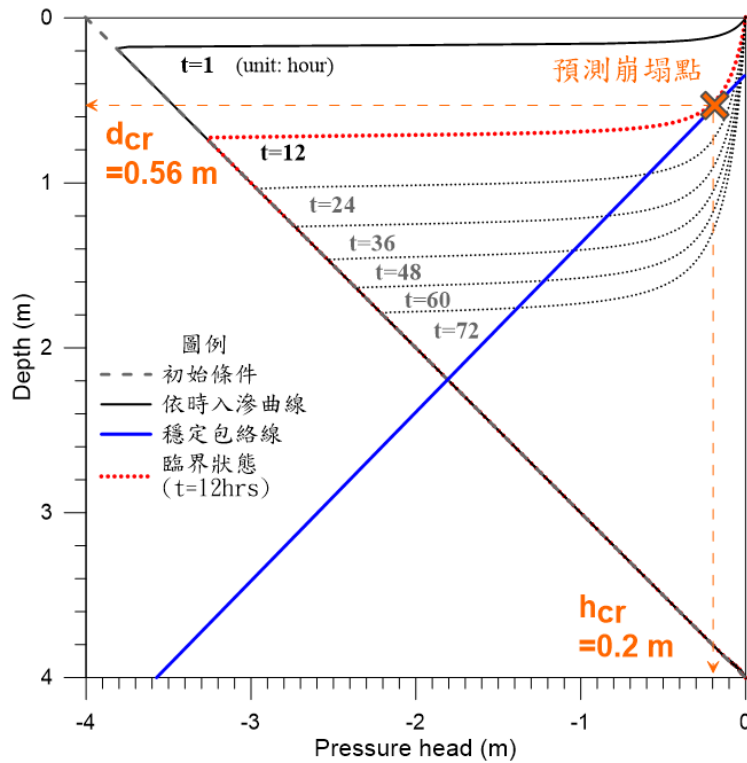


圖 6.8 台 20 線 50.7k 淺層水力耦合分析成果

對於現場監測模組而言，體積含水量計主要安裝位置，如圖 4.13 所示，分別安置於 25 公分與 60 公分處。基於淺層水力力學耦合分析成果，入滲分析所得之滲流曲線經 SWCC 轉換後，可繪製不同深度下入滲分析下特定深度 $z=25$ 公分、臨界破壞深度 56 公分與 60 公分之體積含水量依時入滲變化，如圖 6.9 所示。依據分析成果，在有效入滲行為持續下，破壞時間 $t=12.0$ 小時，其體積含水量分布應分別為 54.8%、45.4%與 41.9%，說明在降雨持續入滲觸發崩塌時，25 公分處之體積含水量計應處於飽和狀態，此與 6.2 節崩塌監測成果一致，發生破壞時 25 公分處體積含水量處於飽和狀態，在無限邊坡的條件下，崩塌位置為深度 56 公分處之土層。

依解析解進行入滲分析，可得連續降雨下不同深度體積含水量之依時變化預測，依破壞時間前推不同門檻警戒值，可得不同反應時間。為展示計畫客製化依時預警架構，圖 6.9 說明以 25 公分處水份計作為監測目標時，建議以 52%，可得反應時間 7 小時；而採 60 公分處時，

建議為 13% (圖 6.10)，可得預警反應時間 4 小時。不同深度門檻值，其代表入滲意義不同，25 公分處警戒值可反應淺層土層趨近飽和，而 60 公分處警戒值可反應浸潤面底抵達 60 公分處，代表臨界深度以上之土層將開始明顯上升，若降雨持續造成入滲，臨界深度水份將達臨界值。

對於降雨引致之土壤淺層崩塌行為，關鍵為降雨入滲造成部分坡體趨近飽和，而喪失非飽和土壤基質吸力提供之剪力強度。考量邊坡現場設置張力計不易，本計畫透過體積含水量計，偵測入滲雨水之入滲深度與體積含水量變化，以反應坡體穩定性與不同深度體積含水量之關係。以本年度台 20 線 50.7k 邊坡示範場址，建議訂定 25 公分處達 52% 為預警值，代表表層土壤已趨近飽和，而 60 公分處達 13% 為警戒值，代表入滲深度已超過臨界破壞深度 56 公分處，配合現場監測成果，破壞前傾斜儀傾角變化速率將明顯提升，進而發生累積 15 度左右之變化，因此，可訂定傾角明顯變化為行動值，可明確反應淺層邊坡崩塌發生，做為相關單位行動封路之依據。

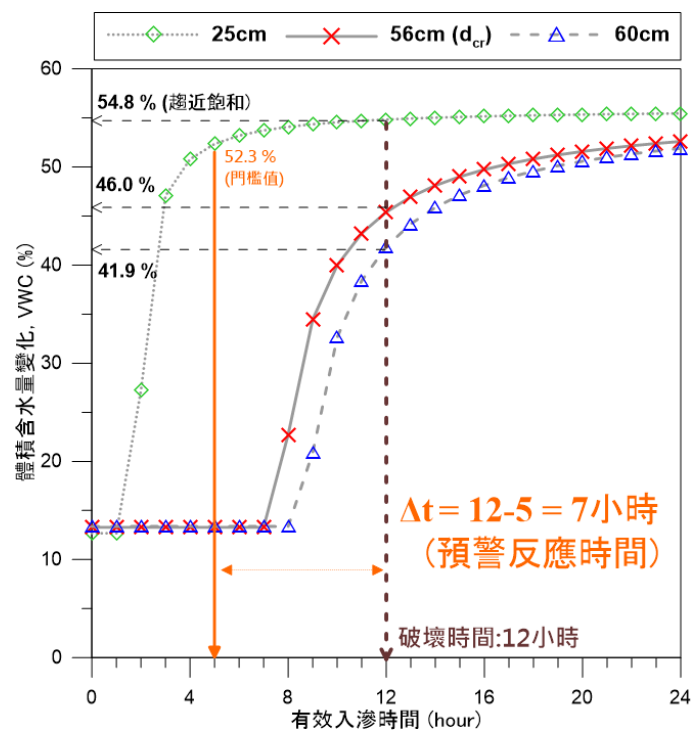


圖 6.9 台 20 線 50.7k 體積含水量依時預警曲線應用說明 (25 公分處)

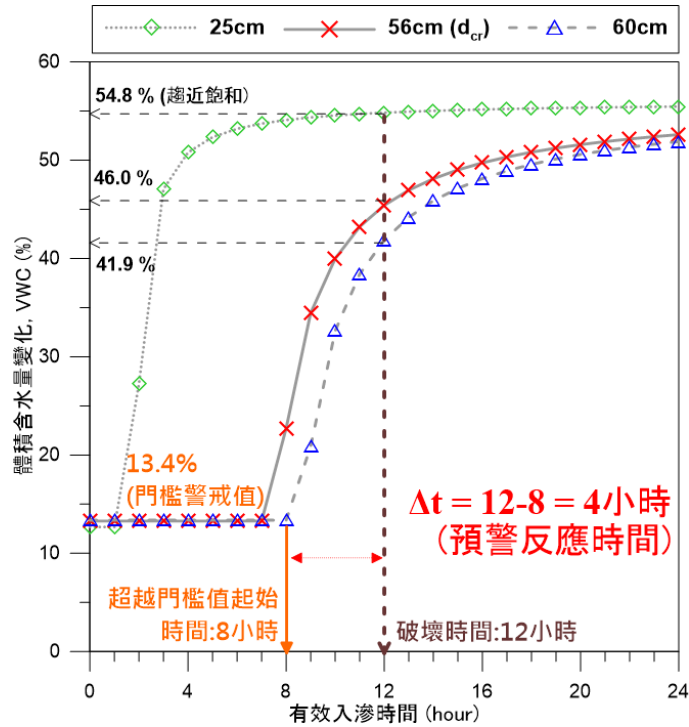


圖 6.10 台 20 線 50.7k 體積含水量依時預警曲線應用說明 (60 公分處)

耦合分析中入滲模擬為連續降雨事件，因此，預測最快破壞時間為 12 小時，對於現場監測而言，仍須考量實際降雨強度是否足夠產生實際入滲行為，由 4.4.2 節之現場崩塌事件監測成果可知，現場從降雨事件開始至邊坡崩塌約為 24 小時，扣除時雨量小於 0.2 公厘之時間，有效降雨延時約 14 小時，與模型預測之 12 小時接近，可驗證淺層耦合分析可靠性。因此，對於台 20 線 50.7k 邊坡依時預警，可選定深度 60 公分處之體積含水量計，當其量測值達警戒值(13.4%)時，在連續降雨行為與足夠降雨強度下，場址預計最快於 4 小時觸發崩塌，整體預警流程，整理如圖 6.11 所示。

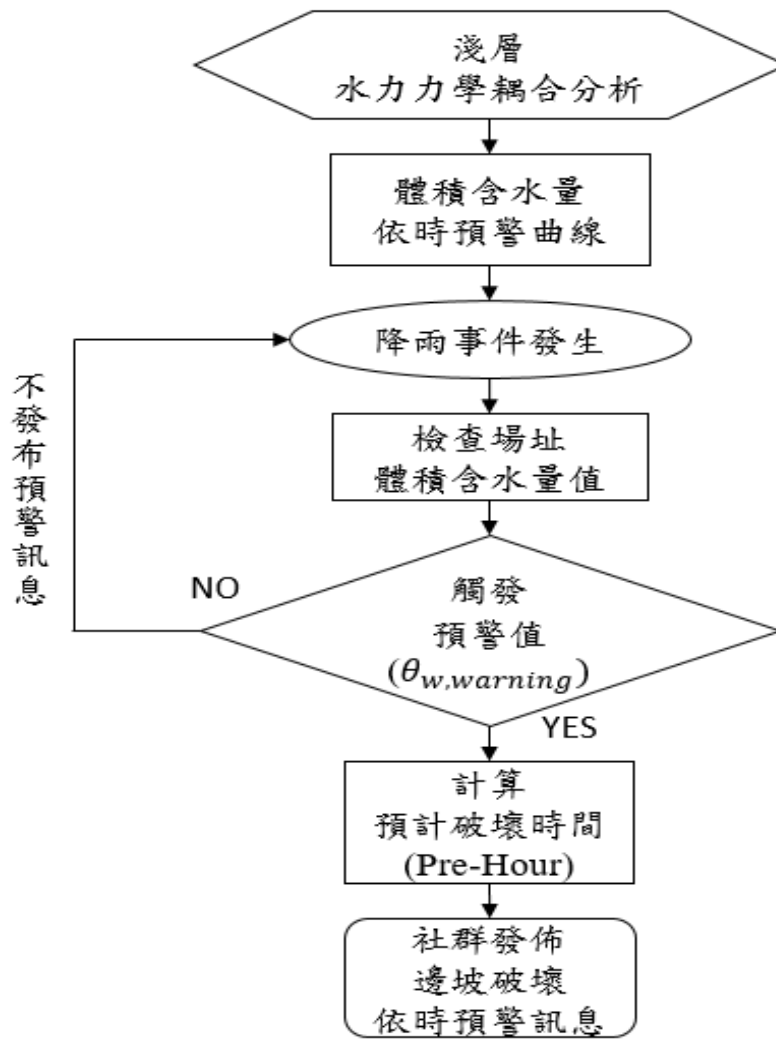


圖 6.11 台 20 線 50.7k 淺層崩塌依時預警流程

計畫分層含水量變化量測採標準化設計，相關門檻值之訂定，主要以 25 與 60 公分，兩種深度進行說明。對於未來客製化相同破壞類型之邊坡預警系統時，應以淺層崩塌水力耦合分析，在現場幾何、坡體土壤類型與非飽和特性等條件下，評估臨界破壞深度與入滲所需時間。而體積含水量計之埋設深度，最佳情況為設置於分析所得之臨界破壞深度，並考量入滲分析所得之體積含水量依時變化曲線特徵，訂定合適之警戒值，而門檻值越接近臨界體積含水量時，則可供預警之時間越短。計畫嘗試以解析架構下之水力反應來預測邊坡破壞行為，不同深度之含水量變化屬連續行為，相關水份計埋設深度與對應門檻值之訂定，須

對土壤入滲與非飽和強度特性有議定瞭解，並一併考量現場體積含水量計設置之難易度，因此，仍有賴專家學者會議進行充分討論其合適性。

為說明淺層耦合分析參數之敏感度，此處針對土壤類型、坡角變化與基質吸力摩擦角變化，說明對淺層崩塌耦合分析之影響。對於不同土壤類型，其非飽和特性將影響入滲深度與所需入滲時間，而一維非飽和入滲分析中，以選用之 SWCC 為關鍵參數，6.2.1 節之標準分析流程提出以 Fredlund and Xing (1994)^[24]三種典型 SWCC 曲線來簡化分析流程，而對於淺層崩塌($\beta > \phi'$)，邊坡常時穩定由基質吸力提供額外剪力強度，因此，淺層崩塌依破壞機制，多屬含粉土或黏土比例較高之土壤邊坡，砂質土壤粒徑相較大，產生基質吸力質小，因此，不在淺層崩塌機制之討論範圍內。圖 6.12 為土壤類型對淺層崩塌耦合分析之影響結果，於相同幾何條件與剪力強度參數條件下，對於台 20 線 50.7k 邊坡之土壤，粉土質土壤以入滲 12 小時達臨界狀態，黏土質為 24 小時，說明土壤類型對淺層崩塌將致使入滲時間增加，才能抵達相同之入滲深度。而此處，對於不同土壤類型之淺層崩塌邊坡，其暫態穩定形程之邊坡坡角與其剪力強度參數也不盡相同，因此，相同幾何條件與剪力強度參數條件，僅討論土壤類型對入滲影響。

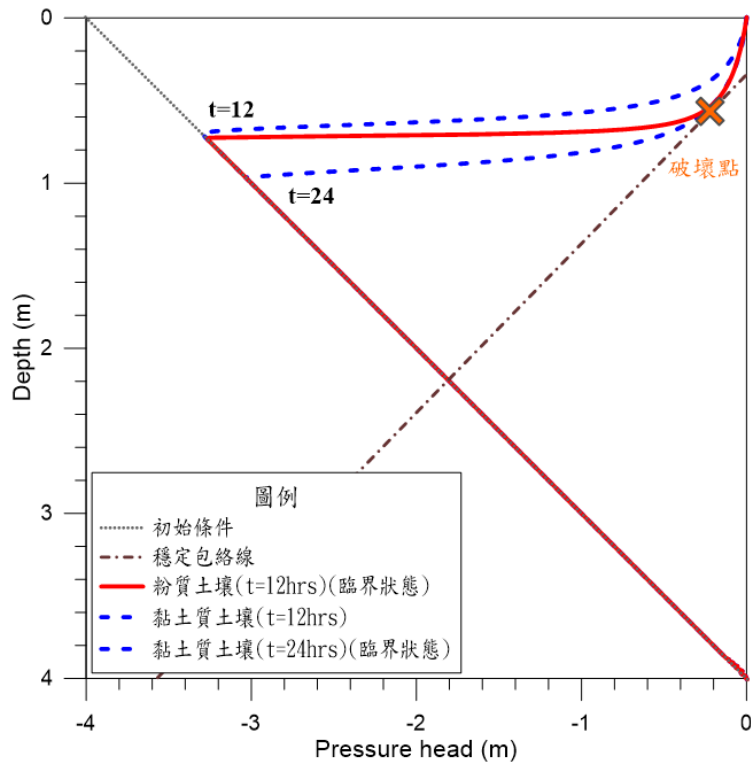


圖 6.12 土壤類型對淺層崩塌水力耦合分析之影響

圖 6.13 為探討坡角 β 對台 20 線 50.7k 邊坡場址淺層崩塌耦合分析之影響，由圖可觀察，當邊坡坡角 β 上升時，入滲曲線與穩定包絡線相切交點之臨界破壞深度 d_{cr} 將變淺，而所需入滲時間將變短，說明較陡之淺層崩塌邊坡其坡角越高，則在降雨強度與延時相對較小之降雨事件，其破壞機率較高，其原因為邊坡穩定極限平衡分析下之驅動力提高。而破壞深度分布範圍在 0.4 至 0.95 公尺，當坡角提高，破壞深度 d_{cr} 將變淺，但隨每 10 度坡角之增加，對破壞深度之變化將有限。綜合以上，對於坡角 45 度與 55 度之淺層崩塌邊坡，破壞深度依分析結果分別為 0.40 與 0.56 公尺，其差距約為 29%；入滲觸發穩定包絡線所需時間推估為 8 小時與 12 小時，其差距約為 33%。說明坡角大於 45 度，此類破壞機率較高之淺層崩塌邊坡，其預測破壞深度與入滲時間之誤差約在 30% 上下。圖 6.14 為探討基質吸力摩擦角 ϕ^b 對台 20 線 50.7k 邊坡場址淺層崩塌耦合分析結果之影響，由圖可觀察，質吸力摩擦角上升時，臨界破壞深度 d_{cr} 變深，破壞預測時間變久，其原因為邊坡穩定極限平衡分析下之抗剪強度提高之原因，而基質吸力摩擦角 ϕ^b 增加 50%，

對於破壞深度之預測，其誤差大約在與入滲時間之誤差約在 30% 上下，而基質吸力摩擦角之增加，對於淺層崩塌發生時，所需入滲時間約在 40%，說明基質吸力摩擦角對入滲所需時間誤差較高。對於基質吸力摩擦角參數 ϕ^b ，建議以三軸試驗，分別進行飽和試體與非飽和試體之 CU 試驗，並考量衍生莫爾庫倫破壞準則，可求取合適之參數。Gan et al. (1988)^[27] 以冰凍土進行多階段非飽和直剪試驗，結果則顯示剪力強度與基質吸力為非線性遞增關係，意即 ϕ^b 非為定值。由於基質吸力並不會無限上升，且土壤處於過於乾燥的狀態，更可能產生龜裂，致使入滲係數上升，考慮孔隙水於負 1 大氣壓時開始蒸發（穴蝕現象, cavitation），因此建議基質吸力分析範圍建議在 100 kPa 以內即可。

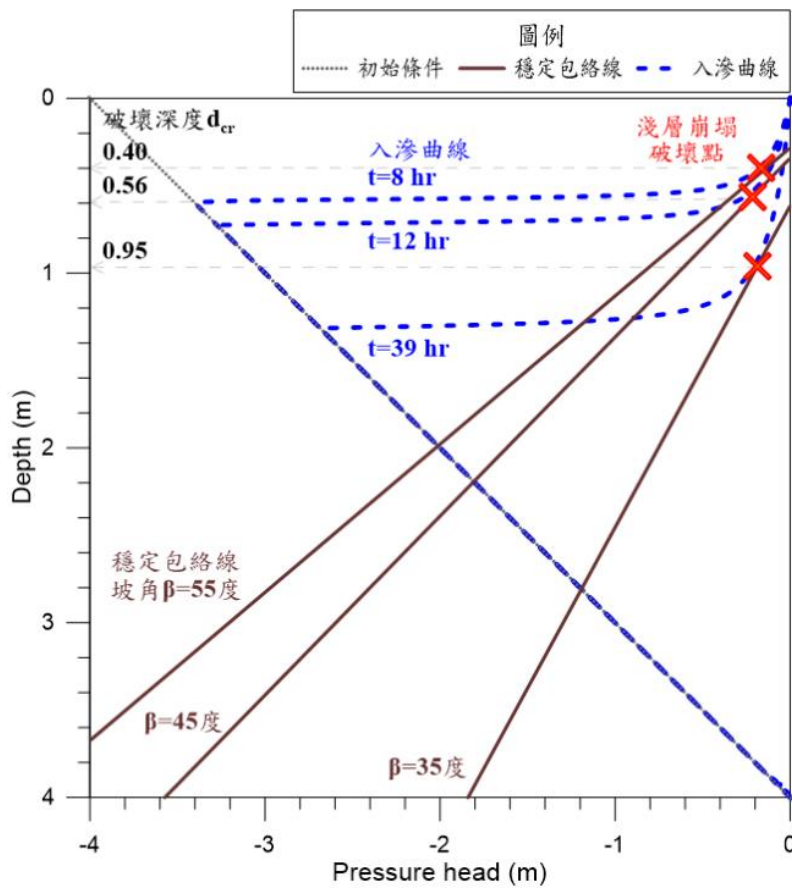


圖 6.13 坡角 β 對淺層崩塌耦合分析之影響

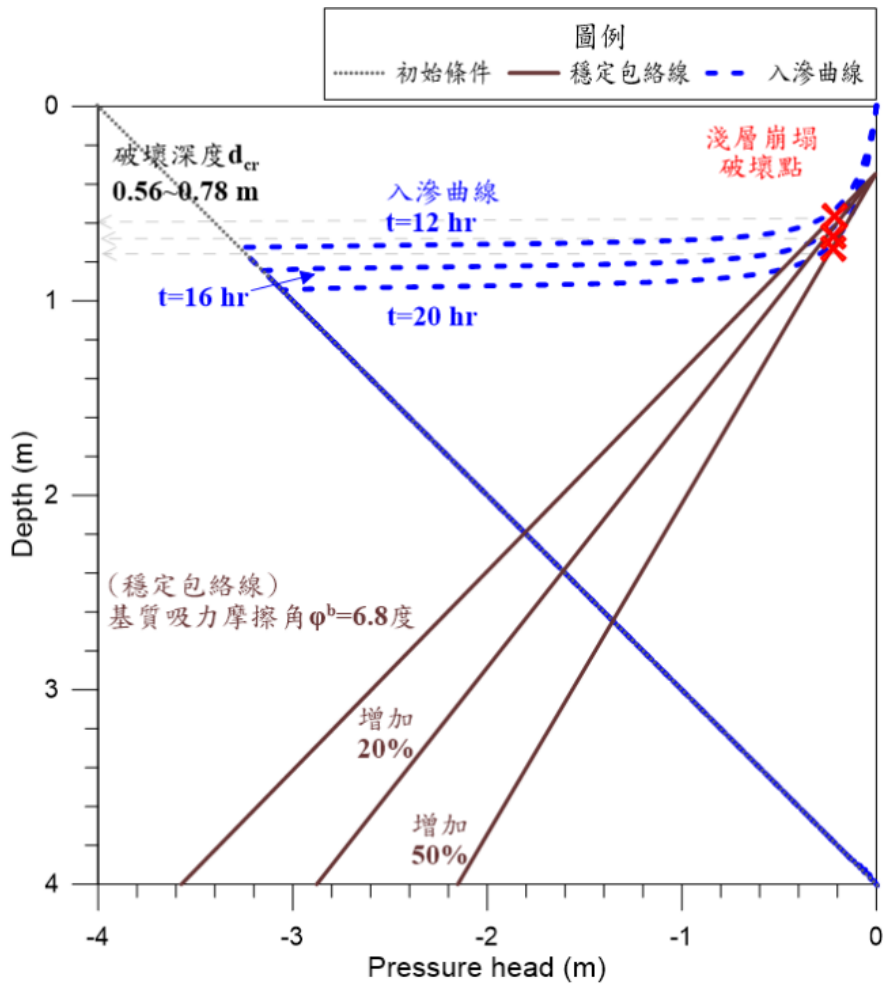


圖 6.14 基質吸力摩擦角 ϕ^b 對淺層崩塌耦合分析之影響

6.2.3 飽和土層滑動依時水力耦合分析

水力耦合分析應用於飽和層滑動類型時，須進行適度修正，針對一維無限邊坡飽和層滑動，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，坡體內平行滲流力效應，則須加以考慮，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。

飽和層滑動依時水力耦合分析流程整理如圖 6.15 所示，飽和層滑動屬於坡角小於土壤摩擦角之類型，在長期持續性降雨之條件下，坡體地下水壓抬升，致使驅動力與有效應力下降，致使坡體失穩。整體分析流程包含降雨後地下水位變化分析與極限平衡或二維數值模型邊坡穩定分析。進行地下水位變化分析時，因孔隙水壓力與飽和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)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)關聯性及(2)進行集水區降雨入滲分析，而運研所發展之監測模組可提供長期監測，作為統計回歸之依據。而邊坡穩定分析部分，則需考量現場是否有擋土支撐系統存在，考量現今高風險邊坡多已進行整治，因此，108 至 109 年度計畫於飽和層滑動分析架構中，導入擋土系統探討於水力耦下，擋土系統與邊坡穩定之互制作用影響，而此效應無法以傳統極限平衡方法進行量化，因此，對於整治之邊坡應建立二維數值模型進行模擬。而對於自然邊坡(無擋土支撐系統)，則簡化以極限平衡分析計算地下水位變化與安全係數關係即可。以下就地下水變化分析與無限邊坡飽和層滑動分析進行說明：

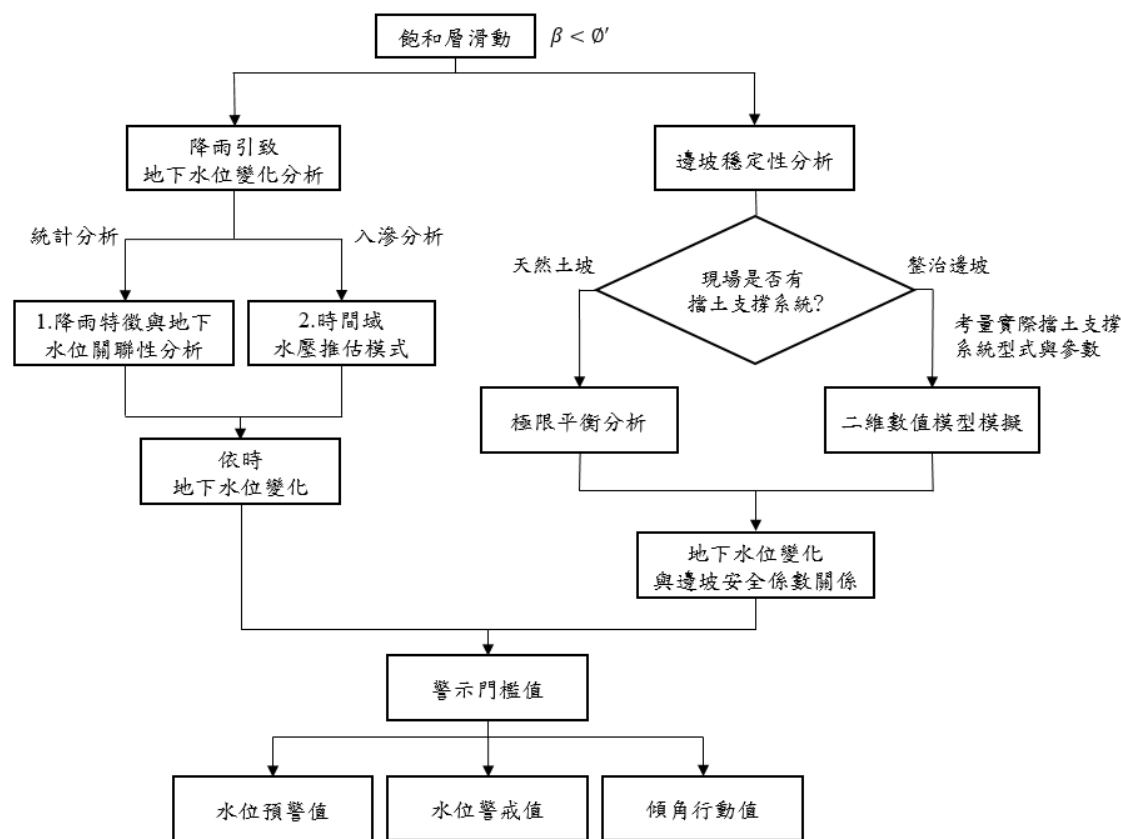


圖 6.15 飽和層水力耦合分析流程

1. 降雨下地下水位變化分析

(1) 降雨特徵與地下水位關聯性分析

探討降雨下之地下水位變化時，第一種方法如圖 6.16 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(洪芯琦，2018)^[5]，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。以邊坡現場長期觀測迴歸孔隙水壓與降雨參數關聯性分析，可增進應用於地下水變化推估之準確性，其相關成果主要呈現於第五章淺層場址監測成果之 5.3 節中，此處不另說明。

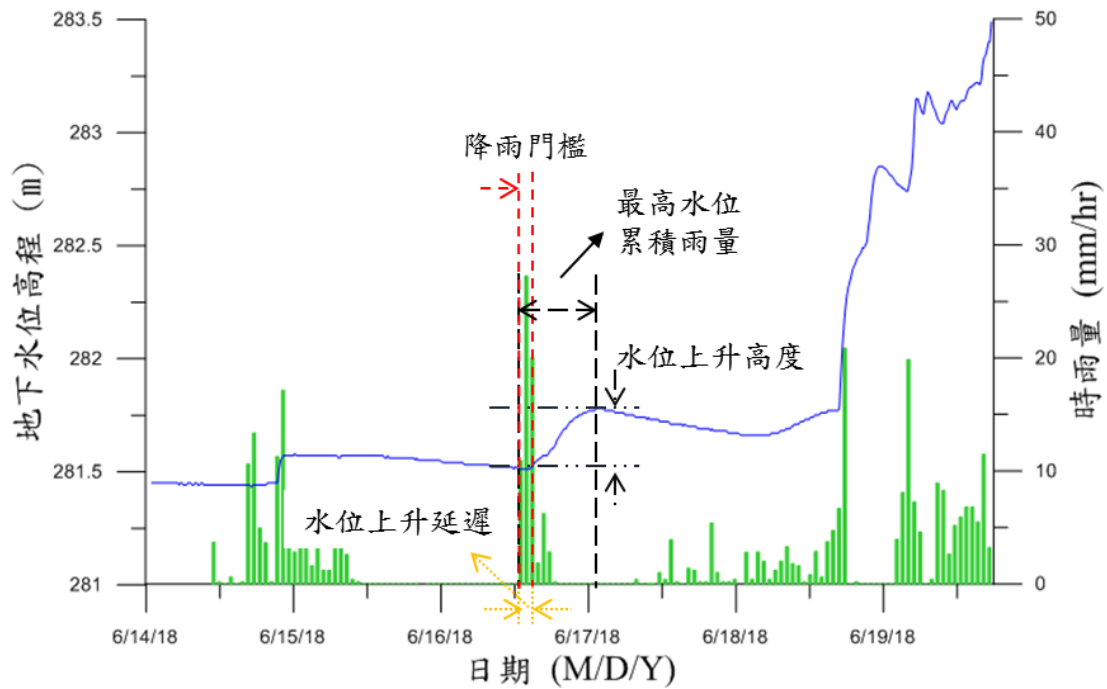


圖 6.16 降雨特徵參數定義示意圖(洪芯琦，2018)

(2) 時間域水壓推估模式

第二種方法同前述之入滲分析，其關鍵在於掌握長期降雨導致地下水壓上升之依時變化行為，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。本計畫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，此做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 52k 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。

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動控制方程式。垂直方向之一維 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(式 2.5)。其數值方法之誤差與時間間格(Δt)、空間間格(Δz)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。

建立之一維 FDM 入滲數值模型，如圖 6.17 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，上述做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。

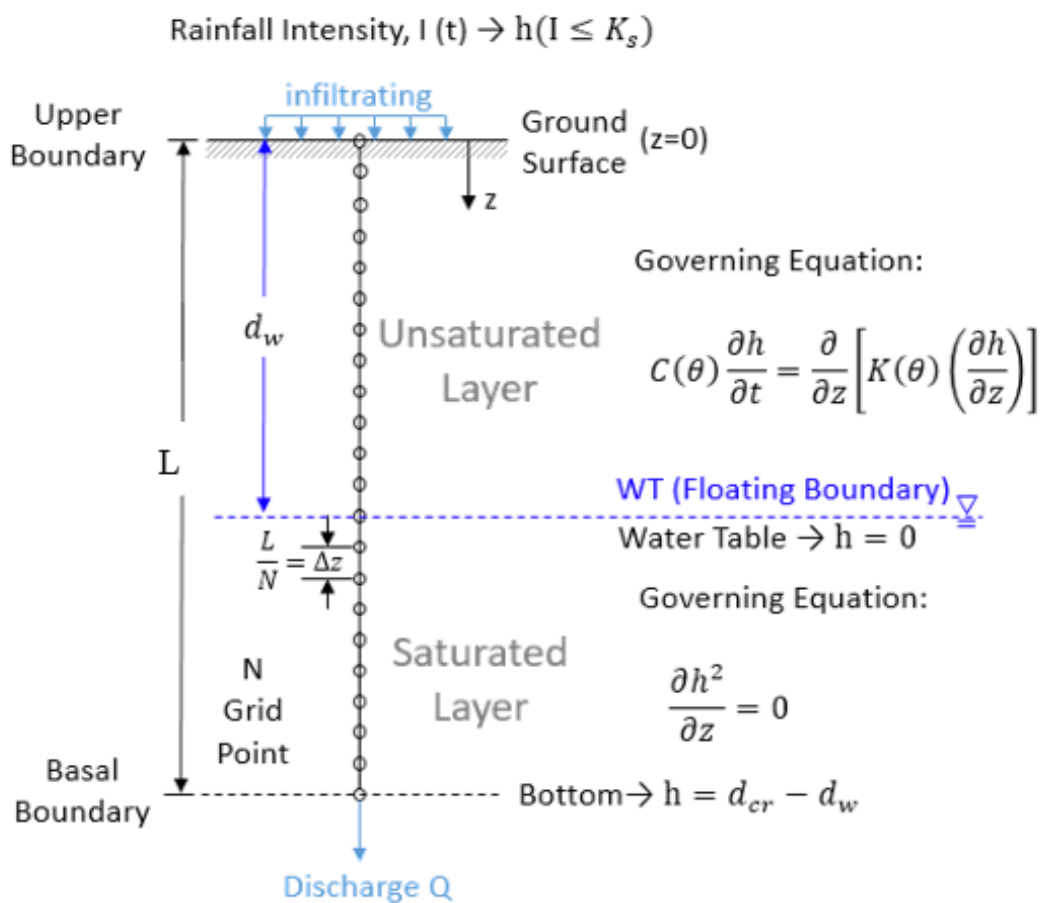


圖 6.17 一維 FDM 入滲數值模型

模型中非飽和土層之土水特徵曲線同樣採用 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

2. 邊坡穩定性分析

(1) 極限平衡分析方法

無限邊坡飽和層滑動分析部分，於傳統無限邊坡滑動分析探討孔隙水壓抬升之安全係數變化，以圖 2.10 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(6.11)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 γ' 為滑動面土壤浸水單位重。考慮平行滲流時，則 γ_u 大於 1，造成安全係數降低直至破壞，其應力變化如圖 2.11 所示(Anderson and Sitar, 1995)^[19]。

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做為依時預警之指標。因 γ_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 γ_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，可做為飽和土層依時預警之架構。

(2) 二維數值模型分析方法

對於具擋土支撐系統之邊坡，其結構物與邊坡之水力耦合與互制作用效應，應以二維數值軟體進行模擬。因此，自 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，並以介面元素做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，本計畫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。

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 6.18 所示(運研所，2020)^[16]，目的建立完整分析流程，分析結果選定預警指標及數值，做為預警門檻值訂定依

據。

運研所(2020)^[16]二維數值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 (2)設定材料參數(表 6-3)(3)加入結構元素及設定相關參數如(表 6-4) (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，以平行坡面之地下水深 10 m、5 m 進行模擬與比較，最後依需求將結果進行輸出，即地下水位與安全係數關係，數值分析成果以台 20 線 52k 場址進行示範。

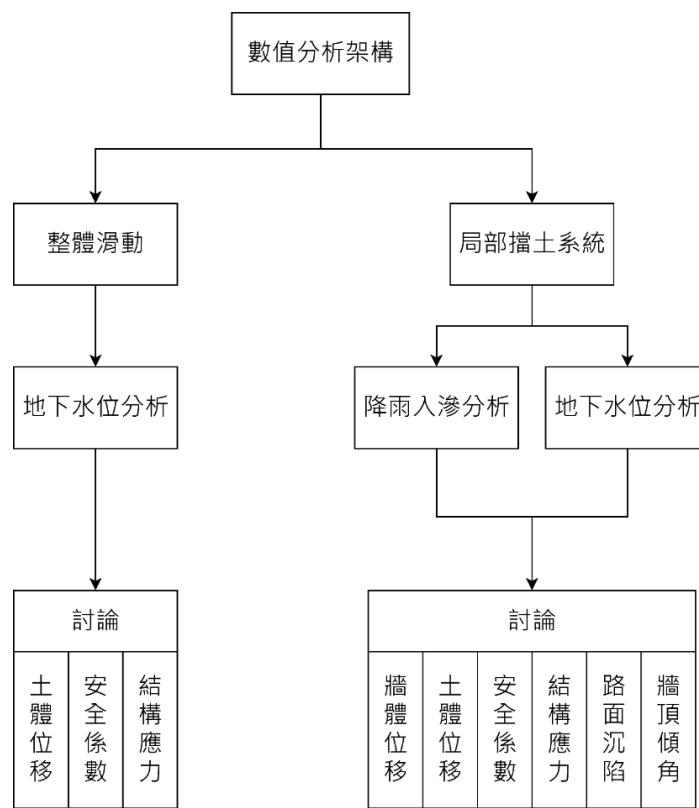


圖 6.18 邊坡擋土系統數值分析流程圖(運研所，2020)

表 6-3 地層材料參數(運研所，2020)

地層分類	單位重 γ (kg/m^3)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
岩層	2200	100	30
崩積層	2000	3	32

表 6-4 擋土系統結構元素參數(運研所，2020)

擋土牆	彈性係數(GPa)	截面積(m ²)		慣性矩(m ⁴)	
	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 ²)	極限強 度(ton)	預力 (ton)	間距 (m)
	200	0.5	50	50	1

6.2.4 飽和層滑動水力耦合分析應用(以台20線52k場址為例)

1. 時間域水壓推估模式驗證與精進

前期(109 年度) 台 20 線 52k 邊坡場址，以 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。並選定期間有效水位抬升事件(event A)率定數值模型，如圖 6.19 所示。Event A 最佳擬合參數，整理如表 6-5 所示，擬合求得之 VG 模式 SWCC 參數為一組擬參數(pseudo parameters)，以統整三維地形影響、崩積層均質性不佳、土層非飽和性質等效應之結果。

降雨事件(Event A)下短期水位模擬成果，請參考圖 6.20，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。

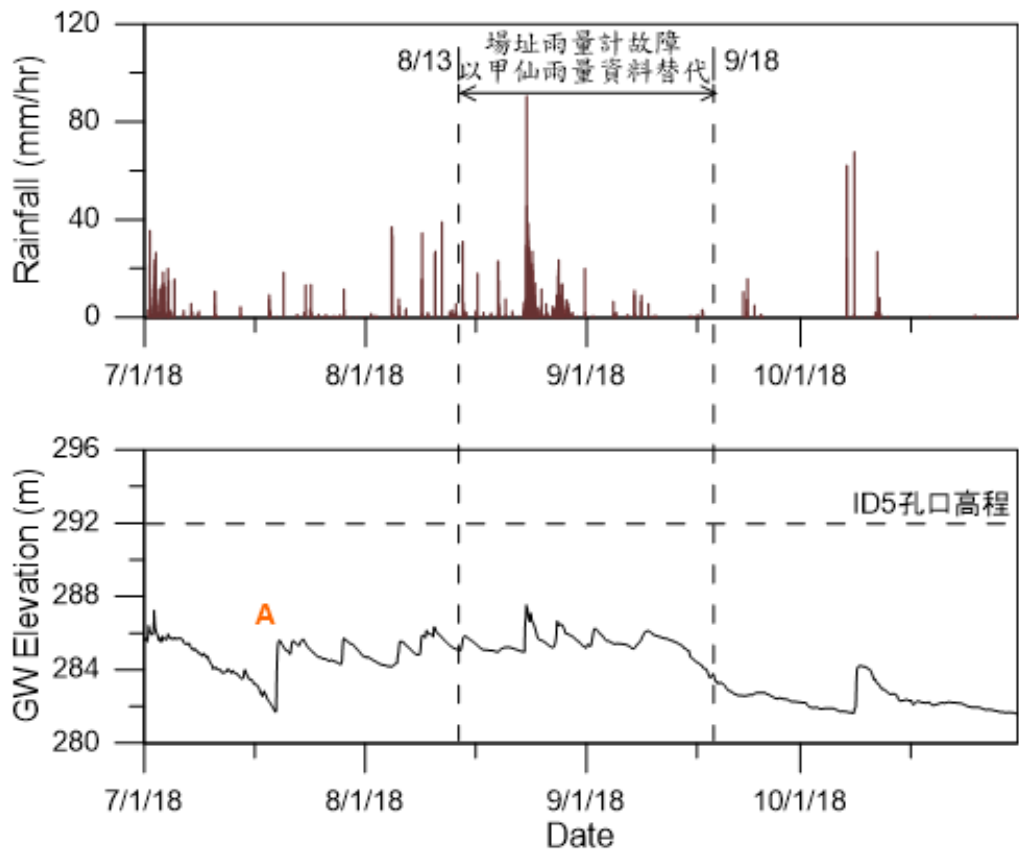


圖 6.19 台 20 線 52k 地下含水層水位觀測結果(2018 年 7 月至 12 月)
(運研所，2020)

表 6-5 Event A 最佳擬合參數

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

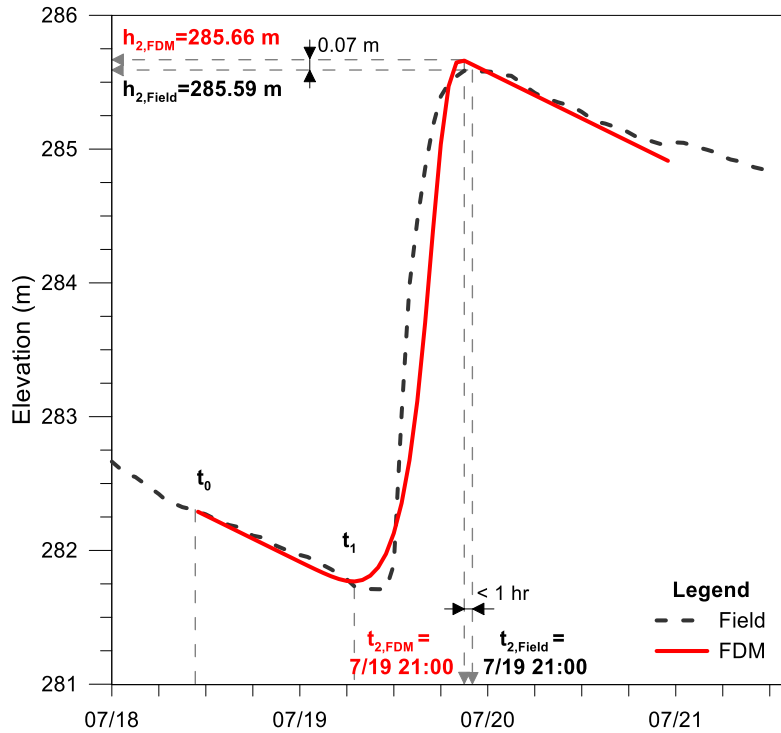


圖 6.20 台 20 線 52k 場址降雨事件下短期水位模擬成果(Event A)

(運研所，2020)

為驗證前期發展之時間域孔隙水壓推估模式，此處以崩積層 2021 年 6 月份地下水壓與雨量監測成果進行參數驗證，取 ID5 崩積層地下水壓 6/4 12:00 至 6/6 22:00 約 60 小時監測值進行模擬，如圖 6.21 所示，依據現地監測資料，截至 110 年 6 月，崩積層地下水位最高值 285.29 m(發生於 2021/6/6/ 5:00)。另外今年五月前因長期乾旱，崩積層內地下水位處於地層交界面，並無量測到地下水壓，因此，此處假設水位開始抬升前，其 $Q=0$ ，反之，在水位抬升後，以監測數據實際反算之 Q 值 $=30.6$ mm/hr 帶入水壓推估模式中，其中 Q 值與 Event A 使用之滲漏值接近，而模型相關 SWCC 參數直接使用 EventA 率定所得之參數(表 6-5)，FDM 數值模型上、下依時水力邊界，整理如圖 6.22 所示。水位依時推估所得成果為圖 6.23，水位誤差 0.15 m，預估時間誤差 1.2 小時，所得擬合成果與監測值相近。

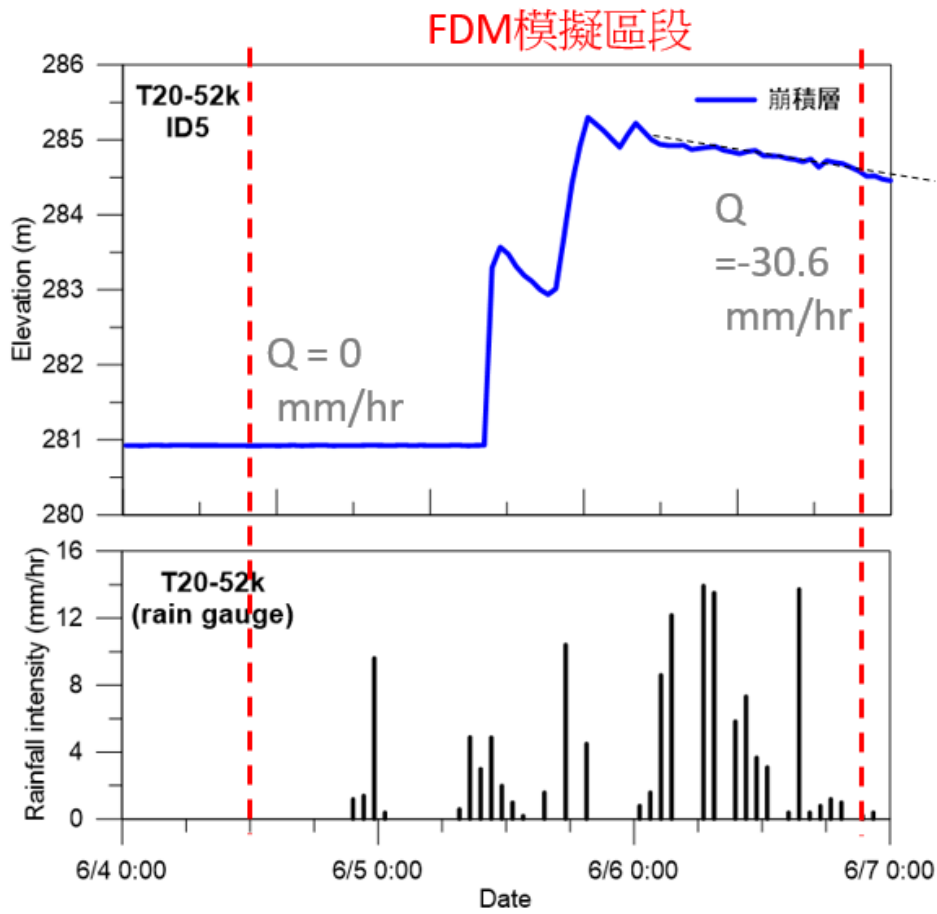


圖 6.21 台 20 線 52k 場址 2021 年 6 月份降雨事件

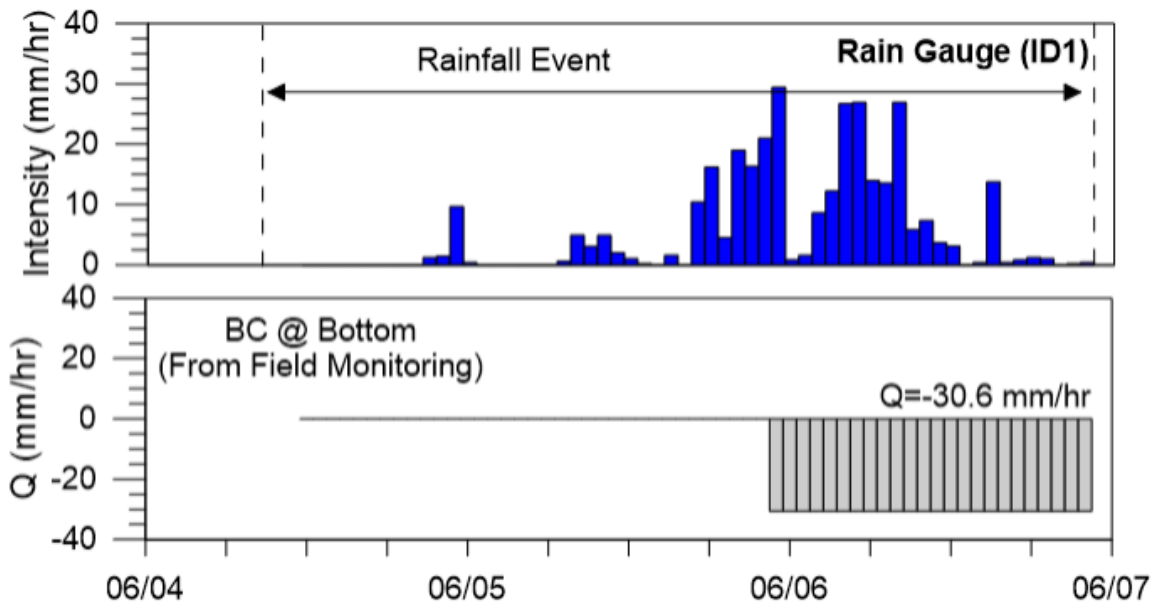


圖 6.22 2021 年 6 月份降雨事件擬合 FDM 模型水力邊界條件

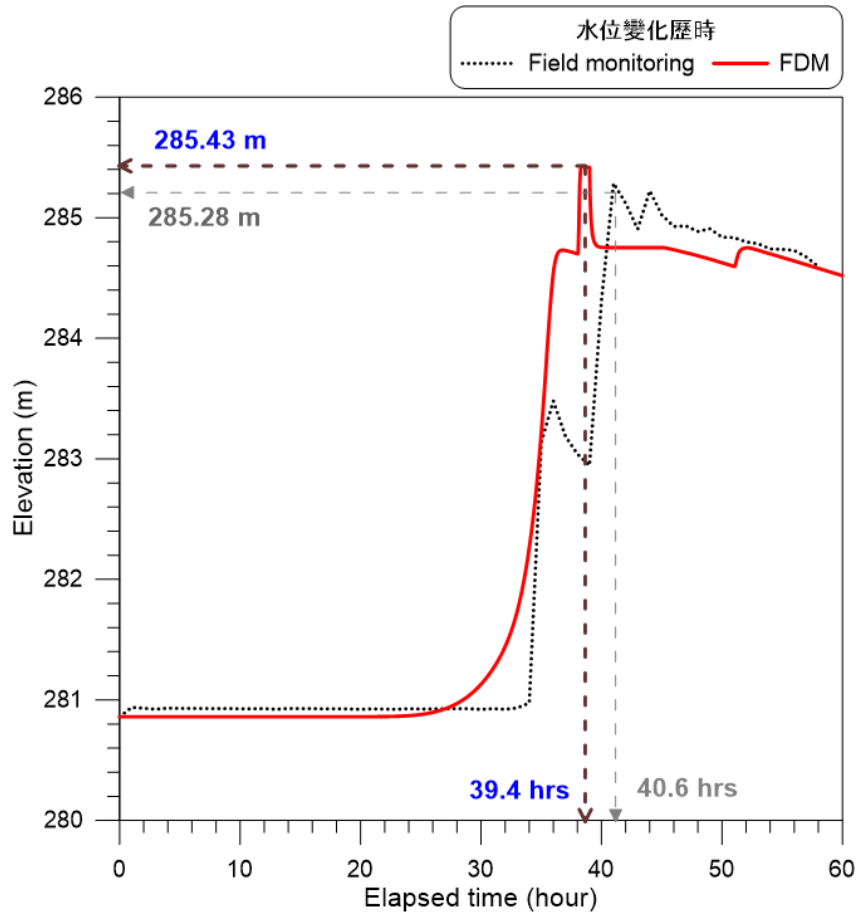


圖 6.23 台 20 線 52k 場址 2021 年 6 月份降雨事件短期水位模擬成果

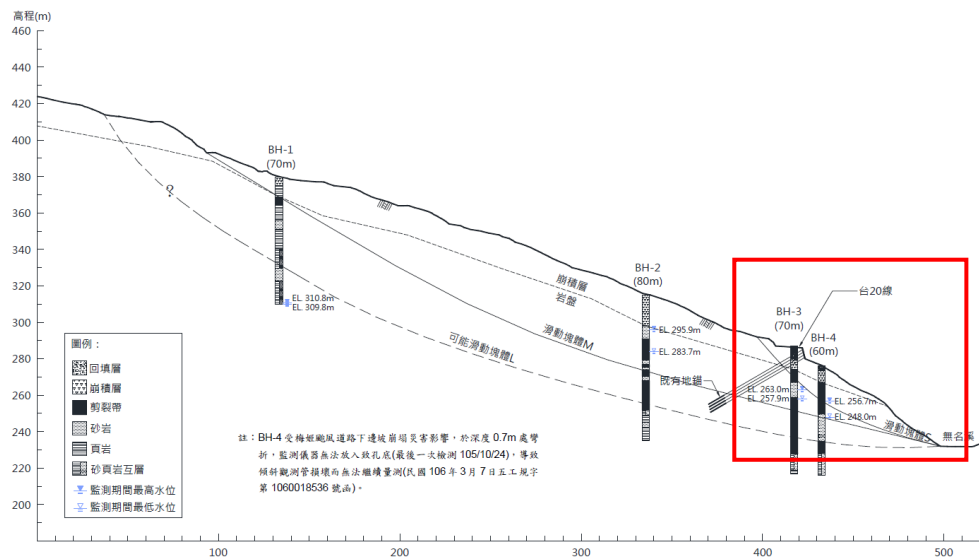
率定後之一維入滲數值模型可用於推估不同降雨特徵下，時間域上孔隙水壓依時反應，對於降雨引致飽和土層滑動破壞之類型，降雨事件開始後，需特定時間才能由地表入滲與上游水位補注至地下水層，降雨開始到孔隙水壓抬升至臨界狀態(破壞)所需時間差可作為預警時間。所發展之時間域孔隙水壓推估模式，可於現地雨量監測值回傳降雨特徵後，即時推估未來坡體地下孔隙水壓變化，以爭取孔隙水壓達臨界值前之預警時間發布警報，而相關地下水位變化與邊坡安全穩定關係，對於此類有擋土支撐系統之飽和層滑動場址，則需以二維數值模型來進行分析。

2. 邊坡穩定性分析

邊坡穩定性分析流程依循 6.2.3 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。

(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 6.24 剖面地形幾何；力學參數由於無完整室內實驗報告，參考倪勝火(2013)^[6]於距離本場址約 45k 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 17.6 kPa 與摩擦角 26 度；擋土結構物設計與參數參考青山工程(2017)^[3]竣工圖(圖 6.25)，本路段擋土牆高約 10m，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 6.26 所示。



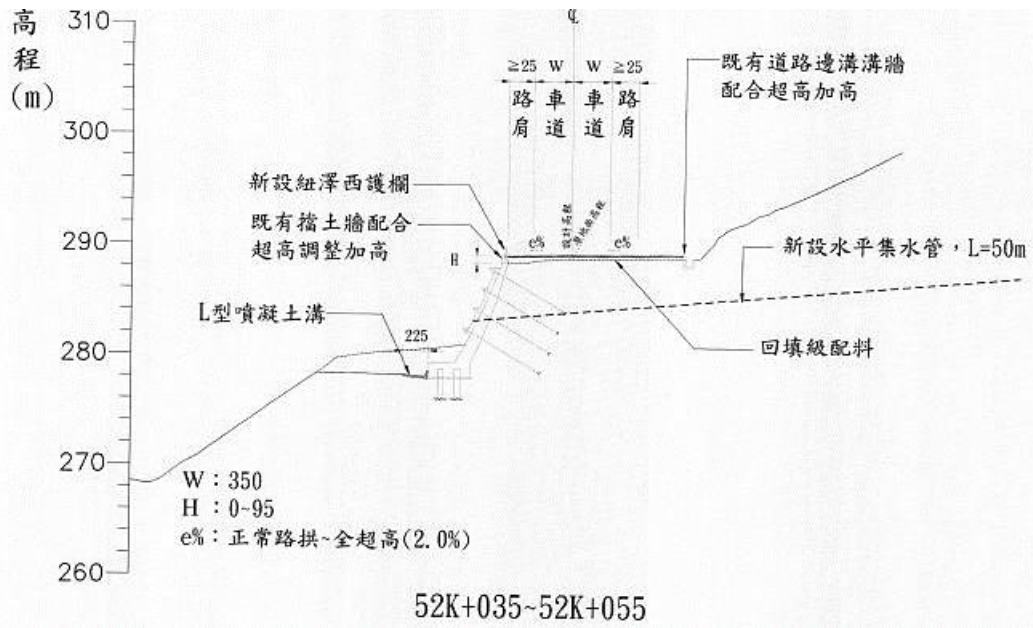


圖 6.25 台 20 線牆體與地錨示意圖(青山工程，2017)

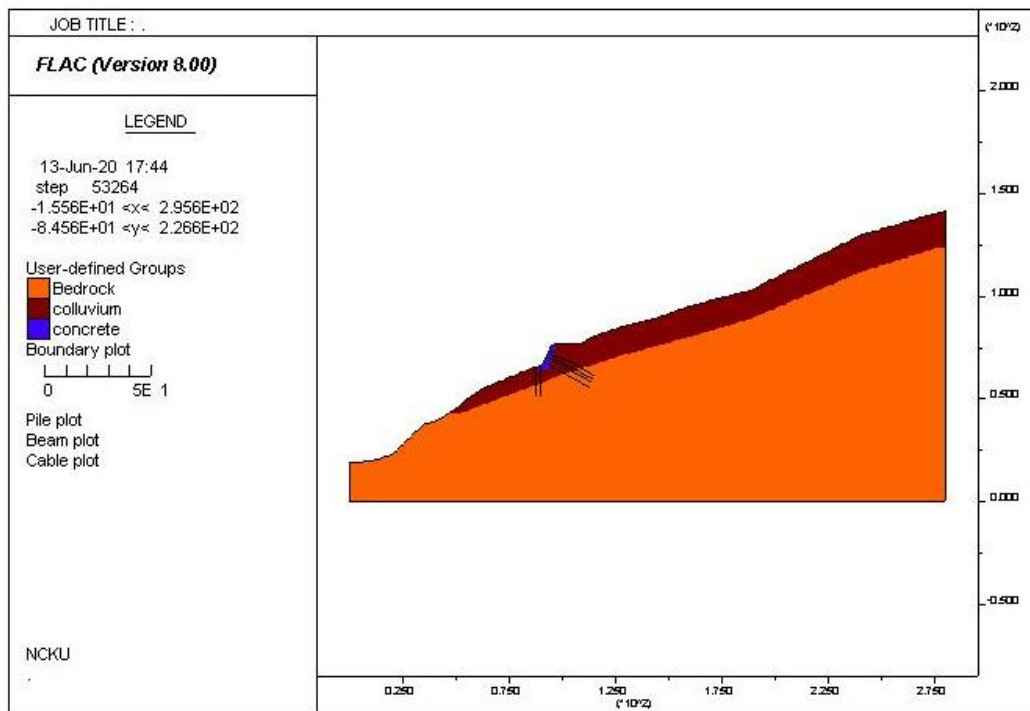


圖 6.26 台 20 線 52k 總體滑動數值模型

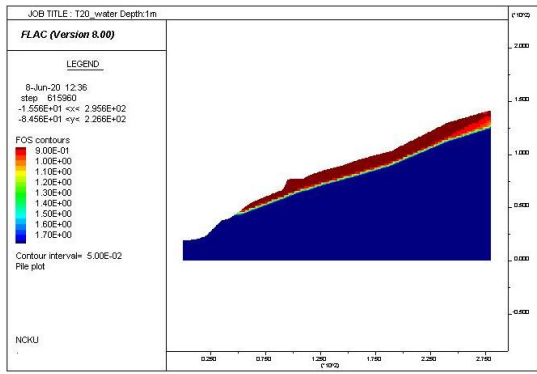
分析中以地下水位與地錨極限強度為變數，為結合現地監測資訊，水位選用 ID5 孔口地下水位深度為代表，此處挑選地下水位 10m 與地下水位 1m 進行解說，分析結果如圖 6.27 所示，由上到下 3 組案例分

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、及(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 1.0。

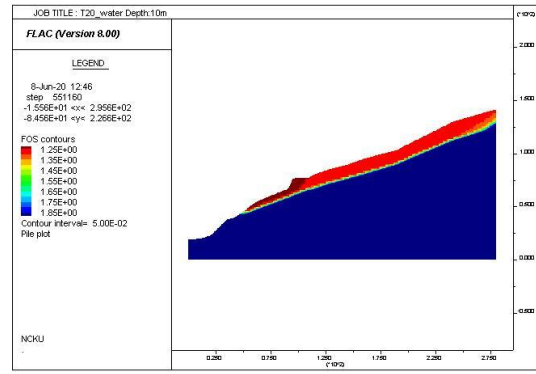
於加入極限強度 10 噸地錨與止滑樁案例中，地下水位深度 10m 案例滑動區域改善了擋土系統附近之穩定性，但於地下水位上升時穩定性的改善不甚明顯；在地錨極限強度 50 噸案例中，地下水位深度較深之情形其穩定性有明顯改善，擋土牆系統周圍較上部與下部邊坡更為安全，地下水位上升時，擋土系統穩定了周圍區域，使其比上部邊坡更為穩定。

(2).台20線52k局部擋土系統地下水位變化分析

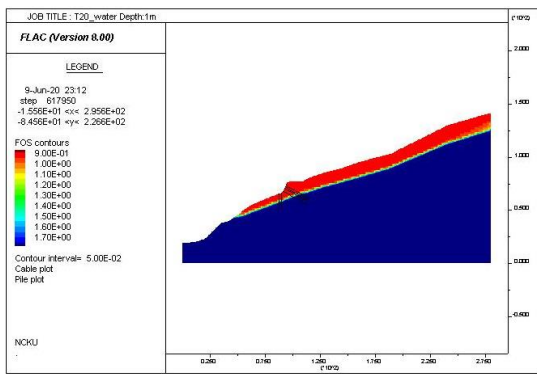
局部擋土牆地下水位分析地型參考圖 6.24 窗選區域之剖面地形幾何，力學參數與結構物參數與總體滑動分析相同，模型建立完成後如圖 6.28 所示。分析以地下水位為變數，並以 ID5 位置水位深度做為代表，分析結果整理如圖 6.29(a)所示，水位深度在 10m 時安全係數為 1.4，當地下水位逐漸上升至深度 2m，安全係數降為 0.96；以剪應變等值線圖(圖 6.29 (c) & (d))判斷臨界滑動面，結果顯示於地下水位較深時(10m)滑動面為道路至下邊坡土層出露區域，當地下水位上升，其滑動面延伸至上部邊坡且安全係數降低。挑選地下水位 4m 情形進行地錨極限強度折減分析，結果如圖 6.29(b)所示，當地錨極限強度折減至 10 ton 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。



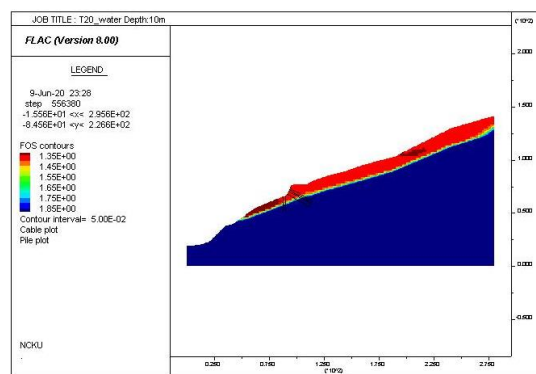
(a) 擋土牆水深 1 m



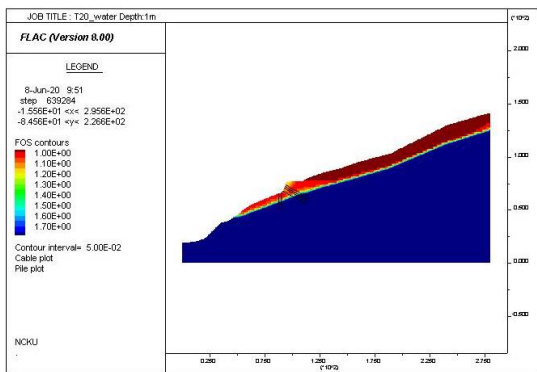
(b) 擋土牆水深 10 m



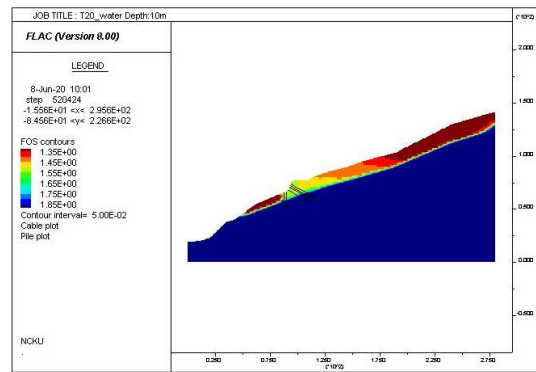
(c) 擋土牆+10 ton 地錨系統
水深 1 m



(d) 擋土牆+10 ton 地錨系統
水深 10 m



(e) 擋土牆+50 ton 地錨系統
水深 1 m



(f) 擋土牆+50 ton 地錨系統
水深 10 m

圖 6.27 台 20 線 52k 總體滑動分析結果

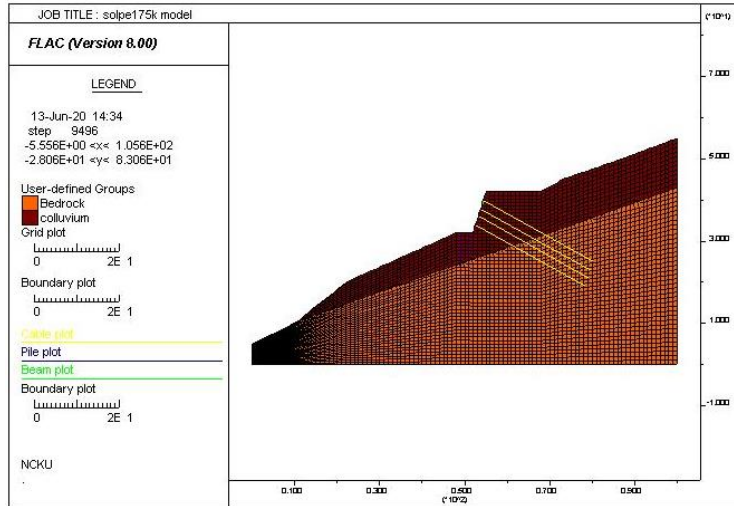
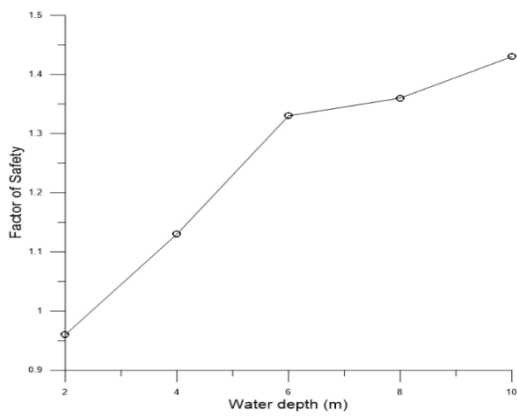
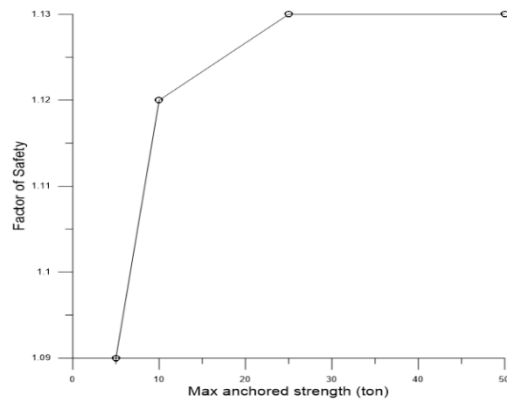


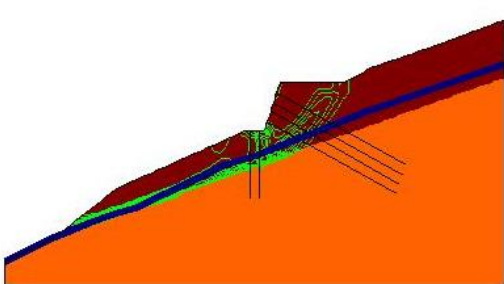
圖 6.28 台 20 線 52k 局部擋土系統模型模擬



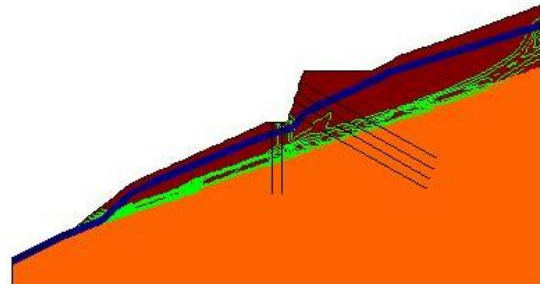
(a) 地下水位與 FS



(b) 地錨強度折減與 FS



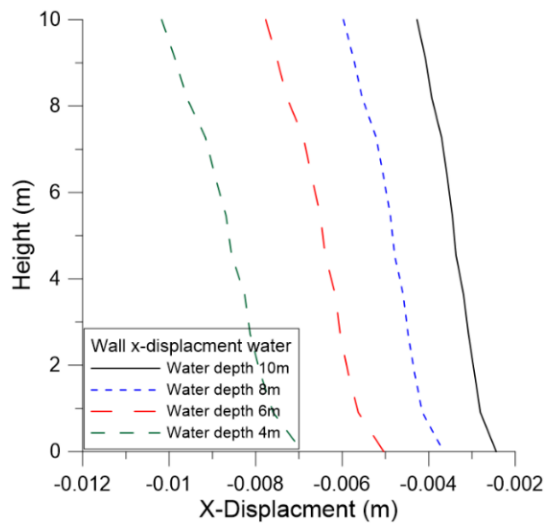
(c) 低水位(10m)滑動面示意圖



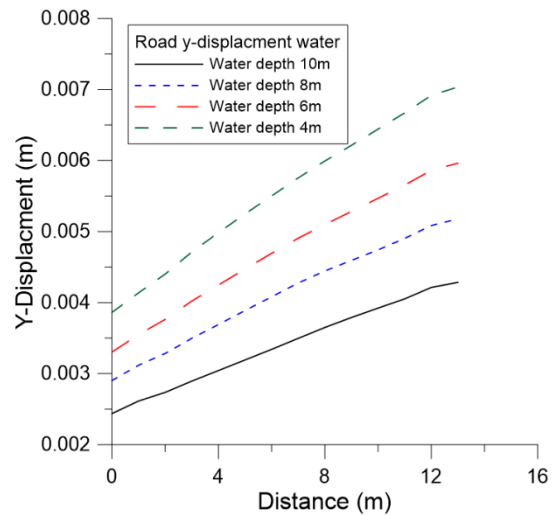
(d) 高水位(2m)滑動面示意圖

圖 6.29 台 20 線 52k 局部擋土牆系統地下水位分析結果

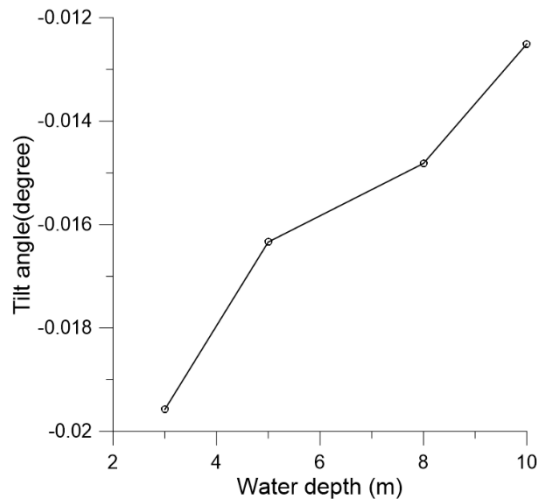
於安全係數大於 1 之情形進行力學平衡，擋土牆與路面位移如圖 6.30(a)及(b)所示，於地下水位低於 4m 情形下，牆體與路面位移量不大，最大位移處為牆頂約 1 cm；計算牆頂傾角(圖 6.30(c))，其傾斜方向為逆時針，且隨地下水位上升有變大趨勢但因位移量不大，傾角值亦無明顯增加，最大約 0.024 度。



(a) 牆體位移



(b) 路面位移



(c) 牆頂傾角

圖 6.30 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位分析-位移圖

牆體彎矩與地錨軸力變化如圖 6.31(a)及(b)所示，牆體彎矩於不同地下水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 6.31(c)及(d)所示，其中 1 號止滑樁為左側 2 號為右側，當地下水水位上升，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。

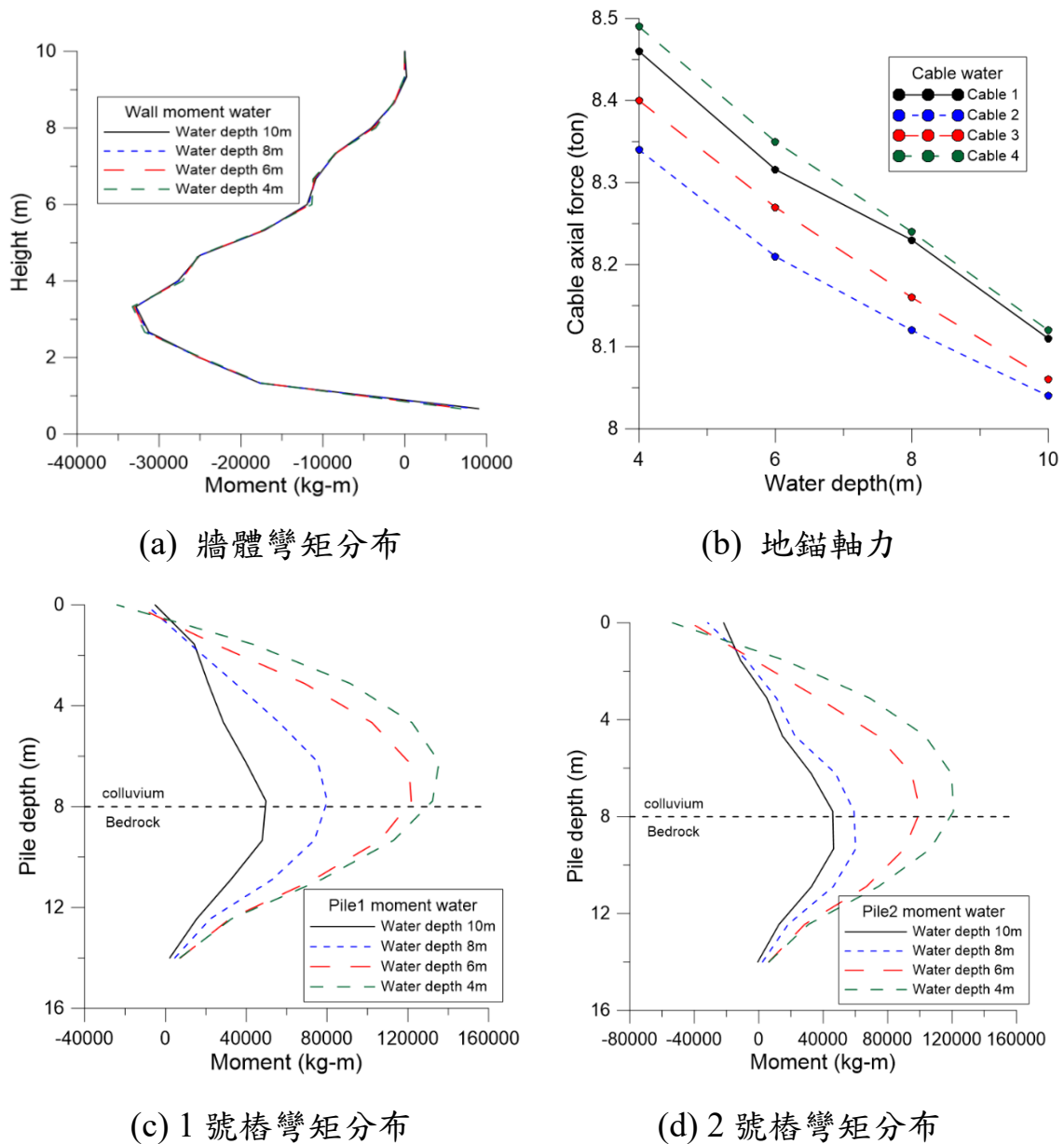
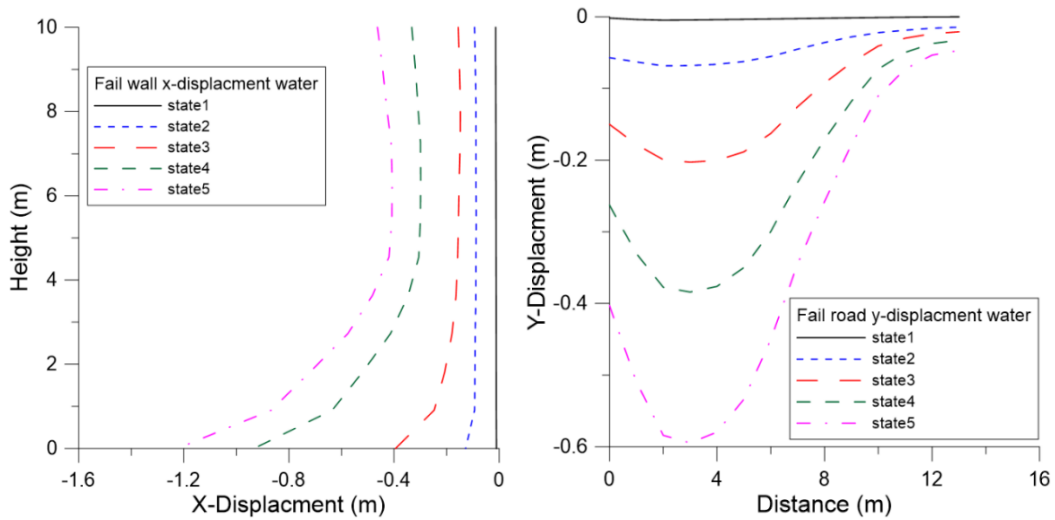


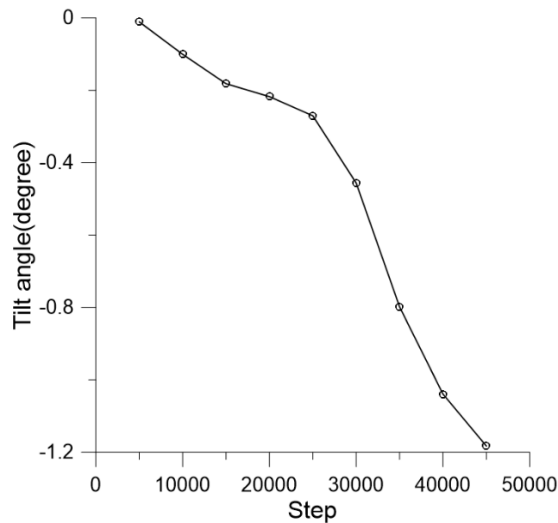
圖 6.31 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水水位分析-結構受力圖

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 6.32 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，最終位移圖如圖 6.33 所示，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) 牆體位移

(b) 路面沉陷



(c) 牆頂傾角

圖 6.32 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位分析-逐步破壞圖

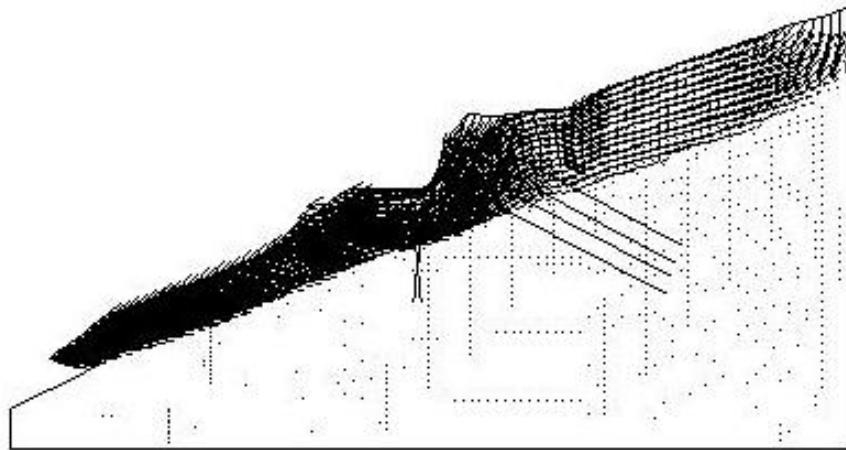


圖 6.33 台 20 線 52k 局部擋土系統地下水位引致破壞位移圖

(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 6.34)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 6.35，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為 3×10^{-9} (m/s)。

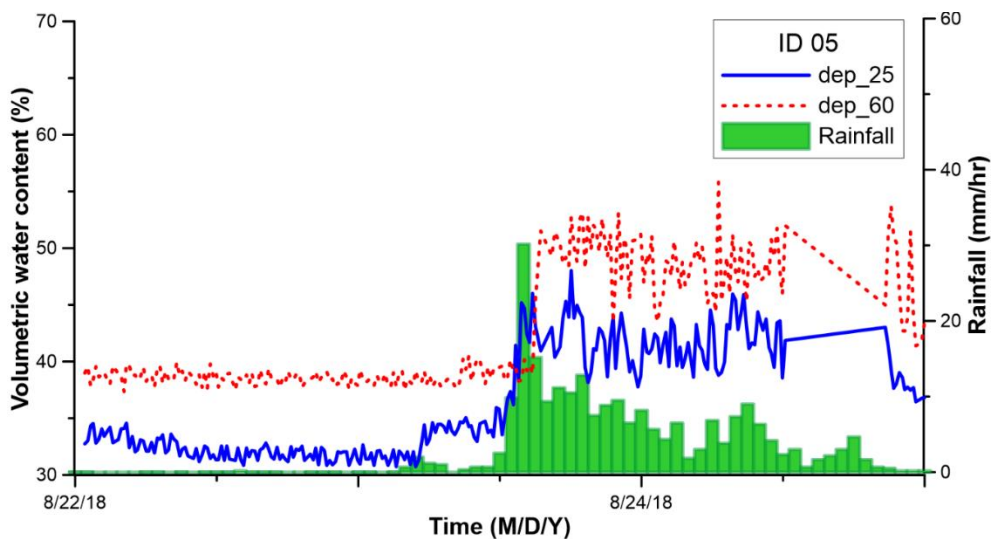


圖 6.34 台 20 線 52k 分層含水量率定紀錄

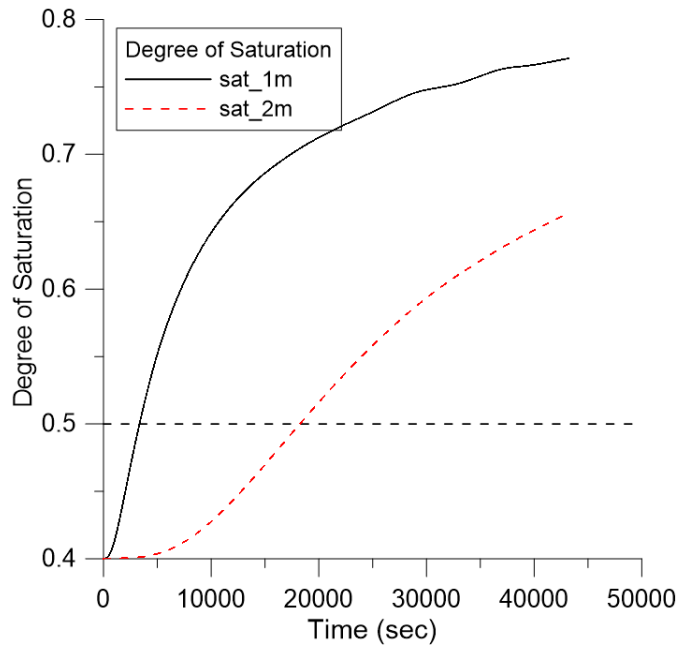
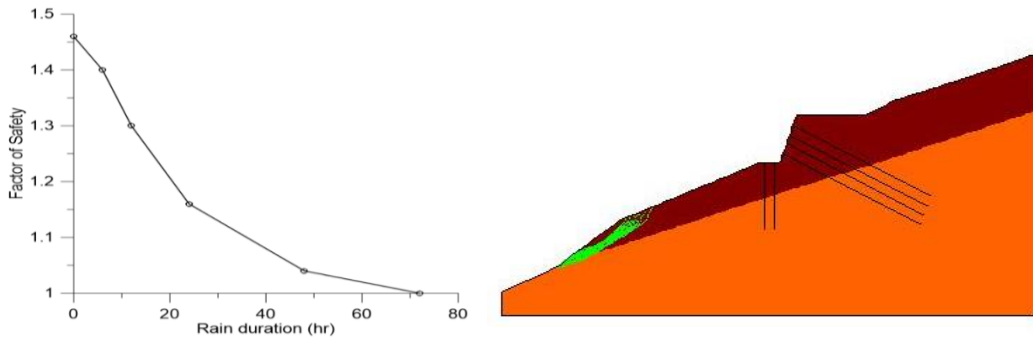


圖 6.35 台 20 線 52k 水力參數率定結果

以降雨時間為變數，分析結果整理如圖 6.36(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 6.36(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 6.37，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。

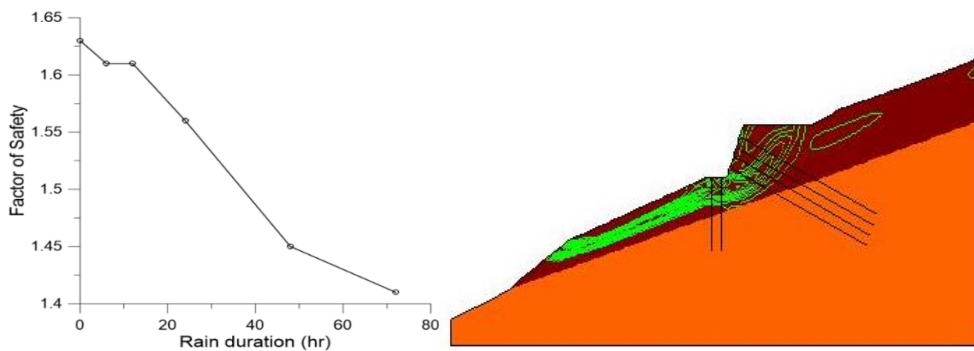
挑選降雨入滲 48 小時案例進行地錨強度折減分析，結果如圖 6.38(a)所示，當地錨極限強度折減至 10 噸時，安全係數開始有顯著變化，當極限強度減至 5 噸時安全係數為 1.30，臨界滑動面從下邊坡向路面延伸改為擋土牆系統局部破壞(圖 6.38(b))。計算牆頂傾斜角，結果顯示，隨降雨入滲時間增加，牆頂傾斜為逆時針，且有降雨延時增加傾向，但因位移量不大，傾斜角變化值也不大。



(a) 安全係數

(b) 滑動面

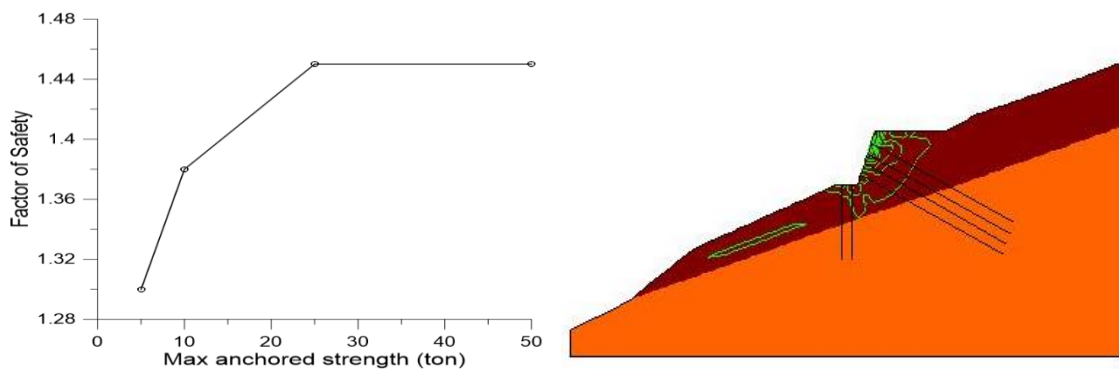
圖 6.36 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲分析結果



(a) 安全係數

(b) 滑動面

圖 6.37 台 20 線 52k 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 6.38 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲地錨強度折減分析

牆體彎矩與地錨軸力變化如圖 6.39(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 6.39(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。

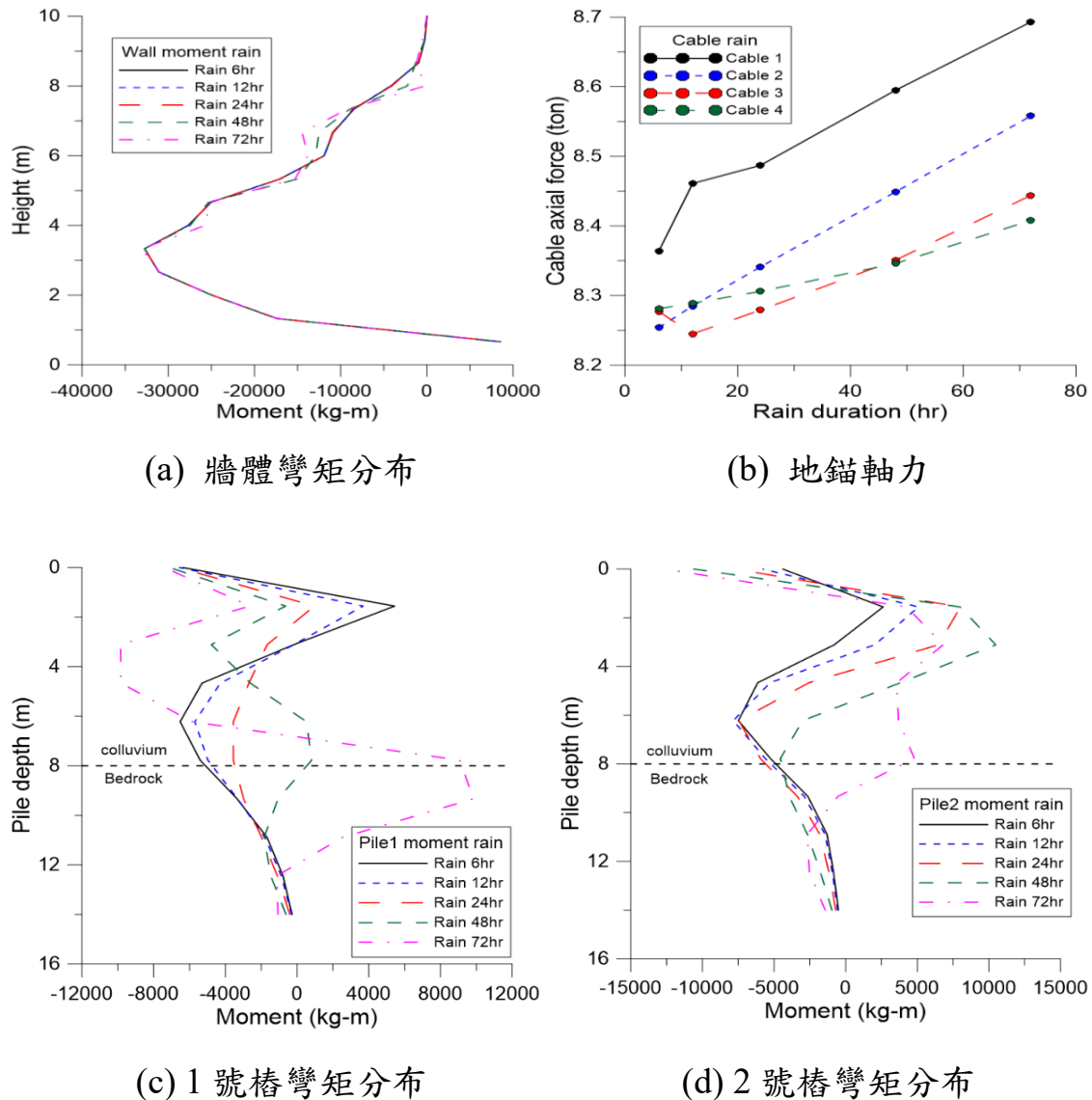


圖 6.39 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲分析-結構受力圖

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 6.40)，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。

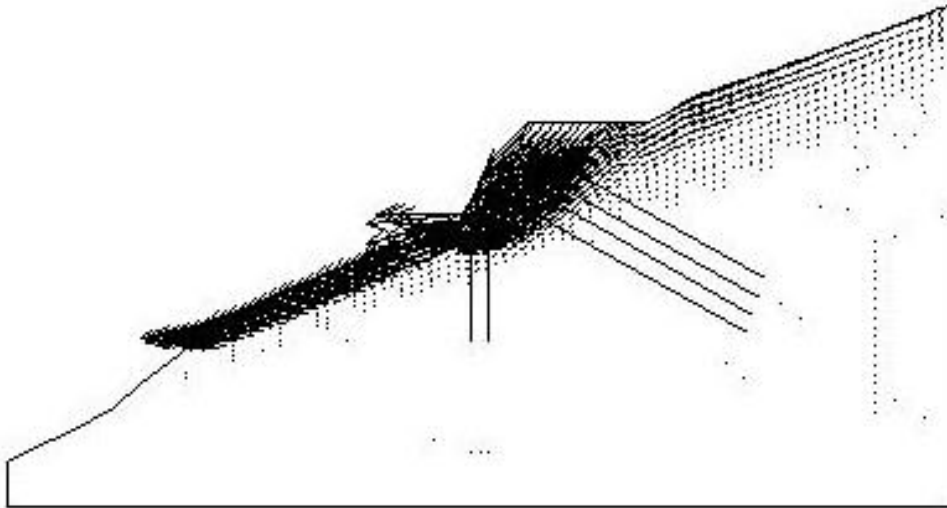


圖 6.40 台 20 線 52k 局部擋土牆系統降雨入滲引致位移圖

(3).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，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，根據邊坡穩定分析，本計畫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預警值，安全係數 1.0 狀態之地下水位為滑動警戒值，牆頂傾角為行動值。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 3.65m，安全係數 1.0 則為水位深度 2.5m，故地下水位預警值為 3.65m、警戒值為 2.5m。

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，是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地下水位 2m 狀態分析做為訂定標準，如圖

6.30(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度做為本場址擋土牆頂傾角行動值，各監測指標彙整如表 6-6。

表 6-6 台 20 線 52k 場址警示監測指標整理

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

3. 台 20 線 52k 依時安全係數

由前述成果，可整合台 20 線 52k 場址之時間域水壓推估模式與二維水力耦合數值分析成果，即提出依時安全係數。為達上述目標，計畫採用 MATLAB 商用軟體，以時間域水壓推估模式程式，此商用軟體主要用於簡易之矩陣運算，如行列式與特徵值計算、矩陣轉置，其後開發版本與其工具箱(tool box)，可用於演算法開發、資料分析、視覺化與相關數值計算等功能，如圖 6.41 為率定後台 20 線 52k 時間域水壓推估模式的獨立執行檔，可依現場雨量計模組之即時監測成果，產生現場降雨時序輸入檔，程式會產出預測依時水位與安全係數計算成果之輸出檔。

以現場監測率定後之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，可做為預警時間，整合圖 6.23 與圖 6.29(a)成果，可呈現不同降雨事件下依時安全係數變化，成果如圖 6.42 所示。

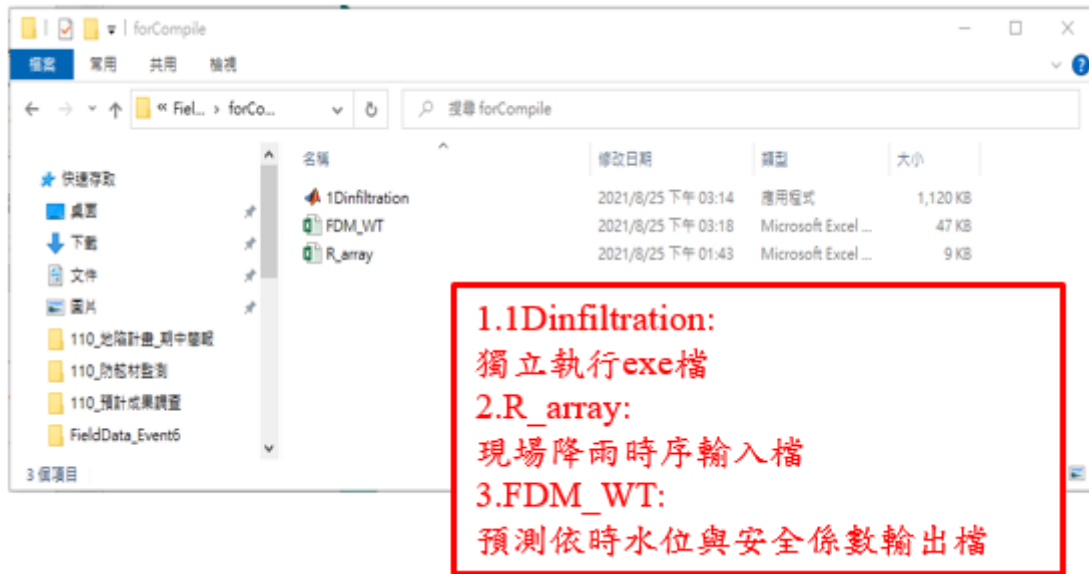


圖 6.41 時間域水壓推估模式獨立 exe 執行檔

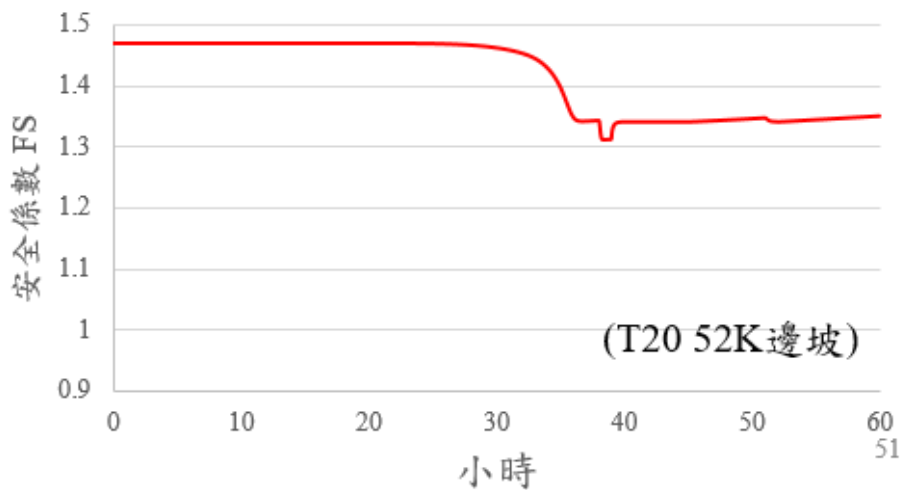


圖 6.42 台 20 線 50.7k 邊坡依時安全係數計算示意圖

6.3 無線感測模組選用原則

公路邊坡不同之破壞形式，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，本計畫以較常見之淺層降雨崩塌為研究對象，以發展依時預警系統之理論架構。由於進行解析法邊坡穩定分析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，鑒於以大區域雨量監測準確度不佳，現有邊坡土層監測系統佈設費時、維護不易且多為非即時監測，建議可搭配本計畫開發之低成本、安裝便利的無線土層監測模組。

圖 6.43 為公路邊坡依時預警系統無線感測模組選用原則，於邊坡現場架設無線感測模組前，應就現有監測與擋土設施進行調查，可提供初步現場相關水力反應之依據，以歷史傾斜管量測數據可確認高風險場址破壞深度位置，與對應之土層範圍。另外，如應用於飽和層滑動類型時，使用之水位計主要投入於開孔式地下水位井進行量測，若現地有合適開篩深度之水位井，則可迅速完成邊坡地下水壓變化之即時監測，可免除重新設置一水位井之作業程序。依據架設場址之邊坡破壞機制，淺層崩塌類型主要配置分層水份計與土壤表層傾斜儀，而飽和層滑動類型，主要配置水位計、雨量計與擋土系統傾斜儀，以搭配計畫發展之水力耦合分析與預警架構。至於篩選合適之架設位置，其考量原則應包含下列：

1. 可反應邊坡正確水力反應之架設位置，以搭配水力耦合分析架構進行相關預警。
2. 預計設置位置應可接受至少半天之太陽日照。
3. 設置位置應於無線訊號可抵達之位置。
4. 電子模組應設置於相對隱蔽處，避免人為破壞。
5. 宜設置備份資料點位，以確保單一測點停機時，仍有另一監測模組保持運作，回傳即時資料。

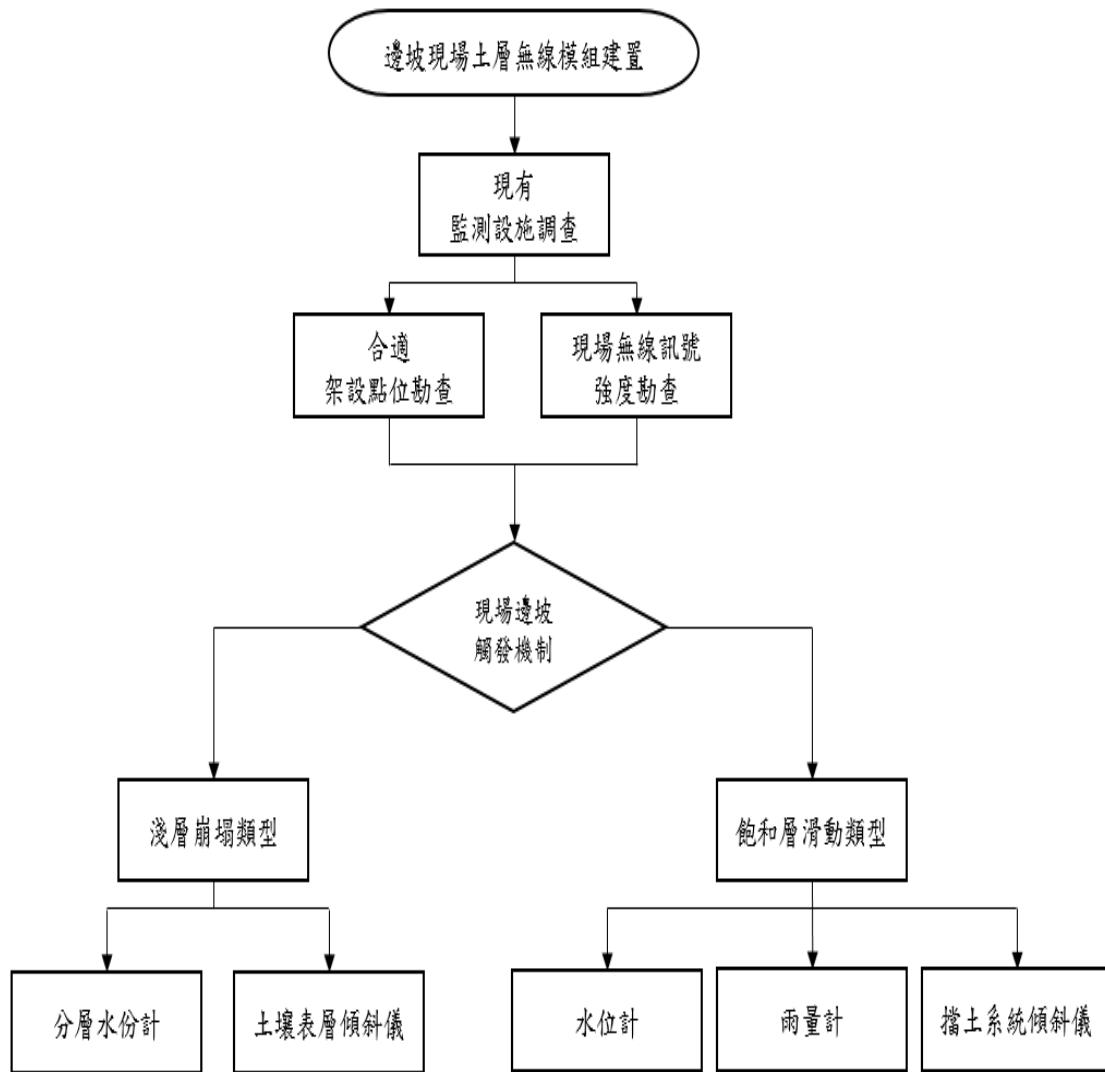


圖 6.43 公路邊坡依時預警系統無線感測模組選用原則

其中關於第一項，應徵詢專家學者意見，研判潛在滑動場址之破壞區域、地表幾何特徵、深度、與對應坡體材料性質，乃至其破壞機制，架設於關鍵反應位置，以提升預警之準確性，如此，也可避免大規模區域之佈設，相對監測系統維護之成本與時間也會大幅下降。而本計畫應用之場域，常為山區野外道路之林道，無法提供穩定室電，需搭配太陽能充電設備進行電子模組之供電，因此，應至少選擇上午或下午之其中一時段，太陽可照射之區域，而原則為盡量選擇接近中午時段可照射到太陽之區域為主，此時段日照強度相對充足，可穩定進行電池充電作業，

目前運研所發展之無線土層監測模組在軟硬體耗電優化與設置監測週期為 30 分鐘之情況下，在日照充足保持 4 小時之情況下，應可彌平每日電子模組運作所消耗之電力，維持鋰電池處於滿電狀態；而滿電狀態下，於單一感測端模組配置鋰電池 12 顆鋰電池之狀況，至少可提供一周無日照情況之模組運作時間，可確保於降雨期間，模組持續回傳感測資料，以充足且正確之資訊輔助路段養護單位進行相關應對措施。依據歷年計畫執行經驗，建議太陽能板架設之功率瓦數應為 20 瓦，而模組提供電源監測之功能，可監測每日充放電狀況，系統維護人員應每月進行審視與調節各感測端採用之太陽能板，如此，可提高監測系統運作之穩定性。

目前微機電系統有需多種無線通訊方式可供選擇，如 WiFi、RFID、藍芽、無線電等無線通訊模組，基於使用地點、功耗、傳輸距離與連接裝置數目，無線通訊模組各有其優缺點。以 WiFi 來舉例，其消耗功耗較大，適用於有穩定電源，但其連接設定方便、串聯裝置數目高，如目前智慧住宅使用之智慧開關、燈泡、家電裝置皆是以 WiFi 進行連接；以藍芽、RFID 來說，目前應用偏向於點對點(point to point, P2P)裝置連接，並避免用戶或裝置間相互干擾，使用目的為快速裝置連接，常運用於電腦、手機周邊裝置連接，如滑鼠、鍵盤、喇叭、耳機等，無線通訊模組之選擇應就開發者使用目的而定。

對於歷年計畫執行採用之無線通訊模組，初期以 NRF24L01 做為區域無線傳輸模組，傳輸頻段屬於免執照的 2.4 GHz，但遭遇傳輸距離過短、資料掉封包率高，且使用程式設定上複雜，對於多點傳輸設定不易；再來採取以 ZigBee 為通訊架構之 Xbee S1 Pro 無線電模組，在無遮蔽狀況下，其傳送距離約為 300 公尺，相較於 NRF 模組，Xbee 系統架構發展完整，但單價相對較高，支援點對點、單點對多點、星狀(star)與網狀(mesh)資料傳輸架構，傳輸架構彈性大，資料可以接力方式傳輸，彌補傳輸距離部分，且支援睡眠模式(sleep mode)，可進一步節省無線電模組待機下之功耗，雖 Xbee 無線電模組相較於 NRF 模組性能已有所提升，但就野外監測場域較廣闊時，以無法支援形成廣域無線區域網路，

雖可以接力方式傳輸資料，但會增加系統複雜度，較不建議此方式傳輸。

因此於類似山區道路監測時，建議使用 LoRa 低功耗長距離無線傳輸技術，LoRa(由 long range 縮寫)由 Semtech 公司開發之集成無線通訊技術，屬於 LPWAN (low-power wide-area network)通信技術之一種，其特點為傳輸距離遠、功耗極低、支援廣播或特定點傳輸，可任意建構網路架構，其傳輸頻段主要有 433、868、915 MHz 三種，依電信法第 50 條之低功率射頻電機技術規範(國家通訊傳播委員會，2018)，非電信物聯網使用的免執照頻段部分，目前開放 920-928MHz 頻段供低功率物聯網使用。目前採用之 LoRa 模組，支援 UART 界面，可省去 16 進位與 ASCII 碼轉換之步驟，於成大周邊(市區，遮蔽率高)測試傳輸距離可達 1 公里，目前搭配 15 dB 天線，於山區目前最遠傳輸距離可達 2 公里，歷年計畫使用過之無線電模組優缺點，整理如表 6-7 所示，在考量傳輸距離、工作瞬時耗電、睡眠模式、使用複雜度與單價因素下，LoRa 模組皆有勝出之處，適合本計畫即時野外監測之目的。

表 6-7 計畫歷年無線電通訊模組比較

模組	NRF24L01	Xbee S1 Pro	LoRa
傳輸距離	100 公尺	300 公尺	1 公里(市區) 2 公里(郊區)
工作瞬時耗電	高	中	低
睡眠模式	不支援	支援	支援
使用複雜度	高	中	低
單價	低	高	低

而監測場址現地區域無線電網路內，所有感測資料以無線方式匯流至現場資料蒐集器(gateway)，並由其上傳至雲端資料庫對應之頻道(channel)，閘道器配置手機無線網際網路模組，因所有監測資料之物理量皆已轉換為數位資料，其資料大小僅為幾 byte 之文字、數字資料，初期以 2G 無線網路(GPRS)模組進行配置，但 106 年 6 月，2G 無線網

路服務已退場，所以轉移置 3G 無線網路模組(WCDMA)，但至 107 年 12 月，3G 無線網路也退場，目前已改至 4G 無線網路模組(LTE)。另外，目前盛行於物聯網應用之無線網路通訊架構，還包含 NB-IOT 與 Lte-M 通訊技術，以窄頻寬之無線網路通訊架構提供低功耗、低成本、廣域覆蓋及大量終端設備連結為特點，也適合應用於山區道路之監測情境，但其無線訊號涵蓋範圍相對 4G 網路之普及性較低，選用此 NB-IOT 技術時，應就提供服務之電信商確認架設區域是否有 NB-IOT 無線網路訊號。而近年提供 5G 之無線網路服務，其特點為高傳輸量與低延遲性，如前述所提，感測端已完成所有傳感器(Sensor)之數位類比訊號轉換作業，其傳送資料大小僅為幾 byte 之字節資料，因此，於公路邊坡應用場域與監測週期 30 分鐘之情境下，較不建議使用 5G 網路技術。

歷年計畫發展之無線土層監測系統，於計畫初期遭遇微控單元不定時發生當機情況(Shut-down)，微控單元會停止程式碼運作，須以人工重啟電源之方式解決，但計畫監測場址皆為山區道路，無法於當機時立即至現場重啟模組，因此，於所有感測模組和太陽能控制器中間增設定時重啟模組(timer relay)。但市售 Timer Relay 模組耗電量大，不利於本計畫野外監測系統使用，因此，以微控單元 ESP8266 搭配繼電器開發符合低耗電定時重啟系統模組，其體積極小不影響防水和內部空間使用。建議設立類似監測系統時，應配置定時重啟模組，每天進行模組斷電，並設置斷電保持 5 秒以上，其後復電，確保電子模組可完全關閉，如此，可降低為微控單元當機之狀況。

另外，設置之感測端電子模組應處於相對隱蔽處，避免人為破壞，如圖 6.44 為南市道 175 監測場址於本年度進行災害復建工程之施工照，而圖 6.45 為 ID3 於 4 月初停止回傳資料後，於現場勘察發現監測電子模組遭人為破壞，各電子零件散落。110 年度監測系統故障與維護狀況整理如表 4-1 與表 5-1，可歸納感測端模組故障原因，主要為電子零件故障、日照不佳電池電量耗盡與人為破壞三大項，除前述南市道 175 監測場址 ID3 電子模組遭人為破壞，近期 9 月份 ID4 之水位計也遭人為因素，感測器被人為移出至水位井外，於現場例行維護勘查時，才予以

排除。因此，相關監測系統設置，除應與路段養護單位積極接洽外，仍需與鄰近民眾保持良好溝通，並設置警示牌說明系統歸屬與柔性勸說，降低人為破壞之機率，並盡量隱蔽監測模組硬體，以保全監測系統持續運作。另外，在經費允許之情況下，宜設置備份資料點位，以確保單一測點停機時，仍有另一監測模組保持運作，回傳即時資料。



圖 6.44 110 年南市道 175 線 25.5k 現場進行災害復建工程施工照



圖 6.45 南市道 175 線 25.5k 場址 ID3 監測模組遭人為破壞

第七章 結論與建議

本年度計畫著眼於精進相關監測系統軟硬體技術，依據計畫執行經驗，研擬預警系統標準分析流程，落實應用解析法邊坡與支撐系統結構體反應分析及分佈式監測技術監測技術，評估降雨地層入滲及滲流量對實際邊坡與支撐系統反應，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：現有淺層與飽和土層監測場維護、模組無線傳輸與模組耗電優化、飽和層場址孔隙水壓推估模式精進、雲端虛擬儀表功能開發與主動通知擴充、水位與降雨特徵關聯分析精進、時間域水壓推估模式與二維水力耦合數值分析整合、雲端整合平台精進與穩定度測試與公路邊坡依時預警系統標準流程架構研擬，並增設臺 20 線 50.5k 監測場址。

計畫所提邊坡場址之建議預警值、警戒值及行動值，目前僅止於理論分析結果，後續還需降雨事件來驗證數值之可靠度，且相關數值訂定，應由權管單位核定。

7.1 結論

本年度計畫執行結論摘要如下：

1. 維護與精進運研所架設 4 處示範與測試場址，分別為甲仙、臺 20 線 50.7k、臺 20 線 52k 與南市道 175 線 25.5k，除持續進行監測與現地測試，並已更新相關硬體，精進現有模組穩定與應用性，完成 110 年度監測與資料彙整。
2. 臺 20 線 50.7k 場址，於 6 月份成功監測淺層崩塌破壞過程，驗證以淺層土壤體積含水量進行預警之水力耦合解析架構，可建立監測點不同深度體積含水量變化與淺層崩塌之關聯性，可作為後續依時預警之學理依據。

3. 計畫完成模組無線傳輸與模組耗電進行優化調整，以 4G 無線網路模組新增睡眠模式，及 LoRa 無線電傳輸程序，進一步完成電力節省，以現場資料資料閘道器為例，無日照運轉天數由 5 日提升至 8 日，更符合野外監測需求。
4. 雲端平台朝使用者友善化方向精進，導入虛擬儀表顯示、社群 APP 軟體主動通知、雲端資料庫轉移與穩定度測試，確保雲端平台保持良好運作，提供使用者更簡易使用環境，輔助路段養護單位防災管理。
5. 以本年度降雨事件驗證時間域孔隙水壓推估模式，模式依時水壓變化結果可結合前期二維水力耦合數值模型，完整推估飽和層滑動場址地下水位深度與安全係數關係，流程可供後續飽和土層滑動預警應用。另外基於統計方式，以本年度降雨事件更新臺 20 線 52k 水位與降雨特徵關聯性分析結果。
6. 本年度彙整系列計畫研究成果，研擬公路邊坡依時預警系統標準流程，依破壞機制定義淺層崩塌與飽和層滑兩種應用對象，說明依時水力耦合分析流程與應用示範，成果可供相關各邊坡養護單位參考使用。

7.2 建議

針對本計畫提出下列建議：

1. 計畫發展以解析法為架構之 IoT 無線預警系統，可持續應用架設於各土壤邊坡監測，作為智慧雲端化邊坡安全管理系統監測先導，利於對此類災害預警及管理之參據。
2. 臺 20 線 50.7k 場址示範場址區域改善工程接近完工，建議完工後，於擋土系統後方邊坡恢復監測，有助於路段養護單位評估擋土系統成效與預警。
3. 飽和層滑動示範場址，於雨季過後，累積些微傾角變化，雖今年降

雨不足以觸發坡壞，但可說明 2 處場址仍為高風險場址，建議延長監測期程，以驗證飽和層滑動分析架構。

7.3 預期效益與應用情形

1. 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，以關鍵體積含水量與地下水位作為關鍵指標，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，可輔助現有以經驗法預警模式，助於災害管理。
2. 臺 20 線 50.7k 場址示範場址成功監測淺層崩塌過程，驗證淺層水力耦合分析架構，研究成果預計投稿國際期刊。
3. 本年度以臺 20 線示範場址之研究成果，於公路總局第五區養護工程處曾文工務段進行計畫預警系統推廣說明，主動建置預警雲端平台，可供路段養護單位使用。
4. 研擬之公路邊坡依時預警系統標準流程，可供交通部、公路總局、養護工程處及各工務段等單位，客製化高風險場址預警系統，作為防災管理之參考。

參考文獻

1. 交通部，2015，公路邊坡工程設計規範，交通技術標準規範公路類公路工程部，研究報告。
2. 行政院，2015，「104年災害防救白皮書」，災害防救辦公室，政策報告。
3. 青山顧問有限公司，2017，「台20線52K-150路基保護工程委託地滑調查測量及設計服務工作監測總成果報告」，交通部公路總局第五區養護工程處。
4. 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。
5. 洪芯琦，2018，「崩積層邊坡滑動即時雲端監測系統研發」，國立成功大學土木工程學系，碩士論文。
6. 倪勝火，2013，「暴雨下非飽和土壤公路邊坡之破壞機制監測與分析-總計畫(2/2)」，行政院國家科學委員會補助專題研究計畫，期末報告。
7. 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。
8. 運研所，2011，「全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試(4/4)」，運輸研究所。
9. 運研所，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)」，運輸研究所。
10. 運研所，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)」，運輸研究所。
11. 運研所，2015，「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)」，運輸研究所。
12. 運研所，2016，「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)」，運輸研究所。

13. 運研所，2017，「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」，運輸研究所。
14. 運研所，2018，「公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發」，運輸研究所。
15. 運研所，2019，「公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」，運輸研究所。
16. 運研所，2020，「公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」，運輸研究所。
17. 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。
18. 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。
19. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp. 544-552.
20. 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.
21. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, pp. 362–372.
22. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
23. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil mechanics for unsaturated soils." New York, Wiley.
24. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
25. Freeze, R. A. and Banner, J. (1970). "The mechanism of natural ground-water recharge and discharge 2 – laboratory column experiments and field measurements." *Water Resources Research*, 6(1), 138-155.

26. Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979). Groundwater. textbook.
27. Gan, K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988). "Determination of shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test." Canadian Geotechnical Journal, 25(3), pp.500-510.
28. 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, 52(4), 737-747.
29. 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, 14
30. Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., Paz, A. D. and Marturia, J. (2003). "A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet Area." Journal of Natural Hazards, 30(3), 281-295.
31. TRB (1996). "Landslides, investigation and mitigation", National Research Council, Special report 247, USA.
32. 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
33. 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.
34. Zezere, J. L., Trigo, R. M., Trigo, I. F. (2005). "Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation." Natural Hazards and Earth System Sciences, 5(3), 331-344.

附錄一
期中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：公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護

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
一、 高邦基 委員		
(一) 甲仙攔河堰淺層滑動邊坡入滲速率及依時預警校正之具體作法,建議可補充於第四章作說明。	以分層體積含水量推估現地邊坡入滲速率,為前期「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」成果,淺層崩塌邊坡依時預警流程可參考報告 p.6-10 6.2.2 小節「淺層崩塌水力耦合分析應用」。	同意依處理情形辦理。
(二) 未來於擬定依時預警系統標準建立流程,不同情境之預警依據指標宜明確標示於流程內。	謹遵辦理。本計畫針對降雨引致之邊坡破壞進行預警架構開發,依破壞機制,區分淺層崩塌邊坡與飽和土層滑動邊坡,預警指標分別為特定深度之體積含水量與地下水位高程變化,相關說明請參考報告 p.6-5 6.2 節「依時水力學耦合分析」流程。	同意依破壞機制,區分淺層崩塌邊坡與飽和土層滑動邊坡。
(三) 第 3-1 頁,客戶端為監測模組,但伺服器端仍列有監測模組,請說明其用途。	伺服器端與客戶端之差異,僅在於是否配置 4G 無線網路模組(報告 p.3-34 圖 3.31),即負責雲端資料上拋網路之作業,其餘微處理器 MCU、相關電子元件皆相同,可依實際現場監測需求,客製化電子監測模組。相關內容請參考報告 p.6-52 6.3 節「無線感測模組選用原則」。	同意依處理情形辦理。
(四) 台 20 線 50.7K 上邊坡本年 6	台 20 線 50.7k 之預警值訂定,參	同意依處理情形

<p>月 5 日發生崩塌，係採場址體積含水量值為預警指標，警戒值為 VWC 20.9%，如何訂定？又預警值及行動值若干？如何訂定？</p>	<p>請參考考報告 p.6-10 6.2.2 小節「淺層崩塌水力耦合分析應用」。建議未來應以淺層水力耦合穩定分析，客製化分析現場臨界破壞深度 d_{cr} 與入滲所需時間，最佳情況為設置於分析所得之臨界破壞深度，並考量入滲分析所得之體積含水量依時變化曲線特徵，訂定合適之警戒值。</p>	<p>形辦理。</p>
<p>(五) 報告書內容部分文字誤漏繕，請參考修正：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期中報告委員所提意見同意修正或補充部分，請以紅色文字顯示。 2. p6-1，倒數第 6 行，飽和層滑「動」，請修改；第 7 行「分析降雨行為下邊坡」建議改為「分析邊坡於降雨行為其土壤之入滲行為」，以免誤認為「下邊坡」。 3. p6-3「交通部 2015 定義」...為交通部 2015 部頒規範。 4. 多處引述其他論文均未註明於重要參考文獻內。 5. p6-23 圖 6.16 應為飽和層水力耦合分析流程圖？(與圖 6-3 相同?)，降雨下地下水位變化分析，建議改為降雨致地下水位變化分析。 6. p6-30 及 p6-31，表 6-3 及表 6-4 參數表，請註明資料來源。 	<p>感謝委員指導，已對應修正各部分文字。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

7. p6-36 第 2 行，依循 6.3 節，應為 6.2.3 節。		
二、蘇苗彬 委員		
(一) 本案持續以公路邊坡之穩定性進行監測，並研發預警系統之軟硬體所需，已累積相當之成果，可以開始推廣應用，以擴大驗證成果之可行性。	感謝委員肯定，團隊將配合港研中心，執行相關推廣規劃。	本案應累積更多監測成果及驗證，方可推廣應用。
(二) 對儀器使用之效能應有更明確之標定，如第 3-5 頁圖 3.4，點位分散是否表示可能的變化，可靠度由 0.35~0.6 度是否代表其精度。	感謝委員指導，報告 p3-11 圖 3.10 主要展示計畫使用傾斜儀之類比訊號與數位訊號差異，而此差異值主要來自於傾斜儀內部數位類比電壓轉換元件之解析度差異。由實測成果，類比電壓訊號搭配外部 16-bit ADC 模組，其解析度達 0.05 度以下，而數位訊號僅為 0.1 度左右。此次台 20 線 50.7k 邊坡崩塌監測成果可說明傾斜儀之適用性，而邊坡觸發破壞時，其傾角變位將明顯大於 0.05 度，其可用於反應監測邊坡傾角變化速率。	同意依處理情形辦理。
(三) 第 4-4 頁，圖中體積含水量量測結果會有短期內很大的跳動，是否為儀器的誤差可能很大。	報告 pp.4-4~4-6 圖中部份體積含水量監測成果，係以前期數位式水份計進行監測，考量其通訊界面特性與耐久性，110 年度 3 月份已對現存場址各體積含水量感測模組進行全面更換。模組更換後，於 2021 年 6 月份監測成果降雨事件下，體積含水量與降雨量已有明顯之對應關係。	同意依處理情形辦理。
(四) 第 5-10 頁，擋土牆之水平方向傾角有每日相當大的跳動，	感謝委員指導，報告 pp.5-7~5-8 每日擋土牆之水平方向傾角感測值	同意在大幅度傾角變化下，

<p>約達 0.5°，是否有溫度的效應，可否研究如何篩選或去除。</p>	<p>跳動約在 0.5 度，此為溫度造成熱漲冷縮之效應，對於傾解變位監測，應就同一溫度下進行比較，然而，此次台 20 線 50.7k 邊坡崩塌監測成果可說明傾斜儀之適用性，而邊坡觸發破壞時，其累積傾角變位可達 15 度左右，在大幅度傾角變化下，溫度效應對監測目標值之影響應可接受。</p>	<p>溫度效應對監測目標值之影響應可接受</p>
<p>(五) 第六章中，台 20 線 50.7K 的邊坡擋土牆傾斜，其上邊坡陡，崩落之土石配合推動擋土牆，主動土壓力太大，與無限長邊坡的假設有相當大的差別，可以再觀察與檢討。</p>	<p>感謝委員指導，台 20 線 50.7k 邊坡於 2021/06/05 崩塌前，曾經歷類似崩塌事件，業管單位初步移除阻擋道路之土方(報告 p.4-16 圖 4.21)，土壤削坡後，靠擋土牆側之坡角約為 55 度左右，而其原生邊坡約在 45 度左右，均大於土壤摩擦角，而其原有重力式擋土牆處於輕微傾倒狀態。此次 06/05 崩塌屬原生邊坡崩塌後土石運移至擋土牆造成，如報告 p.4-17 圖 4.22 所示。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>三、游繁結 委員</p>		
<p>(一) 第 3-4 頁，土壤電容水份計校正曲線，何以只校正至體積含水量 45%，若實測值超過 45%，如何？(後續實測有 50%之案例？)</p>	<p>感謝委員指導，將新增體積含水量變化 50%區間之數據點(參考報告 p.3-10 圖 3.9)。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(二) 雨量計校正方法非屬正規氣象儀器校正之標準方法，其校正回歸線之法定代表性如何？</p>	<p>本計畫中雨量監測模組之開發屬簡易式雨量站概念，並非做為法定計測設備，室內校正以體積應變儀率定水流流量，模擬特定降雨強度，迴歸結果以決定係數(R^2)</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

	值)來代表校正數據與迴歸模式之殘差，而 R^2 達 0.99，可說明校正迴歸線之代表性。	
(三) 第 4-8 頁，圖 4.9，水位監測結果，其變化似與降雨量無關？	感謝委員指導，五彎仔場址原主要監測目標為淺層崩塌，水位監測屬於地下水位模組測試，五彎仔現場因深層抽水井安裝，且因 2020 年秋冬至 2021 年春季臺灣處於大旱，因此水位與雨量無明顯相關變化。經 110 年度 3 月份工作會議討論，因原阿里山五彎仔場址目前狀況較不符合研究需求，因此，於 2021/04/07 完成撤站。	同意水位監測期間，水位與雨量無明顯相關變化。
(四) 第 4-15 頁，圖 4.17，土壤含水量變化急升急降，似不合理？	感謝委員指導，報告 p.4-13 圖 4.15 為邊坡降雨下不同深度體積含水量變化關係，可說明體積含水量隨降雨入滲增加，且隨降雨事件過後，體積含水量隨時間逐漸下降，顯示模組運作尚可接受。	同意依處理情形辦理。
(五) 第 4-10 頁，有台 20 線 50.7K 之土壤參數實測值，何以第 6-17 頁之模擬採取不同參數值？此等參數項對模式模擬之敏感度如何？	感謝委員指導，台 20 線 50.7K 之土壤依 USCS 分類為低塑性粉土 ML，其單位重為 18.3kN/m^3 、液性限度 LL 為 33%、塑性指數 PI 為 7.6%。報告 p.6-14 表 6-2 淺層水力耦合分析參數中已修正誤植之部分，而阿太保試驗結果僅用於判別土壤種類，進而選擇典型土水特徵曲線，相關說明如報告 p.6-8。	同意依處理情形辦理。
(六) 依所測得台 20 線 50.7K 之土壤液化限度(LL=37%)，但實	感謝委員指導，表 6-2 之淺層水力耦合分析參數中已修正誤植之部	同意依處理情形辦理。

<p>測土壤體積含水量達 40% 才造成崩塌，如何解釋？</p>	<p>分，台 20 線 50.7K 之土壤依 USCS 分類為低塑性粉土 ML，其液性限度 LL 為 33% 屬重量含水量。而報告 p.6-15 圖 6.9 臨界破壞深度 56 公分處，對應崩塌含水量為 46% 屬體積含水量，考慮現地可能孔隙比，其值仍低於液性限度。</p>	
<p>(七) 土壤含水量特徵曲線 (SWCC) 之變化度甚大，以 Fredlund and Xing 之資料運用，有無可能造成失真之情形？(可信度如何？)</p>	<p>決定現地 SWCC 之代表曲線有其困難度，最佳方法為應用現場入滲監測成果，以分層體積含水量推估現地邊坡入滲速率變化，建立場址入滲速率與基質吸力關係，可推估現場非飽和特徵參數，並應用於非飽和入滲依時分析，可參考前期「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」成果。考量後續標準流程建立，計畫以 USCS 分類結果來選用典型 SWCC 曲線，可降低應用淺層水力耦合分析之困難度，而實際崩塌監測成果與水力耦合分析結果具一定之相符性，顯示台 20 線 50.7K 場址採用 Fredlund and Xing (1994) 之典型粉土曲線應可接受，相關說明如報告 p.6-8。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(八) SWCC 之主要係土壤 matric(基質)之吸水、排水特性，在下雨時，其吸水狀態與雨停後之排水狀態，基質吸力相同但土壤含水量卻差異甚大之情形有之，以台灣多屬崩積土層邊坡，此等基礎吸力之影響如何？是否為模</p>	<p>感謝委員指導，土壤含水量特徵曲線於吸水、排水狀況下具遲滯效應。對於本計畫應用於降雨引致淺層邊坡崩塌行為，其崩塌行為主要發生於下雨持續進行時，土壤屬由乾到濕(吸水狀況)狀況，邊坡崩塌會發生於吸水狀況，且降雨延時與強度不足以發生持續</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

<p>式模擬之重要敏感參數？可再加強說明。</p>	<p>入滲行為時，邊坡處於相對安全狀態，因此暫不考慮遲滯效應。</p>	
<p>四、 謝忠和 委員</p>		
<p>(一) 文字勘誤:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 第 4-10 頁，4.4 第 7 行流失及道路下線(陷)... 2. 第 5-2 頁，5.1.1 第 4 行 路下線(陷)... 3. 第 5-9 頁，5.1.3 第 5 行 監測結果顯示...成果繪製，節制(截至) 4. 第 5-14 頁，第 4 行 為驗證前其(期)發展... 5. 第 6-1 頁，第 12 行產生飽和土層邊坡滑動...發展淺層及飽合(和)土層 6. 第 6-4 頁，第 4 行生明顯知傾倒(內至(置)傾斜晶片) 	<p>感謝委員指導，已對應修正各部分文字。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(二) 建議對於本研究方法預警系統，說明適用條件。</p>	<p>謹遵辦理。計畫主要針對降雨引致之邊坡破壞進行預警架構開發，依破壞機制，區分淺層崩塌邊坡與飽和土層滑動邊坡，預警指標分別為特定深度之體積含水量與地下水高程變化，相關說明請參考報告第六章「公路邊坡依時預警系統標準流程」。</p>	<p>同意預警指標分別為特定深度之體積含水量與地下水高程變化。</p>
<p>(三) 報告中部分監測量測結果圖中，數值有中斷，請於圖上標註原因或說明事件，如圖 4.9，其餘成果圖，亦請一併加註。</p>	<p>謹遵辦理。監測數值中斷的多數原因為現場太陽能充電效率不佳或日照時數不足，造成模組電源中斷，因此，本(110)年度計畫針對模組軟硬體省電進行優化，期望可使模組於野外困難的環境</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

	下，減少耗電並持續運作。報告相關監測成果資料中斷處，以加註說明。	
(四) 報告中部分監測量測結果圖中，數值起伏幅度甚大，如圖 4.8，原因為何?與雨量之間有何關係?再請加以補充說明。	原期中報告圖 4.8 屬原阿里山五彎仔場址成果，因該場址不符合研究需求，已撤站。圖中體積含水量變化係由前期數位式水份計監測之成果，因其通訊界面特性與耐久性問題影響監測成果。	同意依處理情形辦理。
(五) 五彎仔邊坡，圖 4.10 請增加雨量資料，以瞭解降雨與場址傾斜監測成果相關性。	感謝委員指導，已於傾斜監測成果增加雨量資料，詳請參閱報告第四章、第五章。原阿里山五彎仔場址成果，因該場址不符合研究需求，已撤站。	原阿里山五彎仔場址，因不符合研究需求，本所要求更換場址。
(六) 台 20 線 50.7K，圖 4.20 請說明邊坡地表傾角變化之意義及研判。	計畫分層含水量計係採人工鑽孔進行模組安裝，ID1 主要安裝處坡角大，且無適當立足處，安裝處過度擴孔，造成傾斜監測成果有明顯之傾斜變化增量，模組於 10 月重新安裝後，傾角已無增加之趨勢。詳細說明請參考報告 p.4-13 說明。	同意依處理情形辦理。
(七) 台 20 線 52K，圖 5.10~5.12 請增加雨量資料，以瞭解降雨與場址傾斜監測成果相關性。	感謝委員指導，已於傾斜監測成果增加雨量資料，詳請參閱報告第四章、第五章。本計畫目標設定為降雨引致之邊坡崩塌，預警指標分別以體積含水量、地下水高程變化與雨量有高度正相關，計畫內傾角變化僅應用於判別實際邊坡崩塌傾角變位行為發生並作為行動值，其與雨量之相關性較低。	同意依處理情形辦理。
(八) 台 20 線 52K，第 5-15 頁是否可由現有監測成果研擬出降	台 20 線 52K 屬飽和土層滑動場址，在考慮擋土支撐系統與水力	同意依處理情形辦理。

<p>雨或坡體地下孔隙水壓變化與邊坡滑動管理基準值之建議。</p>	<p>力學耦合效應下，已於前期計畫「公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進及預警系統測試」提出相關警戒值，相關說明請參考報告 p.6-48。</p>	
<p>(九) 有關台 20 線 50.7K 近期有發生邊坡淺層崩坍事件，對於崩塌依時預警流程，請再依據監測結果加以研判及回饋預警。</p>	<p>感謝委員指導，相關內容報告 p.6-10 6.2.2 小節。考量計劃中定義之淺層崩塌主因為降雨入滲造成，不同深度之含水量變化屬連續行為，對於台 20 線 50.7k 邊坡，建議訂定 25 公分處達 52% 為預警值，代表表層土壤已趨近飽和，而 60 公分處達 13% 為警戒值，代表入滲深度已超過臨界破壞深度 56 公分處，配合現場監測成果，破壞前傾斜儀傾角變化速率將明顯提升，進而發生累積 15 度左右之變化，因此，可訂定傾角明顯變化為行動值，可明確反應淺層邊坡崩塌發生，作為相關單位行動封路之依據。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>五、黃俊豪委員</p>		
<p>(一) 關於本研究合適應用場域，實務上無差別大範圍佈設之可能性不高，但對於甫發生災害之新生崩塌邊坡而言，由於其完成修復前仍有二次災害風險，因此於該空窗期導入本研究成果進行短期監測，應為後續可切入方向，建議主辦機關可納入考量。</p>	<p>感謝委員指導。本計畫適用場域與標的，請參考報告 p6-3 6.1 節。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(二) 關於台 20 線 50K+700 邊坡監測結果，2021/6/5 邊坡崩塌事</p>	<p>感謝委員肯定。針對委員條列之意見回覆如下：</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

<p>件對本案應具高度研究價值，建議可對重要因子進行更詳細分析及探討，以利未來持續增進，相關意見如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 依圖 4.18(報告書第 4-15 頁)之 ID2 監測結果，其於 2021/5/1~5/21 期間並未降雨，但土體含水量卻緩慢上揚。另圖 4.19 之 ID3 亦有類似情形，原因為何？ 2. 關於地下水位監測，比較圖 5.4 及圖 5.5 之監測數據，ID05 之地下水位之變化趨勢與降雨量大致吻合，但 ID02 則無明顯趨勢，建議可進一步探討其原因。 3. 依圖 6.9 之 ID2 監測數值，VWC(25cm)於邊坡崩塌前呈現明顯上揚，VWC(60cm)則無明顯反應，顯示出 VWC(25cm)於預測淺層崩塌方面應具較高發展潛力，後續除持續監測 VWC(25cm)，建議可嘗試監測其他鄰近值(例如 35cm 或 40cm)，甚至改良設備以同時監測不同深度含水量。 4. 依圖 6.10 之 ID3 監測數值，VWC(25cm)於邊坡崩塌前似無明顯反應，該結果與 ID2 迥異，顯示佈設位置可能會是成功監測與否的重要關鍵，建議可詳加探討其可能原因。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依據取樣結果，台 20 線 50K+700 邊坡土壤 USCS 分類為粉土，其體積含水量上升後，不易消散，與現場勘查結果一致，且水份變化僅有淺層 25 公分處有變化，說明表層水氣較易影響淺層土壤體積含水量。 2. 台 20 線 52K 邊坡，潛在滑動面位於崩積層(10~12m)與岩盤交界面間，而 ID05 水位計埋設深度約為 12 米，而 ID02 水位值埋設深度為 40 米，與地表入滲造成之水位變化關係性較低，因此 ID05 可較好反應實際降雨行為。 3. 感謝委員指導。 4. ID3 模組深度 25 公分處水份計(報告 p.4-26 圖 4.30)，顯示崩塌前即趨近飽和狀態，此為其降雨引致或地表水活動造成之差異，其主要反應將影響耦合分析中之初始水頭狀態。 5. 感謝委員肯定。 	
--	---	--

<p>5. 依圖 6.16 之分析結果，VWC(25cm)於邊坡崩塌前 9 小時開始出現轉折，該時距可讓公路養護單位有足夠時間啟動應變，於實務上具高度可行性。</p>		
<p>(三) 關於甲仙觀測站土體含水量與降雨量間之關聯，依據圖 4.3 及圖 4.4(報告書第 4-3 頁及 4-4 頁)，Node 0 於 2020/5/1~2020/9/1 期間之關聯明顯，但 2020/9/1~2021/3/1 期間則似無明顯關聯，兩時期之差異頗大。另 Node 1~3 亦有類似情形，原因為何？</p>	<p>報告 pp4-4~4-6 圖中部份體積含水量變化，係由前期數位式水份計進行監測，因其耐久性，本年度 3 月份已對現存場址各體積含水量感測模組進行全面更換為類比式水份計(參考報告第 3-8 頁)。模組更換後，於 2021 年監測成果，體積含水量與降雨量已有明顯之對應關係。另因現地有人工灑水行為，其淺層亦可能受人為灑水影響。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(四) 崩塌發生在公路上邊坡時之俗稱為落石塌方，發生在下邊坡則為路基流失，由於均會危及用路人行車安全，因此後續除監測上邊坡 VWC 外，亦可嘗試監測下邊坡 VWC。</p>	<p>感謝委員指導。計畫主要針對降雨引致之邊坡破壞進行預警架構開發，依破壞機制，區分淺層崩塌邊坡與飽和土層滑動邊坡，預警指標分別為特定深度之體積含水量與地下水高程變化，對於相同類型之邊坡可應用計畫之預警架構，若有合適之下邊坡場址可考量進行監測。相關預警指標選用，請參考報告 pp.6-5 6.2 節「依時水力力學耦合分析」之說明。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>六、港研中心 賴瑞應科長</p>		
<p>(一) 針對此次台 20 線 50K+700 邊坡監測的經驗，建議能針對本案例，檢討相關監測設備如含水量計、傾斜儀、液位計</p>	<p>感謝委員指導。請參考報告 pp.6-50 6.3 節「無線感測模組選用原則」。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

<p>及雨量計等設備之安裝區位、深度及數量，是否有需調整之處，以供後續研究或應用單位之參考。</p>		
<p>(二) 本研究後續工作重點為建立依時預警系統之標準流程，建議能針對本研究前期定義的 2 種破壞模式(不飽和土層滑動與飽和土層滑動)及擋土牆，提出相關監測指標及所需監測設備，並針對其安裝位置、深度、數量及規格給予建議，以供後續應用單位之參考。</p>	<p>謹遵辦理。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(三) 今年 6 月豪雨事件，本研究研發的邊坡監測系統有成功監測到 6 月 5 日台 20 線 50.7K 邊坡崩塌，驗證本系統的可行性，後續有機會希望能至公路總局第五區養護工程處曾文工務段說明本系統，進行系統的應用推廣，未來也可以將相關訊息即時提供給曾文工務段做公路邊坡防災之應用。</p>	<p>感謝委員肯定，團隊將配合港研中心規劃，進行相關應用推廣。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>七、港研中心 胡啟文研究員</p>		
<p>(一) 本計畫結合理論公式推導、現地監測分析、土壤與結構互制等，且提供預警技術，幾年執行下來已累積相當成果，對於使用場址定量化評估(如預</p>	<p>感謝委員肯定。</p>	

<p>警、行動值訂定)需有相關資料及專業方能執行,要實際應用至基層公務養護單位上具相當操作門檻,實用性不大,因此本計畫期末重要工作項目即是依據歷年計畫執行成果,提出一套標準作業流程,有此一作業流程後,未來可做為維管單位委外技術服務時,遇到可適用之邊坡場址時,相當具有參考價值之設置作業手冊,如此對於公路災害精準化的決策管理將有所助益。</p>		
<p>(二) 基於上述第 1 點,對於場址適用性,以及何謂淺層滑動或飽和土層滑動之定義,地下含水層之分布(拘限或非拘限),所對應場址之儀器佈設原則、預算、儀器障礙排除、資料分析…等,建議應在標準作業流程中明確說明,另外除原則說明外,真實設置案例亦為有效地去輔助使用者快速去理解設置原則之重要參考資料,建議可擇歷年執行計畫中較成功之監測案例(有完整之雨量、地下水位及邊坡發生破壞,如:台 20 線 52K 及台 20 線 50.7K 這兩案試驗場址),列入標準作業程序中的示範參考案例。</p>	<p>謹遵辦理。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(三) 本計畫所選擇之試驗場址涵蓋公路總局及縣市政府所管養之道路,亦應為上述管養單位所列管之高風險路段,依據</p>	<p>感謝委員指導。計畫主要針對降雨引致之邊坡破壞進行預警架構開發,預警指標分別為特定深度之體積含水量與地下水高程變</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

<p>公路總局預警機制，應訂有預警、警戒及行動雨量值，依本計畫理論分析及設備監測的結果，是否可與該局所訂之門檻值相互比較分析並反饋，藉以提供修正該路段相關預警門檻值之參考，將有助於提升預警封路之準確性，降低因封路所造成之社會成本。</p>	<p>化，其與現行公路總局預警使用之雨量相關預警門檻值不同，較難直接進行比較。</p>	
<p>八、港研中心 曾文傑研究員</p>		
<p>(一) 感謝各位委員今天來幫忙公路邊坡計畫之期中審查，計畫執行至今已順利完成模組無線傳輸與模組耗電優化、飽和層場址孔隙水壓推估模式精進，並詳細說明台 20 線 50.7 公處邊坡監測點崩塌事件監測成果之破壞時序與類型探討。整體工作符合期中預定進度，感謝團隊的努力付出。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>	
<p>(二) 報告封面計畫編號” MOTC- “請刪除，另中英文摘要請依照本所出版品規定格式編排。</p>	<p>已修正。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(三) 現有監測場址現況、更新及是否有監控場址相關量測元件正常運作之機制?另監測場址之設備故障(或施工)及排除障礙修復時間，請以表格方式完整彙整於期中報告</p>	<p>目前場址監測模組主要使用鋰電池電壓偵測，定時回報各模組運作狀態，請參考報告表 4-1 與表 5-1，完整彙整 110 年度現有場址設備故障(或施工)及排除障礙修復時間彙整。</p>	<p>同意彙整 110 年度現有場址設備故障及排除障礙修復時間表。</p>

中。		
(四) 50.7k 淺層崩塌事件(6月5日) 監測成果，報告中論述已可驗證體積含水量監測可作為此類崩塌類型重要指標，另亦驗證淺層耦合分析的可靠度，後續應可依此次崩塌事件的驗證成果，於標準作業程序中加入為示範案例，並進行應用單位之推廣說明。	謹遵辦理。	同意依處理情形辦理。
(五) 第 4-10 頁，第 1 行” 110 年度經工作會議討論”，請修改為” 110 年度經 3 月份工作會議討論”。並將本計畫每月舉辦之工作會議記錄，增列於報告書後面。	已修正。謹遵辦理，增列附錄三「各期工作會議記錄」。	同意依處理情形辦理。
(六) 第 6-8 頁，倒數第 2 行” ，，” 請修改為” ，” ；另倒數第 1 行，語意不清請重新撰寫。	已修正。	同意依處理情形辦理。
(七) 報告書多處單位表示不一致，例如第 5-17 頁及 6-4 頁之米、m、公分、cm，請統一表示方式，並全面檢視修改。	已修正。	同意依處理情形辦理。
(八) 第 6-14 頁，第 7 行” …基質吸入變化關係”，請修改為” …基質吸力變化關係”；第 13 行” …kN/m ³ ”，請修改為” …kN/m ³ ”。	已修正。	同意依處理情形辦理。

附錄二
期末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)

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護

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
一、 高邦基 委員		
(一) 雲端即時監測平台擴充新增 LINE 警示訊息(預警值、警戒值及行動值)主動通知公路維管人員，非常有利於防災工作，惟公路養護人員操作或訓練以瞭解本計畫及配合，是否再補充說明。	感謝委員肯定。本年度精進之雲端平台相關使用說明彙整如附錄四「台 20 線 52k 雲端監測平台操作說明」，可供公路養護人員參考。	同意依處理情形辦理。
(二) 無線網路模組耗電優化(節電 88%)後模組存活(正常持續運作)之時間為何(增加運作小時數)?	前期系統於無日照情況下，可持續運作約 5 日，透過本年度無線網路模組耗電優化，運作時間可增加至 8 日，詳細說明請參考報告 pp.3-34~3-35。	同意依處理情形辦理。
(三) 台 20 線 50.7k 淺層崩塌預警架構分析建置指標為 25 公分深及 60 公分深處之土壤含水量及坡面傾斜角 15°變化，未來客製化於其他類似邊坡尚需專家學者再討論，究應如何訂定水份計埋設深度及門檻值，可否再加說明。	建議未來應以淺層水力耦合穩定分析，客製化分析現場臨界破壞深度 d_{cr} 與入滲所需時間，最佳情況為設置於分析所得之臨界破壞深度，並考量入滲分析所得之體積含水量依時變化曲線特徵，訂定合適之警戒值。詳細說明請參考報告 pp.6-14~6-18。	同意依處理建議，訂定合適之警戒值。
(四) 飽和土層無限邊坡滑動採用孔隙水壓比 r_u 為預警值，請再補充說明具體方法。	本計畫主要採用地下水位深度作為警示門檻，呈現如表 6-6 之警示監測指標，可簡化路段養護單位判釋流程。以台 20 線 52k 場址為例，現場佈設水位計(ID5)可反應關鍵崩積層之地下水壓變化(r_u)，	同意依處理情形辦理。

	而監測實務上，習慣以水位高程來代表地下水位變化，考量水位計埋設高程為 280 米、孔口高程為 292 米，即可以雲端運算即時計算地下水位深度，並以此發佈警報。	
<p>(五) 期末報告文字內容建議釐清或修正如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期中報告委員所提意見同意修正或補充部分，請以紅色文字顯示。 2. p.6-1，倒數第 6 行，飽和層滑「動」，請修改；第 7 行「分析降雨行為下邊坡」建議改為「分析邊坡於降雨行為其土壤之入滲行為」，以免誤認為「下邊坡」。 3. p.6-3「交通部 2015 定義」... 為交通部 2015 部頒規範。 4. 多處引述其他論文均未註明於重要參考文獻內。 5. p.6-23 圖 6.16 應為飽和層水力耦合分析流程圖？(與圖 6-3 相同?)，降雨下地下水位變化分析，建議改為降雨致地下水位變化分析。 6. p.6-30 及 p.6-31，表 6-3 及表 6-4 參數表，請註明資料來源。 7. p.6-36 第 2 行，依循 6.3 節，應為 6.2.3 節。 	<p>針對委員條列之意見，回覆如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員指導，已修改期中審查意見回覆情形表，註明對應章節頁碼。 2. 已修正。 3. 已修正。 4. 參考文獻格式已依規定進行修改，並整理於重要文獻中。 5. 已修正，請參考報告 p.6-24 圖 6.15。 6. 表 6-3 與表 6-4 係摘錄自去年度計畫成果，以註名資料來源。 7. 已修正。 	<p>同意依處理情形回覆，進行修正。</p>
二、 蘇苗彬 委員		
<p>(一) 本案辦理邊坡預警系統已累積數年工作，有很完整可行之成果，可以持續擴大辦理，並</p>	<p>感謝委員肯定，團隊積極配合港研中心進行相關推廣活動。</p>	<p>同意依處理情形辦理，本案應累積更多監</p>

積極推動現場安裝測試。		測成果及驗證，方可推廣應用。
(二) p.3-22 中所引用文獻“洪芯琦”看不到參考文獻，其中所述趨勢大致相同，但圖 3.21 看來有相當大的差異可補充說明。另很多文獻在後面的參考文獻都找不到，應注意納入。	感謝委員指導，已更新參考文獻，請參考 p.參-1「重要參考文獻」。現場真實降雨量將影響評估坡體入滲行為之準確性，相關補充說明請參考報告 3.4.4 小節。	本案應累積更多監測成果及驗證，方可推廣應用。
(三) 表 4-1 中故障排除多項顯示儀器仍不穩定，應謀求可靠度提升有利於推廣使用。	本年度因更換水份計型號，於系統整合測試初期，有發生硬體問題，5 月份後異常狀況已排除；淺層崩塌場址共設置 6 組分層水分感測端節點，於 3 月份至 11 月份監測區間，僅供換其中 2 感測端之類比轉換模組與 4G 無線網路模組，考量儀器為低成本電子元件整合之系統，穩定性應可接受。	同意依處理情形辦理。
(四) p.4-7 的傾斜觀測數值變化頗大，對擋土構造而言已非常明顯，不像 P4-6 所述無明顯增加，建議應調整說法。	感謝委員指導，甲仙監測場址傾斜監測主要反應土壤表層變形行為，請參考報告 p.4-6 4.2.2 小節之補充說明。	同意依處理情形辦理。
(五) p.5-20 及 p.5-21 等地下水位上升高度與累積雨量關係圖 R^2 值偏低，顯示有其他影響因子，可以再深入討論。	感謝委員指導，本年度基於統計概念，持續分析場址降雨特徵與地下水位關聯性分析，對於地下水位補助，其來源可分為降雨垂直入滲與集水區地下滲流補助。地下水位抬升幅度，可能受滲流補助與前期降雨之地表含水量而有所差異，但大部分數據仍在 95% 信賴區間內，統計結果應可接受。而實務上，習慣以水位高程來代表地下水位變化，考量水位計埋設高程為 280m、孔口高程為 292m，即可以雲端運算即時計算	同意以水位高程來代表地下水位變化，並以地下水位深度發佈警報。

	地下水位深度，並以此發佈警報。	
三、游繫結 委員		
(一) 公路邊坡在實務面上，大致可分人工邊坡(挖、填方)與自然邊坡(未刷坡)，而自然邊坡之土層力學參數不易精確掌握，應用本研究之預警架構，如何建立模式所需之參數？尤以 VG model 之適用性如何，似可詳加引申。另現地以電容式含水量計取代孔隙水壓計之量測，兩者意義仍有不同，對模式分析結果之影響如何？	<p>本年度以台 20 線 50.7k 場址之崩塌事件驗證淺層崩塌水力耦合分析方法 VG 模式之適用性。未來應用研究成果時，可以現場土樣進行統一土壤分類(USCS)，並選取對應典型 SWCC 曲線參數(參考表 6-1)，可簡化未來應用分析架構之複雜性。</p> <p>本計畫針對降雨引致之邊坡破壞，以破壞機制區分，淺層崩塌以特定深度之體積含水量為代表；飽和層滑動，則考慮地下水深度與坡體穩關係。兩指標為觸發邊坡穩定分析之力學關鍵因子。體積含水量上升，代表由非飽和土壤提供之額外剪力強度下降，而地下水壓上升，則代表坡體有效應力下降與驅動力增加。</p>	同意依處理情形辦理。
(二) 現行開發之土壤含水量計在實務應用上，仍存在許多精度之落差，其可靠性如何？(圖 4.3~圖 4.17 等均可看出其不穩定性？)	<p>本年度崩塌監測成果可驗證土壤含水量計之可靠性。但此類感測器應用於邊坡預警時，主要考量耐久性，因其主要開發於農業使用，並不像本計畫應用方式，完全埋設於土體中，電子元件之防水保護為一大挑戰。</p> <p>圖 4.3 至圖 4.7 與圖 4.15 係為本年度完整監測成果，其感測值之升降，與降雨事件有高度正相關，且體積含水量於降雨事件後，逐步下降，並非感測值跳動，以圖 4.29</p>	同意依處理情形辦理，未來應精進感測器之準確度，並提升含水量計之防水效果。

	與 4.30 之短期監測成果可佐證可靠性。	
(三) 圖 4.22~圖 4.25 所示之土體破壞現象係土體滑動、崩塌或屬表土流失之沖蝕現象，宜有所判別。	圖 4.22~圖 4.26 請參考 p.4-16 補充說明，圖 4.22 為現場 ID3 監測區域屬淺層崩塌行為，圖 4.23 則類似於 ID2 表層沖刷造成之表土流失行為。	同意依處理情形辦理。
(四) 本研究以地下水位作為警戒或監測指標，而實際邊坡之滲透理論係雨水自地表往下滲透，其浸潤線(面)到達深度之表層破壞。而崩塌之地下水係由下往上升之水位影響。兩者對地下水位之認定不同，宜釐清此等在土層邊坡之地下水文環境之差異。	<p>入滲水由地表往下將改變淺層土壤體積含水量，而浸潤線(面)抵達坡體地下水位面時，則視為降雨垂直入滲補助。降雨入滲行為於淺層崩塌與飽和層滑動分析時，皆一致。淺層崩塌主要討論淺層(表層)土壤含水量變化，地下水位不變，而飽和層滑動主要討論地下水位變化。</p> <p>其差異主要為坡體土壤類型與其形成之邊坡幾何狀態，淺層崩塌在入滲時，浸潤線(面)抵達地下水位面前，已經產生崩塌行為，此時浸潤面不一定為坡壞面所在位置。而飽和層滑動，除降雨垂直入滲，另須考慮上游集水區地下滲流補助引起之地下水位抬升。本計畫研究成果係基於解析架構之考量地下水文、邊坡幾何與力學穩定分析方法，有助於提升邊坡預警之準確性。</p>	同意淺層崩塌主要受土壤含水量變化影響，而飽和層滑動主要受地下水位變化影響。
四、 謝忠和 委員		
(一) 台 20 線 50.7K 場址，圖 4.15 含水量變化量測成果曲線，上下跳動訊號較大，其趨勢	圖 4.15 係為本年度完整監測成果，其感測值之升降，與降雨事件有高度正相關，且於降雨事件後，量測值逐步下降，此現象並非水	同意短期崩塌監測成果可佐證含水量變化量測成果之正

不易研判，請說明原因。	份計感測值跳動。以圖 4.29 與 4.30 之短期崩塌監測成果可佐證含水量變化量測成果之正確性。	確性。
(二) 台 20 線 50.7K 場址，由圖 4.18 中 ID01 邊坡地表傾角變化有向下邊坡傾斜趨勢，是否說明該處邊坡有淺層位移潛勢？且傾斜變化量的增加量，請說明原因是否與降雨有關。	本計畫分層含水量計係採人工鑽孔進行模組安裝，ID01 主要安裝處坡角大，且無適當立足處，安裝處過度擴孔，造成傾斜監測成果有明顯之傾斜變化增量，模組於 10 月重新安裝後，傾角已無增加之趨勢。詳細說明請參考報告 pp.4-12~4-13。	同意依處理情形辦理。
(三) 台 20 線 52K 場址，圖 5.3 中 ID02 地下水位監測於 2021 年 7 月份水位上升至高程約 280m，其上升量約 15m？再請確認。	台 20 線 52k 場址 ID02 於 7 月份上升區段係因現場電子模組故障，已於圖 5.3 中加註說明。地下水位抬升應為連續且緩慢之變化，圖中數據屬階梯式變化，非實際地下水上升行為。感測值於更換現場類比數位轉換元件後，ID02 地下水位監測資料已恢復正常。	同意依處理情形辦理。
(四) 台 20 線 52K 場址，圖 5.5 及圖 5.6 其傾斜角監測，一為有傾斜，一為無傾斜，請說明評估原因。	<p>圖 5.5 代表道路上邊坡石籠後方之土壤表層傾角變化，圖 5.6 與圖 5.7 分別為擋土系統平行與垂直坡向傾角變化。</p> <p>圖 5.5 顯示 ID2 於雨季前，感測值無明顯變動，雨季後累積約 1 度之變化，說明蛇籠局部有部分輕微變形。而圖 5.6 則說明在本年度在雨季時，擋土系統平行坡向之方向，仍有累積約 0.25 度之向外傾角變化，說明台 20 線 52k 示範場址，於雨季時，仍為高風險邊坡，應保持相關監測系統運作。</p>	同意依處理情形辦理。
(五) 南市道 175 線場址，地下水監測中圖 5.14 及圖 5.16 於 2021	圖 5.14 係因本年度現場於道路上邊坡完成相關抽水集水井改善工	同意依處理情形辦理。

<p>年 8 月後地下水位下降至較常時水位更低，而圖 5.15 地下水位則持續升高，評估原因為何？</p>	<p>程，ID2 屬於此抽水區域，因此水位於 8 月份後有明顯下降。而 ID4 於 10 月份例行維護時，則發現水位計遭人取出，此區段量測值異常，經維護放回後，感測值回復正常量測範圍，相關說明已於圖上備註。</p>	
<p>五、黃俊豪 委員</p>		
<p>(一) 報告書第 4-14 頁圖 4.18 台 20 線 50.7K 處 ID01 傾角變化，不論降雨量多寡、地表傾角，均等速變化，是否合理？可能原因為何？</p>	<p>本計畫分層含水量計係採人工鑽孔進行模組安裝，ID1 主要安裝處坡角大，且無適當立足處，安裝處過度擴孔，造成傾斜監測成果有明顯之傾斜變化增量，模組於 10 月重新安裝後，傾角已無增加之趨勢。詳細說明請參考報告 pp.4-12~4-13。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(二) 報告書第 5-7 頁圖 5.5 台 20 線 52K 場址 ID02 傾角變化，2021 年 9 月下旬後，幾無降雨卻有劇烈變化，建議探討其原因，並可視需要納入後續精進。</p>	<p>圖 5.5 代表道路上邊坡石籠後方之土壤表層傾角變化，本年度 6 月份前，傾角無明顯變化，而雨季後，則累積約 1 度之變化，說明蛇籠局部有部分輕微變形。而 9 月下旬後，無明顯事件，但傾角仍持續變化，主因為 9 月份崩積層水位仍處於本年度相對高點(圖 5.4)，說明此場址穩定性，與地下水位高度具高度正相關，為高風險邊坡，應保持相關監測系統運作。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(三) 報告書第 5-18 頁圖 5.22 及第 5-19 頁圖 5.23 南市道 175 線 ID07 傾角垂直與水平變化，有降雨卻無變化，建議探討其原因。</p>	<p>本計畫擋土系統之傾斜角量測為雙軸向系統，分別設置為垂直與平行擋土牆。圖 5.22 代表垂直擋土牆方向，即平行坡向，本年度雨季後約累積 0.1 度內之傾角變化，說明於雨季時，仍為高風險邊坡，應保持相關監測系統運作；而水</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

	平方向變化則代表面對擋土系統是否有差異沉陷造成的角度變化，對於南市道 175 場址之 ID07 模組，並無明顯變化。	
(四) 台 20 線 50.7K 場址，地錨預力改變對監測結果之影響，如何考量？	台 20 線 50.7k 場址屬淺層崩塌監測示範場址，現場並無地錨之擋土支撐系統。地錨預力改變之相關分析，請參考台 20 線 52k 與南市道 175 線場址，詳細請參閱 109 年度成果「公路土壤邊坡與擋土支撐監測系統精進與預警系統測試」第六章，完整呈現擋土支撐參數變化，對於邊坡與擋土系統之互制作用。	同意依處理情形辦理。
六、港研中心 柯正龍副主任		
(一) 本計畫已依契約規定，完成彙整前期歷年監測成果、研擬依時預警系統標準流程架構、精進雲端整合平台及測試穩定度等主要工作，及於公路總局第五區養護工程處曾文工務段辦理教育訓練，成果豐碩。	感謝港研中心肯定。	
(二) 為落實歷年研究成果提供公路邊坡養護單位應用，歷年相關研究監測場址及儀器配置，請於報告製表詳列，俾利應用參考。	謹遵辦理。請參閱表 1-1「運研所歷年與本計畫相關研究案列表」。	同意依處理情形辦理
七、港研中心 胡啟文研究員		
(一) 本計畫從無線感測模組應用到邊坡監測之探討至結合土壤穩定分析、水力力學耦合分	感謝港研中心肯定。團隊積極以本年度崩塌監測成果整理投稿國際期刊。	同意以台 20 線 50.7K 崩塌監測成果，投

<p>析，開發整合為依時預警系統，已累積相當之成果，並於今年經現地試驗驗證具有其可行性，除可開始推廣應用外，建議團隊後續亦可朝申請專利方向進行。</p>		<p>稿國際期刊。</p>
<p>(二) 因標準流程係為使用者參用之指引，其適用條件應明確定義，如淺層破壞適用條件須為「陡坡」，其定義為何？應與圖 6.14 探討之坡角對淺層耦合分析中，對於坡角影響預測破壞深度與入滲時間誤差之討論有關，可將討論結果簡要再補充於此一定義說明。</p>	<p>淺層破壞定義為坡角大於土壤有效摩擦角($\beta > \phi'$)，請參考報告 p.6-3 定義。對於「陡坡」之定義，建議非僅以角度進行定義，應綜合考量土壤類型與土壤邊坡平均坡角之相對關係，進行考量破壞機制。由圖 6.13 成果，可總結對台 20 線 50.7k 場址，坡角 45 度以上，此類破壞機率較高之淺層崩塌邊坡，其預測破壞深度與入滲時間之誤差約在 30% 上下。</p>	<p>同意依處理情形建議淺層破壞之定義，應綜合考量土壤類型與土壤邊坡平均坡角之相對關係，進行考量破壞機制。</p>
<p>(三) P6-14，誤差為 2 維尺度效應，「2 維尺度效應」所指為何？</p>	<p>淺層崩塌水力耦合分析中，邊坡臨界破壞深度(d_{cr})公式主要基於 2 維無限邊坡塊體進行力學推導(圖 2.9)。但崩塌成果屬實際 3 維邊坡，現場破壞深度推估約為 45 公分至 60 公分(請參考 p.4-18 說明)，分析結果與現場破壞深度相近，其誤差為尺度效應造成。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(四) 以台 20 線 50.7K 為例，分別於 25 及 60 公分處設置體積含水量計，其設置位置應與淺層水力耦合分析預測可能破壞深度有關，如 25 公分位置為可能破壞面之上做為預警值監測使用，60 公分處為接近破壞點做為警戒值監測使用，若是如此，可將此一體積含水量計佈設原則納入 6.3 節</p>	<p>感謝委員指導。請參考報告 p.6-14 補充說明，建議未來應以淺層水力耦合穩定分析，客製化分析現場臨界破壞深度 d_{cr} 與入滲所需時間，最佳情況為設置於分析所得之臨界破壞深度，並考量入滲分析所得之體積含水量依時變化曲線特徵，訂定合適之警戒值。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

<p>中補充,除無線感測模組選用原則外,亦提供佈設原則予使用者參用。</p>		
<p>(五) P6-20, 預測破壞深度與入滲時間之誤差約在 30%上下, 「破壞深度」與「入滲時間」兩者係為不同物理量,如何比較誤差?圖 6.15 為說明基質吸力摩擦角對淺層耦合分析之參數敏感度分析,如何取得合理之基質吸力摩擦角參數,建議於標準程序中補充說明。</p>	<p>感謝委員指導,對於坡角 45 度與 55 度之淺層崩塌邊坡,坡壞深度依分析結果分別為 0.40 與 0.56 公尺,其差距約為 29%;入滲觸發穩定包絡線所需時間推估為 8 小時與 12 小時,其差距約為 33%,係基於相同物理量進行比較。請參考 p.6-19 補充說明。 對於基質吸力摩擦角參數 ϕ^b, 建議以三軸試驗,分別進行飽和試體與非飽和試體之 CU 試驗,並考量衍生莫爾庫倫破壞準則,可求取合適之參數。詳細說明請參考報告 pp.6-19~6-20。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(六) 淺層崩塌模式遇有擋土設施時之施作程序為何?是否與深層破壞分析模式相同,建議於標準程序中說明。</p>	<p>對於潛在淺層崩塌邊坡,因其崩塌深度與破壞量體皆明顯小於飽和層滑動,其改善工程,大多以蛇籠護坡、型框植生與排水工程等簡易工法進行改善。因此,建議以天然無支撐之天然土坡進行分析即可。請參考報告 p.6-5 6.2.1 小節。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(七) 報告書內容部分文字再請檢視修繕,如下:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. p.6-1, 「廉價」一詞建議修改為「低成本」會較為貼切。 2. p.6-17, …, 而從 6.2 節現場崩塌事件監測…, 查該節與所述內容有出入,請修正。 3. p.6-19, … 其暫態穩定型程…, 語句有誤;…之增加,對「坡」壞深度之變化…, 文字有誤。 	<p>感謝委員指導,針對委員條列之意見回覆如下:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 已修正。 2. 已修正為 4.4.2 小節。 3. 已修正。 4. 已修正,請參考報告 p.6-23 圖 6.15。 5. 已修正為 6.2.3 小節。 6. 已修正。 	<p>同意依處理情形意見回覆,進行修正。</p>

<p>4. 圖 6.16,應為說明深層水力耦合分析流程,惟圖名為「淺」層,請檢視修正。</p> <p>5. p.6-36, …依循 6.3 節建立之流程…,查該節與所述內容有出入,請修正。</p> <p>6. p.6-56, …除應與「路端」養護單位積極…,「」內文字請修正。</p> <p>7. p.7-3,7.2 建議事項第 1 點, …若針對「下列目標」改善,可…,後文無表列目標,請修正。</p>	<p>7. 已修正。</p>	
<p>八、港研中心 曾文傑研究員</p>		
<p>(一) 首先感謝與會的委員百忙之中,參與本所公路土壤邊坡計畫期末審查,計畫執行已順利完成所有工作項目,團隊並新增台 20 線 50.7K 處邊坡淺層監測場址,也詳細說明該監測場址於 6 月 5 日崩塌事件監測成果,另建立預警系統標準流程(SOP)架構。整體工作符合預定進度,感謝團隊的努力付出。</p>	<p>感謝港研中心肯定。</p>	
<p>(二) 本計畫每月舉辦之各期工作會議紀錄、各期審查意見與回覆及期末簡報等,請列於報告書後面(依順序編列附錄一、附錄二…………)。</p>	<p>謹遵辦理。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(三) 報告書中第 1-9 頁與第 1-10 頁工作項目有些不一致,請修改;另第 1-12 頁預定進度</p>	<p>謹遵辦理。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

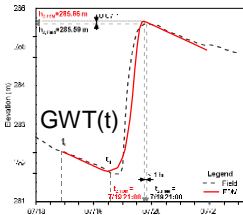
甘特圖，請刪除。		
(四) 8 月 31 日於公路總局第五區養護工程處曾文工務段舉辦說明會情形，以及針對台 20 線 52K 場址雲端平臺，該段使用後回饋內容，請補充於報告書中，並將雲端平臺操作手冊說明放於附錄中;另自動預警通知，亦請發送給該段段長。	謹遵辦理。推廣說明會紀錄與相關回饋，增錄於 1.5 小節「邊坡依時預警系統發展歷程」中，詳細請參考報告 p.1-11 之說明。操作手冊請參閱附錄四。	同意依處理情形辦理。
(五) 有很多用語表示不一致，例如第 4-1 頁台 20 線 50K+700 及台 20 線 50.7 公里，請統一以台 20 線 50.7 K 表示，並全面檢視修改。	謹遵辦理。	同意依處理情形辦理。
(六) 目錄中第七章為結論與建議，請修改。另第 7-1 頁 7.1 結論似乎是工作項目交代事項，請重新調整修改；第 7-3 頁，7.3 預期效益與應用情形也是相同，請增加公路總局第五區養護工程處使用台 20 線 52K 場址雲端平台應用情形、開發自動預警通知、研究成果預計投稿及依時預警標準流程等效益與應用。	謹遵辦理，目錄已修正。	同意依處理情形辦理。
(七) 報告書中文章之排法多處不一致(如第 1-4 頁)，章、節、小節下之小項目之排法一律為 1、(1)依序排印，請全部檢視，並依照本所出版品規定格式修改。	謹遵運研所出版品規定進行修改。	同意依處理情形辦理。

<p>(八) 報告書中有部分圖例不清楚，例如第 2-18 頁圖 2.11、第 3-3 頁圖 3.2、第 3-24 頁圖 3.22、第 6-28 頁圖 6.20，請縮小調整解析度。</p>	<p>謹遵辦理。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(九) 報告書中第一次提到之名詞，請在後面括弧裡用”以下簡稱為…”來表示，另很多本計畫、本研究及本團隊之用語亦請統一表示。</p>	<p>謹遵辦理。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(十) 第 5-1 頁，南市道 175 線”50k+500”，第 5-8 頁南市道 175 線”25k+500”，請釐清哪一個正確。</p>	<p>謹遵辦理，已修正為南市道 175 線 25.5k。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>
<p>(十一) 報告書中有部分誤植處，例如第 6-11 頁 6.2.2 節淺層崩塌，請修改為淺層崩塌，第 6-23 頁圖 6.16 淺層，請修改為飽和層。</p>	<p>已修正。</p>	<p>同意依處理情形辦理。</p>

附錄三

台 20 線 52k 雲端監測平台操作說明

台20線52K雲端監測平台操作說明



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：周仕勳、張文忠、黃安斌

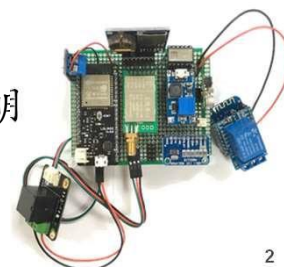


110年度

大綱

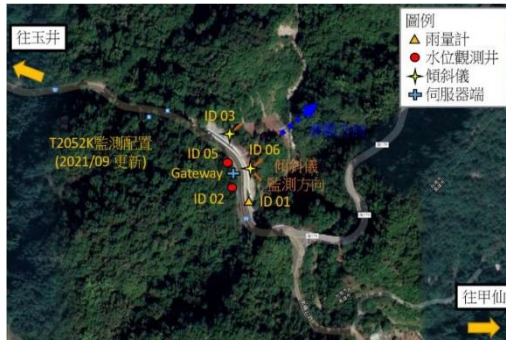
- 曾文工務段使用帳號
- 52k現場監測模組配置說明
- 台20線52k雲端平台操作說明
 - 即時顯示資訊
 - 監測資料下載操作
- 警示值即時LINE群組通知
 - 警示值對應監測物理門檻說
 - LINE群組加入方法(Qrcode)

明



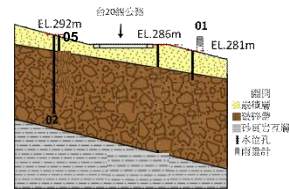
飽和層滑動監測配置_台20線52公里處

➢ 現場監測模組相對位置

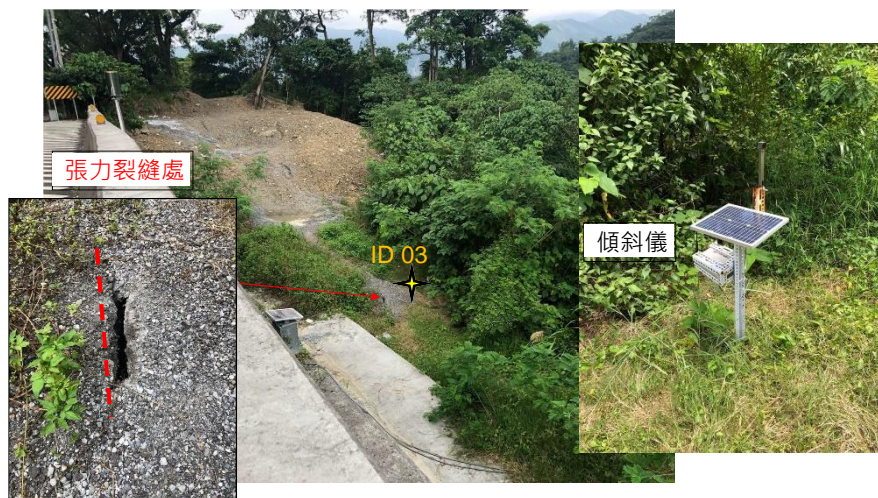


- ID1: 邊坡現場簡易雨量筒
 - ID2: 岩盤破碎帶地下水水位
 - ID3: 道路下邊坡土表傾斜儀
 - ID5: 崩積層地下水水位
(預警與警戒值標的)
 - ID6: 擋土系統雙軸向傾斜儀
(行動值標的)
- 開孔式水位井對應監測目標說明:

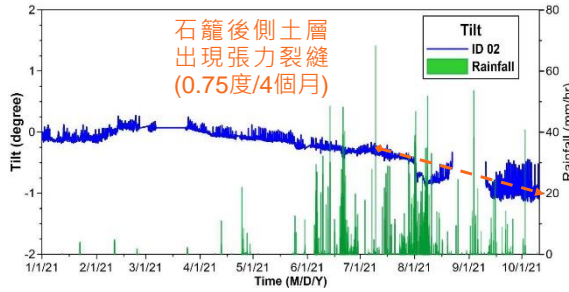
模組狀態			
模組編號	時間	運作狀態	故障
ID1	2021-11-05 09:10:34	正常	無量計
ID2	2021-11-05 09:40:28	正常	裝置地下水位
ID3	2021-11-05 09:40:58	正常	傾斜儀
ID5	2021-11-05 09:13:03	正常	崩積層地下水位
ID6	2021-11-05 09:42:58	正常	擋土牆傾斜儀



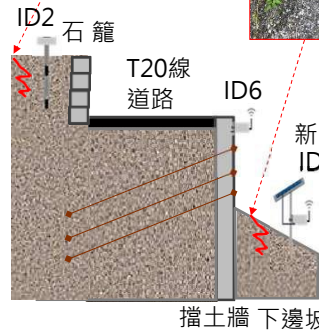
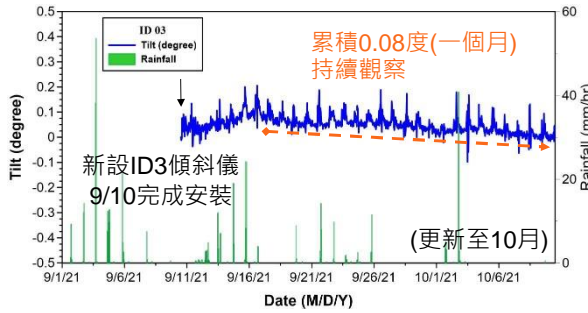
於9/11依照路段養護單位需求 新增道路下邊坡傾斜儀 (ID3)



✓ 道路上、下土壤表層傾斜變化



上邊坡
張力裂縫



曾文工務段單位使用帳號



交通部運研所港研中心
即時監測平台

網址: <http://slopecloud.com.tw:5003>



台20線52K處即時邊坡擋土監測平台
新增五工處曾文工務段使用帳號一組

thbu5@gmail.com 密碼

登入

請洽台港研所 研研新帳號

使用者權限: 1.即時監測諮詢查詢
2.歷史監測資料下載

港灣技術研究中心



雲端平台即時資訊顯示說明(1/2) (台20線52k)

台20線52k處即時邊坡濺土監測平台

現在時間: 2021-10-19 10:11:07

監測配置

模組狀態

警示燈號

資料即時處理/顯示



雲端平台即時資訊顯示說明(2/2) (台20線52k)

➢ 歷史資料即時繪圖與詳細數值

可選擇資料長度

可選擇不同ID

詳細數值

即時圖表呈現

雲端平台監測資料下載說明(台20線52k)



雲端整合平台智慧化通知訊息

➢ LINE群組警示訊息格式

即時運算檢核監測目標

(相關監測指標為109年度成果僅供參考)

表 6-5 台 20 場址參考監測指標整理

ID5水位	預警值	警戒值	行動值	ID6傾角
	地下水位 3.65 米	地下水位 2.5 米	牆頂傾角 0.27 度	

1. 對應邊坡穩定分析安全係數 = 1.1
2. 對應邊坡穩定分析安全係數 = 1.0
3. 對應邊坡穩定分析安全係數 = 1.0

✓ 52k平台警示訊息接收群組(掃描QRcode加入)



預警訊息格式

LINE Notify

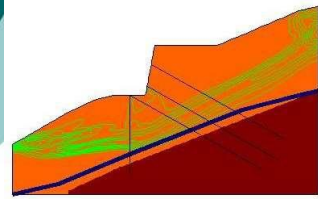
簡報結束
敬請指教



附錄四
期末報告簡報資料

公路邊坡場址客製化依時預警 系統精進與維護

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：周仕勳、張文忠、黃安斌

Outline

- ◆ 110 年計畫摘要
- ◆ 現有淺層與飽和土層監測場維護
- ◆ 模組發展歷程、無線傳輸技術與耗電優化
- ◆ 雲端友善化調整、主動通知擴充與穩定性提升
- ◆ 水位與降雨特徵關聯分析精進
- ◆ 時間域孔隙水壓推估模式驗證與整合
- ◆ 公路邊坡依時預警系統標準流程說明
- ◆ 結論與建議

期中審查回覆重點列表(1/2)

水力耦合分析相關

審查意見	合作研究單位處理情形
土壤含水量特徵曲線(SWCC)之變化度甚大，以Fredlund and Xing之資料運用有無可能造成失真之情形？(可信度如何？)	決定現地SWCC之代表曲線有其困難度，最佳方法為應用現場入滲監測成果，以分層體積含水量推估現地邊坡入滲速率變化，建立場址入滲速率與基質吸力關係，可推估現場非飽和特徵參數，並應用於非飽和入滲依時分析。考量後續標準流程建立，計畫以USCS分類結果來選用典型SWCC曲線，可降低應用淺層水力耦合分析之困難度，而實際崩塌監測成果與水力耦合分析結果具一定之相符性，顯示台20線50.7K場址採用Fredlund and Xing (1994)之典型粉土曲線應可接受。
有台20線50.7K之土壤參數實測值，何以模擬採取不同參數值？此等參數項對模式模擬之敏感度如何？	感謝委員指導，台20線50.7K之土壤依USCS分類為低塑性粉土ML，其單位重為18.3kN/m ³ 、液性限度LL為33%、塑性指數PI為7.6%。表G-1之淺層水力耦合分析參數中已修正誤值之部分，而阿太保試驗結果僅用於判別土壤種類，進而選擇典型土水特徵曲線。相關說明將於期末報告補充。
SWCC之主要係土壤matrix(基質)之吸水排水特性，在下雨時，其吸水狀態與雨停後之排水狀態，基質吸力相同但土壤含水量卻差異甚大之情形有之，以臺灣多屬崩積土層邊坡，此等基礎吸力之影響如何？是否為模式模擬之重要敏感參數？可再加強說明。	感謝委員指導，土壤含水量特徵曲線於吸水、排水狀況下具遲滯效應。對於本計畫應用於降雨引致淺層邊坡崩塌行為，其崩塌行為主要發生於下雨持續進行時，土壤屬由乾到濕(吸水狀況)狀況，邊坡崩塌會發生於吸水狀況，且降雨延時與強度不足以致發生持續滲行為時，邊坡處於相對安全狀態，因此暫不考慮遲滯效應，相關內容將於期末補充。

3

期中審查回覆重點列表(2/2)

標準分析流程相關

審查意見	合作研究單位處理情形
未來於擬定依時預警系統標準建立流程不同情境之預警依據指標宜明確標示於流程內。建議對於本研究方法預警系統說明適用條件。	謹遵辦理。計畫主要針對降雨引致之邊坡破壞進行預警架構開發，依破壞機制，區分淺層崩塌邊坡與飽和土層滑動邊坡預警指標分別為特定深度之體積含水量與地下水高程變化，於擬定標準流程時，將明確說明適用對象與對應預警指標。
台20線50.7K上邊坡本年6月5日發生崩塌，係採場址體積含水量值為預警指標，警戒值為VWC 20.9%，如何訂定？又預警值及行動值若干？如何訂定？	依時體積含水量變化特性之客製化預警值建立流程，將於期末淺層滑動SOP建立章節補充說明
關於本研究合適應用場域，實務上無差別大範圍佈設之可能性不高，但對於甫發生災害之新生崩塌邊坡而言，由於其完成修復前仍有二次災害風險，因此於該空窗期導入本研究結果進行短期監測應為後續可切入方向，建議主辦機關可納入考量。	感謝委員指導。本計畫適用場域與標的將於期末補充。
今年6月豪雨事件驗證系統的可行性，後續有機會希望能至公路總局第五區養護工程處曾文工務段說明本系統，進行系統的應用推廣，未來也可以將相關訊息即時提供給曾文工務段做公路邊坡防災之應用。	感謝委員肯定，團隊將配合港研中心規劃，進行相關應用推廣。

4

8月份於曾文工務段辦理系統推廣說明會

會議照片



系統推廣說明會講義

公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護

推廣說明會-Part1-計畫簡介

系統架構：現場即時預警
傳訊模式：對講機/人機/人機/人機/人機
負責人：黃博中

客製化邊坡依時預警系統介紹
Introduction for of Customized Time-dependent Warning of Rainfall-Induced Soil Slope Failures

系統架構：現場即時預警
傳訊模式：對講機/人機/人機/人機/人機
負責人：周均壽 碩士
2021.08.31

當日出席簽到：

會議簽到表

季·會議名稱：KOE1104-HI-C003 公路邊坡場址客製化依時預警系統精進與維護
 地點：台研所研發二樓會議室
 日期：110年8月31日(星期二)上午 11時 30分
 參加地點：交通部公路總局第四區管理處曾文工務段會議室
 (臺南市將軍區曾文路100號)
 主辦：曾文工務段 周均壽
 協辦：公路總局研發中心

出席單位	職稱	姓名
交通部公路總局第四區管理處曾文工務段	段長	謝志和
	副段長	林慶壽
	副段長	陳明龍
	副段長	游文治
	副段長	游文治
交通部公路總局研發中心	計畫主持人	周均壽
	計畫主持人	游文治
	計畫主持人	游文治
交通部公路總局研發中心	研發	游文治
交通部公路總局研發中心	研發	游文治

110年研究內容與項目

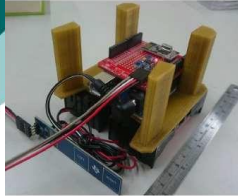
- **現有四處監測場持續觀測與精進:**
 - 甲仙攔河堰邊坡、台20線50.7k&52k及南市道175場址
 - 淺層崩塌量測成果→驗證淺層水力耦合分析架構
- **精進雲端依時預警系統架構:**
 - 精進模組間通訊、省電模式運作
 - 擴充主動預警功能
 - 雲端平台虛擬儀表與運作穩定性提升
- **飽和土層場址地下水壓推估:**
 - 水位與降雨特徵關聯分析精進
 - 時間域水壓推估模式驗證與整合
- **公路邊坡依時預警系統標準流程架構:**
 - 降雨下土壤邊坡破壞模式→分析類型定義
 - 依時水力耦合分析(以台20線兩場址進行說明)
 - 無線感模組選用

土層無線監測模組發展歷程



系統初期(104-105年度)

(發射端)



(接收端)→PC電腦

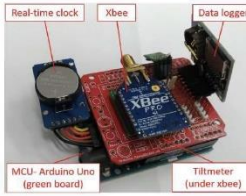


特點：

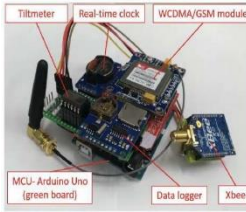
1. 淺層崩塌為目標。
2. NRF無線電傳輸。(傳輸距離在100公尺內、具高度指向性)。
3. 資料儲存於現場個人電腦。
4. 採鉛蓄電池，耗電量大。

系統中期(106-107年度)

(發射端)



(接收端)→雲端



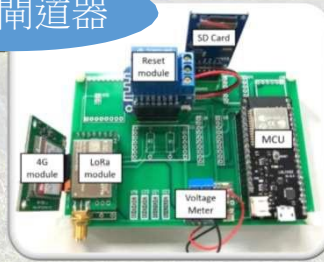
特點：

1. 加入飽和層滑動為目標
2. XBee無線電傳輸技術。(傳輸距離在300公尺內)
3. 資料開始上傳雲端資料庫。(ThingSpeak.com)
4. 採18650鋰電池，開始導入省電模式架構。



現有監測系統架構(1/2)

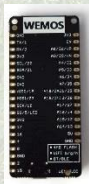
資料閘道器



❖ 模組特色：

1. 可編程微型微控板(MCU)
2. 模組化特性
3. 萬物聯網概念
4. 獨立電源系統
5. 輕量化、佈設迅速

微控制器



LoRa



SD card



4G-module



定時斷電

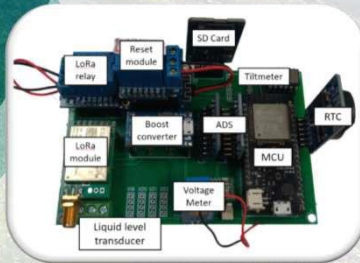


現存監測系統架構(2/2)



感測端

❖ 分散式無線監測網路：



感測器

液位計

傾度儀

雨量計

含水量計



9

土層無線監測模組與雲端平台精進

- 雲端資料庫更換：
國外ThingSpeak平台→**中華電信雲端大平台**
- 分層水份計電子模組更換：
數位式電容感測→**類比式電容感測**
- 電源管理及節電效能精進：
1. Gateway 閘道器模組 2. Client 模組省電模式
- 雲端主動訊息通知功能擴充：
原email通知更改為**LINE 群組訊息通知**
- 雲端平台顯示資訊朝使用者友善化調整：
導入虛擬儀表功能
- 雲端主機運作穩定性提升：
主機排程開關機+ Python程式自動啟動

10

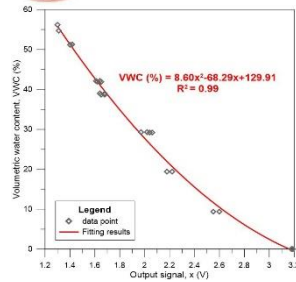
體積含水量計改版

- I²C通訊串聯
- 耐久性

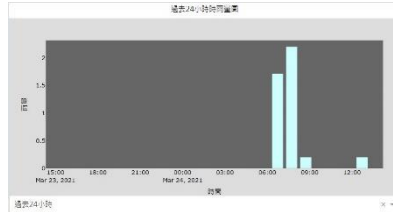


圖 3.2 電容式土壤水份計

➢ 新式類比電容含水量感應計



➢ 2021/3/24 24小時雨量



國內雲端資料庫(CHT IOT)

(雲端資料庫DB更換為中華電信IOT雲端平台)

可同步中華電信IOT平台進行即時數據更新

樞紐編號	站號	深度25cm電阻	深度50cm電阻	樞紐編號	站號	方向(使用瓦數)	數據庫異常數(使用瓦數)	轉型值(%)	轉型值(%)
ID0	2021-03-18 17:29:35	0.38	0	ID0	2021-03-18 17:29:35	-0.932	0.002	0.3	0.5

資料傳遞架構:



歷史數據查詢

Gateway 閘道器模組省電模式精進

➢ 4G/LTE無線網路模組



SIM7500SA採UART通訊界面
以AT command 進行控制

✓ 省電模式精進

AT+CSCLK = 1; % 進入睡眠模式
配合DTR腳位上拉電阻，可離開睡眠模式

$$\text{可節省} \frac{13.7 - 1.6}{13.7} \times 100\% = 88\% \text{ 電量}$$

• 4G模組瞬時電流消耗對照表 待機時

LTE Sleep/Idle mode		
LTE supply current (without USB connection)		Sleep mode Typical: 1.6mA Idle mode Typical: 13.7mA
LTE Data		
LTE-FDD B1	@5 MHz	Typical: 482mA
	@10 MHz	Typical: 489mA
	@20 MHz	Typical: 534mA
LTE-FDD B2	@5 MHz	Typical: 589mA
	@10 MHz	Typical: 577mA
	@20 MHz	Typical: 626mA
LTE-FDD B3	@5 MHz	Typical: 479mA
	@10 MHz	Typical: 491mA
	@20 MHz	Typical: 538mA

資料傳輸時

13

Client 模組省電模式精進

➢ LoRa無線電模組



LoRa採UART通訊界面
以無線電方式進行資料傳遞

✓ 區域廣播模式(現行方式)



✓ 定點喚醒模式(精進方向)



主要参数	性能			备注
	最小值	典型值	最大值	
工作电压 (V)	2.3	5.0	5.2	>5.0V 可保证输出功率
通信电平 (V)		3.3		使用 5V TTL 有风险烧毁
工作温度 (°C)	-40	-	+85	工业级设计
工作频段 (MHz)	900	-	915	出厂默认 915MHz
功耗	发射电流 (mA)	110		瞬时应机
	接收电流 (mA)	14		
	休眠电流 (uA)	4		软件关断
最大发射功率 (dBm)	19.0	19.5	20.0	
接收灵敏度 (dBm)	-144	-146	-147	空中速率为 2.4kbps
空中速率 (bps)	0.3k	2.4k	18.2k	用户自行配置

$$\text{於模組喚醒時，可節省} \frac{14 - 4}{14} \times 100\% = 71\% \text{ 電量}$$

14

雲端即時監測平台

雲端即時監測平台

Python Flask架構網頁

- 地理資訊
- 即時監測數據
- 警戒值資訊
- 監測資料下載
- 預警訊息傳送

15

雲端主動訊息通知架構擴充

➢ 場址依時警報發佈流程

即時雲端平台

Real time data & Analysis (Python)

預設觸發動作

if this then that
Web Event Trigger Platform (IFTTT)

預警訊息至使用者

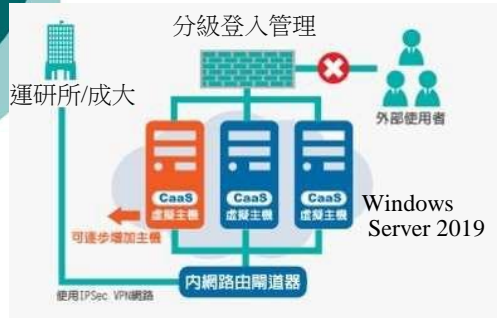
應用程式:

- LINE
- FB
- Gmail
- Tweet
- SMS Message

16

雲端整合平台精進與穩定度測試(1/2)

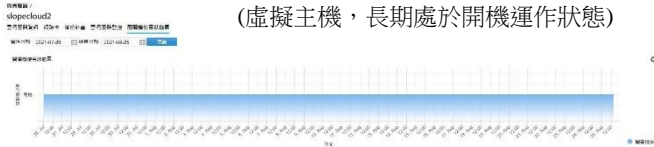
- 現存Python雲端平台架設位置→ 中華電信Hicloud Caas雲運算服務



1. 雲端借用採用Python Flask(輕量化網路架構)開發。
2. 在長期運作下，Windows 虛擬主機會變緩慢影響Python程式運作。

須排程雲端虛擬主機重新開機，並使用排程器依序打開Python程式

(虛擬主機，長期處於開機運作狀態)



17

雲端整合平台精進與穩定度測試(2/2)

- Hicloud Caas雲運算服務-主機開關機排程

- ✓ 配合Windows Shell功能:StartUp 可於開機後，自動開啟Python程式



排程每周日凌晨00:00-00:05關機，而後開啟虛擬主機

排程ID	名稱	狀態	排程時間	執行時間	下次執行時間	是否成功	備註
1	關閉雲端主機(slopecloud2)	成功	2021/02/22 00:00:00	2021/02/22 00:05:00	2021/02/22 00:00:00	成功	
2	開啟雲端主機(slopecloud2)	成功	2021/02/22 00:05:00	2021/02/22 00:05:00	2021/02/22 00:05:00	成功	

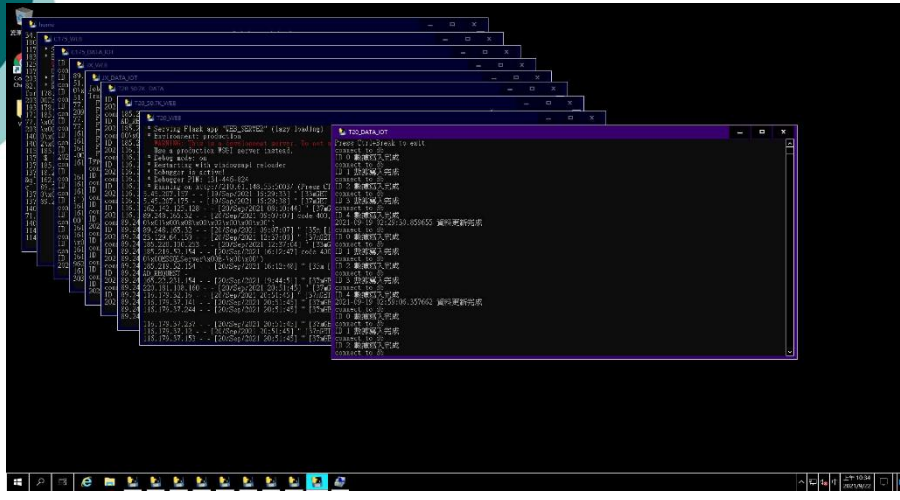
18

					九月 2021				
					1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12			
13	14	15	16	17	18	19			
20	21	22	23	24	25	26			
27	28	29	30						

星期日凌晨

遠端Windows主機定時開關機

➤ 主機開關機確認與Python程式自動啟動



單位使用帳號登入管理



交通部運研所港研中心
即時監測平台

網址: <http://slpocloud.com.tw>



台20線52K處即時邊坡擋土監測平台

帳號 密碼

還沒有帳號? 註冊新帳號

- 分級使用者權限: 1.即時監測諮詢查詢
- 2.歷史監測資料下載
- 3.使用人員權限

臺灣港研研究中心

朝使用者友善化方向調整

雲端平台即時資訊顯示說明(1/2) (台20線52k)

台20線52k處即時邊坡濺土監測平台

現在時間: 2021-10-19 10:11:07

監測配置

模組狀態

儀器編號	名稱	儀器狀態	名稱
ID1	2021-10-18 09:08:13	正常	雨量計
ID2	2021-10-18 09:08:54	正常	水位觀測井
ID3	2021-10-18 09:07:37	正常	傾斜儀
ID5	2021-10-18 09:08:37	正常	傾斜儀水位
ID6	2021-10-18 09:08:37	正常	傾斜儀水位

警告燈號

資料即時處理/顯示

雲端平台即時資訊顯示說明(2/2) (台20線52k)

➢ 歷史資料即時繪圖與詳細數值

詳細數值

可選擇資料長度

可選擇不同ID

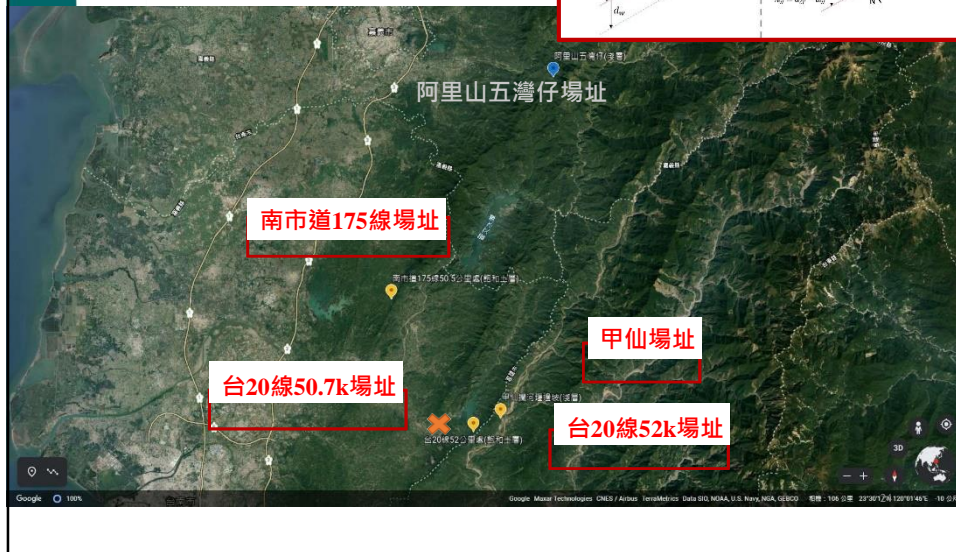
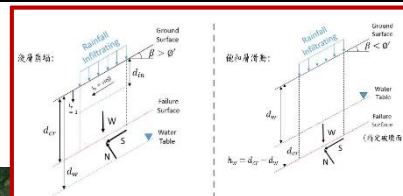
即時圖表呈現

雲端平台監測資料下載說明(台20線52k)

23

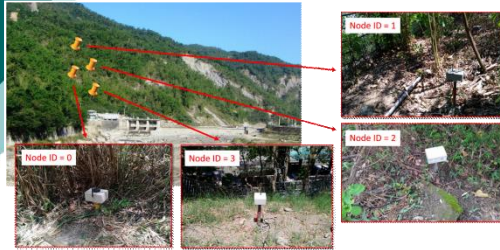
計畫應用場域說明

➤ 場域相對位置:

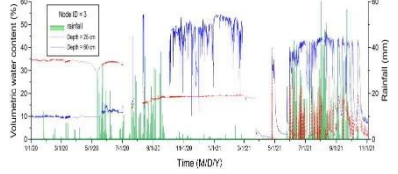
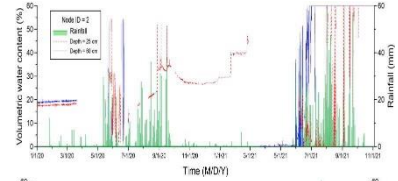
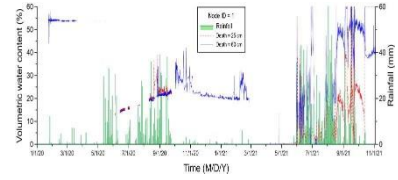
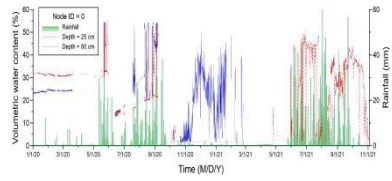


淺層崩塌_甲仙110年度監測成果(1/2)

➤ 監測儀器位置配置圖



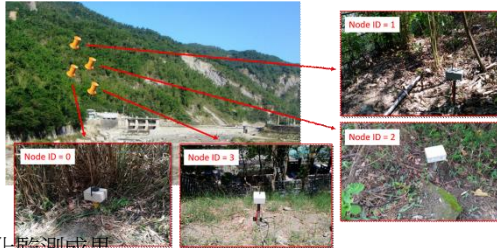
✓ 分層體積含水量監測成果



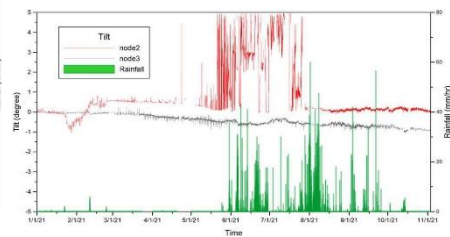
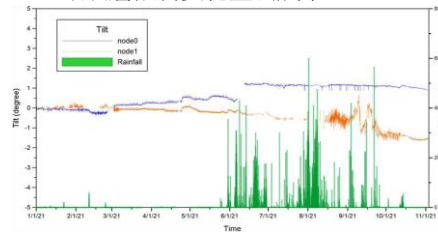
25

淺層崩塌_甲仙110年度監測成果(2/2)

➤ 監測儀器位置配置圖



✓ 土壤表層傾斜變化監測成果



26

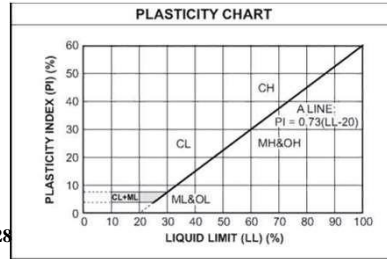
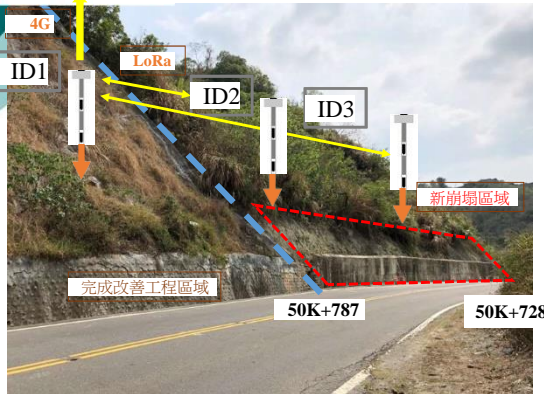
110年度新設淺層崩塌監測站_台20線50.7k

CHT IOT
雲端資料庫

➤ 液、塑限:

➤ 新設測點：台20線50.7公里處

PL (%)	LL (%)	PI (%)
25.4	33.0	7.6



✓ 統一土壤分類USCS

→ 屬**低塑性粉土(ML)**

➤ 監測模組於4/14完成裝設分層含水量計
ID1, ID2 & ID3 → 分層水分與傾角變化

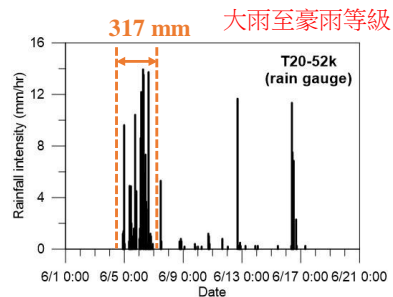
50.7公里處邊坡崩塌現場勘查說明(1/3)

➤ 崩塌現場照片比對 (6/5 20:00左右崩塌發生) ➤ 降雨延時50小時，累積雨量317mm。



(現場崩塌照片拍攝於6/7)

中央氣象局雨量分級
(www.cwb.tw)



名稱	大雨	豪雨		
		豪雨	大豪雨	超大豪雨
雨量	80mm/24h 或 40mm/h 以上	200mm/24h 以上 或 100mm/3h以 上	350mm/2 4h 以上	500mm/24h 以上

50.7公里處邊坡崩塌現場勘查說明(2/3)

➢ 新崩塌區模組裝設與破壞照比對

■ ID2 (Client)



50K+787
平均坡角55°



ID2模組
傾倒

太陽能板位置
(崩塌後)

風化程度較低
之岩盤



40cm

崩塌
剪動位置

破壞深度約40cm
崩積層厚度較薄

29

50.7公里處邊坡崩塌現場勘查說明(3/3)

➢ 新崩塌區模組裝設與破壞照比對

■ ID3 (Client)



50K+740
原始坡面坡角45°



太陽能板位置
(崩塌後)

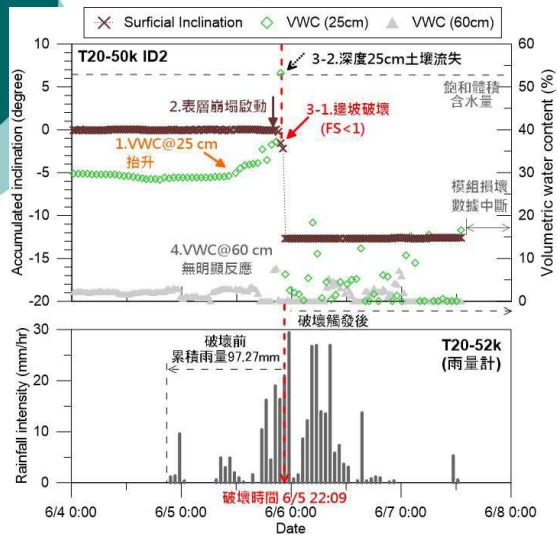
ID3模組被
土石淹沒

ID2&3崩塌後
模組外構狀況

破壞深度大於60cm
崩積層厚度較ID2位置厚

30

50.7公里處邊坡崩塌監測成果(ID2)

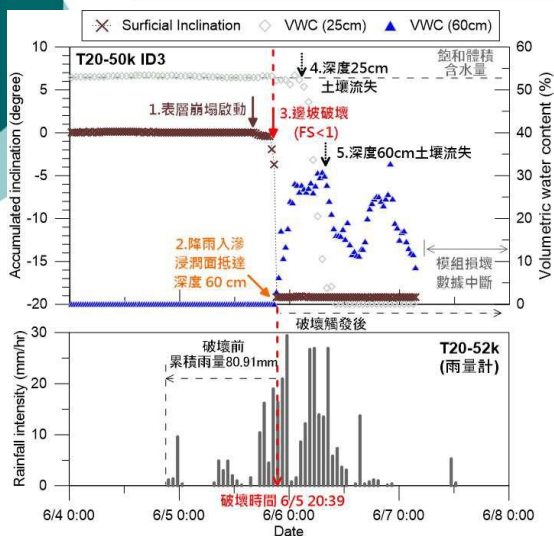


➤ ID2破壞後狀況



31

50.7公里處邊坡崩塌監測成果(ID3)



➤ ID3破壞後狀況



32

淺層崩塌現有監測配置 (台20線50.7公里處)

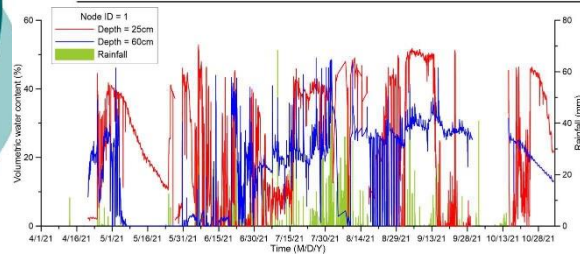
測點相對位置：台20線50.7公里處



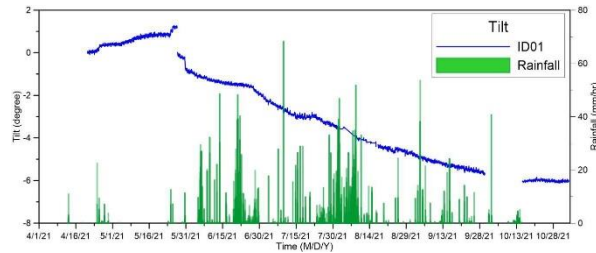
CHT IOT
雲端資料庫



✓ ID1土壤含水量與傾角變化



ID1人工鑽孔位置
重新回填安裝

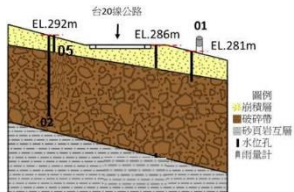


飽和層滑動_台20線52k監測成果

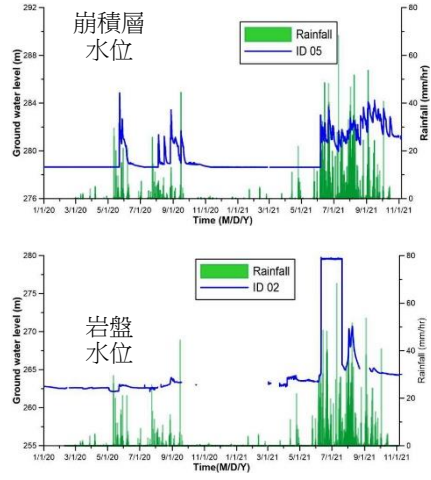
現場監測模組相對位置



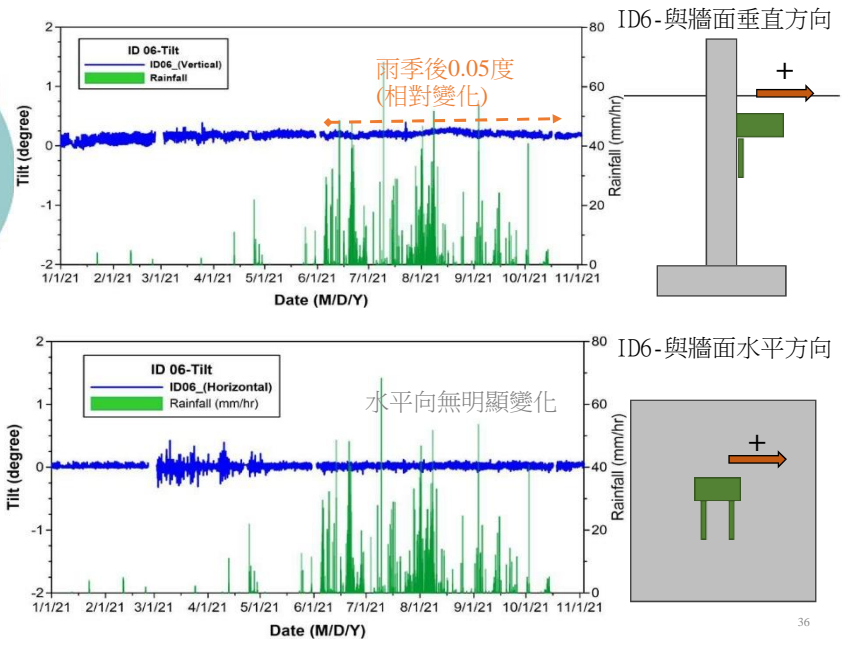
開孔式水位井對應監測目標說明:



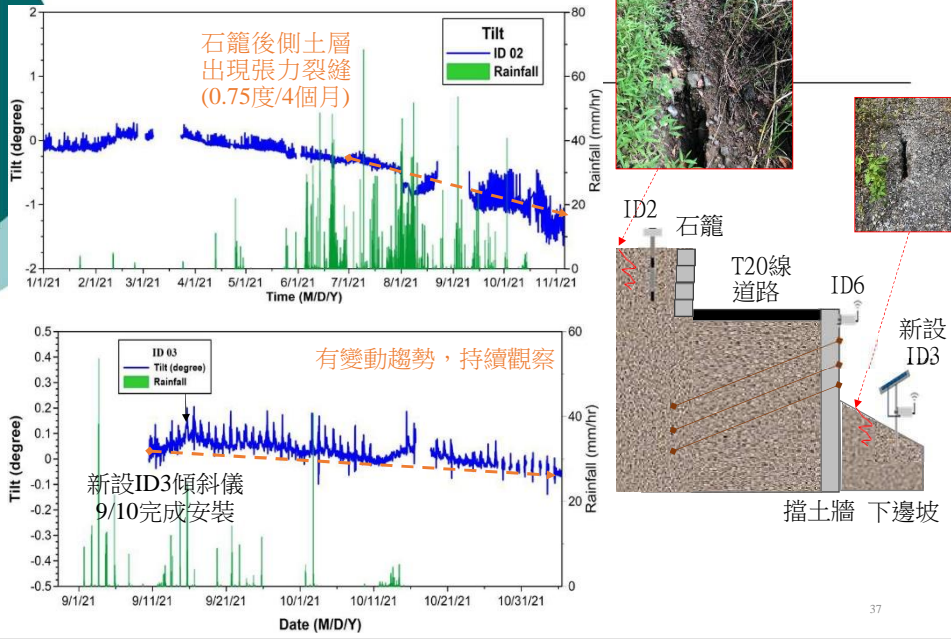
地下水水位監測成果:



擋土牆體傾斜



✓ 邊坡表層土壤傾斜



37

飽和層滑動 南市道175線監測成果(1/2)

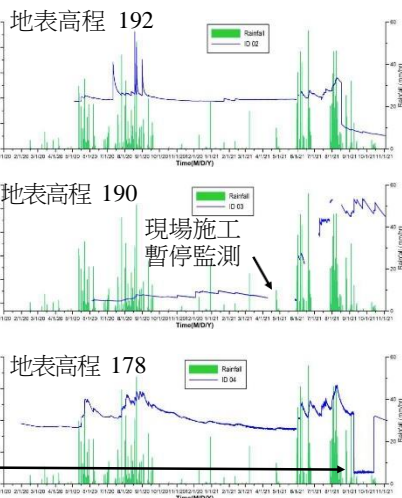
➢ 現場監測模組相對位置



ID3液位計模組人為破壞 ID4液位計被拔起



✓ 地下水水位監測成果:



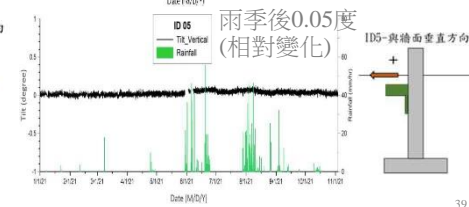
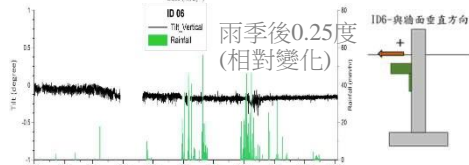
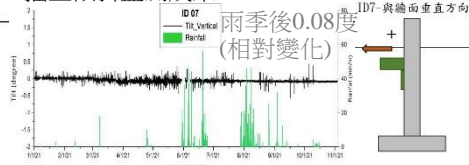
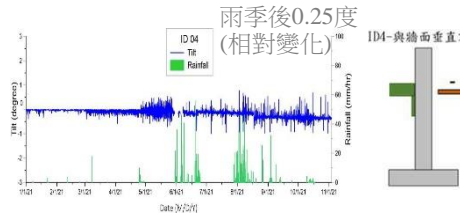
38

飽和層滑動 南市道175線度監測成果(2/2)

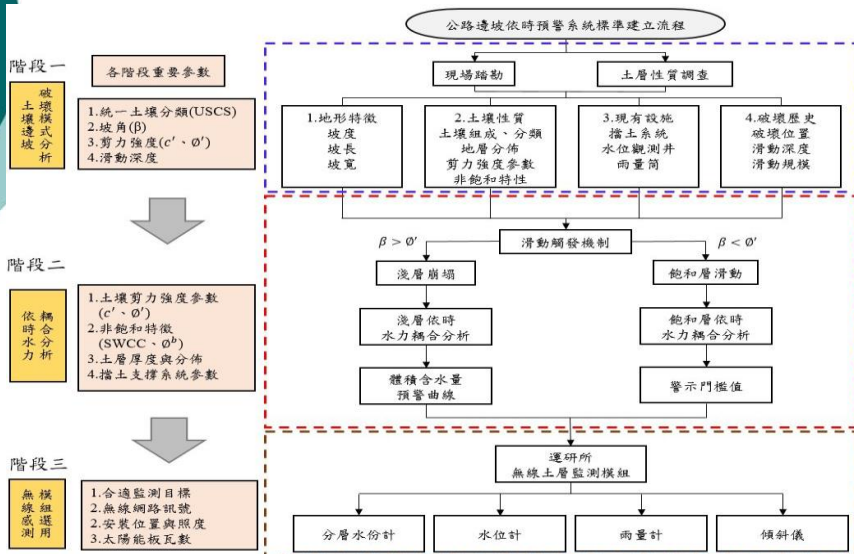
雨季下，垂直牆面傾斜儀
仍有變化，具滑動跡象

✓ 擋土傾斜監測成果:

➢ 現場監測模組相對位置



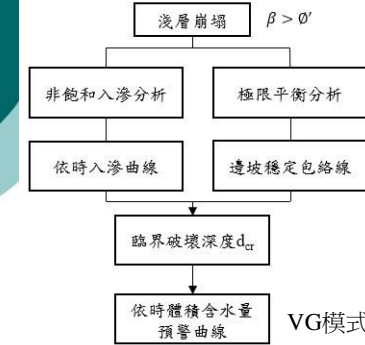
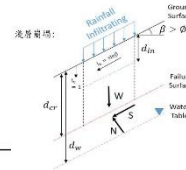
公路邊坡依時預警系統標準流程



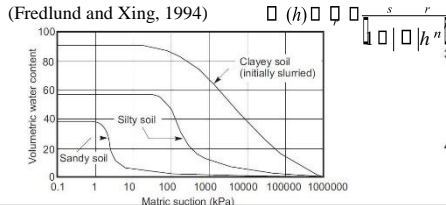
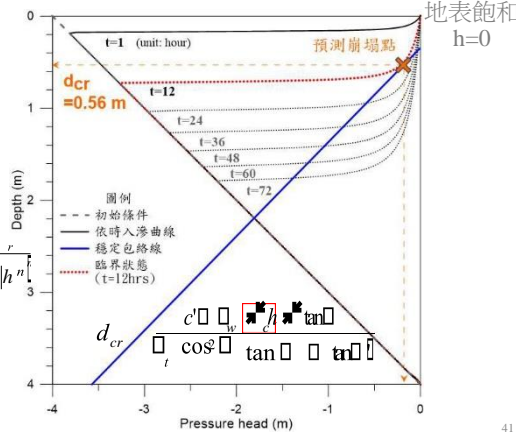
公路邊坡依時預警系統標準流程 (淺層依時水力耦合分析)

淺層水力耦合分析流程圖:

✓ 台20線50.7k淺層分析成果



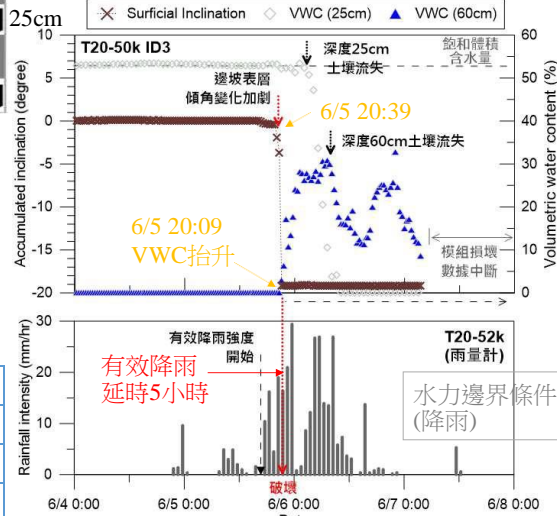
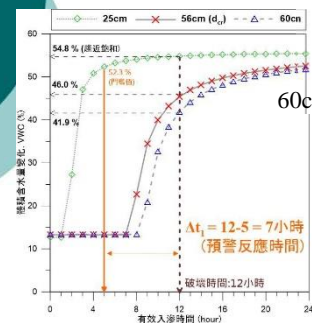
d_w (m)	γ_t (kN/m ³)	γ_w (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	β (deg)	ϕ^b (deg)
4	18.3	9.81	1.6	26	45	6.8



以體積含水量為預警指標驗證

依時入滲分析結果(模擬)

現場水力反應結果(現場監測)



預警反應時間比較:

預警 深度&門檻值	預警反應時間	
	模擬	實際崩塌發生
25 cm 52.3%	7小時	約5小時
60 cm 13.4%	2小時	約1小時內

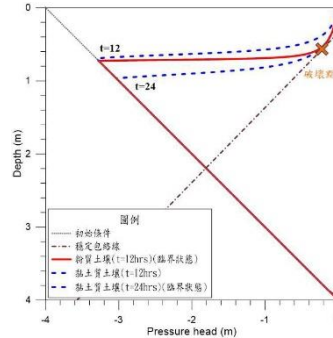
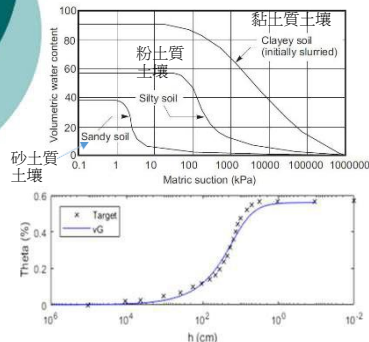
土壤類型 淺層崩塌耦合分析之影響

VG模式:

$$\theta(h) = \theta_s - \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{h}{h_0}\right)^n}$$

Van Genuchten (1980)

不同土壤之典型SWCC曲線 (Fredlund and Xing, 1994) ✓ 不同土壤類型對淺層耦合分析之影響



- 對於淺層崩塌($\beta > \phi$)，邊坡常時穩定由基質吸力提供額外剪力強度。
- 砂質土壤粒徑相較大，產生基質吸力質小，因此不在淺層崩塌機制之討論範圍內。
- 相同幾何條件與剪力強度參數條件下，對於台20線50.7公里處邊坡之土壤，粉土質土壤以入滲12小時達臨界狀態，黏土質為24小時。(僅討論對入滲影響)

典型SWCC曲線VG模式擬合成果

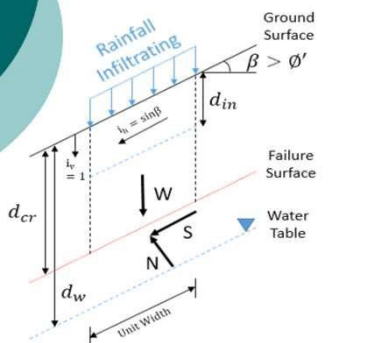
土壤類型	粒徑	θ_s	θ_r	α (1/cm)	n
砂土質土壤	粗 ↓ 細	0.38	0.02	0.018	1.26
粉土質土壤		0.56	0.02	0.032	1.65
黏土質土壤		0.91	0.02	0.1	5.05

坡角 β 對淺層崩塌耦合分析之影響

d_w (m)	γ_t (kN/m^3)	γ_w (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	β (deg)	ϕ^b (deg)
4	18.3	9.81	1.6	26	45	6.8

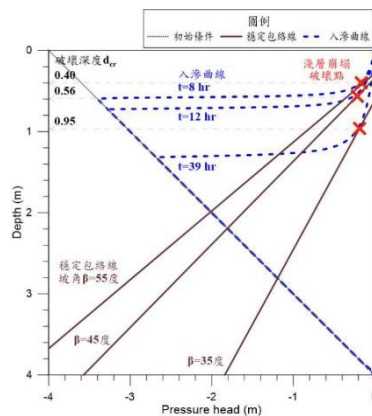
(台20線50.7公里處邊坡)

淺層崩塌極限平衡分析 (張文忠等人, 2016) ✓ 坡角 β 對淺層耦合分析之影響



張文忠等(2016)忽略平行滲流與入滲對單位重之改變:

$$d_{cr} = \frac{c' \cos^2 \phi' + \gamma_w h \tan \phi'}{\gamma_t \cos^2 \phi' \tan \phi'}$$



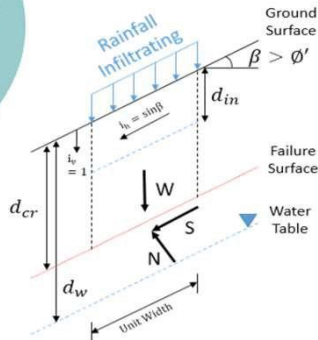
坡度 $\beta \uparrow$
→ 臨界破壞深度 d_{cr} 變淺，破壞預測時間變短

基質吸力摩擦角 ϕ^b 對淺層崩塌耦合分析之影響

(台20線50.7公里處邊坡)

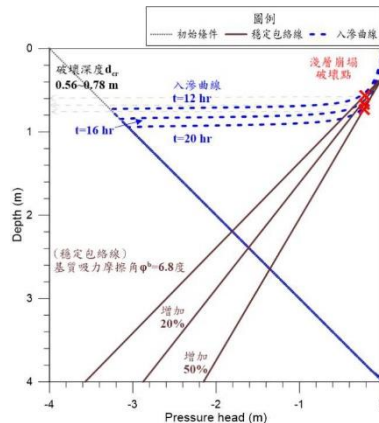
d_w (m)	γ_t (kN/m ³)	γ_w (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	β (deg)	ϕ^b (deg)
4	18.3	9.81	1.6	26	45	6.8

淺層崩塌極限平衡分析 (張文忠等人, 2016) ✓ 基質吸力摩擦角 ϕ^b 對淺層耦合分析之影響



張文忠等(2016)忽略平行滲流與入滲對單位重之改變:

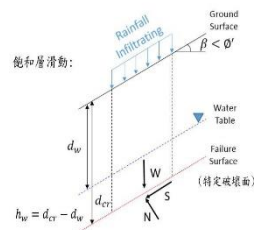
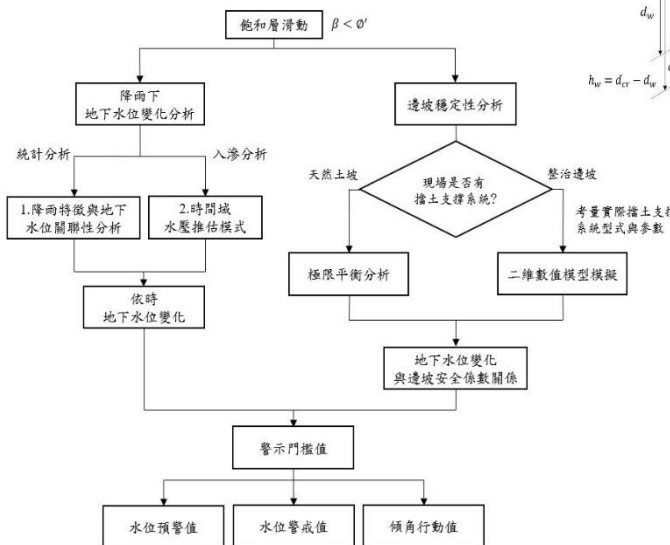
$$d_{cr} = \frac{c' \cos^2 \alpha + h \tan \alpha}{\gamma_t \cos^2 \alpha - \gamma_w \tan \alpha}$$



基質吸力摩擦角 $\phi^b \uparrow$
→ 臨界破壞深度 d_{cr} 變深, 破壞預測時間變久

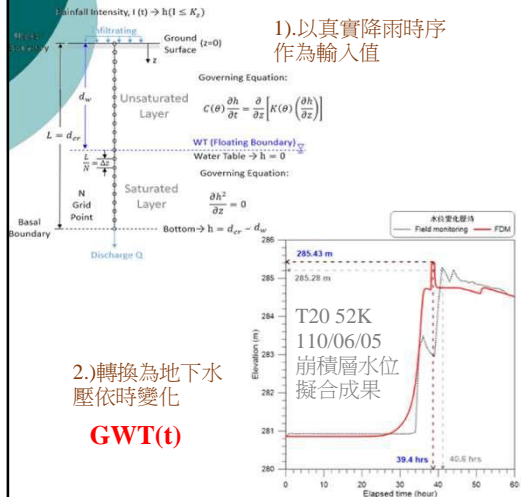
公路邊坡依時預警系統標準流程 (飽和層依時水力耦合分析)

飽和層水力耦合分析流程圖:

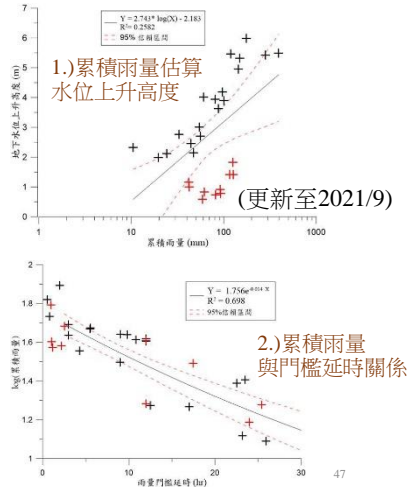


飽和土層場址地下水壓變化推估方法

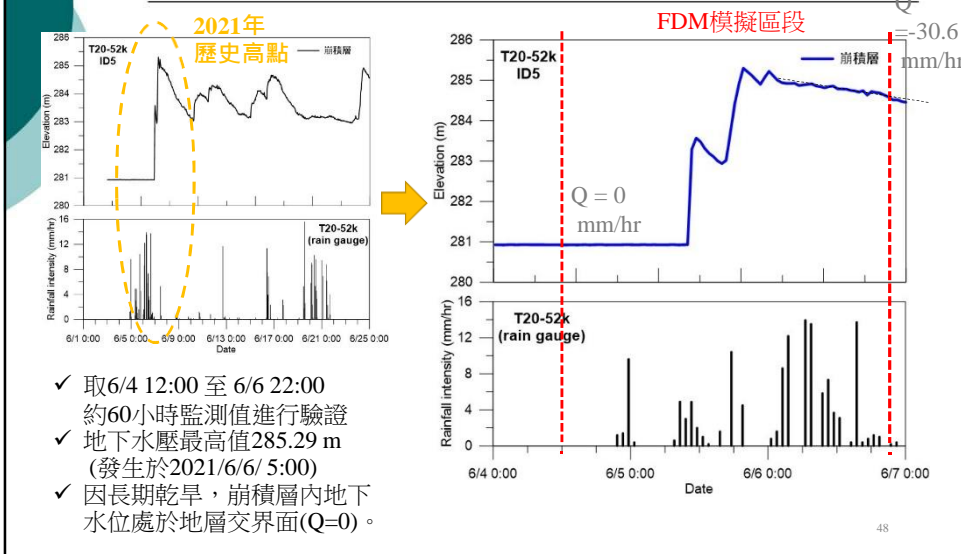
1. 解析解(以真實降雨事件率定模型)



2. 統計(以現場監測數據進行分析)

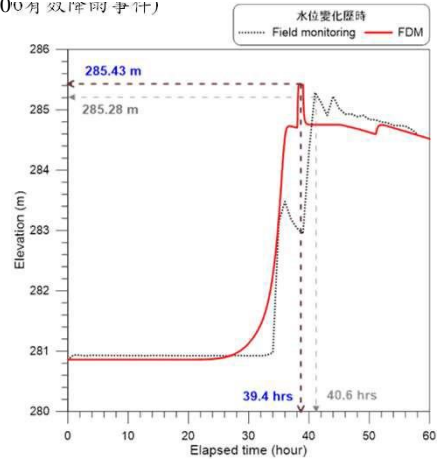
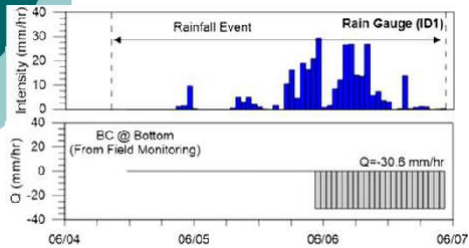


台20線52公里處崩積層水位與雨量變化 (110/06有效降雨事件)



時間域水壓推估模式驗證

台20線52公里處崩積層水位與雨量變化(110/06月 雙峰雨事件)



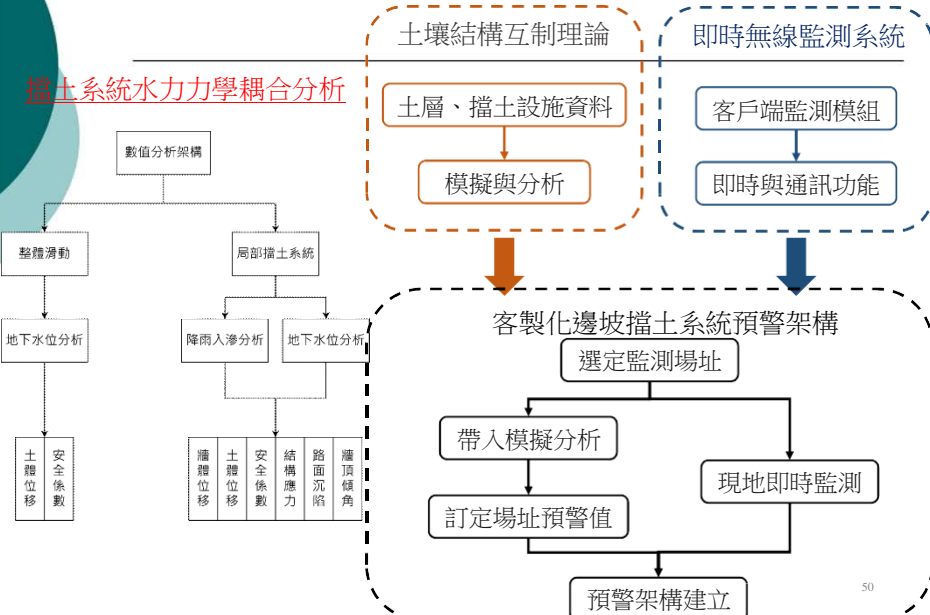
SWCC from 前期成果:

BC @ Top (From SWCC)
 $\theta_s=0.48, \theta_r=0.08, K_s=2.64 \times 10^{-4}$ cm/sec
 $vG_\alpha=0.00123, vG_n=10.5,$
 $Ceva=2.4 \times 10^{-3}$ cm/sec, $Q=8.0 \times 10^{-4}$ cm/sec
 (Q依現場實際水位變化估算)

✓ 水位誤差0.15 m, 預估時間誤差1.2小時

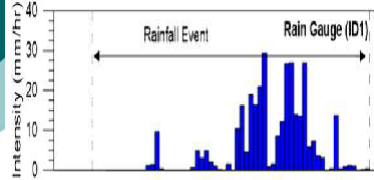
擋土系統預警架構及水力力學耦合分析

擋土系統水力力學耦合分析

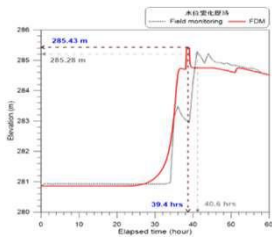


時間域水壓推估模式 與二維水力耦合數值分析整合(1/2)

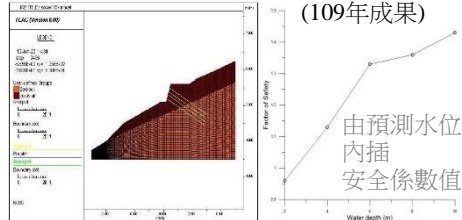
1. 即時雨量變化(土層無線模組)



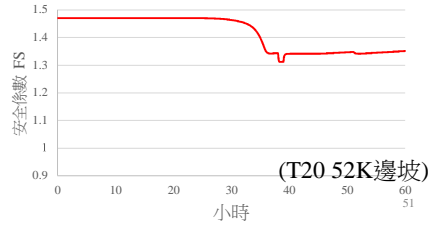
2. 預測依時水位高程(水壓推估模式)



3. 依時安全係數變化(由二維數值模型)



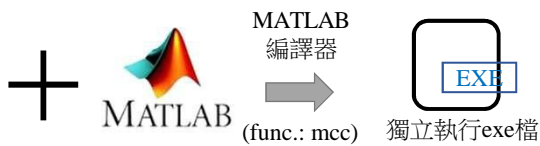
4. 依時安全係數變化(由二維數值模型)



時間域水壓推估模式 與二維水力耦合數值分析整合(2/2)

➢ 程式整合

- 1. 1D Richard eq. 水位推估模式
- 2. 安全係數與地下水位關係 FLAC



➢ 使用方式

✓ 輸出檔格式 **FS(t)**



hour	Elev_WT	Water_Depth	FS
1	0	280.8602531	11.1974689
2	0.02777778	280.8602531	11.1974689
3	0.05555556	280.8602531	11.1974689
4	0.08333333	280.8602531	11.1974689
5	0.11111111	280.8602531	11.1974689
6	0.13888889	280.8602531	11.1974689
7	0.16666667	280.8602531	11.1974689
8	0.19444444	280.8602531	11.1974689
9	0.22222222	280.8602531	11.1974689
10	0.25	280.8602531	11.1974689
11	0.27777778	280.8602531	11.1974689
12	0.30555556	280.8602531	11.1974689

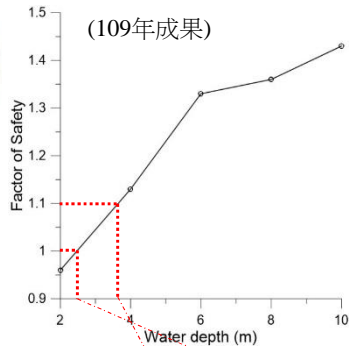
方便Python雲端平台整合使用

邊坡擋土系統數值分析架構: 場址警戒值訂定

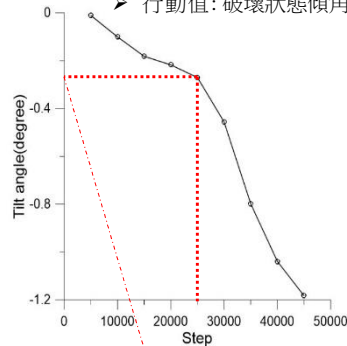
台20線52k:

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



地下水分析結果



地下水水位2米, 破壞時牆頂傾角漸變圖

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

53

雲端整合平台智慧化通知訊息

LINE群組警示訊息格式

即時運算檢核監測目標

(相關監測指標為109年度成果僅供參考)

表 6-5 台 20 場址參考監測指標整理

ID5水位	預警值	警戒值	行動值	ID6傾角
	地下水位 3.65 米	地下水位 2.5 米	牆頂傾角 0.27 度	

1. 對應邊坡 分析 安全係數 =1.1
2. 對應邊坡 穩定分析 安全係數 =1.0
3. 對應邊坡 穩定分析 安全係數 =1.0

✓ 52k平台警示訊息接收群組(掃描QRcode加入)



預警

警戒

行動

預警訊息格式

LINE Notify

54

結語

- ▶ 本年度計畫完成項目：
 - 現有監測場址維護與模組精進
 - 土層無線監測模組通訊與耗電優化
 - 雲端平台精進與穩定度提升
 - 水位變化與降雨特徵關聯分析
 - 時間域水壓推估模式驗證、數值分析整合
 - 公路邊坡依時預警系統標準流程

- ▶ 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。

 - ✓ 本年度以台20線50.7k監測場址崩塌監測成果可驗證淺層崩塌依時預警之架構。但飽和層監測場，今年雨季事件中，尚無明顯破壞跡象，可延長監測期程，以驗證飽和依時預警分析架構。

55

簡報完畢，敬請指教

56