

108-026-7B17

MOTC-IOT-107-H1DB001h

公路土壤邊坡滑動無線感測網路 監測系統研發



交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

108-026-7B17

MOTC-IOT-107-H1DB001h

公路土壤邊坡滑動無線感測網路 監測系統研發

著者：謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌
周仕勳、洪苾琦、邱心彥

交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發 /
謝明志等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，
民 108.02

面；公分

ISBN 978-986-05-8531-5(平裝)

1.公路管理 2.運輸系統

557

108000877

公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

著者：謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、洪芯琦、邱心彥

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04)26587176

出版年月：中華民國 108 年 2 月

印刷者：采峰實業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：250 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1・電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010800149 ISBN：978-986-05-8531-5 (全套:平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，

須徵求交通部運輸研究所書面授權。

公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

交通部運輸研究所

GPN: 1010800149

定價：250 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-05-8531-5	政府出版品統一編號 1010800149	運輸研究所出版品 編號 108-026-7B17	計畫編號 MOTC-IOT-107- H1DB001h
主辦單位：港研中心 主管：朱金元 計畫主持人：陳志芳 協同主持人：謝明志 參與人員：魏瓊蓉 聯絡電話：04-26587181 傳真號碼：04-26564418		合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計劃主持人：張文忠 協同主持人：黃安斌 研究人員：周仕勳、洪芯琦、邱心彥 地址：臺南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575~63128	
研究期間 自 107 年 02 月 至 107 年 12 月			
關鍵字：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			
摘要： 本計畫針對公路土壤邊坡可能遭遇之土層滑動破壞，進行解析法分析並搭配無線土層反應監測模組，測試發展適用於土層之解析法依時預警模式，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性。研究依滑動面發生於飽和土層之深層滑動及非飽和土層之淺層滑動，淺層滑動為延續前期研究成果，持續進行現地監測與模式測試，並精進現有模組；深層滑動以結合具嚴謹力學及通用性之解析法邊坡穩定分析及量測表層土層反應之無線監測模組，利用建立之場址水文與地質模型進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，以發展場址客製化具依時特性之公路土壤邊坡深層滑動預警架構。所開發之監測模組以廣為應用於物聯網之微機電感測系統，結合無線通訊與雲端儲存顯示技術，整合具無線通訊功能且可監測地表傾角、土中分層濕度、溫度及孔隙水壓之監測模組，形成分佈式深層滑動感測網路，作為相關防災作為啟動之準據。			
成果效益與應用情形： 1. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法土壤邊坡深層滑動分析架構，並以此做為公路土壤邊坡深層滑動預警模式之雛形。 2. 針對山區公路土壤邊坡深層滑動現象，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，研發低成本易安裝之表層無線監測網路。 3. 展解析法客製化之公路土壤邊坡深層滑動監測與預警技術，提升預警準確度。 4. 研究成果提供交通部、公路總局與臺鐵局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。			

出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
108 年 2 月	174	250	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 限閱 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密【限】條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
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: Development of Wireless Monitoring Modules for Soil Slope Failures of Highway			
ISBN(OR ISSN) 978-986-05-8531-5	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010800149	IOT SERIAL NUMBER 108-026-7B17	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-107 -H1DB001h
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jyh-Fang Chen PROJECT STAFF: M. J. Hsieh PROJECT TECHNICIAN: C.R. Wei PHONE: 04-26587181 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM : February, 2018 TO : December 2018
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Jong Chang CO-PROJECT INVESTIGATOR: An-Bin. Huang ADDRESS: No.1, University Road, Tainan City 701, Taiwan (R.O.C) PHONE: 886-06-2757575~63128			
KEYWORDS: slope failure, wireless sensing module, coupled hydro-mechanical analysis, time-dependent warning system, internet of things			
ABSTRACT: To improve the limitations of rainfall-based slope warning system, a new framework that integrated the hydro-mechanical slope analysis and wireless sensing module for field key properties is under development. Wireless sensing modules adopting micro-electro-mechanical system (MEMS) sensors with wireless communication components are integrated to monitor surficial ground inclination, water content profile, and pore water pressures. The target failure modes include both shallow slips in unsaturated zone triggered by infiltration and deep slides in saturated zone triggered by excess pore pressures due to seepage. For shallow slip site, soil moisture contents at two depths and surface inclination are monitored and process for warning. In deep slide cases, pore water pressure near the slip surface and rainfall characteristics are monitored. Two shallow slip sites have been monitored for over 2 years and the wireless monitoring modules have been upgraded. A deep sliding testing site has been setup with pore pressure, surface inclination, and infiltration process measurements. A coupled hydro-mechanical analysis is performed to model both the hydraulic and mechanical responses of slopes. Combining the real-time monitoring of pore pressure and and rigorous analysis, a customized, time-dependent warning system might be feasible. BENEFIT AND APPLICATION : 1. Develop a rigorous analytical method that integrates the failure mechanism and field material properties to predict the deep slides along roadside and provide theoretical basis of warning system. 2. Develop surface wireless sensing module for deep seated landslide warning. 3. Develop customized, time-dependent warning system and procedure to improve the limitations of current warning techniques. 4. The system potentially can be used by ministry of transportation, directorate general of highways, and Taiwan railways administration for hazard management.			
DATE OF PUBLICATION February, 2019	NUMBER OF PAGES 174	PRICE 250	CLASSIFICATION ☐ SECRET ☐ CONFIDENTIAL ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	VII
表目錄	XIII
第一章 計畫概要	1-1
1.1 研究計畫之背景、目的及重要性	1-1
1.2 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	1-7
第二章 研究方法及進行步驟	2-1
2.1 研究方法	2-1
2.2 國內外有關本計畫之研究情況	2-4
2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警	2-11
第三章 無線土層即時監測系統	3-1
3.1 系統架構	3-1
3.2 系統感測器	3-2
3.3 系統組成	3-9

3.4 無線土層監測模組.....	3-19
3.5 雲端顯示及運算平台	3-27
第四章 現有淺層滑動場址監測成果.....	4-1
4.1 甲仙攔河堰聯外道路西側邊坡.....	4-1
4.2 2018 年甲仙場址監測資料.....	4-3
4.3 西湖場址土層監測模組安裝測試.....	4-10
4.4 2018 年西湖場址監測資料.....	4-12
第五章 飽和層滑動場址監測與分析.....	5-1
5.1 監測場址背景資料.....	5-1
5.2 監測配置	5-5
5.3 監測資料與分析	5-6
5.4 二維水力力學耦合穩定分析	5-23
5.5 二維水力力學非耦合穩定分析.....	5-28
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議.....	6-2
6.3 研究成果與效益.....	6-2
6.4 提供政府單位應用情形.....	6-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 2-1

附錄三 期末報告簡報資料.....附錄 3-1

附錄四 工作會議紀錄.....附錄 4-1

圖目錄

圖 2.1 依時邊坡預警系統研究架構圖.....	2-2
圖 2.2 由有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)....	2-5
圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012) ..	2-7
圖 2.4 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004) ..	2-8
圖 2.5 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004) ..	2-8
圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)	2-10
圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)	2-12
圖 2.8 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995)	2-13
圖 2.9 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)	2-14
圖 2.10 非飽和滲流分析結果比較.....	2-15
圖 2.11 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....	2-16
圖 2.12 數值分析模型.....	2-22
圖 2.13 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....	2-22
圖 2.14 ID05 位置預測孔隙水壓歷時	2-23
圖 2.15 ID05 位置預測地表運動歷時	2-23
圖 2.16 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....	2-24
圖 2.17 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念	2-24
圖 2.18 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念	2-25
圖 2.19 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....	2-25
圖 3.1 系統架構示意圖.....	3-2
圖 3.2 電容式土壤水份計	3-3

圖 3.3 I ² C 連接方式.....	3-4
圖 3.4 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖	3-4
圖 3.5 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖	3-5
圖 3.6 SCA103T 傾斜儀.....	3-5
圖 3.7 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較.....	3-6
圖 3.8 傾斜儀類比電壓比例輸出標定.....	3-7
圖 3.9 沉水式液位計	3-7
圖 3.10 液位計校正結果.....	3-8
圖 3.11 雨量計器示值校正	3-9
圖 3.12 系統運作示意圖	3-10
圖 3.13 Wemos Lolin32 開發板	3-11
圖 3.14 WCDMA(3G)模組 SIM5320E.....	3-12
圖 3.15 LoRa 網路	3-13
圖 3.16 LoRa 無線傳輸模組.....	3-14
圖 3.17 時鐘與數據儲存模組.....	3-15
圖 3.18 ADS1115	3-15
圖 3.19 太陽能電源控制器	3-16
圖 3.20 太陽能板 (左 10W，右 20W)	3-16
圖 3.21 18650 鋰電池.....	3-17
圖 3.22 Wemos D1 mini Pro	3-18
圖 3.23 繼電器與內部構造.....	3-18
圖 3.24 伺服器端.....	3-20
圖 3.25 客戶端-雨量計	3-20

圖 3.26 客戶端-土層監測.....	3-21
圖 3.27 軟體流程圖.....	3-22
圖 3.28 土層監測模組外構.....	3-24
圖 3.29 防水電子合內部配置.....	3-24
圖 3.30 含水量計外構.....	3-25
圖 3.31 雨量計支架.....	3-26
圖 3.32 太陽能板支架.....	3-26
圖 3.33 水位計夾具.....	3-27
圖 3.34 雲端即時顯示平台.....	3-29
圖 3.35 過去 24 小時時雨量.....	3-30
圖 3.36 過去 72 小時電量變化.....	3-30
圖 4.1 監測模組相對位置圖.....	4-2
圖 4.2 監測站點周遭環境.....	4-2
圖 4.3 Thingspeak 即時顯示情況.....	4-4
圖 4.4 Node0 體積含水量量測結果.....	4-5
圖 4.5 Node1 體積含水量量測結果.....	4-6
圖 4.6 Node2 體積含水量量測結果.....	4-7
圖 4.7 Node3 體積含水量量測結果.....	4-8
圖 4.8 甲仙測站傾斜角監測結果.....	4-10
圖 4.9 傾斜角量測方向.....	4-10
圖 4.10 西湖邊坡實照.....	4-11
圖 4.11 西湖系統安裝位置示意圖 (Google Earth).....	4-11
圖 4.12 Node4 體積含水量量測結果.....	4-12

圖 4.13 Node5 體積含水量量測結果	4-13
圖 4.14 Node6 體積含水量量測結果	4-13
圖 4.15 西湖測站傾斜角監測結果	4-14
圖 5.1 場址位置圖	5-2
圖 5.2 區域地質圖(改自中央地質調查所)	5-3
圖 5.3 2013 年至 2017 年月平均降雨量	5-4
圖 5.4 道路上邊坡鑽探施工情形	5-5
圖 5.5 道路下邊坡鑽探施工情形	5-6
圖 5.6 監測儀器配置圖	5-7
圖 5.7 監測剖面示意圖	5-8
圖 5.8 ID 01 測站	5-8
圖 5.9 ID 02 測站	5-9
圖 5.10 ID 03 測站	5-9
圖 5.11 ID 04 測站	5-9
圖 5.12 伺服器端與 ID 05 測站	5-10
圖 5.13 ID 01 雨量監測數據	5-11
圖 5.14 甲仙雨量站時雨量	5-11
圖 5.15 ID 02 地下水位監測數據	5-12
圖 5.16 ID 03 地下水位監測數據	5-13
圖 5.17 ID 04 地下水位監測數據	5-13
圖 5.18 ID 05 地下水位監測數據	5-14
圖 5.19 降雨特徵與水位上升統計分析各項參數定義示意圖	5-15
圖 5.20 ID 02 與 ID 04 水位比較示意圖	5-15

圖 5.21 岩層累積雨量與水位上升高度關係圖.....	5-16
圖 5.22 崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖.....	5-17
圖 5.23 累積雨量與地下水位高度關係.....	5-17
圖 5.24 地下水位上升速率與體積含水量關係.....	5-18
圖 5.25 ID 03 體積含水量監測數據	5-21
圖 5.26 ID 05 體積含水量監測數據	5-22
圖 5.27 各測站傾斜角監測數據.....	5-22
圖 5.28 台 20 線 52k 數值分析模型.....	5-26
圖 5.29 入滲開始後 1.2E5 秒後孔隙水壓分布與流動向量	5-26
圖 5.30 入滲後垂直有效應力分布與位移向量.....	5-27
圖 5.31 入滲後水平位移分布	5-27
圖 5.32 ID 05 位置預測孔隙水壓歷時	5-28
圖 5.33 非耦合分析 ID03 下邊坡臨界滑動區域	5-29
圖 5.34 非耦合分析下邊坡水平位移分布.....	5-29
圖 5.35 非耦合分析地下水流軌跡.....	5-30

表目錄

表 5-1 場址土層參數.....	5-3
表 5-2 測站資訊表.....	5-7
表 5-3 ID 02 降雨事件整理	5-19
表 5-4 ID 05 降雨事件整理	5-20
表 5-5 分析所用土層參數	5-24
表 5-6 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數.....	5-24
表 5-7 非飽和水文參數.....	5-25

第一章 計畫概要

1.1 研究計畫之背景、目的及重要性

1.1.1 計畫背景

臺灣地區地狹人稠，使得山區與坡地仍有人類與經濟活動，山區道路除為當地居民對外聯繫主要途徑，更具有觀光與國防之重要性，而台灣受造山運動影響導致地質脆弱之坡地分佈廣泛，且颱風與地震發生頻繁，整體天然環境因素導致坡地崩塌無法避免，而山區公路邊坡崩塌時常導致人員損傷、交通中斷及經濟損失等。山區道路邊坡崩塌主因為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且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。本研究將針對公路邊坡可能遭遇之滑動面位於飽和面以下之深層滑動，進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線土層反應感測模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以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。

現有對於降雨引發崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法兩種。經驗法為根據以往崩塌資料及崩塌的內在因素如地形、地質與外在誘因如降雨資料等，以統計迴歸與資料處理等方法，歸納出簡易的關係式，作為未來評估崩塌之用。經驗法因具有簡單與單純性，因此較為廣泛地被使用，尤其是對區域性之坡地崩塌分析與預警機制之擬訂已行之有年，如以累積降雨量或降雨強度為基準發佈土石流警戒燈號即為典型之應用。但是此類經驗法因缺乏嚴謹之力學概念，且近年來受極端氣候常態化影響，降雨有趨於異常強烈之傾向，導致近期之崩塌案例其緩坡之崩塌面積擴大與陡坡之滑動面深度增加，限於過去類似經驗有限，經驗法則對此類邊坡崩塌之預測有其局限。

現有公路邊坡預警系統中少數案例已引進地表運動及土層滑動監

測文指標(廖瑞堂等, 2008)、另有利用 CCD 攝影機、雨量計、GPS、地震儀 (交通部運輸研究所, 2011)等監測系統, 但主要仍沿用坡地治理常用之降雨特徵做為預警依據 (交通部運輸研究所, 2014), 其並未將地形與地質特徵、場址入滲行為及破壞機制等因素列入考量。而以大區域降雨作為指標時, 無法考慮場址微氣候特性, 且因降雨為地滑發生之間接指標, 而警戒值多由過往案例統計而得, 缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下不同之破壞類型, 導致此類預警系統常流於過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, 因此廣為使用且具一定之準確性, 但因其具有相當不確定性, 導致應用與特定場址時其準確度常有不足, 作為區域防災預警尚為可行, 但對重要交通區段預警減災策略擬定常有不足之處。

而現有公路養護單位所用之時雨量及累積雨量警戒共有「預警」、「警戒」及「行動」3 個等級, 而以大區域降雨做為指標時, 無法考慮場址實際降雨, 且因其為地滑發生之間接指標, 警戒值多由過往案例統計而得, 缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下之極端降雨破壞類型, 導致此類預警系統常流於過於保守或無法提供反應時間。整體而言, 經驗法因具相當不確定性, 導致其特定場址之準確度不足, 無法完全滿足重要路段預警減災策略擬定之依據。解析法為以嚴謹的力學概念為基礎, 考慮地形幾何、地質構造、水文特性、地質材料力學行為之影響, 探討邊坡滑動機制發生原因、過程與影響範圍, 其流程具有通用性與客觀性, 且成果具有場址客製化之特性, 但此類分析需有詳細現地調查與土層資料, 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。

降雨引致公路邊坡破壞依其滑動機制可分為淺層與深層滑動, 本研究之淺層滑動定義為發生於非飽和區, 其機制為因降雨入滲使非飽和土壤基質吸力降低, 非飽和土壤強度降低而產生滑動; 深層滑動定義為滑動面發生於原飽和區, 其力學平衡因地下水上升及滲流影響, 使其孔隙水壓增加導致土壤強度降低, 且下滑力因增加滲流應力而增

加，導致邊坡滑動。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，淺層滑動之研究於前期研究已具初步成果，本研究以降雨引致深層崩塌為研究對象，依 Varnes (1978)之邊坡移動分類方法屬工程土壤之平面或圓弧滑動，水土保持局山崩分類方法之地滑，其為發生於崩積土壤或崩塌岩屑，且為以固體型態滑動之破壞類型。

現今對邊坡預警之趨勢為整合考慮地形、地質材料特性與水力行為之場址破壞機制分析，搭配即時監測相關引致滑動之土壤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，因此發展具備即時無線土層監測之模組化系統，對於推廣以解析法為依據之公路邊坡降雨崩塌預警系統具重要關鍵。

1.1.2 計畫目的

本計畫係依據行政院「104 年災害防救白皮書」課題七：建立潛在大規模崩塌防災警戒機制，結合具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。

本年度計畫為延續前期「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發」(交通部運研所, 2016)及 2017 年「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」研究成果，針對公路土壤邊坡可能遭遇到破壞面位於飽和土層之滑動崩塌，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，並以運研所發展中之表層無線監測模組為基礎，研發與解析法搭配之無線感測土層反

應監測模組，建立場址表層水文及力學無線感測網路，研發降雨引致破壞面位於飽和層崩塌之近地表監測預警模式之雛形，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，以利相關權責單位對此類災害預防及災後管理之決策參考。

運研所現有淺層滑動無線感測網路模組為依據淺層滑動特性所研發，具有廉價、快速安裝與無線傳輸等特性，但因飽和土層滑動機制與淺層不同，飽和土層滑動破壞面位於飽和土層以下，其場址具有坡角小於土壤有效摩擦角、土層厚度大於數公尺且現場地下水系發達或入滲速率快之條件，因此其監測之物理量與淺層滑動有所不同，本計畫以運研所發展之表層無線監測模組為基礎，加入開孔水位量測，結合飽和層滑動之機制分析，建立場址孔隙水壓及力學反應無線感測網路，發展降雨引致飽和層崩塌之監測預警模式之雛形。因研發技術基於力學理論，可依場址幾何與材料特性分析，建立客製化之監測預警系統。

本研究整體計畫執行之連貫性包括：

- (1) 持續精進發展中之公路土壤邊坡崩塌監測無線感測網路模組。
- (2) 不同土層邊坡滑動型態其特徵資料分辨、解析研判方法及監測配件設計為本計畫研發重點，而監測儀器仍需保有廉價、快速安裝與無線傳輸等特性。
- (3) 由前期進行之公路土壤邊坡淺層崩塌無線感測網路模組發展至土壤邊坡飽和層滑動監測，而飽和層及淺層的區分，係以飽和地下水位為分界，水位上下的破壞機制不同，需依不同破壞模式來做分析。本研究所研發之解析及監測技術將可選擇使用於常發生飽和層滑動之公路土壤邊坡。

1.2 研究範圍與對象

本年度研究針對飽和層滑動破壞類型，飽和層滑動之破壞面發生

於飽和土層，其力學平衡因地下水位上升及滲流影響，使其孔隙水壓與下滑力增加，引致土壤強度降低導致邊坡滑動。本計畫目的為結合嚴謹力學概念為基礎之解析法與邊坡無線土層監測模組，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、材料力學行為之影響，發展場址客製化飽和層公路邊坡降雨崩塌預警系統，利用建立之場址地質模型進行水力力學耦合(coupled hydro-mechanical)邊坡滑動分析，探討崩塌機制發生原因、過程與影響範圍，預測邊坡依時性反應，除作為表層土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據外，因可預測邊坡之滑動面、滑動歷時等，故預警精度、正確性、滑動時間及滑動體積皆可評估，可用來改善預警精度、建立依時預警模式與減災設施規劃等。

本計畫解析法分析以前期針對淺層滑動所發展之無限邊坡極限平衡與二維邊坡因降雨入滲引致破壞之數值模式，進一步考慮降雨引致之地下水力反應，考慮滑動面於飽和區，進行土層有效應力分析，發展具飽和層滑動潛勢場址之水力力學耦合分析技術，評估其滑動面、滑動歷時及水力反應，作為表層監測量測物理量與預警模式之依據。

計畫前期於阿里山公路五彎仔路段進行深層滑動無線監測模組測試，並完成搭配之水力力學耦合極限平衡及二維數值分析，但此場址因陸續完成深層排水井整治，其常時地下水位低於地表下 40m，因此短期內再滑動之機率大幅降低，且無法與前期 Huang et al. (2012)之現地觀測結果進行反算驗證，因此本年度除維持原有監測系統外，亦新增一飽和層滑動預警測試場址，搭配相關現地參數推估、水力力學耦合分析及監測模組佈設。

本計畫工作項目尚包括精進運研所現有淺層滑動無線監測模組及持續現地測試，其採用廣為應用於物聯網(Internet of Things, IoT)之微機電系統 (Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角及土中分層含水量之監測模組，形成分布式表層土壤感測網路。2017 年度主要精進項目包括電力供應方式、無線傳輸網路改善、量測資料顯示及系統簡化，現地測試則包括耐候性、靈敏度、模式驗證等。利用此模組之架構，加入降雨引致深

層滑動之指標物理量，考慮之量測量包括地表傾斜、降雨強度、入滲速率、地下孔隙水壓等，研發適用於土壤邊坡深層滑動且具低成本易安裝特點之無線監測模組

1.3 研究內容與項目

本計畫著眼於落實應用在非靜態水壓之分佈式監測技術之推廣，提供降雨量與地層滲流量之關係與實際水壓分佈，做為邊坡穩定分析及表層監測系統架設與解讀技術，達到現場預警功能。本年度計畫工作項目條列如下：

1. 針對運研所所已架設之公路土壤邊坡淺層崩塌監測無線感測網路模組 2 處場址，持續進行監測與現地測試，並精進現有模組。
2. 選定潛在深層滑動場址一處，進行土層水力與力學試驗，完成傳統極限平衡及有效應力數值分析反算與驗證。
3. 建立具深層滑動潛勢場址水力力學耦合解析法分析技術，撰寫分析軟體並進行分析測試。
4. 精進適用於土壤邊坡深層滑動之低成本易安裝之無線監測模組，並於選定場址進行監測模組原型測試。

針對本年度(2018 年)研究之內容與項目說明如下：

1. 現有淺層崩塌場址持續觀測與精進：目前運研所於前期計畫已建置甲仙攔河堰通達道路邊坡及國道三號西湖休息區邊坡兩處淺層滑動觀測場址，此兩場址為本研究團隊協助建置，2018 年度完成系統精進更新，包括現有模組間通訊、電源及遠端資料擷取與雲端顯示介面，目前均正常運作，本期持續觀測且進行分析模式測試驗證，以利於後續推廣。
2. 選定潛在深層滑動場址一處：本團隊於 2017 年計畫完成阿里山五彎

仔深層滑動場址相關分析並作為深層滑動監測模組測試場址，2018年度建立台 20 線 52k 深層滑動潛在滑動場址，進行相關土層水力與力學試驗，進行極限平衡及有效應力數值分析之反算與驗證。

3. 建立具深層滑動潛勢場址水力力學耦合解析法分析技術:以前期針對淺層滑動所發展之無限邊坡極限平衡及二維邊坡變形與穩定分析，將其延伸應用於降雨引致之地下水流況模擬，結合飽和土壤力學理論，分析滑動面位於飽和土層之深飽和層滑動，建立極限平衡分析流程及數值分析輸入流程。
4. 精進適用於土壤邊坡飽和層滑動之低成本易安裝之無線監測模組:以運研所原有低成本易安裝之深層滑動無線監測模組為基礎，精進模組間通訊、電源及雲端顯示介面，提供穩定可靠之深飽和滑動監測與預警模式之即時觀測值，並於選定場址進行監測模組原型現地測試。

1.4 預期成果、效益及應用

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

預期成果:

1. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法土壤邊坡深層滑動分析架構，並以此做為公路土壤邊坡飽和層滑動預警模式之雛形。
2. 針對山區公路土壤邊坡飽和層滑動現象，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，研發低成本易安裝之表層無線監測網路。
3. 展解析法客製化之公路土壤邊坡深層滑動監測與預警技術，提升預警準確度。

預期效應與應用：

1. 本計畫針對崩積土層進行解析法推論，發展具依時特性之公路土壤深層邊坡降雨滑動監測及預警技術，提升現有以經驗法為依據之預警模式準確度，以利災害管理。
2. 利用臺灣消費性電子系統整合之優勢，發展簡易土層監測模組，應用於地質災害監測與預警。

第二章 研究方法及進行步驟

2.1 研究方法

本研究與現有公路邊坡預警系統主要差異為發展以土層水力反應與地表位移為指標之預警模式，研發搭配之表層邊坡無線監測模組，取代傳統土中監測之鑽孔費時與昂貴之限制，監測系統具有快速佈設與單價便宜之特點。以物聯網常用之軟硬體，採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、運動量、土壤濕度、孔隙水壓等之監測模組，於數個邊坡反應靈敏之處佈設，形成分佈式表層土層反應感測網路。由於此類電子產品大量生產因此可大幅降低成本，且監測點位選定與分佈式監測感測模組反應詮釋一併考量，監測之結果亦可回饋解析與數值分析模式，此流程將可做為開發快速佈設且具依時特性之公路邊坡破壞預警技術，及相關防災啟動之準據。

本計畫針對之破壞類型為滑動面位於飽和土層之深層滑動，研究包括進行考慮水力力學耦合之土層邊坡穩定分析及無線監測模組開發，整合此二主軸，發展具依時特性之公路邊坡預警系統，研究流程如圖 2.1 所示，整體流程包括以解析與數值法為基礎之水力力學耦合分析，建立場址具依時特性之地表運動量(位移與傾角)及表層土壤水力反應，結合本計畫研發之簡易無線監測模組研發，即時監測土層力學與水力反應，修正水力力學耦合分析成果，並依修正結果推估滑動發生時間及滑動土體幾何性質，作為依時特性之場址客製化預警系統。

水力力學耦合分析包括考慮非飽合土壤中入滲之及飽和區孔隙水壓變化特點，考慮水力邊界條件，求解 Richard' s equation，以模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低及下滑力增加，考慮極限平衡分析即可進行與(Collins and Znidarcic, 2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測若破壞其可能破壞之時間，此為初步之解析成果，其

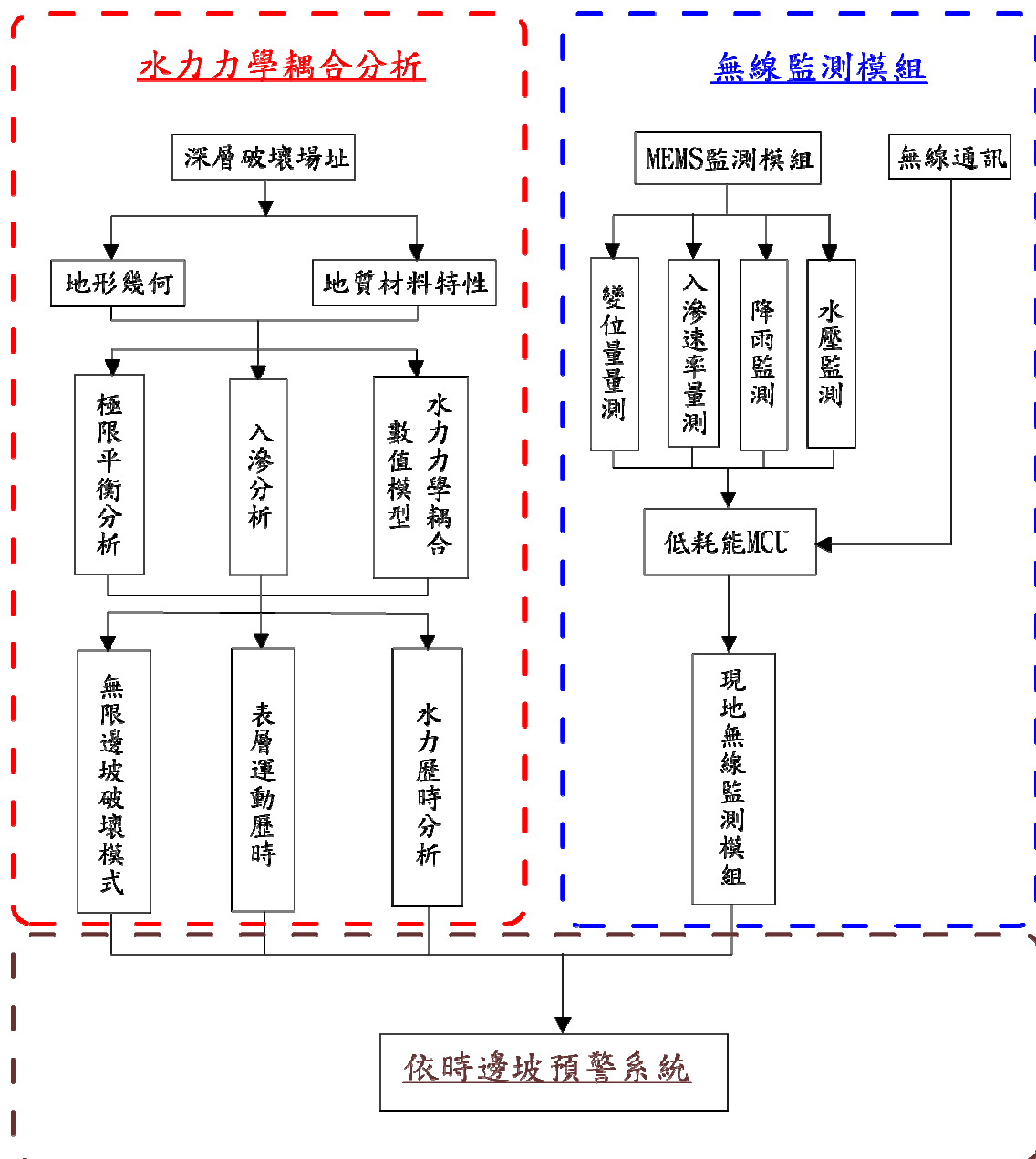


圖 2.1 依時邊坡預警系統架構圖

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有賴於複雜之數值模擬，本研究將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，水力分析之結果即時更新土壤有效應力及土壤勁度與強度，進行二維土層時域有效應力分析，以推估滑動土體於地表位移與傾角歷時。

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，鑒於以雨量監測準確度不佳，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、地表運動量、土壤含水量、入滲速率及孔隙水壓力之監測模組，形成分佈式表層土壤無線感測網路，入滲速率將由不同深度之土中含水量變化，利用入滲引起含水量增加而改變土壤介電係數之特性，量測入滲速率與含水量剖面，所量測之入滲速率將用於考慮入滲之極限平衡分析，以推估其可能破壞時間，降雨前基質吸力將由含水量結果及土壤特徵曲線推估，並作為數值分析之初始含水量依據。由水力力學耦合分析，可預測地表監測點之地表傾角與位移歷時，由監測之地表傾角與位移量可及時修正數值分析結果，並據以推估滑動之可能時間，作為依時預警之依據。

2017 年度研究以簡化之無限邊坡進行分析，建立水力力學耦合分析架構，進行簡易表層邊坡無線監測模組之研發測試，選定阿里山公路五彎仔段進行測試場址，進行全尺度分析、現地安裝與連續監測，作為發展依時預警架構之測試。但此場址因陸續完成深層排水井整治，其常時地下水位低於地表下 40m，因此短期內再滑動之機率大幅降低，因此需另尋合適場址進行理論驗證及硬體測試。

針對深層滑動機制分析，本年度之主要目標為完成水力力學耦合之邊坡極限平衡與數值模擬，關鍵為選定適合之研究場址。深層滑動測試場址須具備下列條件，其場址坡角小於土壤有效摩擦角、土層厚度大於數公尺且現場地下水系發達，而為進行分析模式驗證，以具有完整現地調查資料與觀測值之場址為佳，候選場址將於下一節說明。選定場址將進行考慮入滲之滲流分析，結合滲流分析與極限平衡分析可進行與(Collins and Znidarcic, 2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測可能破壞之時間，另以現地資料建立水力力學耦合數值分析模型，藉由更新土壤有效應力彈性模數及強度變化，預測不同位置地表位移量分布及位移時間歷時，作為無線監測模組佈設及由地表運動量或水力反應推算破壞時間。

2.2 國內外有關本計畫之研究情況

2.2.1 解析法邊坡分析

美國交通研究委員會(TRB, 1996)依邊坡破壞之材料種類及運動方式，將邊坡崩塌型態分類，依照滑動材料可區分為岩層(rock)、岩屑(debris)及土壤(soil)，而根據崩塌運動類型，區分為墜落(fall)、傾覆(toppling)、滑移(slide)、側移(spreads)及流動(flow)等五種基本類型，本研究標的為土壤滑移。Kurahashi (2008) 分析 1990~2004 年期間日本 1310 個公路崩塌災點，發現約有 90%的崩塌災害是因為降雨造成的，且 80%是表層破壞造成的崩塌。吳從龍(2009)由問卷調查方式得知地震及颱風豪雨來襲時對山區道路邊坡破壞最大，其次則是道路開闢的影響。

多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲會增加土坡的下滑力，減弱材料特性，在非飽和邊坡還會因基質吸力減少使剪力強度下降，因此水和土壤之耦合反應於邊坡穩定問題中不可或缺。經驗指出絕大部分因降雨而導致之崩積層坡地崩塌屬於淺層破壞(Cascini et al. 2010; Fannin et al., 2005)，破壞面深度約在 0.5 至 3m 之間，覆土壓力在 5 至 55kPa 之間。Cascini et al. (2010) 歸納前人的研究，將此類淺層邊坡崩塌分析分成破壞(failure)，破壞後(post-failure)與擴散(propagation)三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。Cascini et al. (2010)使用現地應力路徑(field stress path)的框架，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：

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

F_d 代表地層內之驅動力， F_r 為抵抗力， δ 為地層移動量。受到降雨入滲或地層內泉水之影響使得應力路徑達到破壞線，同時 $F_d \geq F_r$ 時即發生邊坡破壞，但是破壞發生後是否產生流動型地滑則控制於地層力學性質，地下水壓變化以及破壞時排水狀況的特性。大部分地滑式邊坡破壞屬於圖 2.2b 所示，破壞時 q 保持常數。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）。

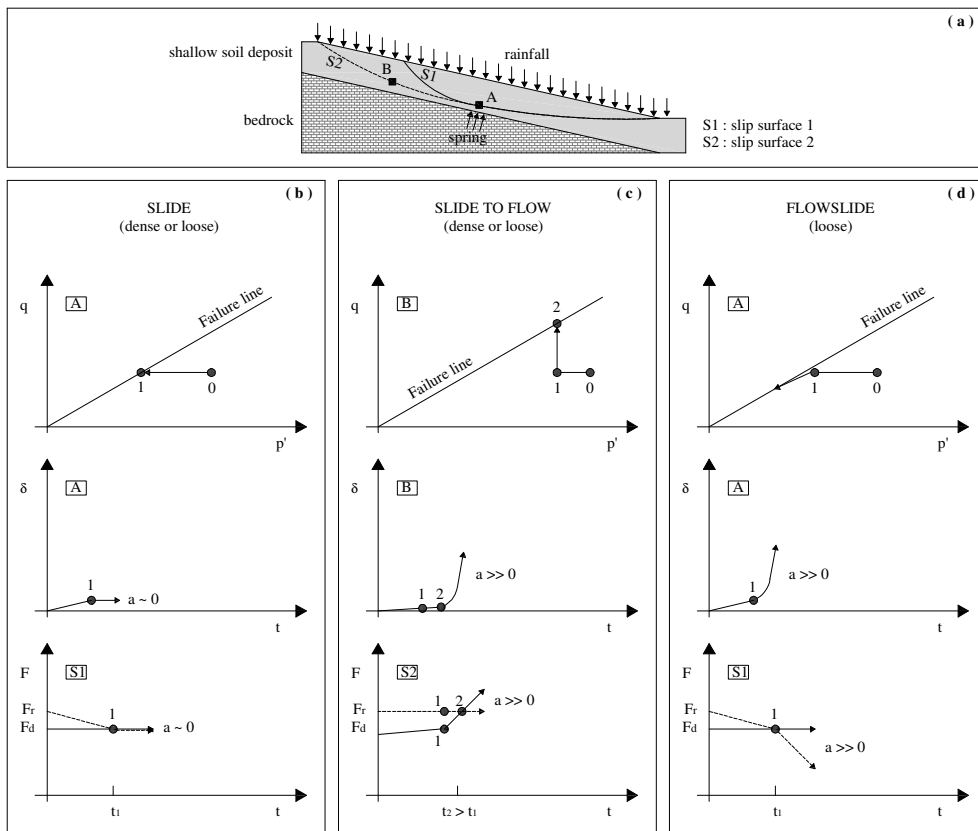


圖 2.2 由有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)

Huang et al. (2012) 以光纖改測技術進行阿里山公路五彎仔段分層水壓即時量測，其於 2009 年莫拉克颱風期間之觀測結果如圖 2.3 所示，

分層地下水位因強降雨顯著增加，其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)提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，所以降雨對邊坡穩定在不考慮邊界毛細現象之情況下沒有影響，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，孔隙水壓在邊坡內之分部會隨著水向下入滲至土壤內而改變。因此在分析非飽和邊坡穩定性時，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。

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)，可以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。

對於基質吸力降不顯著之粗顆粒土壤，其入滲行為(如圖 2.5 所示)與細顆粒顯著不同，此因其非飽和與飽和狀態下滲透係數差異不大，若邊坡坡角(β)小於土壤有效摩擦角，則其滑動發生於正孔隙水壓處(圖 2.5 之 D 點)，此為深層滑動之類型之一，無限邊坡深層滑動將以相近之概念進行推導。

對於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力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且力學計算中考慮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，適切模擬邊坡土層因降雨引致之破壞過程。

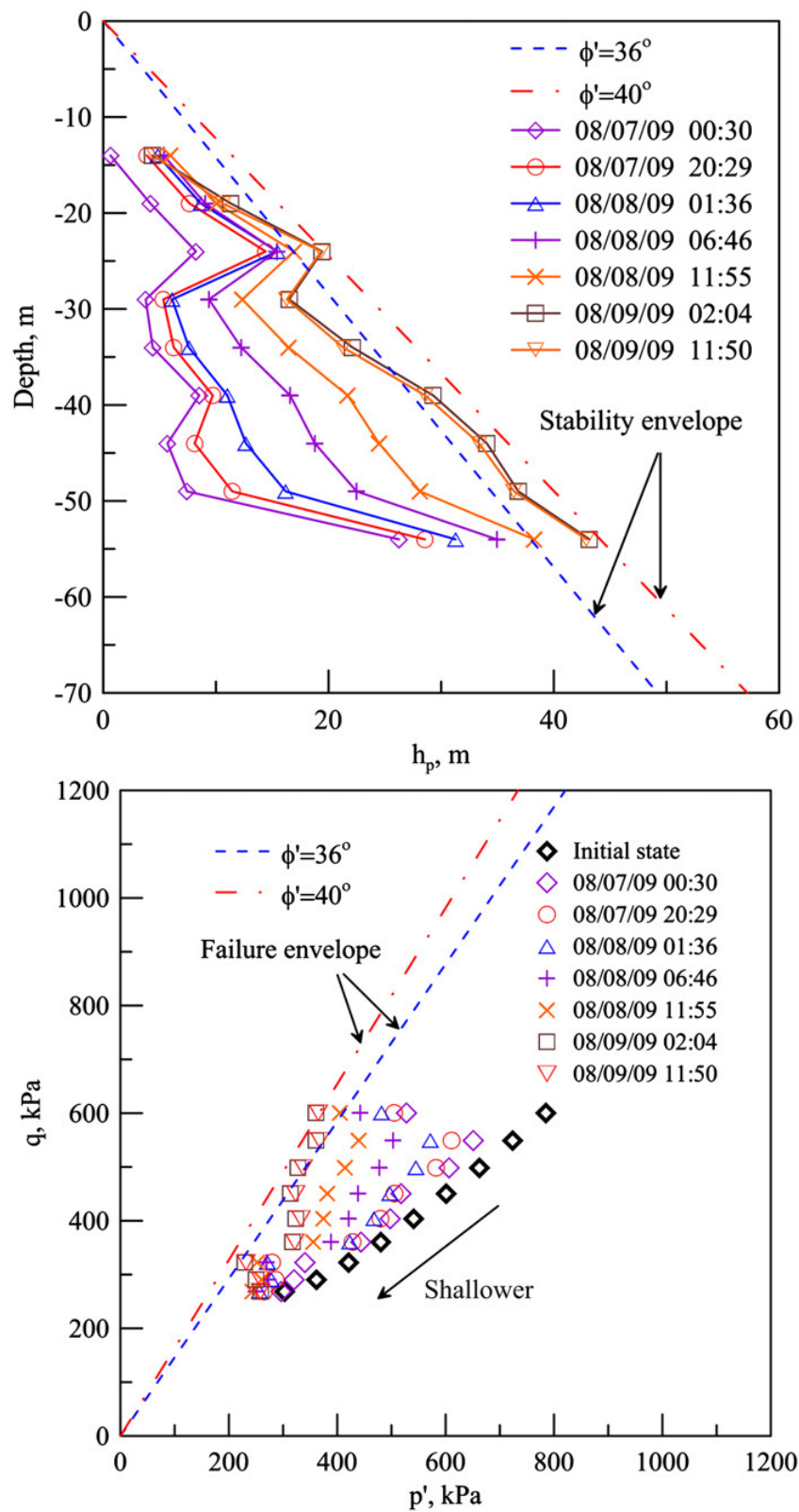


圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)

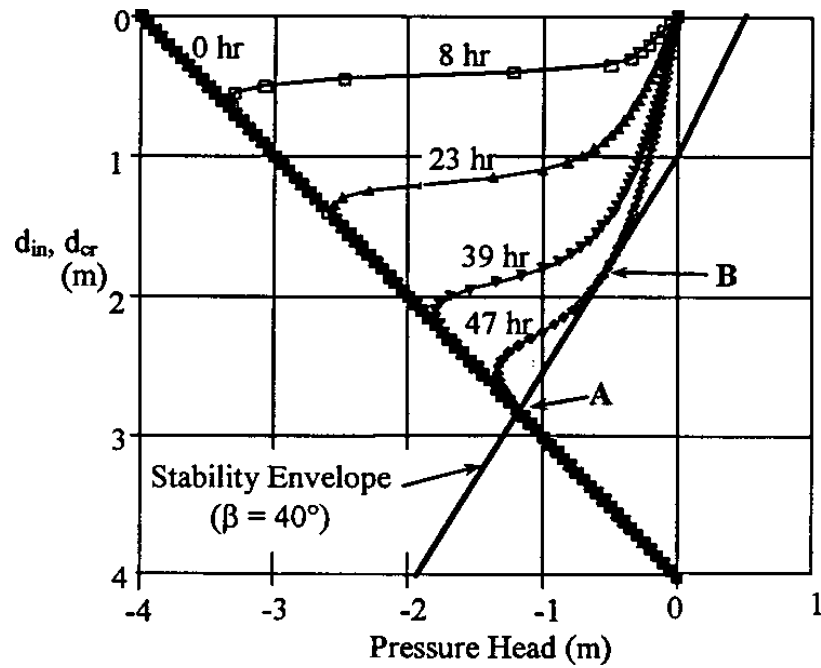


圖 2.4 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

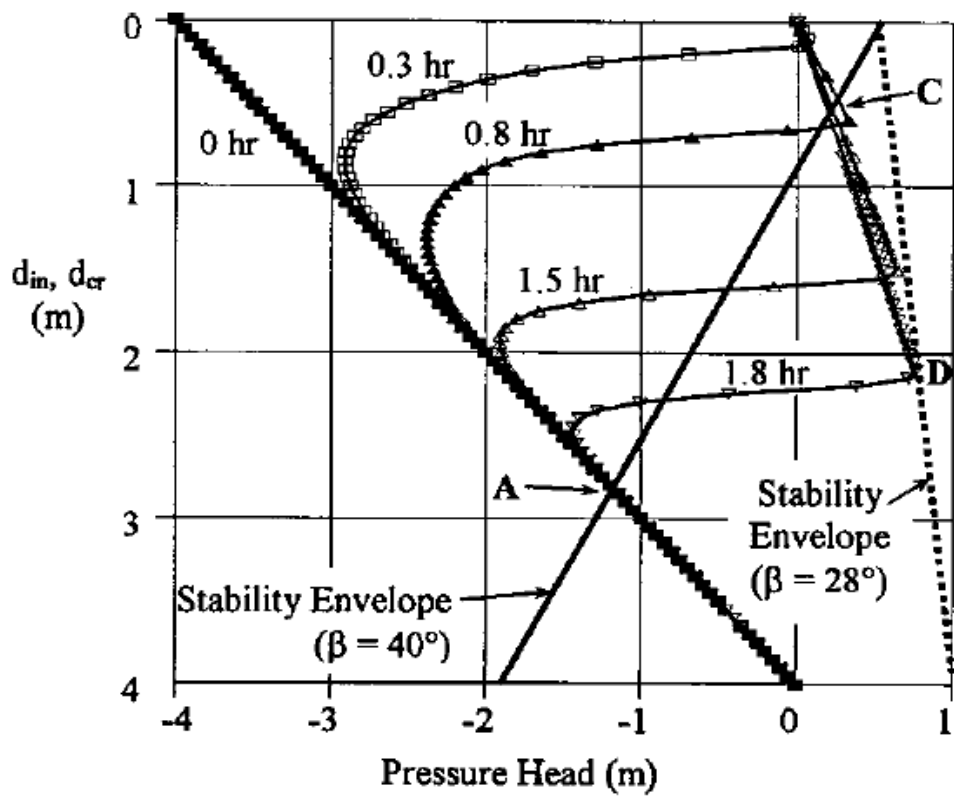


圖 2.5 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

2.2.2 邊坡監測預警

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

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

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

系統監測至破壞之時間不一，並無安裝位置之建議，對於非圓弧破壞其地表傾度並不顯著，且預警準則為經驗法則，缺乏嚴謹力學分析，仍有相當改善空間。

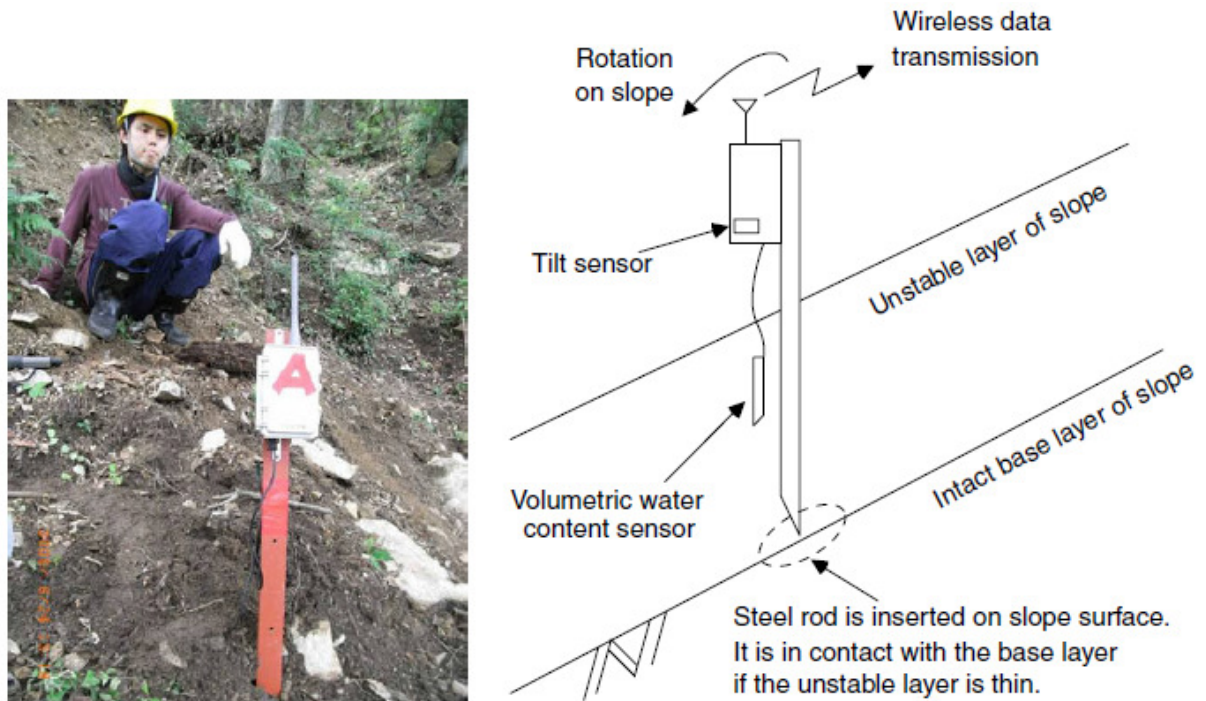


圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

李秉乾(2004)透過現地實測的結果，建議各項感測單元的傳輸方式以 TCP 為佳，盡量避免異質傳輸規格的整合，以減少系統不穩定性。而在相同的傳輸協定下，資訊傳輸介質可依地形需要進行不同的規劃，如 RS485、TCP 或是 802.11b 之方式。該研究亦指出山區道路邊坡監測系統在整體架構上，以監測路段現地資料的接收及整合為主要目的，經由無線傳輸技術將監測資料傳回資料接收中心並儲存於資料庫。所有資料經過加值與整合成資訊，即可反應現地邊坡的狀況，進行監測現況了解，整合預測破壞模式即可發展為具有即時應變能力的通報系統。

分布式無線感測器網路(Wireless Sensor Networks, WSN)是由一到數個無線資料收集器以及為數眾多的感測器(sensors)所構成的網路系統(Chong and Kumar, 2003)，元件之間的溝通採用無線的通訊方式，且具備低成本、低耗電、體積小、容易佈建，並具有感應環境裝置，可

程式化、可動態組成等特性，已開發於土木工程之應用如 Senera 之橋梁監測系統。現今物聯網(Internet to Thing, 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。為充分利用台灣於高科技產業之優勢，陳志芳等(2015)採用廣為應用之微機電系統(MEMS)感測器，發展可監測地表傾角(tilting)、淺層土壤濕度(soil moisture)以推估土壤基質吸力 (matric suction)之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分布式無線感測器網路，由於其可大量生產，可大幅降低成本，長期目標為建立模組化可拋棄式 WSN，以利於推廣。

由於監測點位選定與分布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數值分析，此結果將用於監測網路佈設，而監測之結果亦可回饋數值分析模式，本計畫將結合無線散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，以此流程建立場址不同階段預警值，做為相關防災作為啟動之準據。

2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警

道路土壤邊坡依其機制可分為淺層與深層滑動，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，本研究以降雨引致滑動面位於飽合土層之深層崩塌為研究對象，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，搭配水力力學耦合試驗了解降雨對土壤應力狀態之影響程度，以探討邊坡滑動機制，並作為依時預警系統之理論架構。

2.3.1 土壤含水量特徵曲線

土壤含水量特徵曲線(soil-water characteristic curve, SWCC)為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，含水量通常以體積含水量(θ)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 2.7，土水特徵曲線之斜率可視為土壤的儲水能力(storage

capacity)。非飽和土壤因基質吸力(matric suction, $u_a - u_w$)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。

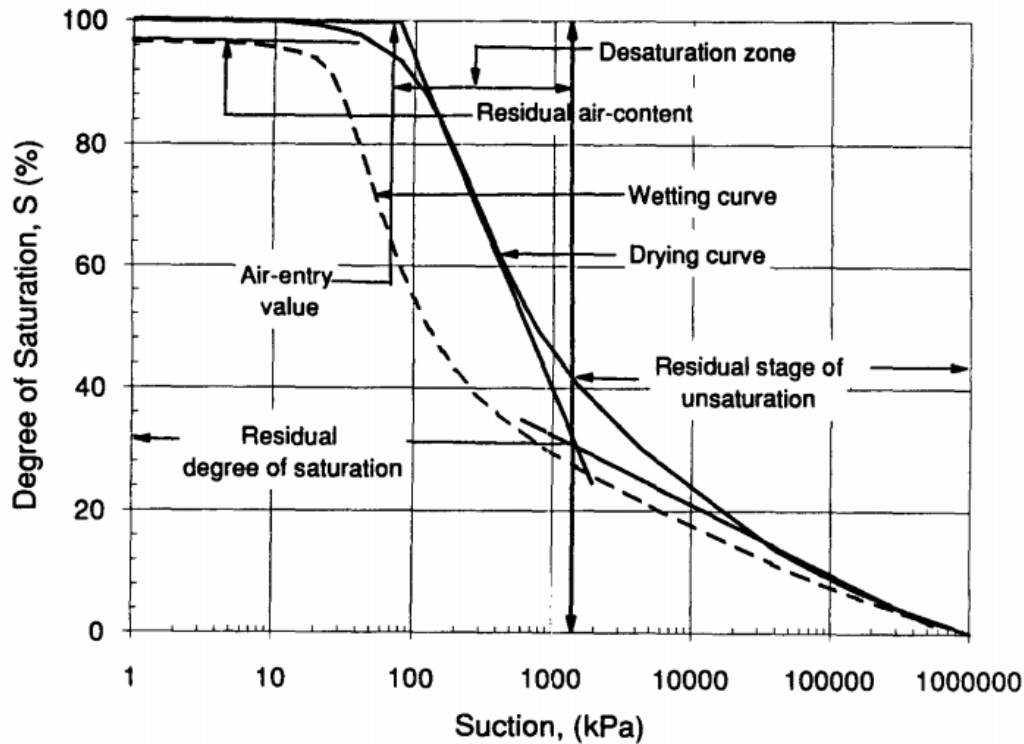


圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)

土壤含水量特徵曲線去飽和的過程可分為三個階段，邊界效應階段(boundary effect stage)，此階段幾乎所有孔隙都被水填滿，當基質吸力大於進氣值(air-entry value)，空氣開始進入土壤孔隙；接著進入轉移階段(transition stage)，土壤開始去飽和，含水量隨基質吸力增加而明顯降低；最後進入殘餘階段(residual stage)，此階段含水量受基質吸力的影響快速降低達到殘餘含水量(residual water content)。另外，在非飽和土壤中，滲透係數亦會受到基質吸力的影響，如圖 2.8 所示。

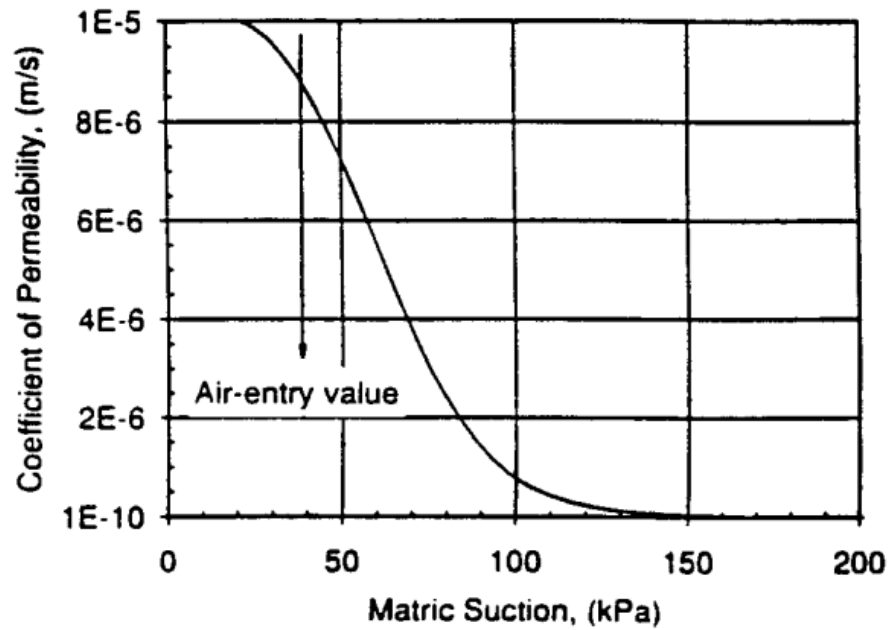


圖 2.8 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995)

2.3.2 非飽和滲流分析

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

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 2.9 為典型土壤之非飽和土壤特性曲線，非飽和滲流中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動之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控制方程式，Freeze and Cherry(1979) 假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在均質、均向土壤內之三維流體流動之控制方程式可以 Richard 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。

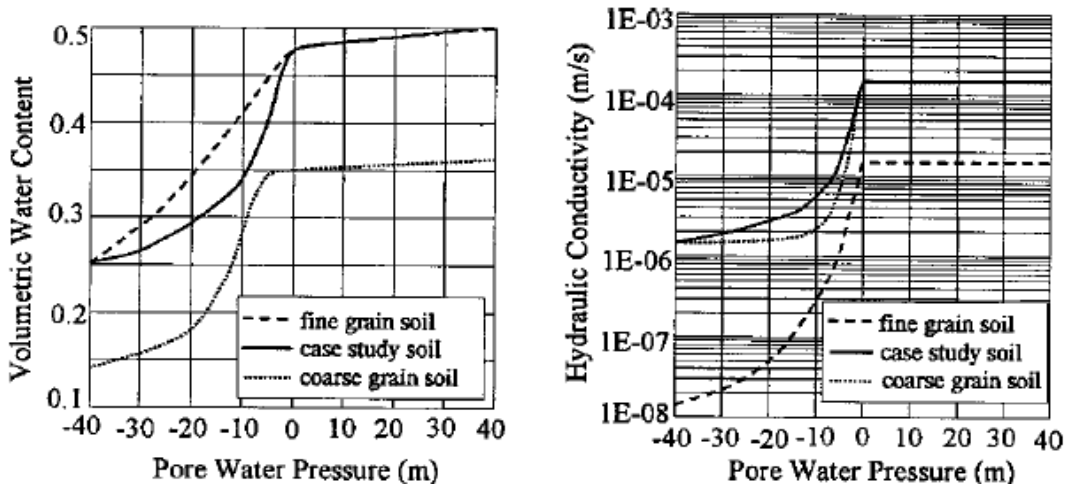


圖 2.9 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

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，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 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，以求解深度之 $1/400$ 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，可將式 2.4 式改寫為差分形式：

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

為驗證一維分析模式之可靠度，以邊界條件和 Collins and Znidarcic (2004)相同，上邊界之使用壓力水頭為 0，下邊界條件為排水邊界，地下水位在 4m 處，基質吸力分佈為靜基質吸力分布，使用「典型」細顆粒土壤之水土特性曲線，解得之滲流分析結果和 Collins and Znidarcic (2004)以二維數值程式 SEEP/W 之結果比較如圖 2.10，可以發現趨勢大致上相同，但數值上有差異，可能是因為 SEEP/W 係利用有限元素法進行二維分析，而本研究為利用一維有限差分數值方法進行分析。

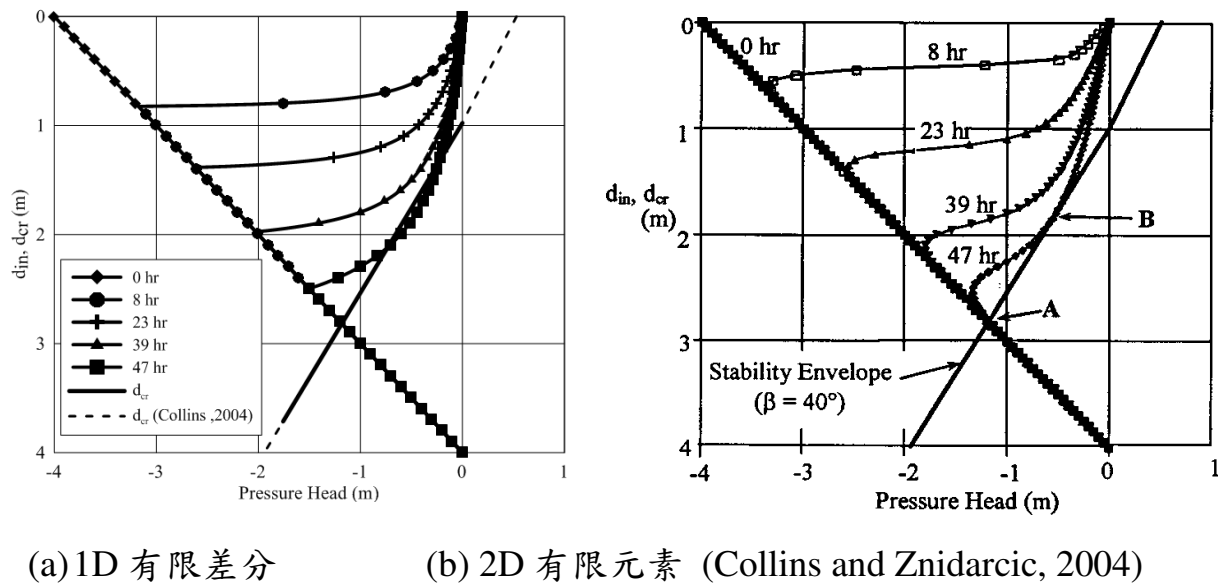


圖 2.10 非飽和滲流分析結果比較

2.3.3 無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

本研究參考 Collins and Znidarcic (2004) 降雨下之無限邊坡穩定分析概念，推導無限邊坡之水力力學耦合穩定分析，考慮一坡角為 β 之無限長邊坡，如圖 2.11，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。

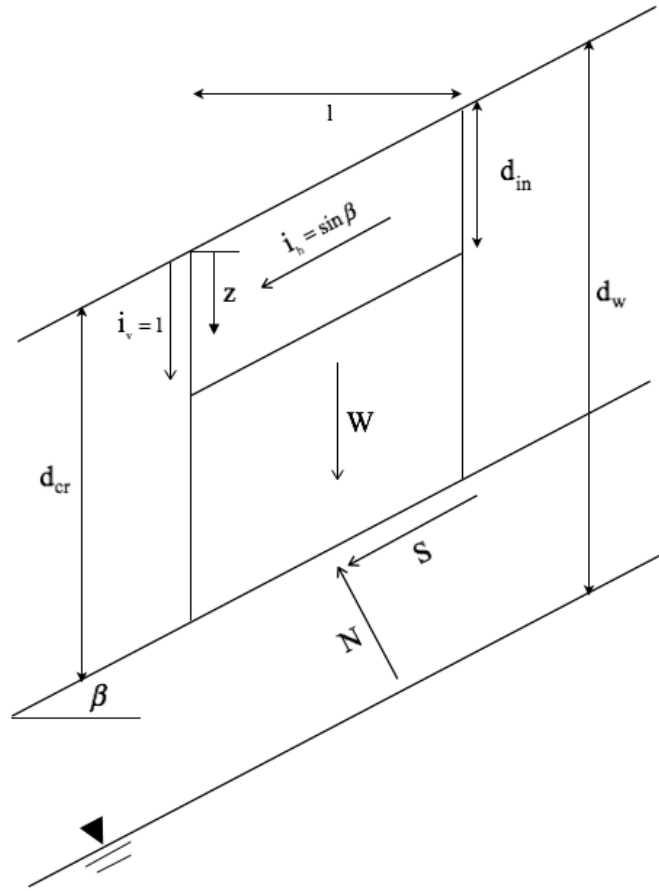


圖 2.11 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

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 $h_c = d_w - z$ 。

自重 W 可分解為垂直坡面 W_N 和平行坡面 W_S 兩個分量：

$$W_N = [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos \beta \quad (2.6a)$$

$$W_S = [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta \quad (2.6b)$$

其中 $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w$ 。垂直滲流力 S_v 可分解為垂直坡面和平行坡面兩個分量，可以式(2.7a)、(2.7b)表示：

$$S_{vN} = i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \cos \beta \quad (2.7a)$$

$$S_{vS} = i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin \beta \quad (2.7b)$$

水平滲流力 S_h 可以式(2.8)表示：

$$S_h = i_h \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \quad (2.8)$$

故滑動面上之正向力 N 及剪力 S 可以式(2.9a)、(2.9b)表示：

$$\begin{aligned} N &= [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos \beta + i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \cos \beta \\ &= [\gamma_s \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (2.9a)$$

$$\begin{aligned} S &= [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta + i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin \beta + i_h \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \\ &= [\gamma_s \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (2.9b)$$

除以 $l \cdot \sec \beta$ 可得到滑動面上之正向應力及剪應力，如式(2.10a)、(2.10b)：

$$\sigma = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos^2 \beta \quad (2.10a)$$

$$\tau = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (2.10b)$$

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

$$\tau_f = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.11)$$

可推導臨界滑動深度 d_{cr} 為：

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in} - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} \quad (2.12)$$

由 $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c \tan \phi^b$ 、 $h_c = d_w - d_{cr}$ ，可將式(2.12)改寫為：

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr} \\ &= \frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \underbrace{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲流}} - \underbrace{\frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'}}_{\text{水平滲流}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

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，可將式(2.10a)、(2.10b)改寫為：

$$\sigma = \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta \quad (2.14a)$$

$$\tau = \gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (2.14b)$$

所對應之安全係數(FS)為：

$$FS = \frac{c_t + \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.15)$$

當 $z = d_{cr}$ 時 $FS = 1.0$ ，則式(2.15)可轉換為：

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.16)$$

由 $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b$ ，可將式(2.16)改寫為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.17)$$

式(2.17)中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(2.17)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滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

式(2.13)中若忽略基質吸力、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，則其破壞模式即為深層滑動，相同架構可建立具依時特性之滑動機制，此部分將於研究初期推導完成，並以元素試驗加以驗證。

2.3.4 二維水力力學耦合數值分析

由於無限邊坡分析僅適用於一維案例，且無法得到位移分佈、大小與方向以及時間歷時，不利於監測點決定及位移量預測，因此本研究將進行結合土中入滲滲流分析及飽和土層非線性有效應力分析，利用相同的網格，於進行滲流分析時，將孔隙水壓傳遞給相同網格之土壤進行力學分析，滲流分析之結果將用於更新飽和土壤之彈性及強度，此程序可近似模擬水力力學耦合耦合分析。

為進行初始非飽和土層水力力學耦合分析，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)進行初始非飽和到飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且力學計算中考慮土壤孔隙水壓力改變對有效應力之影響，更新土壤彈性參數及強度，模擬初始非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程。

分析時以修正之 Mohr-Coulomb 彈塑性組構模式，考慮其剪力強度($\tau^{\max}$)為：

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w(u_a - u_w) \tan \phi + c' \quad (2.18)$$

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

$$P_c(S_w) = P_0(S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \quad (2.19)$$

式中 a 為土壤常數， S_e 為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (2.20)$$

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

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \quad (2.21)$$

式中 ρ_w 為水之密度， α 為土壤常數。

非飽和滲透係數亦以常用之 van Genuchten (1980) 準則表示，其與相對飽和度之關係為：

$$k_r = S_e \left[1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \quad (2.22)$$

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

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \quad (2.23)$$

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

以甲仙監測場址二維維水力力學耦合分析為例，該場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，以圖 2.12 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學

耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 2.13 所示，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，其值與深度相近，來源為靜水壓，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，ID05 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 2.14 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動，此可由 ID05 地表位移與傾角歷時(如圖 2.15 所示)與不同深度達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，上邊坡 ID05 預測於持續降雨入滲下於 2.2×10^5 秒(約 2.54 日)產生滑動，且此時土層均達到飽和，且地表於 1.5×10^5 秒(約 1.6 日)前開始有顯著傾角變化，且傾角為先正(順時針)後負，此因滑動面由淺層轉為深層，深層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

2.3.5 邊坡依時預警架構

依時性邊坡預警系統可分為無限邊坡及二維水力力學分析，無限邊坡之依時預警以下列分析結果為例，若不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 2.16 所示，破壞發生於地表飽和後 42 小時，滑動面深度為 1.5m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果或 VG model 推估，在 0.75m 深度，以式 2.16 推估之破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.17 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 0.75m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.17 推估。

而二維案例以甲仙場址上邊坡為例，由 vG model 可推估其體積含水量變化，深度 1.5m 處含水量歷時如圖 2.18 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，因此其數值較不可靠，此乃因所選場址土層厚度僅約 2.5m，

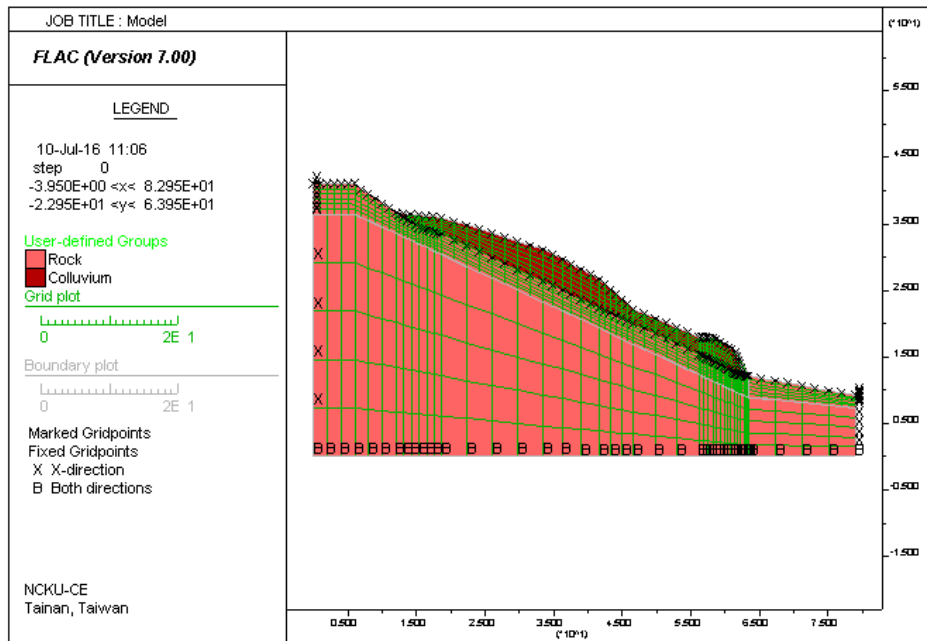


圖 2.12 數值分析模型

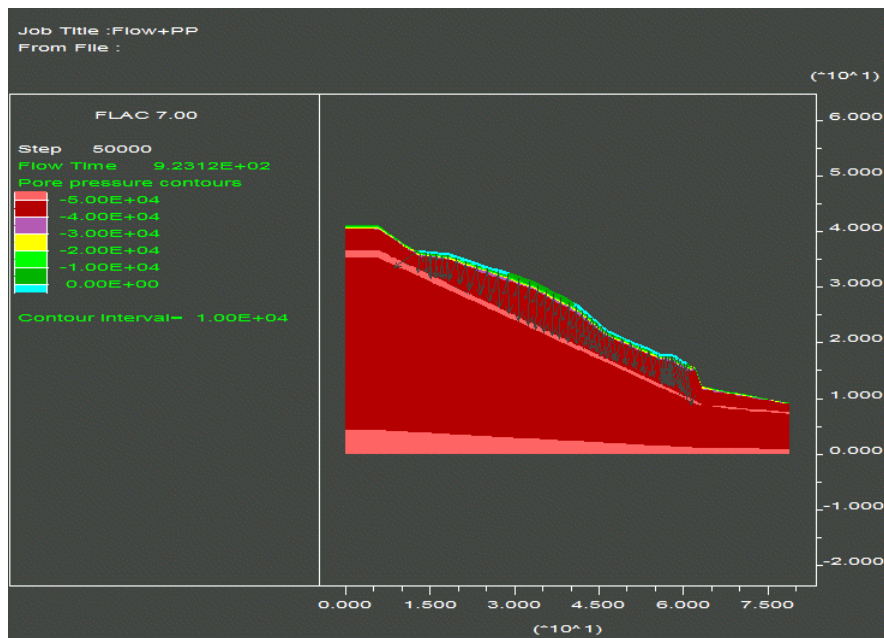


圖 2.13 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量

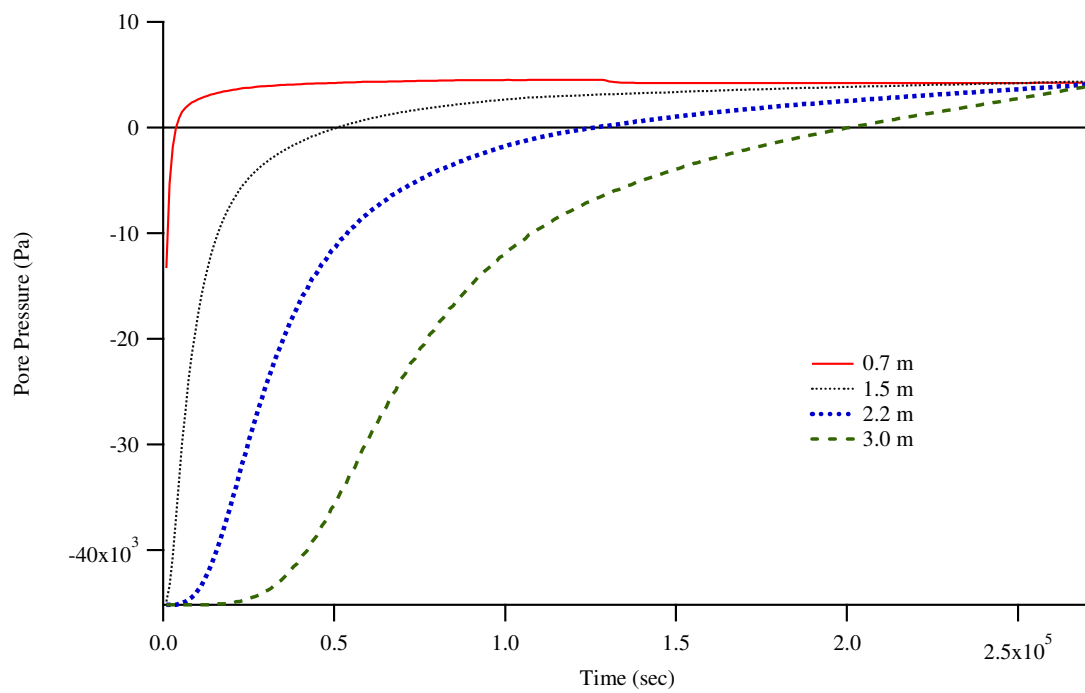


圖 2.14 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

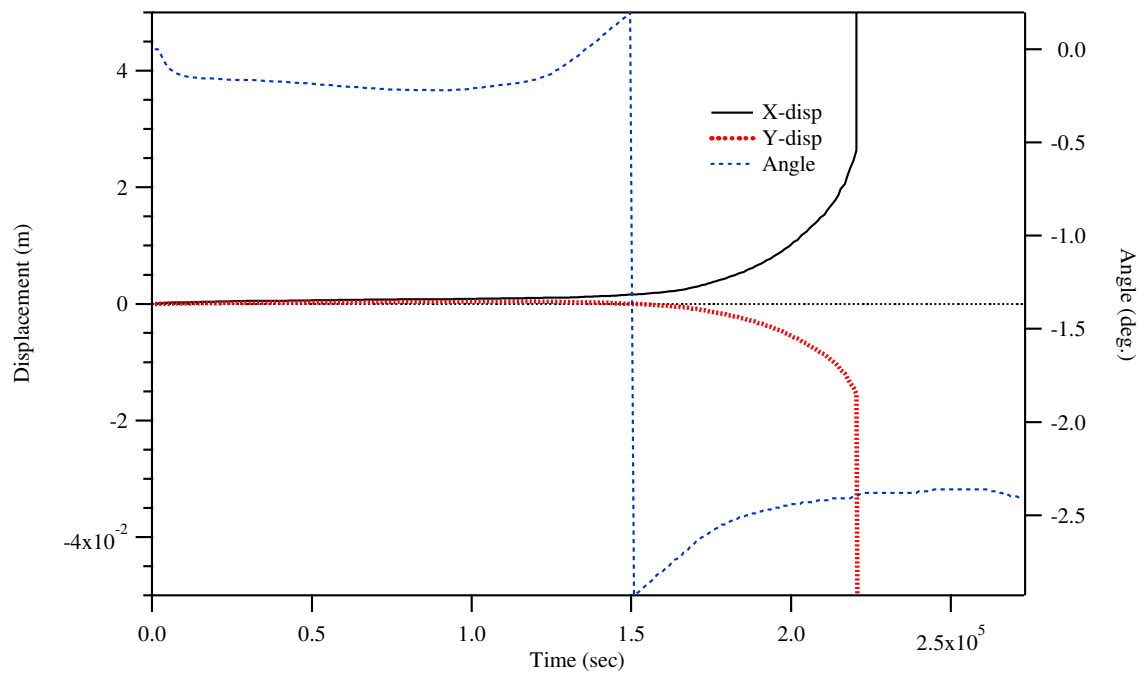


圖 2.15 ID05 位置預測地表運動歷時

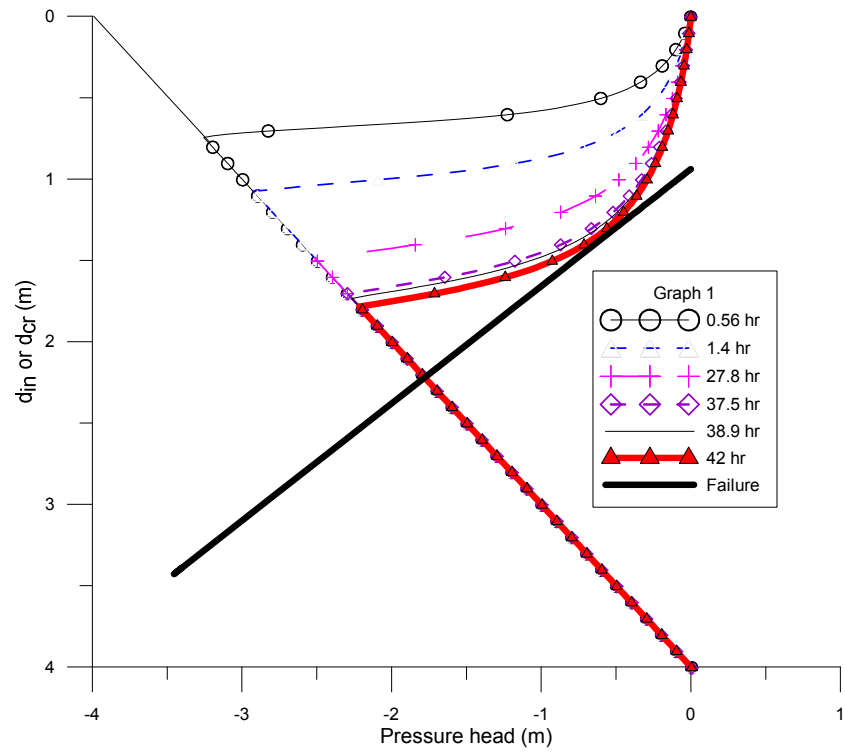


圖 2.16 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

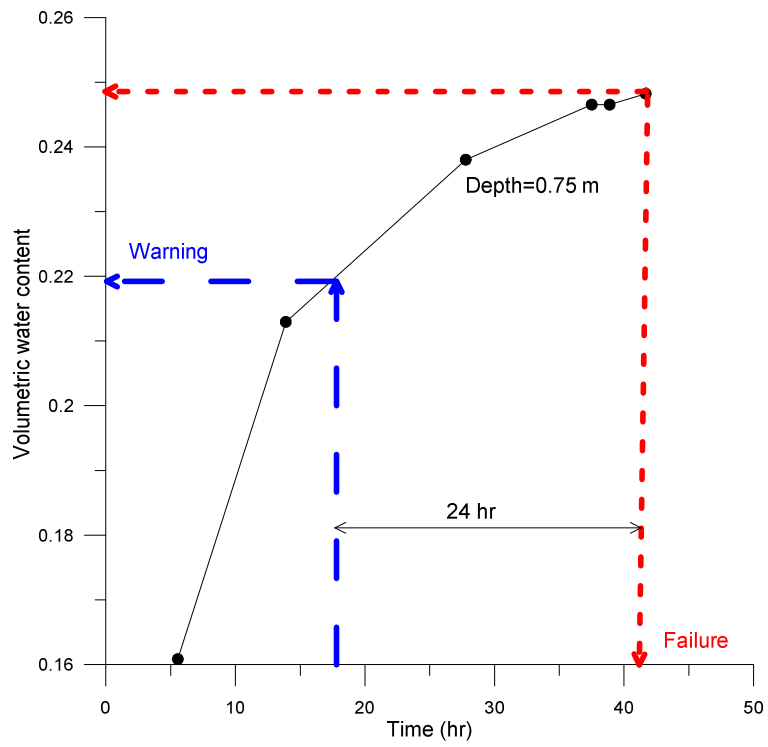


圖 2.17 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念

破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但由地表傾度觀測結果(如圖 2.19 所示)，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，因此此類邊坡較適宜以地表傾角作為訂定依時預警之物理量。

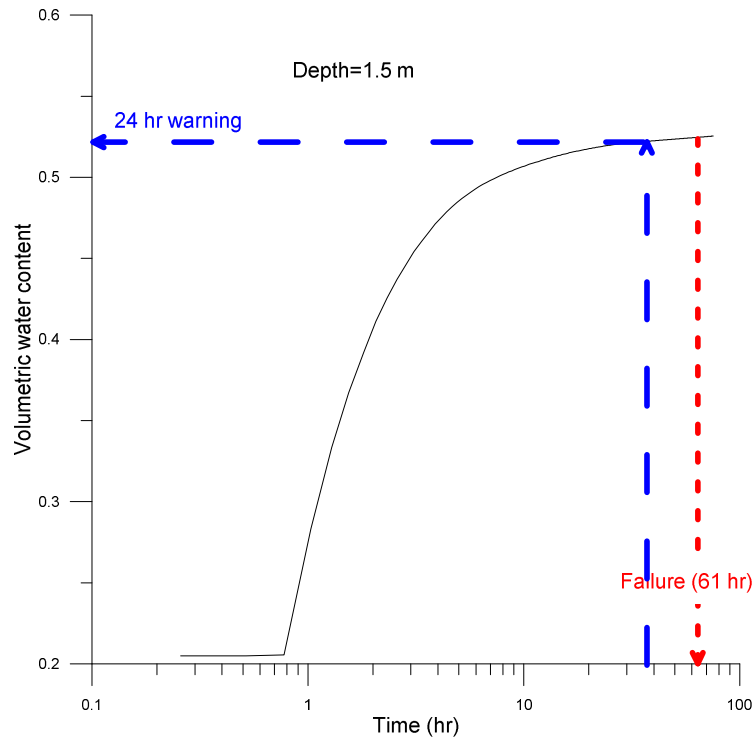


圖 2.18 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念

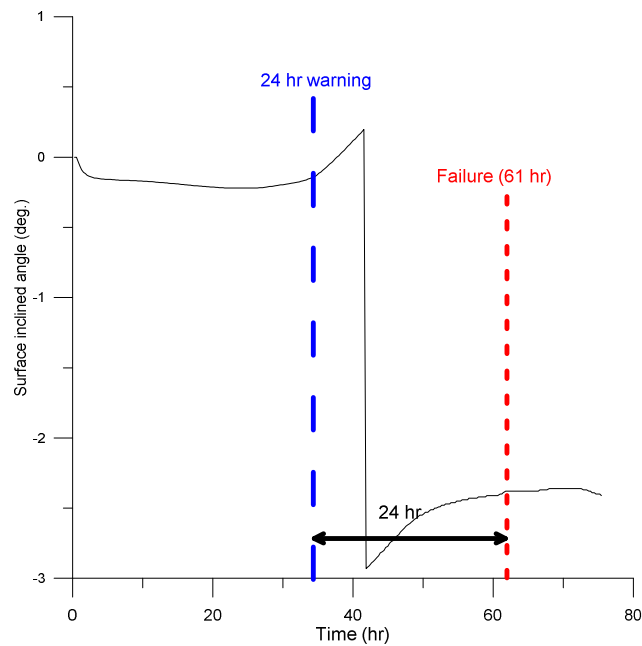


圖 2.19 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念

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，此為無線監測模組中分層含水量監測所具有之功能。

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

現有依時預警主要為基於淺層滑動，應用於深層滑動時須進行適度修正，針對一維無限邊坡深層滑動，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(2.3)中之平行滲流力像須加以考慮，而基質吸力效應則可忽略不計，且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，詳細推導仍在驗證中，將於簡報中呈現。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。

第三章 無線土層即時監測系統

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

3.1 系統架構

無線土層監測系統係由微控制器(Micro Controller Unit, MCU)結合各感測器以及無線傳輸模組，裝設於待測地點並透過無線傳輸將各感測器之量測資料。無線土層監測系統主要組成包括微控制器、感測原件(sensor)及通訊單元，並以軟體進行整合，另外還包括附屬之模組外構及電源系統。本研究採用 Wemos lolin32 作為系統之微控制器，搭配各式感測原件，如：觀測入滲速率之土壤分層含水量計、地表傾角之高精度傾斜儀(Inclinometer)、地下水位之壓力式液位計(Liquid level sensor)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 3G 無線網路，達到遠端監測之功能。

系統架構示意圖如圖 3.1 所示，無線土層監測系統包含兩種型態，分別為客戶端與伺服器端，客戶端即為監測模組，將量測之現地資訊發送給伺服器端，透過 WCDMA(3G)無線通訊模組將資訊上傳至雲端，系統同時備有記憶卡備份現地資料，達到對邊坡即時自動監測目的。

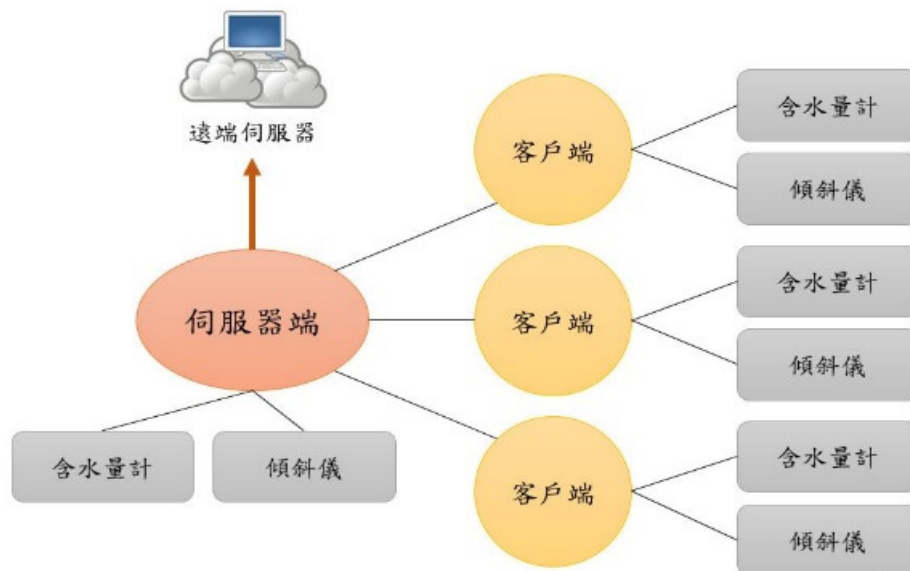


圖 3.1 系統架構示意圖

3.2 系統感測器

在消費性電子產品大量使用下，微機電系統(Micro-Electro Mechanical-Systems, MEMS)感測器近來迅速發展，其具有體積微小、低耗電、低成本以及通訊介面簡易等優點，本計畫系統感測器之種類與功能如下：

1. 電容式含水量計(Capacitance moisture sensor)：量測周圍環境電容變化，透過感測器內嵌之類比數位轉換晶片(Analog to Digital Converter, ADC)進行數位輸出，間接測得非飽和土壤之含水量。
2. 傾斜儀(Tiltmeter)：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(Liquid Level Transducer)：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記式雨量計，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。

3.2.1 電容式土壤水份計

目前市售之研究級現地土壤水分計成本較高，且尺寸不易整合於監測模組，因此本研究透過量測土壤介電係數，間接量測土壤含水量變化，以評估土壤內基質吸力。

本研究採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式土壤水份計(圖 3.2)，其具有低成本、高解析度與高重複性等優勢，工作電壓 3.3V~5V，工作溫度 0~85°C，並採用 I²C(Inter-Integrated Circuit)通訊界面與微控制器與周邊設備整合。I²C 是內部整合電路的稱呼，是一種串列通訊匯流排，I²C 連接方式如圖 3.3，至少須有一主控端(Master, 通常由微處理器擔任)，負責發送時脈與位址訊號，所有 I²C 元件之資料線(SDA)、時脈線(SCL)連接，具有可多組元件串聯、連接線數量少等優勢。



圖 3.2 電容式土壤水份計

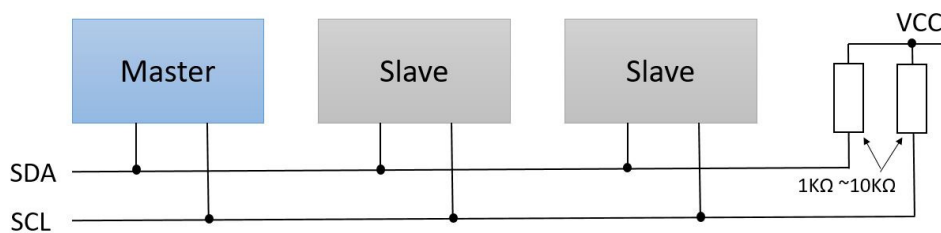


圖 3.3 I²C 連接方式

圖 3.4 為含水量計數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖，試驗土壤於邊坡現地取得，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。

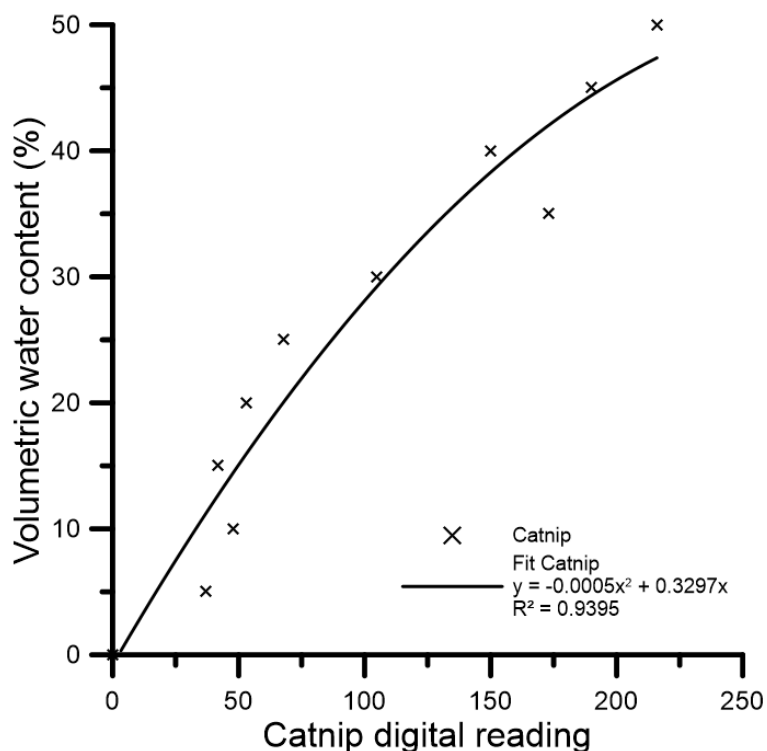


圖 3.4 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖

土壤水份計可進行分佈式地層含水量量測，透過多組電容感測裝設於探棒表面(圖 3.5)，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。

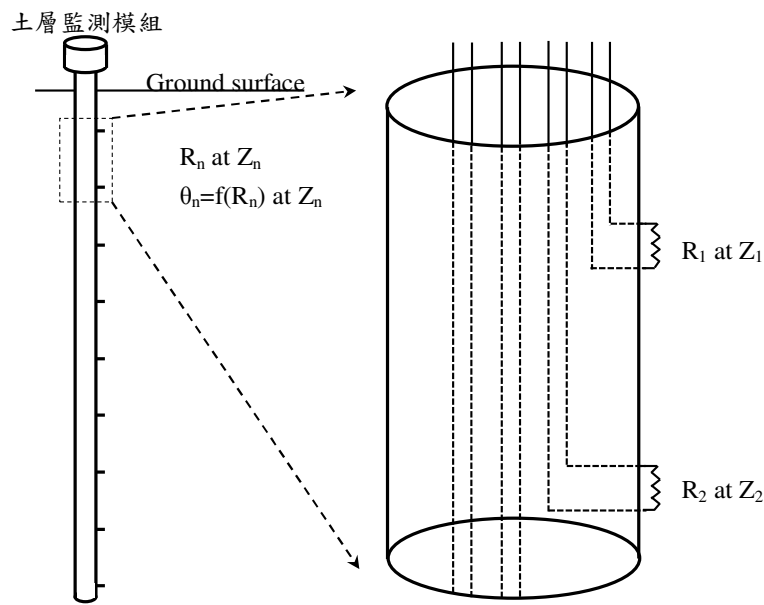


圖 3.5 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖

3.2.2 傾斜儀

本計畫使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA103T(圖 3.6)，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。



圖 3.6 SCA103T 傾斜儀

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 3.7 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。

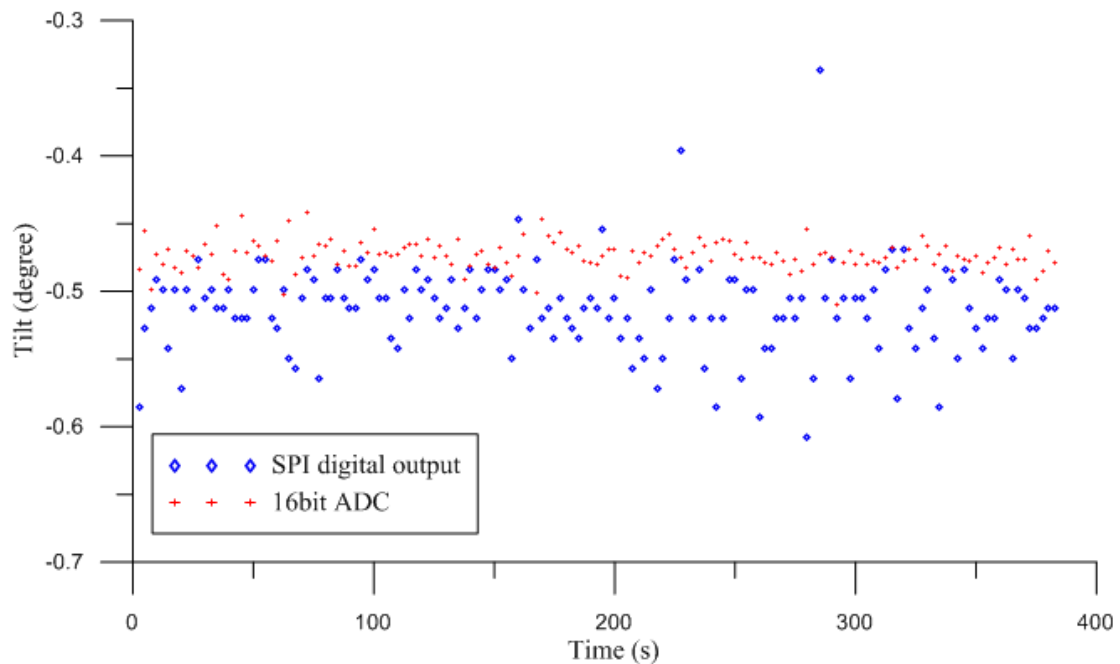


圖 3.7 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較

傾斜儀工作電壓 5V 與多數微控器相同，可直接以 Wemos lolin 32 內部穩壓晶片供給電源。將傾斜儀固定於土層監測模組上，長時間監測因土層滑移所造成之傾斜角改變量。SCA103T 類比電壓比例輸出標定如圖 3.8 所示，顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。

3.2.3 沉水式液位計

現有深層滑動監測模組之地下水位量測，採用國產之沉水式液位計(圖 3.9)，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；

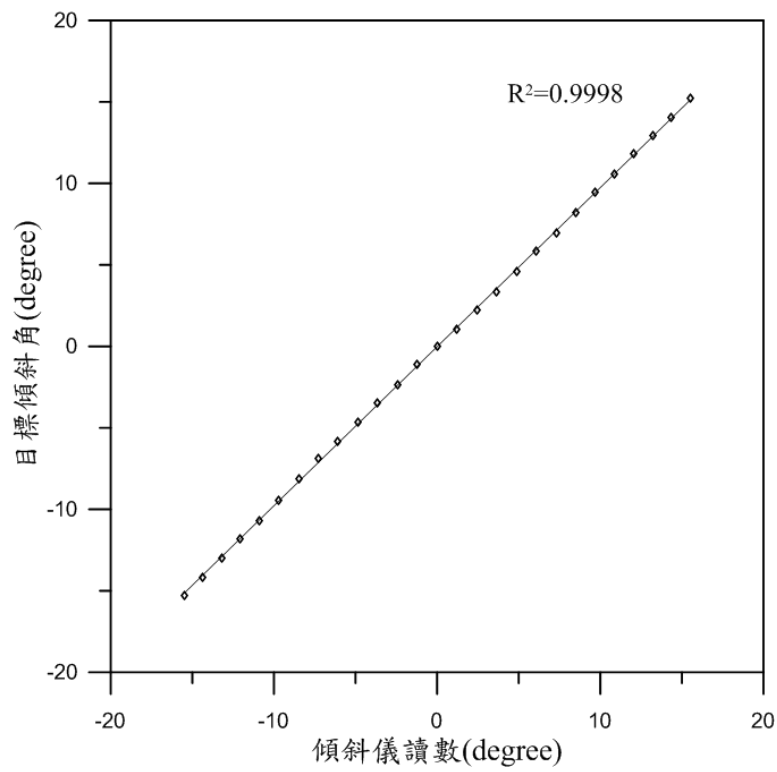


圖 3.8 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

3. 防結露，防雷擊設計；
4. 316 不銹鋼隔離膜片；
5. 堅固密封、高可靠、高精度等。



圖 3.9 沉水式液位計

此感測器為類比輸出，因此感測模組需整合類比-數位轉換器使用，本研究以 16-bit 之 ADC 模組，確保水位解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 3.10 所示。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。

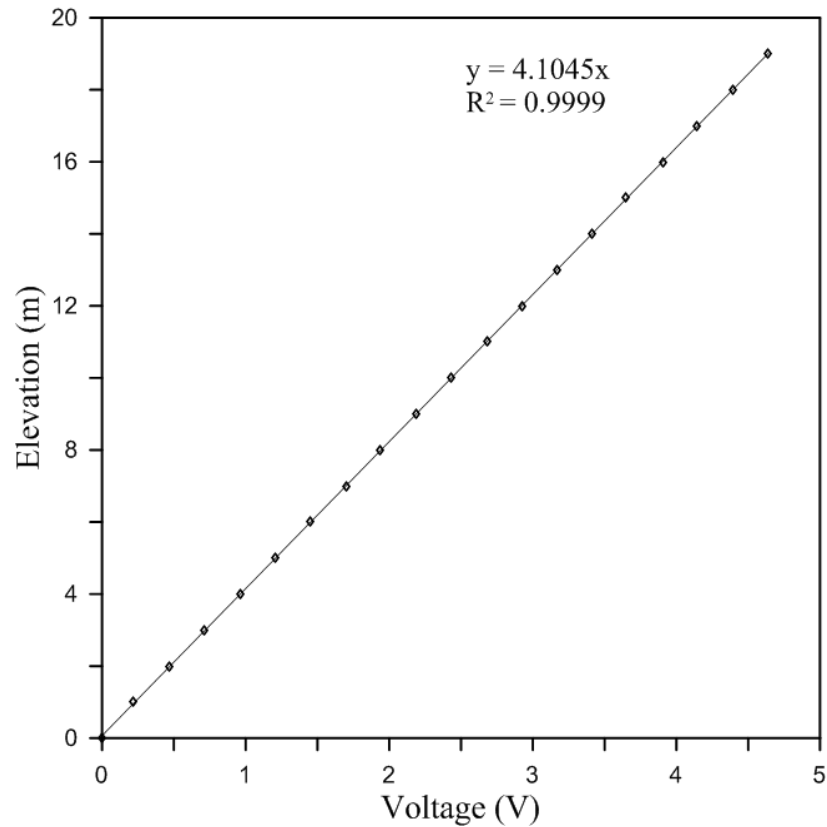


圖 3.10 液位計校正結果

3.2.4 雨量計

本計畫採用雙傾斗式雨量計，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 3.11，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。

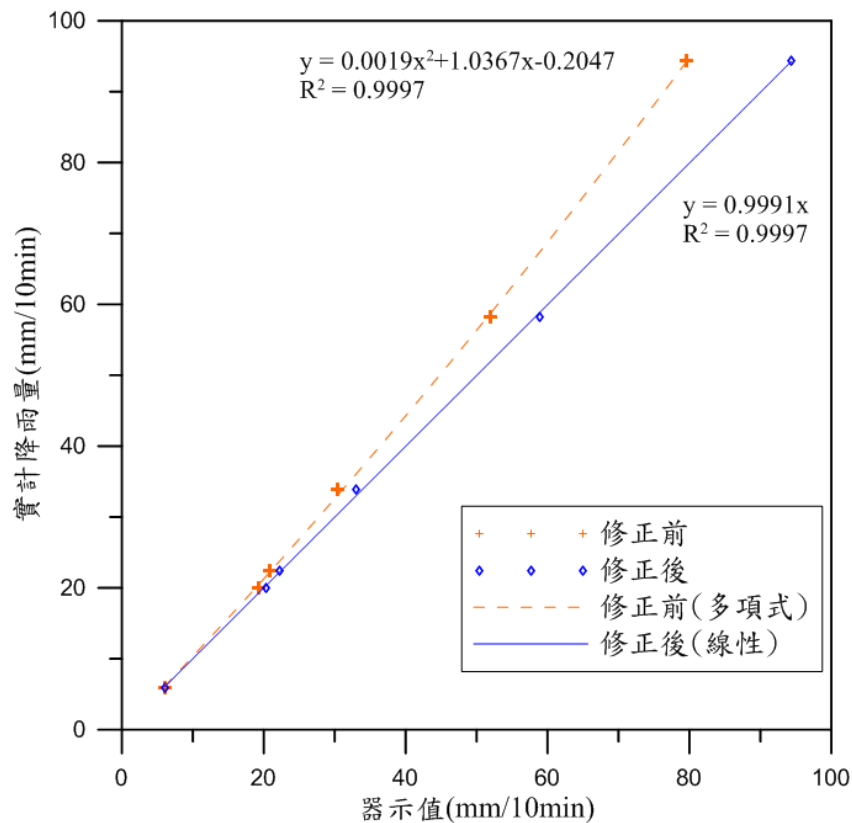


圖 3.11 雨量計器示值校正

3.3 系統組成

本研究使用之無線傳輸模組、數據計錄模組、即時時間模組、感測器以及微控制器，以可插拔方式配置於客製化電路板上，以便於維護，並連同電源供應模組放置於防水耐候之電子盒中，其下方可連結分佈式土壤水分計。透過客戶端與伺服器端建構之區域無線網路，以及感測器擷取之數據，可進行即時邊坡監測，其系統運作示意圖如圖 3.12 所示，無線土層監測系統之部分包括：(1)微控制器、(2)無線傳輸模

組、(3)時鐘與數據儲存模組及(4)感測器等，除感測器外各部分說明如下。

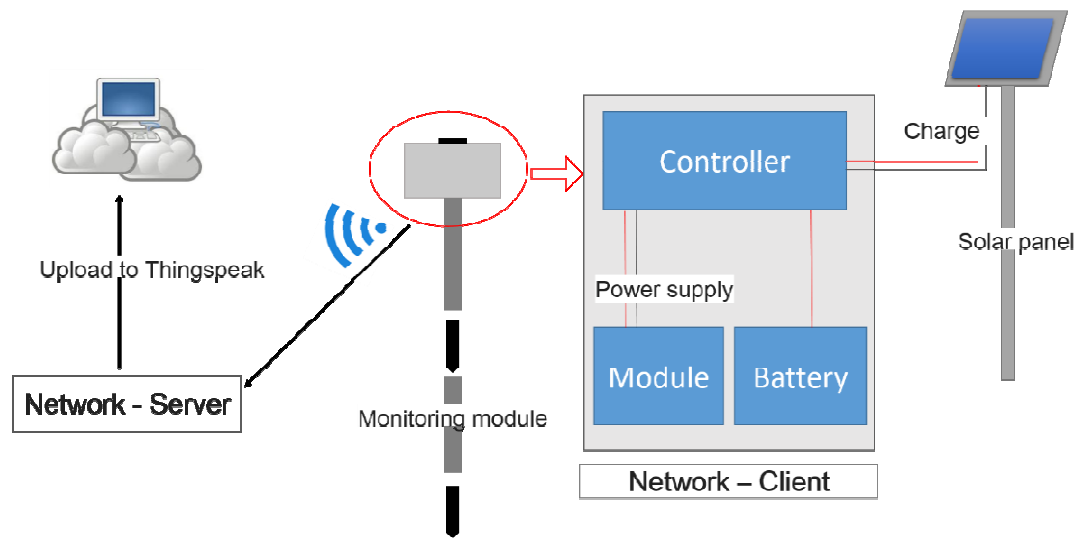


圖 3.12 系統運作示意圖

3.3.1 微處理器

微控制器(MCU)，又稱單晶片微電腦(Single-chip Microcomputer)，是把中央處理器、記憶體、定時/計數器 (timer/counter)、各種輸入輸出介面等都整合在一塊積體電路晶片上的微型電腦。基於開放原始碼之開發平台，允許使用者發展符合特殊需求的模組，整合 SPI、UART、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，作為智慧型無線感測模組之基礎，MCU 之選擇可基於接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於智慧型無線模組中可比喻為大腦，進行所有電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作。

透過 Arduino 開發之整合開發環境(Integrated Development Environment, IDE)可進行韌體撰寫，IDE 為一整合文字編譯器(Editor)、編譯器(Compiler)、連結器(Linker)及除錯器(Debugger)之軟體，使用與

C 語言和 C++相仿的程式語言，可與開發板透過電腦以 USB 介面連結，即可編寫及燒錄韌體以設定執行程序，降低開發門檻，同時增加監測模組功能客製化的彈性。

坊間開發版產品眾多，為符合無線土層監測系統之需求，本研究採用 Wemos lolin32 開發板(圖 3.13)，其搭載 ESP32 晶片，240MHz 雙核微控制器，運算數度高達 600 DMIPS，內建 16MB 程式設計空間，且具 34 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPI (Serial Peripheral Interface Bus) 介面、一組 I²C 介面，I²C 支援單一匯流排，最多可與 112 個結點通訊，足以應付多組模組間數位資料傳輸，以及 12 支接腳可做為類比訊號接腳，可滿足基本監測模組的功能需求。



圖 3.13 Wemos Lolín32 開發板

3.3.2 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 WCDMA(3G)技術將資料上傳至雲端平台。

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 WCDMA(3G)模組—SIM5320E(圖 3.14)，以連結場址資訊與後台人員形成廣域網路。SIM5320E 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM (Subscriber Identity Module)卡作為用戶身分識別。SIM5320E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。



圖 3.14 WCDMA(3G)模組 SIM5320E

本計畫以 LoRa 無線傳輸模組作為伺服器端與客戶端之間互相傳輸資訊之區域網路模組，LoRa 為英文 Long Range 的縮寫，為低功耗廣域網路(Low Power Wide Area Network, LPWAN)通信技術的一種，在 LPWAN 產生之前，使用者只能在遠距離以及低功耗兩者之間做取捨，而 LoRa 無線技術的出現，改變了關於傳輸距離與功耗的折衷考慮方式，不僅可以實現遠距離傳輸，並且同時兼具低功耗、低成本的優點。LoRa 屬於專有技術，由 Semtech Corporation 所有並申請專利，在 ISM 頻段中操作。ISM 頻率的分配和法規要求隨區域而有所不同。兩個最常見的頻率分別為歐洲採用的 868 MHz，以及北美的 915 MHz。其他區域，則有不同的要求。LoRa 網路包含四個要件 (圖 3.15)：

1. 終端：會採集感測器數據、向上游發送，並且從下游接收來自應用伺服器的通訊。端點裝置 - 採用單中繼無線通訊與一或多個閘道器溝通

2. 匯集器/閘道器：作為透通橋接器並在終端節點和上游伺服器之間轉送雙向數據。
3. 雲端伺服器：透過安全的 TCP/IP 連線以有線或無線方式連接到多個閘道器；排除重複訊息；決定要回應終端節點訊息的閘道器；用調適性數據傳輸率（ADR）機制管理終端節點數據傳輸率，發揮最大網路容量並延長終端節點的電池續航力。
4. 應用伺服器：收集並分析來自終端節點的數據，再決定終端節點的行動。

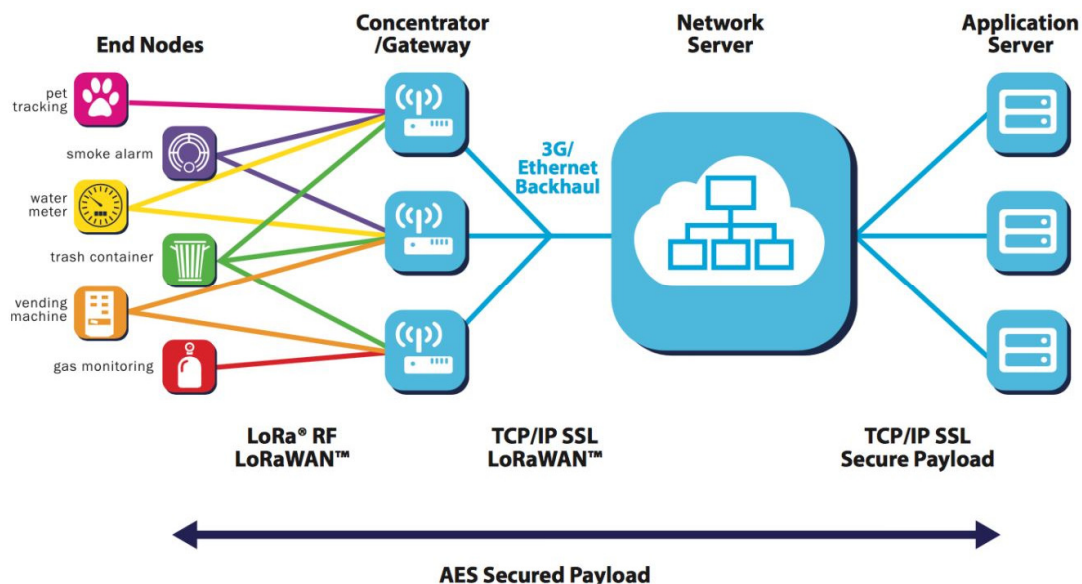


圖 3.15 LoRa 網路

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。模組具有資料加密和壓縮功能，模組在空中傳輸的資料，具有隨機性，通過嚴密的加解密演算法，使得資料截獲失去意義。而資料壓縮功能有概率減小傳輸時間，減小受干擾的概率，提高可靠性和傳輸效率，綜合上述各項特點，故選擇該模組作為本次計劃資料無線傳輸之工具。

本研究採用一款基於 SEMTECH 公司 SX1276 射頻晶片的無線串口模組（圖 3.16），採用透明傳輸方式，工作頻段介於 900 至 931MHz 之間，可選擇與他人不同之頻段進行資料傳輸，以減少干擾。使用 LoRa 擴頻技術，TTL 邏輯電壓準位資料傳輸，相容 3.3V 與 5V 的電壓。此外，該模組可藉由控制腳位 M0 及 M1 之高低電位變化使其進入省電模式，如此便可減少無線感測模組之耗電量。



圖 3.16 LoRa 無線傳輸模組

3.3.3 時鐘與數據儲存模組

為提供監測資料儲存安全以提供數據分析的完整性，本研究使用 Deek Robot 設計生產之 SD 卡數據紀錄模組(Data logger)(圖 3.17)備份土層監測資料。當無線傳輸模組因故斷訊時，仍可藉由 SD 卡備份檔案得知現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站即時時間、節點編號、土層分層溫度、含水量、傾斜角度與地下水位高程，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。

此 SD 卡數據計錄模組附含一即時時鐘(Real-time clock, RTC)，晶片為 DS1307，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。DS1307 內含電源檢測電路並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。

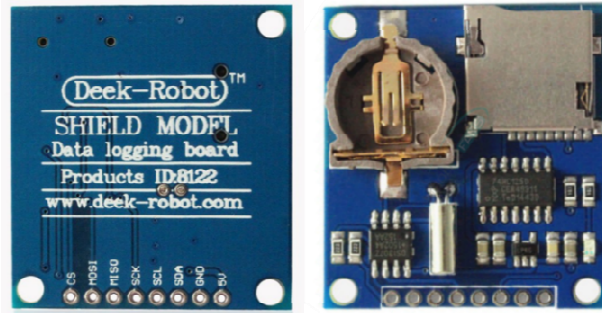


圖 3.17 時鐘與數據儲存模組

3.3.4 資料擷取模組

由於微控板之 ADC 解析度為 10bit，不足以應付本研究之精度需求，故以外接之 ADC 模組整合感測器，本研究使用基於 ADS1115 晶片之資料擷取卡(圖 3.18)，使用 I²C 介面與微控板通訊，每秒最高可處理 860 個資料點，解析度達 16-bit，符合本研究之需求。

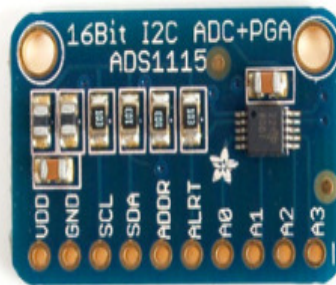


圖 3.18 ADS1115

3.3.5 電源系統

由於邊坡滑移多發生於長歷時、高強度之降雨期間，為使監測系統獨立運作達到現地長期監控的成果，本研究使用太陽能控制系統搭配 18650 鋰電池組作為土層監測系統之電源系統。

系統組成是由太陽能電源控制器(圖 3.19)，搭配太陽能板，並依模組功能選擇 10W 與 20W 之太陽能板(圖 3.20)，其上三組接口分別作為太陽能板電源輸入端、鋰電池電源輸入端、鋰電池電源輸出端。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，充電電流最高可達 0.55A，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。



圖 3.19 太陽能電源控制器



圖 3.20 太陽能板 (左 10W，右 20W)

本研究使用含保護板之 18650 鋰電池(圖 3.21)，保護板為一塊電路板，串聯在電池上，對電池充電及放電過程做保護。18650 鋰電池容量最高達 3400mAh，額定電壓 3.7V，為目前市面上能量密度最高之循環鋰電池。土層監測模組依照現場系統空間配置可搭載 12 至 18 顆 18650 鋰電池，高電容量使土層監測模組於颱風、梅雨季時仍得以維持系統運作至少 7 日。



圖 3.21 18650 鋰電池

3.3.6 定時斷電模組

由於監測系屬於長時間運作，模組長時間放至於室外，環境較室內惡劣許多，可能造成模組的不穩定，而導致當機或運算失常，本研究使用繼電器使模組斷電後重新供電，以達到模組重啟，減低因模組失常而無法正確監測的時間與可能性。

模組使用 Wemos D1 mini Pro(圖 3.22)做為微控制板，搭載 ESP8266 晶片，16MB 快閃記憶體，且具 11 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPI 介面與一組 I²C 介面，D1 mini Pro 亦包含睡眠模式，其方式為連接微控板 D0 與 RST 腳位，以程式控制微控板進入睡眠，再以微控板內部計時器於預定時間從 D0 發送一脈波至 RST，使微控板重啟，變數重啟後會消失，故亦可利用 ESP8266 的 FS.h 檔案系統，將變數存入快閃記憶體的 SPIFFS 區域，以便日後讀取。

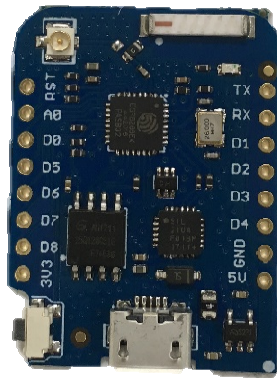


圖 3.22 Wemos D1 mini Pro

本研究使用之繼電器如圖 3.23，為單刀雙擲型，其運作原理為輸入部分為一組電磁鐵，當電流通過電磁鐵時，產生磁性，吸引輸出接點閉合或斷開。當電流消失後輸出接點又回復到原始狀態。輸出部分，試一組常開（N.O Normal Open）與常閉接點（N.C Normal Close）。本研究利用以上特性，將電源系統對模組之供電接至共點，模組接收接至常閉，以微控板於每小時重啟並讀取記憶體類的變數，若小於 24 則將變數+1 後儲存並進入睡眠，反之則以訊號觸發繼電器切換共點與常開連接，使無線監測模組斷電重啟。

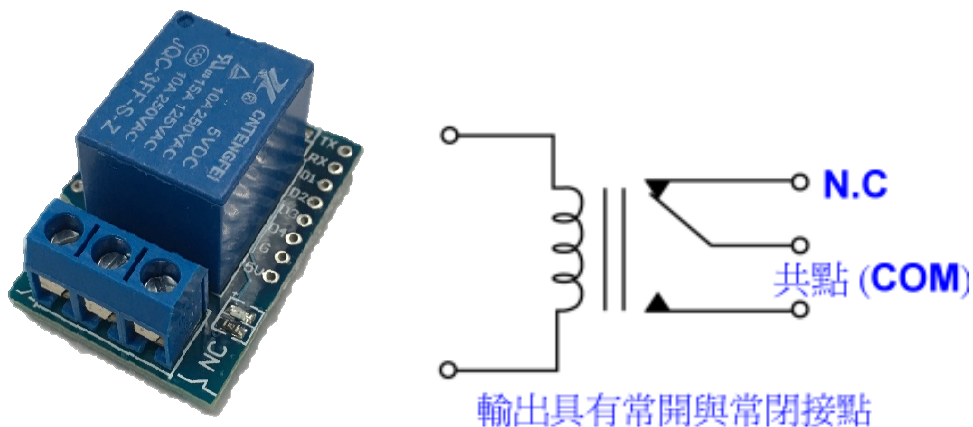


圖 3.23 繼電器與內部構造

3.4 無線土層監測模組

本計畫自主研發無線土層監測模組，依據用途不同可搭配不同感測元件，如淺層滑動監測模組即不須地下水位監測，飽和層滑動除地下水位外，亦可加入分層含水量及傾角量測。透過電池與太陽能充電模組為系統提供電力，以供野外進行模組布設並可維持太陽照度不足時之電源持續運轉系統。而無線土層監測模組，以 MCU 搭配傾斜晶片、含水量計與無線傳輸等模組可定時將數據傳送至廣域網路，即時感測(real-time monitoring)推送監測數據至雲端，監測模組之架設相對傳統監測簡單、便宜與節省人力。

3.4.1 無線土層監測模組

無線土層監測模組係由微控制器、無線傳輸模組、時鐘與數據儲存模組、電源系統及感測器結合而成，本研究使用萬用電路板做為模組底座，其上以排針母座連結各模組，使用排針母座之優點為模組的連接方式都為可插拔式，易插拔以便於之後的維護。土層監測模組依其具備之硬體與功能分成(1)伺服器端、(2)客戶端，關於兩者說明如下：

(1) 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 WCDMA(3G)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，土層監測模組伺服器端之成品及其系統組成如圖 3.24。

(2) 客戶端

本計畫使用之客戶端又分成雨量計、含水量與液位計以及純液位計，除監測對象不同之外，皆於 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，

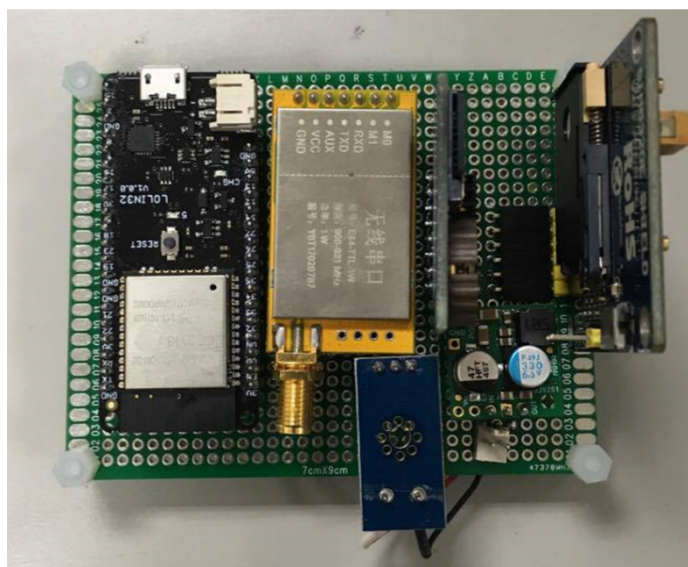


圖 3.24 伺服器端

其發送之量測資料包括降雨量、土壤分層含水量、溫度以及土層監測模組之傾斜角以及地下水位高程，並附上節點編號供伺服器端辨識訊號來源。為避免因不可抗力之因素斷訊，致使與伺服器端之連線中斷，客戶端同時備有 SD 紀錄卡作監測數據紀錄，確保數據分析之完整性，土層監測模組客戶端之完成品及其系統組成如圖 3.25 和圖 3.26。



圖 3.25 客戶端-雨量計

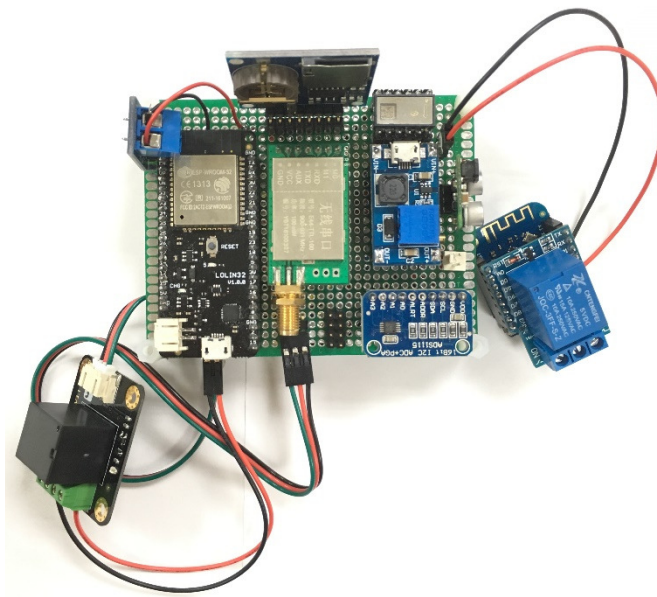


圖 3.26 客戶端-土層監測

3.4.2 系統程式流程

微處理器之程式流程依照時間軸大致分成：(1)伺服器端系統啟始及喚醒客戶端、(2)指定客戶端、(3)感測器與 RTC 資料讀取、(4)SD 卡資料寫入以及(5)無線傳輸，以下就各部分詳細說明，圖 3.27 為模組軟體流程圖。程式流程說明如下：

1. 伺服器端系統啟始及喚醒客戶端：利用 MCU 內建之 Timer 到達指定時間後發送脈波至觸發腳位，使 MCU 從睡眠模式中被喚醒，伺服器端系統啟動後，則由伺服器端向客戶端發送喚醒碼，利用 Lora 模組 AUX 腳位在低功耗模式中接收喚醒碼可發送脈波觸發 MCU 從睡眠模式中被喚醒。
2. 指定客戶端：客戶端從睡眠模式中被喚醒後，進入待機模式，待伺服器端發送指定碼，每個客戶端皆有其唯一指定碼，收到指定碼後，客戶端即進行感測器與 RTC 資料讀取。
3. 感測器與 RTC 資料讀取：土壤淺層與飽和層含水量之 I^2C 設備位址分別設置為於特定位址，透過暫存器讀取電容感測值以及溫度感測值，並透過率定係數轉換成體積含水量與真實溫度。

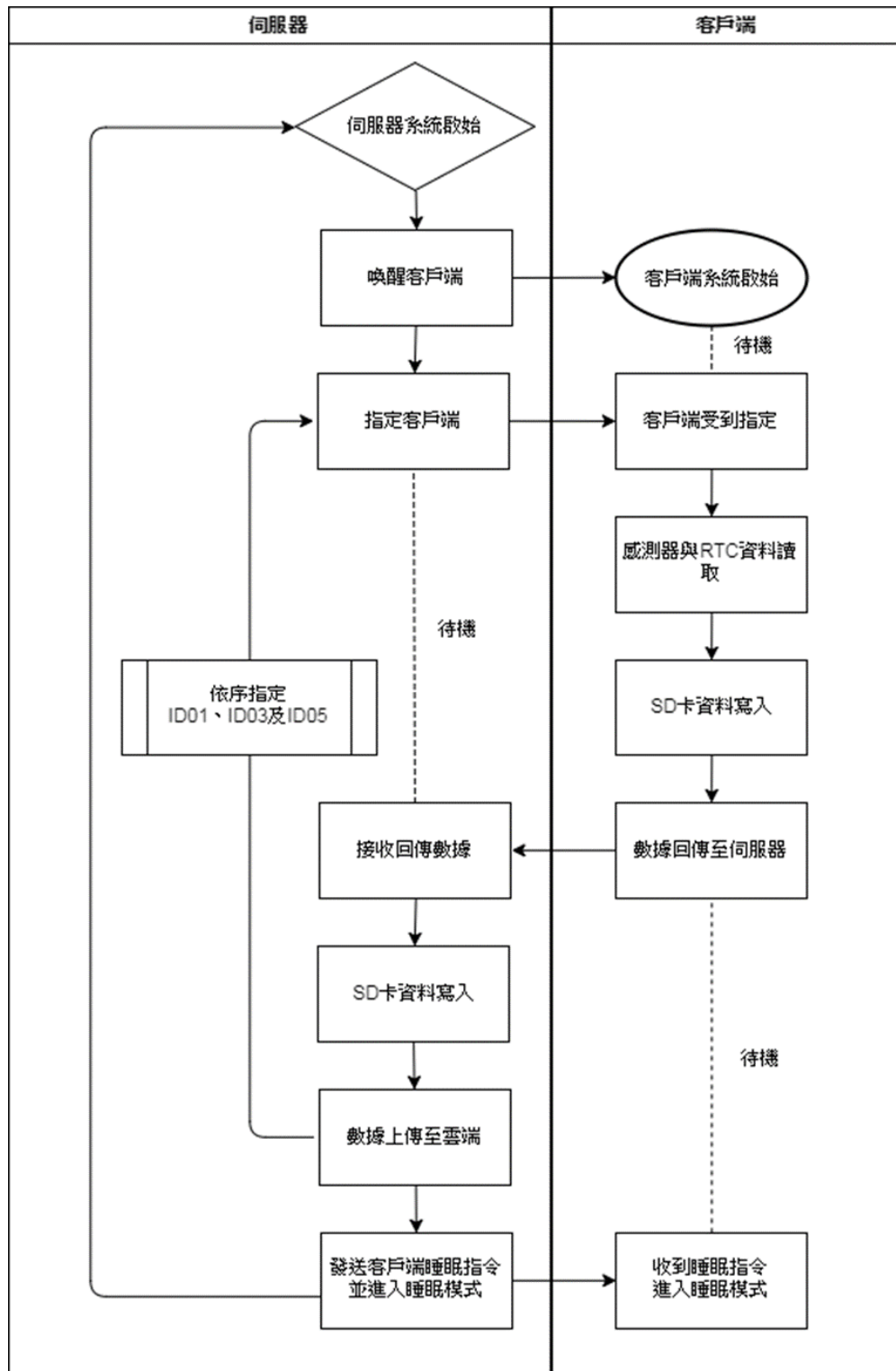


圖 3.27 韌體流程圖

傾斜儀與 MCU 以 SPI 介面傳輸，晶片選擇線接於 MCU，其低電位為有效，傾斜角度經類比電壓率定係數校正後輸出。再將

所有數據依節點編號、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、地下水位高程及模組電壓存入字串 `datastring` 供後續處理使用。DS1307 之讀取時間函式將年、月、日、時、分、秒等時間資訊分別儲存於變數，為簡化日後數據處理之流程，將時間變數以格式 `yyyy/mm/dd hr:min` 存入字串 `datetime` 中以供後續處理使用。

4. SD 卡資料寫入: SD 卡模組之晶片選擇線接於 MCU，由 MCU 輸出低電位以選擇該 SPI 設備。建立 *.txt 後將 `datetime` 與 `datastring` 存入。
5. 無線傳輸: LoRa 模組於安裝前經過設定統一其通信頻率，MCU 將資料以字串格式(檢查碼, `datastring`)透過一組序列線輸出給 LoRa，LoRa 間之資料無線傳輸將自動通透至伺服器端，其中檢查碼作為伺服器端擷取並拆解資料的起點，數據發送結束後伺服器端對客戶端發送睡眠指定後進入睡眠模式，客戶端收到指定後才進入睡眠模式，等候下一運作週期。

3.4.3 系統硬體架構

土層監測系統外構設計(圖 3.28)可大致分為五部分，各部件詳述如下：

1. 核心防水盒：以市售電子防水盒加工而成，上下蓋具有 O 型環與溝槽，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 管黏合後可連接含水量計外構。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 3.29。核心防水盒開孔以裝設耐候型天線，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。

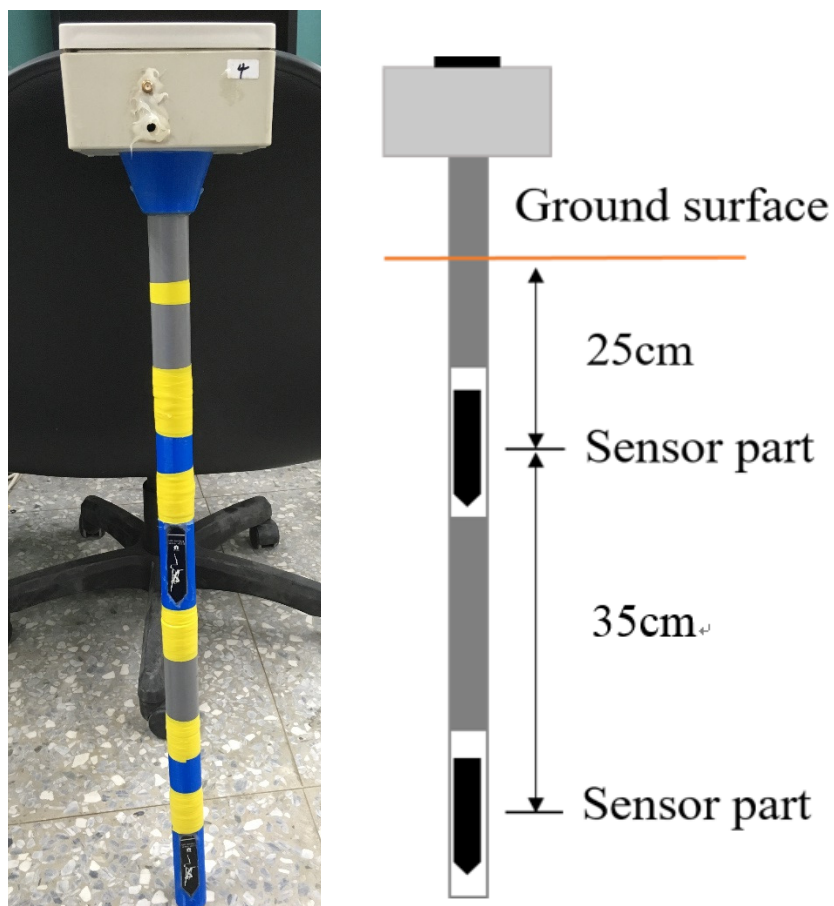


圖 3.28 土層監測模組外構



圖 3.29 防水電子盒內部配置 (左:伺服器端, 右:客戶端)

2. 含水量計外構：可裝設一只含水量計之桿件外構如圖 3.30，並可透過 PVC 管依需求數量進行串聯，以延伸至預計裝設之土層深度。本研究以兩只含水量計作串聯，並延伸至地下深度分

別為 25 公分以及 60 公分。含水量計外構將水分計之電容感測區塊暴露於外，以直接接觸待測土壤以量測土壤含水量，含水量計之接線處與元件位置則置入後方空間，並以電子膠封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐候型外披覆電子訊號線，殼層以 3D 列印製作以降低成本。

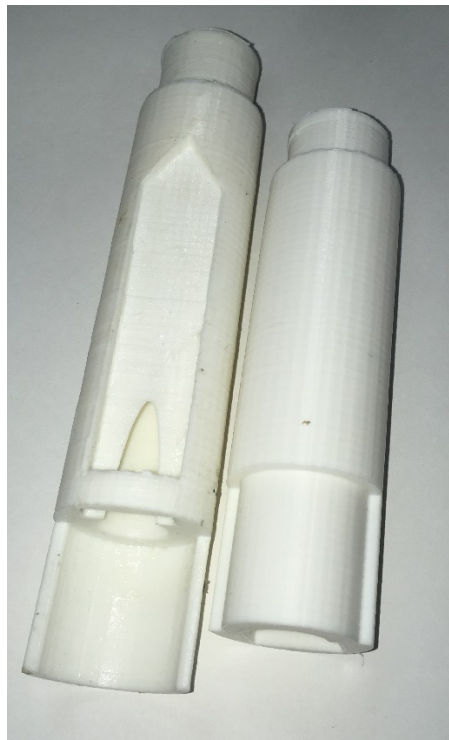


圖 3.30 含水量計外構

3. 雨量計支架：以角鋼交疊形成一平面以放置雨量計，將平面鎖至四根角鋼上，再將角鋼敲入泥土以固定雨量計(圖 3.31)。
4. 太陽能板支架(圖 3.32)：本研究採用 10W 及 20W 太陽能板以提升模組續航力，並可視土層監測模組之耗電情況作太陽能板輸出功率的增減。
5. 水位計夾具(圖 3.33)：以角鋼與螺絲螺帽組成，夾住液位計之電線以固定液位計維持固定深度。



圖 3.31 雨量計支架



圖 3.32 太陽能板支架



圖 3.33 水位計夾具

3.5 雲端顯示及運算平台

物聯網，是網際網路、傳統電信網等資訊承載體，讓所有能行使獨立功能的普通物體實現互聯互通的網路。運用 IoT 能將現實世界數位化，應用範圍十分廣泛。物聯網統整物與物的數位資訊，拉近分散的資訊，例如：通過物聯網可利用中心電腦對機器設備、裝置等進行集中管理與控制，也可以對家庭裝置、汽車進行遙控、搜尋位置及防止物品被盜等，形成類似自動化操控系統，同時也可收集此類資料，整合成大數據，包含重新設計道路以減少車禍、都市更新、災害預測與犯罪防治、流行病控制等等社會的重大改變，實現物和物相聯。

網路是構成物聯網其中一項不可或缺的技術，而 IoT 平台則是用來蒐集並記錄各使用者上傳的數據資料，這些資料可以自己使用也可以分享給其他人做使用，對於需要在世界各地蒐集資料的科學家或是程式設計師，善用這些資料可以加速其研究分析的工作，節省更多的時間。

近年物聯網的興起使各領域累積數據量急劇攀升，開發商也因應

推出各種 IoT 資訊平台以滿足資料儲存與顯示的需求。Thingspeak 為 2010 年 IoBridge 開發用以整合物聯網應用之開源平台，除了開放程式碼供使用者作專案應用外，也開放一定量之資料讀寫功能讓使用者免費使用，並透過 API(Application Programming Interface)作資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，因此本研究以 Thingspeak 作為系統伺服器，做為現地監測資料之雲端即時顯示平台。後續亦可依各平台通訊協定與資料型態，撰寫廣域網路通訊協定

本研究之深層邊坡滑動即時雲端監測系統式建立於物聯網之架構上，現地透過網路將數據上傳，使用者即可在遠端進行監控及收集資料，為符合本研究之需求，雲端平台除需可即時顯示監測成果，還需可對監測數據進行簡易分析，如顯示 24 小時降雨量及長時電量變化等，為達成上述需求，可運用物聯網供應商提供之 IoT 軟體平台，或自行架設私人伺服器配合網頁設計與資料庫管理整合監測數據。

本研究以 Matlab 公司所提供之免費 ThingSpeak.com 網頁伺服器，進行前述無線感測模組監測資料回傳與顯示如圖 3.34，此平台亦可於雲端後台進行資料運算，如圖 3.35 與圖 3.36 所示。

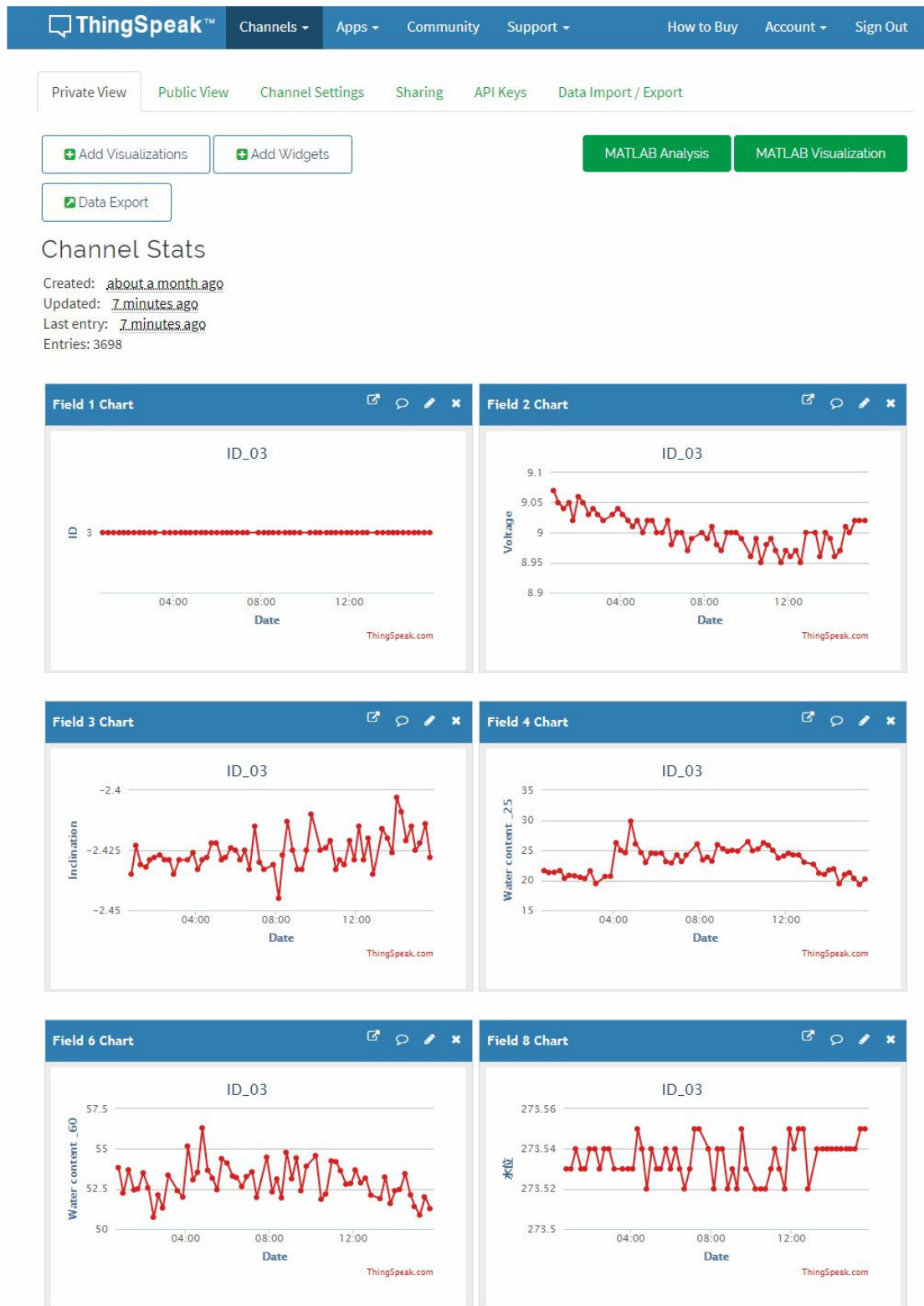


圖 3.34 雲端即時顯示平台

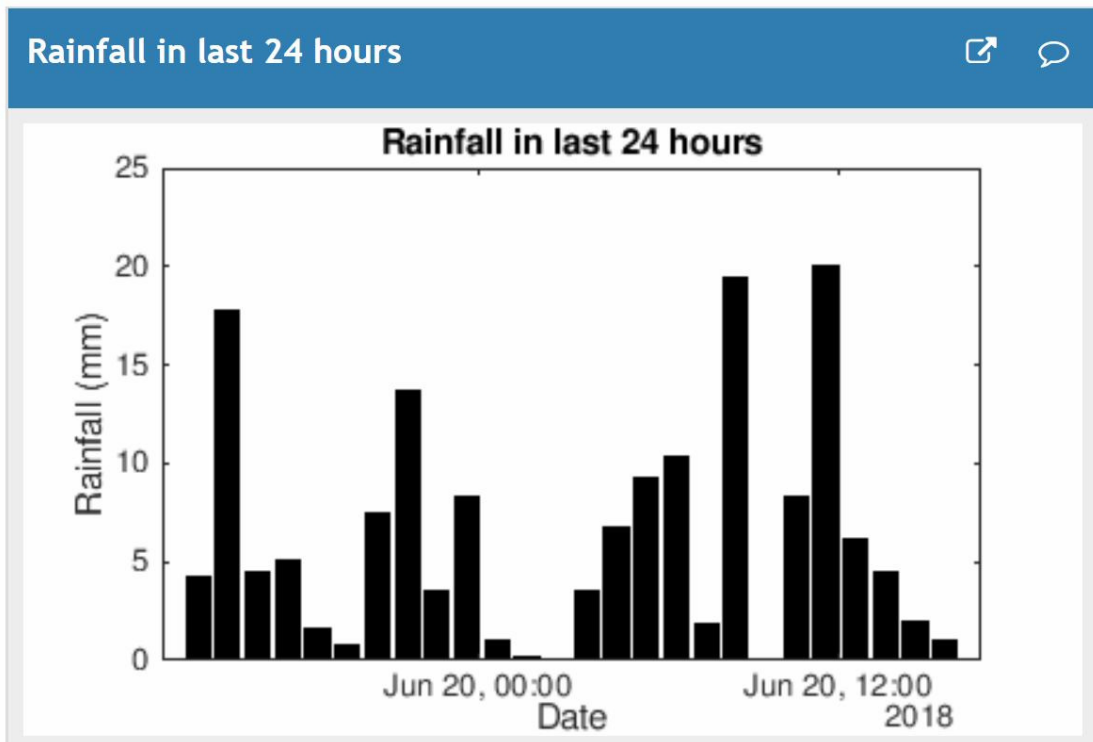


圖 3.35 過去 24 小時時雨量

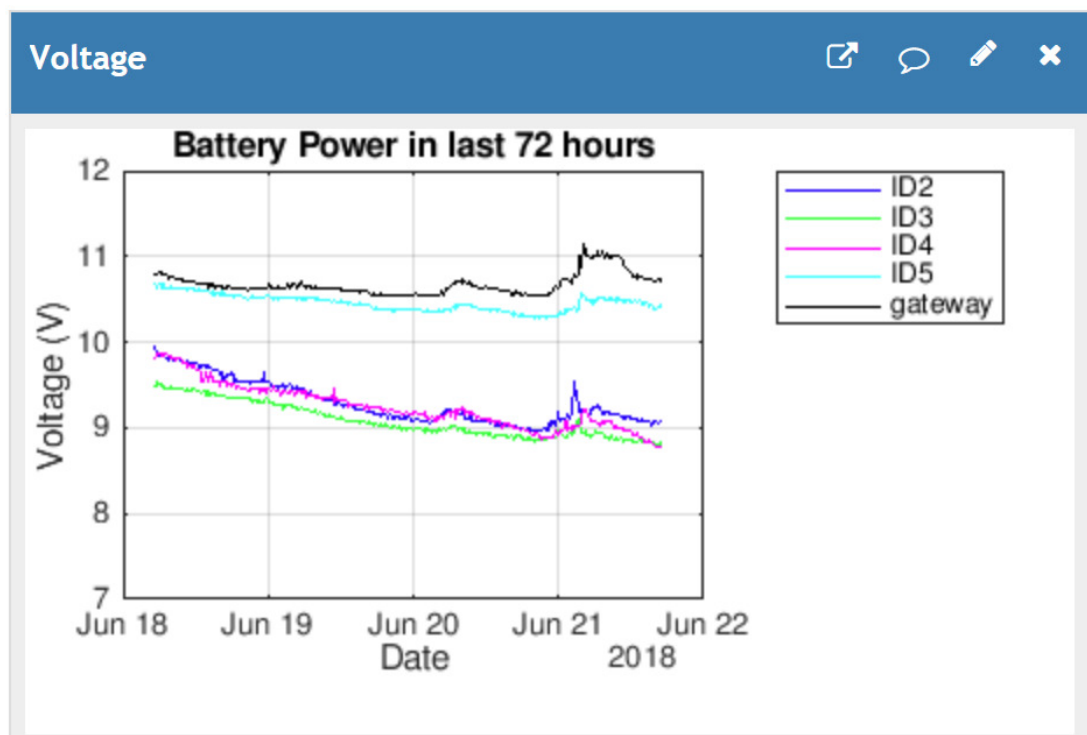


圖 3.36 過去 72 小時電量變化

第四章 現有淺層滑動場址監測成果

4.1 甲仙攔河堰聯外道路西側邊坡

甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地曾於民國 94 年 9 月受泰利風災連續豪雨影響，聯外道路邊坡發生數次崩坍而阻斷交通，道路上、下邊坡擋土牆亦形成多處裂縫，而民國 98 年莫拉克颱風期間又導致邊坡再次坍塌。民國 99 年 3 月 4 日發生規模 6.4 甲仙地震，事後邊坡傾斜儀量測結果顯示邊坡有滑動現象，最大位移達 155 mm，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 1.5m 至 4.8m 之崩積層或岩土界面。

此場址符合以下淺層滑動場址條件：(1)為陡坡地形且為軟弱土層，具有高破壞潛勢以及破壞歷史。(2)有相關地質、水文及幾何參數等現地監測資料可供參考。(3)區域為無線網路訊號涵蓋範圍。因此選定甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地，作為即時淺層邊坡無線監測模組現地測試之區域。

本研究總計於甲仙攔河堰西側邊坡裝設四支土層監測模組，包括一組伺服器端(Node ID = 0)以及三組客戶端(Node ID = 1~3)，並以 3G 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。

土層監測模組於安裝過程中須保持約略水平，以維持最大可量測範圍，另於近地表面與監測模組桿身之間回填皂土，避免降雨直接沿桿身入滲影響滲流監測成果。無線土層監測模組安裝流程如下：

1. 以孔徑 62mm 之電動鑽機鑽孔至預定土層深度 0.8m。
2. 置入土層監測模組桿身，並確保監測模組維持水平。

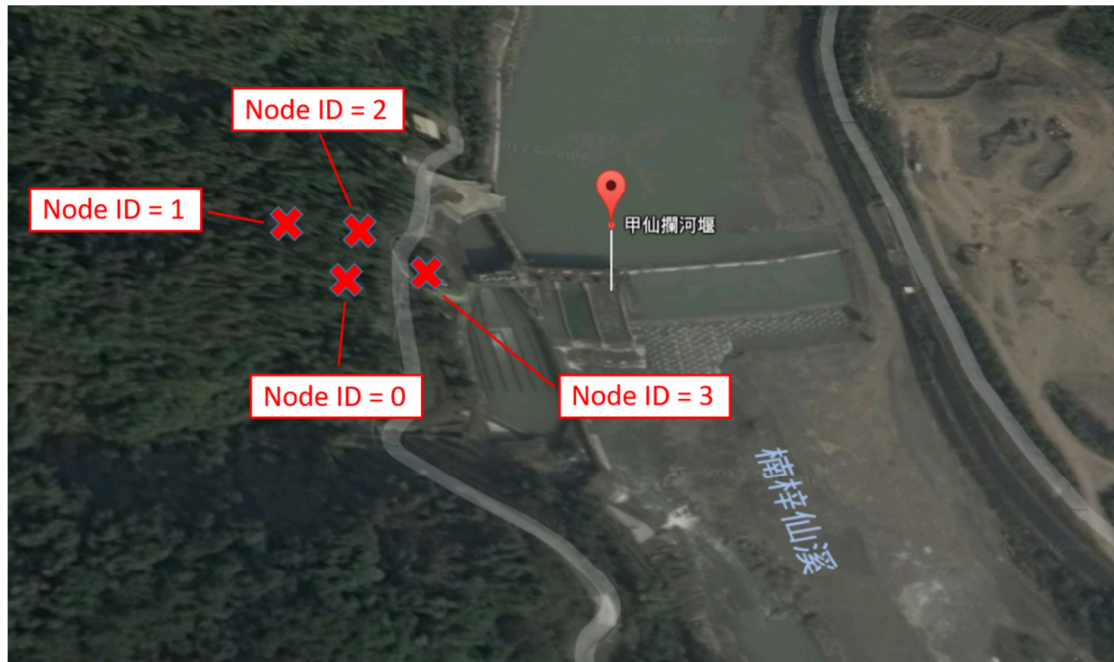


圖 4.1 監測模組相對位置圖

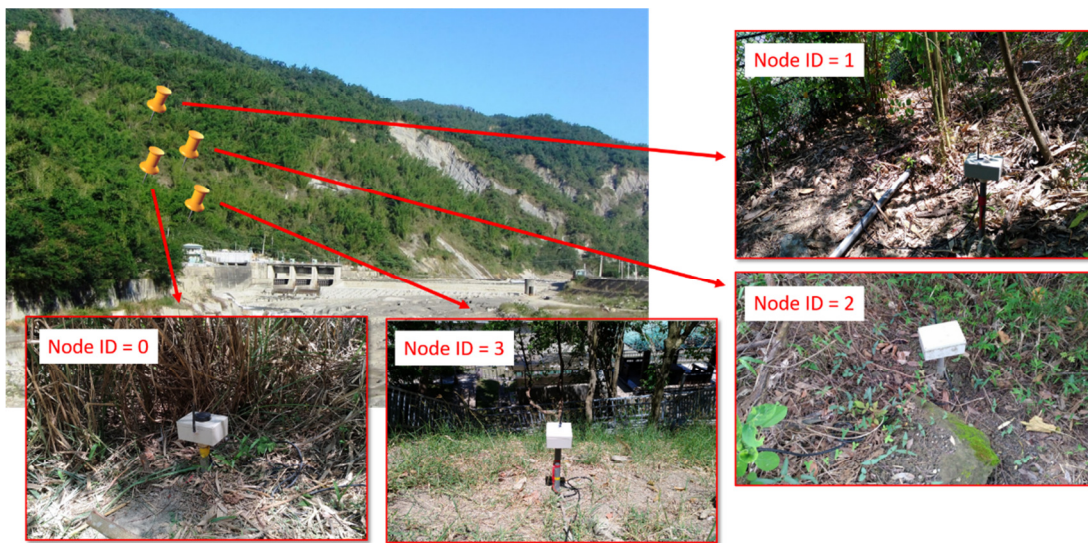


圖 4.2 監測站點周遭環境

3. 回填皂土至含水量計上方。
4. 以少量皂土圍繞覆蓋於桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。
5. 重複上述步驟回填至地表。
6. 以少量皂土圍繞覆蓋於地表桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。

待土層監測模組外構安裝完畢後，於盒身側邊預留鑽孔裝設耐候型天線，作為 LoRa 無線傳輸用途，其中伺服器端需多留一孔供 WCDMA(3G)模組天線使用，所有模組與天線皆為 SMA 接頭，將來若需更改硬體設置會有較佳之相容性。太陽能板之電源線則於盒底開孔進入盒內供電，最後以矽膠封填所有孔隙。依序將土層監測模組以及電源系統固定於電子防水盒中，土層監測模組須保持約略水平，以維持傾斜儀最大可量測範圍，並確保傾斜儀之軸向平行邊坡走向。

4.2 2018 年甲仙場址監測資料

原有甲仙場址之土層監測模組系統於 2017/05/22 安裝完畢，並於 2018/02/20 升級更新優化之模組，目前仍持續穩定上傳監測資料至 thingspeak 伺服器。2018 年 5 月至 107 年 10 月期間歷經數次集中且長歷時之降雨事件，過程中顯示降雨事件並不影響本研究無線傳輸系統之穩定性，同時在雨季長時間日照不足的情況下，太陽能電源系統也足以支撐土層監測模組持續運行，證明系統之可行性與耐久性。圖 4.3 以 NodeID=3 之 thingspeak 頁面為例顯示場址即時資訊，Field1 至 Field6 依序顯示該測站之節點編號、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量以及傾斜角，溫度量測於本計畫中未使用。游標移至資料點上即可獲知該監測值以及發生時刻，可用以監測甲仙淺層邊坡水文及運動之依時性的反應，現地監測期間體積含水量計以及傾斜移之量測成果說明如下。

4.2.1 體積含水量監測結果

由於邊坡滑移多起因於高強度長延時之降雨，因此本研究之監測資料以雨量監測作為土層體積含水量比較之標的。雨量資料來源為中央氣象局之雨量監測結果，與本研究監測場址最近之測站為甲仙測站，其位於高雄市甲仙國中操場後方山丘。圖 4.4、圖 4.5、圖 4.6 以及圖 4.7 分別為 Node0~Node3 自 2017/05/22 至 2018/10/7 期間之體積含水量

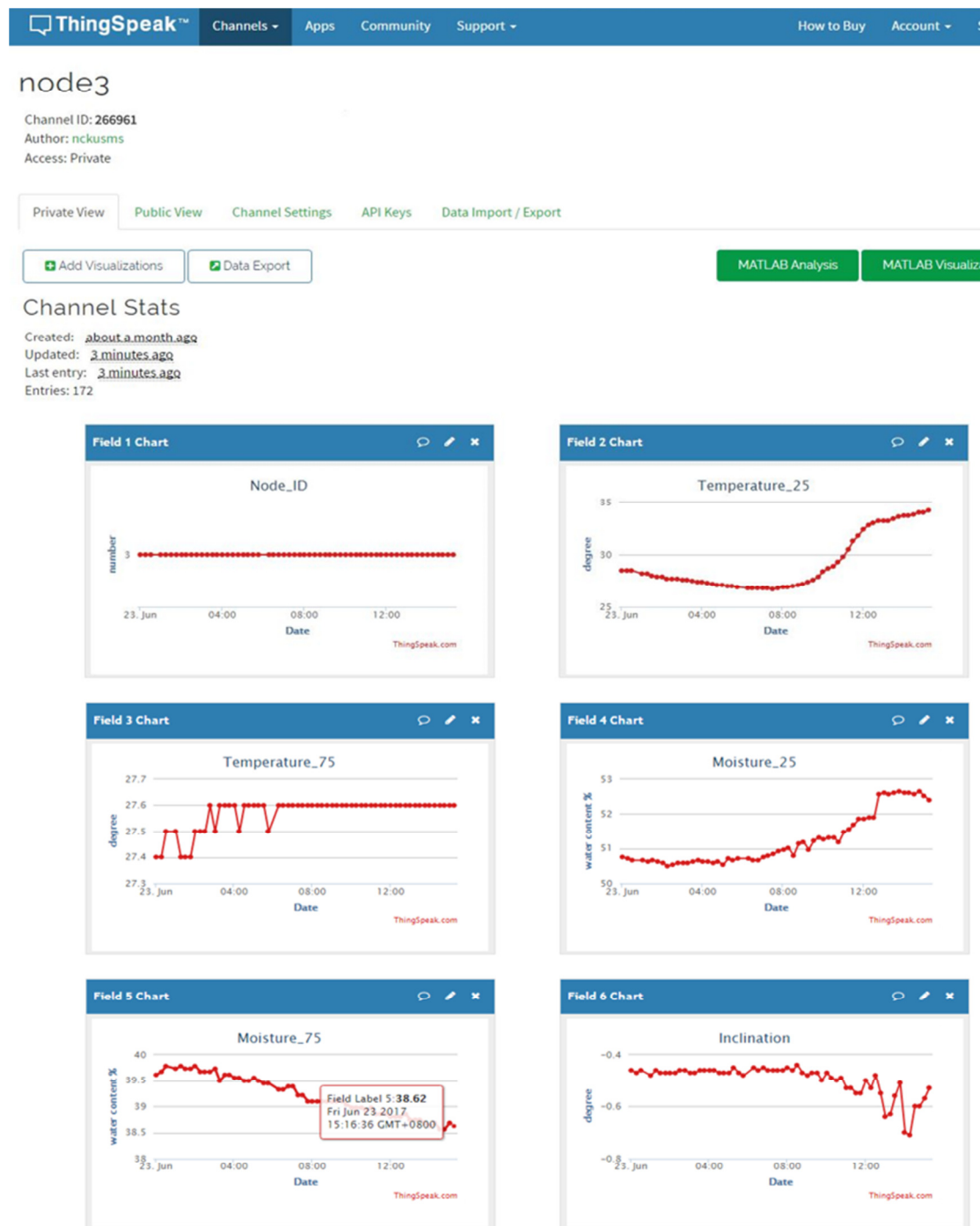


圖 4.3 Thingspeak 即時顯示情況

監測資料，X 軸為標準時間，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：

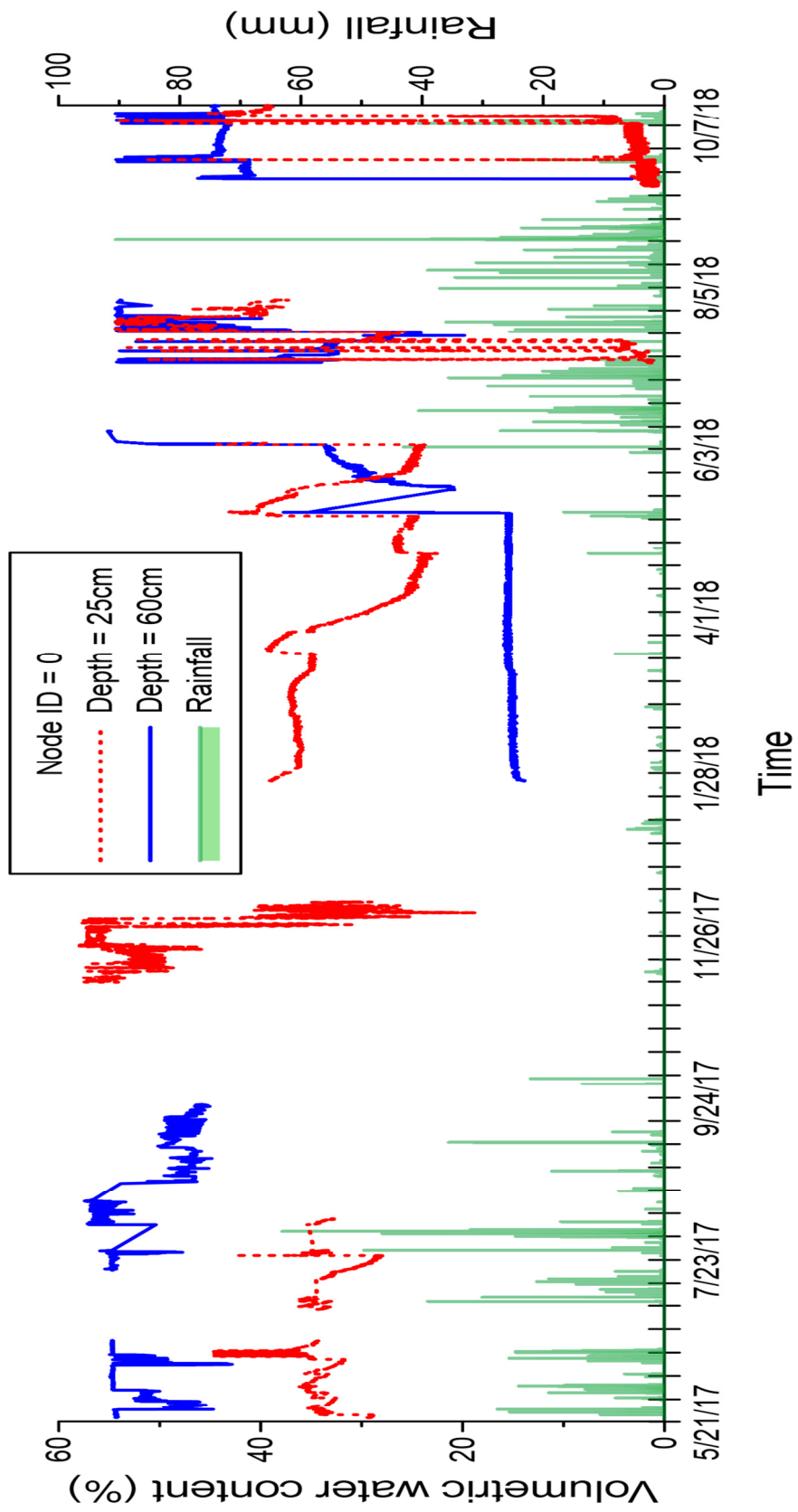


圖 4.4 Node0 體積含水量量測結果

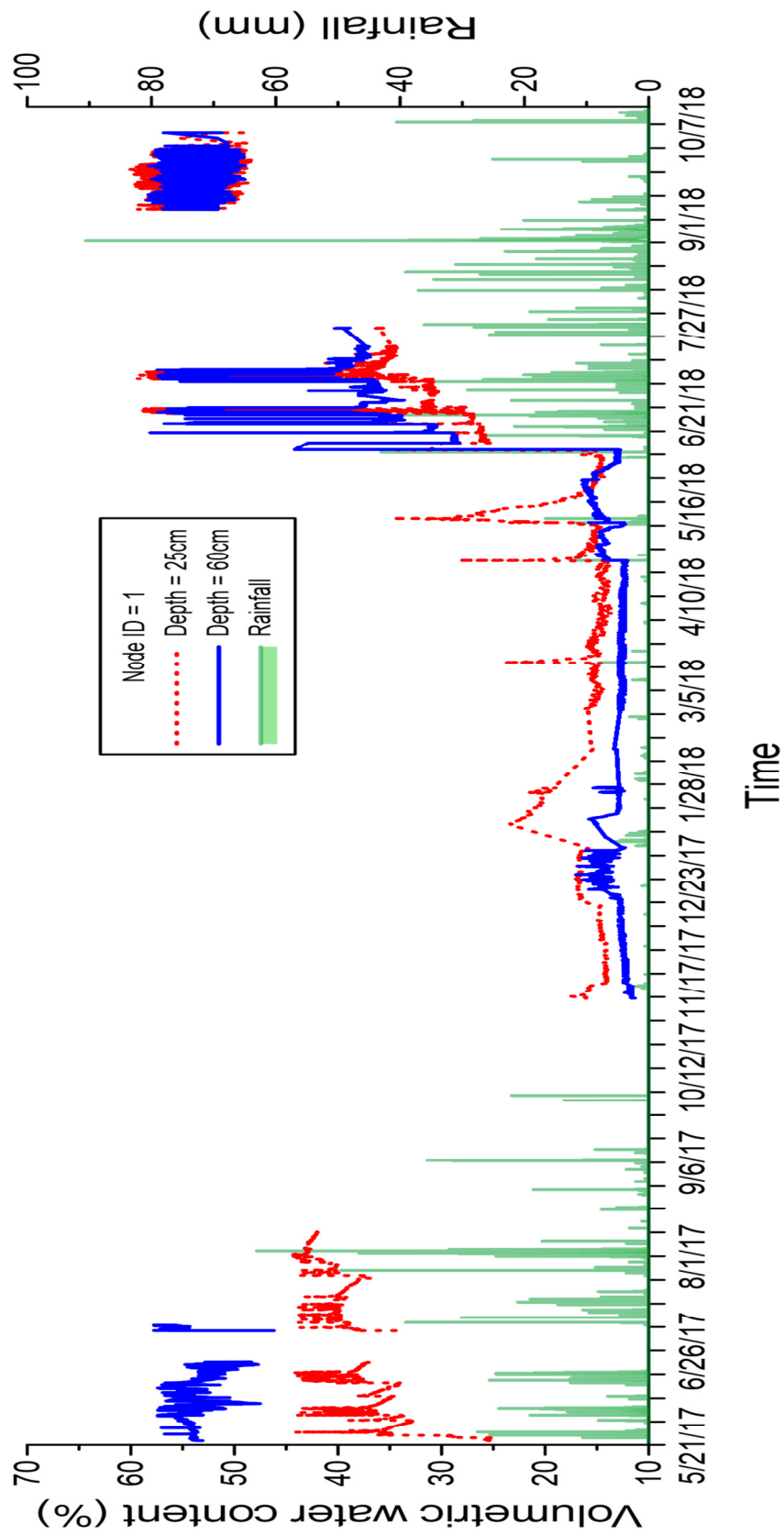


圖 4.5 Node1 體積含水量量測結果

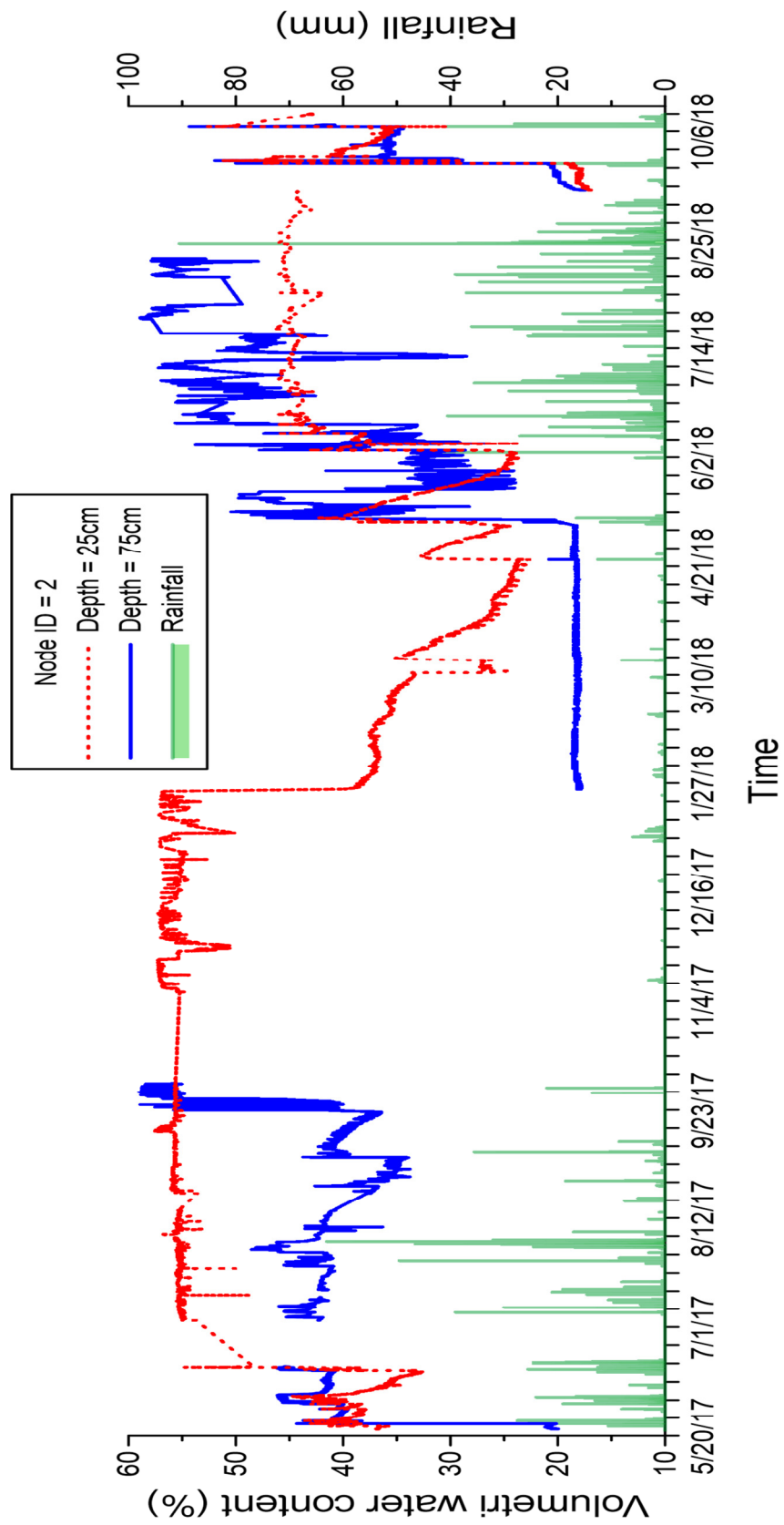


圖 4.6 Node2 體積含水量量測結果

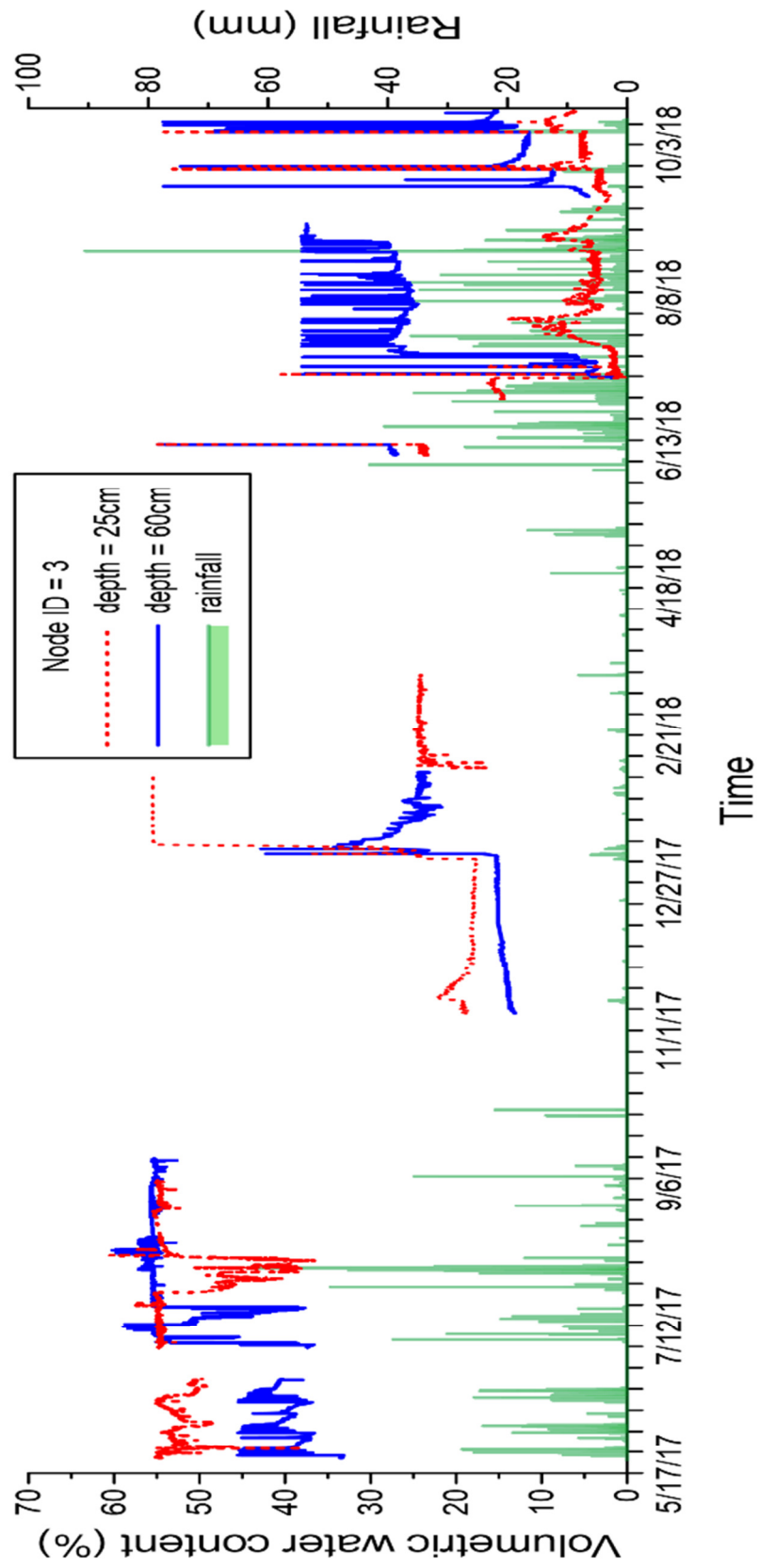


圖 4.7 Node3 體積含水量量測結果

- (1). 土壤水份計感測值對於降雨事件之反應相當明顯，而深層水份計之感測值反應時間略晚於淺層含水量計，其間差異為土層入滲時間差導致，本場址從降雨發生至含水量抵達峰值之歷時甚短，可及時反應降雨事件的影響。
- (2). 在降雨事件發生後，含水量皆會在乾季時逐步降回降雨前之穩定值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測用途。
- (3). 藉由已完成之基本物性試驗得知甲仙現地地表土壤之孔隙比為 0.6，可推算其飽和時之土壤體積含水量為 38%。圖中顯示 Node0、Node1 與 Node2 之深層含水量計始終處於飽和狀態，而淺層含水量計於降雨時迅速接近飽和狀態。
- (4). Node3 之含水量計反應較為異常，其淺層含水量始終高於深層含水量，且深層含水量對於降雨事件之影響更大也更迅速，可能相較於其他監測點位皆位於甲仙聯外道路之上邊坡，Node3 則位於聯外道路之下邊坡，可能有路基、擋土牆等結構物影響地表下土層分布。另外由聯外道路旁之擋土牆透水孔流量甚大顯示，道路旁邊坡土層長期處於飽和狀態也有可能影響下邊坡之地下水分布。

4.2.2 傾斜儀監測結果

圖 4.8 為各監測模組測得之傾斜角變化，傾斜角方向之數值意義如圖 4.9 所示，結果顯示甲仙邊坡之各測站位置，表層土壤於觀測期間內有約 1 度微幅的滑移，其方向同邊坡走向，惟傾斜角變化幅度不大，現地並無顯著淺層邊坡破壞跡象，仍待系統長時間觀察。

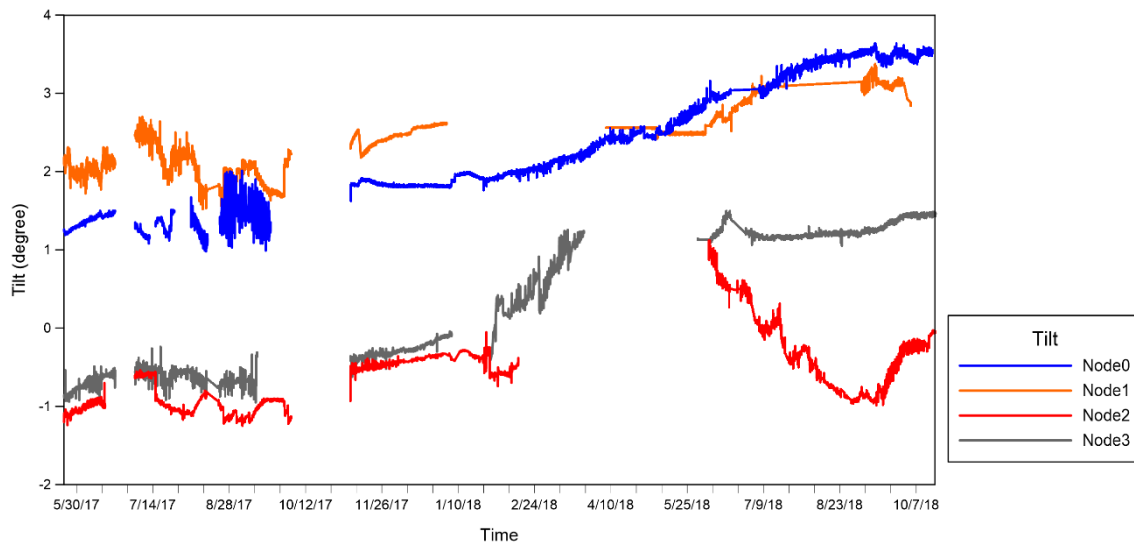


圖 4.8 甲仙測站傾斜角監測結果

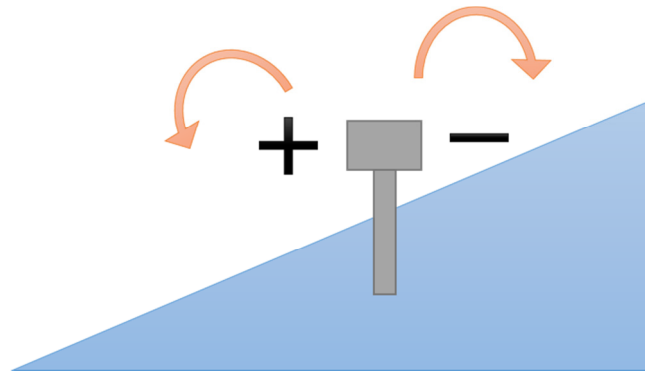


圖 4.9 傾斜角量測方向

4.3 西湖場址土層監測模組安裝測試

西湖場址位於國道三號西湖服務區北上段旁之邊坡(如圖 4.10 所示)，邊坡定位約在北緯 $24^{\circ}33'48.21''$ 、東經 $120^{\circ}45'37.37''$ (如圖 4.11 所示)。於西湖場址取樣做室內基本物性試驗，包括篩分析試驗、比重計試驗、土壤比重試驗、阿太堡試驗、現地乾單位重試驗。由篩分析試驗結果結合比重計試驗結果，可大致分類為含細料細砂，大部分粒徑分佈於 100 號篩，細料含量超過 12%，由阿太堡試驗結果液性限度 LL 為 42，塑性限度 PL 為 26，塑性指數 PI 為 18，統一土壤分類法分類結果為 SC 黏土質砂。由現地取低擾動土樣試驗，三組結果平

均得現地乾單位重 $\gamma_d = 1.47 \text{ (gw/cm}^3\text{)}$ ，換算可能土壤單位重約介於 $14.5 \sim 18.75 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ ，若取平均(飽和度 50%)則單位重約為 $16.62 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 。



圖 4.10 西湖邊坡實照

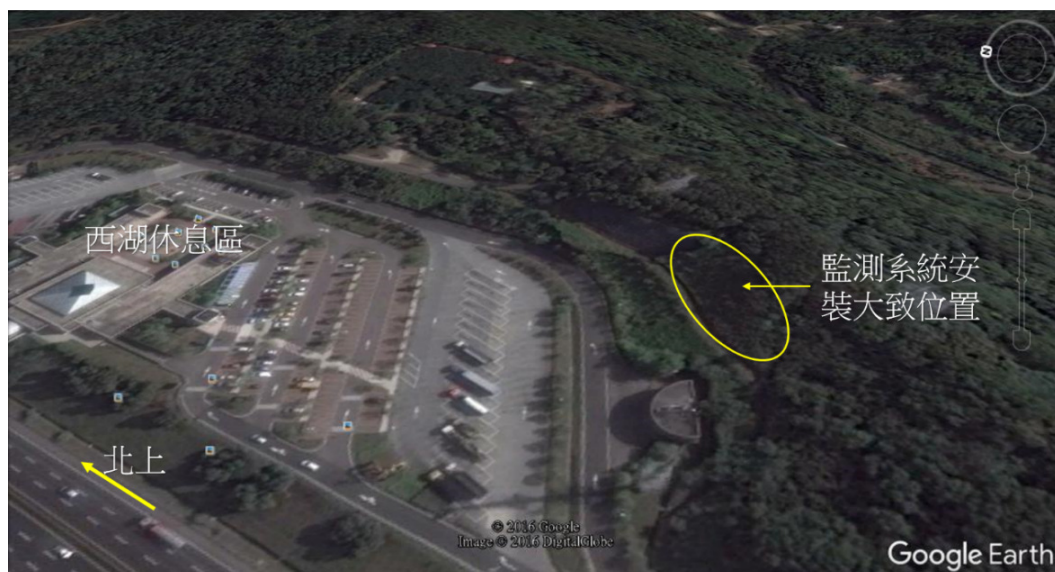


圖 4.11 西湖系統安裝位置示意圖 (Google Earth)

監測系統設計上由監測模組、太陽能系統及資料接收端三部分組成(如圖 4.13)，監測模組上配置多點電子式含水量計、高精密度電子式傾斜儀、無線傳輸模組及微控制器，為各種微機電感測元件之整合，

量測各深度土壤含水量及地表傾斜量，並將資料以無線傳輸方式傳出。太陽能系統用於供給監測模組電力，使系統不斷電長期監測。

西湖場址共安裝 3 支監測模組，分別編號為 Node 4、Node 5 及 Node 6，Node 6 為 4 深度含水量量測總長約 1 米，Node 4 及 5 為 2 深度含水量量測總長約 1.1 米。

4.4 2018 年西湖場址監測資料

4.4.1 西湖場址土層含水量監測資料

圖 4.12~14 分別為 Node4~6 於 2017/7/8—2018/10/之體積含水量隨降雨之變化，結果顯示此區土壤深度達 50cm 之土層飽和後不易消散，而本年度更新之 Node6 其 25cm 深度之水分計已失效，將於明年雨季前進行更換。

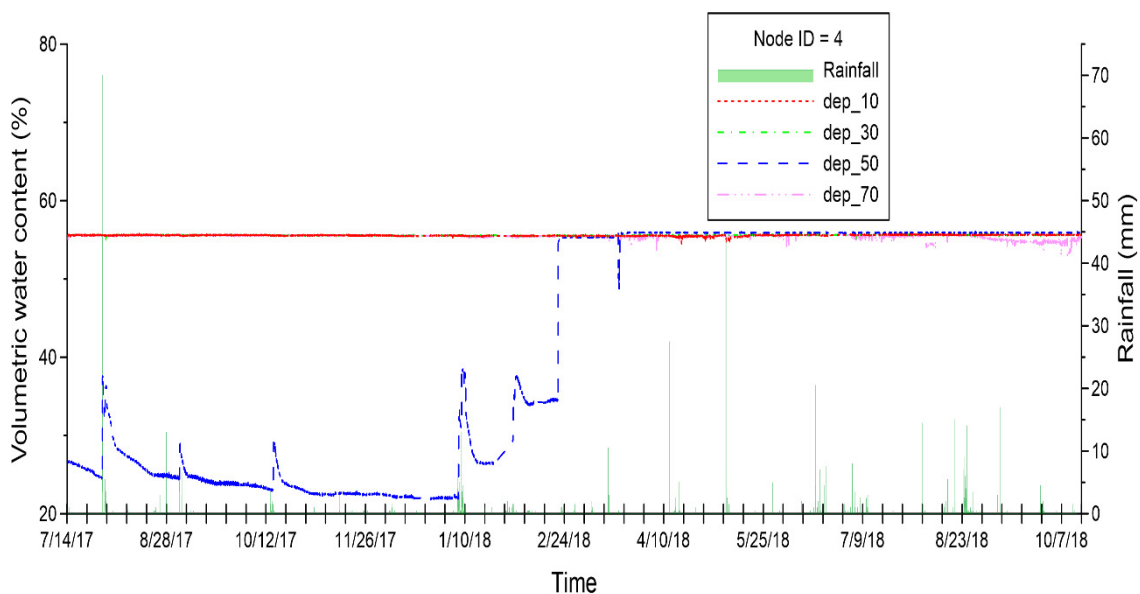


圖 4.12 Node4 體積含水量量測結果

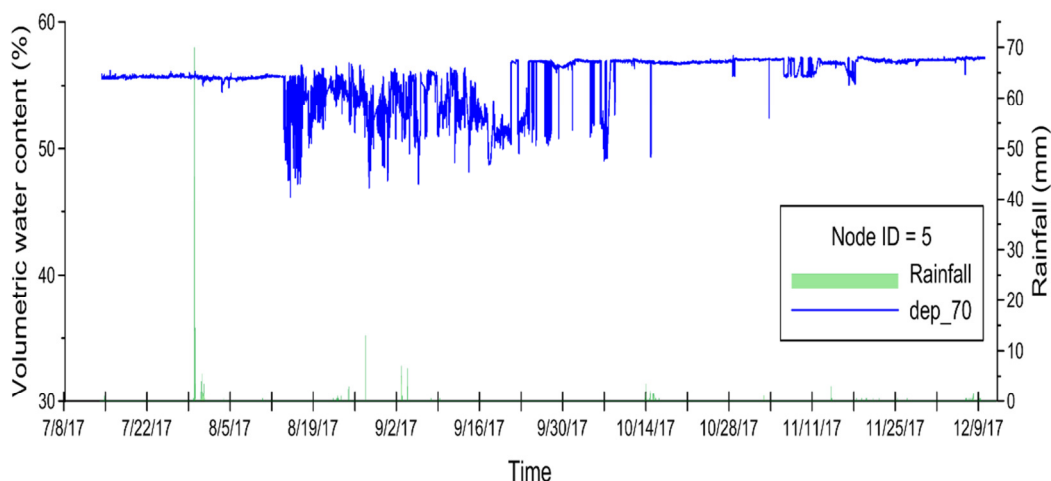


圖 4.13 Node5 體積含水量量測結果

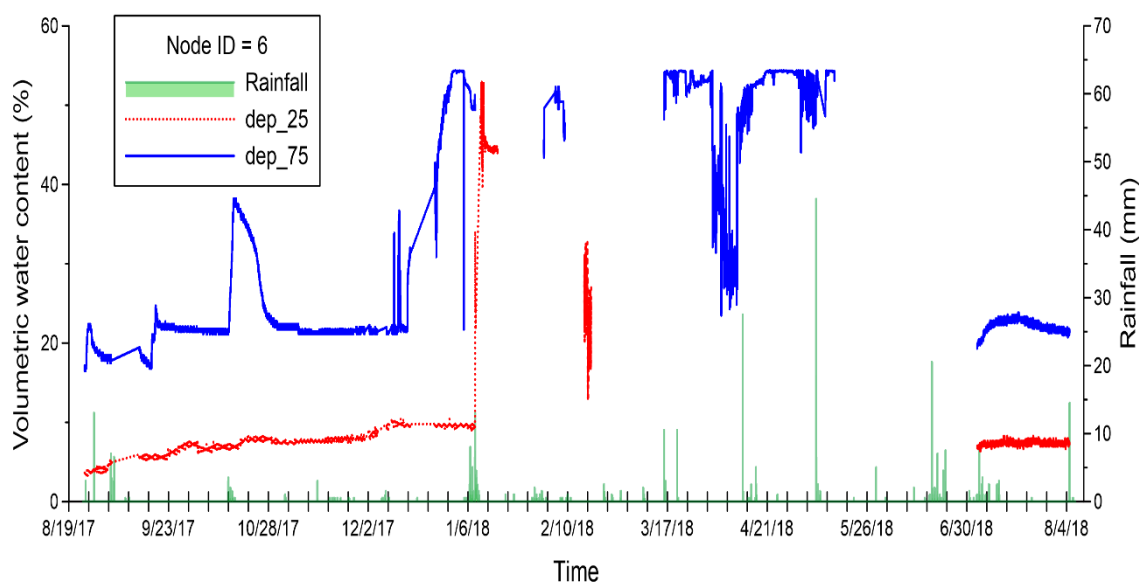


圖 4.14 Node6 體積含水量量測結果

4.4.2 西湖場址傾斜監測資料

圖 4.15 為 Node 5 及 6 於 2017/7/20 至 2018/6/20 之監測傾斜量變化結果。各 Node 安裝時初始傾斜量約 $-4.0\sim 2.5$ 度，原因為鑽孔非垂直與傾斜模組焊接於電路板時即有些許偏斜，初始偏斜量僅作為後續監測相對應之初始值。

由 Node6 長期監測結果可發現整體趨勢為傾斜度數增加約 $0.5\sim 1$ 度左右，現地淺層變位監測結果顯示場址於過去半年內傾斜量約增加

0.2 度，假設監測模組底端若為不動點則換算後之地表位移約 0.3~1.0 cm 左右，代表此邊坡淺層可能有持續潛變的現象，但實際上是否如此仍需持續觀察。

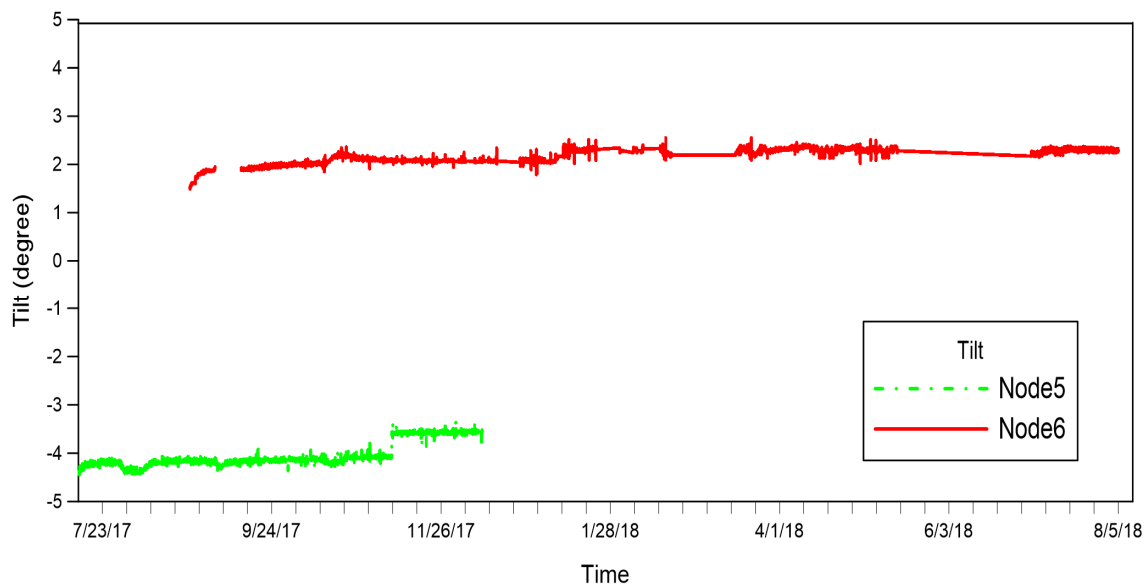


圖 4.15 西湖測站傾斜角監測結果

第五章 飽和層滑動場址監測與分析

針對飽和層滑動預警系統研發，本年度之主要目標為完成現地監測系統建置及搭配之水力力學耦合之邊坡極限平衡與數值模擬，關鍵為選定適合之研究場址。本研究飽和層破壞定義為破壞面發生於飽和土層，其力學平衡因地下水位上升使其孔隙水壓增加導致土壤強度與勁度降低，平行滲流使下滑驅動力增加，引致邊坡滑動。為進行本研究之系統測試與現地監測，飽和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，坡角小於土壤有效摩擦角。
2. 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。
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. 鄰近具有通訊訊號，以進行雲端資料傳輸。

由於本計畫研究對象為飽和層土壤邊坡破壞，此雖為台灣常見之災害類型，但進行解析法分析需有一定解析度之地形幾何與詳盡之地質材料參數資料，此類資料並不見於現有資料庫，經公路總局第五工程處同意，選定台 20 線 52k+150 處為監測場址，並於雨季前完成監測系統建置。

5.1 監測場址背景資料

5.1.1 地理位置及破壞歷史

本研究選定監測場址為台 20 線 52k+150 處，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、路基流失及道路下線等情形，嚴重時甚至造成道路中斷，影響交通，危及用路人之安全，亦造成經

濟上的重大損失，里程 52k+80~240 路段下邊坡於 2010 年莫拉克颱風期間，發生嚴重崩塌，造成西行線車道交通中斷，而 2011 年，該路段針對莫拉克風災緊及補強後，至今路段仍持續下陷，邊坡尚處於不穩定之情形。



圖 5.1 場址位置圖

5.1.2 地質構造與狀態

根據中央地質調查所之地質資料顯示本場址附近出漏地層為北寮頁岩、長枝坑層及糖恩山砂岩，場址西北側有一逆斷層-平溪斷層。北寮頁岩以青灰色頁岩和砂岩為主，長枝坑層以青灰色細粒砂岩或泥質砂岩與黑色頁岩所形成枝帶狀互層為主，糖恩山砂岩主要由淡青灰色細粒砂岩所組成，砂岩成塊狀，而本研究路段邊坡位於長枝坑層及糖恩山砂岩之交界處，如圖 5.2 所示。根據青山工程顧問公司(2017)於此處進行之鑽探調查報告，本研究之邊坡地質狀態可概分為三種，分別說明如下：

1. 崩積層：本層為覆蓋邊坡之最表層，主要由土壤、岩屑及大小不一之崩積岩塊組成。本研究區域道路上下邊坡之崩積層厚度大多在 10 公尺內。

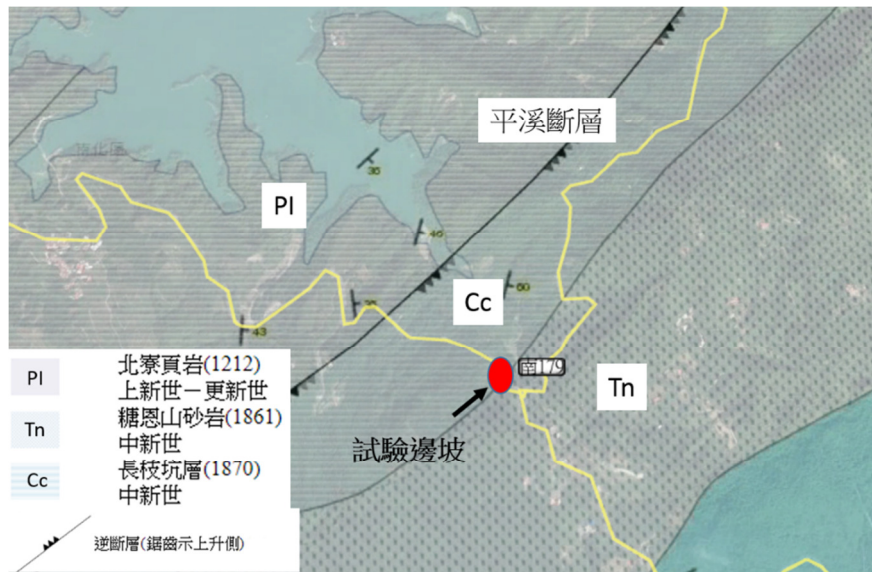


圖 5.2 區域地質圖(改自中央地質調查所)

2. 岩層：本路段岩盤上部多為厚層砂岩，下部則多為深灰色頁岩與灰白色細粒砂岩所組成之互層。
3. 破碎帶：因所在區域鄰近數個斷層及皺褶作用影響，受大地應力作用較劇烈，使本場址之地質較為破碎，產生相當發達之節理與剪裂帶。

並根據曾致仁(2017)整理此場址各層土層土壤、岩石試體之室內試驗結果如表 5-1。

表 5-1 場址土層參數

地層	崩積層	破碎帶	砂頁岩互層
濕土單位重(t/m^3)	2.01	2.2	2.56
含水量(%)	19.61	8.18	2.27
凝聚力 c (kPa)	50.1	81.7	340
摩擦角 ϕ (deg)	14.4	17.4	28.4
飽和水力傳導係數 (m/sec)	1.5E-3	1E-5	5.2E-5

5.1.3 歷年降雨與地下水概述

本研究地區歷年降雨狀況係參考鄰近之甲仙雨量站與北寮雨量

站，統計 2013 年至 2017 年月平均降雨量如圖 5.3，年平均降雨量分別為 2925.4 mm 與 2280.8 mm，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，佔全年總雨量 89.3%及 87.5%，而 10 月至翌年 4 月期間，降雨量則明顯較少。

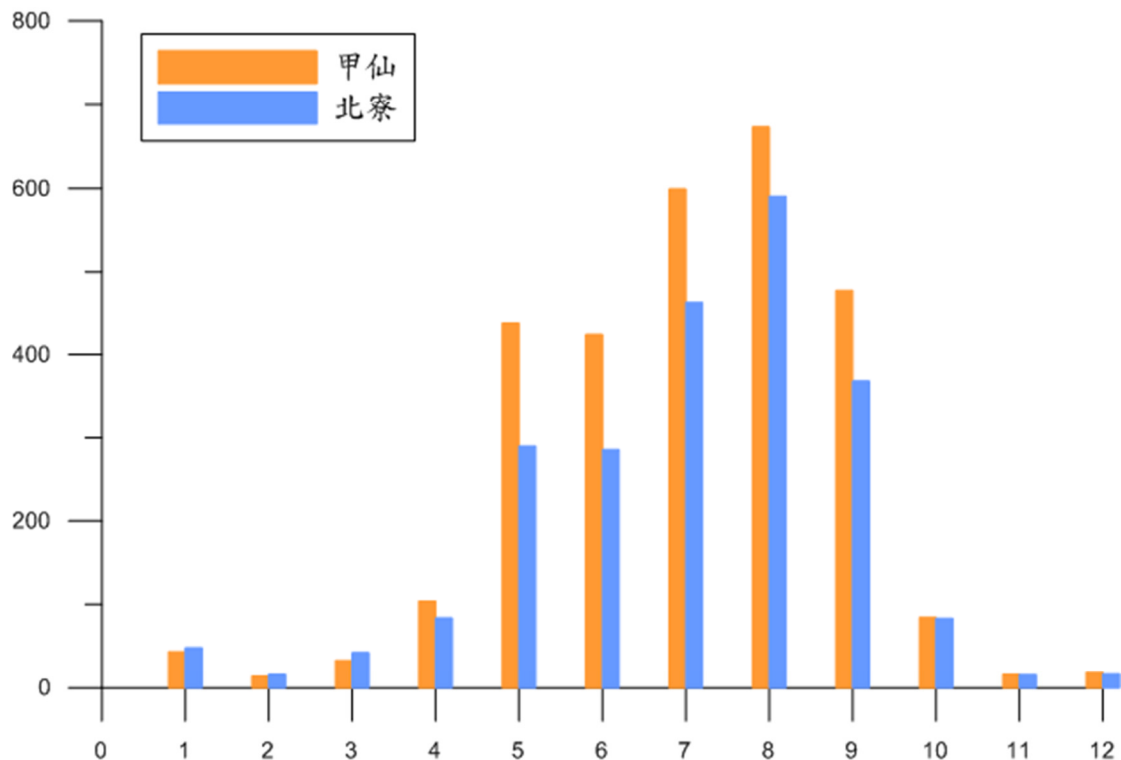


圖 5.3 2013 年至 2017 年月平均降雨量

根據曾致仁(2017)與青山工程顧問公司於此區域之水位監測資料，本研究道路下邊坡(孔位編號 ID 02)與道路上邊坡(孔位編號 ID 04)之歷年地下水位變化分別如下：

- (1) ID 02 之乾季常時水位約在高程 262.5m 左右，並於 2016 年 9 月底梅姬颱風侵襲時達到該孔位自監測以來最高地下水位 271.14m。
- (2) ID 04 之地下水位較高記錄發生於蘇迪勒颱風、梅姬颱風及 2017 年 5 月至 7 月之連續降雨期間，水位上升幅度最大約 7~9m。

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。

5.2 監測配置

本場址舊有 ID 02 與 ID 04 之水位井為量測位於深層砂岩與破碎待間之拘限含水層，本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。新設水位孔於 2018 年 5 月 21 日開始施工，圖 5.4 與圖 5.5 為現場施工情形，並已於 2018 年 5 月 24 日完成，為監測本區域自由含水層之水位變化，新設孔位鑽探深度僅需達崩積層厚度，經現場施工人員依岩芯判斷，兩孔深度皆為 11m。

本研究亦於此場址設置雨量計，有鑑於過往研究皆為利用臨近雨量站之降雨資料，可能無法反應場址真實降雨情況、土壤入滲及地下水位變化，故此雨量計監測之降雨量將與臨近雨量站、現地模組監測資料進行比對。並於上下邊坡各裝設含水量探棒及傾角監測，監測地表體積含水量及傾角變化。



圖 5.4 道路上邊坡鑽探施工情形



圖 5.5 道路下邊坡鑽探施工情形

本研究計於台 20 線 52k+150 處裝設五組無線監測站，與一組伺服器端，各監測站之資訊如表 5-2，位置配置圖與剖面示意圖如圖 5.6 與圖 5.7 所示，圖 5.8 ID 01 測站為雨量計，位於道路下邊坡，經現地探勘，考量雨量計裝設需求、裝設難易度及人員通達便利性後，此處位較適宜之場地；圖 5.9 ID 02 與圖 5.11 ID 04 測站分別位於道路上下邊坡，02 與 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侷限含水層水位；圖 5.10 ID 03 與圖 5.12 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；伺服器端現場安裝示意圖如圖 5.12，另外此處光照較好，故 ID 02 與 ID05 測站太陽能板亦安裝於此。

5.3 監測資料與分析

台 20 線 52k 之無線土層監測系統於 2018/05/25 安裝完畢，歷經梅雨季，監測成果將於以下小節分別說明。

表 5-2 測站資訊表

ID	配置	水位孔深度	水位孔高程	圖
01	雨量計	無	無	5.8
02	液位計	40 m	292m	5.9
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m	5.10
04	液位計	60 m	286m	5.11
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m	5.12

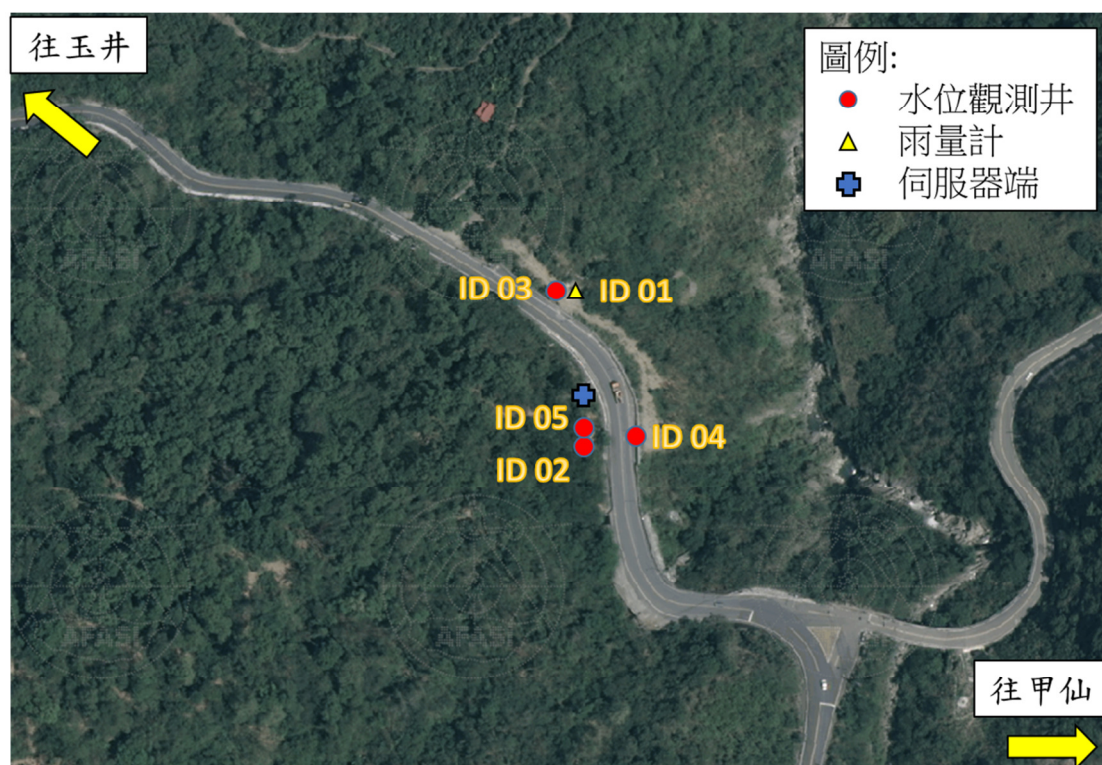


圖 5.6 監測儀器配置圖

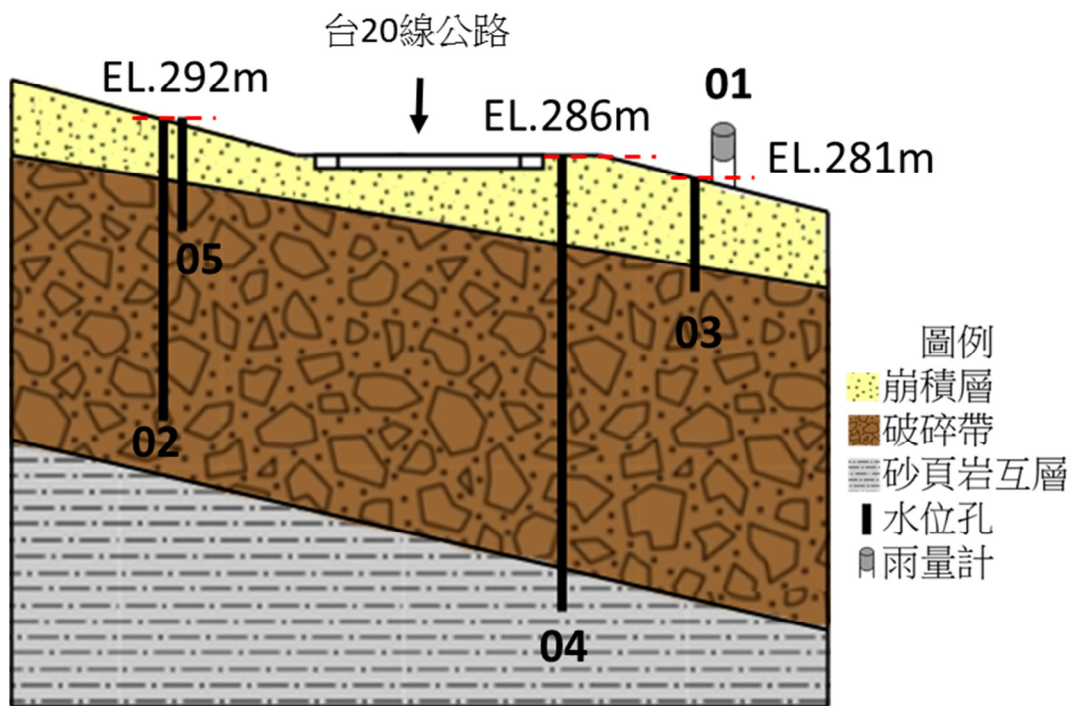


圖 5.7 監測剖面示意圖



圖 5.8 ID 01 測站



圖 5.9 ID 02 測站



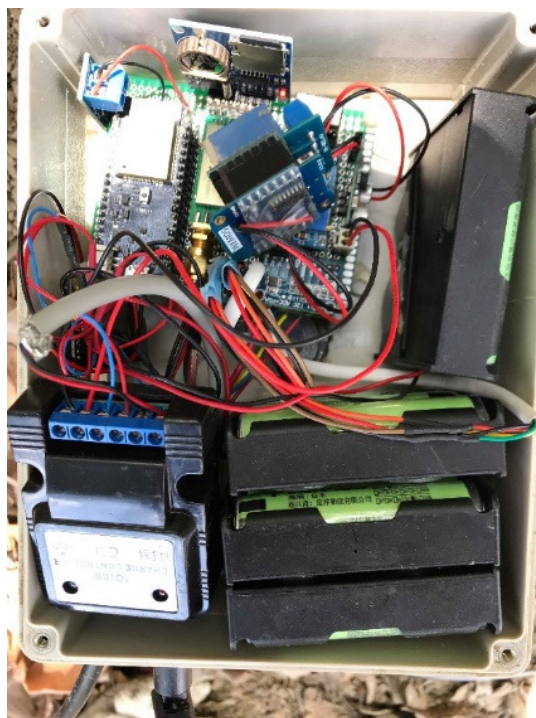
圖 5.10 ID 03 測站



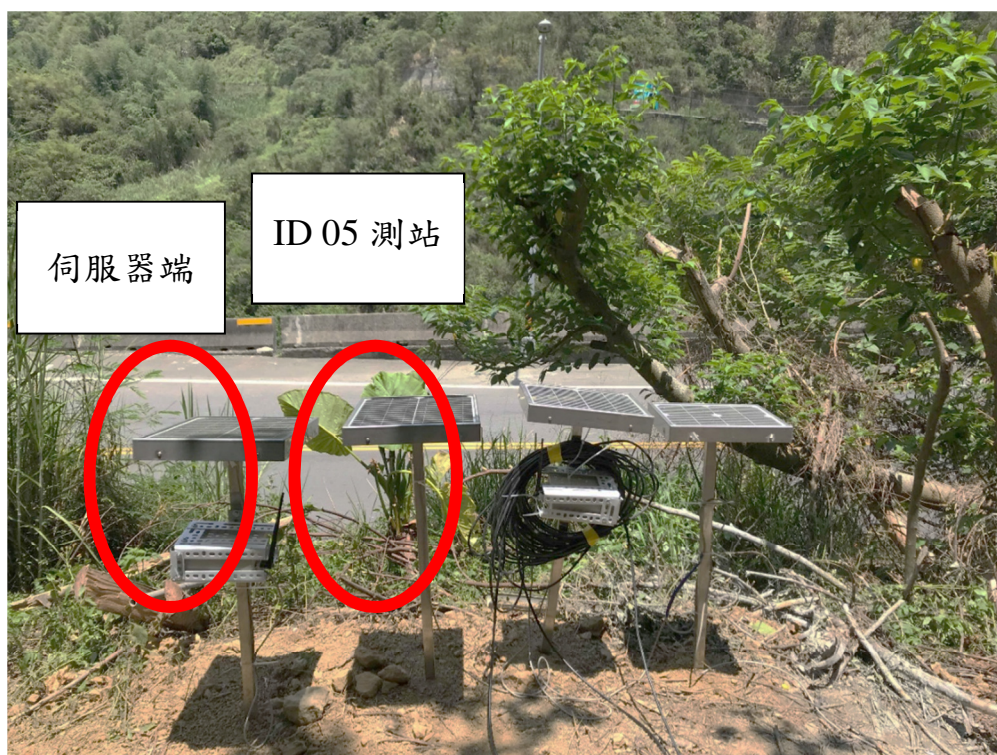
圖 5.11 ID 04 測站



(a) 伺服器端現場配置



(b) ID 05 測站模組配置



(c) 現場安裝示意圖

圖 5.12 伺服器端與 ID 05 測站

5.3.1 降雨

場址安裝至今所經歷之降雨事件與雨量記錄如圖 5.13，鄰近甲仙雨量測站之記錄如圖 5.14，兩圖對比可發現降雨事件幾乎相同，但有局部降雨事件與降雨強度差異，引此本研究後續資料分析皆使用 ID 01 雨量計之降雨量，以反應真實之現場情況。

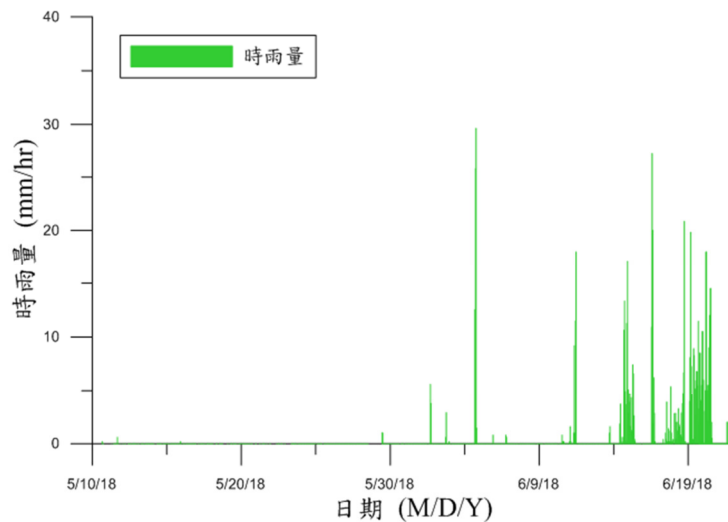


圖 5.13 ID 01 雨量監測數據

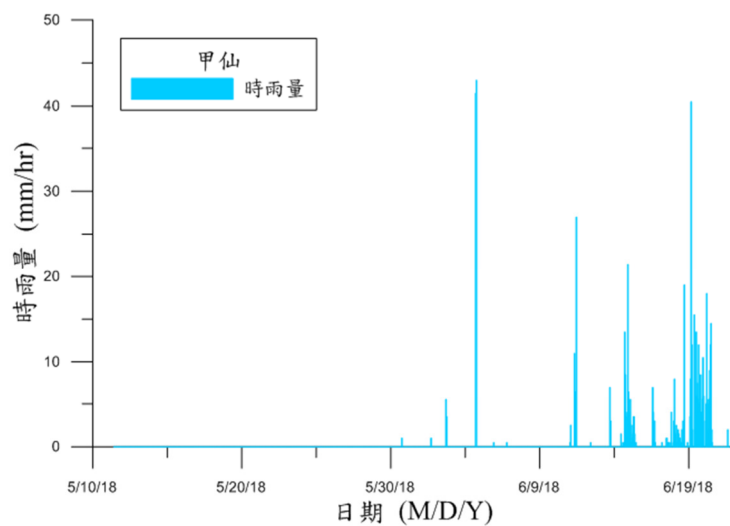


圖 5.14 甲仙雨量站時雨量

5.3.2 地下水位

圖 5.15 至圖 5.18 為各測站之地下水位監測圖，ID 02 與 ID 04 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，符合過往監測記錄；ID03 測站初期水位為鑽探施工的殘餘水位，施工完成後即快速消散，此孔於梅雨季期間，水位僅些微上升，推測因此孔位於道路下邊破，臨近坡面可快速排水，導致崩積層內水位難以蓄積；ID05 測站初期亦有殘餘水位，施工完成後即快速消散，而此孔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易蓄水，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。

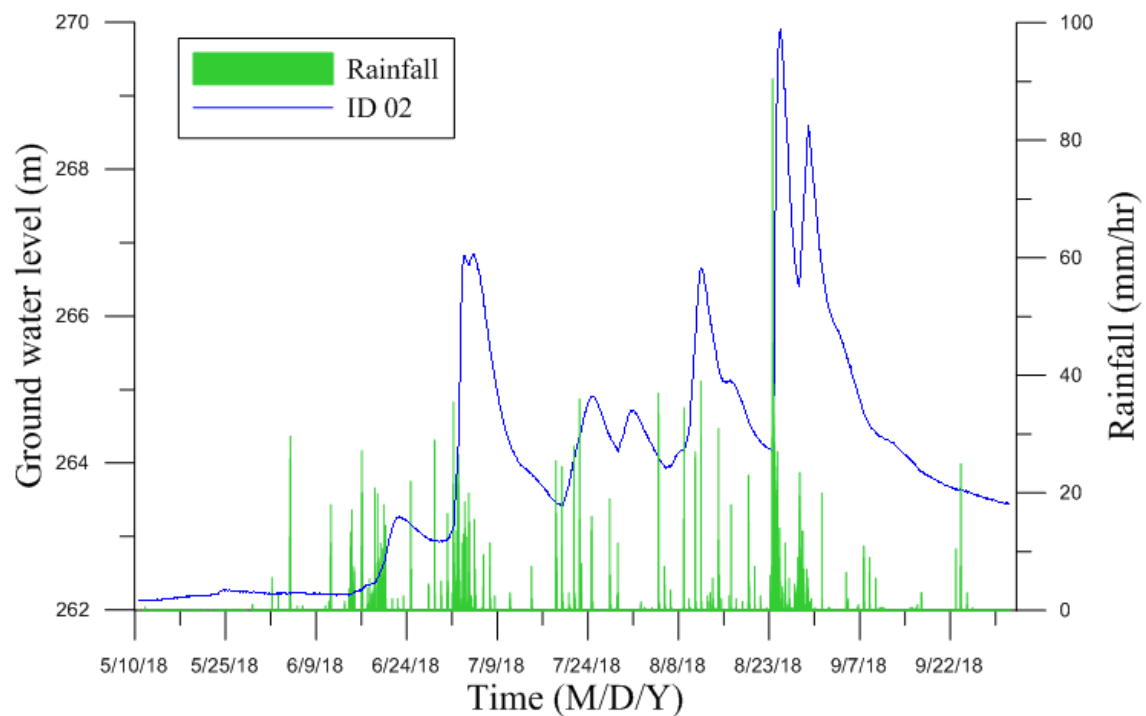


圖 5.15 ID 02 地下水位監測數據

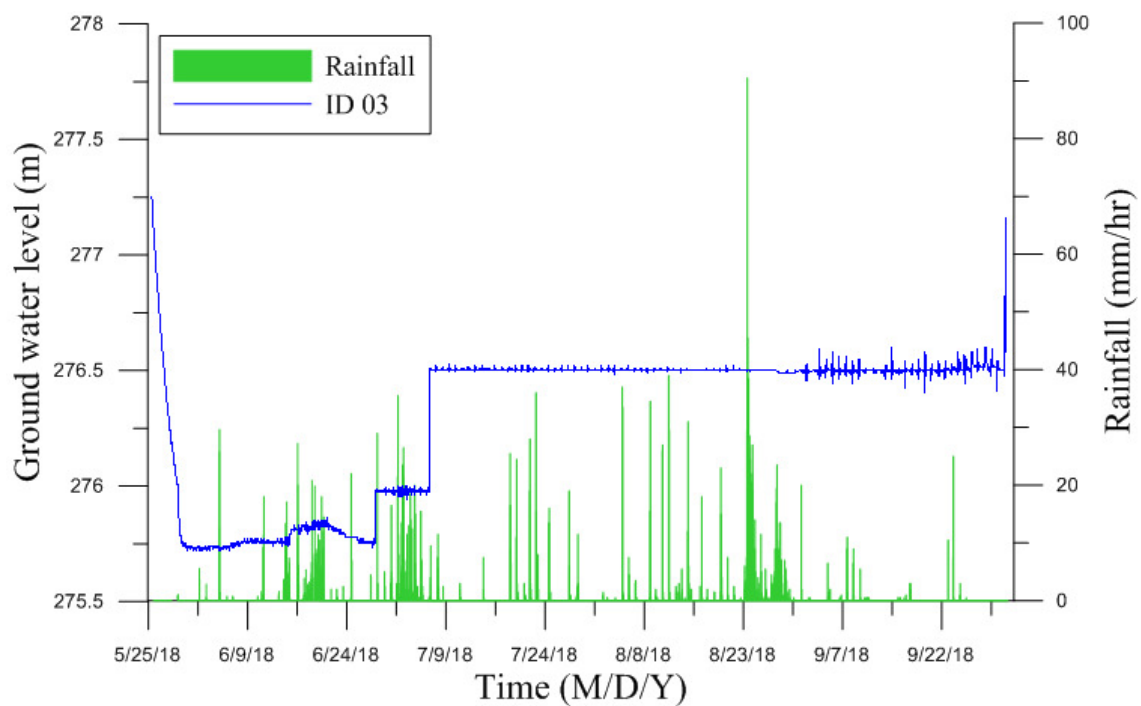


圖 5.16 ID 03 地下水位監測數據

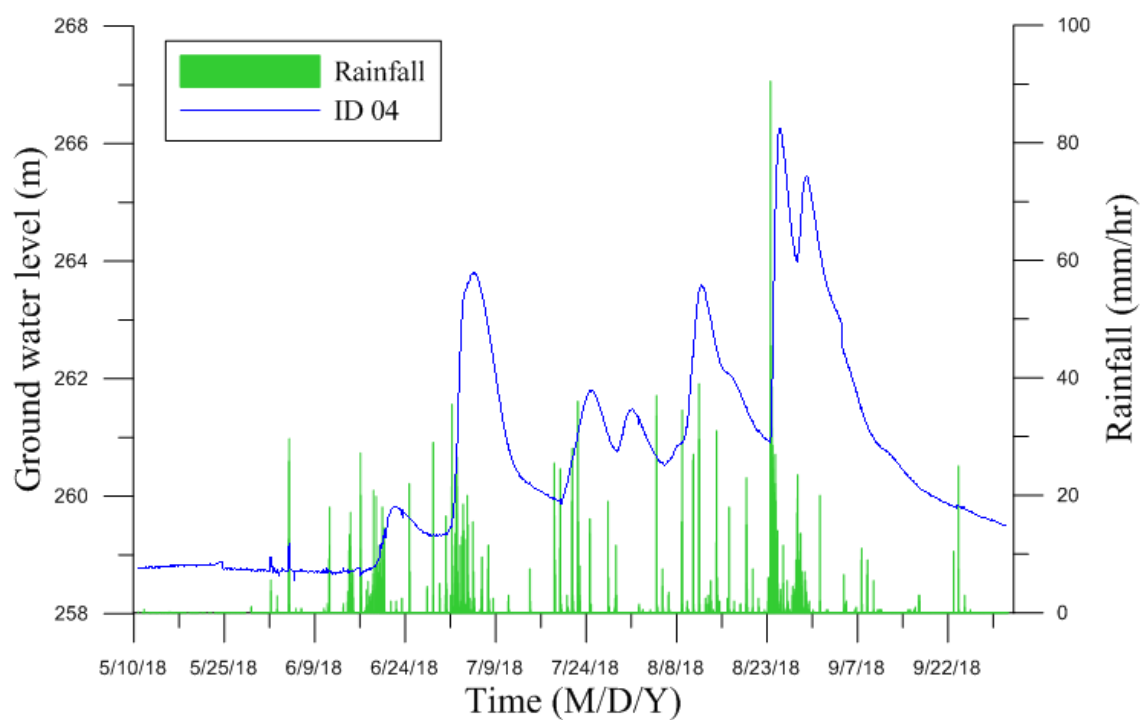


圖 5.17 ID 04 地下水位監測數據

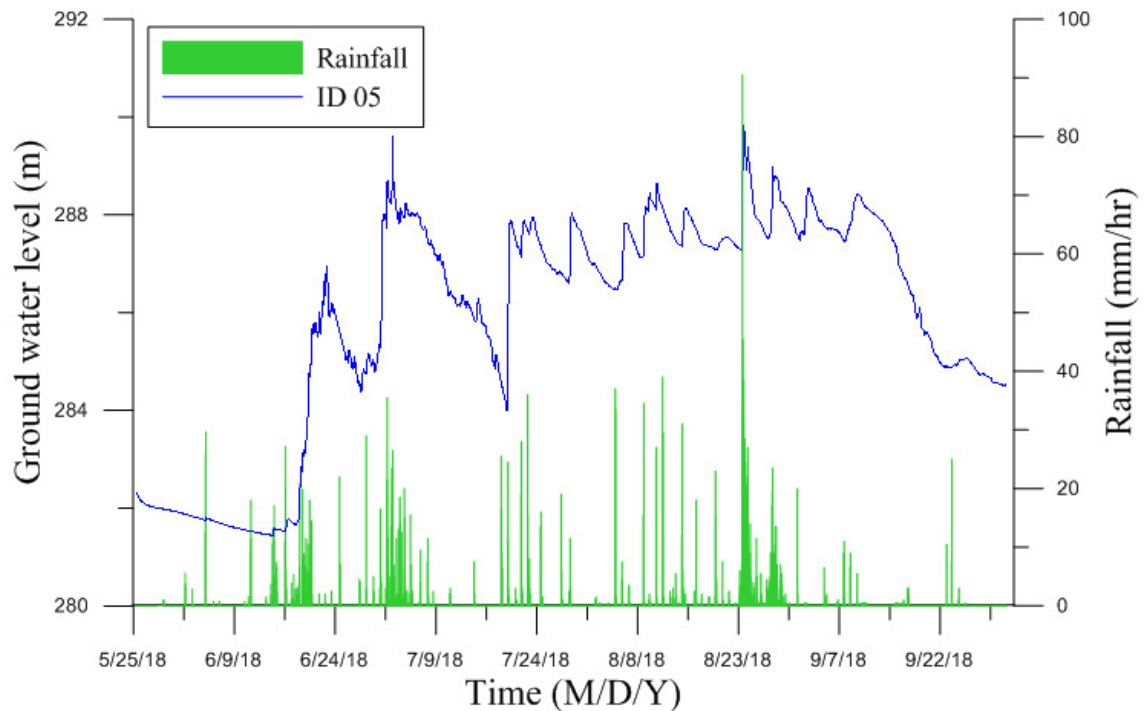


圖 5.18 ID 05 地下水位監測數據

圖 5.19 為進行降雨特徵與水位上升統計分析各項參數定義示意圖，定義開始降雨至地下水位開始變動間的累積雨量為地下水位上升之降雨門檻值，其時間為雨量門檻延時，地下水位上升速率為水位上升高度除最高水位時間減水位開始上升時間，最高水位累積雨量指開始降雨到最高水位之間的累積雨量。本研究將事件相關數據整理成表 5-3 與表 5-4，根據國家災害防救科技中心定義降雨延時 6 小時以內為短延時降雨，6 小時以上為長延時降雨。

圖 5.20 顯示 ID 02 與 ID 04 二者水位上升趨勢相同，水位上升高度幾乎相同，由此可證明二者為同一岩層地下水層，以下分析皆以 ID 02 監測結果(圖 5.15)為代表。岩層地下水位變動受累積雨量影響，水位於累積雨量達 70 mm 時開始上升，圖中 2018/06/21 至 2018/06/26 期間雖偶有降雨，但因降雨量未達變動門檻，故水位並無變化，2018/06/27 至 2018/06/30 之降雨累積雨量稍大，仍僅維持水位高程，直至 2018/07/01 開始降雨到 2018/07/04 期間累積雨量達門檻值，水位開始升高。圖 5.21 為累積雨量與水位上升高度關係，趨勢顯示累積雨量越大，水位上升越多，而圖中事件四之數據與其他數據關聯性較低，推測因事件四發生前，前期降雨使土層飽和度上升，使事件四之降雨能快速滲入地下水層，提升地下水位高度。

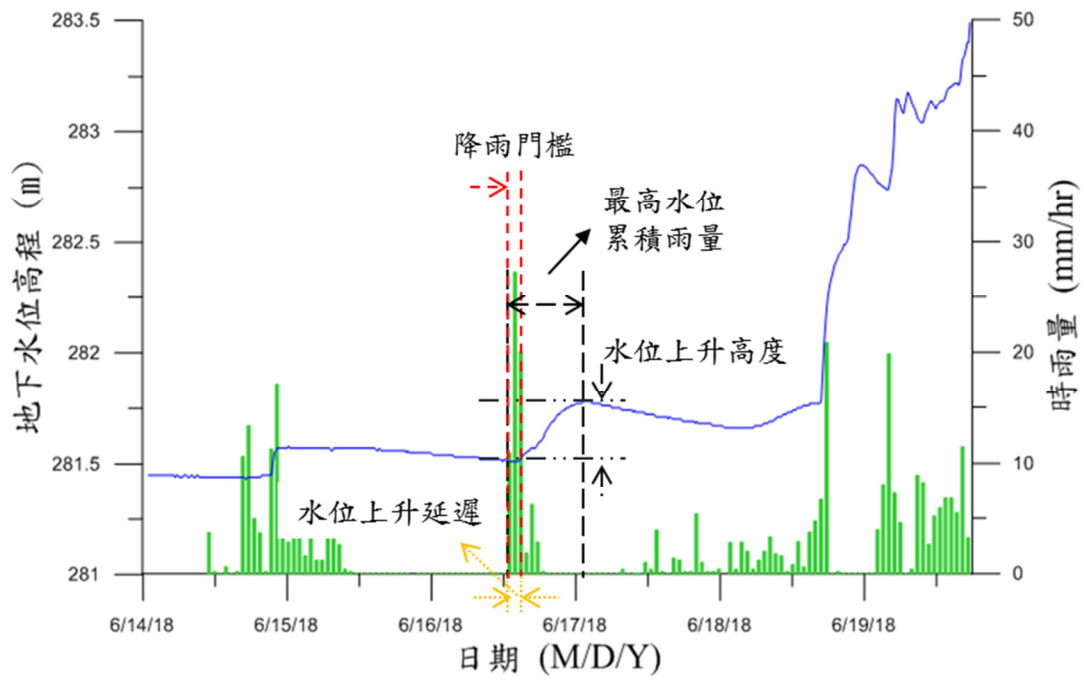


圖 5.19 降雨特徵與水位上升統計分析各項參數定義示意圖

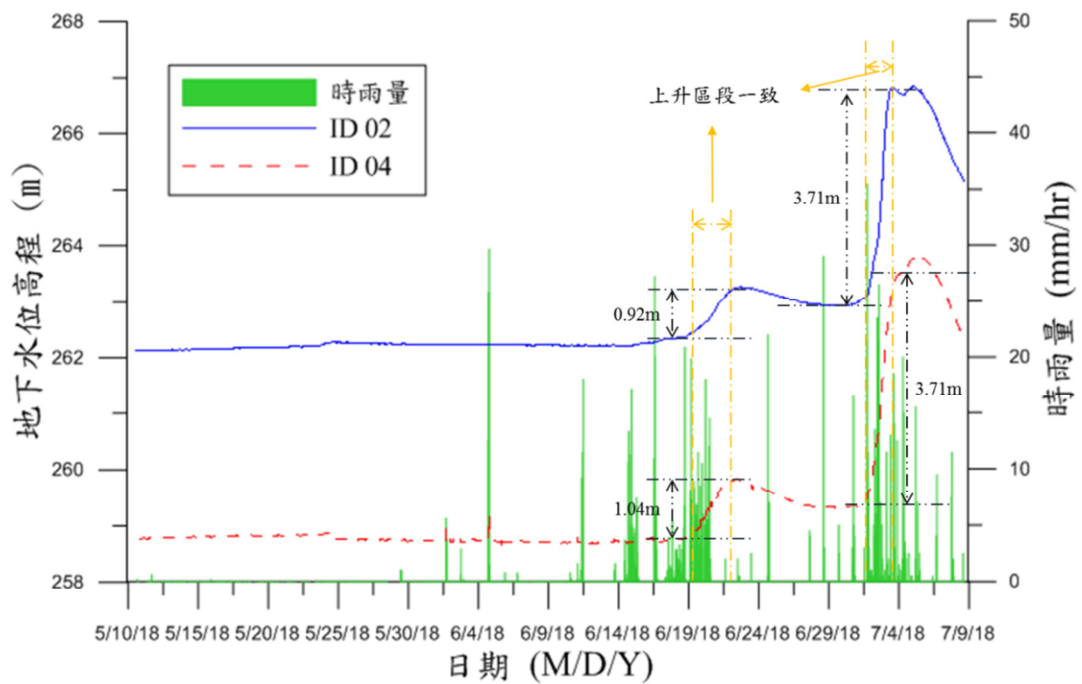


圖 5.20 ID 02 與 ID 04 水位比較示意圖

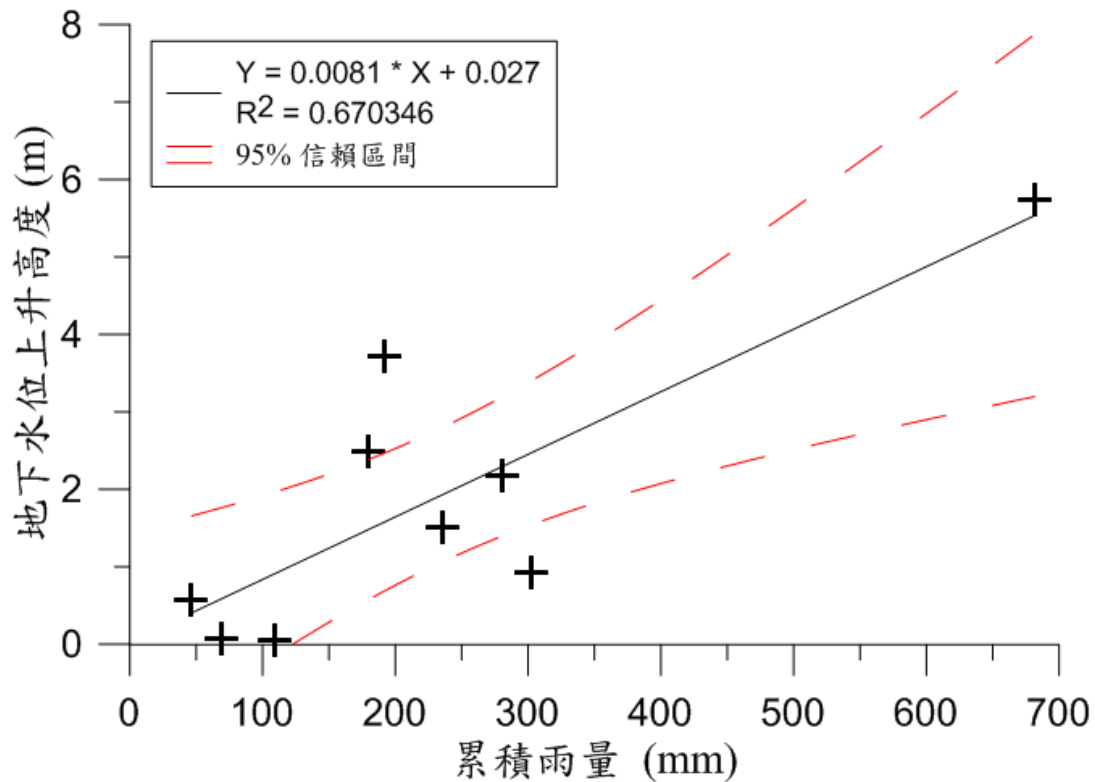


圖 5.21 岩層累積雨量與水位上升高度關係圖

監測初期，尚處於乾季，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 5.22 所示，可以此特性推估降雨開始後水位開始上升時間。圖 5.23 顯示累積雨量影響地下水位上升高度，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。

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與飽和滲透係數，土壤越接近飽和時，水力傳導越快，地表土層含水量越高，降雨越容易補充地下水層，水位越容易升高。

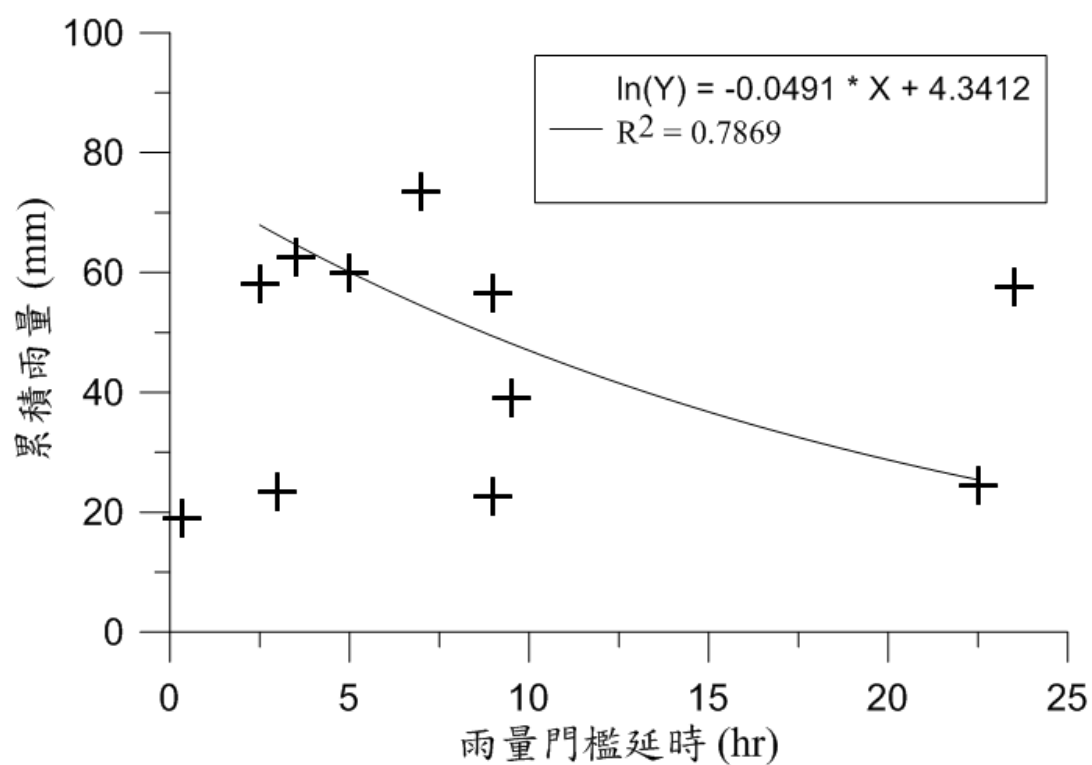


圖 5.22 崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖

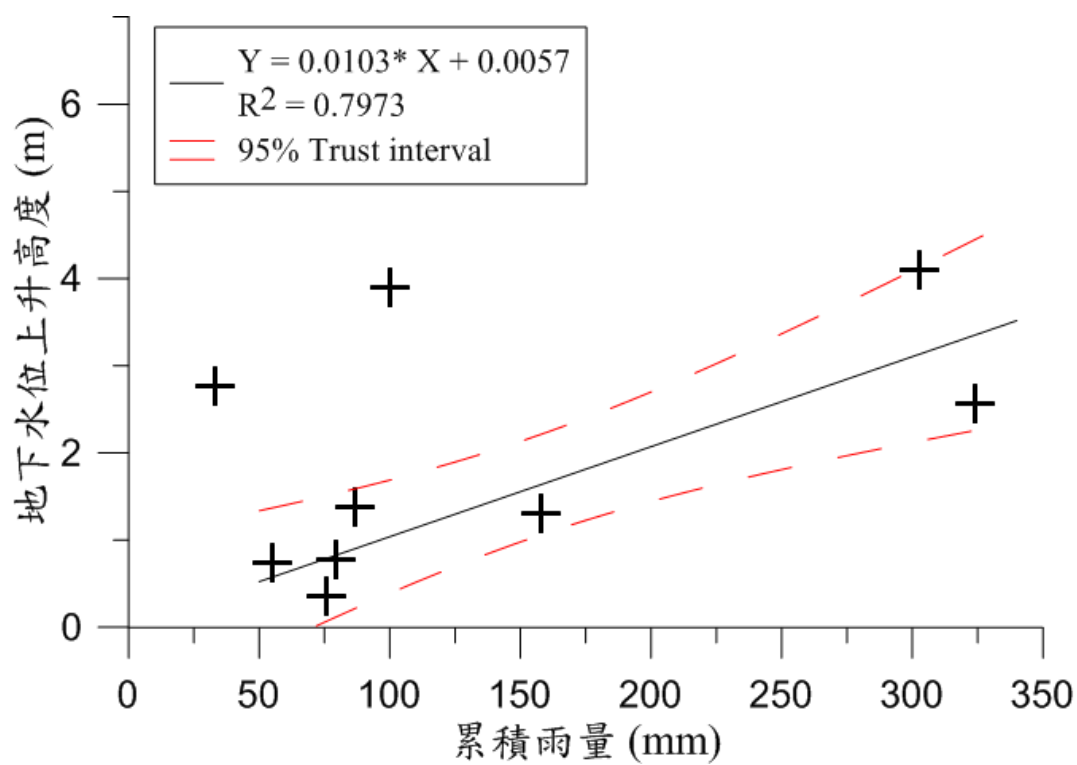


圖 5.23 累積雨量與地下水位高度關係

圖 5.24 為分析地下水位上升速率與體積含水量之關係，結果成高度正相關，顯示地表的體積含水量對地下水位上升速率有極大的影響，含水量越多上升速率越大。

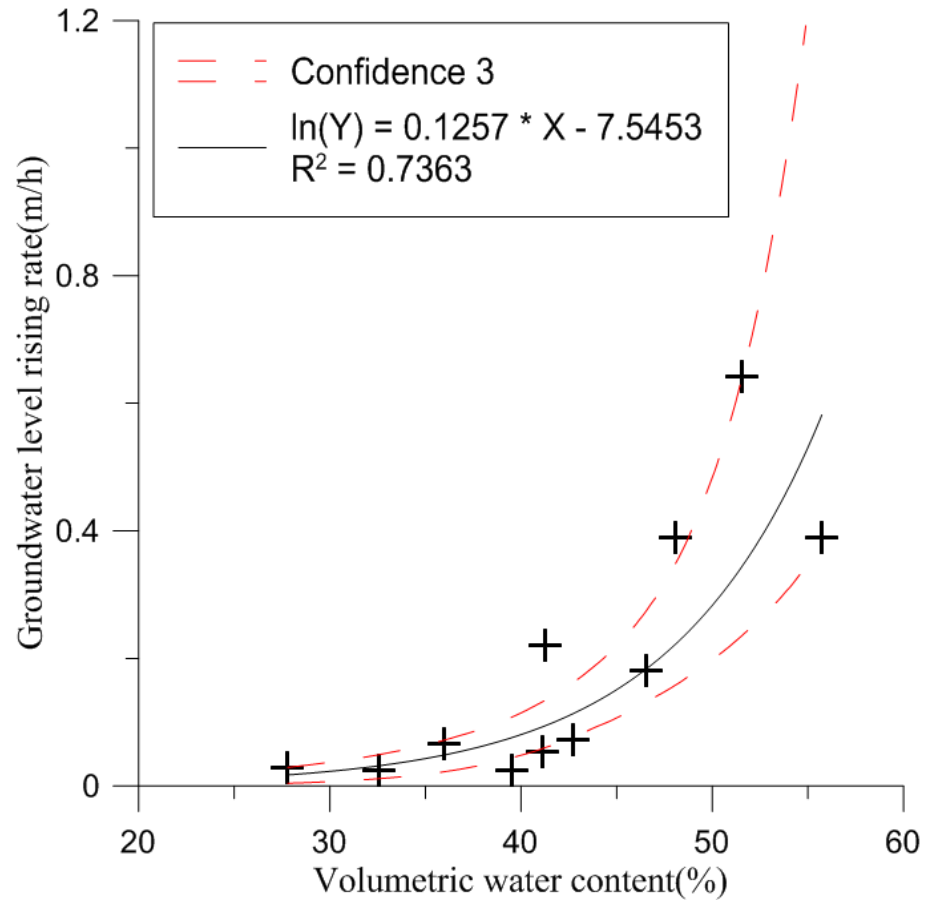


圖 5.24 地下水位上升速率與體積含水量關係

表 5-3 ID 02 降雨事件整理

事件	降雨開始	最高水位累積 雨量(mm)	水位開始上升 時間	最高水位時間	水位上升 高度(m)	門檻雨量 (mm)	雨量門檻 延時(hr)	地下水位上升 速率(m/h)
一	6/14/18 10:00	109.7	6/15/18 0:40	6/15/18 23:16	0.04	69.27	13.5	0.0018
二	6/16/18 12:00	69.27	6/16/18 15:33	6/17/18 3:47	0.06	69.27	3.5	0.005
三	6/17/18 7:00	183.66	6//18 11:20	6/22/18 14:48	0.92	34.57	27	0.0092
四	7/1/18 13:00	191.5	7/1/18 18:39	7/3/18 12:36	3.71	60	5.5	0.088
五	7/18/18 17:00	235.5	7/19 19:57:54	7/24 14:27:47	1.5	99	27	0.0131
六	7/27/18 15:00	46.5	7/29 1:26:21	7/31 13:48:01	0.56	46.5	34	0.0156
七	8/08/18 20:00	180	8/8 23:39:51	8/11 19:19:25	2.49	52	3.5	0.0369
八	8/23/18 04:00	681.5	8/23 15:27:35	8/24 20:39:52	5.74	192.5	11.5	0.1979
九	8/27/18 05:00	281	8/27 22:25:58	8/29 11:38:33	2.17	59.5	17.5	0.06

表 5-4 ID 05 降雨事件整理

事件	降雨開始	最高水位 累積雨量 (mm)	水位開始上升 時間	最高水位時間	水位上升 高度(m)	門檻雨量 (mm)	雨量門 檻延時 (hr)	地表體積 含水量 (%)	地下水 位上升 速率 (m/h)
一	6/14/18 10:00	75.6	6/14/18 19:30	6/15/18 0:12	0.14	39.08	9.5	27.79	0.029
二	6/16/18 12:00	69.27	6/16/18 14:23	6/17/18 1:12	0.27	58.17	2.5	32.54	0.025
三	6/17/18 7:00	302.66	6/18/18 5:28	6/20/18 19:55	4.1	24.5	22.5	35.98	0.0656
四	6/30/18 16:00	33	6/30/18 19:07	7/1/18 7:37	2.76	23.5	3	55.73	0.221
五	7/1/18 13:00	79.5	7/1/18 17:58	7/1/18 19:51	0.78	60	2	46.56	0.25
六	7/1/18 22:00	158	7/2/18 6:44	7/2/18 13:45	1.3	28.5	9	41.28	0.18
七	07/18/18 17:00	100	07/19/18 16:26	07/20/18 02:21	3.89	57.5	23.5	48.06	0.389
八	07/21/18 16:00	55	07/21/18 16:18	07/22/18 02:10	0.73	19	0.33	42.69	0.073
九	07/22/18 15:00	75.5	07/22/18 20:35	07/23/18 11:41	0.36	62.5	3.5	39.5	0.024
十	08/04/18 16:00	87	08/04/18 23:06	08/06/18 05:57	1.37	73.5	7	41.11	0.0527
十一	08/23/18 04:00	324	08/23/18 12:55	08/23/18 19:01	2.57	56.5	9	51.52	0.6425

5.3.3 表層體積含水量與傾斜儀

圖 5.25 與圖 5.26 為 ID 03 與 ID 05 測站含水量監測結果，感測器對降雨事件反應敏感，在降雨事件後逐步降低，顯示感測器具有重複性，可用於長期監測。圖 5.27 為傾斜儀監測結果，顯示於此段觀測期間上邊坡 ID05 有約 1 度之變化，此與道路旁石籠輕微外推現象吻合，顯示表層有輕微變位；下邊坡 ID03 其傾角於 2018/08/23 起之降雨事件中累積傾角達到 2 度，顯示下邊坡有顯著變位，經檢視現場鄰近擋土牆底部有縫隙產生，邊坡土層有明顯變位，顯示下邊坡可能已產生破壞，下邊坡相關監測資料將做為數值分析之佐證資料。

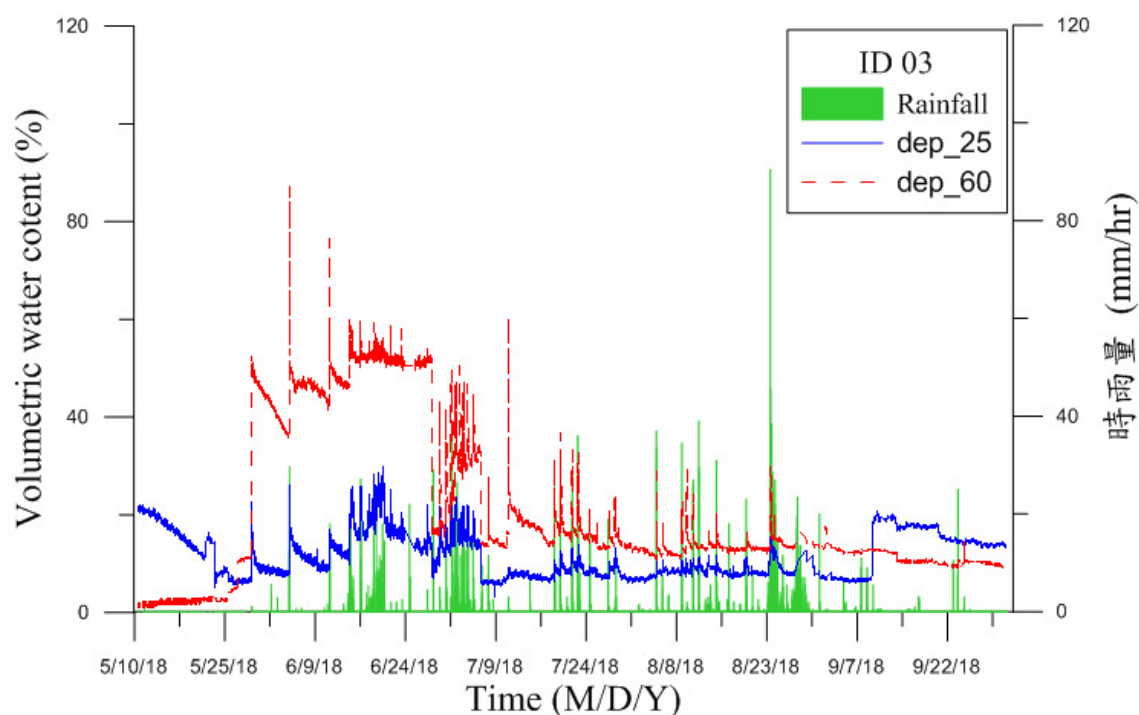


圖 5.25 ID 03 體積含水量監測數據

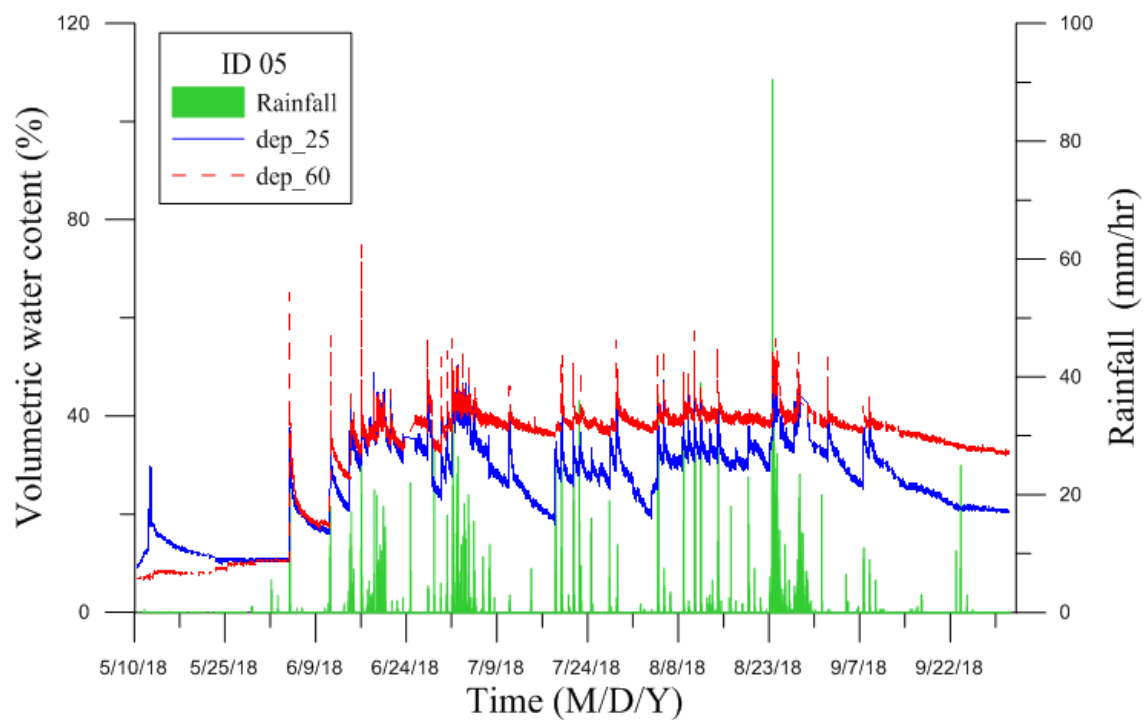


圖 5.26 ID 05 體積含水量監測數據

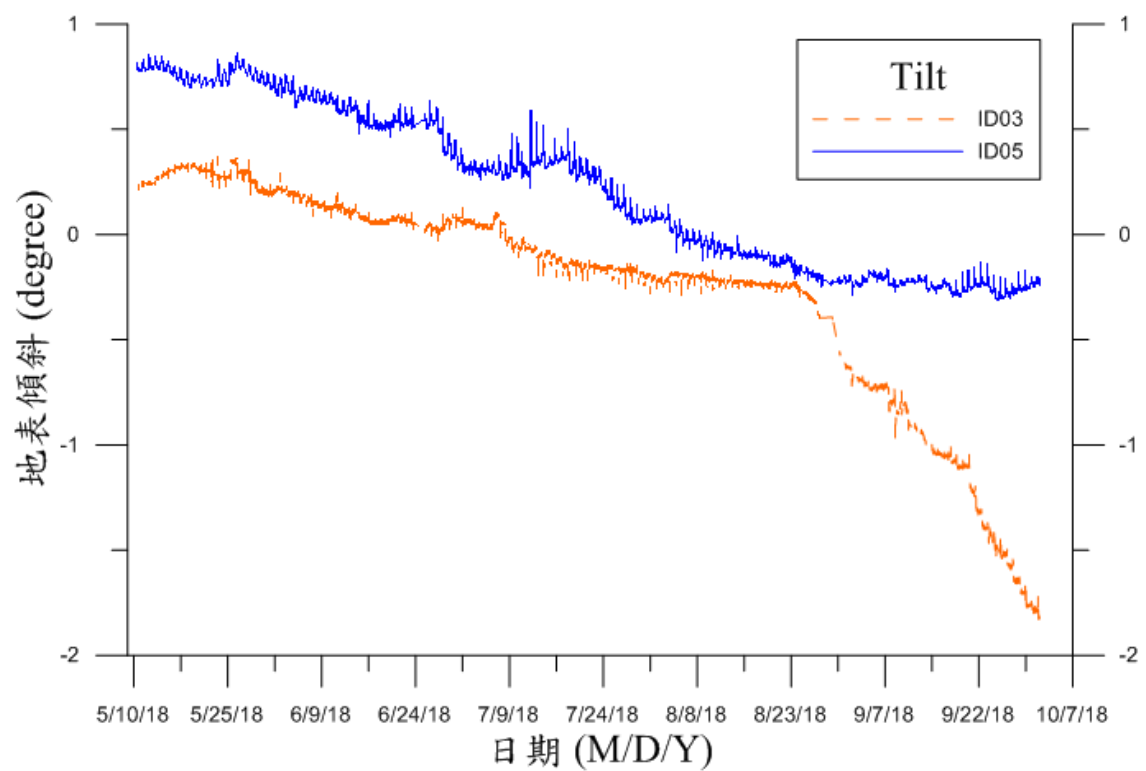


圖 5.27 各測站傾斜角監測數據

5.4 二維水力力學耦合穩定分析

為模擬降雨入滲引致之孔隙水壓變化，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)，進行場址編號 A-A 剖面非飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且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，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程模擬。分析相關理論詳 2.3.4 節說明，模擬細節說明如下：

5.4.1 土層參數與幾何

依現有文獻顯示，台 20 線 52k 現地地層分為表土崩積層 (Colluvium)、破碎帶(fractured rock, FR)、及砂頁岩互層岩盤(Rock)，所分析之 A-A 剖面無破碎帶，僅考慮崩積層及岩盤，分析時採用之彈性與強度參數如表 5-5 所示，非飽和崩積層 van Genuchten (1980) 模式擬合參數如表 5-6 所示，非飽和水文參數如表 5-7 所示，基質吸力引致土壤強度參數 ϕ^b 為 5° 。

以圖 5.28 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初始基質吸力為表 5-5 之 P_c 值，初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測 ID 05 孔位處之反應。

因現地道路下邊坡存在背拉地錨擋土牆，上邊坡有石籠護坡，為適切模擬現地狀況，本分析中包含擋土牆體以樑元素模擬，下邊坡牆體下方連結基樁元素，地錨以 cable 元素模擬，相關結構元素均與現地土壤以介面元素連結。因缺乏實際結構元素資料，因此結構元素主要為控制破壞區域使用，擋土系統模擬建議於後續研究加入。

表 5-5 分析所用土層參數

參數(單位)	Colluvium	Rock
非飽和單位重 (kN/m ³)	18.5	23.0
飽和單位重 (kN/m ³)	20.1	25.6
楊氏模數(kPa)	4000	2.0E5
柏松比	0.3	0.25
有效凝聚力 (kPa)	0	1200
有效摩擦角 (deg.)	35	30
膨脹角 (deg.)	2	0
滲透係數 (m/s)	1.5E-3	5.2E-5

表 5-6 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數

θ_s (%)	θ_r (%)	α	m	n
43.5	10.0	0.3	0.99	1.11

表 5-7 非飽和水文參數

參數	Colluvium	WR	意義
Porosity	0.35	0.1	孔隙率
k_{sat} (m/s)	1.0E-4	1.0E-6	飽和滲透係數
fmodulus (Pa)	2.0E9	2.0E9	水體積模數
saturation	0.54	0.54	初始飽和度
Vga	0.1	0.1	VG parameter a
Vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
Vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0 (Pa)	15000	15000	VG P0
Pc (Pa)	-45203	-45203	初始 From Pc(Sw)

5.4.2 耦合分析結果

圖 5.29~圖 5.31 為入滲達 2.6×10^5 秒後水壓分布與流動向量、垂直有效應力分布，反應與前期甲仙場址相近，圖 5.31 位移向量及水平位移分布圖顯示鄰近 ID03 下邊坡為位移量最大之地區，具有相對較高滑動潛勢。

模擬至 2.6×10^5 秒孔隙水壓及水分子流動向量如圖 5.29 所示，水由表層以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolatation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，其值與深度相近，來源為靜水壓，第二階段為而當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，鄰近 ID05 位置於不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 5.32 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著滑動。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，ID05 預測於持續降雨入滲下於 2.6×10^5 秒(約 3 日)產生破壞。

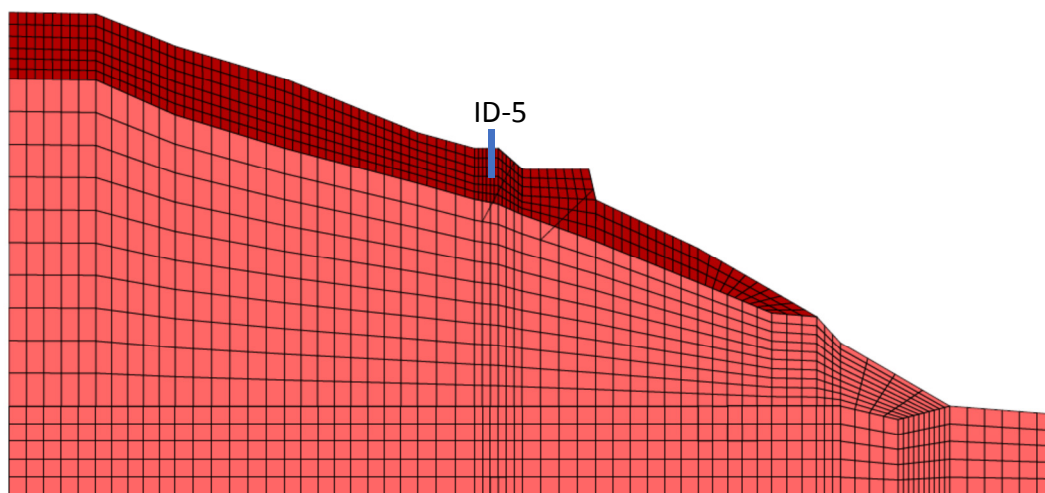


圖 5.28 台 20 線 52k 數值分析模型

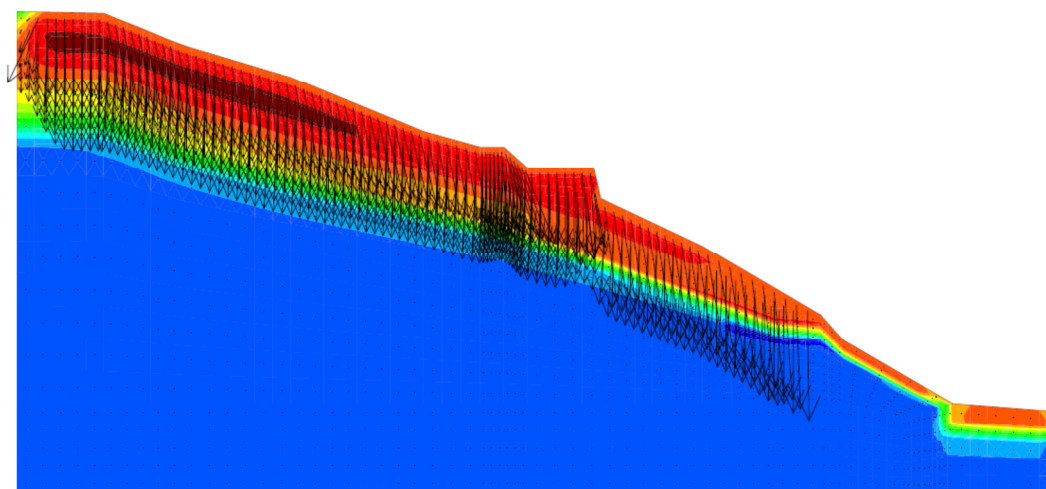


圖 5.29 入滲開始後 1.2E5 秒後孔隙水壓分布與流動向量

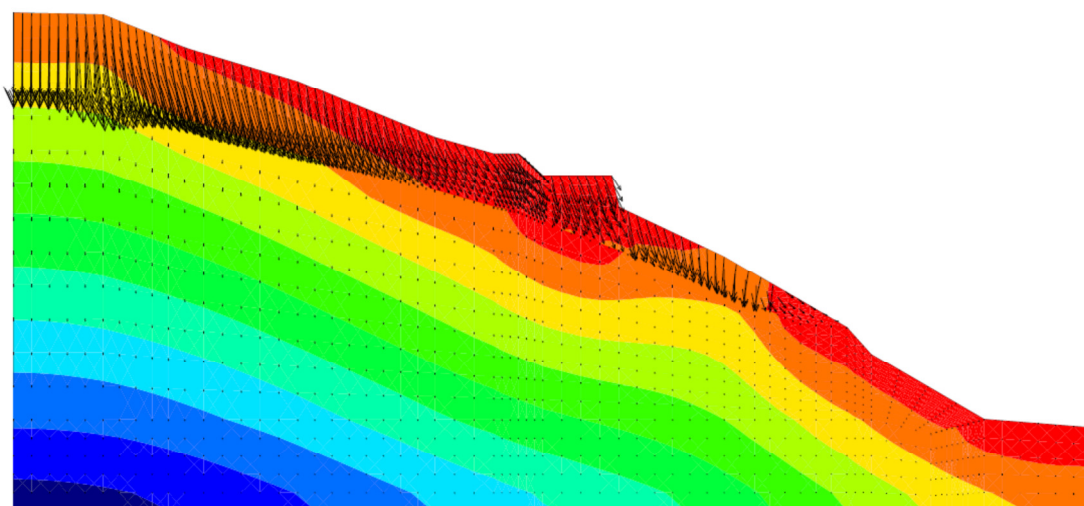


圖 5.30 入滲後垂直有效應力分布與位移向量

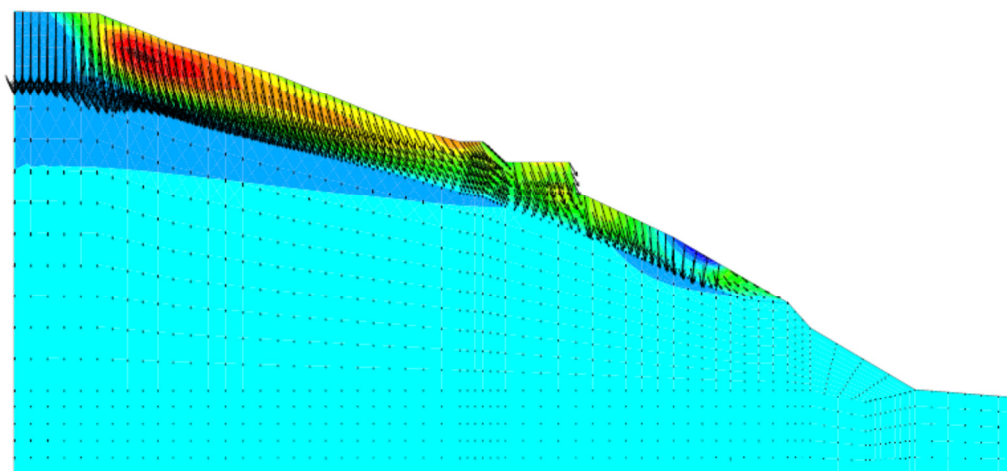


圖 5.31 入滲後水平位移分布

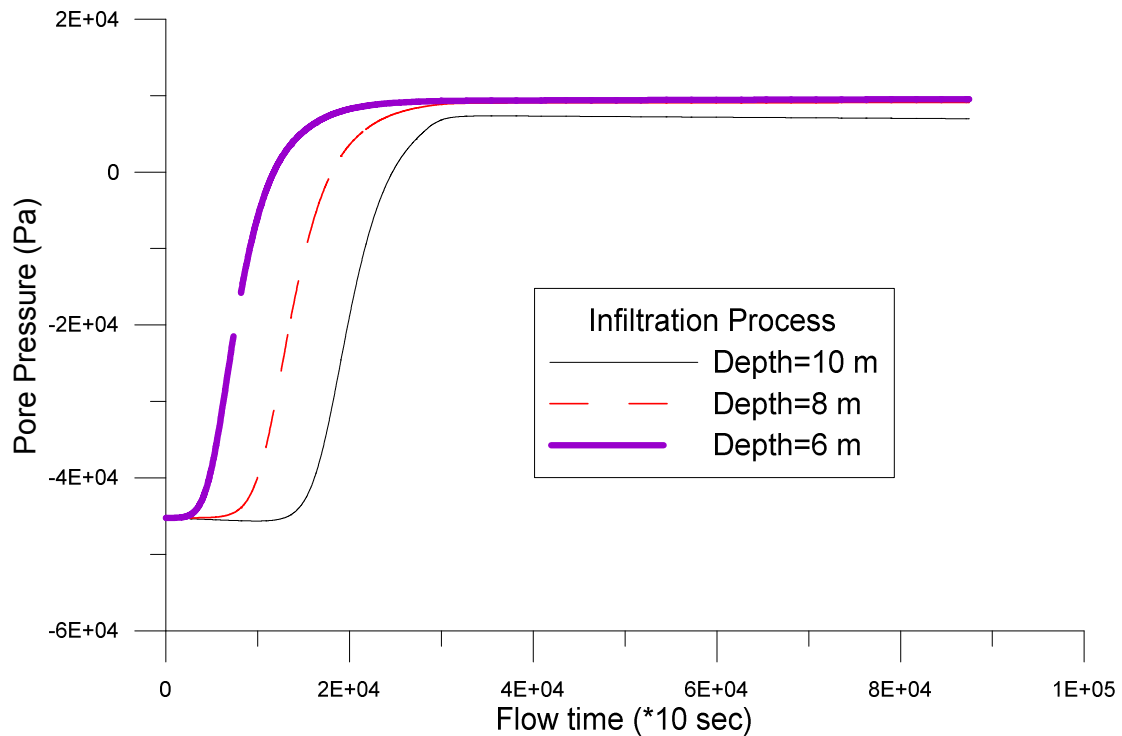


圖 5.32 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

5.5 二維水力力學非耦合穩定分析

以二維水力力學耦合計算分析飽和土層破壞有下列侷限：

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

因此本計畫提出以長期水位觀測資料，建立場址地下水位升降與降雨前土壤狀態及降雨特徵關聯，搭配非耦合邊坡穩定分析，本年度以 ID03 所在下邊坡進行測試。

採用圖 5.28 網格，分析時取消大變形非線性分析，於不同水位

上升階段進行二維極限平衡分析，當 ID03 上升 1.0m 時，安全係數為 1.01，滑動區域分布如圖 5.33 所示，滑動集中於下邊坡崩積層與岩盤交界面，其水平位移分布如圖 5.34 所示，所對應之地下水流軌跡如圖 5.35 所示。此結果與 5.16 中 ID03 於 2018/08/23 降雨事件之反應相同，地下水位上升約 1.0 m，地表即有顯著變位，所觀測地下水反應與土層地表反應高度相似。

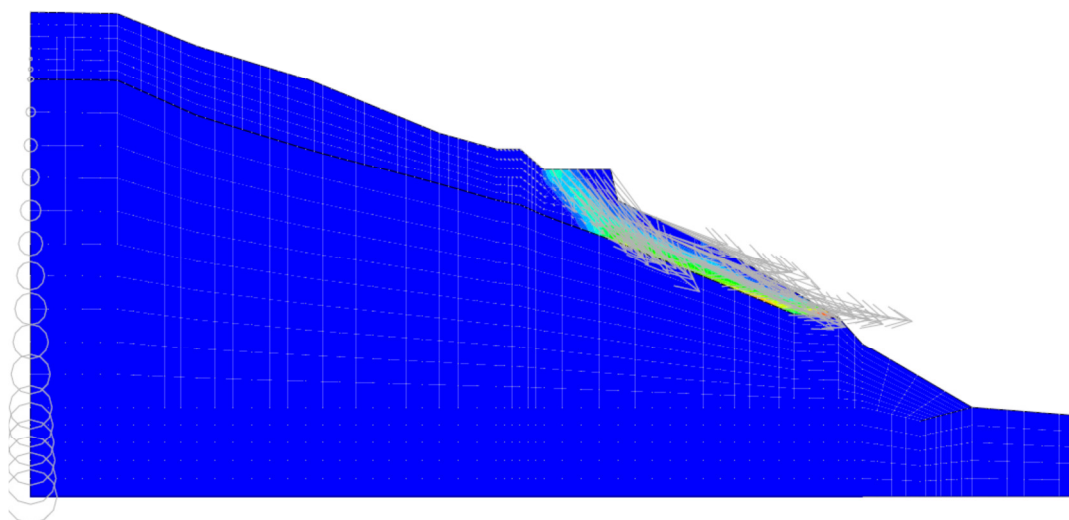


圖 5.33 非耦合分析 ID03 下邊坡臨界滑動區域

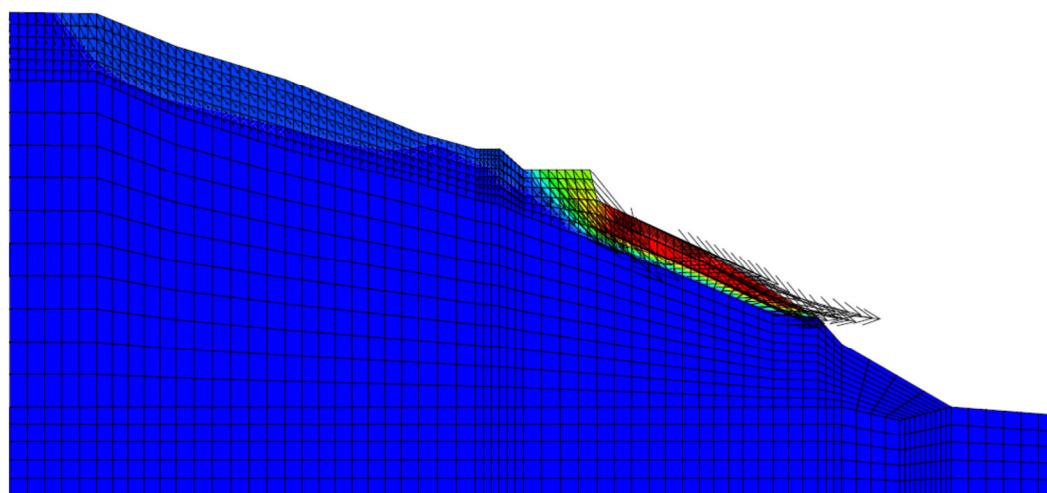


圖 5.34 非耦合分析下邊坡水平位移分布

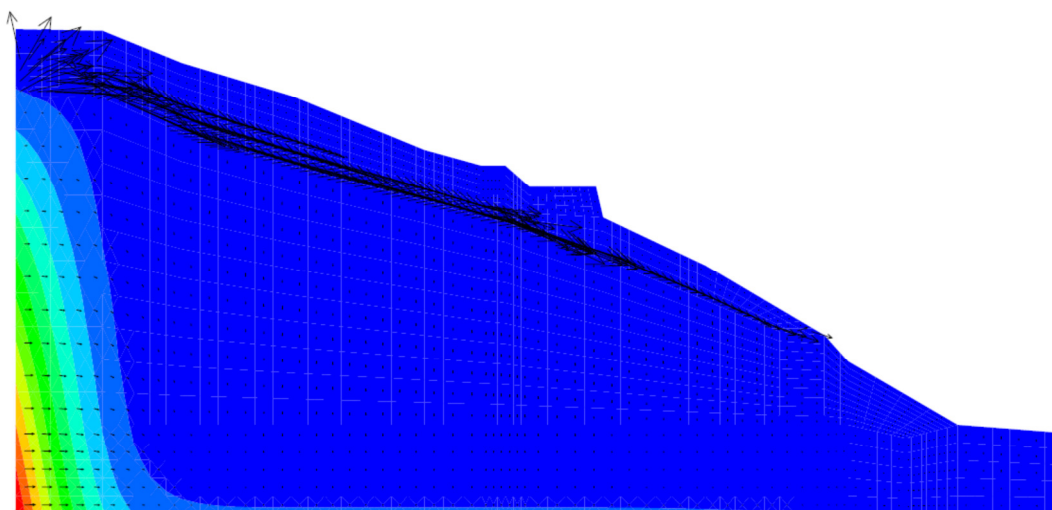


圖 5.35 非耦合分析地下水流軌跡

第六章 結論與建議

6.1 結論

本計畫為延續 2017 年「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」研究成果，針對公路土壤邊坡可能遭遇到破壞面位於飽和土層之滑動崩塌，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，並以發展中之表層無線監測模組為基礎，研發與解析法搭配之無線感測土層反應監測模組，建立場址表層水文及力學無線感測網路，研發降雨引致破壞面位於飽和層崩塌之近地表監測預警模式之雛形，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，以利相關權責單位對此類災害預防及災後管理之決策參考。

本年度計畫要項為飽和層滑動解析法分析架構建立及無線監測模組設計與整合測試，將來以訂定場址於破壞不同階段之警戒值，發展客製化公路邊坡降雨深層崩塌預警系統架構。本年計畫執行結論摘要如下：

1. 淺層滑動監測場址維護：針對現有兩處淺層滑動監測場址，檢視必要量測量，進行更新或修復，並持續進行監測與資料彙整。
2. 飽和層滑動場址監測系統優化：飽和層滑動無線監測模組中最重要之元件為地下水位量測，此部分已完成並佈設進行現地測試，且模組已具有無線即時監測所需之所有功能，現有結果顯示系統取樣傳送頻率及通訊具有一定穩定性與可靠度。
3. 維護與精進運研所所已架設之公路土壤邊坡淺層崩塌監測無線感測網路模組 2 處場址：原有甲仙及西湖場址，除持續進行監測與現地測試，已更新相關硬體，增加雲端監看功能，大幅精進現有模組穩定與應用性。

4. 飽和層滑動監測資料處理：飽和層滑動監測系統資料中最重要指標為地下水位變化，此與現地幾何及材料水力邊界與特性有關，且計畫目標之一為由監測資料推估建立降雨特徵對地下水位變化模式，相關資料處理程序已建立並有初步成果。
5. 飽和層滑動場址極限平衡分析：飽和層滑動極限平衡理論推導與傳統以有效應力參數及地下水位升降相同，但為配合入滲與地下水位及平行滲流影響，須將降雨入滲與極限平衡連結，相關公式已推導完成。
6. 飽和層滑動水力力學耦合分析：此為針對二維深層滑動依時分析，本年度完成非飽和水力力學耦合分析之架構，針對選定場址已有初步成果，但參數仍待進一步以現地量測資料進行比對校正。

6.2 建議

針對本計畫執行提出下列建議：

1. 由於場址選定不易，且須滿足研究之要求與其他單位之配合，現有場址目前為穩定狀態，且已有整治之規畫，而系統仍需更多案例進行測試，相關數值驗證與監測比較仍待後續補強。建議如有後續研究，應考慮更換研究地點。
2. 由於地下水位非僅由現地垂直入滲而改變，因此水力力學耦合分析有其侷限，建議以長期觀測之地下水位與降雨特徵進行統計分析，帶入極限平衡分析架構，應可增加其應用案例。

6.3 研究成果與效益

1. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法土壤邊坡深層滑動分析架構，並以此做為公路土壤邊坡深層滑動預警模式之雛形。

2. 針對山區公路土壤邊坡深層滑動現象，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，研發低成本易安裝之表層無線監測網路。
3. 發展解析法客製化之公路土壤邊坡深層滑動監測與預警技術，提升預警準確度。

6.4 提供政府單位應用情形

研究成果提供交通部、公路總局與臺鐵局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。

參考文獻

1. 林哲毅，1999，「土壤電阻率與含水特性關係之探討」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
2. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙，2002，「先進邊坡監測系統之研發」，中國土木水利學會會刊，第二十九卷第二期，第 65-78 頁。
3. 青山顧問有限公司（2006），「台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地滑地區補充監測執行總報告」，交通部公路總局第五區養護工程處。
4. 廖文選，2010，「以 DSP 實現 GPS 與 IMU 感測器整合系統」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文。
5. 邱永芳、黃安斌、饒正、李瑞庭、陳志芳、何彥德（2011），「全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試 (4/4)」，交通部運輸研究所。
6. 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。
7. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯（2017），「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)」，交通部運輸研究所。
8. 社團法人永續發展工程學會（2015），「宜蘭縣大忠村一號崩塌地特定水土保持區調查及監測計畫成果報告書」，宜蘭縣政府。
9. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp. 544-552.
10. 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.

11. Chang, M., Chiu, Y., Lin, S., and Ke, T.C. (2005) "Preliminary study on the 2003 slope failure in Woo-wan-chai Area, Mt. Ali Road, Taiwan," *Engineering geology*, 80, 93-114
12. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 130, pp. 362–372.
13. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). " Soil mechanics for unsaturated soils. " New York, Wiley.
14. Ho, Y. T., Huang, A. B., and Lee, J. T. (2006) "Development of a Fiber Bragg Grating Sensored Ground Movement Monitoring System," *Journal of Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.
15. Ho, Y. T., Huang, A. B., & Lee, J. T. (2008) "Development of a Chirped/differential Optical Fiber Bragg Gating Pressure Sensor," *Journal of Measurement Science and Technology*(19):6pp, doi:10.1088/0957-0233/19/4/045304.
16. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Tsai, T.L. (2009) "Field monitoring of pore-water pressure profile in a slope subjected to heavy rainfalls," *Proceedings, XVII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, pp.1931-1934.
17. Kuo, C. Y., Tai, Y. C., Bouchut, F., Mangeney, A., Pelanti, M., Chen, R. F., Chang, K. J., (2009) Simulation of Tsaoling landslide, Taiwan, based on Saint Venant equations over general topography," *Eng. Geo.*, 104, 181-189.
18. Ni, C. F. and Li, S. G. (2005) "Simple closed-form formulas for predicting groundwater flow model uncertainty in complex, heterogeneous trending media," *Water Resources Research*, 41(11).
19. Orense RP, Towhata I, Farooq K (2003) Investigation of failure of sandy slopes caused by heavy rainfall. In: *Proc. Int. Conf. on Fast Slope Movement—Prediction and Prevention for Risk Mitigation (FSM2003)*, Sorrento.
20. Orense RP, Farooq K, Towhata I (2004) Deformation behavior of sandy slopes duringrainwater infiltration. *Soil Found* 44(2):15–30.

21. Richards, B. G. (1965) "Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors.", in *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, A Symp. in Print. Australia: Butterworths, pp. 39-46.
22. Sassa K, Nagai O, Solidum R, Yamazaki Y, Ohta H (2010) An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide, *Landslides*, 7:219-236
23. Tsai, T.L and Yang, J. C. (2006) "Modeling of rainfall-triggered shallow landslide", *Environmental Geology*, 50(4), 525-534.
24. 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
25. Uchimura, T., Towhata, I., Trinh, T. L. A., Fukuda, J., Bautista, C. J. B., Wang, L., Seko, I., Uchida, T., Matsuoka, A., Ito, Y., Onda, Y., Iwagami, S., Kim, M. S., and Sakai, N. (2010): "Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface", *Landslides*, 7:351–357
26. Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes.", In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33.
27. van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Journal of Soil Science Society of America*, 44, pp. 892–898.

附錄一

期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

計畫編號： MOTC-IOT-107-H1DB001h

執行單位：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
國立中興大學水保系 游繁結委員		
1. 報告中 P.1-4，深層，淺層滑動之區分，以飽和地下水位為分界，此等界定是否妥當？宜斟酌其發生機制與地下土、岩之關係否？（P.5-1 亦是）。	感謝委員指正。本計畫邊坡分類為依據非飽和陡坡及飽和緩坡其觸發機制不同區分，且僅適用於土坡，為避免混淆，將與承辦單位商討更換名稱，以避免慣用之深層與淺層滑動定義衝突。	同意辦理方式
2. 邊坡無線土層監測模組之深度可達多深，以之作為深層滑動之數值分析，其間之土、岩構造、岩性、水文條件能否充分掌握？又如 p.2-11 謂本研究係以飽和土層之深層崩塌為研究對象，目的雖屬明確，惟其實務面之適用性如何？	本計畫兩類土壤滑動係以機制不同區分，實務上本計畫所指”深層”具有坡角小於土壤摩擦角、破壞面為於地下水位以下等特徵，與深度並無絕對關聯性，實務上此類邊坡破壞並非少數。	同意辦理方式
3. P.3-6 液位計是否任何液體均可感測？或是只有感測水之水位？另依圖 3.10 之校正係以公尺為單位，電壓係以伏特為單位，其精度如何達 1cm 以下？	液位計為電子壓力計，任何可產生液壓之流體均可感測，因其電壓解析度為 16bit，精度可達 1cm 以下。	同意辦理方式
4. 圖 3.11 雨量計校正是否依氣象局之規定校正？10 分鐘之雨量如何率定？	本研究雨量計校正僅為求得校正係數，校正程序與 WMO 程序相近，以等流量灌入雨量計，由每 10 min 之傾倒次數比較。	同意辦理方式
5. P.3-24 含水量計之裝置是否可詳加說明？並配合圖示說明之。	此因為前期成果延續應用，因此期中報告未加說明，將於期末報告依委員建議補充。	同意辦理方式
6. 圖 4.4 等之圖面意義是否能補充說明之，以利瞭解。	將於期末報告依委員建議補充。	同意辦理方式
7. P.5-3 試驗段之地質剖面是否能予以	將於期末報告依委員建議補	同意辦理方式

圖示之。	充。	
8. P.5-4 甲仙與北寮雨量站之年平均雨量佔全年總雨量之 89.3%及 87.5%，何意？	感謝委員指正，此為筆誤，將刪除。	同意辦理
9. P.5-4 地下水位以高程呈現，其相對地表高程如何？是否一併示出，以利瞭解。	將於途中加繪地表高程及距地表深度。	同意辦理方式
10. 圖 5.7 是否在垂直部份註明高程分布？	將於期末報告依委員建議補充。	同意辦理方式
11. 傾斗式雨量與傾斜儀之率定方法，是否妥適，似有斟酌之處。	將加註其非標準校驗機構，但校正係數應為可信。	同意辦理方式
12. 耦合分析模式之建立，構想甚佳，惟如何掌握地層參數之特性，以便快速推估深層崩塌之預警，宜有再詳細之交待。	此場址地層參數已有相關調查報告，將依反算分析成果求得力學參數，水文參數則由現地監測成果推估。	同意辦理方式
國立中興大學土木系 蘇苗彬委員		
1. 本案進行多年已累積相當多成果應逐步推廣至相關單位，應用這些新的技術，也可多做測試。	感謝委員肯定，研究團隊將配合承辦單位於適當場址進行監測系統測試。	同意辦理方式
2. 告中 P.1-2 降雨引致邊坡破壞，其機制應可詳細做分類，落石、山崩等，可考慮依中央地質調查所地質法的定義。	謹遵委員建議修改。	同意辦理方式
3. 依時邊坡預警系統架構圖，如 P.2-2 所示相當完整，建議可將各年度完成之工作分別標示，以利了解相關進度。	此為延續性研究，目前階段為依時預警系統測試，將於期末補充說明。	同意辦理方式
4. P.2-16 中的圖 2.11 無限邊坡之水力學耦合穩定分析示意圖，在飽和水位以上為入滲，應只有 $i_v=1$ ，無 $i_h=\sin \beta$ 的部份，可以試驗率定與修正。	深層滑動在飽和水位以下，故有平行滲流力。	同意辦理方式
5. P.3-6 的傾斜儀解析度比較，似乎變異性相當大，達 0.2 度，是否有溫度效應。	原廠並無須進行溫度效應之說明，因傾斜儀為輔助觀測且採用長期趨勢，現有解析度尚可接受。	同意辦理方式
6. 發展現地用的監測系統，應注意資料的解析度與穩定性，需持續討論。	謝謝委員提醒，謹遵委員建議。	同意辦理方式
高苑科技大學土木系 劉文宗委員		
1. 報告中 P.1-4 定義深淺層用水位上下為分界，但水位經年累月均不同，如何界定。	感謝委員指教，此指破壞時滑動面深度在水位以下，此與水位變動無關。	同意辦理方式
2. P1-7 之第 2 點內文中，本年度將選	此場址已有前期滑動調查報	同意辦理方式

擇另一處深層滑動潛在滑動場址，進行相關土壤水力與力學試驗，進行極限平衡及有效應力數值分析之反算與驗證，就反算分析應如何修正？應如何進行分析與驗證？	告，將以滑動案例針對現地滑動幾何面，進行材料參數反算。	
3. P1-8 之表 1.1 預定進度甘特圖 (Gantt Chart)，期中報告在第二季 (五月)，但目前已 7 月。	所列為執行月數，計畫由 2 月開始執行。	同意辦理方式
4. P1-7 之第 3 點，深層水力偶合分析，需要寫軟體分析，有否考慮自動反算執行求最佳參數？	本計畫無此規劃，但將以現地監測成果回饋分析。	同意辦理方式
5. 整個研究流程以連續執行 2 年了，最後如何提高其準確度？(快速性量測已有達到)	因此計畫仍在發展階段，分析驗證仍需現地監測資料測試反饋。	同意辦理方式
6. 研究成果最後提供交通部相關單位參考，至何程度？	後續推廣研究團隊將全力協助，研究成果將由運研所參酌辦理。	同意辦理方式
運研所港研中心 柯正龍委員		
1. 本研究已依計畫預定期程完成地層滑動監測系統維護及優化、建立水利力學耦合解析法分析技術、精進適用於土壤邊坡滑動之低成本易安裝之無限監測模組等，成果豐碩並具創新研發，值得肯定。	感謝委員肯定。	同意辦理方式
2. 本研究已研發解析法搭配之無線土層反應感測模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，建議後續研究可加強說明提高預警之準確與時效性相關作法或規劃通報方式等，強化本研究對公路邊坡防災之貢獻度。	謹遵辦理。	同意辦理方式
3. 第 1-3 頁，第 5 行有關水土保持局山崩分類方法之地滑，建議增列參考文獻來源或稍再加說明。	將於期末報告依委員建議補充。	同意辦理方式
4. 第 1-9 頁，預期成果 3. 展解析法客製化…，展字是否為贅字。	為贅字，文字會進行修正	同意辦理方式
5. 第 2-12 頁，土壤含水量特徵曲線去飽和過程分 3 階段之說明，與圖 2.7 所示稍有出入，建議調整圖說，使其符合。	此為前期成果延續應用，因此期中報告未加說明，將於期末報告依委員建議補充。	同意辦理方式
6. 第 5-4 頁，圖 5.3 之 X、Y 座標無單位，建議補充。	謹遵辦理。	同意辦理方式
7. 中英文摘要撰寫格式，建議於期末	謹遵辦理。	同意辦理

報告，應依本所出版品規定格式撰寫。		
運研所港研中心 賴瑞應委員		
1. 第二章已針對淺層邊坡之不同埋設深度，分析出邊坡破壞依時預警架構，建議於第四章之監測成果，能將各土層的預警體積含水量及傾斜角與實測值作比較說明，以瞭解預警架構之警戒值是否適宜。	感謝委員指教。因現有場址與所適用條件均有不同程度之差異，甲仙場址因擋土牆作用，非為無限邊坡，因此無法適用。	同意辦理方式
2. 報告第 2-25 頁之傾角變化依時預警概念能否再補充說明。另外，傾角變化正負值之物理意義為何。	因傾斜儀為輔助觀測且採用長期趨勢，正負值將增加標示，相關修正將於期末增補。	同意辦理方式
3. 報告提到甲仙場址下邊坡可能有路基、擋土牆等結構物影響地表下土層分佈，導致監測數據不如預期，此案例是個案還是通案，如果是通案，未來監測站佈設是否要避免設於下邊坡。	因具滑動潛勢之道路邊坡常有保護工，同意建議未來監測站佈設需避免設於下邊坡。	同意辦理方式
4. 目前系統之穩定性(包括電源供應、監測資料量測及傳送)是否已達預期的穩定度，還是需要再精進。簡報提到過去有損壞抽換的點位，請問損壞的主因為何	監測模組已達預期的穩定度，更換均為感測元件，此為消耗品。	同意辦理方式
交通部高速公路局 魏佳韻工程司(書面意見)		
1. P4-12，針對國 3 西湖服務區邊坡的監測資料顯示地表位移為 0.3~1.0cm 有持續潛變的現象，則警戒值為何？建議提供相關資料供本局參考。	所量測值應為裝設空隙，相關文字將進行更正，該邊坡應為穩定狀態。	同意辦理方式
2. P5-5，針對本計畫深層邊坡滑動監測儀器鑽孔深度僅需超過崩積層厚度，是否鑽孔無需像傾度管須深入新鮮岩盤固定？建議補充說明。	所監測為開孔地下水位井，僅需低於監測水位即可，無須固定。	同意辦理方式
3. 本計畫 2 維分析係採用 FLAC 軟體，由於目前邊坡設計安全考慮皆利用 FS，則兩者如何結合應用於邊坡防災預警上，建議補充說明。	FLAC 為計算依時位移與水壓等，與極限平衡之 FS 值觀念不同，因此可進行不同時間之預警，將於期末報告補充說明。	同意辦理方式
運研所港研中心 謝明志科長		
1. 硬體設施已做了大幅更新，如通訊模組、控制單元，增設 16bit A/D	感謝科長肯定。	同意辦理

卡，另一個重要的改變是省電設計，可克服長久以來現地儀器電源持續供應的問題，成效值得肯定。		
2. 甲仙 ID0 測站含水量監測值，在上一年雨季時，表層(25cm 處)的含水量，一直低於底層(60cm 處)的監測值，但到年底旱季時，無下雨記錄，為何表層含水量會高升約 1 倍，而今年初到 5 月，底層(60cm 處)的含水量，一直低於表層(25cm 處)，且只有一半的量，此處表層的水，從那裡得到供應？又這 2 處只差 35cm，都是土層，物理性質應相似，含水量的變化及差異，宜加以探討。	謹遵辦理，並進行資料檢核，目前其成果與鄰近 ID02 相近。	同意辦理方式
交通部公路總局 黃國廷工程司(書面意見)		
1. 資料如有引用，應註明，後面參考文獻之序號，俾利查閱。	感謝委員指正，將於期末報告依運研所出版品規定格式修正。	同意辦理方式
2. 計畫提到「淺層滑動無線感測網路模組」具有廉價特性，未有具體數字呈現或比較，建議增列	此為前期成果延續應用，因此期中報告未加說明，將於期末報告依委員建議補充。	同意辦理方式
3. 報告中 P1-9 頁第 3 項漏字，應為“發展”	感謝委員指正，依建議修正。	同意辦理方式
4. 本計畫所使用的無線網模組為 3G 通訊訊號，如於沒有訊號的深山否無法應用，又或有什麼解決方式？	公路邊坡多有 3G 訊號涵蓋，若無訊號可以 LoRa 接力傳送。	同意辦理方式

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

計畫編號： MOTC-IOT-107-H1DB001h

執行單位：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
國立中興大學土木系 蘇苗彬委員		
1. 期末報 P.1-2 等描述建議依時間順序如 2014 運研所報告完後後續文獻反而更早，不太妥當 2011 已有其他非雨量的基準。	謹遵委員建議修改。	同意辦理
2. P.1-3 有用西元 2016 及民國年 106，應統一整份報告應再檢查。	謹遵委員建議修改，中文報告改採民國年。	同意處理方式
3. P.2-2 的系統圖，用了很多次，乃有編排不佳，應改善。	此為轉檔 PDF 時格式錯誤，將改為圖型格式。	同意處理方式
4. 儀器應標明量測範圍，解析度及精準度，由 P.3-6 傾斜儀跳動太大，接近 0.1 度，則解析度沒有太大得意義。	量測範圍文字已有說明，精度將補充，因傾斜儀為輔助觀測且採用長期趨勢為判讀依據，0.1 度尚可接受。	同意辦理方式
5. 本案測試 ThingSpeak 的雲端，公路單位應以有自己的平台，可以考慮連接，較符合需求。	ThingSpeak 的雲端為測試研發階段使用，若業主有指定平台，韌體可依規格與傳輸協定修改。	同意辦理方式
6. P.4-6 起有很多資料顯示不連續，距離實用乃待努力。	本系統原設計僅為雨季短期使用，資料不連續原因包括人為、天候及元件耐候不足等因素，距離實用乃待努力但並非不可能。	同意辦理方式
7. P.4-10 等傾斜角度變化已達 1 度以上，P.5-22 所述變化甚小，不符。	此為文字內容錯誤，現地已有破壞跡象，謹遵委員建議修改。	同意辦理方式
高苑科技大學土木系 劉文宗委員		
1. 遠端監測顯示不錯成效，減少人員量測，模型量測更新來得及潮流變化生產產品。	感謝委員肯定與鼓勵。	同意辦理
2. 土壤監測模組若能與傳統傾斜儀校正比對更有說服力。	因所觀測為地表傾角，與地下傾斜剖面非直接相關，且現地鄰近之傾斜管均已損	同意處理方式

	壞，後續將列入考量。	
3. 目前為止，淺層有水位、含水量等量測變化數據，然移位量不大，無明顯邊坡滑動，如何確保其有效值。	現有場址除台 20 線下邊坡局部有損壞徵兆外均未達破壞，因此仍需補強現地破壞案例，但相關系統已可適切反映量測數值。	同意處理方式
4. 應對量測值與所建立深層水位耦合模型所計算分析值做比對，以提高模型的實用預測能力。(回饋與修正模型)	因現場並無顯著破壞，無法進行回饋分析，所提建議將列於報告建議事項。	同意處理方式
交通部高速公路局中區養護工程分局 賴榮俊委員		
1. 期末報告 P3-9 第三行降「與」—「雨」?	此為打字錯誤，已修正為”雨”，感謝委員指正。	同意處理方式
2. P4-3, 3G 模組年底將不提供服務，有否考量改為 4G? 土層監測模組若未呈約略水平，是否會有雨水入滲影響監測成果情形? 系統可否自行偵知?	搭配模組之 4G 系統已研發完成可進行升級。監測系統埋設時已封裝皂土，避免地表水由外側管壁入滲，確保量測為鄰近土壤入滲水。	同意處理方式
3. P4-3, 甲仙場址即時資訊 Field1~Field6 顯示淺層土壤溫度、深層土壤的溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量、傾斜角，請教讀取溫度用意?	溫度感測為水分計原有功能，本計畫目前僅讀取儲存，並未使用。	同意處理方式
4. P4-9, 4.2.2 節, 傾斜儀監測結果有 1 度的微幅滑移，產生滑移當時的降雨量、土壤飽和度是多少? 另外入滲速率與滑移的產生是否有相對關係?(or 地下水位)。	此讀數顯示道路邊坡牆背土層產生表層局部位移，相關降雨與分層水位變化詳圖 4.6，深度 75cm 土層已接近飽和。入滲速率與滑移的產生關係由現有理論僅會影響滑移發生時間，地下水位變化則與土體穩定有必要關聯，相關性詳見飽和土層滑動理論章節。	同意處理方式
5. 西湖場址淺層變位監測半年內傾斜量約增加 0.2 度，它是降雨土壤飽和所生或經年累月蠕動的累計值?	因西湖場址表層為軟泥岩，雨水不易入滲與消散，且所觀測傾角數值不大，推測應為安裝回填之孔徑與 PVC 管徑誤差，並無直接證據與蠕動行為連結。	同意處理方式
6. 土質監測模組應用於地質災害監測與預警為本計畫之預期應用。依目前累積的成果可否訂出入滲速率之預警值? 降雨量強度之預警	表層滑動相關預警值建立流程詳見 106 年成果報告，若有所需現地幾何與土層參數，應可以土層含水量作為	同意處理方式

值?土壤飽和度之預警值?或介電常數臨界作為預警值?	預警值。	
運研所港研中心 賴瑞應委員		
1. 本計畫主要工作為持續監測與精進淺層滑動測站、開發及建置深層無線監測模組及建立飽和土層滑動水力力學耦合模式，由報告看來已完成相關工作項目，研究團隊的努力值得肯定。	感謝委員肯定。	同意辦理
2. 報由簡報第 16 頁及第 17 頁提到，含水量及傾斜之監測資料有中斷現象，原因是儀器被剪斷，未來監測邊坡破壞時，在未達到邊坡破壞前，是否可能發生監測儀器先損壞的疑慮，未來該如何確保災害期間監測儀器的運作正常。	現有系統每 15 min. 資料更新一次，若系統元件損壞可立即得知，電源供應可由電池組電壓得知其電量，可於雨季前進行維護。另原設計僅為雨季期間監測，元件耐久性恐有不足，相關感測元件可於雨季前更新。	同意處理方式
3. 在建立土層滑動水力力學耦合模式時，是否有考慮到擋土牆及地錨等保護工法的影響，如何考慮請說明。	目前台 20 線部份路段已將擋土牆及支撐設施列入考慮，但僅為控制滑動於邊坡產生，擋土牆體土壤結構互制建議作為後續研發標的。	同意處理方式
4. 由報告顯示，雖飽和土層滑動水力力學耦合模式已建立，但似乎還未與現地監測資料來進行反算修正模式的參數，以目前的監測資料及過去的破壞案例資料，是否能修正部分參數，如滲透係數等。	因現地並無飽和土層滑動產生，無法進行詳細反算，但以下邊坡崩積層滑動分析結果顯示，ID03 水位上升 1m 於崩積層與岩層交界之出露處即可產生破壞，顯示分析架構應屬合理。	同意處理方式
交通部高速公路局 魏佳韻工程司(書面意見)		
1. 報告 4.4 節有關西湖場址長期監測資料顯示在 Node 6，每年有 0.3~1cm 左右的地表位移，若如貴基金會所言，則建議的累積位移警戒值為何?	地表位移是由 Node 6 傾斜角度換算位移量，並無實際位移監測值，又西湖場址因無地質資料，因此未有耦合分析成果及相關預警值，監測主要為初期耐久性測試。	同意處理方式
2. 針對西湖場址的潛在滑動面位置為何?是否有數值分析資料可供參考?	西湖場址因背景資料不足，無相關分析與預警值。	同意處理方式
3. 本研究的示範場地目前皆位於穩定狀態，無法驗證該計畫成效，建議未來可選定具不穩定徵兆邊坡進行驗證。	同意委員建議，若有適合場址，研究團隊樂意配合裝設以使研究完整。	同意辦理方式

附錄三

期末報告簡報資料

公路土壤邊坡滑動無線感測網 路監測系統研發

期末簡報



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

Outline

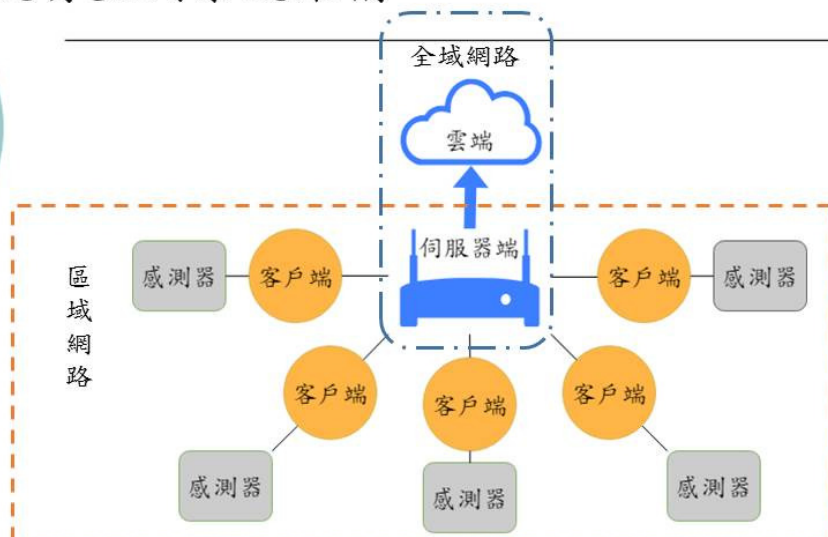
- ◆ 107 年計畫摘要
- ◆ 土層監測模組精進與更新
- ◆ 非飽和土層滑動監測場址成果
- ◆ 飽和土層滑動場址選定與監測成果
- ◆ 飽和土層力力學耦合解析法分析技術
- ◆ 結論

107年研究內容與項目

- 現有淺層滑動場址持續觀測與精進：
 - 持續觀測兩處淺層滑動場址
 - 精進系統穩定性與回饋場址穩定分析
- 建立飽和土層滑動水力力學耦合分析技術：
 - 考慮無限邊坡極限平衡及二維邊坡變形與穩定分析
 - 模擬地下水流沉變化引致飽和土層滑動滑動
- 選定潛在飽和土層滑動場址測試一處
 - 進行極限平衡及有效應力數值分析之反算與驗證
 - 測試無線監測模組原型與分析可靠度
- 精進邊坡深層滑動無線監測模組：
 - 精進模組間通訊、電源及量測可靠度
 - 選定場址進行監測模組原型測試

3

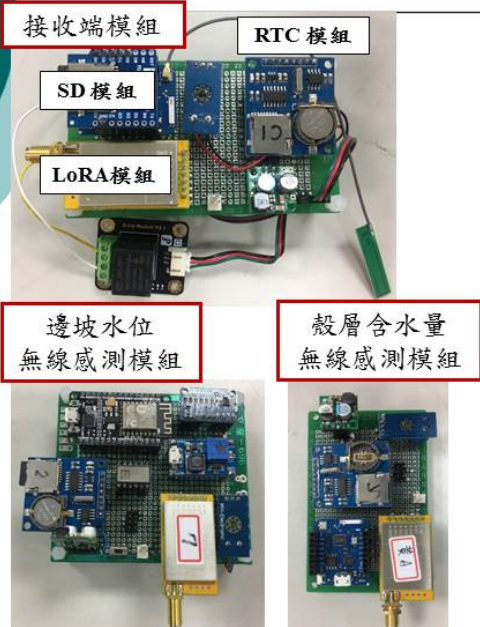
現有監測系統架構



4

IoT土層無線監測模組特色

模組硬體配置：



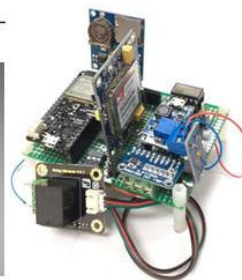
模組特色：

1. 可編程微型微控板(MCU)，達成智慧化量測控制。
2. 模組化特性可擴充感測器與無線模組進行串聯(LoRa、NB-IoT)。
3. 可與不同感測器進行串聯，達成萬物聯網概念。(研究以殼層體積含水量、邊坡水位與傾角變位進行長期監測)
4. 獨立電源系統配合智慧電源管理，克服野外電源問題，模組不受制電源影響佈設。
5. 相較於傳統監測系統具輕量化，且性價比優異

5

邊坡無線雲端監測模組組成

- 表層變位監測
 - 傾斜角度量測
- 地表水入滲監測
 - 分層土層含水量量測
- 無線通訊模組
- 資料處理流程



無線感測模組



電池模組



土層監測模組內部架構示意圖

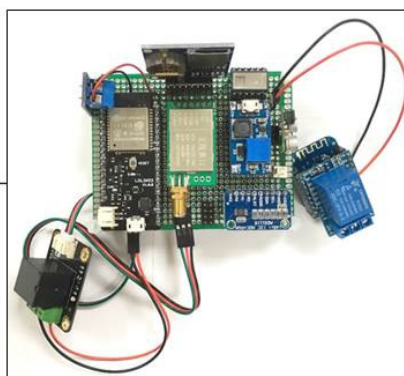
6

現有淺層滑動監測模組精進

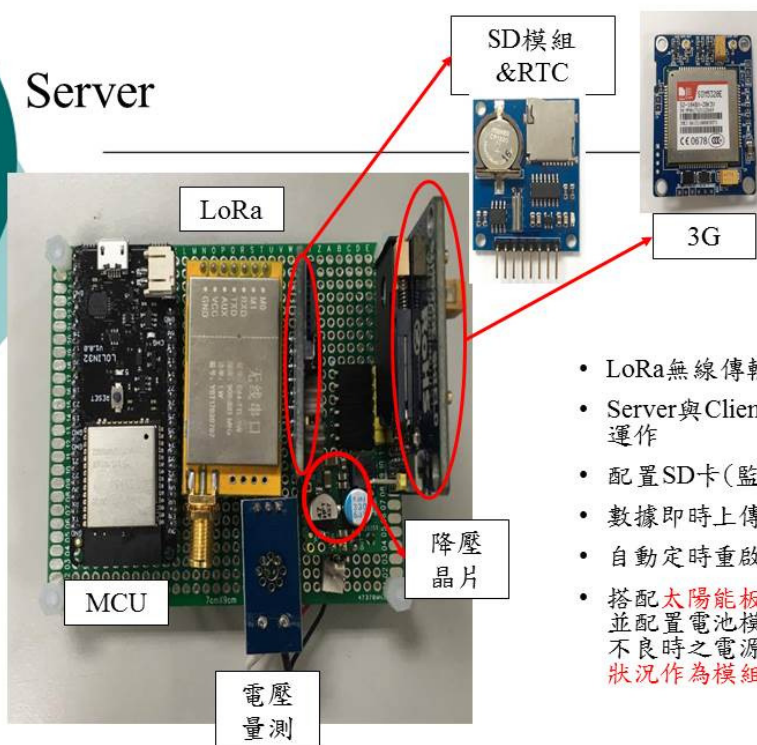
- 通訊改為LoRa 搭配3G, 由伺服端(Server) 喚醒模組(Client), 預留4G升級
- 定時重啟與電源監測, 遠端健康監測及減少人員至現場次數
- 傾斜儀改為類比轉16-bit ADC輸出, 提高解析與穩定性
- 更換MCU為ESP8266, 採WeMos Lolin 32 雙核心達到深度休眠
- 更新雨量計模組並完成率定

7

精進之監測模組



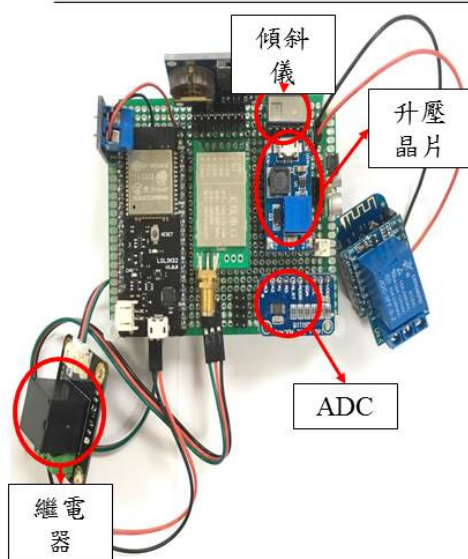
Server



- LoRa無線傳輸
- Server與Client採雙向通信方式運作
- 配置SD卡(監測資料備份)
- 數據即時上傳網路(實時監測)
- 自動定時重啟
- 搭配太陽能板提供野外電源，並配置電池模組提供天氣狀況不良時之電源，並可回傳電源狀況作為模組維護之參考。

9

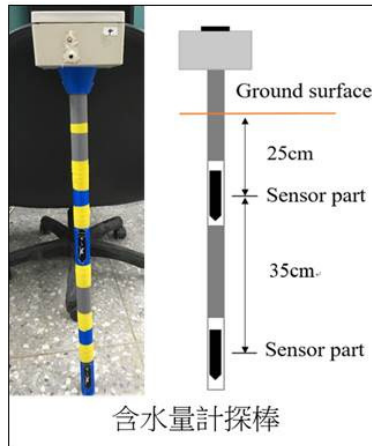
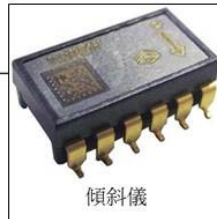
Client



- LoRa無線傳輸
- 配置SD卡(監測資料備份)
- 傳送資料含傾角變位、土壤體積含水量、地下水位與模組電壓
- 搭配太陽能板與電池模組
- 自動定時重啟

10

感測器



11

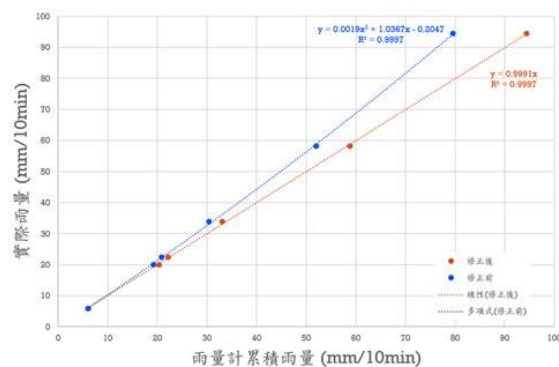
雲端雙傾斗雨量計

- 分辨率: 0.2mm
- 時雨量:
35~566 mm/h

雨量計：透過傾斗排雨時磁簧開關產升高低電位變化，MCU計讀10分鐘內電位變化次數即可得知10分鐘雨量。

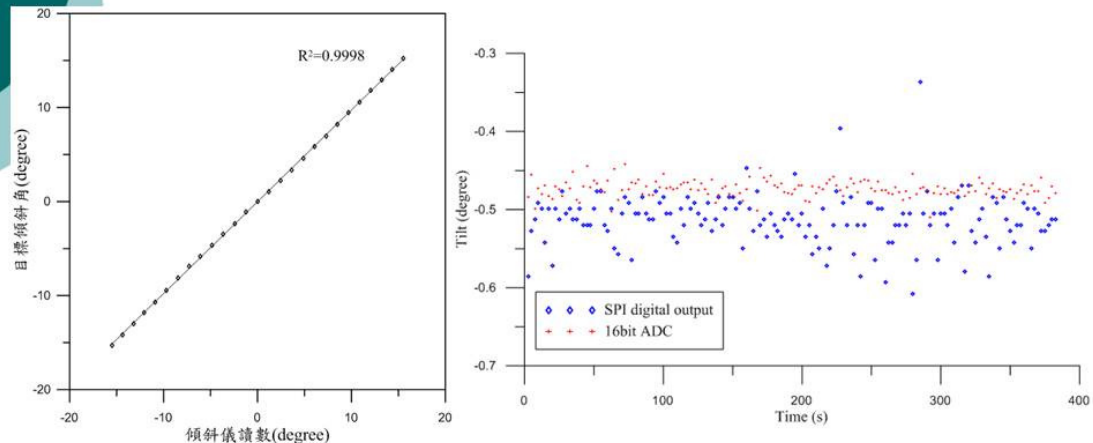


- LoRa無線傳輸
- 配置SD卡(監測資料備份)
- 傳送資料含降雨量與模組電壓
- 搭配太陽能板與電池模組
- 自動定時重啟



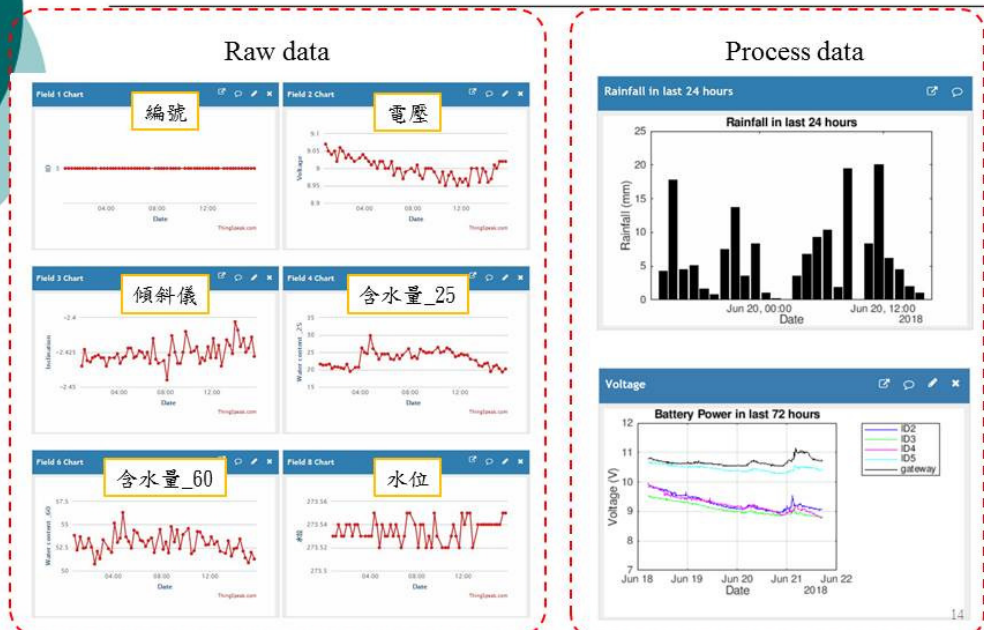
12

傾斜儀率定及穩定性改善



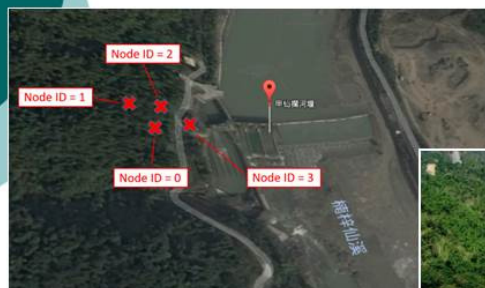
13

雲端即時顯示平台-Thingspeak

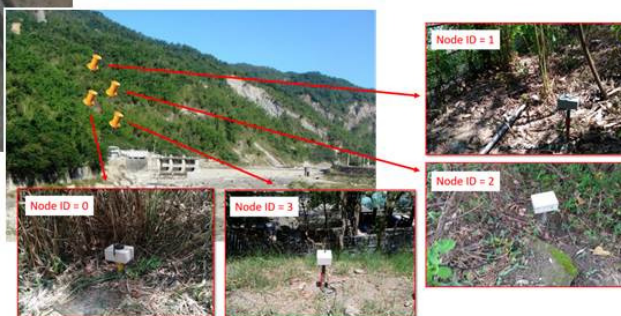


14

非飽和土層滑動監測場址成果： 甲仙攔河堰通達道路邊坡

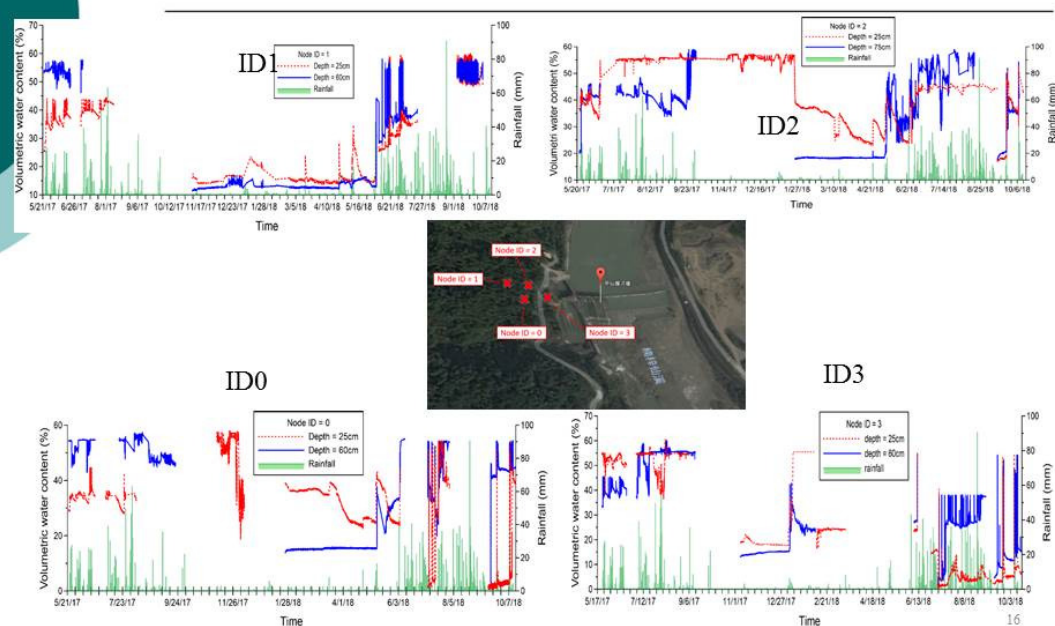


監測配置圖



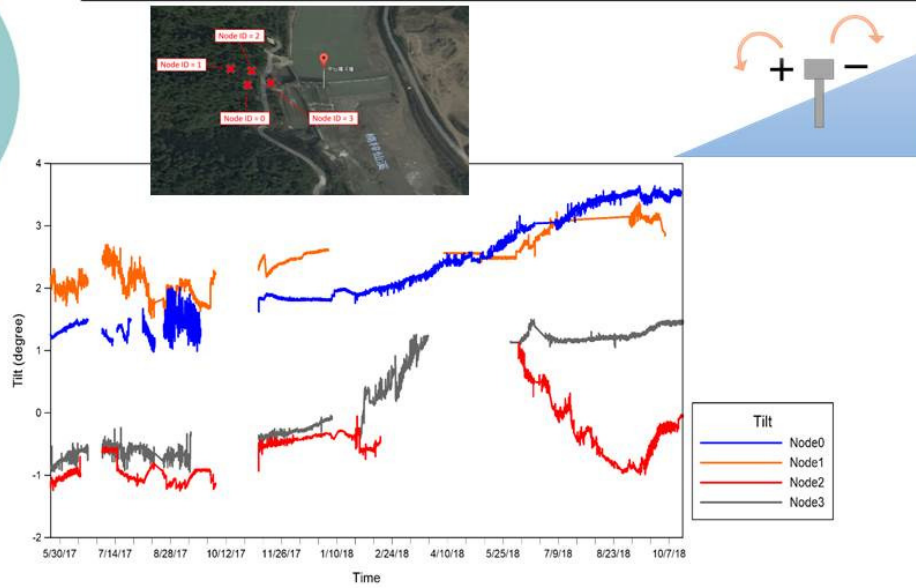
15

甲仙監測數據—含水量計



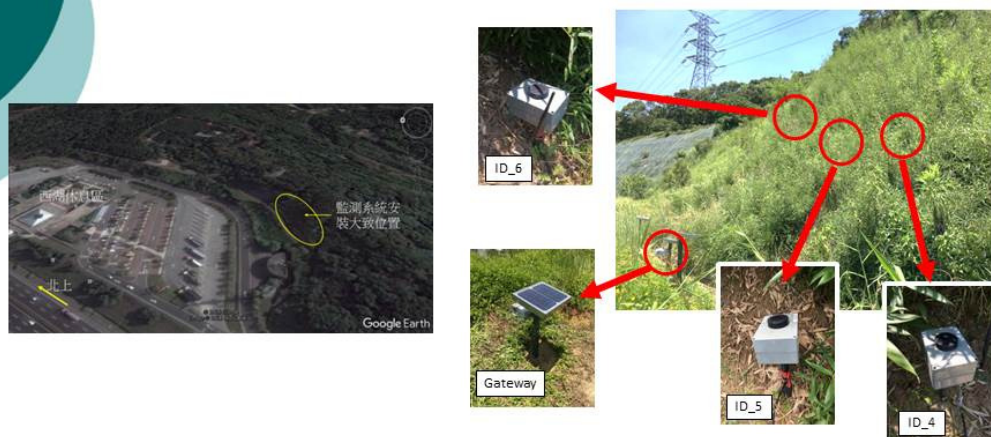
16

甲仙監測數據－傾斜儀



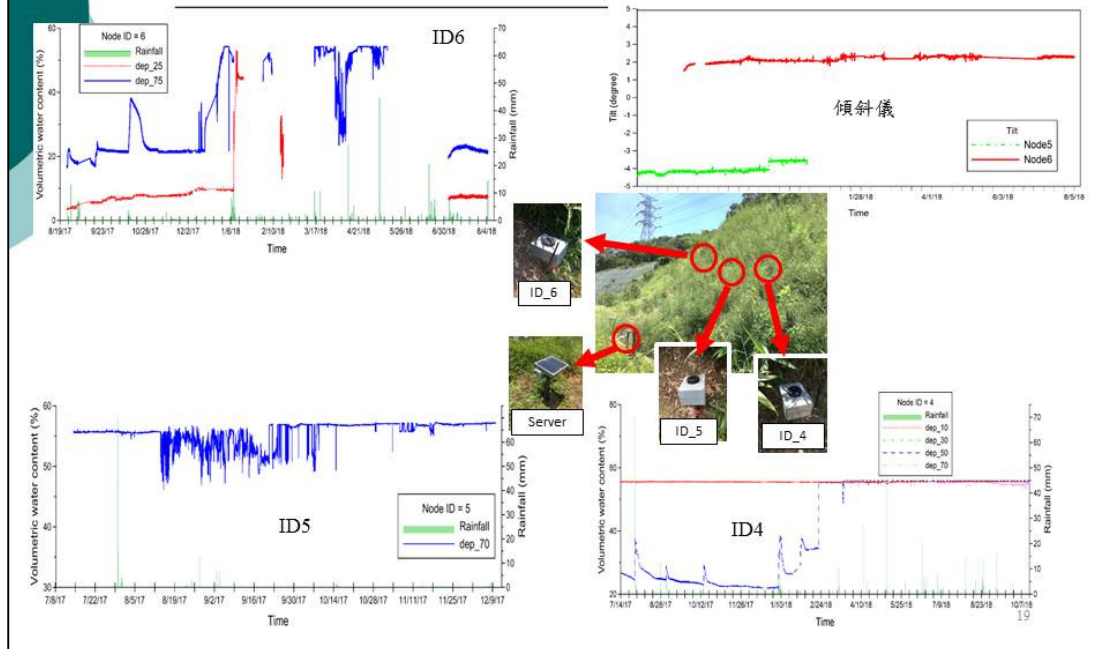
17

西湖休息站邊坡監測配置圖



18

西湖監測數據－含水量計& 傾斜儀



飽和土層滑動預警架構

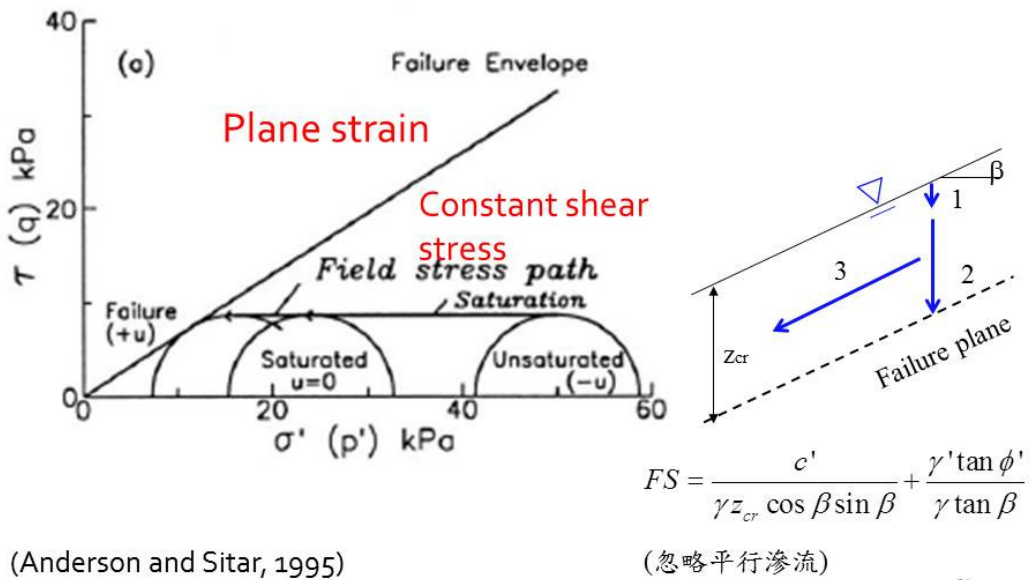
•經驗法

- 累積雨量 + 降雨強度 → 非直接
- 地表位移或速率 → 因場址而異

•解析法

- 基於嚴謹力學分析 → stress path method, 水力力學耦合模擬
- 現地監測 → failure type dependent

深層滑動應力狀態



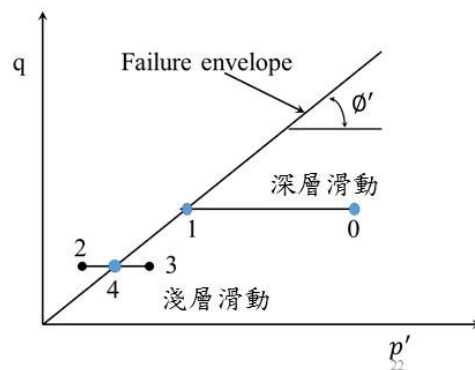
21

應力路徑土壤邊坡監測與預警架構

- 初始應力-平面應變線彈性分析
- 破壞包絡線由現地土壤強度決定
- 固定剪應力應力路徑
- 應力狀態決定預警階段

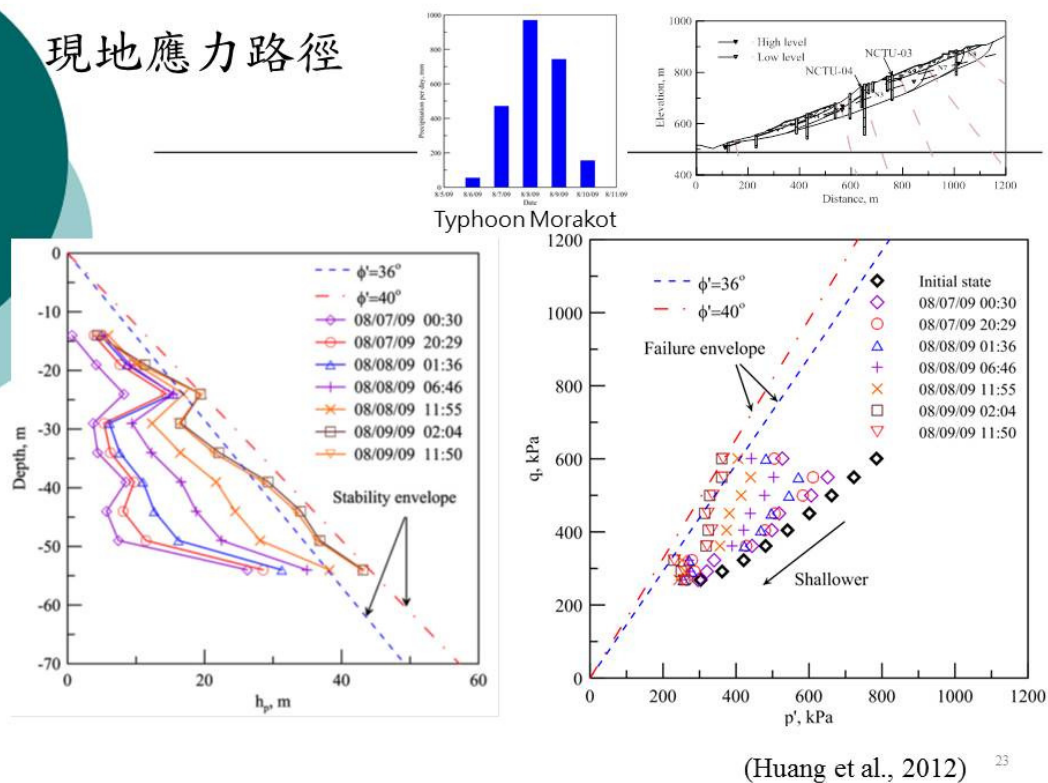
$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \left(\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w r_u}{\gamma_{sat}} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

$$r_u = \frac{h_w}{d_{cr}}$$



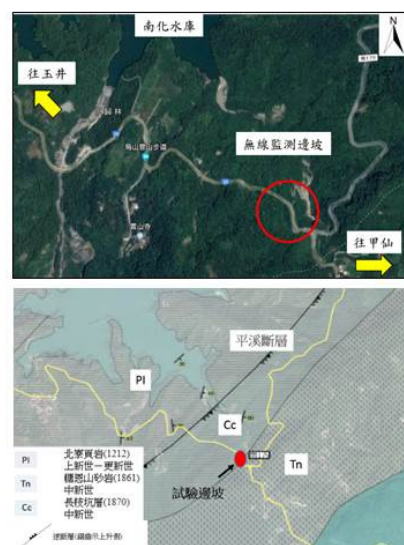
22

現地應力路徑



107年飽和土層滑動場址: 台20線52k場址

- 鄰近南化水庫
- 公路局五工處在此場址設有四處60m水位兼傾斜管鑽孔
- 崩積層厚度約13m，有災害歷史紀錄
- 滑動面約位於地表下10m崩積層與剪裂泥夾砂質泥岩交界
- 地下水位變化在6m內
- 穩定性受強降雨影響顯著



(改自中央地質調查所)

24

位置與地形



邊坡位置圖(取自google map)



台20線邊坡地形圖(青山工程顧問有限公司)

25

歷史破壞記錄

- 莫拉克颱風期間，里程52K+80~240 路段下邊坡發生嚴重崩塌，造成西行線車道交通中斷。
- 下邊坡路基地錨補強工程完工後，於102年9月道路鋪面仍產生下陷及開裂，顯示區域邊坡仍呈不穩定情形。



道路下邊坡淺層崩塌(青山工程顧問公司)



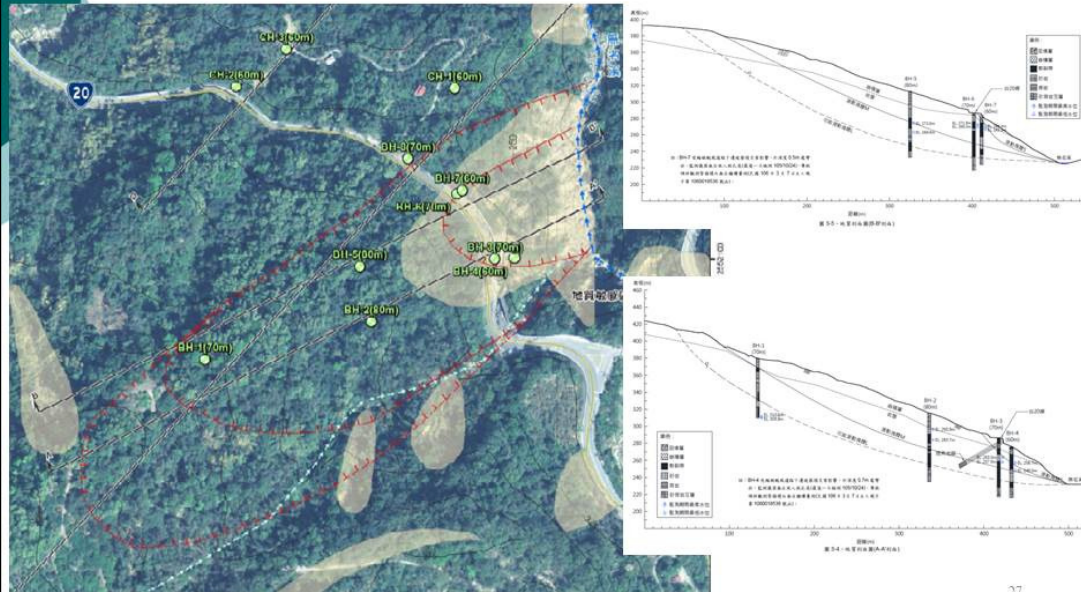
里程52K+80~+160 道路開裂(青山工程顧問公司)



莫拉克颱風期間道路下邊坡崩塌(青山工程顧問公司)

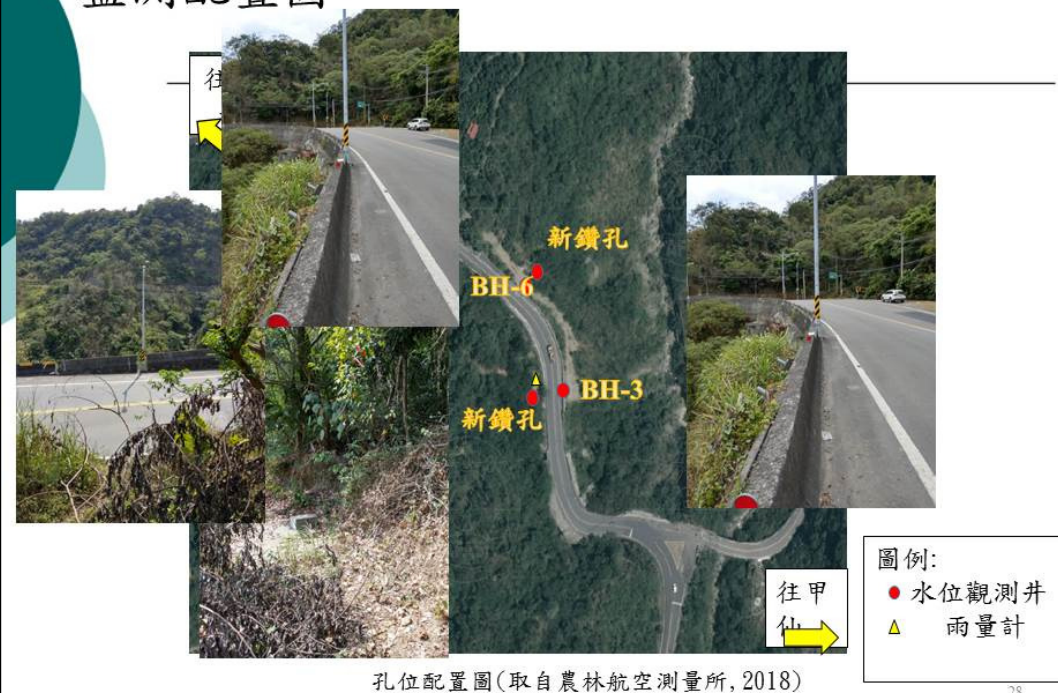
26

原有監測配置



27

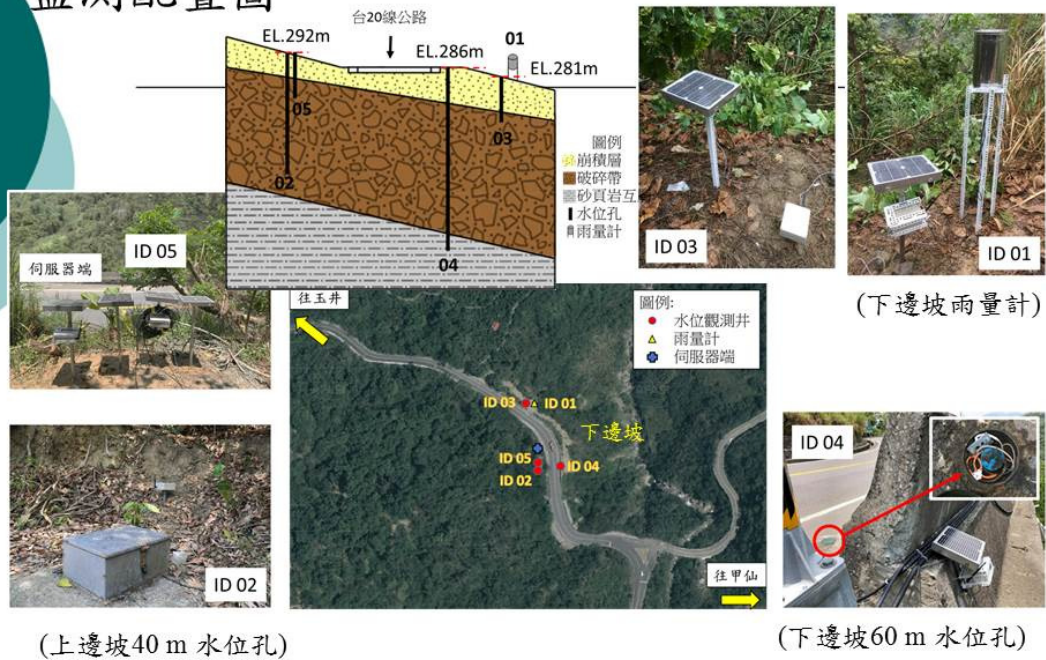
監測配置圖



孔位配置圖(取自農林航空測量所, 2018)

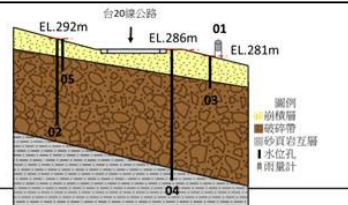
28

監測配置圖

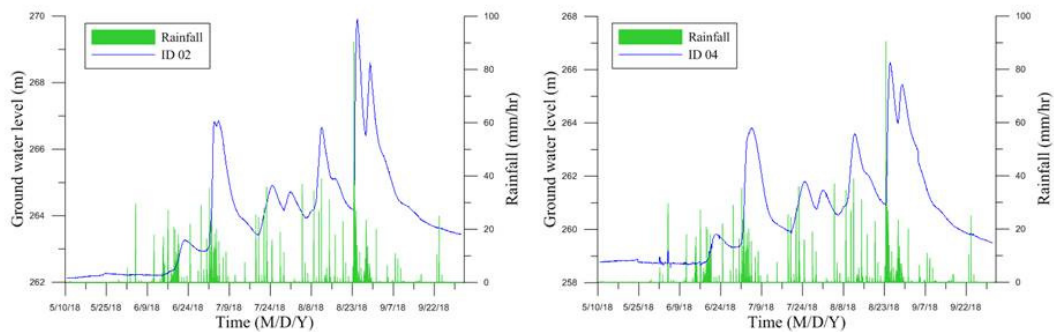


29

監測數據－岩層地下水位

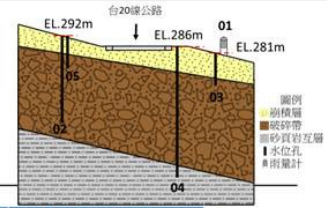


ID	配置	水位孔深度	水位孔地表高程
01	雨量計	無	無
02	液位計	40 m	292m
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m
04	液位計	60 m	286m
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m

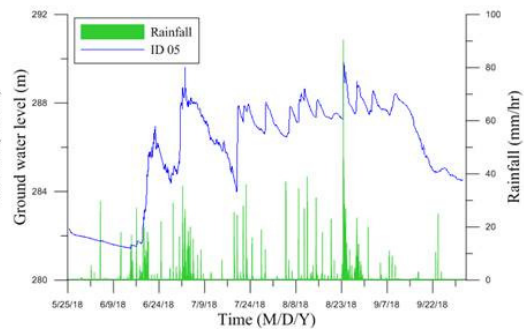
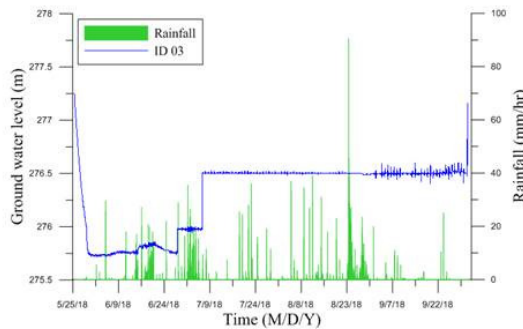


30

監測數據－崩積層地下水位

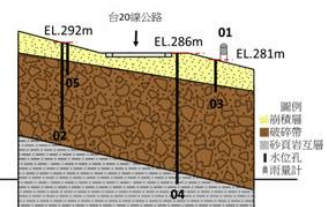


ID	配置	水位孔深度	水位孔地表高程
01	雨量計	無	無
02	液位計	40 m	292m
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m
04	液位計	60 m	286m
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m

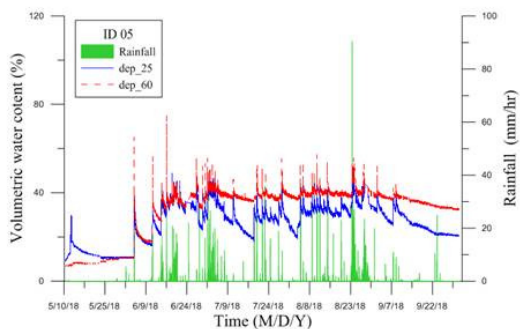
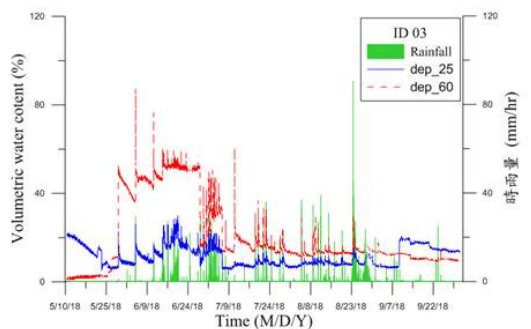


31

監測數據－表層含水量計

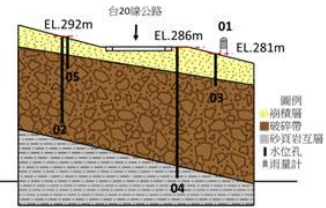


ID	配置	水位孔深度	水位孔地表高程
01	雨量計	無	無
02	液位計	40 m	292m
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m
04	液位計	60 m	286m
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m

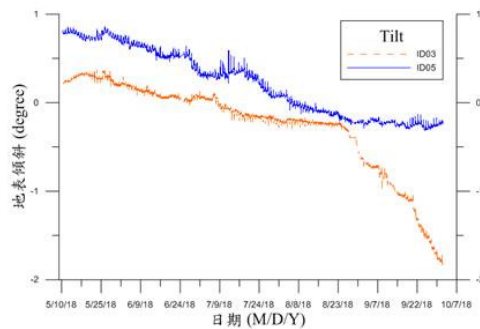
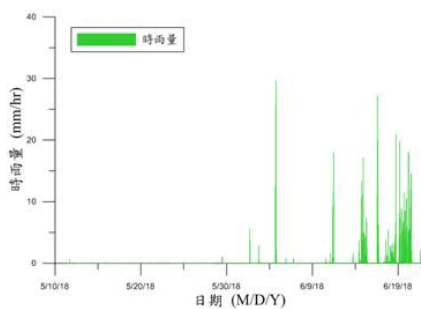


32

監測數據－降雨量、傾斜儀



ID	配置	水位孔深度	水位孔地表高程
01	雨量計	無	無
02	液位計	40 m	292m
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m
04	液位計	60 m	286m
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m



33

二維水力力學耦合邊坡分析

水力力學耦合數值分析

FLAC程式

- 兩相流(two phase flow)模組:進行具兩相流體(包含不同液體及氣-液兩相)孔隙介質流動行為模擬，可進行非飽和土層中水的流動行為模擬
- 可整合於原有之連續體固體元素力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，適切模擬非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程模擬。

$$\tau^{max} = \sigma^b \tan \phi + C \quad \sigma^b = \sigma - (S_w P_w + S_a P_a)$$

$$\tau^{max} = (\sigma - P_a) \tan \phi + S_w (P_a - P_w) \tan \phi + C$$

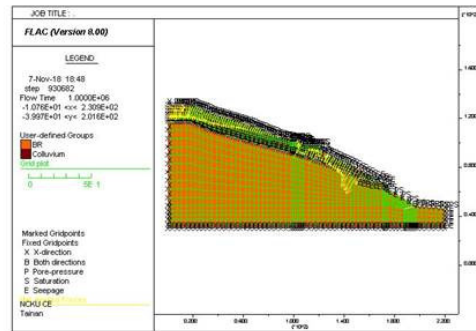
$$C_c = S_w P_c \tan \phi \quad P_c = P_0 [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a}$$

34

台20線52k水力力學耦合穩定分析

土層參數

參數(單位)	Colluvium	Rock
非飽和單位重 (kN/m ³)	18.5	23.0
飽和單位重 (kN/m ³)	20.1	25.6
楊氏模數(kPa)	4000	2.0E5
柏松比	0.3	0.25
有效凝聚力 (kPa)	0	1200
有效摩擦角 (deg.)	35	30
膨脹角 (deg.)	2	0
滲透係數(m/s)	1.5E-3	5.2E-5

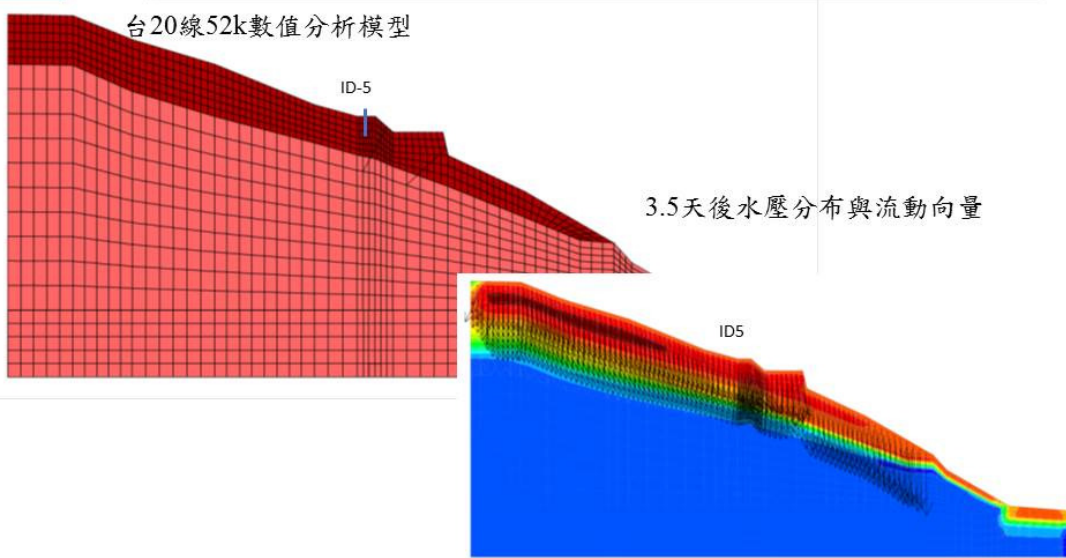


非飽和水文參數

參數	Colluvium	WR	意義
Porosity	0.35	0.1	孔隙率
k_{sat} (m/s)	1.0E-4	1.0E-6	飽和滲透係數
$f_{modulus}$ (Pa)	2.0E9	2.0E9	水體積模數
saturation	0.54	0.54	初始飽和度
Vga	0.1	0.1	VG parameter a
Vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
Vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0 (Pa)	15000	15000	VG P0
Pc (Pa)	-45203	-45203	初始From Pc(Sw)

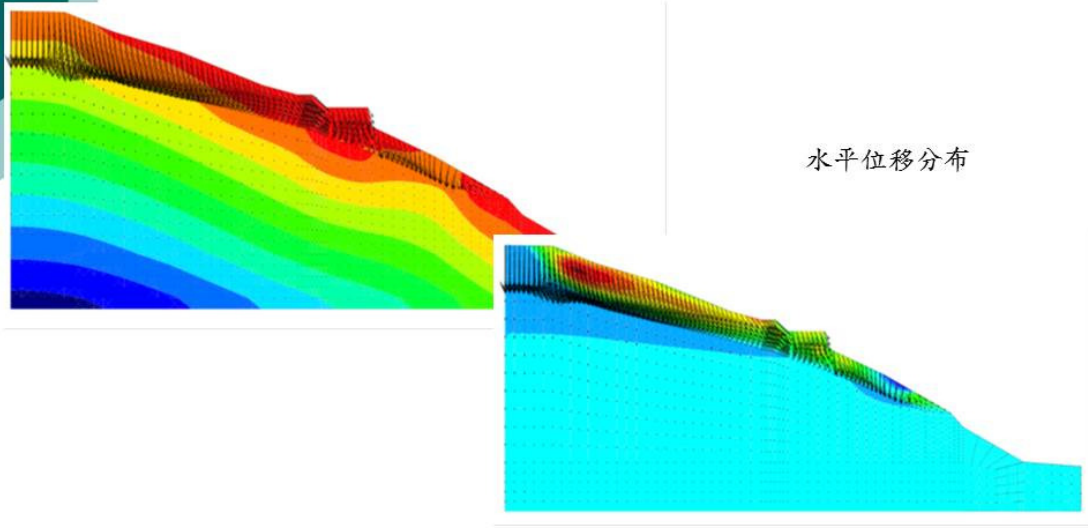
數值模型與水力反應

台20線52k數值分析模型



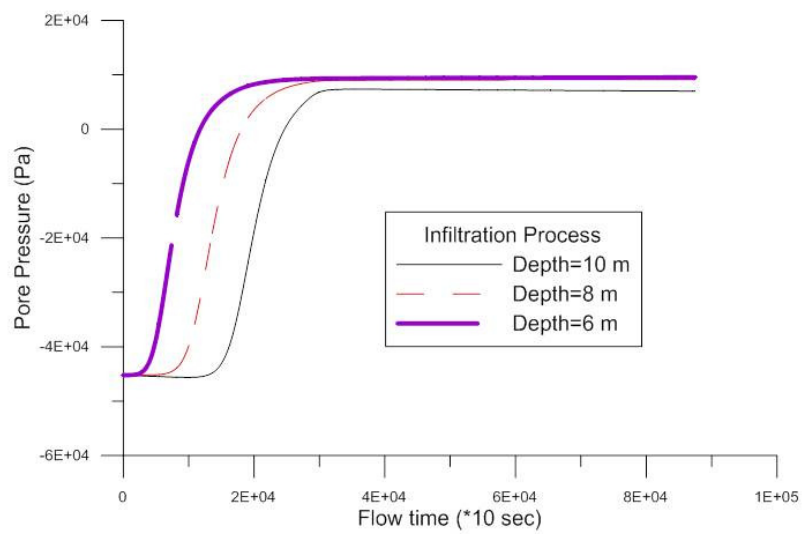
力學反應與位移分佈

垂直有效應力分布與位移向量



37

入滲過程孔隙水壓歷時



38

現有深層滑動解析限制與對策

- 深層解析限制：
 - 無限邊坡中平行滲流之影響不可忽略
 - 現地垂直入滲非為增加孔隙水壓之唯一因子
 - 地下水需考慮整體集水區降雨與入滲特性
 - 土壤非均質與強度不確定性
- 對策
 - 由長期降雨與地下水壓監測，建立降雨與水壓關聯
 - 由現地入滲觀測，量化垂直入滲與上游補注之比例
 - 考慮二元堆積之崩積土層強度特性搭配反算解析

Key: 長期有效連續觀測

39

非耦合分析結果

臨界滑動面FS=1.1
ID3 水上升1 m

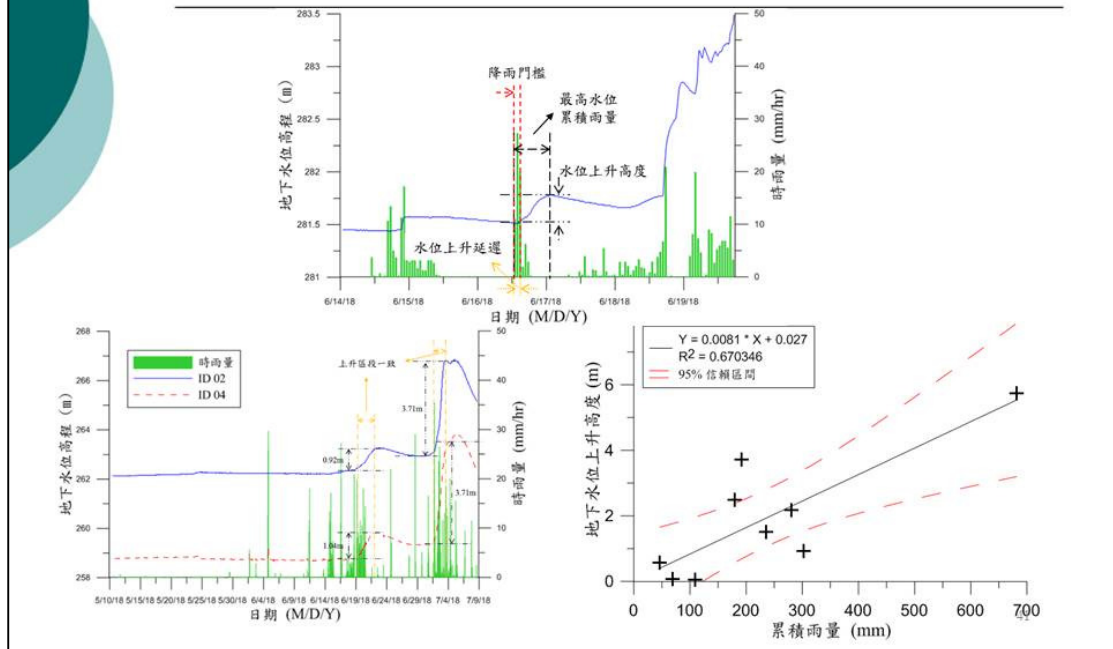
下邊坡滑動破壞

地下水流軌跡

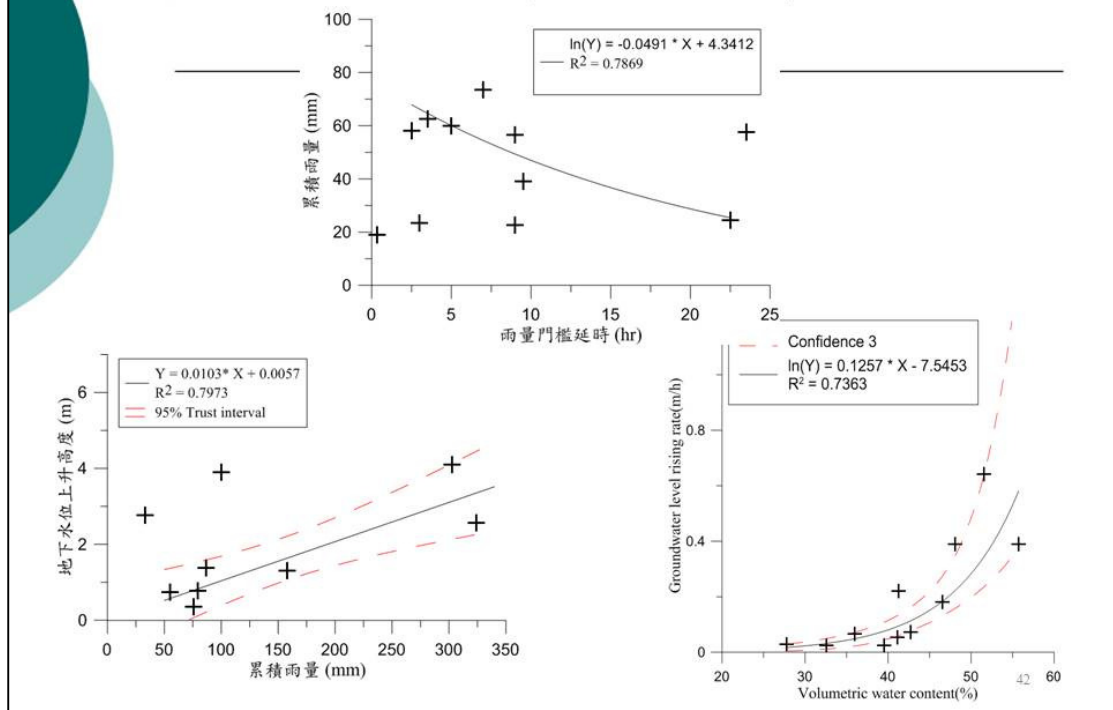
水平位移分布

40

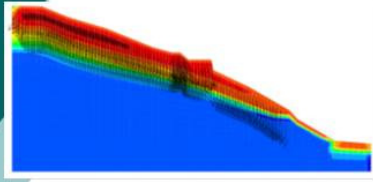
岩盤水位變化與降雨特徵分析



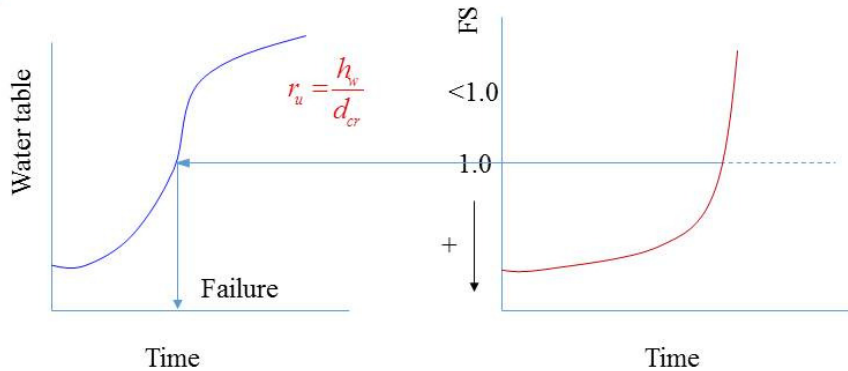
崩積層水位變化與降雨特徵分析



飽和土層滑動地下水位預警架構



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



43

結論

- 完成項目：
 - 兩處淺層滑動監測場址維護
 - 監測模組系統優化與更新
 - 飽和土層滑動監測資料處理與應用
 - 飽和土層滑動場址水力力學耦合分析與極限平衡分析
- 建議
 - 現有場址目前為穩定狀態，且已有整治之規畫，建議如有後續研究，應考慮更換研究地點。
 - 地下水位變化機制複雜，水力力學耦合分析有其侷限，建議以長期觀測之地下水位與降雨特徵進行統計分析，帶入極限平衡分析架構，應可增加其應用案例。

44

簡報完畢，敬請指教

45

附錄四

工作會議紀錄

第一季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-107-H1DB001h

採購案名稱：公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

時間：107年4月23日(星期一)上午11時 地點：國立成功大學

主席：謝明志科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志

港研中心一科：陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、原設置於阿里山五彎仔公路之邊坡滑動監測站，由於該滑動區實施深井排水工法，地下水位降至地表40m以下，而監測系統液位計底部埋設至於地表下30m，故缺少地下水位資料，需另選地點設置監測站進行試驗。
- 3、於台20線52k+150深層滑動場址製作與安裝感測儀器(含電源系統、伺服器、沉水式液位計、雨量計、土壤含水量計、傾斜儀等)。
- 4、持續進行西湖與甲仙等淺層邊坡滑動站監測及維護。目前研究進度與契約規劃之期程相符。

第二季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-107-H1DB001h

採購案名稱：公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

時間：107年6月26日(星期二)下午15時30分

地點：本所港研中心5樓第一會議室

主席：謝明志 科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志、陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

1、上月份工作進度報告

2、後續工作重點

3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、於公路局第五區養護工程處曾文工務段轄區之台20線52k+150滑動場址進行地質鑽探，分別為編號ID3與ID5等2孔，深度皆為11公尺，鑽探入岩深0.5公尺，完成後安裝沉水式液位計進行量測地下水位，並於周邊適當位置安裝無線感測儀器，可監測土層含水量與邊坡傾斜滑動。
- 3、完成(台20線52k+150場址)設置深層監測站，監測儀器含沉水式液位計、雨量計、土壤含水量計、傾斜儀等。監測站共有5個孔位，除了編號ID3與ID5外，尚有ID1、ID2與ID4，其中ID1為雨量計，ID2與ID4(深度為40公尺與60公尺)，係借用公路養護單位原有孔位安裝沉水式液位計，進行量測地下水位，監測站自107年5月10日起開始量測，目前儀器正常運作，監測數據進行彙整分析中。
- 4、持續進行西湖與甲仙等淺層邊坡滑動站監測及維護，惟西湖測站因土層屬軟岩，透水性較低，土層含水量不易量測，監測系統需考慮遷移。

第三季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-107-H1DB001h

採購案名稱：公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發

時間：民國107年9月20日(星期四)上午10時30分

地點：台20線52k+150地滑場址(南橫公路近南化水庫)

主席：柯科長正龍

記錄：陳志芳

出席者：柯正龍

港研中心一科：陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、設置於台20線52k+150深層滑動站共有5個孔位(編號ID1至ID5)，
監測儀器分別是沉水式液位計、雨量計、土壤含水量計、傾斜儀等，測站自107年5月10日進行監測迄今，各孔位儀器如下：
(1)ID1：雨量計，設置於下邊坡。
(2)ID2：深度 40 公尺安裝沉水式液位計，量測上邊坡地下水位。
(3)ID3：深度為 11 公尺，監測土層分層含水量與邊坡傾斜滑動。

(4)ID4：深度 60 公尺安裝沉水式液位計，量測下邊坡地下水位。

(5)ID5：深度為 11 公尺，監測土層分層含水量與邊坡傾斜滑動。

3、編號ID1之雨量計，因外殼損壞，於本(第三)季工作會議時赴現地完成更新，修復後雨量計正常運作，目前測站太陽能供電正常，監測數據進行彙整分析中。

4、持續進行西湖與甲仙等淺層邊坡滑動站監測及維護。