

109-022-7B69

MOTC-IOT-108-H1DC001

# 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護 及模組功能提升



交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月



109-022-7B69

MOTC-IOT-108-H1DC001

# 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護 及模組功能提升

著者：曾文傑、謝明志、陳志芳、黃安斌、張文忠

交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升 /  
曾文傑等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，  
民 109.02

面；公分

ISBN 978-986-531-080-6(平裝)

1.公路管理 2.運輸系統

557

108023137

公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升

著 者：曾文傑、謝明志、陳志芳、黃安斌、張文忠

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](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版 > 中心出版品)

電 話：(04)26587116

出版年月：中華民國 109 年 2 月

印 刷 者：

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：200 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：1010900121 ISBN：978-986-531-080-6(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。



109

公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升

交通部運輸研究所

GPN: 1010900121

定價:200 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：公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-080-6 (平裝)	政府出版品統一編號 1010900121	運輸研究所出版品編號 109-022-7B69	計畫編號 108-H1DC001
主辦單位：港研中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：曾文傑 研究人員： 參與人員：王培源 聯絡電話：04-26587116 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：張文忠 協同主持人：黃安斌 研究人員：周仕勳、洪芯琦、邱心彥、吳博巧 地址：臺南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575~63128	研究期間 自 108 年 02 月 至 108 年 12 月	
關鍵字：公路邊坡破壞、無線監測模組、水力力學耦合分析、依時預警系統、物聯網			
<p>摘要：</p> <p>為提升現有以降雨為指標之公路邊坡預警架構之準確性，交通部運研所持續進行客製化場址無線監測技術及預警系統研發，整合微機電(MEMS)感測元件與物聯網(IoT)通訊技術發展監測模組，並以水力力學耦合分析建立依時預警模式。本計畫針對前期建置之公路邊坡崩塌監測測試場址進行維護及資料處理，並對現有監測模組進行功能提升，本年度新增阿里山五彎仔路段監測場址，模組提升主要為廣域網路更新為 4G 網路，此外本年度新增公路邊坡擋土系統監測與預警值分析功能，以 PYWALL 軟體分析擋土牆破壞前變形，建立擋土支撐系統傾角及背填水位雙重指標預警值，另建構專屬整合雲端儲存與顯示功能之雲端平台，結合基於水力力學耦合分析之邊坡滑動與土壤結構互制分析之擋土牆體分析建議之預警值，進行預警顯示，後續可擴充主動通知警示功能，以期發展場址客製化具依時特性之公路邊坡淺層破壞與牆體穩定預警架構，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，作為相關防災作為啟動之準據。</p> <p>成果效益與應用情形：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>4. 研究成果提供交通部、公路總局與台鐵局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。</li> </ol>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
109 年 2 月	117	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>限閱 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密          (解密【限】條件：<input type="checkbox"/>年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，  <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密)  <input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Upgrading of wireless monitoring modules and maintaining of testing sites for highway slope failures			
ISBN(OR ISSN) 978-986-531-080-6(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010900121	IOT SERIAL NUMBER 109-022-7B69	PROJECT NUMBER 108-H1DC001
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Jier Tseng PROJECT STAFF: PHONE: 04-26587116 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM : February, 2019 TO : December 2019
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: highway 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 in Institute of Transportation, MOTC. Wireless sensing modules adopting micro-electro-mechanical system (MEMS) sensors with wireless communication components are developed and deployed in the field. This project continues the on-going research to maintain the testing sites and upgrading the modules to 4G network. A new shallow failure site located in Highway 18 has been added in this study. A new module for retaining wall inclination monitoring is deployed and a soil-structure interaction program PYWALL is adopted to predict the pre-failure deformation of the retaining wall. A cloud platform capable of data storage, display, and warning is also developed. Combining the real-time monitoring of ground hydraulic and mechanical responses and rigorous coupled hydro-mechanical analysis, a customized, time-dependent warning system might be feasible.  BENEFIT AND APPLICATION : <ol style="list-style-type: none"> <li>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.</li> <li>2. Develop surface wireless sensing module for deep seated landslide warning.</li> <li>3. Develop customized, time-dependent warning system and procedure to improve the limitations of current warning techniques.</li> <li>4. The system potentially can be used by ministry of transportation, directorate general of highways, and Taiwan railways administration for hazard management.</li> </ol>			
DATE OF PUBLICATION February, 2020	NUMBER OF PAGES 117	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升

## 目 錄

計畫摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XII
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.....	1-5
1.3 研究內容與項目.....	1-6
1.4 預期成果、效益及應用.....	1-8
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.....	2-10
第三章 無線土層即時監測系統.....	3-1
3.1 系統架構.....	3-1
3.2 土層水文與運動反應量測.....	3-1
3.3 土層無線監測模組組成.....	3-6

3.4 淺層滑動邊坡無線監測模組.....	3-12
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 甲仙場址監測資料.....	4-2
4.3 阿里山五彎仔場址土層監測模組配置與安裝.....	4-10
4.4 五彎仔場址監測資料.....	4-11
第五章 飽和土層滑動監測場址.....	5-1
5.1 監測場址背景資料.....	5-1
5.2 監測配置.....	5-3
5.3 監測資料與分析.....	5-5
5.4 二維水力力學耦合穩定分析.....	5-18
5.5 二維水力力學非耦合穩定分析.....	5-23
第六章 邊坡擋土系統變形分析與預警.....	6-1
6.1 PYWALL 軟體基本介紹.....	6-1
6.2 邊坡擋土系統模擬.....	6-2
第七章 雲端整合即時監測平台.....	7-1
7.1 平台架構.....	7-1
7.2 平台功能簡介.....	7-2
7.3 監測平台警戒值管理.....	7-6
第八章 結論與建議.....	8-1
8.1 結論.....	8-1

8.2 建議.....	8-2
8.3 預期效益與應用情形.....	8-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 各期審查意見與回覆.....	附錄 1-1
附錄二 工作會議記錄.....	附錄 2-1
附錄三 期末簡報.....	附錄 3-1





## 圖目錄

圖 2.1 依時邊坡預警系統研究架構圖.....	2-2
圖 2.2 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖.....	2-6
圖 2.3 典型細顆粒土壤入滲分析結果.....	2-7
圖 2.4 典型粗顆粒土壤入滲分析結果.....	2-7
圖 2.5 地表邊坡預警監測系統.....	2-9
圖 2.6 典型土壤之非飽和土壤特性曲線.....	2-11
圖 2.7 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....	2-13
圖 2.8 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖.....	2-15
圖 2.9 深層無限邊坡滑動應力狀態.....	2-16
圖 2.10 數值分析模型.....	2-19
圖 2.11 入滲開始 900 秒孔隙水壓分布與流動向量.....	2-19
圖 2.12 同一剖面不同深度孔隙水壓歷時.....	2-20
圖 2.13 預測地表運動歷時.....	2-20
圖 2.14 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....	2-22
圖 2.15 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念.....	2-22
圖 2.16 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化及依時預警概念.....	2-23
圖 2.17 甲仙上邊坡表面傾角變化及依時預警概念.....	2-23
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 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖.....	3-3

圖 3.4 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較.....	3-4
圖 3.5 傾斜儀類比電壓比例輸出標定.....	3-5
圖 3.6 雨量計量測值校正結果.....	3-6
圖 3.7 邊坡無線監測系統運作示意圖.....	3-7
圖 3.8 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖 .....	3-11
圖 3.9 土層監測模組外構.....	3-13
圖 3.10 防水電子盒內部配置.....	3-13
圖 3.11 液位計實體與校正結果.....	3-16
圖 4.1 監測模組相對位置圖.....	4-1
圖 4.2 監測站點周遭環境.....	4-2
圖 4.3 Thingspeak 即時顯示情況 .....	4-3
圖 4.4 Node0 體積含水量量測結果 .....	4-5
圖 4.5 Node1 體積含水量量測結果 .....	4-6
圖 4.6 Node2 體積含水量量測結果 .....	4-7
圖 4.7 Node3 體積含水量量測結果 .....	4-8
圖 4.8 甲仙測站傾斜角監測結果.....	4-9
圖 4.9 傾斜角量測方向 .....	4-9
圖 4.10 五彎仔邊坡空照圖.....	4-10
圖 4.11 ID02 體積含水量量測結果.....	4-14
圖 4.12 ID03 體積含水量量測結果 .....	4-14
圖 4.13 ID04 體積含水量量測結果 .....	4-15

圖 4.14 ID02 傾斜監測結果.....	4-15
圖 4.15 ID03 傾斜監測結果.....	4-16
圖 4.16 ID04 傾斜監測結果.....	4-16
圖 4.17 ID02 於 2019/08/12 降雨事件中傾斜監測結果 .....	4-17
圖 4.18 ID04 水位監測結果.....	4-17
圖 4.19 2019/10/26 五彎仔測站修復後配置圖 .....	4-18
圖 4.20 五彎仔測站修復後 ID2 分層水份計量測成果 .....	4-18
圖 4.21 五彎仔測站修復後 ID3 分層水份計量測成果 .....	4-19
圖 4.22 五彎仔測站修復後 ID4 水位量測成果 .....	4-19
圖 4.23 五彎仔測站修復後 ID2 表面傾斜量測成果 .....	4-20
圖 4.24 五彎仔測站修復後 ID3 表面傾斜量測成果 .....	4-20
圖 5.1 場址位置圖 .....	5-2
圖 5.2 監測儀器配置圖 .....	5-4
圖 5.3 監測剖面示意圖 .....	5-5
圖 5.4 ID 02 地下水位監測數據.....	5-6
圖 5.5 ID 03 地下水位監測數據.....	5-6
圖 5.6 ID 04 地下水位監測數據.....	5-7
圖 5.7 ID 05 地下水位監測數據.....	5-7
圖 5.8 降雨特徵參數定義示意圖 .....	5-8
圖 5.9 ID 02 與 ID 04 水位比較示意圖 .....	5-9
圖 5.10 岩層累積雨量與水位上升高度關係圖 .....	5-9

圖 5.11 崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖.....	5-10
圖 5.12 累積雨量與地下水位高度關係.....	5-11
圖 5.13 地下水位上升速率與體積含水量關係.....	5-11
圖 5.14 ID 03 體積含水量監測數據.....	5-16
圖 5.15 ID 05 體積含水量監測數據.....	5-17
圖 5.16 各測站傾斜角監測數據.....	5-17
圖 5.17 台 20 線 52k 數值分析模型.....	5-20
圖 5.18 入滲開始 1.2E5 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....	5-21
圖 5.19 入滲後垂直有效應力分布與位移向量.....	5-22
圖 5.20 入滲後水平位移分布.....	5-22
圖 5.21 ID05 位置預測孔隙水壓歷時.....	5-23
圖 5.22 非耦合分析 ID03 下邊坡臨界滑動區域.....	5-24
圖 5.23 非耦合分析下邊坡水平位移分布.....	5-24
圖 5.24 非耦合分析地下水流軌跡.....	5-25
圖 6.1 PYWALL 土壤結構模型.....	6-2
圖 6.2 牆體變形分析流程圖.....	6-3
圖 6.3 模擬擋土牆體示意圖.....	6-5
圖 6.4 水位深度 7-5 公尺位移圖.....	6-8
圖 6.5 水位深度 4.5-2.5 公尺位移圖.....	6-8
圖 6.6 水位深度 2-0 公尺位移圖.....	6-9
圖 6.7 地下水位深度與牆頂位移量.....	6-10

圖 6.8 地下水位深度與旋轉角 .....	6-11
圖 6.9 ID5 孔頂高程與地下水位示意圖 .....	6-12
圖 7.1 平台架構示意圖 .....	7-1
圖 7.2 平台身分驗證系統首頁 .....	7-3
圖 7.3 即時監測平台頁面 .....	7-3
圖 7.4 監測儀器狀態頁面 .....	7-4
圖 7.5 雨量資訊頁面 .....	7-4
圖 7.6 地下水位資訊頁面 .....	7-5
圖 7.7 傾角資訊頁面 .....	7-5
圖 7.8 資料下載頁面 .....	7-6
圖 7.9 使用者管理頁面 .....	7-6
圖 7.10 平台警戒值設定 .....	7-7



## 表目錄

表 4-1 模組資訊表.....	4-12
表 5-1 台 20 線 52k 測站配置表 .....	5-4
表 5-2 ID 02 降雨事件整理 .....	5-12
表 5-3 ID 05 降雨事件整理 .....	5-13
表 5-4 分析所用土層參數 .....	5-19
表 5-5 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數 .....	5-19
表 5-6 非飽和水文參數.....	5-20
表 6-1 牆體斷面表.....	6-5
表 6-2 土壤參數表.....	6-7
表 6-3 地錨參數表.....	6-7
表 6-4 不同土壤下主動破壞旋轉角 .....	6-9





# 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

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。本計畫目標為針對公路土壤邊坡可能遭遇降雨引致之土層滑動破壞，進行解析法分析並搭配無線土層反應監測模組，發展適用於崩積土層之解析法依時預警模式，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性，利於相關單位對此類災害預警及管理之決策參考。

降雨引致公路土壤邊坡破壞依其滑動機制可分為淺層與飽和土層滑動，淺層滑動發生於非飽和區，因降雨入滲使基質吸力降低，非飽和土壤強度降低而滑動；飽和土層滑動發生於飽和區，其力學平衡因地下水滲流影響，使下滑力增加，且因孔隙水壓增加導致土壤強度降低而引發土體滑動，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。淺層滑動之解析法於前期計畫已發展相對成熟，將持續進行現地觀測與驗證資料收集，此外本年度計畫將持續對深土層降雨崩塌解析與觀測技術進行精進，另外加入擋土系統監測與土壤-擋土結構互制分析，建立完整公路邊坡預警架構。

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與外在誘因，如地形、地質與降雨資料與崩塌相關性之統計迴歸與整理等，歸納出簡易的關係式，以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侷限。

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、場址入滲行為土壤-擋土系統互制及破壞機制等因素列入考量。而現有公路養護單位所用之時雨量及累積雨量警戒共有「預警」、「警戒」及「行動」3個等級，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。解析法為以嚴謹的力學概念為基礎，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、地質材料力學行為及土壤-擋土系統互制之影響，探討邊坡滑動機制發生原因、過程與影響範圍，其流程具有通用性與客觀性，且成果具有場址客製化之特性，但此類分析需有詳細現地調查，土層資料與擋土系統設計圖等，且其分析過程複雜，因此相關研究較少，但其對於改善預警精度、建立依時預警模式、與減災設施規劃等具有前瞻性。

現今對邊坡預警之趨勢為整合考慮地形、地質材料特性之場址破壞機制分析，搭配即時監測相關引致滑動之土層物理量與地層運動之預警系統，此類預警技術包含兩部分，其一為藉由地質探勘與地形測量，建立場址地質模型並據以進行解析法分析，預測其滑動機制、範

圍及不同階段警戒值；其二為佈設監測硬體於反應敏感之位置，進行即時土層監測並發佈警報。目前以數值方法進行崩塌機制分析已有相當進展，但是現地土層邊坡預警監測系統仍有價格昂貴、佈設不易及維護困難等瓶頸，因此發展具備無線土層監測之模組化系統，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。而108年度「海洋及交通運輸防災技術研究(2/4)」研商會議中確定本年度計畫目標，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，測試發展適用於崩積土層之解析法依時預警模式，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性。

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」、106年「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」及107年「公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發」研究成果，針對前期發展之公路土壤邊坡崩塌監測無線感測網路模組進行維護並持續精進及擴充，由前期進行之公路土壤邊坡淺層崩塌無線感測網路模組延伸至土壤飽和土層滑動監測，尤其針對公路土壤邊坡可能遭遇到破壞面位於飽和土層之滑動崩塌解析技術，而為因應邊坡飽和土層滑動場址多已整治，因此，本年度將於水力力學耦合分析之邊坡穩定架構中，加入擋土設施之互制反應，並搭配之擋土系統監測系統與對應之預警指標。利用不同複雜程度之解析法，建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之分析架構，結合本所發展中之土層無線監測模組為基礎，研發與解析法搭配之無線感測飽和土層滑動與擋土系

統反應監測模組，建立場址土層水文及力學無線感測網路，研發降雨引致深土層崩塌之土層監測預警模式之架構，提高預警之準確與時效性，以利災害預防及災後管理之決策參考。

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

本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，其場址具有坡角小於土壤有效摩擦角、土層厚度大於數公尺且現場地下水系發達或入滲速率快之條件，因此其監測之物理量與淺層滑動有所不同，本研究以本所發展之表層無線監測模組為基礎，加入開孔水位量測，本年度並研發現地擋土系統監測模組，結合飽和土層滑動之機制與土壤結構互制分析，建立場址孔隙水壓及力學反應無線感測網路，發展降雨引致飽和土層崩塌之監測預警模式之雛形。因研發技術基於力學理論，可依場址幾何與材料特性分析，建立以地下水位及地表傾斜為指標之客製化之監測預警系統。

本研究整體計畫執行之連貫性包括：

(1) 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土層滑動監測，而飽和土層與淺層滑動之區分，係以飽和地下水位為分界，因滑動面位於飽和水位上與下的破壞機制不同，需依不同破壞模式進行分析。本年度研發之解析及監測技術將可選擇使用於常發生飽和土層滑動之公路土壤邊坡。

## 1.2 研究範圍與對象

本年度計畫除淺層滑動監測站維護外，並將針對滑動面發生於飽和土層之飽和土層滑動解析與監測進行精進，飽和土層滑動其力學平衡因地下水位上升及滲流影響，使其孔隙水壓與下滑力增加，引致土壤強度降低導致邊坡滑動。解析法分析以前期針對淺層滑動所發展之無限邊坡極限平衡與二維邊坡因降雨入滲引致破壞之數值模式，進一步考慮降雨引致之地下水水力反應，考慮滑動面於飽和區，進行土層有效應力分析，發展具飽和土層層滑動潛勢場址之水力力學耦合分析技術，評估其滑動面、滑動歷時及水力反應，作為監測量測物理量選定與預警模式之依據。

本所於前期已於甲仙攔河堰西側通達道路邊坡及高速公路西湖休息站邊坡完成兩處淺層滑動監測站，其採用廣為應用於物聯網(Internet of Things, IoT)之微機電系統 (Micro-electro-mechanical system, MEMS) 感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角及土中分層含水量之監測模組，形成分布式表層土壤感測網路。本年度(108年)淺層監測站將持續進行系統維護與更新，更新部分包括通訊系統由3G更新為4G、資料分析雲端化以及預警值修正，另於經費許可下於阿里山五彎仔路段新增淺層監測站。107年度利用此模組之架構，加入降雨引致深層滑動之指標物理量，量測值包括地表傾斜、現地雨量監測、入滲速率、地下孔隙水壓等，研發適用於土壤邊坡飽和土層滑動且具低成

本易安裝特點之無線監測模組。本年度(108年)深層土壤監測站將增加崩積層開孔式孔隙水壓監測，通訊系統由3G改4G，並增加擋土牆傾角監測。

### 1.3 研究內容與項目

本計畫著眼於落實應用非穩態水壓之分佈式監測技術之研發，以提供降雨地層入滲及滲流量之關係與實際水壓分佈，做為邊坡穩定與擋土支撐系統分析即時更新參數，達到現地預警功能。本年度計畫工作項目條列如下：

1. 針對本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場址，持續進行監測與現地測試，並精進現有模組資料分析模式。
2. 選定潛在飽和土層滑動場址一處，於雨季前安裝無線開孔液位計及雨量計，發展現地地下孔隙水壓升降與降雨特徵之推估模式。
3. 利用場址現地深土層地下水位監測成果，進行傳統極限平衡及有效應力數值分析反算與驗證。
4. 精進適用於土壤邊坡飽和土層滑動之低成本易安裝之無線監測模組及搭配之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。
5. 參考科技部「科技計畫績效管考平台([http:// stprogram.stpi.narl.org.tw](http://stprogram.stpi.narl.org.tw))」之「績效指標(實際成果)資料格式(word 檔案)」及「佐證資料格式(word 檔案)」，就本計畫成果之特性，選填合適績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究成果及重大突破。本計畫績效指標項目至少包括下列3項：

- (1)學術成就(科技基礎研究)-A 論文發表: 將投稿港灣報導，國際期刊一篇已接近完稿。

(2)技術創新(科技整合創新)- I 技術活動：研究成果發表於國內或國外研討會：部分成果發表於 Symposium on Smart Infrastructure and Geotechnical Engineering Innovation 國際研討會並受邀至中興工程顧問社演講。

(3)社會影響(民生社會發展)- W.提升公共服務：研究成果提供交通部、公路總局等公路管理單位邊坡防災之參考。

針對本年度(108 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：目前本所於前期計畫已建置甲仙攔河堰通達道路邊坡淺層滑動觀測場址，此場址 106 年度已完成系統精進更新，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，至 107 年底均正常運作，但原有 3G 模組因停止服務，本年度更新為 4G 廣域網路以延續原有觀測，提供分析模式測試驗證，以利於後續推廣。
2. 深層滑動場址開孔液位計及雨量計安裝與資料分析：本所於 107 年度於台 20 線 52k 佈設飽和土層滑動監測場址，利用原有公路局五工處 60 m 鑽孔及成大李德河教授之 40 m 鑽孔作為深層開孔水位觀測井，並於道路上邊坡鑽設孔底位於崩積層底部之約 15 m 之開孔水位觀測井，本年度將持續觀測，並更新雨量計韌體提升其功能，另以水位觀測與雨量監測結果，建立飽和層孔隙水壓升降與降雨特徵之關聯，建立時間域孔隙水壓推估模式，結合邊坡極限平衡分析，達到依時預警之目的。
3. 深層滑動場址傳統極限平衡及有效應力數值分析反算與驗證：本團隊於 107 年度已推導以孔隙水壓比為指標之無限邊坡極限平衡方程式，並建構二維有效應力邊坡數值分析，本年度以現地觀測成果，進行土壤參數反算及分析模式驗證，同時將現地擋土系統亦列入分析考量，以利現地應用。

4. 精進適用於土壤邊坡飽和土層滑動之低成本易安裝之無線監測模組：以運研所現有低成本易安裝之飽和土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，提供穩定可靠之飽和土層滑動監測與預警模式之即時觀測值，並於現有場址進行監測模組長期現地測試，另外搭配之極限平衡分析或預先計算之二維數值分析預警模式以雲端計算型式，於雲端平台進行計算測試。

#### 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、公路總局與臺灣鐵路管理局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。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。

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

本計畫與現有公路邊坡預警系統主要差異為考慮土壤淺層與飽和土層破壞機制不同，發展以土層水力反應與地表位移或傾斜為指標之預警模式，研發搭配之表層邊坡無線監測模組，監測系統具有快速佈設與單價便宜之特點，克服傳統於土層中安裝監測設備費時與設備昂貴之限制。監測模組以物聯網常用之軟硬體，採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤濕度、孔隙水壓、雨量特徵等功能之監測模組，於數個邊坡反應靈敏之處佈設，形成分佈式表層土層反應感測網路。由於此類電子產品可大量生產，因此，能大幅降低成本，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。

本計畫針對之土壤破壞類型包括：滑動面位於非飽和土層之淺層滑動及滑動面位於飽和土層之飽和土層滑動。計畫包括進行考慮水力力學耦合之土層邊坡穩定分析及現地無線監測模組開發，整合此二主軸，發展具依時特性之公路土壤邊坡預警系統，飽和土層依時預警架構流程如圖 2.1 所示，整體流程包括以解析與數值法為基礎之水力力學耦合分析，建立場址具依時特性之地表運動量(位移與傾角)及土層土壤水力反應，結合本計畫研發之簡易無線監測模組，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之幾何性質，做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和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 Richards 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

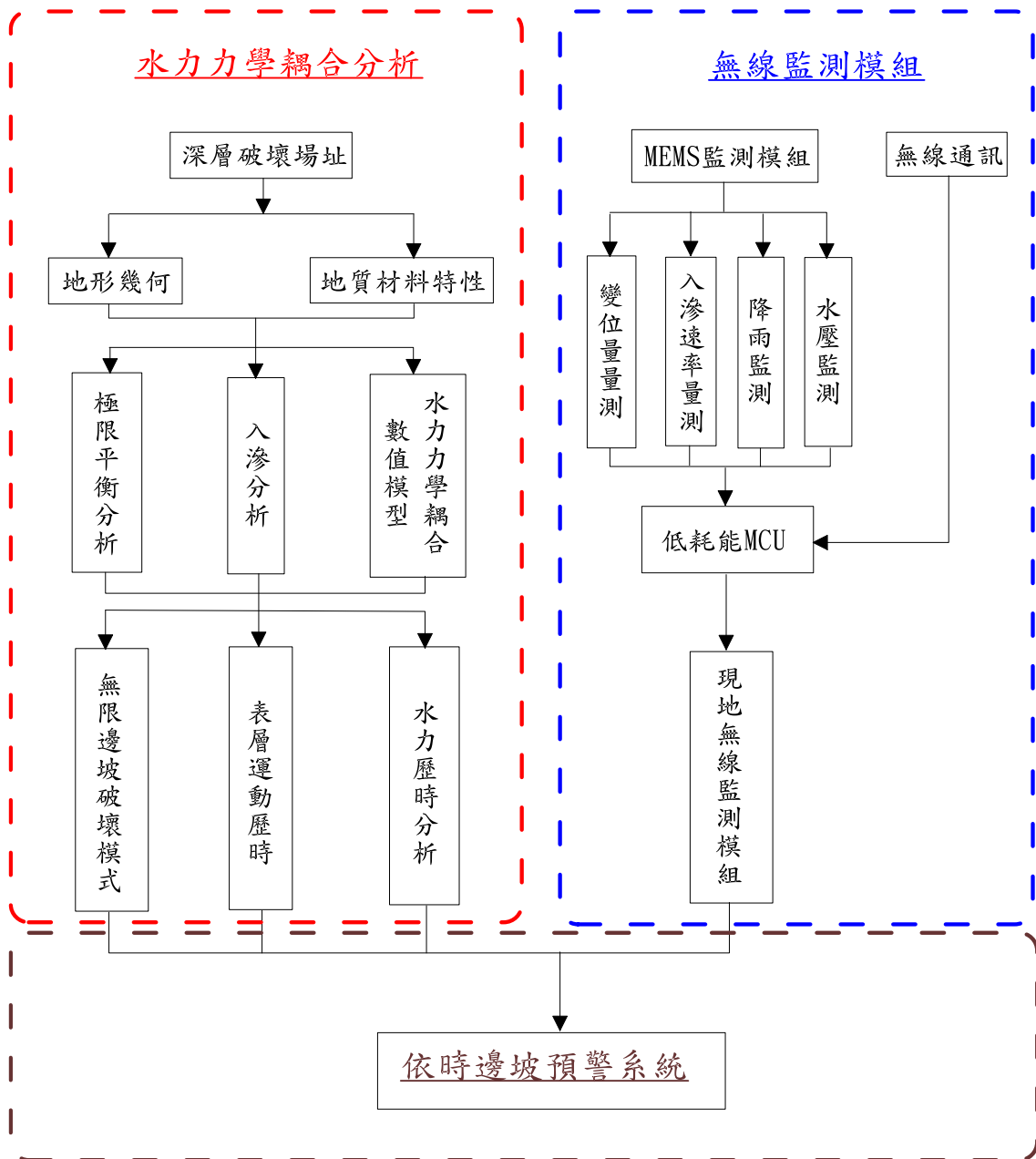


圖 2.1 依時邊坡預警系統架構圖

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，鑒於以雨量預警具一定不確定性，而現有邊坡土層監測系統佈設費時且維護不易，因此本計畫以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤含水量、入滲速率、孔隙水壓力及降雨特徵之監測模組，形成分佈式表層土壤無線感測網路。

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

本所(2017)之研究已完成飽和土層土壤無限邊坡分析架構，建立水力力學耦合分析架構，並研發測試簡易表層邊坡無線監測模組測試，選定阿里山公路五彎仔段為測試場址，但此場址因陸續完成深層排水井整治，其常時地下水位低於地表下 40m，因此短期內再滑動之機率大幅降低，需另尋合適場址進行理論驗證及硬體測試。2018 年另於台 20 線 52k+150 處設置一處監測場址，進行淺層入滲及飽和土層孔隙水壓即時監測並設置雨量計，完成此場址二維水力力學耦合穩定分析，但以二維水力力學耦合計算分析飽和土層破壞有下列侷限：

1. 無限邊坡中平行滲流之影響不可忽略。
2. 現地垂直入滲非為增加孔隙水壓之唯一因子。
3. 地下水位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 2018 年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，本年度持續觀測並以現地觀測資料進行驗證測試，以完備飽和土層滑動依時預警。

## 2.2 國內外有關本計畫之研究情況

### 2.2.1 解析法邊坡分析

美國交通研究委員會(TRB, 1996)依邊坡破壞之材料種類及運動方式，將邊坡崩塌型態分類。依材料種類可區分為岩層(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，其次則為道路開闢的影響。

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可以獨立進行分析。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)。

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 2.2 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  $40^\circ$  之無限邊坡破壞包絡線。

Collins and Znidarcic (2004) 提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，所以降雨對邊坡穩定在不考慮邊界毛細現象之情況下沒有影響，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，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 2.3)，以此做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。運研所(2018) 利用相近概念，提出淺層滑動依時預警架構，以定深度含水量變化作為預警指標。

對於基質吸力降不顯著之粗顆粒土壤，其入滲行為(如圖 2.4 所示)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 $\beta$ 小於土壤有效摩擦角，則滑動發生於正孔隙水壓處(圖 2.4 之 D 點)，此為深層滑動之類型之一，無限邊坡深層滑動可以近似之概念進行推導。

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。

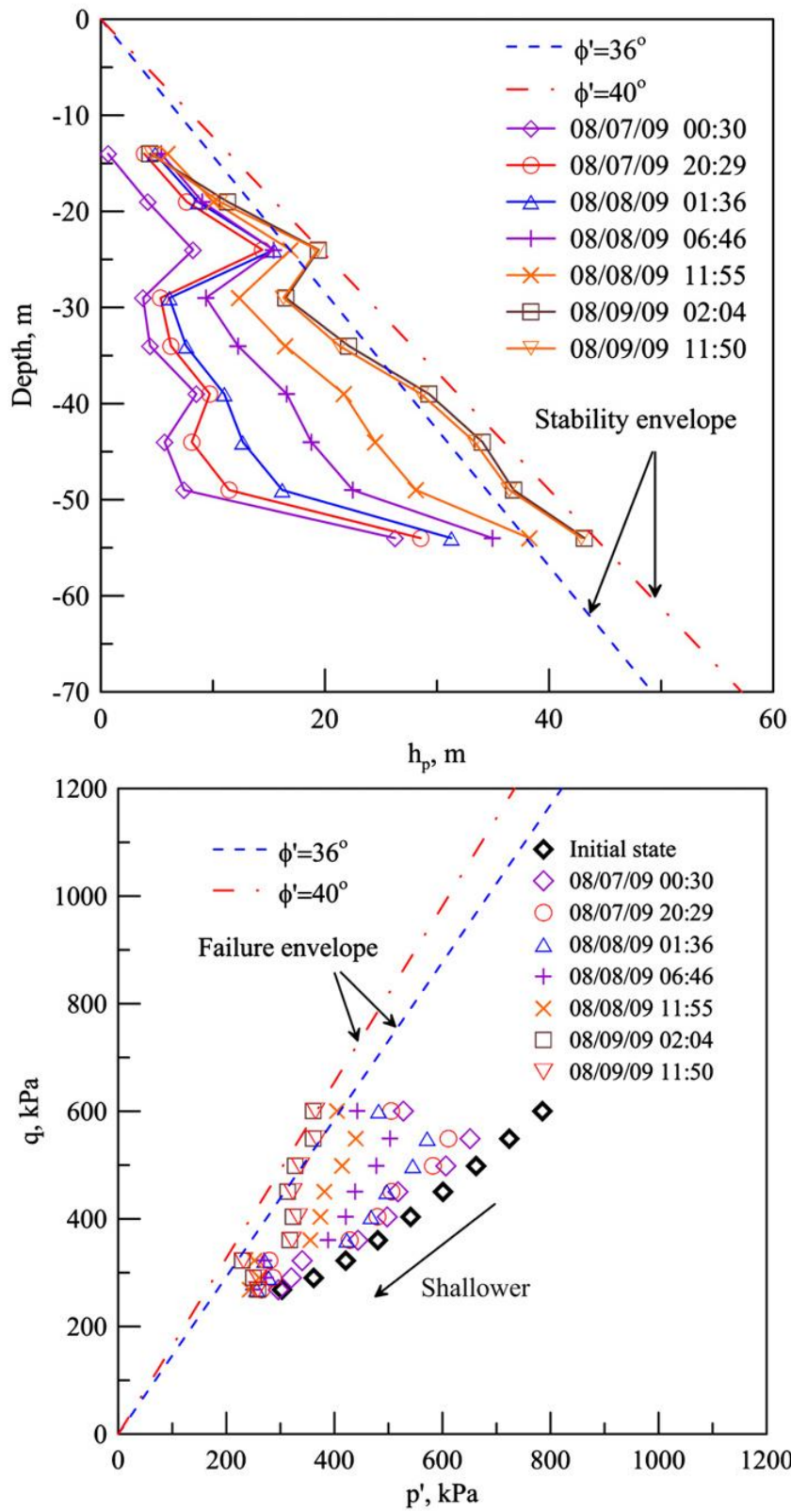


圖 2.2 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)

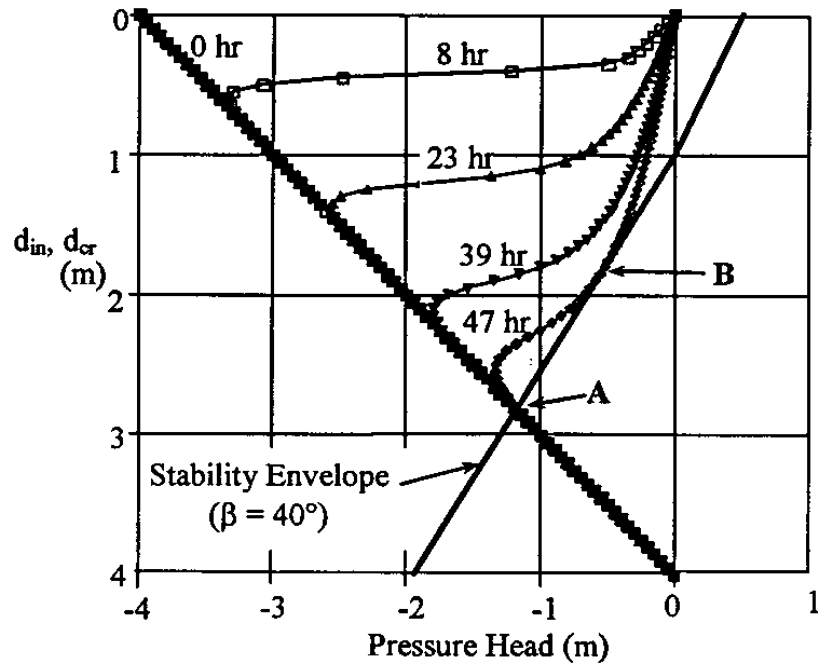


圖 2.3 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

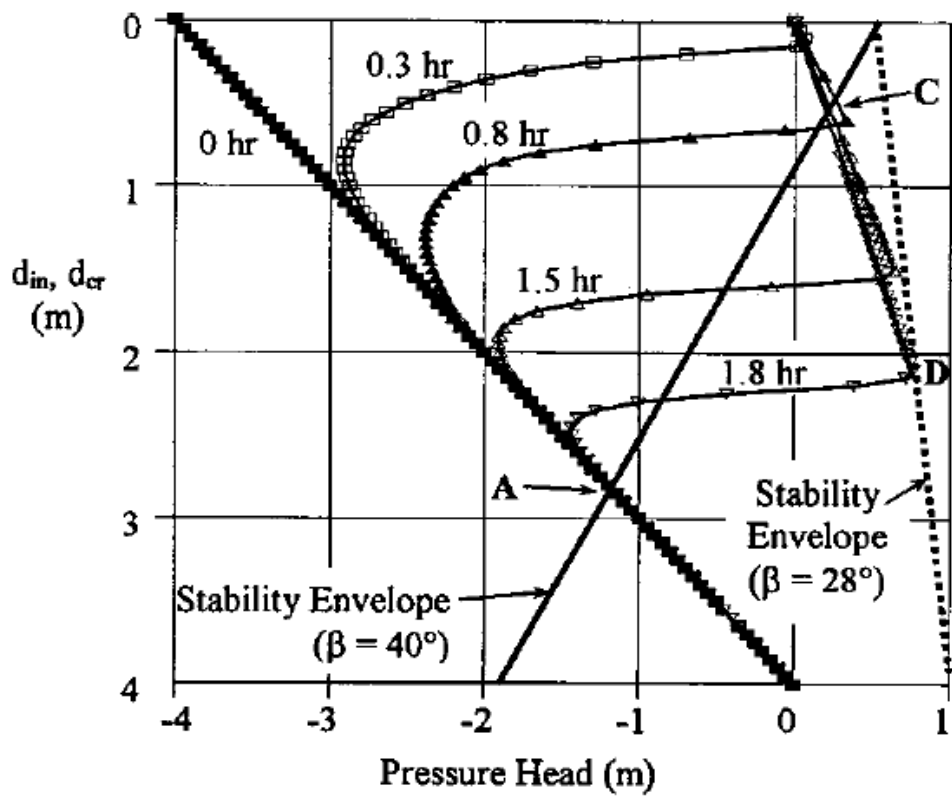


圖 2.4 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

## 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)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 2.5 所示，藉由無線網路可將地表運動與含水量變化傳送至監控中心，配合邊坡破壞前會有一顯著轉動之特性，可進行必要之預警，此系統已布設於多個場址，為現今具有較多應用案例之系統，國內則有張達德等(2013)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。



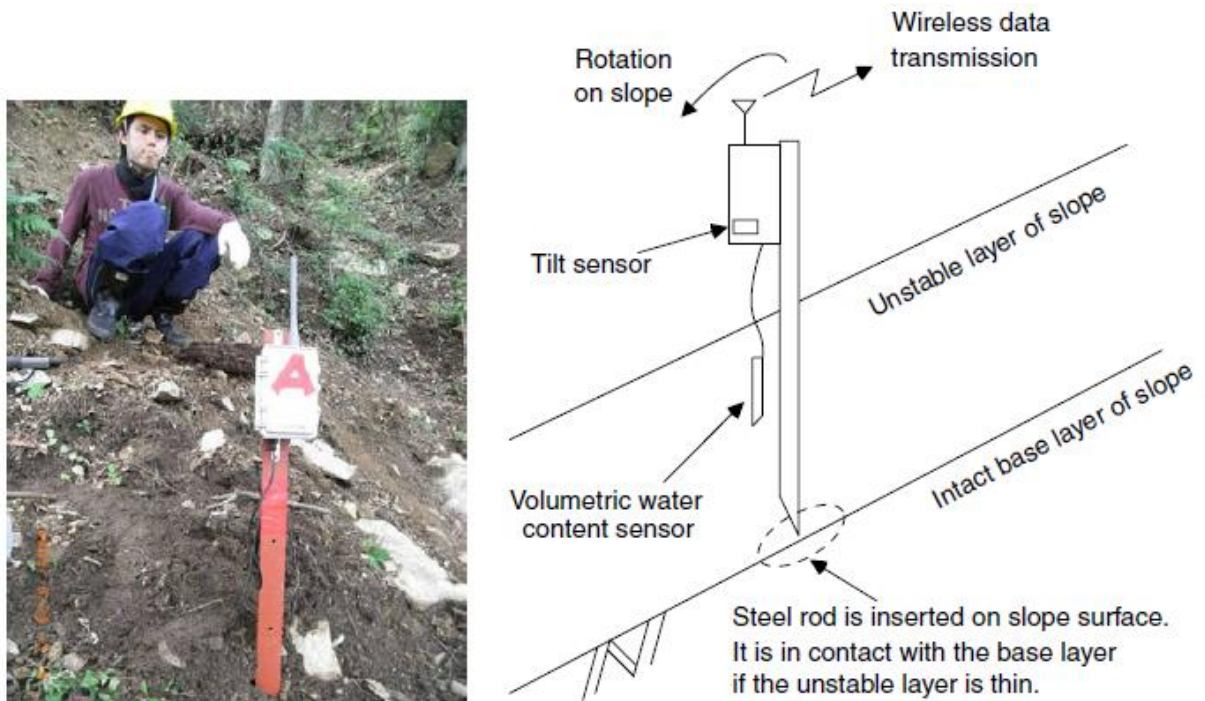


圖 2.5 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

李秉乾(2004)透過現地實測的結果，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)(2017)採用廣為應用之微機電系統(MEMS)感測器，發展可監測地表傾角(tilting)、淺層土壤濕度(soil moisture)以推估土壤基質吸力 (matric suction)之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分布式無線感測器網路，由於其可大量生產，可大幅降低成

本，長期目標為建立模組化可拋棄式模組，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，結果用於監測網路佈設參考，而監測之結果亦可回饋數值分析模式，本計畫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飽和土層滑動，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非飽和及飽和土層之崩塌為研究對象，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 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 2.6 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。土中水流動支控制方程式可依質量守衡的原理來推導建立，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的地下水流控制方程式，Freeze and Cherry (1979) 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：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h_p) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h_p) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta(h_p)}{\partial t} \quad (2.1)$$

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

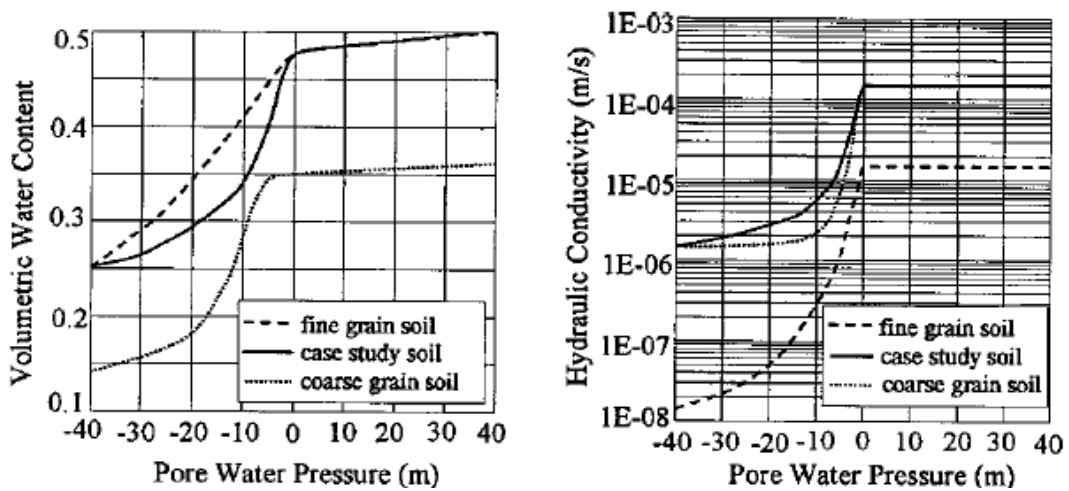


圖 2.6 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

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 Richards equation：

$$M(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial z} \right] \quad (2.2)$$

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  $\Delta z$ ,  $\Delta t$  則以 Hills 等人所建議的  $\Delta t$  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 2.2 式改寫為差分形式:

$$M(h_p) \frac{h_{p,j}^{n+1} - h_{p,j}^n}{\Delta t} = \frac{k_{j+\frac{1}{2}} \left[ (h_{p,j+1}^{n+1} - h_{p,j}^{n+1}) + (h_{p,j+1}^n - h_{p,j}^n) \right]}{2\Delta z^2} - \frac{k_{j-\frac{1}{2}} \left[ (h_{p,j}^{n+1} - h_{p,j-1}^{n+1}) + (h_{p,j}^n - h_{p,j-1}^n) \right]}{2\Delta z^2} \quad (2.3)$$

### 2.3.2 淺層滑動無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

參考 Collins and Znidarcic (2004) 降雨下之無限邊坡穩定分析概念, 推導無限邊坡之水力力學耦合穩定分析, 考慮一坡角為  $\beta$  之無限長邊坡, 如圖 2.7, 地下水位面位於  $d_w$  處,  $W$  為自重,  $N$  及  $S$  分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力,  $d_{in}$  為入滲深度, 假設邊坡破壞會發生在臨界深度  $d_{cr}$  處。切片內飽和部分( $z \leq d_{in}$ )以有效應力進行分析, 土壤單位重為飽和單位重  $\gamma_s$ , 在土壤飽和部分會產生滲流, 平行向滲流平行坡面, 水力梯度為  $i_h = \sin \beta$ , 垂直向滲流由入滲造成, 水力梯度  $i_v = 1$ ; 切片內非飽和部分( $z > d_{in}$ )以總應力分析, 土壤單位重為總體單位重  $\gamma_t$ , 其基質吸力之大小隨深度改變, 即  $h_c = d_w - z$ 。

滑動面上之正向應力及剪應力, 如式(2.4a)、(2.4b):

$$\sigma = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos^2 \beta \quad (2.4a)$$

$$\tau = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (2.4b)$$

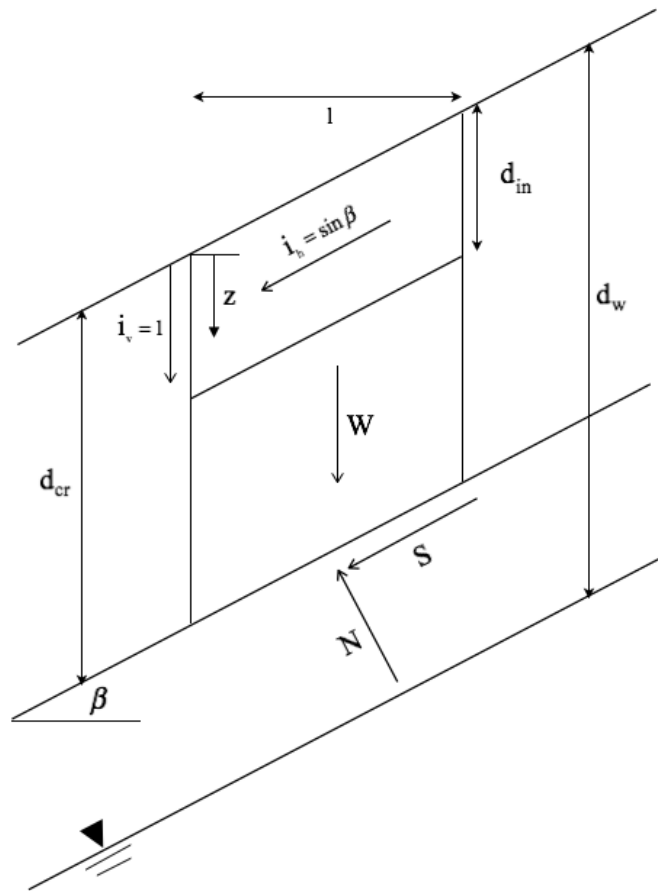


圖 2.7 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

代入延伸莫爾-庫倫破壞準則：

$$\tau_f = [c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b] + (\sigma - u_a)\tan\phi' \quad (2.5)$$

可推導臨界滑動深度  $d_{cr}$  為：

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in} - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} \quad (2.6)$$

由  $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c \tan \phi^b$ 、 $h_c = d_w - d_{cr}$ ，可將式(2.6)改寫為：

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr} \\ &= \frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \underbrace{\left( \frac{\gamma_s - 1}{\gamma} \right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲流}} - \underbrace{\frac{\gamma_w \cdot d_{in} \cdot \tan \beta}{\gamma \tan \beta - \tan \phi'}}_{\text{水平滲流}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

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

$$FS = \frac{c_t + \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.8)$$

當  $z = d_{cr}$  時  $FS = 1.0$ ，則式(2.8)可轉換為：

$$1 - \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot d_{cr} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (2.9)$$

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.10)$$

由  $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b$ ，可將式(2.10)改寫為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.11)$$

式(2.11)為非飽和邊坡穩定包絡線(stability envelope)公式，其基質吸力隨深度的分布  $h_c(z)$  可由 1-D 滲流分析解得，並代入式(2.11)進行迭代計算得到滑動面深度  $d_{cr}$ ，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

### 2.3.3 深層滑動無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

傳統無限邊坡深層滑動分析，以圖 2.8 所示其安全係數計算為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \left( \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w r_u}{\gamma_{sat}} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.12)$$

式中  $r_u = \frac{h_w}{d_{cr}}$  為孔隙水壓比， $h_w$  為地下水位上升之總水頭高，包含靜水壓力與滲流引致之孔隙水壓。不考慮平行滲流時 ( $r_u = 1.0$ )，則式(2.12)可簡化為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma \tan \beta} \quad (2.13)$$

式中  $\gamma'$  為滑動面土壤浸水單位重。考慮平行滲流時，則  $r_u$  大於 1，造成安全係數降低直至破壞，其應力變化如圖 2.9 所示 (Anderson and Sitar, 1995)。

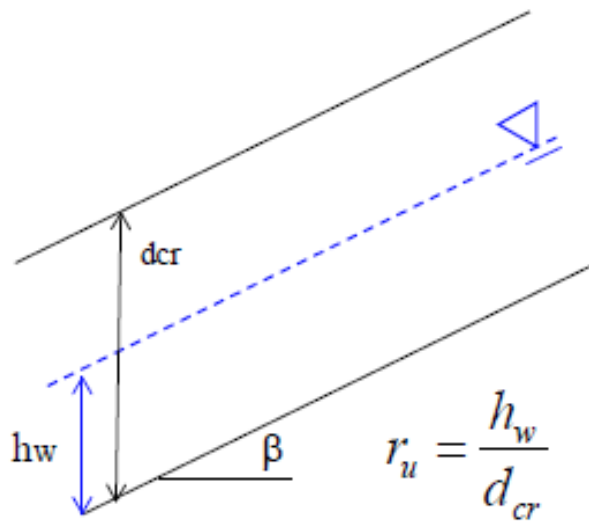


圖 2.8 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖

此外由式(2.7)，若忽略基質吸力、基質吸力摩擦角與垂直滲流影響，將入滲轉換為孔隙水壓力，則式(2.7)中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。

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

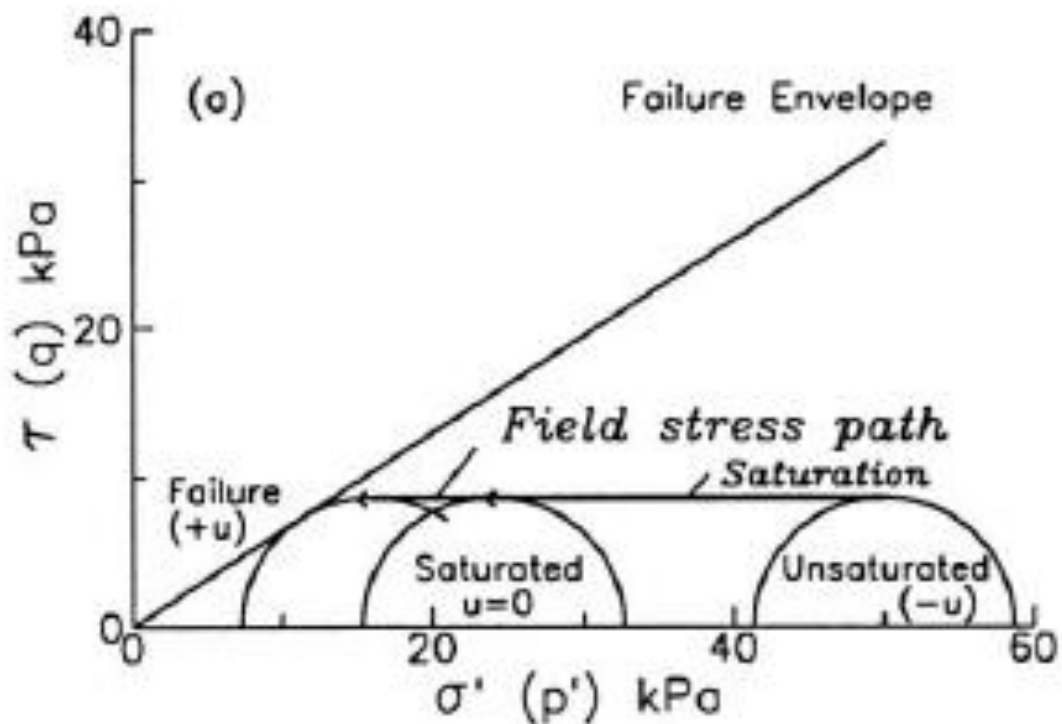


圖 2.9 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995)

### 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，因此前期研究引入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。

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

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w (u_a - u_w) \tan \phi + c' \quad (2.14)$$

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：

$$P_c(S_w) = P_0 (S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \quad (2.15)$$

式中  $a$  為土壤常數， $S_e$  為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (2.16)$$

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

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \quad (2.17)$$

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

$$k_r = S_e \left[ 1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \quad (2.18)$$

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

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \quad (2.19)$$

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

甲仙監測場址二維維水力力學耦合分析其網格如圖 2.10 所示，其力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 2.11 所示，第一階段水由地表以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，同一剖面但不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 2.12 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動，其地表位移與傾角歷時如圖 2.13 所示，與不同深度達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，可預測於持續降雨入滲下於產生滑動時間，滑動時時土層均達到飽和，且地表開始有顯著傾角變化，因滑動面由淺層轉為深層，傾角為先正(順時針)後負，深層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

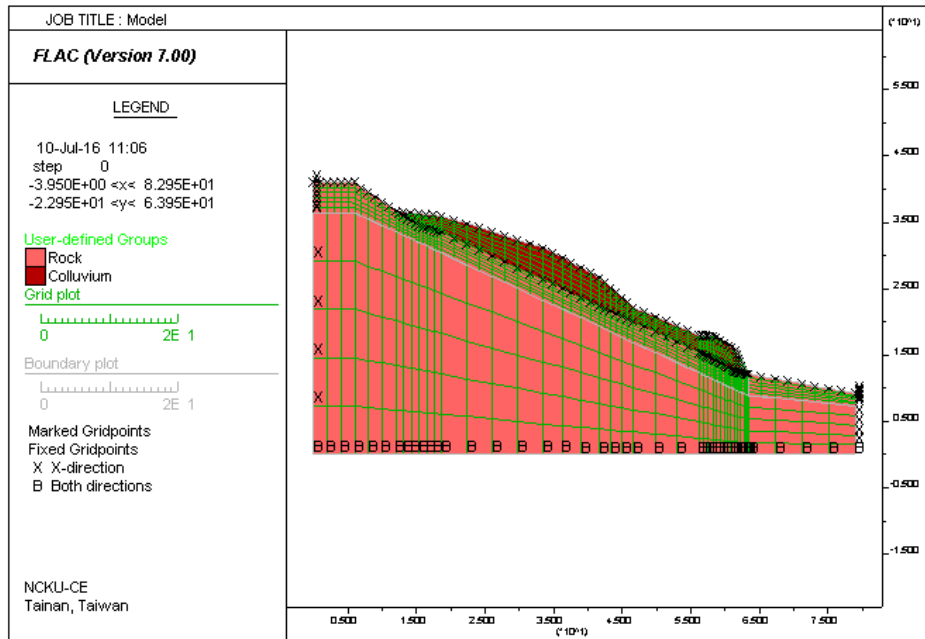


圖 2.10 數值分析模型

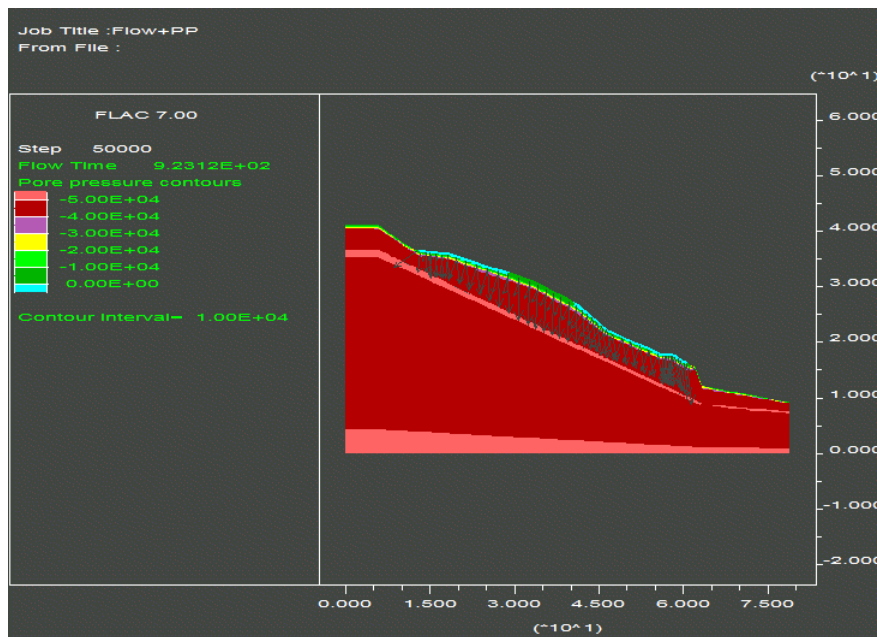


圖 2.11 入滲開始 900 秒孔隙水壓分布與流動向量

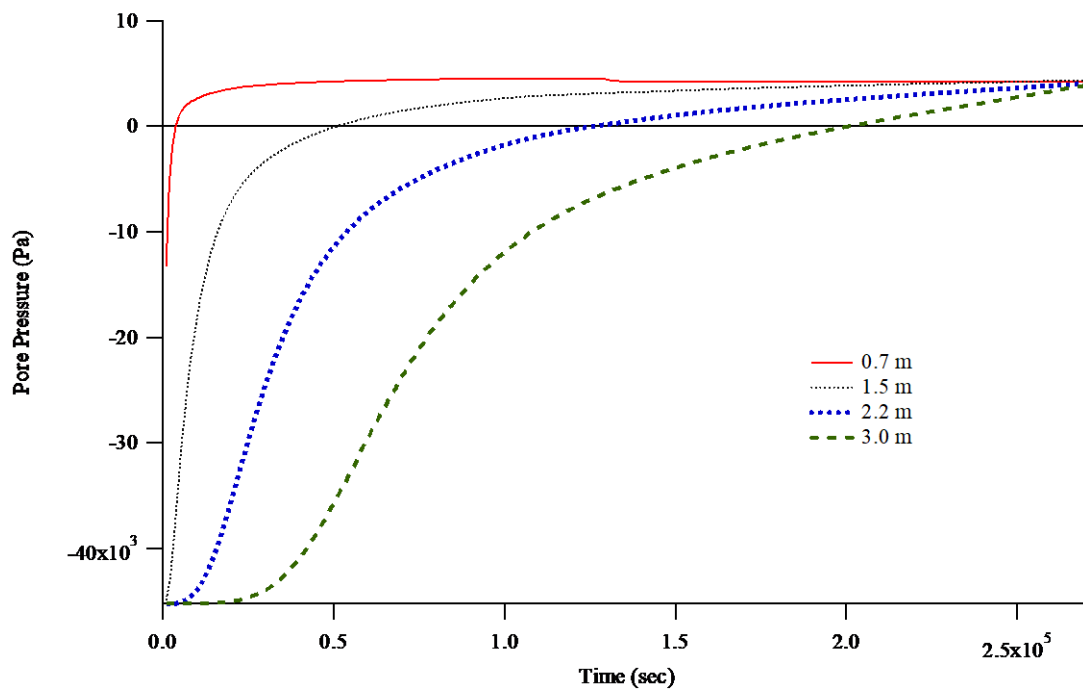


圖 2.12 同一剖面不同深度孔隙水壓歷時

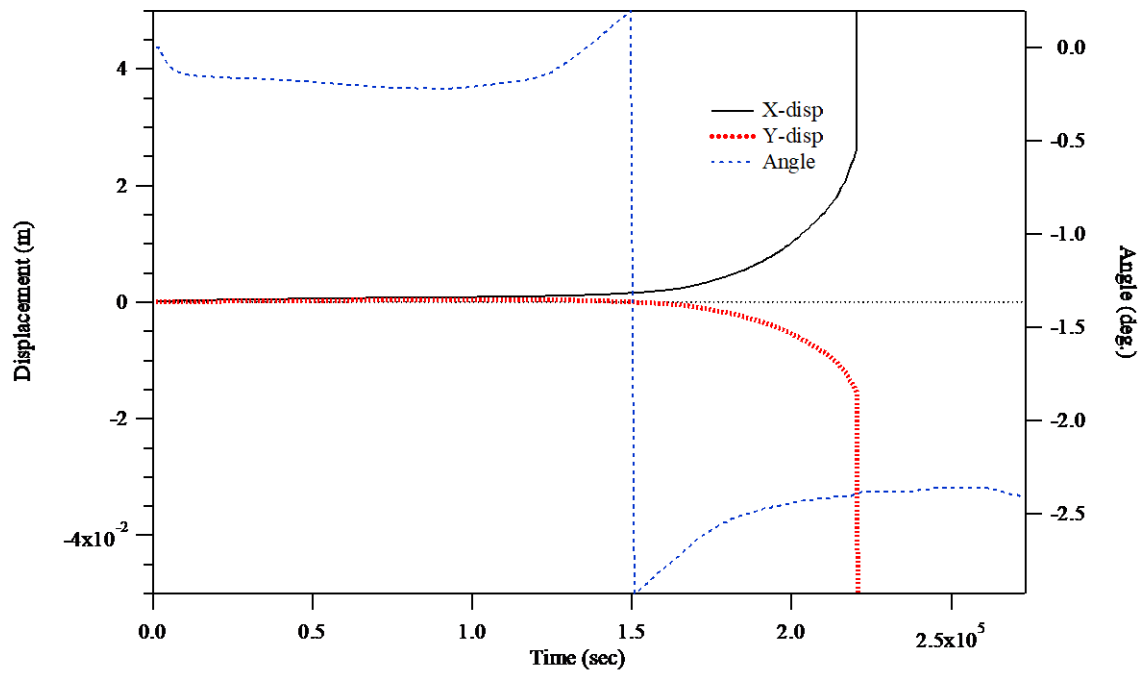


圖 2.13 預測地表運動歷時

### 2.3.5 邊坡依時預警架構

依時性邊坡預警系統可分為無限邊坡及二維水力力學分析，無限邊坡之依時預警以分析結果為例，若不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 2.14 所示，可推估破壞發生於地表飽和入滲開始後累積 42 小時，滑動面深度為 1.5 m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果或 VG model 推估，在 0.75m 深度於破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.15 所示，由破壞時間(42 小時)往前推算可決定不同時間所對應之體積含水量，若以破壞前 24 小時為預警時間，則所對應之體積含水量為 0.22，可由現地於 0.75 m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.15 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 1.5 m 處含水量歷時如圖 2.16 所示，推估破壞時間為 61 小時，因此往前推算 24 小時所對應之體積含水量為 0.52，因此時已接近飽和，此數值較不可靠，此乃因所選場址土層厚度僅約 2.5m，且地下水位位於土層底部，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但地表傾度觀測結果如圖 2.17 所示，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，因此此類邊坡較適宜以地表傾角作為訂定依時預警之物理量。

由無限邊坡與二維分析結果顯示非飽和水力分析中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。

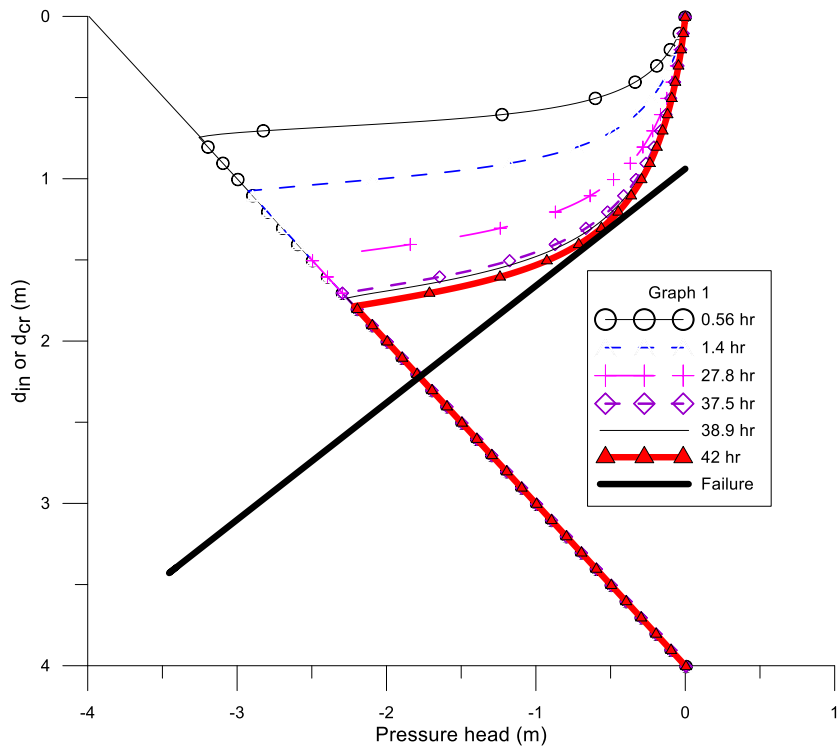


圖 2.14 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

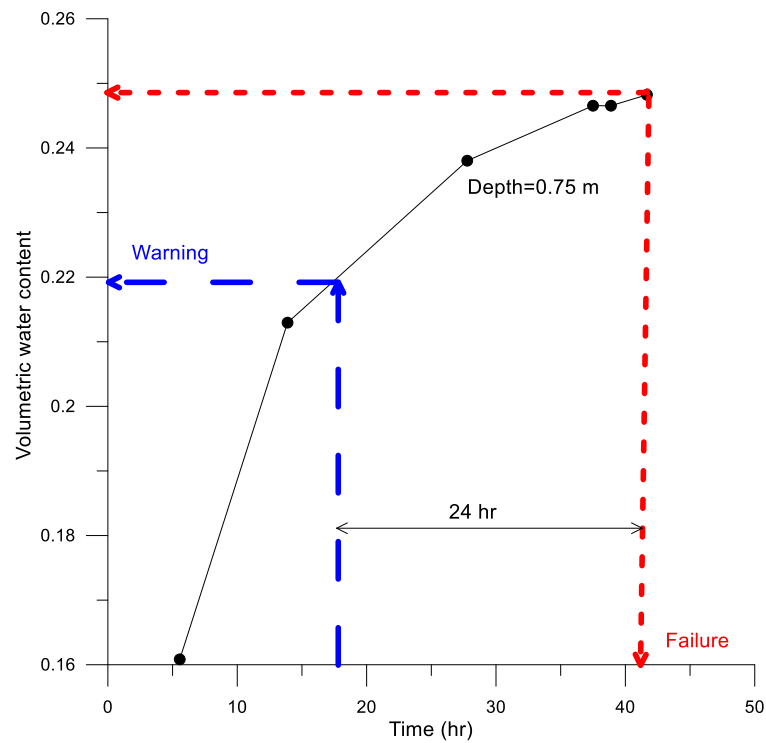


圖 2.15 深度 0.75m 體積含水量變化及依時預警概念

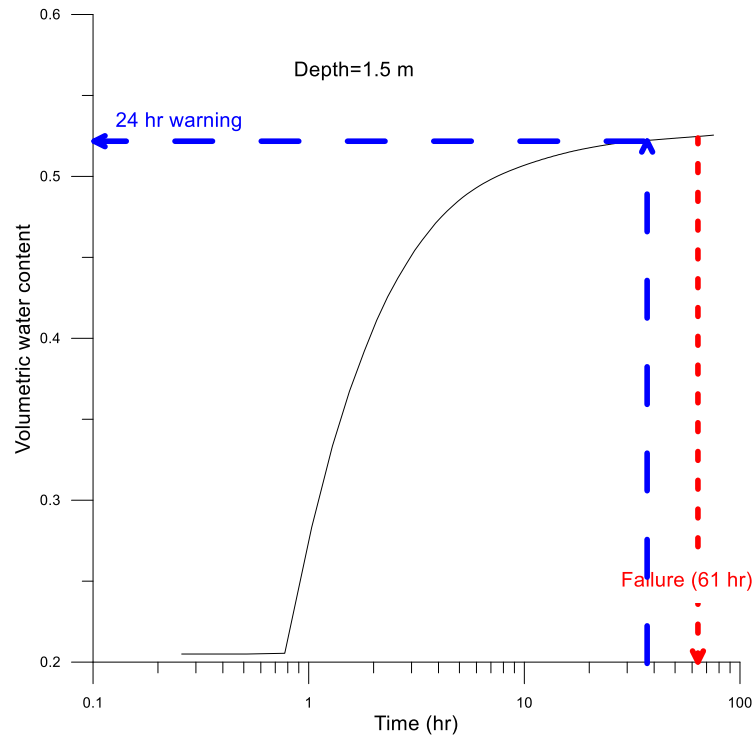


圖 2.16 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化及依時預警概念

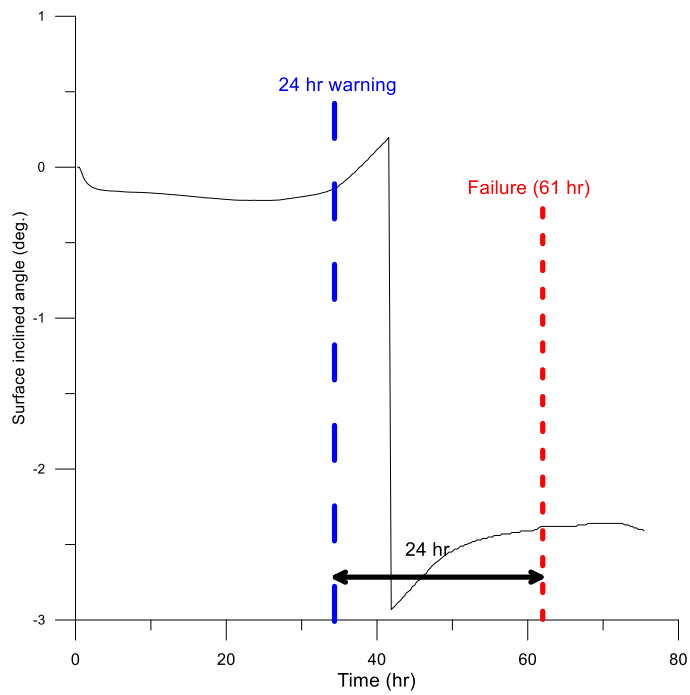


圖 2.17 甲仙上邊坡表面傾角變化及依時預警概念

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

應用於飽和土層滑動依時預警時須進行適度修正，針對一維無限邊坡飽和土層滑動，其滑動面仍以極限平衡分析，但滑動面深度與時間則與滑動面所在孔隙水壓變化及入滲後飽和土層滲流力大小有關，式(2.7)中之平行滲流力項須加入考慮，即飽和土層中除靜水壓力外尚須考慮原有飽和土層滲流引致之超額孔隙水壓力之影響，基質吸力效應則可忽略不計。而二維分析則需假設孔隙水壓上升條件或是包含上游邊坡入滲至飽和土層之影響，相關入滲分析與非飽和入滲相同。

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



## 第三章無線土層即時監測系統

### 3.1 系統架構

無線土層監測系統係由微控制器(Microcontroller Unit, MCU)結合各感測器以及無線傳輸模組，裝設於待測地點並透過無線傳輸將各感測器之量測資料。無線土層監測系統主要組成包括微控制器、感測原件(sensor)及通訊單元，並以韌體進行整合，另外還包括附屬之模組外構及電源系統。本計畫採用 Wemos lolin32 作為系統之微控制器，搭配各式感測元件，如觀測入滲速率之土壤分層含水量計、地表傾角之高精度傾斜儀(Tiltmeter)、地下水位之壓力式液位計(Liquid level 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 建立感測模組間與接收端通訊，形成區域監測網路，經由接收端連接 3G 無線網路，達到遠端監測之功能。

監測系統架構示意圖如圖 3.1 所示，無線土層監測系統包含兩種型態，分別為客戶端與伺服器端，客戶端即為監測模組，將量測之現地資訊發送給伺服器端，透過 4G 無線通訊模組將資訊上傳至雲端，系統同時備有記憶卡備份現地資料，達到邊坡無線、即時之自動化監測。

### 3.2 土層水文與運動反應量測

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

1. 電容式含水份計(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體積含水量或經換算為飽和度。

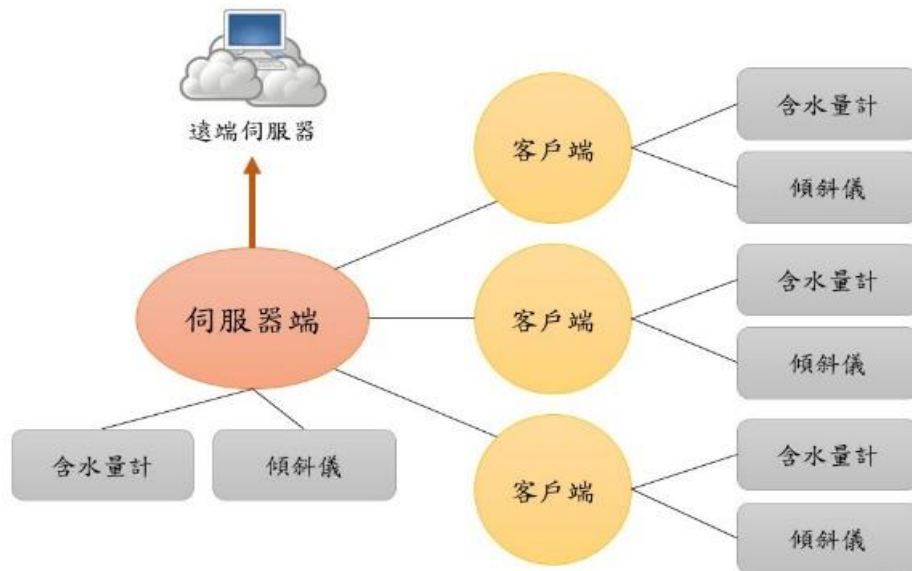


圖 3.1 系統架構示意圖

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，提供單方向高精度及高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計式雨量計，又依量測方式可分為虹吸式雨量計、秤重式雨量計、傾斗式雨量計等。

本研究採用 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 I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated circuit)通訊界面與微控制器與周邊設備整合。

圖 3.3 為含水量計數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖，試驗土壤為現地取得之粉土質土壤，土壤體積飽和度為在控制體積含水量下，固定土水比例求得，圖中可見此含水量計具備足夠之重複性與一致性，但水份計於接近飽和狀態誤差較大，因此其較適用於飽和前量測。透過多組電容感測裝設於探棒表面，即可同時監測探棒長度內土層不同深度之含水量，提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。



圖 3.2 電容式土壤水份計

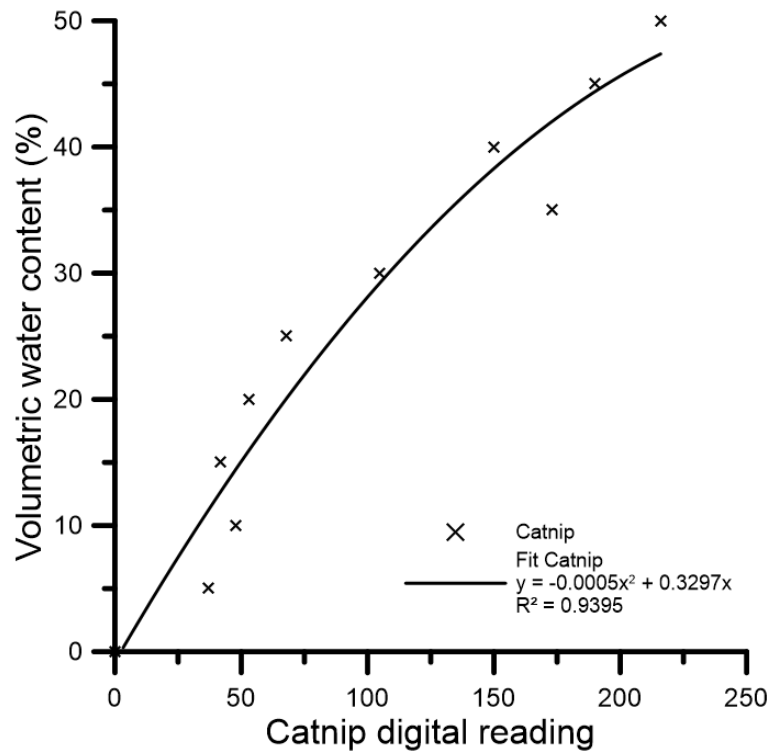


圖 3.3 Catnip 訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖(運研所, 2017)

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

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

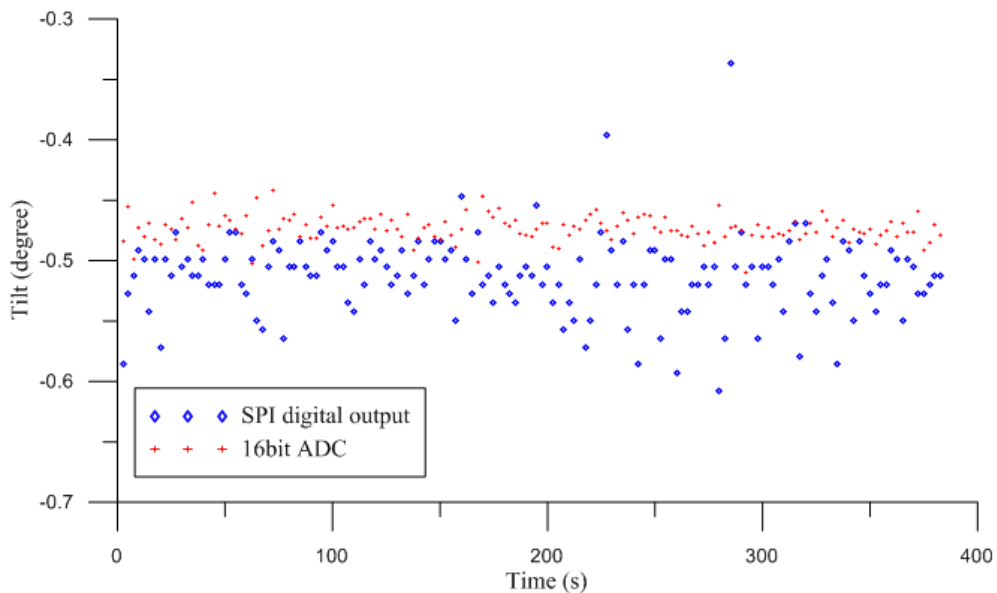


圖 3.4 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較

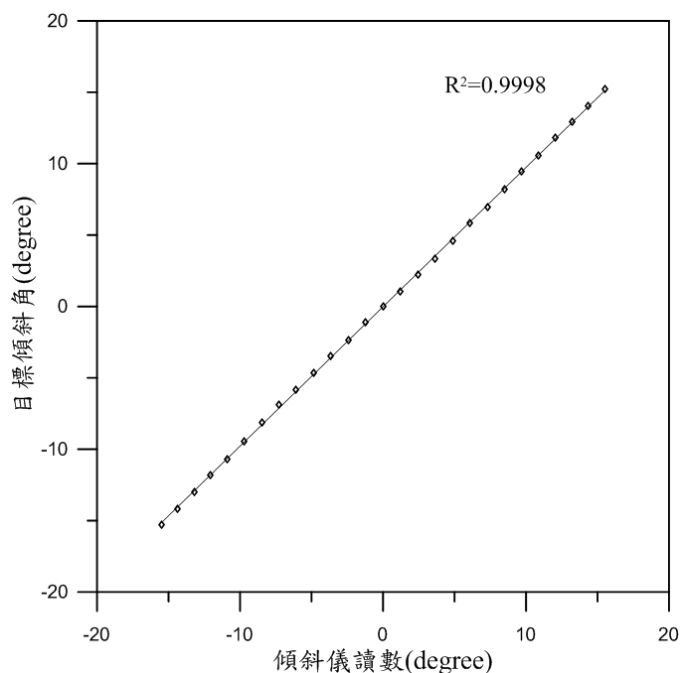


圖 3.5 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

深土層滑動監測模組之地下水位量測，採用放置於開孔水位觀測井搭配沉水式液位計量測，其具備有以下幾點特色，包含：(1)內置微型信號處理電路，可進行遠程傳輸；(2)抗干擾強，長期穩定性好；(3)防結露，防雷擊設計；(4)採 316 不銹鋼隔離膜片具堅固密封、高可靠、高精度等特點。此感測器液位計工作電壓為 24V，與模組輸入電壓不同，故需以升壓晶片將輸入電壓變壓以供液位計使用，其輸出為類比電壓，因此感測模組需整合類比-數位轉換器使用，本計畫以 16-bit 之 ADC 模組，確保水位解析度達 1 cm 以下。

前期計畫採用標準雙傾斗式雨量計，搭配微控制器組成自計式雨量計，其原理為利用傾斗計算降雨量，雨水經由口徑 200 mm 的承雨口流入傾斗，到達一定雨量時，傾斗傾倒且同時帶動磁簧開關並產生脈衝信號(pulse)，利用微控器讀取高低電位變化計算傾斗傾到次數，搭配微控制器組成自計式雨量計。採用之雙傾斗雨量計解析度為 0.2 mm，因解析度較高對降雨量觀測較為敏銳，對降雨強度較大之降雨所產生之系統性誤差則經由室內試驗對記錄器示值加以修正，其率定結果如圖 3.6 所示，室內試驗室率定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 500 mm/hr，可滿足氣候變遷下的極端降雨事件。

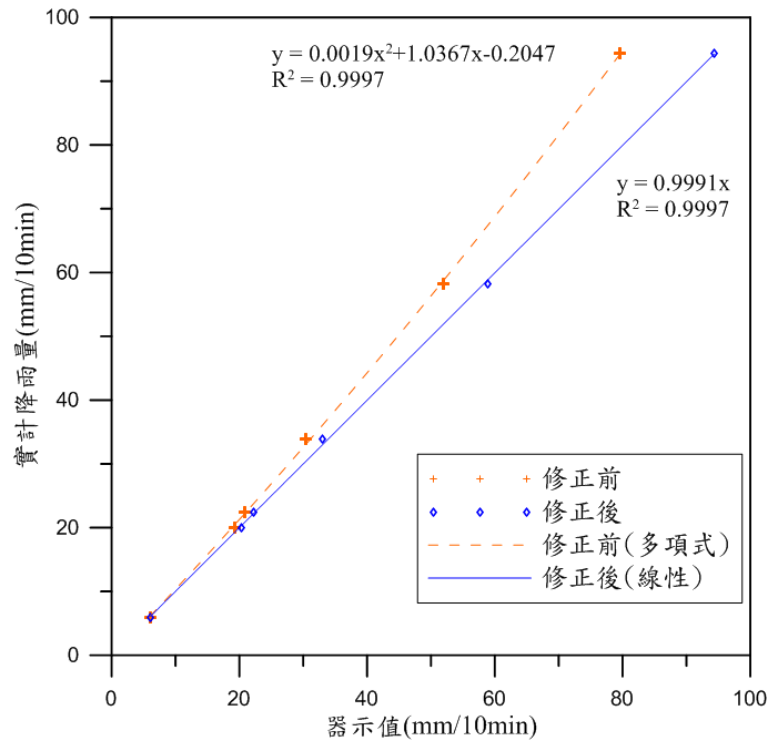


圖 3.6 雨量計量測值校正結果

### 3.3 土層無線監測模組組成

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

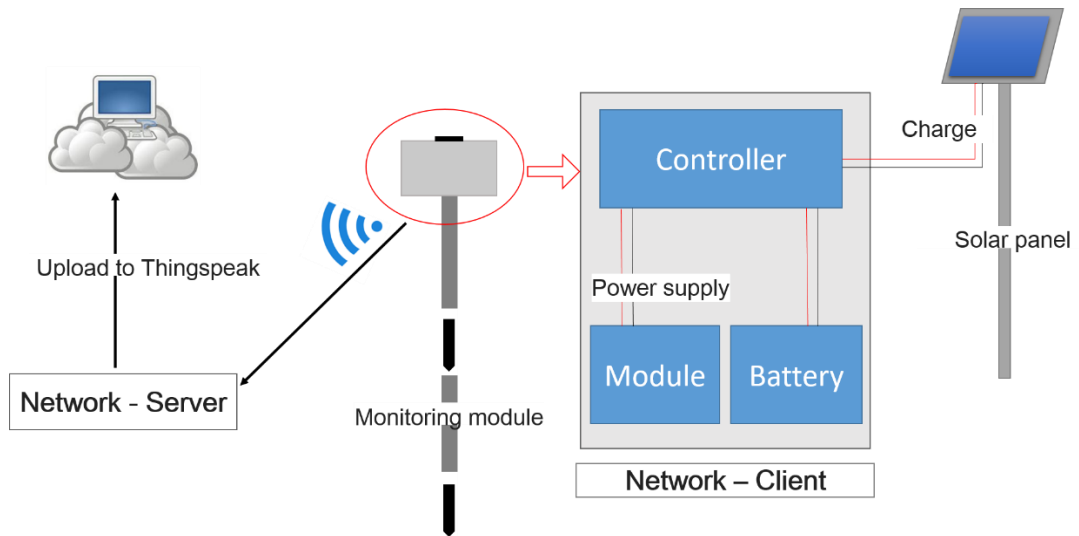


圖 3.7 邊坡無線監測系統運作示意圖

### (1) 微處理器

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

微控制器可將程式邏輯帶入監測架構中，藉由簡易之迴圈、布林參數可將監測架構升級為智慧化感測，使用者可自行設定擷取頻率或寫入特定觸發條件讓微控制器進行特定動作，作為智慧型無線感測模組之基礎，MCU 之選擇可基於接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於智慧型無線模組中可比喻為大腦，進行所有電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作。與開源(open-source) 架構 Arduino 相容之 MCU，可透過整合開發環境(Integrated Development Environment, IDE)進行韌體撰寫，IDE 為一整合文字編譯器(Editor)、編譯器(Compiler)、連結器(Linker)及除錯器(Debugger)之軟體，使用與 C 語言和 C++相仿的程式語言，可與開發電路板透過電腦以 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。

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

## (2) 無線傳輸模組

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

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 Low Consumption 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 擴頻技術使數據傳輸距離加長，且具有功率密度集中，抗干擾能力強的優勢。模組具有軟體前向糾錯演算法，其編碼效率較高，糾錯能力強，在突發干擾的情況下，能主動糾正被干擾的資料封包，大大提高可靠性和傳輸距離。而資料壓縮功能有概率減小傳輸時間，減小受干擾的概率，提高可靠性和傳輸效率，綜合上述各項特點，故選擇該模組作為本次計畫資料區域無線傳輸之工具。



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

為將感測網路蒐集到之現地數據上傳至雲端平台，伺服器端之土層監測模組搭載 4G 模組—SIM7020E，以連結場址資訊與後台人員形成廣域網路。SIM7020E 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。SIM7020E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。

### (3) 時鐘、數據儲存及資料擷取模組

為提供監測資料儲存安全以提供數據分析的完整性，研究使用 Deek Robot 設計生產之 SD 卡數據紀錄模組 (Data logger) 備份土層監測資料，當無線傳輸模組因故斷訊時，仍可藉由 SD 卡備份檔案紀錄現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站即時時間、節點編號、土層分層溫度、含水量、傾斜角度與地下水位高程，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。此 SD 卡數據計錄模組附含一即時時鐘(Real-time clock, RTC)，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 I<sup>2</sup>C 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。

由於微控板之 ADC 解析度為 10-bit，不足以應付本研究之精度需求，故以外接之 ADC 模組整合感測器，本研究使用基於 ADS1115 晶片之資料擷取卡，使用 I<sup>2</sup>C 介面與微控板通訊，每秒最高可處理 860

個資料點，解析度達 16-bit，以符合量測之需求。

#### (4) 雲端伺服平台

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

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



圖 3.8 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖

### 3.4 淺層滑動邊坡無線監測模組

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

#### 3.4.1 淺層模組系統硬體架構與精進

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

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

土層監測模組外構設計(圖 3.9)可分為三部分，各部件詳述如下：

- (1) 核心防水盒: 內含土層監測模組，18650 鋰電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒，其內部配置如圖 3.10。
- (2) 土壤水份計外構: 可裝設一只土壤水份計之桿件外構如圖 2.23，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。本研究以兩只土壤水份計作串聯，並延伸至地下深度分別為 25 公分以及 75 公分。
- (3) 太陽能板支架: 本研究採用 10W 太陽能板以提升模組續航力，並可視土層監測模組之耗電情況作太陽能板輸出功率的增減。



圖 3.9 土層監測模組外構

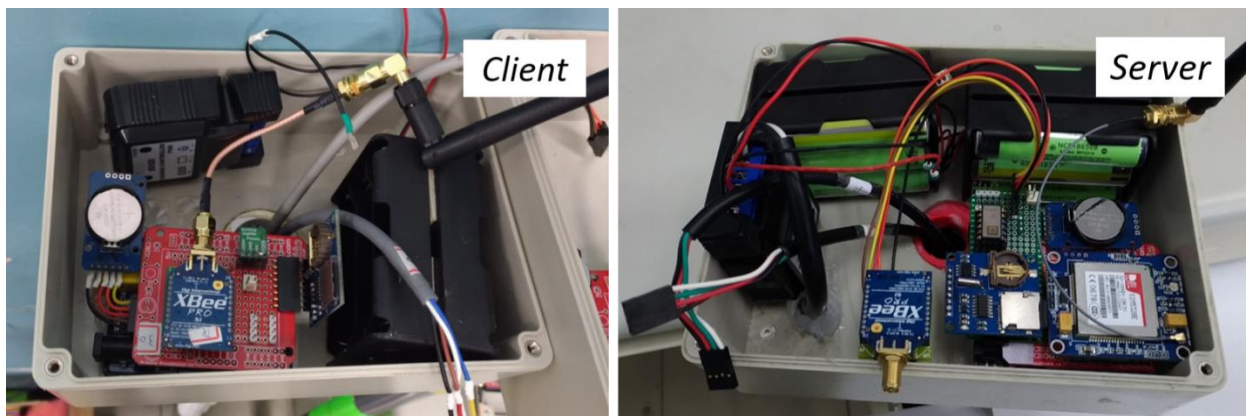


圖 3.10 防水電子盒內部配置

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

土壤水份計外構將水份計之感測區塊暴露於外，直接接觸待測土壤以量測土壤體積含水量，土壤水份計之接線處與元件位置則置入後方空間，並以電子封裝膠封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐

候型外披覆 4 芯電子訊號線，殼層以 3D 列印製作以大幅降低成本。

由於邊坡滑移多發生於長歷時、高強度之降雨期間，為使監測系統獨立運作達到現地長期監控的成果，本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。以太陽能電源控制器，搭配 10W 太陽能板。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。

模組使用 18650 鋰電池，額定電壓 3.7V 容量最高達 3400 mAh，為目前市售能量密度最高之充電式鋰電池，其高電壓輸出使其易於串接以提供微處理器之輸入電壓。土層監測模組依照現場系統空間配置可搭載 6~12 顆鋰電池，高電容量使監測模組於颱風、梅雨季時仍得以維持系統運作至少 5 日。

原有淺層模組其設計年限為 1 年，其間雖有部分模組已於更新優化過程進行感測器更換，但仍有相當比例需進行更新，以維持系統完整性，此部分已於雨季前完成。而為降低功耗、確保元件來源及減少人員現地維護之所需，本年度對模組進行下列升級與優化：

1. 廣域網路改為 4G 模組：原有 3G 模組因 3G 網路將停止服務，因此需儘快更新為 4G 網路，與現有 3G 模組廠商亦提供 4G 模組，但須選擇適合頻率並進行伺服模組韌體修改，目前本團隊已完成所有測站更新。
2. 以 LoRa 喚醒之功能，使模組非工作時處於低耗電之休眠狀態，由具備 4G 模組之伺服端喚醒對應之 LoRa 模組後再啟動系統運作，此可大幅降低耗電量，並延伸監測網路涵蓋範圍。
3. 增加電源管理及節電效能：由目前系統運行經驗，系統下線主要為電源問題，尤其是太陽能日照不足引致之充電量短少，107 年度已新增電池電壓監測，作為提早規劃人員現地維修之依據，本並對傳統液位計及雨量計進行節電設計。

4. 雲端平台功能擴充: 原有 Thingspeak 雲端平台僅有顯示及儲存功能，本年度另利用中華電信 IoT 智慧聯網大平台(<https://iot.cht.com.tw/iot/>)，以達資料本土儲存之目的，並以 Python 撰寫雲端儲存與顯示平台。

### 3.4.2 深層滑動邊坡無線監測模組

深層滑動中孔隙水壓力變化為滑動預測之重要指標，孔隙水壓中因入滲及滲流所造成之超額孔隙水壓為觸發深層滑動之物理量，其可以開孔式地下水位代表總水頭，扣除位置水頭後可求得壓力水頭，106 年度本團隊已完成在原有淺層滑動模組增加開孔井液位觀測之深層滑動模組，並於阿里山五彎仔及牡丹水庫邊坡進行測試，107 年以優化之系統裝設於台 20 線 52k 場址。

深層監測模組以物聯網之架構進行研發，由微控板(MCU)搭配數位類比擷取卡(AD board)可連接傳統電子式感測器，配合 4G 模組(WCDMA)將監測資料送入雲端，突破常用有線監測之模式，並允許使用者透過雲端即時查看監測資料，此監測架構連結各式感測器形成局部(Local)或全域(Global)監測網路，提供管理者或工程師由即時監測數據(real time monitoring)進行決策。運研所現有深層滑動監測模組為利用淺層監測模組加入電子式液位計，並搭配相關之電壓與類比數位轉換模組。採用國產之沉水式液位計，此感測計為類比輸出，因此感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)，此計畫以 16-bit 之 A/D converter 模組，以確保解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 3.11 所示，現有模組中使用之液位計實驗室校正結果顯示其線性度佳。

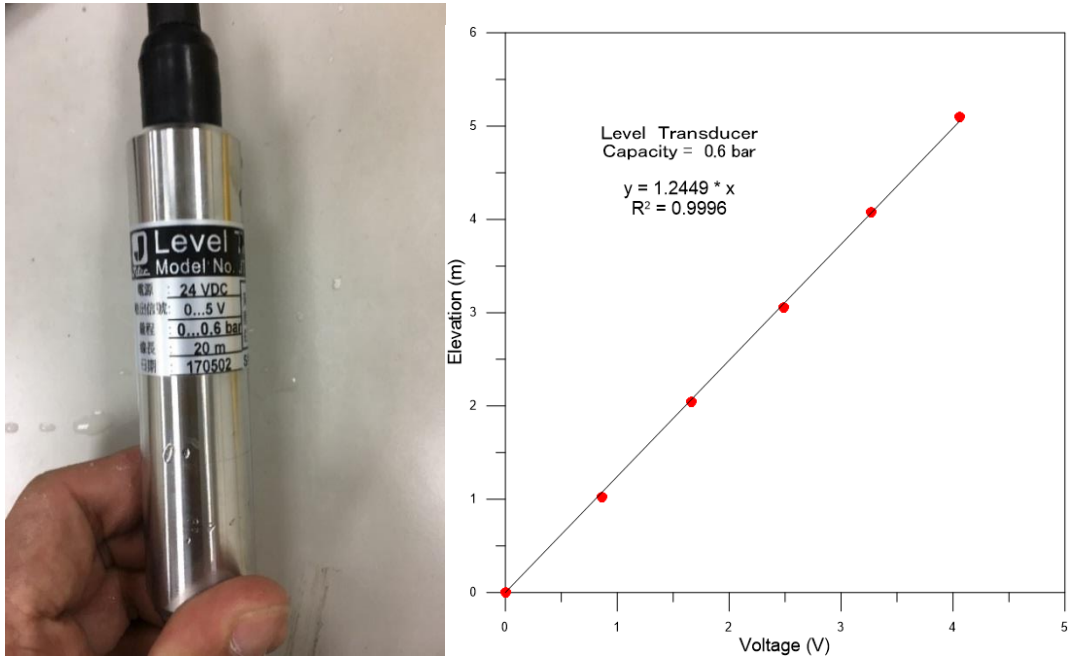


圖 3.11 液位計實體與校正結果



## 第四章 淺層滑動場址監測成果

### 4.1 甲仙攔河堰聯外道路西側邊坡

甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地曾於民國 2005 年 9 月受泰利風災連續豪雨影響，聯外道路邊坡發生數次崩坍而阻斷交通，道路上、下邊坡擋土牆亦形成多處裂縫，而 2009 年莫拉克颱風期間又導致邊坡再次坍塌。2010 年 3 月 4 日發生規模 6.4 甲仙地震，事後邊坡傾斜儀量測結果顯示邊坡有滑動現象，最大位移達 155mm，滑動崩塌潛勢甚高，根據「甲仙攔河堰第一次安全評估」於上邊坡埋設四處傾斜儀之量測資料顯示，上邊坡之潛在滑動面約位於地表下 1.5 至 4.8 m 之崩積層或岩土界面。

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

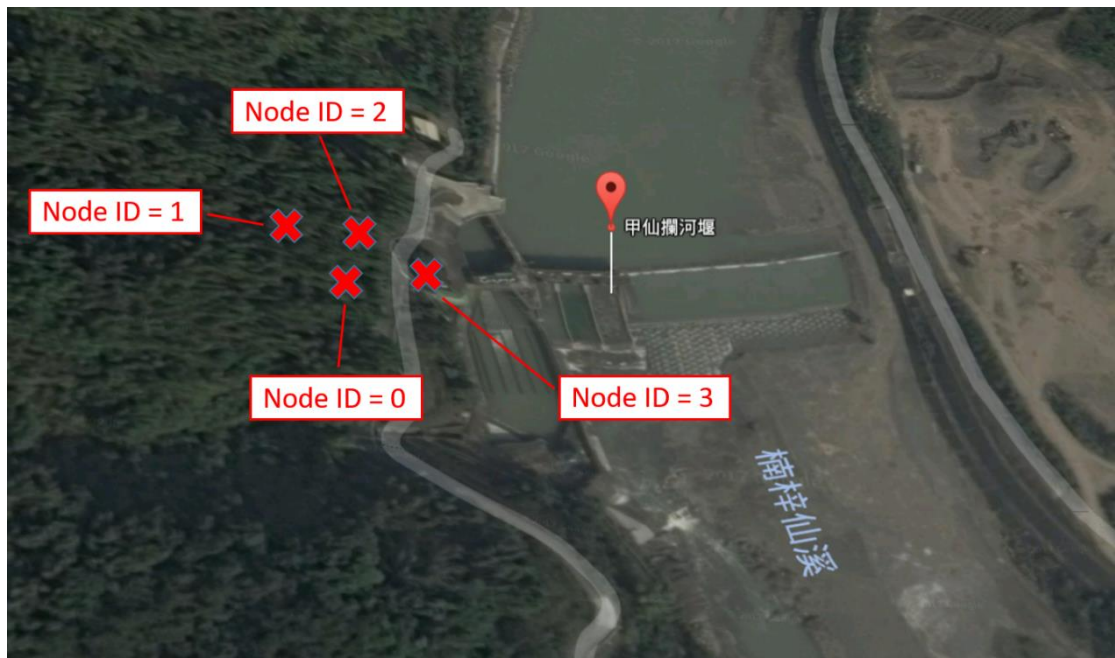


圖 4.1 監測模組相對位置圖

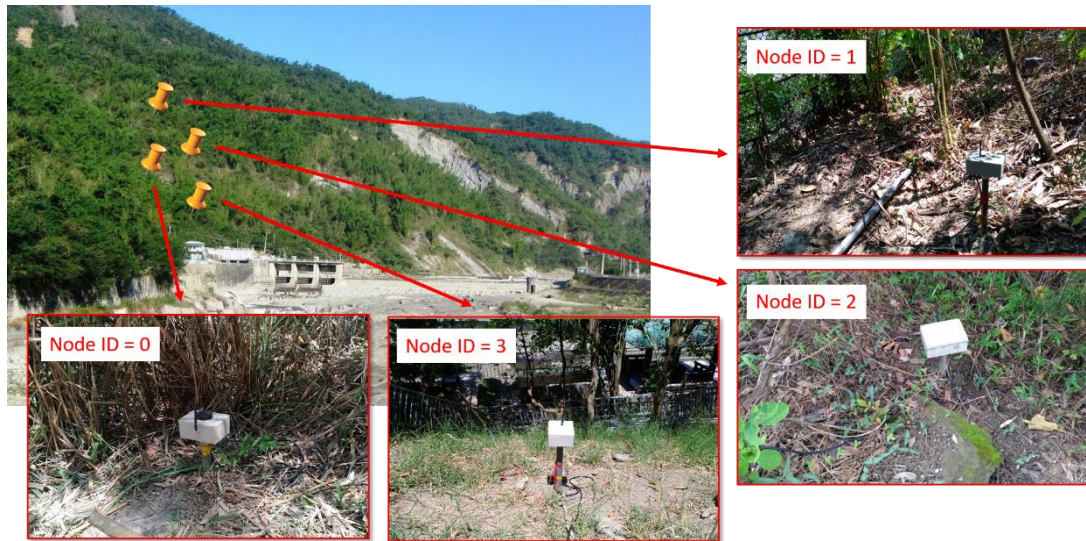


圖 4.2 監測站點周遭環境

## 4.2 甲仙場址監測資料

原有甲仙場址之土層監測模組系統於 2017/5/22 安裝完畢，並於 2018/2/20 升級更新優化之模組，2019/02/27 進行優化，目前仍持續穩定上傳監測資料至 Thingspeak 伺服器。期間歷經數次集中且長歷時之降雨事件，過程中顯示降雨事件並不影響本研究無線傳輸系統之穩定性，同時在雨季長時間日照不足的情況下，太陽能電源系統也足以支撐土層監測模組持續運行，證明系統之可行性與耐久性。圖 4.3 以 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，游標移至資料點上即可獲知該監測值以及發生時刻，可用以監測甲仙淺層邊坡水文及運動情況之依時性的反應。以下展示現地監測期間體積含水量計以及傾斜移之量測成果。

# node3

Channel ID: 266961  
 Author: nckusms  
 Access: Private

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

Add Visualizations Data Export

MATLAB Analysis MATLAB Visualiz

## Channel Stats

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



圖 4.3 Thingspeak 即時顯示情況

#### 4.2.1 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將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 2017/5/22 至 2019/10/18 期間之體積含水量監測資料，期間 2019 年 9 月因雷擊導致伺服器端損壞而無紀錄。圖中 X 軸為時間，Y 軸為土壤體積含水量(%)，同時與甲仙雨量站之每小時累積雨量(mm)做對比。土壤分層水份監測結果可得下列成果：

- (1) 土壤水份計感測值對於降雨事件之反應相當明顯，而深層水份計之感測值反應時間略晚於淺層含水量計，其間差異為土層入滲時間差導致。從降雨發生至含水量抵達峰值之歷時甚短，可及時反應降雨事件的影響。
- (2) 在降雨事件發生後，含水量皆會在乾季時逐步降回降雨前之穩定值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測用途。
- (3) 藉由已完成之基本物性試驗得知甲仙現地地表土壤之孔隙比為 0.6，可推算其飽和時之土壤體積含水量為 38%。圖中顯示 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。

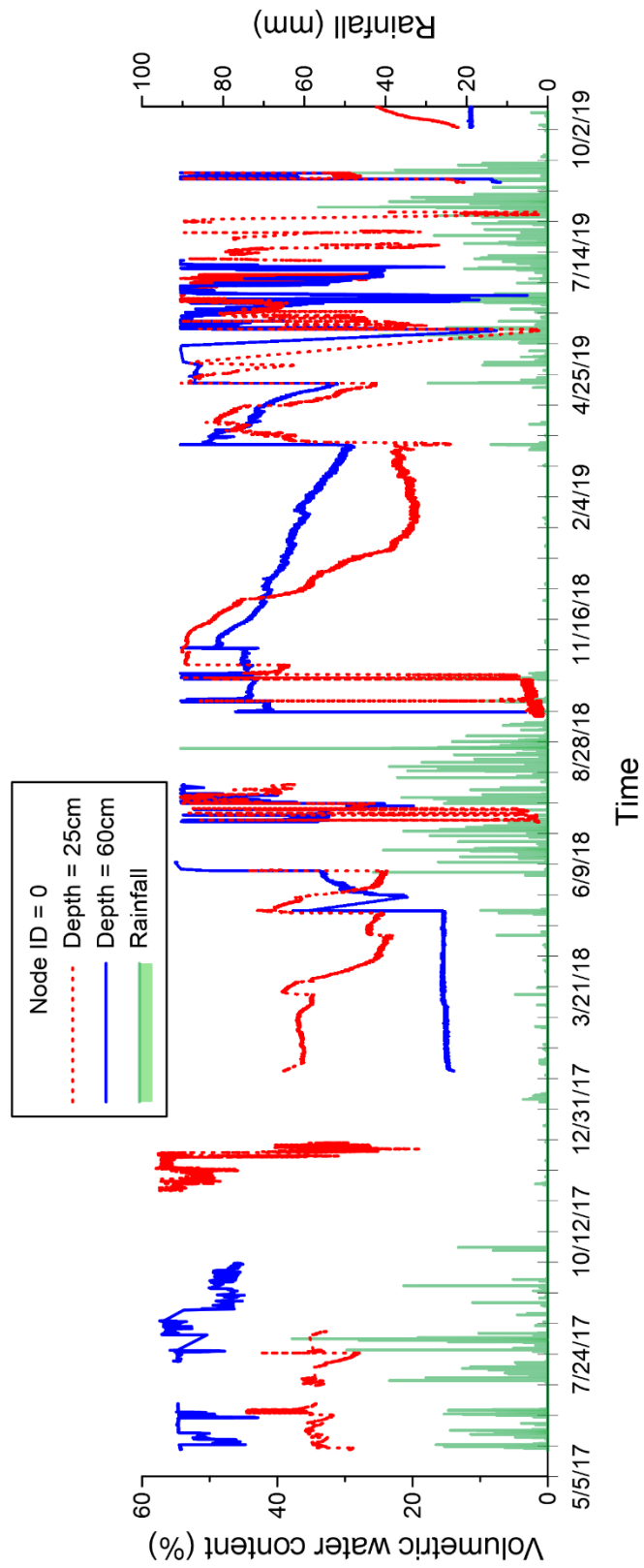


圖 4.4 Node0 體積含水量量測結果

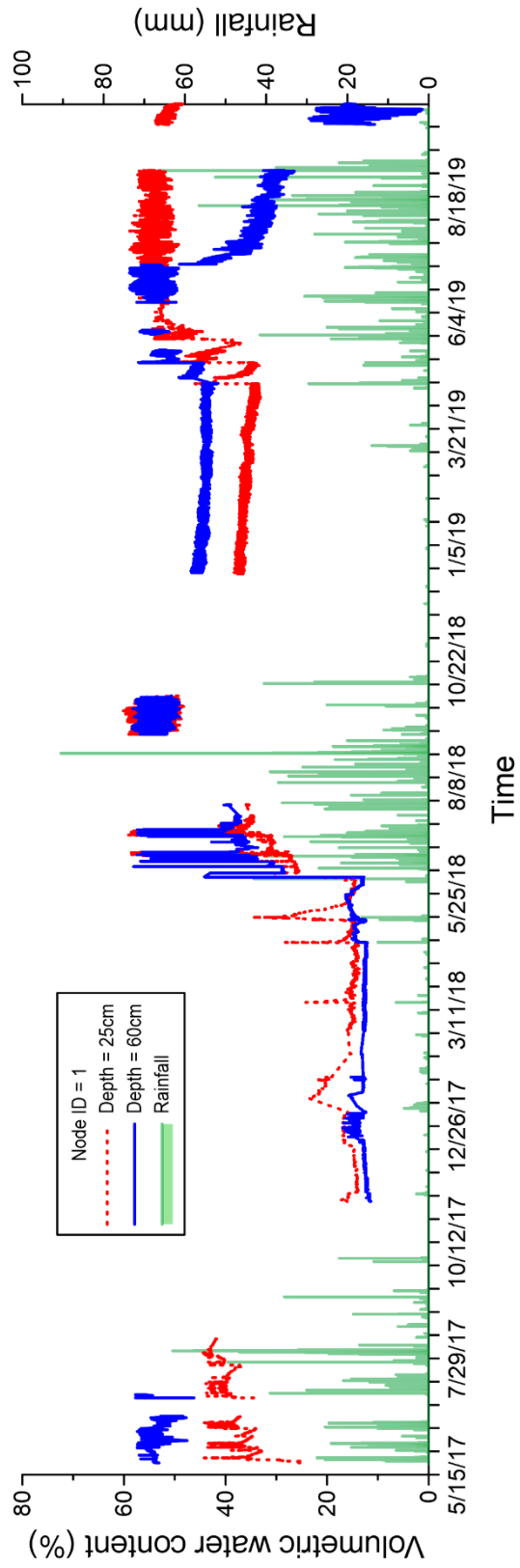


圖 4.5 Node1 體積含水量量測結果



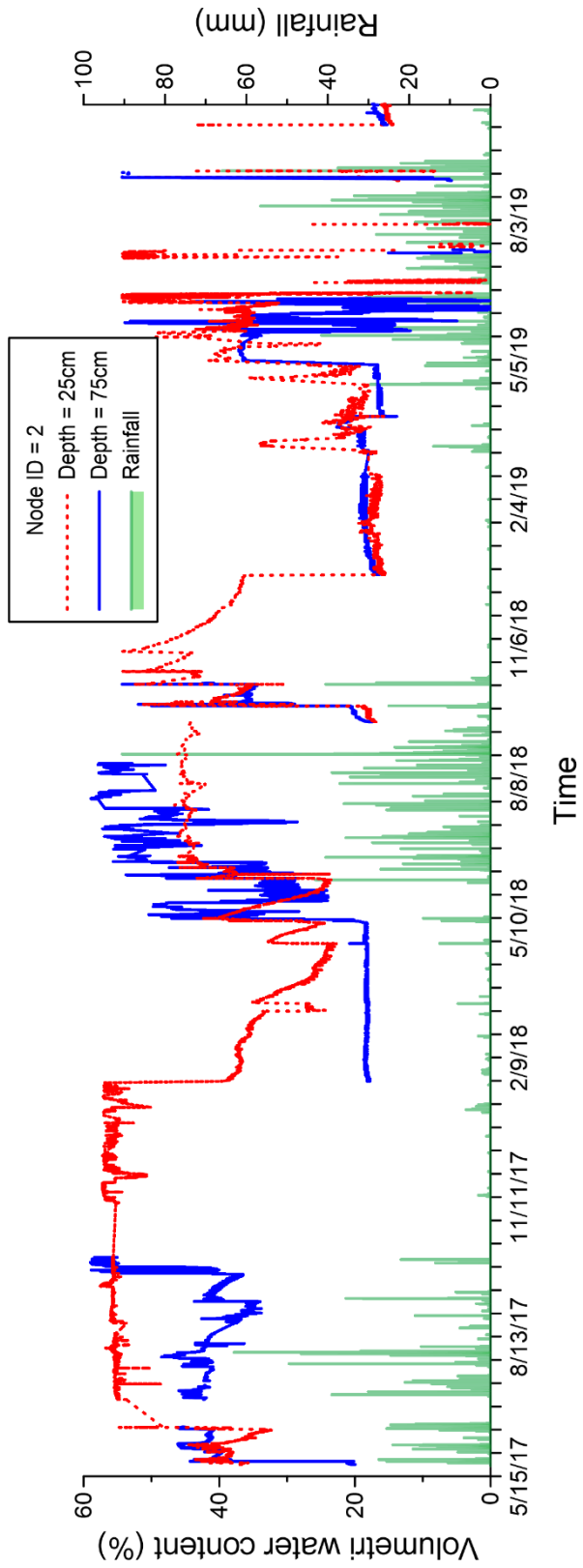


圖 4.6 Node2 體積含水量量測結果

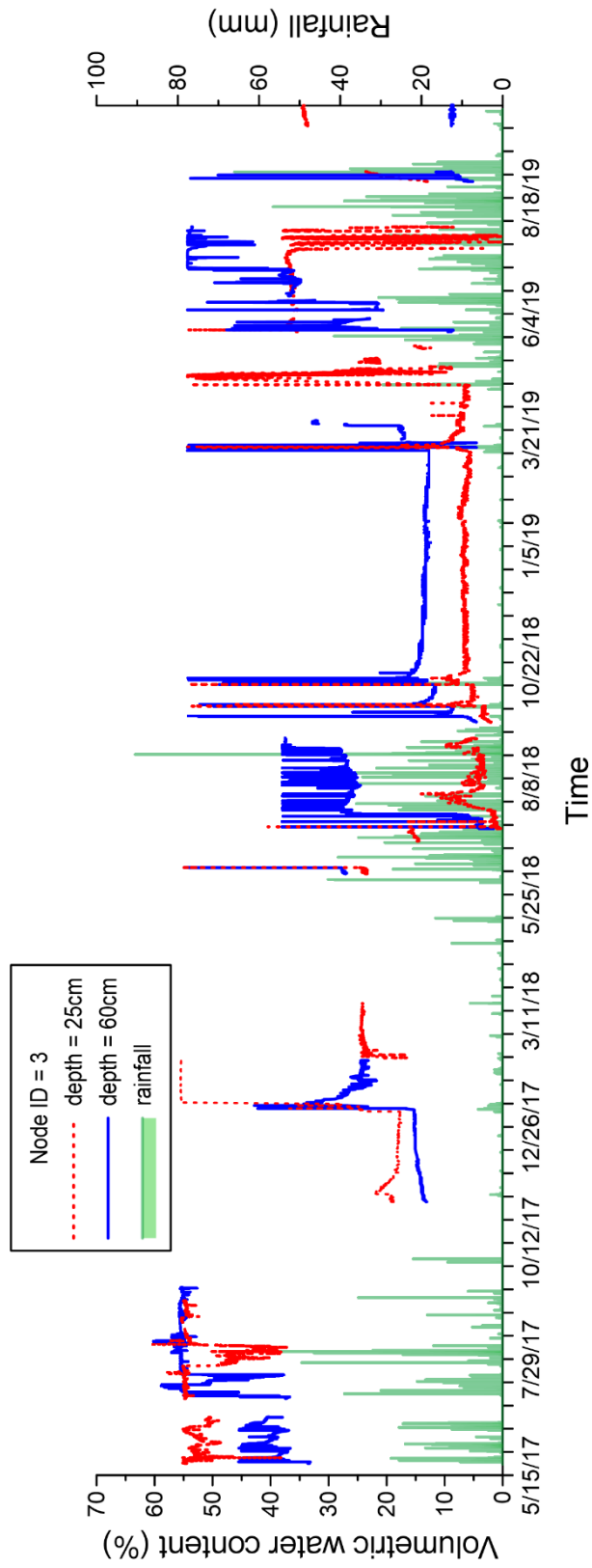


圖 4.7 Node3 體積含水量量測結果



## 4.2.2 傾斜儀監測結果

圖 4.8 為自 2017 年 5 月起各監測模組測得之傾斜角變化，傾斜角方向之數值意義如圖 4.9 所示，結果顯示 2019 年度至今甲仙邊坡之各測站於觀測期間內有小於 1 度微幅的傾斜，其方向同邊坡走向，數值雖有變動，但多為儀器更換未歸零之值，對單一降雨事件，無顯著增加，且為表土局部滑動引致，但傾斜角變化幅度不大且無持續增加，無淺層邊坡破壞跡象，符合現地邊坡狀態。

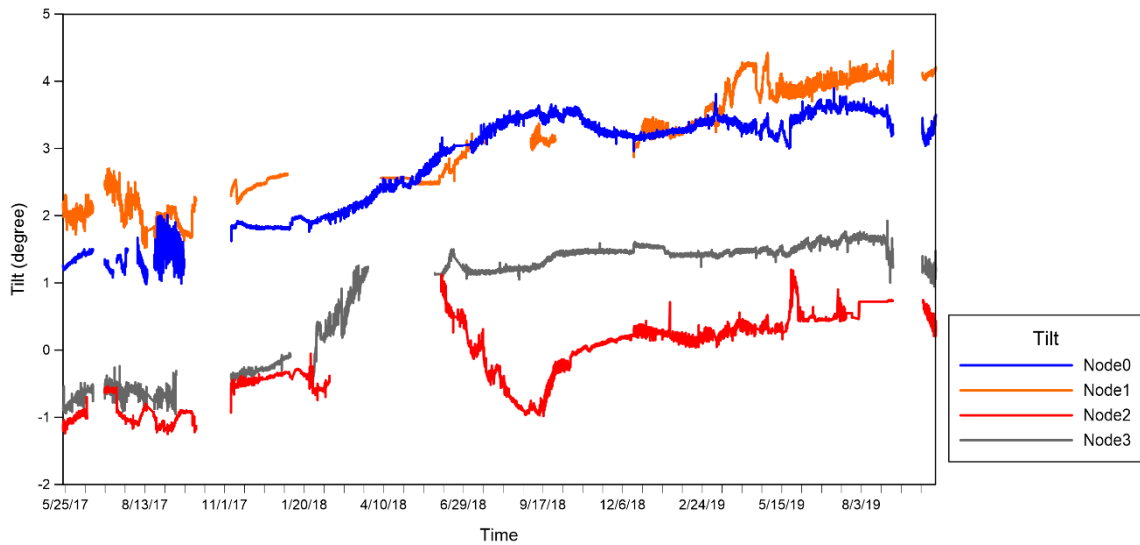


圖 4.8 甲仙測站傾斜角監測結果

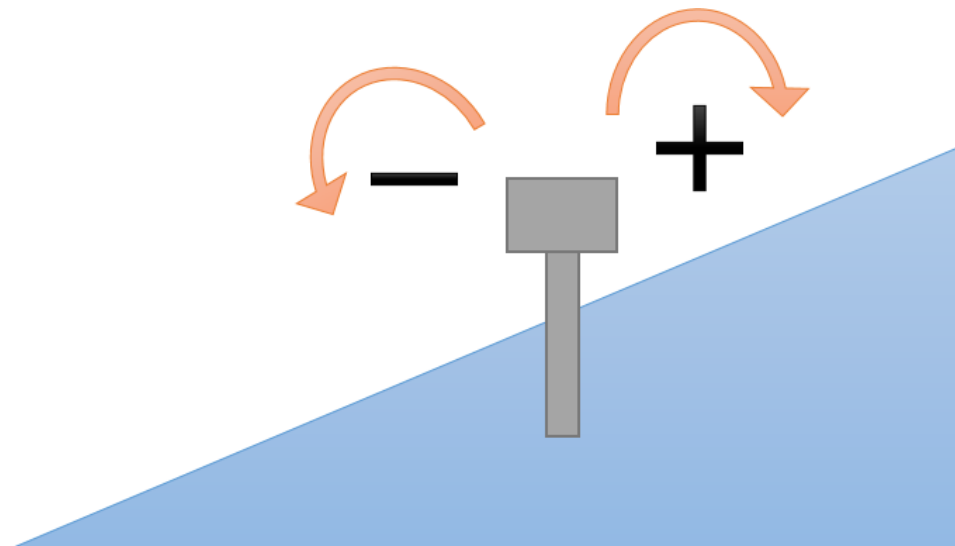


圖 4.9 傾斜角量測方向

### 4.3 阿里山五彎仔場址土層監測模組配置與安裝

本年度經工作會議討論，因原西湖休息站邊坡測站較不符合研究破壞類型，且設備多已損壞，決定撤除西湖休息站場址，並於阿里山五彎仔崩塌增設新淺層滑動監測場址，系統於 2019/06/18 正式上線，場址位於臺 18 線五彎仔路段(里程 42K+400 至 46K+100 之間)，如圖 4.10 所示。

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



圖 4.10 五彎仔邊坡空照圖(Google Earth)

監測系統設計上由監測模組、太陽能系統及資料接收端三部分組成，監測模組上配置多點電子式含水量計、高精密度電子式傾斜儀、液位計、無線傳輸模組及微控制器，為各種微機電感測元件之整合，量測各深度土壤含水量及地表傾斜量，並將資料以無線傳輸方式傳出。太陽能系統用於供給監測模組電力，使系統不斷電長期監測。五彎仔場址共安裝 4 支監測模組，模組配置如圖 4.10 所示，各模組資訊如表 4-1 所列，ID01 為雨量計，ID02 及 ID03 為安裝於崩積陡坡之分層水分及地表傾斜儀，ID04 主要為地下水位監測。第一批安裝設備因現地滑動掩埋及人為移動而僅餘雨量計，研究團隊於 2019/08/11 重新安裝 ID2~4。

## 4.4 五彎仔場址監測資料

### 4.4.1 五彎仔場址土層含水量監測資料



圖 4.11~13 分別為 ID02 至 ID04 於 2019/6/18 至 2019/8/13 之體積含水量隨降雨之變化，所用之雨量資料為 ID01 之讀數，安裝完成後感測器對降雨皆有反應，此區土壤含水量高，地表可見少量逕流水，所以含水量讀多數偏高，且含水量不易消散，導致經過較大降雨時地表均產生滑動而將模組掩埋，其破壞機制與淺層滑動不盡相符，建議重新規劃監測系統及分析模式。



### 4.4.2 五彎仔場址傾斜監測資料

圖 4.14~16 為 ID02 至 ID04 於安裝完成至 2019/8/13 之監測傾斜量變化結果，其中 ID03 於 2019/06/11 安裝完成，其餘皆在 2019/06/18 完成系統上線並於 2019/08/11 更換。ID02 安裝期間無明顯傾斜量變化，ID04 因人為破壞，觀測期間鬆動。ID03 經歷過幾場較大降雨，可以由傾斜量變化約達 3 度發現，淺層土壤有滑動的跡象，而新裝 ID2 於 2019/08/12 降雨中傾角變化如圖 4.17 所示，模組於 24 小時內變化超過 2 度，並將模組掩埋，經事後現場勘查，表層土體有顯著滑動的痕跡，現地地貌顯著改變，顯示此區具有極高的破壞潛勢。



表 4-1 模組資訊表

序號	感測器	現場照片
ID01	雨量計	
ID02	含水量計、 傾斜儀	

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

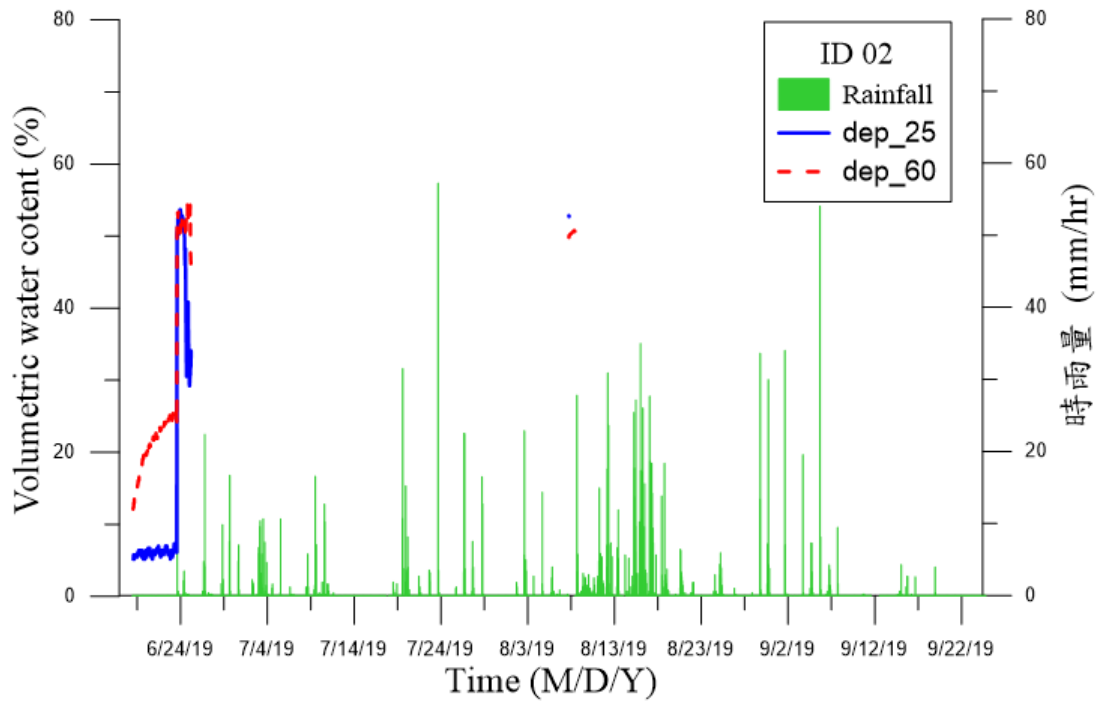


圖 4.11 ID02 體積含水量量測結果

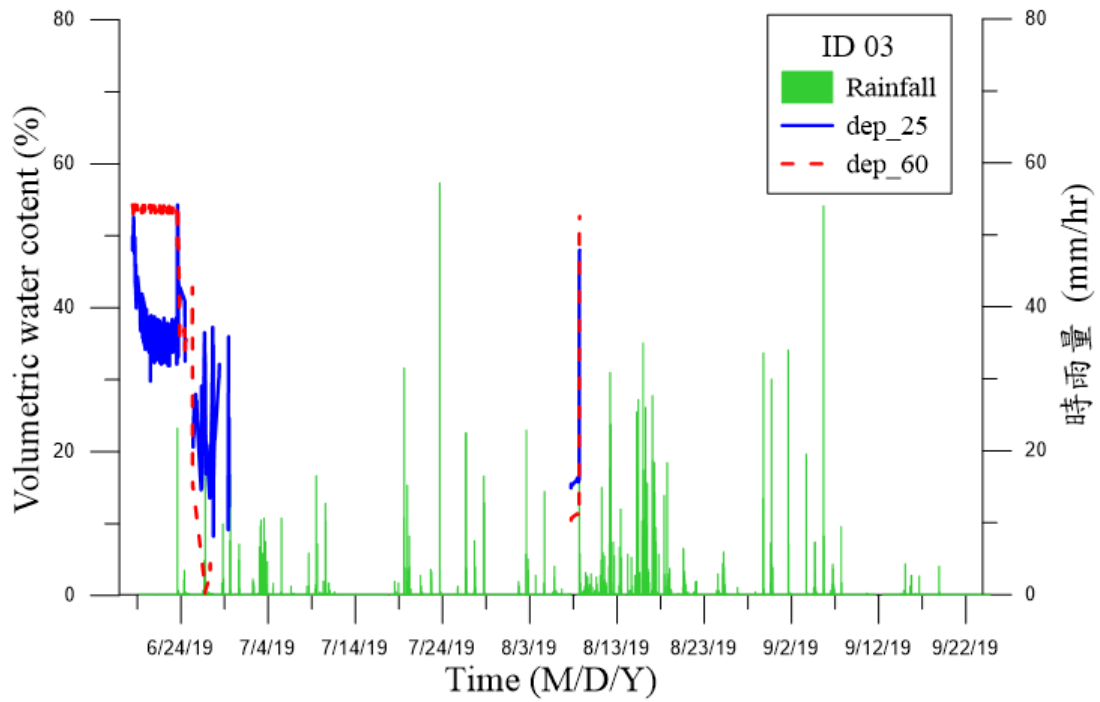


圖 4.12 ID03 體積含水量量測結果



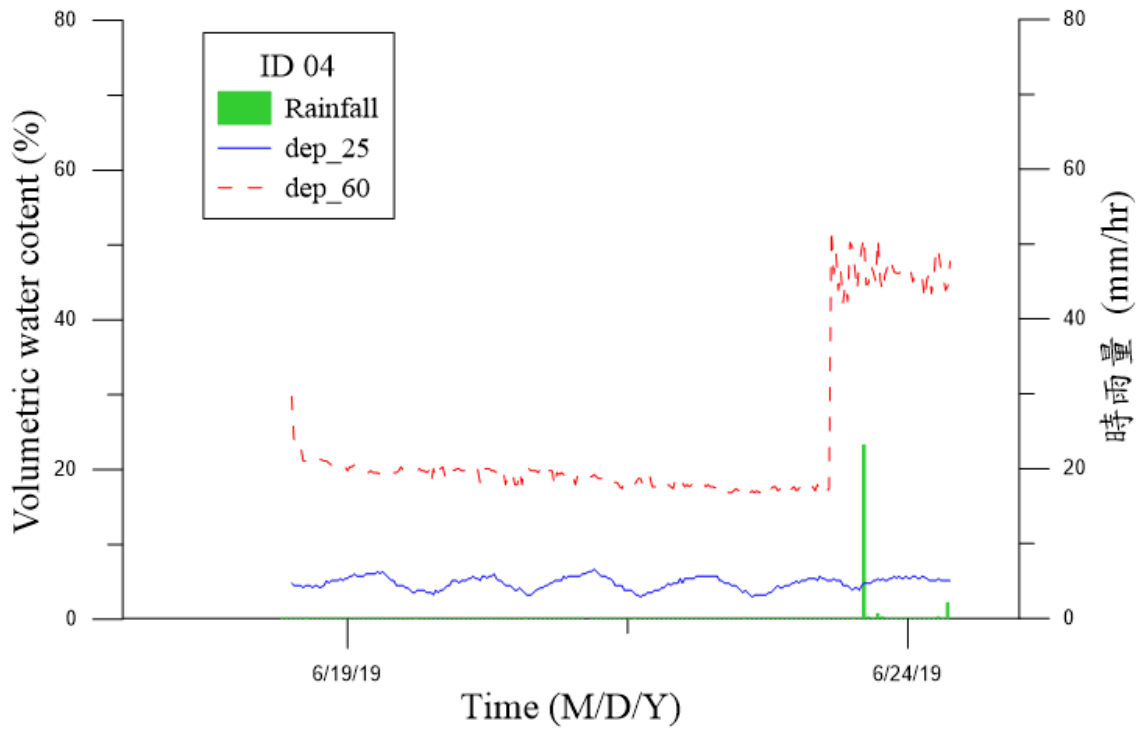


圖 4.13 ID04 體積含水量量測結果

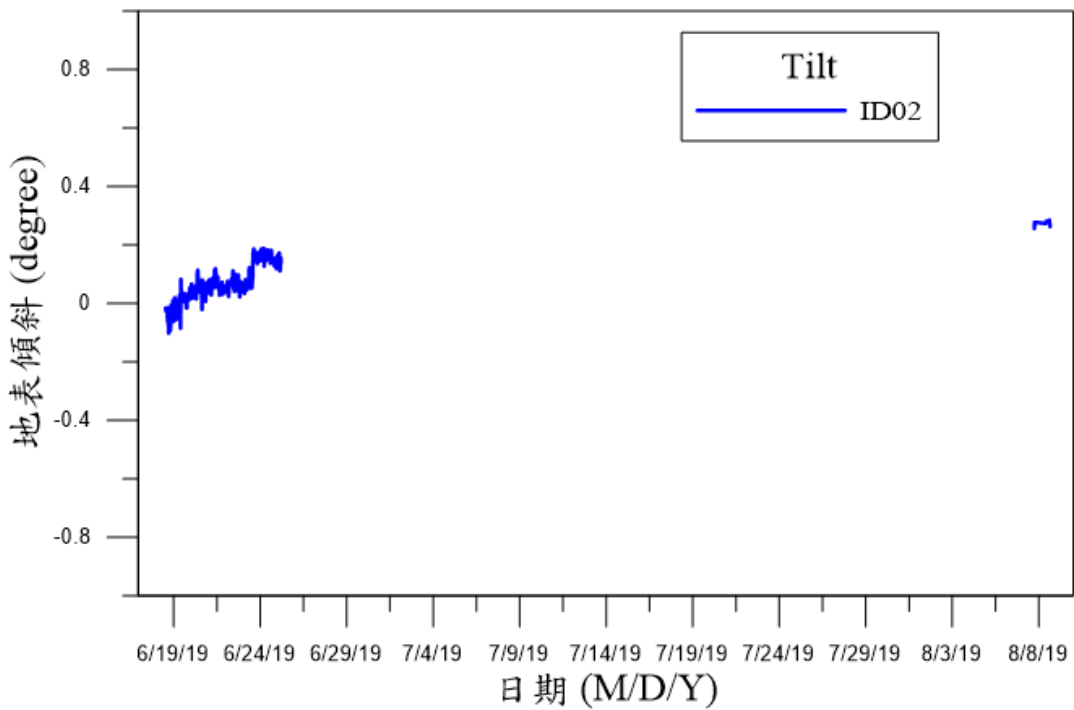


圖 4.14 ID02 傾斜監測結果

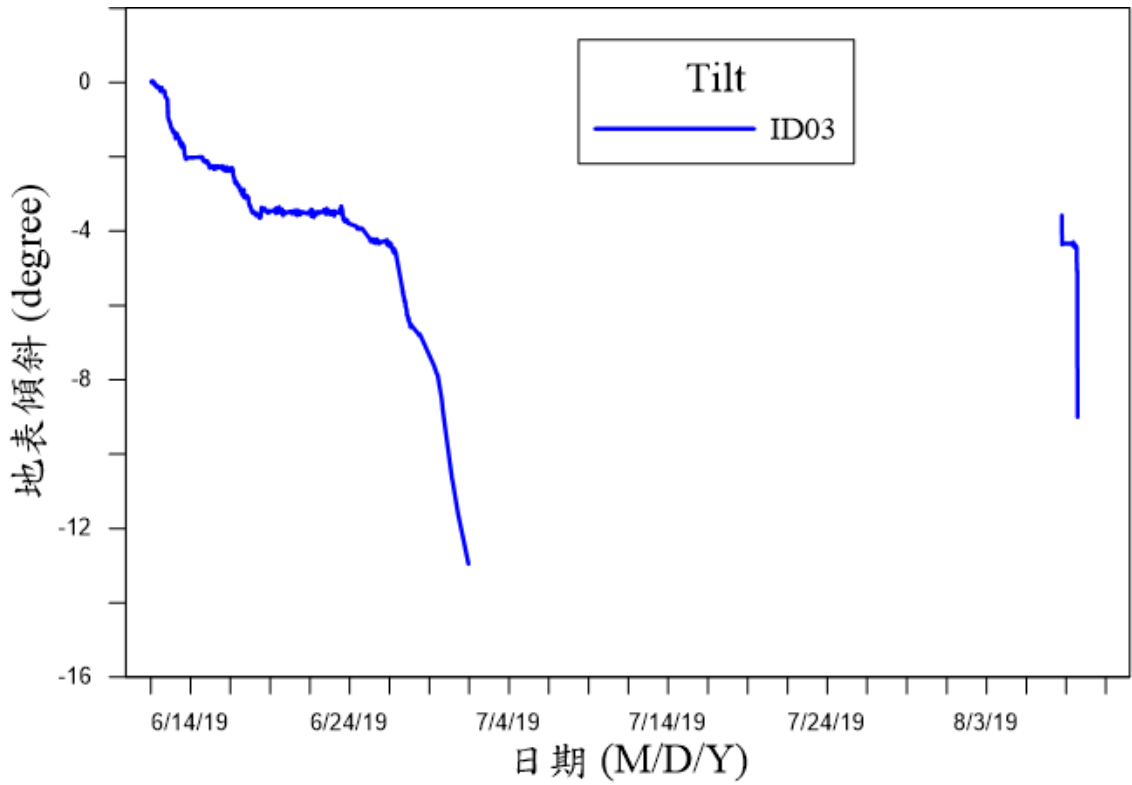


圖 4.15 ID03 傾斜監測結果

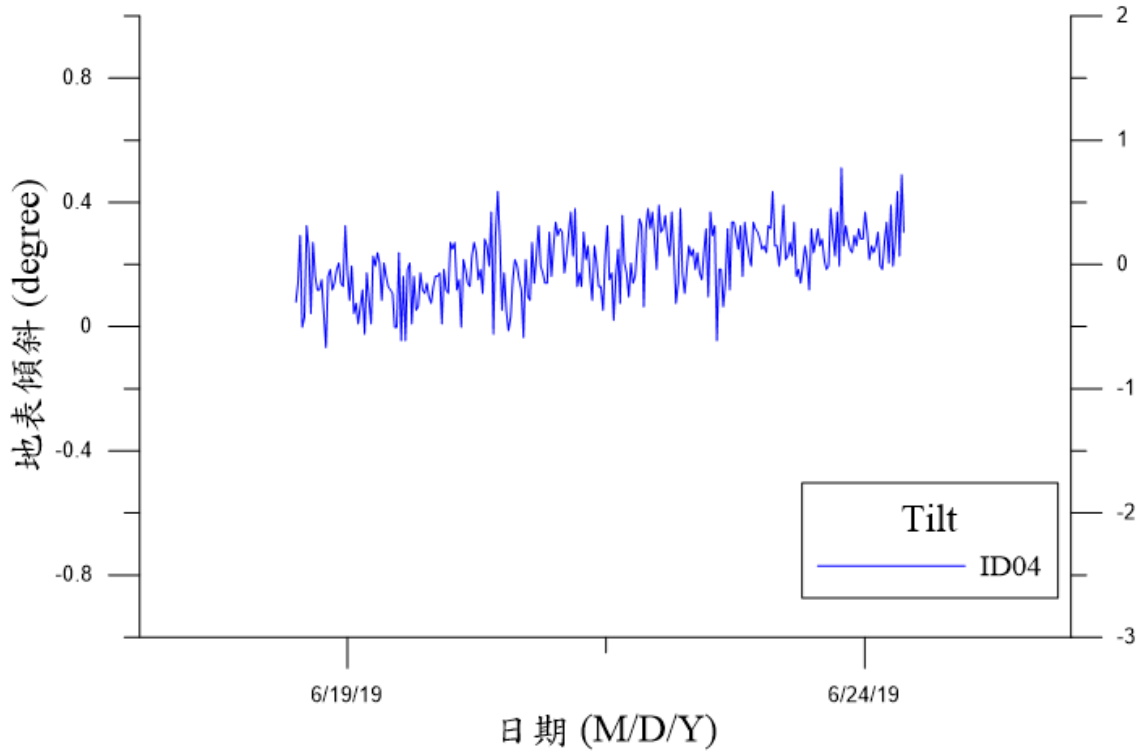


圖 4.16 ID04 傾斜監測結果



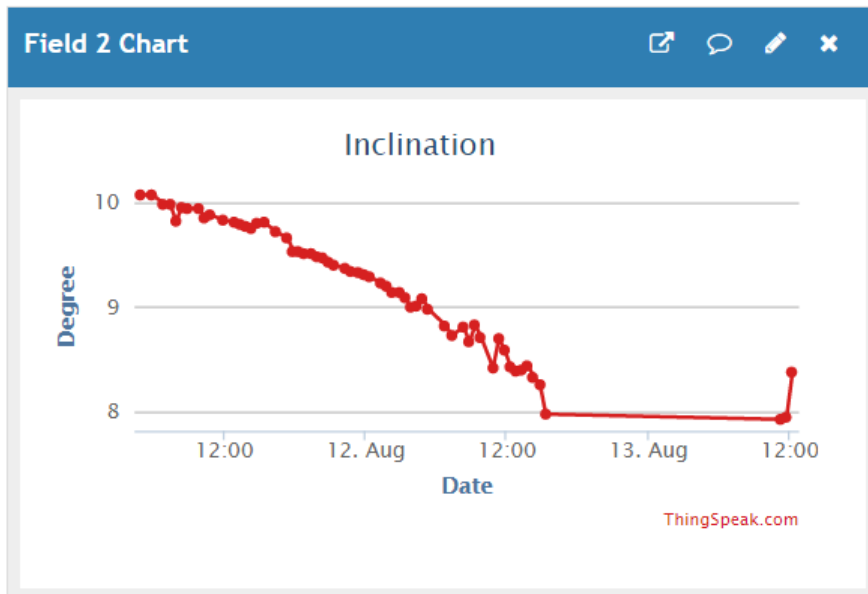


圖 4.17 ID02 於 2019/08/12 降雨事件中傾斜監測結果

#### 4.4.3 五彎仔場址水位監測資料

圖 4.18 為水位監測結果，此孔位孔口高程為 702 m，安裝完成時水位位在地表下 12 公尺，期間沒下雨時，水位略微下降，經過一場累積降雨量 20 mm 之降雨，水位小幅上升後又下降，目前水位約在地表下 15 公尺。

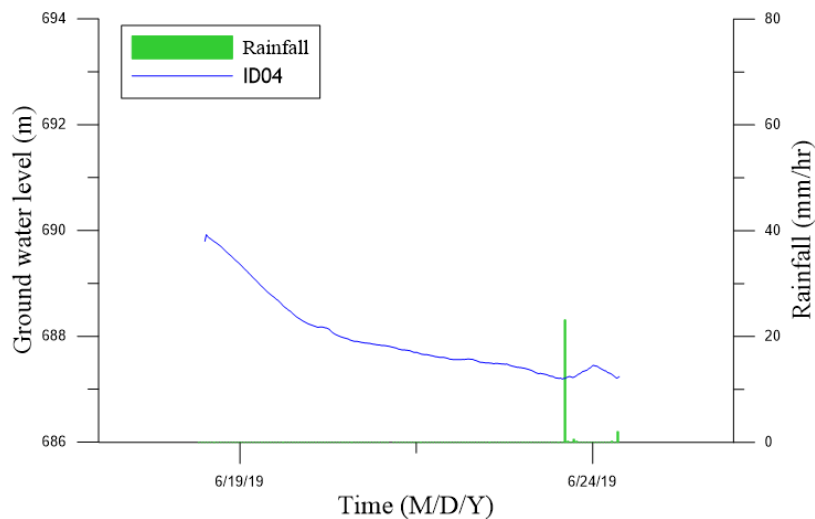


圖 4.18 ID04 水位監測結果

#### 4.4.4 修復後五彎仔場址監測資料

因五彎仔場址於 10 月上旬因現地表層滑動損壞，研究團隊於 10 月下旬進行模組更換與系統修復，修復後配置如圖 4.19 所示，ID2 於 2019/11/05 被掩埋斷訊，至 2019/11/13 日止監測資料如圖 4.20~4.24 所示，此場址因地表變動劇烈，後續需檢討替代方案，建議採審查委員建議，量測道路邊緣邊坡，並引入擋土設施監測與預警。



圖 4.19 2019/10/26 五彎仔測站修復後配置圖

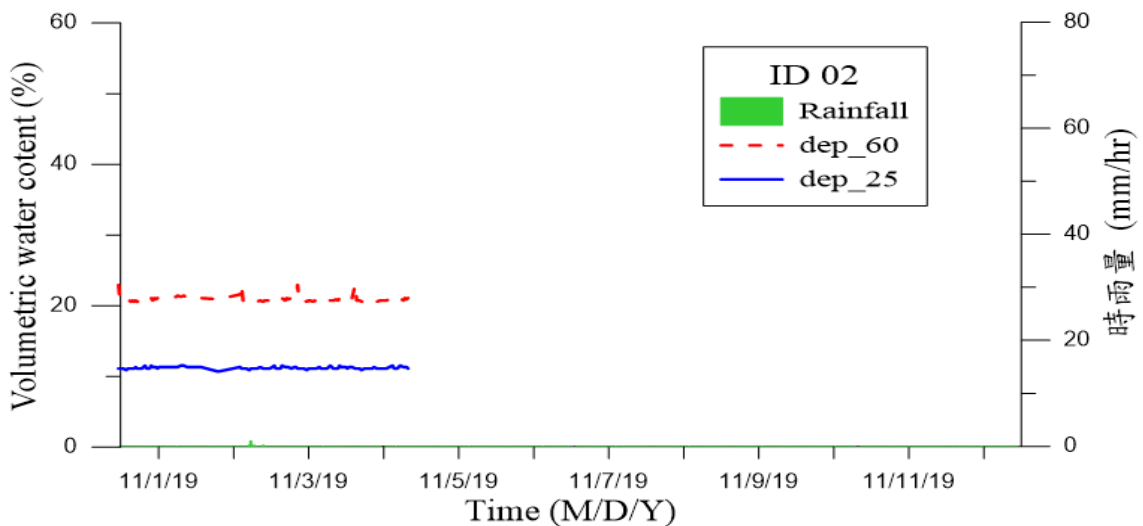


圖 4.20 五彎仔測站修復後 ID2 分層水份計量測成果

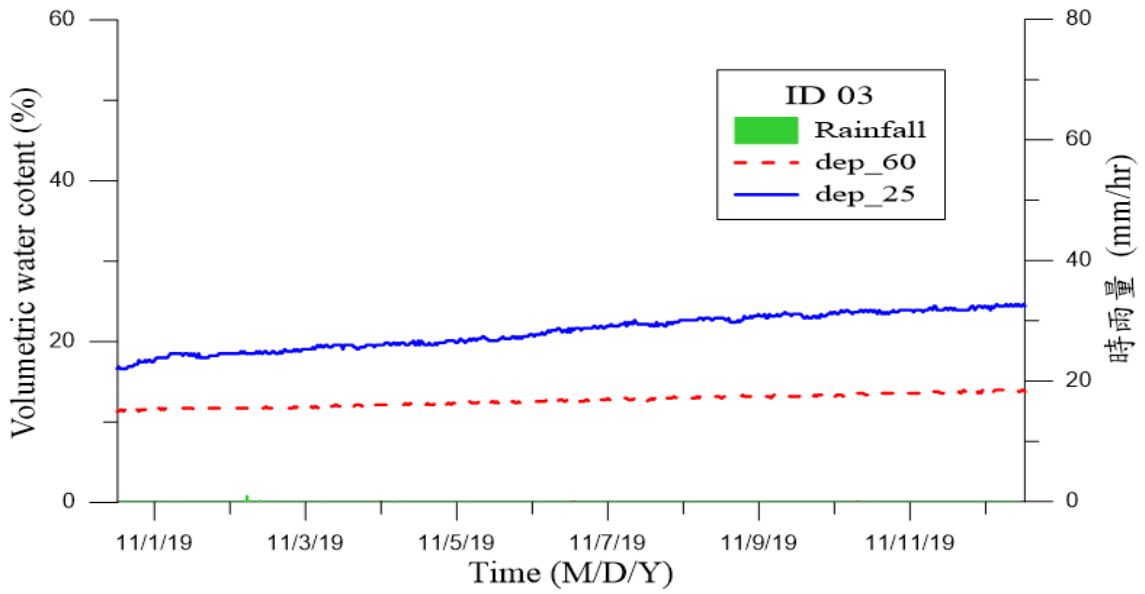


圖 4.21 五彎仔測站修復後 ID3 分層水份計量測成果

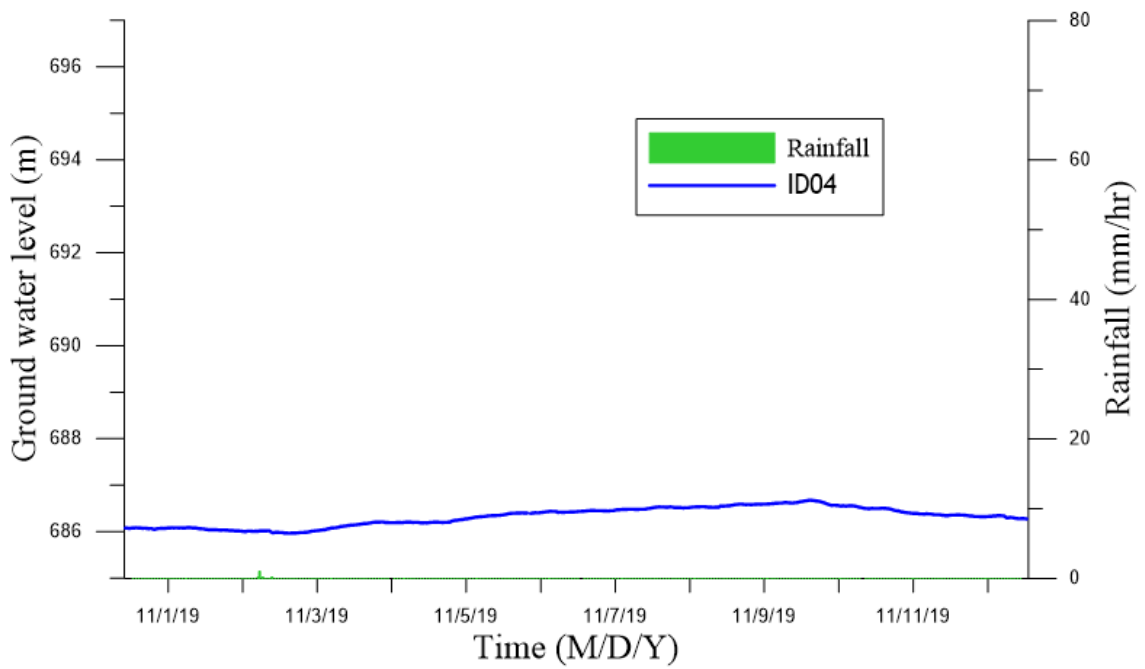


圖 4.22 五彎仔測站修復後 ID4 水位量測成果

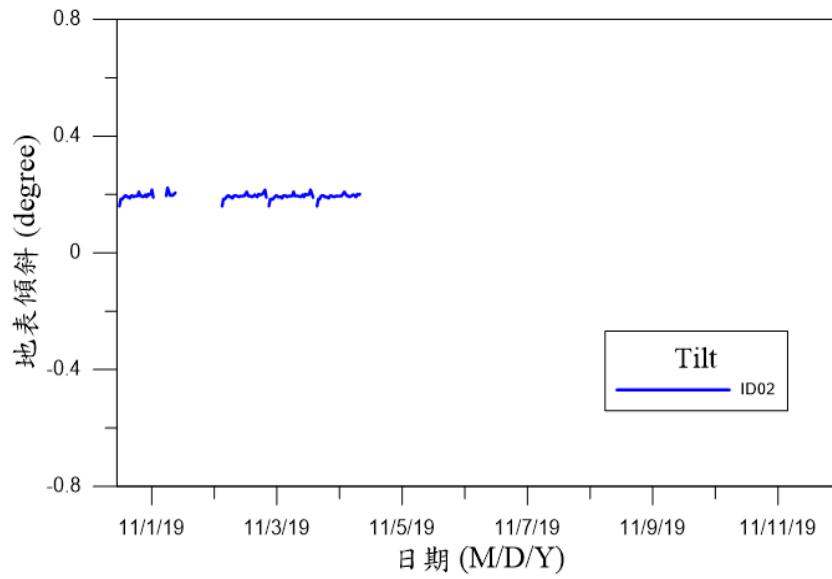


圖 4.23 五彎仔測站修復後 ID2 表面傾斜量測成果

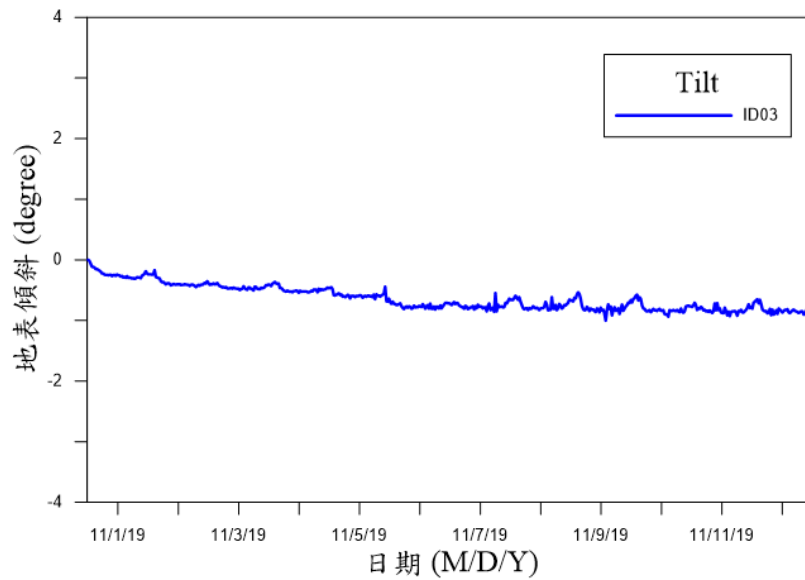


圖 4.24 五彎仔測站修復後 ID3 表面傾斜量測成果

## 第五章 飽和土層滑動監測場址

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

由於本計畫研究對象包含飽和土層土壤邊坡破壞，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，2018年經公路局五工處同意，選定台20線52k+150處為監測場址，2019年因場址下邊坡進行整治工程，路面同步進行維護，因此2019年5月起之下邊坡監測系統及60m深水位監測必須暫停監測，原安裝之擋土牆傾角監測亦一併暫停，待本年度整治工程完成後再恢復相關監測。

### 5.1 監測場址背景資料

2018年計畫已於台20線52k+150處安裝飽和土層滑動監測場址，地理位置如圖5.1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

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

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

本場址鄰近地區歷年降雨狀況系參考鄰近之甲仙雨量站與北寮雨量站，統計 2013 年至 2017 年月平均降雨量資料，年平均降雨量分別為 2925.4mm 與 2280.8mm，佔全年總雨量 89.3%及 87.5%，降雨受到梅雨季節與夏季颱風影響，多集中於每年 5 至 9 月期間，而 10 月至翌

年 4 月期間，降雨量則明顯較少。

根據曾致仁(2017)與青山工程顧問公司於此區域之水位監測資料，本研究 ID 02 與 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兩孔深度皆為 11m，並於此場址設置雨量計。2018 年度起陸續於台 20 線 52k+150 處裝設五組無線監測模組與一組伺服器端。

各監測點之配置如表 5-1 所列，位置配置圖與剖面示意圖如圖 5.2 與圖 5.3 所示，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，2019 年因施工影響，遷移至 ID04 路旁；ID 02 與 ID 04 測站分別位於道路上下邊坡，ID 02 與 ID 04 測站之液位計裝設深度皆約 35m，為量測位於破碎帶與砂岩間的侷限含水層水位，ID04 因路面整修，暫時移除，整修完後再恢復觀測；ID 03 與 ID 05 測站分別位於道路下邊坡與上邊坡，為本計畫新增孔位，ID 03 與 ID 05 測站之液位計深度皆約 11m，量測位於崩積層之自由含水層，2019 年 5 月 ID03 因進



行下邊坡整治工程已撤除，規劃於整治工程結束後重新鑽孔安裝。

表 5-1 台 20 線 52k 測站配置表

ID	配置	水位孔深度	水位孔高程	2019 現況
01	雨量計	無	無	正常
02	液位計	40 m	292m	正常
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m	移除
04	液位計	60 m	286m	暫停
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m	正常

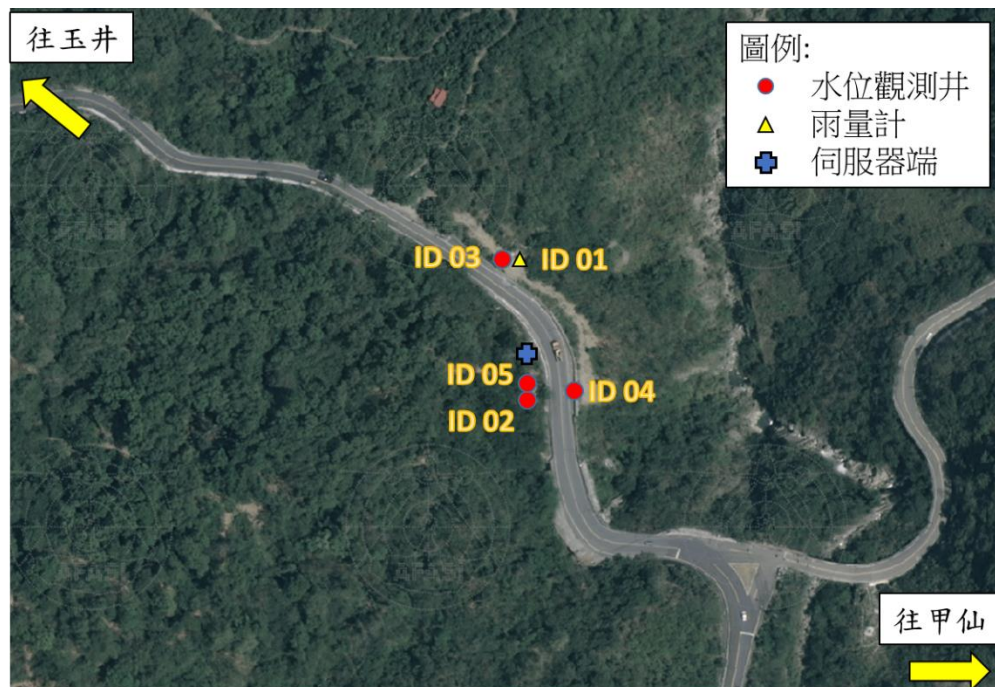


圖 5.2 監測儀器配置圖



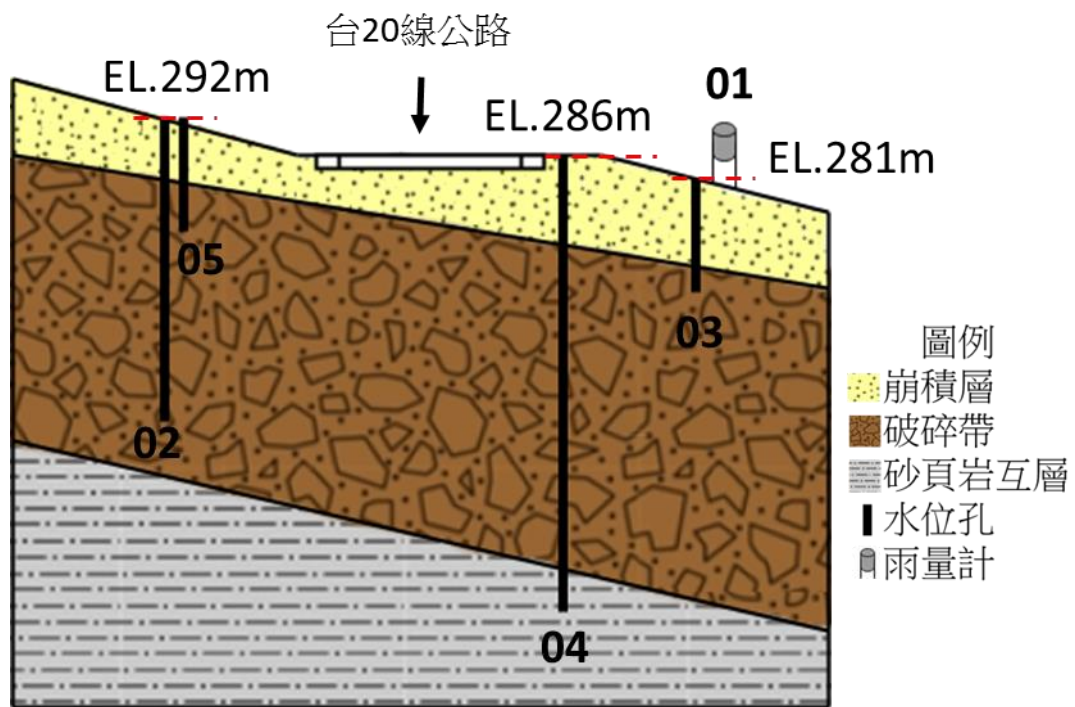


圖 5.3 監測剖面示意圖

### 5.3 監測資料與分析

台 20 線 52k 之無線土層監測系統於 107/05/25 安裝完畢，2019 年更換 4G 模組，目前未受整治工程影響之模組維持正常運作，監測成果將於以下小節分別說明。

#### 5.3.1 地下水位

圖 5.4 至圖 5.7 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。ID03 測站此孔於梅雨季期間，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。另外因應台 20 線道路下邊坡整治，ID03 水位於

2019/04/15 暫停監測，ID04 水位於 2019/05/20 暫停監測。

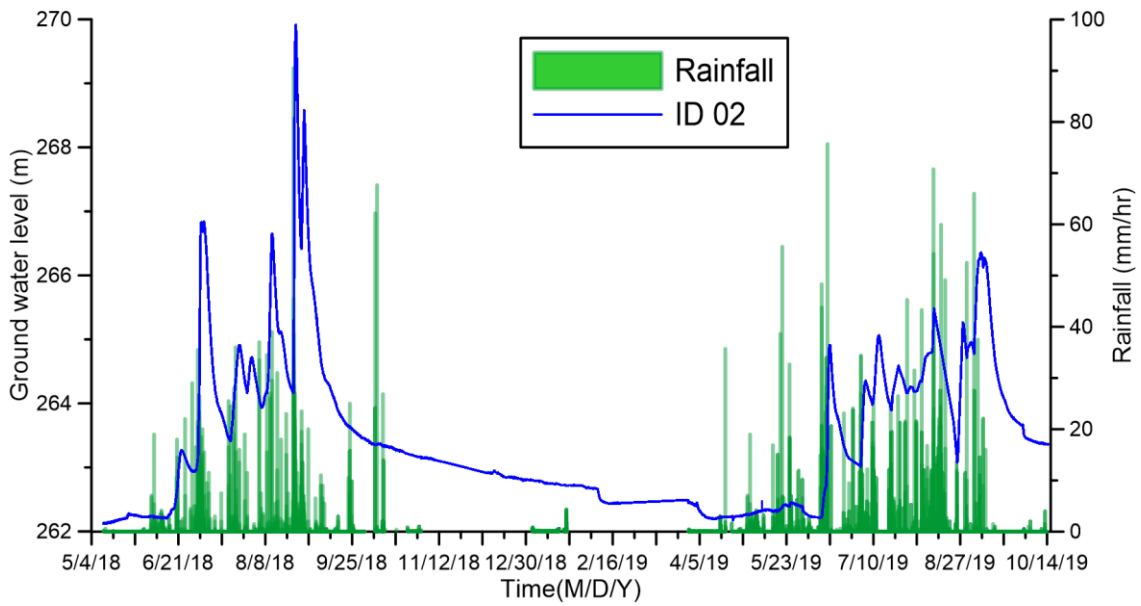


圖 5.4 ID 02 地下水位監測數據

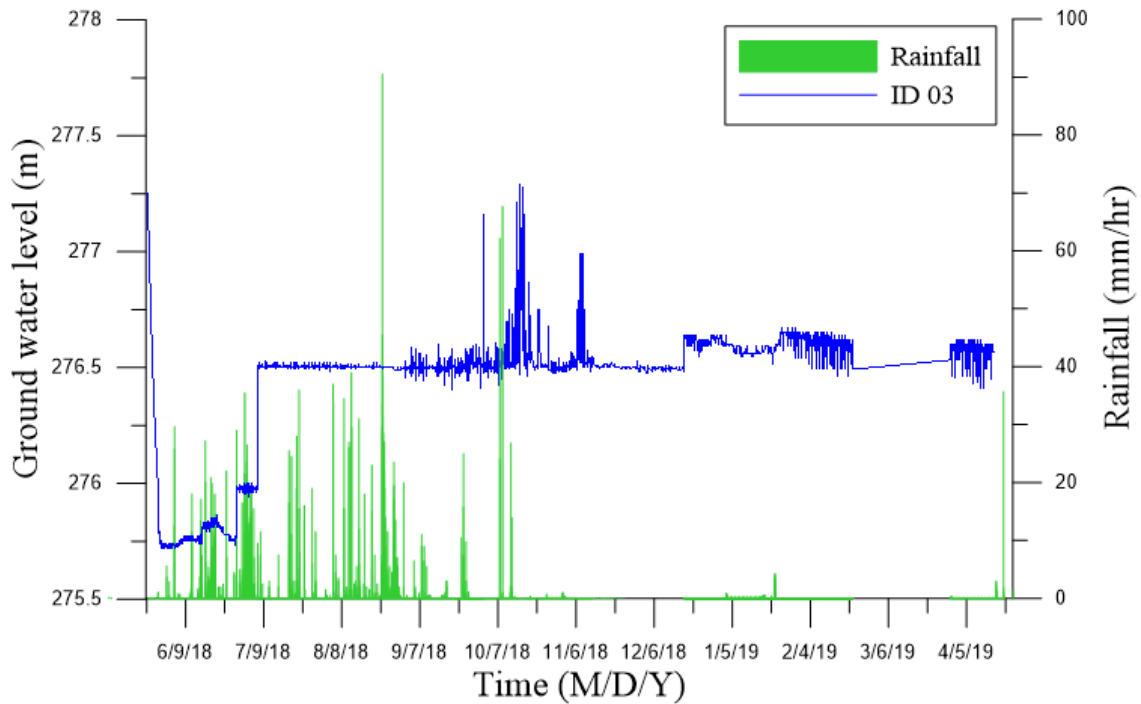


圖 5.5 ID 03 地下水位監測數據

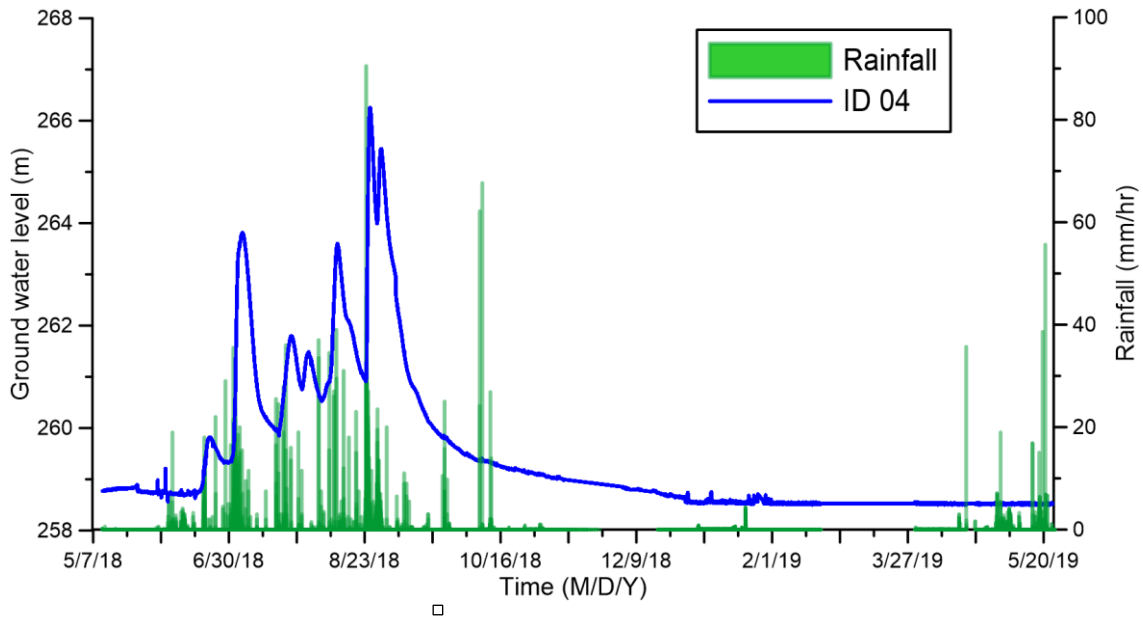


圖 5.6 ID 04 地下水位監測數據

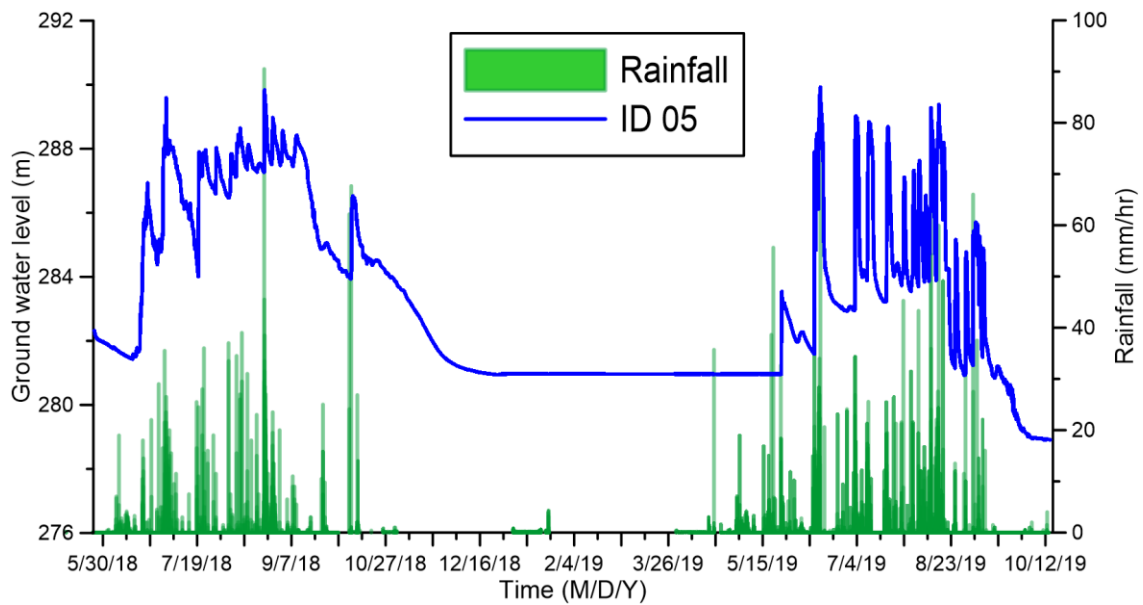


圖 5.7 ID 05 地下水位監測數據

圖 5.8 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 5-5.2 與

表 5-3，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。

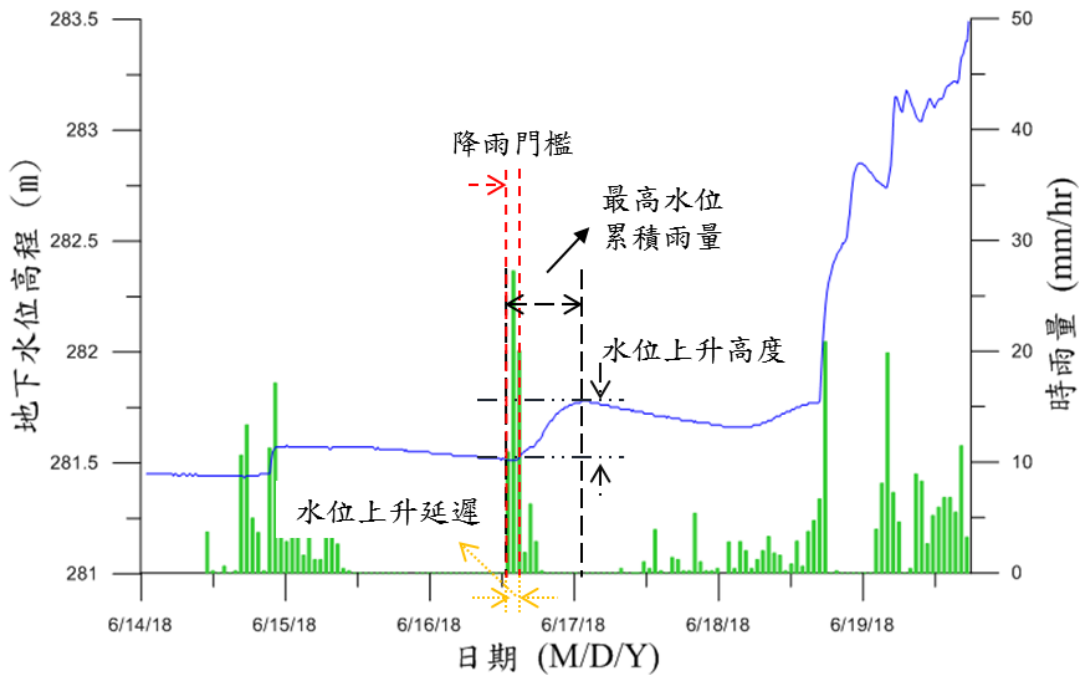


圖 5.8 降雨特徵參數定義示意圖

圖 5.9 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 5.10 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，但仍有數個降雨事件落在 95% 信賴區間外，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，此外現有資料顯示，岩層累積雨量與水位上升高度關聯性不明確，兩數值間有其他因素影響，此為後續可精進之處。

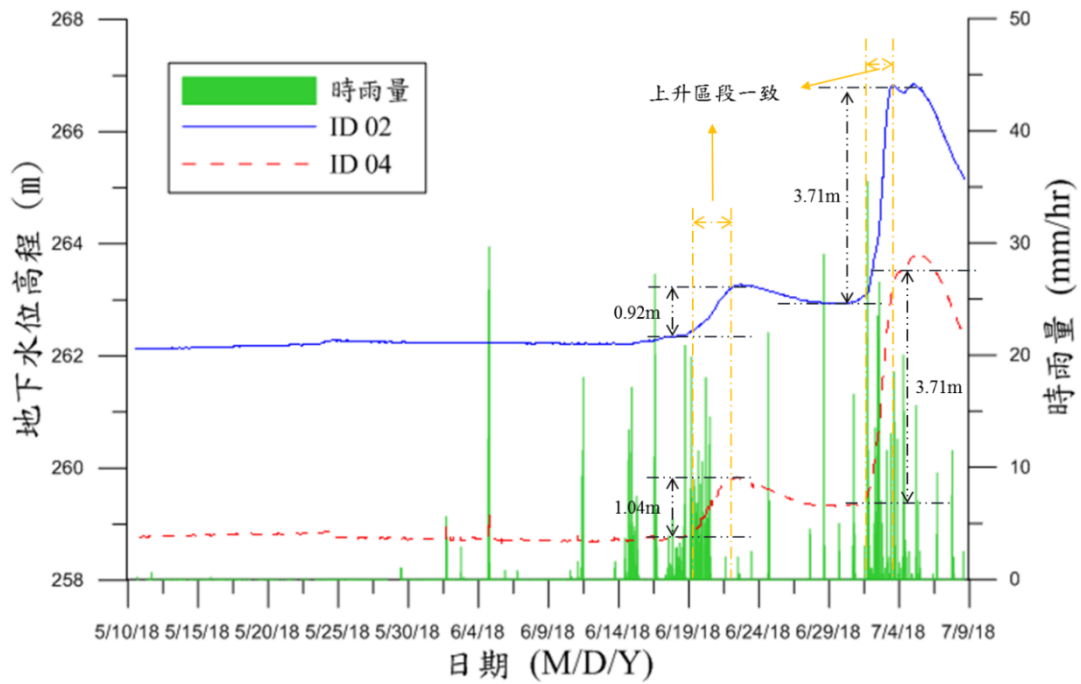


圖 5.9 ID 02 與 ID 04 水位比較示意圖

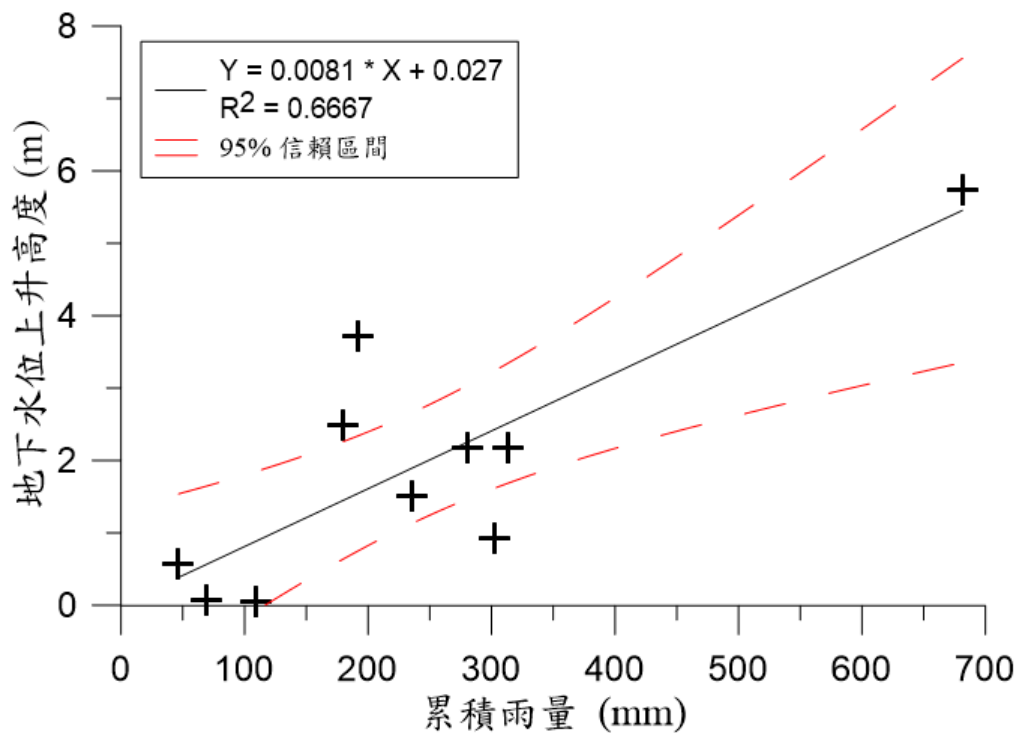


圖 5.10 岩層累積雨量與水位上升高度關係圖

監測結果顯示，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 5.11 所示，可以此特性推估降雨開始後水位開始上升時間。圖 5.12 顯示累積雨量影響地下水位上升高度，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 5.13 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。

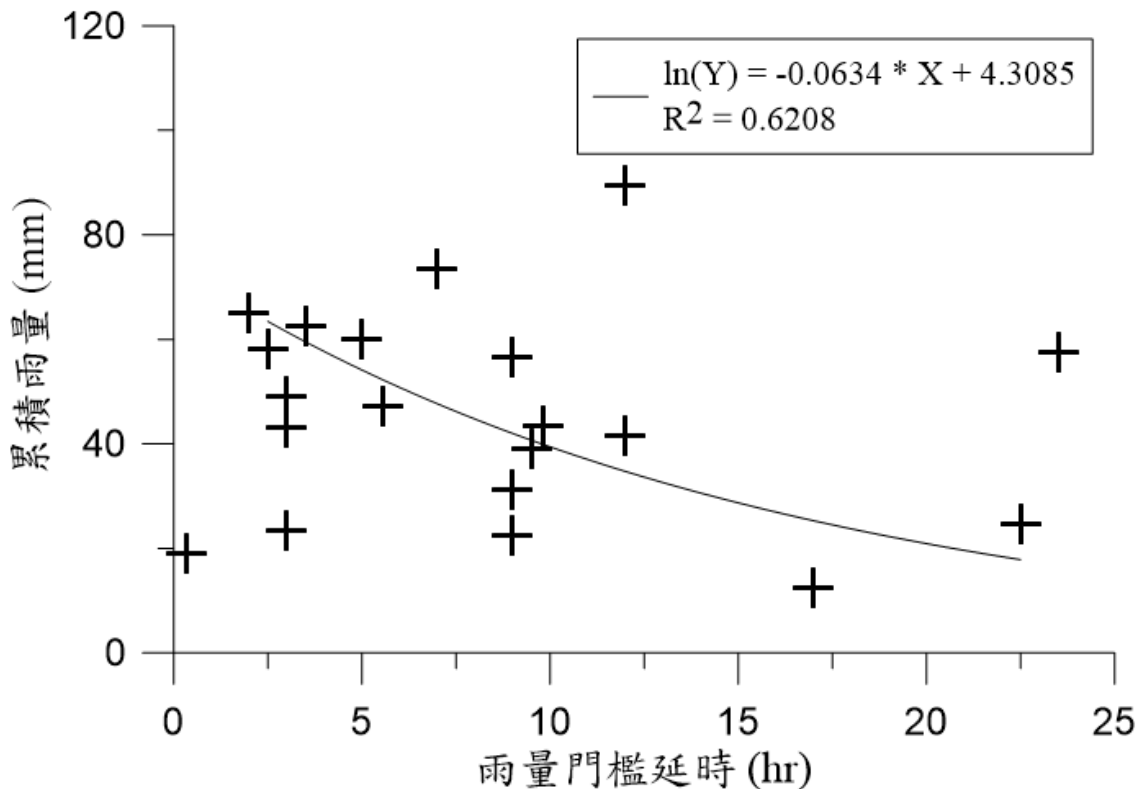


圖 5.11 崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖

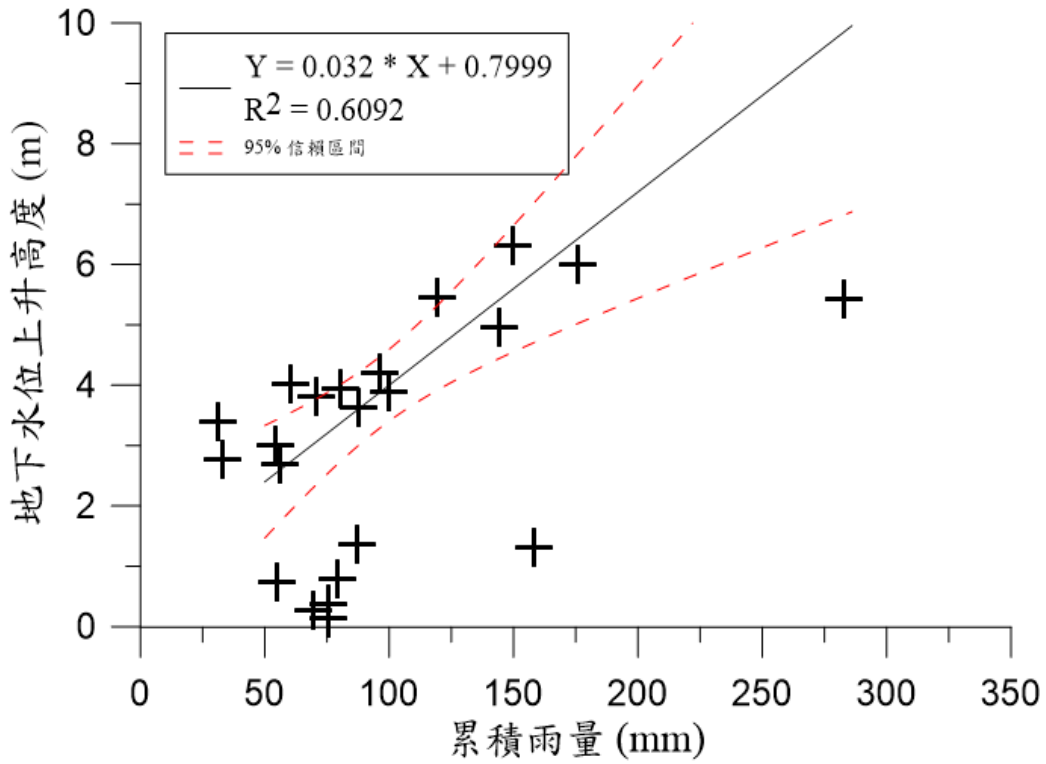


圖 5.12 累積雨量與地下水位高度關係

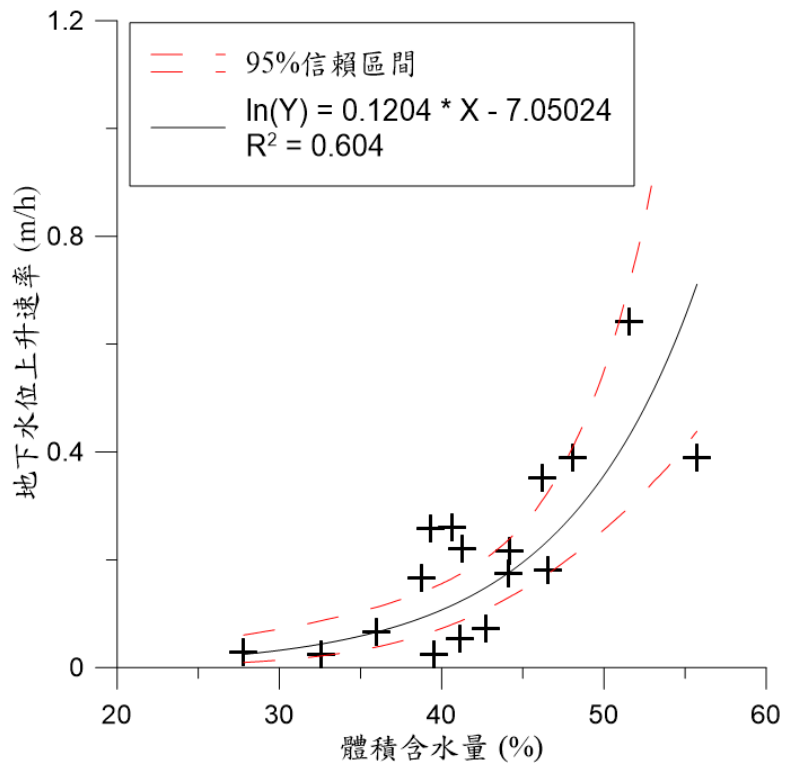


圖 5.13 地下水位上升速率與體積含水量關係

□

表 5-2 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)
1	06/14/18 10:00	109.7	06/15/18 0:40	06/15/18 23:16	0.04	69.27	13.5	0.0018
2	06/16/18 12:00	69.27	06/16/18 15:33	06/17/18 03:47	0.06	69.27	3.5	0.005
3	06/17/18 07:00	183.66	06/18/18 11:20	06/22/18 14:48	0.92	34.57	27	0.0092
4	07/01/18 13:00	191.5	07/01/18 18:39	07/03/18 12:36	3.71	60	5.5	0.088
5	07/18/18 17:00	235.5	07/19/18 19:57	07/24/18 14:27	1.5	99	27	0.0131
6	07/27/18 15:00	46.5	07/29/18 01:26	07/31/18 13:48	0.56	46.5	34	0.0156
7	08/08/18 20:00	180	08/08/18 23:39	08/11/18 19:19	2.49	52	3.5	0.0369
8	08/23/18 04:00	681.5	08/23/18 15:27	08/24/18 20:39	5.74	192.5	11.5	0.1979
9	08/27/18 05:00	281	08/27/18 22:25	08/29/18 11:38	2.17	59.5	17.5	0.06
10	06/13/19 12:00	313.27	06/13/19 23:56	06/15/19 19:26	2.18	87	12	0.05



□

表 5-3 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)
1	06/14/18 10:00	75.6	06/14/18 19:30	06/15/18 0:12	0.14	39.08	9.5	27.79	0.029
2	06/16/18 12:00	69.27	06/16/18 14:23	06/17/18 1:12	0.27	58.17	2.5	32.54	0.025
3	06/17/18 07:00	302.66	06/18/18 5:28	06/20/18 19:55	4.1	24.5	22.5	35.98	0.066
4	06/30/18 16:00	33	06/30/18 19:07	07/01/18 07:37	2.76	23.5	3	55.73	0.221
5	07/01/18 13:00	79.5	07/01/18 17:58	07/01/18 19:51	0.78	60	2	46.56	0.25
6	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
7	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
8	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
9	08/04/18 16:00	87	08/04/18 23:06	08/06/18 05:57	1.37	73.5	7	41.11	0.053

□

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)
10	08/23/18 04:00	324	08/23/18 12:55	08/23/18 19:01	2.57	56.5	9	51.52	0.643
11	06/10/19 23:41	149.44	06/11/19 11:41	06/11/19 13:56	6.32	89.33	12	47.37	3.16
12	06/11/19 18:24	87.49	06/12/19 06:13	06/12/19 19:57	3.62	41.49	12	39.29	0.259
13	06/13/19 11:54	313.27	06/13/19 15:12	06/14/19 16:13	3.81	43.24	3	38.78	0.166
14	07/02/19 14:16	175.95	07/02/19 18:49	07/03/19 08:33	5.99	31.31	9	X	0.707
15	07/09/19 06:31	144.02	07/09/19 12:05	07/10/19 10:50	4.95	47.16	5.55	44.19	0.217
16	07/19/19 12:05	119.15	07/20/19 12:09	07/19/19 15:09	5.46	49.02	3	40.62	0.260
17	07/28/19 14:51	54.5	07/28/19 15:40	07/29/19 05:54	3.01	43.66	0.8	X	0.212
18	08/05/19 14:54	80.56	08/05/19 16:57	08/06/19 04:11	3.94	65.04	2	46.18	0.351
19	08/08/19 16:10	56.2	08/08/19 21:41	08/09/19 13:14	2.7	36.62	5.5	44.08	0.174
20	08/11/19 00:25	282.97	08/11/19 04:43	08/12/19 09:14	5.42	23.27	4.28	X	0.278

□

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)
21	08/14/19 15:42	392.32	08/15/19 01:29	08/16/19 11:30	5.49	43.47	9.8	X	0.392
22	08/24/19 08:00	60.5	08/25/19 00:47	08/25/19 14:33	4.01	12.5	17	X	0.291
23	08/30/19 14:00	70.5	08/30/19 14:32	08/31/19 01:18	3.8	22.5	0.53	X	0.353
24	09/03/19 15:00	96.5	09/03/19 15:33	09/03/19 22:04	4.19	23	0.55	X	0.644
25	09/08/19 17:00	31.5	09/08/19 17:05	09/08/19 22:36	3.4	9	0.3	X	0.616

### 5.3.2 表層體積含水量與傾斜儀

圖 5.14 與圖 5.15 為 ID 03 與 ID 05 測站含水量監測結果，因應台 20 線道路下邊坡整治，ID03 含水量與傾斜於 2019/04/15 暫停監測，感測器對降雨事件反應敏感，在降雨事件後逐步降低。圖 5.16 為傾斜儀監測結果，顯示 ID05 傾斜儀於監測初期間有極微幅的滑移，2019 年起有 0.25 度上下震盪讀數，因其位於蛇籠擋土牆上方，蛇籠局部有部分輕微變形，顯示表層傾斜儀可反應擋土設施之變化，2019 年監測結果顯示變形並無持續增加。ID03 傾斜儀則於觀測初期至 2019/04/15 期間內有持續變動，與道路下邊坡產生滑動現象吻合。

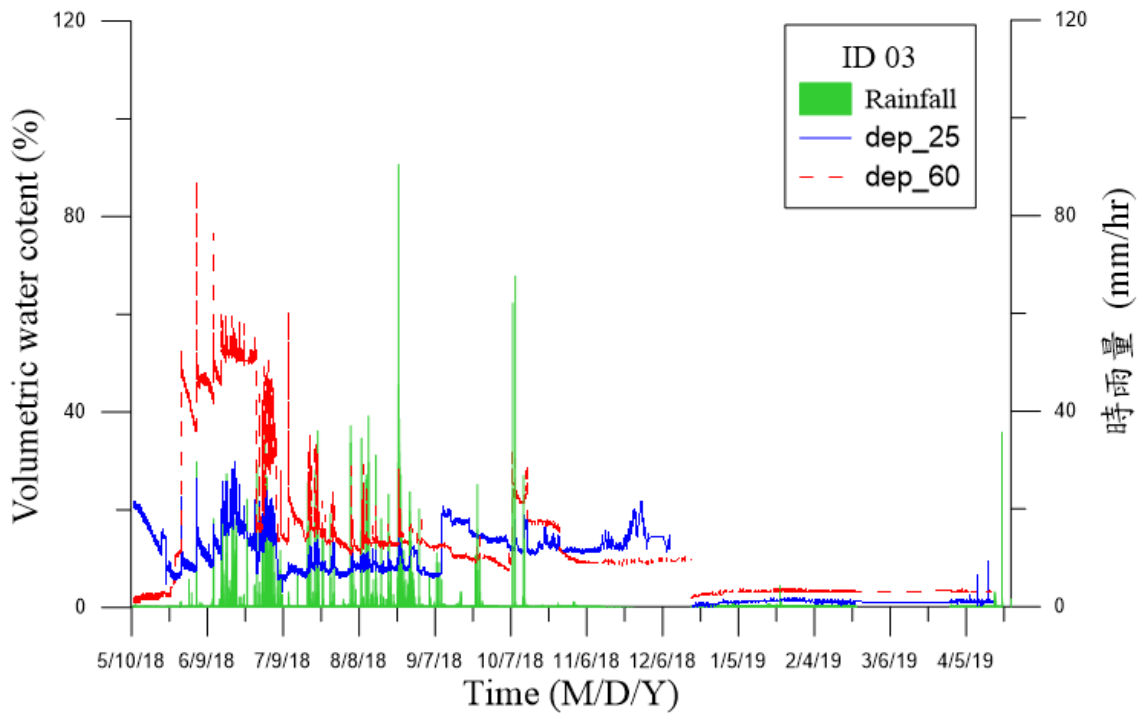


圖 5.14 ID 03 體積含水量監測數據

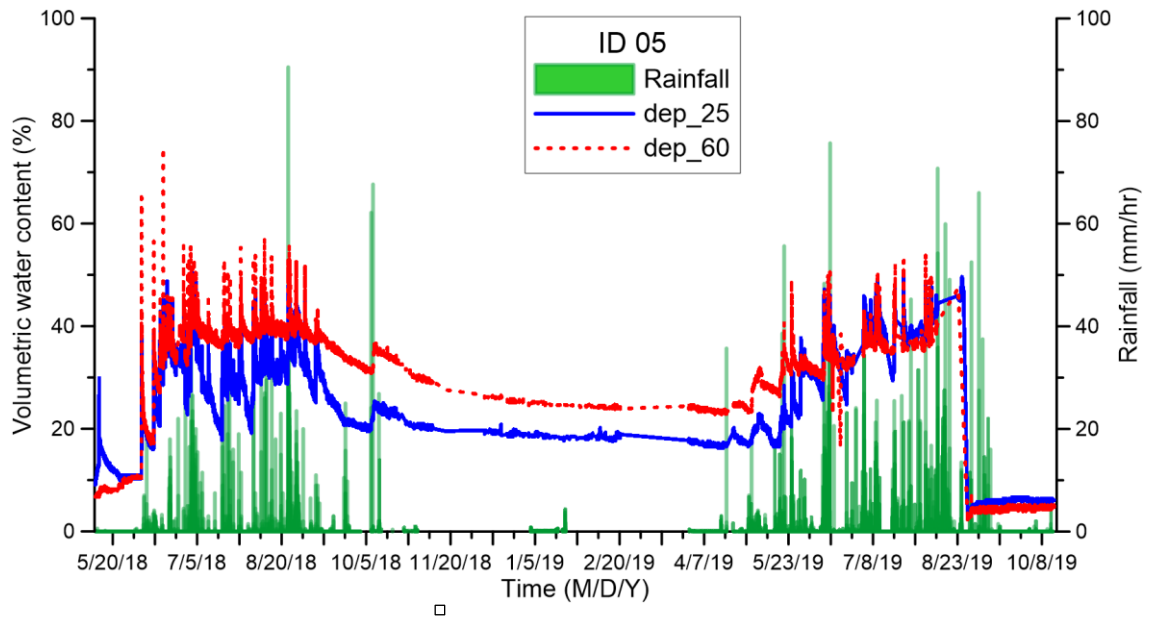


圖 5.15 ID 05 體積含水量監測數據

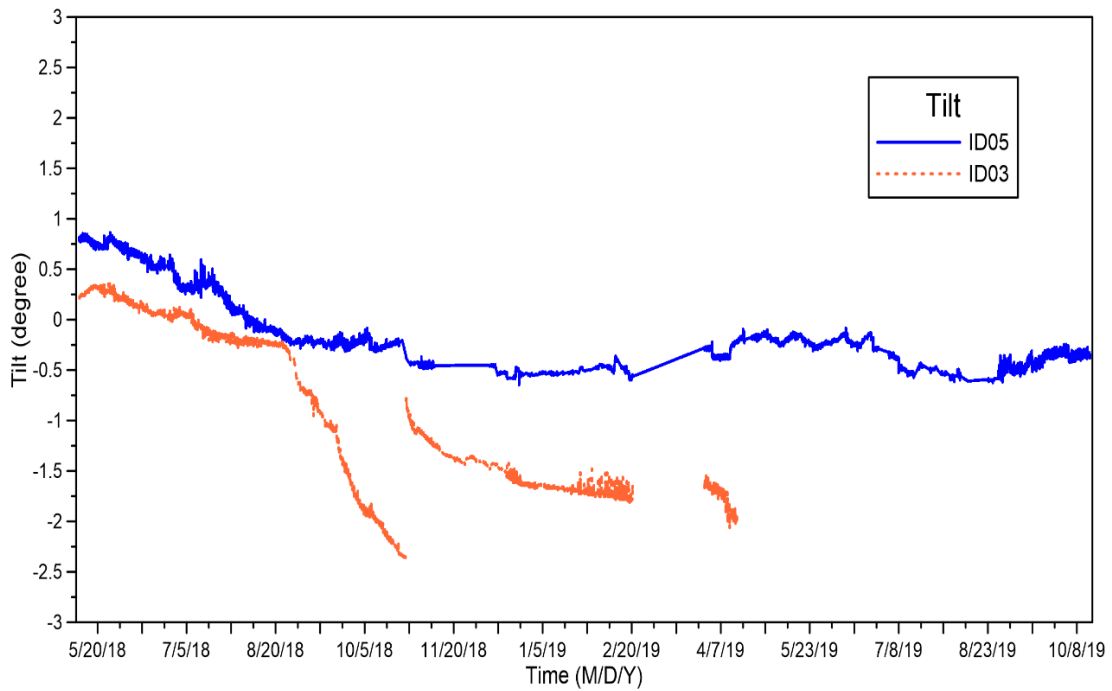


圖 5.16 各測站傾斜角監測數據

## 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，限於可得前期改善工程資料有限，尚未考慮橫向排水，相關影響並未於本年度分析討論，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 5-4 所示，非飽和崩積層 van Genuchten (1980)模式擬合參數如表 5-5 所示，非飽和水文參數如表 5-6 所示，基質吸力引致土壤強度參數 $\phi^b$ 為 $5^\circ$ 。

以圖 5.17 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 5-4 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。

表 5-4 分析所用土層參數

參數(單位)	Colluvium	Rock
非飽和單位重 (kN/m <sup>3</sup> )	18.5	23.0
飽和單位重 (kN/m <sup>3</sup> )	20.1	25.6
楊氏模數(kPa)	4000	2.0E5
柏松比	0.3	0.25
有效凝聚力 <sup>□</sup> (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 5-5 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數

$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)	$\alpha$	m	n
43.5	10.0	0.3	0.99	1.11

表 5-6 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 <sup>□</sup>	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)

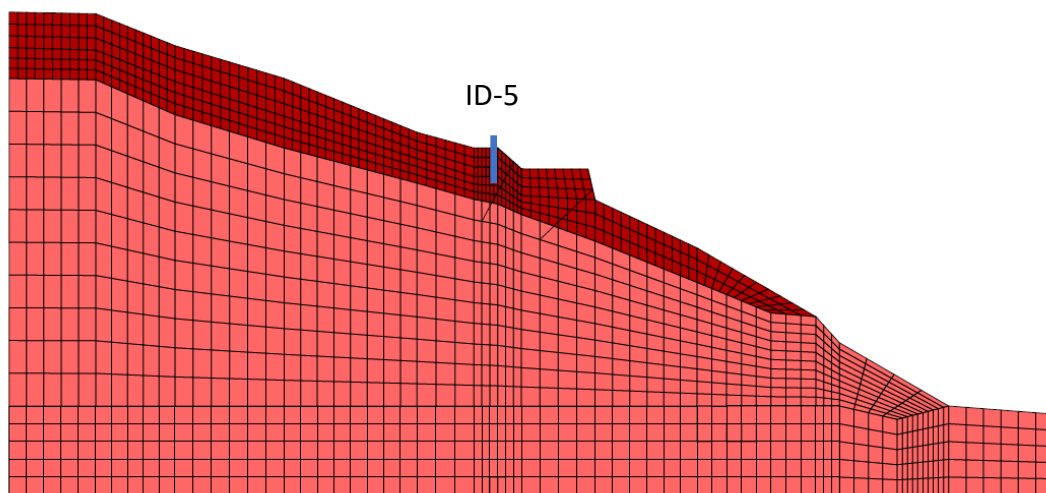


圖 5.17 台 20 線 52k 數值分析模型



#### 5.4.2 耦合分析結果

圖 5.18~圖 5.20 為入滲達  $2.6 \times 10^5$  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 5.20 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  $2.6 \times 10^5$  秒孔隙水壓及水分子流動向量如圖 5.18 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 5.21 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  $2.6 \times 10^5$  秒(約 3 日)產生破壞。

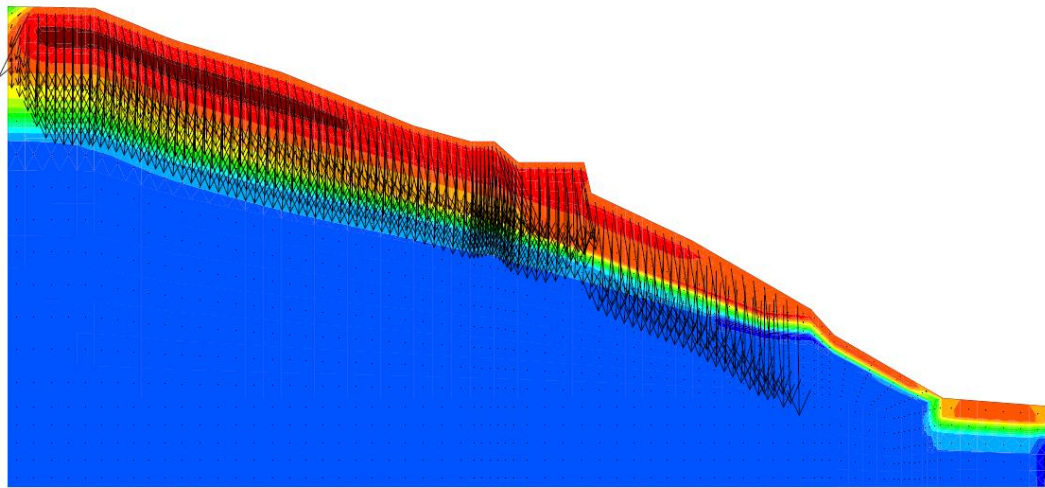


圖 5.18 入滲開始  $1.2 \times 10^5$  秒孔隙水壓分布與流動向量

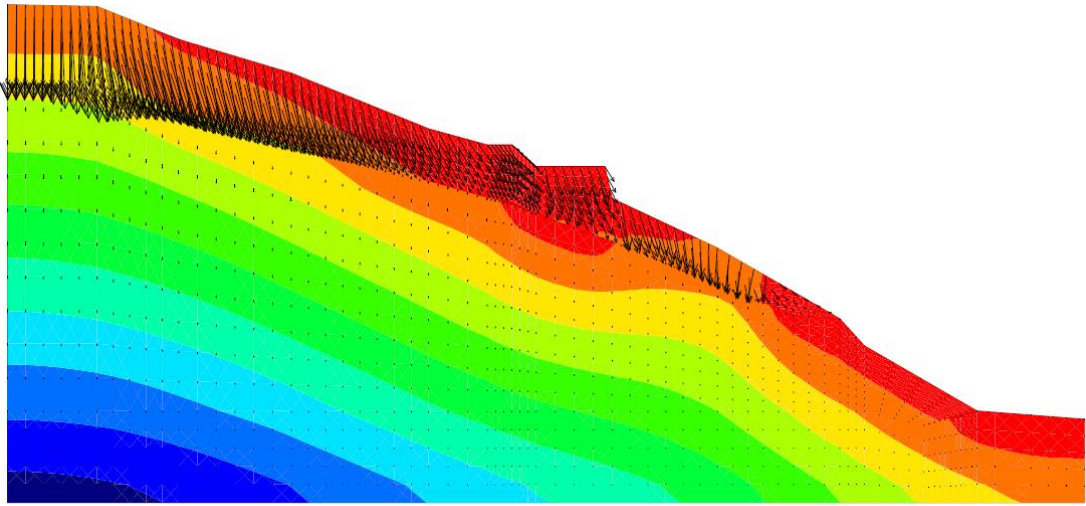


圖 5.19 入滲後垂直有效應力分布與位移向量

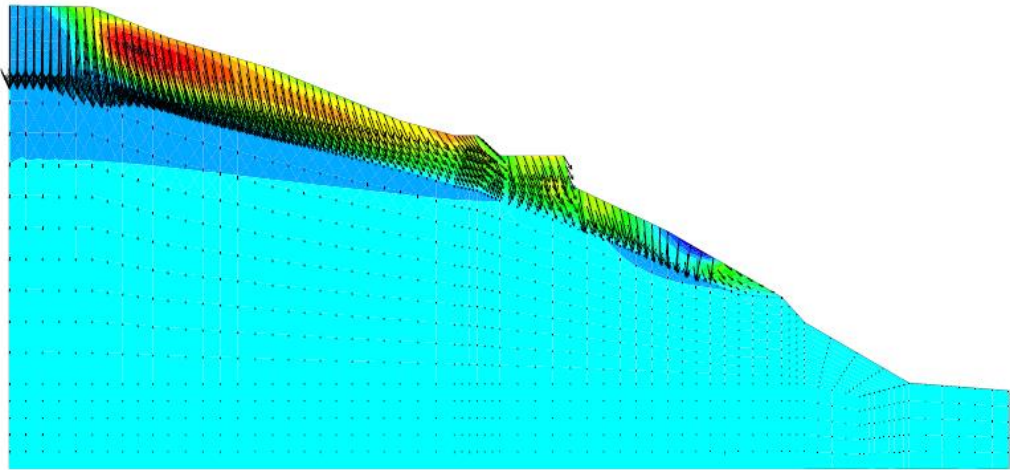


圖 5.20 入滲後水平位移分布

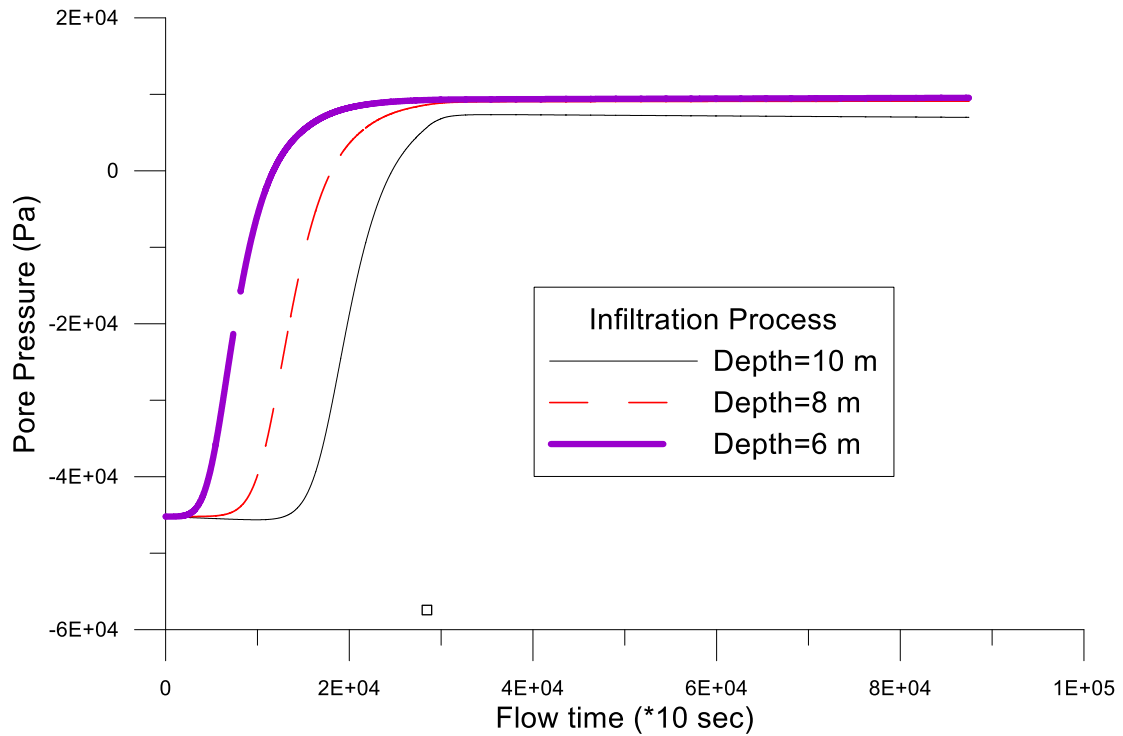


圖 5.21 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

## 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

因此本研究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，2018 年度以 ID03 所在下邊坡進行測試。

採用圖 5.17 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 5.22 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 5.23 所示，所對應之地下水流軌跡如圖 5.24 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。

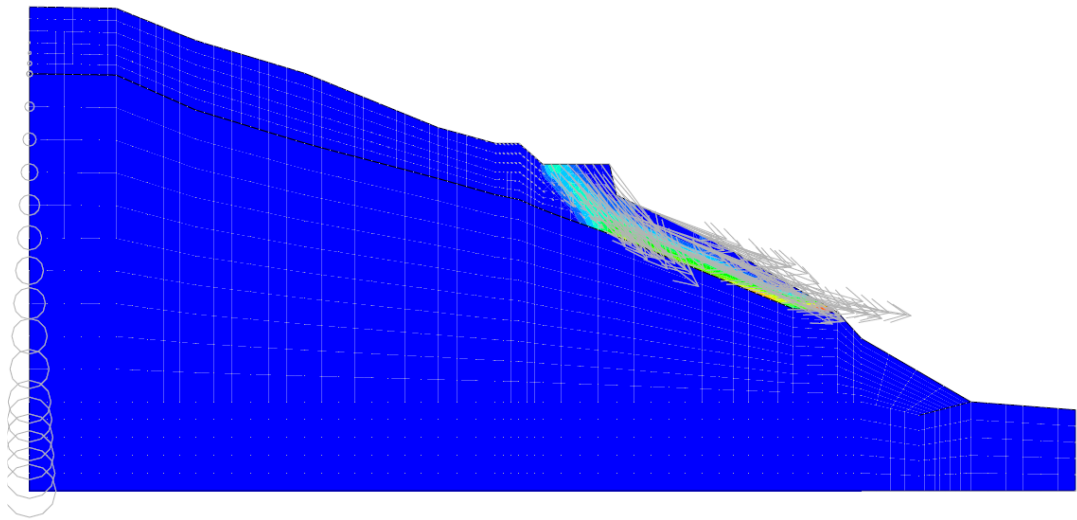


圖 5.22 非耦合分析 ID03 下邊坡臨界滑動區域

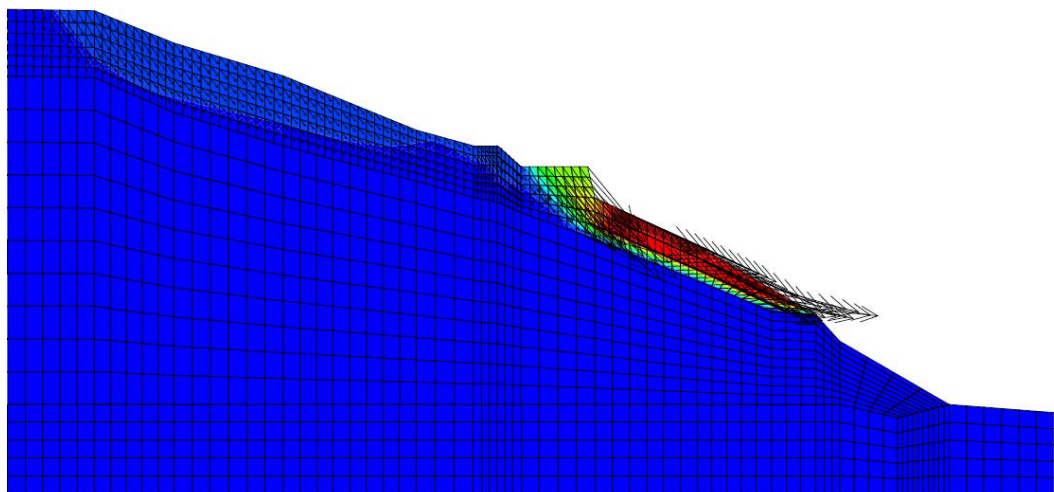


圖 5.23 非耦合分析下邊坡水平位移分布

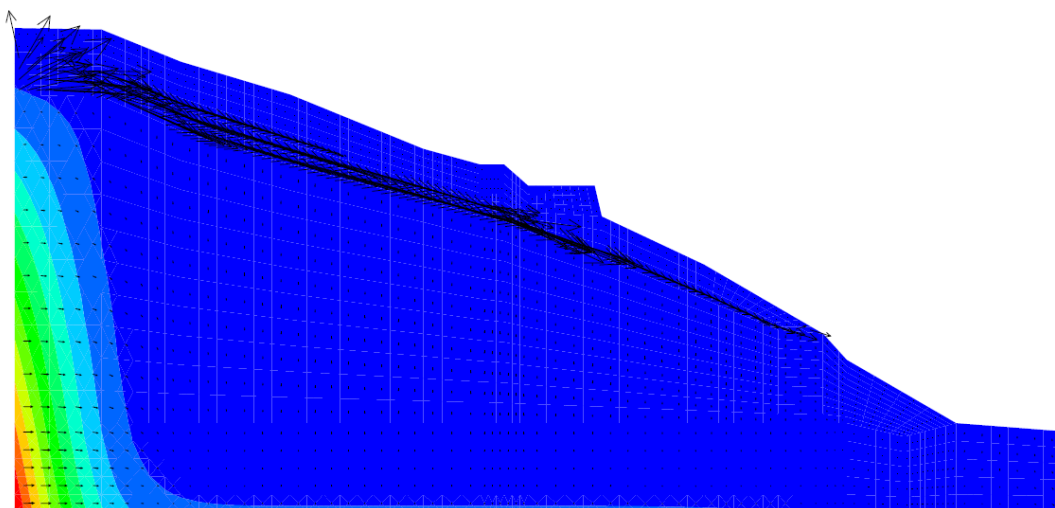


圖 5.24 非耦合分析地下水流軌跡



## 第六章 邊坡擋土系統變形分析與預警

本計畫前期已發展淺層及深層滑動之極限平衡分析及二維數值分析，2019 年度將持續以監測資料更新精進分析，並據以修正相關警戒值。而為因應多數公路邊坡多有不同程度整治，本年度將擴充原有土壤邊坡分析，將擋土支撐系統加入，並規劃以現地資料進行驗證。擋土系統分析將以二維土壤結構互制分析進行，並考慮水力與力學邊界，目標為進行變位與結構穩定預測。

經由前項考慮土壤結構互制反應之水力力學耦合分析成果，並搭配擋土結構反應即時量測，可進一步擴充現有原僅考慮土壤反應之解析方法與預警模式，做為具擋土支撐系統之邊坡依時預警分析與警示技術，將計畫導向由研究導向實際應用層面。

為簡化擋土支撐系統變位分析，本研究以基於基樁 p-y 曲線相同概念之 PYWALL 軟體，進行不同背填水位變化下彈性牆體傾角，並建議以牆頂傾角及背填水位為預警指標之預警架構，為進行驗證所需，現有深層滑動監測場址將增加擋土牆頂兩向傾角量測，以作為後續比對驗證。

### 6.1 PYWALL 軟體基本介紹

PYWALL 軟體之理論有別於傳統之極限平衡理論之分析，此軟體之最大優勢為考慮結構物與土壤互制關係，以非線性之土壤行為與材料性質模擬擋土設施行為，因此於分析柔性擋土牆時，相較於傳統分析將整體擋土設施視為一剛性旋轉體之方式，可得到牆體變形行為 (Ensoft, 2019)。分析擋土結構物時包含真實土壤狀況與結構物本身之相關細節。因此合理的分析與設計必須包含非線性土壤-阻力-位移之關係、樁間距、結構體性質等，PYWALL 透過樑柱模型來考慮樁土互制行為，軟體內也可以加入不同支撐系統或載重來分析擋土牆之行為。

PYWALL 軟體中之模型是基於 Winkler spring 模型改良而來，由 Rankine 理論假設主動土壓力，開挖面以下的土壤視為一系列之非線性彈簧以提供阻抗力。對於開挖面以下之土壤而言，開挖面以上之土壤所提供的主動土壓力可視為外部載重，概念如圖 6.1 表示。

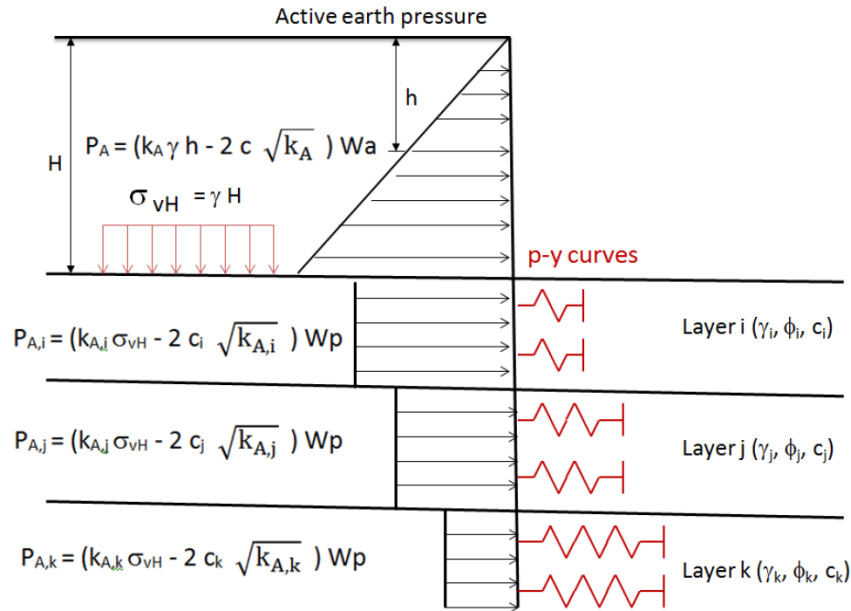


圖 6.1 PYWALL 土壤結構模型(改自 Reese et al., 2019)

## 6.2 邊坡擋土系統模擬

使用 PYWALL 模擬軟體前，需先充分了解軟體內之分析理論及各參數之定義，因此需建立一合理之分析流程，以下將說明分析流程與本計畫分析之場址。

### 6.2.1 模擬分析流程

現地場址基本模擬之流程如圖 6.2 所示，細節說明如下：



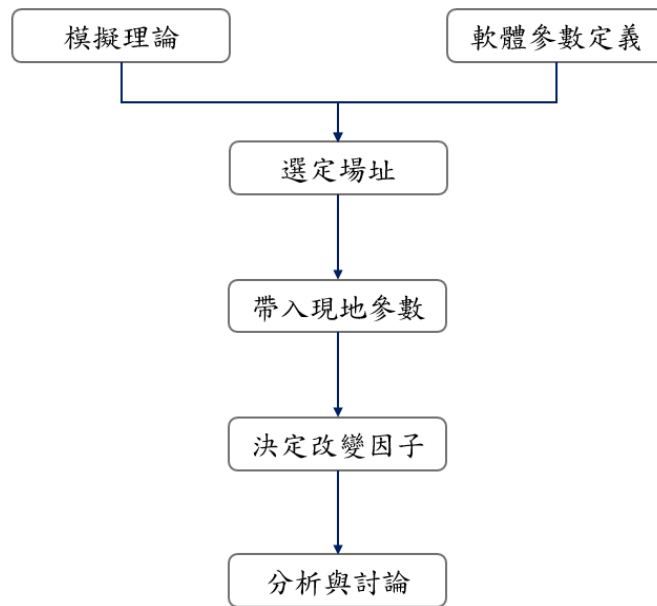


圖 6.2 牆體變形分析流程圖

1. 理解模擬理論：如前述所提，PYWALL 之理論有別於傳統分析，將土壤視為非線性之彈簧，考慮土壤結構互制關係，利用現今計算與數值分析的進步，更能真實模擬現地土壤與結構物。
2. 了解軟體參數定義：每套模擬軟體中對於各項參數之定義皆不同，在分析現地場址前需了解 PYWALL 中各項參數定義，如牆體斷面 (Wall cross sections) 及砂土層中的  $k$  值等參數，軟體內皆有特定定義及不同情況下建議值。
3. 選定分析場址：了解理論與軟體內參數後，即可選定分析與監測場址，於選定場址時需了解(1)場址之歷史與背景、(2)場址之土壤參數、(3)場址之水文情況、(4)場址擋土設施分佈及(5)場址擋土設施參數。可獲得之土壤與結構物資訊量越多，越能充分模擬現地狀況。
4. 決定改變因子：本研究使用軟體模擬之主要目的在於改變現地因子，得以了解隨著因子之改變擋土系統之改變狀況，本計畫將分析地下水位升降對於邊坡擋土系統之影響，因此開挖側與背填土側之地下水位為改變因子。

5. 模擬分析與討論：利用改變因子去了解擋土設施之改變並分析討論，亦可以了解不同參數改變後對於整體模擬影響性大小，使假設之參數達到合理性與最接近現地狀況，為模擬之最終目的。

## 6.2.2 現地模擬案例說明

本計畫以台 20 線 52K+150 之深層滑動監測場址為分析案例場址，由於監測場址曾有遭遇豪雨及颱風產生被破壞之行為與歷史，因此可作為分析地下水對於擋土系統之影響案例，分析所使用之參數如下：

### 1. 牆體斷面

PYWALL 軟體中牆體斷面需定義單位牆體(Wall unit)，牆體單位中需輸入牆體之撓曲勁度(Flexural stiffness)，此係數由楊氏模數(E)與面積二次矩(I)所組成，軟體中面積二次矩由水平斷面之寬度(Width)與深度(Depth)所計算得來，深度為水平截面之長度。

分析參考台 20 線 52k+036 護坡排水改善工程竣工圖(公路局五工處，2013)，牆體斷面以半重力式擋土牆進行合理假設，而因軟體限制並沒有辦法完全模擬出半重力式擋土牆之形式。因此初期將牆體切割為(1)上部梯形結構、(2)下部矩形擋土基座與(3)底部貫入樁(如圖 6.3 所示)。將擋土系統之材料假設為鋼筋混凝土且三部分結構為同一材料，將其楊氏模數參數設定稍高於一般混凝土材料，本模擬場址之牆體斷面表如表 6-1 所示。

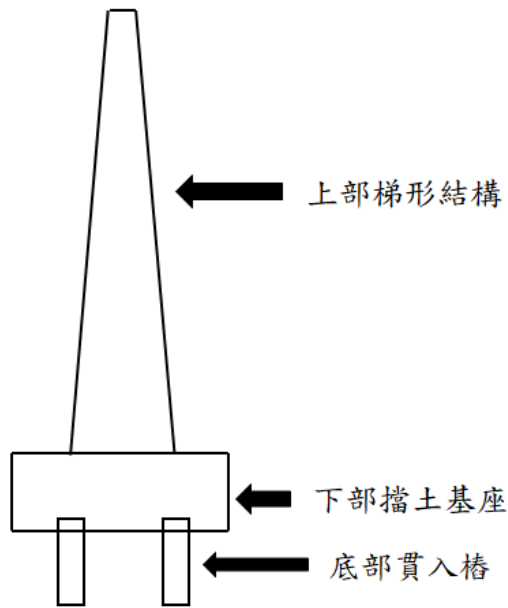


圖 6.3 模擬擋土牆體示意圖

表 6-1 牆體斷面表

牆體說明	高度(m)	寬度(m)	深度(m)	楊氏模數(GPa)
上部梯形結構頂部	0~10	1	0.5	35
上部梯形結構底部		1	1.5	35
下部擋土基座	10~11.5	1	4.2	35
底部貫入樁	11.5~14	1	1	35

## 2. 牆體性質

牆體性質(Wall properties)主要需設定擋土牆體總高度及牆體分段(Wall section)，擋土牆體總高度包含擋土牆高及貫入深度，本計畫所定義之擋土牆體總高度為 14 公尺，牆體分段則以上述自行假設之三部分進行分段。

### 3. 牆體配置

基本的牆體配置(Wall configuration)包含(1)擋土牆高、(2)背填土側地下水位、(3)開挖側地下水位、(4)土壤阻抗寬度與(5)主動土壓寬度，以下分別說明：

- (1) 擋土牆高：擋土牆高即為擋土系統中背填土側頂端至開挖側頂端之高度。本案例擋土牆高定義為 7.3 公尺。
- (2) 背填土側地下水位：背填土側之地下水距離頂端之深度，地下水之上升將可能引致擋土設施之損毀。
- (3) 開挖側地下水位：開挖側之距離開挖面的地下水深度。
- (4) 土壤阻抗寬度：土壤阻抗寬度用以計算結構體於開挖面(線)以下之土壤阻抗，定義為每一單位牆體的寬度。例如，擋土牆體為非連續擋土牆時，假設單樁與單樁間距為 1 公尺，單樁之直徑為 0.5 公尺，則土壤阻抗寬度為 0.5 公尺，而本研究模擬對象為連續擋土牆，因此土壤阻抗寬度與牆體斷面所假設之單位寬度相同。
- (5) 主動土壓寬度：主動土壓寬度用以計算結構體於開挖面(線)以上之主動土壓力，定義為單位牆體之間隔距離。如上述範例中主動土壓寬度則為 1 公尺，本研究模擬對象為連續擋土牆，因此主動土壓寬度與牆體斷面所假設之單位寬度相同。

### 4. 土壤性質

本案例崩積層分布範圍約至道路下方 30 公尺處為止，因此本研究模擬之擋土設施皆假設全部位於崩積層內，假設為鬆軟無凝聚性之砂土，土壤參數表如表 6-2 所示。軟體內定義之單位重為飽和單位重，k 值為土壤模數(Soil modulus)，PYWALL 中對於不同緊密程度之砂土有不同建議之 k 值。

表 6-2 土壤參數表

土層	深度(m)	單位重(kN/m <sup>2</sup> )	摩擦角(°)	k 值
砂土	0~15	19.5	33	12000

## 5. 地錨參數

本場址模擬之地錨參數如表 6-3 所示，表中之截面積與彈性模數為參考一般地錨中鋼條之截面積與彈性模數進行合理假設；自由端長度、傾角及水平間隔則參考 2013 年台 20 線 52k+036 護坡排水改善工程竣工圖。

表 6-3 地錨參數表

編號	深度 (m)	截面積 (mm <sup>2</sup> )	彈性模數 (GPa)	自由端長度 (m)	傾角 (角度)	水平間隔 (m)
1	0.81	625	200	50	30	3
2	2.84	625	200	50	30	3
3	4.87	625	200	50	30	3
4	6.89	625	200	50	30	3

## 6.2.3 案例分析成果

模擬中探討地下水位上升對於擋土設施位移量之影響，因此假設開挖側之地下水位上升至開挖面，即為深度 7.3 公尺處，背填土側之地下水位由深度 7 公尺，以 0.5 公尺之幅度逐漸上升，直到背填土側之地下水位上升至頂端，即為深度 0 公尺處，成果圖如圖 6.4~6.6 所示，圖中可得到隨著地下水位上升，牆體位移量逐漸增大，當背填土側之地下水位上升至頂端時，牆頂之位移量達到 14 公分左右。

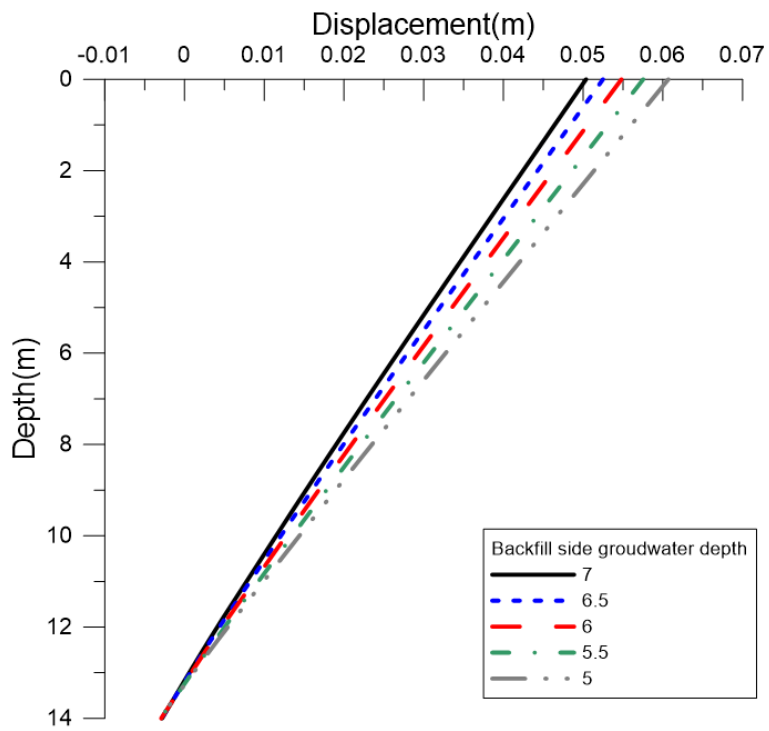


圖 6.4 水位深度 7-5 公尺位移圖

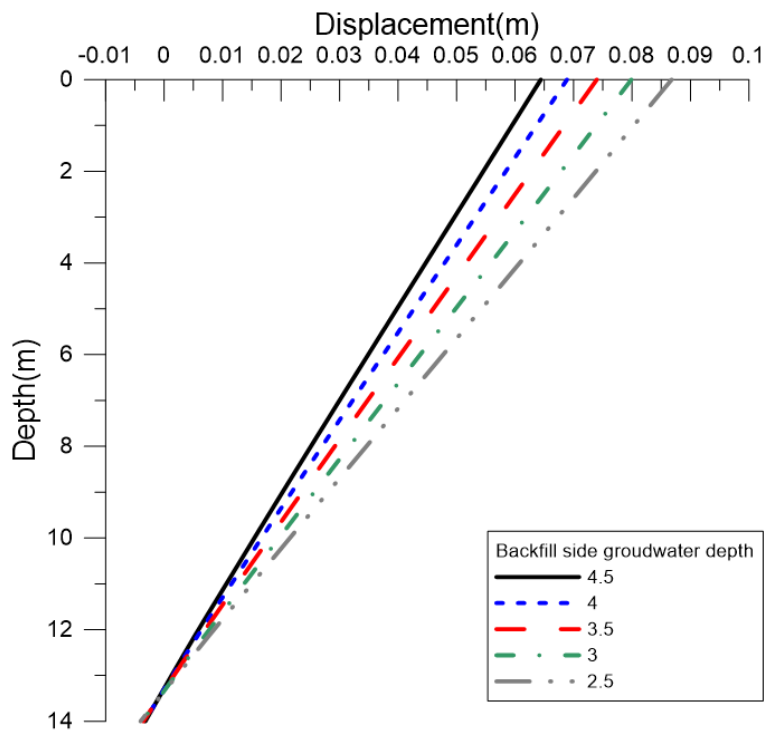


圖 6.5 水位深度 4.5-2.5 公尺位移圖

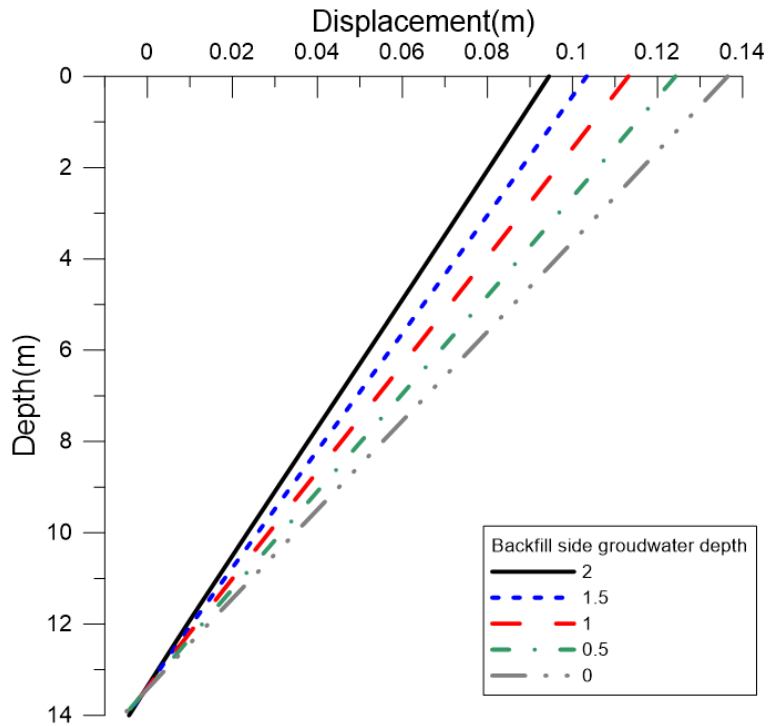


圖 6.6 水位深度 2-0 公尺位移圖

由於監測場址之擋土設施監測模組架設位置位於擋土牆頂部，因此取各地下水位深度之牆頂位移，繪製成地下水位與牆頂位移關係圖，如圖 6.7 所示。

參考文獻中不同土壤下主動破壞時之 Y/H 比值，將其轉換為旋轉角度，以利進行比較與訂定預警值，如表 6-4 所示。

表 6-4 不同土壤下主動破壞旋轉角

Soil type and condition	Y/H(NAVFAC, 1982&CGS, 2007)	Rotation(Degree)
	Active	Active
Dense cohesionless	0.0005-0.001	0.028-0.057
Loose cohesionless	0.002-0.004	0.115-0.229
Stiff cohesive	0.01	0.573
Soft cohesive	0.02	1.146

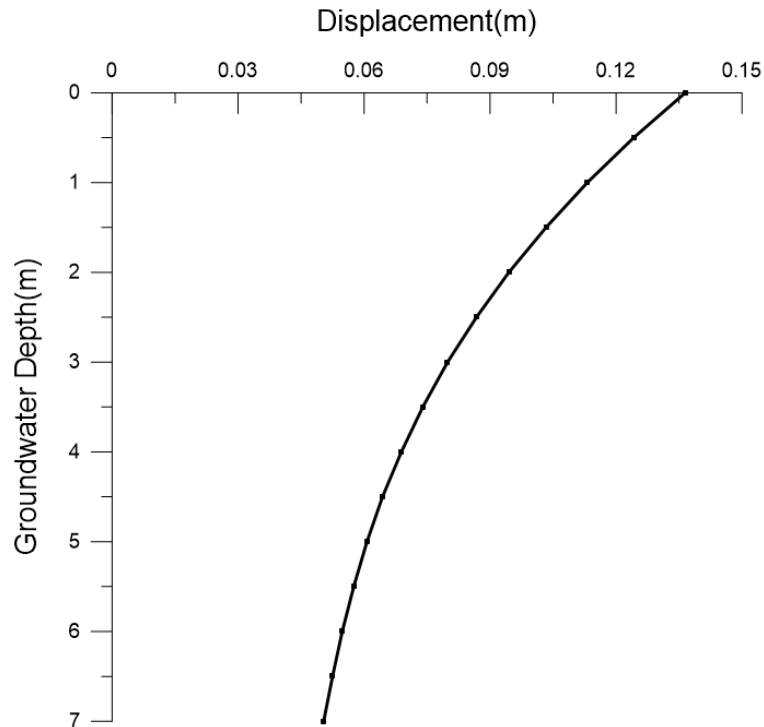


圖 6.7 地下水位深度與牆頂位移量

取模擬之擋土牆頂部之水平位移量與擋土牆向下 1 公尺處之水平位移量，以兩者位移差值計算  $Y/H$  後轉換成旋轉角，計算出不同地下水位深度時之擋土牆頂部旋轉角。

NAVFAC DM-7(1982)與 CGS(2007)中擋土設施皆視為一剛性旋轉體且適用於重力式擋土牆，而於本研究中所考慮的為柔性擋土牆，因此受背填土側擠壓後所產生之水平位移會大於兩者所假設。參考文獻後，於本研究中訂定此場址之預警之旋轉角度為  $0.3^{\circ} \sim 0.35^{\circ}$ ，可由圖 6.8 得到背填土側之地下水位上升至距離土側頂端 2.9 公尺到 4 公尺時，進入預警之範圍。



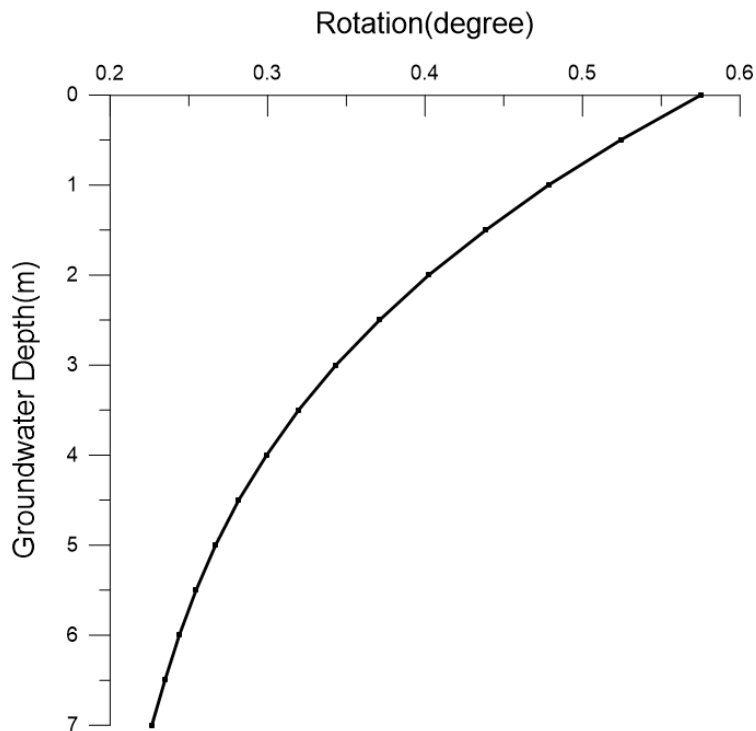


圖 6.8 地下水位深度與旋轉角

將本計畫所定義之預警地下水位與現地監測之地下水位進行比較，取台 20 線監測場址中上邊坡 ID5 測站之地下水位監測圖，此測站所監測之地下水位為崩積層內之自由含水層，在此假設上邊坡至道路面屬於同一種土層，並考慮無限邊坡之效應，因此假設 ID5 測站監測之地下水位深度與路面上之地下水位深度相同。

2018 年 6 月至 8 月曾有較大且延時較長之降雨發生，根據中央氣象局於高雄市甲仙區所設置之觀測站得知 6 月 19 日之日累積降雨 (mm/24hr) 達 177.5mm，趨近於豪雨標準(200mm/24hr)，8 月 23 日之日累積降雨達 445.5mm，已達大豪雨標準(350mm/24hr)，且於此期間亦有許多降雨事件發生，這些大雨及豪雨可能造成落石、坍方、山洪暴發等災害發生。ID5 測站之孔頂高程為 292 公尺，於此期間此測站之地下水位高程已達 287.5 至 288.5 公尺，地下水位深度約 3.5 至 4.5 公尺，本場址模擬所訂定之地下水位深度預警值為距離頂端 2.9 至 4 公尺，可得模擬假設預警值與現地監測之數據相符合(圖 6.9)。

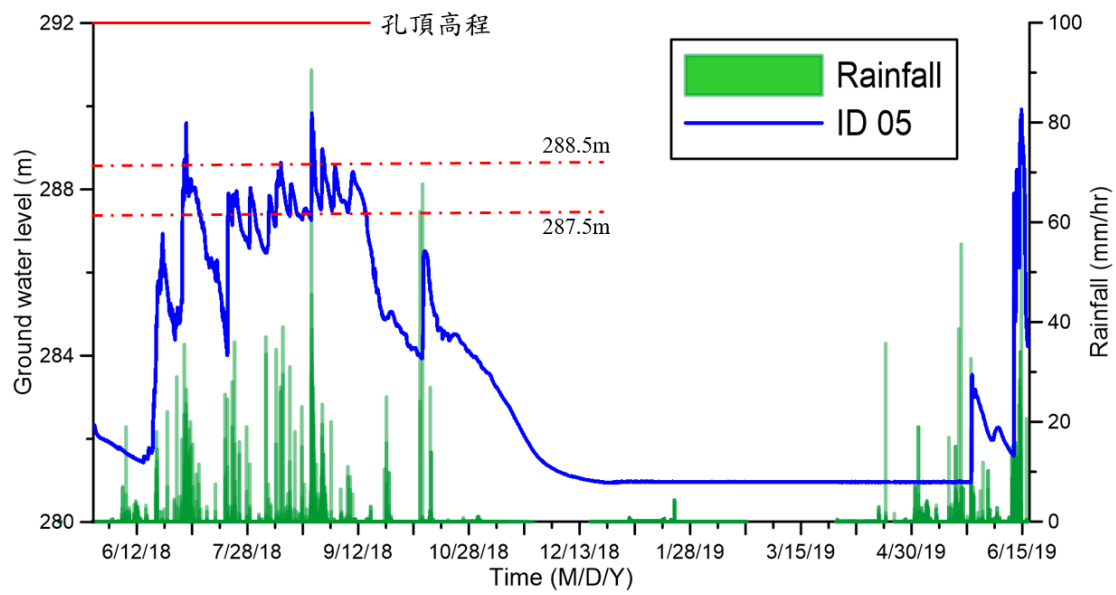


圖 6.9 ID5 孔頂高程與地下水位示意圖

整合現有成果，規劃將定義兩種預警方式，一為擋土設施監測之旋轉角，定義預警旋轉角為  $0.3^{\circ} \sim 0.35^{\circ}$ ；另一為土層地下水位監測之地下水位深度，定義預警地下水位深度為 2.9 至 4 公尺。相關預警將於近期該路段整建工程完工後裝設牆頂雙向傾斜進行監測，以現有元件解析度，應可符合需求。

## 第七章 雲端整合即時監測平台

本年度計畫將前期成果進行整合，建立具顯示、儲存及預警功能之雲端監測顯示平台，以下為此平台初步架構介紹：

### 7.1 平台架構

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

平台架構示意圖如圖 7.1 所示，此平台整合了 IoT 資訊平台資訊、衛星影像、與該場址之預警值，提供使用者一個完整的現地監測與預警值資訊，並將網站架設於個人或虛擬伺服器主機中。具體執行步驟如下：

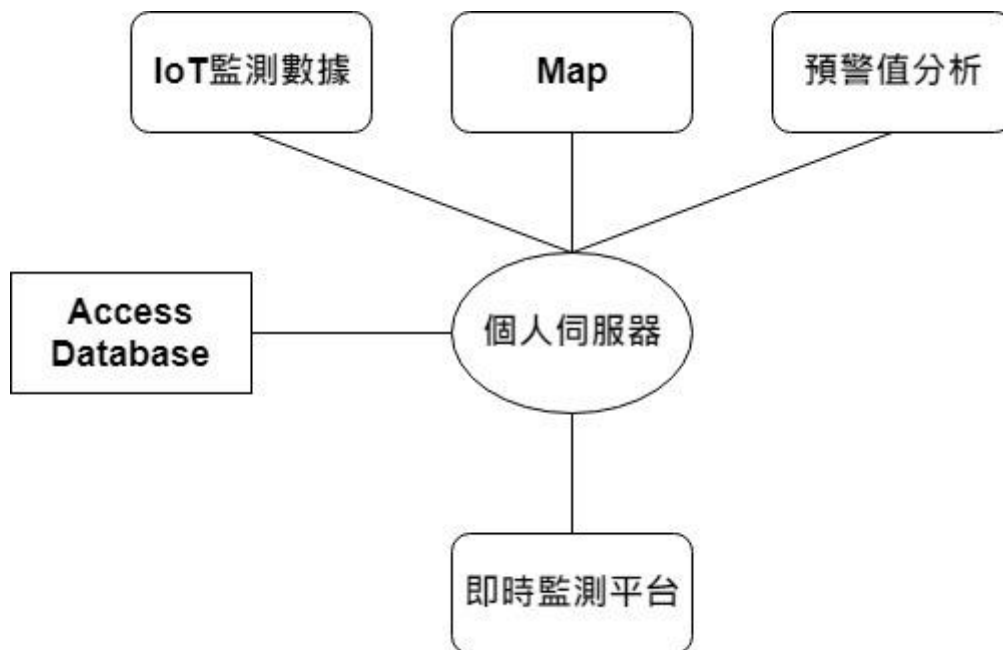


圖 7.1 平台架構示意圖

- (1)設定場址之基本資訊：於個人伺服器中設定場址感測器編號、種類、讀取 API、經緯度、預警值等後續程式使用的基本參數。
- (2)於個人伺服器中建立資料庫：在個人伺服器中建立一數據資料庫可以達到備份資料、快速提取數據的目的。本系統使用 Microsoft Access 為數據庫程式，Access 程式可以快速建立數據庫框架，並通過 ODBC(Open Database Connectivity)達到資料庫存取。
- (3)即時更新伺服器資料庫：即時監測平台需即時更新資料庫數據。本研究使用 Python 撰寫一網路爬蟲，抓取 IoT 平台監測數據，即時同步個人伺服器資料庫。
- (4)提取資料庫數據，展示於監測平台：利用數據庫的監測數據、與場址之預警值進行分析，並將分析結果視覺化、表格化展示於平台。

## 7.2 平台功能簡介

### 7.2.1 身分驗證系統

進入監測平台首頁為身分驗證系統，如圖 7.2 所示，使用者欲使用此平台必須先註冊帳戶，並待管理者開通後即可使用，系統管理者可依需求定義帳戶為訪客、計畫成員、系統管理者三種權限，不同權限帳戶登入後可使用功能有些許不同。

### 7.2.2 即時監測平台頁面

完成身分驗證功能後，將進入即時監測平台頁面，如圖 7.3 所示，依不同權限帳戶登入可使用功能有些許不同。訪客權限僅可使用「即時資訊」欄位功能，計畫成員可額外使用「資料下載」欄位功能，系統管理者權限則可使用包含「使用者權限」欄位等全部功能，以下將介紹各欄位功能。



圖 7.2 平台身分驗證系統首頁



圖 7.3 即時監測平台頁面

「即時資訊」頁面由上至下，包含：

- (1) 監測儀器分佈：左側欄為場址衛星影像圖，監測儀器分佈、配置、編號標註其上。右側欄為外掛 Mapbox 可縮放式地圖，縮小後可了解場址地理位置。
- (2) 監測儀器狀態：如圖 7.4 所示，此表格顯示各模組狀態，顯示資訊有：編號、最後上傳時間、電池狀態、運轉狀態、感測器配置、與管理值判定。

監測儀器狀態							
模組編號	時間	電池狀態(%)	運轉狀態	感測器	水位管理值判定	傾角1管理值判定	傾角2管理值判定
ID0	2019-10-02 14:41:07	-286	正常	雨量計	-	-	-
ID1	2019-10-02 14:41:49	46	正常	分層含水量&地下水水位	正常	正常	-
ID2	2019-10-02 14:42:30	51	正常	分層含水量&地下水水位	正常	正常	-
ID3	2019-10-02 15:13:04	43	正常	分層含水量&地下水水位	正常	正常	-
ID4	2019-10-02 14:43:54	36	正常	分層含水量&地下水水位	正常	正常	-
ID5	2019-10-02 14:44:36	41	正常	分層含水量張力計	-	正常	-
ID6	2019-10-02 14:45:18	-343	正常	分層含水量	-	正常	-
ID7	2019-10-02 14:45:59	-2	正常	分層含水量	-	正常	-
ID8	2019-10-02 14:46:40	60	正常	分層含水量	-	正常	-
ID9	2019-10-02 14:47:21	43	正常	製罐計	-	正常	正常
ID10	2019-10-02 14:48:01	50	正常	製罐計	-	正常	正常
ID11	2019-10-02 14:48:42	47	正常	製罐計	-	正常	正常

圖 7.4 監測儀器狀態頁面

- (3) 雨量資訊：如圖 7.5 所示，左側欄為場址監測雨量圖，最多可顯示過去 72 小時資訊。右側欄為過去 24 小時雨量資訊的詳細資料，0-10 為該小時 0 分至 10 分雨量，10-20 為該小時 10 分至 20 分雨量，以此類推。

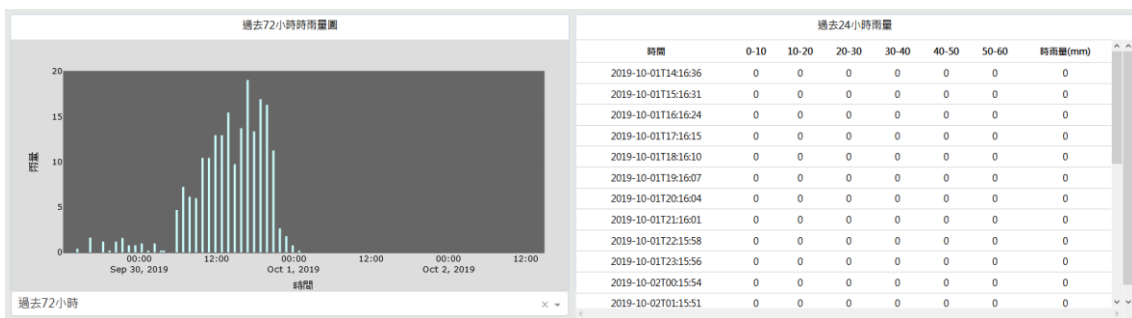


圖 7.5 雨量資訊頁面

- (4) 地下水位資訊：如圖 7.6 所示，左側圖表顯示場址量測點之地下水位變化，最多可顯示 100 筆資訊。右側表格提供監測點之水位高程、深度與警戒值資訊。

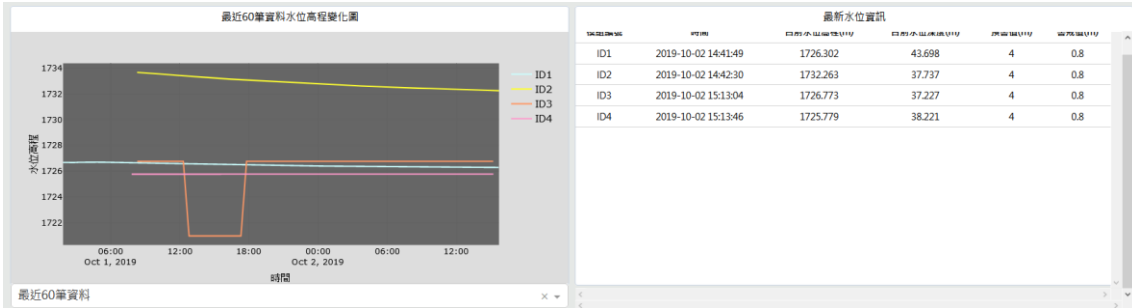


圖 7.6 地下水位資訊頁面

(5)傾角資訊：如圖 7.7 所示，上方表格顯示所有監測傾角資訊，包含量測值、累積角變量、與警戒值資訊。下方兩欄位分別為：邊坡監測傾角變化圖與擋土牆監測傾角變化圖，選擇欲顯示儀器編號後將顯示傾角隨時間變化圖，最多可顯示 1000 筆資訊。



圖 7.7 傾角資訊頁面

「資料下載」頁面可下載監測之原始資料，如圖 7.8 所示，選擇欲下載之日期區間與 Channel ID 後，點選下載，原始檔案將以 csv 格式儲存於個人電腦，監測資訊排序與 ThingSpeak 相同。



圖 7.8 資料下載頁面

「使用者管理」頁面可管理監測平台使用者之權限，使用方法如圖 7.9 所示，選擇欲改變權限之帳戶、更改後權限、開通狀態、是否通知，確定後使用者權限即更改。

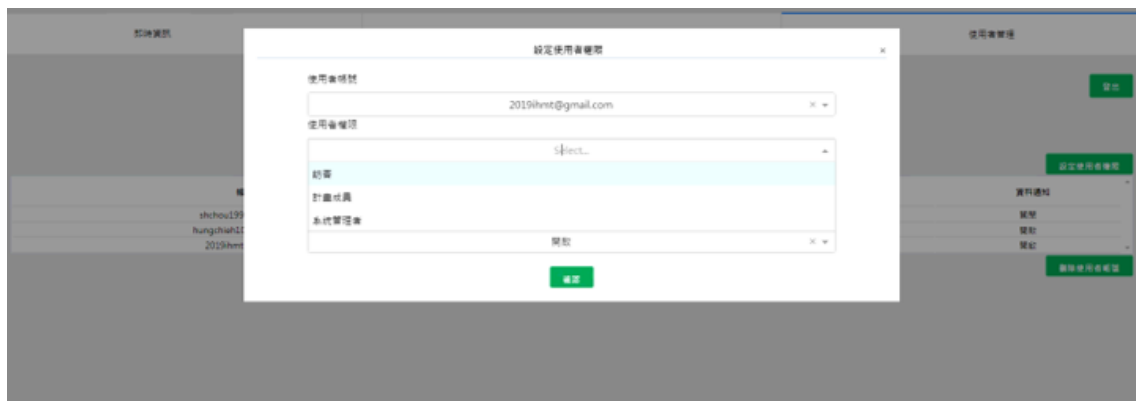


圖 7.9 使用者管理頁面

### 7.3 監測平台警戒值管理

因應不同場址、不同理論，將分析出不同的警戒值。本平台警戒值設定如圖 7.10 所示，於資料夾中 Channel\_list 檔案更改初始值、警戒值



後儲存即可更改警戒值設定。

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table of sensor data. The columns are labeled C through Q. The table contains 14 rows of data. The columns for warning values (警戒值) are highlighted with a red box. The values in these columns are 0.3, 0.5, 4, and 0.8.

Channel ID	Read API Keys	資料點數	Channel Name	預警值(傾角)	警戒值(傾角)	預警值(水位)	警戒值(水位)	N座標	E座標	電池電壓(標式)	電池電壓(標小)	傾	球角1折點值	球角2折點值
677084	78E70711J1CSJR2	100	ID657084	0.3	0.5	4	0.8	2440336111	121.3694722	12.6	9.6	50	0	0
650945	0F4IG60LJPR8A2V	100	ID650945	0.3	0.5	4	0.8	2440338889	121.3695	12.6	9.6	70	7.016	0
650947	ZWIT8SD4MOX71GEB	100	ID650947	0.3	0.5	4	0.8	2440347222	121.3695278	12.6	9.6	70	-1.957	0
650949	1R2QQP14X9R3R3OV	100	ID650949	0.3	0.5	4	0.8	2440347222	121.3693611	12.6	9.6	64	-2.1	0
651981	8YUKED26ASV1UKN	100	ID651981	0.3	0.5	4	0.8	2440341667	121.3693611	12.6	9.6	64	0.01	0
651982	8VJOKL47116H77IU	100	ID651982	0.3	0.5	4	0.8	2440355556	121.3695556	12.6	9.6	50	2.71	0
651983	U1E1LCH9JWKT08T	100	ID651983	0.3	0.5	4	0.8	2440352778	121.3695	12.6	9.6	50	-13.557	0
651984	2PT28F3HRG8XAP3H	100	ID651984	0.3	0.5	4	0.8	2440333333	121.3695556	12.6	9.6	50	0	0
651985	4MYZ29XG85PH5XH1	100	ID651985	0.3	0.5	4	0.8	2440338889	121.3693056	12.6	9.6	50	-2.18	0
652025	Z7DHGCS8BS0FR1V	100	ID652025	0.3	0.5	4	0.8	2440288889	121.3695	12.6	9.6	50	-1.71	-3.87
652026	9K3R20SDF0Q2U9K	100	ID652026	0.3	0.5	4	0.8	2440286111	121.3694722	12.6	9.6	50	5.648	4.456
652027	LQQPILZ9H8689YC	100	ID652027	0.3	0.5	4	0.8	2440308333	121.3695	12.6	9.6	50	-3.8	3.1
652030	ZMOJZMKASPAT3463	100	ID652030	0.3	0.5	4	0.8	2440327778	121.36925	12.6	9.6	50	8.08	-4.3

圖 7.10 平台警戒值設定

本場址目前所用之警戒值為坡面表層預警值為 2 度，擋土牆體預警值為 0.3 度，相關數值可滾動修正並於系統 Channel\_list 檔案修改。



## 第八章 結論與建議

本年度計畫要項為監測模組精進及精進適用於土壤邊坡飽和土層滑動之低成本易安裝之無線監測模組及搭配之水力力學耦合解析法分析技術，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。工作項目包括：現有淺層滑動監測場址維護與模組精進、淺層滑動耦合分析預警系統更新、深層滑動場址維護與擴充、深層滑動場址擋土系統極限平衡分析反算與驗證、水位變化與降雨特徵關聯分析，並新設阿里山五彎仔路段監測場址。

### 8.1 結論

本年計畫執行結論摘要如下：

1. 現有淺層滑動監測場址維護與模組精進：針對現有兩處淺層滑動監測場址，完成相關量測元件更新或修復，並持續進行監測與資料彙整。
2. 淺層滑動耦合分析預警系統更新：原甲仙攔河堰道路邊坡已有相關預警值，阿里山五彎仔場址因地形變化頻繁，尚未進行相同之分析，但基本架構應可套用。
3. 深層滑動場址維護與擴充：現有深層滑動場址因整治工程之故，下邊坡監測暫時無法持續進行，所裝設於擋土牆頂雙向傾度儀亦暫時撤除，現有運作系統持續監測，其他模組將於工程完成後重新安裝佈設。
4. 深層滑動場址極限平衡分析反算與驗證：現有深層滑動場址極限平衡分析已於 2018 年計畫完成，考量現況整治後有所改變，因此需於整治完成後重新進行深層滑動水力力學耦合分析。

5. 水位變化與降雨特徵關聯分析：本年度已將新增降雨事件加入分析，據以更新資料並同時進行驗證。
6. 擋土系統水力力學耦合分析：完成擋土系統極限平衡分析，限於現地整治作業，本年度可提供 PYWALL 驗證資料有限。
7. 深層滑動擋土系統預警架構建立：本年度將整合場址水位變化與降雨特徵關聯分析、更新之深層滑動水力力學耦合分析及擋土系統水力力學耦合分析，提出擋土牆體反應與地下水位為指標之預警值。
8. 雲端顯示平台建構：本年度建構個別場址之雲端顯示與管理平台，後續可擴充預警值更新及通知之功能，現有成果顯示系統符合需求。

## 8.2 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，增加其應用案例。
3. 限於場址整治作業及竣工圖資料有限，本年度擋土系統監測成果有限，但已建立分析流程，後續建議可延長監測期程。
4. 台 20 線 52K 擋土牆已重新辦理復建剛完成結構體特性，限於時程未能於本年度進行相關分析與監測計畫更新，後續建議若有延續計畫，可更新此場址。

### 8.3 預期效益與應用情形

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邊坡降雨滑動監測及預警技術，提高預警模式之準確度，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。
3. 開發可快速佈設且具依時特性之公路土壤邊坡地表監測預警技術，研究成果提供交通部、公路總局與臺灣鐵路管理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. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、洪芯琦、邱心彥，2019，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。
5. 曾致仁，2017，「降雨引致邊坡地下水位變動及作為邊坡崩壞預警指標之研究」，國立成功大學土木系，碩士論文。
6. 青山顧問有限公司，2018，「台 20 線 52K+150 路基保護工程委託地滑調查、測量及設計服務工作監測總成果報告(修正一版)」，交通部公路總局第五區養護工程處。
7. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, pp. 362–372.
8. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil mechanics for unsaturated soils." New York, Wiley.
9. 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.
10. 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.

11. 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.
12. 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
13. 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
14. 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.
15. 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 各期審查意見與回覆



## 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：公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升

計畫編號：MOTC-IOT-108-H1DC001

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
<b>一、陳柏源委員</b>		
1. 感謝港研中心給予機會參與本案討論，因過去討論過程無參與共同討論，恐有誤解研究內容部分，或過去已有討論過之意見，敬請指教。	感謝委員指教。	依處理情形辦理
2. 依據公路總局目前預警機制，係以經驗回歸訂定累積雨量(10分鐘、1小時、24小時)之預警、警戒、及行動雨量特徵值，本案以監測設備搭配無線感測網路模組，依數值分析發展「依時邊坡預警系統」，律定預警地下水位深度，建議兩者可補充勾稽對照之比較分析，反算公路總局封路機制之達雨量特徵值時之地下水位深度及路段之代表性邊坡，並比對數值分析建議警戒地下水位，除可作為雨量以外之封路預警特徵值，甚至進一步可修正預警值，提升封路預警準確性，降低預警封路造成之社會成本。	本研究主要為場址客製化預警，以土體中水分變化與流動為預警指標，與公路總局以雨量為預警機制其適用範圍與原理不同，但可互為互補，後續若有適宜場址可進行比對。	依處理情形辦理
3. 為本計畫推廣應用，成本估算亦為機關應用決策因素，建議期末階段可針對本監測系統說明建置經費情形，甚至與傳統邊坡監測設備進行比較，有助於說明本監測系統之優勢。	因所用之硬體為自主發展，現有系統就功能與單價已較傳統監測顯著改善，尤其現場安裝成本所節省經費與時間，有顯著改善，相關比較已於前期報告說明，期末將摘要補充。	依處理情形辦理

4. 依據第七章說明，本案原甲仙攔河堰路段已有相關預警值，並將應用於阿里山五彎仔場址進行相同分析，建議後續研究階段宜補充兩者場域之比較，說明可進行相同分析之原因，並可適時檢討甲仙路段警戒值是否有需持續驗證及修正之需要。	謹遵辦理，期末報告補充。	依處理情形辦理
5. 本案目前規劃邊坡監測點數量較少且似預警封路情形較不常見，建議未來可視邊坡監測架構健全時，逐步增加試驗場域邊坡，並可考慮較高封路頻率路段，例如台9蘇花、台9南迴、台8等路線，作為與實務預警機制比較之案例。	因計畫尚處研發階段，現階段主要為系統研發測試，且適宜試驗場址不易取得，將參考委員意見建議業管單位後續增加案例。	依處理情形辦理
6. 建議後續期末階段可有教育訓練或成果展示研討會模式，除可推廣研究成果外，並可蒐集第一線同仁於實務管養意見，可做為未來精進之方向參考。	感謝委員建議，相關成果展示均持續進行中，此建議將於期末建議事項加入，並提供業管單位後續計畫項目擬定參考。	依處理情形辦理
<b>二、高邦基委員</b>		
1. 現有監測模組增加其適應環境及減少耗電，作法值得推廣，惟精進效果如何，請再持續觀察及測試。	節電效果可達20%以上，長期成效依委員建議持續測試並於期末報告補充。	依處理情形辦理
2. 擋土牆結構型式不同或基礎型式不同，對於本研究監測及預警模式之建立是否產生變異性，請再補充說明。	不同擋土系統型式與現地土層參數均會影響其預警值擬定，本計畫為客製化場址預警系統，個別場址需分別可量，相關說明將於期末報告補充。	依處理情形辦理
3. 前期監測系統建置迄今，其觀測或監測數據是否已驗證預測模式之正確性高低，模式內各項變數或參數之靈敏度如何，是否須再檢討？	相關成果已於前期報告驗證與檢討，崩積層地下水位預測已有初步成果，但因所選場址尚無破壞案例，此為主要須驗證之項目，相關成果持續更新檢討中。	依處理情形辦理
4. 期中報告文字部份內容誤繕，請補	謹遵辦理，期末報告修正。	依處理情形辦理

正。		理
<b>三、蘇苗彬委員</b>		
1. 本期計畫新增一處現場台 20 線 52K，應可儘量彙整過去相關調查資料，尤其地質資料與過去修復工程之內容。莫拉克後本區災害很多。	此場址重要且與補計畫相關之調查成果已彙整於前期及期中報告中，不足處將於期末補充。	依處理情形辦理
2. 報告文稿應注意訂正，如 P.2-12 仍有“錯誤”。P.2-13 的無限邊坡通常適用淺層破壞，深層破壞仍以後面的數值分析較適用。	謹遵辦理，期末報告修正。	依處理情形辦理
3. P.4-3 等採用 Thingspeak 外國平台，是否選用公路總局的防災監測平台將來較好推廣。	因與不同單位平台介接有難處，因此本年度已上傳中華電信 IoT 智慧聯網平台，並著手計畫專用網頁，以利推廣。	依處理情形辦理
4. P.4-9 甲仙測站傾斜角變化頗大應考慮增加其他的方法來交叉比對實際變化。P.4-16 變化亦大。	此變化為現地淺層滑動及儀器更換之總合，為避免混淆，後續將以雨季前為基準，以相對變化呈現。	依處理情形辦理
5. P.5-4 說明可增加，2018 現況是否有誤？	謹遵辦理，期末報告修正補充。	依處理情形辦理
6. P.5-6 的降雨紀錄是否完整若儀器有遺漏資料可考慮增用鄰近的雨量站。	現地降雨觀測紀錄並無間斷，圖 5.5 因儀器已損壞及施工，資料不再更新。	依處理情形辦理
7. P.5-9 等迴歸關係不好，是否選擇其他關係或參數。	此為岩層地下水位與雨量無可靠關聯性之故，期末報告補充論述說明。	依處理情形辦理
<b>四、公路總局第五區養護工程處</b>		
1. P1-8 現有淺層崩塌場址持續觀測與精進是否漏寫台 18 線五彎仔地區。	因台 18 線五彎仔為新增，相關說明將於期末報告補充說明	依處理情形辦理
2. 未來第一線同仁如何應用這套研究？	本年度將建置專屬網頁，簡易提供觀測資料及預警燈號，作為防災作為參考。	依處理情形辦理

<b>五、胡啟文委員(書面)</b>		
1. P4-3, 甲仙場址, 圖 4.3 傾斜角監測資料, 似受外在因素干擾而呈現上下分佈之折線趨勢, 起伏小可視為無變動, 起伏大的線段該如何判釋?	此變化為現地淺層滑動及儀器更換之總合, 為避免混淆, 後續將以雨季前為基準, 以相對變化呈現。	依處理情形辦理
2. P4-14, 五彎仔含水量量測結果, 同地區之土層分佈應差異不大, 但 3 處含水量量測結果卻呈現不同之現象, 如 ID02 在降雨事件後, 25M 及 60M 之感測器皆對降雨讀數有上升反應, ID02 在降雨事件後, 60M 處讀數不升反降, ID04 則在降雨事件前 60M 處讀數就已上升, 而 20M 處之讀數則沒反應, 是否存在儀器對時之問題或是其他因素影響, 再請說明。	水份觀測受現地土壤與地水位影響, 相關差異於前期報告已有說明, 檢核現地孔隙比數值, 現有系統讀數仍屬正常。	依處理情形辦理
3. 考量土壤與結構互制行為, 以 P-Y curve 客制化求出背填土水位及傾角警戒值, 但若能進一步建立地下水升降與降雨特徵之關係, 在實際應用面上則可利用氣象局降雨預報資料, 提前部署應變。	感謝委員提醒, 此部分須足夠高品質監測資料, 目前仍持續更新驗證正中, 將依此目標精進, 期末報告補充論述說明。	依處理情形辦理
<b>六、林雅雯 委員</b>		
1. 第 4-4 頁甲仙站體積含水量監測成果用途為何? 後續會有分析嗎?	此為淺層滑動預警指標, 相關分析已於前期完成, 將於期末摘要補充。	依處理情形辦理
2. 第 4-9 頁由 4.8 甲仙站傾斜儀的數據看來, 每個 Node 皆有 1 度至 2 度的傾斜變化, 且建議以顏色標示及正負號代表方向於圖 4.1 顯示。	此變化為現地淺層滑動及儀器更換之總合, 為避免混淆, 後續將以雨季前為基準, 以相對變化呈現並加註方向。	依處理情形辦理
3. 第 5-10 及 5-11 頁台 20 線 52K 站將體積含水量與地下水位上升速率做回歸, 只有 11 筆資料, 建議納入所有 ID01~ID05 監測資料, 含水量採用 25cm 或 60cm 深度資料?	所用雨場資料須符合研究定義, 所列表為符合分析定義之事件並程序更新, 且不同水位計監測水層不同, 不宜混用。所欲建立之水位推估模	依處理情形辦理

是否直接量地下水水位即可？	式為替代方案，同意若現地可量測水位為最佳方案。	
4. 第 6-7 頁擋土牆體位移分析，建議補充竣工圖及分析模型，底部貫入樁如何模擬，有無考量擋土牆本身的排水系統及滲流。	相關竣工圖將於期末補充，底部貫入樁將影響整體水平位移量，相關影響將於期末補充。	依處理情形辦理
5. 分層水份監測為何一定時間就要更換？一定時間所指為何？	因此部分非設計為埋入使用，且易受感漸彎曲損壞，因此需於變形後或約一年更換。	依處理情形辦理
<b>七、曾文傑副研究員</b>		
1. 計畫執行至今已順利完成現有淺層滑動耦合分析預警系統更新、深層滑動場址維護與擴充、系統極限平衡分析反算與驗證、水位變化與降雨特徵關聯分析，並新設阿里山五彎仔路段監測場址，整體工作符合預定進度，感謝張老師團隊的努力付出。	感謝肯定。	依處理情形辦理
2. 現有兩處淺層滑動監測場址，應檢視相關量測元件，是否正常運作，若有故障將於何時進行修復，請彙整相關資料，於 8 月工作會議時說明。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
3. 報告書中 P7-1，現有深層滑動場址因整治工程之故，擋土牆頂雙向傾度儀監測暫時無法持續進行，預計 8 月初完成，屆時工程若無法如期完工，是否會影響分析與驗證，是否有替代方案？	若需相關替代方案將於 8 月工作會議討論。	依處理情形辦理
4. 本計畫每月舉辦之工作會議，期末審查時請列於報告書附件。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
5. 請合作團隊，依今天審查意見研提處理情形，送中心審查後作為修正報告依據，並依照本所出版品規定	謹遵辦理。	依處理情形辦理

格式修改。		
-------	--	--



## 交通部運輸研究所合作研究計畫 期末報告初稿審查意見處理情形表

計畫名稱：公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升

計畫編號：MOTC-IOT-108-H1DC001

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
<b>一、蘇苗彬委員</b>		
1. 本期末報告在文稿上仍應再加強，注意不要有錯別字，如 P.2-18 仍有錯字。	P.2.-18 “percolation” 已修正，其他章節已加強校正與潤飾。	依處理情形辦理
2. 相關體積含水量量測結果應加以說明其代表意義，如 P.4-8 顯示與降雨變化的關係。	Node3 數據說明詳見 P4-4 文字說明。	依處理情形辦理
3. P.4-16 傾斜量測結果變異相當大，應注意。	補充說明詳 P.4-11，ID04 因人為破壞，觀測期間鬆動。	依處理情形辦理
4. 台 20 線 52K 應將現地所有資料彙整，以利後續應用。	現地資料為公總五區處及成大李德河教授團隊報告彙整，相關詳細資料詳見 107 年報告。	依處理情形辦理
5. P.5-9 關係圖中變異太大，相關性不明確。	補充說明於 P5-8，”現有資料顯示，岩層累積雨量與水位上升高度關聯性不明確，兩數值間有其他因素影響，此為後續可精進之處。”，顯示水位上升非僅受降雨影響。	依處理情形辦理
6. P.6-5 表 6-1 寬度與深度代表為何？貫入樁形狀為何？。	修正為”軟體中面積二次矩由水平斷面之寬度(Width)與深度(Depth)所計算得來，深度為水平截面之長度。”，貫入樁形狀依竣工圖轉換為二次矩(I)。詳見 P.6-4	依處理情形辦理
<b>二、高邦基委員</b>		
1. 研究團隊十分盡責針對本研究處理方式及精進作為有好的作法，容待時間驗證精進措施實際效果後可予	謝謝委員鼓勵與建議。	依處理情形辦理

推廣至養路參考。		
2. 制定擋土牆變化預警架構採用之指標(牆背填土地下水位及傾角)其引據之各項參數與判定指標之相關性宜於報告內摘要說明。	已依委員建議於修正稿中摘要部分加入此建議。	依處理情形辦理
3. 摘要內容宜再將本案研究成果再予綜整納入。	修正稿中摘要部分已增補此建議。	依處理情形辦理
<b>三、游繁結委員</b>		
1. 各項監測資料之正確性如何？宜詳加檢視，其可信賴度亦宜明示。	相關感測器均有基本率定程序，詳見第四章，但水份計易受現地安裝影響，且接近飽和時誤差較大，但整體結果基本符合降雨變化。	依處理情形辦理
2. 擋土牆變化系統之開發，與原設計之間有無競合之處？	傳統擋土系統設計均以極限平衡分析進行，缺乏破壞前位移變化，本研究採破壞前位移為量測及預警，並無競合之處。	依處理情形辦理
<b>四、陳嘉盈委員</b>		
1. 計畫摘要請配合期末報告適度修正。	已依委員建議於修正稿中摘要部分加入此建議。	依處理情形辦理
2. 試驗場址深層滑動層面在何深度位置跟設置橫向排水系統有無影響二維水力力學耦合穩定分析請再補述。	現地水利與力學配置均會影響結果，限於原有竣工圖之故，目前為108年整治前初估考慮，後續有相關更新資料將進行分析更新。相關說明詳見 P.5-18。	依處理情形辦理
3. 試驗場址擋土牆有設置抗滑樁基礎，數值分析模型底部設定有無設定雙向固定邊界條件。	現有數值模型擋土系統底部以基樁元素連結，詳見 P. 5-18.	依處理情形辦理
4. P6-11 頁圖 6-8 訂定預警旋轉為 0.3~0.35 度，跟台 7 甲線場址一樣，是否兩處場址使用土壤參數相同。	分析結果相近除因台 7 甲線缺乏土層資料，因此以台 20 線土層資料進行微幅修改外，但主要變形是受牆體結構影響，兩場址牆體結構比例相近。	依處理情形辦理
5. 五工處台 20 線 52K 擋土牆已重新辦理復建剛完成結構體特性若計畫時程允許，宜辦理修正較符合實況。	限於計畫期程，本年度尚未更新整治後配置，已將此意見做為延續計畫建議。詳見 P. 8-2.	依處理情形辦理
6. 台 18 線目前監測大都遠離道路，	將此建議增補於後續建議。	依處理情形辦理

若後續計畫再執行，建議增設在道路上下邊坡之間，對公路防災較有正面效益。		理
<b>五、柯正龍委員</b>		
1. 請研究團隊針對本研究之研究成果，提供可應用於推廣或教育訓練應用之電子檔案或影片，俾作為後續成果推廣及相關研究參考應用。	執行團隊會依承辦單位需要，提供相關成果推廣所需型式與內容。	依處理情形辦理
2. 報告 p. 1-6，有關研究內容與項目(章節 1.3)述及參考科技部本計畫績效指標至少包括 3 項，請補充說明具體數量或作為。	已填寫於本計畫 GRB，相關成果填寫依業管單位要求另表提供。	依處理情形辦理
3. 報告 p. 8-2，針對本計畫研究團隊提出之 3 項建議，有關場址選定不易，且須滿足研究之要求與其他單位之配合，建議應考慮更換研究地點部分，後續仍請協助本所搜尋適當場址或供選址條件，俾供本所後續相關研究規劃工作項目參考。另因限於場址整治竣工圖說資料蒐集不易，致本年度擋土系統監測成果有限部分，因本計畫已建立分析流程，本所將依建議納入後續辦理長期監測考量。	研究團隊將協助提供後續研究候選場址資料以符合長期監測考量。	依處理情形辦理
4. 本計畫監測系統建置所需經費估算與成本效益，建議補充說明，俾以提供公路總局等相關應用單位參考。	因目前系統模組仍屬少量製作，且監測系統主要成本為現場維護與零件更換所需交通與人力成本，不易統一考量，後續以進一步簡化系統，可委請相關單位自行維護，僅估算初期建置成本，每一模組可控制在 5 萬以內。	依處理情形辦理
<b>六、林雅雯委員</b>		
1. 報告第 4-5 頁體積含水量量測結果數值約至 55%，依第 2-23 頁深度 1.5m 體積含水量 0.52 即達預警，請補充說明如何判斷體積含水量監	因所選場址土層厚度僅約 2.5m，且地下水位位於土層底部，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，詳見 P.2-21 內容。	依處理情形辦理

測結果是否達預警。		
2. 報告第 4-9 頁甲仙邊坡傾斜角量測方向有標示如圖 4.9，建議於平面圖上標示方向，另由圖 4.8 傾斜角一直有變動，但文字上寫無持續增加，請檢核。	甲仙邊坡傾斜角僅有單一方向，圖 4.8 數值雖有變動，但多為儀器更換未歸零之值，對單一降雨事件，無顯著增加，已增述於 P.4-9.	依處理情形辦理
3. 報告第 4-15 至 4-18 監測資料只到 108 年 6 月 24 日，建議補充 8 月 11 日之後監測數據。	五彎仔場址已損壞兩次，近期已新設於新位置，相關資料可於網站查詢，近日資料補充於修正稿第四章。	依處理情形辦理
4. FLAC 與體積含水量、傾角監測值之關係為何？建議補充說明。	FLAC 為提供預警值之學理基礎，相關說明詳見 107 及本年報告說明。	依處理情形辦理
<b>七、港研中心 曾文傑副研究員</b>		
1. 首先感謝張老師團隊的努力付出，順利完成所有的工作項目。	感謝肯定。	依處理情形辦理
2. 報告書中目錄最後，除了參考文獻，也應列出附錄一、附錄二、附錄三……等頁碼，附錄包括期中、期末審查意見研提處理情形表、每月舉辦之工作會議記錄、現地安裝及維修更換模組之相關照片及時間、期末簡報等資料。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
3. 報告書中 P3-15 之 3.4.2 節，第 3 行總水頭扣除位置水頭後可求得"壓力水頭"，請修改內容。	已依建議修正於 P. 3-15。	依處理情形辦理
4. 五彎仔於 8 月及 10 月重新安裝監測模組，報告書中 P4-15 至 4-18 含水量、傾斜監測資料只呈現到 8 月，請於報告書修正時增加至 11 月的監測資料。	謹遵辦理，將補充於第四章。	依處理情形辦理
5. 各站監測模組之監測資料，對於邊坡穩定之驗證，應有簡要說明。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
6. 報告書中文字內容有部份繕打錯誤，會後會提供報告修改內容給團隊參考，請檢視修正。	謹遵辦理。	依處理情形辦理
7. 請張老師團隊，依今天審查意見研	謹遵辦理。	依處理情形辦理

<p>提處理情形，送中心審查後作為研究報告書修正定稿依據，另請將研究成果發表於本所港灣報導。</p>		
--	--	--



## 附錄二 工作會議記錄



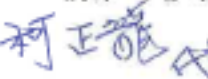



## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

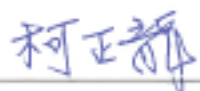


一、會議名稱：〔MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升〕108年3月份工作會議

二、時間：民國108年3月29日(星期五)下午14時30分

三、地點：本所港研中心5樓第一會議室

四、主席：朱主任金元  記錄：陳志芳 

五、出席單位及人員：

本所港研中心：

執行單位：(財團法人成大研究發展基金會)

列席單位：公路總局第五區養護工程處


## 六、討論議題：

- (一)上月份工作進度報告。
- (二)後續工作重點。
- (三)問題與討論。

## 七、主要結論：

- (一)目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- (二)本年度預計於公路總局第五區養護工程處阿里山工務段轄區的五彎仔滑動路段之適當位置，設置土層滑動無線監測場址，屆時惠請該工務段相關承辦人員協助赴現地會勘。
- (三)於 107 年設置於台 20 線 52k+150 深層滑動場址共有 5 孔 (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，目前測站太陽能供電穩定，正常監測中。
- (四)本年度持續進行西湖與甲仙等淺層邊坡滑動站監測及維護，提升廣域網路為 4G，其中國 3 北上西湖測站因場址經過整治，監測成效不佳，宜更換場址。

## 八、散會。(下午 16 時)

## 交通部運輸研究所臺灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：〔MOTC-IOT-108-HIDC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升〕108年4月份工作會議
- 二、時間：民國108年4月26日(星期五)上午10時30分
- 三、地點：台18線阿里山五彎仔監測場址
- 四、主席：朱主任金元 柯正龍代 紀錄：陳志芳
- 五、出席單位及人員：

本所港研中心：
柯正龍
陳志芳 曾文傑
執行單位：(財團法人成大研究發展基金會)
張子弘 陳家漢
洪世揚
列席單位：公路總局第五區養護工程處
王鐘緯

## 六、討論議題：

- (一)上月份工作進度報告。
- (二)後續工作重點。
- (三)問題與討論。

## 七、主要結論：

- (一)目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- (二)本年度預計於公路總局第五區養護工程處阿里山工務段轄區的五彎仔滑動路段之適當位置，設置土層滑動無線監測場址，屆時惠請該工務段相關承辦人員協助赴現地會勘。
- (三)於 107 年設置於台 20 線 52k+150 深層滑動場址共有 5 孔（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，目前測站太陽能供電穩定，正常監測中。
- (四)本年度持續進行西湖與甲仙等淺層邊坡滑動站監測及維護，提升廣域網路為 4G，其中國 3 北上西湖測站因場址經過整治，監測成效不佳，宜更換場址。

## 八、散會。（下午 16 時）

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」工作會議
- 二、時間：108 年 5 月 24 日(星期五) 下午 15 時 30 分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第一會議室
- 四、主持人：朱主任金元(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑
- 五、出(列)席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：
  1. 工作進度說明：
    - (1) 系統持續維持正常運作，並更新耗材及損壞元件。
    - (2) 新增邊坡崩積層鑽孔，長期監測崩積層水位與降雨特徵關聯，現正進行發展時間域地下水位變化與降雨特徵推估模式，現有執行進度符合進度規劃。
  2. 針對目前研究方向與執行情形進行討論：
    - (1) 簡易示範模組可否委請研究團隊更新，以利中心講解示範使用。
    - (2) 預計何時新增台 18 線五彎仔路段崩塌區淺層滑動預警測試場址，屆時請研究團隊於裝設前知會中心。
- 七、結論：
  1. 原西湖休息區測站已撤除，近期將於台 18 線五彎仔路段崩塌區，裝設三組淺層滑動模組、雨量計及傳輸模組，裝設前請研究團隊知會中心。
  2. 資料雲端平台將於本年度轉移至中華電信 IoT 智慧聯網大平台，帳戶資料將由本所提供，所有測站間一併轉移。
  3. 簡易示範模組將委請研究團隊更新，並放置於本中心以利講解示範使用。請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。
- 八、散會：下午 16 時 10 分

會議名稱：會議名稱：「MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測

系統維護及模組功能提升」工作會議

時間：108年5月24日（星期五）下午15時30分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第一會議室

簽到表

單位	簽名
本所港研中心	柯正龍 陳志芳 曹文傑
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基金會	張子忠

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」工作會議
- 二、時間：108 年 6 月 18 日（星期二）下午 13 時 00 分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第一會議室
- 四、主持人：朱主任金元(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑
- 五、出（列）席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：

### （一）工作進度說明：

1. 本計畫現有執行進度符合進度規劃。
2. 取代原西湖休息區測站之台 18 線五彎仔路段崩塌區新增淺層滑動預警測試場址已於 2019/06/18 完整上線，包含雨量計、分層水份計、表層傾斜儀及液位計，新增雲端平台帳戶已可使用。

### （二）針對目前研究方向與執行情形進行討論：

為因應 20 線 52k 測站進行整修工程，是否將工作項目進行調整，先進行擋土牆位移分析架構建立，並於整治後依竣工圖進行水力力學耦合分析及相關警戒值設定。

## 七、結論：

- （一）資料雲端平台將於本年度轉移至中華電信 IoT 智慧聯網大平台，帳戶資料由本所提供，所有測站除原有 ThingSpeak 平台外，應於中華電信 IoT 智慧聯網大平台完成傳輸，兩平台可互為備份。
- （二）因台 20 線 52k 測站進行下邊坡整治及路面修復，原有下邊坡監測及新增擋土牆傾角量測已暫時移除，請於後續整治工程完成後恢復，另工作項目可進行調整，先進行擋土牆位移分析架構建立。
- （三）請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。

## 八、散會：下午 14 時 00 分

會議名稱：會議名稱：「MOTC-IOT-108-HIDC001 公路土壤邊坡崩塌監測  
系統維護及模組功能提升」工作會議

時間：108年6月18日（星期二）下午13時00分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第一會議室

簽到表

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



## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」工作會議
- 二、時間：108年8月27日（星期二）下午15時40分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室
- 四、主持人：謝主任明志(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑
- 五、出（列）席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：
  - (一)工作進度說明：
    - (1)現有監測場址監測結果更新及後續維護與彙整。
    - (2)深層滑動及擋土系統預警架構建立。
  - (二)針對目前研究方向與執行情形進行討論：
    - (1)預警值擬定及考量。
    - (2)網頁內容調整及用途。
- 七、結論：
  - (一)網頁增加說明連結並將所有測站加入。
  - (二)預警值擬定需考慮其穩定性、依據、物理意義及使用者後續作為影響，請研究團隊於下次月會擬定架構討論。
  - (三)除台20線測站需配合現地整治工程外、現有測站於近期將損壞監測點更新修復。
  - (四)請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。
- 八、散會：下午16時50分

簽列表

會議名稱：會議名稱：「MOTC-IOT-108-HIDC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」工作會議

時間：108年8月27日（星期二）下午15時40分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

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

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」工作會議

二、時間：108年9月30日（星期一）下午15時30分

三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

四、主持人：謝主任明志(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

（一）工作進度說明：

（1）現有監測場址監測結果更新及後續維護與彙整。

（2）深層滑動及擋土系統數值分析進度討論。

（3）雲端網頁系統架設細節與管理權限說明。

（二）針對目前研究方向與執行情形進行討論：

（1）網頁內容調整及用途，現有架構說明。

（2）台20線52k 場址現況檢討。

七、結論：

（一）因配合資安要求，本年度監測系統網頁暫以租用中華電信虛擬主機進行，由研究團隊洽詢相關細節並於本年度測試。

（二）除台20線測站需配合現地整治工程、本年度僅就可監測點位進行分析彙整。

（三）請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。

八、散會：下午16時 30分

簽列表

會議名稱：會議名稱：「MOTC-IOT-108-H1DC001 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」工作會議

時間：108年9月30日（星期一）下午15時30分

地點：港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

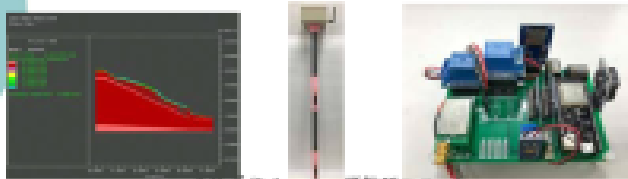
單位	簽名
本所港研中心	柯正龍 曹文傑
合作研究單位： 財團法人成大研究發展基金會	張文忠

### 附錄三 期末簡報



## 公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升

### 期末簡報



委託單位：國防研究院  
授權單位：財團法人成大研究發展基金會  
研究團隊：張文忠、黃奇斌

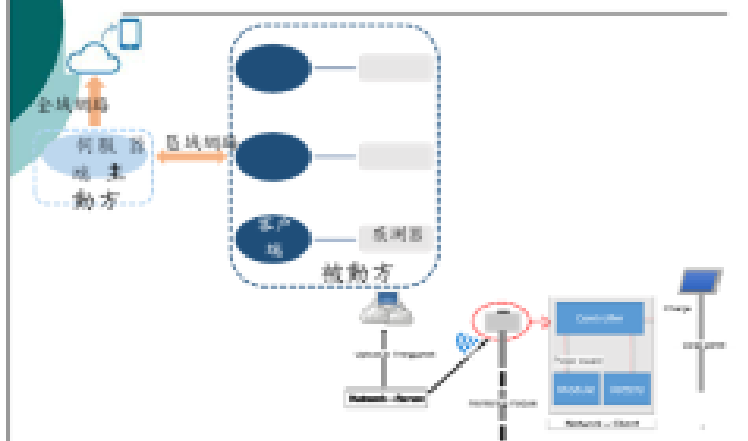
### Outline

- ◆ 108 年計畫摘要
- ◆ 現有監測模組精進
- ◆ 淺層滑動監測場址成果
- ◆ 飽和層滑動場址維護與擴充
- ◆ 水位變化與降雨特徵關聯分析
- ◆ 擋土系統水力力學耦合分析
- ◆ 雲端整合平台建構

## 108年研究內容與項目

- **現有淺層崩塌場址持續觀測與精進:**
  - 持續觀測甲仙淺層滑動場址
  - 增設阿里山五寶寺場址
  - 更新烏崎滑坡網絡
- **深層滑動場址監測與資料分析:**
  - 持續監測20處52&以上層滑動監測場址
  - 建立飽和層孔隙水壓升降與降雨強度之關聯
  - 雲端顯示平台建構
- **深層滑動場址預警模式推估與驗證:**
  - 水力力學耦合解析法分析
  - 發展遠端路土系統監測與預警

## 無線土層滑動監測系統架構



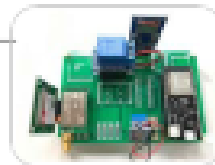


## 現有監測模組精進

- 層級通訊升級為4G。
- 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。
- 加入LoRa喚醒之功能，由4G模組之伺服器喚醒對應之LoRa模組後再啟動系統運作，大幅降低電量並延伸監測網路涵蓋範圍。
- 增加電源管理及節電效能，對傳統液位計及雨量計進行節電設計。
- 雲端平台功能擴充，增加雲端計算功能、上傳中華電信IoT智慧聯網大平台，建置專屬雲端顯示與預警網頁。

## 系統組成-伺服器端

伺服器端



微控制單元

整合所有電子元件



LoRa

與客戶端通訊  
進行資料傳輸



SD card

進行資料儲存



SIM7500GA-H

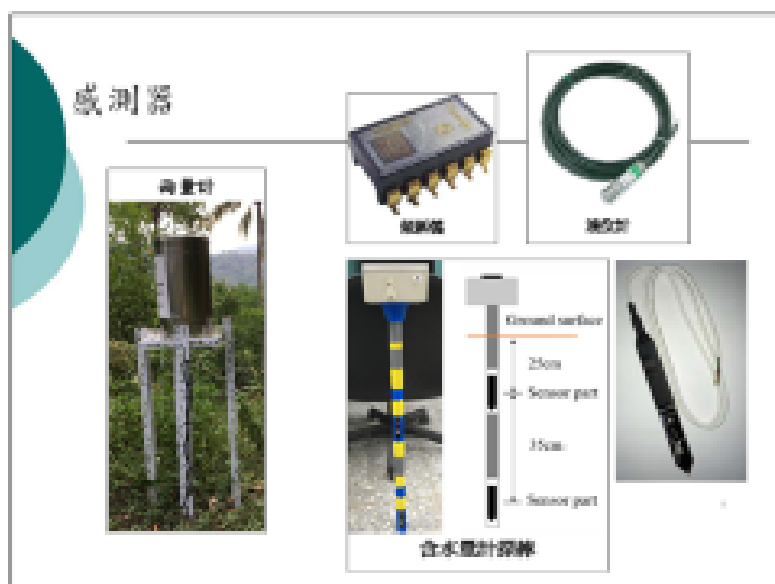
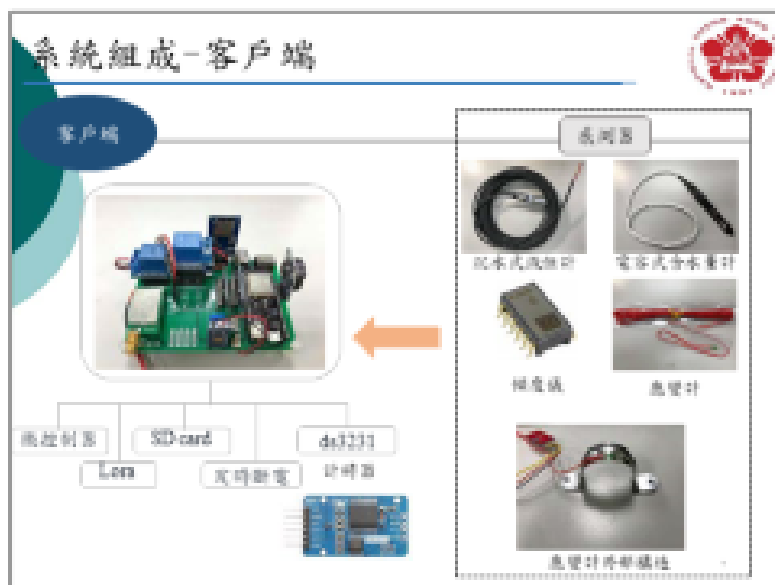
將資料上傳雲端



定時斷電

DI mini Pro  
與微電腦組成

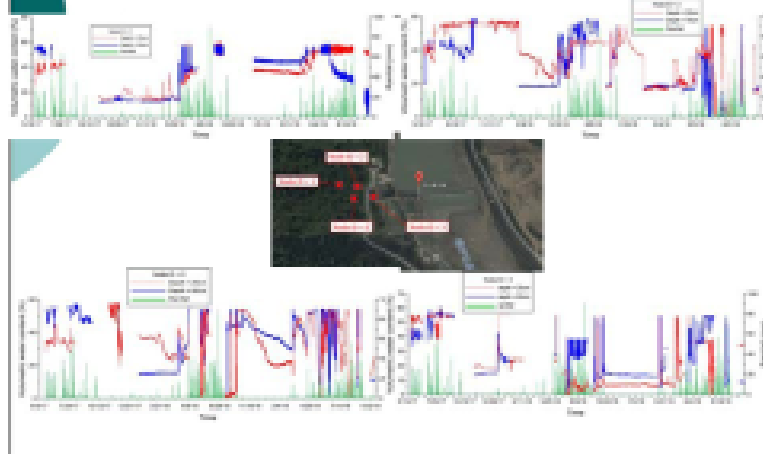


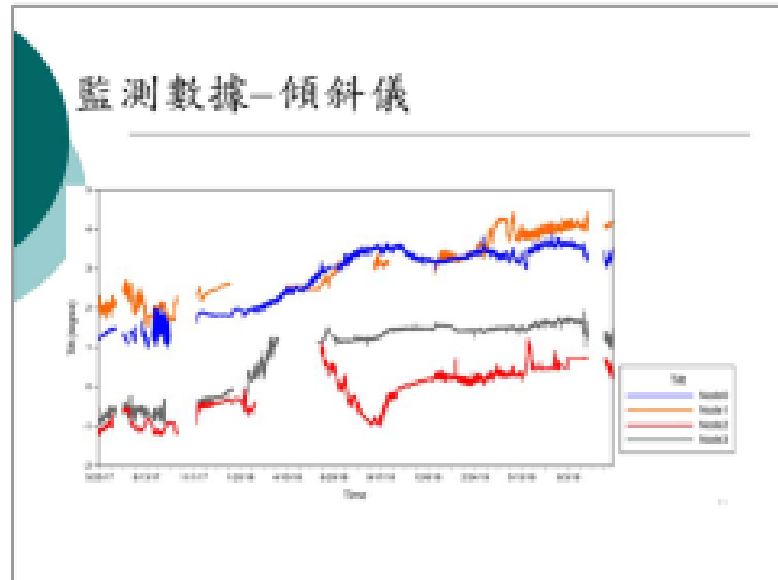


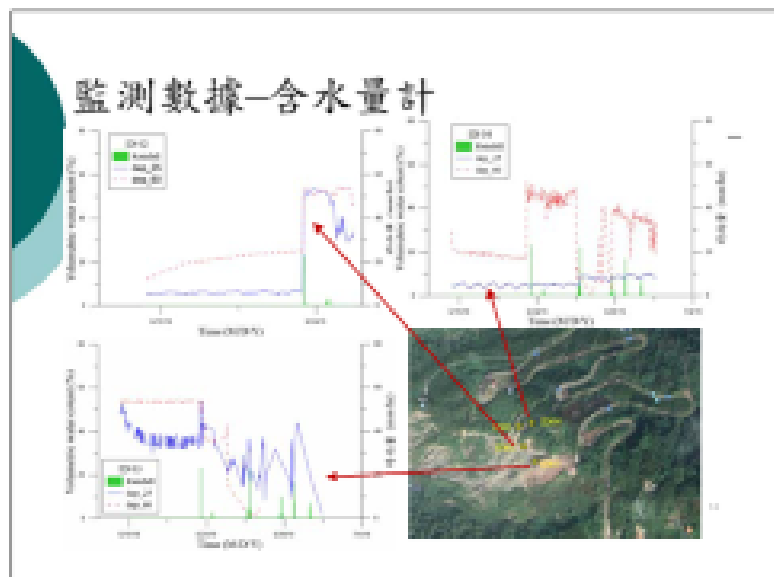
### 甲仙攔河堰通達道路邊坡監測配置圖

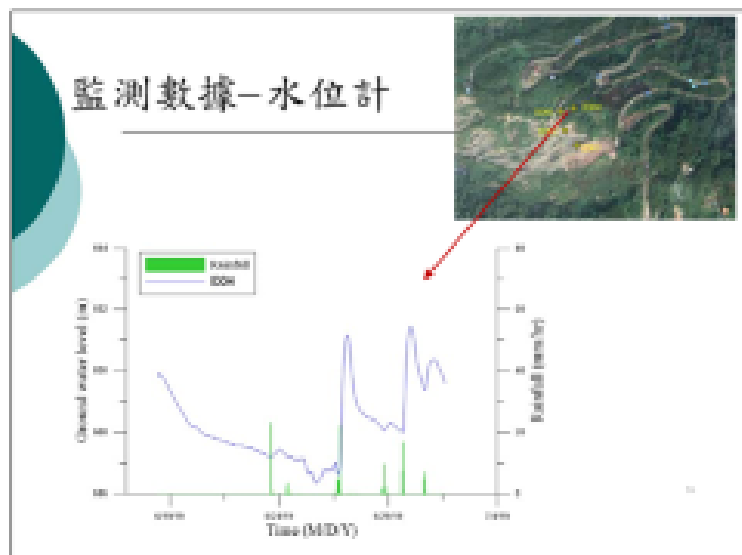
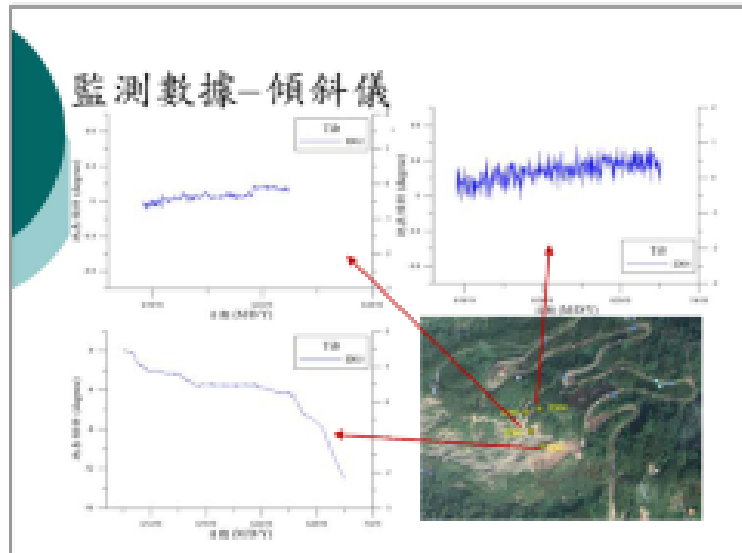


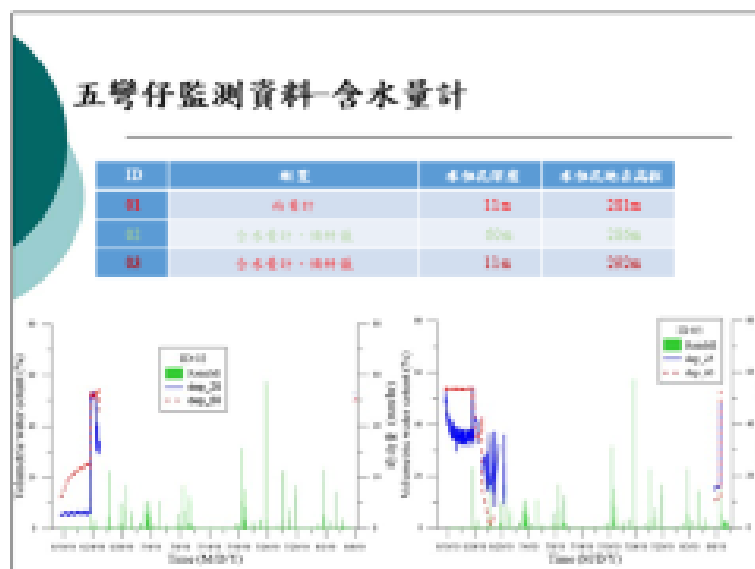
### 監測數據-含水量計

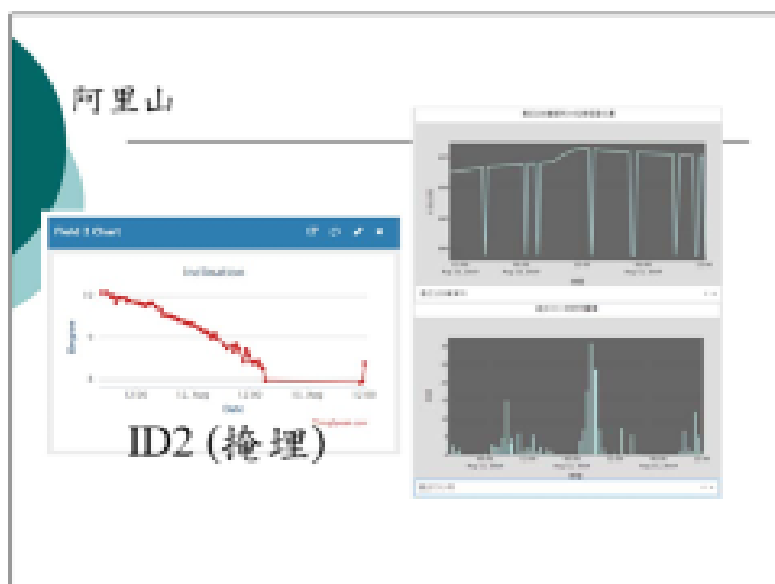
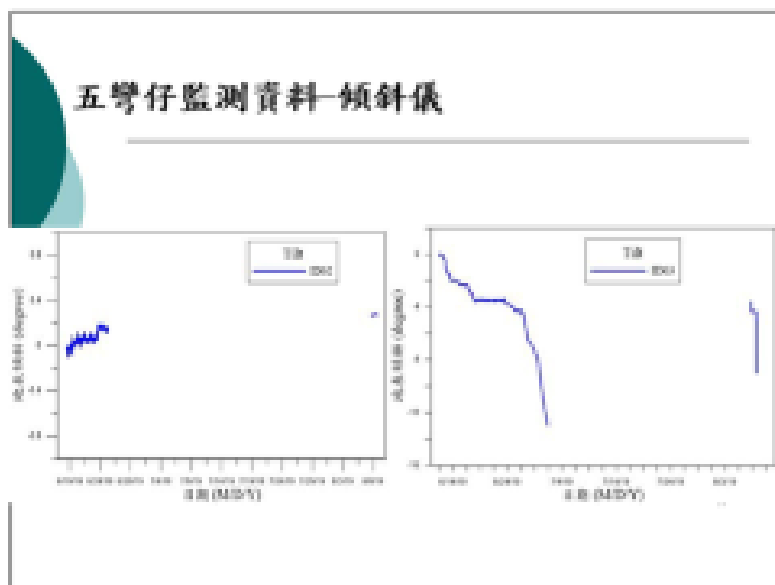




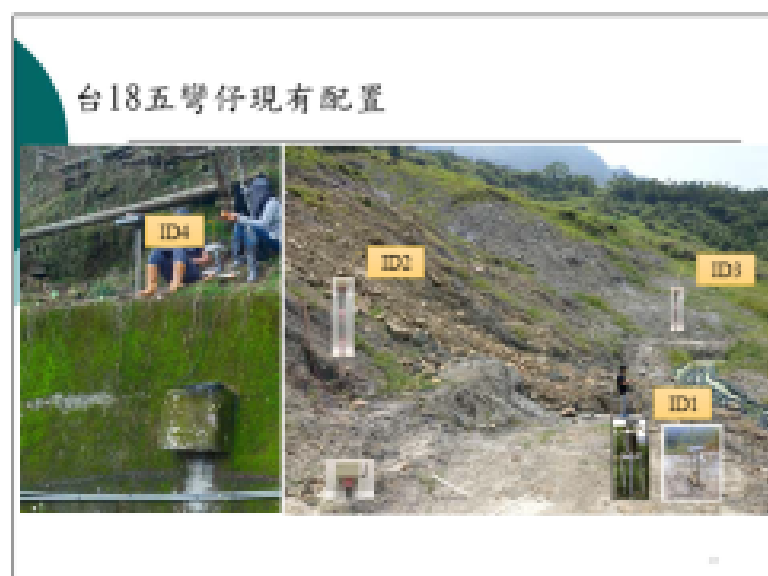
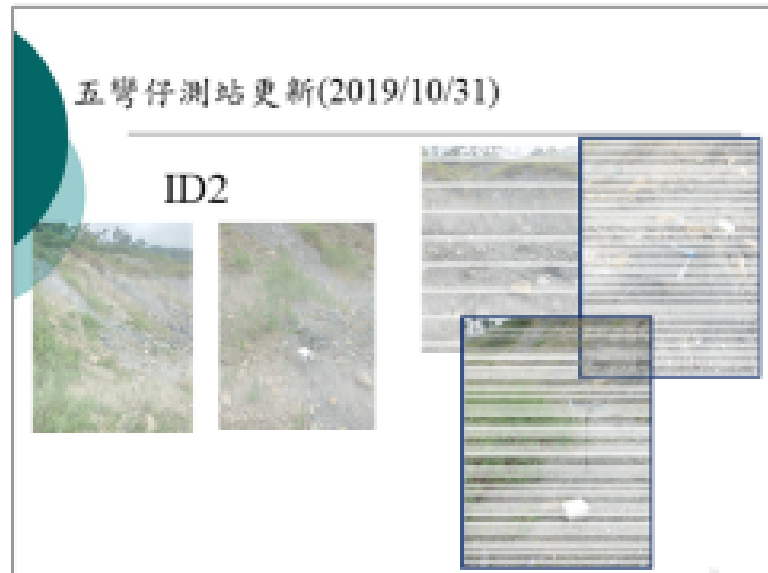


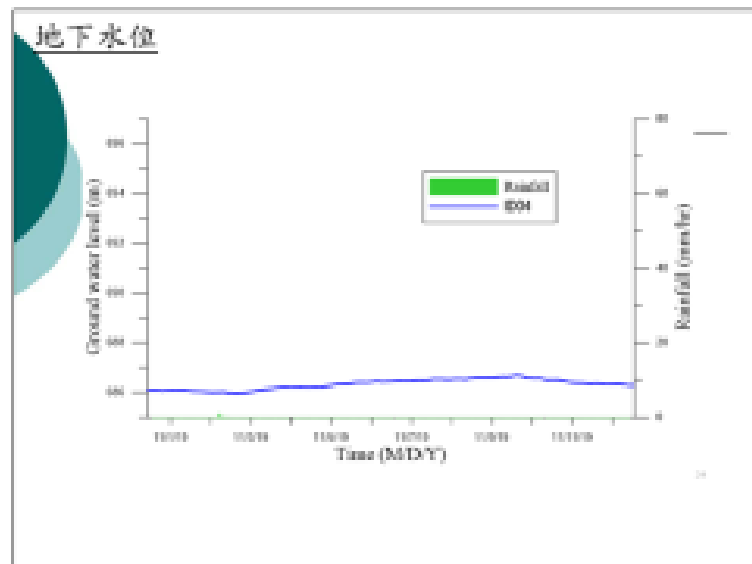
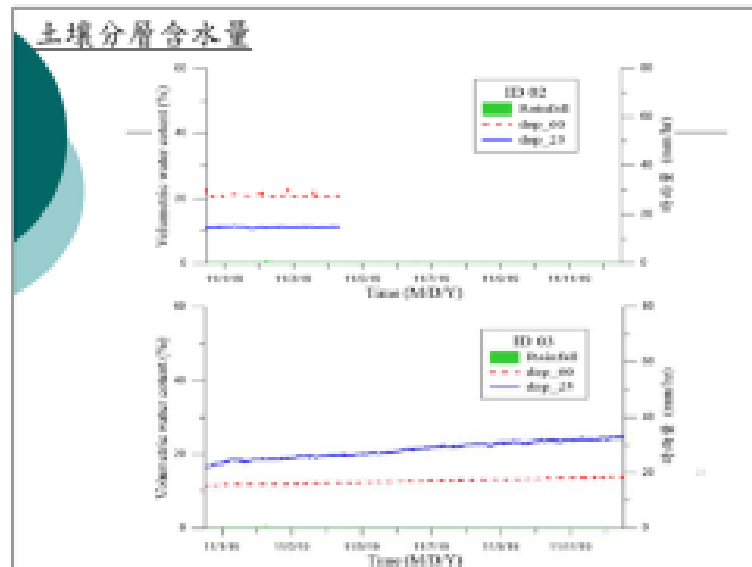


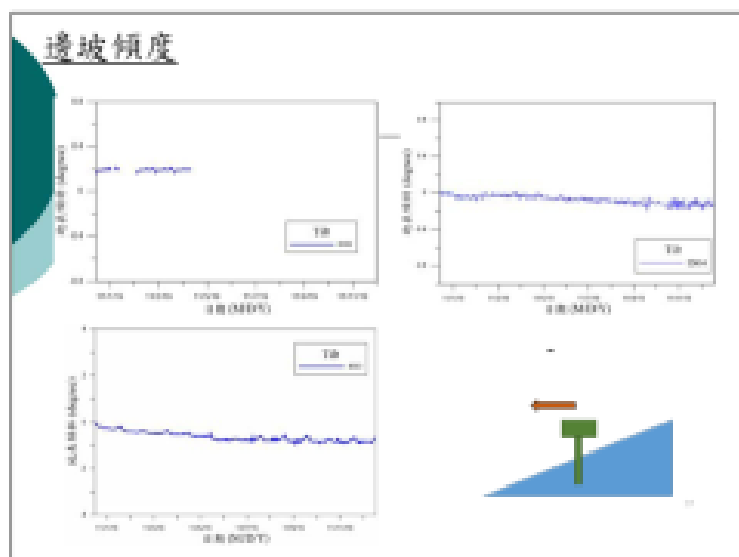






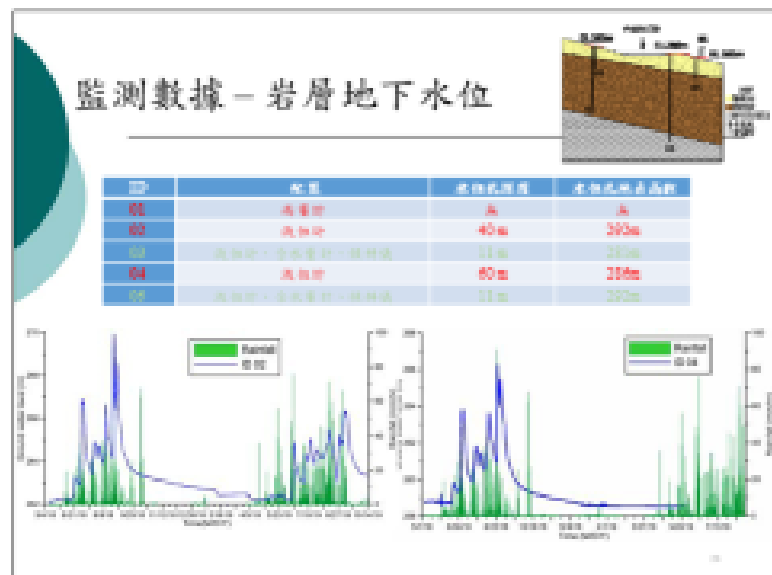


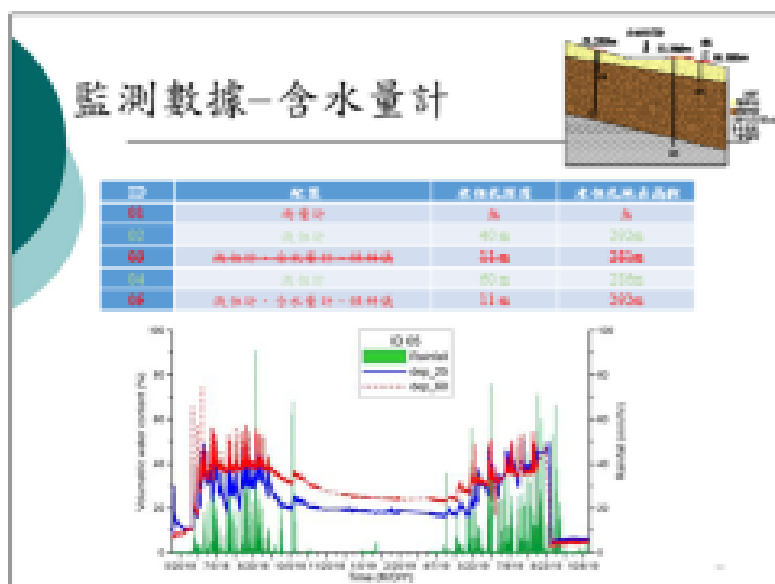
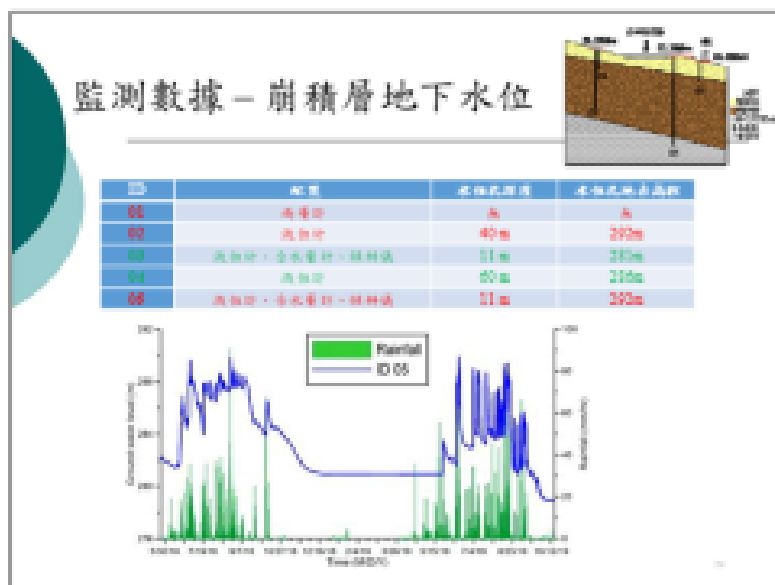


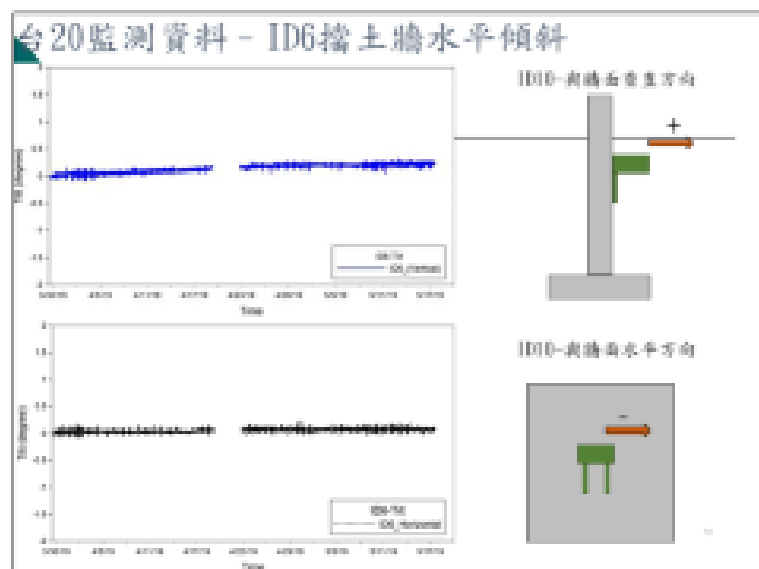
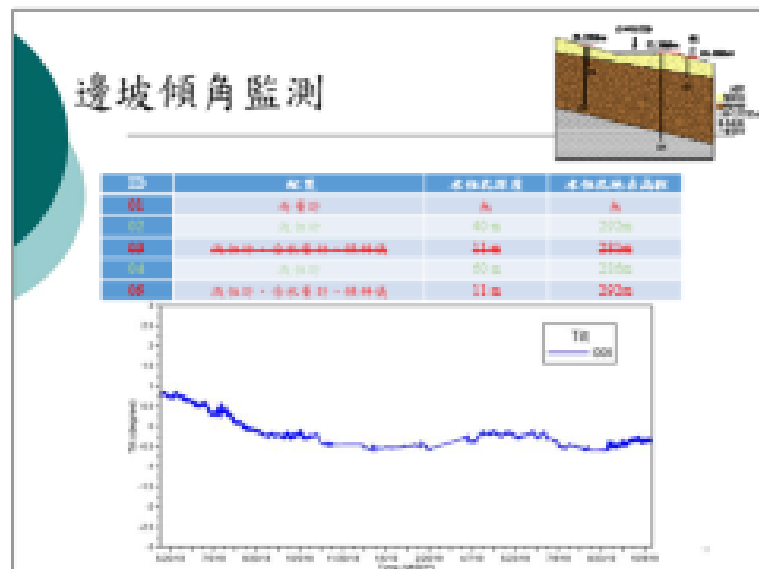


### 飽和層滑動場址維護與擴充

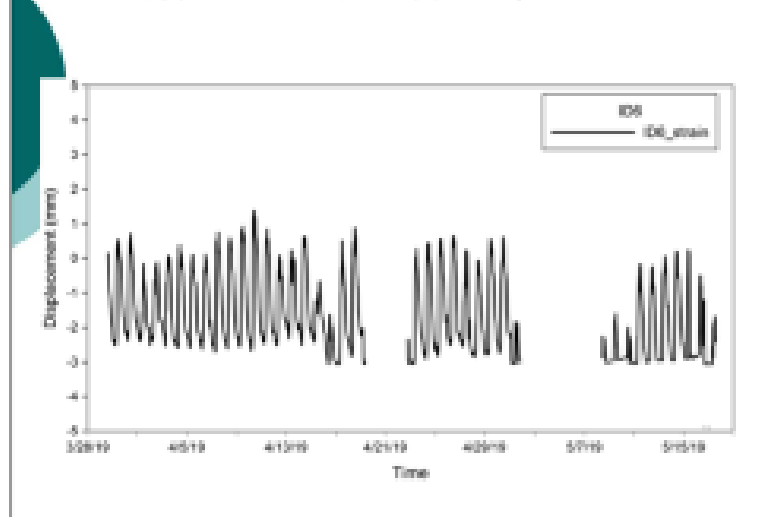
- 發展時間域地下水位變化與降雨特徵推估模式
- 導入邊坡擋土支撐系統時域分析及監測模組
- 建立極限平衡及二維耦合深土層邊坡穩定分析流程
- 提出含擋土支撐反應之場址客製化依時預警







台20監測資料 - ID6擋土牆裂縫計



## 二維水力力學耦合邊坡分析

### 水力力學耦合數值分析

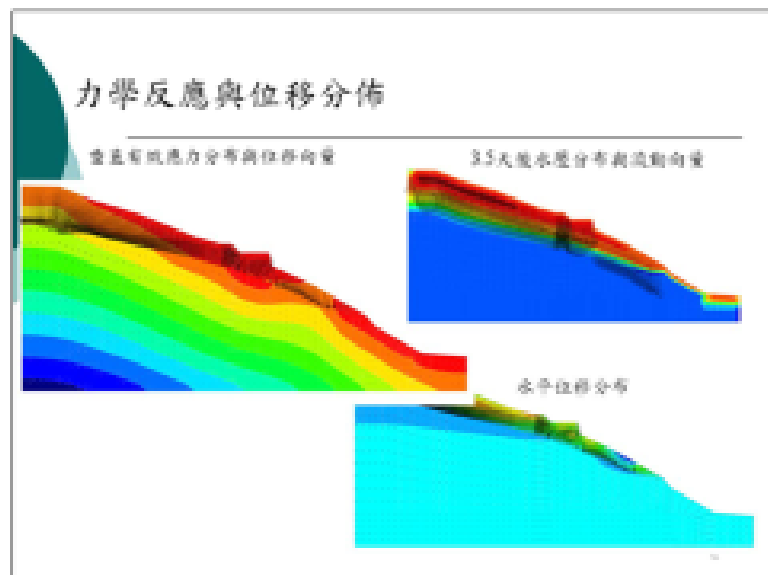
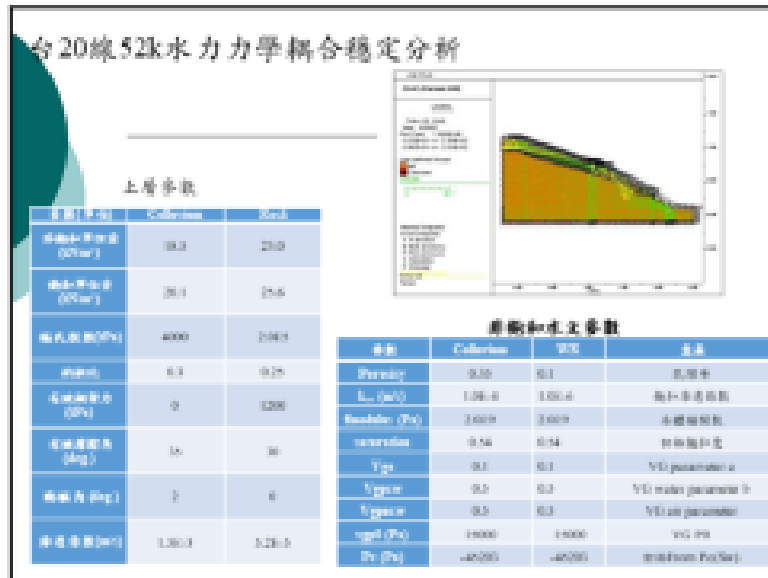
#### FLAC程式

- 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式變形模擬,適切模擬非飽和土層邊坡因降雨引發之破壞過程模擬。

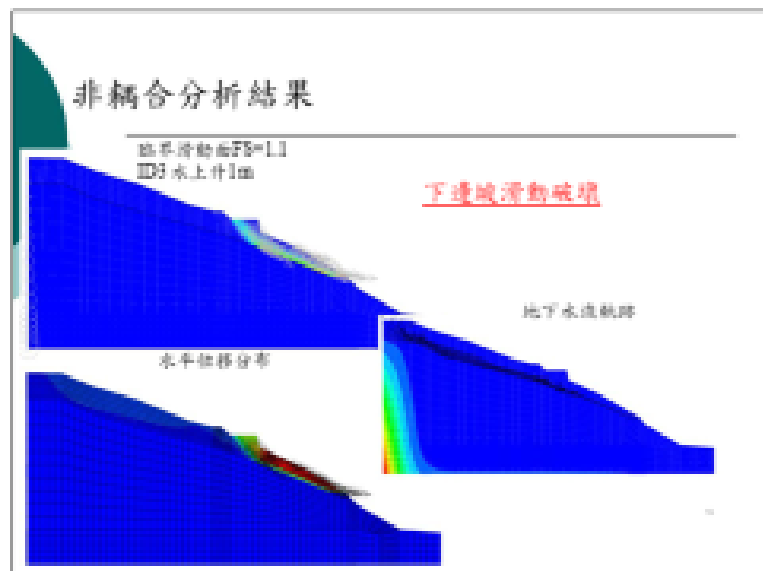
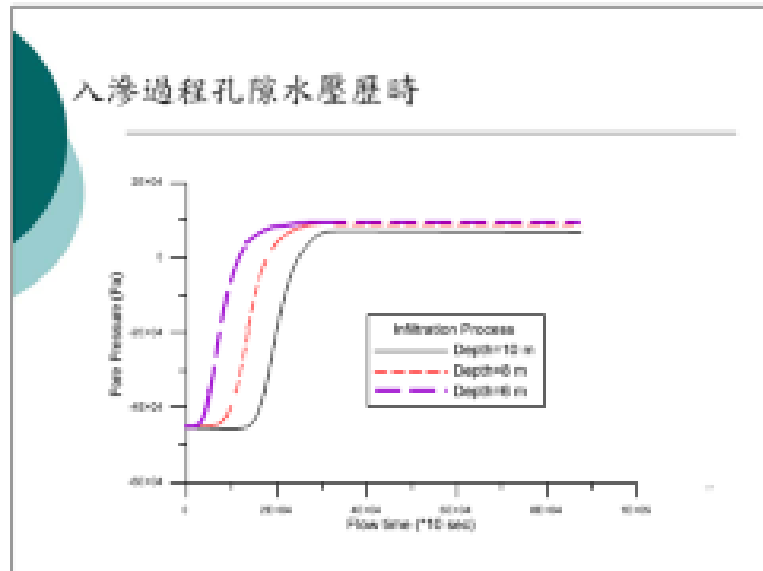
$$\tau^{max} = \sigma^b \tan \phi + C \quad \sigma^b = \sigma - (S_w P_w + S_a P_a)$$

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

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





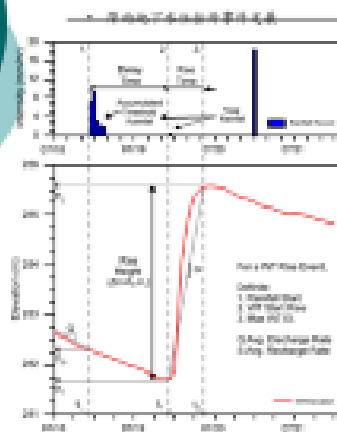


## 現有深層滑動解析限制與對策

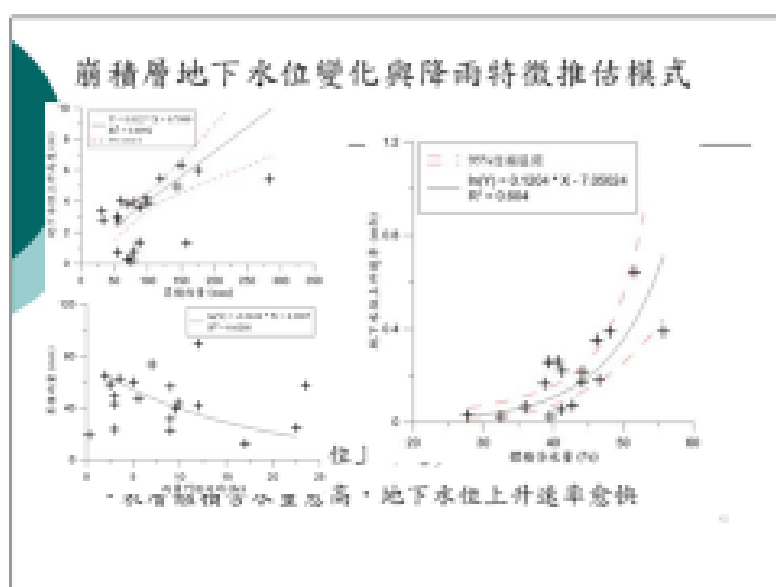
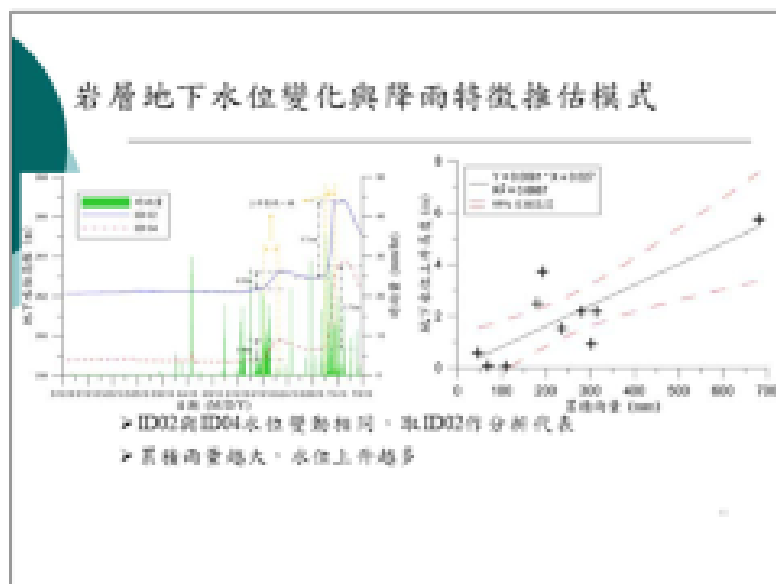
- 深層解析限制:
  - 無限連續中平行滑面之影響不可忽略
  - 現地垂直入滲非為增加孔隙水壓之唯一因子
  - 地下水需考慮整體蓄水區降雨入滲特性
  - 土壤非均質強度不確定性
- 對策
  - 由長期降雨與地下水壓監測，建立降雨與水壓關係
  - 由現地入滲觀測，釐清垂直入滲與上游補注之比例
  - 考慮二元地質之前饋土層強度特性搭配反算解析

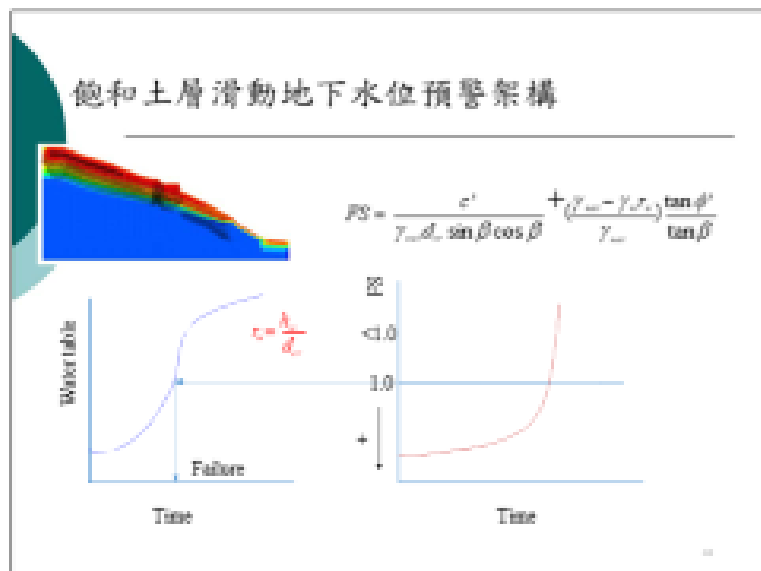
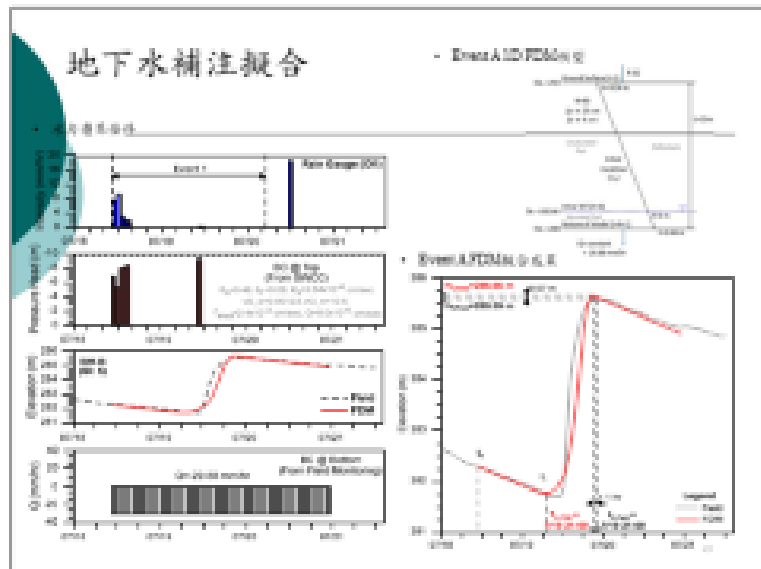
**Key: 長期有效連續觀測**

## 監測成果與地下水位抬升事件定義



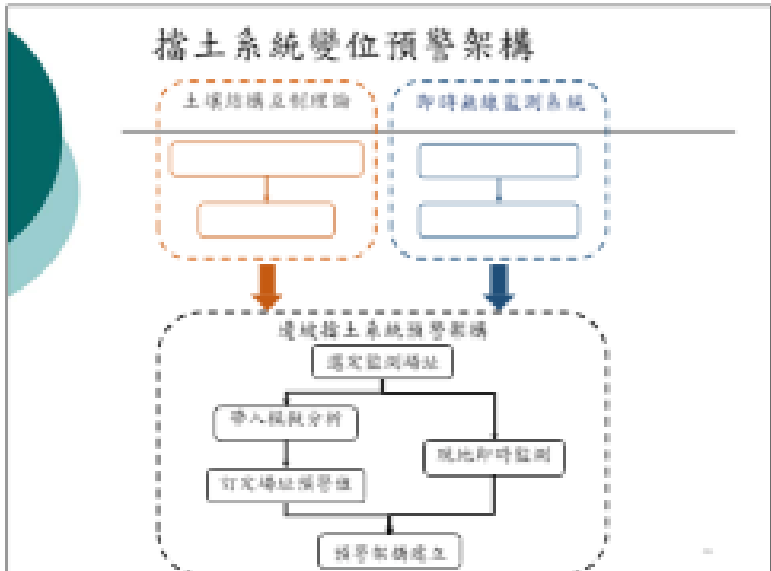
- 有效降雨事件定義原則:
1. 可明確定義影響水位抬升之單獨雨情事件
  2. 非飽和層處於相對飽和狀態—GWT處於明顯下降
  3. 為相鄰降雨事件引起之水位抬升  
**(僅考慮垂直入滲引起之地下水補注行為)**






邊坡擋土系統變形分析與預警

- 擋土系統預警架構
- 模擬軟體基本介紹
- 模擬流程
- 現地案例說明




### PYWALL軟體基本介紹



- 1 有別於傳統極限平衡分析
- 2 最大優勢：考慮土壤結構互制關係
- 3 模型由Winkler Spring改良而來

提供合理的分析與設計

### 輸入資料類別



地軸參數  
地軸位置

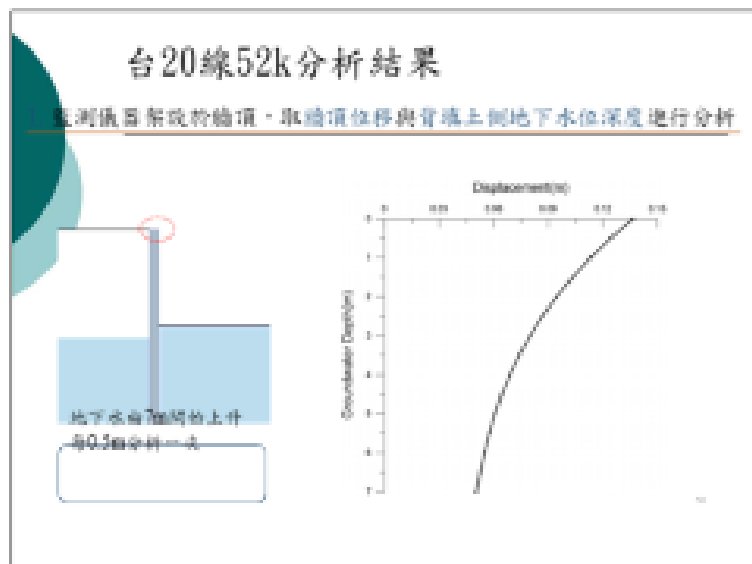
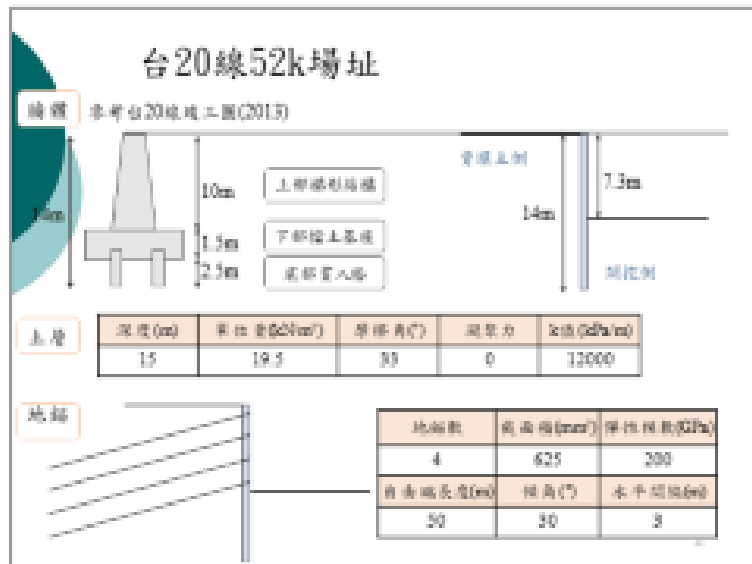
繪體剛度  
繪體性質  
繪體配置

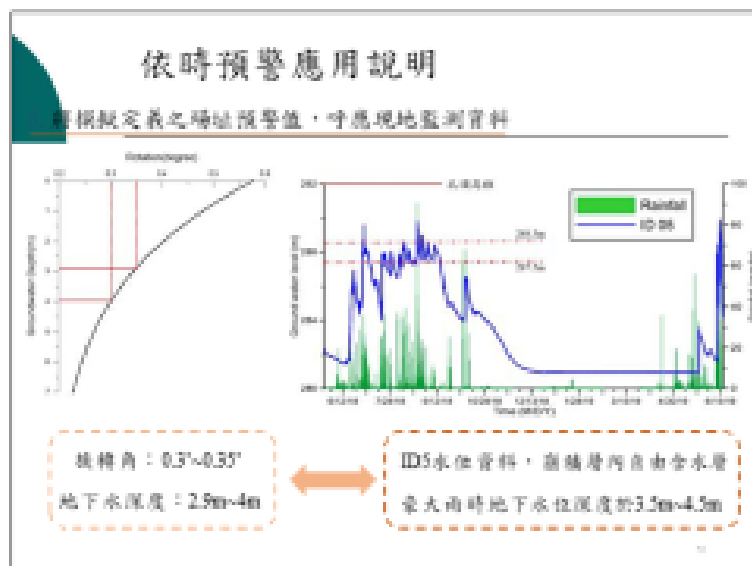
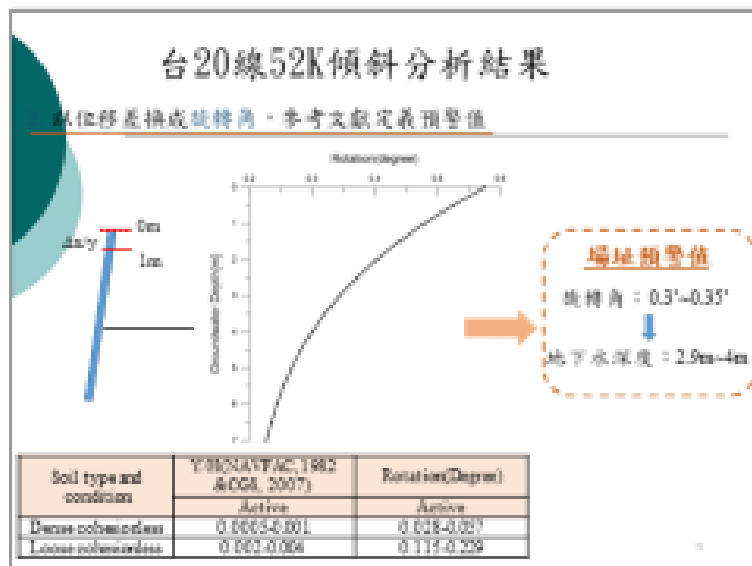
支撐

繪體

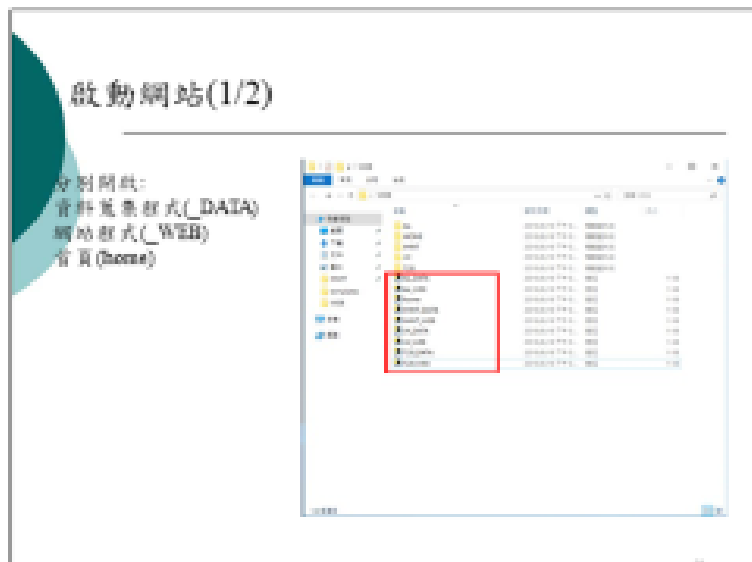
上層

砂土，黏土輸入參數不同









### 啟動網站(2/2)

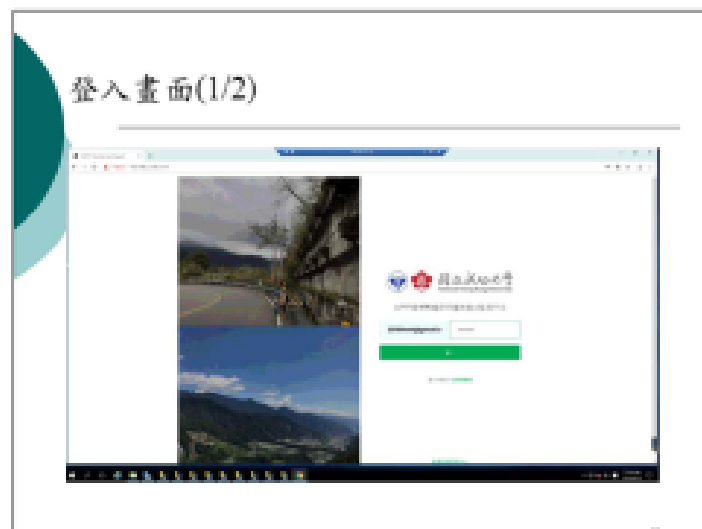
DATA 檔案出現:  
Press Ctrl+Break to exit  
表示執行成功

WEB - home 檔案出現:  
Running on http://0.0.0.0:  
表示執行成功

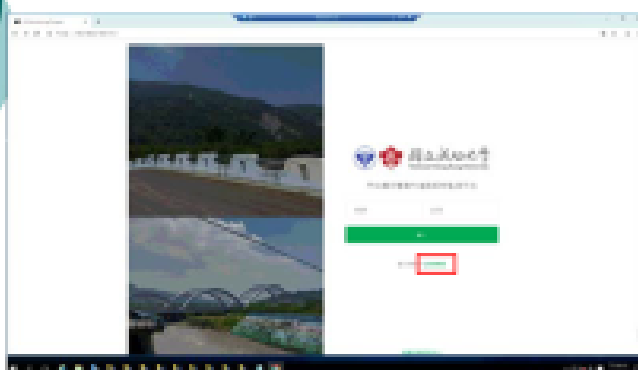


### [slopecloud.com.tw](http://slopecloud.com.tw) (IP: 210.61.148.55)

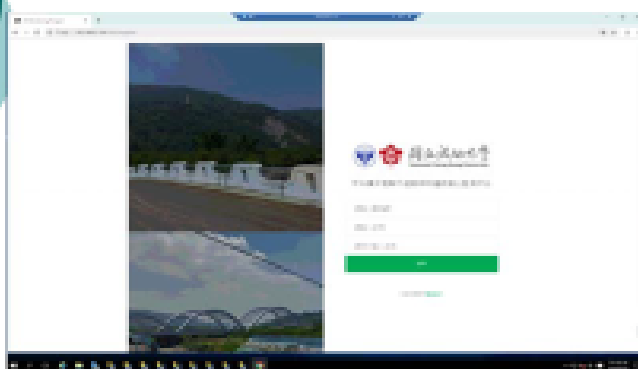




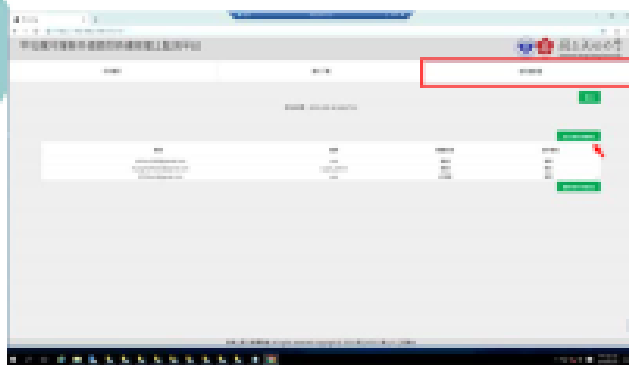
### 帳號申請(1/2)



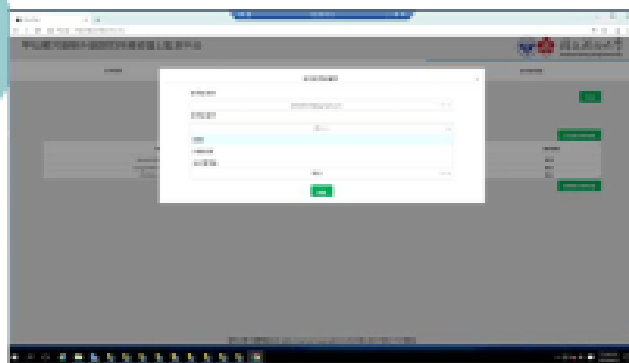
### 帳號申請(2/2)



### 更改權限(1/3)



### 更改權限(2/3)



### 更改權限(3/3)



### 資料下載(1/2)



### 資料下載(2/2)

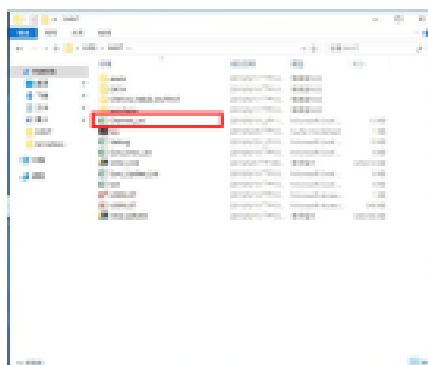


The screenshot shows a data table with the following columns: Date, Time, and multiple columns of numerical data. The data appears to be organized in a grid format, likely representing time-series or sensor data.

獲得原始資料，  
排序與  
THINGSPEA  
K相同

### 更改預警值(1/2)

於資料夾中  
Channel\_list 檔案  
更改

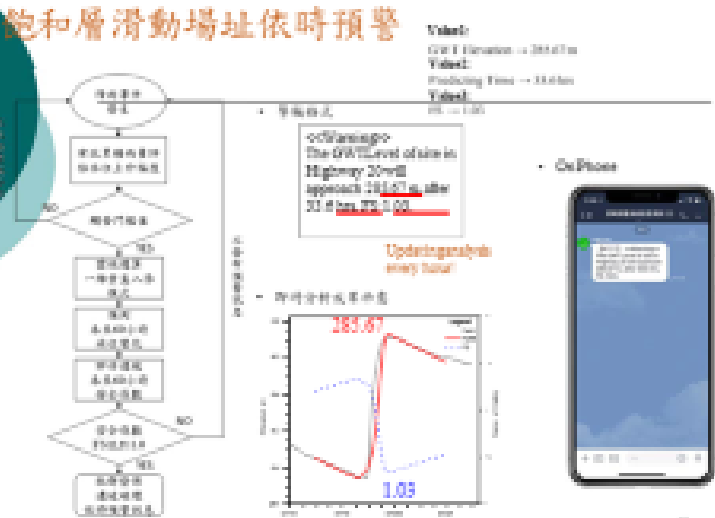


### 更改預警值(2/2)



儲存後將自動進行更新

### 飽和層滑動場址依時預警



Value:  
 GWL Fluctuation → 20.00 m  
 Value:  
 Fluctuating Time → 24.00 hr  
 Value:  
 0.0 → 0.00

```

    <<Warning>>
    The GWL level of site in
    Highway 20-mill
    approach 20.00 m, after
    24.00 hrs, 0.00
    
```

Updating analysis every hour!

即時分析成果示意圖

CoPhone



## 結論

- 計畫總結
  - 現有淺層滑動監測場址
    - 測站佈置與儀器維護
    - 應將現有測站重新配合 2D 模式可分測站
    - 整合分析與警系統更新
  - 飽和層滑動
    - 場址佈置與維護
    - 飽和層滑動場址儀器系統分析與儀器檢定
    - 系統優化與警系統檢定分析
    - 滲入系統水力分析整合分析
    - 飽和層滑動場址系統與警系統建立
  - 雲端整合平台建構
- 建議
  - 現有場址為穩定狀態，且已有警佈之設置，如有後續研究，應考慮更精確研究地點。
  - 地下水位變化與地表變形、水力與整合分析有密切關係，建議增加監測之地下水位與地表變形分析資料，增加地表變形分析數據，可增加其應用價值。
  - 位於場址附近之其他場址應密切注意，本方案場址系統監測成果有限，但已建立分析流程，後續建議可延長監測期程。

簡報完畢，敬請指教