

106-006-7908

MOTC-IOT-105-H1DB001b

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

中華民國 106 年 3 月

106-006-7908

MOTC-IOT-105-H1DB001b

公路邊坡崩塌監測之無線感測 網路模組研發(2/2)

著 者：陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌
周仕勳、蕭 涵、簡裕峻、吳崑瑋

交通部運輸研究所

中華民國 106 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發. (2/2) / 陳志芳
等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民 106. 03
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-1921-1(平裝)

1. 公路管理 2. 運輸規劃

557

106002147

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)

著 者：謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、蕭涵、簡裕峻、
吳崑瑋

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587132

出版年月：中華民國 106 年 3 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：1010600303

ISBN：978-986-05-1921-1 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

公路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

GPN : 1010600303
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：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-05-1921-1(平裝)	政府出版品統一編號 1010600303	運輸研究所出版品編號 106-006-7908	計畫編號 105-H1DB001b
主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳志芳 協同主持人：謝明志 參與人員：王欣郁 聯絡電話：04-26587181 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：張文忠 協同主持人：黃安斌 研究人員：周仕勳、蕭涵、簡裕峻、吳崑瑋 地址：臺南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575~63128		研究期間 自 105 年 02 月 至 105 年 12 月
關鍵字：淺層崩塌破壞、無線監測模組、水力力學耦合分析、依時預警系統、微機電系統			
摘要： 本研究針對公路土壤邊坡可能遭遇之淺層崩塌破壞進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線感測土層反應模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性。研究結合具嚴謹力學及通用性之解析法邊坡穩定分析及量測淺層土層反應之無線監測模組，利用建立之場址地質模型進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，發展場址客製化具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警架構。所發展之監測模組以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電感測系統，結合無線通訊技術，整合具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表位移、土中分層含水量之監測模組，形成分布式淺層土層感測網路，開發經濟型、拋棄式的監測模組，作為相關防災作為啟動之準據。 成果效益與應用情形： 1.建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法邊坡崩塌分析架構，做為公路邊坡淺層崩塌預警模式之雛形。 2.測試淺層簡易土層監測模組於山區公路淺層邊坡崩塌預警之成效。 3.開發客製化公路邊坡淺層崩塌監測與預警技術，提升預警準確度。 4.研究成果提供交通部、公路總局與台鐵局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
106 年 3 月	184	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。
機密等級： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 （解密條件：☐ 年 月 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密， ☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密） ☒普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Development of Wireless Monitoring Modules for Highway Slope (2/2)			
ISBN(OR ISSN) ISBN 978-986-05-1921-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010600303	IOT SERIAL NUMBER 106-006-7908	PROJECT NUMBER 105-H1DB001b
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jyh-Fang Chen PROJECT STAFF: M. J. Hsieh PHONE: 04-26587113 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM February 2016 TO December 2016
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: shallow slope failure, wireless sensing module, coupled hydro-mechanical analysis, time-dependent warning system, micro-electro-mechanical system			
ABSTRACT: To improve the limitations of rainfall-based slope warning system, a new technology that integrated the hydro-mechanical soil slope analysis and wireless sensing module for shallow ground response monitoring was under developed to establish a customized, time-dependent warning system for shallow slope failures triggered by rainfalls. A coupled hydro-mechanical analysis considered both the hydraulic infiltrations and mechanical responses of unsaturated soils in slope stability analysis. Wireless sensing module based on micro-electro-mechanical system (MEMS) components with wireless communication module had been developed to monitor ground movements and subsurface conditions, including ground inclination, ground movement, and water content profile. One of the goals was to develop cheap and disposable sensing modules. Combining the real-time monitoring and rigorous analysis, feasibility of a customized, time-dependent warning system was promising. BENEFIT AND APPLICATION : 1. Develop a rigorous analytical method that integrates the failure mechanism and field material properties to predict the shallow failure along roadside and provide theoretical basis of warning system. 2. Verify the performance of surface wireless sensing module for shallow landslides warning. 3. Develop customized, time-dependent warning system and procedure to improve the limitations of current empirical techniques. 4. The system potentially can be used by ministry of transportation, directorate general of highways, and Taiwan railways administration for hazard management.			
DATE OF PUBLICATION March 2017	NUMBER OF PAGES 184	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (2/2)

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	VI
表目錄	X
第一章 計畫概要	1-1
1.1 研究計畫之背景、目的及重要性	1-1
1.1.1 計畫背景	1-1
1.1.2 計畫目的	1-3
1.2 研究範圍與對象	1-3
1.3 研究內容與項目	1-5
1.4 執行成果、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
2.2.1 解析法邊坡分析	2-4
2.2.2 邊坡監測預警	2-10
第三章 水力力學耦合邊坡穩定分析	3-1

3.1 非飽和土壤力學.....	3-1
3.1.1 非飽和土壤性質與基質吸力.....	3-1
3.1.2 非飽和土壤剪力強度.....	3-4
3.2 非飽和滲流分析.....	3-6
3.2.1 非飽和滲透控制方程式.....	3-7
3.2.2 一維入滲分析.....	3-8
3.3 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析.....	3-10
3.4 水力力學耦合試驗.....	3-14
3.4.1 水力力學耦合試驗系統.....	3-14
3.4.2 非飽和土壤工程試驗結果.....	3-17
3.4.3 水力力學耦合試驗結果.....	3-24
第四章 土層監測模組研發.....	4-1
4.1 土層水力與運動反應量測.....	4-1
4.1.1 基質吸力量測.....	4-1
4.1.2 電容量測土壤含水量原理.....	4-2
4.2 無線感測土層監測模組.....	4-5
4.2.1 系統感測器.....	4-5
4.2.2 系統組成.....	4-12
4.3 無線土層監測模組.....	4-17
4.4 無線感測土層監測模組現地測試.....	4-21
4.4.1 太平山場址安裝測試.....	4-22

4.4.2 太平山場址資料.....	4-26
第五章 邊坡依時預警系統.....	5-1
5.1 研究場址地質與土壤性質.....	5-1
5.1.1 研究場址地質.....	5-1
5.1.2 現地土壤試驗成果.....	5-4
5.2 無線監測模組成果.....	5-6
5.3 二維水力力學耦合穩定分析.....	5-16
5.4 客製化邊坡依時預警.....	5-21
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 104 年度計畫執行結論.....	6-1
6.2 105 年度計畫執行結論.....	6-2
6.3 建議.....	6-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 105 年期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二 105 年期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 2-1
附錄三 期末報告簡報資料.....	附錄 3-1
附錄四 工作會議記錄.....	附錄 4-1

圖目錄

圖 2.1 依時邊坡預警系統研究架構圖.....	2-2
圖 2.2 從有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)....	2-6
圖 2.3 無限邊坡切片之自由體圖 (Collins and Znidarcic, 2004).....	2-7
圖 2.4 無限邊坡內水力梯度和 β 、 β^* 之關係 (Collins and Znidarcic, 2004).....	2-7
圖 2.5 典型細顆粒土壤水力力學耦合邊坡穩定分析結果(Collins and Znidarcic, 2004).....	2-9
圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008).....	2-10
圖 3.1 非飽和土壤結構示意圖(Fredlund and Rahardjo, 1993).....	3-3
圖 3.2 氣水交界面之表面張力現象(Fredlund and Rahardjo, 1993).....	3-3
圖 3.3 非飽和土壤莫爾-庫倫破壞包絡線(Fredlund and Rahardjo, 1993).....	3-5
圖 3.4 剪應力與基質吸力之破壞包絡線(Fredlund, 1995)	3-5
圖 3.5 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)	3-6
圖 3.6 土壤含水量特徵曲線去飽和三階段 (Fredlund, 1995)	3-7
圖 3.7 土壤滲透係數與基質吸力之關係(Fredlund, 1995)	3-7
圖 3.8 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)	3-9
圖 3.9 非飽和滲流分析結果比較.....	3-10
圖 3.10 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....	3-11
圖 3.11 水力力學耦合試驗概念圖	3-14
圖 3.12 水力力學耦合試驗系統實體圖.....	3-15
圖 3.13 水力力學耦合試驗系統剪力盒實體.....	3-16

圖 3.14 試體容器實體圖	3-16
圖 3.15 側向變位量測裝置	3-18
圖 3.16 試體各層剪應變計算示意圖	3-18
圖 3.17 試驗材料粒徑分佈曲線	3-19
圖 3.18 基質吸力與含水量關係圖	3-21
圖 3.19 非飽和強度參數試驗 (a)試體製作(b)試體架設完成圖	3-22
圖 3.20 非飽和壓密排水單剪試驗(a)應力應變曲線(b)體積變化	3-23
圖 3.21 非飽和土壤強度參數	3-24
圖 3.22 水力力學耦合試驗試體架設完成圖	3-26
圖 3.23 水力力學耦合試驗之試驗條件示意圖	3-27
圖 3.24 水力力學耦合試驗之試體配置	3-28
圖 3.25 試體初始含水量	3-29
圖 3.26 體積變化量測裝置與含水量感測元件入滲量比較	3-30
圖 3.27 水入滲量與試體各層剪應變變化情況	3-31
圖 3.28 含水量變化與各層剪應變之變化情形(a) DC-1 (b) DC-2 (c) DC-3	3-33
圖 3.29 入滲深度與各層剪應變之變化情況	3-34
圖 3.30 試體分層剪力強度與各層剪應變之變化情形(a) DC-3 (b) DC-2 (c) DC-1	3-35
圖 3.31 分層剪力安全係數與各層剪應變之變化情形(a) DC-3 (b) DC-2 (c) DC-1	3-37
圖 4.1 TI. FDC1004 電容數位轉換器(TI., 2015)	4-3
圖 4.2 非接觸式電容量測之應用方法	4-3
圖 4.3 液位量測示意圖	4-4

圖 4.4 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖.....	4-6
圖 4.5 傾斜儀電路圖與測試模組.....	4-7
圖 4.6 傾斜角度標定系統.....	4-7
圖 4.7 傾斜儀 Arduino Uno 標定結果	4-8
圖 4.8 Catnip Electronics 電容式土壤水份計	4-9
圖 4.9 測得電容值與土壤體積含水量關係圖.....	4-10
圖 4.10 MPU-6050 模組(Arduino).....	4-11
圖 4.11 IMU 與傾斜角度之關係圖	4-12
圖 4.12 土層監測模組內部架構示意圖.....	4-13
圖 4.13 Arduino Uno	4-14
圖 4.14 nRF24L01 模組(摘自 www.seeedstudio.com).....	4-16
圖 4.15 使用者介面	4-17
圖 4.16 儲存後之文字檔.....	4-17
圖 4.17 Arduino UNO 原型擴展板(Sparkfun).....	4-19
圖 4.18 Arduino UNO(Green Board)結合原型擴展板.....	4-19
圖 4.19 發射端外構.....	4-20
圖 4.20 發射端防水盒.....	4-20
圖 4.21 土壤水份計外構.....	4-21
圖 4.22 安裝場址位置圖	4-22
圖 4.23 接收端與自動化監測記錄系統.....	4-23
圖 4.24 現場鑽孔照片	4-24
圖 4.25 土層監測模組裝設照片	4-25
圖 4.26 阻水層回填照片	4-25

圖 4.27 完工照片	4-26
圖 4.28 太平山土壤水份計紀錄.....	4-27
圖 4.29 太平山土中溫度變化紀錄.....	4-27
圖 4.30 太平山 IMU 傾斜角紀錄.....	4-28
圖 5.1 監測設施平面配置圖(南水局 2011).....	5-2
圖 5.2 監測剖面圖(南水局 2011).....	5-3
圖 5.3 現地土壤粒徑分布圖.....	5-4
圖 5.4 現地重模土樣土水特徵曲線.....	5-5
圖 5.5 飽和壓密排水單剪結果.....	5-6
圖 5.6 基質吸力 25 kPa 時非飽和排水單剪結果.....	5-7
圖 5.7 高雄甲仙攔河堰邊坡無線監測模組安裝位置.....	5-8
圖 5.8 監測點 ID02 安裝情況與相關方位資訊	5-8
圖 5.9 監測點 ID05 安裝情況與相關方位資訊	5-9
圖 5.10 監測點 ID02 現況.....	5-10
圖 5.11 監測點 ID02 觀測紀錄與雨量分布.....	5-11
圖 5.12 監測點 ID05 觀測紀錄與雨量分布	5-12
圖 5.13 Megi 颱風期間 ID02 觀測紀錄與雨量分布	5-13
圖 5.14 Megi 颱風期間 ID02 體積含水量剖面變化.....	5-13
圖 5.15 Megi 颱風期間 ID05 觀測紀錄與雨量分布	5-14
圖 5.16 Megi 颱風期間 ID05 體積含水量剖面變化.....	5-15
圖 5.17 ID05 連續觀測紀錄與雨量分布	5-15
圖 5.18 監測點 ID02 單向傾角連續觀測紀錄與雨量分布	5-16
圖 5.19 數值分析模型.....	5-19

圖 5.20 入滲開始 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....	5-19
圖 5.21 ID05 位置預測孔隙水壓歷時	5-20
圖 5.22 ID05 位置預測地表運動歷時	5-20
圖 5.23 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....	5-21
圖 5.24 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念	5-22
圖 5.25 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念	5-23
圖 5.26 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....	5-23

表目錄

表 1-1 進度甘特圖(Gantt Chart).....	1-7
表 3-1 非飽和土壤應力狀態變數組合(Fredlund and Morgenstern, 1977)	3-2
表 3-2 試驗材料基本物理性質	3-19
表 3-3 水力力學耦合試驗之試驗條件	3-27
表 3-4 水力力學耦合試驗試體配置表	3-29
表 4-1 太平山場址雨量紀錄	4-26
表 5-1 傾斜管孔位鑽孔資料(南水局 2011).....	5-2
表 5-2 簡化地質材料參數(南水局 2011).....	5-3
表 5-3 van Genuchten (1980) 模式擬合參數.....	5-5
表 5-4 非飽和水文參數.....	5-18

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

台灣地區地狹人稠，使得山區與坡地仍有人類與經濟活動，山區道路除為當地居民對外聯繫主要途徑，更具有觀光與國防之重要性，而台灣受造山運動影響導致地質脆弱之坡地分佈廣泛，且颱風與地震發生頻繁，整體天然環境因素導致坡地崩塌無法避免，而山區公路邊坡崩塌時常導致人員損傷、交通中斷及經濟損失等。山區道路邊坡崩塌主因為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且降雨引致之邊坡破壞具有一定之延時與前期徵兆，使得此類災害之預警較為可行且易發揮成效。本研究針對公路邊坡可能遭遇之淺層崩塌破壞進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線感測土層反應模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性，利於相關單位對此類災害預警及管理之參考。

現有對於降雨引發崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法兩種。經驗法為根據以往崩塌資料及崩塌的內在因素與外在誘因，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，作為崩塌潛勢評估與預測。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。

現有公路邊坡預警系統主要為沿用坡地治理常用之降雨作為預警

依據，以降雨特徵作為預警指標，少數案例已引進地表震動與位移監測，但並未將地形效應、地質特性及場址入滲行為一併考量。且以大區域降雨作為指標時，無法考慮場址微氣候特性。且因降雨為地滑發生之間接指標，而警戒值多由過往案例統計而得，缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下之破壞類型，導致此類預警系統常流於過於保守或無法提供反應時間。整體而言，經驗法因具有相當不確定性，導致其準確度不足，侷限其作為預警減災策略擬定之應用。

解析法為以嚴謹之力學概念為基礎，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、及地質材料力學行為之影響，探討崩塌機制發生原因、過程與影響範圍，其流程具有通用性與客觀性，且成果具有場址客製化之特性，但此類分析需有詳細現地調查與土層資料，且其分析過程複雜，因此相關研究較少，但其對於改善預警精度、建立依時預警模式、與減災設施規劃等有其不可取代性。

公路邊坡依其滑動深度可分為淺層與深層滑動，二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，本研究以較常見之淺層降雨崩塌為研究對象，依 Varnes (1978)之邊坡移動分類方法屬工程土壤之平面或圓弧滑動，水土保持局山崩分類方法之地滑，楊樹榮等(2011)所提本土化山崩分類系統中之弧形崩塌及平面型崩塌，初步之定義為發生於崩積土壤或崩塌岩屑，破壞深度在 2~3 m 內，且為以固體型態滑動之破壞類型。現今對淺層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淺層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淺層公路邊坡降雨崩塌預警系統具重要關鍵。

1.1.2 計畫目的

本研究目的為結合解析法與邊坡無線土層監測模組，發展場址客製化淺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，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，研究採用東京大學發展之簡易坡地淺層監測之概念(Uchimura et al. 2008)，增加土壤入滲行為量測，結合解析法預測，發展場址客製淺層公路邊坡降雨崩塌預警模組。

東大之監測系統為於邊坡表層監測土層滑動引致之地表傾角及淺層土壤含水量，於潛在滑動邊坡佈設數個量測點，各點間以無線傳輸方式將資料傳至監測主機，由遠端人員進行判讀並進行相關分析，該系統已於日本及中國進行數個場址測試並取得初步監測成果，但其佈設昂貴，且佈設點位多靠經驗，因此較適於大型高風險場址監測與學術研究。

本研究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(Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，利用台灣高科技產業中電子整合能力，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表運動、土中分層含水量之監測模組，形成分布式淺層土層感測網路，由於此類電子產品可大量生產因此可大幅降低成本，所開發監測模組具有經濟型、拋棄式且可快速安裝之監測網路。且監測點位選定與分布式監測感測反應詮釋一併考量，監測之結果回饋數值分析模式，此流程可作為開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警模組，作為相關防災作為啟動之準據。

1.2 研究範圍與對象

由於公路邊坡破壞類型眾多，本研究僅考慮降雨引致之淺層土坡滑動，不同破壞機制之邊坡破壞類型不在此計畫範圍，但所發展之無

限監測模組具有經修改後應用於不同邊坡破壞形式之監測。本計畫全期為兩年(104 年-105 年)，第一年為解析法分析架構建立及無線監測模組設計與整合測試，第二年為模型邊坡與選定場址現地測試，結合二年之成果，可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崩塌預警系統架構。短期目標為發展具依時特性之公路邊坡降雨崩塌預警技術，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，長期目標為開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警技術，做為相關防災做為啟動之準據。

公路邊坡依其滑動深度可分為淺層與深層滑動，淺層滑動常見於地表破碎層或覆土淺之陡坡，其滑動土體體積與影響區域相較較小，而深層滑動則見於具厚層崩積材料與緩坡地質，具較大之滑動土體與範圍，二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此解析法程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮。本研究適用之邊坡類型為淺層非飽和土壤邊坡，因降雨入滲導致下滑剪應力增加及強度降低，產生滑移及流動破壞。

本計畫選定具破壞潛勢且有上述淺層非飽和土壤邊坡特徵之場址進行解析法分析及佈設無線監測模組進行現地測試，收集地形幾何與地質材料組成及力學與水文特性，據以進行極限平衡分析，檢核其破壞模式是否符合淺層非飽和土層之特徵，同時進行考慮入滲之滲流分析，結合滲流分析與極限平衡分析進行與 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，另以現地資料，建立水力力學耦合數值分析模型，此模型將同時求解 Richard' s equation 及非飽和土壤非線性力學分析，藉由更新入滲引致之非飽和土壤彈性模數及強度參數，預測不同位置地表位移量分布及位移時間歷時，作為無線監測模組佈設及由地表運動量監測推算之破壞時間。

1.3 研究內容與項目

本計畫分二年執行，執行期間為 104 至 105 年，工作項目條列如下：

第一年(104 年已完成):

1. 篩選具詳細調查資料之候選公路邊坡研究場址，進行傳統極限平衡邊坡穩定分析及水力力學耦合數值模擬，建立完整解析法架構。
2. 研製簡易土層無線監測模組原型，系統可監測土層運動量及水力特性，整合資料擷取與無線傳輸功能，進行少量製作及進行模組整合測試。
3. 整合解析法結果，發展簡易土層無線監測模組佈設原則，發展相關資料處理程序。

第二年(105 年):

1. 以模型試驗，測試簡易土層監測模組效能。
2. 安裝簡易土層監測模組於研究測試場址，進行現地測試與連續監測。
3. 建立淺層崩塌數值分析流程及研究場址之監測量警戒及行動值，發展客製化公路邊坡降雨淺層崩塌預警系統架構。
4. 參考科技部「科技計畫績效管考平台 (<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。

依據計畫規劃，本年度(105 年)研究之時程規劃與進度如表 1-1 所示，主要工作內容與項目說明如下：

1. 以完成之簡易土層無線監測模組原型，進行系統優化及耐久測試，

並以解析法分析及對應之模型試驗，監測土層運動量及水力特性，測試簡易土層監測模組效能及資料處理程序之正確性，回饋解析法成果。

2. 依計畫目的與破壞特徵，篩選具詳細調查資料之候選邊坡研究場址，進行必要之地層材料力學試驗，並進行傳統極限平衡邊坡穩定分析及水力力學耦合數值分析，建立完整解析法架構。將完成之土層無線監測模組原型，佈設於研究測試場址，進行現地測試與連續監測。
3. 結合解析法與監測資料，修正場址降雨崩塌行為預測數值模式，建構測試場址客製化公路邊坡降雨崩塌預警技術雛形。

依據研究之內容與項目，105 年度之成果要求說明如下：

1. 以室內或模型試驗測試無線監測性能，並進行系統優化與可靠度提升。
2. 進行選定研究場址之地層材料試驗與地質資料收集與必要之室內實驗，建立場址地質模型，進行考慮入滲行為之非飽和土壤無限邊坡與二維水力力學耦合分析，提供無線監測模組安裝與搭配之依時預警模式。
3. 於選定之研究場址佈設無線監測模組，進行系統現地測試與長期監測。
4. 結合解析法與即時監測數據，修正場址降雨崩塌行為預測數值模式，建構測試場址客製化公路邊坡依時降雨崩塌預警技術架構。

表 1-1 進度甘特圖(Gantt Chart)

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	備註
候選場址選定											
現地取樣與非飽和室內試驗											
無線監測模組原型優化											
場址邊坡水力力學耦合分析											
期中報告											
監測模組現地安裝											
現地監測與資料分析架構建立											
場址客製化預警架構建立											
期末報告初稿											
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	30	45	60	70	80	90	95	100	
預定查核點	第 1 季：現地取樣與非飽和室內試驗										
	第 2 季：期中報告										
	第 3 季：無線監測模組監測與資料分析										
	第 4 季：期末報告初稿										
說明:(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。											
(2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定:①工作天數②經費之分配③工作量之比重④擬達成目標之具體數字。											
(3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。											

1.4 執行成果、效益及應用

計畫執行完成之成果包括：

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邊坡崩塌分析架構，並以此做為公路邊坡淺層崩塌預警模式之雛形。
2. 測試淺層簡易土層監測模組於山區公路淺層邊坡崩塌預警之成效。
3. 開發客製化公路邊坡淺層崩塌監測與預警技術，提升預警準確度。

計畫執行全期效益與應用如下：

1. 發展具依時特性之公路邊坡降雨崩塌預警技術，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. 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邊坡淺層破壞預警技術，做為相關防災作為啟動之準據。

第二章 研究方法及進行步驟

2.1 研究方法

本研究為進行考慮水力力學耦合之非飽和土層邊坡穩定分析及無線監測模組開發，整合此二主軸，發展具依時特性之公路邊坡預警系統，研究流程如圖 2.1 所示，整體流程包括以解析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)及淺層土壤水力反應，結合本計畫研發之簡易無線監測模組研發，即時自動監測土層力學與水力反應，修正水力力學耦合分析成果並依修正結果推估滑動發生時間及滑動土體幾何性質，作為場址客製化具依時特性之預警系統。

水力力學耦合分析包括考慮非飽和土壤中其非線性滲透特性之特點，導入水力邊界條件，求解 Richard' s equation，以模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低。此架構結合極限平衡分析可進行與 Collins and Znidarcic (2004)相近之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測滑動可能發生之時間，此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。但臨界破壞深度與破壞包絡線分析無法推估地表土層運動量，而地表特定位置之運動量推估有賴於複雜之數值模擬。本研究以假設合理之邊界與初始條件，進行考慮入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果更新非飽和土壤有效應力、土壤勁度與強度，進行二維非飽和土層時域有效應力分析，推估滑動土體於地表位移與傾角歷時。

由於進行解析法邊坡穩定分析輸入參數具有不確定性，因此須以現地監測結果反饋進行模式修正與調整，鑒於以雨量監測準確度不佳，現有邊坡土層監測系統佈設費時、維護不易且多為非即時監測，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 (Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，客製化具無線網路通

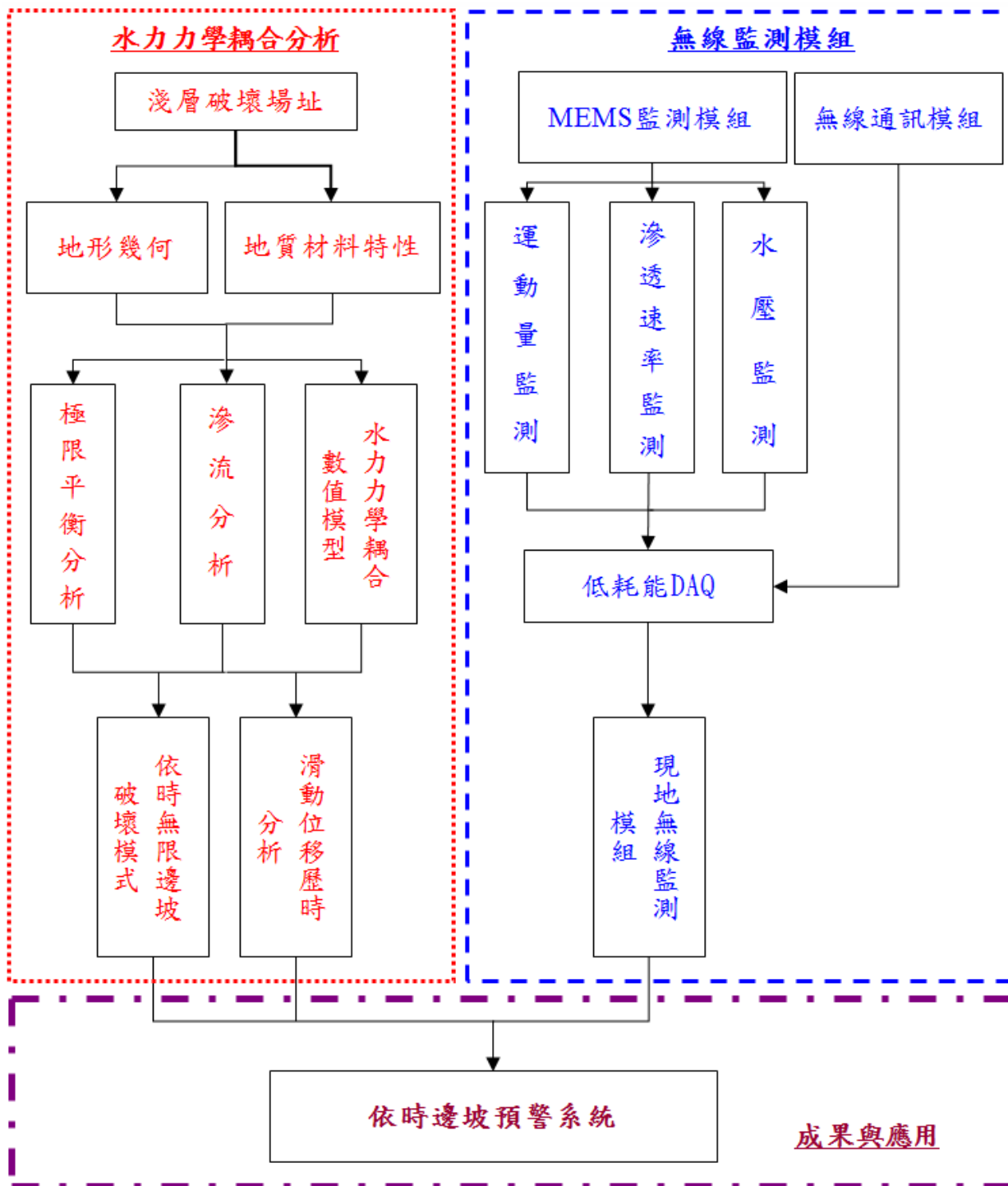


圖 2.1 依時邊坡預警系統研究架構圖

訊功能且可監測地表傾角、地表運動、入滲速率及土壤含水量之監測模組，形成分佈式邊坡淺層無線感測網路，入滲速率將由不同深度之土壤水分計，利用入滲引起含水量增加而改變土壤電容係數之特性，量測土層含水量剖面，由土壤之土水特徵曲線 (soil-water characteristic curve, SWCC)，可推估土層基質吸力(matrice suction)，而入滲速率則由分層含水量變化，以現地瞬時剖面法 (in situ instantaneous profile method) (Watson, 1966)推估非飽和滲透係數，並以地表飽和為水力邊界條件進行入滲速率分析，所量測非飽和滲透係數可用於檢核滲流分析成果、考慮入滲之極限平衡分析與二維水力力學耦合邊坡分析，進一步推估可能破壞時間。由二維水力力學耦合數值分析，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。

本研究初期已完成簡化邊坡模型分析，建立水力力學耦合分析之架構，並進行簡易淺層邊坡無線監測模組雛型之研發測試，本年度則選定一測試場址進行全尺度分析、現地安裝與連續監測，作為依時預警架構之修正與成效評估。場址選取依據現有邊坡調查資料，選定需進行客製化依時預警系統之場址，收集其地形幾何與地質材料組成及力學與水文特性，據以進行極限平衡分析，檢核其破壞模式是否符合淺層非飽和土層之特徵，同時進行考慮入滲之滲流分析，結合滲流分析與極限平衡分析可進行無限邊坡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，另以現地資料，建立水力力學耦合數值分析模型，藉由更新入滲引致之非飽和土壤彈性模數及強度參數，預測不同位置地表位移量分佈及位移時間歷時，作為無線監測模組佈設及由地表運動量監測推算之破壞時間。

為符合淺層破壞與無線通訊涵蓋之條件，候選場址須符合下列條件：

1. 現地需為軟弱土層，為陡坡地形，破壞面為非飽和土層之淺層破壞。
2. 具有相關幾何、水文及地質參數，並儘可能有現地監測資料參考。

3. 須為鄰近道路之邊坡，且具高破壞潛勢或有破壞歷史。
4. 鄰近具有有線通訊及電源供應，以裝設監測主機。

2.2 國內外有關本計畫之研究情況

2.2.1 解析法邊坡分析

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

在多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲不但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，因此水與土壤之耦合特性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 25kPa 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 (postfailure) 與擴散 (propagation) 三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。Cascini et al. (2010)使用現地應力路徑 (field stress path) 的框架，將邊坡破壞後的行為分成地滑 (slide)，地滑變流動 (slide to flow) 與流動型地滑 (flowslide) 如圖 2.2 所示。其中之剪應力 q 定義為：

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

而平均有效應力 p' 定義為：

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

F_d 代表地層內之驅動力， F_r 為抵抗力， δ 為地層移動量。受到降雨入滲或地層內泉水之影響使得應力路徑達到破壞線，同時 $F_d \geq F_r$ 時即發生邊坡破壞，但是破壞發生後是否產生流動型地滑則控制於地層力學性質，地下水壓變化以及破壞時排水狀況的特性。大部分地滑式邊坡破壞屬於圖 2.2b 所示，破壞時 q 保持常數。圖 2.2c 的狀況是當高處邊坡破壞時產生應力轉移（stress transfer）或漸進式破壞使得破壞區之 q 增加。圖 2.2d 則發生於鬆土中，破壞發生後剪力破壞變成不排水應變軟化而流動（Anderson and Sitar, 1995）。

Collins and Znidarcic (2004) 提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，因此在不考慮邊界毛細現象之情況下降雨對邊坡穩定沒有影響，但對非飽和邊坡而言，滲漏(percolation)對邊坡穩定有顯著的影響，邊坡內孔隙水壓分佈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，須將非飽和土壤之基質吸力對剪力強度影響及滲流列入考慮。

考慮一坡角為 β 之無限長邊坡(如圖 2.3)， W 為自重， N 和 T 分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力，並假設邊坡破壞會發生在臨界深度 d_{cr} 處，作用在切片之側向力大小相同方向相反可不考慮，另外由於相鄰兩切片之高層差，在切片內形成一高程水頭差，此水頭差造成平行邊坡坡面之滲流力 S ，其大小、方向和作用位置隨滲透過程而改變，若已知某一時間之壓力水頭分佈，則可以計算此滲流力之大小、方向和作用位置。考慮滲流力只作用在切片內已飽和之部分，在切片內未飽和之部分以總應力分析，飽和部分以有效應力進行分析。

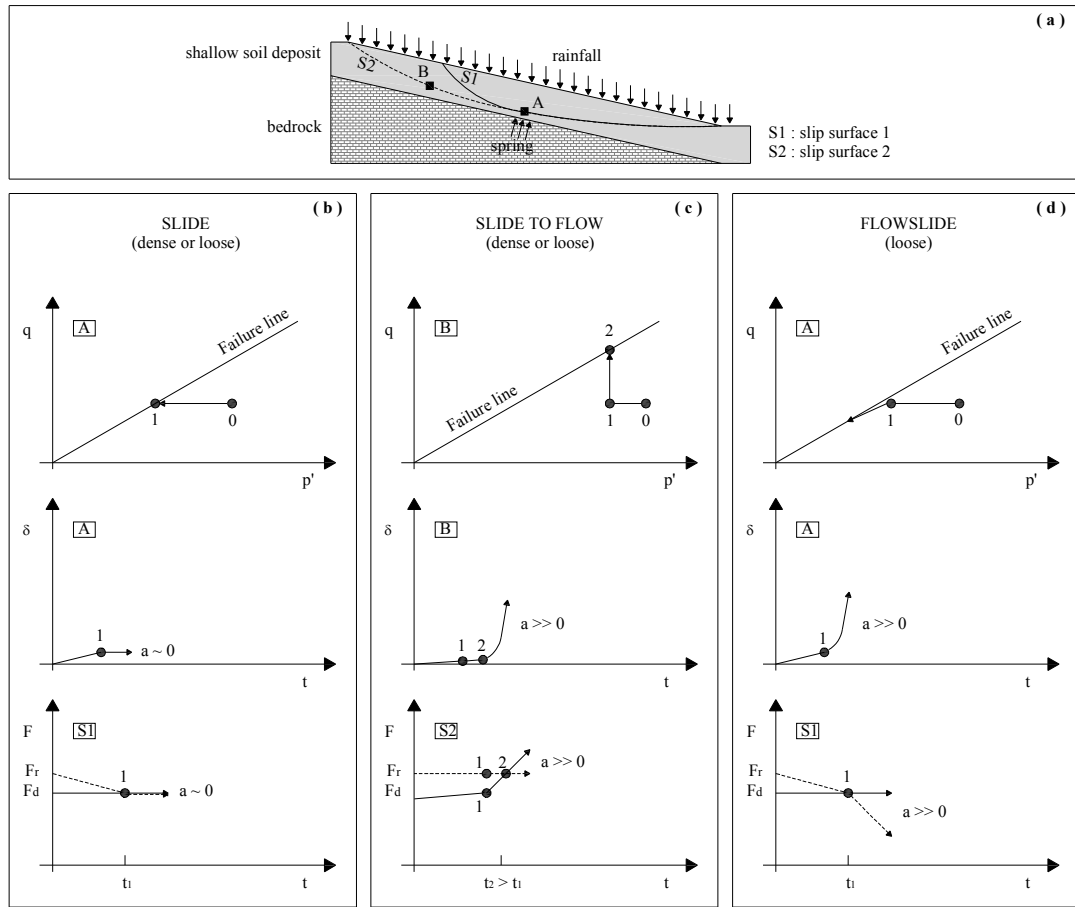


圖 2.2 從有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)

假設為平行坡面滲流和其滲流力之方向與水平面之夾角為 β^* ，滲流力之大小可表示為 $i \cdot \gamma_w$ ， γ_w 為水的單位重， i 為水力梯度，由圖 22.4 之流線網可得知任意深度 Z 之水力梯度和壓力水頭：

$$i = \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \beta^*)} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$h_p = \frac{1}{1 + \tan \beta \cdot \tan \beta^*} (Z) \dots\dots\dots (2.4)$$

滲流力 S 可分解為垂直坡面和平行坡面兩個分量，故隨著入滲深度之滲流力可以式(2.5a)、(2.5b)表示：

$$S_N = i \cdot \gamma_w \cdot \cos \beta \cdot [\sin \beta^* - \cos \beta^* \cdot \tan \beta] \cdot b \cdot d_{in} \dots\dots\dots (2.5a)$$

$$S_T = i \cdot \gamma_w \cdot \cos \beta \cdot [\cos \beta^* + \sin \beta^* \cdot \tan \beta] \cdot b \cdot d_{in} \dots\dots\dots (2.5b)$$

其中 d_{in} 為入滲深度， b 為切片寬度。

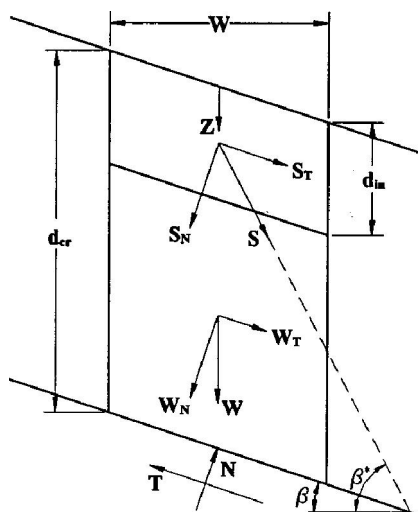


圖 2.3 無限邊坡切片之自由體圖 (Collins and Znidarcic, 2004)

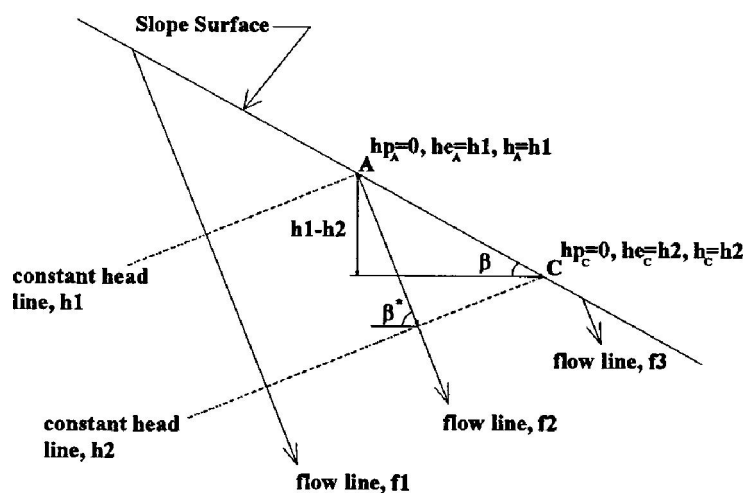


圖 2.4 無限邊坡內水力梯度和 β 、 β^* 之關係 (Collins and Znidarcic, 2004)

重力 W 可分解為垂直坡面和平行坡面兩個分量，以式(2.6a)、(2.6b) 表示：

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

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

其中 γ 為飽和土壤單位重(假設入滲部分飽和)， γ' 為入滲部分之土壤單位重(即浸水單位重，假設為 $\gamma - \gamma_w$)。

由極限平衡概念可以得到正向力(N)和剪力(T)之力平衡方程式如式(2.7a)、(2.7b)：

$$N = [\gamma' \cdot d_{in} + \gamma \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot b \cdot \cos \beta + i \cdot \gamma_w \cdot \cos \beta \cdot [\sin \beta^* - \cos \beta^* \cdot \tan \beta] \cdot b \cdot d_{in} \quad \dots\dots\dots (2.7a)$$

$$T = [\gamma' \cdot d_{in} + \gamma \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot b \cdot \sin \beta + i \cdot \gamma_w \cdot \cos \beta \cdot [\cos \beta^* + \sin \beta^* \cdot \tan \beta] \cdot b \cdot d_{in} \quad \dots\dots\dots (2.7b)$$

由上述二式可得到正向應力 ($\sigma = N \cos \beta / b$) 及剪應力 ($\tau = T \cos \beta / b$)，再根據衍伸莫爾-庫倫破壞準則(Fredlund et al., 1978)，得到無限邊坡破壞之臨界深度 d_{cr} ，如式(2.8)：

$$d_{cr} = \frac{c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma \cdot \cos^2 \beta \cdot [\tan \beta - \tan \phi']} + \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot d_{in} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \tan \beta \cdot \tan \beta^*} \cdot \left(\tan \beta + \frac{1}{\tan(\beta - \phi')} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

根據式(2.4)，且 $Z = d_{in}$ ，可將式(2.8)改寫為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c \cdot \tan \phi^b - \gamma_w \cdot h_p \cdot \tan \phi}{\gamma \cdot \cos^2 \beta \cdot [\tan \beta - \tan \phi']} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

式中 h_c 及 h_p 分別為基質吸力及壓力水頭(單位為長度)，如此可將臨界深度表示為壓力水頭和土壤特性參數的函數，而 $(\gamma_w \cdot h_c) = u_a - u_w$ ，為負的壓力水頭，根據式(2.9)，並考慮土層內之壓力水頭變化，可定義出土層之穩定包絡線(即壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係)。

Collins and Znidarcic (2004)將式(2.9)以下列邊坡土壤參數： $\beta = 40^\circ$ ， $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ， $c' = 3 \text{ kPa}$ ， $\phi' = 30^\circ$ ， $\phi^b = 26^\circ$ ，並根據一預測之壓力水頭 h_p ，可計算出對應之臨界破壞深度(如圖 2.5)，圖中穩定包絡線和滲流曲線交於 A 和 B 兩點(FS=1)，由於無限邊坡分析未考慮切片間的側向束制力，所以在某一深度切片之下滑力會克服下滑之抵抗力(即 A 點)，故 A 點之破壞和滲流沒有關聯，而 B 點和穩定包絡線交於滲流開始後 47 小時，深度 1.8m 處，可明顯看出 B 點之破壞乃由於滲流使土壤內之基質吸力降低，土壤的剪力強度下降所造成的。

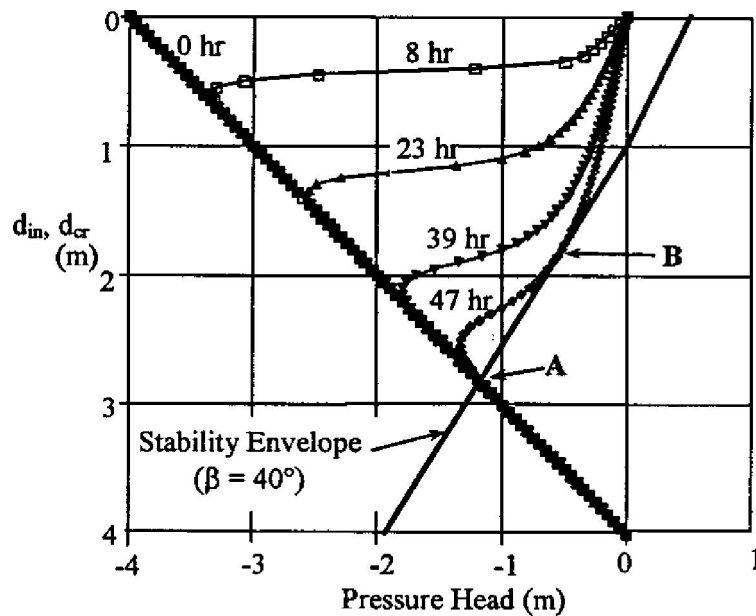


圖 2.5 典型細顆粒土壤水力力學耦合邊坡穩定分析結果(Collins and Znidarcic, 2004)

以無限邊坡極限平衡分析，結合非飽和土壤之衍伸莫爾-庫倫破壞準則(Fredlund et al., 1978)，可推估非飽和無限邊坡破壞之臨界深度(d_{cr})，考慮滲流力發展可將臨界深度表示為壓力水頭和土壤特性參數的函數，考慮土層內之壓力水頭變化，可定義出土層壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係之穩定包絡線(圖 2.5)，此可做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。

2.2.2 邊坡監測預警

Uchimura et al. (2008) 發展一簡易邊坡預警監測系統，其僅監測表面位移傾角及坡面含水量變化，系統配置如圖 2.6 所示，藉由無線傳輸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。此系統已佈設於多個場址，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，但現有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，因此仍有相當改善空間。

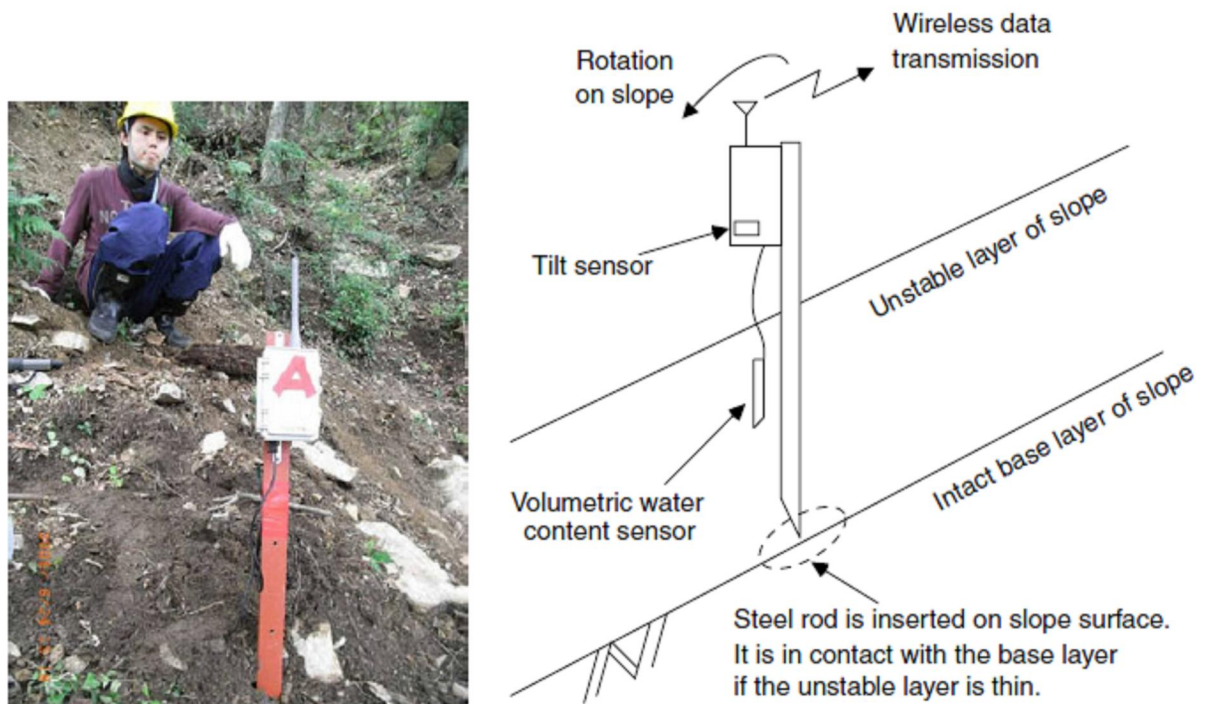


圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

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以應用於管理層次。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，並可發送警示通知守視人員。

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

李秉乾(2004)透過現地實測的結果，建議各項感測單元的傳輸方式以 TCP 為佳，盡量避免異質傳輸規格的整合，以減少系統不穩定性。而在相同的傳輸協定下，資訊傳輸介質可依地形需要進行不同的規劃，如 RS485、TCP 或是 802.11b 之方式。該研究亦指出山區道路邊坡監測系統在整體架構上，以監測路段現地資料的接收及整合為主要目的，經由無線傳輸技術將監測資料傳回資料接收中心並儲存於資料庫。所有資料經過加值與整合，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。

分佈式無線感測器網路(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。為充分利用台灣於高科技產業之優勢，本計畫將採用廣為應用之微機電系統 (MEMS)感測器，發展可監測地表運動量、傾角 (tilting)及淺層土壤含水量(soil moisture)及之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分佈式無線感測器網路，由於其可大量生產，因此可大幅降低成本，長期目標為建立模組化可拋棄式 WSN，利於推廣。

由於監測點位選定與分佈式無線感測器網路反應詮釋與滑動機制相關，為增進預警系統之準確度，監測網路佈設前將進行地質模型建立及邊坡滑動數值分析，此結果將用於監測網路佈設，而監測之結果亦可回饋數值分析模式，本計畫將結合無線散佈式表層感測系統與解析成果，建立可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警系統，以此流程建立場址不同階段預警值，作為相關防災作為啟動之準據。

第三章 水力力學耦合邊坡穩定分析

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

3.1 非飽和土壤力學

3.1.1 非飽和土壤性質與基質吸力

土壤依其飽和程度可分為飽和土壤及非飽和土壤，飽和土壤中的孔隙完全被水填滿，可分為固相及液相；而非飽和土壤中的孔隙因包含水及空氣，故有固、液、氣三相，Fredlund and Morgenstern (1977) 提出非飽和土壤中存在孔隙水及孔隙空氣交界面形成之收縮膜，為非飽和土壤之第四相，收縮膜交界面一側為孔隙氣壓，一側為孔隙水壓，由於兩側壓力不同，為達到壓力平衡，收縮膜會產生一張力，即基質吸力。

飽和土壤之應力狀態多使用 Terzaghi (1936) 提出飽和土壤之有效應力(σ')，以兩個單一應力狀態變數：總應力(σ)與孔隙水壓(u)表示，公式即為 $\sigma' = \sigma - u$ 。而非飽和土壤應力狀態較複雜，Fredlund and Morgenstern (1977) 建議由不同的參考壓力決定兩獨立應力狀態變數組合，以描述非飽和土壤力學行為，如表 3-1 所列，而實際工程問題之孔隙氣壓為大氣壓力，即以孔隙氣壓作為參考壓力，以 $(\sigma - u_a)$ 與 $(u_a - u_w)$ 作為非飽和土壤之應力狀態變數較為恰當，其中 $(\sigma - u_a)$ 為淨正向應力 (net normal stress)， $(u_a - u_w)$ 則為基質吸力。

表 3-1 非飽和土壤應力狀態變數組合(Fredlund and Morgenstern, 1977)

參考壓力	應力狀態參數
孔隙氣壓， u_a	$(\sigma - u_a) \cdot (u_a - u_w)$
孔隙水壓， u_w	$(\sigma - u_w) \cdot (u_a - u_w)$
總應力， σ	$(\sigma - u_a) \cdot (\sigma - u_w)$

Bishop (1959)提出非飽和土壤有效應力公式中應用此兩應力狀態變數如式(3.1)所示：

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \dots\dots\dots (3.1)$$

式(3.1)中 χ 為與飽和度相依之參數，飽和狀態為 1，完全乾燥狀態為 0。此應力狀態變數組合除符合實際工程條件外(Fredlund, 1979; Fredlund and Rahardjo, 1987)，並已廣泛應用於分析非飽和土壤之力學行為(Alonso et al., 1990; Wheeler and Sivakumar, 1995)。

非飽和土壤總吸力為基質吸力(或稱為毛細吸力)與滲透吸力(osmotic suction)之加總，Krahn and Fredlund (1972)對土壤吸力之試驗結果顯示滲透吸力的變化甚小，而基質吸力之變化約等於土壤總吸力之變化，故將基質吸力視為土壤總吸力，並視為非飽和土壤應力狀態變數之一。非飽和土壤之氣相與水相交界面(air-water interface)具有重要的力學影響，因此 Fredlund and Rahardjo (1993)將氣水交界面定義為除固、液、氣三項外之第四相稱之為收縮膜(contractile skin)，圖 3.1 為非飽和土壤結構示意圖。氣水交界面上之分子所受到不平衡之液體內聚力(圖 3.2a)，收縮膜產生表面張力使之平衡，收縮膜之受力情形如圖 3.2b 所示，其中 $u + \Delta u$ 即為孔隙氣壓 u_a ； u 為孔隙水壓 u_w ； T_s 為表面張力； R_s 為收縮膜之曲率半徑，由 Kelvin 毛細模型公式推導出式(3.2)：

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \dots\dots\dots (3.2)$$

上式之 $(u_a - u_w)$ 為收縮膜上氣相與水相之壓差，即為基質吸力。由上式可知當土壤基質吸力上升時，收縮膜之曲率半徑減小其曲率增加。

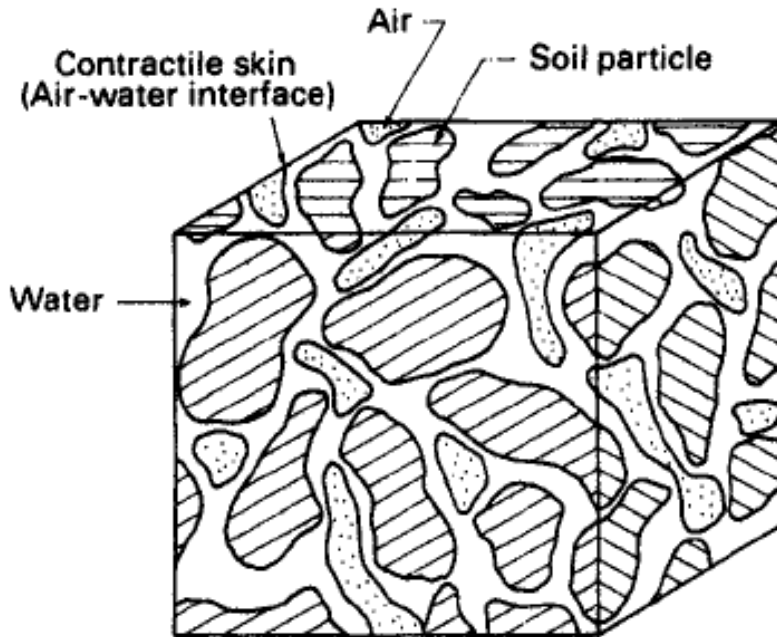
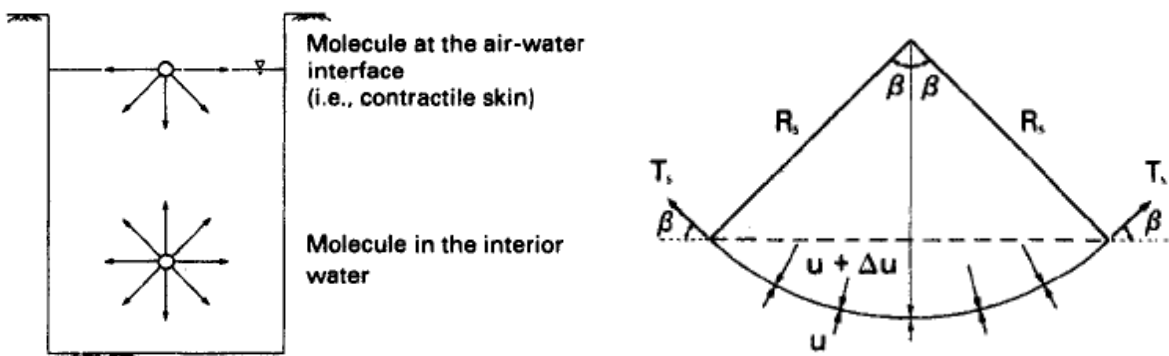


圖 3.1 非飽和土壤結構示意圖(Fredlund and Rahardjo, 1993)



(a)分子受力狀況

(b)收縮膜受力狀況

圖 3.2 氣水交界面之表面張力現象(Fredlund and Rahardjo, 1993)

3.1.2 非飽和土壤剪力強度

Fredlund et al. (1978)將淨正向應力與基質吸力兩獨立之應力狀態變數，代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則(extended Mohr-Coulomb failure criteria)，非飽和土壤抗剪強度如式(3.3)：

$$\tau_f = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi' \dots\dots\dots (3.3)$$
$$= c_t + (\sigma - u_a) \tan \phi$$

式中 c' 與 ϕ' 分別為飽和土壤有效凝聚力與摩擦角， ϕ^b 為非飽和土壤基質吸力所提供之剪力摩擦角； c_t 稱為視凝聚力(apparent cohesion)，為有效凝聚力與基質吸力項之加總，其示意圖如圖 3.3 所示以剪力、淨正向應力與基質吸力繪製之三維圖，而圖中存在一破壞包絡面與所有莫爾圓相切，且剪力強度隨著淨正向應力線性遞增，基質吸力亦有相同趨勢。

Gen et al. (1988)以冰凍土進行多階段非飽和直剪試驗，結果顯示剪力強度與基質吸力為非線性遞增關係，意即 ϕ^b 非為定值。Fredlund et al. (1995)之試驗結果如圖 3.4 所示， ϕ^b 隨基質吸力增大而漸小；Oloo and Fredlund (1996)發表此非線性關係說明當土壤達到殘餘含水量時，其基質吸力對於土壤剪力強度之影響可忽略。

3.1.3 土壤含水量特徵曲線

土壤含水量特徵曲線(Soil-water characteristic curve, SWCC)為描述土壤含水量與基質吸力關係之函數，含水量通常以體積含水量(θ)表示，其定義為土壤中水分佔有的體積和土壤總體積的比值，另亦可用重量含水量(ω)或飽和度(S_r)表示，典型的土壤含水量特徵曲線如圖 3.5 所示。非飽和土壤因基質吸力改變，在吸水(wetting)及排水(drying)的過程中會產生遲滯效應，即在相同基質吸力下吸水曲線(wetting curve)上的含水量會低於排水曲線(drying curve)上的含水量，原因是排水後土壤顆粒排列變緊密。

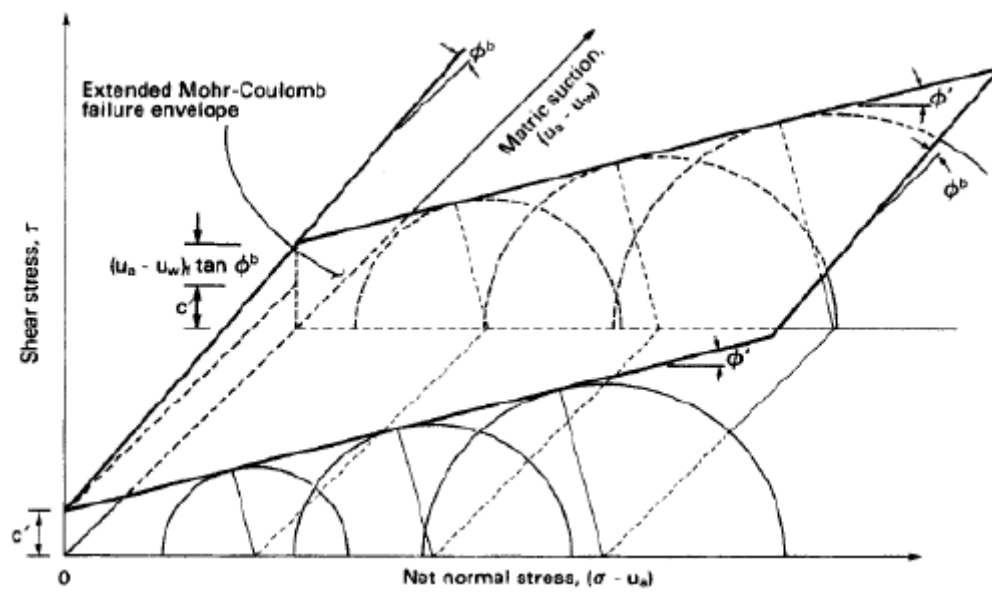


圖 3.3 非飽和土壤莫爾-庫倫破壞包絡線(Fredlund and Rahardjo, 1993)

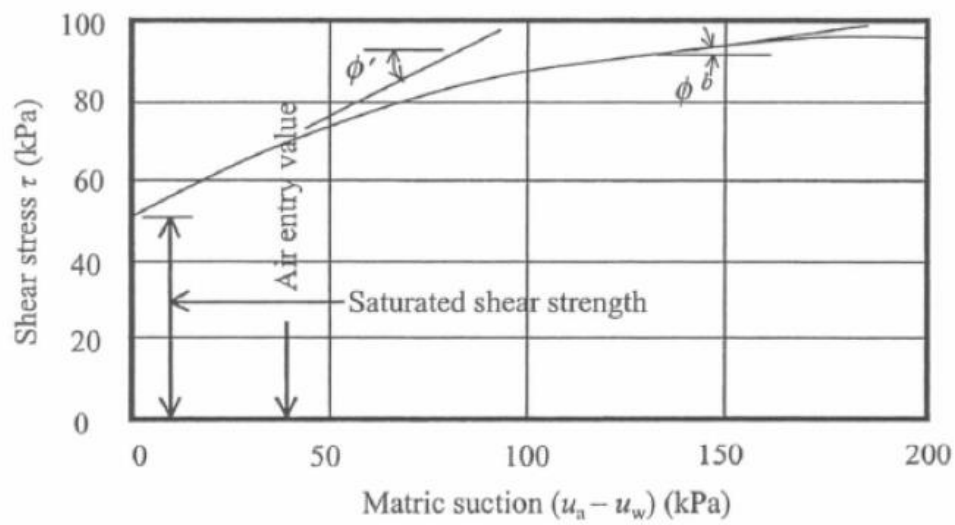


圖 3.4 剪應力與基質吸力之破壞包絡線(Fredlund, 1995)

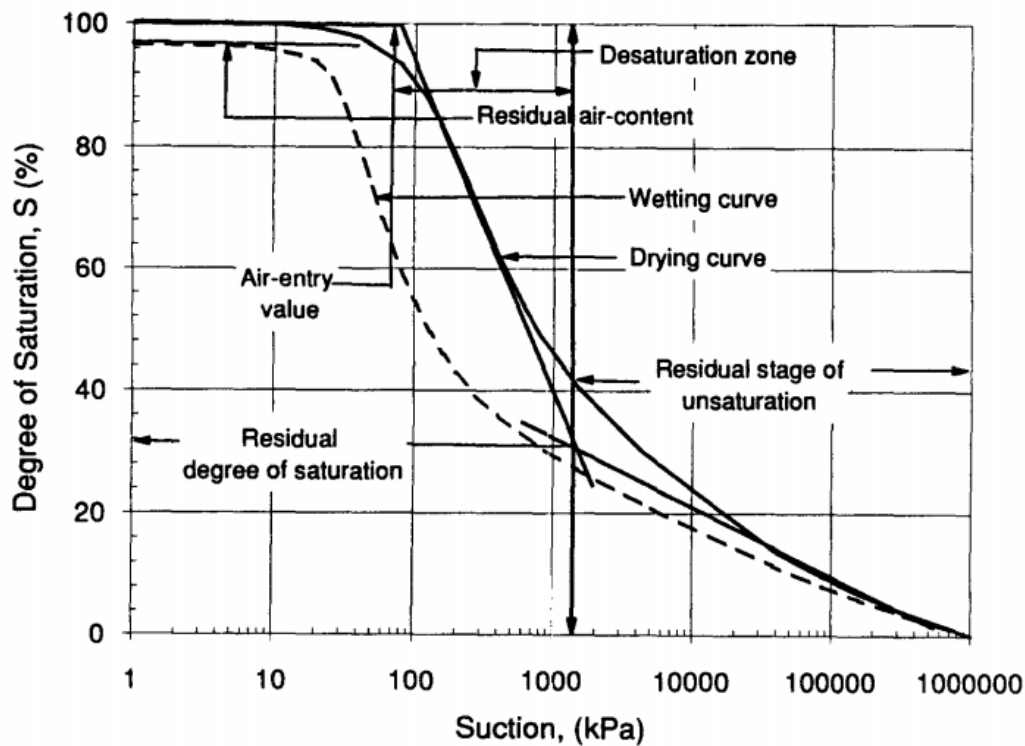


圖 3.5 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)

土壤特徵曲線去飽和的過程可分為三個階段(如圖 3.6 所示)，邊界效應階段(boundary effect stage)時，幾乎所有孔隙都被水填滿，當基質吸力大於進氣值($u_a - u_w$)_b(air-entry value)，空氣開始進入土壤孔隙；接著進入轉移階段(transition stage)，土壤開始去飽和，含水量隨基質吸力增加而明顯降低；最後進入殘餘階段(residual stage)，此階段含水量受基質吸力的影響快速降低達到殘餘含水量(residual water content)。另外，在非飽和土壤中，滲透係數亦會受到基質吸力的影響，如圖 3.7 所示。

3.2 非飽和滲流分析

實務上考慮滲透情形下的邊坡穩定分析，大部份利用提高地下水位以模擬降雨入滲過程中孔隙水壓增加的現象，但孔隙水壓的變化受到土壤本身的滲透特性控制而有不同的反應。因非飽和土壤之基質

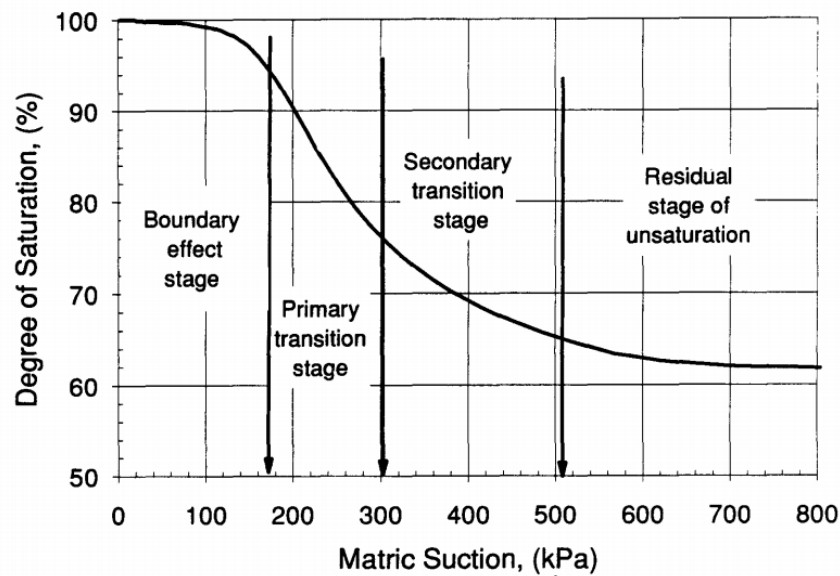


圖 3.6 土壤含水量特徵曲線去飽和三階段 (Fredlund, 1995)

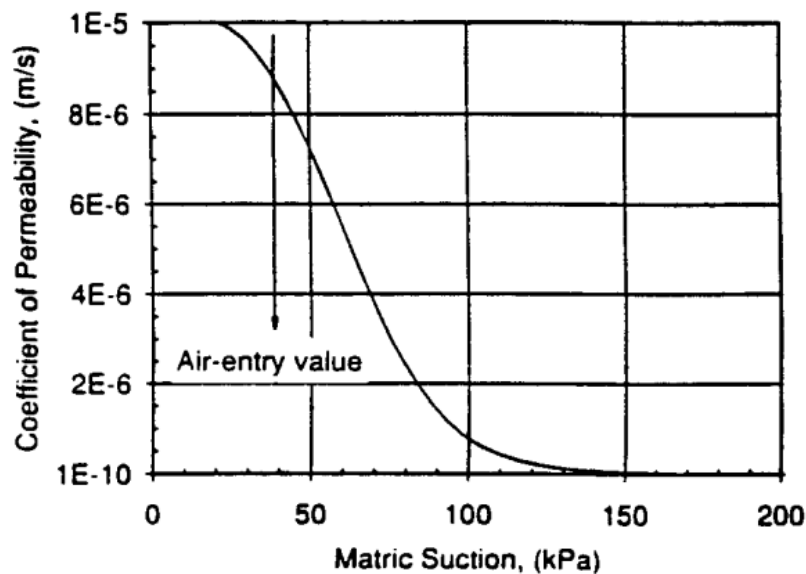


圖 3.7 土壤滲透係數與基質吸力之關係(Fredlund, 1995)

吸力及飽和土層滲流力之變化和孔隙水壓在邊坡內的分佈有密切關係，為得到孔隙水壓分佈隨滲透變化情形，需了解其水力機制。

3.2.1 非飽和滲透控制方程式

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 3.8 為典型土壤之非飽和土壤特性曲線，而土壤含水量為基質吸力函數(土水特性曲線)，因此非飽和滲透(percolation)中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動控制方程式可依質量守衡的原理推導建立，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，提出在一均質、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：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(h_p) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(h_p) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h_p) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta(h_p)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

式中 h =總水頭； θ =體積含水量； h_p =壓力水頭； k =土壤滲透係數(為壓力水頭之函數)，給定初始及邊界條件，可計算土壤內總水頭(或壓力水頭)隨時間之變化。

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。滲透使非飽和之土柱隨時間增加而漸趨飽和，導致細顆粒土壤的基質吸力減少，使其剪力強度下降。

3.2.2 一維入滲分析

由於本研究目標為建立無限邊坡入滲引致之邊坡破壞依時預警系統，因此進行一維入滲分析。考慮一均質土體，根據質量守恆且土壤和水均不可壓縮，為了簡化計算，假設土壤滲透係數 k 不隨深度改變(即 $\partial k(h_p)/\partial z = 0$)，可得鉛垂向之一維 Richard equation 如式 3.5 所示：

$$M(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial z} \right] \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

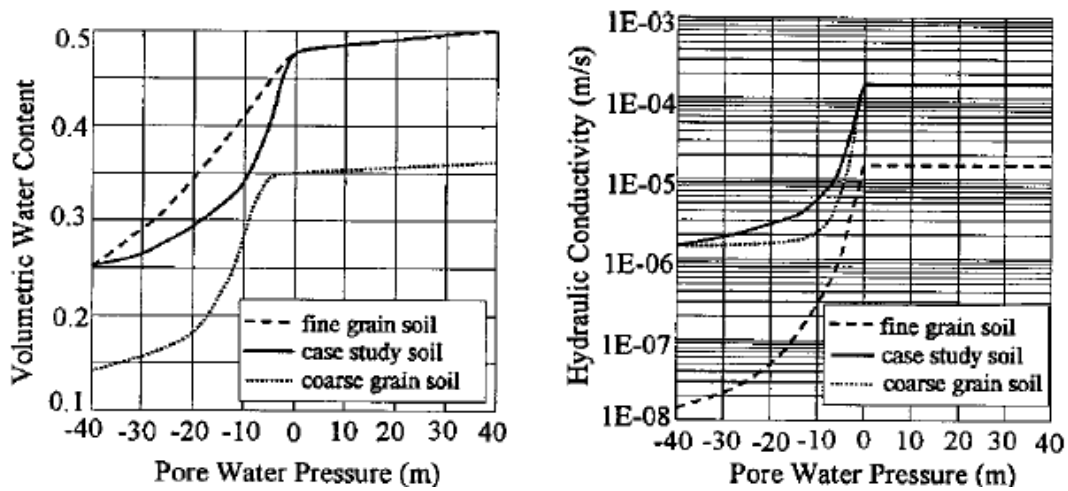


圖 3.8 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

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 $1/200$ 為 Δz ， Δt 則以 Hills 等人所建議的 Δt 限制式， $\Delta t \leq \Delta z / |V|$ ， $V = Q / (\theta(0, t) - \theta_i)$ ，即數值計算之可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可將式 3.5 改寫為差分形式：

$$M(h_p) \frac{h_{p,j}^{n+1} - h_{p,j}^n}{\Delta t} = \frac{k_{j+\frac{1}{2}} \left[(h_{p,j+1}^{n+1} - h_{p,j}^{n+1}) + (h_{p,j+1}^n - h_{p,j}^n) \right]}{2\Delta z^2} - \frac{k_{j-\frac{1}{2}} \left[(h_{p,j}^{n+1} - h_{p,j-1}^{n+1}) + (h_{p,j}^n - h_{p,j-1}^n) \right]}{2\Delta z^2} \dots\dots\dots (3.6)$$

為驗證一維分析模式之可靠度，以邊界條件和 Collins and Znidarcic (2004)相同，上邊界之使用壓力水頭=0m，下邊界條件為排水邊界，使用「典型」細顆粒土壤之水土特性曲線(如圖 3.8 所示)，解得之滲流分析結果，和 Collins and Znidarcic (2004)以 2D 數值程式 SEEP/W 之結果比較如圖 3.9 所示，可以發現趨勢大致上相同，但數值上有差異，可能是因為 SEEP/W 係利用有限元素法進行二維分析，而本研究為利用一維有限差分數值方法進行分析。

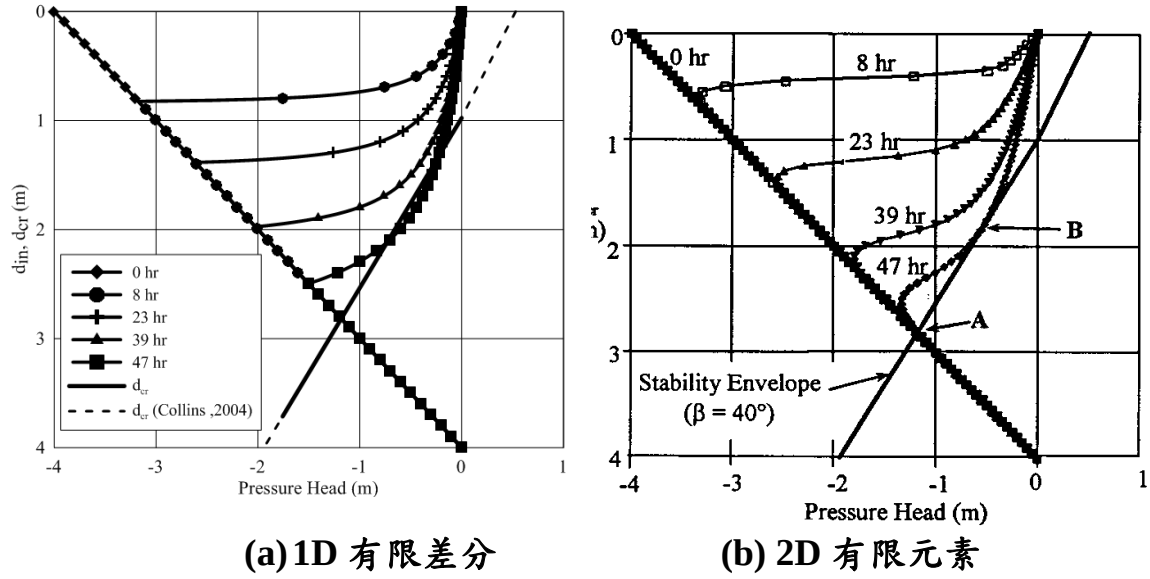


圖 3.9 非飽和滲流分析結果比較

3.3 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析

本研究參考 Collins and Znidarcic (2004) 降雨下之無限邊坡穩定分析概念，推導無限邊坡之水力力學耦合穩定分析，考慮一坡角為 β 之無限長邊坡，如圖 3.10，地下水位面位於 d_w 處， W 為自重， N 及 S 分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力， d_{in} 為入滲深度，假設邊坡破壞會發生在臨界深度 d_{cr} 處。切片內飽和部分 ($z \leq d_{in}$) 以有效應力進行分析，土壤單位重為飽和單位重 γ_s ，在土壤飽和部分會產生滲流，平行向滲流平行坡面，水力梯度為 $i_h = \sin \beta$ ，垂直向滲流由入滲造成，水力梯度 $i_v = 1$ ；切片內非飽和部分 ($z > d_{in}$) 以總應力分析，土壤單位重為總體單位重 γ_t ，其基質吸力之大小隨深度改變，即 $h_c = d_w - z$ 。

$$S_h = i_h \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \dots\dots\dots (3.9)$$

故滑動面上之正向力 N 及剪力 S 可以式(3.10a) 、(3.10b)表示：

$$\begin{aligned} N &= [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos \beta + i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \cos \beta \\ &= [\gamma_s \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos \beta \dots\dots\dots (3.10a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta + i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin \beta + i_h \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \\ &= [\gamma_s \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin \beta \dots\dots\dots (3.10b) \end{aligned}$$

除以 $l \cdot \sec \beta$ 可得到滑動面上之正向應力及剪應力，如式(3.11a) 、(3.11b)：

$$\sigma = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos^2 \beta \dots\dots\dots (3.11a)$$

$$\tau = [\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \dots\dots (3.11b)$$

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

$$\tau = c_t + \sigma \cdot \tan \phi' \dots\dots\dots (3.12)$$

可推導臨界滑動深度 d_{cr} 為：

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in} - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} \dots\dots (3.13)$$

由 $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c \tan \phi^b$ 、 $h_c = d_w - d_{cr}$ ，可將式(3.13)改寫為：

$$\begin{aligned} &\left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr} \\ &= \frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \underbrace{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲流}} - \underbrace{\frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'}}_{\text{平行滲流}} \quad (3.14) \end{aligned}$$

若不考慮平行滲流的影響，並忽略入滲對土壤單位重的改變，可將式(3.11a)、(3.11b)改寫為：

$$\sigma = \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta \dots\dots\dots(3.15a)$$

$$\tau = \gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \dots\dots\dots(3.15b)$$

所對應之安全係數(FS)為：

$$FS = \frac{c_t + \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \dots\dots\dots(3.16)$$

當 $z = d_{cr}$ 時 $FS = 1.0$ ，則式(3.16)可轉換為：

$$1 - \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot d_{cr} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \dots\dots\dots(3.17)$$

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \dots\dots\dots(3.18)$$

由 $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b$ ，可將式(3.18)改寫為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \dots\dots\dots(3.19)$$

式(3.19)中基質吸力隨深度的分佈 $h_c(z)$ 可由 1-D 滲流分析解得，並代入式(3.19)進行迭代計算得到 d_{cr} ，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

3.4 水力力學耦合試驗

3.4.1 水力力學耦合試驗系統

為模擬非飽和無限邊坡上之土壤元素，本研究利用 NGI 式單剪改為水力力學耦合試驗系統，利用置於試體盒底座之高進氣陶瓷板控制試驗所需之不飽和條件，加入入滲水力邊界，進行非飽和邊坡降雨入滲破壞機制之理論與模擬驗證，其概念如圖 3.11 所示，考慮滑動面附近之土壤元素，其受一法線正應力與切線剪應力，其大小可由坡角計算之，土壤於此受力下產生單剪(simple shear)之變形，加入剪動前基質吸力與入滲條件，模擬無限邊坡入滲破壞之行為，完整試驗系統包含剪力機構、含高進氣陶瓷板單剪盒、雙向伺服加載與監測系統，完整系統如圖 3.12 所示，各組成說明如下。

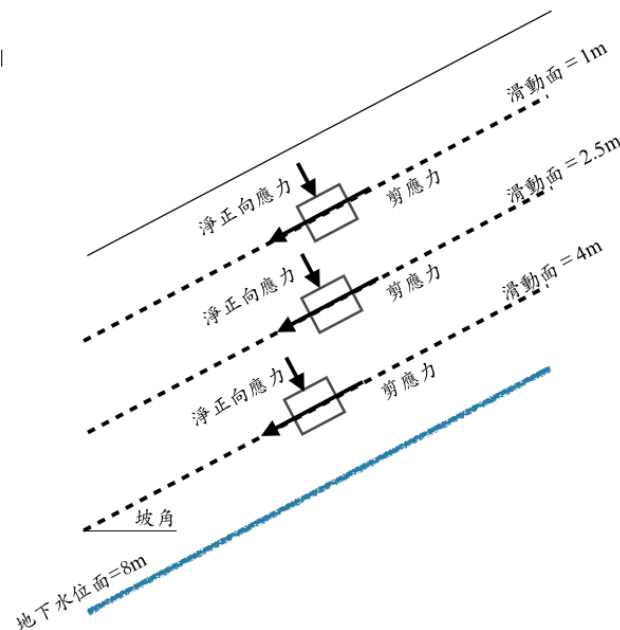


圖 3.11 水力力學耦合試驗概念圖



圖 3.12 水力力學耦合試驗系統實體圖

圖 3.13 為剪力機構，其平台尺寸為長 50cm、寬 50cm、高度可依試驗需求調整，調整範圍為 55cm-75cm，材料為鑄鐵，垂直向及水平向均裝設軸承以確保運動為直線運動，垂直向之運動及應力由軸桿連接試體盒頂蓋至加載系統進行控制，而水平向之運動及應力則透過預壓滑軌為基礎之平台，降低摩擦力，該平台連接試體盒底座至加載系統進行控制。

單剪盒共可分為三個部分，頂蓋、底座及堆疊鋼環，試體容器頂蓋直徑為 30cm，材質為不銹鋼，設計有排水路徑及 4 個可供空氣或水進出之通道，可連接至壓力系統；底座直徑為 30cm，高進氣陶瓷板鑲入底座並使用使矽利康密合，於陶瓷下方預留空間作為蓄水槽，以維持陶瓷之飽和度與提供試體排水或吸水所用。堆疊鋼環材質為鋁，鋼環內側與橡皮模膠合，每層鋼環間皆能自由滑動，可束制試體，使試體在實驗進行時保持 K_0 狀態，圖 3.14 為試體容器完成後實體圖。



圖 3.13 水力力學耦合試驗系統剪力盒實體

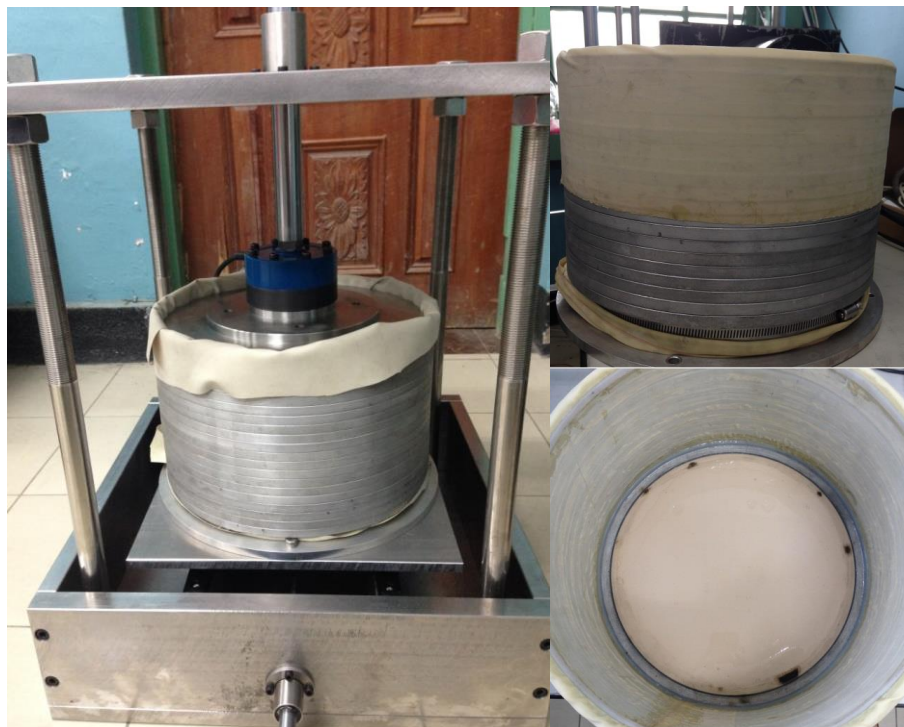


圖 3.14 試體容器實體圖

水力力學耦合試驗需同時控制淨正向應力及剪應力，再加上試驗時間長，因此需穩定之伺服控制系統及自動資料擷取系統，本研究以 LabVIEW 程式撰寫水力力學耦合試驗自動控制及擷取程式，並搭配馬達伺服控制設備及資料擷取設備，以建立自動化之水力力學耦合試驗系統。本研究之加載系統由垂直向及水平向伺服馬達提供，兩組馬達一圈可分解為 614400 steps，透過滾珠螺桿(ball screw)及花鍵(spline)可將馬達的旋轉運動轉為直線運動，利用垂直向及水平向之荷重計及變位計，可根據需要對應力或應變伺服控制，以符合實驗所需之條件。系統使用伺服馬達控制卡，伺服馬達本身只能進行位置、速度及扭矩控制，其中位置控制又可分為絕對位置及相對位置，選用相對位置控制較符合試驗之需求，根據感測器測得之物理量與設定之目標值，透過 PID 控制器運算後得到馬達位置控制輸出值，即步數(steps)，對垂直向及水平向馬達進行伺服控制。

水力力學耦合試驗所需擷取之資料為荷重計、LDT、體積變化儀(入滲量)感測之物理量，其訊號皆以類比電壓之型式輸出。側向變位量測裝置包含 6 個 LDT，6 個 LDT 固定在支架上，如圖 3.15 可分別測得試體 6 個不同高程之變位量。當試體非飽和狀態平衡後，根據邊坡坡角及假設滑動面位置給予正向應力及剪應力，待正向應力及剪應力達到設定值後，水開始由試體頂蓋入滲，並由側向變位量測裝置分析變位情形，將試體分為 5 層，如圖 3.16，由每層上下兩個 LDT 量測值及該層厚度可計算各層之剪應變量。

3.4.2 非飽和土壤工程試驗結果

本研究之試驗分成三部分，分別為土壤非飽和強度參數試驗、壓力鍋試驗以及水力力學耦合試驗。研究之試驗材料取材於台灣南部現地土壤，試驗前對土壤進行基本物理試驗，將現地土壤烘乾過篩後，取通過標準篩號 20 號(孔徑 0.84 mm)之細顆粒土壤為主要試驗材料。基本物理試驗包括粒徑分析試驗、比重試驗、液塑限試驗及滲透係數試驗，試驗步驟均採用 ASTM 試驗規範，其物理性質如表 3-2 所列。

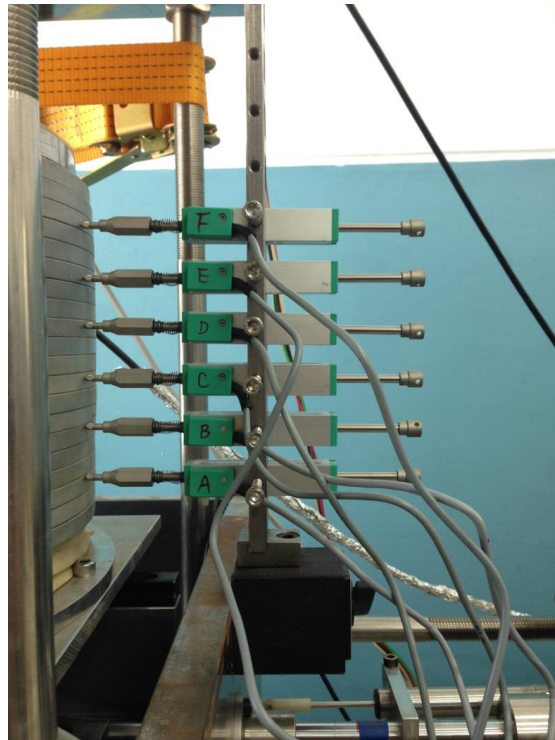


圖 3.15 側向變位量測裝置

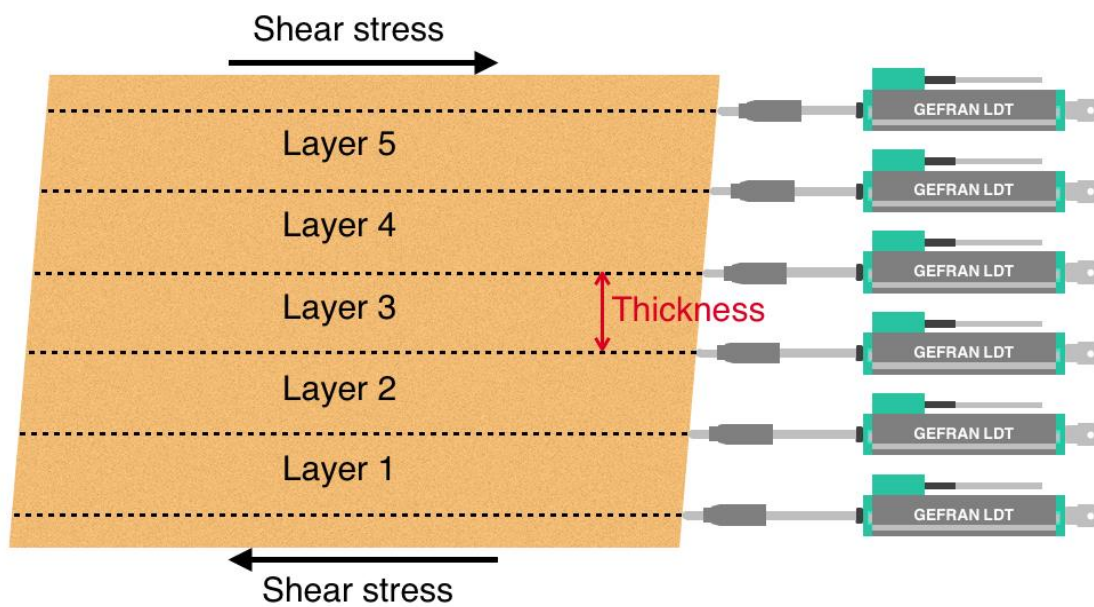


圖 3.16 試體各層剪應變計算示意圖

表 3-2 試驗材料基本物理性質

比重(G_s)	2.67
液性限度(LL, %)	22
塑性指數(PI, %)	0 (NP)
USCS 土壤分類	ML
飽和滲透係數(k_{sat} , cm/s)	1.0×10^{-6}

本試驗材料比重(G_s)為 2.67，液性限度(LL)與塑性指數(PI)分別為 22%、0%(NP)，，統一土壤分類法(USCS)為 ML，飽和滲透係數 k_{sat} 為 1.0×10^{-6} cm/s，圖 3.17 為試驗材料之粒徑分佈曲線。

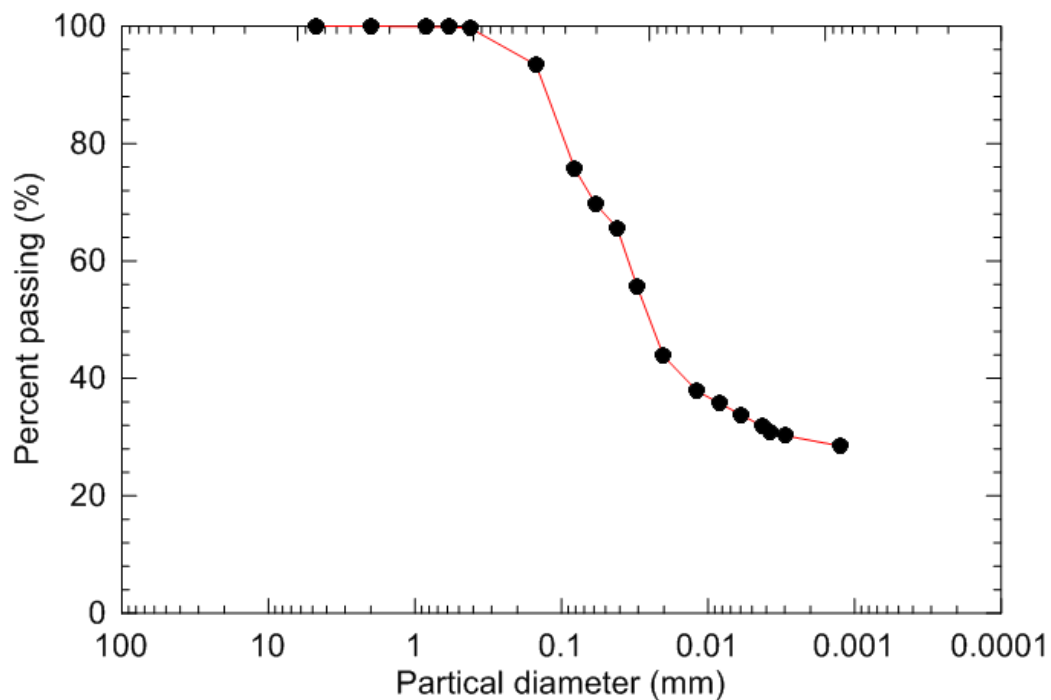


圖 3.17 試驗材料粒徑分佈曲線

壓力鍋試驗試體直徑為 6.3cm、高度為 2.5cm，共五個。將試驗材料放置烘箱烘乾至少 24 小時(溫度 110oC)，試體架設前將試驗材料取出，待其冷卻至室溫。以初始總體單位重 18kN/m³ 及含水量 15%計算

所需土重與水重，均勻攪拌試驗材料後，再以濕搗法、不分層製作壓力鍋試驗試體。

試驗根據 ASTM 試驗規範，試驗前須將高進氣陶瓷板置於去氣水中至少 8 小時，使陶瓷板達到飽和狀態，將陶瓷板放入壓力鍋中，接著將試體鋪以濾紙置於高進氣陶瓷板上，壓力鍋試驗試體須至少準備 5 個試體，每一試體之面積需大於 15cm^2 ，並將高進氣陶瓷板蓄水空間以橡皮管與室壓連接，即試驗過程中之孔隙水壓為 0kPa ，蓋上壓力鍋上蓋並鎖緊以確保氣密性，於壓力鍋內施加一氣壓，平衡過程中試體中可由橡皮管排水或吸水，當試體達到平衡狀態時之基質吸力即為 $(u_a - u_w)$ ，每階段須至少 18 小時以上使基質吸力和含水量達到平衡，當 48 小時內試體重量不再改變或壓力鍋進排水量變化小於 0.05 ml 時可視為此階段平衡，每階段完成後取出試體量測重量，根據不同基質吸力及平衡時之含水量即可求得土壤含水量特徵曲線。由於遲滯現象，壓力鍋試驗又可分為乾化及浸潤試驗，其兩種試驗結果不同，可根據研究需求進行所需試驗。

本研究之壓力鍋試驗分別施作乾化與浸潤試驗，依序提供之基質吸力為 10 、 20 、 30 、 50 、 80 與 100kPa ，待其每階段非飽和平衡，卸除壓力鍋內壓力，將土餅取出量取重量，重複此步驟完成各階段平衡。其試驗結果如圖 3.18 所示，可看出在相同基質吸力下乾化曲線的含水量比浸潤曲線的高，結果與以往之研究符合。由於本研究水力力學耦合試驗為入滲試驗，故以浸潤曲線為參考依據較符合本研究之試驗條件，式(3.20)為以指數回歸得到試體體積含水量(θ)與基質吸力(ψ)之關係：

$$\psi = 73659 \exp(-0.91 \times \theta) \dots\dots\dots (3.20)$$

式中 θ 為%而 ψ 之單位為 kPa 。

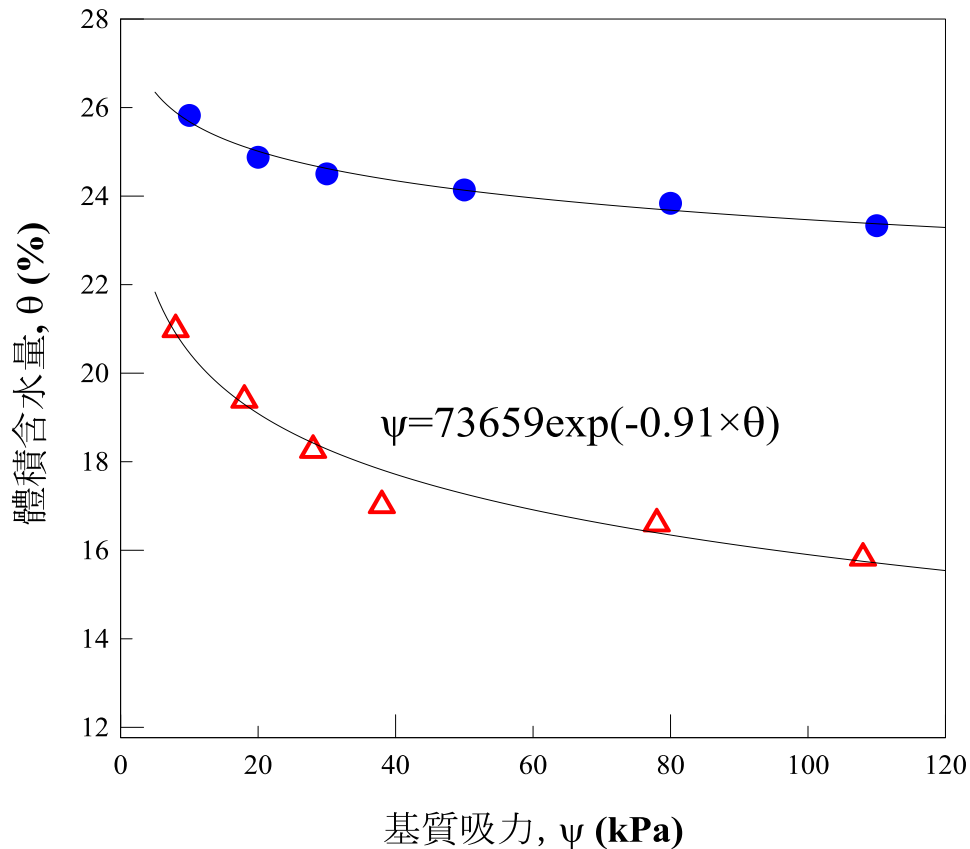


圖 3.18 基質吸力與含水量關係圖

本計畫以自行研發小型單剪進行非飽和與飽和壓密排水單剪試驗(如圖 3.19 所示)，求取非飽和土壤強度參數，試體直徑為 7cm、高度為 3cm。將試驗材料放置烘箱烘乾至少 24 小時(溫度 110°C)，試體架設前將試驗材料取出，待其冷卻至室溫，以初始總體單位重 18 kN/m³ 及含水量 15% 計算所需土重與水重，均勻攪拌試驗材料後，再以濕搗法，分 2 層，將材料搗實於堆疊鋼環加勁之橡皮膜內，且層與層之間需均勻刮花。

進行飽和壓密排水單剪試驗時將試體固定於剪動臺上，試體頂底閥門與壓力控制面板連接，並通以水路，進行試體進水與飽和步驟。待試體飽和後施加預壓密應力(OCR=2)施加，再解壓至壓密應力分別為 25kPa、50kPa、75kPa。壓密完成後進行試體剪動。進行非飽和壓密排水單剪試驗時，更換鑲有高進氣陶瓷板之試體底座，且須先將高進氣陶瓷板浸泡於去氣水中至少 8 小時，待高進氣陶瓷板飽和方可進行試

體架設，試體架設完畢後將其固定於剪動臺上，頂底閥門與壓力控制面板連接，頂閥通以空氣，底閥通以水路。頂閥提供氣壓 25kPa 的基質吸力值，接著施加預壓密應力($OCR=2$)於試體上，再解壓至壓密應力分別為 25kPa、50kPa、75kPa。等待試體非飽和平衡狀態方可進行剪動。



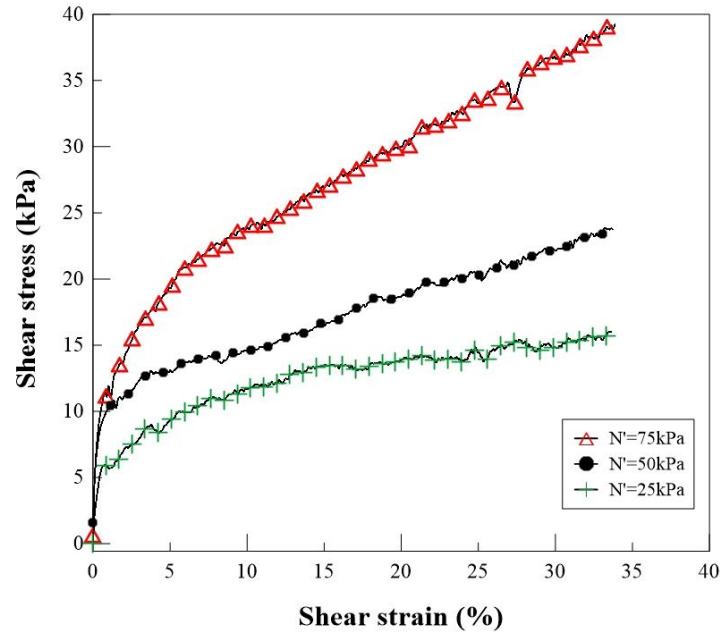
(a)



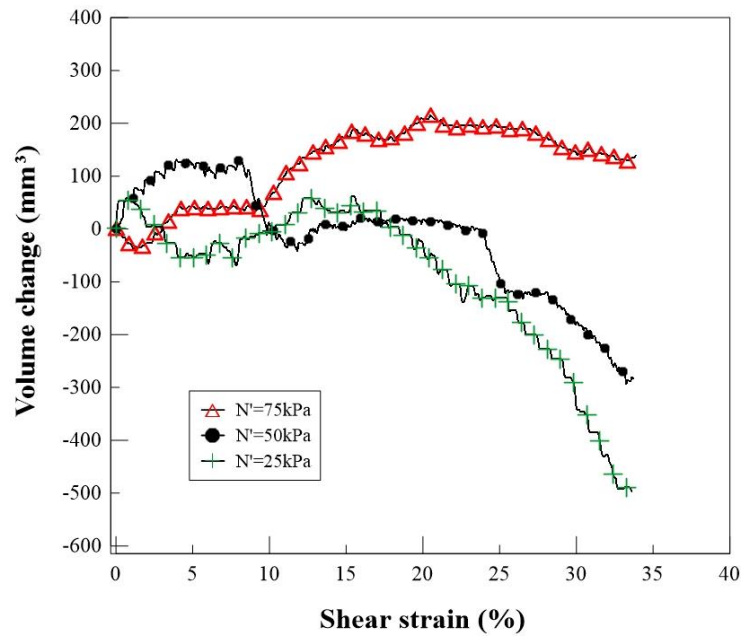
(b)

圖 3.19 非飽和強度參數試驗 (a)試體製作(b)試體架設完成圖

本研究進行飽和土壤壓密排水單剪試驗，其有效壓密應力分別為 25、50 及 75kPa，待試體壓密完畢後進行試體剪動，取剪應變 35%時為破壞，求得土壤飽和強度參數 c' 、 ϕ' 。非飽和土壤壓密排水單剪試驗，提供試體 25kPa 氣壓(基質吸力)，接著分別施加 25、50、75kPa 之淨正向應力進行試體壓密步驟，待試體非飽和平衡後即可剪動試體，同樣取剪應變 35%時為破壞點，求取土壤非飽和強度參數 ϕ^b ，試驗結果如圖 3.20 與 3.21 所示，試驗土壤強度參數為 $c'=3.06$ kPa， $\phi'=25.07^\circ$ ， $\phi^b=6.73^\circ$ 。



(a)



(b)

圖 3.20 非飽和壓密排水單剪試驗(a)應力應變曲線(b)體積變化

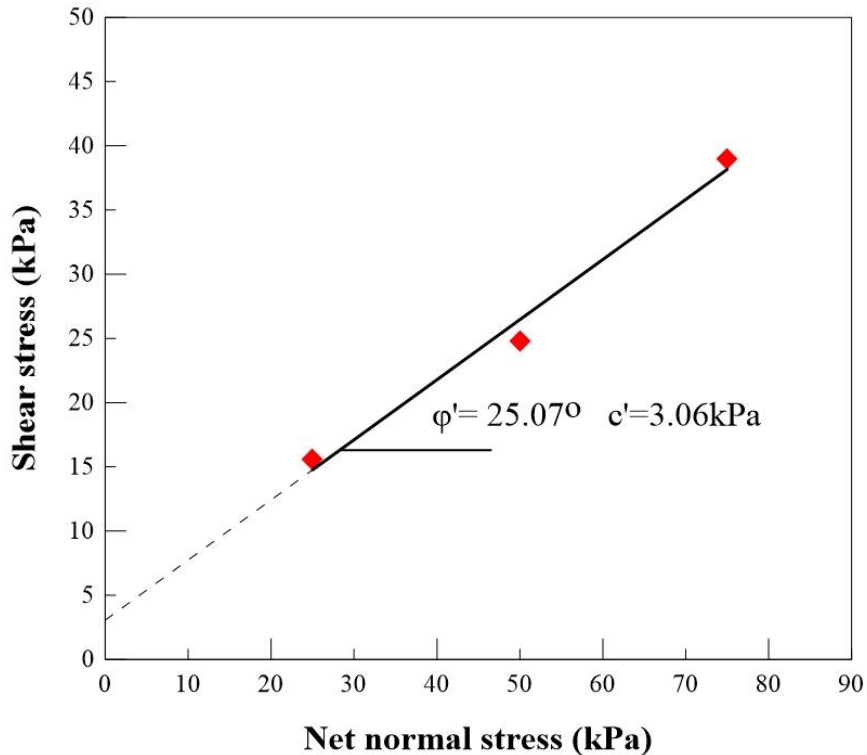


圖 3.21 非飽和土壤強度參數

3.4.3 水力力學耦合試驗結果

本試驗以初始總體單位重及初始含水量計算所需土重及水重，再以濕搗(moist tamping)之方式製作重模試體，經分層搗實後完成試體製作。水力力學試驗儀試體直徑為 30.5 公分、高度為 18 公分詳細架設流程如下：

1. 將試驗材料以烘箱烘乾 24 小時以上(溫度 110°C)，試體架設前取出使其冷卻至室溫。
2. 以初始總體單位重 18kN/m³，含水量 15%均勻攪拌後，分為 6 層以濕搗法製作水力力學試驗儀試體，層與層間須均勻刮花，使試體均勻，避免層與層之間產生弱面。
3. 以初始總體單位重 18kN/m³，含水量 15%均勻攪拌後，以濕搗法製作壓力板試驗試體根據欲控制之基質吸力連接壓力面板提供孔隙氣壓和孔隙水壓。

非飽和平衡狀態為平均淨應力與基質吸力於試體中達到穩定之狀態，多位學者均有不同之定義準則，Wheeler and Sivakumar (1995)以比水體積小於 0.001/day 之標準判定為非飽和平衡狀態；而 Ng et al. (2007)以含水量變化小於 0.05%/day 定義為達到平衡；本研究以總體積變化量作為平衡狀態判定之準則，故引用 Ng et al. (2007)之含水量判定數據，以總體積變化小於 0.05%/day 時表示非飽和狀態達到平衡，本試驗大約需要 4~6 天達到非飽和平衡狀態。

在試體架設前須先將水力力學耦合試驗之單剪盒浸於去氣水中至少 8 小時，使高進氣陶瓷板飽和。同時將試驗材料放置烘箱烘乾至少 24 小時(溫度 110°C)，取出已烘乾之試驗材料，待其冷卻至室溫方可進行試體架設。以初始總體單位重 18kN/m^3 及含水量 15%計算所需土重與水重，均勻攪拌試驗材料後，再以濕搗法，分 6 層，將試驗材料搗實於水力力學耦合試驗之單剪盒內，且層與層間須刮花並分層埋入含水量感測元件。

將試體固定於剪動臺上，下降頂蓋至接觸試體，拉出含水量感測元件線路並將其線路通道密封。連接壓力控制面板與頂底閥門，頂閥施予 25kPa 基質吸力，底閥通以水路並連接至室壓，先施加一預壓密應力，預壓密完成後再根據試驗條件解壓至所需之正向應力，待試體達到非飽和平衡狀態，接著施加試驗條件剪應力。剪應力施加完畢後待其穩定後進行入滲試驗。觀察入滲量、時間以及各層側向應變變化。圖 3.22 為試體架設完畢圖。

試驗條件乃根據水力力學耦合數值分析使用之參數，進行水力力學耦合試驗，即地下水位為 4m、坡角為 30° ，並根據 3.3 節分析得到之 d_{cr} ，計算 d_{cr} 之應力狀態，假設基質吸力隨滑動深度變化為線性，即滑動深度 1m 處基質吸力為 30kPa、2.5m 處為 15kPa、4m 處為 0kPa，計算 d_{cr} 之應基質吸力，其試驗示意圖如圖 3.23、試驗條件如表 3-3。

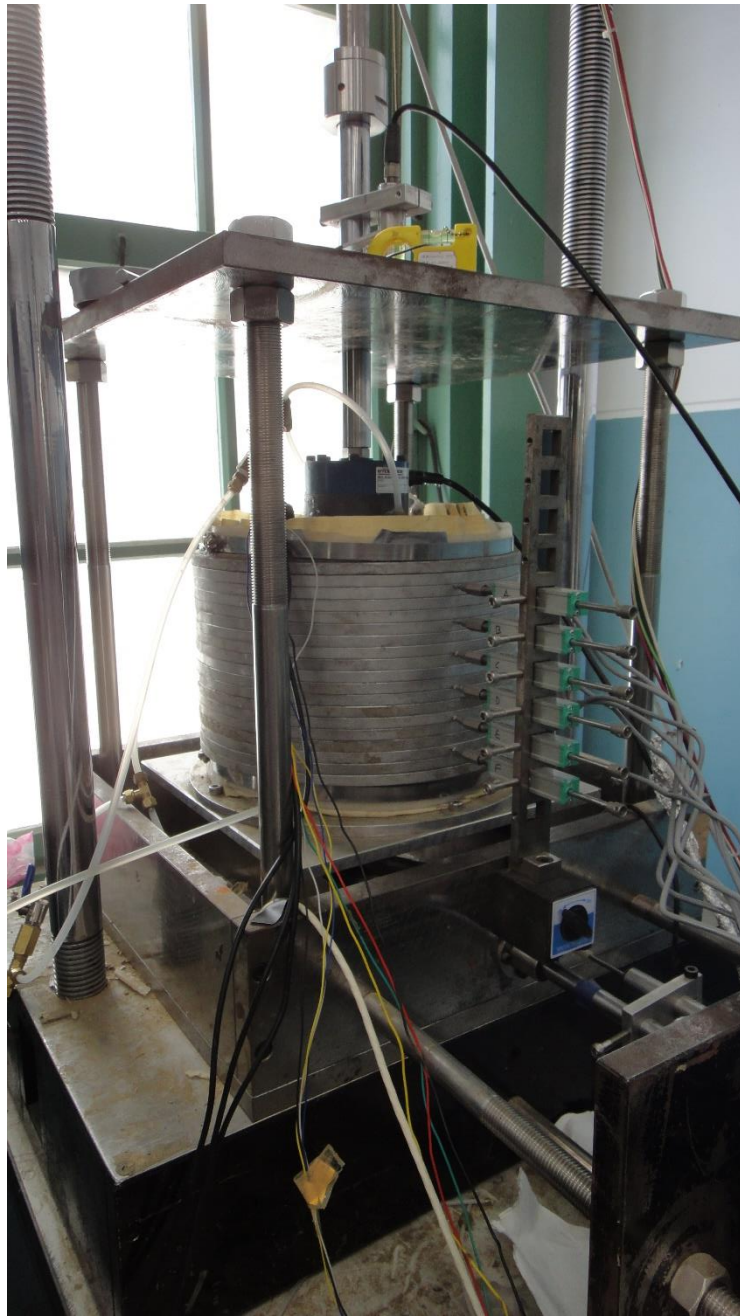


圖 3.22 水力力學耦合試驗試體架設完成圖

表 3-3 水力力學耦合試驗之試驗條件

滑動面深度 d_{cr} (m)	1.5
地下水位深度 (m)	4
基質吸力 (kPa)	25
淨正向應力 (kPa)	22.7
剪應力 (kPa)	13.1

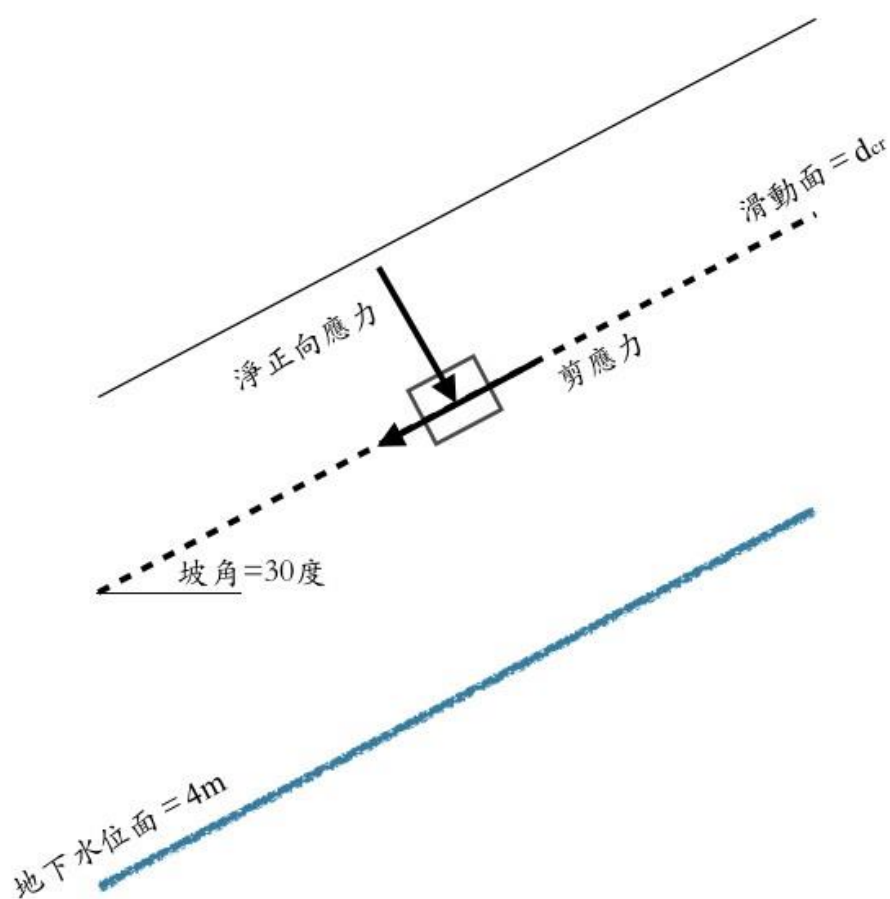


圖 3.23 水力力學耦合試驗之試驗條件示意圖

水力力學耦合試驗試體在 1(底)至 2 層間(DC-3)、3 至 4 層間(DC2)及 5 至 6(頂)層間(DC-1)埋設含水量感測元件，含水量感測元件皆埋設在試體中心附近，並在試體側邊架設分層側向變位量測裝置，由頂端到底部之變位計編號分別為 A 至 F，其剪應變以相鄰兩變位計中間為基準。試體配置如圖 3.24 與表 3-4 所示，白色透明部分為含水量感測元件量測範圍。

試體平衡厚含水量感測元件讀數結果如圖 3.25，可發現其量測之含水量數值與實際架設配比之試體含水量相近，DC-1 含水量為 15.21%、DC-2 含水量為 13.91%、DC-3 含水量為 14.14%，其量測誤差約為 $\pm 5\%$ 。

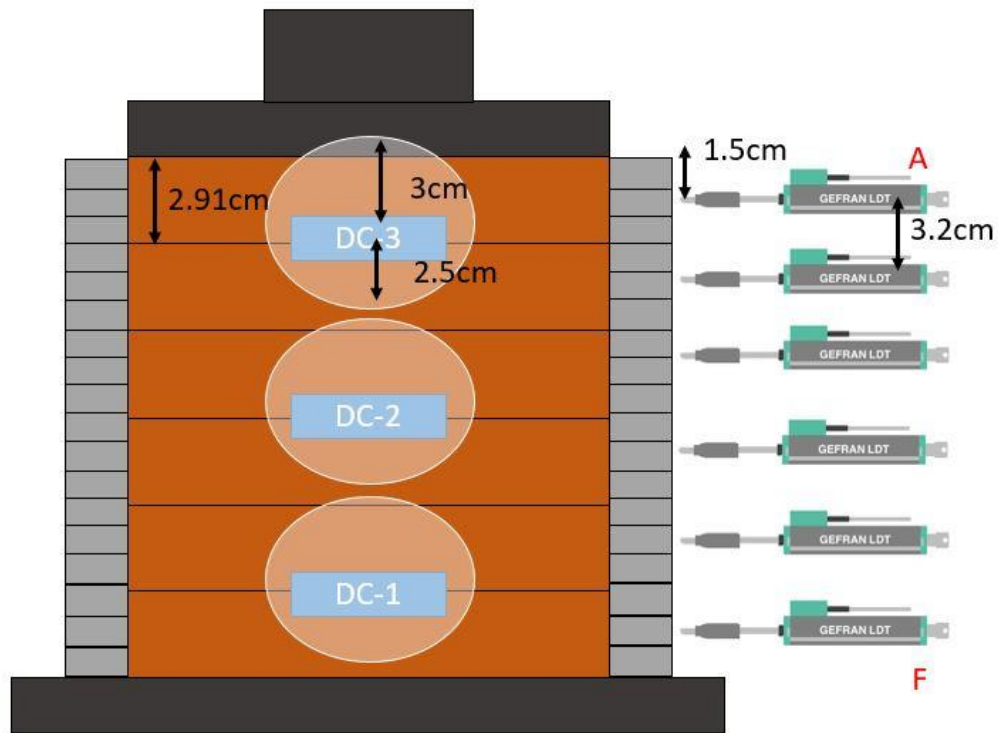


圖 3.24 水力力學耦合試驗之試體配置

表 3-4 水力力學耦合試驗試體配置表

感測器	編號	深度(cm)
含水量感測元件	1	2.91
	2	8.73
	3	14.55
側向變位計	A	1.5
	B	4.7
	C	7.9
	D	11.1
	E	14.3
	F	17.5

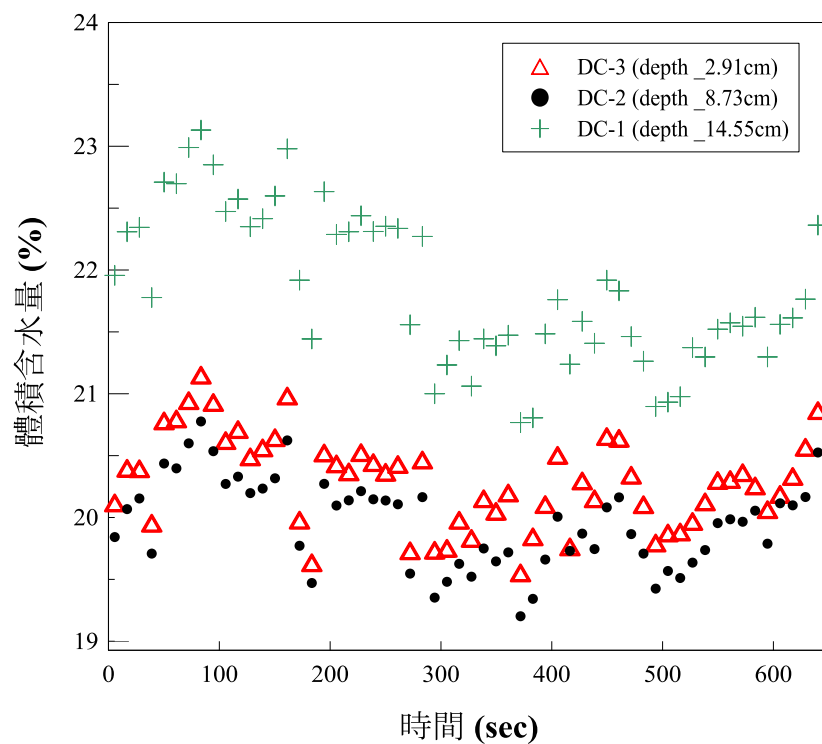


圖 3.25 試體初始含水量

入滲試驗時於頂閥提供 25 kPa 之孔隙氣壓(u_a)，底閥連接室壓，試體上方施加預壓密應力，預壓密完成後解壓至試驗條件之正向應力，等待試體達非飽和平衡狀態。入滲試驗過程以大型體積變化量測裝置提供試驗所需之反水壓與量測入滲水量變化，並同時以含水量感測元件偵測各層土壤之含水量變化，利用含水量變化可反推感測範圍內土壤水量變化，圖 3.26 為體積變化量測裝置與含水量感測元件入滲量量測比較圖。可發現利用體積變化量測裝置量得之入滲量大於利用含水量感測元件反推之入滲量，相差大約 100~150cc，其原因可能為土壤的水平滲流量並未涵蓋在含水量感測元件感應範圍內，且試體具有側邊邊界，水沿著側邊邊界滲流速度較大，故兩者量測裝置會產生差值。但由於本研究需了解各層剪應變與土壤含水量之關係，故選用土中水分計所量測之入滲量當作參考依據。

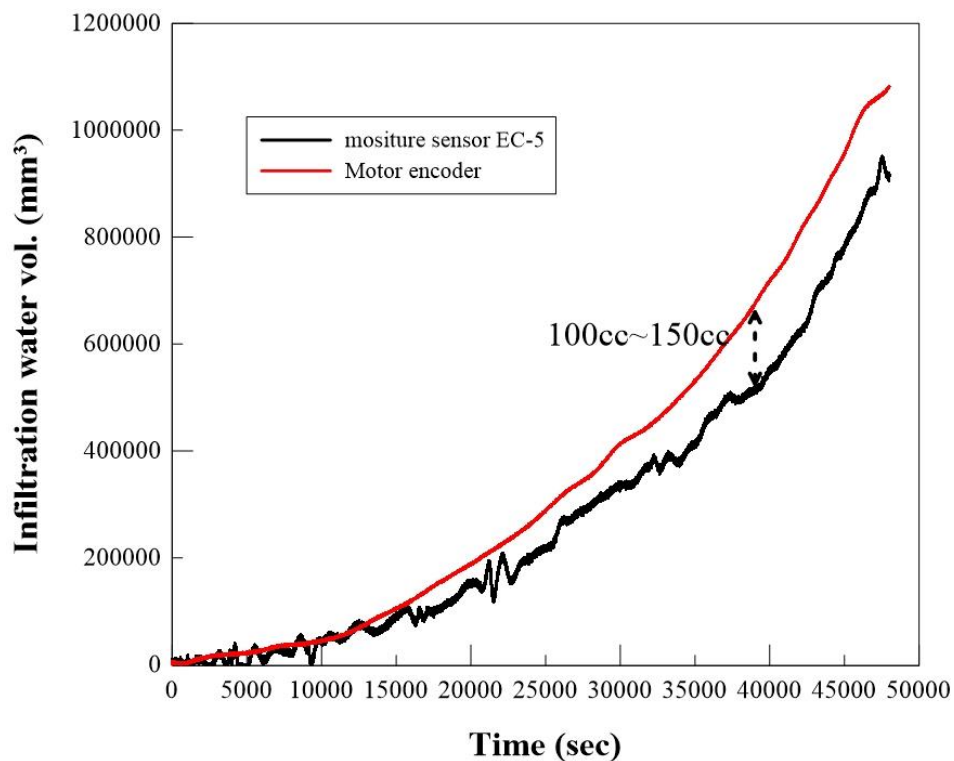


圖 3.26 體積變化量測裝置與含水量感測元件入滲量比較

圖 3.27 為以含水量感測元件量測之入滲量與各層剪應變之變化情形，由各層剪應變的變化可以觀察到，入滲開始後，試體各層並無產生明顯的剪應變，在入滲開始後約 30000 秒後，最上層剪應變開始增

加，此為水滲入試體，使基質吸力降低，造成基質吸力提供的剪力強度下降，最後試體剪力強度降低到無法提供足夠的阻抗(即剪應力>剪力強度)。隨著入滲時間越久，水入滲量越多也越深時，下層剪應變也開始增加。上層比下層先滑動的原因應為水是由試體頂部入滲，造成試體上層部分的強度會小於下層部分的強度，故破壞會從試體上層部分開始發生。

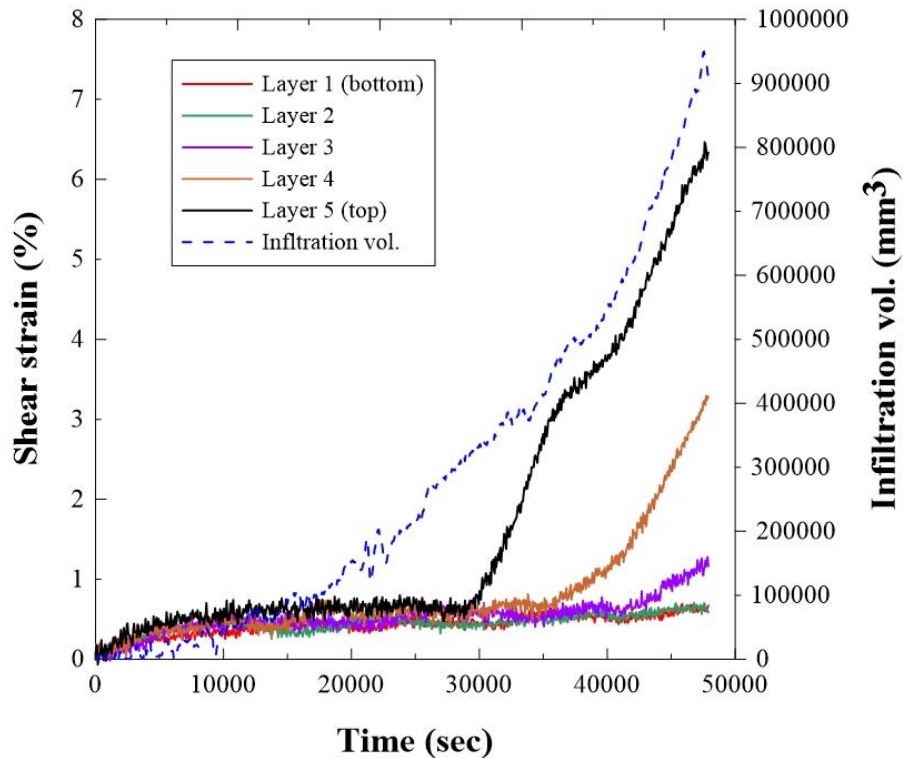


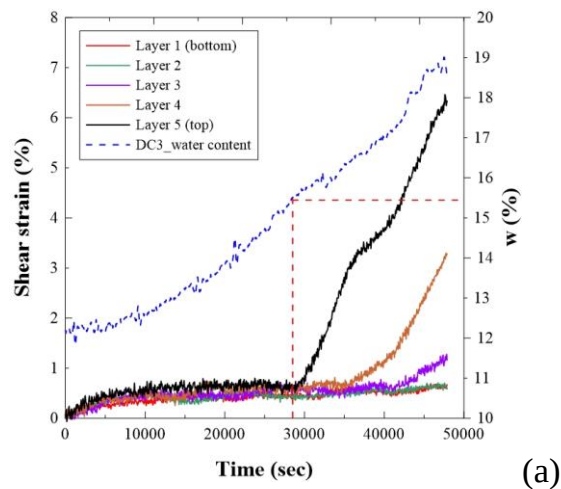
圖 3.27 水入滲量與試體各層剪應變變化情況

圖 3.28 為各層含水量與各層剪應變之變化情形，因水由試體頂部開始往下滲流，故頂層(Layer 1)內部含水量會最先開始增加，再者為 Layer 2，依序增加其含水量。圖 3.28(a)可看出當 Layer 1 開始滑動時其對應到 DC-3 所量測之含水量約為 15.5%，可視為試體之極限含水量，亦即當試體之含水量大於此值時，基質吸力所提供之強度降低至試體破壞強度。圖 3.28(b)發現 Layer 2 滑動點對應 DC-2 量測之含水量約為 14.3%，與 Layer 1 之試體極限含水量不同，其原因為感測儀器配置深度不同的關係，Layer 2 剪應變量測深度為 6.3cm，而 DC-2 含水量感測元件埋設深度為 8.73cm，DC-2 埋設深度大於 Layer 2 剪應變量測深度，

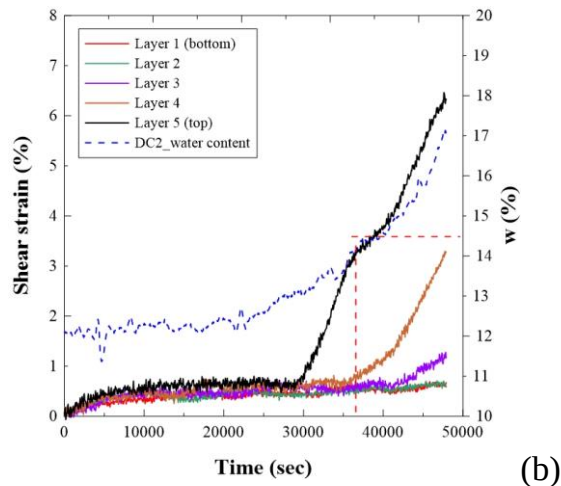
故當 Layer 2 滑動時，其 DC-2 所量測之含水量會低於極限含水量。圖 3.28(c)為 DC-1 與各層剪應變之變化情形，可發現 DC-1 感測含水量上升，說明其水有滲入至該感測器埋設深度(14.55cm)，但其含水量並未達到極限含水量，故 Layer 3、Layer 4 與 Layer 5 剪應變無明顯變化。

圖 3.29 為入滲深度與試體各層剪應變之變化情況，藍線以試體含水量達極限含水量時定義入滲深度到達之入滲深度與時間之關係；紅線為假設試體須達飽和才能入滲所繪製之入滲深度與時間之關係。可看出若假設試體飽和才能入滲之情況較慢於試體達極限含水量之入滲情況，同時也比各層試體滑動時間慢。大約慢 1000~2000 秒。其原因是假設試體飽和水才能滲入為最保守情況，故入滲時間相對最慢。

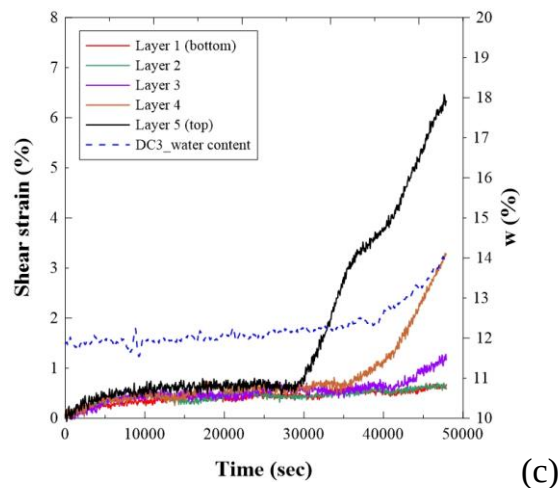
圖 3.30 為試體分層剪力強度與各層剪應變之變化情況，當試體強度低於試體所受之剪應力時，試體開始產生滑動。試驗施加至試體之剪應力為 13.1kPa(虛線)，稱之為臨界剪力強度。由圖 3.30(a)可看出 DC-3(頂層)層內之土壤剪力強度小於臨界剪力強度之時間與 Layer 1 滑動時間近乎相同，約為 30000 秒。圖 3.30(b)為 DC-2 層內土壤剪力強度之變化，可看出其剪力強度小於臨界剪力強度之時間晚於 Layer 2 之滑動時間，如同上述所說，這是由於 DC-2 埋設深度大於 Layer 2 剪應變量測深度。故 Layer 2 會較早發生滑動。圖 3.30(c)為 DC-1(底層)層內土壤剪力強度變化，其剪力強度並未達臨界剪力強度，故其餘分層並無明顯滑動跡象。圖 3.31 為試體分層安全係數與各層剪應變之變化情況，其趨勢與各層剪力強度相同，當 FS 小於 1 時，該層土壤會發生滑動現象。



(a)



(b)



(c)

圖 3.28 含水量變化與各層剪應變之變化情形(a) DC-1 (b) DC-2 (c) DC-3

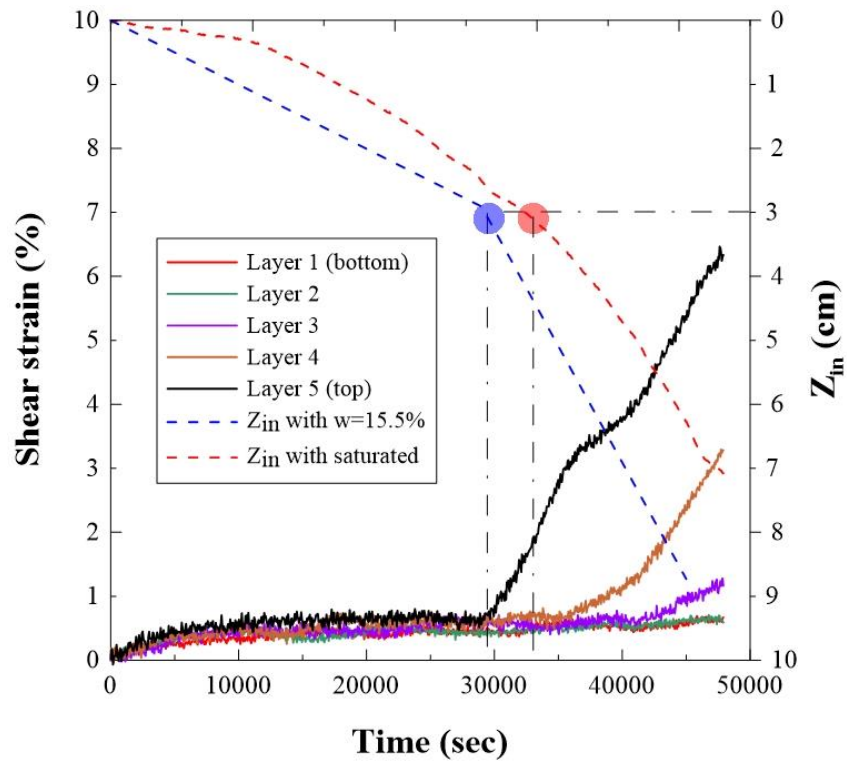
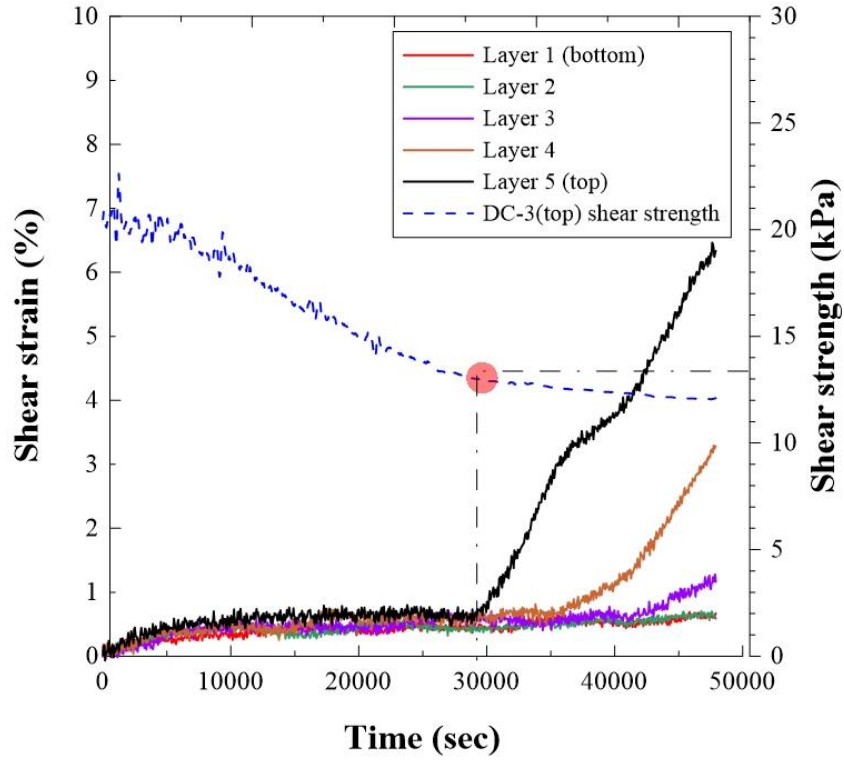
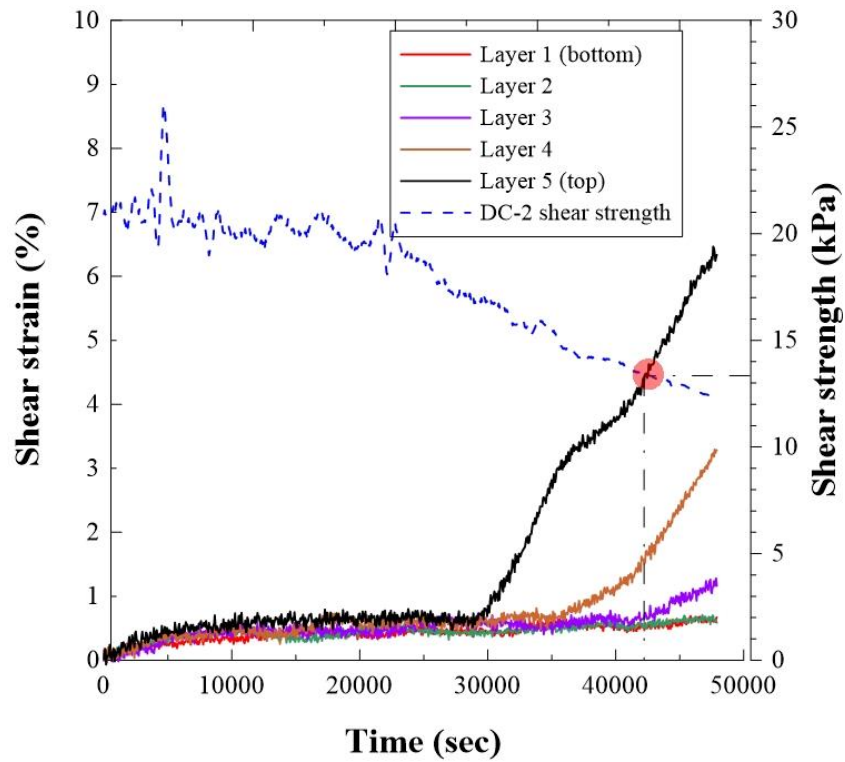


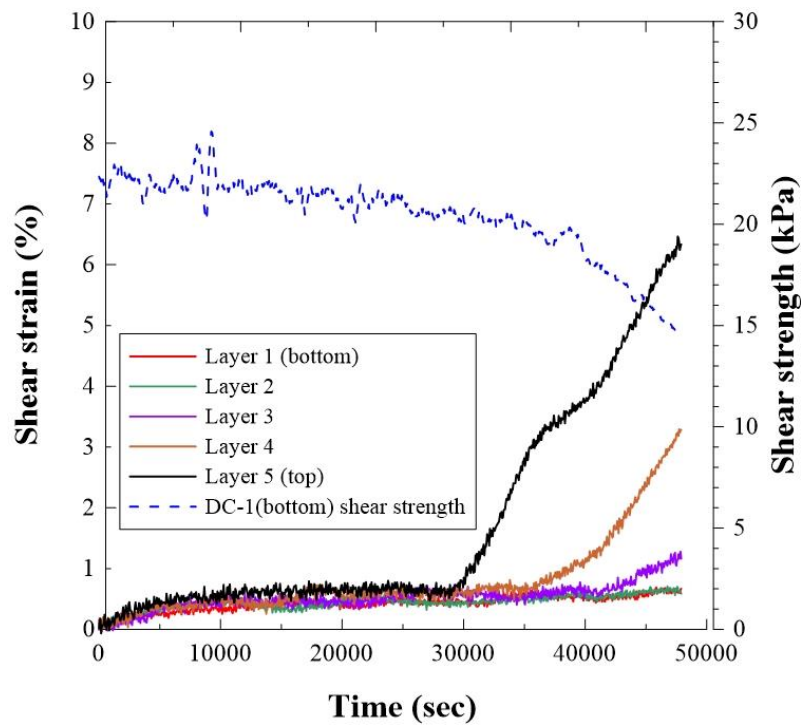
圖 3.29 入滲深度與各層剪應變之變化情況



(a)

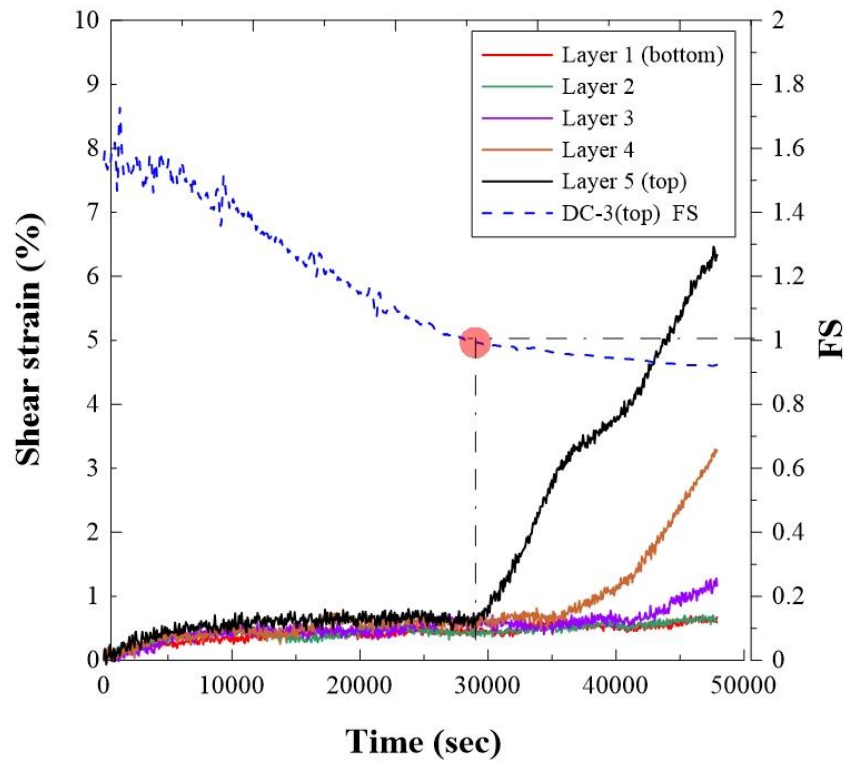


(b)

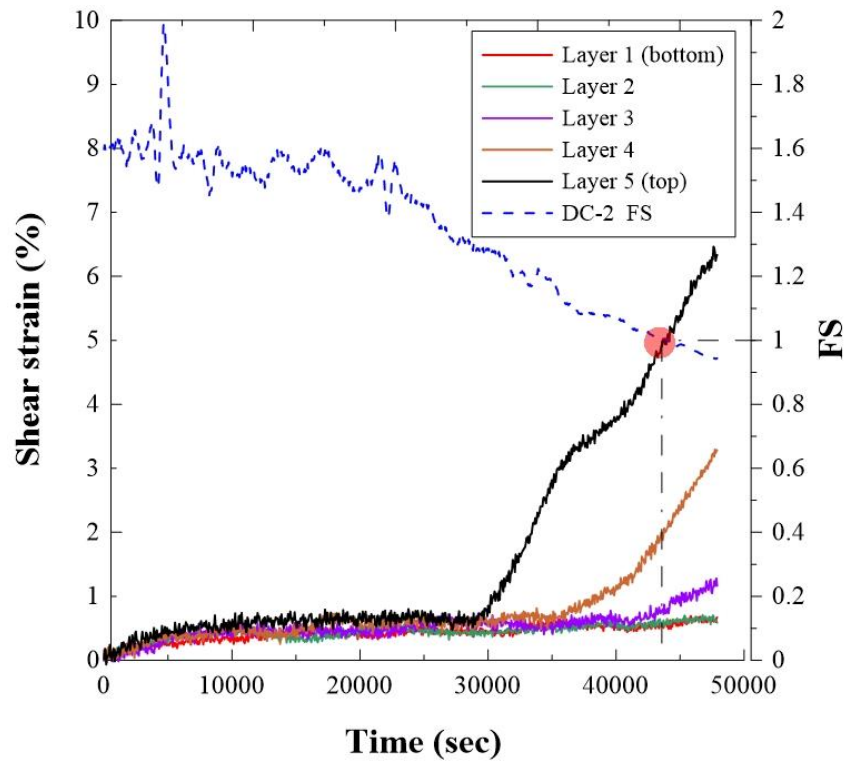


(c)

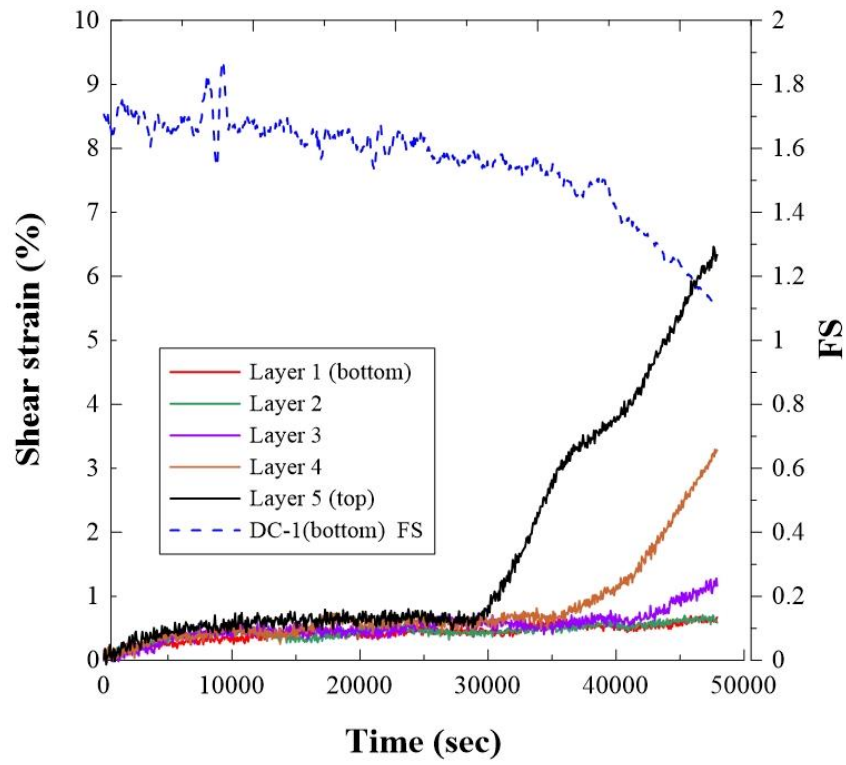
圖 3.30 試體分層剪力強度與各層剪應變之變化情形(a) DC-3 (b) DC-2
(c) DC-1



(a)



(b)



(c)

圖 3.31 分層剪力安全係數與各層剪應變之變化情形(a) DC-3 (b) DC-2
(c) DC-1

第四章 土層監測模組研發

本研究目的為發展一簡易土層監測模組，廣設於具淺層崩坍潛勢之邊坡表層，監測地表傾角及淺層土壤含水量，各模組間以無線傳輸方式將資料傳至監測主機，由遠端人員進行判讀與預警，提前進行相關減災行動。研究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(MEMS)感測器，客製化具無線網路傳輸功能且可監測地表傾角與分層土壤含水量之土層監測模組，形成分佈式淺層土層監測網路，由於此類電子產品為大量生產因此可大幅降低成本。為達此目的，本計畫包含一分佈式土壤含水量計之研發，透過量測多深度土層電容值變化，間接測得各個深度土壤含水量，推估非飽和土壤強度參數以進行非飽和邊坡穩定分析，並可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。

4.1 土層水力與運動反應量測

4.1.1 基質吸力量測

國內外研究已提出充分證據顯示土壤邊坡淺層崩塌主要之機制在於非飽和土壤內基質吸力($u_a - u_w$)(負孔隙水壓)受降雨入滲影響而降低或消失使得土壤強度降低，進而導致崩塌，因此推估不飽和邊坡破壞所需主要強度參數分別為($u_a - u_w$)及 ϕ^b 。

既有應用於現地之非飽和土壤內基質吸力量測方法可分為直接法與間接法兩種。直接方法使用張力計(Tensiometer)直接量測土壤內基質吸力。張力計使用一飽和之高進氣吸力值陶瓷(High air entry ceramic)量測周圍土壤之負孔隙水壓，但此類陶瓷製作成本相當高，且陶瓷內之孔隙水在較高負壓下會逐漸汽化為水蒸氣而形成氣泡，此現象稱穴蝕效應(Cavitation)，形成之氣泡將阻礙孔隙水的聯通而影響量測，故張力計須定期重新飽和其陶瓷，使其無法應用於長期邊坡安全監測。

間接量測方法係將取自現場試驗土樣依據現場孔隙比大小重模

後，求得土壤體積含水量與基質吸力之關係曲線，稱之為土水特性曲線(soil-water characterization curve, SWCC)，透過量測現地土壤體積含水量，藉由 SWCC 曲線間接推估現場土壤基質吸力大小。

已知土壤體積含水量(以下簡稱含水量)量測方式有下列二種方法：(1) 土壤電阻率 (R, Resistivity) 及 (2) 土壤介電常數 (ϵ_r , Relative permittivity)，而土壤電阻率主要受土壤種類、土壤組構及土壤飽和度影響(林哲毅，1999)，其中土壤種類與土壤組構具有場址相依性，因此若欲透過量測土壤電阻率間接量得土壤含水量/飽和度，需先調查監測區域內之土壤種類與組構，其中土壤組構須透過現地試驗或取現地非擾動土樣方可測得，此法顯得相當不經濟。

土壤介電常數雖亦受上述土壤參數影響，但由於土壤固體介電常數(3~5)與空氣介電常數(=1)相當接近，而水介電常數在 20 度時為 80.1，100 度時為 55.3，皆遠大於土壤固體以及空氣之介電常數，若將土壤視為空氣所產生之誤差小於 5%，即土壤種類與土壤組構對土壤介電常數影響相當有限，其值主要受水佔有之比例(即土壤含水量或飽和度)影響，因此透過量測土壤介電常數間接量測土壤含水量方法可省去上述二土壤參數之調查，量測介電常數是取得土壤含水量較經濟的方法(林哲毅，1999)。

4.1.2 電容量測土壤含水量原理

介電常數可藉由平行板電容(parallel-plate capacitor)之特性，量測土壤電容間接獲得，下式即平行板電容特性關係式：

$$C = \epsilon A / D \dots\dots\dots (4.1)$$

式中 C = 電容， ϵ = 介電常數，A=平行板面積，D=平行板間距。透過式(4.1)可知平行板間土壤之電容值與其介電常數成正比，其餘參數皆可控制，故透過量測平行板間土壤電容值即可量得土壤之介電常數。

目前量測電容最經濟可靠之方案為利用德州儀器(TI., Texas Instruments)所販售之 FDC1004 轉換器(如圖 4.1 所示)，FDC1004 係一

4 頻道電容/數位轉換器(Capacitance/Digital Converter)，量測範圍為 ± 15 pF，解析度可達 0.5 fF，工作電壓 3V，工作電流僅 0.75 mA，並透過 I2C 介面傳輸，屬於非接觸式電容量測，其應用方法如圖 4.2 所示，由左而右分別為：

1. 姿勢感測(Proximity Detection, Isolated Sensor - No GND)
2. 液位感測(Liquid Level Sensing, Parallel Fingers)
3. 材料檢測(Material Analysis, Parallel Plate)



圖 4.1 TI. FDC1004 電容數位轉換器(TI., 2015)

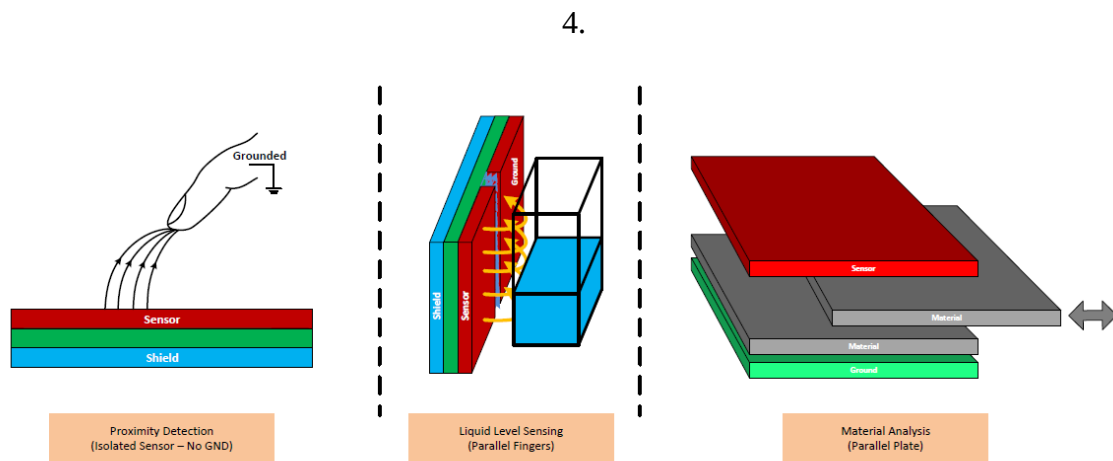


Figure 3. Basic Implements for Capacitive Sensing

圖 4.2 非接觸式電容量測之應用方法

液位量測(圖 4.3)即量測待測目標內液體與氣體比例，可透過下列二式獲得液面位置：

$$C_{meas} \propto h_w \varepsilon_w + (h_L - h_w) \varepsilon_a \quad (4.2)$$

其中 h_L = 最大液位高， h_w = 液位高， ε_w = 水介電常數， ε_a = 空氣介電常數。

$$Level = h_{RL} \frac{C_{level} - C_{level}(0)}{C_{RL} - C_{RE}} \quad (4.3)$$

其中 h_{RL} = 單位參考液位高(通常=1)， C_{level} = 液位電容量測值， $C_{level}(0)$ = 液位電容乾燥值， C_{RL} = 參考液位電容量測值， C_{RE} = 參考環境電容量測值。

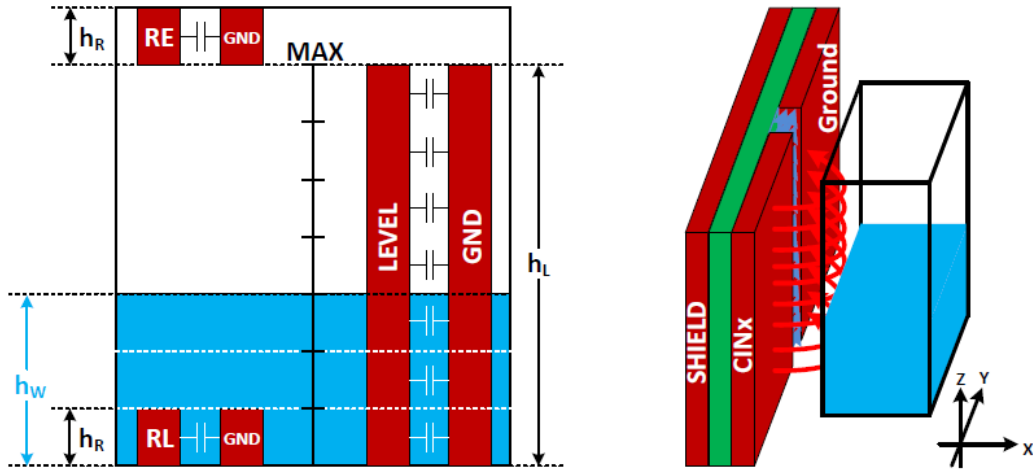


圖 4.3 液位量測示意圖

土壤雖包含液體、氣體、固體三相，較液位量測多一固相，但固相介電常數為一常數，不受含水量變化而改變，又式(4.3)中 $\frac{h_{RL}}{C_{RL} - C_{RE}}$ 為常數，則式(4.3)可簡化為下式：

$$\begin{aligned} C_{level} - C_{level}(0) &= (h_a \varepsilon_a + h_w \varepsilon_w + h_s \varepsilon_s) - (h_a \varepsilon_a + h_w \varepsilon_a + h_s \varepsilon_s) \\ &= h_w (\varepsilon_w - \varepsilon_a) \quad (4.4) \end{aligned}$$

由式(4.4)可得固相影響因子為常數，在消除乾燥初始值時得以將之消除，故含水量計算與液位計算相同，顯示此方法可行性相當高。

4.2 無線感測土層監測模組

4.2.1 系統感測器

受消費性電子產品大量使用之影響，微機電系統(MEMS)感測器近來快速發展。此類感測器有以下之優點：

1. 體積微小，常用 MEMS 感測器長寬在 3 mm，厚度在 1 mm 以下。
2. 低功耗，其功率通常以 μW 來標示，非常省電。
3. 介面簡易，MEMS 輸出數據大多使用標準之數位介面，容易與其他感測器及通訊模組整合。
4. 低成本，本研究所需之 MEMS 感測器單價大都在 20 元美金以下，部分在 1 元美金以下，可提高監測目標區之佈設密度。且可以輕易在市場上找到配合廠商做系統整合，線路板製作與量產，所需零件可以輕易在國內取得。

本計畫主軸之一為開發一同時適用於非飽或與飽和土壤，因降雨造成之淺層邊坡滑移的即時、無線、自動化土層監測模組。充分利用 MEMS 優點，開發一適用於因降雨造成淺層邊坡滑移的即時、無線、自動化土層監測模組。感測器之種類與功能如下：

1. 傾斜儀(tiltmeter/inclinometer)：量測單軸向傾斜量變化，透過傾斜儀提供滑動方向高精度與高靈敏度之傾斜量。
2. 數位電容土壤水分計(digital capacitance soil moisture sensor)：量測周圍土壤電容變化，間接量得土壤之含水量並推估基質吸力。
3. 慣性量測單元 (IMU)：具備有一個三軸向重力感測器以及一個三軸向陀螺儀，運用於軌跡運算。

上述感測器皆為 MEMS 感測器，成本低廉且已發展成熟。而現有市售之現地含水量計成本相當高，且體積甚大，不利於整合進監測模組，因此本計畫將整合簡易含水量計，透過量測土壤介電係數，間接

量測土壤含水量變化，透過間接方法評估土壤內基質吸力。本計畫所研發之簡易含水量計可進行分佈式地層含水量量測，係透過多組電容感測裝置於一探棒表面(圖 4.4)，即可同時監測探棒長度內多深度土層之含水量，亦可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。

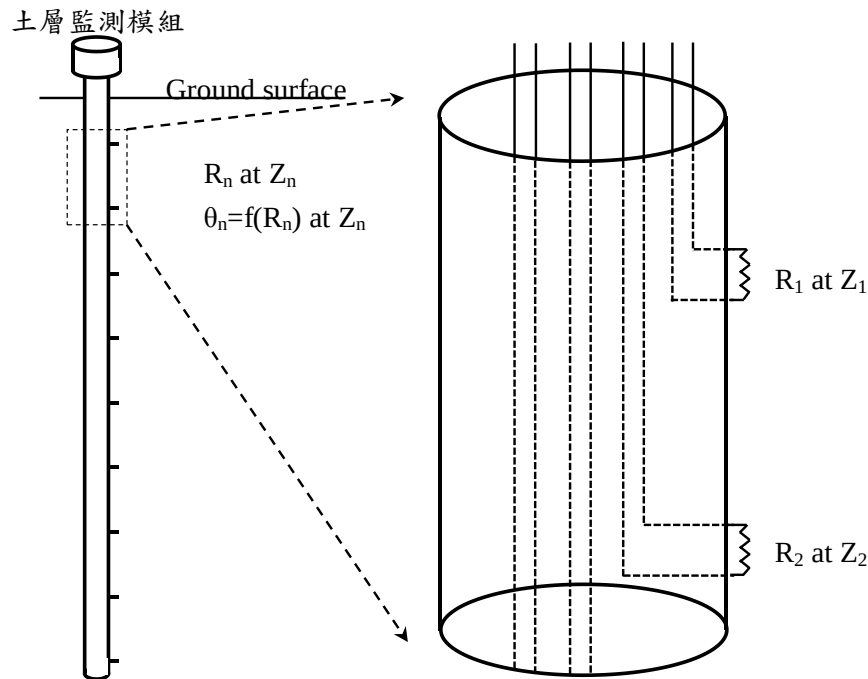


圖 4.4 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖

(1) 傾斜儀

傾斜儀主要用於觀察地表傾斜角度之變化，因土層監測模組對傾斜儀之解析度要求相當高，市售高精度傾斜儀以 Murata Electronics 所生產之傾斜儀 SCA100T 具有 $\pm 15^\circ$ 度量測範圍下最高可達 0.0035 度 (10Hz BW 類比輸出)之解析度，且差分訊號的輸出可提供優異的抗雜訊能力，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，與微控制器間通訊相當彈性，故採用其作為土層監測模組之傾斜儀。

根據原廠建議之電路圖製作一 SCA100T 測試模組(圖 4.5)，並將 SCA100T 分別透過 Arduino Uno 以電源供應器進行數位訊號輸出標定，圖 4.6 為所使用之傾斜角度標定系統。整合於 Arduino 之高精度傾

斜儀標定結果展示如圖 4.7 所示，結果顯示 SCA100T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。

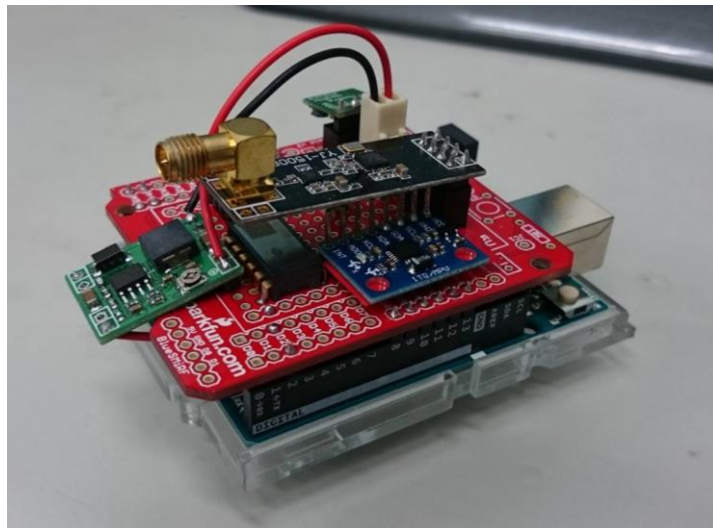


圖 4.5 傾斜儀電路圖與測試模組

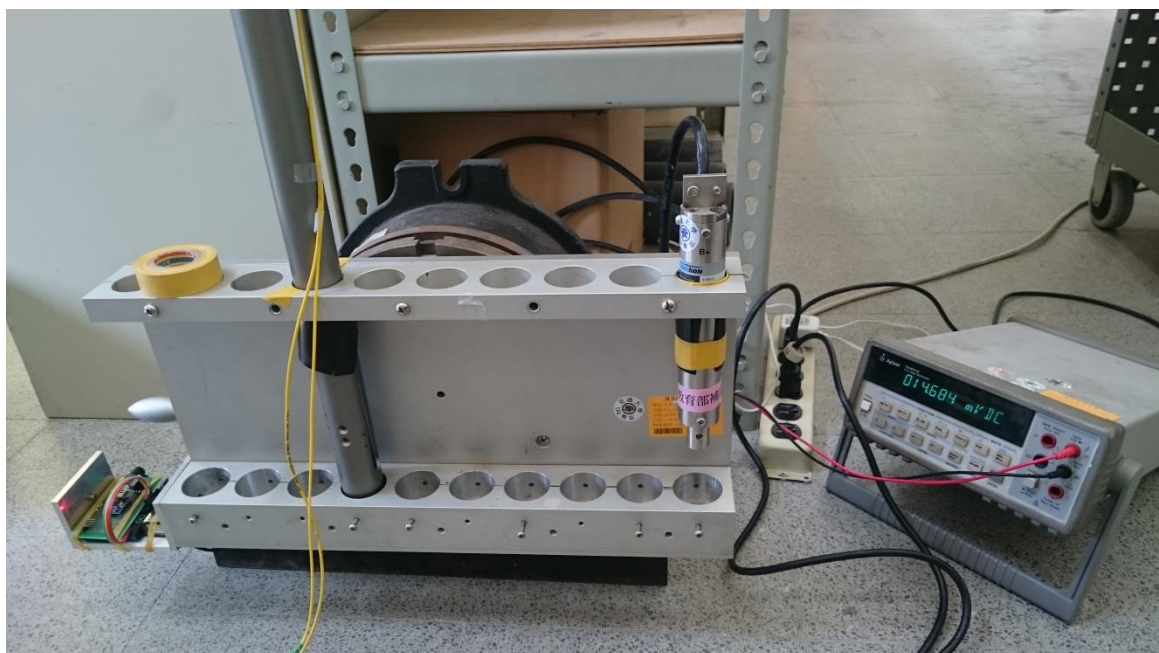


圖 4.6 傾斜角度標定系統

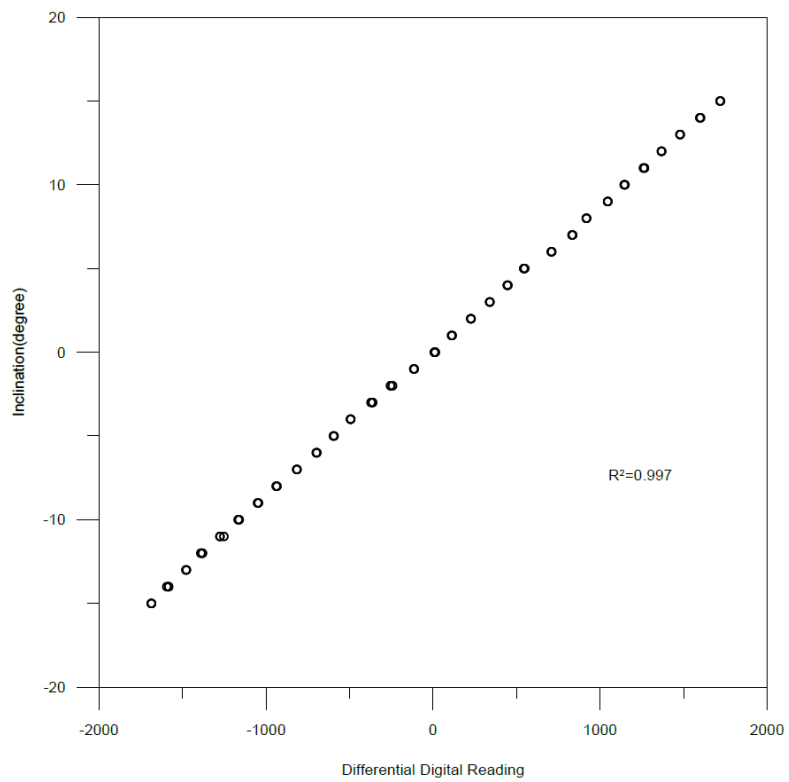
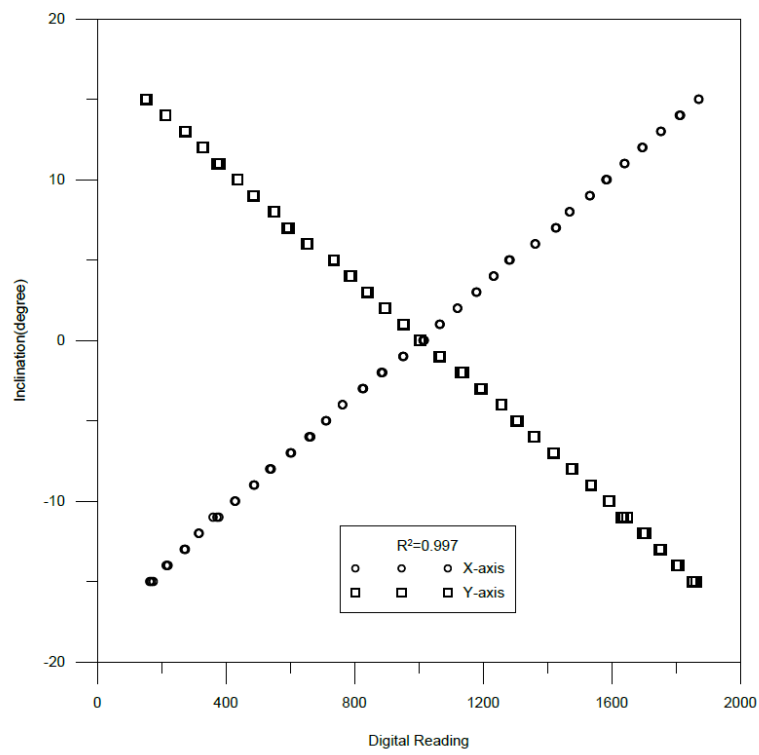


圖 4.7 傾斜儀 Arduino Uno 標定結果

(2) 數位電容土壤水份計

市售土壤水份計可分為電阻式與電容式，以電容式精度與重複性較高，本計畫採用由 Catnip Electronics 所設計製作之電容式土壤水份計(如圖 4.8 所示)，其具有低成本、高解析度與高重複性等優勢，並同時支援 I²C 與 SPI 二種傳輸方式，降低與其他元件衝突之可能，利於與微控制器 Arduino Uno 之整合。



圖 4.8 Catnip Electronics 電容式土壤水份計

圖 4.9 為所用土壤水份計測得之數值與土壤體積飽和度之關係圖，測試之土壤為台灣南部現地土壤，圖中可見 Catnip 具備足夠之線性度。與率定所用 Decagon 之 MAS-1 相比，MAS-1 使用之量測頻率為 70MHz 高於 Catnip 的 16MHz，具有較佳之重複性與抗干擾性，但其售價約為 Catnip 的 20 倍，且 MAS-1 採用類比輸出，於訊號傳輸過程中亦受其他含水量計訊號與電源干擾，且 Arduino Uno ADC 僅 10 bit，解析度有限，相較之下 Catnip 同時支援 I²C 與 SPI 二種數位輸出，不僅訊號抗干擾力強，與控制器間傳輸更為彈性。

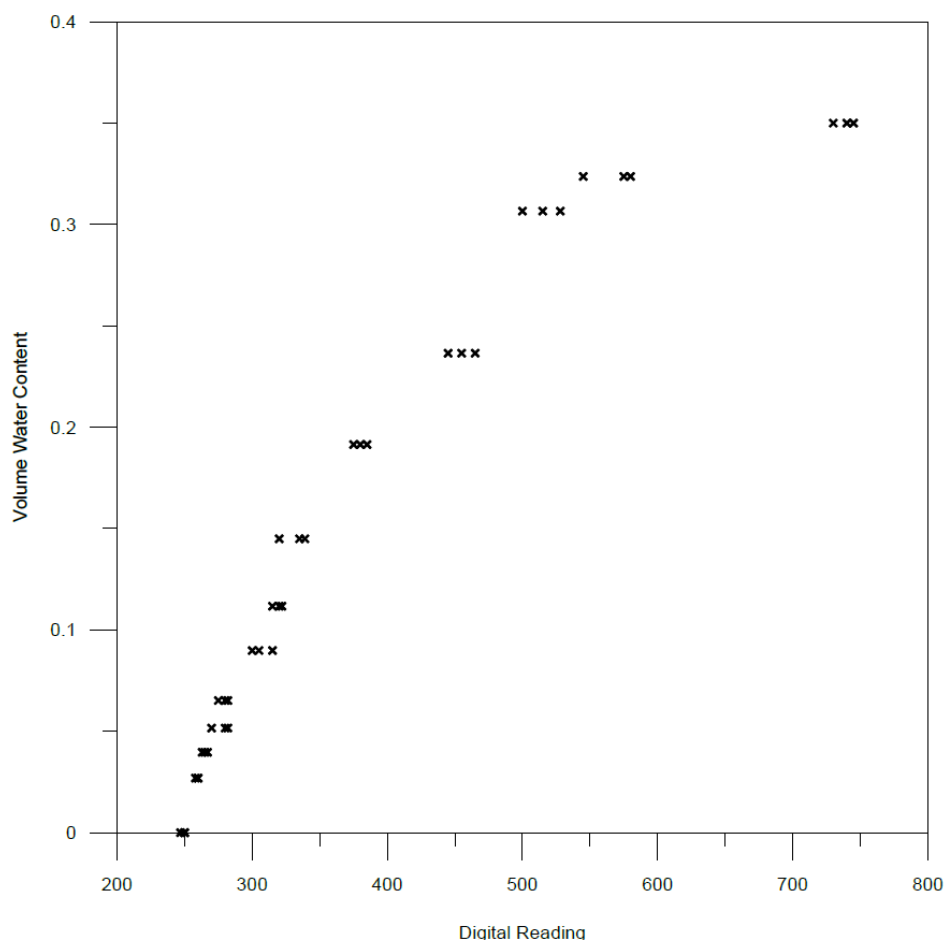


圖 4.9 測得電容值與土壤體積含水量關係圖

(3) 慣性量測(IMU)單元

IMU 已廣泛應用於飛行器，汽車導航，娛樂與運動器材之中，做為軌跡追蹤主要感測單元，IMU 至少具備有一個三軸向重力感測器以及一個三軸向陀螺儀，由此二感測器分別提供三軸向線性加速度及三軸向角速度，上述二者共計六項物理量為循跡運算所必須之物理量，故 IMU 亦稱作六軸動態感測器。市面亦有九軸動態感測器，係指除上述六項必要物理量外，增設一三軸向磁力計(3-axis Magnetometer)，提供 IMU 一絕對參考準位以避免六軸 IMU 經由積分所產生之誤差累積，由於本研究軌跡量測可視為靜態量測，誤差累積並不明顯，為簡化軟體與硬體之開發，故本研究將選擇六軸 IMU 作為動態感測器。由於軌跡運算相當複雜，而 InvenSense 所生產之 MPU-6050 六軸 IMU 內

建一 MCU，除了同一般六軸 IMU 可提供三軸向之線性加速度與角速度外，該 MCU 已嵌入運算韌體，可將六軸資料轉換成軌跡運算所需之歐拉角(Euler angles)，大幅簡化韌體開發難度並提升 CPU 運算效能，考量土層監控模組所蒐集之六軸資料將來可運用於軌跡運算，故本研究採用 InvenSense 所生產之 MPU-6050。

MPU-6050 已經廣泛使用並有許多市售之模組可直接使用(圖 4.10)，由於 MPU-6050 之 IC 封裝較不易使用傳統焊槍與熱風槍進行焊接，因此本研究直接使用市售之模組以節省開發成本。IMU 亦可提供傾斜角度資訊，圖 4.11 顯示 MPU-6050 所測得之 X 向與 Y 向線性加速度與同向傾斜角度變化之關係，結果相當線性且高重複性，但雜訊較大，浮動值達 0.5 度是其缺點。



圖 4.10 MPU-6050 模組(Arduino)

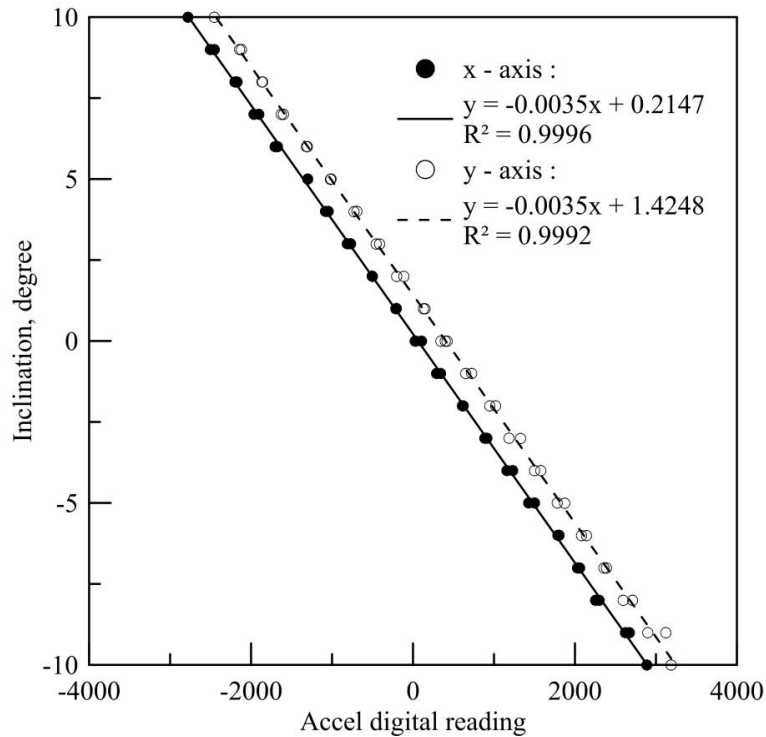


圖 4.11 IMU 與傾斜角度之關係圖

4.2.2 系統組成

規劃之 MEMS 感測器、通訊、數據及訊號處理/紀錄與電源供應模組全部裝置於一多層電路板(如圖 4.12 所示)，並固定於一防水金屬盒中，其外覆以防曬層以降低其受日曬影響其耐久性，防曬層可以 3D 印表機製作多孔隙之塑料殼層以增加通風，且製作成本低廉。其下方將連結分佈式含水量計。結合以上各感測器所測得之參數，配合遠端即時運算與預警系統，可進行即時邊坡穩定分析，並透過設立警戒值，適時在邊坡災害產生前提前發布預警。為達上述目的，在地層監測模組內裝有無線數據傳輸系統，以無線訊號傳送至管理單位並於遠端主機紀錄相關讀數。

無線土層監測模組包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)韌體與使用介面及(4)感測器，除感測器外各部分說明如下：

(1) 微處理器

計畫採用市售開放式原始碼之微控制器，目前常見之市售開放式原始碼的軟硬體平台主要有四種：(1)Arduino、(2) 樹莓派(Raspberry Pi)、(3)Linkit、及(4)Intel Edison。其中 Intel Edison 由於成本較高，實際使用狀況尚不明確，Linkit 則缺乏記憶體管理單元 (Memory Management Unit, MMU)，故本研究不採用上述二者作為微控制器。

樹梅派係微型化電腦，而 Arduino 則為微處理器，因此樹梅派在功能上勝過 Arduino，但是 Arduino 包含 I/O 腳位，多可直接與電子元件連結，使得開發難度相對低於樹梅派，透過 USB 介面連結電腦便可更改其操作程序，使得 Arduino 在開發上較具優勢，且樹梅派需要掛載擴充面板方可提供足夠數量的輸入端，使得 Arduino 在空間上略勝一籌。故採用 Arduino 作為土層監測模組之微處理器，將來若 Arduino 無法滿足將來衍生功能，則再改採用微型化電腦以提供足夠之處理能力。

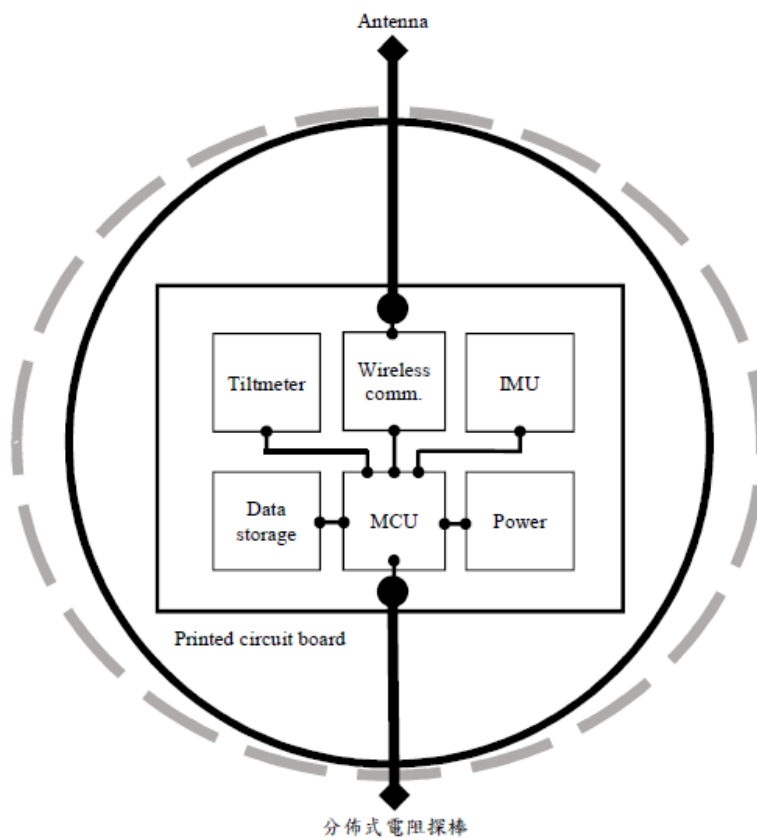


圖 4.12 土層監測模組內部架構示意圖

本研究採用 Arduino Uno 版本(圖 4.13)，其搭載 ATmega328 微處理器，其時脈高達 16MHz，且具 14 支數位 I/O 接腳，其中包含有一組 SPI (Serial Peripheral Interface Bus)介面以及一組 I²C (Inter-Integrated Circuit)介面，I²C 支援單一匯流排最多可和 112 個節點通訊，足以應付多數模組間之數位資料傳輸。另外配有 6 支類比訊號接腳，可透過微控制器內含之 ADC (Analog/Digital Converter)將類比訊號轉換成數位訊號，亦可作為數位 I/O 接腳使用，滿足土層監測模組的功能需求，且尺寸僅長 2.7” (約 6.9cm)、寬 2.1” (約 5.4cm)，符合土層監測模組尺寸限制，工作電壓 5V，輸入電壓介於 7~12V 也適用多數市售充電電池。

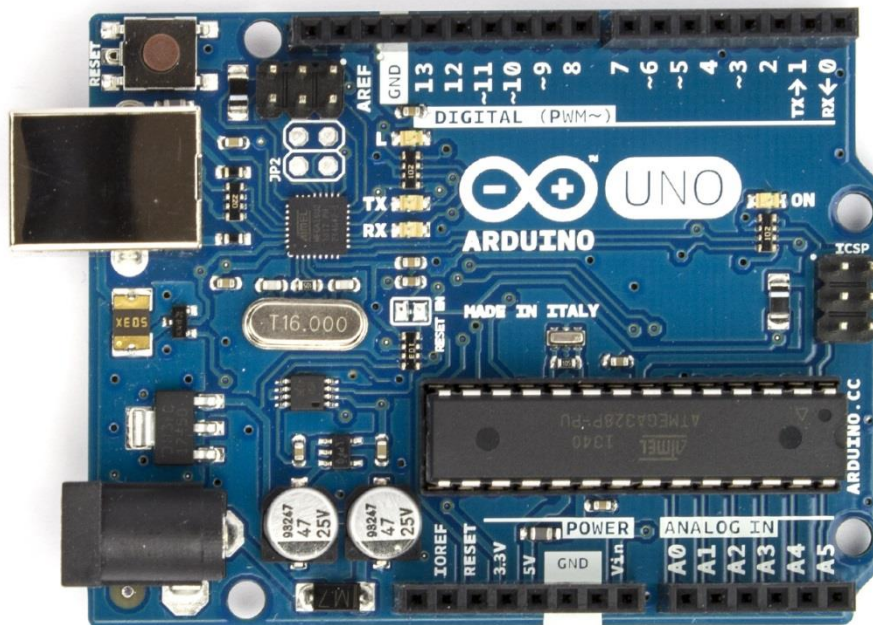


圖 4.13 Arduino Uno

(2) 無線傳輸模組

無線數據傳輸平台有許多選擇，如 wi-fi，藍牙，GSM 與 zigbee 等相關技術可以在市場上購得。由於邊坡滑移多發生於強降雨時，而水對電磁波的傳遞具有相當程度的屏蔽效應，因此無線傳輸平台的選擇須將穿透屏蔽能力納入考量，而傳輸距離以及傳輸網路陣列則可降

低中繼站數量，降低能源與成本需求，亦為選擇上之考量。為此，各種適用於本案之無線通訊模組條列如下：

1. RF – 最為廣泛使用之無線訊號傳輸模組，由於具有智能調整以及可延伸傳輸的特性，使其幾乎適用各種狀況，對多系統平台的支援也使其更便於擷取。戶外無訊號屏蔽環境下傳輸距離約 650m。
2. XBee – 採用低速率無線個人區域網(WPAN, Wireless Personal Area Network)，具有多種頻段訊號發送能力，可因應環境條件選擇高頻或低頻發送訊號，低頻訊號傳輸較不受水的訊號屏蔽所影響。支援雙向傳輸，可藉此建立土層監測模組間的傳輸網路陣列，傳輸距離約 750m。
3. CC1200DK – 適用長距離數據傳輸，外接天線模組可使其傳輸距離達到 2.3km。
4. RC522 – 採用 RFID 傳輸技術，傳輸距離短，但具有最強的訊號遮蔽穿透能力可穿透 1m 水深。
5. CE0700 – 採用手機 GSM 傳輸技術，只要鄰近區域有基地台即可傳輸數據，無須另外架設傳輸中繼站。

其中 RC522 僅可作為回收用途，無法作為主要通訊方式。考慮災害時常伴隨惡劣天候條件，GSM 傳輸技術則仰賴基地台與監測地區距離，且有監測需求地區基地台密度通常較低，容易受到降雨造成之訊號屏蔽影響，故不列入考慮。XBee 係屬 ZigBee 傳輸技術之衍生，此類傳輸技術具有資料不同步的缺點，且耗電量約為 RF 的 10 倍左右，將減少監測模組在災害間之運作時間。相較於 CC1200DK，RF 具有低功耗、高速率、多頻點、低應用成本以及便於開發等優勢，故本計畫以 RF 傳輸技術的衍生技術 nRF24L01 作為無線傳輸模組。

由於 nRF24L01 之電路與元件已完全模組化(圖 4.14)，使其便於開發，而其低工作電壓(1.9V~3.6V)與工作電流(<25mA)使其具備低功耗之優勢，高速傳輸(2Mbps)並支援多達 125 頻點，滿足多點通信與跳頻

通訊之需求。NRF24L01 集成了所有與 RF 協議相關的高速信號處理功能，包括自動重發丟失數據包和自動產生應答信號，使其得以自動檢測並重發遺失的封包，重發時間及重發次數可透過軟體控制，並可自動存取未收到應答信號的封包，自動應答功能在收到有效數據後，模組將自動送出應答信號，無須另行編程載波檢測。NRF24L01 內部具有固定頻率檢測硬體 CRC 偵錯和對多點通道地址控制，封包傳輸錯誤計數器及載波檢測功能則可用於跳頻設置，提供同時最大 6 組接收通道地址設置，並可有選擇性地開啟接收通道標準排針 Dip2.54mm 介面，便於嵌入式應用。NRF24L01 的 SPI 介面可以利用微控制器的 SPI 介面連接或以 I/O 接腳進行模擬，內部具有 FIFO(First In, First Out)與各種高低速微處理器接腳，便於使用低成本微控制器。

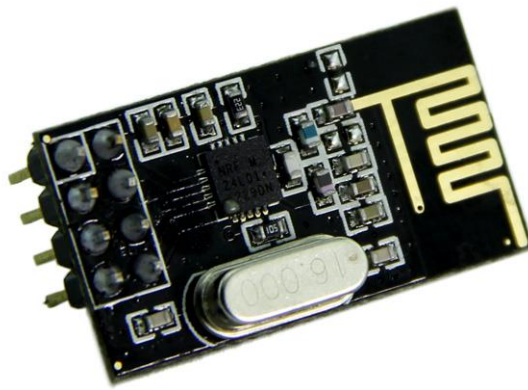


圖 4.14 nRF24L01 模組(摘自 www.seeedstudio.com)

(3) 使用者介面(User interface)

本研究使用者介面採用第三方應用程式 Teraterm(圖 4.15)，以監控接收端 Arduino Uno、接收無線模組所發射之訊號，有效數據包括土壤體積飽和度變化、兩向度之傾斜角變化，以及加入系統時間，與所有資料儲存功能。

儲存不會覆蓋既有資料，新儲存之資料將空一行後繼續寫入文字檔，儲存後之檔案格式為.txt 文字檔(圖 4.16)，儲存時各資料皆以逗點分隔，便於以 Matlab 撰寫之之程式讀取及數據處理：

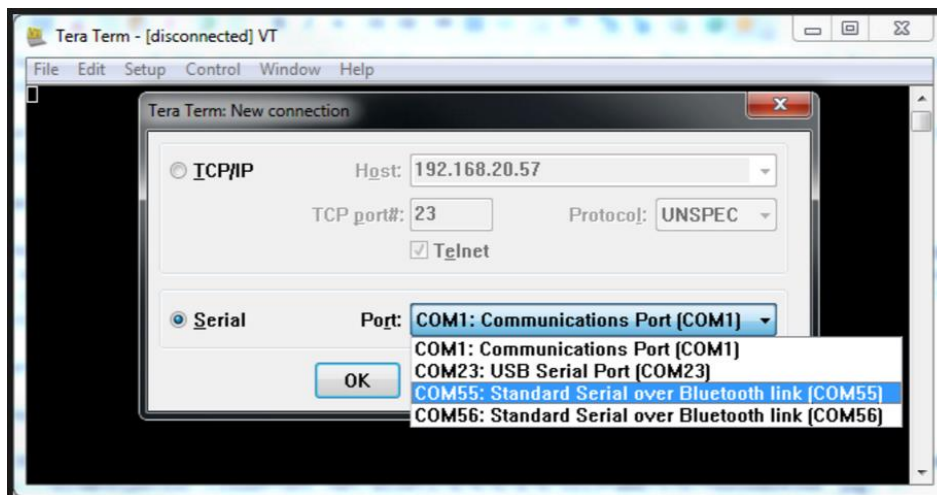


圖 4.15 使用者介面

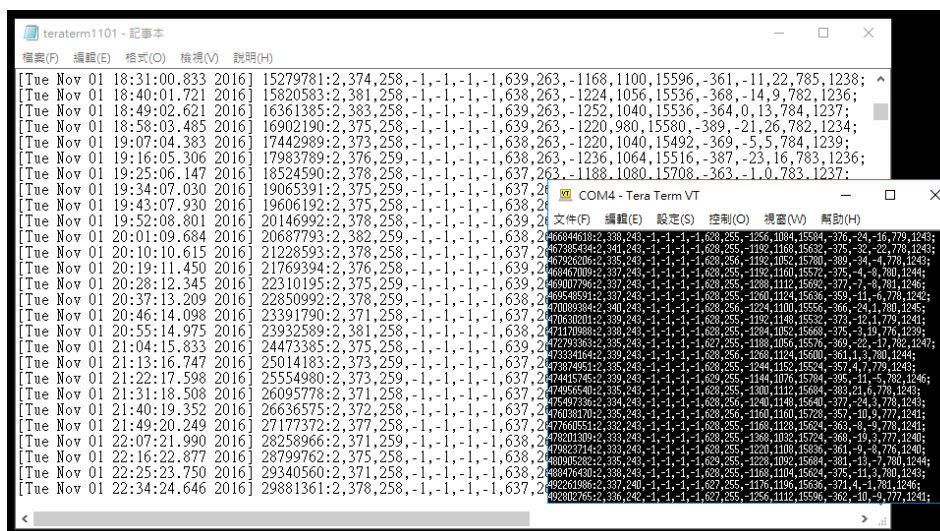


圖 4.16 儲存後之文字檔

4.3 無線土層監測模組

土層監測模組可分為發射端與接收端兩部分，發射端係指由微控制器結合各感測器所構成之土層監測模組，裝置於待測地點並持續透

過無線傳輸將各感測器所獲取之資料送出；接收端則指單純由微控制器結合無線傳輸模組之無線接收系統，負責管理 nRF24 網路中各發射端之網路位址，並不具備量測功能，裝設於現地之伺服電腦進行資料收集，並儲存至伺服電腦以供管理單位透過遠端監控並存取監測數據。

Sparkfun 推出一可相容 Arduino UNO 的原型擴充板(圖 4.17)可直接固定於作為微控制器 Arduino UNO 之排針母座上(如圖 4.18 所示)，本研究採用該原型擴充板，並將發射端方面除電容感測器以外之感測器皆固定於該原型電路板上，另設有多組含水量計排線接口，如此減少線材走線所佔用之體積以及接頭鬆脫之風險。發射端除了包含微控制器外，搭載 45AH 之蓄電池作為戶外供電系統，加入太陽能板與供電控制器以提升土層監測模組續航能力。圖 4.19 為本研究所研發之土層監測模組發射端之外構，發射端的外構設計可大致分為三部分：

- (1) 核心防水盒(圖 4.20)：可裝置微控制器、IMU、單向傾斜儀、無線傳輸模組、外接天線與電源之防水電子盒。
- (2) 含水量計外構(圖 4.21)：可裝置一只電容感測器之桿件外構，依含水量計配置數量進行串聯，或透過連接器以抗蝕 UPVC 管連接並延伸至預定裝設深度。

核心防水盒係採用市售之電子防水盒加工而成，其上具有 O 型環與溝槽使其上下盒以螺絲逼緊後具有防水功能，防水盒下方開孔並搭配底座與 UPVC 管黏合以連接下方含水量計外構，UPVC 管可視含水量計配置深度與核心防水盒高度進行調整，目前設計為將核心防水盒配置於地表上 0.2m 處。核心防水盒上蓋則開孔並裝設 2.4GHz 頻段專用之耐候型外接天線，透過 SMA 端子與無線傳輸模組連結，天線下方具有防水螺絲，並另以矽膠封填天線與上蓋間之縫隙。盒內則用以工業用膠條固定微控制系統與感測器電路板。

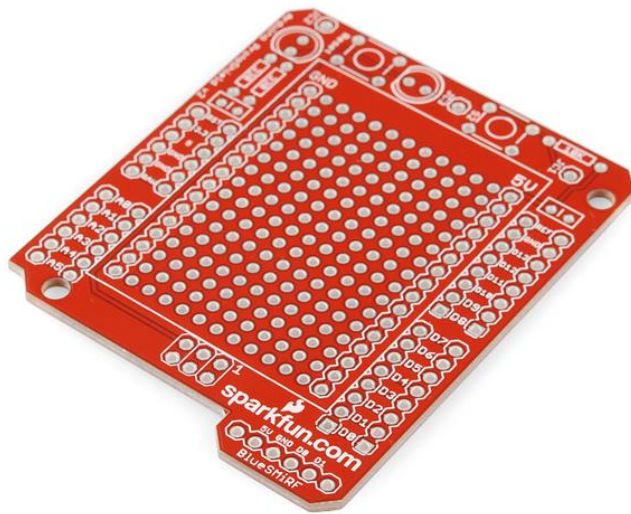


圖 4.17 Arduino UNO 原型擴展板(Sparkfun)

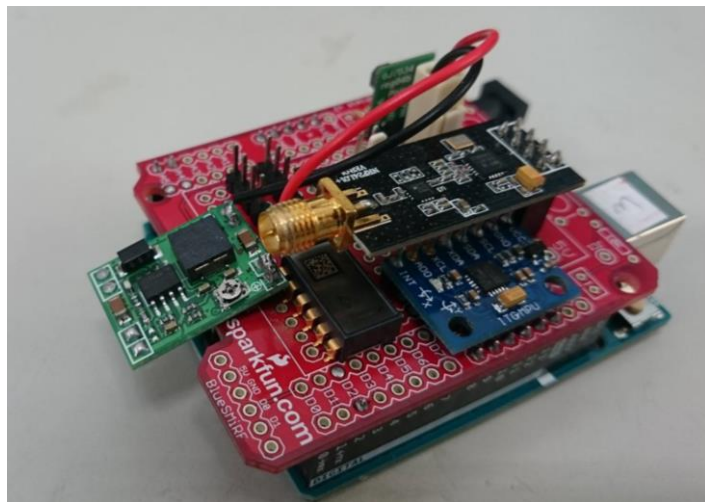


圖 4.18 Arduino UNO(Green Board)結合原型擴展板



圖 4.19 發射端外構



圖 4.20 發射端防水盒



圖 4.21 土壤水份計外構

含水量計外構可將水分計感測區塊暴露於外，使其得以直接接觸待測土壤以量測土壤含水量，含水量計之接線處與元件位置則置入後方箱體中，並以電子封裝膠進行封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐油污之耐候型外披覆 4 芯電子訊號線，故含水量計外構無須防水設計，採用 3D 列印以降低原型製作成本。

接收端包含一微控制器與一搭載無線傳輸模組之電路板，該電路板與感測電路板(圖 4.18)相同僅拔除感測單元，並以 USB 傳輸線與工業嵌入式電腦連接，將數據透過虛擬序列埠傳輸寫入電腦。

4.4 無線感測土層監測模組現地測試

為測試優化之土壤無線監測模組現地表現，本年度已於宜蘭太平山及甲仙攔河堰旁邊坡進行現地安裝測試，甲仙攔河堰旁邊坡為本年度測試場址，相關結果將於第五章呈現，宜蘭太平山主要用於現地測試與建立安裝程序，相關說明如下：

4.4.1 太平山場址安裝測試

本研究於 2016 年 6 月 20 日於宜蘭縣太平山公路(太平林道)13k 處(如圖 4.22)裝設二支土層監測模組，根據經濟部中央地質調查所既有地質調查資料顯示該處屬廬山層仁澤段地層，土壤為黃色粉土質黏土夾岩塊或黃色粉土質黏土，地下水位約位於地下 40m 以下，淺層皆處非飽和狀態相當適合飽和度量測，土壤厚度約 0.6 至 1.7m 間，故規劃本次安裝之含水量計數量為 2，深度位於 0.25m 與 0.75m 間隔為 0.5m，該處並設有中央研究院與中央大學之監測機箱，配有市電與無線網路，經溝通後取得中央研究院同意使用其監測機箱與工業電腦裝設接收端與外接天線如圖 4.23 所示。

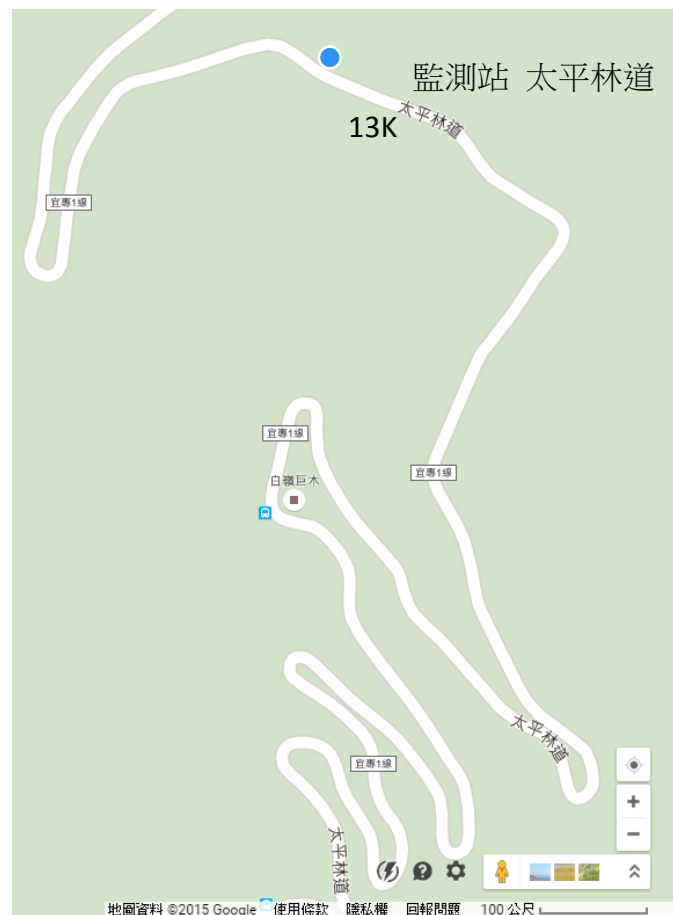


圖 4.22 安裝場址位置圖



圖 4.23 接收端與自動化監測記錄系統

安裝程序：

1. 鑽孔至預定深度 0.8m。
2. 置入土層監測模組並定向定平。
3. 回填至含水量計上方，以少量皂土圍繞覆蓋於桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。
4. 重複上述步驟回填至地表，以少量皂土圍繞覆蓋於地表桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。

由於該場址土壤含有大量岩塊，故鑽孔採明挖法以電動錘破碎並以人工出渣交替進行(圖 4.24)，鑽至預定深度後安裝土層監測模組並定向定平後(圖 4.25)，以現場土料進行回填，回填過程確保石塊遠離感測桿件，回填至含水量計上方以少量皂土覆蓋(圖 4.26 左)以確保孔隙水無法沿桿件流動造成孔隙水之連通，回填完成後亦於地表鋪設皂土(圖 4.26 右)以防止地表水直接沿桿件滲流影響土壤飽和度，最後完工如圖 4.27 所示。



圖 4.24 現場鑽孔照片

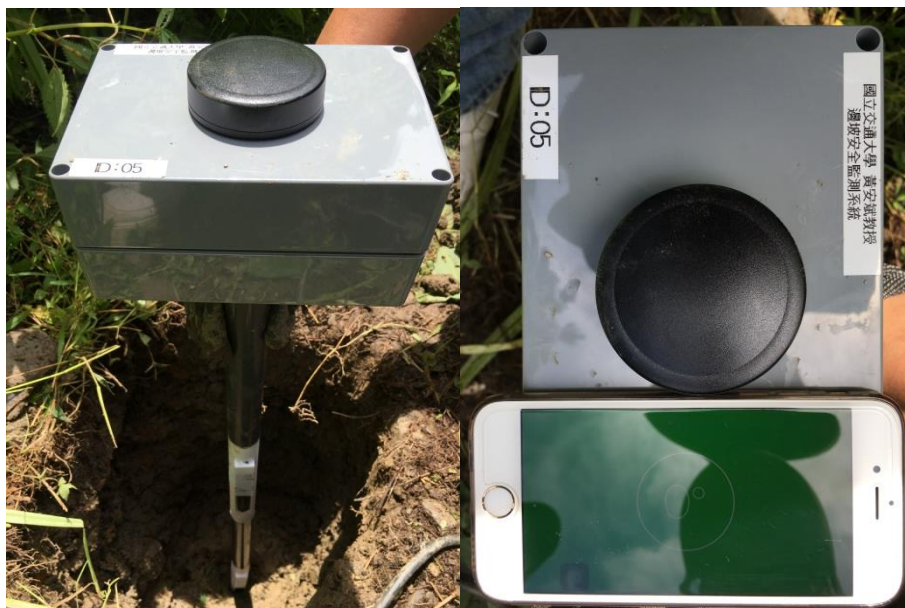


圖 4.25 土層監測模組裝設照片



圖 4.26 阻水層回填照片



圖 4.27 完工照片

4.4.2 太平山場址資料

太平山場址計安裝兩組監測模組，模組間間距約為 10m，編號為 N2 及 N5，測試期間於 2016/06/21~23 日間有降雨發生，降雨紀錄依中央氣象局太平林道測站觀測紀錄如表 4-1 所列，無線觀測模組所量測之土壤飽和度變化、溫度變化及 IMU 之傾角如圖 4.28~4.30 所示，圖 4.28 顯示深層飽和度較高，且降雨需有一定延時方可引致飽和度變化，而 N5 之淺層(深度 0.25 cm)之水份計對降雨之反應較靈敏，而深層水份變化可能與土下水位變化腳有關連。而溫度變化顯示降雨時段較低，結果顯示土壤水份計已達到量測之功能。

表 4-1 太平山場址雨量紀錄

日期	時段(時)	時雨量 (mm)
2016/06/21	15~16	22
	16~17	19
	17~18	0.5
2016/06/22	13~14	4
	14~15	17.5
2016/06/23	16~17	9

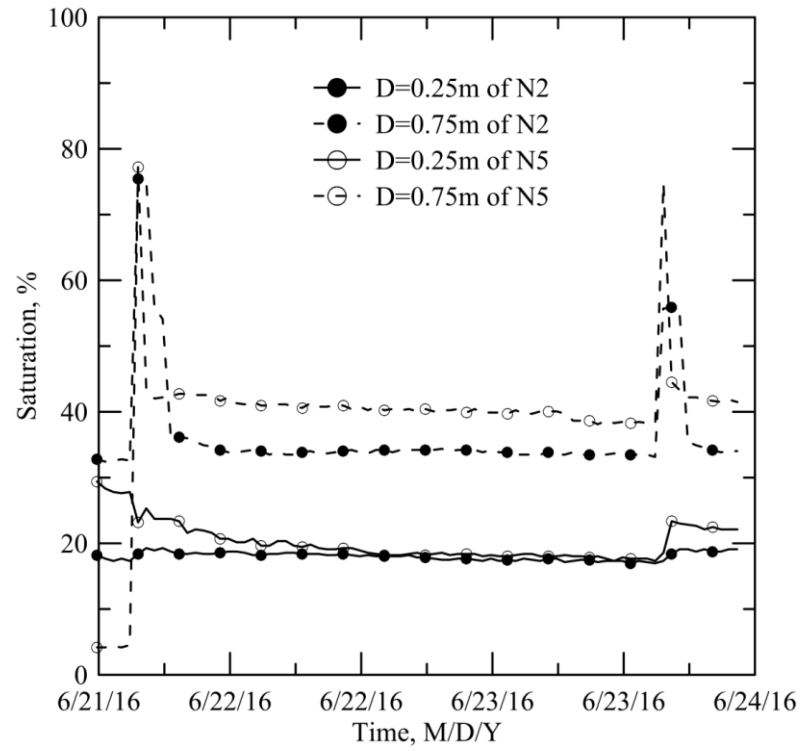


圖 4.28 太平山土壤水份計紀錄

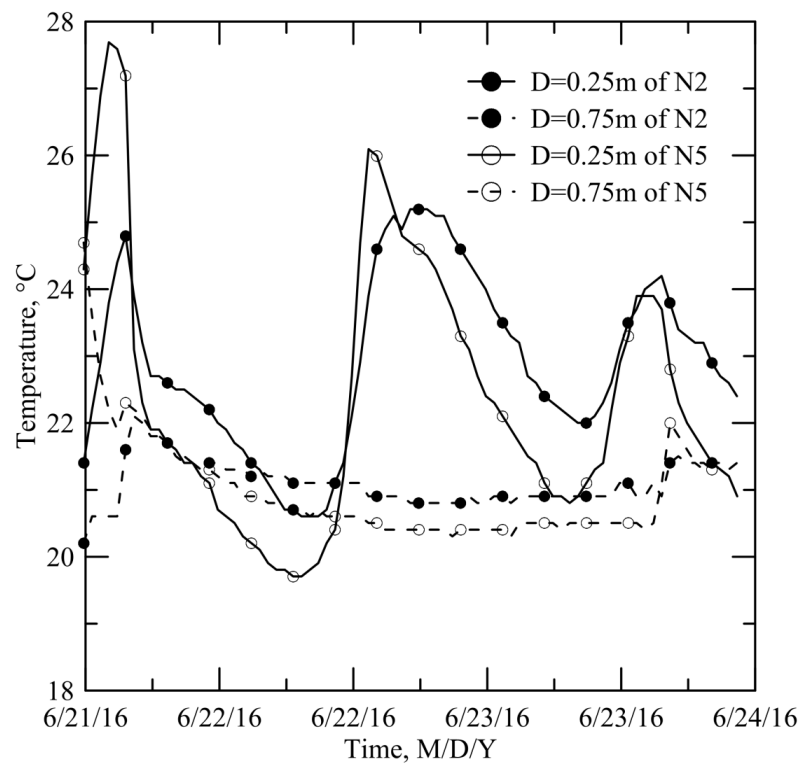


圖 4.29 太平山土中溫度變化紀錄

圖 4.30 顯示太平山以 IMU 量測之兩向傾角變化，因現地並無滑動跡象，所記錄應為感測之雜訊，此結果顯示高精度傾斜儀之必要性，配置高精度傾斜儀之感測器已開發完成並裝設於另一場址。此現地測試結果證明土中水份感測及資料傳輸具依定可靠度，且提供系統優化之方向。

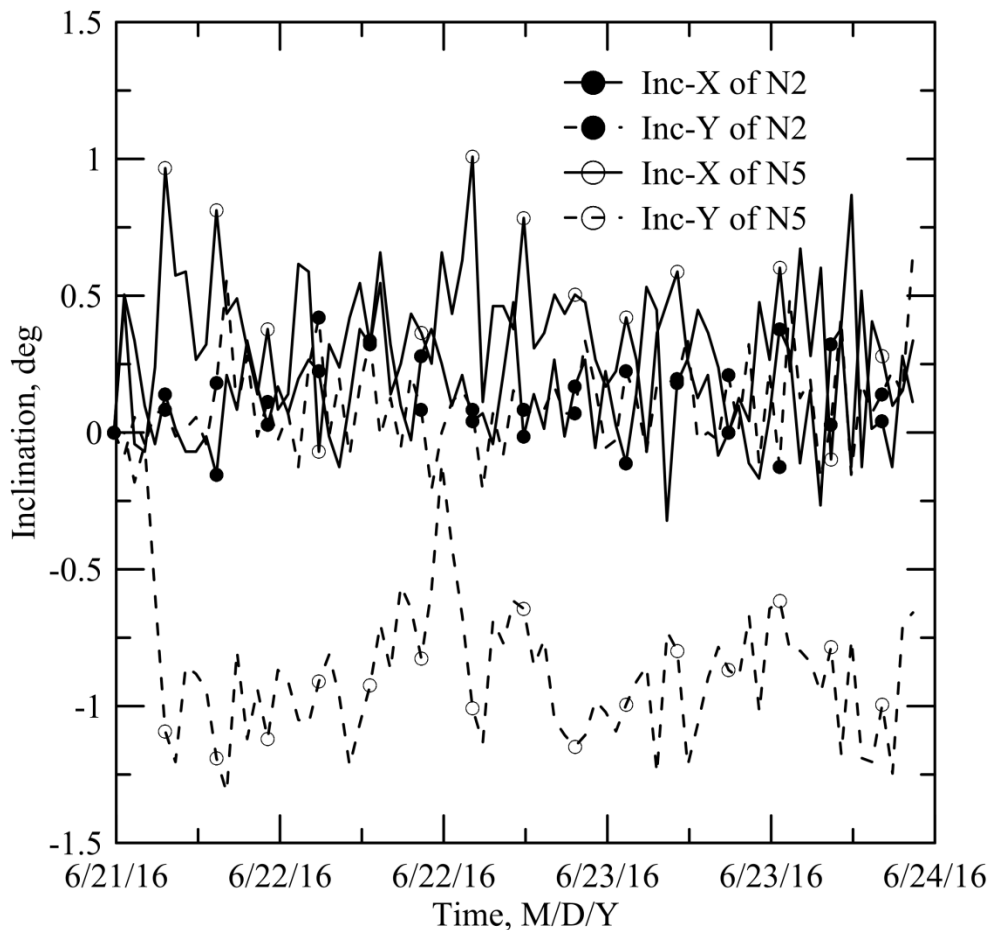


圖 4.30 太平山 IMU 傾斜角紀錄

第五章 邊坡依時預警系統

本年度選定候選場址一處進行現地監測及二維水力力學耦合分析，並整合提出場址客製化依時預警架構，相關成果於本章節呈現。

5.1 研究場址地質與土壤性質

5.1.1 研究場址地質

為配合淺層邊坡破壞條件及後續監測模組安裝測試便利性，候選場址須符合下列條件：

1. 現地需有軟弱土層，且為陡坡地形，破壞面為非飽和土層之淺層破壞。
2. 具有相關幾何、水文及地質參數，並有現地監測資料參考。
3. 須為鄰近道路之邊坡，且具高破壞潛勢或有破壞歷史。
4. 鄰近具有有線通訊及電源供應，以裝設監測主機。

綜合考慮上述條件，本年度選定高雄甲仙區甲仙攔河堰通達道路邊坡，此場址位於甲仙攔河堰聯外道路上邊坡，西側坡地曾於民國 94 年 9 月受泰利風災連續豪雨影響，甲仙攔河堰聯外道路上方有數處邊坡發生坍滑而阻斷交通，道路上、下邊坡擋土牆亦形成多處裂縫。98 年莫拉克颱風期間造成邊坡再次坍塌，99 年 3 月 4 日規模 6.4 甲仙地震，由震後邊坡傾斜儀量測結果，顯示邊坡有滑動現象，最大滑移量約達 155mm，滑動崩塌潛勢甚高，依據「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，潛在上邊坡滑動面約位於地表下 1.5~4.8m 之崩積層或土岩界面。

此場址已完成地形測量、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，

圖 5.1 為現地監測設施平面圖，表 5-1 為鑽孔資料，本次安裝於通過 BH-03 及 BH-04 之剖面，其剖面如圖 5.2 所示，地質材料參數如表 5-2 所示，部分相關資料將用於水力力學耦合分析。

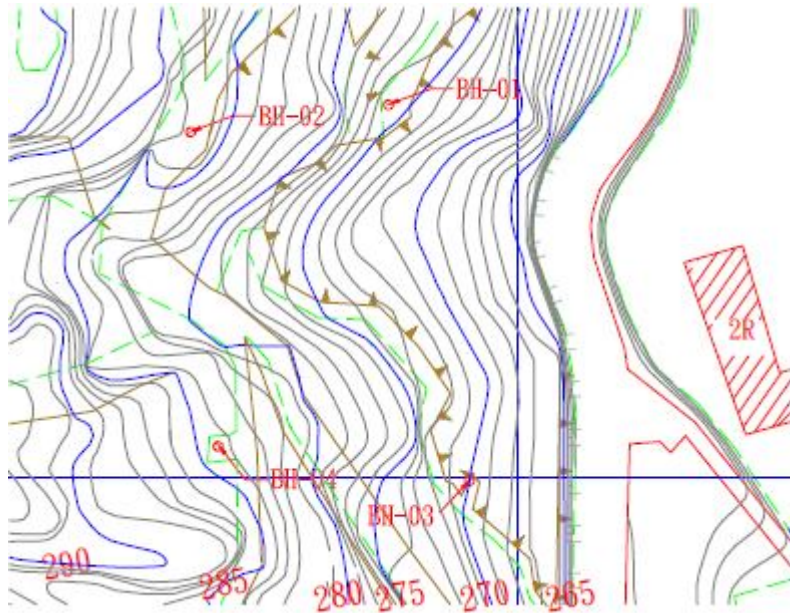


圖 5.1 監測設施平面配置圖(南水局 2011)

表 5-1 傾斜管孔位鑽孔資料(南水局 2011)

孔號	深度(m)	測傾管	鑽探成果
BH-01	15	有	0~0.8m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 0.8~1.5m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 1.5~4.2m，頁岩層：棕灰色破碎頁岩 4.2~15.0m，頁岩層：灰色頁岩。
BH-02	15	有	0~2.5m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 2.5~2.9m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 2.9~15.0m，頁岩層：灰色頁岩
BH-03	20	有	0~0.5m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 0.5~2.45m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 2.45~4.80m，頁岩層：棕灰色破碎頁岩 4.8m~20.0m，頁岩層：灰色頁岩局部破碎
BH-04	20	有	0~1.4m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 1.4~2.2m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 2.2~3.0m，頁岩層：棕灰色破碎頁岩 3.0~20.0m，頁岩層：灰色破碎頁岩

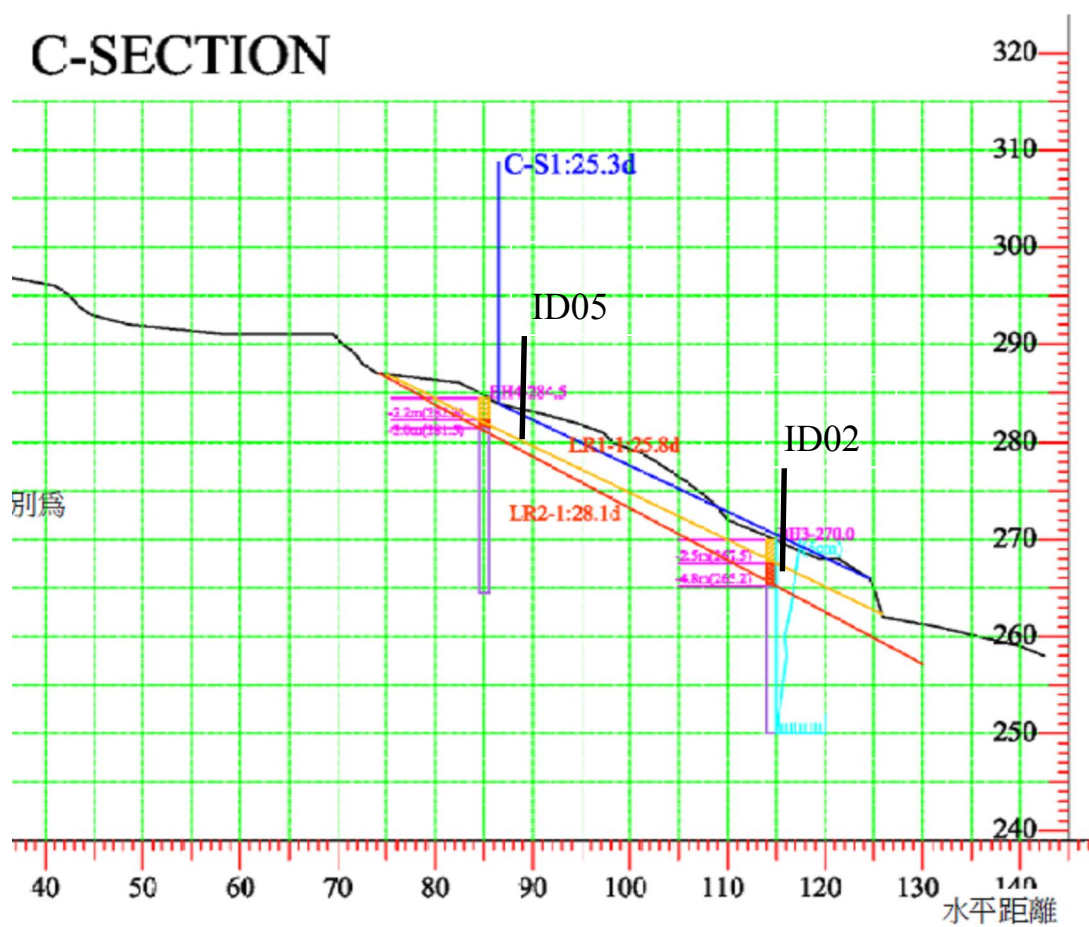


圖 5.2 監測剖面圖(南水局 2011)

表 5-2 簡化地質材料參數(南水局 2011)

參數	單位	風化土層	破碎頁岩	頁岩
飽和單位重	kN/m ³	18.1	19.6	24.5
非飽和單位重	kN/m ³	20.6	21.6	---
楊氏模數	kPa	7840	8820	29400
柏松比		0.3	0.3	0.2
有效凝聚力	kPa	24.5	29.4	98
有效摩擦角	度	31	32	30
膨脹角	度	2	0	0

5.1.2 現地土壤試驗成果

因現有報告並無進行水力力學耦合分析所需之完整參數，尤其是非飽和滲透係數及衍伸莫爾庫倫破壞準則之強度參數，因此本計畫於現地取得表土，於室內以控制相同孔隙比之重模式體進行相關試驗，現地取得土樣其粒徑分布如圖 5.3 所示，現地含水量為 24%時，總體單位重為 18 kN/m^3 ，上邊坡指圖 5.1 中 BH-04 所在，下邊坡為 BH-03 旁土樣，兩處粒徑分布相近，土樣 Atterberg limits 為 $LL=39$ 、 $PL=28$ ，USCS 分類為 ML。以壓力鍋進行現地重模土樣之浸潤(wetting) SWCC 如圖 5.4 所示，以 van Genuchten 模式擬合參數如表 5-3 所列，殘餘體積含水量(θ_r)採用典型粉土數值。以重模視體進行三軸飽和透水試驗，所得之飽和滲透係數(k_{sat})為 $1.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

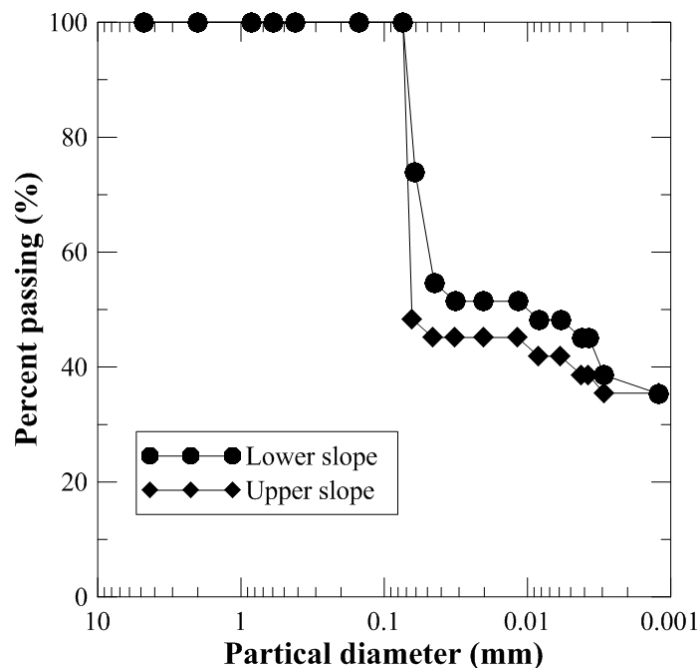


圖 5.3 現地土壤粒徑分布圖

非飽和土壤強度參數則以非飽和壓密排水單剪進行，包括飽和壓密排水單剪及基質吸力 25 kPa 下非飽和壓密排水單剪，飽和壓密排水單剪結果如圖 5.5 所示，定義剪應變達 15%時之剪應力為破壞強度，現地土壤之有效凝聚力(c')為 2.46 kPa，有效摩擦角為 17.3° 。基質吸力 25 kPa

下非飽和壓密排水單剪試驗結果如圖 5.6 所示，其視凝聚力(ct)為 4.51 kPa，摩擦角為 17.7° ，依據土壤衍伸莫爾-庫倫破壞準內，求得基質吸力引致土壤強度參數 ϕ^b 為 $\phi^b = \tan^{-1}(\frac{4.51 - 2.46}{25}) = 4.69^\circ$

表 5-3 van Genuchten (1980) 模式擬合參數

θ_s (%)	θ_r (%)	α	m	n
43.5	6.1	0.1	0.99	1.11

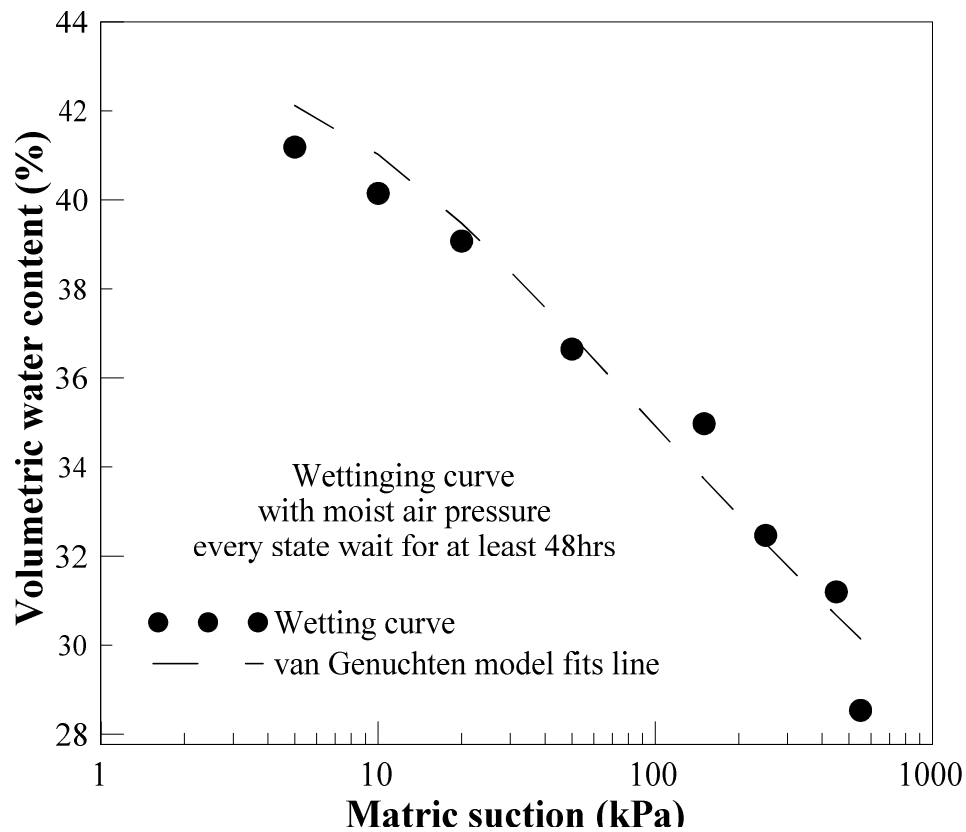


圖 5.4 現地重模土樣土水特徵曲線

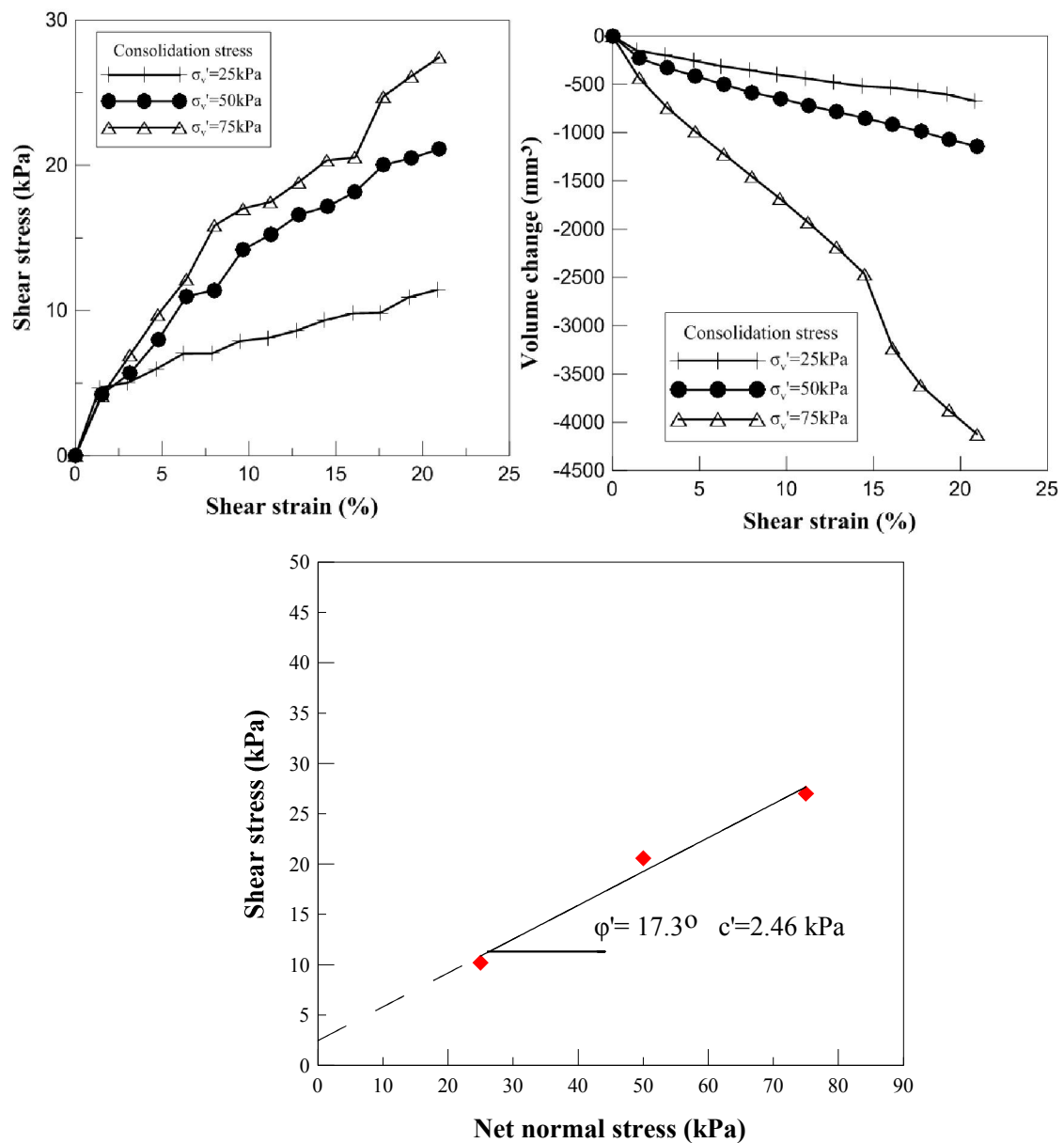


圖 5.5 飽和壓密排水單剪結果

5.2 無線監測模組成果

本研究於 2016/06/23 日於高雄甲仙攔河堰旁邊坡裝設二支土層監測模組(ID02 及 ID05)，並於甲仙攔河堰管理中心安置接收模組(ID00)，以 4G 無線網路進行資料回傳，其 ID 為統一以節點(Node)編號進行命名。監測點與接收點相對位置如圖 5.7 所示，ID02 裝置於 BH-03 旁，ID05

裝置於 BH-04 旁，監測點 N02 與 N05 安裝情況與方位相關資訊如圖 5.8 及 5.9 所示，監測點主要朝北偏東 65 度之方向，其安裝過程需注意監測模組保持水平避免造成量測誤差，另於近地表面回填皂土於無線監測模組桿身四周，避免降雨滲流直接沿桿身入滲影響入滲監測成果。

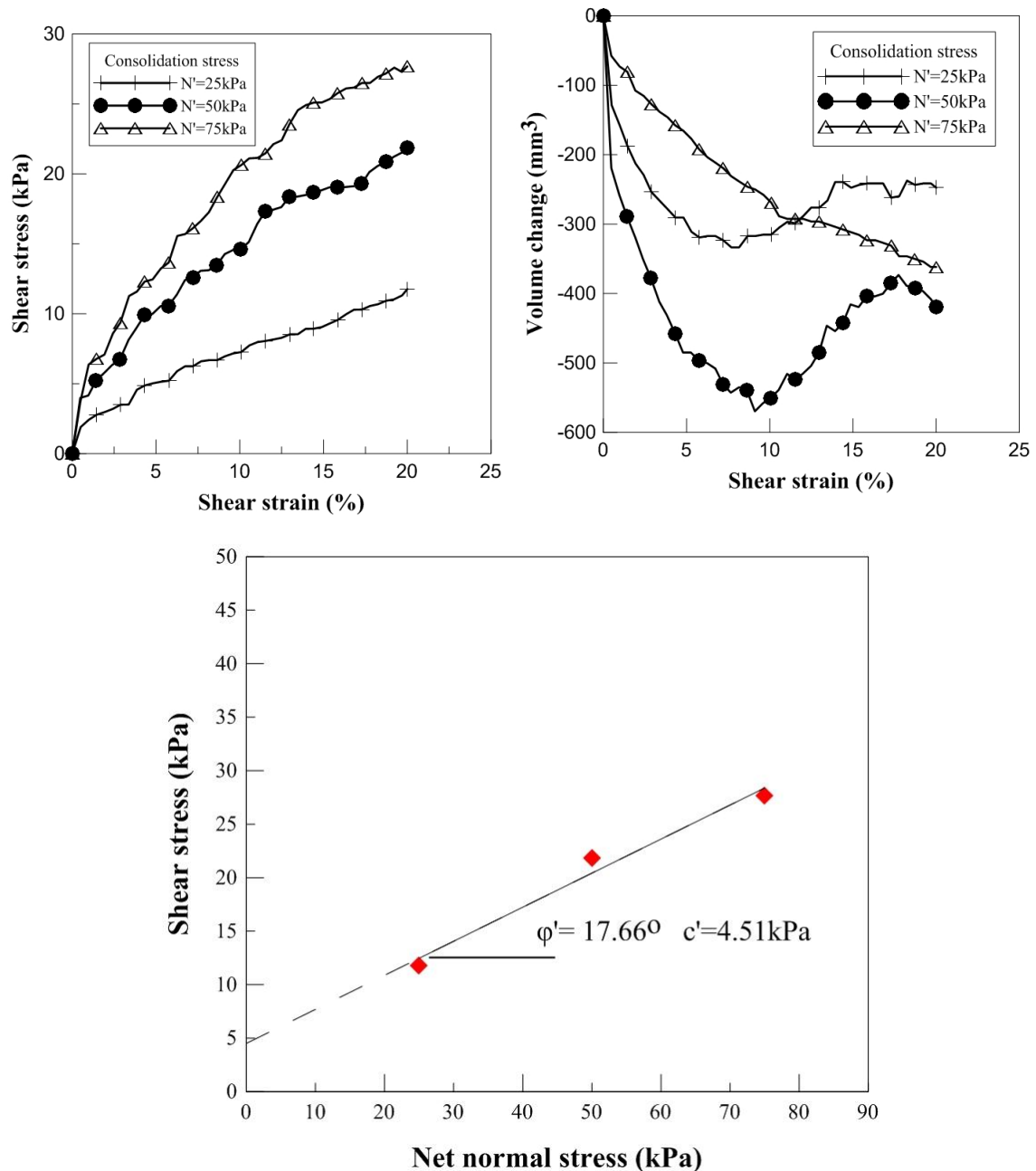


圖 5.6 基質吸力 25 kPa 時非飽和排水單剪結果



圖 5.7 高雄甲仙攔河堰邊坡無線監測模組安裝位置

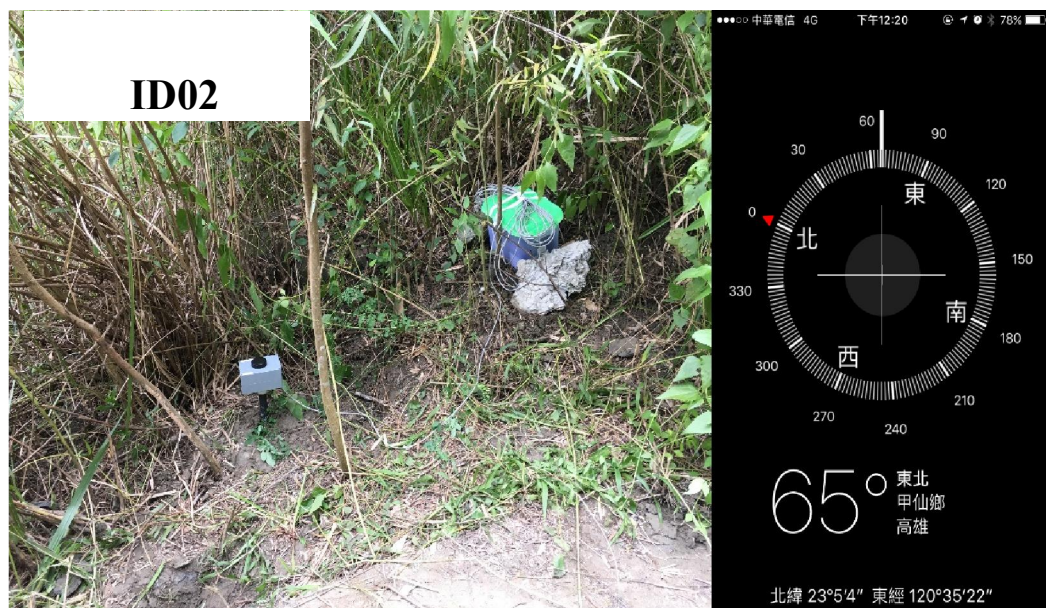


圖 5.8 監測點 ID02 安裝情況與相關方位資訊

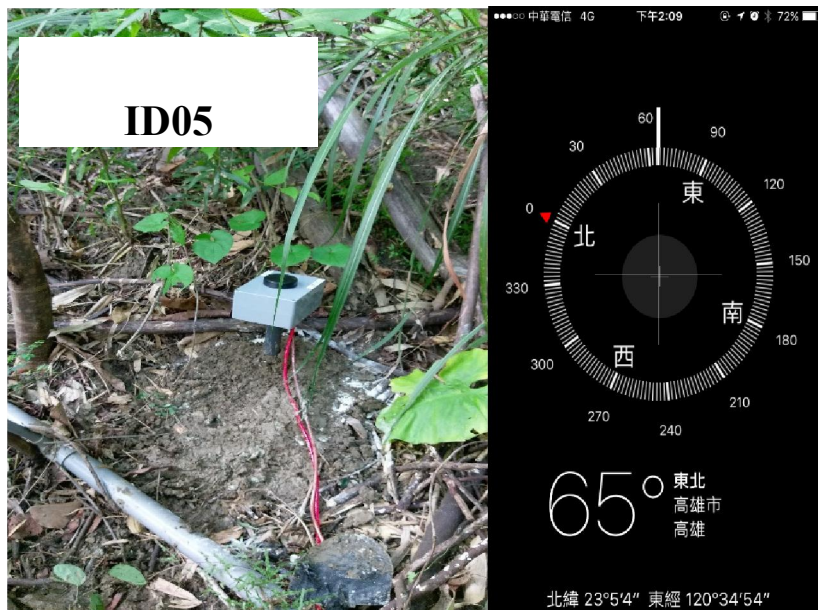


圖 5.9 監測點 ID05 安裝情況與相關方位資訊

本場址於本年度計畫執行期間進行過不同組件更換與升級，為延長電源使用期間，兩組監測模組均更換為 20W 太陽能板及 40AH 鉛蓄電池，目前配置如圖 5.10 所示，此更換可使系統運作超過 60 日以上。

系統安裝後已經歷兩次以上颱風，自 2016/09/1~2016/10/31 期間 ID02 與 ID05 之監測結果與氣象局甲仙站雨量資料如圖 5.11 及 5.12 所示，其共同趨勢為淺層體積含水量(V_w/V_s ； V_w 為水體積， V_s 為顆粒體積)較深層為低，淺層土壤均無顯著運動。但下邊坡模組 ID02 因位於修復之擋土牆後方回填土層，因此其反應與降雨較為吻合，而 ID05 則位於原有崩積層，其土層厚度僅約 2 m，因此深層土壤常處於高含水量，與降雨較無關聯，因兩測點土層與排水邊界不同，需分開討論。

ID02 於梅姬(Megi)颱風期間之分層體積含水量與時雨量歷時如圖 5.13 所示，其深層含水量先上升，而淺層含水量在約 4 小時後亦達到飽和，淺層飽和前其體積含水量剖面變化如圖 5.14 所示，淺層含水量於 5 min 左右達到幾乎飽和，此與入滲分析並不一致，推測其應為地下水位上升引致。



圖 5.10 監測點 ID02 現況

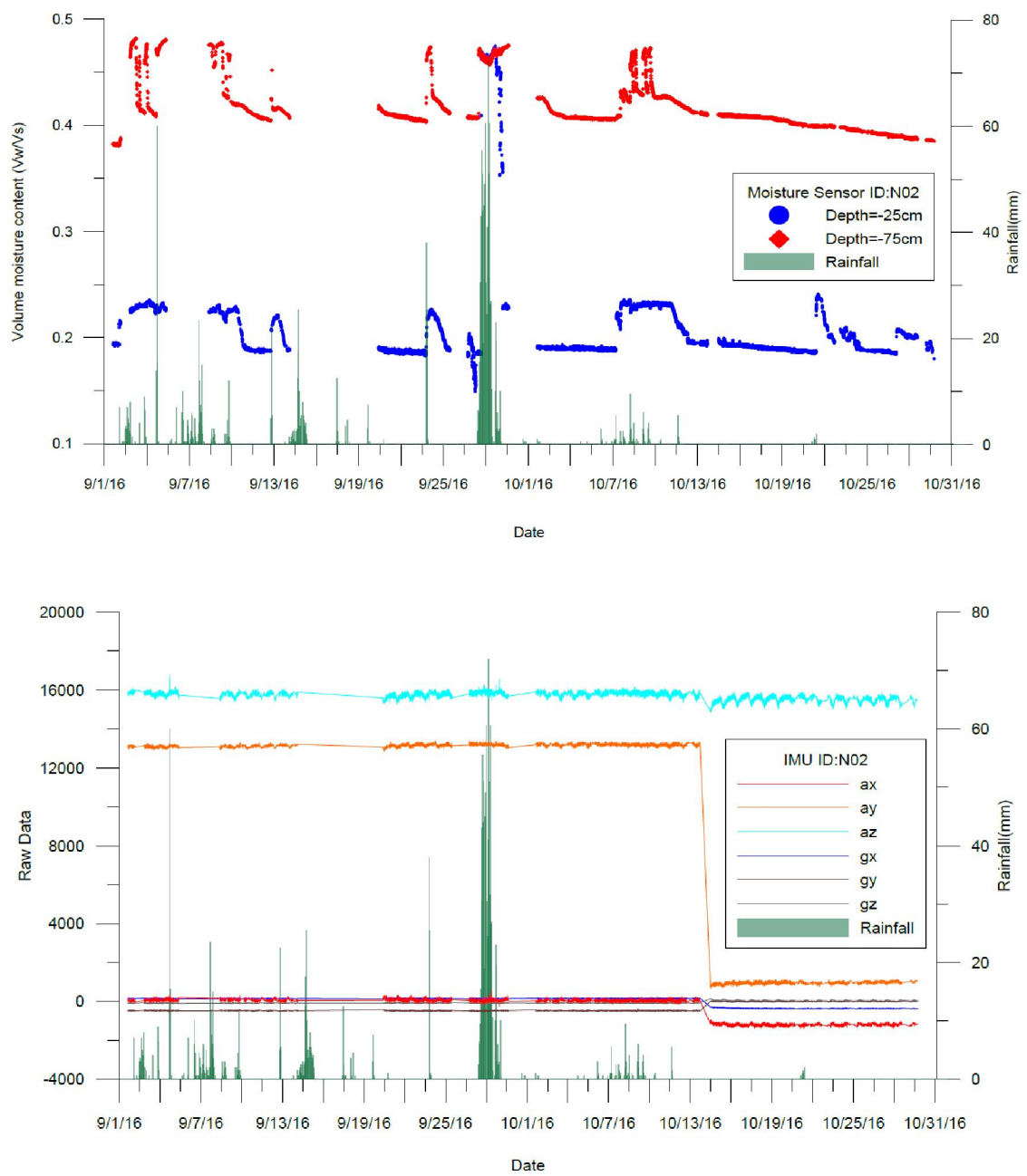


圖 5.11 監測點 ID02 觀測紀錄與雨量分布

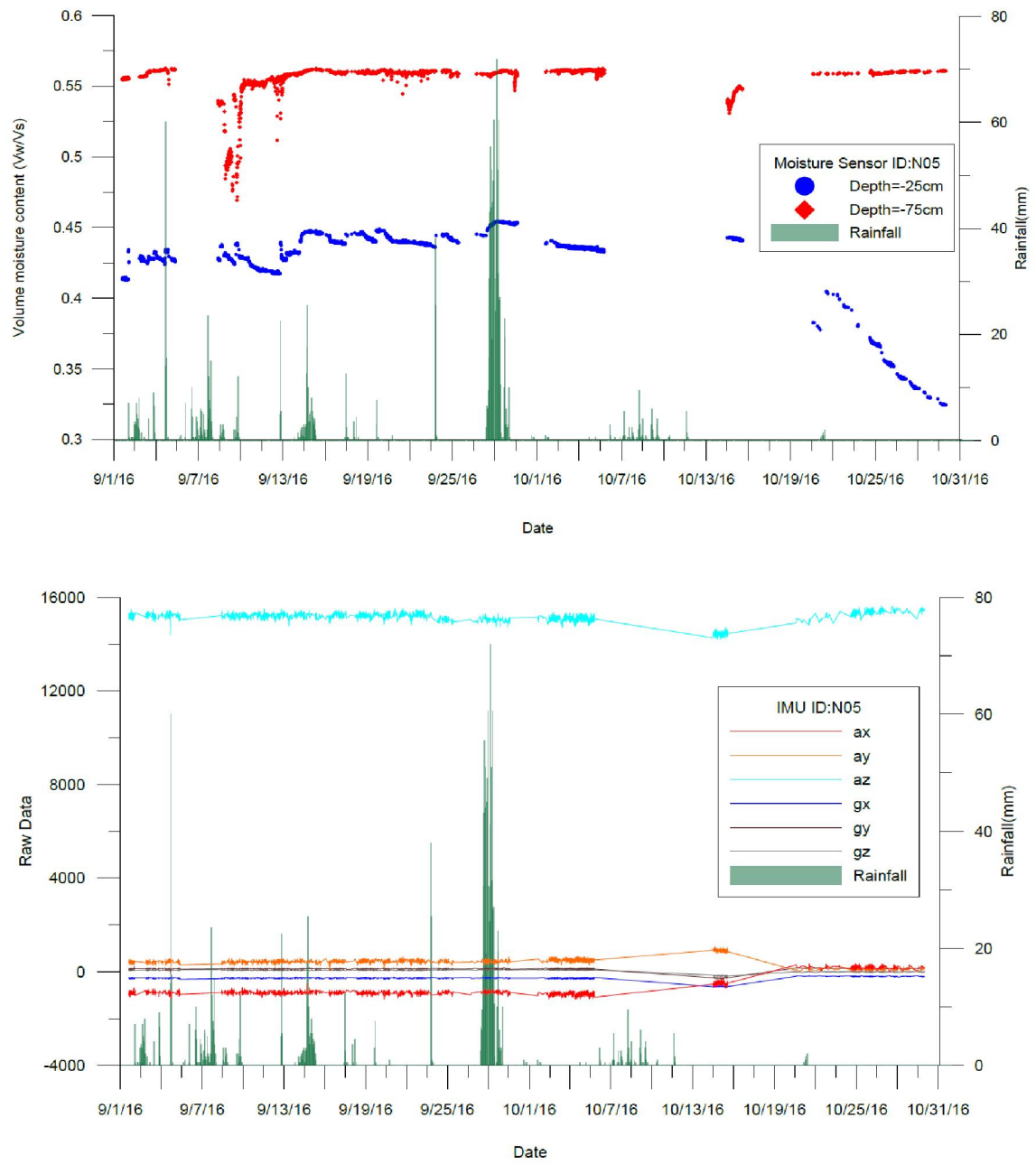


圖 5.12 監測點 ID05 觀測紀錄與雨量分布

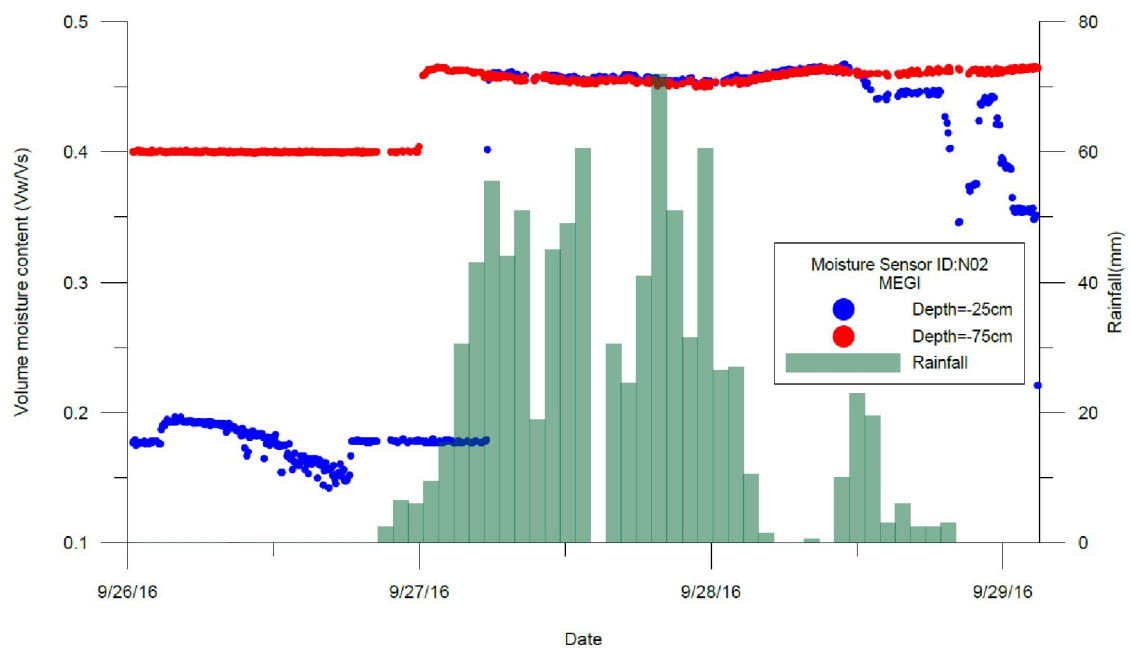


圖 5.13 Megi 颱風期間 ID02 觀測紀錄與雨量分布

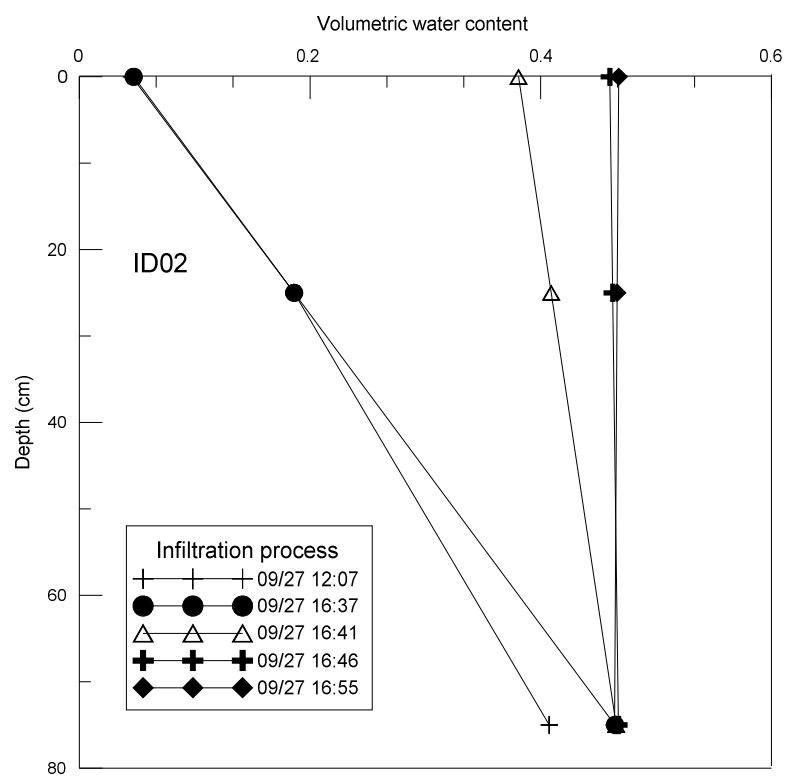


圖 5.14 Megi 颱風期間 ID02 體積含水量剖面變化

ID05 於梅姬(Megi)颱風期間之分層體積含水量與時雨量歷時如圖 5.15 所示，深層含水量因土層厚度僅約 2m，因此降雨前即達到近乎飽和狀態，但淺層其變化則與降雨強度與分布吻合，ID05 體積含水量剖面變化如圖 5.16 所示，以此可作為現地以瞬時剖面法(In situ instantaneous profile method) (Watson, 1966)推估土層滲透係數之數據，初步計算土層現地滲透係數約為 5×10^{-6} cm/s，為典型粉土範圍，且因此狀態含水量較高，接近飽和狀態滲透係數，與三軸定水頭試驗結果在相同數量級。圖 5.17 為 2016/09/13~2016/09/25 期間之監測記錄，此期間其變化模式具相同模式，顯示監測模組資料準確性應可接受。

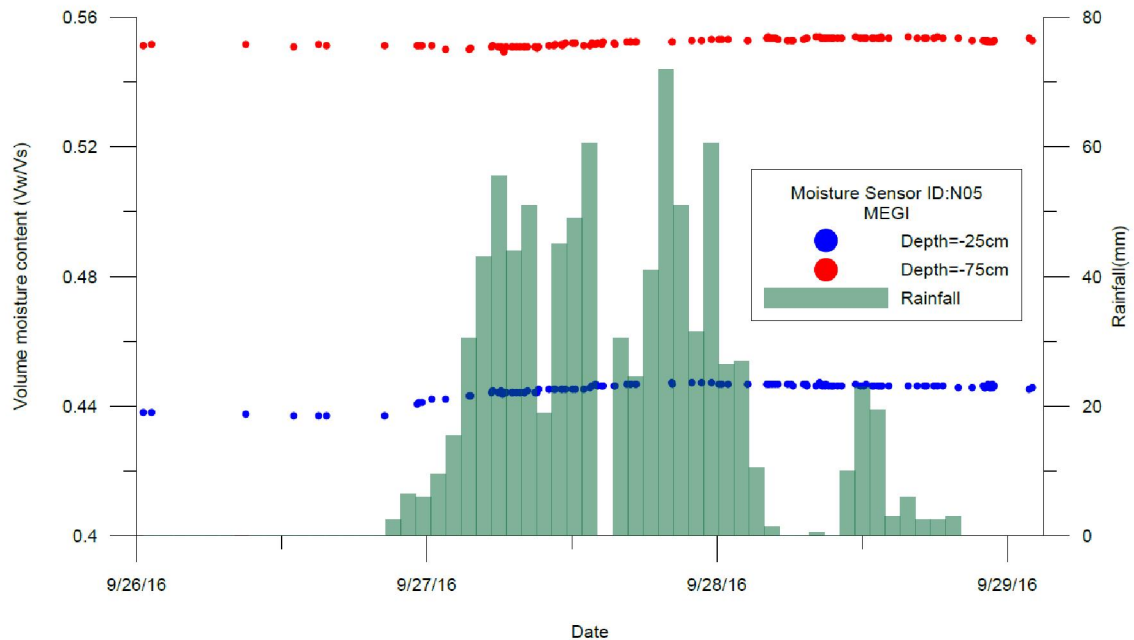


圖 5.15 Megi 颱風期間 ID05 觀測紀錄與雨量分布

此場址監測模組於 2016/10/14 日增加高精度單向傾斜儀量測，連續觀測結果如圖 5.18 所示，其中 ID05 部分資料因資料傳輸遮蔽而缺失，但 ID02 則有連續紀錄，且降雨期間有微小反應，此推測為表土暫態反應，整體而言現有模組功能已達計畫執行設定目標。

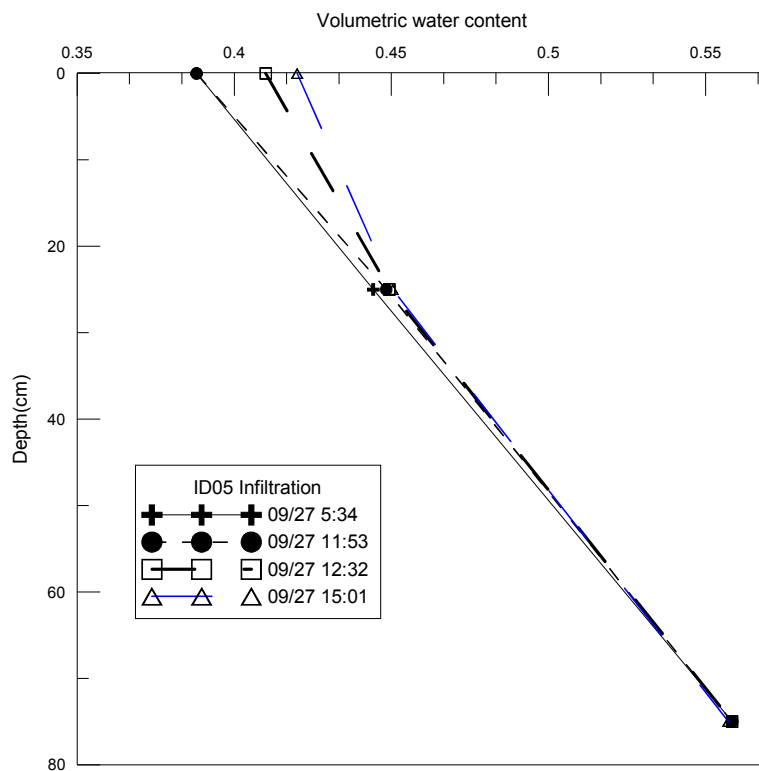


圖 5.16 Megi 颱風期間 ID05 體積含水量剖面變化

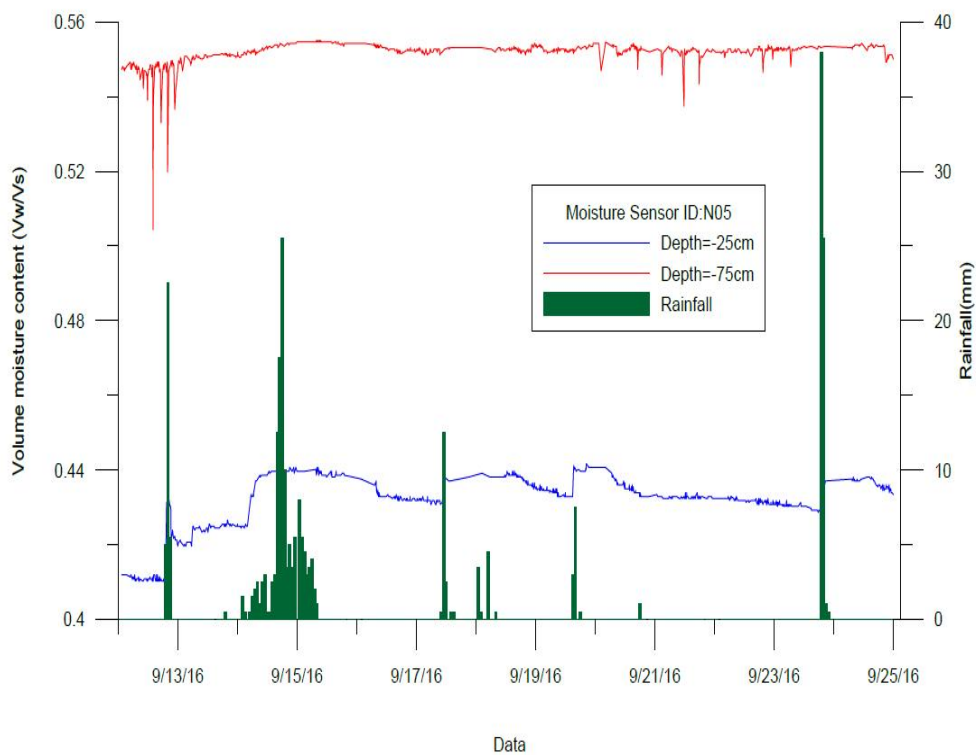


圖 5.17 ID05 連續觀測紀錄與雨量分布



圖 5.18 監測點 ID02 單向傾角連續觀測紀錄與雨量分布

5.3 二維水力力學耦合穩定分析

為進行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，適切模擬非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程模擬。

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

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w (u_a - u_w) \tan \phi + c' \dots\dots\dots (5.1)$$

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：

$$P_c(S_w) = P_0 (S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \dots\dots\dots (5.2)$$

式中 a 為土壤常數， S_e 為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \dots\dots\dots (5.3)$$

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

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \dots\dots\dots (5.4)$$

式中 ρ_w 為水之密度， α 為土壤常數。

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

$$k_r = S_e \left[1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \dots\dots\dots (5.5)$$

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

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \dots\dots\dots (5.6)$$

研究場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，相關水力參數如表 5-4 所示，力學參數則參考表 5-2 及單剪試驗結果。以圖 5.19 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，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

表 5-4 非飽和水文參數

參數	Colluvium	Bedrock	意義
Porosity	0.44	0.1	孔隙率
k_{sat} (m/s)	1.2e-8	1e-12	飽和滲透係數
fmodulus (Pa)	2e9	2e9	水體積模數
saturation	0.54	0.54	初始飽和度
Vga	0.1	0.1	VG parameter a
Vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
Vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0 (Pa)	15000	15000	VG P0
Pc (Pa)	-45203	-45203	初始 From Pc(Sw)

模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 5.20 所示，水由表層開始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，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，ID05 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 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運動，此可由 ID05 地表位移與傾角歷時(如圖 5.22 所示)與不同深度達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，上邊坡 ID05 預測於持續降雨入滲下於 2.2×10^5 秒(約 2.54 日)產生滑動，且此時土層均達到飽和，且地表於 1.5×10^5 秒(約 1.6 日)前開始有顯著傾角變化，且傾角為先正(順時針)後負，此因滑動面由淺層轉為深層，深層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

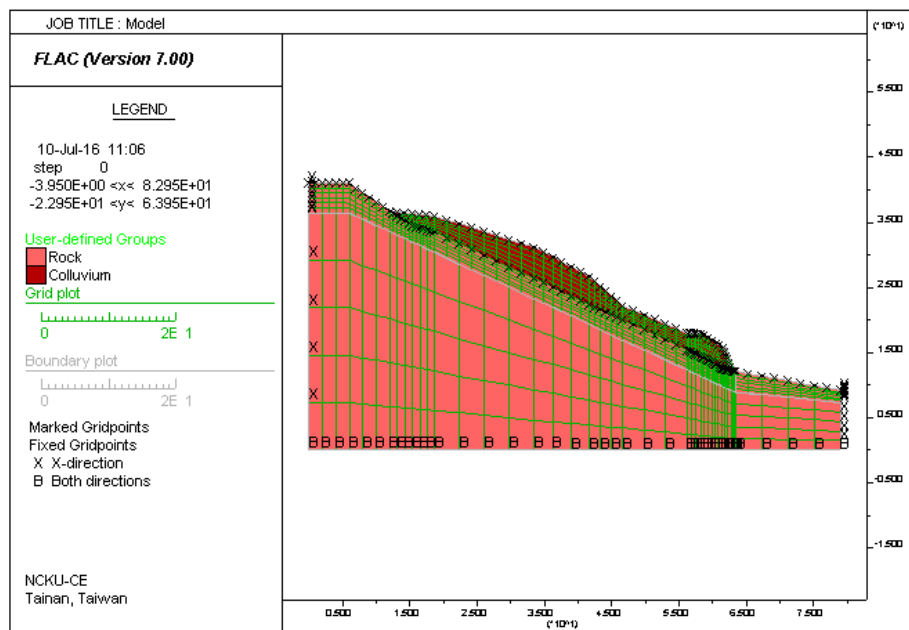


圖 5.19 數值分析模型



圖 5.20 入滲開始 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量

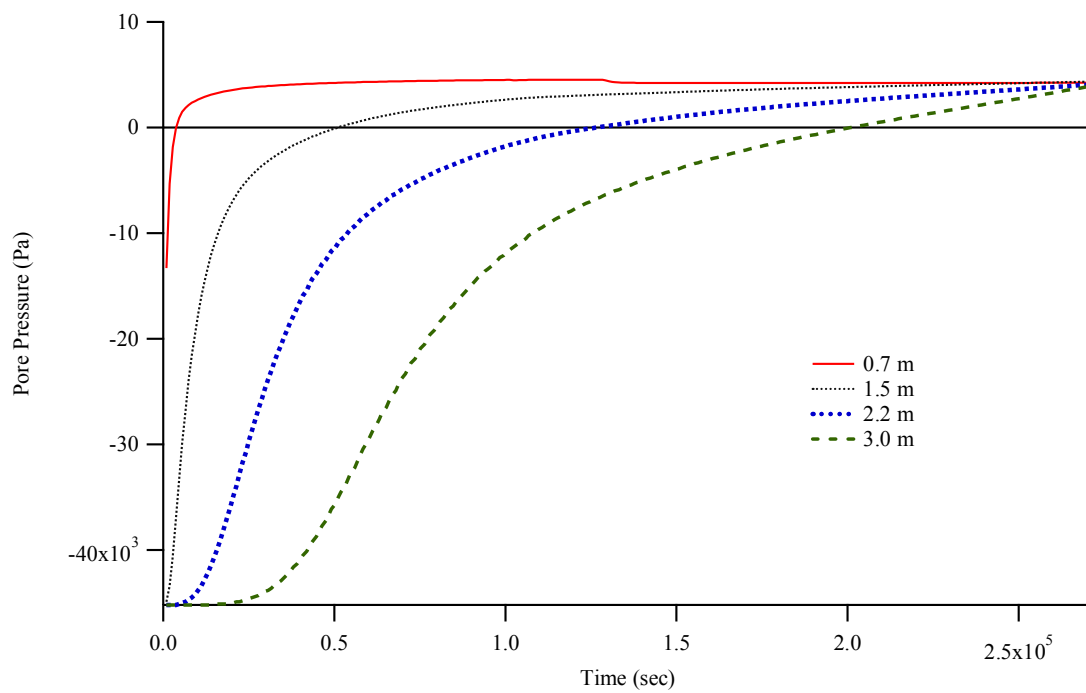


圖 5.21 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

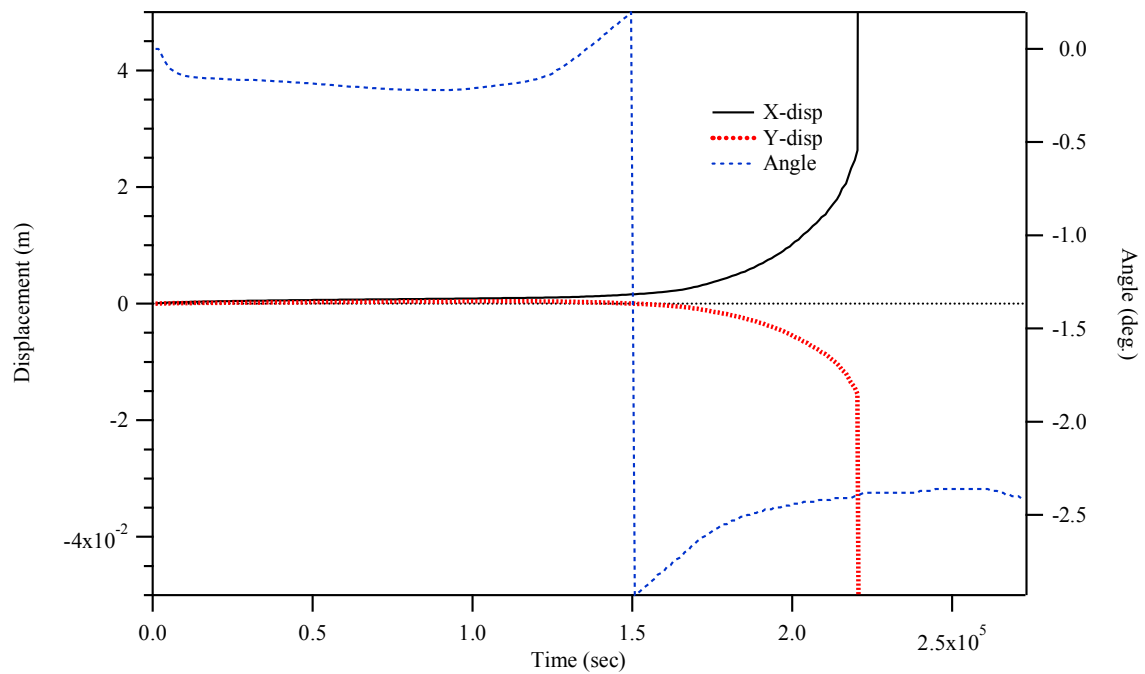


圖 5.22 ID05 位置預測地表運動歷時

5.4 客製化邊坡依時預警

客製化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第三章模型試驗之試驗條件(表 3-3)為例，其不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 5.23 所示，破壞發生於地表飽和後 42 小時，滑動面深度為 1.5m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果(公式 3.20)或 VG model(公式 5.2 及 5.3)推估，在 0.75m 深度，以公式 3.20 推估之破壞過程體積含水量依時變化如圖 5.24 所示，由破壞時間(42 hr)往前推算可決定不同時間所對應之體積含水量，若以破壞前 24 小時為預警時間，則所對應之體積含水量為 0.22，可由現地於 0.75m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 5.24 推估。

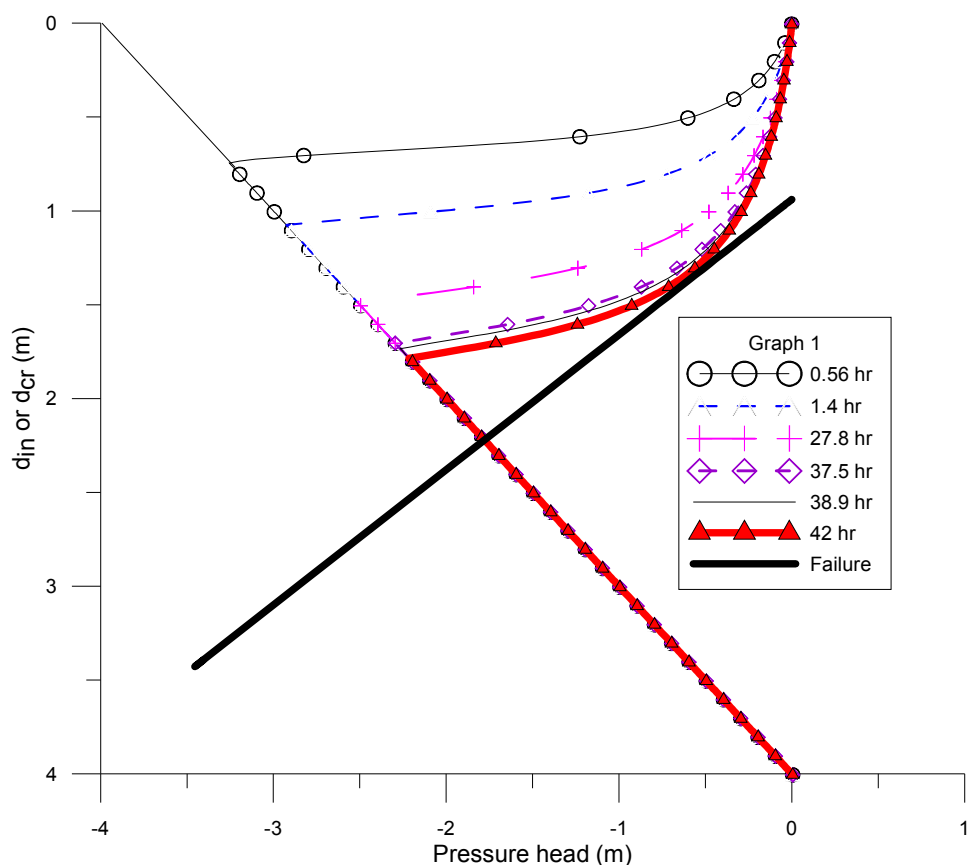


圖 5.23 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

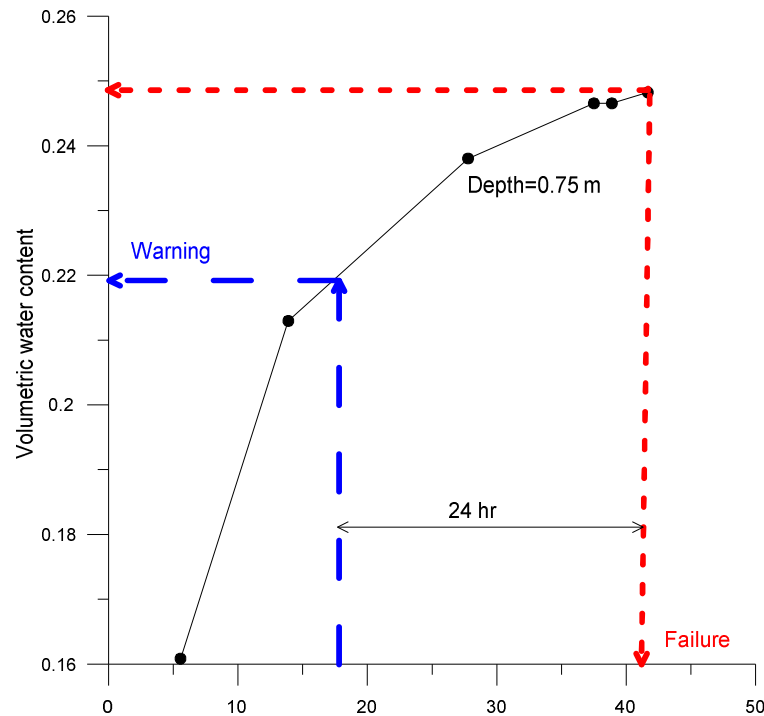


圖 5.24 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念

而二維案例以甲仙場址上邊坡為例，由圖 5.21 及 VG model(公式 5.2 及 5.3)可推估其體積含水量變化，深度 1.5m 處含水量歷時如圖 5.25 所示，推估破壞時間為 61 小時，因此往前推算 24 小時所對應之體積含水量為 0.52，因此時已接近飽和，因此其數值較不可靠，此乃因所選場址土層厚度僅約 2.5m，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但由地表傾度觀測結果(如圖 5.26 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，此為無線監測模組所具有之功能。

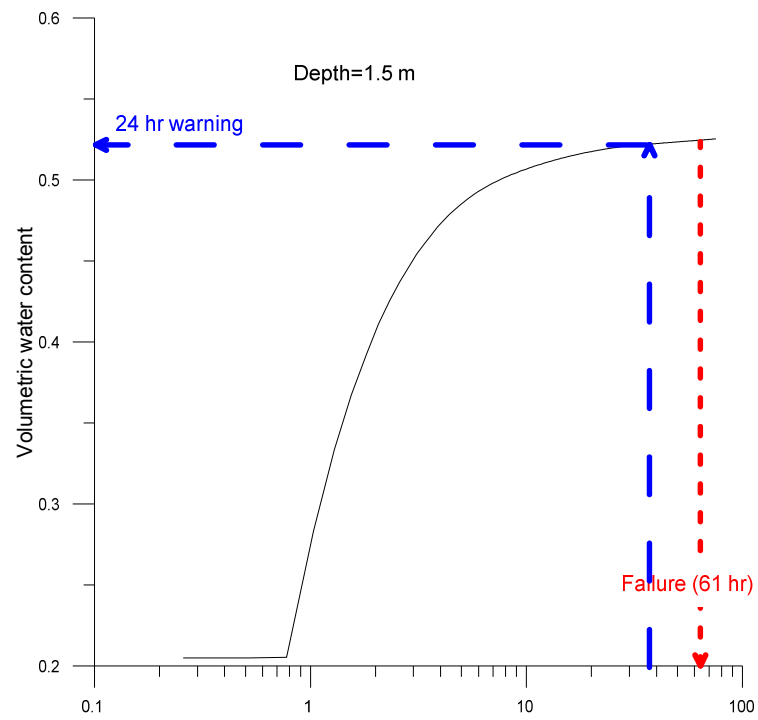


圖 5.25 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念

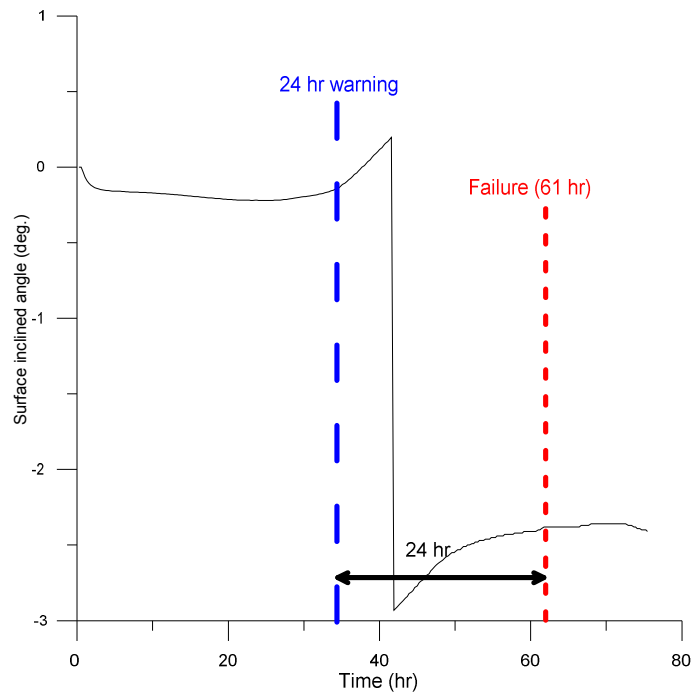


圖 5.26 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念

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

第六章 結論與建議

本計畫全期為兩年(104 年-105 年)，第一年為解析法分析架構建立及無線監測模組設計與整合測試，第二年為模型邊坡與選定場址現地測試，結合二年之成果，可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崩塌預警系統架構。分年計畫執行結論摘要如下：

6.1 104 年度計畫執行結論

1. 水力力學耦合邊坡穩定分析：104 年度完成無限邊坡因入滲引致淺層滑動依時分析架構，考慮非飽和土層水文與力學性質，並發展大型模型試驗設備，結果顯示所發展之架構完整可行。
2. 二維水力力學耦合數值分析：由於無限邊坡分析無法得到位移分布與大小，不利於監測點決定及位移量預測，因此進行結合土中入滲滲流分析及非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，將孔隙水壓及含水量變化狀態參數，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非飽和土壤之彈性及強度參數，此程序可近似模擬水力力學耦合耦合分析，所建立數值分析程序將以元素試驗結果進行驗證，後續將用於選定場址，作為現地監測模組佈設與警戒值制定之依據。
3. 無線監測模組原型組裝測試：本研究包含一分佈式土壤含水量計之研發，透過量測多深度土層電容值變化，間接測得各個深度土壤含水量，提供非飽和土壤強度參數以進行非飽和邊坡穩定分析，並可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。本期計畫完成相關硬體元件組裝整合，並進行相關軟體與圖形介面撰寫，可作為後續整合元件製作之依據，並已完成資料處理程序之流程建立。
4. 模組整合測試與資料架構建立：本計畫包含解析法預測模式建立與監測模組研發，以達成依時預警監測模組之功能，整合此二部份

成果，提出整合之預警系統架構，本年度已完成軟硬體整合之架構，後續可進行場址測試修正。

5. 選定淺層破壞研究測試場址一處：考量參數取得及監測模組佈設便利性，參考經濟部地調所研究成果，選定高雄甲仙區寶隆崩塌地做為測試場址，並由地調所取得相關數位資料，完成傳統極限平衡及水力力學耦合數值分析。

6.2 105 年度計畫執行結論

1. 無線監測模組系統優化及耐久測試：105 年度完成現地無線監測模組性能測試，並進行系統優化與可靠度提升，包括傳輸穩定性、長期電源系統改善、土壤水分計耐久測試，通過兩次以上颱風事件。
2. 選定測試場址並進行相關土壤性質試驗：選定兩處以上場址進行佈設，並以甲仙攔河堰通達道路邊坡為測試場址，完成重模試體於非飽和狀態下水力與力學參數試驗，回饋水力力學耦合分析。
3. 進行監測場址現地連續監測及資料判釋：甲仙監測場址具有超過 90 天以上連續監測記錄，目前結果可佐證次系統可適用超過單一雨季以上，且於惡劣天候下仍可持續運行。所量測資料已建立相關判釋流程，解釋量測資料之物理意義。
4. 結合場址數值分析成果，提出客製化依時預警架構：針對無限邊坡提出以表層含水量為指標之依時預警，而二維淺層破壞則以監測案例提出以表層含水量及地表傾角變化為指標之依時預警模式，由室內模型實驗與數值模擬結果，此架構應為可行。
5. 不同預警技術各有其優劣及適用情境，本系統僅適用於淺層滑動之土壤邊坡，但具有合於力學理論及客製化特性，可做為重要路段降雨預警之輔助。

6.3 建議

針對本計畫執行提出下列建議：

1. 本年度雖選定研究場址作為解析法測試，但該場址目前為穩定狀態，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，系統實際應用仍需更多案例進行測試。
2. 由於入滲量測具一定難度及不確定性，本計畫雖已建立以現有分層土壤含水量感測模組，進行現地水文參數測定方法，但量測數量仍有所不足，後續建議可擴充土壤水分量測數量。
3. 由於所用傳輸模組須具備一定通透性且雨天傳輸距離僅數十公尺，選用適宜傳輸網路或整合高功率無線傳輸元件，對於系統推廣與佈設將有極大助益。
4. 本研究僅考慮淺層滑動，但無線監測網路技術架構應可用於不同機制，不同機制應發展不同量測系統與預警模式，對主機可考量新發展的模組，持續引進測試。
5. 直接量測土壤含水量變化為本計畫重點，所述為直接量測之意義及研究目的，與資料取得難易無關，後續應用取決於管理單位之綜合考量。

參考文獻

1. 林哲毅，1999，「土壤電阻率與含水特性關係之探討」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
2. 李維峰等人，2003，「台灣地區道路邊坡崩塌發生機制及防治效益評估方法研究與應用（二）」，MOTC。
3. 吳從龍，2009，「山區道路邊坡崩塌潛勢之研究」，逢甲大學交通工程與管理所，碩士論文。
4. 財團法人中興工程顧問社，2009，「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置(第 2 期 98 年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2/3)」，經濟部中央地質調查所研究報告，成果報告。
5. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙，2002，「先進邊坡監測系統之研發」，中國土木水利學會會刊，第二十九卷第二期，第 65-78 頁。
6. 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅，2009，「莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例」，地工技術，第 122 期（2009 年 12 月）第 133-142 頁。
7. 廖文選，2010，「以 DSP 實現 GPS 與 IMU 感測器整合系統」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文。
8. 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。
9. Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils." *Géotechnique*, 40(3), pp.405-430.
10. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp. 544-552.
11. Bishop, W. (1959). "The principle of effective stress.", Lecture delivered in Oslo, Norway, 1955; published in *Technisk Ukeblad*, 106(39), pp. 859-863.

12. Cascini, L., Cuomo, S., Pastor M, and Giuseppe Sorbino, G. (2010). "Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp. 85-98.
13. Chong, C.Y. Kumar, S.P. (2003). "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. " *Proc. IEEE*, August.
14. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 130, pp. 362–372.
15. Eberhardt, E. (2008). "Twenty-ninth Canadian Geotechnical Colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms." *Canadian Geotechnical Journal*, 45, pp. 484–510.
16. Edlefsen, N.E. and Anderson, A. B. C. (1943) "Thermodynamics of Soil Moisture." *Hilgardia*, 15, pp. 31-298.
17. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977). "Stress state variables for unsaturated soils." *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 103(5), pp.447-466.
18. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), pp.313-321.
19. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H (1987). "Soil mechanics principles for highway engineering in arid regions." *Transportation Research Record*, 1137, pp.1-11.
20. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). " Soil mechanics for unsaturated soils. " New York, Wiley.
21. Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D. and Barbour, S. L. (1995). "The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 32(3), pp.440-448.
22. Gen, K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988). "Determination of shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test." *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), pp.500-510.

23. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y. (2012). "Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides Through Pore Pressure Profile Measurements." *Soils and Foundations*, 52(4), pp. 737-747.
24. Krahn, J. and Fredlund, D. G. (1972). "On total matric and osmotic suction." *Journal of Soil Science*, 114(5), pp.339-348.
25. Kurahashi, T., Yajima, Y., & Sasaki, Y. (2008). "Landslide disasters and hazard maps along national highways in Japan. ", In: *The 2nd East Asia Landslides Symposium*, Seoul, Korea, May 22–23, 2008.
26. Muraleetharan, K. K. and Granger, K. K. (1999). "The use of miniature pore pressure transducers in measuring matric suction in unsaturated soils." *Geotechnical Testing Journal*, 22(3), pp.226-234
27. Oloo, S. Y. and Fredlund, D. G. (1996). "A method for determination of b for statically compacted soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 33, pp.272-280
28. 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.
29. Ridley, A. M. and Burland, J. B. (1995). "Measurement of suction in materials which swell." *Applied Mechanics Reviews*, 48(9), pp.727-732
30. Terzaghi, K. (1936). "The shear resistance of saturated soils.", *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, 1, pp.54-56
31. Texas Instruments (2015). "FDC1004 4-Channel Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensing Solutions." Literature Number: SNOSCY5B
32. Texas Instruments (2015). "TI Designs: Capacitive-Based Liquid Level Sensing Sensor Reference Design." Literature Number: TIDU736A
33. Texas Instruments (2014). "FDC1004EVM User Guide." Literature Number: SNAU163B

34. Texas Instruments (2015). “TI Designs: Capacitive-Based Liquid Level Sensing Sensor Reference Design.” Literature Number: TIDU736A
35. Uchimura T, Towhata I, Wang L and 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.
36. 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.
37. 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.
38. Wang, D. (2014). “FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications.” Texas Instruments, Literature Number: NOA927
39. Wang, D. (2015). “Capacitive Sensing: Out-of-Phase Liquid Level Technique.” Texas Instruments, Literature Number: SNOA925
40. Watson, K. K. (1967). “A recording field tensiometer with rapid response characteristics.” *Journal of Hydrology*, 5, pp.33-39
41. Wheeler, S. J. and Sivakumar, V. (1995). “An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil.” *Géotechnique*, 45(1), pp.35-53

附錄一
期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (2/2)

計畫編號: MOTC-IOT-105-H1DB001b

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
國立中興大學土木系 蘇苗彬委員		
1. 無線感測連接至物聯網是智慧防災必要的部份，很值得投入研發的工作，若無線仍要接有線則可考慮直接嵌入式網路。	有線網路為用於資料回傳，目前系統以電信業者提供之4G網路取代有線網路。	同意辦理方式
2. 本案應持續討論邊坡崩塌的啟動因子，本主題國內有很多過去的個案，可多參考。	計畫將於期末補充相關文獻，但目前國內並無與此完全相同之解析法分析結合淺層監測。	同意辦理方式
3. 監測儀器應力求方便及便宜，本案所建議的系統應有單價成本分析，同時要注意感應的精度與範圍。	將於期末報告補充，相關元件將於測試期間進行優化及更換。	同意辦理方式
4. 本案只有做淺層崩塌，只有入滲而非滲流，報告中第2-7頁中假設有兩方向的滲流不太合理，其實入滲土壤未飽合，與分析的假設不符，無限長邊坡不含入滲。	原意為上方飽和區滲流向量於垂直與水平兩方向分量，所討論為簡化均質土層，相關說明將於期末報告增補。	同意辦理方式
5. 本案包括有現場安裝，應提早裝設才能提供檢討與分析，而非要結案前才裝設，量取得資料不足。	因目前仍為研發測試階段，且考慮為降雨引致邊坡水力與力學行為，因此非雨季監測並無意義。	同意辦理方式
中華大學土木系 吳淵洵委員		
1. 報告中第3-1頁，第三章諸多內容與第一年研究成果多所重疊，計畫主持人應加以區別本期研究成果。	將於期末報告補充。	同意辦理方式
2. 報告中第4-24頁請說明候選場址選擇條件，並依p.1-6所述條件，補充太平山場址之鑽探資料，說明地質剖面變化及地質參數細節。	因太平山資料非屬公開資料，且此場址主要為模組耐候測試，相關資料將於期末補充或更換測試場址。	同意辦理方式
3. 請補充說明候選場址之邊坡穩定狀況及預期發生邊坡滑動之可能性，以完成本報告邊坡崩塌監測效能之	已於簡報中對甲仙場址進行相關分析，期末報告後有完整描述。	同意辦理方式

驗證。		
4. 報告第 4-24 頁二處場址均佈設二支監測模組，請補充說明決定此數量之依據，並確認此數量是否足以提供邊坡穩定與否之監測數據。	此為測試階段，所選地點為鄰近傳統監測點，以目前架構與目的尚可滿足。	同意辦理方式
5. 報告第 4-29 頁“相關資料將用於水力力學耦合分析，結果將於簡報中呈現”。所述不妥，分析結果應於報告中完整加以說明。	因規劃期程分析部分跨越期中報告，提送時並不完整，初步成果已於簡報中呈現，完整說明將於期末提送。	同意辦理方式
朝陽科技大學營建系 賴俊仁委員		
1. 報告書中有幾處(P. 1-4, 1-5, 2-1, 3-20)文書編輯錯誤，請修正。	謝謝委員提醒，已修正	同意辦理方式
2. 報告書中第 3-2 頁之表 3-1，總應力之符號應為 σ 。	已修正。	同意辦理方式
3. 報告中第 3-19 頁之表 3-2 建議增加試驗土壤#200 篩之通過百分比；滲透係數應與土壤之孔隙大小有關，故增加試驗土壤之密度或孔隙比及飽和含水量。	將於期末報告補充說明。	同意辦理方式
4. 報告中第 3-20 頁之公式 3.20 建議增加 ϕ 及 ω 之單位。	已修正。	同意辦理方式
5. 理論上土壤之含水量特徵曲線其乾化與浸潤曲線在飽和及乾燥時應趨於一致，但是圖 3.18(第 3-21 頁)中兩條曲線有很大之差別？請再檢核。	此為受限於空壓機壓力範圍，但此部分尚符合試驗壓力範圍，並將基質吸力以對數表示，並重新檢核。	同意辦理方式
6. 報告中第 3-22 頁之試驗土壤強度為剪應變 35%時所測得，此時是否會有正向力偏心之問題？文字敘述中之 C' ， ϕ' 值與圖 3.21 不符， ϕ^b 是否亦由圖 3.21 求得。	將修正為剪應變量 20%為破壞，並將相關強度參數一併修正。	同意辦理方式
7. 報告中第 3-34 頁之圖 3.29 中曲線之顏色無法辨識，建議以不同線條樣式加以區別。	已修正。	同意辦理方式
8. 報告中第 4-11 頁之圖 4.11，建議未來率定時飽和度介於 0~60%能增加率定點。	將進行增補並於期末報告修正。	同意辦理方式
9. 圖 4.36(第 4-34 頁)在降雨前水分計讀數即以上升，故 P. 4-32 頁之敘述可能須要加以修正。	此為時間軸資料有誤，已修正。	同意辦理方式
10. 報告中對水分計之原理及應用之說明相當詳盡，但對於傾斜儀及慣性量測單元之應用說明相對較少，建議適度加以補充。	將與期末報告補充。	同意辦理方式

健行科技大學土木系 許書王委員		
1. 前期期中、期末、工作會議紀錄及本期工作會議紀錄等文件資料，建議列入各期報告中供參。	遵照辦理，並於期末提送時補充。	同意辦理方式
2. 目前國內已採預警性封路及開放等(以降雨預測)，此與本研究之警戒值或行動值之相關性建請探討，以供實務應用參考(如驗證等)。	謹遵辦理。	同意辦理方式
3. 有關工作內容或項目等，有關內容所提「系統架構」，「預警技術雛形」，「預警模式」等是否均屬同一目的，若屬實，請統一並參考運研所所提之工作項目。	謹遵辦理。	同意辦理方式
4. 對於現地監測，在實質惡劣氣候下，如何確保存活，有效達到監測目的的對策為何。	目前現地已通過一強烈颱風測試，後續將持續進行測試。	同意辦理方式
本所港研中心 謝明志科長		
1. 現地測試地點之宜蘭太平專道 13k 處是大面積的地滑地區，因本研究主要開發邊坡淺層崩塌監測及預測模組，能否取得該處其它計畫的深層滑動資料，來修正並開發出適合當地的淺層崩塌預測模組。	太平山場址資料已有管道可獲得，另本年度將考慮於高速公路邊坡增設其他適合場址。	同意辦理方式
2. 惡劣天候下的訊號傳輸及持續供電，為現地監測常遇到的 2 大問題，研究團隊也提出了改善規畫，請儘速完成以進行現地測試。	謹遵辦理。	同意辦理方式
3. 報告中之文書編排請依本所之格式呈現，如表目錄及內文中之表 1.1~表 4.2，請統一更改為表 1-1~表 4-2。	謹遵辦理。	同意辦理方式
交通部國道高速公路局 魏佳韻小姐		
1. 報告中所選定的 2 個現地，報告中僅見其量測之飽和度數據，建議相關數據分析可納入雨量計讀值，進行綜合分析。	謹遵辦理。	同意辦理方式
2. 有關試驗場址的選定，本局轄區之國道公路中有適合設置監測儀器的淺層邊坡崩塌地點，本局非常樂意提供相關資料與協助安裝感測儀器，研究團隊可考慮於適當路段增設。	將由港研中心出面協調符合研究條件之場址，並儘快設置。	同意辦理方式，後續由本所與高公局聯繫。

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (2/2)

計畫編號: MOTC-IOT-105-H1DB001b

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
國立中興大學土木系 蘇苗彬委員		
1. 本案引進新發展的量測技術做為公路邊坡崩塌監測新方法，相當有意義，尤其堆動低耗能、新穎且 CP 值較高，有發展之潛力。	感謝委員肯定	同意辦理方式
2. 針對後續工作，建議在無限邊坡破壞只適用在平面滑動的限制下，儘量納入各種破壞機制的考量。	此研究僅考慮淺層滑動，但無線監測網路技術架構應可用於不同機制，不同機制應發展不同量測系統與預警模式，此部分於建議中條列。	同意辦理方式
3. 滑動位移歷程分析，可以潛變的概念，尤其公路下邊坡因載重、長期發展潛變的沉陷行為，可以當作後續的重點。	此將列入建議中，提供承辦單位參考。	同意辦理，作為後續發展方向。
4. 無線監測模組，對主機應考量有很多新發展的模組，可持續引進測試。	本計畫採用 Arduino 之原因為 open source 及可用資源較多，此意見已列於建議中。	同意辦理方式
5. 淺層非飽合土壤的崩壞，可能非公路邊坡最大威脅，後續仍應以配合狀態下影響來深入研究。	本計畫適用條件已於第一章說明，不同機制之監測模組將列於建議事項，提供承辦單位參考	同意辦理方式
中華大學土木系 吳淵洵委員		
1. 報告中第 1-5 頁，參考國科會請改為科技部。	已修正	同意辦理方式
2. 依據本計畫自訂績效指標：請指出本計畫之相關論文發表。	此績效將有另外表格，本年度發表研討會論文 1，中文期刊論文 1，另有一國際期刊投稿中。	同意辦理方式
3. 報告中第 5-3 頁，表 5.2 請說明所列各參數之名稱。	已增補並重製表 5.2。	同意辦理方式
4. 報告中第 5-17 頁，請說明土壤常數	a 數值列於表 5.4， α 數值內	同意辦理方式

a 及 α 數值為何。	含於表 5.4 之 P0 中	
5. 報告中第 5-18 頁，表 5.4 各參數請列其單位。各參數之數據從何而來？e.g. $P_c = -45203$ 如何求得？P.5-14 頁之現地滲透係數為 $5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 與表 5.4 不符。	單位已增補於第一欄，滲透係數參數已修正， P_c 為由土層初始平均體積含水量估算。	同意辦理方式
6. 請說明第三章研究成果於預警系統應用之關聯性，e.g. 圖 3.28~3.31 未見於第五章之分析模型。	已於 5.4 節補充說明。	同意辦理方式
7. 報告中第 1~6 頁，105 年度研究成果 4，結合解析法與即時監測數據....建構測試場址客製化....預警技術雛形。請具體擬訂本研究發展預警系統之標準作業程序以供甲方未來使用此系統之參考。	已增補於 5.4 節。	同意辦理方式
朝陽科技大學營建系 賴俊仁委員		
1. 報告中有許多單位及符號之上下標位正確使用，請修正。	已修正	同意辦理方式
2. 報告中第 1-5 頁中，第二年執行內容第 4 項之敘述方式建議加以修訂。	已修正	同意辦理方式
3. 報告中第 1-8 頁之 1-4 節，標題與內容建議修正為執行成果、效益及應用。	已修正	同意辦理方式
4. 表 3.1(P3-2)，總應力之符號應為 σ	已修正	同意辦理方式
5. 報告中第 3-10 頁中第 2 與第 3 行之參照來源，請再加以確認。	已修正	同意辦理方式
6. 公式 3.14(P.3-12)之符號未能及時正確顯示，請修正。	已修正	同意辦理方式
7. 公式 3.20(P.3-20)建議增加 ψ 及 ω 之單位，並建議將圖 3.18(P.3-21)之 Y 軸改為體積含水量或飽和度。	已修正為體積含水量並加入單位	同意辦理方式
8. 報告中第 3-22 頁，試驗土壤強度參數中之 c' ， ϕ' 值與圖 3-21 不符。	已修正	同意辦理方式
9. 圖 4.9(P.4-10)標題為體積飽和度，但 Y 軸為含水量，建議應一致。	已修正為體積含水量	同意辦理方式
10. 圖 4.28(P.4-27)6/22 有明顯之降雨為何 0.25m 深之土壤飽和度沒有變化？	此與降雨型態有關，入滲需有飽和表層並維持一定時間，推測與當日降雨集中有關。	同意辦理方式
11. 表 5.3(P5.4) θ_r 的值是否超出試驗含水量範圍太多。	因受限空壓設備之故， θ_r 採用典型粉土數值	同意辦理方式
12. 圖 5.5(P.5-5)為何採用 drying curve 而不使用 wetting curve？	此為筆誤，原圖為 wetting curve 已修正	同意辦理方式

13. 圖 5.5 與 5.6 為何飽和試體 CU 試驗剪動過程中體積變化量會高於不飽和試體？	應為壓密排水試驗，已修正。	同意辦理方式
14. 建議增繪一張甲仙攔河堰河堰邊坡之地形與地質剖面圖，並在其上標示監測設備點位。因為圖 5.2 比例尺太大。	已修正圖 5.2 並增繪監測點位。	同意辦理方式
15. 圖 5.11~5.18 體積含水量(V_w/V_s)中 V_s 之定義為何？是否用飽和度會較為恰當？	V_s 之定義為顆粒體積，採用體積含水量之故為與 VG 模式一致，且彼此間可以換算。	同意辦理方式
16. 圖 5.13(P.5-13)為何採用降雨發生後含水量之變化會如此急遽？	此乃因所觀測為擋土牆後回填土層，其透水係數高且含水量變化主要為下方岩盤地下上升，非僅入滲影響。	同意辦理方式
17. 圖 5.15(P.5-14) ID05 淺層含水量之變化趨勢雖與降雨強度吻合，但其增加量卻明顯偏低。	因土層厚度僅約 2.5m，常時地下水位偏高，土壤含水量受地下水位影響較入滲顯著。	同意辦理方式
18. 報告中第 5-18 頁最後一行，內文中敘述數值模擬結果此邊坡不易產生滑動，但圖 5.22 中 ID05 處在 55×10^3 秒後為何 X、Y 向之位移均急速增加？	此部分已重採實驗參數進行分析，更新結果於 P5-18 及 5.4 節。	同意辦理方式
健行科技大學土木系 許書王委員		
1. 各章節款項等，請一致性方式修正。	已修正。	同意辦理方式
2. 請校核合約書之工作內容與期末報告書完成的項目與成果，比對是否滿足所方需求。	已校核相關結果與合約項目之成果對照，成果符合合約要求。	同意辦理方式
3. 報告中第 2-12 頁，最後一段所提「... 建立場址不同階段預警值...」，此部分與結論似有不甚符合的情形。	結論已修正，場址客製化依時預警系統已增列於 5.4 節。	同意辦理方式
4. 全文圖、表、座標等，建議中文化。	配合修正有通用之中文譯名，其餘中英並列。	同意辦理方式
5. 個人期中報告審查意見 1，合作研究單位回覆「遵照辦理，並於期末時提送...補送...」，惟事實並未補送。	已於期末修訂版增補。	同意辦理方式
交通部公路總局 陳進發委員		
1. 公路邊坡預警可分為個案型場址及區域型長路段場址 2 種，就路管單位而言，實務需求在個案場址面，係採一般儀錶監測，律定管理值，而針對長路段場址，其地質、坡度、	本研究應用範圍與限制已於第一章說明僅適用於降雨引致淺層滑動，不同滑動機制並不適用。	同意辦理方式

水文環境、均甚複雜、尚無法以理論假設條件去解釋。本研究應用案件應載明清楚，尚非一體適用所有邊坡。另如何發現脆弱點亦是重要課題，以本研究適用條件而言，如何去發現進一步應用是必需要去思考，否則應用端會有所疑慮。		
2. 理論假設條件所分析成果，宜有較多實際監測成果驗證。	目前階段為技術研發與初步測試，後續仍須更多現地時測結果驗證，此意見已列於建議事項。	同意辦理方式
3. 本研究所分析成果，應可應用於降雨延時指標之律定，而並非與降雨監測無關，依據公路管理單位之統計分析，公路發生災情規模與次數，均與 6 小時累積雨量強度有密切關係。後續研究或許可藉由歷史災害紀錄與雨量紀錄之統計分析與相關性分析，由其成果來驗證本研究之成果，亦能題供路管單位應用。	不同預警技術各有其優劣及適用情境，本系統僅適用於淺層滑動之邊坡，但具有合於力學理論及客製化特性，可做為重要路段降雨預警之輔助。	同意辦理方式
4. 無線傳輸模組，路管單位所須的是高抗災，避免在災時紀錄不到資料。	目前測試結果顯示強烈颱風 Megi 期間仍可正常運作。	同意辦理方式
5. 氣象局雨量資料係 10 分鐘一筆，非 1 小時一筆，雨量資料來源及位置應註明。	雨量資料為鄰近之氣象局測站，已於文中補增，利用時雨量為此乃公開資訊。	同意辦理方式
6. 降雨類型影響土壤入滲變化，研究結論認為只需監測入滲變化，可不必理會降雨類型，可是這 2 者究竟那一種資料比較容易取得，方便應用，是應審慎思考的。	直接量測土壤含水量變化為本計畫重點，所述為直接量測之意義及研究目的，與資料取得難易無關，後續應用取決於管理單位之綜合考量。	同意辦理方式
本所港研中心 謝明志科長		
1. 本案理論與實務兼具，研究架構完整，於 2 年內完成軟硬體設計開發及系統建構，研究團隊的努力及成果，值得肯定。	感謝委員肯定。	同意辦理
2. 本研究目的是開發經濟型、拋棄式的監測機器，在摘要開頭及第一章計畫目的部份，應強調此點，請補上。	已於中英文摘要及第一章加入相關文字。	同意辦理方式
3. 報告摘要，請依本所出版品規定製作。	已修正	同意辦理方式
4. 台南甲仙監測結果，圖 5.13 可推知測點 02 在深度 0.25m 及 0.75m 的孔	此乃因所觀測為擋土牆後回填土層，其透水係數高且含	同意辦理方式

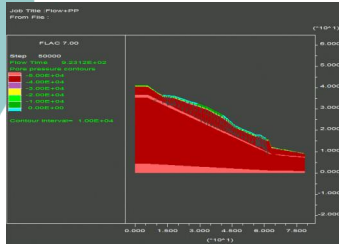
隙率應很接近，透水係數應相近，但圖 5.15，測點 05，2 個深度的監測值在雨量大時仍無法靠近，是否表示這 2 個深度的孔隙率、透水係數不同，與模式假設土層均勻，k 值固定不相符，是否應修正模式？	水量變化亦受下方岩盤地下水影響，非僅入滲而來。	
5. 本儀器在現地佈設密度如何考慮？	現地佈設要點為坡地幾何或材料變異處，令上下邊坡亦建議至少一組。	同意辦理方式
交通部公路總局 王睿懋工程司		
1. 報告中 3-10 頁中，第三行參照連結錯誤。	已修正	同意辦理方式
2. 報告中 3-19 頁，最後一行溫度單位應改為上標。	已修正	同意辦理方式
3. 目前傳輸模組在惡劣氣候條件下，傳輸距離較短，對於偏遠地區(電力及通訊不易到達處)之邊坡監測是否有建議對策。	目前正在測試不同通訊模組及接收端，此為後續長期目標。	同意辦理方式
交通部臺灣區高速公路局(臺灣營建研究院 廖振程組長)		
1. 報告中第 3-12 頁，式 3.14 有部份文字無法顯示。	已修正	同意辦理方式
2. 報告中第 3-10 頁，第二行圖參照有誤。	已修正	同意辦理方式
3. 高工局目前提供西湖服務區邊坡進行監測，後續相關監測資料請提供本局參考。	建議承辦單位配合。	同意辦理。由本所持續與高公局聯繫。
4. 依據報告內容，是否僅適用於以凝聚力 and 基質吸力控制的邊坡，建議彙整相關本研究的使用條件於附件中，以利公路單位邊坡監測利用參考。	本計畫僅適用於產生於非飽和土層滑動之淺層破壞，適用條件增補於結論中。	同意辦理方式

附錄三

期末報告簡報資料

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)

期末簡報



委託單位：交通部運輸研究所

投標單位：財團法人成大研究發展基金會

研究團隊：張文忠、黃安斌

簡報大綱

- 工作構想與對策
 - 計畫背景
 - 研究內容、項目與成果要求
 - 進度規劃
- 研究成果
 - 水力力學耦合邊坡穩定分析
 - 現地取樣與非飽和室內試驗
 - 無線監測模組研發與優化
 - 監測場址選定與量測成果
 - 依時預警系統架構
- 結論與建議

計畫背景

◆現有邊坡預警局限:

- 降雨引發崩塌之評估方法→經驗法與解析法
- 僅以降雨特徵作為預警指標→不確定高且無法提供反應時間
- 邊坡破壞機制差異 → 客製化需求

◆發展客製化依時邊坡預警系統提高預警之準確與時效性

3

計畫目的

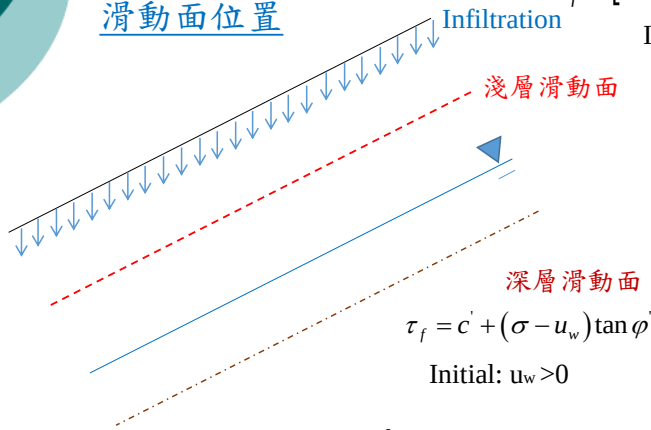
- 發展水力力學耦合邊坡滑動分析流程，預測邊坡依時性反應作為監測模組佈設及制定警戒值之依據
- 開發整合微處理器、微機電系統感測器(MEMS)與無線傳輸之監測模組
- 結合依時分析與現地無線感測，開發可快速佈設且具依時特性預警模組作為相關防災作為啟動之準據

4

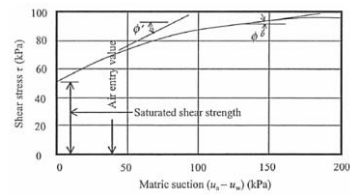
研究範圍

• 淺層 vs. 深層滑動

滑動面位置



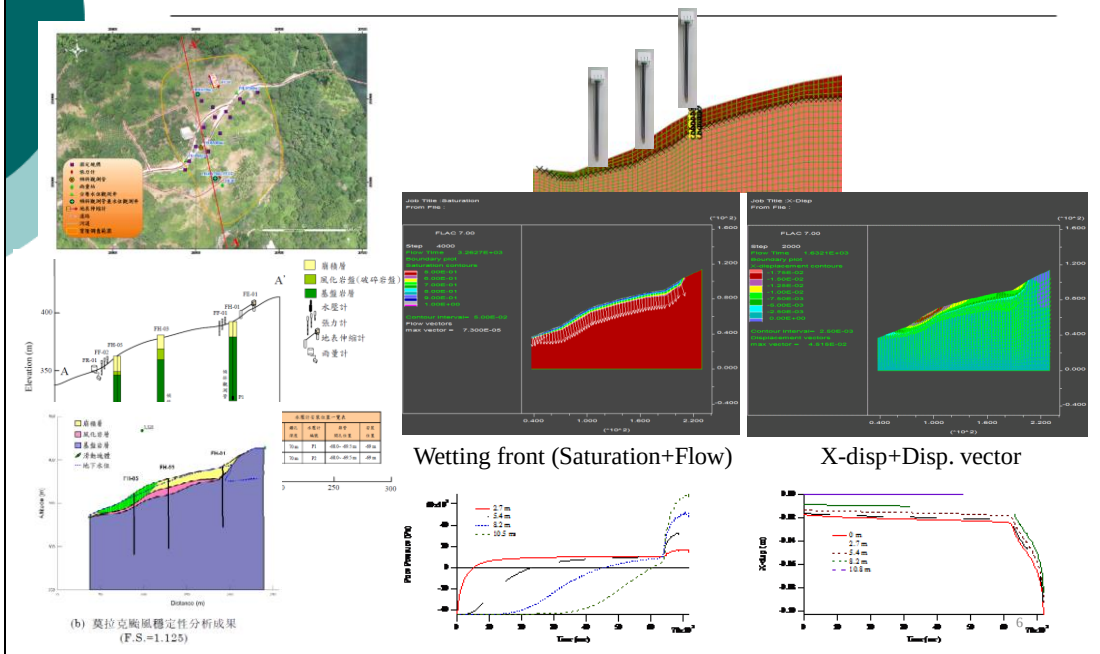
淺層滑動機制



$u_w \rightarrow$ parallel seepage + WT inc. $\rightarrow$ reduce τ_f

5

傳統監測 vs. 耦合解析+地表監測



整體計畫 - 第一年(104年)

• 104 年

1. 發展水力力學耦合邊坡滑動分析架構
2. 研製簡易土層監測模組原型，進行模組整合測試
3. 選定淺層破壞研究測試場址一處，進行場址地層材料力學試驗並進行傳統極限平衡及水力力學耦合數值分析
4. 規劃簡易土層監測模組佈設及發展資料處理程序

• 105 年

1. 以模型試驗，測試簡易土層監測模組精確度及預警分析模式之可靠性分析
2. 佈設簡易土層監測模組於研究測試場址，進行現地測試與連續監測
3. 修正淺層崩塌數值分析及不同階段警戒值，發展客製化公路邊坡降雨崩塌預警系統架構

7

非飽和土壤剪力強度

- Fredlund et al. (1978) 衍伸莫爾-庫倫破壞準則

$$\tau_{ff} = \left[c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \right] + (\sigma - u_a) \tan \phi'$$

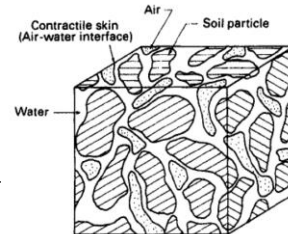
$$= c_t + (\sigma - u_a) \tan \phi'$$

c' = 有效凝聚力

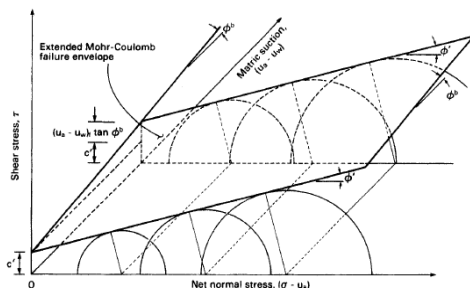
ϕ' = 有效摩擦角

ϕ^b = 基質吸力所提供之剪力摩擦角

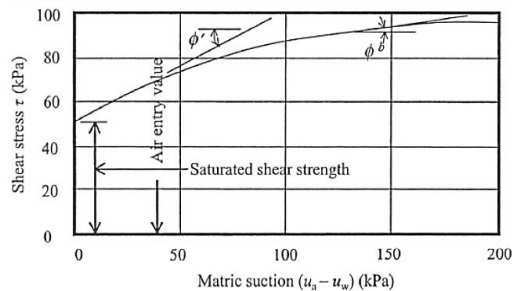
c_t = 視凝聚力



非飽和土壤結構示意圖 (Fredlund and Rahardjo, 1993)



(Fredlund and Rahardjo, 1993)



剪應力與基質吸力之破壞包絡線
(Fredlund et al., 1995)

土水特徵曲線(SWCC)

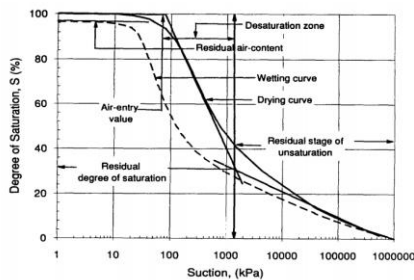
土水特徵曲線為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，含水量通常以體積含水量(θ)表示，亦可用重量含水量(ω)或飽和度(S_r)表示。

➤ van Genuchten模式(van Genuchten, 1980)

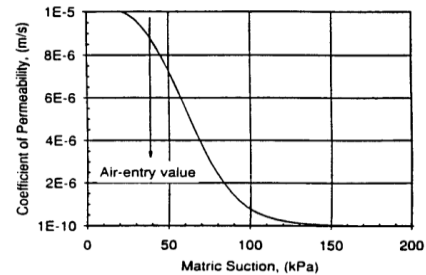
$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

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



典型之土壤水分特徵曲線(Fredlund, 1995)



典型之土壤滲透係數與基質吸力之關係(Fredlund, 1995)

9

非飽和土層入滲分析

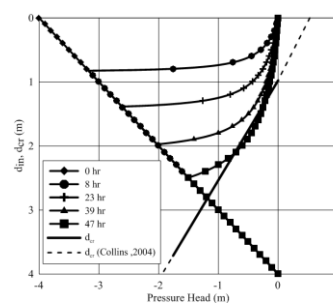
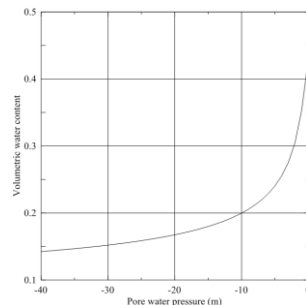
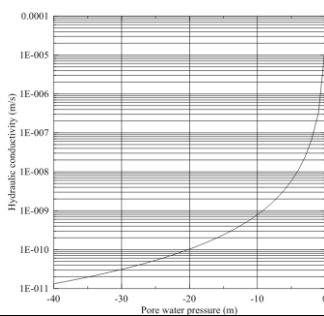
控制方程式: Richard's equation

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

1D 入滲控制方程式: $M(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial z} \right]$ M =孔隙水含容能力

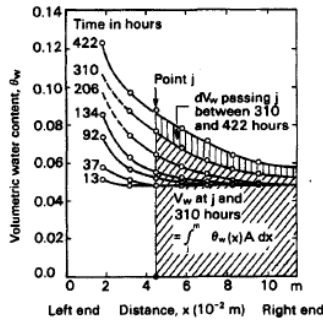
有限差分離散化:

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



入滲速率推估

- In situ instantaneous profile method (Watson, 1966)



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right)$$

$$k = \frac{\int_{z1}^{z2} \theta(z) dz}{dt \cdot i_{avg}}$$

$$i_{avg} = \frac{i(z1) + i(z2)}{2}$$

11

水力力學耦合無限邊坡穩定分析

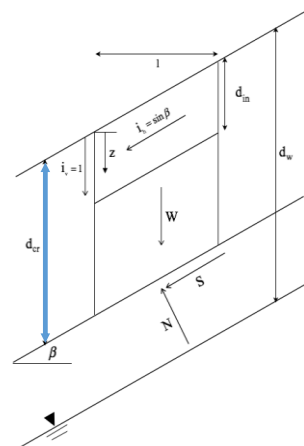
$$\left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr}$$

$$= \frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \underbrace{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲漏}} - \underbrace{\frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'}}_{\text{平行滲流}}$$

- 細顆粒土壤可不考慮水平滲流的影響
- 忽略入滲對土壤單位重的改變

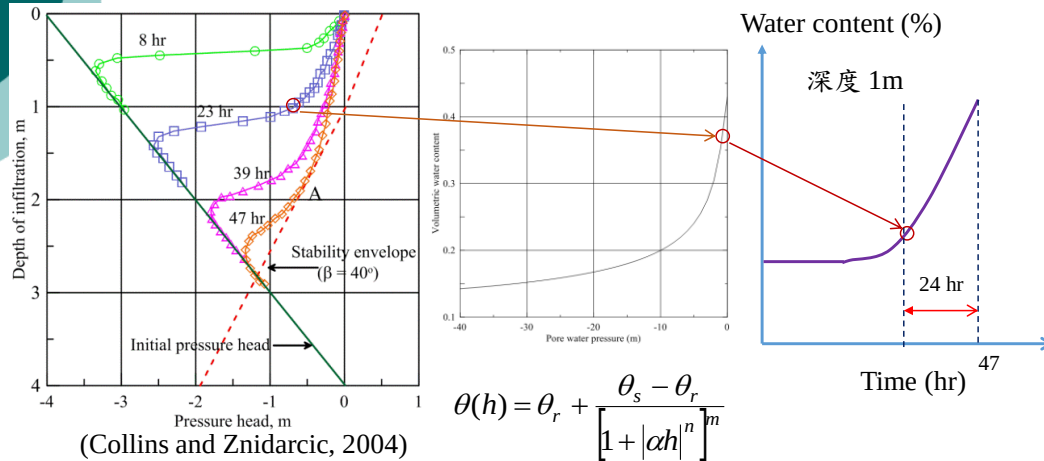
$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')}$$

$h_c(z)$ 為不同時間邊坡內基質吸力分布



12

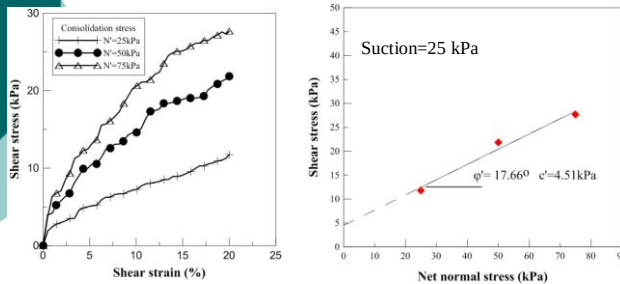
無限邊坡依時預警模式



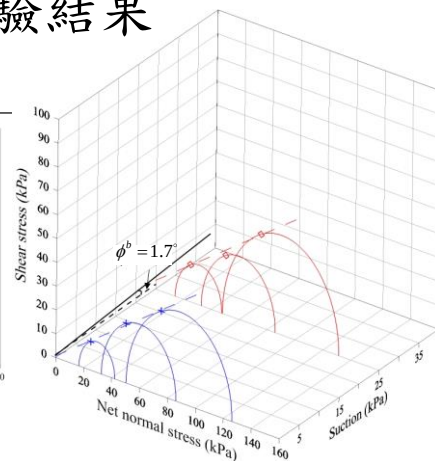
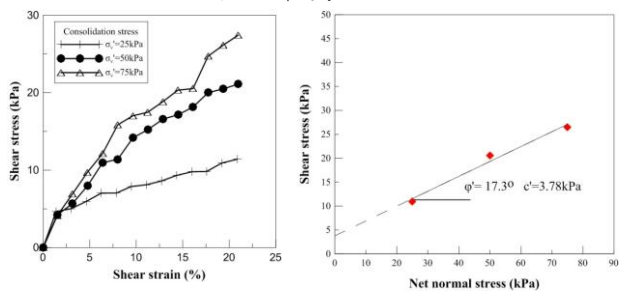
13

非飽和土壤強度參數試驗結果

➤ 非飽和壓密排水單剪試驗結果



➤ 飽和壓密排水單剪試驗結果



衍伸莫爾-庫倫破壞準則

$$\phi^b = \tan^{-1} \left(\frac{c'_{unsat} - c'_{sat}}{u_a - u_w} \right)$$

c' (kPa)	ϕ' (°)	ϕ^b (°)
3.78	17.3	1.67

14

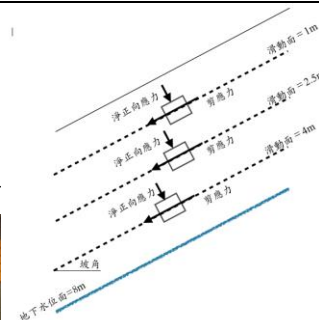
水力力學耦合試驗系統



水力力學耦合系統實體圖
(含加載系統)



側向變位量測裝置



15

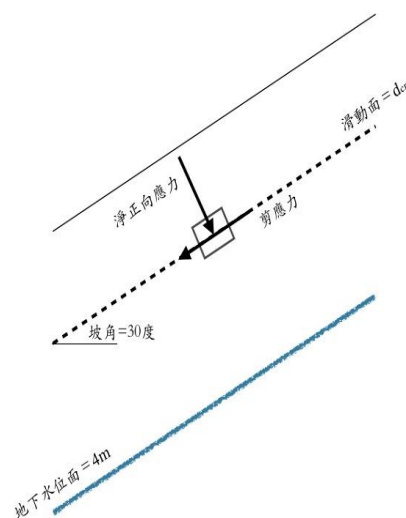
試驗規劃

水力力學耦合試驗之試驗條件

滑動面深度 d_{cr} (m)	1.5
地下水位深度 (m)	4
基質吸力 (kPa)	25
淨正向應力 (kPa)	22.7
剪應力 (kPa)	13.1
入滲水壓(kPa)	2

試驗材料基本物性

比重(Gs)	2.67
液性限度(LL, %)	22
塑性指數(PI, %)	2
USCS土壤分類	SM
飽和滲透係數(k_{sat}), m/s	7×10^{-4} cm/s

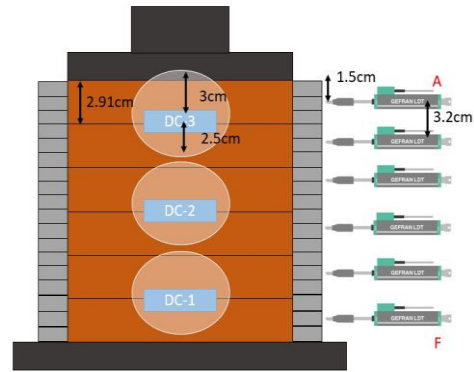


水力力學耦合試驗之試驗條件示意圖(趙慶宇,2015)

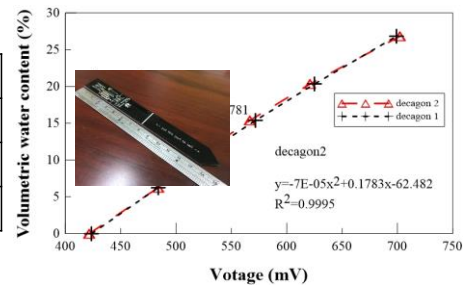
16

試體量測配置

感測器	編號	深度(cm)
含水量感測元件	DC-3	2.9
	DC-2	8.7
	DC-1	14.5
側向變位計	A	1.5
	B	4.7
	C	7.9
	D	11.1
	E	14.3
	F	17.5

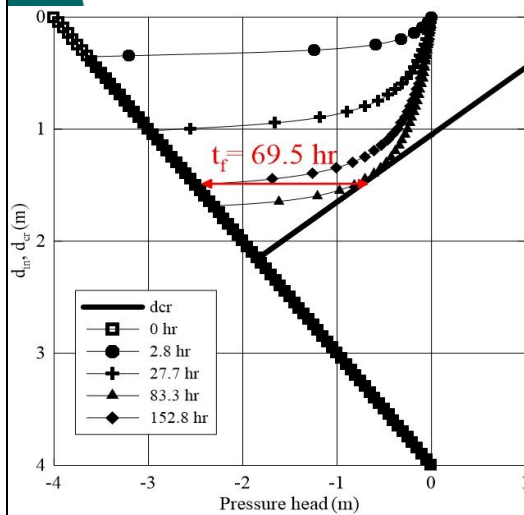


量測配置示意圖



17

無限邊坡水力力學耦合預測值



➤ 1-D 滲流分析之VG參數

θ_r	θ_s	α (1/cm)	n	k_{sat} (cm/s)
0.061	0.43	0.012	1.39	7×10^{-4}

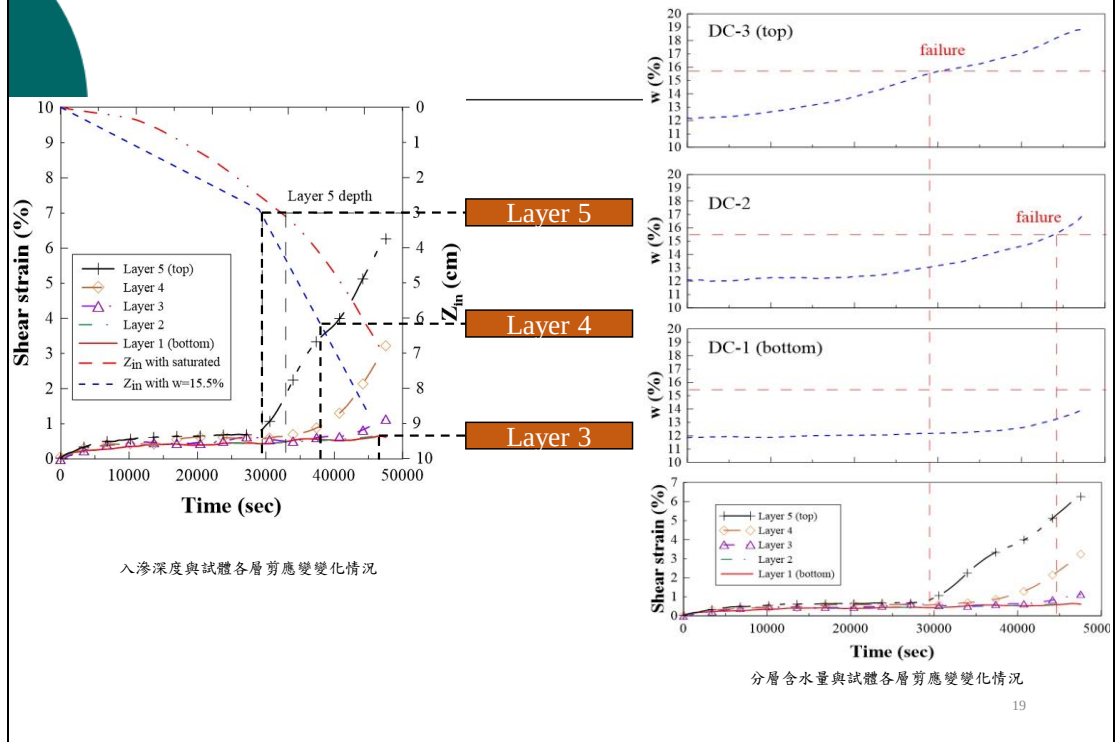
➤ 水力力學耦合邊坡穩定分析參數

c' (kPa)	ϕ' (°)	ϕ^b (°)	γ (kN/m ³)	β (°)	GWT (m)
0.66	25.1	6.8	17.5	30	4

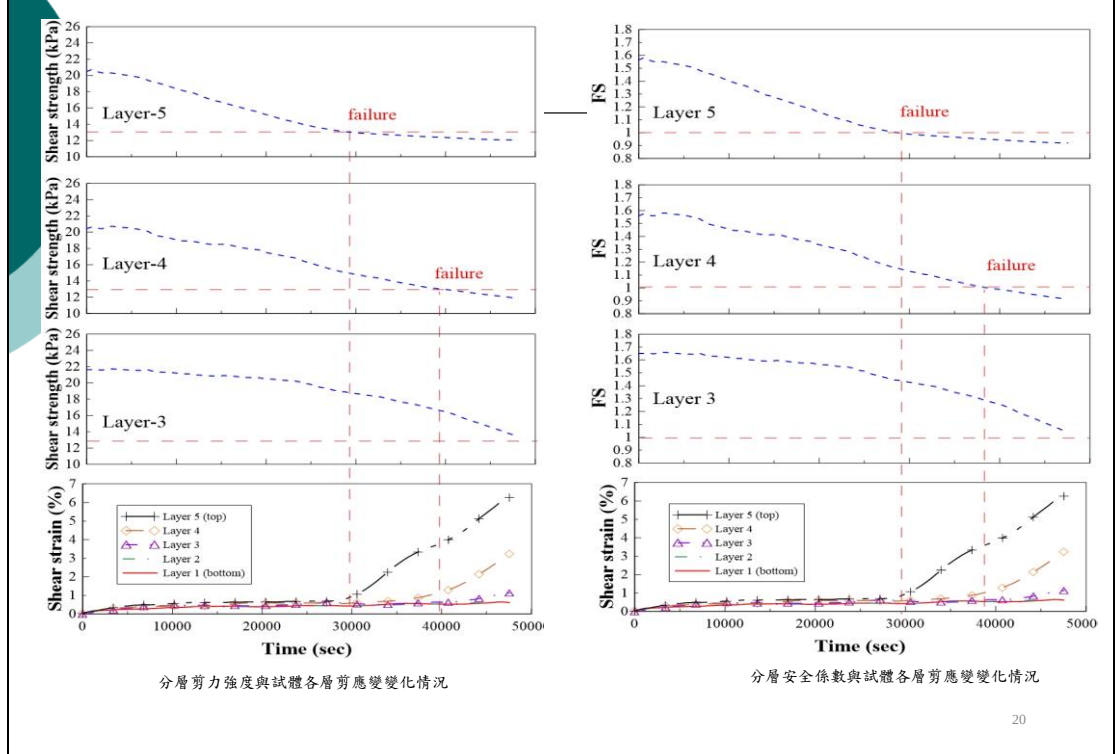
- 破壞深度1.5m
- 試驗理論破壞時間69.5hr

18

水力力學耦合試驗結果(1/3)

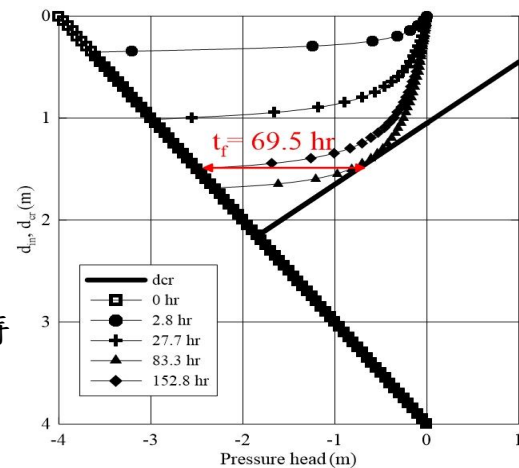


水力力學耦合試驗結果(2/3)



水力力學耦合試驗結果(3/3)

- 試驗理論破壞時間69.5hr
- 試驗實際破壞時間8.3hr
- 水由地表入滲至1.5m深歷時59.5hr
- 考慮水由地表入滲試體破壞時67.8hr



21

二維水力力學耦合邊坡分析

水力力學耦合數值分析

FLAC程式

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

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

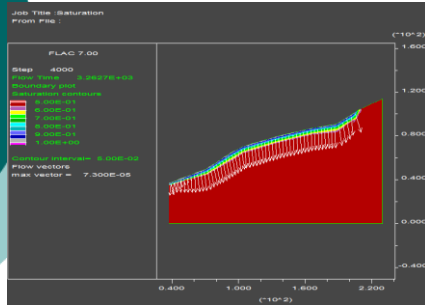
$$\tau^{max} = (\sigma - P_a) \tan \phi + S_w (P_a - P_w) \tan \phi + C$$

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

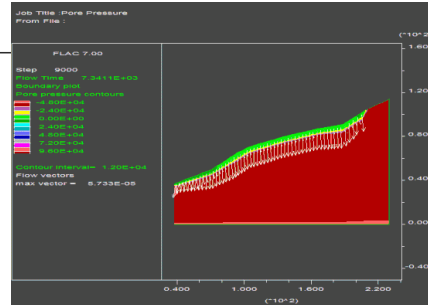
22

耦合分析結果

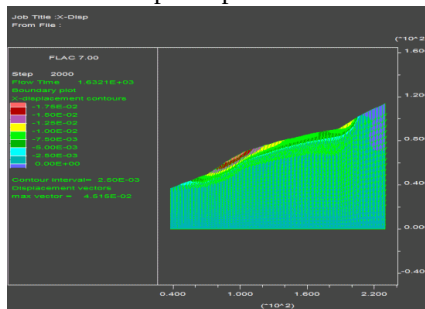
Wetting front (Saturation+Flow)



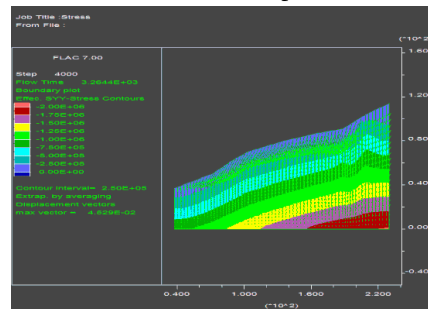
Pore pressure+Flow



X-disp+Disp. vector

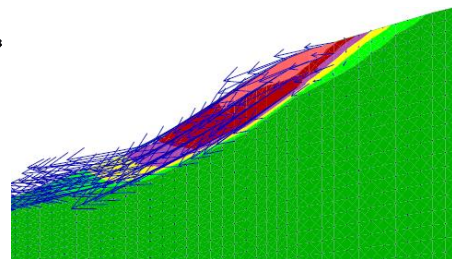
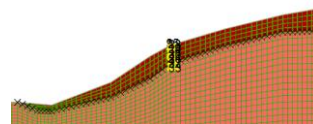
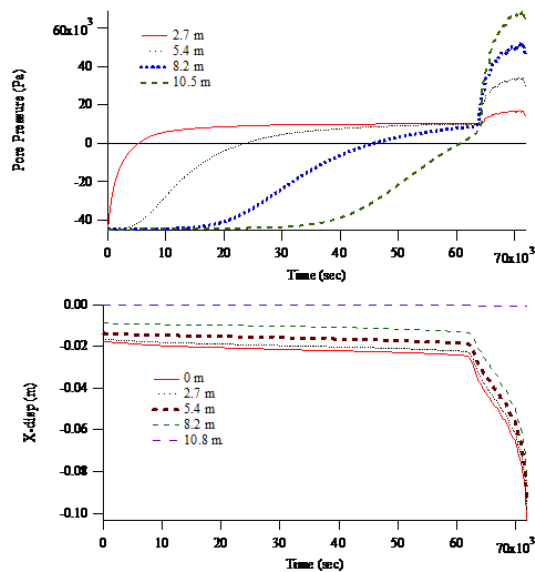


Eff. Vert. stress+ Disp. vector



23

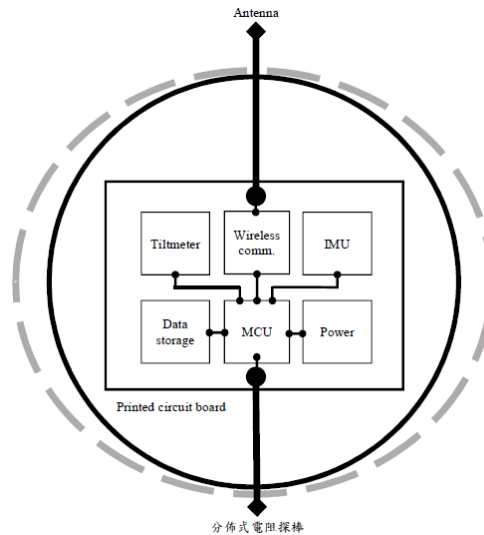
水力與力學耦合反應歷時



24

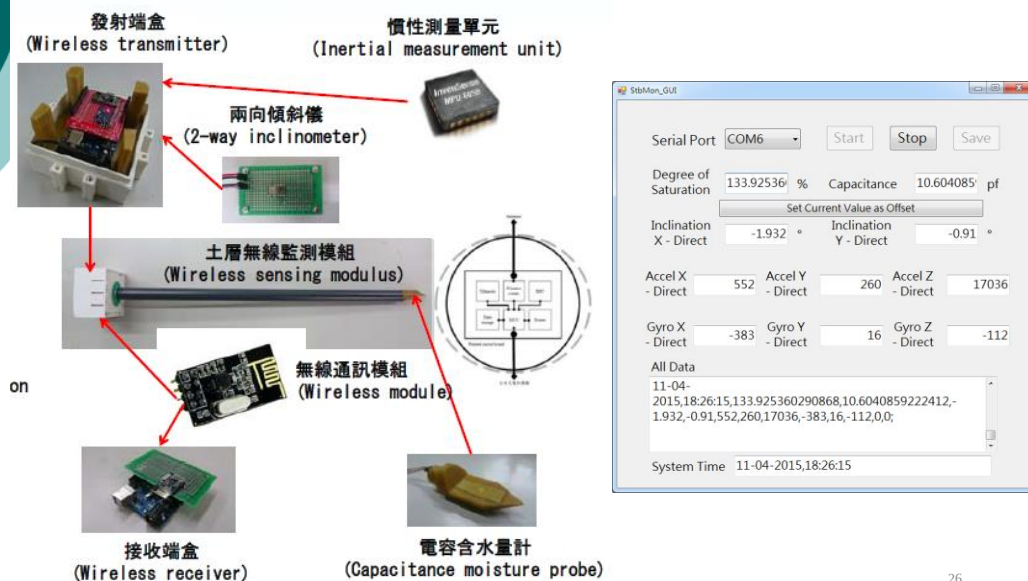
無線監測模組構件/功能

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



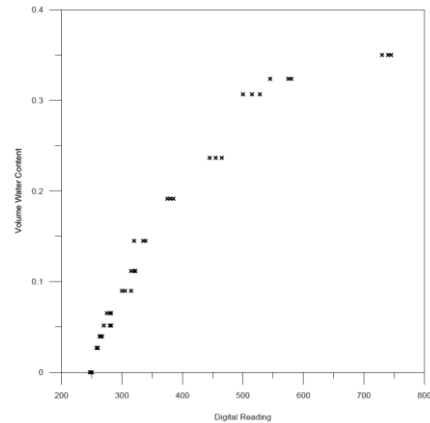
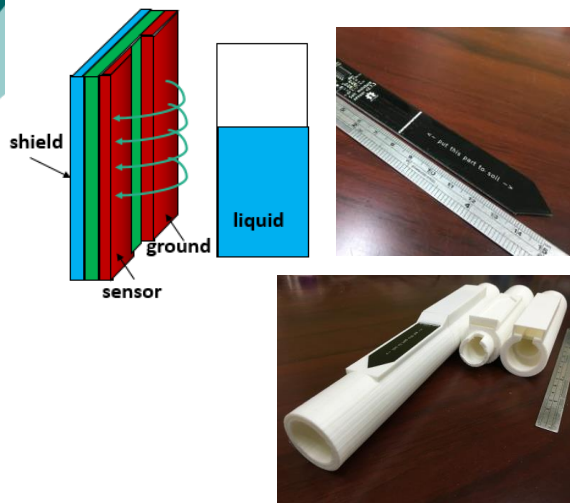
土層監測模組內部架構示意圖

無線監測模組原型 (104年)



數位電容土壤水份計

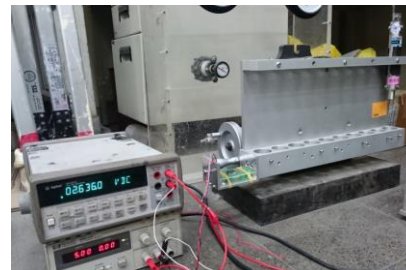
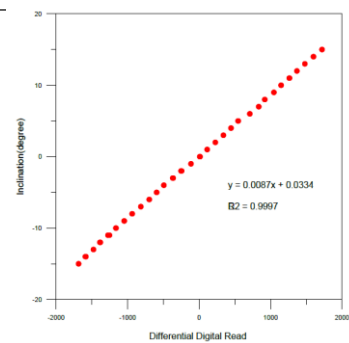
以電容感應原理量測兩導體板間物質之介電常數改變值。具有高解析度、低成本、非接觸性、受外界影響低等特性。



27

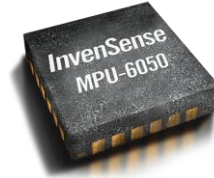
高精度傾斜角度感測器規格

- 廠牌: Murata Electronics
- 型號: SCA103T-D04
- 單軸向傾斜儀
- 工作電壓+5V
- 範圍: ± 15 度
- 解析度: 0.001度(10Hz 類比輸出)
- 傾斜與溫度-數位SPI輸出 (0.01度)



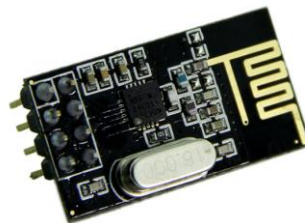
IMU規格

- 廠牌: InvenSense
- 型號: MPU-6050
- 六軸慣性量測單元
 - 三軸加速度
 - 三軸角速度
- 工作電壓: +3.3V
- 加速度、角速度與溫度 - 數位I²C輸出
- 傾斜量測範圍: $\pm 30^\circ$
- 傾斜解析度: 0.0035度
- 傾斜誤差: $\pm 0.5^\circ$
- 內建MCU計算歐拉角(Euler angles) - 數位I²C輸出

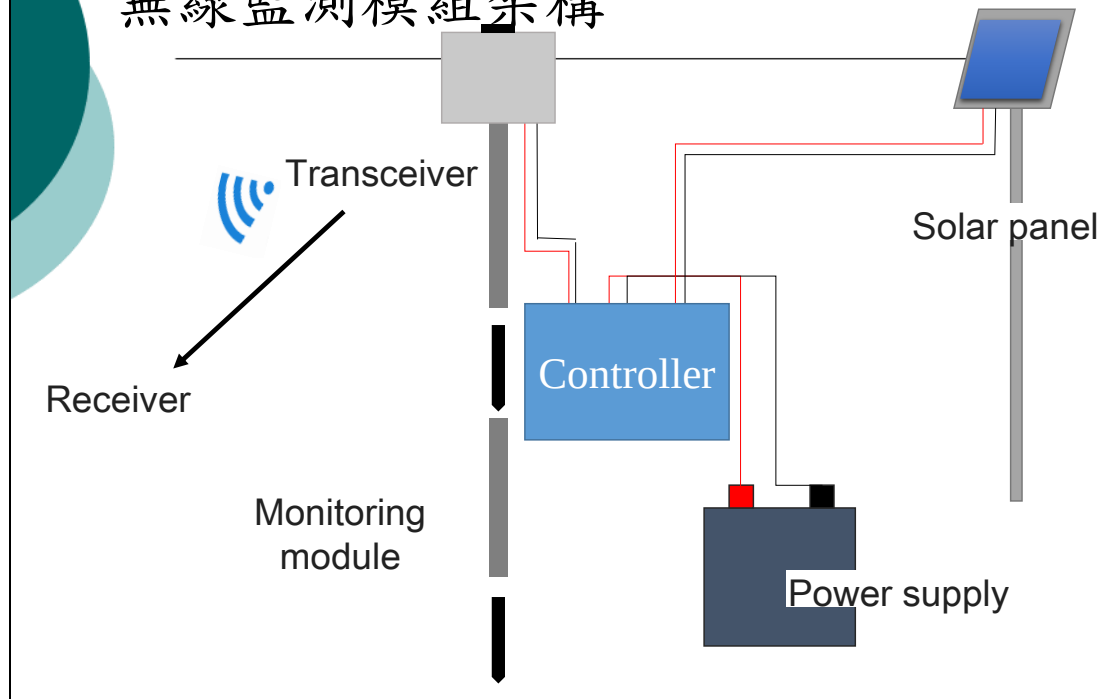


無線通訊模組

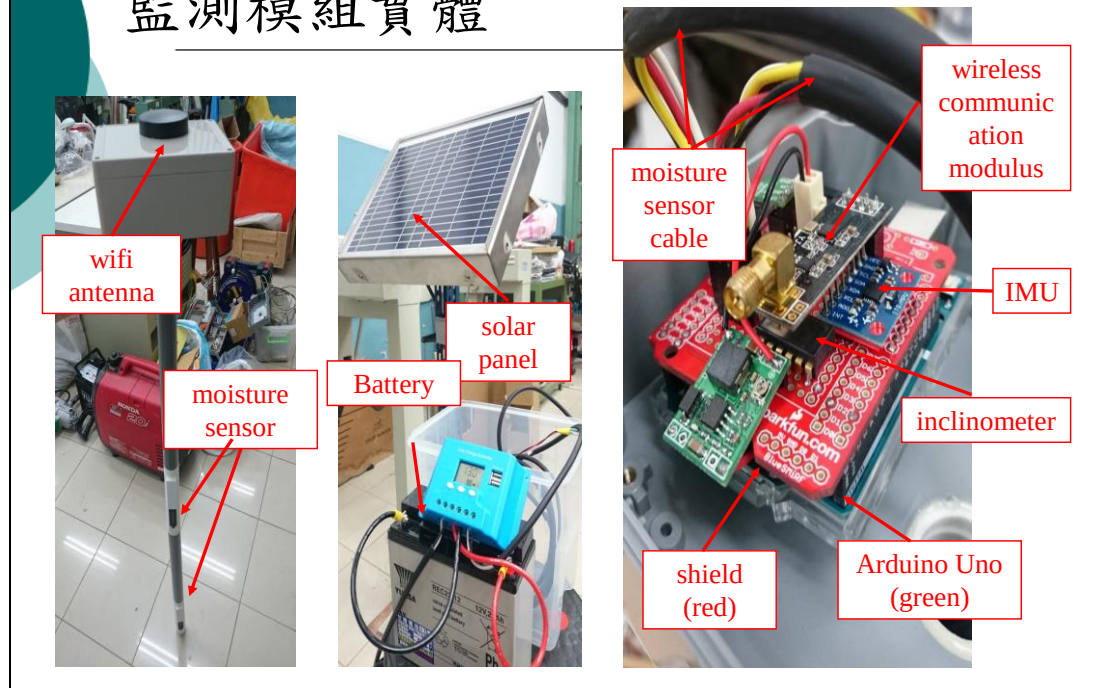
- 市售多種無線通訊模組以ZigBee與其衍伸傳輸技術為大宗
- ZigBee系列傳輸系統有資料不同步的缺點
- 軌跡量測需同步6軸參數, 若使用ZigBee傳輸技術易生誤差
- 本研究選用2.4GHz RF-nRF24L01做為無線傳輸模組
 - 低工作電壓(1.9V~3.6V)
 - 高速率(2Mbps)
 - 多頻點
 - 125頻點, 滿足多點通信和跳頻通信需要
 - 體積小(15 mm x 29 mm)
 - 低功耗
 - 低應用成本
 - 便於開發



無線監測模組架構



監測模組實體



優化之無線監測模組



Inclinometer



IMU



MCU+Wireless



天線



監測模組發射端

電容土壤水分計



33

淺層滑動測試場址

• 候選場址條件：

1. 現地需為軟弱土層、陡坡地形(坡角>摩擦角)、低地下水位、破壞面為非飽和土層。
2. 具有相關幾何、水文及地質參數，並有現地監測資料參考。
3. 須為鄰近道路之邊坡，且具高破壞潛勢或有破壞歷史。
4. 鄰近具有有線或無線通訊及電源供應，以裝設監測主機。

34

太平山場址



安裝程序：

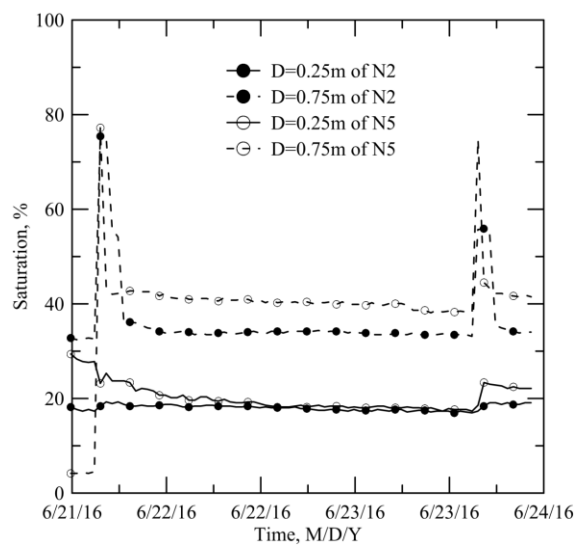
1. 鑽孔至預定深度0.8m
2. 置入土層監測模組並定向定平
3. 回填至含水量計上方
4. 以少量皂土圍繞覆蓋於桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹
5. 重複上述步驟回填至地表
6. 以少量皂土圍繞覆蓋於地表桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹



35

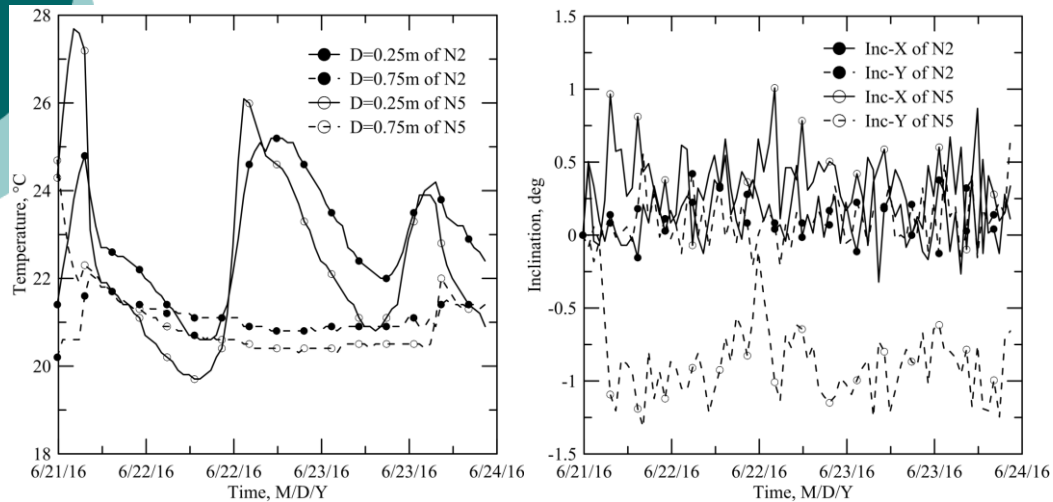
太平山監測資料(飽和度)

- 中央氣象局觀測資料
- 測站C0U710_太平山
- 太平林道22.3K
- 6/21 15:00~16:00 22mm
16:00~17:00 19mm
17:00~18:00 0.5mm
- 6/22 13:00~14:00 4mm
14:00~15:00 17.5mm
- 6/23 16:00~17:00 9mm



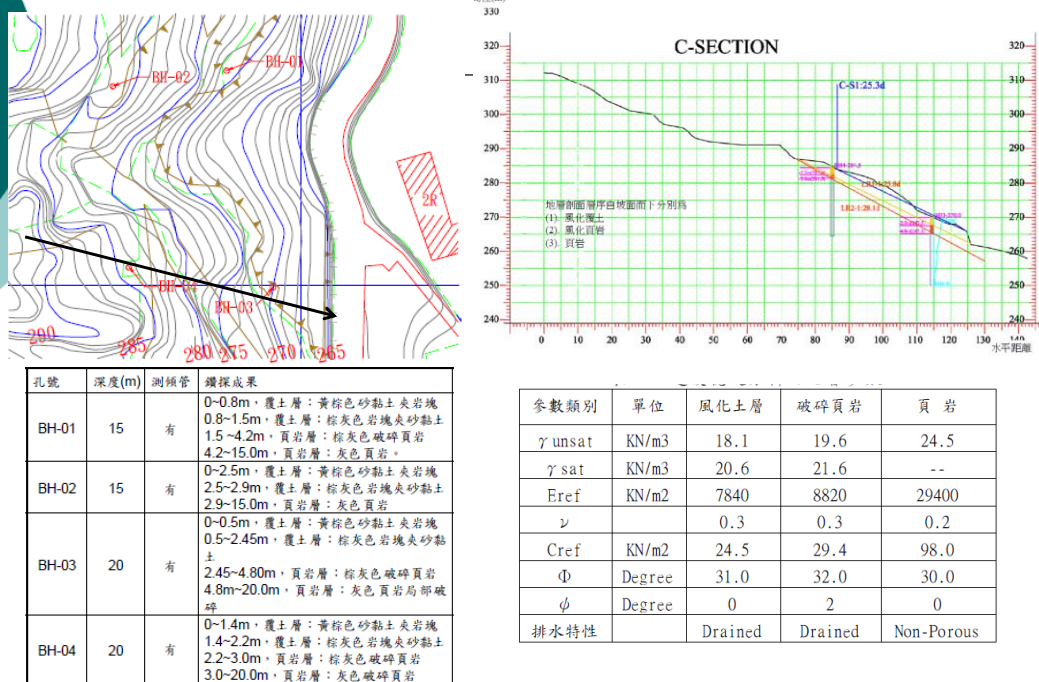
36

太平山監測資料:溫度與傾斜量

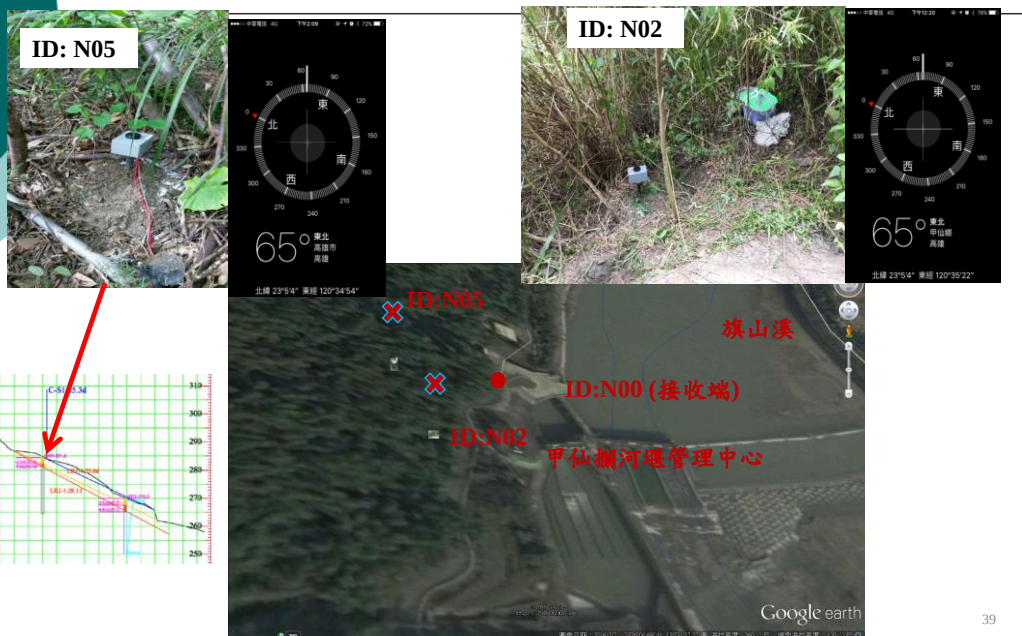


37

甲仙攔河堰通達道路邊坡



淺層滑動無線監測模組安裝

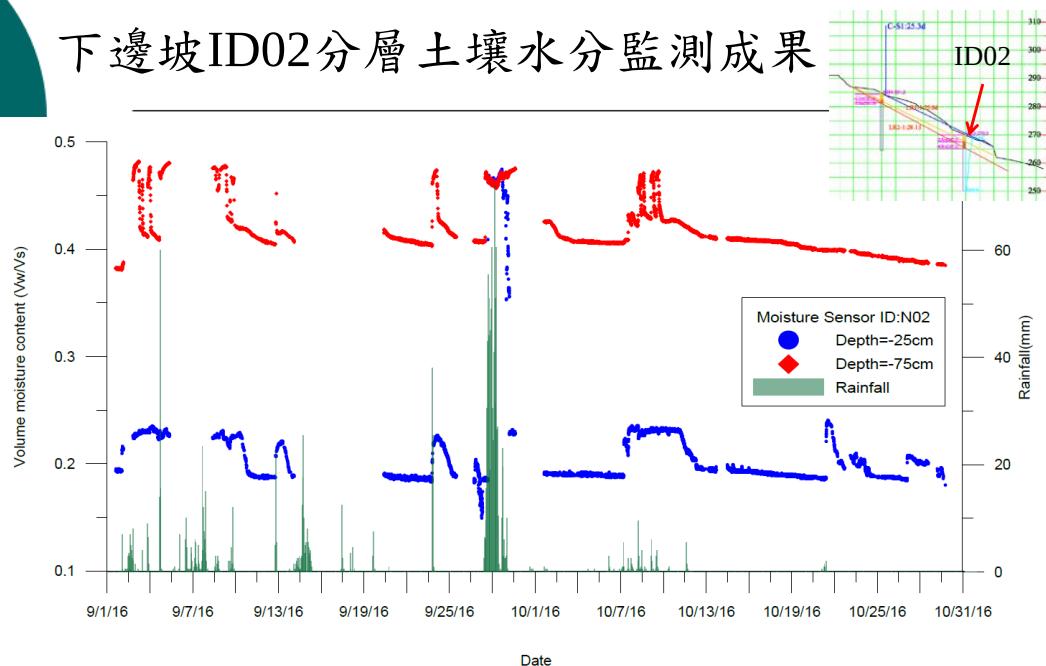


39

場址現況

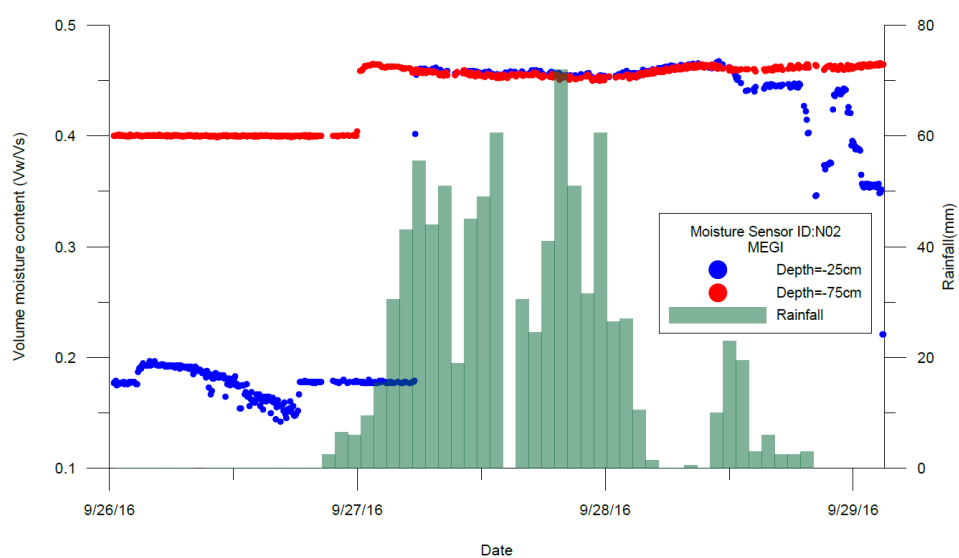


下邊坡ID02分層土壤水分監測成果



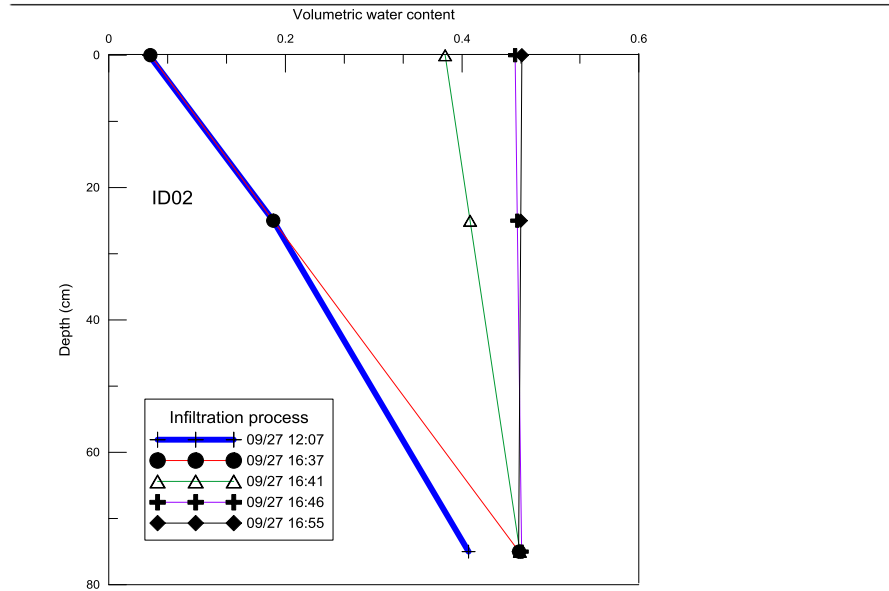
41

下邊坡ID02於Megi 颱風期間反應



42

ID02 於Megi期間分層含水量變化



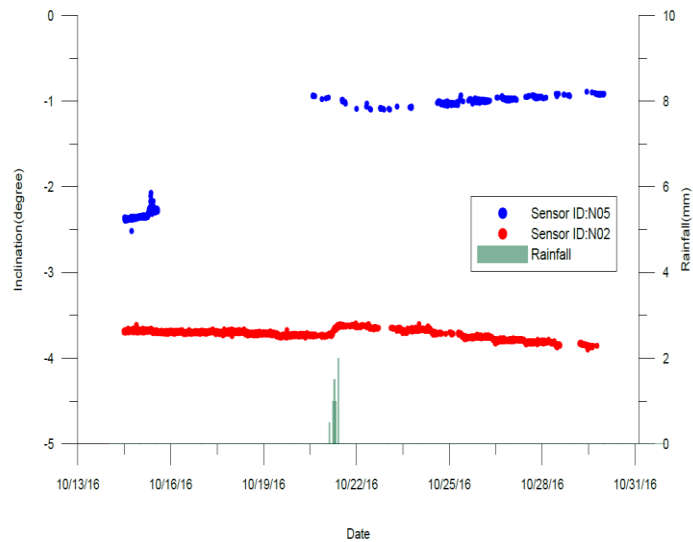
43

下邊坡ID02 六軸IMU監測成果

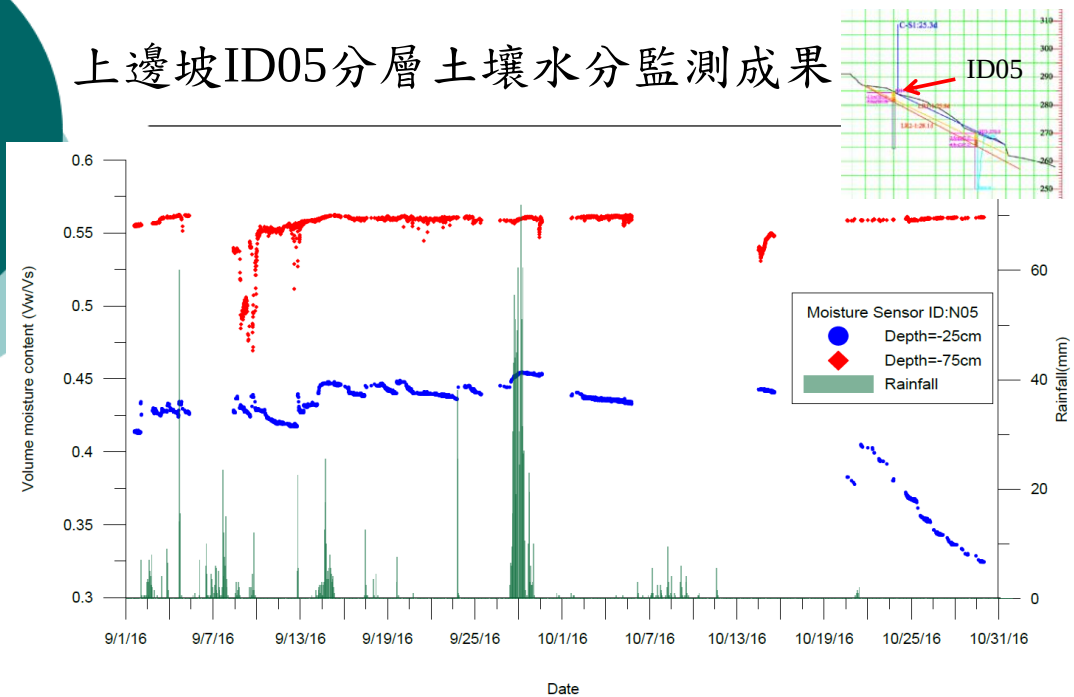


44

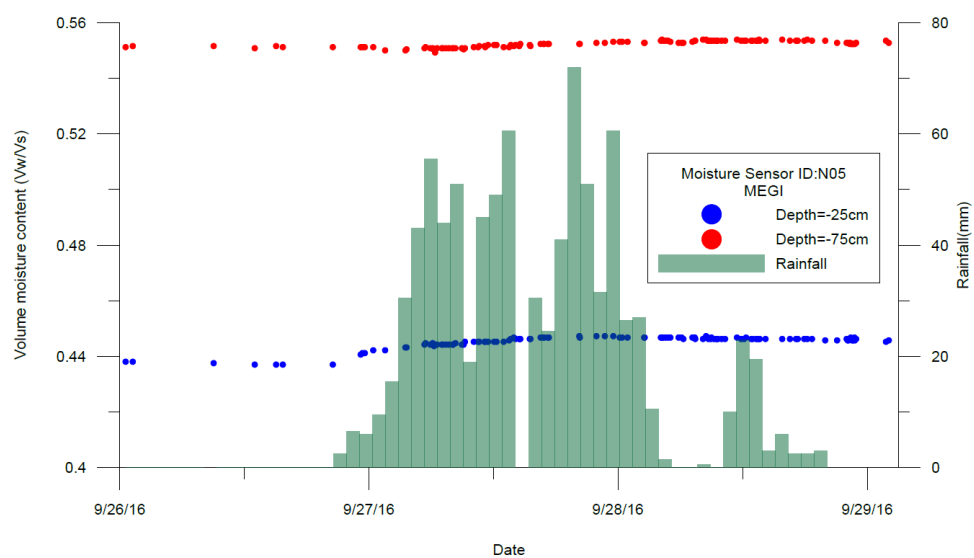
傾斜儀監測成果



上邊坡ID05分層土壤水分監測成果

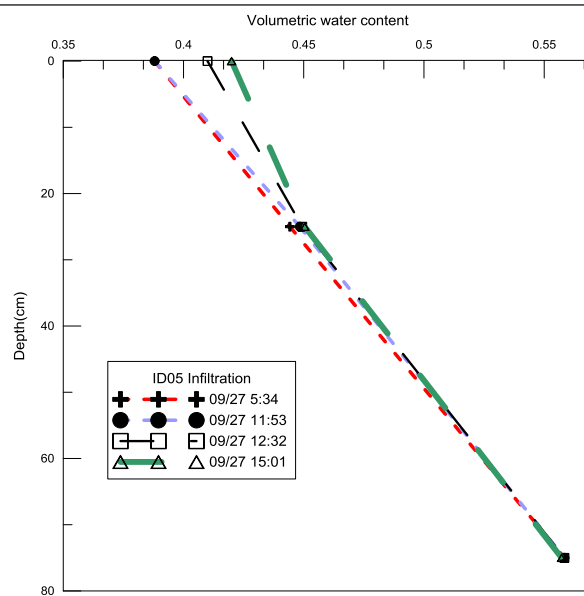


上邊坡ID05於Megi 颱風期間反應



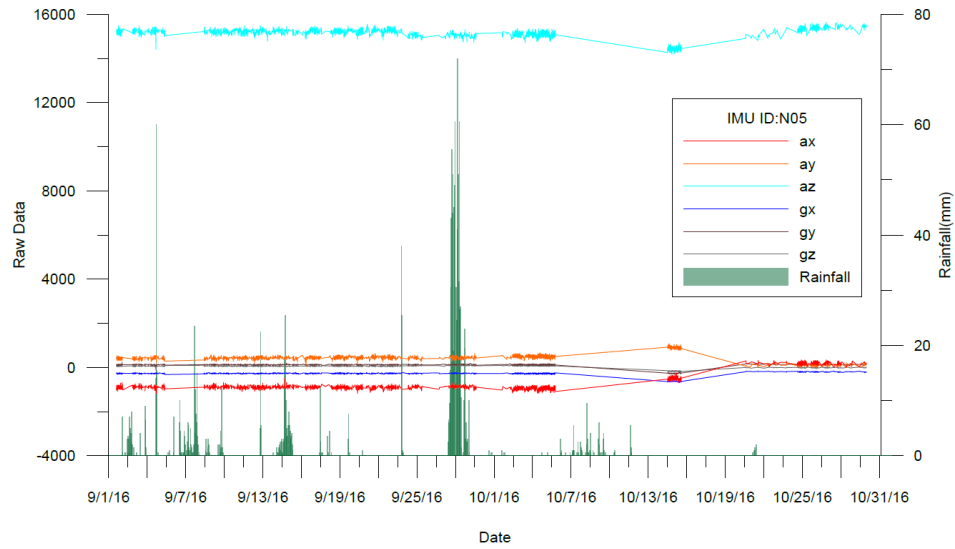
47

ID05 於Megi期間分層含水量變化



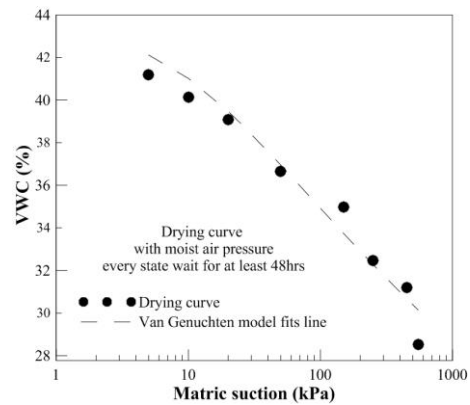
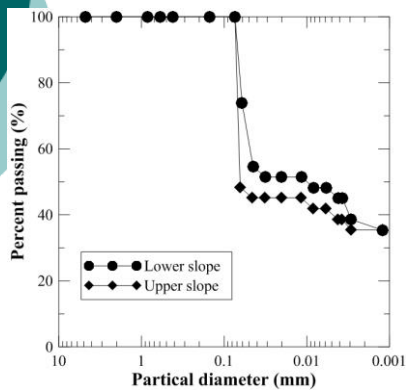
48

上邊坡ID05 六軸IMU監測成果



49

現地土壤試驗成果



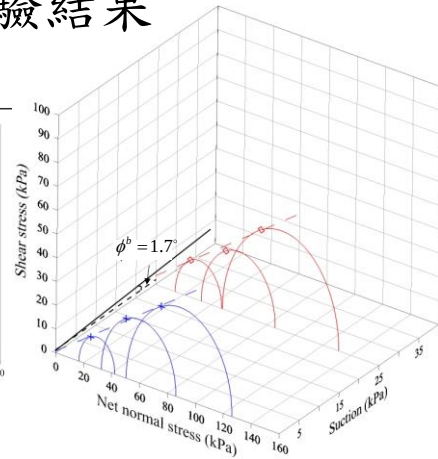
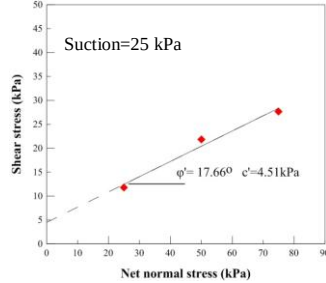
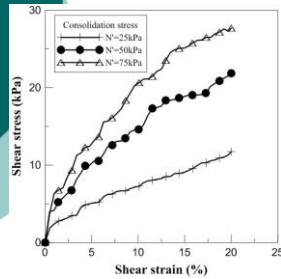
van Genuchten 模式擬合參數

土樣位置	USCS	θ_s (%)	θ_r (%)	α	m	n
上邊坡(Upper slope)	ML	43.5	6.1	0.1	0.99099	1.11
下邊坡(Lower slope)	ML					

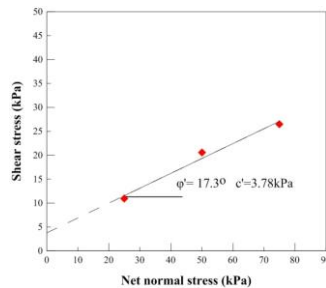
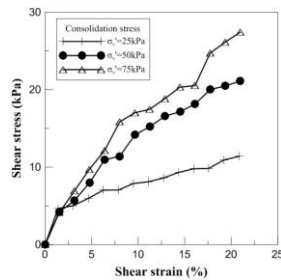
50

非飽和土壤強度參數試驗結果

➤ 非飽和壓密排水單剪試驗結果



➤ 飽和壓密排水單剪試驗結果



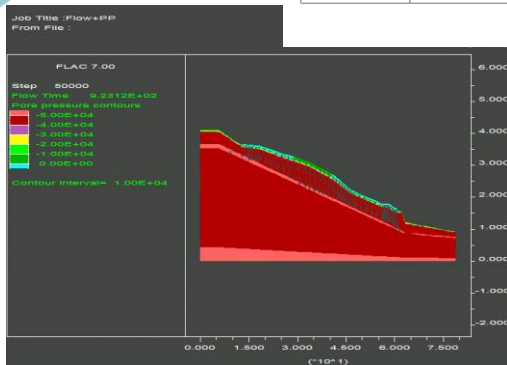
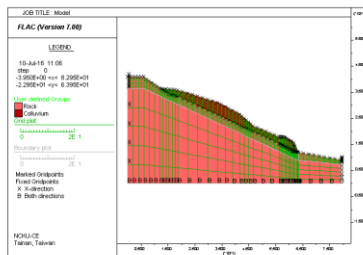
衍伸莫爾-庫倫破壞準則

$$\phi^b = \tan^{-1} \left(\frac{c'_{unsat} - c'_{sat}}{u_a - u_w} \right)$$

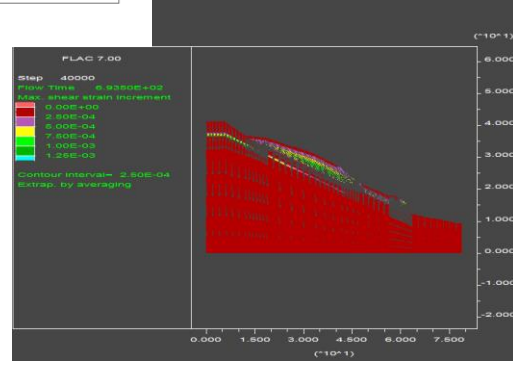
c' (kPa)	ϕ' (°)	ϕ^b (°)
3.78	17.3	1.67

51

甲仙攔河堰耦合分析成果



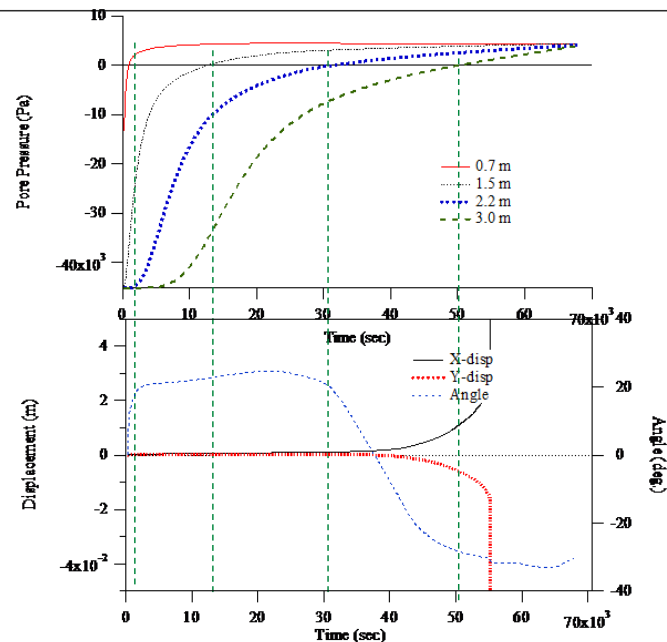
Pore pressure and flow



Shear strain + Disp

52

反應時間歷時 (ID05)



53

甲仙攔河堰邊坡監測彙整

• Positive

- 建立監測模組現地安裝與耐久測試
- 通過颱風與高溫測試
- 提供系統優化與資料處理基礎
- 監測資料可反應現地淺層土壤水力行為

• Negative

- 場址土層厚度不足，易受地下水影響
- 現地經整治，力學行為受擋土結構影響
- 無破壞發生

54

結論

- 大型模型試驗結果顯示，考慮非飽和土層水力力學耦合之無限邊坡淺層滑動依時分析架構完整可行。
- 結合土中入滲與滲流分析及非飽和土層非線性有效應力分析，計算孔隙水壓變化狀態，用於更新非飽和土壤之勁度與強度參數，耦合分析架構可作為現地監測模組佈設與警戒值制定之依據。
- 系統優化後之無線監測模組，現地性能測試顯示其傳輸穩定性、電源系統改善、土壤水分計耐久測試等，通過兩次以上颱風事件。
- 甲仙監測場址連續監測記錄佐證系統可適用超過單一雨季以上，且於惡劣天候下仍可持續運行。所量測資料已建立相關判釋流程，解釋量測資料之物理意義。
- 本計畫包含解析法預測模式建立與監測模組研發，以達成依時預警監測模組之功能，整合此二部份成果可提出整合預警系統架構

55

簡報完畢，敬請指教

56

附錄四

工作會議紀錄

第一季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-105-H1DB001b

採購案名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)

時間：105年3月30日上午10時30分 地點：台9甲線10.2K測站場址

主席：謝明志 科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志

港研中心一科：陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、本年度規劃理想的候選場址有三處，除了本次勘查之台9甲線10.2K(烏來)路段外，尚有台14線87K(廬山地滑)與台9線115K(蘇花公路)兩處路段可考慮，將收集現有場址資料並進行現勘，最後的目標應可選擇兩處監測場址，並預計於本年度雨季來臨前完成安裝監測模組，俾能有完整的監測資料可供分析。
- 3、監測系統模組目前正進行含水量量測優化，並進行模組間通訊測試等工作。

第二季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-105-H1DB001b

採購案名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)

時間：105年6月24日上午10時30分 地點：甲仙攔河堰測站場址

主席：謝明志 科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志

港研中心一科：陳志芳、胡啟文

財團法人成大研究發展基金會：張文忠、周士勳、張鈞、蕭涵、
蕭廷翰

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、由於安裝感測器的場址必需有場址的地質相關資料進行水力力學耦合分析，因此本年度目前選定安裝的場址有二處，分別為宜蘭太平山公路的(宜專1線)13k處測站，另外一處為高雄甲仙攔河堰旁之滑動邊坡。
- 3、本年度選定兩處無線感測器之試驗場址皆於本(6)月20~21日及24日順利安裝完成，並進行持續監測，預計至年度計畫結束前能有完整的資料可供分析。
- 4、本次安裝之宜蘭(宜專1線)13k處測站，由於該地點之無線訊號傳輸受太多樹林遮蔽，影響監測正常運作，需設法改善。

第三季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-105-H1DB001b

採購案名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)

時間：105年9月30日上午10時30分 地點：港研中心五樓會議室

主席：謝明志 科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志

港研中心一科：陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、本季工作會議原訂105年9月27日上午10時30分召開，因梅姬颱風影響順延至9月30日上午10時30分進行。
- 2、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 3、甲仙攔河堰道路的邊坡場址歷經9月份的莫蘭蒂、馬勒卡與梅姬等颱風侵襲皆可成功記錄到土壤水分變化，且監測資料持續達3週以上，顯示電力配置系統與穩定性已初步完成預設目標。
- 4、目前感測器所採用的傾斜儀量測精度較為不足，未來將儘速於現有系統加裝單向高精度傾斜感測計之模組，希於期末報告初稿前有初步成果。

第四季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-105-H1DB001b

採購案名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)

時間：105年11月4日上午10時30分 地點：國立成功大學

主席：謝明志 科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志

港研中心一科：陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符，本年度期末報告初稿於11月10日前可如期提交。
- 2、無線感測儀器應用於公路現地邊坡，中心近期與高速公路局洽商於國3公路適當地點安裝感測模組進行測試研究，預計近日內辦理現地會勘。
- 3、甲仙攔河堰邊坡監測系統定期前往維護，目前儀器正常運作，資料紀錄穩定。
- 4、因先前感測器所採用的傾斜儀量測精度較為不足，現已加裝單向高精度傾斜感測計模組，可提高邊坡傾斜量測精度。