

107-018-7A63

MOTC-IOT-106-H1DB002a

公路邊坡深層滑動無線感測網路 監測系統研發



交通部運輸研究所

中華民國 107 年 3 月

107-018-7A63

MOTC-IOT-106-H1DB002a

公路邊坡深層滑動無線感測網路 監測系統研發

著者：謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌
周仕勳、蕭 涵、簡裕峻、吳崑瑋

交通部運輸研究所

中華民國 107 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發 / 謝明志等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 107. 03

面 ; 公分

ISBN 978-986-05-5205-8(平裝)

1. 公路管理 2. 運輸規劃

557

107000576

公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

著 者：謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、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 107 年 3 月

印 刷 者：采峰實業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 50 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

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：1010700157 ISBN：978-986-05-5205-8 (全套:平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發
交通部運輸研究所

GPN: 1010700157
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：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-05-5205-8	政府出版品統一編號 1010700157	運輸研究所出版品編號 107-018-7A63	計畫編號 106-H1DB002a
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：魏瓊蓉 聯絡電話：04-26587181 傳真號碼：04-26564418		合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：張文忠 協同主持人：黃安斌 研究人員：周仕勳、蕭涵、簡裕峻、吳崑璋 地址：臺南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575~63128	
研究期間 自 106 年 02 月 至 106 年 12 月			
關鍵字：深層崩塌破壞、無線監測模組、水力力學耦合分析、依時預警系統、孔隙水壓			
摘要： 本研究針對公路邊坡可能遭遇之破壞面位於飽和土層之深層滑動進行解析法分析，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。計畫針對之破壞類型為滑動面位於飽和土層深層滑動，其機制為超額孔隙水壓激發，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表層土層反應之無線監測模組，利用建立之場址水文與地質模型進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，發展場址客製化具依時特性之公路邊坡深層滑動預警架構。本年度完成潛在深層滑動場址水力力學耦合分析一處，並整合具無線通訊功能且可監測地表傾角、地表位移、土中分層濕度及土層孔隙水壓之監測模組，現地測試結果顯示模組符合計畫目標，結合數值分析與現地孔隙水壓監測，可發展場址客製化且具依時特性之預警系統。 成果效益與應用情形： 1. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法土壤邊坡深層滑動分析架構，並以此做為公路土壤邊坡深層滑動預警模式之雛形。 2. 針對山區公路土壤邊坡深層滑動現象，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，研發低成本易安裝之表層無線監測網路。 3. 發展解析法客製化之公路土壤邊坡深層滑動監測與預警技術，提升預警準確度。 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
107 年 3 月	187	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： ☐限閱 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 （解密【限】條件：☐ 年 月 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密， ☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密） ☒普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Development of wireless monitoring modules for deep seated landslides of highway slopes			
ISBN(OR ISSN) 978-986-05-5205-8	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010700157	IOT SERIAL NUMBER 107-018-7A63	PROJECT NUMBER 106-H1DB002a
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jyh-Fang Chen PROJECT STAFF: M. J. Hsieh PHONE: 04-26587181 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM : February, 2017 TO : December 2017
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: deep slip failure, wireless sensing module, coupled hydro- mechanical analysis, time-dependent warning system, pore water pressure			
ABSTRACT: To improve the limitations of rainfall-based slope warning system, a new framework that integrated the hydro-mechanical slope analysis and wireless sensing module for field key properties is under development. The target failure mode in this study is deep slips that failure surfaces occur in the saturated zone and trigger by excess pore pressures. The long-term goal is to establish a customized, time-dependent warning system for deep slip failures triggered by rainfalls. A potential deep sliding slope is selected for testing site . A coupled hydro-mechanical analysis is performed to model both the hydraulic and mechanical responses of slopes. Wireless sensing module based on micro-electro-mechanical system (MEMS) components with wireless communication components is integrated to monitor surficial ground movements and subsurface conditions, including ground inclination, water content profile, and pore water pressures. Combining the real-time monitoring of pore pressure and and rigorous analysis, a customized, time-dependent warning system might be feasible.			
BENEFIT AND APPLICATION : 1. Develop a rigorous analytical method that integrates the failure mechanism and field material properties to predict the deep slides along roadside and provide theoretical basis of warning system. 2. Develop surface wireless sensing module for deep seated landslide warning. 3. Develop customized, time-dependent warning system and procedure to improve the limitations of current warning techniques. 4. The system potentially can be used by ministry of transportation, directorate general of highways, and Taiwan railways administration for hazard management.			
DATE OF PUBLICATION March, 2018	NUMBER OF PAGES 187	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ SECRET ☐ CONFIDENTIAL ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	V
表目錄	XI
第一章 計畫概要	1-1
1.1 研究計畫之背景、目的及重要性	1-1
1.2 研究範圍與對象	1-4
1.3 研究內容與項目	1-6
1.4 預期成果、效益及應用	1-7
第二章 研究方法及進行步驟	2-1
2.1 研究方法	2-1
2.2 國內外有關本計畫之研究情況	2-4
2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警	2-11
第三章 邊坡水力力學反應無線感測模組	3-1
3.1 系統架構	3-1
3.2 系統感測器	3-2
3.3 系統組成	3-7

3.4 無線淺層土壤監測模組.....	3-16
3.5 深層水力力學反應無線感測模組.....	3-25
第四章 淺層滑動場址監測成果與分析.....	4-1
4.1 甲仙攔河堰聯外道路土層監測模組安裝測試.....	4-1
4.2 甲仙場址監測資料.....	4-7
4.3 西湖場址土層監測模組安裝測試.....	4-21
4.4 西湖場址監測資料.....	4-27
第五章 深層滑動場址監測與分析.....	5-1
5.1 五彎仔深層監測.....	5-1
5.2 五彎仔二維水力力學耦合穩定分析.....	5-12
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-12
參考文獻.....	參.-1
附錄一 106 年期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二 106 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 工作會議紀錄.....	附錄 4-1

圖目錄

圖 2.1 依時邊坡預警系統研究架構圖.....	2-2
圖 2.2 由有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)....	2-6
圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012) ..	2-7
圖 2.4 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004) ..	2-8
圖 2.5 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004) ..	2-8
圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008).....	2-9
圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)	2-12
圖 2.8 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995)	2-13
圖 2.9 典型土壤非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004) ..	2-14
圖 2.10 非飽和滲流分析結果比較.....	2-15
圖 2.11 淺層無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....	2-16
圖 2.12 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖.....	2-19
圖 2.13 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995).....	2-20
圖 2.14 數值分析模型.....	2-24
圖 2.15 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....	2-24
圖 2.16 ID05 位置預測孔隙水壓歷時	2-25
圖 2.17 ID05 位置預測地表運動歷時	2-25
圖 2.18 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....	2-26
圖 2.19 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念	2-26
圖 2.20 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念	2-27
圖 2.21 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....	2-27

圖 3.1 系統架構示意圖	3-2
圖 3.2 電容式土壤水份計	3-3
圖 3.3 I ² C 連接方式	3-3
圖 3.4 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖	3-4
圖 3.5 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖	3-4
圖 3.6 SCA103T 傾斜儀	3-5
圖 3.7 傾斜儀類比電壓比例輸出標定	3-6
圖 3.8 沉水式液位計	3-7
圖 3.9 客製化電路板	3-8
圖 3.10 系統運作示意圖	3-8
圖 3.11 Arduino Uno	3-9
圖 3.12 拓樸示意圖	3-11
圖 3.13 XCTU 參數設定	3-12
圖 3.14 Xbee S1 pro	3-12
圖 3.15 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組 SIM5320E	3-13
圖 3.16 即時時鐘模組 DS3231	3-14
圖 3.17 SD 卡數據紀錄模組	3-14
圖 3.18 太陽能電源控制器	3-15
圖 3.19 10W 太陽能板	3-15
圖 3.20 18650 鋰電池	3-16
圖 3.21 Arduino Uno 原型擴展板	3-17
圖 3.22 擴展板與微控制器	3-17

圖 3.23 土層監測模組客戶端.....	3-18
圖 3.24 土層監測模組伺服器端.....	3-19
圖 3.25 客戶端之程式流程圖.....	3-20
圖 3.26 伺服器端程式流程圖.....	3-22
圖 3.27 伺服器端之程式流程圖(續).....	3-23
圖 3.28 土層監測模組外構.....	3-26
圖 3.29 防水電子盒內部配置.....	3-26
圖 3.30 土壤水份計桿件外構.....	3-26
圖 3.31 太陽能板支架.....	3-27
圖 3.32 Wemos lolin32 微處理器(摘自 www.wemos.cc).....	3-28
圖 3.33 液位計實體與校正結果.....	3-29
圖 3.34 深層邊坡無線感測模組內部組件圖.....	3-29
圖 3.35 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖.....	3-31
圖 4.1 監測設施平面配置圖(南水局 2011).....	4-2
圖 4.2 監測剖面圖(南水局 2011).....	4-3
圖 4.3 監測模組相對位置圖.....	4-4
圖 4.4 電動鑽機鑽至預計深度.....	4-4
圖 4.5 確保模組保持水平.....	4-5
圖 4.6 皂土覆蓋桿身與地表.....	4-5
圖 4.7 客戶端盒內配置.....	4-6
圖 4.8 伺服器端盒內配置.....	4-6
圖 4.9 監測站點周遭環境.....	4-6
圖 4.10 Thingspeak 即時顯示情況.....	4-8

圖 4.11 監測場址與甲仙雨量站相對位置	4-9
圖 4.12 Node0 含水量監測結果	4-9
圖 4.13 Node1 含水量監測結果	4-10
圖 4.14 Node2 含水量監測結果	4-10
圖 4.15 Node3 含水量監測結果	4-11
圖 4.16 擋土牆透水孔	4-12
圖 4.17 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage1	4-15
圖 4.18 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage2	4-15
圖 4.19 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage3	4-16
圖 4.20 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage4	4-16
圖 4.21 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage5	4-17
圖 4.22 甲仙現地入滲速率-基質吸力	4-18
圖 4.23 典型細砂 SWCC (Gonzalez and Adams, 1980)	4-18
圖 4.24 Node0 土壤體積含水量依時性剖面	4-19
圖 4.25 Node1 土壤體積含水量依時性剖面	4-19
圖 4.26 Node2 土壤體積含水量依時性剖面	4-20
圖 4.27 測站傾斜角監測結果	4-21
圖 4.28 傾斜角量測方向	4-21
圖 4.29 西湖邊坡實照	4-22
圖 4.30 西湖系統安裝位置示意圖 (Google Earth)	4-22
圖 4.31 西湖監測系統架構圖	4-23
圖 4.32 西湖場址監測模組尺寸與實際安裝深度示意圖	4-24
圖 4.33 各監測模組安裝相對位置與系統盒內模組	4-25

圖 4.34 監測模組安裝流程圖	4-26
圖 4.35 資料接收端位	4-27
圖 4.36 Node 2 於 2017/3/31—2017/4/02 降雨與含水量變化	4-28
圖 4.37 Node 2 於 2017/4/11—2017/4/16 降雨與含水量變化.....	4-29
圖 4.38 Node2 於 2016/12/23—2017/4/28 傾斜量變化	4-30
圖 4.39 Node5 於 2016/12/23—2017/4/28 傾斜量變化	4-30
圖 4.40 Node10 於 2016/12/23—2017/4/28 傾斜量變化	4-31
圖 4.41 更新後西湖 Node4 土層含水量紀錄	4-32
圖 4.42 更新後西湖 Node5 土層含水量紀錄	4-32
圖 4.43 更新後西湖 Node6 土層含水量紀錄	4-33
圖 4.44 更新後西湖傾斜量紀錄	4-33
圖 5.1 阿里山公路五彎仔路段航照圖(青山工程顧問公司,2006).....	5-3
圖 5.2 阿里山公路五彎仔路段監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2006)	5-4
圖 5.3 全光纖式監測儀器配置圖 (青山工程顧問公司, 2007)	5-5
圖 5.4 台 18 線阿里山公路五彎仔崩塌區塊體滑動與深井配置圖(公路 局五工處)	5-6
圖 5.5 五彎仔地區崩積材料剖面	5-7
圖 5.6 五彎仔地區崩積材料剖面	5-8
圖 5.7 五彎仔崩塌區監測儀器配置圖(公路局五工處提供).....	5-9
圖 5.8 滑動塊體分布及可能滑動深度圖(公路局五工處提供).....	5-9
圖 5.9 深層邊坡無線感測模組外構與現場安裝圖	5-10
圖 5.10 深層邊坡無線感測模組電子配置圖	5-11
圖 5.11 深層邊坡無線感測模組分層水分紀錄	5-12

圖 5.12 深層邊坡無線感測模組傾角紀錄.....	5-12
圖 5.13 深層邊坡無線感測模組孔隙水壓紀錄.....	5-13
圖 5.14 五彎仔數值分析模型.....	5-16
圖 5.15 入滲開始後 410000 秒後孔隙水壓分布與流動向量	5-16
圖 5.16 入滲後垂直有效應力分布與位移向量.....	5-17
圖 5.17 入滲後水平位移分布	5-17
圖 5.18 B-7 位置預測孔隙水壓歷時.....	5-18

表目錄

表 3-1 AT command 操作流程與參數意義	3-24
表 4-1 傾斜管孔位鑽孔資料(南水局 2011).....	4-2
表 4-2 簡化地質材料參數(南水局 2011).....	4-3
表 4-3 各階段淺層入滲速率	4-17
表 4-4 不同測站淺層入滲速率	4-20
表 5-1 分析所用土層參數	5-14
表 5-2 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數.....	5-14
表 5-3 非飽和水文參數.....	5-15

第一章 計畫概要

1.1 研究計畫之背景、目的及重要性

1.1.1 計畫背景

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

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

現有公路邊坡預警系統主要為沿用坡地治理常用之降雨做為預警

依據，以降雨特徵做為指標(交通部運輸研究所, 2014)，少數案例已引進 CCD 攝影機、雨量計、GPS、地震儀 (交通部運輸研究所, 2011)與地表運動及土層滑動監測(廖瑞堂等, 2008)，但並未將地形與地質特徵、場址入滲行為及破壞機制等因素列入考量。而以大區域降雨作為指標時，無法考慮場址微氣候特性，且因降雨為地滑發生之間接指標，而警戒值多由過往案例統計而得，缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下不同之破壞類型，導致此類預警系統常流於過於保守或無法提供反應時間。整體而言，經驗法因簡單且資料較易取得，因此廣為使用且具一定之準確性，但因其具有相當不確定性，導致應用與特定場址時其準確度常有不足，作為區域防災預警尚為可行，但對重要交通區段預警減災策略擬定常有不足之處。

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

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

加，導致邊坡滑動。二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，淺層滑動之研究於前期研究已具初步成果，本研究以降雨引致深層崩塌為研究對象，依 Varnes (1978)之邊坡移動分類方法屬工程土壤之平面或圓弧滑動，水土保持局山崩分類方法之地滑，其為發生於崩積土壤或崩塌岩屑，且為以固體型態滑動之破壞類型。

現今對邊坡預警之趨勢為整合考慮地形、地質材料特性與水力行為之場址破壞機制分析，搭配即時監測相關引致滑動之土壤物理量與地層運動之預警系統。此類預警技術包含兩部分，其一為藉由地質探勘與地形測量，建立場址地質模型並據以進行解析法分析，預測其滑動機制、範圍及不同階段警戒值；其二為佈設監測硬體於反應敏感之位置，進行即時土層監測並發佈警報。目前以數值方法進行崩塌機制分析已有相當進展，但是現地土層邊坡預警監測系統仍有價格昂貴、佈設不易及維護困難等瓶頸，因此發展具備即時無線土層監測之模組化系統，對於推廣以解析法為依據之公路邊坡降雨崩塌預警系統具重要關鍵。

1.1.2 計畫目的

本計畫係依據行政院「104 年災害防救白皮書」課題七：建立潛在大規模崩塌防災警戒機制，結合具有相當經驗與基礎之技術研發，擴大災害防救科技研發與技術支援能量，強化資訊綜整與分析研判機制，將研發能量由「技術支援」提升至「政策支持」，使政府面臨災害防救重大決策時，能夠及時獲得正確資訊。

本年度計畫為延續前期「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發」研究成果(交通部運研所, 2016)，針對公路土壤邊坡可能遭遇到破壞面位於飽和土層以下之深層滑動崩塌，利用不同複雜程度之解析法，建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之分析架構，並以運研所發展中之表層無線監測模組為基礎，研發與解析法搭配之無線感測土層反應監測模組，建立場址土層水文及力學運動無線

感測網路，研發降雨引致深層崩塌之土層監測預警模式之雛形，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性，以利相關權責單位對此類災害預防及災後管理之決策參考。

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

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，以近年因物聯網(Internet of Things, IoT)而興起之開源(open source)微機電整合平台，自行研發客製化具無線通訊功能且可監測地表傾角、地表位移、土中分層濕度及土中孔隙水壓之監測模組，形成分布式土層感測網路，由於此類電子產品可大量生產因此可大幅降低成本。且監測點位選定與分布式監測感測反應詮釋一併考量，監測之結果亦可回饋數值分析模式，此流程將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

本年度研究以深層滑動為預警之破壞類型，前述定義深層滑動之破壞面發生於飽和土層，其力學平衡因地下水位上升及滲流影響，地

下水位上升使其孔隙水壓增加導致土壤強度與勁度降低，平行滲流使下滑驅動力增加，引致邊坡滑動。

本計畫目的為結合嚴謹力學概念為基礎之解析法與邊坡無線土層監測模組，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、材料力學行為之影響，發展場址客製化深層滑動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邊坡滑動分析，考慮水利與力學邊界，模擬崩塌滑動之過程與影響範圍，預測邊坡依時性反應，除作為土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據外，因可預測邊坡之滑動面、滑動歷時等，故預警精度、正確性、滑動時間及滑動體積皆可評估，可用來改善預警精度、建立依時預警模式與減災設施規劃等。

本計畫解析法分析將以前期針對淺層滑動所發展之無限邊坡極限平衡與二維邊坡因降雨入滲引致破壞之數值模式，進一步考慮降雨引致之地下水水力反應，考慮滑動面於飽和區，進行土層有效應力分析，發展可分析深層滑動潛勢場址水力力學耦合反應之技術，評估其滑動面、滑動發展歷時及水力反應，作為土層監測量測物理量與預警模式之依據。選定場址為阿里山公路五彎仔路段，分析所需之材料參數由相關文獻建議值。

本年度計畫工作項目尚包括精進運研所現有淺層滑動無線監測模組及持續現地測試，此模組採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表變形及土中分層含水量之監測模組，形成分布式表層土壤感測網路。本年度主要精進項目包括電力供應方式、無線傳輸網路改善、量測資料顯示及系統簡化，現地測試則包括耐候性、靈敏度、模式驗證等。利用此模組之架構，加入降雨引致深層滑動之土層物理量，考慮之量測量包括地表傾斜、降雨強度、入滲速率、地下水壓等，研發適用於土壤邊坡深層滑動且具低成本易安裝特點之無線監測模組。

1.3 研究內容與項目

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

1. 針對運研所所已架設之公路土壤邊坡淺層崩塌監測無線感測網路模組 2 處場址，持續進行監測與現地測試，並精進現有模組。
2. 進行深層滑動土層地層材料力學試驗，並以前期監測成果檢核進行傳統極限平衡及有效應力數值分析反算與驗證。
3. 發展具深層滑動潛勢場址水力力學耦合解析法分析技術，撰寫分析軟體並進行資料擷取及分析測試。
4. 研發適用於土壤邊坡深層滑動之無線監測模組，並於選定場址進行監測模組原型測試。

依據計畫規劃，針對本年度研究之內容與項目說明如下：

1. 現有場址持續觀測與精進：目前運研所已建置甲仙攔河堰通達道路邊坡及國道三號西湖休息區邊坡兩處淺層滑動觀測場址，此兩場址為本研究團隊建置，目前均正常運作，後續將持續觀測且提供分析模式測試驗證。而為使系統能穩定運作且資料更易於整合，目前規畫改善現有模組間通訊、電源及遠端資料擷取與顯示介面，以利於後續推廣。
2. 發展具深層滑動潛勢場址水力力學耦合解析法分析技術：以前期針對淺層滑動所發展之無限邊坡極限平衡及二維邊坡變形與穩定分析，將其延伸應用於降雨引致之地下水流況模擬，結合飽和土壤力學理論，分析滑動面位於飽和土層之深層滑動。
3. 土壤邊坡深層滑動無線監測模組研發：以運研所現有低成本易安裝之無線監測模組為基礎，依據深層滑動潛水力力學耦合分析成

果，增加感測模組，作為深層滑動監測與預警模式之即時觀測值，並於選定場址進行監測模組原型測試。

1.4 預期成果、效益及應用

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

預期成果：

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

預期效應與應用：

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

第二章 研究方法及進行步驟

2.1 研究方法

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

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

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

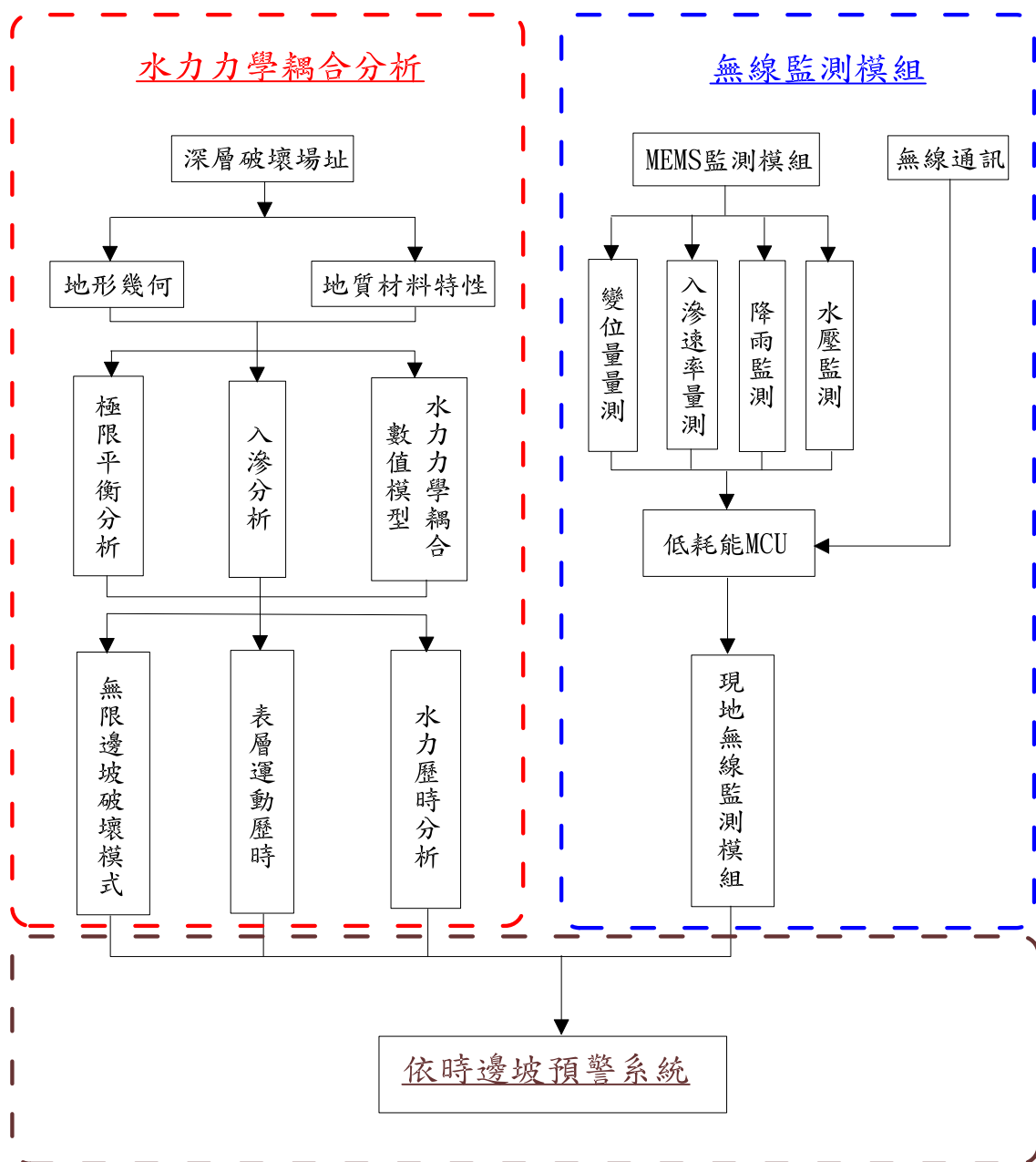


圖 2.1 依時邊坡預警系統架構圖

準確度有賴於入滲速率及土壤抗剪強度推估可靠度。臨界破壞深度與破壞包絡線分析無法推估地表土層運動量，而地表特定位置之運動量推估有賴於複雜之數值模擬，本研究將以假設合理之邊界與初始條件，進行考慮入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果即時更

新土壤有效應力及土壤勁度與強度，進行二維土層時域有效應力分析，以推估滑動土體於地表位移與傾角歷時。

由於進行解析法邊坡穩定分析輸入參數具有不確定性，因此須以現地監測結果反饋進行模式修正與調整，鑒於以雨量監測準確度不佳，現有邊坡土層監測系統佈設費時且維護不易，因此本計畫自行研發以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表運動量、土壤含水量、入滲速率及孔隙水壓力之監測模組，形成分佈式表層土壤無線感測網路，入滲速率由不同深度之土中含水量變化，利用入滲引起含水量增加而改變土壤介電係數之特性，量測入滲速率與含水量剖面，所量測之入滲速率將用於考慮入滲之極限平衡分析，以推估其可能破壞時間，降雨前基質吸力將由含水量結果及土壤特徵曲線推估，並作為數值分析之初始含水量依據。由水力力學耦合分析，可預測地表監測點之地表傾角與位移歷時，由監測之地表傾角與位移量可及時修正數值分析結果，並據以推估滑動之可能時間，作為依時預警之依據。

本年度研究以簡化之無限邊坡模型進行分析，建立水力力學耦合分析架構，並進行簡易表層邊坡無線監測模組之研發測試，並選定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。適宜場址須具備潛在深層滑動之條件，其場址常具有坡角小於土壤有效摩擦角、土層厚度大於數公尺且現場地下水系發達，而為進行分析模式驗證，以具有完整現地調查資料與觀測值之場址為佳，本年度選定阿里山公路五彎仔段，此處港研中心曾進行現地監測站安裝，有詳細地型地形幾何資料，且研究團隊於前期進行科技部整合型計畫期間，有地質材料組成及力學與水文特性參數資料，可用於本研究中據以進行極限平衡分析，檢核其破壞模式是否符合深層滑動特徵，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與(Collins and Znidarcic, 2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測可能破壞之時間，另以現地資料建立水力力學耦合數值分析模型，藉由更新土壤有效應力彈性模數及強度變化，預測不

同位置地表位移量分布及位移時間歷時，作為無線監測模組佈設及由地表運動量或水力反應監測推算之破壞時間。

針對深層滑動機制分析，本年度之主要目標為完成水力力學耦合之邊坡極限平衡與數值模擬，初期關鍵為選定適合之研究場址，本年度以阿里山五彎仔為場址，相關幾何模型與地質參數參考文獻建議值，依選定場址之現地幾何與地質材料性質，進行二維水力力學耦合分析，並將所發展之深層滑動無線感測模組原型佈置於現地進行現地測試。

2.2 國內外有關本計畫之研究情況

2.2.1 解析法邊坡分析

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

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

擴散(propagation)三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。Cascini et al. (2010)使用現地應力路徑 (field stress path) 的框架，將邊坡破壞後的行為分成地滑 (slide)，地滑變流動 (slide to flow) 與流動型地滑 (flowslide) 如圖 2.2 所示。其中之剪應力 q 定義為：

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

而平均有效應力 p' 定義為：

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

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

Huang et al. (2012) 以光纖改測技術進行阿里山公路五彎仔段分層水壓即時量測，其於 2009 年莫拉克颱風期間之觀測結果如圖 2.3 所示，分層地下水位因強降雨顯著增加，其應力路徑隨孔隙水壓增加而接近土壤有效摩擦角 40° 之無限邊坡破壞包絡線。

Collins and Znidarcic (2004) 提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，所以降雨對邊坡穩定在不考慮邊界毛細現象之情況下沒有影響，但對非飽和細顆粒土壤邊坡而言，滲透對邊坡穩定有顯著的影響，孔隙水壓在邊坡內之分部會隨著水向下入滲至土壤內而改變。因此在分析非飽和邊坡穩定性時，須將非飽和土壤之剪力強度和基質吸力影響及滲流力列入考慮。

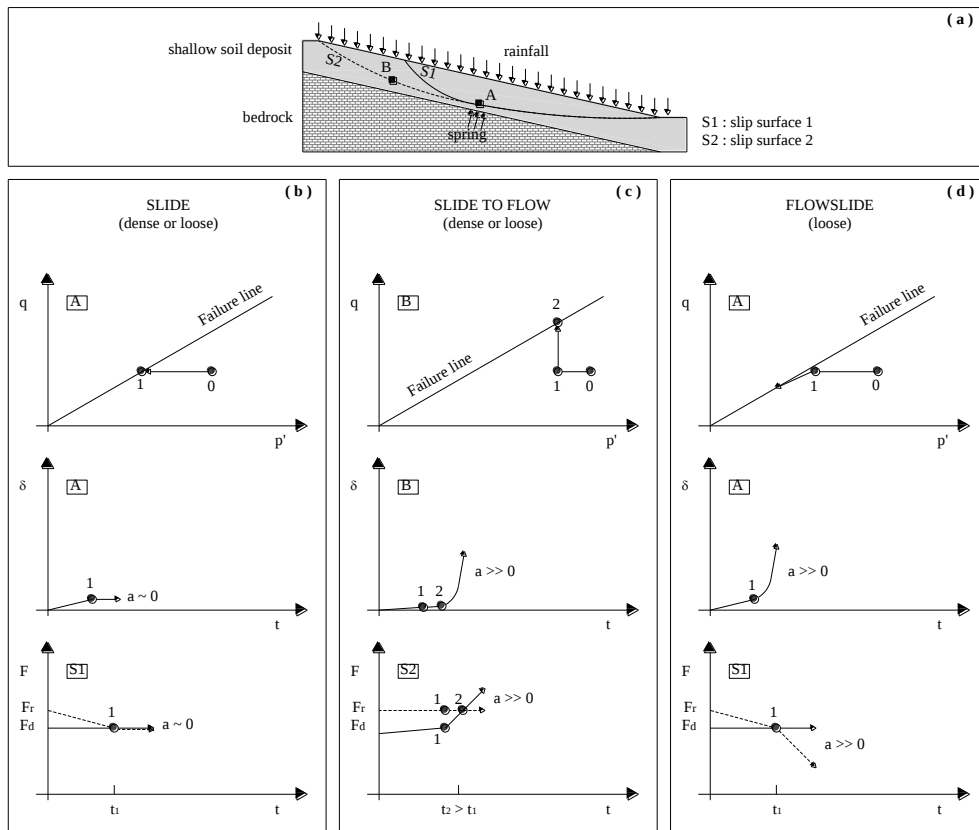


圖 2.2 由有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)

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)，可以得到無限邊坡破壞之臨界深度 d_{cr} ，考慮細顆粒土壤滲流力發展及土層內之壓力水頭變化，可定義出土層壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係之穩定包絡線(圖 2.4)，此可做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。對於基質吸力降不顯著之粗顆粒土壤，其入滲行為(如圖 2.5 所示)與細顆粒顯著不同，此因其非飽和與飽和狀態下滲透係數差異不大，若邊坡坡角(β)小於土壤有效摩擦角，則其滑動發生於正孔隙水壓處(圖 2.5 之 D 點)，此為深層滑動之類型之一，無限邊坡深層滑動將以相近之概念進行推導。

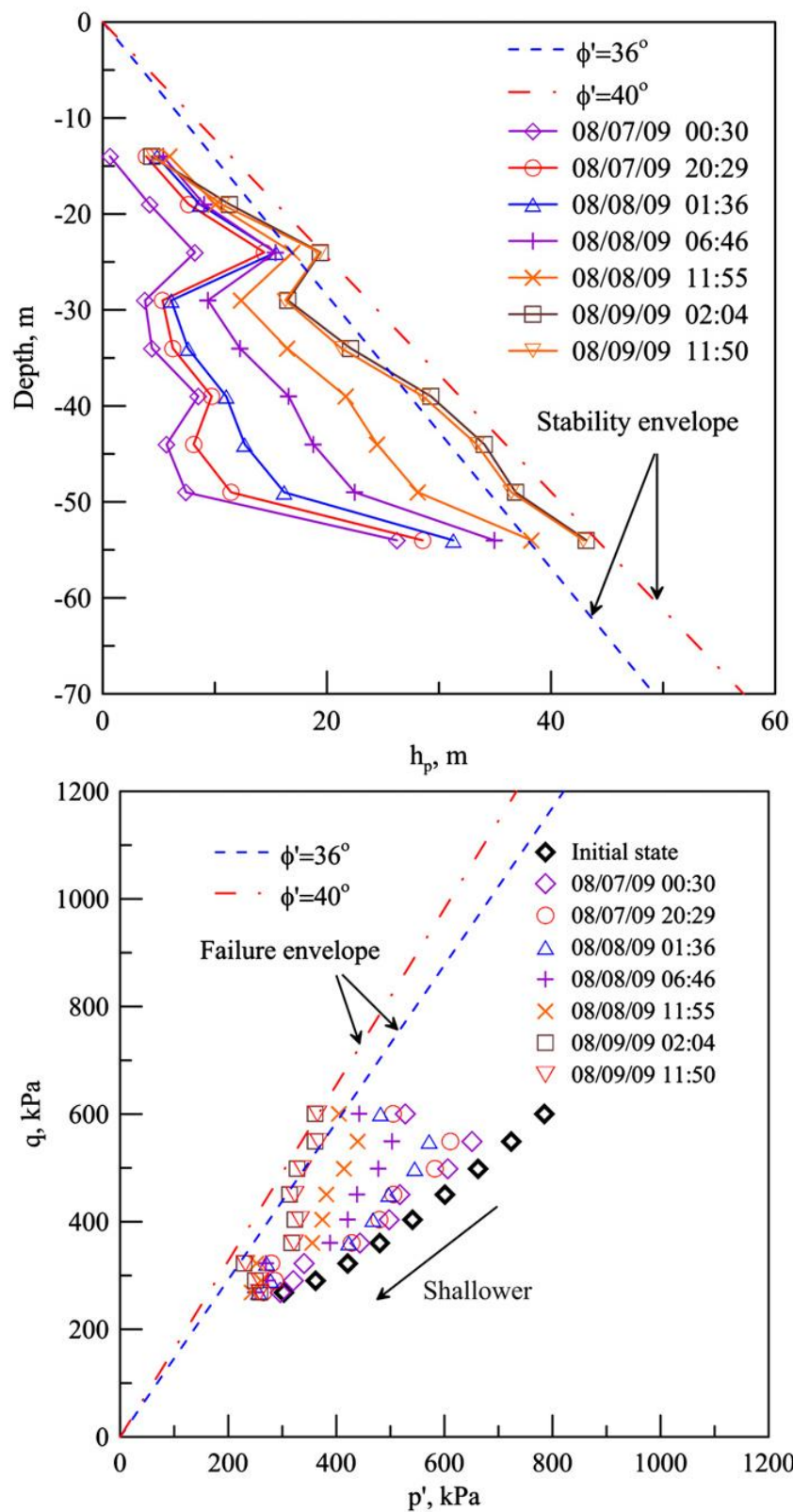


圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)

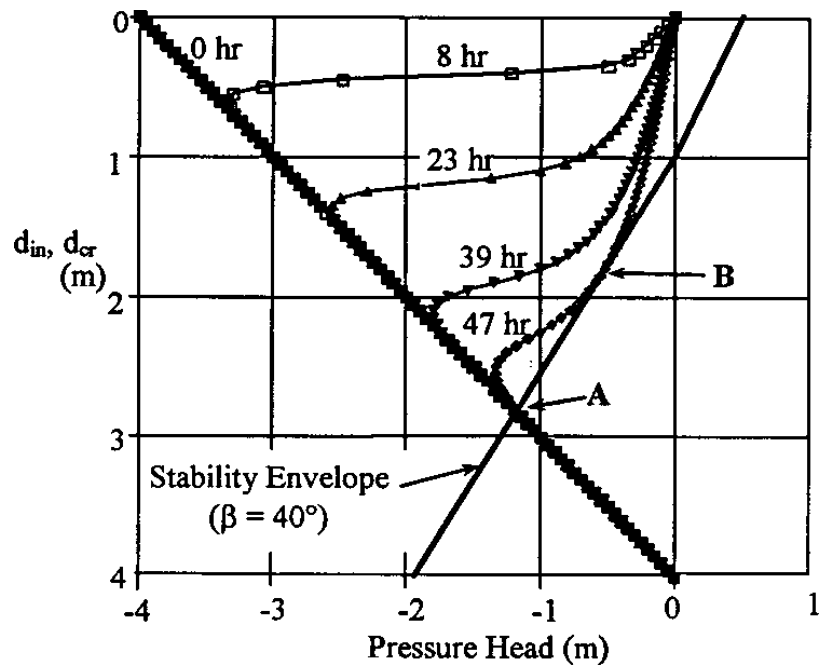


圖 2.4 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

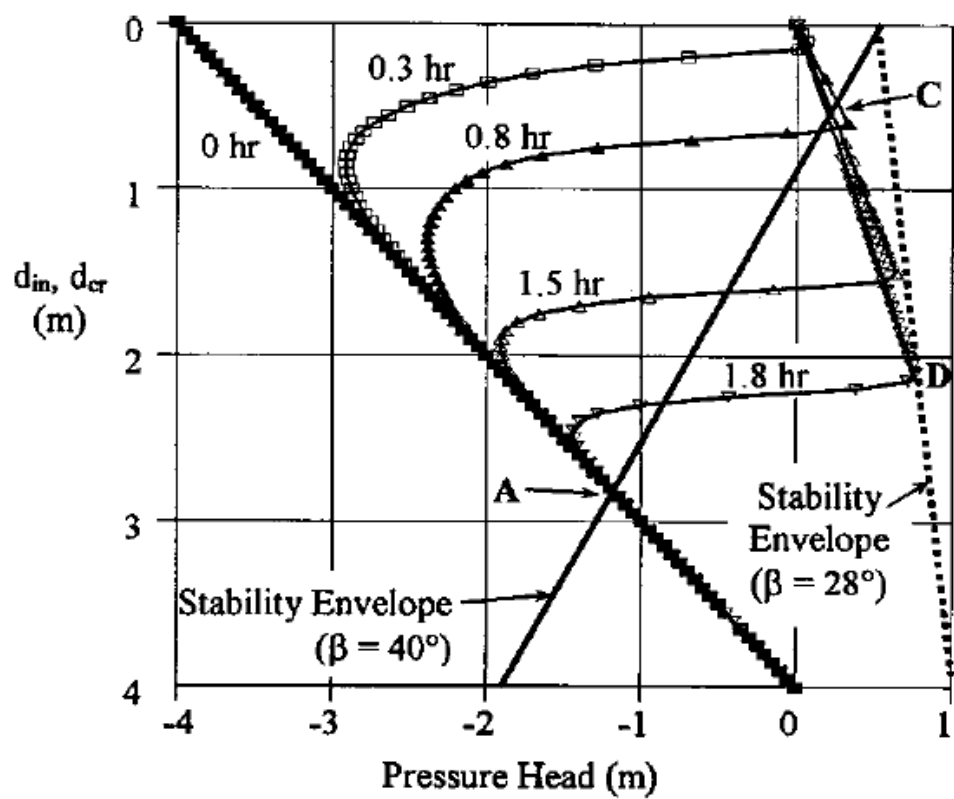


圖 2.5 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

對於無法滿足無限邊坡條件之案例，則需進行考慮飽和與非飽和土壤特性之二維水力力學耦合穩定分析，進行滲流分析時同時進行力學分析，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，進行非線性大變形模擬，且力學計算中考慮土壤基質吸力改變對有效應力之影響，更新土壤彈性參數及強度，適切模擬邊坡土層因降雨引致之破壞過程。

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，藉由無線網路可將地表運動與含水量變化傳送至監控中心，配合邊坡破壞前會有一顯著轉動之特性，可進行必要之預警，此系統已布設於多個場址，為現今具有較多應用案例之系統，國內則有張達德等(2013)以傾度儀結合 Zigbee 無線傳輸，於國道三號 3.1K 進行無線網路邊坡預警監測，但其系統監測至破壞之時間不一，並無安裝位置之建議，對於非圓弧破壞其地表傾度並不顯著，且預警準則為經驗法則，缺乏嚴謹力學分析，仍有相當改善空間。

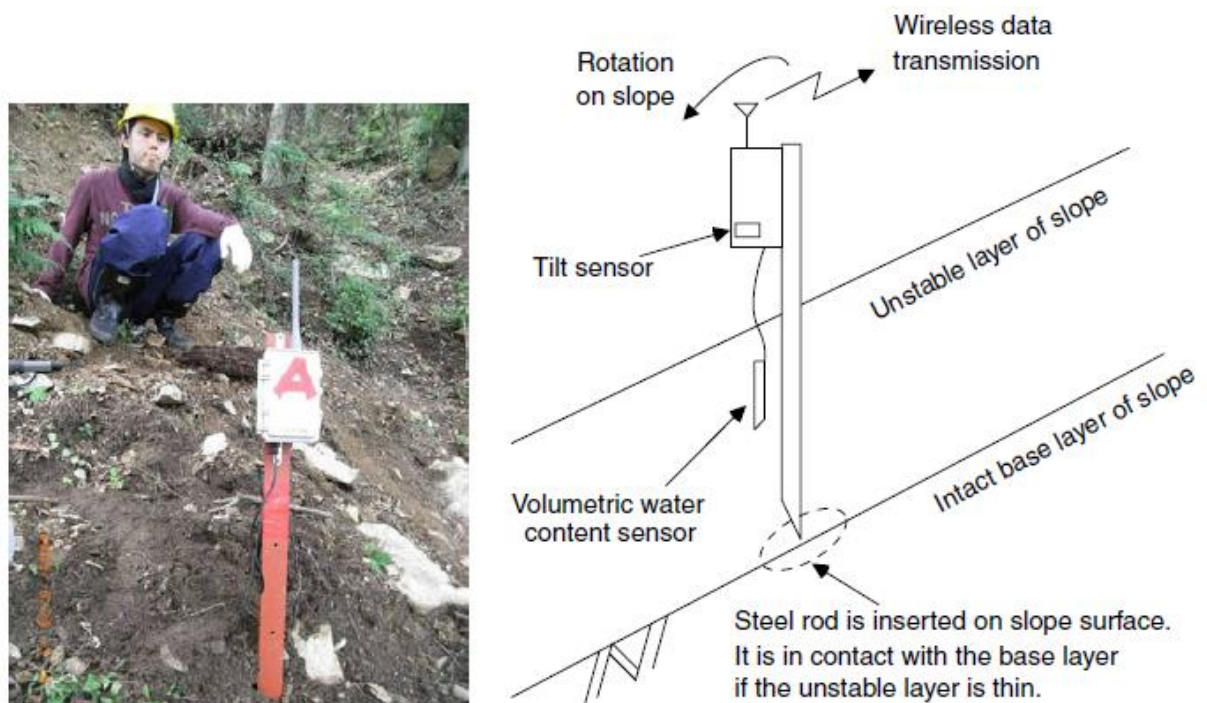


圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

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

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成資訊，即可反應現地邊坡的狀況，進

行監測現況了解，整合預測破壞模式即可發展為具有即時應變能力的通報系統。

分布式無線感測器網路(Wireless Sensor Networks, WSN)是由一到數個無線資料收集器以及為數眾多的感測器(sensors)所構成的網路系統(Chong and Kumar, 2003)，元件之間的溝通採用無線的通訊方式，且具備低成本、低耗電、體積小、容易佈建，並具有感應環境裝置，可程式化、可動態組成等特性，已開發於土木工程之應用如 Senera 之橋梁監測系統。現今物聯網(Internet to Thing, IoT)為無線感測加上控制之功能，其中無線感測為重要之部分。為充分利用台灣於高科技產業之優勢，陳志芳等(2015)採用廣為應用之微機電系統(MEMS)感測器，發展可監測地表傾角(tilting)、淺層土壤濕度(soil moisture)以推估土壤基質吸力 (matric suction)之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分布式無線感測器網路，由於其可大量生產，可大幅降低成本，長期目標為建立模組化可拋棄式 WSN，以利於推廣。

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

2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警

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

2.3.1 土壤含水量特徵曲線

土壤含水量特徵曲線(soil-water characteristic curve, SWCC)為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，含水量通常以體積含水量(θ)表示，亦可用重量含水量(ω)或飽和度(S_r)表示，典型的土壤含水量特徵曲線如圖 2.7，土水特徵曲線之斜率可視為土壤的儲水能力(storage capacity)。非飽和土壤因基質吸力(matric suction, $u_a - u_w$)改變，在吸水(wetting)及排水(drying)的過程中會產生遲滯效應，即在相同基質吸力下吸水曲線(wetting curve)上的含水量會低於排水曲線(drying curve)上的含水量，原因是排水後土壤顆粒排列變緊密。

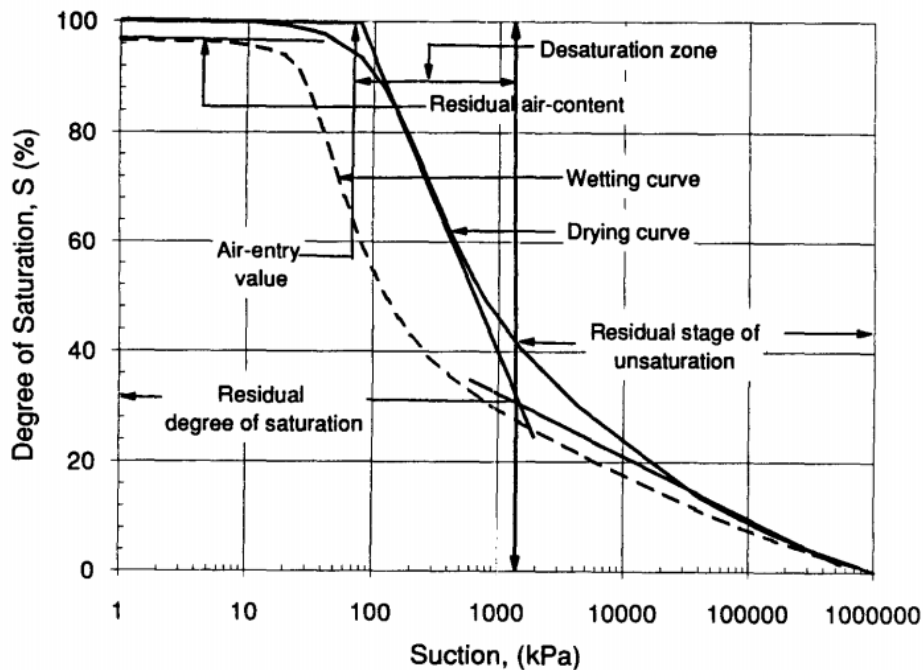


圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)

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

土壤中，滲透係數亦會受到基質吸力的影響，如圖 2.8 所示。

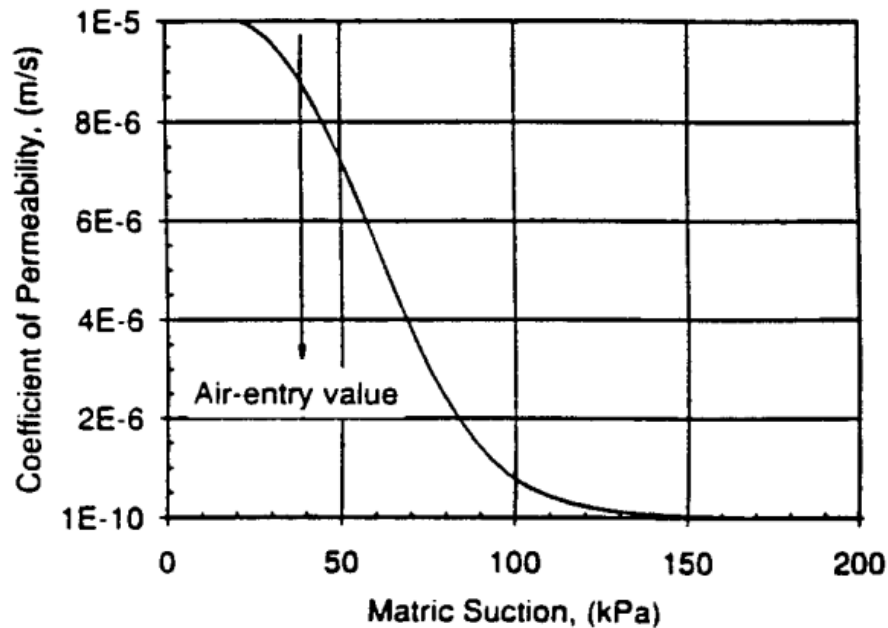


圖 2.8 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995)

2.3.2 非飽和滲流分析

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

假設水在非飽和土中的流動滿足達西定律，但和飽和土中滲流的不同為非飽和土之滲透係數為土壤含水量的函數，稱為基質吸力-滲透係數曲線，圖 2.9 為典型土壤之非飽和土壤特性曲線，非飽和滲流中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動之控制方程式可依質量守衡的原理來推導建立，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的地下水流控制方程式，Freeze and Cherry(1979) 假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在均質、均向土壤內之三維流體流動之控制方程式可以 Richards equation 表示，以總水頭的形式表示為：

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

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

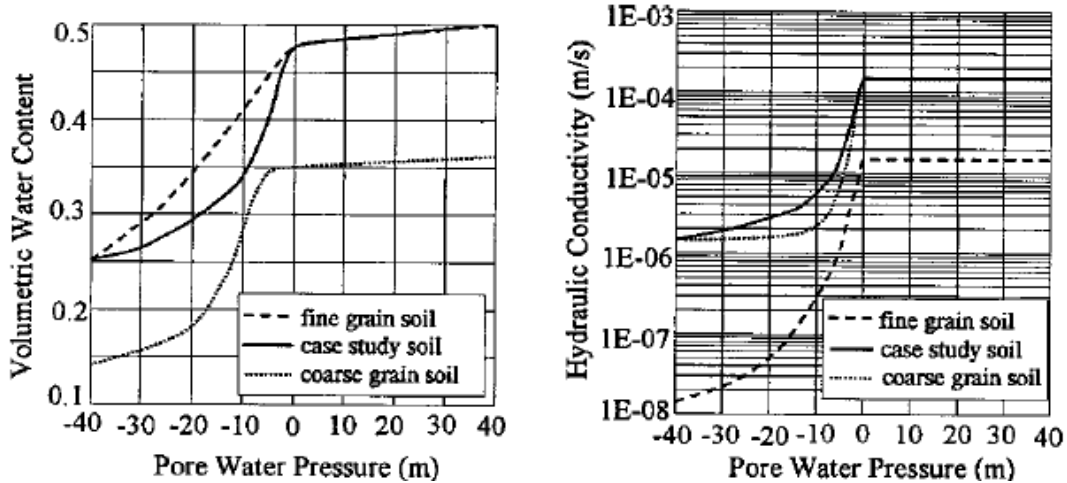


圖 2.9 典型土壤非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

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，分析中地表邊界並非以入滲率控制，而是以壓力水頭控制。滲流使非飽和之土柱隨時間飽和，使細顆粒土壤的基質吸力減少，並使其剪力強度下降。

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

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

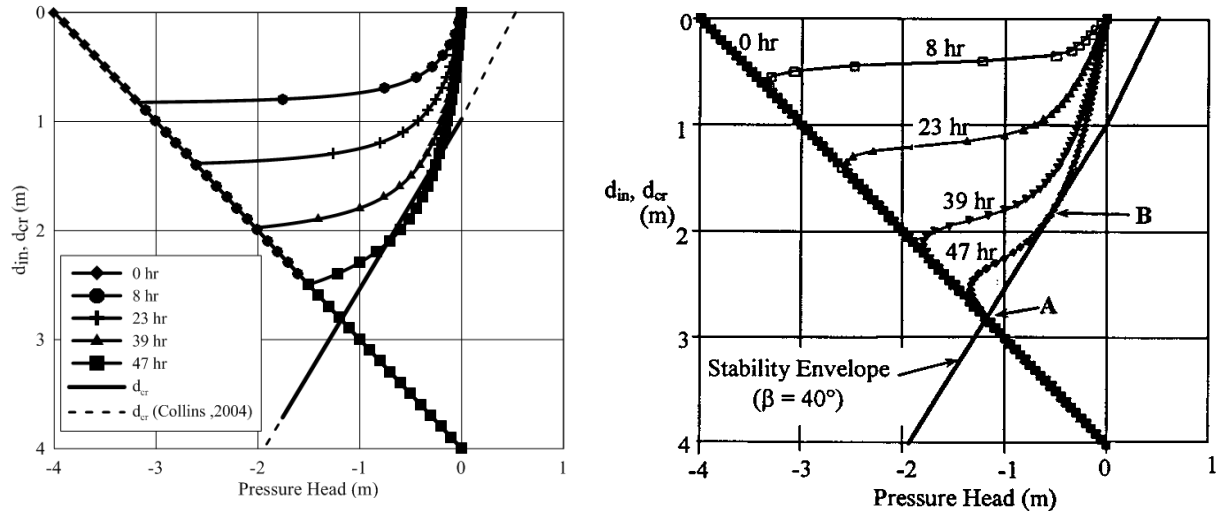
其中 z 為深度(地表為零且向下為正)； h_p =壓力水頭； k =土壤滲透係數(為壓力水頭之函數)，可由土水特性曲線決定； M =孔隙水含容能力。

以 Crank-Nicolson 有限差分法，以求解深度之 $1/400$ 為 Δz ， Δt 則以

Hillset al. 所建議的 Δt 限制式， $\Delta t \leq \Delta z / |V|$ ， $V = Q / (\theta(0, t) - \theta_i)$ ，即數值計算之可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可將式 2.4 式改寫為差分形式：

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

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



(a) 1D 有限差分

(b) 2D 有限元素 (Collins and Znidarcic, 2004)

圖 2.10 非飽和滲流分析結果比較

2.3.3 淺層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

本研究參考 Collins and Znidarcic (2004) 降雨下之無限邊坡穩定分析概念，推導淺層無限邊坡之水力力學耦合穩定分析，考慮一坡角為 β 之無限長邊坡，如圖 2.11，地下水位面位於 d_w 處， W 為自重， N 及 S 分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力， d_{in} 為入滲深度，假設邊坡破壞會發生在臨界深度 d_{cr} 處。

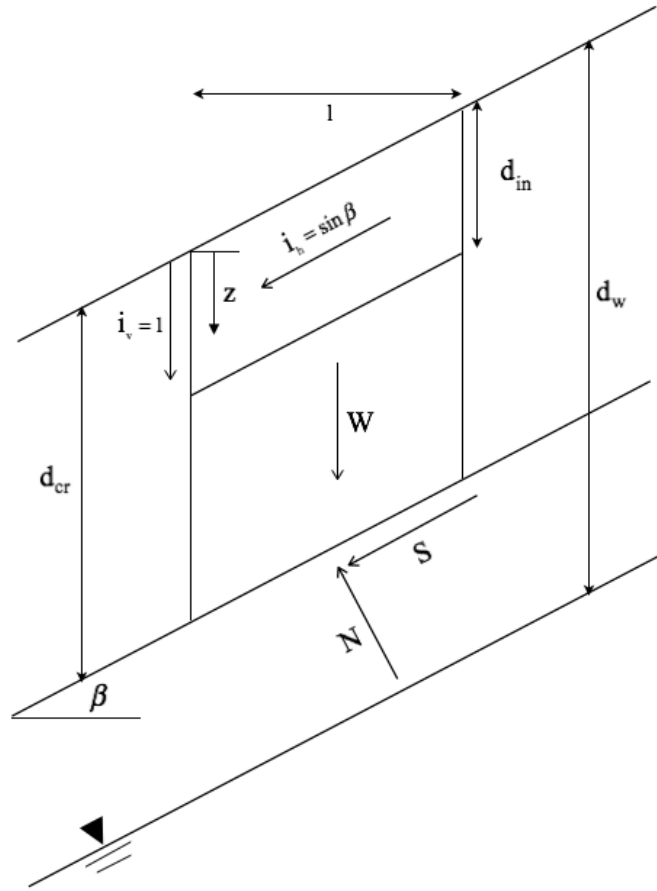


圖 2.11 淺層無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

切片內飽和部分($z \leq d_{in}$)以有效應力進行分析，土壤單位重為飽和單位重 γ_s ，在土壤飽和部分會產生滲流，平行向滲流平行坡面，水力梯度為 $i_h = \sin \beta$ ，垂直向滲流由入滲造成，水力梯度 $i_v = 1$ ；切片內非飽和部分($z > d_{in}$)以總應力分析，土壤單位重為總體單位重 γ_t ，其基質吸力之大小隨深度改變，即 $h_c = d_w - z$ 。

自重 W 可分解為垂直坡面 W_N 和平行坡面 W_S 兩個分量：

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

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

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

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

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

水平滲流力 S_h 可以式(2.8)表示：

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

故滑動面上之正向力 N 及剪力 S 可以式(2.9a)、(2.9b)表示：

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

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

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

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

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

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

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

可推導臨界滑動深度 d_{cr} 為：

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

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

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

考慮淺層滑動情形，不考慮水平滲流的影響並忽略入滲對土壤單位重的改變，可將式(2.10a)、(2.10b)改寫為：

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

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

所對應之安全係數(FS)為：

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

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

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

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

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

式(2.17)中基質吸力隨深度的分布 $h_c(z)$ 可由 1-D 滲流分析解得，並代入式(2.17)進行迭代計算得到 d_{cr} ，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

式(2.13)中若忽略基質吸力、基質吸力摩擦角與垂直滲流影響，將入滲轉換為孔隙水壓力，則其破壞模式即為深層滑動，相同架構可建立具依時特性之滑動機制，此部分將於研究初期推導完成，並以元素試驗加以驗證。

2.3.4 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

傳統無限邊坡深層滑動分析，以圖 2.12 所示其安全係數計算為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \left(\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w r_u}{\gamma_{sat}} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.18)$$

式中 $r_u = \frac{h_w}{d_{cr}}$ 為孔隙水壓比， h_w 為地下水位上升之總水頭高，包含靜水壓力與滲流引致之孔隙水壓。

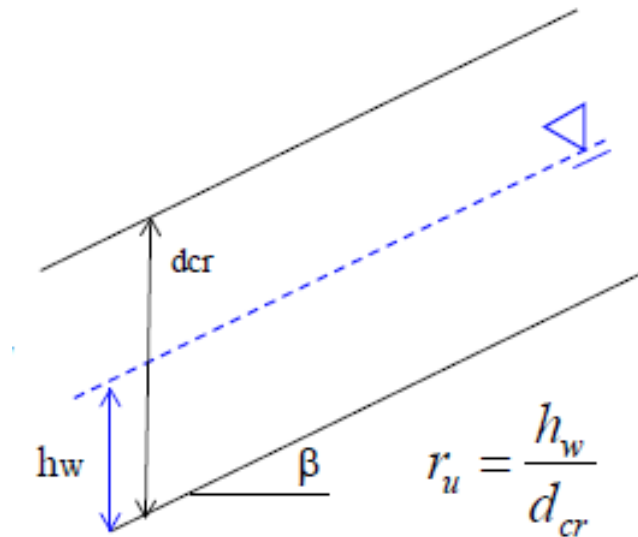


圖 2.12 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖

不考慮平行滲流時($r_u=1.0$)，則式(2.18)可簡化為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma \tan \beta} \quad (2.19)$$

式中 γ' 為滑動面土壤浸水單位重。考慮平行滲流時，則 r_u 大於 1，造成安全係數降低直至破壞，其應力變化如圖 2.13 所示(Anderson and Sitar, 1995)。

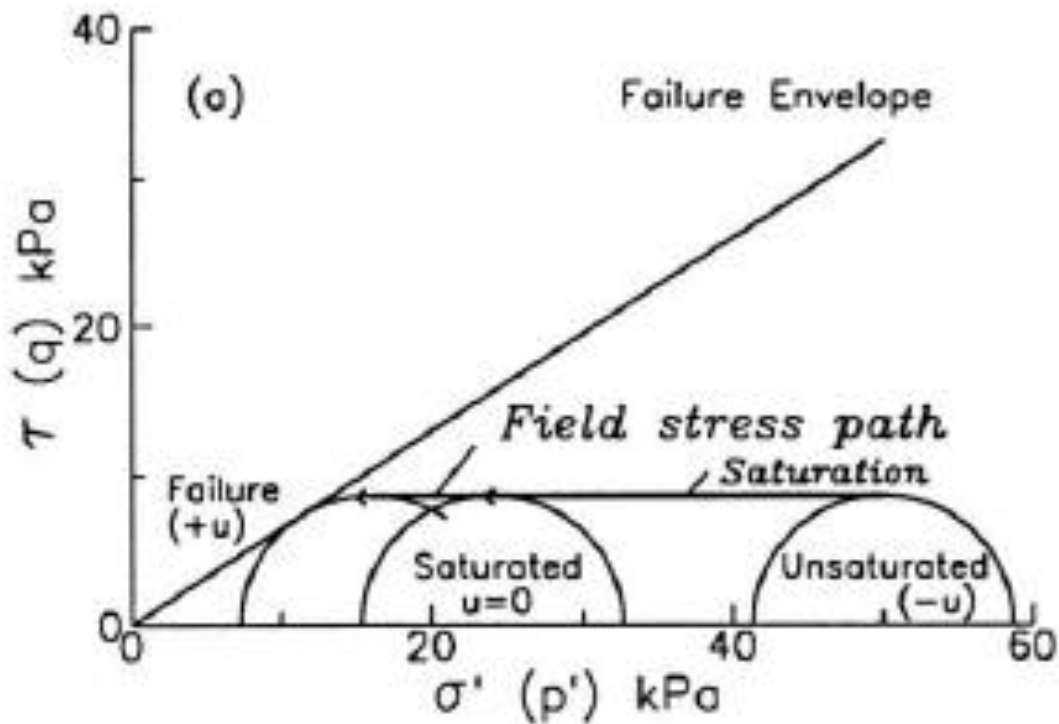


圖 2.13 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995)

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

2.3.5 二維水力力學耦合數值分析

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

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

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

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w(u_a - u_w) \tan \phi + c' \quad (2.20)$$

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

$$P_c(S_w) = P_0(S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \quad (2.21)$$

式中 a 為土壤常數， S_e 為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (2.22)$$

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

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \quad (2.23)$$

式中 ρ_w 為水之密度， α 為土壤常數。

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

$$k_r = S_e \left[1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \quad (2.24)$$

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

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \quad (2.25)$$

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

以甲仙監測場址二維維水力力學耦合分析為例，該場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，以圖 2.14 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 2.15 所示，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，其值與深度相近，來源為靜水壓，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，ID05 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 2.16 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動，此可由 ID05 地表位移與傾角歷時(如圖 2.17 所示)與不同深度

達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，上邊坡 ID05 預測於持續降雨入滲下於 2.2×10^5 秒(約 2.54 日)產生滑動，且此時土層均達到飽和，且地表於 1.5×10^5 秒(約 1.6 日)前開始有顯著傾角變化，且傾角為先正(順時針)後負，此因滑動面由淺層轉為深層，深層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

2.3.6 邊坡依時預警架構

依時性邊坡預警系統可分為無限邊坡及二維水力力學分析，無限邊坡之依時預警以下列分析結果為例，若不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 2.18 所示，破壞發生於地表飽和後 42 小時，滑動面深度為 1.5m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果或 VG model 推估，在 0.75m 深度，以式 2.16 推估之破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.19 所示，由破壞時間(42 hr)往前推算可決定不同時間所對應之體積含水量，若以破壞前 24 小時為預警時間，則所對應之體積含水量為 0.22，可由現地於 0.75m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.19 推估。

而二維案例以甲仙場址上邊坡為例，由 vG model 可推估其體積含水量變化，深度 1.5m 處含水量歷時如圖 2.20 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，且地下水位位於土層底部，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但由地表傾度觀測結果(如圖 2.21 所示)，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，因此此類邊坡較適宜以地表傾角作為訂定依時預警之物理量。

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

之功能。

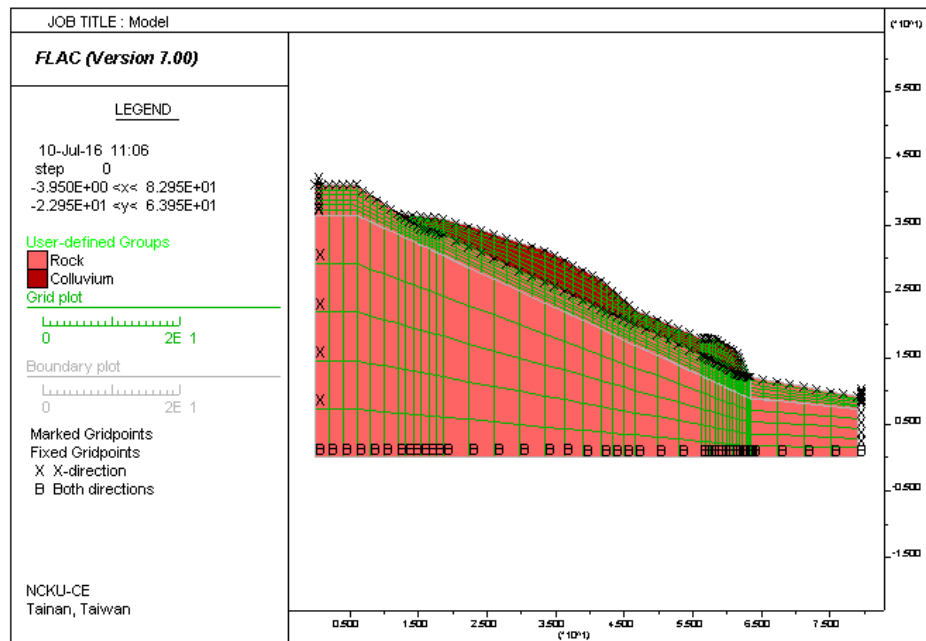


圖 2.14 數值分析模型



圖 2.15 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量

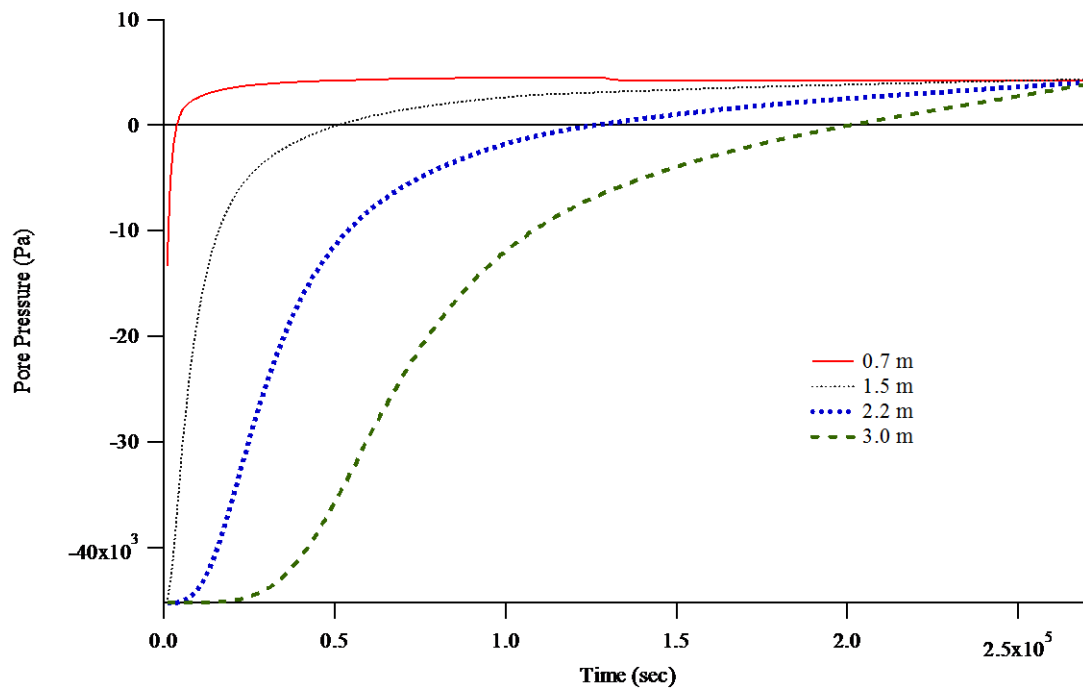


圖 2.16 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

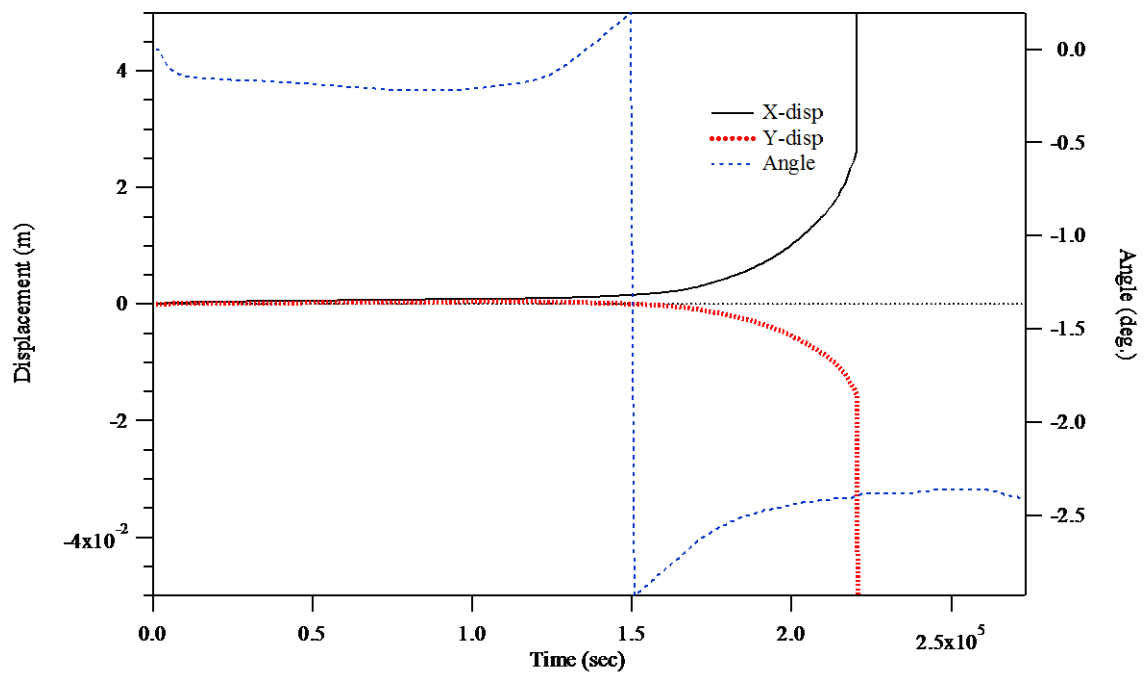


圖 2.17 ID05 位置預測地表運動歷時

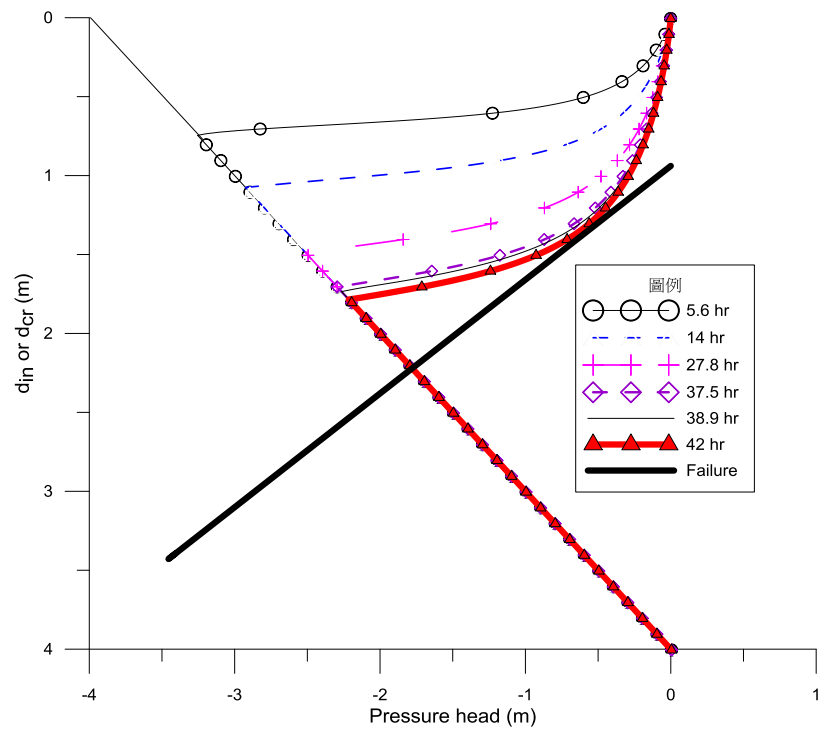


圖 2.18 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

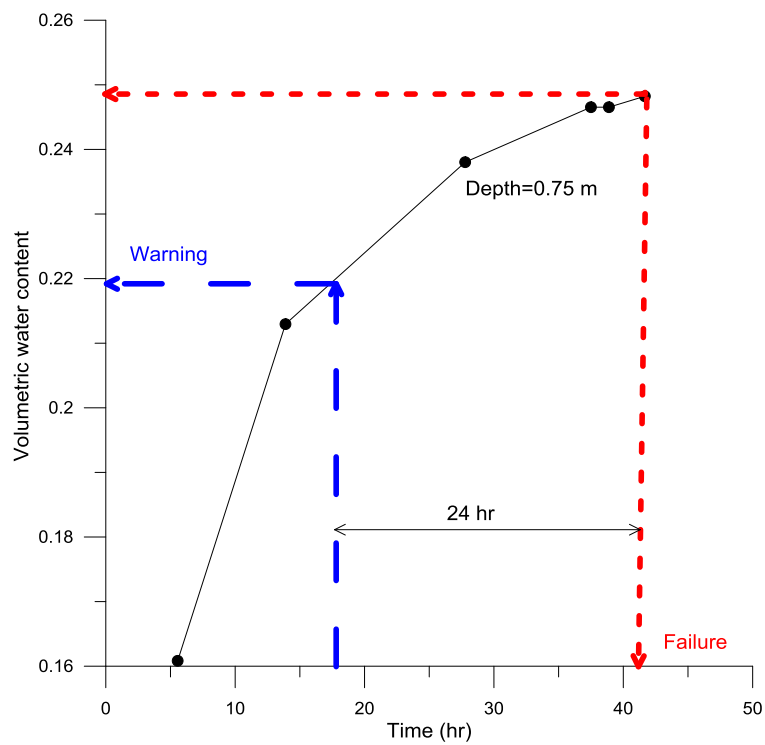


圖 2.19 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念

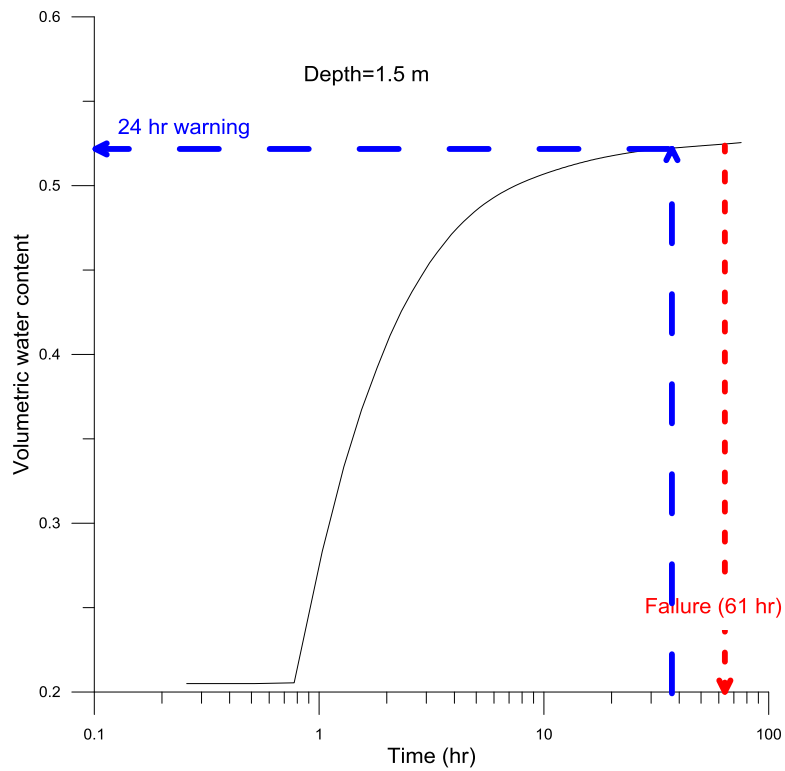


圖 2.20 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念

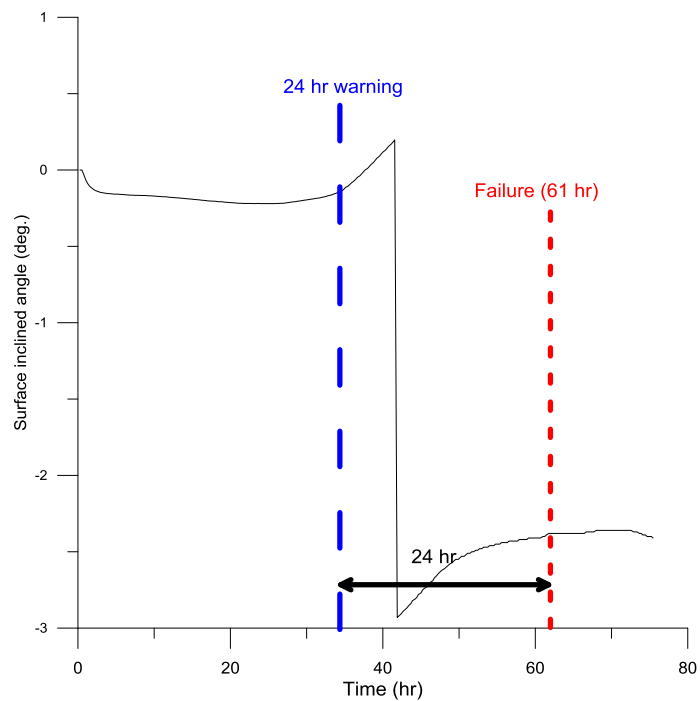


圖 2.21 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念

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

應用於深層滑動依時預警時須進行適度修正，針對一維無限邊坡深層滑動，其滑動面仍以極限平衡分析，但滑動面深度與時間則與滑動面所在孔隙水壓變化及入滲後飽和土層滲流力大小有關，式(2.18)中之平行滲流力像須加以考慮，即飽和土層中除靜水壓力外尚須考慮原有飽和土層滲流引致之超額孔隙水壓力之影響，基質吸力效應則可忽略不計。而二維分析則需假設孔隙水壓上升條件或是包含上游邊坡入滲至飽和土層之影響，相關入滲分析與非飽和入滲相同。

因孔隙水壓力與深層邊坡穩定具學理之關聯，因此連結孔隙水壓變化與降雨特徵為改善現有純以降雨為指標之預警之關鍵，相關方法包括：(1)進行集水區降雨入滲分析及(2)以長期觀測迴歸孔隙水壓與降雨參數(如降雨強度、累積降雨量、降雨分布及延時等)關聯性，本年度將以降雨入滲分析為主，但所發展之監測模組可提供長期監測，作為統計回歸之依據。

第三章 邊坡水力力學反應無線感測模組

本計畫目的之一為發展一土層監測模組，廣佈於具崩坍潛勢之邊坡表層，模組間以無線傳輸方式於場址形成區域監測網絡，並將各測站監測資料傳至伺服主機，由遠端人員對邊坡水文及運動行為進行預判。研究採用發展日臻成熟之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能，且可即時監測地表傾角與土壤分層含水量之土層監測模組，形成分佈式土層監測網路，做為日後發展邊坡滑動預警系統之雛形。

3.1 系統架構

無線土層監測系統係由微控制器結合各感測器以及無線傳輸模組，裝置於待測地點並持續透過無線傳輸將各感測器之量測資料送出。無線土層監測系統主要組成包括感測元件(sensor)、微控制器(MCU)及通訊單元，此三部分須以韌體進行整合，另外還包括附屬之外構、電源及接收端。本計畫以 Arduino 為監測端之微控制器，選擇不同感測元件，發展不同監測目的之感測模組，規劃有觀測降雨入滲之分層土壤水分計、地表傾角之高精度傾度儀(inclinometer)、開口豎井水位之壓力式液位計(liquid level sensor)等，並以可形成區域通訊網路之 Xbee 建立感測模組間及與接收端通訊，經由接收端連結現有 3G 通訊網路，達到遠端監測之功能。

系統架構示意圖如圖 3.1 所示，土層監測模組包含兩種型態，分別為客戶端以及伺服器端，由客戶端將量測之現地資訊發送給伺服器端，伺服器端統一收集各節點資料後，透過 WCDMA(3G)/GSM(2G)無線通訊模組將資訊上傳至遠端伺服器，各監測模組同時備有記錄卡備份現地資料，達到對邊坡即時、無線、自動化監測目的。

3.2 系統感測器

本研究主軸為研發一同時適用於非飽和與飽和土壤，用以監測因降雨造成淺層邊坡滑移之土層監測模組。在消費性電子產品大量使用下，微機電系統(Micro-Electro Mechanical-Systems, MEMS)感測器近來迅速發展，其具有體積微小、低耗電、低成本以及通訊介面簡易等優點，系統感測器之種類與功能如下：

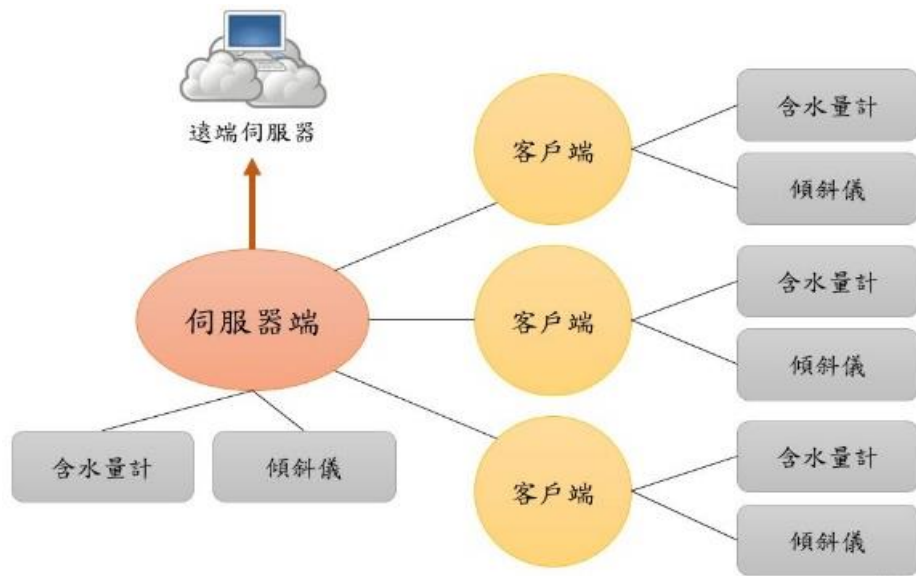


圖 3.1 系統架構示意圖

- (1) 電容式土壤水分計(Capacitance moisture sensor)：以非接觸式量測周圍環境電容變化，透過感測器內嵌之 ADC (Analog to Digital Converter)進行數位輸出，間接測得非飽和土壤之含水量。
- (2) 傾斜儀(Tiltmeter)：量測單軸向傾斜量變化，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，提供軸向上高精度、靈敏度之傾斜角量測。
- (3) 類比式壓力計(pressure sensor)：以電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位，以高精度 AD 模組與現有模組連結。

3.2.1 電容式土壤水份計

目前市售之研究級現地土壤水分計成本較高，且尺寸不易整合於

監測模組，因此本研究透過量測土壤介電係數，間接量測土壤含水量變化，以評估土壤內基質吸力。

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



圖 3.2 電容式土壤水份計

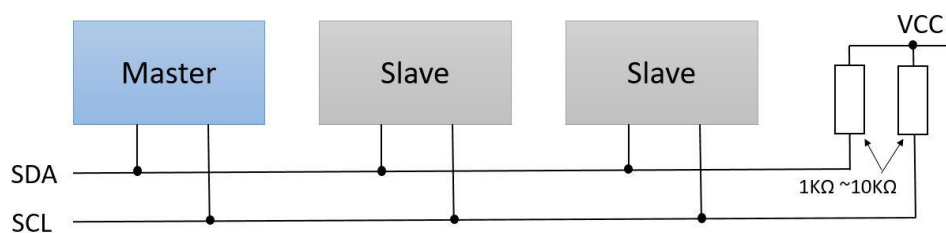


圖 3.3 I²C 連接方式

土壤水份計可進行分佈式地層含水量量測，透過多組電容感測裝設於探棒表面(圖 3.4)，即可同時監測探棒長度內土層不同深度之含水量，亦可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。圖 3.5 為 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖，土壤體積飽和度為在控制體

積含水量下，固定土水比例求得，圖中可見 Catnip 具備足夠之重複性與一致性。

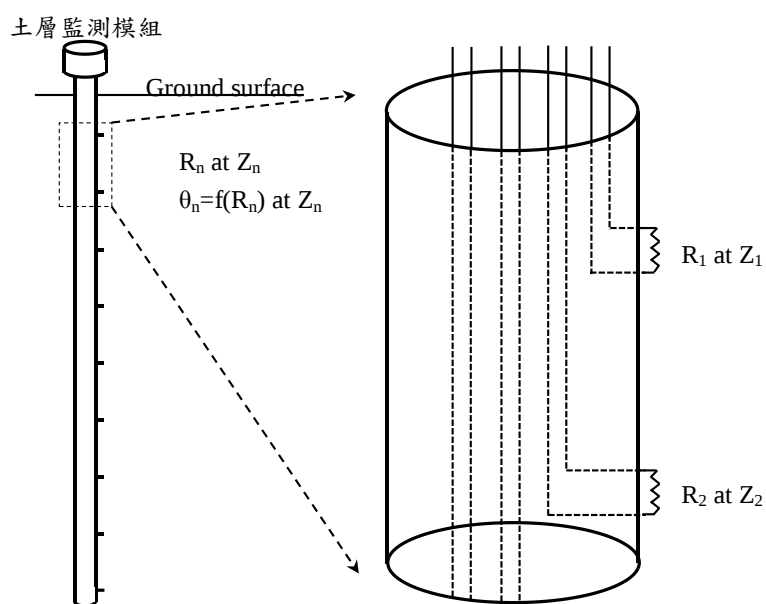


圖 3.4 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖

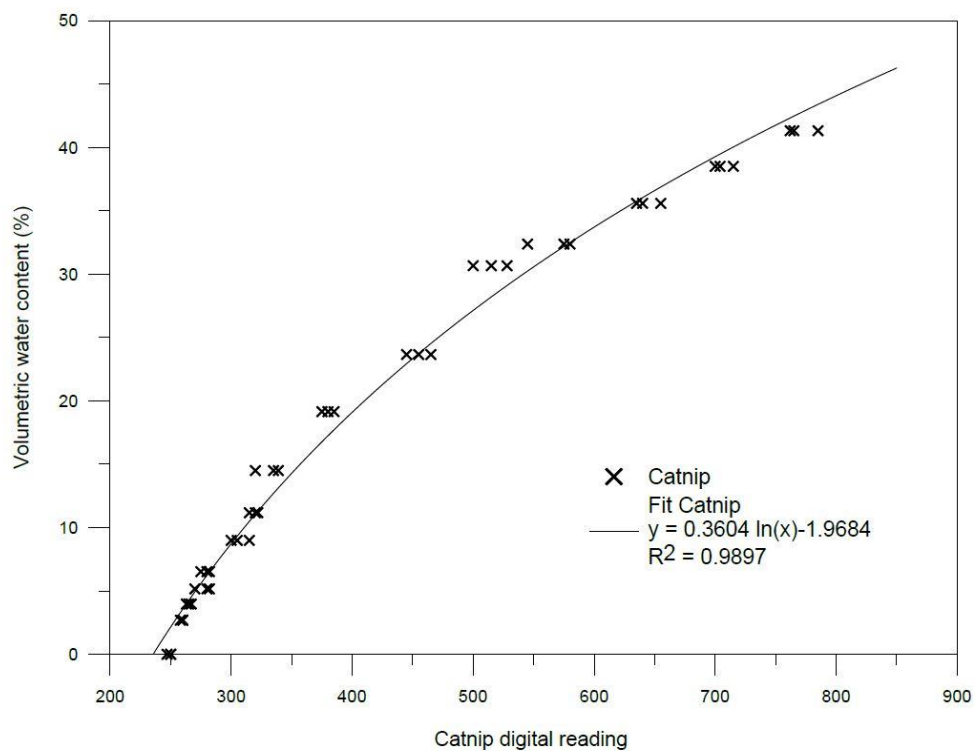


圖 3.5 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖

3.2.2 傾斜儀

本研究使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA103T(圖 3.6)，採用差動量測原理補償雜訊效應及誤差，具有極佳的耐震力，能在車輛、航空、建築機械以及手持裝置中提供穩定的量測功能。量測範圍 ± 15 度，解析度可達 0.001 度(10Hz BW 類比輸出)，支援比例類比電壓與序列周邊介面 (Serial Peripheral Interface Bus, SPI) 數位輸出，SPI 係透過 4 條連接線與微控制器連接，分別為資料輸入線 (MISO)、資料輸出線(MOSI)、序列時脈線(SCK)以及晶片選擇線(CS)，透過不同的晶片選擇線微控制器可同時運行多組 SPI 設備。

傾斜儀工作電壓 5V 與多數微控制器相同，可直接以 Arduino Uno 內嵌之穩壓晶片供給電源。將傾斜儀固定於土層監測模組上，長時間監測因土層滑移所造成之傾斜角改變量。SCA103T 透過 Arduino Uno 進行之類比電壓比例輸出標定(圖 3.7)，結果顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。



圖 3.6 SCA103T 傾斜儀

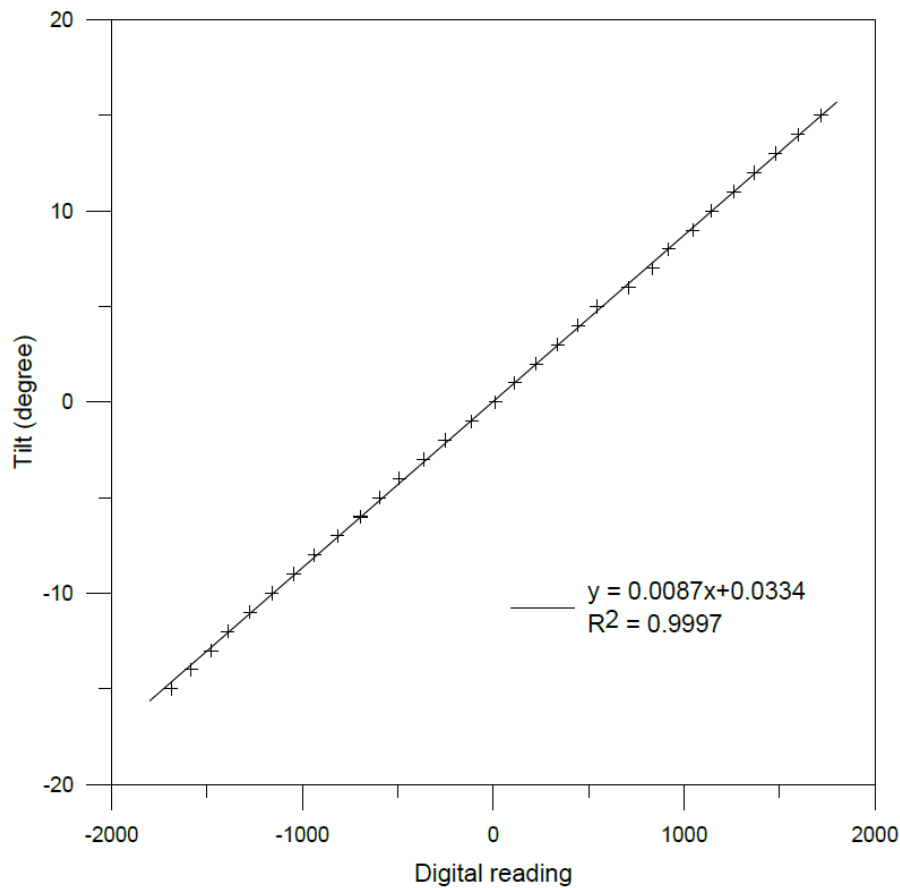


圖 3.7 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

3.2.3 類比式壓力計

本計畫為量測特定土層深度之孔隙水壓力，以量測開口豎井水位換算孔隙水壓力，豎井液位計採用沉水式液位計(如圖 3.8 所示)，其具備有以下幾點特色，包含(1) 內置微型信號處理電路，可進行遠程傳輸；(2) 抗干擾強，長期穩定性好；(3) 防結露，防雷擊設計；(4) 316 不銹鋼隔離膜片；(5) 堅固密封、高可靠、高精度等，綜合上述各項特點，故選擇該儀器作為本次計畫量測邊坡水位之感測器。此感測計為類比輸出，因此所發展之感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)，此計畫以 16bit 之 A/D converter 模組，以確保解析度達 1 cm 以下。



圖 3.8 沉水式液位計

3.3 系統組成

本研究採用之無線傳輸模組、數據紀錄模組、即時時間模組以及微機電感測器，皆配置於客製化電路板如圖 3.9 所示，用以直接與微控制器連接，並連同電源供應模組固定於防水耐侯之電子盒中，其下方連結分佈式土壤水份計。透過客戶端與伺服器端建構之無線網路，以及感測器擷取之數據，可進行區域即時邊坡監控，其系統運作示意圖如圖 3.10 所示。其中無線土層監測模組之部分包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)數據紀錄、(4)即時時間、(5)感測器，除感測器外各部分說明如下。

3.2.1 微處理器

微處理器(Micro Control Unit, MCU)，是一單晶片的微控制器，基於開放原始碼的開發平台，允許使用者自行發展符合特別需求的模組，建構簡易輸入/輸出的控制板，可進行類比/數位的量測或控制，整合 SPI、UART、I2C 與 GPIO 等通訊界面，可與不同之感測器/控制板進行連結，常見具備開放原始碼特性之開發版如基於 ATMEGA328P 晶片的 Arduino UNO、Mega，基於 Linux 的 Raspberry Pi 與基於 ESP32 晶片之 lolin、ESPUINO-32。

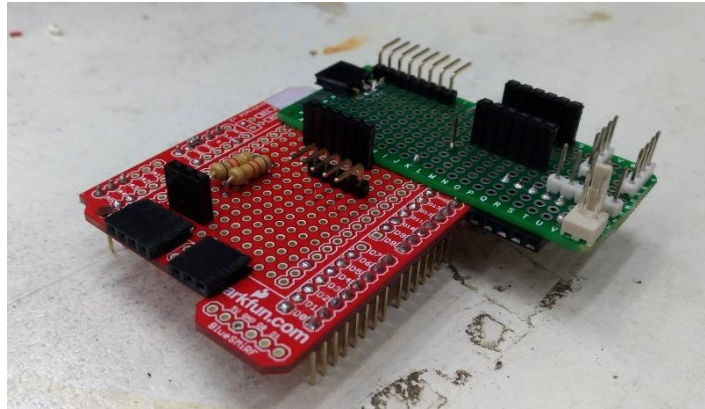


圖 3.9 客製化電路板

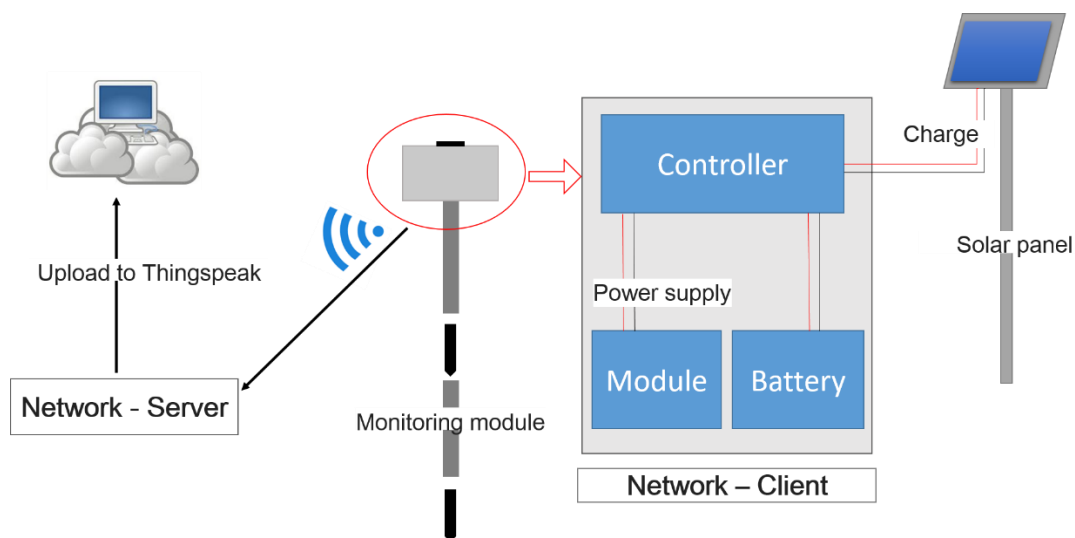


圖 3.10 系統運作示意圖

透過微控板可將程式邏輯帶入監測架構中，藉由簡易之迴圈、布林參數可將監測架構升級為智慧化感測，可由使用者自行設定擷取頻率或寫入特定觸發條件讓微控板進行特定動作，作為智慧型無線感測模組之基礎，MCU 之選擇可基於接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於智慧型無線模組中可比喻為大腦，進行所有電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作；。

Arduino 為一系列基於開放原始碼發展出來的 I/O 介面控制板，並使用 C 語言的開發環境，可與電腦透過 USB 介面連結，撰寫及燒錄韌

體以更改執行程序，使其開發門檻相對於市面上其他微電腦及微處理器降低許多，同時增加監測模組功能客製化的彈性。

本研究採用 Arduino Uno(圖 3.11)為系統控制器，其搭載 Atmega328 微處理器，內含 32 KB Flash memory、2 KB SRAM、1KB EEPROM，其時脈達 16 MHz，且具 14 支數位 I/O 接腳，包含一組 SPI 介面以及一組 I²C 介面，其中 I2C 支援單一匯流排最多可和 112 個節點通訊，足以滿足與模組間數位資料傳輸。另外備有 6 支類比訊號接腳，可透過微控制器內含之 ADC 將類比訊號轉換成數位訊號，亦可作為數位 I/O 接腳使用。Arduino UNO 長寬分別僅 69 mm 及 54 mm，符合土層監測模組於現地安裝的尺寸限制，且其工作電壓 5V 可直接與大多數電子元件連結，輸入電壓介於 7~12V 也適用多數市售充電式鋰電池。



圖 3.11 Arduino Uno

3.2.2 無線傳輸模組

本以模組化之無線傳輸平台，於監測場址建立網路傳輸陣列收集各監測站量測數據，並透過 WCDMA(3G)、GSM(2G)等無線通訊技術將現地監測資料上傳至遠端伺服器。由於邊坡滑移多發生於長延時及高強度降雨時，而水對電磁波的傳遞具有相當程度的屏蔽干擾，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，降低能源與成本門檻。

Digi International 公司製造的 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，以下條列 Xbee 之特點。

- (1) 傳輸距離長且穿透性佳：節點間戶外傳輸距離達 750 m，且於坡地植被中穿透性佳，使監測站的佈設極為彈性，涵蓋監測區域所需之監測站數量也得以最小化，大幅降低材料成本及安裝便利性。
- (2) 支援 ZigBee 通訊協定：ZigBee 是在 802.15.4 通訊協定的標準上，加入路由和聯網功能，其特點是連線簡易、低數據傳輸率(250Kbps)以及低功耗(傳輸時 63mW)，且可支援高達 65,000 個網路節點，適合家庭網路、工業自動化和醫療看護等應用，被視為物聯網最廣泛的協定之一。
- (3) 具有多種網路拓樸：拓樸(topology)即網路的構成方式(圖 3.12)，網路中各節點依據在網路中的定位分為協調器 (Coordinator)、路由器 (Router)、終端 (Endpoint) 三種，協調器於一個網路中僅有一個，用以管理網路的設置；路由器負責轉發節點訊號；終端則僅具有單向傳輸功能。依據不同的傳輸協議，xbee 支援如單點對多點 (Point-to-multipoint)、簇樹狀(Cluster)、網狀(Mesh) 等多種拓樸。每個節點可以擷取資料，或傳遞來自其他節點的資料。
- (4) DigiMesh 為 Digi International 開發之無線傳輸協議，其特色為全功能節點建構之網狀網路，網路中任一節點皆可擷取資料及傳遞資料，大幅增加建構無線網路的彈性，本計畫透過 xbee 建構之網路中，每一個土層監測模組都是一節點，當一個網路節點被移除或是斷訊，DigiMesh 傳輸協議另其周遭的節點可透過迂迴曲折的傳輸方式以接續到其目的地。以上可確保在少數監測站因任何因素斷訊下不致丟失監測數據，提升系統耐久性及可靠性。倘若監測範圍超過單點傳輸距離時，也可增加節點以中繼站之方案擴展監測區域。

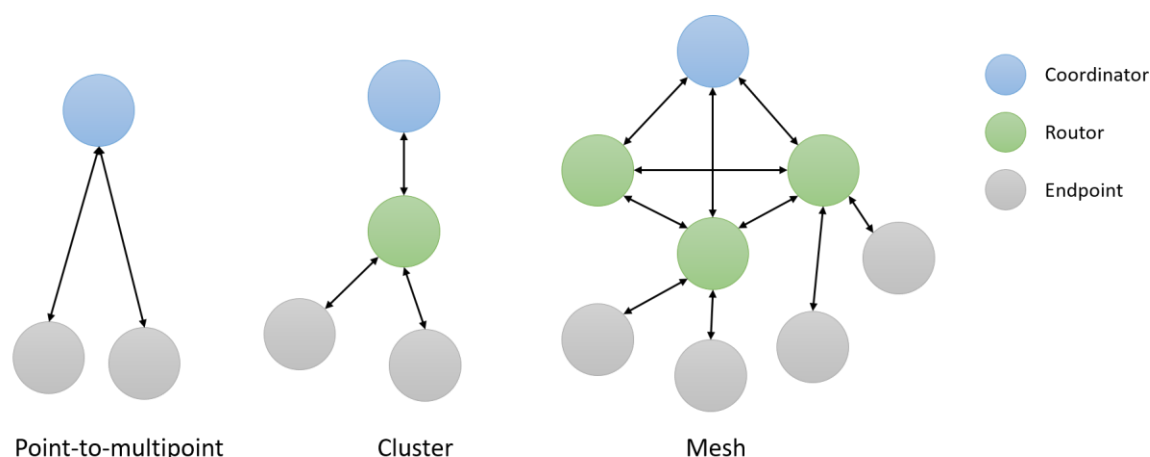


圖 3.12 拓模示意圖

DigiMesh 同時具有節點深度睡眠模式供選擇，配合模組之觸發條件達到電源優化的目的。透過 Digi International 提供之模組溝通介面 XCTU (圖 3.13)，可對 Xbee 進行傳輸協議、節點功能、網路參數、睡眠模式等設定。於網狀網路中，每個 XBee 裝置需要使以下兩個網路參數一致以彼此溝通：(1)頻道(Channel): XBee 模組之間的無線通訊頻道 (2)個人區域網路(Personal Area Network, PAN):同一頻道內之個人網路。

Xbee 產品不同型號各自擁有不同的天線類型和功能，較常見的為 s1 和 s2 系列，而 s1 系列支援 Digi International 研發之 DigiMesh 傳輸協議。和 MCU 之間可直接經由序列埠進行資料傳遞，提升其數據傳輸穩定性。另外 Xbee 之工作電壓為 3.3V，可直接藉由 Arduino Uno 內嵌之穩壓晶片供電運作，優化模組的空間配置及電源轉換效率。綜合上述考量，本研究以 Xbee S1 pro(圖 3.14)做為無線傳輸平台，藉此建立土層監測模組間的傳輸網路陣列。

物聯網的興起使各領域累積數據量急劇攀升，開發商也因應推出各種 IoT 資訊平台以滿足資料儲存與顯示的需求。Thingspeak 為 2010 年 IoBridge 開發用以整合物聯網應用之開源平台，除了開放程式碼供使用者作專案應用外，也開放一定量之資料讀寫功能讓使用者免費使用，並透過 API(Application Programming Interface)作資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，因此本研究以 Thingspeak 作為系統伺服器。

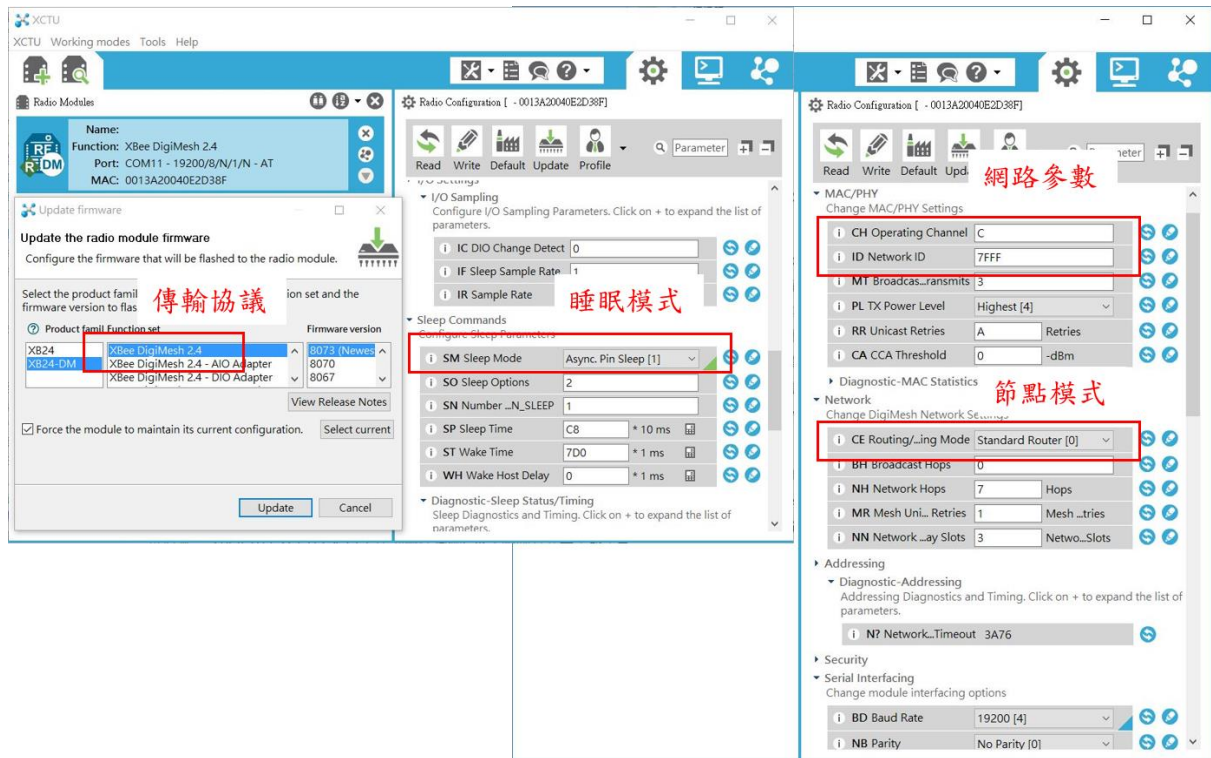


圖 3.13 XCTU 參數設定



圖 3.14 Xbee S1 pro

為將感測網路蒐集到之現地數據上傳至 Thingspeak，伺服器端之土層監測模組搭載 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組—SIM5320E(圖 3.15)，以連結場址資訊與後台人員。SIM5320E 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM(Subscriber Identity Module)卡作為用戶身分識別。SIM5320E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與

微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連線程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。



圖 3.15 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組 SIM5320E

3.2.3 即時時間模組

考量監測站間無線網路傳輸的發送及接收時間同步，土層監測模組之伺服器端與客戶端皆須運作於標準時間之下，以達成獨立計時及時間格式輸出的目的。

本研究採用之 DS3231(圖 3.16)為一低成本、高精度之即時時鐘模組(Real-time clock)，年誤差在一分鐘以內，符合土層監測模組時間精度的需求。其保存年、月、日、時、分、秒資訊，與微處理器透過 I2C 序列傳輸位址與時間資訊，並備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電仍可確保時間正常計讀。DS3232 提供兩個可設置的日曆鬧鐘和支援程式設計的方波輸出，搭配 Arduino Uno 進入休眠模式後可因外部訊號觸發而喚醒的機制，達到省電功能增加系統續航力。

3.2.4 數據紀錄模組

為提供監測資料儲存安全以提供數據分析的完整性，本研究使用 Deek Robot 設計生產之 SD 卡數據紀錄模組(圖 3.17)備份土層監測資料，在遠端資料因故無法順利上傳至伺服器時，仍可藉由備份檔案得知現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站節點編號、

土層分層溫度及含水量、傾斜角度與即時時間，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。

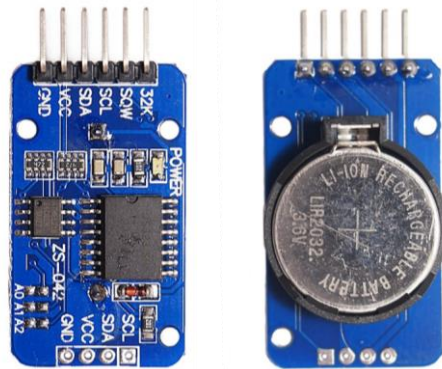


圖 3.16 即時時鐘模組 DS3231

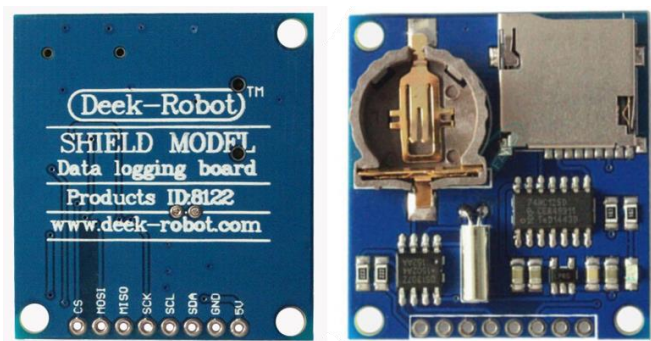


圖 3.17 SD 卡數據紀錄模組

3.2.5 電源系統

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

系統太陽能電源控制器(圖 3.18)，搭配 10W 太陽能板(圖 3.19)，其上三組接口分別作為太陽能板電源輸入端、鋰電池電源輸入端、鋰電池電源輸出端。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。

研究使用 18650 鋰電池(圖 3.20)，其直徑 18mm 高度 65mm，容量最高達 3400mAh，額定電壓 3.7V，為目前市面上能量密度最高之循環鋰電池，其高電壓輸出使其易於串接以提供微處理器之輸入電壓。土層監測模組依照現場系統空間配置可搭載 12 顆 18650 鋰電池，高電容量使土層監測模組於颱風、梅雨季時仍得以維持系統運作。



圖 3.18 太陽能電源控制器

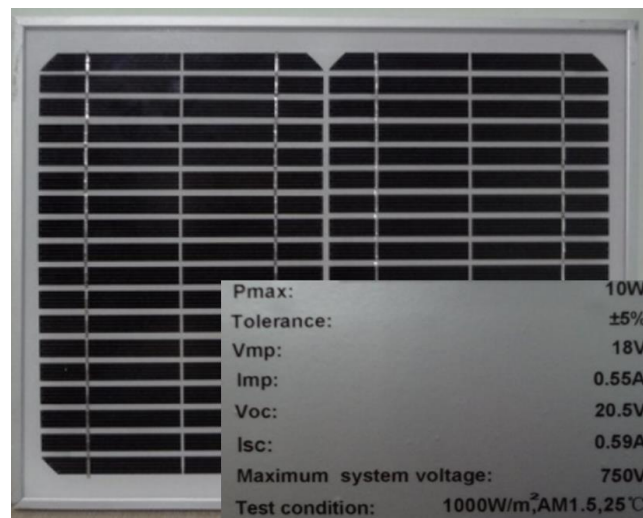


圖 3.19 10W 太陽能板



圖 3.20 18650 鋰電池

3.4 無線淺層土壤監測模組

3.4.1 淺層土壤監測模組

無線土層監測模組係由微控制器結合各感測器以及無線傳輸模組，裝置於待測地點並持續透過無線傳輸將各感測器之量測資料送出，於無線網路中扮演通訊節點的角色，可根據使用者所需或監測場址之地形限制，形成不同的拓樸(topology)以達成最佳的網路通訊效能。

Sparkfun 推出與 Arduino UNO 相容的原型擴展板如圖 3.21，可直接固定於微控制器之排針母座上如圖 3.22 所示，本研究採用該原型擴展板，並將土層監測模組上除土壤水份計外之感測器及模組固定於該原型電路板上，並設有多組含水量計排針接口，減少線材走線所佔用之體積以及接頭鬆脫之風險。所有土層監測模組皆可搭載 12 顆 18650 鋰電池作為戶外供電系統，並配合太陽能板與供電控制器提升土層監測模組續航能力，達到野外長期自動化量測之目的。土層監測模組依其具備之硬體與功能分成(1)客戶端、(2)伺服器端，關於兩者說明如下：

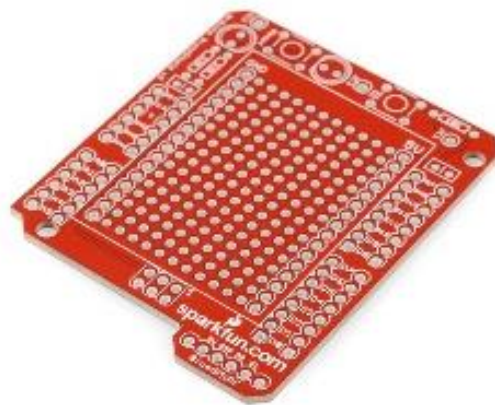


圖 3.21 Arduino Uno 原型擴展板

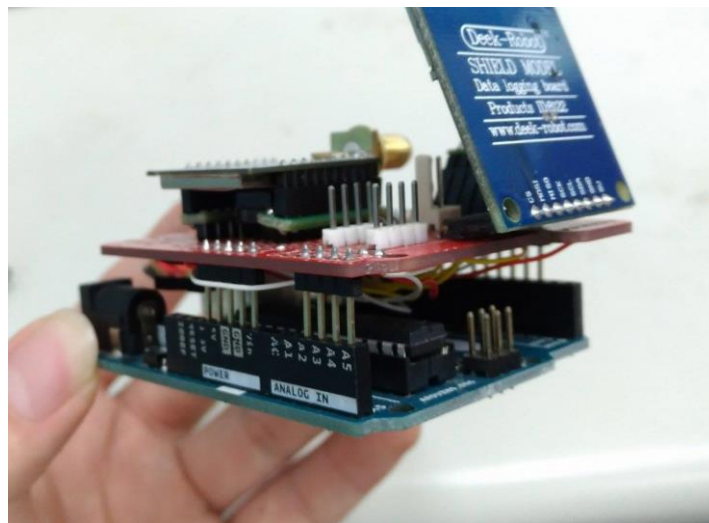


圖 3.22 擴展板與微控制器

(1) 客戶端

節點編號 node1 至 node3，於 xbee 建構之無線網路中負責對伺服器端發送量測資料，量測資料皆已透過微處理器進行校正係數之率定，其發送之量測資料包括土壤分層含水量、溫度以及土層監測模組之傾斜角，並附上節點編號供伺服器端辨識訊號來源。為避免因不可抗力之因素斷訊，致使與伺服器端之連線中斷，客戶端同時備有 SD 紀錄卡作監測數據紀錄，確保數據分析之完整性，土層監測模組客戶端之完成品及其系統組成如圖 3.23。

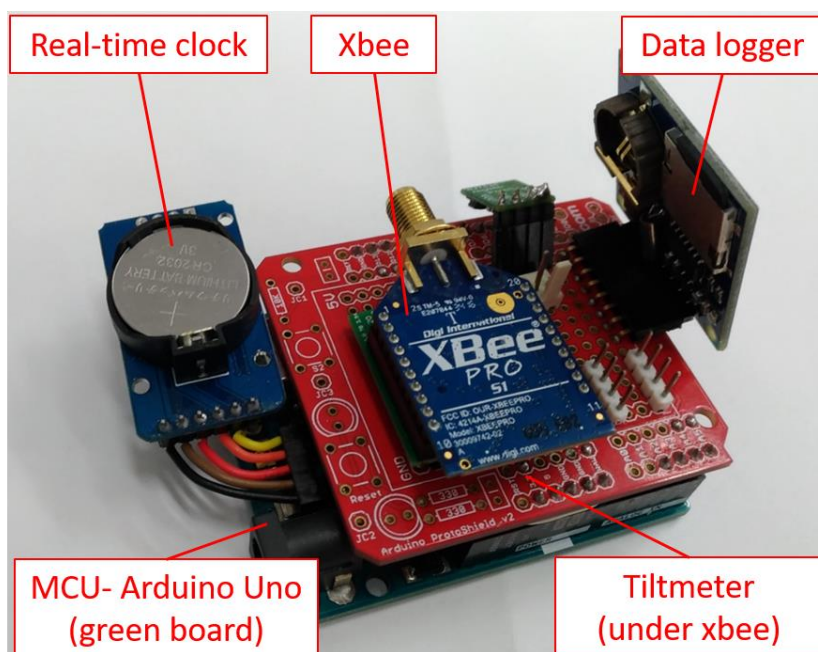


圖 3.23 土層監測模組客戶端

(2) 伺服器端

節點編號 node 0，於 Xbee 建構之無線網路中負責接收客戶端發送之監測資料，因配有 WCDMA(3G)/GSM(2G)無線通訊模組，具有和遠端伺服器連線之功能，其微處理器根據接收到之資料格式將其拆解並儲存於變數後，視使用者所需可儲存於紀錄卡，並將監測數據根據節點編號上傳至遠端伺服器，為遠端人員和現地監測情況之溝通橋樑。伺服器端具有傾斜儀以及土壤水份計之排針接口，因此具備量測功能，可納入監測座標以擴展監測點位於現地之涵蓋範圍，降低系統佈設成本，土層監測模組伺服器端之完成品及其系統組成如(圖 3.24)。

3.4.2 微處理器程式流程

客戶端微處理器之程式流程依照時間軸大致可分成：(1)系統起始時間與週期設定、(2)感測器與 RTC 資料讀取、(3)SD 卡資料寫入以及(4)無線傳輸，以下就各部分詳細說明，圖 3.25 為客戶端之程式流程圖。

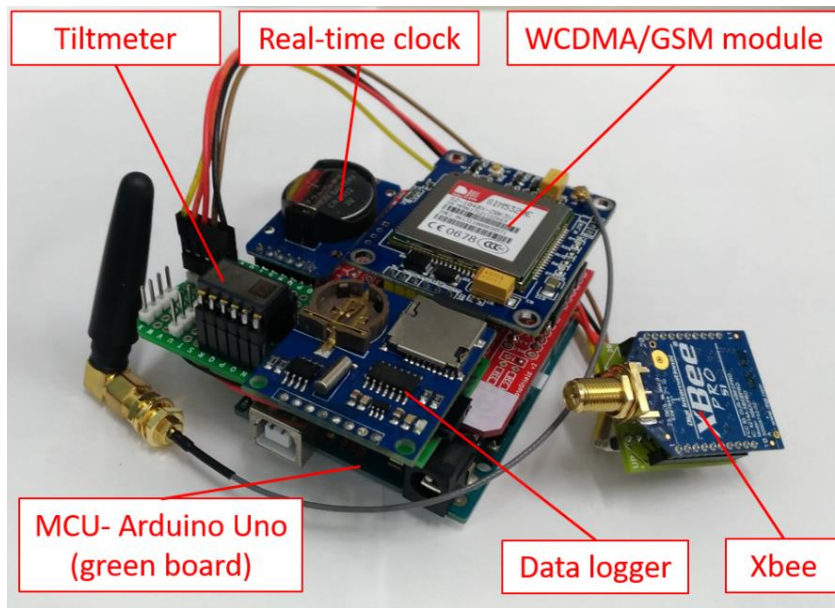


圖 3.24 土層監測模組伺服器端

- (1)系統起始時間與週期設定: 由於 DS3231 具備可程式化之方波輸出以及 2 個高精度鬧鐘設置, 配合 Arduino Uno 可因外在條件觸發而從睡眠模式中被喚醒的功能, 可使土層監測模組保持常態性睡眠狀態, 僅於須發送資料時短時間運作。MCU 根據 RTC 讀取之目前時間, 設定系統起始分鐘(0、15、30、45), 並根據 Node1~Node3 使三個客戶端分別以起始分鐘第 0、10、20 秒為起始時刻, 再以等間距 15 分鐘設置鬧鐘輸出方波予 MCU 之外部觸發腳位(Pin2), 即可達成每小時中第 0、15、30、45 分鐘, 三個客戶端將以等間距 10 秒鐘對伺服器端發送資料之目的。
- (2)感測器與 RTC 資料讀取: 土壤淺層與深層含水量之 I²C 設備位址分別設置, 透過暫存器, 可讀取電容感測值以及溫度感測值, 並透過律定係數轉換成體積含水量與真實溫度。傾斜儀與 MCU 以 SPI 傳輸介面, 晶片選擇線(CS)接於 MCU, 其低電位為有效, 傾斜角度經類比電壓率定係數校正後輸出。DS3231 之讀取時間年、月、日、時、分、秒等時間資訊分別儲存於變數, 為簡化日後數據處理之流程, 透過語法, 輸出需求字串格式。變數分別代表 NodeID、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層體積含水量、深層體積含水量、傾斜角。

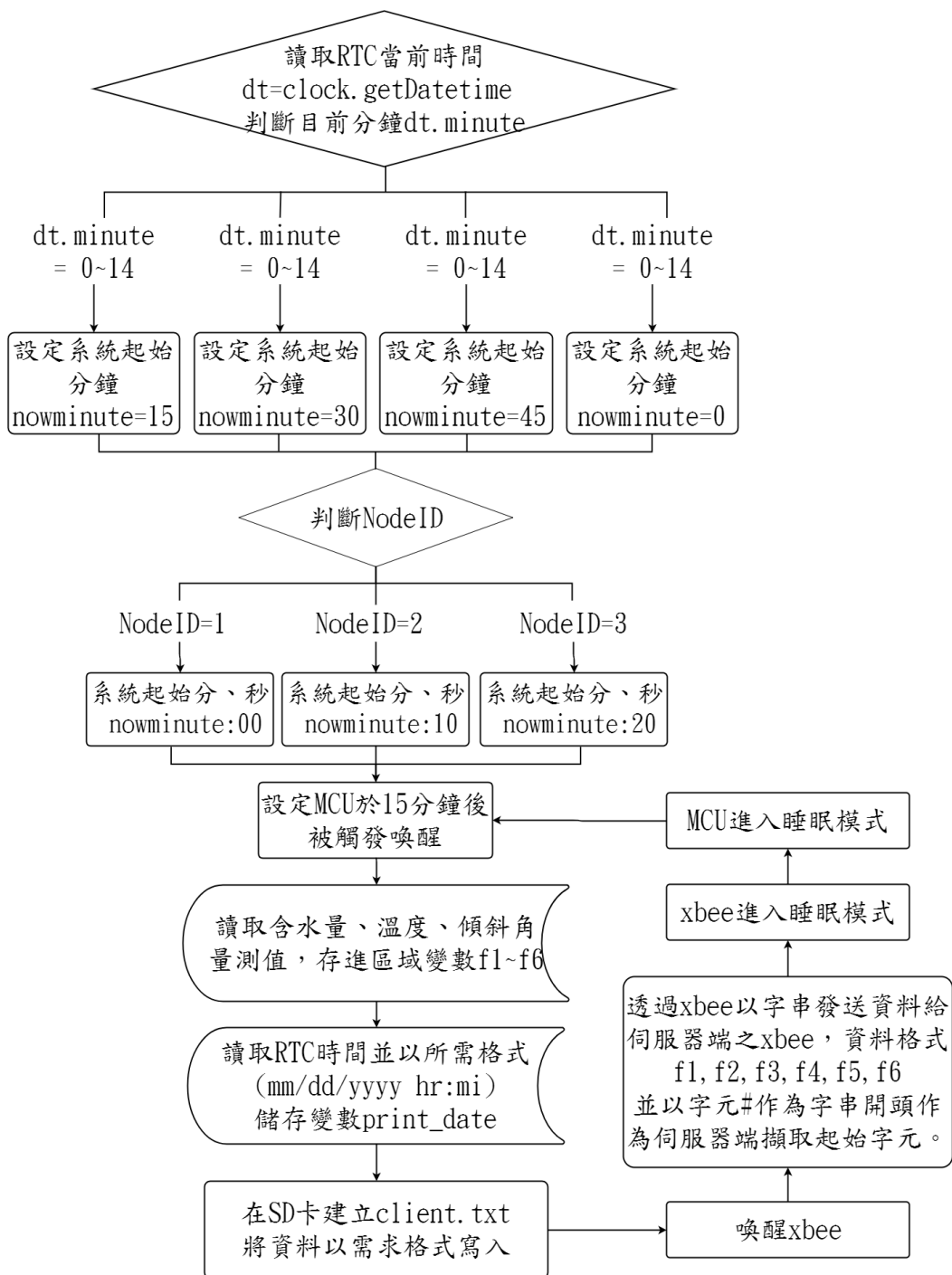


圖 3.25 客戶端之程式流程圖

(3)SD 卡資料寫入: 建立檔案，以所需資料格式以及換行符號儲存。

(4)無線傳輸: Xbee 於安裝前已經過 XCTU 設定為 Pin hibernate 模式，因此需對 xbee 輸出低電位以喚醒模組，MCU 將資料字串格式透過

一組序列線輸出給 Xbee，Xbee 間之資料無線傳輸將自動通透至伺服器端，其中字元#作為伺服器端擷取並拆解資料的起點，發送結束後對 Xbee 之 sleep pin 輸出高電位令其進入睡眠模式。

伺服器端微處理器之程式流程包括：(1)系統起始時間與週期設定、(2)Xbee 之資料接收、拆解以及儲存、(3)感測器與 RTC 資料讀取、(4)SD 卡資料寫入以及(5) WCDMA(3G)/GSM(2G)數據上傳，以下就各部分詳細說明，圖 3.26 以及圖 3.27 為伺服器端之程式流程圖。

- (1)系統起始時間與週期設定: MCU 根據 RTC 讀取之目前時間，設定系統起始分鐘(0、15、30、45)，並以等間距 15 分鐘設置 RTC 鬧鐘輸出方波予 MCU 之外部觸發腳位(Pin2)，即可達成每小時中第 0、15、30、45 分鐘喚醒 MCU 運作之目的。
- (2)Xbee 之資料接收、拆解以及儲存: 以低電位脈衝喚醒 xbee 後即進入資料等待，當 xbee 資料緩衝區接收客戶端之無線傳輸資料，即以逗號為分隔字元拆解及儲存資料至全域變數，並根據 NodeID 儲存至相對應之變數。以上程序執行三次即代表成功接收三支客戶端之資料，當中若 Xbee 因故未接收到客戶端之封包，當次迴圈將於 30 秒後跳出而進入下一等待程序。
- (3)感測器與 RTC 資料讀取: 土壤淺層與深層含水量之 I²C 設備位址分別設定，透過暫存器，可讀取電容感測值以及溫度感測值，並透過律定係數轉換成體積含水量與真實溫度。傾斜儀之傾斜角度經類比電壓率定係數校正後輸出。輸出需求字串格式。6 個變數分別代表 NodeID(Server=0)、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層體積含水量、深層體積含水量、傾斜角。
- (4)SD 卡資料寫入: 建立 node0.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存；建立 node1.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存；建立 node2.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存；建立 node3.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存。

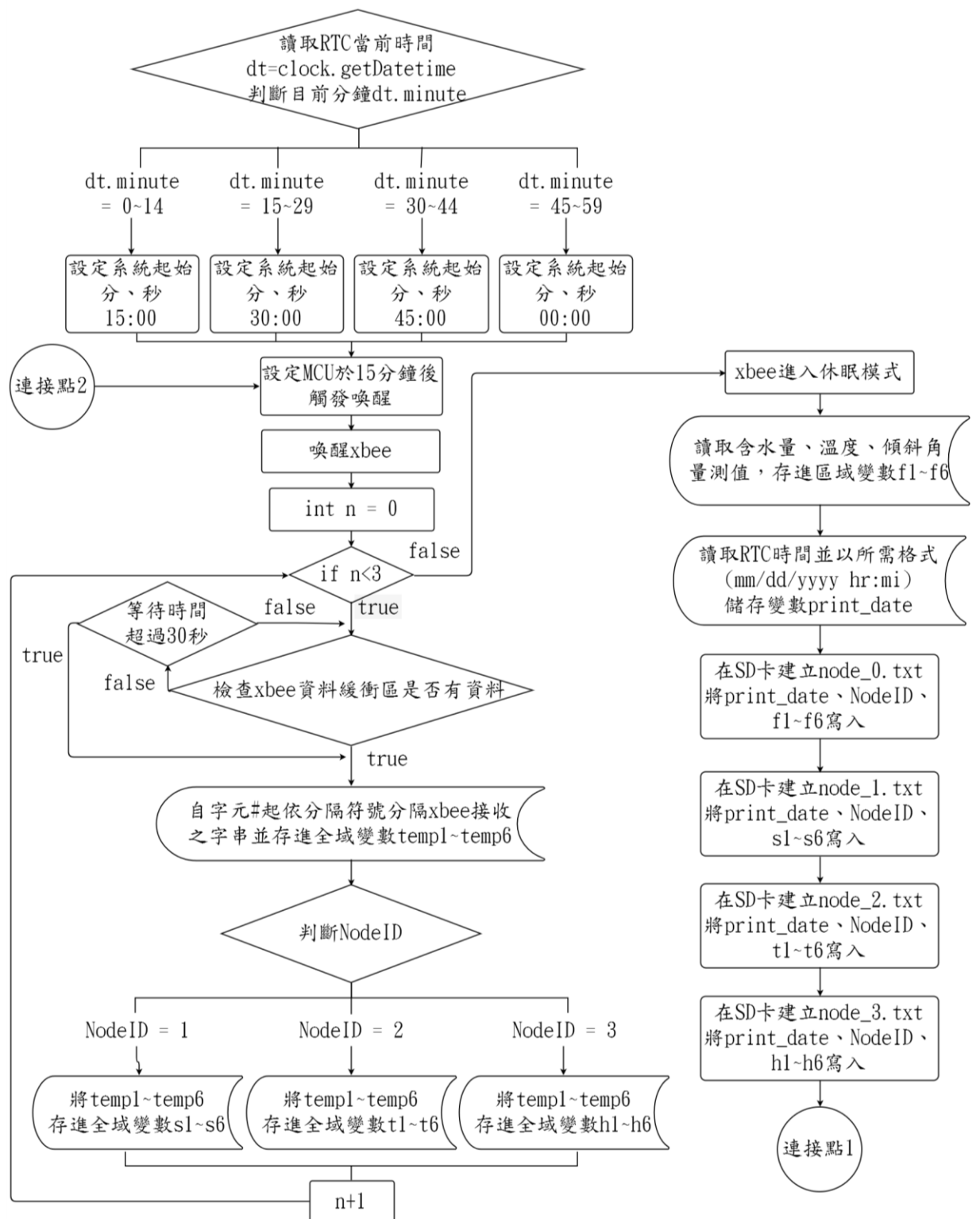


圖 3.26 伺服器端程式流程圖

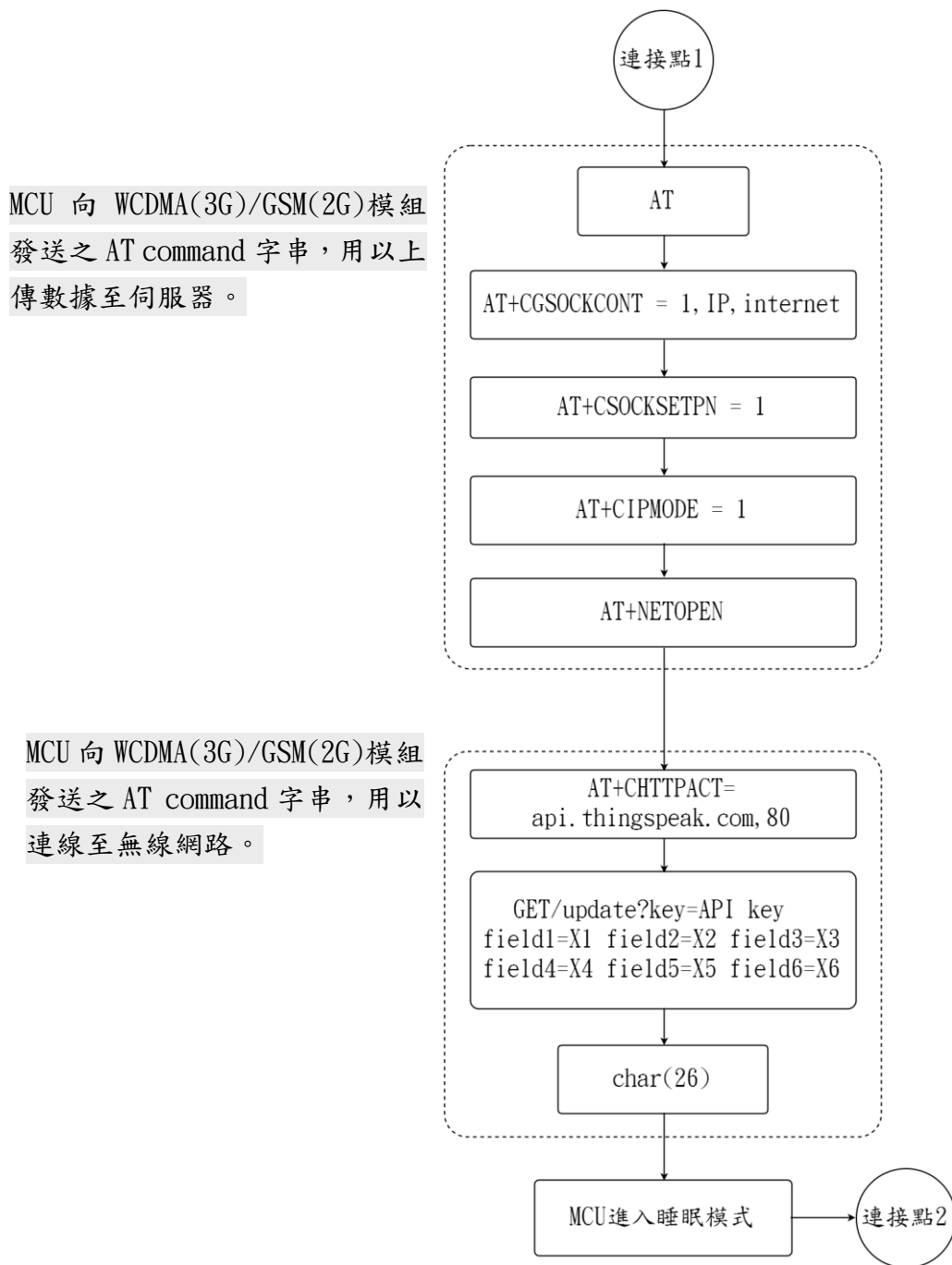


圖 3.27 伺服器端之程式流程圖(續)

- (5)WCDMA(3G)/GSM(2G)數據上傳: Thingspeak 伺服器提供每個頻道(Channel)上 8 個免費數據上傳區域(Field)，本研究 Node1~Node4 將分開上傳至 4 個 channel(根據 NodeID 命名)以即時展示監測成果，各 channel 中之 field1~field6 分別代表 NodeID、淺層土壤溫度、深

層土壤溫度、淺層體積含水量、深層體積含水量以及傾斜角。透過 MCU 對 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組下達 AT command，可用以改變模組之通訊參數、無線網路連線以及數據上傳等功能。表 3.1 為研究使用 AT command 之操作流程以及其意義簡述。

表 3.1 AT command 操作流程與參數意義

AT	AT command 通訊開始
AT+CGSOCKCONT = 1, IP, internet	1: PDP Context Identifier: 可為 1~16 之任意值。 IP: 採用網路通訊協議 (Internet Protocol)，非點對點通訊。 Internet: SIM 卡 APN(中華電信、台灣大哥大皆為 internet)。
AT+CSOCKSETPN = 1	模組硬體參數(預設值)
AT+CIPMODE = 1	設定TCPIP應用模式為傳輸模式
AT+NETOPEN	連線開始
AT+CHTTPACT= api.thingspeak.com,80	執行http動作，指定thingspeak網域以及埠口(80)連接
GET/update?key=PR4PSUWMWK8PS1SE field1= f1 field2= f2 field3= f3 field4= f4 field5= f5 field6= f6 以上為字串	GET: 伺服器存取模式 API key: 每個 channel 有唯一的 API key，用以供伺服器核可存取。 field1- field6: 參數存取頻道 X1-X6: 自定義變數(於此為監測數據)
(char)26	傳送確認字元

3.4.3 系統硬體架構

土層監測模組外構設計(圖 3.28)可分為三部分，各部件詳述如下：

- (1)核心防水盒：內含土層監測模組，18650 鋰電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒，其內部配置如圖 3.29。
- (2)土壤水份計外構：可裝設一只土壤水份計之桿件外構如圖 3.30，並可透過 PVC 管依需求數量進行串聯，以延伸至預計裝設之土層深度。本研究以兩只土壤水份計作串聯，並延伸至地下深度分別為 25 公分以及 75 公分。
- (3)太陽能板支架(圖 3.31)：本研究採用 10W 太陽能板以提升土模組續航力，並可視土層監測模組之耗電情況作太陽能板輸出功率的增減。

核心防水盒係以市售電子防水盒加工而成，上下蓋具有 O 型環與溝槽，使其以螺絲旋緊後具有防水功能，防水盒下方開孔並透過 3D 列印之底座與 PVC 管黏合以連接下方土壤水份計外構。核心防水盒開孔以裝設 2.4GHz 頻段專用之耐候型天線，透過 SMA 接頭與無線傳輸模組連結，並以矽膠封填天線與盒間縫隙。土層監測模組、鋰電池組以及供電控制器則依空間配置固定於盒內。

土壤水份計外構將水分計之電容感測區塊暴露於外，以直接接觸待測土壤以量測土壤飽和度，土壤水份計之接線處與元件位置則置入後方空間，並以電子封裝膠封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐候型外披覆 4 芯電子訊號線，殼層以 3D 列印製作以大幅降低成本。

3.5 深層水力學反應無線感測模組

針對深層滑動主要為現地孔隙水壓力控制，因此將孔隙水壓量測整合於現有入滲與地表運動監測模組為關鍵技術，為符合現地監測高精度、長期耐候與耐久之要求，本研究將現有淺層監測模組增加傳統電子式類比液位計，以高精度 AD 模組與現有模組連結。



圖 3.28 土層監測模組外構

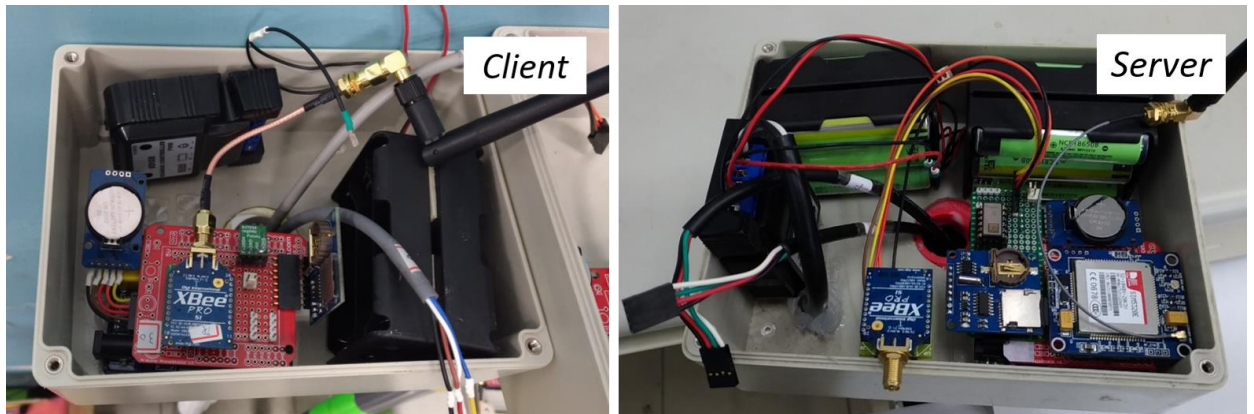


圖 3.29 防水電子盒內部配置



圖 3.30 土壤水份計桿件外構



圖 3.31 太陽能板支架

深層監測模組以物聯網(IoT)之架構進行研發，由微控板(MCU)搭配數位類比擷取卡(AD board)可連接傳統電子式感測器，配合 3G 模組(WCDMA)將監測資料送入雲端，突破常用有線監測之模式，並允許使用者透過雲端即時查看監測資料，此監測架構連結各式感測器形成局部(Local)或全域(Global)監測網路，可提供重大工程結構管理者或工程師由即時監測數據(real time monitoring)進行決策。

無線感測模組包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)時鐘與數據儲存模組及(4)感測器，各部分說明如下：

3.5.1 微處理器

因感測模組連接腳位較多，本研究採用 wemos lolin32(圖 3.32)，其為與 Arduino 相容開放原始碼之微處理器，搭載 ESP32 晶片，240MHz 雙核微控制器，運算數度高達 600 DMIPS，16MB 程式設計空間，且具 34 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPT(Serial Peripheral Interface Bus)介面、一組 (Inter-Integrated Circuit)介面，I²C 支援單一匯流排，最多可

與 112 個結點通訊，足以應付多組模組間數位資料傳輸，以及 12 支接腳可做為類比訊號接腳，滿足土層監測模組的功能需求。



圖 3.32 Wemos lolin32 微處理器(摘自 www.wemos.cc)

3.5.2 電子式液位計

採用國產之沉水式液位計(liquid level transducer)，此感測計為類比輸出，因此感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)，此計畫以 16bit 之 A/D converter 模組，以確保解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 3.33 所示，現有模組中使用之液位計實驗室校正結果顯示其線性度佳。

3.5.3 感測模組

圖 3.34 為研發之深層無線感測模組內部元件圖，外構與淺層監測模組相同，電池模組可透過電池與太陽能充電模組為系統提供電力，以供野外進行模組布設並可維持太陽照度不足時之電源持續運轉系統，而無線監測模組，以 MCU 搭配傾斜晶片、分層含水量計、液位計與無線傳輸等模組，可定時將數據傳送至全球網路，即時感測(real time monitoring)推送監測數據至雲端。

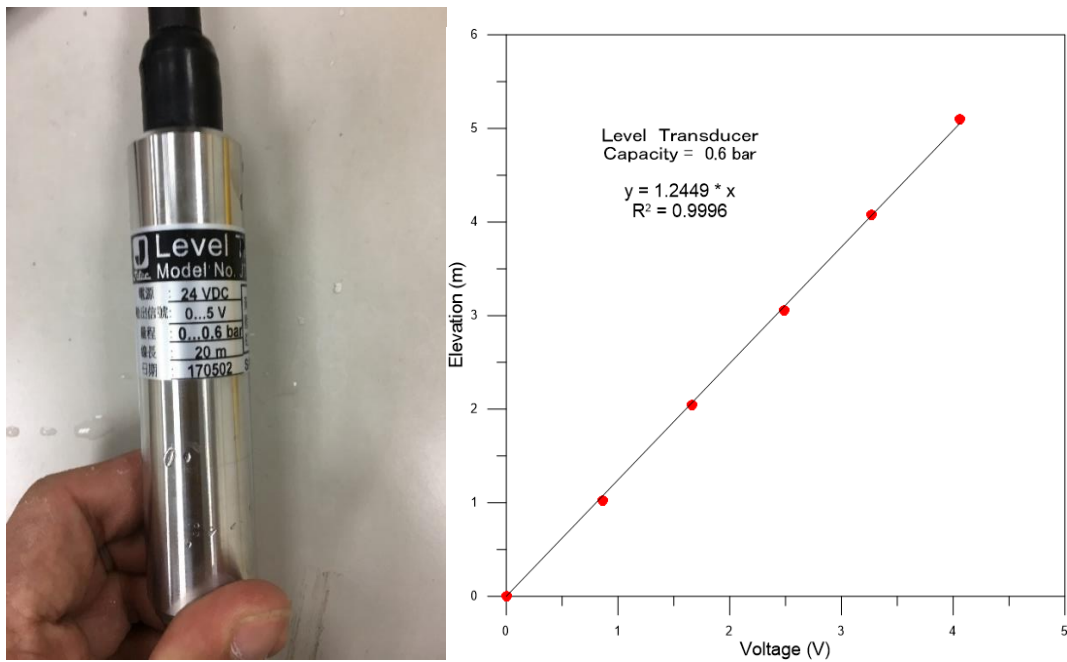
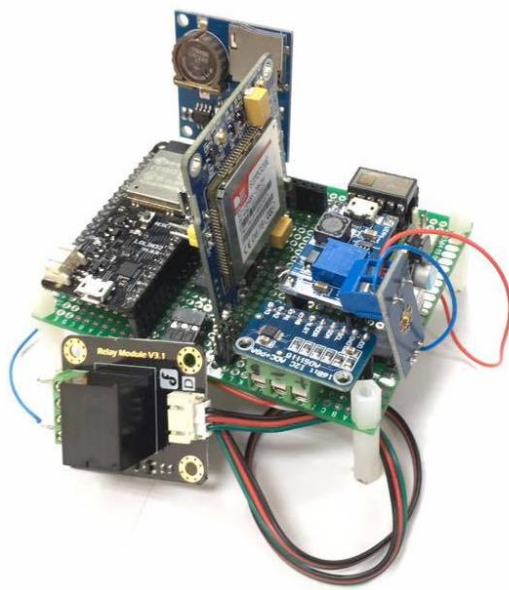


圖 3.33 液位計實體與校正結果



(a) 無線感測模組



(b) 電池模組

圖 3.34 深層邊坡無線感測模組內部組件圖

3.5.4 雲端伺服器

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

圖 3.35 為 Thingspeak 雲端即時顯示頁面，Field1 至 Field7 依序顯示該測站之節點編號、傾斜角、淺層土壤體積含水量、淺層土壤溫度、深層土壤體積含水量、深層土壤溫度、水位以及模組電壓，游標移至資料點上即可獲知該監測值及其量測時間，用以展示及時監測成果，而平台也提供歷史資料輸出功能，其副檔名為 csv 格式，可用 Excel 直接開啟。



圖 3.35 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖

第四章 淺層滑動場址監測成果與分析

4.1 甲仙攔河堰聯外道路土層監測模組安裝測試

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

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，南區水資源局皆有相關資料可供參考，包括現地監測設施平面圖(圖 4.1)、鑽孔資料(表 4-1)、邊坡剖面圖(圖 4.2)以及地質材料參數(表 4-2)。根據上述資料顯示，此場址符合以下本研究選址條件：(1)為陡坡地形且為軟弱土層，具有高破壞潛勢以及破壞歷史。(2)有相關地質、水文及幾何參數等現地監測資料可供參考。(3)區域為無線網路訊號涵蓋範圍。因此選定甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地，作為即時淺層邊坡無線監測模組現地測試之區域。

本研究總計於甲仙攔河堰西側邊坡裝設四支土層監測模組，包括一支伺服器端(Node ID = 0)以及三支客戶端(Node ID = 1~3)，並以 3G 無線網路進行資料回傳。相對位置如圖 4.3 所示，土層監測模組於安裝過程中須保持約略水平，以維持足夠之量測範圍，另於近地表面與監測模組桿身之間回填皂土，避免降雨直接沿桿身入滲影響滲流監測成果。無線土層監測模組安裝流程如下：

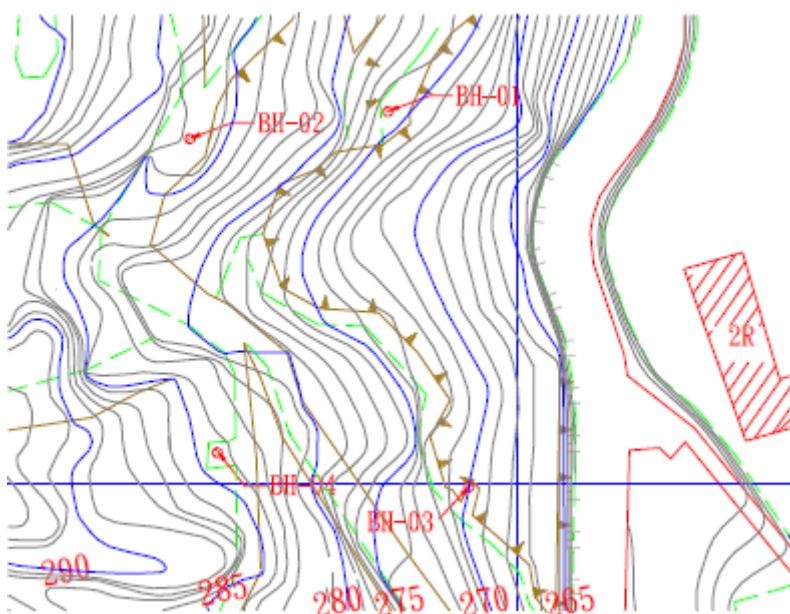


圖 4.1 監測設施平面配置圖(南水局 2011)

表 4-1 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

1. 以孔徑 62mm 之電動鑽機鑽孔至預定土層深度 0.8m(圖 4.4)。
2. 置入土層監測模組桿身，並確保監測模組維持水平(圖 4.5)。

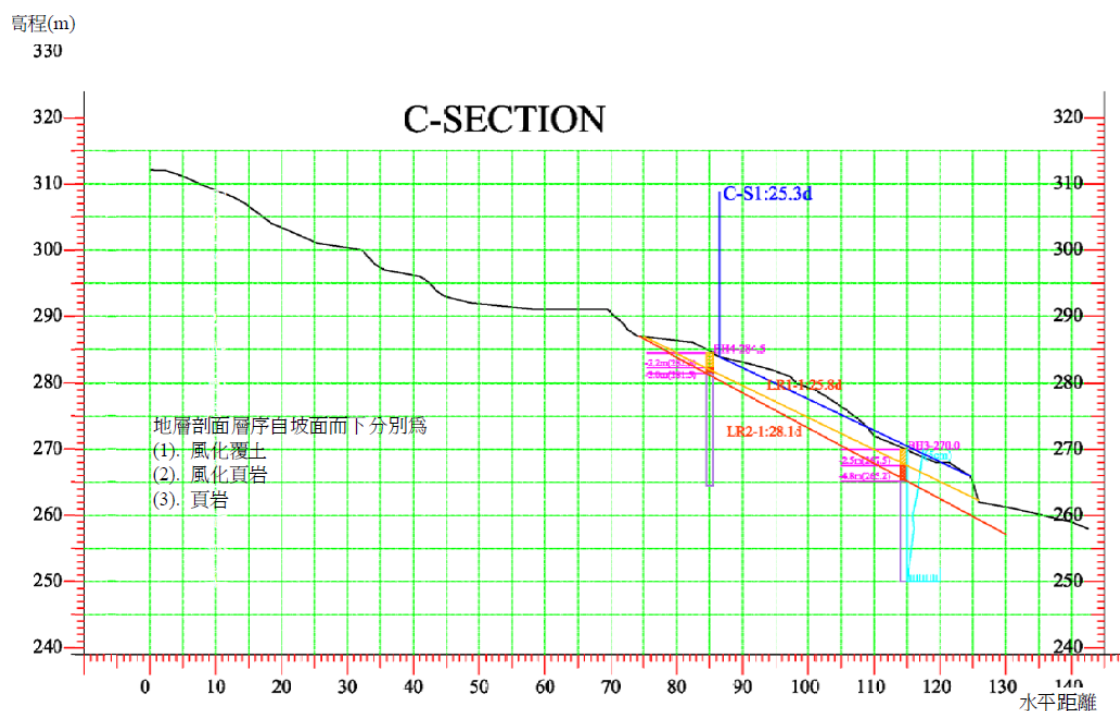


表 4-2 簡化地質材料參數(南水局 2011)

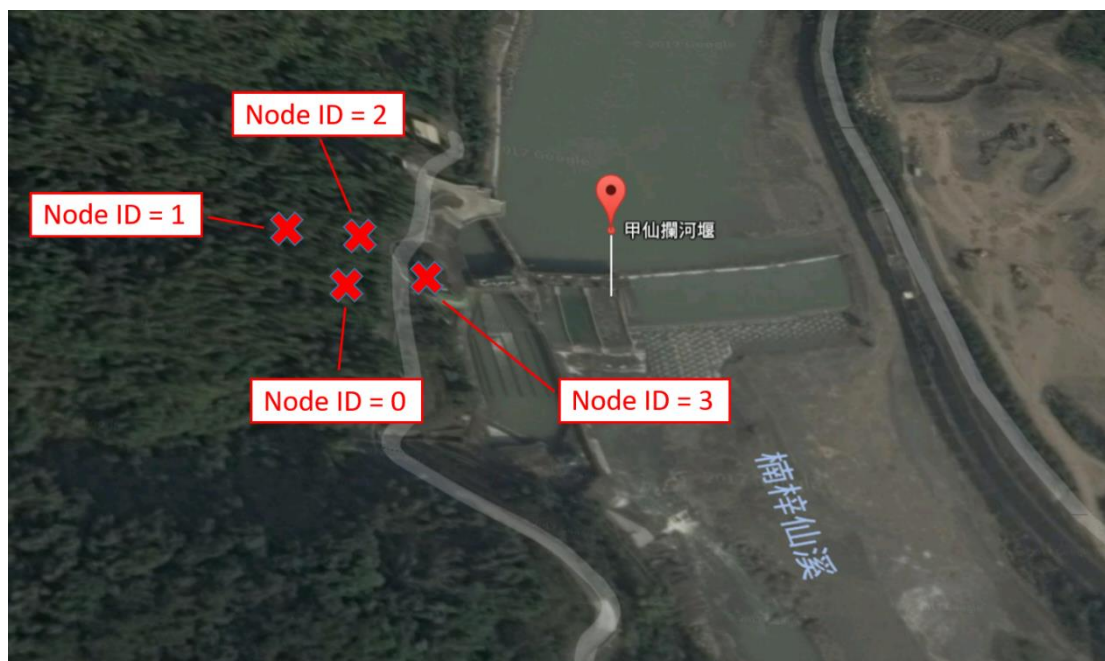


圖 4.3 監測模組相對位置圖

3. 回填皂土至含水量計上方。
4. 以少量皂土圍繞覆蓋於桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。
5. 重複上述步驟回填至地表(圖 4.6)。
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。



圖 4.4 電動鑽機鑽至預計深度



圖 4.5 確保模組保持水平



圖 4.6 皂土覆蓋桿身與地表

待土層監測模組外構安裝完畢後，於盒身側邊鑽孔以固定 2.4GHz 之耐候型天線，作為 Xbee 無線傳輸用途，其中伺服器端需多開一孔供 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組天線使用，所有模組與天線皆為 SMA 接頭，將來若需更改硬體設置會有較佳之相容性，太陽能板之電源線則於盒底開孔進入盒內供電，最後以矽膠封填所有孔隙。依序將土層監測模組以及電源系統固定於電子防水盒中，土層監測模組須保持水平避免傾斜儀超出其量測範圍並確保傾斜儀之軸向面對邊坡走向。圖 4.7、圖 4.8 分別為客戶端以及伺服器端於現地裝設完成之盒內情況紀錄。圖 4.9 為各監測站點周遭環境以及邊坡上之相對位置。



圖 4.7 客戶端盒內配置



圖 4.8 伺服器端盒內配置

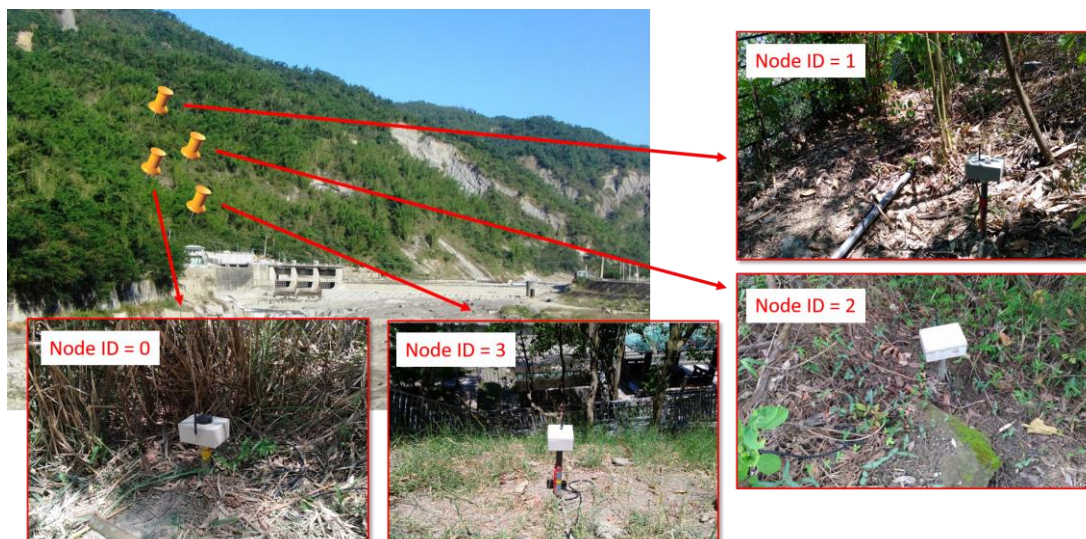


圖 4.9 監測站點周遭環境

4.2 甲仙場址監測資料

甲仙場址之土層監測模組系統於 106/5/22 安裝完畢，並於 106/6/21 換上韌體優化之模組，目前仍持續穩定上傳監測資料至 thingspeak 伺服器。106/5/22 至 106/9/17 期間歷經多次集中且長歷時之降雨事件，過程中顯示降雨事件並不影響本研究無線傳輸系統之穩定性，同時在雨季長時間日照不足的情況下，太陽能電源系統也足以支撐土層監測模組持續運行，證明系統之可行性與耐久性。圖 4.10 以 NodeID=3 之 thingspeak 頁面為例顯示場址即時資訊，Field1 至 Field6 依序顯示該測站之節點編號、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量以及傾斜角，游標移至資料點上即可獲知該監測值以及發生時刻，可用以監測甲仙淺層邊坡水文及運動情況之依時性的反應。以下展示現地監測期間體積含水量計以及傾斜移之量測成果。

4.2.1 體積含水量監測結果

由於邊坡滑移多起因於高強度長延時之降雨，因此本研究之監測資料將以雨量監測作為土層體積含水量比較之標的。雨量資料來源為中央氣象局之雨量監測結果，與本研究監測場址最近之測站為甲仙測站，其位於高雄市甲仙國中操場後方山丘，兩者相對位置圖如圖 4.11。

圖 4.12、圖 4.13、圖 4.14 以及圖 4.15 分別為 Node0~Node3 於 106/5/22 至 106/9/17 期間之體積含水量監測資料，X 軸為標準時間，Y 軸為土壤體積含水量(%)，同時與甲仙雨量站之每小時累積雨量(mm)做對比。土壤分層水份監測結果可得下列成果：

- (1). 土壤水份計感測值對於降雨事件之反應相當明顯，而深層水份計之感測值反應時間略晚於淺層含水量計，其間差異為土層入滲時間差導致。從降雨發生至含水量抵達峰值之歷時甚短，可及時反應降雨事件的影響。

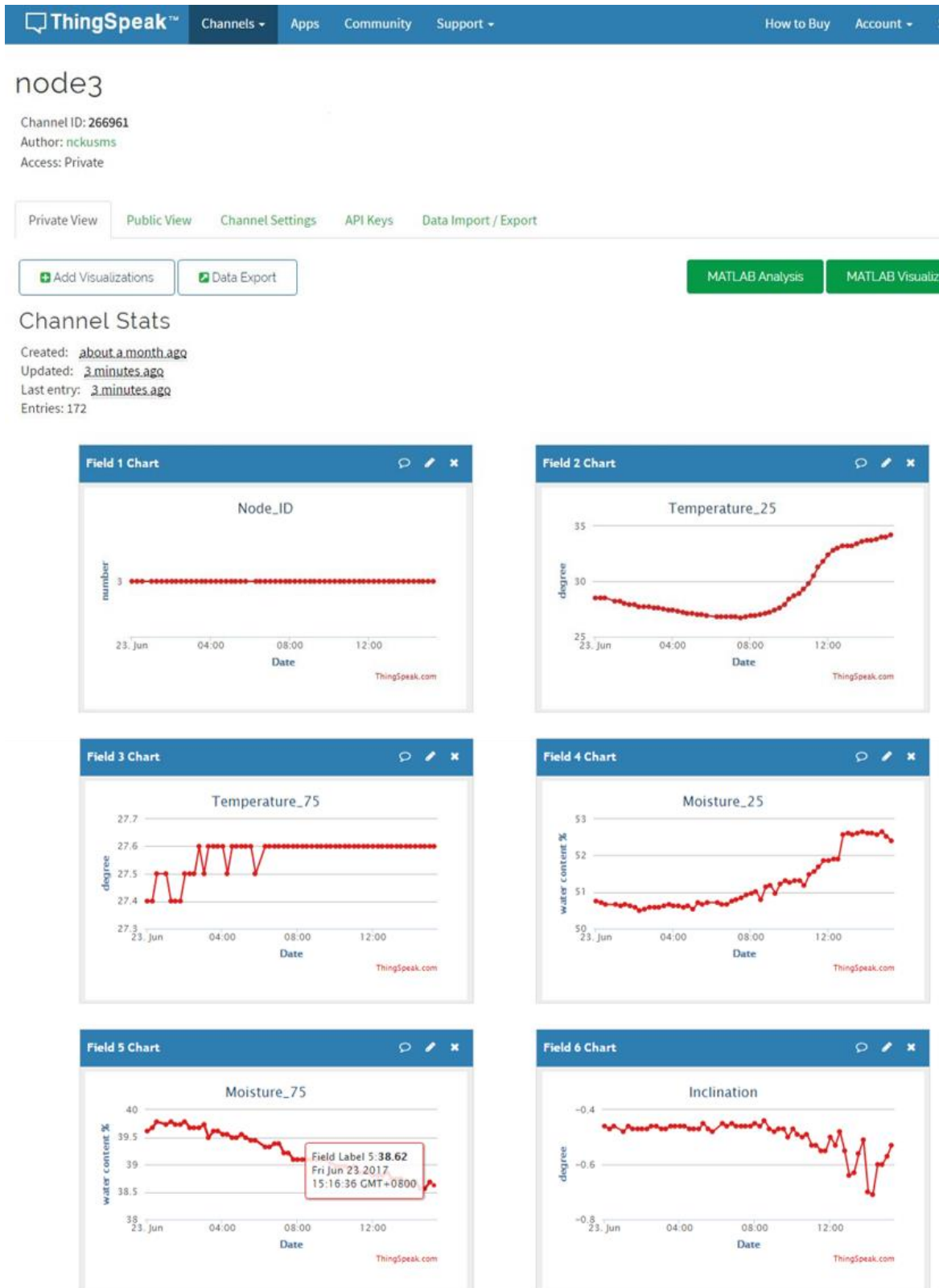


圖 4.10 Thingspeak 即時顯示情況



圖 4.11 監測場址與甲仙雨量站相對位置

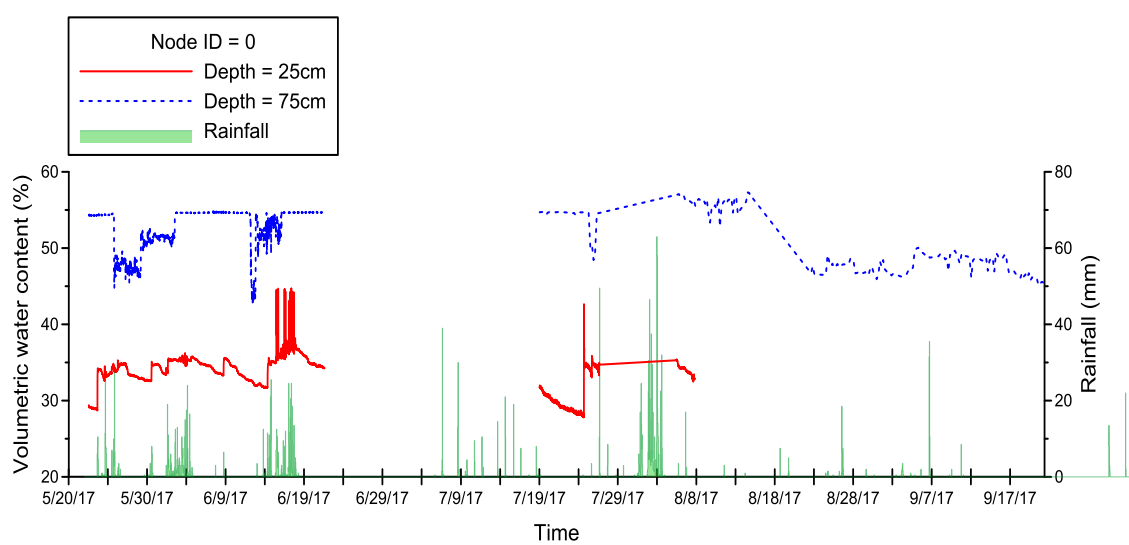


圖 4.12 Node0 含水量監測結果

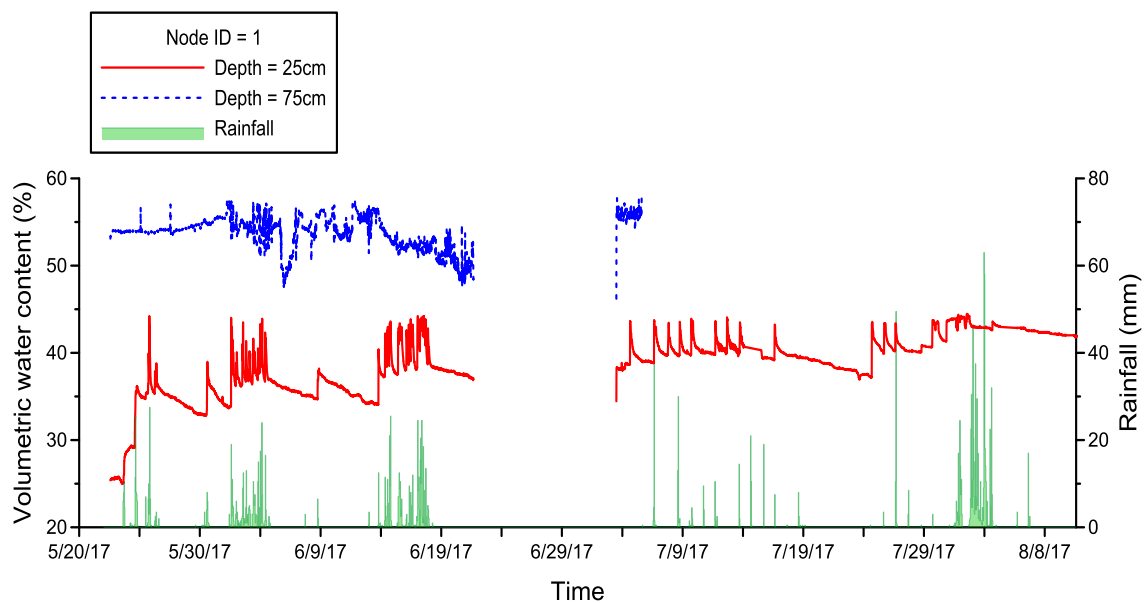


圖 4.13 Node1 含水量監測結果

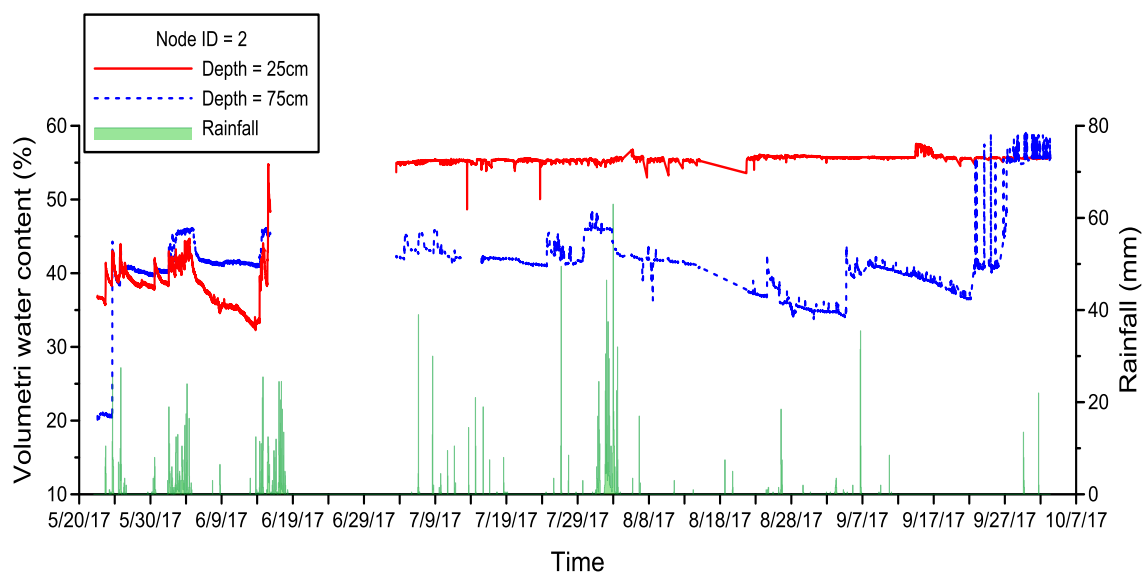


圖 4.14 Node2 含水量監測結果

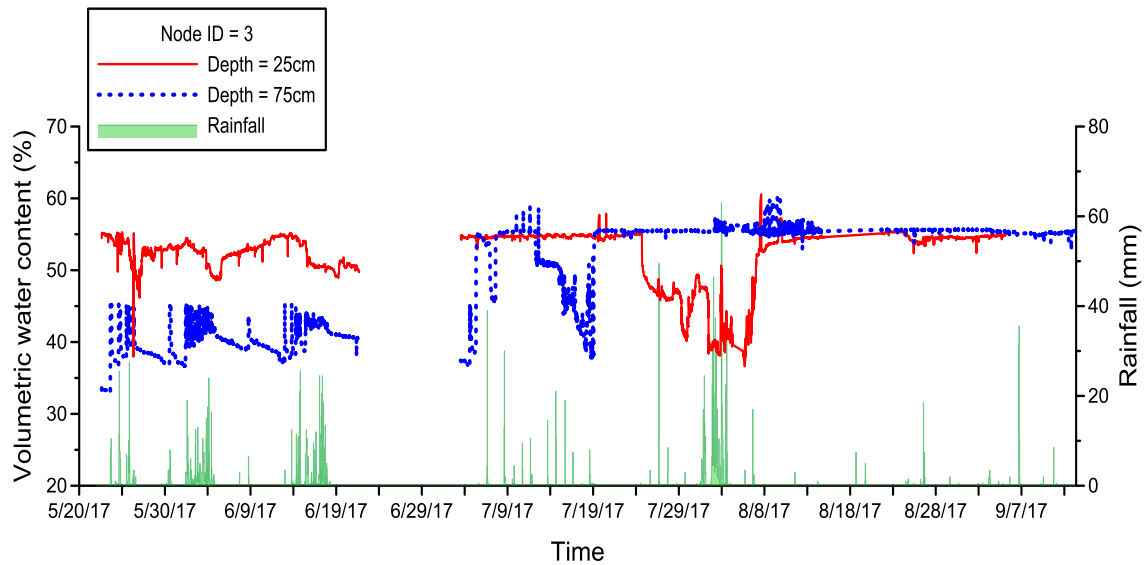


圖 4.15 Node3 含水量監測結果

- (2). 在降雨事件發生後，含水量皆會在乾季時逐步降回降雨前之穩定值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測用途。
- (3). 藉由已完成之基本物性試驗得知甲仙現地地表土壤之孔隙比為 0.6，可推算其飽和時之土壤體積含水量為 38%。圖中顯示 Node0、Node1 與 Node2 之深層含水量計始終處於飽和狀態，而淺層含水量計於降雨時迅速接近飽和狀態。
- (4). Node3 之含水量計反應較為異常，其淺層含水量始終高於深層含水量，且深層含水量對於降雨事件之影響更大也更迅速，可能相較於其他監測點位皆位於甲仙聯外道路之上邊坡，Node3 則位於聯外道路之下邊坡，可能有路基、擋土牆等結構物影響地表下土層分布。另外由聯外道路旁之擋土牆透水孔(圖 4.16)流量甚大顯示，道路旁邊坡土層長期處於飽和狀態也有可能影響下邊坡之地下水分布。



圖 4.16 擋土牆透水孔

4.2.2 現地入滲速率推估

非飽和土壤滲流分析中最重要之參數即為滲透係數，但因需引入時間參數以及土壤基質吸力之量測範圍限制，滲透係數亦為較難量測之非飽和土壤參數。水在非飽和土中的流動滿足達西定律，但與飽和土壤滲流的不同為非飽和土壤之滲透係數為土壤含水量的函數，可用基質吸力-滲透係數曲線表示。

由於現地土壤具非均質性及異向性，且張力裂縫、裂隙等現地情況無法於室內小尺寸之試體中真實呈現，使滲透係數量測較難進行。Hillel et al. (1972)將瞬時剖面法之概念應用於現地土層，並將土層中之位置水頭引入公式推導，發展出非飽和土壤滲流係數之計算過程，期間假設水僅在垂直方向發生入滲，無地表水平滲流，且非飽和壤中之氣相壓力維持一大氣壓。

取現地土層深度位置 z_1 和 z_2 ，則在連續時刻 t_1 和 t_2 期間通過土層單位截面積之水總體積，根據質量守恆將等同於 z_1 到 z_2 間土壤體積含水量之變化總量如式 2.4，其中 θ_v 為體積含水量； A 為土層單位截面積。

$$V_w = \int_{z_1}^{z_2} \theta_v(Z) Adz \quad (4.1)$$

又通過截面 z_1 之流速可以式(4.2)表示，其中 k_w 為滲透係數； i_{ave} 為土層深度 z_1 到 z_2 之水力梯度。

$$v_w = \frac{dV_w}{Adt} = k_w * i_{ave} \quad (4.2)$$

由於現地情形需考慮位置水頭之影響，因此總水頭 $h_w = h_g + h_p$ ， h_g 與 h_p 分別為位置水頭以及壓力水頭，壓力水頭於非飽和土壤中為負值；於飽和土壤中為正值。水力梯度 $i_{ave} = \frac{dh_w}{dz} = \frac{\Delta z - \Delta \psi}{\Delta z} = 1 - \frac{\Delta \psi}{\Delta z}$ ，其中 ψ 為負壓力水頭，飽和土壤 i_{ave} 為1；非飽和土壤 i_{ave} 最大為2，視土層深度內之基質吸力分布而定。

結合式 2.4 與式 2.5，令單位截面積 $A=1$ ，將滲透係數 k_w 之關係式表示為式 2.6 如下：

$$k_w * \left(1 - \frac{\Delta \psi}{\Delta z}\right) = \frac{\int_{z_1}^{z_2} \theta_v(Z) Adz}{dt} \quad (4.3)$$

藉由重複量測不同初始含水量下之入滲速率，即可求得現地基質吸力或含水量與入滲速率之關係。

圖 4.17~圖 4.21 為 Node1 在不同初始體積含水量下各階段之體積含水量依時性剖面，發生時刻最早之曲線(棕色)為降雨事件前土壤體積含水量之初始值，圖中假設地表土壤於降雨期間處於飽和狀態，曲線移動涵蓋之面積可視為土層之儲水能力。

利用瞬時剖面法衍伸公式 4.3，以及各測站之體積含水量依時性剖面，可求取甲仙現地淺層土壤之入滲速率，其中參數的訂定以及選擇依據如下：

(1) 由於本研究僅於 0.25m、0.75m 兩土層深度進行體積含水量量測，而深度 0.75m 之體積含水量計因位於地下水位附近致使監測值變化甚小，因此以地表至上層含水量計之區段作為淺層土壤入滲速率之計算依據，即 $z_1 = 0$ ， $z_2 = 0.25\text{m}$ 。

(2) dt 定義為自降雨事件發生時刻起，到上層土壤含水量計讀值開始變化之歷時。

(3) $\int_{z_1}^{z_2} \theta_v(Z) Adz$ 即為土壤體積含水量依時性剖面中從降雨時刻到土壤含水量改變時刻掃掠過之面積，但不包括深度超過 0.25m 的部分。

(4) 理論上應以甲仙現地土壤之土水特徵曲線，繪製基質吸力-土層深度剖面後求取水力梯度 $i_{ave} = (1 - \frac{\Delta\psi}{\Delta z})$ ，惟本研究體積含水量測深度較少，因此假設地表至深度 0.25m 之基質吸力為線性分布，取 $i_{ave} = 2$ 。

表 4-3 為 Node1 各階段現地入滲速率計算結果，因此可以得到入滲速率-基質吸力關係如圖 4.22，並與典型之特徵曲線(Collins and Znidarcic, 2004)做比較，結果顯示甲仙現地淺層土壤之入滲行為較接近高滲透性之粗粒料，在基質吸力 0~3kPa 時則落於粗細粒料之間，其中甲仙現地之基質吸力係以典型細砂之 SWCC (Gonzalez and Adams, 1980)(圖 4.23)轉換而得。

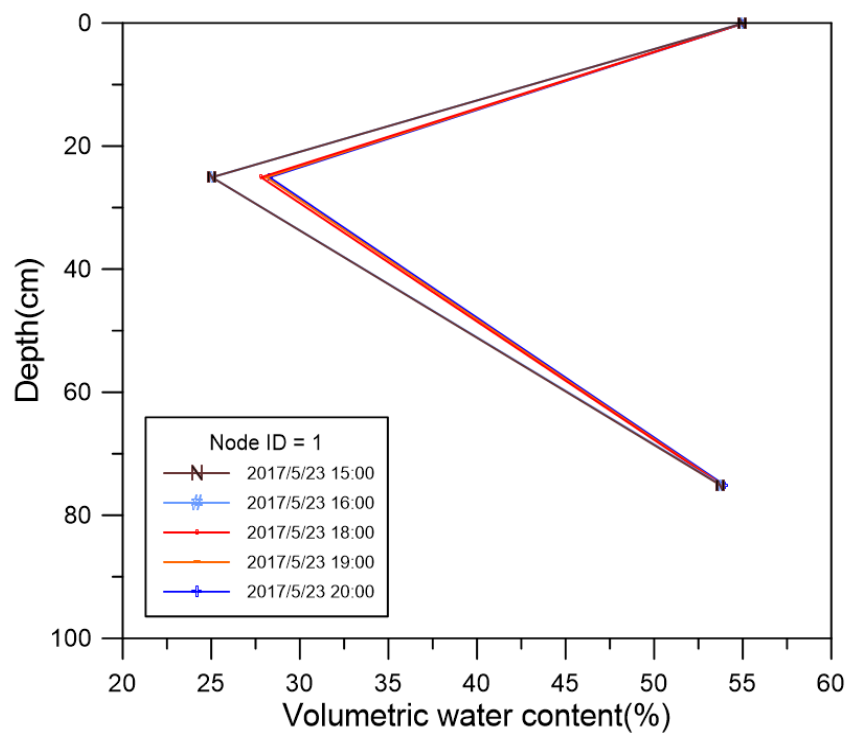


圖 4.17 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage1

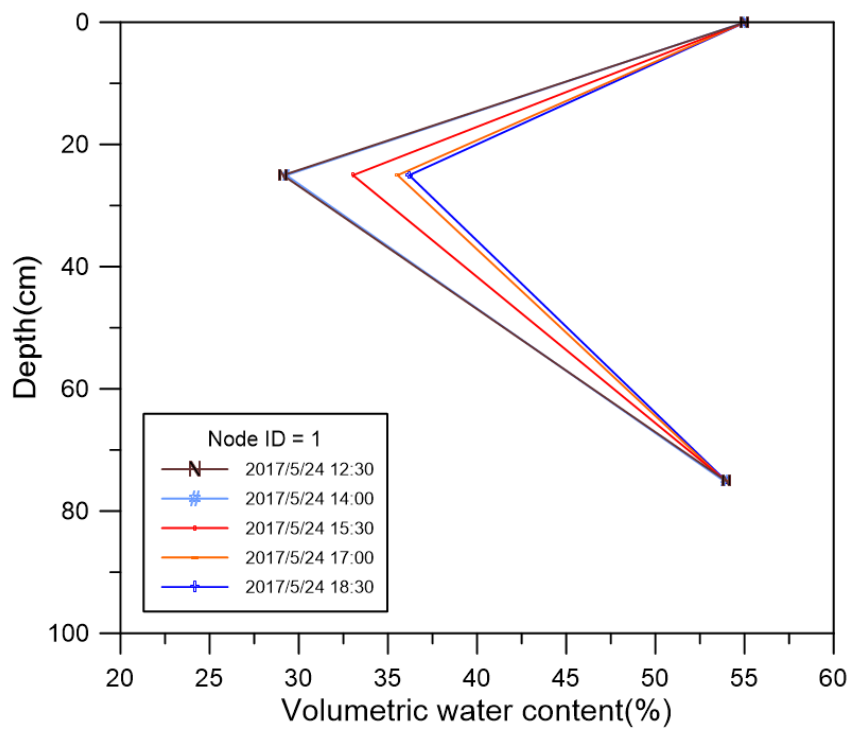


圖 4.18 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage2

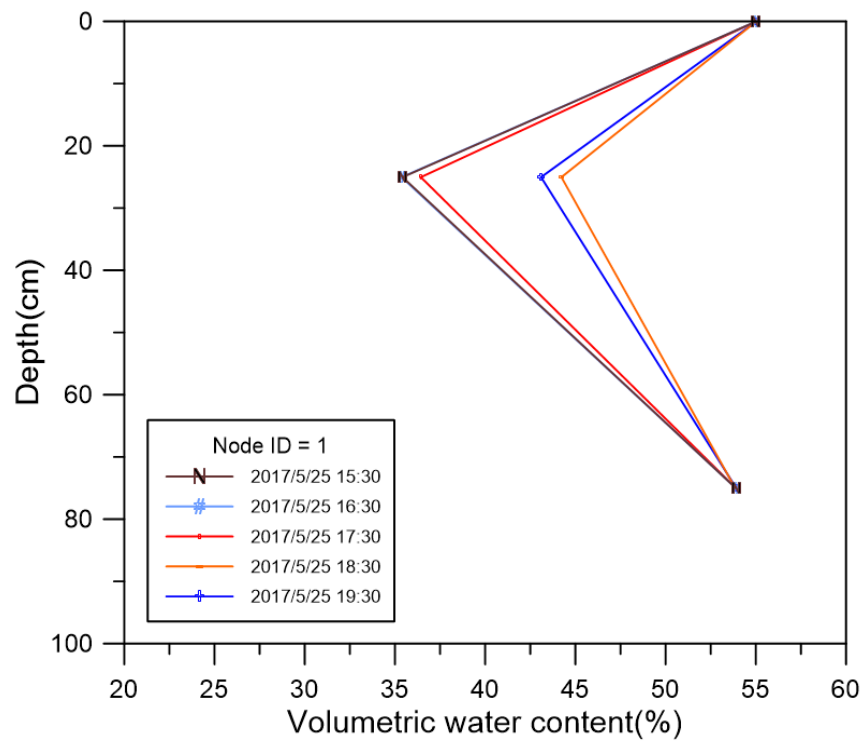


圖 4.19 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage3

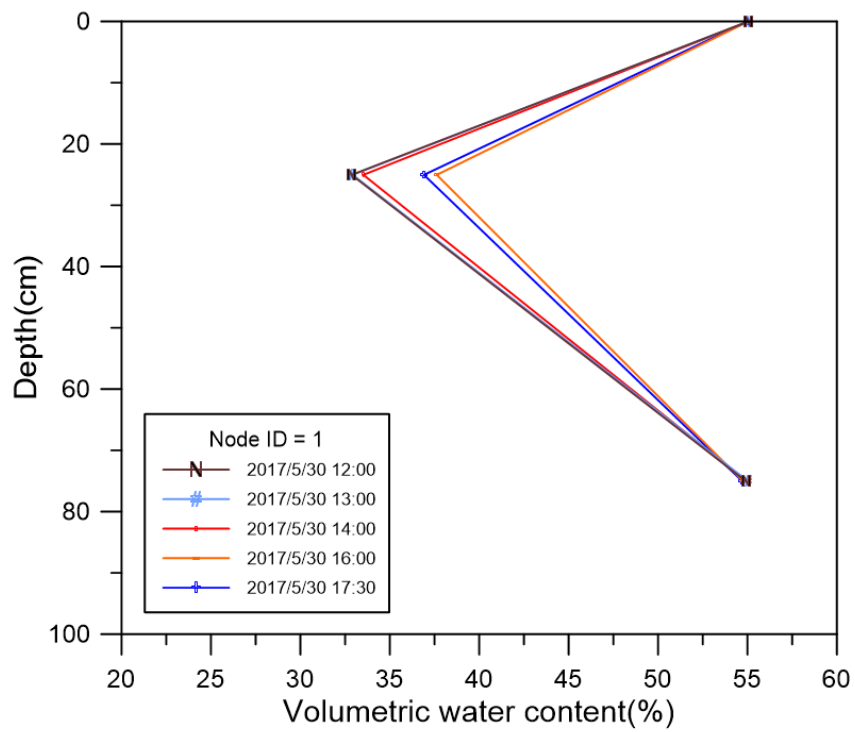


圖 4.20 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage4

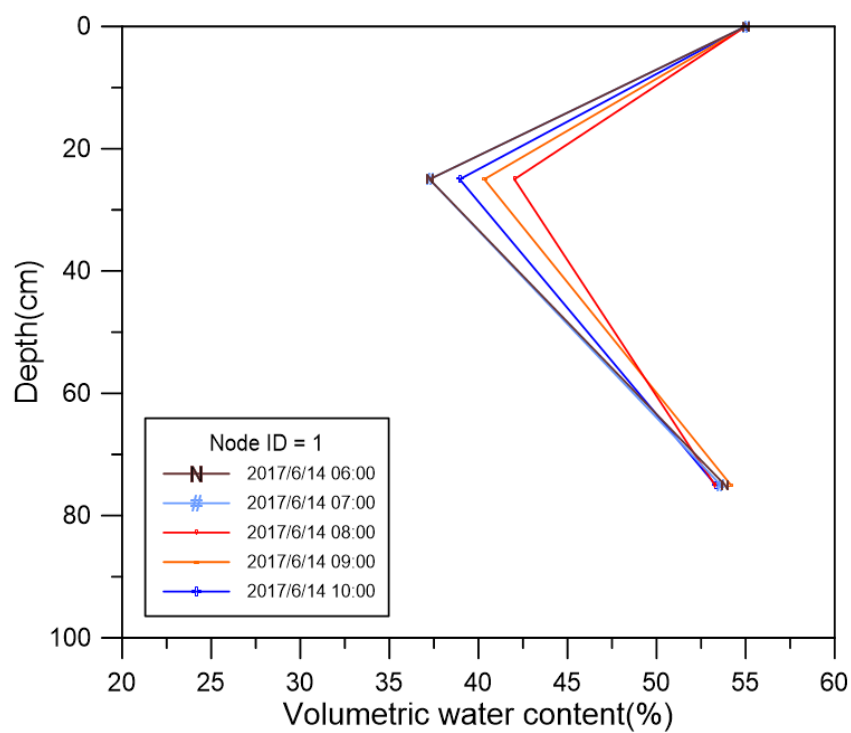


圖 4.21 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage5

表 4-3 各階段淺層入滲速率

不同初始含水量階段	淺層入滲速率(m/sec)
1	1.5×10^{-5}
2	2.3×10^{-5}
3	3.8×10^{-5}
4	4.1×10^{-5}
5	4.2×10^{-5}

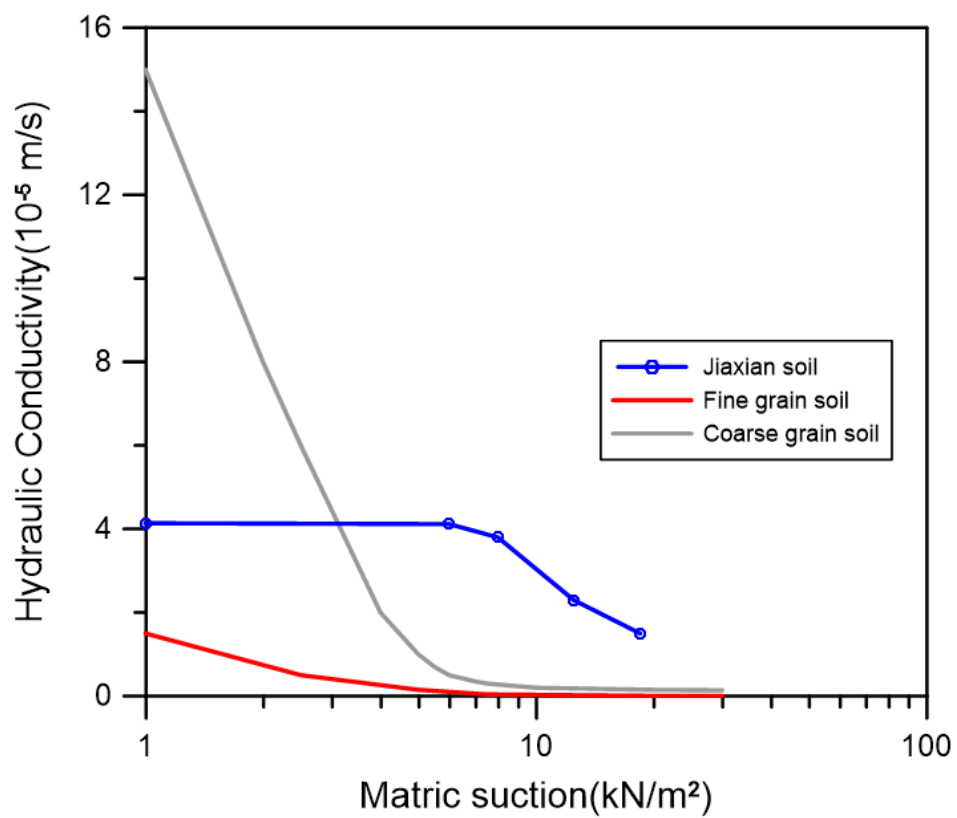


圖 4.22 甲仙現地入滲速率-基質吸力

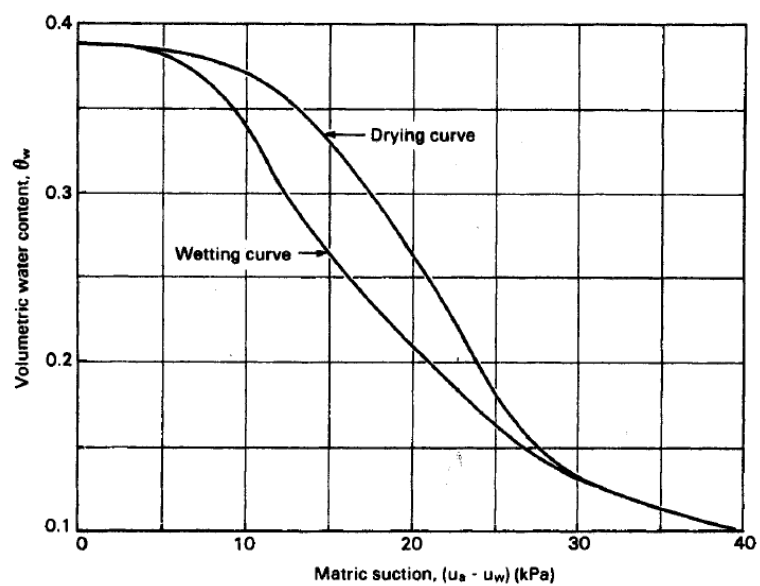


圖 4.23 典型細砂 SWCC (Gonzalez and Adams, 1980)

圖 4.24、圖 4.25 以及圖 4.26 為為測站 Node0~Node2 於 2017/5/23 同一降雨事件下土層各深度之體積含水量依時性剖面，以同一流程計算各測站之現地入滲速率如表 4-4 所示，其中 Node0 與 Node2 在地理位置上相鄰且屬於同一土層，結果顯示兩者淺層入滲速率相近，證明現地入滲速率計算流程具重複性。

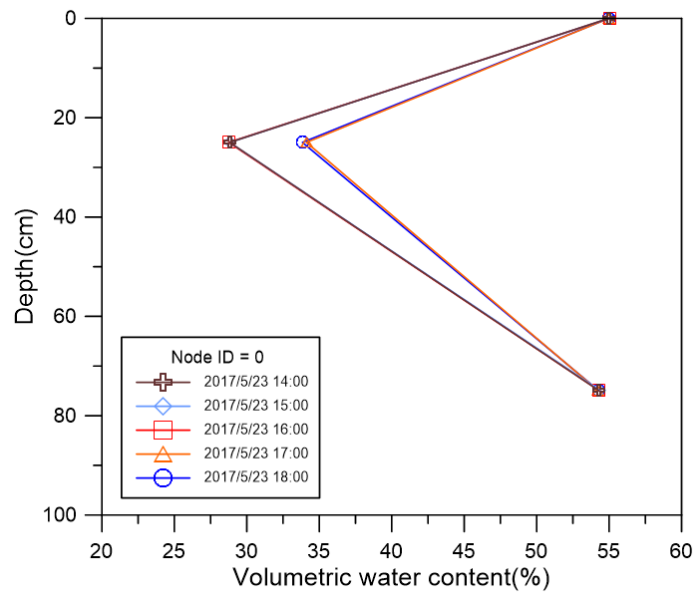


圖 4.24 Node0 土壤體積含水量依時性剖面

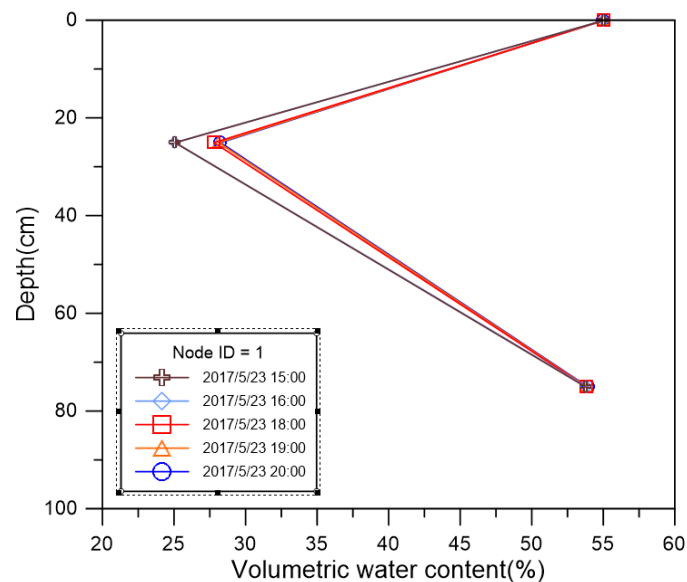


圖 4.25 Node1 土壤體積含水量依時性剖面

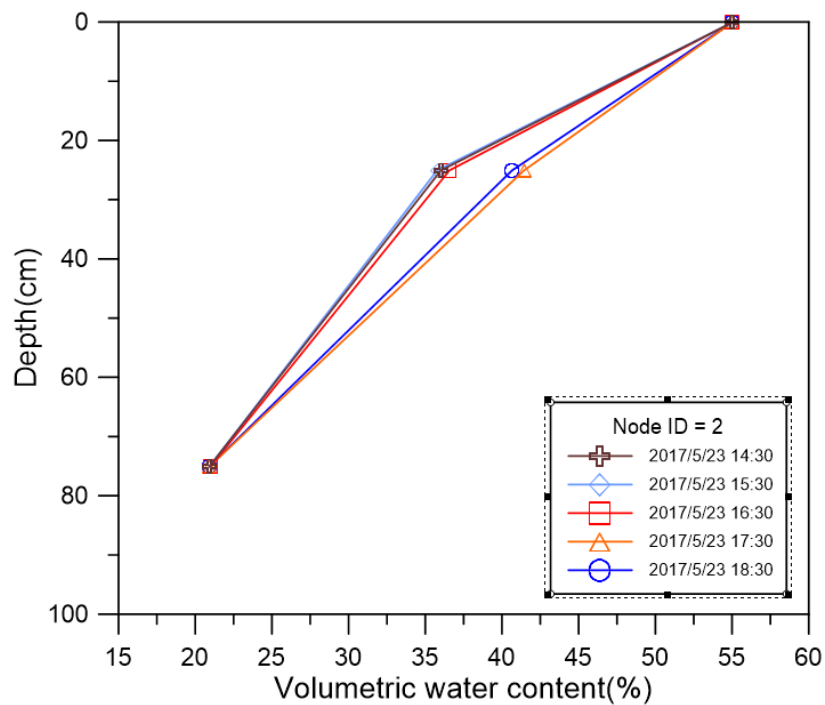


圖 4.26 Node2 土壤體積含水量依時性剖面

表 4-4 不同測站淺層入滲速率

Node ID	淺層入滲速率(m/sec)
0	4.7×10^{-5}
1	1.5×10^{-5}
2	4.2×10^{-5}

4.2.3 傾斜儀監測結果

圖 4.27 為各監測模組測得之傾斜角變化，傾斜角方向之數值意義如圖 4.28 所示，結果顯示甲仙邊坡之各測站位置，於觀測期間內有約 0.5 度微幅的滑移，其方向同邊坡走向，惟傾斜角變化幅度甚小，暫無淺層邊坡破壞跡象，仍待系統長時間觀察。

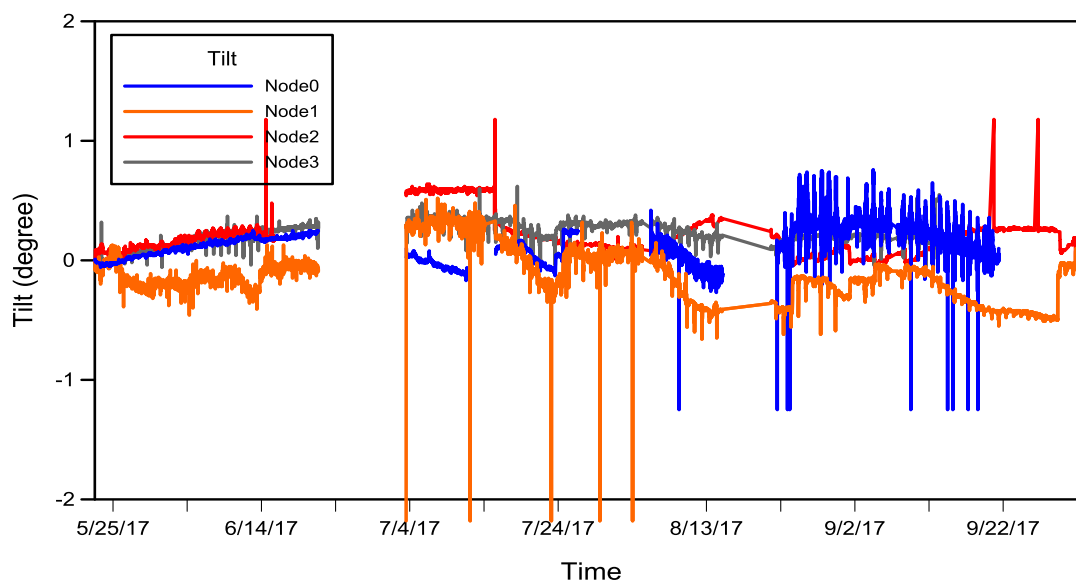


圖 4.27 測站傾斜角監測結果

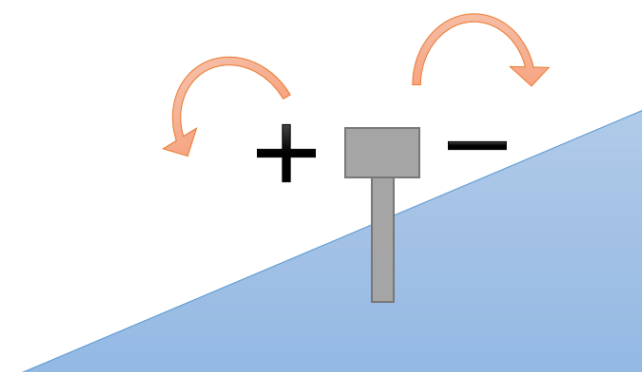


圖 4.28 傾斜角量測方向

4.3 西湖場址土層監測模組安裝測試

西湖場址位於國道三號西湖服務區北上段旁之邊坡(如圖 4.29 示)，邊坡定位約在北緯 $24^{\circ}33'48.21''$ 、東經 $120^{\circ}45'37.37''$ (如圖 4.30)。於西湖場址取樣做室內基本物性試驗，包括篩分析試驗、比重計試驗、土壤比重試驗、阿太堡試驗、現地乾單位重試驗。由篩分析試驗結果結合比重計試驗結果可得土壤粒徑分布曲線，可大致分類為含細料細砂，大部分粒徑分佈於 100 號篩，細料含量超過 12%，由阿太堡試驗

結果液性限度 LL 為 42，塑性限度 PL 為 26，塑性指數 PI 為 18，統一土壤分類法分類結果為 SC(黏土質砂)。由現地取低擾動土樣試驗，三組結果平均得現地乾單位重 $\gamma_d = 1.47 \text{ (gw/cm}^3\text{)}$ ，換算可能土壤單位重約介於 $14.5 \sim 18.75 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ ，若取平均(飽和度 50%)則單位重約為 $16.62 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 。



圖 4.29 西湖邊坡實照

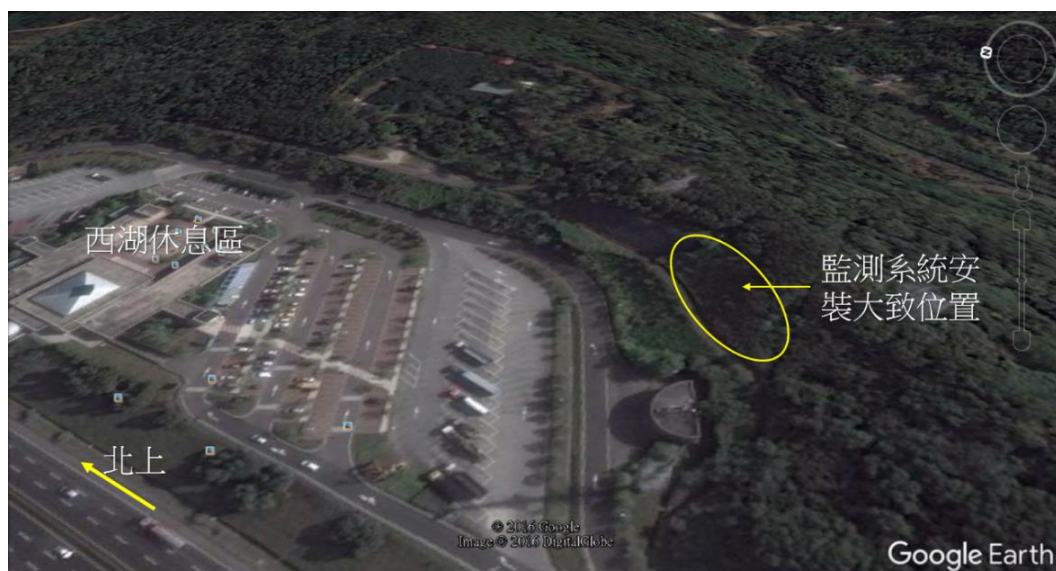


圖 4.30 西湖系統安裝位置示意圖 (Google Earth)

監測系統設計上由監測模組、太陽能系統及資料接收端三部分組成(如圖 4.31)，監測模組上配置多點電子式含水量計、高精密度電子式傾斜儀、無線傳輸模組及微控制器，為各種微機電感測元件之整合，量測各深度土壤含水量及地表傾斜量，並將資料以無線傳輸方式傳出。太陽能系統用於供給監測模組電力，使系統不斷電長期監測。資料接收端由電腦與 4G 連網組成，主要接收監測模組傳出之資料自動記錄，並連結網際網路可從遠端隨時監控。

西湖場址於 2016/12/09 共安裝 3 支監測模組，分別編號為 Node 2、Node 5 及 Node 10，並因前幾個月監測成果較不如預期，因此於 2017/03/23 將 Node 2 更換為 4 深度含水量量測，並於回填時確保土壤夯實緊密與含水量計緊密接觸，現場各監測模組尺寸及安裝深度如圖 4.32，實際安裝於邊坡之相對位置如圖 4.33，Node 2 為 4 深度含水量量測總長約 1 米，Node 5 為 2 深度含水量量測總長約 1.1 米，Node 10 為 3 深度含水量量測 1.3 米。

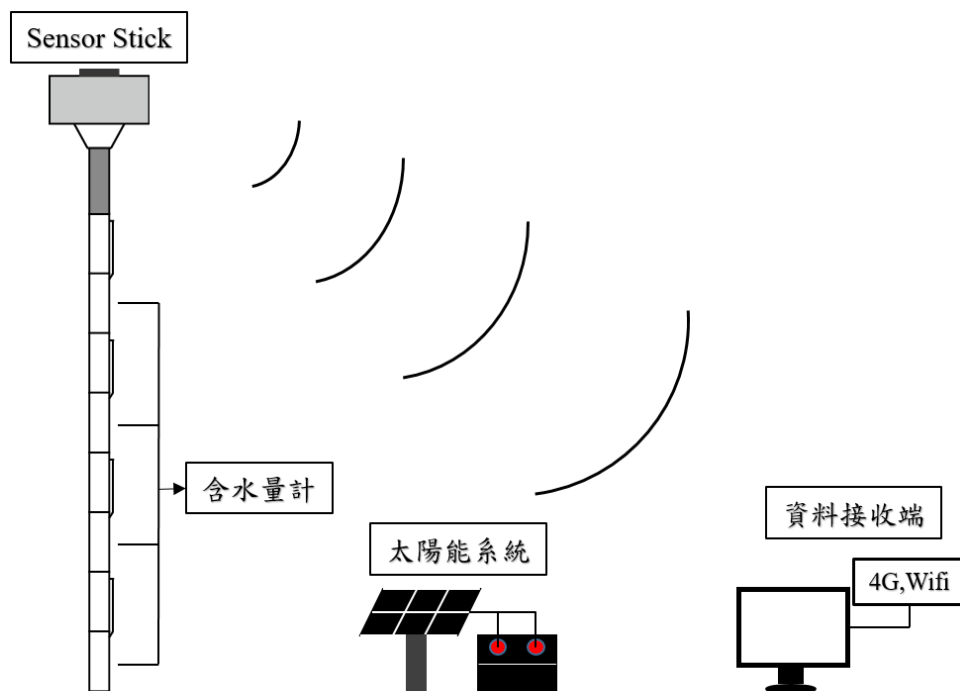


圖 4.31 西湖監測系統架構圖

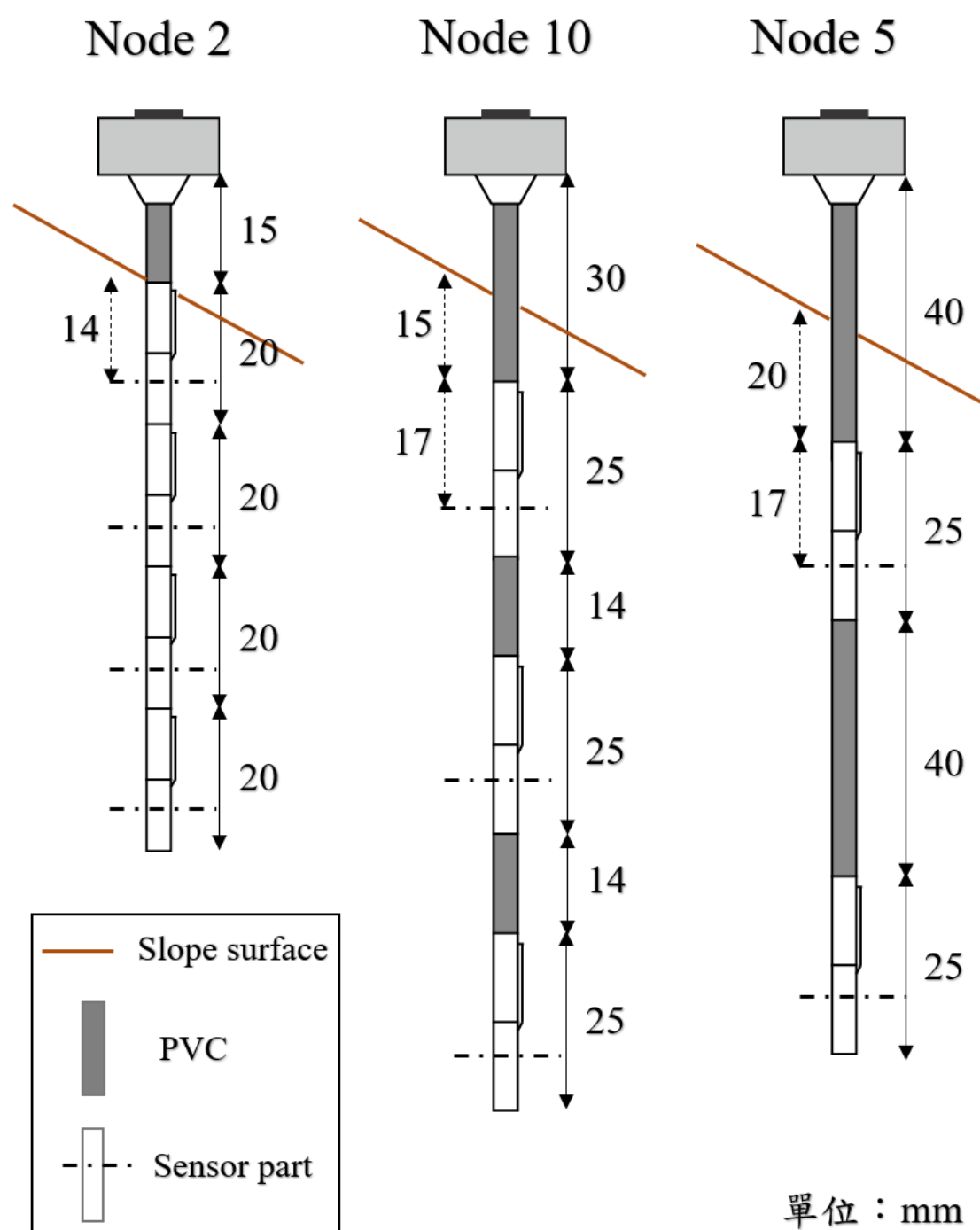


圖 4.32 西湖場址監測模組尺寸與實際安裝深度示意圖



圖 4.33 各監測模組安裝相對位置與系統盒內模組

監測模組安裝流程如圖 4.34，先利用手持式電動鑽機於安裝位置鑽孔至預定深度，鑽孔直徑需大於監測模組感測桿端直徑，而後將孔內土壤挖除以便放入監測模組，置入監測模組後將水準儀放上確保垂直度，再將挖除之土壤回填並夯實，必須讓土壤水份計與土壤緊密接觸，若未緊密接觸則可能造成量測上的錯誤，回填完成後於模組地表周圍鋪上薄層皂土(蒙脫土)並加水，防止降雨雨水直接沿著桿壁向下流。

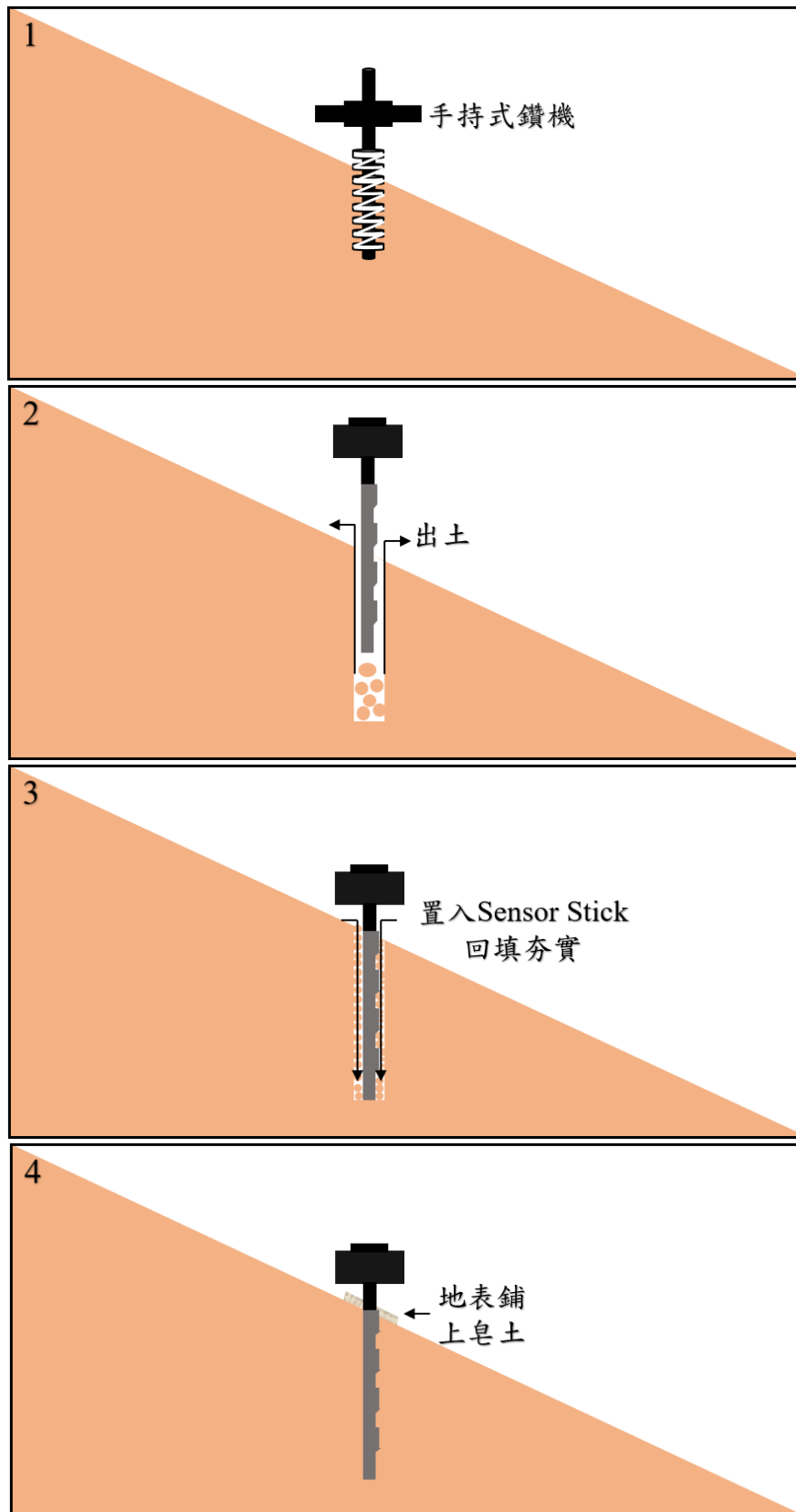


圖 4.34 監測模組安裝流程圖

資料接收端位於邊坡下方之機房內如圖 4.35，距離安裝監測模組之邊坡約 50 米，設備主要有 Arduino+ nRF24L01、Huawei 移動寬頻及電腦，將所有設備所需電源接上，移動寬頻僅須開啟 wifi 並設定好 4G 網際網路連線，電腦連線上移動寬頻 wifi，開啟永不休眠模式，並用 USB 連接 Arduino 開啟 Tera Term 程式自動記錄資料，同時開啟 Teamviewer 以便遠端監控。因機房為二層混凝土建築，為了使無線通訊上障礙減少，nRF24L01 需外接一條延長式天線並固定於窗戶上。



圖 4.35 資料接收端位

4.4 西湖場址監測資料

本計畫於西湖安裝監測模組後，各監測模組資料約每 10 分鐘穩定無線傳輸至資料接收端的電腦，計畫期間除因幾次電量不足及電腦故障因素導致了資料傳輸中斷，已記錄了從 2016.12.23 ~ 2017.04.28 約 5 個月之資料(包括含水量與傾斜量)。於去年 12 月至今年 3 月間，屬旱季降雨事件極少，因此土層含水量幾乎沒有特別變化，至 3 月底至 4 月中開始有降雨事件。以下為因降雨造成之含水量變化資料以及傾斜量變化資料。

4.4.1 西湖場址土層含水量監測資料

本章節擷取了 3 月底至 4 月中兩場降雨事件，選取 Node 2，4 深度(地表下 10、30、50、70 cm)含水量量測監測模組之資料，但因地表下 30cm 含水量計故障，因此僅有其餘 3 個深度之數據。而 Node 10 含水量計已有兩個深度損壞，Node 5 含水量量測異常(可能與安裝土壤回填未緊密有關)，因此本章僅擷取 Node 2 之資料。

圖 4.36 為 Node2 於 2017/3/31–2017/4/02 之含水量隨降雨之變化，可看出降雨發生後，地表下 10cm 之含水量計最先反應含水量增加，而後 50cm 之含水量計隨後慢慢增加，最深之含水量計原先幾乎沒有變化卻突然與 50cm 含水量增加至近乎飽和，以降雨入滲的觀點不太可能有這麼迅速的含水量變化，尤其雨量其實不大，因此合理推斷為最深處含水量計周圍土壤安裝時較難夯實緊密，可能因周圍回填土壤相較於現地未擾動土壤疏鬆且裂隙較大，當上層土壤水量足夠時直接流入最深的含水量計周圍導致量測之含水量極高，且降雨過後土層含水量消散也可看出最深處含水量計消散的最慢，因此推斷為類似碗公儲水的可能性極高。

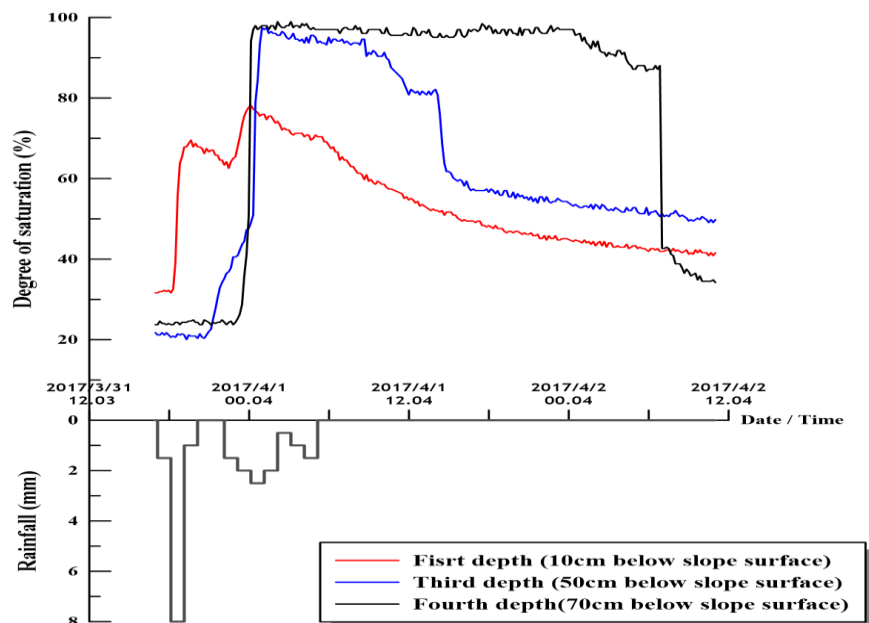


圖 4.36 Node 2 於 2017/3/31–2017/4/02 降雨與含水量變化

圖 4.37 為 Node 2 於 2017/4/11–2017/4/16 之含水量隨降雨之變化，其變化趨勢與圖 4.36 之降雨事件類似，10cm 含水量計隨降雨量之

變化反應迅速，50cm 則較慢反應，70cm 最深之含水量則出現儲水的反應現象。由兩次降雨事件結果可得出：(1) 離地表越近之土壤含水量直接受降雨量之影響變化最顯著，而越深之含水量則反應越慢。(2) 現地安裝監測模組因挖填導致土壤孔隙變化，可能造成量測上的問題，且水可能直接進入挖填最深處造成儲水。因此安裝時盡量減少回填土壤與周圍土壤滲透上的差異性為入滲監測準確與否之關鍵。

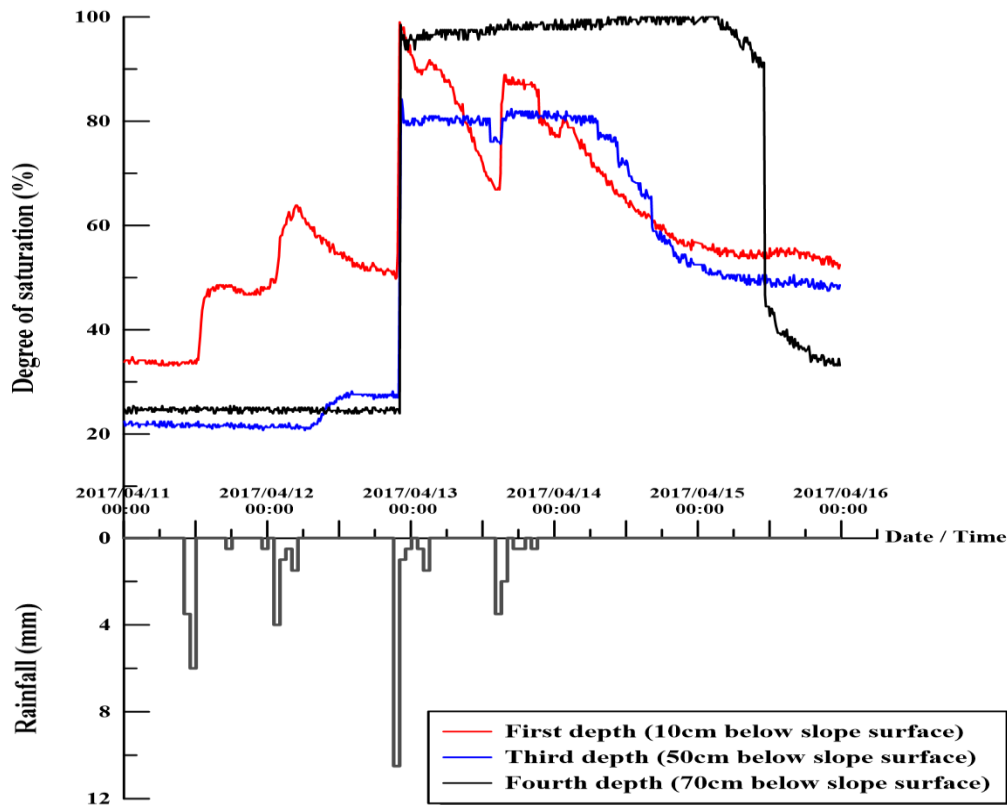


圖 4.37 Node 2 於 2017/4/11—2017/4/16 降雨與含水量變化

4.4.2 西湖場址傾斜監測資料

圖 4.38~圖 4.40 別為 Node 2、5、10 於 2016/12/23 至 2017/4/28 之監測傾斜量變化結果。各 Node 初始傾斜量即有約 1~2.5 度不等的傾斜量，原因為鑽孔非垂直與傾斜模組焊接於電路板時即有些許偏斜，初始偏斜量僅作為後續監測相對應之初始值。

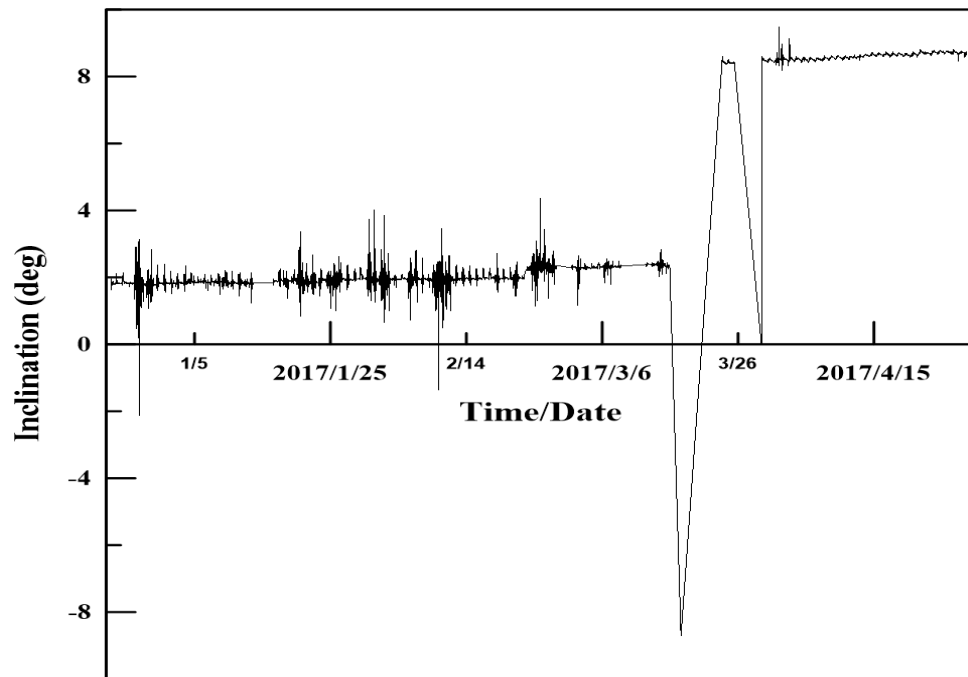


圖 4.38 Node2 於 2016/12/23—2017/4/28 傾斜量變化

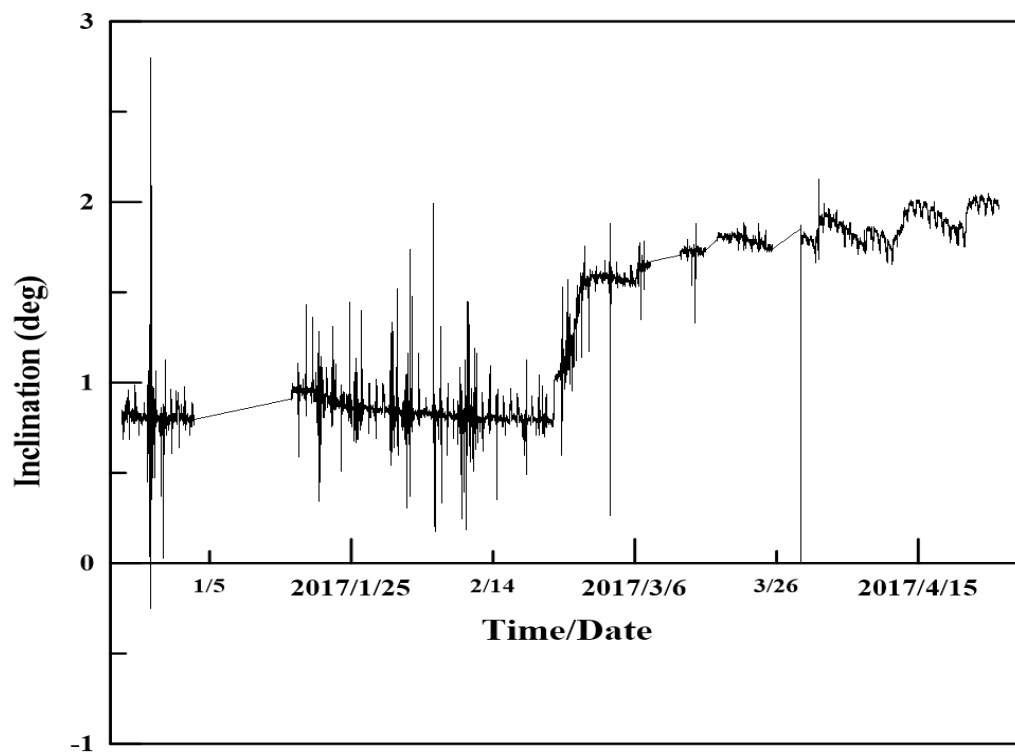


圖 4.39 Node5 於 2016/12/23—2017/4/28 傾斜量變化

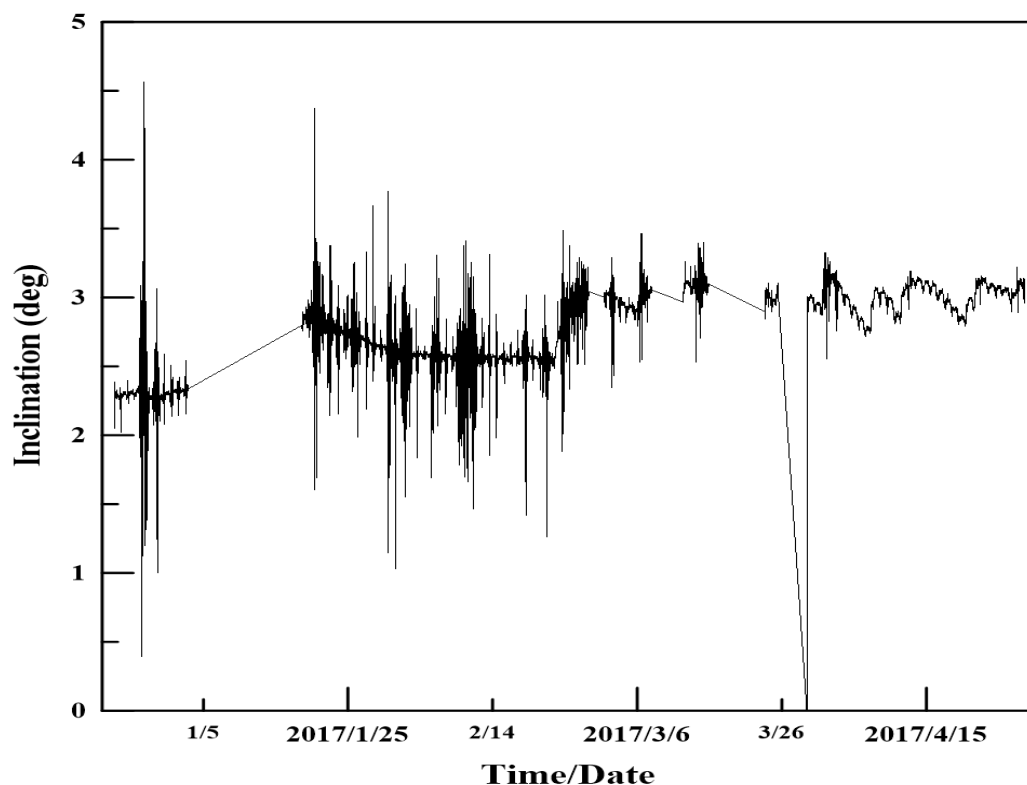


圖 4.40 Node10 於 2016/12/23—2017/4/28 傾斜量變化

由各 Node 長期監測結果可發現整體趨勢為傾斜量增加約 0.5~1 度左右，期間有許多時間跳躍的點位代表系統供電不足暫時無法收取資料，通常待太陽能自行充電足夠後電池即恢復放電，而傾斜量變化較大之狀況為因風力或者系統於斷電後復電第一次數據量測誤差造成。圖 4.38 之 Node2 數據於約 3/20 後傾斜量增加至 8 度原因為更換監測模組時因原鑽孔有些許坍孔，導致置入新的監測模組時僅能勉強嵌入鑽孔無法確保水平。現地淺層變位監測結果顯示場址於過去半年內傾斜量約增加 0.5~1 度，假設監測模組底端若為不動點則換算後之地表位移約 0.8~1.7cm 左右，代表此邊坡淺層可能有持續潛變的現象，但實際上是否如此仍需持續觀察。

4.4.3 更新後西湖場址監測資料

西湖監測站因原有系統於 7 月上旬大部損壞，因此於 7 月下旬進行系統重整更新，更新為與甲仙場址相同系統，並增設一組監測模組

(Node ID=6)，相關觀測成果如圖 4.41 至 4.44 所示，更新後系統穩定度顯著提升。

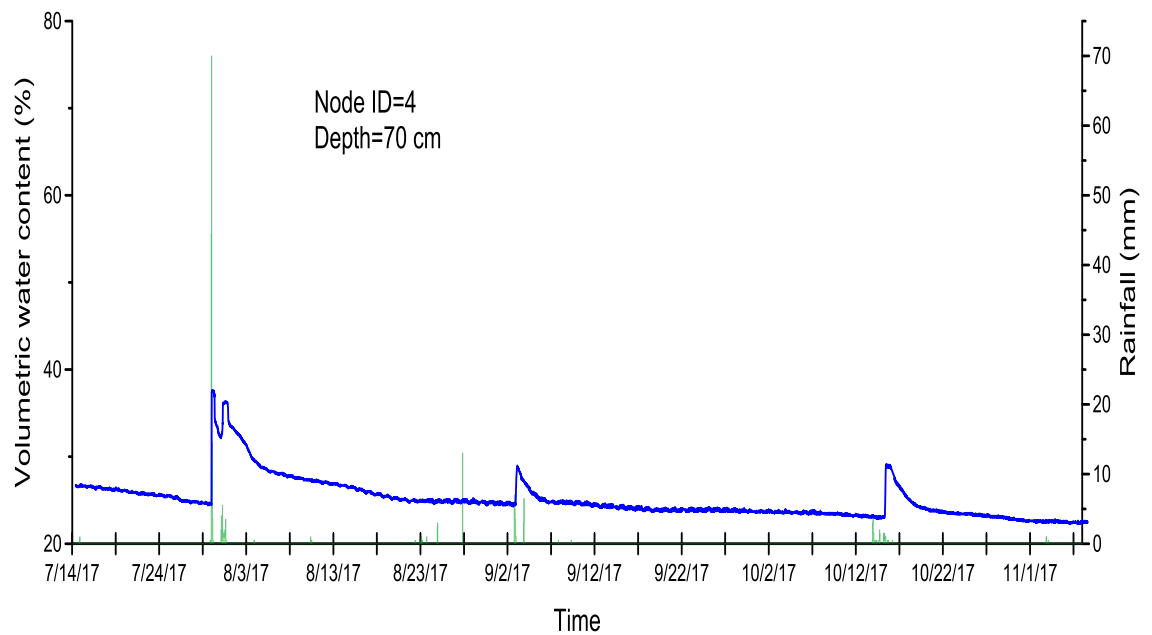


圖 4.41 更新後西湖 Node4 土層含水量紀錄

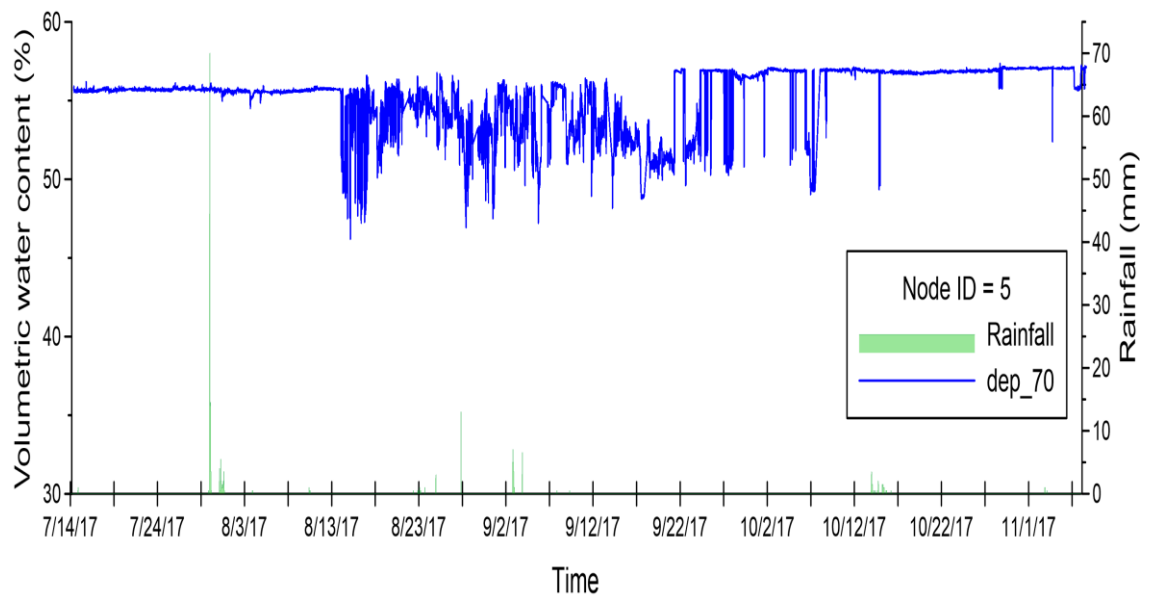


圖 4.42 更新後西湖 Node5 土層含水量紀錄

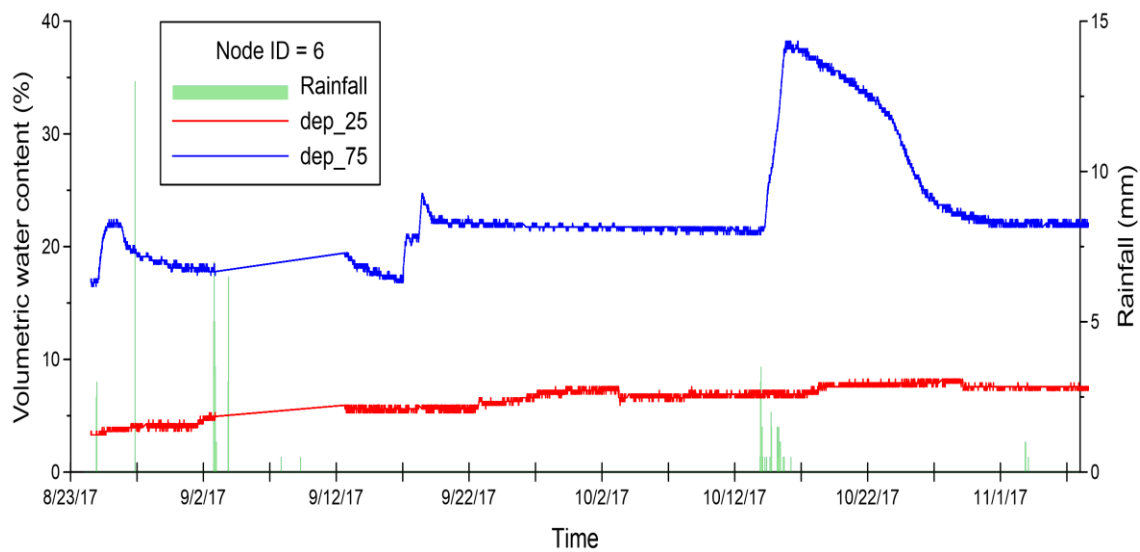


圖 4.43 更新後西湖 Node6 土層含水量紀錄

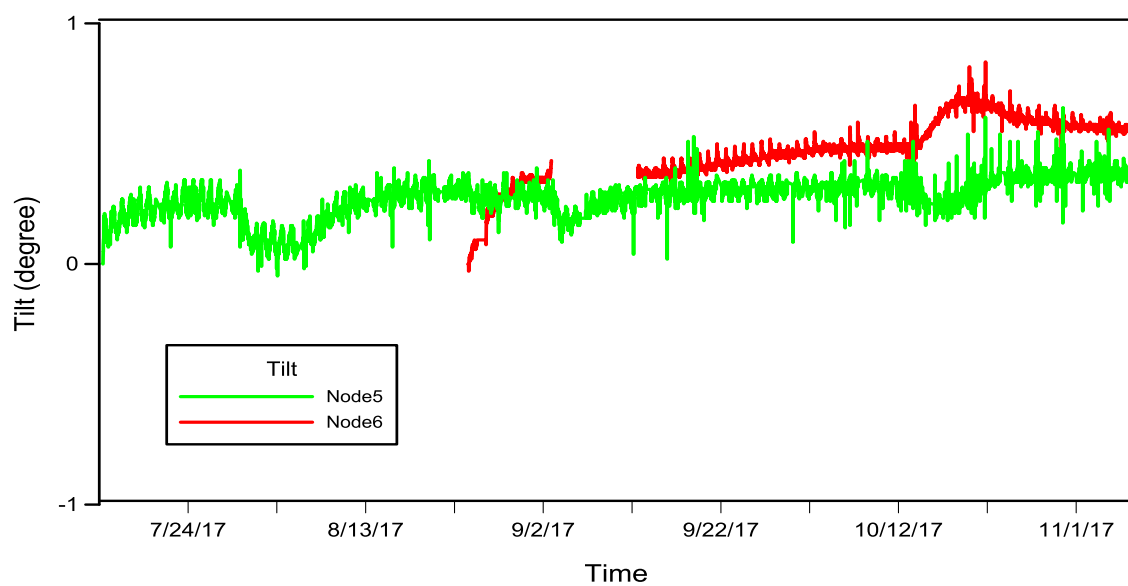


圖 4.44 更新後西湖傾斜量紀錄

第五章 深層滑動場址監測與分析

針對深層滑動機制分析，本年度之主要目標為完成水力力學耦合之邊坡極限平衡與數值模擬，初期關鍵為選定適合之研究場址，相關幾何模型與地質參數參考文獻，依選定場址之現地幾何與地質材料性質，進行二維水力力學耦合分析，此結果將可作為規劃深層滑動表層監測模組量測物理量之依據，所規劃之深層滑動無線感測模組原型亦可進行現地測試。

深層滑動候選場址須符合下列條件：

1. 現地需具有厚層軟弱土壤，坡角小於土壤有效摩擦角，地下水位高或入滲速率快，臨界破壞面為飽和土層之深層破壞。
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. 鄰近具有通訊訊號，以進行雲端資料傳輸。

由於本計畫研究對象為深層土壤邊坡破壞，此雖為台灣常見之災害類型，但進行解析法分析需有一定解析度之地形幾何與詳盡之地質材料參數資料，經與承辦單位進行商討，由相關設計或施工單位收集相關資料，本年度選定以阿里山五彎仔路段進行研究。

5.1 五彎仔深層監測

5.1.1 五彎仔路段資料彙整

根據交通部勘查全臺灣公路，阿里山公路列名最危險公路之一，其中以阿里山公路五彎仔路段最為嚴重，該公路之里程樁號為42k+900~45k+500之路段，行政區域屬嘉義縣番路鄉公田村。自民國71年拓寬通車後，該路段常常發生路面下陷龜裂及檔土結構物錯動破

壞，且每年投入許多經費養護、整治，但該路段至今仍繼續滑動中。而在民國 92 年 6 月發生大規模崩坍，其中崩坍範圍如圖 5.1 所示，阿里山公路 31.5k 裸坡崩坍後，不但造成沿線交通中斷 3 個月且該路段因此改線。

依民國 93 年青山工程顧問公司五彎仔地滑區調查與監測結果，圖 5.2 顯示五彎仔地滑區所埋設監測儀器配置圖，但所安裝之各式監測儀器，大多因坡面滑動而造成破壞，無法繼續發揮監測功能。據該研究結果，進行水平排水井整治前，該地區仍在繼續滑動中，其中以 N2、N3 及 N4 滑動塊體滑動量最大，在雨季期間，平均每月滑動可達 1.5 公分。另外現地地質調查與監測結果顯示，此區域岩層層面與坡面傾向並非一致，可排除地層滑動與順向坡之關連性，其可能滑動機制為崩積層與岩層介面之滑動或沿著深層破碎岩層弱面滑動，加上該區域涵蓋有剪裂帶且岩層也相當破碎。雨季期間，受地表水入滲的影響，局部區域地層之水位或水壓遽增，也可能是地層滑動主要之原因。

五彎仔地滑區面積約達 50 公頃，各滑動塊體滑動位移方向，大都朝向坡址之南獨座溪及北獨座溪向下滑移。根據青山工程顧問公司到查結果，將阿里山五彎仔地區分為 8 個滑動塊體，如圖 5.2。其中以 N2、N3 及 N4 滑動塊體滑動量最大，尤其在雨季期間，平均每月滑動可達 1.5 公分。可從水位觀測井 B2、05-02 及 05-01 的觀測數據得知，在暴雨其間該區域之水位變化均可達數十至二十公尺以上，顯示該區域地質是非常破碎且影響水位變化的可能原因並非全由地表水入滲，部分是由側向水流補注所造成，導致地下水位上升快速，土壤有效應力減小，降低土壤之抗剪強度，造成該區域滑動量為最大。



圖 5.1 阿里山公路五彎仔路段航照圖（青山工程顧問公司, 2006）

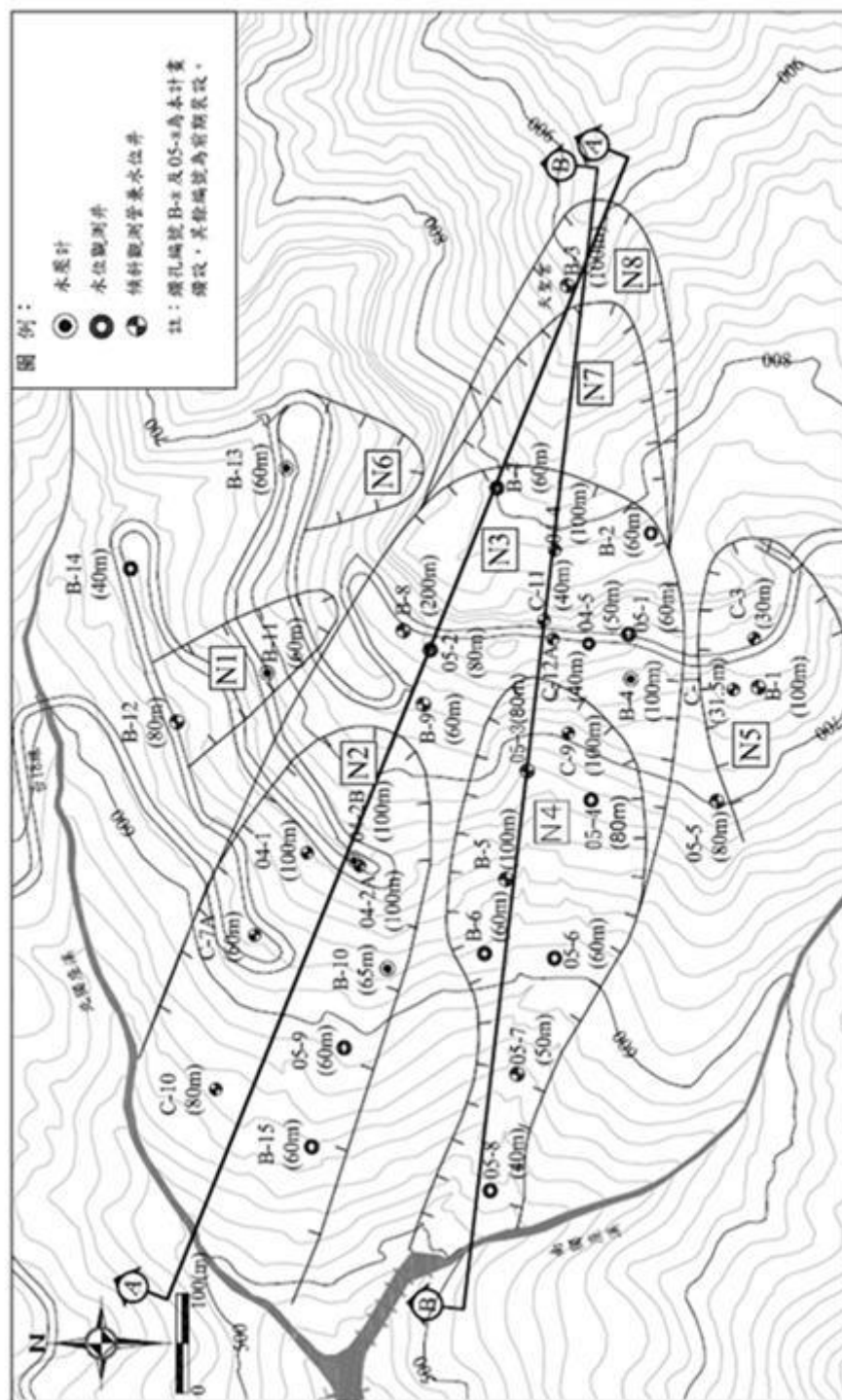


圖 5.2 阿里山公路五灣仔路段監測儀器配置圖（青山工程顧問公司，2006）

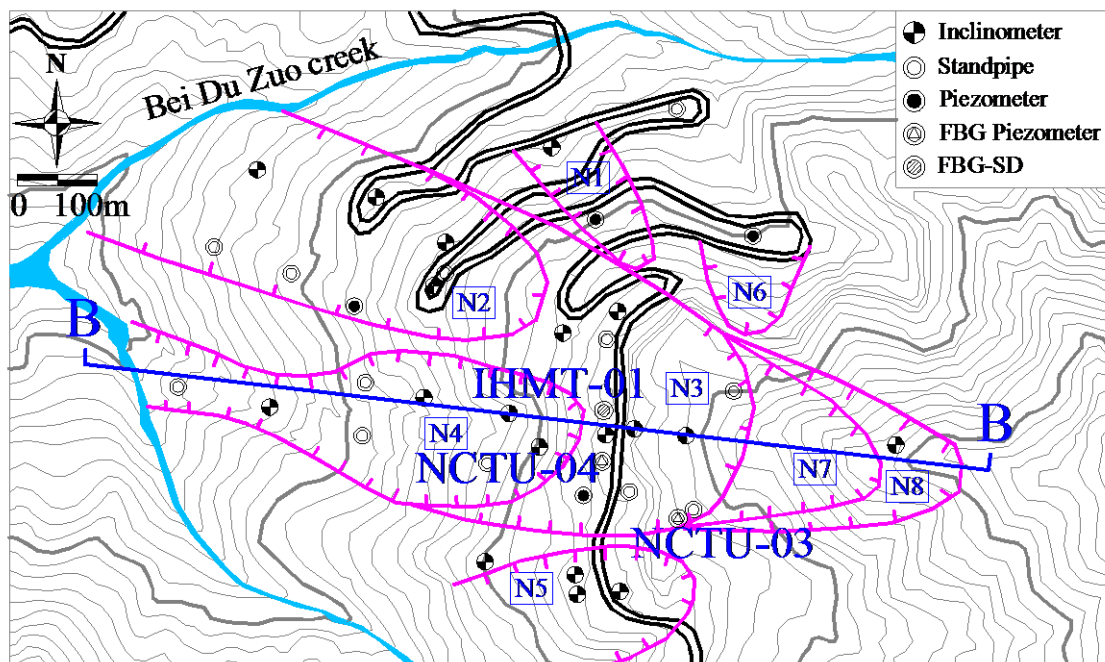


圖 5.3 全光纖式監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2007）

邱永芳等(2011)於 2006~2010 年間以光纖感測監測此區域之地層傾斜與分層水位變化，其配置如圖 5.3 所示，由 NCTU-03 於辛樂克與莫拉克颱風監測結果(圖 2.3)，該區域的地層內之水壓力變化，淺層部分水壓力會開始先增加，之後深層部分，因受其側向水流入滲，則水壓力開始有變化趨勢，可觀察出，當地層內部受到水平向滲流影響時，則水壓並非呈靜態水力梯度增加。

本場址之優點包括具完整地質與監測資料、屬典型深層滑動、距離適宜且仍可能具滑動高潛勢，缺點為整治後力學與水力機制複雜、現有監測孔位非完全適宜及須取得相關許可。

5.1.2 五彎仔路段現狀與監測規劃

該路段於 2006 年 6 月 26 日區因山區連續豪大雨，造成 45k+500 處約有 150~170 公尺的路基嚴研重流失。決定由該崩塌坡頂較安全地方開闢道路來改線銜接前後公路路線，並且在災後該地滑區施作多處的擋土牆與全套管基樁及深長度地錨等抑制工法，如在 42k 的全套管基樁與地錨擋土工法並加貫入約 25m ϕ 15cm 之 HDPE 排水管等措施，

來緩和該地區的滑動與崩塌行為。且於 2014 年 5 月~2016 年 7 月期間委託專業工程顧問辦理該五彎仔地滑區之調查、整治及提出防治工程。

其中規劃排水工法，在地滑區布設大口徑(φ 4.5 公尺)、深度 45~50 公尺之集水井 (4 口，W-1、W-6、W-7、W-8)，並於井底再往上各 5m 打設有 3 層不同深度(每層有 9 管以 22.5°間距向上游打設，其仰角約為 4~6°其長度在 70m 左右每井約有 27 支集水管)，往上游打設扇形橫向集水管 (70 公尺)，藉由井底排水管往下游較適當地點在導排之，希望可以把該地滑區因降雨期間所造成之崩塌區的地下水位迅速排出，以降低其地下水壓力，提升其土體內的有效應力，即以較為軟性的抑制方式提高地滑區之邊坡穩定性，該大口徑深井排水工法的示意圖如圖 5.4 所示。

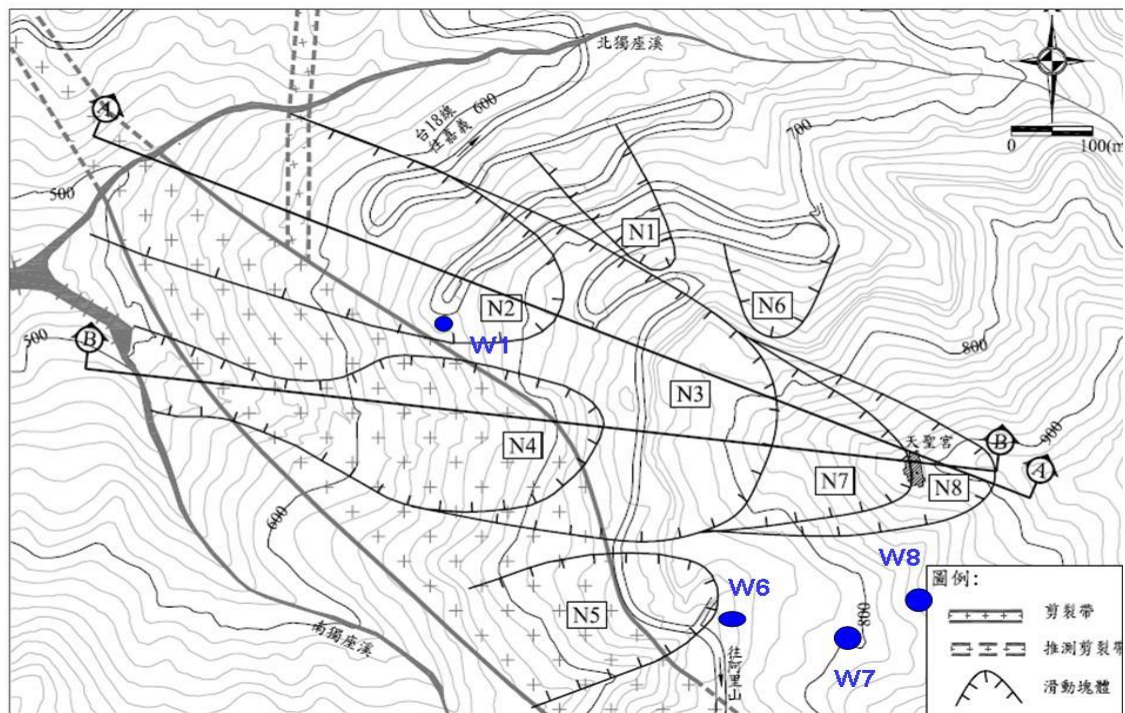


圖 5.4 台 18 線阿里山公路五彎仔崩塌區塊體滑動與深井配置圖(公路局五工處)

現地崩塌材料剖面如圖 5.5 所示，為含大顆粒礫石之典型崩積層，其堆積疏鬆且礫石多以懸浮狀態分佈於殘餘土壤，傳統上此類土壤強度參數決定須以大型試體進行剪力實驗，但受限此類設備並不常見且

價格昂貴，因此 Chang and Phantachang (2016) 提出考慮礫石含量之土壤強度修正程序，其建議以重模土壤顆粒進行控制 skeleton void ratio 之實驗結果，進行礫石顆粒效應修正，本研究將以此程序推估現地崩積層土壤強度參數。



圖 5.5 五彎仔地區崩積材料剖面

圖 5.6 為利用成大自行研發之單剪儀以五彎仔崩塌區土壤，以重模土壤顆粒進行控制 skeleton void ratio 之實驗結果，圖中顯示不同垂直有效應力下不同礫石含量之最大剪應力，可做為剪力強度參數推估之依據。

5.1.3 五彎仔路段監測規劃

圖 5.7 為公路局五工處提供現有該路段監測儀器配置，現地踏勘後考量破壞機制、破壞潛勢、監測井完整性、人員通達便利性及通訊訊號強度，選定 B-7 孔位，圖 5.8 為圖 5.4 中 A-A 剖面之滑動塊體分布及可能滑動深度，B-7 位於 N3 滑動塊體，滑動塊體底部約在 80~120m，B-7 孔深為 60m，地下水位在雨季約為 10~20m，乾季則在 40m 以下。

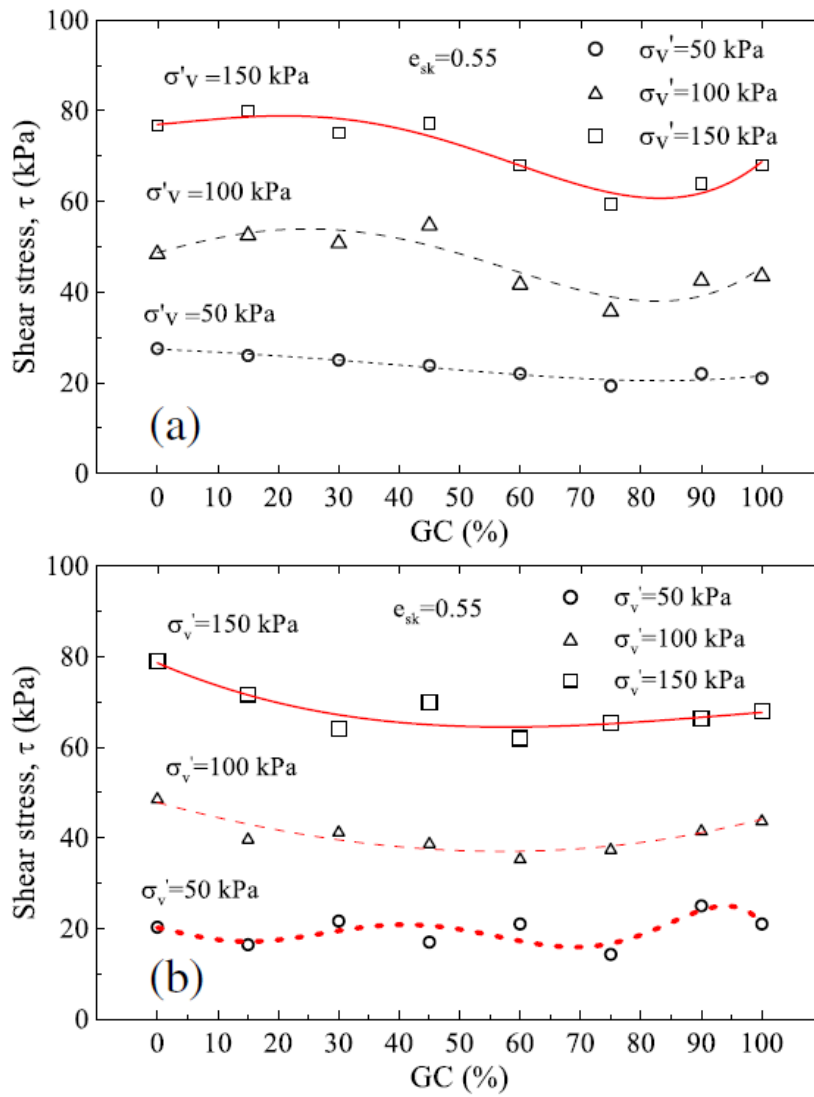


圖 5.6 五彎仔地區崩積材料剖面

經取得業管單位公路局五工處之許可後，深層滑動監測模組安裝於 B-7 井旁，感測模組外構與現場安裝如圖 5.9 所示，表層佈設入滲與傾角監測模組，增加液位計與通訊模組，圖 5.10 為內部電子配置圖，以太陽能板及鋰電池供給電源。

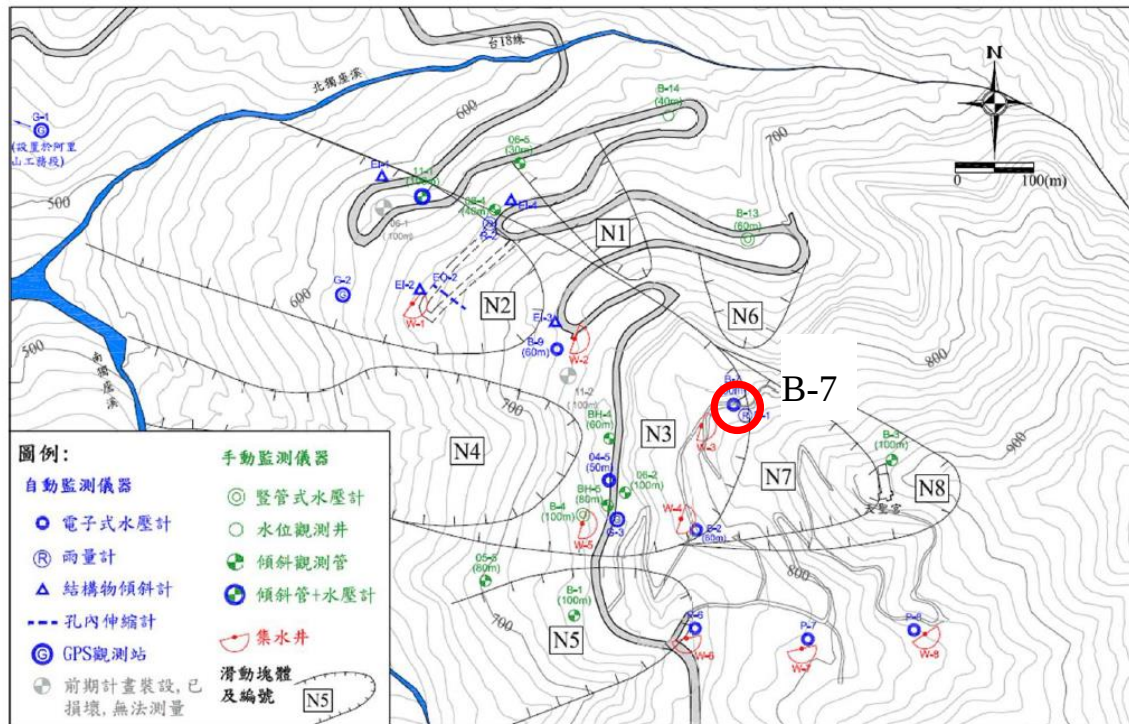


圖 2-1 監測儀器平面配置圖

圖 5.7 五彎仔崩塌區監測儀器配置圖(公路局五工處提供)

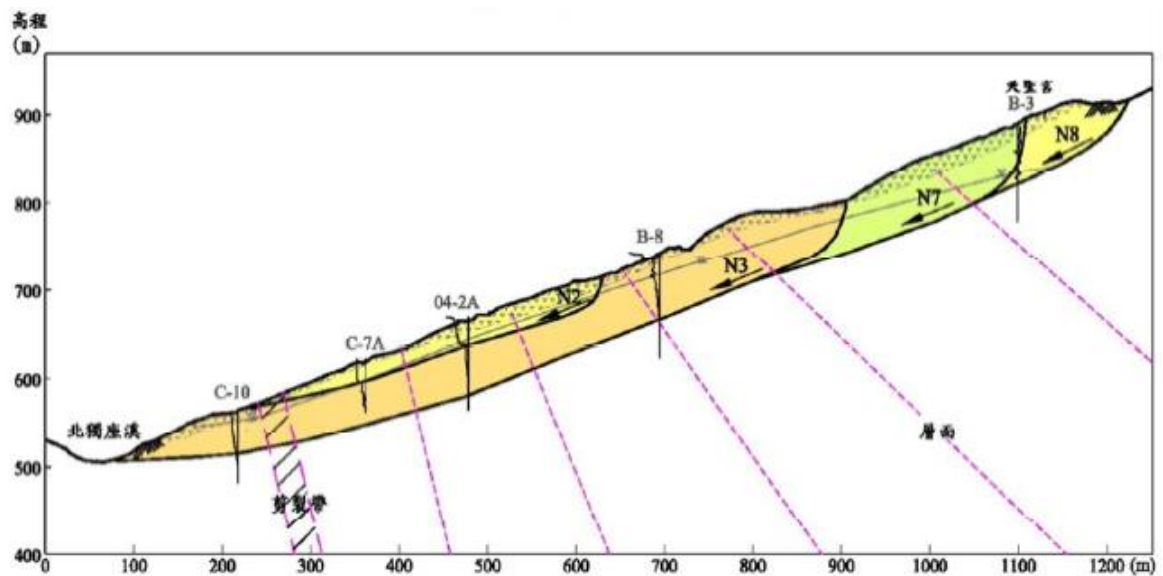


圖 5.8 滑動塊體分布及可能滑動深度圖(公路局五工處提供)

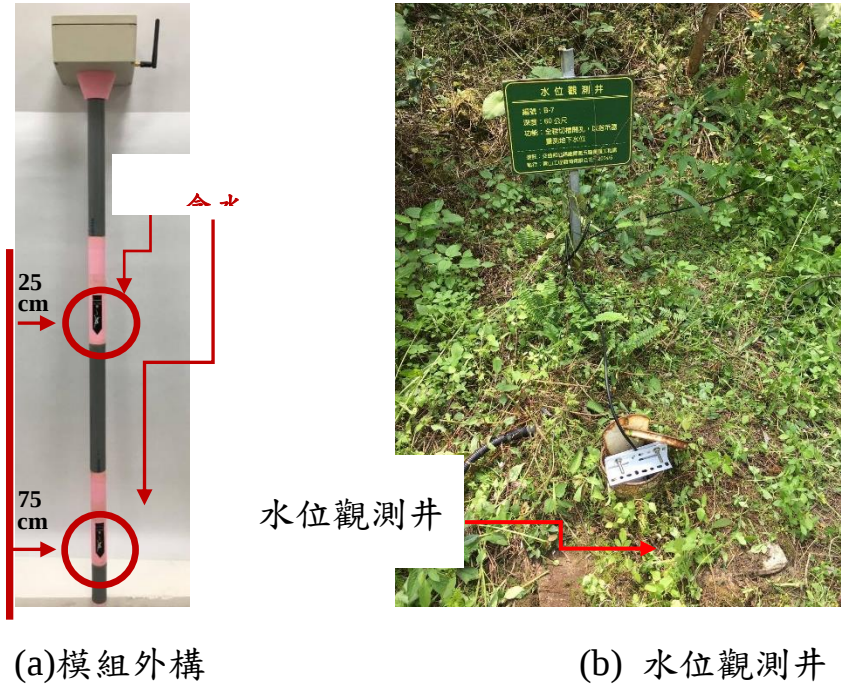


圖 5.9 深層邊坡無線感測模組外構與現場安裝圖

因目前僅有單一監測點，因此直接以 3G 模組上傳資料至雲端伺服器，但考量後續多點監測之需求，已預先整合 LoRa 通訊界面，另為連結類比式液位計，另加入類比-數位卡及直流電源供應，液位計底部位於地表下 30m，可量測水深為 20m，解析度可達 1 cm，每 10 分鐘讀取一次。

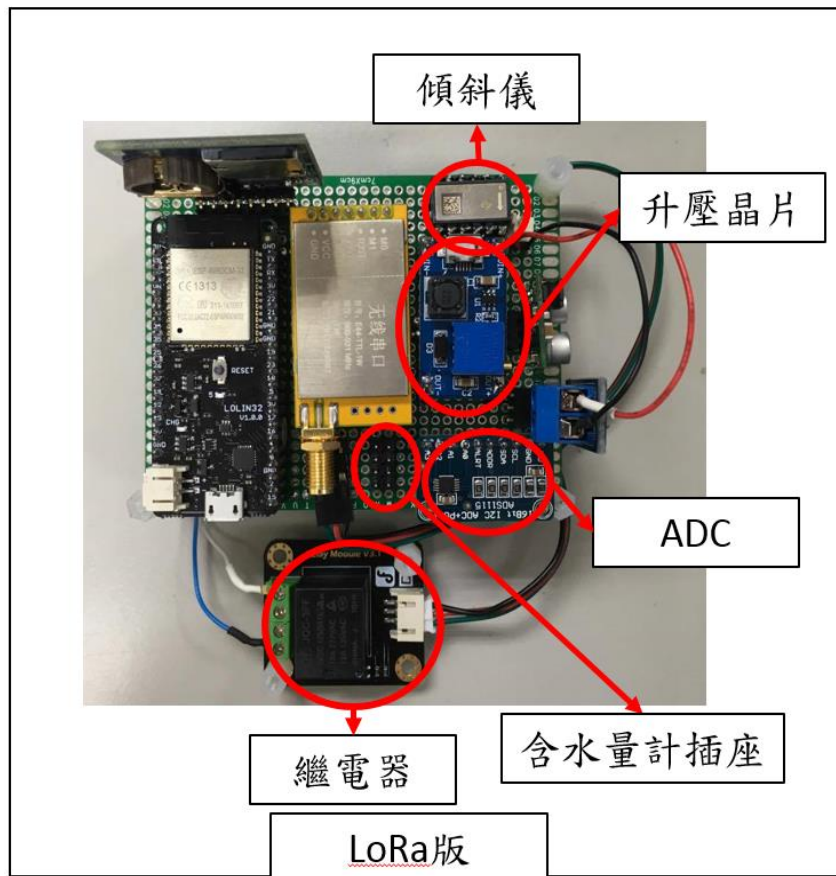


圖 5.10 深層邊坡無線感測模組電子配置圖

5.1.4 深層滑動模組監測成果

模組於 2017/09/05 裝設完畢上線後，因地下水位位於地表下 40m 以下，因此無水位紀錄，但地表分層水分及傾角仍持續有紀錄，結果如圖 5.11 及 5.12 所示，分層水位與降雨關聯符合入滲現象，而傾角則有持續變動。

為驗證地下水位監測之性能，研究團隊以相同之系統安裝於牡丹水庫右岸邊坡，進行性能測試，相近時間內監測成果如圖 5.13 所示，降雨與水位具正相關且水位上升具延遲現象，顯示深層監測模組架構已具一定完整性，以測試目的而言，符合原先規劃。

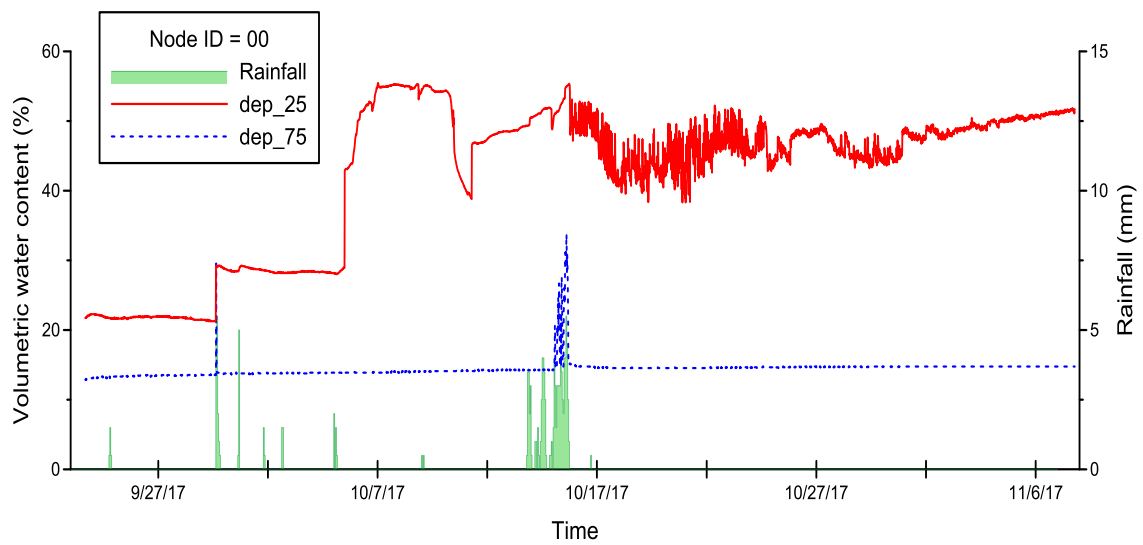


圖 5.11 深層邊坡無線感測模組分層水分紀錄

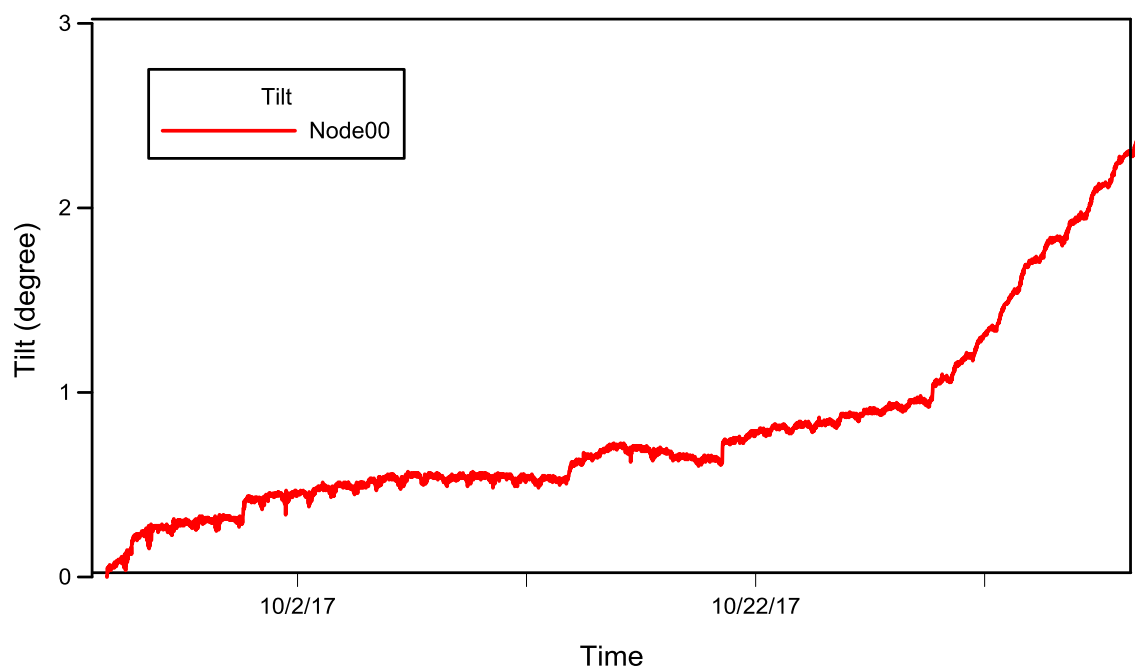


圖 5.12 深層邊坡無線感測模組傾角紀錄

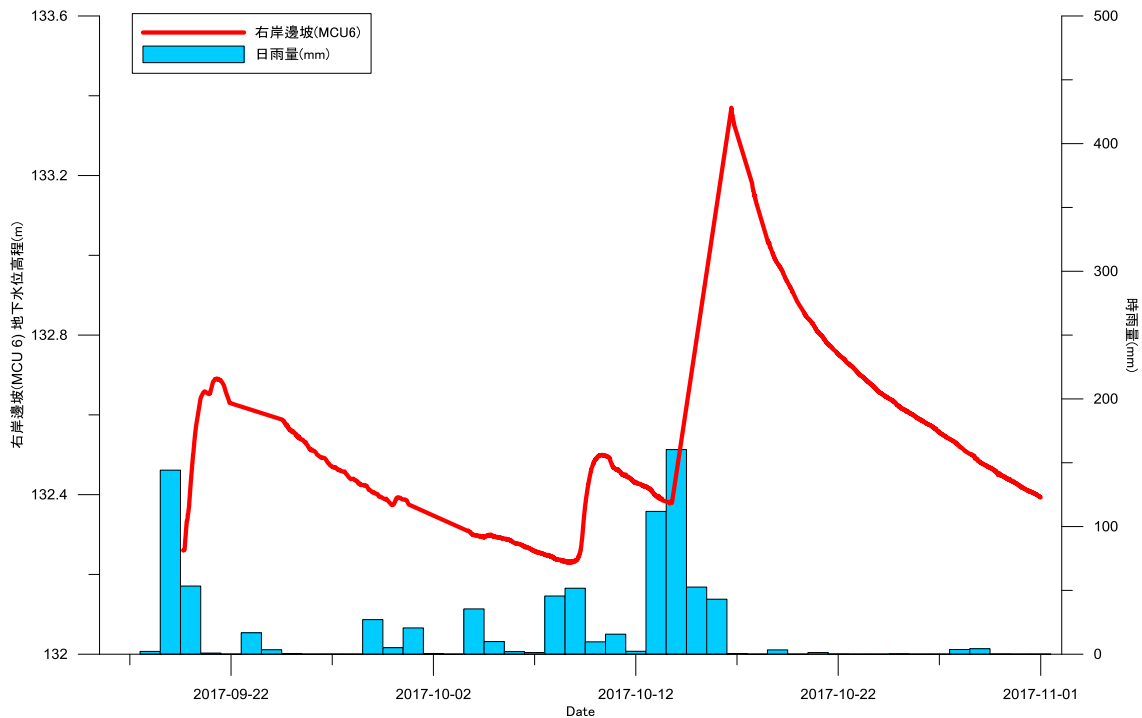


圖 5.13 深層邊坡無線感測模組孔隙水壓紀錄

5.2 五彎仔二維水力力學耦合穩定分析

為模擬降雨入滲引致之孔隙水壓變化，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)，進行五彎仔 A-A 剖面非飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且考慮非飽和土壤基質吸力改變對有效應力之影響，更新土壤彈性參數及強度，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程模擬。分析相關理論詳 2.3.5 節說明，模擬細節說明如下：

5.2.1 土層參數與幾何

依現有文獻顯示，五彎仔現地地層分為表土崩積層(Colluvium)、高度風化岩層(weathered rock, WR)、輕微風化(light weathered rock, LWR)及岩盤(Rock)，分析時採用之彈性與強度參數如表 5-1 所示，非飽和崩積層 van Genuchten (1980)模式擬合參數如表 5-2 所示，，非飽

和水文參數如表 5-3 所示，基質吸力引致土壤強度參數 ϕ^b 為 5° 。

表 5-1 分析所用土層參數

參數	單位	Colluvium	WR	LWR	Rock
非飽和單位重	kN/m ³	18.5	19.6	21.0	22.0
飽和單位重	kN/m ³	21.0	21.6	22.0	22.0
楊氏模數	kPa	4000	1.0E4	2.0E4	1.0E5
柏松比		0.4	0.35	0.35	0.25
有效凝聚力	kPa	0	4.0	12.0	120
有效摩擦角	度	31	30	40	40
膨脹角	度	2	0	0	0
滲透係數	(m/s)	1.0E-4	1.0E-6	1.0E-8	1.0E-10

表 5-2 崩積層 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

以圖 5.14 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 5.3 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学耦合模擬，分析時監測 B-7 孔位處之反應。

表 5-3 非飽和水文參數

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

圖 5.15~圖 5.16 為入滲達 $4.1E5$ 秒後水壓分布與流動向量、垂直有效應力分布，反應與前期甲仙場址相近，圖 5.17 位移向量及水平位移分布圖顯示鄰近 B-7 邊坡為位移量最大之地區，顯示其具有相對高滑動潛勢。

模擬至 $4.1E5$ 秒孔隙水壓及水分子流動向量如圖 5.15 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，第二階段為而當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，B-7 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 5.18 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。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，B7 預測於持續降雨入滲下於 $4.1*10^5$ 秒(約 5 日)產生滑動。

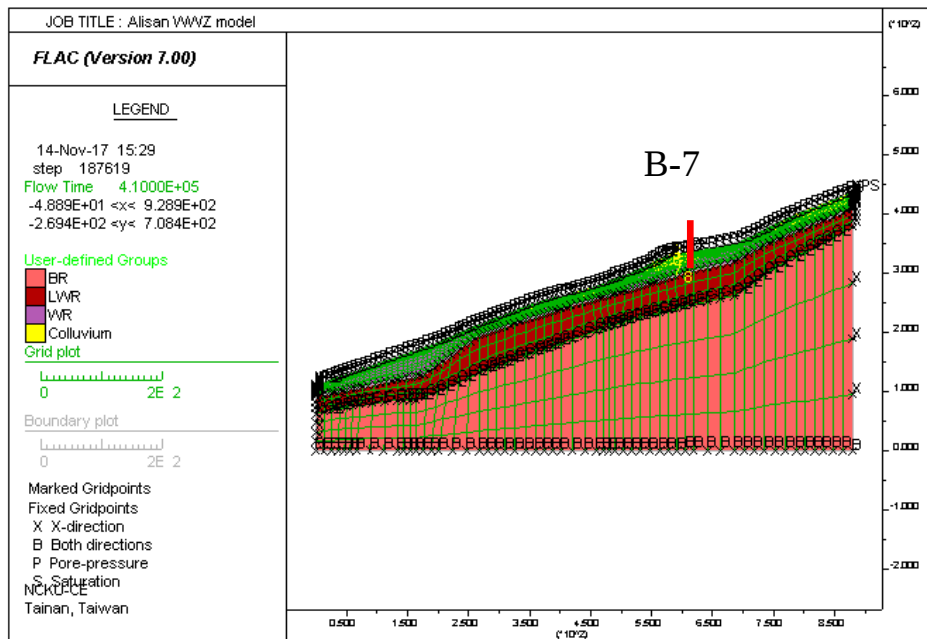


圖 5.14 五彎仔數值分析模型

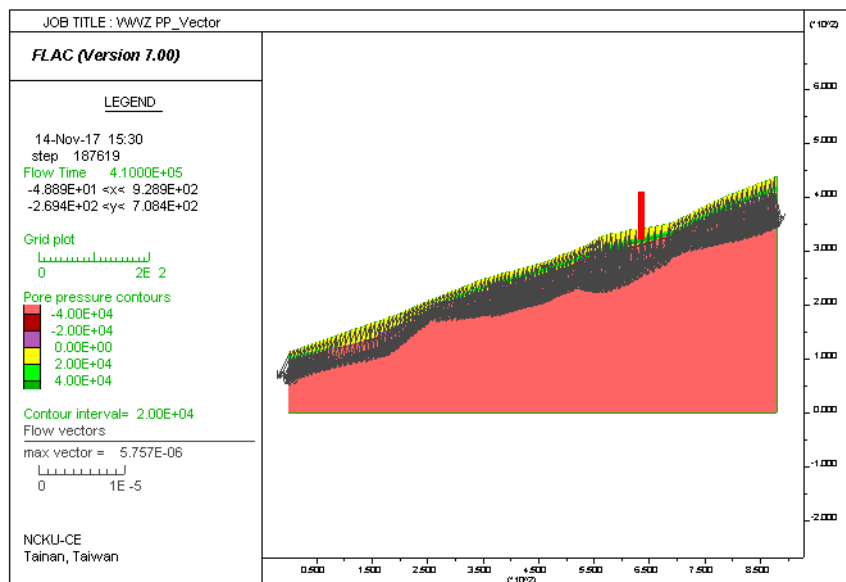


圖 5.15 入滲開始後 410000 秒後孔隙水壓分布與流動向量

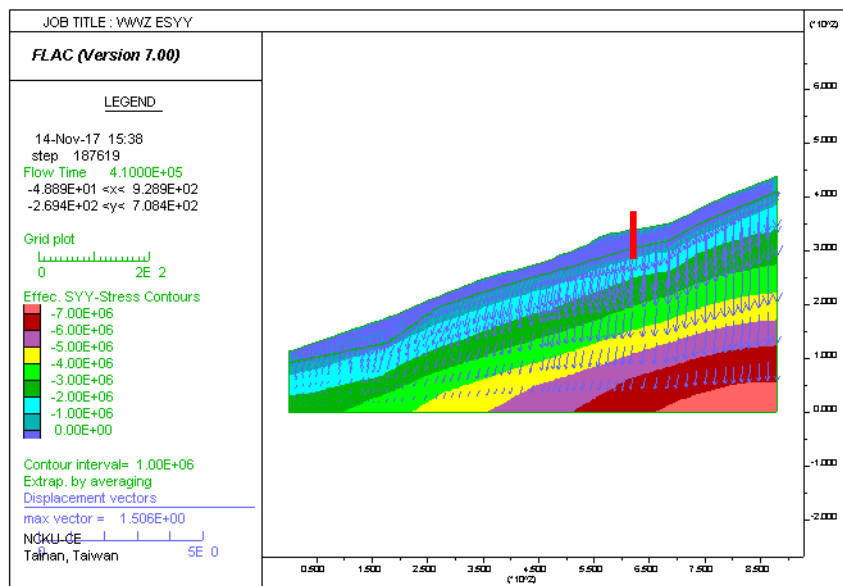


圖 5.16 入滲後垂直有效應力分布與位移向量

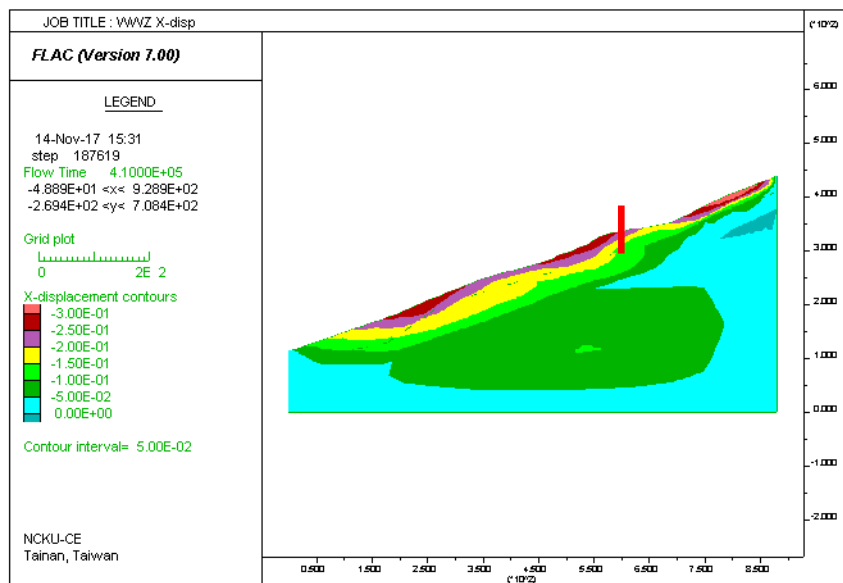


圖 5.17 入滲後水平位移分布

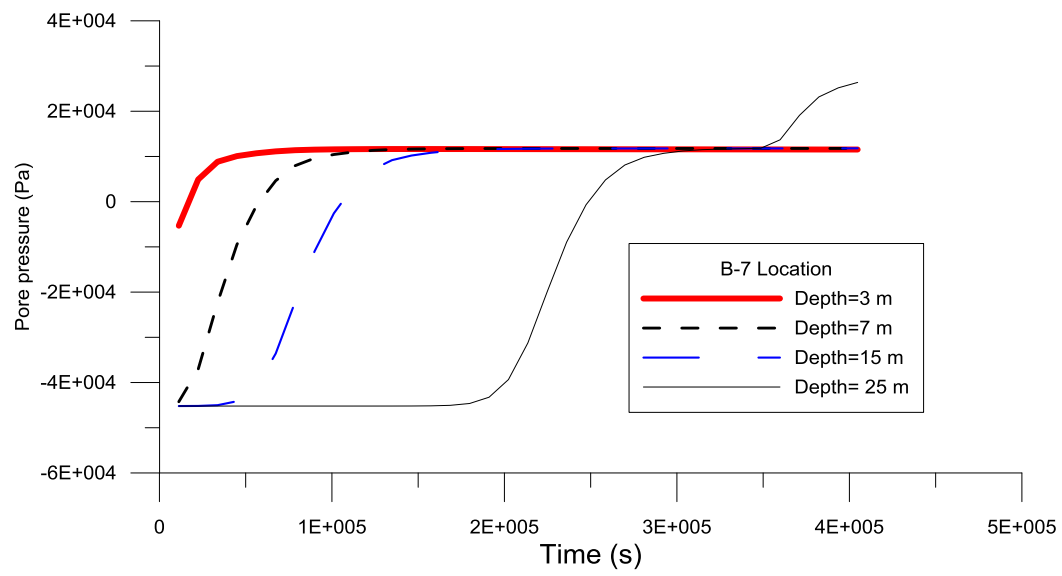


圖 5.18 B-7 位置預測孔隙水壓歷時

第六章 結論與建議

6.1 結論

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

1. 維護與精進運研所所已架設之公路土壤邊坡淺層崩塌監測無線感測網路模組 2 處場址，分別為甲仙及西湖場址，除持續進行監測與現地測試，並已更新相關硬體，增加雲端監看功能，大幅精進現有模組穩定與應用性。
2. 發展具深層滑動潛勢場址水力力學耦合解析法分析技術，撰寫分析軟體並進行資料擷取及分析測試：完成選定場址阿里山五彎仔 A-A 剖面之降雨垂直入滲下，水力力學耦合分析，同時推導孔隙水壓與安全係數關聯。結合孔隙水壓比依時關係及深層無限邊坡滑動理論，可推估符合無限邊坡破壞之依時反應，應用二維耦合分析之孔隙水壓歷時，可建立監測點孔隙水壓與滑動之關聯性，可做為後續依時預警之學理依據。
3. 研發適用於土壤邊坡深層滑動之低成本易安裝之無線監測模組，以原有淺層滑動監測模組為基礎，增加孔隙水壓量測功能，並於選定阿里山場址及測試邊坡進行監測模組原型測試，成果符合原先規劃且完整度高。

6.2 建議

針對本計畫執行提出下列建議：

1. 本年度雖選定研究五彎仔場址作為測試，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，相關數值驗證與監測比較仍待後續補強。建議如有後續研究，除考慮更換研究地點外，也考慮增列鑽孔費用及設置水位監測系統。
2. 由於地下水位非僅由現地垂直入滲而改變，因此水力力學耦合分析有其侷限，建議以長期觀測之地下水位與降雨特徵進行統計分析，帶入極限平衡分析架構，應可增加其應用案例。

重要參考文獻

1. 林哲毅，1999，「土壤電阻率與含水特性關係之探討」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
2. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙，2002，「先進邊坡監測系統之研發」，中國土木水利學會會刊，第二十九卷第二期，第 65-78 頁。
3. 青山顧問有限公司（2006），台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地滑地區補充監測執行總報告，交通部公路總局第五區養護工程處。
4. 廖文選，2010，「以 DSP 實現 GPS 與 IMU 感測器整合系統」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文。
5. 邱永芳、黃安斌、饒正、李瑞庭、陳志芳、何彥德（2011），全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試 (4/4)，交通部運輸研究所。
6. 張達德、蔡育秀、李宏徹、楊凱鈞，2013，無線感測網路應用於邊坡穩定即時監測系統的研究，第十五屆大地工程學術研討會。
7. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯（2017），公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)，交通部運輸研究所。
8. 社團法人永續發展工程學會（2015），宜蘭縣大忠村一號崩塌地特定水土保持區調查及監測計畫成果報告書，宜蘭縣政府。
9. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp. 544-552.
10. Cascini, L., Cuomo, S., Pastor M, and Giuseppe Sorbino, G. (2010). "Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp. 85-98.

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

21. Richards, B. G. (1965) "Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors.", in *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, A Symp. in Print. Australia: Butterworths, pp. 39-46.
22. Sassa K, Nagai O, Solidum R, Yamazaki Y, Ohta H (2010) An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide, *Landslides*, 7:219-236
23. Tsai, T.L and Yang, J. C. (2006) "Modeling of rainfall-triggered shallow landslide", *Environmental Geology*, 50(4), 525-534.
24. Uchimura T, Towhata I, Wang L, Seko I (2008) Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. In: *Proc. of the First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL)*, Tokyo, pp 611–614
25. Uchimura, T., Towhata, I., Trinh, T. L. A., Fukuda, J., Bautista, C. J. B., Wang, L., Seko, I., Uchida, T., Matsuoka, A., Ito, Y., Onda, Y., Iwagami, S., Kim, M. S., and Sakai, N. (2010): "Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface", *Landslides*, 7:351–357
26. Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes.", In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33.
27. van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Journal of Soil Science Society of America*, 44, pp. 892–898.

附錄一
期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

計畫編號： MOTC-IOT-106-H1DB002a

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. 本案深層滑動監測系統開發，應先將深層滑動的機制先研究清楚，與淺層滑動基本差異應先說明。無限長理論不太適合深層的概念。	本年度深層滑動定義常時坡角小於土壤摩擦角、滑動面發生於飽和土層、因孔隙水壓增加而產生滑動，相關滑動機制已於簡報補充，後續將進行二維水力力學耦合模擬，補足無限邊坡之不足。	同意辦理方式
2. P.3-1 系統架構採 2G/3G，可能要考慮更新或者選用 XBee。	目前區域網路已更新為 xBee，廣域網路採 3G 模組，後續將可更新至 NB-IoT 架構。	同意辦理方式
3. 對深層滑動場址的選擇應儘速決定，觀測系統應有較長的時間驗證。	將於 8 月上旬由所建議兩場址擇一並儘速安裝。	同意辦理方式
4. P.4-8 即時顯示看來，傾斜量變動很大，跳動達 0.2 度似乎不合理，是否為儀器的問題。溫度一直維持 27.6 度也不合理。	此為更新前系統傳輸不穩定之故，精進之系統已大幅改善穩定性，如甲仙場址所示。	同意辦理方式
5. P.4-25 傾斜量變化跳動很大，似乎不合理，達到 1 度以上，儀器表現不合理。	此感測器將於近期更新為新系統，可降低此誤差	同意辦理方式
朝陽科技大學營建系 賴俊仁委員		
1. 本計畫擬利用 MENS 之感測元件開發無線網路邊坡安全監測系統具有相當好的應用潛能，但各感測元件之精度及穩定性（圖 4.12、圖 4.28~4.30）是否符合要求則建議先加以確認。	圖 4.28~4.30 為更新前系統傳輸不穩定之故，精進之系統已大幅改善穩定性。甲仙場址紀錄顯示其穩定性符合需求。	同意辦理方式
2. 2.3.4 節之水力力學耦合數值分析是否考慮降雨強度之影響？	本研究非考慮降雨強度之影響，而以地表為飽和作為水力分析邊界。	同意辦理方式
3. P.2-26 圖 2.18 若改採飽和度是否可	此案例為深層滑動，不宜以	同意辦理方式

能有較佳的效果？	含水量或飽和度作為預警指標，將嘗試以孔隙水壓力作為預警指標。	
4. P.2-26 圖 2.19 地表傾斜度是否會受所在位置及破壞形式之影響？	不同破壞形式及位置其反應一定不同，此為客製化系統，所用地表傾斜度歷時為對應監測場點之預測值。	同意辦理方式
5. P.1-6 研究內容與項目中第 5 項之績效指標敘述方式建議加以修訂且應有明確之量化指標。	將於期末報告修正。	同意辦理方式
6. P.2-2 圖 2.1 之解析度建議加以改善。	謝謝委員提醒，已修正。	同意辦理方式
7. P.2-7 之圖 1.4 應為圖 2.5。	謝謝委員提醒，已修正	同意辦理方式
8. P.2-15 第 11 行，P.2-16 第 2 行之公式與第 9 之參照來源，請再加以確認。	謝謝委員提醒，已修正	同意辦理方式
高苑科技大學土木系 劉文宗委員		
1. 候選場址之材料參數仍未有全部試驗資料。	因候選場址均有大量資料，初期將依篩選之資料分析，必要時進行室內力學實驗或現地量測值反算水力參數，結果將於期末呈現。	同意辦理方式
2. 既名深層滑動，是否應略序述淺層、深層滑動。	此將於期末報告 1.2 節進行定義，釐清適用場址，淺層定義將引用前期研究，深層則詳審查意見回覆。	同意辦理方式
3. 淺層滑動的精進模組，應對準確性加以說明及反算的依據是何種目標函數。	水力參數反算已於簡報說明，期末將補充詳述計算原理。	同意辦理方式
4. 所分析皆為滑動邊坡且行之有年，若為新產生的滑動或將產生的滑動的危險邊坡，是否有其可靠性。	以學理而言，若參數選擇合宜，應有其可靠性，非侷限為已滑動之邊坡	同意辦理方式
5. 深層量測水壓往往易堵塞，要思考永續性。	本研究將以 open pipe 形式，以利於電子感測器更換。	同意辦理方式
高公局中區工程處 賴榮俊委員(書面審查)		
1. 期中報告第 2.3.3 無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論以無限邊坡之水平和垂直滲流推導臨界滑動深度與實際山區公路土壤邊坡，路塹邊坡坍塌損壞現象機制是否相符？另外坡面常存有裂隙、縫發展是否也需納入分析考量？	無限邊坡適用於滑動面遠大於滑動深度且側向具足夠之延伸距離，與高路塹較相符，所發展之分析模式適用於均質連續體土層，無法考慮裂隙、縫發展之局部影響	同意辦理方式
2. 第 3-2 節電容式土壤水份計以量測	因採用高頻震盪量測電容，	同意辦理方式

土壤之介電常數來間接量測土壤的含水量變化。圖 3 西湖-通宵路段為紅土礫石層與沙泥岩互層，地質導電路徑都不同，含水量檢測成果是否會影響實際值的精度？	此受土壤組成影響較不顯著，且背景電阻影響有限。	
農委會水土保持局 尹孝元委員		
1. 建議針對淺層及深層滑動進行明確的定義(目前大規模崩塌定義為深度 10m，面積大於 10ha，土方大於 10 萬 m ³ ，如 p2-22、p2-26，甲仙土層 2.5m 為深層滑動？	深淺層滑動定義將於期末報告定義，甲仙非為常用之深層滑動，但其滑動較可能發生於飽和土層，非為典型深層滑動場址。	同意辦理方式
2. 建議彙整歷年公路邊坡崩塌災例資料，並區分出屬淺層或深層破壞；另相關潛在崩塌區應如何確認？如何搭配地調所山崩地滑地質敏感區進行未來儀器布置的規劃，請說明。	本研究為進行技術開發，不同破壞形式之篩選可由坡面幾何、土壤組成、水文地質條件進行初判，公路邊坡與坡地治理非全然一致，推廣應用建議於後續研究進行。	同意辦理方式
3. 深層滑動潛勢區若無相關土壤力學參數、水文特性參數及鑽探資料，如何推估如何其可能滑動面？如何給定模式之起始及邊界條件？另目前模式主要分析土壤含水及入滲特性，若深層滑動已達岩盤應如何量測分析？	初步分析可以典型土壤參數進行，利用現地量測資料可反算推估現地入滲參數，相關水力與力學邊界將於期末補充，土壤含水及入滲特性僅適於淺層滑動，深層滑動將以孔隙水壓力為指標。	同意辦理方式
4. 參考文獻有誤，缺 p2-11 李秉乾(2004)，p2-12 陳志芳為(2015)或(2017)，p2-16 插圖錯誤，請修正。	謹遵辦理。	同意辦理
5. 以阿里山公路五彎仔為例，其滑動面積達 50ha： (1)無線監測系統數量應如何規劃？成本分析為何？ (2)現場監測點位如何選定？原則為何？才足以反應滑動的真實狀況。 (3)另相關儀器(土壤水份計、傾斜儀……等)，其警戒管理值應如何訂定？ (4)一旦儀器有反應時，到邊坡滑動有多少反應時間？ (5)部份滑動塊體較為活潑，若在未知的狀況下，應如何選擇？另五彎仔部分滑動深度達 25m，介於砂及頁岩間，土壤水份計是否適用？	(1) 本年度僅初步測試模組適用性，後續須以數值分析進行監測配置，考慮施工之簡易快捷性與供電便利性，成本可較現有系統大幅降低。 (2) 點位將依數值分析成果進行最少監測點配置。 (3) 相關警戒值為場址客製化數值，依初步分析成果訂定並以監測成果修正。 (4) 此須依場址而定，由依時分析成果可依不同需求制訂警戒值。 (5) 資訊不足時可考慮增加監測點位，五彎仔深層滑動將以孔隙水壓取代淺層土壤	同意辦理方式

	水分，淺層土壤水分將用以驗證入滲與孔隙水壓之關聯。	
運研所港研中心 謝明志委員		
1. 監測模組硬體的精進，值得肯定，尤其可不接市電及使用 pc，可使本設施能更廣泛的應用在偏遠地區。	感謝肯定。	同意辦理
2. 請依本所格式編輯研究報告，如摘要、表說等部份。	謹遵辦理。	同意辦理方式
3. 第二章 Collins 的分析上，粗細顆粒是如何界定，在圖 2.4 及圖 2.5 上，報告第 2-7 頁中，為何細顆粒可代表淺層，粗顆粒可代表深層，因深、淺層及顆粒粗、細並無絕對關係，請說明。	此為呼應滑動面孔隙水壓為正或負值，負孔隙水壓發生於細顆粒土壤，深淺層滑動定義將於期末報告補充定義。	同意辦理方式
4. 報告第 2-16 頁中倒數第三行，文字錯誤，請修正。	謝謝委員提醒，已修正	同意辦理方式
5. 目前本研究有調整工作項目的作業順序(如第 6-1 頁)，即監測模組原型測試先作，再於近期內完成深層理論推導，主辦單位原則同意這個調配，但也儘速完成理論推導部份(目前簡報內已列出相關公式，應可於近期完成)。	將於第三季工作會議前完成。	同意辦理方式
運研所港研中心 賴瑞應委員		
1. 因為本研究很有挑戰性，要在短期內完成研究成果並落實應用並不容易，肯定研究團隊接受挑戰的勇氣及努力。	感謝肯定。	同意辦理
2. 報告提到深層滑動機制與淺層不同，建議針對淺層滑動與深層滑動的特性做個比較表，以利瞭解兩者差異。另外，針對未來實務應用，能不能彙整較簡易的淺層與深層滑動的判斷因子，以利實務應用。	謹遵辦理。	同意辦理
3. 報告第 2-4 頁提到美國交通研究委員會，依邊坡破壞之材料種類及運動方式，可將邊坡崩塌型態分類，請問本研究研發的監測系統適用於何類型材料及運動方式，請補充說明。	本研究標的為土壤滑移，已增補。	同意辦理方式
4. 報告第 4-22 頁提到，目前監測西湖場址傾斜的監測資料顯示，期間有許多時間跳躍的點位，代表系統供	精進之模組已利用電池及 3G 通訊模組改善電源與傳輸，並增加資料初步檢核演	同意辦理方式

電不足造成，顯示供電問題為本系統穩定度的重要因素之一，未來應思考如何加強供電的穩定性。	算，可大幅避免此狀況發生。	
交通部公路總局 王睿懋工程司(書面意見)		
1. 有關西湖場址傾斜監測資料部分，因電力系統供電問題導致數據產生誤差及變化，是否有相關電力穩定對策以確保監測數據可靠度。	精進之模組已利用電池及3G通訊模組改善電源與傳輸，並增加資料初步檢核演算，可大幅避免此狀況發生。	同意辦理方式
2. 有關第五章監測與分析場址選定，阿里山公路五彎仔路段資料請取得最新監測設置資料，以確保相關監測設施設置位置是否可提供本研究分析比對使用。	謹遵辦理。	同意辦理
交通部國道高速公路局 魏佳韻小姐		
1. 國道3號西湖服務區邊坡之監測，依據報告所述其監測結果地表位移0.8~1.7公分，則其達警戒值與行動值為何?建議提供高公局邊坡養護參考。	此場址目前僅做為量測系統測試，客製化場址不同階段數值將於期末提供。	同意辦理方式
2. 國道3號西湖服務區邊坡之監測，是否有提供網路線上監測資料查詢?若有建議提供相關網址與帳號供本局邊坡管養利用。另外，當監測發現邊坡有異狀時，其應變機制為何?是否會通知高公局?建議於報告中補充說明。	此系統已具雲端儲存顯示功能，相關帳號於系統完整穩定後會提供參考。	同意辦理方式
3. 國道3號西湖服務區邊坡之監測，於報告4-22頁中說明「現地安裝監測模組因挖填導致土壤孔隙變化，可能造成量測上的問題」，則該處的后續量測的資料是否具參考性?監測管理值是否須修正?建議於報告中補充說明。	目前已規劃重新安裝一組感測模組進行驗證。	同意辦理方式
4. 圖4.4顯示國道3號西湖服務區邊坡之監測，埋設深度為95mm~133mm，與報告中含水量變化描述的深度不符，請檢核。	將於期末報告修正。	同意辦理方式
5. 報告2-16頁，圖2.10參照有誤，請修正。	已修正。	同意辦理方式
運研所港研中心 陳志芳研究員		
1. 報告中第2-25頁，圖2.16之Graph 1(圖例)其中「0.56hr」及「1.4hr」	謹遵辦理，期末報告修正。	同意辦理方式

請改為「5.6hr」及「14hr」。		
2. 報告中目錄頁碼需修正，例如 3.5 的頁碼應改為 3-24，4.3 的頁碼改為 4-15，4.4 的頁碼改為 4-19，還有，目錄中「4.5 依時預警模式後續工作事項」一節，頁碼非為 4-23，需修正並增補。	謹遵辦理，期末報告修正。	同意辦理
3. 第 3-7 頁之 3.2.1 微處理器一節，應修改為「3.3.1」。第 3-8 頁之 3.2.2 無線傳輸模組，應改為 3.3.2。第 3-12 頁之 3.2.3 改為 3.3.3。3.2.4 改為 3.3.4。第 3-13 頁之 3.2.5 電源系統，改為 3.3.5。	謹遵辦理，期末報告修正。	同意辦理方式
4. 報告中無「結論」章節，需於期末報告中增列。	謹遵辦理，期末報告修正。	同意辦理方式

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

計畫編號： MOTC-IOT-106-H1DB002a

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
國立中興大學水保系 林德貴委員		
(一)監測設備		
1. WSN 無限感測器網路，如何排除無線傳輸訊號中斷時觀測數據資料漏失，並補足期間之關測數據。	模組本身內建儲存模組，可組足資料漏失，唯須人工至現場存取。	同意辦理方式
2. 如何克服 WSN 無限感測器網路，在地形、地貌影響下的傳輸訊號品質不良之問題(增加功率或增加傳輸頻率)？	通訊模組已選用高功率元件，通透可達 3km，監測場址僅數百公尺，已將降雨干擾因子列入考量。	同意辦理方式
3. 土壤水份計在鑽掘後埋設回填，如何避免土壤因壓密程度的不同，影響土壤水份計感測。	安裝流程詳見 4.1 節，相關說明詳見此節。	同意辦理方式
4. 於五彎仔觀測場址，預先整合 LoRa 通訊介面(報告書 P5-9)，如何應用低功率的傳輸方式進行數據傳輸。	LoRa 本身即為低功耗傳輸元件，為區域網路使用。	同意辦理方式
5. 圖 5.8(a)模組外構僅至 75cm，如何進行深層觀測。	深層監測為開管式液位計，分層水分監測為入滲推估之用。	同意辦理方式
(二)監測結果與數值分析		
1. 研究流程中，建議詳細說明分析與監測間的相互關係為何？又如何由分析與監測資料建立依時邊坡預警系統？此系統之預警參數為何？	第二章為研究架構，監測與分析結合架構詳見 2.3.4 及 2.3.5 節說明。	同意辦理方式
2. 甲仙測站體積含水量監測點位之 75cm 及 25cm 深度量測值大小，互有變換，於文中說明可能原因？	此與量測點初始地下水與土層有關，相關說明詳見 4.2.1 節說明。	同意辦理方式

3. 甲仙現地地表土壤之孔隙比 $e=0.6$ 如何求得？其值影響土壤之飽和體積含水量之計算？	現地孔隙比為前期現地取樣求得，此會影響土壤飽和含水量，亦即量測之上限值。	同意辦理方式
4. 耦合分析結果，應著重於表示孔隙水壓(體積含水量)，安全係數及潛在滑動面隨時間之變化情況。	相關說明詳見 5.2(深層滑動)及 2.3.5 節(淺層滑動)	同意辦理方式
5. 結論中，請具體說明如何由分析及監測結果來建立依時邊坡預警系統？	已增補於 6.1 節第二項。	同意辦理方式
朝陽科技大學營建系 賴俊仁委員(書面審查)		
1. 計畫摘要中建議適當加入本計畫重要成果之敘述。	已加入本年度場址分析與模組摘要	同意辦理方式
2. 圖 3.1(p3.2)，系統架構示意圖建議加入水壓計或水位計。	通用示意圖非僅適用於深層，為簡化起見因此無顯示其他感測器	同意辦理方式
3. 圖 4.12~圖 4.15 中兩個深度含水量變化曲線報告如以黑白印出時，兩曲線不易辨識，建議以不同線條樣式加以區別。	已修正為虛線詳 P4-9~4-11	同意辦理方式
4. 圖 4.12~圖 4.15 中部份時間僅一水份計有監測數據，其原因為何應加以說明。	因原設計為一年監測，因此有部分感測器已損壞。	同意辦理方式
5. 圖 4.14(9/27/17)與圖 4.15(7/9/17~7/9/17)中含水量變化趨勢與降雨量相反建議進一步加以檢討。	此因地下水位與降雨之時間差影響。	同意辦理方式
6. 公式 4.1~4.3 字形無法辨識，應加以修正。	已修正加大。	同意辦理方式
7. 圖 4.27(P.4-21)傾斜計之監測數值似乎不太穩定建議尋求改善方法。	此因突波導致，但長期趨勢具一致性，後續會加入訊號處理運算修正，但現有誤差值尚可接受。	同意辦理方式
高苑科技大學土木系 劉文宗委員		
1. 淺層滑動分析、預警架構、精進模組有定時器開關，是不錯的改進。	感謝肯定。	同意辦理方式
2. 深層滑動模型有數值分析模型(p5-15~p5-17)，但現場量測值未與分析模型的計算值作比對，以查核模型的準確性及未來預測能力。	因場址現況與量測時間與季節限制，因此無法比對，相關數值模擬限制於報告中已說明，準確性與校核之必要	同意辦理方式

	性已於建議中增補。	
3. 由於場址(深層)之現場位移量數據較小，對深層預警應用如何正確切入應再作闡述，以印證此深層滑動系統架構之完整性，也應該說明以何數值或因子來估算預警值。	深層滑動預警架構因尚在發展中，目前選定以孔隙水壓作為預警物理量，相關論述詳見 P.2-28~2-29	同意辦理方式
高公局中區工程處 賴榮俊委員(書面審查)		
1. 報告中第 2.1 節之 P2-2，入滲速率及土壤抗剪強度的變化，為推估可能破壞時間、破壞深度作為警戒、行動管理值依據，入滲速率、強度變化如何檢核其正確性？另外入滲速率是否是由介電係數改變量測而得？	淺層滑動與非飽和水力力學耦合分析詳見 2.3 節，相關理論已經室內元素試驗驗證，因非本年度重點因此為詳列，請參考 105 年報告。入滲速率為由含水量剖面變化推估，介電係數為量測體積含水量之方法之一。	同意辦理方式
2. 報告中 P2-14 頁，入滲率大於飽和滲透係數時，無法入滲之降雨....，入滲率與滲透係數如何比較？有無對照表可供參考？	此段為說明水力分析之邊界條件，本研究採固定壓力水頭模擬。入滲速率採 Darcy's law 計算，非飽和滲透係數非為定值，相關說明請參考 2.3.2 節說明。	同意辦理方式
3. 報告中 P4-4 頁，土層監測模組，鑽 80 公分深度之考慮為何？P4-7 頁 4.2.1 利用雨量監測作為土層含水量比較之標的，有無成果？	此為淺層監測模組深度，監測成果詳見 4.2 及 4.3 節。	同意辦理方式
4. 報告中 P4-7 頁(1)，從降雨發生至含水量抵達峰值時間甚短，要如何與預測成果之滑動監測之警戒行動管理值？	此須淺層滑動預警架構部分，預警需搭配數值或極限平衡分析，預警架構詳見 2.3.5 節。	同意辦理方式
5. 報告中 P4-31 頁，觀測到移動 0.8~1.7 公分，可否提供雨量土壤含水量變化對應警戒行動管理值(P1-7 之預期成果)。	西湖場址長期趨勢並無顯著傾斜，且因缺乏現地試驗資料，並無完整淺層滑動預警架構。	同意辦理方式
6. 報告中 P4-12 頁有漏字、錯字、如土壤、非均質性、飽和土壤等、P5-2 調查。	已修正。	同意辦理方式
7. 淺層滑動監測模組會繼續運轉多久？	現有測站於計畫結束後仍會持續維護，測站維護均列為後續計畫之工作項目。	同意辦理，列為持續量測場址。

臺北科技大學土木系 施邦築委員		
1. 成果良好，但需實際滑動案例的驗證。	感謝肯定，因相關技術仍在發展中，長期監測及資料回饋驗證為必要作為。	同意辦理方式
2. 預警值的設定需有足夠時間避難，考量實務需求。	因所發展為依時預警，實務上可以依需求制訂客製化預警值。	同意辦理方式
3. 監測模組的點位配置，建議補充說明較佳的模式與點位數量。	因深層滑動仍在發展中，因此須配合現有鑽孔，但相關監測配置與傳統邊坡監測考量相同。	同意辦理方式
4. 滲透速率的監測需要多少個感測元件較為合理，土壤的深度變化可能相當複雜。	監測數量與場址範圍及土層分布有關，土層深度變化無法在現有系統考慮，但淺層滑動其深度通常有限，應可合理推估。	同意辦理方式
交通部公路總局 王睿懋工程司		
1. 期末報告中，研究單位在五彎仔監測數據不足，本局在五彎仔路段建置監測設施，是否能應用於本研究案中。	因五彎仔現有監測另有執行單位，為避免困擾，因此並未參考，後續可進行協調。	同意辦理方式
2. 建議研究成果可以與運研所(港研所)合作申請專利。	感謝委員肯定，將與運研所商討。	可列為未來發展重點
3. 由於合適監測地點選擇不易，如有適當地點位於本局轄管範圍，將協助辦理。	感謝委員，後續會主動拜訪接洽。	同意辦理方式
交通部臺灣區高速公路局 魏佳韻工程司(書面意見)		
1. 第 1-4 頁，文中針對深層滑動定義與既有之深層滑動定義不同，應補充明確說明。	此與傳統深度定義不同，相關說明詳見第二章。	同意辦理方式
2. 第 2-2 頁，圖 2.1 不清晰，建議予以調整。	已修正。	同意辦理方式
3. 第 2-5 頁， F_d 、 F_r 、 δ 與式 2.2 及式 2.1 之關係為何？	式 2.1 及 2.2 為應力路徑參數定義，其他參數為配合圖 2.2	同意辦理方式
4. 第 2-14 頁，式 2.4 前二行，格式有誤，請予以修正。	已修正。	同意辦理方式
5. 第 4-12 頁，末 3 行，格式有誤，請予以修正。	已修正。	同意辦理方式
6. 第 4-12~4-14 頁，方程式不清晰，請	已放大修正。	同意辦理方式

予以修正。		
7. 第 4-31 頁，請補充說明監測數據結果與效益，有關西湖監測場址邊坡滑動的臨界含水量與深度為何？	此場址因缺乏現地試驗資料，並無完整淺層滑動預警架構。	同意辦理方式
8. 第 5-13 頁，表 5.2 符號不清晰，請予以修正。	已修正。	同意辦理方式
運研所港研中心 謝明志委員		
1. 研究團隊在硬體設施的精進，如通訊及省電設施的改善，可大幅克服資料傳輸及電源不足等現地常見的問題，成果值得肯定。	感謝肯定。	同意辦理方式
2. 摘要、內文請依本所格式編輯。	謹遵辦理。	同意辦理方式
3. 甲仙測站 106 年雨季觀測紀錄，4 個測站中，ID2，九月中到十月中旬的數據較特異，特別是深層(75cm)的含水量高低變化劇烈，而雨量下不大，淺層(25cm)含水量好像也處在穩定飽和的狀態，建議繼續觀察，檢視儀器是否已劣化。	感測器本身已完成檢測，並無異常，此應為該監測點為擋土牆背填，土層複雜所致。	同意辦理方式
4. 探討深層滑動，勢必要有地下水位的監測數據，建議如有後續研究，除考慮更換研究地點外，也考慮增列鑽孔費用及設置水位監測系統。	將列為建議事項並與運研所商討。	同意辦理方式
運研所港研中心 賴瑞應委員		
1. 後續將提送定稿報告，建議刪除 P1-8 頁表 1.1 預定進度甘特圖。另外，P1-7 頁之預期成果效益重複請刪除。	謹遵辦理。	同意辦理方式
2. 報告部分圖與公式不清楚請檢視修正。	謹遵辦理。	同意辦理方式
3. P5-11 圖 5.11 傾角紀錄曲線後段角度有加快的趨勢，是否表示監測場址有滑動的趨勢，請說明。	此因淺層模組裝設於局部陡坡，經目視檢查應為局部有限之變形，非深層滑動。	同意辦理方式
4. 為落實應用，持續精進本計畫所研發之系統有其必要，未來若本系統研發成熟後，建議除了將本系統適合的坡址條件列出供有興趣之單位參考外，系統安裝與實測的經驗，	因現階段為研發測試，具較多變動，後續若要推廣將為成熟系統，且有固定程序，應可大幅簡化相關流程，相關建議將提供業管單位參考。	同意辦理方式

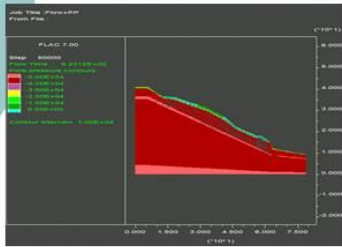
包括遭遇電力供給、安裝點位選取、儀器精度、儀器安裝及網路傳輸等問題，建議未來可專章分享給後續相關研究之參考。		
--	--	--

附錄三

期末報告簡報資料

公路邊坡深層滑動無線感測網 路監測系統研發

期末簡報



委託單位：交通部運輸研究所

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

Outlines

- 計畫摘要
 - 背景、目的及重要性
 - 研究方法及進行步驟
- 淺層滑動監測模組更新與監測成果
 - 軟硬體更新及雲端資料顯示與儲存
 - 甲仙與西湖測站更新與監測成果
- 深層滑動方法水力力學耦合分析
 - 研究場址
 - 無限邊坡分析架構與二維數值模擬
- 深層滑動無線感測系統研發
 - 系統架構與測試成果
- 結論與建議



計畫背景

- 雨量監測為指標之經驗法預警模式侷限 → 非全然保守或無法提供反應時間
- 解析法+無線土層監測 → 發展降雨引致土層滑動之公路邊坡依時預警，與降雨預警互補
- 深層滑動+淺層變位 → 由表層滑動與水壓變化推估深層滑動之解析法與監測技術

3

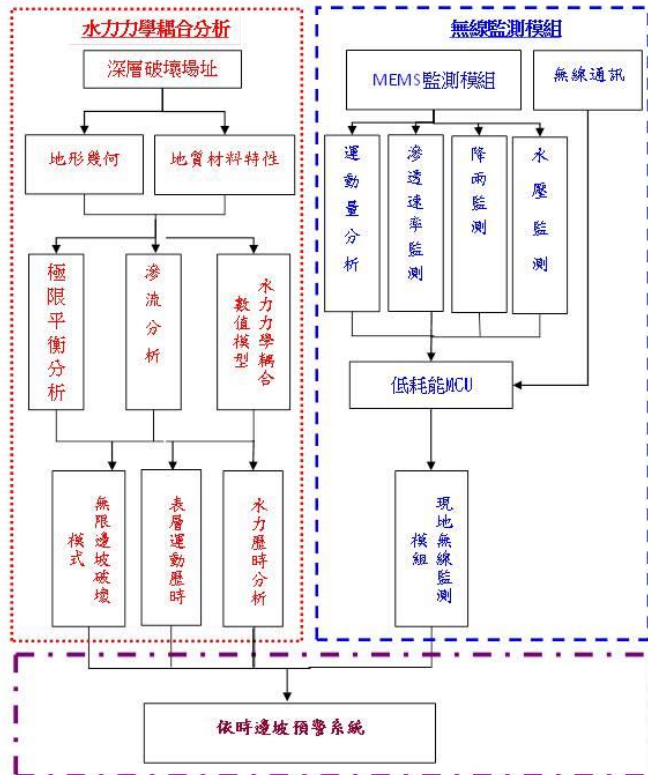


計畫目的

- 建立深層滑動水力力學耦合邊坡滑動解析與數值分析架構
- 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
- 研發可快速佈設且具依時特性之深層滑動無線感測模組

4

研究流程

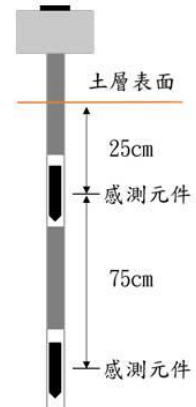


深層滑動預警架構

- 經驗法
 - 累積雨量 + 降雨強度 → 非直接
 - 地表位移或速率 → 因場址而異
- 解析法
 - 基於嚴謹力學分析 → 無限邊坡應力路徑法, 水力力學耦合模擬
 - 現地監測 → 結合解析成果, 觀測致災因子與滑動表徵

淺層滑動監測模組精進

- 區域通訊模組改善: NRF24 → Xbee
 - 增加通訊距離與改善死角
 - 模組化設計, 低耗電
 - 資料檢核程序
- 廣域通訊精進
 - 改用3G模組, 連結網路
 - 低耗電, 無須市電與PC電腦
- 電源改善
 - 更新為省電MCU
 - 增加休眠模組, 省電60%以上
 - 改用鋰電池, 增加容量, 縮小體積
- 遠端監控
 - 連結Thingspeak, 以密碼管制連結
 - 多人連結, 不同裝置連結
- 其他功能
 - 現地資料儲存模組備份
 - 系統電力監測與資料檢核功能
 - 增加定期(24hr)重新啟動功能



7

資料雲端化與應用

MCU

UNO



Sensors



Communication

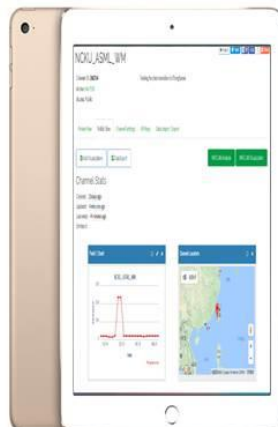
3G/4G/LORA



WIFI

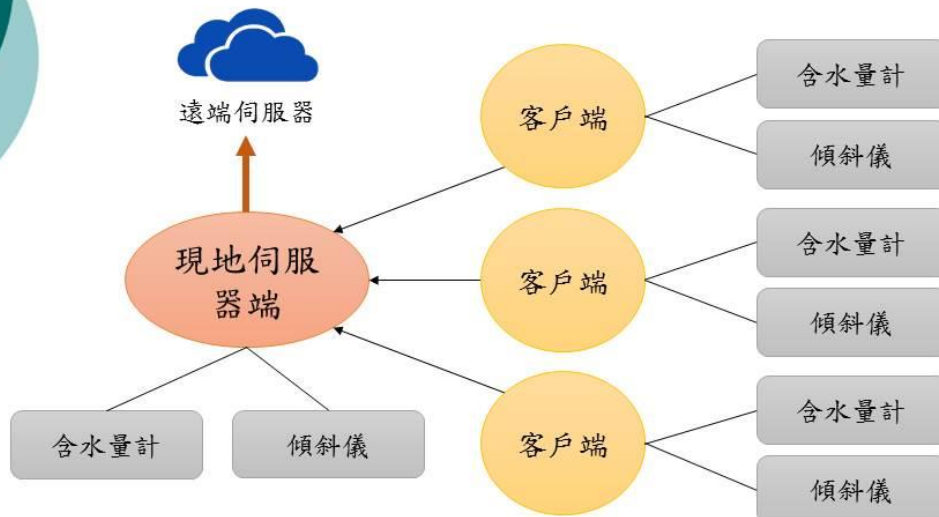


Cloud



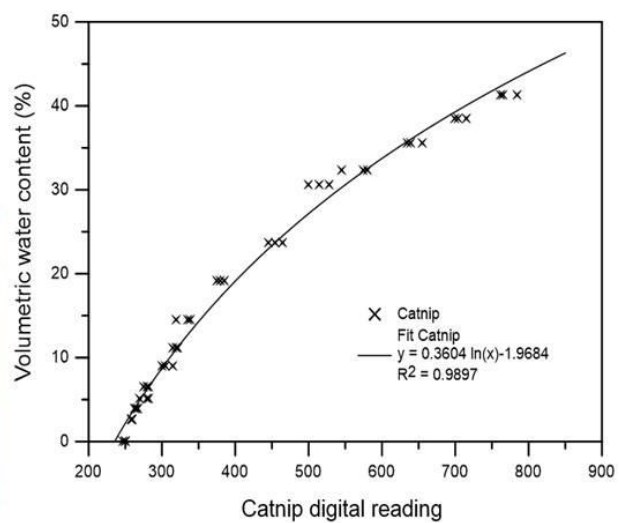
8

無線淺層滑動監測系統架構



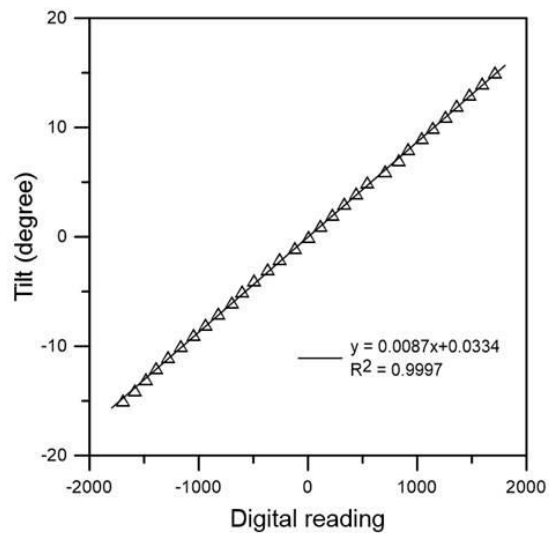
系統感測器-含水量計

- 小尺寸、低成本、高解析度與高重複性
- 電容式含水量計
- 支援ADC數位輸出



系統感測器-傾斜儀

- 差動量測原理
- 單軸量測範圍±15度
- 精度0.01 度以上
- 可以類比電壓或數位輸出



無線監測模組

- C語言開發環境
 - 32支數位I/O接腳
- Wemos lolin32

微處理器



WCDMA(3G)模組

- 僅伺服器端裝設
- 以AT command上傳數據

即時時間



數據紀錄



無線傳輸

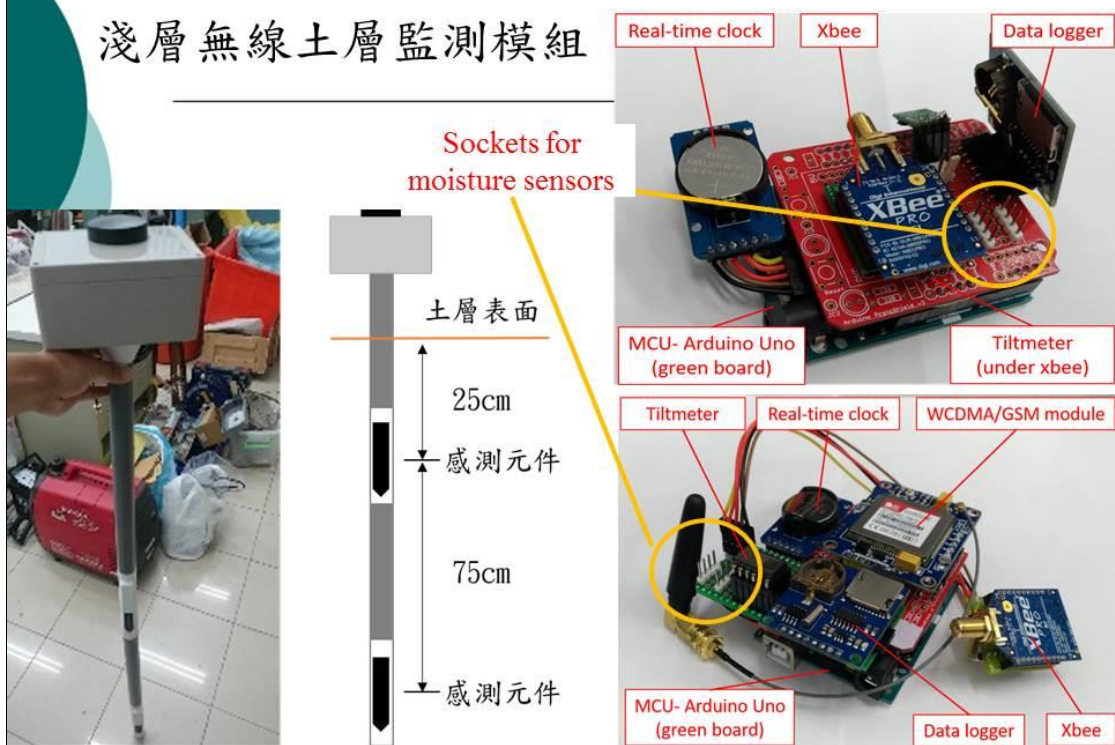


- 使模組間時間同步
- 結合鬧鐘設置與方波輸出使微處理器週期運作

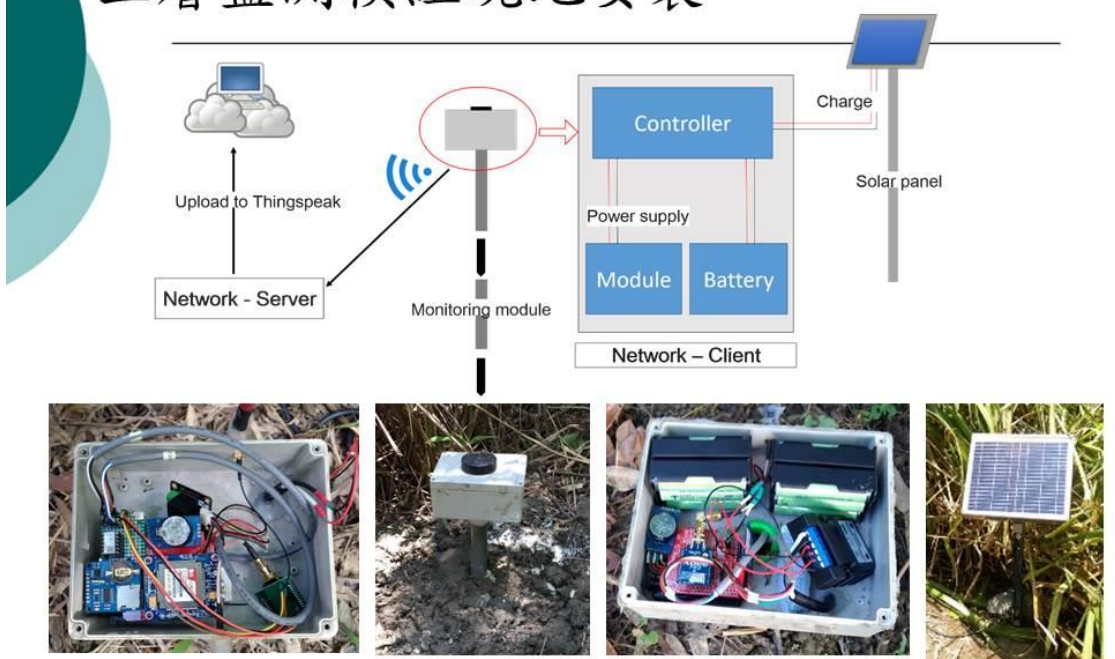
- 備份現地監測資料避免通訊中斷丟失數據

- 模組間無線傳輸平台

淺層無線土層監測模組



土層監測模組現地安裝



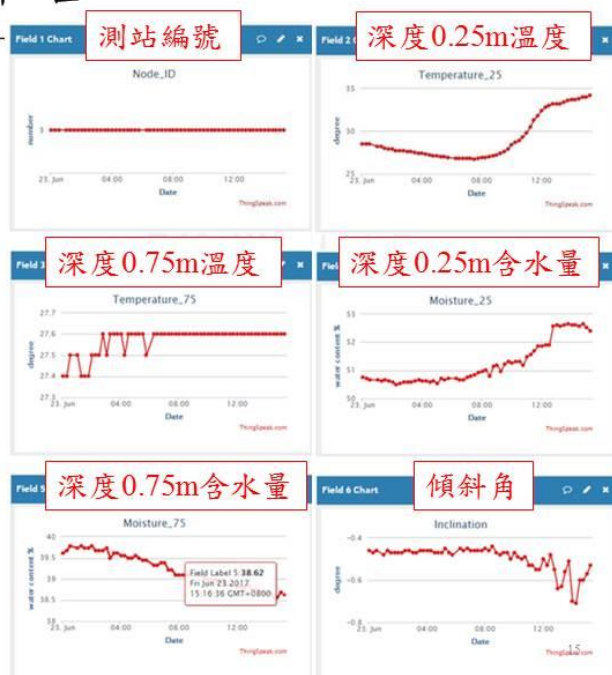


雲端即時顯示平台

- Thingspeak-現地數據
遠端存取

- 體積含水量與傾斜量
依時性反應

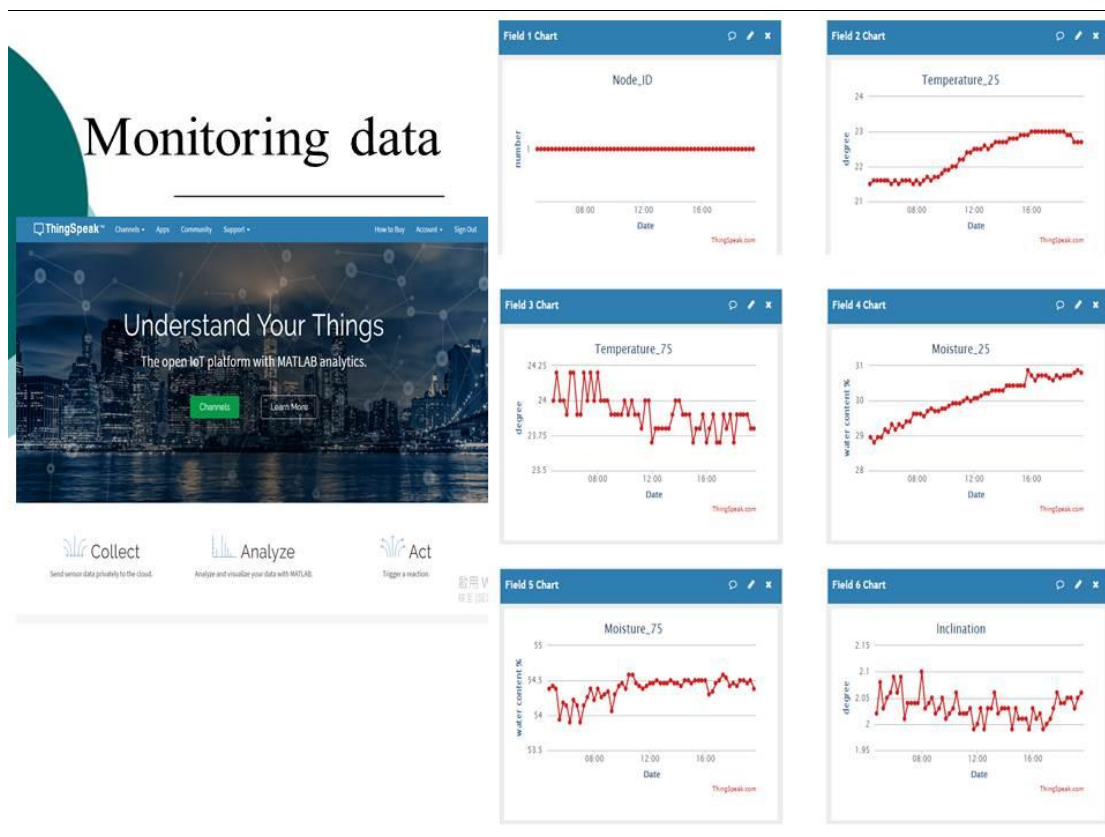
即時顯示平台



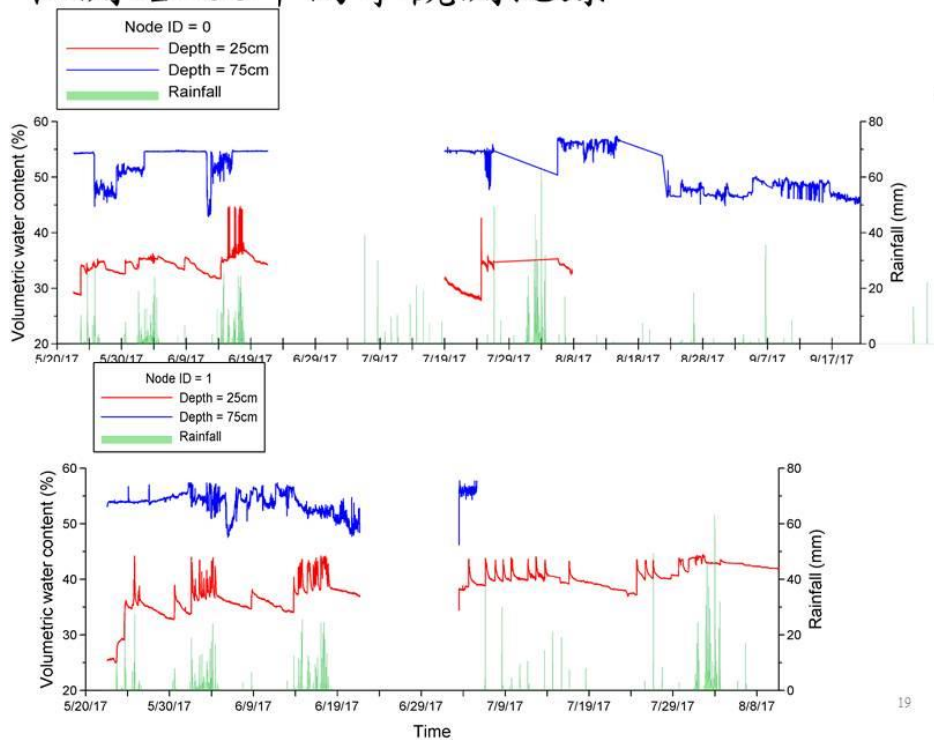
淺層滑動監測場址維護與監測資料

- 甲仙監測站更新及觀測資料
- 現地資料應用與回饋分析
- 西湖監測場址資料與系統更新
 - 已於2017/07/05 更換與甲仙相同系統
 - 增加土壤水分計自我檢測功能

甲仙土層監測模組配置

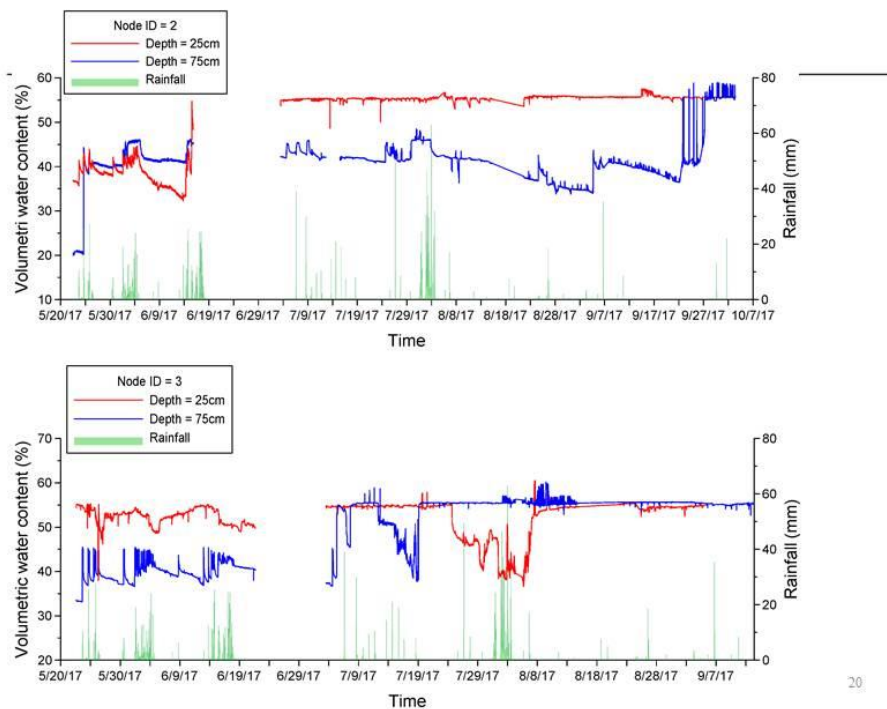


甲仙測站106年雨季觀測紀錄



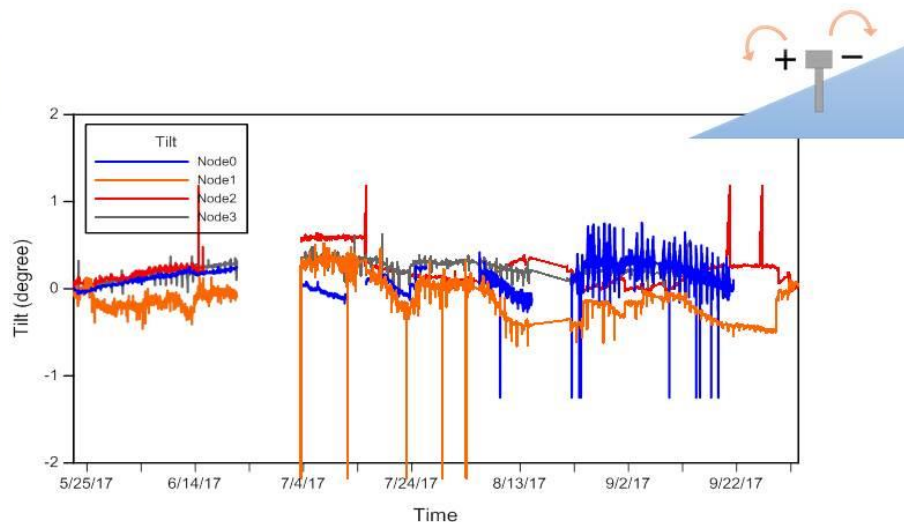
19

甲仙測站106年雨季觀測紀錄



20

甲仙測站傾角監測成果

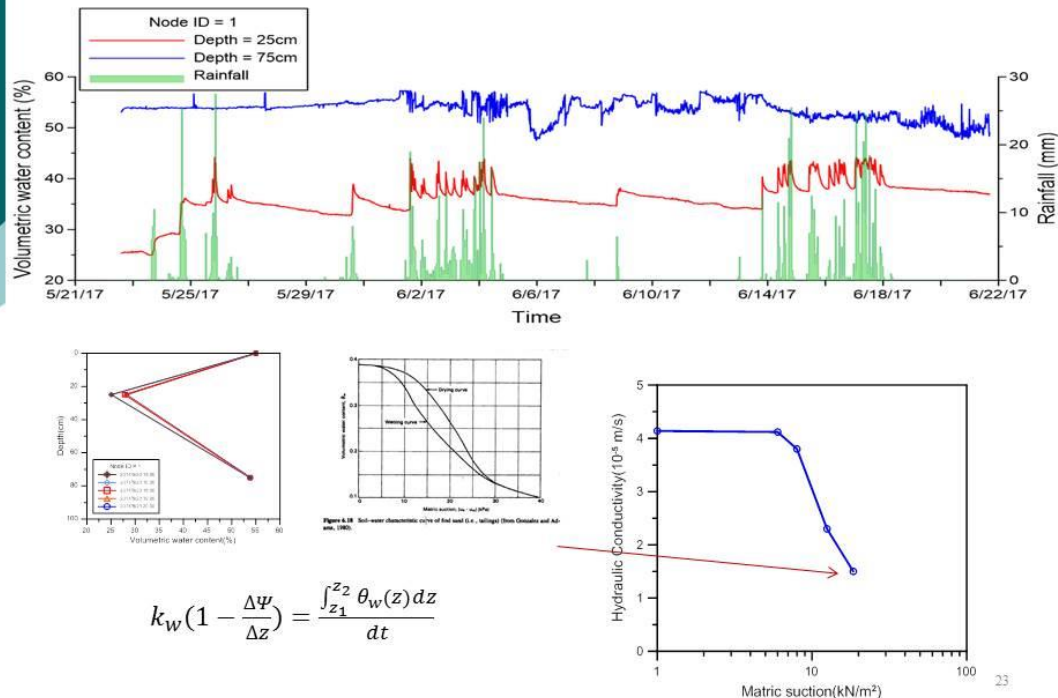


21

甲仙含水量監測數據趨勢

- 土壤水份計感測值對於降雨事件之反應相當明顯，而深層水份計之感測值反應時間略晚於淺層含水量計，其間差異為土層入滲時間差導致。
- 在降雨事件發生後，含水量皆會在乾季時逐步降回降雨前之穩定值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測用途。
- 甲仙現地地表土壤之孔隙比為0.6，可推算其飽和時之土壤體積含水量為38%。圖中顯示Node0、Node1與Node2之深層含水量計始終處於飽和狀態，而淺層含水量計於降雨時迅速接近飽和狀態。

現地非飽和滲透係數量測結果



現地非飽和入滲速率估算(1/2)

$$k_w \left(1 - \frac{\Delta \Psi}{\Delta z}\right) = \frac{\int_{z_1}^{z_2} \theta_v(z) dz}{dt}$$

k_w : 平均滲透係數

$\Delta \Psi / \Delta z$: 負壓力水頭隨深度之變化

$\theta_v(z)$: 土層深度 z 之體積含水量

z_1 、 z_2 : 計算土層之上下界深度，

取 $z_1 = 0$ ， $z_2 = 0.25\text{m}$

dt : 降雨開始至上層含水量變化之歷時

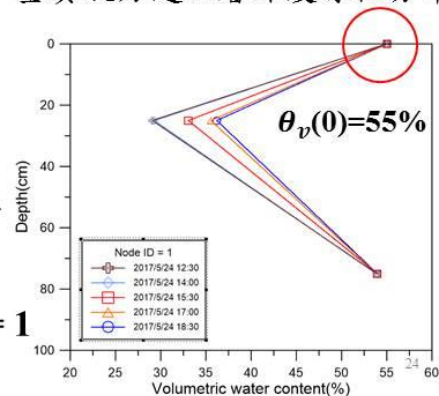
• 假設

➢ 只考慮垂直方向入滲

➢ 降雨期間地表 $\theta_v = 55\%$

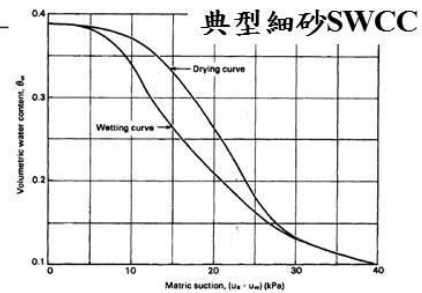
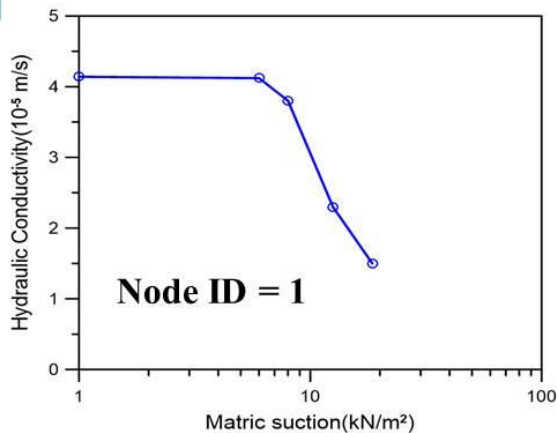
➢ 基質吸力隨土層深度線性分布

Node ID = 1



現地非飽和入滲速率估算(2/2)

- 取Node1不同初始含水量
以計算入滲速率
- 入滲速率-基質吸力



(Gonzalez and Adams, 1980)

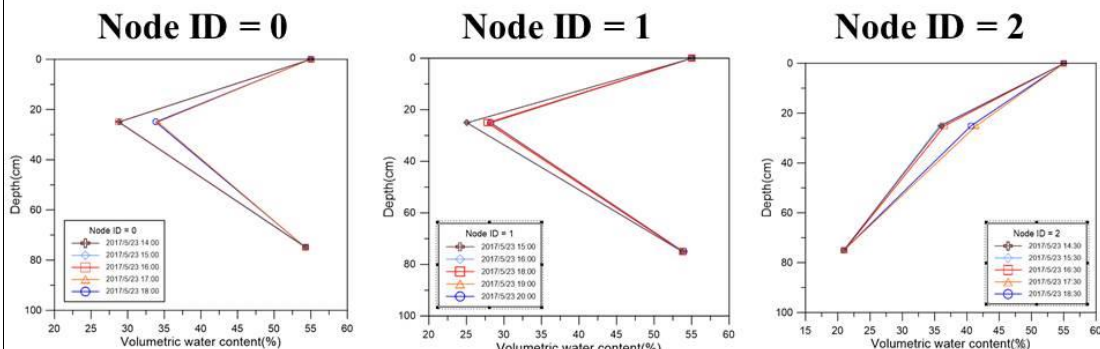
Stage	淺層入滲速率(m/sec)
1	1.5×10^{-5}
2	2.3×10^{-5}
3	3.8×10^{-5}
4	4.1×10^{-5}
5	4.2×10^{-5}

25

不同測站入滲速率比較

- 0號與2號測站淺層滲透係數
相近→具重複性

Node ID	淺層入滲速率(m/sec)
0	4.7×10^{-5}
1	1.5×10^{-5}
2	4.2×10^{-5}





Pore Pressure (Pa)



西湖場址土層原有監測模組配置

Figure 1 consists of three main parts: a photograph of the slope, a Google Earth aerial view, and three vertical diagrams of the monitoring modules.

The photograph shows a slope with three monitoring nodes marked: Node 2, Node 5, and Node 10. Node 10 is at the top, Node 5 is in the middle, and Node 2 is at the bottom.

The Google Earth aerial view shows the site location with labels for the monitoring system installation location (監測系統安裝大致位置) and the data receiver (資料接收端).

The three vertical diagrams show the sensor part (PVC) and sensor part (Sensor part) for nodes 2, 10, and 5. The diagrams show the depth of the sensors in the soil profile, with dimensions in mm. A legend indicates the slope surface, PVC, and sensor part.

Node 2: The sensor part is 14 mm deep. The PVC part is 20 mm deep. The total depth is 34 mm.

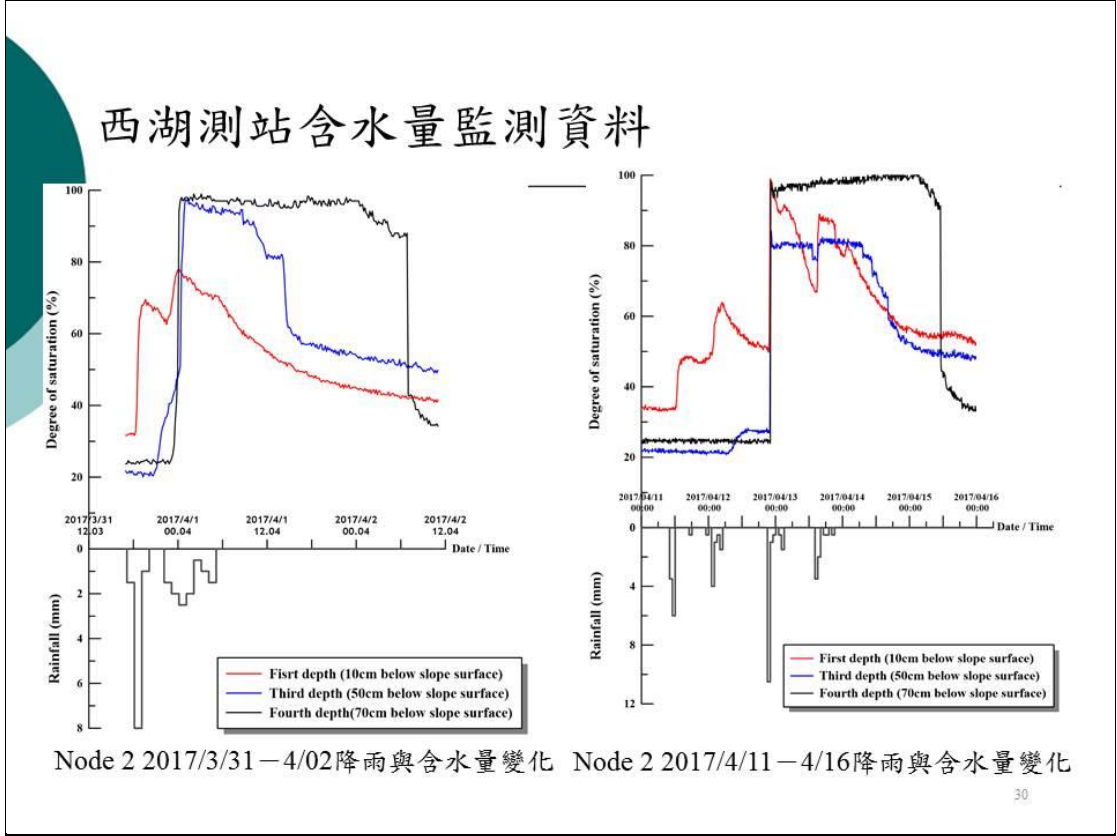
Node 10: The sensor part is 15 mm deep. The PVC part is 25 mm deep. The total depth is 40 mm.

Node 5: The sensor part is 17 mm deep. The PVC part is 25 mm deep. The total depth is 42 mm.

Legend:

- Slope surface
- PVC
- Sensor part

單位: mm



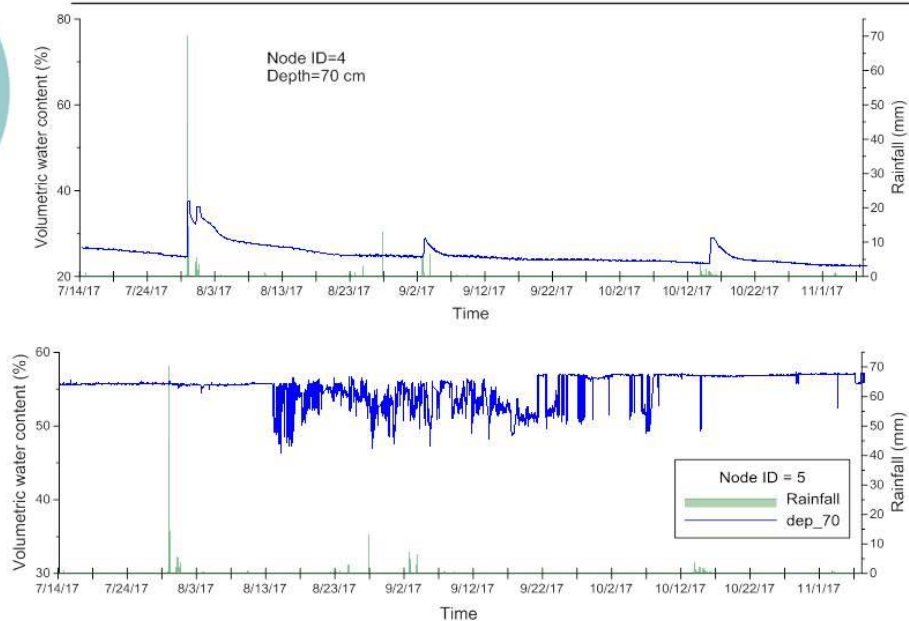
西湖測站更新

- 7月下旬進行系統重整更新，增設一組監測模組(Node ID=6)
- 現有感測系統：
 - Node4 深度70 cm 水分計
 - Node5 深度70 cm水分計及傾斜儀
 - Node6 深度25 & 75 cm水分計及傾斜儀



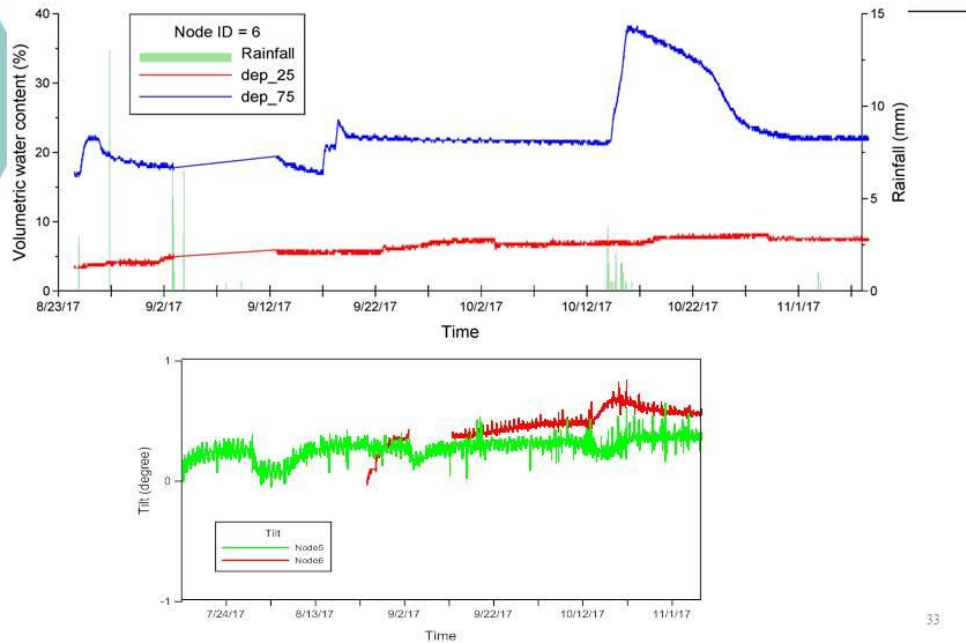
31

西湖測站106年雨季觀測紀錄(1/2)



32

西湖測站106年雨季觀測紀錄(2/2)

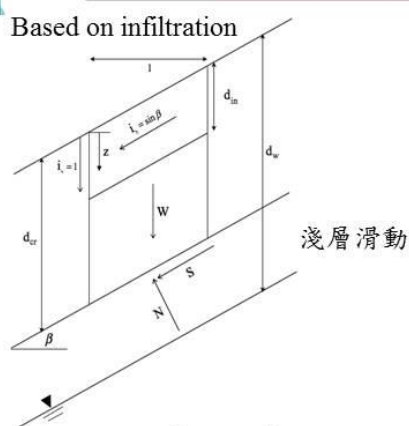


33

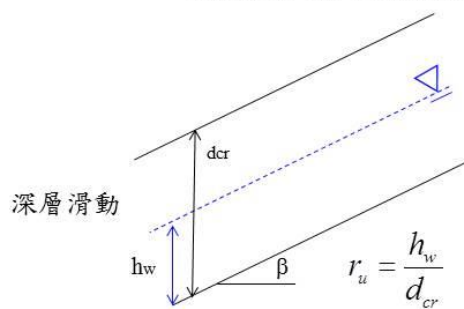
無限邊坡深層滑動極限平衡分析

Key: pore pressure profile

Based on infiltration



Based on GWT variation



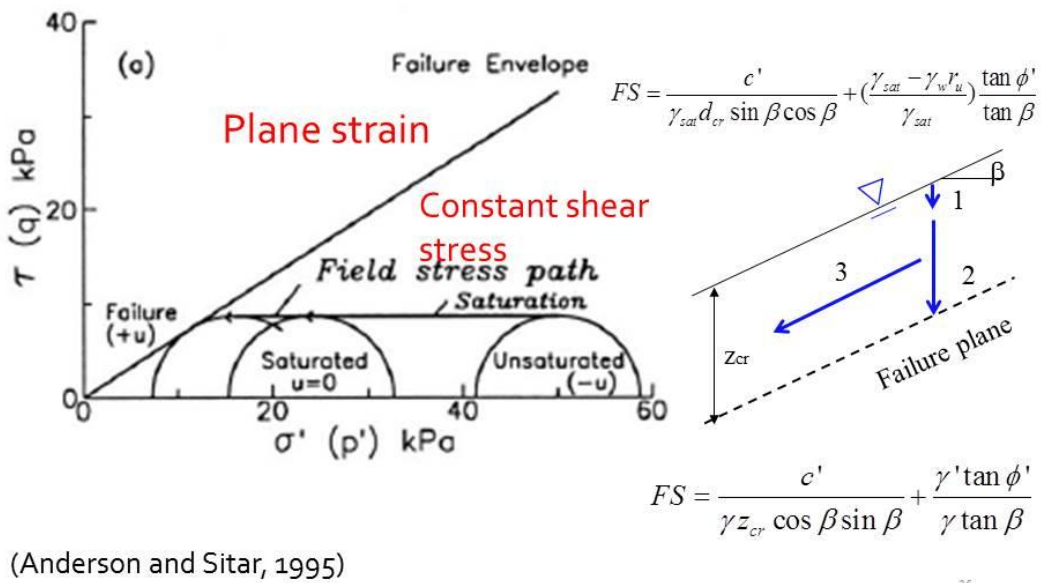
$$\left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi^i)} \right] \cdot d_{cr}$$

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

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

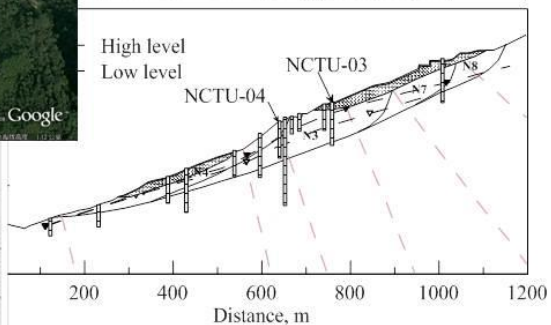
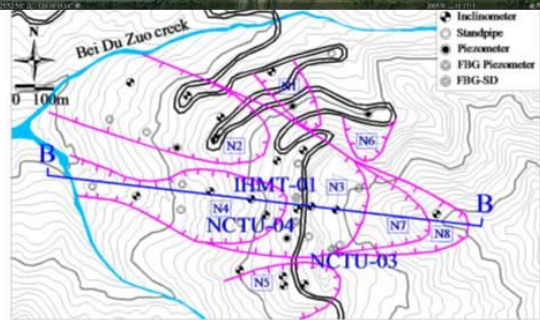
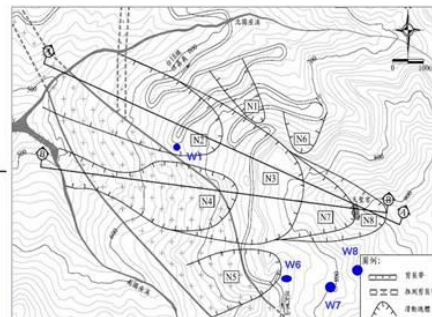
34

深層滑動應力狀態



35

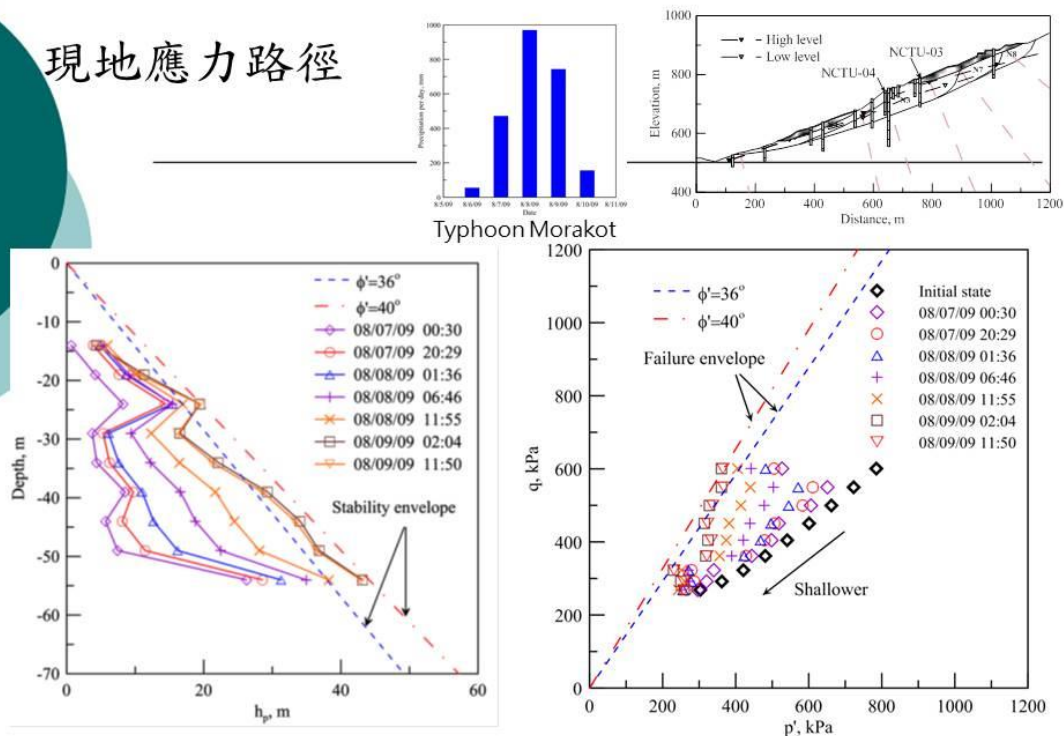
Section B-B



g Consultants, Co., Ltd., 2007)

36

現地應力路徑



(Huang et al., 2012) 37

二維水力學耦合邊坡分析

水力學耦合數值分析

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。

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

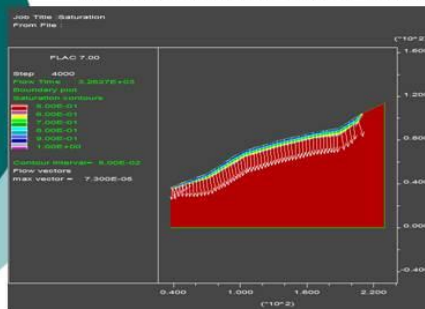
$$\tau^{max} = (\sigma - P_a) \tan \phi + S_w (P_a - P_w) \tan \phi + C$$

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

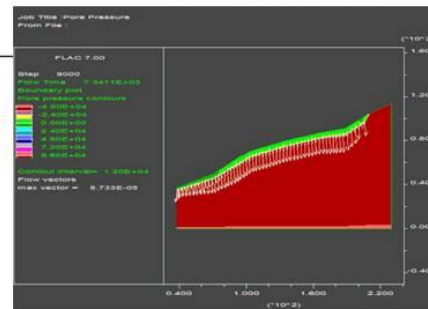
38

耦合分析結果

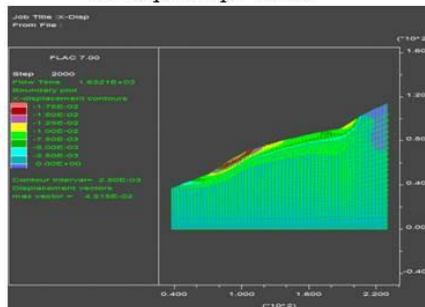
Wetting front (Saturation+Flow)



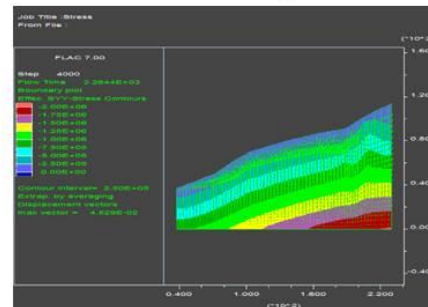
Pore pressure+Flow



X-disp+Disp. vector



Eff. Vert. stress+ Disp. vector



39

現有深層滑動解析限制與對策

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

Key: 長期有效連續觀測

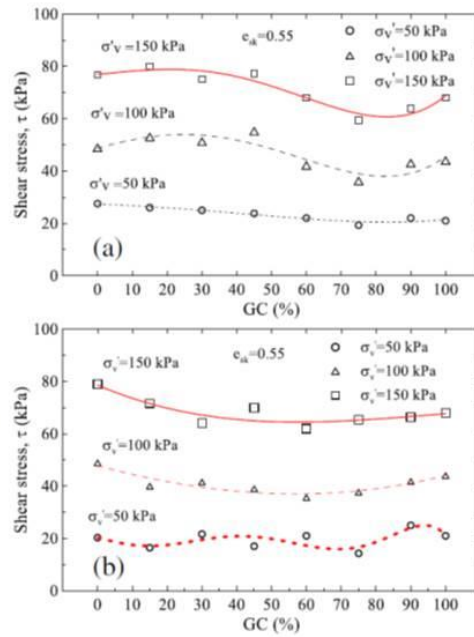
40

五彎仔地滑區材料性質

礫石含量對土壤強度影響



崩積材料剖面



41

深層滑動測試場址

候選場址條件：

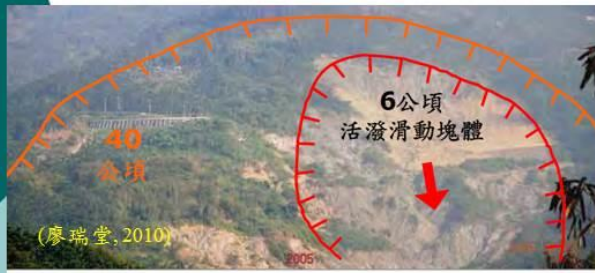
- 具有厚層軟弱土壤，坡角小於土壤有效摩擦角，地下水位高或入滲速率快，臨界破壞面為飽和土層之深層破壞。
- 高破壞潛勢或有破壞歷史，具有相關幾何、水文及地質參數、現地監測資料參考。
- 鄰近具有通訊網路，以利雲端資料傳輸。



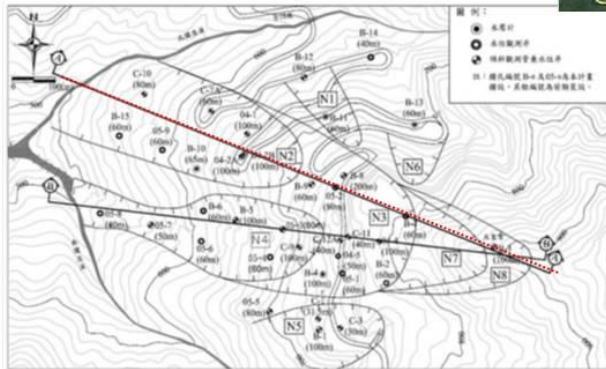
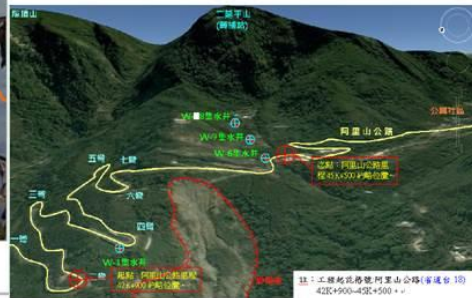
圖 2-1 監測儀器平面配置圖

42

阿里山公路五彎仔地滑區

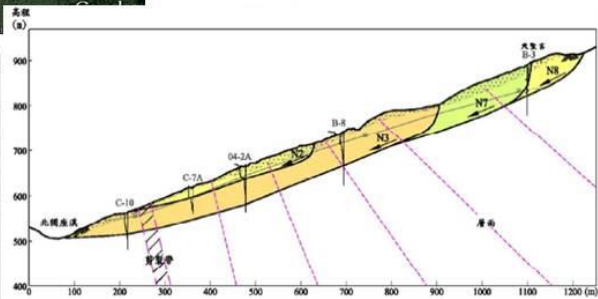
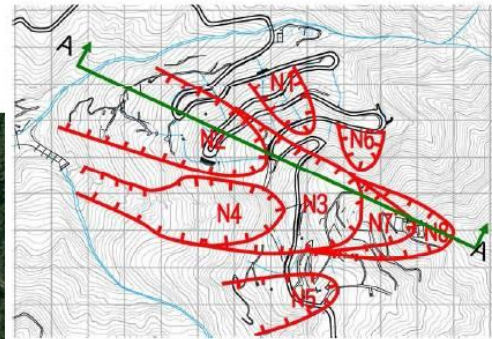


滑動面積約40公頃，位移速率每年約20cm



43

Section A-A



註：本圖係以阿里山公路(省道台10) 42K+900~42K+500為範圍，並依據工程地誌(廖瑞堂, 2010)之資料繪製。圖中紅色虛線為活潑滑動塊體之範圍，黃色虛線為穩定滑動塊體之範圍。

Engineering Consultants, Co., Ltd., 2007)

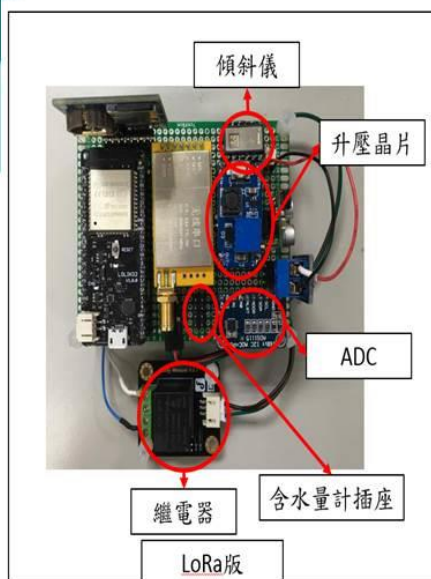
44

深層滑動無線監測模組架構

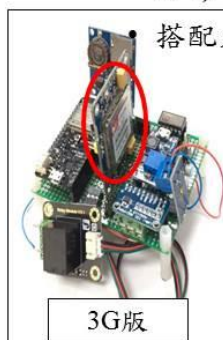
- 現地深層水位及表層入滲與變位監測
- 建立降雨與地下水位關聯性
- 監測模組規劃：
 - 即時孔隙水壓力監測
 - 地表入滲與變位觀測
 - 現地雨量監測(107年)
 - 無線傳輸與雲端儲存

45

深層滑動無線監測模組



- LoRa無線傳輸
- 配置SD卡(監測資料備份)
- 傳送資料含傾角變位、土壤體積含水量、地下水位與模組電壓
- 模組ID為00(水位觀測井B-7)
- 搭配太陽能板與電池模組



左圖3G版是將LoRa替換成3G模組，用以解決Client與Server間干擾過多無法傳輸資料之問題

監測模組原型測試

- 取得五工處同意函並於2017/09/23 裝設完畢
- 液位計深度為30 m, 解析度為1 cm, 量測最大深度20 m
- 因鄰近抽水井，目前水位在沉水式液位計以下
- 資料上傳間距為15 min. 運作正常

47

模組位置



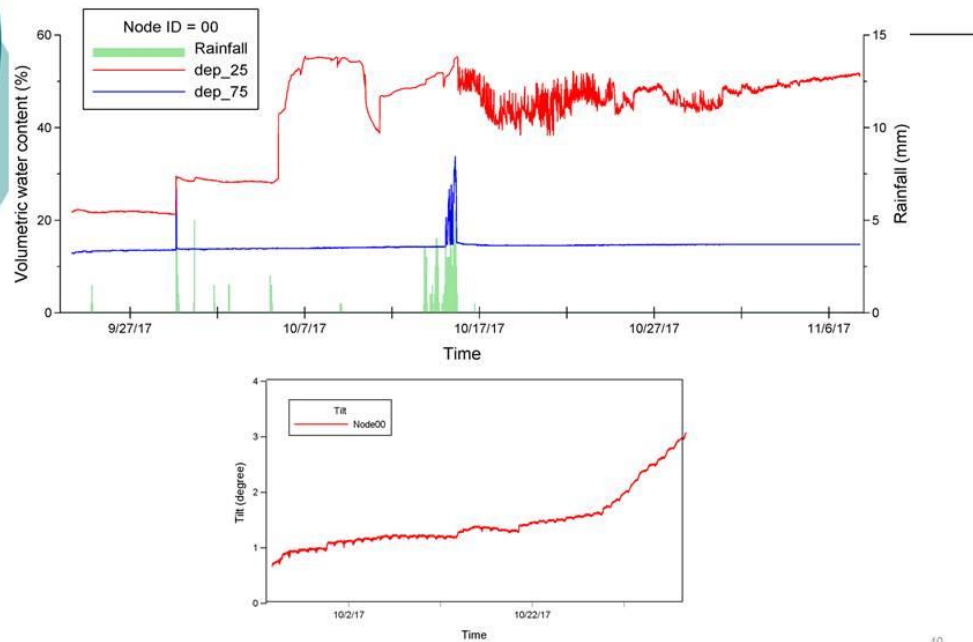
雨量計



- 紀錄每十分鐘降雨量與時雨量
 - LoRa無線傳輸
 - 配置SD卡(監測資料備份)
- 模組ID為01
搭配太陽能板與電池模組



阿里山深層模組監測資料



49

深層邊坡滑動監測模組測試: 牡丹水庫

◆ 右岸邊坡監測模組(MCU6)



◆ C線道路邊坡監測模組(MCU7)



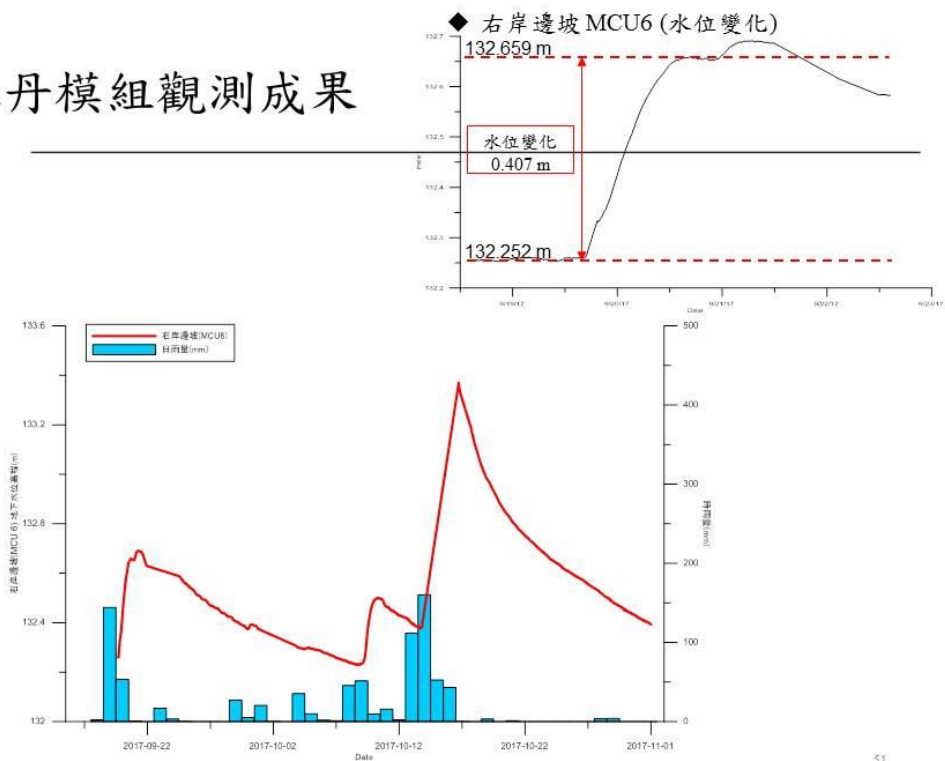
◆ 水位計安裝流程:

1. 放置水位計至預定高程
2. 固定水位計
3. 密封水位計開口
4. 安裝完畢



50

牡丹模組觀測成果

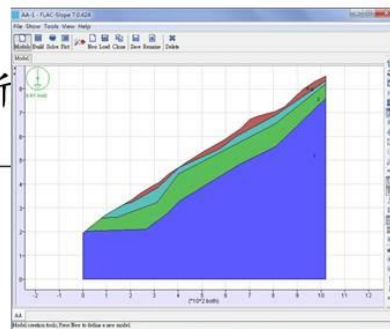


51

五彎仔二維水力力學耦合穩定分析

土層參數

參數	單位	Colluvium	WR	LWR	Rock
非飽和單位重	kN/m ³	18.5	19.6	21.0	22.0
飽和單位重	kN/m ³	21.0	21.6	22.0	22.0
楊氏模數	kPa	4000	1.0E4	2.0E4	1.0E5
柏松比		0.4	0.35	0.35	0.25
有效凝聚力	kPa	0	4.0	12.0	120
有效摩擦角	度	31	30	40	40
膨脹角	度	2	0	0	0
滲透係數	(m/s)	1.0E-4	1.0E-6	1.0E-8	1.0E-10

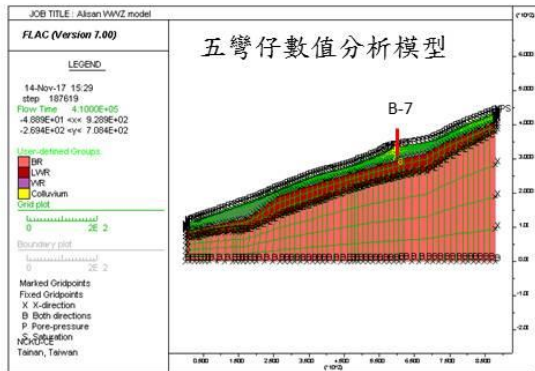


非飽和水文參數

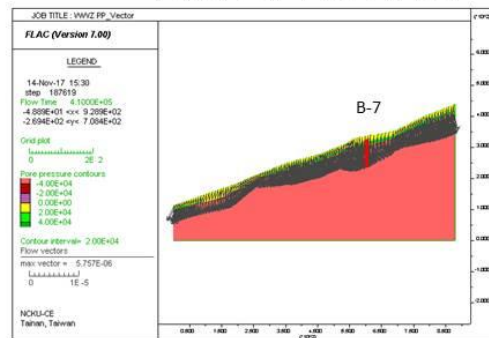
參數	Colluvium	WR	意義
Porosity	0.35	0.1	孔隙率
k_{sat} (m/s)	1.0E-4	1.0E-6	飽和滲透係數
$fmodulus$ (Pa)	2.0E9	2.0E9	水體積模數
saturation	0.54	0.54	初始飽和度
Vga	0.1	0.1	VG parameter a
Vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
Vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0 (Pa)	15000	15000	VG P0
Pc (Pa)	-45203	-45203	初始 From Pc(Sw)

52

數值模型與水力反應

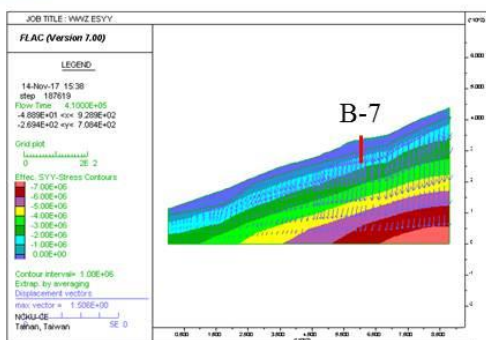


4.75天後水壓分布與流動向量

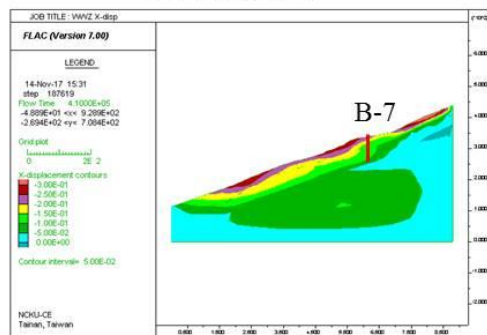


力學反應與位移分佈

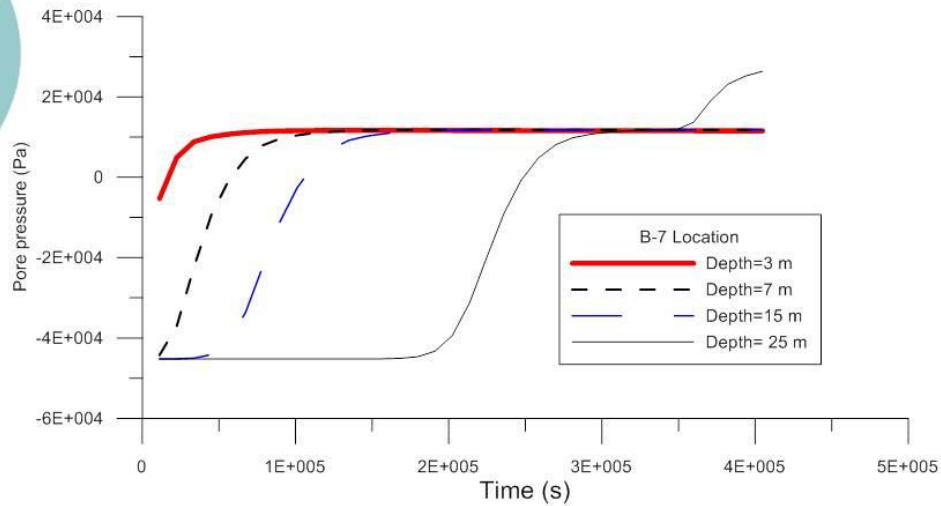
垂直有效應力分布與位移向量



水平位移分佈



孔隙水壓歷時



55

結論與建議

• 成果總結:

- 現有監測站之淺層滑動無線模組已完成系統更新，增加雲端監看功能及重新設計之硬體元件，並完成現地滲透係數解析架構，結果顯示模組穩定與應用性已顯著提高。
- 以場址阿里山五彎仔A-A剖面為案例，模擬降雨垂直入滲下水力力學耦合分析，並建立無限邊坡孔隙水壓與安全係數關聯，可做為後續依時預警之學理依據。
- 完成以原有淺層滑動監測模組為基礎，增加孔隙水壓量測功能之深層滑動模組，於選定阿里山場址及測試邊坡進行監測模組原型測試，成果符合原先規劃且完整度高。

• 建議

- 因五彎仔已完成深井排水整治，後續深層滑動機率不高，建議現有系統作為模組測試，後續測試可另擇適宜場址。
- 建議以長期觀測之地下水位與降雨特徵進行統計分析，帶入極限平衡分析架構，可提高其應用準確度。

56



簡報完畢，敬請指教

57

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-106-H1DB002a

採購案名稱：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

時間：106年4月25日下午2時30分 地點：國立臺灣科技大學

主席：謝明志 科長

記錄：陳志芳

出席者：謝明志

港研中心一科：陳志芳

財團法人成大研究發展基金會：張文忠

討論議題：

- 1、上月份工作進度報告
- 2、後續工作重點
- 3、問題與討論

主要結論：

- 1、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、無線感測網路監測系統主要是進行公路邊坡滑動監測，對於淺層邊坡滑動有那些山區道路可適用系統進行監測。
- 3、本監測網路模組儀器可否應用到土層振動下陷的監測？是未來可思考的方向。

第二季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-106-H1DB002a

採購案名稱：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

時間：106年6月16日(星期五)下午15時30分

地點：港研中心5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.目前研究進度與契約規劃之期程相符，期中報告初稿於6月27日前可如期繳交。
- 2.甲仙公路邊坡滑動測站目前共有4支感測器同時監測，儀器正常監測中，西湖休息區監測站資料傳輸儲存系統正進行雲端化作業中。
- 3.現有監測模組技術已完成廣域通訊、低耗電與使用Thingspeak多人連結等精進功能。
- 4.深層滑動監測場址選定阿里山五彎仔公路邊坡進行試驗，目前已完成感測器組裝，並擇期前往設置。

第三季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-106-H1DB002a

採購案名稱：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

時間：106年10月2日(星期一)下午14時

地點：國立成功大學土木工程系

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、完成無限邊坡深層滑動之極限平衡推導，並以應力路徑法進行深層滑動分析。
- 3、深層滑動監測場址經選定阿里山五彎仔公路邊坡進行試驗後，目前已完成無線感測器安裝，整體監測模組架構包含現地深層水位、表層入滲、邊坡滑動變位等儀器與資料無線傳輸。
- 4、後續進行的工作為嘉義阿里山五彎仔深層滑動監測站之土層參數推估、水力力學耦合數值模擬、持續監測現有之淺層滑動崩塌監測站，維持儀器正常監測及定期量測資料整理。

第四季工作會議紀錄

採購案編號：MOTC-IOT-106-H1DB002a

採購案名稱：公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發

時間：106年11月8日(星期三)上午10時30分

地點：本所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、目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- 2、完成以應力路徑法進行深層滑動分析及監測模組架構測試。(含現地深層水位、表層入滲等儀器與資料無線傳輸)
- 3、完成設置阿里山五彎仔公路邊坡滑動站與持續監測，並進行測站之土層參數推估、水力力學耦合數值模擬、持續監測現有之淺層滑動崩塌監測站，維持儀器正常監測及定期量測資料整理。
- 4、期末報告初稿預計於履約期限內完成。