

105-030-7870

MOTC-IOT-104-H1DB001b

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路 模組研發(1/2)



交通部運輸研究所

中華民國 105 年 3 月

105-030-7870

MOTC-IOT-104-H1DB001b

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路 模組研發(1/2)

著者：陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌
許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯

交通部運輸研究所

中華民國 105 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發. (1/2)
/ 陳志芳等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，
民 105.03
面；公分
ISBN 978-986-04-8283-6(平裝)

1.公路管理 2.運輸規劃

557

105004686

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)

著者：陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶堯
甯敘堯

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04)26587176

出版年月：中華民國 105 年 3 月

印刷者：禾泰印刷設計有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：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：1010500369

ISBN：978-986-04-8283-6 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發
(1/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1010500369
定價 200 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)			
國際標準書號 ISBN：978-986-04-8283-6 (平裝)	政府出版品統一編號 1010500369	運輸研究所出版品編號 105-030-7870	計畫編號 104-H1DB001b
主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳志芳 協同主持人：謝明志 參與人員：王欣郁 聯絡電話：04-26587113 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：許智超、周仕勳、趙慶堯、甯敘堯 地址：70101 臺南市大學路 1 號 聯絡電話：06-2757575~63128		研究期間 自 104 年 02 月 至 104 年 12 月
關鍵字：淺層崩塌破壞、無線監測模組、水力力學耦合分析、依時預警系統，微機電系統			
摘要： 本研究針對公路邊坡可能遭遇之淺層崩塌破壞進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線感測土層反應模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性。研究結合具嚴謹力學及通用性之解析法邊坡穩定分析及量測淺層土層反應之無線監測模組，利用建立之場址地質模型進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，發展場址客製化具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警架構。所發展之監測模組將以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電感測系統，結合無線通訊技術，整合具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表位移、土中分層濕度、溫度及孔隙水壓之監測模組，形成分布式淺層土層感測網路作為相關防災啟動之準據。 成果效益與應用情形： 1.建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法邊坡崩塌分析架構，做為公路邊坡淺層崩塌預警模式之雛形。 2.測試淺層簡易土層監測模組於山區公路淺層邊坡崩塌預警之成效。 3.開發客製化公路邊坡淺層崩塌監測與預警技術，提升預警準確度。 4.研究成果提供交通部、公路總局與台鐵局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
105 年 3 月	176	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 （解密條件：☐ 年 月 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密，☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密） ☒普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Development of wireless monitoring modules for highway slope (1/2)			
ISBN 978-986-04-8283-6 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010500369	IOT SERIAL NUMBER 105-030-7870	PROJECT NUMBER 104-H1DB001b
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jyh-Fang Chen PROJECT STAFF: M. J. Hsieh PHONE: 04-26587113 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM February. 2015 TO December 2015
RESEARCH AGENCY: NCKU Research And Development Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Jong Chang CO-PROJECT INVESTIGATOR: An-Bin. Huang ADDRESS: No.1, University Road, Tainan 70101, Taiwan (R.O.C) PHONE: 886-06-2757575~63128			
KEYWORDS: shallow slope failure, wireless sensing module, coupled hydro-mechanical analysis, time-dependent warning system, micro-electro-mechanical system			
ABSTRACT: To improve the limitations of rainfall-based slope warning system, a new technique that integrated the hydro-mechanical slope analysis and wireless sensing module for shallow ground response monitoring is under development to establish a customized, time-dependent warning system for shallow slope failures triggered by rainfalls. A coupled hydro-mechanical analysis considers both the hydraulic infiltrations and mechanical responses of unsaturated soils in slope stability analysis. Wireless sensing module based on micro-electro-mechanical system (MEMS) components with wireless communication module will be developed to monitor ground movements and subsurface conditions, including ground inclination, ground movement, water content profile, and pore water pressures. Combining the real-time monitoring 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 shallow failure along roadside and provide theoretical basis of warning system. 2. Verify the performance of surface wireless sensing module for shallow landslides warning. 3. Develop customized, time-dependent warning system and procedure to improve the limitations of current empirical techniques. 4. The system potentially can be used by ministry of transportation, directorate general of highways, and Taiwan railways administration for hazard management.			
DATE OF PUBLICATION March 2016	NUMBER OF PAGES 176	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (1/2)

目 錄

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

3.1.1 非飽和土壤性質與基質吸力	3-1
3.1.2 非飽和土壤剪力強度	3-4
3.1.3 土壤含水量特徵曲線	3-4
3.2 非飽和滲流分析	3-8
3.2.1 非飽和滲流控制方程式	3-8
3.2.2 1D 入滲分析	3-9
3.3 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析	3-10
3.3.1 無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論	3-10
3.3.2 水力力學耦合試驗系統	3-14
3.3.3 試驗材料基本物理性質	3-17
3.3.4 試驗規劃	3-20
3.3.5 試驗結果與分析	3-25
3.3.6 水力力學耦合試驗結果與分析	3-27
3.4 研究場址及二維水力力學耦合穩定分析	3-35
3.4.1 研究場址選定	3-35
3.4.2 研究場址邊坡穩定分析	3-38
3.4.3 研究場址水力力學耦合分析	3-40
3.5 水力力學耦合分析於預警應用	3-44
第四章 土層監測模組研發	4-1
4.1 表層水文與運動反應量測	4-1
4.1.1 基質吸力量測量測	4-1
4.1.2 電容量測土壤含水量原理	4-2
4.2 無線感測土層監測模組	4-5

4.2.1 土層監測模組架構.....	4-5
4.2.2 土層監測模組組成.....	4-7
4.3 研究成果.....	4-15
4.4 監測模組小結.....	4-33
第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 104 年度計畫執行結論.....	5-1
5.2 建議.....	5-2
重要參考文獻.....	參-1
附錄一 104 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二 104 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

圖目錄

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

圖 3.14 試體容器實體圖	3-17
圖 3.15 側向變位量測裝置	3-18
圖 3.16 試體各層剪應變計算示意圖	3-18
圖 3.17 試驗材料粒徑分佈曲線	3-19
圖 3.18 試驗流程圖	3-21
圖 3.19(a) 水力力學試驗試體	3-22
圖 3.19(b) 壓力鍋試驗試體	3-22
圖 3.19(c) 單剪試驗試體	3-22
圖 3.20 試驗 A 示意圖	3-24
圖 3.21 基質吸力與含水量關係函數	3-25
圖 3.22(a) 應力應變曲線	3-26
圖 3.22(b) 孔隙水壓變化	3-26
圖 3.23 試驗土壤之強度參數	3-26
圖 3.24 試驗 A 入滲量及試體各層剪應變隨時間變化情形	3-27
圖 3.25 試驗 A 入滲深度隨時間變化歷時	3-28
圖 3.26 試驗 A 試體平均含水量隨時間變化情形	3-29
圖 3.27 試驗 A 試體平均剪力強度隨時間變化情形	3-29
圖 3.28 試驗 A 試體平均安全係數隨時間變化情形	3-30
圖 3.29 試驗 B 入滲量及試體各層剪應變隨時間變化情形	3-32
圖 3.30 試驗 B 入滲深度隨時間變化情形	3-32
圖 3.31 試驗 B 試體平均含水量隨時間變化情形	3-33
圖 3.32 試驗 B 試體平均剪力強度隨時間變化情形	3-34
圖 3.33 試驗 B 試體平均安全係數隨時間變化情形	3-34

圖 3.34 寶隆調查範圍監測儀器布置圖(鄭清江等 2009).....	3-36
圖 3.35 寶隆調查範圍水文地質模型與邊界條件(鄭清江等 2009)....	3-36
圖 3.36 寶隆調查範圍常時邊坡穩定性($FS=1.485$)(鄭清江等 2009) .	3-37
圖 3.37 寶隆調查範圍變形性評估結果 (鄭清江等 2009).....	3-38
圖 3.38 寶隆 FLAC 模型.....	3-39
圖 3.39 寶隆 FLAC 常時分析臨界滑動面	3-39
圖 3.40 寶隆 FLAC 常時水平變位分佈圖	3-40
圖 3.41 監測點位分布圖	3-42
圖 3.42 監測點位孔隙水壓歷時.....	3-43
圖 3.43 穩定流況下水力行為	3-44
圖 3.44 穩定流況下邊坡穩定分析結果($FS=1.03$)	3-45
圖 3.45 水力力學耦合分析位移歷時.....	3-46
圖 4.1 TI. FDC1004 電容數位轉換器(TI, 2015).....	4-3
圖 4.2 非接觸式電容量測之應用方法	4-3
圖 4.3 液位量測示意圖	4-4
圖 4.4 土壤三相圖(Das, 2006).....	4-5
圖 4.5 土層監測模組內部感測器架構示意圖	4-7
圖 4.6 Arduino Uno	4-9
圖 4.7 MPU-6050 (InvenSense).....	4-10
圖 4.8 SCA100T (Murata Electronics)	4-10
圖 4.9 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖	4-11
圖 4.10 FDC1004EVM 開發模組	4-12
圖 4.11 NRF24L01 模組(摘自 www.seeedstudio.com).....	4-14

圖 4.12 Arduino 編輯器	4-14
圖 4.13 使用 Microsoft Visual Studio C#編寫 GUI	4-15
圖 4.14 Arduino UNO 原型擴展板(Sparkfun).....	4-16
圖 4.15 Arduino UNO 結合原型擴展板與電容感測器	4-16
圖 4.16 發射端外構.....	4-17
圖 4.17 發射端核心內盒	4-18
圖 4.18 發射端核心外盒	4-18
圖 4.19 含水量計殼層	4-19
圖 4.20 發射端內盒骨架	4-19
圖 4.21 內外盒通風間隙	4-20
圖 4.22 接收端之微控制器與搭載電路板.....	4-21
圖 4.23 接收端外殼.....	4-21
圖 4.24 組合後之接收端僅露出 USB 端口	4-22
圖 4.25 MPU-6050 模組(Arduino).....	4-22
圖 4.26 IMU 與傾斜角度之關係圖	4-23
圖 4.27 傾斜角度標定系統.....	4-23
圖 4.28 傾斜儀電路圖 (Murata).....	4-24
圖 4.29 傾斜儀測試板	4-25
圖 4.30 傾斜儀標定照片	4-25
圖 4.31 傾斜儀透過 Arduino Uno 標定結果	4-26
圖 4.32 傾斜儀透過電錶標定結果.....	4-26
圖 4.33 傾斜儀電壓轉換等效角度與參考角度關係圖	4-27
圖 4.34 測得電容值與土壤體積飽和度關係圖	4-27

圖 4.35 圖形化使用者操作介面 GUI.....	4-29
圖 4.36 儲存後之文字檔.....	4-29

表目錄

表 3-1 非飽和土壤應力狀態變數組合(Fredlund and Morgenstern, 1977)	3-2
表 3-2 試驗材料基本物理性質	3-19
表 3-3 試體內達未飽和平衡狀態時之各層含水量	3-23
表 3-4 試驗 A 及試驗 B 基本參數	3-24
表 3-5 試驗初始條件	3-31
表 3-6 寶隆水文地質單元參數(鄭清江等 2009)	3-37
表 3-7 寶隆非飽和水文參數	3-42

第一章 計畫概要

1.1 研究計畫之背景、目的及重要性

1.1.1 計畫背景

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

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與外在誘因，如地形、地質與降雨資料與崩塌相關性之統計迴歸與整理等，歸納出簡易的關係式，以作為未來評估崩塌之用。經驗法因具有簡單與單純性，因此較為廣泛地被使用，尤其是對區域性之坡地崩塌分析與預警機制之擬訂已行之有年，如以累積降雨量或降雨強度為基準發佈土石流警戒燈號即為典型之應用。但是此類經驗法因缺乏嚴謹之力學概念，且近年來受極端氣候常態化影響，降雨有趨於異常強烈之傾向，導致近期之崩塌案例其緩坡之崩塌面積擴大與陡坡之滑動面深度增加，限於過去類似經驗有限，經驗法則對此類邊坡崩塌之預測有其侷限。

現有公路邊坡預警系統主要為沿用坡地治理常用之降雨作為預警

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

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

公路邊坡依其滑動深度可分為淺層與深層滑動，二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，本研究以較常見之淺層降雨崩塌為研究對象，依 Varnes (1978) 之邊坡移動分類方法屬工程土壤之平面或圓弧滑動，水土保持局山崩分類方法之地滑，楊樹榮等(2011)所提本土化山崩分類系統中之弧形崩塌及平面型崩塌，初步之定義為發生於崩積土壤或崩塌岩屑，破壞深度在 2~3 m 內，且為以固體型態滑動之破壞類型。現今對淺層邊坡預警之趨勢為整合考慮地形、地質材料特性之場址破壞機制分析，搭配即時監測相關引致滑動之土層物理量與地層運動之預警系統，此類預警技術包含兩部分，其一為藉由地質探勘與地形測量，建立場址地質模型並據以進行解析法分析，預測其滑動機制、範圍及不同階段警戒值；其二為佈設監測硬體於反應敏感之位置，進行即時土層監測並發佈警報。目前以數值方法進行淺層崩塌機制分析已有相當進展，但是現地土層邊坡預警監測系統仍有價格昂貴、佈設不易及維護困難等瓶頸，因此發展具備無線土層監測之模組化系統，對於推廣以解析法為依據之淺層公路邊坡降雨崩塌預警系統具重要關鍵。

1.1.2 計畫目的

本研究目的為結合解析法與邊坡無線土層監測模組，發展場址客製化淺層公路邊坡降雨崩塌預警系統，利用建立之場址地質模型進行水力力學耦合(coupled hydro-mechanical)邊坡滑動數值分析，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，研究將擴展由東京大學發展之簡易坡地淺層監測之概念(Uchimura et al. 2008)，增加土壤入滲行為量測，結合解析法預測，發展場址客製化淺層公路邊坡降雨崩塌預警模組。東大之監測系統為於邊坡表層監測土層滑動引致之地表傾角及淺層土壤含水量，於潛在滑動邊坡佈設數個量測點，各點間以無線傳輸方式將資料傳至監測主機，由遠端人員進行判讀並進行相關分析，該系統已於日本及中國進行數個場址測試並取得初步監測成果，但其佈設昂貴，且佈設點位多靠經驗，因此較適於大型高風險場址監測與學術研究。

本研究將採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統 (Micro-electro-mechanical system, MEMS)感測器，利用台灣高科技產業中電子整合能力，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、地表位移、土中分層濕度、溫度及孔隙水壓之監測模組，形成分布式淺層土層感測網路，由於此類電子產品可大量生產因此可大幅降低成本。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

本計畫全期為兩年(104 年-105 年)，第一年為解析法分析架構建立及無線監測模組設計與整合測試，第二年為模型邊坡與選定場址現地測試，結合二年之成果，可訂定場址於破壞不同階段之警戒值，發展客製化公路邊坡降雨崩塌預警系統架構。短期目標為發展具依時特性之公路邊坡降雨崩塌預警技術，提升現有以經驗法為依據之預警模式

準確度，以利災害管理，長期目標為開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警技術，做為相關防災做為啟動之準據。

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

本計畫將選定具破壞潛勢且有上述淺層非飽和土壤邊坡特徵之場址進行解析法分析及佈設無線監測模組進行現地測試，候選場址將參考運研所前期「山區道路易致災路段調查評估、風險分析及監測預警管制技術之研發」所建立之案例進行篩選。依據現有公路邊坡調查資料，選定需進行客製化依時預警系統之場址，收集其地形幾何與地質材料組成及力學與水文特性，據以進行極限平衡分析，檢核其破壞模式是否符合淺層非飽和土層之特徵，同時進行考慮入滲之滲流分析，結合滲流分析與極限平衡分析可進行與(Collins and Znidarcic, 2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測若破壞其可能破壞之時間，另以現地資料，建立水力力學耦合數值分析模型，此模型將同時求解 Richard's equation 及非飽和土壤非線性力學分析，藉由更新入滲引致之非飽和土壤彈性模數及強度參數，以預測不同位置地表位移量分布及位移時間歷時，作為無線監測模組佈設及由地表運動量監測推算之破壞時間。

1.3 研究內容與項目

本計畫分二年執行，執行期間為 104 至 105 年，工作項目條列如下：

第一年(104 年)：

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

第二年(105 年)：

1. 以模型邊坡進行試驗，測試簡易土層監測模組精確度及預警分析模式之可靠性分析。
2. 佈設簡易土層監測模組於研究測試場址，進行現地測試與連續監測。
3. 修正淺層崩塌數值分析及不同階段警戒值，發展客製化公路邊坡降雨崩塌預警系統架構。
4. 參考科技部「科技計畫績效管考平台(<http://stprogram.stpi.narl.org.tw>)」之「績效指標(實際成果)資料格式(word 檔案)」及「佐證資料格式(word 檔案)」，就本計畫成果之特性，選填合適績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究成果及重大突破。本計畫績效指標項目至少包括下列 3 項：

(1)學術成就(科技基礎研究)-A 論文發表。

(2)技術創新(科技整合創新)- I 技術活動：研究成果發表於國內或國外研討會。

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

依據計畫規劃，104 年研究之主要工作內容與項目說明如下：

1. 與運研所商討，依計畫目的與破壞特徵，篩選具詳細調查資料之候選公路邊坡研究場址，進行必要之地層材料力學試驗，並進行傳統極限平衡邊坡穩定分析及水力力學耦合數值模擬，建立完整解析法

架構。

2. 研製簡易土層無線監測模組原型，系統將可監測土層運動量及水力特性，整合資料擷取與無線傳輸功能，進行少量製作以進行模組整合測試。
3. 整合解析法結果，發展簡易土層無線監測模組佈設原則，發展相關資料處理程序。

105 年研究規劃之內容與項目如下：

1. 以完成之土層無線監測模組原型，進行模型邊坡試驗及模型邊坡解析法分析，測試簡易土層監測模組效能及資料處理程序之正確性，並回饋解析法成果。
2. 將完成之土層無線監測模組原型，佈設於研究測試場址，進行現地測試與連續監測。
3. 結合解析法與監測資料，修正場址降雨崩塌行為預測數值模式，建構測試場址客製化公路邊坡降雨崩塌預警技術雛形。

依據研究之內容與項目，104 年度之成果要求說明如下：

1. 進行選定場址之地層材料試驗與地質資料收集與調查，完成地質模型並進行傳統極限平衡分析。
2. 進行考慮非飽和土壤特性之邊坡水力力學耦合數值分析，建立場址降雨崩塌行為預測。
3. 訂製簡易土層監測模組原型，進行少量製作以進行模組整合測試。

計畫執行預期完成之成果包括：

1. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法邊坡崩塌分析架構，並以此做為公路邊坡淺層崩塌預警模式之雛形。
2. 測試淺層簡易土層監測模組於山區公路淺層邊坡崩塌預警之成效。

3. 開發客製化公路邊坡淺層崩塌監測與預警技術，提升預警準確度。

計畫執行全期預期效應與應用如下：

1. 發展具依時特性之公路邊坡降雨崩塌預警技術，提升現有以經驗法為依據之預警模式準確度，以利災害管理。
2. 發展簡易土層監測模組，應用於地質災害監測與預警。
3. 開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警技術，做為相關防災作為啟動之準據。

1.4 預期成果、效益及應用

1. 依率定之數值模擬之成果，提出港區碼頭結構安全臨界值，包括臨界地表加速度、震後碼頭位移與變形、液化後碼頭穩定性等，作為港區災害應變管理之依據及提供目前耐震補強之策略及震後修復之參據。
2. 提供不同型式碼頭結構物耐震功能性設計之參考，達到減少地震災害所造成的港埠營運損失，並滿足運輸安全需求。
3. 建構可靠之災損評估模式，作為港區災害管理及地震災害速報系統之參據。
4. 研究成果提供各港務分公司及相關單位，作為港灣碼頭工程規劃設計之參據，以提升碼頭耐震能力，減低震害。

計畫執行預期完成之成果包括：

1. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法邊坡崩塌分析架構，並以此做為公路邊坡淺層崩塌預警模式之雛形。
2. 測試淺層簡易土層監測模組於山區公路淺層邊坡崩塌預警之成效。
3. 開發客製化公路邊坡淺層崩塌監測與預警技術，提升預警準確度。

計畫執行全期預期效應與應用如下：

- 1.發展具依時特性之公路邊坡降雨崩塌預警技術，提升現有以經驗法為依據之預警模式準確度，以利災害管理。
- 2.發展簡易土層監測模組，應用於地質災害監測與預警。
- 3.開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警技術，做為相關防災作為啟動之準據。

第二章 研究方法及進行步驟

2.1 研究方法

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

水力力學耦合分析包括考慮非飽和土壤中其非線性滲透特性之特點，考慮水力邊界條件，求解 Richard's equation，以模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低，結合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，預測可能破壞之時間，此為初步之解析成果，其準確度有賴於入滲速率及土壤抗剪強度推估可靠度。臨界破壞深度與破壞包絡線分析無法推估地表土層運動量，而地表特定位置之運動量推估有賴於複雜之數值模擬，本研究將以假設合理之邊界與初始條件，進行考慮入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果即時更新非飽和土壤有效應力及土壤勁度與強度，進行二維非飽和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，因此本計畫將以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統 (Micro Electro-Mechanical System, MEMS)感測器，客製化具無線網路通訊功能

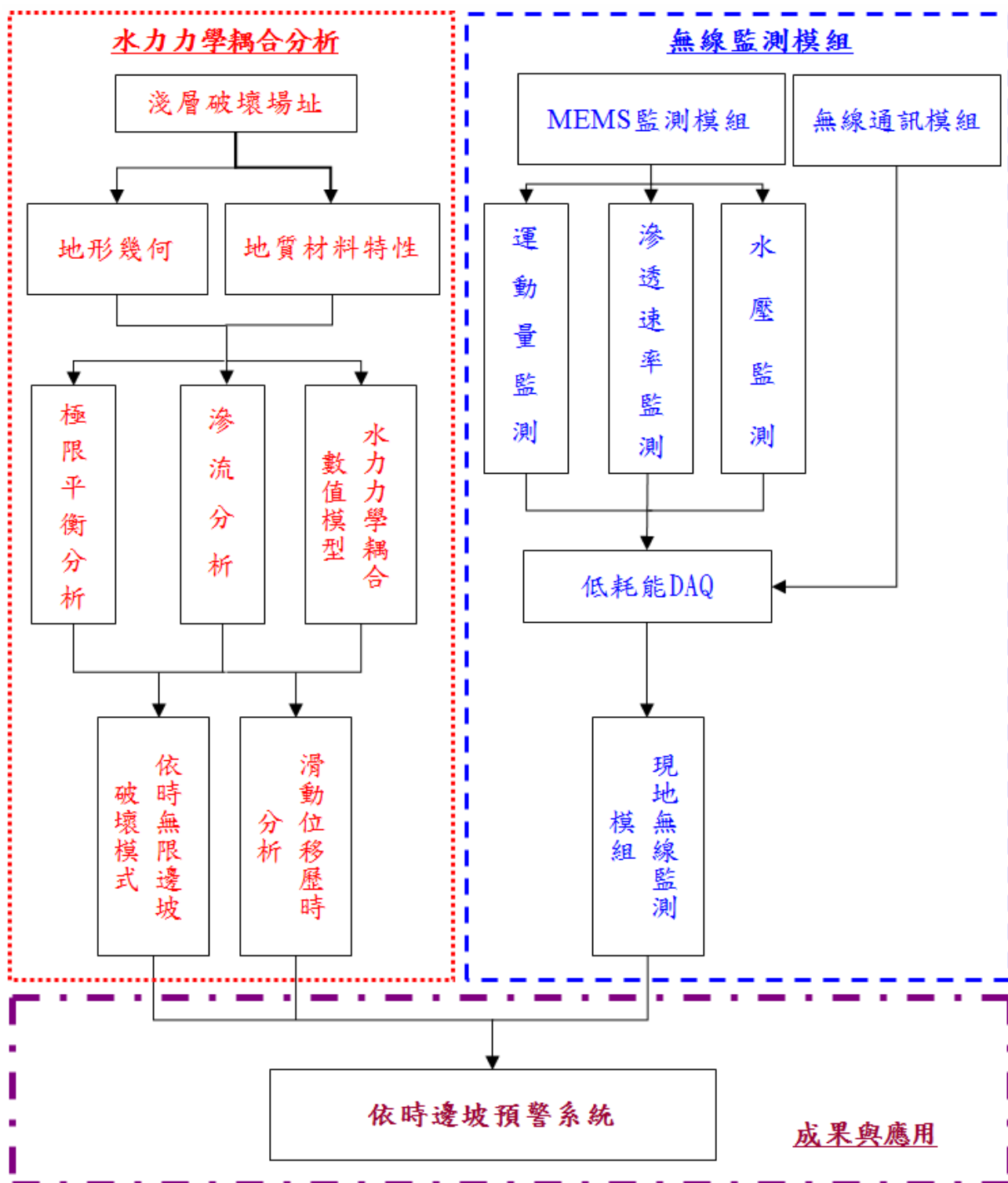


圖 2.1 依時邊坡預警系統研究架構圖

且可監測地表傾角、地表位移、入滲速率、基質吸力及孔隙水壓之監測模組，形成分佈式淺層土層無線感測網路，入滲速率將由不同深度之土中電阻電極，利用入滲引起含水量增加而降低土壤電阻值之特性，量測入滲速率與剖面，並於土中裝設一組張力計進行初始土層含水量量測與入滲速率校核，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，基質吸力量測則可作為數值分析之初始含水量依據，而孔隙水壓力量測可作為土壤飽合狀態下滲流應力值，以檢核滲流分析成果。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。

本研究初期將以簡化之邊坡模型進行分析，以建立水力力學耦合分析之架構，並進行簡易淺層邊坡無線監測模組之研發測試，後期將選定一測試場址進行全尺度分析、現地安裝與連續監測，作為依時預警架構之修正與成效評估。場址選取將依據現有公路邊坡調查資料，選定需進行客製化依時預警系統之場址，收集其地形幾何與地質材料組成及力學與水文特性，據以進行極限平衡分析，檢核其破壞模式是否符合淺層非飽和土層之特徵，同時進行考慮入滲之滲流分析，結合滲流分析與極限平衡分析可進行與(Collins and Znidarcic, 2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測若破壞其可能破壞之時間，另以現地資料，建立水力力學耦合數值分析模型，藉由更新入滲引致之非飽和土壤彈性模數及強度參數，以預測不同位置地表位移量分佈及位移時間曲線，作為無線監測模組佈設及由地表運動量監測推算之破壞時間。本年度(104 年)預計執行之部分為水力力學耦合解析法建構及完成淺層土層無線感測模組，相關細項如 1.3 節所述。

2.2 國內外有關本計畫之研究情況

2.2.1 解析法邊坡分析

美國交通研究委員會(TRB, 1996)依邊坡破壞之材料種類及運動方

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

在多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲不但會增加土坡的下滑力，減弱材料特性，在非飽和邊坡還會因基質吸力減少使剪力強度下降，所以水和土壤之耦合特性在邊坡穩定問題中是不可或缺的。經驗指出絕大部分因降雨而導致之崩積層坡地崩塌屬於淺層破壞(Cascini et al. 2010; Fannin et al., 2005)，破壞面深度約在 0.5 至 3m 之間，覆土壓力在 5 至 25kPa 之間。Cascini et al. (2010) 歸納前人的研究，將此類淺層邊坡崩塌分析分成破壞 (failure)，破壞後 (postfailure) 與擴散 (propagation) 三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。Cascini et al. (2010)使用現地應力路徑 (field stress path) 的框架，將邊坡破壞後的行為分成地滑 (slide)，地滑變流動 (slide to flow) 與流動型地滑 (flowslide) 如圖 2.2 所示。其中之剪應力 q 定義為：

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

而平均有效應力 p' 定義為：

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

F_d 代表地層內之驅動力， F_r 為抵抗力， δ 為地層移動量。受到降雨入滲或地層內泉水之影響使得應力路徑達到破壞線，同時 $F_d \geq F_r$ 時即發生邊坡破壞，但是破壞發生後是否產生流動型地滑則控制於地層力學

性質，地下水壓變化以及破壞時排水狀況的特性。大部分地滑式邊坡破壞屬於圖 2.2b 所示，破壞時 q 保持常數。圖 2.2c 的狀況是當高層邊坡破壞時產生應力轉移（stress transfer）或漸進式破壞使得破壞區之 q 增加。圖 2.2d 則發生於鬆土中，破壞發生後剪力破壞變成不排水應變軟化而流動（Anderson and Sitar, 1995）。

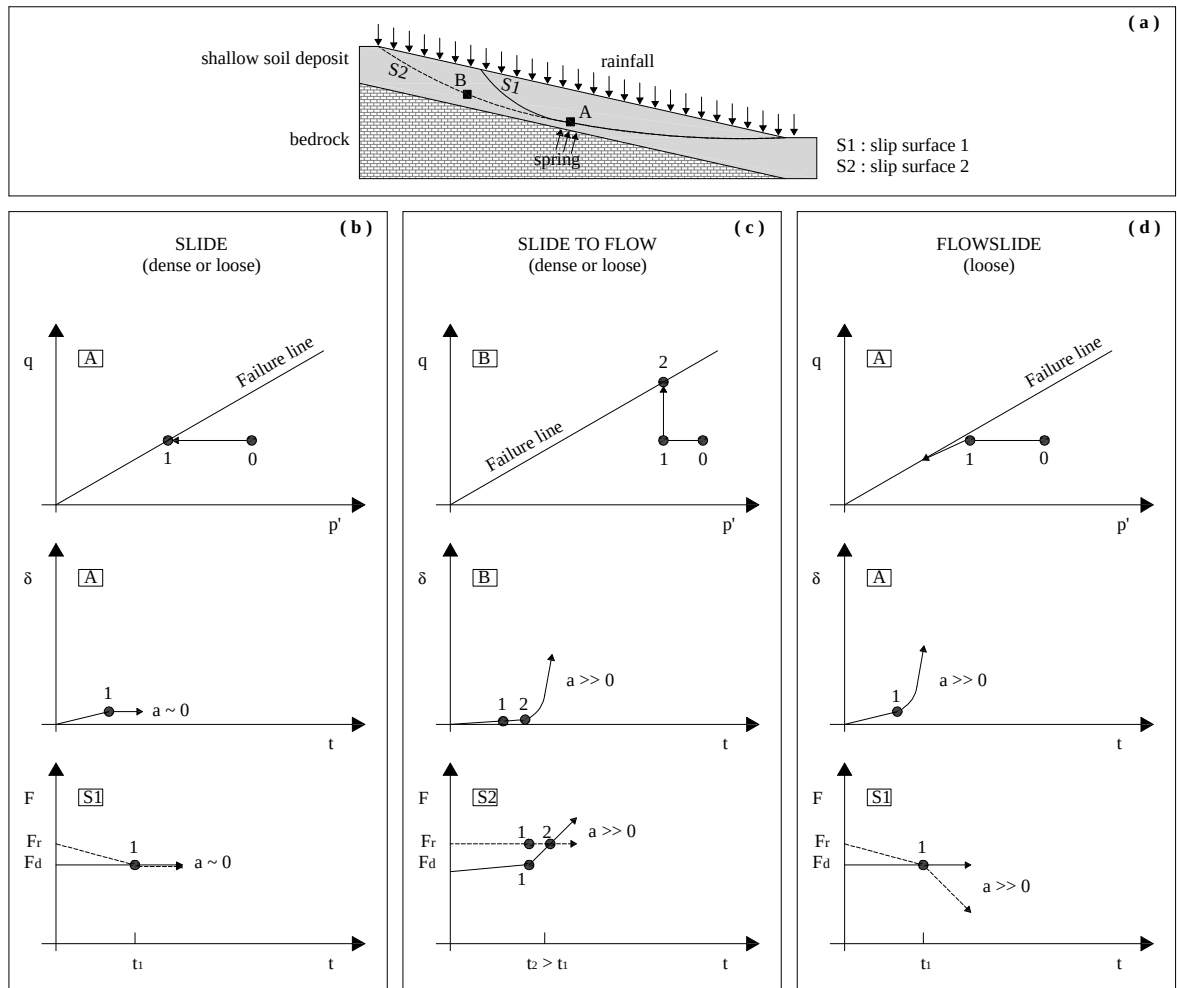


圖 2.2 從有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)

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布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。

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

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

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

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

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

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

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

其中 d_{in} 為入滲深度， b 為切片寬度。

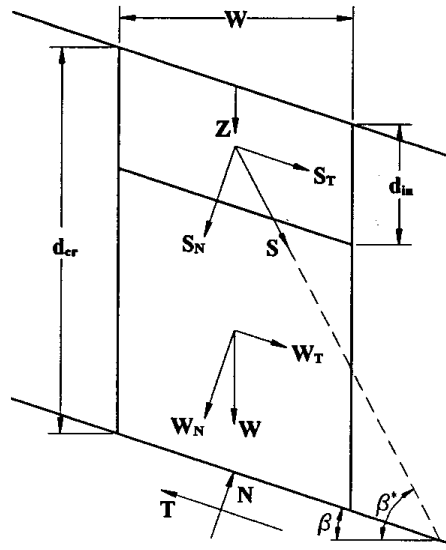


圖 2.3 無限邊坡切片之自由體圖 (Collins and Znidarcic, 2004)

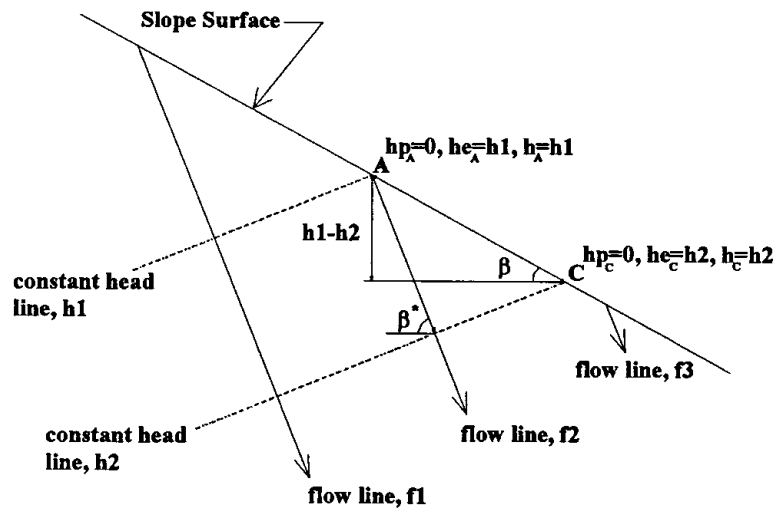


圖 2.4 無限邊坡內水力梯度和 β 、 β^* 之關係 (Collins and Znidarcic, 2004)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

根據式(2.4)，且 $Z = d_{in}$ ，可將式(2.8)改寫為：

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

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

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

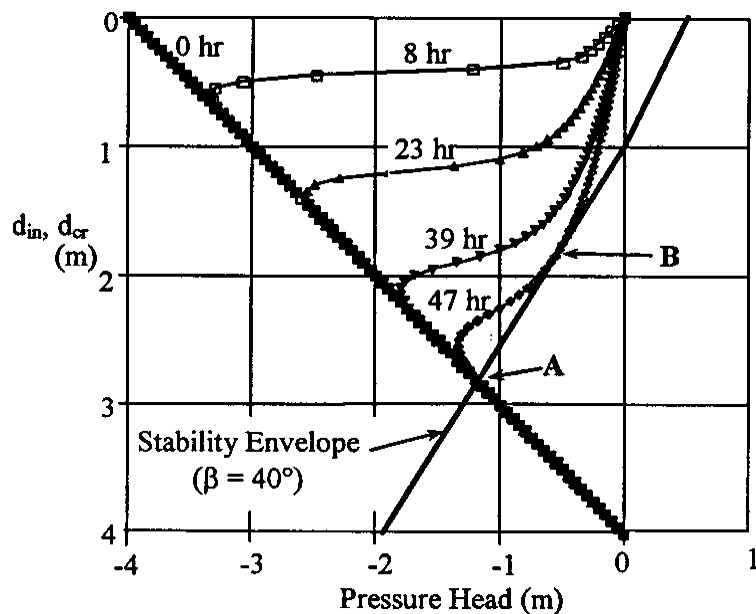


圖 2.5 典型細顆粒土壤水力力學耦合邊坡穩定分析結果(Collins and Znidarcic, 2004)

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

2.2.2 邊坡監測預警

Uchimura et al. (2008) 發展一簡易邊坡預警監測系統，其僅監測表面位移傾角及坡面含水量變化，系統配置如圖 2.6 所示，藉由無線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，此系統已佈設於多個場址，為現今具有較多應用案例之系統，國內則有張達德等(2013)以傾度儀結合 Zigbee 無線傳輸，於國道三號 3.1K 進行無線網路邊坡預警監測，但現有系統監測至破壞之時間不一，並無安裝位置之建議，對於非圓弧破壞其地表傾度並不顯著，且預警準則為經驗法則，缺乏嚴謹力學分析，仍有相當改善空間。

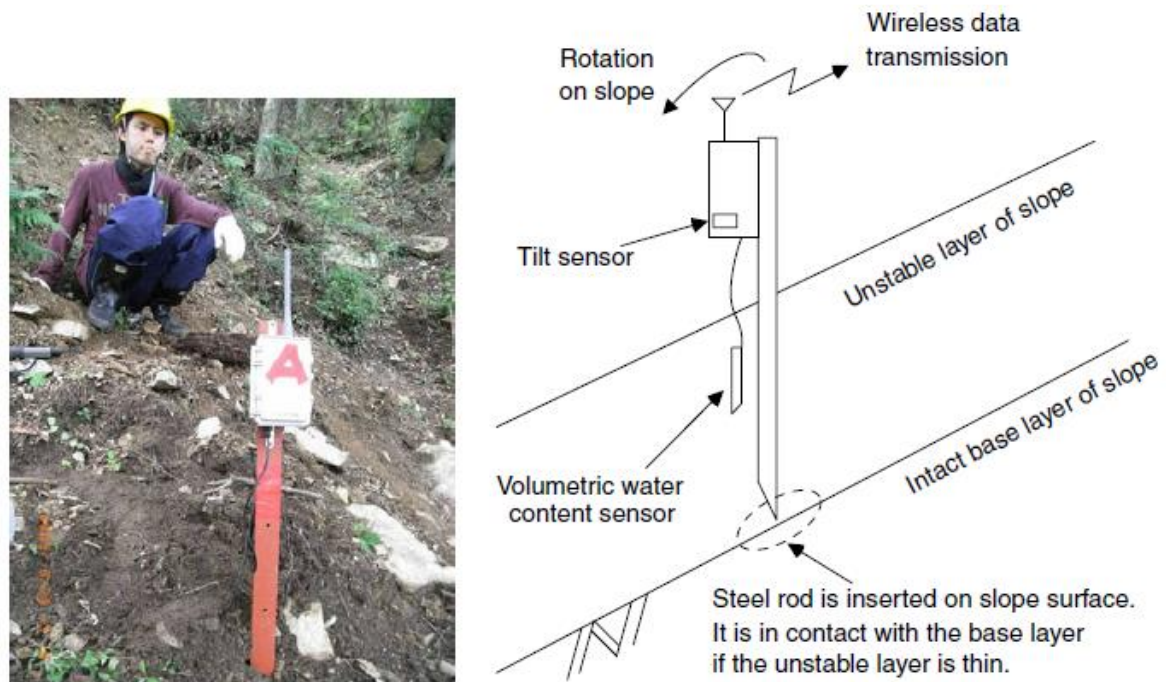


圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

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。

分佈式無線感測器網路(Wireless Sensor Networks, WSN)是由一到數個無線資料收集器以及為數眾多的感測器(sensors)所構成的網路系統(Chong and Kumar, 2003)，新近發展之物聯網(Internet to Thing, IoT)為

將單純感測加入控制之功能，此一概念之元件之間的溝通採用無線的通訊方式，且具備低成本、低耗電、體積小、容易佈建，並具有感應環境裝置，可程式化、可動態組成等特性，已開發於土木工程之應用如 Senera 之橋梁監測系統。為充分利用台灣於高科技產業之優勢，本計畫將採用廣為應用之微機電系統 (Micro-electro- mechanical system, MEMS) 感測器，發展可監測地表傾角(tilting)、淺層土壤濕度(soil moisture)及土壤基質吸力 (matric suction)之監測單元，並以低耗電之無線網路連接，形成分佈式無線感測器網路，由於其可大量生產，因此可大幅降低成本，長期目標為建立模組化可拋棄式物聯網元件，以利於推廣。

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

第三章 水力力學耦合邊坡穩定分析

公路邊坡不同之破壞形式，其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，本研究以較常見之淺層降雨崩塌為研究對象，以解析法整合地形、地質材料及水文特性之場址破壞機制分析，接著搭配水力力學耦合試驗深入了解降雨對土壤應力狀態之影響程度，以探討淺層邊坡滑動機制，並作為依時預警系統之理論架構。

3.1 非飽和土壤力學

3.1.1 非飽和土壤性質與基質吸力

土壤主要可分為飽和土壤及非飽和土壤，飽和土壤中的孔隙完全被水填滿，可分有兩相，即固相和液相；而非飽和土壤中的孔隙因包含水及空氣，故有固、液、氣三相，Fredlund and Morgenstern (1977) 提出非飽和土壤中尚有孔隙水及孔隙空氣交界面形成之收縮膜，為非飽和土壤之第四相，收縮膜交界面一側為孔隙氣壓，一側為孔隙水壓，由於兩側壓力不同，為達到壓力平衡，收縮膜會產生一張力，即基質吸力(matric suction)。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

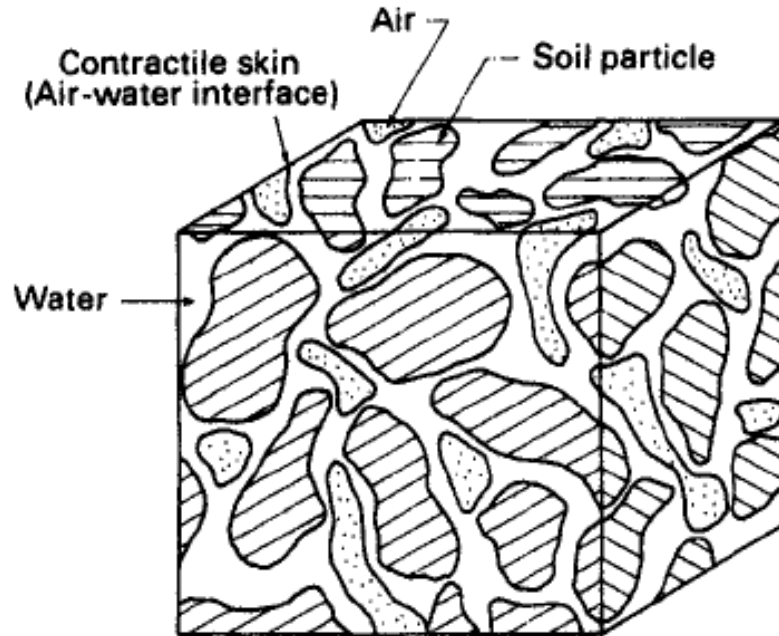


圖 3.1 非飽和土壤結構示意圖(Fredlund and Rahardjo, 1993)

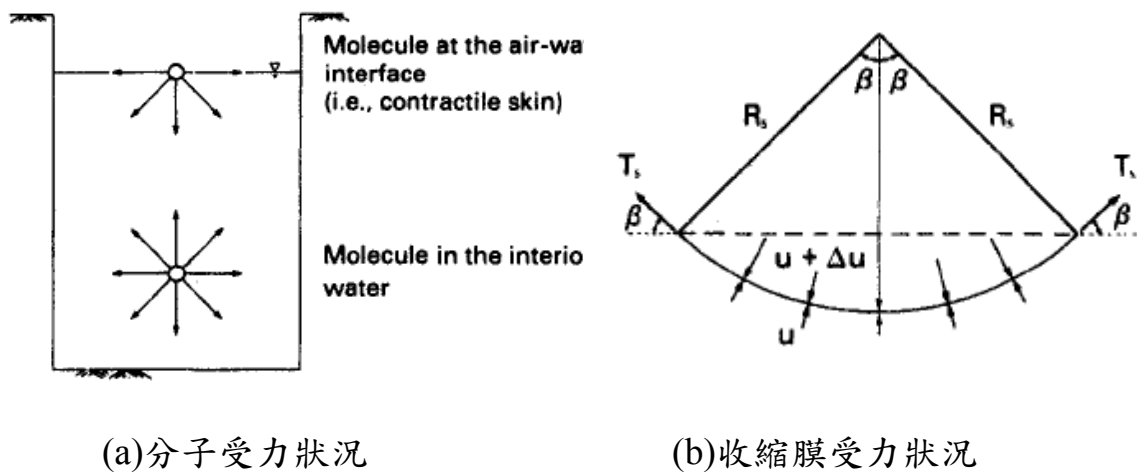


圖 3.2 氣水交界面之表面張力現象(Fredlund and Rahardjo, 1993)

3.1.2 非飽和土壤剪力強度

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

$$\begin{aligned}\tau_f &= [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi' \\ &= c_t + (\sigma - u_a) \tan \phi \dots\dots\dots (3.3)\end{aligned}$$

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

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

3.1.3 土壤含水量特徵曲線

土壤含水量特徵曲線(soil-water characteristic curve, SWCC)為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，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 3.5，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改變，在吸水(wetting)及排水(drying)的過程中會產生遲滯效應，即在相同基質吸力下吸水曲線(wetting curve)上的含水量會低於排水曲線(drying curve)上的含水量，原因是排水後土壤顆粒排列變緊密。

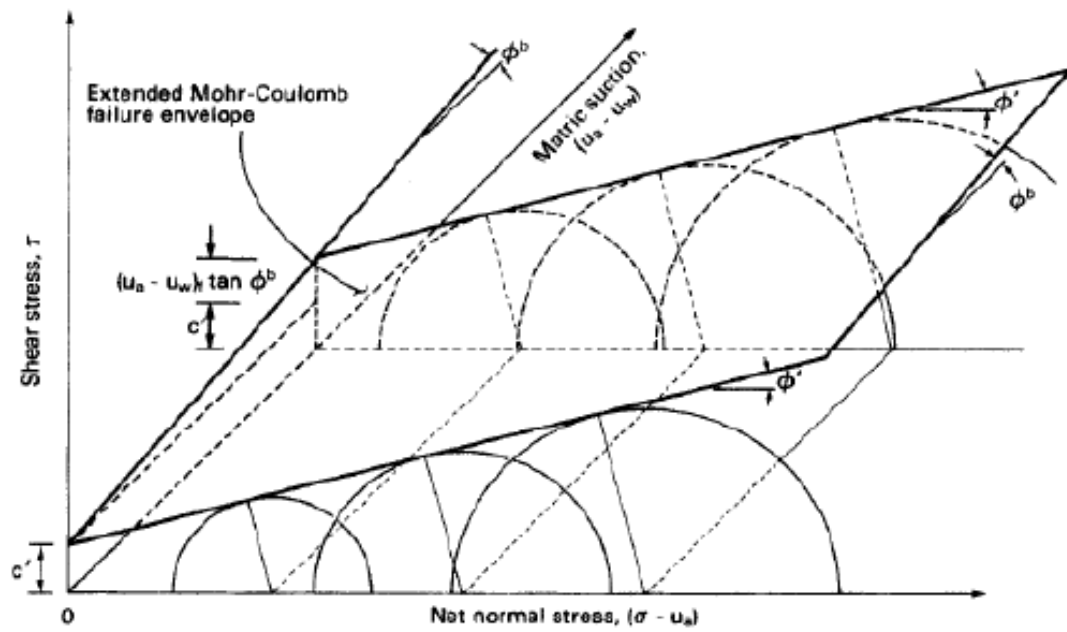


圖 3.3 非飽和土壤莫爾-庫倫破壞包絡線(Fredlund and Rahardjo, 1993)

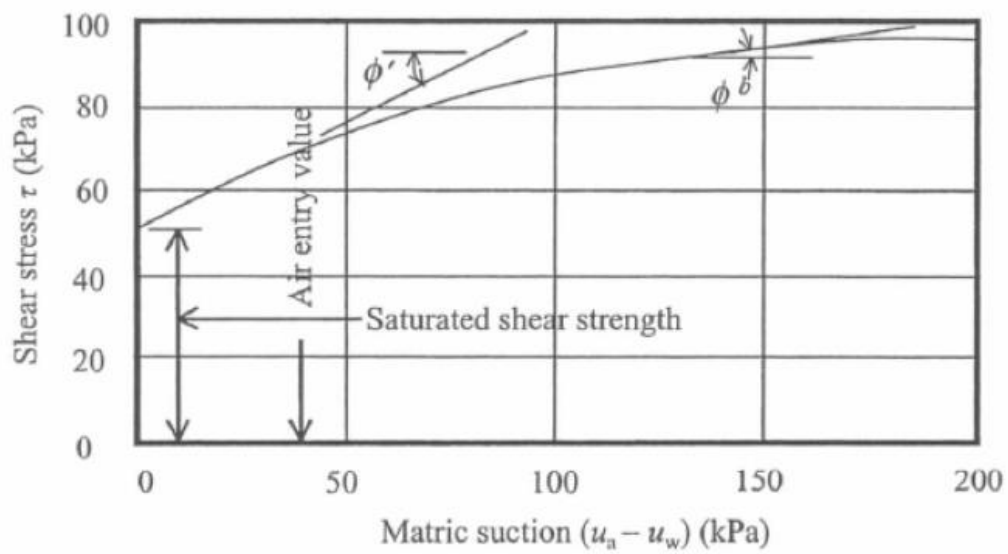


圖 3.4 剪應力與基質吸力之破壞包絡線(Fredlund et al, 1995)

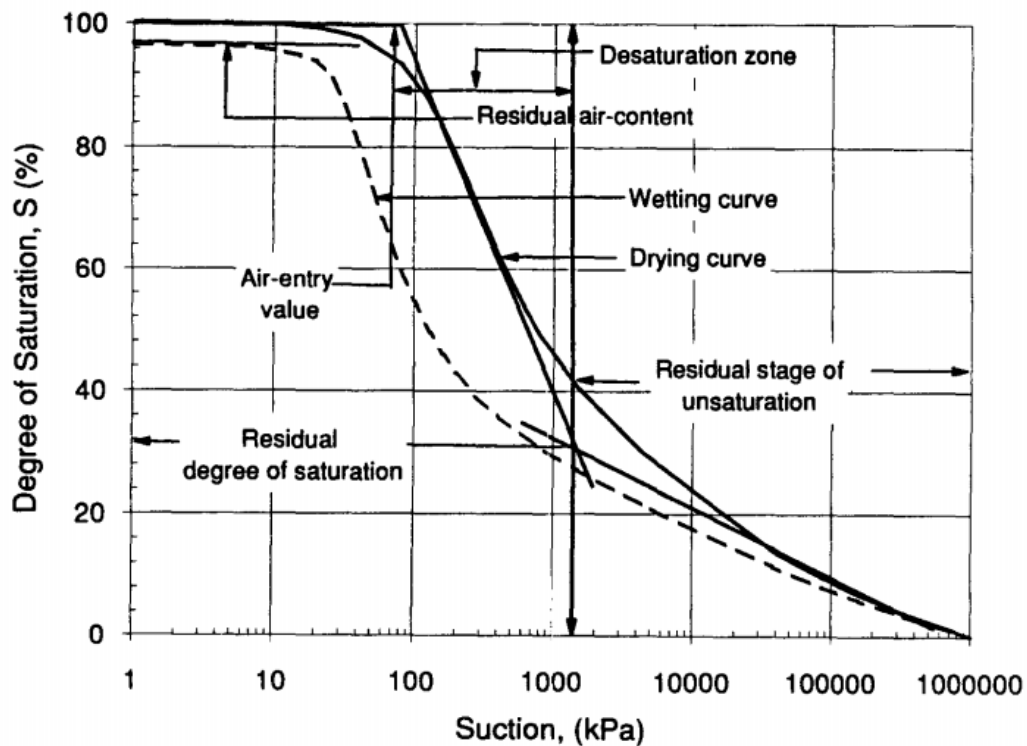


圖 3.5 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund et al, 1995)

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

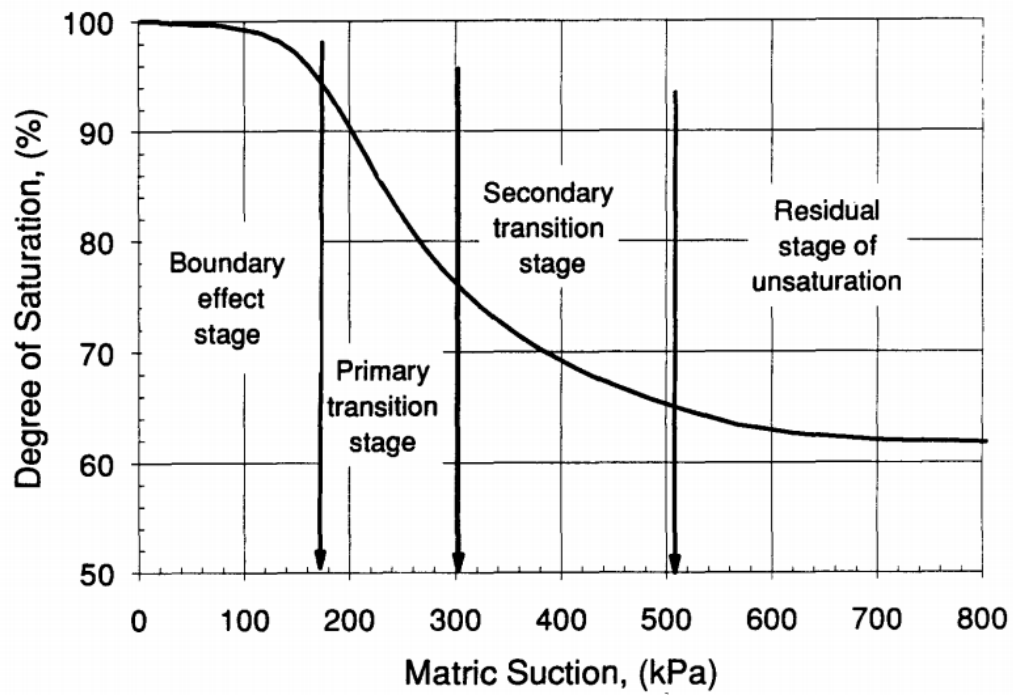


圖 3.6 土壤含水量特徵曲線去飽和三階段 (Fredlund et al, 1995)

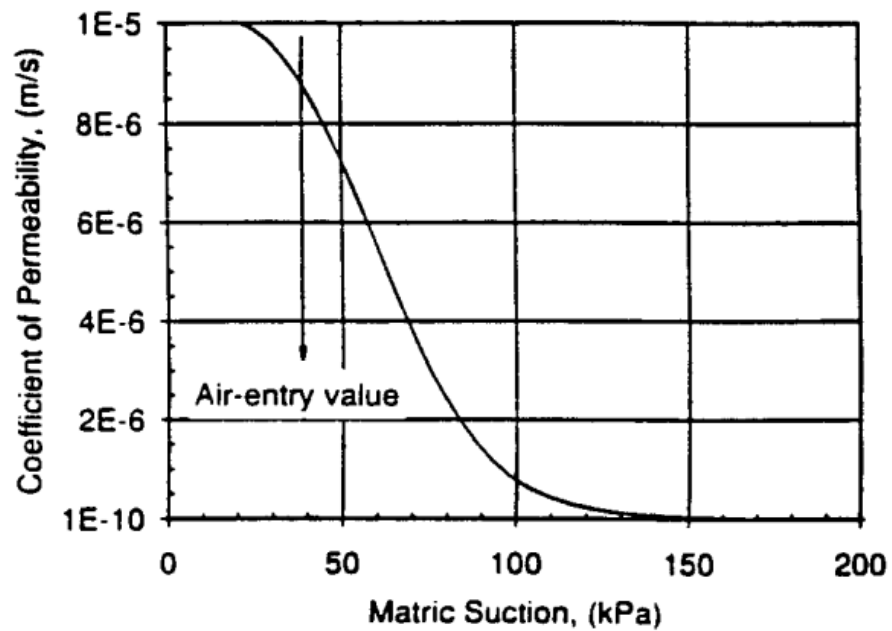


圖 3.7 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund et al, 1995)

3.2 非飽和滲流分析

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

3.2.1 非飽和滲流控制方程式

假設水在非飽和土中的流動滿足達西定律，但和飽和土中滲流的不同為非飽和土之滲透係數為土壤含水量的函數，稱為基質吸力-滲透係數曲線，圖 3.8 為典型土壤之非飽和土壤特性曲線，而土壤含水量與孔隙水壓力的關係稱為土壤-水分特性曲線，因此非飽和滲流中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動之控制方程式可依質量守衡的原理來推導建立，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的地下水控制方程式，Freeze and Cherry(1979) 假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在一均質、均向土壤內之三維流體流動之控制方程式可以 Richard' s equation 表示，以總水頭的形式表示為：

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

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

在自然邊坡中，若入滲率大於飽和滲透係數(k_{sat})，無法入滲之降雨會沿著邊坡表面流動，使邊坡表面之壓力水頭為零，故分析中上邊界之邊界條件並非以入滲率控制，而是以壓力水頭控制。滲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。

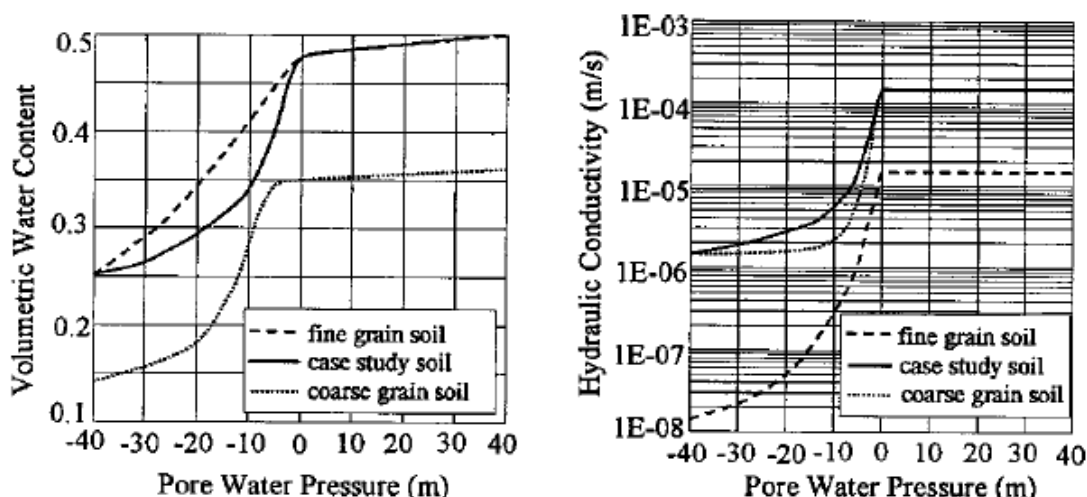


圖 3.8 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

3.2.2 1D入滲分析

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

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

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

以 Crank-Nicolson 有限差分法，以求解深度之 $1/400$ 為 Δz ， Δt 則以 Hills 等人所建議的 Δt 限制式， $\Delta t \leq \Delta z/|V|$ ， $V=Q/(\theta(0, t)-\theta_i)$ ，即數值計算之可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可將式 3.5 式改寫為差分形式：

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

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

為驗證一維分析模式之可靠度，以邊界條件和 Collins and Znidarcic (2004)相同，上邊界之使用壓力水頭=0m，下邊界條件為排水邊界，地下水位在 4m 處，基質吸力分佈為靜基質吸力分布，使用「典型」細顆粒土壤之水土特性曲線，解得之滲流分析結果和 Collins and Znidarcic (2004)以 2D 數值程式 SEEP/W 之結果比較如圖 3.9，可以發現趨勢大致上相同，但數值上有差異，可能是因為 SEEP/W 係利用有限元素法進行二維分析，而本研究為利用一維有限差分數值方法進行分析。

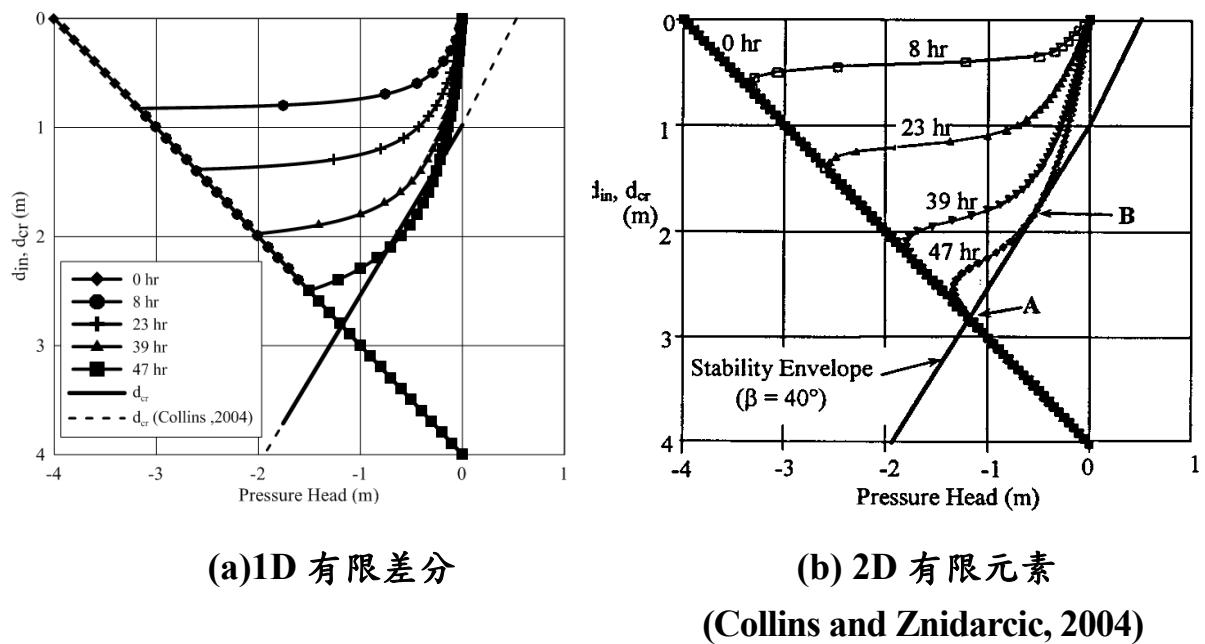


圖 3.9 非飽和滲流分析結果比較

3.3 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析

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

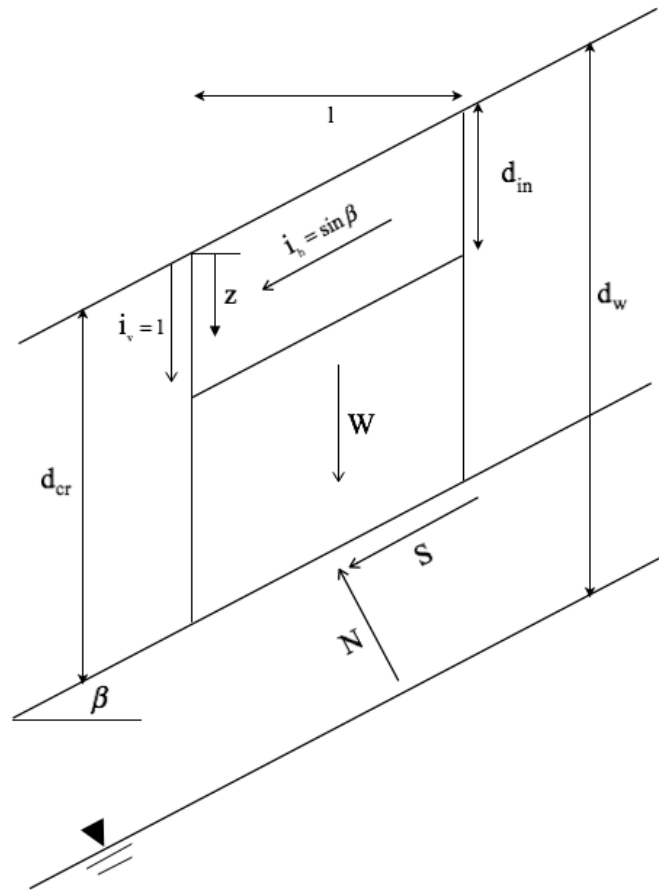


圖 3.10 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

自重 W 可分解為垂直坡面和平行坡面兩個分量，以式(3.7a)、(3.7b)表示：

$$W_N = [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \cos \beta \dots\dots\dots (3.7a)$$

$$W_S = [\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})] \cdot \sin \beta \dots\dots\dots (3.7b)$$

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(3.8a)、(3.8b)表示：

$$S_{vN} = i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \cos \beta \dots\dots\dots (3.8a)$$

$$S_{vS} = i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin \beta \dots\dots\dots (3.8b)$$

水平滲流力 S_h 可以式(3.9)表示：

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

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

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

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

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

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

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

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

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

可推導臨界滑動深度 d_{cr} 為：

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

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

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

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

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

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

所對應之安全係數(FS)為：

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

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

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

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

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

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

式(3.19)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(3.19)進行迭代計算得到 d_{cr} ，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

3.3.2 水力力學耦合試驗系統

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

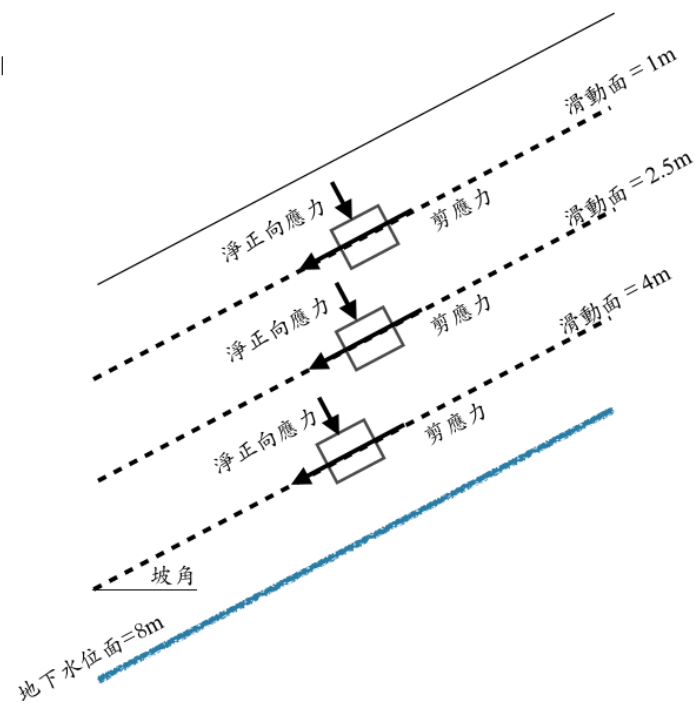


圖 3.11 水力力學耦合試驗概念圖

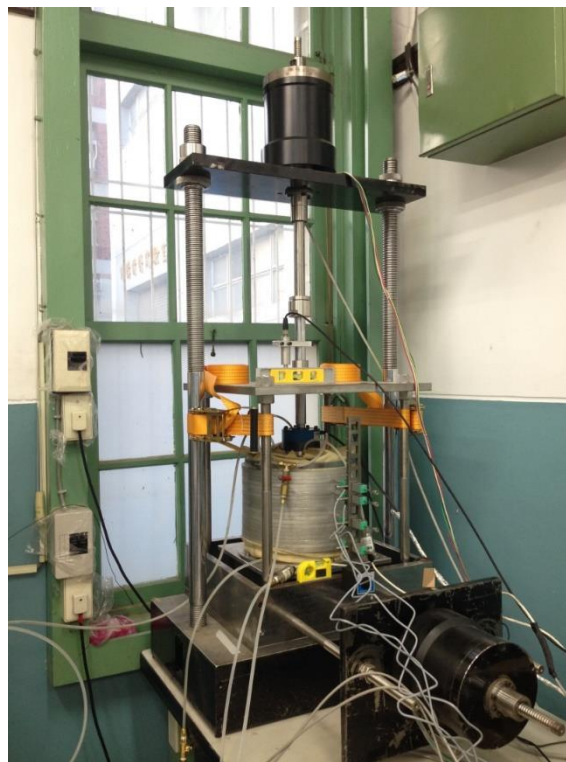


圖 3.12 水力力學耦合試驗系統實體圖

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

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



圖 3.13 水力力學耦合試驗系統剪力盒實體

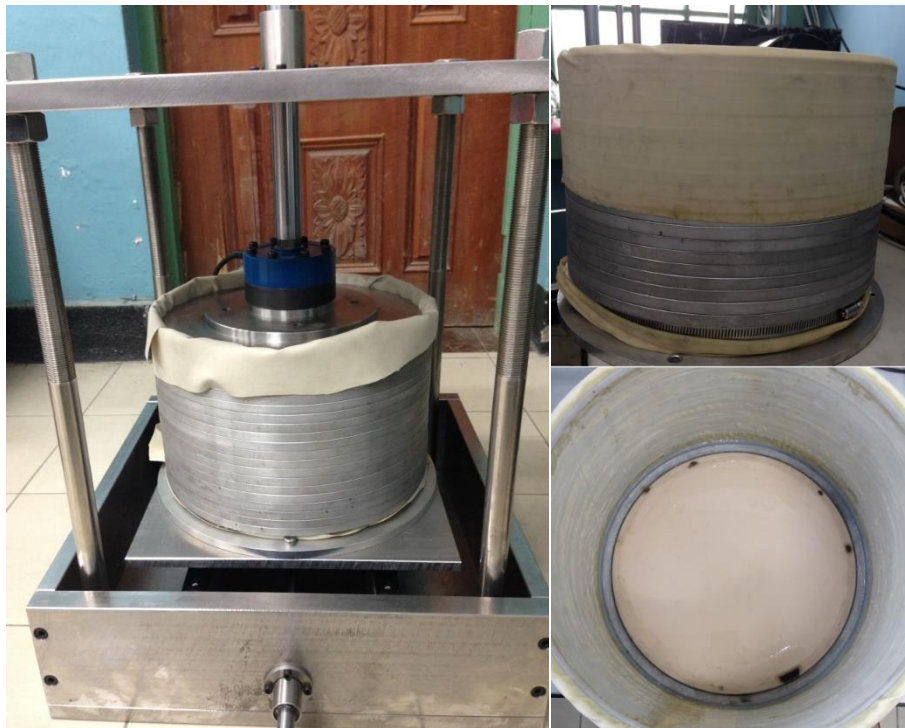


圖 3.14 試體容器實體圖

側向變位量測裝置包含 6 個 LDT，6 個 LDT 固定在支架上，如圖 3.15 可分別測得試體 6 個不同高程之變位量。當試體非飽和狀態平衡後，根據邊坡坡角及假設滑動面位置給予正向應力及剪應力，待正向應力及剪應力達到設定值後，水開始由試體頂蓋入滲，並由側向變位量測裝置分析變位情形，將試體分為 5 層，如圖 3.16，由每層上下兩個 LDT 量測值及該層厚度可計算各層之剪應變量。

3.3.3 試驗材料基本物理性質

本研究之試驗材料取材於台灣南部現地土壤，試驗前須對土壤進行基本物理試驗，將現地土壤烘乾過篩後，取通過標準篩號 20 號(孔徑 0.84 mm)之細顆粒土壤為主要試驗材料。基本物理試驗包括粒徑分析試驗、比重試驗、液塑限試驗及滲透係數試驗，試驗步驟均採用 ASTM 試驗規範，其物理性質如表 3-2 所列。

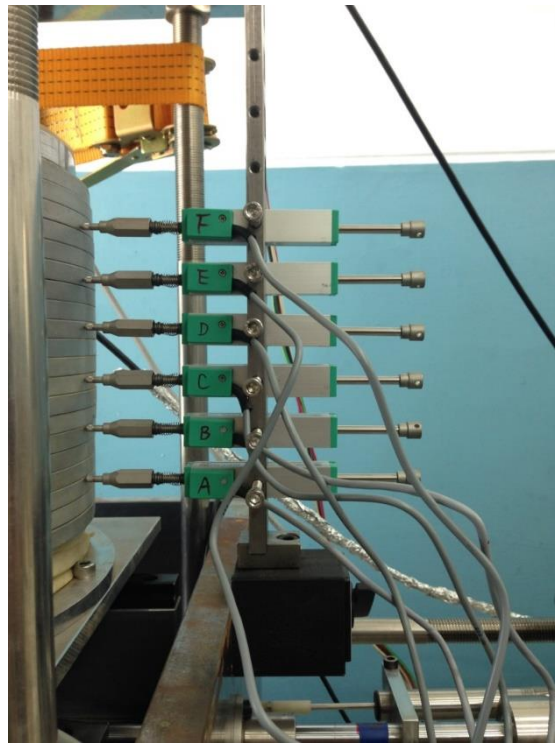


圖 3.15 側向變位量測裝置

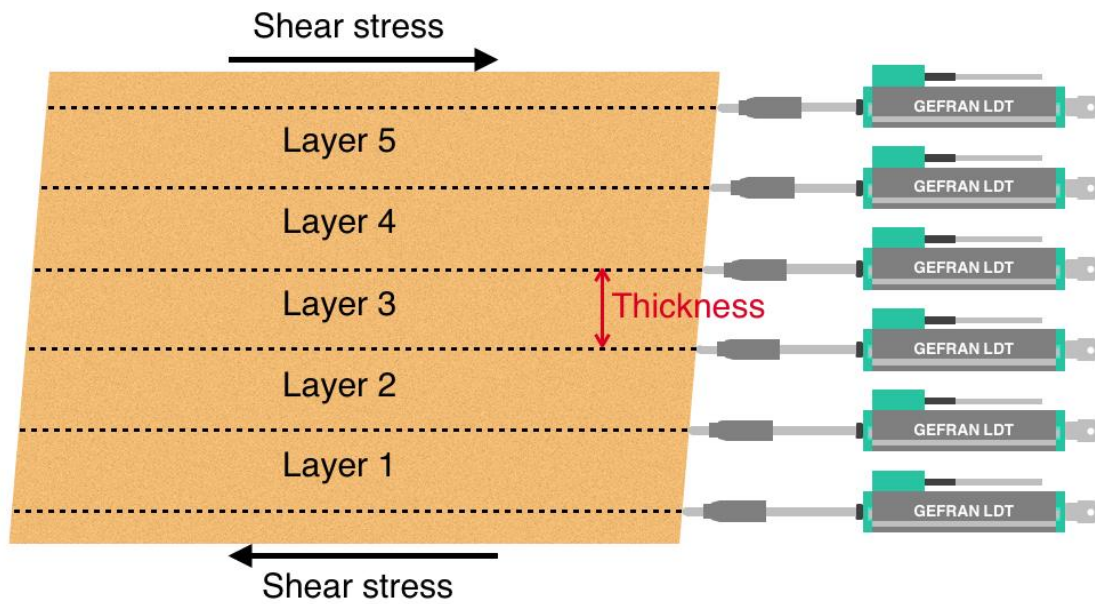


圖 3.16 試體各層剪應變計算示意圖

表 3-2 試驗材料基本物理性質

比重(G_s)	2.67
液性限度(LL, %)	22
塑性指數(PI, %)	2
USCS 土壤分類	SM
飽和滲透係數(k_{sat})	$1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$

本試驗材料比重(G_s)2.67，液性限度(LL)與塑性指數(PI)分別為 22%、2%，統一土壤分類法(USCS)為 SM，飽和滲透係數 k_{sat} 為 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，圖 3.17 為試驗材料之粒徑分佈曲線。

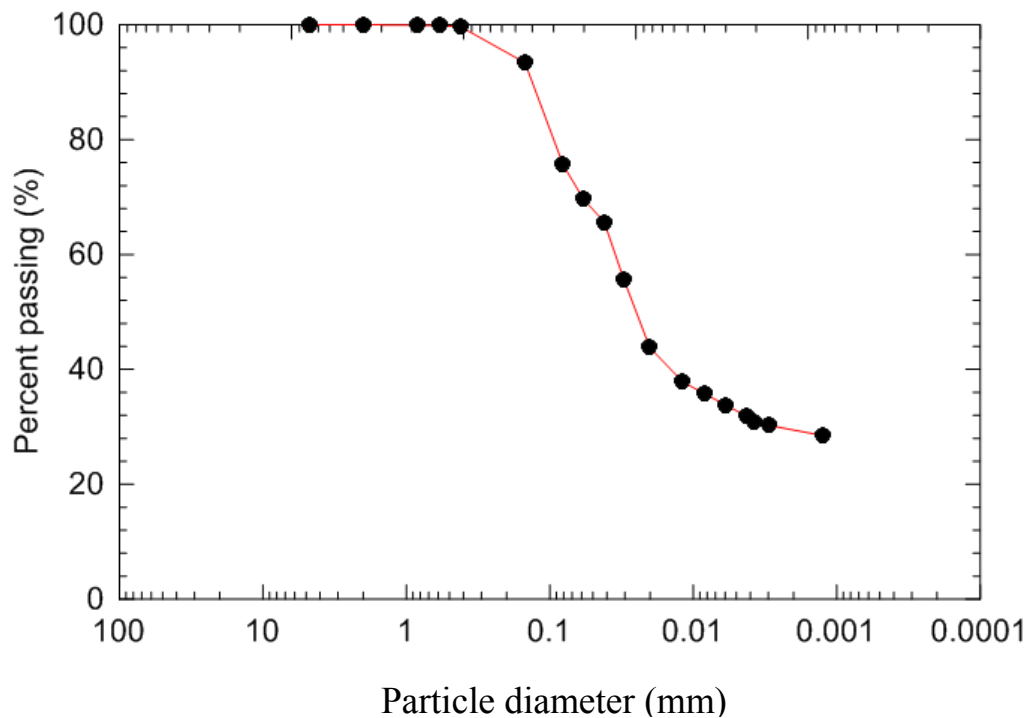


圖 3.17 試驗材料粒徑分佈曲線

3.3.4 試驗規劃

本研究之試驗流程如圖 3.18 所示，試驗主要目的為求出入滲量、側向變位及土壤強度間之關係，首先進行試體製作，待達到非飽和平衡狀態後，提供淨正向應力及剪應力，接著進行入滲試驗。

本試驗以初始總體單位重及初始含水量計算所需土重及水重，再以濕搗(moist tamping)之方式製作重模試體，經分層搗實後完成試體製作。水力力學試驗儀試體直徑為 30.5cm、高度為 18cm，壓力鍋試驗試體直徑為 6.3cm、高度為 2.5cm，而壓密不排水單剪試驗試體直徑為 10cm、高度為 2.5cm，詳細架設流程如下：

1. 將試驗材料以烘箱烘乾 24 小時以上(溫度 110°C)，試體架設前取出使其冷卻至室溫。
2. 以初始總體單位重 18kN/m^3 ，含水量 15% 均勻攪拌後，分為 6 層以濕搗法製作水力力學試驗儀試體，層與層間須均勻刮花，使試體均勻，避免層與層之間產生弱面，如圖(a)。

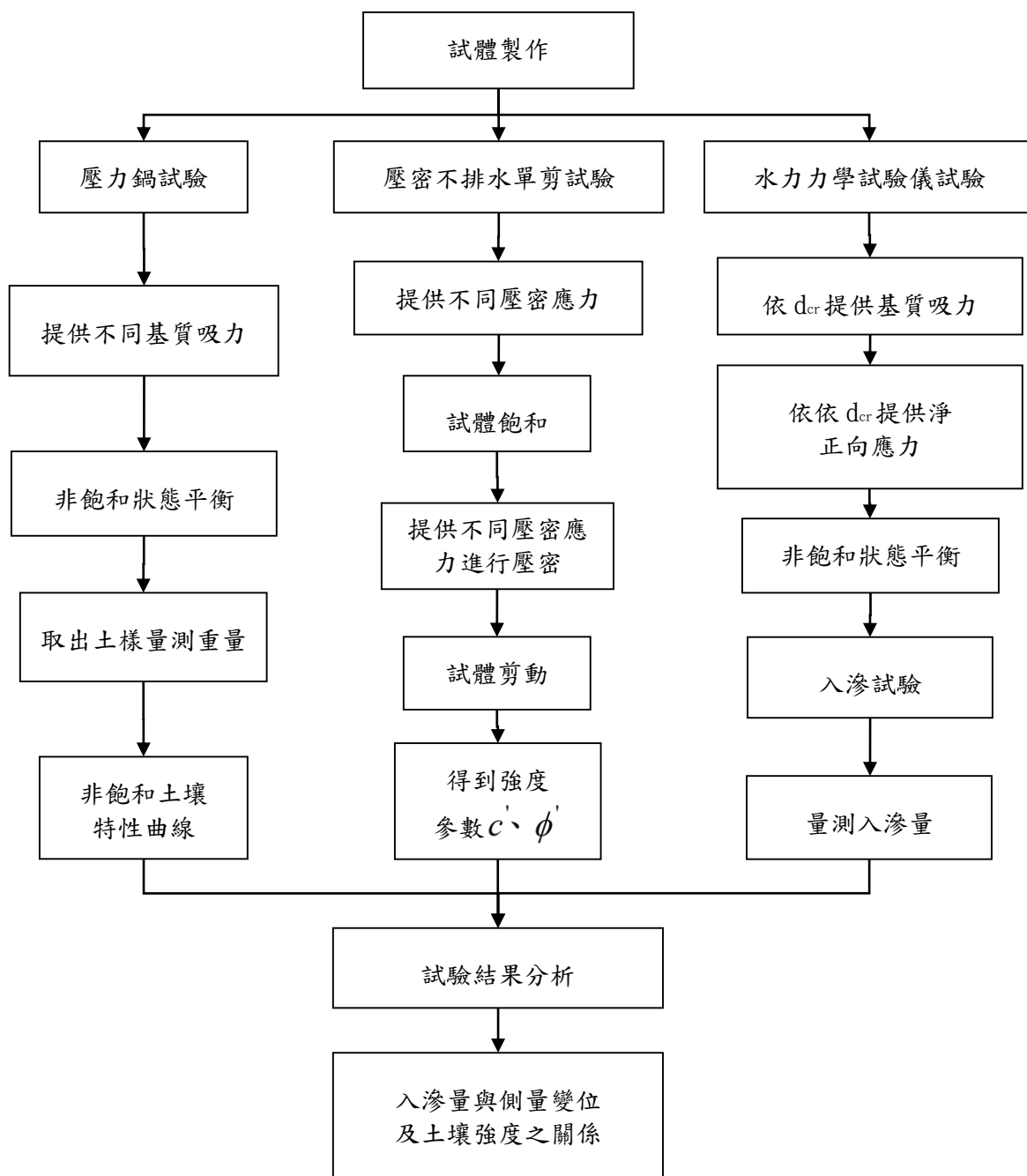


圖 3.18 試驗流程圖

3. 以初始總體單位重 18kN/m^3 ，含水量 15% 均勻攪拌後，以濕搗法製作壓力鍋試驗試體，如圖(b)。
4. 以初始總體單位重 18kN/m^3 ，含水量 15% 均勻攪拌後，以濕搗法製作壓密不排水單剪試驗試體，如圖(c)。

5. 壓力鍋試驗、水力力學試驗根據欲控制之基質吸力連接壓力面板提供孔隙氣壓和孔隙水壓。
6. 壓密不排水單剪試驗連接壓力面板提供反水壓。



(a)



(b)



(c)

圖 3.19 (a)水力力學試驗試體 (b)壓力鍋試驗試體 (c)單剪試驗試體

非飽和平衡狀態為平均淨應力與基質吸力於試體中達到穩定之狀態，多位學者均有不同之定義準則，Wheeler and Sivakumar (1995)以比水體積小於 0.001/day 之標準判定為非飽和平衡狀態；而 Ng et al. (2007)以含水量變化小於 0.05%/day 定義為達到平衡；本研究以總體積變化量作為平衡狀態判定之準則，故引用 Ng et al. (2007)之含水量判定數據，以總體積變化小於 0.05%/day 時表示非飽和狀態達到平衡，本試驗大約需要 4~6 天達到非飽和平衡狀態，表 3-3 為試體達非飽和平衡狀態時不同高度處之含水量，誤差不大。

表 3-3 試體內達未飽和平衡狀態時之各層含水量

含水量量測高度	含水量
15cm	15.5%
12cm	15.1%
9cm	14.9%
6cm	14.5%
3cm	13.7%

本試驗可分為三部分進行：

1. 進行壓密不排水單剪試驗，試驗控制之初始條件為壓密應力，分別為 25kPa、50kPa、75kPa，得到試驗土壤之有效摩擦角 ϕ' 及凝聚力 c' 。
2. 試驗 A：以水力力學耦合數值分析所使用之參數，進行水力力學耦合試驗，即地下水位為 4m、坡角為 30° ，並根據分析得到之 d_{cr} ，計算 d_{cr} 之應力狀態，假設基質吸力隨滑動深度變化為線性，即滑動深度 1m 處基質吸力為 30kPa、2.5m 處為 15kPa、4m 處為 0kPa，計算 d_{cr} 之應基質吸力，其試驗示意圖如圖 3.20、試驗初始條件如表 3-4，接著進行入滲試驗，完成試驗後進行飽和滲透係數 k_{sat} 之率定。

3. 試驗 B：接著以不同坡角、不同地下水位及率定後之飽和滲透係數進行水力力學耦合數值分析計算 d_{cr} ，根據 d_{cr} 之應力狀態及基質吸力再次進行水力力學耦合試驗，其試驗基本參數如表 3-4。

試體架設控制之總體單位重為 18 kN/m^3 ，而 A、B 部分試驗之應力計算均假設：滑動面以上土體總體單位重為 17.5 kN/m^3 。

表 3-4 試驗 A 及試驗 B 基本參數

試驗編號	A	B
滑動面深度 d_{cr} (m)	1.5	由水力力學耦合數值分析計算
地下水位深度 (m)	4	5
基質吸力 (kPa)	25	35
淨正向應力 (kPa)	22.5	根據 d_{cr} 給定應力狀態
剪應力 (kPa)	13.1	

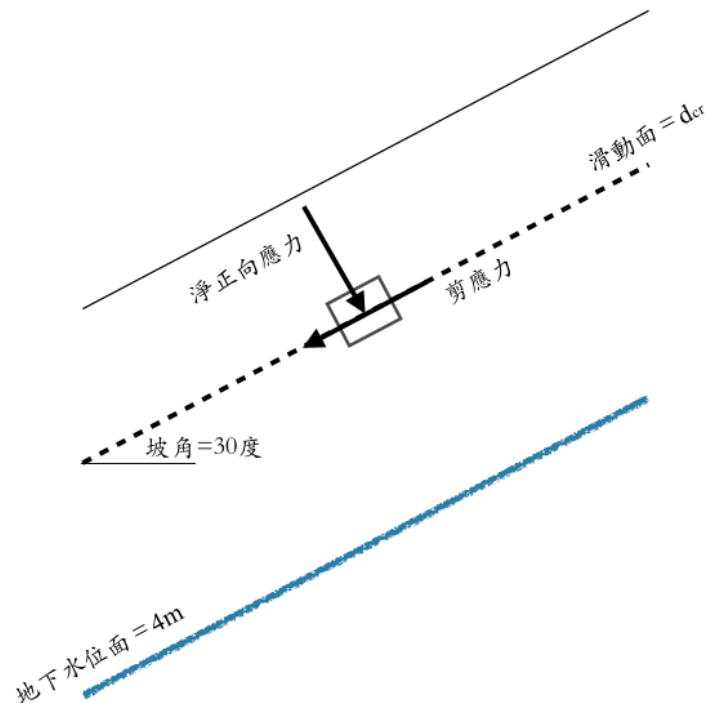


圖 3.20 試驗 A 示意圖

3.3.5 試驗結果與分析

(a) 壓力鍋試驗結果

土餅試體置於壓力鍋試驗內密封後，將壓力鍋一端連接至一氣壓，該氣壓值即為孔隙氣壓(u_a)，而另一端連接至室壓，孔隙水壓值等於室壓(u_w)，使試體在不同孔隙氣壓下平衡，為了符合入滲試驗之情況，進行吸水(wetting)試驗，即先給予一較大之基質吸力，待平衡之後，分階段降低基質吸力並量測含水量試驗結果如圖 3.21，式(3.20)為以指數迴歸得到試體基質吸力(ψ in kPa)和含水量 w (in %)之關係。

$$\psi = 1.87E13 \exp(-1.92 \times w) \dots\dots\dots (3.20)$$

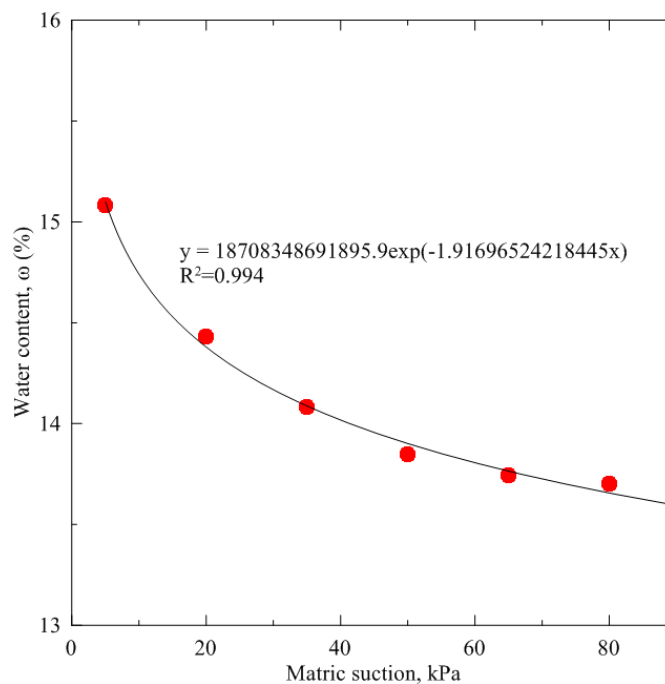


圖 3.21 基質吸力與含水量關係函數

(b) 壓密不排水單剪試驗結果

試體架設完成後，將試體頂蓋及底蓋連接至一反水壓，待試體達到飽和後，進行預壓密，使試驗材料為過壓密狀態，完成後施加正向應力，維持試體體積不變(固定垂直向變位)並剪動。試驗

結果應力應變曲線如圖 3.22(a)，孔隙水壓變化如圖 3.22(b)。進行三個不同正向應力下之壓密不排水單剪試驗後，以最大剪應力為破壞點，可得到土壤強度參數，如圖 3.23 所示，得到試驗材料之有效摩擦角 $\phi' = 24.6^\circ$ 、凝聚力 $c' = 1.3\text{kPa}$ 。

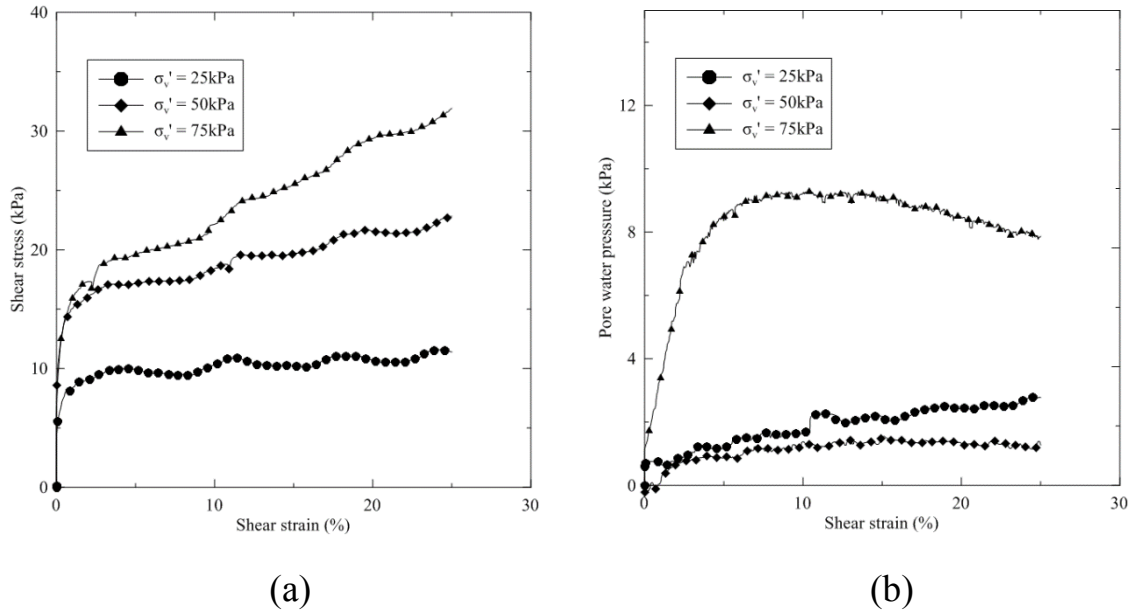


圖 3.22 壓密不排水單剪試驗(a)應力應變曲線(b)孔隙水壓變化

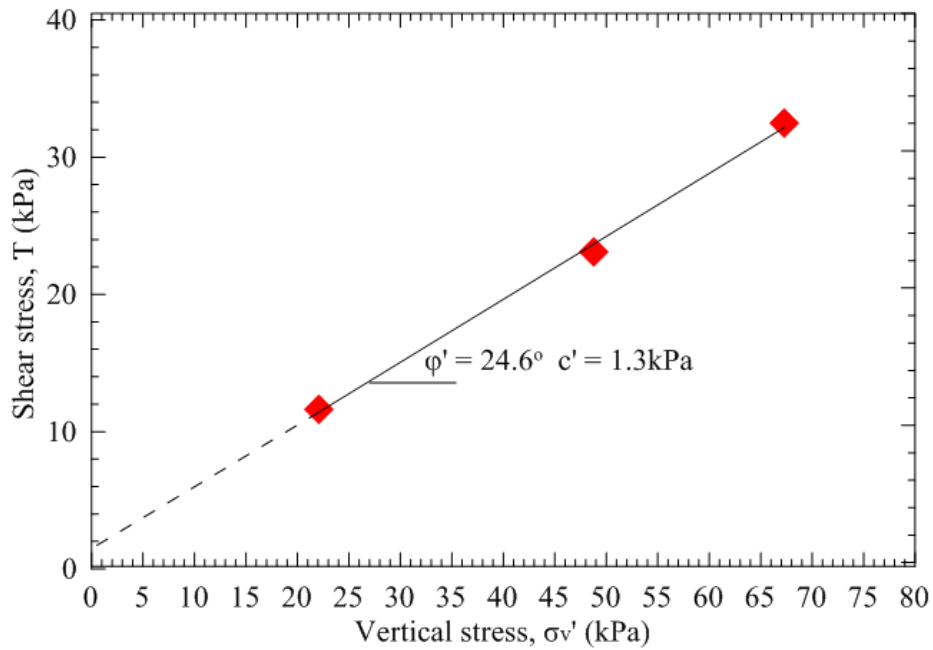


圖 3.23 試驗土壤之強度參數

3.3.6 水力力學耦合試驗結果與分析

(a) 試驗A

試體架設完成後，將試體頂蓋連接至一氣壓，該氣壓值即為孔隙氣壓(u_a)，而底蓋連接至室壓，孔隙水壓值等於室壓(u_w)，先施加一預壓密應力，預壓密完成後再根據試驗條件正向應力，待試體達到非飽和平衡狀態，接著施加剪應力，剪應力施加完成後側向變位分布如圖 3.24，可以看出試驗試體的側向變位近乎線性分布，表示試體內之剪應力是均勻的，剪應力施加完成後，進行入滲試驗。

圖 3.24 為入滲體積與分層剪應變歷時，由各層剪應變的變化可以觀察到，入滲開始後，試體各層並無產生明顯的剪應變，在入滲開始後約 25000 秒後，試體開始滑動，各層之剪應變增加，這是由於水滲入試體，使基質吸力降低，造成基質吸力提供的剪力強度下降，最後試體剪力強度降低到無法提供足夠的阻抗(即剪應力>剪力強度)。

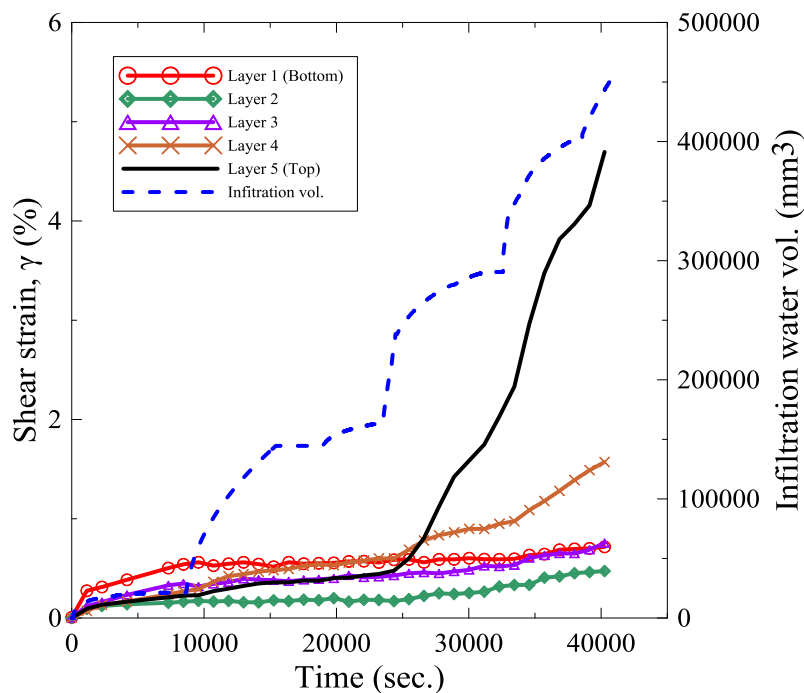


圖 3.24 試驗 A 入滲量及試體各層剪應變隨時間變化情形

圖 3.25 為試驗過程中入滲深度變化與分層剪應變歷時，試體在入滲開始後 25000 秒時發生破壞的範圍在 7cm 處(Layer 4、Layer 5)；而從圖中可以發現在入滲開始後約 14000 秒處，入滲深度已達到 7cm 處，試體卻尚未發生破壞，這是由於實際上土壤的入滲行為不會是完全飽和後水才往下入滲，故假設飽和後水才會繼續向下入滲推估得到之破壞時間會較實際破壞時間短，為較保守之假設為破壞時間之下限。

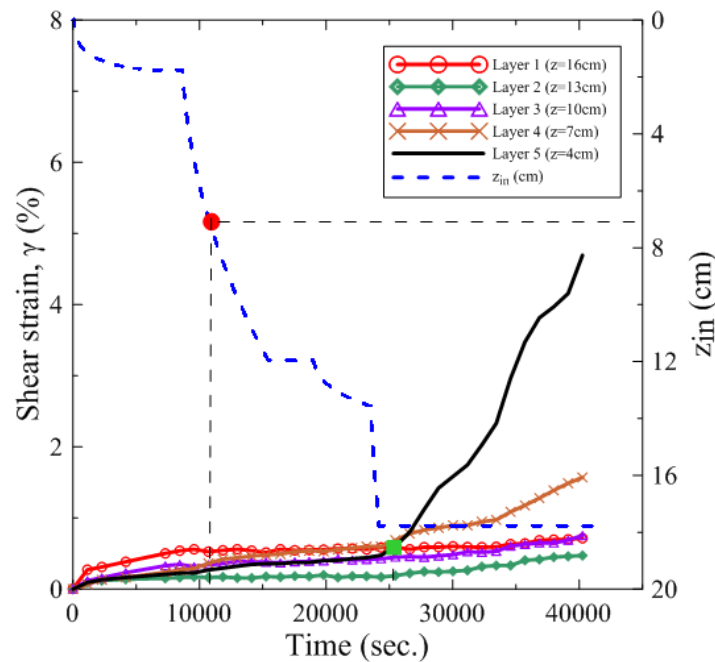


圖 3.25 試驗 A 入滲深度隨時間變化歷時

圖 3.26 為試體平均含水量與分層剪應變隨時間變化情形，根據耦合分析得到破壞時之基質吸力，及壓力鍋試驗結果反推破壞時試體平均含水量(圖 3.26 中水平虛線)。入滲造成土樣平均含水量改變(圖 3.26 中虛線)，當含水量達到破壞含水量時，試體產生破壞。圖 3.27 為試驗中試體平均剪力強度隨時間變化情形，根據水力力學耦合分析得到破壞時之基質吸力，將試體含水量變化透過壓力鍋試驗結果轉換為基質吸力之變化，套用至衍伸莫爾-庫倫破壞準則可以得到試體剪力強度的變化，發現剪力強度隨入滲量增加而降低(圖 3.27 中藍色虛線)，當剪力強度小於剪應力(圖 3.27 中水平虛線)時，試體預期產生破壞。

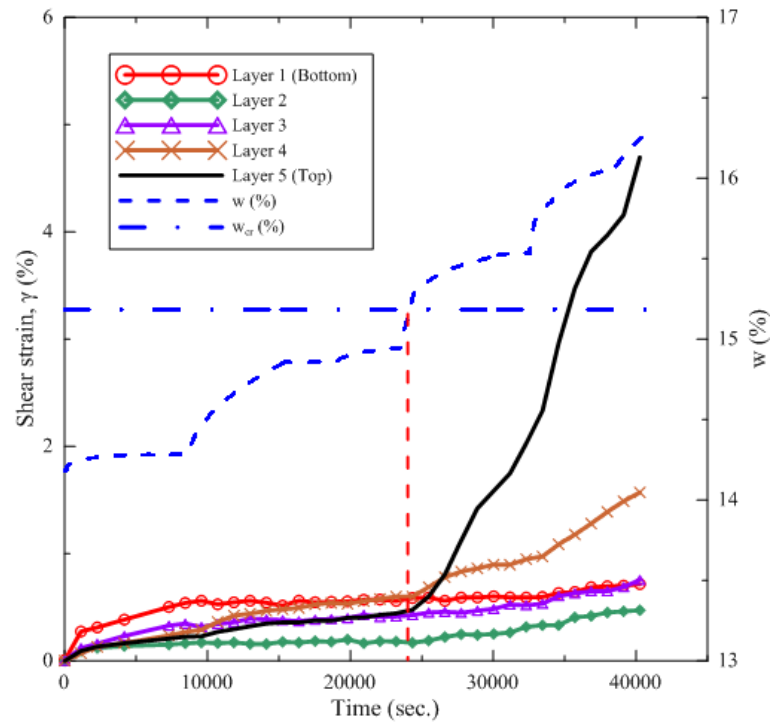


圖 3.26 試驗 A 試體平均含水量隨時間變化情形

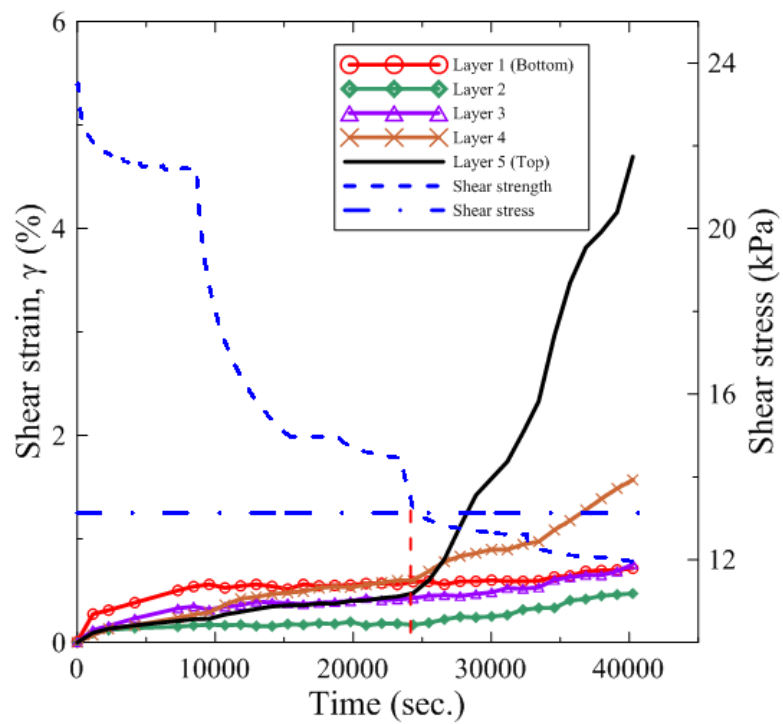


圖 3.27 試驗 A 試體平均剪力強度隨時間變化情形

圖 3.28 為試驗中試體平均安全係數隨時間變化情形，安全係數為剪力強度除以剪應力得到，可以發現安全係數隨入滲量增加而降低(圖 3.28 中藍色水平虛線)，當安全係數小於 1 時時，試體預期產生破壞。

將水力力學耦合數值分析得到之理論破壞時間，和試驗入滲開始至破壞所需時間比較，當飽和滲透係數為 $1 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 時，理論之破壞時間為 91.7 小時，而試驗之破壞時間約為 6.9 小時，其差異為降雨由地表入滲至 1.5m 深度之時間，經以式(3.6)之一維計算後，其入滲至 1.5m 所需時間約為 81 小時，修正後破壞時間為 87.9 小時，理論與實驗時間誤差為 4.1 %，其誤差主要來源為飽和滲透係數 k_{sat} 及非飽和滲透係數變化曲線之擬合，整體而言其結果應可接受。

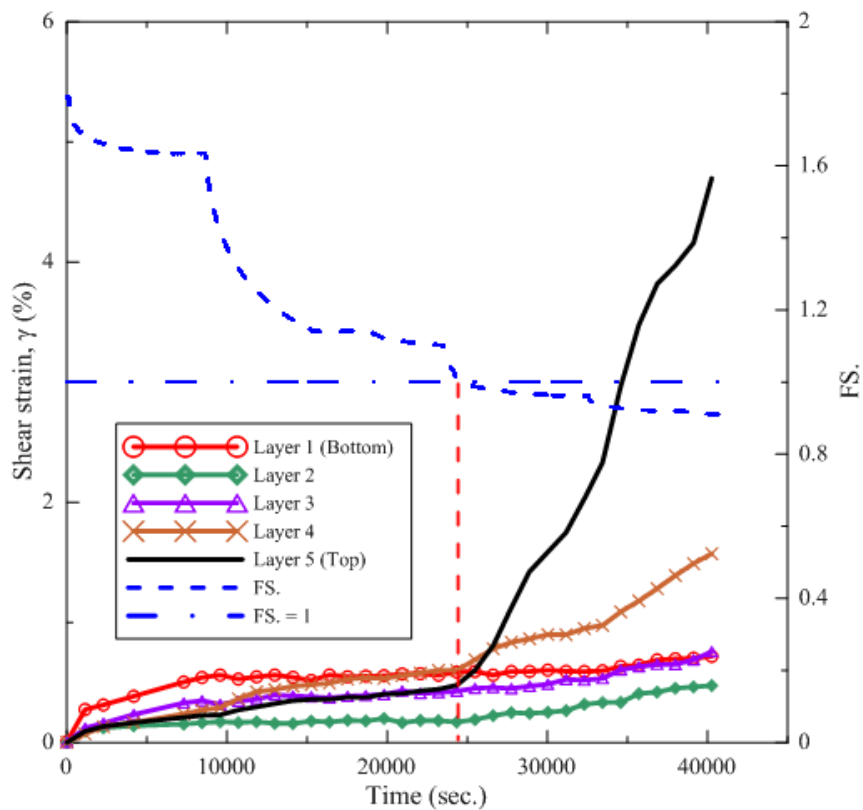


圖 3.28 試驗 A 試體平均安全係數隨時間變化情形

(b) 試驗B

本實驗以不同地下水位及飽和滲透係數進行水力力學耦合數值分析計算 d_{cr} ，水力力學耦合數值分析， d_{cr} 為 1.5m，根據臨界破壞深度(d_{cr})計算得到試驗初始條件如表 3-5。

表 3-5 試驗初始條件

滑動面深度 d_{cr} (m)	1.5
地下水位深度 (m)	5
基質吸力(kPa)	35
淨正向應力, kPa	22.7
剪應力, kPa	13.1

圖 3.29 為試驗過程中入滲量及試體各層剪應變之變化情形，由各層剪應變的變化可以觀察到，入滲開始後，試體各層並無產生明顯的剪應變，在入滲開始後約 33000 秒後，試體開始滑動，各層之剪應變增加。圖 3.30 為試驗過程中入滲深度之變化，試驗試體確實發生破壞的範圍亦在 7cm 處(Layer 4、Layer 5)、在入滲開始後 33000 秒時；而從圖中可以發現在入滲開始後約 28000 秒處，入滲深度亦達到 7cm 處，試體卻尚未發生破壞，故破壞時間之下限(Lower bound)約為入滲開始後 28000 秒。

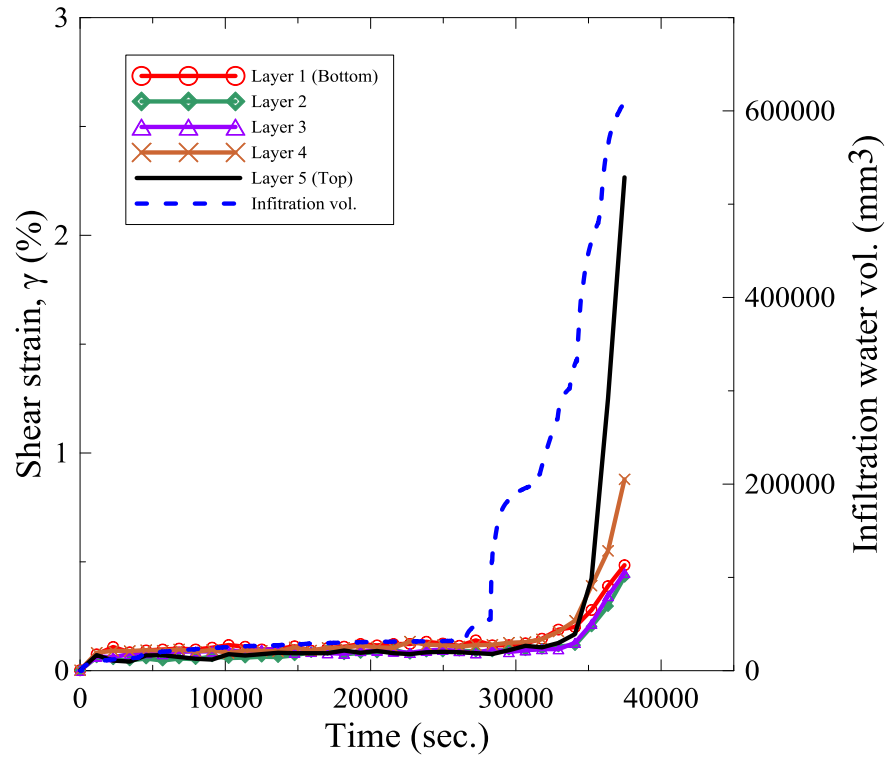


圖 3.29 試驗 B 入滲量及試體各層剪應變隨時間變化情形

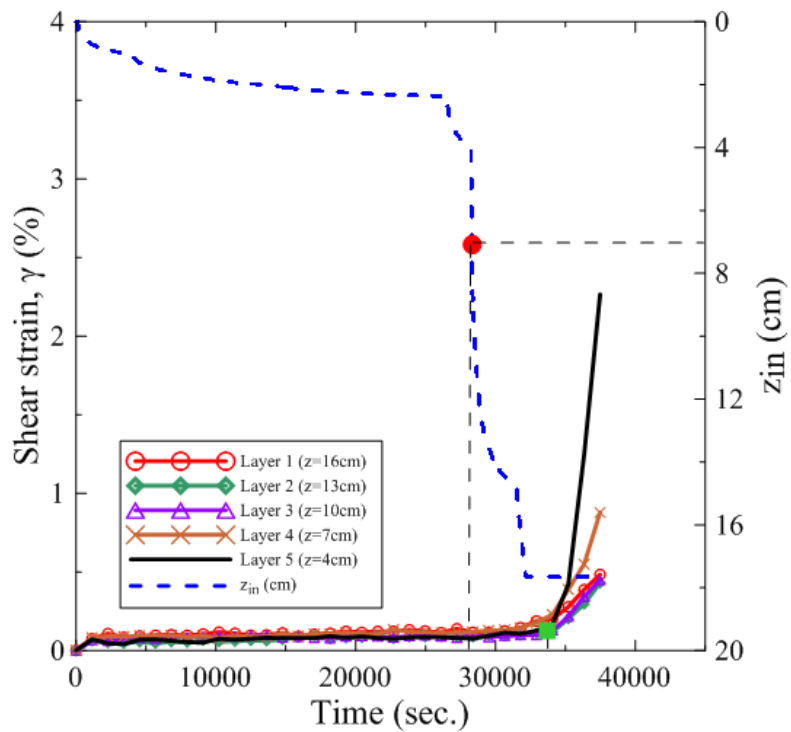


圖 3.30 試驗 B 入滲深度隨時間變化情形

圖 3.31 為試驗過程中試體平均含水量隨時間變化情形，在入滲開始後 32000 秒時，含水量達到破壞含水量，試體產生破壞。圖 3.32 為試驗過程中試體平均剪力強度隨時間變化情形，試體產生破壞時，剪應力大於剪力強度。圖 3.33 為試驗過程中試體平均安全係數隨時間變化情形，試體產生破壞時，安全係數小於 1。由圖 3.31 至圖 3.33 可以觀察到，試驗實際破壞時間接近破壞時間之上限(Upper bound)。

以水力力學耦合數值分析得到之自深度 1.5m 起算之理論破壞時間為 9.4 小時，而試驗之破壞時間約為 9.2 小時，誤差約 2%，比較試驗 A 及 B 顯示初始土壤具較大基質吸力時 (或較深地下水位)，其破壞時間會延遲，此符合較大基質吸力時其非飽和滲透係數較低，入滲速率較慢。此外由剪應變與時間歷時發現土壤滑動前其剪應變速率大幅增加，此與以位移為預警指標之架構吻合，初步結果顯示所發展之無限邊坡水利力學耦合分析模式具依定之可靠度。

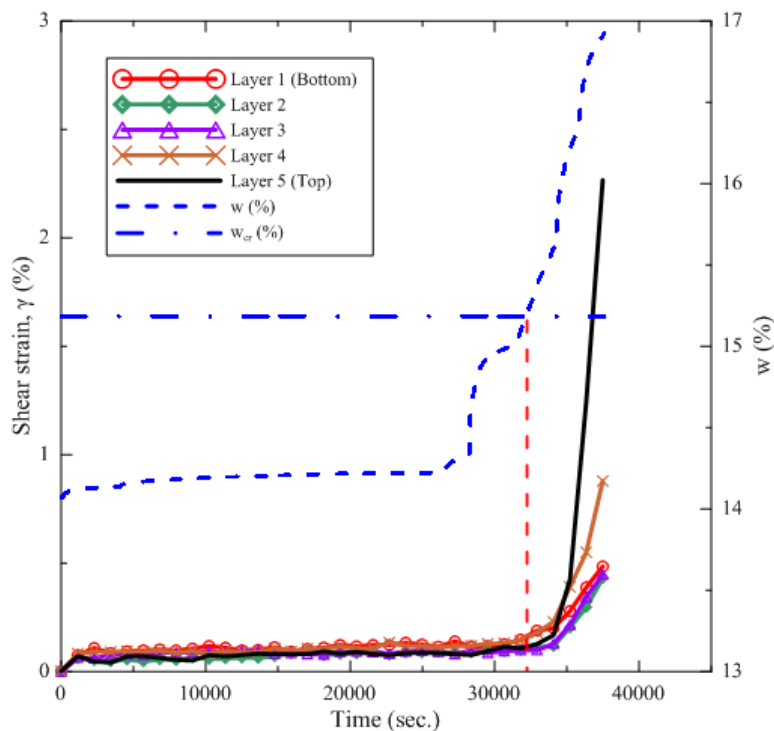


圖 3.31 試驗 B 試體平均含水量隨時間變化情形

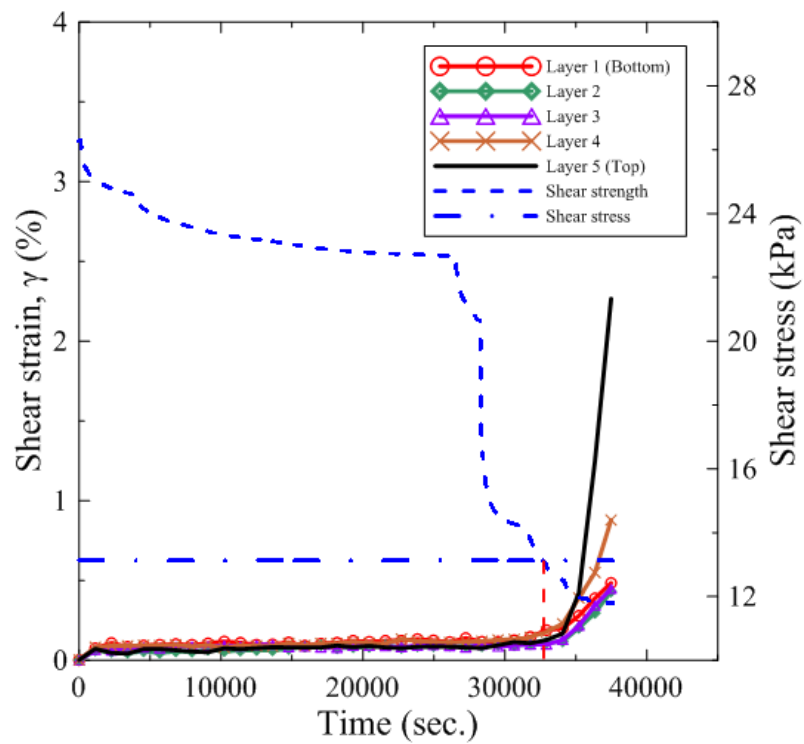


圖 3.32 試驗 B 試體平均剪力強度隨時間變化情形

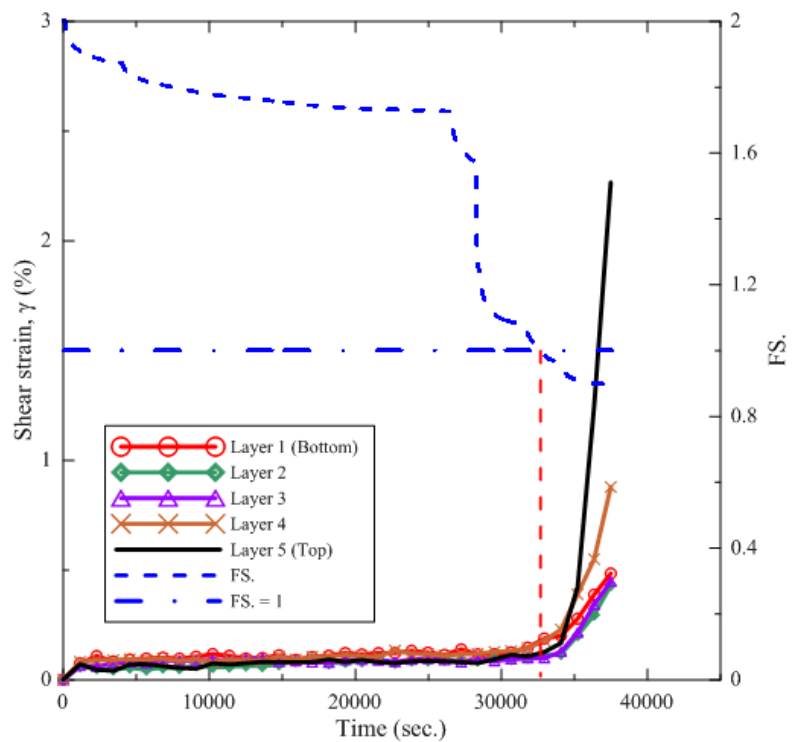


圖 3.33 試驗 B 試體平均安全係數隨時間變化情形

3.4 研究場址及二維水力力學耦合穩定分析

3.4.1 研究場址選定

為配合淺層邊坡破壞條件及後續監測模組安裝測試便利性，本年度需選定候選場址一處並進行場址穩定性分析及二維水力力學耦合分析，候選場址須符合下列條件：

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

滿足前兩項之需求案例多為學術研究之案例，其中水文地質參數並不常見，國內僅有經濟部地調所於「集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」(2007) 有相關調查。因此由此計畫研究之研究場址進行篩選，該計畫中尚包含降雨入滲對崩塌地邊坡穩定之耦合分析，但其為假設入滲條件並將入滲與力學分析分開計算，且非飽和土壤強度計算亦以簡化法計算，因此可作為本研究之雛形。

綜合考慮上述條件，本年度選定高雄甲仙區寶隆崩塌地，鄭清江等(2009)以此場址進行降雨引致邊坡淺層崩塌分析，寶隆崩塌地航照及監測儀器配置如圖 3.34 所示，其水文地質模型如圖 3.35 所示，包含崩積層、風化岩層及基盤岩層，基盤岩層為不透水層，各層水文及強度參數如表 3-6 所示。鄭清江等(2009)以 SEEP/W 進行降雨入滲及滲流水文分析，以滲流分析成果帶入極限平衡邊坡穩定分析 SLOPE/W 及有限元素變形分析 SIGMA/W，結果分別如圖 3.36 及 3.37 所示。

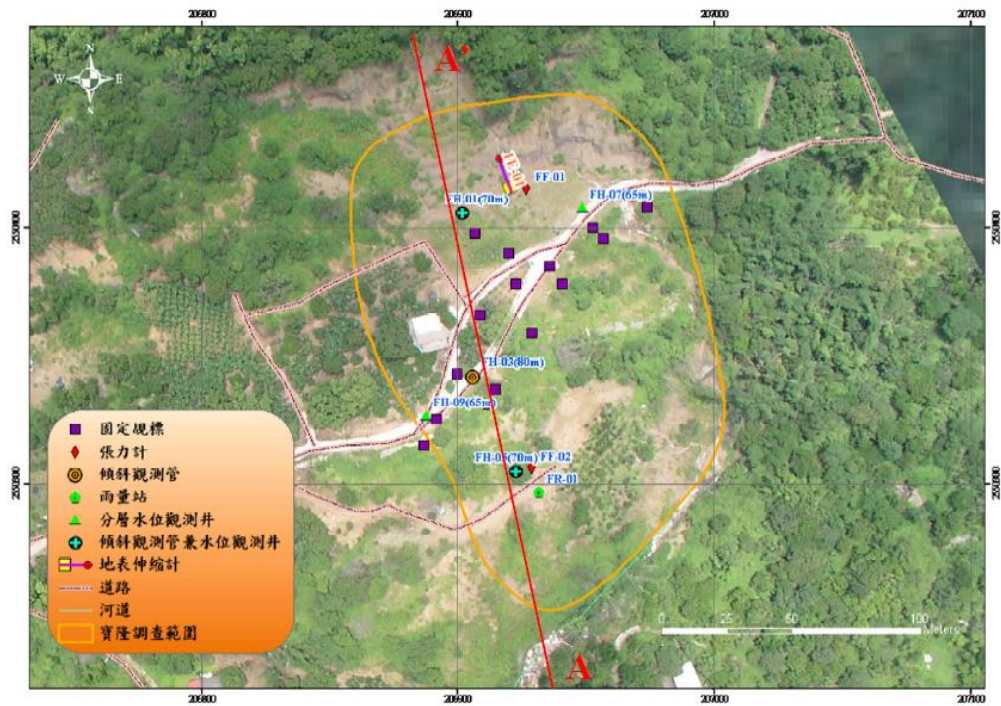


圖 3.34 寶隆調查範圍監測儀器布置圖(鄭清江等 2009)

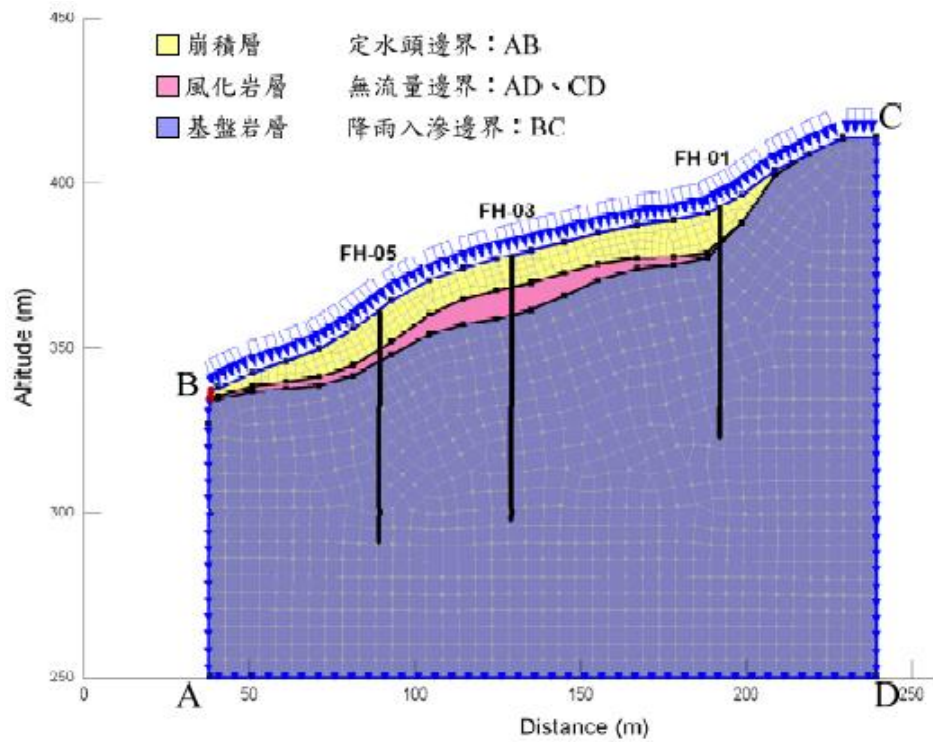


圖 3.35 寶隆調查範圍水文地質模型與邊界條件(鄭清江等 2009)

表 3-6 寶隆水文地質單元參數(鄭清江等 2009)

水文地質單元 參數名稱	崩積層	風化 岩層	基盤 岩層
飽和透水係數 $K_s \times 10^{-6}$ (m/sec)	50	1.9	0.01
飽和體積含水量 ω (%)	0.35	0.11	0.10
單位重 γ_t (kN/m ³)	20.0	25.3	25.7
摩擦角 ϕ (deg)	27	32	40
凝聚力 c (kPa)	25	100	500
彈性模數 $E \times 10^5$ (kPa)	35	3.0	0.35
柏松比 μ	0.33	0.32	0.22

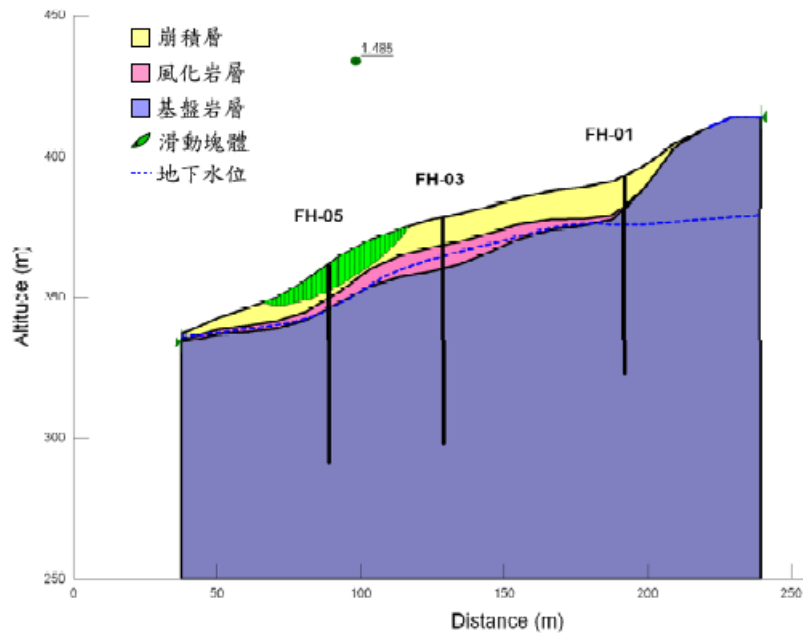


圖 3.36 寶隆調查範圍常時邊坡穩定性(FS=1.485) (鄭清江等 2009)

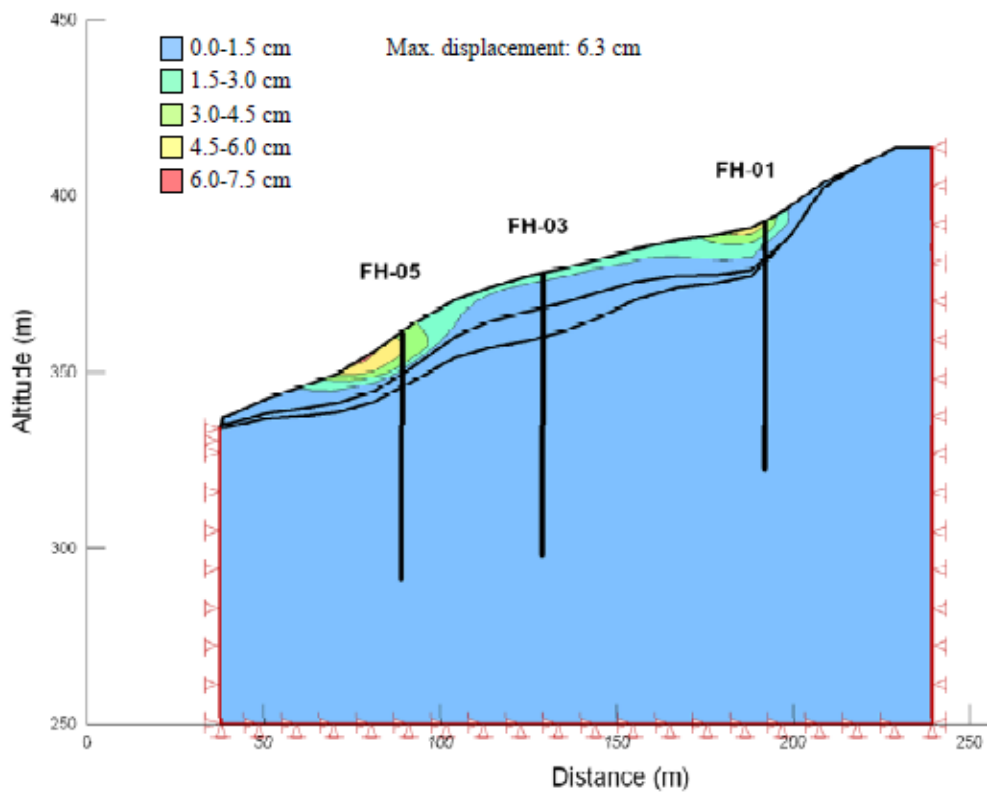


圖 3.37 寶隆調查範圍變形性評估結果 (鄭清江等 2009)

3.4.2 研究場址邊坡穩定分析

為與經濟部地調所研究成果進行比較，因此計畫執行團隊徵得經濟部地調所同意及協助，取得研究分析模型之數位資料，建立 FLAC 數值模型(如圖 3.38 所示)，其以強度折減法所求得之邊坡滑動面如圖 3.39 所示，對應之安全係數 1.48 與地調所成果吻合，其常時變形性分佈如圖 3.40 所示，與圖 3.36 常時邊坡穩定分析及 3.37 之變形分析成果高度相近，但以 FLAC 之單一架構可進行前人以二個程式組合之成果，可簡化分析步驟。

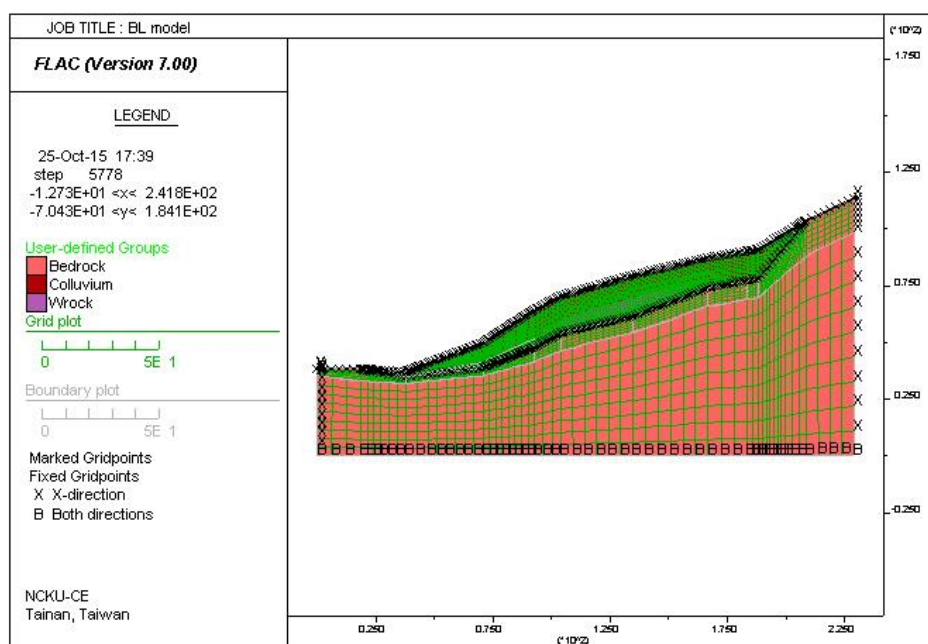


圖 3.38 寶隆 FLAC 模型

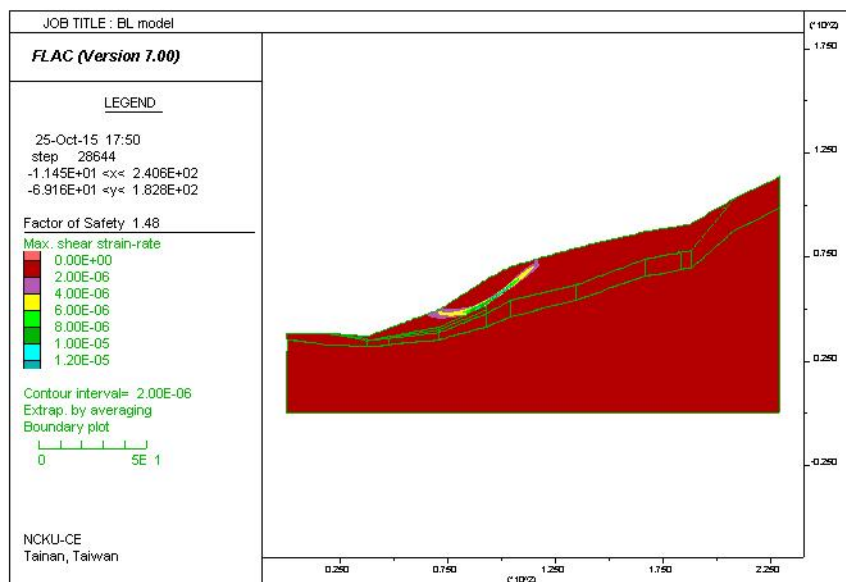


圖 3.39 寶隆 FLAC 常時分析臨界滑動面

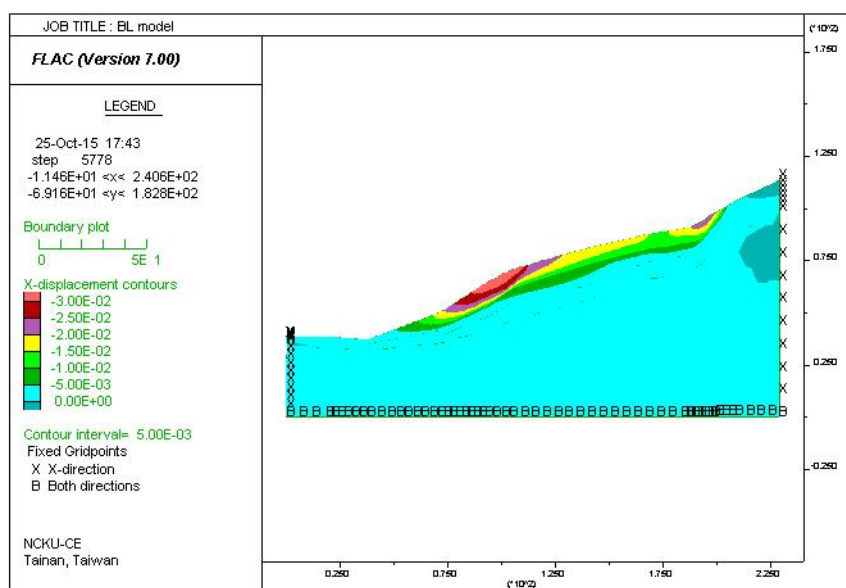


圖 3.40 寶隆 FLAC 常時水平變位分佈圖

3.4.3 研究場址水力力學耦合分析

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

分析時以修正之 Mohr-Coulomb 彈塑性組構模式，簡化式(3.3)並考慮其剪力強度($\tau^{\max}$)為:

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a) \tan \phi + S_w(u_a - u_w) \tan \phi + c' \dots\dots\dots (3.19)$$

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

$$P_c(S_w) = P_0(S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \dots\dots\dots (3.20)$$

式中 a 為土壤常數， S_e 為有效飽和度，其定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \dots\dots\dots (3.21)$$

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

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \dots\dots\dots (3.22)$$

式中 ρ_w 為水之密度， α 為土壤常數。

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

$$k_r = S_e \left[1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a \right]^2 \dots\dots\dots (3.23)$$

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

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \dots\dots\dots (3.24)$$

研究場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，相關水力參數如表 3-7 所示，力學參數則與表 3-6 相同。以圖 3.40 所示之網格，選用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 3-7 之 P_c 值，初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應，監測點位如圖 3.41 所示。

模擬過程中不同深度孔隙水壓力歷時如圖 3.42 所示，孔隙水壓變化可分成兩階段，第一階段表面飽和入滲開始後，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲，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，此與 3.3 節之假設相同，且此時因孔隙水壓增加導致安全係數大幅降低。

表 3-7 寶隆非飽和水文參數

參數	Colluvium	Bedrock	意義
Porosity	0.486	0.1	孔隙率
kat	5e-9	1e-12	飽和滲透係數
fmodulus	2e9	2e9	水體積模數
saturation	0.53978	0.53978	初始飽和度
vga	0.336	0.1	VG parameter a
vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0	15000	15000	VG P0
Pc	-45203	-45203	初始 From Pc(Sw)

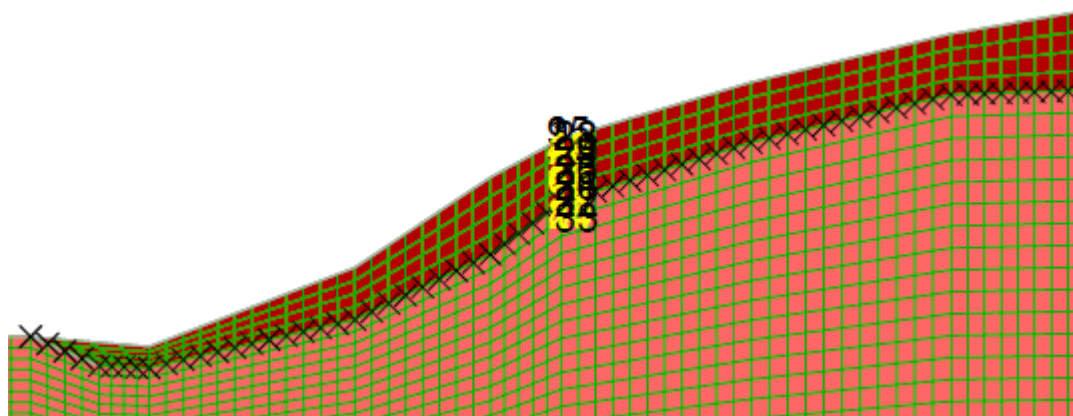


圖 3.41 監測點位分布圖

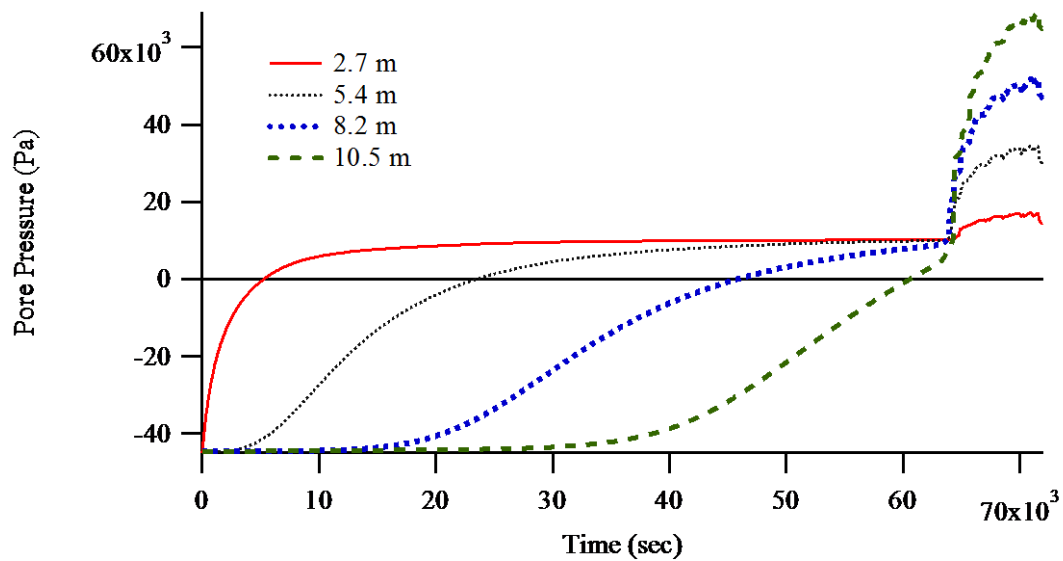
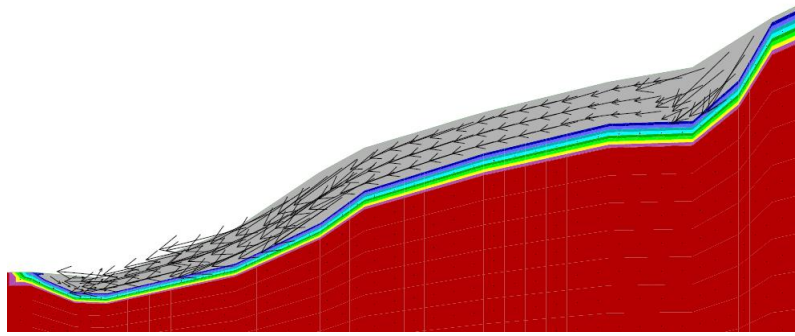


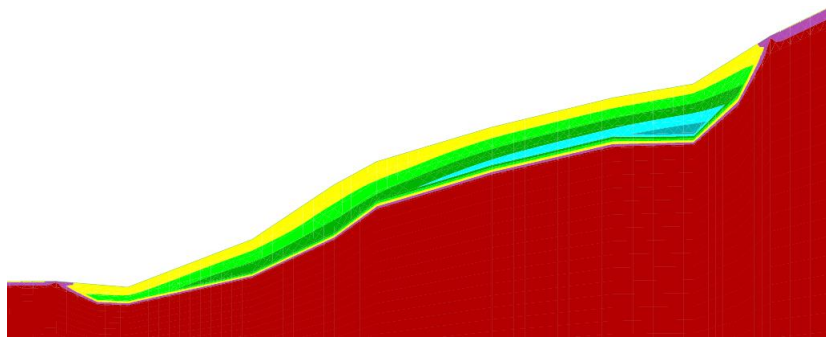
圖 3.42 監測點位孔隙水壓歷時

圖 3.43 為當崩積層均達飽和狀態時之穩定狀態下之流況與孔隙水壓分佈，崩積層均達飽和且產生平行邊界之流況，而其孔隙水壓力分佈為隨深度增加而增加，此流況下邊坡穩定分析結果與位移分佈如圖 3.44 所示，位移集中於下邊坡，且最大水平位移發生於上下邊坡交界，位移向量顯示其表面傾角最大，此時安全係數為 1.03，接近破壞。與地調所分析結果比較其於莫拉克降雨時最小安全係數為 1.125，對應之地表最大位移量約為 6.3cm，發生於邊坡中段，其差異為流況分析選取階段差異，地調所分析並無水平流況考慮，僅假設地下水位上升至地表，另外分析結果顯示，若現有使用參數及地質模型具可信度，此邊坡不易產生滑動。

水力力學耦合分析中監測點之水平與垂直變位歷時如圖 3.45 所示，崩積層與基岩交界無顯著位移發生，最大位移量發生於地表，且由圖 3.42 水壓歷時比較顯示，水壓力與位移變化發生時間差異有限，發生整體滑動前具有一定警戒時間，而由水平與垂直位移之比值顯示其破壞前地表具有顯著傾斜角發生，此特點為監測模組量測物理量與訂定警戒值之依據。



(a) 飽和度分佈及流線



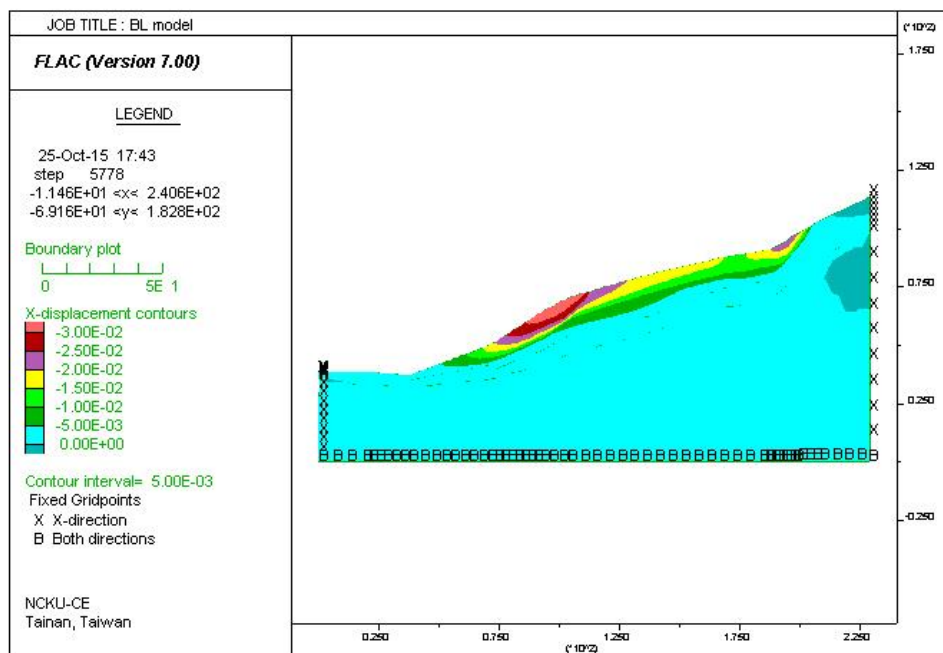
(b) 孔隙水壓力分佈圖

圖 3.43 穩定流況下水力行為

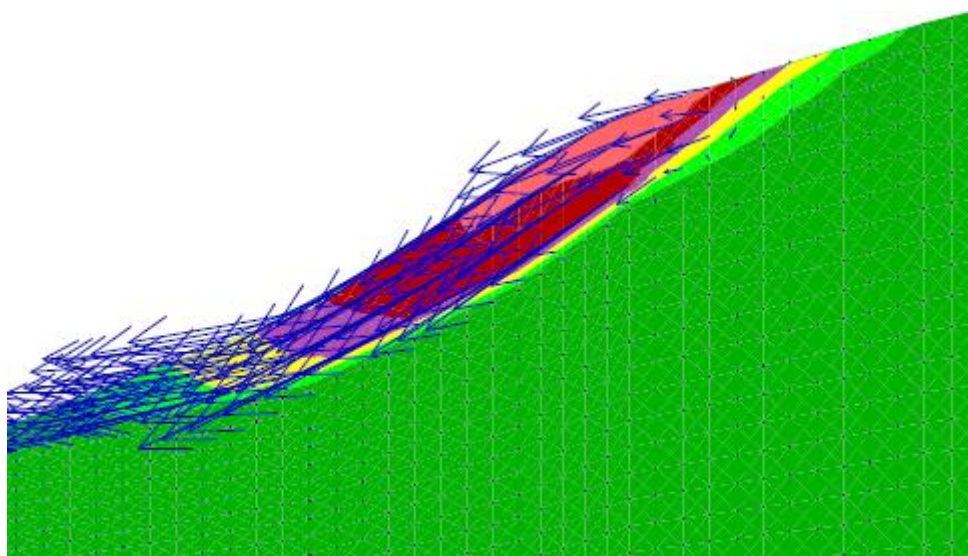
3.5 水力力學耦合分析於預警應用

本計畫主軸為發展監測模組與具依時性預警架構，其組成包括硬體組成與對應之分析模式，本章所進行之無限邊坡解析及二維數值水力力學耦合分析為預警監測之解析法分析模式，其結果可作為發展表層無線監測模組與預警架構之連結。

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，此為無線監測模組需具有之功能。

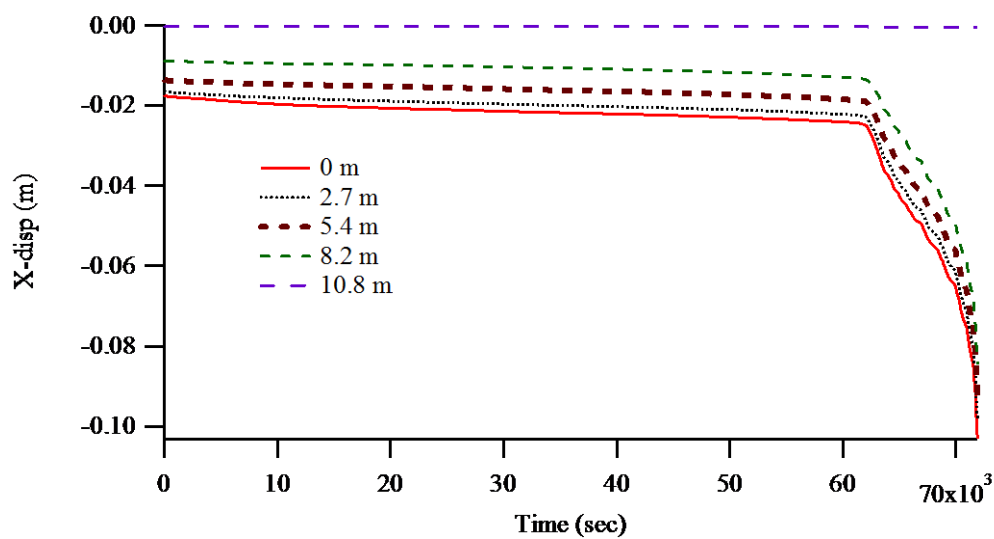


(a) 滑動面與水平位移分佈

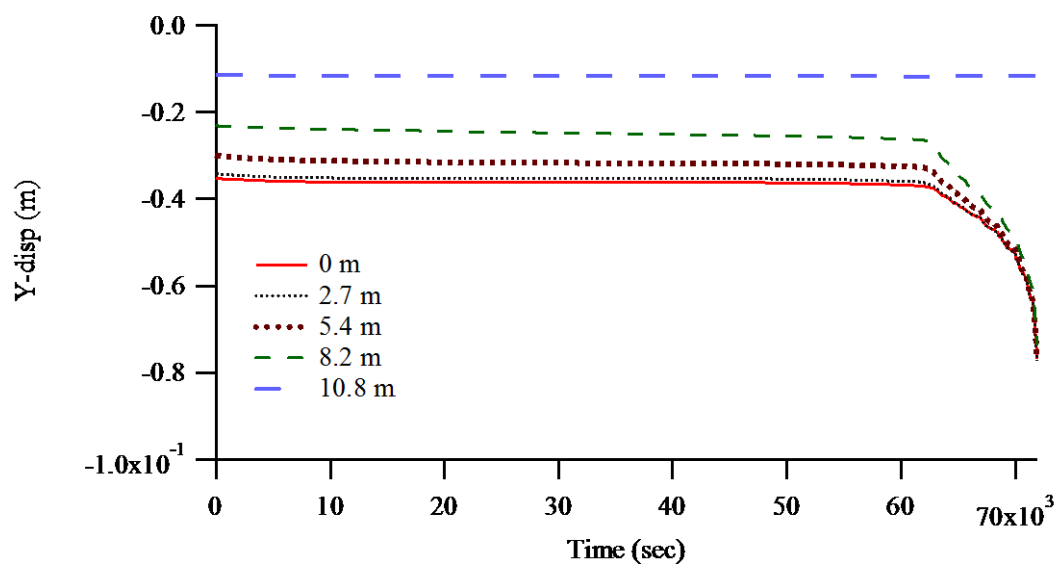


(b) 位移向量

圖 3.44 穩定流況下邊坡穩定分析結果(FS=1.03)



(a) 水平位移歷時



(b) 垂直位移歷時

圖 3.45 水力力學耦合分析位移歷時

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，兩

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，二者具不可切割性。

第四章 土層監測模組研發

本研究目的為發展一簡易土層監測模組，廣設於具淺層崩坍潛勢之邊坡表層，監測地表傾角及淺層土壤含水量，各模組間以無線傳輸方式將資料傳至監測主機，由遠端人員進行判讀或自動判讀以達即時預警之目的，提前進行相關減災行動。本研究將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，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤含水量之土層監測模組，形成分佈式邊坡表層監測網路，利用此類電子產品可大量生產，達到大幅降低成本。由前章水力力學耦合分析成果，本研究將進行一分佈式土壤含水量計之研發，透過量測多個深度土層電容值變化，間接測得各個深度土壤含水量，現地監測降雨時浸潤面隨時間之變化，提供非飽和土壤水力與強度參數，進行非飽和邊坡耦合穩定分析。

4.1 表層水文與運動反應量測

4.1.1 基質吸力量測量測

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

既有應用於現地之非飽和土壤內基質吸力量測方法可分為直接法與間接法兩種。直接方法使用張力計(Tensiometer)直接量測土壤內基質吸力。張力計使用一飽和之高進氣吸力值陶瓷(High Air Entry Ceramic)量測周圍土壤之負孔隙水壓，但此類陶瓷製作成本相當高，且陶瓷內之孔隙水在負壓下會逐漸汽化為水蒸氣而形成氣泡，此現象稱為穴蝕效應(Cavitation)，形成之氣泡將阻礙孔隙水的聯通而影響量測，故張力

計因須定期重新飽和其高透氣陶瓷，無法應用於長期邊坡安全監測。

間接量測方法係將取自現場試驗土樣依據現場孔隙比大小重模後，求得土壤體積含水量與基質吸力之關係曲線，稱之為土壤水分特性曲線(soil-water characterization curve, SWCC)，透過量測現地土壤體積含水量，藉由 SWCC 曲線間接推估現場土壤基質吸力大小。

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

土壤介電常數雖亦受上述土壤參數影響，但由於土壤固體介電常數(3~5)與空氣介電常數(=1)相當接近，而水介電常數在20度時為80.1，100度時為55.3，皆遠大於土壤固體以及空氣之介電常數，若將土壤視為空氣，其所產生之誤差小於5%，即土壤種類與土壤組構對土壤介電常數影響相當有限，且介電係數值主要受水佔有比例影響，即土壤含水量或飽和度對介電係數具有顯著影響，因此透過量測土壤介電常數以間接量測土壤含水量方法可省去土壤參數之調查，因此量測介電常數為取得土壤含水量較經濟的方法(林哲毅，1999)。

4.1.2 電容量測土壤含水量原理

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

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

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

目前量測電容最經濟可靠之方案為利用德州儀器(TI., Texas Instruments)所販售之 FDC1004 轉換器(如圖 4.1 所示)，FDC1004 係一 4 頻道電容/數位轉換器(Capacitance/Digital Converter)，量測範圍為 ± 15 pF，解析度可達 0.5 fF，工作電壓 3V，工作電流僅 0.75 mA，並透過 I2C 介面傳輸，屬於非接觸式電容量測，其應用方法如圖 4.2 所示，由左而右分別為：(1)姿勢感測(Proximity Detection, Isolated Sensor - No GND)，(2)液位感測(Liquid Level Sensing, Parallel Fingers)，及(3)材料檢測(Material Analysis, Parallel Plate)。



圖 4.1 TI. FDC1004 電容數位轉換器(TI., 2015)

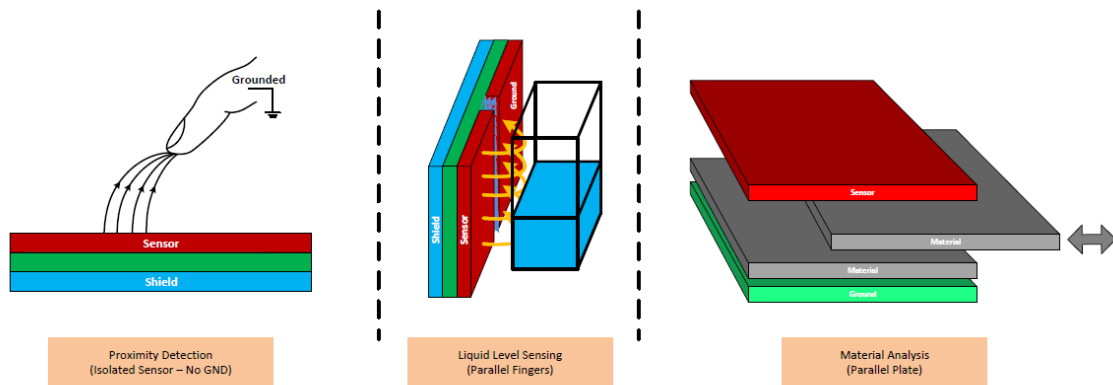


Figure 3. Basic Implements for Capacitive Sensing

圖 4.2 非接觸式電容量測之應用方法

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

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

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

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

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

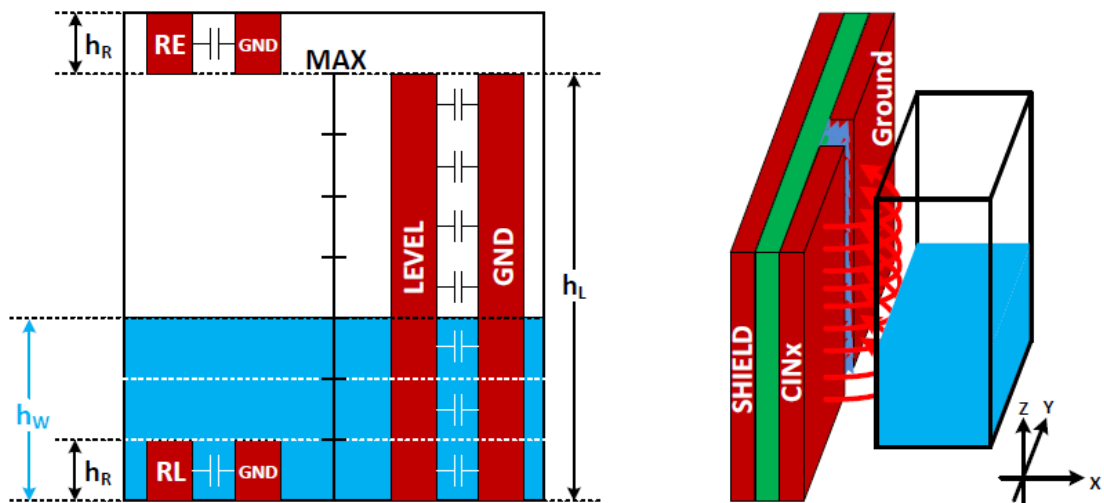


圖 4.3 液位量測示意圖

土壤雖包含液體、氣體、固體三相(如圖 4.4 所示)，較液位量測多一固相，但固相介電常數為一常數，不受含水量變化而改變，又式 4.3 中 $\frac{h_{RL}}{C_{RL} - C_{RE}}$ 為常數，則式(4.3)可簡化為下式：

$$C_{level} - C_{level}(0) = (h_a \varepsilon_a + h_w \varepsilon_w + h_s \varepsilon_s) - (h_a \varepsilon_a + h_w \varepsilon_a + h_s \varepsilon_s) \\ = h_w (\varepsilon_w - \varepsilon_a) \dots\dots\dots (4.4)$$

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

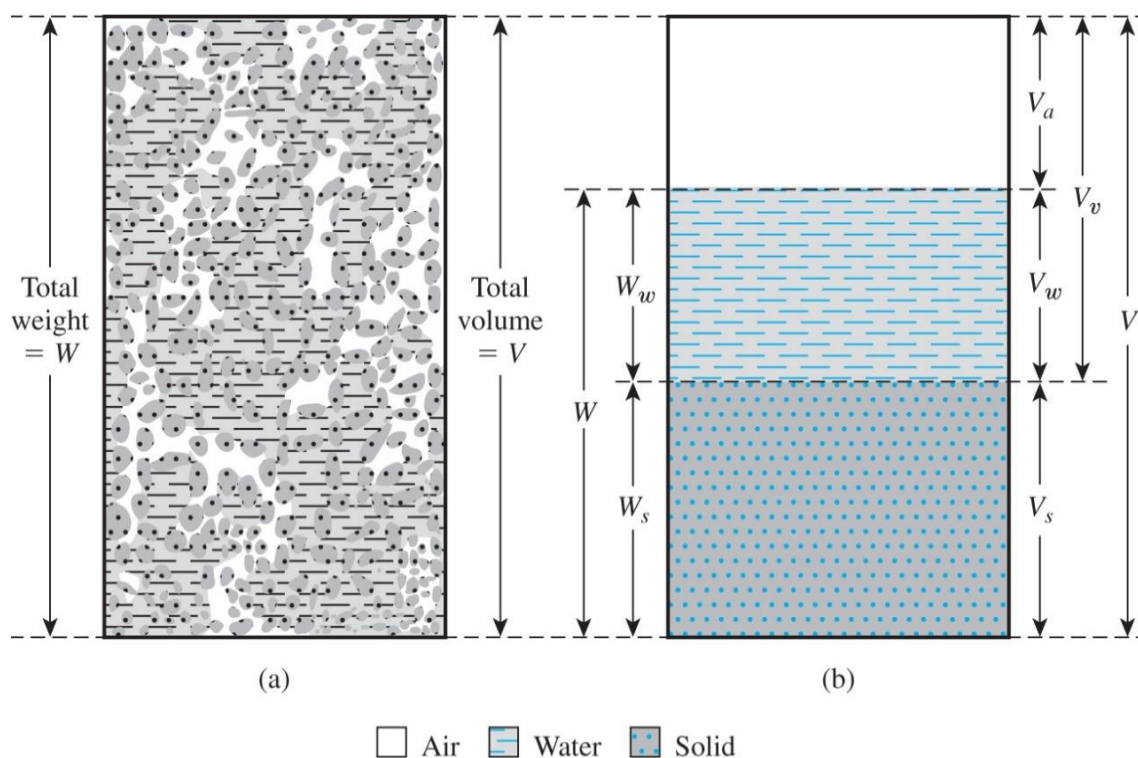


圖 4.4 土壤三相圖(Das, 2006)

4.2 無線感測土層監測模組

4.2.1 土層監測模組架構

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

1. 體積微小：常用 MEMS 感測器長寬在 3mm，厚度在 1 mm 以下。
2. 低耗電：其功率通常以 μW 來標示，非常省電。
3. 介面簡易：MEMS 輸出數據大多使用標準之數位介面，容易與其他感測器及通訊模組整合。
4. 低成本：本研究所需之 MEMS 感測器單價大都在 10 元美金以下，部分在 1 元美金以下，可提高監測目標區之佈設密度。系統整合與製作容易，可以輕易在市場上找到配合廠商做系統整合，相關線路

板製作與量產，所需零件可以輕易在國內取得。

本計畫主軸為開發一適用於因降雨造成之淺層邊坡滑移且具有即時、無線、自動化特點之邊坡表層監測模組，所整合之感測器種類與功能如下：

1. 三軸向重力感測器(G sensor)：量測 xyz 三軸向線性加速度，反應相對於重力方向傾斜角度變化，透過積分後可得三軸向上之位移量。
2. 三軸向陀螺儀(Gyroscope sensor)：量測 xyz 三軸向旋轉角加速度，與 G sensor 整合形成一慣性量測單元(Inertial Measurement Unit, IMU)，使用各加速度隨時間之積分來計算地表監測模組的運動軌跡。提供地表加速度、傾斜及位移等參數，作為邊坡滑移與地震時之即時參數。IMU 已廣泛的應用於飛行器，汽車導航，娛樂與運動器材之中，做為軌跡追蹤主要感測單元(廖文選，2010)。
3. 傾斜儀(Tiltmeter/Inclinometer)：量測雙軸向傾斜量變化，透過一只傾斜儀提供 xy 二軸向上高精度及高靈敏度之傾斜量測。
4. 電容/數位轉換器(Capacitance/Digital converter)：非接觸式量測周圍環境電容變化，間接量得土壤之含水量。

上述感測器除傾斜儀外皆為 MEMS 感測器，成本低廉且已發展成熟，感測架構如圖 4.5 所示。

所研發之 MEMS 動態感測器(傾斜儀)、通訊、數據及訊號處理/紀錄與電源供應模組將全部裝置於一防雨密閉盒中(圖 4.5 中實線圓)，並於其外覆以耐候層(圖 4.4 中虛線圓)以降低其受日曬之影響其耐久性並提升其防雨性，其下方將連結分佈式含水量計，感測器位置側向管壁將以塑料取代金屬，使其得以透過非接觸式量測方法量測周圍土壤之含水量。

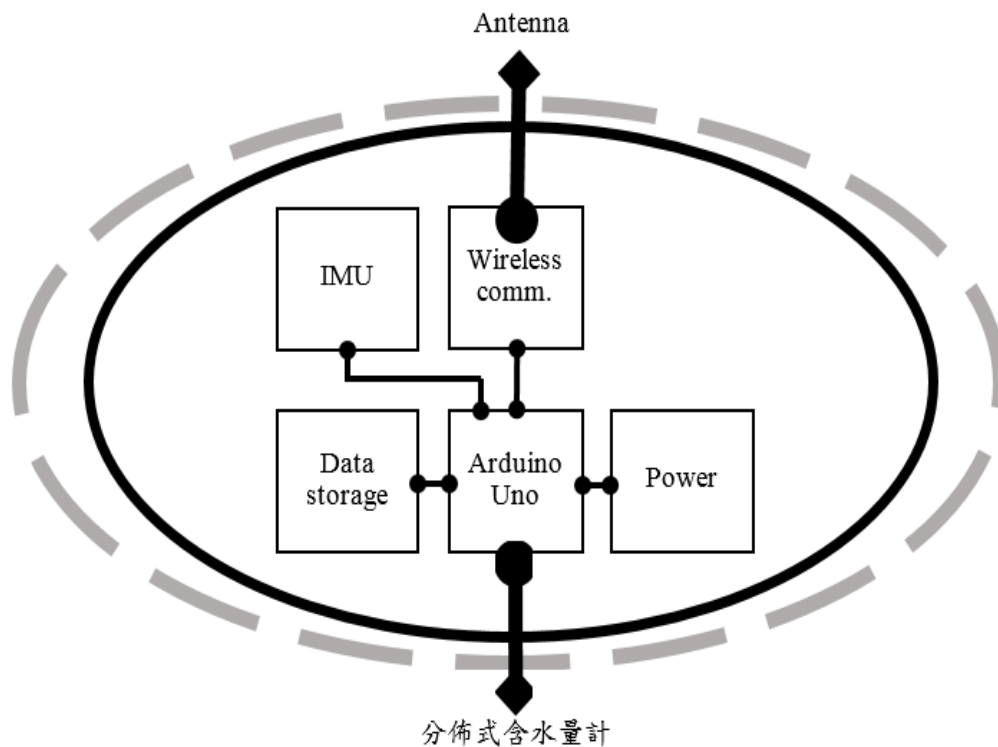


圖 4.5 土層監測模組內部感測器架構示意圖

4.2.2 土層監測模組組成

土層監測模組結合各感測器所測得之參數，未滑動時可律定現地參數，以修正解析法預警模式，配合依時預警模式，可進行即時邊坡穩定預測，並透過設立警戒值，適時在邊坡災害產生前提前發布預警。為達上述目的，在地層監測模組內將裝有紀錄卡與無線數據傳輸系統，以無線訊號傳送至管理單位，若無線傳輸受到天候等不可抗力因素所阻礙，則由紀錄卡負責感測器數據之紀錄。

所發展之無線土層監測模組包括(1)微處理器、(2)慣性量測單元、(3)傾斜儀、(4)分佈式含水量計、(5)無線傳輸模組及(6)圖形化使用介面，除感測器外各部分說明如下：

(1) 微處理器

計畫採用市售開放式原始碼之微控制器，目前常見之市售開放

式原始碼的軟硬體平台主要有四種：(1)Arduino、(2) 樹莓派 (Raspberry Pi)、(3)Linkit、及(4)Intel Edison。其中 Intel Edison 由於成本較高，且發售於 2014 年 9 月，實際使用狀況尚不明確，Linkit 則缺乏記憶體管理單元 (Memory Management Unit, MMU)，故本研究暫不考慮採用上述二者作為微控制器。

樹莓派為一微型化電腦，而 Arduino 則為微處理器，因此樹莓派在功能上勝過 Arduino，但是 Arduino 包含 I/O 腳位，多可直接與電子元件連結，使得開發難度相對低於樹莓派，透過 USB 介面連結電腦便可更改其操作程序，使得 Arduino 在開發上較具優勢，且樹莓派需要掛載擴充面板方可提供足夠數量的輸入端，使得 Arduino 在空間上略勝一籌。故本計畫決定採用 Arduino 作為土層監測模組之微處理器，後期若 Arduino 無法滿足將來衍生功能，則再改採用微型化電腦，以提供足夠之處理能力，相關轉換相對於重新開發之難度較低。

本研究採用 Arduino Uno (如圖 4.6 所示)版本之微處理器，其搭載 ATmega328 微處理器，其時脈高達 16MHz，且具 14 支數位 I/O 接腳，其中包含有一組 SPI (Serial Peripheral Interface Bus) 介面以及一組 I²C (Inter-Integrated Circuit) 介面，I²C 更支援單一匯流排最多可和 112 個節點通訊，足以應付多數模組間之數位資料傳輸。另外配有 6 支類比訊號接腳，可透過微控制器內含之 ADC (Analog/Digital Converter) 將類比訊號轉換成數位訊號，亦可作為數位 I/O 接腳使用，滿足土層監測模組的功能需求，其尺寸僅長 2.7" (約 6.9cm)、寬 2.1" (約 5.4cm)，符合監測模組尺寸要求，所用工作電壓為 5V，輸入電壓介於 7~12V 也適用多數市售充電電池，基於上述理由，本年度採用 Arduino Uno 作為土層監測模組之微處理器。

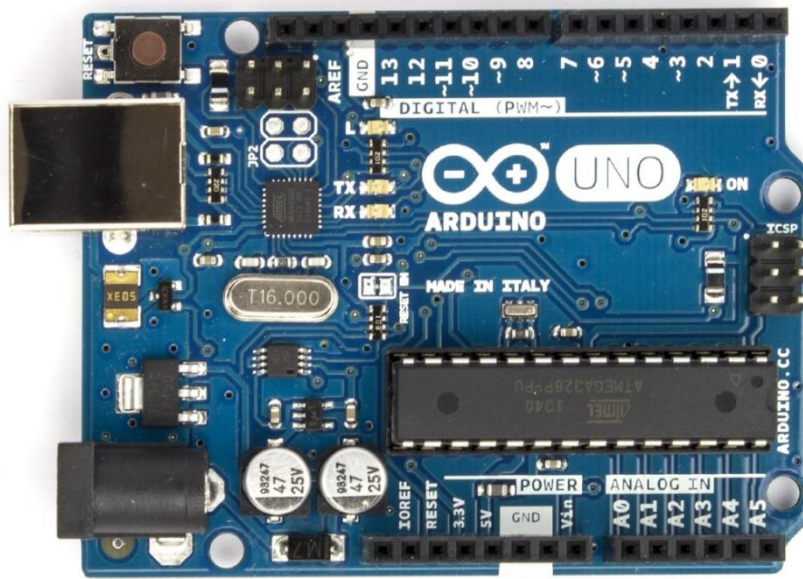


圖 4.6 Arduino Uno

(2) 慣性量測單元(IMU)

IMU 已廣泛的應用於飛行器，汽車導航，娛樂與運動器材之中，做為軌跡追蹤主要感測單元，IMU 至少具備有一個三軸向重力感測器以及一個三軸向陀螺儀，由此二感測器分別提供：(1)三軸向線性加速度及(2)三軸向角速度。上述二者共計六項物理量為循跡運算所必須之物理量，故 IMU 亦稱作六軸動態感測器。

目前已有九軸動態感測器，其係指除上述六項必要物理量外，增設一三軸向磁力計(3-axis Magnetometer)，提供 IMU 一絕對參考準位以避免六軸 IMU 經由積分所產生之誤差累積，由於本研究軌跡量測可視為靜態量測，誤差累積並不明顯，為簡化軟體與韌體之開發，故本研究先選擇六軸 IMU 作為動態感測器。由於軌跡運算相當複雜，而 InvenSense 所生產之 MPU-6050 六軸 IMU(圖 4.7)內建一 MCU，除了同一般六軸 IMU 可提供三軸向之線性加速度與角速度外，該 MCU 已嵌入運算韌體，可將六軸資料轉換成軌跡運算所需之歐拉角(Euler angles)，大幅簡化韌體開發難度並提升 CPU 運

算效能，考量土層監控模組所蒐集之六軸資料將來可運用於軌跡運算，故本研究採用 InvenSense 所生產之 MPU-6050。

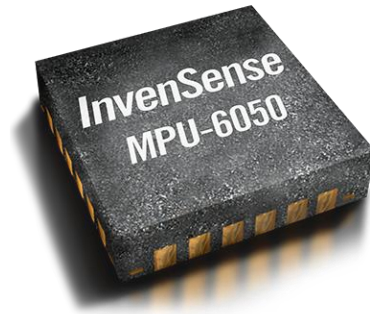


圖 4.7 MPU-6050 (InvenSense)

(3) 傾斜儀

傾斜儀可以觀察長期地表傾斜角度之變化，耦合分析顯示地表傾角於滑動前持續產生變化，由於土層監測模組對傾斜儀之解析度要求相對較高，本研究以市售高精度傾斜儀以 Murata Electronics 所生產之傾斜儀 SCA100T(圖 4.8)具有 ± 90 度量測範圍下最低之解析度，可達 0.0035 度(10Hz BW 類比輸出)，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，與微控制器間通訊相當彈性，故採用其作為土層監測模組之傾斜儀，其缺點為價格高昂。



圖 4.8 SCA100T (Murata Electronics)

(4) 分佈式含水量計

現有市售現地含水量計成本相當高，且體積甚大，不利於整合進監測模組，因此本計畫研發簡易含水量計，透過量測土壤介電係數，間接量測土壤含水量變化，透過間接方法評估土壤內基質吸力。透過多組電阻裝置於一電阻探棒表面(圖 4.9)，所研發之簡易含水量計可進行分佈式地層含水量量測，同時監測探棒長度內多深度土層之含水量，提供降雨時浸潤面隨時間與降雨量的變化。

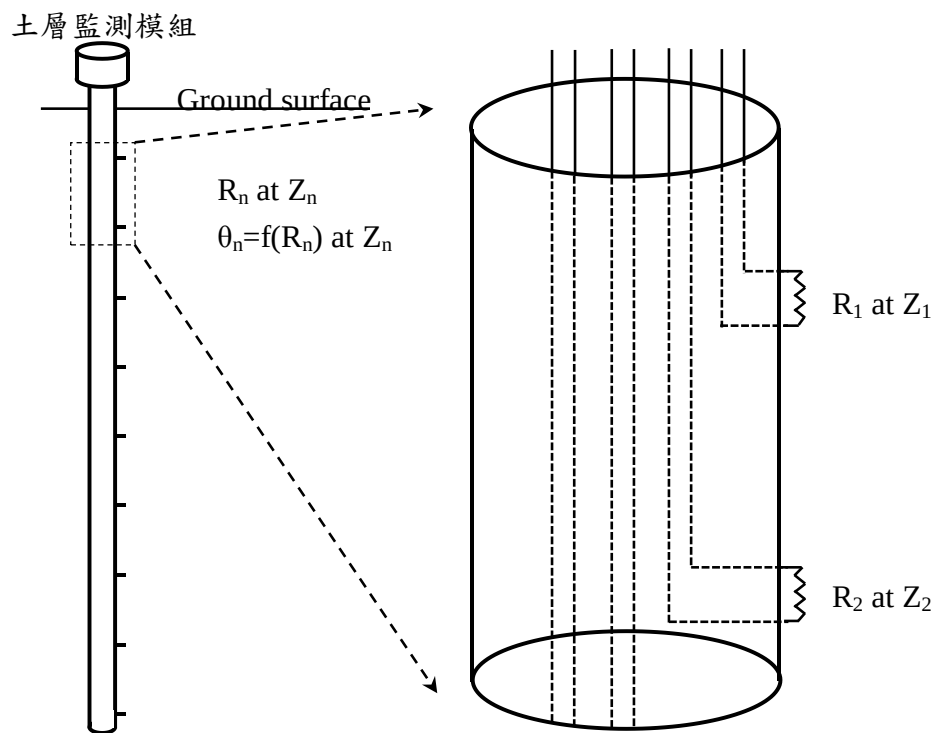


圖 4.9 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖

含水量量測由電容改變間接推估，所需硬體主要為 FDC1004 電容轉換器，由於 FDC1004 封裝甚小，腳位皆位於底面，無法焊接至電路板上，需打件方可進行測試，而打件成本甚高，故決定開發階段採用 FDC1004EVM 開發模組(圖 4.10)，以利進行含水量量測測試。該開發模組包含微控制器、FDC1004 模組以及液位量測感測器，可直接透過微控制器上之 USB 與電腦傳輸進行測試，且提供免費現成之 GUI，便於開發，開發模組屬於可拆式設計，待確認感

測器無誤後可拆除微控制器，將 FDC1004 模組與感測器直接與 Arduino Uno 連接進行測試。

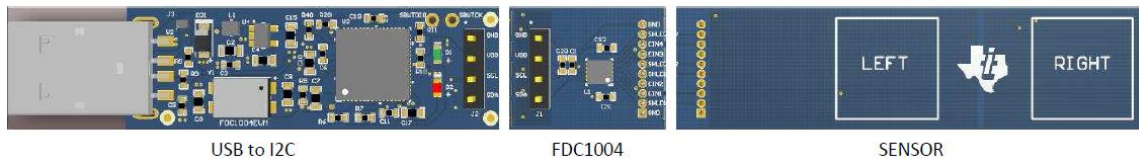


圖 4.10 FDC1004EVM 開發模組(摘自 [www.TI.com](http://www.ti.com))

(5) 無線傳輸模組

無線數據傳輸平台有許多選擇，如 Wi-Fi，藍牙，GSM 與 Zigbee 等相關技術可以在市場上購得。由於邊坡滑移多發生於強降雨時，而水對電磁波的傳遞具有相當程度的屏蔽效應，因此無線傳輸平台的選擇須將穿透屏蔽能力納入考量，而增加傳輸距離以及採用傳輸網路陣列則可降低中繼站數量，降低能源與成本需求，亦為選擇上之考量。為此，各種適用於本案之無線通訊模組條列如下：

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

5. CE0700：採用手機 GSM 傳輸技術，只要鄰近區域有基地台即可傳輸數據，無須另外架設傳輸中繼站。

其中，RFID 傳輸技術優勢為極短距離內高穿透傳輸，但不適用長距離傳輸，故 RC522 僅可作為回收用途，無法作為主要通訊方式，將來在評估土層監測模組回收之可行性後可考慮是否另行裝設。考慮災害時常伴隨惡劣天候條件，GSM 傳輸技術則仰賴基地台與監測地區距離，且有監測需求地區基地台密度通常較低，容易受到降雨造成之訊號屏蔽影響，故不列入考慮。XBee 係屬 ZigBee 傳輸技術之衍生，此類傳輸技術具有資料不同步的缺點，且耗電量約為 RF 的 10 倍左右，將減少監測模組在災害間之運作時間。相較於 CC1200DK，RF 具有低功耗、高速率、多頻點、低應用成本以及便於開發等優勢，故本計畫以 RF 傳輸技術的衍生技術 NRF24L01 作為本案主要無線傳輸模組。

由於 NRF24L01 之電路與元件已完全模組化(圖 4.11)，使其便於開發，而其低工作電壓(1.9V~3.6V)與工作電流(<25mA)使其具備低功耗之優勢，高速傳輸(2Mbps)並支援多達 125 頻點，滿足多點通信與跳頻通訊之需求。NRF24L01 集成了所有與 RF 協議相關的高速信號處理功能，包括自動重發丟失數據包和自動產生應答信號，使其得以自動檢測並重發遺失的封包，重發時間及重發次數可透過軟體控制，並可自動存取未收到應答信號的封包，自動應答功能在收到有效數據後，模組將自動送出應答信號，無須另行編程載波檢測。NRF24L01 內部具有固定頻率檢測硬體 CRC 偵錯和對多點通道地址控制，封包傳輸錯誤計數器及載波檢測功能則可用於跳頻設置，提供同時最大 6 組接收通道地址設置，並可有選擇性地開啟接收通道標準排針 Dip2.54mm 介面，便於嵌入式應用。NRF24L01 的 SPI 介面可以利用微控制器的 SPI 介面連接或以 I/O 接腳進行模擬，內部具有 FIFO(First In, First Out)與各種高低速微處理器接腳，便於使用低成本微控制器。

(6) 圖形化使用介面(GUI, Graphical user interface)

為簡化並加快對各土層監測模組之監控，需發展一圖形化使用者介面，透過 GUI 可不必透過 Arduino 編輯器(圖 4.12)更改 Arduino 韌體(firmware)，即可達到對土層監測模組以及接收端之 Arduino 進行必要之控制與資料擷取。為簡化程式開發成本與時間，本研究 GUI 使用 Microsoft Visual Studio 進行編寫(圖 4.13)，並以 C++ 語言作為 GUI 開發語言。

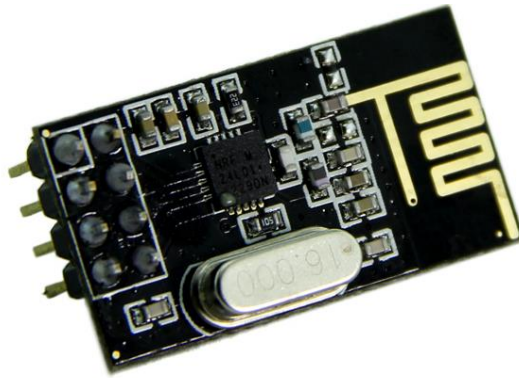


圖 4.11 NRF24L01 模組(摘自 www.seeedstudio.com)

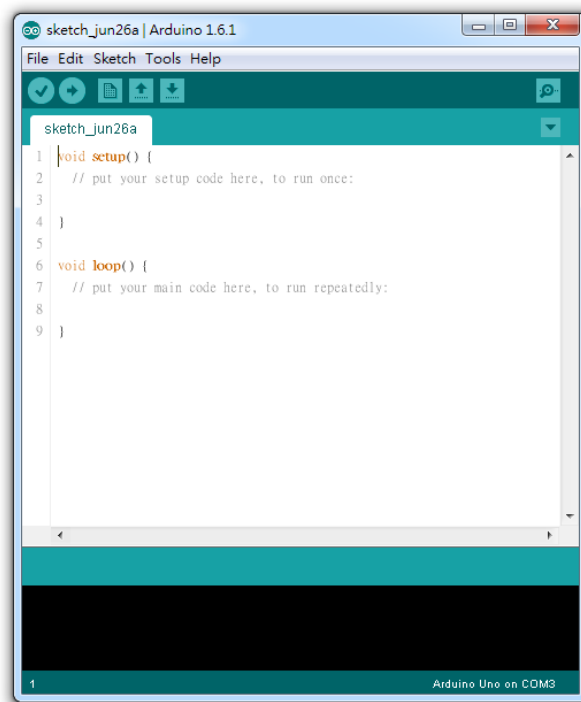


圖 4.12 Arduino 編輯器

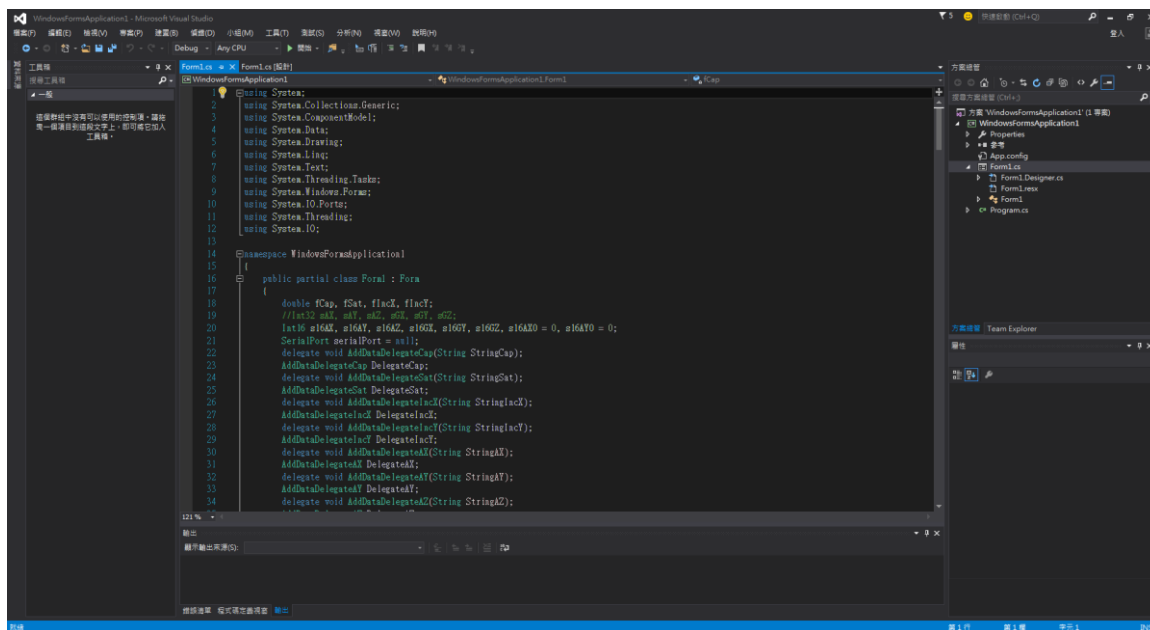


圖 4.13 使用 Microsoft Visual Studio C#編寫 GUI

4.3 研究成果

本節介紹研發之土層無線監測模組，並依序展示本研究所採用之各感測器標定情形，建議土層監測模組之安裝程序，最後討論其成果以作為後續研究之參考。

(1)土層無線監測模組

土層監測模組可分為發射端與接收端兩部分，發射端係指由微控制器結合各感測器所構成之土層監測模組，裝置於待測地點並持續透過無線傳輸將各感測器所獲取之資料送出；接受端則指單純由微控制器結合無線傳輸模組之無線接收系統，並不具備量測功能，裝設於現地之伺服電腦進行資料收集，並儲存至伺服電腦以供管理單位透過遠端監控並存取監測數據。

Sparkfun 推出一可相容 Arduino UNO 的原型擴充板(圖 4.14)可直接固定於作為微控制器 Arduino UNO 之排針母座上如圖 4.15 所示，本研究採用該原型擴充板，並將發射端方面除電容感測器以外之感測器皆

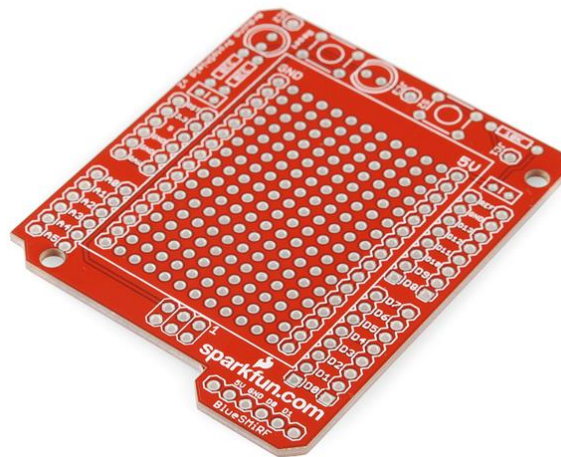


圖 4.14 Arduino UNO 原型擴展板(Sparkfun)

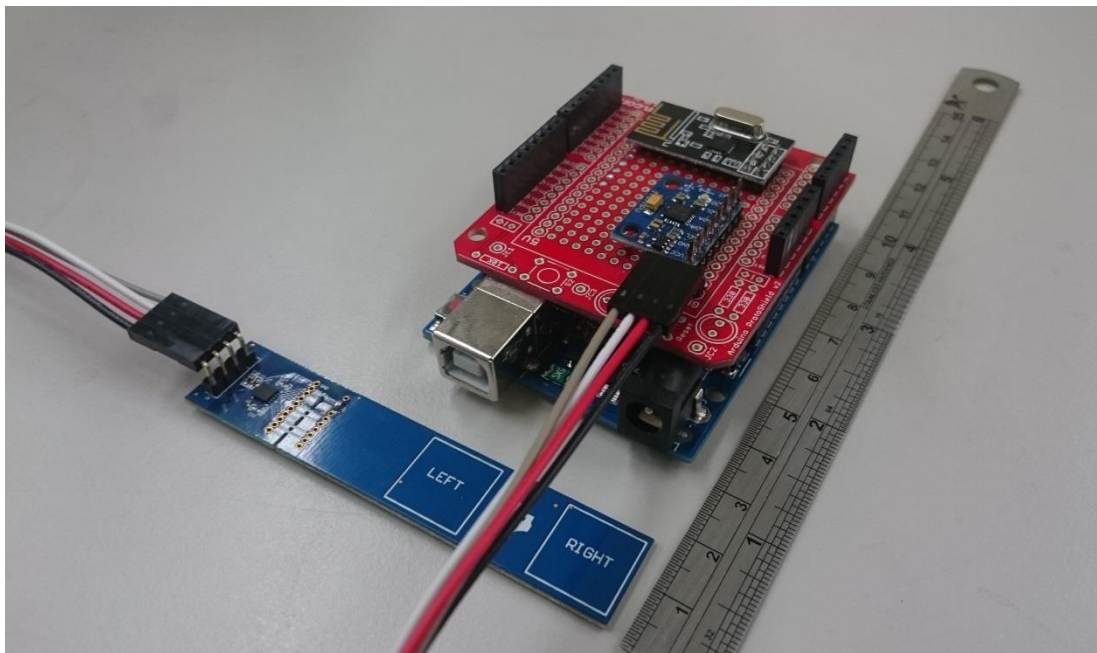


圖 4.15 Arduino UNO 結合原型擴展板與電容感測器

固定於該原型電路板上，並設有電容感測器排線接口，如此減少了線材走線所佔用之體積以及線接頭鬆脫之風險。發射端除了包含微控制器外，更搭載 4 顆鋰電池作為戶外供電系統，將來可加入太陽能板與供電控制器以提升土層監測模組續航能力。圖 4.16 為本研究所研發之土層監測模組發射端之外構，發射端的外構設計可大致分為三部分：

1. 核心內盒(圖 4.17)：負責搭載微控制器、IMU、無線傳輸模組、供電系統。
2. 核心外盒(圖 4.18)：提供防雨、防曬與散熱之保護殼層
3. 含水量計(圖 4.19)：裝置電容感測器(圖 4.15 左下)之防水殼層



圖 4.16 發射端外構

核心內盒包含一骨架如圖 4.20 所示，其下方固定有電池盒，其上則用以固定微控制系統與感測器電路，骨架主要功能為固定微控制器、感測器電路板以及電池盒，其上支撐設計將抵住外盒頂部，使骨架緊密與內外盒緊密貼合避免內外相對震動，外盒與感測器電路板與微控制器間留有空間(圖 4.17 中顯示支撐高過內盒部分)，搭配外盒與內盒間預留之空隙(圖 4.21)使其具有隔熱與散熱作用，外盒預留之通風孔(圖 4.21 外盒壁上垂直向開孔)高度皆低於內盒高以確保雨水無法進入內盒，使其通風散熱同時達到防雨的需求。

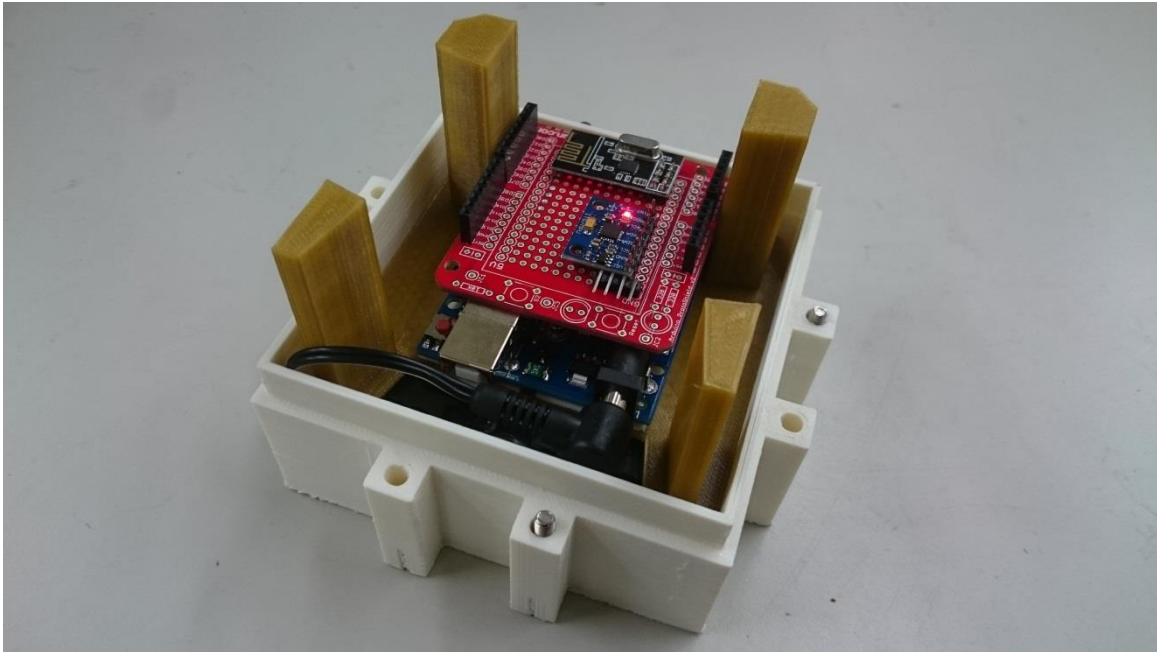


圖 4.17 發射端核心內盒

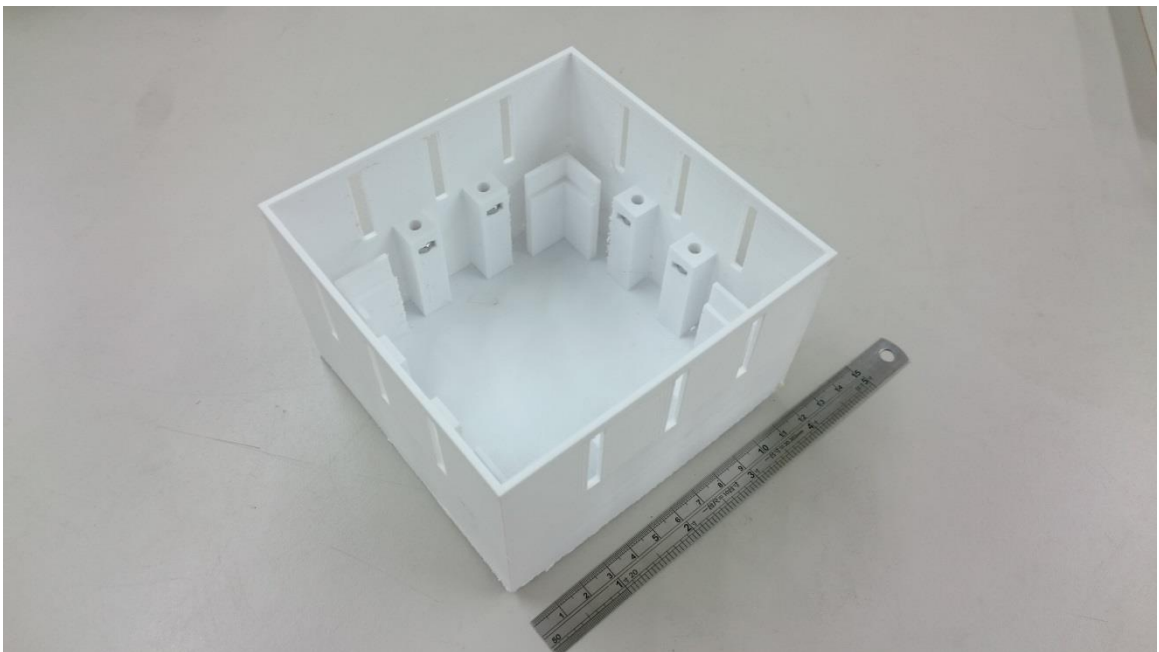


圖 4.18 發射端核心外盒



圖 4.19 含水量計殼層

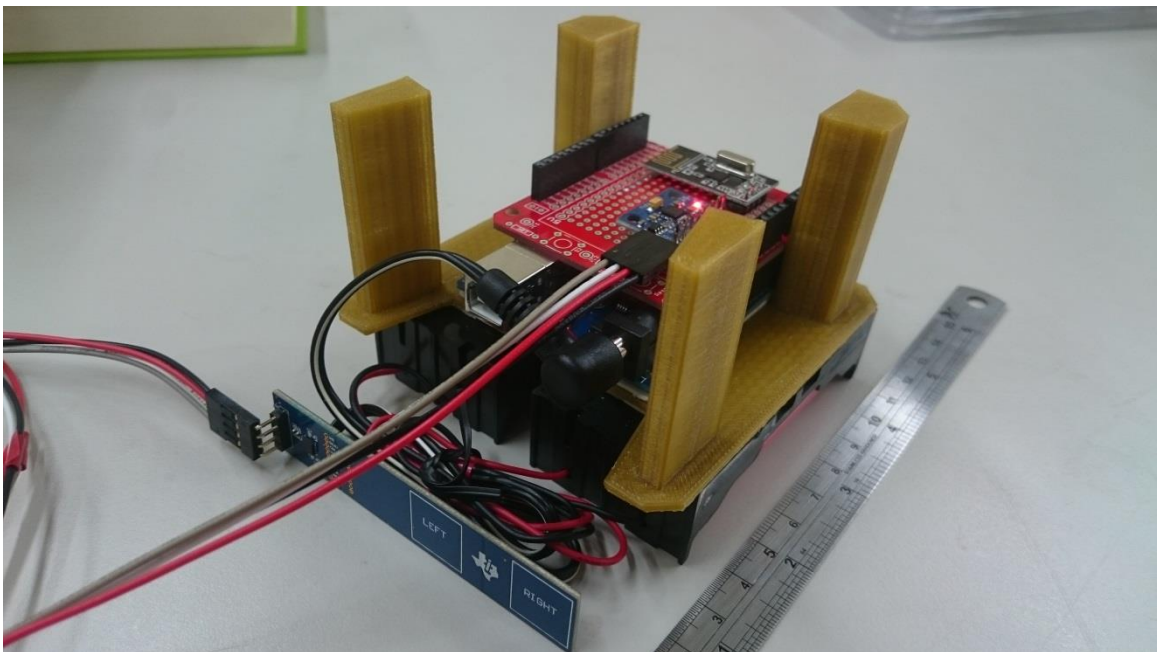


圖 4.20 發射端內盒骨架

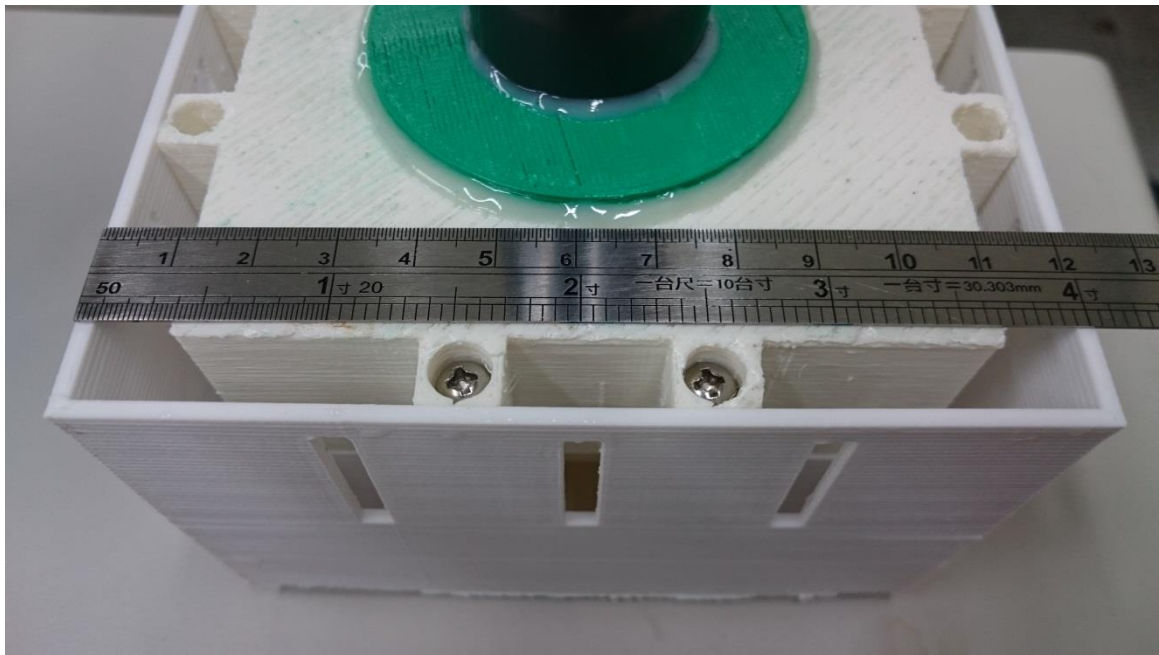


圖 4.21 內外盒通風間隙

內盒下方以一連結器連結一長 80cm 之高密度 PCV 管(UPVC)如圖 4.16 所示，UPVC 管下方與含水量計黏合，接縫處皆以膠充填使其完全防水，電容感測器則以一 90cm 長之 4 芯排線穿過 UPVC 水管連結至感測器電路板上之排線接口，未來將在管壁上多處增設開口，並裝置多處含水量計於其表面，使其得以分佈式量測淺層土壤飽和度。

接收端包含一微控制器與一搭載無線傳輸模組之電路板，該電路板之針腳設計使其得以直接固定於 Arduino UNO 如圖 4.22 所示，並透過一 USB 傳輸線與電腦連接，接收端連結至電腦後僅需啟動本研究所開發之 GUI 即可顯示土層監測模組回傳之數據。

本研究亦製作一接收端專用外殼如圖 4.23 所示，避免電路板與微控制器接觸金屬導致短路，並預留有一 USB 開孔(圖 4.24)，並不影響其功能性。

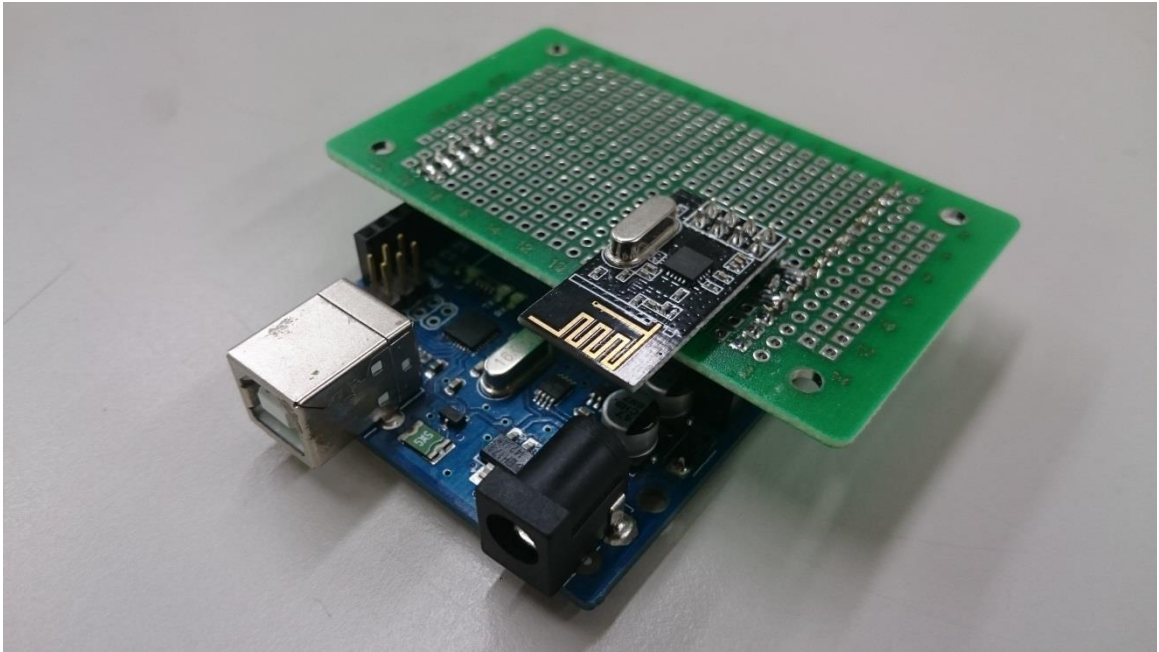


圖 4.22 接收端之微控制器與搭載電路板

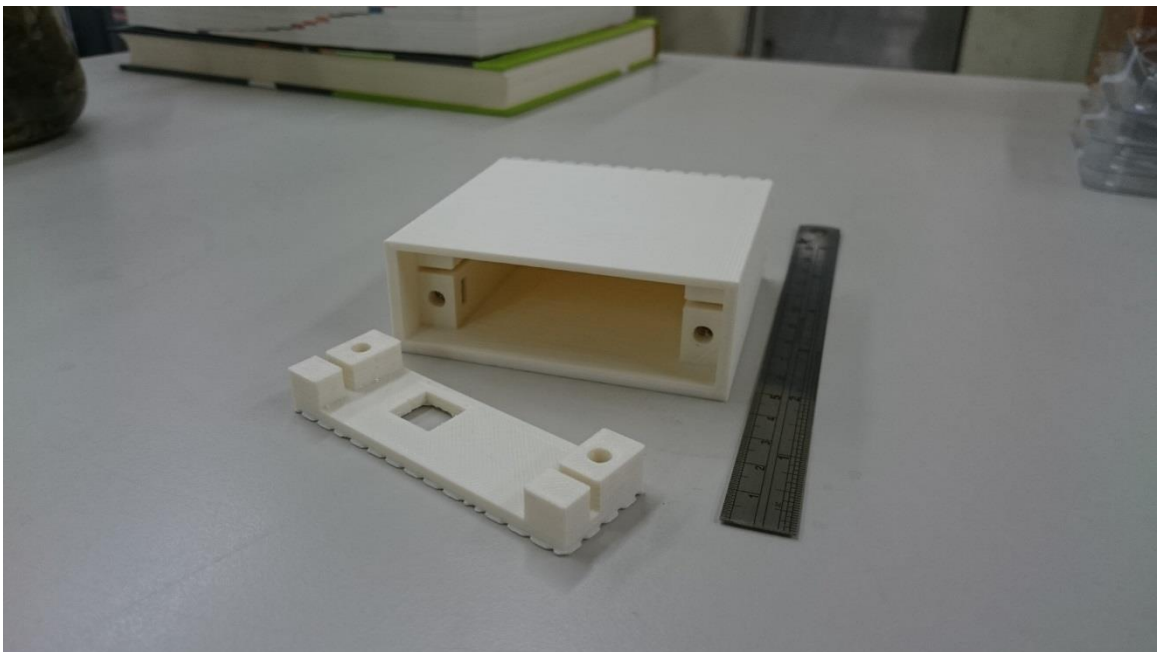


圖 4.23 接收端外殼



圖 4.24 組合後之接收端僅露出 USB 端口

(2)慣性量測單元

MPU-6050 已經廣泛使用並有許多市售之模組可直接使用(圖 4.25)，由於 MPU-6050 之 IC 封裝較不易使用傳統焊槍與熱風槍進行焊接，因此本研究直接使用市售之模組以節省開發成本。IMU 亦可提供傾斜角度資訊，圖 4.26 顯示 MPU-6050 所測得之 X 向與 Y 向線性加速度與同向傾斜角度變化之關係，結果相當線性且高重複性，惜雜訊較大，浮動值達 0.5 度是其缺點。圖 4.27 則展示所使用之傾斜角度標定系統。



圖 4.25 MPU-6050 模組(Arduino)

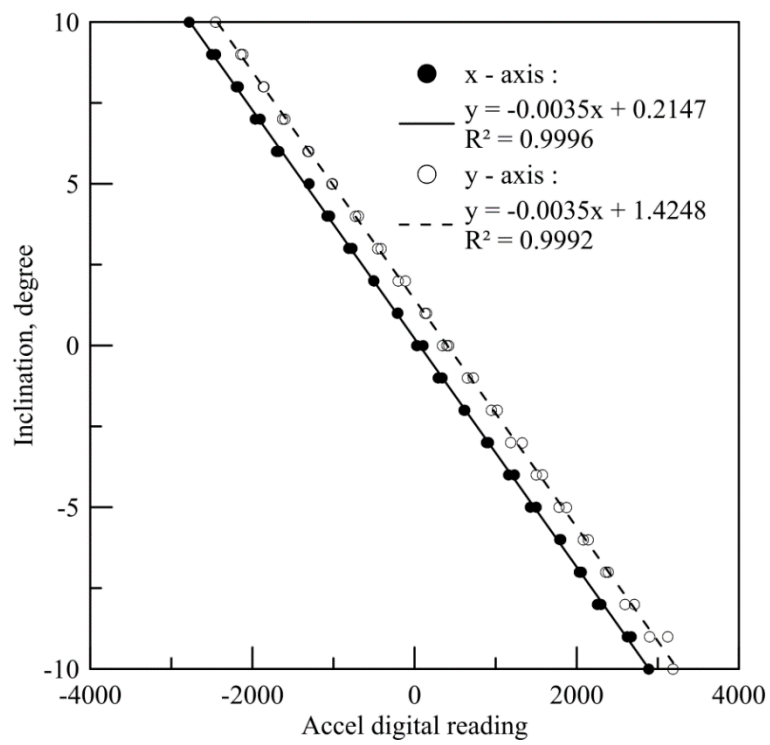


圖 4.26 IMU 與傾斜角度之關係圖

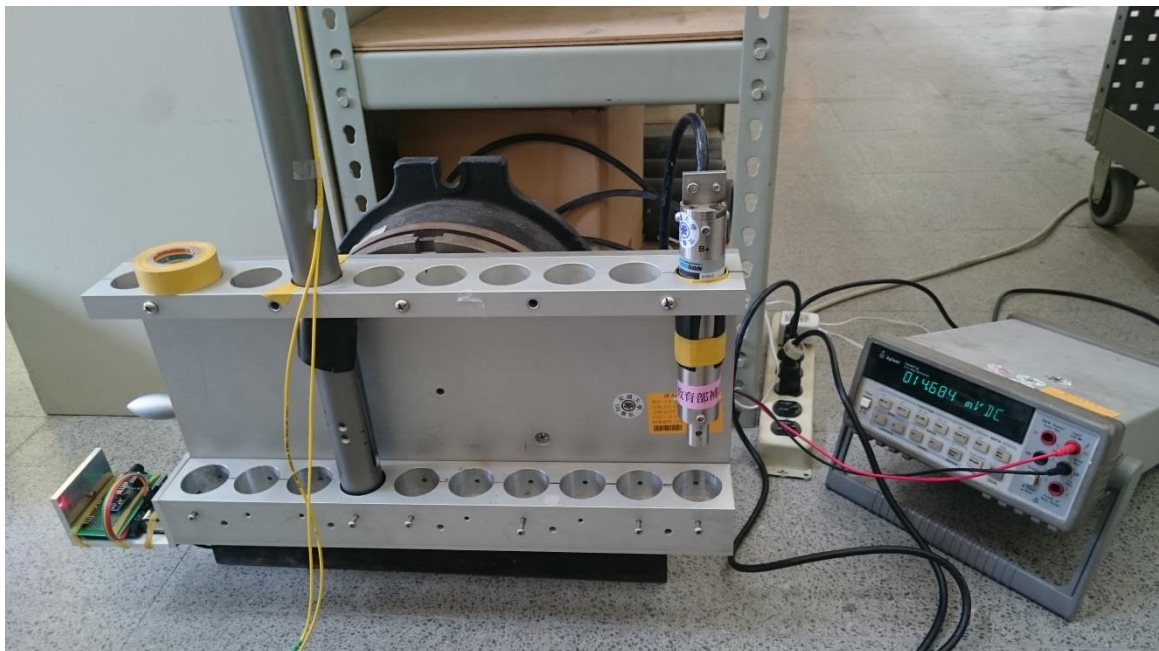


圖 4.27 傾斜角度標定系統

(3) 傾斜儀

根據 Murata Electronics 建議之電路圖(圖 4.28)製作一 SCA100T 測試板(圖 4.29)，並將 SCA100T 分別透過 Arduino Uno 以及精密電錶與電源供應器進行比例類比電壓輸出標定(如圖 4.30)，並以一振弦式傾斜儀作為參考基準，Arduino 標定結果展示如圖 4.31，電錶標定結果展示如圖 4.32，圖 4.33 則展示電錶量得電壓經過 Murata Electronics 建議之電壓-角度關係轉換後之角度與振弦式傾斜儀量測角度間之關係，結果顯示 SCA100T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。但其售價高昂，單價即超過土層監測模組其他元件之總和，故建議將來針對重要監測點之土層監測模組選擇性加裝。

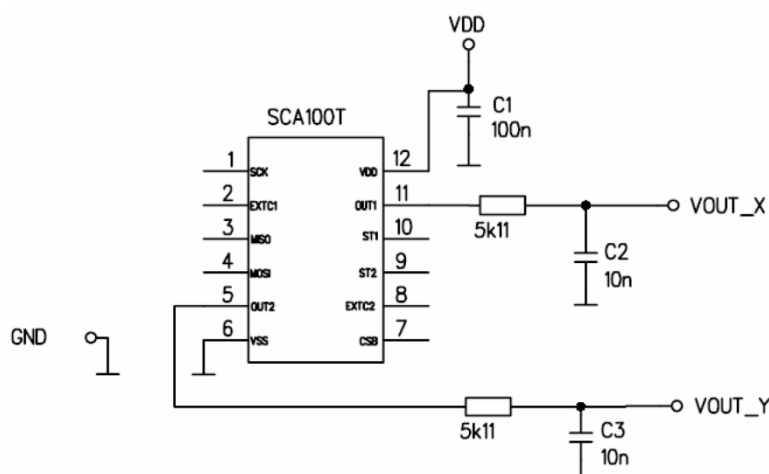


圖 4.28 傾斜儀電路圖 (Murata)

(4) 土壤介電常數量測(ϵ_r , Relative permittivity)量測

本研究實測後發現使用 FDC1004 EVM 即可辨識土壤含水量，故直接採用 FDC1004 EVM 作為含水量計核心。經過多種測試結果顯示 FDC1004 EVM 與土壤間之隔層約 0.5mm 時所測得之電容值最最具代表性，圖 4.34 展示含水量計測得之電容值與土壤體積飽和度之關係圖，測試之土壤為麥寮砂，Wobschall & Lakshmanan (2005) 研究指出土壤介電常數與其體積飽和度理論應呈二次曲線之關係，與圖 4.34 結果相似。

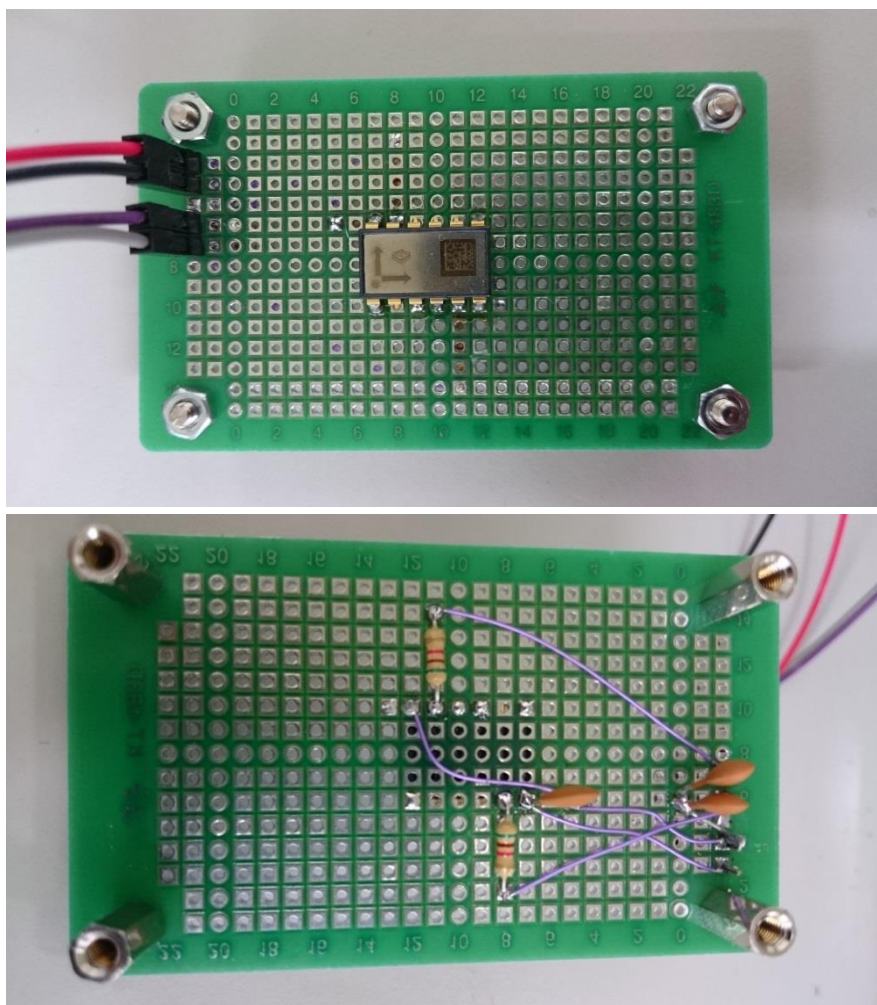


圖 4.29 傾斜儀測試板



圖 4.30 傾斜儀標定照片

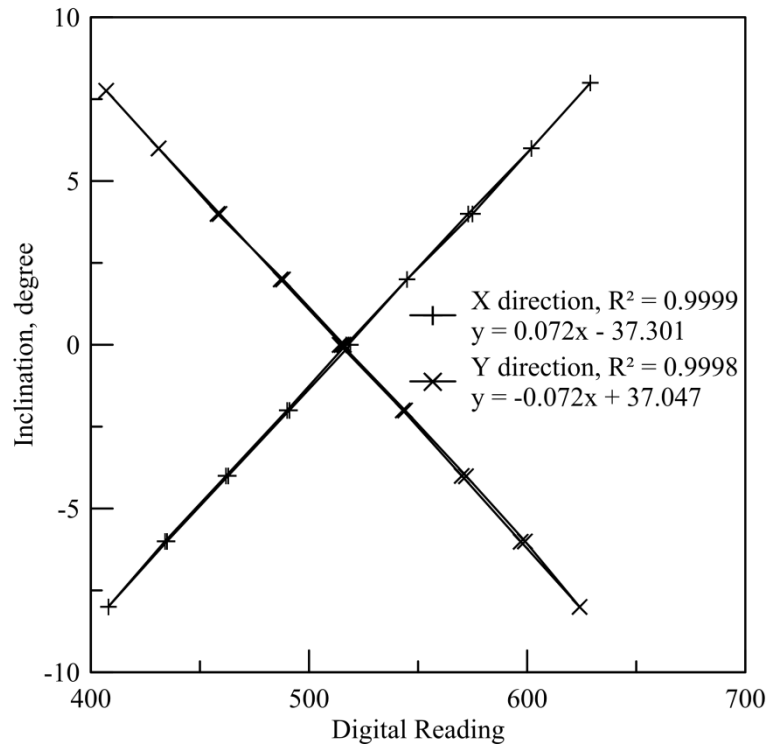


圖 4.31 傾斜儀透過 Arduino Uno 標定結果

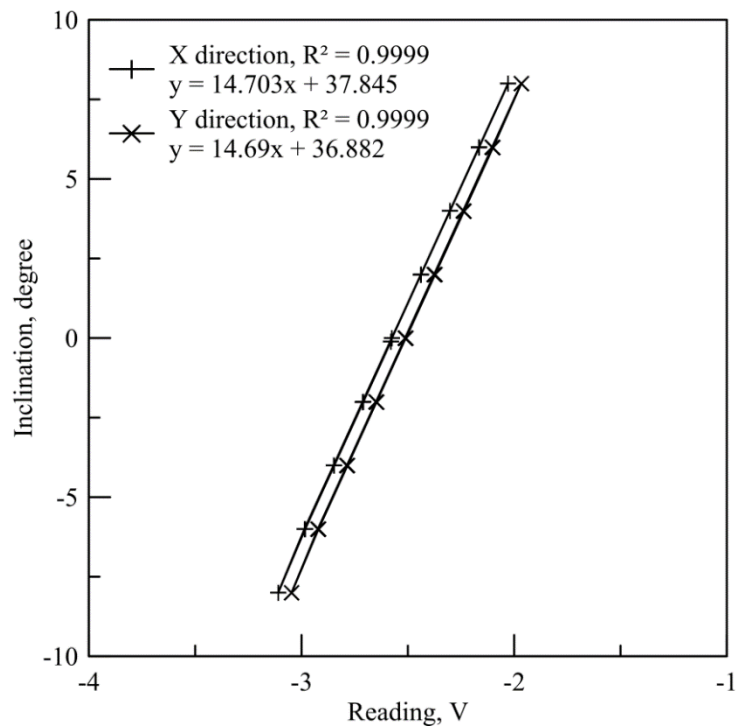


圖 4.32 傾斜儀透過電錶標定結果

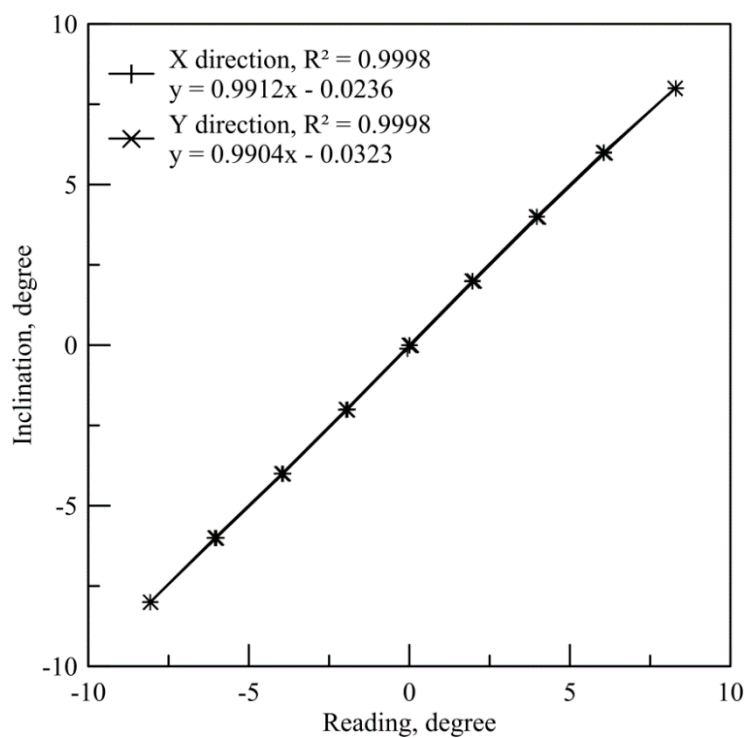


圖 4.33 傾斜儀電壓轉換等效角度與參考角度關係圖

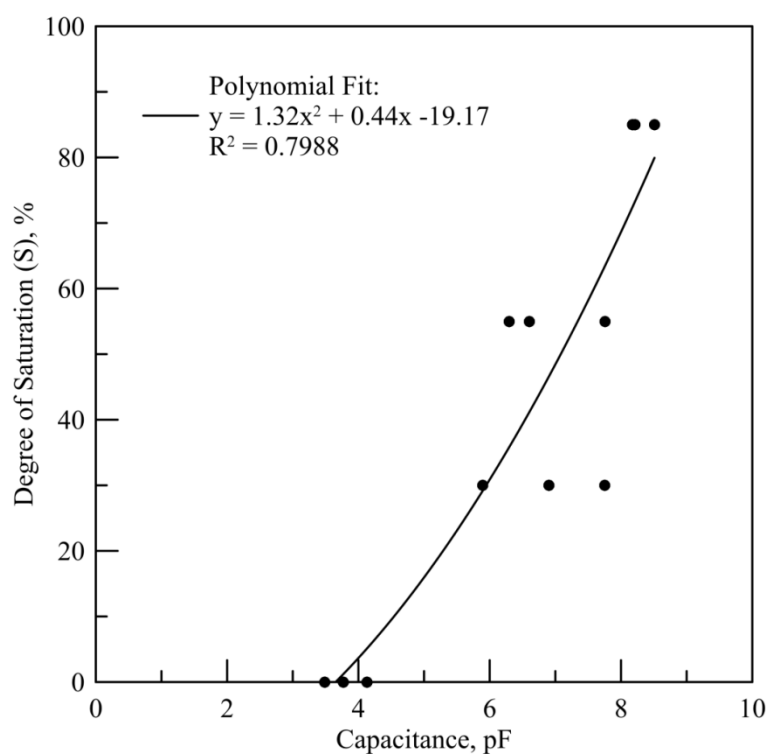


圖 4.34 測得電容值與土壤體積飽和度關係圖

(5)圖形化使用者介面(GUI, Graphical user interface)

本研究 GUI 採用 Microsoft Visual Studio 進行編寫(圖 4.13)，並以 C++ 語言作為 GUI 開發語言。完成之 GUI 展示如圖 4.35，GUI 可控制接收端 Arduino Uno、接收無線模組所發射之訊號，並將接受到之資料進行編譯，換算成有效數據後顯示於 GUI 內，有效數據包括土壤體積飽和度變化、兩向度之傾斜角變化，並具備傾斜角度歸零與所有資料儲存功能。

GUI 之操作方法：

1. 自 ” Serial Port” 下拉選單選取並設定序列埠 (Serial port)。
2. 點擊 ” Start” 按鈕即可開始量測。
3. 量測結束後點擊 ” Stop” 按鈕即停止量測，但注意此時資料尚未完成儲存。
4. 點擊 ” Save” 按鈕即可將資料全數儲存至電腦 D:\Arduion file\Arduino.txt 中。或點擊 ” Start” 按鈕以繼續進行量測。

儲存後之檔案格式為.txt 文字檔(圖 4.36)，儲存時各資料皆以逗點分隔，使用 Excel 內建之 ” 資料剖析” 功能即可將各項資料分離，便於數據之分析與應用，資料儲存順序為：

系統日期(mon, day, year), 系統時間(hour, min, sec), 土壤體積飽和度(%), 電容值(pF), X 向傾斜角度($^{\circ}$), Y 向傾斜角度($^{\circ}$), X 向加速度數值, Y 向加速度數值, Z 向加速度數值, X 向角速度數值, Y 向角速度數值, Z 向角速度數值, 歸零 X 向加速度準位數值, 歸零 Y 向加速度準位數值歸零按鈕則提供管理單位可於完成安裝後使用，點擊該按鈕將儲存當下所測得之 X、Y 向加速度數值作為參考準位，X、Y 向傾斜角度計算將以該準位作為零點，但不影響儲存之三軸向加速度與角速度數值，僅影響儲存之 X、Y 向之傾斜角度，且歸零時之參考準位將作為末二項數值一併儲存入文字檔中。

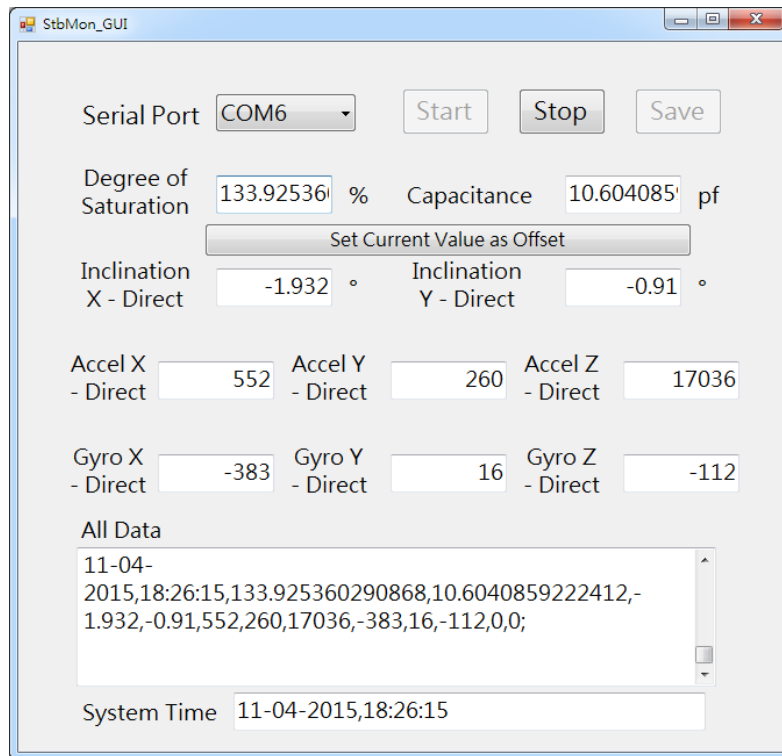


圖 4.35 圖形化使用者操作介面 GUI

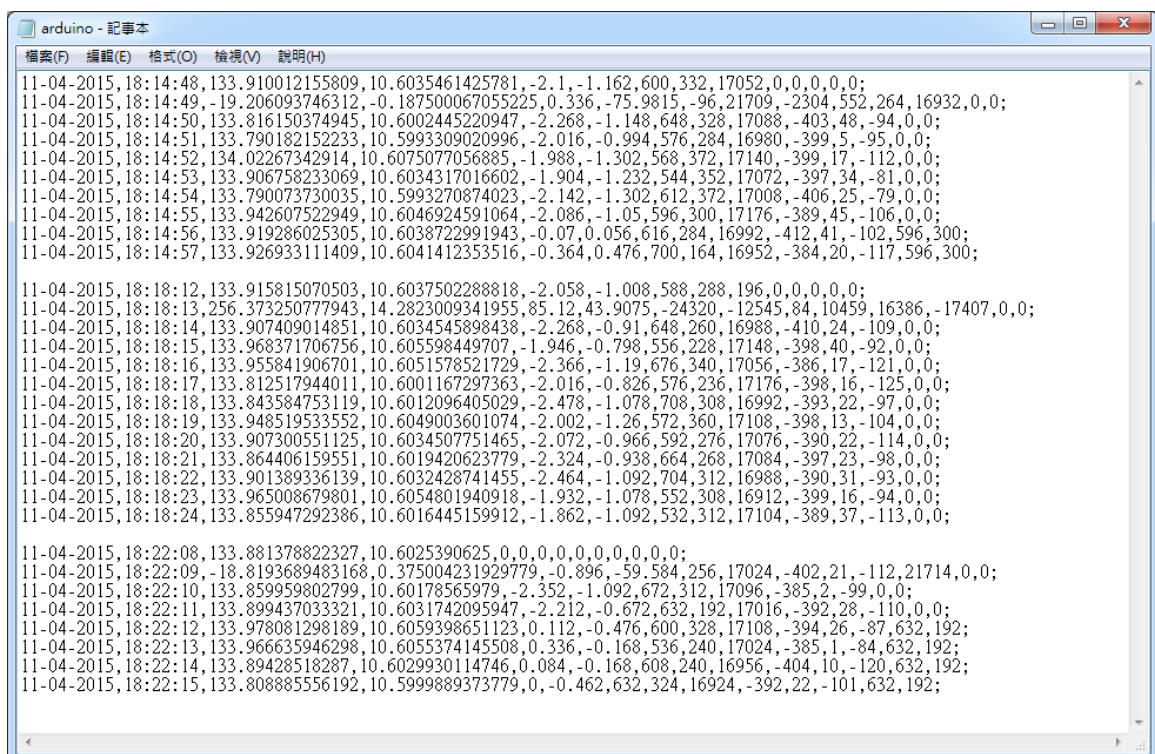


圖 4.36 儲存後之文字檔

(6)建議安裝程序

由於土層監測模組之含水量計有防水之需求，採取貫入方式安裝有可能破壞其防水功能，因此建議採預鑽孔埋設後回填安裝方式，安裝流程如下：

1. 使用手鑽(Hand auger)於安裝地點鑽掘一深度 0.5m 之鑽孔。
2. 將土層監測模組置入鑽孔中，並向下貫入 80mm。
3. 含水量計上下 50mm 區間以粗砂回填。
4. 其餘深度以皂土漿回填至地表。

4.4 監測模組小結

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，如此可大幅降低成本，增加監測範圍。本研究所研發之土層無線監測模組備有下列元件：

1. 微控制器 Arduino UNO
2. 慣性量測單元 MPU-6050
3. 傾斜儀 SCA100T
4. 電容/數位轉換器 FDC1004 EVM
5. 無線傳輸模組 nRF24L01+

藉由上述元件量測資料可推估淺層土壤之體積飽和度以及地層傾斜角度，並藉由無線傳輸模組將資料傳至監測主機，由遠端人員透過本研究開發之圖形化人機介面進行判讀或自動判讀以及時預警，提前進行相關減災行動。

本研究並針對各感測器進行標定，結果顯示各感測器皆符合本研究目的之需求，惟因傾斜儀單價高昂，故建議將來針對重要監測點之土層監測模組選擇性加裝，以滿足低成本大範圍的需求。

第五章 結論與建議

本計畫全期為兩年(104 年-105 年)，第一年為解析法分析架構建立及無線監測模組設計與整合測試，第二年為模型邊坡與選定場址現地測試，結合二年之成果，可訂定場址於破壞不同階段之警戒值，發展客製化公路邊坡降雨崩塌預警系統架構。第一年計畫執行結論摘要如下：

5.1 104 年度計畫執行結論

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

4. 模組整合測試與資料架構建立：本計畫包含解析法預測模式建立與監測模組研發，以達成依時預警監測模組之功能，整合此二部份成果，提出整合之預警系統架構，本年度已完成軟硬體整合之架構，後續可進行場址測試修正。
5. 選定淺層破壞研究測試場址一處：考量參數取得及監測模組佈設便利性，參考經濟部地調所研究成果，選定高雄甲仙區寶隆崩塌地做為測試場址，並由地調所取得相關數位資料，完成傳統極限平衡及水力力學耦合數值分析。

本年度計畫執行符合原規劃與計畫要求，包括解析法分析模式建立與搭配之表層無線監測模組研發，相關成果可應用於後續場址測試與修正。

5.2 建議

針對本年度計畫執行提出下列建議：

1. 本年度雖選定研究場址作為解析法測試，但該場址目前為穩定狀態，為便於解析法分析破壞測試及下一年度安裝場址選定與佈設規劃，相關場址篩選與現地資料收集希與運輸研究所同仁商討決定，可能之候選場址為烏來地區道路崩塌整修工程，篩選條件為陡坡、一定厚度表土層與具細顆粒土壤。
2. 由於入滲量測具一定難度及不確定性，因此後續將考慮以現有感測模組，發展現地單點水文參數測定方法。

參考文獻

1. 林哲毅，1999，「土壤電阻率與含水特性關係之探討」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
2. 李維峰等人，2003，「台灣地區道路邊坡崩塌發生機制及防治效益評估方法研究與應用（二）」，MOTC。
3. 吳從龍，2009，「山區道路邊坡崩塌潛勢之研究」，逢甲大學交通工程與管理所，碩士論文。
4. 財團法人中興工程顧問社，2009，「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置(第 2 期 98 年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(2/3)」，經濟部中央地質調查所研究報告，成果報告。
5. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙，2002，「先進邊坡監測系統之研發」，中國土木水利學會會刊，第二十九卷第二期，第 65-78 頁。
6. 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅，2009，「莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例」，地工技術，第 122 期（2009 年 12 月）第 133-142 頁。
7. 廖文選，2010，「以 DSP 實現 GPS 與 IMU 感測器整合系統」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文。
8. 張達德、蔡育秀、李宏徹、楊凱鈞，2013，「無線感測網路應用於邊坡穩定即時監測系統的研究」，第十五屆大地工程學術研討會。
9. Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils." *Géotechnique*, 40(3), pp.405-430.
10. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp.

544-552.

11. Bishop, W. (1959). "The principle of effective stress.", Lecture delivered in Oslo, Norway, 1955; published in *Technisk Ukeblad*, 106(39), pp. 859-863.
12. Cascini, L., Cuomo, S., Pastor M, and Giuseppe Sorbino, G. (2010). "Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp. 85-98.
13. Chong, C.Y. Kumar, S.P. (2003). "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. " *Proc. IEEE*, August.
14. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 130, pp. 362–372.
15. Eberhardt, E. (2008). "Twenty-ninth Canadian Geotechnical Colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms." *Canadian Geotechnical Journal*, 45, pp. 484–510.
16. Edlefsen, N.E. and Anderson, A. B. C. (1943) "Thermodynamics of Soil Moisture." *Hilgardia*, 15, pp. 31-298.
17. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977). "Stress state variables for unsaturated soils." *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(5), pp.447-466.
18. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), pp.313-321.
19. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H (1987). "Soil mechanics principles for highway engineering in arid regions." *Transportation Research Record*, 1137, pp.1-11.

Record, 1137, pp.1-11.

20. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). “ Soil mechanics for unsaturated soils. ” New York, Wiley.
21. Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D. and Barbour, S. L. (1995). “The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve.” *Canadian Geotechnical Journal*, 32(3), pp.440-448.
22. Gen, K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988). “Determination of shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test.” *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), pp.500-510.
23. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y. (2012). “Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides Through Pore Pressure Profile Measurements.” *Soils and Foundations*, 52(4), pp. 737-747.
24. Krahn, J. and Fredlund, D. G. (1972). “On total matric and osmotic suction.” *Journal of Soil Science*, 114(5), pp.339-348.
25. Kurahashi, T., Yajima, Y., & Sasaki, Y. (2008). “Landslide disasters and hazard maps along national highways in Japan. ”, In: *The 2nd East Asia Landslides Symposium*, Seoul, Korea, May 22–23, 2008.
26. Muraleetharan, K. K. and Granger, K. K. (1999). “The use of miniature pore pressure transducers in measuring matric suction in unsaturated soils.” *Geotechnical Testing Journal*, 22(3), pp.226-234
27. Oloo, S. Y. and Fredlund, D. G. (1996). “A method for determination of b for statically compacted soils.” *Canadian Geotechnical Journal*, 33, pp.272-280
28. Richards, B. G. (1965) “Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors.”, in *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, A Symp. in Print.* Australia: Butterworths, pp. 39-46.

29. Ridley, A. M. and Burland, J. B. (1995). "Measurement of suction in materials which swell." *Applied Mechanics Reviews*, 48(9), pp.727-732
30. Terzaghi, K. (1936). "The shear resistance of saturated soils.", *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, 1, pp.54-56
31. Texas Instruments (2015). "FDC1004 4-Channel Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensing Solutions." Literature Number: SNOSCY5B
32. Texas Instruments (2015). "TI Designs: Capacitive-Based Liquid Level Sensing Sensor Reference Design." Literature Number: TIDU736A
33. Texas Instruments (2014). "FDC1004EVM User Guide." Literature Number: SNAU163B
34. Texas Instruments (2015). "TI Designs: Capacitive-Based Liquid Level Sensing Sensor Reference Design." Literature Number: TIDU736A
35. Uchimura T, Towhata I, Wang L and Seko I. (2008). "Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. ", In: *Proc. of the First World Landslide Forum*, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, pp. 611–614.
36. Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes.", In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33.
37. van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Journal of Soil Science Society of America*, 44, pp. 892–898.
38. Wang, D. (2014). "FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications." Texas Instruments, Literature Number: NOA927

39. Wang, D. (2015). "Capacitive Sensing: Out-of-Phase Liquid Level Technique." Texas Instruments, Literature Number: SNOA925
40. Watson, K. K. (1967). "A recording field tensiometer with rapid response characteristics." *Journal of Hydrology*, 5, pp.33-39
41. Wheeler, S. J. and Sivakumar, V. (1995). "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil." *Géotechnique*, 45(1), pp.35-53

附錄一
期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (1/2)

計畫編號：MOTC-IOT-104-H1DB001b

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
臺灣海洋大學河海系 林三賢委員		
1. 報告中第 1-5 頁之 20~21 行之敘述與本計畫完全不相干。	此為招標文件內容，計劃完成須完成填報	同意辦理
2. 第 2-2 頁之圖 2.1 有關水力力學耦合分析與無線監測模組應有相互的關連性，否則與 2-1 頁之說明不符。	所監測之物理量即為分析之預測值，彼此具對應關係。	同意辦理
3. 圖 2.2 之圖說明應更正為“從有效應力……”。	已修正	同意辦理
4. 第 2-9 頁應說明本計畫採無限長邊坡分析之適用性。若採無限長邊坡，則與滲透就無關。	模式適用性將補充說明，模式明示其與入滲引致之基質吸力及滲流相關。	同意辦理
5. 第三章之 3.1 節前敘述“公路邊坡依其滑動深度可分為淺層與深層滑動”於第二章已敘述。	已修正	同意辦理
6. 第 3-19 頁之圖 3.17，橫座標文字有誤，Partical diameter (mm)應修改為 Particle diameter (mm)。	已修正	同意辦理
7. 降雨所影響之 Wetting Front 影響基質吸力，因為影響 Volumetric Water Content，則影響 Pore Water Pressure Profile 而致影響剪力強度。此 Wetting Front 之影響如何模擬？應說明。	針對無限邊坡相關模擬說明於 3.2~3.2 節，2D 分析將於期末報告說明。	同意辦理
國立中興大學水保系 游繁結委員		
1. 報告中第 3-19 頁，表 3.2 中試驗土壤之 PI 為 0%，LL 為 22%，但飽和滲透係數卻為 1.4×10^{-8} m/s，似乎兩種參數不太一致？	原文為單位誤植，已修正。	同意辦理
2. 報告中第 3-20 頁第 9 行，文中有	已移除文字。	同意辦理

“如圖 4-2”，但該圖與示意不符。		
3. 土壤含水量監測之敏銳度與精度能否立即反應於傾斜儀？相對於傾斜儀之變化是否可反應土體破壞之徵兆，宜有探討。	含水量量測其對邊坡穩定之影響會先發生，地表變位在後且邊坡已發生會即將發生，此關聯於二維水力力學耦合數值分析會說明之。	同意辦理
4. 無線傳輸之效率為能否立即掌握災變之重要因素，以所提之各種傳輸元件，似仍難克服暴雨狀態下之傳輸功能，能否滿足防災需求，似宜有客觀之評析。	因感測模組為於同一場址會有多個佈設，且彼此可互相連結傳輸，此可縮短傳輸距離，長程傳輸仍需以有線網路連結。 同上	同意辦理
5. 本研究之監測模組，如何布設，方能掌握有效資訊？宜有一布設之基準或 SOP 之說明。	相關佈設 SOP 於二維分析完成後補充說明之，以考慮反應具代表性、極端點位及安裝便利性一併考量。 已於第四章新增建議安裝程序	同意辦理
中華大學土木系 吳淵洵委員		
1. 報告中第 1-2 頁及第 1-4 頁中，提到本研究以淺層、非飽和土壤邊坡(深度 2-3m)之崩塌為研究對象，作為研究主題“公路邊坡崩塌”中之一部份，委託單位應確任並同意之。	已確認，本期為以淺層邊坡為研究邊坡類型。	同意辦理
2. 內文參考文獻多處未列於文後考文獻清單之中，例如 P1-2 頁之楊樹榮(2011)，P2-4 吳從龍(2009)等	已修正。	同意辦理
3. 報告中第 1-5 頁國科會應修正為科技部。	已修正。	同意辦理
4. 請說明如何將水力力學耦合邊坡穩定分析與土層監測結合，並發展為一有效的依時預警系統。	研究架構與方法已簡述於 2.1, 3-2~3.3 節，細節將於期末補充說明。	同意辦理
5. 報告中第 3-19 頁試驗之代表性(與現地案例之關聯性)是否適當？	此為模式驗證之用，研究場址性質將以現地材料性質進行分析，以達客製化之目的。	同意辦理
6. 第 3-14 頁中第 11 行之文字有誤，單剪(simple sjear)應更正為(Simple Shear)。	已修正	同意辦理
7. 第 1-5 頁，選定淺層研究測試場址一處為本研究第一年確定工作內容，惟 P5-1 頁似乎不確定，請確認	將於本年度確認，相關文字將修正。	同意辦理

之。		
健行科技大學土木系 許書王委員		
1. 報告中第 2-4 頁之第 2.2.1 小節，其文字不須反黑。	已修正	同意辦理
2. 第 2-6 頁第 4 行“分部”，應更正為“分布”。	已修正	同意辦理
3. 第 3-20 頁第 9 行“如圖 4-2”內文中找不到，請修正。	已修正	同意辦理
4. 第 4-15 頁倒數第 1 行，文中“即時”應修正為“即時”。	已修正	同意辦理
5. 第 5-1 頁倒數第 4 及第 5 行，“港研中心”是否妥適請再斟酌(簽約單位)。	已修正為運輸研究所	同意辦理
6. 第 5-1 頁中，完成之項目與 P1-7 頁甘特圖及 P1-5 頁應統一用詞。	已修正	同意辦理
7. 圖 2.2 之“從效應力”應更正為“從有效應力”。	已修正	同意辦理
8. 實務上崩塌不太可能均為單純原因造成，就本研究是否有週延考量以利現場應用。	本研究所研發系統僅針對特定邊坡機制之破壞類型，無意涵蓋所有類型，相關限制條件將於期末補充條列。	同意辦理
9. 預警值之決定會因場址不同而有不同的影響因子，實際應用時如何規畫考量？是否另也有行動值的考量？	所研發為場址”客製化”預警系統，因此已將場址特性列入考量，且此為解析法之特點，相關預警應用應依使用單位權責進行制定，本計畫僅進行技術研發。	同意辦理
10. 針對單一場址之測試成果，如何確認可應用在其它場址？	不同場址需進行解析法分析，以達”客製化”需求，研究會建立先關分析與監測佈置流程。	同意辦理
11. 場址的選定是否應避免有其它足以影響本研究之因子？	詳見 8	同意辦理
12. 設備的抗災能力夠強否？災中可存活否？	因研發硬體單價及佈設費用較現有技術便宜簡易，且資料可即時傳輸，因此災害中存活與否並非必要。 同上	同意辦理
13. 淺層滑動各因子應考量及說明。	已補充。	同意辦理
國立成功大學土木系 陳景文委員		
1. 整體計畫之目標，也是第一年的發	文獻僅有入滲及非飽和強度	同意辦理

展目標，目標中將完成「發展水力力學耦合邊坡滑動分析架構」，唯Hydraulics 與 Slope Stability Coupling 在目前已有不少既有model，本計畫擬將發展之新模式有何特色，比既存模式有多少改進，請說明。	個別分析成果，所發展之模式具有明確物理意義且具耦合特性，目前並無此類模式。	
2. 第二年目標將「修正淺層崩塌數值分析及不同階段之警戒值，發展客製化公路邊坡降雨崩塌預警系統架構」，既是修正，請說明既有警戒值有何缺點或不足之處？	現有預警系統限制已說明於1.1節，本架構特點於1.2節說明。	同意辦理
運研所港研中心 謝明志委員		
1. 本研究探討不飽和土壤邊坡的破壞理論，及研發無線感測網路監測模組，研究團隊的構思新穎，且目前在軟應體上已有初步成果，發展上值得肯定與期待。	感謝委員支持。	同意辦理
2. 在力學分析上目前採用簡易及數值兩種方法，數值主要引用FLAC的兩相流模組，依此規劃，在監測分析的伺服器上，是否需採購安裝FLAC，請說明。	因場址客製化分析於系統佈設前須先完成，因此無須進行即時運算與分析。	同意辦理
3. 文中所提非飽和土壤剪力強度模式，相關參數如何求得，如 u_w 可用團隊研發的監測儀器量得，但 u_a 是否可以量取，或採用常數？另模式中有兩個摩擦角，基質吸力的摩擦角如何取得？請說明。	氣壓可假設為定值，基質吸力摩擦角一般為土壤有效摩擦角之 $1/2 \sim 2/3$ 。 同上，補充說明儀器間接量得 $(u_a - u_w)$ 而非 u_w	同意辦理
4. 因所研發的監測桿長度有限，若滑動面發生在埋設的監測桿下方，系統有否處置方法？或需界定本案所能監測的有效深度範圍，以免遭誤用。	所研發為表層監測模組，破壞面為推估值，因此無須貫入破壞深度。	同意辦理
運研所港研中心 林雅雯委員		
1. 水力力學耦合數值分析與模型試驗模擬採用之土壤條件為「典型」細顆粒土壤與通過20號篩之細顆粒土壤，結果將用於現地監測之警戒值訂定，其土壤性質與現地土壤不同，模式之適用性建議說明。	所附實驗結果為模式驗證用，場址分析需用現地參數。	同意辦理

2. 無線傳輸模組採用 RF，傳輸距離為 650 公尺，採用現場收數據嗎？請說明資料儲存及傳送機制。	無線模組之訊號需傳至當地之有線網路基地台，以有線網路傳回監控中心。 本研究採用 nRF24L01+作為 RF 傳輸模組，無遮蔽情況下傳輸距離可達 100m 以上，降雨情況則視降雨強度而定。資料儲存與傳輸機制已新增於第四章。	同意辦理
3. 儀器、設備單價、傳輸費用、場址適用性及日後如何維護及維護費用等建議說明，以利日後不同場址監測之推廣。	因所有系統為自主研發，相關資訊於系統原型完成後可提供，但經費將遠較現有系統具吸引力。 一組(包含發射端與接收端)土層無線監測模組元件成本約在\$4000 NTD(不含傾斜儀)，傾斜儀單價約\$2800 NTD。設備材料成本(機櫃與工業電腦)約\$80000，以上皆不含施工、搬運與人事費用，其餘費用則須依安裝場址與監測時間而定	同意辦理
4. 建議說明預警時間如何決定?是否有與時降雨量、累積降雨量結合，討論其相關性。	預警時間為場址解析法分析決定，因維直接量測土中含水量變化，因此無須與降雨資訊相關。	同意辦理
5. 現地儀器埋設深度如何取決，建議說明。	所研發為表層監測模組，因無須達到破壞深度，因此為表土 1.0 m 左右。	同意辦理

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (1/2)

計畫編號：MOTC-IOT-104-H1DB001b

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
臺灣海洋大學河海系 林三賢委員		
1. 報告撰寫錯別字及誤植處太多。	已大幅修正	同意辦理
2. 室內試驗、數值分析與現地監測之間的相關性，應於報告內有清楚的連結。	室內試驗為驗證無限邊坡模式，數值分析與監測關聯已增列於 3.5 節	同意辦理
3. 結論能否就今年度執行結果與成效上做總結另應就與計畫原要求之工作相目的預期成就有所說明。	已增列相關文字於第五章，成果符合合約要求。	同意辦理
4. 報告內所提預警機制，是否已有初步想法？	預警機制說明於 3.5 節。	同意辦理
5. 報告中 1-5 頁倒數第 6 行之第(3)項與本計畫不相干。	已修正(3)社會影響(民生社會發展)- W.提升公共服務：研究成果提供交通部、公路總局等公路管理單位邊坡防災之參考。	同意辦理
6. 報告中 2-2 頁圖 2.1 左右兩項工作之關連性應連上，i.e.監測數據應能回饋左側之分析。另極限平衡法無法得知滑動位移歷時，則極限平衡法與數值分析法應有確認兩者結果為一致之機制。	相關說明增列於 3.5 節，無限邊坡與二維分析適用於不同複雜程度之預警機制。	同意辦理
7. 報告中 2-4 頁，期中報告審查時，吳淵洵委員提到吳從龍(2009)未列入參考文獻中，本次仍未修正。	已修正	同意辦理
8. 報告中 2-4 頁，第 15-16 行破壞面深度為 0.5~3m，為何覆土壓力只有 5-25kPa 之間。	此數值摘自文獻，實際數值需依場址調整。	同意辦理
9. 公式(2.1)與圖 2.2 對照不起來，一為 3D 之公式，一為 2D 之破壞面。	公式(2.1)為 3 維應力計算，假設為平面應變即可用於	同意辦理

	2D 分析。	
10. 報告中 3-10 頁倒數第 4 行後端之敘述應修正。	已修正。	同意辦理
11. 報告中 3-23 頁實驗之壓密應力是否應與 2-4 頁之覆土壓力對應，或與實際監測位置之壓力相符？最後一行之圖 3 應修正。	第三章為模式建構與元素試驗測試，所用為模型試驗之數值，與第二章文獻無關，本研究並無使用圖 2.2 之方法分析。	同意辦理
12. 報告中 3-24 頁第 4 行表 3.3 應是表 3.4。	已修正	同意辦理
13. 報告中 3-31 頁至 3-34 頁應重寫，圖都誤植了。	已修正	同意辦理
14. 報告中 3-34 頁倒數 3 行之圖 33.30 應修正。	已修正	同意辦理
15. 寶隆崩塌地之破壞位於下邊坡，則無限長邊坡假設是否適用？	因寶隆崩塌地不適用無限邊坡分析，因此以 2 維數值分析測試。	同意辦理
國立中興大學水保系 游繁結委員		
1.報告中第 3-25 頁式 3.20)之常數與係數取太多位數，是否予以概約化。	已簡化為工程常用之格式。	同意辦理
2.報告中第 3-25 頁圖 3.20 之地下水面 4m 是指鉛直之深度或指垂直地面之深度？	此為鉛直之深度，已增列說明。	同意辦理
3.報告中第 3-28 頁入滲開始後 25000 秒，試體開始滑動是指水平滑動或指一般邊坡破壞之斜向滑動。	因系統以垂直與水平力模擬斜坡上滑動面法線與切線作用力，因此為斜向滑動。	同意辦理
4.飽和滲透係數之率定結果與理論值可差 12 倍以上則在實地之值如何選用，又本試驗率定值與土體之實測值相差如何。	該段文字說明已修正，誤差原因為忽略考慮入滲至 1.5m 深度所需時間。	同意辦理
中華大學土木系 吳淵洵委員		
1.報告中第 2-5 頁圖 2.2 之 a 之定義？使用符號甚多，宜建立一符號表以方便閱讀。	應為 q，相關符號已修正一致並於相關文字說明，以便於閱讀。	同意辦理
2.報告中第 3-11 頁圖 3.9 之參考文獻？第 3-32 圖 3-28 彩色列印(與文字敘述不符)？	圖 3.9(a)為本研究以 1D 有限差分之滲流分析結果，圖 3.9(b)為 Collins and Znidarcic (2004)以 2D 數值程式 SEEP/W 之結果。	同意辦理
3.報告中第 3-42 之表 3.7 數值有誤。第 3-19 頁之表 3.2 滲透系數之單位？	已修正	同意辦理

4.報告中第 3-45 頁敘述宜修正，簡報成果應包含於報告之中。	已將簡報結果整合於 3-40~3-47 頁。	同意辦理
5.報告中第 4-32 頁宜繪製安裝施工圖，並說明相關使用儀器之建議規格。	初期建議安裝步驟已說明於 P4-30，因尚未進行現地測試，後續測試後將可行之安裝程序繪圖說明。	同意辦理
6.報告中第 4-33 頁宜提供監測儀器之概略成本單價分析。	監測儀器單價在 8000 台幣以下，因價格與數量有關，且本年度計畫要求為原型發展測試，本年度不宜列單價分析。	同意辦理
7.第三章與第四章缺乏關聯性，本報告宜針對現場監測資料建立代表性分析模式，並概略說明從監測系統安裝、資料取得、彙整、歸納至完成邊坡穩定性分析、安全評估等一系列之依時性邊坡預警系統之操作流程，提供使用者未來之參考。	分析與監測關聯性增列於 3.5 節，完整預警系統建構非為本年度工作範圍。	同意辦理
8.本報告參考文獻格式應統一，此外，引用文獻必須與參考文獻清單對應，例如第 2-10 頁黃安斌(2002)，第 2-4 頁 Kurahashi(2008)，吳從龍(2009)等均未列於參考文獻之中。	已修正	同意辦理
9.報告中第 3-16 頁圖 3.12 宜繪製儀器組裝設計圖，並標示使用之儀器及試體尺寸。	相關尺寸已於文字說明，此系統研發非為本計畫內容，不宜詳列。	同意辦理
10.報告中第 3-31~3-32 圖形重複。	此非重複，其右側第二 y 軸物理量不同。	同意辦理
健行科技大學土木系 許書王委員		
1. 如圖 3-26 為黑白印製，在 P3-29 倒數第 4、5 行所提藍色實線與藍色虛線實在無法閱悉，建議改善，如採符號等等。	已修正	同意辦理
2. 報告中 P3-30 列圖 3.26，P3-31 列圖 3.28，中間無圖 3.27，請改善。	已修正	同意辦理
3. 報告中 P3.31 列 3 張圖均為圖 3.28，該頁第 2 張圖與說明分頁，以及一些奇怪的括弧，文書品質有加強必要。	已修正	同意辦理
4. 報告中 P1-5 本年工作項目包括選定場址一處，P5-2 結論 5 選定甲	(1)本年度為建立分析架構，並以選定場址測試，結	同意辦理

仙...，似已據此完成場址地層材料力學試驗等，惟 5.2 建議 1. 又云該場只目前為穩定狀態.....相關廠址篩選希與所內同仁商討決定，請說明 (1) 既為穩定狀態為何要選定？既已選定又為何要與所內同仁商討決定？ (2) 若改場址本年計畫工作項目即有部分未完成，如工作項目 1. (3) 若未改場址又可能影響後續研究...如 5.2 建議. 1. 所述。	果為場址分析後之結論，與合約內容並不違背，本年度工作項目均已完成。 (2) 進行後續監測與分析測試需有穩定性較低之場址，此為需與業主商討之處，若邊坡不損壞則其測試效應較低，但仍可提供有用之資訊。	
5. 報告中 P4-2 各節使用 (1) 或 1. 太過....，請依序排列較妥。	以依港研所格式修正。	同意辦理
運研所港研中心 謝明志委員		
1. 本研究有理論依據，並依據理論需求籌組元件開發硬體，研究架構完整，且一年期間軟體雛型都已建構起來，工作努力值得肯定。	感謝委員肯定。	同意辦理
2. 目前本案開發的監測桿長度約 0.8m，而文中提及淺層破壞深度約在 0.5m~3m 之間，是否宜加長測桿長度至 3m，以底部的不動點做基礎，如此刊用傾斜推算位移量應較準確。	所發展之監測模組均為淺層監測，結合解析法分析可推估滑動面，此為與現有監測主要之不同及本計畫之特點。	同意辦理
3. 因不同監測場址都需依現地條件客製化各地點的分析模組，將來若要大範圍推廣應用，是否可考慮建構一公用模式，只需輸入各地參數值，即可與硬體配合使用，如此更方便推廣應用。	若有足夠多案例分析結果，應可建立區域性簡易預警模組安裝流程，此為後續目標。	同意辦理
運研所港研中心 林雅雯委員		
1. 簡報提及本計畫適用淺層邊坡滑動、陡坡、細顆粒或凝聚性土壤、試驗室用粉土提到入滲 1.5m 需要 60hr，寶隆崩坍地或一般崩坍地之崩積層，透水系數高，監測在淺層，預警時間足夠嗎？適用的崩坍機制為何？簡報 P.32 孔隙水壓力迅速上升，如何預警？	水力參數可由現地監測模組推估，預警時間及後續資料管理應用非本計畫範圍，計畫主軸為技術研發。	同意辦理
2. 電容/數位轉換器間接求得土壤基質吸力，其關係式為何，有否驗證？	電容感測為推估含水量，由含水量結合 SWCC 可推估基	同意辦理

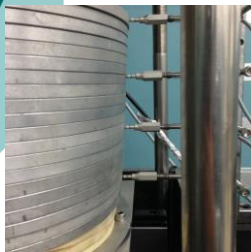
	質吸力，原理詳見 4.1 節，率定結果如圖 4.34 所示	
3. 傾斜儀適用於長期潛變監測，本監測儀器之使用年限為何？	因本設備單價低，考慮電池容量使用年限在 1 年左右。	同意辦理
4. 目前規劃安裝深度為 0.5m，是否未來有考量 2-3m 內 1 孔安裝多組？	因僅作淺層監測，無須 1 孔多組安裝。	同意辦理
5. 展示介面建議中文化，傳輸時間更新時間間距為何？傳輸內容為文字檔？即時傳輸？降雨時應是快速監測，即時傳輸。	更新速率可程式設定，傳輸延遲應在數秒內，相關傳輸資料詳見圖 4.36。	同意辦理
6. 蘇花公路 115.9k 可考量列入場址選擇。	若其地質與幾何條件符合，可列入考慮。	同意辦理
7. 慣性量測單元，傾斜儀與電容/數位轉換器位置不同，後續分析如何整合？	運動量量測在地表，入滲行為在不同深度，量測值與解析法整合詳見 3.5 節	同意辦理
列席單位 交通部公路總局 洪家翔先生		
1. 請說明設備消耗功率，檢修抽換週期，設備續航力等	因目前為發展測試階段，尚無相關數據，但因其單價低，目標為做為可快速佈設及拋棄式設備。	同意辦理
2. 報告中 P2-3「預測地表傾角歷時」，歷時(Time history)為已發生之歷程，和“預測”衝突，請說明。	已修正為曲線。	同意辦理
3. 報告中 P3-10 第十六行錯誤	已修正	同意辦理
4. 報告中 P3-25 回歸會何選用指數回歸？是否有其他方式，如二次曲線。	因相關經驗公式均為指數。	同意辦理
5. 報告中 P3-20 提議加入圖標，如  、  ，以利辨識	已修正	同意辦理
6. 報告中 P3-32 理論破壞時間如何求得，應詳加敘明	此為 3.2.2 節 1D 入滲分析結果。	同意辦理
7. 報告中 P3-32 材料性質 Ksat 為 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，求出之理論破壞時間和試驗相去甚遠，為何可用欲驗證之水利耦合之數值分析反推 Ksat，而再用此 Ksat 檢視公式之破壞時間，因反推 Ksat 之破壞時間為實驗破壞時間，故預測和實際相去不遠並不能代表公式之正確性，請說明。	此段文字已修正，原誤差為忽略入滲至 1.5m 所需時間。詳見 3.3.6 節。	同意辦理
8. 本計畫是否可應用於烏來坪林崩塌。	若其地質與幾何條件符合，可列入考慮。	同意辦理

附錄三

期末報告簡報資料

公路邊坡崩塌監測之無線感測 網路模組研發(1/2)

期末簡報



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

簡報大綱

- 工作構想與對策
 - 計畫背景
 - 研究內容、項目與成果要求
 - 進度規劃
- 研究成果
 - 水力力學耦合邊坡穩定分析
 - 土層監測模組研發
- 結論與建議



計畫背景

- 坡地地質脆弱且颱風與地震發生頻繁
- 降雨引發崩塌之評估方法→經驗法與解析法
- 僅以降雨特徵作為預警指標→過於保守或無法提供反應時間
- 發展依時邊坡預警系統提高預警之準確與時效性

3



降雨引致淺層邊坡滑動特徵

- 陡坡細顆粒或凝聚性土壤
- 滑動面發生於非飽和區
- 常時基質吸力提供額外凝聚力
- 降雨因基質吸力降低抗剪強度且單位重增加
- 淺層飽和區伴隨平行坡面水平滲流增加下滑驅動力
- 力學反應與土層水力行為相關

4

計畫目的

- 發展水力力學耦合邊坡滑動簡易與數值分析
- 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
- 結合微機電系統感測器(MEMS)與無線傳輸模組
- 開發可快速佈設且具依時特性之預警模組作為相關防災作為啟動之準據

5

整體計畫 - 第一年(104年)

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

6

104年研究內容與項目

1. 進行傳統極限平衡邊坡穩定分析及水力力學耦合數值模擬，建立淺層邊坡破壞解析法架構
2. 研製表層邊坡無線監測模組原型，系統將可監測土層運動量及水力特性，整合資料擷取與無線傳輸功能
3. 整合解析法結果，發展簡易土層無線監測模組佈設原則與資料處理程序

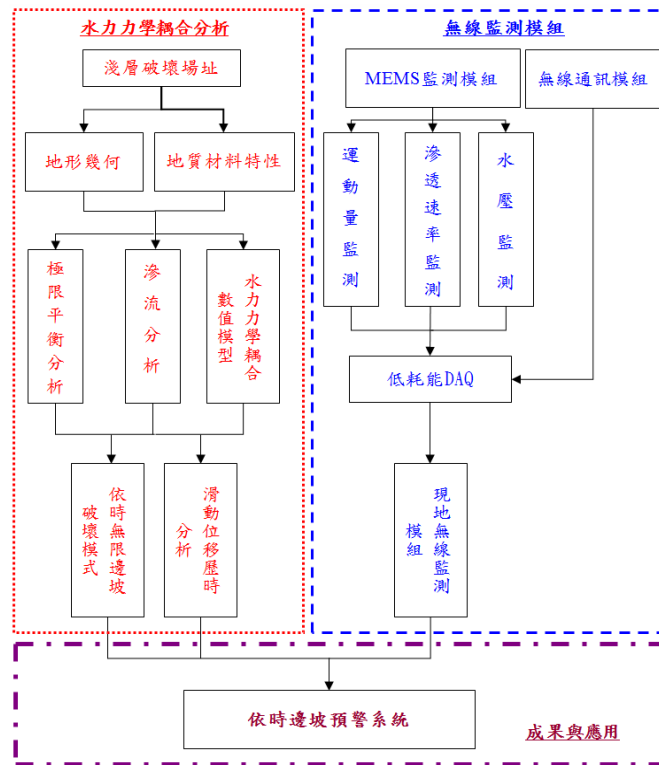
7

全期計畫預期成果、效益及其應用

- 發展具依時特性之公路邊坡降雨崩塌預警技術，提升現有以經驗法為依據之預警模式準確度
- 發展簡易土層監測模組，應用於地質災害監測與預警
- 開發可快速佈設且具依時特性之公路邊坡淺層破壞預警技術，做為相關防災作為啟動之準據

8

工作構想與對策研究流程



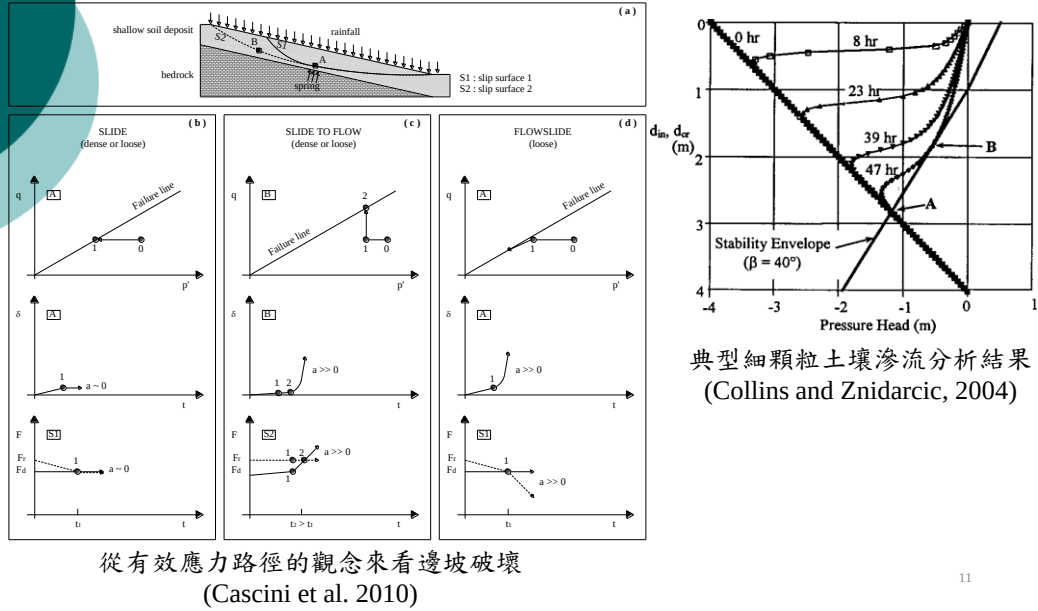
9

水力力學耦合邊坡穩定分析

- 解析法邊坡穩定分析
- 分析架構:
 - 非飽和土壤力學描述土壤力學性質
 - 非飽和土層入滲/滲流分析
- 分析方法:
 - 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析 → 極限平衡 (LEM)
 - 水力力學耦合數值分析 → 入滲與變形歷時 (Numerical modeling)

10

解析法極限平衡邊坡穩定分析



11

非飽和應力狀態變數

- Fredlund and Morgenstern (1977)提出應力狀態變數組合

參考壓力	應力狀態變數組合
孔隙氣壓, u_a	$(\sigma - u_a)$ 、 $(u_a - u_w)$
孔隙水壓, u_w	$(\sigma - u_w)$ 、 $(u_a - u_w)$
總應力, σ	$(\sigma - u_a)$ 、 $(\sigma - u_w)$

備註：

$(\sigma - u_a)$ = 淨正向應力 (net normal stress)

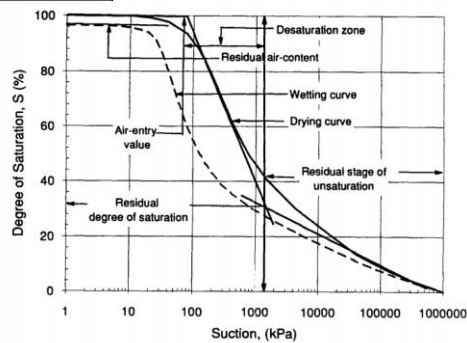
$(u_a - u_w)$ = 基質吸力 (matric suction)

- 非飽和土壤之有效應力

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

$\chi = 0$ (完全乾燥) ~ 1 (飽和)

Bishop (1959)



12

非飽和土壤剪力強度

- Fredlund et al. (1978) 衍伸莫爾-庫倫破壞準則

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

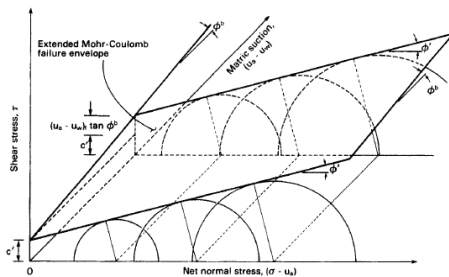
$$= c_t + (\sigma - u_a) \tan \phi'$$

c' = 有效凝聚力

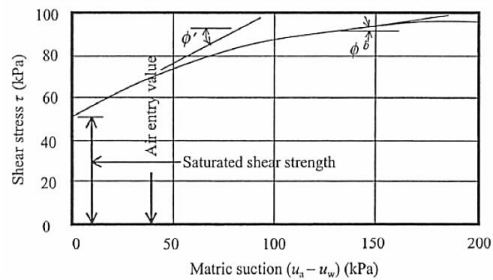
ϕ' = 有效摩擦角

ϕ^b = 基質吸力所提供之剪力摩擦角

c_t = 視凝聚力



(Fredlund and Rahardjo, 1993)



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

1-D 滲流分析

1-D Richard's equation

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

假設土壤滲透係數不隨深度改變

- SWCC以VG模式擬合，以Crank-Nicolson 有限差分法求解

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

水力力學耦合LEM邊坡穩定分析

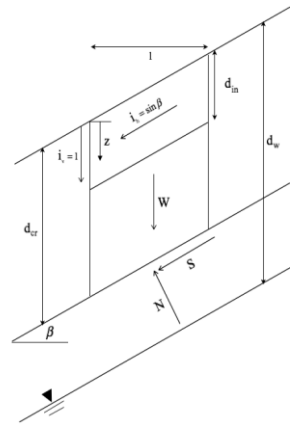
$$\left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr}$$

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

- 細顆粒土壤可不考慮水平滲流的影響
- 忽略入滲對土壤單位重的改變

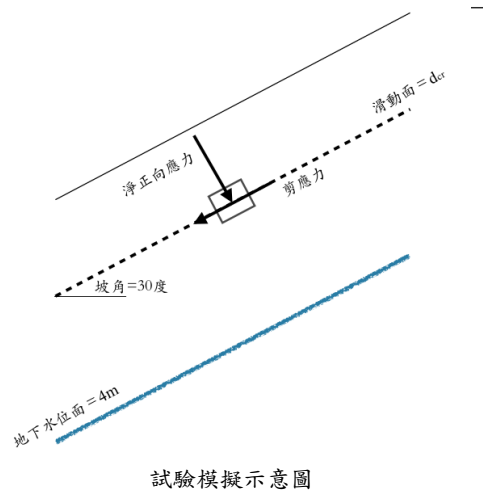
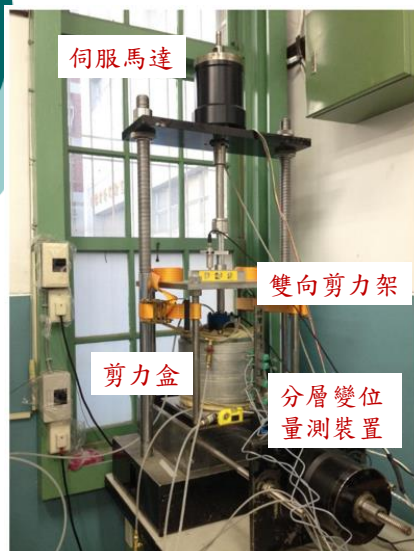
$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')}$$

$h_c(z)$ 為不同時間邊坡內基質吸力分布



12

水力力學耦合試驗系統



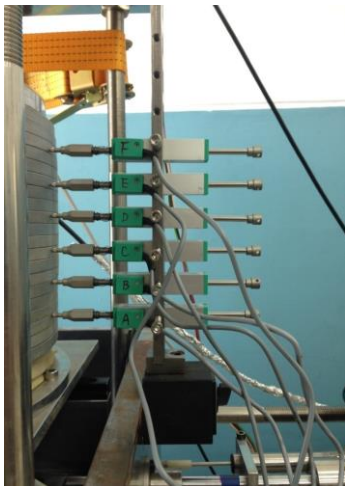
試驗模擬示意圖

16

水力力學耦合試驗

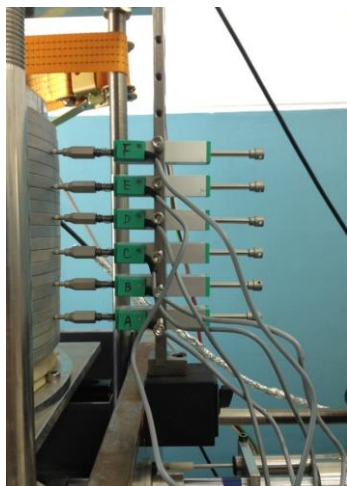


水力力學耦合系統實體圖
(含加載系統)



側向變位置量測裝置

17



側向變位量測裝置

17

試體準備

- 試驗材料基本物性

比重(G_s)	2.67
液性限度(LL, %)	22
塑性指數(PI, %)	2
USCS 土壤分類	SM
飽和滲透係數(k_{sat}), m/s	1×10^{-3} cm/s

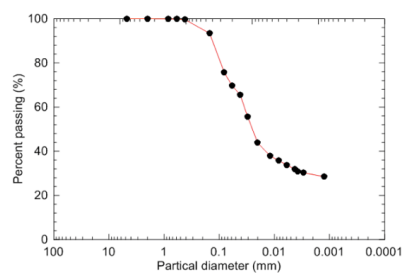
Particle size distribution curve showing Percent passing (%) versus Partical diameter (mm). The curve indicates a soil with a high percentage of fine particles (clay and silt).

- 試體準備方法：濕搗法
- 控制總體單位重： 18 kN/m^3
- 含水量：15%
- 非飽和平衡判定：總體積變化 $< 0.05\%/ \text{day}$ (Ng et al., 2007)

17

- 試體準備方法：濕搗法
- 控制總體單位重：18kN/m³
- 含水量：15%
- 非飽和平衡判定：總體積變化 < 0.05%/day (Ng et al., 2007)

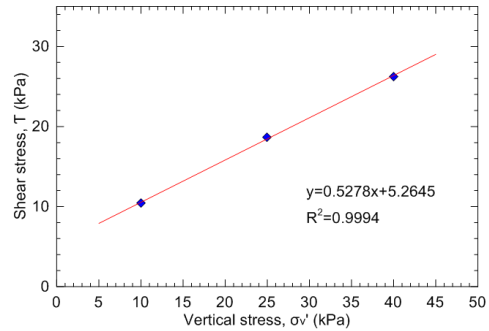
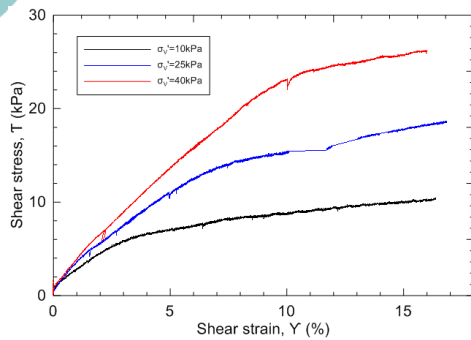
比重(G_s)	2.67
液性限度(LL, %)	22
塑性指數(PI, %)	2
USCS 土壤分類	SM
飽和滲透係數(k_{sat}), m/s	1×10^{-3} cm/s



17

試驗土樣強度參數

- 試驗土樣之摩擦角約為28度，凝聚力約為5kPa



19

試驗規劃



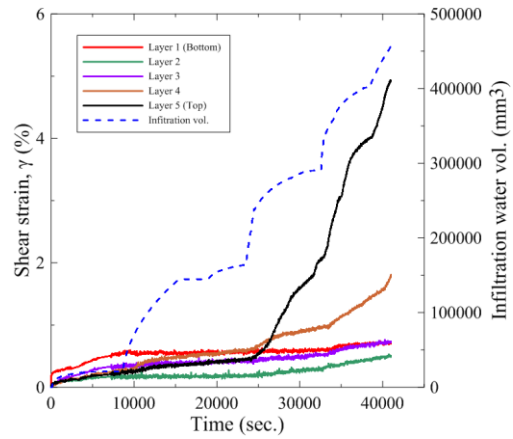
水力力學耦合試驗之試驗條件

滑動面深度 d_{cr} , m	1.5
地下水位深度, m	4m
基質吸力, kPa	25
淨正向應力, kPa	2 4
剪應力, kPa	13.1

18

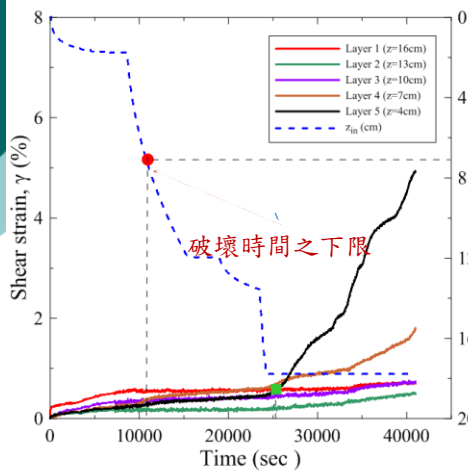
試驗結果(1/2)

- 自地表入滲理論破壞時間
67 hrs
- 自地表入滲至1.5 m 需時59
hrs
- 元素試驗實際破壞時間
7 hrs
- 破壞發生厚度
7cm (Layer4、5)

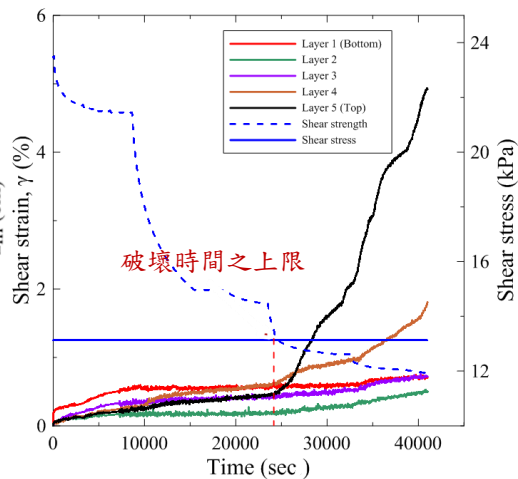


20

試驗結果(2/2)



入滲深度與各層剪應變之關係



試驗過程試體平均剪力強度變化

21

分析案例:高雄寶隆崩塌地(1/6)

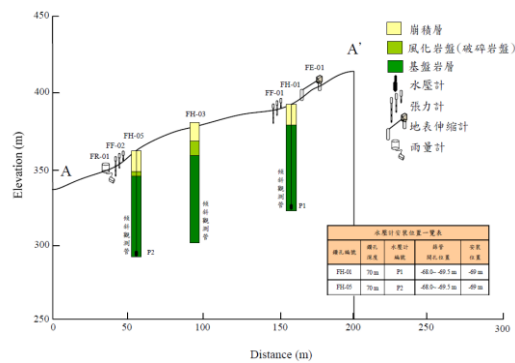
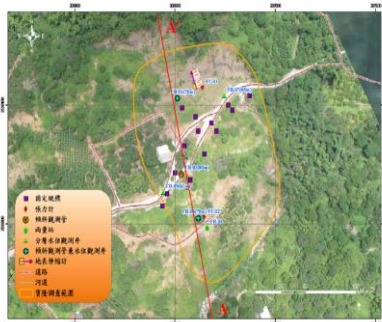
- 鄭清江等人(2009)分析寶隆崩塌地之案例，
寶隆村位於高雄縣甲仙鎮西南方約3km



23

分析案例:高雄寶隆崩塌地(2/6)

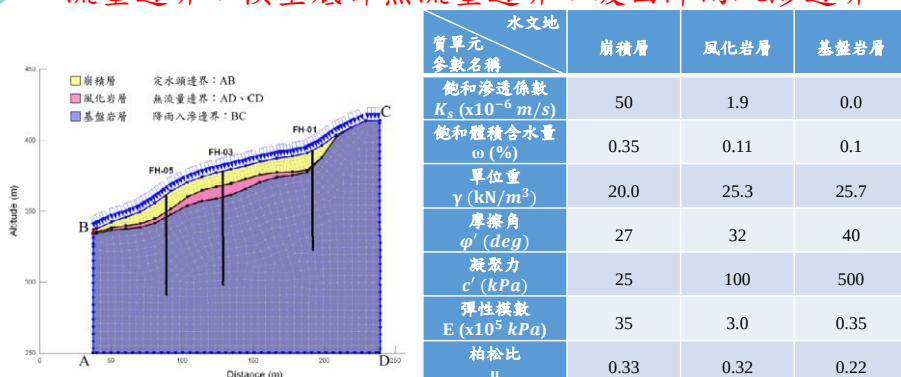
- 監測系統: 1組雨量站、1組地表伸縮計、2口全孔水位觀測井、2口分層水位觀測井、15處地表固定覘標點、3口傾斜觀測管、及2處土壤張力計
- 目標: 同步進行降雨量、地下水位、地中水平變形、地表變形及淺層不飽和土壤張力等監測工作



24

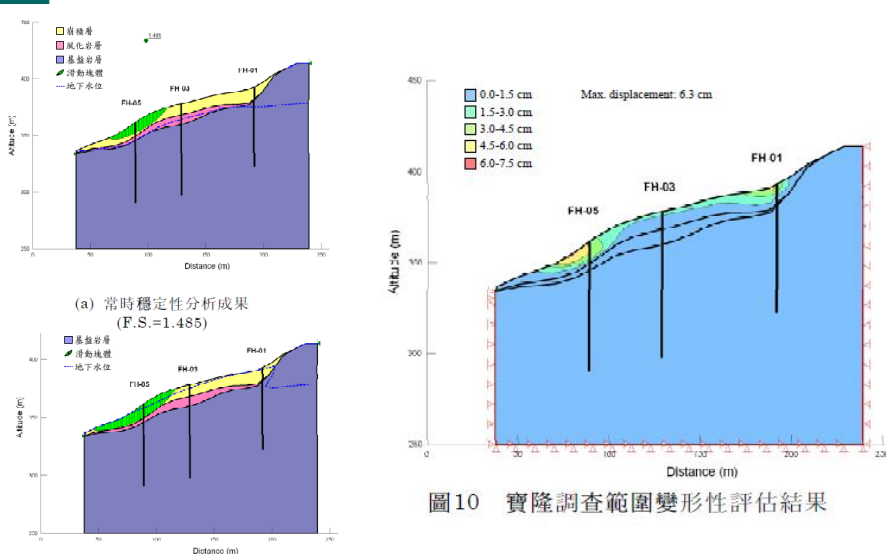
分析案例:高雄寶隆崩塌地(3/6)

1. 數值地形係採5m× 5m DEM 數值資料建置
2. 剖面依鑽孔岩心及現地調查成果決定各水文地質單元之地層深度及地下水位
3. 水文地質邊界: 左側邊界定水頭邊界; 右側邊界無流量邊界; 模型底部無流量邊界; 坡面降雨入滲邊界



25

分析案例:地調所穩定分析成果(4/6)



26

水力力學耦合邊坡分析

水力力學耦合數值分析

FLAC程式

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

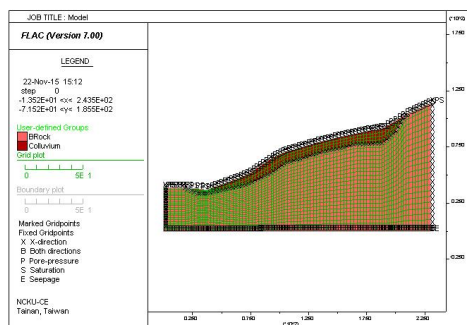
$$\tau^{max} = \sigma^b \tan \phi + C \quad \sigma^b = \sigma - (S_w P_w + S_a P_a)$$

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

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

27

數值模型網格



- 分為崩積層與岩盤
- 初始水位在模型底部
- 力學邊界:
 - 兩側水平固定，底部Fix
- 水力邊界:
 - 地表自由入滲
 - 地表飽和且孔隙水壓為0
 - 模型底部為滲水邊界
- 初始條件:
 - 設定土層初始飽和度
 - 設定基質吸力

$$\kappa_r^w = S_e^b \left[1 - \left(1 - S_e^{1/a} \right)^a \right]^2 \quad P_g - P_w = P_c(S_w)$$

$$S_e = \frac{S_w - S_r^w}{1 - S_r^w} \quad P_c(S_w) = P_0 \left[S_e^{-1/a} - 1 \right]^{1-a} \quad (\text{van Genuchten 1980})$$

28

非飽和水文參數

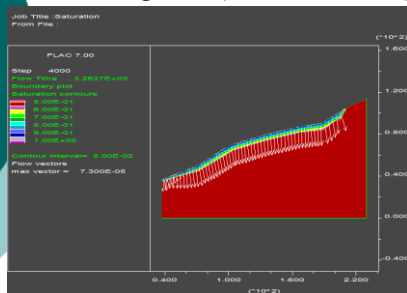
參數	Colluvium	Bedrock	意義
Porosity	0.486	0.1	孔隙率
kat	5e-9	1e-12	飽和滲透係數
fmodulus	2e9	2e9	水體積模數
saturation	0.53978	0.53978	初始飽和度
vga	0.336	0.1	VG parameter a
vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0	15000	15000	VG P0
Pc	-45203	-45203	From Pc(Sw)

$$P_c(S_w) = P_0 \left[S_e^{-1/a} - 1 \right]^{1-a} \quad \kappa_r^w = S_e^b \left[1 - \left(1 - S_e^{1/a} \right)^a \right]^2$$

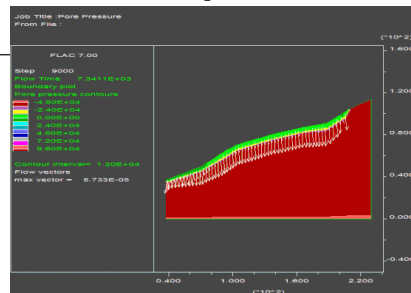
29

耦合分析結果

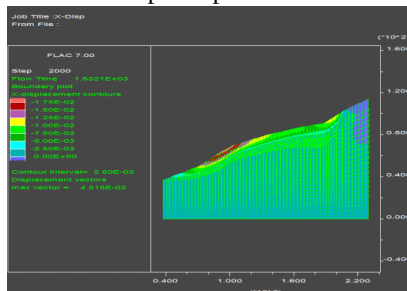
Wetting front (Saturation+Flow)



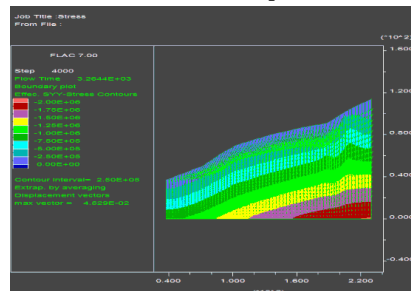
Pore pressure+Flow



X-disp+Disp. vector

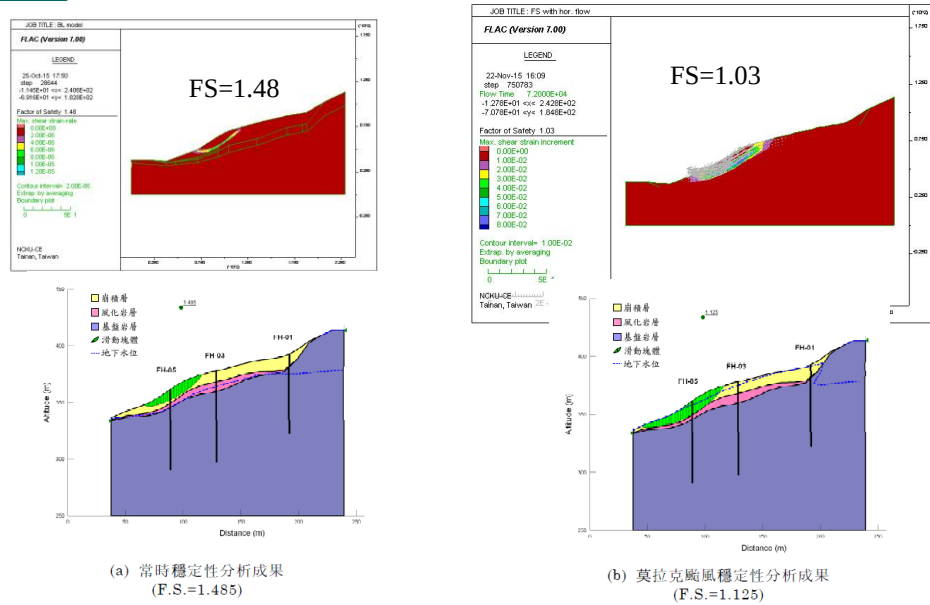


Eff. Vert. stress+ Disp. vector



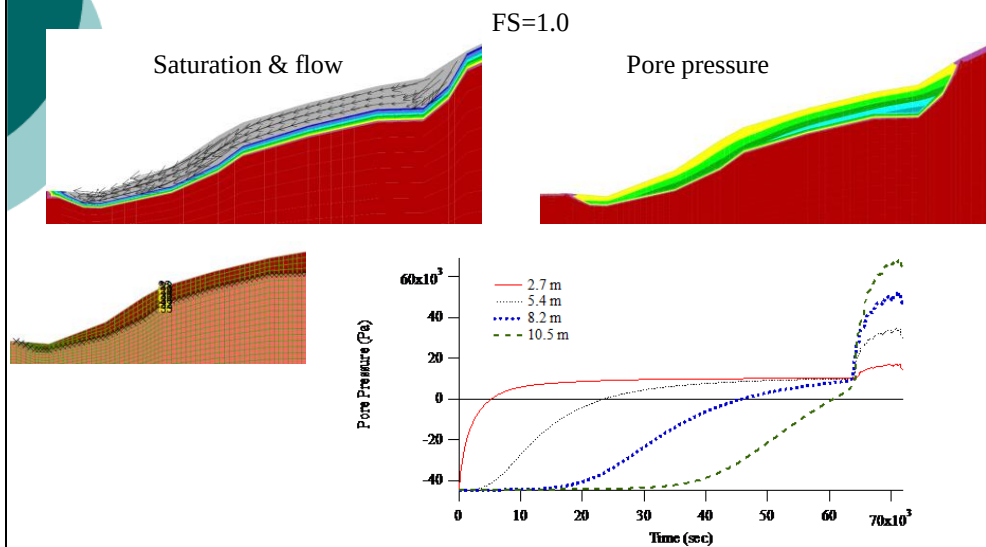
30

極限平衡分析結果比較



31

水力反應



32

Figure 10 displays the results of deformation analysis, showing three plots related to slope stability and deformation.

The top-left plot is a cross-section of a slope model (JOB TITLE: DL model) using FLAC (Version 7.00). It shows the initial state of the slope with displacement contours. The legend indicates X-displacement contours ranging from -3.00E-02 to 0.00E+00. The plot shows a cross-section of a slope with displacement contours. The legend indicates X-displacement contours ranging from -3.00E-02 to 0.00E+00. The plot shows a cross-section of a slope with displacement contours. The legend indicates X-displacement contours ranging from -3.00E-02 to 0.00E+00.

The top-right plot is a cross-section of a slope model (JOB TITLE: Xidrop window -11.5.241.5.48.5.183.5) using FLAC (Version 7.00). It shows the final state of the slope with displacement contours. The legend indicates X-displacement contours ranging from -1.00E-01 to 0.00E+00. The plot shows a cross-section of a slope with displacement contours. The legend indicates X-displacement contours ranging from -1.00E-01 to 0.00E+00. The plot shows a cross-section of a slope with displacement contours. The legend indicates X-displacement contours ranging from -1.00E-01 to 0.00E+00.

The bottom plot is a graph showing the relationship between Distance (m) on the X-axis and Alpha, deg (m) on the Y-axis. It displays the deformation profile of the slope, with points FH 05, FH 03, and FH 01 marked. The graph shows the deformation profile of the slope, with points FH 05, FH 03, and FH 01 marked. The graph shows the deformation profile of the slope, with points FH 05, FH 03, and FH 01 marked.

位移歷時與應力

FLAC (Version 7.00)

LEGEND

22-Nov-15 16:01
Step: 745668
Flow Time: 7.2000E+04
+1.278E+01 sec: 2.420E+02
-7.078E+01 sec: 1.848E+02

Boundary plot
0 5E 1

Effect: SY-Vertical Stress Contours
1.75E+06
1.50E+06
1.25E+06
1.00E+06
7.50E+05
5.00E+05
2.50E+05
0.00E+00

Contour interval= 2.50E+05
Extrac: by averaging
Displacement vectors
max vector = 1.360E-01
Nucleus: 1
Tilt: 0.000000

X-disp (m)

Time (sec)

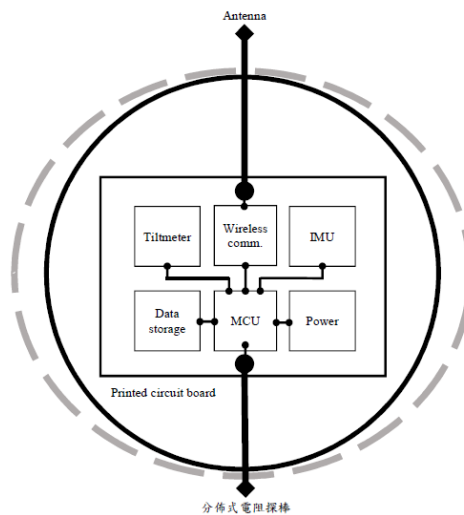
Y-disp (m)

Time (sec)

34

無線監測模組構件/功能

- 運動量監測
 - 高精密傾斜角度量測
- 地表水入滲監測
 - 土層含水量量測
- 無線通訊模組
- 圖形人機介面



土層監測模組內部架構示意圖

淺層無線感測監測模組

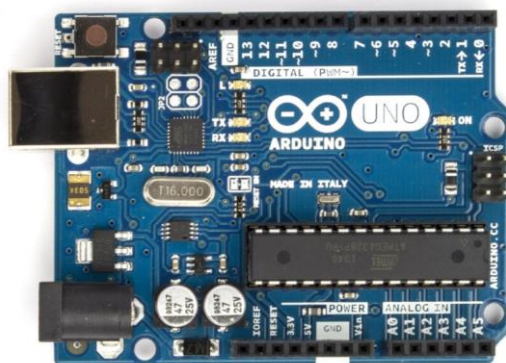
- 土層無線監測模組之開發
 - 感測器測試與標定
 - 含水量計之開發
 - 感測器韌體之撰寫
 - 感測器外構之設計與製作
- 圖形化使用者操作介面(GUI)之開發
- 建議安裝程序

土層無線監測模組組成

- 微控制器
- 運動量監測
 - 高精密傾斜角度量測
 - 慣性量測
- 地表水入滲監測
 - 土層含水量量測
- 無線通訊模組

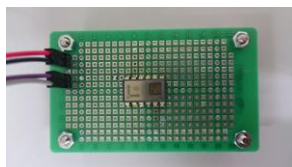
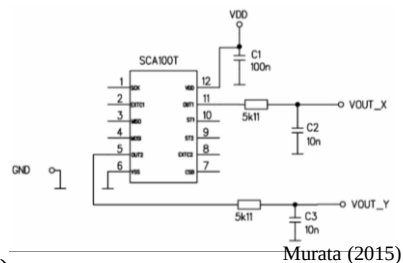
微控制器規格

- 廠牌: Arduino
- 型號: Arduino UNO
- 工作時脈: 16MHz
- 快取記憶體: 32kB
- 工作電壓
 - USB: 5V
 - DC: 7~12V
- 工作電流
 - I/O: 20mA
 - 3.3V pin: 50mA
- USB傳輸
- 14組數位I/O
- 6組類比/數位I/O
- 1組I²C
- 2組SPI
- +5V與+3.3V供電



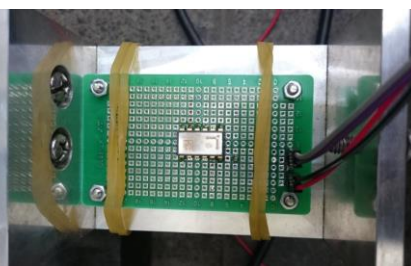
高精度傾斜儀規格

- 廠牌: Murata Electronics
- 型號: SCA100T
- 二軸向傾斜儀
- 工作電壓: +5V
- 範圍: $\pm 90^\circ$
- 解析度: 0.0035度(10Hz BW, 類比輸出)
- 傾斜與溫度 - 數位SPI輸出
- 比例類比電壓輸出



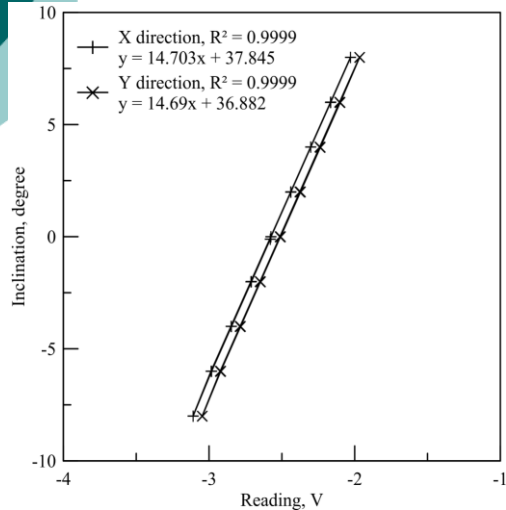
傾斜儀類比訊號標定程序

- 使用微控旋轉台
- 使用一電子傾斜儀作為參考值
- 電壓輸出

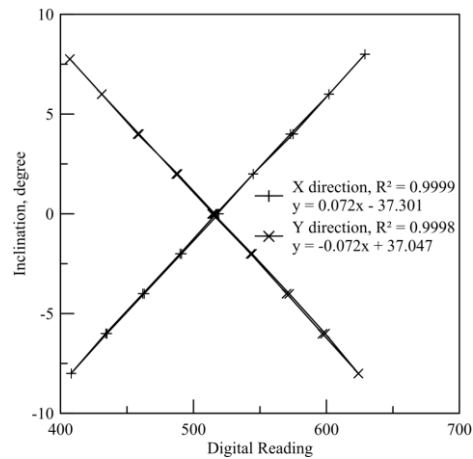


傾斜儀類比訊號標定結果

- SCA100T輸出之電壓與參考用電子傾斜儀量測角度比較

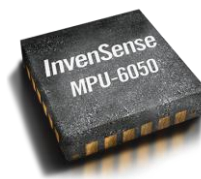


傾斜儀內建ADC數位輸出



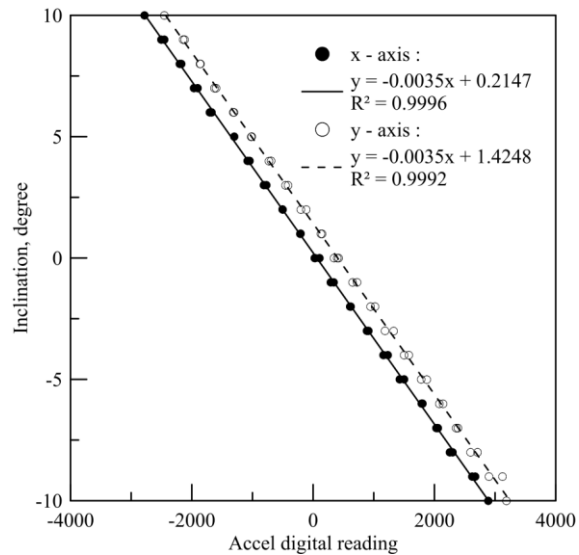
IMU規格

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



IMU傾斜標定結果

- 同傾斜儀標定系統
- 數位I²C輸出



地表水入滲監測

- 透過量測不同深度土層含水量可得降雨引致地表水入滲速率
- 含水量量測有兩種方式
 - 土壤電阻率
 - 土壤介電常數
- 土壤電阻率的變因包含
 - 土壤種類
 - 土壤結構
 - 飽和度
- 若透過量測土壤電阻率推估飽和度需先調查上述參數
- 土壤介電常數受飽和度外之參數影響有限
- 本研究採介電常數量測

土壤介電常數量測

- 土壤介電常數量測可透過量測平行板土壤電容間接獲得
- 平行板電容 $C=\epsilon A/d$
- 其中
 - C: 電容
 - ϵ : 介電常數
 - A: 平行板面積
 - d: 平行板間距
- 由上式可知已知平行板間土壤之電容值與其介電常數成正比
- 透過量測電容即可量得介電常數

電容感測器規格

- 廠牌: Texas Instruments
- 型號: FDC1004
- 4頻道電容/數位轉換器
- 頻道數: 4
- 量測範圍: ± 15 pF
- 解析度: 0.5 fF
- 工作電壓: 3 V
- 工作電流: 0.75 mA
- 待機電流: 29 μ A
- 傳輸介面: I2C
- 工作溫度: -40~85 $^{\circ}$ C



T.I. (2015)

電容量測應用

- 非接觸式量測
- 各種Sensor型式
 - 姿勢感測(Proximity Detection, Isolated Sensor t No GND)
 - 液位感測(Liquid Level Sensing, Parallel Fingers)
 - 材料檢測(Material Analysis, Parallel Plate)

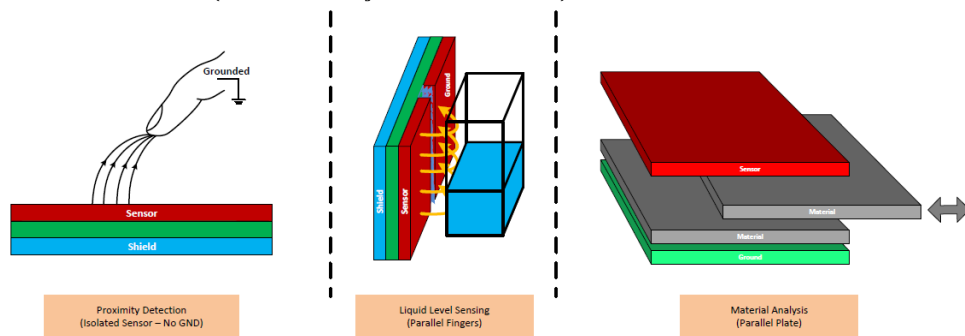
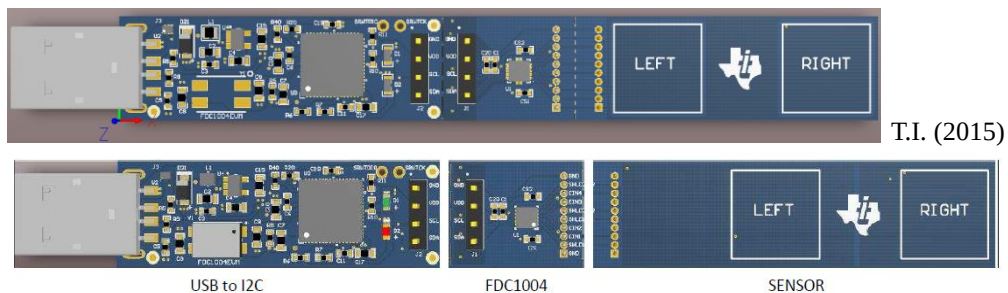


Figure 3. Basic Implements for Capacitive Sensing T.I. (2015)

FDC1004EVM

- Texas Ins. FDC1004EVM 開發模組
- Parallel Fingers類型Sensor，適用液位量測
- 包含微控制器與USB訊號傳輸，可直接連接電腦進行測試
- 包含GUI，易於Sensor開發測試
- 可分式設計，可拆除透過Arduino uno連接FDC1004與Sensor進行韌體控制測試



T.I. (2015)

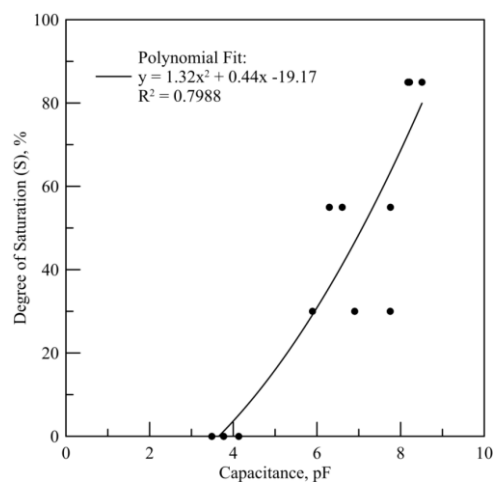
含水量計

- 經測試發現FDC1004 EVM可直接量測土壤含水量
- EVM表面隔層0.5mm時量測電容最具代表性



含水量計標定結果

- 含水量計
- 表面防水層0.5mm
- 測試土樣: 麥寮砂
- 土壤飽和度與理論電容值呈現二次關係曲線 (Wobschall & Lakshmanan, 2005)

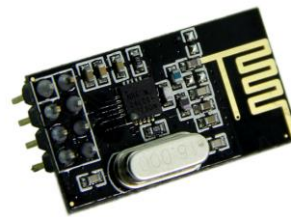


無線通訊模組

- 市售多種無線通訊模組以ZigBee與其衍伸傳輸技術為大宗
- ZigBee系列傳輸系統有資料不同步的缺點
- 軌跡量測需同步6軸參數, 若使用ZigBee傳輸技術易生誤差
- 本研究將選用2.4GHz RF-nRF24L01做為無線傳輸模組

無線通訊模組規格

- 廠牌: Nordic
- 型號: nRF24L01+
- 頻寬: 2.4GHz
- 低工作電壓(1.9V~3.6V)
- 高速率(2Mbps)
- 多頻點
 - 125頻點, 滿足多點通信和跳頻通信需要
- 體積小(15 mm x 29 mm)
- 低功耗
- 低應用成本
- 便於開發



nRF24L01與ZIGBEE比較

Feature(s)	nRF24L01	XBee
無線規範標準	Nordic ESB	IEEE802.15.4
電源持續力	months-years	months-years
最大操作電流	<25mA	<100mA
省電模式之電流	<1 μ A	<10 μ A
傳輸距離	15-610m (空曠無障礙物情況)	60-750m (空曠無障礙物情況)
擴充性	可加裝天線，增強訊號	可加裝天線，增強訊號
資料傳輸率	2Mbps	250kbps
接收資料型態	同步	非同步
通訊演算法型態	分碼多重進接演算法	分時多重進接演算法

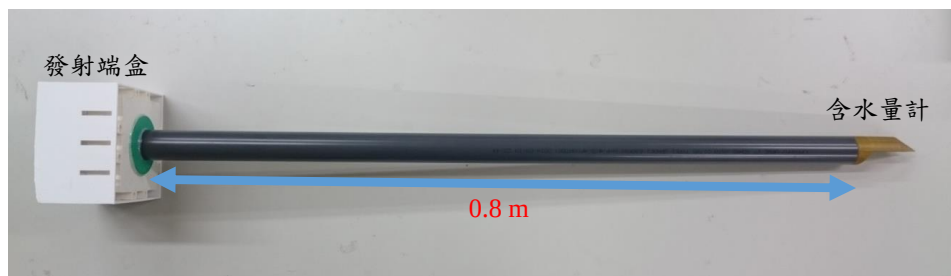
[illegible]

土層無線監測模組組成

- 發射端
 - 微控制器
 - 傾斜儀
 - 慣性量測單元(IMU)
 - 含水量計
 - 無線傳輸模組
 - 電池組
- 接收端
 - 微控制器
 - 無線傳輸模組

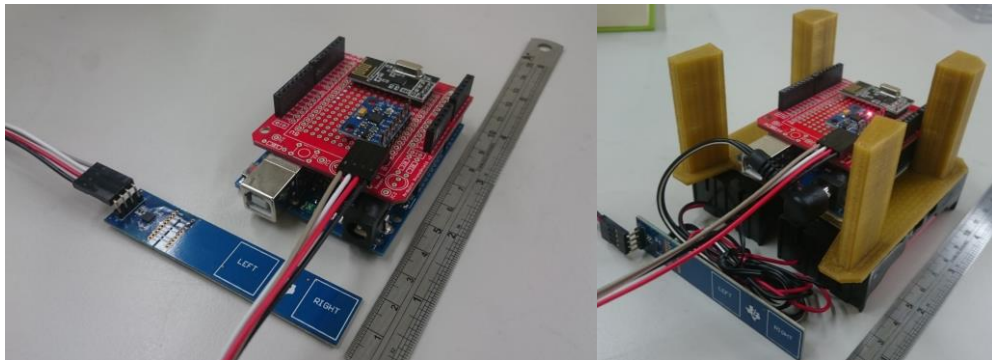
土層無線監測模組 - 發射端

- 含水量計位於發射端盒下方0.8m處
- 以高密度PVC(UPVC)管延伸
 - 高強度
 - 高抗蝕
- 其餘元件皆裝置於發射端盒內



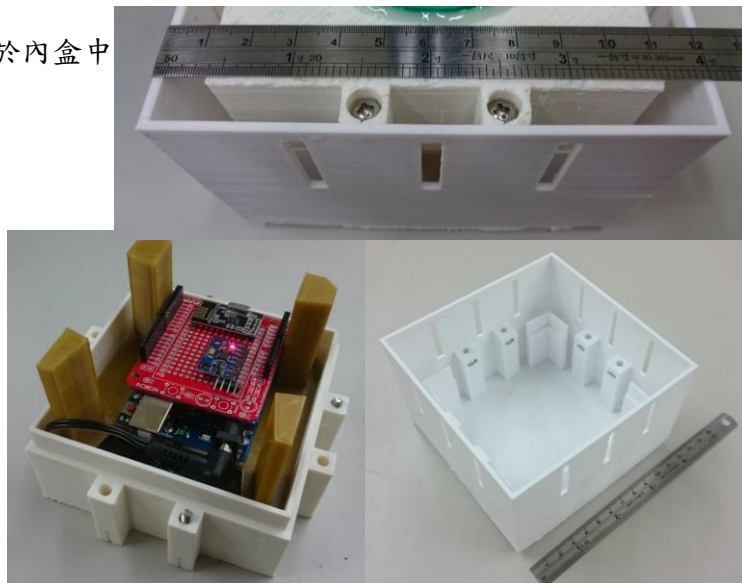
發射端－感測電路板與系統

- 感測器與無線傳輸模組皆銲於一原型擴展板上
- 感測電路板可透過排針固定於微控制器上
- 感測電路板預留含水量計排線端口
- 發射端系統固定於內盒骨架上
- 電池盒(18650型電池*4)固定於內盒骨架下



發射端 - 盒

- 內盒骨架置於內盒中
- 外盒設計
 - 防雨
 - 防曬
 - 通風



接收端－無線傳輸電路板與系統

- 無線傳輸電路板使用排針固定於微控制器上
- 透過USB與伺服電腦傳輸

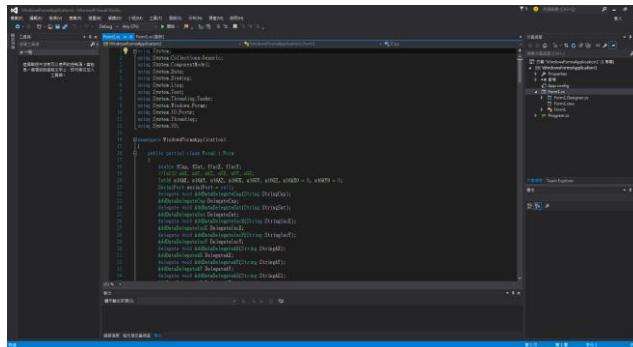


接收端－外殼



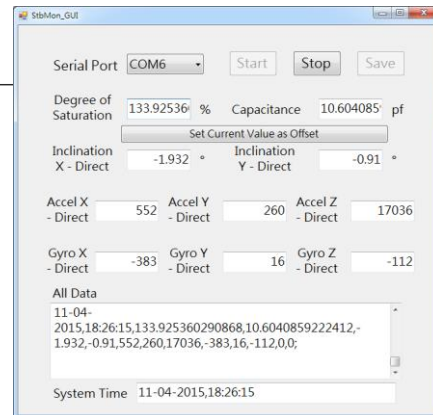
圖形化使用者操作介面要求

- 使用Microsoft Visual Studio編寫
 - Windows OS下免安裝
- 操作無須透過Arduino編輯器
- 快速且簡單地監控各土層監測模組



圖形化使用者操作介面

- 整合無線傳輸模組進行控制/量測
- 設定接收端Arduino Uno序列埠
- 開始/停止鍵
- 即時顯示二軸傾斜角度
- 即時顯示土壤含水量&電容值
- 歸零功能鍵
- 儲存記錄鍵
- GUI僅23kb
- 儲存資料格式:
 - 系統日期(mon, day, year), 時間(hour, min, sec)
 - 土壤體積飽和度(%), 電容值(pF)
 - X向傾斜角度($^{\circ}$), Y向傾斜角度($^{\circ}$)
 - X向加速度數值, Y向加速度數值, Z向加速度數值
 - X向角速度數值, Y向角速度數值, Z向角速度數值
 - 歸零X向加速度準位數值, 歸零Y向加速度準位數值





建議安裝程序

- 使用手鑽(Hand auger)於預定安裝地點鑽掘一深度0.5m之鑽孔
- 將土層監測模組置入鑽孔中，並向下貫入80mm
- 含水量計上下50mm區間以粗砂回填
- 其餘深度以皂土漿回填至地表



監測模組原型小結

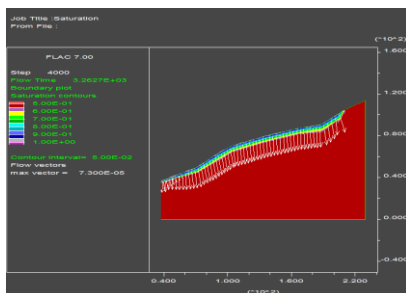
- 各感測器皆符合本研究需求
- 無線土層監測模組具備下列元件
 - 微控制器Arduino UNO
 - 慣性量測單元MPU-6050
 - 傾斜儀SCA100T
 - 電容/數位轉換器FDC1004 EVM (含水量計)
 - 無線傳輸模組nRF24L01+
- 可提供邊坡穩定因子
 - 淺層土壤體積飽和度
 - 傾斜角度
- 圖形化使用者操作介面(GUI)
 - 即時資料運算顯示
 - 資料儲存
- 提供建議之安裝程序

結論

- 完成無限邊坡入滲淺層滑動依時分析架構，考慮非飽和土層水文與力學性質，並由大型模型試驗結果顯示發展之架構完整可行。
- 結合土中入滲與滲流分析及非飽和土層非線性有效應力分析，於水力分析時，計算孔隙水壓及含水量變化狀態，用於更新非飽和土壤之強度參數，耦合分析架構可作為現地監測模組佈設與警戒值制定之依據。
- 無線監測模組原型組裝，包含土壤含水量計及表面運動量測之研發，並進行相關韌體與圖形介面撰寫，作為後續整合元件製作之依據，並已完成資料處理程序之流程建立。
- 本計畫包含解析法預測模式建立與監測模組研發，以達成依時預警監測模組之功能，整合此二部份成果可提出整合預警系統架構。
- 考量參數取得及佈設便利性，參考經濟部地調所研究成果，選定高雄甲仙區寶隆崩塌地做為候選測試場址，由取得相關數位資料，完成傳統極限平衡及水力力學耦合數值分析。

65

簡報完畢，敬請指教



66