

109-079-7C19

MOTC-IOT-107-H1EB002

# 均質土壤淺層滑動無線監測系統 公路邊坡檢監測計畫



交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

109-079-7C19

MOTC-IOT-107-H1EB002

# 均質土壤淺層滑動無線監測系統 公路邊坡檢監測計畫

著者：曾文傑、謝明志、陳志芳  
林雅雯、張文忠、倪勝火

交通部運輸研究所

中華民國 109 年 2 月

均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫 / 曾文傑等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運輸研究所，民 109.02

面；公分

ISBN 978-986-531-124-7(平裝)

1.公路管理 2.運輸系統

557

109000900

均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫

著者：曾文傑、謝明志、陳志芳、林雅雯、張文忠、倪勝火

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

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

電話：(04)26587116

出版年月：中華民國 109 年 2 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：250 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

GPN：1010900247 ISBN：978-986-531-124-7 (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。

均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫 交通部運輸研究所

GPN: 1010900247

定價:250 元



## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                |                            |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 出版品名稱：均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                |                            |                                                              |
| 國際標準書號（或叢刊號）<br>ISBN 978-986-531-124-7 (平裝)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 政府出版品統一編號<br>1010900247                                                                                        | 運輸研究所出版品編號<br>109-079-7C19 | 計畫編號<br>MOTC-IOT-107-H1EB002                                 |
| 主辦單位：港研中心<br>主管：蔡立宏<br>計畫主持人：林雅雯<br>研究人員：曾文傑<br>參與人員：王培源<br>聯絡電話：04-26587116<br>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<br>計畫主持人：張文忠<br>協同主持人：倪勝火<br>研究人員：洪芯琦、邱心彥、吳博巧、張弘杰<br>地址：臺南市大學路1號<br>聯絡電話：06-2757575~63128 |                            | 研究期間<br>自 107 年 11 月<br>至 108 年 12 月                         |
| 關鍵字：公路邊坡破壞、無線監測模組、均質土層滑動、依時預警系統、淺層滑動、物聯網                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                |                            |                                                              |
| <p>摘要：</p> <p>台 7 甲線 41.55K 至 41.65K 邊坡屬公路總局第四區養護工程處所管轄山區公路邊坡，現地鑽探顯示表層至少 50 m 為高度破碎岩盤，邊坡遭受向源侵蝕破壞，地形或地質條件不佳且每年受颱風、地震及豪大雨影響，導致邊坡不穩定性，本計畫以原應用於均質土壤淺層邊坡預警之架構，於該路段設置雲端無線感測網路模組，監測邊坡表層傾角及牆體傾斜，結合具嚴謹力學理論之解析法進行邊坡與擋土牆體穩定分析，發展場址客製化具依時特性之公路邊坡淺層破壞與牆體穩定預警架構，並建構專屬雲端儲存與顯示平台，用以互補現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，提高預警之準確與時效性。研究成果提供交通部、公路總局第四區養護工程處及各工務段等單位，做為相關防災啟動之參據。</p> <p>成果效益與應用：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.本計畫針對台 7 甲線 41.55K~41.65K 場址之公路邊坡與擋土壁體長期潛在不穩定機制，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，製作均質土層無線監測網路模組，並以解析法提出相關預警值，發展具依時特性之公路土壤邊坡降雨滑動監測及預警技術，輔助現有以經驗法為依據之預警模式準確度，以利災害管理。</li> <li>2.利用消費性電子系統，整合發展簡易土層監測模組，應用於地質災害監測與預警，研究成果提供交通部、公路總局與臺灣鐵路管理局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。</li> </ol> |                                                                                                                |                            |                                                              |
| 出版日期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 頁數                                                                                                             | 定價                         | 本 出 版 品 取 得 方 式                                              |
| 109 年 2 月                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 224                                                                                                            | 250                        | 凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。 |
| <p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>限閱 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密【限】條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，<br/> <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                |                            |                                                              |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                |                            |                                                              |

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

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                              |                                   |                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TITLE: Monitoring program for the homogenous soil shallow landslide wireless monitoring system on highway slope                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                              |                                   |                                                                                                                                                                                                                        |
| ISBN(OR ISSN)<br>978-986-531-124-7(pbk)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER<br>1010900247 | IOT SERIAL NUMBER<br>109-079-7C19 | PROJECT NUMBER<br>MOTC-IOT-107-H1EB002                                                                                                                                                                                 |
| DIVISION: Harbor & Marine Technology Center<br>DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ya-Wen Lin<br>PROJECT STAFF: Wen-Chieh Tseng<br>PHONE: 04-26587116<br>FAX: 04-26564418                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                              |                                   | PROJECT PERIOD<br>FROM : November 2018<br>TO : December 2019                                                                                                                                                           |
| RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation<br>PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Jong Chang<br>CO-PROJECT INVESTIGATOR: Sheng-Huo Ni<br>ADDRESS: No.1, University Road, Tainan City 701, Taiwan (R.O.C)<br>PHONE: 886-06-2757575~63128                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                              |                                   |                                                                                                                                                                                                                        |
| KEYWORDS: highway slope failure, wireless sensing module, homogeneous slope failure, time-dependent warning system, shallow slope failure, internet of things                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                              |                                   |                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>ABSTRACT:</p> <p>On-site drill at the mountainous slope of section 41.55K to 41.65k of the 7th Taiwan Provincial Road showed highly fractured bedrock at least 50m-deep surface layer had been destroyed by the headward erosion, bad topographical and geographical conditions, in addition to d slope instability resulted from typhoons, earthquakes, and heavy rainfalls.) The project installed innovative wireless, cloud sensing modules to monitor the responses of the slope and retaining structures. Rigorous analyses for slope stability and soil structure interactions are conducted and integrated with the monitoring system to provide customized, time-dependent warning system for shallow slope failures and retaining systems. A cloud platform is developed to store, display, and implement the data. The system is featured with quick installation, time-dependent warning, and real-time monitoring. A cloud platform is developed for data storage and display to complement the experiential rainfall-based early warning monitoring mode, and to upgrade the accuracy and efficiency of the early warning system.</p> <p>BENEFIT AND APPLICATION :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. The project aims to establish a customized cloud warning system integrating wireless sensing modules for shallow slope inclinations and retaining walls deformation and threshold warning values based on rigorous mechanical analysis for long-term warning. The system intends to be an effective supplement system of conventional rainfall-based warning system for road safety management during raining season.</li> <li>2. The application to the geographic monitoring and early warning by utilizing consumption electronic system and integrating simplified soil monitor module may be used as basis for initiating hazard prevention by the Ministry of Ransportation, Directorate General of Highways, and Taiwan Railways Administration.</li> </ol> |                                              |                                   |                                                                                                                                                                                                                        |
| DATE OF PUBLICATION<br>February, 2020                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | NUMBER OF PAGES<br>224                       | PRICE<br>250                      | CLASSIFICATION<br><input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL<br><input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET<br><input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED |
| The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                              |                                   |                                                                                                                                                                                                                        |

# 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫

## 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  |
| 1.1.3 計畫重要性 .....        | 1-3  |
| 1.2 研究範圍與對象 .....        | 1-4  |
| 1.3 研究內容、項目與成果要求 .....   | 1-8  |
| 1.4 預期成果、效益及其應用 .....    | 1-10 |
| 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 .....       | 2-8  |

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警 .....  | 2-10 |
| 2.3.1 土壤含水量特徵曲線 .....        | 2-10 |
| 2.3.2 非飽和滲流分析 .....          | 2-12 |
| 2.3.3 無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論 ..... | 2-14 |
| 2.3.4 二維水力力學耦合數值分析 .....     | 2-17 |
| 2.3.5 邊坡依時預警架構 .....         | 2-19 |
| 2.4 研究進行步驟 .....             | 2-25 |
| 2.4.1 監測規劃及安裝 .....          | 2-25 |
| 2.4.2 監測資料分析與網頁展示 .....      | 2-26 |
| 2.4.3 水力力學耦合解析法分析 .....      | 2-26 |
| 第三章 無線土層即時監測系統 .....         | 3-1  |
| 3.1 土層水文與力學反應量測 .....        | 3-1  |
| 3.2 無線感測土層監測系統組成 .....       | 3-7  |
| 3.2.1 微處理器 .....             | 3-7  |
| 3.2.2 無線傳輸模組 .....           | 3-9  |
| 3.2.3 時鐘與數據儲存模組 .....        | 3-10 |
| 3.2.4 資料擷取模組 .....           | 3-10 |
| 3.2.5 電源系統 .....             | 3-11 |
| 3.2.6 定時斷電模組 .....           | 3-11 |
| 3.3 無線土層監測模組 .....           | 3-12 |
| 3.3.1 伺服器端 .....             | 3-12 |

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 3.3.2 客戶端 .....           | 3-13 |
| 3.4 雲端顯示及運算平台 .....       | 3-14 |
| 第四章 現地監測成果 .....          | 4-1  |
| 4.1 監測邊坡背景資訊 .....        | 4-1  |
| 4.2 監測配置 .....            | 4-1  |
| 4.3 監測資料與分析 .....         | 4-7  |
| 4.3.1 監測資料處理程序 .....      | 4-7  |
| 4.3.2 雨量監測記錄 .....        | 4-8  |
| 4.3.3 地下水位 .....          | 4-9  |
| 4.3.4 邊坡表層體積含水量 .....     | 4-10 |
| 4.3.5 邊坡表層傾斜 .....        | 4-13 |
| 4.3.6 擋土牆壁體傾度監測 .....     | 4-17 |
| 第五章 邊坡與擋土系統變位分析 .....     | 5-1  |
| 5.1 二維水力力學耦合穩定分析 .....    | 5-1  |
| 5.1.1 土層參數與幾何 .....       | 5-1  |
| 5.1.2 數值分析結果 .....        | 5-3  |
| 5.2 擋土支撐系統變位分析 .....      | 5-7  |
| 5.2.1 PYWALL 軟體基本介紹 ..... | 5-3  |
| 5.3 邊坡擋土系統模擬 .....        | 5-8  |
| 5.3.1 模擬分析流程 .....        | 5-8  |
| 5.3.2 現地模擬案例說明 .....      | 5-10 |

|                      |        |
|----------------------|--------|
| 5.3.3 案例分析成果.....    | 5-13   |
| 第六章 雲端整合即時監測平台 ..... | 6-1    |
| 6.1 平台架構.....        | 6-1    |
| 6.2 平台功能簡介.....      | 6-2    |
| 6.3 監測平台警戒值管理.....   | 6-7    |
| 6.4 教育訓練.....        | 6-8    |
| 第七章 結論與建議.....       | 7-1    |
| 7.1 結論.....          | 7-1    |
| 7.2 建議.....          | 7-1    |
| 7.3 預期效益與應用情形.....   | 7-2    |
| 參考文獻.....            | 參.-1   |
| 附錄一 各期審查意見與回覆.....   | 附錄 1-1 |
| 附錄二 工作會議記錄.....      | 附錄 2-1 |
| 附錄三 期末簡報.....        | 附錄 3-1 |

## 圖目錄

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| 圖 1.1 計畫檢測區域範圍(Google map) .....                           | 1-2  |
| 圖 1.2 監測區域 2013 年照片(Google earth) .....                    | 1-2  |
| 圖 1.3 台 7 甲線 41K+700 監測儀器配置圖(公路總局).....                    | 1-5  |
| 圖 1.4 台 7 甲 41K+700 S1-3 傾斜管紀錄(改繪自公路總局).....               | 1-6  |
| 圖 1.5 台 7 甲 41K+700 S1-4 傾斜管紀錄(改繪自公路總局).....               | 1-6  |
| 圖 1.6 台 7 甲 41K+700 S1-5 傾斜管紀錄(改繪自公路總局).....               | 1-7  |
| 圖 1.7 台 7 甲 41K+700 S1-6 傾斜管紀錄(改繪自公路總局).....               | 1-7  |
| 圖 2.1 依時邊坡預警系統架構圖 .....                                    | 2-2  |
| 圖 2.2 由有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)...           | 2-5  |
| 圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)               | 2-6  |
| 圖 2.4 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004).         | 2-7  |
| 圖 2.5 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004).         | 2-8  |
| 圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008) .....             | 2-9  |
| 圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線(Fredlund, 1995) .....                   | 2-11 |
| 圖 2.8 土壤滲透係數與基質吸力之關係(Fredlund, 1995) .....                 | 2-11 |
| 圖 2.9 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)<br>..... | 2-13 |
| 圖 2.10 無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖 .....                            | 2-14 |
| 圖 2.11 數值分析模型 .....                                        | 2-20 |
| 圖 2.12 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....                        | 2-20 |

|                                          |      |
|------------------------------------------|------|
| 圖 2.13 ID05 位置預測孔隙水壓歷時 .....             | 2-21 |
| 圖 2.14 ID05 位置預測地表運動歷時 .....             | 2-21 |
| 圖 2.15 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....             | 2-22 |
| 圖 2.16 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念 .....    | 2-22 |
| 圖 2.17 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念 ..... | 2-24 |
| 圖 2.18 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....            | 2-24 |
| 圖 3.1 Catnip Electronics 電容式土壤水份計 .....  | 3-3  |
| 圖 3.2 測得電容值與土壤體積含水量關係圖.....              | 3-4  |
| 圖 3.3 SCA103T 傾斜儀.....                   | 3-5  |
| 圖 3.4 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較.....               | 3-5  |
| 圖 3.5 液位計 .....                          | 3-6  |
| 圖 3.6 液位計校正結果.....                       | 3-6  |
| 圖 3.7 系統運作示意圖 .....                      | 3-7  |
| 圖 3.8 Wemos Lolin32 開發板 .....            | 3-8  |
| 圖 3.9 伺服器端.....                          | 3-13 |
| 圖 3.10 客戶端－土層監測.....                     | 3-13 |
| 圖 3.11 雲端即時顯示平台 .....                    | 3-15 |
| 圖 3.12 過去 24 小時時雨量.....                  | 3-16 |
| 圖 3.13 過去 72 小時電量變化.....                 | 3-16 |
| 圖 4.1 監測範圍示意(改自國土測繪圖資中心).....            | 4-2  |
| 圖 4.2 監測儀器位置配置圖 .....                    | 4-2  |



|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 圖 4.3 ID0 雨量計監測數據及與鄰近測站比較 ..... | 4-8  |
| 圖 4.4 ID1 地下水位監測數據.....         | 4-9  |
| 圖 4.5 ID2 地下水位監測數據.....         | 4-9  |
| 圖 4.6 ID3 地下水位監測數據.....         | 4-9  |
| 圖 4.7 ID4 地下水位監測數據.....         | 4-10 |
| 圖 4.8 ID1 體積含水量監測數據.....        | 4-10 |
| 圖 4.9 ID2 體積含水量監測數據.....        | 4-11 |
| 圖 4.10 ID3 體積含水量監測數據.....       | 4-11 |
| 圖 4.11 ID4 體積含水量監測數據.....       | 4-11 |
| 圖 4.12 ID5 體積含水量監測數據.....       | 4-12 |
| 圖 4.13 ID6 體積含水量監測數據.....       | 4-12 |
| 圖 4.14 ID7 體積含水量監測數據.....       | 4-12 |
| 圖 4.15 ID8 體積含水量監測數據.....       | 4-13 |
| 圖 4.16 傾斜儀傾斜方向示意圖 .....         | 4-13 |
| 圖 4.17 ID1 傾斜角監測數據.....         | 4-14 |
| 圖 4.18 ID2 傾斜角監測數據.....         | 4-14 |
| 圖 4.19 ID3 傾斜角監測數據.....         | 4-15 |
| 圖 4.20 ID4 傾斜角監測數據.....         | 4-15 |
| 圖 4.21 ID5 傾斜角監測數據.....         | 4-16 |
| 圖 4.22 ID6 傾斜角監測數據.....         | 4-16 |
| 圖 4.23 ID7 傾斜角監測數據.....         | 4-17 |

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| 圖 4.24 ID9 牆體傾斜監測數據.....              | 4-18 |
| 圖 4.25 ID10 牆體傾斜監測數據.....             | 4-19 |
| 圖 4.26 ID11 牆體傾斜監測數據.....             | 4-20 |
| 圖 4.27 ID12 牆體傾斜監測數據.....             | 4-21 |
| 圖 5.1 台 7 甲線 41k 場址鄰近區域等高線圖.....      | 5-2  |
| 圖 5.2 分析剖面地表高程圖.....                  | 5-2  |
| 圖 5.3 台 7 甲線 41k 數值分析模型.....          | 5-3  |
| 圖 5.4 靜力平衡位移分佈圖.....                  | 5-5  |
| 圖 5.5 入滲開始後 1.2E4 秒後飽和度分布(紅色為飽和)與流動向量 | 5-6  |
| 圖 5.6 入滲開始後 1E6 秒後飽和度分布(紅色為飽和)與流動向量   | 5-6  |
| 圖 5.7 入滲開始後 8E6 秒後飽和度分布(紅色為飽和)與流動向量   | 5-7  |
| 圖 5.8 PYWALL 土壤結構模型.....              | 5-8  |
| 圖 5.9 牆體變形分析流程圖.....                  | 5-9  |
| 圖 5.10 牆體斷面示意圖.....                   | 5-10 |
| 圖 5.11 水位深度 5~2.5 位移圖.....            | 5-13 |
| 圖 5.12 水位深度 2~0 位移圖.....              | 5-13 |
| 圖 5.13 台 7 甲線牆頂位移量與地下水位深度關係圖.....     | 5-14 |
| 圖 5.14 地下水位深度與牆頂位移量.....              | 5-15 |
| 圖 5.15 地下水位深度與旋轉角.....                | 5-16 |
| 圖 6.1 平台架構示意圖.....                    | 6-1  |
| 圖 6.2 平台身分驗證系統首頁.....                 | 6-3  |

|                        |      |
|------------------------|------|
| 圖 6.3 即時監測平台頁面 .....   | 6-3  |
| 圖 6.4 監測儀器狀態頁面 .....   | 6-4  |
| 圖 6.5 雨量資訊頁面 .....     | 6-4  |
| 圖 6.6 地下水位資訊頁面 .....   | 6-5  |
| 圖 6.7 傾角方向示意圖 .....    | 6-5  |
| 圖 6.8 傾角資訊頁面 .....     | 6-6  |
| 圖 6.9 資料下載頁面 .....     | 6-6  |
| 圖 6.10 使用者管理頁面 .....   | 6-7  |
| 圖 6.11 平台警戒值設定 .....   | 6-7  |
| 圖 6.12 教育訓練開場 .....    | 6-10 |
| 圖 6.13 近景攝影計畫說明 .....  | 6-11 |
| 圖 6.14 無線監測計畫說明 .....  | 6-11 |
| 圖 6.15 計畫主持人簡報說明 ..... | 6-12 |



## 表目錄

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 表 1-1 預定進度甘特圖(Gantt Chart).....             | 1-9  |
| 表 4-1 測站資訊表.....                            | 4-3  |
| 表 5-1 分析所用土層參數 .....                        | 5-4  |
| 表 5-2 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數 ..... | 5-4  |
| 表 5-3 非飽和水文參數.....                          | 5-5  |
| 表 5-4 台 7 甲線土壤參數表 .....                     | 5-12 |
| 表 5-5 地錨參數表.....                            | 5-12 |
| 表 5-6 不同土壤下主動破壞旋轉角 .....                    | 5-15 |
| 表 6-1 教育訓練簽到表.....                          | 6-9  |



# 第一章 計畫概要

## 1.1 研究計畫之背景、目的及重要性

### 1.1.1 計畫背景

現有公路邊坡預警系統主要為沿用坡地治理常用之降雨做為預警依據，以降雨特徵做為指標(交通部運輸研究所, 2014)，少數案例已引進 CCD 攝影機、雨量計、GPS、地震儀 (交通部運輸研究所, 2011)與地表運動及土層滑動監測(廖瑞堂等, 2008)，但並未將地形與地質特徵、場址入滲行為及破壞類型等因素列入考量。而以大區域降雨作為指標時，無法考慮場址微氣候特性，且因降雨為地滑發生之間接指標，而警戒值多由過往案例統計而得，缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下不同之邊坡破壞類型，導致此類預警系統常流於過於保守或無法提供反應時間。此類經驗法因具有相當不確定性，導致其準確度不足，作為區域防災預警尚為可行，但對重要交通區段預警減災策略擬定常有不足之處，因此研發即時自動監測之預警架構，於公路營運災害管理具有前瞻價值。

本所於坡地現地無線感測模組研發與資料分析已發展多年，為測試相關技術須有適合之場址，台 7 甲線 41.55K~41.65K 邊坡屬山區公路邊坡，此處經緯度座標為(24.401, 121.369)，屬公路局第四工程處獨立山段管轄，行政區域屬宜蘭縣大同鄉南山村，監測場址範圍如圖 1.1 所標示，該處為沿里程增加方向爬坡之迴頭彎(如圖 1.2 所示)，因轉彎處位於馬當溪上游向源侵蝕區，因此原有路線已改線內縮，且向源侵蝕面之邊坡仍持續發生滑動，此處因地形及地質條件不佳，導致每年受颱風、地震及豪大雨影響，且現地鑽探結果顯示地表下 50m 內為高度風化破碎岩盤，除易產生邊坡滑動，其工程性質整體較接近均質地質材料，因此以試辦計畫形式，測試原應用於均質土壤淺層滑動監測與預警架構，並提出長期監測與預警架構。

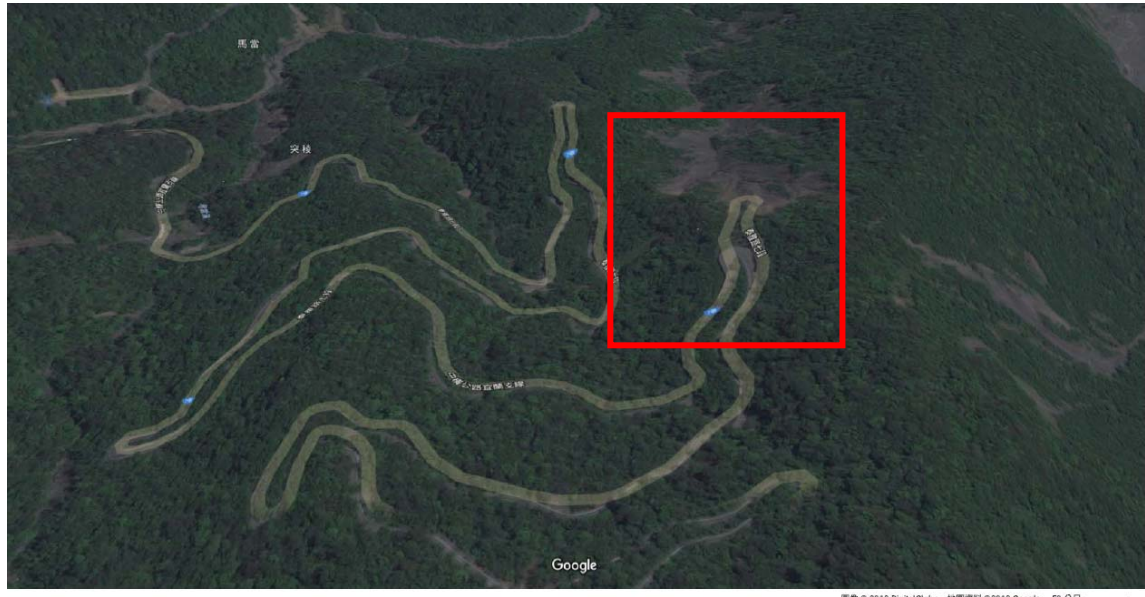


圖 1.1 計畫檢測區域範圍(Google map)

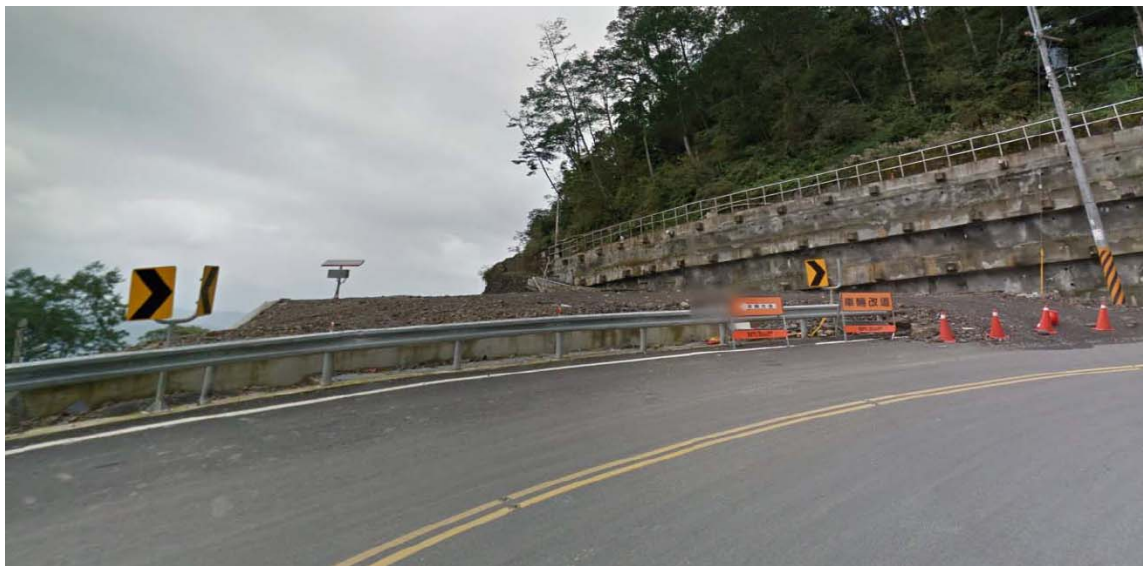


圖 1.2 監測區域 2013 年照片(Google earth)

本所與公路總局第四區養護工程處針對此測試場址已召開兩次會議研商，於 106 年 7 月 27 日於交通部公路總局第四區養護工程處，召



開「公路邊坡災害預警系統運用在蘇花公路及中橫公路可行性」研討會議，107 年 1 月 5 日於交通部公路總局第四區養護工程處召開「為辦理近景攝影測量技術與均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測試辦計畫」研商會議。會議決定啟動相關測試場址監測與分析作業，此試辦計畫應運而生。

### 1.1.2 計畫目的

本試辦計畫測試發展中以入滲速率、地表傾斜及土層孔隙水壓為指標之預警模式，搭配邊坡與擋土牆體無線監測模組，除具快速佈設與價廉之特點，尚可取代傳統人工監測費時、昂貴及非即時之限制。搭配考慮入滲之非飽和土層滑動極限平衡分析及時域邊坡水力力學耦合數值分析，建立客製化公路依時預警系統。

計畫以本所目前發展測試中之公路邊坡無線監測模組，以台 7 甲線 41.55K~41.65K 邊坡為測試場址，利用物聯網使用之軟硬體，結合傳統自動監測感測器及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，客製化以太陽能及鋰電池供電，以具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤濕度、溫度之監測模組，於邊坡及擋土牆反應靈敏處佈設，搭配即時地下水位監測及擋土牆體傾角，並以無線傳輸方式將各量測點間資料傳至雲端或監測主機，形成分佈式土層及擋土結構反應監測網路，並結合力學理論之解析法進行邊坡穩定分析，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，研究成果期能達到應用科技於邊坡檢監測之成效，提供研擬相關應變處置作為之參考。

### 1.1.3 計畫重要性

因降雨引發滑動崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法兩種。經驗法因缺乏嚴謹之力學概念，具有相當不確定性，導致其準確度不足。解析法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、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。因採用水力力學耦合進行分析，可預測邊坡之滑動面、滑動歷時及滑動體積，故預警精度、正確性相對提高，藉以用來改善預警精度、建立依時預警模式與減災設施規劃等有其必要。

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

本所發展公路邊坡監測模組及分析已有數年，前期主要以硬體研發及搭配分析軟體為主，目前已有三處執行中之監測場址，藉由本計畫執行將現有系統於現地進行整合測試，此外本計畫增加擋土牆體監測及考慮擋土牆之邊坡土壤結構互制分析，擴展現有架構之適用性，拉近研究與實務之差距，漸次累積發展中之邊坡依時預警系統之應用案例，除作為後續改良之參據，並可縮短實際推廣應用之期程。

## 1.2 研究範圍與對象

本計畫針對選定之山區公路土壤邊坡，進行無線感測網路模組設置，並結合具嚴謹力學理論之解析法進行邊坡穩定分析，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，監測與預警標的為台 7 甲線 41.55K~41.65K 之迴頭彎外側向源侵蝕邊坡及現有公路擋土結構，研究全程 13 個月。

依公路總局第四區養護工程處 106 年”台 7 甲線 41K+700 及 34K+400 邊坡觀測工作-新增觀測孔位地層資料”報告，與此場址最近之 34K+400 鑽孔資料顯示，由地表往下 50m 深度內均為 RQD 為 0 之破碎頁岩層，岩石弱面結構不顯著，分析時可視為均質具粗顆粒之土壤，於台 7 甲線 41K+700 附近現有 4 孔安裝傾斜管(編號 S1-3~S1-6)觀測土中位移分布，另有 2 組牆體傾度盤(編號 T1-1 及 T1-2)，儀器配置如圖 1.3 所示，其中除 S1-5 深度為 80m，其餘 3 孔深度均為 50 m，依

106 年”台 7 甲線 41K+700 及 34K+400 邊坡觀測工作-監測報告書”顯示該年度含初始值量測計監測 5 次，各傾斜管讀數改繪之觀測紀錄如圖 1.4~1.7 所示。監測記錄顯示邊坡滑動為沿 A 向(坡面法線方向)，滑動深度可能大於 80m，此與鄰近鑽孔 50 m 深度內均為 RQD 為 0 之破碎頁岩層結果一致，最靠近裸露坡面之 S1-5 及 S1-6 地表累積位移超過 20 mm，且 S1-5 於深度 5 m 處有一顯著滑動面，相關資料將做為地表傾斜監測配置之依據。而傾度盤監測顯示角變量小於 1/5000，小於警戒值 1/300。

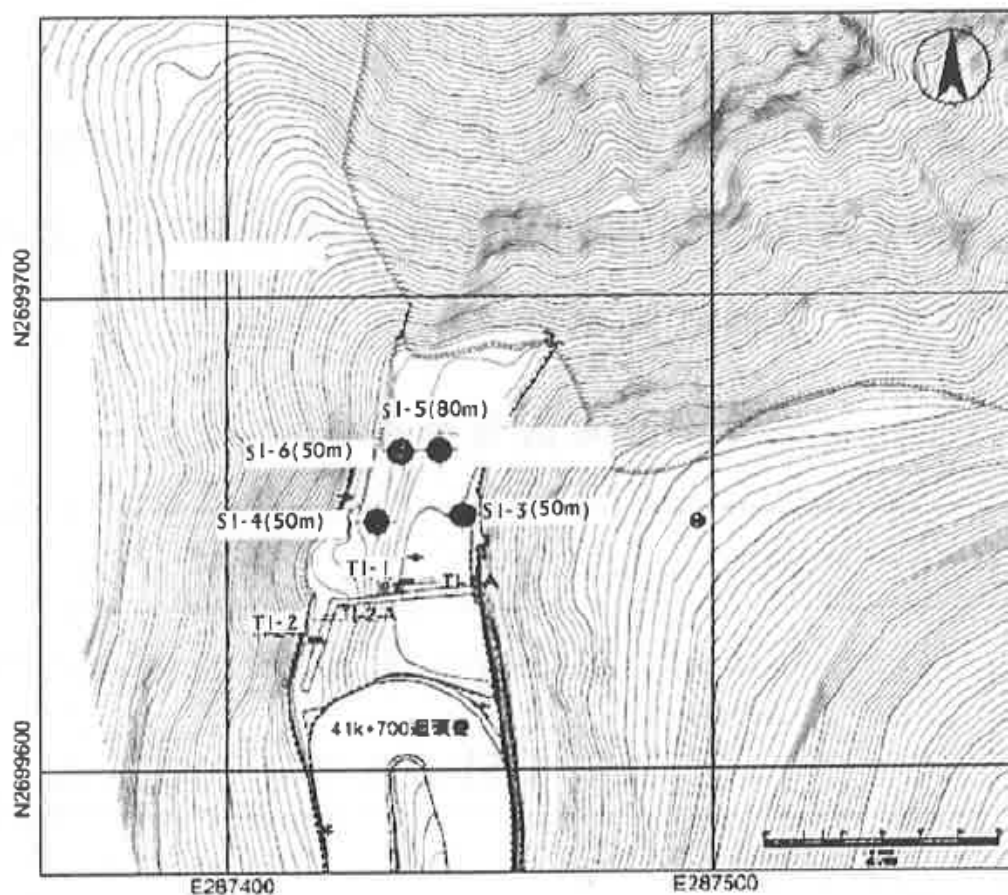


圖 1.3 台 7 甲線 41K+700 監測儀器配置圖(公路總局四區處)

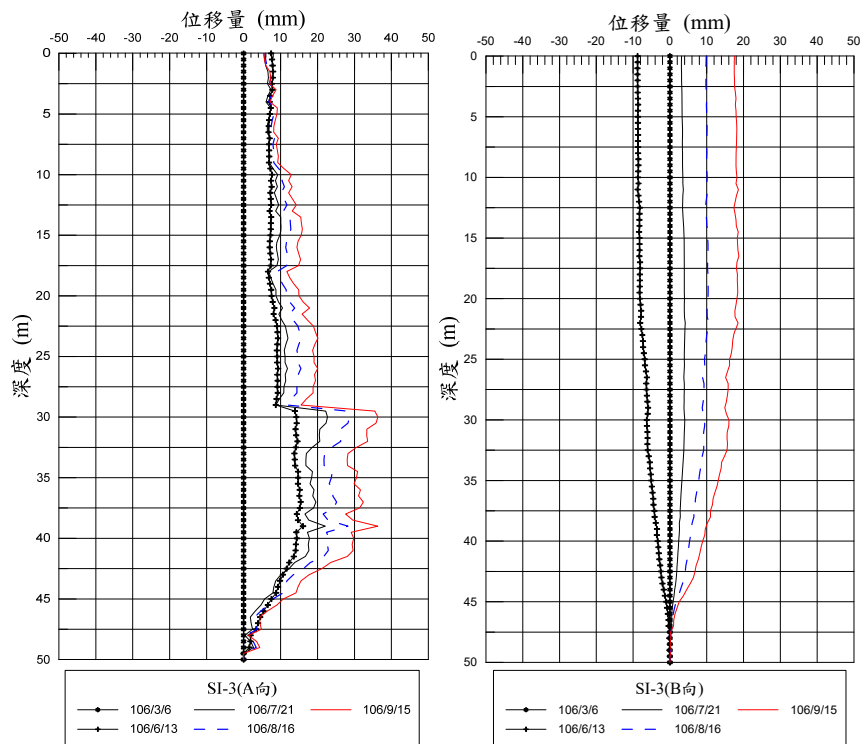


圖 1.4 台 7 甲 41K+700 S1-3 傾斜管紀錄(改繪自公路總局四區處)

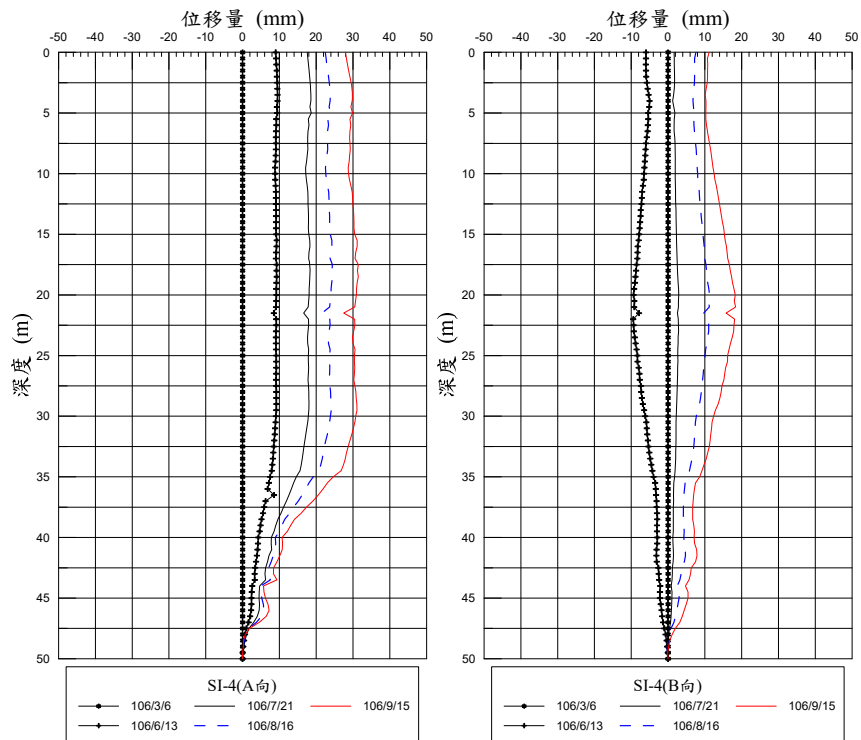


圖 1.5 台 7 甲 41K+700 S1-4 傾斜管紀錄(改繪自公路總局四區處)

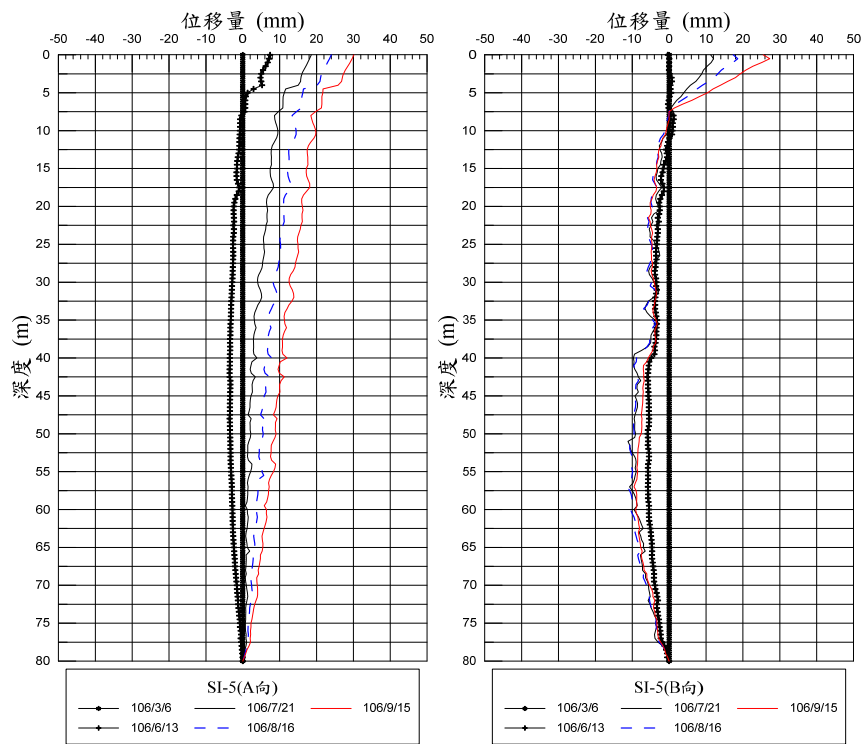


圖 1.6 台 7 甲 41K+700 S1-5 傾斜管紀錄(改繪自公路總局四區處)

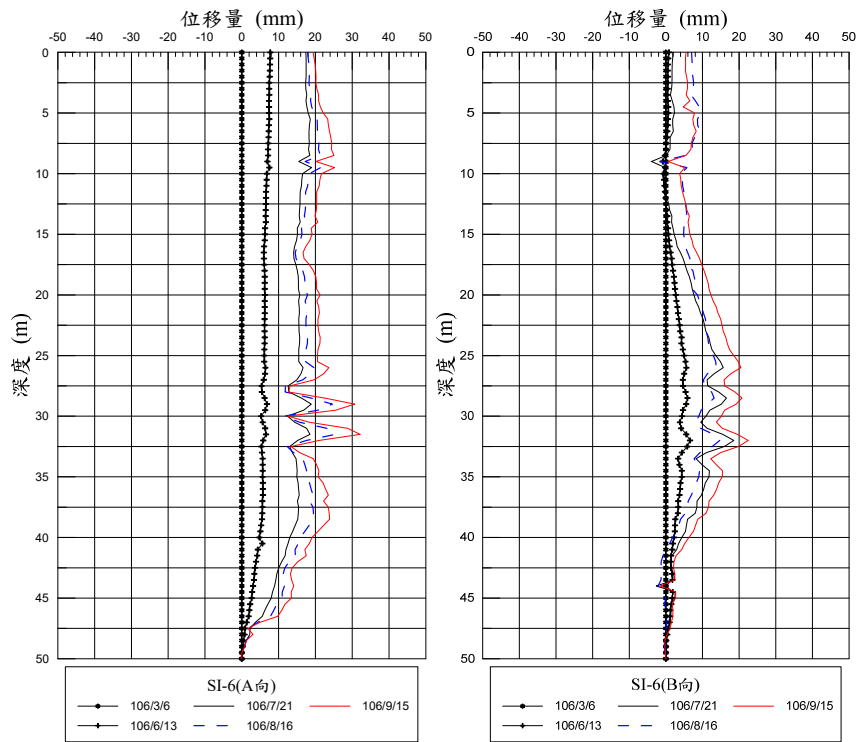


圖 1.7 台 7 甲 41K+700 S1-6 傾斜管紀錄(改繪自公路總局四區處)

本計畫原規劃以分層電子水份計監測入滲速率，電子式傾度儀監測地表角度變化，並於現地傾斜管內裝設可取出式電子液位計，監測現地邊坡受降雨引致之地下水位變化，以此三類感測器監測邊坡變化，擋土牆體以兩向(平行及垂直牆面)傾度儀監測牆面變位。模組監測訊號以 LoRa 傳送至現地資料匯集傳輸模組，以 4G 網路傳送至雲端儲存與顯示，並以網頁方式呈現，所有模組均以太陽能板及充電式鋰電池供電，可避免現地佈線與市電需求。而為因應現場為向源侵蝕之粗顆粒礫石，因此計畫後期調整為監測表層土壤傾角與擋土牆體傾斜。

計畫另測試以現有針對不同滑動機制之土壤無限邊坡極限平衡與二維邊坡因降雨入滲引致破壞之數值模式，進一步考慮降雨引致之地下水水力反應，進行土層有效應力分析，發展具滑動潛勢場址之水力學耦合分析技術，評估其滑動面、滑動歷時及水力反應，作為表層監測量測物理量與預警模式之依據。因現地為向源侵蝕之粗顆粒礫石，表層入滲快速且地下水位極低，因此分析改以向源侵蝕機制模擬。

### 1.3 研究內容、項目與成果要求

本測試計畫全程計 13 個月，橫跨 107~108 年度，第 1(107)年為製作監測設備，第 2(108)年為監測設備安裝與資料分析，所列工作項目與進度如表 1-1 所示，分年工作項目如下：

(一)107 年度完成的工作項目如下：

1. 選定台 7 甲線 41.55K~41.65K 邊坡淺層破壞檢監測場址，規劃邊坡擋土壁體監測模組布設及發展資料處理程序。
2. 針對台 7 甲線 41.55K~41.65K 山區公路土壤邊坡滑動現象，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，製作均質土層無線監測網路模組，模組項目與數量如下：

(1) 雲端液位計即時監測傳輸模組 4 組：運用電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位。

表 1-1 計畫進度甘特圖(Gantt Chart)

| 工作項目                                                                          | 第<br>1<br>月       | 第<br>2<br>月 | 第<br>3<br>月 | 第<br>5<br>月 | 第<br>7<br>月 | 第<br>9<br>月 | 第<br>10<br>月 | 第<br>11<br>月 | 第<br>12<br>月 | 第<br>13<br>月 | 備<br>註 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| 監測模組製作組裝測試                                                                    |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 模組現地安裝與調整                                                                     |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 監測資料分析                                                                        |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 期中報告                                                                          |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 場址水力力學耦合分析                                                                    |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 客製化預警值建立                                                                      |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 監測網頁建置                                                                        |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 期末報告初稿                                                                        |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 系統轉移教育訓練                                                                      |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 工作進度估計<br>百分比(累積數)                                                            | 10                | 20          | 30          | 45          | 60          | 70          | 80           | 90           | 95           | 100          |        |
| 預定查核點                                                                         | 第 1 季: 監測模組製作組裝測試 |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
|                                                                               | 第 2 季: 期中報告       |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
|                                                                               | 第 3 季: 客製化預警值建立   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
|                                                                               | 第 4 季: 期末報告初稿     |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| 說明:(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。                               |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| (2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定:①工作天數②經費之分配③工作量之比重④擬達成目標之具體數字。 |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |
| (3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。                               |                   |             |             |             |             |             |              |              |              |              |        |

- (2) 表層入滲及傾斜無線傾斜監測模組 8 組：以電容式土壤水分計及傾斜儀進行量測，並包含電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒。
- (3) 擋土牆壁體無線傾斜監測模組 4 組：以傾斜儀進行量測，並包含鋰電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒。
- (4) 資料匯集傳輸模組(Server 端)1 組：監測資料收集並回傳。
- (5) 電源供輸及節電裝置 12 組：運用太陽能板、太陽能電源控制器及鋰電池，設計節電裝置。

## (二) 108年完成項目

1. 於台 7 甲線 41.55K~41.65K 土層邊坡及擋土牆上設置無線感測網路模組，進行現地測試、監測與分析。
2. 以 FLAC 分析軟體進行邊坡水力力學耦合反應分析，且考慮滲流對土壤有效應力之影響，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程。
3. 建立淺層崩塌數值分析流程及研究場址之資料即時展示網頁。

## 1.4 預期成果、效益及其應用

本計畫之核心為於選定場址安裝並測試可快速佈設且具依時特性之公路土壤邊坡地表及擋土結構監測破壞預警技術，研究成果初期可提供養護工程處及各工務段等單位做為相關防災啟動之參據，預期完成之成果與效益包括如下：

預期成果：

1. 針對台 7 甲線 41.55K~41.65K 山區公路土壤邊坡與擋土壁體滑動現象，組合資料擷取、分析研判、數據傳輸功能，製作均質



土層無線監測網路模組。

2. 完成台 7 甲線 41.55K~41.65K 邊坡及擋土牆設置無線感測網路模組，進行地表傾角、土中分層含水量及擋土牆傾角監測，形成分布式淺層土層感測網路，實施連續監測與資料分析。
3. 建立以嚴謹力學概念及具代表性現地材料參數為基礎之解析法土壤邊坡滑動分析架構，並以此做為台 7 甲線公路土壤邊坡滑動預警模式之雛形。

預期效應與應用：

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

後續可推廣應用於可快速布設且具依時特性之公路土壤邊坡地表監測預警技術，研究成果提供交通部、公路總局第四區養護工程處及各工務段等單位，做為相關防災啟動之參據。



## 第二章 研究方法及進行步驟

### 2.1 研究方法

多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，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。降雨入滲除增加土坡的下滑力，減弱材料勁度與強度，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不可或缺。

本計畫與現有公路邊坡預警系統主要差異為發展以土層水力反應與地表位移為指標之預警模式，研發搭配之表層邊坡與土中水壓無線監測模組，監測系統具有快速佈設與單價便宜之特點。以物聯網常用之軟硬體，採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表與牆體傾角、坡面與背填土壤分層土壤含水量、土層孔隙水壓等功能之監測模組，於選定場址反應靈敏或對公路具危害之處佈設，形成分佈式公路邊坡反應感測網路。由於此類電子產品大量生產因此可大幅降低成本，且監測點位選定與分佈式監測感測模組反應詮釋一併考量，監測之結果亦可回饋解析與數值分析模式，此流程將可做為開發快速佈設且具依時特性之公路邊坡破壞預警技術，及相關防災啟動之準據。

本計畫針對之破壞類型為包括滑動面位於非飽和土層深度較淺之滑動及滑動面位於飽和土層之深度較深之滑動類型，此二類型觸發機制不同且較為常見。計畫包括進行考慮水力力學耦合之土層邊坡與擋土結構穩定分析及無線監測模組安裝，整合此二主軸，建立具依時特性之公路邊坡預警系統，研究流程如圖 2.1 所示，整體流程包括以解析與數值法為基礎之水力力學耦合分析，建立場址具依時特性之地表運動量(位移與傾角)及表層土壤水力反應，結合所安裝之無線監測模組提供之即時監測土層力學與水力反應，修正水力力學耦合分析成果，並

依修正結果推估滑動發生時間及滑動土體幾何性質，作為具依時特性之場址客製化預警系統。

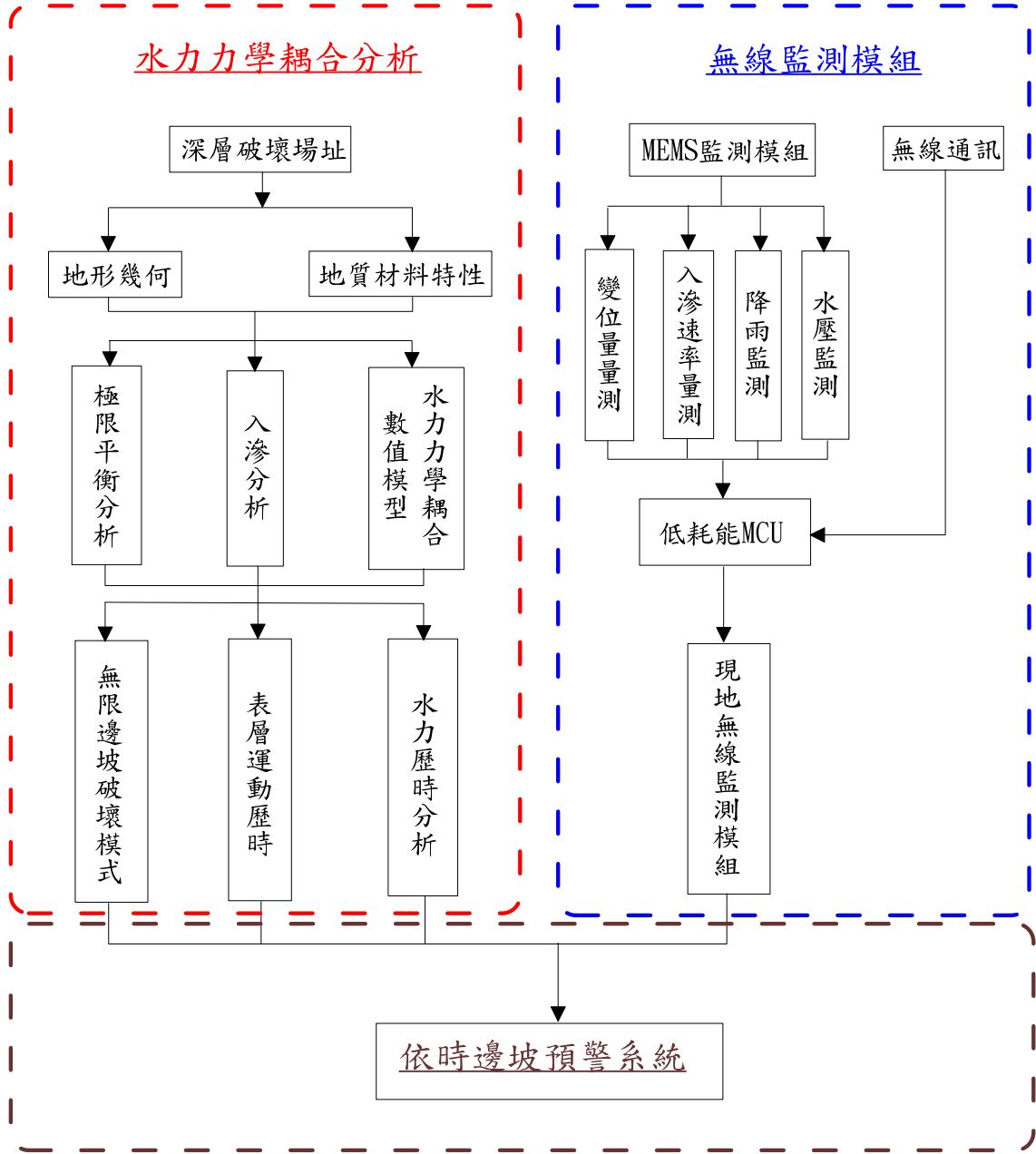


圖 2.1 依時邊坡預警系統架構圖

水力力學耦合分析包括考慮非飽合土壤中入滲之及飽和區孔隙水壓變化特點，考慮水力邊界條件，求解 Richards equation，以模擬入滲與滲流引起之土壤抗剪強度降低及下滑力增加，考慮極限平衡分析即可進行與 Collins and Znidarcic (2004)近似之臨界破壞深度與破壞包絡線分析，預測若破壞其可能破壞之時間，此為初步之解析成果，其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，本計畫以假設合理之邊界與初始條件，進行考慮入滲與滲流之時間域水力分析，水力分析之結果即時更新土壤有效應力及土壤勁度與強度，進行二維土層時域有效應力分析，以推估滑動土體於地表位移與傾角歷時。

由於進行解析法邊坡穩定分析輸入參數具有不確定性，因此須以現地監測結果反饋進行模式修正與調整，鑒於以雨量預警具一定不確定性，而現有邊坡土層監測系統佈設費時且維護不易，因此本計畫以廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤含水量、入滲速率及孔隙水壓力之監測模組，形成分佈式表層土壤無線感測網路，入滲速率由不同深度之土中含水量變化，利用入滲引起含水量增加而改變土壤介電係數之特性，量測含水量剖面並據以推估入滲速率，所推估之入滲速率將用於考慮入滲之極限平衡分析，以推估其可能破壞時間，降雨前基質吸力將由含水量結果及土壤特徵曲線推估，並作為數值分析之初始含水量依據。由水力力學耦合分析，可預測地表監測點之地表傾角與位移歷時，由監測之地表傾角與位移量可及時修正數值分析結果，並據以推估滑動之可能時間，作為依時預警之依據。

## 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

經驗指出絕大部分因降雨而導致之崩積層坡地崩塌屬於淺層破壞

(Cascini et al. 2010; Fannin et al., 2005)，破壞面深度約在 0.5 至 3m 之間，覆土壓力在 5 至 55kPa 之間。Cascini et al. (2010) 歸納前人的研究，將此類淺層邊坡崩塌分析分成破壞 (failure)，破壞後 (post-failure) 與擴散 (propagation) 三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。Cascini et al. (2010) 使用現地應力路徑 (field stress path) 的框架，將邊坡破壞後的行為分成地滑 (slide)，地滑變流動 (slide to flow) 與流動型地滑 (flowslide) 如圖 2.2 所示。其中之剪應力  $q$  定義為：

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

而平均有效應力  $p'$  定義為：

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

$F_d$  代表地層內之驅動力， $F_r$  為抵抗力， $\Delta$  為地層移動量。

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

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

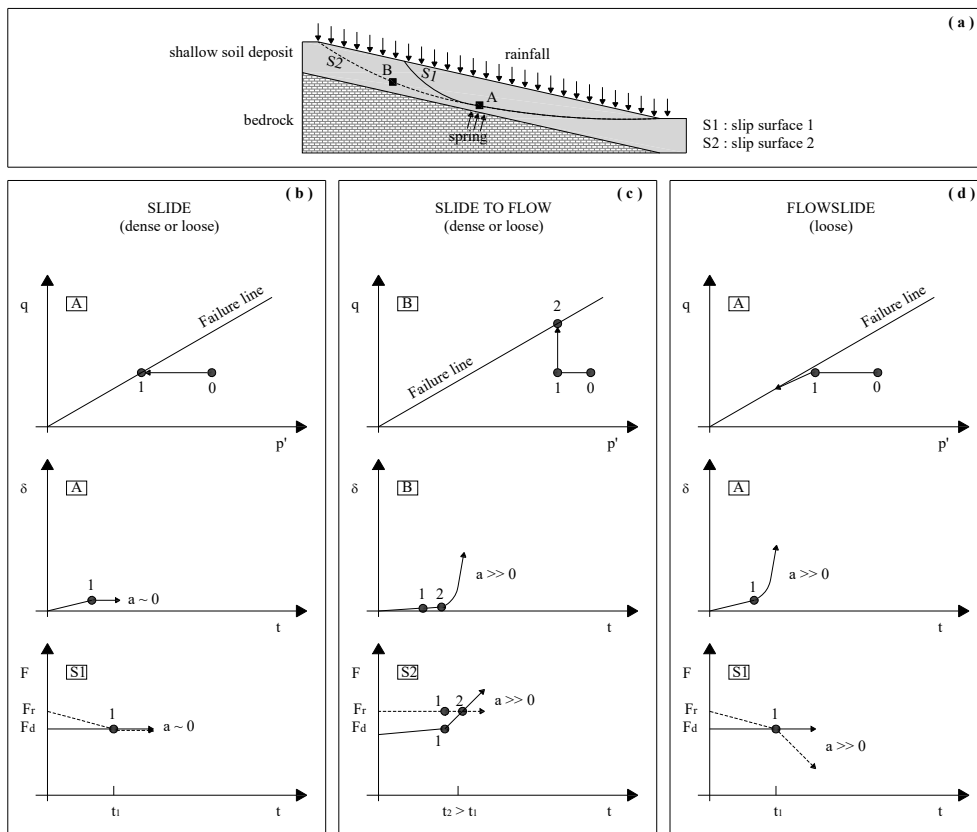


圖 2.2 由有效應力路徑的觀念來看邊坡破壞 (Cascini et al., 2010)

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

以無限邊坡極限平衡分析，結合非飽和土壤之衍伸莫爾-庫倫破壞準則(Fredlund et al. 1978)，可以得到無限邊坡破壞之臨界深度  $d_{cr}$ ，考慮滲流力發展，將臨界深度表示為壓力水頭和土壤特性參數的函數，考慮土層內之壓力水頭變化，可定義出土層壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係之穩定包絡線(圖 2.4)，此可做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。

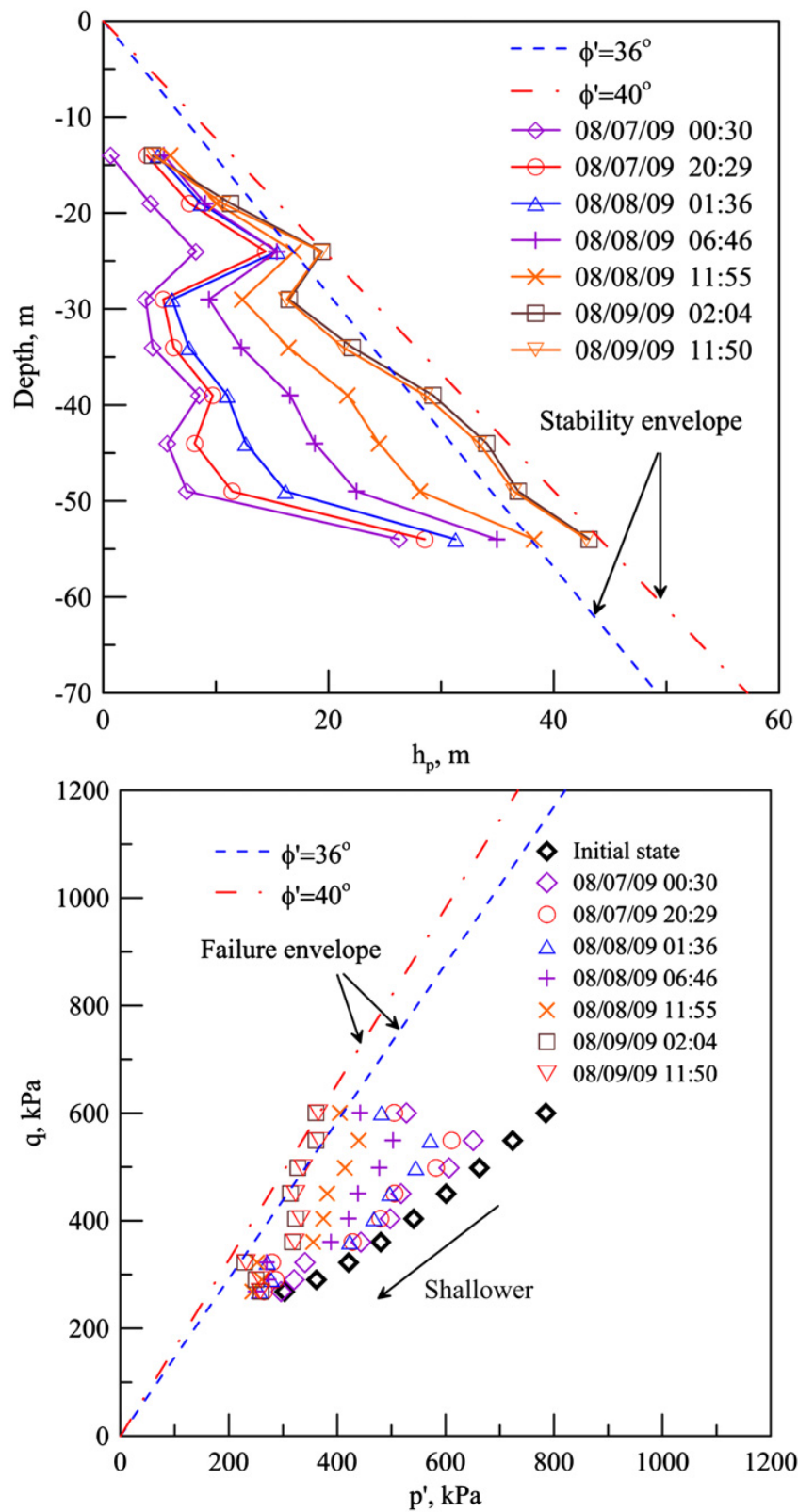


圖 2.3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)



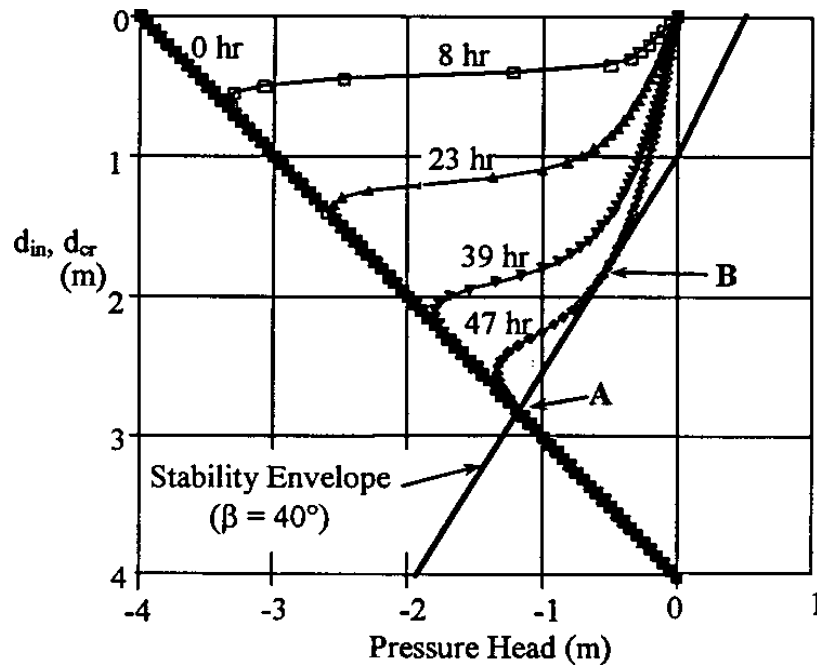


圖 2.4 典型細顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

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

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

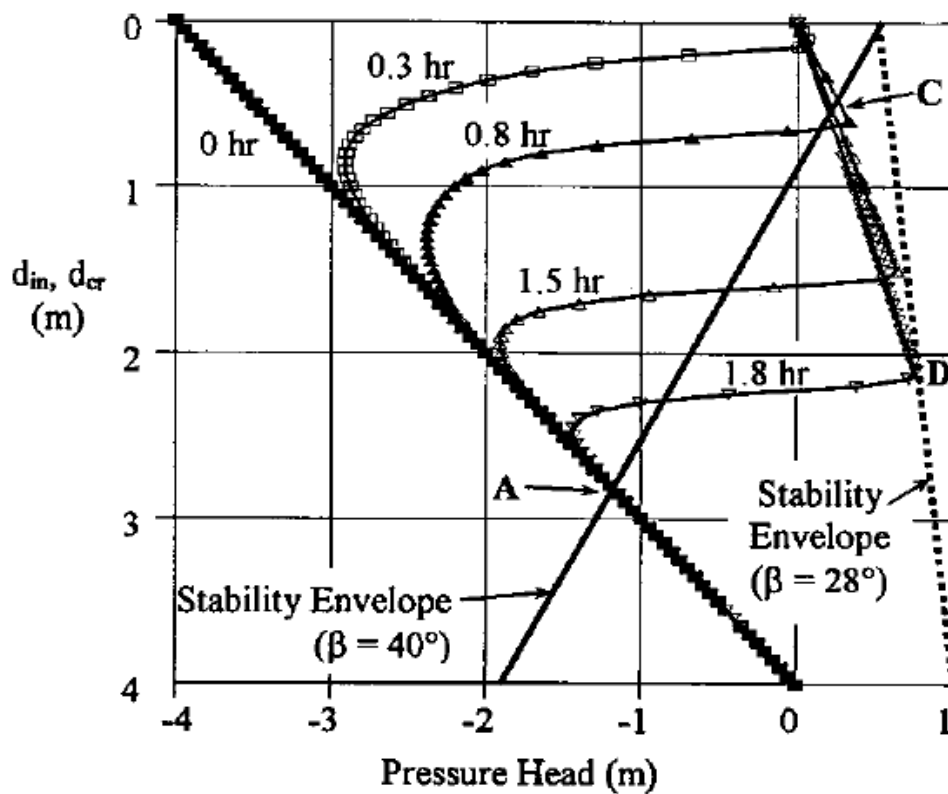


圖 2.5 典型粗顆粒土壤入滲分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

### 2.2.2 邊坡監測預警

目前國內外所採用之道路邊坡監測系統(儀器)種類繁多,常見之監測儀器可分為:(1)土中位移監測;(2)地表位移監測;(3)水壓或地下水位監測;(4)雨量監測;(5)土壓監測;(6)擋土結構監測等。可依據邊坡之可能破壞模式及風險性之不同進行分級,對於風險性較低或較穩定之邊坡,選擇簡易及較經濟之監測系統加以監測,對於風險性較高或較不穩定之邊坡,則需選擇較完整之監測系統(運研所, 2013)。

黃安斌等人(2002)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。

李秉乾(2004)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。

Uchimura et al. (2008) 發展一簡易邊坡預警監測系統，其僅監測表面位移傾角及坡面含水量變化，系統配置如圖 2.6 所示，藉由無線網路可將地表運動與含水量變化傳送至監控中心，配合邊坡破壞前會有一顯著轉動之特性，可進行必要之預警，此系統已布設於多個場址，為現今具有較多應用案例之系統，國內則有張達德等(2013)以傾度儀結合 Zigbee 無線傳輸，於國道三號 3.1K 進行無線網路邊坡預警監測，但其系統監測至破壞之時間不一，並無安裝位置之建議，對於非圓弧破壞其地表傾度並不顯著，且預警準則為經驗法則，缺乏嚴謹力學分析，仍有相當改善空間。運研所(陳志芳，2015~2018)自 2015 年起開始發展現地淺層監測模組，並結合水力力學耦合分析，本研究即基於此架構進行應用測試。

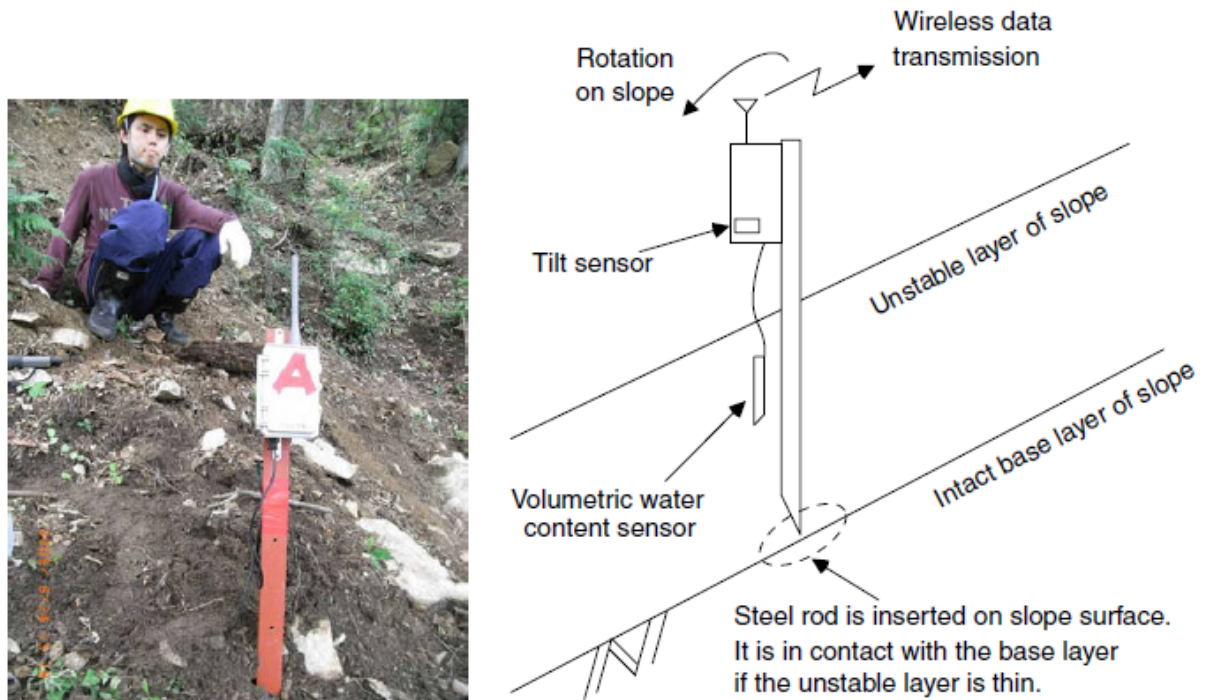


圖 2.6 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

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

## 2.3 水力力學耦合邊坡穩定分析與依時預警

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

### 2.3.1 土壤含水量特徵曲線

土壤含水量特徵曲線(soil-water characteristic curve, SWCC)為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，含水量通常以體積含水量( $\theta$ )表示，亦可用重量含水量( $\omega$ )或飽和度( $S_r$ )表示，典型的土壤含水量特徵曲線如圖 2.7，土水特徵曲線之斜率可視為土壤的儲水能力(storage capacity)。非飽和土壤因基質吸力(matric suction,  $u_a - u_w$ )改變，在吸水(wetting)及排水(drying)的過程中因排水後土壤顆粒排列變緊密會產生

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。另外，在非飽和土壤中，滲透係數亦會受到基質吸力的影響，如圖 2.8 所示。

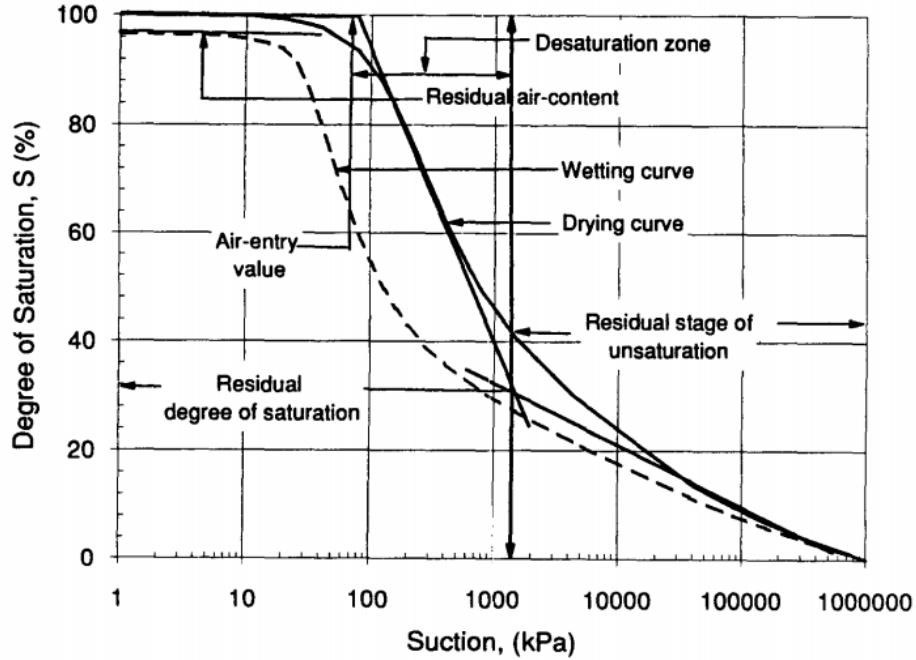


圖 2.7 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)

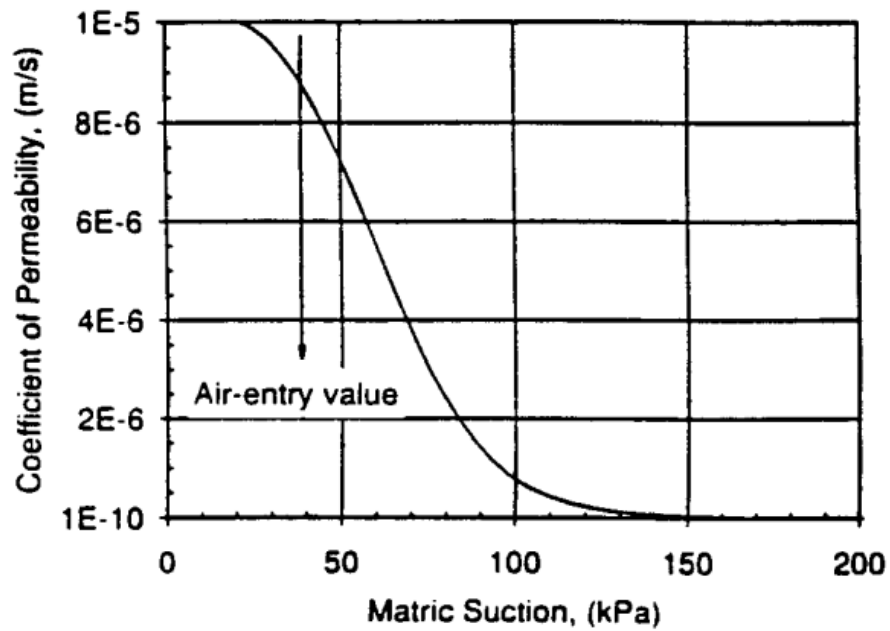


圖 2.8 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995)

### 2.3.2 非飽和滲流分析

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

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

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

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

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。

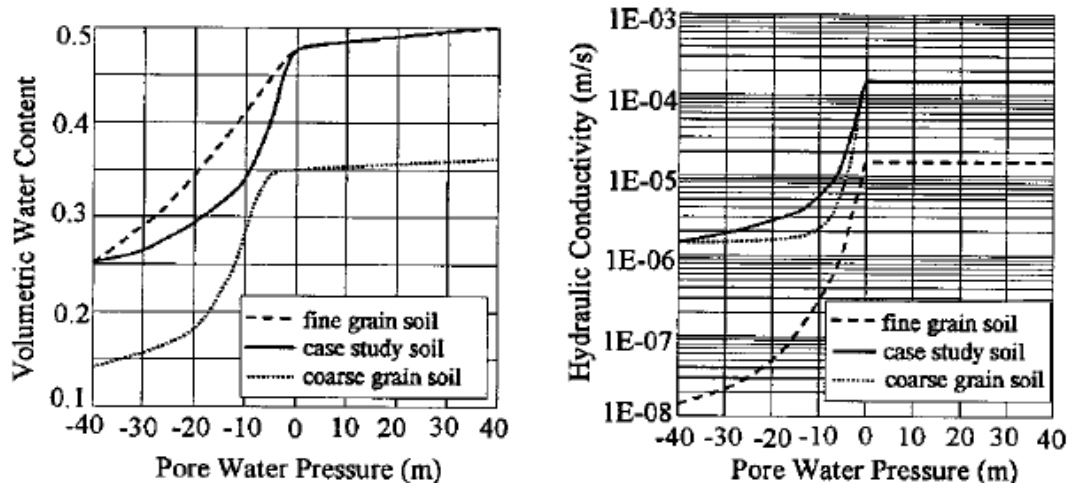


圖 2.9 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

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

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

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

以 Crank-Nicolson 有限差分法，以求解深度之  $1/400$  為  $\Delta z$ ， $\Delta t$  則以 Hills 等人所建議的  $\Delta t$  限制式， $\Delta t \leq \Delta z / |V|$ ， $V = Q / (\theta(0, t) - \theta_i)$ ，即數值計算之可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可將式 2.4 式改寫為差分形式：

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

前期以此一維分析模式，以上邊界之使用壓力水頭為 0，下邊界條





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

自重  $W$  可分解為垂直坡面  $W_N$  和平行坡面  $W_S$  兩個分量：

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

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

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

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

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

水平滲流力  $S_h$  可以式(2.8)表示：

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

故滑動面上之正向力  $N$  及剪力  $S$  可以式(2.9a)、(2.9b)表示：

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

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

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

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

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

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

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

可推導臨界滑動深度  $d_{cr}$  為：

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

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

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

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

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

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

所對應之安全係數(FS)為：

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

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

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

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

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

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

式(2.13)中若忽略基質吸力、基質吸力摩擦角與垂直滲流影響，將入滲轉換為孔隙水壓力，則其破壞模式即為傳統無限邊坡滑動，考慮孔隙水壓變化歷時，可建立具依時特性之飽和土層滑動機制。

### 2.3.4 二維水力力學耦合數值分析

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

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

分析時以修正之 Mohr-Coulomb 彈塑性組構模式，考慮其剪力強

度( $\tau^{\max}$ )為:

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

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

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

式中  $a$  為土壤常數， $S_e$  為有效飽和度，其定義為:

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

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

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

式中  $\rho_w$  為水之密度， $\alpha$  為土壤常數。

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

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

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

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

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

以甲仙監測場址二維維水力力學耦合分析為例，該場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，以圖 2.11 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 2.12 所示，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，其值與深度相近，來源為靜水壓，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，ID05 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 2.13 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動，此可由 ID05 地表位移與傾角歷時(如圖 2.14 所示)與不同深度達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，上邊坡 ID05 預測於持續降雨入滲下於  $2.2 \times 10^5$  秒(約 2.54 日)產生滑動，且此時土層均達到飽和，且地表於  $1.5 \times 10^5$  秒(約 1.6 日)前開始有顯著傾角變化，且傾角為先正(順時針)後負，此因滑動面由淺層轉為深層，深土層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

### 2.3.5 邊坡依時預警架構

無限邊坡之依時預警以上述分析結果為例，若不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 2.15 所示，破壞發生於地表飽和後 42 小時，滑動面深度為 1.5m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果或 VG model 推估，在 0.75m 深度，以式 2.16 推估之破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.16 所示，由破壞時間(42 hr)往前推算可決定不同時間所對應之體積含水量，若以破壞前 24 小時為預警時間，則所對應之體積含水量為 0.22，可由現地於 0.75m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.16 推估。

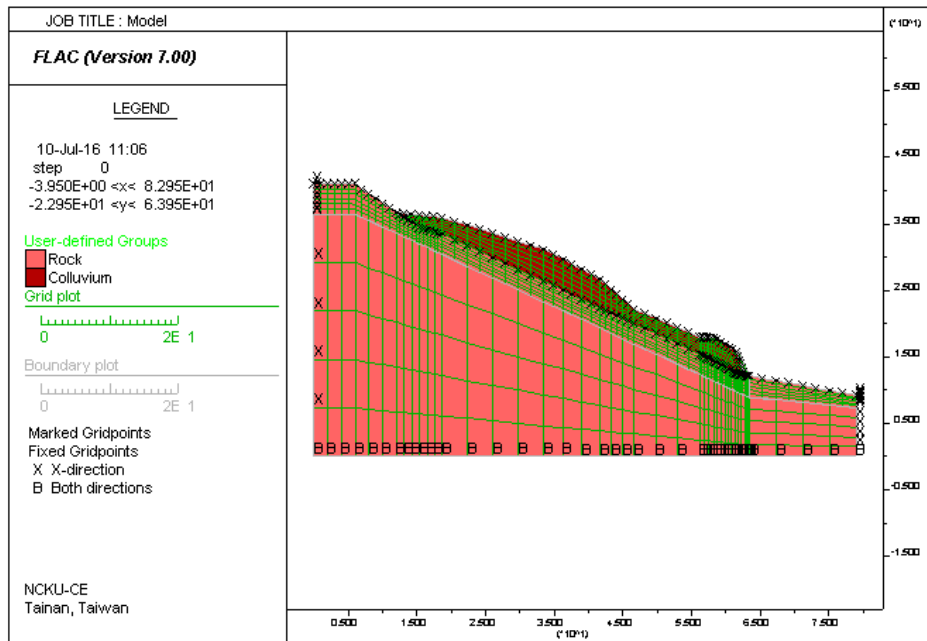


圖 2.11 數值分析模型



圖 2.12 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量

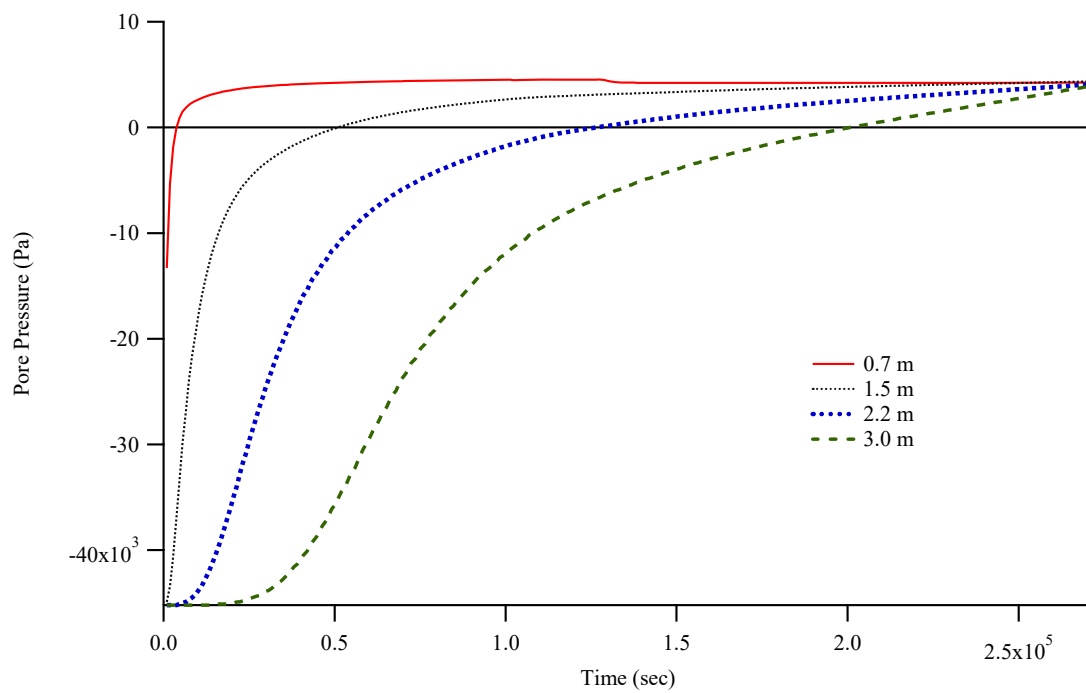


圖 2.13 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

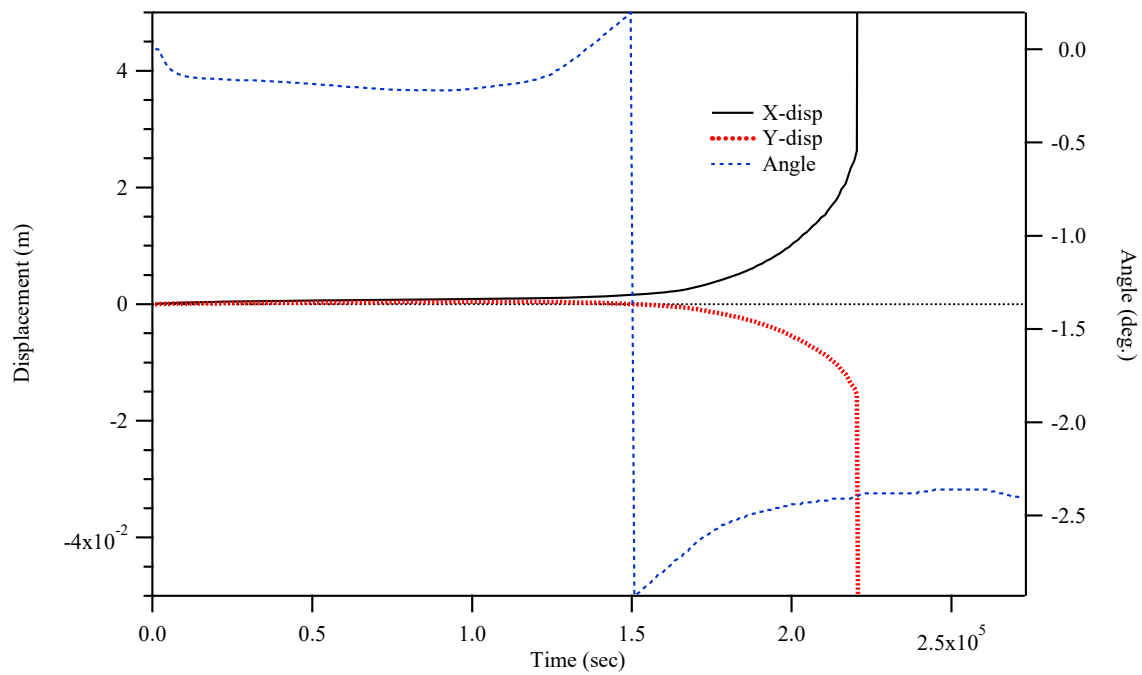


圖 2.14 ID05 位置預測地表運動歷時

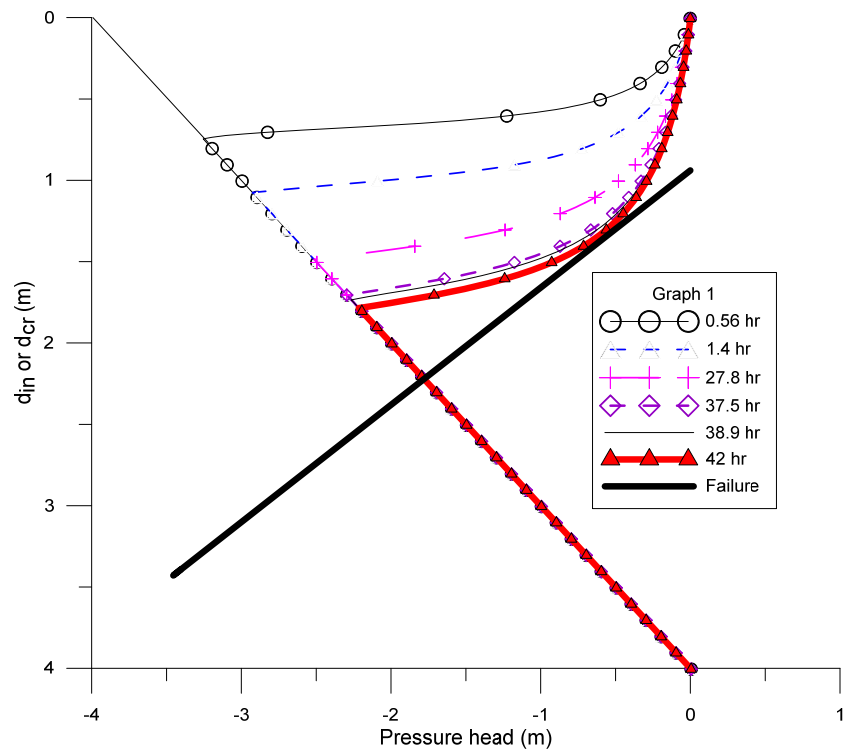


圖 2.15 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

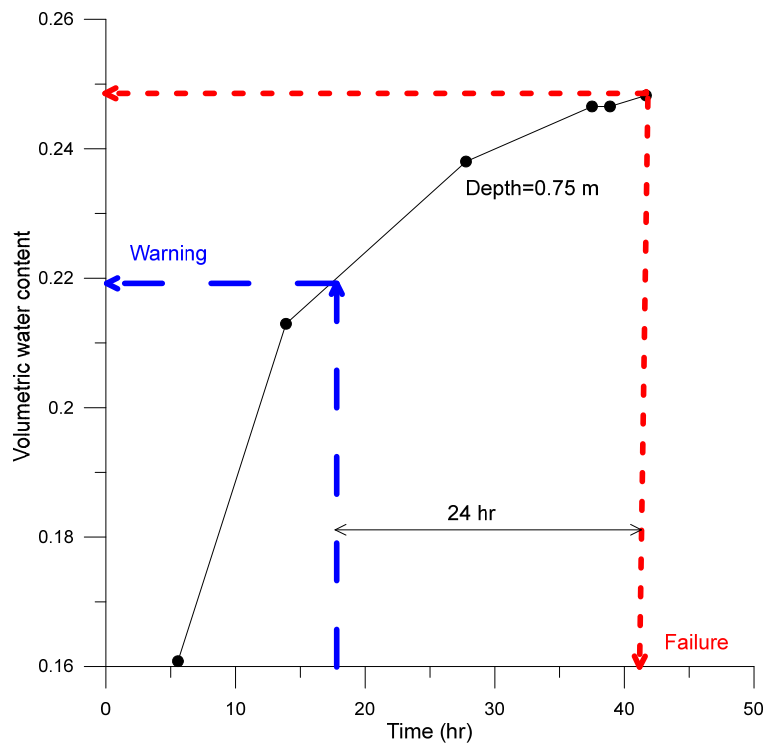


圖 2.16 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念



而二維案例以甲仙場址上邊坡為例，由 VG model 可推估其體積含水量變化，深度 1.5m 處含水量歷時如圖 2.17 所示，推估破壞時間為 61 小時，因此往前推算 24 小時所對應之體積含水量為 0.52，因此時已接近飽和，因此其數值較不可靠，此乃因所選場址土層厚度僅約 2.5m，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但由地表傾度觀測結果(如圖 2.18 所示)，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，因此此類邊坡較適宜以地表傾角作為訂定依時預警之物理量。

由無限邊坡與二維分析結果顯示非飽和水力分析中之滲透係數對破壞時間預測具有重要影響，但是此類參數求取不易，且會受降雨前地下水位或基質吸力大小之影響，因此相當複雜，而解決途徑之一為於降雨時進行現地監測水分變化，由其表層入滲流況推估，並可據以更新破壞時間推估曲線，此為無線監測模組中分層含水量監測所具有之功能。若現地符合無限邊坡條件，則可由現地土層參數及量測推估之滲透係數推估滑動深度及滑動之時間。若現地須進行二維分析，則由初期以合理假設之參數進行耦合分析，求得地表傾角與運動量分佈，作為無線監測模組安裝位置之依據，安裝時依滑動面選取包括最大運動及無顯著反應處，由初期無顯著破壞之監測值可先進行模式修正，雨季時由即時表層入滲及運動量據以修正依時預警歷時曲線及滑動面位置，相關不同階段之門檻值可由管理單位需求進行後續制定。由相關耦合分析結果顯示，以表層入滲行為與表層運動量監測推估破壞過程理論上可行。

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

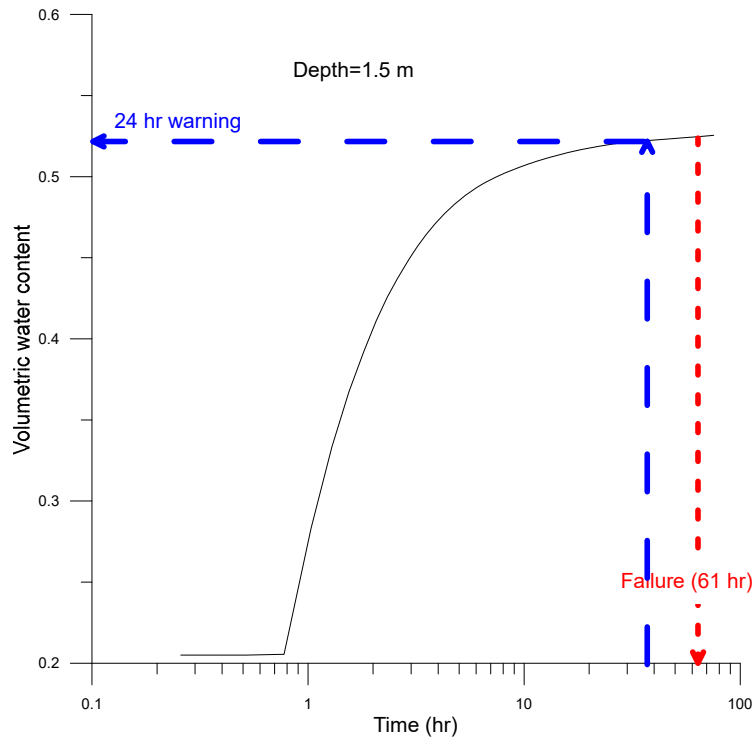


圖 2.17 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念

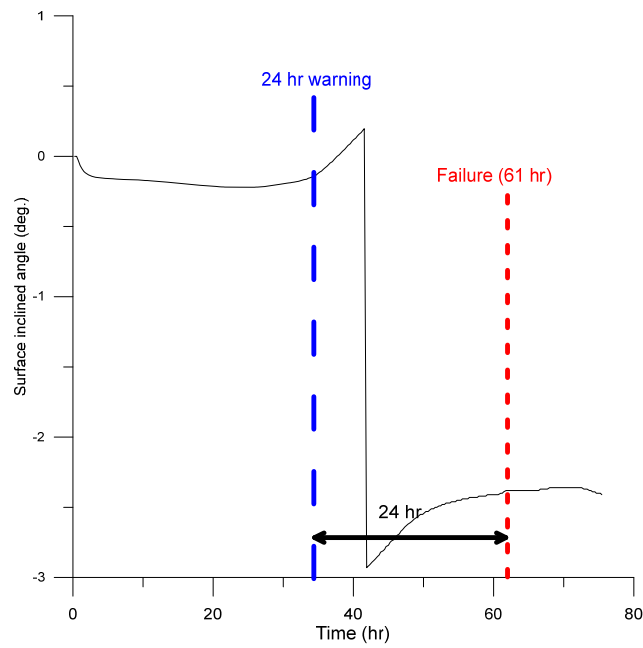


圖 2.18 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念

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

## 2.4 計畫進行步驟

本計畫期間合約要求之主要工作包括：(1)於選定場址台 7 甲線 41.55K~41.65K 規劃安裝邊坡土層及擋土壁體即時監測系統、(2)監測資料分析與網頁展示及(3)進行場址水力力學耦合解析法分析及預警值建立，主要工作項目說明如下：

### 2.4.1 監測規劃及安裝

合約規定模組項目與數量如 1.3 節所列，規劃安裝配置如下：

1. 利用現有四孔傾斜管安裝液位計，監測土中孔隙水壓變化，並由本團隊自行安裝之雨量計，觀測降雨與常時邊坡孔隙水壓變化，希冀建立降雨特徵與孔隙水壓變化之預測模式。
2. 於向源侵蝕邊坡以四組表層入滲及傾斜無線傾斜監測模組，結合液位計，建立兩排表層入滲反應與傾斜監測陣列，整合表層與飽和層水力力學反應成果，釐清向源侵蝕邊坡破壞機制，以利後續預警值建立依據。
3. 於現有迴頭彎內外擋土牆體各安裝兩組牆體無線傾斜監測模組，傾斜模組由兩組位於水平面且互相垂直之傾斜儀組成，以監測牆體長期傾角變化。
4. 將四組表層入滲及傾斜傾斜監測模組安裝於選定擋土牆後背填邊坡，監測背填土壤與後方邊坡水力力學反應，作為擋土系統土壤結

構互制分析驗證，擬定擋土牆破壞預警值，限於場地限制，此部分無法進行。

5. 資料匯集傳輸模組(Server 端)1 組安裝於與各監測模組通透且安定之點位，以 4G 訊號將監測資料上傳雲端。
6. 裝設與模組搭配之 12 組太陽能供電系統，太陽能板安裝點位將考慮日照與土層穩定，以戶外型電纜連接模組。

相關安裝於 108 年雨季之前完成，以觀測降雨期間邊坡與擋土系統反應，相關位置與承辦相關人員於現地勘查後確定，且於觀測期間依工作會議決議進行滾動修正。

#### 2.4.2 監測資料分析與網頁展示

現有系統將監測資料上傳至 ThingSpeak 平台，作為雲端儲存與即時資料顯示，並以帳號管制資料流通範圍，108 年期中報告後已可上傳於中華電信 IoT 智慧聯網大平台，本年度計畫並完成專屬網頁建置，除資料顯示外尚有警戒值顯示及預留後續通知之功能。

資料分析程序包括向源侵蝕機制與滑動面分析、邊坡變位分析即牆體變位分析，相關程序於本計劃建立並於本報告中說明，所建立之即時資料分析程序於網頁進行雲端運算，並定期更新。

#### 2.4.3 水力力學耦合解析法分析

原規劃進行之水力力學耦合包括向源侵蝕邊坡及擋土結構系統，並由現地監測成果回饋力學分析，建議不同階段之量測管理值。但因此場址屬向源侵蝕，與現有水力力學耦合分析適用性有差異，因此牆體變位改以 PYWALL 進行牆後水位與牆體傾角警戒值擬定參考，另以有限差分軟體 FLAC 程式，進行大變形分析，利用擴充之兩相流分析模組、進行水力力學耦合有效應力分析，定性模擬向源侵蝕之過程。

數值模擬所需地質模型，以內政部地政司衛星測量中心申請 1~2m

解析度之空載光達數值地形模型(DTM)，以 GIS 軟體切出所需地表高程變化，相關土層資料以文獻建議值進行測試。



## 第三章 無線土層即時監測系統

本計畫採用港研中心及本團隊研發之雲端無線土層監測模組，佈設於場址邊坡表層及擋土結構物，監測邊坡地表傾角、入滲行為、土中孔隙水壓變化及牆體與背填反應，各模組間以無線傳輸方式將資料傳至雲端，由雲端進行警戒值比對並提供遠端人員判讀與預警功能，提前進行相關減災行動。模組採用廣為應用於物聯網與消費性電子產品之 MEMS 感測器，自行整合為具無線網路傳輸功能且可監測表層水力與力學反應之監測模組，形成分佈式表土層與擋土結構監測網路。由於此類電子產品為大量生產因此可大幅降低成本，本團隊已於前期計畫完成整合分佈式土壤水分計、液位計與高精度傾斜儀之無線監測模組，精進之相關模組應用於本計畫中，並開發網頁整合界面。

### 3.1 土層水文與力學反應量測

本團隊已開發一適用於降雨造成之土層邊坡滑移監測系統，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. 電容式含水量計(Capacitance moisture sensor)：量測周圍環境電容變化，透過感測器內嵌之 ADC (Analog to Digital Converter)進行數位輸出，間接測得非飽和土壤之含水量。
2. 傾斜儀(Tiltmeter/Inclinometer)：量測單軸向傾斜量變化，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，提供單軸上兩方向高精度、靈敏度之傾斜角量測。
3. 液位計(Liquid level transducer)：以電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位，以高精度 ADC 模組與微控制器(Micro-Control Unit, MCU)連結。
4. 雨量計(Rain gauge)：用於量測降雨，依操作方式可分為非自記式

雨量計與自記式雨量計，又依量測方式可分為虹吸式雨量計、秤重式雨量計、傾斗式雨量計等，本計畫採用自記式傾斗式雨量計，結合雲端模組，達到遠端監控目標。

國內外研究已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( $u_a - u_w$ )之降低，即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( $u_a - u_w$ )及與基質吸力有關之土壤摩擦角( $\phi^b$ )。現有使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，且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。間接量測方法係透過量測現地土壤體積含水量，利用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)，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( $\epsilon_r$ , 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，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，實務應用有其侷限。土壤介電常數雖亦受土壤參數影響，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。

目前市售之研究級現地土壤水分計成本較高，且尺寸不易整合於監測模組，因此本計畫以透過量測土壤介電係數，間接量測土壤含水量變化，以評估土壤內基質吸力。模組採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式土壤水份計(圖 3.1)，其律定結果如圖 3.2 所示，其於接近飽和狀態誤差較大，因此適於低於飽和狀態量測。其具有低成本、高解析度與高重複性等優勢，工作電壓 3.3V~5V，工作溫度 0~85°C，並採用 I<sup>2</sup>C(Inter-Integrated Circuit)通訊界面與微控制器與周邊設備整合。I<sup>2</sup>C 是內部整合電路的稱呼，為一種串列通訊匯流排，至少須有一主控端(Master 通常由微處理器擔任)，負責發送時脈與位址訊號，所有 I<sup>2</sup>C 元件之資料線(SDA)、時脈線(SCL)連接，具有可多組元件串聯、連接線數量少等優勢。



圖 3.1 Catnip Electronics 電容式土壤水份計

土壤水份計可進行分佈式地層含水量量測，透過多組電容感測裝設於探棒表面，即可同時監測探棒長度內土層不同深度之含水量，亦可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。

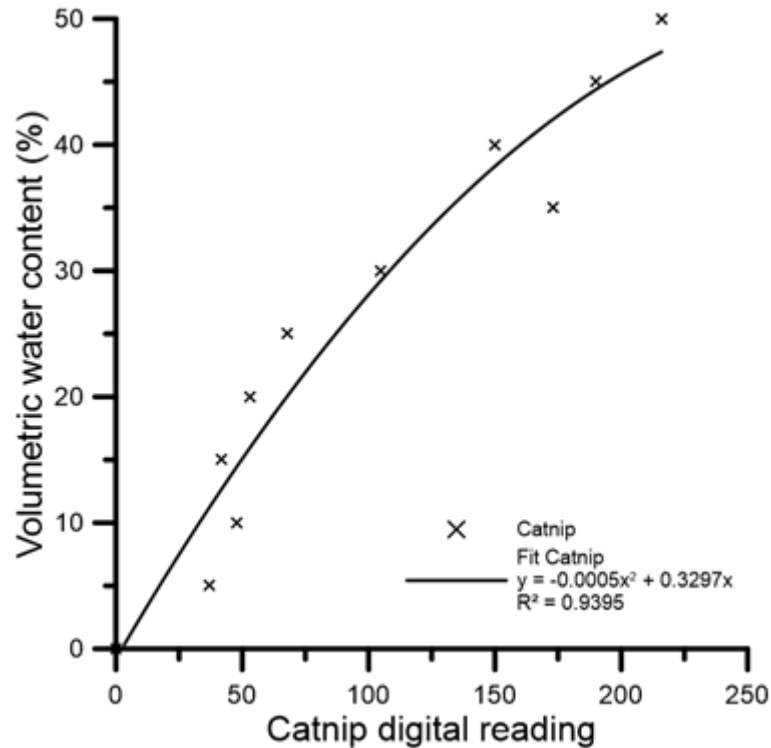


圖 3.2 測得電容值與土壤體積含水量關係圖

本計畫使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之型號 SCA103T 高精度傾斜儀 (Inclinometer) (圖 3.3)，採用差動量測原理補償雜訊效應及誤差，具有極佳的耐震力。其量測範圍 $\pm 15$ 度，解析度可達 0.001 度 (於 10 Hz 類比輸出)，支援比例類比電壓與序列周邊介面 (Serial Peripheral Interface Bus, SPI) 數位輸出，SPI 係透過 4 條連接線與微控制器連接，分別為資料輸入線(MISO)、資料輸出線(MOSI)、序列時脈線(SCK)以及晶片選擇線(CS)，透過不同的晶片選擇線微控制器可同時運行多組 SPI 設備。傾斜儀工作電壓 5V 與多數微控制器相同，可直接以 MCU 內嵌之穩壓晶片供給電源。將傾斜儀固定於土層監測模組上，長時間監測因土層滑移所造成之傾斜角改變量。SCA103T 透過類比電壓比例輸出標定，圖 3.4 為類比輸出與數位輸出之訊號解析度比較，顯示類比輸出解析度較高，故本研究以 16-bit 之類比-數位轉換器(A/D converter)模組，以確保解析度達 0.01 度以下。



圖 3.3 SCA103T 傾斜儀

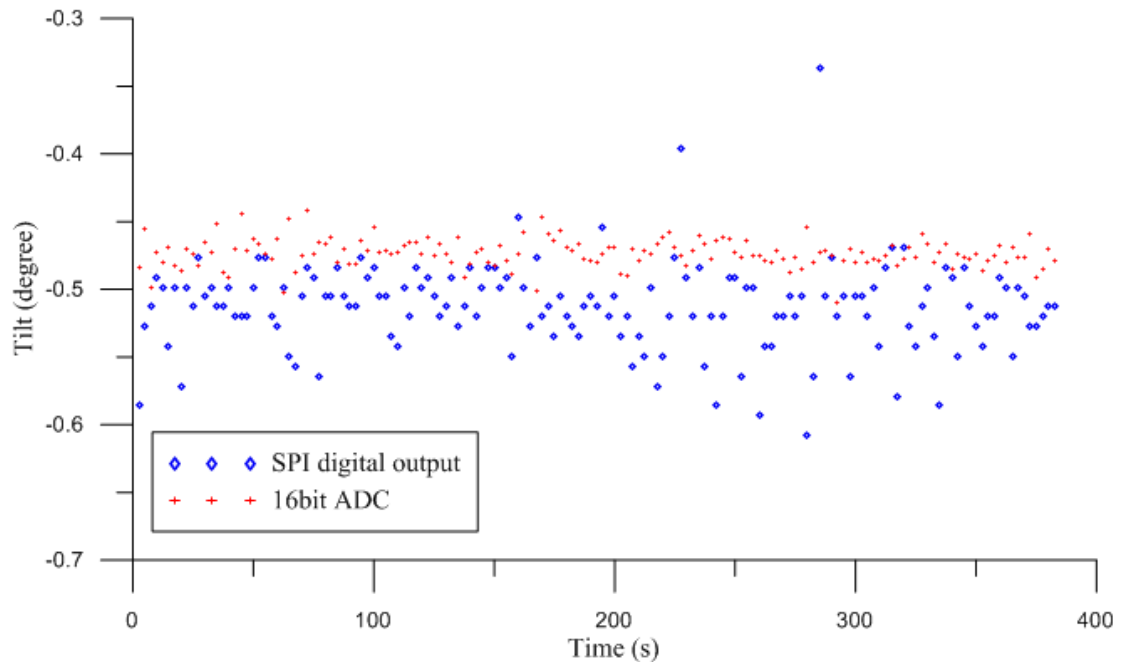


圖 3.4 傾斜儀數位與類比輸出解析度比較

土層地下水位量測，採用國產之沉水式液位計(圖 3.5)，其具備有以下幾點特色，包含：

1. 內置微型信號處理電路，可進行遠程傳輸；
2. 抗干擾強，長期穩定性好；
3. 防結露，防雷擊設計；
4. 316 不銹鋼隔離膜片；
5. 堅固密封、高可靠、高精度等。



圖 3.5 液位計

此感測器為類比輸出，因此感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)使用，本模組以 16-bit 之 A/D converter 模組，以確保水位解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 3.6 所示。液位計工作電壓為 24V，與模組輸入電壓不同，需以升壓晶片變壓以供液位計使用。

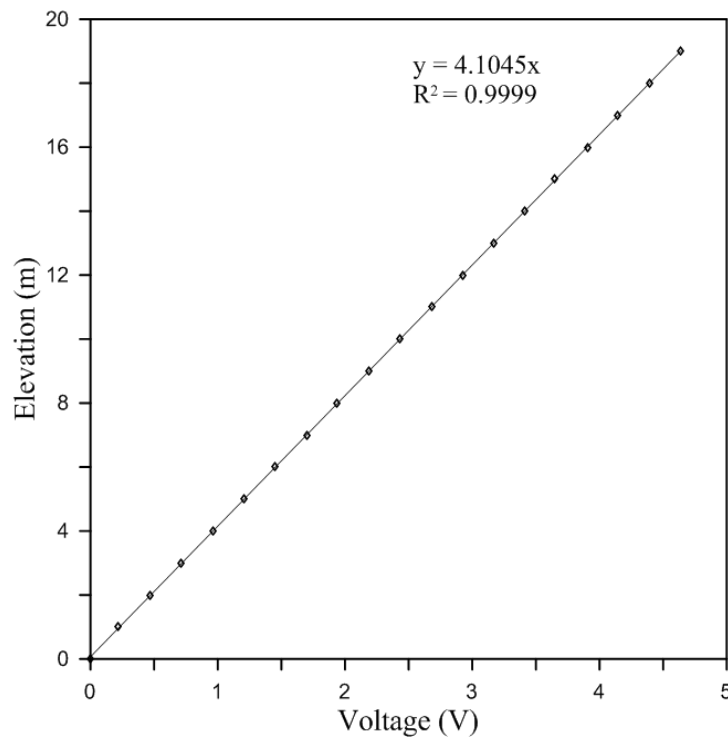


圖 3.6 液位計校正結果

## 3.2 無線感測土層監測系統組成

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

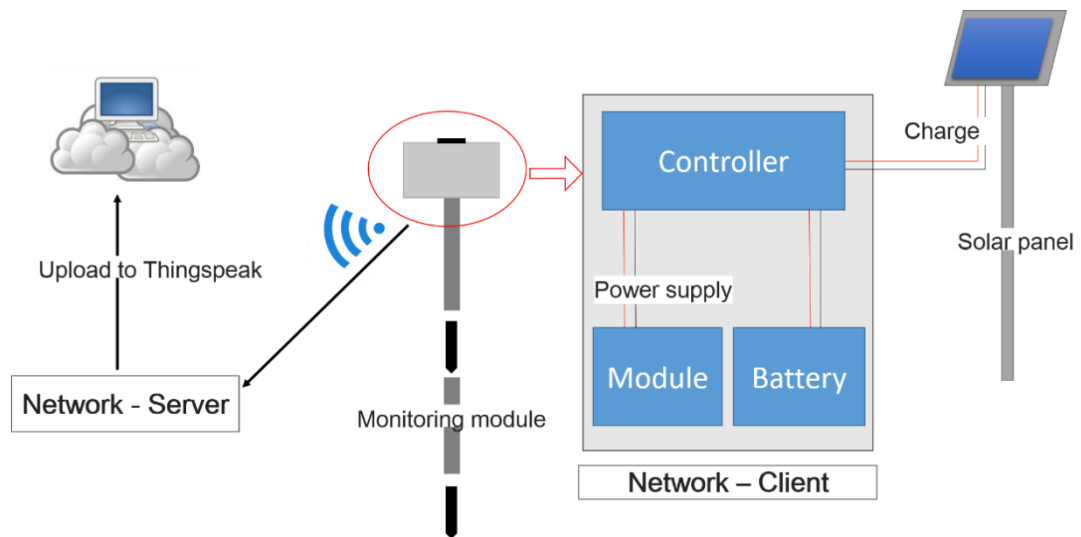


圖 3.7 系統運作示意圖

### 3.2.1 微處理器

微控制器(MCU)，又稱單晶片微電腦(Single-chip microcomputer)，是把中央處理器、記憶體、定時/計數器 (timer/counter)、各種輸入輸出介面等都整合在一塊積體電路晶片上的微型電腦。基於開放原始碼之開發平台，允許使用者發展符合特殊需求的模組，整合 SPI、UART、I<sup>2</sup>C 及 GPIO 等通訊界面，建構易於輸入/輸出之開發電路板。微控制器可將程式邏輯帶入監測架構中，藉由簡易之迴圈、布林參數可將監測架構升級為智慧化感測，使用者可自行設定擷取頻率或寫入特定觸發

條件讓微控制器進行特定動作，作為智慧型無線感測模組之基礎。

MCU 之選擇可基於接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於智慧型無線模組中可比喻為大腦，進行所有電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作。透過如開源架構 Arduino 開發之整合開發環境(Integrated Development Environment, IDE)文字編譯器(Editor)、編譯器(Compiler)、連結器(Linker)及除錯器(Debugger)之軟體，使用與 C 語言和 C++相仿的程式語言，透過電腦以 USB 介面連結開發板，即可編寫設定執行程序之韌體，此開源架構大幅降低開發門檻，同時增加監測模組功能客製化的彈性。

坊間開發版產品眾多，為符合無線土層監測系統之需求，本研究採用 Wemos lolin32 開發板(圖 3.8)，其搭載 ESP32 晶片，為具時脈 240 MHz 之雙核微控制器，運算數度高達 600 DMIPS，記憶體達 16MB 程式設計空間，且具 34 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPI 介面、一組 I<sup>2</sup>C 介面，I<sup>2</sup>C 支援單一匯流排，最多可與 112 個結點通訊，足以應付多組模組間數位資料傳輸，另其具 12 支接腳可做為類比訊號接腳，可滿足土層監測模組的功能需求。



圖 3.8 Wemos Lolin32 開發板



### 3.2.2 無線傳輸模組

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

為了將感測網路蒐集到之現地數據上傳至 Thingspeak，伺服器端之土層監測模組搭載 4G 模組—SIM7500SA，以連結場址資訊與後台人員。SIM7500SA 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM (Subscriber Identity Module) 卡作為用戶身分識別。SIM7500SA 由一組 TTL 邏輯電壓準位與微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。

本計畫以 LoRa 無線傳輸模組作為伺服器端與客戶端之間互相傳輸資訊之模組，LoRa 為英文 Long Range Low Consumption 的縮寫，為低功耗廣域網路 (Low Power Wide Area Network, LPWAN) 通信技術的一種，在 LPWAN 產生之前，使用者似乎只能在遠距離以及低功耗兩者之間做取捨，而 LoRa 無線技術的出現，改變了關於傳輸距離與功耗的折衷考慮方式，不僅可以實現遠距離傳輸，並且同時兼具低功耗、低成本的優點。LoRa 屬於專有技術，由 Semtech Corporation 所有並申請專利，在 ISM 頻段中操作。ISM 頻率的分配和法規要求隨區域而有所不同。兩個最常見的頻率分別為歐洲採用的 868 MHz，以及北美的 915 MHz，其他區域，則有不同的要求，台灣地區 NCC 開放之頻段為 920-925 MHz。

LoRa 擴頻技術使數據傳輸距離加長，且具有功率密度集中，抗干擾能力強的優勢。模組具有軟體 FEC 前向糾錯演算法，其編碼效率較

高，糾錯能力強，在突發干擾的情況下，能主動糾正被干擾的資料封包，大大提高可靠性和傳輸距離。模組具有資料加密和壓縮功能，模組在空中傳輸的資料，具有隨機性，通過嚴密的加解密演算法，使得資料截獲失去意義。而資料壓縮功能有概率減小傳輸時間，減小受干擾的概率，提高可靠性和傳輸效率，綜合上述各項特點，故選擇該模組作為本次計劃資料無線傳輸之工具。

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

### 3.2.3 時鐘與數據儲存模組

為提供監測資料儲存安全以提供數據分析的完整性，本模組整合一 SD 卡數據紀錄模組(Data logger)備份土層監測資料。當無線傳輸模組因故斷訊時，仍可藉由 SD 卡備份檔案得知現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站即時時間、節點編號、土層分層溫度、含水量、傾斜角度與地下水位高程，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。

此 SD 卡數據計錄模組附含一即時時鐘(Real-time clock, RTC)，晶片為 DS1307，低功耗且提供年、月、日、時、分、秒資訊，與微控制器透過 I<sup>2</sup>C 序列傳輸位址與時間資訊。DS1307 內含電源檢測電路並備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電能切換至備用電源以確保時間正常計讀。

### 3.2.4 資料擷取模組

由於 MCU 內建之 ADC 解析度為 10-bit，不足以應付本研究之精



度需求，故以外接之資料擷取卡(DAQ)整合感測器，本研究使用基於 ADS1115 晶片之資料擷取卡，使用 I<sup>2</sup>C 介面與微控板通訊，每秒最高可處理 860 個資料點，解析度達 16-bit，符合本模組之需求。

### 3.2.5 電源系統

由於邊坡滑移多發生於長歷時、高強度之降雨期間，為使監測系統獨立運作達到現地長期監控的成果，本計畫使用太陽能控制器搭配 18650 鋰電池組作為土層監測系統之電源系統。系統組成是由太陽能電源控制器搭配太陽能板，並依模組功能選擇 10 W 與 20 W 之太陽能板。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，充電電流最高可達 0.55 A，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。

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

### 3.2.6 定時斷電模組

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

模組使用 Wemos D1 mini Pro 做為微控制板，搭載 ESP8266 晶片及 16 MB 快閃記憶體，且具 11 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPI 介面與一組 I<sup>2</sup>C 介面，D1 mini Pro 亦包含睡眠模式，其方式為連接微控板 D0 與 RST 腳位，以程式控制微控板進入睡眠，再以微控板內部計時器於預定時間從 D0 發送一脈波至 RST，使微控板重啟，變數重啟後會消

失，故亦可利用 ESP8266 的 FS.h 檔案系統，將變數存入快閃記憶體的 SPIFFS 區域，以便日後讀取。

本計畫使用之繼電器為單刀雙擲型，其運作原理為輸入部分為一組電磁鐵，當電流通過電磁鐵時，產生磁性，吸引輸出接點閉合或斷開。當電流消失後輸出接點又回復到原始狀態。輸出部分，設一組常開（N.O Normal Open）與常閉接點（N.C Normal Close），本模組利用以上特性，將電源系統對模組之供電接至共點，模組接收接至常閉，以微控板於每小時重啟並讀取記憶體類的變數，若小於 24 則將變數+1 後儲存並進入睡眠，反之則以訊號觸發繼電器切換共點與常開連接，使無線監測模組斷電重啟。

### 3.3 無線土層監測模組

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

#### 3.3.1 伺服器端

於 LoRa 建構之無線網路中負責接收客戶端發送之監測資料，因配有 4G 無線通訊模組，具有和遠端伺服器連線之功能，其微處理器根據接收到之資料格式將其拆解並儲存於變數後，視使用者所需可儲存於紀錄卡，並將監測數據根據節點編號上傳至遠端伺服器，為遠端人員和現地監測情況之溝通橋樑，土層監測模組伺服器端之完成品及其系統組成如圖 3.9。

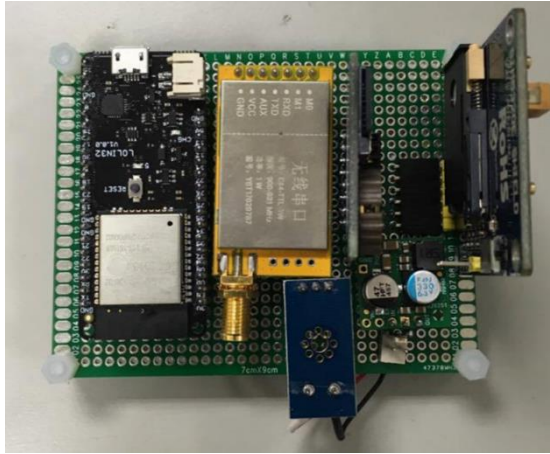


圖 3.9 伺服器端

### 3.3.2 客戶端

客戶端可連結不同感測元件，皆於 LoRa 建構之無線網路中負責對伺服器端發送量測資料，量測資料皆已透過微處理器進行校正係數之率定，其發送之量測資料包括土壤分層含水量、溫度、土層監測模組之傾斜角以及地下水位高程，並附上節點編號供伺服器端辨識訊號來源。為避免因不可抗力之因素斷訊，致使與伺服器端之連線中斷，客戶端同時備有 SD 紀錄卡作監測數據紀錄，確保數據分析之完整性，土層監測模組客戶端之完成品及其系統組成如圖 3.10。

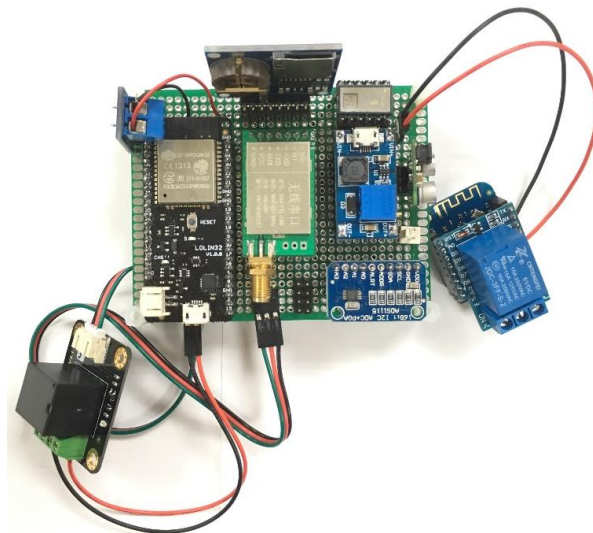


圖 3.10 客戶端-土層監測

### 3.4 雲端顯示及運算平台

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

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

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

本研究以 Matlab 公司所提供之 ThingSpeak.com 網頁伺服器，進行前述無線感測模組監測資料回傳與顯示，如圖 3.11~3.13 所示，此平台亦可於雲端後台進行資料運算。另外並已上傳中華電信 IoT 智慧聯網大平台，計畫目前將資料傳至兩平台，互為備份並利於後續維護。

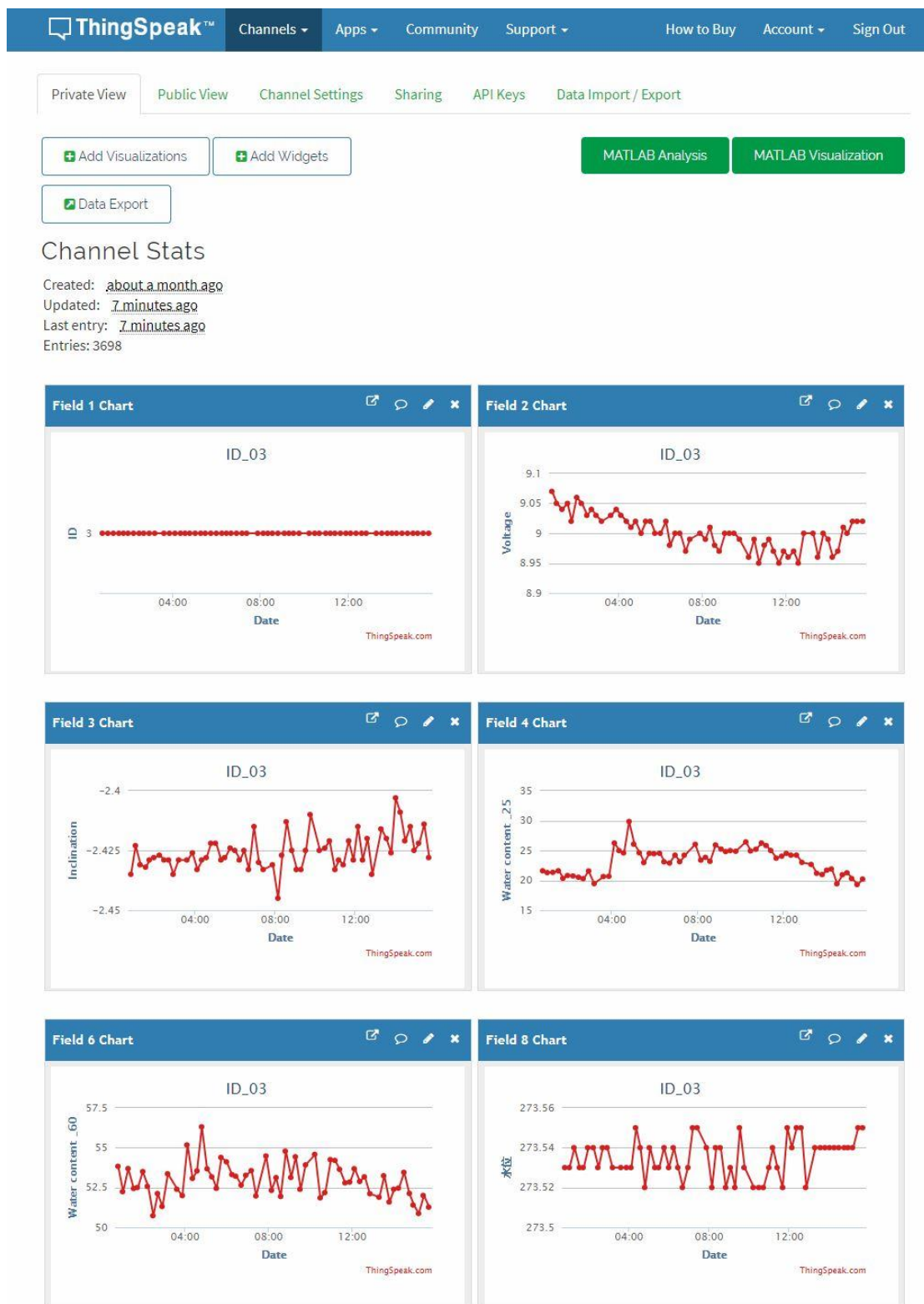


圖 3.11 雲端即時顯示平台

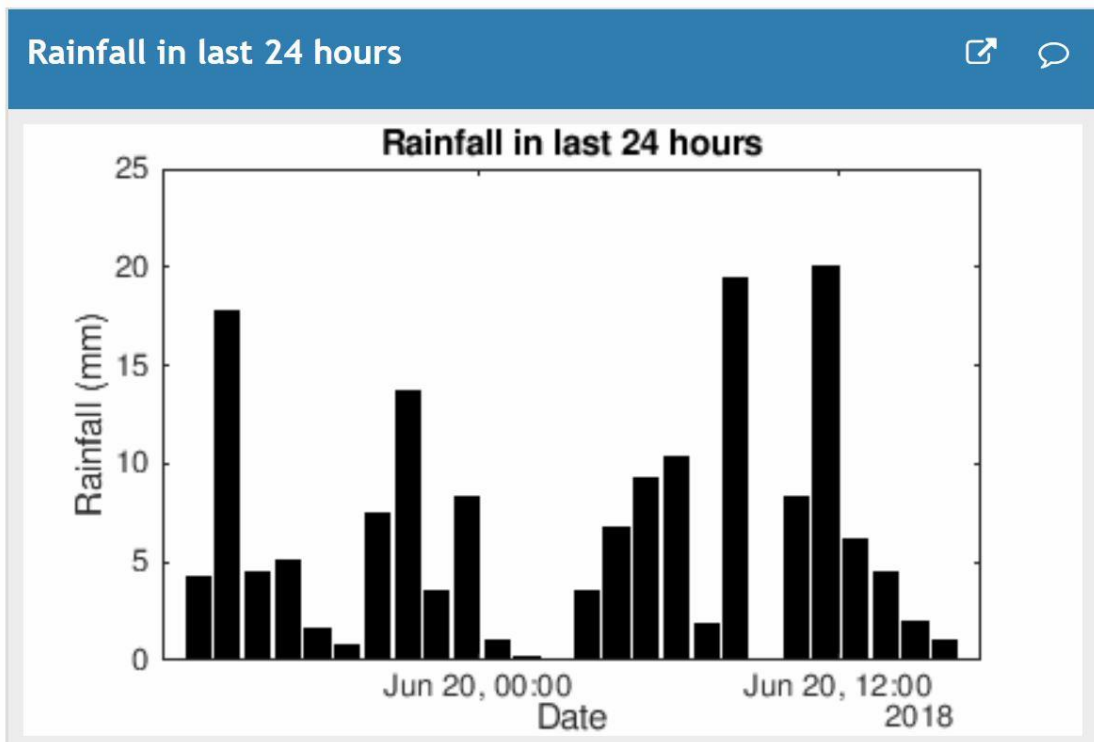


圖 3.12 過去 24 小時時雨量

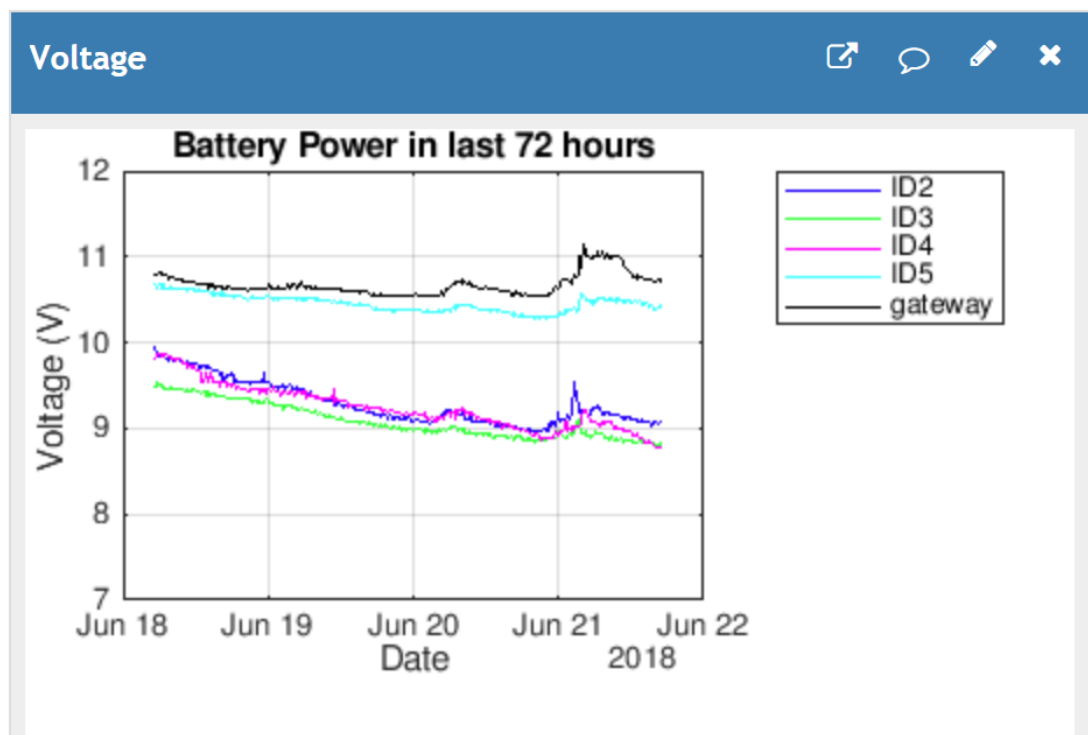


圖 3.13 過去 72 小時電量變化

## 第四章 現地監測成果

### 4.1 監測邊坡背景資訊

台 7 甲線 41.55K~41.65K 邊坡屬山區公路邊坡，此處經緯度座標為(24.401, 121.369)，屬公路總局四工程處獨立山段管轄，行政區域屬宜蘭縣大同鄉南山村，監測場址範圍如圖 4.1 所標示，該處為沿里程增加方向爬坡之迴頭彎，此區域地下岩盤由板劈理發達之千枚岩質板岩或夾部分剪裂帶岩層組成，岩層組成較軟弱，岩盤上方則有厚薄不均的崩積層覆蓋，崩積層由由岩層的風化產物如岩塊、岩屑等和邊坡崩塌土壤混雜而成，不整合而覆於岩層之上。迴頭彎段道路主要受北側下邊坡馬當溪之向源侵蝕影響，邊坡坡度陡高差極大，公路下方路基掏空，並於民國 96 年受柯羅莎颱風影響，路基受局部掏空，民國 97 年辛樂克及薔蜜颱風侵襲後，下邊坡再次崩塌，擋土牆受崩塌影響，基礎下方地層流失並倒塌損壞，約有一半車道路基流失，因此原有路線已改線內縮約 15 公尺，且向源侵蝕面之邊坡仍持續發生滑動，此處因地形及地質條件不佳，導致每年受颱風、地震及豪大雨影響，易產生邊坡滑動。

### 4.2 監測配置

本計畫之測站位置配置圖如圖 4.2，測站資訊表如表 4-1，模組皆包含電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒。監測場址安裝模組詳列如下：

1. 雲端液位計即時監測模組四組：運用電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位。
2. 表層入滲及傾斜監測模組八組：以分層電容式土壤水分計及單向傾斜儀進行量測。
3. 擋土牆壁體無線傾斜監測模組四組：以雙向傾斜儀量測牆體法線及切向傾角。



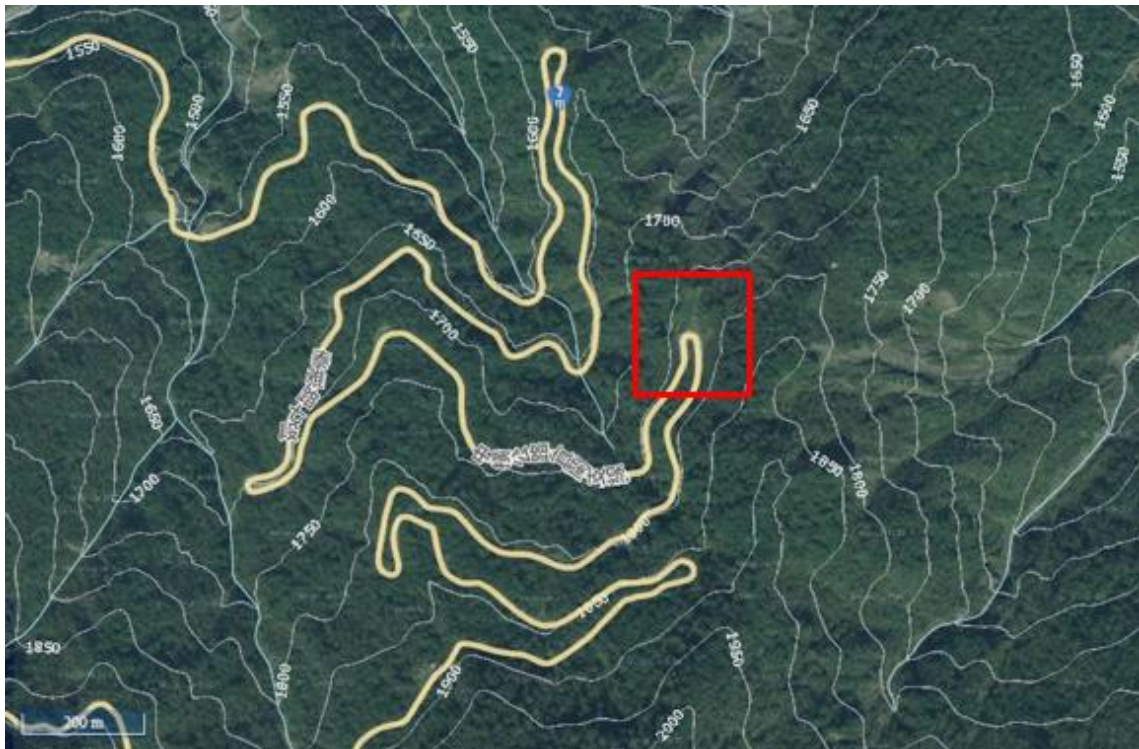


圖 4.1 監測範圍示意(改自國土測繪圖資中心)



圖 4.2 監測儀器位置配置圖

4. 即時無線雨量監測模組一組：以自記式傾斗式雨量計進行量測。
5. 資料匯集傳輸模組一組：監測資料收集並回傳。



表 4-1 測站資訊表

| ID | 配置                     | 水位孔高程 | 現場照片                                                                                                                                                                     |
|----|------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0  | 雨量計                    | -     |                                                                                        |
| 1  | 液位計、<br>含水量計、<br>表層傾斜儀 | 1770m |   |

|   |                        |       |                                                                                                                                                                           |
|---|------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | 液位計、<br>含水量計、<br>表層傾斜儀 | 1770m |      |
| 3 | 液位計、<br>含水量計、<br>表層傾斜儀 | 1764m |   |



|   |                        |       |                                                                                                                                                                        |
|---|------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | 液位計、<br>含水量計、<br>表層傾斜儀 | 1764m |   |
| 5 | 含水量計、<br>表層傾斜儀         | -     |                                                                                    |
| 6 | 含水量計、<br>表層傾斜儀         | -     |                                                                                    |

|    |                |   |                                                                                      |
|----|----------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 7  | 含水量計、<br>表層傾斜儀 | - |    |
| 8  | 含水量計、<br>表層傾斜儀 | - |   |
| 9  | 牆體傾斜儀          | - |  |
| 10 | 牆體傾斜儀          | - |  |



|    |       |   |                                                                                     |
|----|-------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 | 牆體傾斜儀 | - |   |
| 12 | 牆體傾斜儀 | - |  |

### 4.3 監測資料與分析

系統於 108 年 1 月中旬至現地安裝，因現地終年潮濕，因此系統故障比例高，經變更密封設計及調整監測頻率後可較穩定運作，但現地因部分邊坡局部有淺層滑動，且發現可能有人為干擾或野生動物破壞，使得系統少數監測資料無法連續，經數次維修及更換模組後，目前監測成果整理如下。

#### 4.3.1 監測資料處理程序

監測資料處理依監測物理量不同須於顯示平台進行資料處理，再與警戒值進行比對以顯示不同狀態，相關說明如下：

1. 雨量計：雨量計紀錄為每 10 分鐘降雨資料，為配合應用，先計算時雨量歷時，但相關原始資料仍保留時間與 10 分鐘降雨，另每日可顯示日累積雨量。

2. 水份計：所觀測為電容值，先於模組轉換為體積含水量，相關資料可進行現地入滲速率計算，但現地為含粗礫石高滲透性材料，因此降雨時於量測時間間距內兩深度水份計常同時反應，因此僅進行記錄並繪製歷時圖。
3. 液位計：液位計量測值代表由感測點以上壓力水頭高，因此分析時以感測點高程加上壓力水頭高作為水位高程，分析時考慮降雨與水位上升高度變化。
4. 傾角資料：所觀測傾角資料以轉換為物理量，但為排除溫度及儀器更換之影響，因此以扣除每月初始值顯示，作為相對傾角顯示，長期累積傾角則可由原始資料計算。
5. 非正常資料點處理：觀測點資料偶爾會因通訊、天候及電子元件干擾影響產生奇異點或凸波訊號，對於長期變化之觀測值如傾角及液位，顯示之觀測值先進行與之前兩觀測值比對，若差異值大於 25%，則該觀測點資料進行儲存但不顯示，所顯示值以前一點代表，如此可降低誤報機率。

#### 4.3.2 雨量監測記錄

圖 4.3 為 ID0 雨量計資料與鄰近高程較高之氣象局思源站比較，顯示場址降雨與鄰近氣象局測站數值有所差異，但主要降雨均有紀錄，顯示數據應具可信度，後續均以 ID0 數據與其他監測資料進行整理。

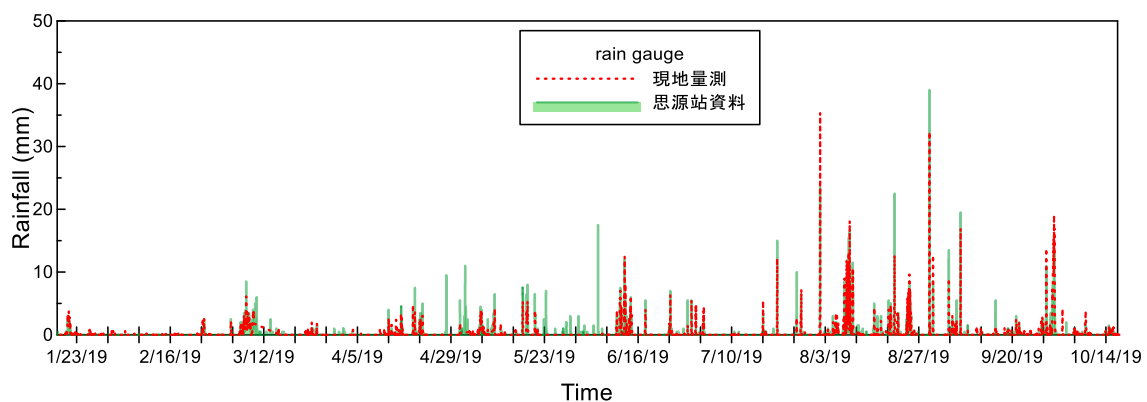


圖 4.3 ID0 雨量計監測數據及與鄰近測站比較

### 4.3.3 地下水位

圖 4.4 至圖 4.7 為 ID1~4 各測站之地下水位監測與降雨紀錄圖，上階之 ID1 及 ID2 隨降雨有較顯著變化，但 ID2 水位並未隨降雨結束而完全回復原值，鑽孔可能已堵塞，下階 ID3 及 ID4 於觀測期間皆為初值，現地模組測試正常，量測結果顯示水位在地表 40 m 以下。整體而言，現地水位並無明顯變化，常時地下水位位於地表深處 40m 之下。

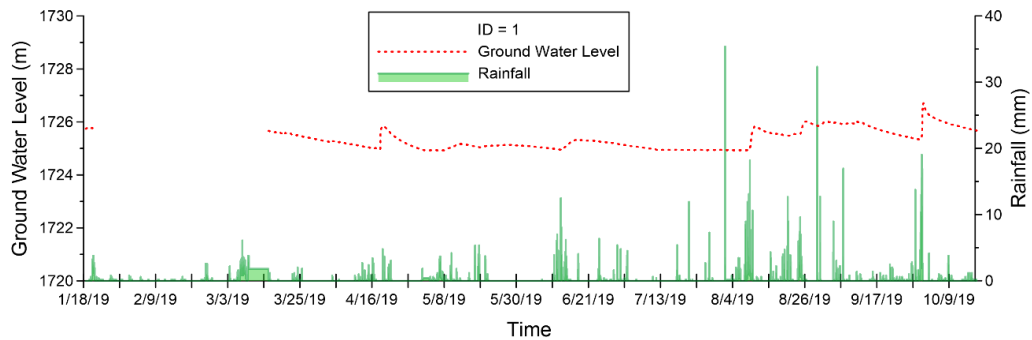


圖 4.4 ID 1 地下水位監測數據

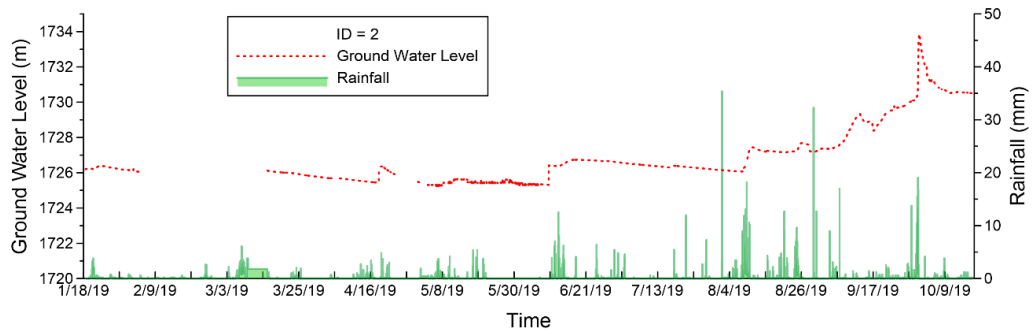


圖 4.5 ID 2 地下水位監測數據

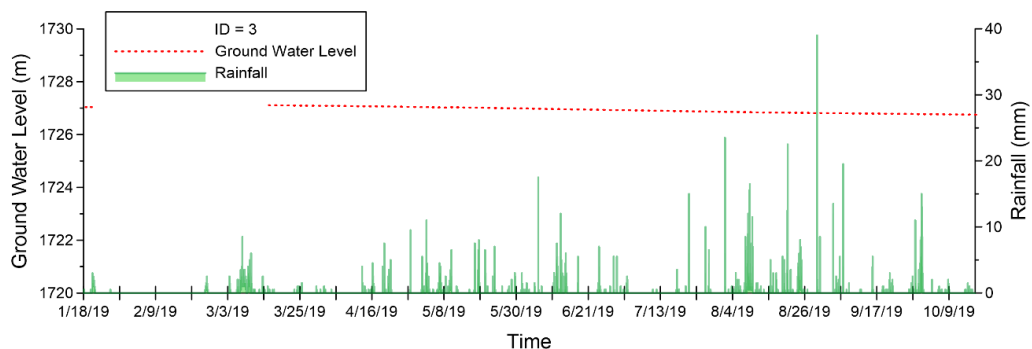


圖 4.6 ID 3 地下水位監測數據

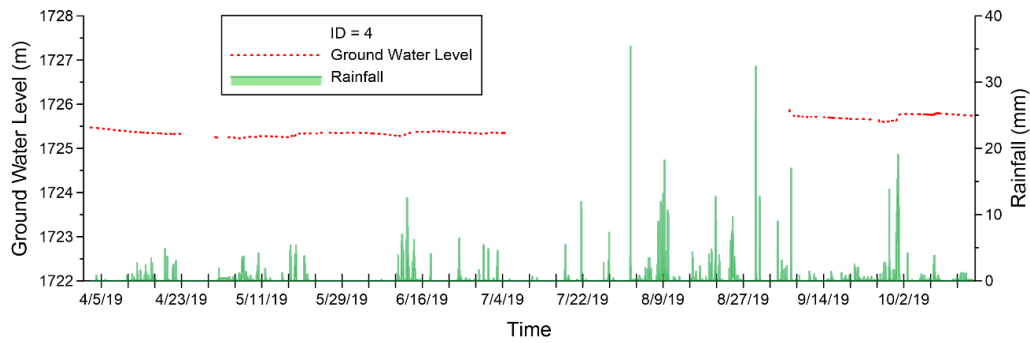


圖 4.7 ID 4 地下水位監測數據

#### 4.3.4 邊坡表層體積含水量

圖 4.8~4.15 為 ID1~ID8 測站土層含水量監測結果，其中 ID7 因損壞多次，且受限於場址表層為破碎崩積或風化層，破壞機制為表層滑落向源侵蝕，分層水分計量測於現場無顯著功能，因此 2019 年 5 月後不再觀測。整體而言，土層含水量變化隨降雨反應，現地表層濕潤含水量高，ID1、ID4 及 ID6 之深層(60 cm)含水量較淺層高，ID1 推測可能為土層未與含水量計緊密貼合，留下空隙使水在空隙殘留，造成量測值跳動。量測數據顯示場址表層水份分布並無一致趨勢，差異極大，傳統非飽和土層滑動理論無法套用。

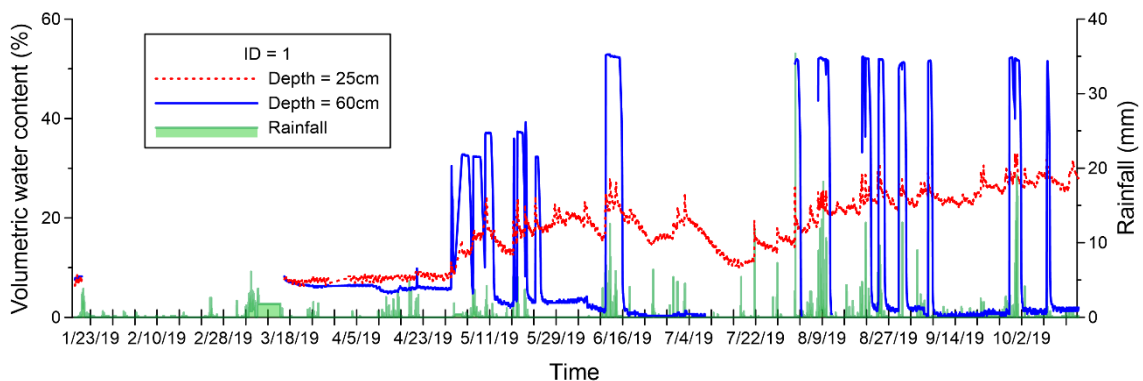


圖 4.8 ID 1 體積含水量監測數據



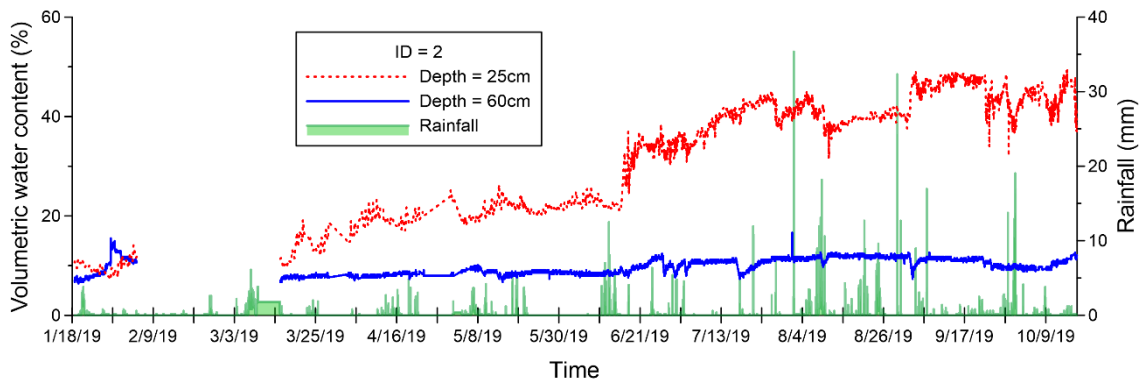


圖 4.9 ID 2 體積含水量監測數據

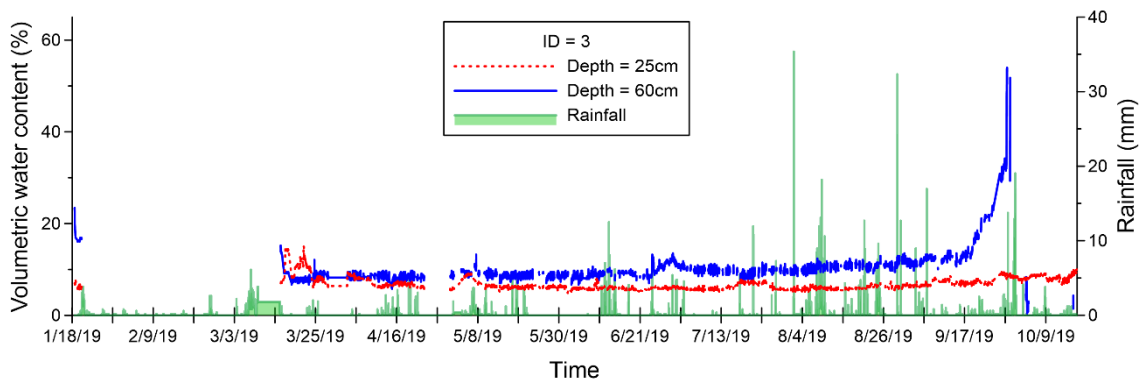


圖 4.10 ID 3 體積含水量監測數據

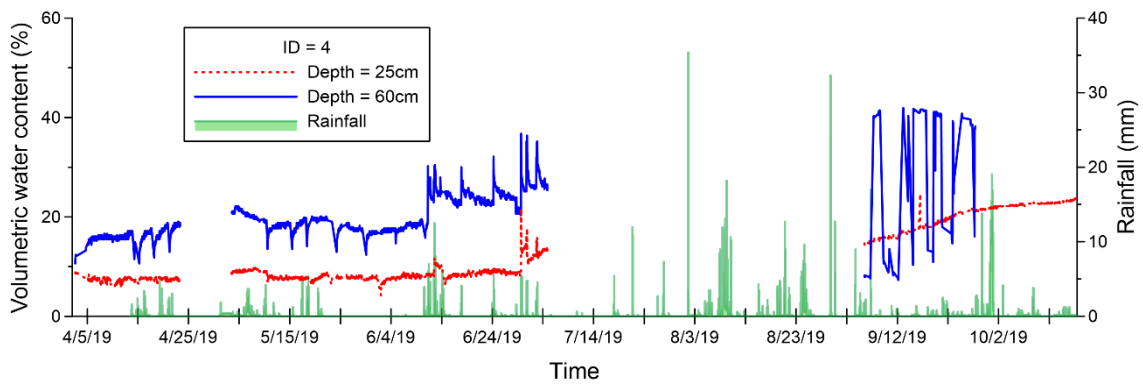


圖 4.11 ID 4 體積含水量監測數據

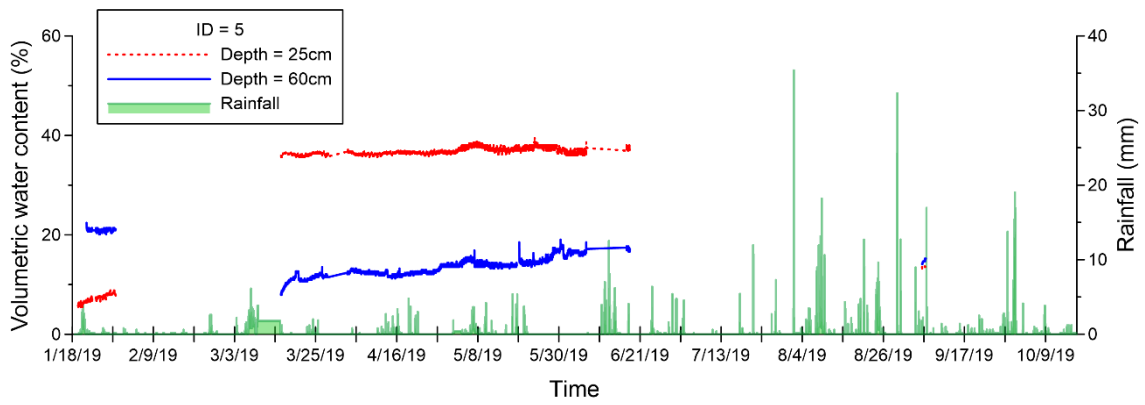


圖 4.12 ID 5 體積含水量監測數據

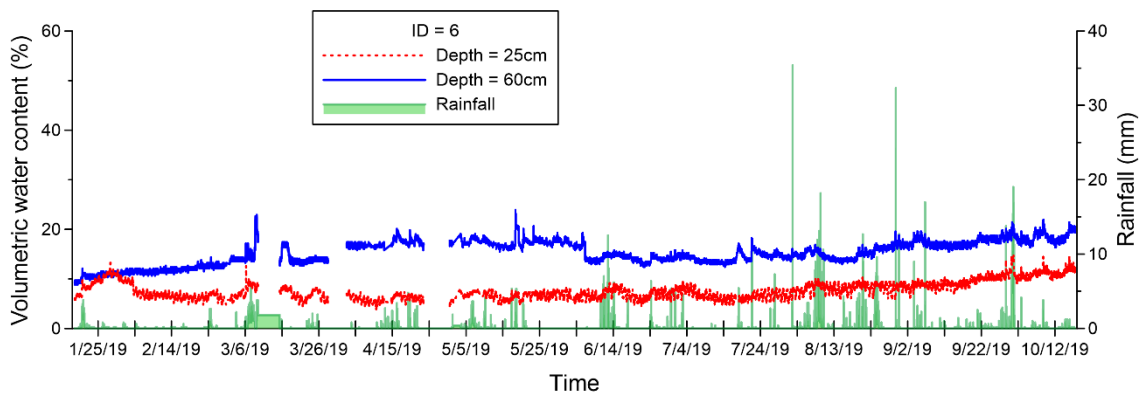


圖 4.13 ID 6 體積含水量監測數據

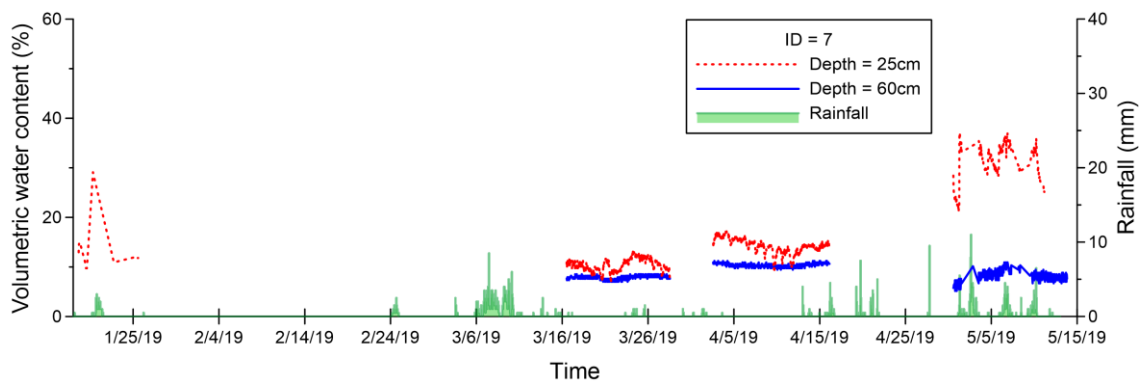


圖 4.14 ID 7 體積含水量監測數據

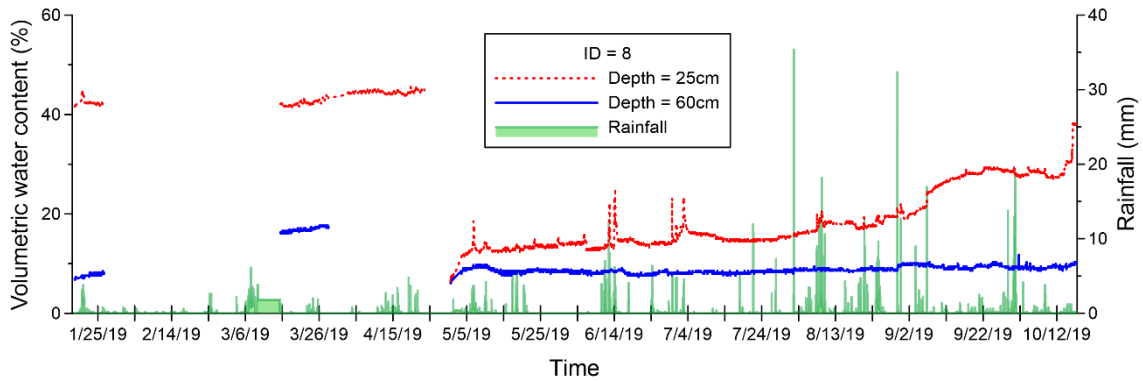


圖 4.15 ID 8 體積含水量監測數據

#### 4.3.5 邊坡表層傾斜

因現地滾動調整多次，現有配置傾斜儀正方向示意如圖 4.16 所示，圖 4.17~4.23 為除 ID7 外邊坡表層傾斜儀監測結果，所顯示為其相對變化，ID7 因位於不穩定之坡面，因此導致其因變位過大而經常損壞，計畫後期變更監測點。整體地表傾角觀測結果結果顯示，此段觀測期間主要為向北側向源侵蝕面滑移，傾角大於 2 度且累積傾斜速率為每日 0.03~0.05 度，顯示此區塊仍不穩定，而舊擋土牆測傾斜角變化幅度甚小，暫無邊坡滑動跡象。依現有監測成果，統整後之監測系統以傾角作為主要預警，向源侵蝕以南北向依次排列，以提供滑移範圍預警，舊有擋土設施，以東西向傾斜監測，搭配牆體傾斜提供擋土系統穩定性預警。



圖 4.16 傾斜儀傾斜方向示意圖

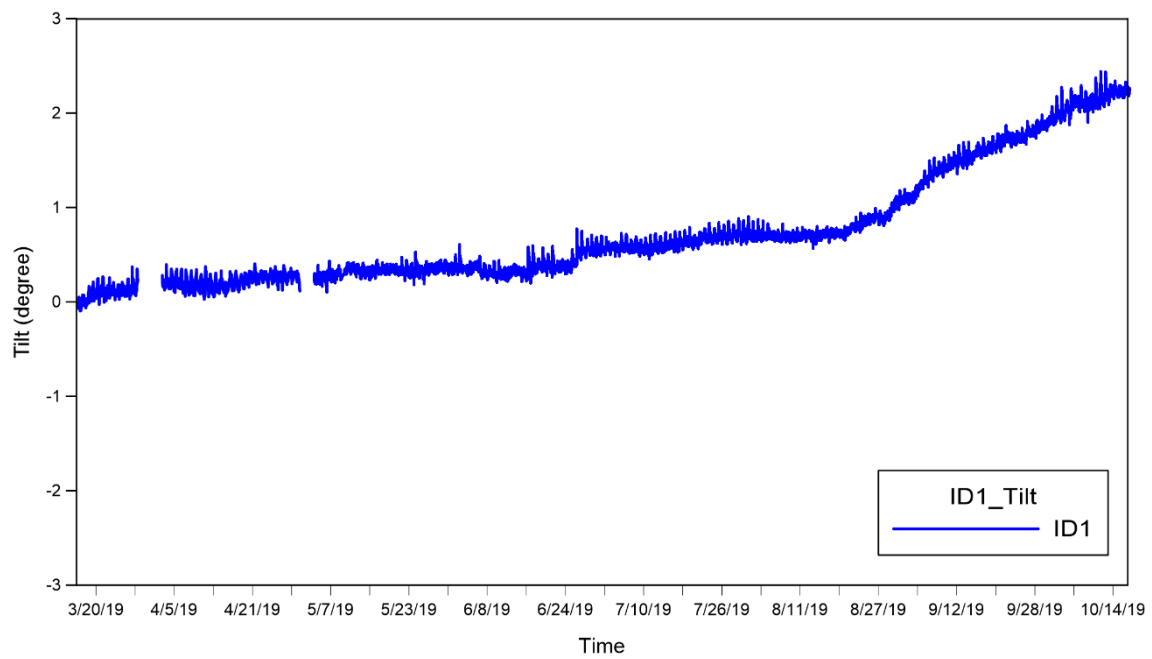


圖 4.17 ID1 傾斜角監測數據

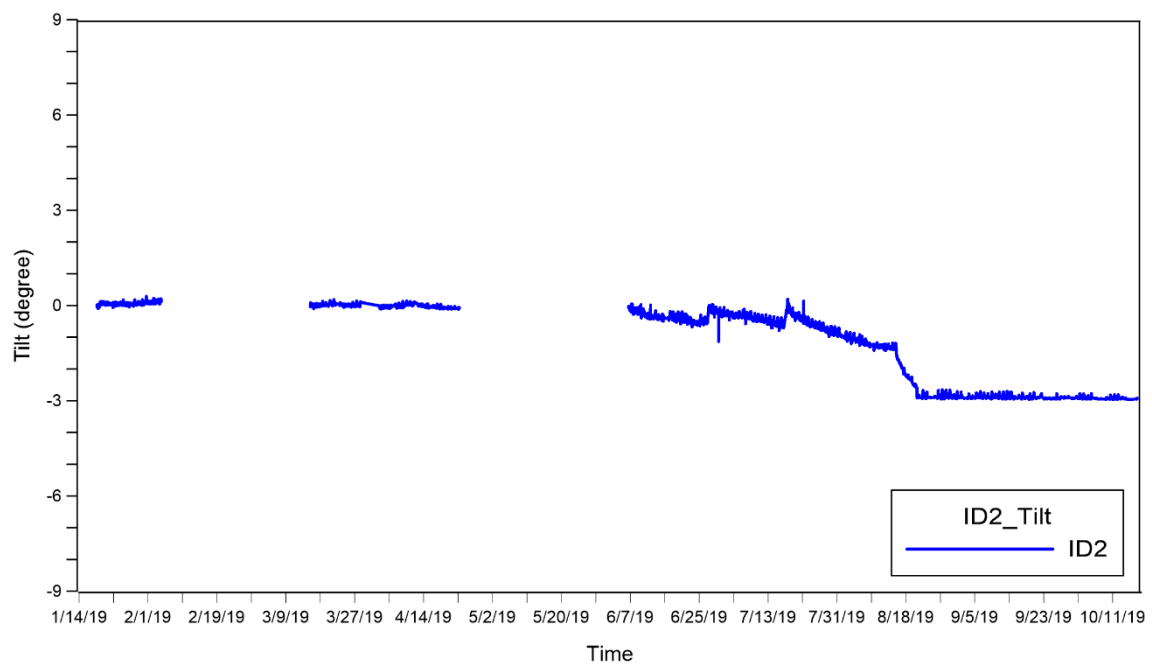


圖 4.18 ID2 傾斜角監測數據

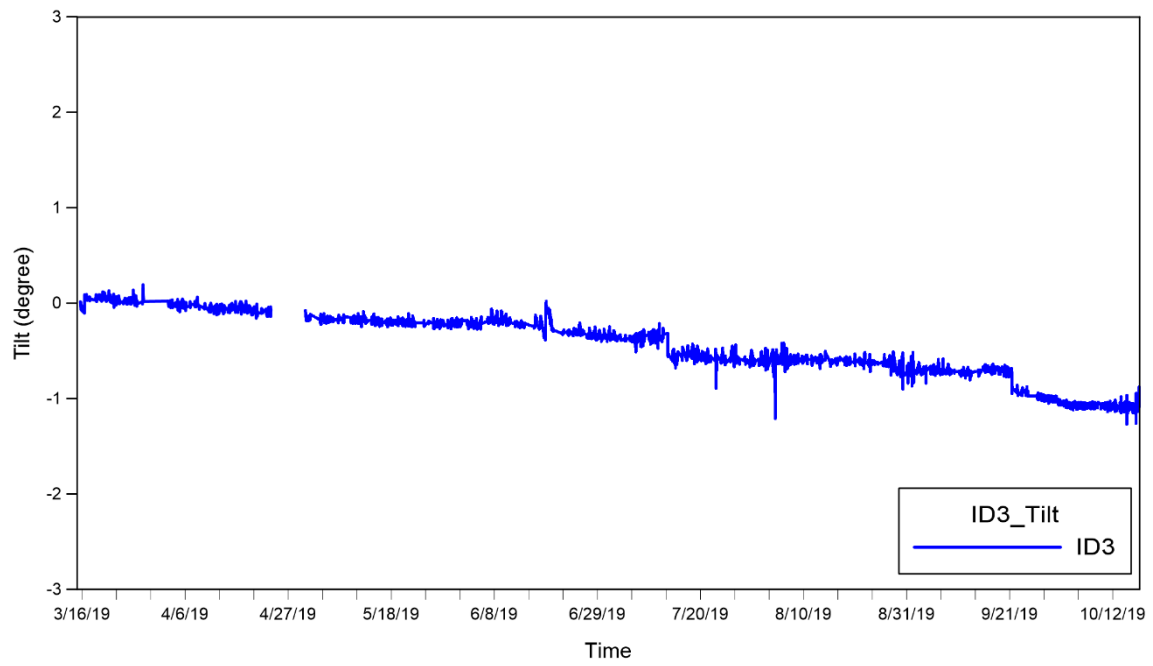


圖 4.19 ID3 傾斜角監測數據

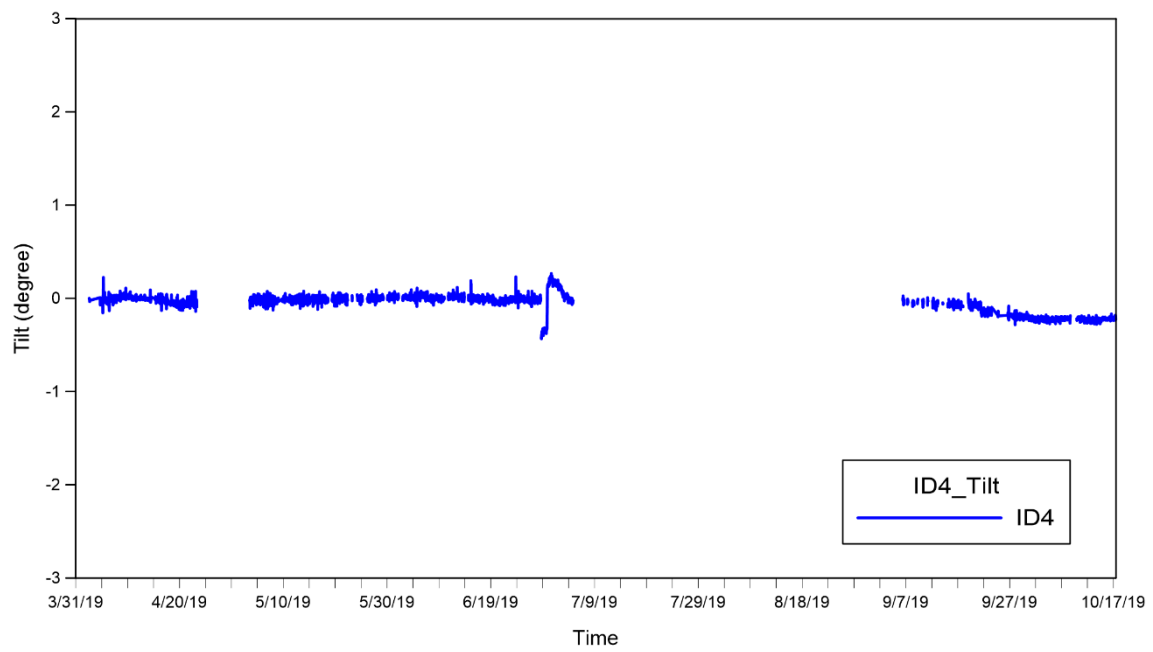


圖 4.20 ID4 傾斜角監測數據

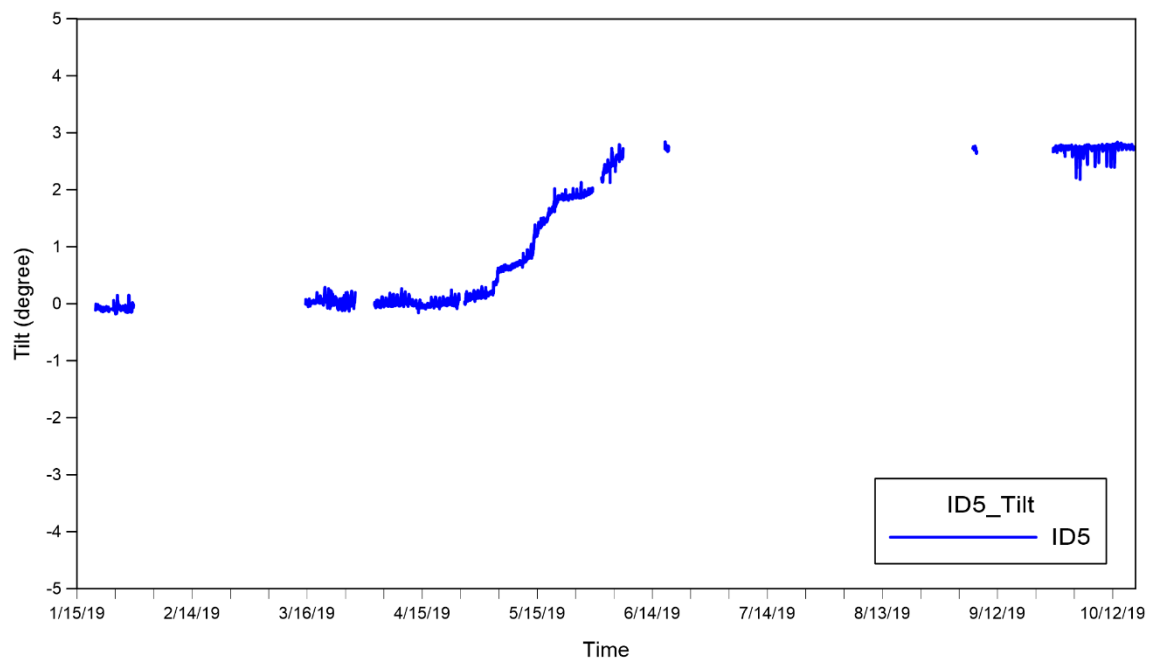


圖 4.21 ID5 傾斜角監測數據

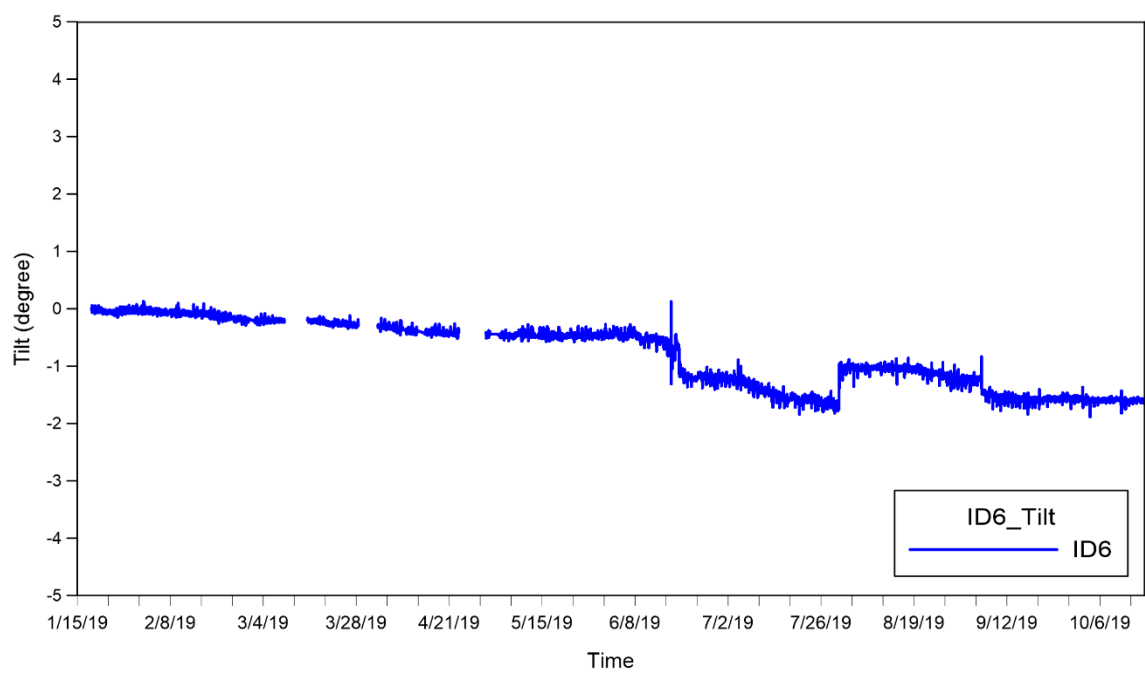


圖 4.22 ID6 傾斜角監測數據

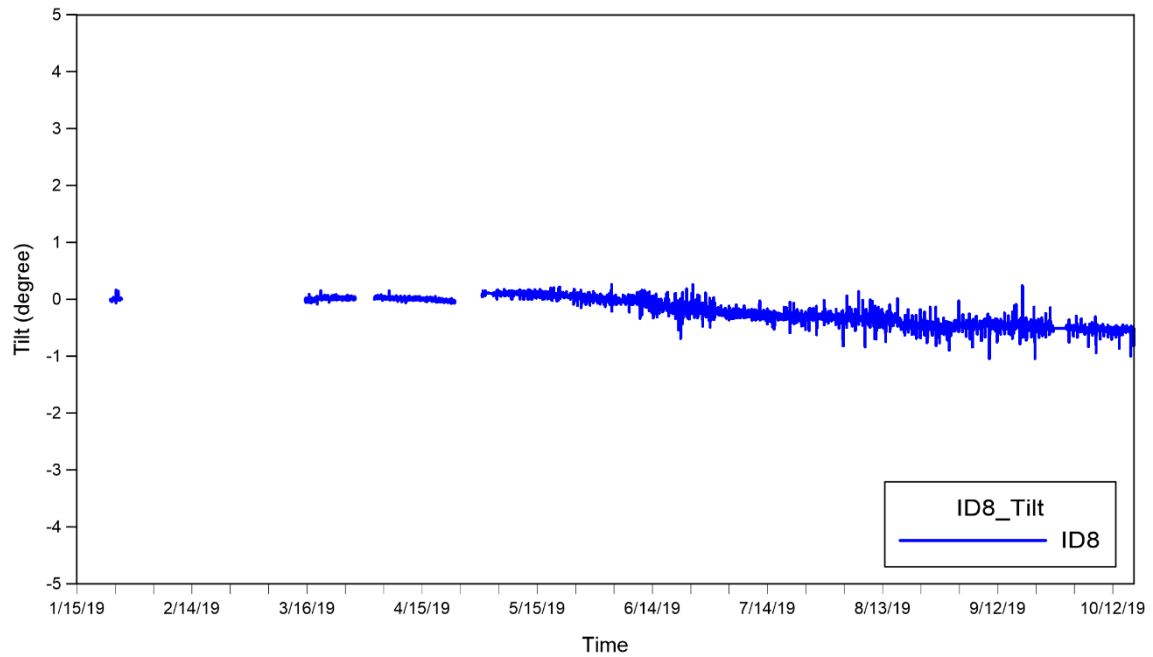


圖 4.23 ID8 傾斜角監測數據

#### 4.3.6 擋土牆壁體傾度監測

圖 4.24 至 4.27 為 ID9~12 擋土牆壁體監測數據，包含與法線垂直 (vertical) 與平行 (horizontal) 牆面傾角，量測期間 ID9 曾受人為破壞而螺絲鬆脫，導致傾角變化逐漸升高，經過修復後數值回復為穩定狀態，其餘測站之傾角量測至今變化皆小於 0.05 度，顯示觀測期間道路上下邊坡之擋土牆無明顯之變動。

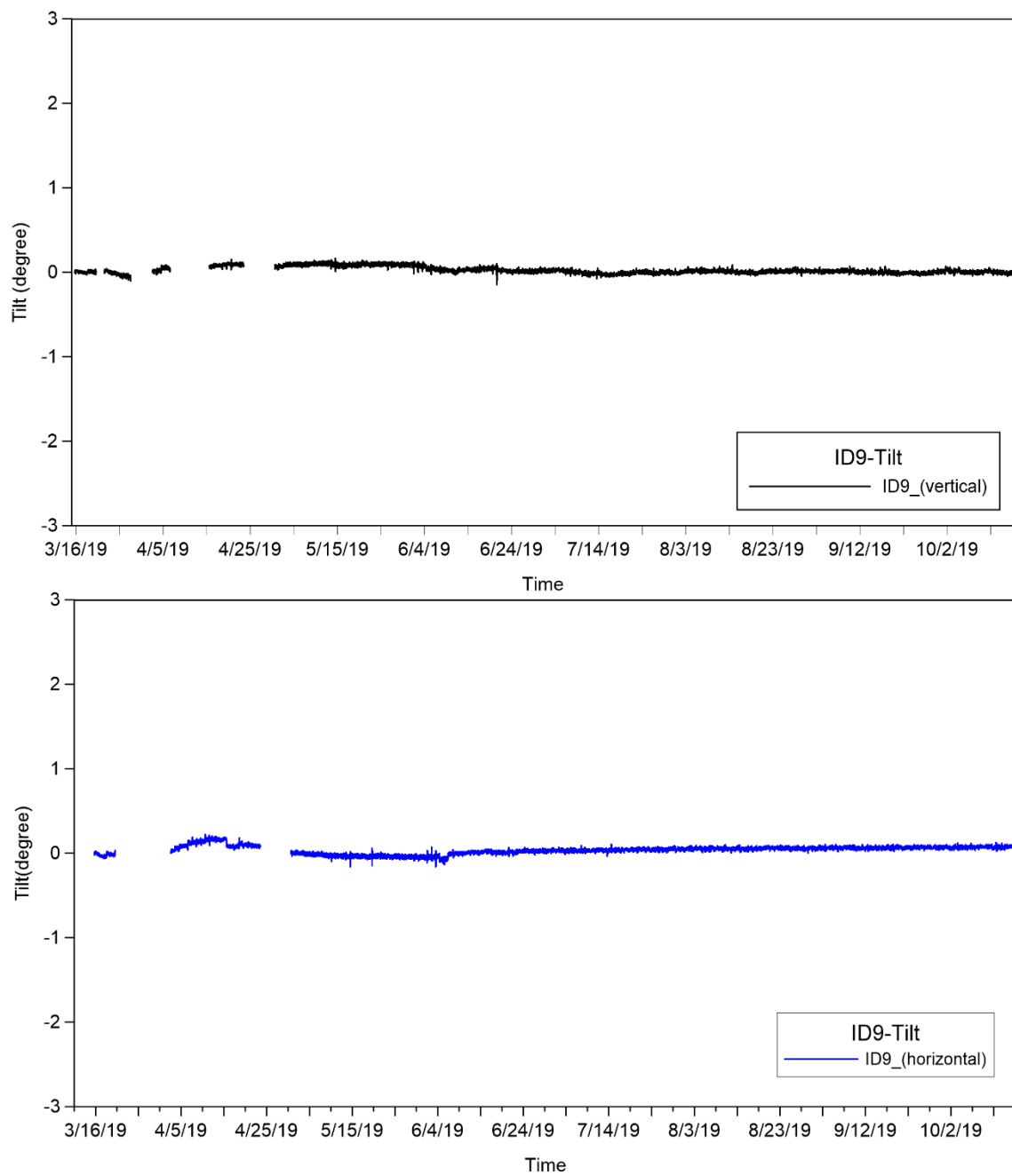


圖 4.24 ID9 牆體傾斜監測數據



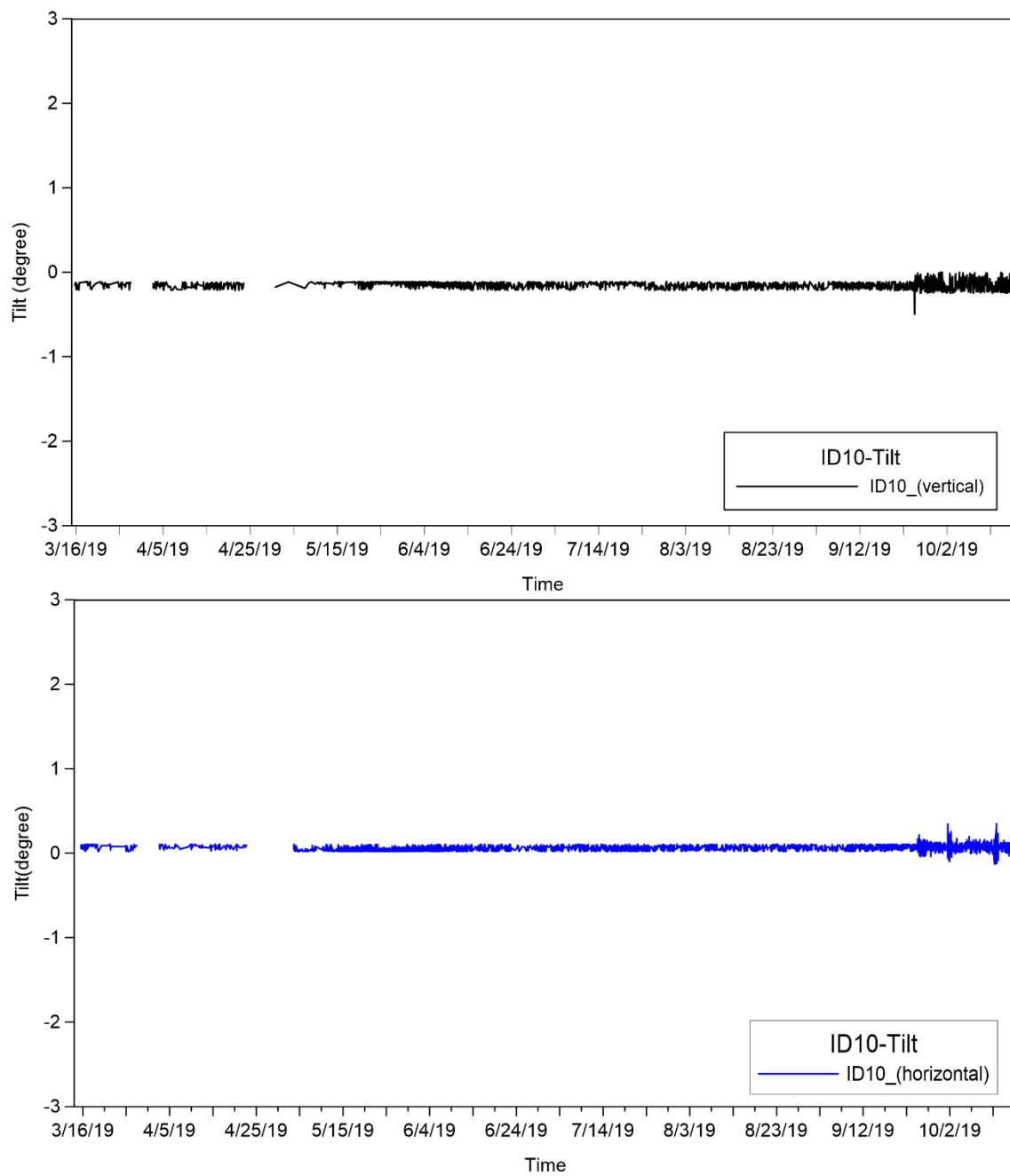


圖 4.25 ID10 牆體傾斜監測數據

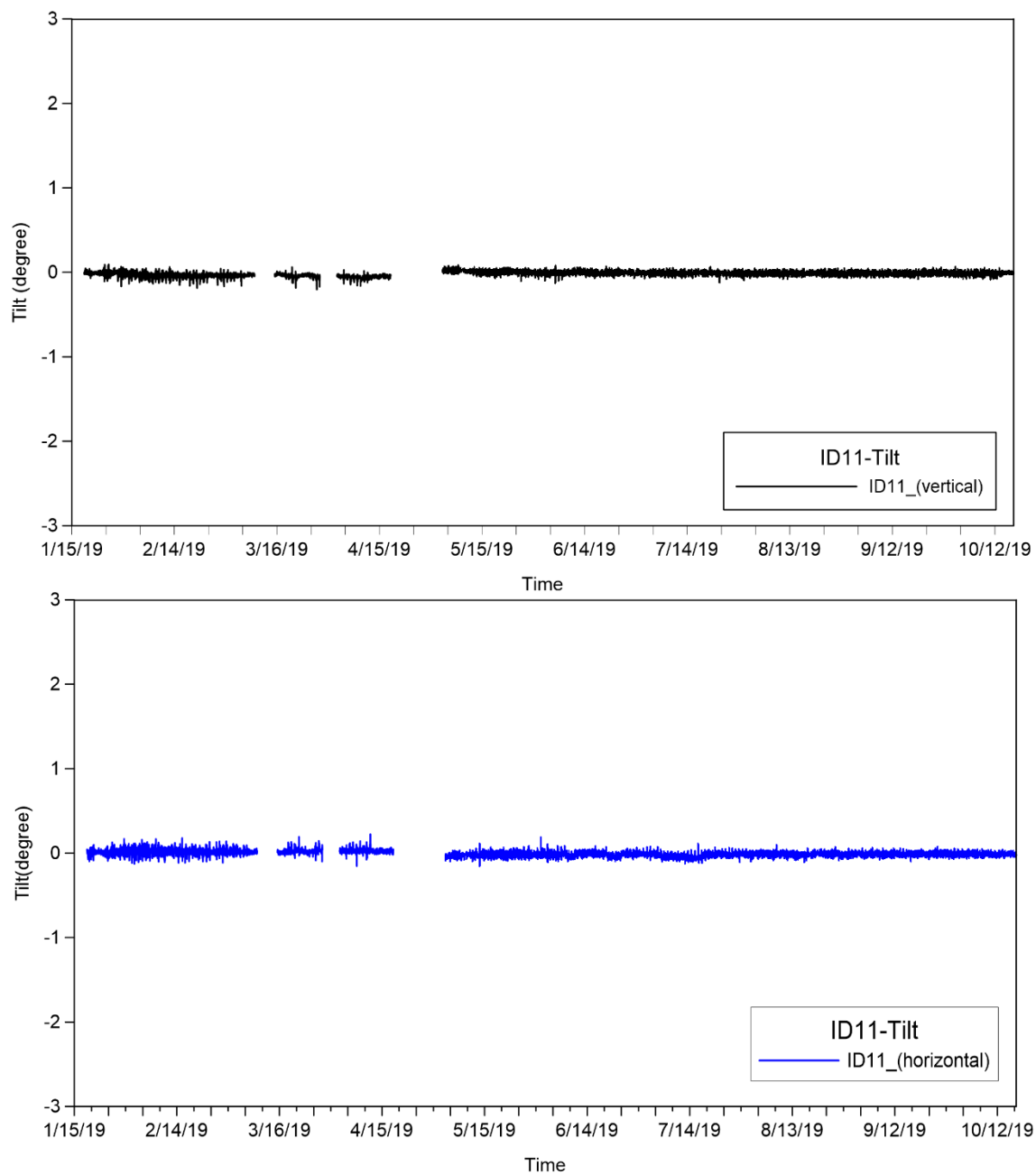


圖 4.26 ID11 牆體傾斜監測數據

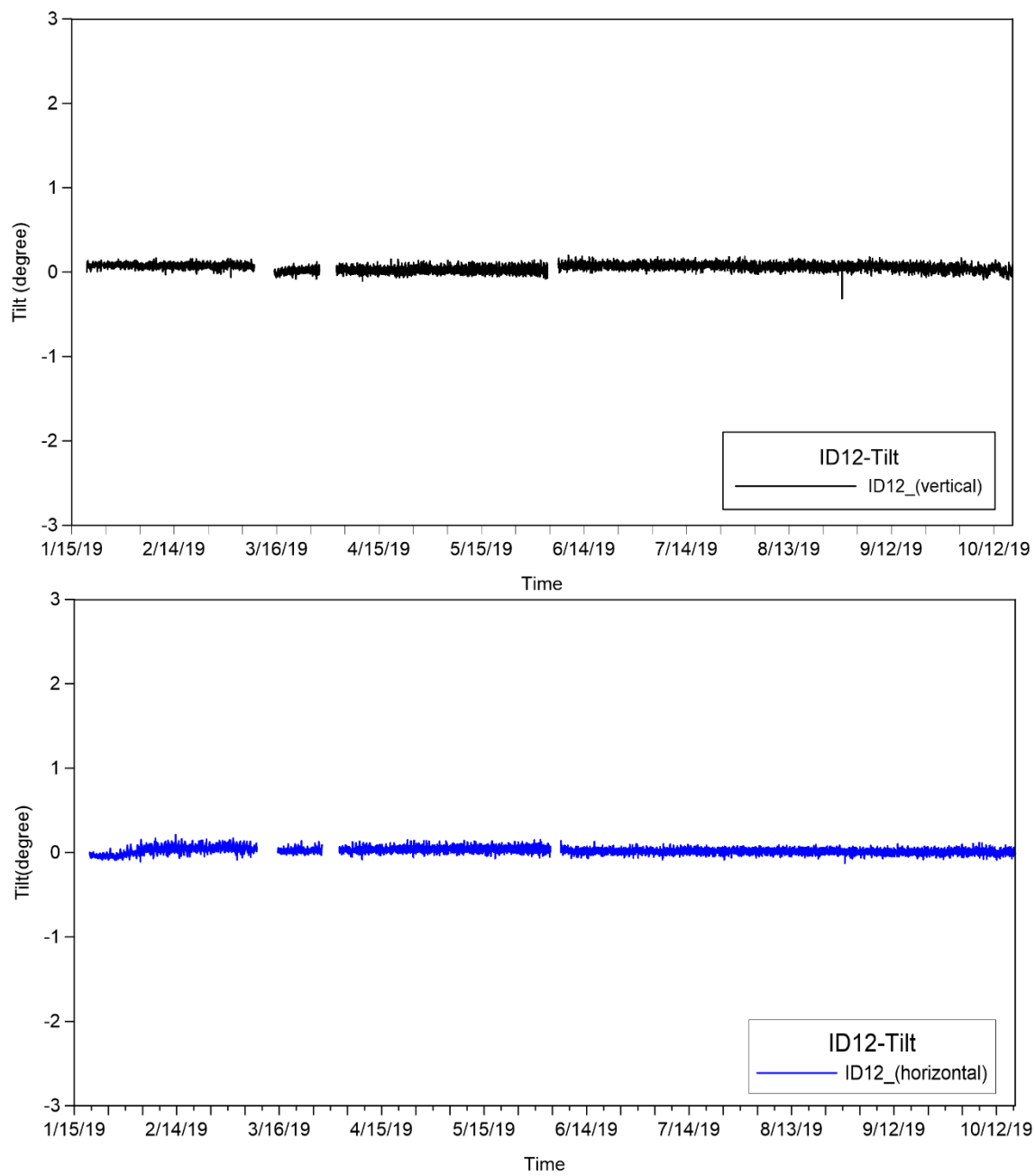


圖 4.27 ID12 牆體傾斜監測數據



## 第五章 邊坡與擋土系統變位分析

為建立本場址道路邊坡及擋土系統預警值，本計畫以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)，進行邊坡水力力學耦合分析，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程模擬，另以 PYWALL 軟體分析擋土牆體於不同牆後水位下變位，以擬定邊坡及擋土設施預警值，相關成果於本章說明。

### 5.1 二維水力力學耦合穩定分析

為模擬降雨入滲引致之孔隙水壓變化，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)，進行場址南北向剖面非飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程模擬，所用地表高程來自內政部地政司衛星測量中心之 1~2m 解析度之空載光達數值地形模型(DTM)，場址等高線圖如圖 5.1 所示，考慮向源侵蝕破壞類型，與監測對應之剖面標示於圖 5.1，對應之地表高程如圖 5.2 所示，最大坡角位於監測區段下方，超過 40 度。以此剖面建立地質模型進行水力力學耦合分析，模擬細節說明如下：

#### 5.1.1 土層參數與幾何

依現有調查資料顯示，台 7 甲線 41k 鄰近地層由地表往下 50m 深度內均為 RQD 為 0 之破碎頁岩層，岩石弱面結構不顯著，為模擬向源侵蝕表層崩落並降低計算量，模型僅考慮 30 m 深度為均質破碎頁岩層，下方為低透水性頁岩，所分析之 N-S 剖面無破碎帶，僅考慮崩積層及岩盤，所建立之模型如圖 5.3 所示，分析時採用之彈性與強度參數如表 5.1 所示，非飽和崩積層 van Genuchten (1980) 模式擬合參數如表 5-2 所

示，非飽和水文參數如表 5-3 所示，基質吸力引致土壤強度參數 $\phi^b$  為 $5^\circ$ 。

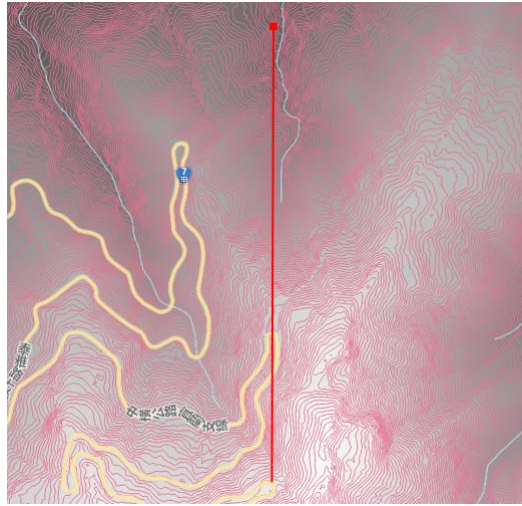


圖 5.1 台 7 甲線 41k 場址鄰近區域等高線圖

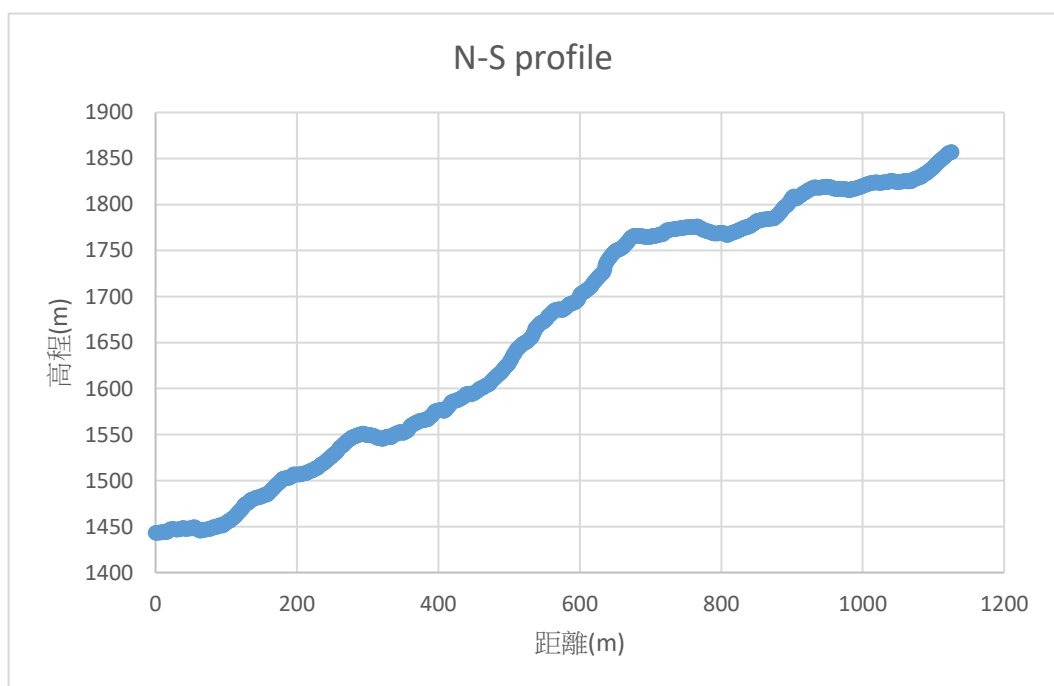


圖 5.2 分析剖面地表高程圖

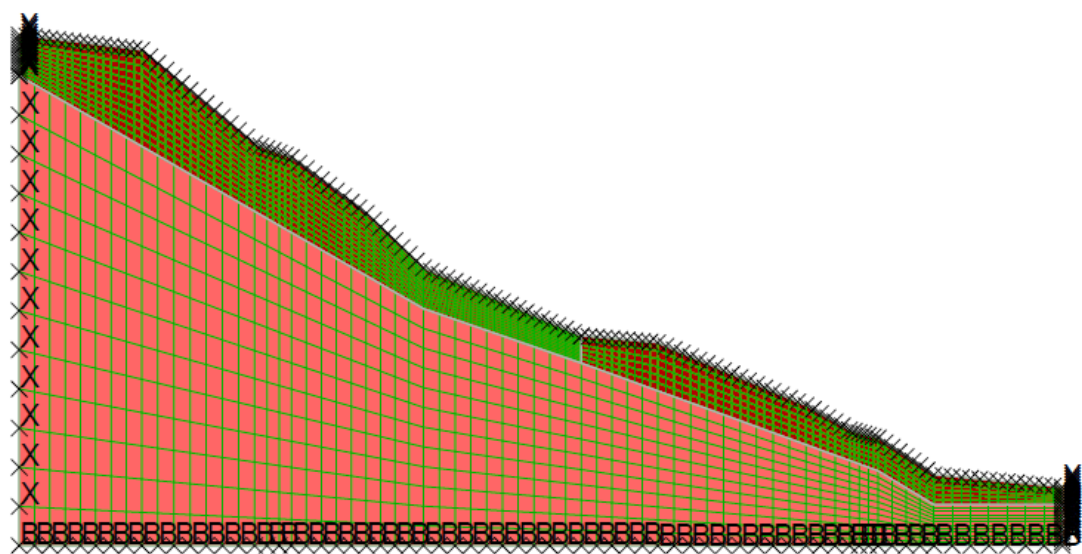


圖 5.3 台 7 甲線 41k 數值分析模型

以圖 5.3 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初始基質吸力為表 5-4 之  $P_c$  值，初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測向源侵蝕邊坡之反應。

### 5.1.2 數值分析結果

圖 5.4 為不考慮入滲下將破碎頁岩層有效摩擦角降為 40 度時穩定分析結果，模型無法滿足平衡條件，於侵蝕坡面表層產生滑動，最先由坡角最大處產生滑移，現有坡面結果顯示在向源侵蝕面上緣具較大位移潛勢，且於近坡面上方均有顯著位移，因此以傾角作為監測與預警指標有其合理性。

表 5-1 分析所用土層參數

| 參數(單位)                         | 破碎頁岩層  | 頁岩     |
|--------------------------------|--------|--------|
| 非飽和單位重<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 19     | 23.0   |
| 飽和單位重<br>(kN/m <sup>3</sup> )  | 20.1   | 25.6   |
| 楊氏模數(kPa)                      | 4000   | 2.0E5  |
| 柏松比                            | 0.3    | 0.25   |
| 有效凝聚力<br>(kPa)                 | 1000   | 5000   |
| 有效摩擦角<br>(deg.)                | 42     | 28     |
| 膨脹角 (deg.)                     | 2      | 0      |
| 滲透係數 (m/s)                     | 1.5E-3 | 5.2E-5 |

表 5-2 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數

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



表 5-3 非飽和水文參數

| 參數              | 破碎頁岩層  | 頁岩     | 意義                   |
|-----------------|--------|--------|----------------------|
| Porosity        | 0.25   | 0.1    | 孔隙率                  |
| $k_{sat}$ (m/s) | 1.0E-4 | 1.0E-6 | 飽和滲透係數               |
| fmodulus (Pa)   | 2.0E9  | 2.0E9  | 水體積模數                |
| saturation      | 0.54   | 0.54   | 初始飽和度                |
| Vga             | 0.1    | 0.1    | VG parameter a       |
| Vgpcw           | 0.5    | 0.5    | VG water parameter b |
| Vgpncw          | 0.5    | 0.5    | VG air parameter     |
| vgp0 (Pa)       | 15000  | 15000  | VG P0                |
| Pc (Pa)         | -25203 | -25203 | 初始 From Pc(Sw)       |

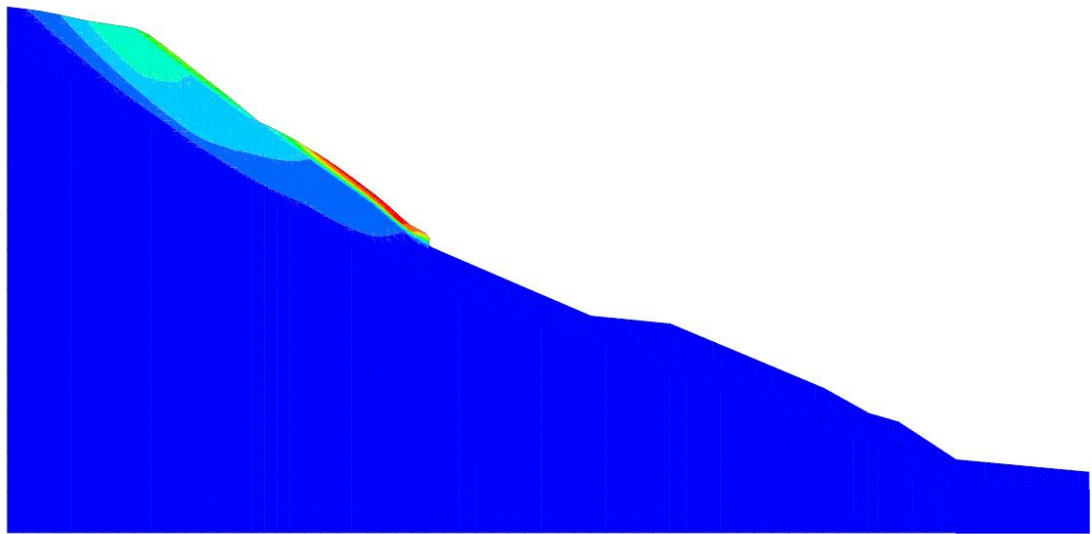


圖 5.4 靜力平衡位移分佈圖

圖 5.5~圖 5.7 為入滲達  $8 \times 10^6$  秒前不同階段飽和度分布與流動向量分布，結果顯示此區入滲為垂直向下，地下水位並無顯著升降且無平行滲流產生，此與液位計監測結果吻合，此場址預期非因地下水位上升而滑動。

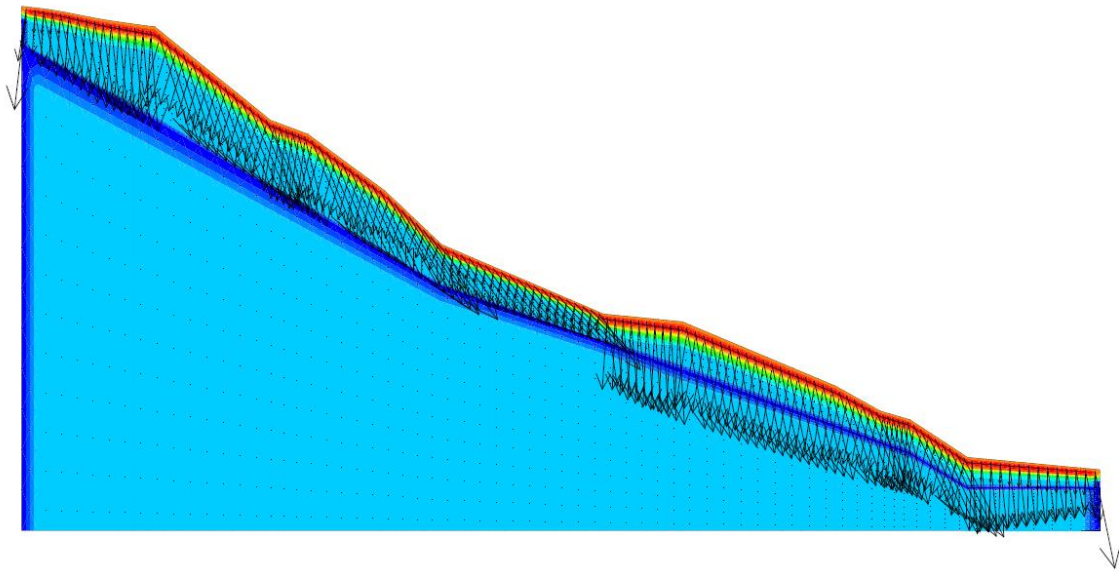


圖 5.5 入滲開始後  $1.2E4$  秒後飽和度分布(紅色為飽和)與流動向量

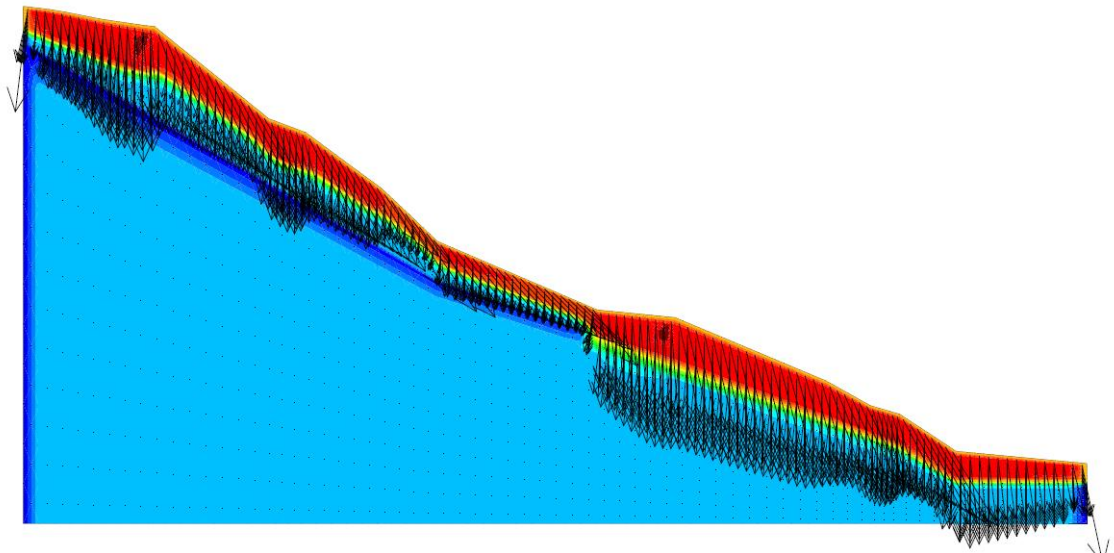


圖 5.6 入滲開始後  $1E6$  秒後飽和度分布(紅色為飽和)與流動向量

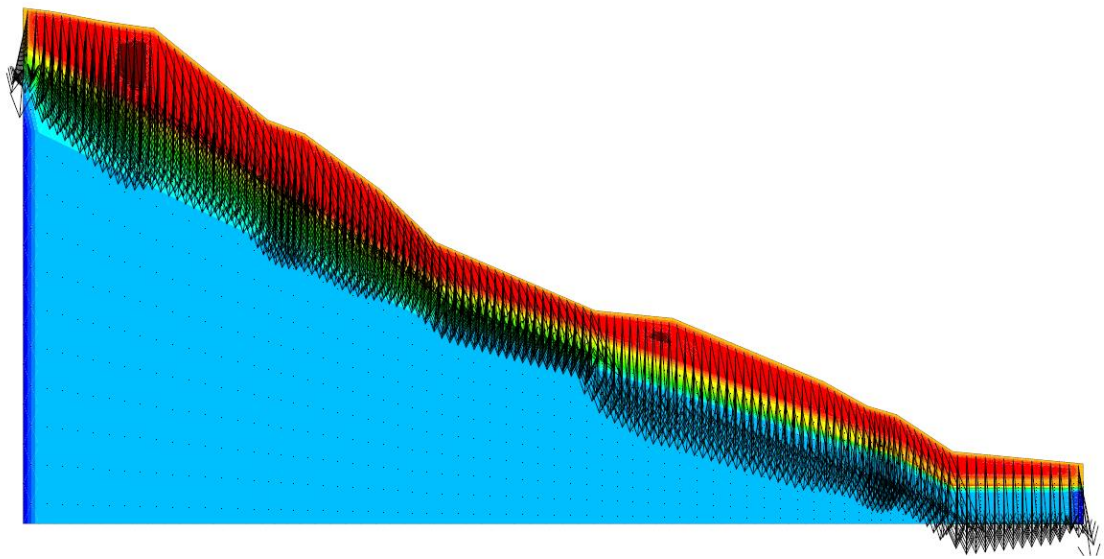


圖 5.7 入滲開始後 8E6 秒後飽和度分布(紅色為飽和)與流動向量

由於現地土壤為推估值，因此地表傾斜分析具不確定性，但結果顯示安裝監測儀器之平台於向源侵蝕發生時，距離 3~5m 處會有 2~3 度之傾斜，且愈接近坡面其傾角越大，現地觀測 ID5 結果亦顯示此數值，因此表層傾斜預警值採 2 度，可提供預警參考。

## 5.2 擋土支撐系統變位分析

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

### 5.2.1 PYWALL 軟體基本介紹

PYWALL 軟體之理論有別於傳統之極限平衡理論之分析，此軟體之最大優勢為考慮結構物與土壤互制關係，以非線性之土壤行為與材料性質模擬擋土設施行為，因此於分析柔性擋土牆時，相較於傳統分析將整體擋土設施視為一剛性旋轉體之方式，可得到牆體變形行為

(Ensoft, 2019)。分析擋土結構物時包含真實土壤狀況與結構物本身之相關細節。因此合理的分析與設計必須包含非線性土壤-阻力-位移之關係、樁間距、結構體性質等，PYWALL 透過樁柱模型來考慮樁土互制行為，軟體內也可以加入不同支撐系統或載重來分析擋土牆之行為。

PYWALL 軟體中之模型是基於 Winkler spring 模型改良而來，由 Rankine 理論假設主動土壓力，開挖面以下的土壤視為一系列之非線性彈簧以提供阻抗力。對於開挖面以下之土壤而言，開挖面以上之土壤所提供的主動土壓力可視為外部載重，概念如圖 5.8 表示。

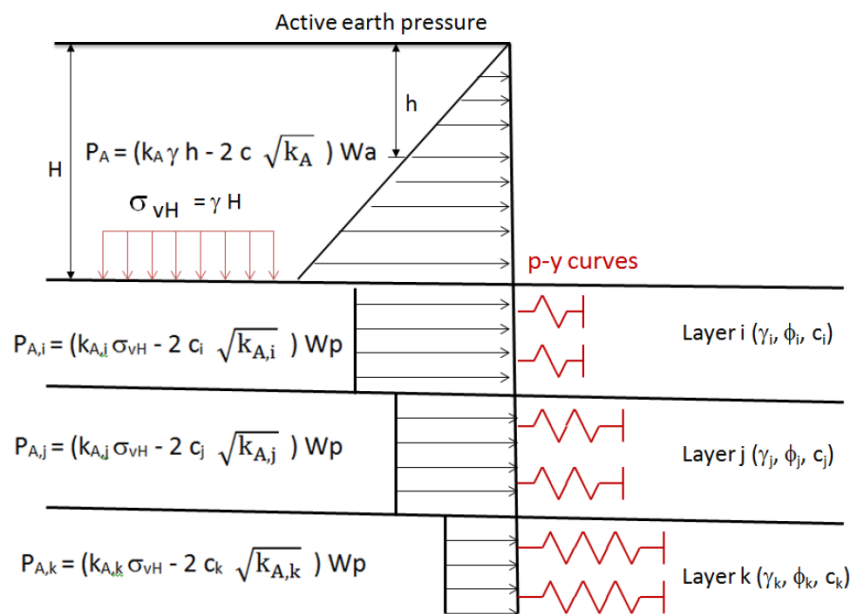


圖 5.8 PYWALL 土壤結構模型(改自 Reese et al., 2019)

### 5.3 邊坡擋土系統模擬

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

#### 5.3.1 模擬分析流程

現地場址基本模擬之流程如圖 5.9 所示，細節說明如下：

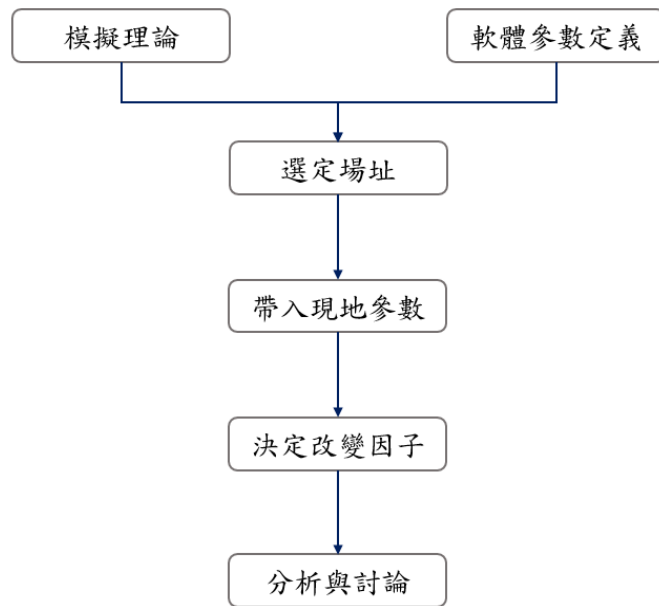


圖 5.9 牆體變形分析流程圖

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

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

### 5.3.2 現地模擬案例說明

本計畫以台 7 甲線 41K 之監測場址為分析案例場址，作為分析地下水對於擋土系統之影響案例，分析所使用之參數如下：

#### 1. 牆體斷面

此場址之牆體斷面示意圖參考臺七甲線 41k+700 迴頭彎災害復建工程竣工圖(2011)，如圖 5.10 所示。構造圖中為排樁，其總長度為 13 公尺，楊式模數設定為 35GPa，稍高於一般混凝土材料。

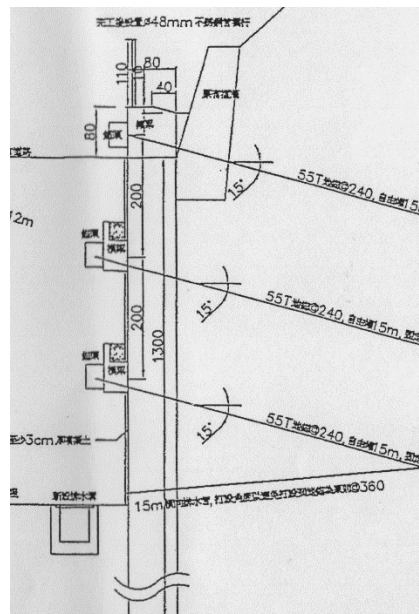


圖 5.10 牆體斷面示意圖

(臺七甲線 41k+700 迴頭彎災害復建工程竣工圖，2011)

## 2. 牆體性質

牆體性質參考圖 5.10 之示意圖，牆體總高度為 13 公尺且牆體不分段，總共為 130 個節點，即為每 0.1 公尺取一分段進行分析。

## 3. 牆體配置

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

- (1) 擋土牆高：參考圖 5.10 後擋土牆高定義為 6.7 公尺。
- (2) 背填土側地下水位：本場址案例中之背填土側地下水位將由深度 5 公尺開始上升，每 0.5 公尺取一段進行分析。
- (3) 開挖側地下水位：本場址案例之開挖側地下水位將固定為深度 6.7 公尺。
- (4) 土壤阻抗寬度：本場址所假設為排樁，其排樁中心間距為 1.2 公尺，直徑為 0.8 公尺，則土壤阻抗寬度( $W_p$ )為 0.8 公尺。
- (5) 主動土壓寬度：本場址之主動土壓寬度( $W_a$ )為 1.2 公尺。

## 4. 土壤性質

本案例場址之土層主要分為上部表土及崩積層與下部板岩，因此於本案例中將土壤進行分層假設，上部土壤假設為鬆軟至中等緊密之無凝聚力砂土，下部土壤參數皆以軟弱岩石為假設， $k_{rm}$  用於決定岩石之剛度，類似黏土中之 E50 的概念， $k_{rm}$  值越大則岩石剛度越小，其範圍為 0.0005 至 0.00005，土壤參數表如表 5-4 所示。

表 5-4 台 7 甲線土壤參數表

| 土層 | 深度(m) | 單位重<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 摩擦角(°)                         | k 值<br>kPa/m |                              |            |
|----|-------|-----------------------------|--------------------------------|--------------|------------------------------|------------|
| 砂土 | 0~5   | 19.5                        | 33                             | 12000        |                              |            |
| 土層 | 深度(m) | 單位重<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 單軸壓縮強度<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | krm          | 楊式模數<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | RQD<br>(%) |
| 軟岩 | 5~15  | 21                          | 5000                           | 0.0005       | 20000000                     | 15         |

## 5. 地錨參數

本場址案例中之地錨配置與參數參考圖 5.10，其地錨參數表如表 5-5 所示

表 5-5 地錨參數表

| 編號 | 深度<br>(m) | 截面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 彈性模數<br>(GPa) | 自由端長<br>度(m) | 傾角<br>(角度) | 水平間<br>隔(m) |
|----|-----------|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| 1  | 0.4       | 240                       | 200           | 15           | 15         | 2.4         |
| 2  | 2.4       | 240                       | 200           | 15           | 15         | 2.4         |
| 3  | 4.4       | 240                       | 200           | 15           | 15         | 2.4         |

本場址之模擬背填土側地下水位上升後，對於整體擋土牆之行為變化，其背填土側地下水位深度由 5 公尺開始往上每 0.5 公尺取一段分析，其不同地下水位之牆體高度與牆體位移成果圖如圖 5.11 與圖 5.12 所示。



### 5.3.3 案例分析成果

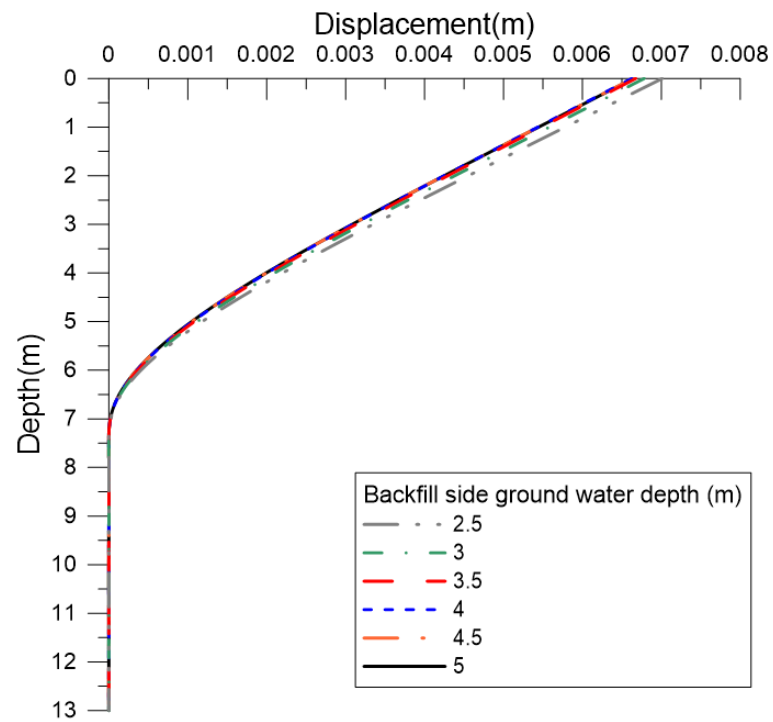


圖 5.11 水位深度 5~2.5 位移圖

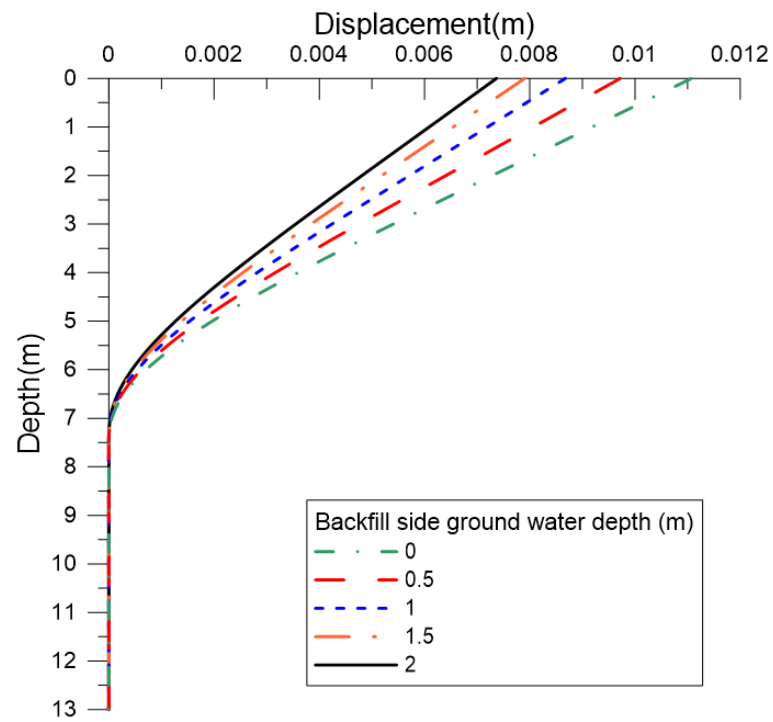


圖 5.12 水位深度 2~0 位移圖

取擋土牆頂部之位移與地下水位深度進行比較，如圖 5.13 所示。

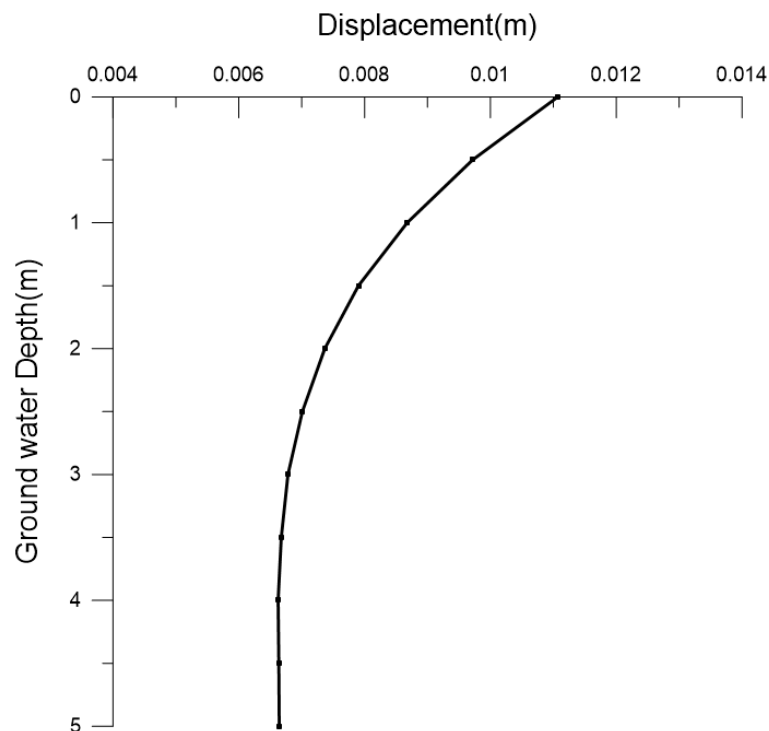


圖 5.13 台 7 甲線牆頂位移量與地下水位深度關係圖

自圖 5.11 與圖 5.12 中可見，於本場址模擬土層假設中下層土層為岩石，其強度相較於一般砂土或黏土來的高，因此擋土牆本身因地下水位上升後所產生之位移量幾乎趨近於 0，而接近兩種土層交界時，牆體則會開始產生較明顯位移。

由於監測場址之擋土設施監測模組架設位置位於擋土牆頂部，因此取各地下水位深度之牆頂位移，繪製成地下水位與牆頂位移關係圖，如圖 5.14 所示。

參考文獻中不同土壤下主動破壞時之 Y/H 比值，將其轉換為旋轉角度，以利進行比較與訂定預警值，如表 5-6 所示。

表 5-6 不同土壤下主動破壞旋轉角

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

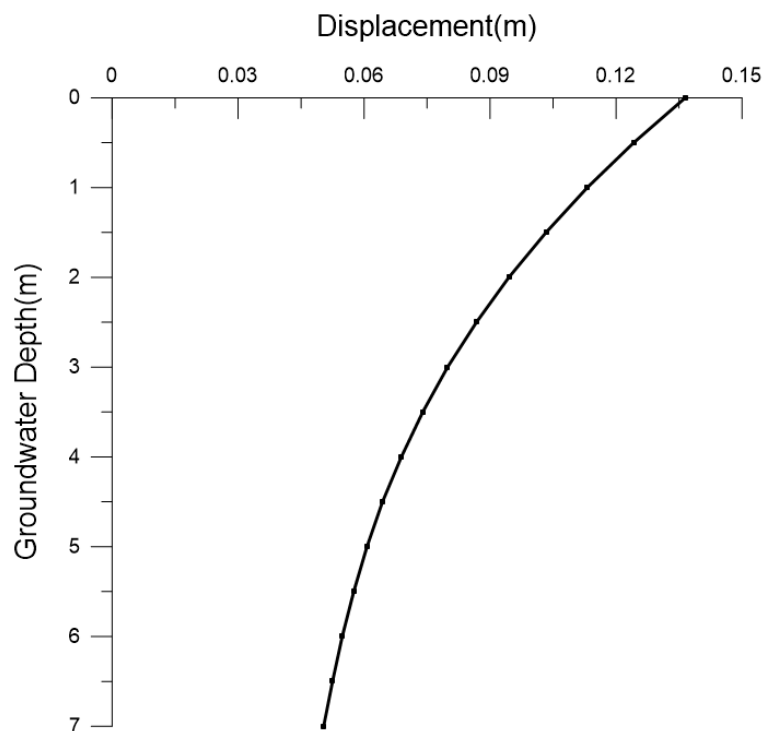


圖 5.14 地下水位深度與牆頂位移量

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

NAVFAC DM-7(1982)與 CGS(2007)中擋土設施皆視為一剛性旋轉體且適用於重力式擋土牆，而於本研究中所考慮的為柔性擋土牆，因此受背填土側擠壓後所產生之水平位移會大於兩者所假設。參考文獻後，

於本研究中訂定此場址之預警之旋轉角度為  $0.3^{\circ}\sim 0.35^{\circ}$ ，可由圖 5.15 得到背填土側之地下水位上升至距離土側頂端 2.9 公尺到 4 公尺時，進入預警之範圍。

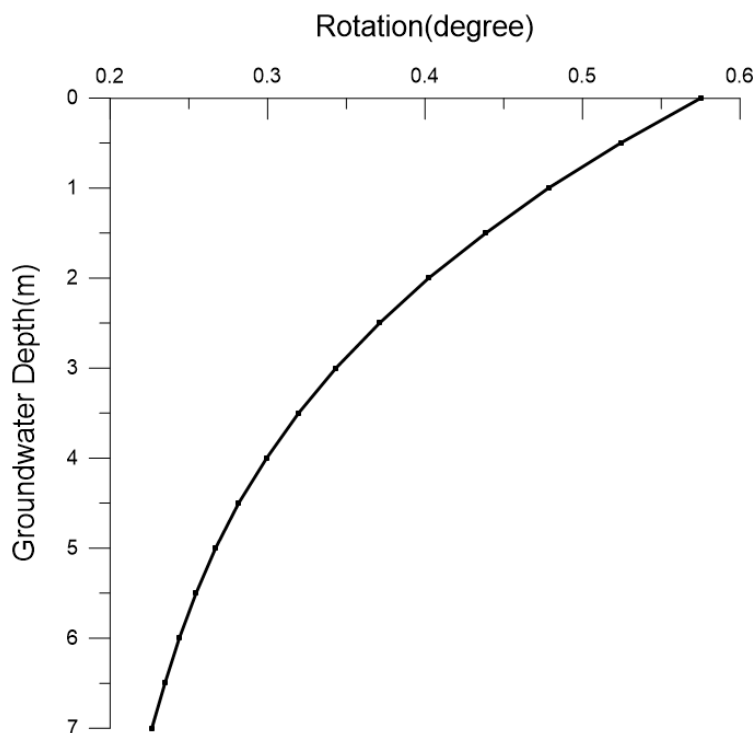


圖 5.15 地下水位深度與旋轉角

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

## 第六章 雲端整合即時監測平台

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

### 6.1 平台架構

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

平台架構示意圖如圖 6.1 所示，此平台整合了 IoT 資訊平台資訊、衛星影像、與該場址之預警值，提供使用者一個完整的現地監測與預警值資訊，並將網站架設於個人或虛擬伺服器主機中。具體執行步驟如下：

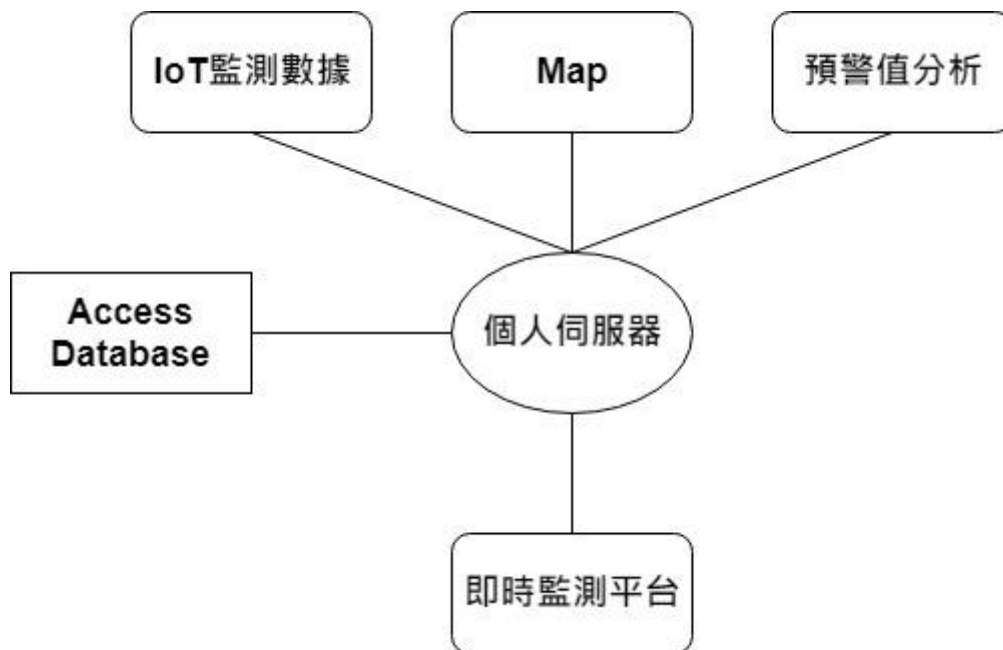


圖 6.1 平台架構示意圖

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

## 6.2 平台功能簡介

### 6.2.1 身分驗證系統

進入監測平台首頁為身分驗證系統，如圖 6.2 所示，使用者欲使用此平台必須先註冊帳戶，並待管理者開通後即可使用，系統管理者可依需求定義帳戶為訪客、計畫成員、系統管理者三種權限，不同權限帳戶登入後可使用功能有些許不同。

### 6.2.2 即時監測平台頁面

完成身分驗證功能後，將進入即時監測平台頁面，如圖 6.3 所示，依不同權限帳戶登入可使用功能有些許不同。訪客權限僅可使用「即時資訊」欄位功能，計畫成員可額外使用「資料下載」欄位功能，系統管理者權限則可使用包含「使用者權限」欄位等全部功能，以下將介紹各欄位功能。

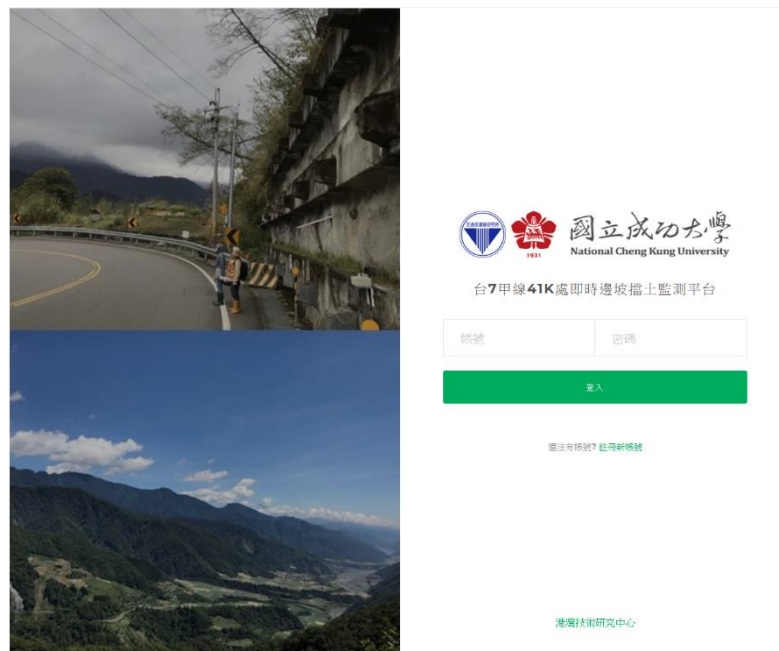


圖 6.2 平台身分驗證系統首頁



圖 6.3 即時監測平台頁面

「即時資訊」頁面由上至下，包含：

- (1) 監測儀器分佈：左側欄為場址衛星影像圖，監測儀器分佈、配置、編號標註其上。右側欄為外掛 Mapbox 可縮放式地圖，縮小後可了解場址地理位置。
- (2) 監測儀器狀態：如圖 6.4 所示，此表格顯示各模組狀態，顯示資訊有：編號、最後上傳時間、電池狀態、運轉狀態、感測器配置、與管理值判定。

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

圖 6.4 監測儀器狀態頁面

- (3) 雨量資訊：如圖 6.5 所示，左側欄為場址監測雨量圖，最多可顯示過去 62 小時資訊。右側欄為過去 24 小時雨量資訊的詳細資料，0-10 為該小時 0 分至 10 分雨量，10-20 為該小時 10 分至 20 分雨量，以此類推。

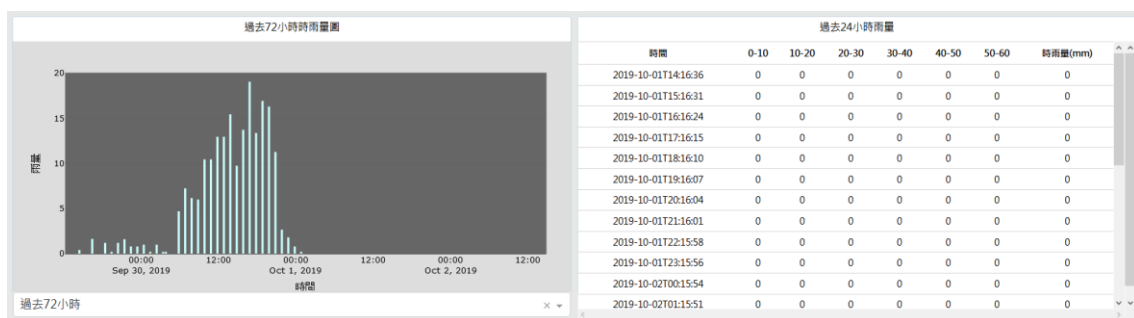


圖 6.5 雨量資訊頁面



- (4) 地下水位資訊：如圖 6.6 所示，左側圖表顯示場址量測點之地下水位變化，最多可顯示 100 筆資訊。右側表格提供監測點之水位高程、深度與警戒值資訊。

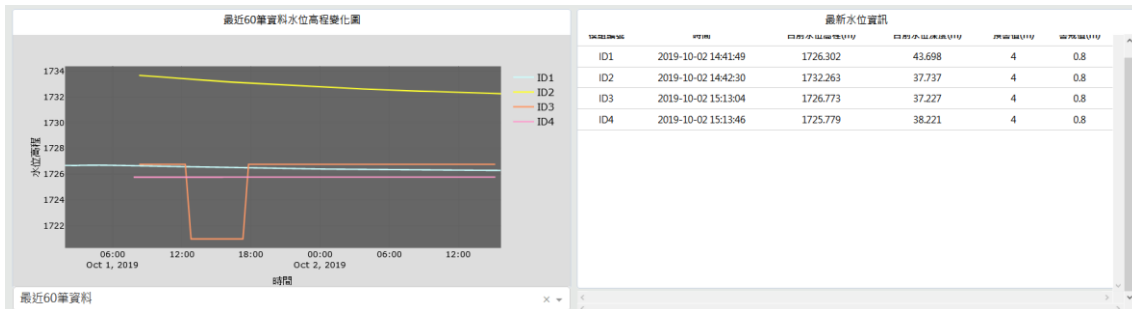


圖 6.6 地下水位資訊頁面

- (5) 傾角資訊：經簡化後，傾角量測正向如圖 6.7 所示，平台顯示如圖 6.8 所示，上方表格顯示所有監測傾角資訊，包含量測值、累積角變量、與警戒值資訊。下方兩欄位分別為：邊坡監測傾角變化圖與擋土牆監測傾角變化圖，選擇欲顯示儀器編號後將顯示傾角隨時間變化圖，最多可顯示 1000 筆資訊。

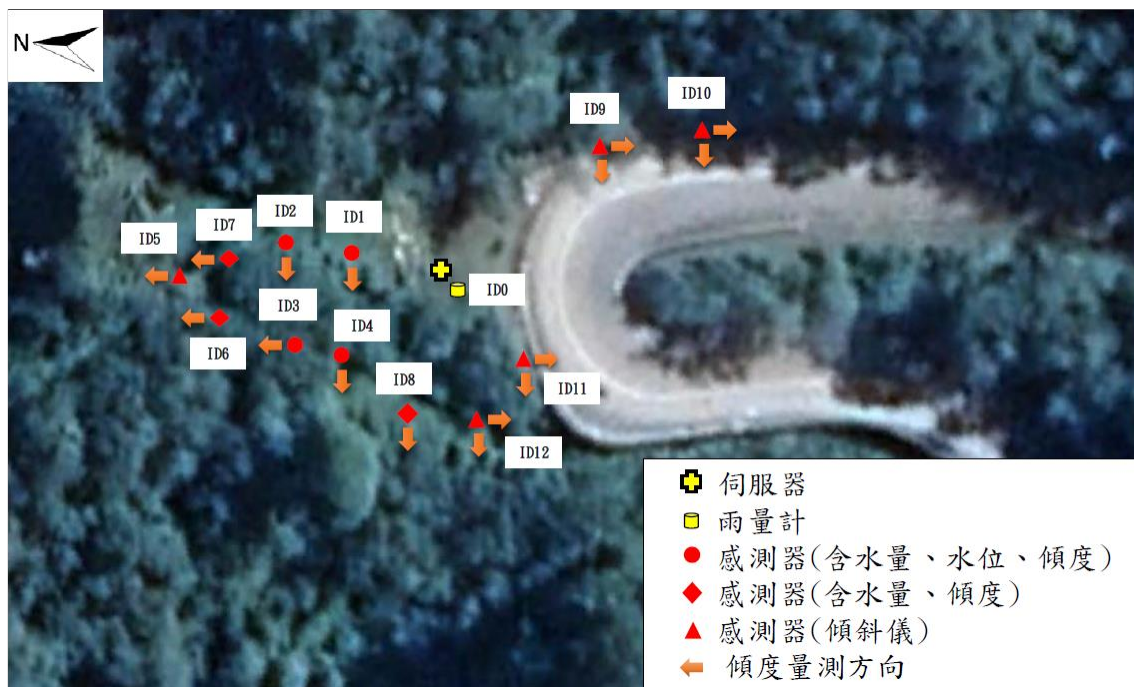


圖 6.7 傾角方向示意圖



圖 6.8 傾角資訊頁面

「資料下載」頁面可下載監測之原始資料，如圖 6.9 所示，選擇欲下載之日期區間與 Channel ID 後，點選下載，原始檔案將以 csv 格式儲存於個人電腦，監測資訊排序與 ThingSpeak 相同。



圖 6.9 資料下載頁面

「使用者管理」頁面可管理監測平台使用者之權限，使用方法如圖 6.10 所示，選擇欲改變權限之帳戶、更改後權限、開通狀態、是否通知，確定後使用者權限即更改。

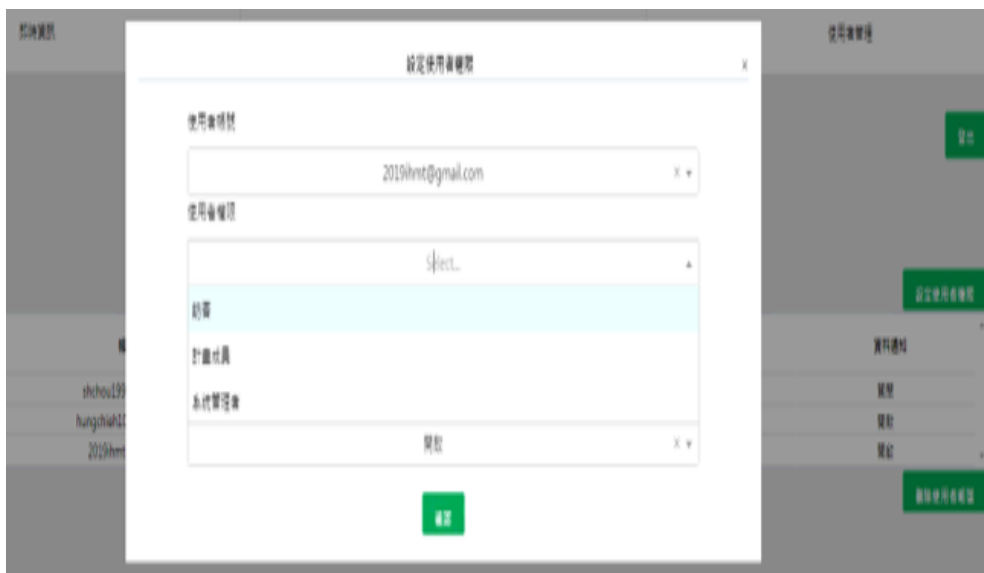


圖 6.10 使用者管理頁面

## 6.3 監測平台警戒值管理

因應不同場址、不同理論，將分析出不同的警戒值。本平台警戒值設定如圖 6.11 所示，於資料夾中 Channel\_list 檔案更改初始值、警戒值後儲存即可更改警戒值設定。

| Channel ID | Channel Name     | Read API Keys | 資料點數     | Channel Name | 警戒值(傾角) | 警戒值(傾角) | 警戒值(水位) | 警戒值(水位)    | N 座標        | E 座標 | 電位(電壓(毫伏)) | 電位(電壓(毫伏)) | 傾角1初始值  | 傾角2初始值 |
|------------|------------------|---------------|----------|--------------|---------|---------|---------|------------|-------------|------|------------|------------|---------|--------|
| 677084     | 78E70F11J1C5JR2  | 100           | ID677084 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440336111 | 121.3694722 | 12.6 | 9.6        | 50         | 0       | 0      |
| 650945     | 0F4IG60LJPM8A2V  | 100           | ID650945 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440338889 | 121.3695    | 12.6 | 9.6        | 50         | 7.016   | 0      |
| 650947     | ZWIT8SD4MOX71GEB | 100           | ID650947 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440347222 | 121.3695278 | 12.6 | 9.6        | 50         | -1.957  | 0      |
| 650949     | 1R2QQP16X93R3OV  | 100           | ID650949 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440347222 | 121.3693611 | 12.6 | 9.6        | 50         | -2.1    | 0      |
| 651981     | 8YUK7ED26ASV1UKN | 100           | ID651981 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440341667 | 121.3693611 | 12.6 | 9.6        | 50         | 0.01    | 0      |
| 651982     | 8VOMKUA716HE77IU | 100           | ID651982 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440355556 | 121.3695556 | 12.6 | 9.6        | 50         | 2.71    | 0      |
| 651983     | U1E1LCH8WKN70BT  | 100           | ID651983 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440352778 | 121.3695    | 12.6 | 9.6        | 50         | -13.557 | 0      |
| 651984     | 2PT2BF3HRG6XAP3H | 100           | ID651984 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440333333 | 121.3695556 | 12.6 | 9.6        | 50         | 0       | 0      |
| 651985     | 4MYZ29XG85PHSXM1 | 100           | ID651985 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440338889 | 121.3693056 | 12.6 | 9.6        | 50         | -2.18   | 0      |
| 652025     | Z7DHGCSAB50FR1V  | 100           | ID652025 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440288889 | 121.3695    | 12.6 | 9.6        | 50         | -1.71   | -3.87  |
| 652026     | 9K3GH2OSDFQZU9K  | 100           | ID652026 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440286111 | 121.3694722 | 12.6 | 9.6        | 50         | 5.648   | 4.456  |
| 652027     | LQQP1ZSHB8SYHC   | 100           | ID652027 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440308933 | 121.3695    | 12.6 | 9.6        | 50         | 3.9     | 3.1    |
| 652030     | ZMOJZMKASPAT3463 | 100           | ID652030 | 0.3          | 0.5     | 4       | 0.8     | 2440327778 | 121.36925   | 12.6 | 9.6        | 50         | 8.08    | -4.3   |

圖 6.11 平台警戒值設定

本場址目前所用之警戒值為向源侵蝕坡面(ID3, 5-7)預警值為 2 度，擋土牆體預警值為 0.3 度，相關數值可滾動修正並於系統 Channel\_list 檔案修改。

## 6.4 教育訓練

本試辦計畫於 2019 年 10 月 24 日上午假公路總局第四區養護工程處 2 樓會議室進行教育訓練，四工處各工務段及養護科同仁計有 15 位參加，並由副處長主持，簽到表如表 6-1 所示。本計畫由主持人進行簡報，內容包括計畫緣起、監測系統簡介、相關分析介紹以及雲端平台使用說明，過程照片如圖 6.12~6.15 所示，並與同仁說明資料應用、雲端系統設定及後續系統硬體維護等課題，主要結論彙整如下：

1. 資料應用：此試辦計畫建置系統相關警戒值限於監測期間缺乏強降雨事件驗證，因此警戒值為依數值分析及有限觀測結果擬定，其現有主要建議功能為提供人員巡查頻率及巡察重點，後續更新驗證警戒值後，可進一步增加主定提醒功能及作為封路與相關防災作為之參據，暫僅作輔助管理之用。
2. 雲端系統設定：目前雲端平台暫由研究團隊代管，並可開放管理權限於工務段，因平台採 python 架構，可隨時進行轉移，相關初始與警戒值設定不須進程式修改，現有資料採密碼管制，可避免初期試用對業管單位之負擔。
3. 後續維護：本監測模組採模組化設計，維修建議採整組更換方式，初期由計畫團隊進行維護，並開始教育第一線人員簡易更換程序，後續可由研究團隊將模組寄至工務段後由工務段人員協助更換，以降低維護成本。

表 6-1 教育訓練簽到表

近景攝影測量技術與均質土壤淺層滑動無線監測系統

公路邊坡檢監測試辦計畫教育訓練

簽到表

時間：108 年 10 月 24 日(星期四)上午 9 時 30 分

地點：公路總局第四區養護工程處2樓會議室

| 單位     | 簽名  | 如欲取得公務人員終身學習時數(請填身份證字號) |
|--------|-----|-------------------------|
| 南澳工務段  | 何欣頤 |                         |
| 南澳工務段  | 陳源鑫 |                         |
| 頭城工務段  | 蘇銘富 |                         |
| 蠟山工務段  | 黃詩書 |                         |
| 玉里工務段  | 翁以毅 |                         |
| 玉里工務段  | 鍾澄益 |                         |
| 太魯閣工務段 | 楊銘弘 |                         |
| 橋養護科   | 顏錫堅 |                         |
| 養護科    | 林育廷 |                         |
| //     | 謝永榮 |                         |
| //     | 曾慶新 |                         |
| //     | 鄧禮信 |                         |

林俊和

| <del>張庭</del> 單位 | 姓名  | 身分證字號 |
|------------------|-----|-------|
| 經緯航太             | 張庭榮 |       |
| 港研中心             | 黃子謙 |       |
| 養護科              | 林宛瑩 |       |
| 成大土木             | 張文忠 |       |
| 港研中心             | 胡絡及 |       |
| ''               | 曾文傑 |       |
| 太魯閣段             | 王國霖 |       |
|                  |     |       |
|                  |     |       |



圖 6.12 教育訓練開場





圖 6.13 近景攝影計畫說明



圖 6.14 無線監測計畫簡介



圖 6.15 無線監測計畫說明



## 第七章 結論與建議

本年度計畫以入滲速率、地表傾斜及土層孔隙水壓為指標之預警模式，搭配邊坡與擋土牆體無線監測模組，除具快速佈設與價廉之特點，尚可取代傳統人工監測費時、昂貴及非即時之限制。搭配考慮入滲之非飽和土層滑動極限平衡分析及時域邊坡水力力學耦合數值分析，建立客製化公路依時預警系統。以台 7 甲線 41.55K 至 41.65K 邊坡為監測測試場址，於該路段設置雲端無線感測網路模組，結合具嚴謹力學理論之解析法進行邊坡穩定分析，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，測試可快速布設且具依時特性之公路土壤邊坡地表監測預警技術。計畫執行結論與建議摘要如下：

### 7.1 結論

1. 監測模組安裝與資料分析：安裝雨量計、地表與牆體傾度、地下水位及表層分層水份計，監測期間針對此監測場址，進行更新或修復，並進行監測與資料彙整。
2. 場址水力力學耦合分析：針對此場址，進行考慮土層水力力學耦合及擋土系統互制行為之極限平衡與數值分析，提供可能之破壞模式預測，及提供邊坡及擋土設施警戒值設定之參據。
3. 客製化預警值建立：結合邊坡及擋土系統依時分析成果，建立不同階段之邊坡與牆體預警值，轉換成不同燈號顯示於網頁，以利業管單位管理之參考。
4. 監測網頁建置：本計畫成果以專屬監測網頁呈現，顯示內容包括最新監測值、邊坡與擋土系統狀態(以燈號顯示)、儀器狀態顯示等，系統架設於中華電信機房，以租用形式運作，並以帳號密碼管制可閱覽權限，目前由計畫團隊暫管，後續可配合平台移轉。

## 7.2 建議

針對本計畫執行提出下列建議：

1. 後續系統維護：現有系統近期將由研究團隊進行維護，但因路途遙遠不便，後續將輔導現地工程人員，以整組模組更換方式進行維修，所需模組元件可以郵遞方式送達，以利長期測試。
2. 現有傾斜監測建議：目前監測結果顯示 ID2 孔位疑似阻塞，但因本系統僅有表層監測，後續建議相關傾斜管監測計畫可持續進行，以與新設系統互為輔助，並可滾動更新地表傾斜警戒值。

## 7.3 預期效益與應用情形

1. 針對崩積土層進行解析法推論，發展具依時特性之公路土壤邊坡降雨滑動監測及預警技術，提高預警模式之準確度，以利災害管理。
2. 計畫執行期間，在運輸研究所、公路總局四工處與計畫團隊努力及相關單位之配合下，計畫依原規劃進行並進行必要調整，如期完成相關工作項目與達到預期效益。
3. 開發可快速布設，且具依時特性之公路土壤邊坡地表監測預警技術，研究成果提供交通部、公路總局第四區養護工程處及各工務段等單位，做為相關防災啟動之參據。

## 參考文獻

1. 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。
2. 邱永芳、黃安斌、饒正、李瑞庭、陳志芳、何彥德，2011，全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試 (4/4)，交通部運輸研究所。
3. 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。
4. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯，2015，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。
5. 公路總局第四工程處，2017，「台 7 甲線 41K+700 及 34K+400 邊坡觀測工作-新增觀測孔位地層資料」。
6. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pp. 544-552.
7. 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.
8. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, pp. 362-372.
9. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil mechanics for unsaturated soils." New York, Wiley.
10. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Tsai, T.L. (2009) "Field monitoring of pore-water pressure profile in a slope subjected to heavy rainfalls," *Proceedings, XVII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, pp.1931-1934.

11. Kuo, C. Y., Tai, Y. C., Bouchut, F., Mangeney, A., Pelanti, M., Chen, R. F., Chang, K. J., (2009) Simulation of Tsaoling landslide, Taiwan, based on Saint Venant equations over general topography,” Eng. Geo., 104, 181-189.
12. Ni, C. F. and Li, S. G. (2005) “Simple closed-form formulas for predicting groundwater flow model uncertainty in complex, heterogeneous trending media,” Water Resources Research, 41(11).
13. Orense RP, Towhata I, Farooq K (2003) Investigation of failure of sandy slopes caused by heavy rainfall. In: Proc. Int. Conf. on Fast Slope Movement—Prediction and Prevention for Risk Mitigation (FSM2003), Sorrento.
14. Orense RP, Farooq K, Towhata I (2004) Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration. Soil Found 44(2):15–30.
15. 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.
16. Uchimura T, Towhata I, Wang L, Seko I (2008) Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. In: Proc. of the First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, pp 611–614
17. Uchimura, T., Towhata, I., Trinh, T. L. A., Fukuda, J., Bautista, C. J. B., Wang, L., Seko, I., Uchida, T., Matsuoka, A., Ito, Y., Onda, Y., Iwagami, S., Kim, M. S., and Sakai, N. (2010): “Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface”, Landslides, 7:351–357
18. 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.
19. van Genuchten M. (1980). “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” Journal of Soil Science Society of America, 44, pp. 892–898.

## 附錄一 各期審查意見與回覆



# 交通部運輸研究所合作研究計畫 期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫

計畫編號：MOTC-IOT-107-H1EB002

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

| 參與審查人員<br>及其所提之意見                                        | 合作研究單位<br>處理情形                                | 本所計畫承辦<br>單位審查意見 |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------|
| <b>一、蘇苗彬委員</b>                                           |                                               |                  |
| 1. P.1-5，傾度盤的警戒值採 1/300，是否考慮架設於構造物上，會有所不同。               | 此為前期報告建議值，本研究將以擋土牆體變位分析建議構造物警戒值取代。            | 依處理情形辦理          |
| 2. P.1-6 的傾斜管等表現不太合理，後續變化如何應可持續觀察。                       | 此為前期報告資料，非屬本計畫範圍，將轉知四工處。                      | 依處理情形辦理          |
| 3. 台七甲 41K 作為觀測試驗場應屬不錯，可以驗證預警的概念，尤其有治理工程，可以做為安全保障與成效的評定。 | 感謝委員肯定。                                       | 依處理情形辦理          |
| 4. P.2-19 的滲漏英文字有誤，可以修正。                                 | 修正為” percolation” ，期末報告修正。                    | 依處理情形辦理          |
| 5. 以傾斜觀測，對邊坡穩定應屬合理，較易達成變位的觀測，以地表及結構物為主，應可發揮功能。           | 感謝認同與肯定。                                      | 依處理情形辦理          |
| 6. 由 P.4-3 等照片看來，現地安裝的儀器沒有完整的保護，後續應再加強。                  | 計畫結束前會將較無作用之感測器移除，並適當遮蔽，以簡化管理與維護需求。           | 依處理情形辦理          |
| 7. P.4-10 的體積含水量變化不太合理，應可再加強。                            | 現有水份計會受周圍土壤及安裝條件影響。體積含水量於本場址作用不大，後續會加以移除。     | 依處理情形辦理          |
| 8. P.4-14 等牆體傾斜監測變化已很明顯，應仔細分析。                           | ID9 及 ID10 位於路邊，有人為移動之跡象，導致固定不良，現地觀察牆體並無傾斜跡象。 | 依處理情形辦理          |
| <b>二、游繁結委員</b>                                           |                                               |                  |
| 1. 傾斜管 A 向、B 向所指宜明確註明，以利判釋(即傾向或走向?)。                     | 謹遵辦理。                                         | 依處理情形辦理          |
| 2. P.2-13 文中有微分符號誤植，請檢視修正之。                              | 此為字型錯誤，將於期末報告修正。                              | 依處理情形辦理          |
| 3. P.2-19 邊坡依時預警架構之構想良                                   | 本場址現地狀態與均質土壤                                  | 依處理情形辦理          |

|                                                                                                        |                                                                              |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 好，亦值得嘗試，惟因推估破壞時間受土體參數影響甚大，在不均質土壤更存在甚大變異性，故其實用性之限制如何，宜論述之。                                              | 有別，已於工作會議取得共識，專注於牆體及邊坡監測預警，將於期末報告補充。                                         | 理       |
| 4. 電容式含水量計係以間接之訊號轉換，故其反應時間受此等間接感測，可能遲滯效應大增，不利於即時反應之需，宜說明此等儀器之敏銳度。                                      | 所用電容式含水量計於室內率定時其反應時間與土壤類型有關，因本場址存在大顆粒材料，現有設備較不適用且用處有限，將於計畫結束後移除。             | 依處理情形辦理 |
| 5. 液位計以其量測高差達 20m 程度之精度，能否反應土壤中之地下水位變化影響？又，由圖 4.5 所示地下水位變化與降雨似無關係？何以？                                  | 所用液位計解析度達 1cm，硬體符合要求，但所測水位為孔底水位，其反應與土層水力特性有關，上階坡面與降雨距關聯性，下階坡面其水位在感測頭以下，並非無關。 | 依處理情形辦理 |
| 6. 圖 4.7 土壤含水量在 60m 處之變動如內文所示，可能為土層未與含水量計緊貼，顯示該等儀器量測環境之掌握不易，如何獲得可靠資料，宜檢討。                              | 現有水份計會受周圍土壤及安裝條件影響。體積含水量於本場址作用不大，後續會加以移除。                                    | 依處理情形辦理 |
| 7. 土層傾斜計之裝置如何固定土體中，而不受土體常態變形之影響？(如冷縮熱漲，土粒壓密或流失等現象？)。                                                   | 土層傾斜計裝設於分層水份計上端防水盒內，反應貫入深度 60cm 內土層傾角。                                       | 依處理情形辦理 |
| 8. 依現況地形，地下水質之分布似不大可能，故土壤孔隙水壓較之地下水位可能更具支配條件，宜詳加探討因應。                                                   | 將於工作會議討論，同意委員揭示，現地地下水位不高，非屬飽和土層滑動類型。                                         | 依處理情形辦理 |
| 9. 現地儀器之功能是否正常，如何有效掌控？                                                                                 | 因資料定時上傳雲端，可遠端監控其電量與狀態，後續於管理網頁將以燈號顯示。                                         | 依處理情形辦理 |
| <b>三、高邦基委員</b>                                                                                         |                                                                              |         |
| 1. P.1.1.3 計重要性：「可預測邊坡之滑動面」，請增加為滑動面之位置。文字誤繕或不足包括 P2-3:「飽合改為飽和，「土壤中入滲之」請改為土壤中入滲之速率。P2-5，「邊坡內之分部」請修正為分佈。 | 謹遵辦理，期末報告修正。                                                                 | 依處理情形辦理 |
| 2. P.2-1 「建立場址具依時特性之……」，請將依時之英文註明。                                                                     | 依時英文為” time-dependent”，強調其預警與時間關聯性。                                          | 依處理情形辦理 |



|                                                                                                   |                                                                        |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------|
| 3. P. 2-2 依時邊坡預警系統架構圖，建議將未來將建置之預警指標納入架構圖。                                                         | 謹遵辦理，期末報告補充。                                                           | 依處理情形辦理 |
| 4. 請說明本計畫完成後，公路管理機關操作本計畫監測系統(含軟硬體維護管理及監測網頁之友善性)是否順利運行及教育訓練。                                       | 計畫結束前會將較不適用之感測器移除(如水份計)，並有專屬網頁及教育訓練，相關提醒會以燈號表示，並無複雜計算與繁重維護。            | 依處理情形辦理 |
| <b>四、陳嘉盈委員</b>                                                                                    |                                                                        |         |
| 1. 目前各區工程處都有建制邊坡落石告警系統，比較屬於被動式監測，本研究計畫要以水力力學耦合解析分析，若確實可建置完成，比較屬主動式監測告警系統，對邊坡災害告警及維護用路人安全應比較有保障。   | 感謝認同與提示計畫之方向與價值。                                                       | 依處理情形辦理 |
| 2. 本監測計畫工址背景資料如天候降雨、災修復建後擋土牆施工背填實際情形，請洽四工處盡量取得一致性，減少假設況。                                          | 四工處已提供，將於期末補充。                                                         | 依處理情形辦理 |
| 3. 未來計畫完成如何提供四工處做為防災、預警及告警功能使用，請在期末報告敘明。                                                          | 相關警戒值與提示將以專屬網頁呈現，相關細節將於期末報告補充。                                         | 依處理情形辦理 |
| <b>國立中興大學水保系 鄭皆達委員</b>                                                                            |                                                                        |         |
| 1. 合作團隊架設、操作使用現地儀器是否熟念?                                                                           | 所用系統為自主研發，操作應無窒礙。                                                      | 依處理情形辦理 |
| <b>五、胡啟文委員</b>                                                                                    |                                                                        |         |
| 1. 圖 1.3 請加繪 A、B 剖面線，以利判讀圖 1.4~1.7 中各項觀測紀錄。                                                       | 謹遵辦理。                                                                  | 依處理情形辦理 |
| 2. 要純以降雨為預警指標，除進行集水區降雨入滲分析外，需透過長期迴歸孔隙水壓與降雨參數之關聯性才能達到以降雨為預警指標的目的，但於本計畫結束前，似無法達到該需求，是否有其他因應措施，再請說明。 | 場址現況與水位上升引致之飽和土層滑動差異較大，雨量與水位主要影響邊坡，坡面表層及牆體傾角為另一指標，將可作為備案。              | 依處理情形辦理 |
| 3. 土層參數之選定，必要時可取重模土壤進行大型直剪試驗取得之，以目前之時程及現地狀況，以該方式取得土壤參數是否有其可行性?                                    | 土層參數為規畫用於均質土層分析，場址現況與水位上升引致之飽和土層滑動差異較大，分析成效受限，原有規劃正進行滾動式修正，並於歷次工作會議討論。 | 依處理情形辦理 |

|                                                                                                                |                                                               |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------|
|                                                                                                                |                                                               |         |
| 4. 建置雲端顯示及運算平台是將本計畫推向實際應用之重要媒介，提供使用單位可以瞭解邊坡即時狀態，據以進行相關之應變處置作為之參考，鑒於日後係為提供相關權管單位使用，平台相關功能之需求與規劃，建議可儘早與使用單位進行討論。 | 謹遵辦理。                                                         | 依處理情形辦理 |
| 5. 內文有關交通部運輸研究所之敘述，請改以本所來敘述為宜。                                                                                 | 謹遵辦理。                                                         | 依處理情形辦理 |
| <b>六、林雅雯委員(書面)</b>                                                                                             |                                                               |         |
| 1. 報告書第 1-6 及 1-7 頁台 7 甲 41K+700 傾斜管最新紀錄至 106 年 8 月 16 日，如有新檢測數據，建議補充。                                         | 此為前期報告資料，非屬本計畫範圍，將向四工處洽詢。                                     | 依處理情形辦理 |
| 2. 報告書第 2-19 頁甲仙監測場址二維水力力學耦合分析提到使用現有參數及地質模型，建議補充分析使用之參數項目及數值。                                                  | 謹遵辦理，期末報告補充。                                                  | 依處理情形辦理 |
| 3. 報告書第 2-21 頁圖 2.13 預測孔隙水壓歷時，此孔隙水壓對應之降雨型態為何？如時降雨量多少，降雨量持續累積嗎？降雨型態為何會呈現圖 2.13 之孔隙水壓累積？                         | 相關細節請參考 107 年合作計畫報告，期末報告補充。                                   | 依處理情形辦理 |
| 4. 報告書第 4-9 頁至 4-12 頁在 25cm 及 60cm 深體積含水量，得到此監測數據後如何應用如報告書第 2-21 頁的依時預警？建議補充說明。                                | 本場址現地狀態與均質土壤有別，淺層滑動預警模式並不適用，已於工作會議取得共識，專注於牆體及邊坡監測預警，將於期末報告補充。 | 依處理情形辦理 |
| 5. 報告書第 4-12 及 4-13 頁傾斜儀的監測結果及第 4-14、4-15 擋土牆壁體傾度數據圖，建議增加減去初始值之最近一筆監測數值表格，擋土牆壁體傾度建議增加減去初始值且換算為最近一筆傾斜量的表格。      | 謹遵辦理，期末報告更新。                                                  | 依處理情形辦理 |
| <b>七、公路總局第四區養護工程處</b>                                                                                          |                                                               |         |
| 1. 這次檢監測計畫地點為本工務段轄區，該地點屬偏遠，平日管養所消耗的人力物力甚鉅，雖要達成邊坡預測的目標有一定程度的困難，但                                                | 感謝認同與肯定。                                                      | 依處理情形辦理 |

|                                                                                   |                      |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------|
| 倘若能達成目標則能對原本人力缺乏基層工務段有著相當大的助益，期待本計畫能有實務上的成功。                                      |                      |         |
| <b>八、運研所港研中心 曾文傑副研究員</b>                                                          |                      |         |
| 1. 計畫執行至今已順利完成邊坡及擋土牆上無線感測系統現地安裝、監測與初步監測資料分析，整體工作符合預定進度，感謝張老師團隊的努力付出。              | 感謝認同與肯定。             | 依處理情形辦理 |
| 2. 已函文公路總局第四區養護工程處獨立山工務段提供台 7 甲線 41.55~41.65K 公路邊坡新、舊擋土牆竣工圖說，資料取得後會提供給團隊參考使用。     | 感謝協助，將儘快開始整理資料並進行分析。 | 依處理情形辦理 |
| 3. 有關報告書中 P1-4，倒數第八行”研究全程 14 個月”，請修改為”……13 個月                                     | 謹遵辦理，期末報告更正。         | 依處理情形辦理 |
| 4. 報告書中 P3-15，倒數第四行敘述的內容較為不足，請於期末增加 3.11-3.13 圖說明，另部分繕打錯誤，會後會提供報告修改內容給團隊參考，請檢視修正。 | 謹遵辦理，期末報告更正          | 依處理情形辦理 |
| 5. 本計畫每月舉辦之工作會議，期末審查時請列於報告書附件。                                                    | 謹遵辦理，期末報告增列。         | 依處理情形辦理 |
| 6. 請合作團隊，依今天審查意見研提處理情形，送中心審查後作為修正報告依據，並依照本所出版品規定格式修改。                             | 謹遵辦理。                | 依處理情形辦理 |



## 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：均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫

計畫編號：MOTC-IOT-107-H1EB002

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

| 參與審查人員<br>及其所提之意見                                          | 合作研究單位<br>處理情形                                                                         | 本所計畫承辦<br>單位審查意見 |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>一、蘇苗彬委員</b>                                             |                                                                                        |                  |
| 1. 關鍵字本案應有淺層滑動及公路邊坡等字，以顯示本案之特性。                            | 謹遵辦理，已增加兩關鍵字。                                                                          | 依處理情形辦理          |
| 2. 計畫背景的描述不太合理，應可增加文獻回顧，有很多更深入的研究可供參考。P.1-1 可以加強。          | 此為計畫規劃內容節錄，相關文獻回顧於第二章呈現，場址參考文獻僅有公路總局四區處報告，研究單位已盡力但相關災害資料無法取得。                          | 依處理情形辦理          |
| 3. P.1-5 的標註公路總局應修正為公路總局四區處。                               | 謹遵辦理。                                                                                  | 依處理情形辦理          |
| 4. 台 7 甲的現場可能不只有淺層崩塌,由現場資料看來深層滑動亦可能發生。傾斜管可持續量測否？           | 傾斜管量測非本計畫範圍，但 ID4 已有阻孔現象，修正報告將建議四區處持續辦理傾斜管監測。                                          | 依處理情形辦理          |
| 5. 現地佈置儀器花費很高，又不易維護相當辛苦，甲方可由現場工作人員協助現地的工作。。                | 後續維護將建議由現場人員進行模組更換，以利持久監測，相關內容增加於第七章。                                                  | 依處理情形辦理          |
| 6. 傾斜角觀測結果顯示數度的傾斜與牆體的傾斜是否相符？本案觀測結果如何轉換成對現場工作人員的建議事項，以發揮功能。 | 計畫期間擋土牆體並無變化，變化主要發生於最近邊坡面之間測點，此與現場狀態吻合，所建議警戒值可提供現場人員作為現場訪視頻率決定與可能破壞區位參考，相關說明增補於 6.4 節。 | 依處理情形辦理          |
| 7. 建議個案的完整資料應儘速彙整，包括災害發生時調查與治理工程的施作等，才能運用做分析與監測結果。         | 經團隊及四區處努力，場址參考文獻僅有公路總局四區處報告，研究單位已盡力但相關災害資料取得有限。所提監測配置由數值分析結果顯示可符合漸進式淺層崩落               | 依處理情形辦理          |

|                                                                        |                                                                                         |         |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                                                                        | 坡頂監測需求。                                                                                 |         |
| <b>二、高邦基委員</b>                                                         |                                                                                         |         |
| 1. 本期末報告內容豐富完整，水力力學分析架構方法清楚。                                           | 感謝委員肯定。                                                                                 | 依處理情形辦理 |
| 2. 已裝設之多項監測設備(例如液位計、水量計或傾度儀等)如因故無法測得相關數據或可測數據不足，是否影響預警模式正確性，如何補救。      | 因應本場址為風化岩盤向源侵蝕案例特性，監測系統已簡化為雨量、表層傾角及擋土牆體傾角，並建議對應警戒值，水分量測不影響計畫目的。另系統有充分配置，少數模組失效並不影響整體應用。 | 依處理情形辦理 |
| 3. 無線傳輸各項數據之作法，據稱成本不高，易於普遍設置，可於未來經實際運作及時間考驗之後，供爾後監測參考。                 | 無線傳輸穩定性已於此場址及其他研究案驗證，所建議已補充於第七章建議事項。                                                    | 依處理情形辦理 |
| 4. 以擋土牆體或邊坡傾角作為預警指標，在各項數值分析及力學分析之後，如何確認本計畫建制之預警機制確實相對準確而優於傳統雨量值為指標之作法。 | 本計畫無意與雨量值預警比較，所提為場址客製化預警，可互為輔助。所提預警指標具客製化、符合學理之特點，但不適宜區域管理使用。                           | 依處理情形辦理 |
| 5. 教育訓練已辦理完成，學員或養路機關對於本計畫研究成果有無具體想法及建議事項，可補充說明列入報告。                    | 教育訓練補充於 6.4 節，相關紀錄與說明詳見附錄二。                                                             | 依處理情形辦理 |
| 6. 請將研究成果重點(例如監測預警指標等)明確列入報告書之摘要內。                                     | 謹遵辦理。                                                                                   | 依處理情形辦理 |
| <b>三、游繁結委員</b>                                                         |                                                                                         |         |
| 1. P.1-5 文謂 A 一向為垂直面方向，何意？語意不明？又，將傾斜管觀測之表面位移量視為滑動之位移量，似有不妥，宜審慎。        | 已修正為坡面法線方向，本意非僅使用表面位移量，主要為滑動深度與延伸範圍，據以規劃表層傾斜觀測點位。                                       | 依處理情形辦理 |
| 2. 圖 3.2，電容值與土壤體積含水量關係之率定圖，其準確度似有商榷之處。。                                | 此為室內律定結果，趨勢與文獻建議為非線性關係相同，因計畫執行結果顯示水份計無法提供有用資訊，因此後續建議不再維護。                               | 依處理情形辦理 |

|                                                                           |                                                                               |         |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 3. 圖 4.3 之圖例宜註明雨量站名。                                                      | 此圖為與氣象局思源站比較，已於修正版圖例加註。                                                       | 依處理情形辦理 |
| 4. 圖 4.7，ID4 之水位監測是否仍有效，ID 3 亦是！                                          | 現地儀器測試顯示硬體正常，結果顯示水位低於液位計底部高程，詳見 P.4-8 說明。                                     | 依處理情形辦理 |
| 5. 擋土牆牆體破壞與土體破壞仍有差別，而牆體變位之樣態不少，能否由土體破壞相提並論，宜斟酌。                           | 本計畫坡面表層與牆體傾斜警戒值不同，機制亦不同。                                                      | 依處理情形辦理 |
| 6. 邊坡數值模擬破壞之剖面採取宜註明其位置(圖 5.1 之紀錄代表什麼？)。另應註明座標軸之尺度。                        | 修正稿中於途 5.1 加註 N-S 剖面，此為高精度 DTM 圖，轉換之尺度如圖 5.2 所示。                              | 依處理情形辦理 |
| 7. 現地之預警監測成效如何？宜就現地驗證，不宜將他處結果納入，避免混淆。                                     | 因本年度無顯著變化，因此僅有分析成果，圖 5.16 為以地下水位預警概念說明，本場址不適用，修正稿已補強釐清。                       | 依處理情形辦理 |
| 8. 本計畫以均質土壤為對象，而研究對象之環境是否為均質土壤，宜明示之。又，該均質程度如何？亦應說明為宜。。                    | 修正稿第一章說明其原由及計畫執行中為達成協助管理單位預警之目的，相關滾動修正之原由。                                    | 依處理情形辦理 |
| <b>四、陳嘉盈委員</b>                                                            |                                                                               |         |
| 1. P. 5-1 頁試驗場址深層滑動層面在何深度位置，50 公尺深度內 RQD 均為 0，模擬建置僅考慮 30 公尺有無特別考量。        | 傾斜管滑動監測為四區處報告成果，本計畫僅引用相關成果。為模擬向源侵蝕表層崩落並降低計算量，模型僅考慮 30 m 深度為均質破碎頁岩層，詳見 P. 5-1. | 依處理情形辦理 |
| 2. P. 5-3 頁試驗場址復建土牆基礎有無設置抗滑類樁基礎，若沒有，圖 5-3 數值分析模型底部設定為雙向固定是否需再確認。          | 5.1 節之目的為模擬向源侵蝕機制，並未考慮擋土牆，若有完整牆體資料，可進行完整分析，此點於修正稿第七章建議中陳述。                    | 依處理情形辦理 |
| 3. 本二維水力力學耦合穩定分析目前計畫似只在下邊坡，在試驗場址上邊坡有無一併列入計畫範圍。。                           | 本分析目的為向源侵蝕模擬，上邊坡不在向源侵蝕坡面。                                                     | 依處理情形辦理 |
| 4. P. 5-3 頁圖 5-15 訂定預警旋轉角為 0.3~0.35 度，預估地下水位在 2.9 到 4 公尺之間，有無與歷次災情顯示紀錄一致。 | 因歷次災情並無相關水位紀錄，無法進行比較，僅依分析與規範建議值設定警戒值。                                         | 依處理情形辦理 |

|                                                                                |                                                                                                 |         |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 5. 深層滑動跟長期降水仍有相當密切關係，建議四工處未來持續監看。                                              | 所列事項非本計畫範圍，所提建議已增補於建議事項。                                                                        | 依處理情形辦理 |
| <b>五、公路總局第四區養護工程處</b>                                                          |                                                                                                 |         |
| 1. 無線感測傳送資料是否會因天候不良、颱風、豪雨情況時致無法傳送，另後續維修監測儀器如何執行說明。                             | 現地測試結果證明計畫期間無線感測傳輸不會受天候影響。後續規劃由計畫團隊準備硬體，請現場人員協助更換，相關細節於 6.4 節教育訓練補充並於第七章建議補述。                   | 依處理情形辦理 |
| 2. 期末報告 P6-7 預警戒值律定有無考量到邊坡地質及坡高、傾度、植被情形等因素。                                    | 預警值擬定請參閱第四與第五章，現有警戒值為考慮應用目的，後續仍需依監測成果滾動更新。                                                      | 依處理情形辦理 |
| <b>六、運研所港研中心 柯正龍科長</b>                                                         |                                                                                                 |         |
| 1. 請研究團隊針對本研究之研究成果，提供可應用於推廣或教育訓練應用之電子檔案或影片，俾作為後續成果推廣及相關研究參考應用。                 | 謹遵辦理。                                                                                           | 依處理情形辦理 |
| 2. 報告 p.1-8 有關 107 年完成工作項目 1.規劃邊坡擋土壁體監測模組布設及發展資料處理程序部分，請補充說明發展資料處理程序。          | 於第四章補充擋土壁體監測模組布設考量及資料處理程序。                                                                      | 依處理情形辦理 |
| 3. 報告 p.1-10，有關 108 年完成工作項目 3.建立淺層崩塌數值分析流程及研究場址之資料即時展示網頁部分，請補充說明建立淺層崩塌數值分析流程。? | 數值分析詳見第五章淺層向源侵蝕模擬。                                                                              | 依處理情形辦理 |
| 4. 本計畫監測系統建置所需經費估算與成本效益，建議補充說明，俾以提供公路總局等相關應用單位辦理實際監測工作參考應用。                    | 因目前系統模組仍屬少量製作，且監測系統主要成本為現場維護與零件更換交通與人力成本，不易統一考量，後續進一步簡化系統，可委請相關單位自行維護，僅估算初期建置成本，每一模組可控制在 5 萬以內。 | 依處理情形辦理 |
| <b>七、運研所港研中心 林雅雯委員</b>                                                         |                                                                                                 |         |
| 1. 報告第 4-12 頁敘述「ID7 因位於不穩定之坡面，…計畫後期變更監測                                        | ID7 結果已於期中報告呈現，因監測系統持續滾動修                                                                       | 依處理情形辦理 |



|                                                                                                   |                                                  |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|
| 點」，圖 4.16 應為變更後之監測點，ID7 原始位置及傾斜角監測結果建議補充圖示。                                                       | 正，為避免後續使用者混淆，報告以最後簡化版本呈現。                        |         |
| 2. FLAC 數值分析結果與雨量計、傾斜角監測、體積含水量等監測之關係為何？VG 模式之公式與輸入參數說明、基質吸力值設定等建議補充說明。                            | 修正版補充說明。                                         | 依處理情形辦理 |
| 3. 傾斜儀方向建議說明方向變更日期。？                                                                              | 因監測系統持續滾動修正，為避免後續使用者混淆，報告以最後簡化版本呈現，相關監測資料已一併修正。  | 依處理情形辦理 |
| 4. 報告第 5-16 頁甲仙之段落敘述是否正確，請檢核。。                                                                    | 圖 5.16 為以地下水位預警概念說明，本場址不適用，修正稿已補強釐清。             | 依處理情形辦理 |
| 5. 第七章後續工作項目規劃說明請改為結論與建議。。                                                                        | 謹遵辦理，修正版更正。                                      | 依處理情形辦理 |
| 6. 建議補充說明哪些監測不再繼續的原因及未來監測佈設情形。                                                                    | 第六章 6.3 節補述後續長期監測系統配置及演進。                        | 依處理情形辦理 |
| 7. 擋土牆安全計算地下水深度 2.9m 至 4m 警戒，其換算高程為何？擋土牆處並無設置地下水位監測井，請補充說明如何應用此數值。                                | 因本計畫無法監測牆後水位，因此此部分僅作為牆體傾角預警值擬定之參考，並無以地下水位作為預警指標。 | 依處理情形辦理 |
| 8. 傾斜角、水位計之警戒值及預警值之建議值，請補充。                                                                       | 補充於修正版 6.3 節內容。                                  | 依處理情形辦理 |
| 9. 儀器如何簡易維護、量測數據如何初始值校正等建議補充說明。                                                                   | 新增於 6.4 節教育訓練與後續維護章節。                            | 依處理情形辦理 |
| 10. 教育訓練辦理情形請補充於報告中。                                                                              | 新增於 6.4 節與附錄二。                                   | 依處理情形辦理 |
| <b>八、運研所港研中心 曾文傑副研究員</b>                                                                          |                                                  |         |
| 1. 計畫執行至今已順利完成所有工作項目包括：邊坡及擋土牆上無線感測系統現地安裝、監測與資料分析、場址水力力學耦合分析、建立預警值及建置網頁，並至四工處完成教育訓練等，感謝張老師團隊的努力付出。 | 感謝計畫中協助與肯定。                                      | 依處理情形辦理 |
| 2. 報告書中最後參考文獻後，應增加附錄，內容應包括期中、期末審查意見研提處理情形表、每月舉辦之工作會議記錄、現地安裝及維修更換                                  | 謹遵辦理，修正版增補。                                      | 依處理情形辦理 |

|                                                                                                  |                        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------|
| 模組之相關照片及時間、系統移轉教育訓練課程簡報資料及期末簡報等資料。目錄也應增加附錄一、附錄二、附錄三……等頁碼。                                        |                        |         |
| 3. 報告書中 P3-14，最後 1 段，目前模組系統應已移至中華電信平台，請修改內容。                                                     | 更正為移至中華電信虛擬主機平台。       | 依處理情形辦理 |
| 4. 報告書中 P3-16 圖 3.12 及 3.13 請更換 2019 年資料。另 P4-2 圖 4.2 儀器位置圖 ID7 應在 ID2 及 ID5 之間，請檢視置放目前最新的儀器位置圖。 | 謹遵辦理，修正報告更正。           | 依處理情形辦理 |
| 5. 報告書中未提及工作項目中之系統移轉教育訓練，此部分應有章節敘述完成教育訓練內容及相關照片。                                                 | 謹遵辦理，期末報告增列 6.4 節與附錄二。 | 依處理情形辦理 |
| 6. 計畫剩下最後 1 哩路，第七章後續工作項目規劃說明，應改為結論與建議，並請增修內容。。                                                   | 謹遵辦理，修正版更正。            | 依處理情形辦理 |
| 7. 報告書中 P4-8 圖 4.5 及 P6-1 圖 6.1，請調整。                                                             | 謹遵辦理，修正版已更正編排。         | 依處理情形辦理 |
| 8. 請張老師團隊，依今天審查意見研提處理情形，送中心審查後作為研究報告書修正定稿依據,另請將研究成果發表於本所港灣報導。                                    | 謹遵辦理。                  | 依處理情形辦理 |

## 附錄二 工作會議記錄



## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：〔MOTC-IOT-107-HIEB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫〕108 年 3 月份工作會議

二、時間：民國 108 年 3 月 29 日(星期五)下午 14 時

三、地點：本所港研中心 5 樓第一會議室

四、主席：朱主任金元 柯正龍代 記錄：陳志芳 陳志芳

五、出席單位及人員：

|                      |
|----------------------|
| 本所港研中心：              |
| 柯正龍                  |
| 林雅雯                  |
|                      |
| 執行單位：(財團法人成大研究發展基金會) |
| 張文忠                  |
|                      |
|                      |
| 列席單位：公路總局第四區養護工程處    |
| 洪詩齊                  |
|                      |
|                      |
|                      |

## 六、討論議題：

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

## 七、主要結論：

- (一)目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- (二)本計畫於 108 年 1 月完成現地安裝後，並於 2 月起進行監測。監測設備分類如下：
  - 1. 雲端液位即時監測傳輸模組 4 組，模組編號為 ID1~ID4。
  - 2. 表層入滲及傾斜(短期)無線傾斜監測模組 8 組，編號為 ID1~ID8。
  - 3. 擋土牆壁體(短期)無線傾斜監測模組 4 組，編號為 ID9~ID12。
  - 4. 資料匯集傳輸模組(Server 端)1 組，為伺服器。
  - 5. 電源供輸及節電裝置 12 組，編號為 ID0~ID12。
- (三)監測資料傳輸採中華電信 4G，目前測站太陽能供電穩定，儀器正常監測中。
- (四)測站進行長期量測資料分析與整理，預計期中報告初稿時可呈現數據與相關分析。

## 八、散會。(下午 16 時)

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：〔MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫〕108 年 4 月份工作會議
- 二、時間：民國 108 年 4 月 26 日(星期五)下午 14 時 30 分
- 三、地點：國立成功大學土木工程系(臺南市大學路 1 號)
- 四、主席：朱主任金元 柯正龍代 紀錄：陳志芳
- 五、出席單位及人員：

|                      |
|----------------------|
| 本所港研中心：              |
| 柯正龍                  |
| 陳志芳 曹文傑              |
| 執行單位：(財團法人成大研究發展基金會) |
| 張文忠 陳家漢              |
| 洪志琦                  |
| 列席單位：                |
|                      |
|                      |
|                      |
|                      |

## 六、討論議題：

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

## 七、主要結論：

- (一)目前研究進度與契約規劃之期程相符。
- (二)本計畫於 108 年 1 月完成監測模組現地安裝，2 月起開始進行監測。

監測模組數量如下：

- 1.雲端液位即時監測傳輸模組 4 組(ID1~ID4)。
- 2.表層入滲及傾斜(短期)無線傾斜監測模組 8 組(ID1~ID8)。
- 3.擋土牆壁體(短期)無線傾斜監測模組 4 組(ID9~ID12)。
- 4.資料匯集傳輸模組(Server 端)1 組(伺服器)。
- 5.電源供輸及節電裝置 12 組(ID0~ID12)。
- (三)資料以中華電信 4G 傳輸儲存於雲端平台，監測系統運作正常並進行資料彙整與分析。
- (四)監測場址需高精度數位圖資料參考，已由本中心向內政部進行高精度數位地圖申請中，以便進行後續邊坡穩定分析。

## 八、散會。(下午 15 時 30 分)



## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

- 一、會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議
- 二、時間：108 年 5 月 24 日（星期五）下午 14 時 00 分
- 三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第一會議室
- 四、主持人：朱主任金元(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑
- 五、出（列）席人員：如後附簽到表
- 六、討論議題：

### （一）工作進度說明：

- (1)本研究計畫已完成邊坡及擋土牆上無線感測系統現地安裝、監測與資料分析。目前以 FLAC 進行邊坡水力力學耦合反應分析，考慮滲流對土壤有效應力之影響，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程。
- (2)本研究計畫期中報告已依合約規定，於 5 月 24 前提送，整體進度符合期程規劃。

### （二）針對目前研究方向與執行情形進行討論：

- (1)本計畫網頁由中華電信數據分公司設計，並架設於中華電信虛擬機房，後續是否由中心申請帳戶。
- (2)現場監測數據資料為何有中斷情形發生。

### 七、結論：

- （一）場址高精度數位模型圖資已行文索取，待核定後轉交研究團隊以利後續分析。
- （二）雲端平台於計畫規劃轉移至中華電信 IoT 智慧聯網大平台 (<https://iot.cht.com.tw/iot/>)，目前已完成測試並上傳於研究團隊之帳戶，後續將由本中心申請帳戶，將相關資料上傳此帳戶，以利管理。
- （三）請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。

### 八、散會：下午 15 時 15 分

會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議

時間：108 年 5 月 24 日（星期五）下午 14 時 00 分

地點：港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第一會議室

簽到表

| 單位                       | 簽名                |
|--------------------------|-------------------|
| 本所港研中心                   | 柯正龍 陳志芳<br>林雅雯 謝銘 |
| 合作研究單位：<br>財團法人成大研究發展基金會 | 張子中               |

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議

二、時間：108 年 7 月 26 日（星期五）下午 15 時 00 分

三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室

四、主持人：柯科長正龍

紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

（一）工作進度說明：

（1）本研究計畫已完成邊坡及擋土牆上無線感測系統現地安裝、監測與資料分析。目前以 FLAC 進行邊坡水力力學耦合反應分析，考慮滲流對土壤有效應力之影響，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程。

（2）本研究計畫期中報告已依合約規定，於 5 月 24 前提送，整體進度符合期程規劃。

（二）針對目前研究方向與執行情形進行討論：

（1）本計畫網頁由中華電信數據分公司設計，並架設於中華電信虛擬機房，後續是否由中心申請帳戶。

（2）現場監測數據資料為何有中斷情形發生。

七、結論：

（一）場址高精度數位模型圖資已行文索取，待核定後轉交研究團隊以利後續分析。

（二）雲端平台於計畫規劃轉移至中華電信 IoT 智慧聯網大平台 (<https://iot.cht.com.tw/iot/>)，目前已完成測試並上傳於研究團隊之帳戶，後續將由本中心申請帳戶，將相關資料上傳此帳戶，以利管理。

（三）請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。

八、散會：下午 16 時 30 分

會議簽到表

會議名稱：「MOTC-IOT-107-HIEB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡  
檢監測計畫」工作會議

時間：108 年 7 月 26 日（星期五）下午 15 時 00 分

地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室

簽到表

| <u>服務單位</u>                        | <u>簽名</u>   |
|------------------------------------|-------------|
| <u>本所港研中心</u>                      | 柯正群 林雅雯 曹文傑 |
| <u>出席單位：</u>                       |             |
|                                    |             |
| <u>合作研究單位【財團法人成大<br/>研究發展基金會】：</u> | 張文忠         |

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線  
監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議

二、時間：108年8月27日（星期二）下午14時30分

三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

四、主持人：謝主任明志(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

（一）工作進度說明：

（1）現有監測結果更新、設備狀態彙整及持續維護監測站。

（2）水力力學耦合分析進度說明。

（二）針對目前研究方向與執行情形進行討論：

（1）分析方法與監測整合。

（2）後續計畫執行細節與教育訓練。

七、結論：

（一）網頁增加說明連結，計畫監測用詞須謹慎，避免對公路管理單位造成負擔。

（二）考量計畫目的，現有損壞之點位進行修復時進行調整，現有ID7移至ID5及ID2間，ID5及ID4進行修復，考量現地破壞機制與淺層滑動不同，損壞之水分計暫不修復。

（三）合約規定之教育訓練規劃於10月初至初稿繳交前進行，預計為半日且與另一子計畫合併舉行。

（四）請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。

八、散會：下午15時30分

會議簽到表

會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議

時間：108 年 8 月 27 日（星期二）下午 14 時 30 分

地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室

| 單位                       | 簽名          |
|--------------------------|-------------|
| 本所港研中心                   | 柯正龍 林雅雯 黃文傑 |
| 合作研究單位：<br>財團法人成大研究發展基金會 | 張文忠         |

## 交通部運輸研究所港灣技術研究中心會議紀錄

一、會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線  
監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議

二、時間：108年9月30日（星期一）下午14時00分

三、地點：本所港灣技術研究中心研究大樓5樓第二會議室

四、主持人：謝主任明志(柯科長正龍代) 紀錄：曾文傑

五、出（列）席人員：如後附簽到表

六、討論議題：

（一）工作進度說明：

（1）現有監測結果更新、設備狀態彙整、分析進度及後續維護原則。

（2）網頁建構及架設討論。

（二）針對目前研究方向與執行情形進行討論：

（1）向源侵蝕邊坡數值分析進度說明。

（2）教育訓練規劃與系統移交討論。

七、結論：

（一）計畫期間網頁以租用中華電信虛擬主機方式架設，網頁細節與使用於期末報告以專章方式說明。

（二）教育訓練規劃於10月下旬於四工處進行，內容由中心研擬，請合作團隊就相關內容配合出席與說明。

（三）請合作團隊依規劃之期程，進行後續研究工作。

八、散會：下午15時30分

會議簽到表

會議名稱：「MOTC-IOT-107-H1EB002 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫」工作會議

時間：108 年 9 月 30 日（星期一）下午 14 時 00 分

地點：本所港灣技術研究中心研究大樓 5 樓第二會議室

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

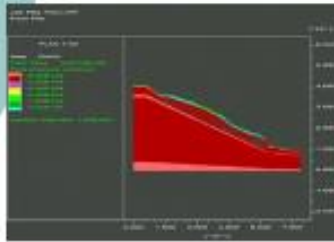


## 附錄三 期末簡報



# 均質土壤淺層滑動無線監測系統公路邊坡檢監測計畫

## 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、倪勝火

## 簡報大綱

- 計畫背景與目的
  - 計畫緣起與目的
  - 研究範圍、對象與成果要求
  - 研究方法與流程
- 工作進度
  - 雲端監測系統架構
  - 監測成果
  - 擋土系統預警值擬定
  - 雲端監測系統介紹
- 結論與建議

## 計畫緣起

---

- 現有監測經驗法預警模式侷限 → 保守或無法提供反應時間
- 土層與擋土系統反應+無線即時監測 → 以解析法與即時監測，建構土層擋土邊坡依時預警系統
- 架構擴充與整合測試
  - 港研中心研發之現地土層邊坡監測模組
  - 四工處台7甲線41.6K迴頭彎向源侵蝕邊坡監測場址
  - 導入擋土牆體監測及考慮擋土牆之邊坡土壤結構互制分析

## 計畫目的

---

- 導入以入滲速率、地表傾斜及土層孔隙水壓 為指標之邊坡預警模式
- 整合測試層邊坡反應與擋土牆體變位無線即時監測模組
- 結合力學解析法與即時監測，推廣客製化工具依時特性之公路邊坡通行預警模式

## 災害歷史

### 場址位置

台七甲線41.55K~41.65K，屬公路局第四工程處獨立山段管轄

### 破壞歷史

民國96年科羅莎颱風時，路基受局部掏空

民國97年辛樂克及薔蜜颱風來襲時，下邊坡再次崩塌，約有一半車道路基流失

### 曾有破壞歷史且每逢颱風時易產生邊坡滑動



監測範圍示意圖(經緯度:24.401121.369)



現場圖片

## 研究範圍與對象

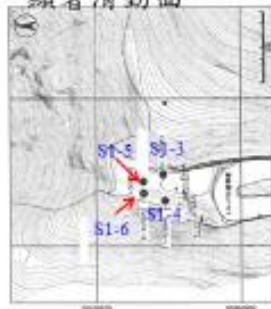
- 台7甲線41.55K~41.65K之迴頭彎外側向源侵蝕邊坡及現有公路擋土結構



(港研中心提供)

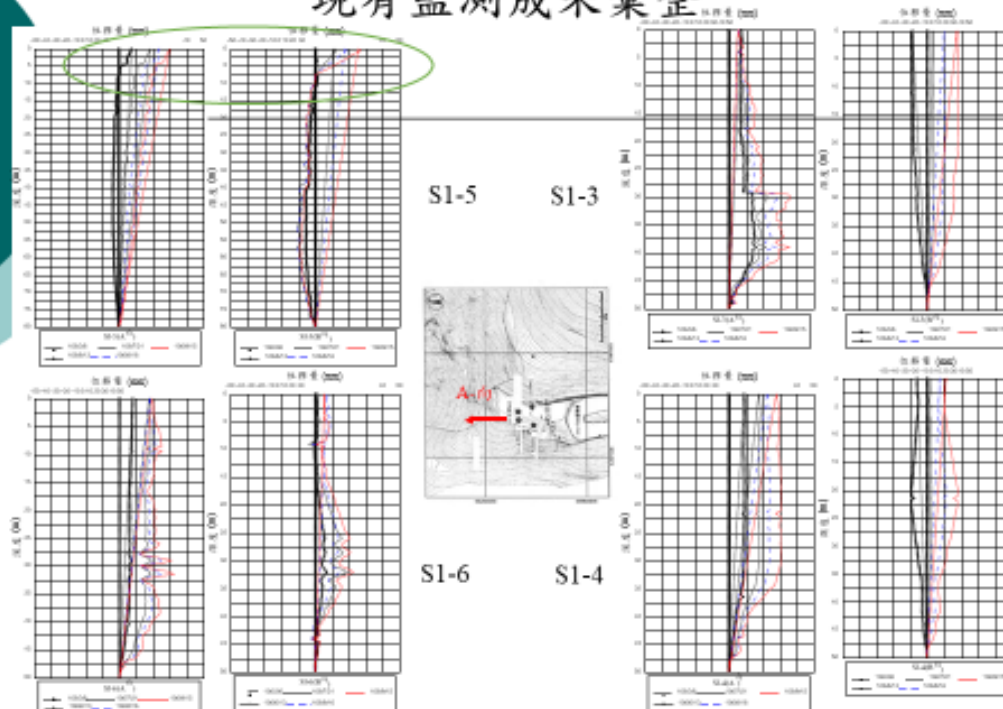
## 監測場址資料

- 現有資料:
  - 台7甲線41K+700及34K+400邊坡觀測工作-新增觀測孔位地層資料
  - 台7甲線41K+700及34K+400邊坡觀測工作-監測報告書
- 位於馬當溪上游, 道路經內縮改線
- 50 m深度內均為RQD=0之破碎頁岩層→可視為均質土層
- 現地4孔土中傾斜管監測, 滑動深度可能大於80m
- S1-5深度5m處有一顯著滑動面



(港研中心提供)

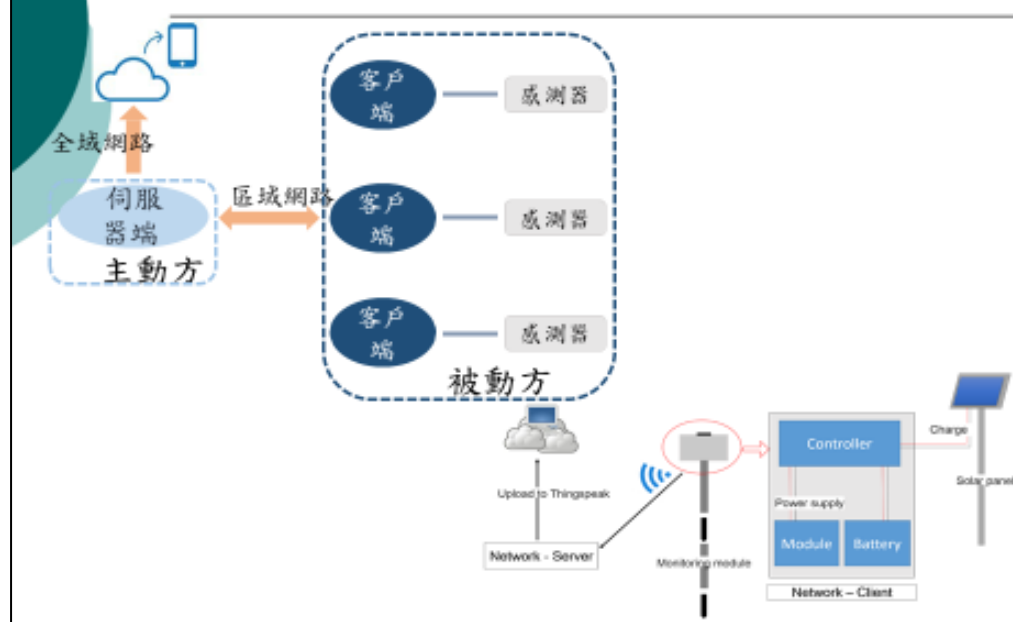
## 現有監測成果彙整



## 計畫內容

- 規劃場址邊坡擋土壁體監測模組布設及發展資料處理程序
- 完成模組硬體製作與系統整合測試，數量如下：
  - 雲端液位計即時監測傳輸模組4組→傾斜孔水位量測
  - 表層入滲及傾斜無線傾斜監測模組8組→分層水分計與傾度儀
  - 擋土牆壁體無線傾斜監測模組4組→牆體電子傾度儀
  - 資料匯集傳輸模組→LoRa+4G模組
  - 電源供輸及節電裝置12組→太陽能板+鋰電池
- 完成邊坡及擋土牆上無線感測系統現地安裝、監測與資料分析。
- 以FLAC進行邊坡水力力學耦合反應分析，考慮滲流對土壤有效應力之影響，釐清非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致破壞機制。
- 建立土層崩塌數值分析流程及研究場址之資料即時展示網頁。
- 系統移轉與教育訓練

## 無線土層滑動監測系統架構





## 系統組成-客戶端



客戶端



微控制器

SD card

ds3231  
計時器

Lora

定時斷電



感測器



沉水式液位計



電容式含水量計



傾度儀



應變計



應變計外部構造

## 系統組成-伺服器端



伺服器端



微控制器

Lora

SD card

SIM7500SA-H

定時斷電

整合所有  
電子元件

與客戶端通訊  
進行資料傳輸

進行資料儲存

將資料上傳雲端

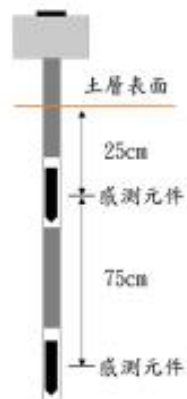
DI mini Pro  
與繼電器組成





## 邊坡監測模組架構

- 通訊模組→ LoRa radio+4G
  - 區域網路以LoRa增加通訊距離與改善死角
  - 廣域網路以4G模組上傳雲端
  - 模組化設計,低耗電
  - 資料檢核程序
- 電源供應
  - 以太陽能板搭配鋰電池
  - 選用省電MCU及Relay
  - 增加休眠模組,省電60%以上
- 類比與數位感測連接
  - 不同感測器連接擴充性
  - 精度與穩定性改善
- 遠端監控
  - 連結Thingspeak或網頁,以密碼管制連結
  - 多人連結,不同裝置連結
- 其他功能
  - 現地資料儲存模組備份
  - 系統電力監測與資料檢核功能
  - 定期(12hr)重新啟動功能



## 邊坡無線雲端監測模組組成

- 表層變位監測
  - 傾斜角度量測
- 地表水入滲監測
  - 分層土層含水量量測
- 孔隙水壓、雨量監測...
- 無線通訊模組
- 雲端平台+資料處理流程



無線感測模組

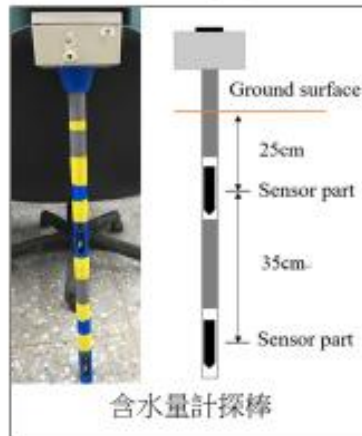


電池模組



土層監測模組內部架構示意圖

## 感測器

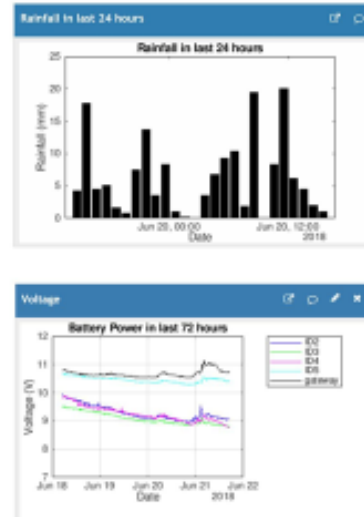


## 雲端即時顯示平台-Thingspeak

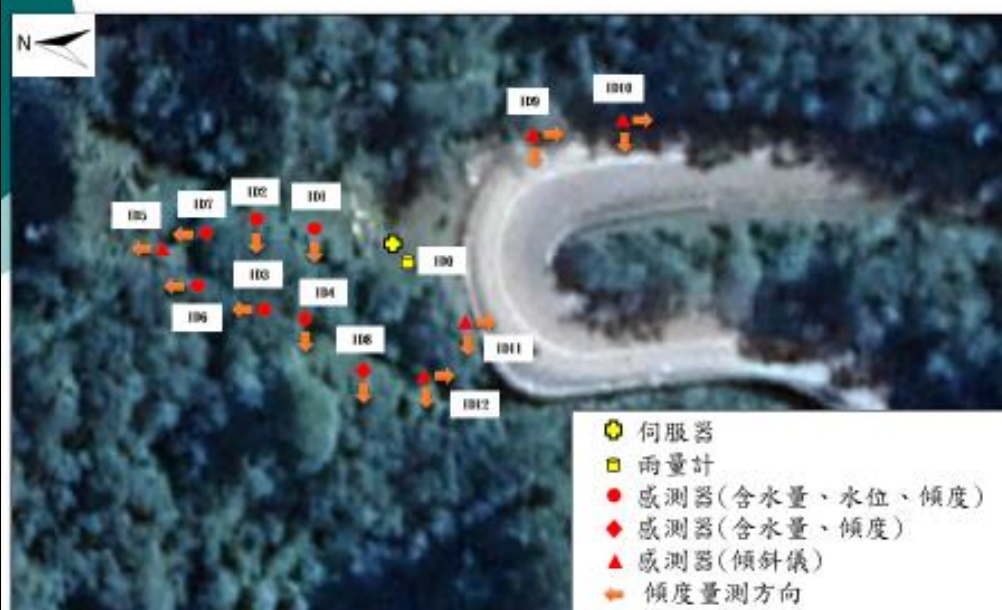
### Raw data



### Process data



## 台7甲線41k處邊坡監測配置



## 監測儀器配置

監測測站資訊表

| ID編號  | 配置           | 架設位置    | 水位孔高程(m) |
|-------|--------------|---------|----------|
| 0     | 雨量計          | 邊坡空曠處   | -        |
| 1, 2  | 液位計、含水量計、傾度儀 | 上邊坡     | 1770     |
| 3, 4  | 液位計、含水量計、傾度儀 | 下邊坡     | 1766     |
| 5-7   | 含水量計、傾度儀     | 上邊坡     | -        |
| 8     | 含水量計、傾度儀     | 下邊坡     | -        |
| 9, 10 | 雙向傾度儀、裂縫計    | 路邊擋土結構  | -        |
| 11    | 雙向傾度儀        | 路邊擋土結構  | -        |
| 12    | 雙向傾度儀        | 下邊坡擋土結構 | -        |



## 現場照片

ID1



ID2



## 現場照片

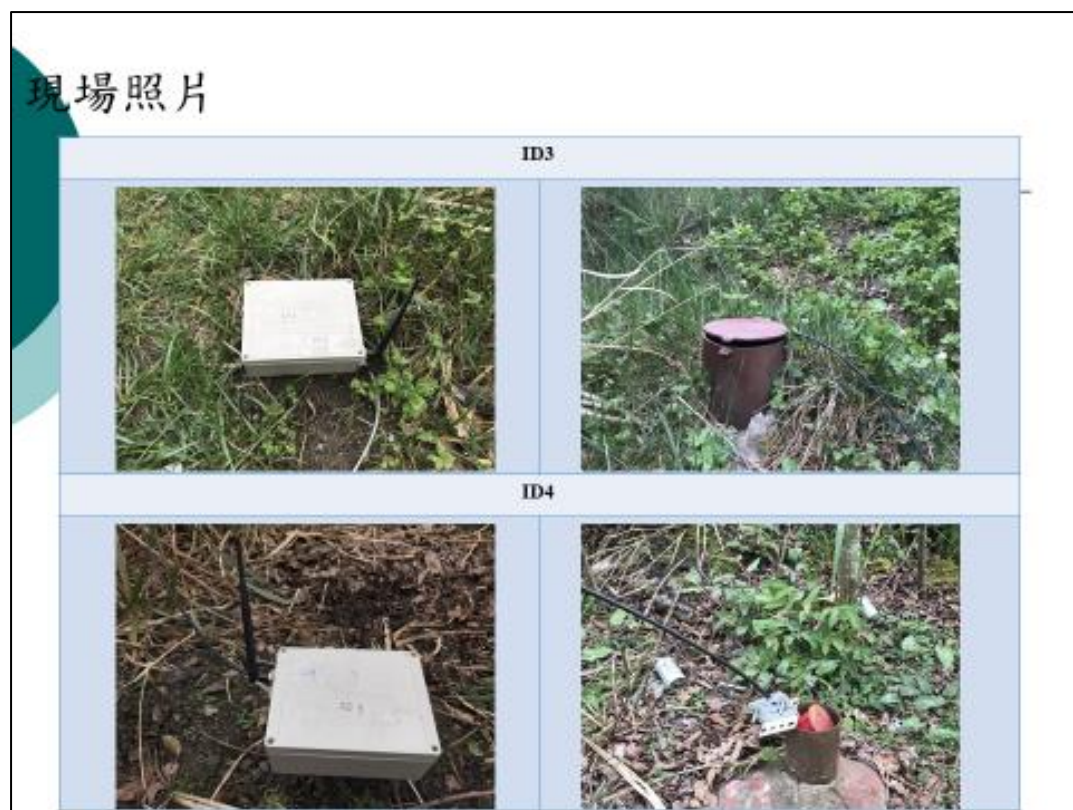
何服器



ID0



## 現場照片



## 現場照片





## 現場照片

ID8



ID9



## 現場照片

ID10

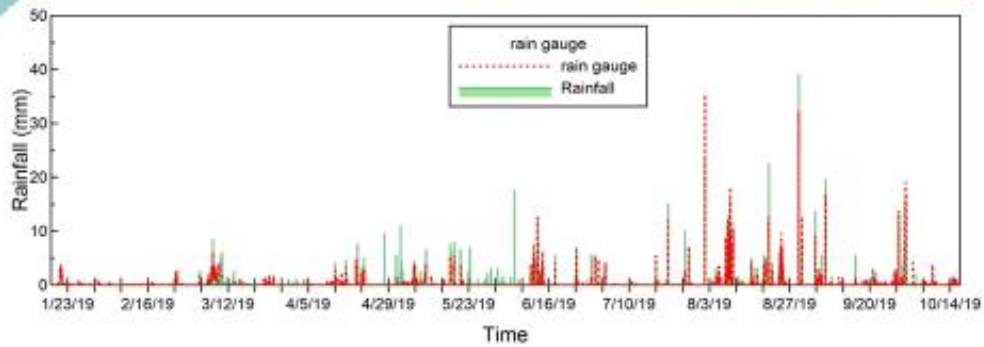


ID11

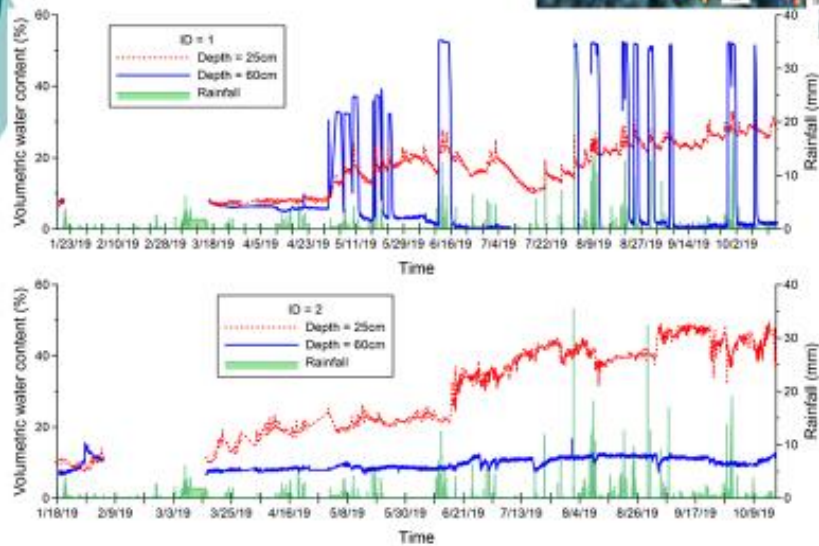
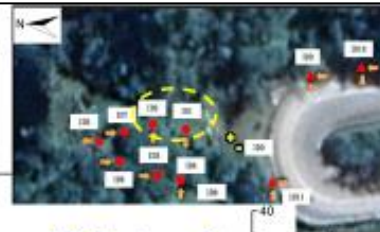
ID12



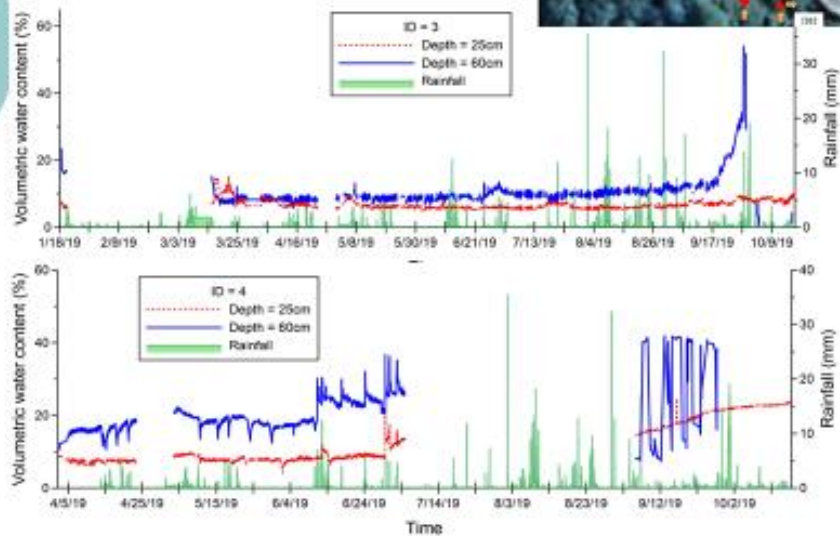
## 監測資料-ID0降雨量



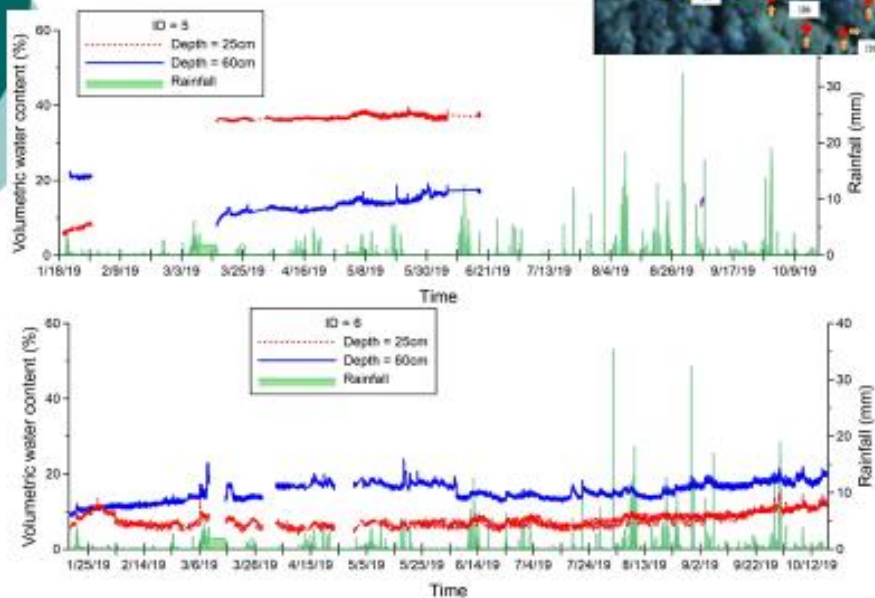
## 監測數據-含水量計(1/4)



### 監測數據-含水量計(2/4)

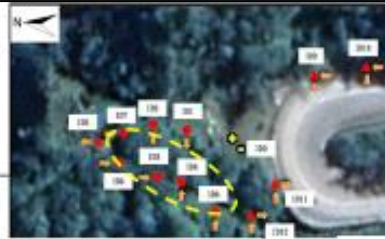
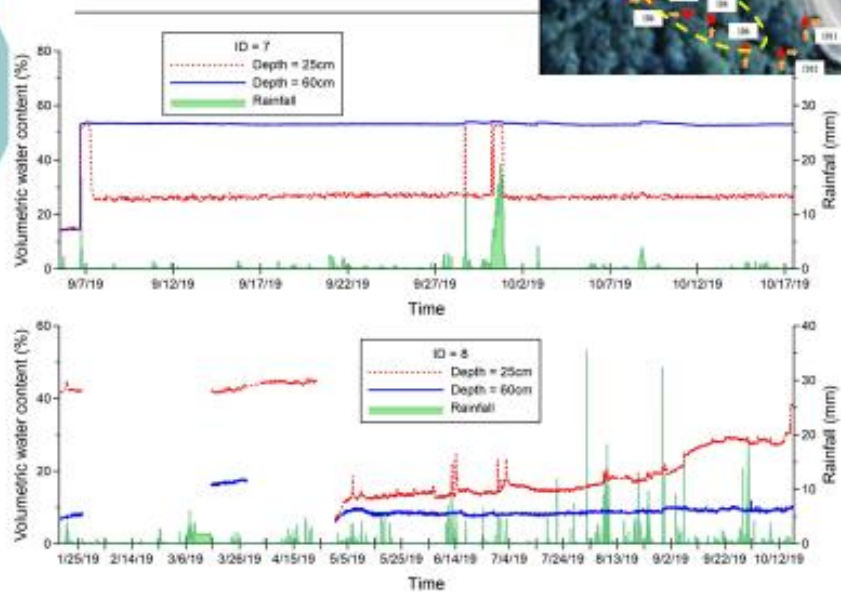


### 監測數據-含水量計(3/4)

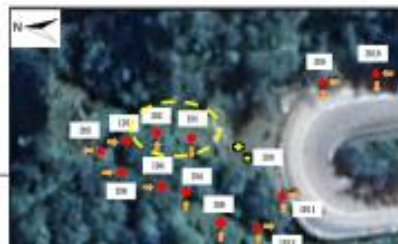
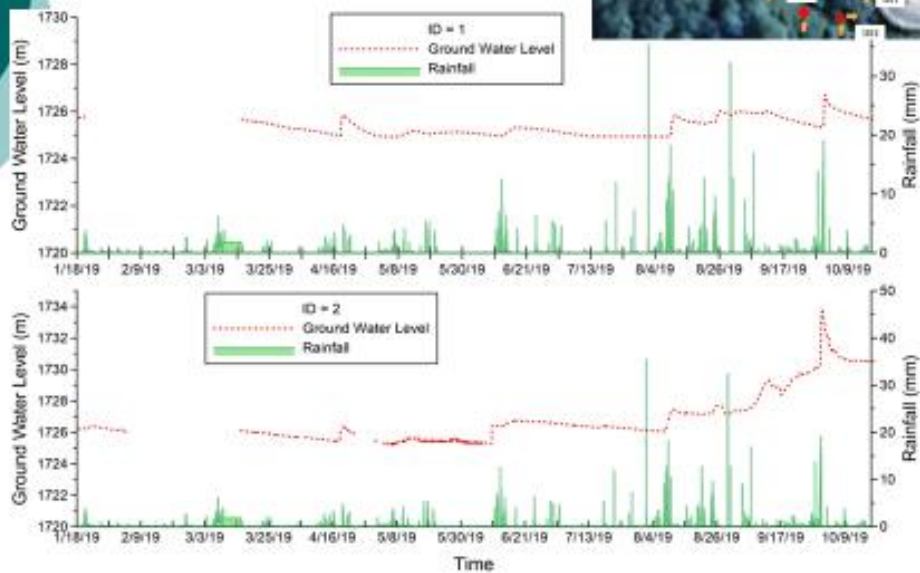




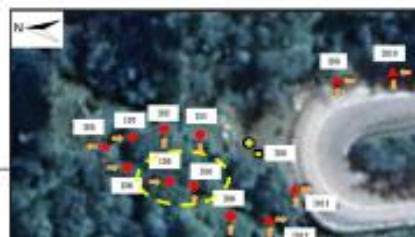
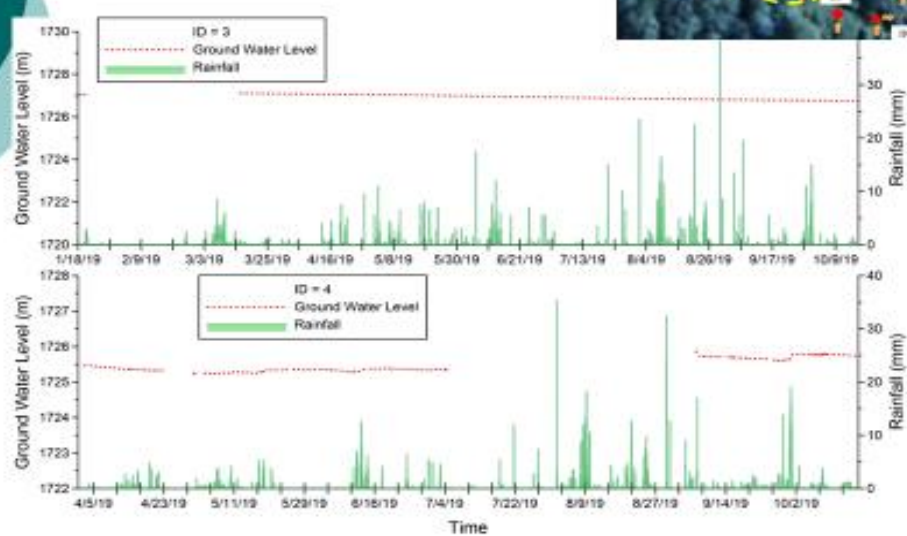
## 監測數據-含水量計(4/4)



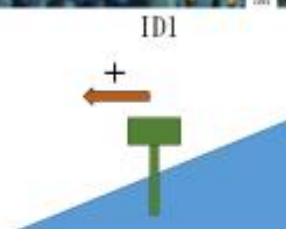
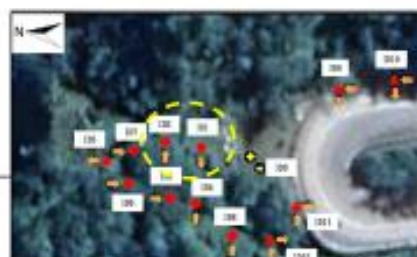
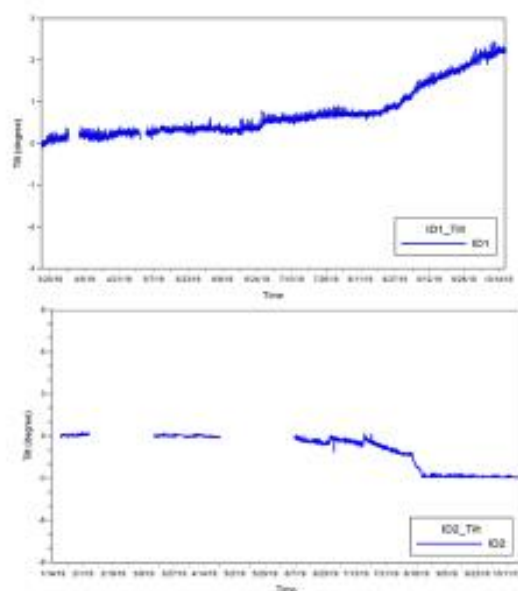
## 監測數據-上階水位計(1/2)



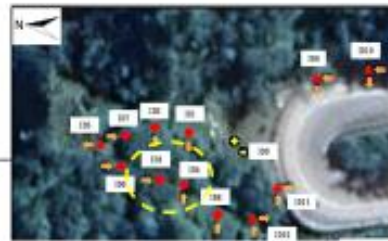
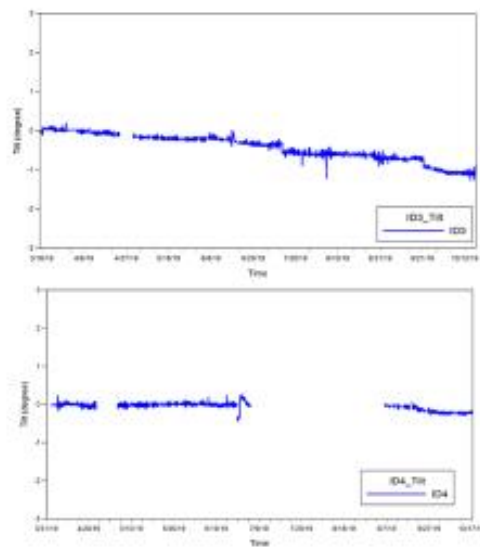
## 監測數據-下階水位計(2/2)



## 監測數據-邊坡表層傾斜 (1/4)



## 監測數據-邊坡表層傾斜 (2/4)



ID3

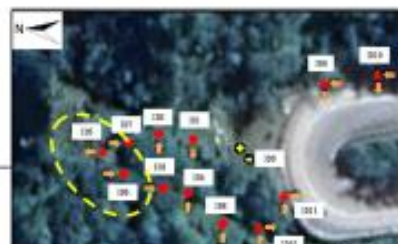
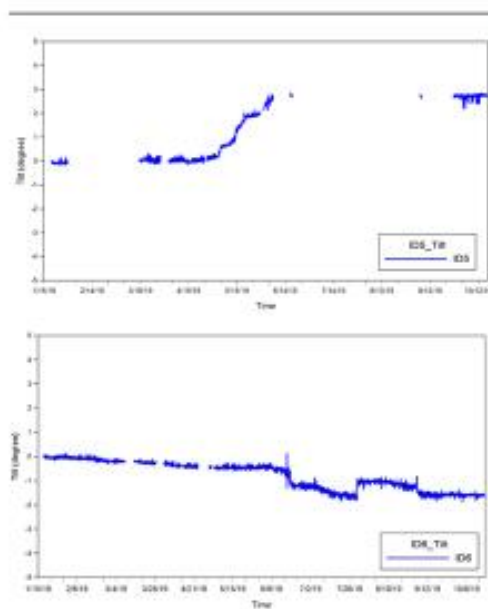


9/26後改往右側懸崖方向

ID4



## 監測數據-邊坡表層傾斜 (3/4)



ID5



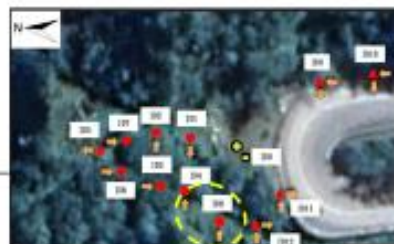
往右側懸崖方向

ID6

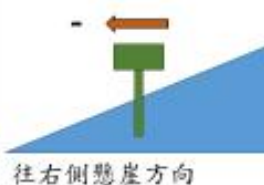
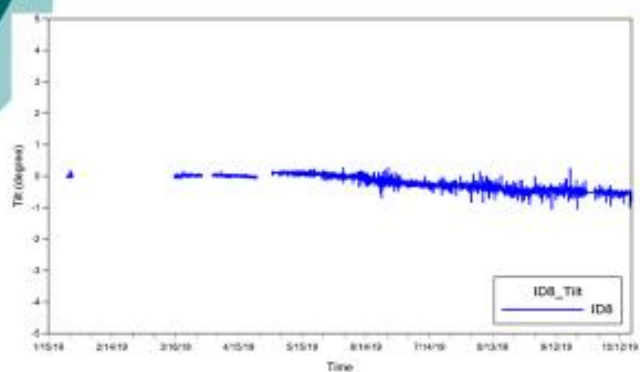


往右側懸崖方向

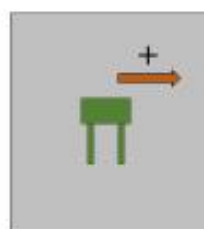
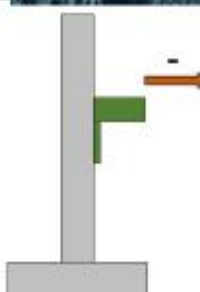
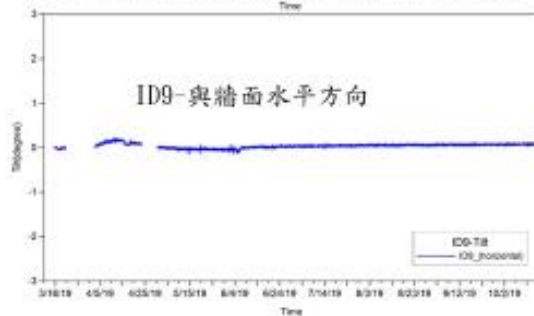
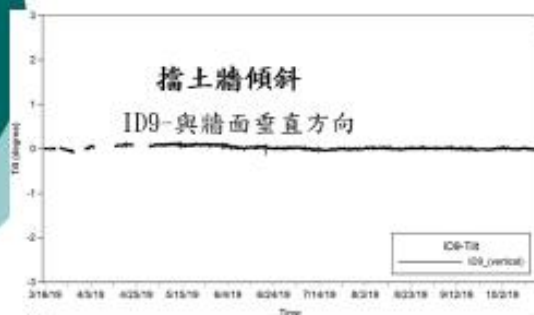
## 監測數據-邊坡表層傾斜 (4/4)

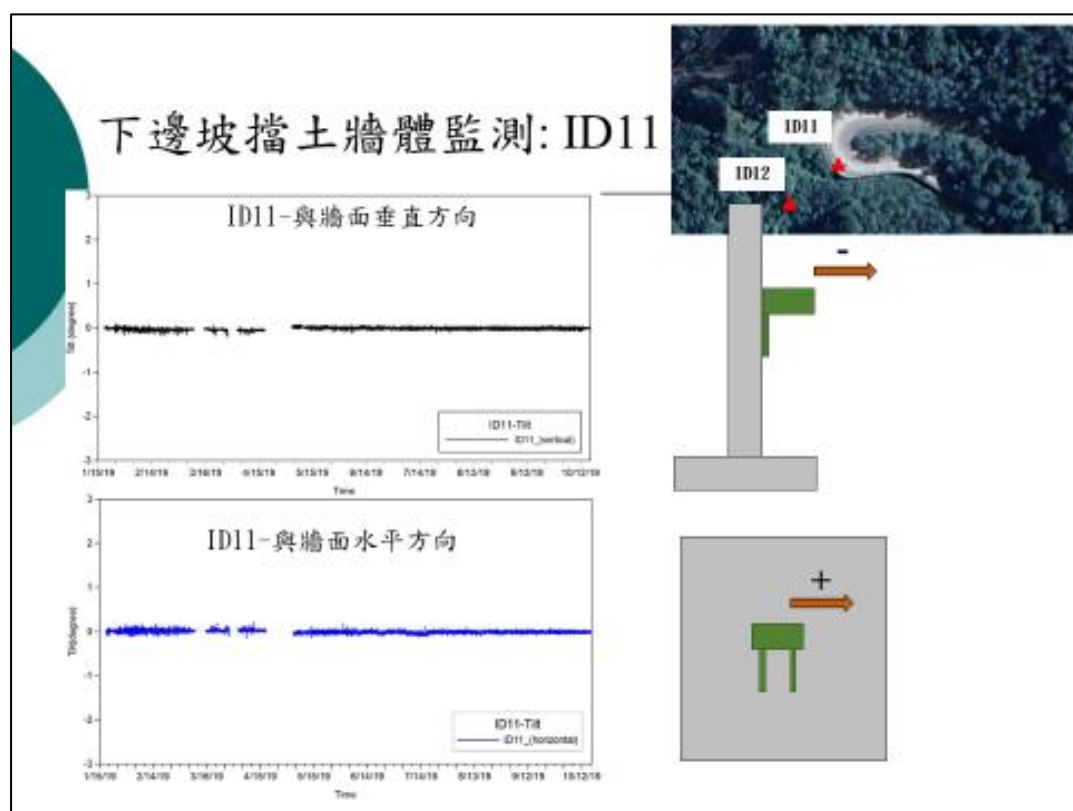
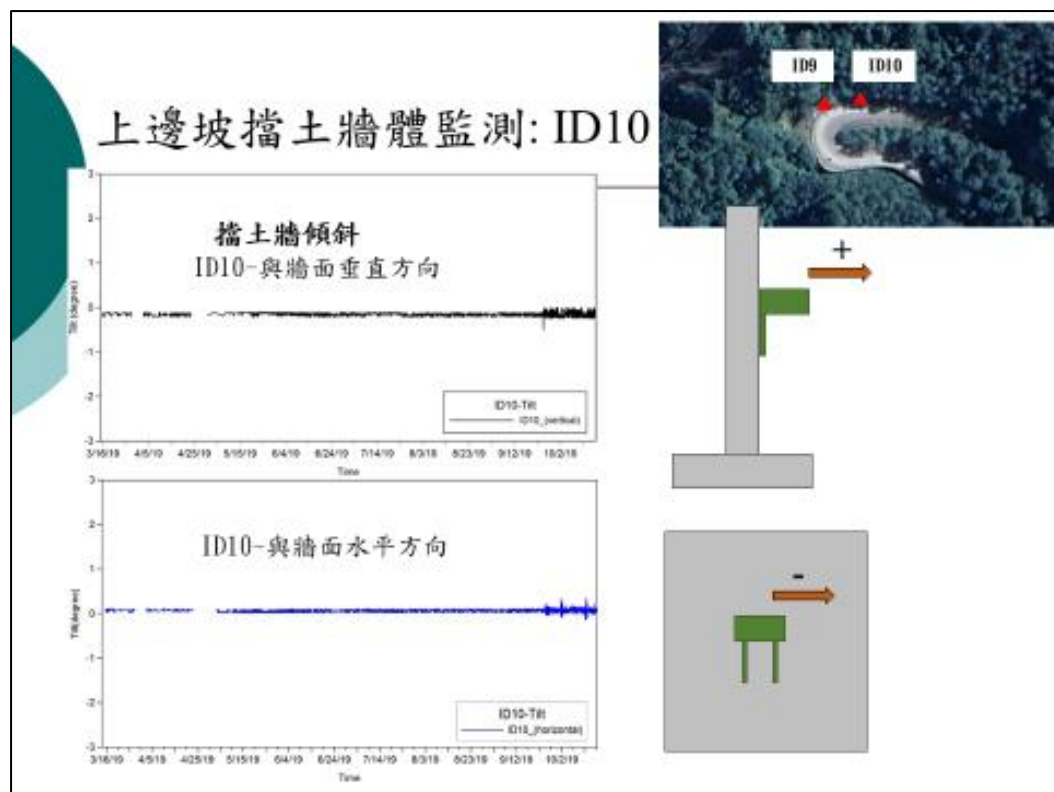


ID8

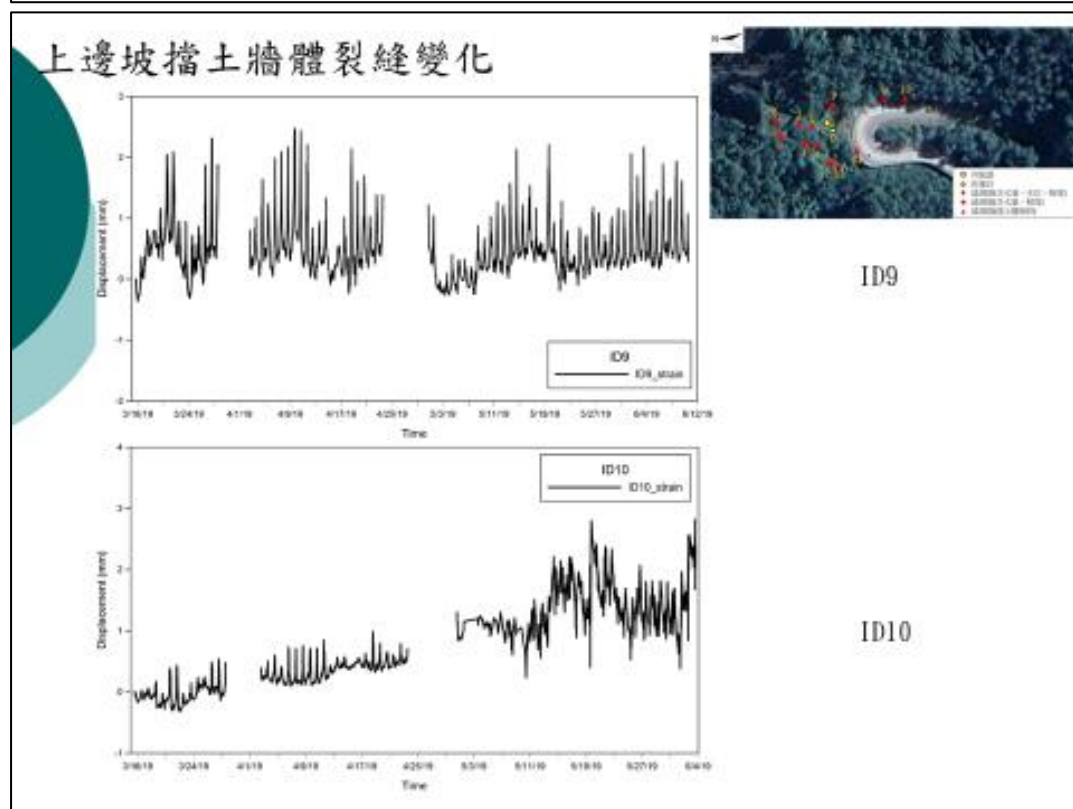
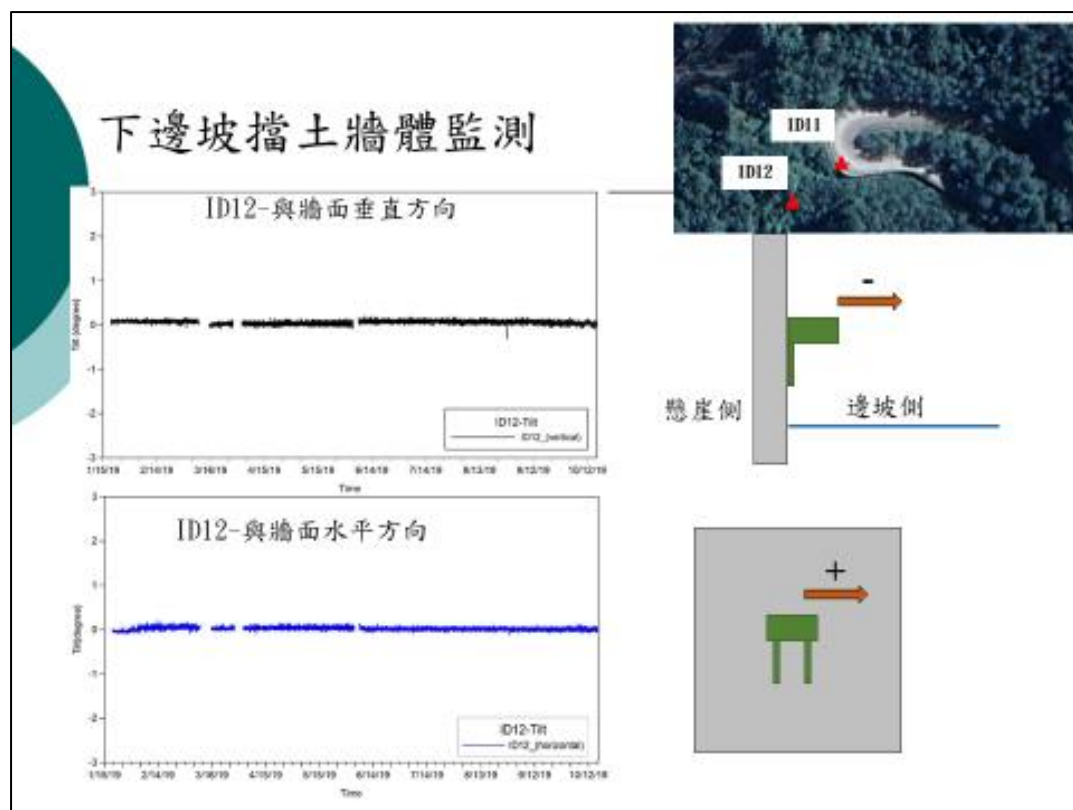


## 上邊坡擋土牆體監測: ID9









## 邊坡擋土系統變形分析與預警

- 模擬軟體基本介紹
- 模擬流程
- 現地案例說明

## PYWALL軟體基本介紹



- 1 有別於傳統極限平衡分析
- 2 最大優勢：考慮土壤結構互制關係
- 3 模型由Winkler Spring 改良而來
- 4 提供合理的分析與設計

## ✓ 模擬流程

模擬理論

◆ 土壓力理論、土壤結構互制關係、數值分析

參數定義

◆ Wall sections、k值等

選定場址

◆ 取得場址資料、參數帶入

決定改變因子

◆ 地下水位變化

分析與討論

◆ 合理並接近現地情況

## 台七甲41k場址

牆體

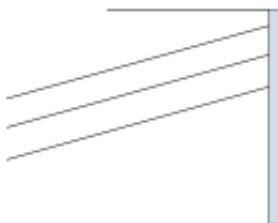


(台7甲線竣工圖, 2011)

土層

| 土層 | 深度(m) | 單位重<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 摩擦角(°)                         | k值<br>kPa/m |                              |            |
|----|-------|-----------------------------|--------------------------------|-------------|------------------------------|------------|
| 砂土 | 0~5   | 19.5                        | 33                             | 12000       |                              |            |
| 土層 | 深度(m) | 單位重<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 單軸壓縮強度<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | krm         | 楊式模數<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | RQD<br>(%) |
| 軟岩 | 5~15  | 21                          | 5000                           | 0.0005      | 20000000                     | 15         |

地錨



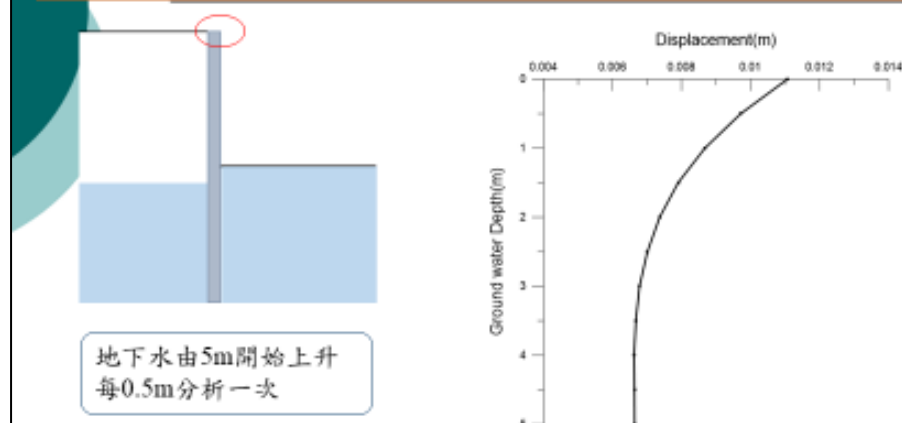
| 編號 | 深度<br>(m) | 截面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 彈性模數<br>(GPa) | 自由端長<br>度(m) | 傾角<br>(角度) | 水平間<br>隔(m) |
|----|-----------|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------|
| 1  | 0.4       | 240                       | 200           | 15           | 15         | 2.4         |
| 2  | 2.4       | 240                       | 200           | 15           | 15         | 2.4         |
| 3  | 4.4       | 240                       | 200           | 15           | 15         | 2.4         |

44



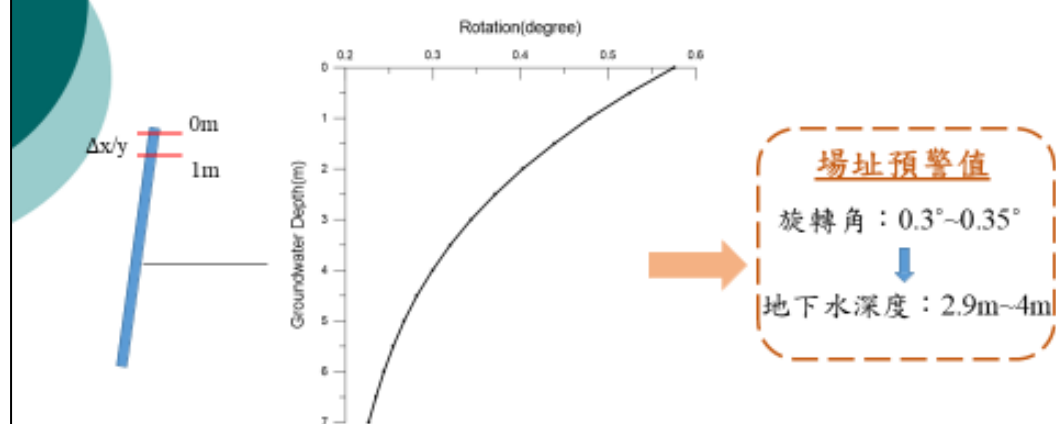
## 現地案例分析成果

監測儀器架設於牆頂，取牆頂位移與背填土側地下水位深度進行分析



## 現地案例說明

以位移差換成旋轉角，參考文獻定義預警值



| Soil type and condition | Y/H(NAVFAC, 1982 & CGS, 2007) | Rotation(Degree) |
|-------------------------|-------------------------------|------------------|
|                         | Active                        | Active           |
| Dense cohesionless      | 0.0005-0.001                  | 0.028-0.057      |
| Loose cohesionless      | 0.002-0.004                   | 0.115-0.229      |

## 水力力學耦合解析法分析

### 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。

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

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

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

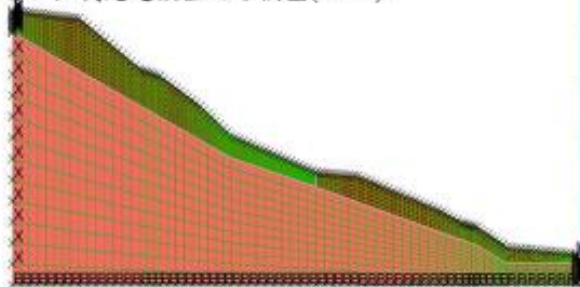
## 台7甲線41k數值分析模型

崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數

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



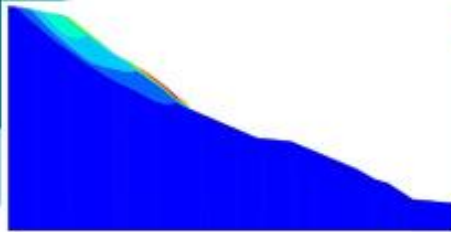
場址空載光達數值地形模型(DEM)



分析所用土層參數

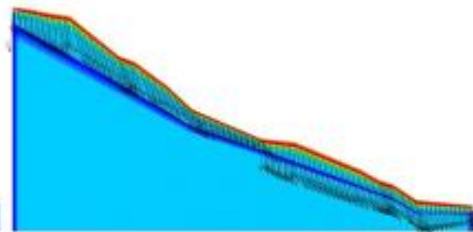
| 參數(單位)                      | 破碎頁岩層  | 頁岩     |
|-----------------------------|--------|--------|
| 非飽和單位重 (kN/m <sup>3</sup> ) | 19     | 23.0   |
| 飽和單位重 (kN/m <sup>3</sup> )  | 20.1   | 25.6   |
| 楊氏模數(kPa)                   | 4000   | 2.0E5  |
| 泊松比                         | 0.3    | 0.25   |
| 有效凝聚力 (kPa)                 | 1000   | 5000   |
| 有效摩擦角 (deg.)                | 42     | 28     |
| 膨脹角(deg.)                   | 2      | 0      |
| 滲透係數(m/s)                   | 1.5E-3 | 5.2E-5 |

## FLAC 成果

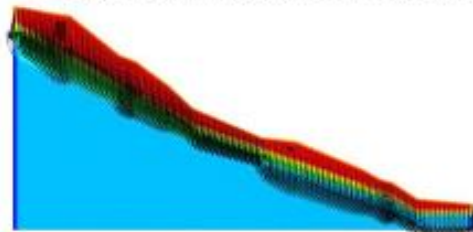


靜力平衡位移分佈圖

此區入滲為垂直向下，地下水位並無顯著升降且無平行滲流產生，此與液位計監測結果吻合，此場址非因地下水位上升而滑動



入滲開始後1.2E4秒後飽和度分布與流動向量



入滲開始後8E6秒後飽和度分布與流動向量

## 架設於slopecloud.com.tw (IP: 210.61.148.55)

ASML

邊坡土石設施無線監測展示

| 淺層滑動監測地點                                                               | 深層滑動監測地點                                                 | 擋土設施監測地點                                                 |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>中區擋土牆</li> <li>區區山石牆</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>台2線擋土牆</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>台7線擋土牆</li> </ul> |

聯絡辦法

國立成功大學土木工程學系  
海岸工程學系

## 即時邊坡擋土監測平台(即時資訊頁面)(1/5)

台7甲線41k處即時邊坡擋土監測平台



目前預設10分鐘  
刷新一次頁面

31

## 即時邊坡擋土監測平台(即時資訊頁面)(2/5)

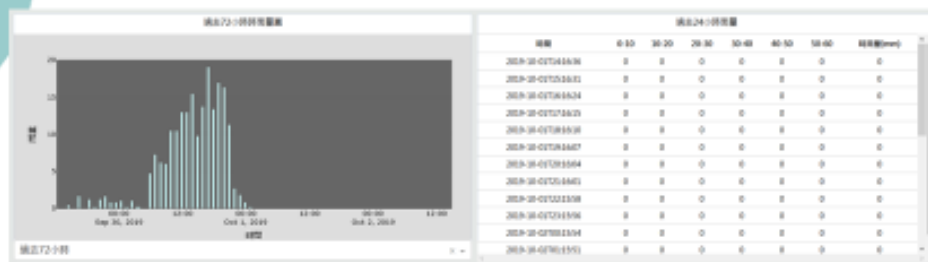
顯示即時監測儀器狀態

模組編號、最後上傳時間、運作狀態、感測器種類與預警值判定

| 模組編號 | 時間                  | 電池剩餘(%) | 運作狀態 | 感測器        | 水位警報值判定 | 傾角/傾斜值判定 | 傾角/傾斜值判定 |
|------|---------------------|---------|------|------------|---------|----------|----------|
| 00   | 2019-10-02 14:41:39 | 100     | 正常   | 雨量計        | -       | -        | -        |
| 01   | 2019-10-02 14:41:40 | 46      | 正常   | 土壤含水率/地下水位 | 正常      | 正常       | -        |
| 02   | 2019-10-02 14:41:40 | 71      | 正常   | 土壤含水率/地下水位 | 正常      | 正常       | -        |
| 03   | 2019-10-02 14:41:40 | 41      | 正常   | 土壤含水率/地下水位 | 正常      | 正常       | -        |
| 04   | 2019-10-02 14:41:40 | 36      | 正常   | 土壤含水率/地下水位 | 正常      | 正常       | -        |
| 05   | 2019-10-02 14:41:40 | 41      | 正常   | 土壤含水率/地下水位 | -       | 正常       | -        |
| 06   | 2019-10-02 14:41:40 | 100     | 正常   | 傾斜儀/傾斜     | -       | 正常       | -        |
| 07   | 2019-10-02 14:41:40 | 10      | 正常   | 傾斜儀/傾斜     | -       | 正常       | -        |
| 08   | 2019-10-02 14:41:40 | 60      | 正常   | 傾斜儀/傾斜     | -       | 正常       | -        |
| 09   | 2019-10-02 14:41:41 | 41      | 正常   | 傾斜儀/傾斜     | -       | 正常       | 正常       |
| 10   | 2019-10-02 14:41:41 | 36      | 正常   | 傾斜儀/傾斜     | -       | 正常       | 正常       |
| 11   | 2019-10-02 14:41:42 | 41      | 正常   | 傾斜儀/傾斜     | -       | 正常       | 正常       |

## 即時邊坡擋土監測平台(即時資訊頁面)(3/5)

可顯示一日內詳細雨量圖表、資訊

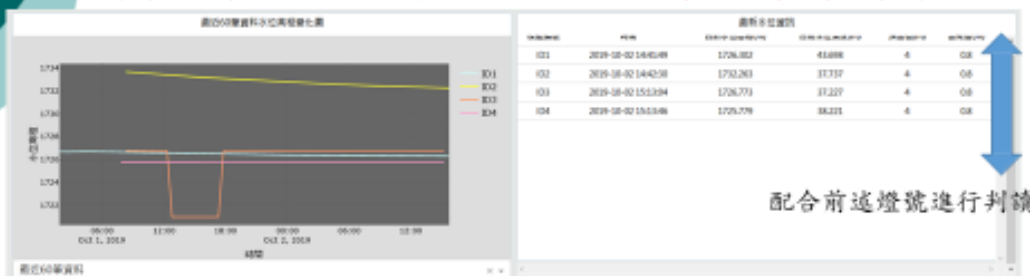


選單式設計  
可選擇24, 36, 48, 72小時

## 即時邊坡擋土監測平台(即時資訊頁面)(4/5)

可即時顯示時地下水位高程變化

目前水位高程, 水位深, 預警與警戒設定值



配合前述燈號進行判讀

選單式設計  
可選擇20, 40, 60, 80, 100筆資料

## 即時邊坡擋土監測平台(即時資訊頁面)(5/5)

地表傾角、擋土結構物傾角、裂縫變化、相關預警警戒值



選單式設計  
選擇ID  
50, 100, 200, 500, 1000筆資料

## 即時邊坡擋土監測平台(資料下載頁面)

The screenshot shows a web interface for downloading data from the monitoring platform. The page title is '台7甲線41k處即時邊坡擋土監測平台' (Real-time Slope and Retaining Wall Monitoring Platform at 41k on Highway 7). The page includes a navigation bar with '即時資訊' (Real-time Information), '資料下載' (Data Download), and '使用者管理' (User Management).

The '資料下載' section contains the following fields and controls:

- 自選時間** (Self-select time): A dropdown menu for selecting the time range. The current selection is '現在時間: 2019-07-26 08:27:19'.
- 欲下載之日期區段:** (Date range to download): Two input fields for the start and end dates. The start date is '07/01/2019' and the end date is '07/26/2019'.
- Channel ID:** A text input field with a dropdown menu. The selected ID is 'ID0'.
- 自選感測模組** (Self-select sensing module): A dropdown menu for selecting the sensing module.
- 下載** (Download): A green button to initiate the data download.

At the bottom, there is a note: '計畫成員與管理者才能訪問此頁面' (Only plan members and managers can access this page).

## 即時邊坡擋土監測平台(使用者管理頁面)

上午9:27 192.168.1.100

ccca701eungrokio

台7甲線41k處即時邊坡擋土監測平台

國立成功大學  
National Cheng Kung University

即時資訊 資料下載 使用者管理

現在時間: 2019-07-26 08:27:38

權限、開通狀態、異常燈號通知設定

使用者列表

| 帳號          | 權限          | 開通狀態 | 資料通知 |
|-------------|-------------|------|------|
| super_admin | super_admin | 開通   | 開啟   |
| super_admin | super_admin | 開通   | 關閉   |
| user        | user        | 未開通  | 關閉   |

管理者才能訪問此頁面  
並設定相關權限給新申請者

高雄土壤力學實驗室 All rights reserved copyright © 2009 國立成功大學土木工程學系

## 模組狀態 - 台7甲線

回傳狀態: 正常

ID4 於10/18 下午3點可能遭不明因素破壞

監測儀器狀態

| 儀器編號 | 時間                  | 儀器狀態 | 儀器位置 | 儀器名稱 | 儀器狀態       | 儀器位置 | 儀器名稱  |
|------|---------------------|------|------|------|------------|------|-------|
| ID0  | 2019-10-18 17:34:19 | 正常   | -285 | 正常   | 儀器計        | -    | -     |
| ID1  | 2019-10-18 17:35:00 | 正常   | 41   | 正常   | 分層式水壓計地下水位 | 正常   | 已連線狀態 |
| ID2  | 2019-10-18 17:35:42 | 正常   | 47   | 正常   | 分層式水壓計地下水位 | 正常   | 已連線狀態 |
| ID3  | 2019-10-18 17:36:25 | 正常   | 38   | 正常   | 分層式水壓計地下水位 | 正常   | 已連線狀態 |
| ID4  | 2019-10-18 17:37:07 | 正常   | -36  | 正常   | 分層式水壓計地下水位 | 正常   | 已連線狀態 |
| ID5  | 2019-10-18 17:37:49 | 正常   | 36   | 正常   | 分層式水壓計地下水位 | 正常   | 已連線狀態 |
| ID6  | 2019-10-18 17:38:31 | 正常   | -343 | 正常   | 分層式水壓計     | 正常   | 已連線狀態 |
| ID7  | 2019-10-18 17:39:13 | 正常   | -34  | 正常   | 分層式水壓計     | 正常   | 已連線狀態 |
| ID8  | 2019-10-18 17:39:54 | 正常   | 58   | 正常   | 分層式水壓計     | 正常   | 已連線狀態 |
| ID9  | 2019-10-18 17:40:34 | 正常   | 33   | 正常   | 儀器計        | 正常   | 已連線狀態 |
| ID10 | 2019-10-18 17:41:15 | 正常   | 44   | 正常   | 儀器計        | 正常   | 已連線狀態 |
| ID11 | 2019-10-18 17:41:55 | 正常   | 46   | 正常   | 儀器計        | 正常   | 已連線狀態 |

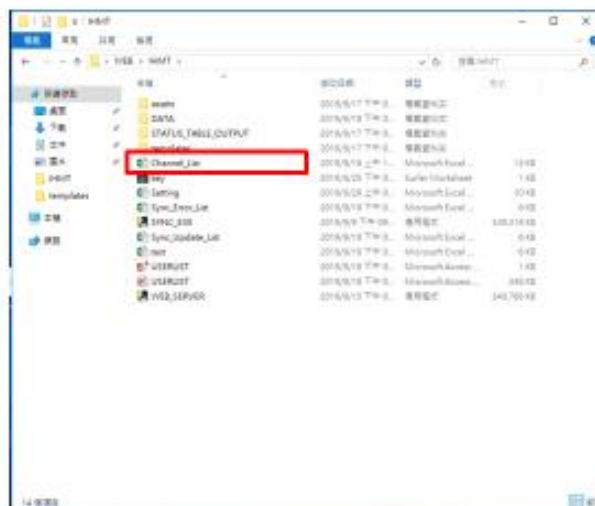
儀器ID4於10/18下午3點可能遭不明因素破壞

ID4

儀器ID4於10/18下午3點可能遭不明因素破壞



於各資料夾中  
Channel\_list 檔案  
更改

[illegible]

儲存後將自動進行更新



## 成果摘要與建議

- 成果摘要:

- 監測模組安裝與資料分析: 線地安裝雨量計、地表與牆體傾度、地下水位及表土分層水份計，由現地破壞機制，此場址以表土與牆體傾斜作為預警指標較適宜。
- 場址水力力學耦合分析: 針對此場址，進行考慮土層水力力學耦合及擋土系統互制行為之極限平衡與數值分析，提供邊坡及擋土設施警戒值設定之參據。
- 客製化預警值建立: 結合邊坡及擋土系統依時分析成果，提出不同階段之邊坡與牆體預警值，轉換成不同燈號顯示於網頁，以利業管單位管理之參考。
- 監測網頁建置: 本計畫成果以專屬監測網頁呈現，顯示內容包括最新監測值、邊坡與擋土系統狀態(以燈號顯示)、儀器狀態顯示等，系統架設於中華電信機房，以租用形式運作，並以帳號密碼管制可閱覽權限。

- 建議:

- 因場址為向源侵蝕破壞，具有一定延時與徵兆，地表傾斜可提供人員巡查之參考。
- 因計畫期間並無強降雨長延時降雨事件，建議持續觀測，計畫團隊會持續提供協助。

## 簡報完畢，敬請指教

