

公路邊坡飽和土層即時監測系統研發與應用

張文忠 國立成功大學土木工程學系教授
曾文傑 交通部運輸研究所研究員
洪芯琦 國立成功大學土木工程學系研究助理
邱心彥 國立成功大學土木工程學系碩士生

摘要

公路土壤邊坡依破壞機制不同，可區分為滑動面發生於飽和土層之飽和層滑動及發生於原非飽和土層之淺層滑動，本研究以發展飽和層滑動監測與解析為標的，發展飽和土層水力力學反應無線雲端監測模組，後續可結合具嚴謹力學及通用性之解析法邊坡穩定分析，進行水力力學耦合邊坡滑動數值分析，預測邊坡依時性反應，做為土層反應無線監測模組佈設及制定警戒值之依據。所開發之監測模組以廣為應用於物聯網之微機電感測系統，結合無線通訊與雲端儲存顯示技術，整合具無線通訊功能且可監測現地雨量、地表傾角、土中分層濕度及孔隙水壓之監測模組，形成分佈式土層感測網路，作為相關防災作為啟動之準據。

一、前言

山區道路邊坡崩塌主因為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且降雨引致之邊坡破壞具有一定之延時與前期徵兆，使得此類災害之預警較為可行且易發揮成效。

本研究與現有公路邊坡預警系統主要差異為考慮土壤破壞機制不同，目標為發展以土層水力反應與地表位移或傾斜為指標之預警模式，研發搭配之邊坡無線即時雲端監測模組，克服傳統土中監測安裝費時與設備昂貴之限制，監測

模組以物聯網常用之軟硬體，採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統 (Micro-electro-mechanical System, MEMS) 感測器，客製化具無線網路通訊功能且可監測地表傾角、土壤濕度、孔隙水壓、雨量特徵等功能之監測模組，於數個邊坡反應靈敏之處佈設，形成分佈式表層土層反應感測網路。由於此類電子產品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之骨幹。

本研究針對之破壞類型為破壞面位於飽和土層之飽和層滑動，研究包括進行考慮水力力學耦合之土層邊坡穩定分析及無線監測模組開發，藉由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，結合研發之雲端即時無線監測模組，即時監測土層力學與水力反應，修正水力力學耦合分析成果，並依修正結果推估滑動發生時間及滑動土體幾何性質，作為依時特性之場址客製化預警系統。

限於篇幅，本文以無線監測模組研發及現地資料整理為主軸，相關解析法細節及預警值建立仍處於發展階段，階段成果可參考運研所歷年報告及港灣季刊^[2,3,5,6]。

二、飽和層滑動分析與監測

2.1 飽和層邊坡破壞解析

多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲會增加土坡的下滑力，減弱材料特性。傳統無限邊坡深層滑動分析，以圖 1 所示模型其安全係數為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \left(\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w r_u}{\gamma_{sat}} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \dots (1)$$

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

($r_u = 1.0$)，則式(1)可簡化為：

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma \tan \beta} \dots \dots \dots (2)$$

式中 γ 為滑動面土壤浸水單位重。考慮平行滲流時，則 γ_u 大於 1，造成安全係數降低直至破壞，其應力變化如圖 2 所示(Anderson and Sitar, 1995)。

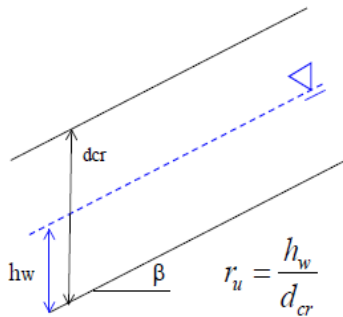


圖 1 飽和層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖

整體而言，臨界滑動面土壤孔隙水壓力對飽和土層土壤無限邊坡穩定具有重大之影響，因此掌握孔隙水壓變化可有效推估現地邊坡穩定性並作為依時預警之指標。因 r_u 為時間之函數，若由量測資料進行統計分析，或以整體集水區

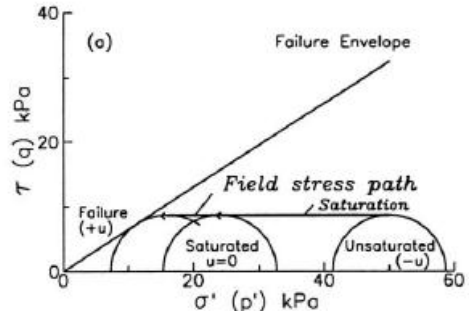


圖 2 飽和層無限邊坡滑動應力狀態 (Anderson and Sitar, 1995)

水文解析，建立孔隙水壓比與降雨特徵之關聯，建立 r_u 預警值，結合現地水壓監測及深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論，可作為飽和土層依時預警之架構。

2.2 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，因此須以結合土中入滲與滲流分析及飽和土層非線性有效應力分析之數值工具，於進行水力分析時，將孔隙水壓傳遞給相同網格之土壤進行力學分析，水力分析之結果將用於更新土壤之彈性及強度，此程序可近似模擬水力力學耦合分析。

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。

但以二維水力力學耦合計算分析飽和土層破壞有下列侷限：

1. 無限邊坡中平行滲流之影響不可忽略；
2. 現地垂直入滲非為增加孔隙水壓之唯一因子；
3. 地下水需考慮整體集水區降雨與入滲特性；
4. 土壤非均質與強度不確定性。

為解決所列限制，本研究提出以長期水位觀測資料，建立場址地下水位升降與降雨前土壤狀態及降雨特徵關聯，搭配非耦合邊坡穩定分析，建立監測水位與安全係數關係曲線，發展以地下水位為指標之客製化邊坡依時預警模式。

2.3 飽和層邊坡監測預警

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

黃安斌等人^[1]認為道路邊坡之安全監測涉及三個環節：(1) 確保安全監測所得之物理量為合宜之參考物理量；(2) 妥善進行監測所得物理量之詮釋；與(3) 訂定合宜之預警基準應用於管理層次。結合參考物理量、物理量之詮釋及預警基準，道路防災管理方能落實。

依運研所(2011)^[1]研究指出，道路邊坡之監測系統可概分為人工記讀系統以及自動化系統，自動化系統其組成包括：(1) 感測單元；(2) 資料擷取單元；(3) 資料傳輸單元；(4) 資料儲存、展現或分析單元；以及(5) 電源供應等五個單元。其中感測單元感測現地物理量(如位移)或環境條件(如雨量)之變化，由資料擷取系統收集、記錄、篩選、判讀並經由資料傳輸單元送達遠端之資料儲存單元儲存

、展現或分析資料，並可發送現地警報通知守視人員。

Huang et al. (2012)^[7]以光纖感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3所示，分層地下水位因強降雨顯著增加，其應力路徑隨孔隙水壓增加而接近土壤有效摩擦角 40° 之無限邊坡破壞包絡線。

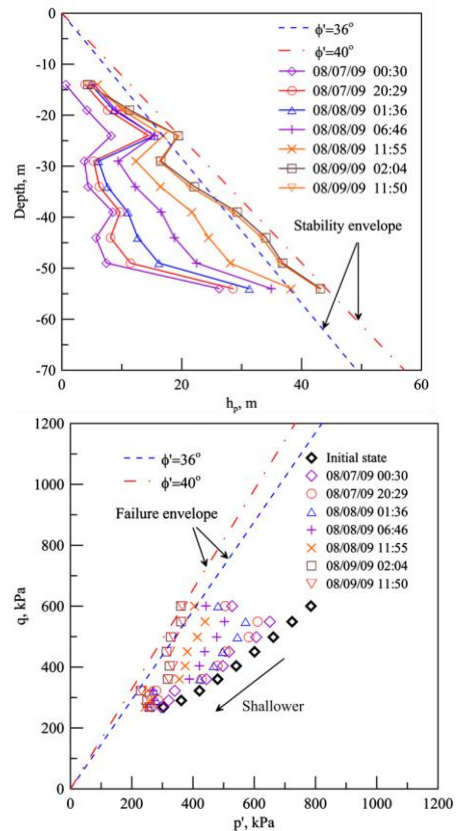


圖3 五彎仔現地孔隙水壓監測與應力路徑圖 (Huang et al., 2012)

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。為充分利用臺灣於高科技產業之優勢，陳志芳等^[2]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，由於其可大量生產及具模組化特性，可大幅降低成本，後續可建立可拋棄式模組，以利於推廣。

三、邊坡即時無線監測系統

3.1 模組系統架構

無線土層監測系統係由微控制器(Microcontroller Unit, MCU)結合各感測器以及無線傳輸模組，裝設於待測地點並透過無線傳輸將各感測器之量測資料。無線土層監測系統主要組成包括微控制器、感測原件(sensor)及通訊單元，並以韌體進行整合，另外還包括附屬之模組外構及電源系統。本研究採用 Wemos Lolin32 作為系統之微控制器，搭配各式感測元件，如觀測入滲速率之土壤分層含水量計、地表傾角之高精度傾斜儀(Tiltmeter)、地下水位之壓力式液位計(Liquid Level Sensor)及區域降水量之雨量計等，組成客製化監測模組，並以運用低功耗廣域網(Low Power Wide Area Network, LPWAN)技術之 LoRa Radio 建立感測模組間與接收端通訊，形成區域監測網路，經由接收端連接 4G 無線網路，達到遠端監測之功能。

無線土層監測系統包含兩種型態，分別為客戶端與伺服器端，客戶端監測模組將量測之現地資訊發送給伺服器端，透過 4G 無線通訊模組將資訊上傳至雲端，模組同時備有記憶卡備份現地資料，達到現地無線即時之自動化監測。

本研究使用之無線傳輸模組、數據紀錄模組、即時時間模組、感測器以及微控制器，以可插拔方式配置於客製化電路板上，以便於維護，並連同電源供應模組放置於防水耐候之電子盒中，其下方可連結分佈式土壤水分計。透過客戶端與伺服器端建構之區域無線網路，以及感測器擷取之數據，可進行即時邊坡監測，其系統運作示意圖如圖 4 所示，

無線土層監測系統之部分包括：(1)微控制器、(2)無線傳輸模組、(3)時鐘與數據儲存模組及(4)感測器等。

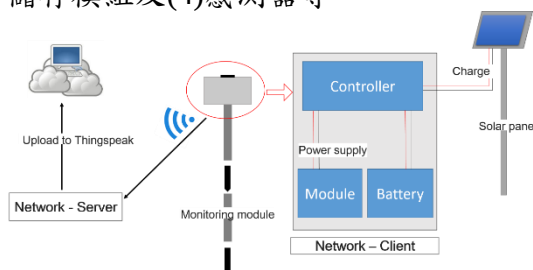


圖 4 邊坡無線監測系統架構圖
(張文忠等 2018)

3.1.1 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，整合不同通訊界面，建構易於輸入/輸出之開發板。

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

以設定執执行程序，降低開發門檻，同時增加監測模組功能客製化的彈性。

坊間開發電路板產品眾多，為符合無線土層監測系統之需求，本研究採用 Wemos Lolin32 開發板，其搭載 ESP32 晶片，240MHz 雙核微控制器，內建 16 MB 程式設計空間，且多種通訊介面，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，另內建 12 支接腳可做為類比訊號接腳，可滿足現有與未來擴充監測模組功能需求。

3.1.2 無線傳輸模組

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

本研究以 LoRa 無線傳輸模組作為伺服器端與客戶端之間互相傳輸資訊之區域網路模組，LoRa 為 Long Range Low Consumption 的縮寫，為低功耗廣域網路(Low Power Wide Area Network, LPWAN)通信技術的一種，在 LPWAN 產生之前，使用者只能在遠距離以及低功耗兩者之間做取捨，而 LoRa 無線技術的出現，改變了關於傳輸距離與功耗的折衷考慮方式，不僅可以實現遠距離傳輸，並且同時兼具低功耗、低成本的優點。LoRa 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。

研究採用基於 SEMTECH 公司 SX1276 射頻晶片的無線模組，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，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，以減少無線感測模組之耗電量。

為將感測網路蒐集到之現地數據上傳至雲端平台，伺服器端之土層監測模組搭載 4G 模組(型號: SIM7500SA-H)，以連結場址資訊與後台人員形成廣域網路。SIM7500SA-H 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，其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。

3.1.3 時鐘、數據儲存及資料擷取模組

為確保監測資料儲存安全以提供後續數據分析的完整性，模組整合 SD 卡數據紀錄模組 (Data Logger)以備份監測資料，當無線傳輸模組因故斷訊時，仍可藉由 SD 卡備份檔案記錄現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站即時時間、節點編號、土層分層溫度、含水量、傾斜角度與地下水位高程，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。

數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。此 SD 卡數據紀錄模組內含一即時時鐘(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 I²C 序列傳輸位址與時間資訊。DS1307 內含電源檢測電路並備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電能切換至備用電源以確保時間正常計讀。

由於微控板之 ADC 解析度為 10-bit，不足以應付本研究之精度需求，故以外接之 ADC 模組整合感測器，本研究使用基於 ADS1115 晶片之資料擷取卡，使用 I²C 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，可符合量測之需求。

3.1.4 電源供應與管理

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目的，本研究使用太陽能控制模組搭配 18650 鋰電池組，作為土層監測系統之電源系統。以太陽能電源控制器，搭配 10W 太陽能板。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。此外為因應不同模組與元件對電壓需求不同，模組內建搭配之直流晶片。

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

為降低功耗，模組具有以 LoRa 喚醒之功能，使模組非工作時處於低耗電之休眠狀態，由具備 4G 模組之伺服端喚醒對應之 LoRa 模組後再啟動系統運作，此可大幅降低耗電量，並延伸監測網路涵蓋範圍。

3.1.5 雲端伺服平台

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

Thingspeaks 雲端即時顯示頁面以“Field”依序顯示所收到之資料，現有系統可顯示測站之節點編號、傾斜角、淺層土壤體積含水量、淺層土壤溫度、

深層土壤體積含水量、深層土壤溫度、水位以及模組電壓，游標移至資料點上即可獲知該監測值及其量測時間，用以展示即時監測成果，而平台也提供歷史資料輸出功能，檔案格式可用 Excel 直接開啟。

3.2 土層水文與運動反應感測器

因土壤邊坡滑動本質為土層水文與力學反應，相關監測應為水文與運動量，本研究以 3.1 節所述架構，結合適宜之感測器，開發適用於因降雨造成之土層邊坡監測且具有即時、無線及自動化特點之邊坡土層監測模組，所整合之感測器種類與功能如下：

1. 電容式含水份計 (Capacitance Moisture Sensor)：量測周圍環境電容變化，透過感測器內嵌之類比數位轉換晶片進行數位輸出，間接測得非飽和土壤之體積含水量或經換算為飽和度。
2. 傾斜儀：量測單軸向傾斜量變化，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，提供單方向高精度及高靈敏度之傾斜角量測。
3. 液位計 (Liquid Level Transducer)：以電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位，以高精度 ADC 模組與 MCU 連結。
4. 雨量計 (Rain Gauge)：用於量測降雨，本研究採用自記傾斗式雨量計，以研發之模組紀錄上傳。

本研究採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式土壤水份計，具有低成本、高解析度與高重複性等優勢，並採用 I²C 通訊界面與微控制器與周邊設備整合。

使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA103T，量測單軸向傾斜量變化，採差分量測 (Differential measurement) 原理補償雜訊及誤差，有效降低一般量測雜訊干擾，提昇長期穩定性及減低溫度影響。量測

範圍 ± 15 度，為提升穩定性及精度，本模組以 16-bit ADC 模組讀取類比輸出，以確保解析度至少 0.05 度。

3.2.1 深層滑動邊坡無線監測模組

深層滑動中孔隙水壓力變化為滑動預測之最重要指標，孔隙水壓中因入滲及滲流所造成之超額孔隙水壓為觸發深層滑動之物理量，其可以開孔式地下水位代表總水頭，扣除位置水頭後可求得壓力水頭，本研究開發之深層滑動模組為在原有模組增加開孔井液位觀測。

深層監測模組以物聯網之架構進行研發，由微控板(MCU)搭配數位類比擷取卡(AD board)可連接傳統電子式感測器，配合 4G 模組(WCDMA)將監測資料送入雲端，突破常用有線監測之模式，並允許使用者透過雲端即時查看監測資料，此監測架構連結各式感測器形成局部(Local)或全域(Global)監測網路，提供管理者或工程師由即時監測數據(real time monitoring)進行決策。

模組採用國產之沉水式液位計，此感測計為類比輸出，因此感測模組需整合 ADC，現有模組以 16-bit 之 ADC 模組，以確保解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 5 所示，現有模組中使用之液位計實驗室校正結果顯示其線性度佳。

3.2.2 雲端雨量計

傾斗式雨量儀是由感應器及信號記錄器組成的自計式雨量儀器，感應器由承水器、上傾斗、計量及計數傾斗、干簧開關等構成；記錄器由計數器、控制線路板等構成。本研究採用標準雙傾斗式雨量計，搭配微控制器組成自計式雨量計，其原理為利用傾斗計算降雨量，雨水經由口徑 200 mm 的承雨口流入傾斗，到達一定雨量時，傾斗傾倒且同時帶動磁簧開關並產生脈衝信號(pulse)，利用微控器讀取高低電位變化計算傾斗

傾到次數，搭配微控制器組成自計式雨量計。

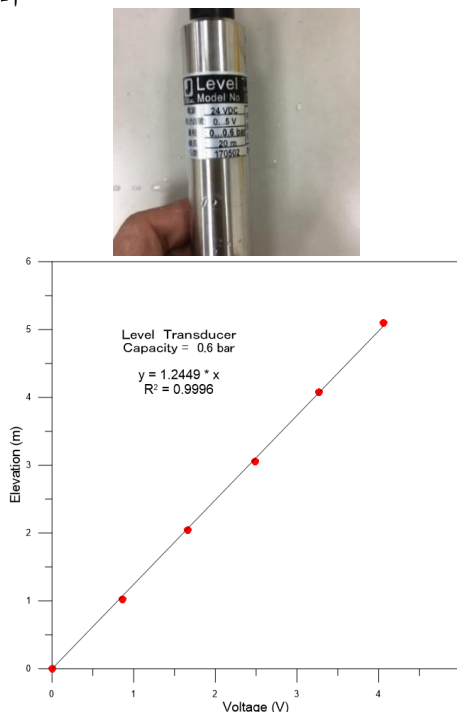


圖 5 液位計實體與校正結果

採用之雙傾斗雨量計解析度為 0.2 mm，因解析度較高對降雨量觀測較為敏銳，對降雨強度較大之降雨所產生之系統性誤差則經由室內試驗對記錄器紀錄值加以修正，其率定結果如圖 6 所示，室內試驗室率定利用體積量測儀記錄十分鐘內通過雨量計之總流量，控制流量大小可模擬不同的降雨強度，本試驗最大十分鐘雨量為 94 mm，大約為 564 mm/hr，根據世界氣象組織 (World Meteorological Organization) 建議檢驗範圍至少達 500 mm/hr，可滿足氣候變遷下的極端降雨事件。

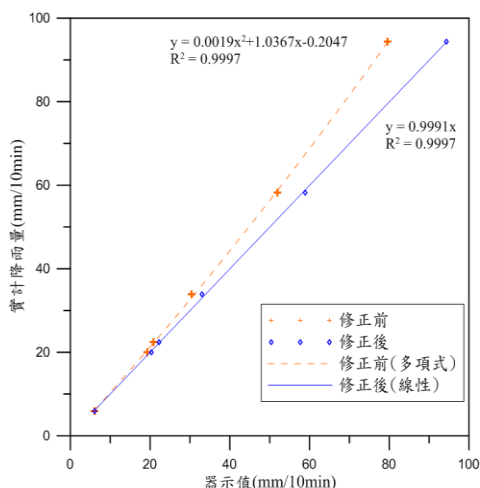


圖 6 雨量計量測值校正成果

四、現地土層水文與變位監測

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

飽和土層邊坡破壞雖為臺灣常見之災害類型，但進行解析法分析需有一定解析度之地形幾何與詳盡之地質材料參數資料，此類資料並不見於現有資料庫，經公路總局第五區養護工程處同意，選定台 20 線 52k+150 處為監測場址，並於雨季前完成監測系統建置。

4.1 場址介紹與監測配置

4.1.1 場址背景資料

選定之場址位於南化水庫東南方，道路邊坡朝東北傾斜，此路段長期以來每逢豪大雨，常會發生邊坡崩塌、路基

流失及道路下陷等情形，其中里程 52k+80~240 路段下邊坡於 2010 年莫拉克颱風期間，發生嚴重崩塌，造成西行線車道交通中斷，而 2011 年，該路段針對莫拉克風災緊及補強後，至 2019 年初該路段仍持續變形中。

根據青山工程顧問公司^[4]2018 年於此處進行之鑽探調查報告，鄰近監測邊坡之地質狀態可概分為三種：(1)崩積層、(2)完整岩層及(3)節理與剪裂帶組成之破碎帶，道路上下邊坡之崩積層厚度大多在 10 公尺左右，完整岩層上部多為厚層砂岩，下部則為頁岩與細粒砂岩所組成之互層。

參考鄰近之甲仙雨量站統計 2013 年至 2017 年月平均降雨量資料，此區域年平均降雨量為 2925 mm，降雨受到梅雨季節與夏季颱風影響，多集中於每年 5 至 9 月期間。根據過往降雨記錄，乾季期間雖有數場連續降雨，但水位無上升趨勢，顯示該區域之地下水位變動存在一門檻值，當累積降雨量或降雨延時超越此值，地下水位才開始變動。

4.1.2 監測配置

本場址原有編號 ID02 與 ID04 之水位井為量測位於深層砂岩與破碎帶間之拘限含水層，本研究另新鑽兩孔深度僅達崩積層底部之水位孔，以觀測位於崩積層之自由含水層水壓變化。有鑑於過往研究皆為利用臨近雨量站之降雨資料，可能無法反應場址真實降雨情況、土壤入滲及地下水位變化，故增設雨量計，監測之降雨量將與臨近雨量站資料進行比對。此外上下邊坡各裝設分層含水量探棒及傾角監測，監測地表體積含水量及傾角變化，監測頻率為每 30 min 一筆。

本研究於台 20 線 52k+150 處裝設五組無線監測模組與一組伺服器模組，各監測站之資訊如表 1，位置配置圖與剖面示意圖如圖 7 與圖 8 所示，ID 01 測站

為雨量計，位於道路下邊坡，經現地地探勘，考量雨量計裝設需求、裝設難易度及人員通達便利性後，此處為較適宜之場地；ID02 與 ID04 測站分別位於道路上下邊坡，其液位計裝設深度皆約 35m，為量測位於破碎帶與砂岩間的侷限含水層水位；ID03 與 ID05 測站分別位於道路下邊坡與上邊坡，為本研究新增孔位，ID03 與 ID05 測站之液位計深度皆約 11m，量測崩積層之自由含水層水壓；伺服器端安裝於光照較好處，ID02 與 ID05 測站太陽能板亦安裝於鄰近伺服器端。

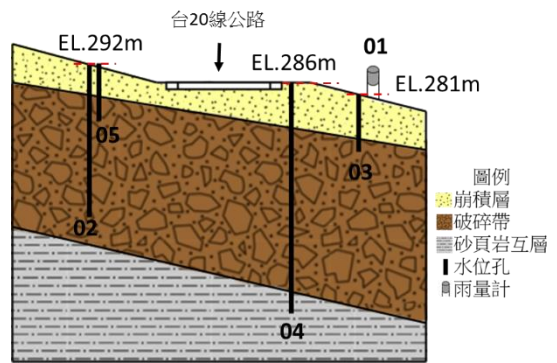


圖 8 監測剖面示意圖

4.2 監測資料與初步分析

4.2.1 降雨與地下水位

圖 9 為孔底深度 40 (ID02) 及 60m(ID04)深度之岩層地下水位與 ID1 記錄之降雨變化，ID02 與 ID04 監測值於乾季為水位較低狀態，偶有降雨，但降雨量或降雨延時未達其入滲門檻值，水位並無變化，而梅雨季期間，長延時降雨使孔內水位升高，且最高水位與最大降雨強度有延遲。ID02 與 ID04 二者水位上升趨勢及高度幾乎相同，顯示二者為同一岩層地下水層。

圖 10 為崩積層地下水位監測紀錄，ID03 測站位於下邊坡，初期水位為鑽探施工的殘餘水位，施工完成後即快速消散，此孔於梅雨季期間，水位僅些微上升，推測因此孔位於道路下邊破，臨近坡面可快速排水，導致崩積層內水位難以蓄積；ID05 測站位於道路上邊坡，初期亦有殘餘水位，施工完成後即快速消散，而此孔於梅雨季期間水位迅速上升，且需一定時間消散，顯示上邊坡之崩積層內有自由地下水層且易蓄水，可能發生因地下水位上升，孔隙水壓增加使土壤強度降低，導致邊坡滑動。

表 1 台 20 線 52k 測站配置

ID	配置	水位孔深度(m)	水位孔頂高程 (m)
01	雨量計	無	無
02	液位計	40 m	292m
03	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	281m
04	液位計	60 m	286m
05	液位計、含水量計、傾斜儀	11 m	292m

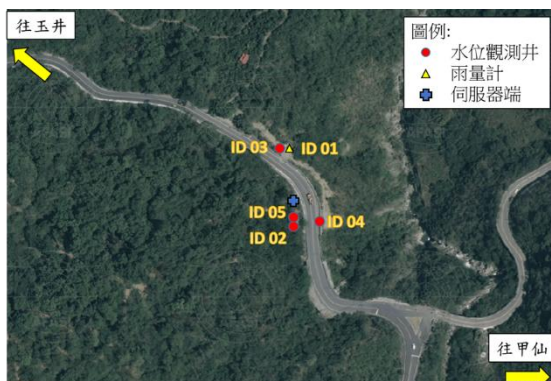


圖 7 監測儀器配置圖

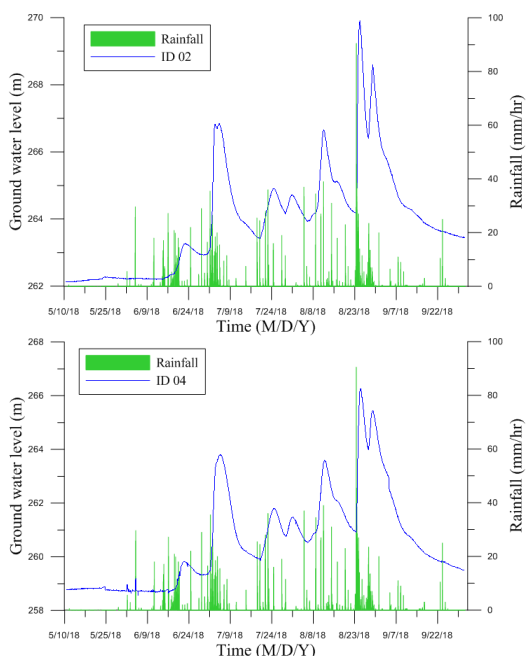


圖 9 岩層地下水位監測成果

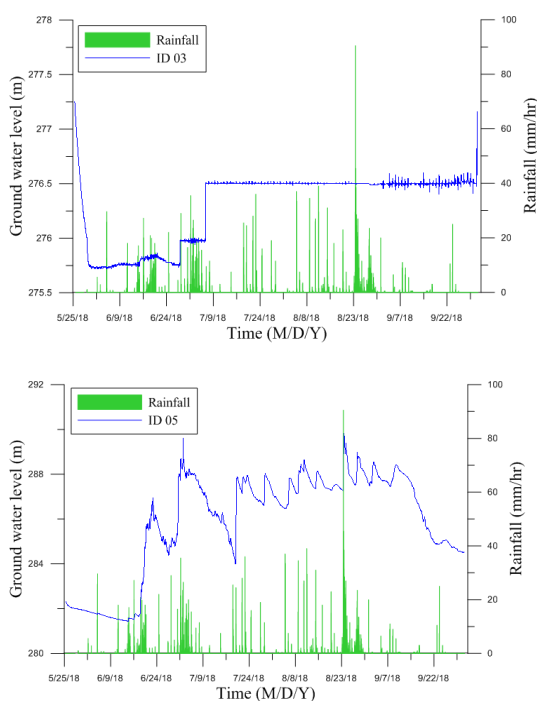


圖 10 崩積層地下水位監測成果

4.2.2 地表體積含水量與傾斜儀

圖 11 為 ID03 與 ID05 測站含水量監測結果，分層水份感測器對降雨事件反應敏感，在降雨事件後體積含水量逐步降低，顯示感測器具有重複性，適於長期監測。圖 12 為地表傾斜儀監測結果，顯示於此段觀測期間上邊坡 ID05 有約 1 度之變化，此與道路旁石籠輕微外推現象吻合，顯示表層有輕微變位；下邊坡 ID03 其傾角於 2018/08/23 起之降雨事件中累積傾角達到 2 度以上，代表下邊坡有顯著變位，經檢視現場鄰近擋土牆底部有縫隙產生，道路下邊坡土層有明顯變位與破壞跡象，此與現地地表徵吻合。相關成果顯示監測模組可有效量測表層土壤水文與變位反應。

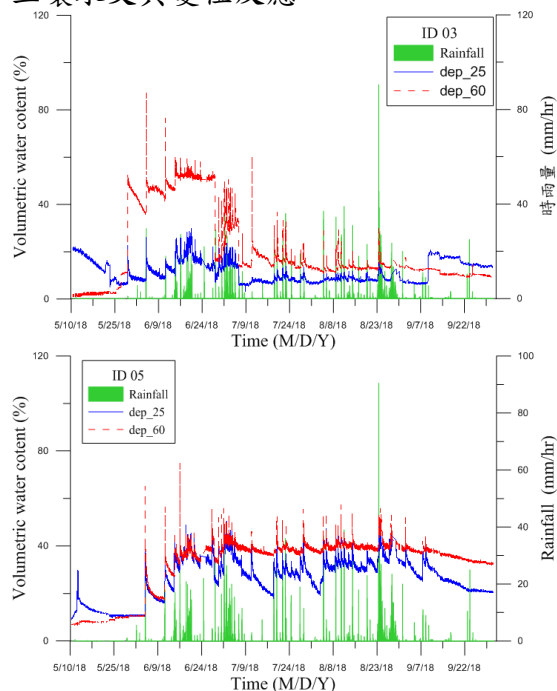


圖 11 表層體積含水量監測成果

4.3 監測資料應用

現有監測成果初步運用為以統計方式建立降雨特徵與崩積層水位上升關聯性，以作為後續地下水位依時預測之基礎。參考國家災害防救科技中心定義降

雨延時 6 小時以內為短延時降雨，6 小時以上為長延時降雨。

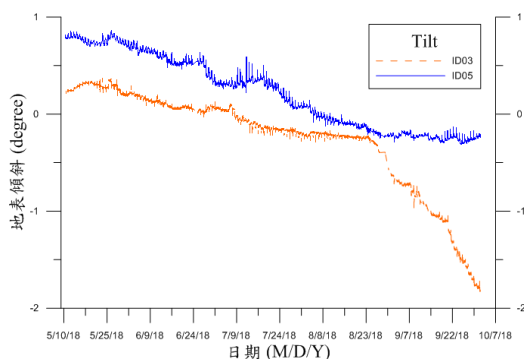


圖 12 地表傾斜監測成果

為進行降雨特徵與水位上升統計分析各項參數定義示意如圖 13 所示，定義開始降雨至地下水位開始變動間的累積雨量為產生地下水位上升之降雨門檻，其時間差為雨量門檻延時，地下水位上升速率為水位上升高度除以由水位開始上升至最高水位時間差，最高水位累積雨量指開始降雨到最高水位之間的累積雨量，將主要降雨事件相關數據整理可進行統計分析。

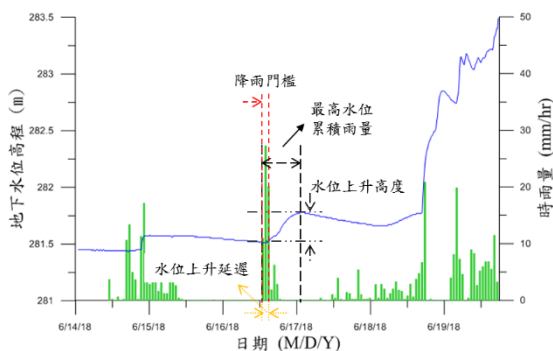


圖 13 降雨特徵參數定義示意圖

監測初期尚處於乾季，崩積層水位於短延時降雨達 60 mm 時水位開始上升，隨著降雨延時增長，觸發地下水位開始上升之所需累積雨量減少，且延時越長所需累積雨量越少，如圖 14 所示，可由此特性推估降雨開始後水位開始上升時間。圖 15 顯示累積雨量影響地下水位

上升高度，累積雨量越多，上升高度越高，以此可推估崩積層降雨後水位上升高度。

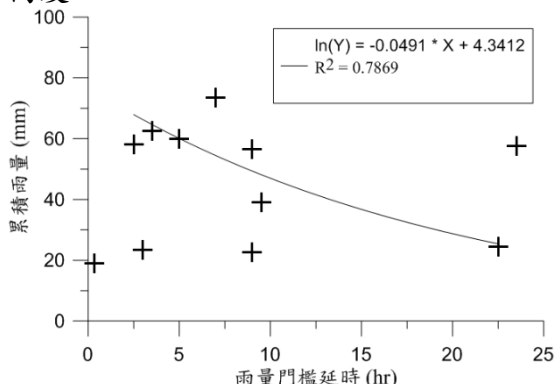


圖 14 崩積層雨量門檻延時與累積雨量關係圖

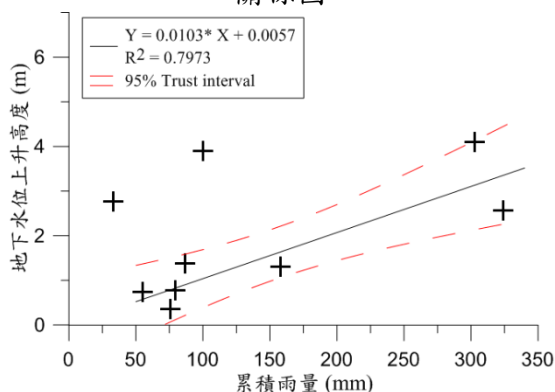


圖 15 崩積層累積雨量與地下水位上升高度關係圖

雨季水位上升速率與土層體積含水量有關，因非飽和滲透係數小與飽和滲透係數，土壤越接近飽和時，水力傳導越快，地表土層含水量越高，降雨越容易補充地下水層，水位越容易升高。圖 16 為地下水位上升速率與體積含水量之關係，結果成高度正相關，驗證地表的體積含水量對地下水位上升速率有極大的影響，含水量越高自由含水層地下水位上升速率越快。

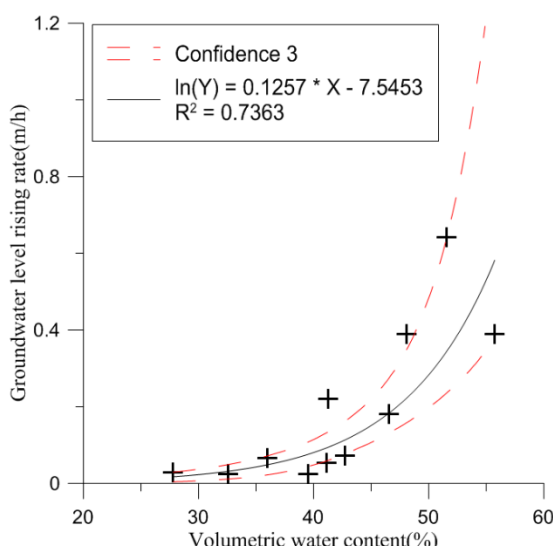


圖 16 地下水位上升速率與體積含水量關係圖

五、結論

本研究以發展飽和土層水力力學反應無線雲端監測模組，監測土層水文及運動量，後續可結合具嚴謹力學及通用性之水力力學耦合邊坡穩定分析，預測邊坡依時性反應，作為相關防災作為啟動之準據。研究提出以長期水位觀測資料，建立場址地下水位升降與降雨前土壤狀態及降雨特徵關聯。

本文介紹土層反應無線監測模組研發、現地測試及初步資料應用，主要成果彙整如下：

1. 現有以 IoT 架構為主之雲端無線監測模組已可連結應用於物聯網之微機電感測及傳統感測器，結合無線通訊與雲端儲存顯示技術，可即時監測現地雨量、地表傾角、土中分層濕度及孔隙水壓之監測模組，形成分佈式土層感測網路。
2. 由台 20 線 52k+150 處長期連續監測成果顯示，量測值與現地破壞表徵吻合，相關成果顯示監測模組可有效量測表層土壤水文與變位反應。
3. 地下水位與降雨統計分析結果顯示

，崩積層水位上升門檻雨量於短延時降雨需達 60 mm，隨著降雨延時增長，觸發地下水位開始上升之所需累積雨量減少，且延時越長所需累積雨量越少；累積雨量越多，上升高度越高。

4. 監測結果顯示，地表的體積含水量對崩積層地下水位上升速率有極大的影響，表層含水量越高地下水位上升速率越快。

參考文獻

1. 邱永芳、黃安斌、饒正、李瑞庭、陳志芳、何彥德，「全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試 (4/4)」，民國 100 年，交通部運輸研究所。
2. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯，「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)」，民國 106 年，交通部運輸研究所。
3. 張文忠、蕭涵、陳志芳、謝明志，「邊坡表層土壤即時無線感測模組研發與現地測試」。港灣季刊，第 111 期，2018 年，20-35 頁。
4. 青山顧問有限公司，「台 20 線 52K+150 路基保護工程委託地滑調查、測量及設計服務工作監測總成果報告(修正一版)」，民國 107 年，交通部公路總局第五區養護工程處。
5. 謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、洪芯琦、邱心彥，「公路土壤邊坡滑動無線感測網路監測系統研發」，民國 108 年，交通部運輸研究所。
6. 曾文傑、謝明志、陳志芳、張文忠、黃安斌、周仕勳、洪芯琦、邱心彥，「公路土壤邊坡崩塌監測系統維護及模組功能提升」，民國 109 年，交通部運輸研究所。

7. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y., "Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides Through Pore Pressure Profile Measurements." *Soils and Foundations*, Vol. 52, No.4, 2012, pp.737-747.