

計畫編號：106 保發-11.1-保-01-06-001(4)

坡地淺層水力力學反應無線感測模組研發
Development of wireless sensing module
for coupled hydro-mechanical responses in
surficial zone of slopes
(期末報告)

執 行 單 位：國立成功大學

執 行 期 間：106 年 01 月 10 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人：張文忠 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 106 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

坡地淺層水力力學反應無線感測模組研發

摘要

由於地球暖化致使近年氣候異常，長年統計資料建立之經驗法預警常須修正，解決方式為提供即時性的監測並搭配合適之分析法進行預警系統之建立，提供決策者即時資訊並依此進行決策，近年嵌入式電子系統發展日趨成熟與便宜，微控制器提供使用者串連各類感測器與通訊模組形成物聯網之架構，並可將大量數據推送至雲端進行儲存與顯示，本研究自主研發基於物聯網技術之邊坡淺層滑動智慧無線感測模組，期望解決山區邊坡監測不易與點位有限之局限，模組即時感測之數據用以監測邊坡水力與力學反應，並導入水力力學耦合分析之解析架構，以精進現有經驗法預警技術，作為智慧雲端化水土保持管理系統之感測端先導研究。

關鍵詞：淺層邊坡破壞、智慧雲端感測模組、水力力學耦合分析、即時監測

Development of wireless sensing module for coupled hydro-mechanical responses in surficial zone of slopes

Abstract

Owing to the climate change, traditional empirical-based warning framework based on statistical distribution of weather pattern requires frequent revisions. To improve the limitations of rainfall-based slope warning system, an early warning framework that integrates the hydro-mechanical slope analysis and smart wireless sensing module for surficial ground response monitoring is under development. The proposed system aims to establish a customized, time-dependent warning framework with real time cloud computing and display for shallow slope failures triggered by rainfalls. The procedure is based on infiltration analysis and unsaturated soil shear strength. To adopt the procedure, a real-time, wireless sensing module using the internet of things (IoT) technology is developed. The development framework can provide government agency and engineers more reliable information to protect the life and properties.

Keywords: slope failure, wireless sensing module, coupled hydro-mechanical analysis, real-time monitoring

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	IV
圖次.....	V
第一章 緒論	1-1
1.1 研究背景	1-1
1.2 研究目的	1-3
1.3 計畫目標	1-4
第二章 研究方法	2-1
2.1 水力力學解析法於淺層非飽和邊坡破壞	2-1
2.2 現地土層滲透係數反算	2-8
2.3 坡地無線感測模組	2-10
2.4 雲端運算顯示平台	2-12
第三章 無線感測模組研發與率定	3-1
3.1 坡地淺層水力力學反應無線感測模組	3-1
3.3 無線模組控制架構	3-9
第四章 無線感測模組現地測試成果	4-1
4.1 無線模組現地配置與安裝說明	4-1
4-2 模組現有測試監測成果說明	4-5
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻.....	附錄-1

表次

表 3.1 雨量計率定結果	3-10
---------------------	------

圖次

圖 1-1 地表邊坡預警監測系統.....	1-4
圖 2-1 非飽和土壤結構示意圖	2-2
圖 2-2 氣水交界面之表面張力現象.....	2-2
圖 2-3 衍伸莫爾-庫倫破壞準則	2-3
圖 2-4 剪應力與基質吸力之破壞包絡線.....	2-4
圖 2-5 無限邊坡水力力學耦合穩定分析示意圖.....	2-6
圖 2-6 壓力水頭與破壞包絡線.....	2-7
圖 2-7 深度 0.75 M 體積含水量變化及依時預警概念	2-7
圖 2-8 典型土壤之非飽和土壤特性曲線.....	2-8
圖 2-9 具備開放原始碼特性之開發版.....	2-11
圖 2-10 THINGSPEAK.COM 即時資料顯示頁面示意圖	2-13
圖 3-1 研發智慧型無線感測模組示意圖	3-2
圖 3-2 智慧型無線感測模組外構.....	3-2
圖 3-3 WEMOS LOLIN32 (摘自 WWW.WEMOS.CC)	3-3
圖 3-4 WCDMA(3G)模組-SIM5320E	3-4
圖 3-5 LoRA 模組(摘自 WWW.CDEBYTE.COM).....	3-4
圖 3-6 時鐘與數據儲存模組	3-6
圖 3-7 電容式含水量計	3-7
圖 3-8 CATNIP 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係.....	3-7
圖 3-9 SCA103T 傾斜儀.....	3-8
圖 3-10 傾斜儀類比電壓比例輸出標定	3-8
圖 3-11 雨量計 (摘自 HTTP://WWW.JETEC.COM.TW).....	3-9
圖 3-12 雨量計率定配置	3-10
圖 3-13 雨量計率定成果	3-11

圖 3-14 模組韌體程式流程圖	3-12
圖 4-1 監測設施平面配置圖(公路局五工處提供)	4-2
圖 4-2 B-B 剖面圖(陳世達等人, 2008)	4-2
圖 4-3 以特製鑽桿鑽掘至預計埋設深度	4-4
圖 4-4 確保無線模組外構保持水平	4-4
圖 4-5 模組架設完成	4-4
圖 4-6 現地監測模組架構與位置	4-5
圖 4-7 ID03 體積含水量監測資料	4-7
圖 4-8 ID05 體積含水量監測資料	4-7
圖 4-9 測站傾角監測結果	4-8

第一章 緒論

1.1 研究背景

台灣受造山運動影響導致地質脆弱之坡地分佈廣泛，且颱風與地震發生頻繁，整體天然環境因素導致坡地崩塌無法避免。山區邊坡崩塌主因為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且降雨引致之邊坡破壞具有一定之延時與前期徵兆，使得此類災害之預警較為可行且易發揮成效。本研究針對邊坡可能遭遇之淺層崩塌破壞研發與解析法搭配之無線感測土層反應模組，發展坡地淺層水力力學反應無線感測模組，並利於相關單位對此類災害預警及管理之參考。

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

現有對於降雨引發崩塌之評估方法可概分為經驗法與解析法兩種。經驗法為根據以往崩塌資料及崩塌的內在因素與外在誘因，歸納出簡易的關係式，作為崩塌潛勢評估與預測，如以累積降雨量或降雨強度為基準發佈土石流警戒燈號即為典型之應用。現有坡地治理常用以降雨特徵作為預警指標，少數案例已引進地表震動與位移監測，但並未將地形效應、地質特性及場址入滲行為一併考量。但是由於地球暖化致使近年氣候異常，降雨強度大幅提升驅使致災性破壞增加，長

年建立之經驗法無法將此類型災害含括在內，且以大區域降雨作為指標時，無法考慮場址微氣候特性。且因降雨為地滑發生之間接指標，而警戒值多由過往案例統計而得，缺乏嚴謹之力學概念且不足以應付氣候變遷下之破壞類型，導致預警系統常流於過於保守或無法提供反應時間。

解析法為以嚴謹的學分析為基礎，考慮地形幾何、地質構造、水文特性、及地質材料力學行為之影響，探討崩塌機制發生原因、過程與影響範圍，其流程具有通用性與客觀性，雖然此類分析需有詳細現地調查與土層資料，且其分析過程複雜，但其對於改善特定場址預警精度、建立依時預警模式、與減災設施規劃等有極高潛力。無論進行經驗法與解析法邊坡預警模式建構，均需有充分之監測資料，而山區邊坡常因交通不便且區域廣大，且須依不同破壞類型及觸發機制，於特定位置觀測不同物理量，使得現有監測系統有其侷限。

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

1.2 研究目的

本研究目的為發展坡地淺層水力力學反應無線感測模組，自主研發佈設於地表之監測模組，解決山區邊坡監測不易與點位有限之侷限，並使感測模組無線化、自動化及雲端化，達到遠端即時監測之目的，後續可結合考慮耦合反應之邊坡穩定解析法，進行水力力學耦合(coupled hydro-mechanical)邊坡滑動分析，預測邊坡依時性反應，作為無線土層反應監測模組佈設及制定警戒值之依據，以精進現有經驗法預警技術，並作為智慧雲端化水土保持管理系統之感測端先導研究。

在多數邊坡穩定的問題中，水為最重要的觸發因子，降雨入滲不但會增加土坡的下滑力，減弱材料特性，在非飽和邊坡還會因基質吸力減少使剪力強度下降，因此水與土壤之耦合特性於邊坡穩定問題中不可或缺。經驗指出絕大部分因降雨而導致之崩積層坡地崩塌屬於淺層破壞(Cascini et al. 2010; Fannin et al., 2005)，破壞面深度約在 0.5 至 3m 之間，覆土壓力在 5 至 25kPa 之間。

研究採用東京大學發展之簡易坡地淺層監測之概念(Uchimura et al. 2008)(如圖 1-1)，但改為土壤入滲行為量測與地表變位量測，結解析法預測，發展坡地淺層水力力學反應無線感測模組。東大之監測系統為於邊坡表層監測土層滑動引致之地表傾角及淺層土壤含水量，於潛在滑動邊坡佈設數個量測點，各點間以無線傳輸方式將資料傳至監測主機，由遠端人員進行判讀並進行相關分析，該系統已於日本及中國進行數個場址測試並取得初步監測成果，但其佈設昂貴，且佈設點位多靠經驗，尤其資料判釋應用仍有改善空間，因此較適於大型高風險場址監測與學術研究。

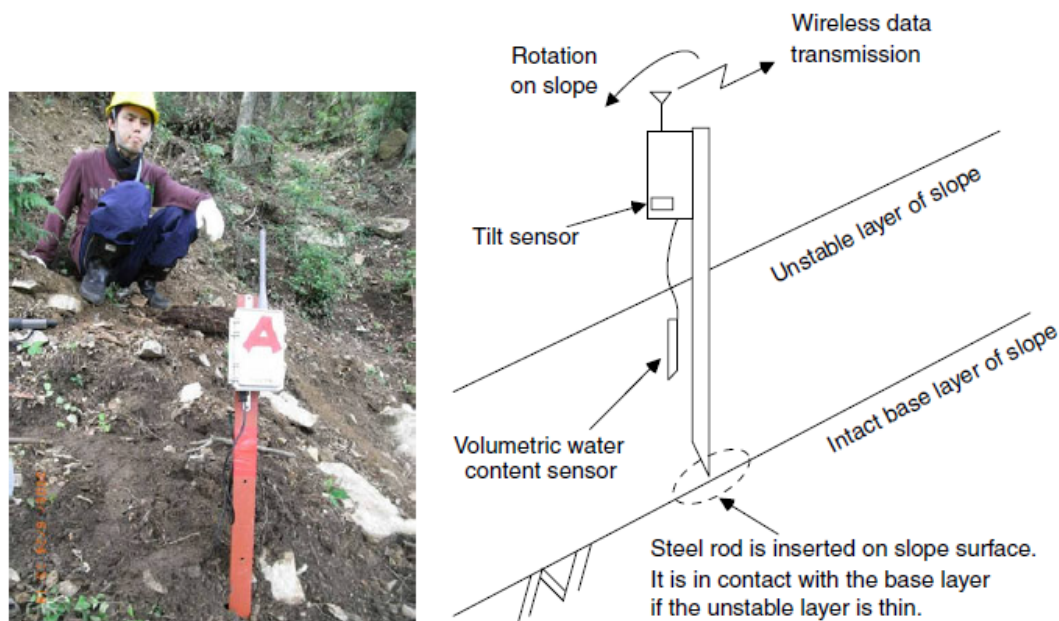


圖 1-1 地表邊坡預警監測系統 (Uchimura et al., 2008)

本研究採用廣為應用於消費性電子產品及醫療器材之微機電系統 (Micro-electromechanical system, MEMS) 感測器，利用開放式(open source)微控制器(Micro Control Unit, MCU)進行硬體整合，並導入區域與全域通訊模組，客製化具無線網路通訊功能且可監測邊坡水土保持有關之物理量，本年度整合包括地表傾角、土中分層含水量、降雨量等不同監測模組，藉由多點佈設單點匯集之通訊概念，形成分布式淺層土壤水力與力學反應感測網。由於此類電子產品可大量生產因此可大幅降低成本，所開發監測模組具有模組化、客製化、低成本且可快速安裝之特性。監測之結果回饋邊坡破壞觸發機制研究與發展預警模式，作為開發可快速佈設且具力學理論之破壞預警模組，作為相關防災作為啟動之準據。

1.3 計畫目標

本計畫之主軸為開發低單價、易安裝且具即時連續觀測功能之邊坡水土保持無線監測網路，無線監測網路主要組成包括感測元件

(sensor)、微控制器(MCU)、通訊單元及雲端主機，此三部分以韌體進行整合，另外還包括附屬之外構、電源及接收端，計畫規劃以兩年時間，達到下列目標：

- (1)導入物聯網中無線感測技術，發展山區邊坡近地表土層水力反應與力學行為觀測技術，精進水土保持技術與深化學理依據。
- (2)提供淺層崩塌機制基礎研究與研發解析法預警模式。
- (3)研發不同無線感測模組，並整合為無線監測網路，達到分佈式即時監測之目的。

針對本年度(106 年)研究之內容與項目說明如下：

- (1)研發適合山區分布式水力力學反應監測之感測模組之軟硬體整合，發展適於本土之水土保持遠端觀測技術。
- (2)選定適合之淺層滑動場址一處，佈設監測網路並進行現地連續測試。
- (3)發展相關資料處理程序及搭配監測之預警模式。

第二章 研究方法

本計畫研究方法包括：(1)解析法與數值模擬於淺層邊坡穩定之分析架構建立、(2)物聯網(IoT)無線感測模組軟、硬體開發及(3)雲端即時顯示運算平台建置。初期將以解析法進行水力力學耦合方法分析淺層邊坡穩定性，探討淺層邊坡穩定性與特徵物理量之關係，建立相關學理基礎與釐清預測所需重要參數，作為物聯網(IoT)無線感測模組之發展標的，後續整合相關電子元件、感測模組整合為無線感測模組，使邊坡監測系統可更便利安裝，並符合解析法架構下之物理量監測，同時結合雲端即時顯示運算平台，以即時回傳之監測值進行解析法下淺層邊坡穩定分析。

2.1 水力力學解析法於淺層非飽和邊坡破壞

台灣山麓地區經常可見堆積之崩積層或階地堆積層，而當崩積土層位於山區地下水位以上時，此區域降雨前屬於非飽和土層範圍，因此非飽和土壤之水力與力學特性對淺層非飽和邊坡之穩定性有密切關係。

非飽和土壤組構包含固(土壤顆粒)、液(孔隙水)、氣三相如圖 2-1 所示，應力狀態變數包括：(1)總應力 σ 、(2)空氣壓力 u_a 與(3)孔隙水壓 u ，以 $(\sigma - u_a)$ 為淨正向應力(net normal stress)， $(u_a - u_w)$ 則為基質吸力(matric suction)。Fredlund and Rahardjo (1993)將氣水交界面定義為第四相，並稱之為收縮膜(contractile skin)。氣水交界面上之分子所受到一不平衡之液體內聚力(圖 2-2a)，收縮膜便產生一表面張力使之平衡，收縮膜之受力情形如圖 2-2b 所示，其中 $u + \Delta u$ 即為孔隙氣壓 u_a ； u_w 為孔隙水壓； T_s 為表面張力； R_s 為收縮膜之曲率半徑，由 Kelvin

之毛細模型公式推導出式(2.1)：

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.1)$$

上式之 $(u_a - u_w)$ 為收縮膜上氣相與水相之壓差，即為基質吸力。

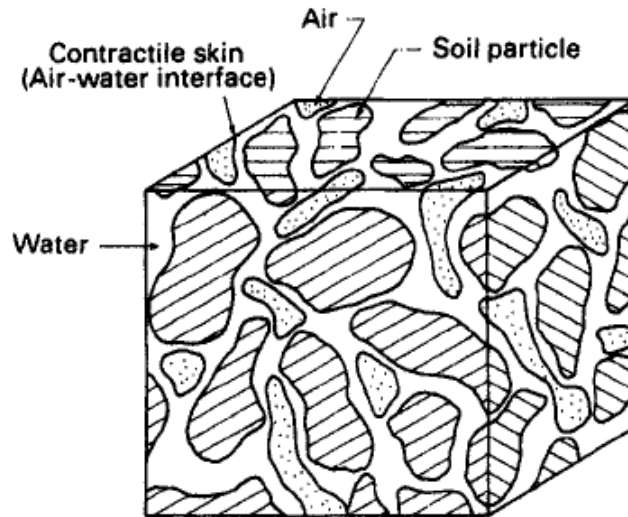


圖 2-1 非飽和土壤結構示意圖(Fredlund and Rahardjo, 1993)

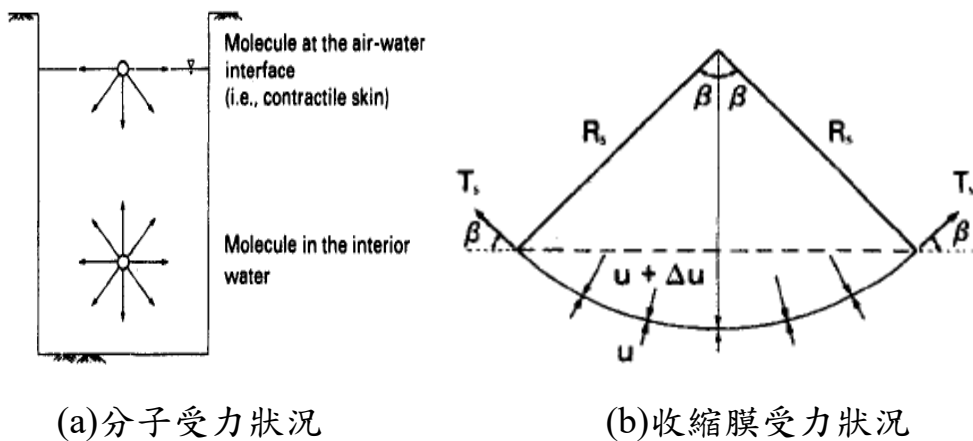


圖 2-2 氣水交界面之表面張力現象(Fredlund and Rahardjo, 1993)

Fredlund et al. (1978)將淨正向應力與基質吸力兩獨立之應力狀態變數，提出衍伸莫爾-庫倫破壞準則(extended Mohr-Coulomb failure

criteria)，非飽和土壤抗剪強度(τ_f)如式(2.2):

$$\begin{aligned}\tau_f &= c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b + (\sigma - u_a) \tan \phi' \\ &= C + (\sigma - u_a) \tan \phi'\end{aligned}\quad (2.2)$$

式中 c' 與 ϕ' 分別為非飽和土壤有效凝聚力與摩擦角， ϕ^b 為基質吸力所提供之剪力摩擦角； C 稱為視凝聚力(apparent cohesion)，為有效凝聚力與基質吸力項之加總，其示意圖如圖 2-3 所示，圖 2-3 為以剪力、淨正向應力與基質吸力繪製之三維圖，而圖中存在一破壞包絡面與所有破壞莫爾圓相切，剪力強度隨著淨正向應力線性遞增，基質吸力亦有相同趨勢。

Gen et al. (1988)以冰凍土進行多階段非飽和直剪試驗，結果則顯示剪力強度與基質吸力為非線性遞增關係，意即 ϕ^b 非為定值；Fredlund et al. (1995)之試驗結果如圖 2-4， ϕ^b 隨基質吸力增大而漸小，Oloo and Fredlund (1996)發表此非線性關係之原因在於當土壤達到殘餘含水量趨近於飽和時，其基質吸力對於土壤剪力強度之影響將可忽略，對於原坡角大於土壤有效摩擦角之非飽和邊坡，原由基質吸力提供之剪力強度將因降雨入滲而喪失，致使淺層非飽和邊坡趨於不穩定。

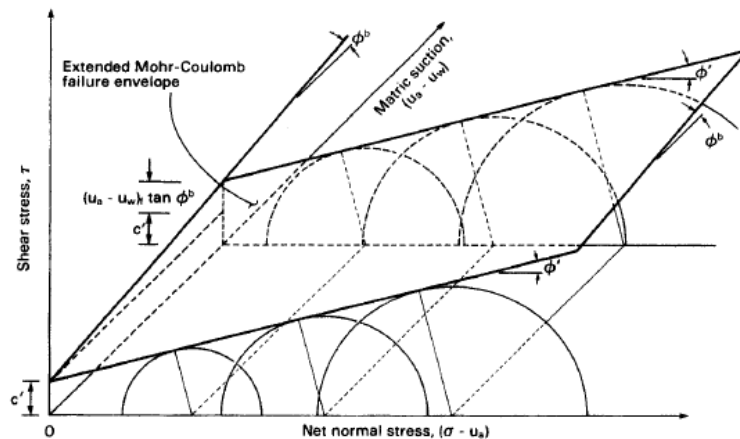


圖 2-3 衍伸莫爾-庫倫破壞準則(Fredlund and Rahardjo, 1993)

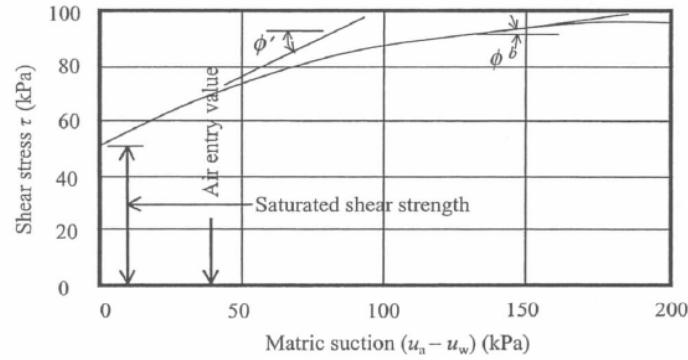


圖 2-4 剪應力與基質吸力之破壞包絡線(Fredlund et al., 1995)

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

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，而土壤含水量為基質吸力函數(土水特性曲線)，因此非飽和滲透(percolation)中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動控制方程式可依質量守衡的原理推導建立，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的地下水流控制方程式，Freeze and Cherry(1979) 假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在一均質、均向土壤內之三維流體流動之控制方程式可以 Richard equation 表示，以總水頭的形式表示為：

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

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

力水頭)隨時間之變化。

在自然邊坡中，若入滲率大於飽和滲透係數(k_{sat})，無法入滲之降雨會沿著邊坡表面流動，使邊坡表面之壓力水頭為零，故分析中上邊界之邊界條件並非以入滲率控制，而是以壓力水頭控制。滲透使非飽和之土層隨時間增加而漸趨飽和，導致細顆粒土壤的基質吸力減少，使其剪力強度下降。

由基質吸力與含水量的關係可推估淺層非飽和邊坡剪力強度，降雨入滲時土層含水量上升且 ϕ^b 下降，忽略土層飽和度增加下土壤單位重變化，原有下滑力不變，但非飽和土層剪力強度降低，當淺層非飽和邊坡承受之剪應力大於剪力強度時將產生破壞，由此一概念可做為預警機制的基礎。

Collins and Znidarcic (2004)提出對於飽和邊坡而言，因無滲透發生，因此在不考慮邊界毛細現象之情況下降雨對邊坡穩定沒有影響，但對非飽和邊坡而言，滲漏對邊坡穩定有顯著的影響，邊坡內孔隙水壓分佈會隨著水向下入滲至土壤內而改變。因此在分析非飽和邊坡穩定性時，須將非飽和土壤之基質吸力對剪力強度影響及滲流力列入考慮。參考 Collins and Znidarcic (2004)降雨下之無限邊坡穩定分析之概念，可推導無限邊坡之水力力學耦合穩定分析。

考慮一坡角為 β 之無限長邊坡(如圖 2-5)，地下水位面位於 d_w 處， W 為自重， N 及 S 分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力， d_{in} 為入滲深度，假設邊坡破壞會發生在臨界深度 d_{cr} 處。切片內飽和部分($z \leq d_{in}$)以有效應力進行分析，土壤單位重為飽和單位重，在土壤飽和部分會產生平行坡面滲流，水力梯度為 $i_h = \sin \beta$ ，垂直向滲流由入滲造成，水力梯度 $i=1$ ；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，其基質吸力之大小隨深度改變，即

$$h_c = d_w - z。$$

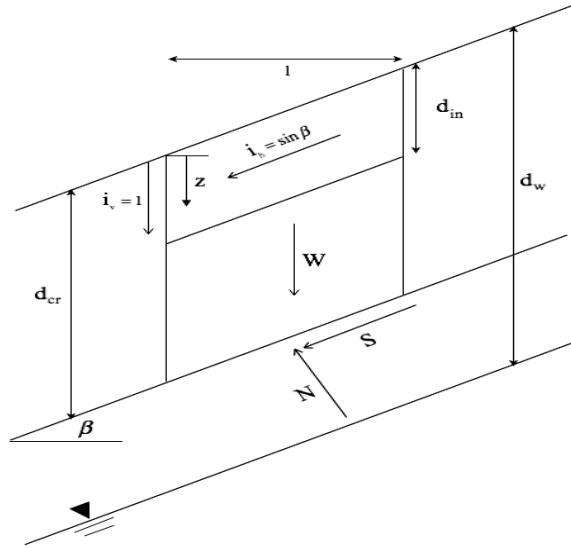


圖 2-5 無限邊坡水力力學耦合穩定分析示意圖

在極限平衡狀態下並代入衍生莫爾-庫倫破壞準則與安全係數為 1(FS=1)，其臨界破壞深度如式(2.4)所示：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \phi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.4)$$

式中基質吸力水頭隨深度的分佈 $h_c(z)$ 可由 1-D 入滲流分析解得，代入式(2.4)進行迭代計算得到 d_{cr} ，圖 2-6 為一場址之壓力水頭依時變化與場址破壞包絡線，在 0.75m 深度，以公式 2.4 推估之破壞過程體積含水量依時變化如圖 2-7 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 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，不同階段預警值亦可由圖 2-7 推估。

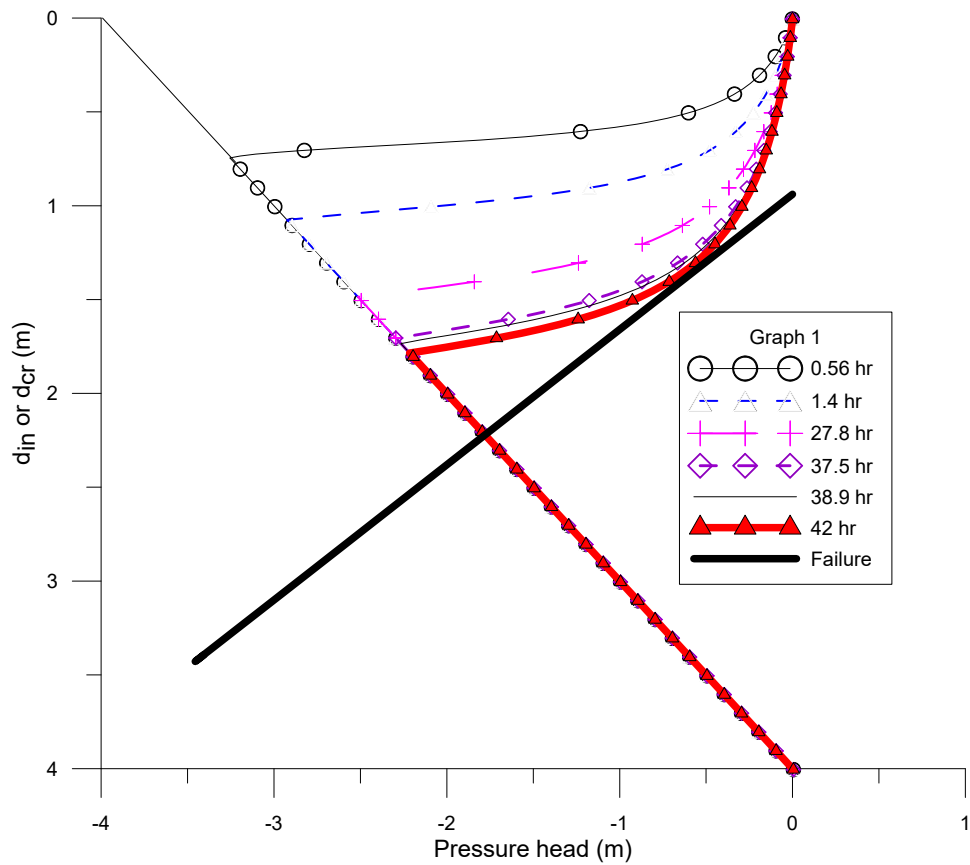


圖 2-6 壓力水頭與破壞包絡線

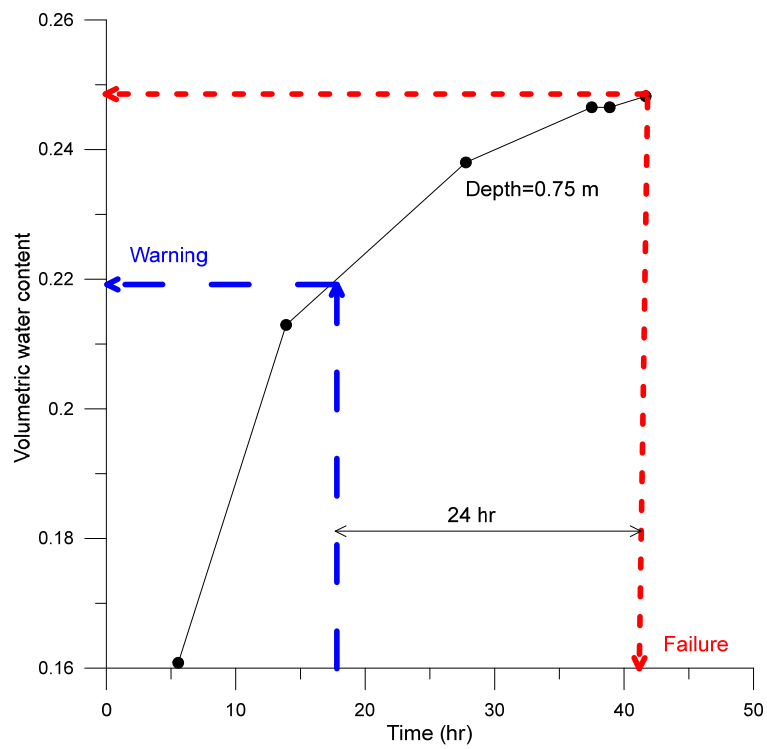


圖 2-7 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念

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，為具依時特性之滑動機制，而入滲行為與土壤分層含水量改變由無線模組進行量測。

2.2 現地土層滲透係數反算

對於淺層非飽和邊坡而言，其非飽和條件下之滲透係數尤其重要，由前述水力力學耦合解析法之分析，降雨時邊坡土壤基質吸力因入滲造成土層含水量上升、基質吸力下降為此類型邊坡破壞之主要機制，而降雨期間邊坡土壤基質吸力依時性反應將與邊坡破壞之時間有密切關係。

圖 2-8 為 Collins and Znidarcic (2004)提出之典型土壤非飽和土壤特徵曲線，由圖中可發現，對於非飽和土壤而言，體積含水量上升時基質吸力下降且滲透係數隨其增加而上升。

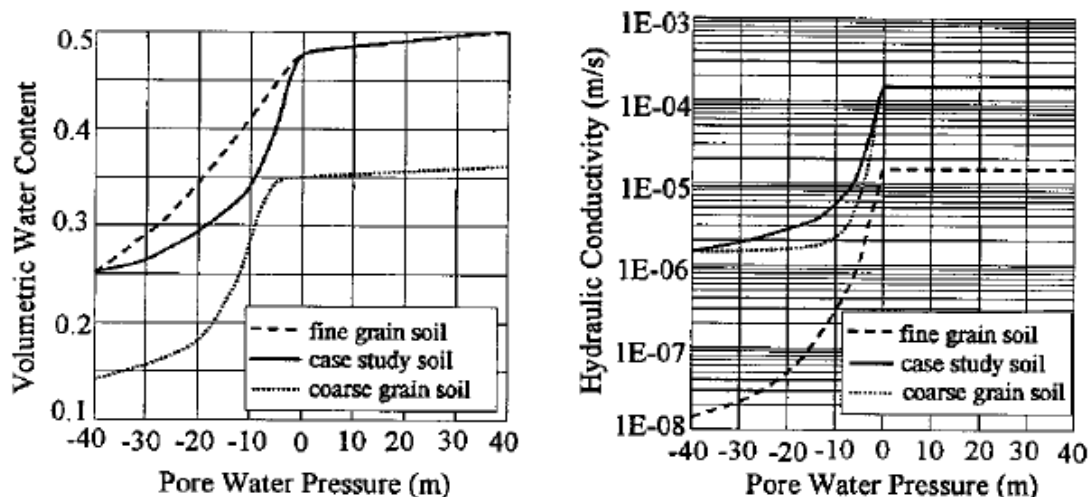


圖 2-8 典型土壤之非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

由監測成果推估現地之非飽和土壤特徵曲線，增加現場土層滲透係數之可靠性。Hamilton et al. (1981)以即時剖面法(Instantaneous profile method)量測非飽和土壤參數，施加一定水頭使水分於水平土柱中產生滲流，期間不考慮位置水頭之影響，並於土柱各剖面架設壓力計，觀測土壤基質吸力之行為。若忽略滲透吸力，且孔隙氣壓為大氣壓力，則孔隙水壓之絕對值即為基質吸力，而體積含水量係利用SWCC由基質吸力轉換而來。發展出一套非飽和土壤滲流係數之計算過程。期間假設水僅在垂直方向發生入滲，無地表水平滲流，且非飽和壤中之氣象壓力維持一大氣壓。

本研究以即時剖面法觀念修改現地水頭分布，發展基於現地含水量剖面變化推估現地入滲參數，取現地土層深度位置 z_1 和 z_2 ，則在連續時刻 t_1 和 t_2 期間通過土層單位截面積之水總體積，根據質量守恆將等同於 z_1 到 z_2 間土壤體積含水量之變化總量如式(2.5)，其中 θ_w 為體積含水量； A 為土層單位截面積。

$$V_w = \int_{z_1}^{z_2} \theta_w(z) A dz \quad (2.5)$$

又通過截面 z_1 之流速可以式(2.6)表示，其中 k_w 為滲透係數； i_{avg} 為土層深度 z_1 到 z_2 之水力梯度。

$$v_w = \frac{dV_w}{A dt} = k_w \cdot i_{avg} \quad (2.6)$$

由於現地情形需考慮位置水頭之影響，因此總水頭 $h_w = h_g + h_p$ ， h_g 與 h_p 分別為位置水頭以及壓力水頭，壓力水頭於非飽和土壤中為負值；於飽和土壤中為正值，非飽和土壤中之壓力水頭

取絕對值即為土壤基質吸力並以 ψ 表示。帶入水力梯度

$$i_{avg} = \frac{dh_w}{dz} = \frac{\Delta z - \Delta \psi}{\Delta z} = 1 - \frac{\Delta \psi}{\Delta z}$$

，飽和土壤 i_{avg} 為 1；非飽和土壤 i_{avg} 最大為 2，視選定深度內之基質吸力分布而定。

結合式(2.5)與式(2.6)，令單位截面積 $A=1$ ，將滲透係數 k_w 之關係式表示為式(2.7)如下：

$$k_w \cdot \left(1 - \frac{\Delta \psi}{\Delta z}\right) = \frac{\int_{z1}^{z2} \theta_w(z) dz}{dt} \quad (2.7)$$

由上述公式可得到現地不同基質吸力下其含水量變化與入滲參數，利用降雨事件前後土層各深度之體積含水量依時性剖面，由降雨事件前土壤體積含水量之初始值，假設地表土壤於降雨期間處於飽和狀態，曲線移動涵蓋之面積可視為土層之儲水能力。利用公式(2.7)及分層體積含水量監測資料，可求取土壤之入滲速率。

2.3 坡地無線感測模組

本年度計畫之重點為研發低單價、易安裝且具即時連續觀測功能之邊坡水土保持無線監測網路，無線監測網路主要組成包括感測元件(sensor)、微控制器(MCU)及通訊單元，此三部分須以韌體進行整合，另外還包括附屬之外構、電源及接收端。

本計畫以交通部運研所(2016)之邊坡淺層無線監測模組為基礎，改善其電源供應、區域傳輸網路及廣域無線模組，結合雲端顯示與儲存平台。利用與開源 Arduino 相容之單晶片處理器為監測端之微控制器，整合所需感測元件，發展不同監測目的之感測模組。本年度完成觀測降雨入滲之分層土壤水分計、地表傾角之高精度傾度儀(tilt

meter)及自記式雨量計(rain gauge)，並以可形成區域通訊網路且具長距離通訊能力之 LoRa 模組建立感測模組間及與接收端通訊，經由接收端連結現有 3G 通訊網路，將資料即時上傳雲端伺服器，使用者可以網頁瀏覽器監看，達到遠端監測之功能。

研究之關鍵為整合各類感測器與微控板發展為智慧型無線監測模組，發展以物聯網架構應用於大地工程監測之即時監測系統(Real time monitoring)，客製化具無線網路通訊功能，且可即時監測各指標性物理量，可廣於布設形成密集監測網路，期望此研究可做為下一世代監測系統之架構，以下針對使用之各類電子元件進行介紹。

微控板為單晶片的微控制器，基於開放原始碼的開發平台，允許使用者自行發展符合特別需求的模組，建構簡易輸入/輸出的控制，可進行類比/數位的量測或控制，整合 SPI、UART、I²C 與 GPIO 等通訊界面，可與不同之數位感測器/控制板進行聯結。

MCU 之選擇考慮接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於無線模組中可比喻為大腦，進行電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作。常見具備開放原始碼特性之開發版如圖 2-9 所示，包括 ATMEGA328P 晶片的 Arduino UNO，Linux 的 Raspberry Pi 與 ESP8266 晶片之 LUA、D1 等。

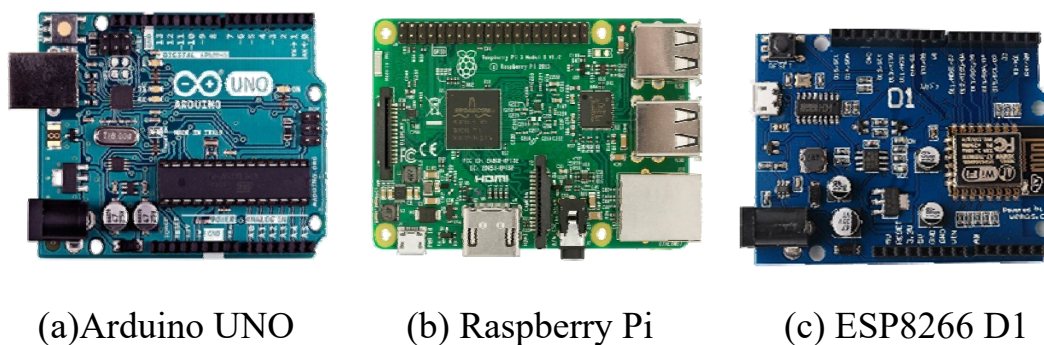


圖 2-9 具備開放原始碼特性之開發版

透過微控板可將程式邏輯帶入，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，由使用者自行設定擷取頻率或寫入特定觸發條件讓微控板進行特定動作，作為智慧型無線感測模組之基礎。

2.4 雲端運算顯示平台

為符合坡地遠端無線監測之需求，系統將現地收集之監測資料以 3G 網路上傳至雲端平台，雲端平台除可即時顯示與儲存目前監測成果外，還可以監測資料比對 2.1 節水力力學解析法進行預警，如以傾斜儀數據結合不同時間之地表變位，以分層含水量計結合場址如圖 2-7 之成果，達到依時預警之目的，供管理者或工程師進行決策。此外水力力學耦合分析需要可靠之非飽和土層水力與強度參數，現地連續監測成果可用於推估場址水力特性與非飽和剪力強度，作為修正與優化解析成果之基礎。

為達成上述需求，需架設伺服器配合網頁設計與資料庫管理整合監測數據，考慮研發成本及連結便利性，目前以 Matlab 公司所提供之免費 ThingSpeak.com 網頁伺服器，進行前述智慧型無線感測模組監測資料回傳與顯示並可於雲端後臺進行資料運算，如圖 2-10 所示。

圖 2-10 中 Field1 至 Field6 依序顯示該測站之節點編號、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量以及傾斜角，游標移至資料點上即可獲知該監測值及其量測時間，用以展示及時監測成果，而平台也提供歷史資料資料輸出功能，其副檔名為 csv 格式，可用 Excel 直接開啟。



圖 2-10 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖

第三章 無線感測模組研發與率定

3.1 坡地淺層水力力學反應無線感測模組

本年度研發之坡地淺層水力力學反應無線感測模組包括淺層水力力學監測模組及雲端雨量計，圖 3-1 為本計畫研發之智慧型無線監測模組，智慧型無線監測模組分為可連接廣域網路之伺服器及具感測與局部通信能力之客戶端，客戶端以 MCU 搭配傾斜晶片及含水量計與無線傳輸等模組，雨量計則搭配定時計數器，定時將數據傳送至現地之伺服器，推送監測數據至雲端，達到遠端即時感測(real time monitoring)目標。電池模組可透過電池與太陽能充電模組為系統提供電力，以供野外進行模組佈設，並可維持太陽照度不足時之電源持續運轉系統，圖 3-2 為智慧型無線感測模組外構與現場安裝示意圖，感測模組之架設相對傳統監測簡單、便宜與節省人力。

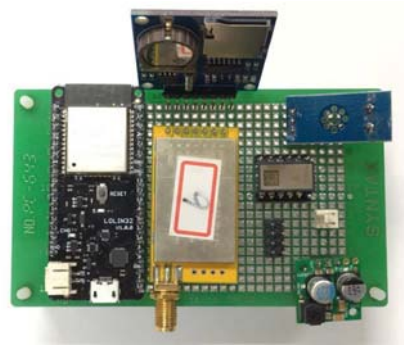
無線感測模組包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)時鐘與數據儲存模組及(4)感測器，各部分說明如下：

(1)微處理器

採用市售開放原始碼之微處理器，本研究採用 Wemos lolin32(圖 3-3)，其搭載 ESP32 晶片，240MHz 雙核微控制器，運算數達 600 DMIPS，16MB 程式設計空間，且具 34 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPT(Serial Peripheral Interface Bus)介面、一組 I²C (Inter-Integrated Circuit)介面，I²C 支援單一匯流排，最多可與 112 個結點通訊，足以應付多組模組間數位資料傳輸，以及 12 支接腳可做為類比訊號接腳，可滿足現有土層監測模組的功能需求且具擴充性。



(a)伺服器



(b)客戶端-含水量計、傾斜儀

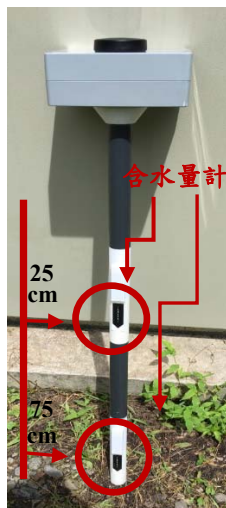


(c)客戶端-雨量計



(d)電池模組

圖 3-1 研發智慧型無線感測模組示意圖



(a)模組外構



(b)現場安裝示意圖

圖 3-2 智慧型無線感測模組外構



圖 3-3 Wemos lolin32 (摘自 www.wemos.cc)

(2)全域無線傳輸模組

近年物聯網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。為將感測網路蒐集之現地數據上傳至雲端伺服平台(如 Thingspeak)，本計畫開發於伺服器端之土層監測模組搭載 WCDMA(3G)模組(如圖 3-4 所示，晶片型號 SIM5320E)。SIM5320E 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM (Subscriber Identity Module) 卡作為用戶身分識別。SIM5320E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。



圖 3-4 WCDMA(3G)模組-SIM5320E

(3)區域無線傳輸模組

模組間區域通信採用低功耗廣域網路(long range low power wide area network, 簡稱 LoRa)無線傳輸模組(圖 3-5),此為基於 SEMTECH 公司 SX1276 射頻晶片的無線串口模組(UART),採用透明傳輸方式,工作頻段介於 900 至 931MHz 之間,可選擇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。

圖 3-5 LoRa 模組(摘自 www.cdebyte.com)

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。此模組具有軟體 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。且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。

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低功耗模式，如此便可減少無線感測模組之耗電量，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。

(4)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，本計畫研發之模組於模組本身具備資料儲存備份裝置，所用之硬體為 Deek Robot 設計生產之 SD 卡數據紀錄模組(Data logger)(圖 3-6)。當無線傳輸模組因故斷訊時，仍可藉由 SD 卡檔案備份現地監測資料。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞，所輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站節點編號、土層分層溫度及含水量、傾斜角度與即時時間，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。

此外此 SD 卡數據紀錄模組附含一 DS1307 即時時鐘 (RTC, Real-time clock)晶片，其保存年、月、日、時、分、秒資訊，與微處理器透過 I²C 序列傳輸位址與時間資訊，並備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電仍可確保時間正常計讀。

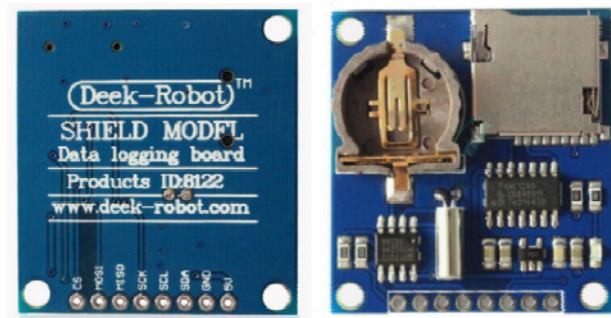


圖 3-6 時鐘與數據儲存模組

(5) 感測器模組

在消費性電子產品大量使用下，微機電系統(Micro-Electro Mechanical-Systems, MEMS)感測器近來迅速發展，其具有體積微小、低耗電、低成本以及通訊介面簡易等優點。研發之模組感測器之種類與功能說明如下：

- (a) 電容式含水量計 (Capacitance moisture sensor): 藉由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。本研究採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式含水量計(圖 3-7)，具有低成本、高解析度與高重複性等優勢。其工作電壓為 3.3V~5V，工作溫度 0~85°C，並採用 I²C 通訊介面與微控制器及周邊設備整合。圖 3-8 為 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖，試驗土壤為現地邊坡取得，土壤體積飽和度為在控制體積含水量下，固定土水比例求得，Catnip (a) 電容式含水量計具備可靠之重複性與一致性。



圖 3-7 電容式含水量計

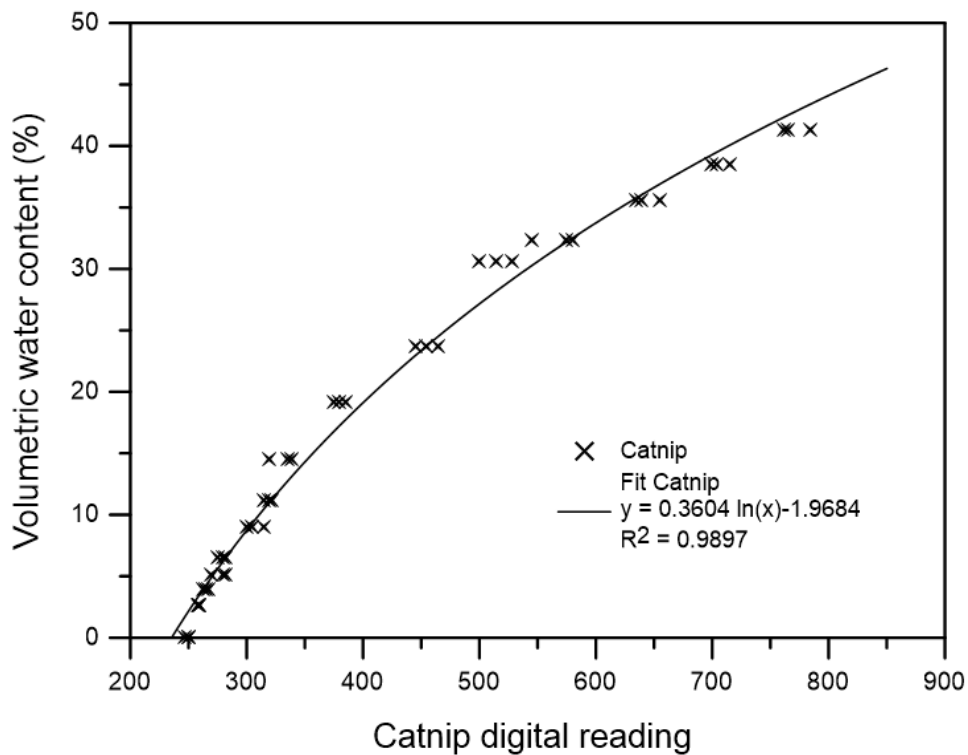


圖 3-8 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖

(b) 高精度傾斜儀 (Tiltmeter)：可量測單軸向傾斜量變化，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，提供單軸上高精度、靈敏度之傾斜角量測。本研究使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA103T-D4 (圖 3-9)，量測範圍 ± 15 度，

解析度可達 0.001 度(10Hz BW 類比輸出)，支援比例類比電壓與 SPI (Serial Peripheral Interface Bus) 數位輸出。傾斜儀固定於土層監測模組內，可長時間監測因表層土層滑移所造成之傾斜角改變量。SCA103T 透過 Arduino Uno 進行之類比電壓比例輸出標定(圖 3-10)，結果顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。



圖 3-9 SCA103T 傾斜儀

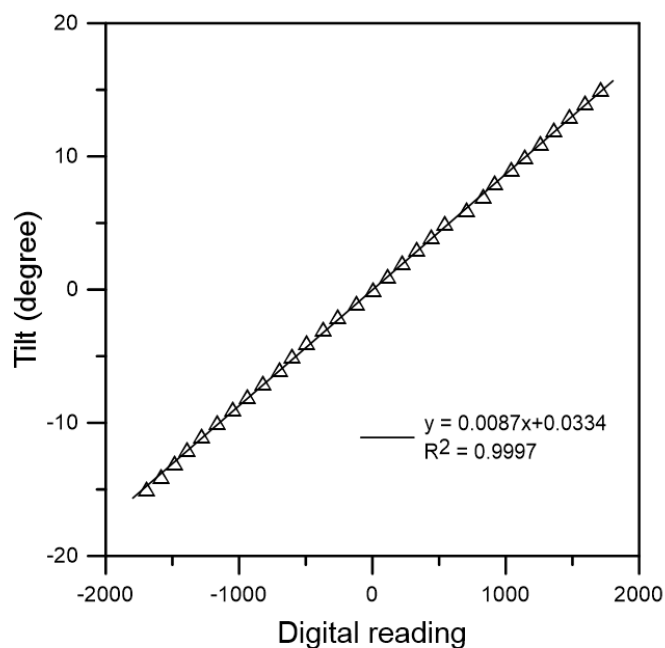


圖 3-10 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

(c) 雨量計(Rain gauge)：採用久得電子有限公司之專業級-單邊傾斗式雨量計，型號 JRP-023(圖 3-11)，解析度可選 0.2mm，透過傾斗排雨時磁簧開關產升高低電位變化，MCU 計讀 10 分鐘內電位變化次數即可得知 10 分鐘雨量。本研究利用所發展之無線監測模組，作為記錄與資料傳輸之單元，率定時之配置如圖 3-12 所示，以噴霧方式定流量噴灑於承接截面並避免溢出，由流量與讀數檢核其精度，結果如表 3-1 與圖 3-13 所示，顯示兩種時雨量下，傾斗每次傾倒累計雨量與模組設定值 0.5mm 差值皆小於 0.05mm，誤差極小，且每種雨量三次結果落點相近，顯示其具有重複性。



圖 3-11 雨量計 (摘自 <http://www.jetec.com.tw>)

3.3 無線模組控制架構

微處理器之程式流程依照時間軸大致分成：(1)伺服器端系統啟始及喚醒客戶端、(2)指定客戶端、(3)感測器與 RTC 資料讀取、(4)SD 卡資料寫入以及(5)無線傳輸，下面就各部分詳細說明，圖 3-14 為模組韌體流程圖。程式流程說明如下：

表 3.1 雨量計率定結果

試驗	時雨量 (mm)	流量(cc/10min)	傾斗每次傾倒累計雨量 (mm)
1	513.47	1732.39855	0.513
		1701.15532	0.503
		1701.15832	0.505
2	100.53	333.76802	0.464
		336.45074	0.467
		335.10938	0.465



圖 3-12 雨量計率定配置

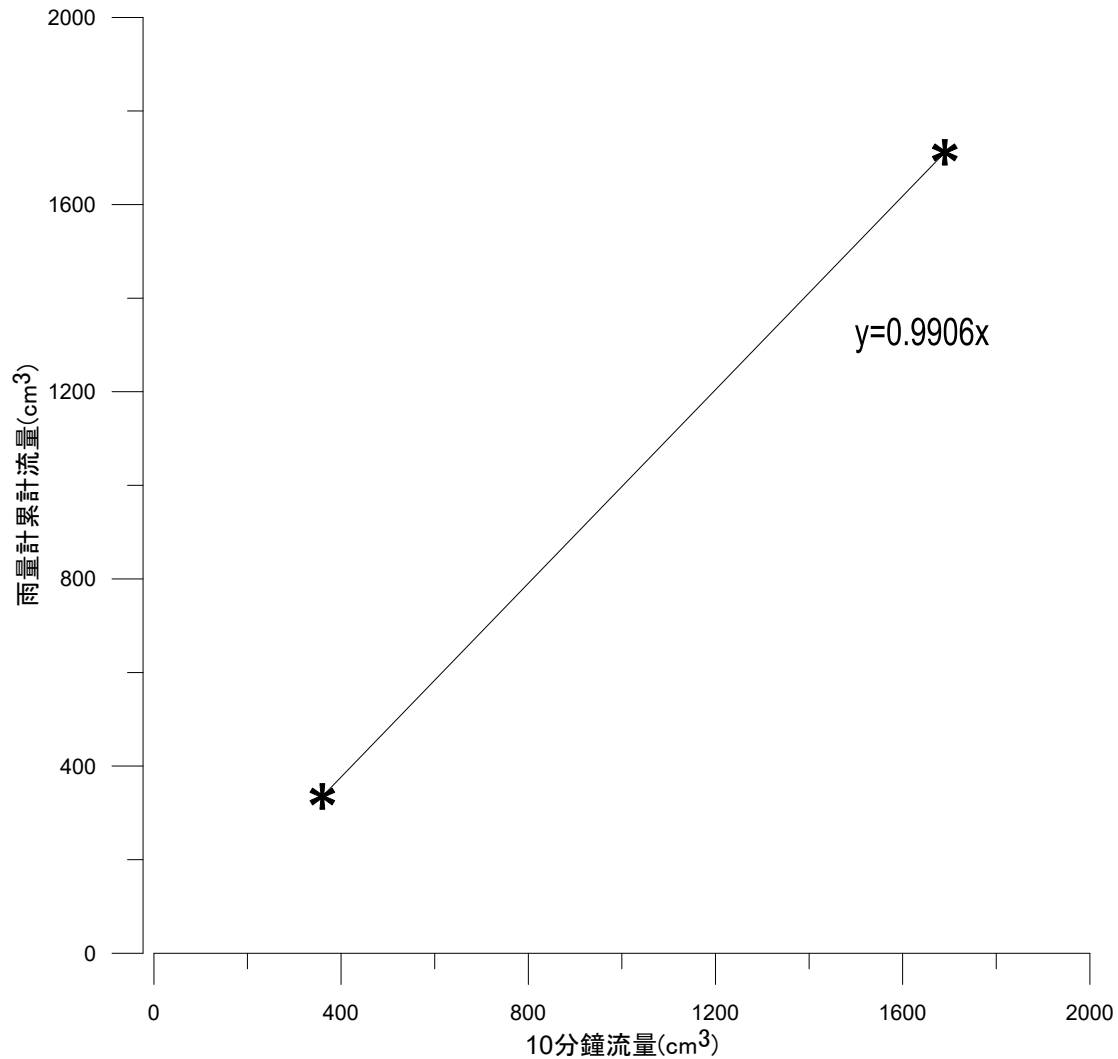


圖 3-13 雨量計率定成果

- (1)伺服器端系統啟始及喚醒客戶端：利用 MCU 內建之 Timer 到達指定時間後發送脈波至觸發腳位，使 MCU 從睡眠模式中被喚醒，伺服器端系統啟動後，則由伺服器端向客戶端發送喚醒碼，利用 Lora 模組 AUX 腳位在低功耗模式中接收喚醒碼可發送脈波觸發 MCU 從睡眠模式中被喚醒。
- (2)指定客戶端：客戶端從睡眠模式中喚醒後，進入待機模式，待伺服器端發送指定碼，每個客戶端皆有其唯一指定碼，收到指定碼後，客戶端即進行感測器與 RTC 資料讀取。

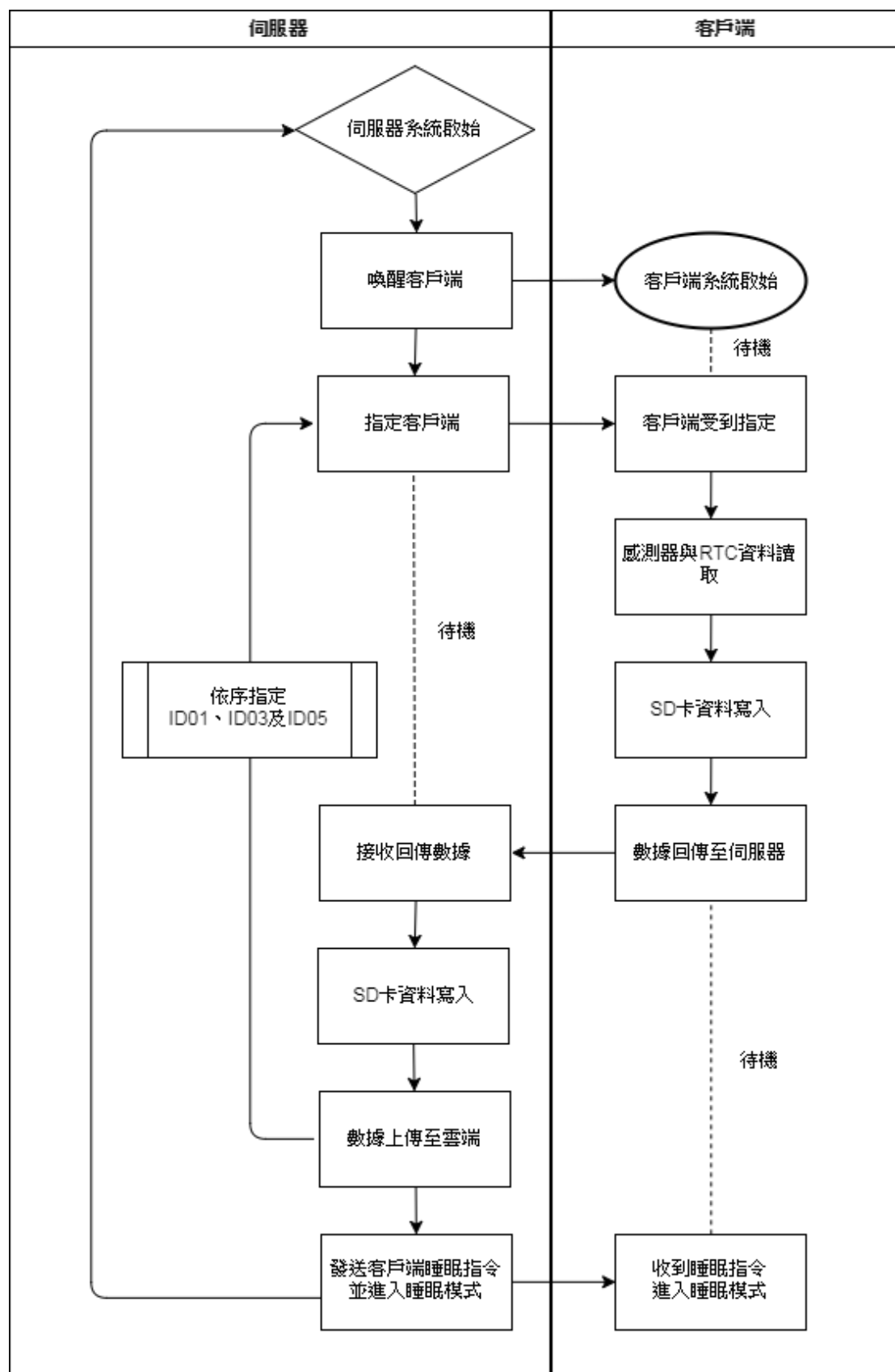


圖 3-14 模組韌體程式流程圖

- (3)感測器與 RTC 資料讀取：土壤淺層與深層含水量之 I2C 設備位址分別設置為 0x20 與 0x22，透過第 0 以及第 5 個暫存器，可讀取電容感測值以及溫度感測值，並透過率定係數轉換成體積含水量與真實溫度。傾斜儀與 MCU 以 SPI 介面傳輸，晶片選擇線(CS)接於 MCU 之 Pin15，其低電位為有效，傾斜角度經類比電壓率定係數校正後輸出。再將所有數據依節點編號、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、深層土壤溫度以及模組電壓存入字串 `datastring` 供後續處理使用。DS1307 之讀取時間函式為 `DateTime now = RTC.now()`，年、月、日、時、分、秒等時間資訊分別儲存於變數 `now.year`、`now.month`、`now.day`、`now.hour`、`now.minute`、`now.second`，為簡化日後數據處理之流程，將時間變數以格式 `yyyy/mm/dd hr:mi` 存入字串 `datetime` 中以供後續處理使用。
- (4)SD 卡資料寫入: SD 卡模組之晶片選擇線(CS)接於 MCU 之 Pin14，由 MCU 輸出低電位以選擇該 SPI 設備。建立”節點編號”.txt 後將 `datetime` 與 `datastring` 存入。
- (5)無線傳輸: LoRa 模組於安裝前經過設定統一其通信頻率，MCU 將資料以字串格式(檢查碼, `datastring`)透過一組序列線輸出給 LoRa，LoRa 間之資料無線傳輸將自動通透至伺服器端，其中檢查碼作為伺服器端擷取並拆解資料的起點，數據發送結束後伺服器端對客戶端發送睡眠指定後進入睡眠模式，客戶端收到指定後才進入睡眠模式，等候下一運作週期。

第四章 無線感測模組現地測試成果

4.1 無線模組現地配置與安裝說明

為進行淺層邊坡無線監測模組之研發測試，本計畫選定一淺層滑動測試場址，作現地安裝及系統測試，淺層滑動場址符合下列條件：

- (a) 現地為陡坡地形且為軟弱土層，具有高破壞潛勢或破壞歷史。
- (b) 區域為無線通訊網路訊號涵蓋範圍。
- (c) 具有相關地質、水文及幾何參數，與現地監測資料可供參考。

綜合考慮上述條件，選定臺 18 線五彎仔路段(里程 42K+400 至 46K+100 之間)已滑動邊坡。五彎仔地滑區，佔地約 50 公頃，為一古老之崩塌地，該地區長年來邊坡滑移嚴重，里程 45k+840 路段在民國 92 年 6 月 26 日發生了自民國 85 年賀伯風災以來，最嚴重的邊坡滑動路基崩踏陷落災害，估計路基流失長度約 150 公尺。

此場址具有地形測量、地質鑽探、地質調查、邊坡監測、地球物理探測、地下水位量測、既有擋土設施調查等工作及邊坡穩定分析成果，皆有相關資料可供參考，包括現地監測設施平面圖(圖 4-1)、邊坡剖面圖(圖 4-2)以及地質材料參數。根據上述資料顯示，此場址符合本研究之選址條件，經取得公路總局第五區工程處之同意後，選定圖 3-13 之 B-B 剖面 N4 滑動區下邊坡(破碎帶區間)，作為坡地淺層水力力學反應無線感測模組現地測試之區域，此區域於 92 年 6 月 26 日滑動後，因路線改道而未有任何整治，具有高滑動潛勢，且上游已配置深層排水井，降低因地下水位上升引致之深層滑動可能性，且現地表土為疏鬆崩積土層，具有一定之基質吸力，為進行測試之優點。

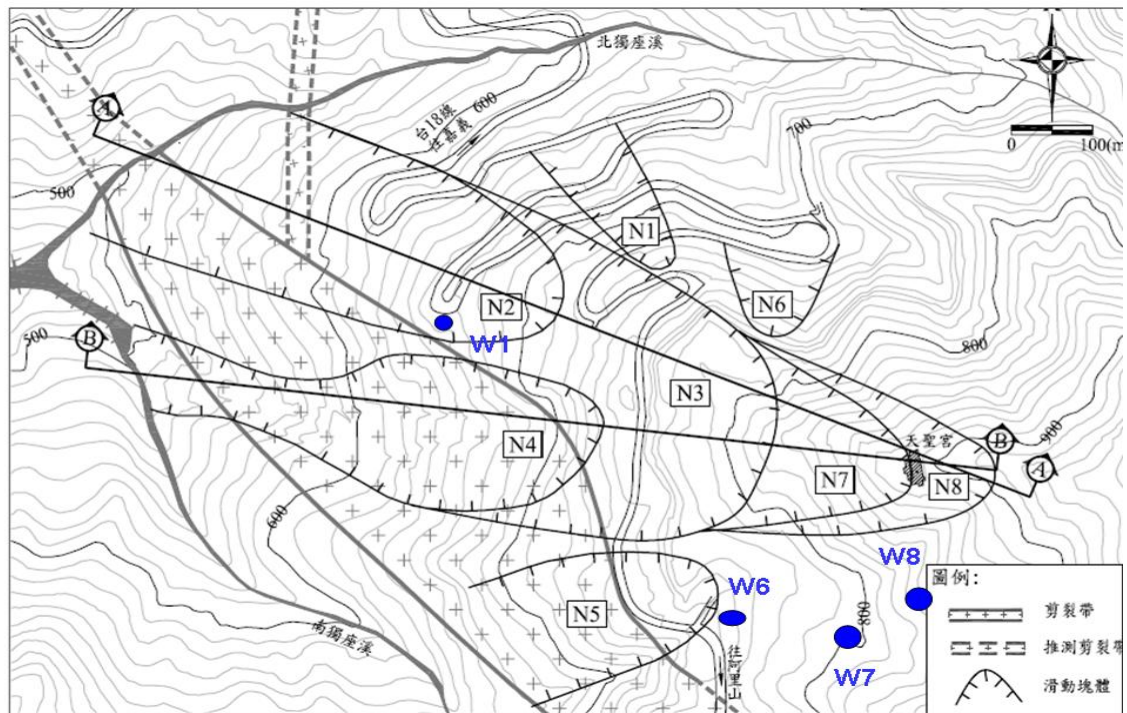


圖 4-1 監測設施平面配置圖(公路局五工處提供)

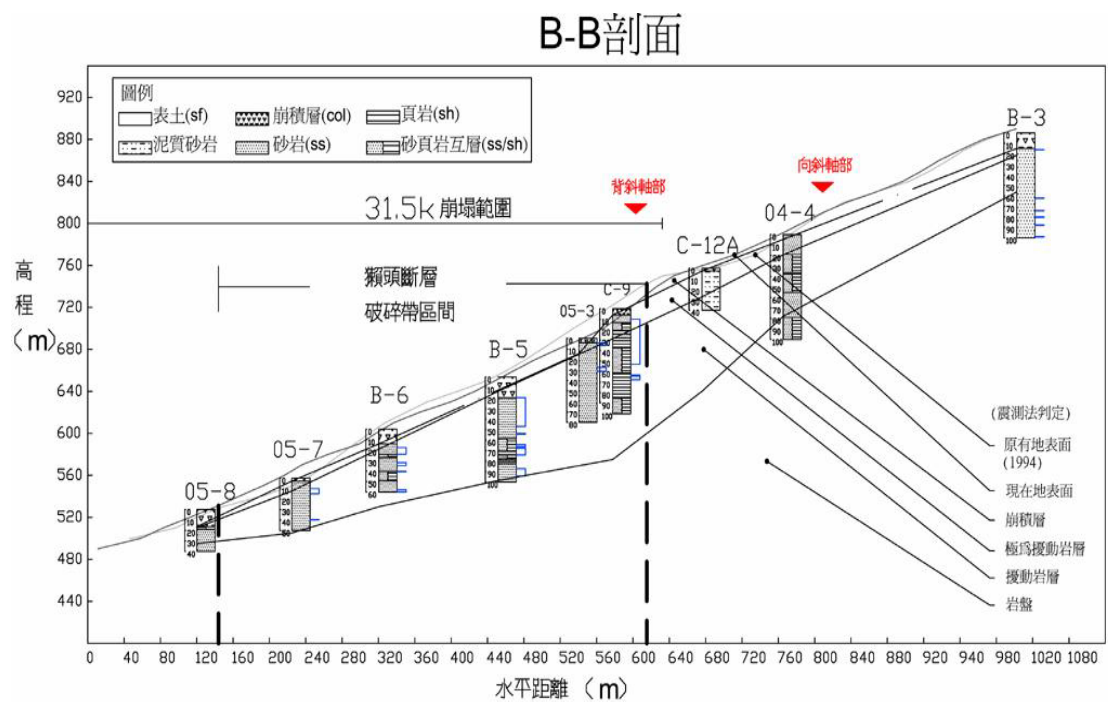


圖 4-2 B-B 剖面圖(陳世達等人, 2008)

為進行模組測試，本年度於臺 18 線五彎仔路段下邊坡裝設一組雨量計及二支淺層土層監測模組，編號分別為 ID01、ID03 及 ID05，形成監測網路，並架設一組伺服器，以 3G 無線網路進行雲端資料傳送。土層監測模組監測表層水力與力學反應，雨量計則監測現地實際降雨，後續可建立場址降雨與水力反應之關聯。

土層監測模組於安裝過程中須儘可能保持水平，以保留較多量測範圍，分析時傾斜角度須扣除初始值，另於近地表面與含水量計中間段之斷面回填皂土，避免降雨後雨水直接沿桿身介面與周圍擾動入滲，使監測成果失準。

無線土層監測模組安裝過程說明如下：

- (1)以孔徑 40mm 之電動鑽機鑽孔至預定土層深度 0.8m (圖 4-3)。
- (2)置入土層監測模組桿身，並確保監測模組外構維持水平，設置傾斜晶片初始值接近 0 度(圖 4-4)。
- (3)回填原樣土壤並稍微夯實使模組與土面緊貼，於近地表面與含水量計中間段之斷面回填皂土，避免降雨後逕流直接沿桿身入滲使監測成果失準。
- (4)重複上述步驟回填至地表，並以皂土圍繞覆蓋於桿件周圍地面，用於阻隔逕流沿模組與土壤之界面流入(圖 4-5)。

而無線感測模組之電源管理為野外進行模組設置之重點之一，研究中以太陽能板進行鋰電池模組充電，並設置太陽能充電控制器避免過充等現象，最後以矽利康封填模組防水合接線處之空隙確保整體模組水密性，現地模組架構與位置如圖 4-6 所示。



圖 4-3 以特製鑽桿鑽掘至預計埋設深度

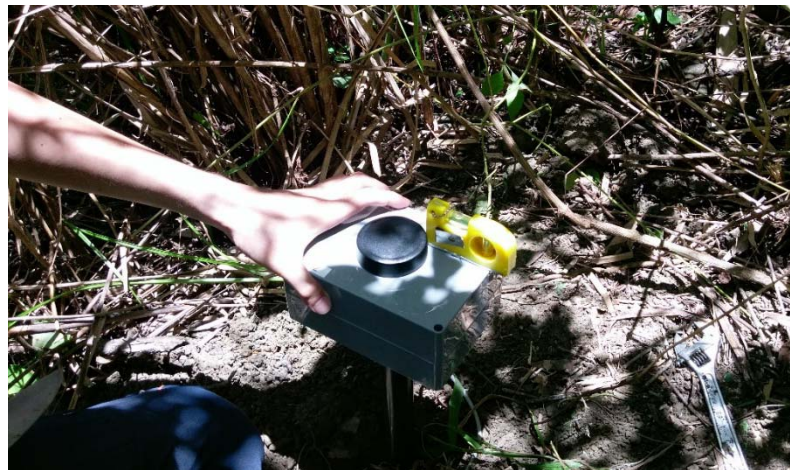


圖 4-4 確保無線模組外構保持水平



圖 4-5 模組架設完成

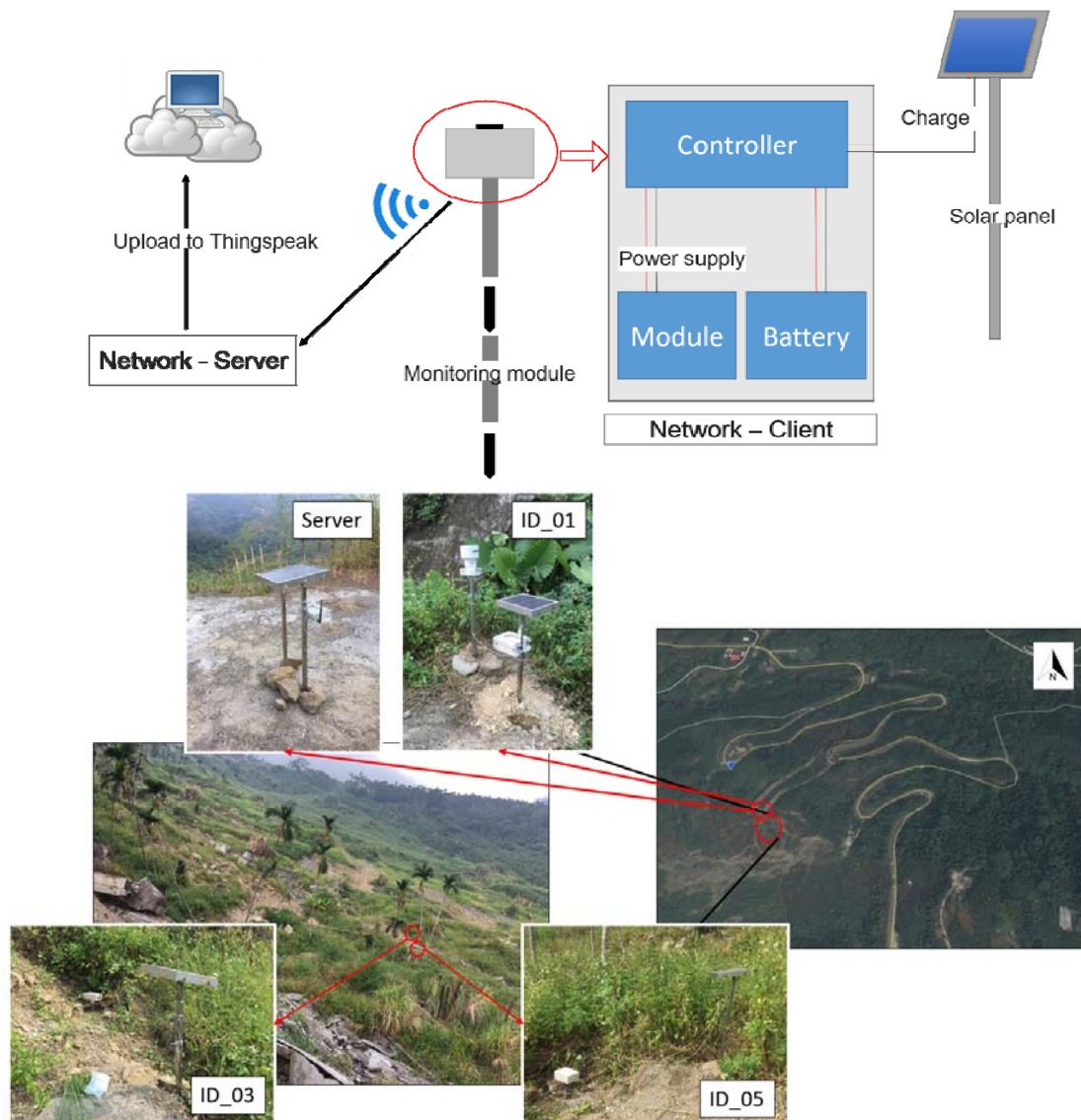


圖 4-6 現地監測模組架構與位置

4-2 模組現有測試監測成果說明

五彎仔場址之土層無線監測模組系統於 107/09/22 安裝完畢，雨量計則於 107/11/04 安裝完畢，皆可持續穩定上傳監測資料至雲端 (ThingSpeak.com) 伺服器。107/09/22 至 107/11/07 期間歷經多次降雨事件，測試期間驗證模組本身的感測器運作、電源系統與無線傳輸之功能不受天候不佳條件影響。

五彎仔地區雖有大量監測設備，但並無與所研發系統相近概念之

系統，且大部分監測均因年代較久，缺乏即時連續監測資料，使所量測資料並無可比對之系統，鄰近雖有中央氣象局龍美測站，但雨量計測試初期並無顯著降雨，因此監測資料討論僅就系統本身與環境資料進行定性說明。

以下就監測結果進行說明，分別為分層體積含水量與傾斜量之監測值，其中以中央氣象局公開之雨量資料進行比對，與本研究監測場址最近之測站為龍美測站，位於嘉義縣番路鄉公興村隆美地區私人茶園內，兩監測場址距離相近，可用於雨量計與模組量測分層體積含水量驗證與比較。但雨量計安裝完畢至 107/11/07 間無降雨事件，僅由雲端資料顯示模組仍持續運作中。

圖 4-7 以及圖 4-8 分別為 ID03 及 ID05 二測點於 107/09/22 至 107/11/07 期間之含水量監測資料，X 軸為標準時間，Y 軸為土壤體積含水量(%)與龍美雨量站每小時累積雨量(mm)之對比，每 15 分鐘量測一次，由數據顯示測站皆穩定且持續運作，而測站 ID05 之上層(深度 0.23m)體積含水量隨降雨而增加，而數據顯示從降雨事件開始至含水量抵達一峰值之歷時甚短，此與其表層滲透係數較高有關，但有限降雨事件顯示模組可即時反映降雨事件的影響。

ID03 其體積含水量變化不大，但與 ID05 深層讀數相近，此因此點位表層土壤透水性低，且量測深度較深，現有降雨事件其降雨強度不高且沿時不長，比較 ID03 與 ID05 之差異，顯示崩積土層水力性質變化劇烈。在降雨事件過後，含水量皆會在非降雨期間時逐步下降回降雨前之穩定值，顯示模組使用之含水量計測量結果具有重複性，可用做現地長期監測用途。無線傳輸模組測試期間經歷多次降雨事件，而監測成果展示無線傳輸系統之穩定性，證明系統之可行性與耐久

性。

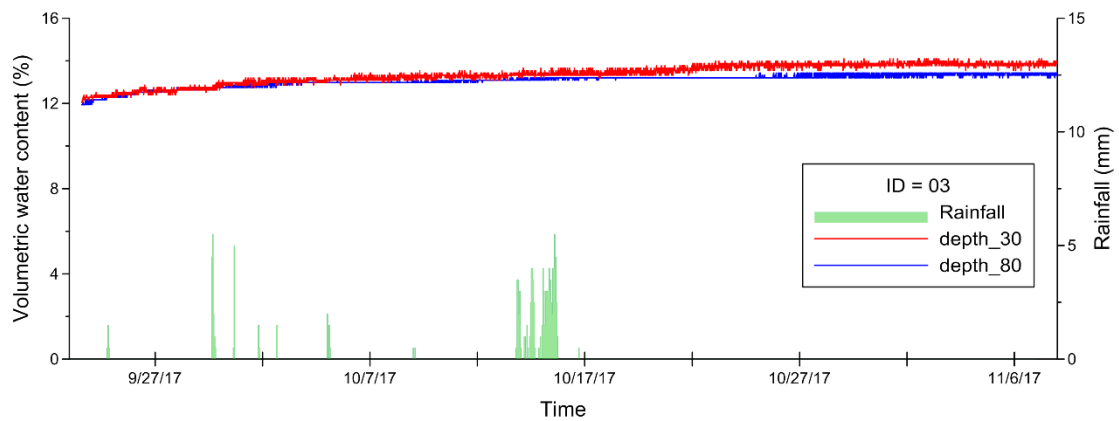


圖 4-7 ID03 體積含水量監測資料

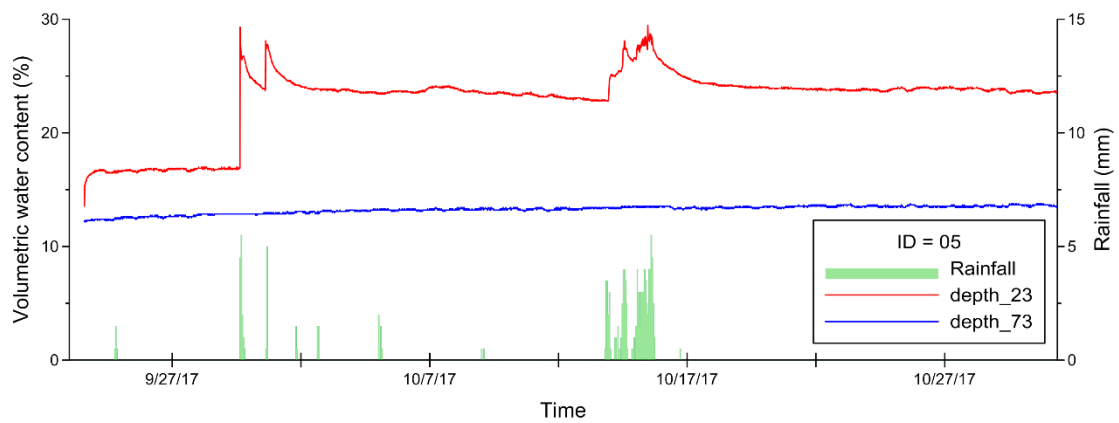


圖 4-8 ID05 體積含水量監測資料

各測點傾斜角方向與邊坡走向相同為正，反之為負，圖 4-9 為各監測模組測得之傾角變化，結果顯示五灣仔邊坡之各測站於一個月期間內有不超過 0.2 度極微幅的滑移，其方向同邊坡走向，惟傾斜角變化幅度甚小，暫無淺層邊坡滑動跡象，符合現地勘查結果。

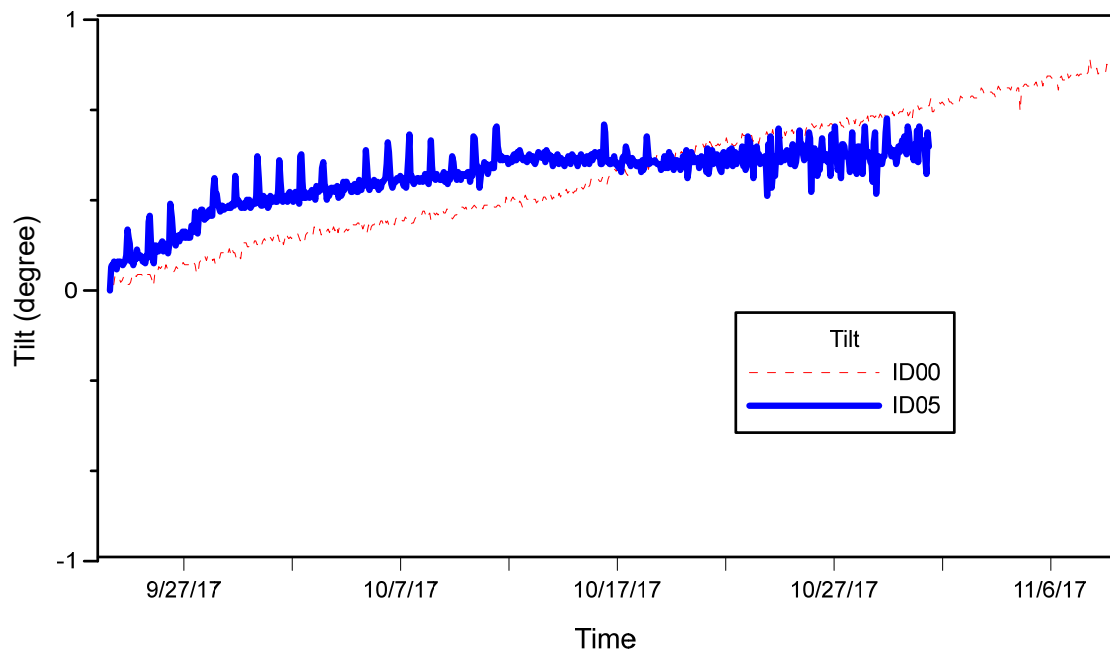


圖 4-9 測站傾角監測結果

第五章 結論與建議

本年度計畫已完成之項目包括：無線監測感測模組原型設計測試、現地無線監測網路佈設與維護優化、資料處理程序原理與應用等，計畫核心感測模組原型已主要架構，計畫書中預計三項可能能遭遇之困難已解決監測場址選擇、監測模組電源限制與通訊距離及監測主機裝設等三項課題，整體執行成果已達成原先設定，研究成果摘要說明如下：

1. 發展監測模組原型：完成具有 LoRa 區域網路及 3G 全域網路之監測模組，並有土層水力力學反應模組及雲端雨量計，模組完成實驗室標定及通訊測試，並已佈設於現場。
2. 選擇淺層滑動及土石流源頭區場址：選定阿里山五彎仔公路崩塌下邊坡為淺層滑動監測場址，並已建構解析法分析流程，據以規劃現地佈設。
3. 現地佈設並進行長期連續觀測：於 2017 年 9 月下旬完成現地佈設，計安裝兩組淺層水力力學反應監測模組及一組雲端雨量計，目前模組運作正常，並有降雨反應紀錄，現有有限成果顯示模組初步達到原先設定目標。
4. 建立資料處理程序及與回饋解析法分析：利用分層體積含水量監測成果進行現地淺層滲透係數之反算，已有成功應用案例，無限邊坡降雨水力力學耦合分析流程已建構完成，後續再導入解析法之水力力學耦合分析，計算監測場址相關穩定性之量化參數。

本年度計畫執行至今，在研究團隊努力及相關單位之配合下，計畫已依原規劃，如期完成相關工作項目與達到預期目標。針對本年度研究過程，相關建議如下：

1. 長期監測之必要性：因模組研發耗時且元件需經長時間測試，因此本年度監測時間有限，且現地設備須經耐久耐候測試，因此建議後續可持續監測，且為快速驗證其可行性，建議可增加場址數量。
2. 模組功能擴充：由於監測模組中通訊、控制與資料擷取及電源管理具有共通性，建議可針對需求發展不同監測目的之監測模組，並可配合現地施工或整合研究進行。

參考文獻

1. 楊樹榮、林忠志、鄭錦桐、潘國樑、蔡如君、李正利， “臺灣常用山崩分類系統”， THE 14TH CONFERENCE ON CURRENT RESEARCHES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING， Aug. 25-26， Taoyuan， Taiwan， 2011。
2. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). “Stability analyses of rainfall induced landslides.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130, pp. 362 – 372.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. New York, Wiley.
4. Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D. and Barbour, S. L. (1995). “The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve.” Canadian Geotechnical Journal, 32(3), pp.440-448.
5. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978). “The shear strength of unsaturated soils.” Canadian Geotechnical Journal, 15(3), pp.313-321.
6. Gan, K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988). “Determination of shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test.” Canadian Geotechnical Journal, 25(3), pp.500-510.
7. Hamilton J. M., Daniel D. E., and Olson R. E. (1981), “Measurement of Hydraulic Conductivity of Partially Saturated Soils.” Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM Special Tech. Publ. 746, T. F. Zimmie and C. O. Riggs, Eds., ASTM, pp. 182-196.
8. Oloo, S. Y. and Fredlund, D. G. (1996). “A method for determination of b for statically compacted soils.” Canadian Geotechnical Journal, 33, pp.272-280.
9. Terzaghi, K. (1936). “The shear resistance of saturated soils.” Proceedings of the 1th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 1, pp.54-56.
10. 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
11. 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.