

邊坡表層土壤即時無線感測模組研發與現地測試

張文忠 國立成功大學土木工程學系教授

蕭 涵 國立成功大學土木工程學系碩士生

陳志芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

謝明志 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員兼科長

摘要

研究以微機電系統感測器，研發具備土壤分層含水量與地表傾角量測功能之土層監測模組，結合無線通訊功能建立網路傳輸架構，於選定之監測場址形成分布式淺層邊坡感測網絡，並透過WCDMA(3G)技術即時上傳現地監測資訊至遠端伺服器，搭配太陽能電源系統，

達到系統全自動化、現地即時資訊、長期監測等目標。由含水量監測結果與雨量測站資料做比對，顯示系統可即時反應現地降雨事件。後續可結合發展完備之解析法，作為邊坡破壞預警系統之雛形，改善目前以雨量監測為指標之經驗法邊坡破壞預警模式。

一、前言

臺灣山區地勢陡峭且多有密集之經濟活動，近幾年極端氣候常態化，因此長達數月的汛期常導致大規模的邊坡災害。降雨入滲將使土壤中之基質吸力下降，進而降低基質吸力所提供之土壤剪力強度，當土壤剪力強度下降至臨界值將導致邊坡淺層滑動的發生(Fredlund and Rahardjo,1993)。

目前之邊坡預警系統係以雨量監測為指標之經驗法，作為警報發布之依據。此經驗法係根據歷史崩塌資料，及崩塌之內在因素如地形與地質，以及外在誘因如降雨強度與延時，分析其關聯

性後歸結出關係式作為預判準則，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應用。近年來受極端氣候影響，降雨特性難以預期，經驗法則較易失準或難以提供反應時間。

本研究針對邊坡較常發生之淺層崩塌破壞，研發一可即時監測地表傾角、淺層土壤分層含水量之無線土層感測模組，廣佈於具高崩坍潛勢之邊坡，用以監測現地非飽和土層之水文及運動特性，由於山區常有缺乏電力供給以及難以架設有線傳輸設施等缺點，因此結

合發展漸趨成熟之物聯網(Internet of Things, IoT)技術，採用應用於消費性電子產品之微機電(Micro-electro-mechanical system, MEMS)系統感測器，客製化具無線通訊功能且可監測地表淺層含水量及地表傾角之監測模組，以此推算土壤基質吸力，並利用土壤水份計因入滲造成土壤周圍電容值改變之特性，推算土層含水量依時性剖面與入滲速率。監測模組利用無線傳輸模組，

於佈設區域形成一分佈式無線感測網路(Wireless Sensor Network)，客製化區域性之監測系統，並應用 WCDMA(3G)等通訊技術將現地資訊即時上傳至遠端伺服器，由後台人員進行資料分析及判讀。搭配太陽能控制系統，達到系統全自動化、長期監測等目標，未來可結合發展完備之解析法，作為邊坡破壞預警系統之雛形。

二、國內外相關研究情況

2.1 表層邊坡破壞

邊坡破壞一般可由幾種方式定義，如運動方式、材料種類、崩塌機制、崩塌誘因以及滑動面深度等，當中以 Varnes(1978)之分類法最被廣為採用，其根據運動型態將邊坡破壞概分為墜落(falls)、傾覆(topples)、滑動(slides)、側滑(lateral spreads)、流動(flows)以及複合型運動(complex and compound)；依材料種類則分為岩石(bedrock)、岩屑(debris)以及土壤(earth)。其中淺層邊坡破壞行為於 Varnes(1978)之分類中與滑動(slides)較為接近。另 Renwick et al.(1982)指出，發生於土層覆蓋或具有風化岩層之崩塌稱為淺層崩塌。

若以滑動面深淺作為淺層邊坡破壞之定義，Fell et al.(2000)將破壞邊坡表面距主要滑動面之深度不超過 5m 之案例定義為淺層邊坡破壞；Santacana et al.(2003)則將崩塌深度小於 0.1 倍崩塌長度之案例稱作淺層崩塌；日本國土交

通省砂防部依據崩塌災害規模大小分為「深層崩壞」及「表層崩壞」兩類，其中「表層崩壞」定義為滑動深度介於 0.5m~2m 之間。本研究所監測之淺層邊坡破壞型態係根據張文忠與黃安斌(2016)所提出，以滑動機制作為淺層邊坡破壞分類之依據，其破壞面位於地下水位面以上之非飽和軟弱土層，且破壞原因為降雨入滲降低非飽和土層基質吸力，進而使剪力強度下降至臨界值而破壞。

Osanai et al.(2009)針對 1972 年到 2007 年間 19035 起於日本發生之邊坡破壞案例進行統計，指出 93% 的邊坡滑動由高強度降雨引致，而當中大多數為淺層滑動。案例平均滑動破壞深度為 1.2m，深度低於 2.5m 者達 90%，因此降雨引致之淺層破壞為臺灣坡地首當防範之邊坡災害型態。Cascini et al.(2010)之經驗也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，其破壞面深

度約在0.5m~3m之間，覆土壓力在5至25kPa之間。

李棹芬等人(2003)於香港大嶼山之現地邊坡裝設水壓計與雨量計進行長期觀測，比較各類型土層邊坡於降雨過程中之穩定性，其研究結果顯示(1)淺層邊坡破壞主要由中短期降雨造成之瞬時孔隙水壓所致。(2)低滲透性邊坡於較小降雨強度下，造成淺層土壤基質吸力下降與瞬時孔隙水壓上升之現象，因此容易導致淺層破壞。(3)高滲透性邊坡於低強度降雨後，基質吸力與孔隙水壓會迅速回復至初始狀態；但在高強度降雨下有發生深層滑動之可能性。

為了解降雨引致邊坡破壞的機制，以及透過水文或運動特性的前期徵兆預判邊坡破壞的發生，Tohari et al. (2007)以室內模型試驗模擬降雨入滲引致邊坡破壞之行為，其配置如圖1所示，以流量計結合灑水裝置模擬降雨，並以土壤體積含水量計紀錄水文反應歷程，結果顯示邊坡破壞皆由滲流水區域上方之近飽和土層開始，而淺層土壤飽和度達85%以上時為邊坡破壞啟動之臨界值，儘管土層孔隙仍有空氣，此飽和度足以使基質吸力降低至邊坡破壞發生的門檻，且破壞形式由淺層非圓弧滑動控制。

Cascini et al. (2010)將淺層邊坡崩塌分析分成破壞(failure)，破壞後(postfailure)與擴散(propagation)三個階段，並指出破壞與破壞後分析可以獨立進行。

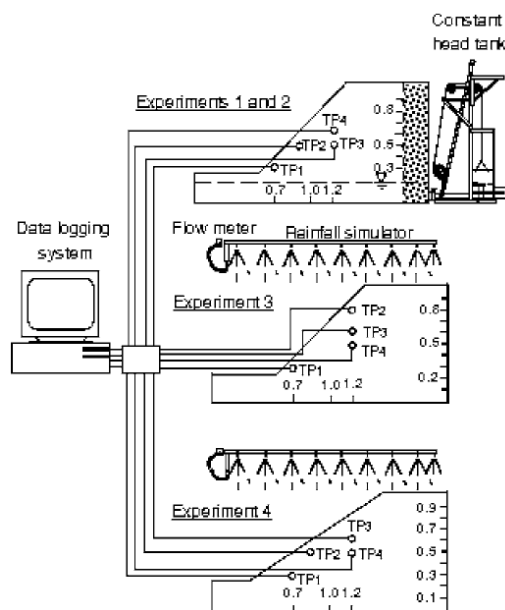


圖1 降雨引致邊坡破壞模型試驗 (Tohari et al. 2007)

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)，以 F_d 代表地層內之驅動力， F_r 為抵抗力， δ 為地層移動量，受到降雨入滲或地層內滲流水之影響，當 $F_d \geq F_r$ 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取決於地層力學性質、孔隙水壓變化以及破壞時排水狀況，大部分地滑式邊坡破壞屬於破壞時剪應力保持定值。

Collins and Znidarcic (2004) 提出非飽和邊坡中滲透對邊坡穩定有顯著的影響，孔隙水壓在邊坡內之分布會隨著水向下入滲至土壤內而改變，因此在分析非飽和邊坡穩定性時，須將非飽和土壤之剪力強度和基質吸力影響及滲流列入考慮。其於非飽和滲流下之無限邊坡穩定分析中，假設平行坡面滲流且滲流

力之方向和水平面之夾角為與坡角相同均為 β ，考慮非飽和土壤中之土壤剪力強度可以衍伸莫爾-庫倫破壞準則 (Extended Mohr-Coulomb failure criteria) 表示 (Fredlund et al., 1978):

$$\tau_f = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.1)$$

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。則其破壞深度 (d_{cr}) 可表示為:

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w h_c \tan \phi^b - \gamma_w h_p \tan \phi'}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (2.2)$$

式中 γ_w 為水單位重， h_c 虹吸水頭高， $\gamma_w \cdot h_c = u_a - u_w$ 為土壤基質吸力， h_p 為壓力水頭高，考慮土層內之壓力水頭變化，可定義出土層之穩定包絡線 (即壓力水頭和臨界破壞深度之變化關係)。

Collins and Znidarcic (2004) 將式 (2.2) 以下列邊坡土壤參數: $\beta=40^\circ$, $\gamma=20\text{kN/m}^3$, $c'=3\text{kPa}$, $\phi'=30^\circ$, $\phi^b=26^\circ$ ，計算穩定包絡線，並根據預測之壓力水頭 h_p/h_c ，計算出對應之臨界破壞深度 (如圖 2 所示)，穩定包絡線和滲流曲線交於 A 和 B 兩點 (FS=1)，A 點之破壞與滲流無關聯，而 B 點和穩定包絡線交於滲流開始後 47 小時深度 1.8m 處，B 點之破壞是由於滲流使土壤內之基質吸力降低，土壤的剪力強度下降所造成的，此可做為預測淺層破壞之依時行為之基礎。

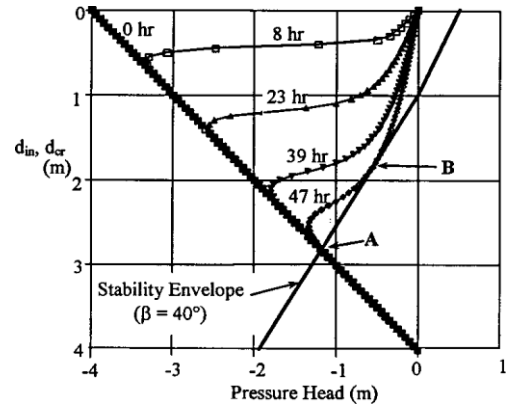


圖2 細顆粒土壤水力力學耦合邊坡穩定分析結果 (Collins and Znidarcic, 2004)

2.2 非飽和邊坡現地量測

Uchimura et al. (2008) 發表一簡易式邊坡預警系統 (圖 3)，其系統應用 MEMS 之傾斜儀與含水量計，以監測邊坡表層傾斜角以及淺層土壤之含水量，探討強降雨引致邊坡滑動之前期徵兆。各監測單元透過無線網路將監測資料回傳至遠端伺服器，由後端人員對現地資訊進行長期的監控，觀測到於邊坡破壞前數小時傾斜角有連續性之改變，同時位移期間土壤飽和度有顯著上升的趨勢。此一系統已於日本、中國等數個場址進行現地裝設與監測，為目前應用案例較多之邊坡監測系統。

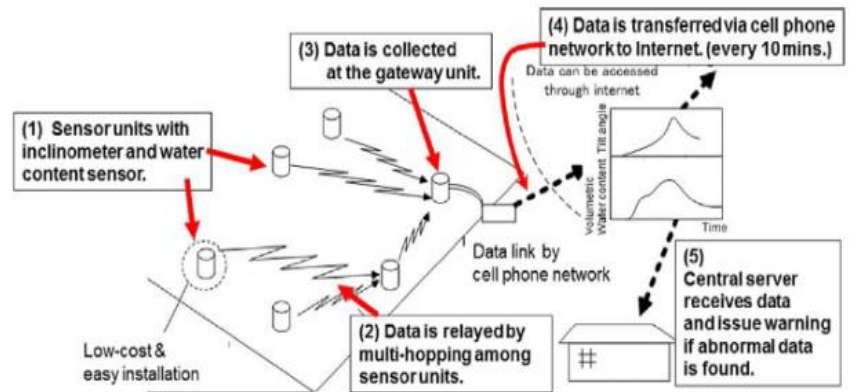


圖3 邊坡無線監測預警系統 (Uchimura et al., 2008)

Springman et al. (2013)於 Toessegg, Switzerland 一砂岩層上方之風化土層佈設一分佈式監測系統(圖 4)，並以 TDR (Time Domain Reflectometry, 時域反射技術)探棒量測介質阻抗以轉換成土壤飽和度；以張力計測得土壤基質吸力，進行兩年尺度之現地物理量觀測，並比對當地降雨事件，探討氣候與邊坡穩定性之關聯性。結果顯示於定性量測上與典型關係吻合，並可歸納出以下結論：

(1)淺層(0.15m)黏土質砂層於雨季達飽和狀態時，土壤基質吸力將趨近於零；

反之於當地旱季時體積含水量常態性低於雨季之量測值，基質吸力則顯著提升至 70kPa 以上。

(2)體積含水量隨季節週期性波動，其程度則隨土層深度遞減，因此淺層量測數據可即時反映現地氣候(雨量、溫度、濕度、蒸散)的綜合影響。

(3)以雨季和旱季時，各深度含水量對於單一降雨事件之依時性反應做比對，相較於雨季中土層維持在高飽和度，旱季時淺層含水量對於降雨事件反應劇烈，且滲流行為可從一定延時內含水量之改變顯著觀測。

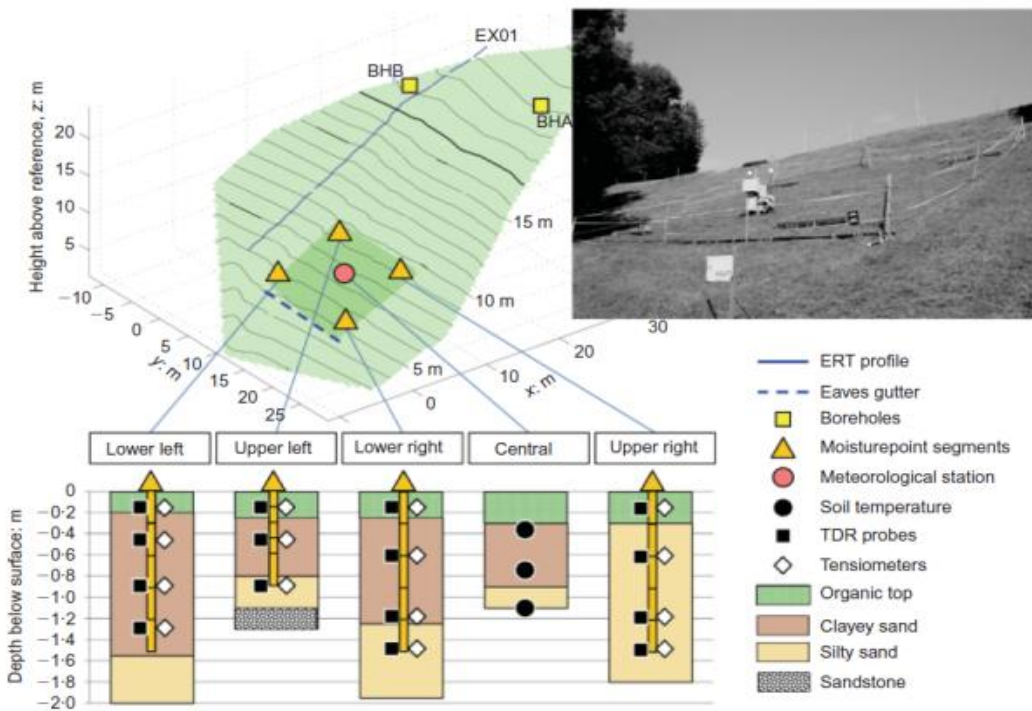


圖4 非飽和邊坡監測配置(Springman et al., 2013)

Springman et al. (2013)之現地試驗結果完整展示出該監測場址對於現地氣候之反應，且可歸結出邊坡不穩定多為

降雨入滲致使土層基質吸力降低所致，但也代表區域氣候型態對於量測資料的詮釋有極大的影響。

圖，試驗土壤於甲仙攔河堰邊坡現地取得，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，圖中可見其具備足夠之重複性與一致性。

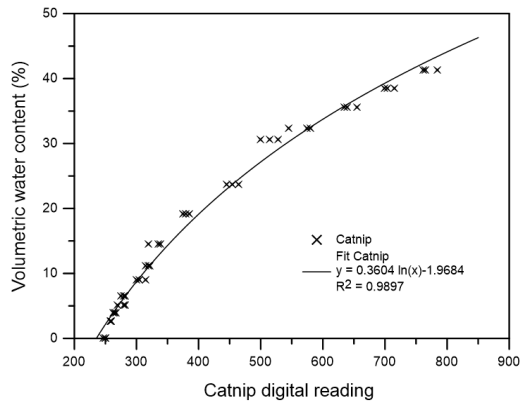


圖6 Catnip水份計數位輸出與體積含水量關係圖

研究使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之 SCA103T 高精度傾斜儀，其採用差動量測(Differential measurement)原理補償雜訊效應及誤差，因此其透過單軸上兩方向之輸出，可抵銷環境影響對於量測造成之誤差，已於車輛、航空、建築機械以及手持裝置中提供穩定的量測功能。其量測範圍±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，其透過 4 條連接線與微控制器連接，透過不同的晶片選擇線微控制器可運行多組 SPI 設備。以 SCA103T 之類比電壓比例輸出標定，其結果如圖 7 所示，顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。傾斜儀工作電壓 5V 與多數微控制器相同，可直接以微控制器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。

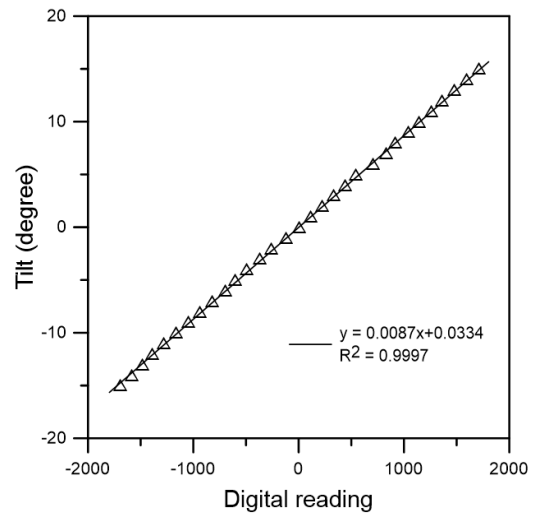


圖7 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

3.2 模組系統組成

本研究採用之無線傳輸模組、數據紀錄模組、即時時間模組以及微機電感測器，皆配置於客製化電路板，用以直接與微控制器連接，並連同電源供應模組固定於防水耐侯之電子盒中，其下方連結分佈式含水量計。透過客戶端與伺服器端建構之無線網路，以及感測器擷取之數據，可進行區域即時邊坡監控，其系統運作示意圖如圖 8 所示。

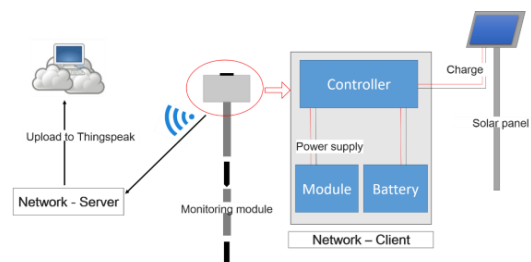


圖8 模組系統運作示意圖

其中無線土層監測模組之部分包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)數據紀錄、(4)即時時間、(5)感測器，除感測器外各部分說明如下。

(一)微處理器

Arduino 為一系列基於開放原始碼發展出來的 I/O 介面控制板，並使用 C 語言的開發環境，與電腦透過 USB 介面連結，透過 Arduino 開發之 IDE (Integrated Development Environment) 可撰寫及燒錄韌體以更改執行程序，IDE 為一整合文字編輯器 (Editor)、編譯器 (Compiler)、連結器 (Linker) 以及除錯器 (Debugger) 之整合開發環境，使其開發門檻相對於市面上其他微電腦及微處理器降低許多，同時增加監測模組功能客製化彈性。

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

(二)無線傳輸模組

本研究目的為以模組化之無線傳輸平台，於監測場址建立網路傳輸陣列收集各監測站量測數據，並透過 WCDMA(3G)無線通訊技術將現地監測資料上傳至遠端伺服器。由於邊坡滑移多發生於長延時及高強度降雨時，而水對電磁波的傳遞具有相當程度的屏蔽干擾，因此無線傳輸平台的選擇須將穿透屏蔽能力納入考量，而傳輸距離以及傳輸網路陣列則可降低中繼站數量，降低能源與成本門檻。

Digi International 公司製造的 xbee 採用低速率無線個人區域網 (WPAN, Wireless Personal Area Network)，具有多種頻段訊號發送能力，可因應環境條件選擇高頻或低頻發送訊號，低頻訊號傳輸較不受水的訊號屏蔽所影響。支援雙向傳輸，可藉此建立土層監測模組間的傳輸網路陣列，以下條列 xbee 之特點。

- (1) 傳輸距離長且穿透性佳：節點間戶外傳輸距離達 750m，且於坡地植被中穿透性佳，使監測站的佈設極為彈性，涵蓋監測區域所需之監測站數量也得以最小化，大幅降低材料成本及安裝便利性。
- (2) 支援 ZigBee 通訊協定：ZigBee 是在 802.15.4 通訊協定的標準上，加入路由和聯網功能，其特點是連線簡易、低數據傳輸率 (250Kbps) 以及低功耗 (傳輸時 63mW)，且可支援高達 65,000 個網路節點，適合家庭網路、工業自動化和醫療看護等應用，為物聯網最廣泛的協定之一。
- (3) 具有多種網路拓樸：依據不同的傳輸協議，xbee 支援如單點對多點 (Point-to-multipoint)、簇樹狀

(Cluster)、網狀(Mesh) 等多種拓樸。每個節點可以擷取資料，或傳遞來自其他節點的資料。

DigiMesh 為 Digi International 開發之無線傳輸協議，其特色為全功能節點建構之網狀網路，網路中任一節點皆可擷取資料及傳遞資料，大幅增加建構無線網路的彈性，在本研究透過 xbee 建構之網路中，每一個土層監測模組都是一個節點，因此當一個網路節點被移除或是斷訊，DigiMesh 傳輸協議另其周遭的節點可透過迂迴曲折的傳輸方式以接續到其目的地。以上可確保在少數監測站因任何因素斷訊下不致丟失監測數據，提升系統耐久性及其可靠性。倘若監測範圍超過單點傳輸距離時，也可增加節點以中繼站之方案擴展監測區域。

DigiMesh 同時具有節點深度睡眠模式供選擇，配合模組之觸發條件達到電源優化的目的。透過 Digi International 提供之模組溝通介面 XCTU，可對 xbee 進行傳輸協議、節點功能、網路參數、睡眠模式等設定。於網狀網路中，每個 XBee 裝置需要將以下兩個網路參數設定一致以彼此溝通：(1)頻道(Channel): XBee 模組之間的無線通訊頻道 (2)個人區域網路(Personal Area Network, PAN): 同一頻道內之個人網路。

Xbee 產品不同型號各自擁有不同的天線類型和功能，其中 s1 系列支援 Digi International 研發之 DigiMesh 傳輸協議。和 MCU 之間可直接經由序列埠進行資料傳遞，提升其數據傳輸穩定性，並具備一腳位供模組觸發及睡眠設置。另外 xbee 之工作電壓為 3.3V，可直接藉由 Arduino Uno 內嵌之穩壓晶片供電運

作，優化模組的空間配置及電源轉換效率。綜合上述考量，本研究以 xbee S1 pro 做為無線傳輸平台，藉此建立土層監測模組間的傳輸網路架構。

為了將感測網路蒐集到之現地數據上傳至廣域網路，作為伺服器端之土層監測模組搭載 WCDMA(3G) 模組 (SIMCOM SIM5320E)，以連結場址資訊與後台人員。SIM5320E 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM(Subscriber Identity Module)卡作為用戶身分識別。SIM5320E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境，連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。

(三)即時時間模組

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

本研究採用之 DS3231 為一低成本、高精度之即時時鐘模組(RTC, Real-time clock)，年誤差在一分鐘以內，符合土層監測模組時間精度的需求。其保存年、月、日、時、分、秒資訊，與微處理器透過 I2C 序列傳輸位址與時間資訊，並備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電仍可確保時間正常計讀。DS3232 提供兩個可設置的日曆鬧鐘和支援程式設計的方波輸出，當鬧鐘抵達設置之時間，將自 RTC 模組 Pin2 輸出一方波，搭配 Arduino Uno 進入休眠模式後可因外部訊號觸發而喚醒的機制，達到省電功能增加系統續航力。

(四)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，本研究使用 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，包括監測站節點編號、土層分層溫度及含水量、傾斜角度與即時時間，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI (Serial Peripheral Interface Bus) 進行資料傳遞。

(五)電源系統

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

系統太陽能電源控制器搭配 10W 太陽能板，其上三組接口分別作為太陽能板電源輸入端、鋰電池電源輸入端、鋰電池電源輸出端。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，充電電流最高可達 0.55A，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。

研究使用 18650 鋰電池，容量最高達 3400mAh，額定電壓 3.7V，為目前市面上能量密度最高之循環鋰電池，其高電壓輸出使其易於串接以提供微處理器之輸入電壓。土層監測模組依照現場系統空間配置可搭載 12 顆 18650 鋰電池，高電容量使土層監測模組於颱風、梅雨季時仍得以維持系統運作至少一星期。

3.3 淺層土壤監測模組

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

(一)客戶端

客戶端於 xbee 建構之無線網路中負責對伺服器端發送量測資料，量測資料皆已透過微處理器進行校正係數之率定，其發送之量測資料包括土壤分層含水量、溫度以及土層監測模組之傾斜角，並附上節點編號供伺服器端辨識訊號來源。為避免因不可抗力之因素斷訊，致使與伺服器端之連線中斷，客戶端同時備有 SD 紀錄卡作監測數據紀錄，確保數據分析之完整性，土層監測模組客戶端之成品及其系統組成如圖 9 所示。

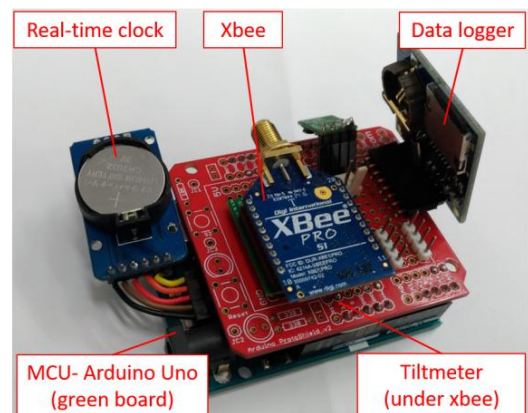


圖9 土層監測模組-客戶端

(二)伺服器端

伺服器端於 xbee 建構之無線網路中負責接收客戶端發送之監測資料，因配有 WCDMA(3G)無線通訊模組，具有和遠端伺服器連線之功能，其微處理器根據接收到之資料格式將其拆解並儲存於變數後，視使用者所需可儲存於紀錄卡，並將監測數據根據節點編號上傳至遠端伺服器，為遠端人員和現地監測情況之溝通橋樑。伺服器端具有傾斜儀以及土壤含水量計之排針接口，具備量測功能，可納入監測座標以擴展現地之涵蓋範圍，降低系統佈設成本。

(三)模組外構設計

土層監測模組外構設計(如圖 10)可大致分為三部分，各部件詳述如下：

- (1)核心防水盒:內含土層監測模組，18650 鋰電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒。核心防水盒係以市售電子防水盒加工而成，上下蓋具有O型環與溝槽，使其以螺絲旋緊後具有防水功能，防水盒下方開孔並透過3D列印之底座與PVC管黏合以連接下方含水量計外構。核心防水

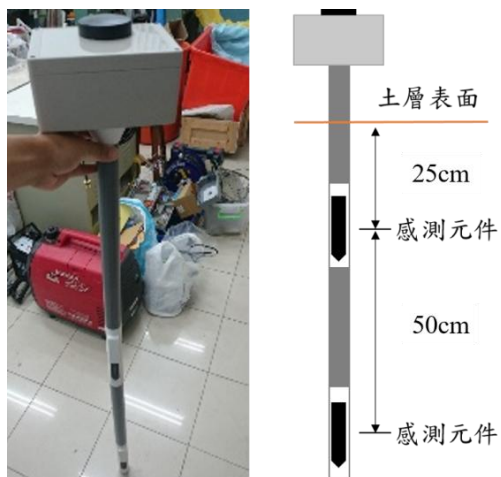


圖10 土層監測模組外構

盒開孔以裝設 2.4GHz 頻段專用之耐候型天線，透過 SMA 接頭與無線傳輸模組連結，並以矽膠封填天線與盒間縫隙。土層監測模組、鋰電池組以及供電控制器則依空間配置固定於盒內。

- (2)含水量計外構: 可裝設一只含水量計之桿件外構(如圖 11)，透過 PVC 管依需求數量進行串聯，以延伸至預計裝設之土層深度。本研究以兩只含水量計作串聯，並延伸至地下深度分別為 25 公分以及 75 公分。水份計外構將水份計之電容感測區塊暴露於外，以直接接觸待測土壤，水份計之接線處與元件位置則置入後方空間，並以電子封裝膠封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐候型外披覆 4 芯電子訊號線，殼層以 3D 列印製作以降低成本。



圖11 水份計桿件外構

- (3)太陽能板支架:本研究採用 10W 太陽能板以提升模組續航力，並可視土層監測模組之耗電情況作太陽能板輸出功率的增減。

(四)雲端即時顯示平台

近年物聯網的興起使各領域累積數據量急劇攀升，開發商也因應推出各種

IoT 資訊平台以滿足資料儲存與顯示的需求。Thingspeak 為 2010 年 IoBridge 開發用以整合物聯網應用之開源平台，除了開放程式碼供使用者作專案應用外，也開放一定量之資料讀寫功能讓使用者免費使用，並透過 API (Application Programming Interface) 作資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，因此本研究以 Thingspeak 作為系統伺服器，形成現

地監測資料之雲端即時顯示平台。

圖 12 以 NodeID=3 之 Thingspeak 頁面為例顯示場址即時資訊，Field1 至 Field6 依序顯示測站節點編號、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量以及傾斜角，游標移至資料點上即可獲知該監測值以及發生時刻，可用以監測淺層邊坡水文及運動情況之依時性的反應。

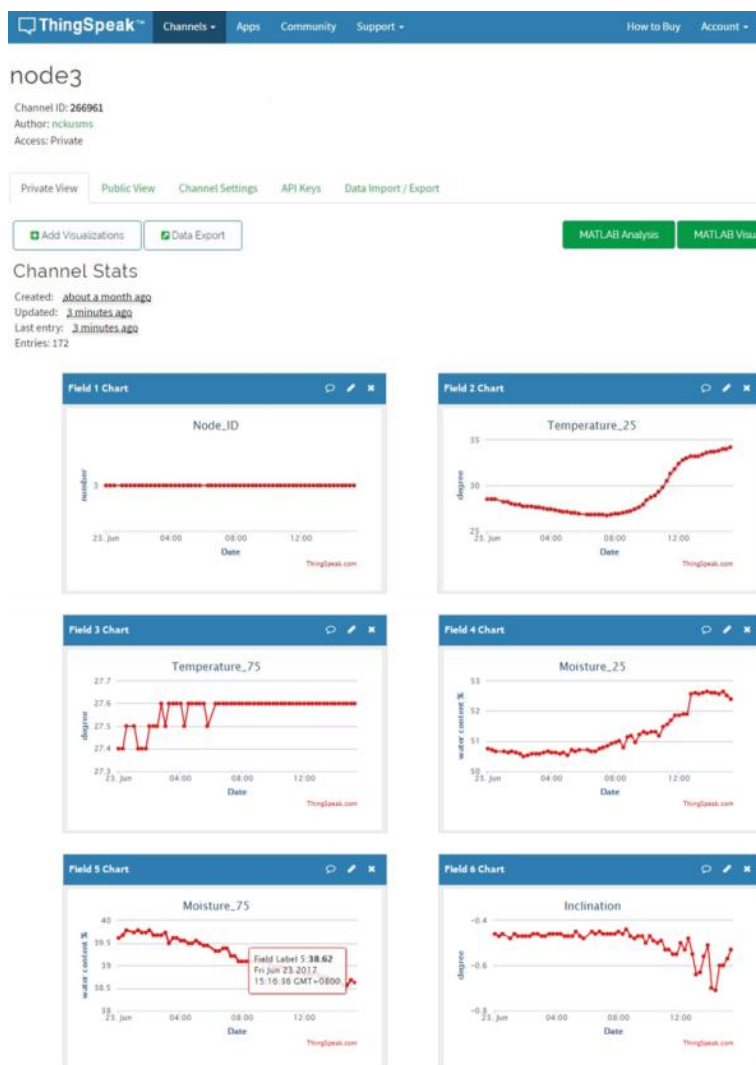


圖12 雲端即時顯示平台

四、現地測試成果

4.1 監測場址與配置

為進行淺層邊坡無線監測模組之研發測試，本研究選定甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地進行現地安裝及系統長時間測試，此邊坡曾於民國 94 年 9 月受泰利風災連續豪雨影響，聯外道路邊坡發生數次崩坍而阻斷交通，道路上、下邊坡擋土牆亦形成多處裂縫，而民國 98 年莫拉克颱風期間又導致邊坡再次坍塌。民國 99 年 3 月 4 日發生規模 6.4 甲仙地震，事後邊坡傾斜儀量測結果顯示邊坡有滑動現象，最大位移達 155mm，滑動崩塌潛勢甚高，根據「甲仙攔河堰第一

次安全評估」於上邊坡埋設四處傾斜儀之量測資料顯示，上邊坡之潛在滑動面約位於地表下 1.5m 至 4.8m 之崩積層或土岩界面。

本研究總計於甲仙攔河堰西側邊坡裝設四支土層監測模組，包括一支伺服器端(Node ID = 0)以及三支客戶端(Node ID = 1~3)，並以 3G 無線網路進行資料回傳。相對位置如圖 13 所示，土層監測模組於安裝過程中須保持水平避免造成測量誤差，另於近地表面與監測模組桿身之間回填皂土，避免降雨直接沿桿身入滲影響滲流監測成果。

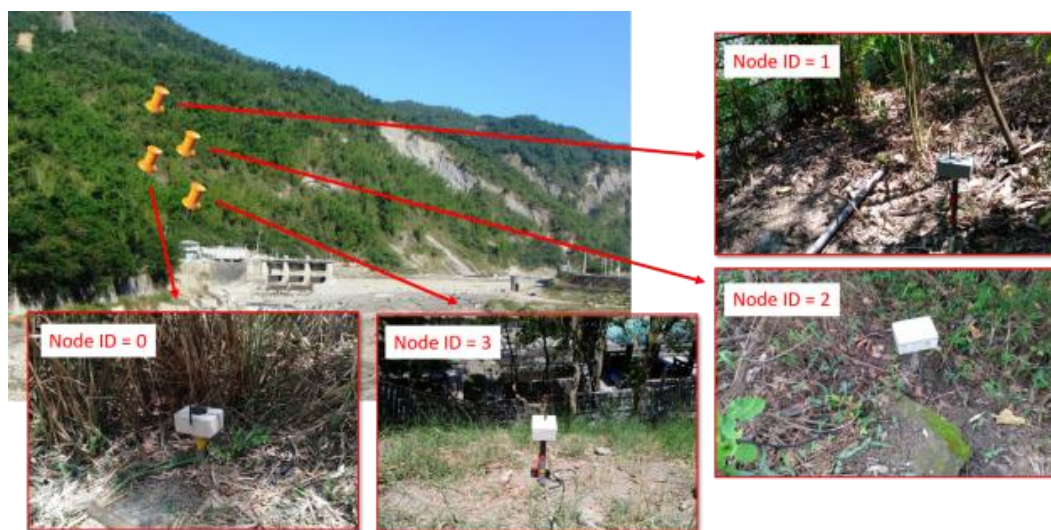


圖13 甲仙監測模組相對位置圖

甲仙場址之土層監測模組系統於 106/5/22 安裝完畢，並於 106/6/21 換上韌體優化之模組，至 106/6/23 為止仍持續穩定上傳監測資料至 Thingspeak 伺服器。106/5/22 至 106/6/21 期間歷經多次集中且長歷時之降雨事件，過程中顯示

降雨事件並不影響本研究無線傳輸系統之穩定性，同時在雨季長時間日照不足的情況下，太陽能電源系統也足以支撐土層監測模組持續運行，證明系統之可行性與耐久性，以下展示現地監測期間含水量計以及傾斜儀之量測成果。

4.2 體積含水量監測成果

由於邊坡滑移多起因於高強度長延時之降雨，因此本研究之監測資料將以雨量監測作為土層含水量比較之標的。雨量資料來源為中央氣象局公開之雨量監測結果，與本研究監測場址最近之測站為甲仙測站，其位於高雄市甲仙國中操場後方山丘，兩者相距約 3 公里。圖 14~17 分別為 Node0~Node3 於 106/5/22 至 106/6/21 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(%)，同時與甲仙雨量站之每小時累積雨量(mm)做對比。

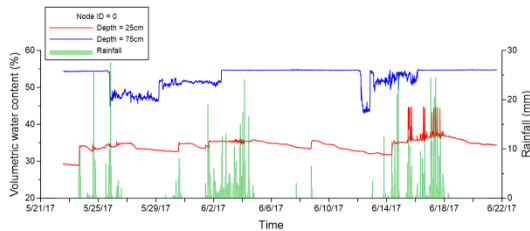


圖 14 Node0 體積含水量監測資料

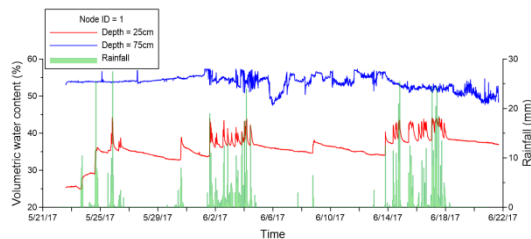


圖 15 Node1 體積含水量監測資料

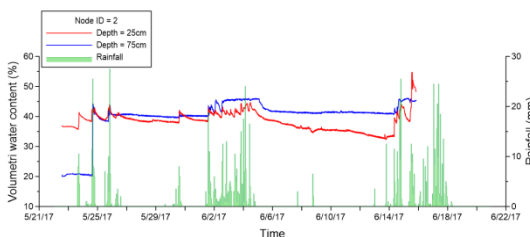


圖 16 Node2 體積含水量監測資料

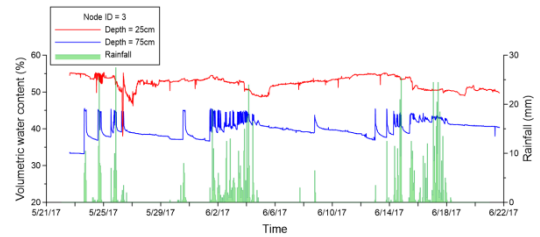


圖 17 Node3 體積含水量監測資料

由數據顯示測站 Node0 與 Node1 之下層(深度 0.75m)體積含水量穩定保持於體積含水量 55% 左右，且於降雨事件期間監測值變動幅度甚小，因此推估地表下深度 0.75m 位於地下水位附近，將 55% 視為現地土壤飽和體積含水量。土壤體積含水量監測得到下列成果：

- (1) 含水量計感測值對於降雨事件之反應敏感，上層含水量和雨量資料吻合，Node0 與 Node1 之下層含水量計長期處於飽和狀態。
- (2) 降雨事件後，含水量皆會在乾早期逐步降回初始值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測。
- (3) Node3 之含水量計反應較為反常，其上層含水量始終高於下層含水量，可能相較於其他監測點位皆位於甲仙聯外道路之上邊坡，Node3 則位於聯外道路之下邊坡，可能有路基、擋土牆等結構物影響地表下土層分布。另外由聯外道路旁之擋土牆透水孔流量甚大顯示，道路旁邊坡土層長期處於飽和狀態亦有可能影響下邊坡之地下水分布。

4.3 傾斜儀監測成果

各測站傾斜角方向之符號以邊坡順向傾向為正，逆向為負，圖 18 為各監測模組測得之傾斜角變化，結果顯示甲仙邊坡之各測站於觀測期間內有不超過 0.2 度極微幅的滑移，其方向同邊坡傾向，惟傾斜角變化幅度甚小，暫無淺層邊坡滑動跡象，此與現地邊坡呈穩定狀態相符。

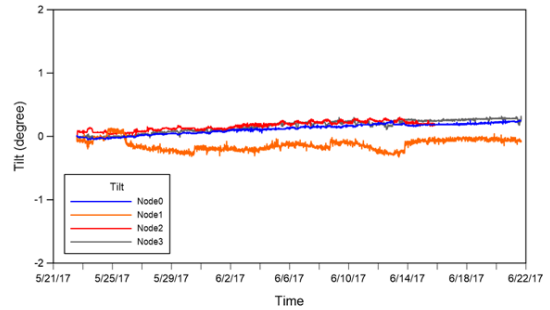


圖18 各測站傾斜角監測資料

五、結論

本研究針對邊坡較常發生之淺層崩塌破壞，自主研發一可即時監測地表傾角、淺層土壤分層含水量之無線土層感測模組，用以監測現地非飽和土層之水文及運動特性，模組結合物聯網技術，採用 MEMS 感測器，客製化具無線通訊功能且可監測地表淺層含水量及地表傾角之監測模組。監測模組利用無線傳輸模組，於佈設區域形成一分佈式無線感測網路，並應用 WCDMA(3G)等通訊技術將現地資訊即時上傳至遠端伺服器。搭配太陽能控制系統，達到系統全自動化、長期監測等目標。現地測試結果顯示：

- (1)無線土層監測模組滿足尺寸小，提供全自動化量測並於雲端即時顯示監測數據。
- (2)根據監測結果顯示，現地深度 75cm

體積含水量保持在 55%左右，應位於地下水位附近；深度 25cm 體積含水量隨降雨與非降雨期間在 30%~45% 間變化且與降雨事件吻合。

- (3)根據傾斜量監測成果，各測站傾斜角變化小於 0.2 度，符合現場勘察結果。

後續預計之研發規畫如下：

- (1)將傳統感測器如液位計、張力計整合進土層監測模組之架構中，增加指標性物理量的監測項目。
- (2)於近地表深度增設水份計，以得到完整土層水份含量剖面資訊。
- (3)在維持無線土層監測模組功能性下，降低組成元件單價，發展可替換式無線監測網路，得以在監測場址大量布設。

參考文獻

1. 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。
2. 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), 85-98.
3. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 362–372.
4. Fell, J. W., Boekhout T., Fonseca A., Scorzetti G. and StatzellTallman A. (2000). "Biodiversity and systematics of basidiomycetous yeasts as determined by large-subunit rDNA D1/D2 domain sequence analysis." *Int J Syst Evol Microbiol* 50, 1351–1371.
5. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977). "Stress state variables for unsaturated soils. " *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(5), pp.447-466.
6. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil mechanics for unsaturated soils. " *New York, Wiley*.
7. Osanai, N., Tomita, Y., Akitama, K., Matsushita, T. (2009). "Reality of cliff failure disaster." *Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management*, No. 530 (in Japanese)
8. Santacana N., De Paz A., Baeza B., Corominas J., and Marturi J. (2003) "A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain)." *Nat Hazards* 30(3):281–295
9. Springman S. M., Thielen A., Kienzler P. and Friedel S. (2013). "A long-term field study for the investigation of rainfall-induced landslides." *Geotechnique* 63, No. 14, 1177–1193
10. Tohari A., Nishigaki M. and Komatsu M. (2007). "Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2007, 133(5): 575-587
11. Uchimura T, Towhata I, Wang L and Seko I. (2008). "Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. " In: *Proc. of the First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL)*, Tokyo, pp. 611–614.