

地下水引發自由端順向坡土體滑動特性分析

陳樹群^[1] 陳冠翰^[1] 吳俊鉉^{[2]*}

摘要 由地下水誘發自由端邊坡滑動現象，崩塌型態屬於後退型崩塌。主要誘發因子為滲透水分造成下層土壤流動化及地下水輸入管鄰近區域因土壤土體底層水分飽和度超過 29%而產生土壤下陷現象。在相同坡度的邊坡滑動實驗中，地下水量越增加，達到邊坡滑動平衡的時間越短且發生滑動次數越少；而在相同輸入地下水量的邊坡滑動實驗中，坡度越增加則達邊坡滑動平衡時間越短、有越高比例的滑動面積集中在特定時段，且總滑動面積也會因此減少。

關鍵詞：地下水誘發邊坡滑動、自由端、後退型崩塌。

The Characteristics of Dip-Slope Landslides Induced by The Groundwater in Free-End Experiments

Su-Chin Chen^[1] Kuan-Han Chen^[1] Chun-Hung Wu^{[2]*}

ABSTRACT Retrogressive sliding can be observed in groundwater-induced landslides. The major inducing factor of this phenomenon is the fluidization in the down-hillslope and the soil of the bottom-layers. Moreover, when the water content in the area around the groundwater input pipe surpasses 29%, sag in the upper soil layer can also occur. As the groundwater discharge increases in experiments with the same slope, the equilibrium time needed to achieve landslide equilibrium gets shorter and the durations of landslides also decrease. As the slope in experiments with the same level of groundwater discharge increases, the equilibrium time required to achieve landslide equilibrium gets shorter, the landsliding area in a specific time period gets larger and the total landsliding area also decreases.

Key Words : Groundwater-induced landslide, free-end, retrogressive sliding.

一、前言

台灣崩塌及地滑誘發原因以地震（如 1999 年集集地震 (Chichi earthquake)、降雨（如 2004 年敏督利颱風 (Typhoon Mindulle) 誘發大甲溪集水區崩塌（陳樹群等，2010）或 2009 年莫拉克颱風 (Typhoon Morakot) 誘發高屏溪集水區崩塌（陳樹群等，2011）及地下水位為主；因地下水位誘發的邊坡滑動現象概以地滑現象為主，台中市和平鄉梨山地滑（黃鎮臺及王文能，1997）及南投縣中寮鄉紅葉坪地滑為主（張光宗等，2008）都是台灣近年著名地滑案例；地滑現象的主要特徵在於邊坡土體或岩層呈現緩慢滑動現象，以梨山地滑案例而言，年地表滑動量約在 20 公分以下，該案例主要誘發原因以「在地下水位較高的坡地社區，降雨造成地下水位更升高，而導致邊坡土體滑動」，因此後續的治理工程也朝向排水工法為主軸（黃鎮臺及王文能，1997）；一般而言，崩塌或地滑的邊坡滑動現象都發生於降雨事件發生期間或之後，但發生於 2010 年 4 月 25 日在國道三號 3.1K 處之大規模邊坡滑動事件

則可謂為少數特殊案例，經陳聯光等（2010）對該起滑動事件調查：該滑動為順向坡滑動，滑動面積約 1.42 ha，滑動深度約 15 至 20 m，實際運移土方量概估約 22 萬 m³；根據陳聯光等（2010）對該起滑動事件調查：該滑動為順向坡滑動，滑動面積約 1.42 ha，滑動深度約 15 至 20 m，實際運移土方量概估約 22 萬 m³；該研究也認為滑動主因為地下水位升高導致邊坡下滑力超過原有土體岩錨固定力；本研究也蒐集該滑動鄰近雨量站（大尖山雨量站，站號 C0A590）降雨資料分析，該邊坡滑動現象發生前之臨前降雨量都少（滑動發生時並無降雨、滑動發生前 10 日內總降雨量僅 58 mm、滑動發生前 10 日內最大時降雨強度不及 5mm/hr）；本研究也蒐集氣象局地震資料，在滑動發生前一個月內，基隆市並無發生超過地震規模超過 3.0 以上地震；由以上兩因素，本研究可將國道三號 3.1K 處滑動事件歸類為因地下水位造成的順向坡滑動事件。

利用渠槽堆土進行邊坡滑動實驗之研究，近年都與 Iverson (1997) 所提出之兩個論點有關：

1. 土壤孔隙水壓可被視為邊坡滑動或土石流發生的一個關

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[2] 逢甲大學水利工程及資源保育學系

Department of Water Resource Engineering and Conservation, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : chhuwu@fcu.edu.tw

鍵指標，由於土壤中高孔隙水壓等同降低土壤剪應力（有效應力），邊坡滑動或土石流現象都發生在土壤孔隙水壓急促上升時期。

2. 土壤孔隙水壓也跟土壤發生移動（soil deformation，或稱土壤表面裂隙）之時間及孔隙水壓在土壤中之擴散有關。

由以上兩個論點，後續多篇研究都以渠槽堆土模擬邊坡滑動實驗中，嘗試找出發生邊坡滑動之土壤孔隙水壓臨界值；Okura et al. (2002) 在非均勻坡度渠槽以鬆散土砂（loosely sand）進行邊坡滑動模擬實驗，邊坡滑動誘發主因為時降雨強度 100 mm/hr 之人工降雨模擬，發現孔隙水壓急速上升是邊坡土壤流體化主因，且在飽和土壤之孔隙水壓上升速度比未飽和土壤更快；Ochiai et al. (2004) 則以真實山坡地進行邊坡滑動實驗，該山坡地為風化解體花崗岩土之 33° 均勻邊坡，主誘發原因為時降雨強度 78mm/h 且維持 4.5 小時之人工降雨模擬，也發現降雨結束 15 分鐘後先產生坡面裂隙，且在降雨過程結束後 80 分鐘發生滑動，而邊坡滑動也的確發生在孔隙水壓急速上升時段；邊坡滑動由淺層土壤逐漸擴散至深層土壤，邊坡滑動速度也以上邊坡為最大，往下邊坡逐漸降低。Moriwaki et al. (2004) 也利用渠槽進行非均勻邊坡（上邊坡 30°，下邊坡 10°）降雨誘發邊坡滑動實驗，土砂材料為河砂，邊坡滑動誘發主因為時降雨強度 100 mm/hr 之人工降雨，也發現坡面在降雨後第 41 分鐘發生裂隙，第 154 分鐘後發生滑動，且最先發生孔隙水壓增加的並不在陡坡（30° 邊坡），而在緩坡（10° 邊坡）。Acharya et al. (2009; 2011) 也進行非均勻邊坡但不同土壤深度之降雨誘發邊坡滑動實驗，邊坡材料為砂質土壤（sandy soil）及粉質黃土（silty loess），滑動誘發主因為時降雨強度 50mm/hr 之人工降雨，在降雨維持 6.5 小時後開始量測孔隙水壓及土壤水分，發現土壤水分飽和度達 26% 便可誘發邊坡滑動，且土壤層深度越深，滑動誘發開始時間及所需降雨量都越低，初次誘發滑動之深度反而越淺；也認為土壤層深度影響滑動誘發及後續地貌崩落過程。



圖 1 國道三號於 3.1K 處於 2010 年 4 月 25 日發生之大規模滑動照片（資料取自國家防災科技中心（2010），本照片乃由空中勤務總隊拍攝）

Fig.1 The picture of the large-area landslide on Apr. 25, 2010 at 3.1 K of Highway No. 3 in Taiwan (NCDR, 2010)

由上述相關文獻可發現：目前以渠槽實驗模擬邊坡滑動現象並無法模擬土層與地層參雜的邊坡滑動，上述文獻皆以單純土層滑動為主（但仍包含具有不同土壤特性之土層滑動）；再者，部分大規模崩塌或地滑現象在滑動發生前，會發生邊坡以緩慢速度向下滑動的現象，而邊坡表面會出現裂隙分佈，例如 2009 年莫拉克颱風引發的小林崩塌（Wu et al, 2011）及上述梨山地滑現象（黃鎮臺及王文能，1997），但目前少有研究探討邊坡表面裂隙分佈跟誘發強度（累積降雨量或地下水位高低）及邊坡地貌特性間之關係；因此本研究以渠槽實驗進行單一土層受地下水誘發之邊坡滑動現象，藉由地下水位引發邊坡滑動過程及坡面裂隙發展情況的說明，討論地下水引發自由端邊坡滑動之過程，說明滑動歷程、坡面裂隙產生、二維水分分佈及坡面滑動方式等。

二、實驗材料及過程說明

目前並無相關文獻說明地下水誘發邊坡土體表面裂隙發展，因此本文進行實驗之主要目的在於利用室內實驗觀測土壤水分與邊坡表面裂隙發展現象，並說明邊坡土體表面裂隙發展過程及與其他參數（如土體水分飽和程度）之相關性。與前述提及邊坡滑動案例或一般實際邊坡滑動案例相比，本研究乃將邊坡滑動現象簡化為「地下水造成土體底層水分擴散及濕鋒發展，並進而引發邊坡表面土體裂隙及後續滑動」之現象，本研究簡化條件如下分述：

1. 僅單一類土壤發生滑動，與一般崩塌案例相比，本研究實驗並無岩層或具有不同土壤特性（如土壤水利傳導度）之元素參與滑動。
2. 實驗渠槽表面假設為光滑表面，對上方土體不提供摩擦力；堆置土體左右兩方也無任何外在施力；土體滑動主因僅為「地下水水分擴散及濕鋒發展導致下層土體液化滑動，進而導致上層土體滑動」，並無下層土體與渠槽表面摩擦力或土體兩側與其他材質之摩擦力。
3. 地下水給予源頭乃為點源式（point source），非一般實際崩塌案例之面源式（surface source）。

1. 實驗材料說明

本實驗於可調整坡降之平台上堆土模擬邊坡土壤，並模擬因地下水造成的順向坡邊坡滑動現象。相關實驗材料如後分述：

- (1) 實驗升降平台及坡度控制：均勻坡降平台，長 2.5m 寬 1.5m（如圖 2），在本實驗中平台角度以 25°、30°、35° 及 40° 進行實驗。
- (2) 實驗用土：本研究實驗用土平均粒徑為 0.44 mm 之石英砂，經本研究進行水利傳導度量測實驗，本實驗用土之水利傳導度約為 1.32×10^{-2} cm/sec。本研究控制實驗前之初始土壤水分含水量為 20%。
- (3) 地下水量控制：為模擬固定流量之地下水量，本研究架設定水頭且固定地下水流速之裝置，地下水量來自平台後方抽水馬達儲水箱，並以每五分鐘量取抽水馬達儲水箱內水深保持地下水量固定；本研究也在土體下方放置

水桶，蒐集由土體滲出之水量，也以每五分鐘量取一次水深，換算為地下水滲出量。

- (4) 土壤水分量測：本研究採用 ECH₂O Dielectric Aquameter sensors (型號 EC-5) 電容式土壤水分感應器，精度為 0.003 m³/m³，量測資料為體積含水量。
- (5) 觀測儀器：本研究為掌握邊坡土體滑動過程，於實驗過程架設高速攝影機及照相機拍攝實驗過程。

2. 實驗過程說明

本研究實驗設定條件如表 1，實驗流程圖如圖 3 所示。本研究在平台角度為 0°時開始堆土，並將堆土下邊坡刻意削成 15°斜坡，上邊坡則維持 0°，上下邊坡堆土長度分別為 100.4 cm 及 74.6 cm (圖 2a)，堆土區四周並以訂製木框固定鋪土範圍及夯實土體。在堆土完畢後，移去木框並在兩側斜坡改削成 45 度斜坡 (圖 2d)，避免土體在木框移走後產生之解壓現象。本研究在實驗土體底面放置 8 個水分監測器，設置位置如圖 2b 所示。由外部導水進入的地下水流量管給予水量位置位於土體由上邊坡起算 35cm 位置。實驗用土鋪設完畢後，開始抬升平台角度並改變地下水流量，便開始進行邊坡滑動實驗。當實驗進行至邊坡崩落且達穩定時 (不再續崩)，則停止實驗。

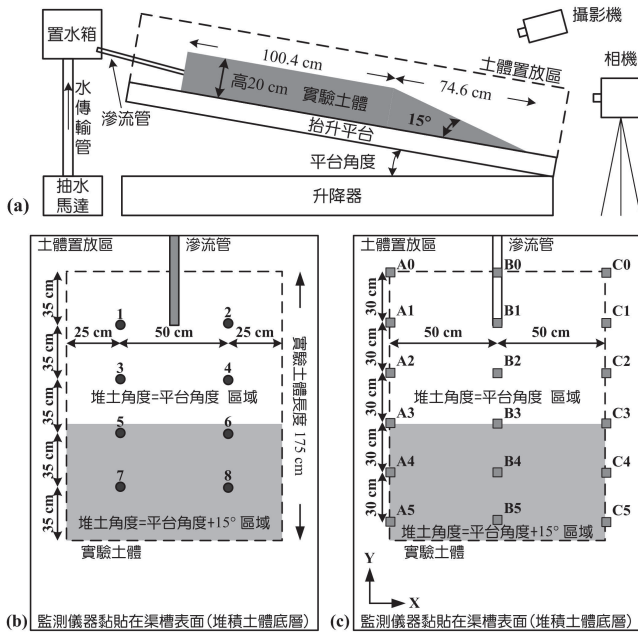


圖 2 本研究實驗設置。圖 b 為水分監測器放置圖，圖 c 為邊坡位移監測器放置圖

Fig.2 The settings of the free-end experiments in the study. Figure b is the distribution of the water content measurement equipments, i.e. Aquameter sensors, and Figure c is the distribution of landslide-monitoring measurement equipments

3. 實驗量測過程說明

(1) 滑動面積量測

本研究以攝影機及相機連續拍攝記錄整個實驗滑動過程，拍攝角度正射於邊坡坡面，因此不需進行角度校正。在整個實驗過程中，以每 5 分鐘擷取一張影像的方式，並以影像處理技術估算邊坡滑動面積。本研究對於「滑動」的定義在於「位於裂隙上邊坡及下邊坡的土體出現明顯位移」，因此當坡面僅出現裂隙但無明顯位移現象時，本研究並未將此現象視為滑動。實驗總記錄時間以 220 分鐘為主。為進行無因次比較，本研究將每 5 分鐘滑動百分比 (滑動面積除以總土體面積) 進行比較。

表 1 本研究實驗控制條件表

Table 1 The value of each parameter in the study

編碼	坡度 (°)	地下水流量 (cm ³ /s)	總體密度 (g/cm ³)	孔隙度
S25Q15	25.0	15.0	1.31	0.50
S25Q20	25.0	20.0	1.17	0.56
S25Q25	25.0	25.0	1.41	0.47
S30Q15	30.0	15.0	1.20	0.55
S30Q20	30.0	20.0	1.18	0.56
S30Q25	30.0	25.0	1.15	0.57
S35Q15	35.0	15.0	1.44	0.46
S35Q20	35.0	20.0	1.16	0.56
S35Q25	35.0	25.0	1.19	0.55
S40Q20	40.0	20.0	1.18	0.56
S40Q25	40.0	25.0	1.16	0.56

備註：編碼規則：S 及後方數字代表實驗坡度，例如 S25 代表位於坡度 25 度之平台進行實驗；Q 及後方數字代表實驗地下水流量 (單位：cm³/s)，例如 Q15 代表於該實驗控制地下水流量為 15 cm³/s。

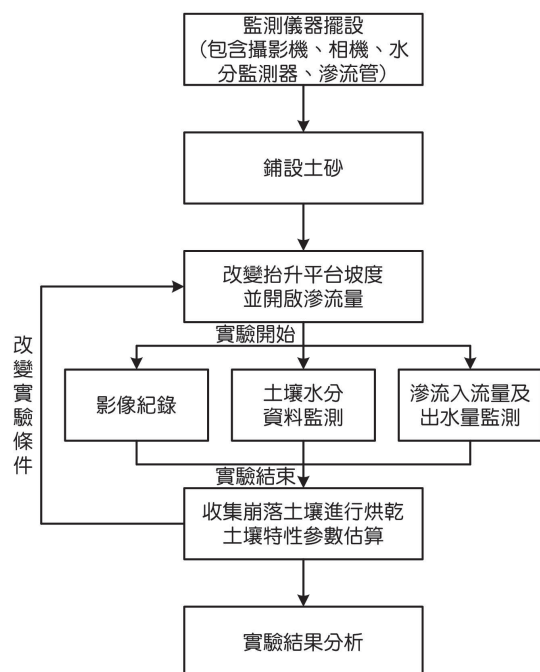


圖 3 本研究實驗流程圖

Fig.3 The flow chart of the experiments in the study

(2) 邊坡位移量測

本研究為掌握由上邊坡至下邊坡各位置在邊坡滑動過程的滑動歷程，因此在邊坡土體表層貼上 18 處標示 (如圖 2c)，並以每 5 分鐘拍照記錄一次，以確實掌握邊坡各位置之位移情況。監測點位分成兩側 (A 及 C) 及中線 (B)，並由最上邊坡處，每 30 cm 設置一處監測點位方式逐次往下，全部實驗土體可分為六個橫斷面。為方便後續分析描述，本實驗以監測點位位置及第幾斷面進行編碼，例如 A0 代表在土體左側最上方的第 0 斷面監測點位，B5 則代表在土體中線最下方的第 5 斷面監測點位。

(3) 土壤水分飽和量及土壤物理參數估算

本研究所提之土壤水分飽和量皆為「以黏貼在渠槽表面 (堆積土體底層) 之儀器所量得之數據值」，後文簡寫為「土體底層水分飽和度」，而量測儀器為 ECH2O Dielectric Aquameter sensors (型號 EC-5) 電容式土壤水分感應器。土壤物理參數估算則以土壤孔隙率為主，推算過程乃將實驗結束後之餘土立即烘乾，藉此估算土砂比重及總體密度，便可求得土壤孔隙率。

(4) 邊坡滑動特徵觀測

本實驗之邊坡滑動特徵可概分為坡腳液化、邊坡表

面土體裂隙發展及邊坡土體滑動等三種，三種特徵除攝影器材拍攝記錄外，也在實驗過程中以人為觀測記錄方式補充資料。

三、結果分析

1. 邊坡滑動歷程

滑動歷程可分為六個階段 (如下分述)，本研究以編號 S35Q25 實驗為說明案例，圖 4 為編號 S35Q25 實驗過程拍攝影像，表 2 則為編號 S35Q25 之實驗過程說明，六個階段滑動現象依出現時間先後分述如下：

- (1) 下邊坡水量滲出：如圖 4a，滲出水量多寡與給予的地下水量成正比，且滲出水量所帶走的下邊坡土砂發生時間則與實驗坡度增加成正比。
- (2) 坡趾液化及下邊坡開始出現回溯淘刷缺口：如圖 4b 及 c，當滲出水量逐漸帶走部分下邊坡土砂，下邊坡開始出現坡趾液化及回溯淘刷缺口等現象。
- (3) 上邊坡開始出現下陷裂隙：如圖 4c，當下邊坡滲出水量逐漸帶走上邊坡下層土體，上邊坡上層土體失去下層土體支撐力而下陷，即會在上邊坡出現下陷裂隙。此種裂隙通常為半圓弧狀，且是由下邊坡逐漸往上邊坡發展。

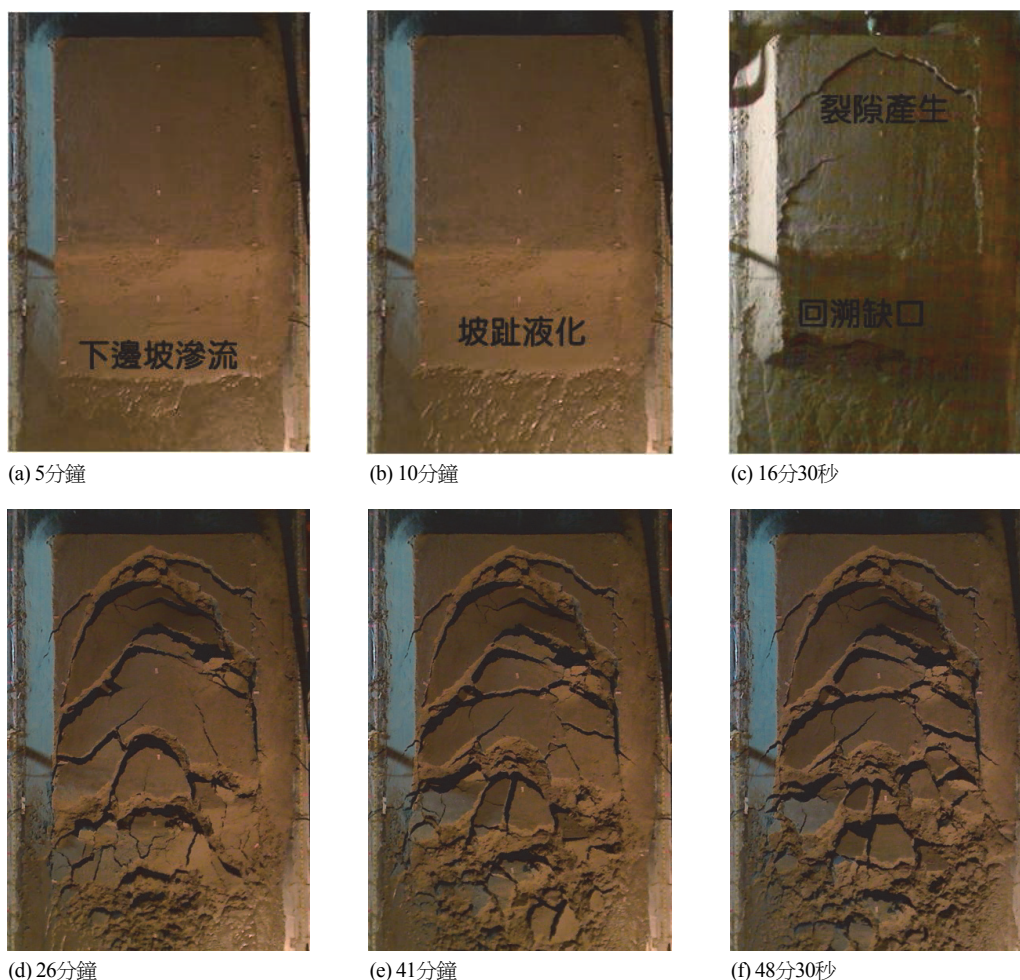


圖 4 編號 S35Q25 邊坡滑動實驗歷程照片

Fig.4 The landsliding process of No. S35Q25 experiments

- (4) 邊坡土體滑動：如圖 4d，當上邊坡土體在地下水量持續增加土體底層水分飽和度，土體摩擦力已無法抵抗重力產生的下滑力時，即出現土體明顯往下邊坡位移現象。
- (5) 下邊坡土體滑動：如圖 4e，當下邊坡坡趾液化及上邊坡土體滑動現象加遽，即導致下邊坡土體滑動。
- (6) 全邊坡土體大規模滑動：當下邊坡坡趾液化及上邊坡土體滑動現象更加遽，下邊坡土體開始崩解且滑動，現象特徵是由大塊土體逐漸再次裂解為小塊土體，且由下邊坡土體擴展至上邊坡土體，直至發生全邊坡大規模滑動，實驗宣告結束。

2. 土壤水分含量及坡面裂縫分佈

本研究假設土體是均勻堆置情況下，右側監測點位 (No.2, 4, 6 及 8) 資料被假設與左側監測點位 (No.1, 3, 5 及 7) 相同且

表 2 編號 S35Q25 組實驗歷程說明

Table 2 The experimental data and explanation of No. S35Q25 experiment

時間 (分:秒)	邊坡滑動歷程	崩塌面積百分比 (%)	土體底層水分飽和度 (%)			
			No. 7	No. 5	No. 3	No. 1
5:00	下邊坡水量滲出，滲出水量逐漸帶走部分下邊坡土砂，產生坡趾液化及下邊坡開始出現回溯源刷缺口	3.4	48.0	55.6	55.6	58.0
10:00	坡趾液化及下邊坡回溯源刷缺口現象持續	7.5	49.5	56.7	58.0	61.4
14:00	下層土體滑動現象加遽	15.2	51.5	59.0	59.0	62.7
16:30	上邊坡出現的第一道圓弧下陷裂隙位置，也發生第一次土體滑動現象	20.1	57.1	61.2	59.5	63.4
17:30	第一次土體滑動擴展至 No.5 監測位置	37.2	25.3	56.2	59.7	63.6
26:00	第一次土體滑動擴展至 No.3 監測位置	83.0	---	---	52.8	62.9
30:30	發生第二次土體滑動現象	84.9	---	---	56.2	63.1
41:00	第二次土體滑動現象結束	85.5	---	---	49.5	63.1
48:30	發生第三次土體滑動現象	85.9	---	---	56.0	64.9
50:00	第三次土體滑動現象結束	88.6	---	---	54.7	65.3

備註：土體底層水分飽和度標示「---」代表該位置土壤已滑動或不再存在於邊坡上。

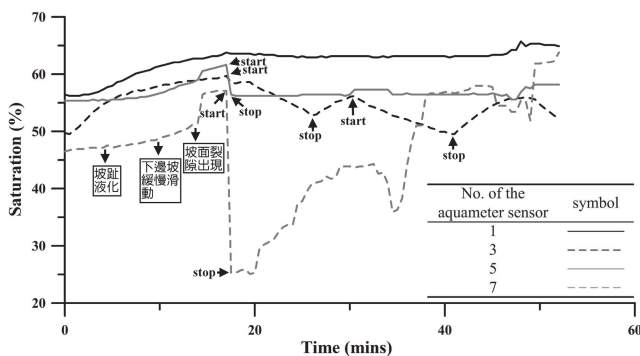


圖 5 編號 S35Q25 實驗水分監測儀器監測資料分佈圖，圖中標示坡面滑動起點 (start) 與終止點 (stop)

Fig.5 The time-series process of the distribution of water saturation in the No. S35Q25 free-end experiment

對稱的，因此實際說明過程僅用左側監測點位資料進行分析。編號 S35Q25 之實驗記錄資料如圖 5 所示，因土壤水分是由下邊坡逐漸擴展至上邊坡，因此本研究也以下邊坡至上邊坡方式說明如表 2。

根據 4 個監測點位所得到之土壤水分含量變化歷程，在整個實驗發生三次滑動現象過程中，可發現不論在哪一個監測點位，在邊坡滑動發生前的土壤水分含量維持持續上升，而邊坡滑動發生時，參與邊坡滑動的斷面在土壤水分含量會有明顯下降的情況，例如 No.5 及 No.7 水分監測器放置位置在實驗進行 16 分 30 秒至 17 分 30 秒間，No.5 及 No.7 位置之土體底層水分飽和度分別下降 5.0% 及 31.8%。而 No.3 水分監測器也分別在邊坡發生三次滑動 (實驗進行 17 分 30 秒、30 分 30 秒及 48 分 30 秒) 時，土體底層水分飽和度都有明顯下降。No.1 水分監測器放置位置之邊坡土壤在全部實驗過程中皆並未參與三次邊坡滑動現象，因此土體底層水分飽和度一直維持在 58.0% 至 65.3% 之間。

圖 6 為編號 S30Q15 實驗之土體底層水分飽和度分佈與坡面裂隙歷程記錄，由於此組實驗進行至 45 分鐘便已產生多次滑動，因此本研究僅記錄至實驗進行至 45 分鐘為止。由圖 6 可敘述坡面裂隙發生歷程，本研究以滑動面 (已發生滑動，圖 6 之粗黑線) 及裂隙 (未發生明顯滑動，圖 6 之細黑線) 說明坡面現象：

- (1) 實驗進行 14 分鐘，坡面第一道滑動面產生於上邊坡，此滑動面位於上邊坡地下水輸入管水分注入點鄰近產生，且沿者土體底層水分飽和度約 33% 至 35% 的分佈面發展。此外全邊坡也開始出現多道圓弧狀明顯。
- (2) 實驗進行 14 至 30 分鐘期間，因滲透水分造成土壤流失現象，下邊坡多道裂隙逐漸轉為破裂面，也引發下邊坡土體滑動。上邊坡主要滑動面位置由由原來沿土體底層水分飽和度約 33% 至 35% 的分佈面逐漸降至土體底層水分飽和度 31% 至 35% 的分佈面。
- (3) 實驗進行 30 至 45 分鐘期間，下邊坡液化導致坡面土體滑動現象持續發生；大多坡面土體已呈現明顯滑動現象，在上邊坡破裂面往下邊坡之土體都出現下陷且程度不一的崩滑現象。上邊坡破裂面最終分佈位置在土體底層水分飽和度 29% 至 35% 分佈面。也代表在全部實驗過程，上邊坡破裂面發生位置一直都保持在土體底層水分飽和度超過 29% 以上的土體表面。

3. 滑動面積分析

圖 7 為本研究自由端滑動面積隨時間之歷程變化圖，圖 7a 為固定坡度之比較圖之滑動歷程記錄結果，圖 7b 則為固定流量之比較圖，表 2 則以編號 S35Q25 實驗說明滑動面積之時間歷程。

在相同坡度的滑動歷程分析上，主要差異有兩點：

- (1) 達到滑動平衡的時間隨地下水量增加而縮短：在坡度 25° 的三組實驗，編號 S25Q25、S25Q20、S25Q15 滑動平衡時間分別約為實驗進行 49、100、220 (仍未達到平衡) 分鐘。

(2) 發生滑動次數隨地下水量增加而減少, 且達到滑動平衡的時間隨地下水量增加而逐漸縮短; 本研究將每 5 分鐘滑動面積增加百分比超過 5% 以上視為有明顯滑動, 則編號 S25Q15 在實驗進行 220 分鐘內共發生 7 次明顯滑動現象, 編號 S25Q25 在實驗進行 45 分鐘內僅發生 2 次明顯滑動現象 (如表 2)。

在相同流量的滑動歷程分析上, 主要差異有兩點:

(1) 坡度增加會使邊坡土體達滑動平衡時間縮短, 且會有更高比例的滑動面積集中在特定時段: 編號 S25Q25 在實

驗進行 20 至 50 分鐘之間, 累計滑動面積增加百分比為 66.1%, 編號 S35Q25 在實驗進行 10 至 20 分鐘之間, 累計滑動面積增加百分比為 72.5%。

(2) 坡度增加也會使邊坡土體最終滑動面積百分比減少: 在地下水量 15 cm³/sec 之三組實驗 (編號 S25Q15、S30Q15 及 S35Q15), 最終滑動面積百分比都維持在 75% 至 80% 之間; 但在地下水量 25 cm³/sec 之四組實驗 (編號 S25Q25、S30Q25、S35Q25 及 S40Q25), 最終滑動面積百分比都維持在 87.0% 至 90.0% 之間。

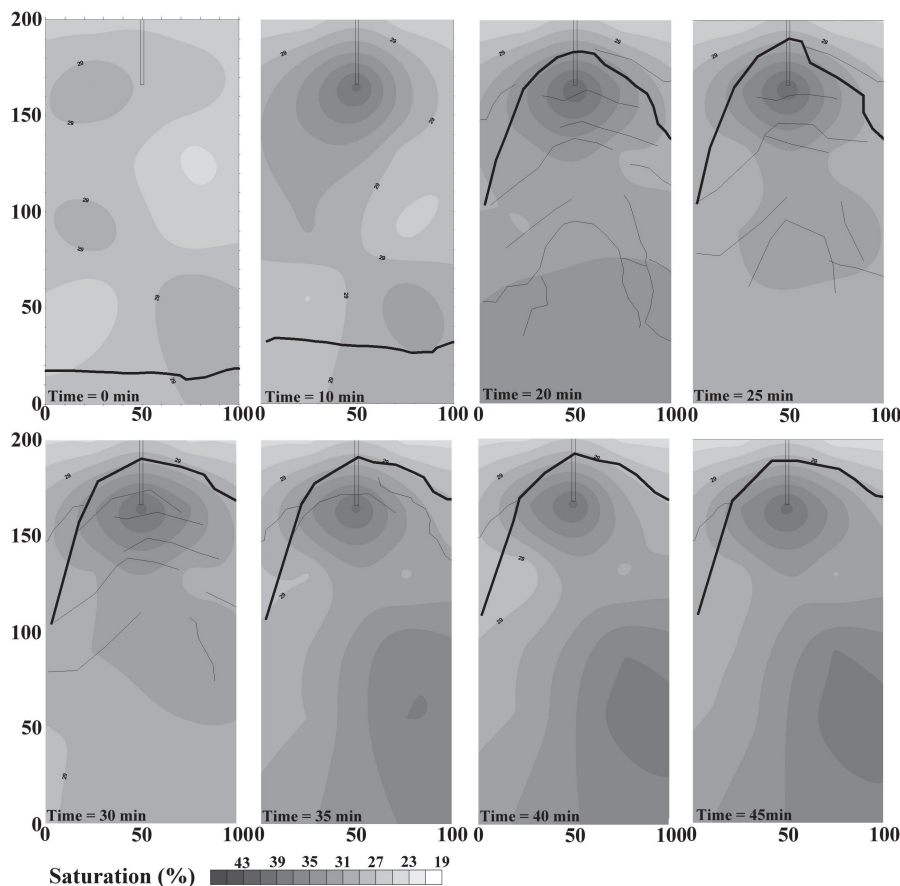


圖 6 編號 S35Q25 組實驗水分與滑動裂縫分佈歷程。粗黑線代表已發生滑動之破裂面, 細黑線代表未發生滑動之裂縫

Fig.6 The distribution of water content and crack in the No. S35Q25 free-end experiments. The bald black line means the fracture line, while the black line means crack line

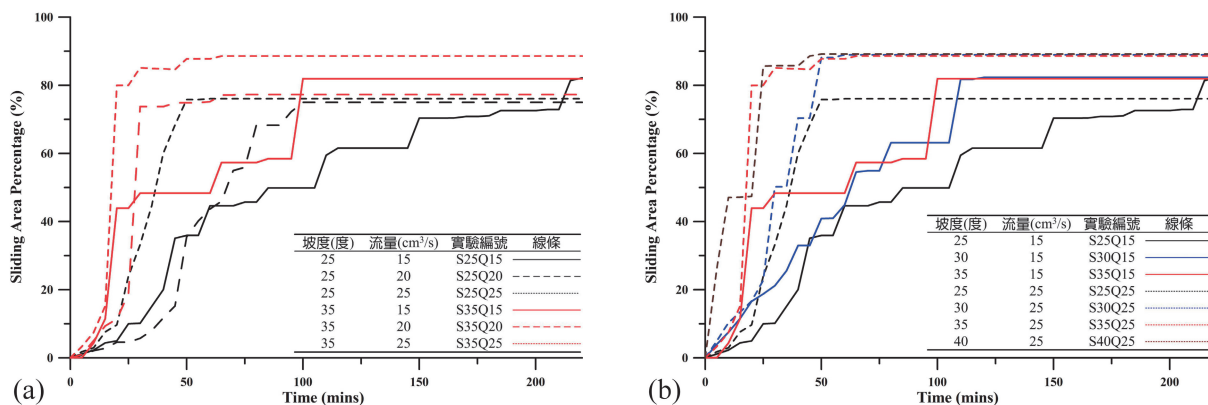


圖 7 自由端實驗滑動面積歷程分佈圖, 圖 a 為自由端相同坡度比較圖, 圖 b 為自由端相同流量比較圖

Fig.7 The time-series process of sliding area in free-end and non-free-end experiments. Fig. a is the free-end experiments with the same slope, while Fig. b is the free-end experiments with the same groundwater discharge

4. 邊坡位移歷程

本研究以編號 S35Q25 實驗邊坡位移歷程 (如圖 8) 進行說明：

- (1) 自由端邊坡滑動歷程是由下邊坡逐漸往上邊坡延伸，例如由第五斷面監測點位之位移發生時間約在實驗進行 5 至 15 分鐘，延伸至第四斷面監測點位之位移發生時間約在實驗進行 25 至 35 分鐘。
- (2) 第三斷面是實驗發生最大位移的斷面，A3 及 B3 最終位移量都達 107.4 cm 以上，本研究認為此現象主因跟第三斷面位置有關，第零斷面至第三斷面都位於堆土角度等同平台角度之區域，第四斷面至第五斷面則為於堆土角度等同平台角度加 15°之區域，第三斷面是最接近堆土角度等同平台角度加 15°之區域但卻仍為堆土角度等同平台角度之斷面，本研究認為第三斷面具有最大位移量跟更下邊坡 (第四斷面至第五斷面) 之滲透水分造成土壤流失現象有關，本研究會在後述以坡面含水量分佈來解釋。
- (3) 以縱向變化量而言，各斷面監測點位都以中線 B 之位移量最大，本研究認為此與中線為地下水量主要灌入線有關。

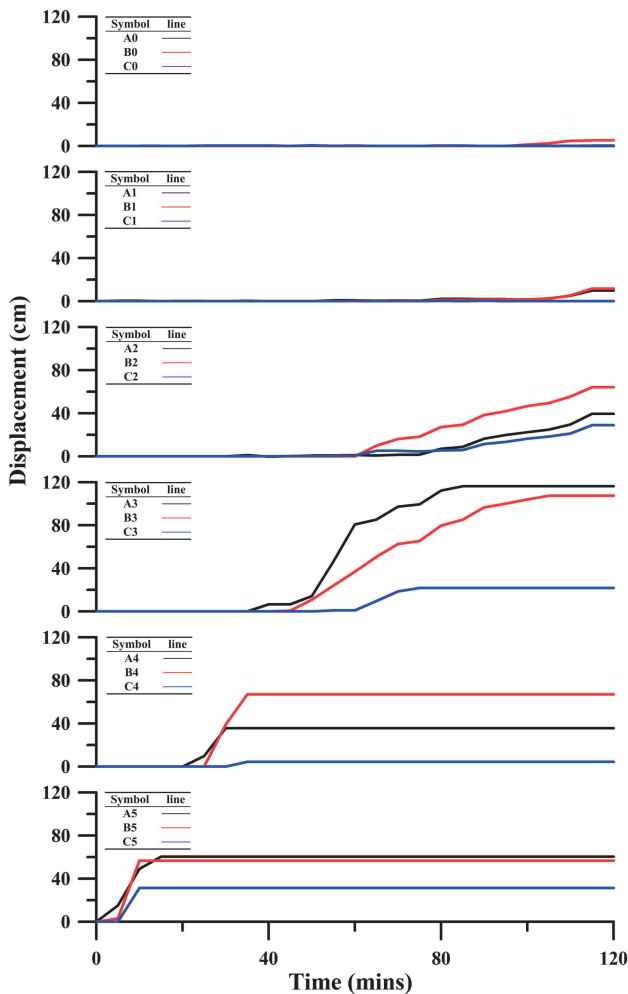


圖 8 編號 S35Q25 組實驗邊坡位移分佈圖

Fig.8 The distribution of displacement in the No. S35Q25 free-end experiments

四、討 論

1. 地下水誘發邊坡滑動主因及破壞型態

根據本研究前述資料分析，地下水誘發之自由端邊坡滑動型態可分述如下：

- (1) 邊坡滑動乃由下邊坡開始，並逐漸擴展至上邊坡。
- (2) 下邊坡滑動說明如圖 9a 所示，地下水水分在邊坡土壤上形成土體底層水分飽和度高及低的兩層 (圖 9b)，下層土壤吸收地下水水分而形成含水量高的流動層 (圖 9a 及 b)，在實驗初期會造成下邊坡滲透水分造成土壤流失現象；隨實驗時間拉長，當下層土壤持續被地下水水分帶出，下邊坡持續下陷，使上層土壤也進入土體底層水分飽和度高的下層，在吸收入滲水分後又再次被入滲水分帶離邊坡土體，如此情況持續就造成下邊坡持續下陷，且滲透水分造成土壤流失現象也持續往上邊坡延伸。
- (3) 下層土壤持續被地下水水分洗出造成下層土壤空隙變大，上方土層因重力而下陷，此時便會在上層土壤表面出現裂隙，此現象可由自由端滑動裂隙分佈形狀與水分分佈形狀類似可得到驗證。上層土壤表面裂隙發展與分佈跟土體底層水分飽和度相關，此點可由土壤表面裂隙為圓弧狀發展，類似土體底層水分飽和度分佈曲線驗證，且上層土壤表面裂隙發展乃沿土體底層水分飽和度 29%之界線發展。
- (4) 上邊坡在地下水輸入管鄰近的主要破裂面是邊坡大規模滑動的起因，地下水流出處鄰近是水分含量最高的區域，當水分含量超過某值區間 (於下一段會敘述) 促使該區域土體下滑力增加，且下方邊坡土體因吸收水分造成下滑力增加，整體下滑力超過邊坡土體之抵抗下滑的抵抗力時，就會造成破裂面產生，而啟動邊坡大規模滑動現象。

若以 Wang and Sassa (2003) 提出之四種邊坡滑動型態，本研究之地下水誘發邊坡滑動型態接近於 Type A 或 Type B 之滑動型態，Wang and Sassa (2003) 將 Type A 或 Type B 崩塌型態稱為後退型崩塌 (retrogressive sliding)，Type A 及 Type B 之差異在於邊坡土層表面出現破裂面 (分散為塊體) 的過程；Type A 乃指邊坡土層表面在幾乎同一時間出現多道破裂面之後退型崩塌，類似於本研究之低地下水流量所引發之多次滑動現象 (如圖 7 之編號 S25Q15、S30Q15 及 S35Q15 等實驗)；而 Type B 則指邊坡土層表面出現之破裂面乃由下邊坡逐漸擴展至上邊坡，類似於本研究之高地下水流量所引發之少次滑動現象 (如圖 7 之編號 S25Q25、S30Q25、S35Q25 及 S40Q25 等實驗)。

2. 地下水誘發與降雨滲流誘發之邊坡滑動現象差異討論

相較於降雨滲流誘發之邊坡滑動現象，地下水誘發崩塌現象在邊坡滑動過程有幾點差異：

- (1) 水分蓄積位置不同：在降雨滲流誘發崩塌滑動之實驗中，經人工降雨模擬一段時間後，在邊坡滑動發生前，

土壤水分蓄積位置在土層下方，但未擴散及最下邊坡 (Okura et al., 2002; Moriwaki et al., 2004); 但在本研究地下水誘發邊坡崩塌實驗，土壤水分一樣蓄積在土層下方，但擴散位置乃從地下水輸入管直至下邊坡，且下邊坡也有滲流產生。

- (2) 邊坡滑動起始點不同：在降雨滲流誘發崩塌滑動之實驗中，邊坡滑動起始點在上邊坡，且通常起使於坡度轉換段 (由陡轉緩段, Okura et al., 2002; Moriwaki et al., 2004)，邊坡滑動後土壤堆積於下邊坡；但在本研究地下水誘發邊坡崩塌實驗，邊坡滑動起始點在於下邊坡，且乃由滲透水分造成土壤流失現象引發的土壤被滲流水帶出現象所啟動，邊坡滑動後土壤可能停留於坡面上形成破碎的土壤塊體，也有可能直接滑落坡面。
- (3) 啟動邊坡滑動之土體底層水分飽和度接近：於 Acharya et al. (2009) 之降雨誘發邊坡滑動實驗，土壤土體底層水分飽和度達 26% 便可誘發邊坡滑動；而在本研究之地下水誘發邊坡滑動之實驗，土壤表面裂隙乃沿土體底層水分飽和度 29% 之界線發展。
- (4) 邊坡滑動前之徵兆相同：邊坡滑動發生在孔隙水壓急速上升段是在降雨滲流誘發邊坡滑動之實驗 (Okura et al., 2002; Ochiai et al., 2004) 及本實驗中 (如圖 5) 都有發現的現象；再者，在邊坡滑動前會先在土層表面產生裂隙，爾後經過若干時間才發生滑動，也是在降雨滲流誘

發邊坡滑動之實驗 (Ochiai et al., 2004; Moriwaki et al., 2004) 及本實驗中 (如圖 4) 都有發現的現象。

3. 國道三號 3.1K 處之邊坡滑動現象

根據陳聯光 (2010) 針對 2010 年 4 月 25 日國道 3 號 3.1K 邊坡滑動事件之調查及分析，國道 3 號 3.1K 邊坡滑動之土體滑動深度概估約為 15 至 20 公尺，而原高速公路旁護欄高度不及 2 公尺，由於護欄高度與土體滑動深度之比率不及 0.1，因此可視為自由端邊坡滑動現象。該報告也指出在已滑動之上方土層 (上層為砂岩，下層為接近泥層之頁岩) 有明顯風化現象，且也都發現氧化鐵，代表此滑動面在滑動前已有水分存在；再則滑動面以下為不易透水之新鮮頁岩，上層透水性佳的砂岩 (已滑動) 與下層透水性差的頁岩 (未滑動) 則是台灣典型順向坡滑動的地層組成，也與本研究進行的實驗特性 (上層透水，下層不透水) 相近。

根據本研究之論點說明說明國道三號 3.1K 處之邊坡滑動現象，分述如下：

- (1) 國道三號 3.1K 處之邊坡滑動屬於一次滑動現象，於本研究中屬於高地下水量所引發之邊坡滑動現象，因此可說明國道三號 3.1K 處發生邊坡滑動現象前之地下水量應該比一般時間偏高。
- (2) 國道三號 3.1K 處之邊坡滑動段包含山脊，且發生邊坡滑動前約 30 小時並未降雨，因此可歸類為地下水誘發邊坡滑動現象；根據本研究實驗現象：僅在地下水輸入管以下之土層參與滑動，地下水輸入管以上之土層幾乎未參與滑動 (如圖 4)，以此可說明引發國道三號 3.1K 處邊坡滑動之地下水位變化應包含該邊坡山脊段。

五、結 論

本研究以渠槽進行地下水誘發自由端順向坡滑動實驗，並以記錄滑動現象發生歷程、水分分佈及坡面裂縫分佈進行比較及說明地下水誘發邊坡滑動現象之特性差異。本研究模擬之地下水誘發邊坡滑動現象，屬於後退型崩塌 (retrogressive sliding)。由地下水誘發的自由端順向坡滑動有兩個主要滑動誘發因子，一為下邊坡坡趾因滲透水分造成土壤流失現象，在本實驗之實驗條件設定下，只要在下邊坡土體底層水分飽和度超過 30% 即會引發下邊坡坡趾因滲透水分造成土壤流失現象，此因滲透水分造成土壤流失現象也逐漸延伸至上邊坡，而下邊坡滲透水分帶走部分下層土壤，形成下層土壤空隙而促使上層土壤下陷；二則增加地下水輸入量及邊坡坡度都會促使邊坡滑動發生時間提早；三則本研究設定之點源地下水輸入方式，在地下水水出口鄰近形成土體底層水分飽和度較高區域，而坡面破裂面及裂隙都從此區域開始產生，根據本研究編號 No.S35Q25 組實驗，破裂面及裂隙的分佈都在土體底層水分飽和度 29% 之土體表面上。根據本實驗數據，在相同坡度的邊坡滑動實驗中，地下水量越增加，達到邊坡滑動平衡的時間越短且發生滑動次數越少；而在相同輸入地下水量的邊坡滑動實驗中，坡度越增加則達邊坡滑動平衡時間越短，有越高比例的滑動面積集中在特定時段，且總滑動面積也會因此減少。

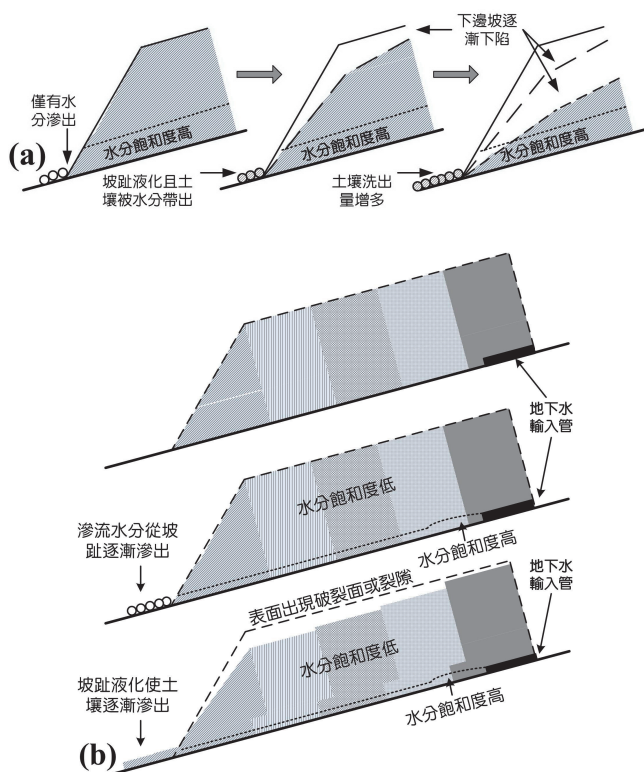


圖 9 本研究自由端滑動歷程示意圖

Fig.9 The landsliding process in the free end experiments, including in the downslope (Fig. a) and upslope (Fig. b)

參考文獻

- [1] 張光宗、賴丞昶、林德貴 (2008), 「集集地震誘發紅葉坪地滑分析」, 中華水土保持學報 39(3), 329-344 頁。
(Chang, K.T., Lai, C.C., and Lin, D.G. (2008). "Analysis of the Huntsaiping landslide induced by the Chichi earthquake." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 39(3), 329-344. (in Chinese))
- [2] 陳聯光、陳樹群、周憲德 (2010), 「國道 3 號滑動事件調查初步探討」, 社團法人台灣災害管理學會電子報, <http://www.dmst.org.tw/e-paper/03/001.html>。(Chen, L.K., Chen, S.C., and Chou, H.T. (2010). "The preliminary investigation of the landslide event on Highway 3. E-paper." Disaster Management Society of Taiwan, <http://www.dmst.org.tw/e-paper/03/001.html>.)
- [3] 陳樹群、吳俊鉉、王雁平 (2010), 「崩塌面積與崩塌深度關係之研究」, 中華水土保持學報, 41(2), 147-158。
(Chen, S.C., Wu, C.H., and Wang, Y.P. (2010). "Discussion of the characteristic of landslides caused by rainfall or earthquake." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 41(2), 147-158. (in Chinese))
- [4] 陳樹群、諸予涵、吳俊鉉 (2011), 「旗山溪集水區長期降雨特性改變與崩塌分佈關係」, 中華水土保持學報, 43(4), 294-303。(Chen, S.C., Chu, Y.H., and Wu, C.H. (2011). "The long term rainfall trend and landslide distribution in Chi-Shan river watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(4), 294-303. (in Chinese))
- [5] 黃鎮臺、王文能 (1997), 「梨山地滑工程地質調查及整治規劃案例探討」, 地工技術 64 期, 33-50 頁。(Huang, C.T., Wang, W.N. (1997). "Case Study of the Li-Shan Landslip." *Sino-Geotechnics*, 64, 33-50. (in Chinese))
- [6] Acharya, G., Cochrane, T., Davies, T., and Bowman, E. (2009). "The influence of shallow landslides on sediment supply: A flume-based investigation using sandy soil." *Engineering Geology*, 109, 161-169.
- [7] Acharya, G., Cochrane, T., Davies, T., and Bowman, E. (2011). "Quantifying and modeling post-failure sediment yields from laboratory-scale soil erosion and shallow landslide experiments with silty loess." *Geomorphology*, 129, 49-58.
- [8] Iverson, R.M. (1997). "The physics of debris flow." *Rev Geophys*, 35(3), 245-296.
- [9] Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., and Wang, G. (2004). "Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator." *Landslides*, 1, 277-288.
- [10] Ochiai, H., Okada, Y., Furuya, G., Okura, Y., Matsui, T., Sammori, T., Terajima, T., and Sassa, K. (2004). "A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall." *Landslides*, 1, 211-219.
- [11] Okura, Y., Kitahara, H., Ochiai, H., Sammori, T., and Kawanami, A. (2002). "Landslide fluidization process by flume experiments." *Engineering Geology*, 66, 65-78.
- [12] Wang, G., and Sassa, K. (2003). "Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content." *Engineering Geology*, 69, 109-125.

2013 年 08 月 02 日 收稿

2013 年 10 月 05 日 修正

2014 年 03 月 28 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 12 月 31 日)