

# 以邊坡物理模型試驗探討崩塌過程中的自然電位變化

馮正一<sup>(1)</sup> 林博翔<sup>(2)</sup> 林聖豪<sup>(3)</sup>

## 摘要

大量降雨常造成崩塌，崩塌前地層內部會有所變動，導致自然電場變化，崩塌時亦會產生震動訊號。本研究利用室內邊坡物理模型進行試驗，控制降雨與地下水上升等變因，觀察試驗期間自然電位變化與震動訊號特性。研究結果發現，自然電位法能反應地下水流動與震動訊號可對應至崩塌事件。降雨試驗只造成模型邊坡坡面表面沖蝕，而地下水上升易促使模型邊坡崩塌。

(**關鍵詞**：自然電位、震動、崩塌、物理模型、降雨、地下水)

## The self-potential changes during landslide using physical modeling of slopes

*Zheng-Yi Feng*<sup>(1)</sup> *Bo-Siang Lin*<sup>(2)</sup> *Sheng-hao Lin*<sup>(3)</sup>

Professor<sup>(1)</sup>, Graduate student<sup>(2)(3)</sup>, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, 402, R.O.C.

## ABSTRACT

Excess rainfalls often induce landslide. Due to landslides, the ground should change and cause self-potential to change. Also, seismic signal will be generated accompany landslides. This study uses physical model tests to observe the self-potential and seismic signals under the controlled factors, rain and groundwater increase. The research results show that self-potential can reflect groundwater rising and seismic signals can be corresponding to landslide events. The 12-hour rainfall test only caused surface erosion on the model slope, while groundwater rising cause the model slope easier to slide.

<sup>1</sup>(**Keyword**: Self-potential, seismic, landslide, physical model, rainfall, groundwater)

---

(1)國立中興大學水土保持學系 教授(通訊作者 e-mail: tonyfeng@nchu.edu.tw) (2)(3)國立中興大學水土保持學系 碩士生

## 前言

邊坡崩塌或滑動時，地表下土層會產生變化，而地層變化未能直接目測，所以須利用監測方式來了解。Troy et al.(2012)指出在材料於破壞時，材料之自然電場會產生變化。藉由實地測量，證實地震前之自然電場會有變化。

洪雋倫(2014)利用自然電位法與水分含量觀測法觀察淺層土壤入滲過程，探討水分含量與自然電位之關係。其研究結果顯示當土壤中水分改變，因電阻率變高，使電位值下降。當入滲試驗開始後，電極受水影響，電位變化量呈現下降趨勢，此時與背景電位值相減得電位差值，其電位變化量會逐漸變大。

Hattori et al. (2009) 以降雨強度 80 mm/hr 進行 110 分鐘人工降雨進行室內人造邊坡滑動試驗。室內人造邊坡為長 10 公尺、寬 1 公尺，而上部坡面為 32 度，下部坡面為 10 度。試驗結果如圖 1，箭頭 ①至箭頭 ②之期間，人造邊坡約於破壞前 30 分鐘，土壤由濕潤至飽和狀態，土體內孔隙水壓力逐漸上升，而自然電位差值也上升。直到圖中 ②箭頭之電位差值開始下降，而③箭頭為土體滑動破壞。其研究結果表示表層下水流動，可與土體位移及自然電位對應。

本研究利用中興大學水土保持學系降雨設備及地下水進水系統進行邊坡物理模型崩塌試驗。量測該邊坡物理模型崩塌過程中之自然電位變化，並與震動訊號比對之，也觀察電位差值變化量與地下水上升之關係。

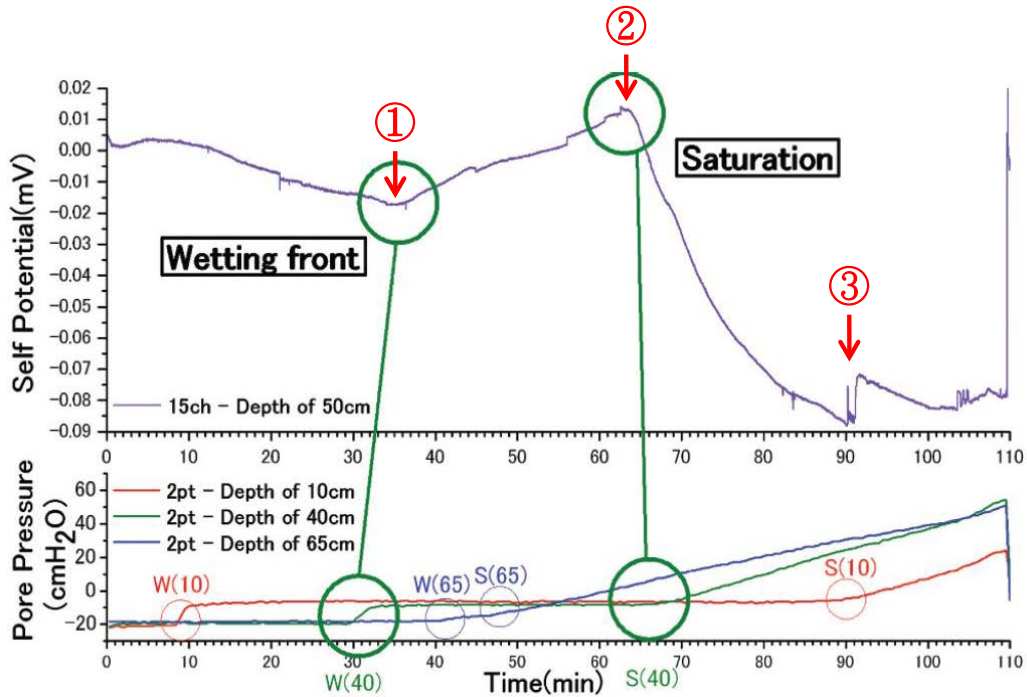


圖 1 自然電位差與孔隙水壓之變化(修改自 Hattori, et al. 2009)

Fig 1 Self-potential difference and pore pressure change (Modified from Hattori, et al. 2009)

## 研究方法與材料

本研究探討不同水文因子對崩塌破壞影響，並量測邊坡模型崩塌前後與自然電位及震動之對應關係。

### 一、邊坡物理模型崩塌試驗

#### 1. 試驗設備

##### (1) 砂箱

本研究將物理模型試體鋪設於砂箱中如

圖 2、圖 3 所示，尺寸與坡面角度可因需要改變。

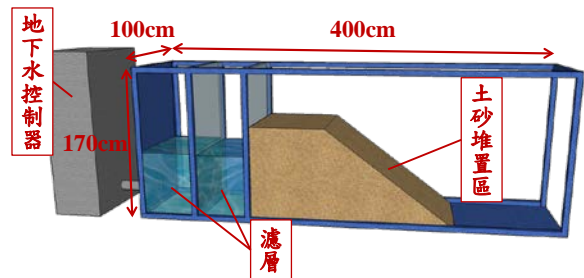


圖 2 砂箱示意圖

Fig 2 Schematic view of the sandbox test equipment



圖 3 砂箱之實體照片

Fig 3 A photo of the sandbox test equipment

## (2) 人工降雨器

人工降雨器以兩千支針頭製成，可調整不同降雨強度。

## 二、訊號量測

### 1. 非極化電極

非極化電極(Non-polarizable electrode)為一種量測自然電位(Self-potential)之感測器(圖 4)，利用兩個電極於不同位置量測，得到兩點間自然電位差。感測器內部之材料成分含有熟石灰、氯化鈉及氯化鉛，其底部放置鉛條，使內部電解液(氯化鉛)能與鉛反應，利用頂部銅線連結至資料擷取器。

### 2. 加速度規

本研究採用低頻率震動加速度規(Ultra

low frequency seismic accelerometer)為一種電壓式感測器。其敏感度高靈敏度(10 V/g)、共振頻率 850 Hz、最大振幅範圍 0.5 g peak。

### 3. 資料擷取器 (National Instruments CompactDAQ)

本研究利用 National Instruments CompactDAQ 資料擷取器(圖 5)記錄感測器訊號資料。



圖 4 非極化電極照片

Fig 4 The non-polarizable electrode

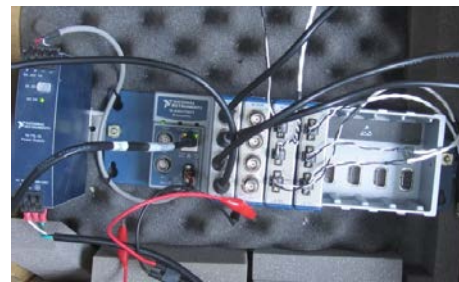


圖 5 NI CompactDAQ 機體

Fig 5 NI CompactDAQ datalogger

## 三、試驗模型和儀器佈設

本研究以均勻粒徑土砂堆置邊坡崩塌物理試驗試體(圖 6)，其頂部 85 公分、底部 180 公分、高 80 公分、寬 100 公分，坡面角度約

40 度。試體內佈設加速度規及非極化電極，感測器佈設位置如圖 7、圖 8。埋設一個非極化電極埋於坡頂正中央，此位置作為正極，作為其他非極化電極（負極）之參考電極。為了增長邊坡坡趾被破壞之時間，於邊坡坡趾埋入粗粒料(鵝卵石)，使細砂相較不易受雨水沖蝕或地下水滲流造成坡趾破壞。

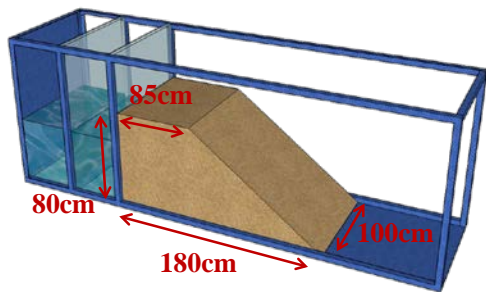


圖 6 邊坡物理模型尺寸

Fig 6 The sizes of the slope model

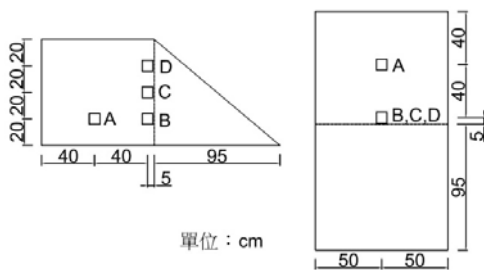


圖 7 加速度規佈設位置

Fig 7 Layout of the accelerometers

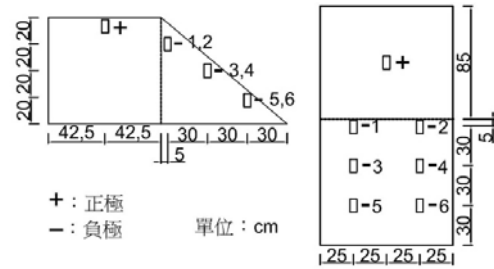


圖 8 非極化電極佈設位置

Fig 8 Layout of the non-polarizable electrode

#### 四、試驗材料

本研究細砂之粒徑分布曲線如下圖 9，得  $D_{10}=0.268$ 、 $D_{30}=0.339$  及  $D_{60}=0.486$ ，均勻係數  $C_u=1.813$  及曲率係數  $C_c=0.882$ 。屬於統一土壤分類法之 SP 砂土。

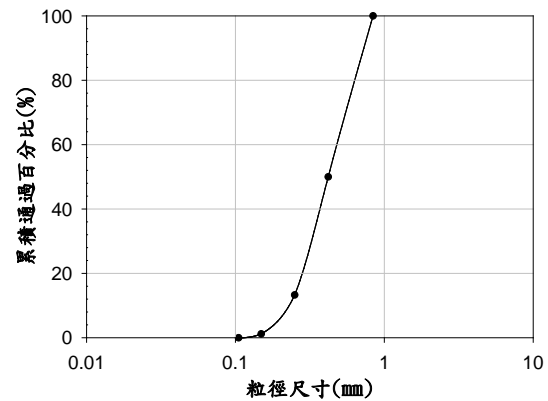


圖 9 試驗砂之粒徑分布曲線

Fig 9 Particle size distribution of the test sands

#### 五、試驗步驟

1. 試驗室儀器設備檢測，檢測地下水位控制器、降雨控制器、感測器(加速度規及非極

化電極)、電腦、資料擷取器等儀器。

2. 堆置土體，並埋設感測器。
3. 架設電腦、資料擷取器、攝影機，量測試驗數據。
4. 每次試驗先量測環境背景值以利參考。
5. 依不同水文因子控制條件(降雨與地下水上升)進行試驗。
6. 試驗結束停止量測。

## 結果與討論

### 一、模擬人工降雨 12 小時之結果

本次試驗降雨強度約為 90 mm/hr，持續降雨 12 小時，試驗過程中並無明顯崩塌(滑動)現象，但自然電位訊號於 1.6 小時開始上升(圖 10)，此現象為降雨入滲，導致其電壓上升。自然電位訊號上升約 1.4 小時達至尖峰後不再上升，判斷應為非極化電極所處位置之土砂體積含水量已達飽和狀態。

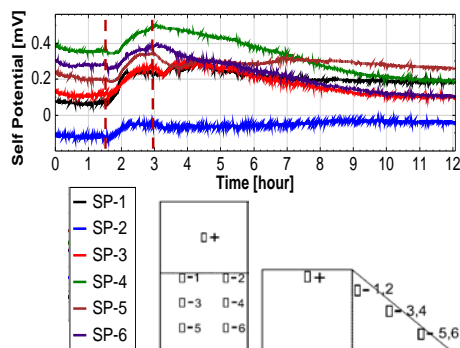


圖 10 六組非極化電極之自然電位訊號

Fig 10 The measured self-potentials by the six non-polarizable electrodes

### 二、不同水文因子探討

本次試驗分成 5 個試驗條件(表 1)，本文僅討論降雨對邊坡物理模型之影響，即試驗條件 1、2 與 4。圖 11、12 為加速度規及非極化電極之原始訊號。

表 1 五個試驗條件之影響因子  
Table 1 Control factors of the five test conditions

試驗條件	影響因子		歷經時間(sec)
	降雨	地下水	
1		無	0-540
		無	541-11340
		固定水位面 (40cm)	12500-13600
		固定水位面 (40cm) (增強)	13601-17200
		提升固定水位面(55cm)	17201-18000

#### 1. 試驗條件 1

試驗條件 1 為無降雨及無地下水影響，量測 9 分鐘之背景值供參考。在量測期間內，加速度規並無明顯震動訊號產生(圖 11-①)，

而非極化電極之自然電位差值也無明顯變化(圖 12-①)。

## 2. 試驗條件 2

試驗條件 2 進行降雨 3 小時，降雨強度約為 33 mm/hr。觀察試驗影片發現邊坡無明顯崩塌現象，僅因降雨影響邊坡表面砂粒沖蝕。

三個不同位置之加速度規無明顯震動訊號產生(圖 11-②)。但加速度規 D 之振幅較加速度規 B、C 為大。因加速度規 D 位於坡頂下 20 公分，易受雨水撞擊震動較大。而加速

度規 B 與加速度規 C 分別位於坡頂下 40 公分與 60 公分，因此受降雨震動影響較小。故淺層的加速度規訊號受降雨影響較大，其加速度振幅較大。

非極化電極之自然電位訊號從 0.65 小時開始緩緩上升，此現象為非極化電極接觸到雨水而產生變化(圖 13)。自然電位差值持續緩慢上升約 1.35 小時，因土砂體積含水量已達飽和狀態，自然電位訊號不再上升。此狀態應為雨水入滲使土砂含水量由濕潤達至飽和狀態。

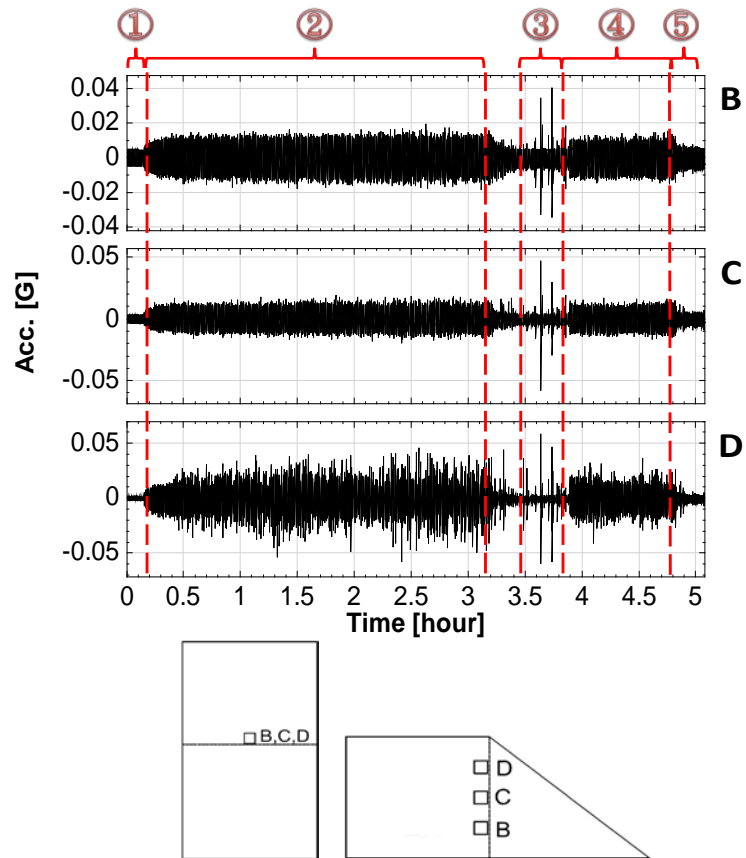


圖 11 五種試驗條件之加速度規原始訊號(Acc.單位:  $m/s^2$ , 以 G 表示)

Fig 11 The acceleration recorded of the five test conditions (Acc. unit:  $m/s^2$ , represented by G)



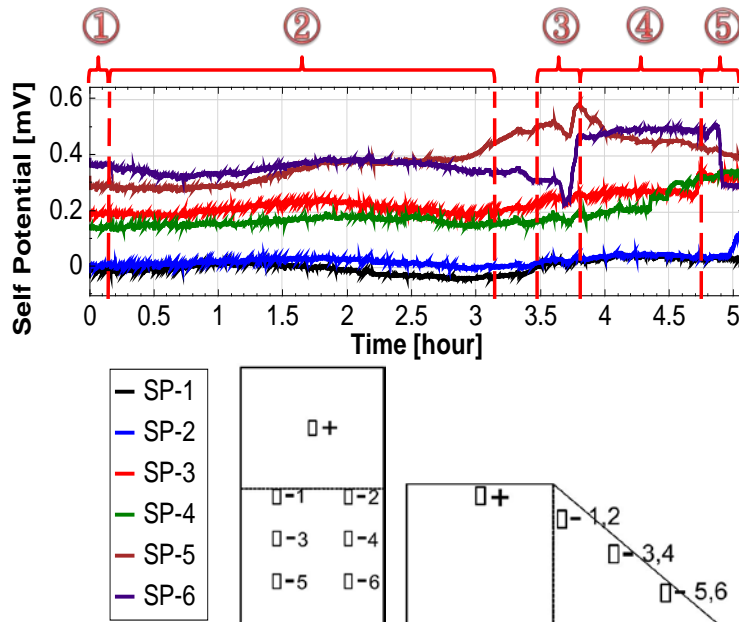


圖 12 五種試驗條件之自然電位訊號

Fig 12 The self-potential signal of the five test conditions

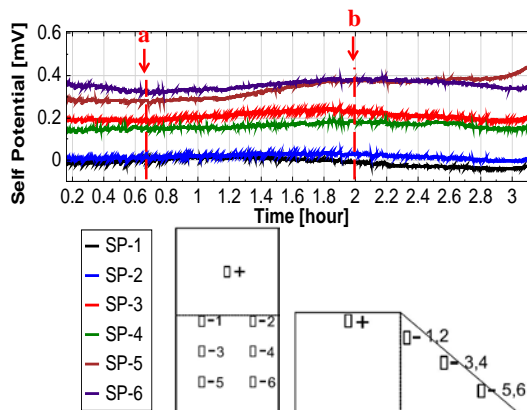


圖 13 試驗條件 2 之雨水入滲達至飽和時自然電位變化(a - b 為土砂含水量從濕潤至飽和狀態)

Fig 13 The self-potential signal changed by infiltration until saturation during the second test condition (The arrow a and b show the

duration from partially saturated to fully saturation.)

### 3. 試驗條件 4

影響因子為降雨與地下水，降雨強度約為 90 mm/hr，地下水水位高度為 40cm，降雨一小時。非極化電極訊號除了第 4 顆之外無明顯變化(圖 14)。可能是試驗條件 2 已降雨 3 小時，使邊坡砂土含水量達至飽和狀態，加上試驗條件 3 邊坡物理模型產生滑動位移變化，且造成非極化電極裸露於空氣中。

從 14000 秒開始進行降雨，試驗影片於 14705 有發生土體崩塌現象，但對應於加速

度規之 IMF 圖(圖 15)中，並無明顯震動訊號產生，皆為降雨撞擊造成雜訊。若擷取 14705 秒發生崩塌前後共 10 秒進行時頻分析(圖 15)，在 IMF 圖中，14705 秒處有明顯之較大震動振幅，但時頻圖中仍然無法辨識崩塌事件。若再將分析時間縮短為 0.5 秒，可發現於時頻圖(圖 16)在 14705.24 秒有較大的頻譜值，且與原始訊號及 IMF 圖皆能對應上。因此時頻圖是否能夠顯示崩塌事件與分析延時(duration)有關。

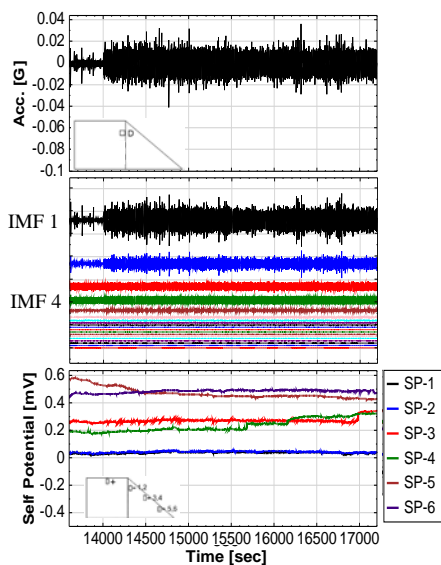


圖 14 試驗條件 4 之加速度規 IMF 及自然電位訊號

Fig 14 The IMFs of the acceleration and the self-potential during the fourth test condition

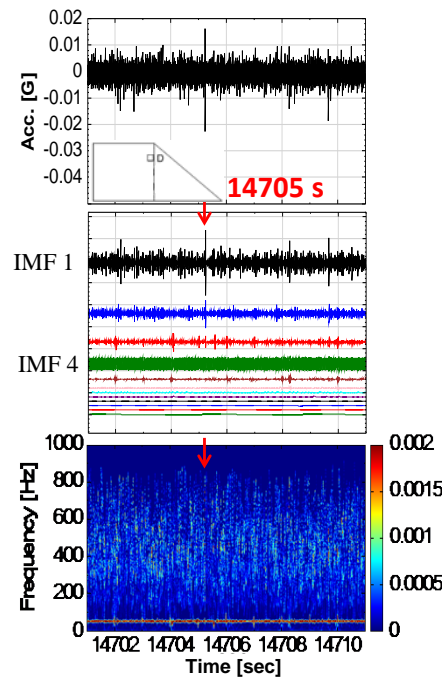


圖 15 於 14705 s 崩塌之加速度訊號時頻圖

Fig 15 The acceleration spectrogram of the sliding event around 14705 s

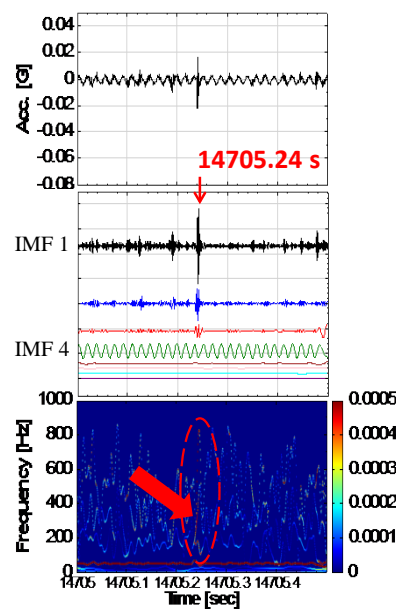


圖 16 於 14705.24 s 崩塌之加速度訊號時頻圖 (將分析時間縮短為 0.5 秒，發現紅色橢圓圈內箭頭顯示處有一頻譜值較高之紅色曲線，此乃崩塌訊號)

Fig 16 The acceleration spectrogram of the sliding event around 14705.24 s (The analysis time duration was shortened to 0.5 seconds. We found that a higher spectral (red) curve caused by the sliding event as shown in the dashed red ellipse circle.)

### 結論

1. 即使進行了 12 小時降雨，邊坡並無明顯崩塌，僅有表面沖蝕。而地下水上升影響邊坡崩塌較大。
2. 非極化電極所量測之自然電位能反應水體入滲。降雨使電位緩慢上升，然後逐漸下降，部分符合 Hattori et al.(2009)之量測結果。
3. 置於淺層的加速度訊號受降雨影響較大，即加速度振幅較大。
4. 震動訊號時頻圖是否能夠顯示崩塌事件與分析的延時有關。

### 誌謝

感謝行政院農業委員會水土保持局 (104 農科-12.1.1-保-S1)對本研究之支持。

### 參考文獻

1. K. Hattori, H. Kohno, Y. Tojo, T. Terajima, H. Ochiai (2009). “Early Warning of Landslides Based on Landslide Indoor Experiments”, in Ch. 20.8 of Landslides – Disaster Risk Reduction Monitoring. Ed. By K. Sassa and P. Canuti, p.363-366.
2. T. Shinbrot, N. H. Kim, and N. N. Thyagu (2012). “Electrostatic precursors to granular slip events”, Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 109, 10806-10.
3. 洪雋倫(2014),「利用自然電位法監測淺層土壤入滲歷程」,國立中央大學應用地質系碩士學位論文。

---

104 年 10 月 26 日收稿

104 年 11 月 17 日修改

104 年 11 月 30 日接受

水土保持學報 48 (4): 1851–1862 (2016)

Journal of Soil and Water Conservation, 48 (4): 1851–1862(2016)