

# 邊坡崩塌引起電位變化之室內試驗

馮正一<sup>(1)</sup> 林柏辰<sup>(2)</sup> 游繁結<sup>(3\*)</sup>

## 摘 要

本論文主要陳述建立一個大型室內邊坡模型設備。此邊坡模型設備可提供模擬地下水滲流與人工降雨之條件，並且可控制邊坡試驗的土砂試體性質與大小形狀，並進行模擬邊坡破壞。試驗過程中，以非極化電極之電位差變化量測為主進行了三組邊坡崩塌的試驗，並據試驗崩塌過程中電位差的改變，與崩塌時產生之振動訊號比對。發現在起始崩塌前電位差會下降，或可作為崩塌前的預兆，而且每次電位差驟減的變化，均可對應崩塌產生的振動訊號。

(**關鍵詞**：電位差、邊坡模型、振動訊號)

## An indoor experiment on the electric potential change due to slope failure

*Zheng-Yi Feng<sup>(1)</sup> Po-Chen Lin<sup>(2)</sup> Fan-Chieh Yu<sup>(3\*)</sup>*

Professor<sup>(1)</sup>, Graduate student<sup>(2)</sup>, Professor<sup>(3\*)</sup>, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung402, Taiwan, ROC

## ABSTRACT

This paper describes the establishment of an indoor equipment for model slope testing. The equipment provides the simulation conditions of groundwater seepage and artificial rainfall to fail model slopes. We can control the soil properties and shape of the model slopes. During test process, there were three model slope failure tests performed with non-polarizable electrodes to measure electrical potential. According to the electrical potential changes and the corresponding vibrational signals during failure process of the model, we found that electrical potential will decrease before the initial sliding of the model slopes. This finding may be implemented as a precursor for landslide. Variations of the electrical potential can be corresponded to the seismic signal generated by the model slope sliding.

---

(1)國立中興大學水土保持學系教授

(2)國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

(3)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail: fcyu@nchu.edu.tw)

(**Keywords:** electrical potential, slope model, vibrational signal)

## 前言

現今邊坡災害對於台灣人民的生命財產安全危害甚大，又因礙於野外實地的邊坡災害之監測與觀察困難，本研究藉由建立一大型室內邊坡模型砂箱堆製土砂邊坡試體進行室內試驗。經由對砂箱內邊坡試體之控制，如試體大小、材料、邊坡坡度、地下水位高度等，使邊坡試體產生崩塌(Landslide)，並量測試驗過程中的多項物理量變化。本研究所使用的邊坡模型試驗設備，可量測的物理量可包括試體之水分含量、導電度、溫度、負孔隙水壓、電場電位差與振動訊號等。可以觀察與分析邊坡試體崩塌破壞之關聯性。

本研究主要目的為探討邊坡試體崩塌時與電位差變化訊號之關聯性。本研究之室內邊坡模型，以非極化電極與加速規進行模型邊坡崩塌時之電位差與振動訊號之量測。

本文整理三次模型試驗結果，發現在邊坡試體崩塌前電位差訊號會開始逐漸下降，而在每次崩落發生時，電位差訊號將會產生變化且均會伴隨振動訊號。本文中先探討地下水滲流造成的破壞，降雨導致破壞的條件之試驗尚未討論。

## 文獻回顧

本試驗主要以電位差分析試體崩塌過程，故參考 Hattori, et al. (2009)，在邊坡模擬試驗中以電位儀器布置於邊坡試體內以測量試體

破壞過程中之電位改變量。並於破壞試驗前以降雨設備使土體飽和，所得結果主要邊坡破壞前三十分鐘，土壤內部孔隙水壓上升，如圖 1 之①號箭頭所示為電位開始下降，②號箭頭所示為試體開始破壞。

本試驗使用室內邊坡模型砂箱進行試驗，故可參考簡睿宏(2009)於建立之模型砂箱試驗之過程與結果。簡睿宏(2009)於水文因子導致邊坡崩塌之研究一文中，以 66\*66cm 之砂箱進行試驗，所得結果如下

(1)文中指出地下水模擬滲流之水位高度會直接影響試驗進行的時間長度，地下水滲流所造成的破壞只沖刷破壞坡趾，對於坡頂並不影響。

(2)配合降雨條件的試驗中，坡趾會因土體表面增加含水量而產生破壞下滑現象。

(3)不論以地下水滲流或是人工降雨為條件之崩塌破壞時，土壤水分含量皆達飽和。

簡睿宏(2009)並在實驗建議中指出因水文環境試驗箱之尺寸問題使坡體兩側砂土因邊界效應而不容易崩落。

相對於簡睿宏(2009)的小尺寸模型所導致之邊界效應，本研究使用之試驗砂箱長寬高分別為 3m、1m、1.5m，使土壤邊界效應之影響較小。同時本研究之試驗砂箱也能提供模擬地下水滲流與人工降雨為條件因素。

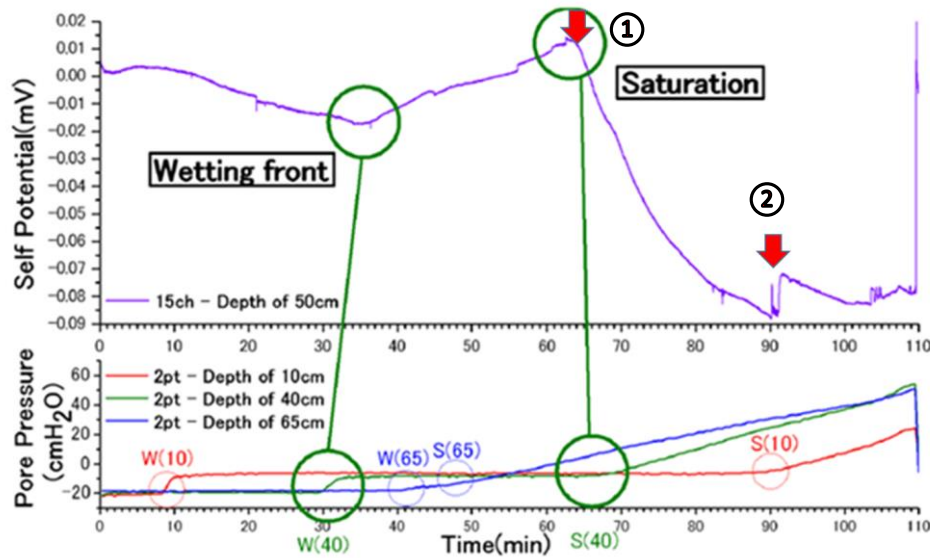


圖 1 孔隙水壓及電位差變化 (Hattori, et al. 2009)

Figure 1 pore pressure and self potential difference

## 研究方法

### 一. 儀器設備簡介

本研究利用國立中興大學水土保持學系建立之室內邊坡模型砂箱設備，在砂箱中堆置土砂邊坡模型試體進行模型邊坡破壞試驗，以量測破壞過程中之個物理量變化。邊坡試體將因為地下水滲流而導致管湧破壞，破壞過程中以非極化電極感應器量測電位差變化，以進行分析探討。其試驗設備如下：

#### 1. 邊坡物理模型砂箱之建立

本研究利用室內大型邊坡物理模型砂箱，其分為三個部分：土體槽、濾水層與水箱。土體槽後之濾水層及水槽可供應水，以模擬地下水上升之情況。另外還有控制水頭箱系統，由抽水馬達將蓄水槽內的水抽至控制水頭箱內，藉由調整控制水頭箱高度來控制模

型邊坡之地下水位高度。

土體槽為長 4m 寬 1m 高 1.5m，模型邊坡試體將會在此被堆疊成各種需要測試的形狀與土質，如圖 2 中之土壤堆疊成一模型邊坡試體。試體土壓主要由兩側之強化玻璃、鋼支架與鋼網來支撐。

位於模型槽後方之濾層和水箱，係由兩片佈滿直徑 5mm 孔隙之鋼製濾網隔開，兩片鋼製濾網皆綁上透水織布以防止試體砂粒回流阻塞管路。濾層中可以放置試驗時所需求的濾材，其濾材之粒徑應大於試體砂粒之粒徑，因本研究因在放置透水織布後，已能使水流入滲邊坡試體穩定，故並未放置濾材。由水箱中之水位可測得邊坡試體之地下水位高度，以提供試驗結果分析之用。

控制水頭箱系統由一可升降之控制水頭箱來調整高度，以控制水箱中水位高度。控

制水頭箱上有三條管線，其中兩條管線連接至蓄水池中，一條為抽水馬達經由從蓄水池抽至控制水頭箱之管線，上有一閥門可控制流量。另一條管線則將多餘的水量從控制水頭箱迴流至蓄水池中。第三條管線連接控制水頭箱與土體槽之水箱，此管線中也設有一閥門可調整控制水頭箱至土體槽水箱之流量。

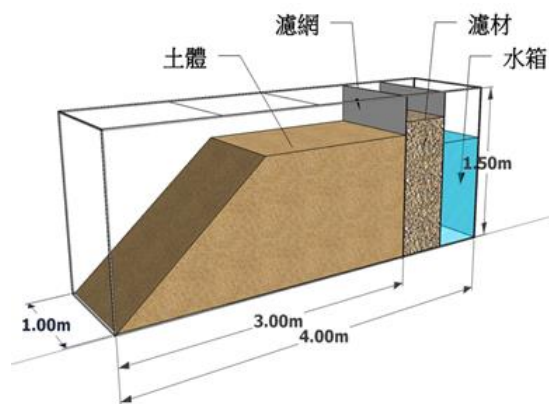


圖 2 邊坡模型土體槽示意圖

Figure 2 Schematic of the slope model



圖 3 邊坡模型設備

Figure 3 The equipment of the slope model

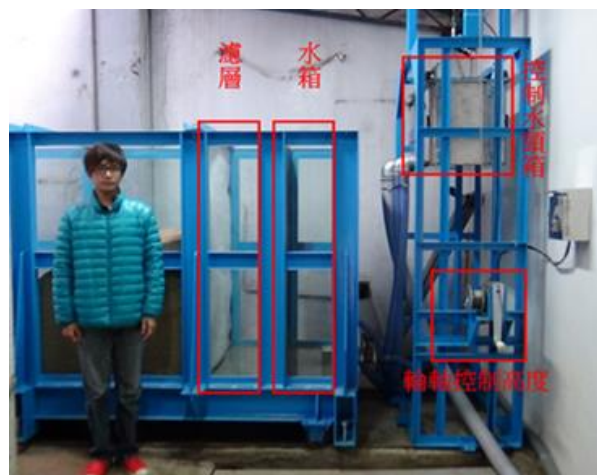


圖 4 邊坡模型後部結構

Figure 4 The backside of the equipment for the slope model

## 2. 測量感測器之準備

(1)非極化電極(non-polarizable electrode): 本研究使用非極化電極，量測電位差。一般電極(如電池)會在試驗過程中因極化現象電位變化逐漸變小，影響試驗數據，故使用較接近理想非極化現象之電極，不因通過之電流大小影響電位差量測，使試驗數據更為精確。極化現象因電流的移動影響，陰陽離子的移動來不及補充，導致電位差下降之現象，理想非極化電極是不產生極化現象之電極。(http://baike.baidu.com/view/270536.htm)

圖 5 為本試驗使用之非極化電極，其使用方式為兩個非極化電極一組(a pair)，一個接正極另一個接負極，兩顆非極化電極間可量測一組電位差。非極化電極可分別放在不同位置，以量測各組之非極化電極所在位置的電位差。



圖 5 非極化電極

Figure 5 The non-polarizable electrode

(2)加速度規(accelerometer): 本研究使用的加速度規是一種電機式感測器，內部有壓電式回饋系統感應慣性力回饋電壓到資料

處理器上，經由產生振動輸出與加速度成正比的電子信號。在此試驗中用於量測崩塌破壞產生的振動訊號。

(<http://www.me.lhu.edu.tw/~sdchen/SensorLab/G28.pdf>)

(3)基質吸力感測器:將基質吸力感測器埋設於邊坡模型崩壞可能處，量測土壤在不飽和狀態下之基質吸力。土壤基質吸力與土壤含水量有極大關係，可藉以探討土壤邊坡崩塌時電位差變化、基質吸力與含水量變化之間的關聯性。

(4)土壤含水量感應器:將土壤含水量感應器埋設於土壤邊坡模型內部，量測在不同條件下之含水量變化趨勢。此量測值與非極化電極所量測之電位差可進行比較，可探討電位差在含水量變化時之關聯性。

本文主要著重於電位差與加速度規之振動訊號以分析崩塌滑落之機制，故基質吸力感測器與土壤含水量感應器在本文中暫不探討。

## 二. 試驗步驟:

(1)考量邊坡模型砂箱尺寸，堆置試驗試體大小為坡頂長、坡底長、寬、高分別為 1m、2m、1m、1m 之梯型邊坡試體。並於每一次試驗邊坡模型堆置完成後，試體均靜置一日，使土體內之水分可較為均勻分別分布於試體內。

(2)依本研究數次預備試驗之經驗，在同樣試體條件下，模型邊坡試體破壞時間與地下水水位水頭高度約略成正比。故將水頭調高至垂直距離坡底 60cm 高度，可將破壞時間約

略控制至 1 小時內，以利於攝影器材攝影及試驗進行。

(3)試驗前將非極化電極與加速規安置於

邊坡試體內，放置 5 組非極化電極(負極)至土體邊坡內 A1、A2、B1、B2、C 如圖 6 所示，且都對應至坡頂的非極化電極 D(正極)。

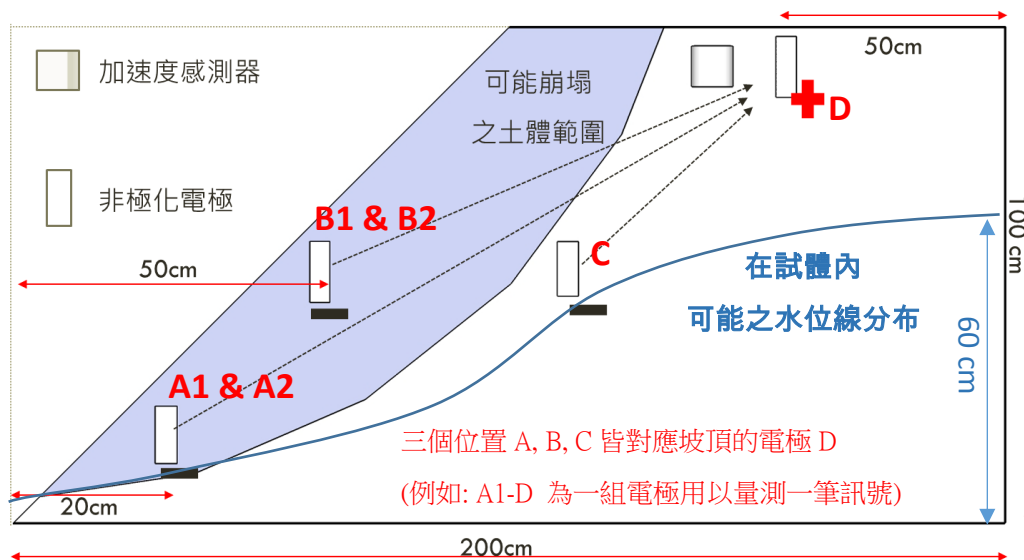


圖 6 邊坡物理模型探測器布設位置側視示意圖

Figure 6 The side view of the sensor arrangement

(4)開啟馬達開關抽水模擬地下水開始紀錄電位差變化與振動訊號，並開啟攝影機開始攝影邊坡試體管湧破壞過程量，至邊坡試體因地下水管湧破壞之影響逐漸減少並無變化後為結束試驗之時間。

(5)試驗結束並使用電腦處理數據，並對應邊坡試體崩塌時電位差變化與邊坡崩塌之關聯性。

從試驗開始將水箱高度調整為距坡底 60 公分高處，由馬達引水至水箱，各個探測器之資料擷取器開始記錄，並同時由正面之攝影機，錄下邊坡試體破壞過程，以供崩塌事件比對。試體破壞之情況不顯著後，即停止試驗與記錄。

## 結果與討論

本試驗進行之前，先量測各組非極化電極之電位差背景值 (如圖 7)，此背景值可能是空氣與儀器之各種雜訊在未連成電位通路前所造成，以作為此討論之基準。

第一次試驗 A1-D, A2-D 兩組非極化電極之電位差數據如圖 8、9 所示。註 A1, A2 為兩個非極化電極放置於側視圖上同一位置 (圖 6)。A1-D, A2-D 這兩組數據之電位差變化趨勢甚為相似，證明使用不同組的非極化電極來進行電位差的量測，其數據是相近的，也代表本試驗的準確性是足夠並可接受。

時間軸為 0 時同時也是以模擬地下水滲

流的開始，可以由圖 8、9 電位差與圖 7 之背景值比較，在土體因含水量上昇而形成利於電勢能之通路後，使得電位差開始上昇，在約 145 秒時達到此次試驗電位差之最大值後，開始下降。

由加速度規所量測之訊號，可以用來比對電位差變化之資料。圖 10 中振動訊號與攝影機影像比對得知，每一次邊坡試體崩塌會產生振動訊號，電位差也會同時有所改變，對應其時間幾乎同時。

圖 10 為加速度規量測所得之振動訊號。  
在邊坡試體因管湧破壞崩塌產生振動時，經

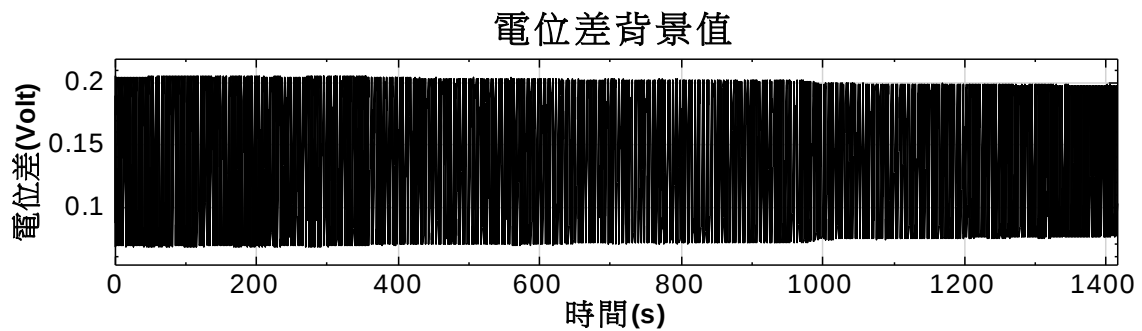


圖 7 第一次試驗之 A1-D 電位差背景值

Figure 7 The background electrical potential of A1-D of the first test

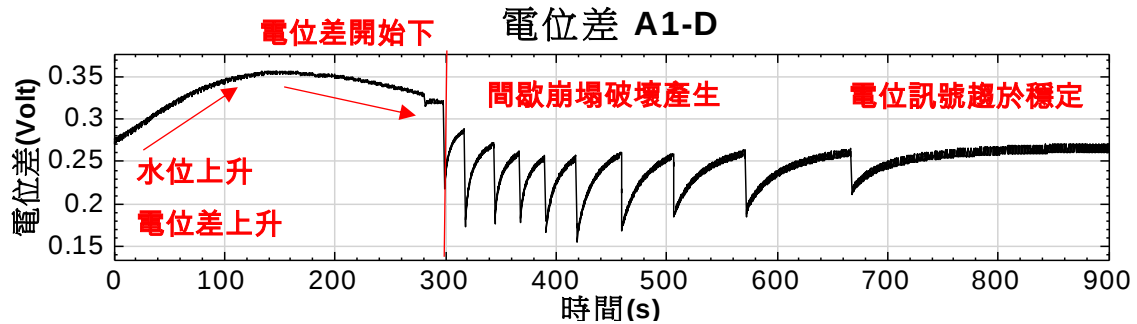


圖 8 第一次試驗之 A1-D 電位差-時間關係

Figure 8 The A1-D electrical potential of the first test

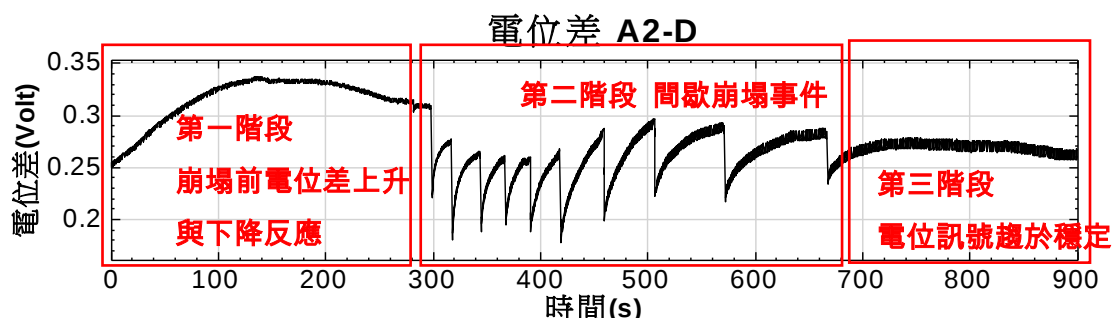


圖 9 第一次試驗之 A2-D 電位差-時間關係

Figure 9 The A2-D electrical potential of the first test

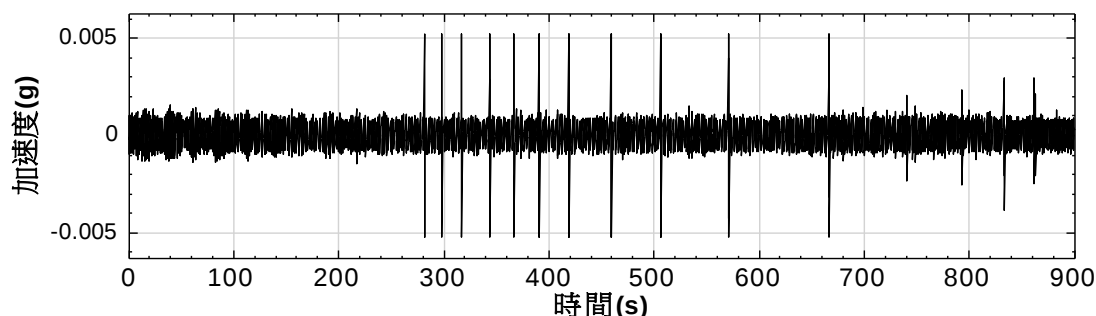


圖 10 第一次試驗之振動訊號

Figure 10 The vibration signal of the first test

以攝影機影像比對此次試驗中之振動訊號，試體約在 300 秒時在試體上方產生所謂崩塌體之「冠部」，亦為此第一次試驗中之最大滑動量。而且此時(300 秒)之電位差值驟減，之後每一個電位差突然下降的現象均能對應到振動訊號。

由此推論在土體崩塌的瞬間，邊坡試體之電勢能通路忽然改變，造成了電位差下降。而在時間 700 秒後，邊坡試體因地下水管湧破壞之影響逐漸減少，此時試體變動量已經不大，電位差訊號開始趨於穩定。

對於第一次試驗之訊息，將試驗過程之電位差變化分為三個階段(如圖 9 之標示)，以利於討論。第一階段為因水位上升形成電場通路而造成電位差上升至第一次土體崩塌前之階段；第二階段為第一次土體大量崩塌後，在接下來間歇的崩塌事件中電位差產生的變化；第三階段為試體管湧破壞漸次減少，電位差訊號趨於穩定的階段。

值得注意的是在第一階段內，約於 145 秒時之電位差到達極值並開始緩慢下降至時間 300 秒時才產生第一次崩塌，在這時段內

(145-300 秒)電位差緩慢下降。但觀察攝影機之影像與振動訊號中,並沒有發現任何事件。因此推測可能是土體內部結構開始因滲流管湧而產生變化(或位移),導致電位差逐漸下降。此電位差逐漸下降的現象,未來或許可應用於崩塌前兆之評估與預警。

圖 11、12 為第二次試驗之電位差訊號與振動訊號。試驗過程中亦有電位變化之三個

階段與崩塌前之電位差下降情況。在時間 1200 秒後,比對攝影機影像之結果,邊坡試體表面的小土塊崩落所產生的振動訊號仍可以辨識,但是這些小土塊崩落並沒有辦法經由電位差變化的訊號(圖 11)來辨識。所以在小崩塌塊體落下時產生的振動訊號比電位差訊號易於辨識崩落事件。但振動訊號也較電位差訊號容易受到人為與環境噪音之干擾。

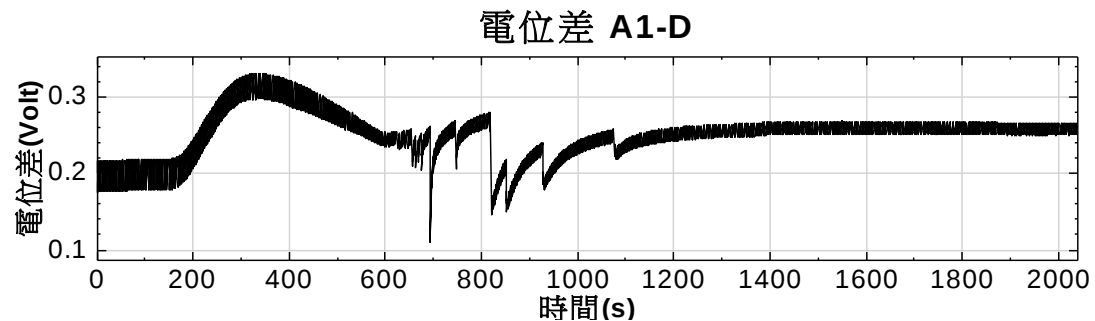


圖 11 第二次試驗之 A1-D 電位差-時間關係

Figure 11 The A1-D electrical potential of the 2nd test

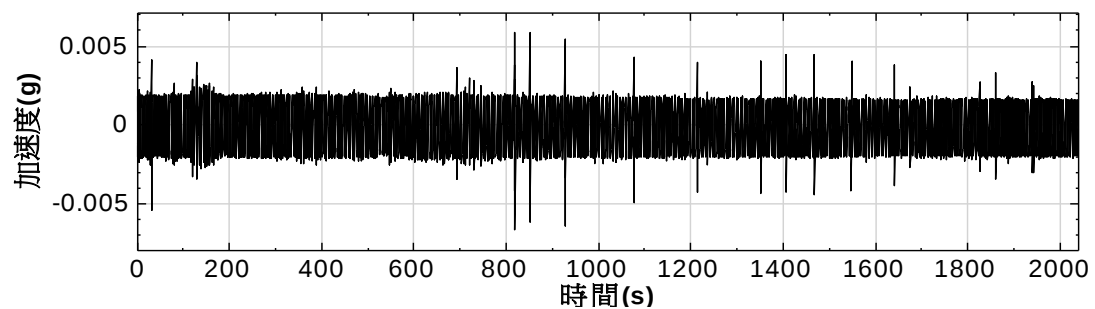


圖 12 第二次試驗之振動訊號

Figure 12 The vibration signal of the 2nd test

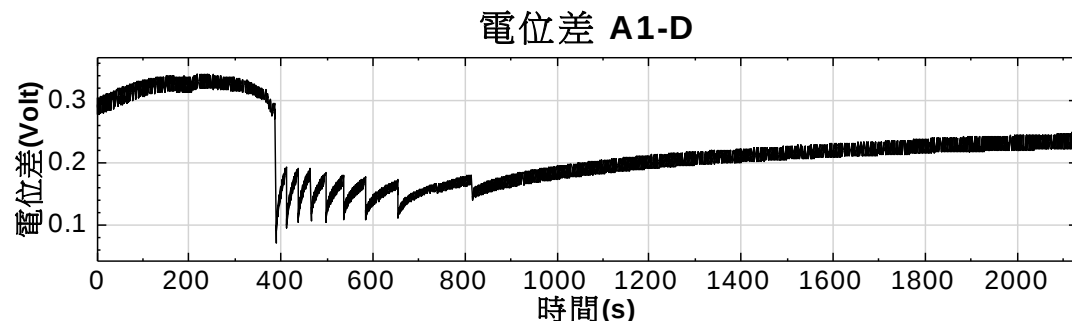


圖 13 第三次試驗 A1-D 電位差-時間關係  
Figure 13 The A1-D electrical potential of the 3rd test

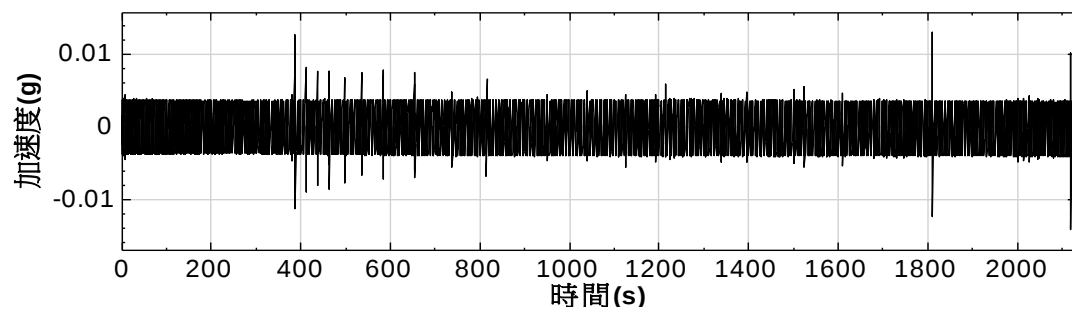


圖 14 第三次試驗之振動訊號  
Figure 14 The vibration signal of the 3rd test

圖 11 中可見約 700 秒處之電位訊號反應，中均不同所致。比對圖 12 中相同時間之振動訊號的反應來的大，對照攝影機影像中的結果可瞭解，此次崩塌的土砂量不少，但是振動訊號卻不明顯，其原因何在有待未來後續研究再進一步探討振動訊號與土壤崩塌量的關係。

圖 13、14 中為第三次試驗之結果，亦有前述三個階段的過程。第三次試驗中之最初崩塌導致電位差變化較第一、二次試驗為大。推估應該是因電位差背景值在三次試驗

## 結論

本研究以邊坡模型試驗設備進行邊坡滲流管湧破壞之試驗，由三次試驗觀測結果及分析。本研究獲得初步結論如下：

在每次試驗初次崩塌前約 150 秒至 200 秒不等，皆有發生電位差開始緩慢下降之趨勢，此等現象或可作為崩塌前兆之預警。而

且由每次電位差驟減的變化均可對應崩塌產生的事件。

本研究歸納邊坡試體破壞過程可分為三個階段：(1)第一階段為滲流水位開始上昇，電位差訊號逐漸上升至一極值後開始緩慢下降。此一緩慢下降之現象可能為崩塌前之前兆。(2)第二階段為間歇崩塌事件。可觀察到許多次崩塌事件。而電位差之變化亦可對應至振動訊號。(3)第三階段為為試體管湧破壞漸次減少，電位差訊號趨於穩定的階段。

### 誌謝

本研究承國科會 NSC 102-2625-M-005-008-計畫之支持與中央大學陳建志教授對電場量測的協助，作者們在此一併表達感謝之意。

### 參考文獻

1. Katsumi Hattori, Hitomi Kohno, Yasunari Tojo, Tomomi Terajima, Hirotaka Ochiai (2009) “Early Warning of Landslides Based on Landslide Indoor Experiments”, in Ch. 20.8 of *Landslides – Disaster Risk Reduction Monitoring*, Ed. By Kyoji Sassa and Paolo Canuti, e-ISBN: 978-3-540-69970-5, p.363-366.
2. 簡睿宏(2009)，「水文因子導致邊坡崩塌之研究」，國立高雄大學土木與環境工程學系碩士論文。

---

103 年 06 月 26 日收稿

103 年 07 月 01 日修改

103 年 07 月 04 日接受

水土保持學報 46 (4): 1149–1160 (2014)

Journal of Soil and Water Conservation, 46 (4): 1149 – 1160 (2014)