

應用 ERT 法於崩場地特性調查與水分變化之研究

馮正一^[1] 陳奕凱^[2] 鄭旭涵^[2]

摘要 傳統鑽探法與地球物理探測法中之地電阻剖面影像法 (electrical resistivity tomography, ERT) 被廣泛運用於崩場地調查, 鑽探法可提供真實的單點地層資訊但施作成本較高, 而 ERT 法施測方便、經濟, 且能快速取得地表下構造之電阻特性。本研究結合 ERT 法與傳統鑽探, 於南投縣中寮鄉之一處崩場地進行試驗, 針對崩塌後之地層狀況、降雨事件前後地層電阻率之變化以及不同電極排列法之適用性等課題進行探討。結果顯示, 地電阻法對崩場地堆積區之探測成果大致與鑽探資料吻合。兩時期間的電阻率變化量顯示乾季時的地表下電阻較濕季時高, 電極排列法則以 Pole-Pole 排列最適用於本試區之地層。另外並驗證了山邊溝可間接促進水分入滲進入邊坡。

關鍵詞: 地電阻剖面影像法、鑽探法、電極排列、崩場地。

Applying ERT to Investigate a Landslide Area and the Variation in Water Content

Zheng-Yi Feng^[1] Yi-Kai Chen^[1] Jero-Hertz Jeng^[2]

ABSTRACT Traditional drilling and Electrical Resistivity Tomography (ERT) are widely applied to the investigation of landslides. Borehole data provide substantial information of strata but drilling work is expensive. ERT is relatively rapid and economical for investigating a large area. In this study, boring and ERT methods were applied to examine an old landslide area in Chung Liao, Nantou, Taiwan to understand the subsurface conditions. We discuss the variations in resistivity following rainfall and the suitability of the electrode array types. The thickness of colluviums detected by ERT agrees with the borehole data, as indicated in the results. Surface resistivity in the dry season is higher than that of the wet season. The pole-pole array type is the best electrode arrangement in this study area which is in a sedimentary formation. It is also verified hillside ditches can assist in rainfall infiltration.

Key Words: Electrical resistivity tomography (ERT), drilling, electrode array, landslide.

一、前言

台灣地處亞熱帶, 雨量豐富但分布不均, 在兩千

五百多毫米的年平均雨量中, 有 70% 集中於 5~10 月間。大量的雨水由地表入滲至邊坡內, 除了增加邊坡荷重外, 孔隙水壓的上昇亦使邊坡土體抗剪強度降低

[1] 國立中興大學水土保持學系副教授 (通訊作者)
Associate professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C. (Corresponding Author)
E-mail: tonyfeng@nchu.edu.tw

[2] 國立中興大學水土保持學系碩士研究生
Master, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

而導致邊坡破壞。因此集中豪雨乃是造成崩塌的主要自然影響因素之一。

崩塌地調查的目的為了解崩塌地之範圍、環境特性、發生條件及易致災對象等相關資料，從而提供最有效而經濟之防治規劃依據。其中鑽探法與地球物理探測法現今已被廣泛運用於崩塌地調查的作業中。傳統的鑽探法雖可直接獲得地層剖面與地質等真實資訊，其缺點為獲得的資訊為點資訊，且價格昂貴。地球物理探測法中之地電阻法（electrical resistivity tomography, ERT），施測方便，可快速取得地表下構造之電學性質，並建立地表下二維甚至是三維的構造模型，以調查地層資訊。但實際上地層的電阻率往往受到各方因素所影響，僅僅由 ERT 所得結果則不易判釋實際的地層狀況。Godio *et al.*等（2005）指出地層的電阻率同時受到地質組成特徵與水文地質因子所影響，為了降低上述因子的影響程度，建議比對鑽探資料或一併考慮震測折射法（SRT）或表面波法（SWM）的測量結果。若能結合兩方法的優點，以鑽探點資料輔助判釋 ERT 法所推估之地電阻性質，進而獲取大範圍的地層資訊，將可提供當地工程問題決策之參考。

ERT 法至今已發展出數種不同的電極排列法，任一種排列法具有其優缺點及適用性。梅興泰等（2006）研究指出，當施作 ERT 法遇到地形變化劇烈或地下物為非均質狀態，施測電極排列的選用以及施測後對視電阻率曲線的初步判讀，將會影響到整體資料判讀上的正確性。

為了研究地表下電阻率隨時間的變化關係，ERT 法時常被重複運用在同一測線上且不同時間之電阻率測量，此類研究包含調查滲流區水流、抽水導致的地下水位變化、化學污染物的流動與洩水的水壩（Loke 1999）。對於地表下含水量變化之調查，Auken（2006）整理 Loke and Barker 以 1999 年 11 月 15 日之電阻率為基準，觀察不同時間點所造成之電阻變化率發現，1999 年 11 月至 2000 年 9 月間，地層電阻率的變化，可反應地層的含水量隨降雨及季節影響而改變的現象。

本研究將以南投中寮一處舊崩塌地為試區，選定四條測線並嘗試使用三種不同之電極排列法（Wenner、Pole-Pole、Dipole-Dipole）分別於 2008 年 7 月中旬與 10 月中旬進行 ERT 的測量並實施鑽探。再將蒐集到之數種不同電極排列之 ERT 測量結果，與鑽探資料與 SPT N 值，以及降雨資料做比對，

針對以下課題進行探討：

1. 邊坡崩塌之地層狀況與崩積土的分布。
2. 降雨事件前後水分影響地層電阻率之變化情形。
3. 不同電極排列法之適用性。

二、研究材料與方法

研究試區選定南投縣中寮鄉一處舊崩塌地，分別於坡頂與坡趾的位置各選定兩條測線，於 2008 年 7 月中旬與 10 月中旬各進行一次 ERT 量測，每條測線最多使用三種不同電極排列法施測，施測同時進行測線地形測量，再於測線交叉處附近實施鑽探作業。其次將現地測量之資料套疊地形資料利用 RES2DINV 軟體進行反算分析與電阻率變化率計算。最後整理地電阻反算資料、鑽探所得之岩芯與 SPT 資料以及施測當月中寮地區之降雨量進行分析與討論。整體研究流程如圖 1 所示。

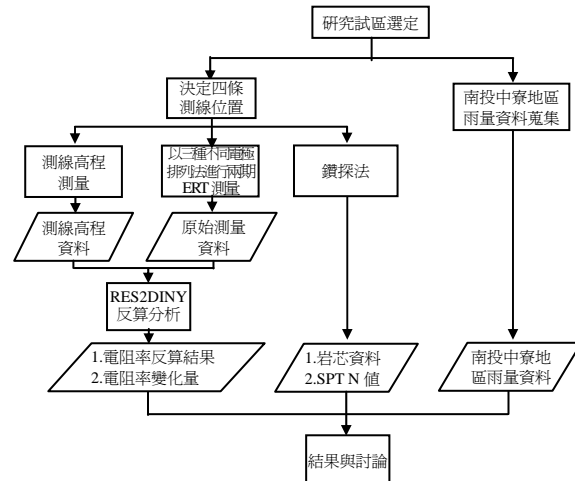


圖 1 研究流程

Fig.1 Flow chart of this study

1. 研究區域概述

本研究選取南投縣中寮鄉復興村一處曾發生過地滑且已進行坡地保育處理之邊坡作為試驗地區，如圖 2。試區山坡地上主要作物為柑桔，邊坡坡面有縱向排水、山邊溝、等高耕作等坡地保育處理；本試區在 1997 年 8 月溫妮颱風侵襲時有頗具規模的地層滑動，之後於坡頂上方邊坡施作擋土牆，在坡趾下方施作箱籠，目前尚稱穩定。

本試區地層屬頭料山層香山砂岩段，香山砂岩主要由厚層砂岩和砂岩與頁岩或泥岩之互層所組成。砂

岩呈淡灰、青灰或灰綠色，風化後呈黃棕色。顆粒為中粒至細粒，有些則為粉砂岩。膠結相當疏鬆，膠結物主要為粘土。本層具有板狀及槽狀交錯層、波痕、球狀或枕狀等原生沉積構造。少數的礫石薄層偶夾在砂岩或泥岩之中（中央地質調查所，2006）。

本研究選定之四條測線分布情形如圖 2，其中測線 ERT1 與 ERT2 位於坡頂處，測線 ERT3 與 ERT4 位於坡趾處，再於兩兩測線交點處附近進行鑽探作業。施測時間與使用之電極排列法如表 1 所示。施測日期當月之逐日降雨量，如圖 3、圖 4 所示。

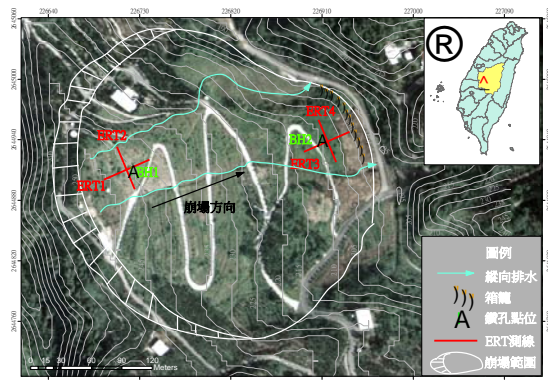


圖 2 研究試區與測線位置

Fig.2 Location of the investigation

表 1 ERT 測線與電極排列

Table 1 ERT and the array types

測線編號	施測時間	使用之電極排列法		
		Wenner	Pole-Pole	Dipole-Dipole
ERT1	20080716	●	●	
	20081015	●	●	●
ERT2	20080716	●	●	
	20081015	●	●	●
ERT3	20080721	●	●	
	20081016	●	●	●
	20080716	●		●
ERT4	20080721		●	●
	20081016	●	●	●

2. 地電阻法 (Electrical Resistivity Tomography, ERT)

ERT 法的施測方法 (Loke 2004) 是將兩根電流極 (C1、C2) 與兩根電位極 (P1、P2) 插入地表 (圖 5)，傳導直流電或非常低頻交流電進入地底產生人為電場，分別利用電位極與電流極量測電位差與電流，

依據電極排列方式不同，對應到不同的空間幾何因子，經由靜電學理論計算出視電阻率 (Apparent resistivity)，如式(1)所示。

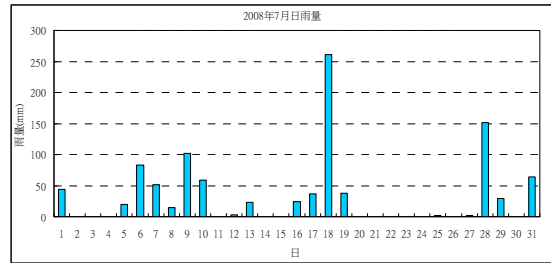


圖 3 南投縣中寮鄉 2008 年 7 月日雨量圖 (中央氣象局)

Fig.3 Daily rainfall during July 2008 in Chung Liao

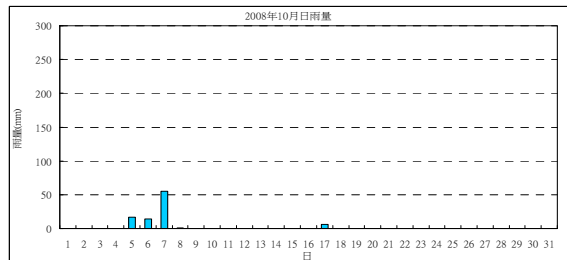


圖 4 南投縣中寮鄉 2008 年 10 月日雨量圖 (中央氣象局)

Fig.4 Daily rainfall during October 2008 in Chung Liao

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left\{ \left(\frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} \right) - \left(\frac{1}{r_{c1p2}} - \frac{1}{r_{c2p2}} \right) \right\}} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

K 為電極排列幾何參數， ΔV 為電位極量測的電位差， I 為輸入的電流強度， r_{c1p1} 為電流極 C1 至電位極 P1 的距離，以下類推。因此只要測得一組 ($K, \Delta V, I$) 即可依上式算出視電阻率，若將電極間距 (展距) 逐漸加大，就可依次測得由淺至深的地層訊號，如圖 6 所示。所謂的視電阻率 (Apparent resistivity) 即為在真實地層中量測時，因為地質材料常為非均質，改變電極間距與位置所量測到的電阻率會有所改變，並不能代表實際電阻率，需要經過反算分析才能得到代表地層的電阻率分佈。

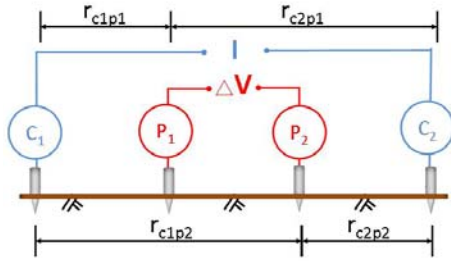


圖 5 地電阻量測基本排列示意圖（修改自 Loke 2004）

Fig.5 Arrangement of basic resistivity measurement

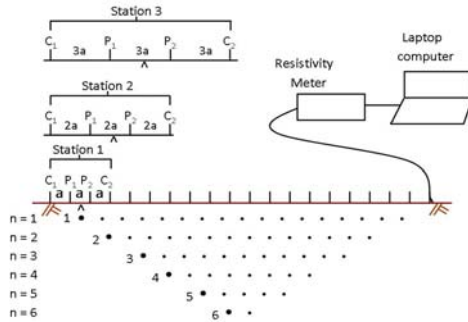


圖 6 ERT 施測順序（修改自 Loke 2004）

Fig.6 The sequence of ERT measurement

3. 二維地電阻反算軟體 RES2DINV

本研究使用 Geotomo 公司開發的 RES2DINV 地電阻影像反算軟體 (Loke, 2007)，針對現地所量測得之資料進行反算模擬。此程式所採用之反算分析方法以「平滑束制最小平方法」為基礎，也就是將高斯-牛頓最小平方的公式，進一步修改，使模型參數在空間中不會有太大的變化，此即為平滑束制最小平方法。此方法的優點是能使阻尼係數與平滑濾器能適用於不同的資料類型。此技術比傳統的最小平方法在龐大資料組的處理上，更為快速且更加節省記憶體。

程式演算時，首先使用正算程序將 2D 地體模型分成矩形網格，以有限差分法或有限元素法決定網格中的視電阻率，由正算程序產生與實地測量吻合的視電阻率。平滑束制最小平方法的目的，是藉由調整模型中網格的電阻率，以迭代方式減小程序計算視電阻率與實地測量視電阻率之間的差異，該差異以均方根誤差 (root mean square, RMS) 表示。然而最小的均方根誤差不一定是最佳的電阻率模型，也可能不是最適於反應地質剖面的模型。一般來說最謹慎的方法

是選擇模型中均方根誤差沒有顯著變化的那一次迭代計算為最佳（通常發生在第三和第五次迭代之間）(Loke, 2007)。

若利用 ERT 法所獲得的資料加入時間變化的因素，則可得到空間內的資料點隨著時間軸變化的情形。本研究使用 Timelapse 之功能即是利用此概念所提出的反算方法，其基本原理是將每一次個別量測到的視電阻率剖面在反算的過程中加以整合，再以第一次所量測到的視電阻率剖面做為後續量測剖面的初始值進行 Timelapse 反算計算 (Loke 1999)。而利用公式(1)的概念，即可得到前後兩次電阻率的變化百分率 (Dahlin and Leroux, 2006; 尤仁弘, 2006)。

$$\Delta\rho_{1,2} = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} \times 100\% \quad (2)$$

其中： ρ_1 為前期電阻率， ρ_2 為後期電阻率。

4. 電極排列法選用

實際在野外施測時，可能要考慮到現地條件與儀器接收狀況的限制，而必須選擇不同的電極排列方式。本研究將探討電極排列方式與訊號解析度之關係，經由 RES2DINV 軟體反算，將結果與鑽探與現地地形資料比對，進而瞭解最適合的電極排列方式，可提供野外施測規劃的參考。本研究使用 Wenner、Dipole-Dipole 與 Pole-Pole 等三種排列法配置。

Wenner 排列法如圖 7(1)所示，為一種線性對稱的排列，施測時須等間距擴大移動，是最簡單、容易的排列方式。Dipole-Dipole 排列如圖 7(2)所示，兩支電流極與電位極各自形成一組偶極，且兩組偶極間的距離比偶極間距大的多。Pole-Pole 排列法如圖 7(3)所示，是將四電極之中之一電流極(C2)與一電位極(P2)拉至遠處，施測時只需改變 C1、P1 即可。各種排列法的優缺點比較整理於表 2。

三、試驗結果與討論

1. ERT 反算結果與鑽探資料分析

本研究參考試區兩處鑽探資料，初步描繪出兩鑽孔間之地層剖面以及縱向測線 (ERT1 與 ERT3) 的探測範圍，如圖 8 所示，層面位態為 N14°W/20°E 顯示本試區為一順向坡，表土覆蓋層深度由 BH1 孔位之 1.5m 下逐漸增厚至 BH2 孔位達 4.2m 深，試區地層岩性大致以砂岩夾頁岩為主，含有部份砂頁岩互層與少量砂岩層。

表 2 各電極排列法之比較 (Loke, 2004)

Table 2 Comparison of array types

電極排列法	優點	缺點
Wenner	1.對縱向的變化有不錯的解析度, 適合探測水平結構 (如沉積層)。 2.訊號最強, 適用於背景雜訊大的地方。有適當的調查深度。	1.隨著電極間距的增加在水平方向有很差的收斂, 所以在電極數較少時可能產生問題。 2.不適用於狹長垂直的結構 (如溝堤、洞穴)。
Dipole-Dipole	1.電阻靈敏度在成對電極間的是最高的。 2.對水平方向的電阻率變化有較佳之解析度; 適用於狹長垂直的結構 (如溝堤、洞穴)。 3.水平收斂程度較 Wenner 佳。	1.不適用於水平的結構 (如沉積層)。 2.訊號強度很差, 故施測時須確認電極棒與地面接觸良好。
Pole-Pole	1.有最好的水平收斂。 2.有最深的探測深度。	1.解析度為所有排列法中最低者。 2.必須要將兩極 (P2,C2) 拉至大於 10 倍電極間距以上之距離, 才有較佳的資料品質, 故佈線較費人力。

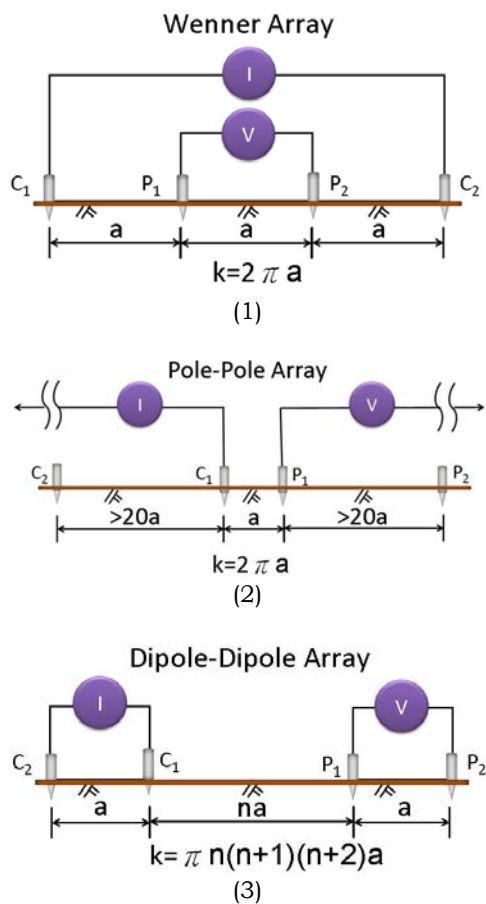


圖 7 各種電極排列法示意, (1)Wenner array, (2)Pole-Pole array, (3)Dipole-Dipole array (修改自 Loke, 2004)

Fig.7 Sketches of array types

測線 ERT1~4 兩時期與各種電極排列法之反算結果套疊鑽探資料如圖 9~圖 12 所示。

由坡頂測線 ERT1、ERT2 結果 (圖 9、圖 10) 中可發現各種電極排列法皆顯示表土覆蓋層與砂岩層有相近之電阻率; 鑽探資料顯示表土覆蓋層僅 1.5m 深, 且地表下 1m 深之 SPT N 值高達 38, 屬於緊密之土層 (Terzaghi and Peck, 1948), 推測應為 1997 年崩塌後出露之砂岩層由於受風化的程度較輕而具有與完整砂岩相近之導電性。Pole-Pole 排列法的反算結果顯示, 砂岩夾頁岩層具有較低之電阻率, 由於頁岩的導電性質受黏土礦物的影響, 使其電阻率遠低於砂岩, 因此研判由於受到頁岩的影響, 使得砂岩夾頁岩層呈現電阻率較低的現象; 由於 Wenner 與 Dipole-Dipole 排列法探測深度較淺, 且越靠近底部之資料準確度越低, 故兩方法較不易測得此現象。

ERT3 測線結果 (圖 11) 中顯示接近地表處存在一深度約 4m 之高電阻率區域, 比較鑽探資料顯示此處雖亦屬表土覆蓋層, 但其中有夾雜岩塊碎屑, 而地表下 1m 處 STP N 值為 14, 顯示位於坡趾之表土覆蓋層的結構較坡頂來得非均質且軟弱鬆散, 研判此為造成地表電阻率較高之主因。深度較深且夾有岩塊碎屑的表土層也驗證了此區應為 1997 年崩塌之堆積區。

ERT4 測線 7 月份之反算結果 (圖 12(1)~(2)) 顯示靠近地表處, 代表表土覆蓋層的高電阻區域厚度較薄, 未能與鑽探資料符合; 然而 10 月份資料的反算結果 (圖 12(3)~(5)), 上部的高電阻率區域之厚度則與鑽探資料符合。由於 ERT4 測線位於山邊溝上, 山邊溝之定義為在坡面上每隔適當距離沿等高方向所構築

之淺三角形溝，目的為減短坡長，分段截洩逕流以防止沖蝕兼提供田間作業道路（水土保持局，2006）。推測因山邊溝截蓄逕流之功能，使 7 月份施測前之幾場降雨所形成的逕流，因停留於山邊溝上時間較久，其增加的入滲量造成表土覆蓋層電阻率下降；至於 10 月份施測前鮮少降雨，使停留於表土覆蓋層下半部之水分已消散而回復至高電阻率狀態。由上述結果得知此測線之地表覆蓋層之電阻率極易受含水量所影響，若無鑽探資料輔助，在岩層交界面的判釋上可能會有出入，如圖 12(1)~(2)虛線所示，當表土覆蓋層含水量較高時所推估之地層交界面則較鑽探資料來得淺。

由深度不深卻具有高蓄水能力的地表覆蓋層推測，1997 年的滑動事件應為大量雨水入蓄積於表土覆蓋層，剪應力增加、剪力強度降低而引發的淺層順向坡滑動。

2. Time-lapse 反算結果分析

ERT1、ERT2 兩時期電阻率的變化率如圖 13、圖 14 所示。各測線及排列法的結果皆顯示出 10 月中旬量測得之地表電阻率較 7 月中旬所測得的結果有上昇之現象，根據中央氣象局中寮氣象站 2008 年 7 月與 10 月之雨量資料（圖 3、圖 4）所示，7 月份在施測日期（16 日）前共有 9 天有降雨紀錄，累積雨量達 402mm，遠高於 10 月份之總降雨量，且 10 月份在施測日期（15 日）前一週幾乎無降雨事件產生，計算結果反映出靠近地表之電阻率上升乃因水分含量下移或受到蒸發散作用而減少所致。同理亦可解釋測線

ERT3 與 ERT4 電阻率變化量結果(圖 15、圖 16(1))。

圖 3 中顯示，卡孜基颱風於 7/16~7/19 間，在中寮地區降下了 360.5mm 的雨量。本研究安排於颱風前後（7/16、7/21）於 ERT4 測線進行 Dipole-Dipole 排列法量測。其中 7/16 的降雨事件發生在量測結束後，此次之量測過程未受降雨影響。而 7/16 與 7/21 兩次施測結果之電阻率變化量如圖 16(2)所示，整個剖面呈現極不規則的電阻率變化趨勢，雖部份區域有電阻率下降之情況，但亦有部份區域之電阻率上升。承前一節之討論，ERT4 測線之 Dipole-Dipole 排列法之資料應有雜訊出現，故此排列法之 Time-lapse 反算結果，無法客觀說明是否低電阻區域即為受降雨入滲之水分所影響。

3. 電極排列法之解析度與適用性探討

由於不同的電極排列具有不同的敏感度與收斂度，因此每一種電極排列對相同的地下結構會有不同的反應，故所量測之擬似剖面（pseudosection）或視電阻率亦有所不同，造就了最後反算結果上的差異。

綜觀所有同一期施測的反算結果，Pole-Pole 與 Wenner 排列法有較接近的電阻率分布趨勢，反觀 Dipole-Dipole 排列法（12(5)）則因容易接收雜訊而有部份反算結果的趨勢與同時期的其他排列法結果有所出入。故對於本試區而言，由於 Pole-Pole 排列法測深最深，且其淺層電阻率趨勢與解析度較高的 Wenner 排列施測結果一致，研判最適用於本試區。

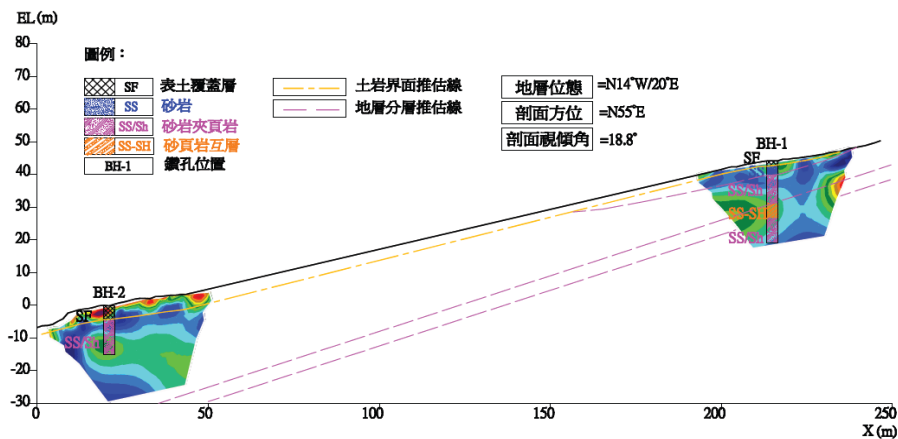
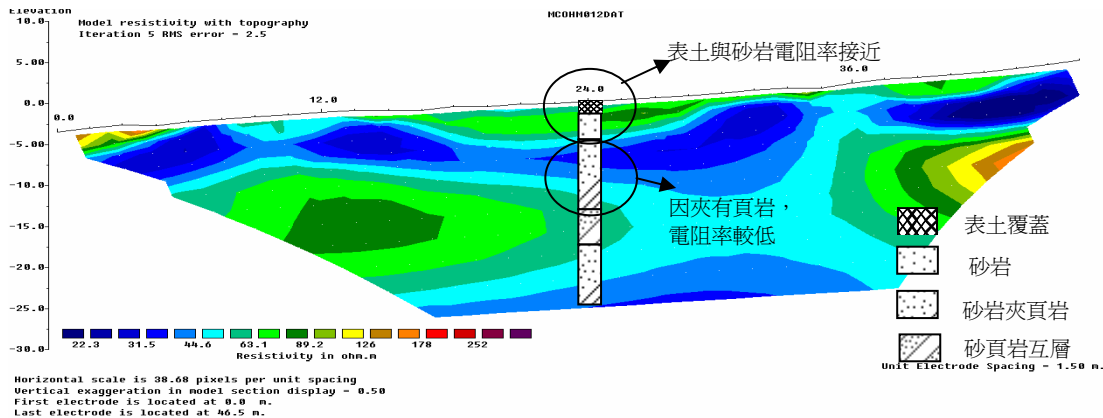
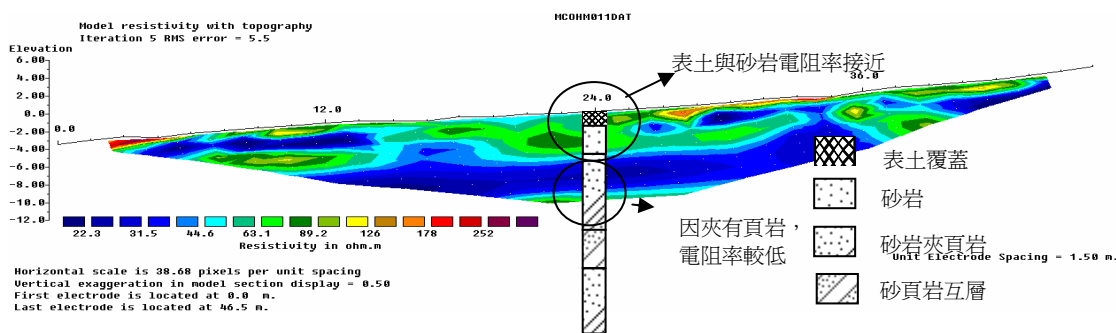


圖 8 試區鑽探成果剖面圖

Fig.8 Result of drillings



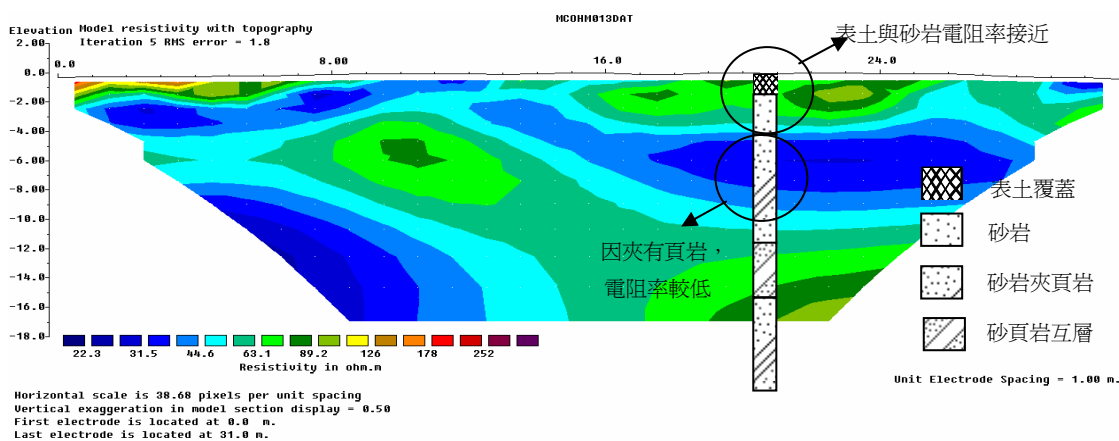
(1) 2008/10/15, Pole-Pole array



(2) 2008/10/15, Wenner array

圖 9 ERT1 測線鑽探資料反算結果

Fig.9 Inversion results of ERT1 with boring log



(1) 2008/10/15, Pole-Pole array

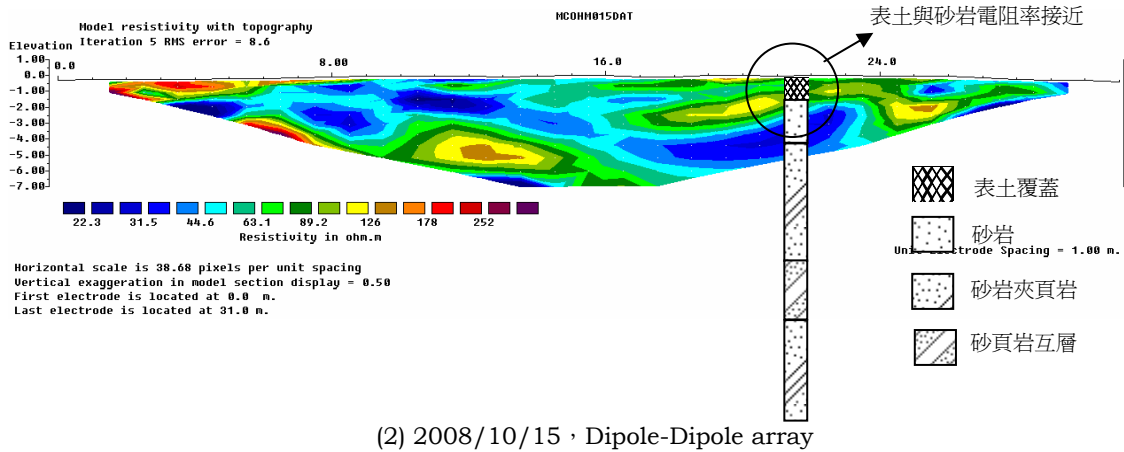


圖 10 ERT2 測線鑽探資料與各電極排列法反算結果

Fig.10 Results of ERT2 with boring log

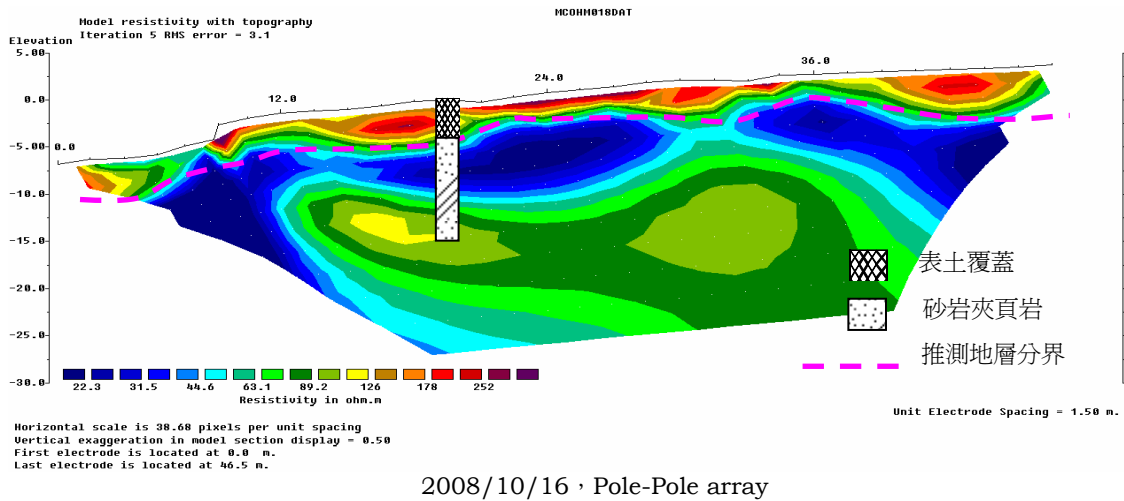
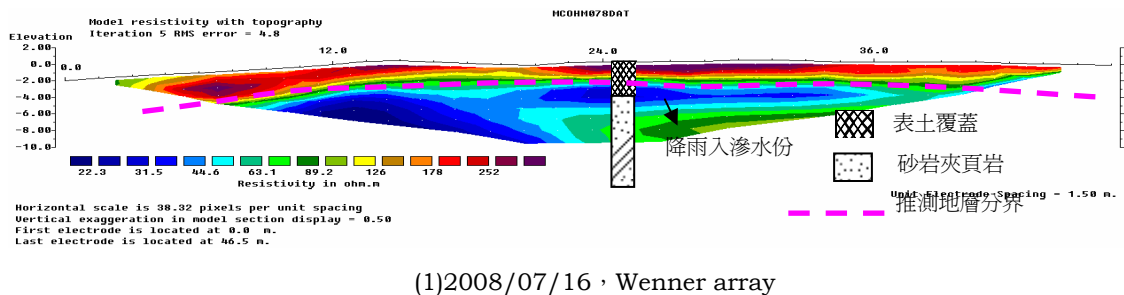
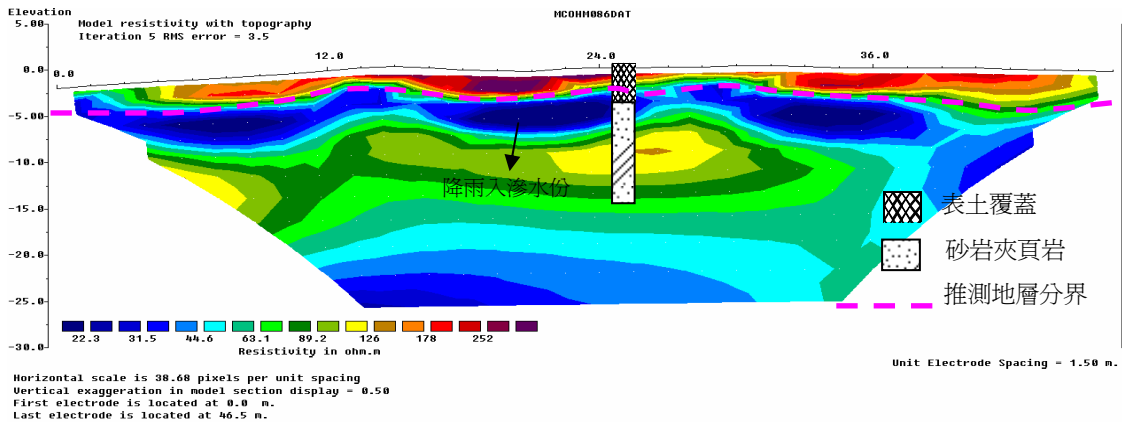


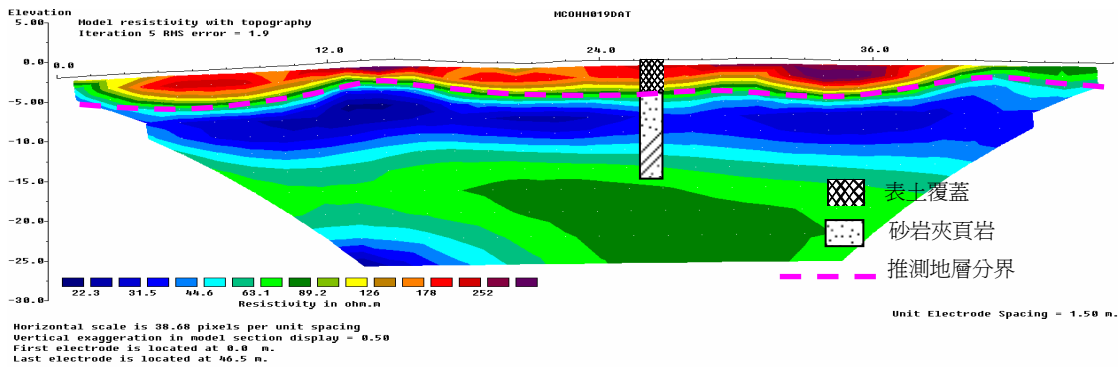
圖 11 ERT3 測線鑽探資料與反算結果

Fig.11 Results of ERT2 with boring log

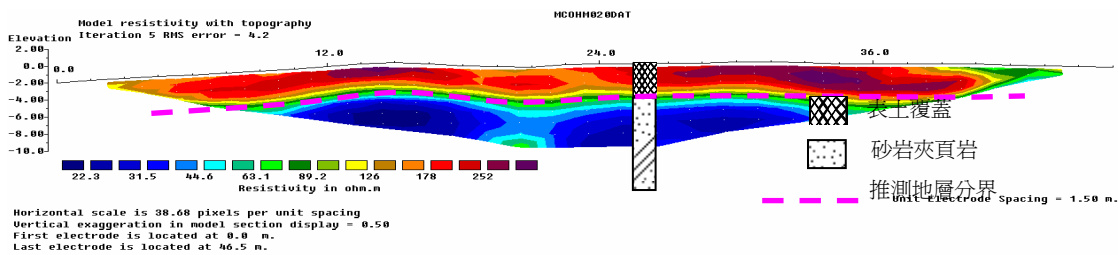




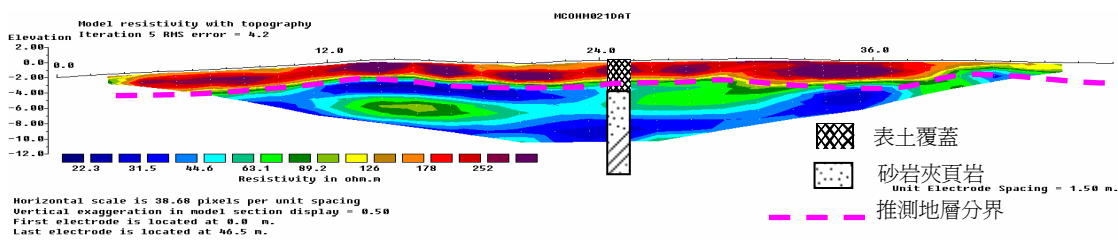
(2) 2008/07/21, Pole-Pole array



(3) 2008/10/15, Pole-Pole array



(4) 2008/10/15, Wenner array



(5) 2008/10/15, Dipole-Dipole array

圖 12 ERT4 測線鑽探資料與各電極排列法反算結果

Fig.12 Results of ERT4 with boring log

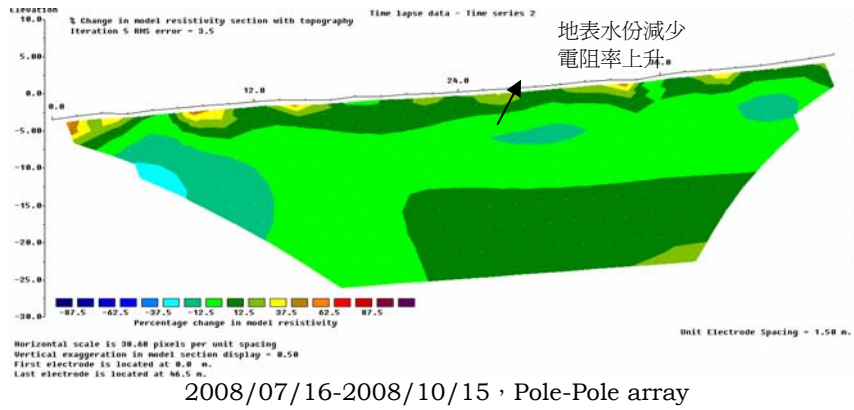


圖 13 ERT1 測線電阻率變化率

Fig.13 Percentage change in resistivity of ERT1

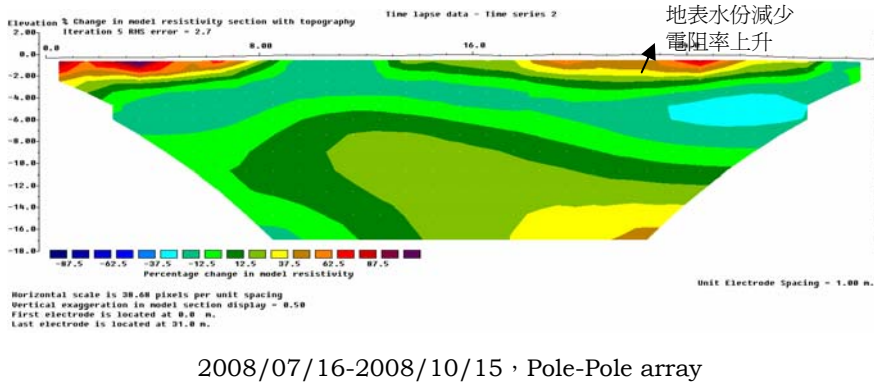


圖 14 ERT2 測線電阻率變化率

Fig.14 Percentage change in resistivity of ERT2

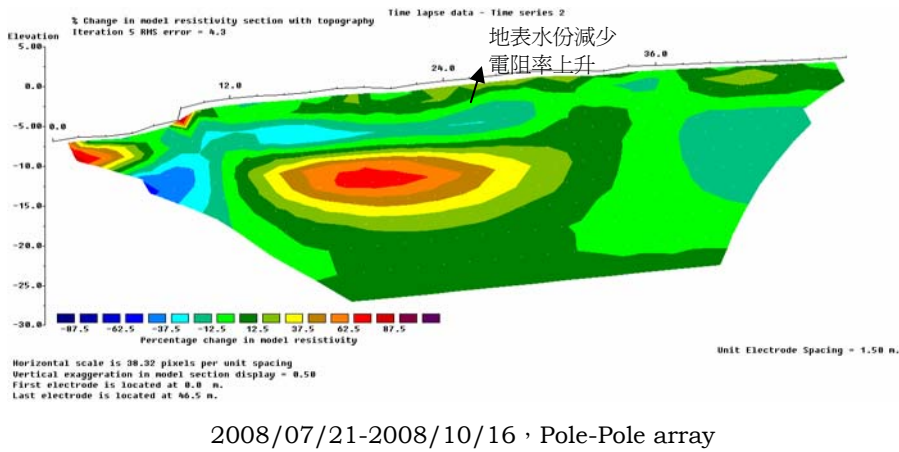
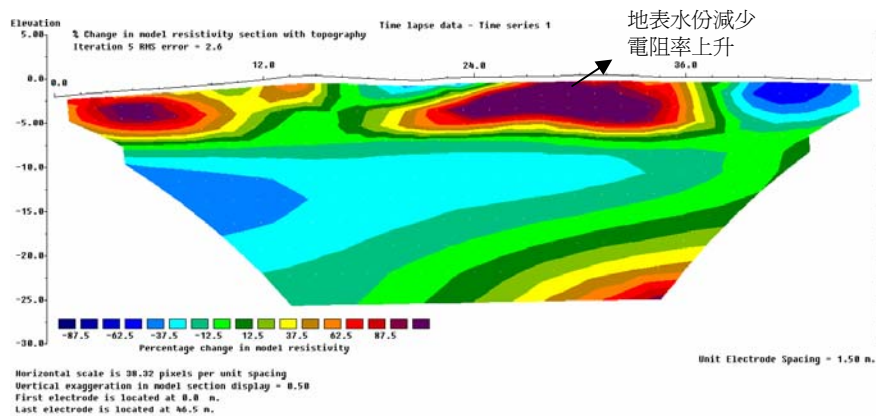
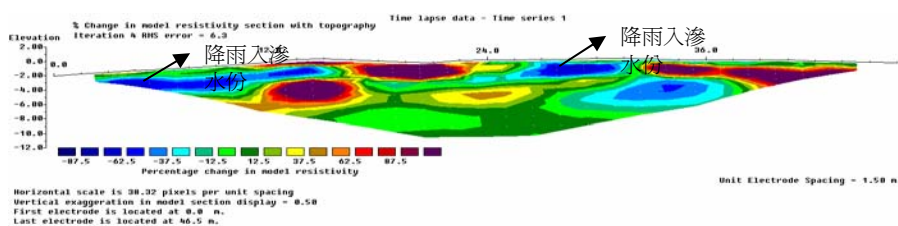


圖 15 ERT3 測線電阻率變化率

Fig.15 Percentage change in resistivity of ERT3



(1) 2008/07/21-2008/10/16, Pole-Pole array



(2) 2008/07/16-2008/07/21, Dipole-Dipole array

圖 16 ERT4 測線各排列法之電阻率變化率
Fig.16 Percentage change in resistivity of ERT4

四、結論與建議

本研究嘗試以數種不同電極排列之 ERT 法結果，輔以鑽探資料比對，針對降雨誘發之邊坡崩塌後之地層狀況、降雨事件前後電阻率之變化以及不同電極排列法之適用性等課題進行探討，歸納以下結論與建議：

1. 本試區位於坡頂由砂岩輕度風化成之表土覆蓋層的電阻率與底部新鮮砂岩相近，而位於坡趾之表土覆蓋層則因風化程度高、土質較鬆軟且非均質的構造而導致有明顯高於下方岩層之電阻率，此現象將有助於應用 ERT 法於崩塌地堆積區範圍的劃定。
2. 實際上電阻率受到多方面因子的影響，尤其水分更是左右測量結果重要因子之一。本研究發現在相同測線之上表土覆蓋層於降雨前後之電阻率差異量可達 100%以上，若無多期的測量資料或鑽探資料比對，極可能對地層厚度造成誤判。故若以地層探測為首要目的，建議避免於降雨事件後施測。
3. 本研究使用 ERT Time-lapse 法計算不同時期

- ERT 結果的變化率，雖未能發現短時間內接近地表的電阻率在暴雨過後有降低的現象，但確實發現乾季時的地表電阻率較雨季為高，此法可有效利用於地層水分含量變化之監測。建議後續研究可導入 Archie's law 模式，間接由地層電阻率的變化來求得實際水分含量的變動加以量化分析。由於 Time-lapse 的計算會採用最初期的測量資料作為後期資料計算變化量的參考，為了提高計算之可信度，建議加強對初始資料的品質管控。
4. 本研究使用的三種電極排列中，Pole-Pole 排列法計算所得結果大致與 Wenner 排列吻合且深度更深，唯 Dipole-Dipole 排列法因訊號強度最差，偶有雜訊產生。因此對於此區域之調查 Pole-Pole 排列法應足以滿足大部分之需求，條件允許時可再使用 Wenner 排列法輔助淺層資料的判釋。對於 Pole-Pole 排列法解析度的改良，建議可於一定長度之測線增加電極棒的數目（亦即降低電極間距）來提高探測剖面的資料密度，以提高反算結果的可

信度。

5. 由深度不深卻具有高蓄水能力的地表覆蓋層推測，此試區 1997 年的滑動事件應為大量雨水入滲蓄積於表土層，造成剪應力增加、剪力強度降低而引發的淺層順向坡滑動。另外並驗證了山邊溝除了具有減短坡長，亦可降低逕流對邊坡的沖蝕，延長逕流存在邊坡的時間，也間接提高水分入滲進入邊坡。

五、誌 謝

本研究承行政院農委會水土保持局研究計畫之部分支持，表達感謝之意。

六、參考文獻

- 中央地質調查所（2000），「埔里圖幅，2000」，1/50,000。
- 中央氣象局（2008），「2008 年中寮氣象站逐日降雨資料」。
- 尤仁弘（2006），「應用地電阻影像法於壩體潛在滲漏調查之研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 梅興泰、鄭富書、蔡道賜（2006），「地電阻影像剖面法對非均質地下實體之模擬分析」，技術學刊，第二十一卷，第四期，pp.369-382。
- 農委會水土保持局（2006），「水土保持手冊」，台灣。
- Auken, E., L. Pellerin, N. Christensen and K. Sorensen(2006), "A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods." *Geophysics* 71(5): G249-G260.

Dahlin, T. and V. Leroux(2006), "Time-lapse resistivity investigation for imaging saltwater transport in glaciofluvial deposit", *Environ Geol*, pp.347-358.

Godio, A., C. Strobbia and G. De Bacco(2006), "Geophysical characterisation of a rockslide in an alpine region." *Engineering Geology* 83(1-3): 273-286.

Loke, M.H.(1999), "Time-lapse resistivity imaging inversion." *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section*, Em1.

Loke M.H.(2004), "Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys", *Geotomo Software*, Malaysia.

Loke M.H.(2007), "RES2DINV ver.3.56", *Geotomo Software*, Malaysia.

Terzaghi, K. and R.B. Peck,(1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", *John Wiley And Sons*.

2010 年 1 月 2 日 收稿

2010 年 1 月 18 日 修正

2010 年 2 月 10 日 接受

(本文開放討論至 2011 年 3 月 31 日)