

應用地電阻剖面法於土壤地層水份變化與 SPT-N 值比對

馮正一* 鄒佩蓉 陳奕凱 鄭旭涵

摘要 本研究在彰化縣灣雅水保持教室，於三個不同時間點施作地電阻試驗，並採用不同電極排列方式探討地表下電阻值之變化。結果發現地表下電阻率分佈與鑽探結果接近，且對於地層水份變化有良好推測結果。本研究亦探討經由鑽探後所得到之 N 值與電阻率分布之關係，其方法採用文獻中提出之轉換公式，主要是將電阻率轉換為橫截電阻率 (transverse resistivity) 後，再比對 N 值之相關性。本研究結果顯示灣雅試區之土層，其土層特性對於橫截電阻率與 N 值之關係有較大的影響。

關鍵詞：不飽和土層，地電阻，SPT，N-value。

An Application of Electrical Resistivity Tomography on Water Changes and Correlation with SPT N-Values of the Strata

Zheng-Yi Feng* Pei-Rong Tsou Yi-Kai Chen Jero-Hertz Jeng

ABSTRACT The tests were performed using various electrical resistivity tomography (ERT) electrode arrangements to discuss the variation of electrical resistivity of the ground at three different periods in Wan-ya, Zhanghua County. The results of ERT measurements are consistent with the drilling data; the changes of water in strata are also well estimated. In addition, the relationships between ERT measurements and SPT N-values are obtained by using an equation proposed in literature. Based on the equation, the resistivity obtained from ERT measurements is converted into transverse resistivity for correlating with the N-values. The results indicate that the characteristic of the strata in Wan-ya has an important influence on the correlation between transverse resistivity and N-value.

Key Words: electrical resistivity tomography, SPT, N-value.

一、前言

地電阻影像剖面法 (Electrical Resistivity Tomography) 簡稱 ERT 法，自 1912 年 Schlumberger 首先應用此法做電阻率量測迄今，無論理論或解釋技巧均頗為成熟。地電阻剖面影像探測法為非破壞式探測，主要應用在大地、地質、環境汙

染等領域範圍，其特點為可快速獲得大量地層資訊，分析地下構造的變化。有許多學者研究地電阻剖面影像探測法應用在地層特性、含水量變化上皆有不錯的結果，洪瑛鈞等 (2006) 應用地電阻剖面探測法於新竹斷層之調查，其結果顯示地電阻剖面影像探測法可有效輔助斷層調查工作；李維峰等 (2006) 利用改良土壤之高電阻率特性，以及高含水軟弱土壤之低電阻率特性來驗證地質改良效果並預測地下工程風險；林

志平等 (2008) 於新山水庫上應用地電阻剖面影像探測法偵測壩體滲漏問題，結果顯示其應用於壩體上有相當顯著之成果。

電流在淺層的地質材料間藉由兩種方法流動，分別為電子傳導 (electronic conduction) 與電解傳導 (electrolytic conduction)。電子傳導主要透過自由電子在金屬間的流動，而電解傳導是透過地下水中離子的運動 (Loke, 2004)。一般來說地質材料的導電性是透過孔隙水的導電性提供，除非地質材料含足

夠的金屬造岩礦物，如磁鐵礦、鏡鐵礦、石墨、黃鐵礦等，才使的地質材料具備有高導電能力 (Loke, 2004)，常見地質材料電阻率值如圖 1，顯示同一種地質材料因乾溼程度不同，電阻率分布範圍甚廣。黏土的離子交換特性會使額外的離子在每個黏土顆粒周圍形成可動的離子點雲，這些離子可促進電流的流動，因此土壤中的黏土含量可能會影響地質材料的導電性 (Sudha et al., 2009)。

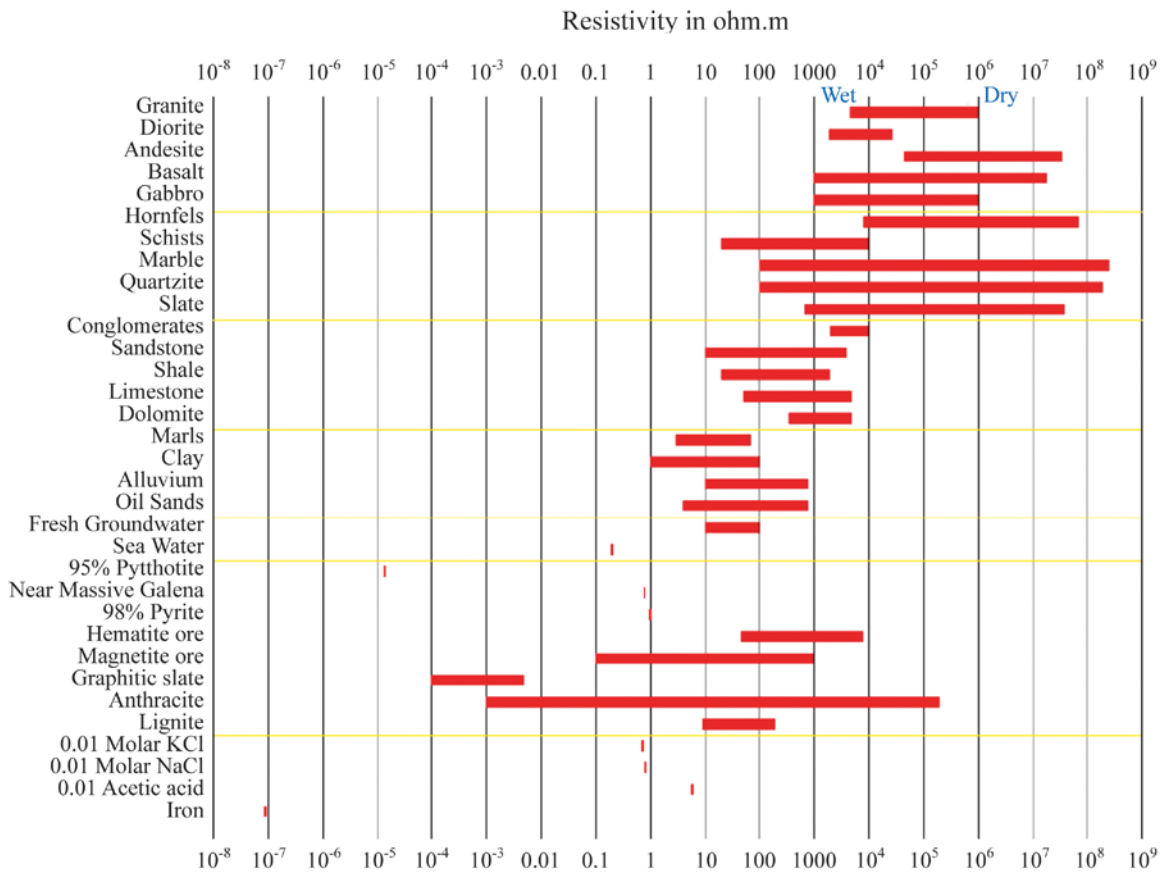


圖 1 地質材料電阻率範圍 (Loke, 2004)

Fig.1 Range of the resistivity of geological materials

Sudha et al. (2009) 使用 Schlumberger-Wenner 電極排列方式得到兩個試區之電阻率，經過公式轉換後，會得到 N 值與轉換後電阻率成線性關係，且其相關係數高達 0.97，Sudha et al. (2009)

同時指出相關係數較低是由於黏土含量較低的關係。圖 2 與圖 3 摘自 Sudha et al. (2009) 之論文。圖 2 說明兩個試區 Aligarh 與 Jhansi 所作標準貫入試驗之 N 值隨著深度改變之示意圖，由圖可知深度越深，N

值越大, 表示其地層強度會隨深度而增強; 圖 3 為 N

值與轉換後電阻率之示意圖, 其呈現線性相關。

陳奕凱 (2010) 將苗栗縣八燕坑崩場地所調查的現地 SPT-N 值, 以是否位於崩塌區內分別整理, 配合 Sudha et al. (2009) 提出之橫截電阻率模式, 將 N 值與對應位置的電阻率進行連結, 發現崩塌區內外之橫截電阻率與 N 值呈現線性正相關的趨勢。

本研究於灣雅水土保持教室選取兩條測線, 共施作三次地電阻 ERT 試驗, 分別施作雙極排列法 (Pole-pole array)、偶雙極排列法 (Dipole-dipole

array) 以及溫奈排列 (Wenner Array) 三種電極排列方式, 並於兩條測線上各鑽一孔, 用以比對地電阻試驗結果。由於雙極排列法可比溫奈排列法測得較深的地層, 且其結果較偶雙極排列法更為穩定, 故本研究以雙極排列法的結果進行探討降雨入滲之變化。但仍以三種電極排列方式探討 Sudha et al. (2009) 提出的 N 值與橫截電阻率之關係。

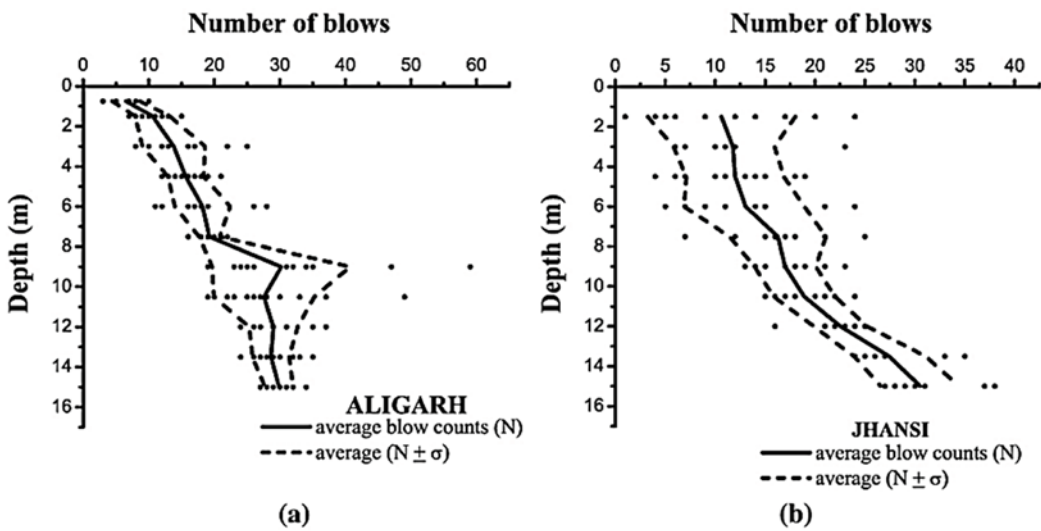


圖 2 N 值隨著地層深度而變化 (a) 試區 Aligarh (b) 試區 Jhansi (Sudha et al., 2009)

Fig.2 N-value varying with depth (a) Aligarh test site (b) Jhansi test site.

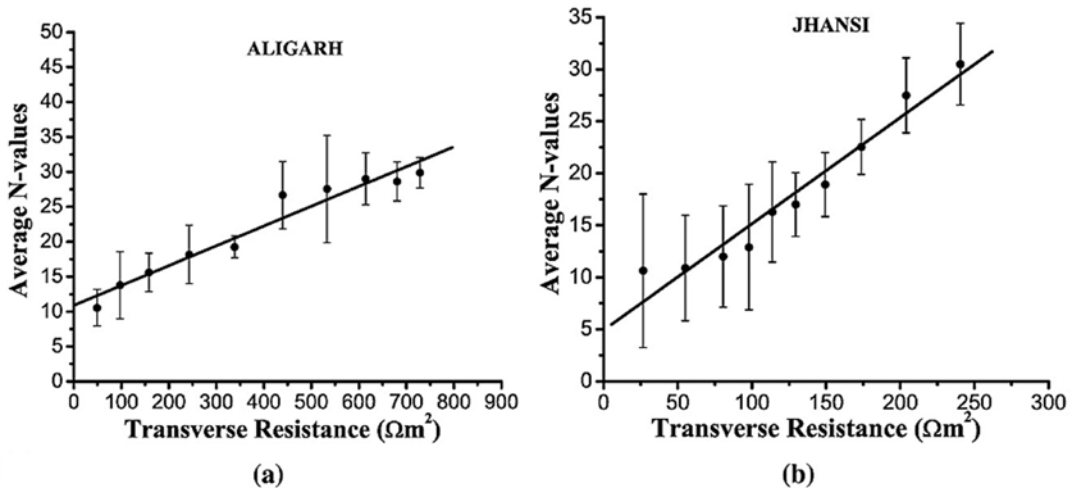


圖 3 N 值與橫截電阻率之示意圖 (a) 試區 Aligarh (b) 試區 Jhansi (Sudha et al., 2009)

Fig.3 Fig. 2 N-value verses transverse resistance (a) Aligarh test site (b) Jhansi test site.

二、研究材料與方法

1. 試區資料

研究試區位於彰化縣花壇鄉轄內東南側水土保持戶外教室，種植西施柚，採山邊溝之水土保持處理，試區內部分為礫石地。由中央地質調查所之台中圖幅亦可得本試區為頭料山層。海拔高度介於 100~120 公尺之八卦山丘陵地，主要由砂岩、泥岩、頁岩組成。土壤大部分屬於崩積土，少部分為黃壤及紅壤。本研究於試區裡選定兩條測線 A 與測線 B (圖 4)。測線 A 坡度為 31.31%，屬於四級坡 (30%~40%)。測線 B 前半部分 (電擊棒第 15~32 根) 坡度平緩，平均坡度為 1.2%，為一級坡 (<5%)，後半部分地勢變陡 (電擊棒第 1~14 根範圍)，經過計算，其平均坡度為 28.04%，屬於三級坡 (15%~30%)。

2. 降雨量 (2008/5 ~ 9 月)

芬園測站為距離灣雅水土保持教室最近之氣象站，5 月之降雨量在月底 29 號為整月降雨最大量，降雨量達 131.5mm，總降雨量為 233mm。6 月降雨量較少，總降雨量為 98mm。7 月份共有兩個颱風侵台，其中，卡玫基颱風之降雨累積量為 435 (mm)，鳳凰颱風為 171 (mm)，幾乎占了整個七月份的降雨量。9 月則有辛樂克颱風及蕃蜜颱風帶來大量的雨量，以致 9 月份的累積雨量高達 766mm。

3. 地電阻試驗

本研究地電阻影像剖面法採用雙極排列法、偶雙極排列法以及溫奈排列。量測結果以 RES2DINV (2007) 軟體進行倒算，以決定二維地體電阻模型。

4. 鑽探

A 測線上 BB2 鑽孔深度 20m (如圖 5)，表層為 1.55m 紅棕色土壤夾礫石，下層則為粗粒砂層與粗粒砂層和泥層互層，兩層交互出現。B 測線上 BB1 鑽孔深度 25m (圖 6)，表層有 4.7m 回填層，下層則為 4.6m 粗粒層偶夾礫石、9.6m 粗粒砂層和泥層互層、4.47m 粗粒砂層等。

5. 地電阻與土壤強度相關性

在大地工程的研究上，標準貫入試驗 (SPT, Standard Penetration Test) 提供了土壤對於貫入抵抗力的資料，我們可藉由敲擊次數 (N 值) 來估算土壤的強度，N 值之定義為貫入土體 45cm 時，後 30cm 所需要的敲擊次數。

雖然 Braga et al. (1999, Giao et al., 2003) 研究顯示，N 值與電阻率之間沒有顯著的相關性存在。但 Sudha et al. (2009) 於 Aligarh 與 Jhansi 兩地施作 SPT 與 ERT，使用橫截電阻率與 N 值進行關聯，土層之橫截電阻率 (T) 計算方式主要是將土層分為 m 層，分別計算各層土層之電阻率及其相對應之厚

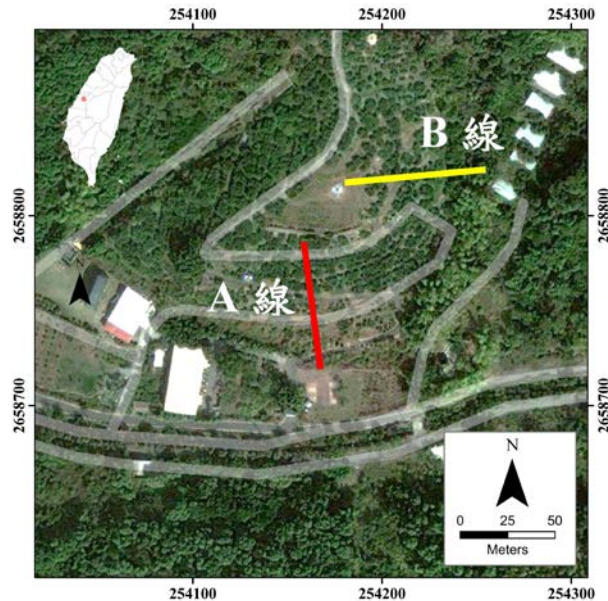


圖 4 灣雅試區位置及測線位置

Fig.4 The Wan-ya test site of this study and the ERT lines

度，最後將各層電阻率及厚度相乘後之總和值，公式如下：

$$T = \sum_{i=1}^m \rho_i h_i \quad (1)$$

其中 ρ_i 與 h_i 為對應於第 i 層的電阻率與厚度。

其結果顯示 N 值與橫截電阻率呈線性正相關，回歸式如下：

$$\text{Aligarh: } N = 0.028 T + 10.909 \quad (2)$$

$$\text{Jhansi: } N = 0.102 T + 4.922 \quad (3)$$

式 (2) 與 (3) 的相關係數分別為 0.974 與 0.975。Sudha et al. (2009) 指出在由於兩試區黏土含量不同，Aligarh 地區土壤黏土含量較 Jhansi 地區少，反應了 (2) 與 (3) 兩回歸式趨勢的差異。

三、結果與討論

本研究於灣雅試區共進行 3 次地電阻施測，第一次地電阻試驗 (2008/07/14) 施測前累積降雨量約達 100mm，第二次地電阻試驗 (2008/10/17) 於蓄蜜颱風侵襲後約 2 星期施作，第三次地電阻試驗 (2008/10/31) 與第二次地電阻試驗間隔兩星期施作，並於兩次施測間量測蒸發量，以確實掌握試區於

兩次地電阻施測間之水份變化對電阻率之影響。本試區於第二次及第三次地電阻試驗中所量測之蒸發量為 42mm/day (以自製蒸發桶量測)。

1. 地電阻剖面分析

(1) A 測線結果

A 測線三次 pole-pole 地電阻試驗之結果如圖 7~9 所示。A 測線地表下有一電阻率較低區域，比對鑽探資料及縱向電阻率結果，推測可能為粗粒砂層與泥層互層地層之上方水份不易下移，故造成上方電阻率較低。第一次施測 (如圖 7) 所得到的結果電阻率較低，推測是由於前幾天降雨入滲造成的關係；第二次施測結果 (如圖 8) 與第三次施測結果 (如圖 9) 比較顯示第三次施測結果之地表面的電阻率較高，說明可能因為蒸發使得水份減少而造成電阻率升高。

(2) B 測線結果

B 測線三次量測之 pole-pole 電阻率結果如圖 10~12 所示。根據 B 測線三次電阻率結果及鑽探結果可發現粗粒砂層偶夾礫石之電阻率最高。且可由電阻率變化量發現此層有較劇烈之電阻率變化，推測可能因此層之透水性佳所致。且如 A 測線一樣，第三次施測結果之地表電阻率大

於第二次施測結果，顯示由於水分的減少造成電阻率升高。

2. 比較 N 值與電阻率之關係

本研究採 Sudha et al. (2009) 之方法將電阻率經過轉換後，得到 N 值與橫截電阻率之關係。Sudha et al. (2009) 地電阻試驗之電極排列方式為 Schlumberger-Wenner，本研究則以三種電極排列

方式—雙極排列法、偶雙極排列法以及溫奈排列—探討 N 值與橫截電阻率之線性關係。圖 13 為 A 測線與 B 測線上鑽探所得之 N 值隨著深度之變化，圖中量測記錄值以標籤標記，A 測線與 B 測線之值分別以虛線及實線連接。A 與 B 測線之 N 值有隨深度而變大之趨勢，但並不明顯，推測因為灣雅試區為砂層與粘土層互層、亦可能有人工回填區，故其土層強度並不均勻。

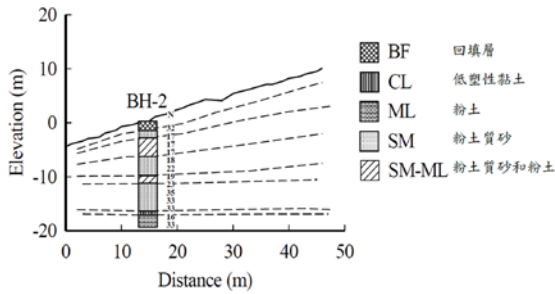


圖 5 ERT A 測線上 BH2 鑽探地質剖面 (深度 20m)

Fig.5 BH2 borehole data (on ERT Test Line A)

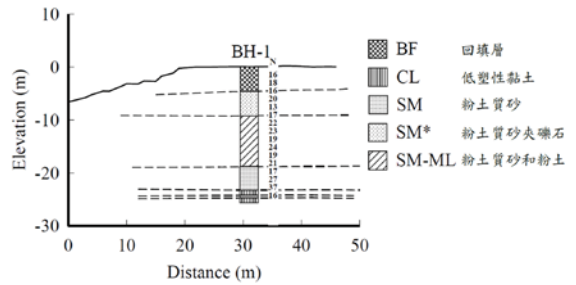


圖 6 B 測線上 BH1 鑽探地質剖面 (深度 25m)

Fig.6 BH2 borehole data (on ERT Test Line B)

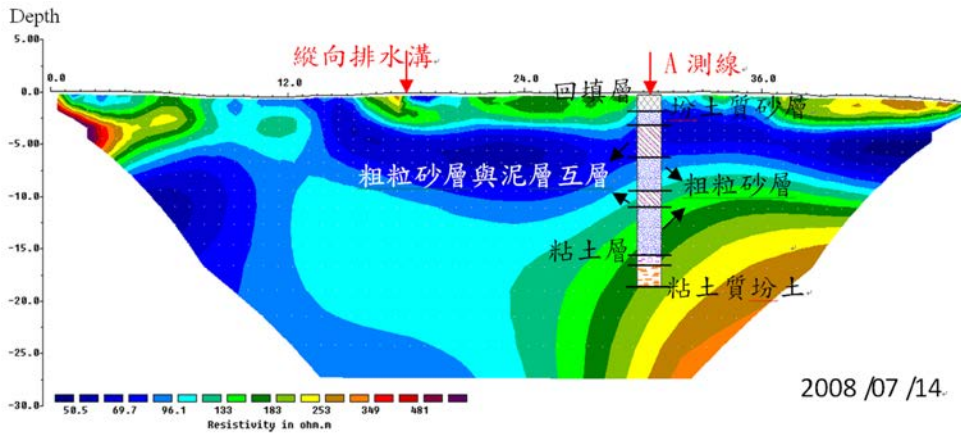


圖 7 A 測線第一次 ERT 結果 (pole-pole array tested on 2008/07/14)

Fig.7 The first ERT result of Test Line A by pole-pole array tested on 2008/07/14

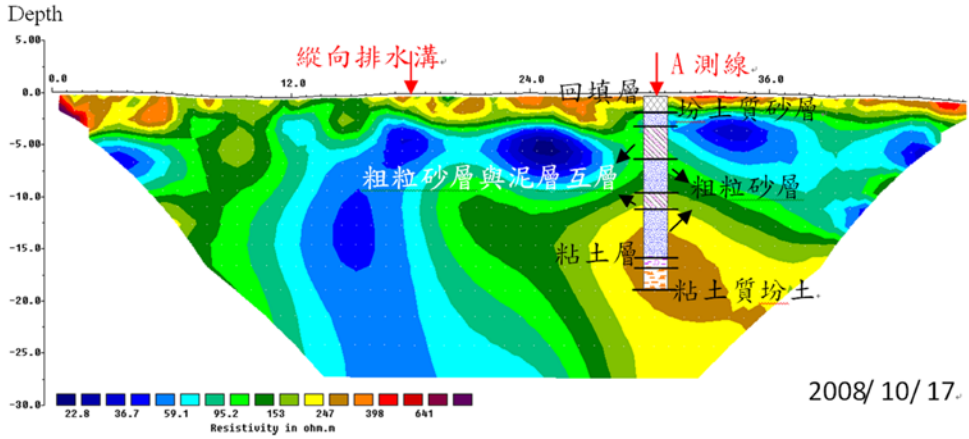


圖 8 A 測線第二次電阻率結果 (pole-pole)

Fig.8 The second ERT result of Test Line A by pole-pole array tested on 2008/10/17

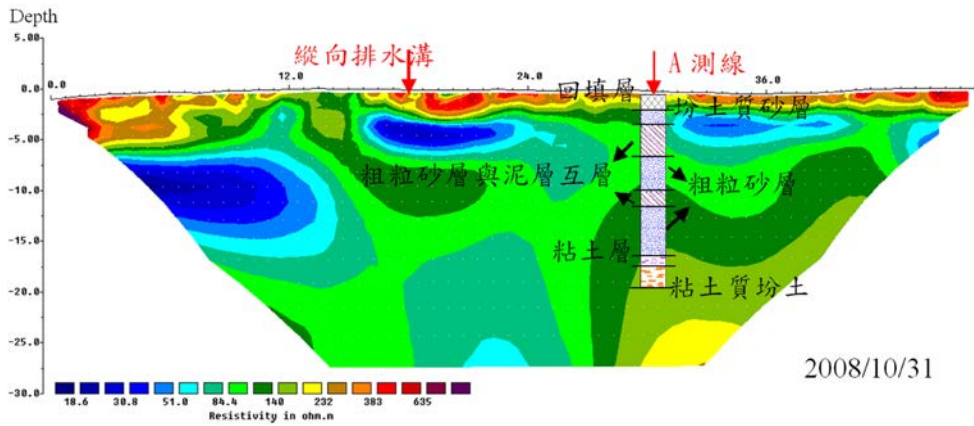


圖 9 A 測線第三次電阻率結果 (pole-pole)

Fig.9 The third ERT result of Test Line A by pole-pole array tested on 2008/10/31

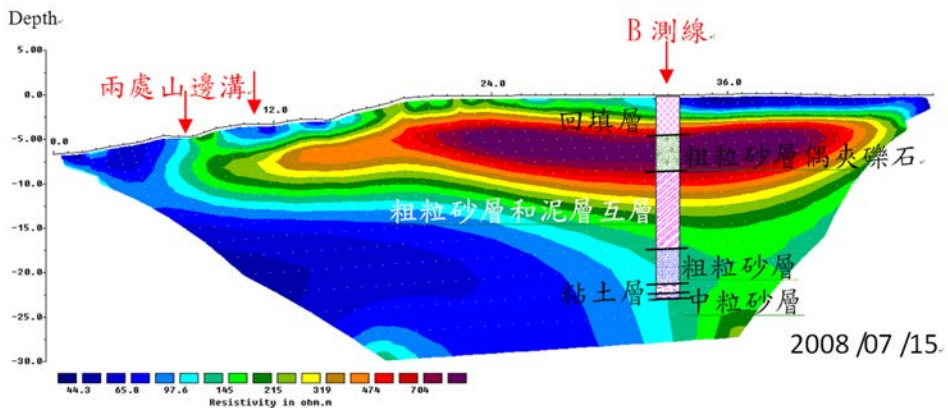


圖 10 B 測線第一次電阻率結果 (pole-pole)

Fig.10 The first ERT result of Test Line B by pole-pole array tested on 2008/07/15

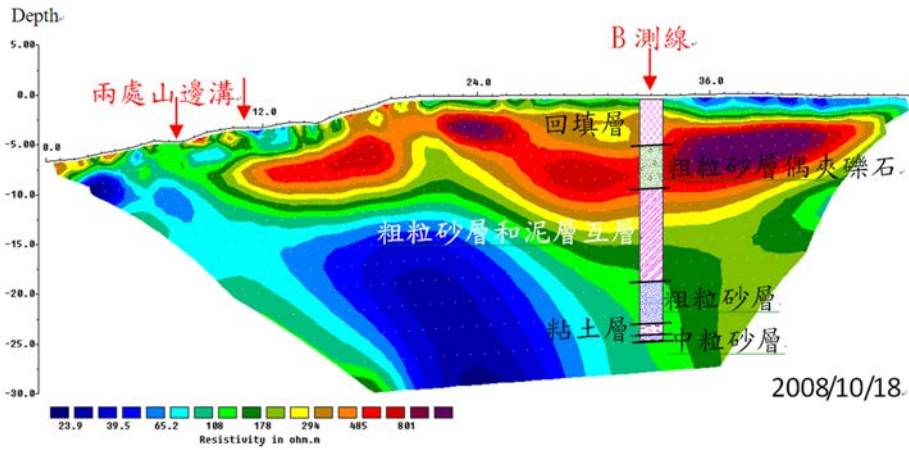


圖 11 B 測線第二次電阻率結果 (pole-pole)

Fig.11 The second ERT result of Test Line B by pole-pole array tested on 2008/10/18

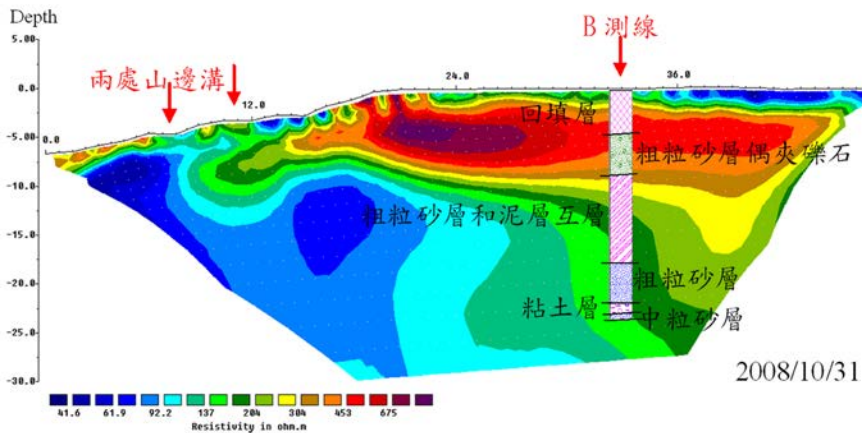


圖 12 B 測線第三次電阻率結果 (pole-pole)

Fig.12 The second ERT result of Test Line B by pole-pole array tested on 2008/10/31

(1) 比較不同電極排列方式

圖 14 為第一次地電阻施測結果之電阻率經過式 (1) 轉換為橫截電阻率後與 N 值所繪出之示意圖，其中紅色虛線為雙極排列法、藍色虛線為偶雙極排列法以及綠色虛線為溫奈排列，黑色實線則為此三種不同電極排列方式相應之趨勢線，圖上各標示其相關係數。比較此三種不同電極排列方式，可以看出 N 值與轉換後橫截電阻

率皆呈現線性關係，但是由於灣雅試區之 N 值隨深度而變大之趨勢並不明顯，推測可能是因為其地層強度並不均勻，故其相關係數不大。其中，雙極排列法於 A、B 測線之相關係數變動不大，約為 0.43 左右；偶雙極排列法以及溫奈排列由圖 14 (a) 與圖 14 (b) 來看，其相關係數改變較大，推測為此兩種電極排列方式所測得的深度低但精度高，故可加總之 m 層較少，繪製在

圖上的點數也較少，其趨勢線較沒有代表性。

(2) 比較不同測線

根據上一節之結果得知，雙極排列法由於地電阻剖面較深，得到的垂直向電阻率較多且相關變化不大，較具有代表性，故圖 15 應用雙極排列法畫出比較 A、B 測線之 N 值與橫截電阻率之圖形。比較 A、B 測線所顯示迴歸方程式之斜率，發現 A 測線之斜率較 B 測線大，主要是因為 A 測線所計算出之橫截電阻率較小，但其 N 值範圍與 B 測線 N 值範圍皆落在 15~35 之間 (圖 13 所示)，故其斜率較大。而造成 B 測線之橫截電阻率會大於 A 測線之原因，推測是因為 B 測線下方有厚約 5 公尺之粗粒砂層，由於土層顆粒較大，透水性良好，導致電阻率較大。另外圖 15 中 (a)、(b)、(c) 說明不同日期施作地電阻之結果，得知由於含水量之不同導致電阻率的差異，故其相關係數及斜率在不同日期所得到的值皆有些許差異。

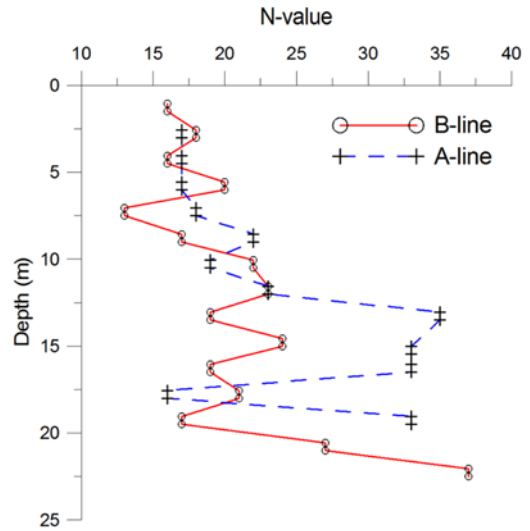


圖 13 A 測線與 B 測線 N 值隨土層深度之變化圖

Fig. 13 N-values varying with depth of Test Line A and B

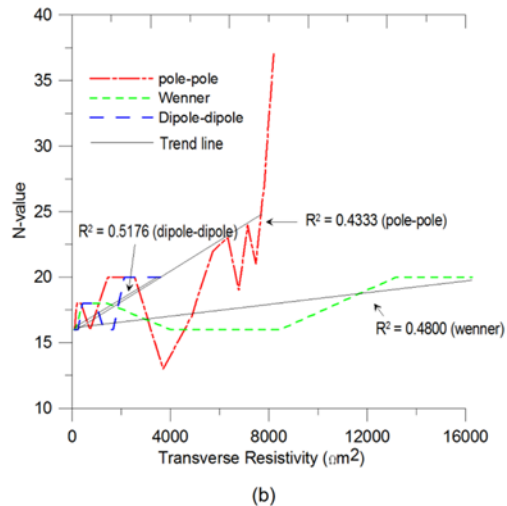
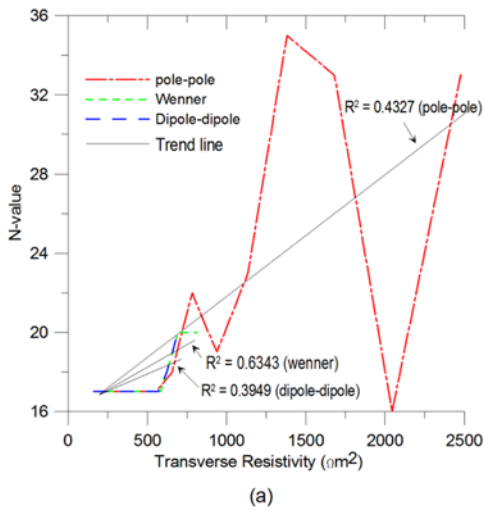


圖 14 不同電極排列方式得到之 N 值與橫截後電阻率之示意圖：(a) A 測線 (b) B 測線

Fig. 14 Comparison of N-value and transverse resistivity obtained by different array arrangement (a) Test Line A (b) Test Line B

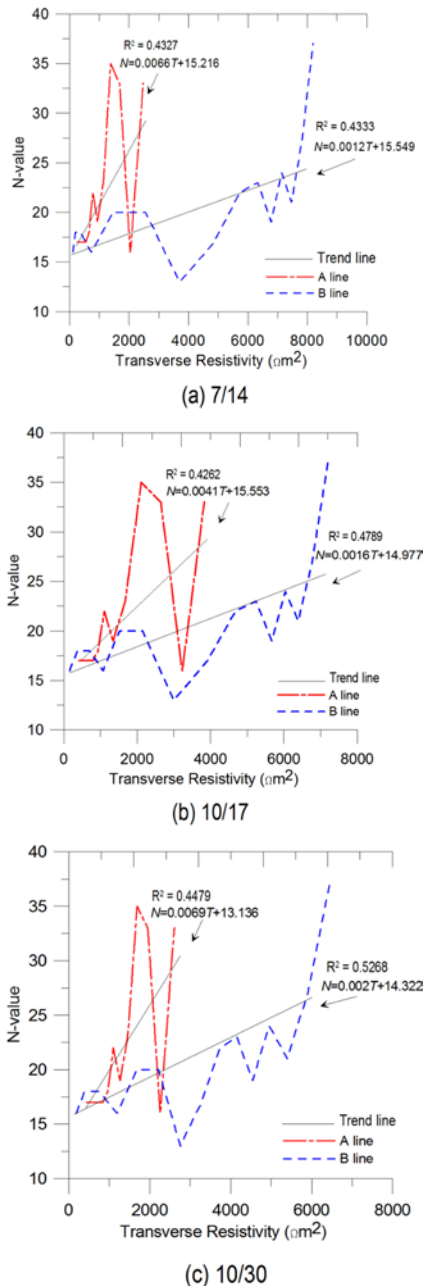


圖 15 比較不同測線之 N 值與橫截電阻率：(a) 第一次地電阻施作 (2008/7/14~15) (b) 第二次地電阻施作 (2008/10/17~18) (c) 第三次地電阻施作 (2008/10/31) (Pole-pole array)

Fig.15 Comparison of N-value and transverse resistivity of the three tests on the two test lines (a) The first test on 2008/7/14~15 (b) The second test on

2008/10/17~18 (c) The third test on 2008/10/31

四、結 論

本研究於灣雅試區施作三次地電阻試驗，使用雙極排列法來探討地表下地電阻剖面，分別比較三次地電阻施作之電阻率變化，發現地層下之電阻率與鑽探分層結果相符，並且比對第二次與第三次地電阻施作結果，蒸發散現象導致地表水份減少而使得電阻率上升，說明地電阻試驗用於地層水分之移動有明顯的效用。

由 Sudha et al. (2009) 提出之電阻率轉換公式，將 N 值與轉換為橫截電阻率繪製成圖，本研究以雙極排列法、偶雙極排列法以及溫奈排列三種電極排列方式作比較。本研究發現由於灣雅試區之 N 值隨深度變大之趨勢較不明顯，可能是受地層強度並不均勻、地層過於複雜與地層有未知的回填區等因素之影響。Sudha et al. (2009) 研究發現黏土含量為影響 SPT-N 值與橫截電阻率回歸公式之斜率的因素，黏土含量較多使得斜率較大；而在本研究中，B 測線具有含量較多之砂層，而使得土層透水性良好，造成所量測到的電阻值較大，得到了砂層含量較多、斜率較小之結果。

SPT-N 值與橫截電阻率此關係式若能逐漸建立，將有助於在類似的地質環境的區域，藉由 ERT 之電阻率量測結果推估 SPT-N 值；相較於直接施作現地試驗，更為經濟且快速。電阻率與 N 值之相關性在本文之探討，讀者必須注意的是本研究地層之 N 值缺 N<15 之資料。故未來仍需更進一步地蒐集更多的 SPT-N 值與 ERT 之電阻率之資料，以增加比對的可靠度與實用性。

誌 謝

本研究承行政院農委會水土保持局研究計畫與國科會計畫 (NSC 97-2313-B-005-042-MY3) 之部分支持，表達感謝之意。

參考文獻

1. 李維峰、張嘉峰、梅興泰、蔡道賜 (2006)，「地電阻影像剖面探測法於地下工程之應用」，地工

- 技術, 108, 91-104. (Lee, W. F., Chang, C. F., Mei, H. T. and Tsai, D. T. (2006). "Application of Electrical Resistivity Imagine Profile Method in Underground Engineering." *Sino-Geotechnics*, 108, 91-104. (in Chinese))
2. 林志平、洪瑛鈞、尤仁弘、鄒和翰 (2008), 「電阻剖面影像法於壩體滲漏調查之應用」, 先進工程學刊, 3(1), 49-55. (Lin, C. P., Hung, Y. C., Yu, Z. H. and Zou, H. H. (2008). "Application of ERT to Leakage Investigation in Dams." *Journal of Advanced Engineering*, 3(1), 49-55. (in Chinese))
 3. 洪瑛鈞、尤仁弘、林志平、廖志中、胡賢能、張震成 (2006), 「地電阻剖面影像探測在新竹斷層調查之應用」, 岩盤工程研討會論文集, 559-568. (Hung, Y. C., Yu, Z. H., Lin, C. P., Hu, H. N. and Chang, C. C. (2006). "Application of ERT on Fault Investigation in Hsinchu." *Taiwan Rock Engineering Symposium*, 559-568. (in Chinese))
 4. 陳奕凱 (2010), 「結合 ERT 法與大地工程試驗於崩場地特性調查之研究—以八燕坑崩塌為例」, 國立中興大學水土保持學系碩士論文. (Chen, Y. K. (2010). *Using the ERT and geotechnical tests in landslide investigation - A case study of Ba-yeng-keng landslide*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C.)
 5. Braga, A., Malagutti, W., Dourado, J. and Chang, H. (1999). "Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements." *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 123-130.
 6. Gao, P.H., Chung, S.G., Kim, D.Y. and Tanaka, H. (2003). "Electrical imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits." *Journal of Applied Geophysics*, 52, 157-175.
 7. Loke M. H. (2004). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
 8. Sudha, K., M. Israil, S. Mittal, and R. Rai (2009). "Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations." *Journal of Applied Geophysics*, 67, 74-79.
 9. RES2DINV (2007). *RES2DINV Ver.3.56 for Windows 98/Me/2000/NT/XP*, Geotomo Software, <www.geoelectrical.com>.
-
- 2010 年 11 月 29 日 收稿
2010 年 12 月 14 日 修正
2011 年 03 月 02 日 接受
- (本文開放討論至 2011 年 09 月 30 日)