

行政院環境保護署

102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

應用多重電極排列與感應極化法調查砂礫質地層污染之研究 期末報告

主 辦 單 位： 行政院環境保護署

計畫執行單位：健行科技大學／空間資訊與防災中心

計畫主持人：鄭世楠 教授

計畫執行期間：101年12月10日起至

102年12月09日

中 華 民 國 102 年 12 月 印製

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

成果自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

- ☒ 達成目標
- ☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）
- ☐ 實驗失敗
 - ☐ 因故實驗中斷
 - ☐ 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

- 論文：☐已發表 ☐未發表之文稿 ☒撰寫中 ☐無
- 專利：☐已獲得 ☒申請中 ☐無
- 技轉：☐已技轉 ☐洽談中 ☒無
- 其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本研究目的是主要解決使用地球物理方法時，現場工作與實驗室解析時容易遇到的盲點與錯誤的施測方式。預期得到正確的使用方式與正確使用在實際調查工作上。本為國內首例，感謝環保署提供經費使本計畫得以完成。本研究成果主要為實際應用，利用本研究成果參數在實場之土壤與地下水先期調查必可得到正確使用方法與經驗。未來建議下一步研究於地球物理運用在土水調查之極限、深部污染調查技術的開發與發展地球物理技術於整治場址即時監測濃度的變化。

摘要

近年來國內外工業活動造成之土地污染案例，對國土資源與生活環境形成莫大威脅。在各類型污染一旦洩漏其移動分佈深受複雜的水文地質變化所影響，其污染流佈與調查是我們所重視的。近年來，非破壞性地球物理探勘技術已逐漸運用在污染場址之地下環境調查，搭配較少量的鑽孔資料可獲得“面與空間”資訊。目前地球物理最廣泛運用之污染調查技術為直流電阻法。

本研究目的利用數值模擬與研究場址中常用之電極排列的二維電阻率影像之解析度與效能。電極排列包括了溫奈-施蘭卜吉、梯度法、雙極排列法、偶極偶極法等五種以上方法，並搭配感應極化法材料選用，藉此檢驗野外調查的效能(異常物效應值、訊號雜訊比)與這些排列法排繪影像的能力。並由實場調查進行檢驗，選出 Dipole(偶極)系列為最佳施測電極排列法。

感應極化法發展出雙電極施測方法，利用最佳不銹鋼棒作為電流極，而最佳電位極材料為硫酸銅電極，再搭配最佳偶極偶極電極排列法為砂礫質地層中調查高電阻率污染物最佳搭配。成功利用 Dipole 系列方法搭配感應極化法在油品污染場址及含氯物染場址，將污染物描繪出來，再利用採水及採土樣成功驗證本研究成果。

根據油品類與含氯場址現場實證調查結果，油品污染與含氯污染皆呈現與背景地質相對高 chargeability (ms) 的現象。實場調查最佳電極間距為 2 公尺以下。應用土壤與地下水調查最佳電極排列法為偶極梯度法(Dipole-Gradient array)、梯度法(Edge-Gradient array)與溫奈-施蘭卜吉法(Wenner-Schlumberger array)等三種方法，其他電極排列在不同的待測物搭配使用。

本研究推薦 Edge-Gradient 電極排列法，Edge-Gradient 電極排列法是理想的多波道記錄的排列法。因最後的選擇則需視野外場址的情況與目標物而定，Wenner-Schlumberger 排列法具有良好的資料品質，但因本身排列法解析度限制的因素所致，對於相對高的異常物響應、高的訊號雜信比與低的雜訊干擾，解析影像無法呈現最佳狀況，但其擁有最強能量與最佳資料品質。

關鍵詞：地電阻影像剖面法、感應極化法、多種電極排列

ABSTRACT

DC electrical resistivity surveying is a popular geophysical exploration technique because of its simple physical principle and efficient data acquisition. Traditional resistivity measurements are carried out on the earth's surface with a specified array in order to obtain apparent-resistivity sounding curves, apparent-resistivity profiling data or apparent resistivity pseudosections, all of which qualitatively reflect the vertical or horizontal variations in subsurface resistivity. This technique is widely used in groundwater, civil engineering and environmental investigations.

Numerical simulations are used to compare the resolution and efficiency of 2D resistivity imaging surveys for 5 electrode arrays. The arrays analysed include polepole (PP), pole-dipole (PD), half-Wenner (HW), Schlumberger (SC), dipole-dipole (DD), γ -array (GM), multiple and moving gradient array (GD). Some synthetic geological models were used to examine the surveying efficiency (anomaly effects, signal-to-noise ratios) and the imaging capabilities of these arrays. The responses to variations in the data density and noise sensitivities of these electrode configurations were also investigated using robust (L1-norm) inversion and smoothness-constrained least-squares (L2-norm) inversion for the these synthetic models.

The results show the following. (i) GM and WN are less contaminated by noise than the other electrode arrays. (ii) The relative anomaly effects for the different arrays vary with the geological models. However, the relatively high anomaly effects of PP, GM and WB surveys do not always give a high-resolution image. PD, DD and GD can yield better resolution images than GM, PP, WN and WB, although they are more susceptible to noise contamination. SC is also a strong candidate but is expected to give more edge effects. Accordingly, the GD, PD, DD and SC arrays are strongly recommended for 2D resistivity imaging, where the final choice will be determined by the expected geology, the purpose of the survey and logistical considerations.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography (ERT) 、 Induced polarization (IP)

第一章 計畫緣起與目的

1.1 計畫背景

近年來國內外工業活動造成之土地污染案例，對國土資源與生活環境形成莫大威脅。在各類型污染物中，含氯有機溶劑屬比水重非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL）所造成之問題最為棘手，如原 RCA 桃園廠、飛利浦竹北廠及台灣氯乙烯公司頭份廠等，其污染整治經耗費鉅額資源與時間後仍未能達成。國內使用含氯有機溶劑工廠遍及各類業別（如金屬製品、塑膠製品、化學製品、化學材料、電子及光學製品、機械設備…），致癌風險性高，污染一旦洩漏其移動分佈深受複雜的水文地質變化所影響，其污染流佈與調查及整治迥異於重金屬或油品類污染，且往往發現污染時均已造成相當程度的環境危害（如污染範圍廣闊）。

地下環境中之含氯有機溶劑污染在調查及整治上均屬相當棘手的問題。含氯溶劑屬比水重之非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL），溶劑本身與地下水不互溶、比水重及低黏滯度的特性，造成其污染純相的移動分佈深受地質變化的影響，因地質變化的不確定性致污染源界定甚為困難。至於溶解於地下水中之溶質污染團則跟隨地下水流擴大分佈，而地下水流場變化亦與地質變化直接相關，污染團的縱向（平行水流方向）、垂向或橫向（垂直水流方向）分佈與地層分層、不同地質材料夾層、優勢流徑或裂隙等息息相關。因此未能掌握地下水文地質特徵，污染範圍的界定便相當困難，同時會誤判污染程度並造成污染流佈或污染風險的預測失當。

傳統侵入性調查，如鑽探或其他直接灌入機具調查均屬“點”之調查，雖具有直接指示地下環境特徵之證據，但其執行費時、花錢，取樣未必完整（礫石層不易採樣），且難以具體客觀描繪不同鑽孔間之連續狀態。抽水試驗可掌握較大範圍之水文地質特徵，但欲取得代表性數據，需有較多的水位觀測井，不易於運作中工廠或人口稠密區施作；而抽出之地下水須經處理避免二次污染問題，且抽水恐有破壞污染團分佈之虞。至於非侵入性方法一般則是以地球物理方法來探勘可能侷限 DNAPL 的地質條件與 DNAPL 污染範圍。地球物理探勘屬非破壞性檢測技術，對探勘環境幾無任何影響，其最大優點在於探勘範圍大（含水平與深度範圍）、速度快、準確性高，同時探勘費用相較於傳統鑽探或設井採樣可節省大幅經費與時間。地球物理除了在經費與時間上可大幅

降低，並可進行更為密集之探勘。特別是針對漏源區與污染源區分佈的細密調查，當要清楚描繪三維分佈或洩漏區位置，土壤採樣點若無更加密集，採樣漏失的機會便相對提高。

以台中工業園區為例，總面積為 26.12 公頃，可能具污染污染潛勢工廠分佈寬廣，工廠設置年代久遠早期製程運作特性不易掌握，地下水位約在地表下約 60~67 公尺，據前期計畫調查結果，場址地表下約 2 公尺以下，多屬砂礫石質地層，且礫石含量自地下 55~60 公尺以下逐漸增大並增多，故選擇經濟可行環境地球物理調查方式，探勘地下環境特徵，以釐清污染潛勢區周遭之地質與污染分佈，因為礫石層其電性反應為高電阻率圖譜區，與含氯溶劑電性圖譜區部分相重疊，皆屬於相對高電阻率。另描繪地下環境特徵需要有相關水文地質調查，以中區工業區為例：地下水深度皆超過 60 公尺以上，工業區可施作腹地較小，佈線長度不夠，無法達到目標深度；另外地電阻影像法掃描法施測過程中地電阻施測過程電流強度會隨深度逐漸遞減，無法解析深部地層細部水文地質特徵。

故本研究利用地電阻影像掃描法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)與感應極化法(Induced Polarization, IP)，相互搭配利用在砂礫質地層中，描繪地層之地下環境特徵，另外增加發電功率與增加激發電壓，配合新穎電擊排列方式，增加深部探測資料，以解決佈線長度不夠時，無法達到目標深度的問題。

1.2 計畫工作內容預期效益

本計畫為一年期之研究補助計畫預計完成工作項目為：

1. 相關感應極化法與多重電極排列於污染場址調查文獻收集。
2. 利用多種電極排列法搭配感應極化法與大桃園地區之紅土礫石層進行相關施測參數資料收集。
3. 選擇一砂礫質污染場址進行實際應用調查，進而建立一感應極化法（IP Method）之標準作業流程。

需完成相關文獻之收集與開始野外工作，先期於實驗室建立電阻率反演模型，模擬現場地層模型，利用數值模擬比較五種電極排列的二維電阻率影像之解析度與效能。電極排列包括了雙極、單極對偶極、溫奈、施蘭卜吉(即是我們使用的 Wenner-Schlumberger)、偶極偶極、梯度、感應極化法等方法，並建立多種地質模型，分別模擬被掩埋的廢棄物、導電度相對較高的泥層、電阻率相對較高的砂礫質層等地質

模型，藉此檢驗野外調查的效能(異常物效應值、訊號雜訊比)與這些排列法排繪影像的能力。這些電極排列對於資料密度與雜訊敏感度的響應也同時由強健逆推法(L1)與平滑限制最小平方逆推法(L2)進行檢驗。

1.3 計畫工作期程

表1、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
文獻回顧相關資料收集													
理論方法建構													
現場資料收集與規劃													
完成第一階段資料收集													
期中報告撰寫													
第二階段現場工作規劃													
完成現場工作													
期末報告撰寫													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	8%	20%	28%	35%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	98%	100%	
預定查核點	期中：		1. 查核點一，完成相關文獻收集與開始進行野外工作。										
			2. 查核點二，開始野外工作與期中報告撰寫。										
	期末：		3. 查核點三，完成所有野外資料收集與開始進行技術評估。										
			4. 查核點四，開始進行期末報告撰寫。										

說明：

- 1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。
- 2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。
- 3、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。

1.4 計畫工作費用

計畫執行經費編列包刮人事費用、耗材藥品費用、其他研究相關費用與行政管理費；相關貴重儀器本研究中心均有，不需額外或與貴重儀器中心租用；現地資料收集，可利用本研究中心相關建教計畫進行現地資料收集，可省去相關模場建置費用。經費明細詳如下表（表2）：

表2、研究輔助經費明細

經費概算	計畫預估經費		核定金額	核銷金額	核銷比例
	計畫經費計算	人事費用	460,330	460,330	100%
		資料蒐集	0	0	0
		消耗性器材藥品費用	315,596	315,596	100%
		貴重儀器使用費	0	0	0
		其他研究有關費用	150,000	150,000	100%
		行政管理費	74,074	74,074	100%
		合計	100,0000	100,0000	100%

第二章 研究方法與過程

2.1 文獻探討

若於均質材料施測，以不同電極排列方法量測，得到電阻率值會相同。然而地層常為非均質材料，量測之電阻率含有許多不同電阻率材料的綜合效應；以不同電極排列法或是在同一種電極排列法，改變電極間距，量測的電阻率會改變，並不能代表實際電阻率值，這非真實電阻率稱為視電阻率值 (apparent resistivity)，資料需透過反算分析得到代表地質非均質材料的電阻率及厚度分析 (Koefoed,1979)。

Takahashi(2004)認為垂直測深探測時常以 Wenner 或是 Schlumberger 電極排列法施測；橫向施測常以 Wenner、Pole-Pole、Pole-Dipole、Dipole-Dipole 電極排列法施測；電極若與地面接觸電阻大，可以多加幾根電極，電極貫入深度加深，或是加以鹽水改進。提供測線選擇概要如下：(Tsourles et al.,1999)

- (1) 選擇地勢平坦或是略為緩坡地形，使的地形效應降低。
- (2) 遠離地下管線、金屬導電物質等，減少雜訊。
- (3) 考慮測深和測線展距比例關係與橫向涵蓋範圍。

Zhou and Dahlin(2003)認為影響施測資料品質兩個因素分別為 (a) 電極間距的誤差 (b) 電位誤差(potential error 與 (c) 正向施測(normal)與反向施測(reciprocity)兩次之間量測電位誤差，其中若正向施測是從測線起點至測線終點進行施測，而反向則為測線終點至測線起點施測。Dipole-Dipole 電極排列法施測容易受 X 方向電極間距(in-line spacing)誤差影響最大，電極間距 10% 差值，影響視電阻率值 20%，受 Y 與 Z 方向偏移誤差 (off-line) 只有 2%；電位誤差和電勢能值成常數次方成反比關係，意即量得電位差值小，電位誤差大。

Edwards(1997)所定的測深參數比較，係在等長的測線展距之下，Pole-Pole 電極排列法最大測深為 0.86 倍的測線展距，接著為 Dipole-Dipole 電極排列法的 0.22 倍的測線展距。最後為 Wenner 與 Wenner-Schlumberger 電極排列法約為 0.17 倍的測線展距。

Loke 與 Baker(1995)討論各種電極排列的靈敏度：

- (a) Wenner 電極排列法靈敏度值為 128%，測線中心點深度以下靈敏度變化為垂直方向遞減，其變化程度大於水準方向。因此 Wenner 電極排列法的垂直解析度比側向解析度佳，適用於探測水準層狀構造。
- (b) Pole-Pole 電極排列法雖然有最大探測深的優點，但靈敏度值只有 2%，垂直及側向

解析度相對來的差。

- (c) Wenner-Shlumberger 電極排列法 (**目前國內普遍使用電極排列法**) 之靈敏度在測深參數 (Dipole 間距) 為 1 時與 Wenner 電極排列法靈敏度相同, 當 n 值加大後, 中心高靈敏度區域開始分離, 靈敏度值從 128% 降到 32%。結果顯示 n 愈小時, 對於垂直方向變化感受大; n 值變大時, 對於水準方向變化感受大, 所以此電極排列法對於垂直與水準皆有較佳解析度。
- (d) Pole-Dipole 電極排列法屬於非對稱性量測系統, 為了消除非對稱性誤差, 建議以順、反之量測方式進行施測。靈敏度當 n 值為 1 時, 靈敏度值為 64%, 當 n 值為 6 時靈敏度值降為 2%, 其高靈敏度區域位於電位極之間, 因此 Pole-Dipole 電極排列法對於水準方向變化比較靈敏。
- (e) Dipole-Dipole 電極排列法之量測靈敏度與 Pole-Dipole 電極排列法雷同, 高靈敏區域集中在電流極之間與電位極之間, 代表對於水準方向變化容易感受, 而垂直方向變化幾乎感受不到, 因此當 n 大於 2 的量測深度資料比較不具備代表性。

橫向涵蓋範圍: 依照各電極排列在相同電極數目資料點數涵蓋範圍討論, 結果顯示以橫向量測區域最廣的為 Pole-Pole, 最小為 Wenner 排列法。於野外做施測的時候, 常因為佈設測線空間有限, 無法獲得測線邊緣兩側的資料。

訊號強度除了受週遭雜訊影響外, 如地球自然電位、地層下的金屬導體與高電阻率絕緣體、地形效應等, 還與電極排列的幾何參數 (K) 成反比關係。Wenner 排列法的訊號衰減最小, 其次是 Wenner-Shlumberger 電極排列法, 訊號衰減最快為 Dipole-Dipole 電極排列法。(Zhou 與 Dahlin, 2003)

Pole-Pole 電極排列法與 Pole-Dipole 的訊號受到遠電極到測線之間雜訊以及遠電極的非理想狀態而造成訊號衰減 (Dahlin 與 Zhou, 2004; Dahlin 與 Zhou, 2003); Pole-Pole 電極排列法衰減係數雖然與 Wenner 排列法相同, 但是遠電位極和遠電流極到測線間的雜訊涵蓋了較多的地球自然電位, 因此訊號衰減會比 Pole-Dipole 快且弱。

Dahlin and Zhou (2004) 以幾種特定地質條件情況, 探討不同電極排列方法的雜訊比值以及施測的異常反應效果 (anomaly effect)。異常反應效果是指以非均質條件的資料和均質條件資料平均差異值表示電極排列對不同地質條件的反應能力。顯示 Pole-Pole 電極排列法對於傾斜構造地層反應大, 但 Pole-Pole 雜訊比值與異常反應效果隨著地層構造不同, 會出現較高或較低之值, 空間解析能力較差。Pole-Dipole 電極排列法屬於高雜訊比和中等

異常反應效果，空間解析度卻比 Pole-Pole、Schlumberger 與 Wenner 電極排列法佳。Wenner 與 Schlumberger 兩種電極排列方法之垂直解析度皆是優於其他方法，從幾何參數上比較 Pole-Pole、Wenner、以及 Schlumberger 之電位訊號強度較 Dipole-Dipole 與 Pole-Dipole 電極排列法佳(Zhou and Dahlin,2003)，但 Pole-Pole 空間解析度卻比不上 Schlumberger、Pole-Dipole、Dipole-Dipole 與 Wenner 電極排列法。

Dipole-Dipole 電極排列法相對於其他電極排列法具有高異常反應效果，但容易受到雜訊影響，空間解析度與 Pole-Dipole 相同；對於垂直或是傾斜構造物的水準位置解析能力非常高，但深度位置解析度不是最佳；**測深長度 n 值建議最大等於 6。**

整體上 Wenner 因具有高電勢能差訊號強度，最適合在背景雜訊大區域施測。

Zhou and Dahlin(2004) 利用數值模擬比較十種電極排列法的二維電阻率影像之解析度與效能。電極排列包含雙極(pole-pole；PP)、單極對偶極(pole-dipole；PD)、半溫奈(half-Wenner；HW)、溫奈(Wenner- α ；WN)、施蘭卜吉(Schlumberger；SC)、偶極偶極(dipole-dipole；DD)、溫奈 β (Wenner- β ；WB)、 γ (γ -array；GM)、梯度(multiple or moving gradient array；GD)與中點電位法(midpoint-potential-referred measurement；MPR)等十種方法，並建立五種地質模型，分別模擬被掩埋之古河道、狹窄且高導電度之岩脈(牆)、夾狹高電阻之岩脈(牆)、具傾角的高低電阻率岩層互層與被掩埋的污泥池，藉此檢驗野外調查的效能(異常物效應值、訊號雜訊比)與這些排列法描繪影像的能力。結果顯示，(1)GM 與 WN 相對其他排列法受到雜訊影響最小；(2)不同電極排列的相對異常物響應值與地質的模型有關，但 PP、GM、WB 的相對高異常響應值無法每次都提供高解析度的影像，PD、DD、GD 則可產出較 GM、PP、WN 與 WB 較高解析度的影像，但它們較容易受到雜訊的影響。SC 是一種不錯的選擇，但其較容易受到邊際效應所影響。(3)多電極排列的測試範圍內資料密度的減少，影像品質仍顯得相對健全。(4)L1 逆推法在雜訊多的情況下仍可提供較 L2 逆推法佳的影響結果，但在有傾角的互層結構。(5)GD 與 MPR 適合多波道的儀器做調查，GD 可顯示媲美 DD 與 PD 的影像，因此，考量地質、調查目的、現場環境等因素，推薦 GD、PD、DD 和 SC 為二維法最適宜的排列法。

自 1950 年代開始，地電探勘技術開始使用許多不同的排列法，例如：pole-pole (PP), pole-dipole (PD), half-Wenner (HW), Wenner- α (WN), Wenner-Schlumberger (SC), dipole-dipole (DD), Wenner- β (WB) and γ -array (GM)。HW 法是 pole-dipole 法的演變，即是 PD 法中的 $n=1$ ；WB 是 DD 法的變異，係將兩偶極間的間距與偶極本身的電極長度

維持相等；而傳統的 WN 則是 SC 法的簡化。GD 與 MPR 很適合多波道的儀器系統，這兩種排列法可以在每對電流極發射電流時進行同步測量。這十種電極排列法在野外調查各有優點與限制，可以針對不同的情況選擇不同的排列法進行調查。其中 PP、WN、SC、PD 和 DD 是較常使用的二維或三維調查的排列方法(Dahlin 1996; Chambers et al. 1999; Storz, Storz and Jacobs 2000)。理論上 PP 法是最基礎的排列法，因其他電極排列法所取得的資料均可以由 PP 法的線性組合中獲得，但因遠極使用的限制與遠電位極受到外部雜訊影響，因此在野外調查時很難取得良好的 PP 資料(Park and Van 1991; Van, Park and Hamilton 1991)。

這十種排列法應用在地質模型的調查時，其成像的能力均有些差異，如在空間解析度，在影像中顯示出人造物的傾向，解析真實電阻率構造的能力，與最大的可解釋深度等等。靈敏度的圖形在逆推過程中的解析能力扮演了最重要的角色，相當多的研究致力於探討各種排列法使用上的優點與長處，例如 Sasaki (1992)綜合比較 PP、PD 與 DD 法在跨孔井測使用上的解析度，**他研判 DD 法如果在儀器精確度高時較 PP 排列法更能解析複雜的結構，而 PD 法在解析度與訊號強度上介於 PP 與 DD 之間。**Oldenburg and Li (1999)分析「探測深度」再重申了 PP、PD 和 DD 排列法在逆推模型中具有不同的穿透深度。Dahlin and Loke (1998) and Olayinka and Yaramanci (2000)各自細查了 WN 排列法的影像解析能力與可信度，他們指出 WN 法的資料點密度對於解析度是很重要的，且逆推的模型僅能提供近似於真實電阻率形體的概略結果。

為取得高解析的影像，**電極排列使用上應理想地給予最大異常訊息資料、合理的資料覆蓋率和高訊號雜訊比**，成像的資料取得會先於地表佈置許多等間距的電極，藉由不同的電極排列取得不同深度的資料點，一般為獲得高解析的影像需要一組低雜訊污染的背景資料，但為獲得大量的資料，即使是使用自動化的系統仍需耗費大量量測時間，此外，大量的資料點也增加自逆推結果中取得良好的「資料不相符」數值的難度，且可能因為未知的雜訊影響製造出人為的(假的)結果(LaBrecque et al. 1996; Zhou and Dahlin 2003)。

2.2 研究方法與過程

2.2.1 物質的電性

物質的電性中以電阻率、介電係數與導磁係數三者最為重要。

(1) 電阻率

電阻率指示物質導電性的良劣。電阻率高的是不良導體或絕緣體，可高至 10^{17}ohm-m (熔化的石英)。電阻率低的是良導體，可低至 $1.5 \times 10^{-8} \text{ohm-m}$ (銀)。地層之電阻率大多在 10^4ohm-m (甚乾的地層) 至 1ohm-m (含海水的地層) 之間。由於分佈範圍很大，不同的地層及不同含水狀態常表現明顯的電阻率差異，是地層分辨的良好依據。

(2) 介電係數

介電係數(permittivity)是指示電容效應的一個參數，通常用 ϵ 表示。真空(free space)的介電係數以 ϵ_0 表示， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。一物質的介電係數與真空的介電係數之比值稱為介電常數(dielectric constant)，以 ϵ_r 表示。大多數物質的介電常數在 1-10 之間。但水的介電常數高至 80，是很特別的。介電常數與物質的狀態及溫度有關也與電場的頻率有關，在電場強度大時也隨電場強度而變。

介電質(dielectrics)是該物質中無自由電荷，因此在電場作用下，物質中無電流。所以介電質物體與電絕緣體(electric insulator)同義。介電質雖無自由電荷但有束縛電荷(bound charges)。束縛電荷在電場作用下會移位，使“正”與“負”電之中心不重合而產生電偶極(electric dipole)此現象稱為介電質被極化(polarized)。在電場作用下產生的電偶極稱為感應電偶極(induced electric dipole)。在無電場作用，有些物質的分子也呈“正”與“負”電荷之中心呈岔移狀態，稱為極化分子(polar molecules)，水分子即是一例。

一個極化分子之電偶極矩(electric dipole moment)以 p 表示其大小以分子電荷乘位移量計算。分子之電偶極矩在日常生活尺度(巨觀)不合使用。在巨觀尺度使用單位體積的電偶極矩，以 P 表示。 $P = Np$ ， N 為單位體積之分子數。通常 P 與電場強度成正比寫為 $P = \epsilon_0 \chi_e E$ ， E 為電場強度， χ_e 稱為電極化率(electrical susceptibility)。在一般的電場強度中 χ_e 與 E 無關，而 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ， $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ 。因此介電係數與介電常數也都是指示電極化特性的一個參數。

(3) 導磁係數

一物質的導磁係數(magnetic permeability)或稱磁導率是指示該物質磁感應的一個參數，也是在介質中電流產生磁場效應的一個參數，以 μ 表示。真空的導磁係數 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。一物質的導磁係數與真空的導磁係數之比值稱為該物質的相對導磁係數，以 μ_r 表示。大多數物質的導磁係數與真空之值接近，相差只千分之幾， $\mu_r \approx 1$ 。但有些物質如鐵、鎳及鈷等材料之 μ_r 很大，稱為鐵磁性物質(ferromagnetic materials)， $\mu_r = 50-5000$ ，其特殊合金可達 105。

在真空中，磁場由電流產生。描述磁場通常使用磁通密度(magnetic flux density)。磁場與電流的關係可寫成

$$\oint_c \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad \text{或} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$\mathbf{B}$ 為磁通密度， I 為電流強度， $\mathbf{J}$ 為電流密度。

在物質空間，磁場與電流的關係寫成

$$\oint_c \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu I \quad \text{或} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

式 (2.1) 與 (2.2) 即是安培定律

在物質空間施加磁場會使物質磁化，產生磁偶矩(magnetic dipole moment)。單位體積的磁偶矩寫成 $\mathbf{M}$ 稱為磁化向量。磁偶矩在其周圍生成磁場的情形如同電流生成磁場，是由微觀電流生成磁場。因此將磁化向量生成磁場的情形，以電流密度生成磁場比擬。此比擬的電流密度稱為等效磁化電流密度以 $\mathbf{J}_m$ 表示。由理論推導得 $\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M}$ ；因此 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J} + \mathbf{J}_m)$ ， $\mathbf{J}$ 為自由電流密度

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \nabla \times \mathbf{M}, \quad \nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}; \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

此處 $\mathbf{H}$ 場稱為磁場強度(magnetic field intensity)。當物質為線性且等向性(linear and isotropic)，磁化向量與磁場強度成正比， $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ ，此處之比例常數 χ_m 稱為磁化率或磁感率(magnetic susceptibility)，是個無因次量(dimensionless quantity)

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}; \quad \mu_r = 1 + \chi_m = \frac{\mu}{\mu_0}$$

2.1.2 地電阻影像掃描法 (Electrical Resistivity Tomograph, ERT)

地電阻影像剖面法屬直流電阻法，其方法原理係利用直流電經電極棒通入地下量測地層電阻率，並以電性區分地層。舉凡地層岩性、組成礦物、顆粒大小、地層含水狀況、水中之含鹽度，皆為影響地層電阻率之因素。故直流電阻法所測得之電阻率資料，配合地質狀況及鑽探的分析結果，可正確地研判水位、含水層、阻水層（或滯水層）分佈、地層岩性構造及地層中之異常區（如污染訊號）。目前國內外已有許多實場調查結合地球物理探勘技術輔助建立特徵概念模型（董倫道等，1995；Zeng and Gorelick, 2003; Bowling et al., 2005, 2006）。特別是近年來 MADE (Macrodispersion Experiment) 場址大量研究以 ERT 探勘剖面逆推大範圍含水層之水力傳導係數 (K) 值分佈。Niwas and Lima (2003) 指出電阻率變化深受孔隙水質影響，例如土壤孔隙中水較乾淨，則電流之傳導主要受土壤-水介面導電性之影響；若孔隙水含高鹽度（或其他污染物質），則電流之傳導主要與孔隙水之導電性有關。由於相同地質條件會因水質化性不同而有迥異結果，因此亦可運用於污染場址調查。圖 1 為比較飽和土壤中各種地質材料及 DNAPL 之電阻率分佈，可發現愈細粒之材質其電阻率愈低（亦即導電性佳），因此較容易導電的黏土、粉土之電阻率均甚低，如黏土之電阻率一般應小於 10 或 30 Ohm-Meters，砂質約 10~100 Ohm-Meters，礫石則較高，約在 70~300 Ohm-Meters，DNAPL 之電阻率一般多超過 1,000 Ohm-Meters，比礫石、砂質或粉土含水層之地質電阻率高出許多，由於 DNAPL 具有高電阻率的異常特徵，因此容易與地層區別開來。加以 ERT 探勘深度將隨測線展距增加而加深，可同時評估各深度之地質變化與污染分佈。ERT 法於特定探勘位置需於地表配置四根電極，在其中兩電極（電流極：A 與 B）以交替直流電 (Alternative Direct Current) 通入地下，並用電流計量測電流強度；此時在另兩根電極（電位極：M 與 N）量度因電流分佈所造成的電位差，ERT 法施測原理與現地探勘示意如圖 2 所示。

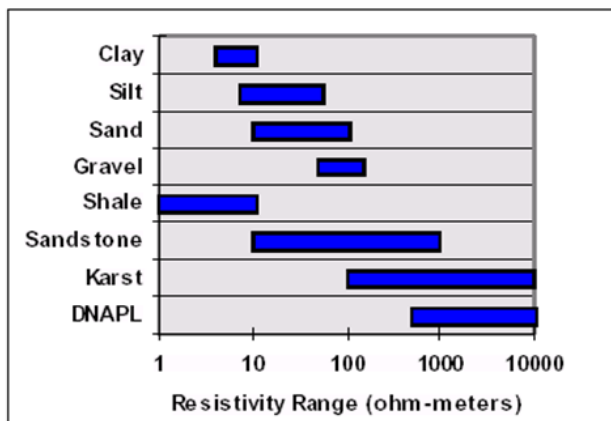


圖1、地下環境不同介質之電阻率分佈（資料來源：修改自 Keller, G.V.; Frischknecht, F.C., *Electrical methods in geophysical prospecting*, Oxford, 184p, 1966.）

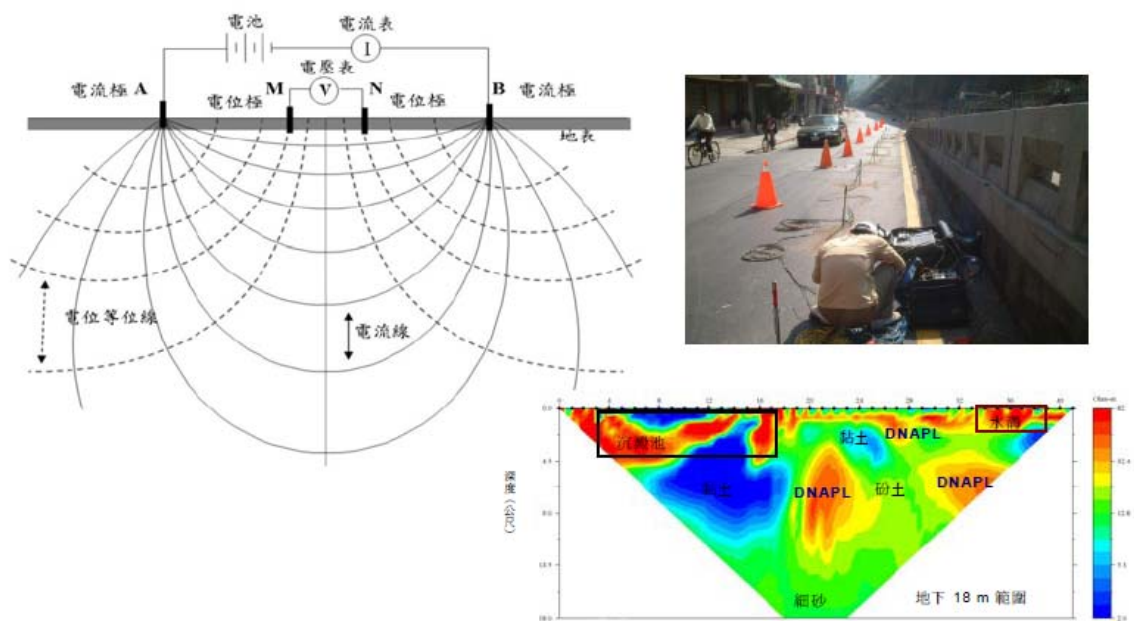


圖2、地電阻影像剖面法原理與探測示意圖

電阻法的探測通常是使用四支導體(一般用金屬棒)分開置於(插入)地表上，其中二支作為通電用，將電流通入地層中造成人為電場。此二支通電用的導體稱為電流極。另兩支導體作為測量電位差用稱為電位極。電位差是電流、地層電阻率構造(或稱地層參數，在一維構造為各層厚度和電阻率)與電極間距的函數。測得電位差，電流與電極間距，可藉由電位函數逆推地層之電阻率構造。

在一電性均質且等向性的半空間地層，亦即地層為一層厚度無限大的情況，地層電阻率與電流、電位差及電極間距之關係可以寫成：

$$\rho = G \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots(2.4)$$

其中

$$G = 2\pi \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}^{-1} \dots\dots\dots(2.5)$$

式中 ρ 為此半空間地層的電阻率， ΔV 為電位極之間的電位差， I 為電流極通入地層的電流。

G 稱為幾何因數，依電極間距的距離而定

AM 為電流極 A 至電位極 M 之距離

BM 為電流極 B 至電位極 M 之距離

AN 為電流極 A 至電位極 N 之距離

BN 為電流極 B 至電位極 N 之距離

在地層為半空間地層情況，只要測得一組 $(G, \Delta V, I)$ 就可依式(2.5)算出其電阻率。然而實際的地層通常是多層的，若測得一組 $(G, \Delta V, I)$ ，再依式(2.4)算出電阻率則稱它為視電阻率，因為它不是地下某一層的真實電阻率，而是在該電極相對位置情況下的綜合電阻率效應。當電極之間的距離小，電流主要分佈於淺部，測出的訊號屬於淺部地層的效應；當電極間距大時，電流分佈廣且深，測出的訊號含淺至深地層之綜合效應。因此，視電阻率會隨電極間距改變而改變。若將電極間距(或展距)由小漸次增大，就可漸次測得由淺至深的地層訊號。在實際測勘時依探測目標可將電極維持相同的幾何形狀，只在地面上整組電極作平移，稱為水準描繪(horizontal mapping)，它是針對地層水準方向變化作探測，屬於定性或是半定量的探測法。可應用於斷層的交界、礦床的邊界、不整合接觸帶等具水準變化之探測目標。若是要探測由淺至深的地層電阻率則須將電極間距由小至大漸次增大以測得由淺至深的地層訊號，此種探測稱為垂直電探(vertical electric sounding，簡稱為 VES)，可作定量解釋的探測法。若是將垂直電探點安排在一直線則可作二維電性地層探測，稱為電阻率剖面探測(electric resistivity profiling)。也可將垂直電探點安排在一區內，測點間距夠小，作三維地層構造探測。

電極排列方式施測時的電極排列方式有多樣，下列五種方式較常使用：

許倫貝格(或稱施蘭柏吉)排列(Schlumberger array)：是一種線形對稱的排列，四支電極排在一直線上，電流極在外，電位極在內如(圖 3)，通常電流極間距較電位極間距大四倍以上($s \geq 4b$)。作垂直電探時將電流極由小展距逐次加大，以逐漸增加測深。理論上電位極間距不必更動，因此在探測時只要移動電流極即可。若電流大小不變，電流極展距增大，電位極間的電位差必下降，因此在實際探測時，當電流極展距增大到某一程度時，必須加大電流或是加大電位極間距以測得較強的訊號。

本排列法之主要優點是較省人工，並且受地層側向局部異常影響較小，資料品質較佳。

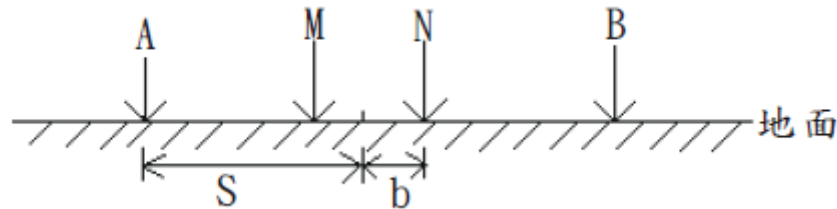


圖3、Schlumberger array 示意圖

溫奈排列(Wenner array)：也是一種線形對稱排列，以等間距將四支電極排在一直線上，在內的兩支為電位極，在外的兩支為電流極如(圖 4)。做垂直電探時需同時移動四支電極位置。其主要優點是儀器精度要求不高，且計算視電阻率容易。缺點是探測時較費人工，且因每次移動電位極，將使地表淺部的局部不均質與地下訊號混合造成資料品質較差，易導致錯誤解釋。

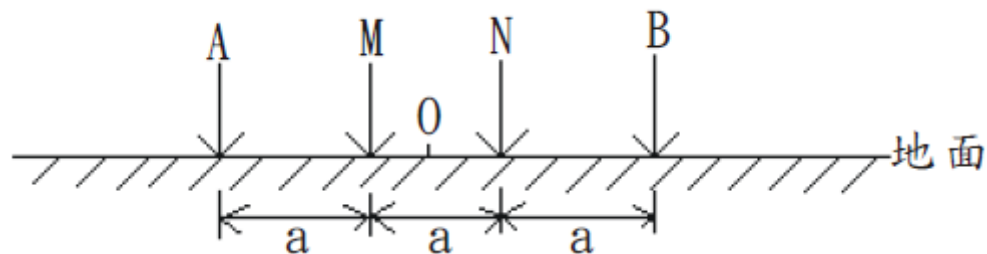


圖4、Wenner array 示意圖

雙偶極排列(double-dipole, dipole-dipole array)：二支電流極形成一個偶極，二支電位極形成另一偶極，二組偶極之間的距離比偶極間距大很多($OO' \gg L$)。雙偶極排列有數種常用的形式(圖 5)。它較適合作深部地層探測(百公尺以下)。

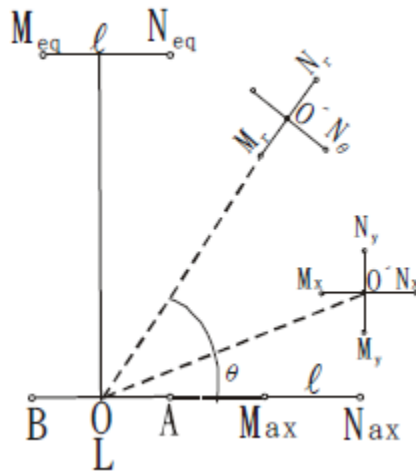


圖5、Dipole-Dipole array 示意圖

三極排列(three-point array)：三極排列是將一支電流極(B 極)置定於遠處稱為遠電流極，二支電位極(M 與 N 極)和一隻電流極(A 極)置於探測區，稱為測量極，如(圖 6)。遠電流極至電位極中點之距離(BO)比測量電流極展距(AO)大 10 倍以上。做垂直電探時，測量電流極展距由小逐次增大，可測得由淺而深的地層訊號。若將 A，M 與 N 極排成一直線，也稱為半許倫貝格排列(half-Schlumberger array)。理論上，在水準地層情況，三極排列與許倫貝格排列可獲相同的探測結果。在實際探測中，BO 之置定距離可以不大於 10 AO，只要 $BO \geq AO_{max}$ ，也可測獲相似深度的地層訊號。

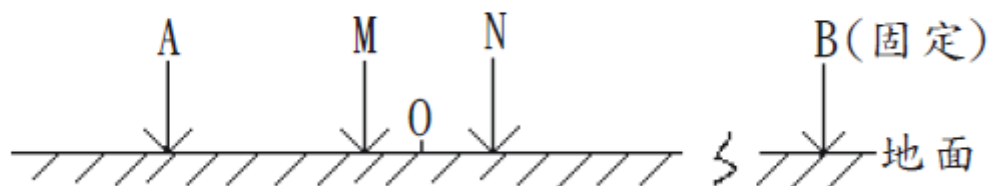


圖6、three-point array 示意圖

二極排列(pole-pole array)：二極排列是將四極中之一支電流極(B 極)與一支電位極(N 極)分別置定於遠處，且彼此相距很遠，另一支電流極(A 極)與一支電位極(M 極)稱為測量電極，置於探測區，如(圖 7)。B 與 N 極稱為遠極，通常 $BM \geq 10AM$ ，

$MN \geq 10AM$ ， $BN \geq 10AM$ 。二極排列通常使用在剖面探測上。在探測目標線上預先等間距排置多支電極，先用第一支電極作電流極，第二支，第三支，至第 N 支依次作為電位極，可得 N 個不同展距的訊號。其次用第二支做電流極，第三支，第四支，……第 $N+1$ 支依次作電位極，也同樣測獲 N 個不同展距的訊號。再次用第三支做電流極，其鄰下 N 支電極依次作電位極，測得 N 個不同展距的訊號。如此依序更替電流極及電位極，可測得一個剖面 N 個不同展距的訊號(稱為 N 層探測結果)。



圖7、Pole-Pole array 示意圖

不同的電極排列法皆可搭配感應極化法資料，但所得到結果差異甚大，所以本研究主題是，不同電極排列法中，哪些適合砂礫質地層調查，以解決砂礫質地層中如出現有機物污染時，以釐清兩種電性反應。不同電極排列會有不同之垂直與側向解析度，假設地層為均質均向介質無限域內，電流極 $C1$ 位於 $(0,0,0)$ ，電位極 $P1$ 位於 $(a,0,0)$ ，另外兩個電極：電流極 $C2$ 與電位極 $P2$ 在無窮遠處。任意一個點 (x,y,z) 上 $d\tau$ 小體積內的電阻率做微量的改變 $\delta\rho$ ，產生的電位變化 δV 與 $\delta\rho$ 的比值定義為靈敏度方程式。如圖 8 所示。

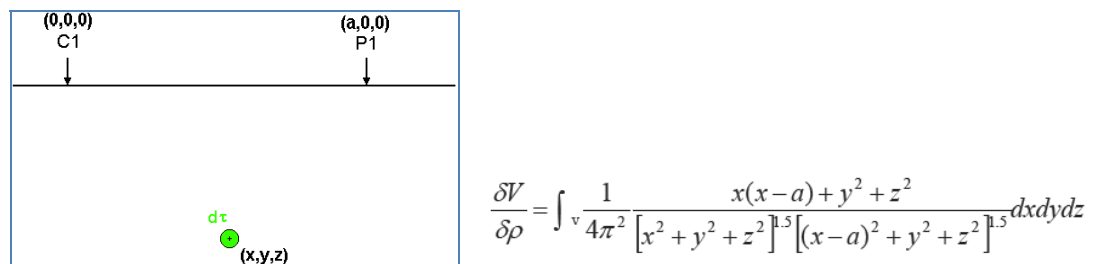
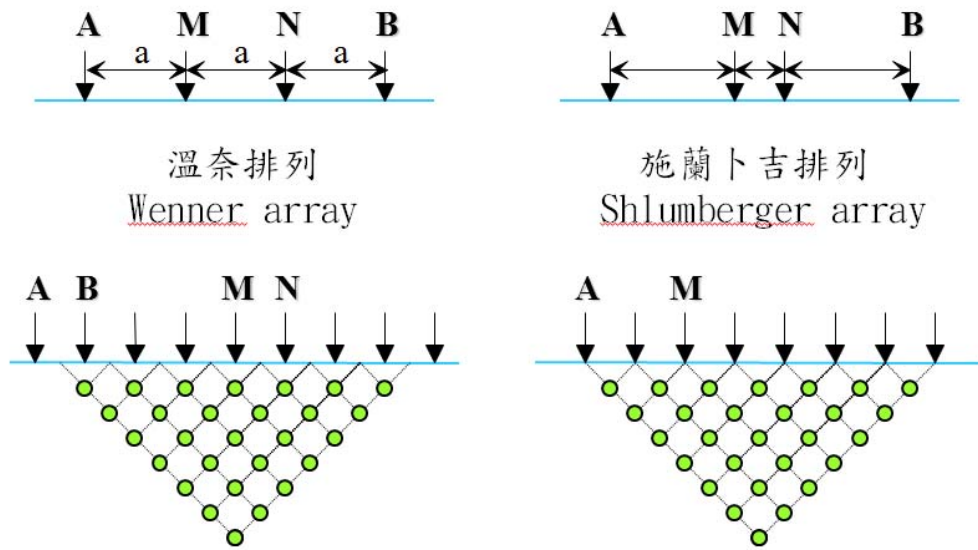


圖8、靈敏方程式

所以根據靈敏方程式在二維條件下之解析解 $F(x,z)$ ，可討論各種電極排列方式的靈敏度；如測線展距為 1 公尺時，根據不同電極排列其探測深度可由 0.025 公尺到 1 公尺。

以下為常見之電極排列法：



雙偶極排列 Dipole-Dipole array 雙極排列 Pole-Pole array

圖9、常見電極排列法

如圖 9 所示不同電極排列法所得之量測點（圖中綠色點；視電阻率）是不同的以及數量亦是不同，結合所有量測值（視電阻率值）所構成的視電阻率剖面，為擬似電阻率剖面（Pseudo Section）；經由反算結果可得到真實地電阻影像剖面。不同電極排列方法及測線展距對於影響範圍深度不同，擬似深度的參數是以 Frechet derivative 靈敏度方程式決定，如圖 8 式，並非圖 9 外側電極傾角 45 度斜線交點為測深位置。

溫奈排列法(wenner array) 負靈敏度值出現在 C1(電流極) 與 P1(電位極) 之間及 C2(電流極) 與 P2(電位極) 之間，表示量測之視電阻率會下降；測線中心點以下的靈敏度變化為隨深度方向遞減，其變化程度大於水準方向。因此 Wenner 的垂直解析度比側向解析度佳，適用於探測水準層狀構造。

施蘭卜吉排列法(shlumbeger array) 當 n 等於 1 時和 Wenner 的靈敏度剖面相同，n 增加到 6 時，中心高靈敏度區域與 C1、C2 分離，集中在 P1、P2 以下。結果表示 n 值小時，對垂直方向變化感受大；n 值大時，對水準方向變化感受大。

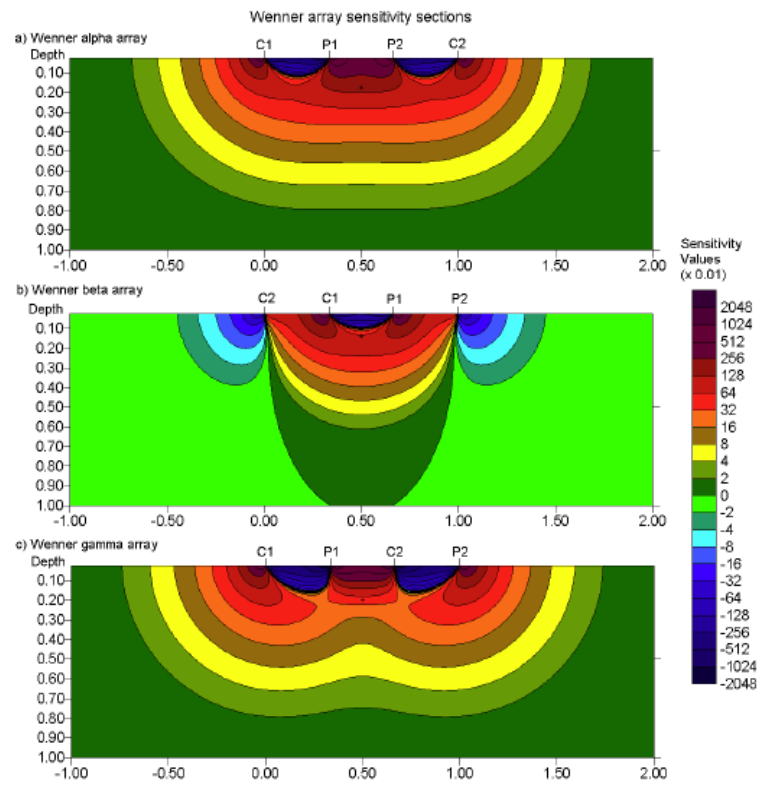


圖10、溫奈排列法靈敏度示意圖

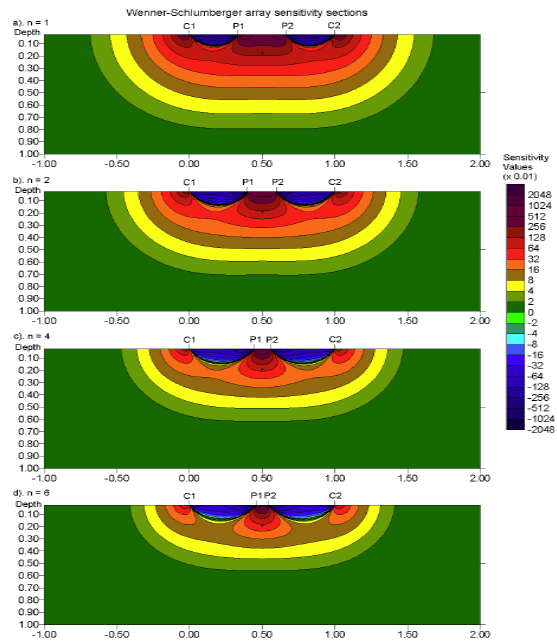


圖11、施蘭卜吉排列法靈敏度示意圖

雙偶極排列法(dipole-dipole array) 當 n 等於 1 時，最大值出現在電流極 C1 與 C2 之間及電位極 P1 與 P2 之間。高靈敏度集中在電流極之間及電位極之間，代表對於水準方向變化容易感受，而垂直方向變化幾乎不能感受到，因此當 n 大於 2 的量測深度資料比較不具備有代表性。

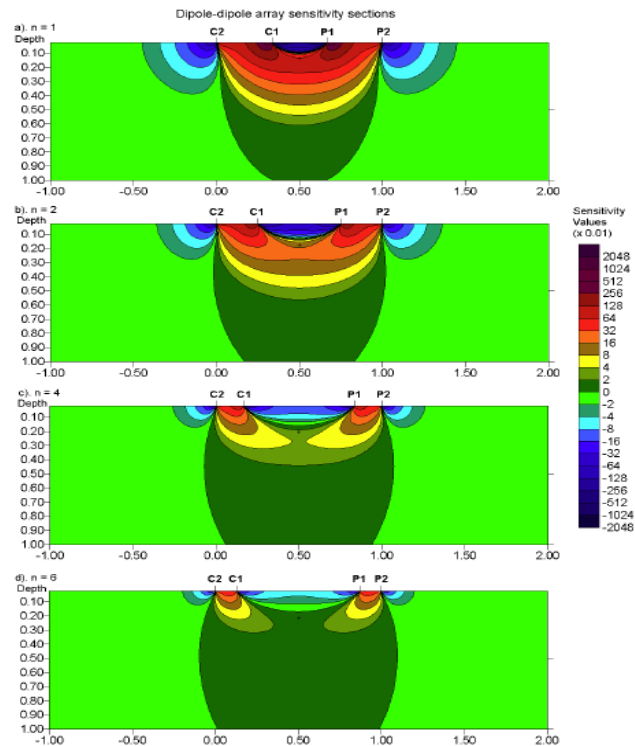


圖12、偶極偶極排列法靈敏度示意圖

Pole-Pole 電極排列法雖有探測深度最深的優點，但垂直和側向解析度皆是最差。

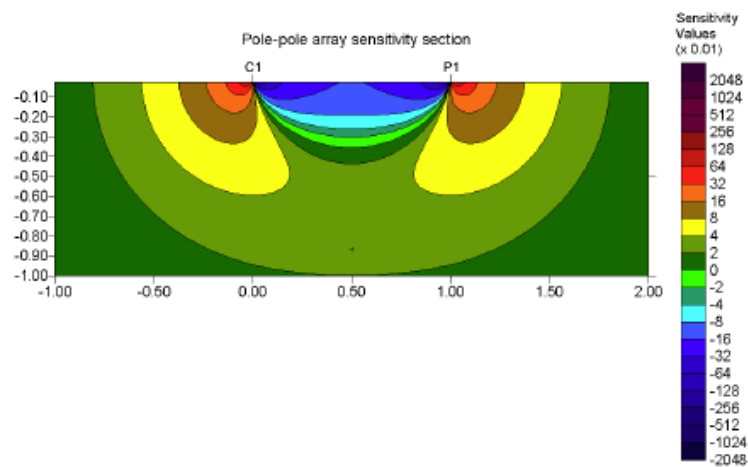


圖13、雙極排列法靈敏度示意圖

資料推求地層參數的工作稱為解釋。觀測資料是電流、電位差與電極位置。一般將此資料表示成該電極排列時的等效電阻率(視電阻率)。推求地層參數首先需要知道電位元函數，但電位函數由地層構造決定，然而地層構造通常是不知道的。較進步的解釋法是先假設地層的構造，依設定的地層模型求出電位元函數，並計算對應於觀測值的模型值。再計算觀測值與模型值的差異，若差異過大則調整或修改模型以求達到觀測值與模型值的差異小到可被接受的範圍，解釋工作即告完成，此方法稱為逆推法。目前大多使用逆推方法作解釋，以其能顯示觀測值與模型值之差的大小，並有效地調整地層參數，使差異量降低，以達可接受的擬合程度。在 1970 年之前，逆推解釋法未完全建立，彼時先繪製許多不同模型的理論值曲線(通常繪成視電阻率曲線，稱為標準曲線)將實際觀測結果與模型的結果作比較以作解釋。除了極少的例子，此種方法無法顯示擬合程度的高低，對地層參數的可信度也不能評估。

逆推解釋的工作流程

- (1) 將實測資料建檔(電極位置，電流，電位差，視電阻率)
- (2) 繪實測視電阻率曲線
- (3) 設立逆推的起始模型
- (4) 計算模型之視電阻率
- (5) 計算實測值與模型值之誤差向量，及均方根相對誤差。
- (6) 若均方根相對誤差未小至可接受程度，則依誤差向量作模型調整，接著作(4)與(5)步驟，以降低均方根相對誤差。直到誤差小到可接受程度。

當設立起始模型與實際地層構造或其等效地層構造差異太大時，調整模型將無法達到均方根誤差小至可接受程度，此時必須修改起始模型才可能獲得有效的結果。

2.1.3 感應極化法 (Induced Polarization, IP)

感應極化法 (Induced Polarization, IP) 又稱複數電阻法 (Complex Resistivity) 是地電方法之一，係以寬頻譜 (一般為 2.4-2.9 Hz) 來量度岩層之電阻率及其相位。電阻率和岩層中之含水量及岩性有關，相位則和岩層之極化 (Polarization) 效應關係密切。一般之直流電阻法從測獲之電阻率資料中分析地下之電阻構造，而複數電阻法則除了分析岩層之電阻率外，尚利用岩層之頻譜相位資料進一步解析地層之極化現象，而極化現象與岩層中之極化物質，如黏土、金屬礦等之含量有關，有助於地電資料進一步之解釋。岩層之複數電阻譜可以柯爾 (Cole-cole) 頻散方程來描述：

$$Z(\omega) = R \left\{ 1 - M \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega T)^c} \right] \right\}$$

其中 (R,M,T,C) 稱為柯爾參數。

柯爾參數與複數電阻譜間之關係:

- (A) R 增加時，振幅增加，相位不變。
- (B) M 增加時，相位曲線峰值增加。
- (C) T 和相位峰值所在之頻率有關，T 愈大則峰值所在之頻率愈低。
- (D) C 增加時，相位曲線斜率增加。

同時柯爾參數與金屬礦體間關係，依物理模擬結果顯示:

- (A) M 正比於金屬礦體之含量(體積百分比)。
- (B) T 與金屬礦體之顆粒度大小有關，顆粒度增加時，將相位峰值移往低頻處，使 T 值增加。
- (C) C 正比於金屬礦體顆粒之淘選度。

簡單來說感應極化法為地層在充放電之過程中產生隨時間緩慢變化的附加電場現象。如圖 14 所示:

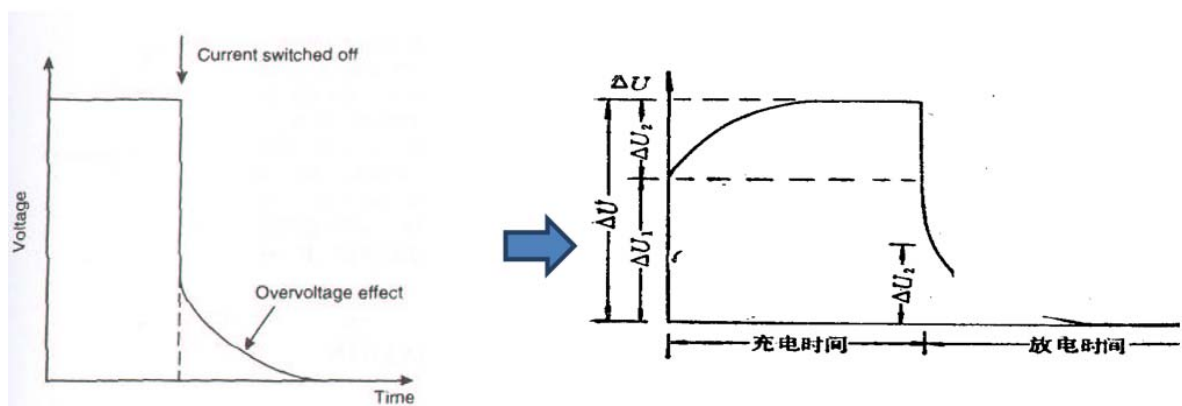


圖14、感應極化法 (IP method) 電位隨時間衰減示意圖

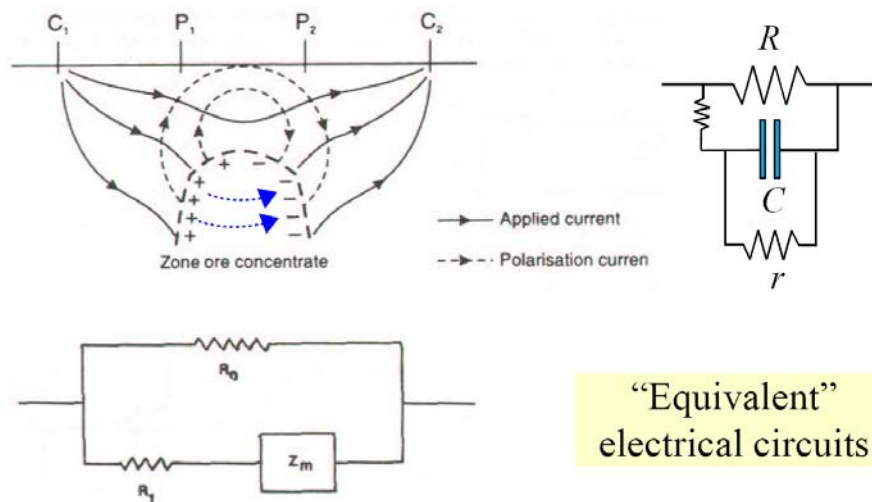


圖15、極化現象示意圖

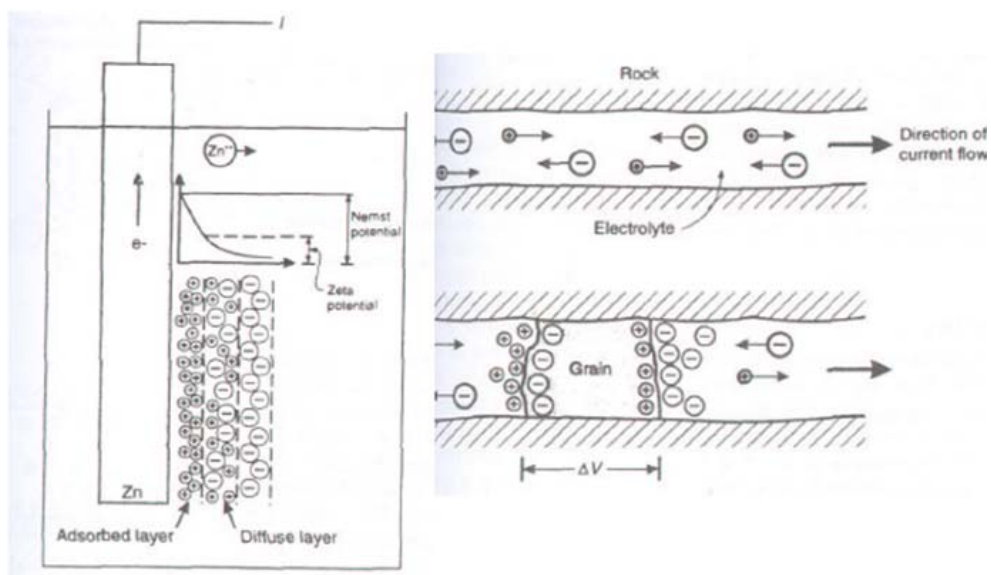


圖16、Grain and electrode 極化現象

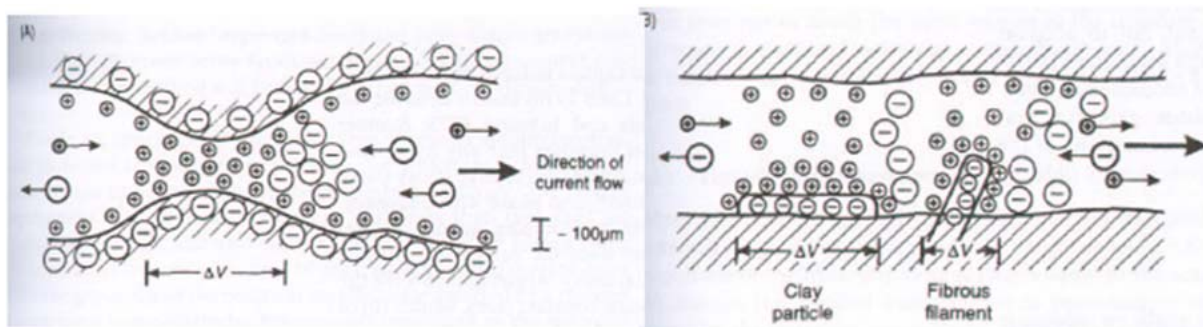


圖17、Electrolytic(membrane)極化現象

第三章 主要發現與結論

3.1 研究區域地質概述

研究區域主於中壢臺地，淺部地層屬於第四紀更新世的紅土臺地堆積，地表地質屬於店子湖層，東側為中壢層。店子湖層主要由上部紅土層及下部礫石層組成。礫石主要為暗灰色砂質砂岩，淺灰色砂岩等。礫石直徑通常在 20-30 公分之間，亦有達公尺以上。礫石層與上蓋之紅土層間大致為漸移關係，其標準剖面下方部應為未受紅土化之礫石層，其上方之礫石表面稍受分解，再上方及變為紅棕色黏土，最上部則移化為紅土（塗明寬等，1990）。研究區域的井資料得知淺部地層中，表層為 3-5 公尺的紅土層，紅土層底為 10-20 公尺的礫石層，礫石層底下為細粒砂岩與黏土的交互層。此交互層深度約為 12-20 公尺。

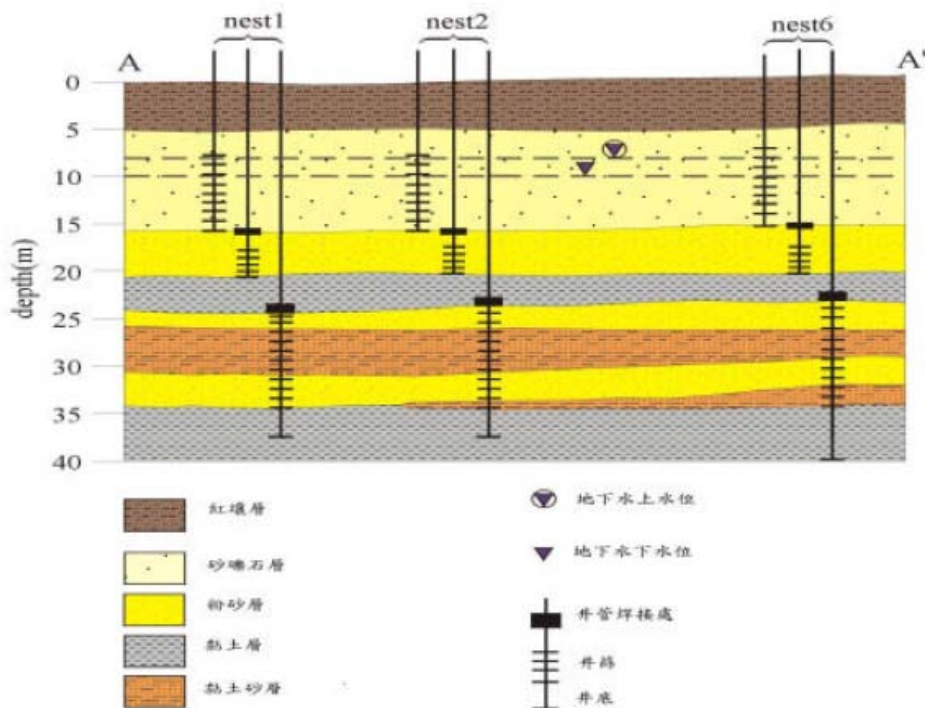


圖18、研究區域地質剖面圖

依圖 18 鑽井資料以電性地層的觀點顯示，本區淺部地層大致可分為三個層次：表面為 3~5 公尺左右的紅土層，覆蓋於膠結不完全之礫石層上，因交界面平緩，判斷為次生紅土。礫石層厚度平均約為 10 公尺，地層上屬於店子湖層；礫石層之下為細粒砂岩與黏土互層，推測此為大南灣層或頭嵙山層之香山砂岩段。測區地下水位面有季節性變化，但經實際量測均在地表下 8~10 公尺處。

3.2 研究區域電性地層模型建立

需有效率地應用電極排列法必須設計出規則，本研究考量到：(1)多電極配置時這些電極排列法的解析度與參數(a 與 n)變化的關係；(2)如何設定參數可有效地描繪地層離型？據瞭解台灣目前還沒有詳細的研究以這各種排列法的成像能力探討最有效率的探測方式，本研究對於野外工作的安排與實際資料的解釋是相當有幫助的。以反應真實地質構造的人工模型研究對於多種排列法的成像能力，並以兩種最常見的逆推方法 robust inversion 與 smoothness-constrained least squares 廣泛地探討比較這排列法成像結果，主要比較以下幾項要素：不同地質模型的解析度、不同資料密度的成像品質與對於雜訊的靈敏度。

圖 19 表示本研究中所探討的排列法的綱要說明，它們的靈敏度分佈於圖中表示，除了 Pole-Pole, Wenner, Wenner-Schlumberger 外，其他的排列法有許多參數 a 和 n 的組合，這些參數可依野外工作所需要的空間解析度、穿透深度與背景雜訊等而做調整，一般來說， a 與 n 值越大可以獲得相對較深的地層資料，當 a 與 n 越小時可提供淺層較佳的水準解析度，本研究以 28 個電極進行排列探測，系統採用美國的 Super StingR8/IP 系統。(Dahlin 1993)

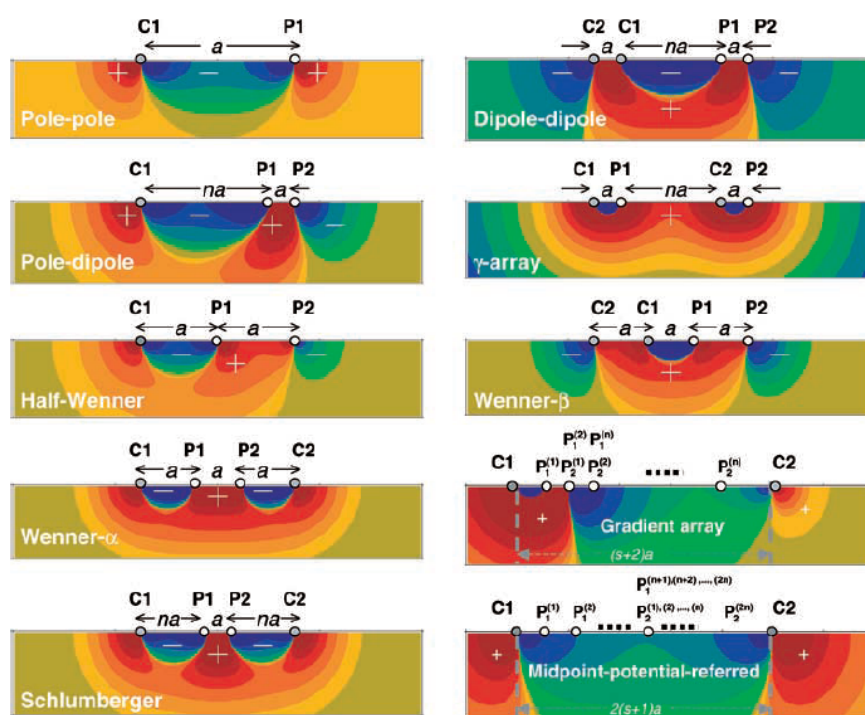


圖19、二維電阻率探測之電極與靈敏度分佈的概要圖（C1 與 C2 是正、負電流極，P1 與 P2 是兩個電位極，斜體字 a 和 n 是控制電極間距與兩偶極間的間距的參數，GD 與 MPR 法的靈敏度分佈圖以一組電位極作為例子。）

台灣地區常使用的電極排列法為 Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Dipole、Pole-Pole 與 Edge-Gradient 電極排列法，本研究便利用此五種電極排列法進行砂礫石層研究，探討各種排列法的成像能力探討最有效率的探測方式。

表3、五種電極排列法之資料密度及施測時間等參數(美國 AGI 八波道設備)

電極排列法	電極間距	放電時間	電阻率量測時間	感應極化法量測時間	資料點數
Wenner-Schlumberger	2 公尺	3.6sec	55 mins	1hr.29 mins	233
Dipole-Dipole	2 公尺	3.6sec	25 mins	30 mins	474
Pole-Dipole	2 公尺	3.6sec	15 mins	25 mins	350
Pole-Pole	2 公尺	3.6sec	12 mins	21 mins	350
Edge-Gradient	2 公尺	3.6sec	23 mins	38 mins	625

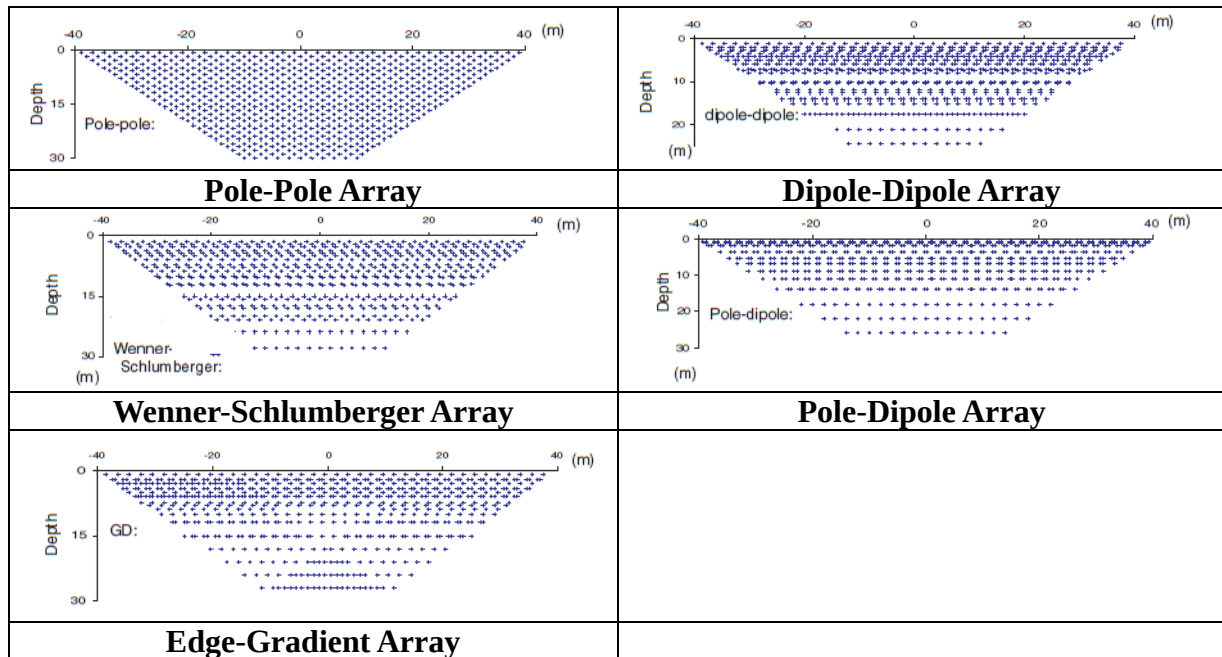


圖20、五種電極排列二維電阻率探測之測點分佈的概要圖。

表 3 與圖 20 分別為為針對研究區域模擬現場施測，假設電極間距為 1 公尺，放電時間為 3.6 秒時所得到資料密度與量測點分佈圖。由於使用設備為美國 AGI 公司之八波道設備，所以量測時間為傳統單波道設備來的快速，如果為單波道設備，施測時間為八波道 4 倍以上時間。Wenner-Schlumberger 電極排列方法施測時間最長且量測點數最少，Edge-Gradient 電極排列方法量測時間中等，但其量測點最多。表 3 增加的感應極化時間，綜合來看並不會增加太多施測時間。

Geological Models(地質模型)

根據研究區域前人研究資料紅土層電阻率為 350-500 歐姆-公尺，厚度 5 公尺，礫石層約 300-1000 歐姆-公尺，因為飽和含水而產生不同電阻率，深度在 5-15 公尺。15 公尺以下為砂夾黏土地層，電阻率設定為 20-80 歐姆-公尺，深度在 15-25 公尺。為了研究這些排列法的成像特性，我們設計上述的地質模型以描繪施測結果。地質模型模擬紅土礫石層，此模型上層是一層厚度為 1 公尺電阻率為 80 歐姆-公尺，此層以下是一層電阻率為 300 歐姆-公尺的紅土層，紅土層下為一較為乾燥粗顆粒礫石層，電阻率為 800 歐姆-公尺，最大深度為 8 公尺，8 公尺以下為濕潤顆粒較細之礫石層，電阻率為 500 歐姆-公尺。並期盼藉由所模擬推演得到的地質模型剖面可以比較這五種排列法的成像能力。

(1) Wenner-Schlumberger Array

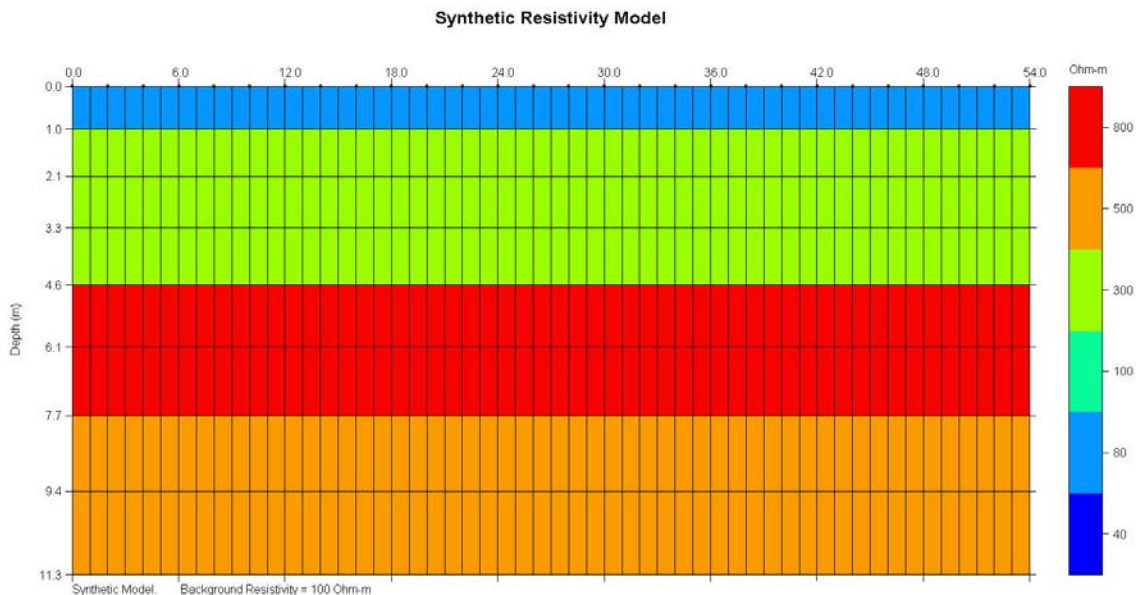


圖21、Wenner-Schlumberger Array 順演模型

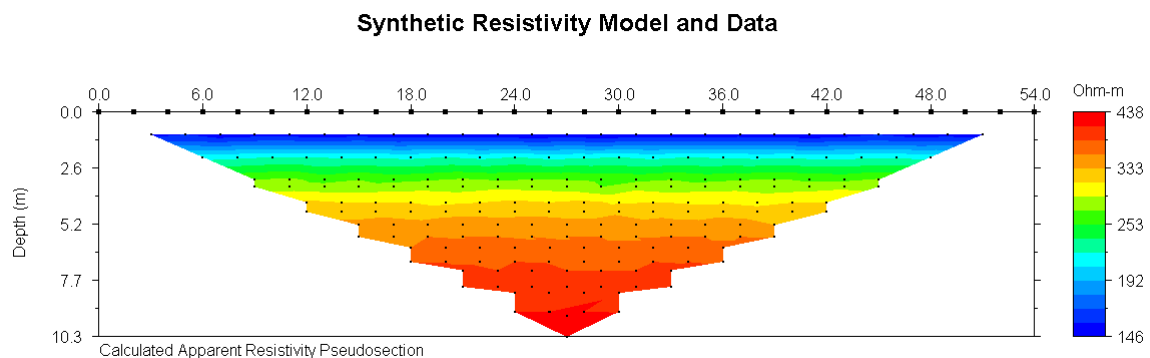


圖22、Wenner-Schlumberger Array 順演擬似剖面

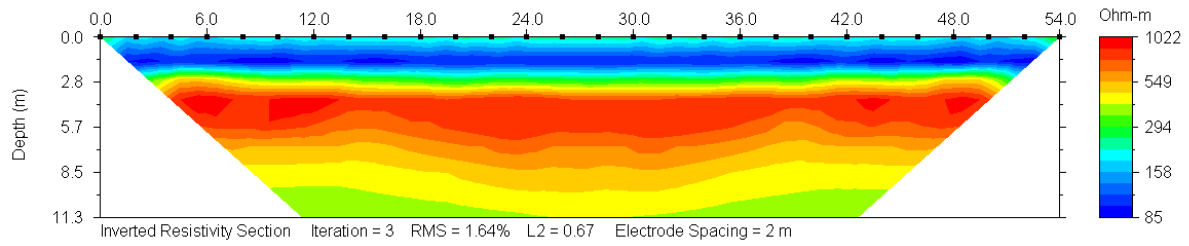


圖23、Wenner-Schlumberger Array 順演結果剖面

(2) Dipole-Dipole Array

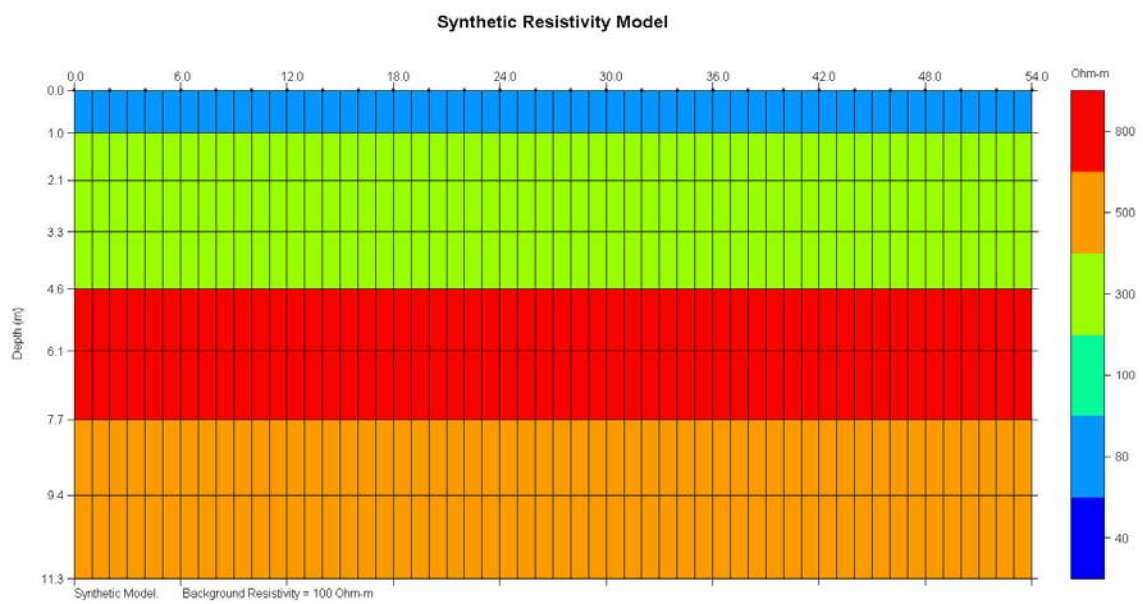


圖24、Dipole-Dipole Array 順演模型

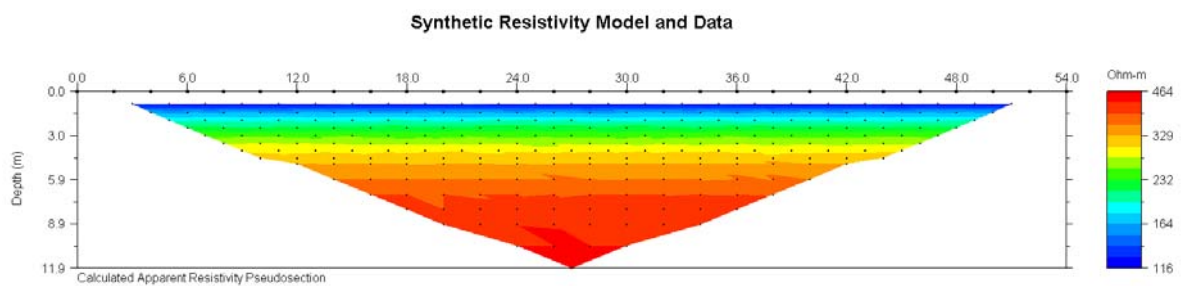


圖25、Dipole-Dipole Array 順演擬似剖面

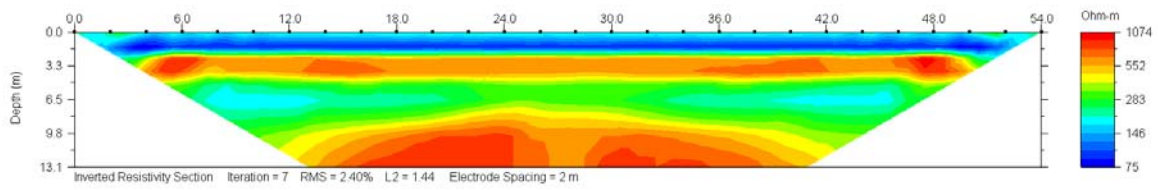


圖26、Dipole-Dipole Array 順演結果剖面

(3) Pole-Dipole Array

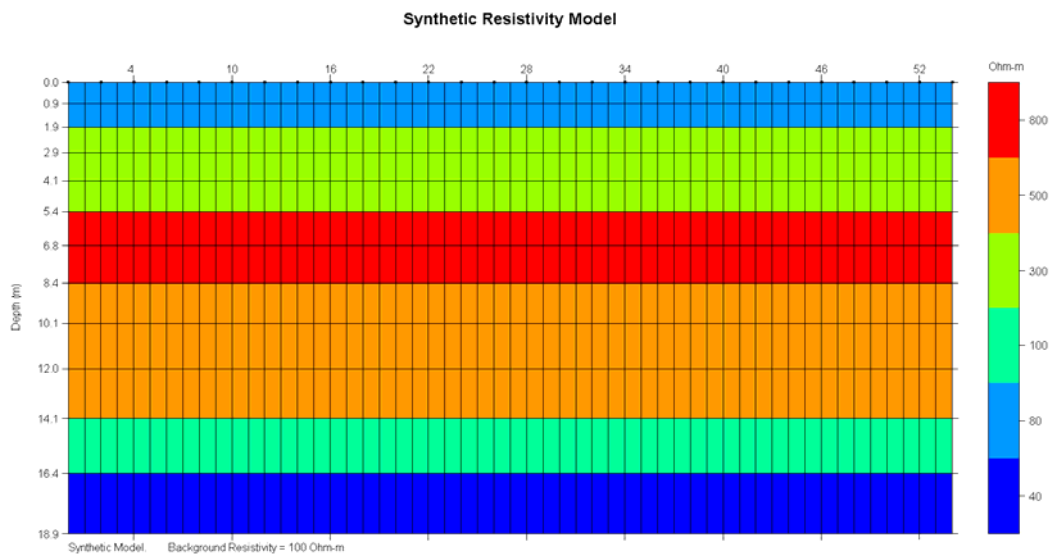


圖27、Pole -Dipole Array 順演模型

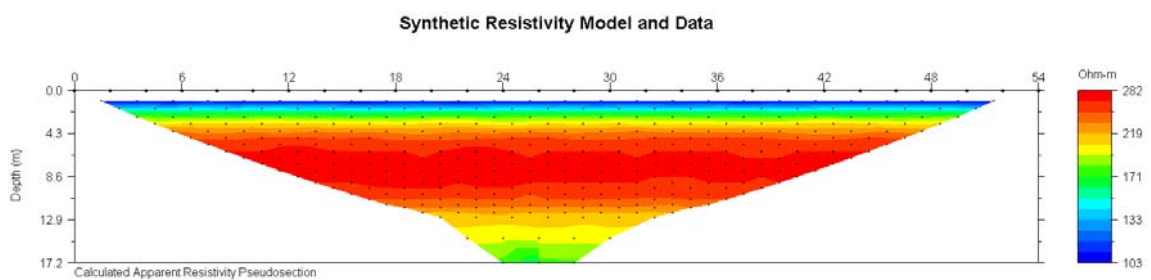


圖28、Pole-Dipole Array 順演擬似剖面

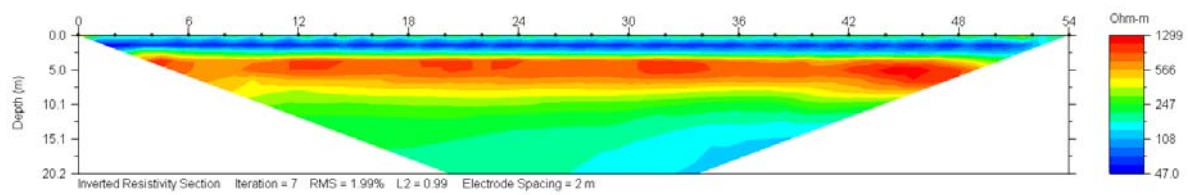


圖29、Pole-Dipole Array 順演結果剖面

(4) Pole-Pole Array

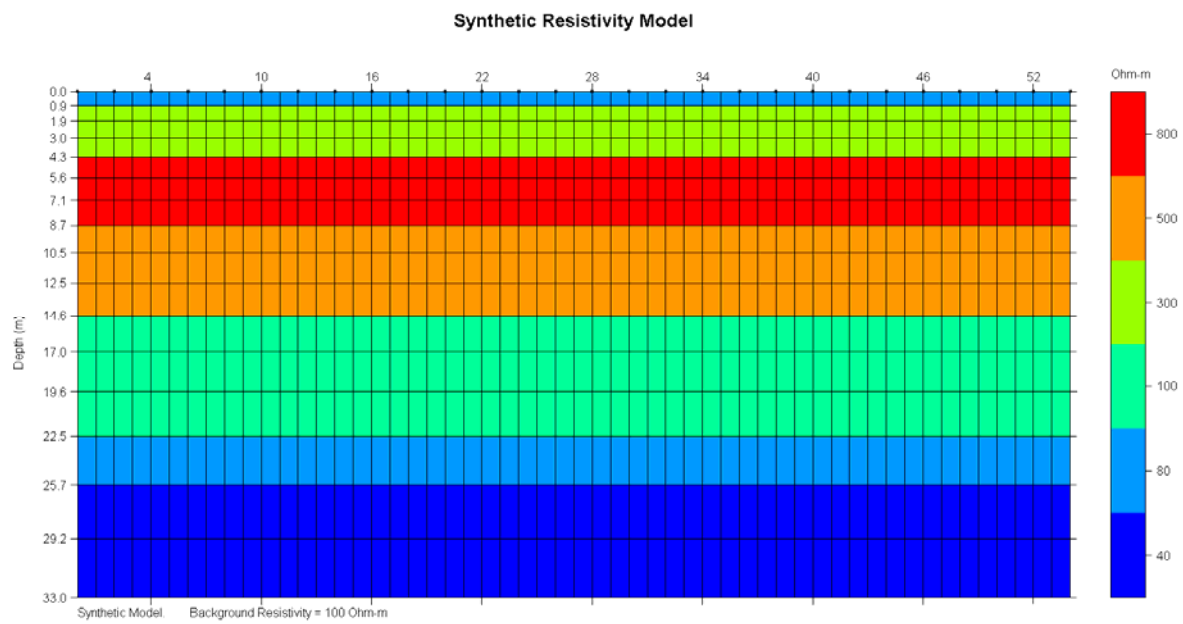


圖30、Pole -Pole Array 順演模型

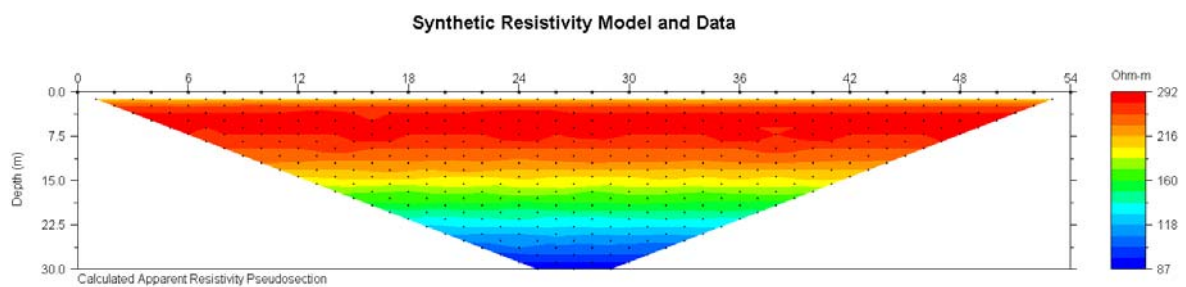


圖31、Pole-Pole Array 順演擬似剖面

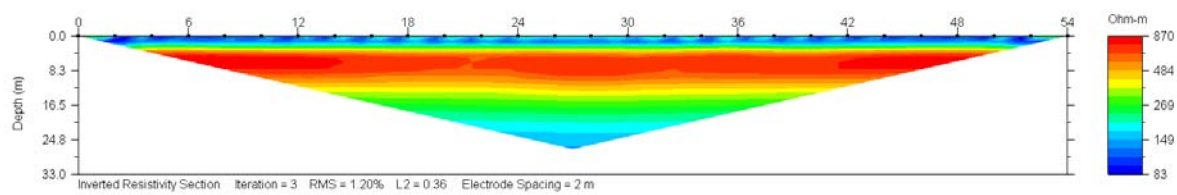


圖32、Pole-Pole Array 順演結果剖面

(5) Edge-Gradient Array

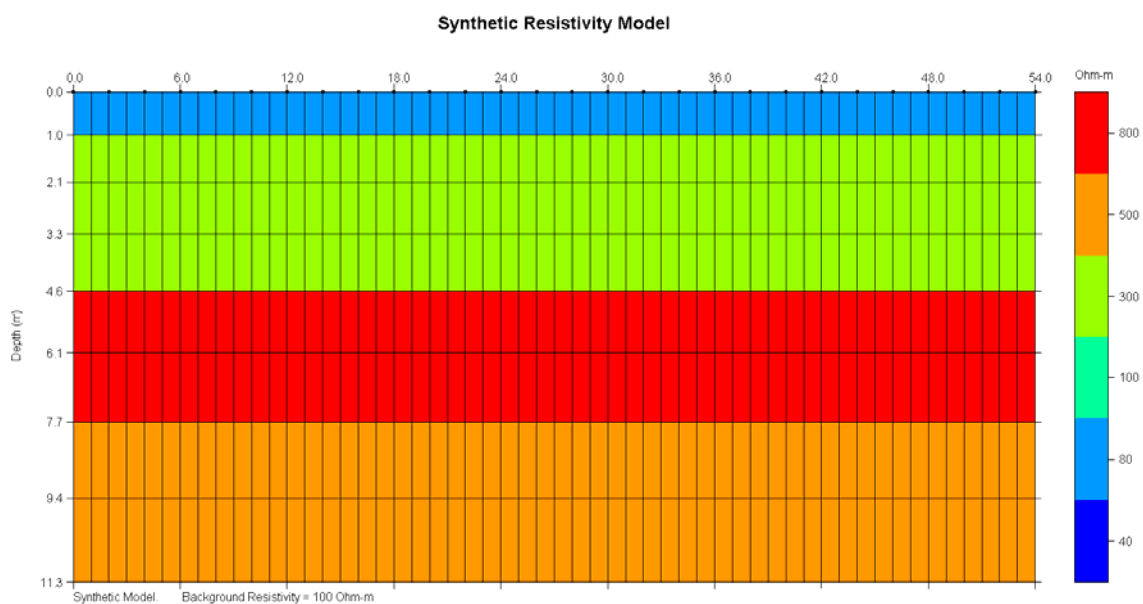


圖33、Edge-Gradient Array 順演模型

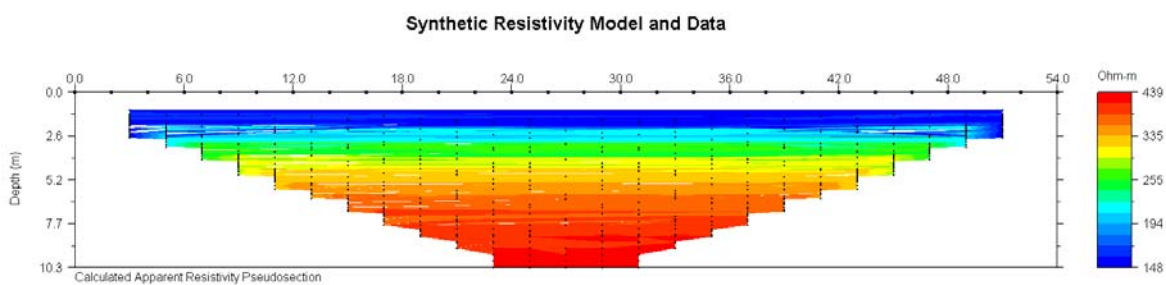


圖34、Edge-Gradient Array 順演擬似剖面

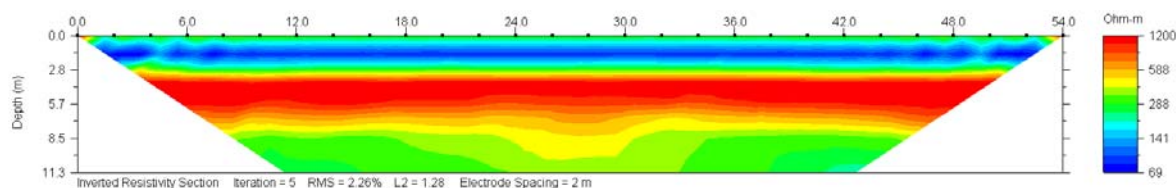


圖35、Edge-Gradient Array 順演結果剖面

本次模型使用本研究之施測結果使用美國 Advanced Geosciences, Inc. 所研發 EarthImager 2D 進行反演運算。該方法先根據野外觀測值自動設一初始模型以進行順推模擬，計算理論視電阻率，使用有限元素法 (Finite element method)，並和測量視電阻率做比較；計算剩餘值後，若收斂則將此逆推地電阻影像存檔，否則必須修正模型參數，採用平滑最小平方法 Smoothness-constrained least-squares method (deGroot-hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1992) 及 Robust(L1-norm)法來作修正。修正模型參數後再順推模擬，重複上述步驟，直至收斂為止而得到地電阻剖面圖，而施測時之地形影響時，程式會將地形起伏之資料一併納入元素區塊，以消除地形效應。

圖 23 為 Wenner-Schlumberger、圖 26 為 Dipole-Dipole、圖 29 為 Pole-Dipole、圖 32 為 Pole-Pole 與圖 35 為 Edge-Gradient 之砂礫石層逆推結果模型，使用 L1 方法逆推，種，電位相關的平均雜訊範圍為 1.2%(用在 Pole-Pole)至 2.4%(用在 Dipole-Dipole)。

由結果顯示 Wenner-Schlumberger 排列法的解析度受到雜訊影響較小(圖 23 至圖 24)，而 Pole-Dipole 排列法與 Edge-Gradient 排列法雖具有較多的雜訊，但仍可逆推出解析度較其他排列法更良好的結果圖(圖 28 至圖 29 與圖 34 至圖 35)，Dipole-Dipole 排列法也可以產生出好的解析度，但在高電阻區下方產生了陰影區(圖 26)，這表示 Dipole-Dipole 排列法深部解析度較差，這可能也是 Dipole-Dipole 排列法的雜訊是所有排列法中較高的關係 (2.4%)，但也可能是敏感方程式特性上所造成的結果。所以 Pole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Edge-Gradient 與 Dipole-Dipole 對於形狀有較佳的解析能力，由於地層為層狀地層 Pole-Pole 排列法可製造出一個合理的影像，雖然比不上其他排列法，但是其解析度仍可以跟地質模型一樣可以電性地層分為四層，其中淺層的成像是較差。

顯示這研究設計雖然資料密度不同，影像品質卻只有些微變化的相似結果，這表示使用相同的電極配置與相同的最大偶極間距，影像品質對資料密度的變化不會有極大差異，但是些案例上最低的資料密度到中等的資料密度確實有使得局部解析度更加細緻，因此花很多時間或使用單波道系統收集到高密度的資料(像是 Wenner-Schlumberger)未必能增進影像的品質，唯一的例外是 Pole-Pole 法，一些實驗顯示越高的資料密度有越佳的結果，

而其他排列法的解析度限制可能部分與逆推使用的網格有關，若使用更佳的網格與高密度的資料結合或許可以得到比本實驗更好的結果。

根據實驗室模擬結果，考量施測時間、考量地質與調查目的等環境因素，Edge-Gradient 排列法其模擬結果解析度是可媲美 Dipole-Dipole 排列法與 Pole-Dipole 排列法，推薦使用 Edge-Gradient 排列法，如果時間允許與現地雜訊很大建議增加 Pole-Pole 電極排列法與 Wenner-Schlumberger 電極排列法。

3.3 研究區域地質電性地層現地實驗



圖36、現場施測照片圖

表4、五種電極排列法之資料密度及施測時間等參數(美國 AGI 八波道設備)

電極排列法	電極 間距	放電時間	電阻率 量測時間	資料 點數
Wenner-Schlumberger	2 公尺	3.6sec	55 mins	220
Dipole-Dipole	2 公尺	3.6sec	25 mins	440
Pole-Dipole	2 公尺	3.6sec	15 mins	350
Edge-Gradient	2 公尺	3.6sec	23 mins	625
Stong-Gradient	2 公尺	3.6sec	15 mins	205

研究區域實地施測採用五種電極排列，由於現地地形與客觀因素，受到遠方干擾影響，無法使用 Pole-Pole 電極排列法，因為遠電極無法展開。另增加一新型電極排列法為加強型梯度法，優點是資料點數少施測時間快。

(1) Wenner-Schlumberger Array

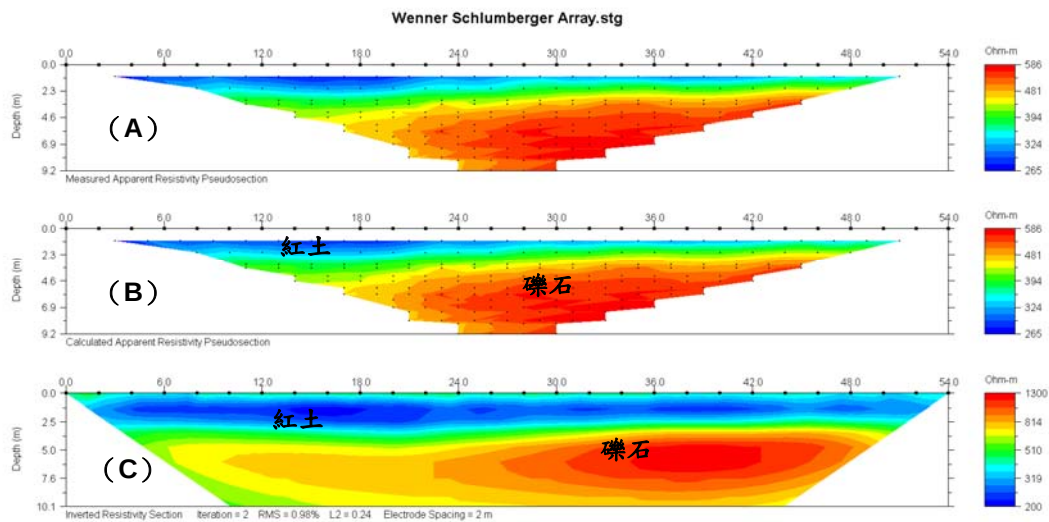


圖 37、Wenner-Schlumberger Array 真實電阻率剖面圖

圖 37 為 Wenner-Schlumberger Array 電極排列法施測成果圖，地電阻影像剖面法在反算成果總共分為三個部分，圖 37 (A) 為現地實測值結果圖，實測電阻值稱為視電阻率，非真實電阻率，而形成之電性剖面稱為擬似剖面。圖 37 (B) 則為反算軟體根據擬似剖面所建立之反算模型，圖 37 (C) 則為反算結果剖面，即為真實電阻率所構成之地層電性剖面。由圖 37 (A) 中出現小黑圓點，即為現場測點位置，此測點平均分布在剖面中。圖 37 (C) 整體電阻率分布可分為三個部分，深度由淺至深，電阻率隨著深度增加而增高，第一層為藍色電阻率分布，深度在 0-2.5 公尺，電阻率介於 200-300 歐姆-公尺，第二層深度 2.5-5 公尺為綠色電阻率分布，電阻率介於 300-500 歐姆-公尺，第三層為 5 公尺以下，電阻率超過 500 歐姆-公尺。地層材料分布與鑽井資料吻合。5 公尺內為紅土層偶夾礫石，超過 3 公尺礫石含量增加，材料顆粒亦變大，所以電阻率會隨著深度而增加。

(2) Dipole-Dipole Array

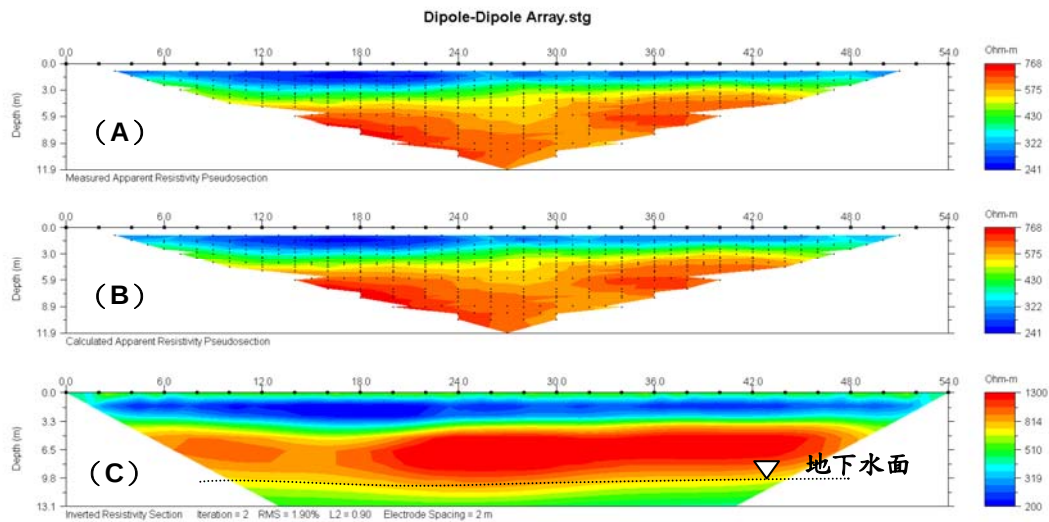


圖38、Dipole-Dipole Array 真實電阻率剖面圖

圖 38 為 Dipole-Dipole Array 電極排列法施測成果圖，地電阻影像剖面法在反算成果總共分為三個部分，圖 38 (A) 為現地實測值結果圖，實測電阻值稱為視電阻率，非真實電阻率，而形成之電性剖面稱為擬似剖面。圖 38 (B) 則為反算軟體根據擬似剖面所建立之反算模型，圖 38 (C) 則為反算結果剖面，即為真實電阻率所構成之地層電性剖面。由圖 38 (A) 中出現小黑圓點，即為現場測點位置，此測點密度明顯與圖 37 (A) 不同，淺層測點密度明顯高於深部。圖 38 (C) 整體電阻率分布可分為三個部分，電性地層反應之地層材料分布與鑽井資料吻合。5 公尺內為紅土層偶夾礫石，超過 3 公尺礫石含量增加，材料顆粒亦變大，所以電阻率會隨著深度而增加。影響電阻原因很多，有溫度、材料、顆粒大小、含水量程度等，超過 8.5 公尺後地層電阻率出現變化，地層電阻率開始漸變下降的趨勢，由於此處礫石層厚度超過 10 公尺，所以推估影響此電阻率變化的原因應為地層材料含水率之關係，根據水位資料，此處地下水位面約在 9-10 公尺左右，所以電性地層在 8.5 公尺電阻率等值線出現變化應與水位有關。

(3) Pole-Dipole Array

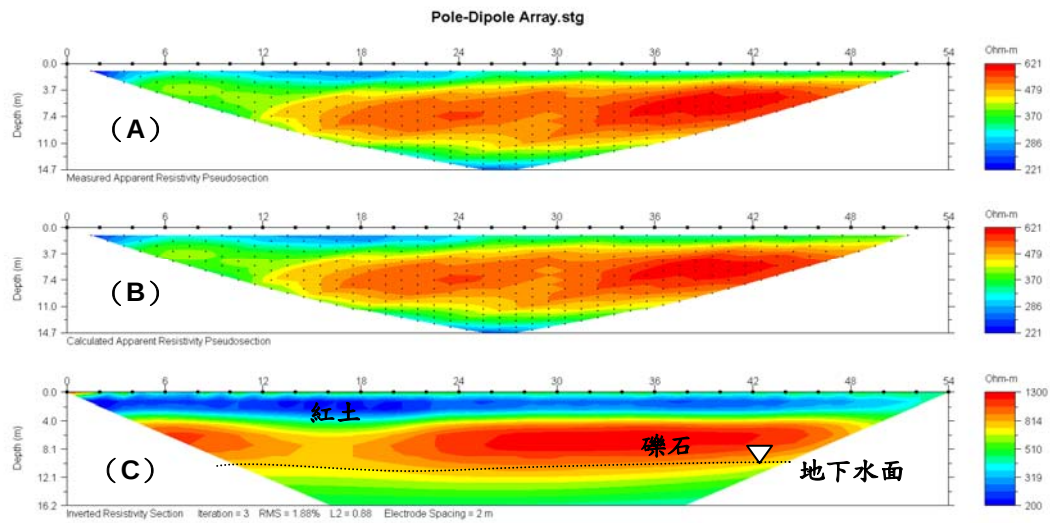


圖39、Pole-Dipole Array 真實電阻率剖面圖

圖 39 為 Pole-Dipole Array 電極排列法施測成果圖，地電阻影像剖面法在反算成果總共分為三個部分，圖 39 (A) 為現地實測值結果圖，實測電阻值稱為視電阻率，非真實電阻率，而形成之電性剖面稱為擬似剖面。圖 39 (B) 則為反算軟體根據擬似剖面所建立之反算模型，圖 39 (C) 則為反算結果剖面，即為真實電阻率所構成之地層電性剖面。由圖 39 (A) 中出現小黑圓點，即為現場測點位置，此測點密度明顯與圖 37、38 (A) 不同，淺層測點密度平均分配，且測點數量比 Wenner-Schlumberger Array 電極排列法多。圖 39 (C) 整體電阻率分布可分為三個部分，電性地層反應之地層材料分布與鑽井資料吻合。5 公尺內為紅土層偶夾礫石，超過 3 公尺礫石含量增加，材料顆粒亦變大，所以電阻率會隨著深度而增加。影響電阻原因很多，有溫度、材料、顆粒大小、含水量程度等，超過 8.5 公尺後地層電阻率出現變化，地層電阻率開始漸變下降的趨勢，由於此處礫石層厚度超過 10 公尺，所以推估影響此電阻率變化的原因應為地層材料含水率之關係，根據水位資料，此處地下水位面約在 9-10 公尺左右，所以電性地層在 8.5 公尺電阻率等值線出現變化應與水位有關。

(4) Edge-Gradient Array

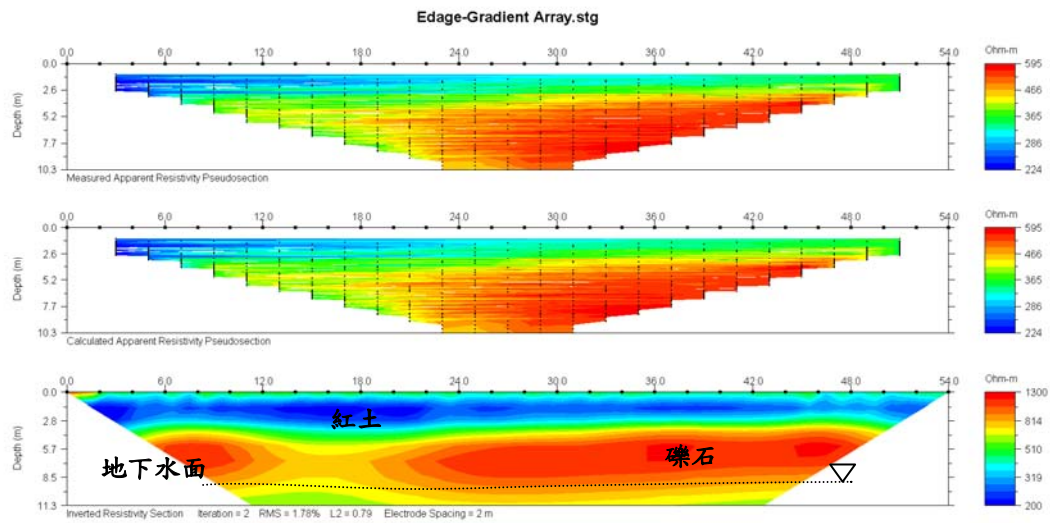


圖40、Edge-Gradient Array 真實電阻率剖面圖

圖 40 為 **Edge-Gradient Array** 電極排列法施測成果圖，地電阻影像剖面法在反算成果總共分為三個部分，圖 40 (A) 為現地實測值結果圖，實測電阻值稱為視電阻率，非真實電阻率，而形成之電性剖面稱為擬似剖面。圖 40 (B) 則為反算軟體根據擬似剖面所建立之反算模型，圖 40 (C) 則為反算結果剖面，即為真實電阻率所構成之地層電性剖面。由圖 40 (A) 中出現小黑圓點，即為現場測點位置，此測點分布明顯不同於其他電極排列法。此電極排列施測時呈現電流極不動，電位極移動量測地層電位差，此方法併合了三極排列法與偶極-偶極排列法之優點。其探測深度與 Wenner-Schlumberger Array 電極排列法雷同，但測點數量明顯高於許多。圖 40 (C) 整體電阻率分布可分為三個部分，深度由淺至深，電阻率隨著深度增加而增高，第一層為藍色電阻率分布，深度在 0-2.5 公尺，電阻率介於 200-300 歐姆-公尺，第二層深度 2.5-5 公尺為綠色電阻率分布，電阻率介於 300-500 歐姆-公尺，第三層為 5 公尺以下，電阻率超過 500 歐姆-公尺。地層材料分布與鑽井資料吻合。5 公尺內為紅土層偶夾礫石，超過 3 公尺礫石含量增加，材料顆粒亦變大，所以電阻率會隨著深度而增加。

(5) Strong-Gradient Array

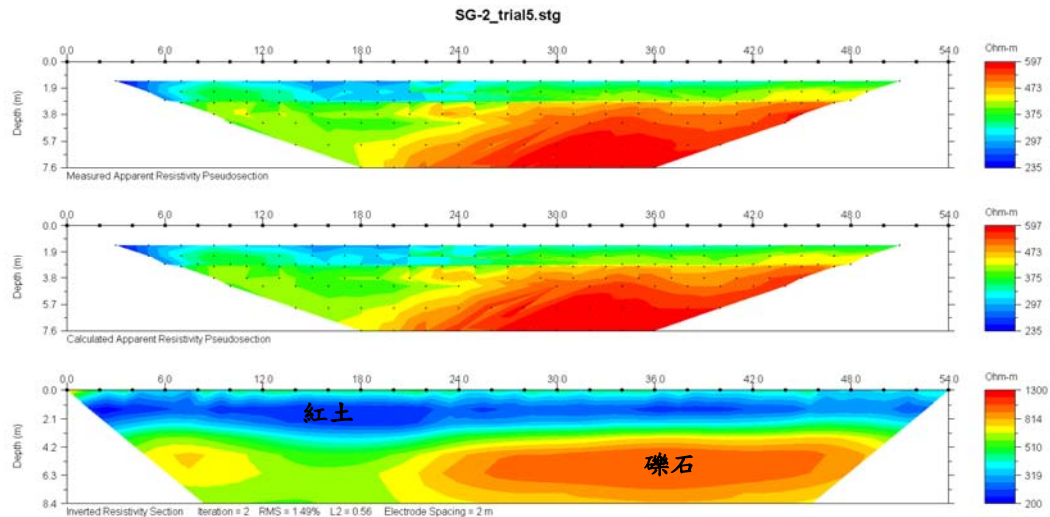


圖41、Strong-Gradient Array 真實電阻率剖面圖

圖 41 為 **Strong-Gradient Array** 電極排列法施測成果圖，地電阻影像剖面法在反算成果總共分為三個部分，圖 41 (A) 為現地實測值結果圖，實測電阻值稱為視電阻率，非真實電阻率，而形成之電性剖面稱為擬似剖面。圖 41 (B) 則為反算軟體根據擬似剖面所建立之反算模型，圖 41 (C) 則為反算結果剖面，即為真實電阻率所構成之地層電性剖面。由圖 41 (A) 中出現小黑圓點，即為現場測點位置，此測點分布明顯不同於其他電極排列法，為所有方法中測點數量最少。此電極排列施測時間大約為其他電極排列法之一半。其探測深度略小於 Wenner-Schlumberger Array 電極排列法。40 (C) 整體電阻率分布之形貌與其他結果雷同，唯獨不通區域在測線前段之礫石層分布電阻率明顯低於其他電極排列法，推估因為此電極排列法測點分布不平均所致。此方法施測時需搭配其他方法使用，此方法使用時機建議在快速得知地層材料電阻率分布時使用。

綜合現場施測結果與鑽探資料比對相當吻合，淺層五公尺內為紅土層，由於淺層乾燥且含有一些小卵石所以電阻率在 150-200 歐姆-公尺之間，超過五公尺出現材料漸變，然後便是電性地層中最高之電阻率層為 800 歐姆-公尺以上，及為本研究區域具有顆粒大且相對乾燥之礫石層，超過 8.5-10 公尺地層又出現一漸變區，推測此漸變區不是材料出現較大變化而影響電阻率的變化，而是地下水讓地層材料出現濕潤與飽和之現象，所以此深度以下之電性地層電阻率降至 500 歐姆-公尺以下。所以地電阻影像剖面法為地層調查之利器，利用不同電極排列法，可得到最佳之地層材料分佈。

3.4 電性地層中增加異常物之實驗

一個廢棄污泥池野外調查，在濕潤之礫石層中(電阻率 100 歐姆-公尺)地層中挖掘了許多坑洞用以傾倒廢料，由於這些凹洞被填充了污泥，所以電阻率假定為 10 歐姆-公尺，而每一個污泥池的厚度與深度均不一定相同。並期盼藉由所模擬推演得到的模型剖面可以比較這五種排列法的成像能力。

(1) Wenner-Schlumberger Array

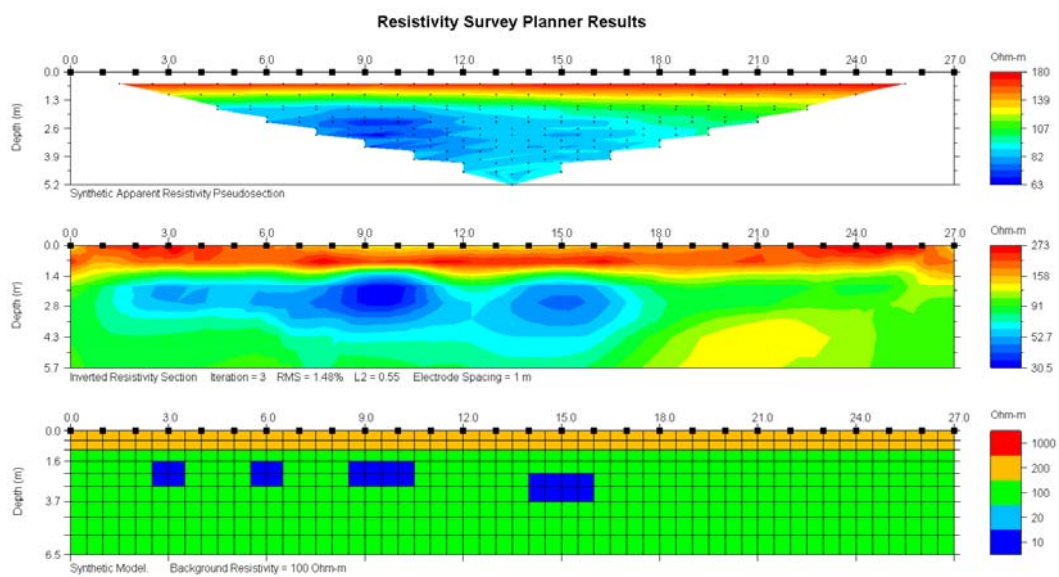


圖42、Wenner-Schlumberger Array 10 歐姆-公尺污泥結果圖

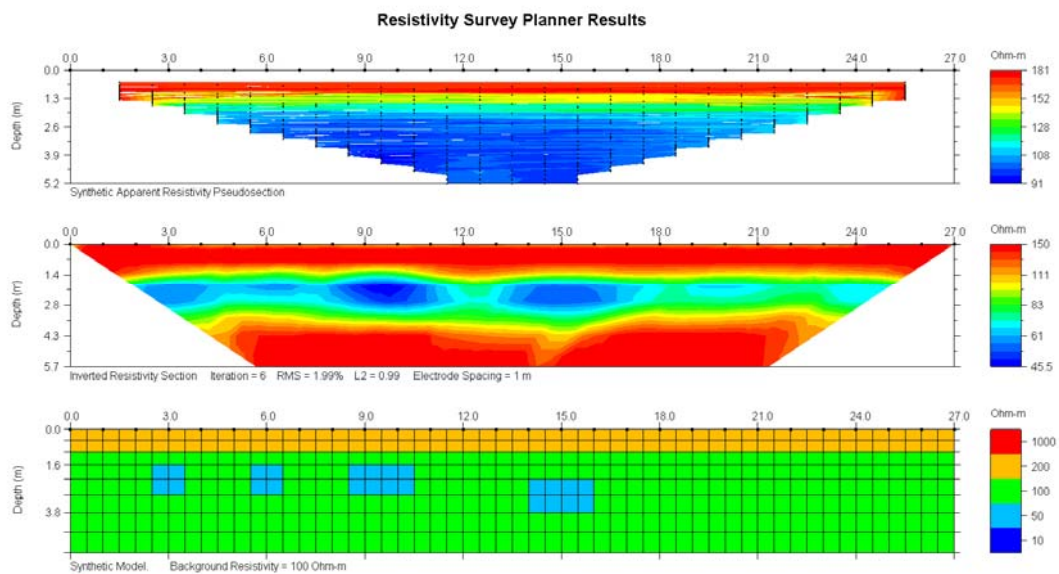


圖43、Wenner-Schlumberger Array 50 歐姆-公尺污泥結果圖

(2) Dipole-Dipole Array

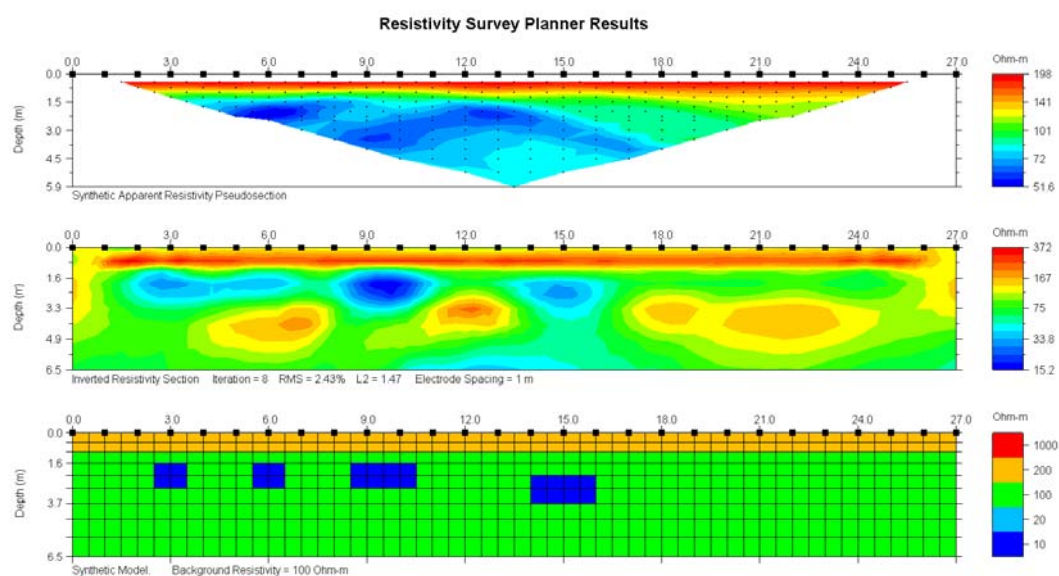


圖44、Dipole-Dipole Array 10 歐姆-公尺污泥結果圖

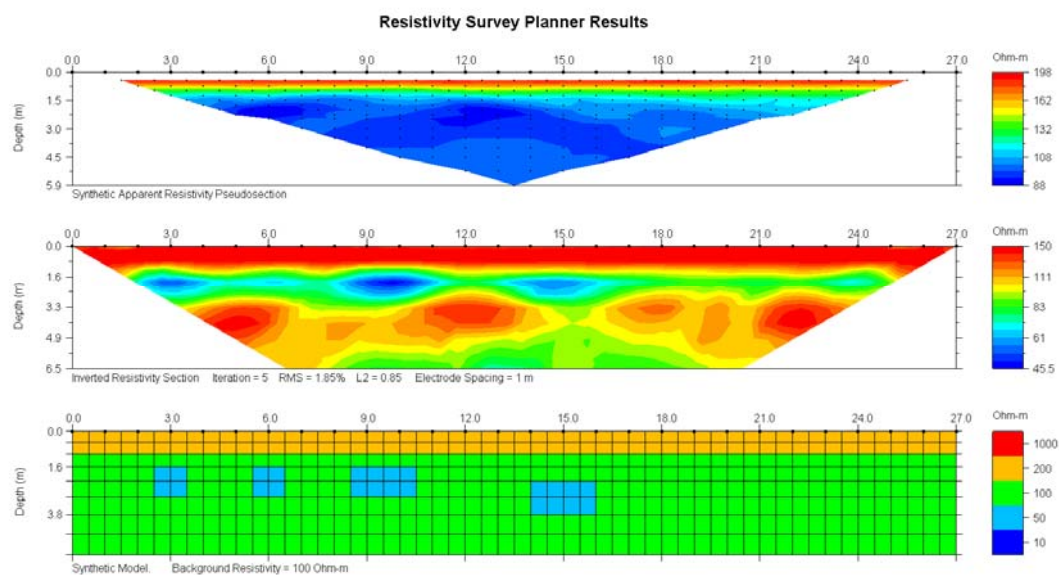


圖45、Dipole-Dipole Array 50 歐姆-公尺污泥結果圖

(3) Pole-Dipole Array

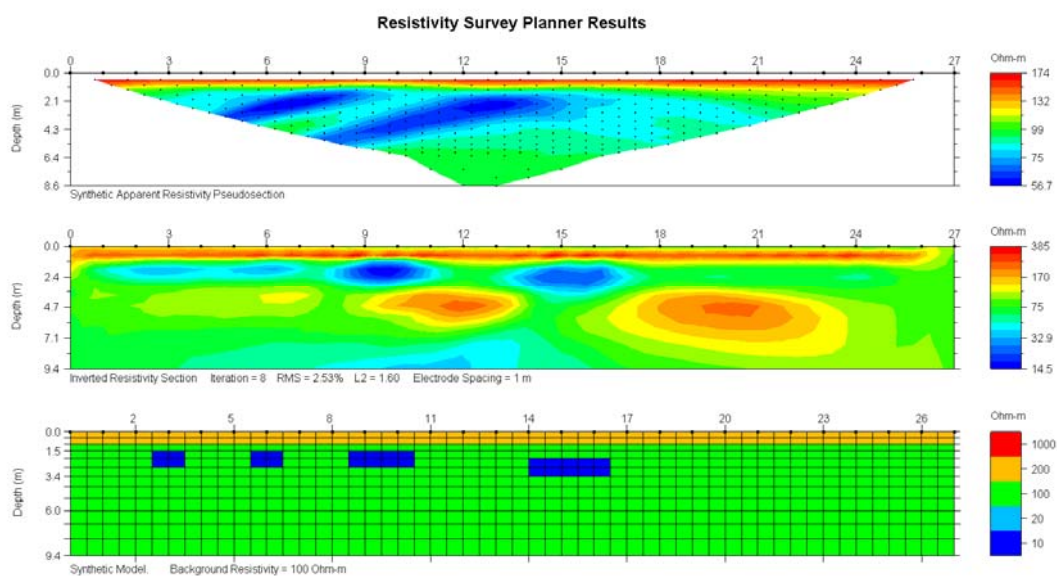


圖46、Pole-Dipole Array 10 歐姆-公尺污泥結果圖

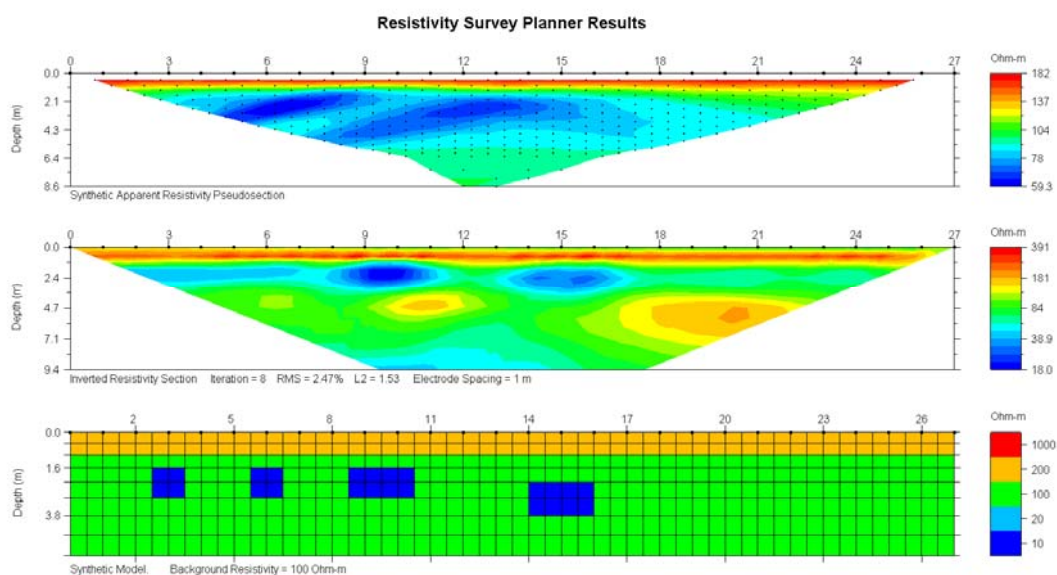


圖47、Pole-Dipole Array 50 歐姆-公尺污泥結果圖

(4) Edge-Gradient Array

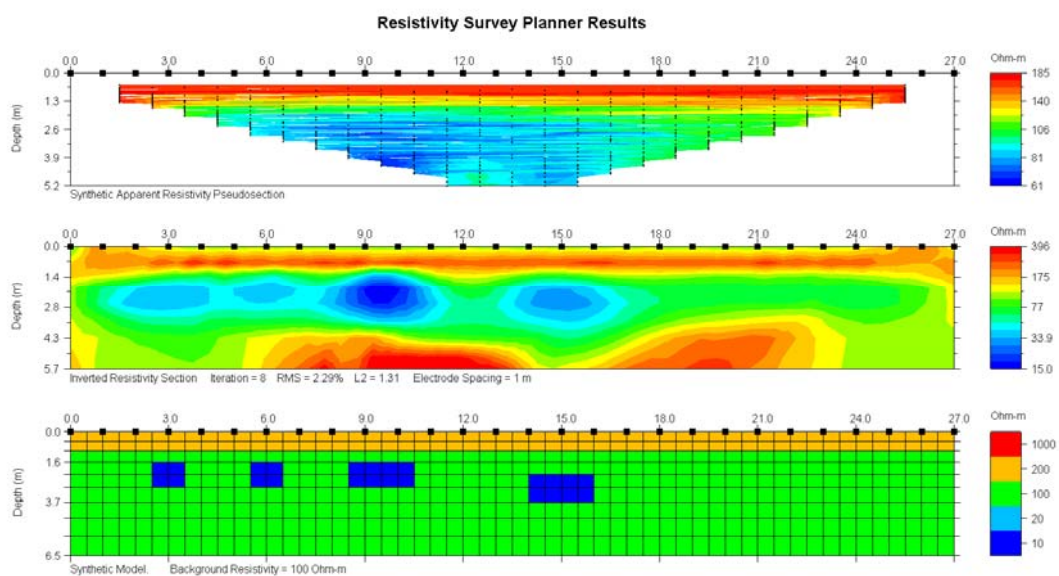


圖48、Edge-Gradient Array 10 歐姆-公尺污泥結果圖

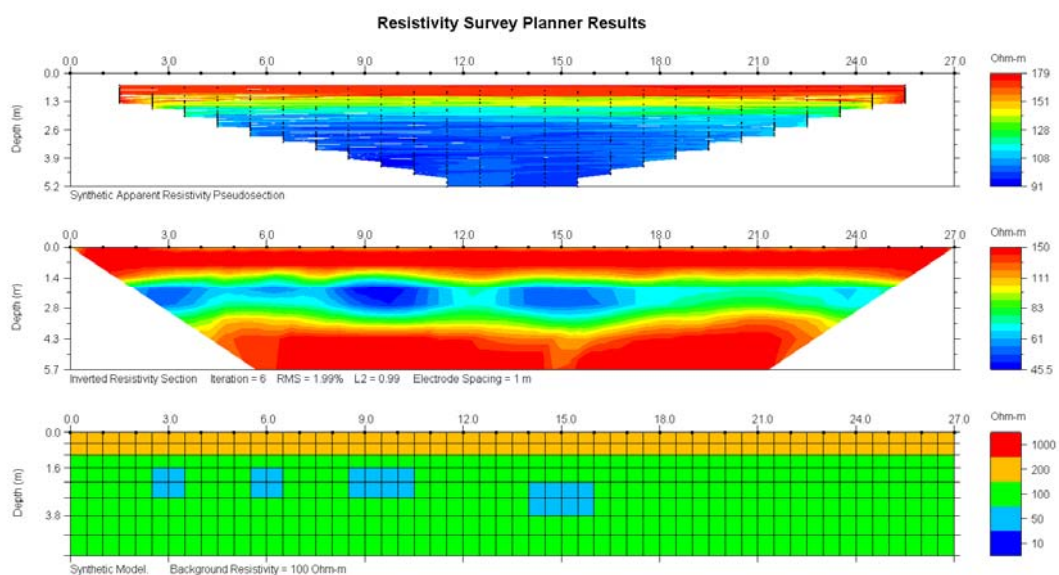


圖49、Edge-Gradient Array 50 歐姆-公尺污泥結果圖

(5) Pole-Pole Array

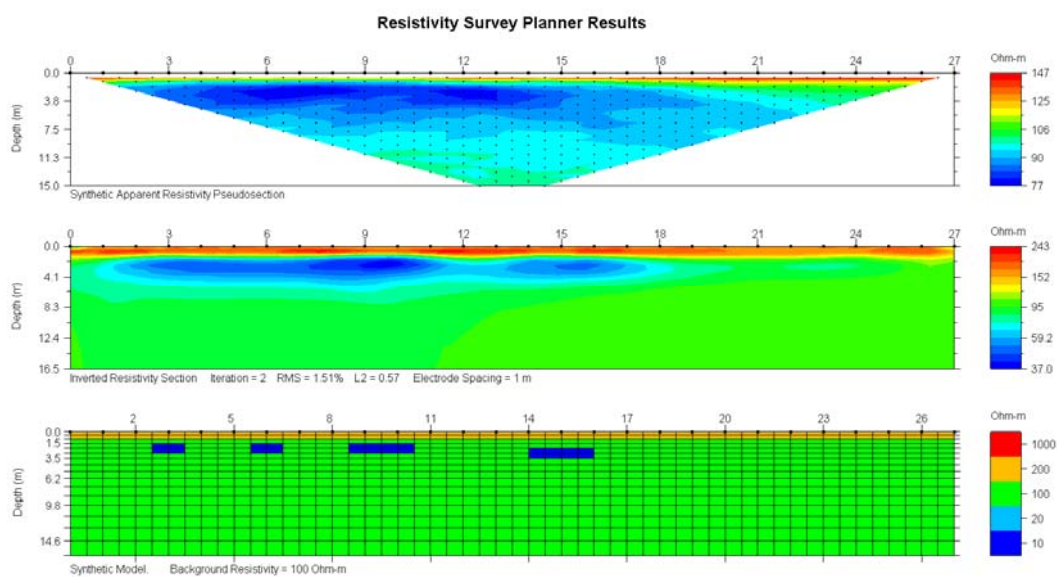


圖50、Pole-Pole Array 10 歐姆-公尺污泥結果圖

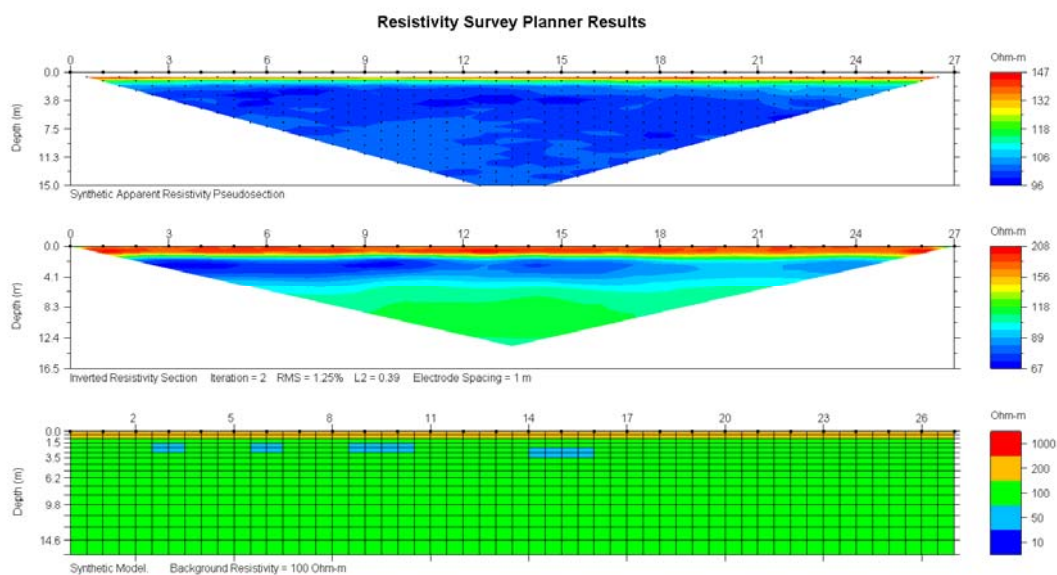


圖51、Pole-Pole Array 50 歐姆-公尺污泥結果圖

上圖為污泥池以 L1 法所逆推之結果，同樣使用前述研究的設計。從圖中可見這些排

列法可以重建出 4 個凹坑中自淺至深的 4 個視覺影像，但它們的空間解析度是有變化的，結果顯示 Edge-Gradient 電極排列法、Dipole-Dipole 電極排列法與 Pole-Dipole 電極排列法之影像最良好，其次是 Wenner-Schlumberger 電極排列法，接來則 Pole-Pole 電極排列法，同時它們共同失去的成像或重建影像結果不佳的區域也可在成果中發現，這些排列法均無法對於最前面的凹坑做出有效地描繪，由此證實在調查中使用相同的最大偶極間距，所有的排列法在逆推模型中將具有共同的穿透深度。

為了研究電阻率對比性質與穿透深度的關係，我們將 4 個凹坑的電阻率自 10 歐姆-公尺提高至 50 ohm-m 以降低電阻率的對比然後再重覆一次實驗，但結果與 10 歐姆-公尺結果相似。這表示一個排列法的穿透深度主要與電阻率對比與最大電極展距(偶極間距)有關，也和目標物的大小與掩埋深度有關，然而，也必須指出最深的異常物可能受到邊際效應的影響，因為遠電極已經接近測線的尾端，而使得資料涵蓋率下降所致。

3.5 場址調查試驗

本研究利用實驗室電性地層正算結果，其目的在建立地電阻法於現地調查時之標準作業流程，例如電極間距、電流放電時間與電極排列等選項。如何選定最佳施測流程，本研究建立一簡單之標準試驗場址，本試驗場址特性是：背景地質為紅土礫石層，屬於相對高電阻率之物理特性，目標物金屬材質，屬於相對低電阻率之物理特性，高對比之物理特性。利用此項優勢將不同電極間距、放電時間與電極排列法施測時，是建立在相同的基準上來做比較。進而推薦最佳之施測參數與電極排列法。

下圖為試驗場址的照片與現場示意圖，本項場址試驗總共施測了六十三條地電阻影像剖面法測線，施測長度超過三公里以上，根據環保署現地地電阻法調查補助原則地電阻施測費用超過一百五十萬以上。本項調查現地工作總共花了三十幾個工作天。目的在建立一個現場調查工作標準。

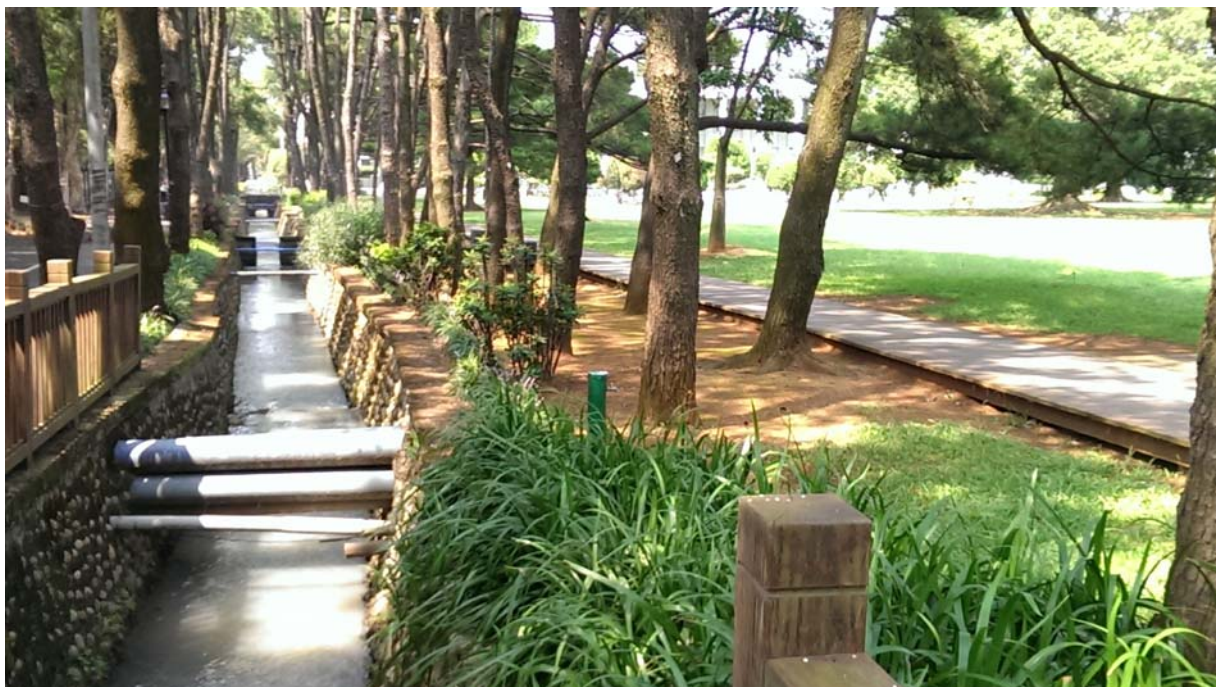
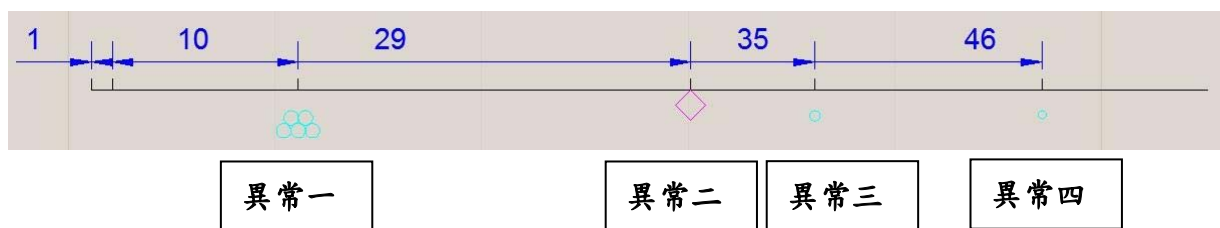


圖52、簡易標準試驗場址示意圖與照片

本試驗場址總共有四個異常區域，第一個異常區域出現在測線的前段約 10 公尺位置、第二個異常區在水平距離 29 公尺位置、第三個異常區域在 35 公尺位置與最後一個即第四個異常區在 44 公尺位置。

本研究總共使用了以下參數設定進行以下試驗：電極間距使用了一公尺、二公尺與四公尺三種常用電極間距；放電時間使用了 0.8 秒、1.2 秒與 3.6 秒，此參數為代表利用不同頻率之電流輸出至地層內，此參數是最容易讓人疏忽的現場工作設定；最後便是電極排列法，本研究利用教科書與國外文獻中選定了七種常用的電極排列法進行施測，依序使用了溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）、梯度法（Edge-Gradient array）、雙極法（Pole-Pole array）、偶極偶極法（Dipole-Dipole array）、三極法（Pole-Dipole array）、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法（Dipole-Gradient array）等七種常見的電極排列法。

3.5.1 電極間距一公尺成果

(1) 0.8 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）

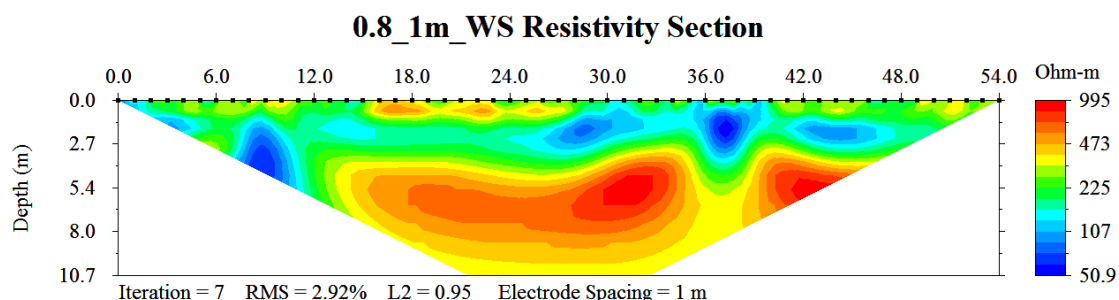


圖53、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

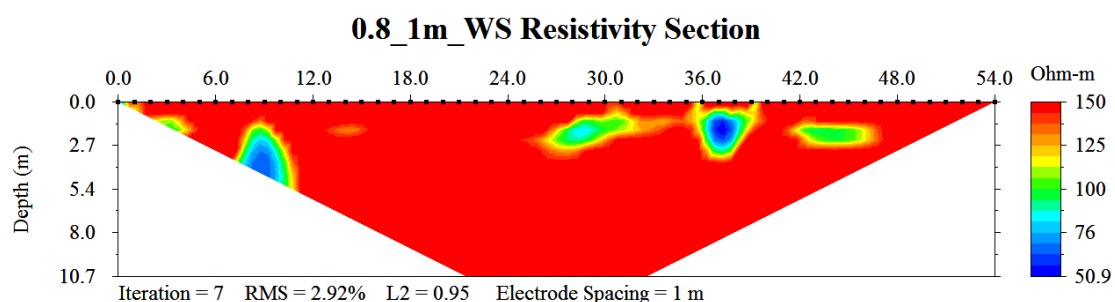


圖54、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

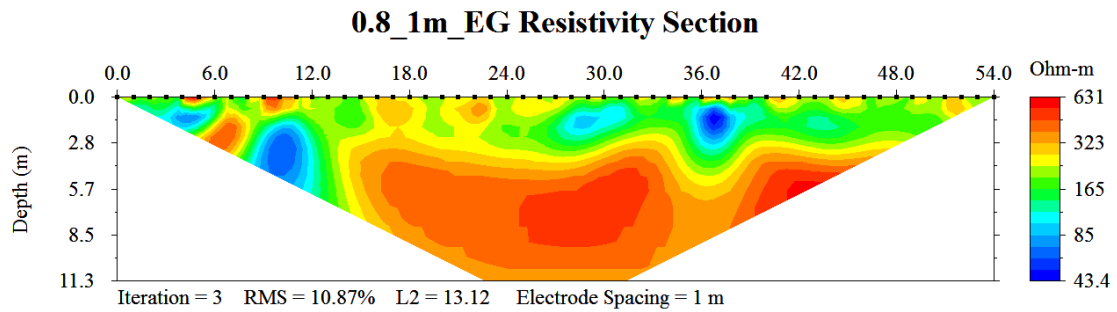


圖55、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

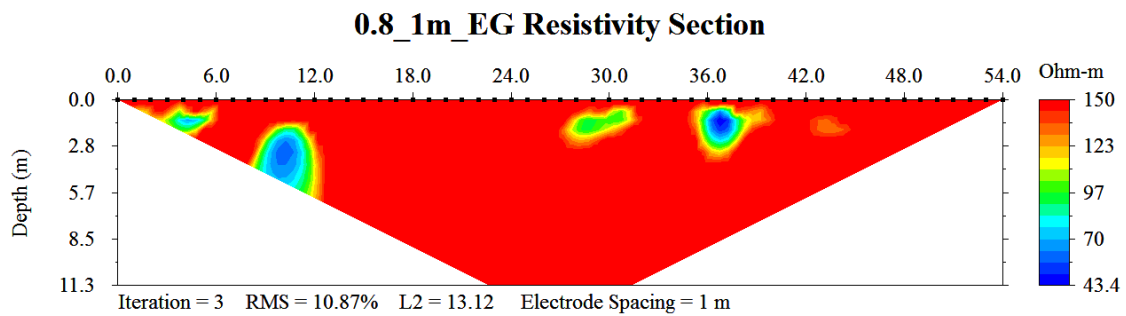


圖56、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

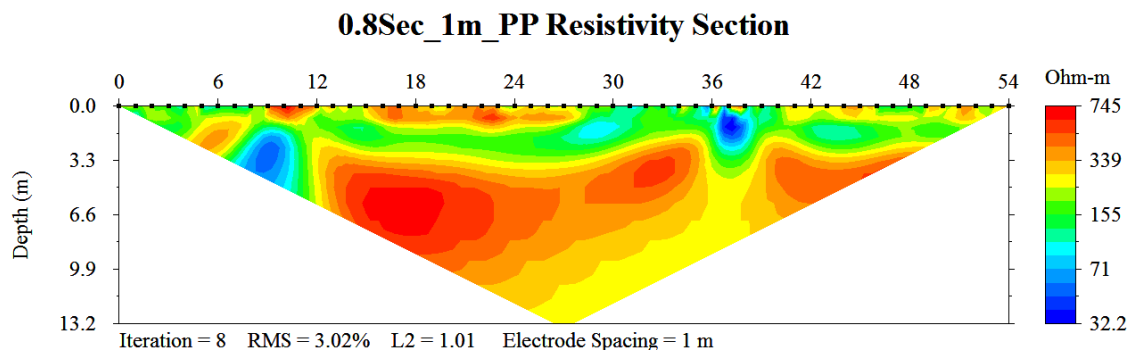


圖57、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 雙極法施測結果圖(Log Scale 色階)

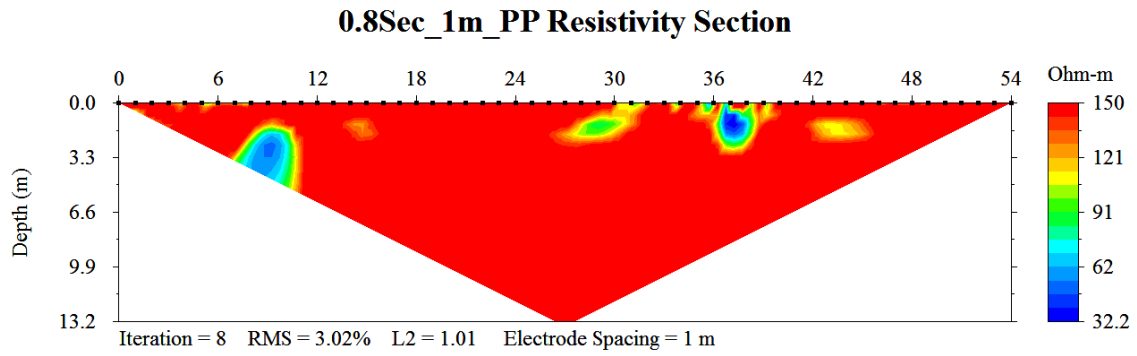


圖58、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 雙極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

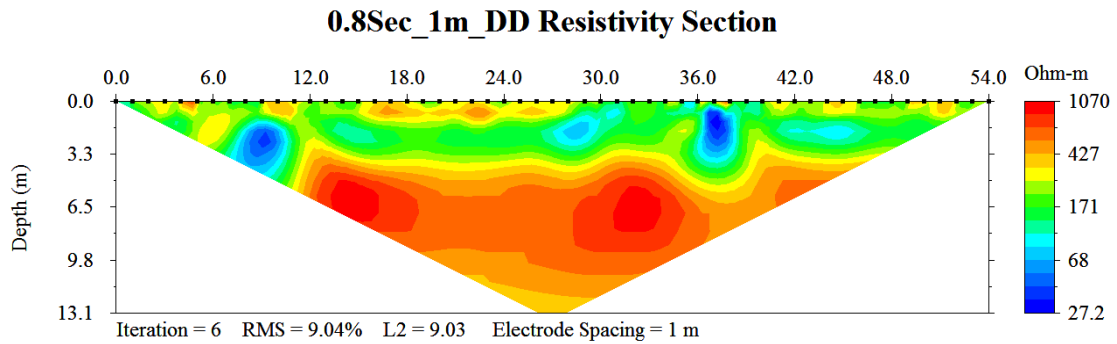


圖59、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

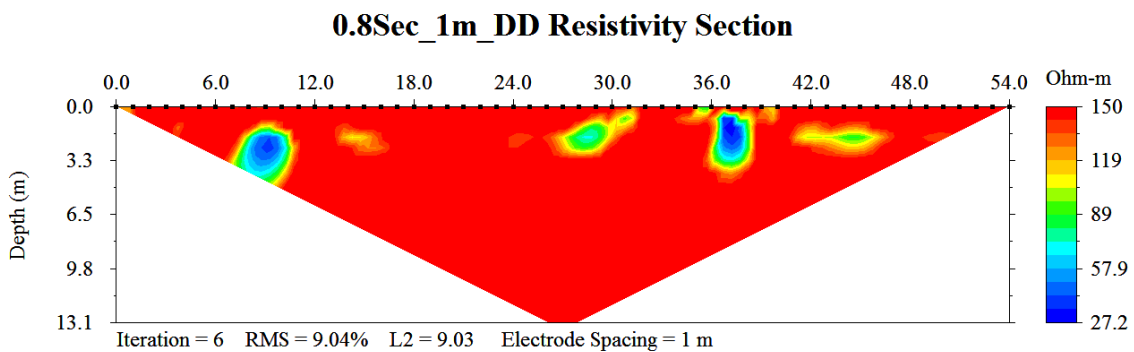


圖60、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

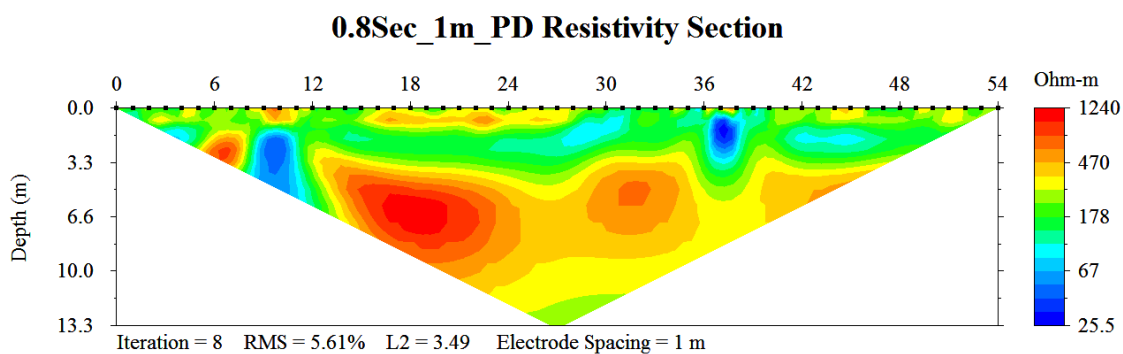


圖61、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 三極法施測結果圖(Log Scale 色階)

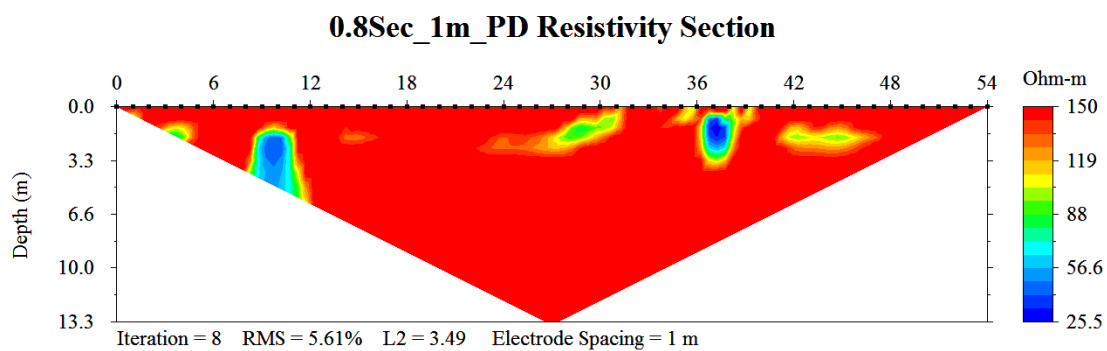


圖62、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 三極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

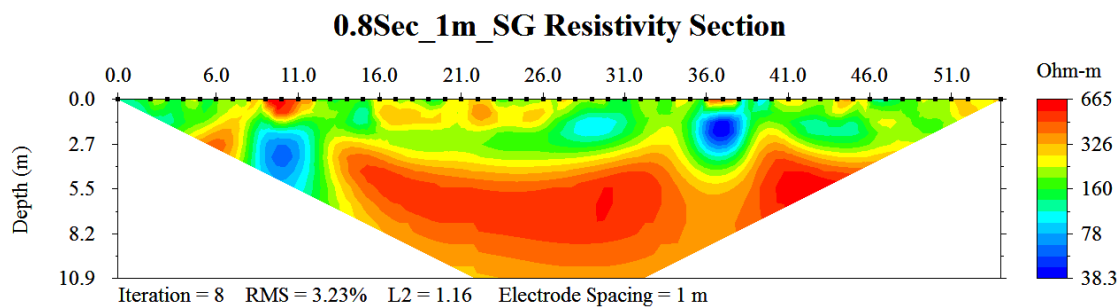


圖63、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

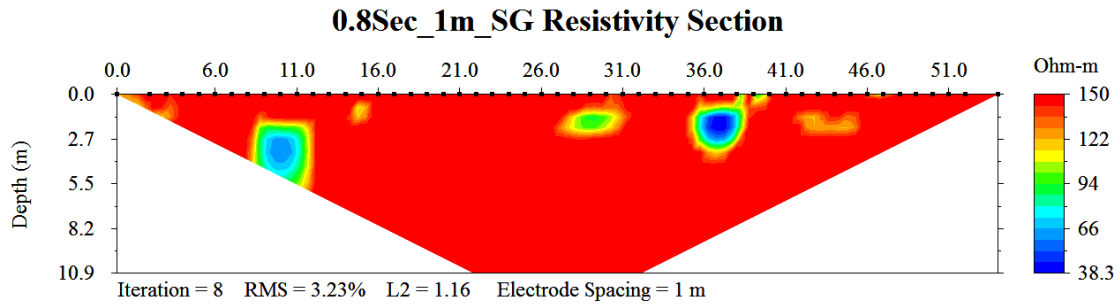


圖64、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

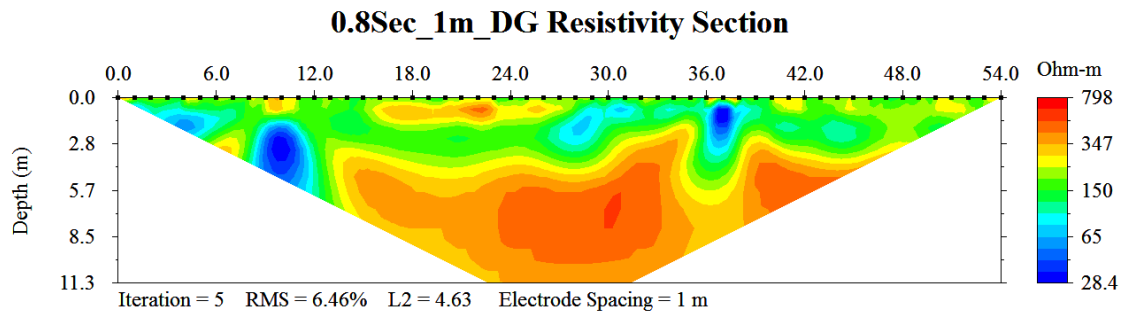


圖65、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

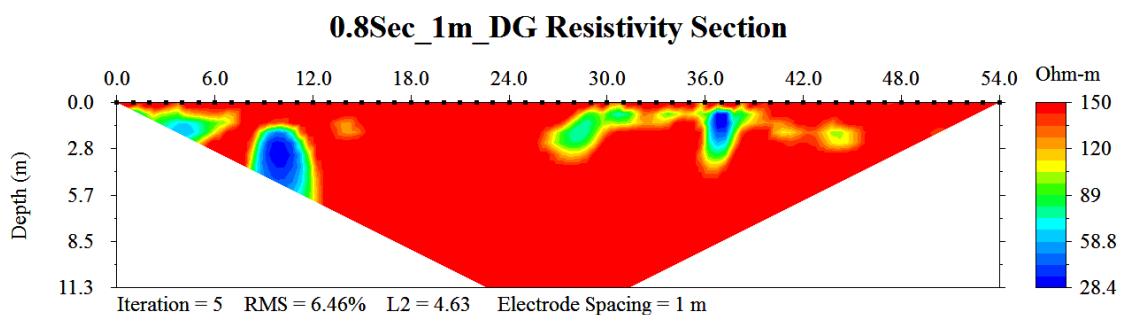


圖66、電極間距 1 公尺放電時間 0.8Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 53 至圖 66 為電極間距 1 公尺放電時間 0.8 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole

array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法(Dipole-Gradient array)等七種常見的電極排列法。其中每個電極排列法總共有兩種色皆呈現真實電阻率剖面圖，目的在呈現出不同色階變化，其凸顯目標物的不同。由於本研究目的之一在利用直流電阻法此項工具提供現場土壤與地下水工作者初步地下地層資訊。所以此次在簡易試驗場址中所收集到的結果，不使用繁複得資料處理，直接利用軟體反算，期望得到一目了然的結果，因為場址特性的異常區域與背景值有很大的物理特性差異，背景值屬於紅土礫石層，呈現相對高電阻率反應，而待測物是金屬材料的管線，屬於相對低電阻率反應，且待測物有尺寸上不同，最小待測物異常區四：直徑為 9 公分，最大待測物為異常區一：直徑大約 30 公分。所以 Log Scale 色階為直流電阻法最一般的色階顯示方式，所以圖 53、55、57、59、61、63、65 為直接反算結果，利用 Log Scale 方式呈現，而且不更改其最大最小之電阻率值，而圖 54、56、58、60、62、64、66 等圖，為 Liner scale 上呈現，目的在凸顯異常區域與背景電阻率的差異。

整體來看，0.8sec 電極間距一公尺的結果就 Log Scale 成果圖顯示出異常一與異常三在各電極排列結果皆有明顯的電阻率差異出現。因為此兩異常物大小較大異常物一大小為直徑 30 公分左右，而異常物三為直徑 15 公分的鐵管。其中在 Log Scale 成果圖的呈現上以溫奈-施蘭卜吉法(Wenner-Shlumberger array)表現最佳，以圖 53 為例，淺層四區之低電阻率異常區一目了然，但是異常區形貌與真實待測物形貌有差距，因為真實待測物形貌為一大致呈現圓形的管線，而異常區二為樹根，目的在呈現異常物向下延伸的形貌。其中以形貌呈現最佳的方法為跟 Dipole 與 Gradient 相關的電極排列法，其缺點是第四異常區若不經過色階的調整皆不易呈現。其中表現最差的為雙極排列法，大致上僅能呈現異常區的位置分布，利用 Liner 色階呈現方式大致上七種電極排列法皆可呈現四個異常區域。

最令人驚艷的是快速梯度法(Strong-Gradient array)，如圖 63 與 64 所示，他施測時間是其他電極排列法的一半，施測點數亦為其他電極排列法的三分之一，其所得到的成果亦不遜色於其他電極排列法，所得到成果與雙極法雷同，異常區形貌亦不遜色於多他三倍時間的偶極梯度法(Dipole-Gradient array)。

(2) 1.2 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

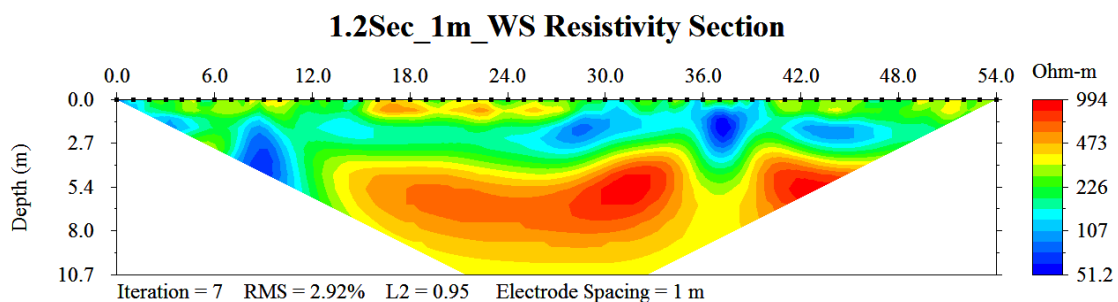


圖67、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

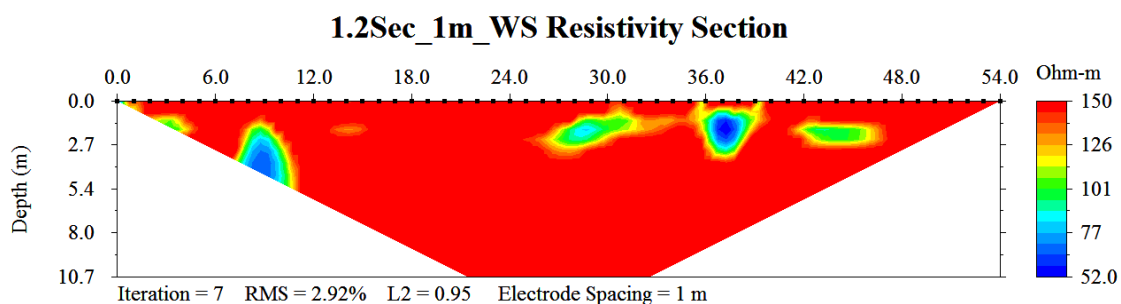


圖68、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

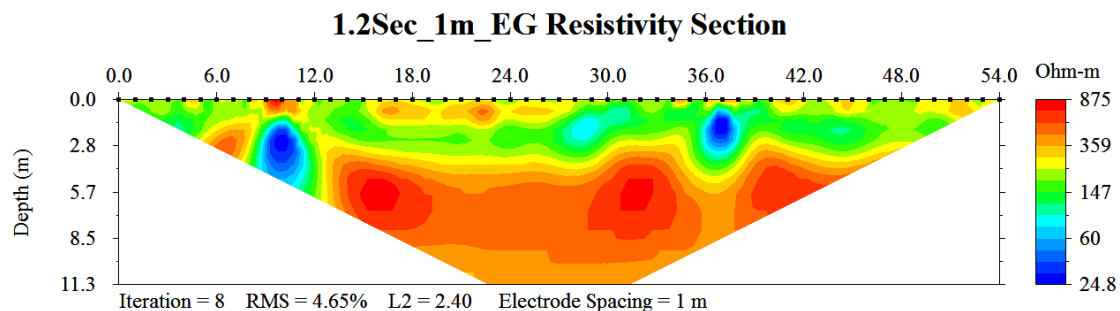


圖69、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

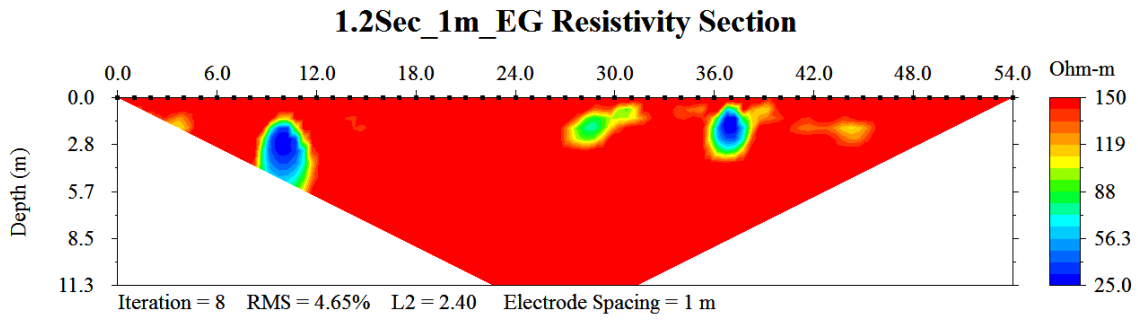


圖70、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

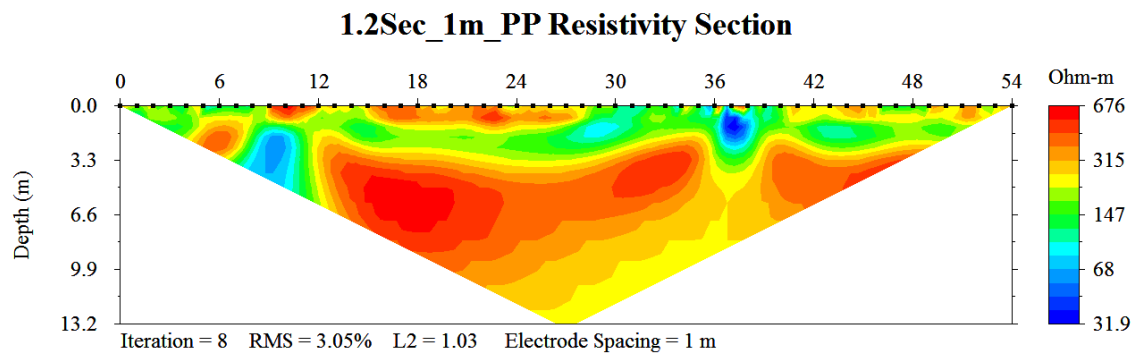


圖71、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 雙極法施測結果圖(Log Scale 色階)

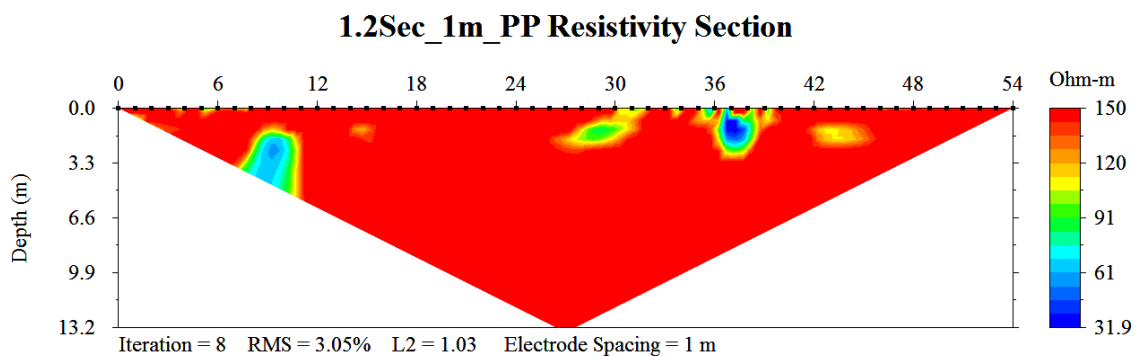


圖72、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 雙極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

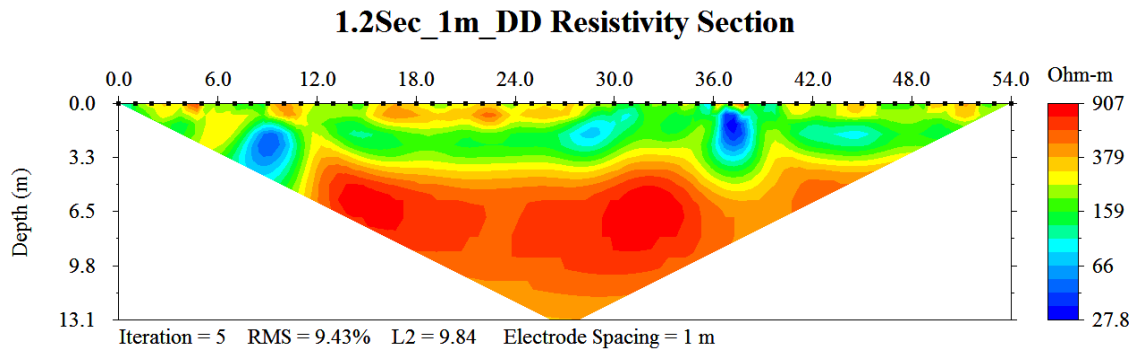


圖73、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

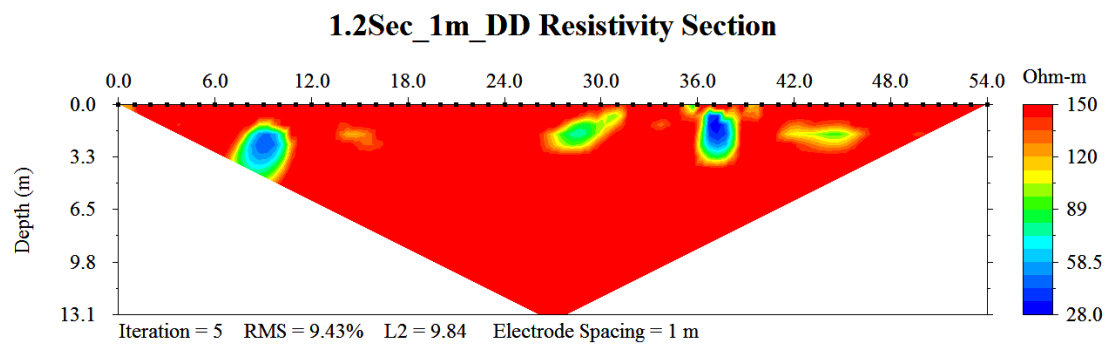


圖74、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

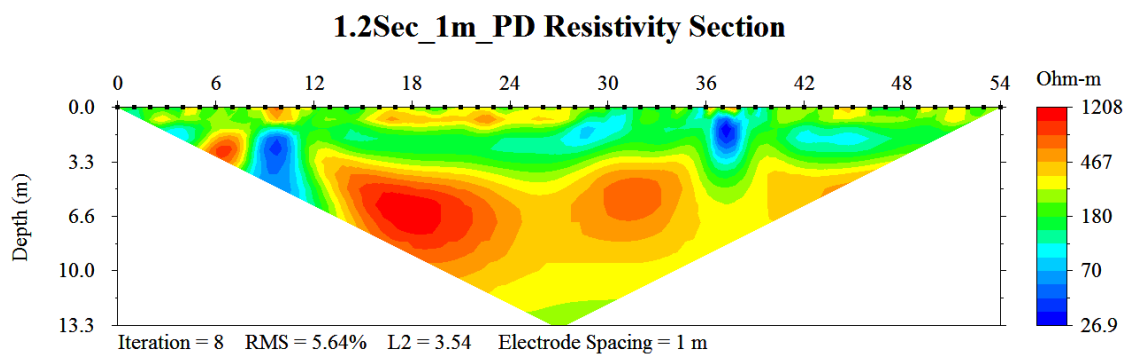


圖75、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 三極法施測結果圖(Log Scale 色階)

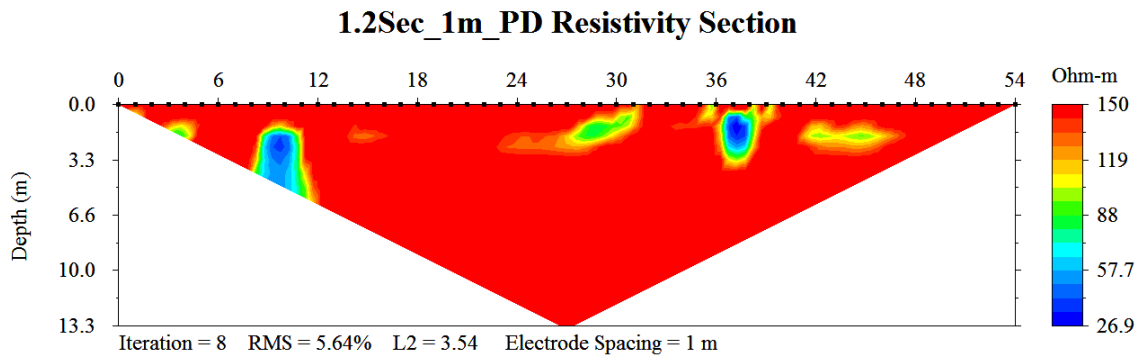


圖76、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 三極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

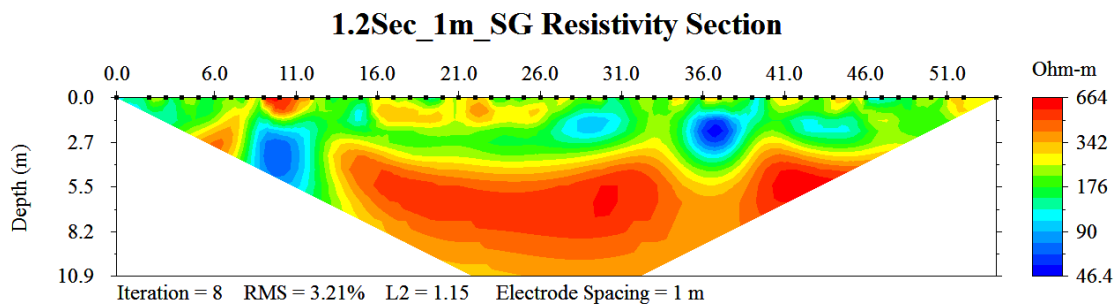


圖77、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

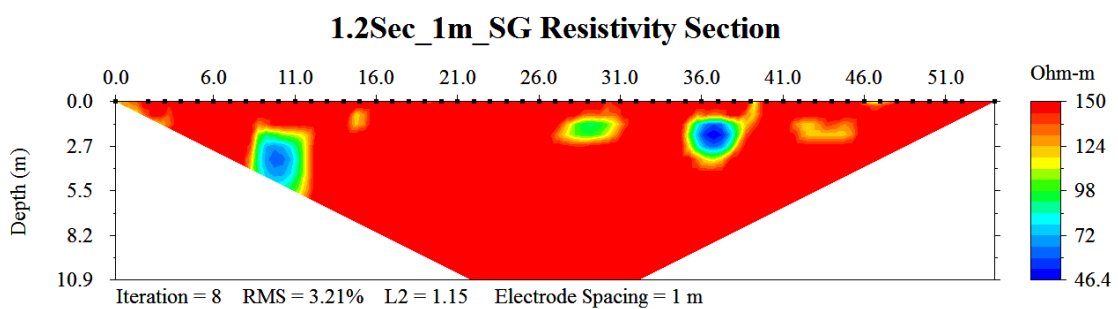


圖78、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

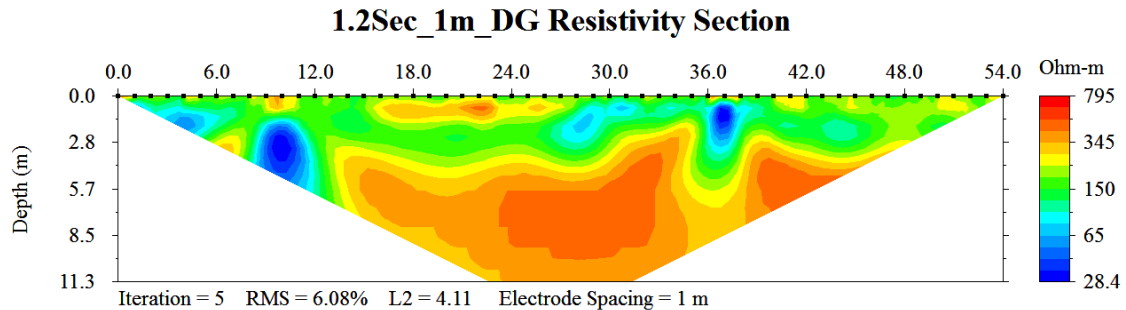


圖79、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

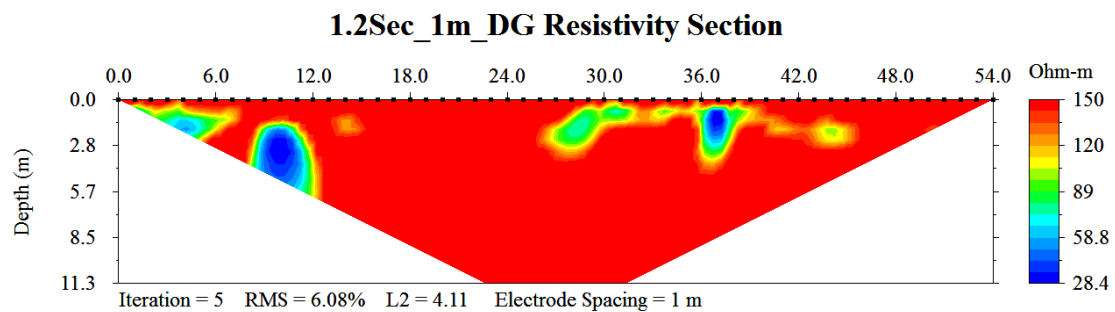


圖80、電極間距 1 公尺放電時間 1.2Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 67 至圖 80 為電極間距 1 公尺放電時間 1.2 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法 (Strong-Gradient array) 與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種常見的電極排列法。本研究在簡易試驗場址中所收集到的結果，不使用繁複得資料處理，直接利用軟體反算，期望得到一目了然的結果，因為場址特性的異常區域與背景值有很大的物理特性差異，背景值屬於紅土礫石層，呈現相對高電阻率反應，而待測物是金屬材料的管線，屬於相對低電阻率反應，且待測物有尺寸上不同，最小待測物異常區四：直徑為 9 公分，最大待測物為異常區一：直徑超過 30 公分。所以 Log Scale 色階為直流電阻法最一般的色階顯示方式，所以圖 67、69、71、73、75、77、79 為直接反算

結果，利用 Log Scale 方式呈現，而且不更改其最大最小之電阻率值，而圖 68、70、72、74、76、78、80 等圖，為 Liner scale 上呈現，目的在凸顯異常區域與背景電阻率的差異。

整體來看，1.2sec 電極間距一公尺的結果與 0.8sec 結果差異不大。不過隨著放電時間增加，相對可以壓抑雜訊功能。利用色階的凸顯，七個電極排列法皆可將異常物給描繪出來。溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array) 在不特別的資料處理中表現最佳，可快速將四個地電阻率異常區呈現出來。梯度法 (Edge-Gradient array) 的形貌與電阻率值最接近異常物質的原貌。而偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 仍是最佳的電極排列法，他將最小的異常區描繪得最清楚，電阻率值亦是最接近原物質。

(3) 3.6 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

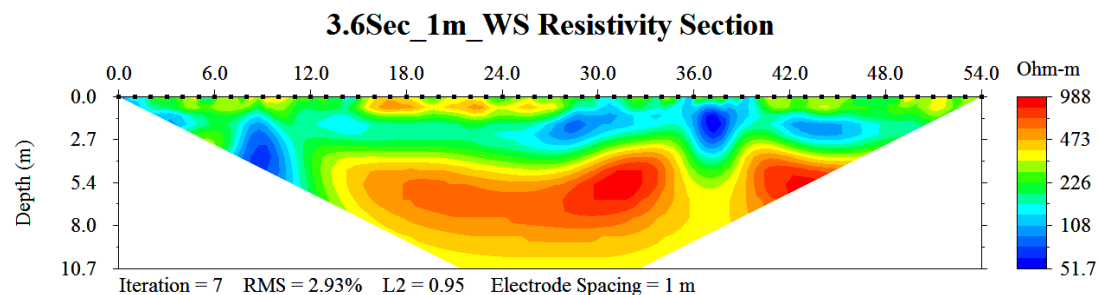


圖81、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

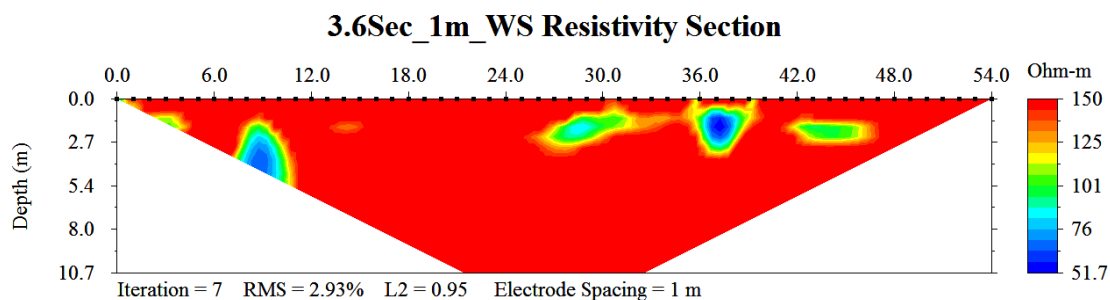


圖82、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

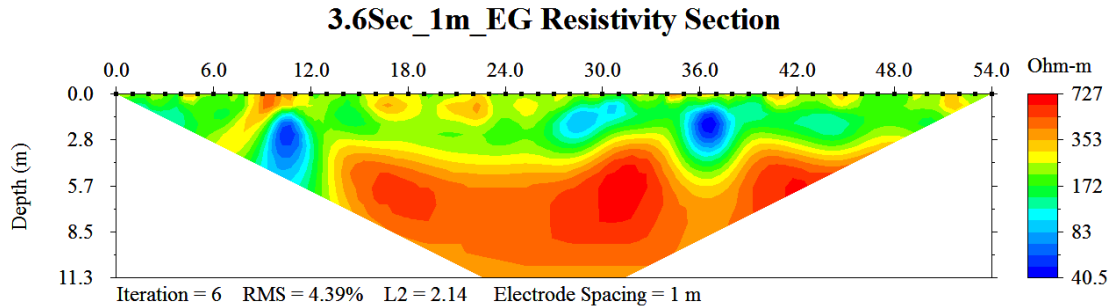


圖83、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

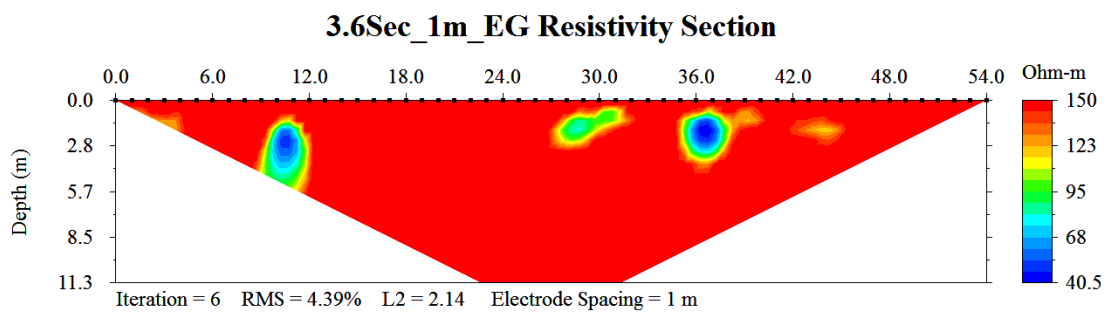


圖84、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

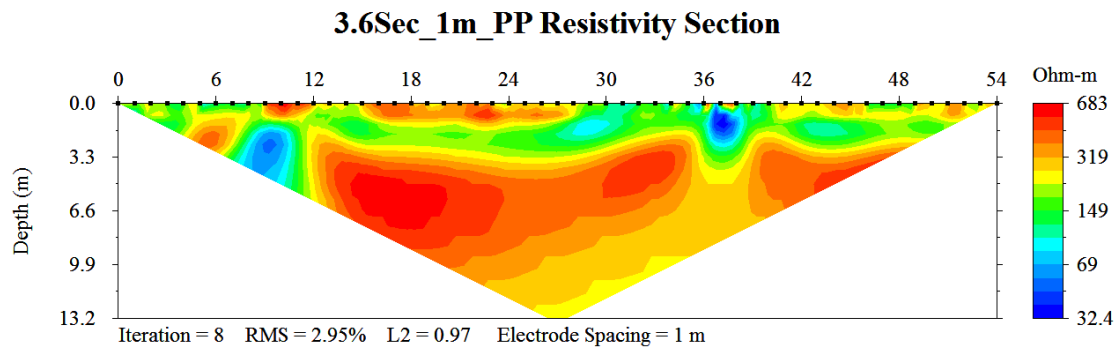


圖85、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 雙極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

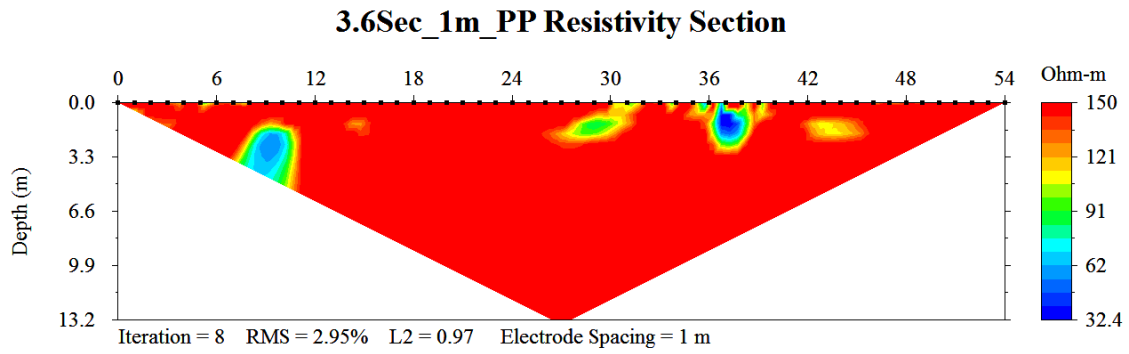


圖86、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 雙極法施測結果圖(Log Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

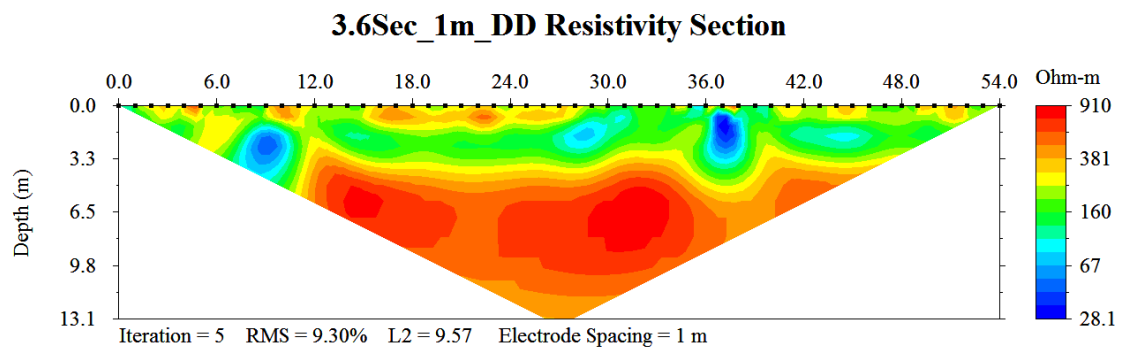


圖87、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

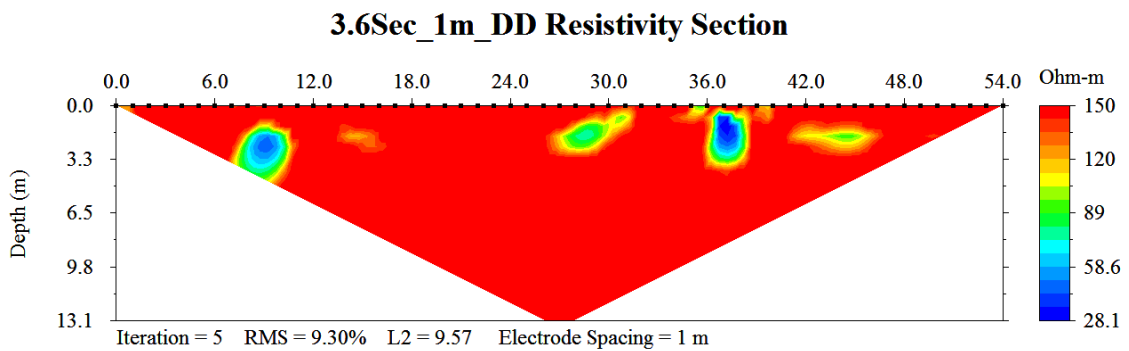


圖88、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

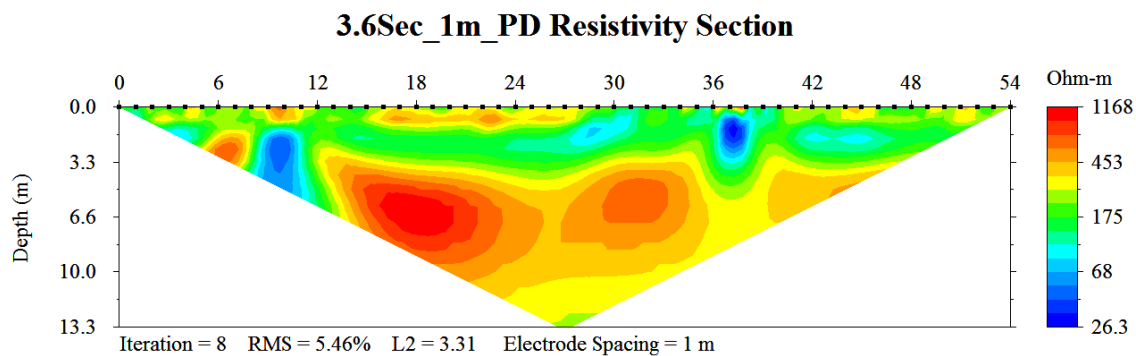


圖89、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 三極法施測結果圖(Log Scale 色階)

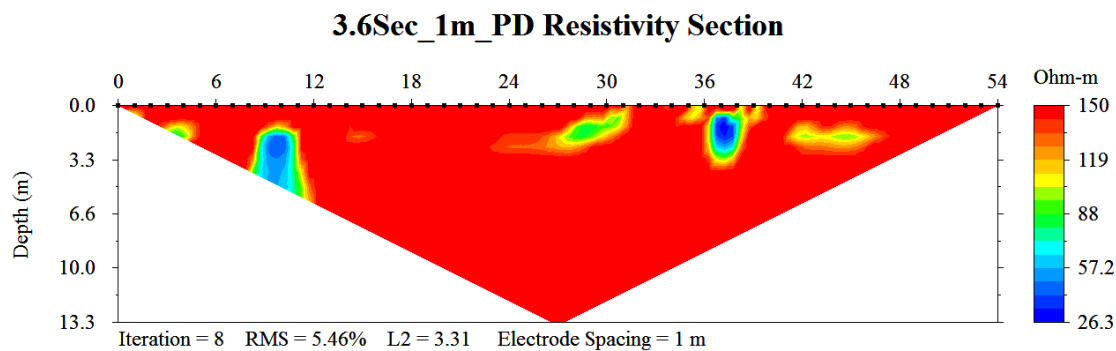


圖90、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 三極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

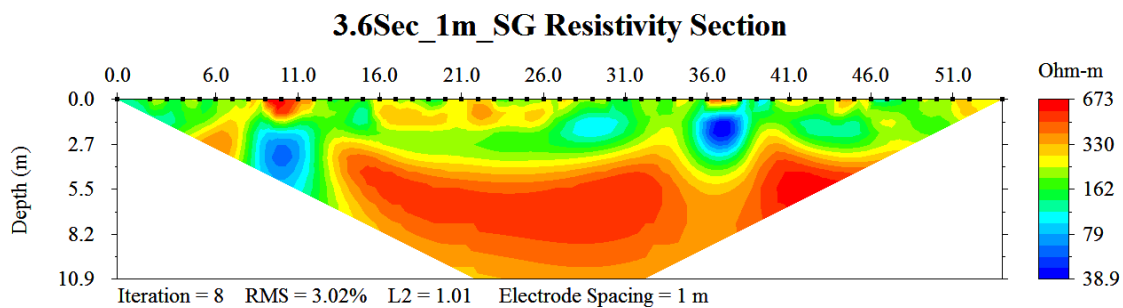


圖91、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

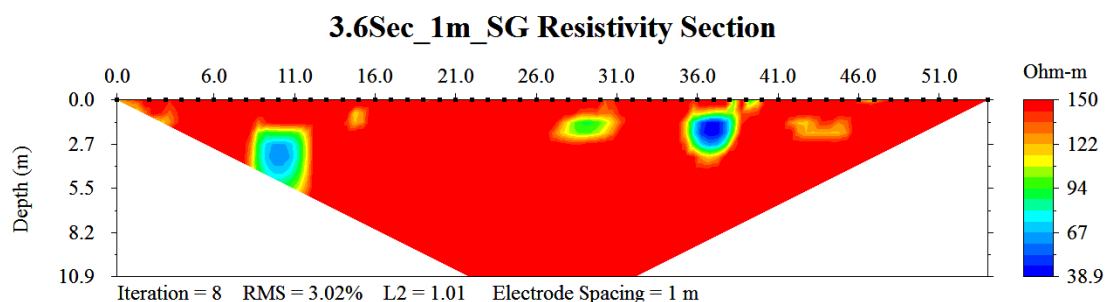


圖92、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

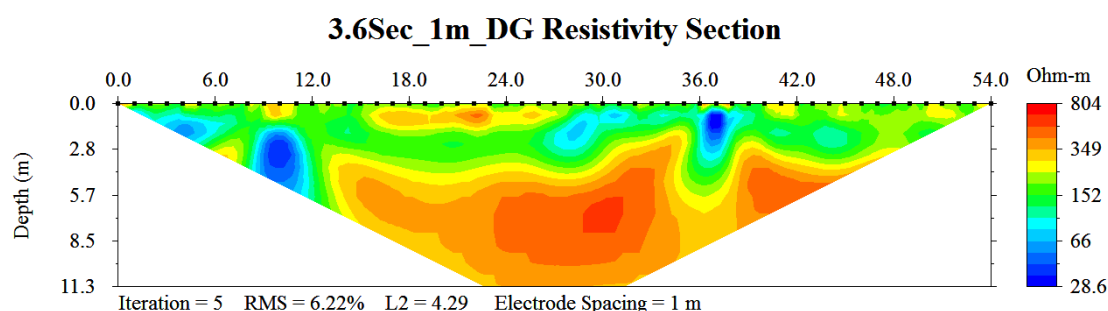


圖93、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

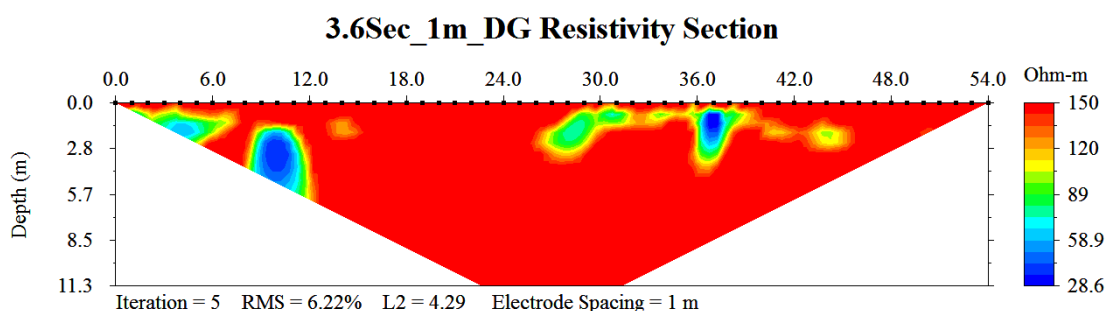


圖94、電極間距 1 公尺放電時間 3.6Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 81 至圖 94 為電極間距 1 公尺放電時間 3.6 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種

常見的電極排列法。本研究在簡易試驗場址中所收集到的結果，不使用繁複得資料處理，直接利用軟體反算，期望得到一目了然的結果。

整體來看，3.6 sec 電極間距一公尺的結果與 0.8sec 結果差異便可以看出隨著放電時間增加，相對可以壓抑雜訊功能。利用色階的凸顯，七個電極排列法皆可將異常物給描繪出來。溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array) 在不特別的資料處理中表現最佳，可快速將四個地電阻率異常區呈現出來。梯度法 (Edge-Gradient array) 的形貌與電阻率值最接近異常物質的原貌。而偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 仍是最佳的電極排列法，他將最小的異常區描繪得最清楚，電阻率值亦是最接近原物質。

3.5.2 電極間距二公尺成果

(1) 0.8 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

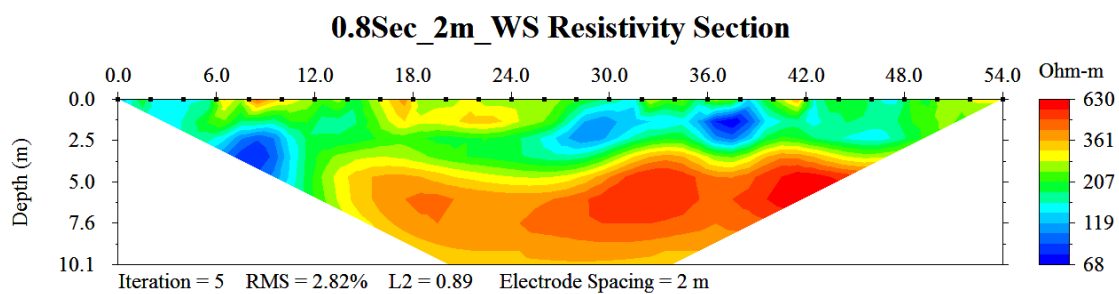


圖95、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

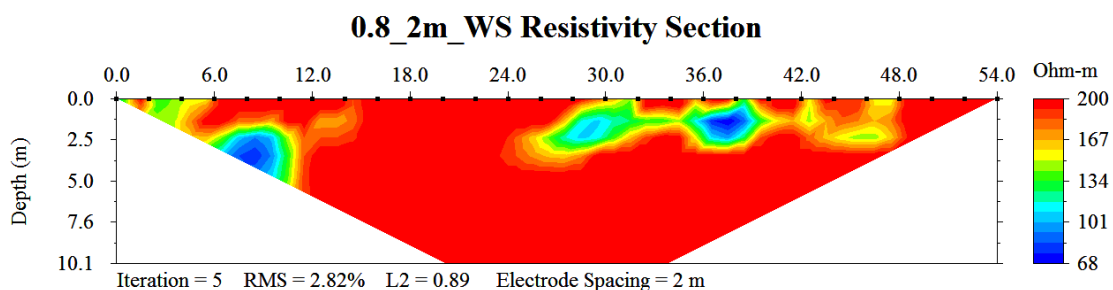


圖96、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

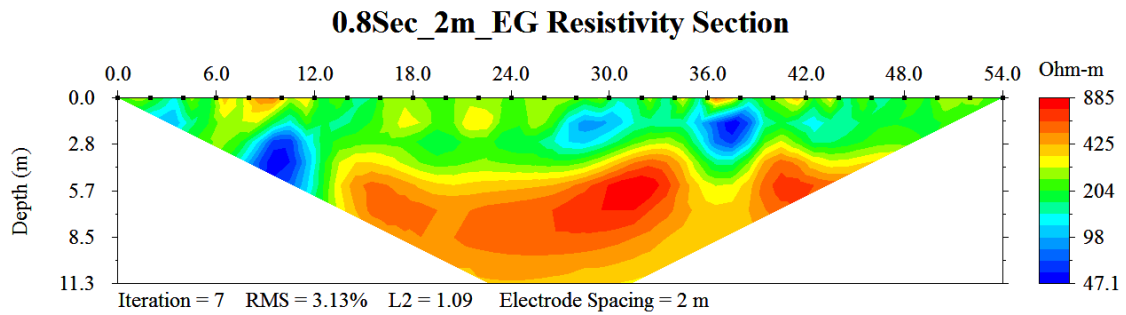


圖97、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

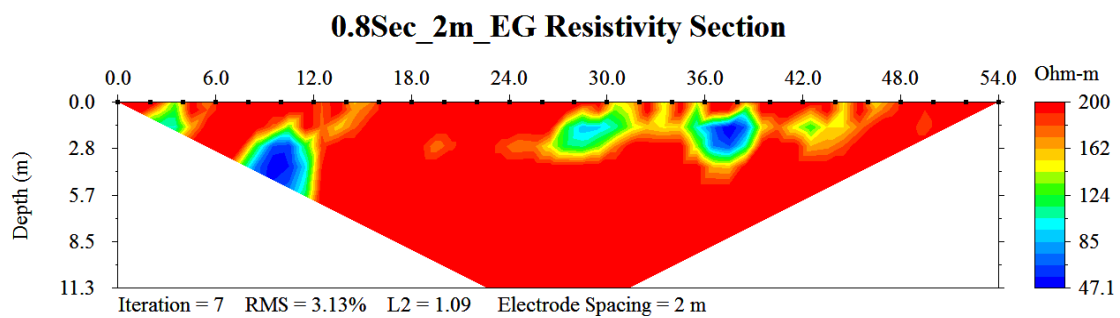


圖98、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

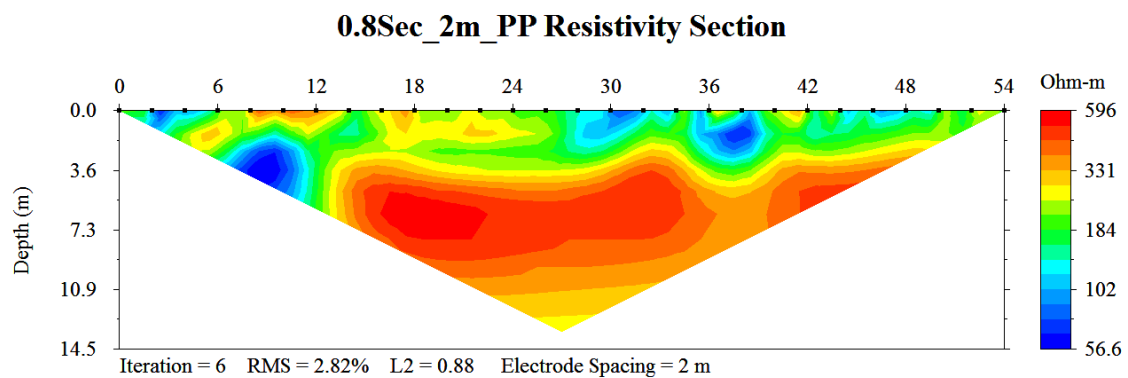


圖99、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 雙極法排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

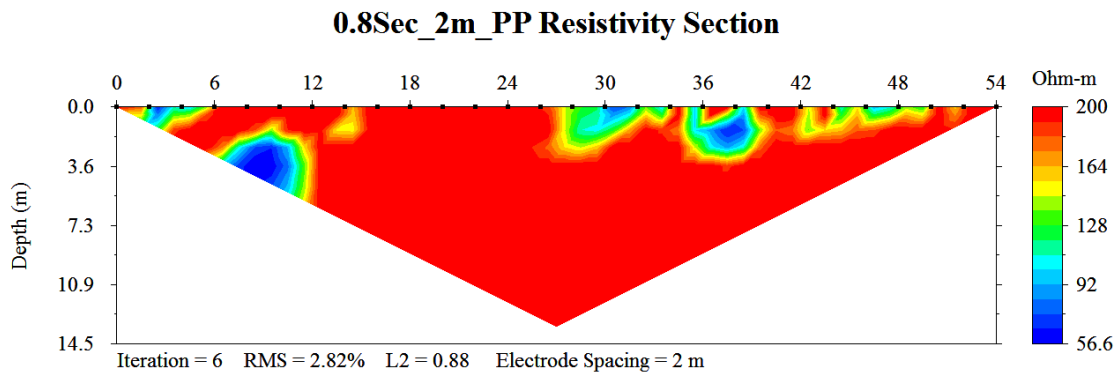


圖100、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 雙極法排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

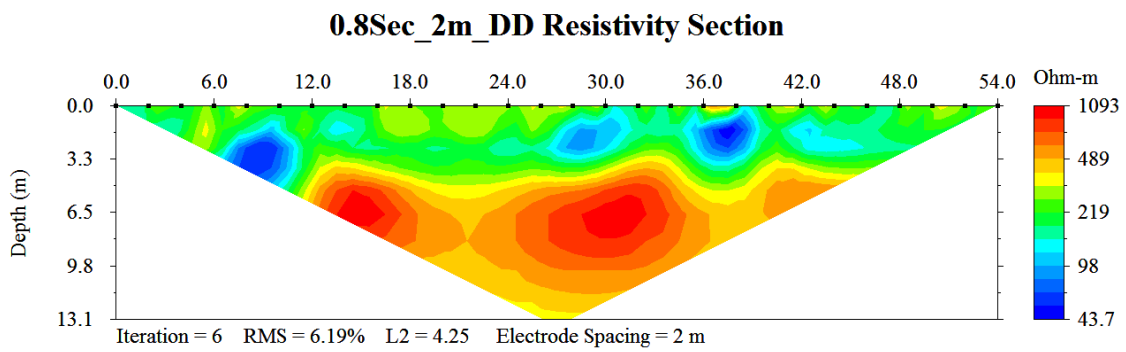


圖101、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 偶極偶極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

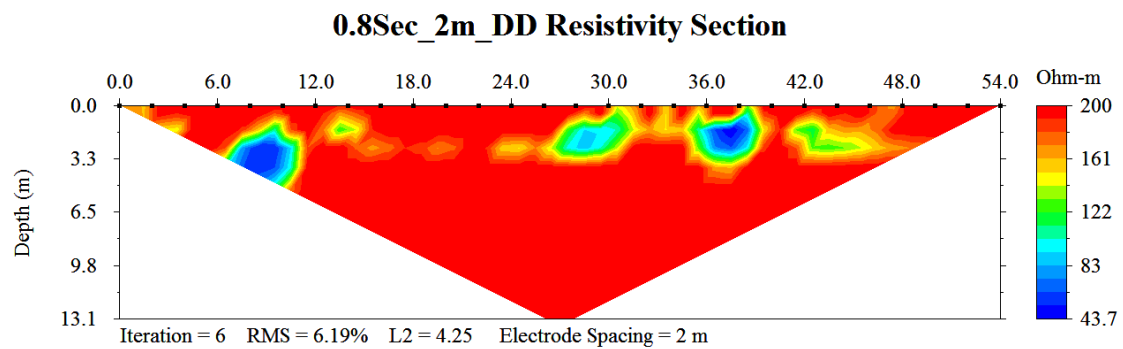


圖102、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 偶極偶極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

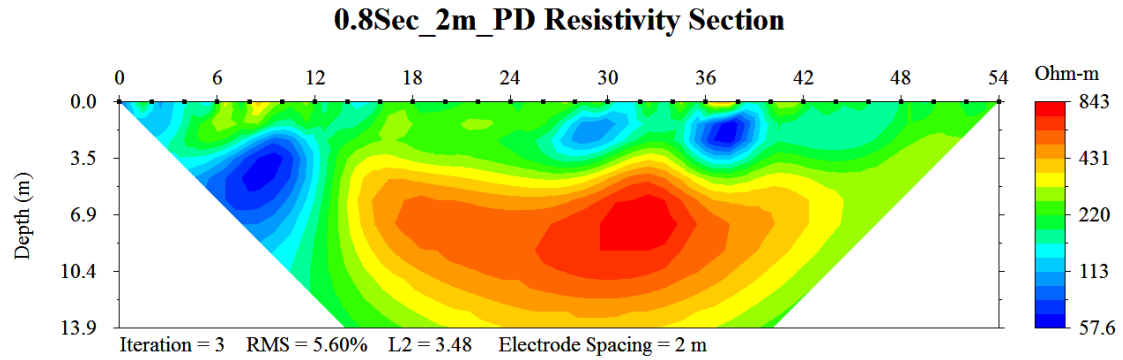


圖103、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 三極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

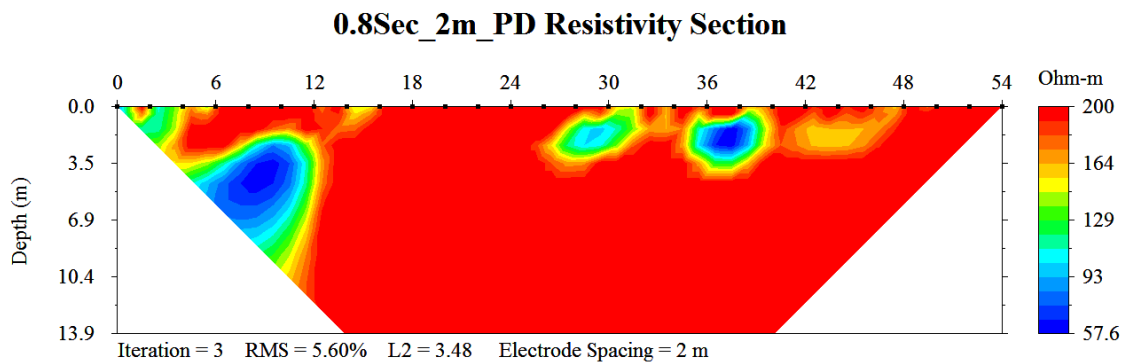


圖104、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 三極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

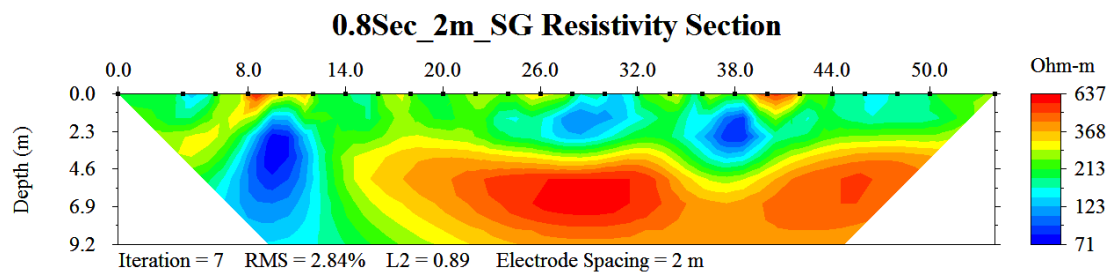


圖105、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

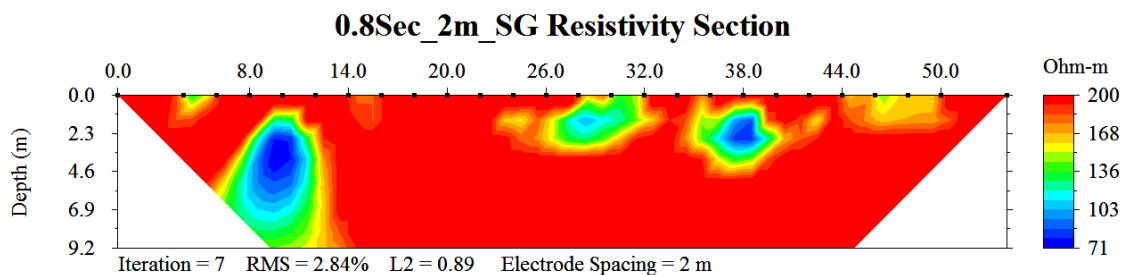


圖106、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

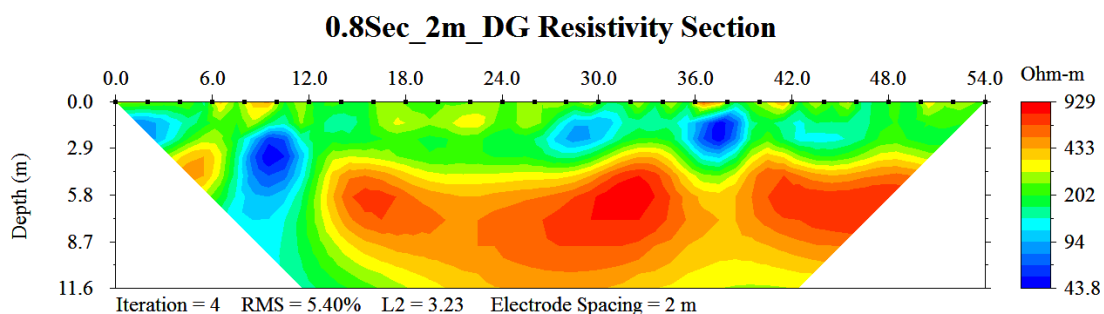


圖107、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

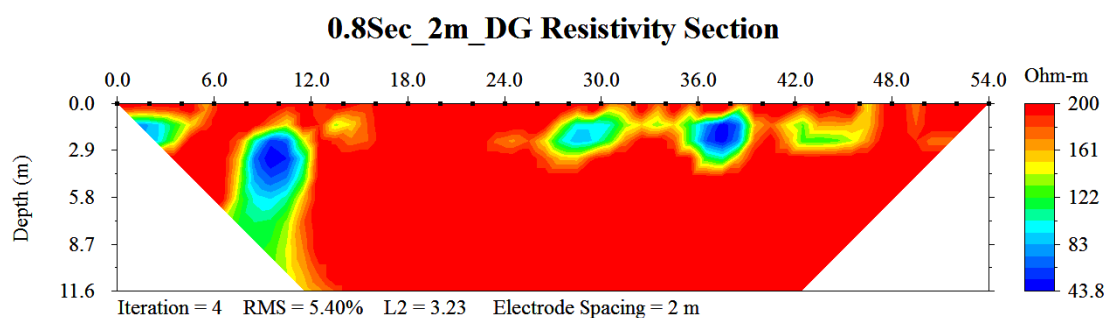


圖108、電極間距 2 公尺放電時間 0.8 Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 95 至圖 108 為電極間距 2 公尺放電時間 0.8 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種

常見的電極排列法。本研究在簡易試驗場址中所收集到的結果，不使用繁複得資料處理，直接利用軟體反算，期望得到一目了然的結果，因為場址特性的異常區域與背景值有很大的物理特性差異。所以圖 95、97、99、101、103、105、107 為直接反算結果，利用 Log Scale 方式呈現，而且不更改其最大最小之電阻率值，而圖 96、98、100、102、104、106、108 等圖，為 Liner scale 上呈現，目的在凸顯異常區域與背景電阻率的差異。

整體來看，0.8sec 電極間距 2 公尺的結果與 1 公尺的結果差異很大。所以電極間距的選擇在現場實務工作時非常重要。以圖 95 為例:圖 95 為溫奈-施蘭卜吉法施測成果圖，使用 Log 或是 Liner 的色皆呈現方式，第四個異常區並無法清楚呈現出來，與圖 53 利用 0.8 秒，電極間距 1 公尺的成果，便有明顯差異。其中差異最大是二極法的成果，雜訊增加了，目標物無法一目瞭然的標定出來。

(2) 1.2 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

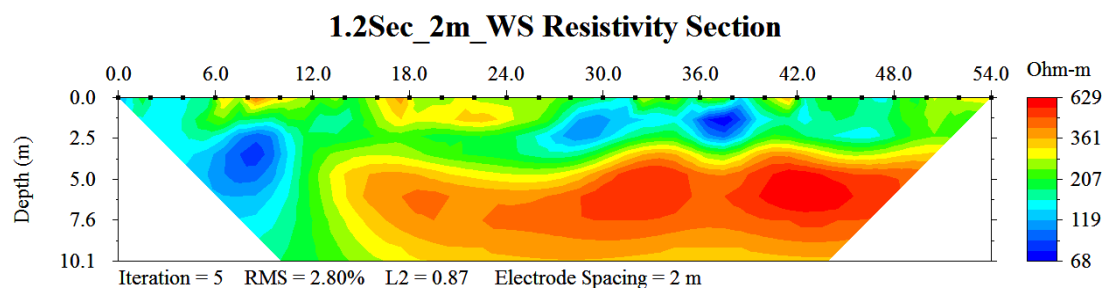


圖109、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

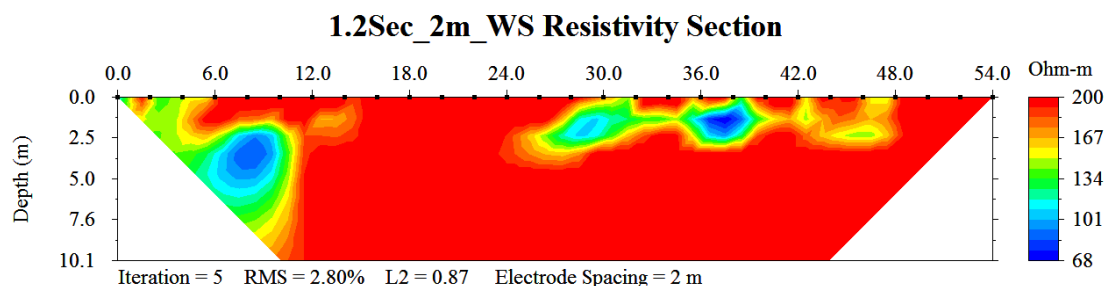


圖110、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

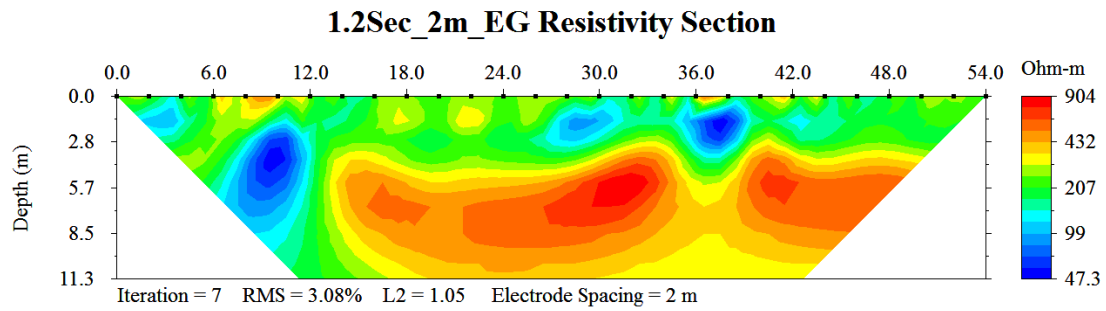


圖111、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

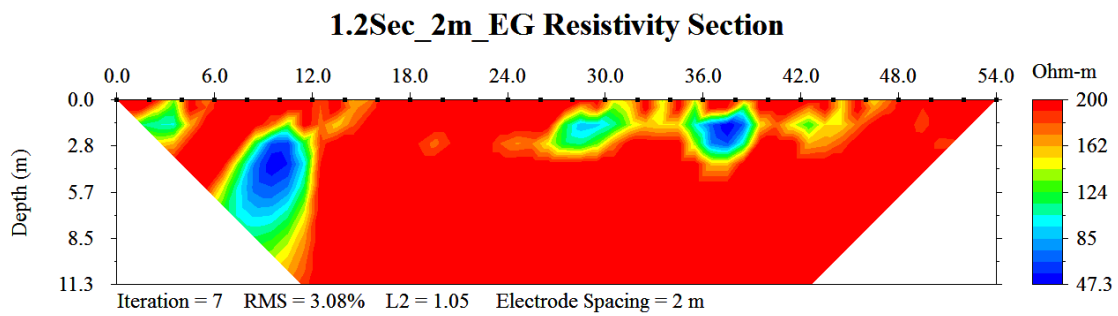


圖112、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙偶極法 (Pole-Pole array)

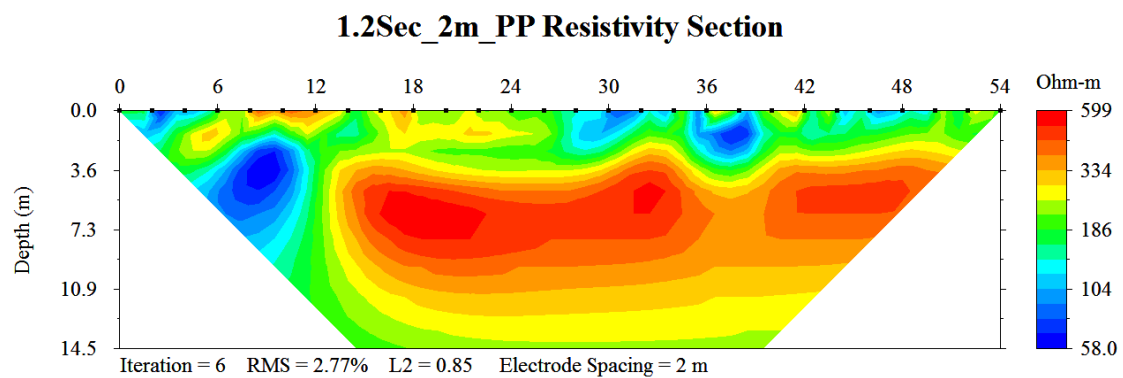


圖113、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 雙極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

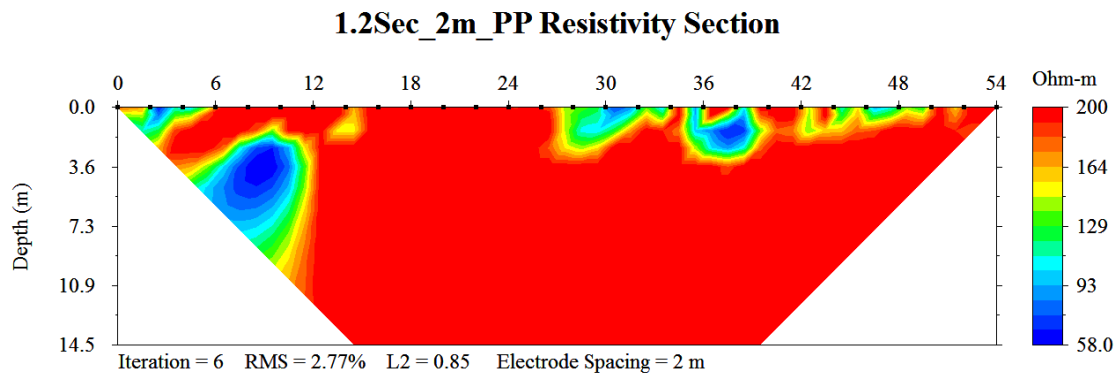


圖114、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 雙極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

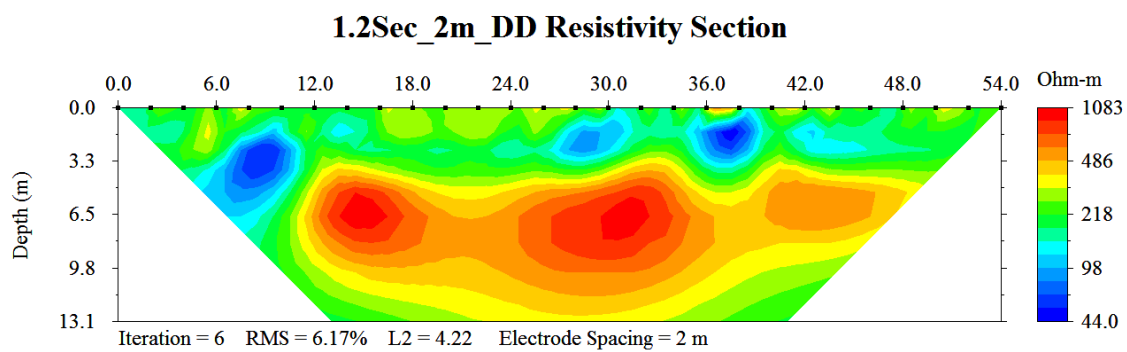


圖115、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

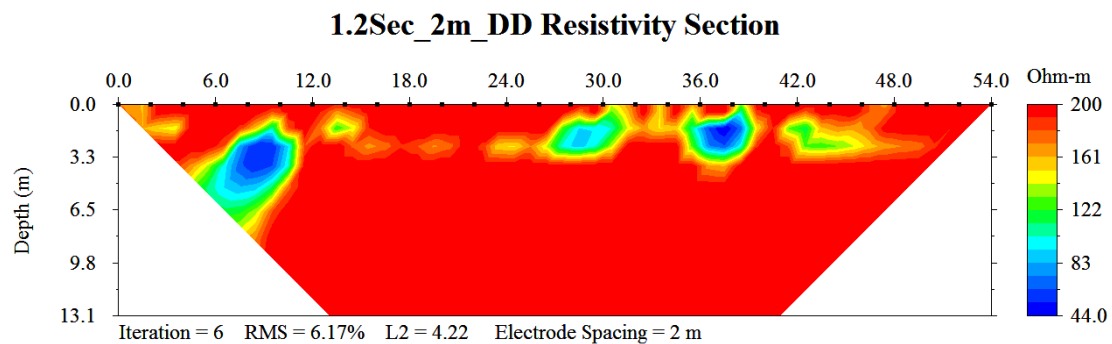


圖116、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

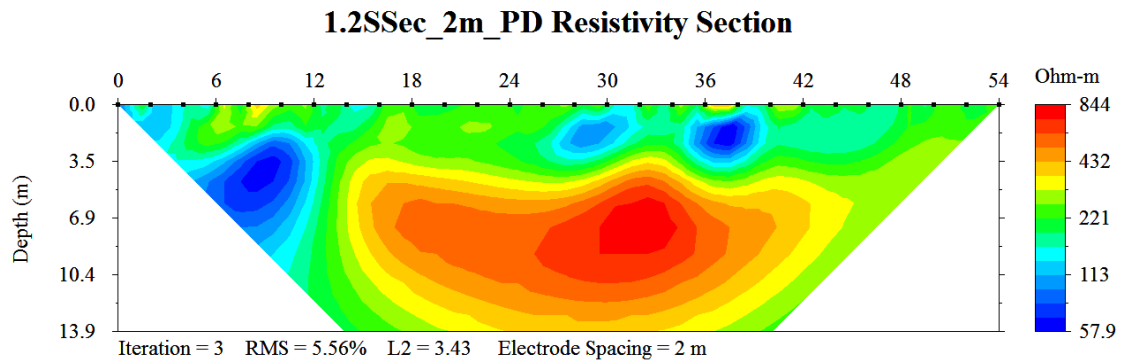


圖117、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 三極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

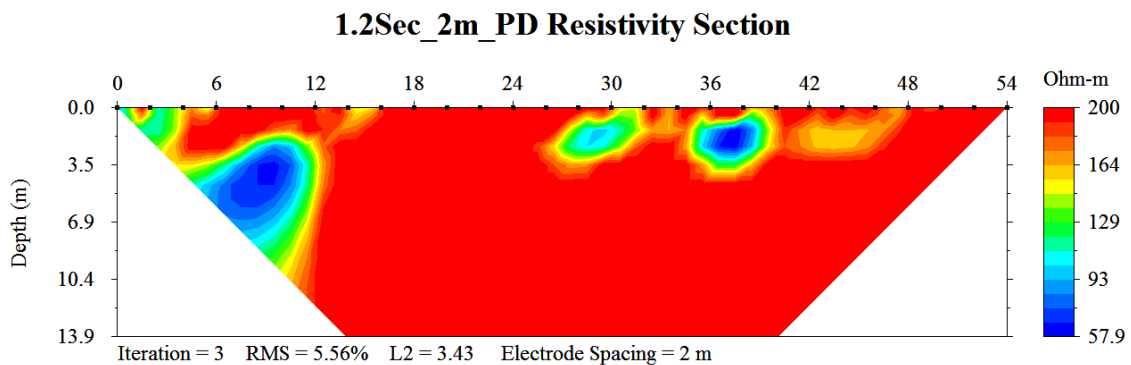


圖118、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 三極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

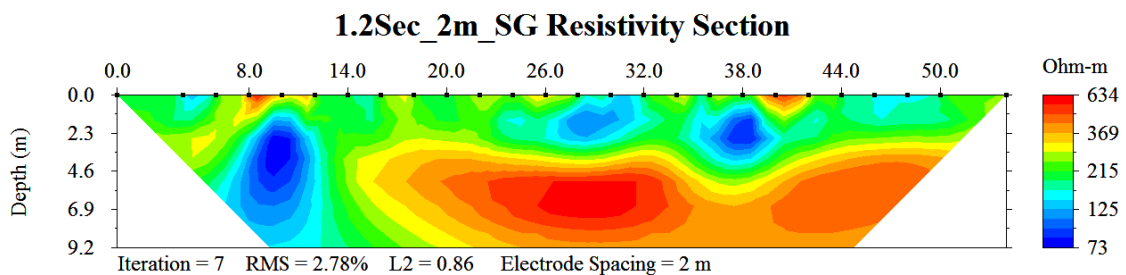


圖119、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

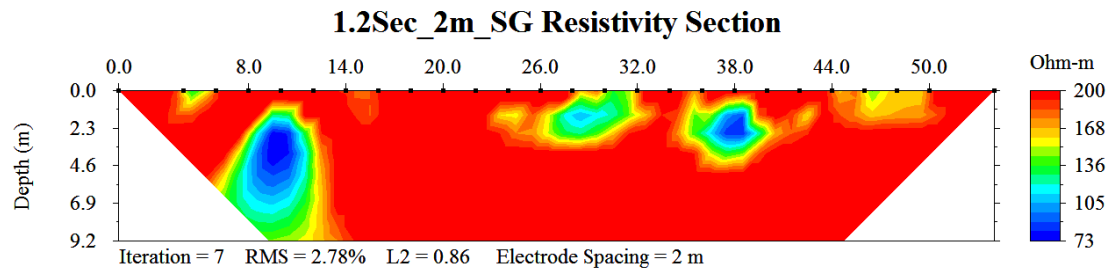


圖120、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

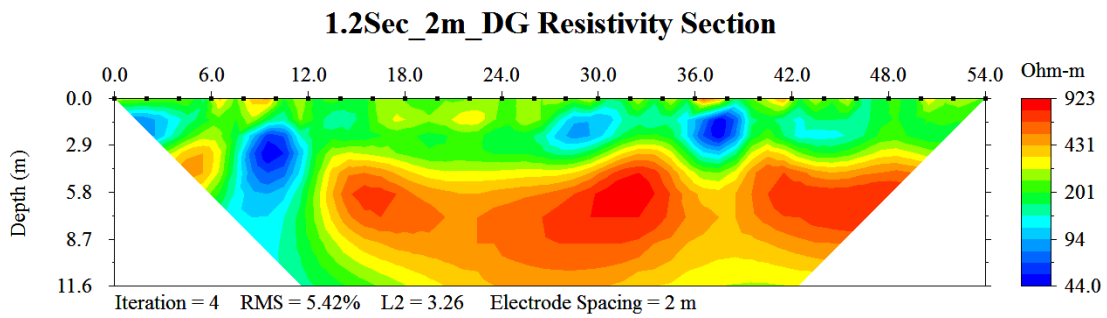


圖121、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

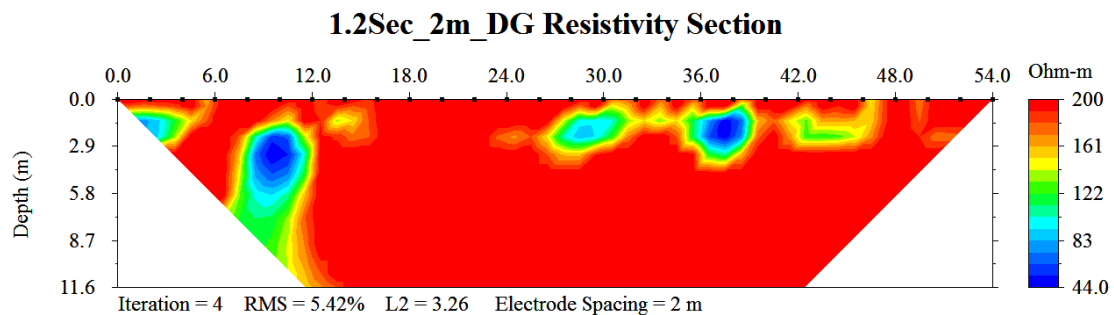


圖122、電極間距 2 公尺放電時間 1.2 Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 109 至圖 122 為電極間距 2 公尺放電時間 1.2 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient

array)、雙極法(Pole-Pole array)、偶極偶極法(Dipole-Dipole array)、三極法(Pole-Dipole array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法(Dipole-Gradient array)等七種常見的電極排列法。本研究在簡易試驗場址中所收集到的結果，不使用繁複得資料處理，直接利用軟體反算，期望得到一目了然的結果，因為場址特性的異常區域與背景值有很大的物理特性差異。所以圖 109、111、113、115、1117、119、121 為直接反算結果，利用 Log Scale 方式呈現，而且不更改其最大最小之電阻率值，而圖 110、112、114、116、118、120、122 等圖，為 Liner scale 上呈現，目的在凸顯異常區域與背景電阻率的差異。

整體來看，1.2 秒的放電時間，雜訊有被稍加壓抑的現象。表現最佳的電極排列法由溫奈-施蘭卜吉法變成偶極系列排列法，其中在 Log 系列中以偶極偶極法表現最佳，在 Liner 系列中以梯度法表現最佳。

(3) 3.6 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法(Wenner-Shlumberger array)

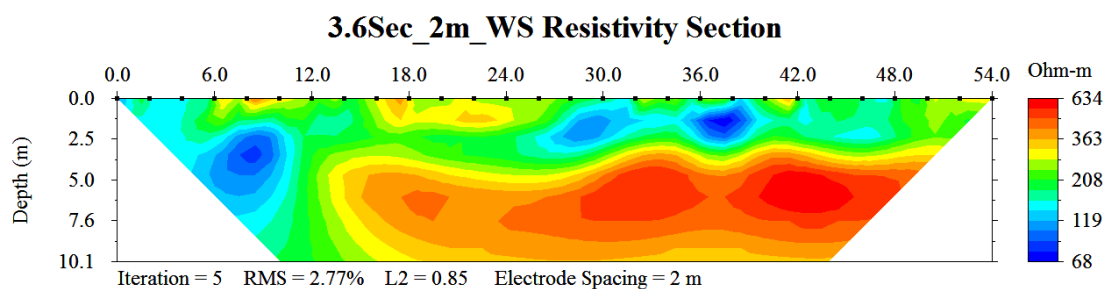


圖123、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

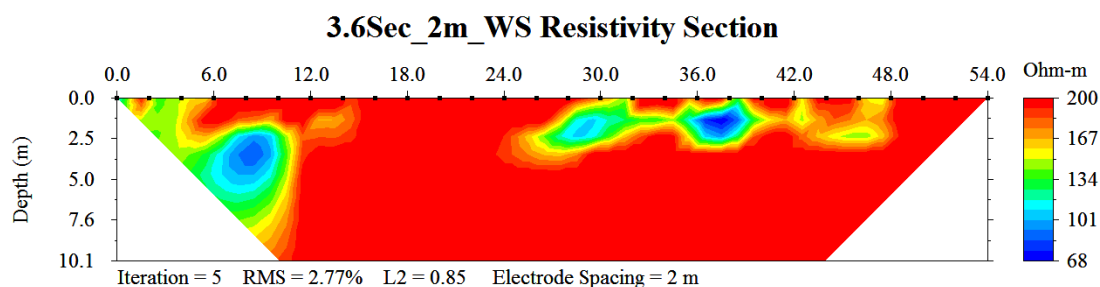


圖124、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

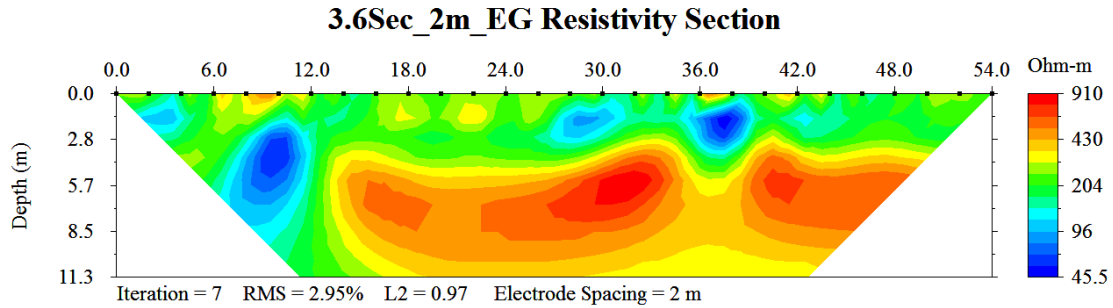


圖125、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

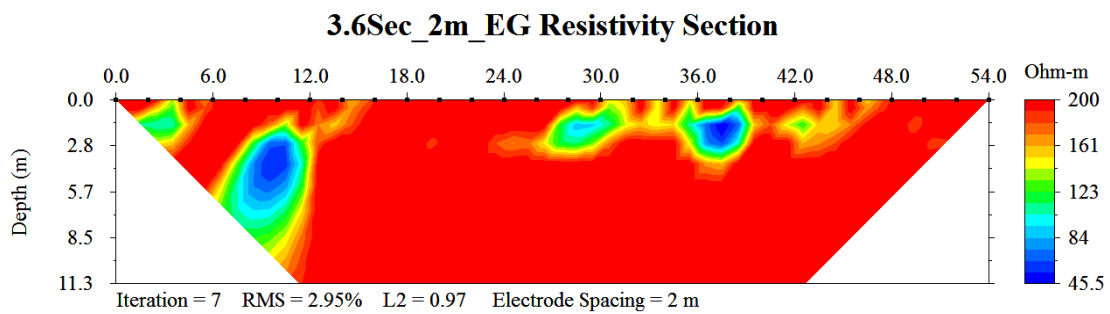


圖126、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

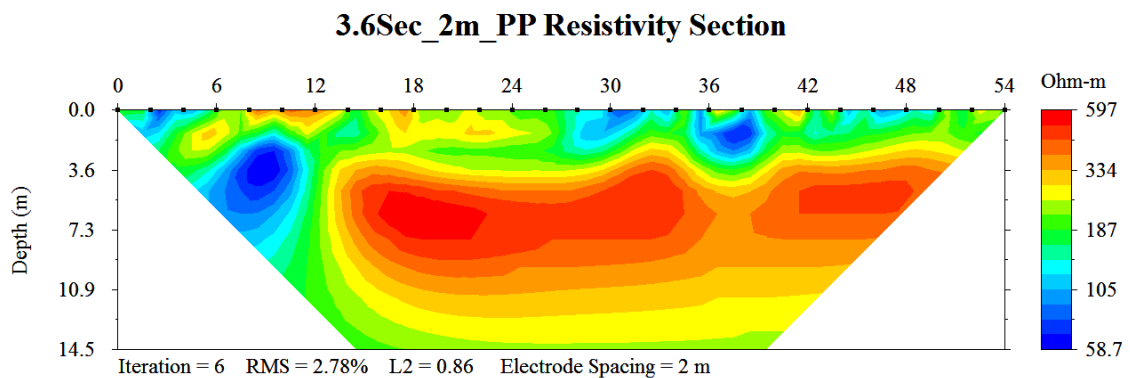


圖127、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 雙極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

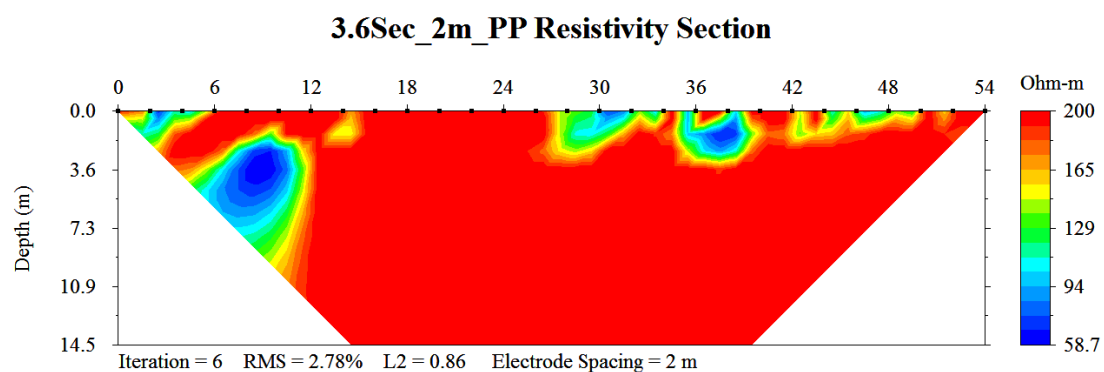


圖128、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 雙極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

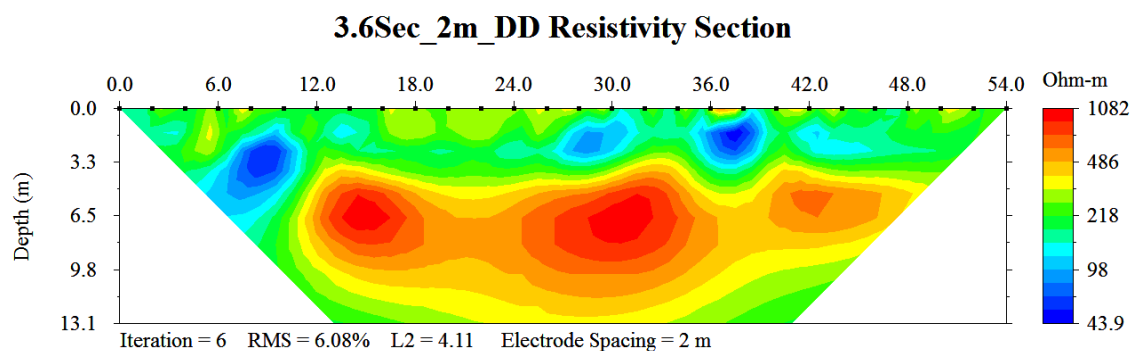


圖129、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

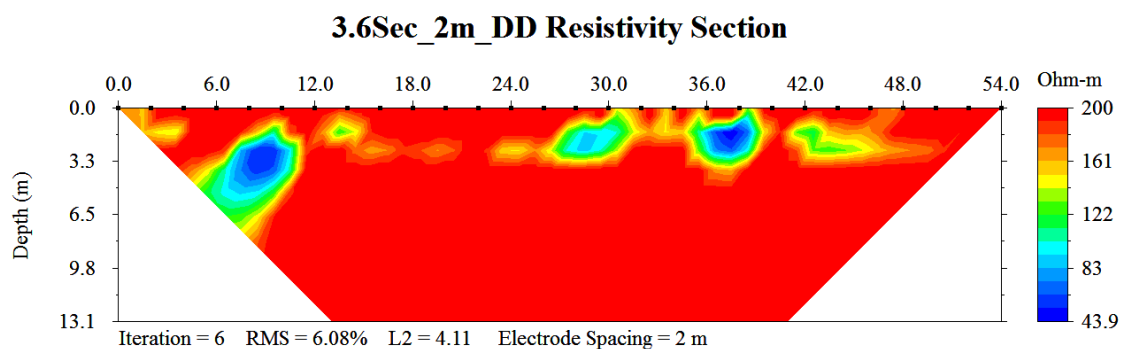


圖130、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

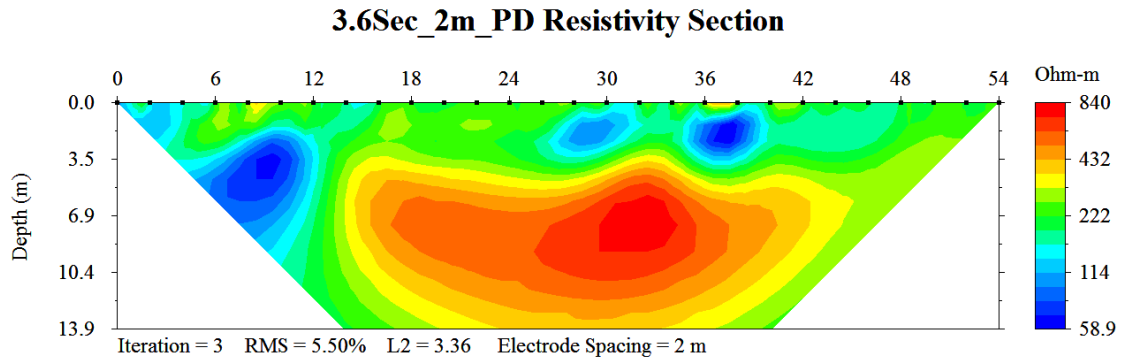


圖131、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 三極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

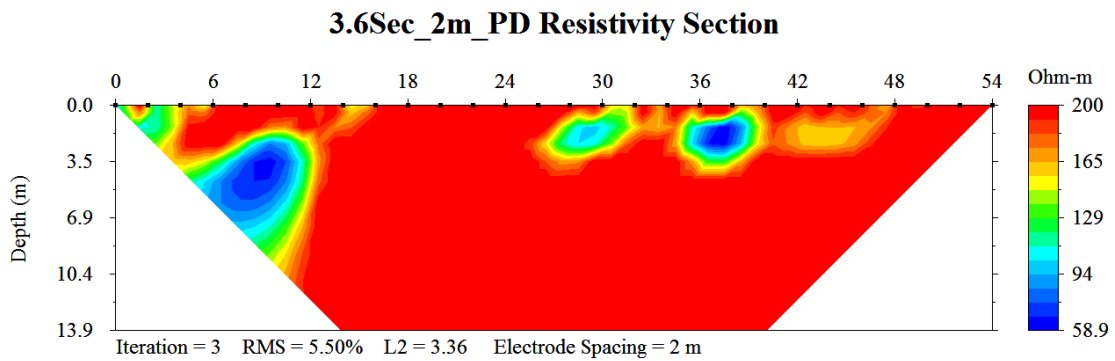


圖132、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 三極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

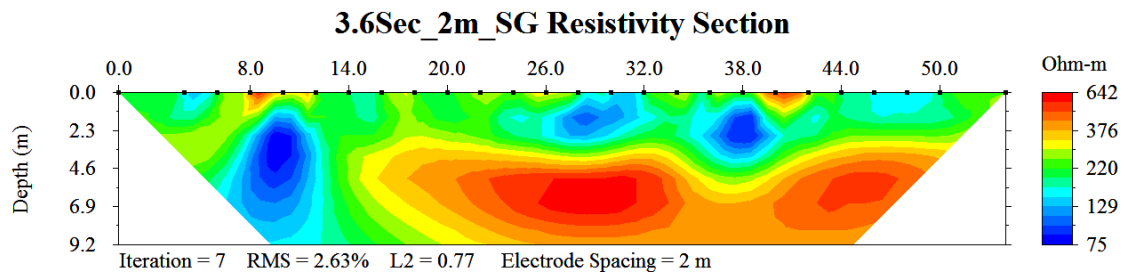


圖133、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

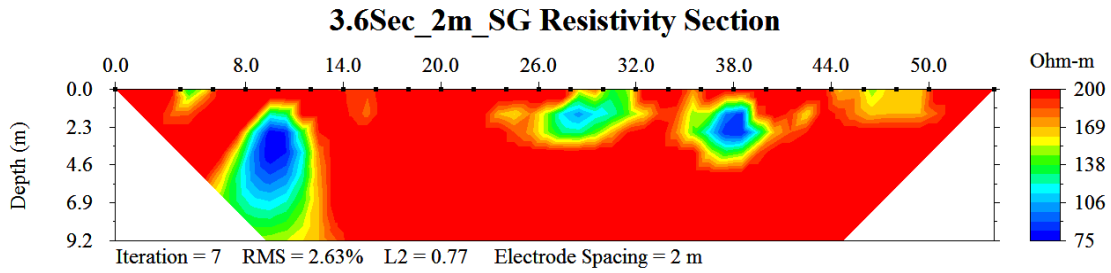


圖134、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

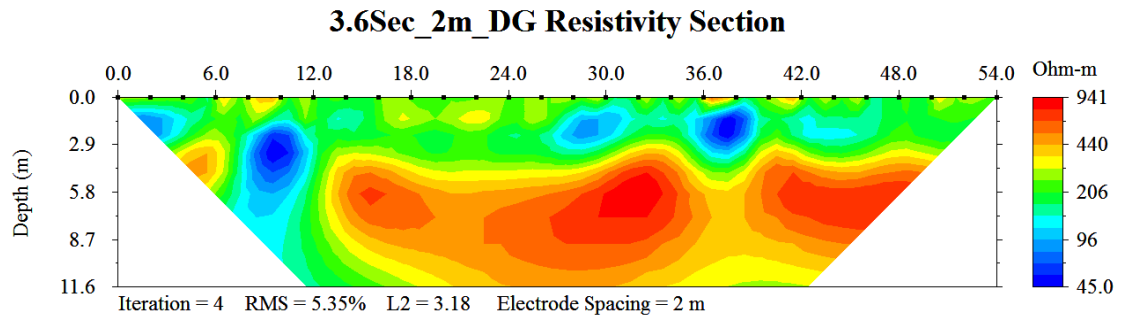


圖135、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

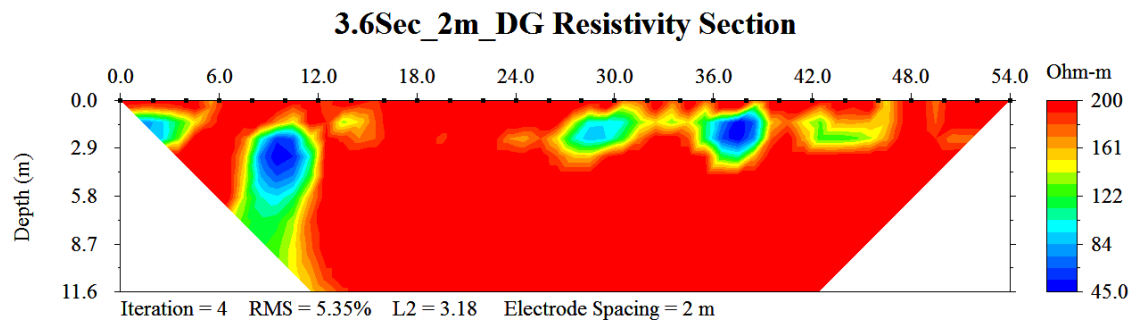


圖136、電極間距 2 公尺放電時間 3.6Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 123 至圖 136 為電極間距 2 公尺放電時間 3.6 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種常見的電極排列法。

整體來看，3.6 秒放電時間與 1.2 秒放電時間資料成果差異不大。表現最佳的電極排列法由溫奈-施蘭卜吉法變成偶極系列排列法，其中在 Log 系列中以偶極偶極法表現最佳，在 Liner 系列中以梯度法表現最佳。

3.5.3 電極間距四公尺成果

(1) 0.8 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

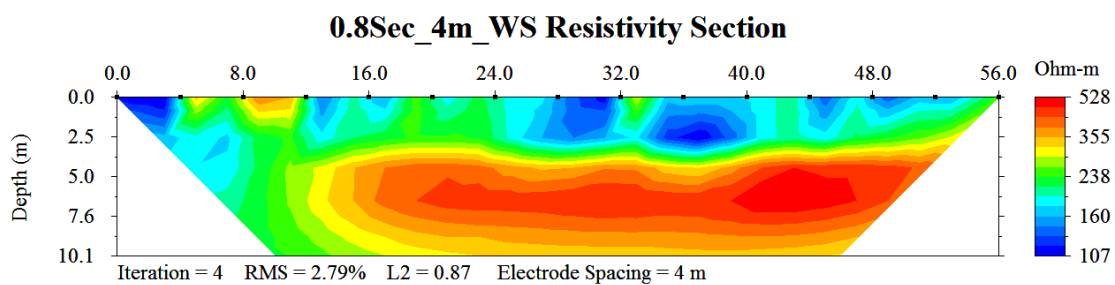


圖137、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

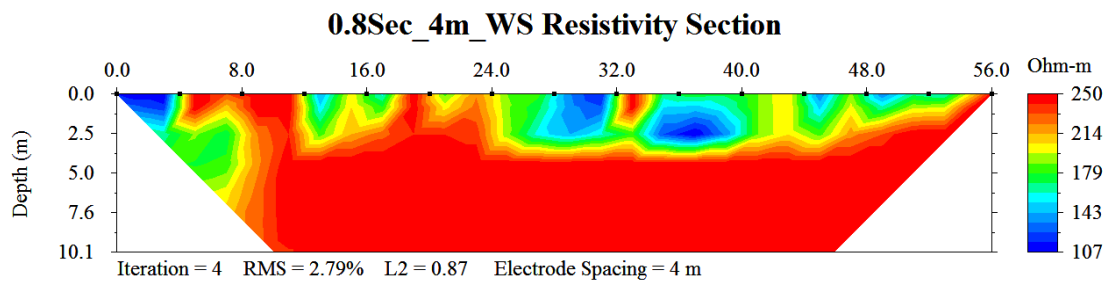


圖138、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

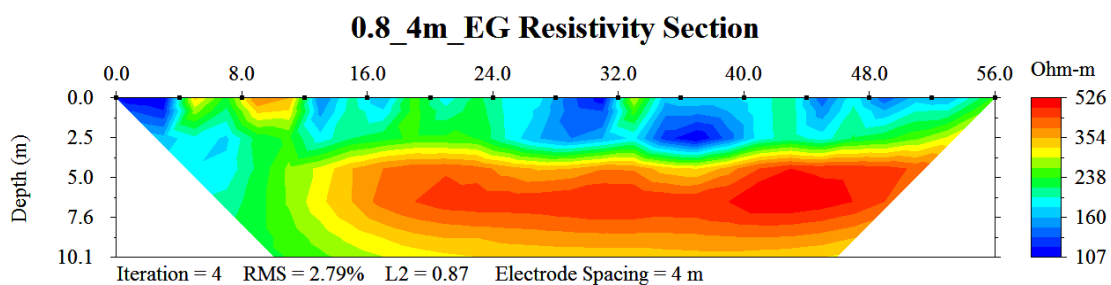


圖139、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

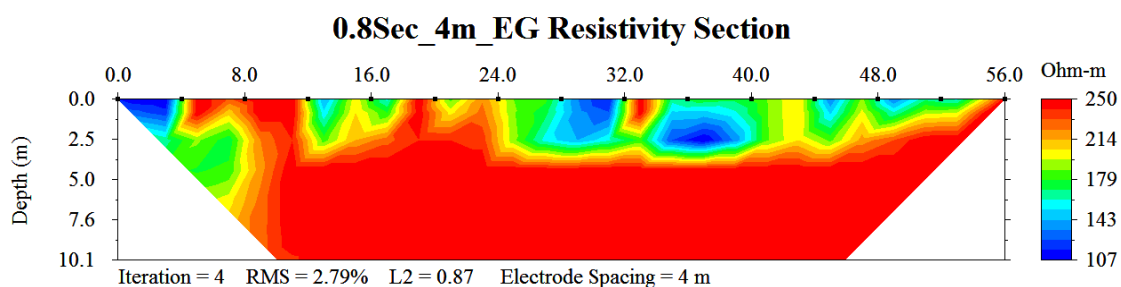


圖140、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

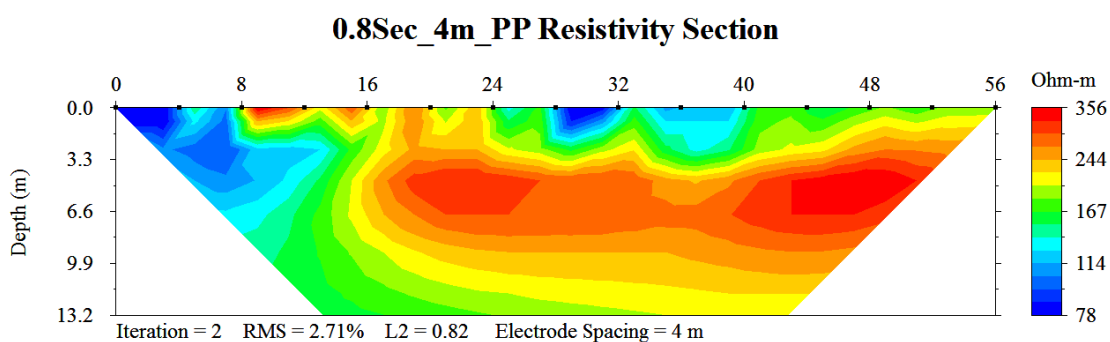


圖141、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 雙極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

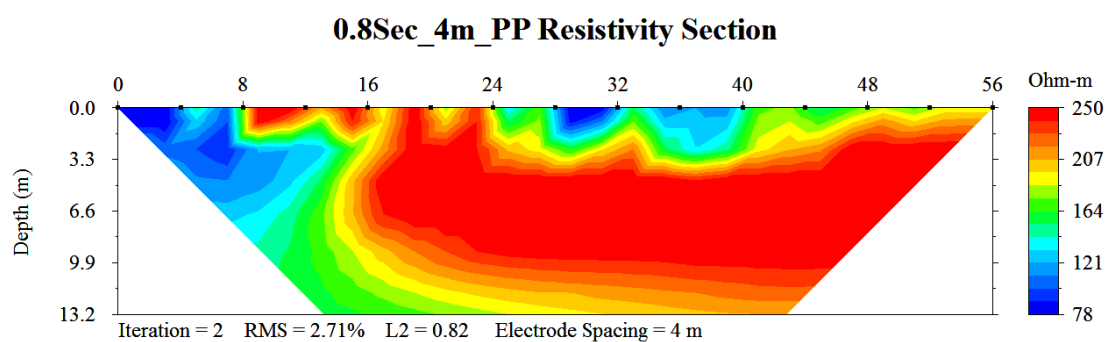


圖142、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 雙極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

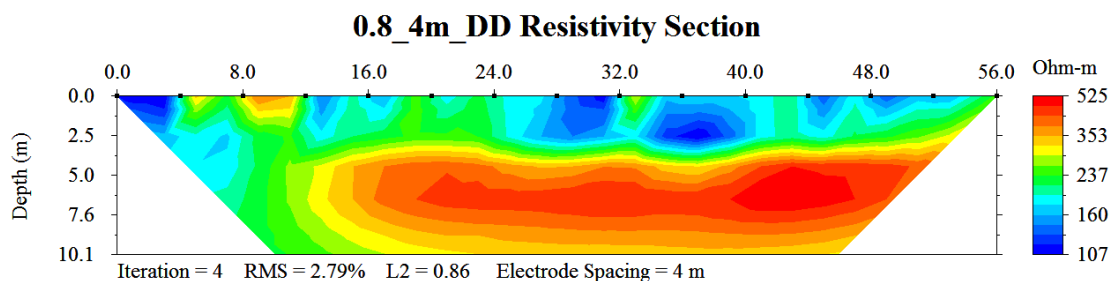


圖143、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

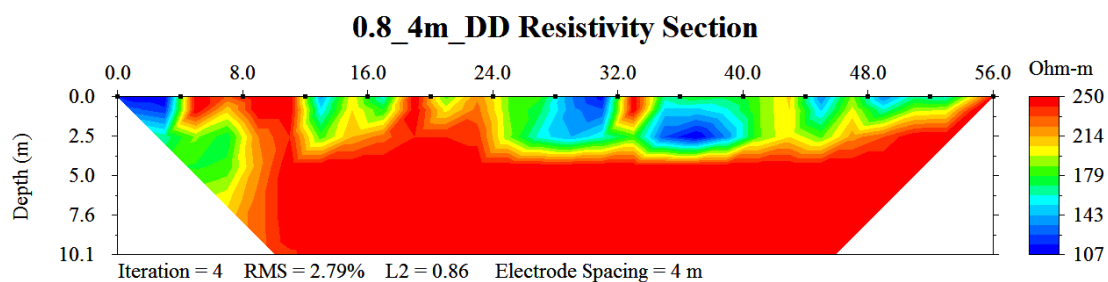


圖144、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

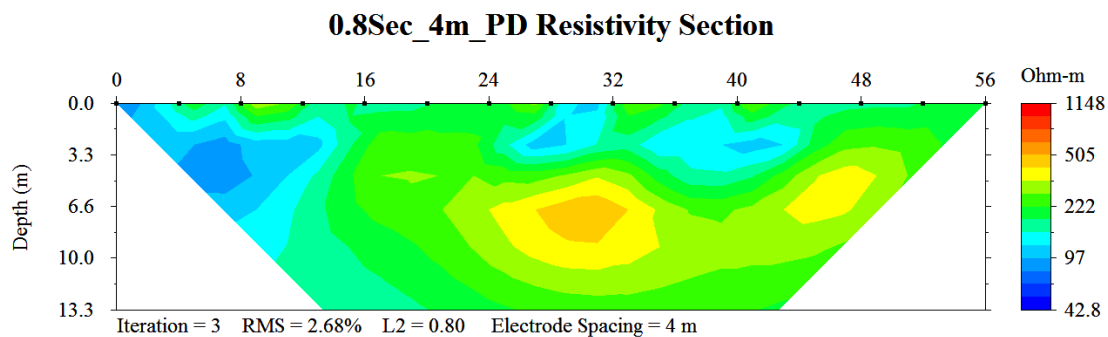


圖145、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 三極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

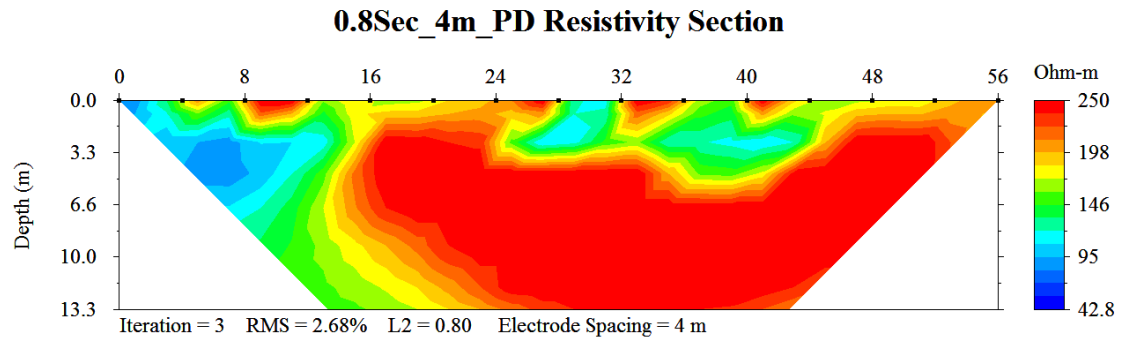


圖146、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 三極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

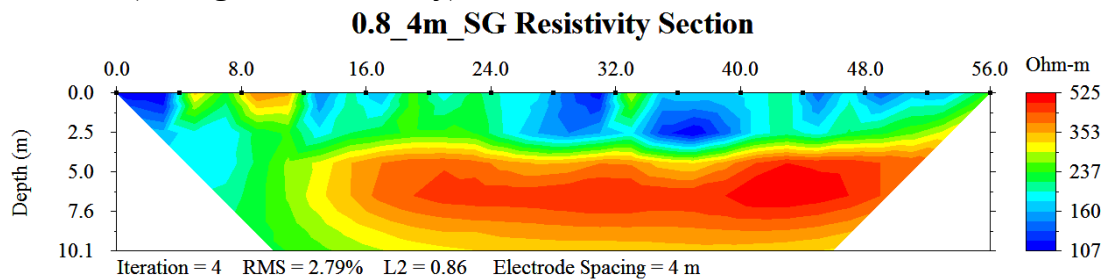


圖 147、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

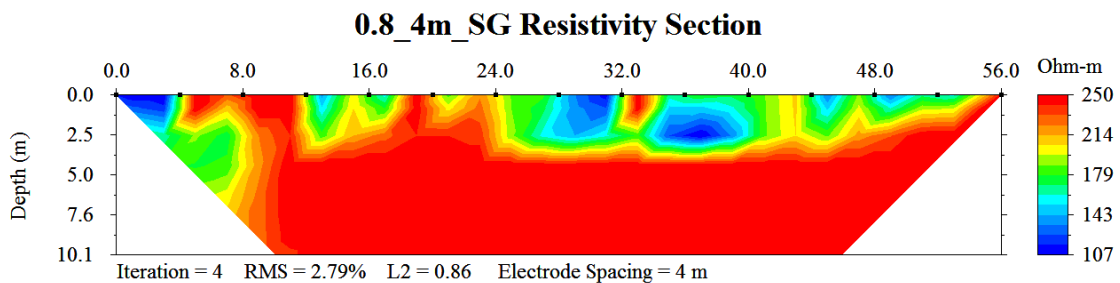


圖148、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

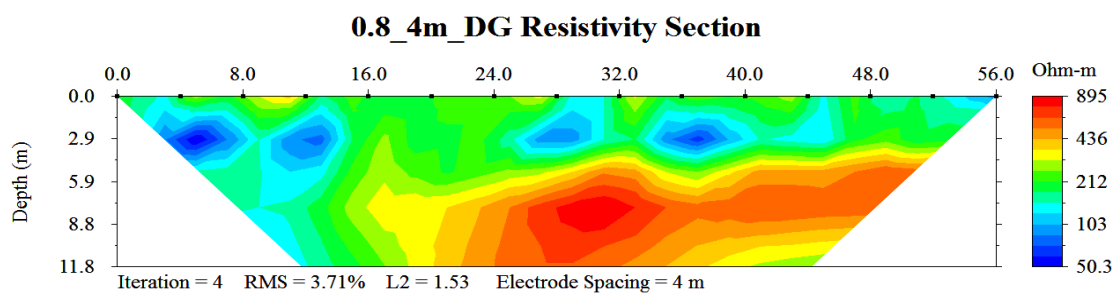


圖149、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

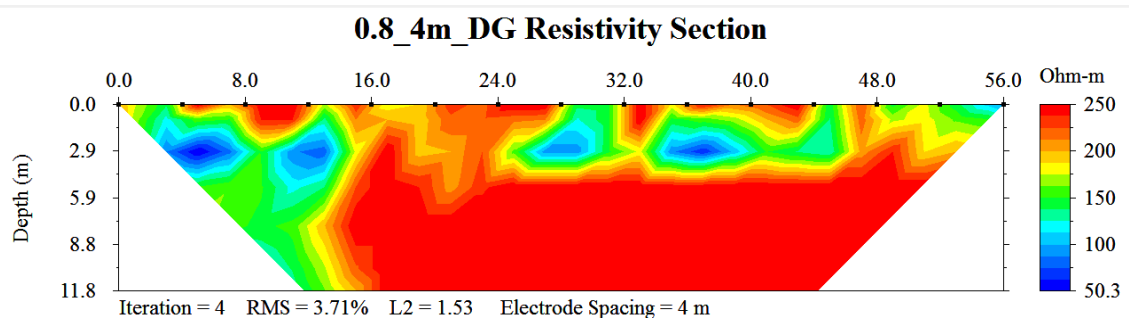


圖150、電極間距 4 公尺放電時間 0.8Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 137 至圖 150 為電極間距 4 公尺放電時間 0.8 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種常見的電極排列法。

整體來看，四公尺的電極間距與前述一公尺與兩公尺的電極排列的結果差異甚多。色階變化並無法凸顯異常訊號，在大展距的施測模式下。表現最佳的電極排列法仍由 Dipole 系列表現最佳。三極法的解析度明顯高於二極法，且結果不會差於四極法的偶極系列電極排列法。

(2) 1.2 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

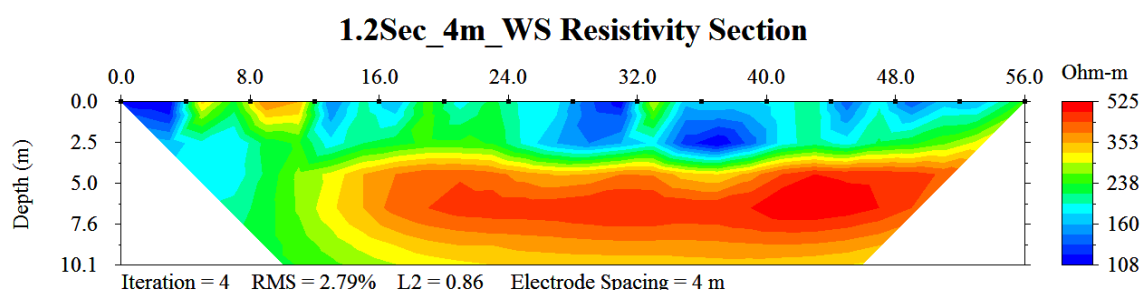


圖151、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

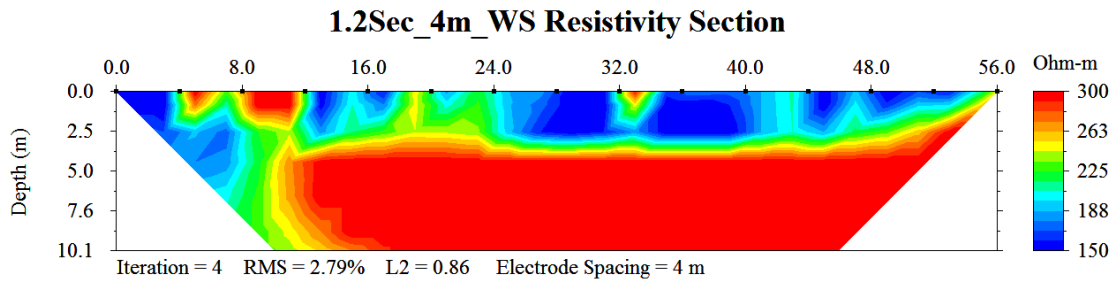


圖152、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

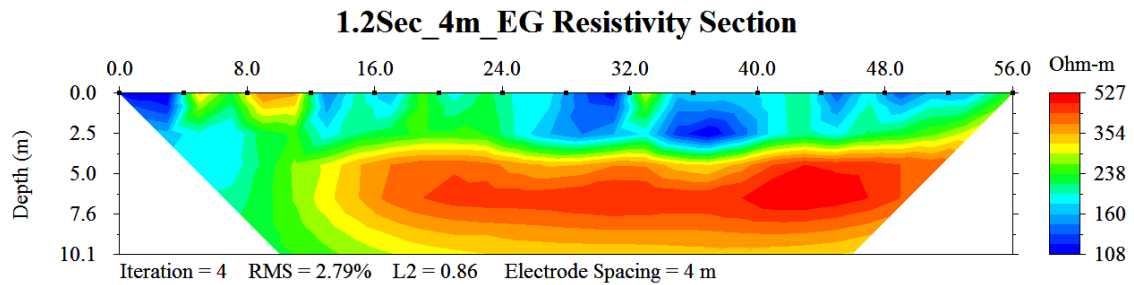


圖153、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

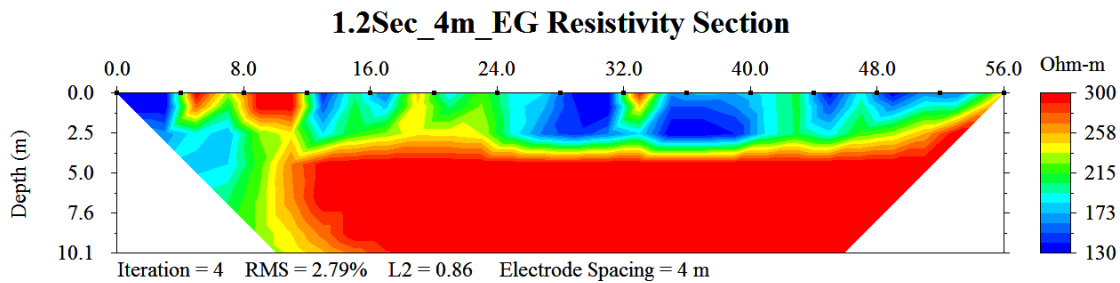


圖154、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

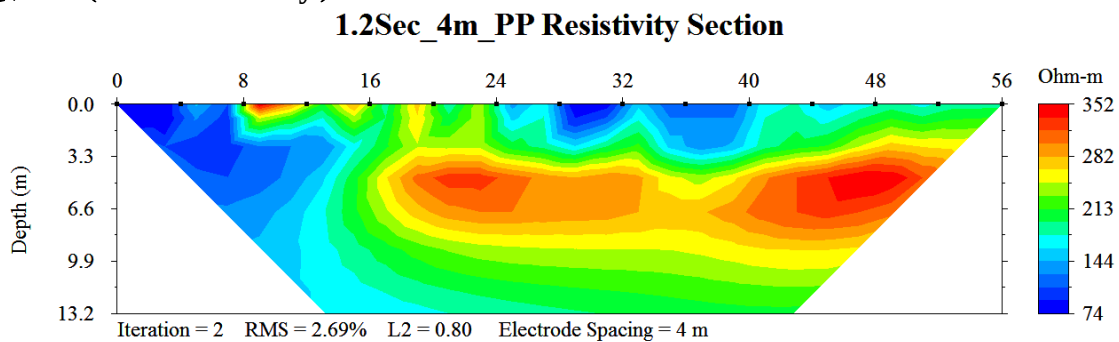


圖155、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 雙極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

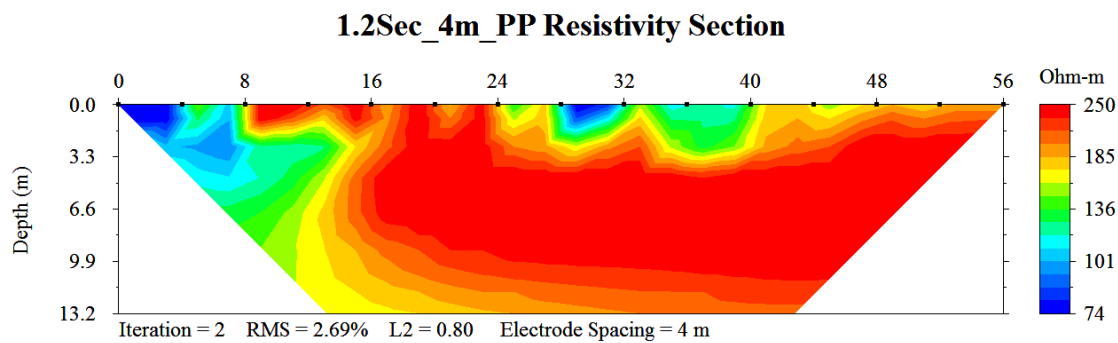


圖156、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 雙極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

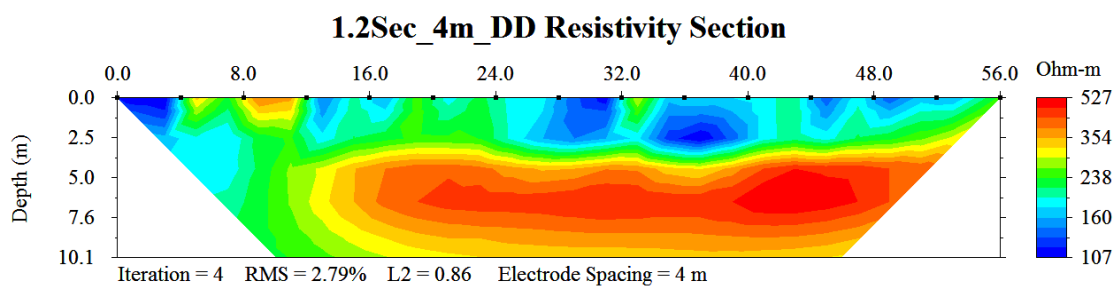


圖157、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

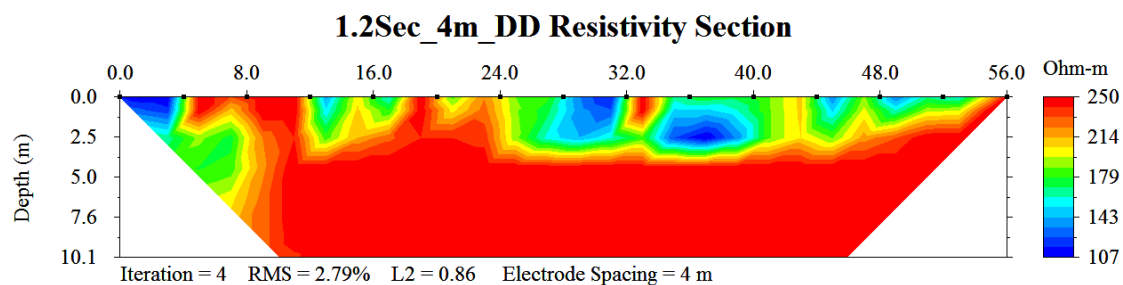


圖158、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

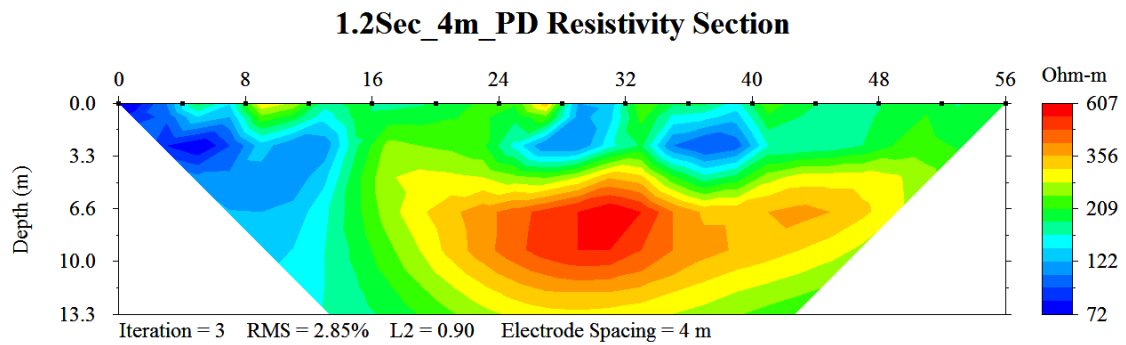


圖159、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 三極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

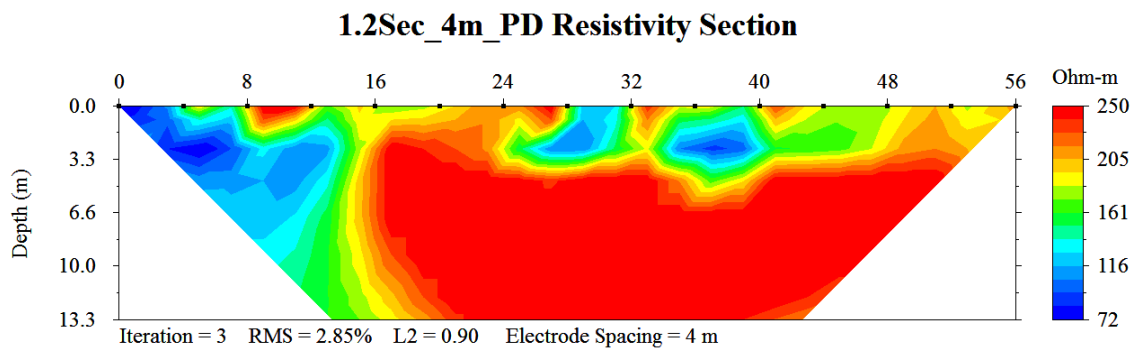


圖160、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 三極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

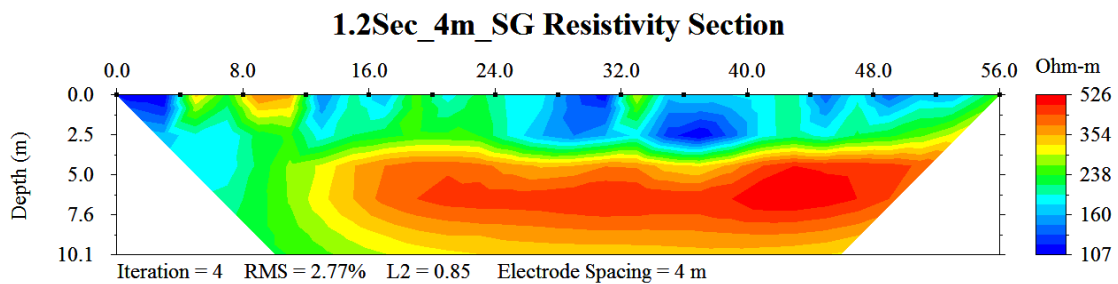


圖161、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

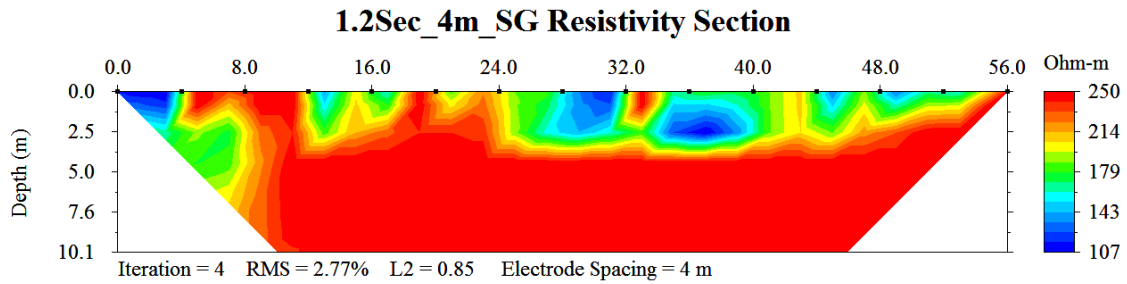


圖162、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

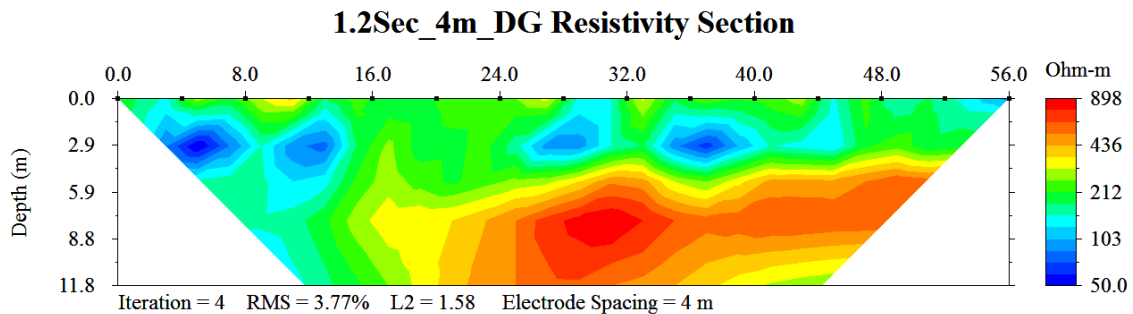


圖163、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

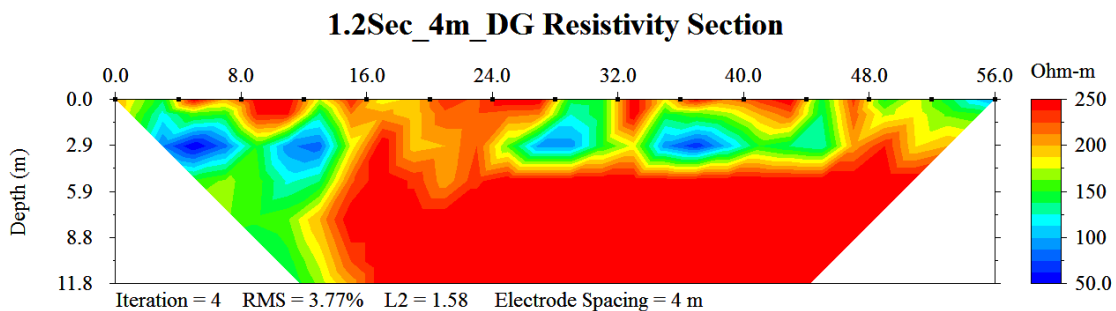


圖164、電極間距 4 公尺放電時間 1.2Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 151 至圖 164 為電極間距 4 公尺放電時間 1.2 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法(Strong-Gradient array)與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種

常見的電極排列法。

整體來看，隨著施測時間的增加，可以稍微抑制背景雜訊。色階變化並無法凸顯異常訊號，在大展距的施測模式下。表現最佳的電極排列法仍由 Dipole 系列表現最佳。三極法的解析度明顯高於二極法，且結果不會差於四極法的偶極系列電極排列法。

(3) 3.6 秒放電時間

溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)

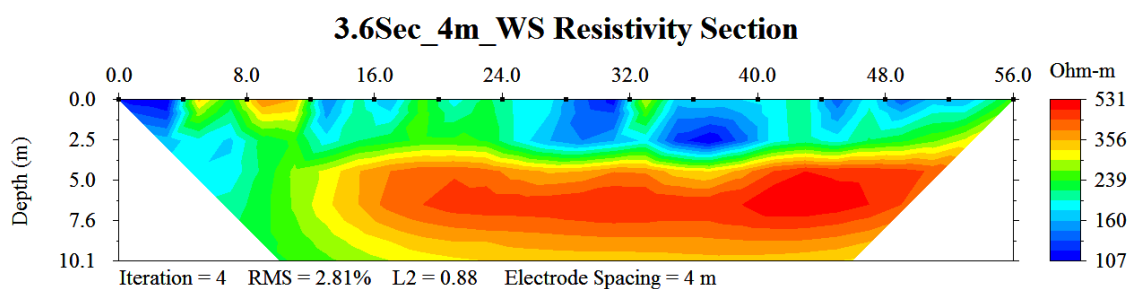


圖165、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Log Scale 色階)

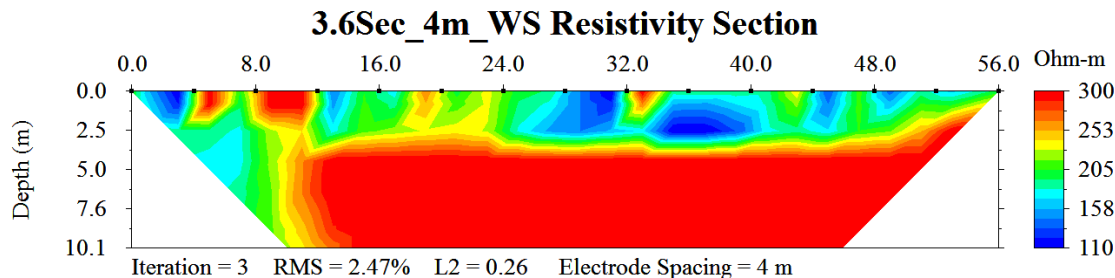


圖166、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 溫奈-施蘭卜吉法施測結果圖(Liner Scale 色階)

梯度法 (Edge-Gradient array)

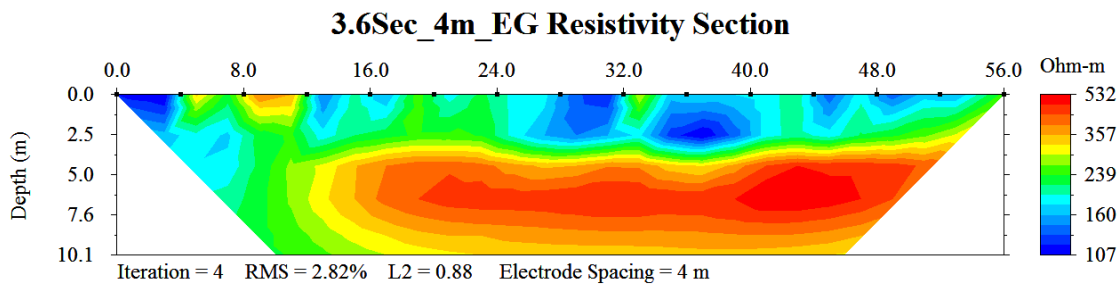


圖167、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

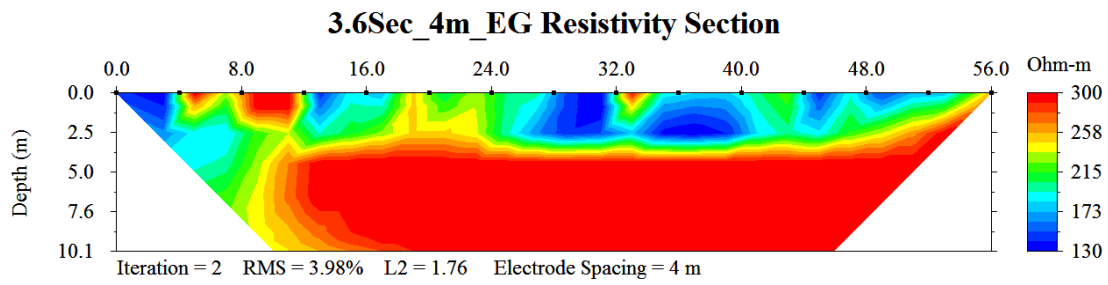


圖168、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

雙極法 (Pole-Pole array)

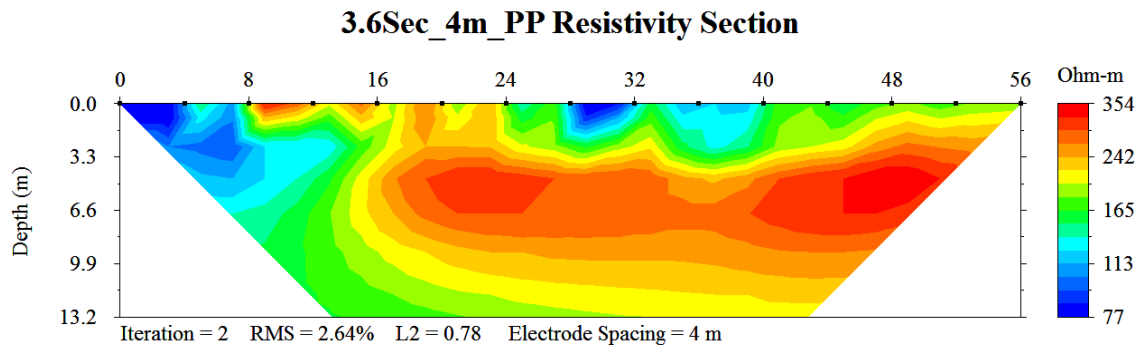


圖169、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 雙極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

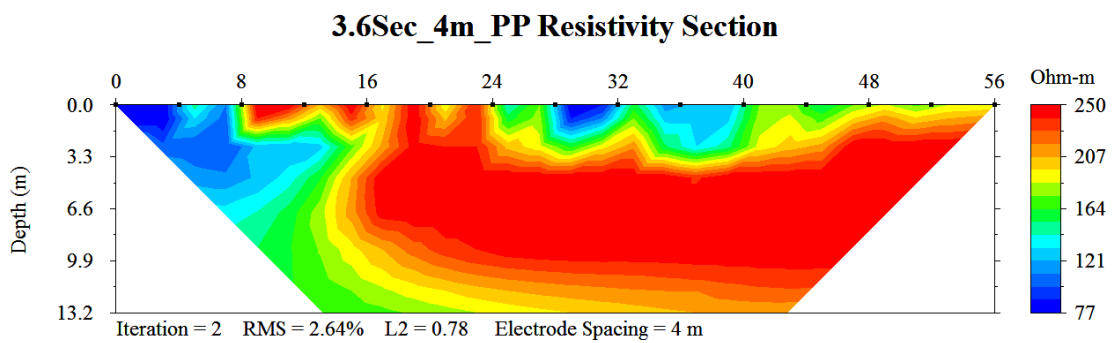


圖170、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 雙極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)

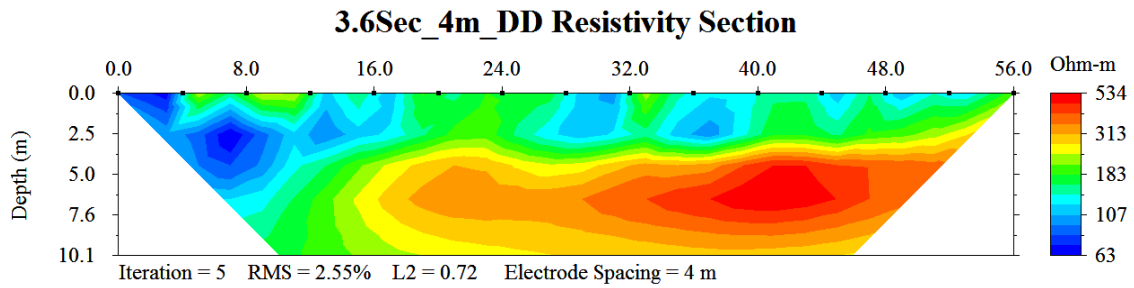


圖171、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 偶極偶極法施測結果圖(Log Scale 色階)

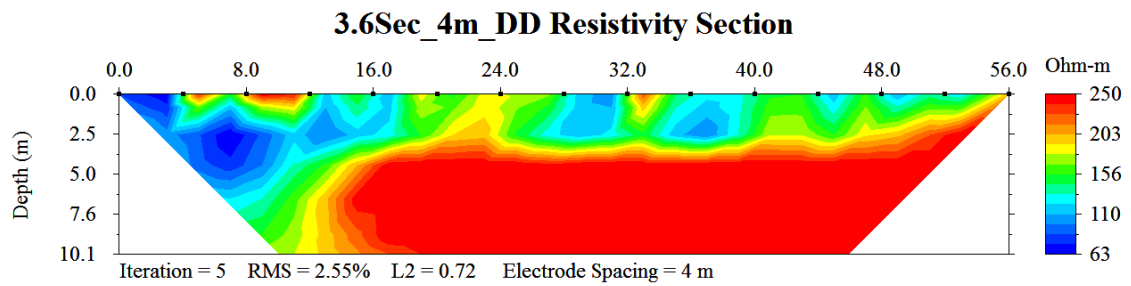


圖172、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 偶極偶極法施測結果圖(Liner Scale 色階)

三極法 (Pole-Dipole array)

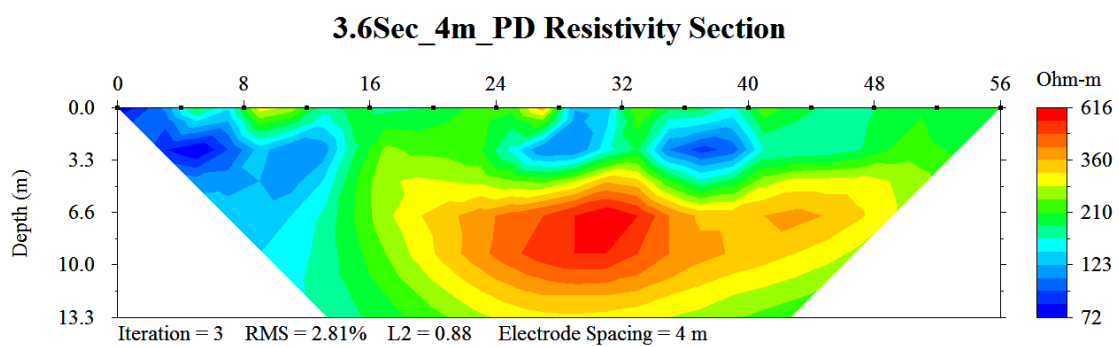


圖173、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 三極排列法施測結果圖(Log Scale 色階)

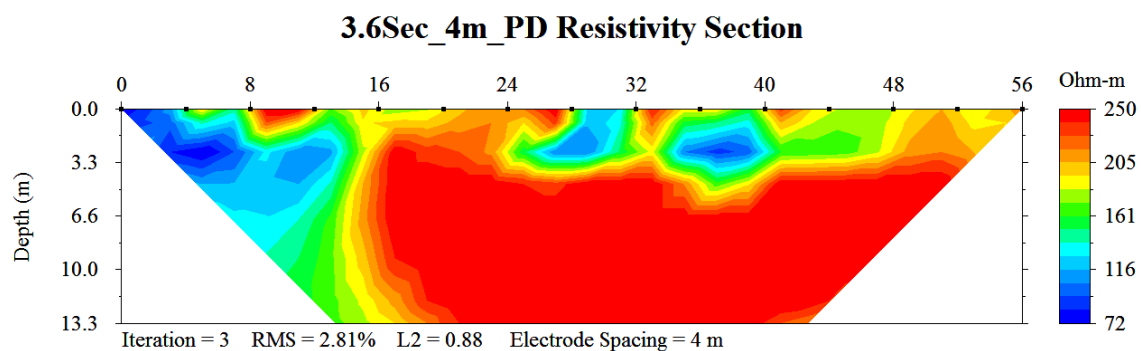


圖174、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 三極排列法施測結果圖(Liner Scale 色階)

快速梯度法(Strong-Gradient array)

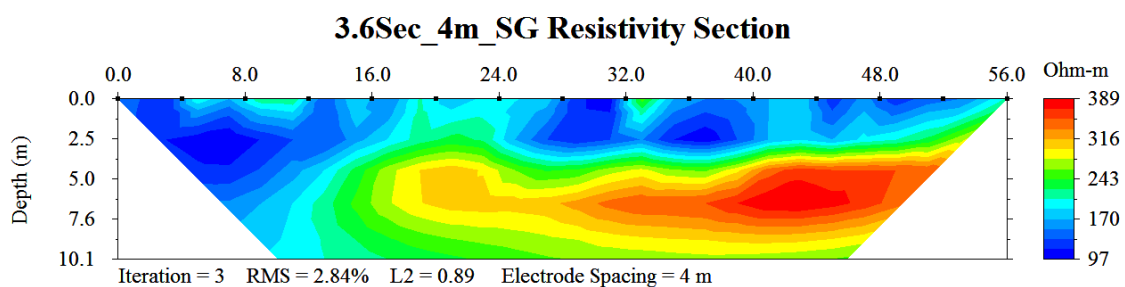


圖175、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 快速梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

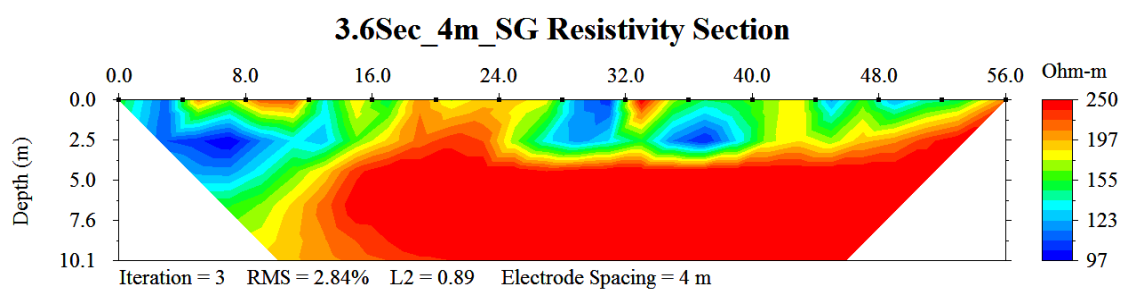


圖176、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 快速梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)

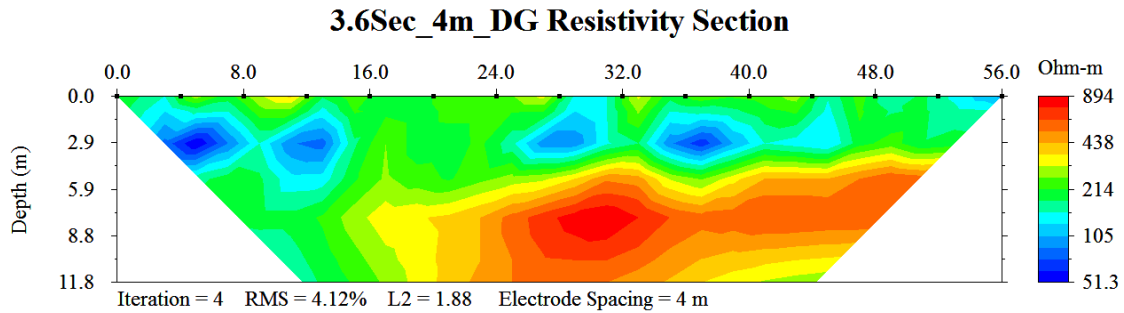


圖177、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 偶極梯度法施測結果圖(Log Scale 色階)

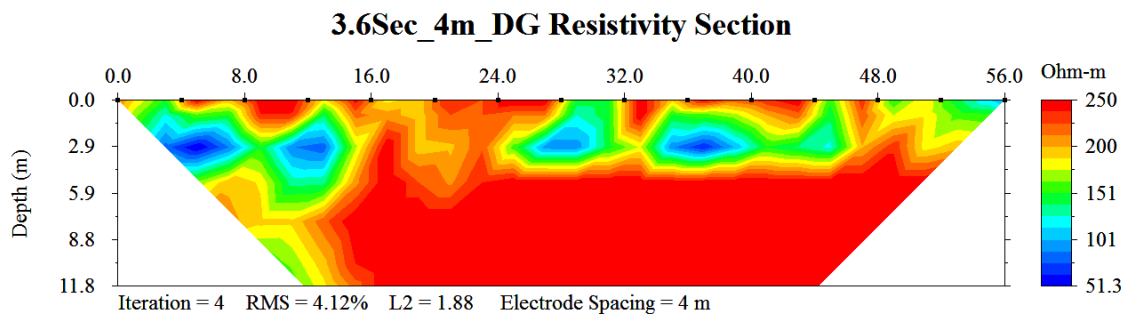


圖178、電極間距 4 公尺放電時間 3.6Sec 偶極梯度法施測結果圖(Liner Scale 色階)

圖 165 至圖 178 為電極間距 4 公尺放電時間 3.6 秒所得到各種電極排列之真實電阻率剖面圖，依序為溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法 (Strong-Gradient array) 與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等七種常見的電極排列法。

整體來看，隨著施測時間的增加，可以稍微抑制背景雜訊。色階變化並無法凸顯異常訊號，在大展距的施測模式下。表現最佳的電極排列法仍由 Dipole 系列表現最佳。三極法的解析度明顯高於二極法，且結果不會差於四極法的偶極系列電極排列法。溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array) 在大展距的情況下 3.6 秒的放電時間，其資料解析度亦有提高之趨勢。由圖 165 所示四個相對低電阻率之異常區，有因放電時間增加被突顯出來。

綜合上述不同量測時間、不同電極間距與不同電極排列法所得到量測結果，針對於四個尺寸不同的異常物進行解析，得到以下成果：在 1 公尺電極排列時，七種電極排列法溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）、梯度法（Edge-Gradient array）、雙極法（Pole-Pole array）、偶極偶極法（Dipole-Dipole array）、三極法（Pole-Dipole array）、快速梯度法（Strong-Gradient array）與偶極梯度法（Dipole-Gradient array）等常見的電極排列法，對於異常物的解析並無明顯的差異，其中溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）可以快速的將四個異常物解析出來，但解析度與解析異常物的形貌與呈現真實電阻率的能力仍略輸於偶極排列法系列，其中偶極梯度法（Dipole-Gradient array）表現最佳，綜合了偶極偶極法與梯度法的優點，梯度法對於形貌大小與真實電阻率呈現佳。令人驚艷的是快速梯度法，利用其他排列法施測時間的三分之一即可得到類似偶極梯度法（Dipole-Gradient array）的結果。增加電極間距，明顯可以看出各電極排列法解析度有明顯下降趨勢，尤其是解析最小的異常物，在不調整色階情況下，偶極系列排列法表現佳，然後是溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array），最後是二極排列法。在大間距施測時建議施測時間不要低於 1.2 秒，因為隨著放電時間增加，可以降低雜訊的干擾，以得到更加的資料品質。所以解析異常物重要的是電極間距其次是電極排列法，在短間距施測時較難分辨出電極排列法的優劣點，最大的差別便是施測時間，施測時間由長至短依序是偶極梯度法（Dipole-Gradient array）、溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）、偶極偶極法（Dipole-Dipole array）、梯度法（Edge-Gradient array）、三極法（Pole-Dipole array）、雙極法（Pole-Pole array）與時間最快的快速梯度法（Strong-Gradient array）。在大間距排列法就必須慎選電極排列法以得到最佳資料與解析度將異常物描繪出來。根據上述成果在時間金錢上選擇最佳野外工作的電極排列法為梯度法（Edge-Gradient array）/偶極偶極法（Dipole-Dipole array）、溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）與三極排列法（Pole-Dipole array）。不過仍須依照待測物的不同使用不同的電極排列法，例如量測地層地質結構，雙極法（Pole-Pole array）就是必須要的，因為雙極法（Pole-Pole array）的優點是在最短的電極排列可以達到最大的量測深度。在必須要快速時間就得到地下異常物的特性時快速梯度法（Strong-Gradient array）再搭配短電極間距即可達到效果。

所以在下階段感應極化法量測時選用最佳的偶極系列排列法搭配溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array），選擇最佳的感應極化法之電極排列。

3.6 感應極化法（Induced Polarization, IP）非極化電極材料試驗

傳統地電阻影像剖面主要是利用不鏽鋼電極棒收集兩電極間之電位差，經由計算而得到視電阻率值，並不考慮電極極化現象，而產生的誤差。為了瞭解地下複雜構造與得到更多地下地層物理參數，在環境與污染調查中除了傳統的直流電阻法外，更發展出感應極化法，目的是在複雜的地下環境中，能夠精準的調查出污染位置與範圍。

感應極化法(Induced Polarization, IP)在施測時，使用的非極化材料是非常重要的，本研究使用三種電極棒材料，作為施測時所使用的量測電位差的材料，依序為碳棒、普通不鏽鋼與硫酸銅電極棒等三種材料。並發展出雙電極（muti-electrode）收集法，目的為了得到感應極化法最佳品質的資料。國內早期使用感應極化法主要是使用單電極（signal-electrode）收集法，且使用不同電極材料作為電極，資料品質參差不齊。本研究希望藉由簡易標準場址的施測結果，未來提供給現場收集資料者，最佳的電極排列與最佳感應極化法施測材料與方法。



圖179、感應極化法之單電極施測法

圖 179 中表示傳統感應極化法中的單電極施測法，所謂單電極施測法顧名思義為此電極材料在施測中有時候為電流極，也有時候為電位極，電極材料若非極化電極，很有可能產生極化現象，會造成施測結果品質較差，帶來大量雜訊，出現假資料，增加誤判機會。

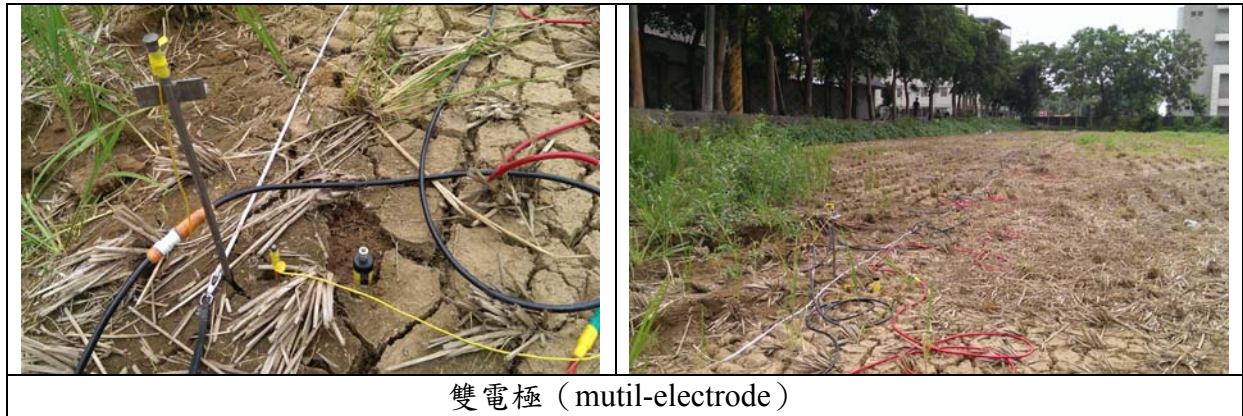


圖180、感應極化法之單電極施測法

圖 180 中表示本研究新發展的雙電極施測法，利用雙電極施測法進行感應極化法的量測。所謂雙電極施測法顧名思義為電位極材料與電流極材料不同，利用兩種不同電極材料的優勢進行感應極化法的量測。本研究利用不鏽鋼鐵棒作為電流極，利用其導電度佳與接地電阻低的特性，提供穩定電流，而電位極則選用三種材料依序為碳棒、不鏽鋼棒與硫酸銅電極棒。如圖 181 所示。

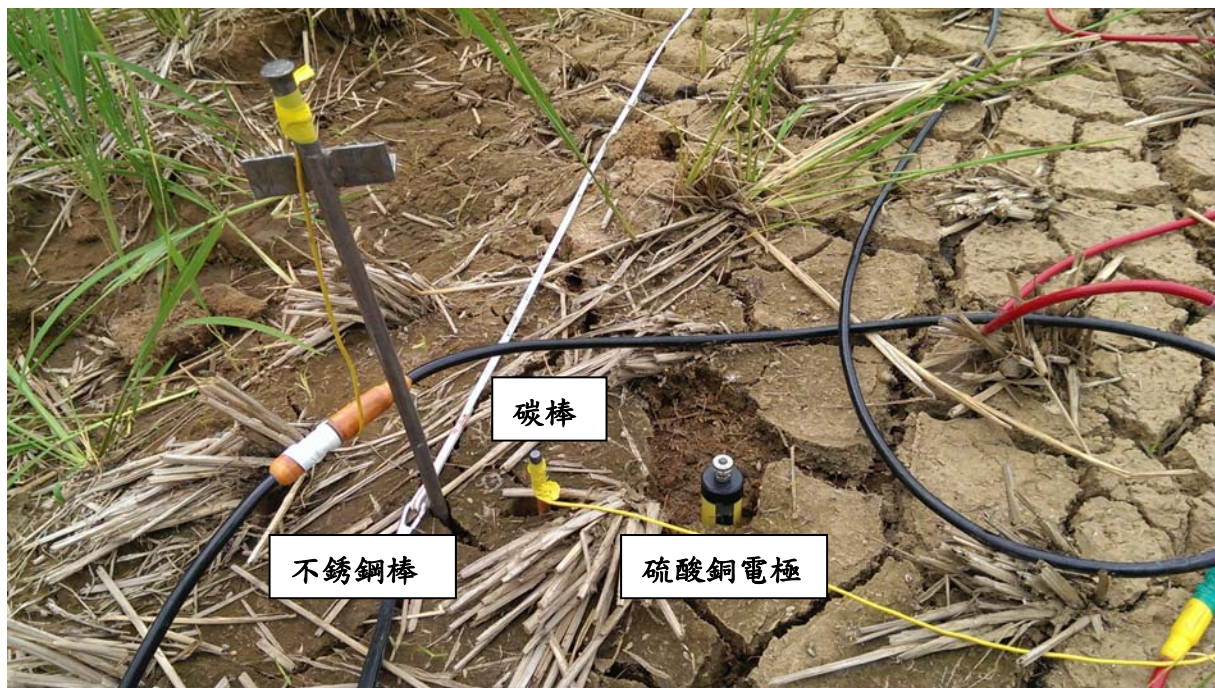


圖181、不同的電位極材料示意圖

本研究區域為標準之砂礫質地層，根據本文 3.1 節區域地質為中壠臺地，淺部地層

屬於第四紀更新世的紅土臺地堆積。上部為紅土層及下部礫石層組成。研究區域的井資料得知淺部地層中，表層為 3-5 公尺的紅土層，紅土層底為 10-20 公尺的礫石層，礫石層底下為細粒砂岩與黏土的交互層。此交互層深度約為 12-20 公尺。所以地層之電性反應為相對低電阻率-相對高電阻率-相對低電阻率三明治地層。標準之感應極化法電容率地層（IP-chagebility）則顯示礫石含量高(clay 比例低於 10%)則呈現相對低電容率(ms)地層，若黏土含量高則呈現相對於高電容率反應。下圖依序為使用雙電極施測法，不同電位極與不同電極排列結果，目的在選定最佳電極排列法與電極材料進行感應極化法施測。

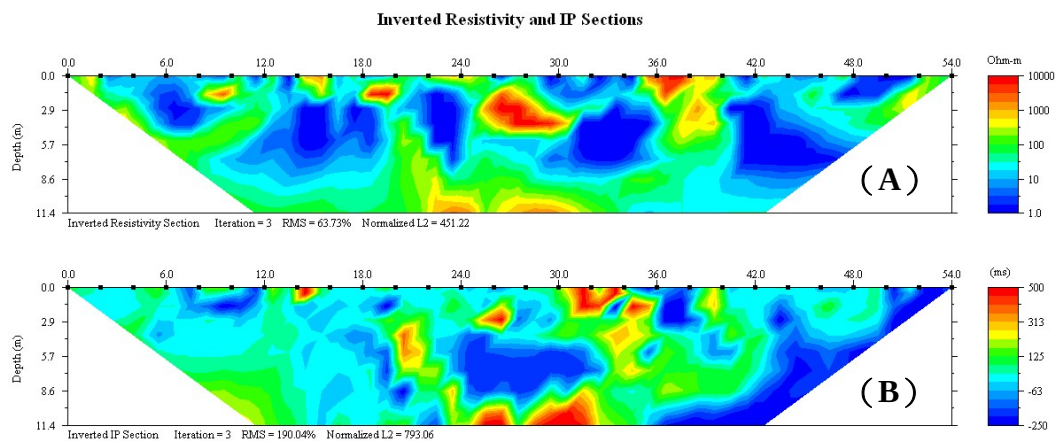


圖182、溫奈-施蘭卜吉法搭配碳棒施測之感應極化法結果圖

(A 為電阻率剖面圖；B 為感應極化法電容率圖)

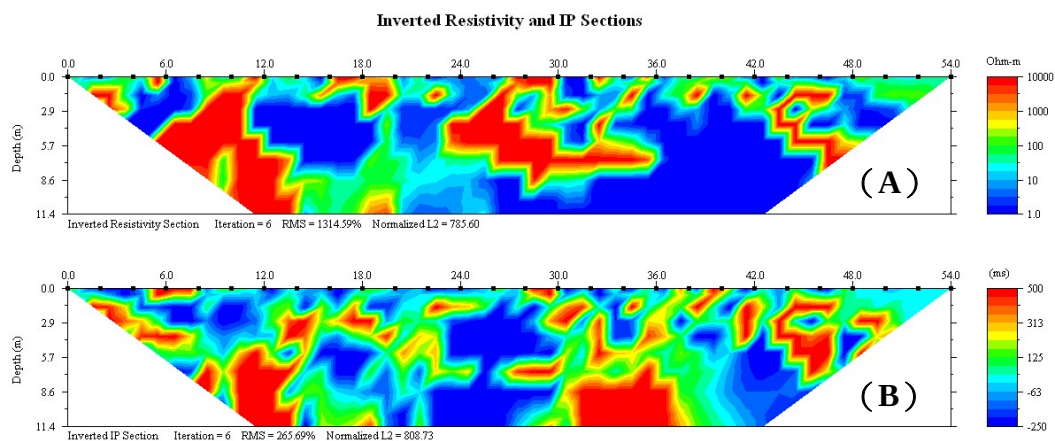


圖183、偶極偶極法搭配碳棒施測之感應極化法結果圖

(A 為電阻率剖面圖；B 為感應極化法電容率圖)

本研究選用溫奈-施蘭卜吉法與偶極偶極法兩種電極排列法搭配碳棒電位極施測感應極化法結果如圖 182 與圖 183 所示。資料結果非常差，完全無法使用的結果，建議未來施測感應極化法時不建議使用碳棒作為電位極材料。

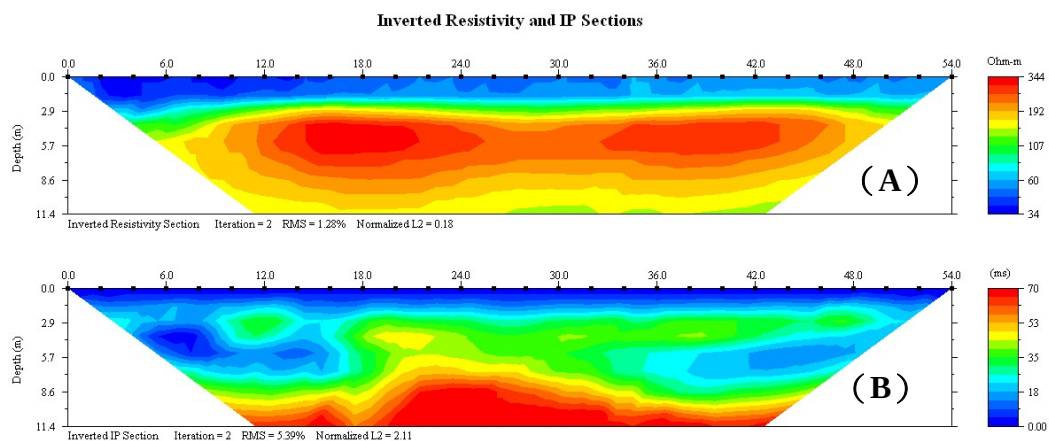


圖184、溫奈-施蘭卜吉法搭配不鏽鋼棒施測之感應極化法結果圖
(A 為電阻率剖面圖；B 為感應極化法電容率圖)

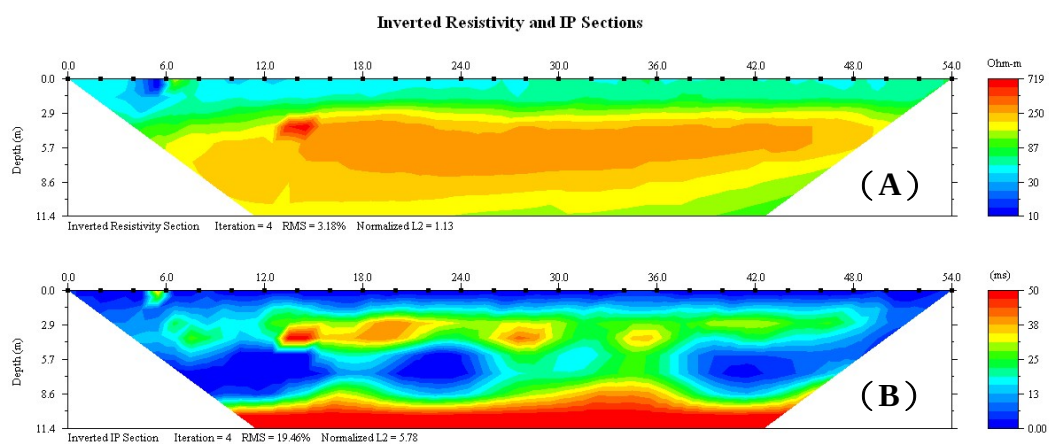


圖185、偶極偶極法搭配不鏽鋼棒施測之感應極化法結果圖
(A 為電阻率剖面圖；B 為感應極化法電容率圖)

圖 184 為溫奈-施蘭卜吉法搭配不鏽鋼棒施測之感應極化法結果圖，圖 A 為直流電

阻法所測得之電阻率剖面圖，而圖 B 為感應極化法所量測之 Chagebility 電容率剖面圖。利用此電極排列法與不鏽鋼鐵棒之結果比碳棒好非常多。但是淺層紅土層並未在電容率剖面圖出現，反而淺層雜訊較大，掩蓋了真實的低電阻率之紅土層。而圖 185 為偶極偶極法搭配不鏽鋼棒施測之感應極化法結果圖，深部超過 10 公尺電阻率下降，代表高電阻率之礫石層材料變少，取而代之為細顆粒之黏土夾砂層，所已呈現低電阻率高電容率之反應。而淺層 4 公尺內之紅土層片段出現在偶極偶極法搭配不鏽鋼棒施測之感應極化法結果圖 B。

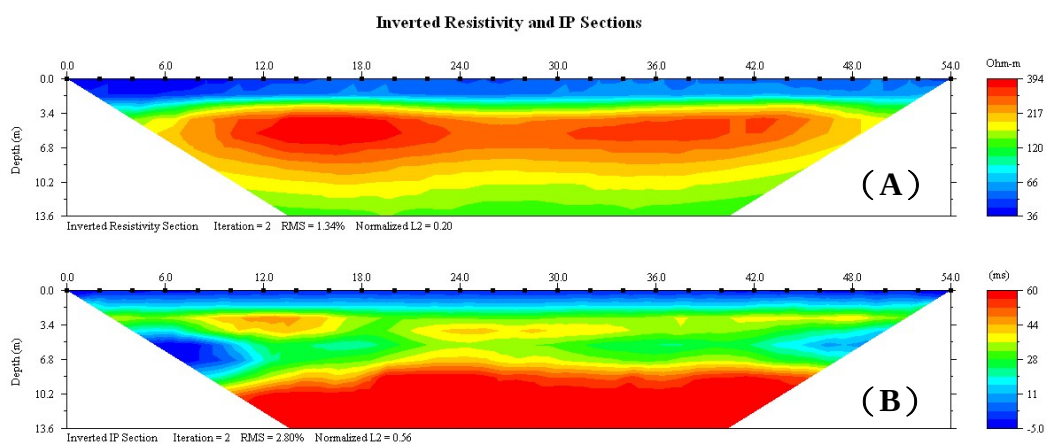


圖186、溫奈-施蘭卜吉法搭配硫酸銅電極施測之感應極化法結果圖

(A 為電阻率剖面圖；B 為感應極化法電容率圖)

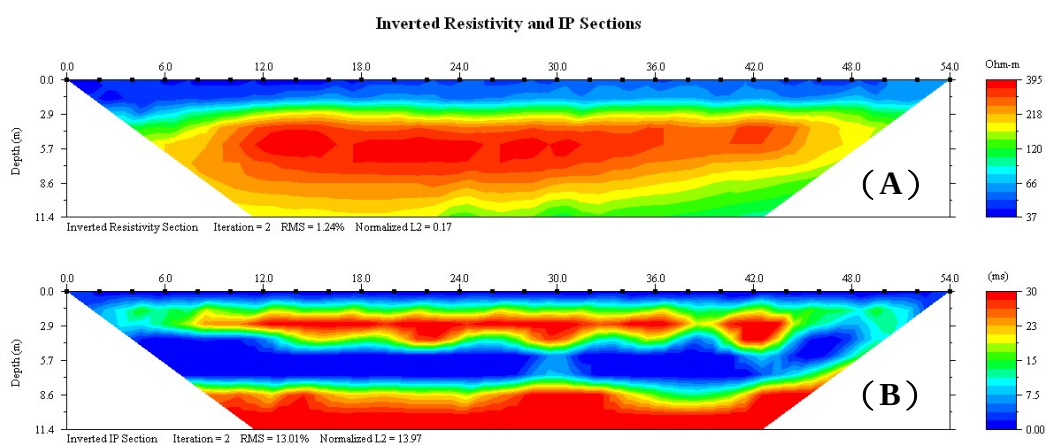


圖187、偶極偶極法搭配硫酸銅電極施測之感應極化法結果圖

(A 為電阻率剖面圖；B 為感應極化法電容率圖)

圖 186 為溫奈-施蘭卜吉法搭配硫酸銅電極施測之感應極化法結果圖，圖 A 為直流電阻法所測得之電阻率剖面圖，而圖 B 為感應極化法所量測之 Chargeability 電容率剖面圖。利用此電極排列法與硫酸銅電極之結果比碳棒跟不鏽鋼棒好非常多。但是淺層紅土層已在電容率剖面圖出現，淺層雜訊仍大，掩蓋了部分低電阻率之紅土層。而圖 187 為偶極偶極法搭配硫酸銅電極施測之感應極化法結果圖，深部超過 10 公尺電阻率下降，代表高電阻率之礫石層材料變少，取而代之為細顆粒之黏土夾砂層，所已呈現低電阻率高電容率之反應。而淺層 4 公尺內之紅土層完整出現在偶極偶極法搭配硫酸銅電極施測之感應極化法結果圖 B。

總合感應極化法結果與教科書 *Applied Geophysics* (2004) 的感應極化法 (Induced Polarization, IP) 結果吻合。礫石 chargeability(ms) 大約在 10(ms) 以下，可極化物質如黏土則超過 10 以上。不過此表主要是依據延遲時間 (delay time) 3 秒與脈波 (integration time) 1 秒所得到的結果，如果施測時間不同其所得到的 chargeability 值亦不相同，所以建議現場施測人員最好使用最佳放電延遲時間，以得到最佳值。

表5、感應極化法 (Induced Polarization, IP) 不同物質電容率 (chargeability) 索引

Material	Chargeability(ms)	Material	Chargeability(ms)
Pyrite (1%)	13.4	Volcanics	8~20
Chalcocite (1%)	13.2	Sandstone	3~12
Graphite (1%)	11.2	Gravels	3~9
Chalcopyrite (1%)	9.4	Alluvium	1~4
Galena (1%)	3.7	Limestone	< 1
Magnetite (1%)	2.2	Dolomite	< 1
Hematite (1%)	0.0	Granite	< 1
		Groundwater	0

Adapted from *Applied Geophysics* by Telford et al. The chargeability was measured with a charging time of 3s and an integration time of 1s.

3.7 污染場址案例施測

本試驗場址為一加油站污染案例，前期執行土壤污染調查工作，共採集 6 點且為連續採集土壤樣品至地下 3.60 m 處(地下水位介於地下 2.20-2.60 m)，其土壤樣品檢測結果如表 4.3-2(採樣點位分佈如圖 4.3-5)。本次土壤樣品檢測結果顯示土壤污染分佈仍集中於場址西南側及油槽區附近，其污染深度(1.20-1.50 m 及 2-3 m 處)多分佈於地下水位附近，主要為含水層土壤吸附相污染物。土壤採樣深度主要以 3-4 公尺為主，站內土壤濃度範圍介於 2,230-6,470 mg/kg，污染深度介於 1.6-3 m。標準井設井深度為 3.6-4 公尺，加油站內部苯及萘高染濃度區域集中於加油泵島內，濃度範圍分別介於 0.121-11.6 mg/L 及 0.84-1.06 mg/L，推測應為管線洩漏所致。經換管改善，地下水管制項目 TPH 仍然超過管制標準許多，所以推測仍有其他污染區域。所以利用本研究成果進行驗證，並預期能調查出其他的污染位置，提供整治相關地下地層參數。

本案例為一加油站污染調查，利用本研究成果實際進行調查。本次調查建立最佳加油站使用直流電阻法施測程序。第一於實驗室先建立現場干擾物模型，利用順演方程式進行模擬，以決定最佳測線佈置位置與範圍，減少干擾物的側向反應與映射現象，例如本實場調查，最大干擾來源為油槽，所以建立如圖 188 所示的模型，進行模擬施測，第二建議將直流電阻法施測最佳測線利用洗孔機器將第一層鋼筋混凝土刨除如圖 189 所示，第三選擇適當間距，由於本案例場址腹地小，目標物為油品類污染，建議施測間距必須小於 2 公尺，才能達到最佳解析，所以本案例施測選擇電極間距 1 公尺，如圖 190 所示。第四選擇使用雙電極施測方式，目的是希望獲得兩種物理量來描繪污染範圍，如圖 191 所示。第五進行參數選用：使用 3.6 秒放電時間與選擇溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array) 與梯度法 (Edge-Gradient array)，第六便是反算與推測異常區。

現場調查側線配置與相關工作進度進行成本分析，本場總共施測約 150 公尺地電阻影像剖面法測線。

1. 地面 RC 刨除工作總共花費 100,000 元整
2. 根據環保署補助原則電極間距 2 公尺以下 150 公尺施測費用約為 200,000 元整

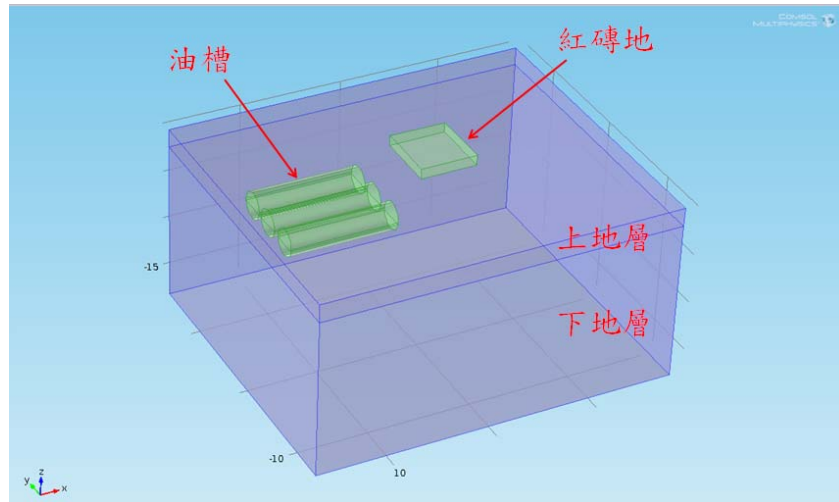


圖188、研究場址模擬示意圖



圖189、刨除干擾物（RC 結構），電極棒可完全接地示意圖



圖190、選擇適當間距

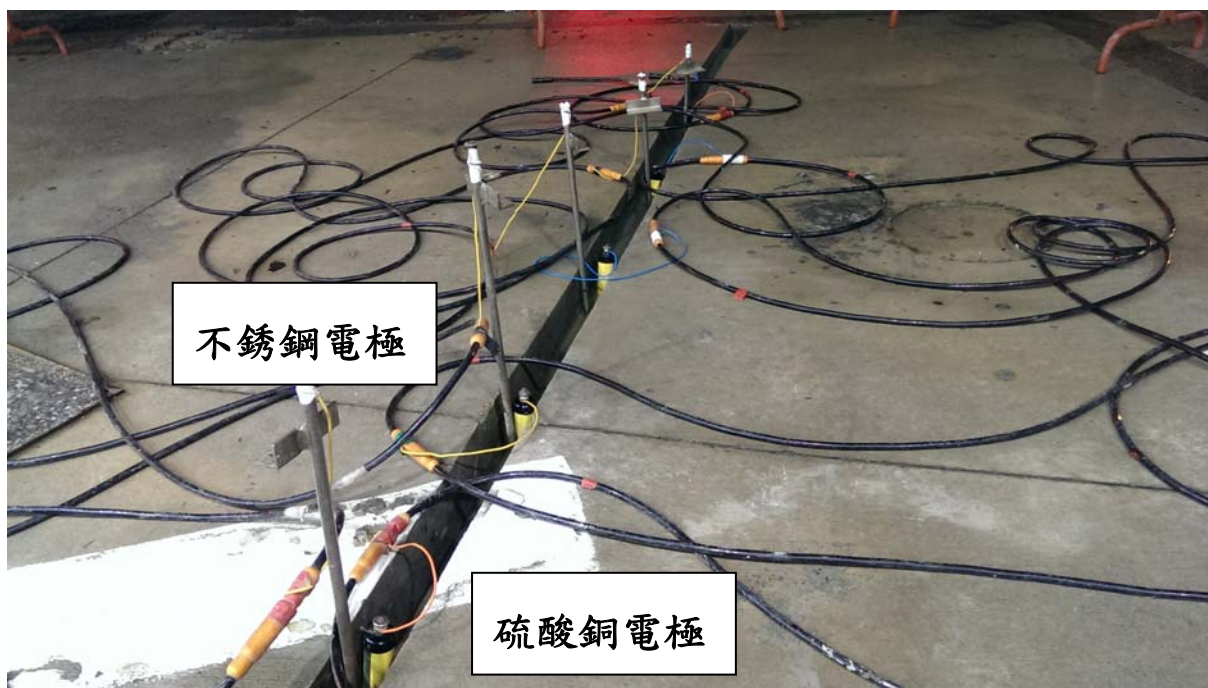


圖191、雙電極施測法示意圖(不銹鋼電極與硫酸銅電極聯測)

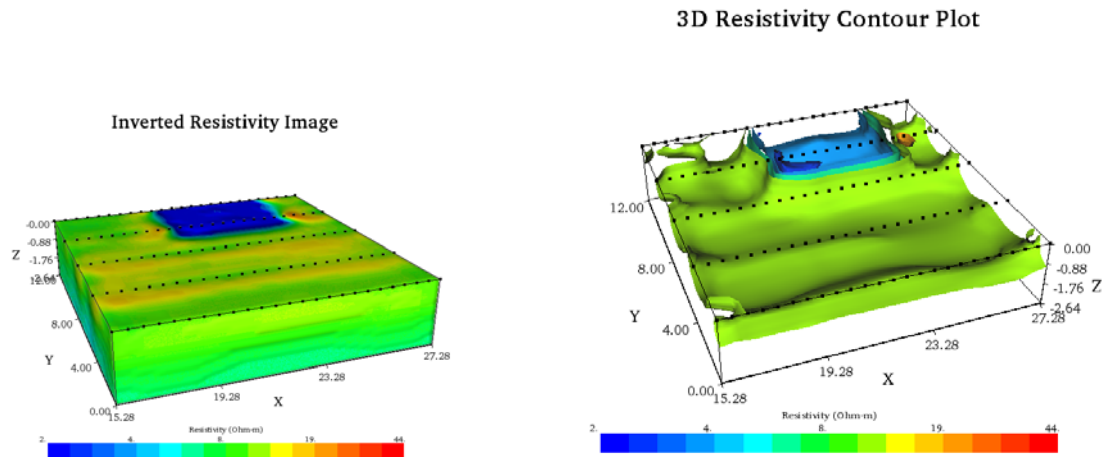


圖192、油槽干擾模擬結果

根據實驗室正算模擬結果如圖 192 所示，表示測線前緣的不銹鋼油槽並不會干擾地電阻影像剖面法的結果，唯一出現的異常區便是三維結果圖的上緣藍色的低電阻區域。所以代表利用地電阻影像剖面法於研究區域施做是可行的，並不會受到大型油槽的映射現場產生干擾，所以施測成果可信度可增加許多。

所以根據正算結果，所以進行實場調查。調查結果如下所示。

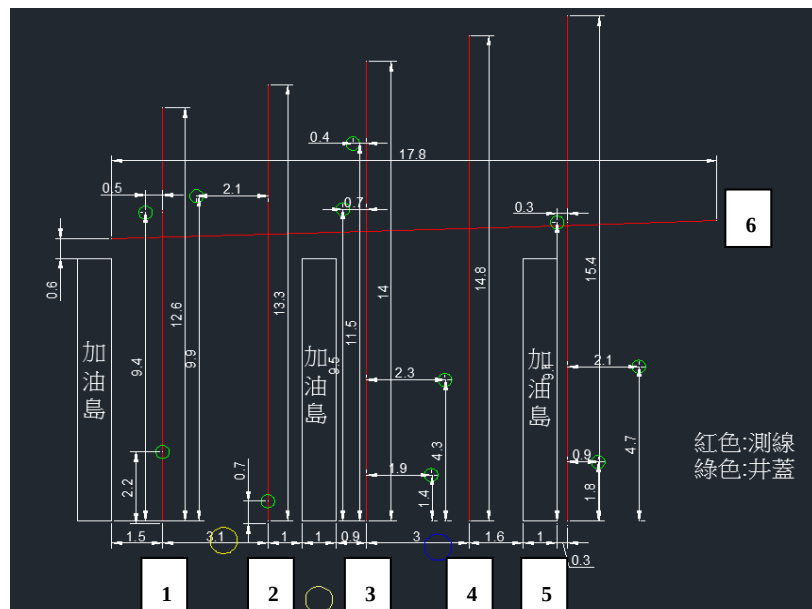
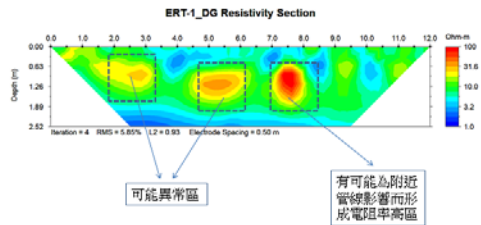


圖193、現場調查測線配置圖

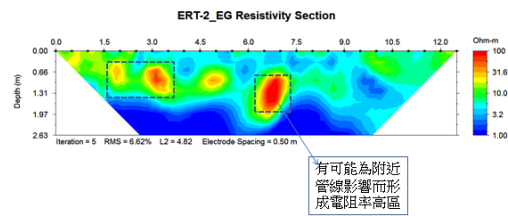
圖 193 為現場測線配置，根據溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array) 與梯度法 (Edge-Gradient array) 探測結果，污染主要範圍在測線 3 至 5 之間，相關探測結果如

下所示：

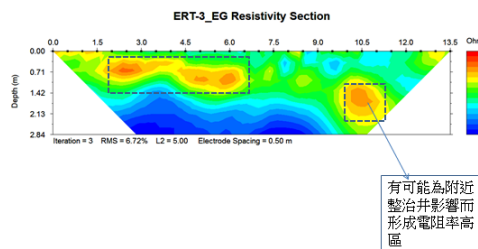
ERT-1 (Dipole-Gradient Array)



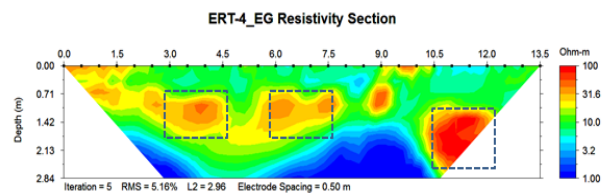
ERT-2 (Edge-Gradient Array)



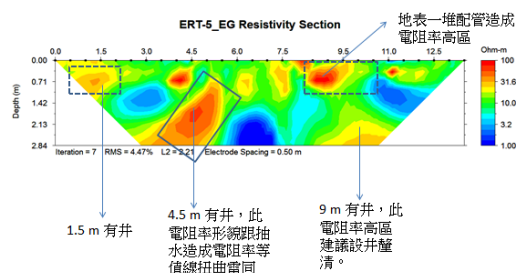
ERT-3 (Edge-Gradient Array)



ERT-4 (Edge-Gradient Array)



ERT-5 (Edge-Gradient Array)



ERT-6 (Edge-Gradient Array)

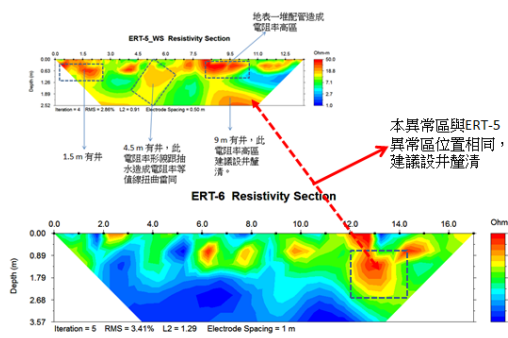


圖194、現場調查測線 1 至測線 6 成果圖

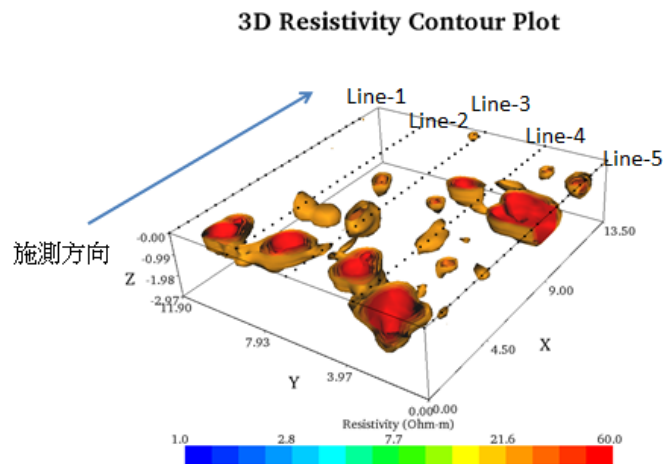


圖195、現場調查測線 1 至測線 5 三維併合逆推成果圖

根據圖 194 與 195 成果圖，本次施測地層背景約為綠色色階所代表之電阻率約 10-15 ohm-m，新鮮油品大致會呈現相對於地層較高之電阻率分佈，本次施測異常高電阻率區約為背景值 5 倍以上，主要分佈為 Line3 至 Line5 之間的區域。在根據感應極化法結果選擇出了三處具有高電阻率與高電容率反應，通常地層中電阻率不高便是低，到底哪一種電阻率分布屬於汙染物之物理特行，由於本區域汙染屬於高電阻率與高電容率之反應，所以選定測線後半段進行採樣驗證。(相關各測線利用不同電極排列法成果如附錄二所示) 本區域地下水深度特別淺，大約介於 0.8-1.5 公尺間。建議採樣深度為 0.7-1.5 公尺間。汙染最高的深度不論是土壤與地下水樣皆超過管制標準。

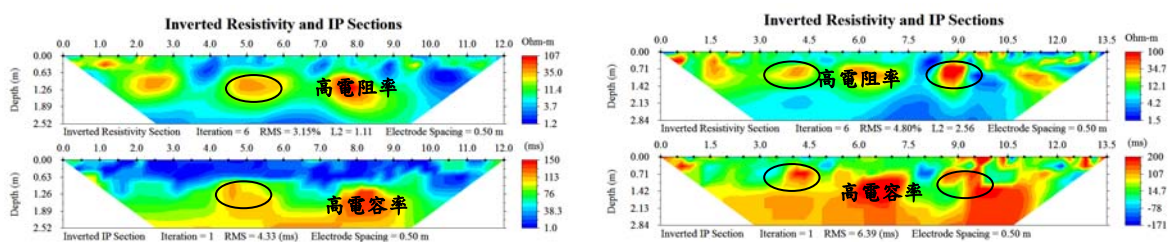


圖196、感應極化法探測結果

表6、地電阻影像剖面法異常區土壤採樣結果

樣品編號	檢驗項目	單位	土壤管制標準	SL-19	SL-20	SL-21
				1.0~1.5	2.0~3.0	4.5~5.0
SL-19	氯乙烷	mg/kg	10	ND	ND	ND
	反-1,2-二氯乙烷	mg/kg	50	ND	ND	ND
	順-1,2-二氯乙烷	mg/kg	7	ND	ND	ND
	三氯甲烷(氯仿)	mg/kg	100	ND	ND	ND
	四氯化碳	mg/kg	5	ND	ND	ND
	苯	mg/kg	5	ND	24.0	ND
SL-20	1,2-二氯乙烷	mg/kg	8	ND	ND	ND
	三氯乙烷	mg/kg	60	ND	ND	ND
	1,2-二氯丙烷	mg/kg	0.5	ND	ND	ND
	甲苯	mg/kg	500	ND	183	ND
	四氯乙烷	mg/kg	10	ND	ND	ND
	乙苯	mg/kg	250	ND	77.5	2.52
	二甲苯	mg/kg	500	ND	390	1.55
	1,3-二氯苯	mg/kg	100	ND	ND	ND
	1,2-二氯苯	mg/kg	100	ND	ND	ND
	總石油烴氫化合物(C6~C40)	mg/kg	1000	87.7	4,040	64.5
SL-21	灰黑砂	0.2~1.0m: 18.2/82.1	表面0.2m: RC			
	灰黑砂	1.0~1.5m: 425/6,300*	1.5m下有鋪面			
	灰黑砂	0.2~1.0m: 237/19.7	表面0.2m: RC			
	黃褐砂	1.0~2.0m: 1,089/27,000	--			
	灰黑砂	2.0~3.0m: 1,089/33,000*	--			
	黃褐砂	3.0~4.0m: 295/235	--			
SL-20	灰黑砂	4.0~4.5m: 275/2,500	--			
	灰黑砂	4.5~5.0m: 610/3,900*	--			
	灰黑砂	5.0~5.5m: 115/110	--			
	灰黑砂	5.5~6.0m: 106/47.0	--			
	黃褐砂	0.2~1.0m: 65.0/28.2	表面0.2m: RC			
	灰黑砂	1.0~2.0m: 1,485/140,000*	--			
SL-21	灰黑砂	2.0~2.7m: 1,030/13,000	2.7m下有鋪面			
	灰黑砂	2.7~3.0m: 1,030/13,000	--			

註：粗黑星號表示這樣土段。

註：1. 檢測值低於定量偵測極限之測定以“ND”表示。

2. 二甲苯=間-對-二甲苯+鄰-二甲苯。

表7、地電阻影像剖面法異常區地下水採樣結果

樣品編號	MDL	單位	地下水(第二類)管制標準	LG-19	LG-20	LG-21
檢驗項目				G10209130301	G10209130501	G10209130601
採樣深度	-	m	-	1.60	1.50	1.60
水位	-	m	-	0.66	0.57	0.66
水溫	-	℃	-	29.6	29.6	30.0
pH	-	-	-	8.47	7.14	7.21
導電度	-	µmho/cm	-	3,180	760	1,684
溶氧	-	mg/L	-	3.82	0.64	1.86
氧化還原電位	-	mV	-	-81	-121	-98
總酚	0.0009	mg/L	0.14	0.0520	0.0146	0.0590
苯	0.00076	mg/L	0.05	0.163	1.66	8.63
乙苯	0.00068	mg/L	7.0	0.0264	2.90	2.18
二甲苯	0.00211	mg/L	100	0.0857	7.83	6.79
苯	0.00058	mg/L	0.40	<0.0100	0.674	0.397
甲苯	0.00069	mg/L	10	0.0710	8.92	5.29
三氯乙烷	0.00073	mg/L	0.050	<0.0100	<0.100	<0.0100
石油烴氫化合物	0.500 ^a	mg/L	10	<0.500	<0.500	<0.500

註：1. 檢測值低於方法偵測極限之測定以“ND”表示。

2. 檢測值高於方法偵測極限，但小於可定量極限值(QDL)，以“<QDL”表示。

3. 二甲苯=間-對-二甲苯+鄰-二甲苯。

根據表六與表七土壤及地下水採樣結果，三處異常區採樣結果地下水之苯皆超過管制標準 1000 倍以上，最嚴重一處土壤亦呈現超過管制標準之狀態。

所以本場址成功利用地電阻影像剖面法與感應極化法，成功將地下污染給描繪出來，成功原因是：先利用有限元素法模擬各測線在加油站施測時，是否會有映射與干擾問題，並利用最佳電極間距 0.5 公尺，獲得最佳電性地層解析度。根據本研究在標準試驗場址調查中，電極間距的選擇是非常重要的，選擇適當電極間距與電極排列法是關係到野外調查的成敗。最後發展出雙電極施測法進行感應極化法，同時間接收電阻率與電容率資料，以提高異常區之可信度，增加命中污染源的機會。

此研究成果除了應用在油品類污染外，亦嘗試利用雙電極排列法使用在含氯污染的場址內，本研究選擇北部一含氯污染場址進行試驗，下圖為試驗成果：

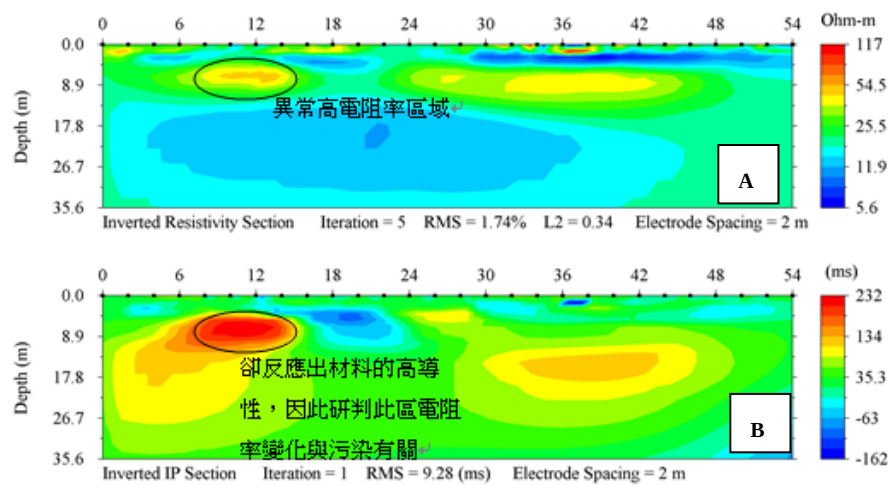


圖 197、利用雙電極施測法於含氯場址逆推成果圖

(A 為地電阻影像剖面法結果圖；B 為感應極化法結果圖)



圖 198、雙電極施測模試驗場照片圖

本項工作主要目的係為利用本研究方法，應用於污染場址之調查驗證作業及整治成效評估之可行性及效益。需選擇整治場址進行地球物理探勘，並搭配土壤及地下水採樣檢測，藉以比較整治前或整治中與整治後之地球物理探勘結果，以瞭解地球物理探勘技術於不同污染場址中作為整治成效驗證方法之能力，提供後續執行相關作業之參考。

本調查利用雙電極施測方法，搭配 2 公尺內電極間距，利用 Dipole 系列電極排列法進行探測調查，所得到結果如圖 197 所示，本次調查研究主要是在砂礫質地層調查含氯污染，由於含氯污染在電阻率索引表中屬於相對高物質電阻率，而砂礫質地層因為顆粒

較大，亦屬於相對高電阻率圖譜形式出現在電性地層中。所以在高電阻率中找高電阻率並不容易，故本研究利用感應極化法進行輔助調查，期望利用此項技術增加對於電性地層的瞭解。

根據圖 197 中出現兩異常高電阻率圈，一是測線前段水平距離 10-12 公尺，深度在約 8 公尺左右，另一異常區域出現在測線後半段，水平距離約 36-40 公尺，深度約 8.9 公尺。但是在感應極化法 chargeability 圖譜中只有在前半段異常高電阻率圈中，出現超過 chargeability 超過 100 ms 之現象，而後半段異常區域並無明顯 chargeability 異常現象，呈現 30ms 以下現象，此值與背景地質相符合。經監測井驗證測線前段異常高電阻率圈，為監測井 A47，採樣結果驗出三氯乙烯 0.922ppm，四氯乙烯 0.0566ppm，1,1,2 三氯乙烷 1.11ppm，探測結果顯示在地下水位面以下之地層電阻率亦有異常偏高的現象，此可作為後續監測與地物方法成效評估之用。A47 井井深 11 公尺，經採井底水樣進行分析，另檢出 1,2-二氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、氯乙烯等污染物，濃度皆超過管制標準，與地電阻影像剖面法中所標定異常高電阻區域之深度相當吻合。

限制條件:

1. 加油站施測時，若無將 RC 鋪面刨除，不建議使用使用直流電阻法探測。
2. 進行地電阻影像剖面法施測時，若是地下有儲槽或是地基時，建議先使用透地雷達先行掃描，避免此三維人工建築物之地阻率映射至二維電阻率剖面中，以免誤判資料。建議在複雜地下構造施測時，先行建立地下正算模型與電阻率正算剖面。
3. 油品類或是含氯汙染避免使用大間距施測，不然無法解析汙染物質電阻率，汙染屋電阻率會被地層背景電阻率掩蓋。
4. 在礫石層進行汙染物調查時，建議不要單一使用直流電阻法施測，建議搭配其他物理量調查方式，例如感應極化法，或是其他調查技術，不然誤判機率大。
5. 地形起伏過大區域與超高壓電下方並不建議使用直流電阻法。

第四章 研究成果與未來建議

4.1 主要研究成果

4.1.1 實驗室數值的模擬結果

Pole-Pole 電極排列法

這種電極排列在野外可以簡單且自動地收集資料並快速地確認資料品質，但此種排列必須配置兩個遠極，使得可施測的場址受到限制，這種排列法的異常物響應值和信號雜訊比可能相對高或低，此取決於地質模型，與其他排列法比較，其理論的雜訊一般來說屬於中等程度，但是它的解析度在5種排列法中是屬於較低的。此外施測區域周圍的雜訊可能被遠電位極所收到，這並不包含在本文所提及的模型之內。

Pole-Dipole 電極排列法

儘管這兩種排列法仍存在中度的異常物響應值與相對低的信號雜訊比，但仍可產生較 Pole-Pole 電極排列法、Wenner-Schlumberger 電極排列法為佳的空間解析影像。在一些解析度有遺漏的區域，可以得到略佳的訊號雜訊比，這是因逐漸增加的電位極間距可以有效地減少雜訊的干擾以獲得顯著的量測訊號。但缺點是必須使用一個遠極，因此限制了部分場址的適用性，而遠電位極因雜訊較高所事，使經由量測對應點確認資料品質的情形複雜化。

Wenner-Schlumberger 電極排列法

這種排列法具有相似的成像能力，因為它們的量測方法與電場相似。它們與其他排列法相較的主要優勢在於較佳的深度研判能力。Wenner-Schlumberger 電極排列法可視為傳統 Schlumberger 電極排列法中的一種特別排列方式，一般來說它比傳統 Schlumberger 電極排列法及其他排列法具有較低的雜訊影響與較佳的訊號雜訊比，但是 Wenner-Schlumberger 電極排列法的解析能力卻較 Pole-Dipole 電極排列法、Dipole-Dipole 電極排列法略差，即使在微小的雜訊抑制時也可以提供較佳的影像解析能力。當我們為了檢驗資料品質而使用相互測量法是，

Wenner-Schlumberger 電極排列法互補型的排列則有比一般基本型排列法具有較高雜訊抑制的傾向。這種排列法 Wenner-Schlumberger 排列法使用多波道收集資料時的一種限制，因為 Wenner-Schlumberger 排列法需要利用許多量測波道，亦即施測時間為五種排列法中最高。

Dipole-Dipole 電極排列法

一般來說，與其他排列法相較，Dipole-Dipole 電極排列法具有相對較高的異常物響應值，但是也有著被雜訊干擾的高風險，與 Wenner-Schlumberger 排列法與 Edge-Gradient 電極排列法等排列法相較，它常常製造出一個低的訊號雜訊比的結果。Dipole-Dipole 電極排列法這種排列法都具有對稱電極配置，可用於正常的量測方法或對稱的量測方法，這有利於資料品質的控制以獲得可信賴且解析度佳的影像。Dipole-Dipole 電極排列法的影像解析能力可與 Pole-Dipole 電極排列法並駕其驅，且比其他排列法為佳，尤其是一些垂直構造與有傾角的結構，但深度的解析度卻不是最佳的。這種排列法與其他排列相較對於空間誤差(Zhou and Dahlin 2003)與存在的三維地質(物或構造) (Dahlin and Loke 1997)是相當敏感的，參數 n 在模擬中設定為 6，並不適合再用更高的數值，因為將導致非常低的訊號雜信比。

Edge-Gradient 電極排列法

這種排列都適合使用多波道儀器收進資料。數值模擬的結果顯示 Edge-Gradient 電極排列法量測結果可提供與 Pole-Dipole 電極排列法和 Dipole-Dipole 電極排列法相似的影像。勝至還要更高之地層解析度，使用有效率的多波道儀器收集此排列法具有高經濟性與高解析的結果。唯一缺點為此排列法非對稱性排列法，建議現場施測時搭配對稱性佳之電極排列法施測，以達到最佳功效。

本研究推薦 Edge-Gradient 電極排列法，Edge-Gradient 電極排列法是理想的多波道記錄的排列法。因最後的選擇則需視野外場址的情況與目標物而定，Wenner-Schlumberger 排列法具有良好的資料品質，但因本身排列法解析度限制的

因素所致，對於相對高的異常物響應、高的訊號雜信比與低的雜訊干擾，解析影像無法呈現最佳狀況，但其擁有最強能量與最佳資料品質。

4.1.2 試驗場址調查選擇最佳施測間距與最佳電極排列

1. 量測時間

由於直流電阻法發射人工電場，是以方塊波形式出現。所以放電時間會影響現場資料品質。綜合現地施測結果，在良好環境，例如電極接地電阻皆小於 100 ohm 以下，在 1 公尺電極間距下施測，放電時間的大小如 0.8 秒、1.2 秒與 3.6 秒，七種電極排列法溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、雙極法 (Pole-Pole array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、三極法 (Pole-Dipole array)、快速梯度法 (Strong-Gradient array) 與偶極梯度法 (Dipole-Gradient array) 等常見的電極排列法，對於異常物的解析並無明顯的差異。增加電極間距，明顯可以看出各電極排列法解析度有明顯下降趨勢，尤其是解析最小的異常物。接地電阻在大於 100 ohm 以上，不建議使用 1.2 秒以下之放電時間，以維持資料品質與可信度。

2. 電極間距

1 公尺的電極間距下，1.2 秒以上放電時間，七種電極排列皆有良好的地層與異常物的解析；2 公尺的電極間距與 1.2 秒以上的放電時間，部分電極排列法對於地層與異常物具有兩好的解析度；4 公尺的電極間距與 1.2 秒以上的放電時間，僅有特定的電極排列法具有異常物的解析度，而僅對於地層地質的解析，七種電極排列法皆可將砂礫質地層解析出低高低的地質材料。

3. 電極排列法

在不調整色階情況下，偶極系列排列法表現佳，然後是溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)，最後是二極排列法。在大間距施測時建議施測時間不要低於 1.2 秒，因為隨著放電時間增加，可以降低雜訊的干擾，以得到更加的資料品質。施測時間由長至短依序是偶極梯度法 (Dipole-Gradient array)、溫奈-施蘭卜吉法 (Wenner-Shlumberger array)、偶極偶極法 (Dipole-Dipole array)、梯度法 (Edge-Gradient array)、三極法 (Pole-Dipole array)、雙極法

(Pole-Pole array) 與時間最快的快速梯度法(Strong-Gradient array)。在大間距排列法就必須慎選電極排列法以得到最佳資料與解析度將異常物描繪出來。根據上述成果在時間金錢上選擇最佳野外工作的電極排列法為梯度法(Edge-Gradient array)/偶極偶極法(Dipole-Dipole array)、溫奈-施蘭卜吉法(Wenner-Shlumberger array)與三極排列法(Pole-Dipole array)。不過仍須依照待測物的不同使用不同的電極排列法，例如量測地層地質結構，雙極法(Pole-Pole array)就是必須要的，因為雙極法(Pole-Pole array)的優點是在最短的電極排列可以達到最大的量測深度。在必須要快速時間就得到地下異常物的特性時快速梯度法(Strong-Gradient array)再搭配短電極間距即可達到效果。

4.1.3 感應極化法調查成果

利用感應極化法施做時建議使用本研究所發展出的雙電極施測法，其中電流極利用不銹鋼電極棒，而電位極電極棒則使用非極化電極：硫酸銅電極。建議搭配 Dipole 系列的電極排列法，其中是偶極偶極法(Dipole-Dipole)與梯度法(Edge-Gradient array)為首選，其次是溫奈-施蘭卜吉法(Wenner-Shlumberger array)，其他方法不建議搭配感應極化法施做。電位極材料建議使用非極化電極硫酸銅電極，其他電極材料如碳棒或是不銹鋼棒接不建議。根據 Applied Geophysics/telford (2004)的建議在使用 chargeability (ms) 與材料對照表時會因為依據延遲時間(delay time) 3 秒與脈波(intergration time) 1 秒所得到的結果，如果施測時間不同其所得到的 chargeability 值亦不相同，所以建議現場施測人員最好使用最佳放電延遲時間，以得到最佳值。建議的最佳值參數為延遲時間(delay time) 3 秒與脈波(intergration time) 1 秒。

4.1.4 加油站調查建議程序

本次調查建立最佳加油站使用直流電阻法施測程序。第一於實驗室先建立現場干擾物模型，利用順演方程式進行模擬，以決定最佳測線佈置位置與範圍，減少干擾物的側向反應與映射現象，例如本實場調查，最大干擾來源為油槽，所以建立如圖 188 所示的模型，進行模擬施測，第二建議將直流電阻法施測最佳測線利用洗孔機器將第一層鋼筋混凝土刨除如圖 189 所示，第三選擇適當間距，由於本案例場址腹地小，目標物為油品類汙染，建議施測間距必須小於 2 公尺，才能達到最佳解析，所以本案例施測選擇電極間距 1 公尺，如圖 190 所示。第四選擇使用雙電極施測方式，目的是希望獲得兩種物理量來描繪污染範圍，如圖 191 所示。第五進行參數選用：使用 3.6 秒放電時間與選擇溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）與梯度法（Edge-Gradient array），第六便是反算與推測異常區。

根據油品類與含氯場址現場實證調查結果，油品污染與含氯污染皆呈現與背景地質相對高 chargeability (ms) 的現象。實場調查最佳電極間距為 2 公尺以下。應用土壤與地下水調查最佳電極排列法為偶極梯度法（Dipole-Gradient array）、梯度法（Edge-Gradient array）與溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）等三種方法，其他電極排列在不同的待測物搭配使用。

4.2 未來建議

1. 本研究場址污染濃度剛好都在 0.9ppm 以上，不管是苯或是三氯乙烯等污染物，未來建議選擇低於 0.5 ppm 以下的污染場址，進行場址調查建立直流電阻法對於污染場址調查的極限。
2. 建議未來調查增加感應極化法(IP)為基本調查項目，其對於油品與含氯污染皆有較佳的解析。期望未來發展井內感應極化法調查技術，應用於深部污染區域，例如潭子工業區或是頭份中港溪區域。

4.3 結論

1. 最佳探測方法本研究建議使用 Edge-Gradient 電極排列法與 WennerSchlumberger 電極排列法，如果時間許可根據不同探測目標物的需求再搭配其他電極排列法。
2. 在所有電極排列法中偶極系列排列法表現佳，然後是溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array），最後是二極排列法。在大間距施測時建議施測時間不要低於 1.2 秒，因為隨著放電時間增加，可以降低雜訊的干擾，以得到更加的資料品質。在大間距排列法就必須慎選電極排列法以得到最佳資料與解析度將異常物描繪出來。根據上述成果在時間金錢上選擇最佳野外工作的電極排列法為梯度法（Edge-Gradient array）/偶極偶極法（Dipole-Dipole array）、溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）與三極排列法（Pole-Dipole array）。不過仍須依照待測物的不同使用不同的電極排列法，例如量測地層地質結構，雙極法（Pole-Pole array）就是必須要的，因為雙極法（Pole-Pole array）的優點是在最短的電極排列可以達到最大的量測深度。在必須要快速時間就得到地下異常物的特性時快速梯度法(Strong-Gradient array)再搭配短電極間距即可達到效果。
3. 利用感應極化法施做時建議使用本研究所發展出的雙電極施測法，其中電流極利用不銹鋼電極棒，而電位極電極棒則使用非極化電極：硫酸銅電極。建議搭配 Dipole 系列的電極排列法，其中是偶極偶極法（Dipole-Dipole）與梯度法（Edge-Gradient array）為首選，其次是溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array），其他方法不建議搭配感應極化法施做。電位極材料建議使用非極化電極硫酸銅電極，其他電極材料如碳棒或是不銹鋼棒接不建議。
4. 根據油品類與含氯場址現場實證調查結果，油品污染與含氯污染皆呈現與背景地質相對高 chargeability（ms）的現象。實場調查最佳電極間距為 2 公尺以下。應用土壤與地下水調查最佳電極排列法為偶極梯度法（Dipole-Gradient array）、梯度法（Edge-Gradient array）與溫奈-施蘭卜吉法（Wenner-Shlumberger array）等三種方法，其他電極排列在不同的待測物搭配使用。

參考文獻

1. 董倫道、梁敬豪、楊潔豪、陳平護、陳洲生，1995，台灣地下水觀測網第一期計畫水文地質調查研究及建檔 83 年度報告—地球物理探側及應用，中央地質調查所，共 91 頁。
2. Aristodemou, E. and A. Thomas-Betts. 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environs. *Journal of Applied Geophysics* 44 (2000) p 275-302.
3. Chambers J., Ogilvy R., Meldrum P. and Nissen J. 1999. 3D resistivity imaging of buried oil- and tar-contaminated waste deposits. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 4, 3–15.
4. Dahlin T. 1993. On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. PhD thesis, Lund University.
5. Dahlin T. and Loke M.H., 1998, “Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling”, *Journal of applied geophysics*, Vol. 38, pp. 237-249.
6. Dahlin T. and Zhou B., 2004, “A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays”, *Geophysical prospecting*, Vol. 52, pp.379-398.
7. Dahlin T., 2000, “Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity acquisition using multi-electrode arrays”, *Geophysical prospecting*, Vol. 48, pp.181-187.
15. Dahlin T., Palm M. and Grain H., 2004, “Combined resistivity imaging and RCPT for geotechnical pre-investigation’ Procs. NGM 2004, Ystad, Sweden, pp.18-20 .
8. Dahlin T., Palm M., and Grain H., 2004, “Combined resistivity imaging and RCPT for geotechnical pre-investigation”, *Procs. NGM 2004, Ystad, Sweden*, 9p..

9. Edwards L.S., 1977, "A modified pseudosection for resistivity and ip ", *Geophysics*, Vol. 42, No.5, pp.1020-1036.
10. Koefoed O., 1979, "Geosounding Principles", Elsevier scientific publishing company.
11. Keller, G.V.; Frischknecht, F.C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*, Oxford, 184pp.
12. LaBrecque, D. et al. 1998. *Electrical resistivity tomography monitoring for process control in environmental remediation. The Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*, 22-26 March 1998, Chicago, Illinois. *Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS)*, Wheat Ridge, CO. p 613-622
13. Loke, M. H., 1999, *Time lapse resistivity imaging inversion*, *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering European, Em 1, Budapest, Hungary*.
14. LaBrecque, D.J., 1989, *Cross-borehole resistivity modeling and model fitting*. Ph.D thesis, Univ. Utah, Salt Lake City, UT.
15. Loke M.H., 2000, "Topographic modelling in electrical imaging inversion", *EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition*.
16. Loke M.H., 2002, "RES2DMOD ver.3.01", *Geotomo Software, Malaysia*.
17. Loke M.H., 2002, "The use of constraints in 2D and 3D resistivity modelling", *EEGS-ES Meeting, Portugal*.
18. Loke M.H., 2003, "RES2DINV ver.3.52", *Geotomo Software, Malaysia*.
19. Loke M.H., 2003, "Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys", *Geotomo Software, Malaysia*.
20. Loke M.H., Acworth I. and Dahlin T., 2003, "A comparison of smooth and blocky inversion method in 2D electrical imaging surveys", *Exploration geophysics*, Vol. 34, pp.182-187.
21. Loke M.H. and Dahlin T., 1997, "A combined Gauss-Newton and Quasi-Newton

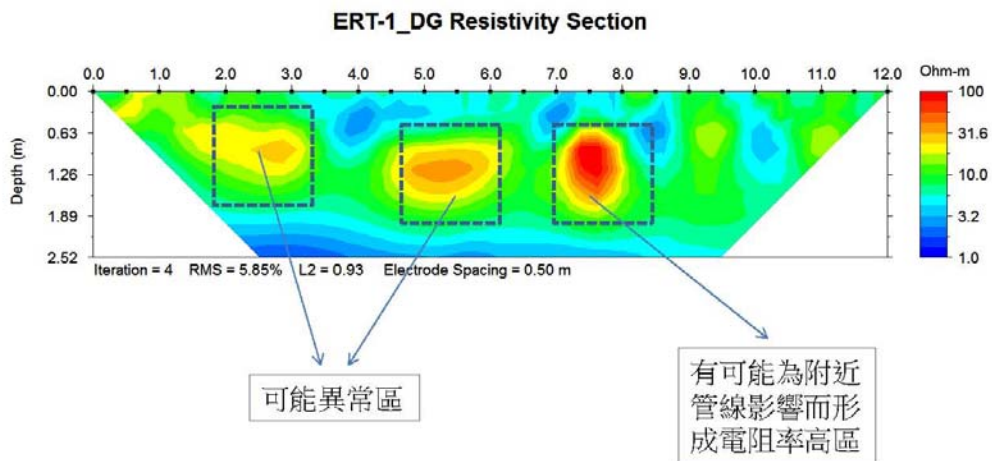
inversion method for the interpretation of apparent resistivity pseudosections”, EEGS.

22. LaBrecque D., Miletto M., Daily W., Ramirez A. and Owen E. 1996. The effects of ‘Occam’ inversion of resistivity tomography data. *Geophysics* 61, 538–548.
23. Niva, B., Olsson, O. and Bluming, P., 1988, Radar crosshole tomography with application to migration of saline tracer through fracture zones, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA) Technical report 88-31, Baden, Switzerland.
24. Niwas, S., and Lima, O. A. L., 2003, Aquifer parameter estimation from surface resistivity data, *Ground Water*, 41(1), 94-99.
25. Newmark, R., W. Daly, K. Kyle, and A. Ramirez. 1998. Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques. *JEEG*, Vol. 3, Issue 1, March 1998, p 7-13.
26. Nasser,M.,Lee,S.,Francisco,A., and Esben,A.,2006, High-resolution geophysical characterization of shallow-water wetlands, *Geophysics*, V.71,No.4, B101-109.
27. Olhoeft, G. 1985. Low frequency electrical properties. *Geophysics*, 50, pp. 2492-2503.
28. Olayinka A. and Yaramanci U. 2000. Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospecting* 48, 293–316.
29. Oldenburg D.W. and Li Y.G. 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64, 403–416.
30. Park S.K. and Van G.P. 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* 56, 951–960.
31. Ramirez, A.L., Daily, W.D., and Newmark, R.L., 1995, electrical Resistance Tomography for steam injection and process control: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 0, No.. 1, 39-51.
32. Rubin, Y. and Hubbard, S.S., 2005, *Hydrogeophysics*, Springer, New York.
33. Slater, L., A. Binley, and A. Kemna. 2000. Case studies of engineering and environmental applications of induced polarization imaging. *The First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies & NDT to*

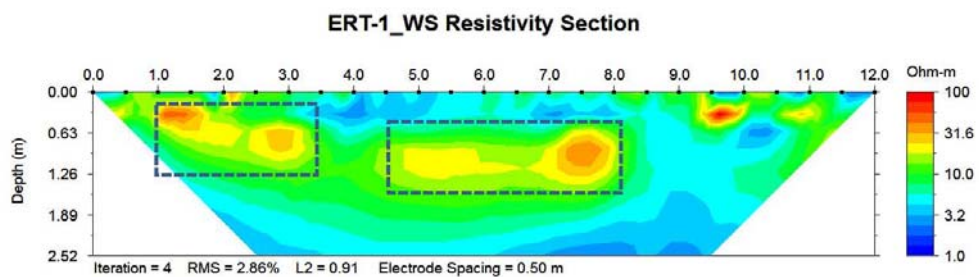
- Transportation Facilities and Infrastructure, December 11-15th 2000 St. Louis, Missouri.*
34. Storz H., Storz W. and Jacobs F. 2000. *Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. Geophysical Prospecting* 48, 455–471.
 35. Sasaki Y. 1992. *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting* 40, 453–463. Sasaki Y. 1994. *3-D resistivity inversion using the finite-element method. Geophysics* 59, 1839–1848.
 36. Sasaki Y. 1994. *3-D resistivity inversion using the finite-element method. Geophysics* 59, 1839–1848.
 37. Takahashi T., 2004, “*ISRM Suggested Methods for land geophysics in rock engineering*”, *International journal of rock mechanics & mining sciences*, Vol. 41, pp.885-914.
 38. Van G.P., Park S.K. and Hamilton P. 1991. *Monitoring leaks from storage ponds using resistivity methods. Geophysics* 56, 1267–1270.
 39. Zheng, C., and S. M. Gorelick, 2003, *Analysis of solute transport in flow fields Influenced by Preferential flowpaths at the decimeter scale, Ground Water*, 41(2), 142-155.
 40. Zhou B. and Dahlin T., 2003, “*Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying*”, *Near surface geophysics*, Vol.1, pp.105-117.
 41. Zhadnov M.S. and Keller G.V., 1994, “*The geoelectrical methods in geophysical exploration*”, Elsevier Science.

附件一 案例一各測線施測結果圖

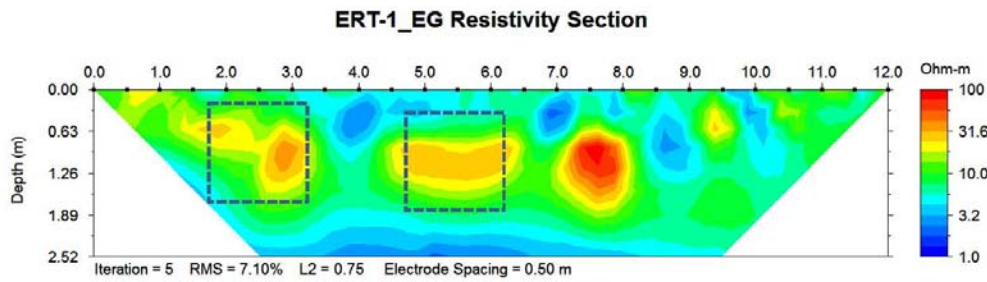
ERT-1 (Dipole-Gradient Array)



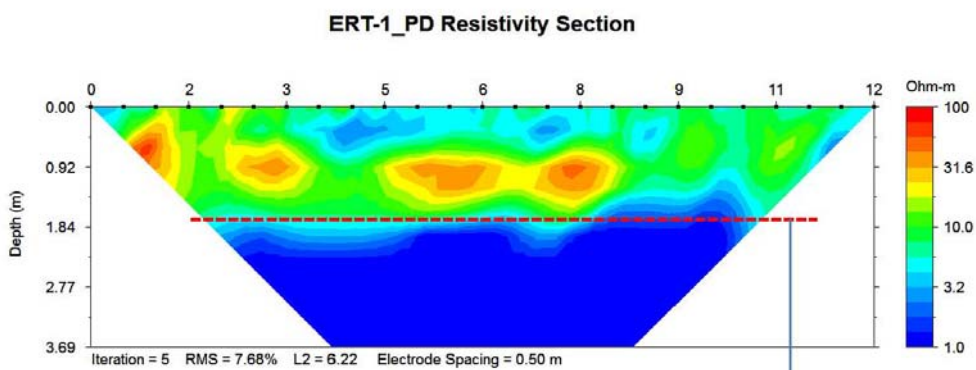
ERT-1 (WS Array)



ERT-1 (Edge-Gradient Array)

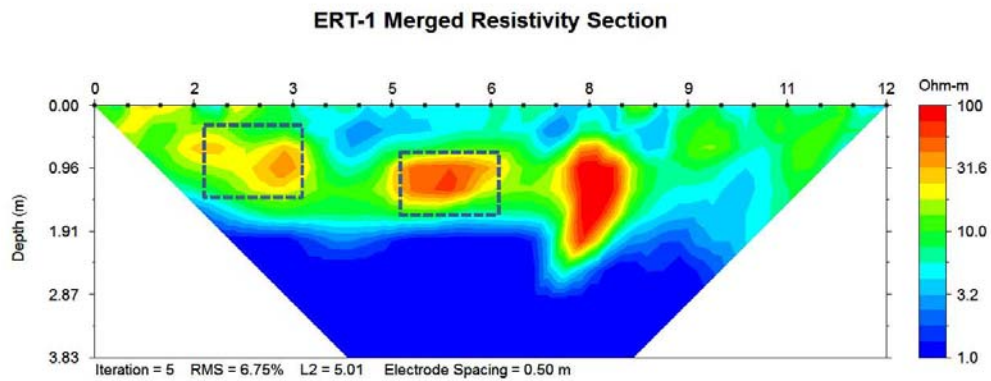


ERT-1 (Pole-Dipole Array)

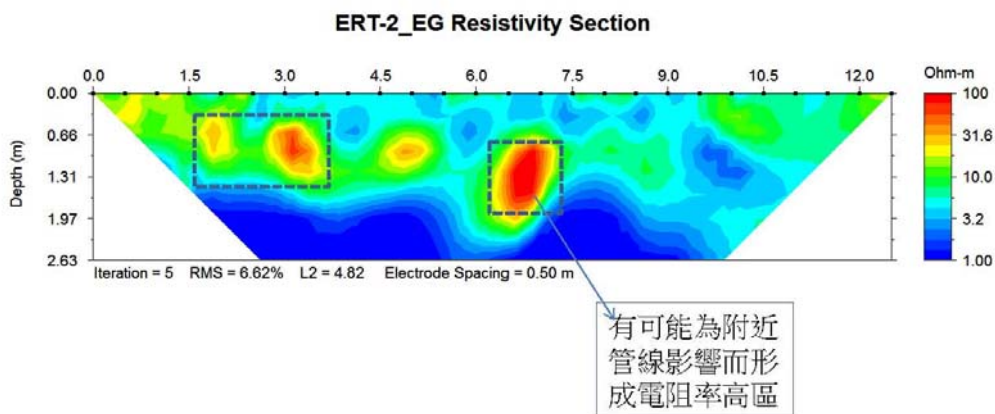


此深度以下電阻率便出現最低之現象

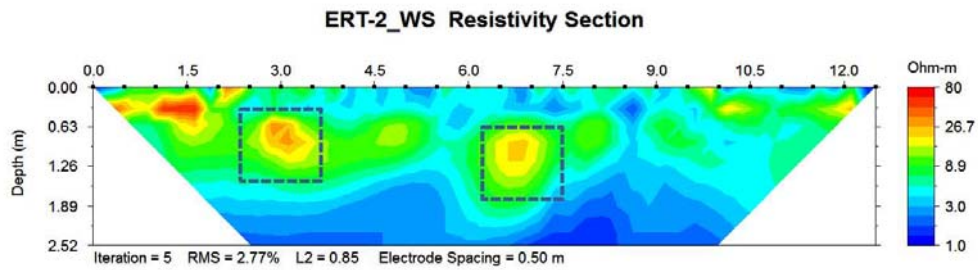
併合多種電極排列反算方法



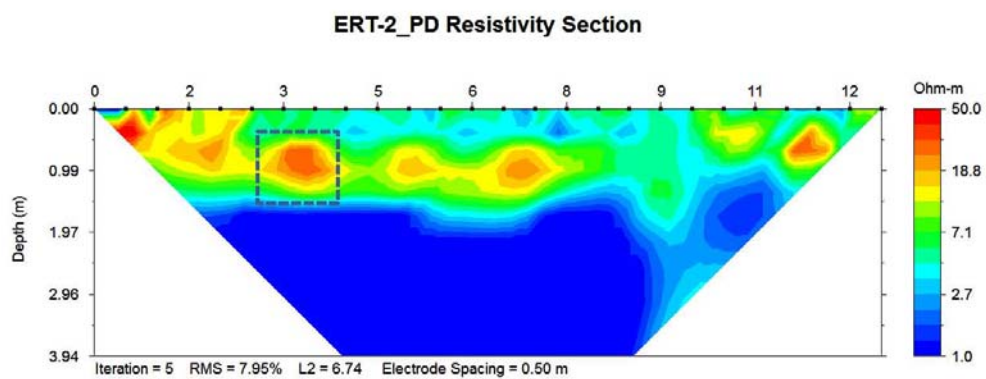
ERT-2 (Edge-Gradient Array)



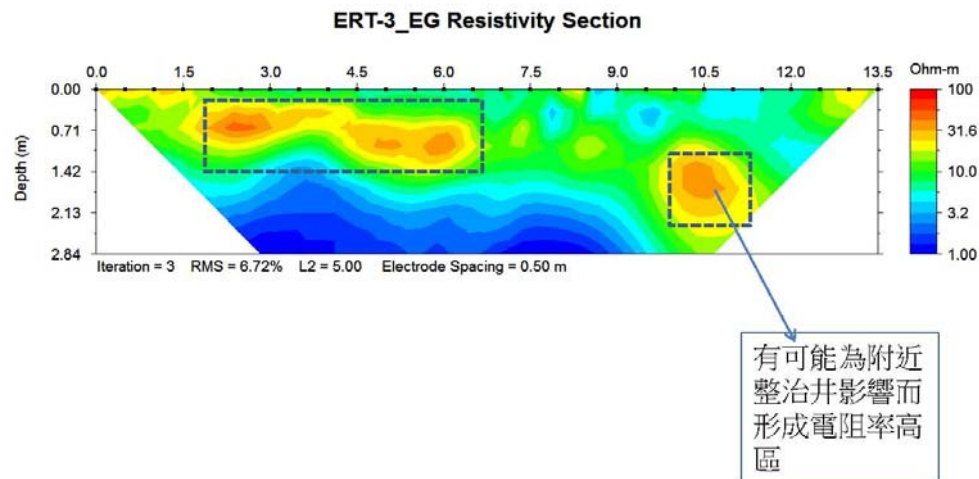
ERT-2 (WS Array)



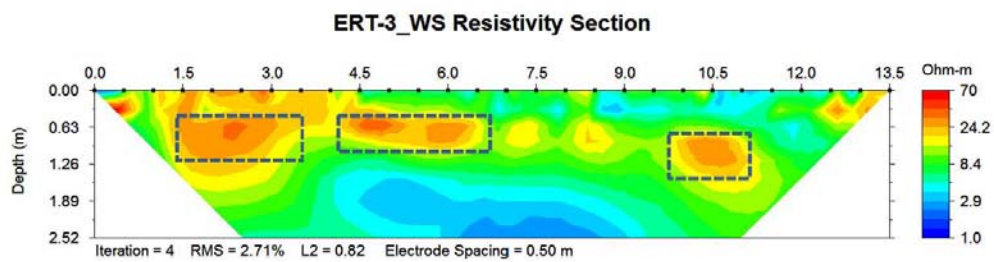
ERT-2 (Pole-Dipole Array)



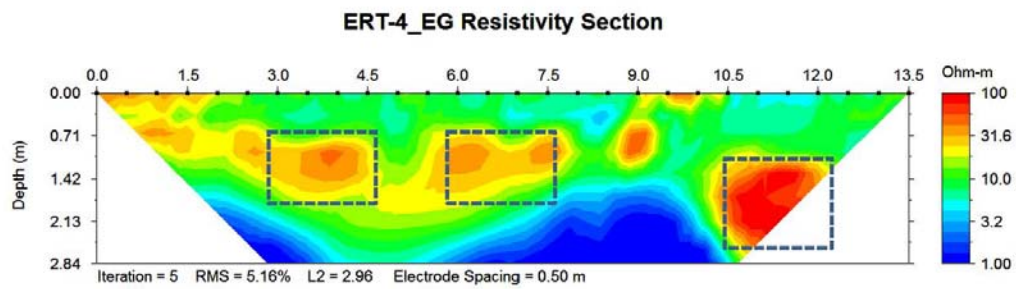
ERT-3 (Edge-Gradient Array)



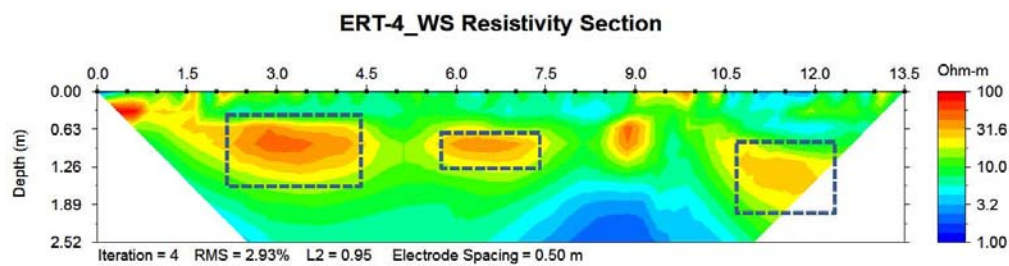
ERT-3 (WS Array)



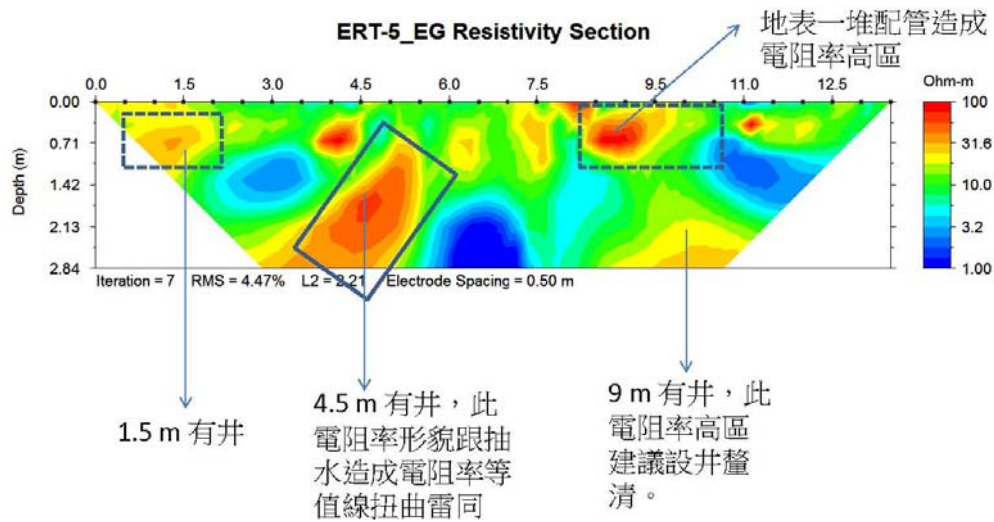
ERT-4 (Edge-Gradient Array)



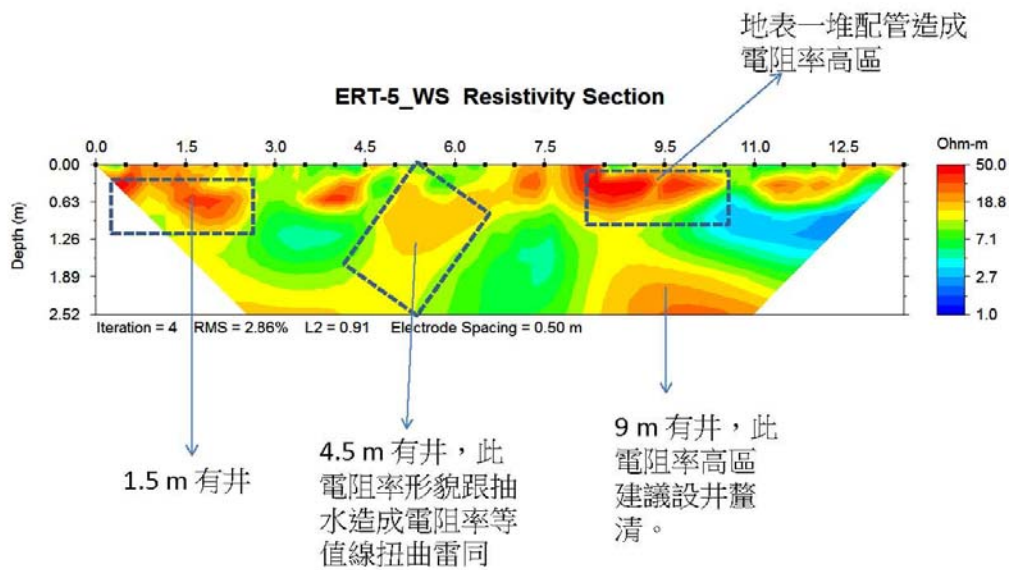
ERT-4 (WS Array)



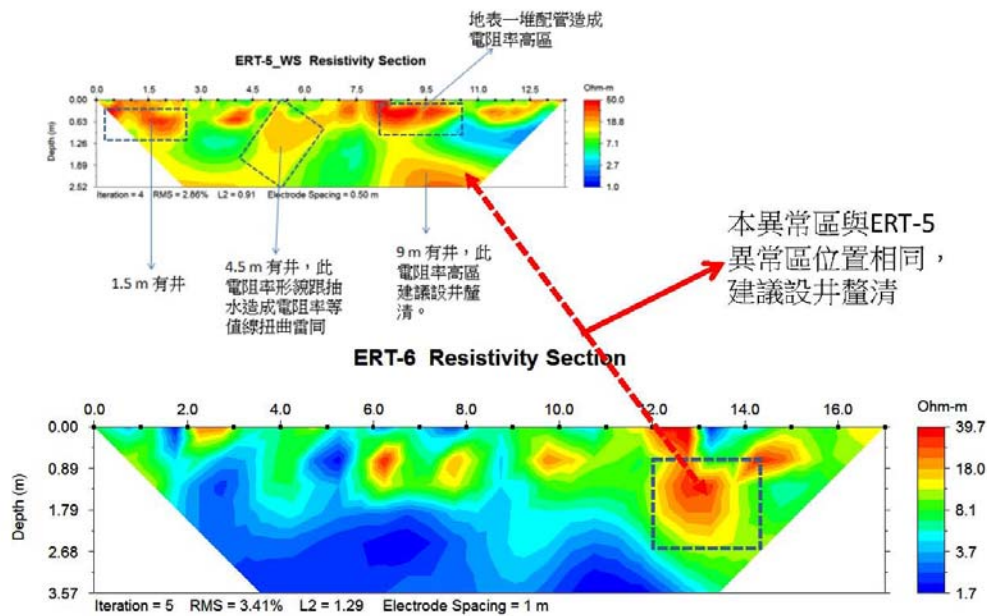
ERT-5 (Edge-Gradient Array)



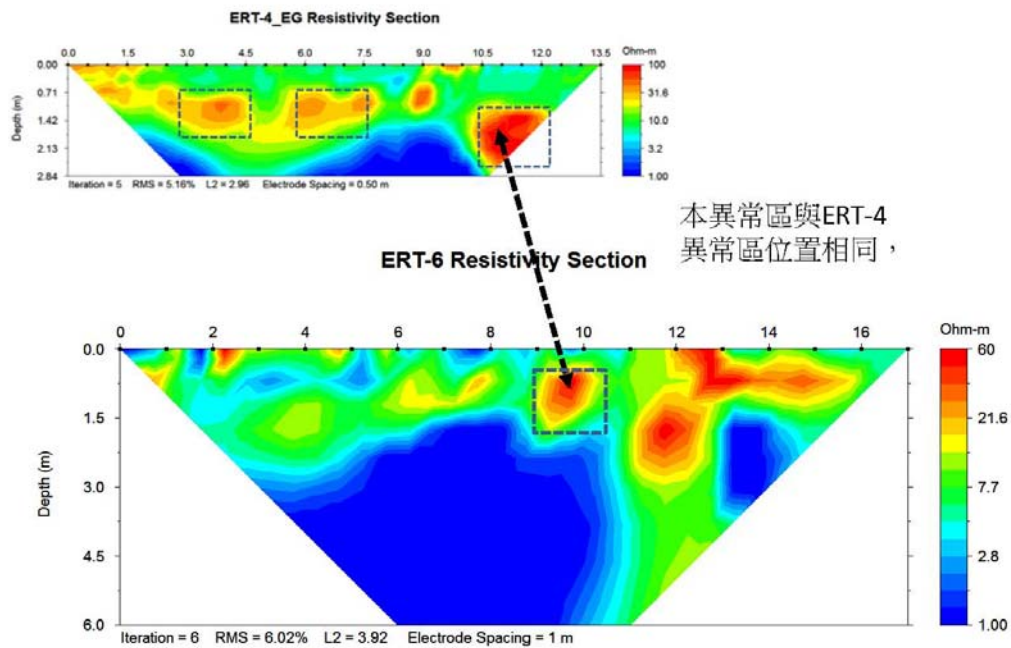
ERT-5 (WS Array)



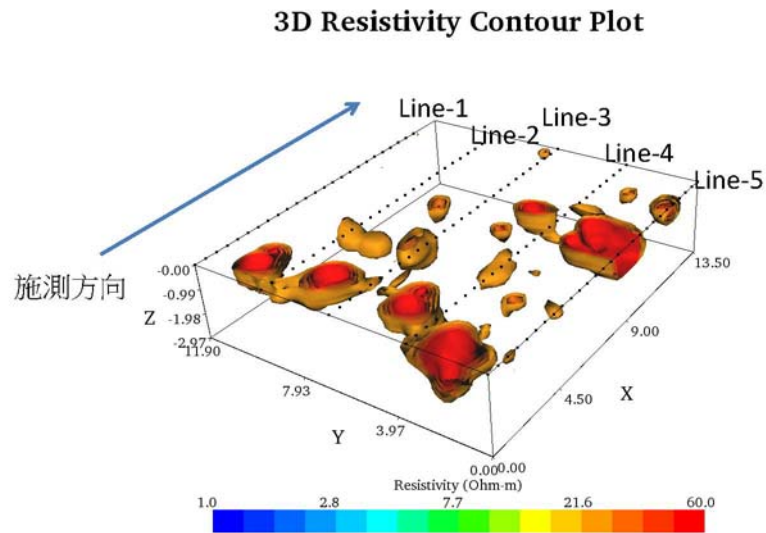
ERT-6(Edge-Gradient Array)



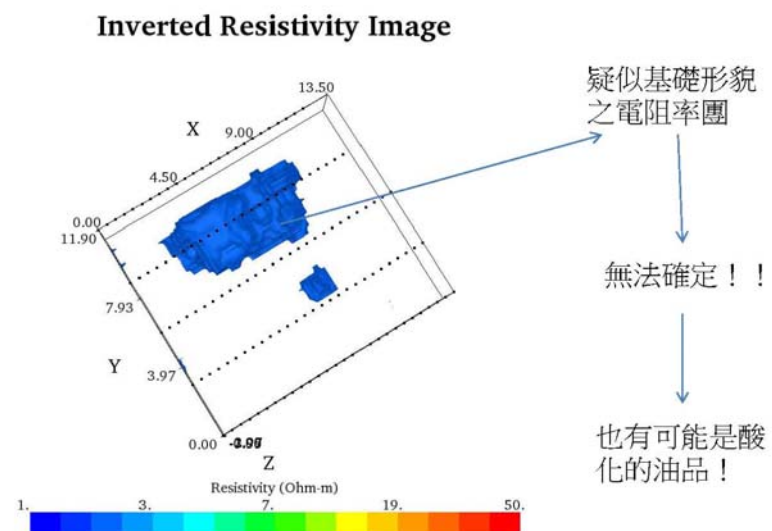
ERT-5 (WS Array)



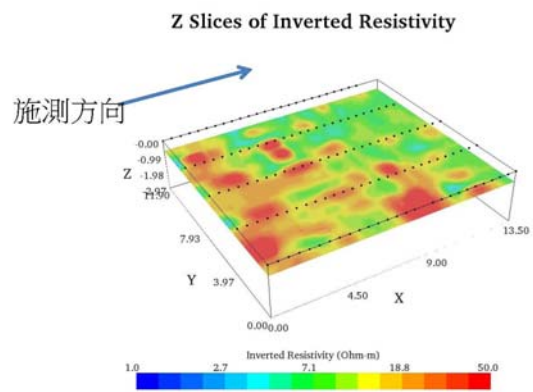
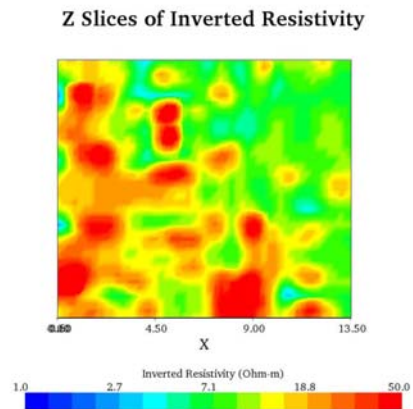
凸顯高電阻率圖



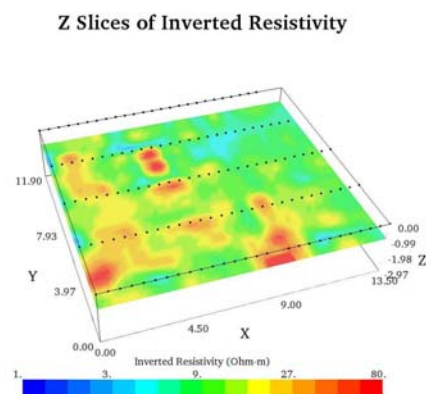
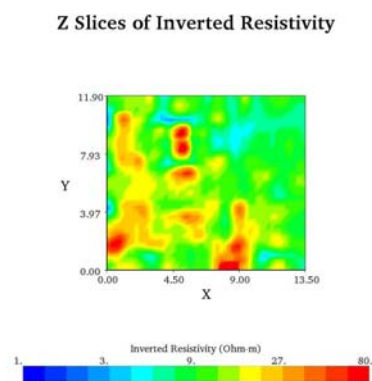
凸顯低電阻率圖



Z=-0.6 m 梯度法

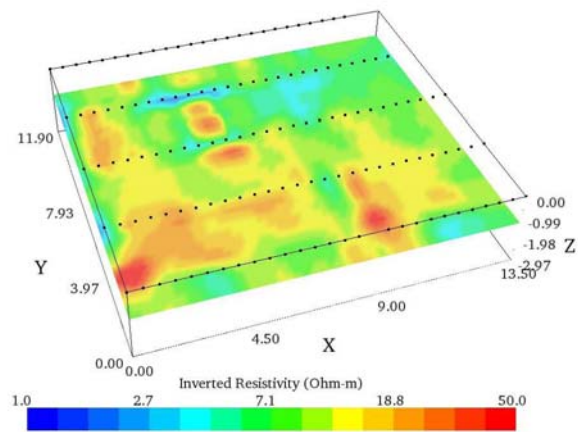


Z=-0.9 m 梯度法



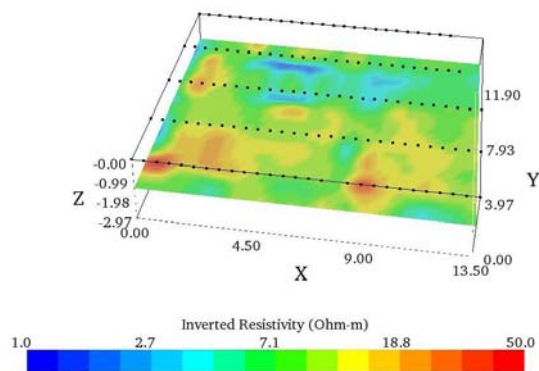
Z=-1.2 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



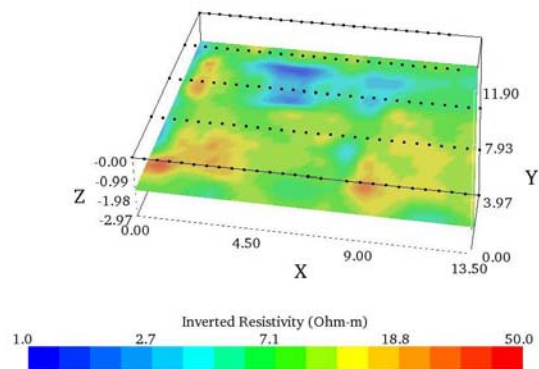
Z=-1.4 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



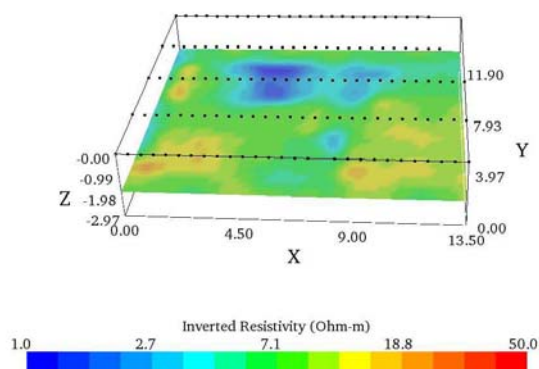
Z=-1.6 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



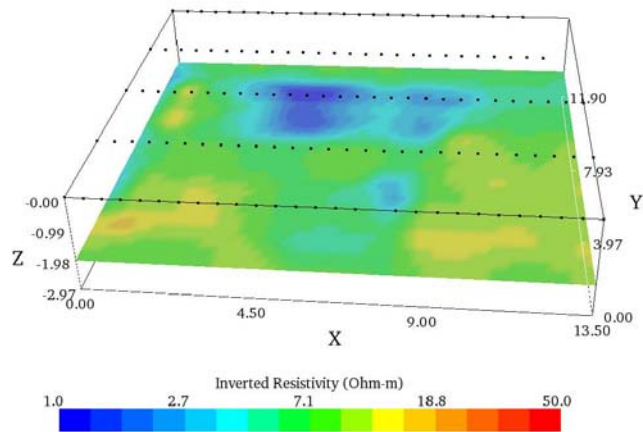
Z=-1.8 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



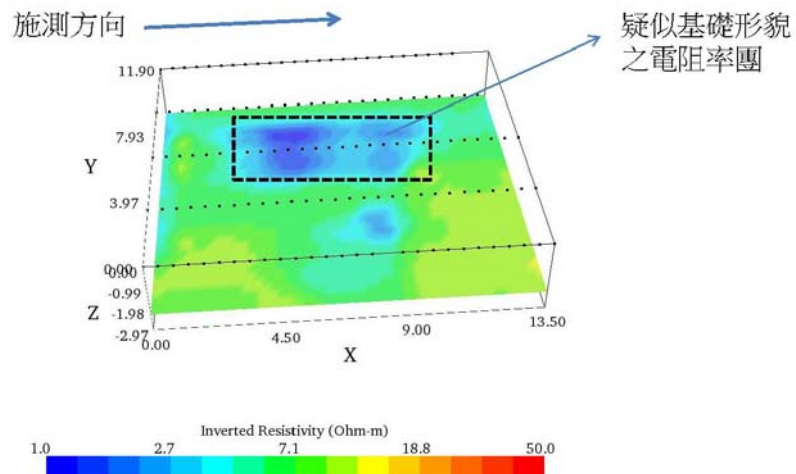
Z= -2 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



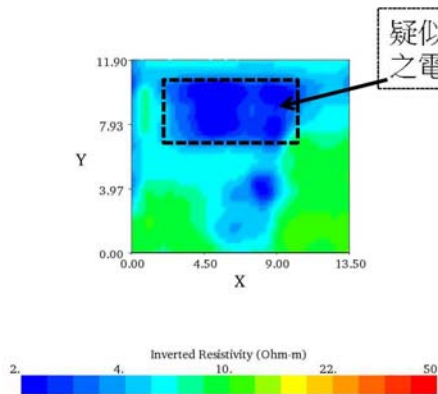
Z=-2.2 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



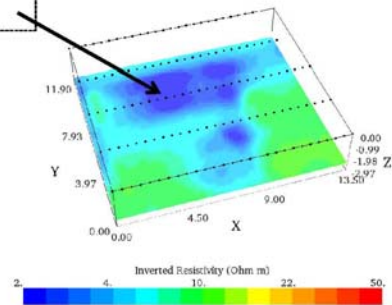
Z= -2.4 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity



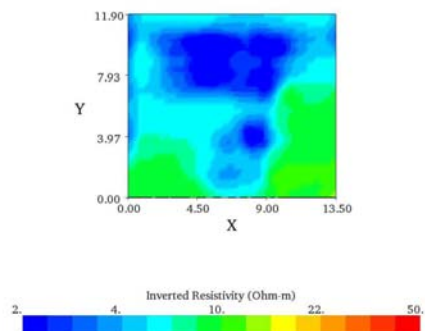
疑似基礎形貌
之電阻率團

Z Slices of Inverted Resistivity

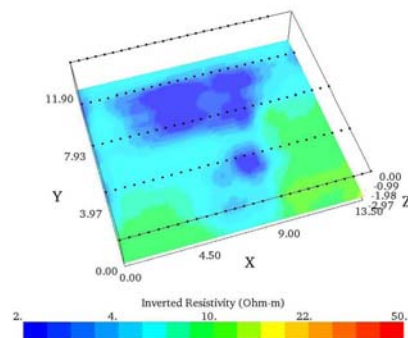


Z= -2.6 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity

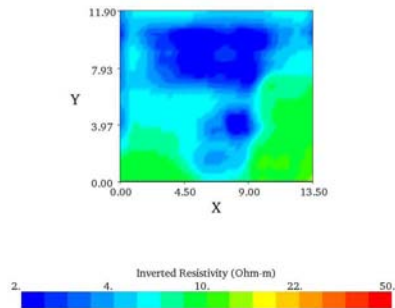


Z Slices of Inverted Resistivity

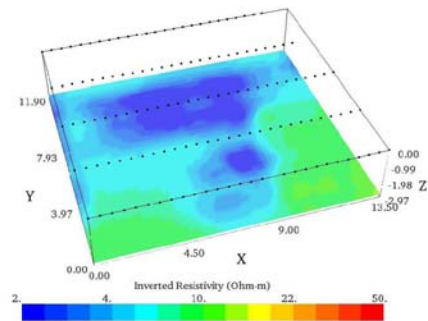


Z= -2.8 m梯度法

Z Slices of Inverted Resistivity

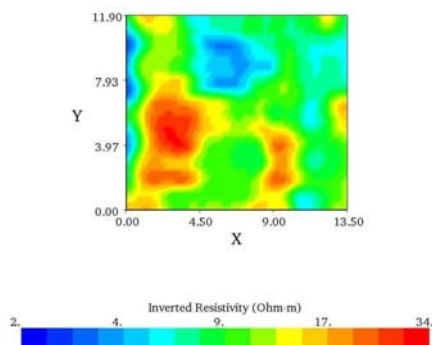


Z Slices of Inverted Resistivity

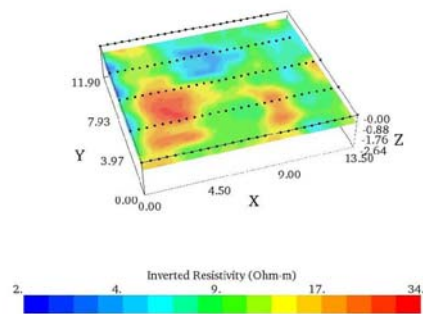


-0.6m (Wenner-Shlumberger)

Z Slices of Inverted Resistivity

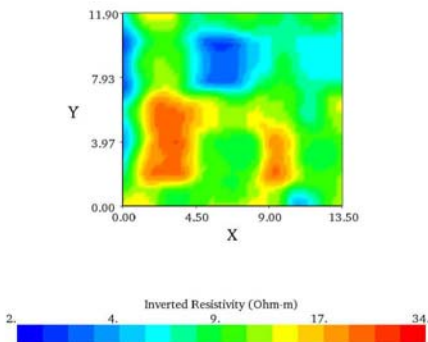


Z Slices of Inverted Resistivity

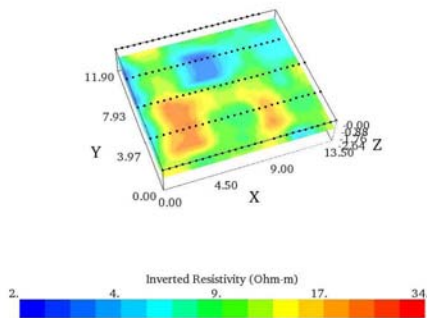


-1 m (Wenner-Shlumberger)

Z Slices of Inverted Resistivity

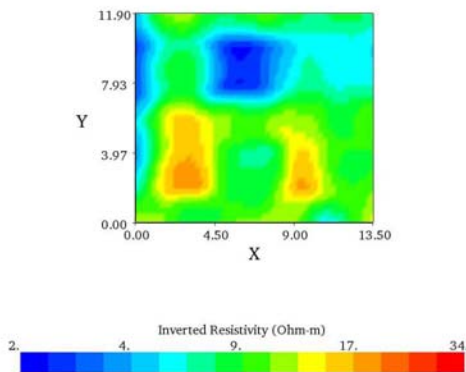


Z Slices of Inverted Resistivity

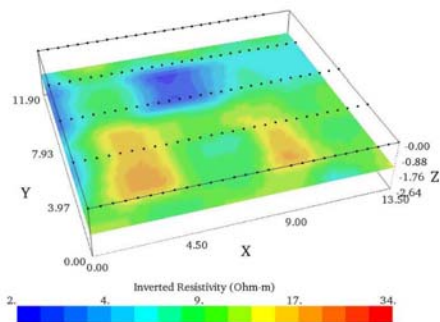


-1.4 m (Wenner-Shlumberger)

Z Slices of Inverted Resistivity

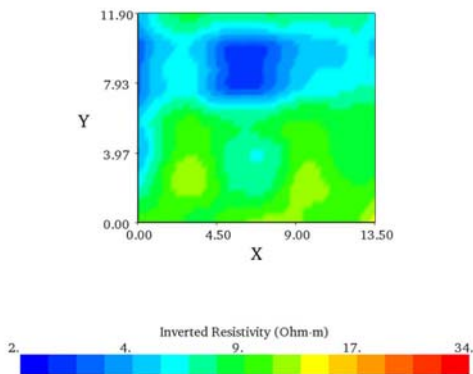


Z Slices of Inverted Resistivity

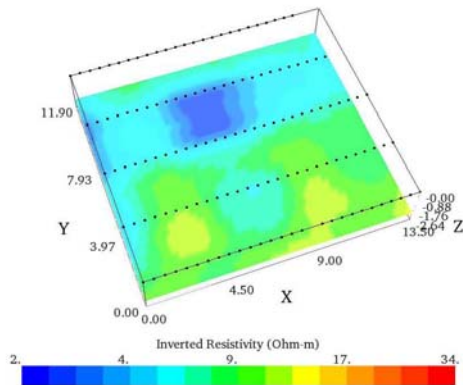


-2 m (Wenner-Shlumberger)

Z Slices of Inverted Resistivity

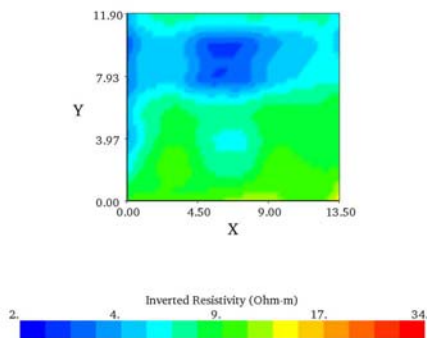


Z Slices of Inverted Resistivity

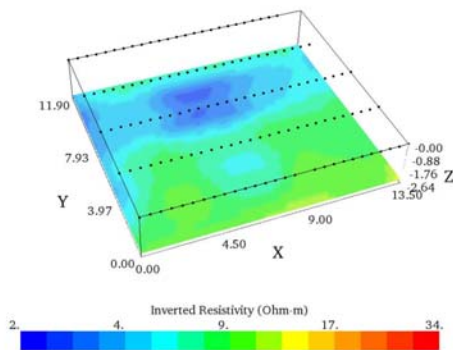


-2.4 m (Wenner-Shlumberger)

Z Slices of Inverted Resistivity



Z Slices of Inverted Resistivity



附件二 期中報告初審意見對照表

期中報告初審意見對照表

計畫年度	102 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 現地試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：鄭世楠 NO：10	
計畫名稱	應用多重電極排列與感應極化法調查砂礫質地層污染之研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
【委員 1】			
1. 執行進度大致與預定進度相符。		謝委員指教。	
2. 能於後續研究中，以一有污染物（最好是 NAPL）存在之場地，建立標準之方法選定、測量及分析之標準程序。		委員意見會於後續研究中，納入期末報告內。	
3. 宜說明本計畫之內容與 100 年本署補助之計畫「應用地球物理方法運用於污染場址與底泥電性反應之研究」有何不同或改進之處。摘要未有重要結果之敘述，較似計畫書之摘要。		100 年度補助計畫只要是應用地球物理方法中井測部分進行研究，在一腹地小地表測線無法展開環境之下，建議使用透地雷達井測或是地電阻井測進行調查，因為井測深度不受測線長度之限制即可得到預計深度之地層物性資料；而另一部分為河川底泥調查計畫，利用水上透地雷達、水上地電阻法與聲納調查法評估三種方法對於河川底泥調查之評估研究。與本年度調查研究方向不同使用方法亦不同。期中報告摘要已修正。	
4. 執行現況、流程及方法說明尚屬具體詳盡。		謝委員指教。	
5. 已有計畫申請經費與自籌款狀況使用之說明。		謝委員指教。	
6. 文獻探討」宜置於「研究方法與過程」之前。		已修正於期中報告中。	
7. 圖表說明過於簡略，符號亦多未註明其意義。		已修正於內文中，針對圖表進行解釋。	
【委員 2】			
1. 已完成預定之工作項目。		謝委員指教。	
2. 已完成以一廢棄污泥地之野外調查及測試，後續之工作建議能以一 DNAPL 污染之場址進行調查以及測試本計劃所建立之方法的可行性。		委員意見會於後續研究中，納入期末報告內。	
【委員 3】			
1. 整體研究成果尚符合預期，惟研究成果似教理論導向，後續可補充如何進行實場應用。		謝委員指教。	
2. 後續可補充成果是否具延伸性，目前結論似無法說明此技術如何進行實場應用之突破及創新。		委員意見會於後續研究中，納入期末報告內。	
3. 主要成果符合計畫書之內容，目前進度並無落後情形。		謝委員指教。	
4. 摘要部分僅作概念介紹，未描述期中報告之重點與成果。		期中報告摘要已修正。	
5. 後續可提出專利之規劃。		謝委員指教。	
【委員 4】			
1. 文獻回顧完整。		謝委員指教。	

2. 以中壢台地(含礫石層)實際現場測定四種不同方法之差異，並已提出建議案 Edge-Gradient 法。	謝委員指教。
3. 請評估多點不同深度之污染物在礫石層之測定可靠性。	目前地表探測技術對於多點污染深度調查，仍有需多問題需要克服，主要是反算軟體對於多點深度反演模型建立需要有足夠之資料庫。本團對建議使用多口井測進行三維調查，可以補足地表調查之盲點。
【委員 5】	
1. 請補充基本資料表。	計畫基本資料補充在附件
2. 目前成果是否如預期?宜先自評。	目前成果在預期中，已在本團隊相關計畫中模擬其成效。謝委員指教。
3. 下半年即將進入實場，實際進行應用調查，並訂定 SOP，成果值得期待，惟請務必將作業時之「 限制條件 」反應注意事項清楚列出，避免被誤用。	謝委員指教，限制條件會是本計畫在後半段之重點。
4. 計畫申請經費已大致說明。無自籌款說明。	謝委員指教。
5. 計畫後續執行工作項目及內容尚為詳盡。	謝委員指教。
6. 實場尚未進行，可期待成果。	謝委員指教。
【委員 6】	
1. 本研究的結果主要在觀測結果的解讀，建議以既有的觀測結果與實際地質條件間的關係多加討論說明。	謝委員指教，相關內容已增加在 3.3 節中。
2. 本觀測結果(p. 45) (“…強烈建議 Edge-Gradient…”)，其適用條件與限制條件建議討論。	相關適用性與限制條件會在污染場調查中，進行觀察與討論。
3. 成層化分層顯著的地質與常見的卵礫石層(部分粒徑極高)的結果的解釋與應用，建議討論。	影響電阻率因素主要有溫度、構成材料、顆粒大小與含水量的不同，卵礫石層主要貢獻電阻率為粒徑大小與含水程度，另如中壢與台中礫石層電阻率即為不同，因為粒徑與地層其他材料的貢獻不同。地層材料顆粒分布不同，其電阻率反應亦不同，如果部分區域粒徑極高，此處電阻率應為相對其他較小粒徑為高之反應。
4. 如果研究成果是： ” …視場址的情況與目標物而定…” ，本計畫的成果的意義建議討論(尤其是與其他類似工法的可信度的比較)。	相關適用性與限制條件會在污染場調查中，進行觀察與討論。
5. 已有初步試驗規畫與結果。	謝委員指教。
6. 計畫後續執行工作項目已條列說明。	謝委員指教。
7. 由本期中報告中不易完整看出研究進度(Chap. 3.5)。	期中報告需要完成文獻收集、實驗室模型建立與開始進行現地實驗，相關成果已修正在第二與第三章中。
8. 建議 3.1~3.4 節的試驗與觀測結果能多加說明(尤其是結果的部分)。	謝委員指教，相關內容已增加修正版中。

附件三 計畫書修正版

土壤及地下水污染整治基金補(捐)助技術開發及模場試驗專案工作申請書

一、專案基本資料

申請編號：

專 案 類 別 (單 選)		☒ 研究專案		☐ 模場試驗		
研 究 主 題		☒ 調查		☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥		
申請機構/系所(單位)		財團法人健行學校健行科技大學/空間資訊與防災中心				
本 專 案 主 持 人 姓 名		鄭世楠		職 稱	主任	
協 同 主 持 人 姓 名		劉興昌		職 稱	博士研究生	
本 專 案 名 稱	中 文	應用多重電極排列與感應極化法調查砂礫質地層污染之研究				
	英 文	The application of multiple array and induced polarization method to investigate the contaminated site.				
	關 鍵 字	Geophysics survey, Electrical Resistivity Tomography, Induced Polarization				
執 行 期 程		自民國 101 年 12 月 10 日起至民國 102 年 12 月 09 日				
專 案 聯 絡 人		姓名：劉興昌 電話：(公) 03-4581196 轉 2201 (宅/手機) 0921190566				
通 訊 地 址		桃園縣 320 中壢市健行路 229 號				
傳 真 號 碼		0 3 - 2 5 0 3 0 1 5		E-mail	lhchang@uch.edu.tw	
經 費 概 算		專 案 預 估 經 費		金 額	備 註	
		計 畫 經 費 計 算	人 事 費 用		460,330	
			資 料 蒐 集		0	
			消耗性器材藥品費用		315,596	
			貴重儀器使用費		0	
			其他研究有關費用		150,000	
			行 政 管 理 費		74,074	含專任助理勞退、職災費用及相關實驗室庶務水電費用
合 計		1,000,000				

專案主持人(申請人)簽名及蓋章：_____ 日期：_____

二、計畫摘要(請分別以中、英文就本專案作一概述，以 1000 字為限)

(一)中文部分：

近年來國內外工業活動造成之土地污染案例，對國土資源與生活環境形成莫大威脅。在各類型污染物中，含氯有機溶劑屬比水重非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL）所造成之問題最為棘手，國內使用含氯有機溶劑工廠遍及各類業別，致癌風險性高，污染一旦洩漏其移動分佈深受複雜的水文地質變化所影響，其污染流佈與調查及整治迥異於重金屬或油品類污染，且往往發現污染時均已造成相當程度的環境危害（如污染範圍廣闊）。近年來，非破壞性地球物理探勘技術已逐漸運用在污染場址之地下環境調查，搭配較少量的鑽孔資料可獲得“面與空間”資訊。目前地球物理最廣泛運用之污染調查技術為直流電阻法。

直流電阻法是一種受歡迎的地球物理探勘技術，因為其物理原理簡單且資料收集快速有效率，傳統上電阻率量測是在地球表面上施行，以配置特定電極的排列以獲得視電阻率探測曲線、視電阻率剖面或視電阻率擬似剖面，這些結果可以反應出地層電阻率水平或垂直向的變化，這種技術已廣泛應用在地下水、土木工程和環境調查上。過去十年，電腦自動化的資料收集技術與二維、三維逆推軟體有很大的進展，所以電阻率影像或電阻率斷層描成為越來越引人注目的探勘技術，許多地球物理學家表示可以藉由大量的量測數據（以足夠的空間採樣與覆蓋率）與二維或三維成像或逆推系統以重建一個精確的地層電阻率影像。

目前在運用直流電阻法此項技術時常遇到如桃園與台中地區地層礫石含量佳，其電阻率性質與污染物（Dnapl）接近且實驗室率定不易，故本計畫利用實驗室數值模擬運用不同電極排列法，來解析砂礫質地層電阻率分布，進而運用在實際砂礫質地層，解析何種電極排列搭配感應極化法可得到最佳結果，最後進入實場施測說明運用最佳電極排列技術與搭配感應極化法（induced polarization, IP），針對實際污染場址進行調查，俾供土壤及地下水污染場址之調查瓶頸能有進一步突破。

二、計畫摘要(請分別以中、英文就本專案作一概述，以 1000 字為限)

(二)英文部分：

Recently, non-invasive technologies such as geophysical technology have been introduced to provide the “plane and space” information of pollution in subsurface by integrating few bore-hole data. The most common used geophysical technologies are ground-penetrating radar method (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT). Both methods have their limitations on the pollution investigation when there are interferences exist such as building structure or heavy pavement.

DC electrical resistivity surveying is a popular geophysical exploration technique because of its simple physical principle and efficient data acquisition. Traditional resistivity measurements are carried out on the earth's surface with a specified array in order to obtain apparent-resistivity sounding curves, apparent-resistivity profiling data or apparent resistivity pseudosections, all of which qualitatively reflect the vertical or horizontal variations in subsurface resistivity. This technique is widely used in groundwater, civil engineering and environmental investigations. In the last decade, there have been great improvements in computerized data acquisition systems and 2D and 3D inversion software, so that resistivity imaging or resistivity tomography has become an increasingly attractive exploration technique. Many geophysicists have shown that it is possible to reconstruct an accurate resistivity image of the subsurface using a large number of measured data (with enough spatial samples and coverage) and employing 2D or 3D imaging or inversion schemes.

Numerical simulations are used to compare the resolution and efficiency of 2D resistivity imaging surveys for 5 electrode arrays. The arrays analysed include pole-pole (PP), pole-dipole (PD), half-Wenner (HW), Schlumberger (SC), dipole-dipole (DD), γ -array (GM), multiple and moving gradient array (GD). Some synthetic geological models were used to examine the surveying efficiency (anomaly effects, signal-to-noise ratios) and the imaging capabilities of these arrays. The responses to variations in the data density and noise sensitivities of these electrode configurations were also investigated using robust (L1-norm) inversion and smoothness-constrained least-squares (L2-norm) inversion for these synthetic models.

This study would first discuss how DNAPL and its soluble-phase components invade into the low permeable layer based on the field observation. Then, the importance of geophysical technology is introduced with comparing to the limitations of IP investigation. Last, the case studies on using geophysical technologies including multiple array for ERT are introduced to snapshot the complex profile of DNAPL distribution for improving future application.

三、計畫目的

研究專案請簡述專案之背景、目的、重要性、國內外相關執行情形及註明重要參考文獻。

模場試驗部分則另需提出場址背景資料分析。

近年來國內外工業活動造成之土地污染案例，對國土資源與生活環境形成莫大威脅。在各類型污染物中，含氯有機溶劑屬比水重非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL）所造成之問題最為棘手，如原 RCA 桃園廠、飛利浦竹北廠及台灣氯乙烯公司頭份廠等，其污染整治經耗費鉅額資源與時間後仍未能達成。國內使用含氯有機溶劑工廠遍及各類業別（如金屬製品、塑膠製品、化學製品、化學材料、電子及光學製品、機械設備…），致癌風險性高，污染一旦洩漏其移動分佈深受複雜的水文地質變化所影響，其污染流佈與調查及整治迥異於重金屬或油品類污染，且往往發現污染時均已造成相當程度的環境危害（如污染範圍廣闊）。

地下環境中之含氯有機溶劑污染在調查及整治上均屬相當棘手的問題。含氯溶劑屬比水重之非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL），溶劑本身與地下水不互溶、比水重及低黏滯度的特性，造成其污染純相的移動分佈深受地質變化的影響，因地質變化的不確定性致污染源界定甚為困難。至於溶解於地下水中之溶質污染團則跟隨地下水流擴大分佈，而地下水流場變化亦與地質變化直接相關，污染團的縱向（平行水流方向）、垂向或橫向（垂直水流方向）分佈與地層分層、不同地質材料夾層、優勢流徑或裂隙等息息相關。因此未能掌握地下水文地質特徵，污染範圍的界定便相當困難，同時會誤判污染程度並造成污染流佈或污染風險的預測失當。

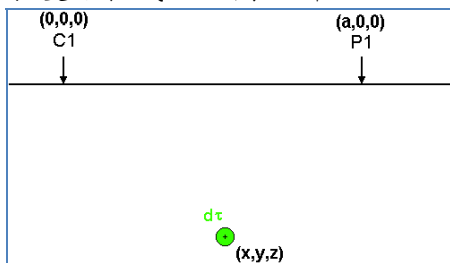
傳統侵入性調查，如鑽探或其他直接灌入機具調查均屬“點”之調查，雖具有直接指示地下環境特徵之證據，但其執行費時、花錢，取樣未必完整（礫石層不易採樣），且難以具體客觀描繪不同鑽孔間之連續狀態。抽水試驗可掌握較大範圍之水文地質特徵，但欲取得代表性數據，需有較多的水位觀測井，不易於運作中工廠或人口稠密區施作；而抽出之地下水須經處理避免二次污染問題，且抽水恐有破壞污染團分佈之虞。至於非侵入性方法一般則是以地球物理方法來探勘可能侷限 DNAPL 的地質條件與 DNAPL 污染範圍。地球物理探勘屬非破壞性檢測技術，對探勘環境幾無任何影響，其最大優點在於探勘範圍大（含水平與深度範圍）、速度快、準確性高，同時探勘費用相較於傳統鑽探或設井採樣可節省大幅經費與時間。地球物理除了在經費與時間上可大幅降低，並可進行更為密集之探勘。特別是針對漏源區與污染源區分佈的細密調查，當要清楚描繪三維分佈或洩漏區位置，土壤採樣點若無更加密集，採樣漏失的機會便相對提高。

以台中工業園區為例，總面積為 26.12 公頃，可能具污染污染潛勢工廠分布寬廣，工廠設置年代久遠早期製程運作特性不易掌握，地下水位約在地表下約 60~67 公尺，據前期計畫調查結果，場址地表下約 2 公尺以下，多屬砂礫石質地層，且礫石含量自地下 55~60 公尺以下逐漸增大並增多，故選擇經濟可行環境地球物理調查方式，探勘地下環境特徵，以釐清污染潛勢區周遭之地質與污染分布，因為礫石層其電性反應為高電阻率圖譜區，與含氯溶劑電性圖譜區部分相重疊，皆屬於相對高電阻率。另描繪地下環境特徵需要有相關水文地質調查，以中區工業區為例：地下水深度皆超過 60 公尺

以上，工業區可施作腹地較小，佈線長度不夠，無法達到目標深度；另外地電阻影像法掃描法施測過程中地電阻施測過程電流強度會隨深度逐漸遞減，無法解析深部地層細部水文地質特徵。

故本研究利用地電阻影像掃描法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)與感應極化法(Induced Polarization, IP)，相互搭配利用在砂礫質地層中，描繪地層之地下環境特徵，另外增加發電功率與增加激發電壓，配合新穎電擊排列方式，增加深部探測資料，以解決佈線長度不夠時，無法達到目標深度的問題。

不同的電極排列法皆可搭配感應極化法資料，但所得到結果差異甚大，所以本研究另一主題是，不同電極排列法中，哪些適合砂礫質地層調查，以解決砂礫質地層中如出現含氯物質汙染時，以釐清兩種電性反應。不同電極排列會有不同之垂直與側向解析度，假設地層為均質均向介質無限域內，電流極 C1 位於(0,0,0)，電位極 P1 位於(a,0,0)，另外兩個電極:電流極 C2 與電位極 P2 在無窮遠處。任意一個點(x,y,z)上 dt 小體積內的電阻率做微量的改變 $\delta\rho$ ，產生的電位變化 δV 與 $\delta\rho$ 的比值定義為靈敏度方程式。如圖一所示。

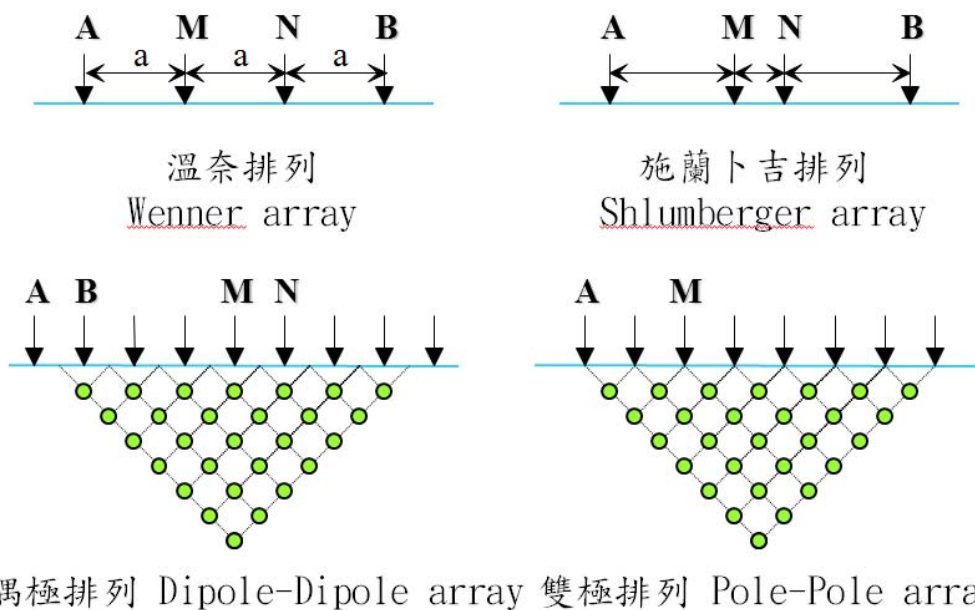


$$\frac{\delta V}{\delta \rho} = \int_v \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} dx dy dz$$

圖一、靈敏方程式

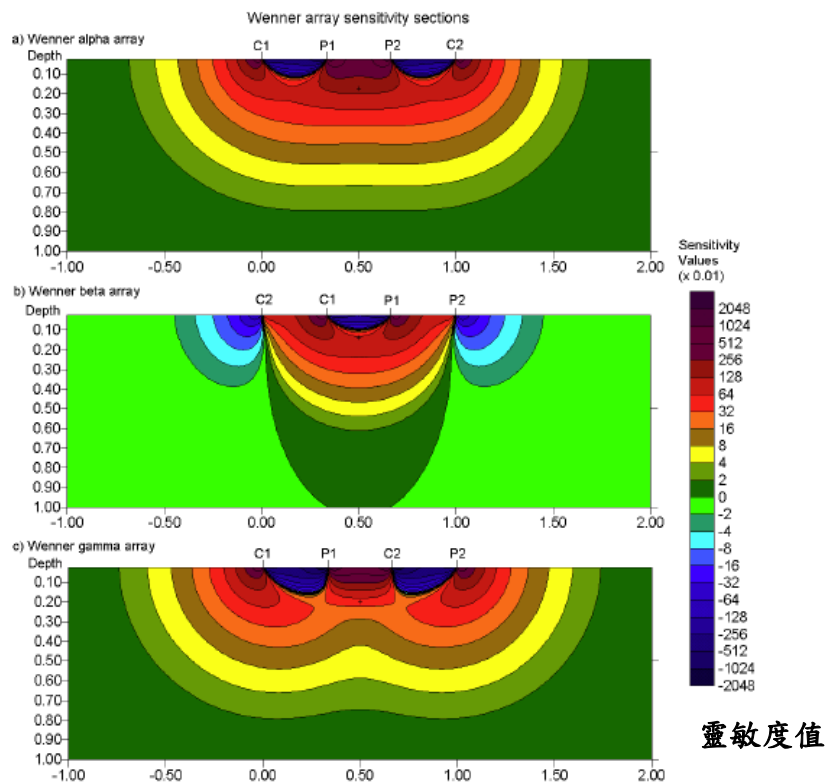
所以根據靈敏方程式在二維條件下之解析解 $F(x,z)$ ，可討論各種電極排列方式的靈敏度；如測線展距為 1 公尺時，根據不同電極排列其探測深度可由 0.025 公尺到 1 公尺。

以下為常見之電極排列法：



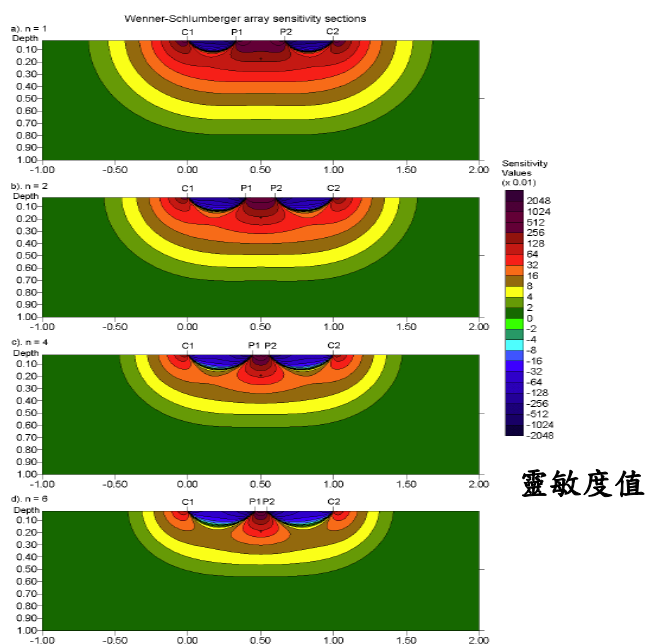
圖二、常見電極排列法

溫奈排列法(wenner array) 負靈敏度值出現在 C1(電流極) 與 P1(電位極) 之間及 C2(電流極) 與 P2(電位極) 之間，表示量測之視電阻率會下降；測線中心點以下的靈敏度變化為隨深度方向遞減，其變化程度大於水平方向。因此 Wenner 的垂直解析度比側向解析度佳，適用於探測水平層狀構造。



圖三、溫奈排列法靈敏度示意圖

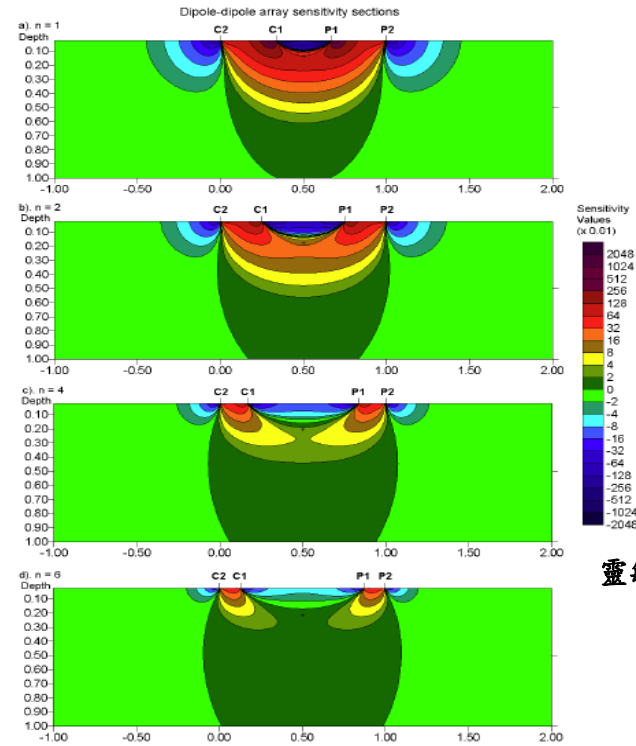
施蘭卜吉排列法(shlumbeger array) 當 n 等於 1 時和 Wenner 的靈敏度剖面相同， n 增加到 6 時，中心高靈敏度區域與 C1、C2 分離，集中在 P1、P2 以下。結果表示 n 值小時，對垂直方向變化感受大； n 值大時，對水平方向變化感受大。



圖四、施蘭卜吉排列法靈敏度示意圖

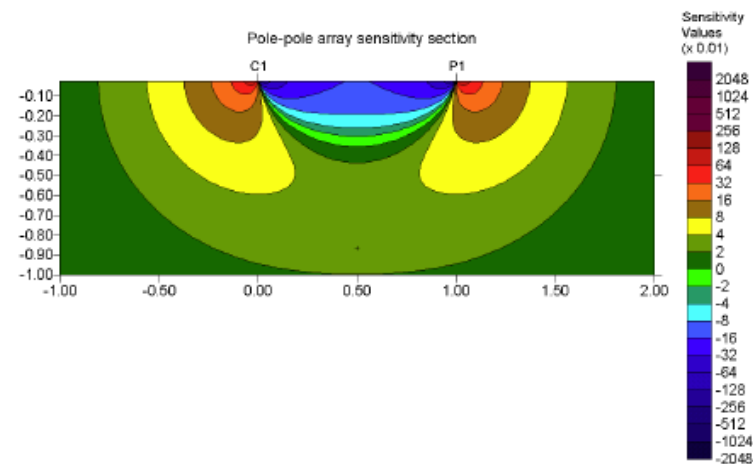
雙偶極排列法(dipole-dipole array) 當 n 等於 1 時，最大值出現在電流極 C1 與 C2 之間及電

位極 P1 與 P2 之間。高靈敏度集中在電流極之間及電位極之間，代表對於水平方向變化容易感受，而垂直方向變化幾乎不能感受到，因此當 n 大於 2 的量測深度資料比較不具備有代表性。



靈敏度值

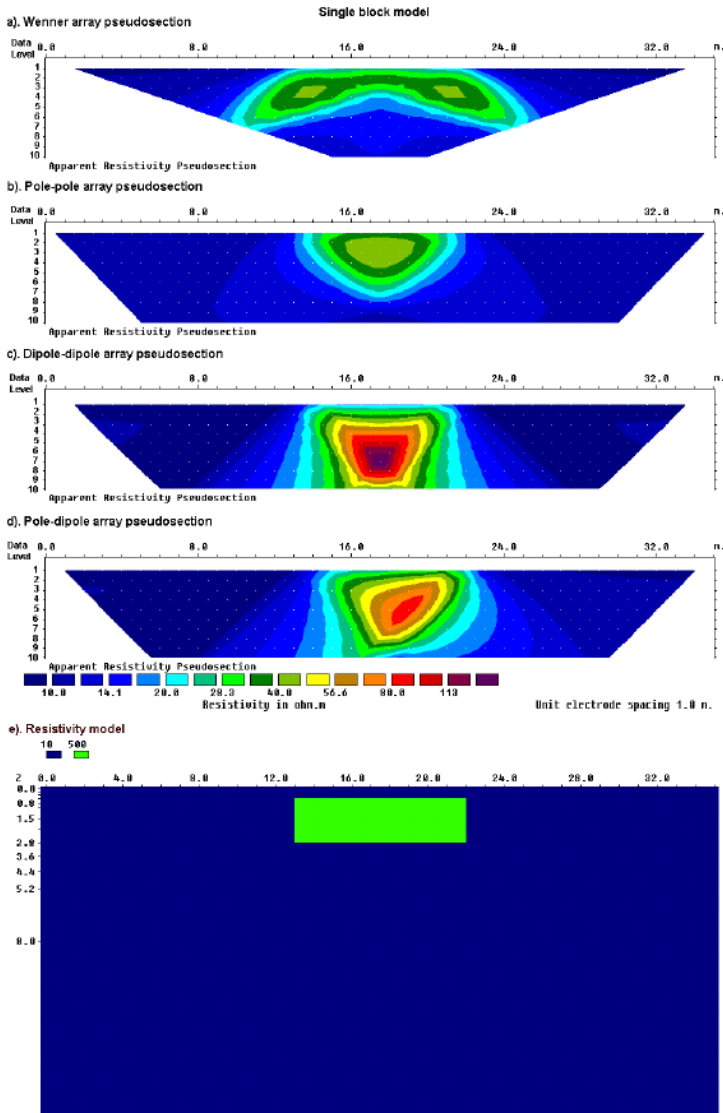
Pole-Pole 電極排列法雖有探測深度最深的優點，但垂直和側向解析度皆是最差。



靈敏度值

圖六、雙極排列法靈敏度示意圖

利用以上電極排列法特性建立一順演算模型，在一電阻率為 10 ohm-m 的地層中出現一相對高電阻率異常區，圖七則為各種電極排列法所得到的擬似剖面(非反演算剖面)，很清楚得知溫奈法垂直解析佳、二極法探測深度最深、雙偶極排列法水平方向容易響應真實狀態及三極法在擬似剖面中出現非對稱現象，此現象並非真實響應，而是傾向另一遠電流極。



Wenner array 溫奈法 擬似剖面

Pole-Pole array 二極法 擬似剖面

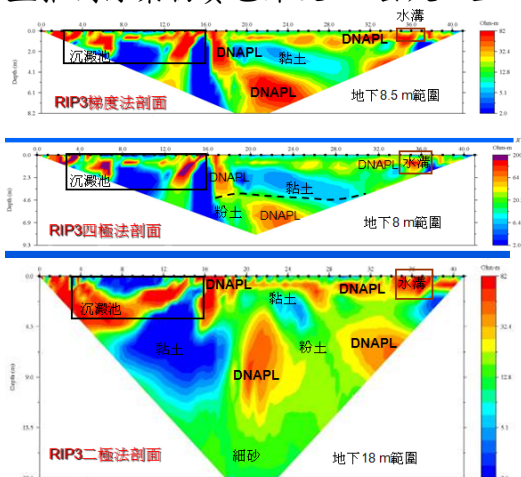
Dipole-Dipole array 雙偶極法擬似剖面

Pole-Dipole array 三極法擬似剖面

原始模型

圖七、四種電極排列順演模型之擬似剖面圖

圖八為北部某污染場址調查結果，其背景地層為黏土及粉土夾砂之地層，所以呈現相對低電阻率圖譜反應，污染物為 DNapl，利用三種電極排列法相互佐證，三種電極排列法大致電阻率分布雷同，但探測深度與細部電阻率曲線仍有不同，發現水溝兩側及沉澱池與地層接縫處均出現異常高電阻率訊號，並推測汙染物質已深及 15 公尺以上，並經土壤及地下水採樣證實。

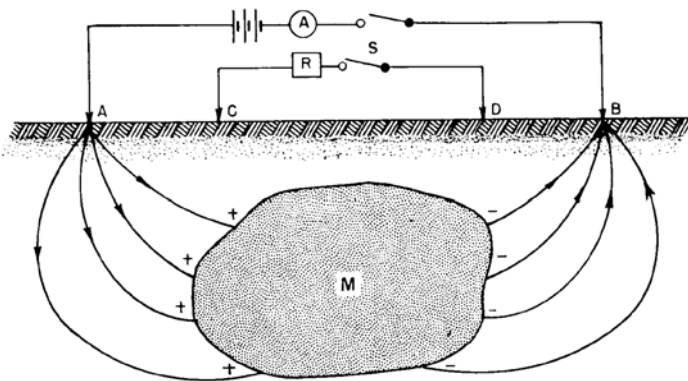


圖八、多重電極排列法於污染場址調查結果圖

根據前人研究：

1. LaBrecque, D. et al. 1998. Electrical resistivity tomography monitoring for process control in environmental remediation. The Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP), 22-26 March 1998, Chicago, Illinois. Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS), Wheat Ridge, CO. p 613-622.
2. Newmark, R., W. Daly, K. Kyle, and A. Ramirez. 1998. Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques. *JEEG*, Vol. 3, Issue 1, March 1998, p 7-13.
3. Aristodemou, E. and A. Thomas-Betts. 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environs. *Journal of Applied Geophysics* 44 (2000) p 275-302.
4. Slater, L., A. Binley, and A. Kemna. 2000. Case studies of engineering and environmental applications of induced polarization imaging. The First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies & NDT to Transportation Facilities and Infrastructure, December 11-15th 2000 St. Louis, Missouri.
5. Olhoeft, G. 1985. Low frequency electrical properties. *Geophysics*, 50, pp. 2492-2503.

等文獻結果在黏土層中皆有良好結果。



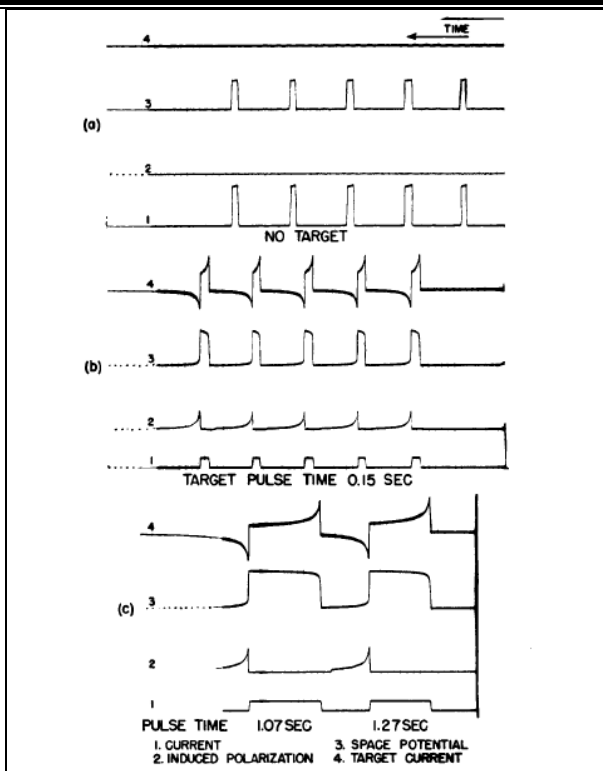
圖九、IP 施作示意圖(當電流截斷時，地層中極化物質 M 可以被 R 量測其電容率)

圖十中顯示了不同放電時間與是否經過污染物質，IP 皆有明顯的波形變化，圖 10.a 為完全乾淨之地層示波器圖形，而 b 與 c 地層皆有污染物質皆放電時間不同。本研究除了利用 IP 方法探討砂礫地層電性值外，亦會產出施測建議值，在未來使用此種方法時之建議參數設定。

Table 9.3. Chargeability of various materials.

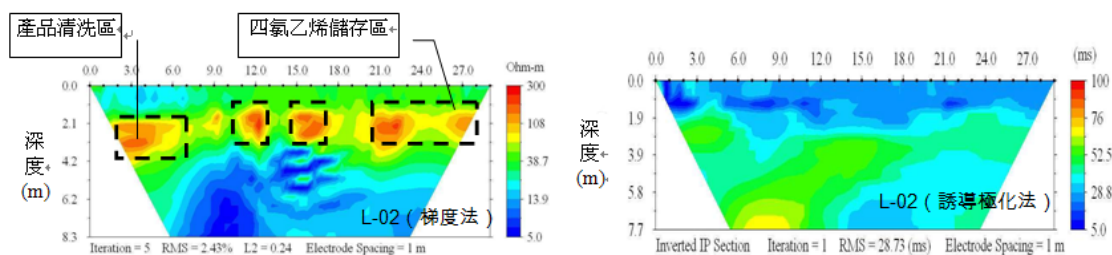
Material	Chargeability (ms)
Ground water	0
Alluvium	1-4
Gravels	3-9
Precambrian volcanics	8-20
Precambrian gneisses	6-30
Schists	5-20
Sandstones	3-12
Argillites	3-10
Quartzites	5-12

圖十、感應極化法圖譜(A.P. Annan)



圖十、典型地電法示波器記錄圖(D.F.BLEIL)

本團隊亦在南部某污染廠址中亦得部分成果，如下圖所示:感應極化法(induced polarization ,IP)係同時量測地層之電阻率及相位。IP 法除可分析地層與異常區之電阻率分佈外，並利用地層之頻譜相位資料進一步解析地層之極化現象 (Polarization)。而極化現象與地層中之極化物質，如黏土、金屬礦等之含量多寡有關 (含量愈多，極化現象愈高；DNAPL 則屬難極化物質)，有助於進一步釐清 ERT 剖面中異常區調查之電性資料。如圖十一之梯度法剖面顯示四氯乙烯儲存區下方屬低滲透性之矽黏土 (屬高導電性或低電阻率；電阻率低於 20 Ohm-Meters)，但 IP 法卻顯示地下 4~8 公尺範圍屬難極化物質 (藍色系)，代表附近的矽黏土地層遭受不導電的外來物質入侵 (如 DNAPL)。而採樣結果亦證實地下 5 公尺處發現四氯乙烯濃度高達 11,000 mg/Kg，地下水濃度 (90 mg/L) 亦超過四氯乙烯飽和溶解度之 60%。



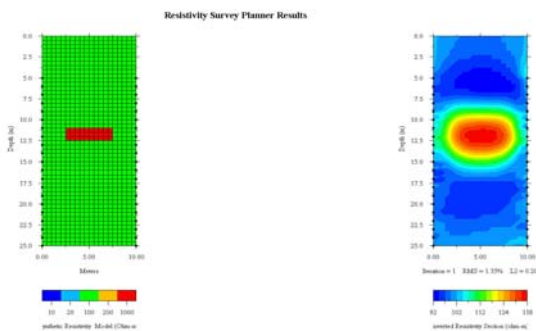
圖十一、南部污染場址電阻率剖面與 IP 極化率剖面圖

故本研究利用多重電極排列與感應極化法來研究砂礫質地層受 Dnaps 污染之調查技術提升，並利用增加發電功率與激發電壓提升電阻率剖面深部地層解析度不佳的問題，以解決台灣中部污染場址地下水位深，且測線施測長度不夠，測深不佳的現象。

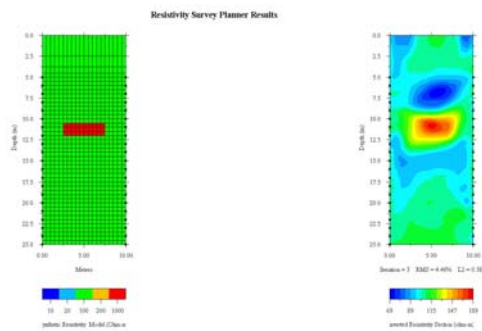
101 年研究成果概述：

前期計畫主要研究結果有二：一為發展高解析度透地雷達井測與多功能電極排列法之地電阻井測來調查工業區或是描繪污染傳輸路徑之研究；二為發展利用淺層地球物理方法（如感應電磁波法、水上透地雷達法與拖曳式連續地電阻掃瞄法）於地泥電性之研究。均得到良好結果與基本作業程序。

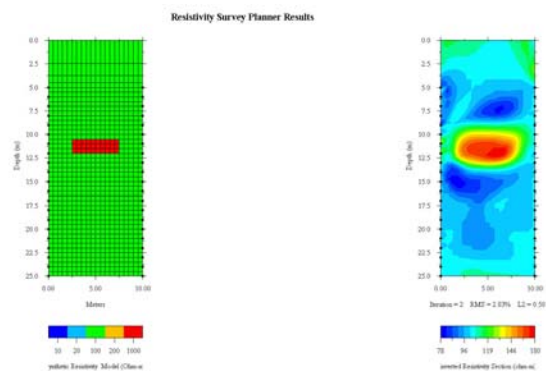
井測使用時機在工業區探測污染範圍時，路上地球物理探測位置主要是在公有道路上，無法明顯界定出污染方向，建議在此時使用地球物理井測，描繪出污染團之路徑，進而調查出污染源之位置。小區域底泥調查：綜合感應電磁波法（EM）、透地雷達法（GPR）與連續性地電阻掃瞄法（CRP）結果知：推測本研究區域河床沈積物主要為砂質地層，含泥量甚低。且河床深度東西兩岸明顯不同，河床深度西岸明顯比東岸深。沈積物電阻率分佈亦不相同，可檢測出新海抽水站至四汴頭抽水站間，東西兩側沈積物電阻率出現明顯變化。



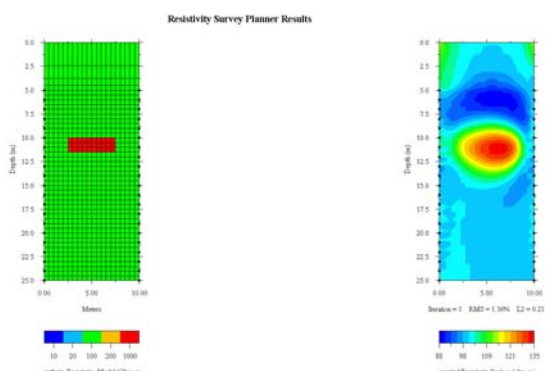
圖十二、雙極法順演模型



圖十三、偶極偶極法順演模型



圖十四、三極法順演模型



圖十五、多重電極排列法順演模型

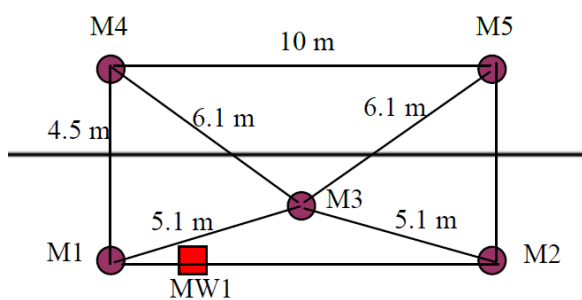
在環境、水文地質和工程的應用上，對於近地表特徵的細微描述的需求，有增加的趨勢，直流電阻法資料的獲得也越來越普遍，因為地表電阻率的變化可解釋為特性的改變，這種變化與這些應用有著密不可分的關係。直流電阻法的二維資料收集與逆推技術在過去幾年裡經歷了快速的發展，而二維的剖面可以被結合成合理精確的三維構造圖(Dahlin and Loke, 1997; Bernstone et al., 1997)，然而，在變化劇烈的環境中，三維井測技術是必須被考慮，尤其是對於地表構造變化劇烈的細微描繪。大多數關於跨孔電阻率井測的施測設計與其特性可以在許多文章中找到，電阻率影像的空間解析度取決於兩電

極的間距及目標物與背景之間的電阻率對比強度，電極間距越小可以得到越高解析度的影像，但是越小的場址，所能配置的電極數也越少。將視電阻率逆推為真實電阻率的模型是將其剖面網格化，以矩形的網格進行逆推，網格的寬度為電極間距(e.g., Bing and Greenhalgh, 2000)或二分之一個電極間距(e.g., Sullivan and LaBrecque, 1998)。跨孔井測的剖面垂直深與水平長的比值接近 1.5，或是再更大些，可以得到更佳的结果。(Ramirez et al., 1995) 然而，地電阻率井測仍存在一個大問題就是所謂的最佳量測方法(傳統的地表電極排列)並不能完全解決現場的問題(LaBrecque quoted in Slater et al., 2000)，因為這個原因，本研究的主要目的為找出跨孔井測於 DNAPLs 地層污染源定位中最有效的電極排列方法，本研究將先以模擬的方式分析各種排列的優劣，並於污染場中進行驗證。

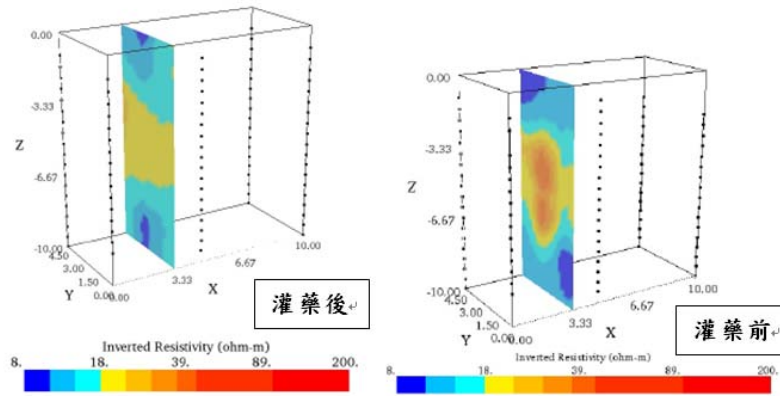
AB-MN 電極排列法是將電流極與電位極各自置於分開的兩井孔內，與其他兩種排列法比較，電流極與電位極間的距離相對較長。AB-MN 排列在資料收集上始終有個「奇異點」的問題，就是探測的電位差資料中含有太多接近零的值，即使電極間距不同，也存在此一問題，實際的應用上，會造成許太少的電位差被背景的雜訊給遮蔽(Bing and Greenhalgh, 2000)；另外，因為電流極都在同一井中的關係，電流還有可能沿著井內的水轉輸，而不是在井間的土層內傳送。AB-MN 排列法對於雜訊的敏感性，以及事實上大多數的污染場址都位在工業區內，基於這些理由，AB-MN 排列法並不適用於現地的污染調查之用。地電阻井測在模擬現場量測之結果均顯示新的跨孔方法可以定出井間微小的高電阻率異常，其原因是當井間存有具高電阻率的 DNAPLs 薄層時，電流線會產生相對的變形。雙偶極排列法的模擬結果亦顯示出合理的結果，但井中間的影像則略顯失真，而 AM-BN 雙偶極排列的探測成果則為最差。另一個三極法重要的優勢在於其探測的點數(也就是探測時間)約為其他電極排列法的一半。

實場驗證結果：

本試驗區主要目的在利用電阻率井測描繪灌藥前後地層電阻率變化，進而研判污染物是否會隨著時間電阻率出現變化。電阻率色階藍(冷)色系表示相對低電阻率，紅(暖)色系表示相對高電阻率。電阻率的差異可反應出地下現況的改變，依現場地質條件研判，有機類物質電阻率將高於地層材料(鄰海沉積物質)，因此探測成果中將著眼於橙色至紅色系所代表之相對高電阻率的變化，它可能表示出地下現存污染物質是否仍存在的可能性與移動方向的潛勢。但整治過程同時也可能注入有機藥劑，並包含抽水、灌注等方法，當整治藥劑尚未完全反應完畢時，亦有可能會造成地下電阻率的改變。

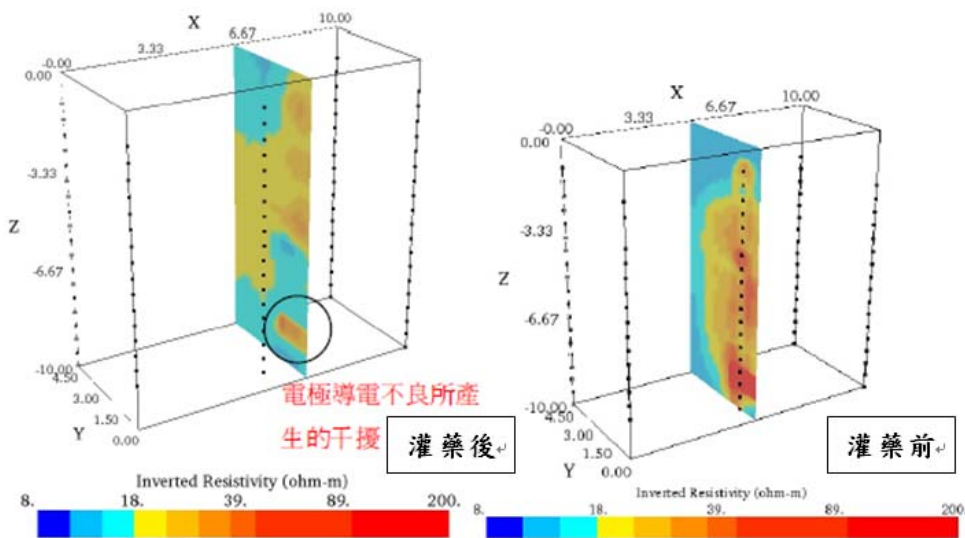


圖十六、井場位置示意圖



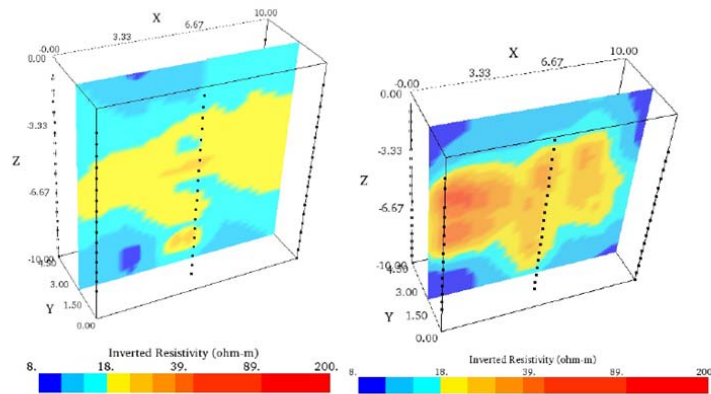
圖十七、灌藥前後電阻率圖

M1 井與 M3 井之間(M4 井與 M3 井之間)，原存有的高電阻率明顯有下降的趨勢，研判此區域的整治已有顯著的成效。



圖十八、灌藥前後電阻率圖

M3 井鄰近區域的電阻率亦明顯下降，表示 M3 井的整治有不錯的效果，圖中的黑框為 M3 井底部電極通電不良所致，經由現場測試研判應屬干擾雜訊資料，並非反應出地下現況，井深度 5 m 以上仍有局部高電阻率的反應，方向似由西向東擴散，推測係污染源區現存尚未整治完成的污染物所致。



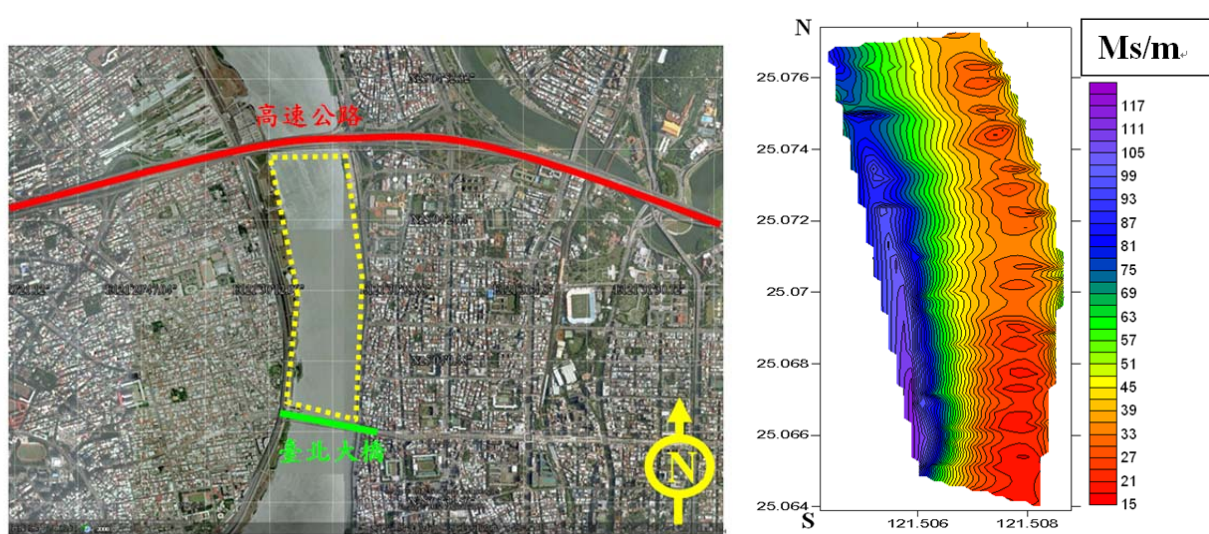
南北向的剖面亦可明顯發現電阻率大幅下降的趨勢。

M3 井以南的電阻率下降幅度更為明顯，M2 與 M5 號井之間平均電阻率雖有上升的趨勢，但最高電阻率則是明顯下降，比對最新的採樣數據，此兩口井目前均無明顯污染物存在，研判主要的污染物質已抽除，地層平均電阻率升高係反應自注入的藥劑，唯獨必須注意的是，M2 號井深度 3-5 m 之間仍電阻率仍相對略微偏高，無法排除南側的污染源區現存的污染物仍有向東擴散的可能性。依本研究研判，本測區南側(M2、3、5 號井)電阻率有明顯下降的情況，此部分與最近的採樣結果相符，此三口井附近已無明顯污染物，整個測區相對高電阻率仍集中在北側與部分的西側，因此仍需注意北側與西側的污染物質擴散的情形。

底泥調查評估結果：

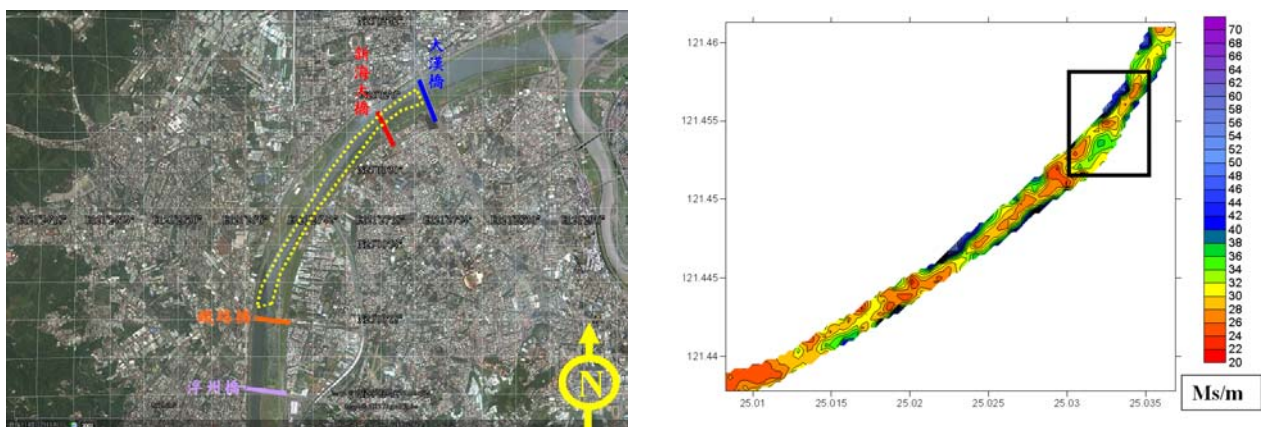
本研究屬於評估可行性計畫，主要利用感應電磁波法 (EM)、水上地電阻影像連續掃瞄法 (CRP) 等技術進行底泥電性反應調查工作，於期中報告，已完成台北橋至鐵路橋間感應電磁波法探測，未來根據 EM 技術調查結果，選定區域進行細部水上地電阻影像連續掃瞄法 CRP 法與透地雷達法 (GPR) 調查底泥深度與其電性地層反應。調查區域為大漢溪新海抽水站附近，小區域可行性評估研究。大漢溪為淡水河系中最長之支流，下游河川沿岸多屬工業區，中游段河床採砂場林立，現今新莊、板橋間廢水竄流與砂石濫挖，沿河下游兩岸之樹林、新莊板橋等鄉鎮大量都市污水與工業廢水排入，構成河川水質嚴重污染。淡水河與大漢溪流經大台北都會區，大量人口所產生之廢污，可能對淡水河與大漢溪沈積物重金屬產生重大之影響。大漢流域約有 133 萬人口，主要集中在三重、板橋、中和與新莊等區域，且因污水下水道普及率偏低，大部分家庭污水均未經妥善處理，即排入河川中造成污染，又流域中工業廢水流入至大漢溪者約有 900 餘家，主要以電鍍業者居多，金屬表面處理及染整業居次，成為大漢流域最大之污染源。大漢溪的新海橋及華江橋底泥 Cr、Cu、Zn 均明顯偏高，中鼎公司調查大漢溪有 570 家電鍍、染整及金屬表面處理工廠有關 (環保署, 1998)。楊等 (1998) 分析大漢溪底質金屬發現 Cr 介於 32.1~149ppm(平均 57.7 ppm)，Ni:18.6~98.2ppm(平均 45.6ppm)，Cd：<0.02~0.16ppm(平均 0.07ppm)，Zn:56.9~362ppm(平均 133ppm)，Pb:13.5~54.0ppm(平均 22.9ppm)，Cu:8.6~379ppm(平均 78.5ppm)。

台北大漢溪上游及下游施作地球物理法作底泥調查，目前已完成電磁法（EM）的資料收集，本場址使用低頻率之線圈，探測 10 m 內之導電度的綜合效應，可快速且有效的界定出異常區域與範圍。依據施測結果共分為兩個區域來說明探測成果：（1）下游 EM 區域；（2）上游 EM 區域。



圖十九、大漢溪下游感應電磁波法探測結果

本區感應電磁法位於大漢溪下游高速公路橋至臺北大橋間之河道施測，以臺北大橋為起點以 N 字型來回轉反覆接收資料，圖 27 黃色虛線處為下游之施測範圍。圖 28 為 EM 探測成果圖，圖上顯示測區範圍之導電度在 15~120 mS/m 間，其中河道可因導電度對半分為左右兩側，河道右側導電度相對較低約 5~40 mS/m 間；河道右側導電度逐漸升高至 80~120 mS/m 間，研判此處為下游堆積區相較於河道右岸材料明顯不同於左岸。

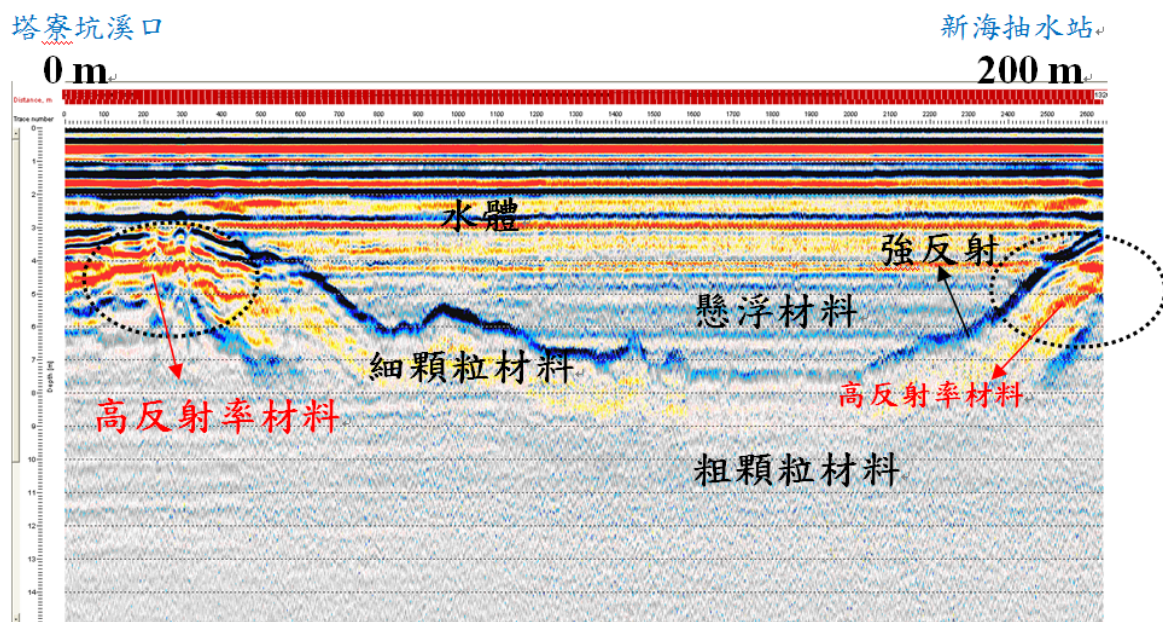


圖二十、上游感應電磁波法探測結果圖

本區電磁法位於大漢溪上游大漢橋至鐵路橋間之河道施測，以鐵路橋為起點以 N 字型來回轉反覆向下游行進並接收資料，部份區域因水勢較低，船隻無法通行故無法進行檢測，圖 29 黃色虛線處為上游之施測範圍。圖 30 為 EM 探測成果圖，圖上顯示測區範圍之導電度在 20~70 mS/m 間，導電度相較於下游低，河道兩側導電度均較高約在 50~70 mS/m 間，河道中間導電度在 20~30 mS/m 間，相對於較穩定。由此結果研判，河道兩側因異物堆積造成導電度的改變，而河道中間因導電度變化穩定。根據上下游 EM 探測結果，本探測河流在高速公路橋與台北橋間導電度分布明顯西岸遠高於東岸，上游 EM 探測導電度曲線較為異常且梯度大的地方黑色方框位置，推測接近新海橋至塔寮坑溪間流域。下表為採樣結果。

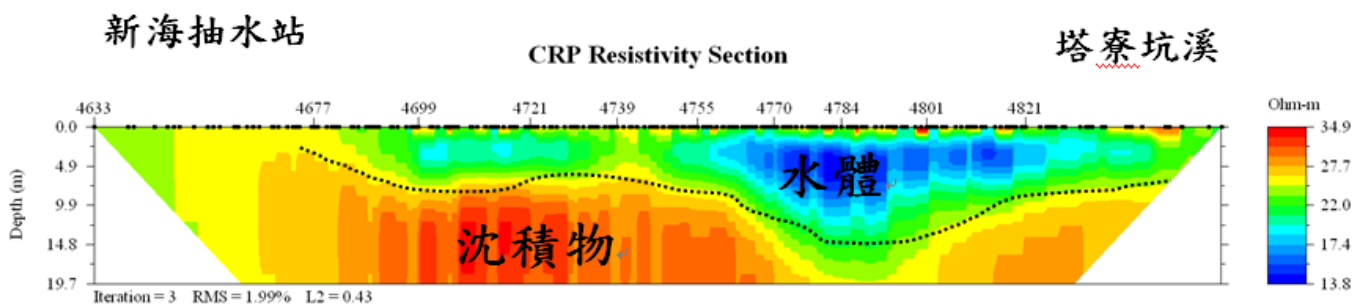
底泥採樣分析結果

測站名稱	導電度(μ mho/cm)	生化需 氧量 (mg/L)	化學需 氧量 (mg/L)	Pb(mg/L)	Cr(mg/L)	Cu(mg/L)	Zn(mg/L)	Ni(mg/L)
塔寮坑溪	806	33.7	110	0.01	0.23	0.91	0.39	0.41
新海抽水 站	479	31.3	87.5	ND	0.01	0.01	0.04	<0.005
新海大橋	319	3.6	16.8	ND	0.01	0.03	0.04	0.03



圖二十一、新海段透地雷達施測結果圖

本研究使用加拿大系統 EKKO PRO 50Mhz 天線施測，激發電壓 1000V，Sampling Interval 為 1600，疊加次數為 8 次，天線間距 1 公尺，使用美國 Trimble 公司圓盤型 GPS 天線進行定位。施測位置由西向東施測，起點為塔寮坑溪口向新海抽水站。測線長度總長為 200 公尺，可信深度約 10 公尺。由圖 33 知整體透地雷達剖面由深度可以分為四層，第一層為水體深度約在 3-4 公尺，第二層為懸浮材料與水體混合厚度 1.5-2 公尺。夾在河床底部強反射與水體間之過渡帶。第三與第四層則在透地雷達強反射以下之河床材料。在測線起點位置深度約在 3-6 公尺出現一紅色強反射高振幅，測線尾段亦出現相同物理性質之材料，但強度明顯較低。與採樣結果相符合，推測此處地層材料含有重金屬，所以出現金屬般之強反射。此強反射愈往河床中段愈不明顯。



圖二十二、水上連續性地電阻掃描法施測成果圖

圖二十二為 CRP 施測結果圖，本剖面綜合聲納系統所量測結果加上 CRP 所量測電阻率成果，綜合反算所到的成果。施測方向為由東向西施測，圖中黑色虛線即聲納系統所繪製底層結果。整體電性地層結果，根據聲納與電阻率曲線分佈知，淺層約 2-8 公尺為水體電阻率，此區域結果明顯與透地雷達結果同，此區域水體電阻率明顯東側高於西側，推測兩側注入河川物質電阻率明顯不同。第一層材料，主要出現在測線中間，推測此材料應與河川回淤沈積物有關。此區域電阻率則與水體電阻率接近，在此區域有出現一高電阻率包，電阻率大約超過 30 歐姆-公尺以上，此異常區應為沙洲或是有機物所造成之高電阻率現象。超過此層至第二材料層，電阻率在左右岸則呈現明顯不同，東岸呈現相對高電阻率材料所組成電阻率大約在 30-35 歐姆-公尺，而水道中間至左岸呈現相對低電阻率材料組成。建議在此兩處採取樣本來釐清是否有受到污染的潛勢。採樣結果與透地雷達方法成果相當吻合。

主要研究發現與結論

(1) 本研究利用地電阻法井測與透地雷達井測兩種方法，目的是在傳統地球物理調查後，以清楚描繪出污染傳輸路徑，或是補足傳統調查方法深度不足的問題。以調查案例一，利用群井地電阻調查技術，可完整描繪出污染物容易匯集區域，利用三維實測資料展現出污染流動路徑，由於非模擬結果，相關地層資訊亦可提供建立水文地質模型，而描繪出真實地層構造。另在使用地電阻井測時，建議使用二極與四極法共同進行資料收集，因為井測電極在地層中，幾何位置以不同於地表施測位置，電流極與電位極的排列會讓二極法施測時，量測出現不準確現象，且容易量測之電位差非真正地層電位差，而是自然電位，此結果容易造成誤判。

透地雷達井測主要是補足傳統調查方法深度不足之資訊，且可利用設井位置，描繪出污染從何處匯集。此種方法主要是利用跨孔或是單孔方式調查。本研究主要是利用跨孔方式，進行雷達井測調查之適用性評估，以本研究案例知，透地雷達井測利用 MOG 探測方法可清楚描繪出污染物在地層中流動之路徑。建議使用透地雷達井測時，建議使用斷層掃描方式之探測方法，如 MOG 與 VRP 探測方法，盡量不要使用 ZOP 探測方法，因為 ZOP 法為等間距調查技術，資料點少，且只點取直接波位置，不易掌握地層污染物資訊。如果純粹調查地層材料分佈，此種方法是最快速且經濟的方式。

綜合地電阻井測與透地雷達井測使用時機，例如在工業區探測污染範圍時，路上地球物理探測位置主要是在公有道路上，無法明顯界定出污染方向，建議在此時使用地球物理井測。如果是舊設井且井深在 20 公尺內，建議使用透地雷達井測，且使用 VRP 法，單井 360 度旋轉施測，以界定出污染物傳輸路徑。本方法以試用在含氯工廠探測計畫，成功界定出污染位置與方向，並公告污染行為人。而新設井且井深超過 10 公尺，污染範圍較大者，建議使用地電阻井測，且井深與兩井間距離建議大於 1.5 倍可壓抑雜訊，增加施測資料可信度。最佳資料解析度為二分之一電極間距。

井測技術主要使用時機為界定污染源位置與流動方向時之探測方法，透地雷達井測技術主要限制條件為探測範圍因為電磁波容易受到地下水及地層導電度影響，所以在單井（VRP）施測時，施測範圍在井周 5 公尺範圍，雙井調查時兩井間不能超過 10 公尺，其優點為不需新設井，在目前普遍 PVC 井管中便可施測。而電阻率井測為主要限制是必須運用在新設井，必須預埋電極，而井間距離符合井深與兩井間距離大於 1.5 倍幾何因子即可。建議使用多重電極排列法以增加資料可信度與完整性。

(2) 綜合感應電磁波法（EM）、透地雷達法（GPR）與連續性地電阻掃描法（CRP）結果知：推測本研究區域河床沈積物主要為砂質地層，含泥量甚低。且河床深度東西兩岸明顯不同，河床深度西岸明顯比東岸深。沈積物電阻率分佈亦不相同，可檢測出新海抽水站至四汴頭抽水站間，東西兩側沈積物電阻率出現明顯變化。需要進行進一步調查工作。

本研究目的在提供河床底泥調查一個快速且經濟的粗篩工具。因為河床沈積物採樣要一定困難地

方，因為採樣深度因採樣機具架設受限且費用昂貴，所以利用兩階段水上地球物理調查是可以將點資料擴及至面資料，可以將採樣點設置在高潛勢區域上。

兩階段水上地球物理調查：

- (一) 第一階段利用水上感應電磁波 (EM) 探測技術，將施測區域作全範圍沈積物導電度調查，繪製導電度異常平面圖。並利用少許採樣進行資料校正與率定使用。
- (二) 第二階段利用感應電磁波 (EM) 率定結果，選擇高潛勢區域進行水上透地雷達 (GPR) 及連續性地電阻掃瞄法 (CRP) 兩種方法，目的在得到真實電阻率電性地層分佈與高反射率及異常界墊常數物質分佈，提供有重金屬污染及有機物匯集區域。提供業務單位進行採樣驗證。另透地雷達結果提供 0-10 公尺高解析度資料，而深度超過 10 公尺以上地層資訊則需要連續性地電阻掃瞄法 (CRP) 提供，此兩種方法相輔相成，缺一不可。

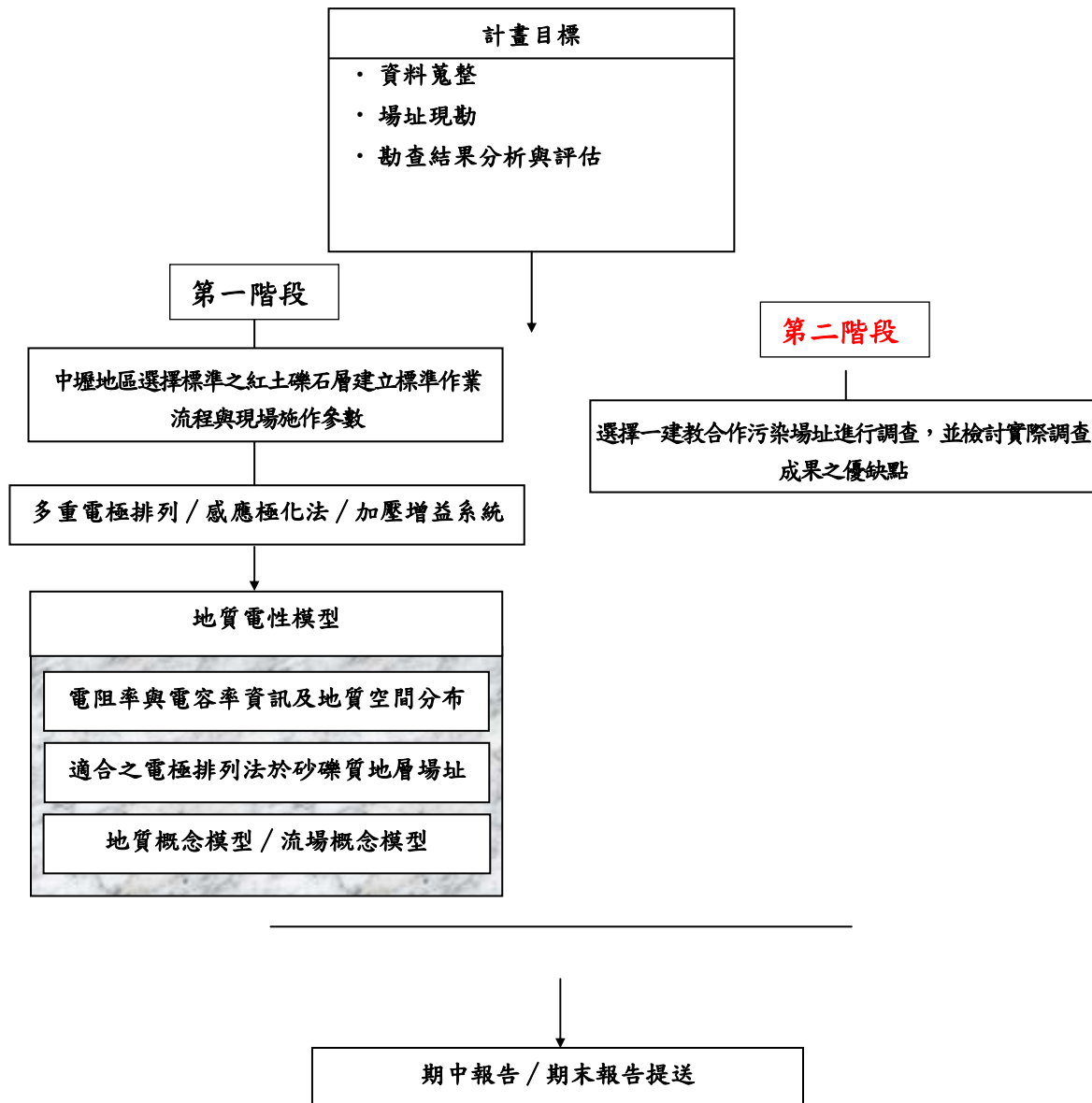
底泥調查技術使用時機與順序，建議先由感應電磁波法進行大範圍粗測，繪製研究區域地下地層導電度分布圖，再利用透地雷達法 (GPR) 或是連續性地電阻掃瞄法 (CRP) 進行細測。此調查技術主要限制為探測深度與水體導電度，如果水體電阻率在 40 Ohm-m 以上，透地雷達探測深度可增加 30% 以上，水上連續性地電阻掃瞄法亦是如此；如果水體電阻率在 40 Ohm-m 以下甚至更低，探測深度會明顯折減 50% 以上，所以在此時便建議使用聲波系統 (Sonar System)。

四、研究方法及步驟

請詳細說明採樣方法與原因、預計可能遭遇之困難及解決途徑，貴重儀器使用情形；

模場試驗需增加說明執行方法、模場規模及相關配套措施。

本研究核心內容為利用多重電極排列法搭配感應極化法技術調查砂礫質地層發生 Dnapi 污染之研究。因此文獻收集、現場實作與實場調查驗證是本研究三個重要的步驟。



現地資料收集，利用本研究中心相關建教計畫進行現地資料收集。相關貴重儀器本研究中心均有，不需額外採購或與貴重儀器中心租用。

研究方法技術

1. 地電阻影像掃描法 (Electrical Resistivity Tomograph, ERT)

ERT 法屬直流電阻法，其方法原理係利用直流電經電極棒通入地下量測地層電阻率，並以電性區分地層。舉凡地層岩性、組成礦物、顆粒大小、地層含水狀況、水中之含鹽度，皆為影響地層電阻率

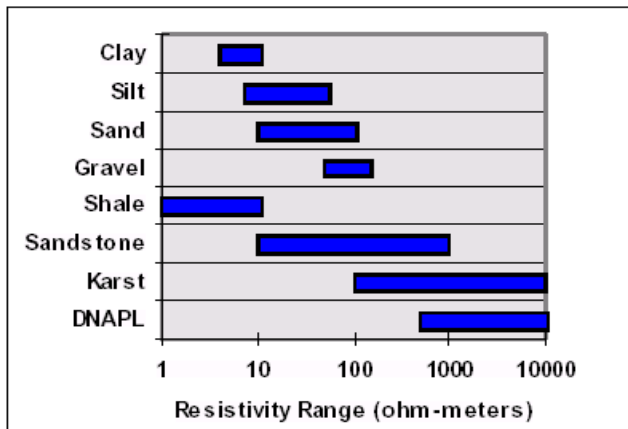
之因素。故直流電阻法所測得之電阻率資料，配合地質狀況及鑽探的分析結果，可正確地研判水位、含水層、阻水層（或滯水層）分佈、地層岩性構造及地層中之異常區（如污染訊號）。目前國內外已有許多實場調查結合地球物理探勘技術輔助建立特徵概念模型（董倫道等，1995；Zeng and Gorelick, 2003; Bowling et al., 2005, 2006）。特別是近年來 MADE（Macrodispersion Experiment）場址大量研究以 ERT 探勘剖面逆推大範圍含水層之水力傳導係數（K）值分佈。Niwas and Lima（2003）指出電阻率變化深受孔隙水質影響，例如土壤孔隙中水較乾淨，則電流之傳導主要受土壤-水界面導電性之影響；若孔隙水含高鹽度（或其他污染物質），則電流之傳導主要與孔隙水之導電性有關。由於相同地質條件會因水質化性不同而有迥異結果，因此亦可運用於污染場址調查。圖十三為比較飽和土壤中各種地質材料及 DNAPL 之電阻率分佈，可發現愈細粒之材質其電阻率愈低（亦即導電性佳），因此較容易導電的黏土、粉土之電阻率均甚低，如黏土之電阻率一般應小於 10 或 30 Ohm-Meters，砂質約 10～100 Ohm-Meters，礫石則較高，約在 70～300 Ohm-Meters，DNAPL 之電阻率一般多超過 1,000 Ohm-Meters，比礫石、砂質或粉土含水層之地質電阻率高出許多，由於 DNAPL 具有高電阻率的異常特徵，因此容易與地層區別開來。加以 ERT 探勘深度將隨測線展距增加而加深，可同時評估各深度之地質變化與污染分佈。ERT 法於特定探勘位置需於地表配置四根電極，在其中兩電極（電流極：A 與 B）以交替直流電（Alternative Direct Current）通入地下，並用電流計量測電流強度；此時在另兩根電極（電位極：M 與 N）量度因電流分佈所造成的電位差，ERT 法施測原理與現地探勘示意如圖十四所示。

過程所量測之電位差與通入地下的電流強度、電極間的相對位置及地層的導電性有關；若測得電流強度 I 、電位差 V 及電極之相對位置可計算出相對均質半空間地層的視電阻率（Apparent Resistivity） ρ_a ：

$$\rho_a = K_{GF} (V/I)$$

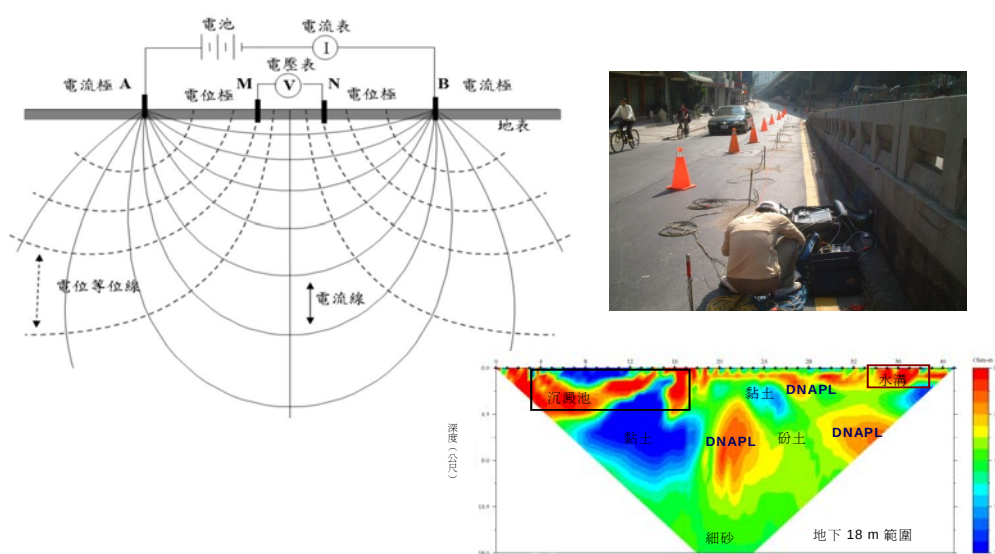
式中 K_{GF} 稱為幾何因子（Geometric Factor），與電極排列的相對位置有關； ρ_a 通常不代表地層之實際電阻率，而是代表在此種電極排列情形下所有地層電性之綜合效應。電流極展距愈大，其效應相對反映較深地層之電性特性，因此在探測過程中將電流極展距逐次加大，可逐次獲得由淺至深的地層反應，經逆推（Inversion）處理後可以獲得地層之真實電阻率與厚度。

地電阻法測勘過程中通入地下電流的頻率變動不大，其探測深度除受地層導電性質影響外，探測深度與電極展距成正比，屬於一種幾何測深法，間距越大其探測深度越深，不過相對地解析能力便會有所降低，所以必須根據探測目的，在探測深度與解析度兩者之間取得平衡，以獲得較佳結果。



資料來源：修改自 Keller, G.V.; Frischknecht, F.C., Electrical methods in geophysical prospecting, Oxford, 184p, 1966.

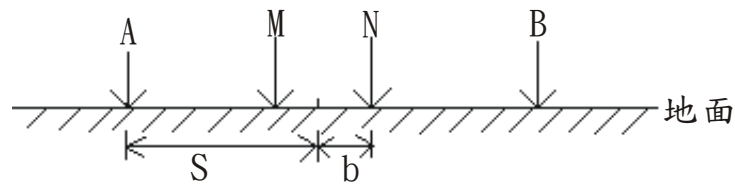
圖十三、地下環境不同介質之電阻率分佈範圍



圖十四、ERT 法施測原理與現地探勘示意圖

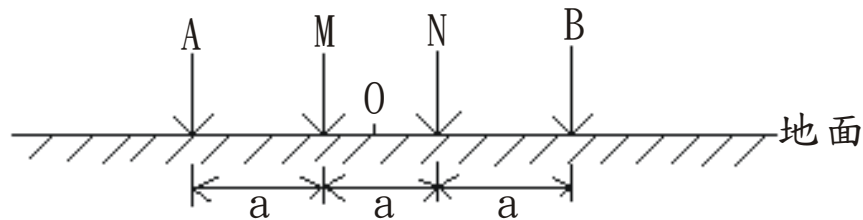
施測時的電極排列方式有多樣，下列五種方式較常使用：

- (1) 許倫貝格(或稱施蘭柏吉)排列(Schlumberger array)：是一種線形對稱的排列，四支電極排在一直線上，電流極在外，電位極在內如下圖，通常電流極間距較電位極間距大四倍以上($s \geq 4b$)。作垂直電探時將電流極由小展距逐次加大，以逐漸增加測深。理論上電位極間距不必更動，因此在探測時只要移動電流極即可。若電流大小不變，電流極展距增大，電位極間的電位差必下降。因此在實際探測時，當電流極展距增大到某一程度時，必須加大電流或是加大電位極間距以測得較強的訊號。本排列法之主要優點是較省人工，並且受地層側向局部異常影響較小，資料品質較佳。



Schlumberger array 示意圖

- (1) 溫奈排列(Wenner array)：也是一種線形對稱排列，以等間距將四支電極排在一直線上，在內的兩支為電位極，在外的兩支為電流極如下圖。做垂直電探時需同時移動四支電極位置。其主要優點是儀器精度要求不高，且計算視電阻率容易。缺點是探測時較費人工，且因每次移動電位極，將使地表淺部的局部不均質與地下訊號混合造成資料品質較差，易導致錯誤解釋。



Wenner array 示意圖

- (2) 雙偶極排列(double-dipole, dipole-dipole array)：二支電流極形成一個偶極，二支電位極形成另一偶極，二組偶極之間的距離比偶極間距大很多($OO' \gg L, \ell$)。雙偶極排列有數種常用的形式。較適合作深部地層探測(百公尺以下)。

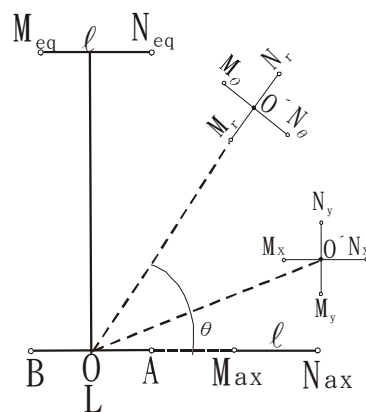
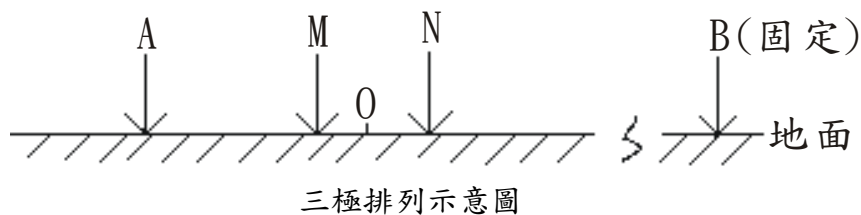


圖2.4 dipole-dipole array 示意圖

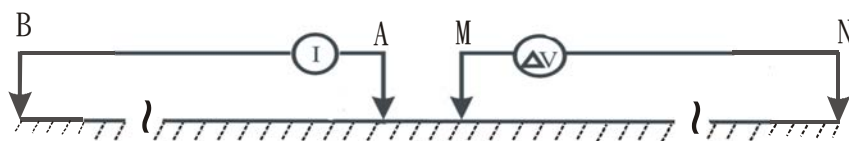
- (3) 三極排列(three-point array)：三極排列是將一支電流極(B 極)置定於遠處稱為遠電流極，二支電位極(M 與 N 極)和一隻電流極(A 極)置於探測區，稱為測量極，如(圖 2.5)。遠電流極至電位極中點之距離(BO)比測量電流極展距(AO)大 10 倍以上。做垂直電探時，測量電流極展距由小逐次增大，

可測得由淺而深的地層訊號。若將 A, M 與 N 極排成一直線，也稱為半許倫貝格排列。理論上，在水平地層情況，三極排列與許倫貝格排列可獲相同的探測結果。在實際探測中， BO 之置定距離可以不大於 $10 A_0$ ，只要 $BO \geq A_{0\max}$ ，也可測獲相似深度的地層訊號。



三極排列示意图

(4) 二極排列(pole-pole array)：二極排列是將四極中之一支電流極(B 極)與一支電位極(N 極)分別置定於遠處，且彼此相距很遠，另一支電流極(A 極)與一支電位極(M 極)稱為測量電極，置於探測區如(圖 2.6)。B 與 N 極稱為遠極，通常 $BM \geq 10AM$ ， $MN \geq 10AM$ ， $BN \geq 10AM$ 。二極排列通常使用在剖面探測上。在探測目標線上預先等間距排置多支電極，先用第一支電極作電流極，第二支，第三支，至第 N 支依次作為電位極，可得 N 個不同展距的訊號。其次用第二支做電流極，第三支，第四支，……第 N+1 支依次作電位極，也同樣測獲 N 個不同展距的訊號。再次用第三支做電流極其鄰下 N 支電極依次作電位極，測得 N 個不同展距的訊號。如此依序更替電流極及電位極，可測得一個剖面 N 個不同展距的訊號(稱為 N 層探測結果)。



Pole-Pole array 示意图

資料推求地層參數的工作稱為解釋。觀測資料是電流、電位差與電極位置。一般將此資料表示成電極排列時的等效電阻率(視電阻率)。推求地層參數首先需要知道電位函數，但電位函數由地層構造決定，然而地層構造通常是不知道的。較進步的解釋法是先假設地層的構造，依設定的地層模型求出電位函數，並計算對應於觀測值的模型值。再計算觀測值與模型值的差異，若差異過大則調整或修改模型以求達到觀測值與模型值的差異小到可被接受的範圍，解釋工作即告完成，此方法稱為逆推法。目前大多使用逆推方法作解釋，以其能顯示觀測值與模型值之差的大小，並有效地調整地層參數，使差異量降低，以達可接受的擬合程度。在 1970 年之前，逆推解釋法未完全建立，彼時先繪製許多不同模型的理論值曲線(通常繪成視電阻率曲線，稱為標準曲線)將實際觀測結果與模型的結果作比較以作解釋。除了極少的例子，此種方法無法顯示擬合程度的高低，對地層參數的可信度也不能評估。

逆推解釋的工作流程

(1) 將實測資料建檔(電極位置，電流，電位差，視電阻率)

- (2) 繪實測視電阻率曲線
- (3) 設立逆推的起始模型
- (4) 計算模型之視電阻率
- (5) 計算實測值與模型值之誤差向量，及均方根相對誤差。
- (6) 若均方根相對誤差未小至可接受程度，則依誤差向量作模型調整，接著作(4)與(5)步驟，以降低均方根相對誤差。直到誤差小到可接受程度。

當設立起始模型與實際地層構造或其等效地層構造差異太大時，調整模型將無法達到均方根誤差小至可接受程度，此時必須修改起始模型才可能獲得有效的結果。

2. 感應極化法(Induced Polarization, IP)：

感應極化法 (Induced Polarization, IP) 又稱複數電阻法 (Complex Resistivity) 是地電方法之一，係以寬頻譜（一般為 2.4-2.9 Hz）來量度岩層之電阻率及其相位。電阻率和岩層中之含水量及岩性有關，相位則和岩層之極化（Polarization）效應關係密切。一般之直流電阻法從測獲之電阻率資料中分析地下之電阻構造，而複數電阻法則除了分析岩層之電阻率外，尚利用岩層之頻譜相位資料進一步解析地層之極化現象，而極化現象與岩層中之極化物質，如黏土、金屬礦等之含量有關，有助於地電資料進一步之解釋。岩層之複數電阻譜可以柯爾 (Cole-cole) 頻散方程來描述：

$$Z(\omega) = R \left\{ 1 - M \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega T)^C} \right] \right\}$$

其中 (R,M,T,C) 稱為柯爾參數。

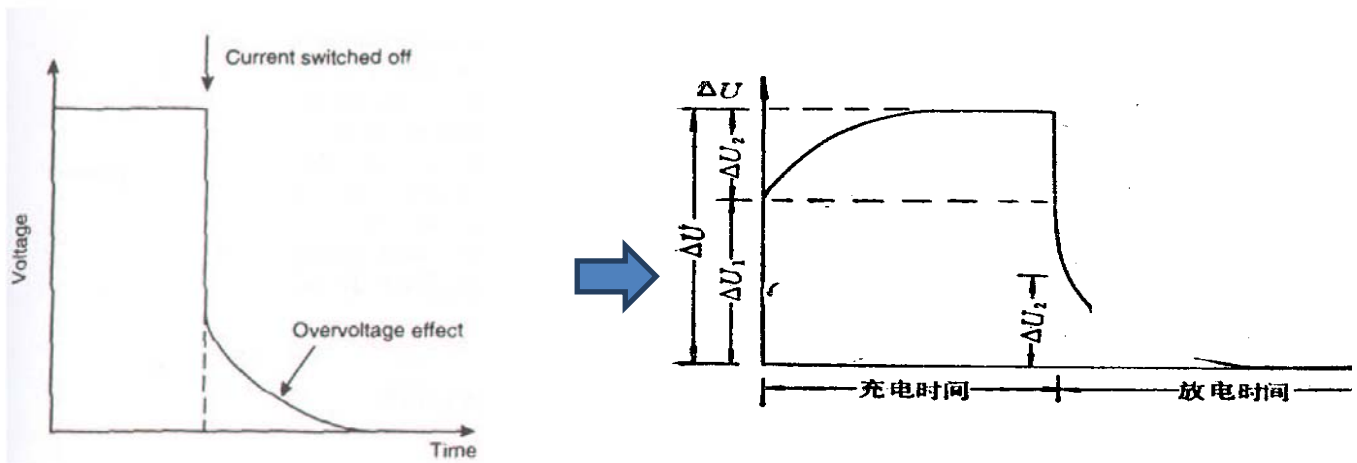
柯爾參數與複數電阻譜間之關係：

- (A) R 增加時，振幅增加，相位不變。
- (B) M 增加時，相位曲線峰值增加。
- (C) T 和相位峰值所在之頻率有關，T 愈大則峰值所在之頻率愈低。
- (D) C 增加時，相位曲線斜率增加。

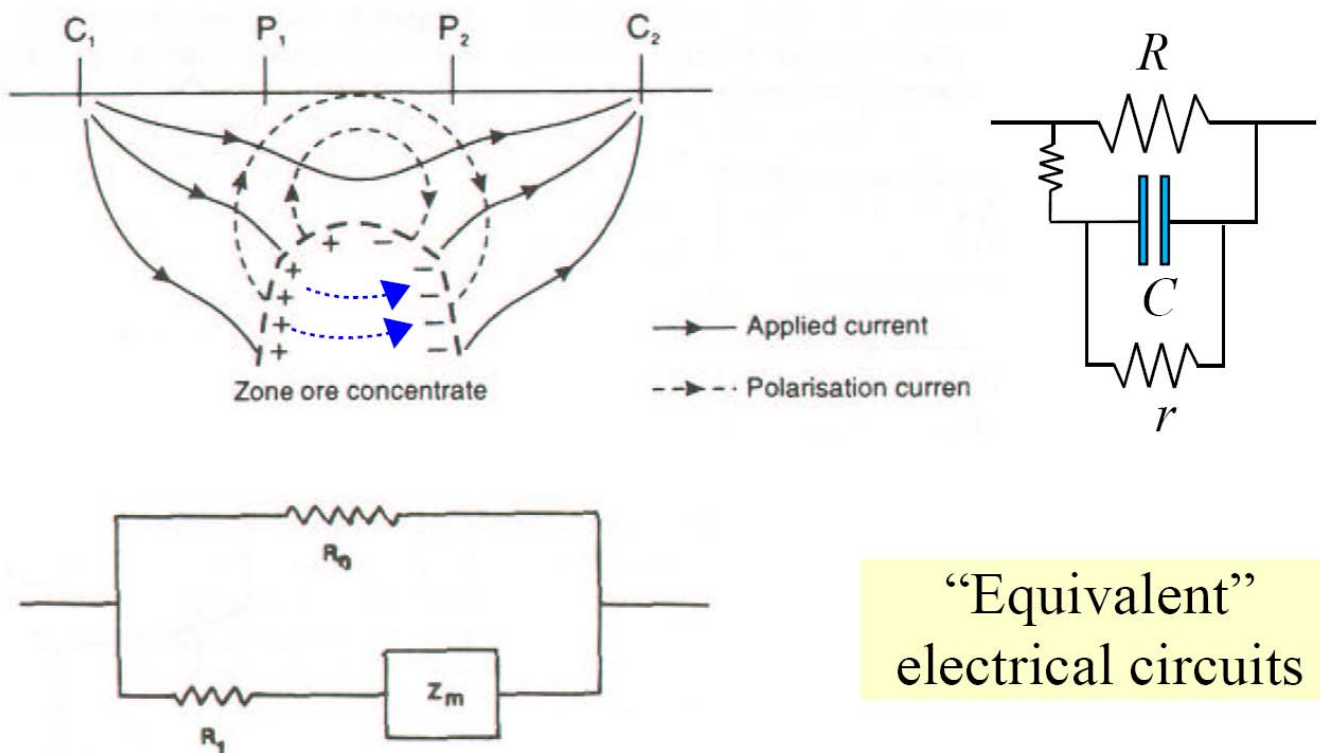
同時柯爾參數與金屬礦體間關係，依物理模擬結果顯示：

- (A) M 正比於金屬礦體之含量(體積百分比)。
- (B) T 與金屬礦體之顆粒度大小有關，顆粒度增加時，將相位峰值移往低頻處，使 T 值增加。
- (C) C 正比於金屬礦體顆粒之淘選度。

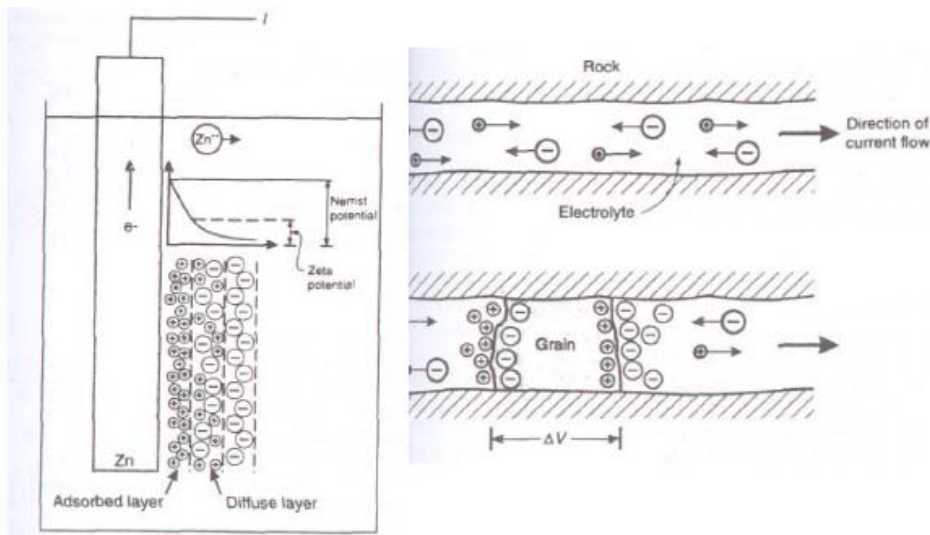
簡單來說感應極化法為地層在充放電之過程中產生隨時間緩慢變化的附加電場現象。如圖十五所示：



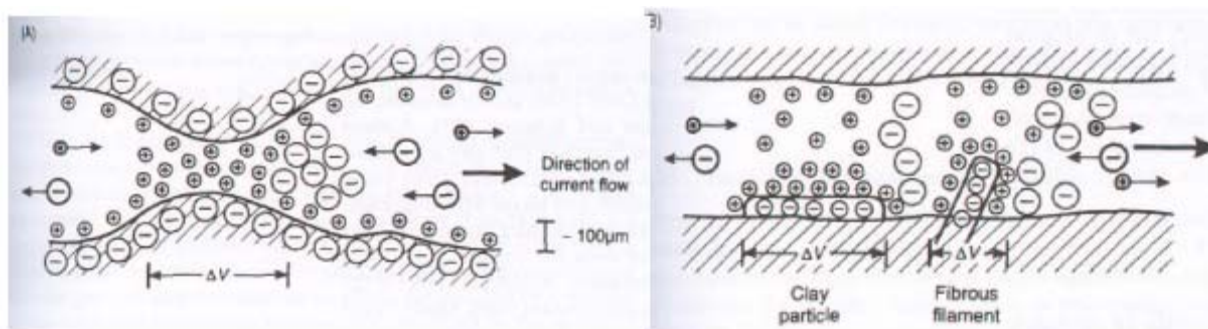
圖十五、IP method 電位隨時間衰減示意圖



圖十六、極化現象示意圖



圖十七、Grain and electrode 極化現象



圖十八、Electrolytic(membrane)極化現象

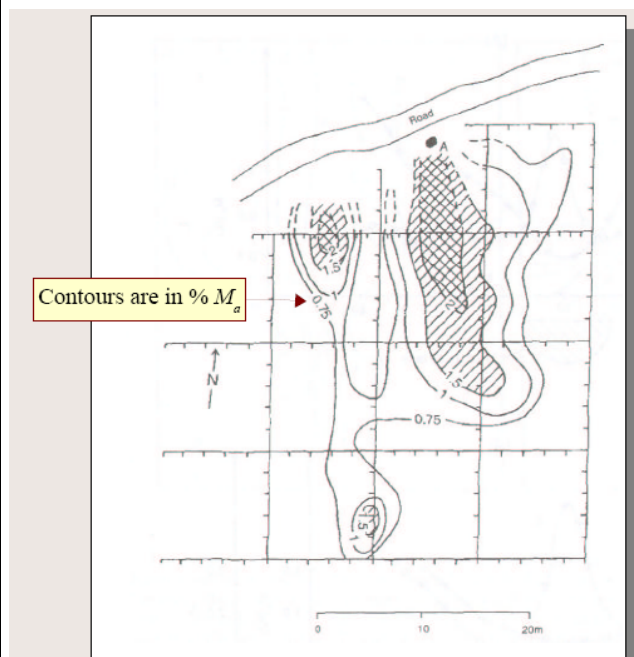
1. 一次電位差:無激電效應時穩定電流形成電位差 ΔU_1 ，不隨時間產生變化。
2. 二次電位差:激發極化現象產生電位差 $\Delta U_2(T)$ ，隨著時間產生非線性變化，充電時從零逐漸增大，放電時逐漸減為零。
3. 总场电位差：一次电位差和二次电位差的和

$$\Delta U(T) = \Delta U_1 + \Delta U_2(T)$$

$$\Delta U_2(T) = \Delta U(T) - \Delta U(0)$$
4. 極化率 η ：表示極化介質的激電性質，與電流無關，與供電時間 T 和測量和測量延遲時間 t 有關。

$$\eta(T, t) = \frac{\Delta U_2(T, t)}{\Delta U(T)} \cdot 100\%$$

所以本研究會提出適當標準作業程序，如適當放電時間與配合適當之電極排列法!極化率以百分數表示，且必須提供其供電時間 T 與量測時間 t 。岩礦時極化率主要取決於所含電子導電礦物的體積百分含量，含量愈高激電效應增強。



上圖為 Cahyna et al., 1990 利用感應極化探測爐石分布結果。作者利用地電阻法與感應極化法探測爐石分佈，結果地電阻法探測爐石結果有限，而感應極化法成功描繪出已知與未知的爐石汙染掩埋區域。

五、研究預期效益及績效指標(Key Performance Indicator,KPI)

請列述在執行期限內(一)預期完成工作項目。(二)執行成果方面之貢獻及成果效益。

預期完成工作項目

1. 相關感應極化法與多重電極排列於污染場址調查文獻收集。
2. 利用多種電極排列法搭配感應極化法與大桃園地區之紅土礫石層進行相關施測參數資料收集。
3. 選擇一砂礫質污染場址進行實際應用調查，進而建立一 IP 法之標準作業流程。

細部工作項目執行計畫：

1. 先期於實驗室建立電阻率反演模型，模擬現場地層模型，利用數值模擬比較五種電極排列的二維電阻率影像之解析度與效能。電極排列包括了雙極、單極對偶極、溫奈、施蘭卜吉(即是我們使用的 Wenner-Schlumberger)、偶極偶極、梯度、感應極化法等十種方法，並建立多種地質模型，分別模擬被掩埋的廢棄物、狹窄且導電度相對較高的泥層、夾窄且電阻率相對較高的砂礫質層等地質模型，藉此檢驗野外調查的效能(異常物效應值、訊號雜訊比)與這些排列法排繪影像的能力。這些電極排列對於資料密度與雜訊敏感度的響應也同時由強健逆推法(L1)與平滑限制最小平方逆推法(L2)進行檢驗。

2. 選擇標準紅土礫石層進行現場實驗再搭配鑽探資料進行驗證，實驗程序如下：

- (a) 搭配**多種電極**排列與**感應極化法**聯合施測，此極化電極為**不鏽鋼棒**。
- (b) 搭配**多種電極**排列與**感應極化法**聯合施測，此感應電極為**碳金棒**。
- (c) 搭配**多種電極排列**與**感應極化法**聯合施測，此感應電極為**硫酸銅電極**。

預期得到何種電極排列法在現地實驗得到最佳解析度，並搭配感應極化法得到最佳電極材料與電極排列法可成功將砂礫質地層與背景地層成功描繪出電性地層分布。

3. 最佳電極排列法搭配多功率增壓器，運用人工高壓電場增加探測深度，增加深部資料密度，進而發展新型電極排列法以運用在砂礫質地層地下水位深，且測線展不開之瓶頸。
4. 選擇一本中心產學合作場址進行實場作業，將前述發展新型技術進行驗證，並**訂定標準作業程序**以供環保署與業界參考使用。

(二)執行成果方面之貢獻與成果效益

1. 本研究利用多重電極排列與感應極化法來研究砂礫質地層受 Dnaps 或是油品汙染之調查技術提升，並利用增加發電功率與激發電壓提升電阻率剖面深部地層解析度不佳的問題，以解決台灣中部污染場址地下水位深，且測線施測長度不夠，測深不佳的現象。
2. 本研究除了利用感應極化法 (IP) 方法探討砂礫地層電性值外(如適當放電時間與配合適當之電極排列法)，亦會產出施測建議值，在未來使用此種方法時之建議參數設定，建立現場施作標準作業流程。
3. 建立砂礫質地層調查標準作業程序，建議出最佳電極排列法與搭配正確電極使用感應極化法描繪出正確電性地層剖面。

六、研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

工作項目	年月												備註	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
文獻回顧相關資料收集														
理論方法建構														
現場資料收集與規劃														
完成第一階段資料收集														
期中報告撰寫														
第二階段現場工作規劃														
完成現場工作														
期末報告撰寫														
工作進度估計百分比 (累 積 數)	8%	20%	28%	35%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	98%	100%		
預定查核點	期中：		1. 查核點一，完成相關文獻收集與開始進行野外工作。											
	期末：		2. 查核點二，開始野外工作與期中報告撰寫。											
				3. 查核點三，完成所有野外資料收集與開始進行技術評估。										
				4. 查核點四，開始進行期末報告撰寫。										
說明：														
1、 工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。														
2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。														
3、 「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。														

七、主要研究人力

請依照「主持人」、「協同主持人」及「研究人員」等類別之順序分別填寫。

類別	姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每週平均投入工作時數比率(%)
主持人	鄭世楠	健行科技大學/ 空間資訊與防災中心	主任	進行校內資源整合、計畫查核點稽查與相關技術開發	50%
協同主持人	劉興昌	健行科技大學/ 空間資訊與防災中心	研究員兼助理教授	相關技術開發、新穎技術轉移、報告撰寫與執行野外工作	70%
研究員	王子賓	中央大學/地球物理研究所	博士候選人	野外工作執行、現場工作參數設定與參與研發工作	70%

※註：每週平均投入工作時數比率係填寫每人每週平均投入本專案工作時數佔其每週全部工作時間之比率，以百分比表示（例如：50%即表示該研究人員每週投入本專案研究工作之時數佔其每週全部工時之百分五十）。

九、參考文獻

1. LaBrecque, D. et al. 1998. Electrical resistivity tomography monitoring for process control in environmental remediation. The Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP), 22-26 March 1998, Chicago, Illinois. Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS), Wheat Ridge, CO. p 613-622.
2. Newmark, R., W. Daly, K. Kyle, and A. Ramirez. 1998. Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques. *JEEG*, Vol. 3, Issue 1, March 1998, p 7-13.
3. Aristodemou, E. and A. Thomas-Betts. 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environs. *Journal of Applied Geophysics* 44 (2000) p 275-302.
4. Slater, L., A. Binley, and A. Kemna. 2000. Case studies of engineering and environmental applications of induced polarization imaging. The First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies & NDT to Transportation Facilities and Infrastructure, December 11-15th 2000 St. Louis, Missouri.
5. Olhoeft, G. 1985. Low frequency electrical properties. *Geophysics*, 50, pp. 2492-2503.
6. Loke, M. H., 1999, Time lapse resistivity imaging inversion, Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering European, Em 1, Budapest, Hungary.
7. Niva, B., Olsson, O. and Bluming, P., 1988, Radar crosshole tomography with application to migration of saline tracer through fracture zones, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA) Technical report 88-31, Baden, Switzerland.
8. Niwas, S., and Lima, O. A. L., 2003, Aquifer parameter estimation from surface resistivity data, *Ground Water*, 41(1), 94-99.
9. Ramirez, A.L., Daily, W.D., and Newmark, R.L., 1995, electrical Resistance Tomography for steam injection and process control: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 0, No. 1, 39-51.
10. Rubin, Y. and Hubbard, S.S., 2005, *Hydrogeophysics*, Springer, New York.
11. Zheng, C., and S. M. Gorelick, 2003, Analysis of solute transport in flow fields Influenced by Preferential flowpaths at the decimeter scale, *Ground Water*, 41(2), 142-155.
12. Nasser, M., Lee, S., Francisco, A., and Esben, A., 2006, High-resolution geophysical characterization of shallow-water wetlands, *Geophysics*, V.71, No.4, B101-109.
13. Keller, G.V.; Frischknecht, F.C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*, Oxford, 184pp.
14. LaBrecque, D.J., 1989, Cross-borehole resistivity modeling and model fitting. Ph.D thesis, Univ. Utah, Salt Lake City, UT.