



行政院環境保護署

107 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

孔內電探法在土壤與地下水汙染 調查與整治監控的技術發展

期末報告（定稿本）

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立交通大學／防災與水環境研究中心
專案主持人：林志平 教授
專案執行期間：107 年 1 月 10 日起至
107 年 11 月 30 日止

中華民國 107 年 12 月 印製





107 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申請書

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別(單選)	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他		
申請機構系所	國立交通大學防災與水環境研究中心		
機構地址	300 新竹市大學路 1001 號		
專案主持人	林志平	職等/職稱	教授兼系主任
協同主持人	劉興昌	職等/職稱	約聘助理研究員
協同主持人	吳柏林	職等/職稱	約聘助理研究員
專案名稱	中文	孔內電探法在土壤與地下水汙染調查與整治監控的技術發展	
	英文	Development of Borehole Electrical Resistivity Tomography Technique in Monitoring the Investigation and Remediation of Soil and Groundwater Contamination	
	關鍵字	孔內電探監測技術; 土壤與地下水污染整治	
執行期程	自民國 107 年 01 月 10 日起 至民國 107 年 11 月 30 日止		
專案主持人	姓名：林志平	E-mail：cplin@mail.nctu.edu.tw	專線：03-5712121#54910 手機：0922-747731
專任助理	姓名：陳軍韜	E-mail：Ctcmm001@yahoo.com.tw	專線： 手機：0936-354976
經費分析總表	專案預估總經費	第一年申請金額	第二年申請金額
	1. 人事費用	392,096	-
	2. 貴重儀器使用含維護費	0	-
	3. 消耗性器材與主要費用	420,000	-
	4. 其它研究相關費用	0	-
	5. 雜項費用	24,268	-
	6. 行政管理費	83,636	-
	專案計畫申請總金額	920,000	-
			編列說明
			(1~5 項相加之 50%為限)
			(與計畫實驗相關)
			(與計畫主體相關)
			(差旅與租賃費用)
			(1~6 項相加之 5%為限)
			(1~5 項相加之 10%為限)
			總金額：920,000

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請時向本署專簽說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：

林志平

林

(簽名及蓋章)

日期：107.12.13

(請蓋上申請單位大小章)





中文摘要

近期國內土壤與地下水研究進入實場整治階段，整治藥劑的灌入狀況為整治成效的重要步驟，但在滲透性差之地層中，重力或加壓方式勢必造成整治藥劑僅會沿優勢流徑（如砂層）傳輸，除容易流失藥劑，亦無法改善已擴散進入粉黏土層之污染溶質，造成持久性污染而持續影響周遭地下水。為求有最佳整治效果，整治者可以根據藥劑擴散半徑適時調整整治參數達到最佳效益，所以對於藥劑灌入的傳輸路徑監測非常重要。在藥劑傳輸路徑的監測上，利用量測地層電學性質之地電阻影像探測法進行是極具效益的方法，將此技術搭配既有標準監測井進行孔內施測可有助解決其單在地表施測會有深度解析能力較為不足的問題，但其仍具有潛在影響解析問題尚待克服。因此本計畫之主要目的有二：(1)孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討；(2)擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。本年度研究結果透過數值模擬詳細的探討，發現造成結合井測產生鏡像效應的根本原因，基於這樣的發現，提出改善資料收錄與分析方法的手段包括聯合反演與加權模型疊加方法。在單孔施測方面，亦透過數值模擬探討指向性的問題，並提出搭配兩個地面電極強化指向性的施測配置方式。最後本研究於實場進行初步的現地測試，基於應用井孔之地電阻影像探測方法進行比較測試，初步結果顯示對於深部解析之提升確實有其效益，建議後續計畫進一步進行較完整的模場評估驗證，基於模場試驗中各種實務應用議題，以各方面之資訊驗證井孔相關分析與實務應用方法，並據以精進改善以達到高解析監測技術之目標。





Abstract

Currently the study of soil and ground water contamination in Taiwan has recently initiated in-situ remediation phase. The distribution of the chemical agents after injection is a key factor for the remediation effectiveness. In practice, however, injection into low conductivity layer (such as silt-clay layers) are difficult as most of the treating agents would most likely be dispersed into high conductivity layer (for example, sandy layers). Consequently the contaminant within silty or clayey layers could not be easily remediated and would continuously affect the underground water environment. In order to enhance site remediation effectiveness, site operators can adjust the parameters of the injection plan according to the in-situ monitoring result on the dispersed radius of chemical agents. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is an effective geophysical technique to monitor the distribution of in-situ injection by measuring the electrical properties distribution of the underlying ground layers. Conducting both surface ERT and borehole ERT within existing monitoring wells can greatly increase the resolution in depth compared to conventional surface ERT survey, but it need to solve some problem such as mirror effect. Aim of this project is to 1. Study the potential problem of borehole ERT survey by numerical simulation; 2. Develop the data acquisition and analysis method of suppress mirror effect. This study finally establish analysis method such as combined inversion and weight model stacking method to enhance the benefit. This project eventually test in an in-situ site, by applying ERT to examine the in-situ application. The follow-up study recommend to evaluate in experimental site to enhance practical feasibility.





目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	VI
第一章 前言	1
第二章 研究目的	2
第三章 文獻探討	3
3.1 地球物理方法與土壤汙染成效監測應用	3
3.2 地電阻影像探測法.....	6
3.2.1 地表與孔內地電阻影像探測法.....	6
3.2.2 孔內電探法之關鍵問題	10
3.3 前期相關計畫成果與待解決問題.....	12
第四章 研究方法與過程.....	14
4.1 研究方法	14
4.2 研究流程	17
4.3 工作進度	18
第五章 結果與討論	19
5.1 孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討.....	19
5.1.1 鏡像問題三維數值分析	19
5.1.1.1 地對孔施測三維數值分析潛在問題原因與現象.....	19
5.1.1.2 跨孔施測三維數值分析潛在問題原因與現象.....	26



5.1.2 定義資料篩選參數	34
5.1.3 單孔施測指向性可行性數值分析評估	36
5.2 擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法	44
5.2.1 聯合反演方法(Combined data inversion)	44
5.2.2 加權模型疊加方法(Model stacking technique, MOST)	44
5.2.3 抑制鏡像效應分析方法有效性評估	45
5.3 實場測試評估	51
第六章 結論與建議	54
6.1 結論	54
6.2 建議	55
參考文獻	56
附錄一 專案成果績效自評表	附 1-1
附錄二 審查意見回覆對照表	附 2-1



圖目錄

圖 1 地下環境不同介質之電阻率分佈(摘自 Schneider and Greenhouse, 1992)	3
圖 2 砂質含水層電阻率與 DNAPL 飽和度之關係圖 (摘自 Greenhouse et al., 1993)	4
圖 3 未飽和層示蹤劑試驗之井中 ERT 三維電阻率分佈變化(摘自 Winship et al., 2006)	5
圖 4 地電阻影像探測技術施測示意圖	7
圖 5 地表地電阻電極排序示意圖	8
圖 6 孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖	8
圖 7 地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖	9
圖 8 地表與搭配孔內地電阻影像模擬結果比較(Rubin et al., 2005)	9
圖 9 單孔(下孔)電探施測範圍示意圖 (Coles., et al, 2009)	11
圖 10 文獻孔對地施測法之鏡像問題探討(Wenner-Slumberger 序列為例): (a) 數值模型; (b) 標準反演結果; (c) 移除單孔資料; (d) 加權反算 (Tsourlos et al, 2011)	11
圖 11 文獻跨孔施測法鏡像問題探討: (a) CH dipole-dipole 序列(AM-BN); (b) CH pole-tripole 序列; (c) CH dipole-dipole 序列 (AB-MN)	12
圖 12 數值模型規劃示意圖(林志平, 2016)	15
圖 13 三維數值模型建構示意圖(林志平, 2016)	15
圖 14 研究流程	17
圖 15 地對孔三維數值模型	20
圖 16 地對孔施測之可能電極配置種類	21



圖 17 地對孔施測之靈敏度分析	22
圖 18 地對孔施測之模擬結果 (低電阻異常區).....	24
圖 19 地對孔施測之模擬結果 (高電阻異常區).....	25
圖 20 跨孔式三維數值模型	27
圖 21 跨孔施測之模擬結果 (低電阻異常區).....	28
圖 22 跨孔施測之模擬結果 (高電阻異常區).....	29
圖 23 跨孔施測之靈敏度分析	30
圖 24 含兩側跨孔施測之模擬結果 (低電阻異常區).....	32
圖 25 含兩側跨孔施測之模擬結果 (高電阻異常區).....	33
圖 26 IOS 資料篩選參數之定義	35
圖 27 單孔施測搭配地面固定電極之形式	37
圖 28 四種單孔搭配固定地面電極形式之靈敏度比較(Surface:Borehole=1:2)	38
圖 29 四種單孔搭配固定地面電極形式之靈敏度比較(Surface:Borehole=1:1)	39
圖 30 單孔搭配地表固定電極方法數值模擬架構示意圖(以 AM-NB 為例) .	40
圖 31 單孔搭配地表固定電極 A-BMN(C-PP)之模擬結果 (a)異常區位於同側 (b)異常區位於對側	41
圖 32 單孔搭配地表固定電極 A-MNB(C-PP)之模擬結果 (a)異常區位於同側 (b)異常區位於對側	41
圖 33 單孔搭配地表固定電極 AB-MN(CC-PP)之模擬結果	42
圖 34 單孔搭配地表固定電極 AM-NB(CP-PC)之模擬結果	43
圖 35 IOS 參數與電極間距評估 (a)AB-MN 平均 IOS(b)AB-MN 最大 IOS(c)A-MNB 平均 IOS(d)AMN-B 最大 IOS.....	45



圖 36 低電阻異常區抑制鏡像方法評估結果：(a) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=4m), (b) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6m), (c) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=8m), (d) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6,8m)之聯合反演；(e) 標準模型疊加(standard MOST), (f) 加權模型疊加(weighted MOST)	47
圖 37 高電阻異常區抑制鏡像方法評估結果：(a) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=4m), (b) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6m), (c) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=8m), (d) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6,8m)之聯合反演；(e) 標準模型疊加(standard MOST), (f) 加權模型疊加(weighted MOST)	48
圖 38 加權模型疊加(weighted MOST) 於跨孔施測不同電阻率對比之分析結果	49
圖 39 預期測試場址測線與井位配置圖	51
圖 40 未投藥前 ERT-K1 施測成果圖(未搭配孔內井測成果)	52
圖 41 投藥後 ERT-K1(未搭配孔內井測成果)	52
圖 42 投藥後 AB 井跨孔井測成果	53
圖 43 投藥後 ERT-K1(配孔內井測成果)	53



表目錄

表 1 進度甘梯圖	18
-----------------	----



第一章 前言

近期國內土壤與地下水研究進入實場整治階段，其中滲透性差之地層整治尤為困難，在低滲透條件下，無論採用重力或加壓方式勢必造成整治藥劑僅會沿優勢流徑（如薄砂層）傳輸，除容易流失藥劑，亦無法改善已擴散進入粉黏土層之污染溶質，造成持久性污染而持續影響周遭地下水。如果第二含水層地質條件屬中等至中低滲透性，深度達地表下數十公尺、厚度達數十公尺厚，地下水位約在地表下 5~7 公尺，地下水層已呈現明顯受壓情況，一般加壓方式無法克服如此高的水壓，重力灌注將耗時甚久，且藥劑會累積在灌注孔內而無法擴散開來。為使整治成效達到最佳效果，整治者可以根據藥劑擴散半徑適時調整整治參數已達最佳效益，所以在整治過程中，對於藥劑的傳輸路徑進行監測非常重要。

在藥劑傳輸路徑的監測上，利用量測地層電學性質之地電阻影像探測法進行是極具效益的方法，將此技術搭配既有標準監測井進行孔內施測可有助解決其單在地表施測會有深度解析能力較為不足的問題，但孔內施測不同電極排列之解析特性與遭遇問題目前並未完全克服，在選擇上尚未有最佳的應用準則。為有效提升孔內地電阻在藥劑傳輸路徑上之監測能力，故進行本研究工作。



第二章 研究目的

誠如第一章所述，為有效提升孔內地電阻在藥劑傳輸路徑上之監測能力，進行應用井孔電探方法潛在問題之研究以及發展相關資料分析方法有其必要性，在此目標下，本研究之主要目的有二：

- (1) 孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討；
- (2) 擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。

本研究最終擇一試驗場址，利用地電阻影像探測方法進行比較測試。



第三章 文獻探討

3.1 地球物理方法與土壤污染成效監測應用

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，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。如圖 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 (導電性佳)，DNAPL 之電阻率一般多超過 1,000 Ohm-Meters，比礫石、砂質、粉土或黏土之電阻率高出許多，容易與地層區別開來。現場施測可在同一測線安排不同電極排列 (如二極法、四極法、梯度法…等) 與解析方法交叉佐證，以同時獲取地質與污染最佳擬合剖面與具說服力之證據。Schneider and Greenhouse (1992) 於砂質含水層 (砂之孔隙率約 0.4) 中觀察到 ERT 法之電阻率隨 DNAPL 飽和度增加而迅速增加 (參考圖 2)。

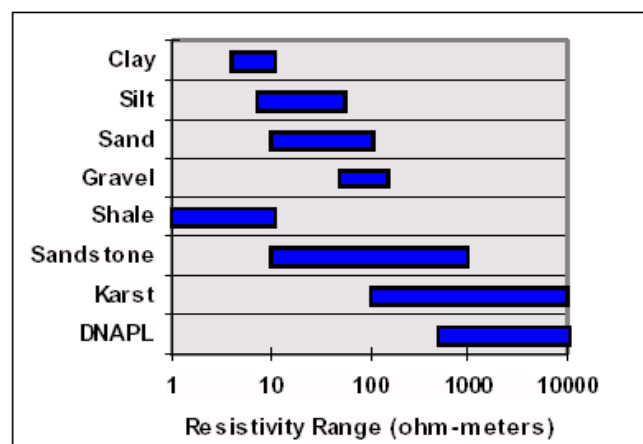


圖 1 地下環境不同介質之電阻率分佈 (摘自 Schneider and Greenhouse, 1992)

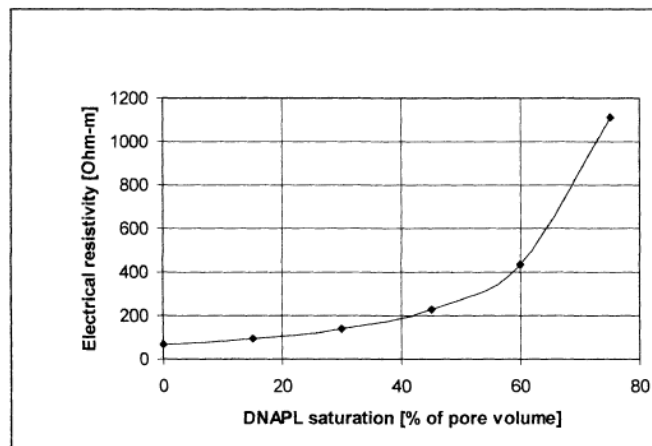


圖 2 砂質含水層電阻率與 DNAPL 飽和度之關係圖(摘自 Greenhouse et al., 1993)

ERT 法施測深度隨測線展距增加測深，若可施作之直線距離不足（如建物阻擋或其他地面干擾物）會造成測深受限，縱使測線展距夠長，ERT 法的特性具有解析度隨深度快速遞減的特性；因此可採行搭配井孔之施測方法增加深度解析能力。將地電阻影像法的電極設置井孔內進行探測的方法稱作孔內地電阻影像法（Borehole Electrical Resistivity Tomography），這樣的配置最初的目的是為了瞭解孔和孔之間的電阻率影像（Cross-Borehole Imaging），為了與地表的探測區隔，且強調成像的目的在於孔和孔之間，所以井孔內的地電阻影像法以跨孔式地電阻影像法（Cross-Hole / Borehole Electrical Resistivity Tomography，CHERT）稱之。

跨孔地電阻影像法（CHERT）可隨著井深或鑽孔深度施作單井/孔周遭或多井/孔間之空間特徵調查，其在探測深度上更具優勢，並增加監測井或鑽孔之利用效益。而早期的井測主要運用在地下深層的石油及天然氣工程中，研究油氣蘊藏量及地質構造。近來已開始應用於地下水、工程地質及岩石力學等相關研究。而地下淺部地層之井測法則有別於傳統深層井測（探油）方法，深層井測必須配合鑽孔、穩定液，僅能於單孔施作，結果僅能說明鑽孔周遭特徵與一維剖面，且無法確認方位；淺層井測則可於不同井或鑽孔中施作，確認特殊地質或污染方位，建立井/孔間之連續二維及三維剖面。

整治場址之整治成效評估也多透過採樣或設井評估驗證，而採樣點之間或井間之變化情形或整治成效則未知或僅能透過模擬。而地球物理透過面與



空間之探勘則可彌補此種缺口，並可輔助掌握整治不佳區或宜加強整治之區域，可同時評估污染物隨時間與空間之變化。例如圖 3 為 Winship et al.(2006) 運用 ERT 井測評估示蹤劑（氯化鈉溶液）於未飽和層之流動情形，可清楚描繪出三維電阻剖面（電阻率變化達 7.5% 之等電阻剖面）隨時空之變化，並發現電阻率剖面約在地下 8~9 公尺（低滲透性夾層）附近呈現橫向流佈，代表示蹤劑受阻於夾層。

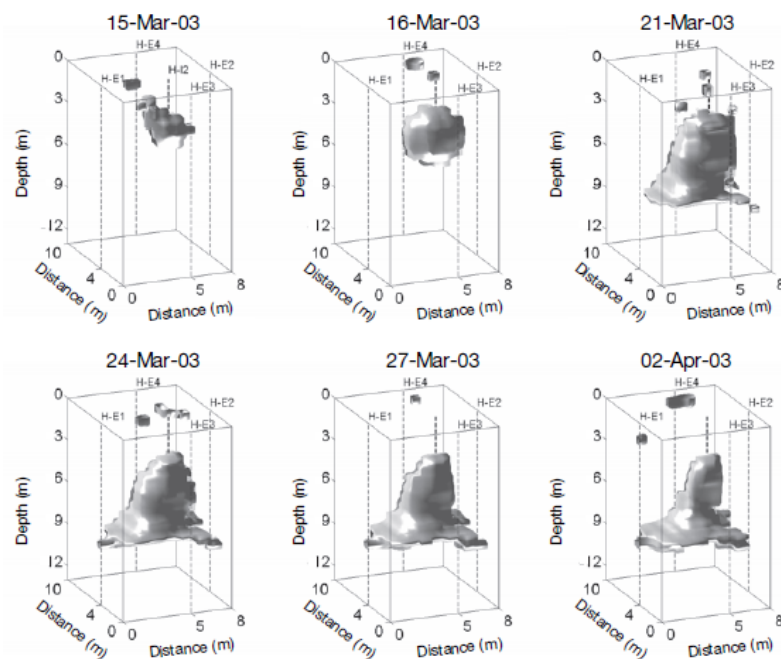


圖 3 未飽和層示蹤劑試驗之井中 ERT 三維電阻率分佈變化(摘自 Winship et al., 2006)

跨孔式地電阻影像法於施測理論上與地表施測最大不同在於，地表施測對電流傳遞而言為半無限域空間(Half-Space)，而孔內施測則為全域空間(Full-Space)，此點造成在分析尚需考量得假設條件會有所不同，但也顯示其可提供不同之訊息。對於井孔之應用除跨孔式施測外，概念上亦可採用單孔式下孔施測(Single-Borehole/Down-hole ERT)或地對孔施測(Surface-to-Borehole ERT)方式，進行地表地電阻施測雖可獲得地表下電阻值之深度剖面，但其因僅有表面具有電極棒進行資料收集，使得施測有效深度



受限且深處所得之量測解析度較低，而無法在深度上獲得較佳之探測結果，而單孔式下孔施測特點為施測靈敏度於鑽井附近且並無指向性，且深層與淺層之解析能力一致，但靈敏度隨水平距離遞減，因此量測水平範圍限於監測孔附近。在施測時，若可單孔孔內配合表面地電阻施作，或兩孔孔內、孔內搭配地表地電阻施作，如此可在於有限之地表測線展距空間下，對於地電阻探測之量測結果增加其在深度上之解析度並兼顧其水平量測範圍。對於井孔之應用，目前較廣為於污染物調查之應用為跨孔式地電阻影像法(CHERT)(王子賓，2016)，然而採用跨孔式施測具有井孔距離之限制，Goes and Meekes(2004)建議井內電極配置的總長度與兩井之間的間距 (D/S) 大於 1，地電阻儀器製造商 AGI(2003)於跨孔施測作業手冊則建議 D/S 大於 1.5，由於並非所有場址皆具有符合跨孔施測條件之適當距離井孔，因此對於地對孔或單孔之施測方法仍具發展必要性。

3.2 地電阻影像探測法

3.2.1 地表與孔內地電阻影像探測法

傳統地表地電阻探測的量測原理為藉由外加低頻電流經由圖 4 中電流極 C1、C2 流入地層中，再利用電位極 P1、P2 量測地層所反應的電位差值，由該量測的電壓值與電流值經由靜電學理論計算受測土層之視電阻率 (apparent resistivity)，每一筆視電阻率其影響深度與其電極棒間距有關，藉由改變電極間距的大小以及空間位置，即可量到不同位置以及不同影響深度的視電阻率值，將所量測得之視電阻率透過反算技巧即可獲得 1 維乃至 3 維之壩體材料地電阻剖面。前述之電流極以及電位極的位置排列並非固定，僅須確保有兩根電極棒放電與兩根電極棒量測電壓即可，而根據其電流與電位極排列的不同，可將其施測模式至少分為五種，包括 Wenner、Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Dipole 及 Pole-Pole 等方式，如圖 5 所示，此些不同排列模式與其水平或垂直解析度及探測深度有關。

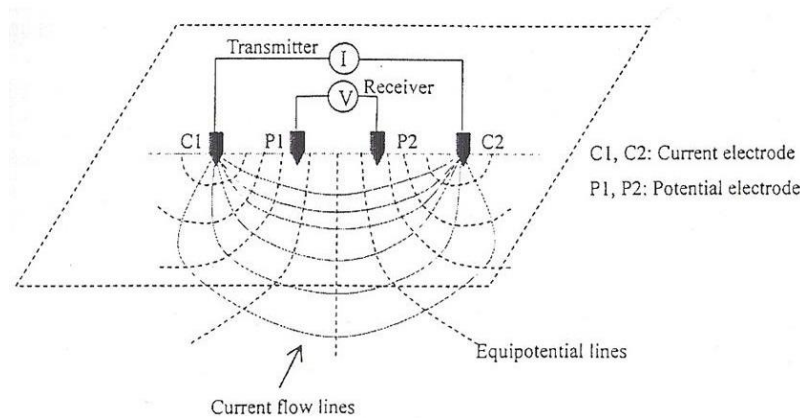
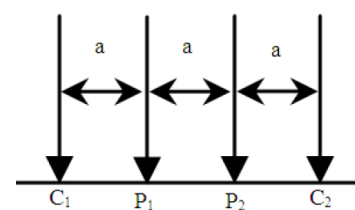
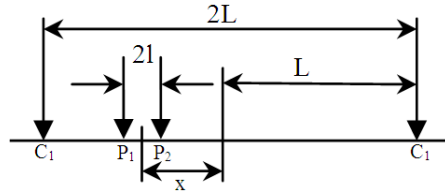


圖 4 地電阻影像探測技術施測示意圖

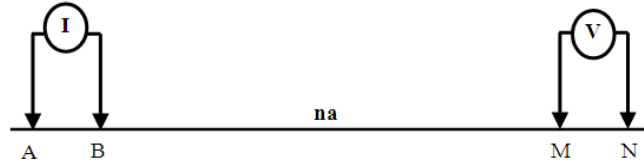
孔內地電阻影像法於施測理論上與地表施測最大不同在於，地表施測對電流傳遞而言為半無限域空間(Half-Space)，而孔內施測則為全域空間(Full-Space)，如圖 6 示，此點造成在分析尚需考量得假設條件會有所不同，但也顯示其可提供不同之訊息。圖 7 為不同地電阻影像施測方法之靈敏度範圍示意圖，進行地表地電阻施測(如圖 7a)雖可獲得地表下電阻值之深度剖面，但其因僅有表面具有電極棒進行資料收集，使得施測有效深度受限且深處所得之量測解析度較低，而無法在深度上獲得較佳之探測結果，而圖 7b 為採用單孔式下孔施測，其影像稱之為 VRP(Vertical Resistivity Profiling, Qian et al., 2007)，特點為施測靈敏度於鑽井附近且並無指向性，且深層與淺層之解析能力一致，但靈敏度隨水平距離遞減，因此量測水平範圍限於監測孔附近。在施測時，若可單孔孔內配合表面地電阻施作(如圖 7c 所示)，或兩孔孔內、多孔孔內搭配地表地電阻施作(如圖 7d 所示)，如此可在有限之地表測線展距空間下，對於地電阻探測之量測結果增加其在深度上之解析度並兼顧其水平量測範圍。



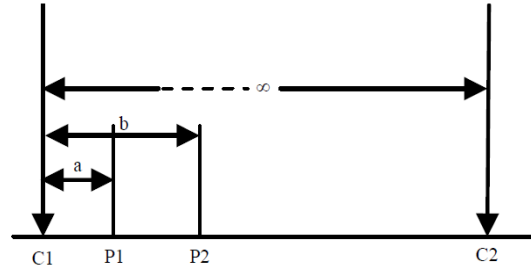
(a) Wenner electrode array



(b) Schlumberger electrode array



(c) Dipole-dipole electrode array



(d) Pole-dipole electrode array

圖 5 地表地電阻電極排序示意圖

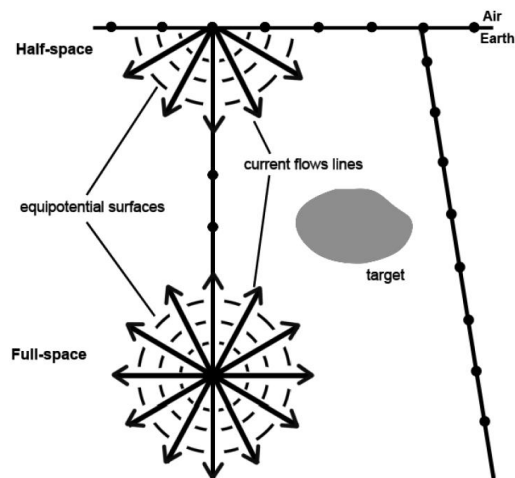


圖 6 孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖

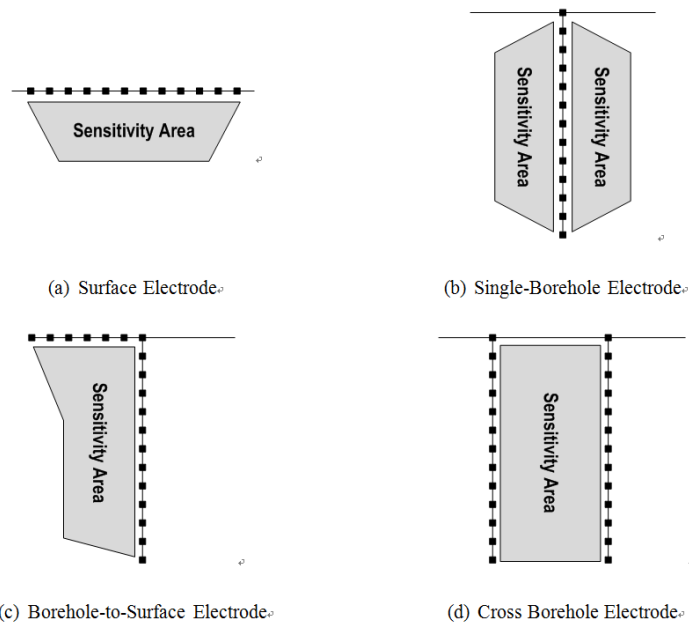


圖 7 地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖

根據 Rubin et al.(2005)利用數值模擬進行孔內探測之優點展示，圖 8a 為模擬之正算模型，圖 8b 為僅採用地表電極之模擬施測反算結果，圖 8c 與 8d 則分別為搭配兩組與三組鑽孔之孔對地施測法模擬結果。此結果顯示，僅採用地表電極對於低電阻之異常區域於深層之轉折趨勢並不明確，而搭配鑽孔之施測結果由於鄰近孔附近具靈敏度，因此當搭配鑽孔距離越近其量測範圍內之解析能力亦越佳，而可更加有效地獲得鑽孔周邊的空間狀態。

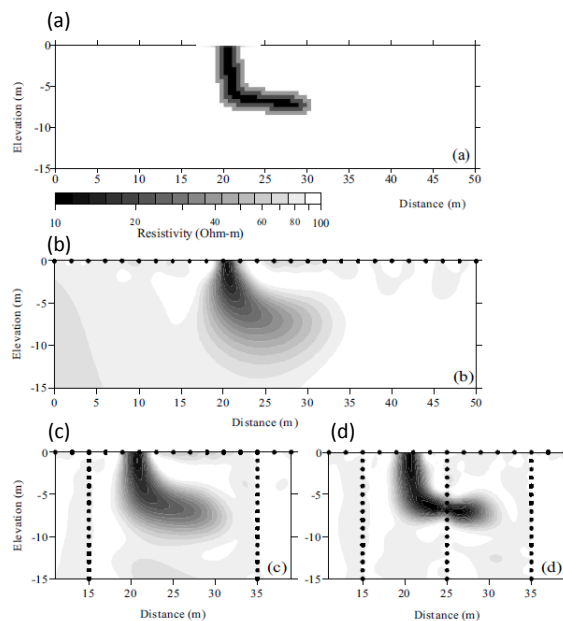


圖 8 地表與搭配孔內地電阻影像模擬結果比較(Rubin et al., 2005)



3.2.2 孔內電探法之關鍵問題

由上述文獻中對於井孔之應用可知，由於其施測空間假設與地表電探不同，因此於應用時須注意其潛在影響施測解析問題，茲分別說明如下：

- (1) 由於單孔(下孔)式電探為圓柱空間座標系，如圖 9 所示(Coles., et al, 2009)，基於其施測方法有施測區域缺乏指向性問題，且量測水平範圍限於監測孔附近，因此對於潛在污染物或整治區域位置與流向可能不易判釋。
- (2) 地對孔井測由於單孔資料在收錄時，電流極和電位極同時存在於孔內，對異常區域無法分辨其方向，因此具有潛在鏡像問題(Symmetric Effect)；靠近地表的部分，由於地表收錄資料之貢獻，能夠較好的消除這種映射的現象。目前解決映射這一問題的方法存在很多不確定性，Tsourlos 等人在 2011 年提出權重反算方法，將單孔資料與其他資料區分開，並給予單孔資料較低的權重，以期降低單孔資料所造成的映射的影響，如圖 10。但該方法仍存在權重參數的設定並沒有一個規律性的標準，且引起鏡像問題的電極排列並不明朗，對於不同的調查對象需要多次嘗試或是依靠經驗進行設定，因此應用不易。
- (3) 目前較廣泛之井孔應用為跨孔式地電阻影像法 (CHERT)，但由於在跨孔式電阻率井測時電流響應為全域無限空間，但於資料反算時，該些全域空間訊號資料則限制於井之間的邊界條件。因此最新文獻指出，採用跨孔式井測亦可能產生引入井孔外資訊之鏡像問題(Bellmunt et al., 2016)，如圖 11 所示，文獻中並建議應採取收錄資料組合或篩選之方式降低鏡像問題之產生。

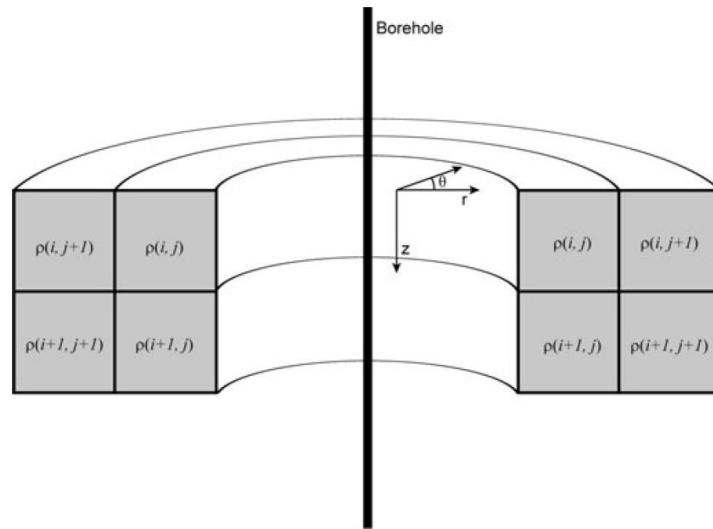


圖 9 單孔(下孔)電探施測範圍示意圖 (Coles., et al, 2009)

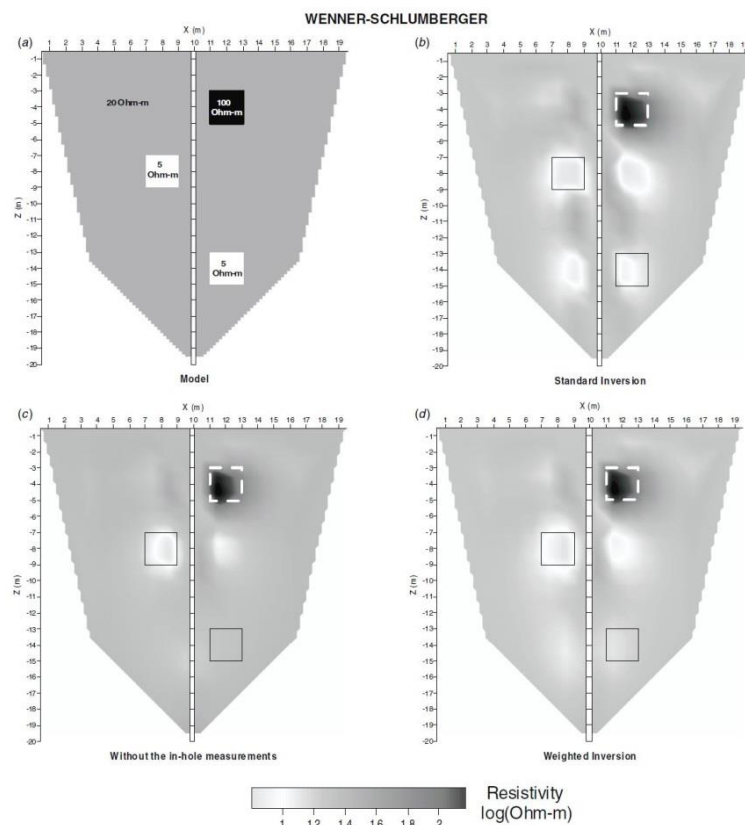


圖 10 文獻孔對地施測法之鏡像問題探討(Wenner-Schlumberger 序列為例): (a) 數值模型; (b) 標準反演結果; (c) 移除單孔資料; (d) 加權反算 (Tsourlos et al, 2011)

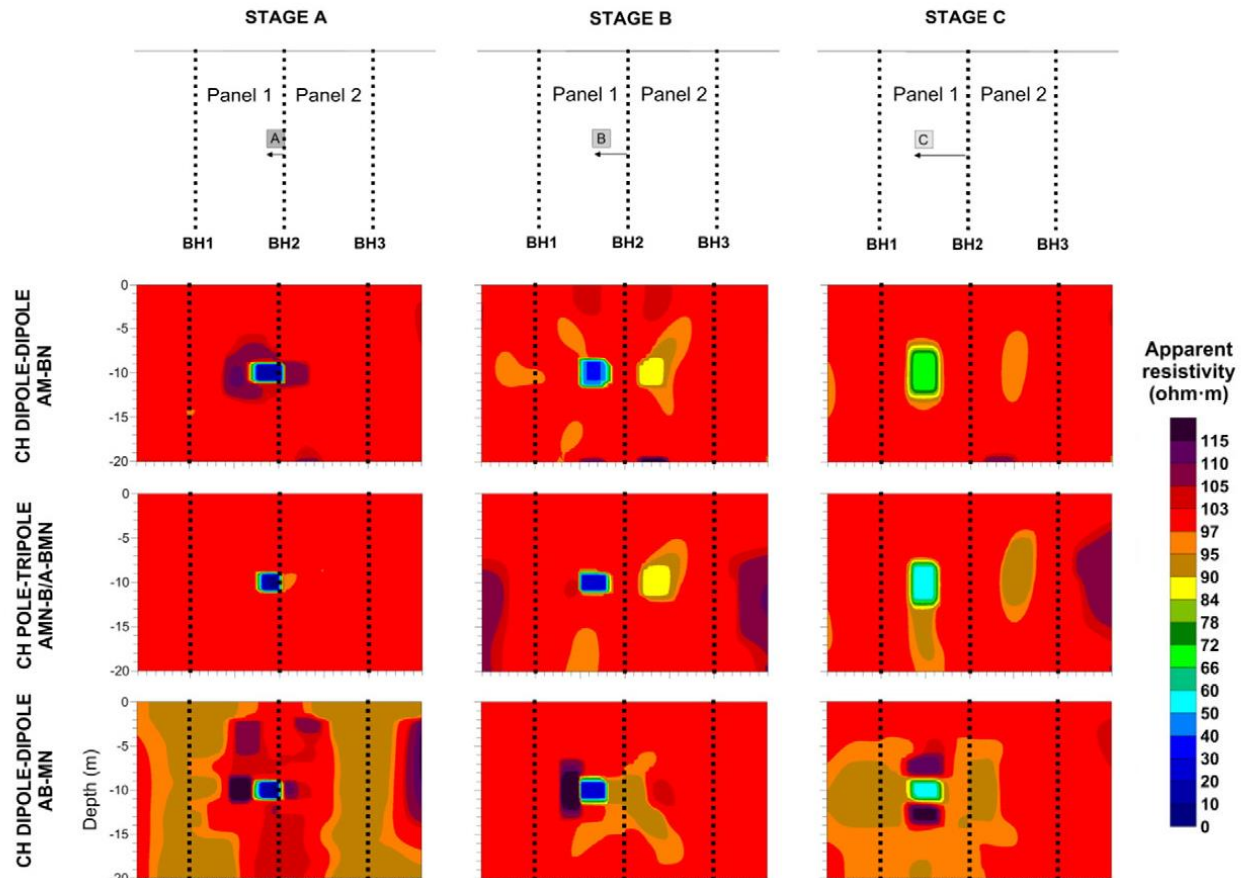


圖 11 文獻跨孔施測法鏡像問題探討: (a) CH dipole-dipole 序列(AM-BN); (b) CH pole-tripole 序列; (c) CH dipole-dipole 序列 (AB-MN)

3.3 前期相關計畫成果與待解決問題

近期國內土壤與地下水研究進入實場整治階段，利用量測地層電學性質之地電阻影像探測法進行污染物或藥劑傳輸路徑的監測是極具效益的方法，將此技術搭配既有標準監測井進行孔內施測可有助解決其單在地表施測會有深度解析能力較為不足的問題。本團隊於前期相關之研究中(林志平, 2016)，已開發模組化且電壓與電流極分列之移動式孔內電極，由量測品質以及施作便利性(直接採用全開篩管且可回收)，該移動式孔內電極已具有實用價值；因此，應用孔內之電探方法於硬體上已具備可行性。此外，前期之研究成果並已透過正算數值模擬方法，針對地對孔施測方式，初步選擇可具備較佳之靈敏度以及抗雜訊等能力之 Wenner-schlumberger 序列，並建議採用與孔內測線長度 1:1 之地表測線配置。



然而應用既有電極序列方式並未完全解決鏡像問題之產生，Tsourlos, et. al. (2011)及 Bellmunt et al. (2016)等文獻皆指出，無論地對孔施測方式或跨孔式施測方式皆會有潛在鏡像問題，並建議應採取適當之資料權重分析或資料組合方法壓抑鏡像之產生。因此，如何有效解決孔對地、或是跨孔測線之鏡像問題，係為影響利用孔內電極施測方法成敗之關鍵問題。因此本計畫之主要目的有二：(1)孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討；(2)擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。本研究最終擇一試驗場址，利用地電阻影像探測方法進行比較測試。



第四章 研究方法與過程

4.1 研究方法

本研究之策略為先以系統性之正算數值模型，探討井中地電阻影像探測法鏡像效應發生之根本成因，並提出鏡像程度之評析方法；而後基於文獻經驗進一步提出抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法，包括優化資料組合聯合反演及加權模型疊加，並評估其成效，最後擇定一合適場址進行初步實場測試。本計畫之研究方法詳述如下：

(1) 孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討

由前述說明可知，應用鑽孔之地電阻探測法可分為跨孔施測、地對孔施測以及單孔施測法；其中跨孔施測及地對孔施測皆可能產生潛在鏡像問題，致使資料解析產生偏差；而單孔式施測方法有施測區域缺乏指向性問題，因此對於潛在污染物或整治區域位置與流向可能不易判釋。由於實驗並不易大規模進行不同施測條件與鏡像問題與指向性問題探討，因此本研究以正算數值模擬方法進行孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討。正算數值模擬將參考前期相關計畫採用之正算模型建構方法，先依據解析與鏡像問題之潛在區域，規畫一系列正算模擬案例，如圖 12 為例；並採用 3D 數值模擬方法，建構合適之數值模型(如圖 13)進行地電阻探測模擬，透過三維數值模型建構幾何與材料參數，以準確描述施測結果與電極配置條件之相互關係。

最新文獻中(Bellmunt et al., 2016)提出資料篩選參數概念，據以評析跨孔式施測鏡像影響程度。因此對於“跨孔式”與“地對孔”施測鏡像問題之探討，本研究將參考此概念並將透過一系列正算數值模擬結果，建立評估應用於跨孔與地對孔施測電極序列中，抵抗鏡像的能力大小之方法，以利基於共同之標準進行資料之歸納與篩選。此外，對於單孔式施測潛在問題，將嘗試搭配單一或少數地面電極之資料收錄方式，以數值模擬評析其對於增加單孔施測指向性之效益。於本項目部分研究工作內容如下：

(a) 建構應用孔內電探之三維數值模型。

(b) 進行正算案例數值模擬，評析各種施測序列條件之鏡像產生原因與現象。



- (c) 定義適用於“跨孔施測”與“地對孔施測”之資料篩選參數。
- (d) 以正算模擬評估案例，評估於單孔施測時搭配單一或少數地面電極之資料收錄方式，分析其對於增加單孔施測指向性之效益與可行性。

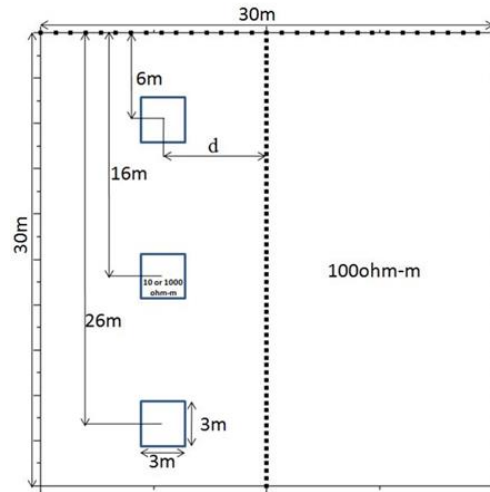


圖 12 數值模型規劃示意圖(林志平，2016)

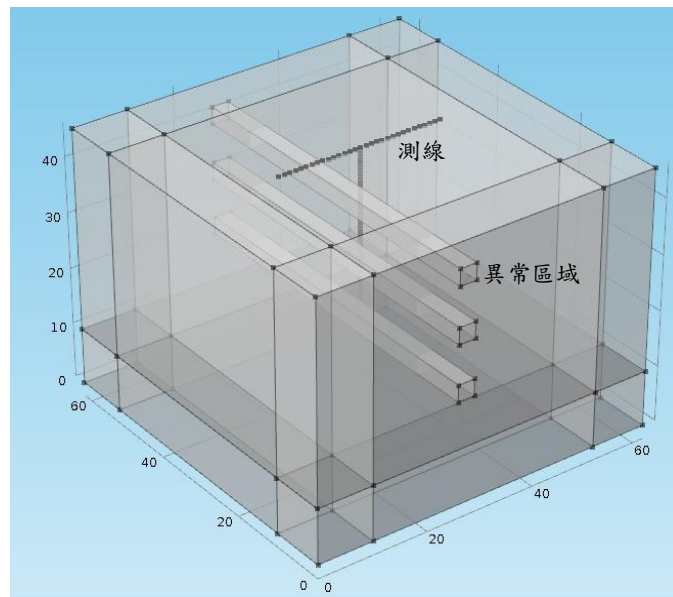


圖 13 三維數值模型建構示意圖(林志平，2016)



(2) 擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法

本研究擬基於前述建立應用於跨孔與地對孔電極序列中抵抗鏡像的能力大小之篩選準則，進一步以優化的資料組合被選擇來進行聯合反算 (Combined data inversion)，並評估其對壓抑鏡像問題成效探討。同時並擬嘗試以加權模型疊加 (model stacking technique, MOST) (Leontakaris and Apostolopoulos, 2012) 評估應用於壓抑鏡像之效益。於本項目部分研究工作內容如下：

- (a) 依據前述建立之資料篩選原則，評估將優化之資料組合進行聯合反演對壓抑鏡像問題之可行性與成效探討。
- (b) 評估加權模型疊加方法(model stacking technique, MOST)應用於壓抑鏡像問題之可行性與成效探討。

(3) 實場測試評估

本研究主要針對調查或整治時應用鑽孔之之地電監測技術發展，因此將基於前期於現場之跨孔施測經驗，利用本團隊既有產學合作案中，選定合適之場址進行實場測試並初步評估其可行性與潛在效益。



4.2 研究流程

本研究先以數值正算模擬方法探討孔內地電阻影像探測法之潛在問題現象與成因，包括建構適當之三維數值模型以進行正算模擬，依據數值模擬結果分析其現象並提出評析方法；而後進一步擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法，最後並擇定一合適場址進行實場測試。本計畫之研究流程步驟如圖 14 所示，：

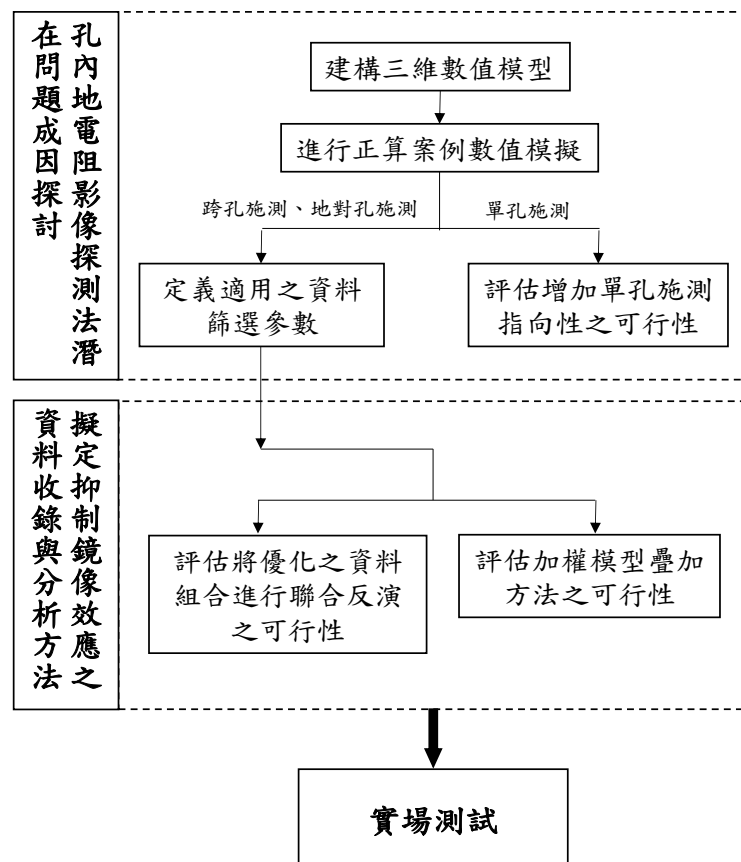


圖 14 研究流程



4.3 工作進度

整體工作進度如表 1，預定查核點如表中說明，目前期末報告工作已全部完成。

表 1 進度甘梯圖

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註	
孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討														
擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法														
實場測試評估														
工作進度估計百分比（累積數）	5%	15%	25%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	95%	100%		
預定查核點	期中		1. 建構三維數值正算模型。 2. 評析不同施測條件之潛在問題原因與現象。 3. 定義"跨孔施測"與"地對孔施測"之資料篩選參數。											
	期末		1. 評估將優化之資料組合進行聯合反演對壓抑鏡像問題之可行性與成效探討。 2. 評估加權模型疊加方法應用於壓抑鏡像問題之可行性與成效探討。 3. 進行實場測試評估可行性與潛在效益。											
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。														
4. 多年期計畫應分年說明各年度工作項目及期程規劃。														



第五章 結果與討論

5.1 孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討

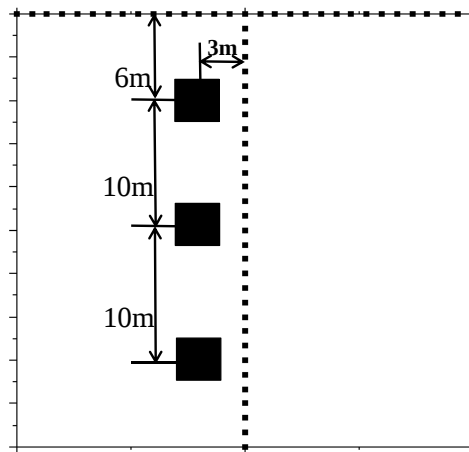
由前述說明可知，應用鑽孔之地電阻探測法可分為跨孔施測、地對孔施測以及單孔施測法；其中跨孔施測及地對孔施測皆可能產生潛在鏡像問題，致使資料解析產生偏差；而單孔式施測方法有施測區域缺乏指向性問題，因此對於潛在污染物或整治區域位置與流向可能不易判釋。由於實驗並不易大規模進行不同施測條件與鏡像問題與指向性問題探討，因此本研究以正算數值模擬方法進行孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討。正算數值模擬參考前期相關計畫採用之正算模型建構方法，依據解析與鏡像問題之潛在區域，規畫一系列正算模擬案例；並採用 3D 數值模擬方法，建構合適之數值模型進行地電阻探測模擬，透過三維數值模型建構幾何與材料參數，以描述施測結果與電極配置條件之相互關係。

最新文獻中(Bellmunt et al., 2016)提出資料篩選參數概念，據以評析跨孔式施測鏡像影響程度。因此對於“跨孔式”與“地對孔”施測鏡像問題之探討，本研究參考此概念並將透過一系列正算數值模擬結果，建立評估應用於跨孔與地對孔施測電極序列中，抵抗鏡像的能力大小之方法，以利基於共同之標準進行資料之歸納與篩選。此外，對於單孔式施測潛在問題，則嘗試搭配單一或少數地面電極之資料收錄方式，模擬評析其對於增加單孔施測指向性之效益。

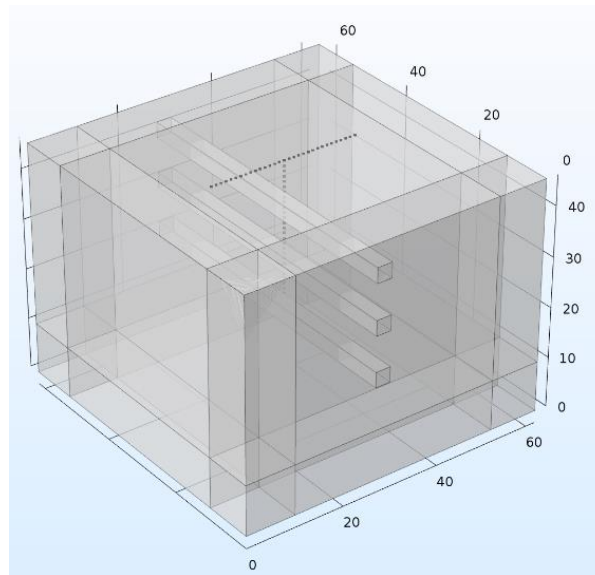
5.1.1 鏡像問題三維數值分析

5.1.1.1 地對孔施測三維數值分析潛在問題原因與現象

圖 15 所示的正演模型的地表測線為 30m，井孔深度也為 30m。地表測線與孔內測線之電極間距均為 1m。井孔的位置位於地面測線的中點。預設異常位於地表線下 6m，16m 和 26m 處，井孔水平距離 3m 處。模型中考慮了兩組不同異常電阻率值，分別模擬低電阻異常區（10 Ohm.m）與高電阻異常區（1000 Ohm.m），背景電阻率值則採用 100 Ohm.m。



(a) 數值模型架構



(b) 三維數值模型

圖 15 地對孔三維數值模型

Tsourlos 等人 (2011) 提到即使捨棄孔內數據或使用加權反演，鏡像效應仍然存在。由於單孔內資料顯然會導致鏡像結果，而單就地表電極所收錄資料（地表上的所有電極）將有助於防止淺層中的鏡像效應，圖 16 列出所有可能的排序方法。對於四極配置，有三種可能的安排來放置電極，如圖 16a、圖 16b 和圖 16c 所示；對於具有遠端極的三極配置，有兩種可能的配置，如圖 16d 和圖 16e 所示；圖 16f 則為二極配置。圖 16c 和圖 16d 中配置



的靈敏度區域大多位於較淺的深度，因此將這兩種配置排除在外。

對於四極配置，有兩種獨立類型的電極排列，Alpha 和 Beta，其他類型的四極排列相當於或可以從這兩種排列中導出 (Loke, 2010)。因此，共評估七種不同的地對孔電極序列之鏡像效應。

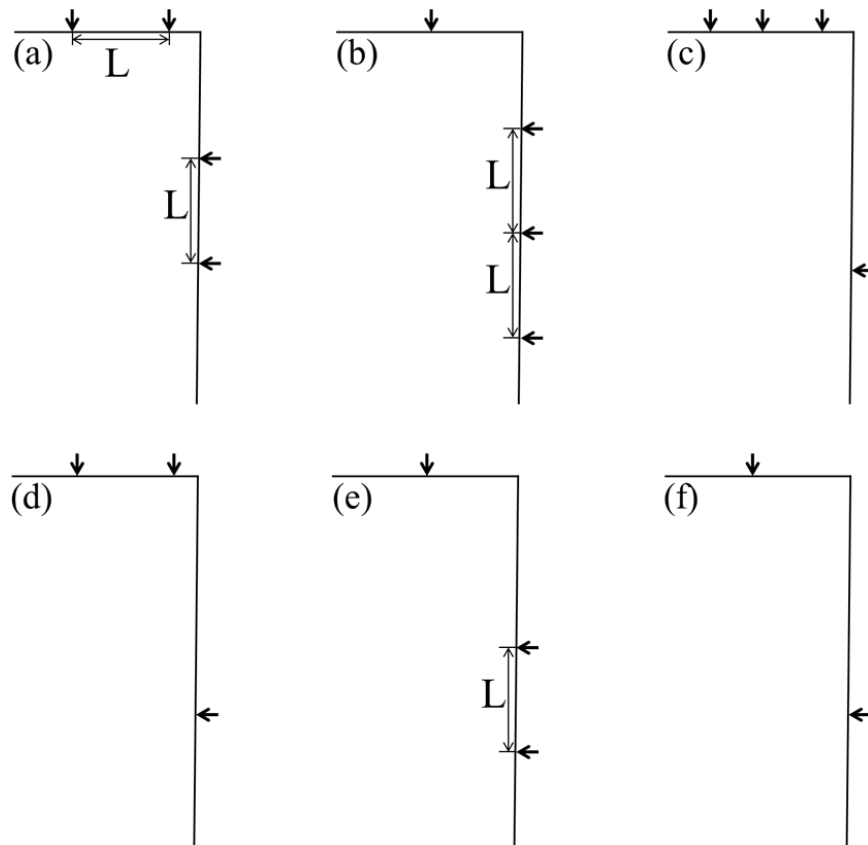
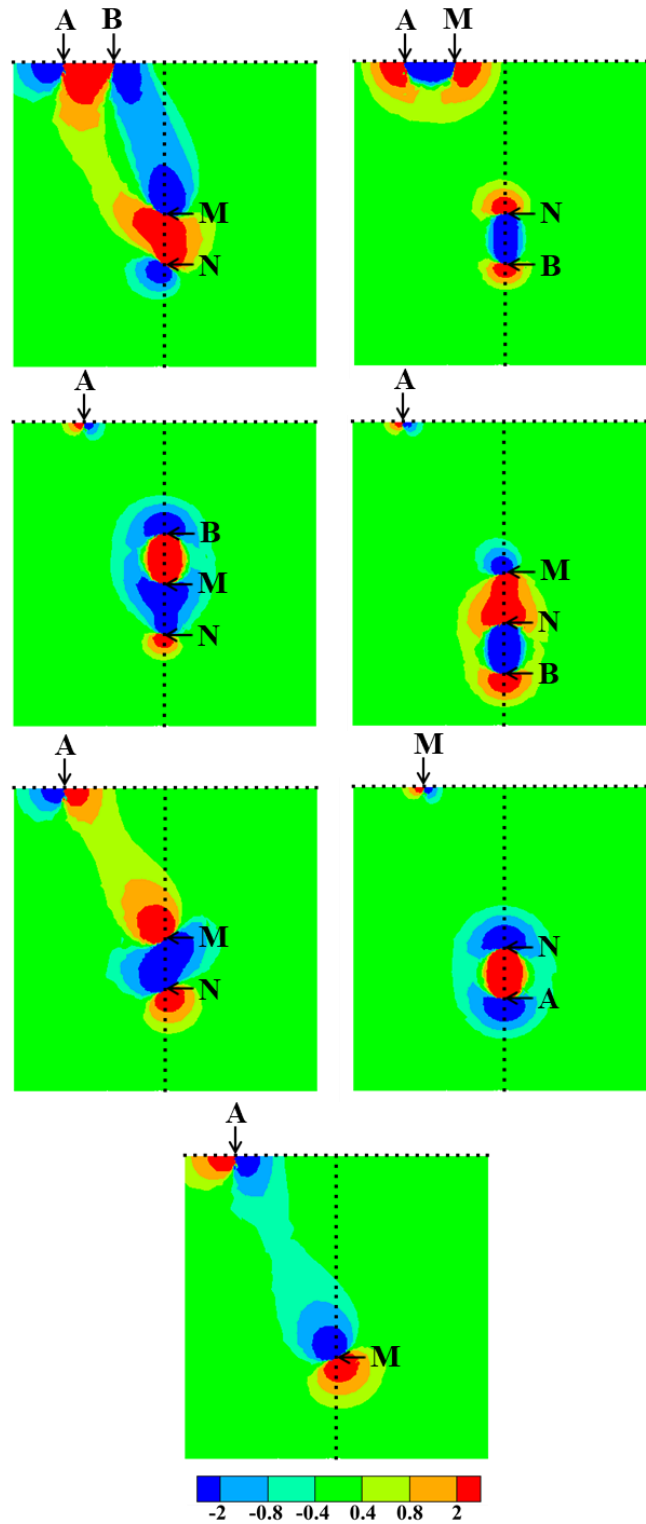


圖 16 地對孔施測之可能電極配置種類

圖 17 為每種配置的靈敏度分析，可發現其中一些顯示較為顯著之鏡像潛在條件，而另一些則較不明顯。從該些結果可以看出，具有對稱靈敏度的現象在井孔中同時具有電位極和電流極，將可能引致較為顯著的鏡像問題；然而，若井孔中只有電位極的電極配置的靈敏度則看起來較不對稱，則可能具有較低之鏡像效應。



A, B: 電流極
M, N: 電位極

圖 17 地對孔施測之靈敏度分析



為使模擬貼近現場數據，因此將 3%的隨機雜訊添加到計算值中，反算則使用 Earthimager 2D，結果如圖 18 和圖 19 所示。兩種不同電阻率對比的鏡像影響結果非常相似，顯示 A-M 配置的結果非常差，因為雜訊比高及解析度較低。即使在理論上（當沒有添加雜訊時），它也不具有對稱效應，但是在進一步的討論中排除了這種二極配置。從這些結果可以觀察到，當使用具有不對稱靈敏度模式的 AB-MN 或 A-MN 配置時，並不會發生對稱之假現象，但是這些序列在檢測異常時解析能力較差，特別是在較深的位置。另一方面，當使用具有對稱靈敏度模式的其他配置時，則出現對稱的鏡像問題，但是這些陣列則具有更好的異常解析能力，尤其是 A-MNB 配置。

因此由上述分析中可發現，鏡像效應的根本原因是井孔中具有一個電流極和一個電位極共存的序列條件。此外，沒有鏡像效應的結果一般具有較低的解析能力，而解析度較高的結果具有明顯的鏡像效應副作用。因此，關鍵問題將在於如何在提高解析度和降低鏡像效應之間取得平衡。



第五章 結果與討論

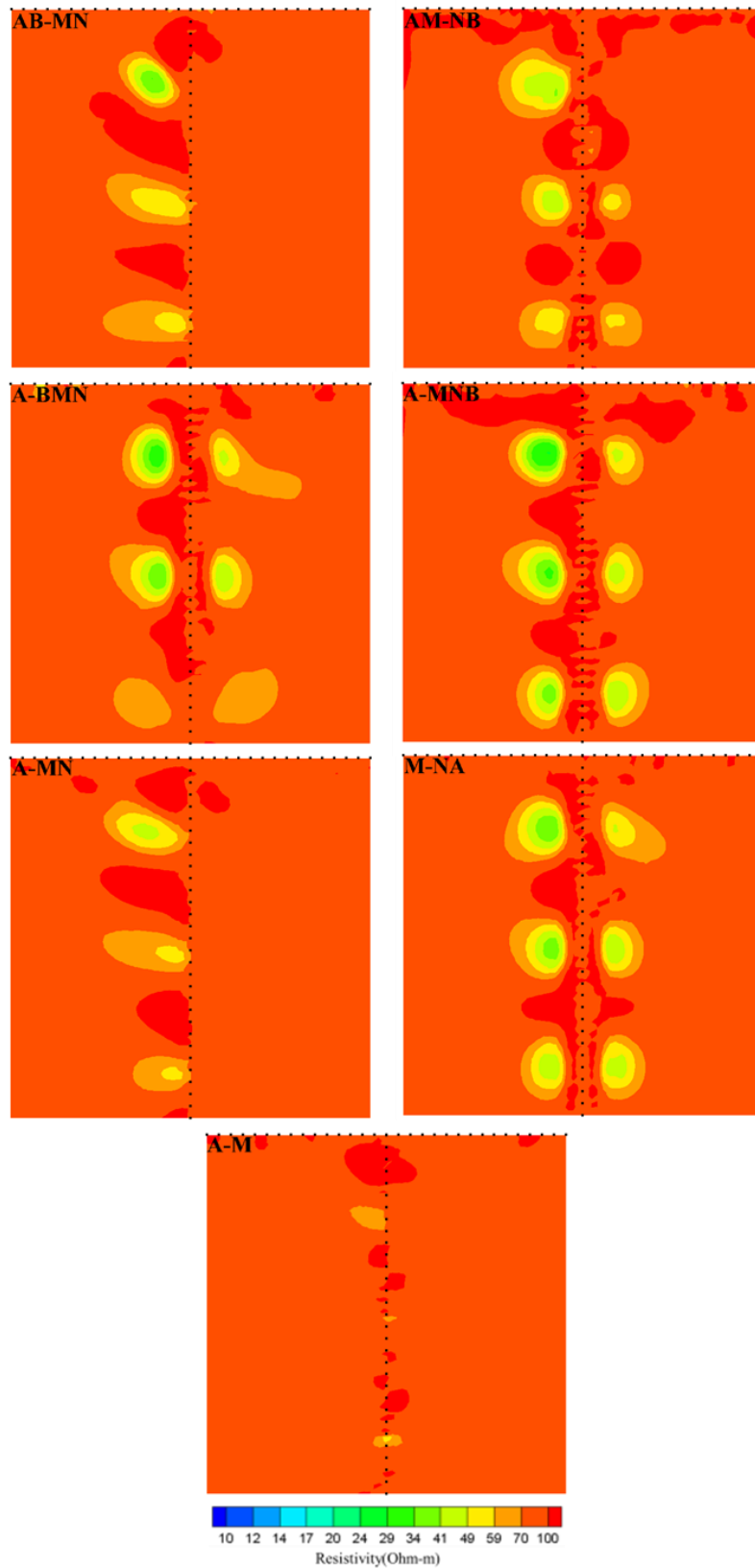


圖 18 地對孔施測之模擬結果 (低電阻異常區)



第五章 結果與討論

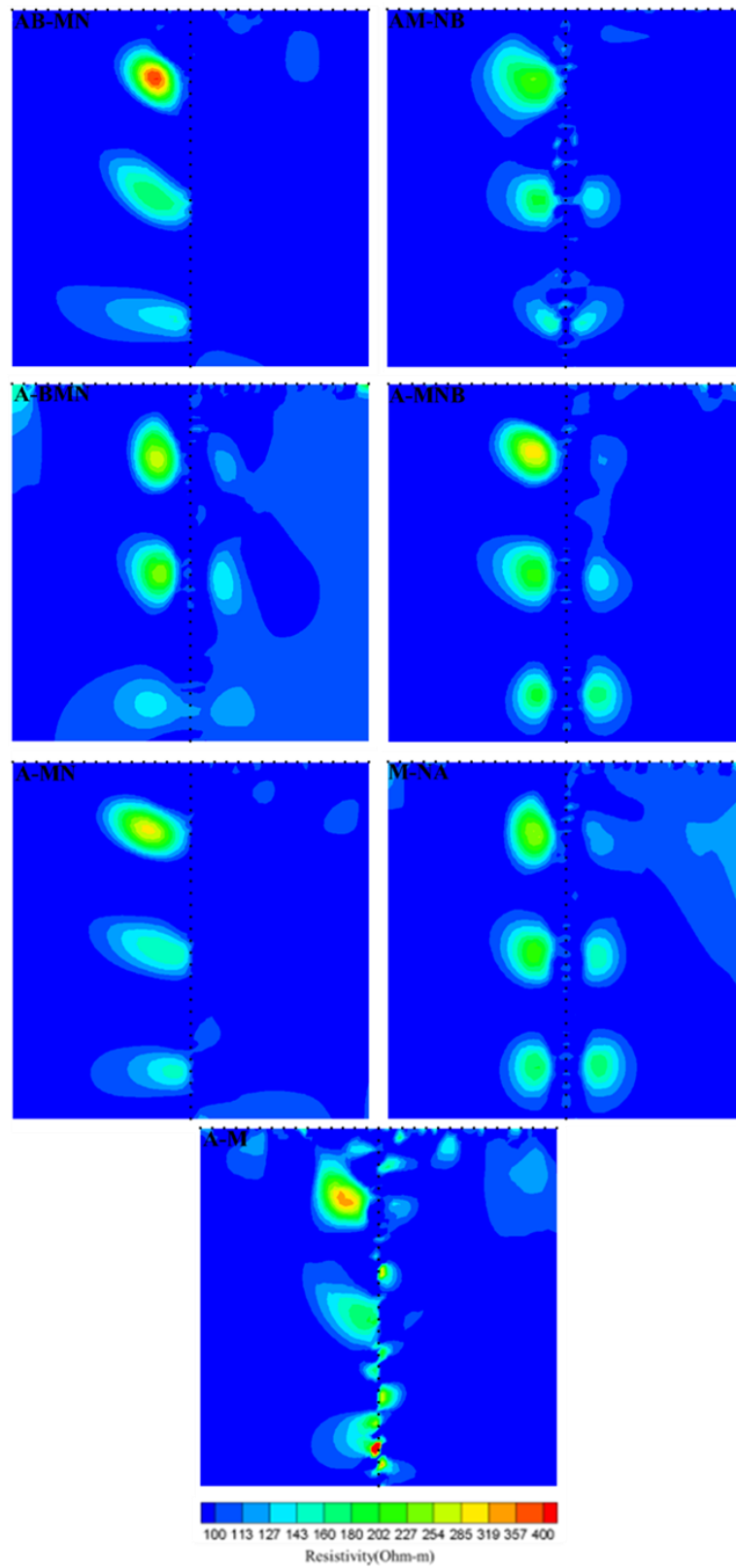
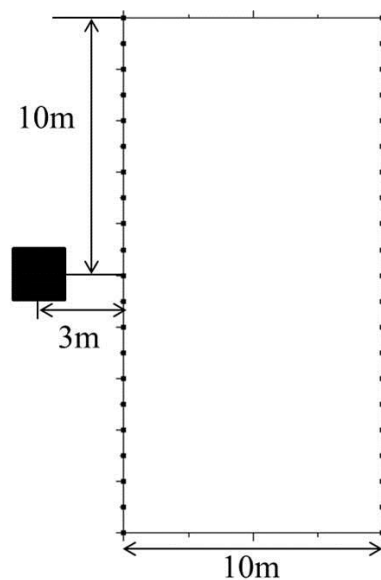


圖 19 地對孔施測之模擬結果 (高電阻異常區)

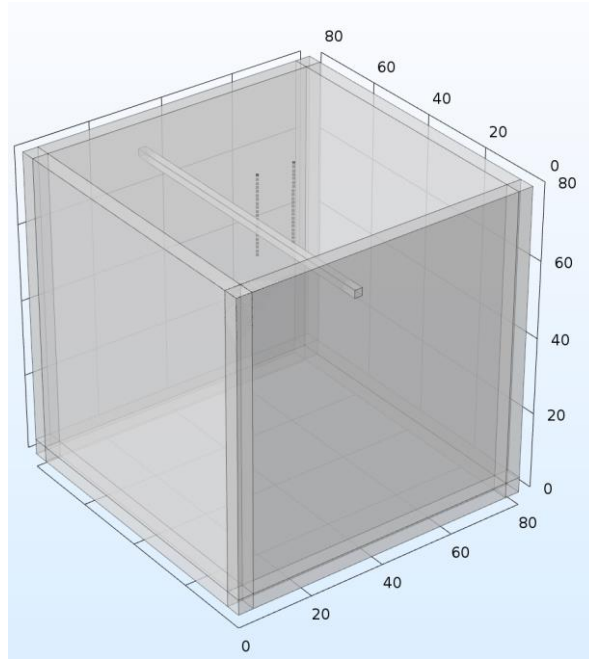


5.1.1.2 跨孔施測三維數值分析潛在問題原因與現象

由於鏡像效應實際上也存在於跨孔 ERT 調查中。Bellmunt 等人 (2016) 討論了三孔施測中鏡像效應的行為，但是現場實務中兩孔施測系統比三孔系統更頻繁地使用。為了研究雙孔系統跨孔施測的鏡像效應並驗證 Bellmunt 等人的結論，因此藉由 Bellmunt 等人的三孔模型概念進行了雙孔模型數值研究。圖 20 中鑽孔的深度為 20m，兩鑽孔的距離為 10m，預設異常位於水平 10m 和 3m 的深度。模型中考慮了兩組不同異常電阻率值，分別模擬低電阻異常區 (10 Ohm.m) 與高電阻異常區 (1000 Ohm.m)，背景電阻率值則採用 100 Ohm.m。



(a) 數值模型架構



(b) 三維數值模型

圖 20 跨孔式三維數值模型

本節討論了八種類型的配置。圖 21 和圖 21 顯示不同配置和對比度的模擬分析結果。於低電阻異常區(對比度 0.1)，除了 AB-MN、A-M 和 A-MN 配置的結果之外，對稱假現象皆出現在剖面中。三個結果的一致性比預期的要差，儘管沒有對稱的人為因素。但對於高電阻異常區(對比度 10)的結果，對稱假現象似乎出現在 A-MN 配置的剖面中。這應是由於反算的非唯一性和不正確的邊界條件造成的。這些結果顯示，同時在井孔中具有一個電流極和一個電位極的配置將產生對稱的假現象，並且井孔中同時沒有一個電流極和一個電位極的結構具有很大的不確定性。反算區域外異常的影響可能會出現在區域內的其他位置，而非對稱的位置。從結果中 Bip-Bip (AGI) 和 OPT (Bellmont) 配置也將導致鏡像效應。至於 OPT (Bellmont) 配置，這個雙孔系統中的 IOS 計算實際上與三孔系統中的相同。

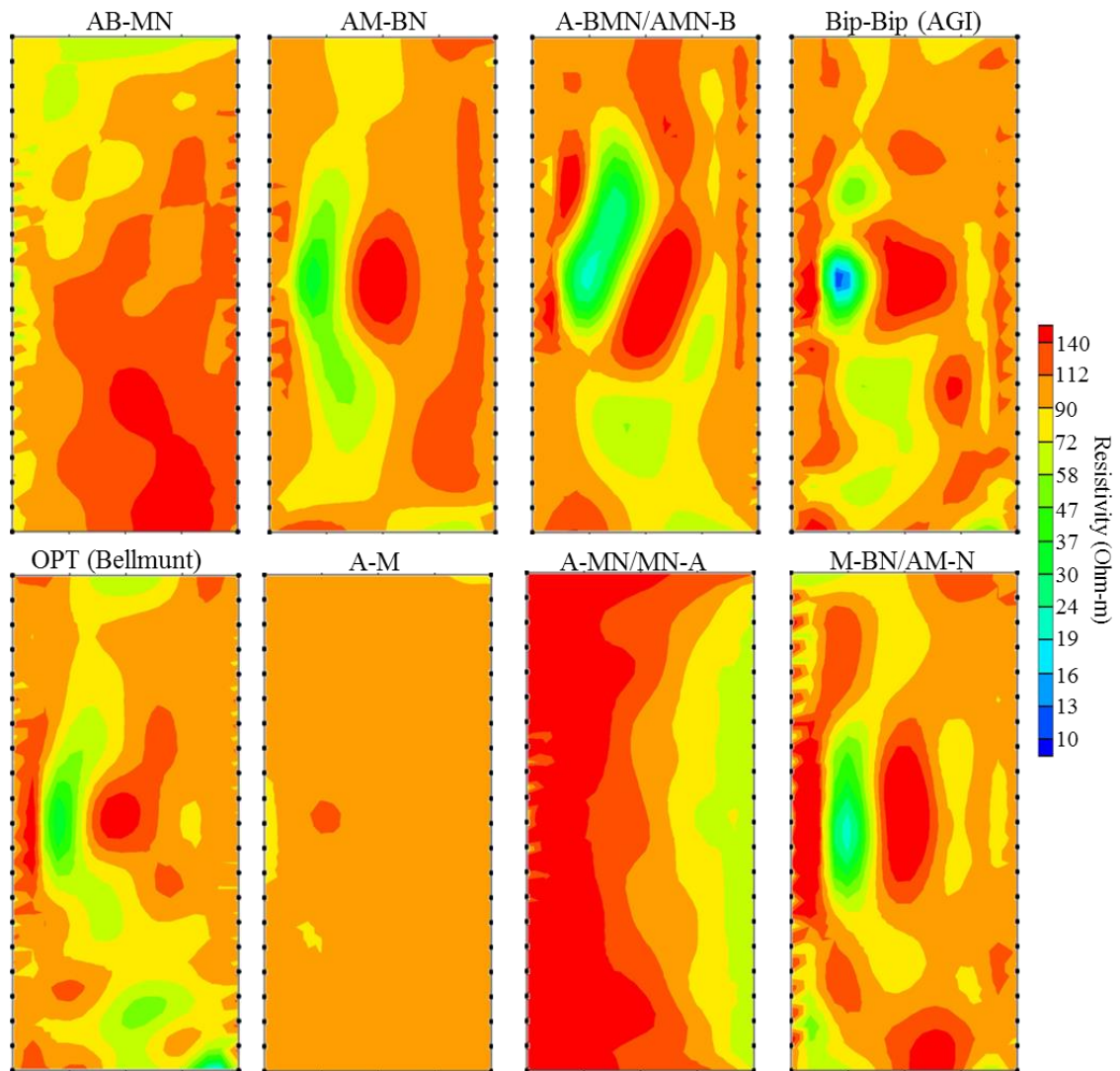


圖 21 跨孔施測之模擬結果 (低電阻異常區)



第五章 結果與討論

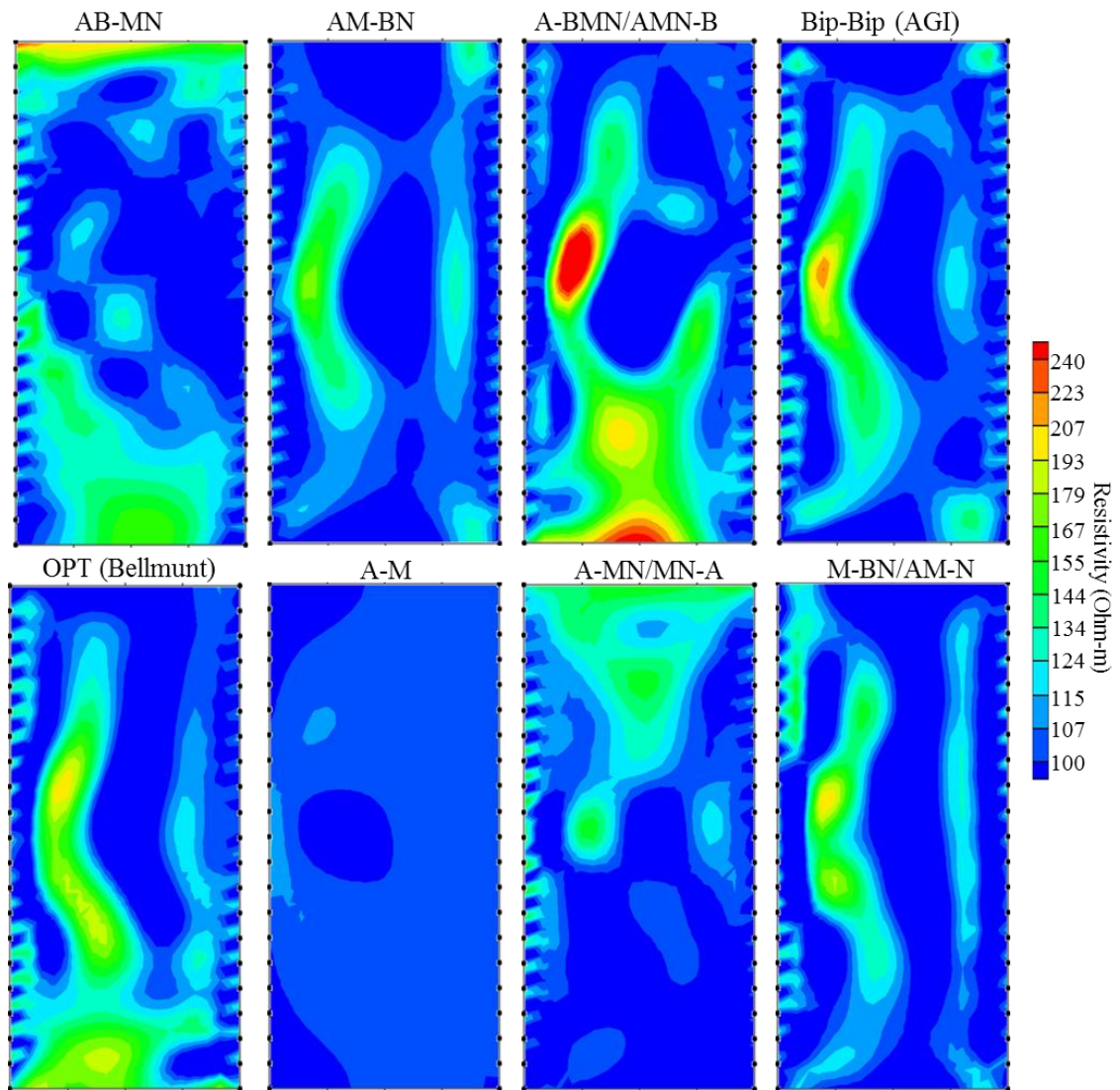


圖 22 跨孔施測之模擬結果 (高電阻異常區)



本節評估六種可能的跨孔配置的靈敏度分析。在圖 23 中，六種靈敏度模式的形態表現出與地對孔之靈敏度分析結果類似。井孔中同時存在一個電流極和一個電位極將導致鑽孔內的靈敏度呈現對稱形式，此將可能引致鏡像效應之假現象。圖除了 AB-MN 配置之外，其他四種配置皆具有井孔中有一個電流極和一個電位極之配置。因此，這些對稱鏡像可能出現在這四個反算模型中。地對孔和跨孔 ERT 之間靈敏度分佈的最大差異是地對孔施測的靈敏度幾乎在反算區域，而跨孔施測的靈敏度則不然。在兩個鑽孔之間的範圍之外仍然存在高靈敏度區域。

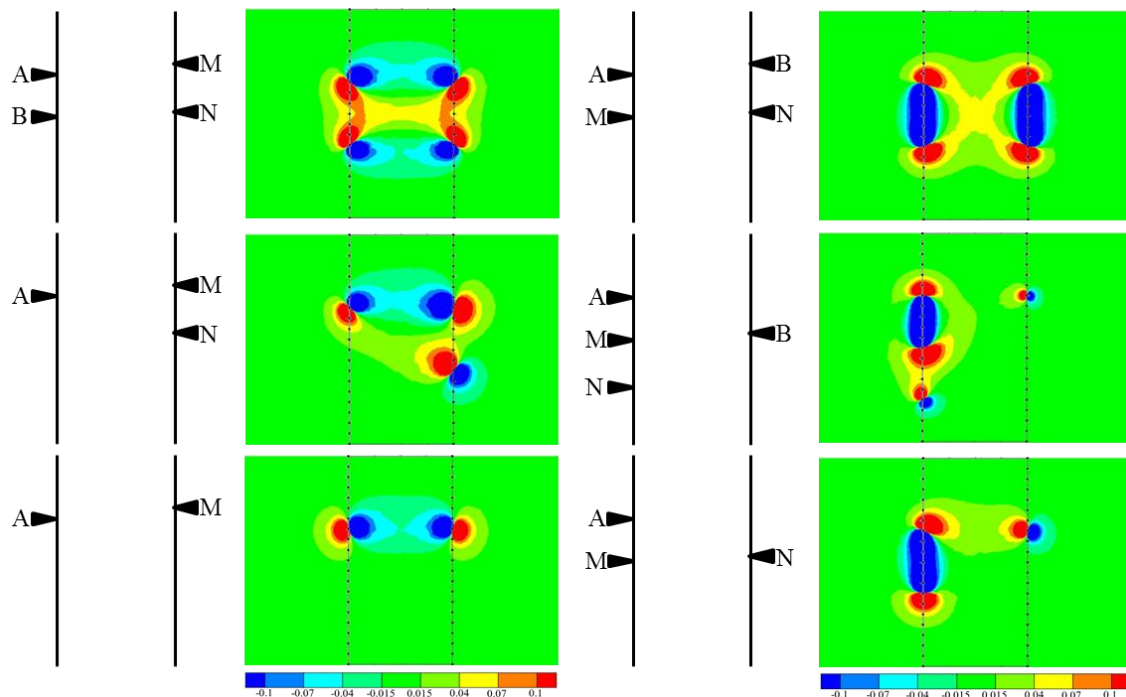


圖 23 跨孔施測之靈敏度分析



一般跨孔施測皆建議兩孔間距為鑽孔深度的 0.5 倍，不超過 0.75 倍；兩孔中心的靈敏度較低，因此限制井孔距離是為了保證中心區域的靈敏度。據此在本研究中，採用兩孔的距離為井孔深度的 0.5 倍。此外，將跨孔以外對靈敏度貢獻的範圍納入反算區域如圖 24 和圖 25 所示。圖中結果顯示井孔中具有一個電流極和一個電位極的配置的結果都具有對稱的鏡像問題。在該些配置之上，AM-BN 配置受對稱效應影響較小，但解析度低於其他配置；不同對比的結果確實顯示出一些差異，但結果的變化趨勢相似。最重要的是，在跨孔施測評估中亦證明了當在井孔中同時具有一個電位極和一個電流極的配置時將出現鏡像效應。

至於 Bipole-Bipole (AGI) 序列，對稱鏡像出現在區域中並且較其他更為複雜；說明 Bipole-Bipole (AGI) 序列會受到跨孔區域外異常的影響。對於 Bellmund 等人(2016)建議的最佳配置，實際上則是聯合數據反演的概念。這個 OPT 序列在這個雙孔系統中表現不佳，因為它產生明顯的對稱鏡像。與 AB-MN 配置相比，OPT 序列的結果與 A-BMN / AMN-B 配置相比具有更低的對稱效應並且具有更高的解析度。



第五章 結果與討論

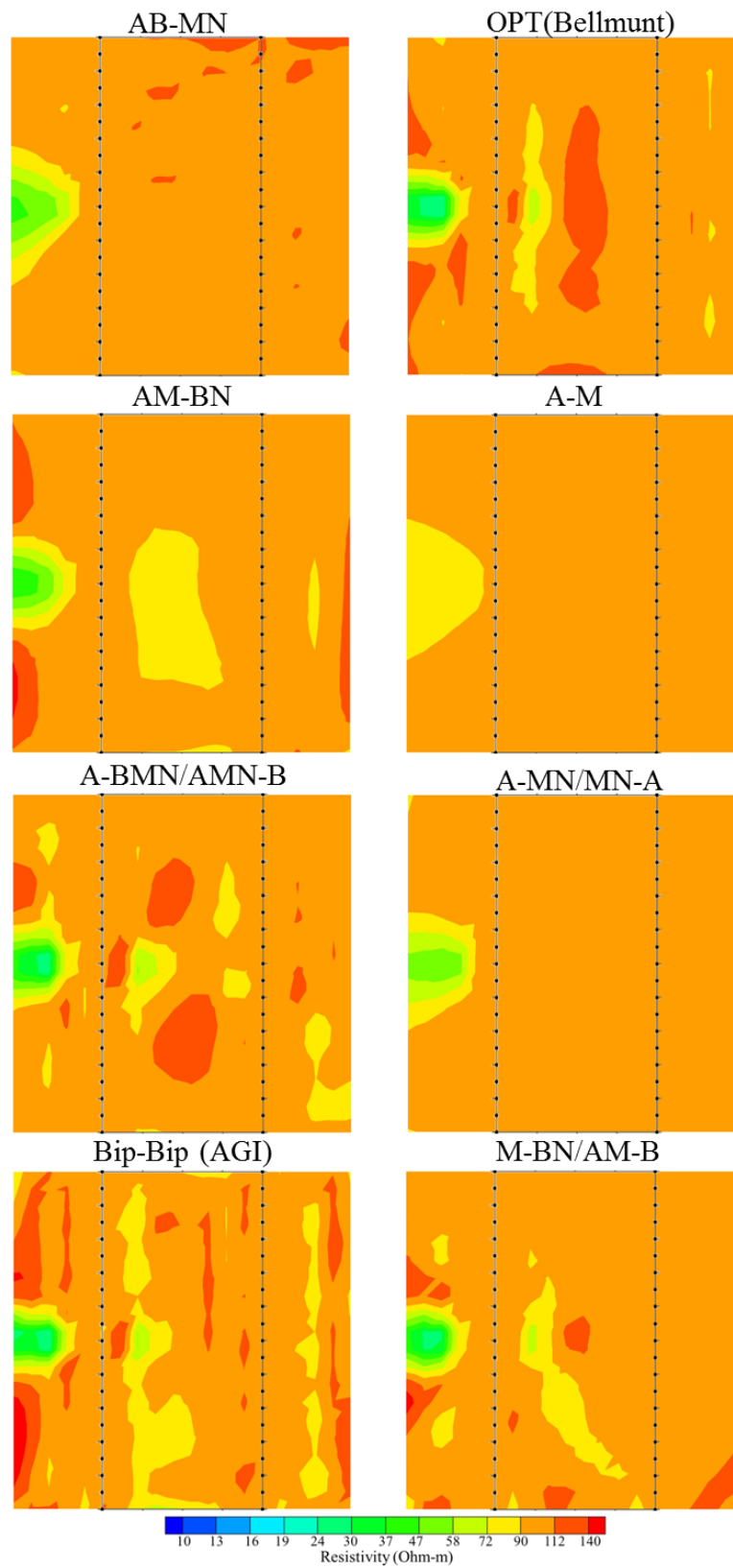


圖 24 含兩側跨孔施測之模擬結果 (低電阻異常區)



第五章 結果與討論

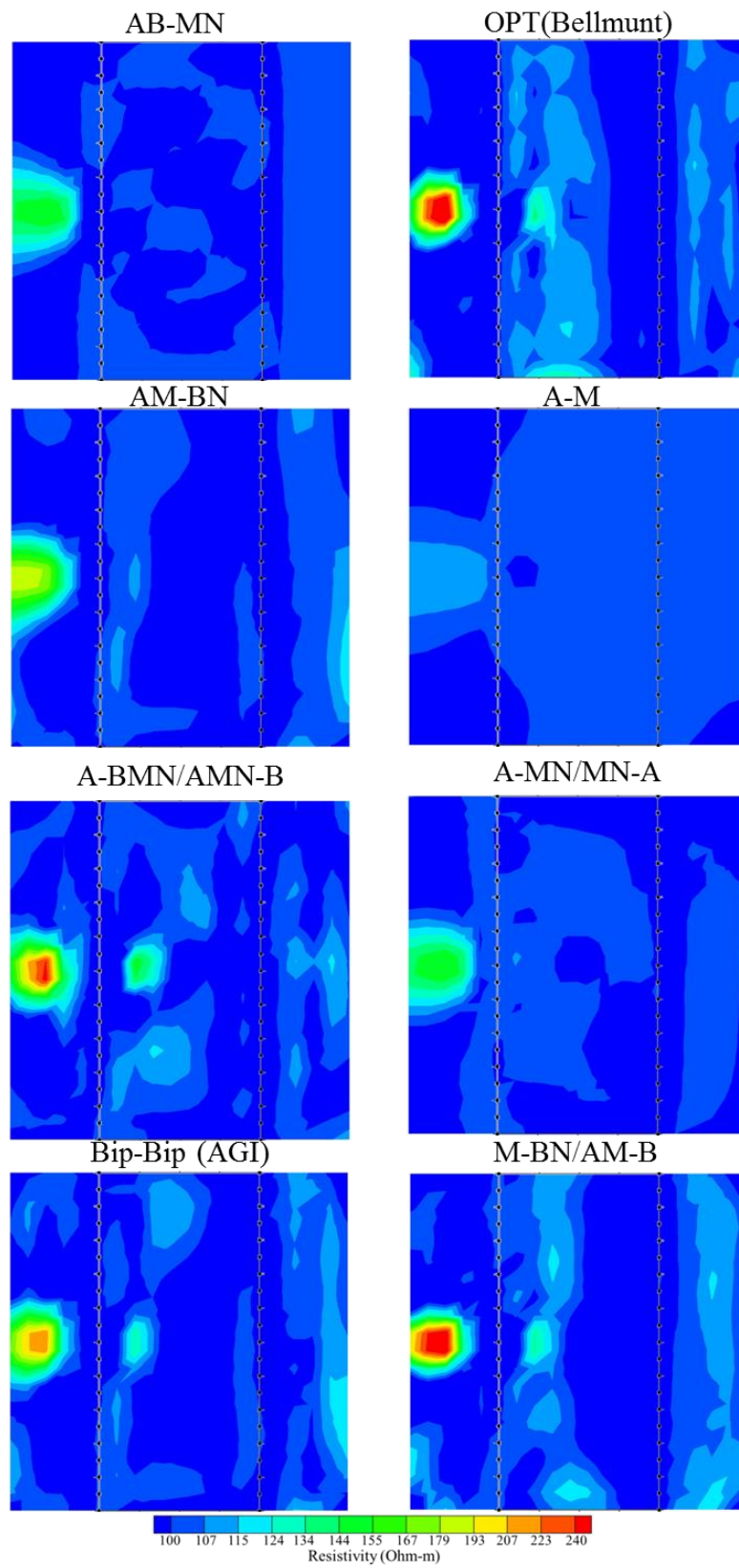


圖 25 含兩側跨孔施測之模擬結果 (高電阻異常區)

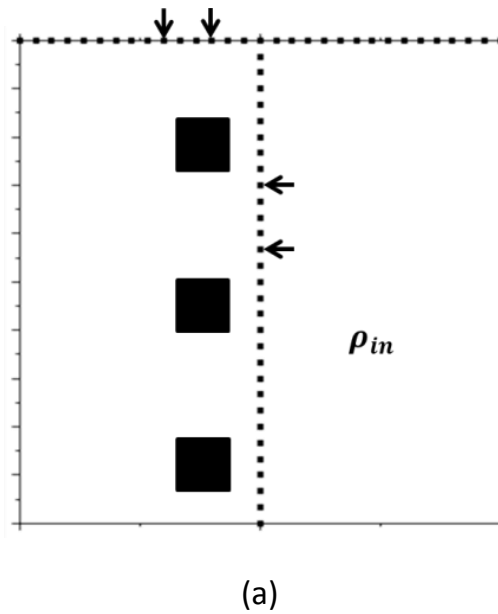


5.1.2 定義資料篩選參數

Bellmunt 等人(2016) 提出 In-panel / Off-panel Sensitivity (IOS) 的資料篩選參數，用以評估跨孔序列分辨異常區遷移方向的能力。本研究擴展了這個概念，將 IOS 定義為每個序列配置和電極分離對抗鏡像效應的指標。所定義之 IOS 如下式：

$$IOS = \left| \frac{2 \times (\rho_{in} - \rho_{off})}{\rho_{in} + \rho_{off}} \right| \quad (1)$$

其中 ρ_{in} 是使用位於左側的異常獲得的視電阻率值； ρ_{off} 是使用位於右側的異常獲得的視電阻率值，分別如圖 26a 與圖 26b 所示，實務上圖 26b 之 ρ_{off} 結果可以圖 26c 替代。差異越小得到的 IOS 值越低，因此意味著抵抗鏡像效應的能力越低。



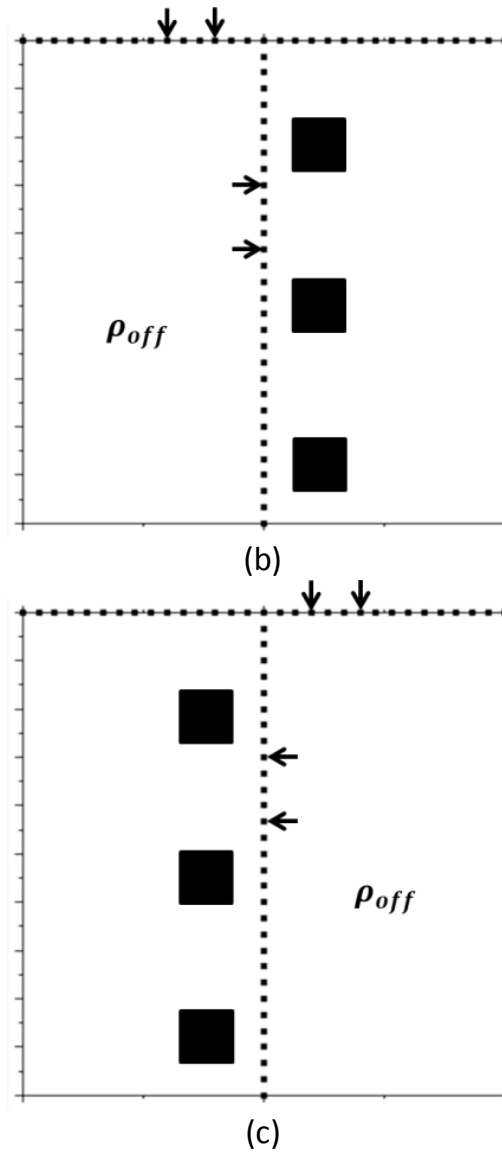


圖 26 IOS 資料篩選參數之定義



5.1.3 單孔施測指向性可行性數值分析評估

(1) 靈敏度分析

對單孔式施測而言，最大問題在於其位於全域空間無法呈現明確指向性，因此較為可行之解決方案係為搭配單一或少數地面電極之資料收錄方式，將全域空間之單孔測線藉由地面固定電極引導明確指向性方向，而成為二維問題。搭配方案須於地表為固定電極，而孔內則為移動之序列資料收錄。如圖 27 所示，歸納可能之收錄方式包括四種，分別為地表具有一固定電極之 A-BMN、A-MNB 以及地表具有兩固定電極之 AB-MN、AM-NB。圖 28 與圖 29 分別以數值模型之靈敏度分析比較此四種收錄方式增加指向性之效益，可發現與地對孔施測類似現象，當孔內不同時具有電流極與電位極時(AB-MN)，靈敏度之指向性最為明確，但同時可發現其靈敏度較低，因此可預期解析能力會較差。此外，由於地表為固定電極而孔內為移動序列，因此圖中亦分別呈現當孔內電極位於 2 倍地表電極距離、1 倍地表電極距離以及孔內電極極接近地表之三種狀況，綜合四種電極配置之靈敏度，可以發現其皆具有潛在指向性之效益。若分別評估，則為 AB-MN 之指向性最為明顯、但整體靈敏度最差，而 AM-NB 則屬平衡具備指向性與靈敏度。

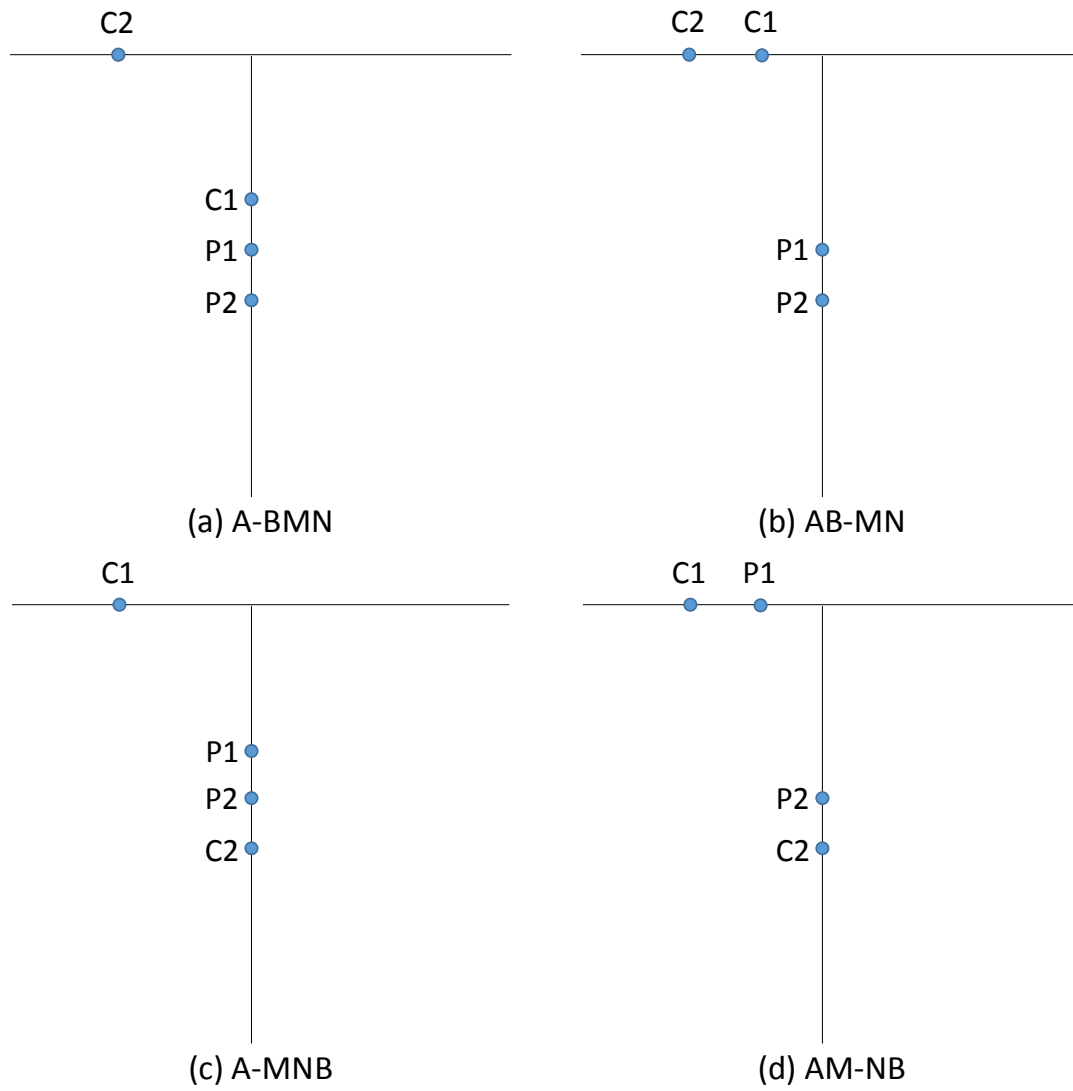


圖 27 單孔施測搭配地面固定電極之形式

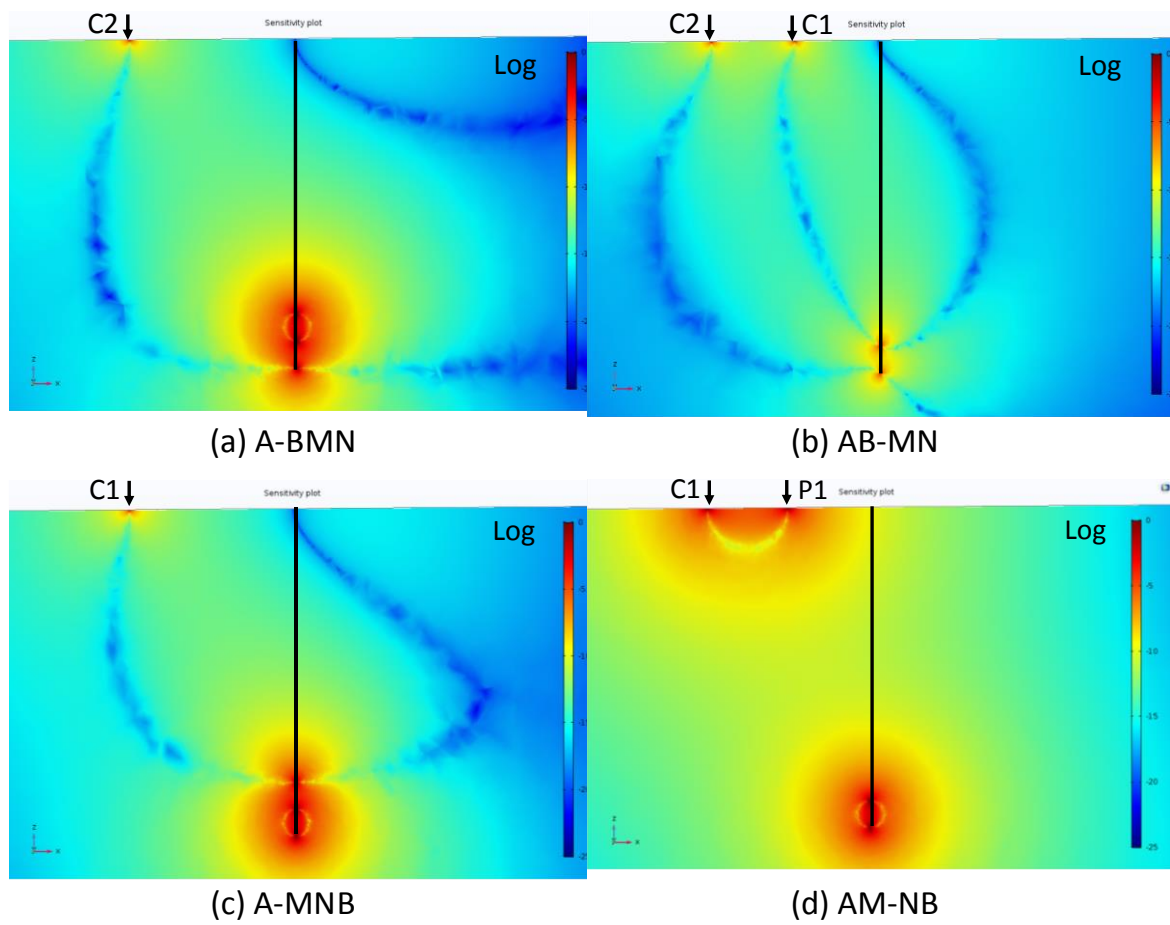


圖 28 四種單孔搭配固定地面電極形式之靈敏度比較(Surface:Borehole=1:2)

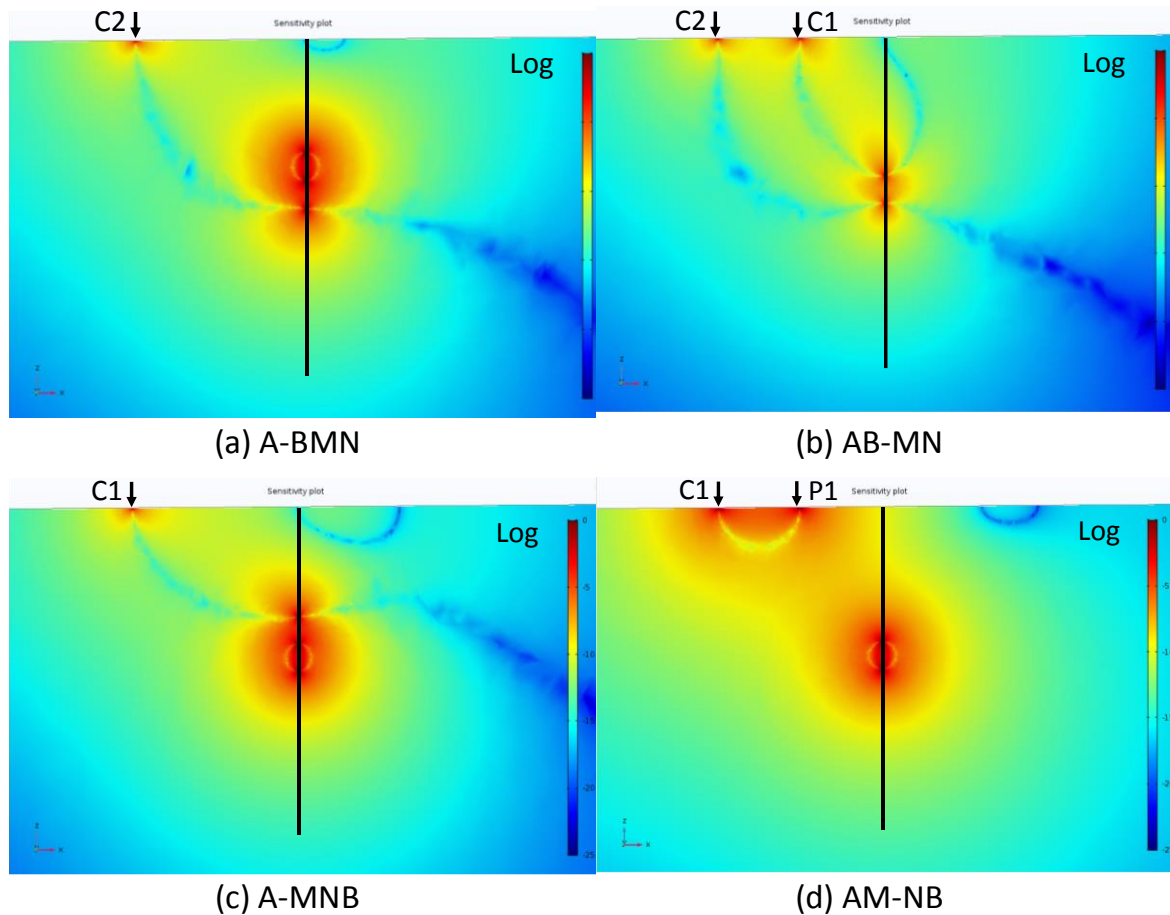


圖 29 四種單孔搭配固定地面電極形式之靈敏度比較(Surface:Borehole=1:1)

(2) 單孔指向性數值分析評估

藉由前述靈敏度分析可知，單孔搭配一組或兩組地面固定電極之資料收錄方式，可將全域空間之單孔測線藉由地面固定電極引導明確指向性方向，而成為二維問題；搭配方案須於地表為固定電極，而孔內則為移動之序列資料收錄。可能之收錄方式包括四種，分別為地表具有一固定電極之 A-BMN、A-MNB 以及地表具有兩固定電極之 AB-MN、AM-NB，可以發現其皆具有潛在指向性之效益。因此依據該四種配置序列進一步以潛在異常區域之案例，模擬比較不同序列對於增加單孔施測指向性與解析能力之差異。圖 30 為正演模型架構，井孔深度為 30m、電極間距為 1m，採用地表電極為固定距離 15m。預設異常位於地表線下 6m，16m 和 26m 處，井孔水平距離 3m 處，並設置兩種情境為異常區域與地表電極同側以及對側，用以評估指向性之效



益。模型中考慮了兩組不同異常電阻率值，分別模擬低電阻異常區（10 Ohm.m）與高電阻異常區（1000 Ohm.m），背景電阻率值則採用 100 Ohm.m。

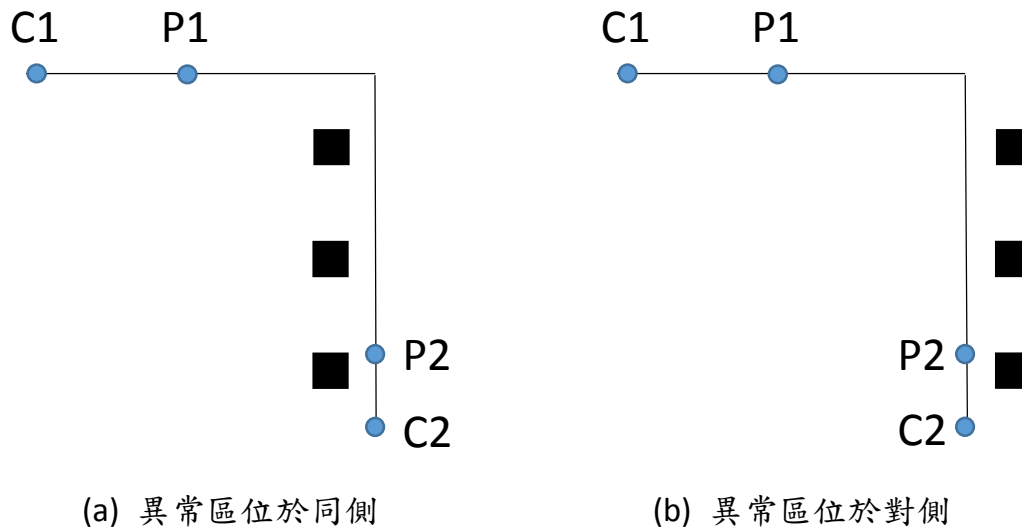


圖 30 單孔搭配地表固定電極方法數值模擬架構示意圖(以 AM-NB 為例)

地表具有一固定電極之 A-BMN、A-MNB 之分析結果如圖 31、圖 32 所示。由地表具有一固定電極之序列而言，可以發現無論是低電阻異常區或是高電阻異常區，於施測區域對側皆會出現顯著之鏡像問題，亦即無法區分單孔施測結果之之指向性。此外，由於地表僅一組固定電極，因此可發現該配置對於異常區域之規模描述與解析能力皆不佳。

地表具有兩固定電極之 AB-MN、AM-NB 之分析結果如圖 33、圖 34 所示。由地表具有兩固定電極之序列而言，可以發現對於異常區域之規模與解析能力皆優於地表具有一固定電極之序列。其中，AM-NB 之解析能力優於 AB-MN 序列結果；而針對指向性效益而言，兩者皆出現程度不高之鏡像效應，因此若以反向重覆施測方式仍有機會區分異常區域位置。



第五章 結果與討論

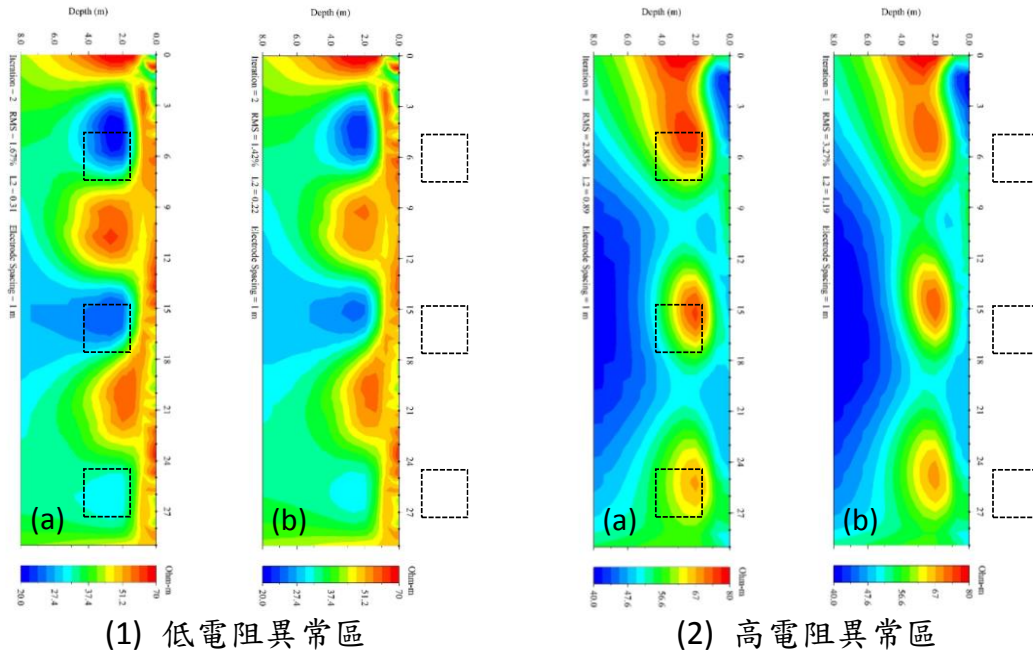


圖 31 單孔搭配地表固定電極 A-BMN(C-CPP)之模擬結果 (a)異常區位於同側 (b)異常區位於對側

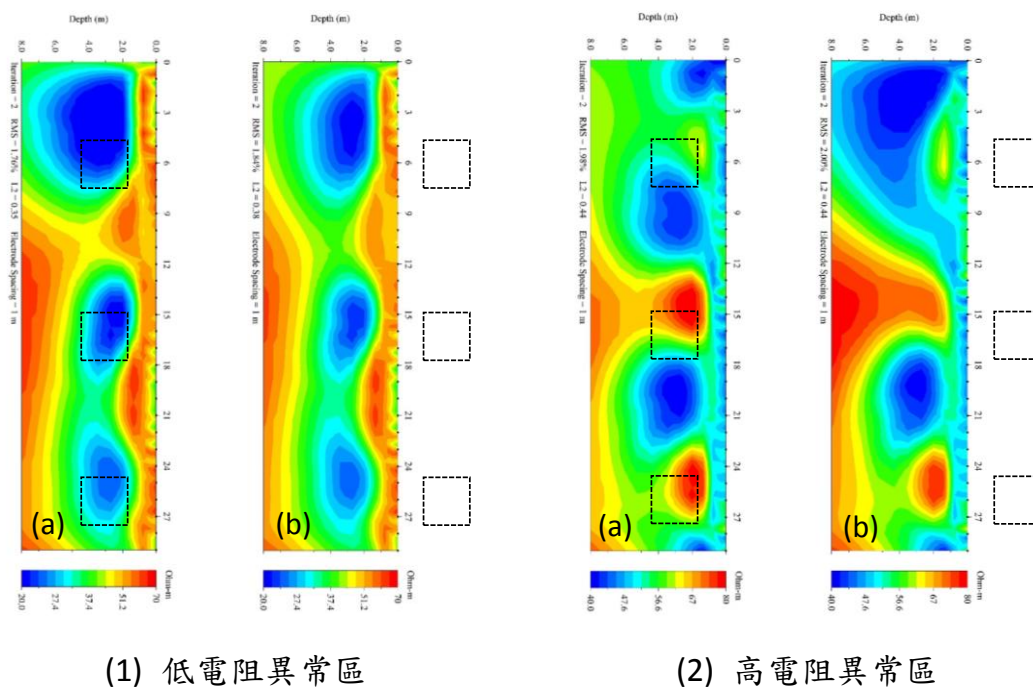
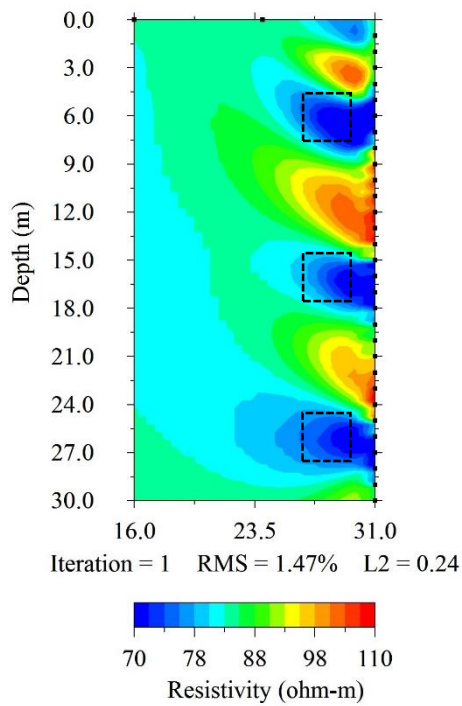


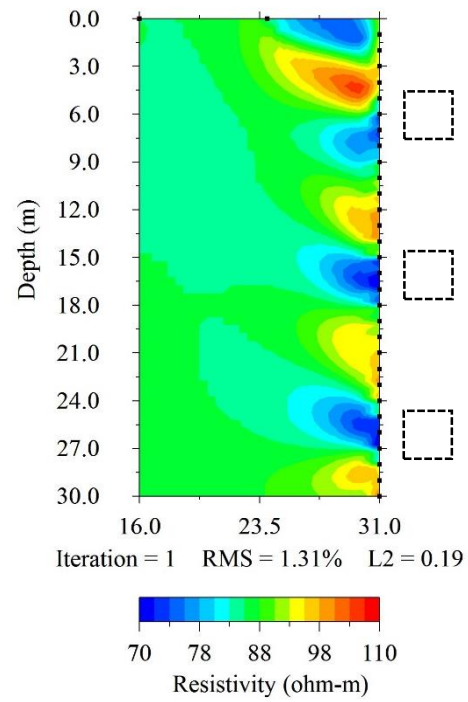
圖 32 單孔搭配地表固定電極 A-MNB(C-PPC)之模擬結果 (a)異常區位於同側 (b)異常區位於對側



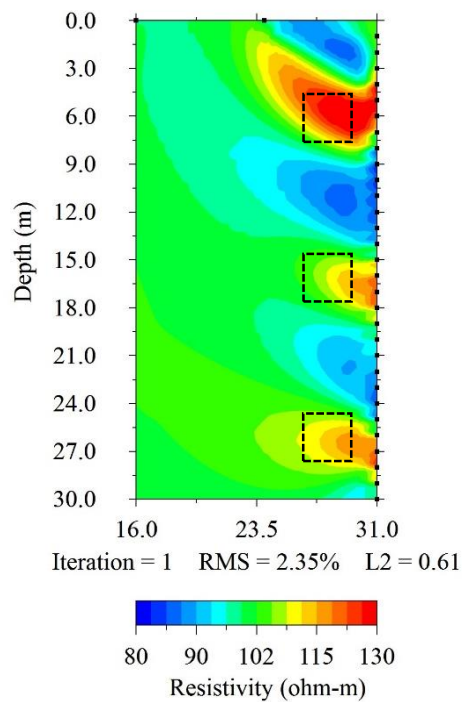
第五章 結果與討論



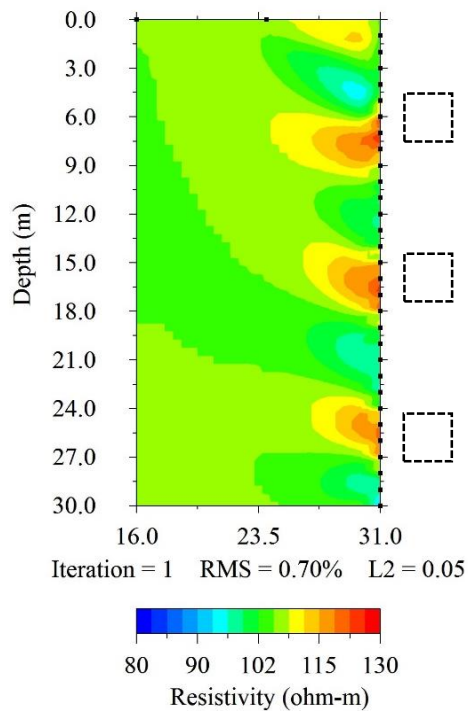
(a) 低電阻異常區位於同側



(b) 低電阻異常區位於對側



(c) 高電阻異常區位於同側

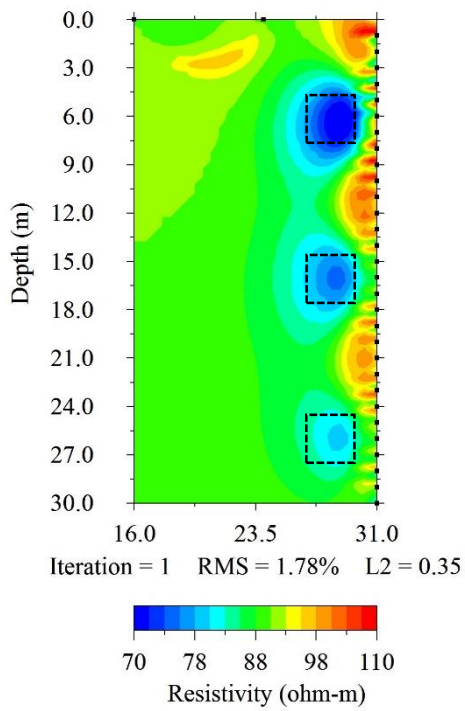


(d) 高電阻異常區位於對側

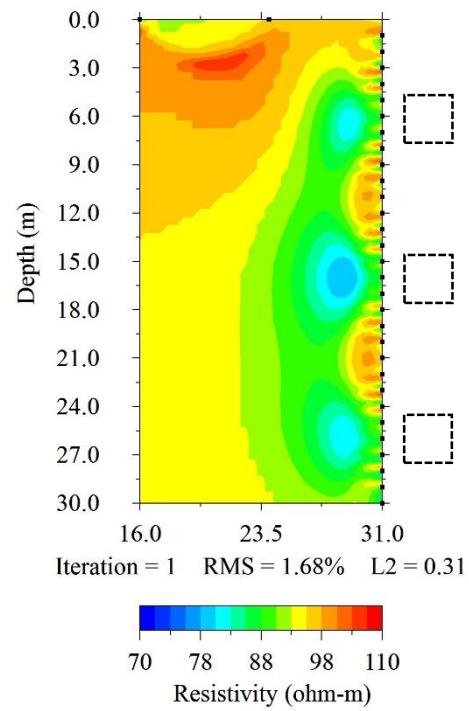
圖 33 單孔搭配地表固定電極 AB-MN(CC-PP)之模擬結果



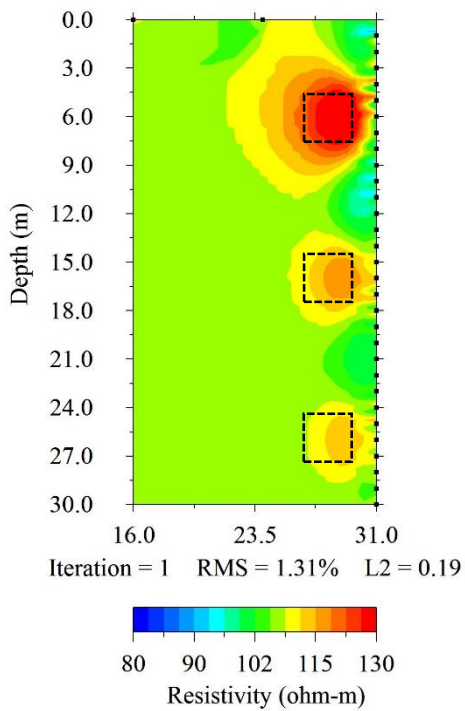
第五章 結果與討論



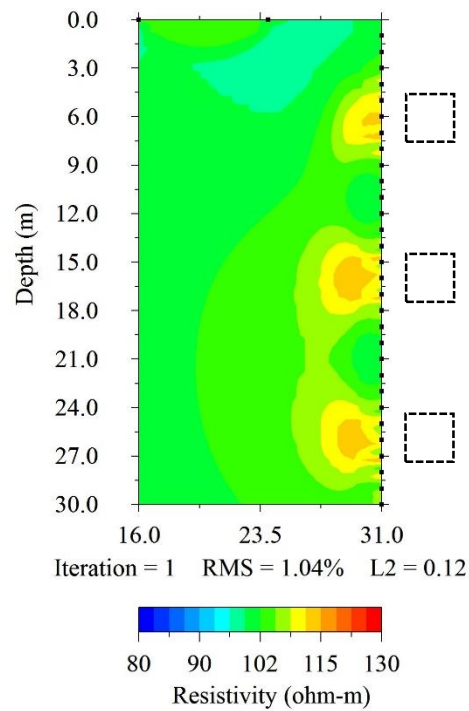
(a) 低電阻異常區位於同側



(b) 低電阻異常區位於對側



(c) 高電阻異常區位於同側



(d) 高電阻異常區位於對側

圖 34 單孔搭配地表固定電極 AM-NB(CP-PC)之模擬結果



5.2 擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法

5.2.1 聯合反演方法(Combined data inversion)

由前節數值模擬研究可知，沒有一個最佳序列可同時滿足高解析度和低鏡像效應的要求；該結果意味著我們至少需要兩種類型的電極配置才能更好地通過聯合數據分析或聯合反演(Combined data inversion)以貼近需求。考慮到設置遠極的潛在缺點，因此只討論四集方法 AB-MN 和 A-MNB 配置，其中 A-MNB 配置顯示具有更高的解析度。由於每種配置都可生成具有不同電極間距 (L) 的序列，因此我們需要單獨評估其抗鏡像效應的能力，以確定用於聯合反演的資料範圍。

從圖 35 可以觀察到，IOS 值受到改變電極間距影響的變化，對於沒有鏡像效應的 AB-MN 配置，平均和最大 IOS 值相對較高並且隨著間距 L 的增加而減小。對於 A-MNB 配置，平均 IOS 隨著電極間距的增加而增加，隨著電極間距 (L) 增加至一門檻後，平均 IOS 達到較高的穩定值；而 IOS 的最大值出現峰值之後下降，此因每個配置之間的 IOS 值的差異隨著間距的增加而降低。因此，對於 A-MNB 配置，在大電極間距的序列中，抵抗鏡像效應的整體能力比在小電極間距的序列中更佳。

5.2.2 加權模型疊加方法(Model stacking technique, MOST)

Leontakaris 和 Apostolopoulos(2012)提出可以採用模型疊加方法(MOST)去除跨孔施測中的假現象，該方法主要用於去除由環境雜訊，不同電極配置或其他效應引起的一些隨機假現象，如下式：

$$\text{MOST} = \sqrt[n]{M_1 * M_2 * \dots * M_n} \quad (2)$$

其中，每個模型的 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 值分別為相同點之值。

環境雜訊等隨機假現象的隨機性是允許此模型疊加方法主要特徵。然而，由鏡像效應引起的非隨機假現象不會被抑制，因為它們出現在特定位置。因此，將權重項納入考量，加權模型疊加方法 (WMOST) 則可表示為

$$\text{WMOST} = M_1^{\frac{w_1}{n}} * M_2^{\frac{w_2}{n}} * \dots * M_n^{\frac{w_n}{n}} \quad (3)$$



其中， $w_1 + w_2 + \dots + w_n = n$

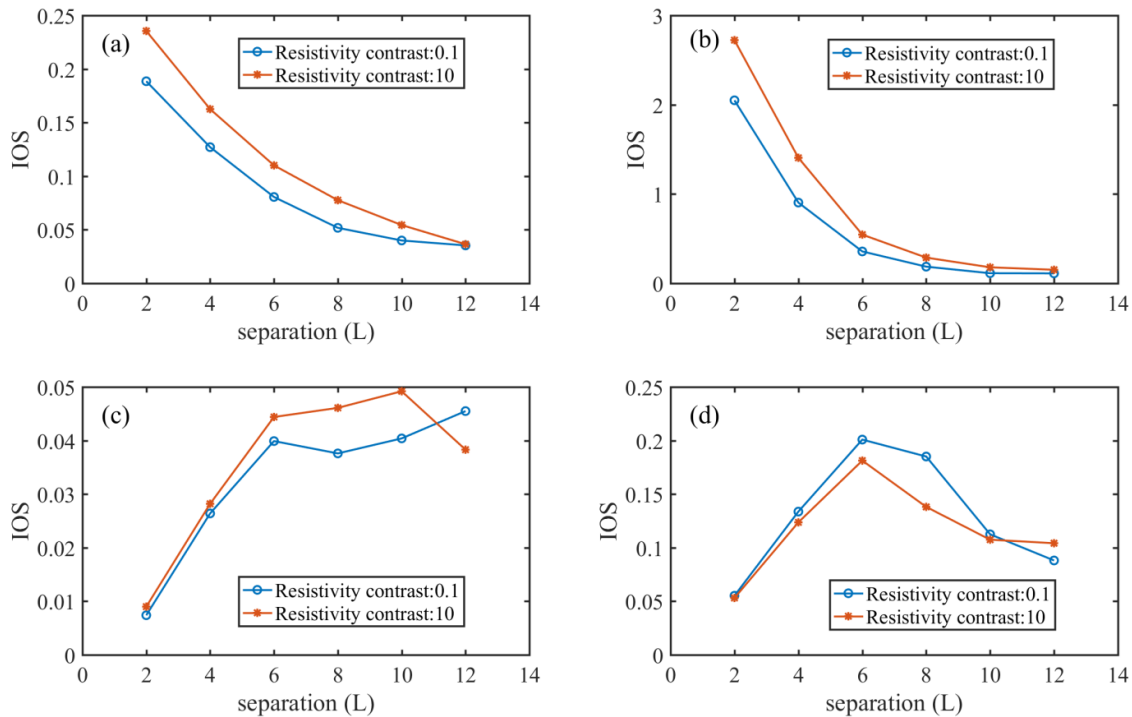


圖 35 IOS 參數與電極間距評估(a)AB-MN 平均 IOS(b)AB-MN 最大 IOS(c)A-MNB 平均 IOS(d)AMN-B 最大 IOS

5.2.3 抑制鏡像效應分析方法有效性評估

(1) 地對孔施測抑制鏡像效應分析結果

基於 IOS 結果，採用來自 $L = 2, 4$ 和 6m 的 AB-MN 資料作為基礎資料，因為這三個間距具有較高的最大和平均 IOS 值。至於 A-MNB 配置，最大和平均 IOS 值在電極間距 $L = 6\text{m}$ 附近相對較高。因此，將來自 $L = 4, 6$ 和 8m 的 A-MNB 資料分別添加到基礎資料以執行資料組合。如圖 37 和圖 38 所示，這種聯合反演的結果顯示，當考慮不同間距的 A-MNB 資料時，聯合反演的結果亦將不同。

在電阻率對比等於 0.1 的情況下（圖 36），圖 36a（基本資料+ A-MNB $L = 4\text{m}$ ）中檢測到的異常的解析度比圖 36b（基本資料+ A-MNB $L = 6\text{m}$ ），36c（基



本資料+ A-MNB $L = 8\text{m}$), 36d (基本資料+ A-MNB $L = 6,8\text{m}$)。然而，圖 36a 中的鏡像效應是仍然顯而易見。圖 36b 和 36c 的結果顯示中間異常的解析度略佳於原始 AB-MN 的結果，而沒有明顯的鏡像問題。然而，這種選擇似乎並沒有改善深層異常區域。在圖 36d 中，透過將 $L = 6\text{m}$ 和 $L = 8\text{m}$ 的 A-MNB 資料添加到基礎資料中，合併成更好的聯合反演剖面。但應該注意的是，完全消除鏡像問題並不能僅透過聯合反演方法。隨著更多 A-MNB 資料納入，鏡像效應在解析度提高的同時變得更加突出。此外，在電阻率對比度等於 10 的情況下亦獲得相似的結果，如圖 38 所示。

在圖 36f 和圖 37f 中，因為已知哪種類型的電極配置具有更高的解析度及哪種類型不受鏡像效應的影響，因此相應的權重分配至模型中。模型加權過程中每個模型的權重在標準 MOST 中是相同的，而加權是根據 WMOST 中的理解來加以定義；加權的選擇需事先理解序列特性，例如低鏡像效應的 AB-MN 反演模型賦予高的權重 1.5，而具嚴重鏡像效應但更高解析度的 A-MNB 反演模型賦予了低的權重 0.5。

本研究提出的兩種方法能夠在解析度和鏡像效應之間進行平衡，但結果可能並不總是令人滿意。尤其聯合反演方法實際上是一種加權反演方法，兩種配置類型的資料量比例即為權重的比率。對於這種方法，首先計算每個序列之 IOS 值，並基於對 IOS 趨勢的觀察將基礎資料和添加的資料合併。這種方法至少需要一些關於目標物知識；此外，IOS 值高度依賴於假設的模型，這在實務應用中常是有困難的。

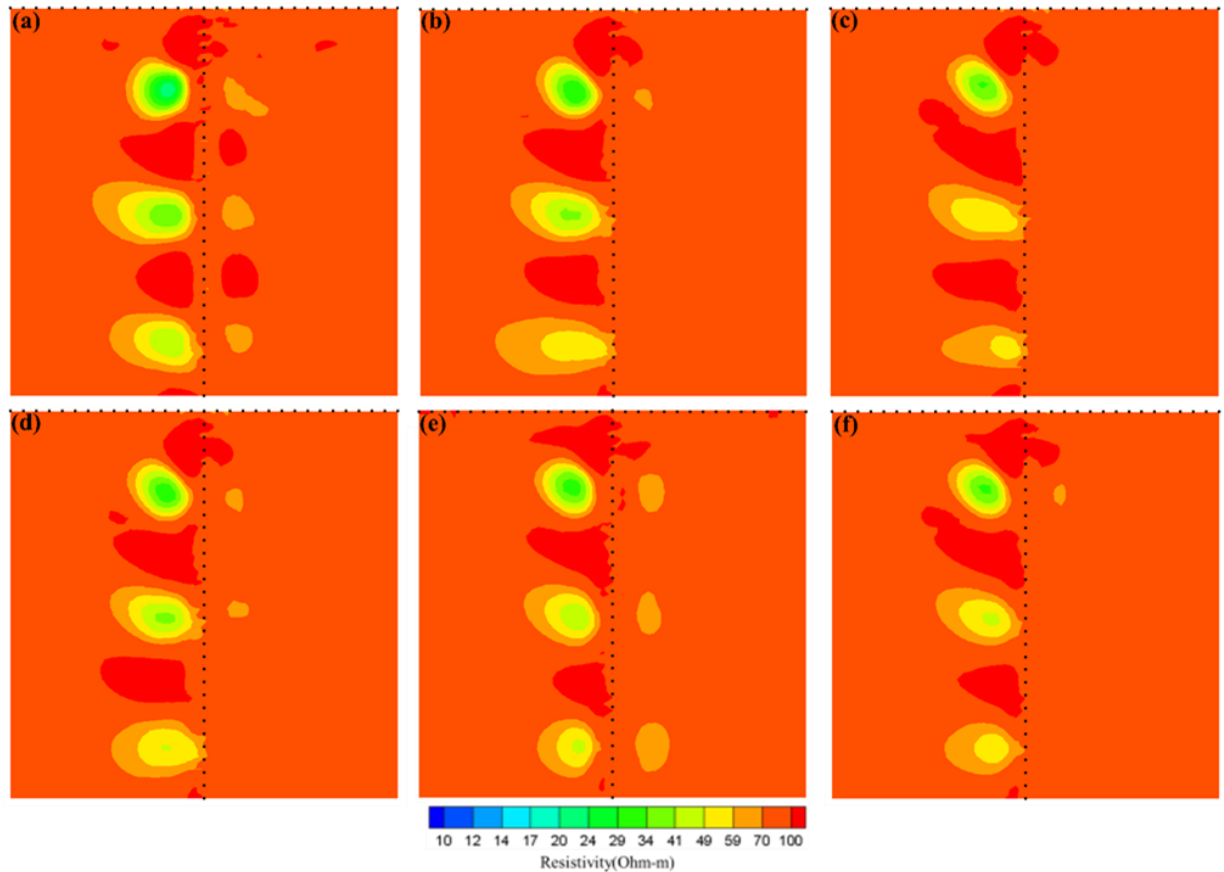


圖 36 低電阻異常區抑制鏡像方法評估結果：(a) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=4m), (b) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6m), (c) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=8m), (d) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6,8m) 之聯合反演；(e) 標準模型疊加(standard MOST), (f) 加權模型疊加(weighted MOST)

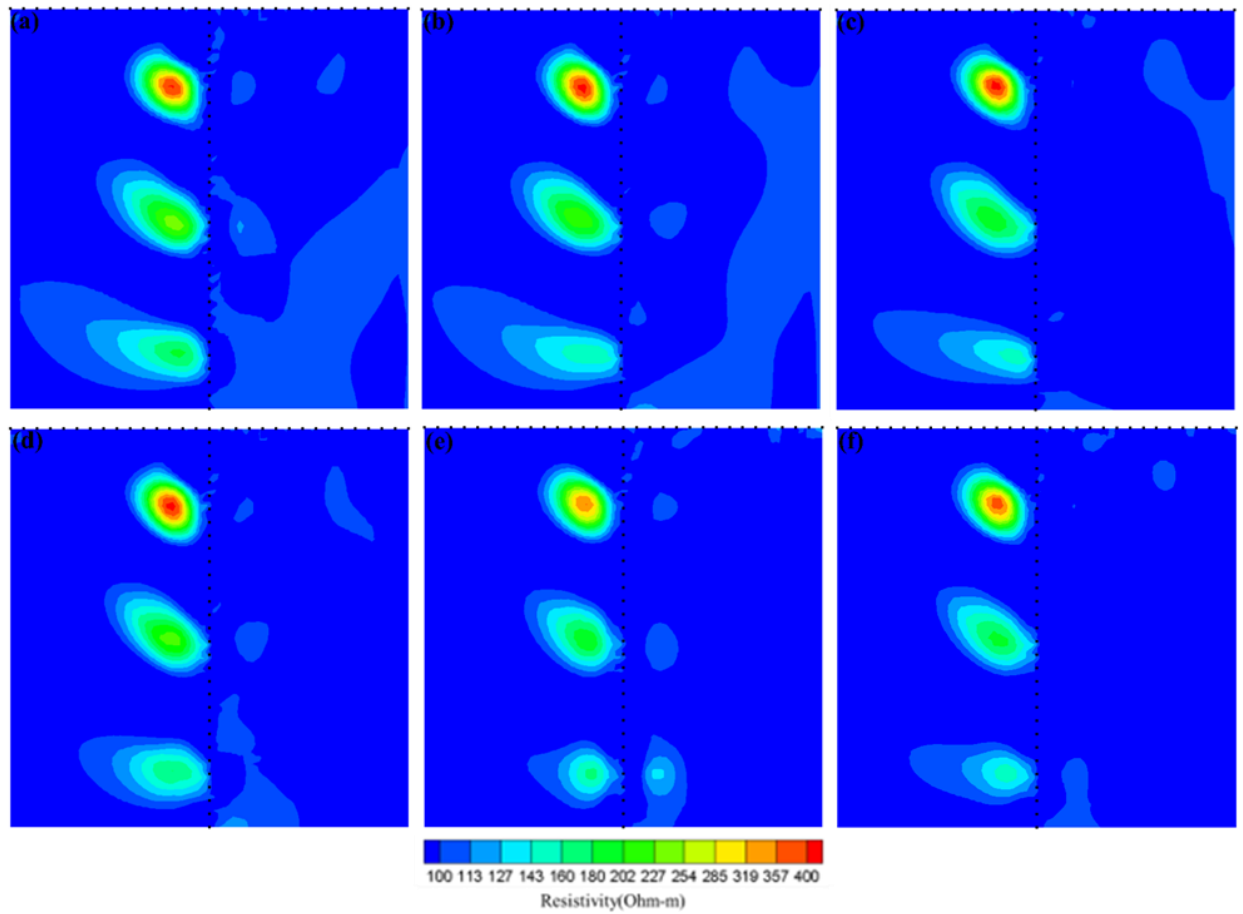


圖 37 高電阻異常區抑制鏡像方法評估結果：(a) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=4m), (b) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6m), (c) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=8m), (d) AB-MN (L=2,4,6m) & A-MNB (L=6,8m) 之聯合反演；(e) 標準模型疊加(standard MOST), (f) 加權模型疊加(weighted MOST)



(2) 跨孔施測抑制鏡像效應分析結果

聯合數據反演方法不僅取決於每個配置的 IOS 值，還取決於數據量的比例。對數據的組合比 WMOST 方法中的加權因子要困難得多。從圖 24 和圖 25 的結果中，選擇 AB-MN 和 A-BMN / AMN-B 的結果來進行 WMOST。結果如圖 38，AB-MN 和 A-BMN / AMN-B 配置的加權因子分別為 0.7 和 0.3，而 WMOST 的結果具有更高的解析度和更低的鏡像效應。

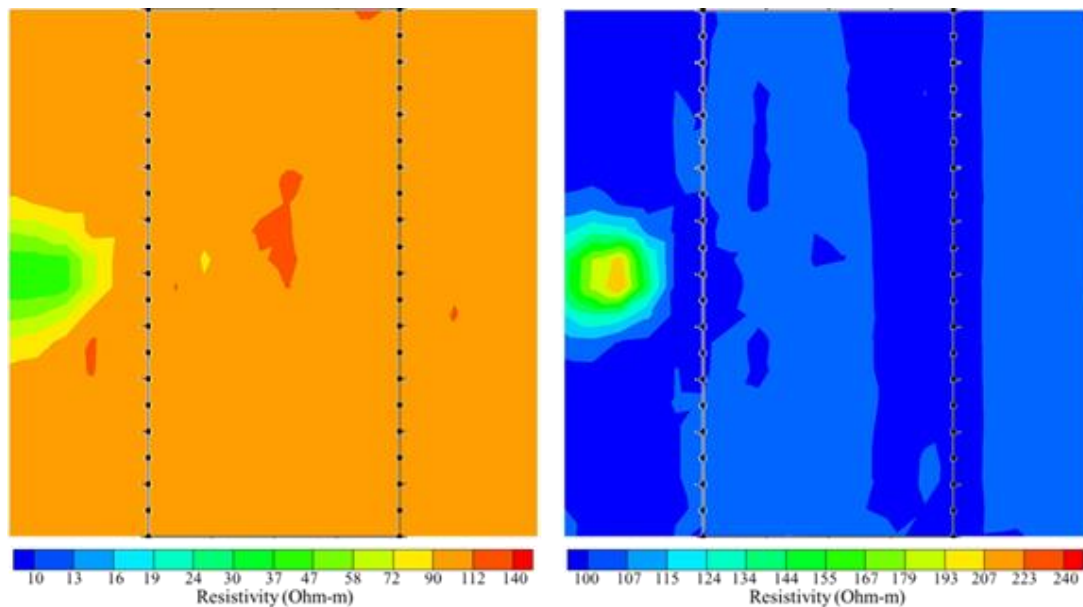


圖 38 加權模型疊加(weighted MOST) 於跨孔施測不同電阻率對比之分析結果

(3) 抑制鏡像效應分析方法有效性評估

通過對各種地對孔數值模型的討論，鏡像對稱效應的原因相當清楚地揭示出來。不僅對於純單孔資料而言，孔內同時存在電流極和電位極也可能導致鏡像剖面中的對稱效應。透過 IOS 分析，執行聯合反演方法可獲得更好的結果。儘管 IOS 計算係基於真實模型，但對 IOS 的討論可知，最佳化的序列配置為具有小或中等電極間距的 AB-MN 配置，以及具有較大間距的 A-MNB 配置。此外，加權模型疊加方法（WMOST）則無需了解地下真實模型，也可以作為維持解析度與降低鏡像效應之間平衡的替代方案。總體而言，建議



的地對孔 ERT 施測方法是至少應兩種類型的序列組合，其一不具有鏡像效應，另一則具有較高的解析能力。

此外，對於跨孔(CHERT)的鏡像效應，於單孔中同時存在一個電流極和一個電位極的配置亦將導致反演結果中鏡像效應。如同在地對孔施測分析方法中，CHERT 測量的建議亦是應兩種類型的序列組合，其一不具有鏡像效應，另一則具有較高的解析能力。前述地對孔鏡像效應的對策於 CHERT 中亦是有效的。特別是對於 WMOST 方法，與聯合反演相比可以很容易地獲得並更穩定。



5.3 實場測試評估

本研究主要針對調查或整治時應用鑽孔之之地電監測技術發展，因此利用本團隊既有產學合作案中，選定合適之場址進行實場測試初步評估實作可行性與潛在效益，測試場址條件茲說明如下：

測試場址屬金屬製品製造業，主要生產製造金屬製品。本廠早期使用三氯乙烯做清洗用途，廢液暫存區域較無完善保護措施，廢水處理設施大部分皆為地下式，本場址表層地質屬更新世中壠層，地層組成為紅土夾礫石、砂及黏土。環保署調查及查證計畫中，於本場址執行地球物理，探測地下污染的潛勢與分布，搭配監測井查證地下水三氯乙烯高污區，污染潛勢最高之 ERT-K1 測線位置如圖 39，先前之調查資料分析結果如圖 40 所示，根據 ERT 剖面異常區，測線上約 33 公尺，所設置之監測井 MW9913-03 地下水 TCE 濃度為 49.3 mg/L、cis-1,2-DCE 為 1.03 mg/L。

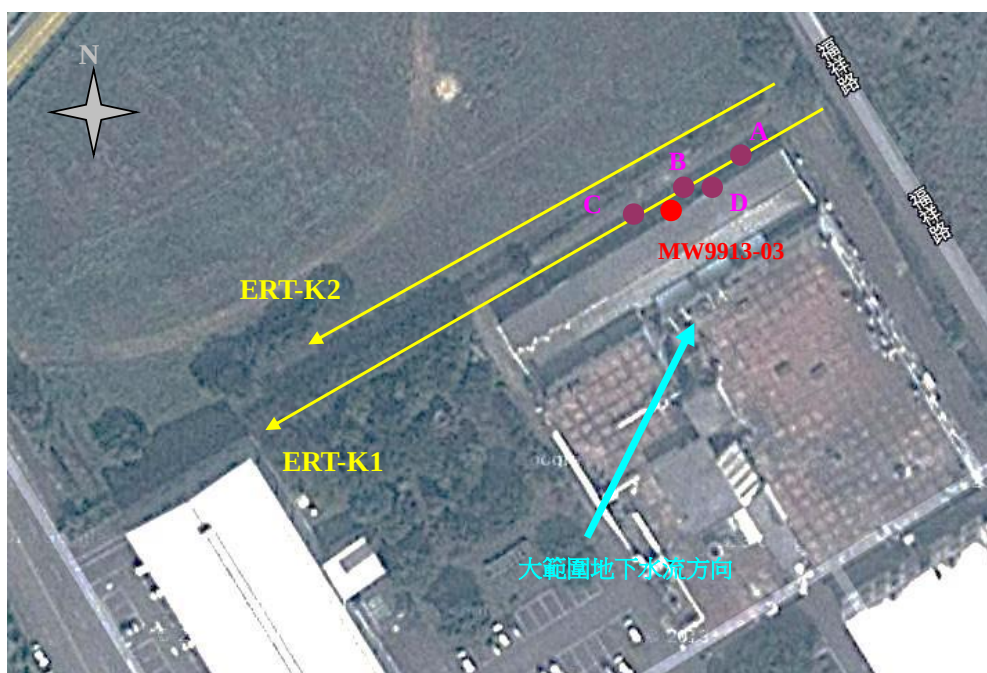


圖 39 預期測試場址測線與井位配置圖

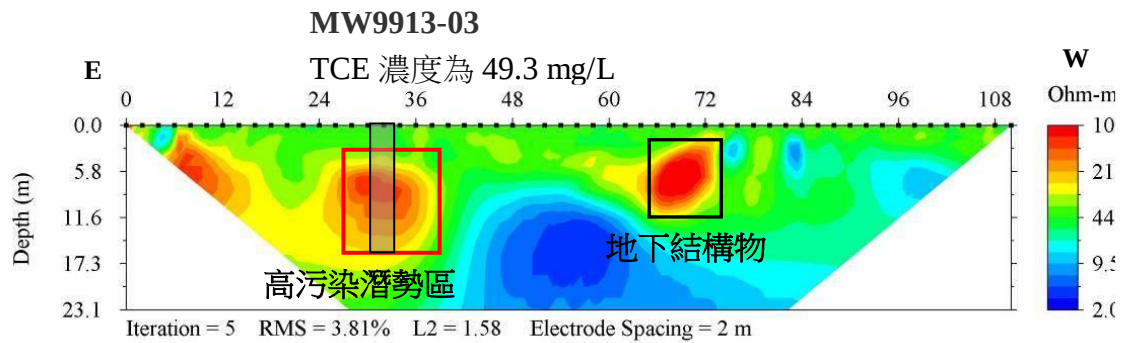


圖 40 未投藥前 ERT-K1 施測成果圖(未搭配孔內井測成果)

本場址已針對該高濃度井，灌注生物復育藥劑 EOS®，進行緊急應變措施，灌注深度為該井最大深度（約 17 公尺）。於相同的測位置、電極間距、排列與資料處理結果，明顯發現高污染潛勢區域的電阻率明顯有下降的趨勢，採樣分析結果也顯示出 TCE 濃度大幅下降，測線上約 33 公尺之監測井 MW9913-03 之地下水 TCE 濃度自整治前之 49.3 mg/L 下降至 0.798 mg/L。

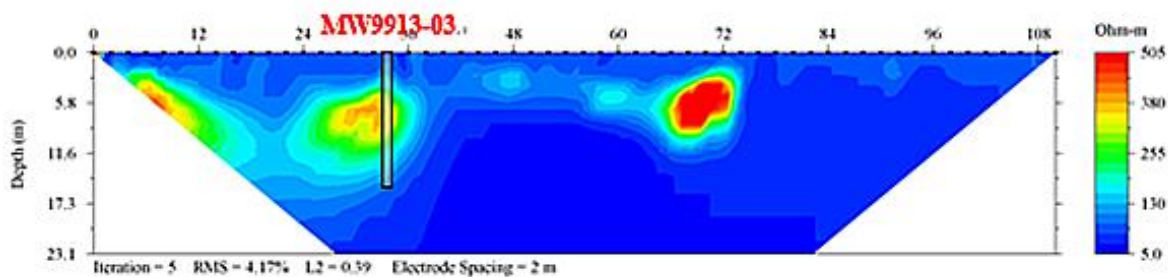


圖 41 投藥後 ERT-K1(未搭配孔內井測成果)

因為透過藥劑灌注很明顯污染團濃度低於 1ppm，地電阻成果也明顯出現電阻率有下向趨勢。因為污染濃度低於 1ppm 辨識污染電阻率異常區難度相對升高，因此透過本場址初步測試地對孔或者是跨孔的施測方法評估其可行性與增加深部解析度之結果，評估於相對低濃度的異常電阻率辨識效益。

圖 42 為 AB 井採用 AM-NB 跨孔施測成果，由於污染團範圍超出跨孔之



外，因此可發現於本案例單純利用跨孔施測成果，仍無法明確評估污染異常區域，因此進一步測試地對孔之施測方法。搭配 A、B 井採用 AM-NB 地對孔施測成果則如圖 43 所示，可發現由於本案例污染團範圍跨於兩孔間延伸至外側，因此並未明顯呈現鏡像效應之評估結果；然而，比較純地表施測(圖 41)及孔對地聯合施測結果(圖 43)，初步可發現採用地對孔施測方法對於污染電阻率異常區域範圍解析度提升確實具有潛在效益，污染團區域位於測線水平距離 28-32 公尺位置，與預期出現電阻率異常範圍相符。

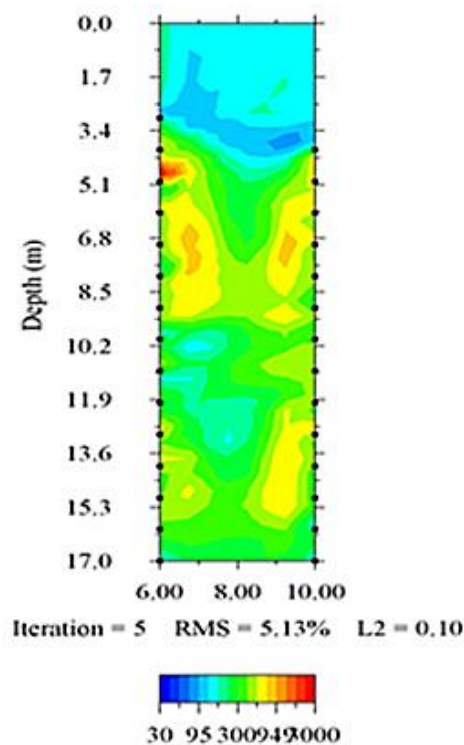


圖 42 投藥後 AB 井跨孔井測成果

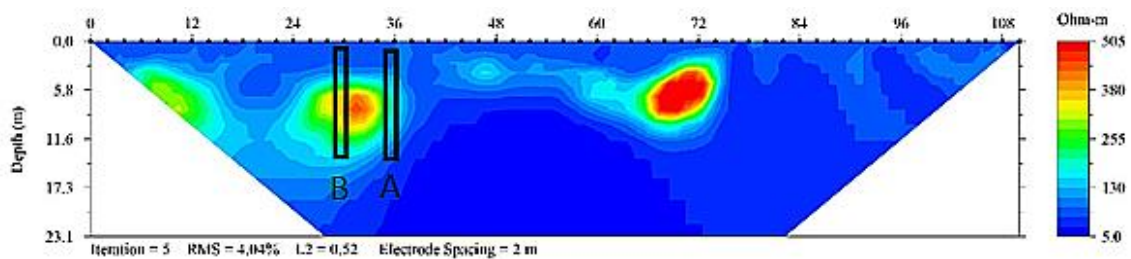


圖 43 投藥後 ERT-K1(配孔內井測成果)



第六章 結論與建議

6.1 結論

實務上地面 ERT 與跨孔 ERT 已常應用於國內有機污染物的調查與整治監控，本研究完成後可進一步釐清應用井孔之方案中，包括地對孔、跨孔以及單孔施測之潛在問題與解決方案，包括地對孔與跨孔式施測時之鏡像問題及單孔施測缺乏指向性問題，可提供在已設立有監測井之污染調查或整治場址監測，解決利用井孔之電探施測問題，以提升應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力。為有效提升孔內地電阻在藥劑傳輸路徑上之監測能力，進行應用井孔電探方法潛在問題之研究以及發展相關資料分析方法有其必要性，在此目標下本研究之主要工作有二：(1) 孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討；(2) 擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。依據研究成果主要結論如下：

(1) 孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討：

- (a) 透過各種地對孔與跨孔之數值模型討論，鏡像效應的原因不僅對於純單孔資料而言，孔內同時存在電流極和電位極也可能導致鏡像剖面中的對稱效應。
- (b) 對單孔式施測而言，透果數值模擬發現地表搭配兩固定電極強化指向性的施測配置方式，對於異常區域之規模與解析能力皆優於地表具有一固定電極之配置，可提升單孔施測之指向性效益。

(2) 擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法：

地對孔與跨孔之施測方式，相較於單一資料收錄方法，透過 IOS 分析執行聯合反演方法可獲得更好的結果。IOS 計算係基於真實模型，加權模型疊加方法則無需了解地下真實模型，也可以作為維持解析度與降低鏡像效應之間平衡的替代方案。總體而言建議結合兩種類型的序列組合，其一不具有鏡像效應，另一則具有較高的解析能力。

(3) 實場測試評估：



基於本年度擇定場址之實場測試結果初步可以發現，搭配井孔之施測對於深部解析具有一定程度提升，對於污染或整治範圍之解析能力具有潛在效益。

6.2 建議

- (1) 本年度於實場初步測試應用井孔實作可行性及評估對於深部解析之提升具有潛在效益，但由於擇定場址特性尚無法明確評估鏡像效應影響，因此建議後續計畫應進一步進行模場評估驗證，基於模場試驗中各方面之資訊驗證井孔相關分析與實務應用方法，並據以精進改善以達到高解析監測技術之目標。
- (2) 建議後續計畫並進一步針對模場相關實務應用議題，如孔內電極與開篩管模場應用適切性以及高解析井測即時監測之可行性評估，以增加實作可行性與潛在效益。



參考文獻

1. 林志平(2016)，地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展，行政院環境保護署 105 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-期末報告。
2. 王子賓(2016)，交互應用各式地球物理探勘方法於土壤及地下水污染場址之研究，國立中央大學地球科學學系博士論文。
3. Advanced Geosciences, Inc, 2003. Cross Borehole Electrical Resistivity Tomography (ERT) Measurements.
4. Bellmund, F., Marcuello, A., Ledo, J. and Queralt, P., 2016. Capability of cross-hole electrical configurations for monitoring rapid plume migration experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 124, pp.73-82.
5. Coles, A. D., Morgam, F., D., 2009. A method of fast, sequential experimental design for linearized geophysical inverse problems. *Geophys. J. Int.*, 178, pp. 145–158.
6. Goes, B. J. M., and Meekes, J. A. C., 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. *JEEG.*, 9(3), pp.127-141.
7. Hagrey, S. A., Petersen, T., 2011. Numerical and experimental mapping of small root zones using optimized surface and borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 76(2), pp. G25-G35.
8. Leontarakis, K. and Apostolopoulos, G.V., 2012. Laboratory study of the cross-hole resistivity tomography: the model stacking (MOST) technique. *Journal of Applied Geophysics*, 80, pp.67-82.
9. Tsourlos, P., Ogilvy, R., Papazachos, C. and Meldrum, P., 2011. Measurement and inversion schemes for single borehole-to-surface electrical resistivity tomography surveys. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(4), p.487.
10. Winship, P., Binley, A., Gomez, D., 2006. Flow and transport in the



參考文獻

unsaturated Sherwood Sandstone characterization using cross-borehole geophysical methods, Geological Society, London, Special Publications, 263, pp.219-231.





附錄一 專案成果績效自評表

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

107 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：107 年 10 月 22 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他		
申請機構系所	國立交通大學防災與水環境研究中心	計畫主持人	林志平
專案名稱	孔內電探法在土壤與地下水汙染調查與整治監控的技術發展		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。（僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數）

（一）學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	-	0	0		
		(2)研討會論文	0	-	0	0		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	-	0	1		已發表於 Journal of Applied Geophysics
		(2)研討會論文	0	-	1	0		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	-	0	0		
		(2)研究報告	1	-	0	1		
	4.專著 (本數)		0	-	0	0		
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	-	0	0		
		(2)成果發表會	0	-	0	0		
		(3)論壇	0	-	0	0		
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	-	1	1		
		(2)技術平台	0	-	0	0		



項目 \ 目標達成程度			申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
B 人才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	-	1	1		
		(2)博士	0	-	0	0		
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	-	0	0		
		(2)跨機構團隊	0	-	0	0		
		(3)形成研究中心	0	-	0	0		
		(4)形成實驗室	0	-	0	0		
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(二) 產業面

項目			目標達成程度	申請 預估數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細資 料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已	發明	0	-	0	0		
		核	新型/設計	0	-	0	0		
		准	合計	0	-	0	0		
		申	發明	0	-	0	0		
		請	新型/設計	0	-	0	0		
		中	合計	0	-	0	0		
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	-	0	0		
		授權金(仟元)		0	-	0	0		
		衍生利益金(仟 元)		0	-	0	0		
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	-	0	0		
		授權金(仟元)		0	-	0	0		
		衍生利益金 (仟元)		0	-	0	0		
	4.技術移轉 (應用技術)	件數		0	-	0	0		
		授權金(仟元)		0	-	0	0		
		衍生利益金(仟 元)		0	-	0	0		
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		1	-	0	1		已具備一項應用井孔 電探分析技術，待後續 更多模場應用評估可 行性後，即可供產業應 用移轉。
		(2)品種/系(件數)		0	-	0	0		
C 產 學 研 合 作	6.促成合 作研究	件數		0	-	0	0		
		金額(仟元)		0	-	0	0		
	7.促成投 資	件數		0	-	0	0		
		投資金額 (仟元)		0	-	0	0		
	8.促成取得 業界科專	件數		0	-	0	0		
		業界投資金額 (仟元)		0	-	0	0		



目標達成程度 項目		申請 預估數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細資 料)
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)						



(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預估數	工作進度達成數	期中達成數	期末達成數	結案達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數	0	-	0	0		
		收入(仟元)	0	-	0	0		
	2.諮詢服務	次數	0	-	0	0		
		收入(仟元)	0	-	0	0		
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策	0	-	0	0		
		(2)法規	0	-	0	0		
		(3)規範	0	-	0	0		
		(4)標準	0	-	0	0		
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)		0	-	0	0		
	5.獲得獎項(件數)		0	-	0	0		
	6.提升能源效率(%)		0	-	0	0		
	7.節能減碳效率(%)		0	-	0	0		
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限）

本研究成果可提供在已設立有監測井之汙染調查或整治場址監測時，運用並搭配既有孔內之地電阻影像探測技術，透過現場施作參數與分析方法的改善，可有效提升孔內地電阻影像探測成果的成像解析度。研究成果之應用價值將可協助提升汙染物或藥劑整治之調查或監測工作，使其可達到設計規劃之效益，有助早日恢復土壤及地下水之生產力。





附錄二 審查意見回覆對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他		主持人：林志平
計畫名稱	孔內電探法在土壤與地下水污染調查與整治監控的技術發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 成果績效自評表均已達成，值得肯定。 2. 本研究已完成孔內電阻影像探測法潛在問題之數值模擬探討，提出擬定抑制鏡像效應之方法，並進行實場測試評估，提升深部解析程度。 3. 後續建議事項，如未完成，恐影響實作可行性，實為缺憾。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 本團隊預計針對相關實務應用議題提出後續模場計畫進一步評估，以增加實作可行性與潛在效益。	
委員二 1. 計畫進度達成原訂目標。 2. 研究成果已發表國外期刊論，請於自評表備註發表處。 3. P.9 第 2 行圖 10b 錯誤請修正。 4. 實場上之監測井之開篩均依目的		1. 感謝委員肯定。 2. 遵照辦理，已補充發表處。 3. 遵照修訂，已修正為圖 8b。 4. 本團隊預計針對相關實務應用議題提出後續模場計畫，進一步評估配合井孔施測採用之開篩對管於電阻率可能	



決定，極少有全開篩，在實際應用上乃造成影響。	造成之影響。
委員三 1. 本計畫列有兩大主要目的，都能按照研究流程依序完成，並達成預期目標。 2. 本計畫之執行有針對某實際案場進行測試，達到解析度提升效果顯著，宜對不同案場測試證明其具有普遍實用性。 3. 自評表中有關「研發技術轉移」項下之五，可移轉產業技術列有一項，應說明執行情形。	1. 感謝委員肯定。 2. 本年度係於實場初步測試應用井孔實作可行性及評估對於深部解析之提升具有潛在效益，本團隊預計針對相關實務應用議題提出後續模場計畫進一步評估實場應用可行性。 3. 遵照辦理，已補充執行情形於備註。
委員四 1. 計畫成果確實已達研究目的的各項成果。 2. 利用地對孔及跨孔之電探法之鏡像問題之原因數值模擬，已提出抑制此效應之資料收錄與分析方法，建議結合此兩類型之序列組合，以提高解析能力來解決此問題。 3. 利用地對孔及跨孔之電探法於金屬製造業之地下水受三氯乙烯污染實場之初步測試仍有許多問題待處理，包括污染物濃度、污染團範圍等問題，仍需後續之研究。 4. 建議期末報告通過。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員建議，本團隊預計針對相關實務應用議題提出後續模場計畫進一步評估，以增加實作可行性與潛在效益。 4. 感謝委員肯定。



委員五 1. 本案擬利用量測地層電學性質之地電阻影像探測法進行藥劑傳輸路徑的監測。 2. 建議未來可以針對地電阻影像測試結果與污染物不同濃度間之關係，進行驗證電阻的靈敏度。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，本團隊預計針對相關實務應用議題提出後續模場計畫進一步評估，以增加實作可行性與潛在效益。
委員六 1. 5.3 節是否可以加入施藥前與施藥後 TCE 實測濃度分布剖面圖?以利與電探之結果比較。 2. 圖 41~43 是否調整解析度與字體大小如圖 40 般清晰程度，以利比較。 3. 圖 43 似乎有兩口井，是一條水平測線搭配 2 個跨孔?	1. 本年度於實場初步測試應用井孔實作可行性，因此僅以單次結果不同施測方法之比較，本團隊預計針對相關實務應用議題提出後續模場計畫進一步評估，以增加實作可行性與潛在效益。 2. 遵照辦理，已加強圖片解析度。 3. 圖 43 為一條地表水平測線搭配兩個跨孔之施測方式。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告

☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：林志平	
計畫名稱	孔內電探法在土壤與地下水污染調查與整治監控的技術發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 績效自評表中尚未達成論文及報告各乙篇，請說明及改正。 2. 本研究目的在利用地電阻影像探測技術，協助提升污染物或整治藥劑之調查與監測工作。工作進度甘特圖顯示進度相符，請繼續執行後續工作。 3. 後續需完成抑制鏡像效應之方法，並評估其成效，進而進行實場試驗，以評估實作可行性，最好能以「可定量」之方法評估實作可行性與效益。		1. 國外期刊論文目前已投稿審查中，研究報告為期末成果報告，將於期末達成。 2. 感謝委員肯定。 3. 遵照辦理，將藉由所發展之資料篩選參數，盡可能以量化評估實作可行性。	
委員二 1. 實際進度符合預定進度。 2. 各項工作項目之實際進度，請於甘梯圖中標示。 3. 後續請於期末說明不同地質廠址		1. 感謝委員肯定。 2. 遵照辦理。 3. 遵照辦理，將於期末依據研究成果說明具有不同電阻率差異之場址可能造成解析污染整治能力之差異。	



是否會有影響及進行現場試驗所選場址污染整治歷程情形。	
委員三 本研究之理論與數值模擬已經發展成熟與精緻，應朝向實場模擬來驗證以前發展之方法與技術在實場之可應用性。	感謝委員肯定，擬將於期末評估本方法之實場可行性。
委員四 1. 已完成地對孔及跨孔之電探鏡像問題之原因與現象，已歸納可行之序列組合與提出資料分析方法。目前仍有如何提高解析度及降低鏡像效應問題。 2. 初步完成四種單孔電探指向性之靈敏度分析。 3. 已規劃三氯乙烯實場測試場址，進一步評估未來實務應用開篩管可能造成之影響，依目前說明將來仍需解決多項問題。 4. 已達成期中查核點項目工作。	1. 感謝委員肯定，將持續努力以提高解析度及降低鏡像效應問題。 2. 感謝委員肯定。 3. 除資料分析方法外，亦將評估實場應用可行問題。 4. 感謝委員肯定。



委員五 1. 本案擬利用量測地層電學性質之地電阻影像探測法進行藥劑傳輸路徑的監測。 2. 根據計劃書，已完成期中報告進度。 3. 圖 4 及圖 8 重複，請修正。 4. 圖 5 及圖 9 重複，請修正。 5. 建議補充說明本案所模擬藥劑的種類。 6. 建議考量不同藥劑濃度對電阻的靈敏度影響。 7. 大部分的藥劑都有吸附作用，本數值模擬如何涵蓋這些因素。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 遵照辦理。 4. 遵照辦理。 5. 本研究所發展技術適合應用於具有搭配既有井孔，具有電阻率差異性之污染或整治場址調查與監測，因此不針對特定藥劑種類。 6. 延續前項回覆，本研究研究目標為已設立有監測井之污染調查或整治場址監測，解決利用井孔之電探施測潛在問題，包括地對孔與跨孔式施測時之鏡像問題及單孔施測缺乏指向性問題，以提升應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力，因此尚不針對特定藥劑種類或濃度。 7. 延續前項回覆，本研究主要針對具有電阻率差異性之污染或整治場址調查與監測，提升地電阻法應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力，因此尚不針對特定藥劑吸附等作用探討。
委員六 1. 第 6 頁第 6 行，「孔內搭配」是否為「多孔內搭配」？ 2. 第 8 頁內容與 5~6 頁內容重複，是否必要？ 3. 第 11 頁中間(2)，「圖 7」是否為圖(d)？ 4. 第 20 頁倒數第 2 行，兩組不同異常電阻率值是否指 3 個深度的異常電阻均相同，但分別模擬低於及高於背	1. 係指孔內搭配地表地電阻(surface to borehole)施作。 2. 感謝委員建議，將酌刪重複部分內容。 3. 已修正為圖 10。 4. 如委員指出，該案例係指 3 個深度的異常電阻均相同，但分別模擬低於及高於背景值的情況。 5. 感謝委員建議，將加強說明為「而單就地表電極所收錄資料」。 6. Alpha 和 Beta 排列僅為 4 極配置之定



景值的情況? 5. 第 21 頁第 2 行,「而單就地表資料」似語意不全。 6. 第 22 頁第 2 行, Alpha 和 Beta 排列是否也可應用於 3 極配置? 7. 第 23 頁圖 19 是否可以圖例註明電位、電流極? 8. 第 44 頁第 1 段, L 的單位是否為公尺(m)? 9. 第 45 頁圖 35 係指第 7 頁圖 5 的哪一種情形? 10. 第 46 頁第 5 行, 圖 36 和圖 37 是否係指第 7 頁圖 5 的(b) 情形?第 2 段第 1~3 行,圖 36a 較其他「高」或「低」? 11. 第 50 頁第 1 段最後 1 行, 井 A~D 的位置點在第 49 頁圖 38 的何處?是既有井或未來新設井? 12. 實務上監測井僅針對目標區間開篩, 極少全開篩, 且篩縫寬度係依地質狀況決定。建議與水文地質專家探討全開篩井的應用情境, 及篩縫寬度放寬的可行性。	義, 因此無法應用於 3 極配置。 7. 遵照修訂, 將加上圖例註明。 8. 如委員所述, 該處電極間距單位為公尺。 9. 係為孔內搭配地表地電阻(surface to borehole)施作條件。 10. 同前回覆, 係為圖 5(c)孔內搭配地表地電阻(surface to borehole)條件。此外, 圖 36a 解析能力較其他高, 已修正筆誤。 11. 井 A~D 係為既有井位於圖中右上方 ERT-K1 測線處, 將加強標示。 12. 感謝委員建議, 將與相關專家討論其可行性。
--	--



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告

審查意見回覆對照表

☒修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	107 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：林志平 NO：2	
計畫名稱	孔內電探法在土壤與地下水汙染調查與整治監控的技術發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 建議宜針對坵黏土層及滲透性差土壤進行相關數值模擬。 2. 本研究過去建置相關研究基礎，其耗材偏高宜建議調降。		1. 感謝委員建議，本研究主要針對運用孔內之地電阻影像探測分析方法的改善，將依委員意見設定合理數值模型材料參數。 2. 遵照辦理，已調整相關耗材費用。	
委員二： 1. 主持人(執行團隊)的學術研究能力與技術發展能力足以勝任本計畫 2. 主持人(執行團隊)近五年研究與技術發展績效佳 3. 本專案對未來地下水污染調查及整治工作推動的貢獻仍待本計畫未來執行成果的呈現與說明（本計畫為延續性計畫，前期研究成果與本計畫的關係尚未明確說明。前期的研究尚未達實務應用的部分為何？仍需藉由本計畫的執行以求應用性的完備的部分為何？建議說明） 4. 本專案預估之成果績效主要為論文發		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 本計畫非延續性計畫，本年度申請計畫為本團隊長期研究方向之延伸課題，與105年度研究成果具有相關性。此外，於申請書中計畫目的(3)前期相關計畫成果與待解決問題，說明105年度相關計畫應用孔內之電探方法研究成果於硬體上與方法上已具備可行性，然而應用既有電極序列方式並未完全解決鏡像問題之產生，因此本計畫之主要目的有二：(1)孔內地電阻影像探測法潛在問題成因數值模擬探討；(2)擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。	



表(研討會或期刊論文) 5. 本研究計畫書撰寫具體 6. 本研究計畫書所擬定的研究方法可行 7. 本研究計畫書所擬定的研究內容與所預期的研究成果，對未來地下水污染場址調查整治(或評估)的實場應用性仍待說明(計畫書中對研究成果的實務應用性的說明仍不具體) 8. 本研究計畫書的文獻蒐集尚完整，對國內外本研究領域現況了解 9. 本研究專案執行期限合理 10. 本研究計畫書中對研究的預期成果已說明，但對實務應用性的說明卻不具體 11. 本計畫應屬延續性計畫 12. 本研究計畫對預期成果的呈現說明以學術發表為主，對實務應用性的說明不具體 13. 本研究計畫已依原計畫構想書的審查意見修正	4. 本研究擬將針對運用孔內之地電阻影像探測分析方法研究成果進行學術發表。 5. 感謝委員肯定。 6. 感謝委員肯定。 7. 感謝委員建議，於計畫預期效益中加強說明實務應用性。 8. 感謝委員肯定。 9. 感謝委員肯定。 10. 同意見(7)，於計畫預期效益中加強說明實務應用性。 11. 同意見(3)，本計畫非延續性計畫，為單年度申請計畫但與 105 年度研究成果具有相關性。 12. 同意見(7)，於計畫預期效益中加強說明實務應用性。 13. 感謝委員肯定。
委員三： 1. 本計畫將擇一合適場址進行實場測試與驗證，應依相關規定申請同意。	1. 本研究擬利用本團隊既有產學合作案中，依據本年度之研究成果，選定合適之場址進行實場試驗評估並驗證其實作可行性與潛在效益，因此無須另外進行申請。



委員四： 1. 本計畫對於實場之測試與驗證計畫之執行方法與步驟，說明並不夠明確，如何確認本技術之監測結果可供後續參考或應用？ 2. 本計畫擬以三氯乙烯之污染場址為探討對象，其中地電阻影像測試結果與污染物濃度間之關係，如何驗證？其相關性或精確性為何？ 3. 本計畫對於抑制鏡像效應之影響，實際之執行與改善作法或策略為何？仍有進一步說明之必要。	1. 本研究主要將基於所評析具可行性，可解決搭配孔內施測潛在問題之電極序列篩選結果與資料分析方法，選定合適之場址進行實場試驗評估並驗證前述分析方法與資料篩選其實作可行性與壓抑鏡像之效果。 2. 同意見(1)，本計畫主要選擇已知之場址，以測試並驗證前述分析方法與資料篩選其實作可行性與壓抑鏡像之效果。 3. 本研究之策略為先以系統性之正算數值模擬探討井中地電阻影像探測法鏡像效應發生之根本成因與評析方法，而後進一步基於文獻經驗評估抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法，包括聯合反算優化的資料組合以及加權模型疊加，評估兩者對壓抑鏡像問題成效。於研究方法概述中加強上述改善方法策略之說明。
本署審查意見	計畫單位回覆
本署建議： 1. 經費編列合理。 2. 請補上專任助理薪資對照表。	1. 感謝委員肯定。 2. 遵照辦理。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒申請計畫書 ☐期中報告

審查意見回覆對照表

☐修正計畫書 ☐期末報告

計畫年度	107 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：林志平 NO：2	
計畫名稱	孔內電探法在土壤與地下水污染調查與整治監控的技術發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 本技術能強化、改進土水調查整治技術哪些具體成效？ 2. 本技術對土水哪些場址的適用性？技術目前問題？ 3. 本技術能測試有效範圍？本技術可提升如何由相關操作參數與分析未具體論述？操作難易技術設備是否已商品化？操作成本？以整治示範場址之成本估算？(量化評估)。 4. 宜說明今年優化技術能解決過去技術缺口？另如何評估提昇電探與地物技術成效？ 5. 本技術應用在實際場址規劃？可針對哪些污染物場址。		1. 本研究成果可提供在已設立有監測井之污染調查或整治場址監測時，運用並搭配既有孔內之地電阻影像探測技術，透過現場施作參數與分析方法的改善，可有效提升孔內地電阻影像探測(ERT)成果的解析度。 2. 地面 ERT 與跨孔 ERT 已應用於國內有機污染物的調查與整治監控，本研究成果可提供在已設立有監測井之污染調查或整治場址監測，解決利用井孔之電探施測潛在問題，包括地對孔與跨孔式施測時之鏡像問題及單孔施測缺乏指向性問題，以提升應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力。 3. 搭配孔內電探監測有效範圍為兩孔或地對孔測線區域，同前意見回應，本技術擬解決搭配井孔之電探施測潛在問題，藉由本計畫擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。ERT 已經有商業化	



	設備，國內亦能夠自製，但如何施測與分析仍有潛在問題需進一步解決。若能克服所指出之問題，可提高此類成像技術的可靠度與適用性，但操作成本大致與現行有潛在問題的做法相同。 4. 遵照辦理，於計畫申請書中強化前期相關計畫成果與待解決問題。此外，本研究擬以正算數值案例並搭配資料篩選與反算分析技巧，嘗試解決利用井孔之電探施測潛在問題，以提升應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力，並進行實場測試。 5. 本計劃發展技術適合應用於具有搭配既有井孔，具有電阻率差異性之污染或整治場址調查與監測。
委員二： 1. 本計畫為延續性計畫，建議說明前期計畫的成果與應用性，與尚待持續研究的重點。 2. 實務應用的干擾與成果的可靠度建議說明。	1. 遵照辦理，於計畫申請書計畫目的中強化前期相關計畫成果與待解決問題。 2. 本計畫工作擬以資料篩選與反算分析技巧，嘗試解決利用井孔之電探施測潛在問題，因此，即欲提升應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力及可靠度。
委員三： 1. 本方法是否需要資料庫用以比對。如果需要目前掌握度如何？ 2. 本方法可適用之污染物有哪些，適用濃度範圍如何？ 3. 應用在監控時，外加其他化學藥劑時是	1. 本方法為類似醫學造影的成像技術，無需以資料庫比對，主要作為空間分佈變化的輔助工具。較量化的分析則仍有相關研究如 Biogeophysics 持續研究中，但若能有高精度的電阻率成像技術，對於輔助傳統鑽探取樣已經可以發



否會產生遮蔽效應。	揮很大作用。 2. 本技術適合應用於具有搭配既有井孔，具有電阻率差異性之污染或整治場址調查與監測。 3. 延續前項回覆，應於調查或監控時，相關污染物或整治之化學藥劑具有電阻率差異性即可辨識，可作為污染範圍或灌注藥劑影響範圍的空間分佈調查，配合對於整治過程可能產生的電阻率變化(Biogeophysics)，亦可以監控整治的過程。
委員四： 1. 本計畫擬開發之孔內電探監控技術，擬探討之污染物種類為何？污染物濃度範圍、靈敏度及技術驗證方式為何？ 2. 本年度具體之驗證方式或作法，以及實場之選地等，均宜說明於計畫書。 3. 請補充說明本年度開發技術與之前執行之計畫內容差異性或優越性為何？	1. 同前意見回覆，本計畫發展技術適合應用於具有搭配既有井孔，具有電阻率差異性之污染或整治場址調查與監測。此外，本計畫嘗試解決利用井孔之電探施測潛在問題，因此，將探討本技術資料解析能力，並將進行實場測試與比較。 2. 遵照辦理，補充說明於工作方法中。 3. 遵照辦理，於計畫申請書計畫目的中強化前期相關計畫成果與待解決問題。
本署審查意見	計畫單位回覆
本署建議： 1. 貴研究團隊接受多年補助，請說明歷年之差異性及突破性。 2. 此研究是否已具有商業化或推廣之方式？	1. 遵照辦理，於計畫申請書計畫目的中強化前期相關計畫成果與待解決問題。 2. 本研究相關技術潛在問題需進一步解決，再考慮後續的應用推廣。