



行政院環境保護署

109 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

結合井測之高解析電法於整治場址 污染擴散之即時監測技術

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：109 年 1 月 30 日起至
109 年 12 月 04 日止

中 華 民 國 109 年 12 月 印製



109 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：

【由本署填寫】

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)	☐ 研究型 ☒ 模場型	
研究主題	☒ 整治 ☒ 調查 ☐ 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	車明道	職等/職稱	副董事長		
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	結合井測之高解析電法於整治場址污染擴散之即時監測技術			
	英文	Real-time contaminant distribution monitoring technique using high resolution electrical resistivity method with integrated borehole measurement in remediation site			
	關鍵字	孔內電探監測技術；即時監測系統；土壤與地下水污染擴散			
執行期程	自民國 108 年 01 月 04 日起 至民國 109 年 12 月 04 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：0936-354976 手機：0936-354976		
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費	第一年申請金額	第二年申請金額	編列說明	
	1. 人事費用	600,000	545,000	(1~5 項相加之 50%為限)	
	2. 貴重儀器使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)	
	3. 消耗性器材與主要費用	630,000	485,909	(與計畫主體相關)	
	4. 其它研究相關費用	32,727	30,000	(含差旅與租賃費用)	
	5. 雜項費用	100,000	30,000	(1~6 項相加之 5%為限)	
	6. 行政管理費	127,273	109,091	(1~5 項相加之 10%為限)	
	7. 自籌款	0	0	(申請單位自行籌備款項)	
	申請補助金額(1~6 項)	1,400,000	1,200,000	總金額：2,600,000	
	計畫總金額(1~7 項)	1,400,000	1,200,000	總金額：2,600,000	

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：

日期：109/12/17

(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。前期相關計畫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，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。基於上述研究成果，本計畫擬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. We have previously investigated the potential problem of borehole ERT survey by numerical simulation and develop the data acquisition and analysis method to suppress the mirror effect. Based on these findings, the project will conduct field experiment to further validate the proposed approach and investigate practical issues that may arise in field applications. Eventually we would like to suggest an improved high resolution ERT method that integrates borehole measurements for site investigation and remediation process monitoring .





目錄

中文摘要	3
Abstract	I
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 計畫背景與文獻回顧	3
3.1 地球物理方法與高解析調查應用	3
3.2 地電阻影像探測法	4
3.2.1 地表與孔內地電阻影像探測法	4
3.2.2 應用井孔高解析電探法之關鍵問題	8
3.3 第一年計畫成果概述	12
第四章 研究方法與過程	15
4.1 研究方法	15
4.2 研究流程	18
4.3 工作進度	19
第五章 結果與討論	21
5.1 結合井測高解析電法精進改良	21
5.1.1 第一年模場試驗成果綜合檢討與評析	21
5.1.1.1 BSERT 模場試驗資料與分析方法檢討	21



5.1.1.2 CHERT 模場試驗資料與分析方法檢討	24
5.1.2 簡化模場數值模擬與最佳化分析方法檢討	28
5.1.2.1 數值模型建構	28
5.1.2.2 地表結合井測最佳化分析方法檢討	29
5.1.2.3 跨孔鏡像效應潛在問題延伸檢討	34
5.1.3 結合井測現地施測與分析方法建議	36
5.2 應用孔內地電阻影像探測法模場高潛勢區監測工作	36
5.2.1 模場場址背景概述	36
5.2.2 模場高潛勢區監測規劃	38
5.2.2.1 模場高潛勢區設井配置	39
5.2.2.2 模場高潛勢區監測規劃說明	44
第六章 初步結論與後續工作說明	58
參考文獻	61
附錄一 專案成果績效自評表	附 1-1
附錄二 計劃書審查意見回覆對照表	附 2-1



圖目錄

圖 1 地電阻影像探測技術施測示意圖	5
圖 2 孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖	6
圖 3 地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖	6
圖 4 地表與孔內地電阻探測聯合運用電極排序示意圖 (Pole-Pole electrode array) (Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014)	7
圖 5 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)	8
圖 6 單孔 (下孔) 電探施測範圍示意圖 (Coles et al., 2009)	9
圖 7 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)	10
圖 8 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)	11
圖 9 台鈴平鎮廠平面圖	12
圖 10 台鈴平鎮廠南區測線規劃圖	13
圖 11 高解析探討數值模型示意圖	17
圖 12 本計畫擬定現地模場位置圖	18
圖 13 研究流程	19
圖 14 E-03 T 字型測線原始收錄反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列 ..	22
圖 15 E-03 IOS 計算結果:(a)AB-MN avg IOS (b)AB-MN max IOS (c)A-MNB avg IOS (d)A-MNB max IOS	23
圖 16 E03 聯合反演(Combined data inversion)結果: (a)AB-MN123/A-MNB3 (b)AB-MN123/A-MNB4 (c) AB-MN123/A-MNB34	23



圖 17 E03 模型加權法結果:(a)MOST (b)W MOST AB-MN:A-MNB=7:3	24
圖 18 孔對孔 Bipole-Bipole 施測成果圖: (a)沒有使用 Extend Model 反算結果, (b)有使用 Extend Model 反算結果.....	25
圖 19 孔對孔 AB-MN 施測成果圖: (a)沒有使用 Extend Model 反算結果, (b)有使用 Extend Model 反算結果	26
圖 20 孔對孔 A-BMN 施測成果圖: (a)沒有使用 Extend Model 反算結果, (b)有使用 Extend Model 反算結果	27
圖 21 建立模型示意圖	28
圖 22 模型測線佈置示意圖	29
圖 23 純地表模擬結果.....	29
圖 24 E02 T 字型測線模擬反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列	30
圖 25 E02 聯合反演(Combined data inversion)模擬結果:(a)AB-MN123/A-MNB3、(b)AB-MN123/A-MNB4 與(c) AB-MN123/A-MNB34	31
圖 26 地對孔聯合地表反演結果.....	31
圖 27 孔對孔模擬成果: (a)Bipole-Bipole 序列(b)TP 序列	32
圖 28 孔對孔與地表資料聯合反演成果: (a)Bipole-Bipole 序列 (b)TP 序列 .	33
圖 29 現地資料聯合反演的成果: (a)Surface; (b)CHERT+ Surface (c)BSERT+ Surface.....	34
圖 30 模型基本設定	35
圖 31 在測線之間測線外側皆有電阻率異常區之模擬結果(a)Bipole-Bipole 序列、(b)TP 序列	35
圖 32 僅測線之間有電阻率異常區之模擬結果(a)Bipole-Bipole 序列、(b)TP 序列、(c)AB-MN 序列	35
圖 33 本計畫擬定現地模場位置圖	37



圖 34 大數據監測線上系統示意圖	39
圖 35 本計畫地物井位置圖	42
圖 36 電測井設置過程	44
圖 37 模場 CHERT 配置	44
圖 38 監測線上系統配置圖	45
圖 39 模場實驗配置圖	45



表目錄

表 1 傳統與高解析調查技術差異表 (工業技術研究院，2018)	3
表 2 進度甘梯圖	20



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，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。

前期相關計畫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，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。基於上述研究成果，本計畫擬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。

本研究擬以模場試驗驗證可移動式井測之高解析電法應用，並應用解決井孔之電探施測潛在問題之資料分析方法，以提升應用於污染場址調查與整治監控之資料解析能力，兩年預期完成工作目標與成果包括：

第一年基於前期研究地對孔（Surface to borehole）與跨孔（Cross hole）與單孔（In-hole）電探限制之施測分析方法之對策，進行模場試驗驗證。

第二年建立模場區域大數據高解析井測時間序列處理模式，監控抽水井水力控制系統之攔截成效，作為現場改善成效評估參考依據之一，協助調整既有抽水系統之抽水量、抽水頻率等，必要時建議抽水井增設位置與數量。



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有其必要性，在此目標下，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。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，又因為整治場址監測井是主要瞭解污染狀況最主要的手段，且數量密集，所以本研究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，本計畫前期先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，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。基於上述研究成果，本計畫擬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。因此，本計畫之主要目的有二：(1) 應用孔內地電阻影像探測法模場試驗驗證；(2) 提出結合井測高解析度電法的資料分析方法精進改良。

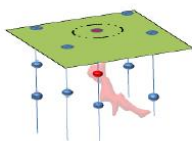
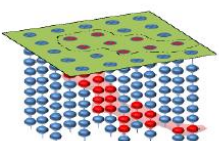


第三章 計畫背景與文獻回顧

3.1 地球物理方法與高解析調查應用

高解析調查技術(High-resolution site characterization, HSRC)為近年來美國環保署建立場址概念模型(conceptual site model, CSM)時所提出的調查概念，其定義為利用適當的採樣密度或調查技術瞭解污染物於環境中分布的位置、傳輸途徑與宿命，以提供更快速或更有效率的場址整治策略。如表 1 所示，無論於採樣規劃、樣品分析至建立場址水文地質模型界定污染分布範圍，多須透過增加鑽孔密度與取樣頻率達成高解析度調查之目的；然而，傳統基於採樣之調查技術多為點狀至線狀取得污染或整治分佈趨勢，若欲達成高解析度化之目標，勢必大幅提升調查成本以增加鑽孔密度。地球物理調查技術可藉由影像化資訊，若結合少數傳統取樣調查點，即可提供所測定物理量之二維至三維空間變異性。然而，若單以地表地球物理調查技術，其解析能力將隨深度大幅降低，導致對於深部污染或整治區域之辨識較為不利；此時，若藉由少數既有鑽孔實施結合鑽孔(如地對孔、跨孔或單孔)之地球物理調查作業，提升地球物理調查之深部解析能力，即有機會於不大幅增加鑽孔數量之條件下，達成高解析度調查之目的。

表 1 傳統與高解析調查技術差異表 (工業技術研究院，2018)

	傳統調查技術	高解析調查技術
水文地質	微水試驗、土壤採樣。	水文地質剖面儀、錐形鑽探技術等技術，了解垂直剖面之水文地質特性變化。
採樣規劃	於幾處監測井進行採樣，且調查尺度通常較大。	直接貫入監測井，執行高密度採樣(土壤或地下水)規劃。
樣品分析	樣品須送至實驗室分析，以獲取場址污染分布。	現地進行樣品污染物相對濃度分析，以便場址動態調查策略調整。
污染分布	了解污染物於此場址分布概況與濃度變化。	全面性了解污染物分布、傳輸途徑與宿命，繪製出污染概念圖。
場址概念模型	建立場址概念模型，提供後續調查或整治行動(Remedial action)實施。	建立或更新場址細部概念模型，依此模型提出整治策略(Remedial strategy)。
示意圖		



動態、即時及高密度的監測系統「跨孔式地電阻影像法」(Cross-hole Electrical Resistivity Tomography, CHERT)已屬發展漸趨成熟技術，經過行政院環境保護署(以下簡稱環保署)「地球物理探勘應用於土壤及地下水污染場址之調查驗證作業及整治技術評估計畫(一、二期)」多處模場試驗評估，已廣泛應用於國內多處污染整治場址，以間接之地物時間序列(Time-Lapse, TL)監測方式搭配直接採樣評析整治期間藥劑傳輸之變化及地下環境空間整治成效。但傳統 CHERT 方法雖可獲得高解析數據，並提昇監測井或整治井的功能(增加電性評估)，但須搭配設井下管於井管周圍配置「永久性」電極與電線，需有豐富設置經驗，增加設置費用與延長設井時間(特別是深層井的設置)，也可能因長期的整治藥劑灌注造成配置於井管外圍的電極與電線被干擾或脫落，須由豐富地物實務經驗者才能釐清與處理相關雜訊，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。此外，孔內施測不同電極排列之解析特性與遭遇問題，如地對孔與跨孔施測時可能之鏡像問題與單孔之指向問題，於既有技術中並未完全克服，因此在實務應用上尚未有最佳的應用準則。故本模場計畫提出近幾年發展出的「可移動式井測之高解析電法即時監測技術」，嘗試透過現場「既設」監測井或整治井，設置可移動式電極並應用最新之資料評估方法，冀能大幅提昇調查與整治評估效益。

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 1 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)，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；因此可採用搭配井孔之施測方法增加深度解析能力。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。

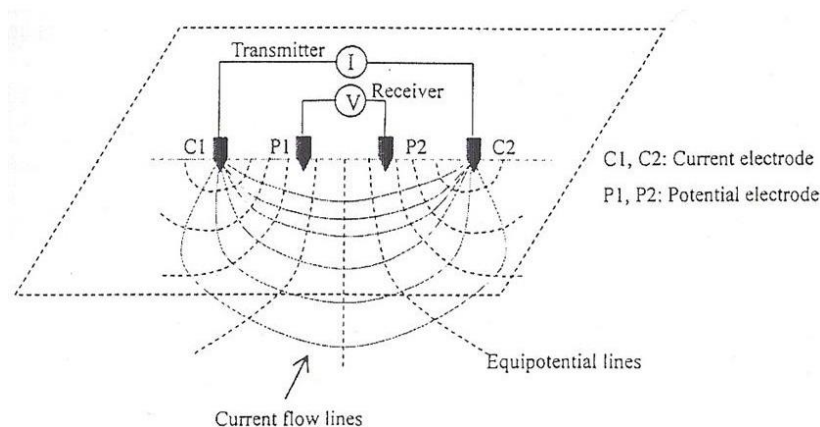


圖 1 地電阻影像探測技術施測示意圖

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 2 所示，此點造成在分析上需考量的假設條件會有所不同，但也顯示其可提供不同之訊息。圖 3 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 3a) 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 3b 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 3c 所示)，或兩孔孔內、多孔孔內搭配地表地電阻施作 (如圖 3d 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。



第三章 計畫背景與文獻回顧

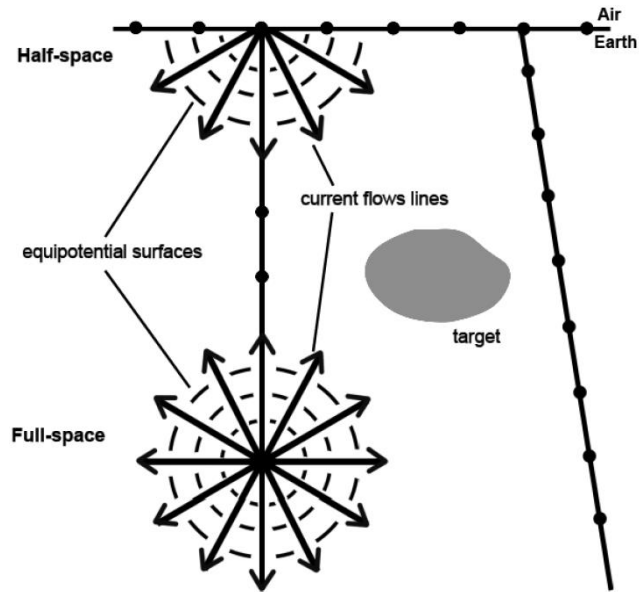


圖 2 孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖

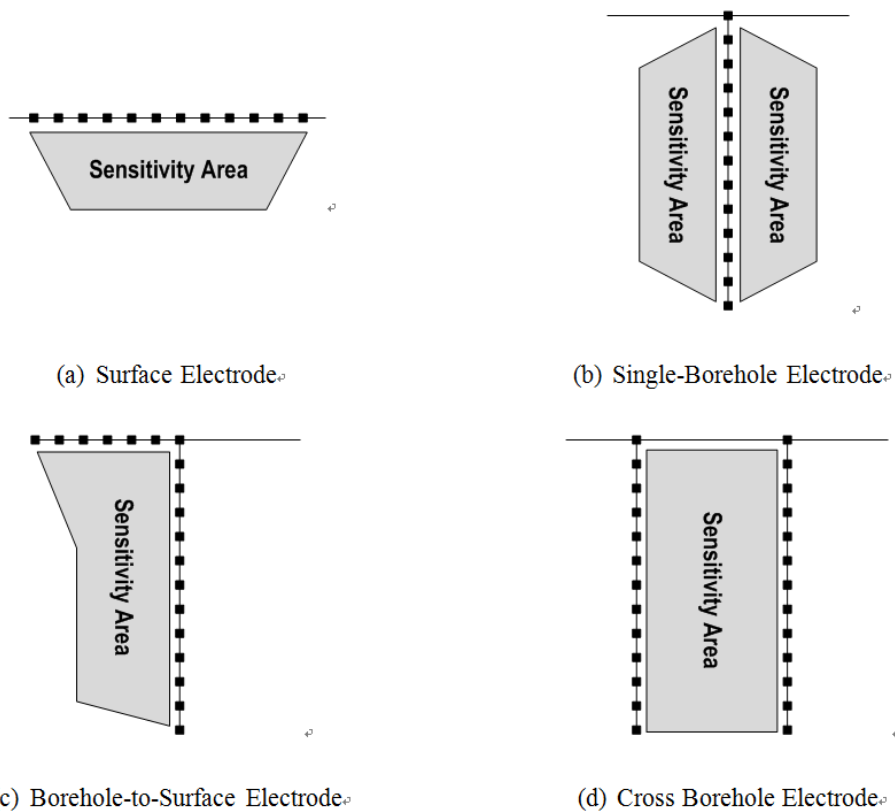


圖 3 地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖



下孔或跨孔式地電阻影像法的電極排列並沒有一種固定的設計，必須考量井的數量、深度與總配置電極數，且電位響應的位置及反算分析與地表探測略有不同。跨孔式地電阻影像法電極配置的邏輯大約可區分為孔對孔電極配置，地表對孔內電極配置，三維式孔對孔電極配置等概念。電極排列方法在 1990 年代初期多使用 Pole-Pole 排列法，由於 Pole-Pole 排列法在跨孔式地電阻影像法的應用上存在有低解析度與響應位置不明確的問題。主要問題仍是回歸到電極位於井內時，模型假設不再是半無限空間，而是全域空間，在此條件之下電阻率量測值響應位置與幾何因子的計算，即電極排列法的設計就變成非常關鍵，目前地表施測之電極排序應用於孔內施測時常用之電極排序概念與施測結果如圖 4 所示。

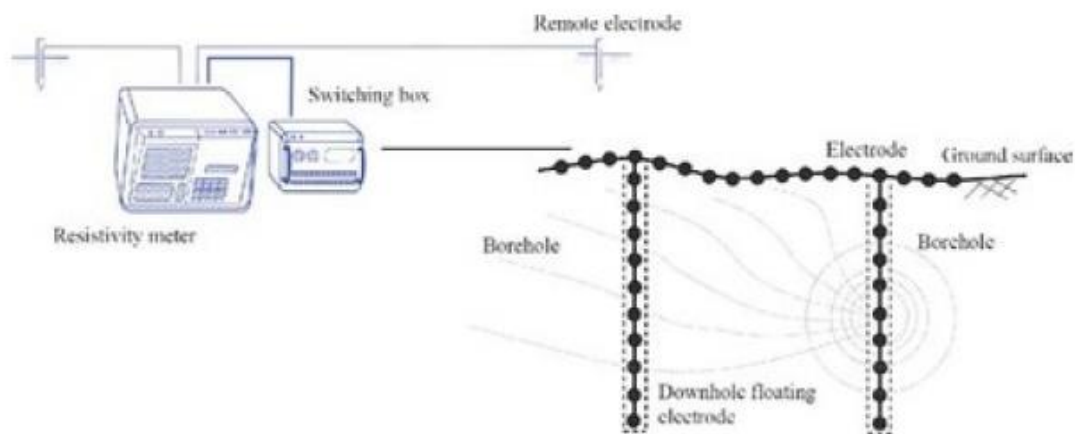


圖 4 地表與孔內地電阻探測聯合運用電極排序示意圖（Pole-Pole electrode array）（ Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014）

整治場址之整治成效評估一般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 5 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，代表示蹤劑受阻於低滲透性夾層。

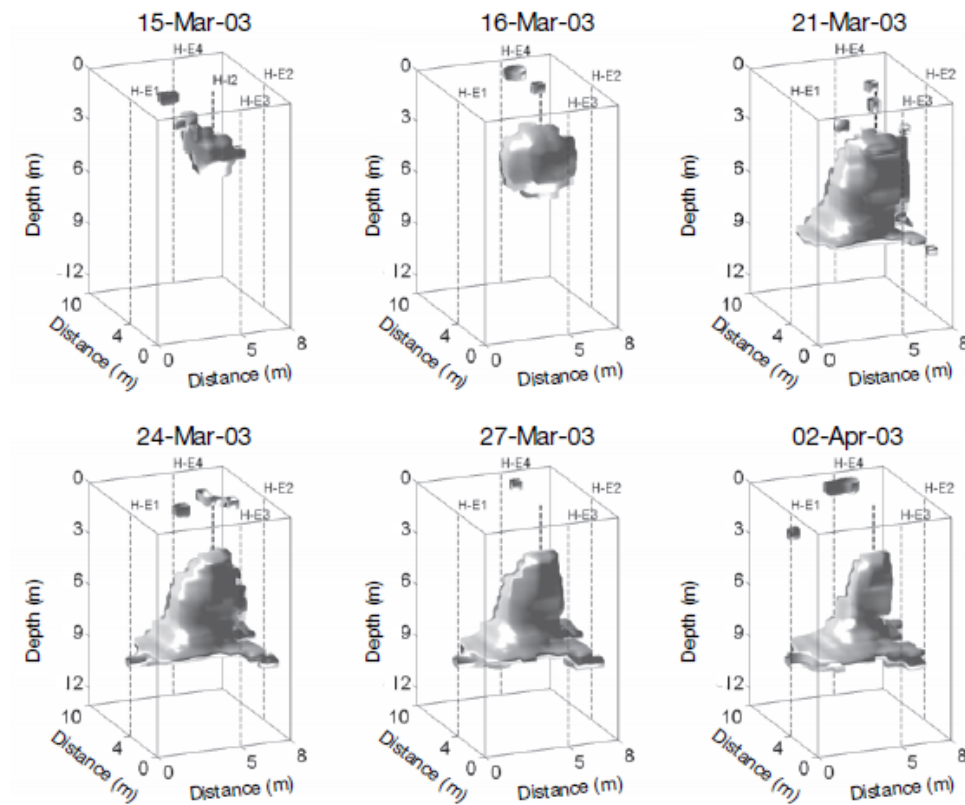


圖 5 未飽和層示蹤劑試驗之井中 ERT 三維電阻率分佈變化 (摘自 Winship et al., 2006)

3.2.2 應用井孔高解析電探法之關鍵問題

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 6 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，以期望降低單孔資料所造成的映射的影響，如圖 7 所示。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，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 CHERT 之電流響應為全域無限空間，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 CHERT 亦可能產生引入井孔外資訊之鏡像問題 (Bellmunt et al., 2016)，如圖 8 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。

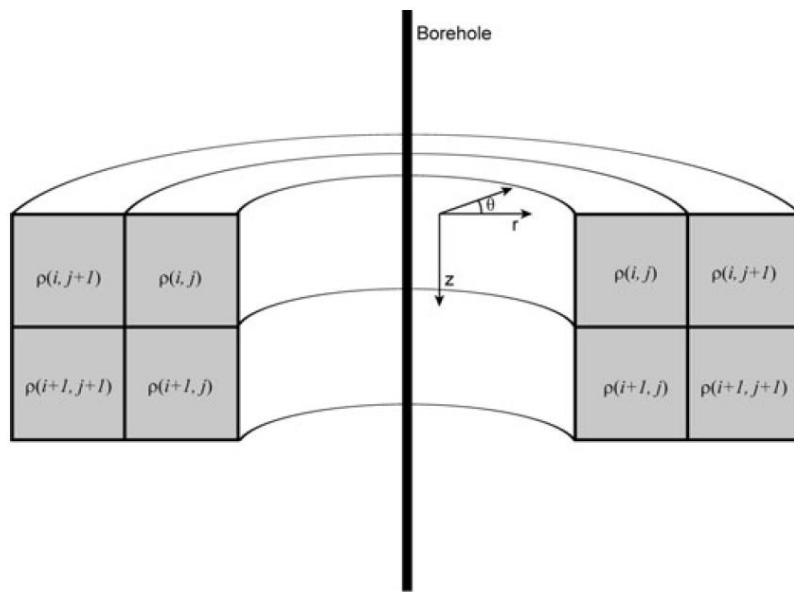


圖 6 單孔（下孔）電探施測範圍示意圖 (Coles et al., 2009)



第三章 計畫背景與文獻回顧

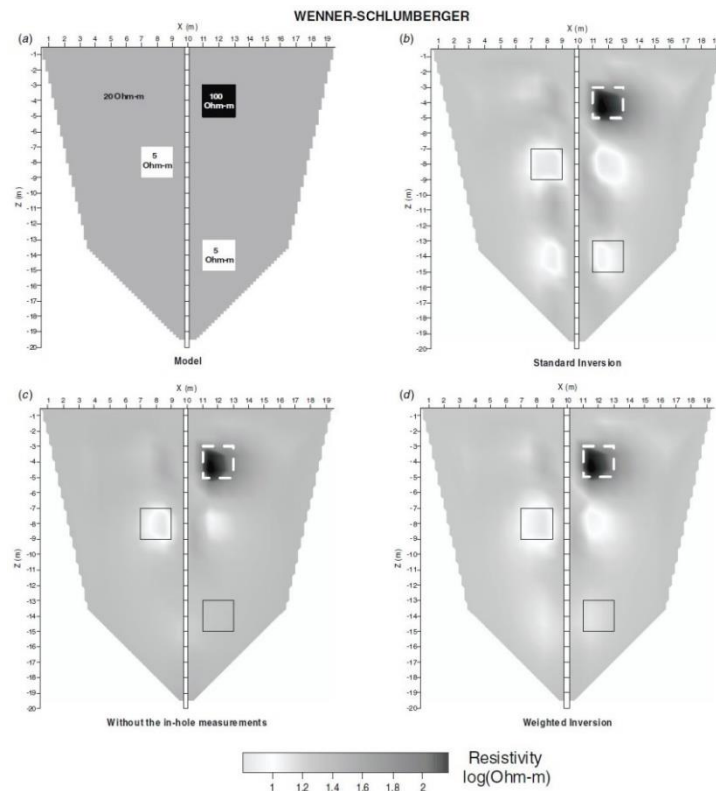


圖 7 文獻孔對地施測法之鏡像問題探討 (Wenner-Schlumberger 序列為例)：
 (a) 數值模型；(b) 標準反演結果；(c) 移除單孔資料；(d) 加權反算
 (Tsourlos et al., 2011)

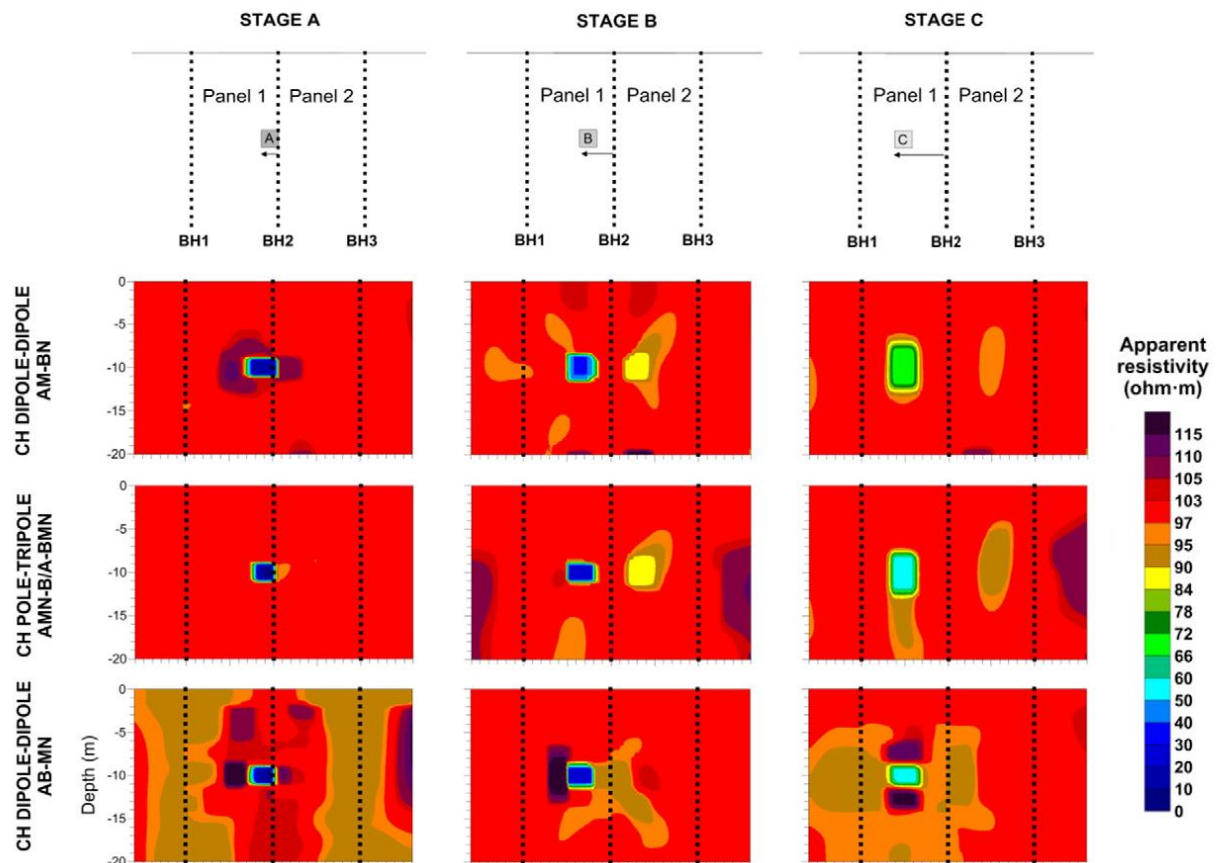


圖 8 文獻跨孔施測法鏡像問題探討：(a) CH dipole-dipole 序列 (AM-BN)；(b) CH pole-tripole 序列；(c) CH dipole-dipole 序列 (AB-MN)

傳統鑽井為水文地質模型建立之基本工作，可提供樣本以及現地試驗場址同時建立水文參數，然而因其耗時費工且較不具經濟性，常使得取樣點位極為有限，為有效率於有限鑽孔條件提升調查解析度，藉由搭配少數既有鑽井拓展地球物理方法於垂直方向之深部解析能力，藉以更明確界定污染或整治範圍，可基於有限鑽孔條件下而達到高解析度調查之目標。然而相較水文地質所需量化參數，地球物理方法以提供物理量為主，但兩者間之關係受眾多水文及地質因子影響，故本模場計畫期望透過可移動式井測之高解析電法即時監測技術於選定之模場範圍進行大數據監測技術，即時將監測數據上雲端。透過模場試驗進行其在水文地質調查與整治評估運用之可適性與基準化評估，以作為後續國內推廣運用與進一步研究之參考依據。

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 106 年度相關之研究中，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。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，為有效解決孔對地、或是跨孔測線之鏡像問題，107 年度計畫「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」藉由數值模擬手段探討孔內地電阻影像探測法鏡像問題成因，並擬定抑制鏡像效應之資料收錄與分析方法。因此，本期遂提出模場計畫將前述研發成果，藉由適當之模場試驗場址，進行實地應用之可適性與基準化評估，並進一步精進改良。

3.3 第一年計畫成果概述

本兩年期模場計畫目的在於進一步進行應用井孔電探之模場評估驗證，模場場址如圖 9 與圖 10，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。



圖 9 台鈴平鎮廠平面圖

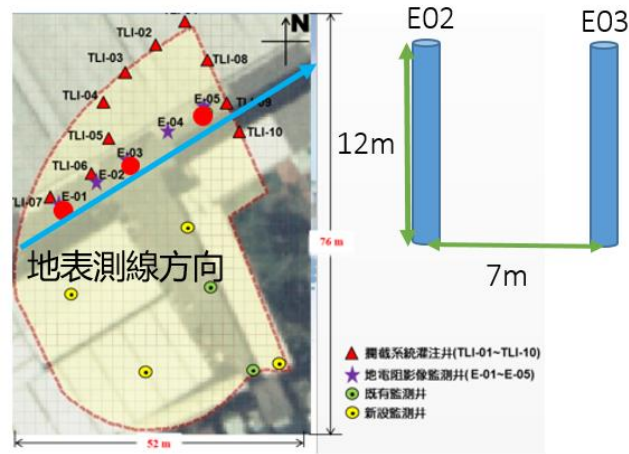


圖 10 台鈴平鎮廠南區測線規劃圖

基於該模場場址，第一年度研究完成工作成果包括：

- (1) 藉由數值模擬探討開篩管開口寬度於實務應用對於量測造成之影響，以增加實作可行性與增進高解析度量測之目標。並透過建議篩管開口寬度 1mm 地物井與傳統綁線地物井進行比較，結果相當接近。由模場成果知，適度放大開篩寬度至 1mm 時，對於孔內施測可能造成資料靈敏度降低之疑慮並無出現與傳統綁線電極成果相匹配。
- (2) 針對跨孔施測資料分析方法評估納入跨孔區域外拓展模型分析方法之成效，發現使用拓展分析對於現地資料的判讀有一定的幫助，畢竟孔對孔施測在測線的外側仍有靈敏度存在，且在使用拓展分析後垂直電性變化與地對孔結果較為接近，因此未來在現地孔對孔資料處理時建議使用拓展分析來做分析並謹慎評估其異常區的電阻值。
- (3) 針對改善井孔施測限制資料分析方法之精進，地對孔實場成果中應用 Combined data inversion 進行資料組合時主要是依據各序列所對應的 IOS 值，在組合資料時除了要考慮該序列抵抗鏡像效應的能力外，還需考慮該序列之靈敏度問題，根據初步結果，使用 Combined data inversion 在現地 T 字型測線的收錄上有顯著的改善資料品質。研究成果顯示孔對地 T 字形成果，並進行 Combined data inversion 時加入地表的資料，應能解決靠近地表感應盲區的問題。此外單純地表施測時解析度會隨著深度下降，往往異常區出現在深處時，因反算網格變大而被放大。模場結果顯示孔



對地 T 字型法成果確保鏡像效應地去除後，可以真實反應出深部異常區的大小，對於整治方可精準描繪出異常區大小，進而減少整治所需的藥劑費用。



第四章 研究方法與過程

4.1 研究方法

本兩年計畫研究目的在既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。第一年已完成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，第二年重點放在提升汙染物或藥劑整治之監測工作，建立模場區域大數據高解析井測處理模式，期望透過最新的監測方法進行模場高潛勢區監測工作。

第一年完成「可移動式井測之高解析電法即時監測技術」，利用模場既設監測井或整治井進行直接施測，並比對場址內既有 CHERT 系統，驗證檢討此項新型發展技術未來於實場應用之可行性，並透過模場試驗中各方面之資訊驗證前期相關計畫所提出之分析與實務應用方法。茲分別說明如下：

(1) 結合井測高解析電法精進改良一

前期相關計畫(林志平，2018)透過各種地對孔與跨孔之數值模型討論，透過數值模擬探討歸納造成結合井測潛在問題的根本原因，並提出改善資料收錄與分析方法包括聯合反演與(Combined data inversion)加權模型疊加方法(Model stacking technique, MOST)；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。因此本年度計畫擬持續精進分析方法，以達到高解析監測技術之目標。預期工作包括：

(a) 結合井測現場實務應用問題探討

基於前期相關計畫(林志平，2016)所開發之孔內電極，進行相關實務應用可行性檢討。此外，針對配合井孔施測採用之開篩對管於電阻率可能造成之影響，擬將藉由數值模擬探討開篩管開口寬度於實務應用對於量測造成之影響，以增加實作可行性與增進高解析度量測之



目標。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，先依據開篩口寬度等影響因子規畫正算模擬案例，並建構合適之數值模型(如圖 9 為例)進行地電阻探測模擬，透過數值模型建構幾何與材料參數，以準確描述施測結果與開篩管影響之相互關係。

(b) 改善井孔施測限制資料分析方法之精進。

前期相關計畫(林志平，2018) 發現跨孔施測時於跨孔區域外仍具有靈敏度，因此第一年擬將嘗試評估納入跨孔區域外拓展模型分析方法之成效，並評估較佳之拓展分析範圍。此外，前期相關計畫發展抑制鏡像效應之資料分析方法，初步發現地對孔與跨孔之施測方式，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，透過 IOS 分析執行聯合反演方法可獲得更好的結果。因此，本計畫將基於所開發之聯合反演與加權模型疊加方法持續檢討精進，並擬將評估其他可能改善鏡像效應之資料分析方法，以持續探討維持解析度與降低鏡像效應之間的平衡方案。

因此，本研究除了增加現地量測解析度外，第二年研究重點除了精進高解析度量測方法外，研究設計一套符合現地模場時間序列量測方法。第二年研究方法茲分別說明如下：

(2) 結合井測高解析電法精進改良二

前年度計畫透過各種地對孔與跨孔之模場評估，並比較資料收錄與分析方法包括聯合反演與(Combined data inversion)加權模型疊加方法(Model stacking technique, MOST)；在單孔施測方面，亦於模場評估指向性的問題，並提出施測配置方式。因此本年度計畫擬持續精進分析方法，以達到高解析監測技術之目標，並提出標準施測方法。工作包括基於第一年模場資料為基礎，進一步藉由數值模擬延伸討論與評析高解析方法檢討。方法為建構合適之數值模型(如圖 11)進行地電阻探測模擬，透過數值模型建構幾何與材料參數，精進井測電極序列組合的最佳化評估分析方法。並結合第一年度模場比較成果與分析方法之檢討進一步應用於後續監測作業最佳化施測方法。

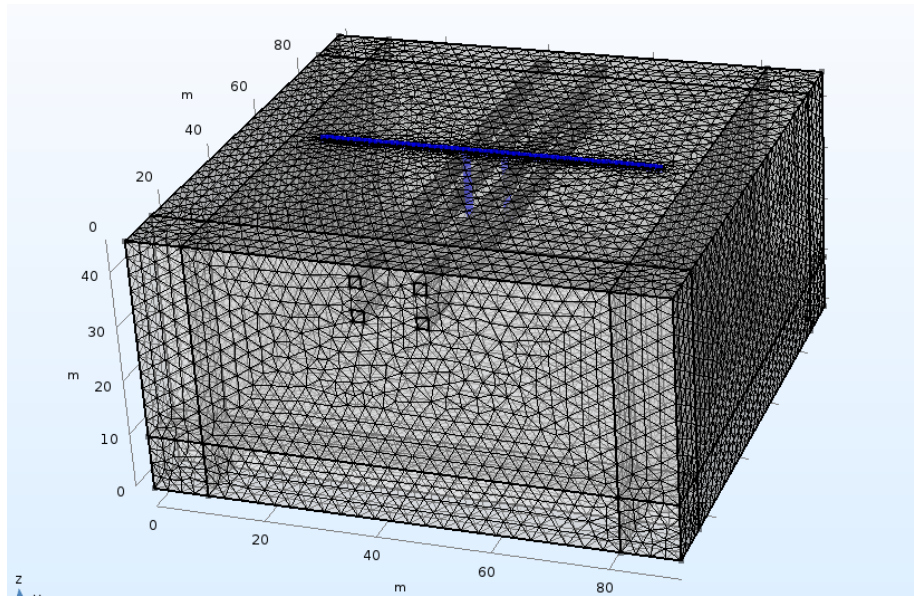


圖 11 高解析探討數值模型示意圖

(3) 應用孔內地電阻影像探測法模場高潛勢區監測工作

主要針對調查或整治時應用鑽孔之地電技術評估「監測化」之可行性，因此將基於第一年研究所評析具可行性，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，於模場區域進行時間序列量測，監控抽水井水力控制系統之攔截成效與即時監測汙染擴散導致地層電性變化。因汙染在地下水中的移動是較難以掌握的，監測化主要使用 time-lapse 資料差值的資料處理方法分析電性差異百分率，藉此評估抽水井是否符合設計，同時分析是否有遺漏未處理之疑似汙染潛勢區。

因此，本年度預計延續第一年模場(位置如圖 12 所示)並進行新設井孔，透過既設與新設井並基於前述所完成之結合井測之高解析電法應用於本模場區域，設置大數據高解析井測即時監測系統，監控抽水井水力控制系統之攔截成效，作為現場改善成效評估參考依據之一。

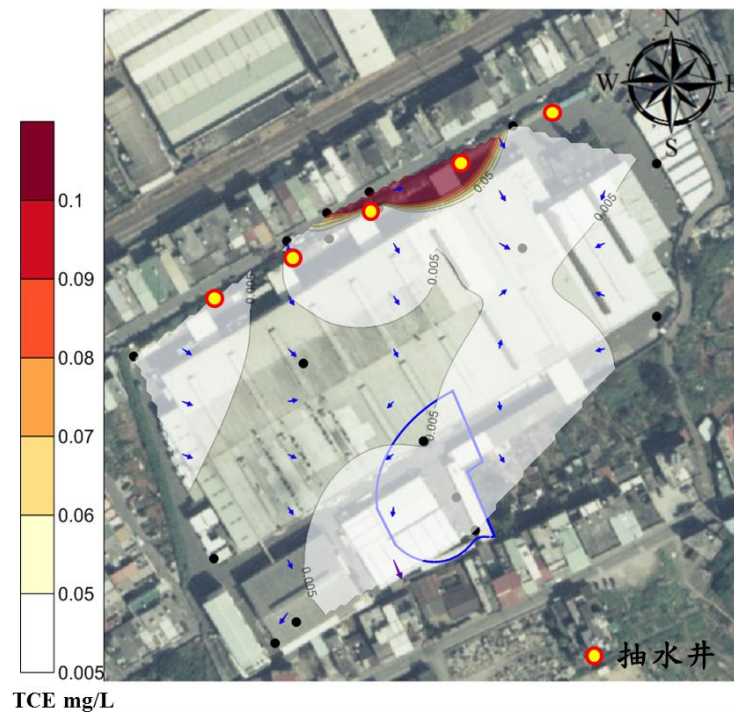


圖 12 本計畫擬定現地模場位置圖

4.2 研究流程

本研究將先進行結合井測高解析電法精進，並同時進行模場試驗建構模場高解析井測監測系統。本計畫之研究流程如圖 13 所示：

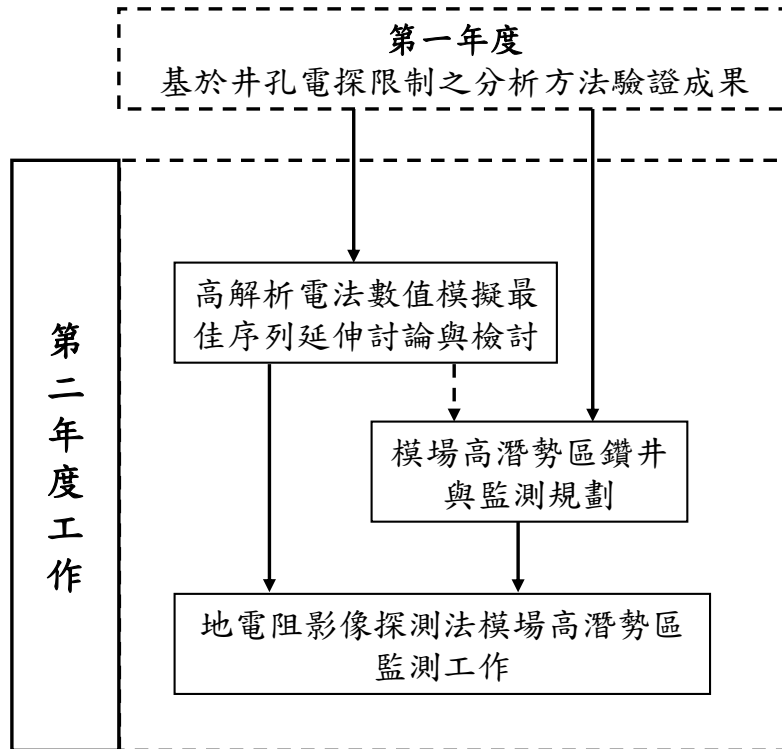


圖 13 研究流程



4.3 工作進度

整體工作進度如表 2 所示，計劃預期執行兩年，本年度為第二年，第二年預定查核點如表中說明，目前期中報告之時間點位於第 6 個工作月，在查核點中進度與預期進度相符。

表 2 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
結合井測高解 析電法精進改 良													
應用孔內地電 阻影像探測法 模場高潛勢區 監測工作													
工作進度估計 百分比（累積 數）	5%	15%	25%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
第二年計劃預 定查核點	期中		1. 結合井測電極序列最佳化探討 2. 模場鑽井與監測規劃										
	期末		1. 應用孔內地電阻影像探測法模場試驗驗證 2. 模場高潛勢區監測工作										
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 結合井測高解析電法精進改良

第一年計畫透過各種地對孔與跨孔之模場施測，透過模場試驗比較改善資料收錄與分析方法包括聯合反演與(Combined data inversion)加權模型疊加方法(Model stacking technique, MOST)。因此本年度計畫基於第一年所收錄模場資料(場址與測線位置如圖 9、圖 10 之佈設)並搭配數模擬進一步精進最佳化序列分析方法，以達到高解析監測技術之目標。

5.1.1 第一年模場試驗成果綜合檢討與評析

5.1.1.1 BSERT 模場試驗資料與分析方法檢討

前年度模場施測結果清楚呈現出 A-MNB 序列出現強烈的鏡像效應，但整體與單純地表施測成果類似，深度 7m 以下有一低電阻率區，深度 7m 以上除了地表為高電阻率區。AB-MN 序列則呈現出高電阻區左右不對稱，左側高電阻率區較為明顯。以 E-03 為例探測結果如圖 14 所示，模場收錄的電極排列法包括兩種，圖 14(a)是孔內只有電位極之序列 AB-MN 序列，該序列不會發生鏡像效應，但解析度較低；圖 14(b)是孔內同時有電流極和電位極存在之 A-MNB 序列，A-MNB 序列會有鏡像效應但解析度相對於 AB-MN 序列高出許多。

為降低鏡像效應但盡量維持成像的解析度，評估比較模型疊加方法(Model stacking technique, MOST 及 Weighted MOST, WMOST)以及聯合反演方法(Combined data inversion)。圖 15 顯示 IOS 值的計算結果，在此配置下 AB-MN 間距最大可到 4m，A-MNB 間距最大可到 5m，此成果明顯呈現出 AB-MN 序列之 IOS 值隨著電極間距變大而減小，而 A-MNB 之 IOS 值則是隨著電極間距增加至 3m 時達到峰值。結合兩種電極序列法聯合反演(Combined data inversion)時，依據上述的 IOS 的計算結果來挑選適當的序列進行阻合，挑選了 AB-MN 序列間距為 1、2、3m 的資料與 A-MNB 間距為 3、4m 的資料進行聯合反演(Combined data inversion)，成果如圖 16 所示，共有三種組合的反算



結果，與 A-MNB 成果相比所關心之鏡像效應似乎得到一定程度的抑制，成果明顯呈現出地下 2.4m 到 6m 處的高阻率區域分佈於測線的左側，而 E-03 地下 7m 處的低電阻塊推測為先前灌入藥劑後之殘留，這裡要注意 BSERT 的探測敏感區為 T 字型，深部的探測涵蓋區域主要侷限在孔的兩側。

圖 17 是 MOST 與 WMOST 的結果，WMOST 的比重分別採用 AB-MN 序列資料比重佔 7 成，A-MNB 序列資料比重佔 3 成，研究成果顯示解析度相較於 Combined data inversion 成果，此方法結果不夠理想，並仍然有一定程度的鏡像存在。

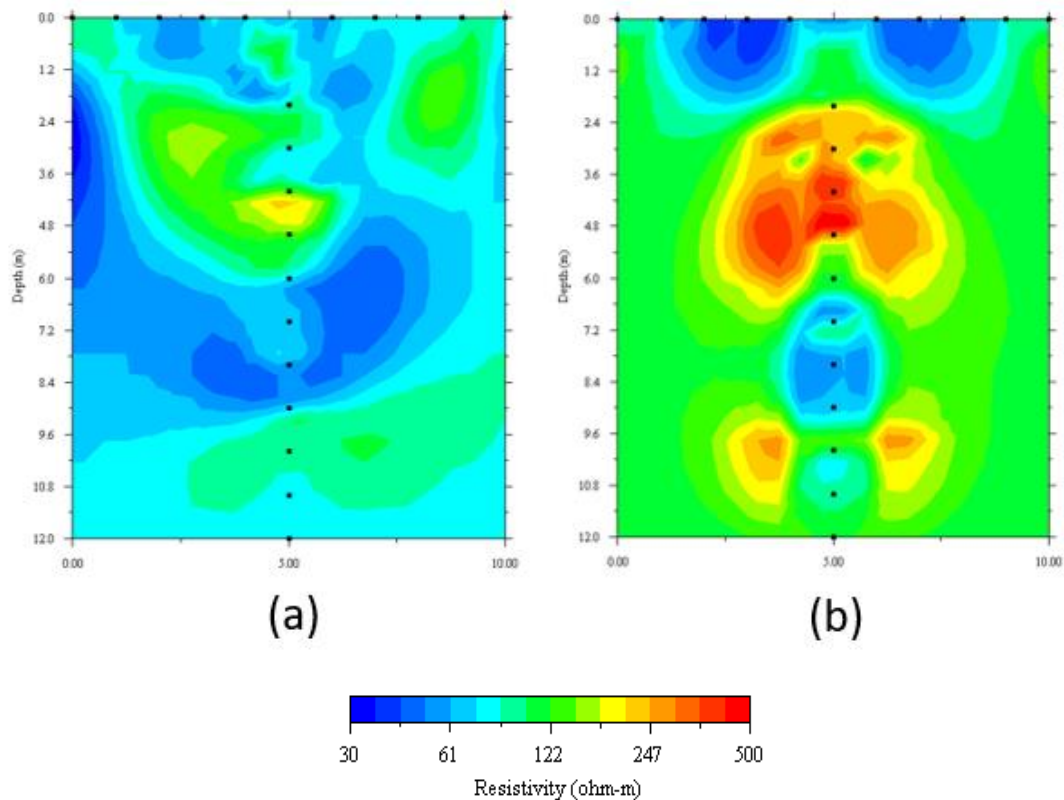


圖 14 E-03 T 字型測線原始收錄反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列

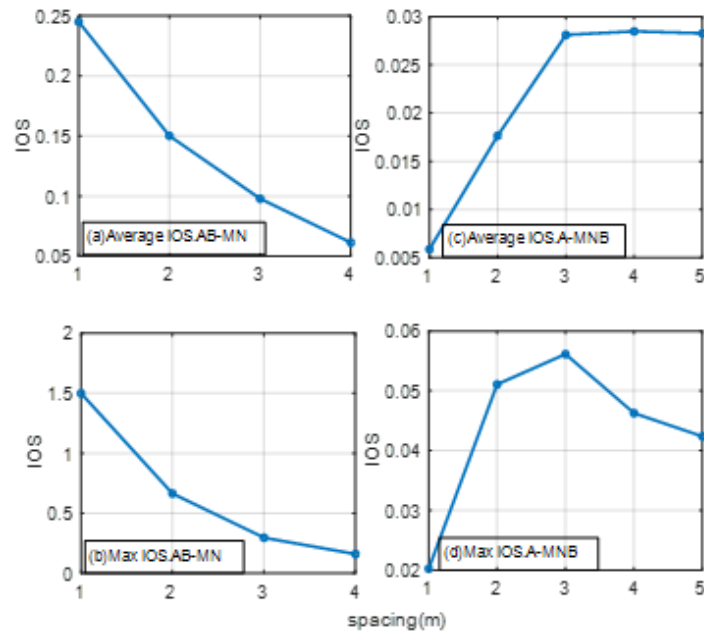


圖 15 E-03 IOS 計算結果:(a)AB-MN avg IOS (b)AB-MN max IOS (c)A-MNB avg IOS (d)A-MNB max IOS

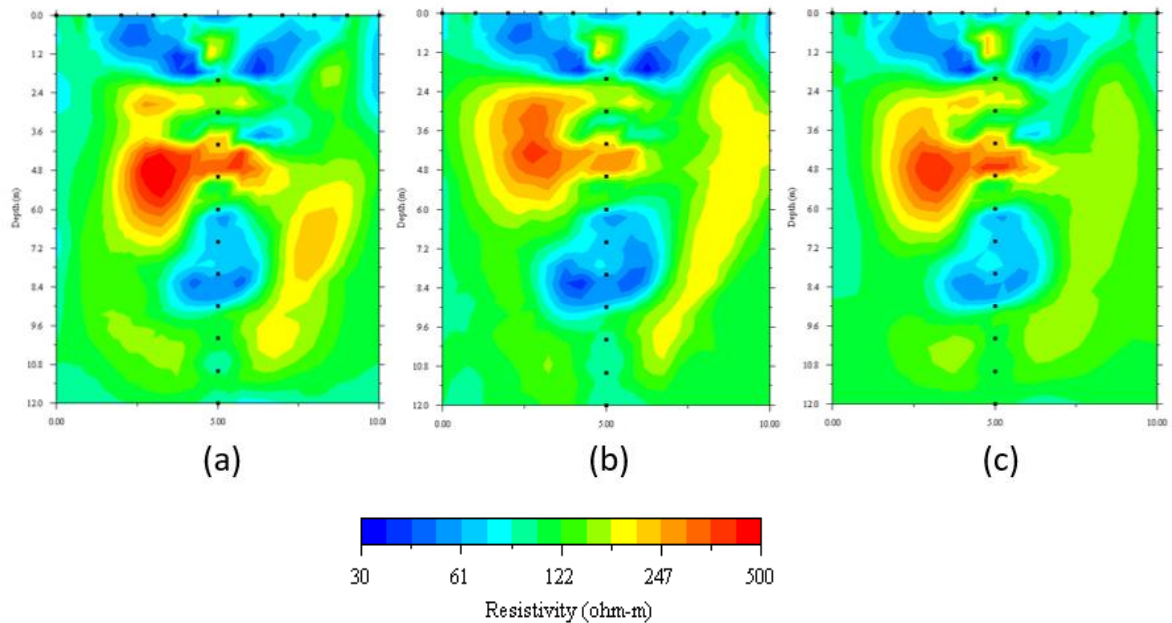


圖 16 E03 聯合反演(Combined data inversion)結果: (a)AB-MN123/A-MNB3 (b)AB-MN123/A-MNB4 (c) AB-MN123/A-MNB34

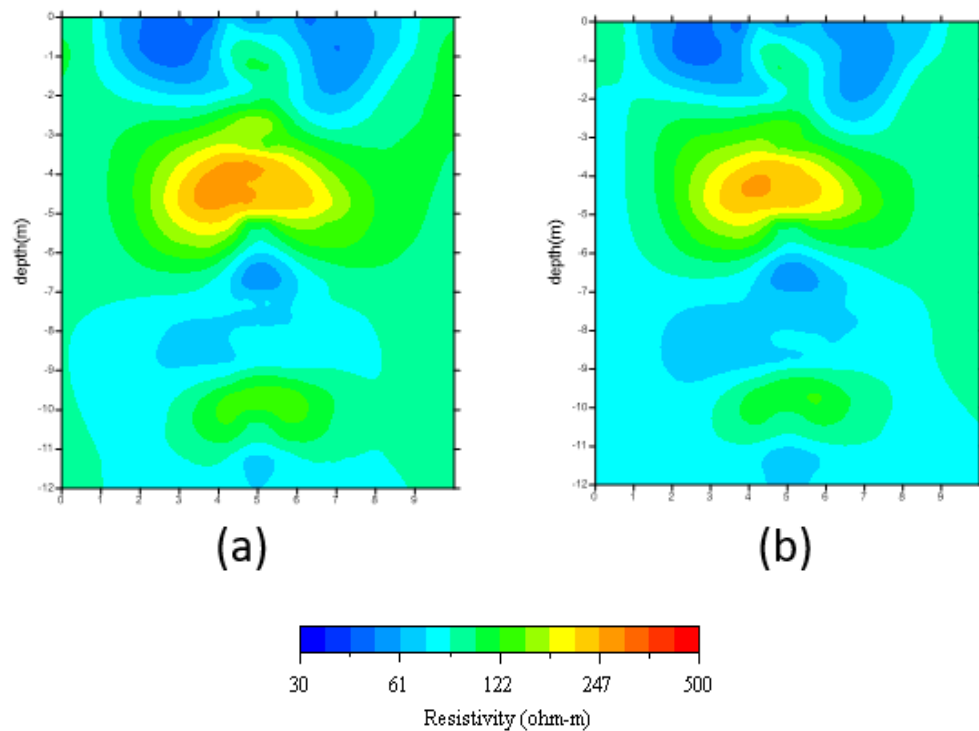


圖 17 E03 模型加權法結果:(a)MOST (b)WMOST AB-MN:A-MNB=7:3

5.1.1.2 CHERT 模場試驗資料與分析方法檢討

由於第一年模場試驗資料分析過程中發現 CHERT 反算的範圍設定對於鏡像效應的程度有很大的影響，且 CHERT 目前尚無通用的 IOS 計算方法，較難據以設定不同序列的聯合反算，根據本研究團隊最新的數值模擬結果發現，設定跨孔反算範圍往外 0.2~0.25 倍孔深拓展模型(Extended Model)可獲得較理想的結果，因此基於第一年 CHERT 模場現地試驗的部分進行進一步的評估。圖 18 為 Bipole-Bipole 的 CHERT 施測結果，左圖為沒有使用 Extended Model 反算結果，右圖為有使用 Extended Model 反算結果，圖中黑色虛線為測線的位置，在該區域剖面的電性趨勢方面，Bipole-Bipole 序列的量測結果和地對孔的結果差異不大，大致上也是以 7.2m 以下有一低阻區，7.2m 以上為高阻區，在是否使用 Extended Model 反算的差異方面，Bipole-Bipole 序列的結果在兩孔之間的成像差異較大，且沒有 Extended Model 的結果的淺層區有異常高的電阻區出現較不合理，使用 Extended Model 整體上就能與地對孔的結果吻合，圖 19 是 AB-MN 之收錄結果，其因孔內沒有同時具有電流



極與電位極，並沒有鏡像效應的問題，因此在兩孔之間的成像結果理論上差異不大，但 AB-MN 序列抵抗雜訊能力較低，K 值較高，受環境雜訊的影響較大，因此 Extended Model 結果中淺層及高阻區和另兩種序列結果有所不同。圖 20 是 TP 的結果，其整體趨勢與 Bipole-Bipole 序列的結果接近。就這三種序列的探測結果來看，使用 Extended Model 對於現地資料的判讀比較不會因為反算邊界條件的設定與現地不符而出現異常的現象，畢竟孔對孔施測在測線的外側一定的距離內仍具有相當長度的靈敏度，研究結果也顯示在使用 Extended Model 後垂直電性變化與地對孔及單孔的結果較為接近。

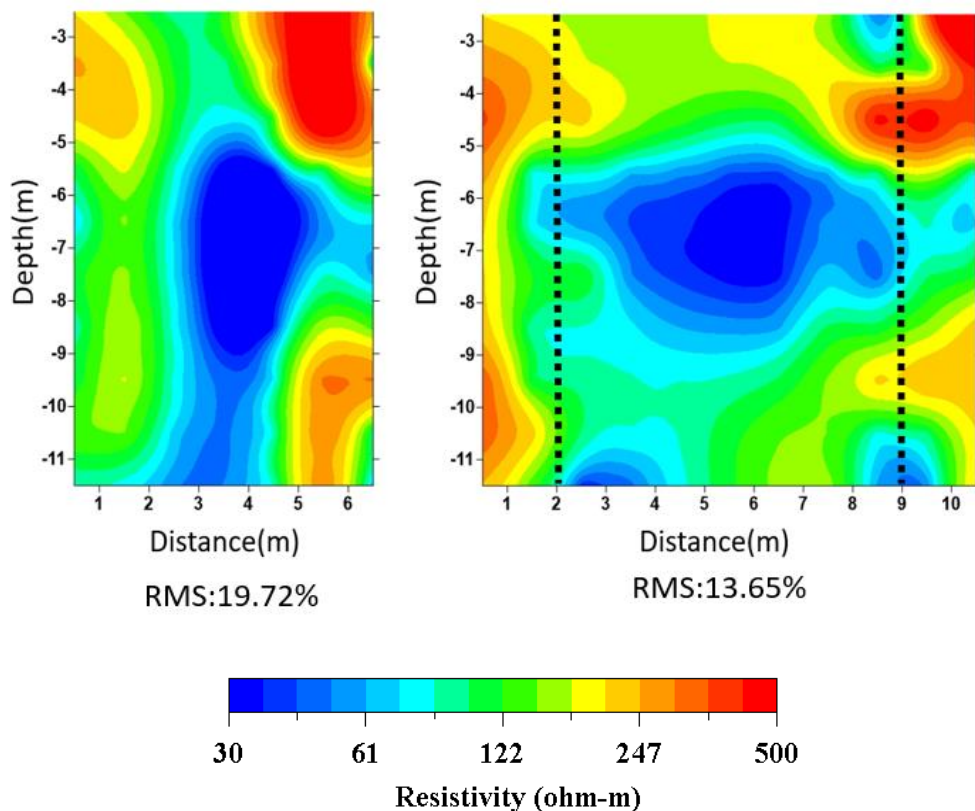


圖 18 孔對孔 Bipole-Bipole 施測成果圖: (a)沒有使用 Extend Model 反算結果，(b)有使用 Extend Model 反算結果

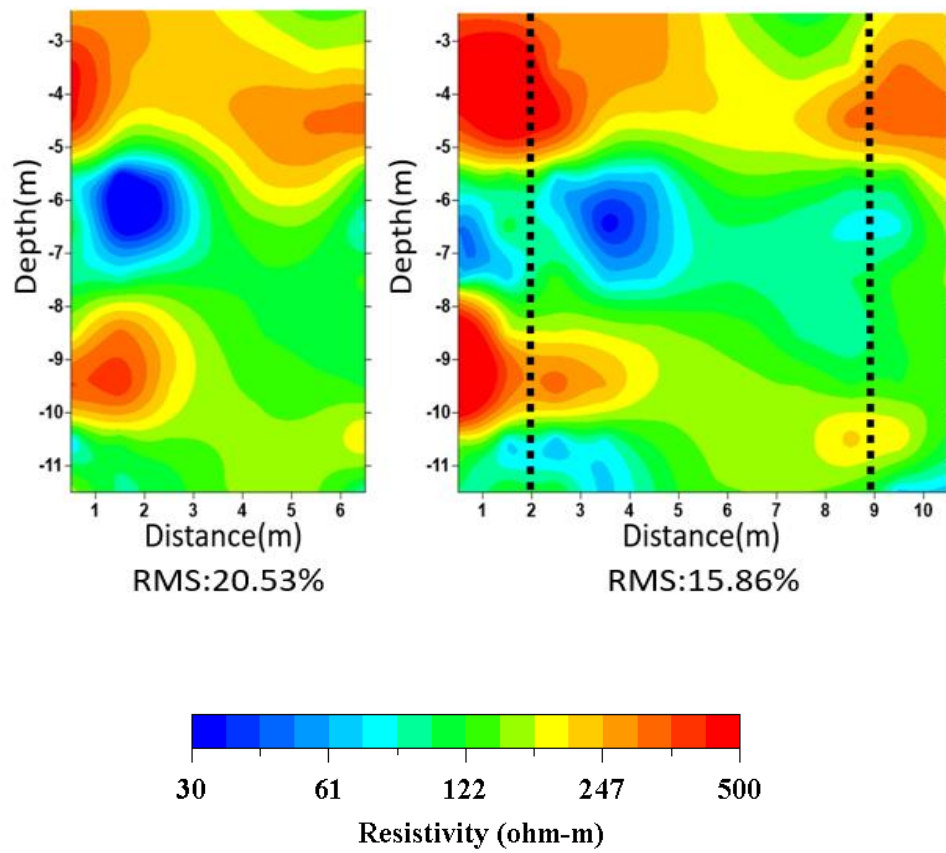


圖 19 孔對孔 AB-MN 施測成果圖：(a)沒有使用 Extend Model 反算結果，
(b)有使用 Extend Model 反算結果

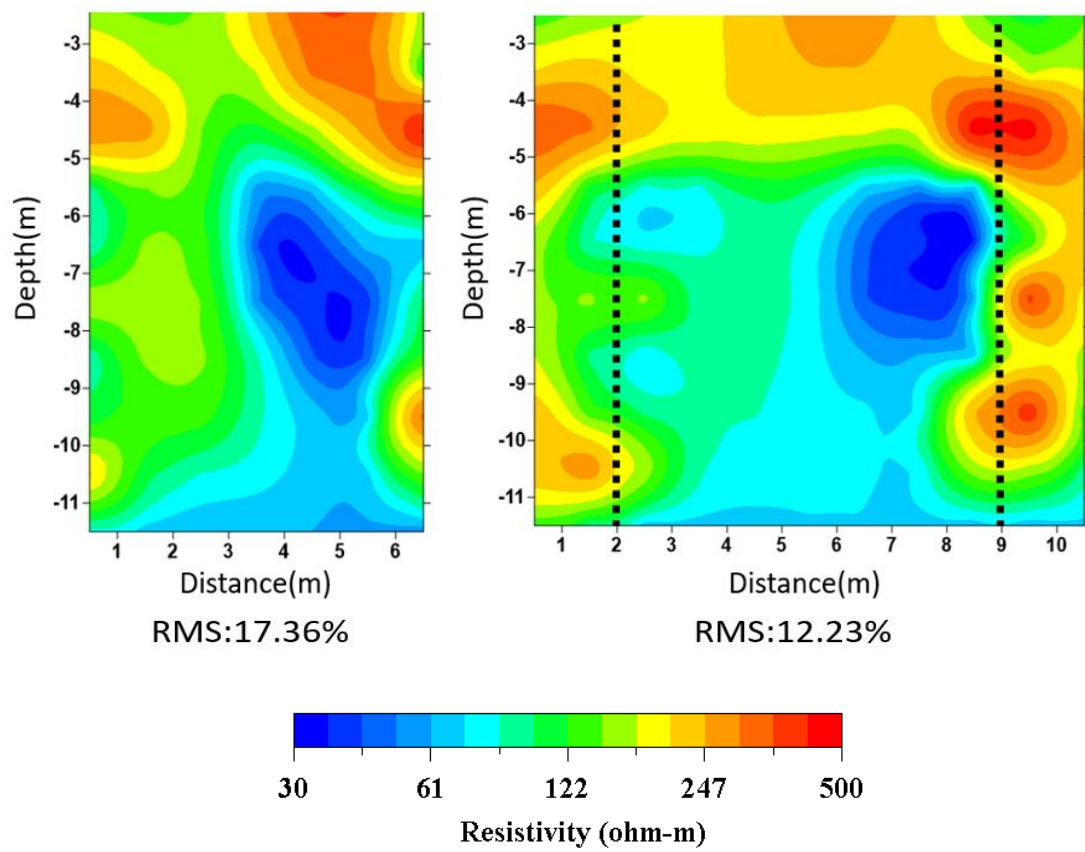


圖 20 孔對孔 A-BMN 施測成果圖：(a)沒有使用 Extend Model 反算結果，
(b)有使用 Extend Model 反算結果



5.1.2 簡化模場數值模擬與最佳化分析方法檢討

5.1.2.1 數值模型建構

由於模場地下電性分佈情況複雜且未知，為了確認地表與孔內資料聯合反演的效果，本研究進一步將模場情況進行簡化，在已知地下電阻異常區分佈的情況下進行地對孔，跨孔以及地表之數值模擬。本研究採用多重物理量耦合有限元素分析軟體 COMSOL Ver. 5.3 - AC/DC module 建立三維電場正算數值模型。地電阻探測的視電阻率剖面是由多組之電極佈設於地表，透過不同排列組合施予電流而得到不同影響深度與位置而成的影像剖面，透過撰寫 Matlab Code 動態連結 COMSOL 正算模型，給定不同電極排列邊界條件，以計算其擬似電阻率剖面(Pseudo-Section)。圖 21 為所建立模型之網格示意圖，其中共分為三條測線，一條為地表測線與兩條孔內測線，地表測線長度為 60m，電極間距為 1m，孔內測線則分別位於地表測線 $X=42\text{m}$ 處(E02)以及 $X=49\text{m}$ (E03)處。背景電阻率設定為 100m ，再設置 4 個 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 之長條型方塊作為電阻率異常區(電阻率為 10m ，分別位於地表測線 $X=40\text{m}$ 何 $X=51\text{m}$ 處，剛好位於兩條孔內測線兩側，深度分別為 3m 與及 9m ，如圖 22 所示。

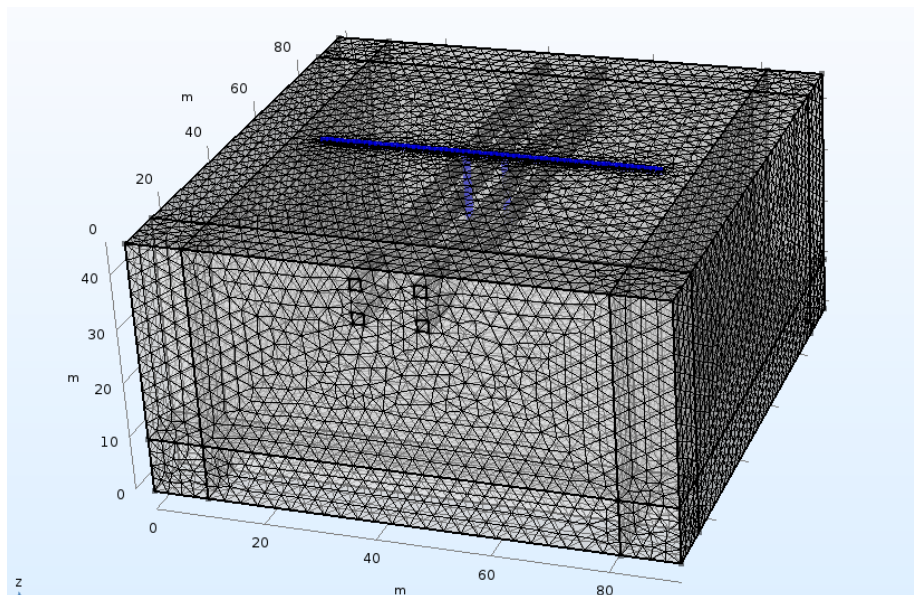


圖 21 建立模型示意圖

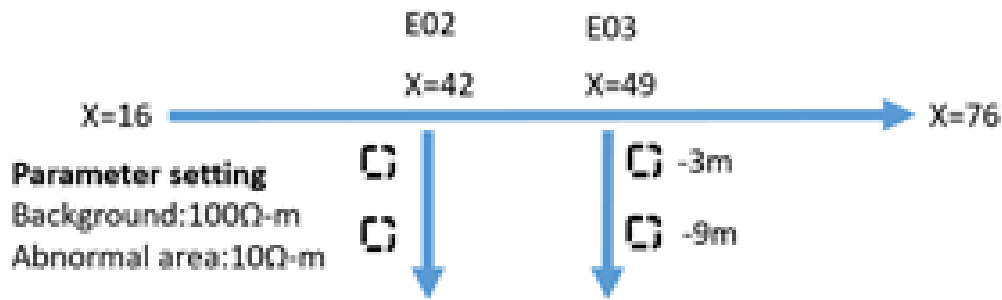


圖 22 模型測線佈置示意圖

5.1.2.2 地表結合井測最佳化分析方法檢討

第一年度模場成果中評析了關於地對孔，孔對孔的資料處理方式於現地的適用性，由結果看來地孔的聯合反演與跨孔的往外延伸反算的方法確實在現地資料的處理上能有效的降低鏡像效應，因此，基於數值模擬主要在比較地對孔和孔對孔兩種方法在和地表資料結合後是否能讓整體剖面達到更好的解析效果。由於現地的地下電阻率分佈情況較為複雜，因此本工作簡化了現地情況，利用數值模擬的方式來進行初步地表與孔內資料聯合反演之探討，在選出成效較佳資料組合後，進一步套用至現地資料上進行分析。模型設定如圖 33 中所描述，純地表模擬結果如圖 23 所示，採用的電極序列為 Wenner-Schlumber，電極間距為 1m，結果顯示單純利用地表量測僅可以觀察到位於地下 3m 處的電阻異常區，9m 深的電阻異常區並沒有顯現出來。

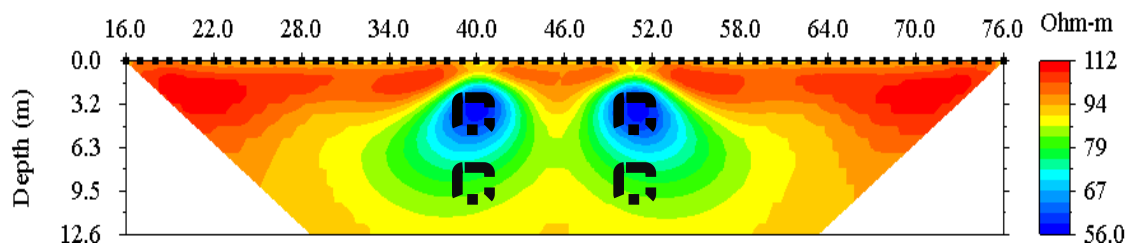


圖 23 純地表模擬結果



(1) BSERT 部分

圖 24 為 E02 和 E03 兩井的模擬成果，其中 AB-MN 沒有鏡像效應但解析度較低，A-MNB 解析度較高但有鏡像效應，接著根據 IOS 值選擇 AB-MN 小間距的資料，A-MNB 較大間距的資料進行組合，其結果如圖 25，組合方式分別為(a)AB-MN123/A-MNB3、(b)AB-MN123/A-MNB4 與(c) AB-MN123/A-MNB34 三種，雖然 A-MNB 間距 5m 的資料平均 IOS 值最高，但其資料點最少僅有 6 點，故沒有選擇 5m 的資料進行組合，三種結果皆沒有明顯的鏡像效應，深部解析度則是 AB-MN123/A-MNB4 較差，其他兩個結果較好一些。E03 的資料挑選方式同 E02。

最後分別採用純地表、E02 AB-MN123/A-MNB3、E03 AB-MN123/A-MNB3 進行聯合反演，圖 36 之聯合反演結果顯示當加入地對孔資料後，較淺之異常區之解析度有著顯著的提升，深部異常區之解析度也有一定的提升，但結合地面資料聯合反演後仍有微弱的鏡像效應存在。此模擬結果驗證了藉由地表與地對孔的收錄資料聯合反算能有效增加整體剖面解析度，但仍應注意可能的鏡像效應，勿作過度的解讀，或亦可參考 BSERT 的結果來綜合判釋。

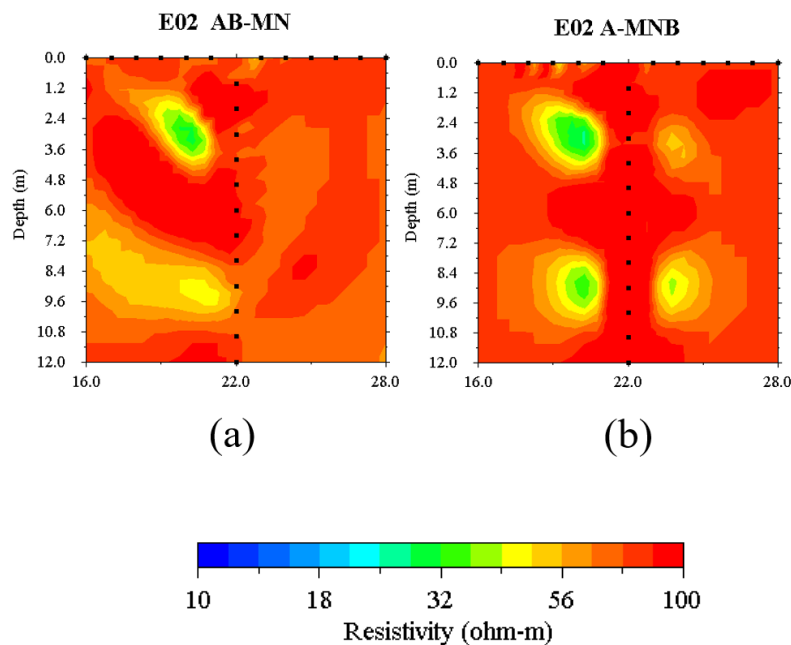


圖 24 E02 T 字型測線模擬反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列

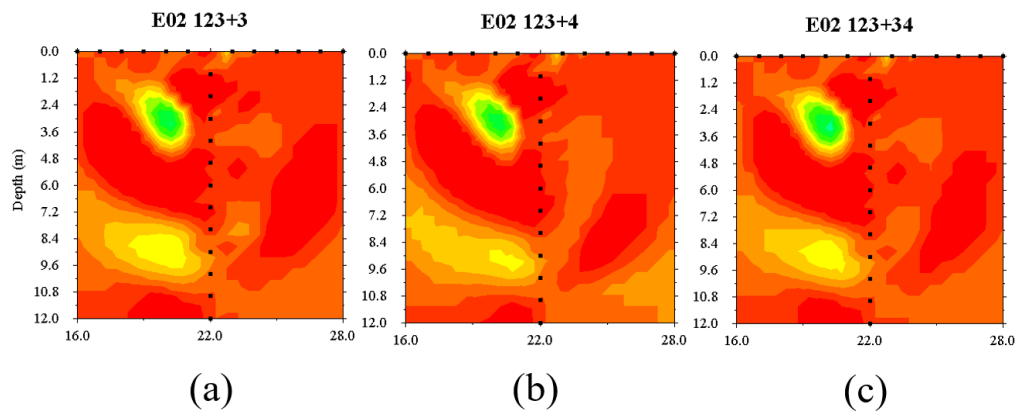


圖 25 E02 聯合反演(Combined data inversion)模擬結果:(a)AB-MN123/A-MNB3、(b)AB-MN123/A-MNB4 與(c) AB-MN123/A-MNB34

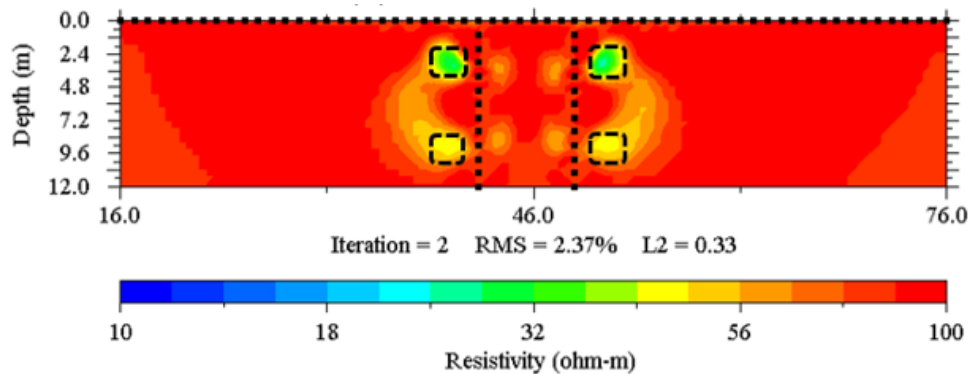


圖 26 地對孔聯合地表反演結果

(2) CHERT 部分

孔對孔數值模擬之電極序列採用探測解析度較好之 TP 序列與 Bipole-Bipole 序列，在反算模型設定上為確保較合適的邊界條件採用 Extended Model 往施測孔左右各延伸 3m，為孔深的 0.25 倍。圖 27 為 CHERT 兩種序列的模擬結果，兩種序列皆可以探測到電阻率異常區的位置，解析度方面兩者差異不大，皆有些許的鏡像效應存在，但並不是非常嚴重，推測 Extended Model 具有一些抑制鏡像效應的效果，如果要增進去除鏡像效應的效果，後續可以進一步利用聯合反演或模型加權疊加法進行探討。圖 28 為孔對孔與地表聯合反演成果，與圖 23 單純地表結果相比，可以看到孔對孔與地表資料聯合反演後對於深部電阻率異常區解析度更佳，對於電阻率異常區成像，Bipole-Bipole 序列結果與 TP 序列差異不大，但鏡像效應似乎較為嚴重，兩孔



之間的成像較為複雜。孔對孔聯合反演模擬結果與地對孔結果相比，孔對孔似乎對於深部的解析度較佳，地對孔則是對淺層解析度較好。

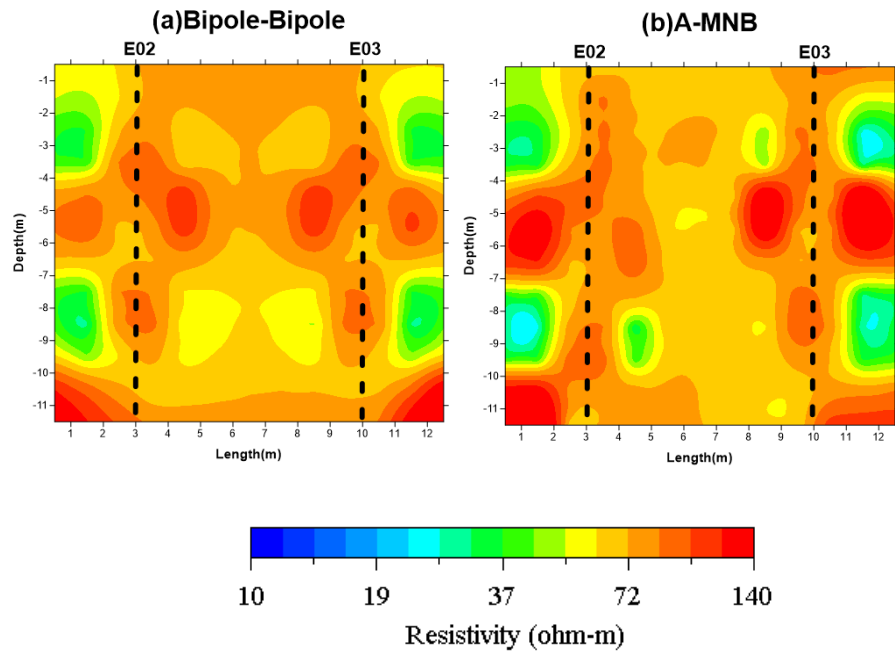


圖 27 孔對孔模擬成果: (a)Bipole-Bipole 序列(b)TP 序列

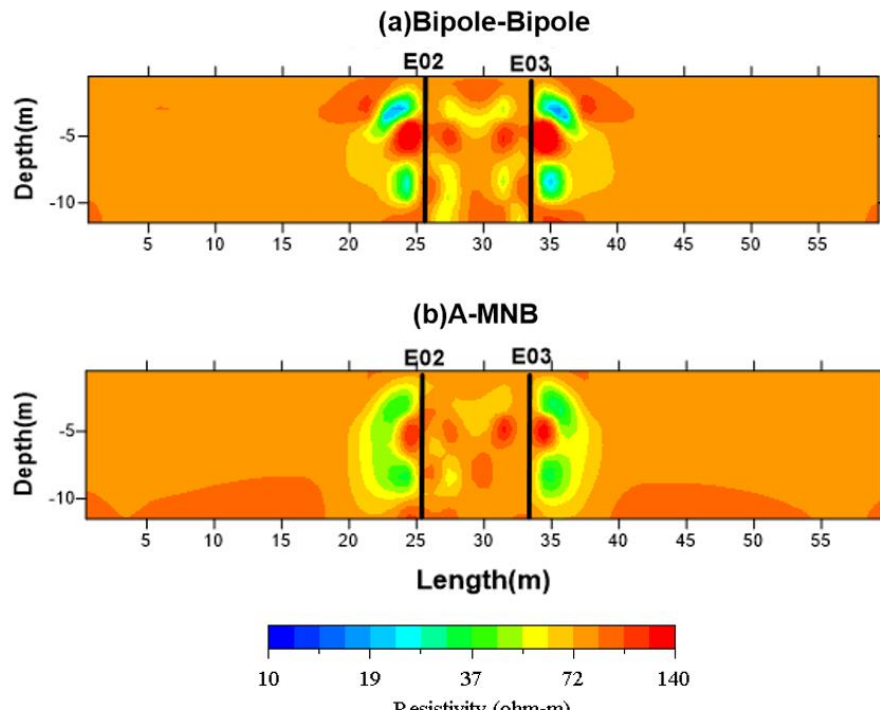


圖 28 孔對孔與地表資料聯合反演成果: (a)Bipole-Bipole 序列 (b)TP 序列

(3) 模場資料分析方法精進

最後將模擬成果套用到模場資料結果上，圖 29 為現地地表結合井測資料的聯合反演成果。CHERT 序列選用 Bipole-Bipole 序列與地表資料結合；BSERT 取 E02 AB-MN123/A-MNB3、E03 AB-MN123/A-MNB3 與地表資料進行聯合反算。CHERT 與 BSERT 結果相比，E02 與 E03 兩井之間縱向區域電性變化差異不大，其中 CHERT 在 7.2m 低阻區處孔對孔的收錄結果較為連續，而非 BSERT 呈現之左右各一團的現象，且推測該區為藥劑擴散區，在無不透水層的情況下兩孔之間應會互相流通，但 BSERT 結果並非如此，推測因 BSERT 序列收錄時解析度貢獻大都為單孔型式，在橫向探測距離增加時解析度下降較快，尤其在深部情況較嚴重。綜合兩種聯合反演的方法來看，利用結合井測與地表資料來提升施測剖面的局部探測解析度應有一定的成效，但現實地下情況變化多端，在施測時仍需搭配鑽孔與地質資料共同判釋，才能得到較為客觀的調查結果。

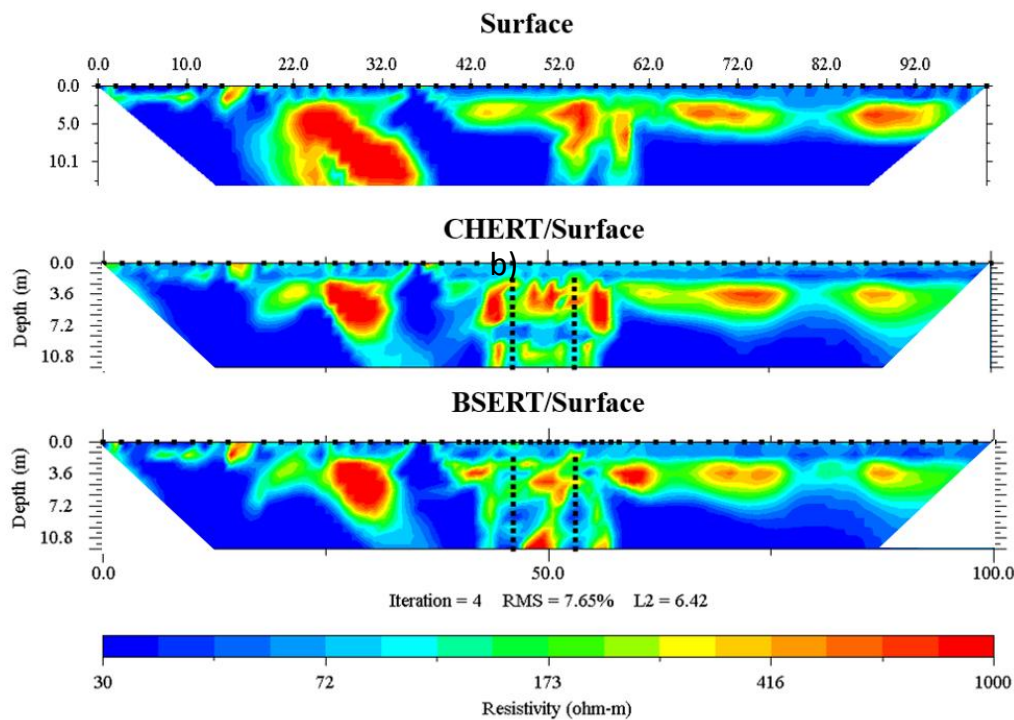


圖 29 現地資料聯合反演的成果: (a)Surface; (b)CHERT+ Surface
(c)BSERT+ Surface

5.1.2.3 跨孔鏡像效應潛在問題延伸檢討

為了確認電阻率異常區在側線外側或在側線內側在進行 CHERT 量測時是否會有不同程度的鏡像效應發生，本研究利用數值模擬來進行進一步檢討。模型設立如圖 30 所示，與圖 22 的模型設定大致相同，但將左側異常區移至跨孔內側。在 CHERT 量測序列上，先採用會發生鏡像效應的 TP 序列和 Bipole-Bipole 序列進行施測，其結果如圖 31 所示，可以看到兩個序列皆有明顯的鏡像效應出現，相較先前的結果，圖 31 的結果所呈現出的鏡像效影顯得更為明顯。圖 32 為基於圖 30 所設定的模型但去除掉跨孔外側電阻率異常區的模擬結果，其量測背景較為單純，可以看到在不會產生鏡像效應的 AB-MN 序列確實沒有出現映射現象，而 Bipole-Bipole 序列與 A-MNB 序列則有鏡像效應發生。因此可推斷在進行 CHERT 量測時，電阻率異常區在測線之間與跨孔外側在相同序列下所造成的鏡像效應嚴重程度有所不同，在兩孔之間對於外側的鏡像效應較為嚴重，爾後在進行現地施測時可能要考慮此問題對資料判釋的影響。

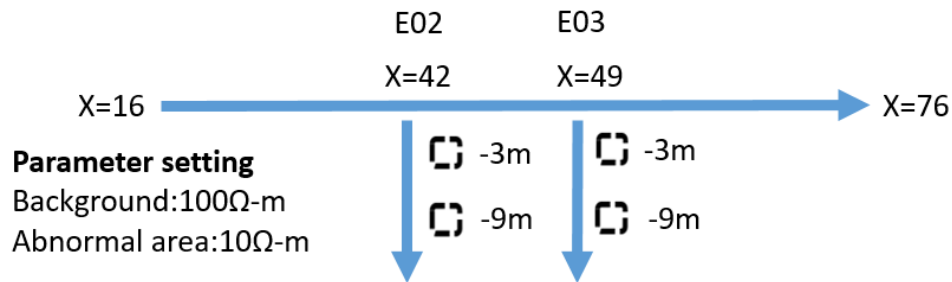


圖 30 模型基本設定

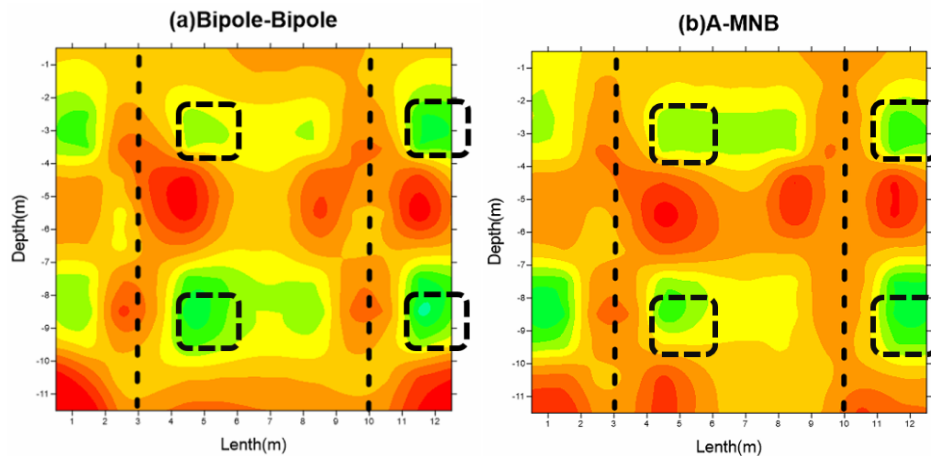


圖 31 在測線之間測線外側皆有電阻率異常區之模擬結果(a)Bipole-Bipole 序列、(b)TP 序列

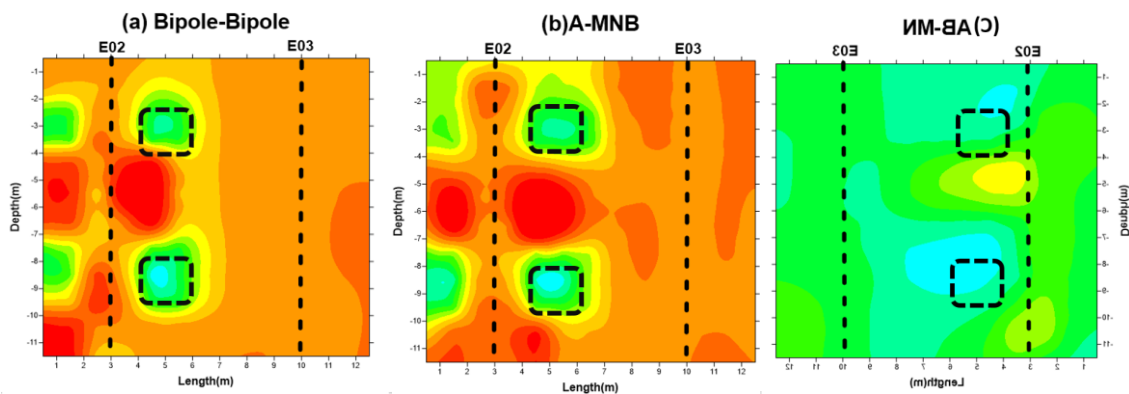


圖 32 僅測線之間有電阻率異常區之模擬結果(a)Bipole-Bipole 序列、(b)TP 序列、(c)AB-MN 序列



5.1.3 結合井測現地施測與分析方法建議

基於第一年於模場現地施作經驗以及第二年補充延伸探討總結，本研究提出初步結合井測現地施測作業方法的建議如下：

- (1) Step1: 在欲調查之區域先進行單孔指向性施測，建議使用地表有兩固定電極之 AM-NB 序列，較能兼顧指向性與解析度，做為二維電探後續佈線的參考依據。
- (2) Step2: 根據單孔指向性結果進行初步地表 ERT 施測，建議使用兩種不同序列施作，並搭配鑽孔資料為調查場址提供一初步的地層概況。
- (3) Step3: 在靠近地表測線中心進行額外鑽孔進行地對孔與跨孔施測，在地對孔方面，需要同時收錄 AB-MN 與 A-MNB 序列，評估其 IOS 值，根據其 IOS 值大小選擇較優的資料組合後進行聯合反演，在跨孔施測方面，資料分析時需要使用 Extended Model 給予其合理的邊界條件進行反算。
- (4) Step4: 分別將地對孔與跨孔的結果與地表資料聯合反演，將兩種結果互相比較並搭配上上述探測結果與現地鑽孔資料進行判釋，以達到更合理的調查結果。

5.2 應用孔內地電阻影像探測法模場高潛勢區監測工作

5.2.1 模場場址背景概述

本研究計畫延續第一年選定之模場場址（圖 33）位於桃園市平鎮區延平路三段 411 巷附近，環保署於民國 99 年「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫（二期）」查證發現地下水三氯乙烯（TCE）已超過第二類地下水污染管制標準（0.05 mg/L）。但其中 1 處 TCE 污染超標區位於廠區北側邊界（上游），為釐清污染來源，地方環境保護局於執行「地下水含氯場址污染來源鑑識及公告範圍界定計畫」調查結果指出，廠內南側 1 口監測井的地下水 TCE 濃度超標，上游北側廠外另有 2 口 TCE 超標井，顯示有兩個污染團存在，經 TCE 之 $\delta^{13}C$ 比對，南、北兩團 TCE 屬不同來源，而下游南側監測井所屬之 TCE 污染團並非受上游北側 TCE 污染團所影響。目前本場址之列管狀態為調查中場址，尚未確認污染行為人。相關調查證據指



出最高污染區域位於廠區北側，北側廠區外應有污染團持續的流入，並向下游廠內移動，研判本場址北側之污染來源可能與廠外污染團有關。為阻絕污染持續擴散至廠內，廠方已於廠區內北側周界區域設置5口抽水井，設置水力控制系統，抽水系統皆由專管導引至污水前處理設備進行化學氧化前處理，待前處理完成後再導入污水處理廠進行後續處理。

目前監控水力控制系統之操作參數主要透過水位變化與水量資料，實際地下水捕獲區範圍（Capture Zone）或地下水流受地質變化的影響（如主要水流移動區域或水流可能受阻礙區域）並無其他科學方法進行監測，因此擬基於前述所完成之結合井測之高解析電法應用於本模場區域，設置大數據高解析井測即時監測系統，監控抽水井水力控制系統之攔截成效，作為現場改善成效評估參考依據之一。

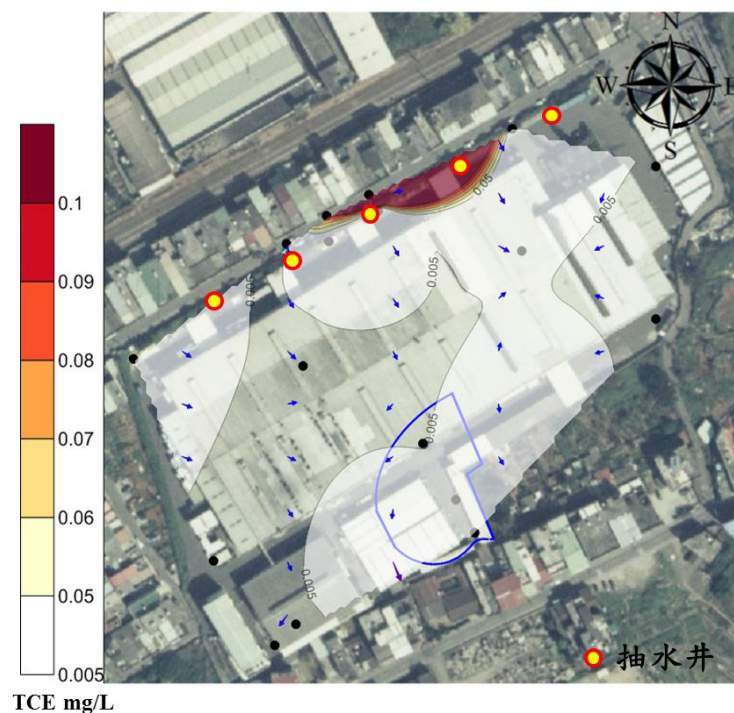


圖 33 本計畫擬定現地模場位置圖



5.2.2 模場高潛勢區監測規劃

因污染在地下水中的移動是較難以掌握的，尤其當地層具異質異向性高，或深層地下水污染，這類型場地在整治過程中就會面臨許多盲點與困境，尤其是無法確定藥劑是否能廣布至預期範圍，若注入之藥劑無法成功與污染物混合產生作用，則場地整治將難以達到具體效果，甚至流於消極的「pumping forever」處理態度。本研究於現場建議一套電阻率動態監測系統，建置一套大數據資料庫，每天進行量測，最初訊號成果為背景值，比對前後差異，使用 time-lapse 資料差值的資料處理方法分析電性差異百分率(線上調查技術)，藉此評估抽水井是否符合設計，同時分析是否有遺漏未處理之疑似污染潛勢區。並透過既設與新設井增加電阻率井內調查技術，將能讓井的使用效益大幅提升，特別是跨孔式地電阻影像法，具備高解析度成像能力，且系能擴及「面」至「體」的探勘技術，密集 time-lapse 探測成果之差異分析，能呈現類 4D 的動態影像成果，且由於井的位置是固定不變，若能在設井同時將跨孔式電極設備一同建立于井內，則跨孔式地電阻影像法即可探測固定兩井甚至多口井間的電性變化，在過程中的持續調查，將能藉由材料的電性變化，評析流向與分佈範圍，若改變空間不如預期時，可立即採樣分析驗證，適時修正修復規劃，特別系針對環境複雜且地下水污染深度較深的場地，以地球物理調查結果，更能較為直接分析地下傳輸現象，對於傳輸模式的建立與推估，將有所幫助。因應未來政策走向及發展，大型或大範圍地下水污染場地可能採取風險評估與長期地下水管理方式，此時地下水監測將扮演重要角色，然地下水分析時間較長，且採樣時間間隔必須適當控制，間隔太短耗費金錢，間隔太長失去監測的意義，而監測井地下水分析畢竟為「點」的調查，兩監測井間的現況缺乏直接或間接的評估，此時地球物理探勘技術或可藉由定期的地表及井內調查提供間接之證據，提出預警建議採樣時機。而地球物理遠端控制調查技術已是國際地物界與儀器商發展的趨勢，有許多純熟有效的文獻提出，本團隊近年來持續致力此項研究，並鑽研提升自動化資料處理之品質，將於本計畫建置一套即時監測遠端自動化電性監控系統，並研析本土化設計應用之適當時機與方式，而此技術將來可以發展甚可達到接近「real-time」即時成果展現，或能使長期地下水風險管理得到更多資訊以利提出預警與做出決策。



本研究應用於模場之監測規劃基於大數據監測線上系統，如圖 34 所示，主要由如下模組構成：

- (a) 本團隊自主發展地電阻影像探測模組
- (b) 地表電極與孔內電極
- (c) Geomornitor 控制器
- (d) 電源模組
- (e) Geo Cloud 雲伺服器
- (f) 用戶端軟體

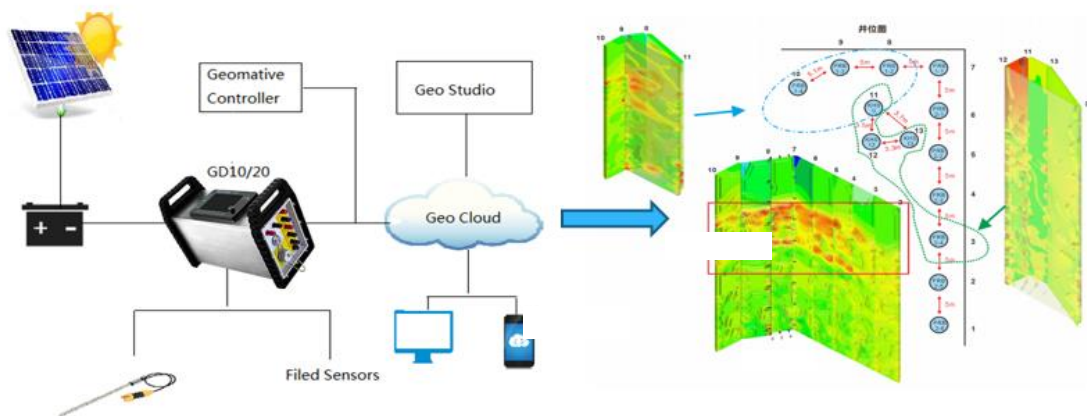


圖 34 大數據監測線上系統示意圖

5.2.2.1 模場高潛勢區設井配置

文獻相關調查證據指出北側廠區外應有污染團持續的流入，並向下游廠內移動，研判本場址北側之污染來源可能與廠外污染團有關。為阻絕污染持續擴散至廠內，廠方已於廠區內北側周界區域設置 5 口抽水井，設置水力控制系統，抽水系統皆由專管導引至污水前處理設備進行化學氧化前處理，待前處理完成後再導入污水處理廠進行後續處理。目前監控水力控制系統之操作參數主要透過水位變化與水量資料，實際地下水捕獲區範圍 (Capture Zone)



或地下水流受地質變化的影響(如主要水流移動區域或水流可能受阻礙區域)並無其他科學方法進行監測，因此本團隊將於本模場北側設置大數據高解析井測即時監測系統，監控抽水井水力控制系統之攔截成效，作為現場改善成效評估參考依據之一。

本模場於第二年工作目前已針對北側有汙染潛勢區完成設置四口新設地球物理監測井，設置位置接近台鈴採樣與監測井附近，如圖 35 所示。目前工作進度已完成監測井之設置，相關設井過程如圖 36 所示。

如圖 35(b)，本次調查位置位於廠區北側，所以右下角為廠區北側調查區域放大圖。地下水流方向為由北向南，圖中紅色圓點為抽水井，其上游有一黃點監測井 MW1，下游側也有一監測井 MW2，主要研究區域為抽水井下游。根據 108 年 12 月地下水檢測結果，MW1(廠內)與 MW2(廠外)三氯乙烯濃度均超標，濃度超過 0.12ppm。代表抽水井攔截成效不佳，且今年七月整治方會在抽水井下游道路設置生物阻隔牆，所以本研究於生物阻隔牆上游與下游設置各兩口多功能地物井，除了可以做地球物理井測外，也可以作為標準監測井使用。目的除了監測抽水井水力控制系統之攔截成效外，今年增加監測生物阻隔牆整治成效。本兩年計畫研究目的在既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。

關於井孔與電極之配合應用，基於第一年之驗證結果可知當開篩孔放寬至 1mm 時所測得之電阻率即相當貼近無開篩關阻擋之結果，而標準開篩管對於孔內施測可能造成資料靈敏度降低之疑慮，因此本監測井採用開篩寬度至 1mm 之井管。此外，於電極應用配置部分，當結合井測於井孔內放置電極進行地電阻施作的方式一般可區分為三類：(1) 裸孔施測方式：利用新設井完成後，將智慧型電極纜線置於孔內，進行施測，電極可重複使用；(2) 將電極預先固定至套管外圍，隨著鑽探進度設置井中，此種方法電極不回收，屬單次使用耗材；(3) 將套管全開篩，放置纜線電極，施測完成將電極取出，電極可重複使用。此三種方法各有優劣，視現場條件皆有其使用之便利性；裸孔一般而言由於井孔易坍而較少採納；而第二類採用一次性的埋入式電極目前較為常用，其雖可提供長期監測使用，但因須考慮使用材質的抗腐蝕性



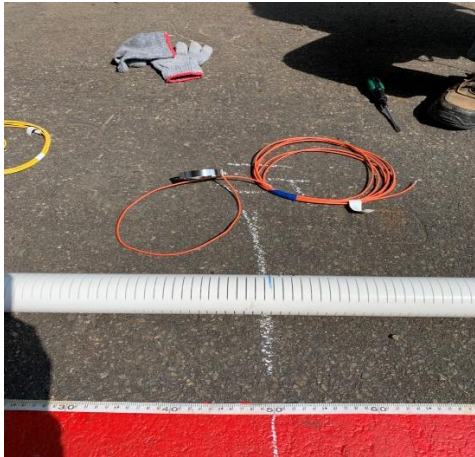
而有耐久性之疑慮且須於井孔設置時即須與井孔共構而有使用上之限制且無法更換。有鑑於此，第三類採納全開篩套管而於其中放置纜線電極之施作方式仍為重要的實務應用選項。所以本研究進行第三類「可移動式井測之高精度電法即時監測技術」與第二類「傳統幫線電井測」進行比對，所以設井方式略微不同。



(a) 場區配置



第五章 結果與討論

	
A. 試挖 1.5 公尺確認管線	B. 選擇 1mm 篩管
	
C. 選擇美製不鏽鋼套環與多芯線	D. 將孔內電極放置適當位置
	



E.本研究孔內電極間距為 0.5 米	F.由-1 米至-12 米設置電極
	
G.設井後將電極與套管置入井中	H.完成設置地物電測井

圖 36 電測井設置過程

5.2.2.2 模場高潛勢區監測規劃說明

5.2.2.2.1 監測方法

模場高潛勢區監測並配合模場方整治時程與現場工作要求，所以本計畫於五月中完成設井工作。配合整治方開始進行現地資料量測，目的是連續監測，每次至少量測一組資料。基於井測高解析電法之成果進行監測，設計 CHERT (跨孔量測法)：兩口地物井進行聯合探測，上游與下游各量測一次，即 TL1 號井與 TL3 號井一組；TL2 號井與 TL4 號井一組進行跨孔量測。

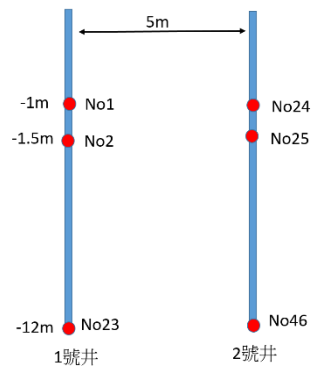


圖 37 模場 CHERT 配置

5.2.2.2.2 監測系統

本研究在線上監測系統如圖 38 所示。它以直流電法主機為核心，基於 GeoCloud 雲平臺 4G 上網，融合網路通訊、孔內電極，對地下環境提供線上即時監測。系統能將孔內電極所量測到的視電阻率資料綜合起來，通過長時間連續觀測，進行 Time-lapse 的分析，從而能夠洞察地下環境的演變。

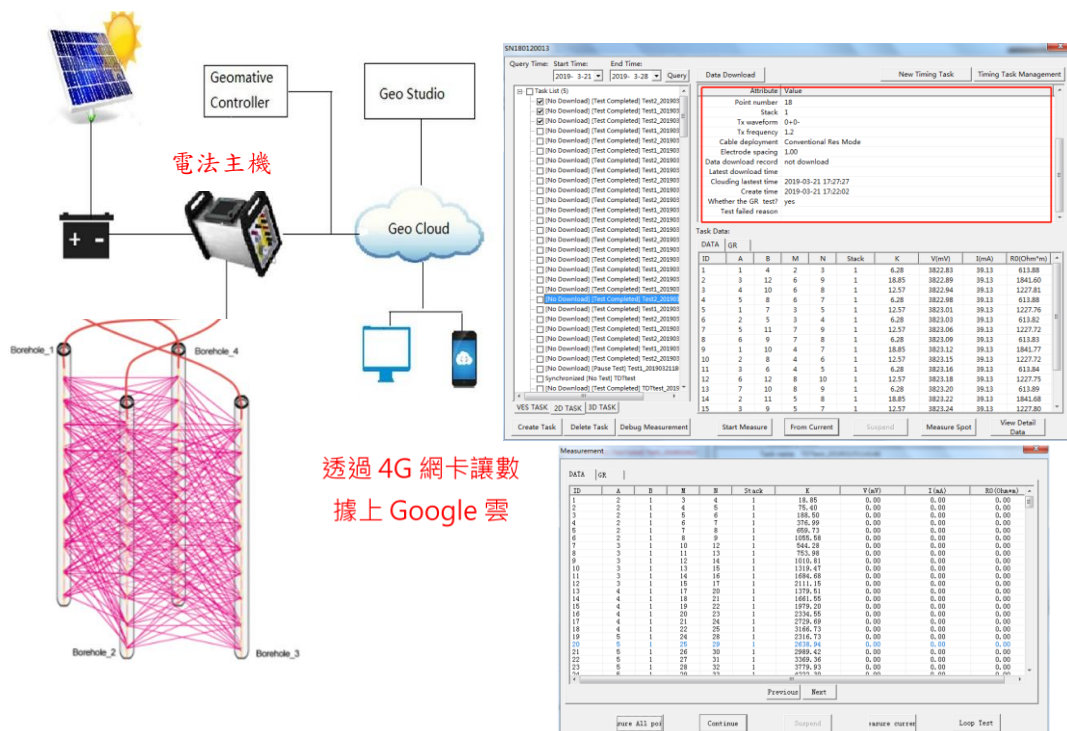


圖 38 監測線上系統配置圖



5.2.2.2.3 現地模場工作與成果說明

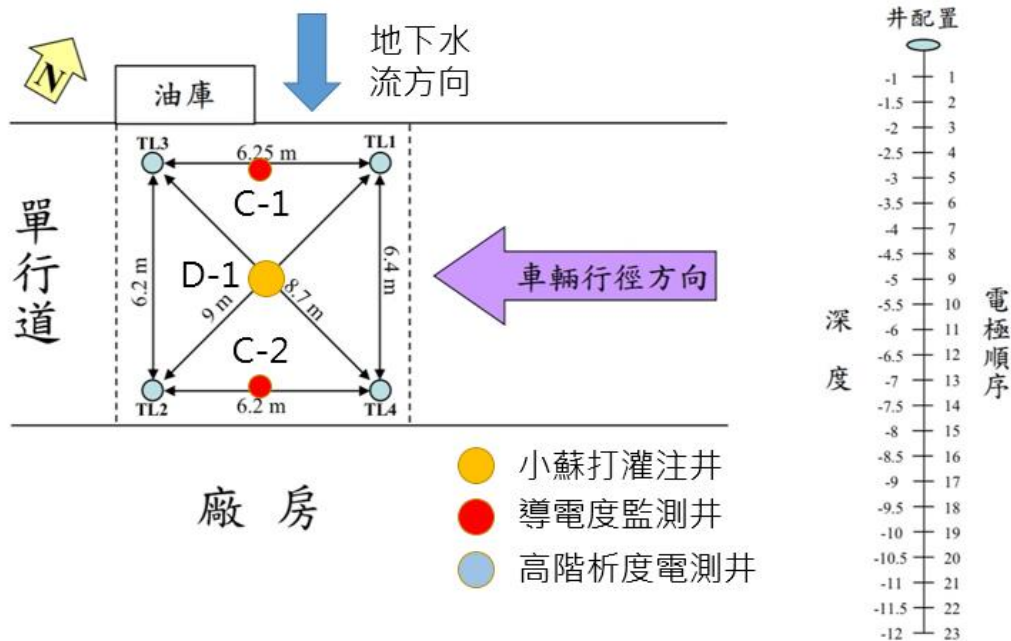


圖 39 模場實驗配置圖

圖 39 為本次模場現地工作配置示意圖，其中淺藍色為本次高解析度電測監測井，總共配置四口，目的是在上下游各監測一個跨孔成果，每口井配置 23 個電極，第一個電極從地下 1 公尺開始配置，電極間距 0.5 公尺，井底為 12 公尺，電極編號為第 23 個。因為今年並無颱風與相關降雨，所以地下水位面較低，水位面約 2.7 公尺，所以這次現地模場試驗，移除 1、2、3 與 4 四根電極，監測深度為地下 3 公尺至 12 公尺，電極數量減為 19 根電極。

由於整治方預計改變地下環境酸鹼值，規劃灌注小蘇打，現地地質屬於紅土礫石層，0-11.5 公尺主要為礫石夾砂，11.5-12 公尺即監測井底部有一層紅棕色的黏土。所以本研究增加設置圖 39 中間橘色灌藥井(D-1)，預計灌注 150 公斤小蘇打。相關設計如下所示：灌注桶每桶 500 公升，每桶加入 25 公斤小蘇打，形成 5%濃度的小蘇打示蹤劑。使用重力式灌注方法，總共灌注 6 桶，每桶灌注時間為 45 分鐘，灌注深度為地下 3.5 公尺。除了透過高解析度井測外，還在上下游個建立一個導電度監測井，如圖 39 中紅色監測井(C-1 與

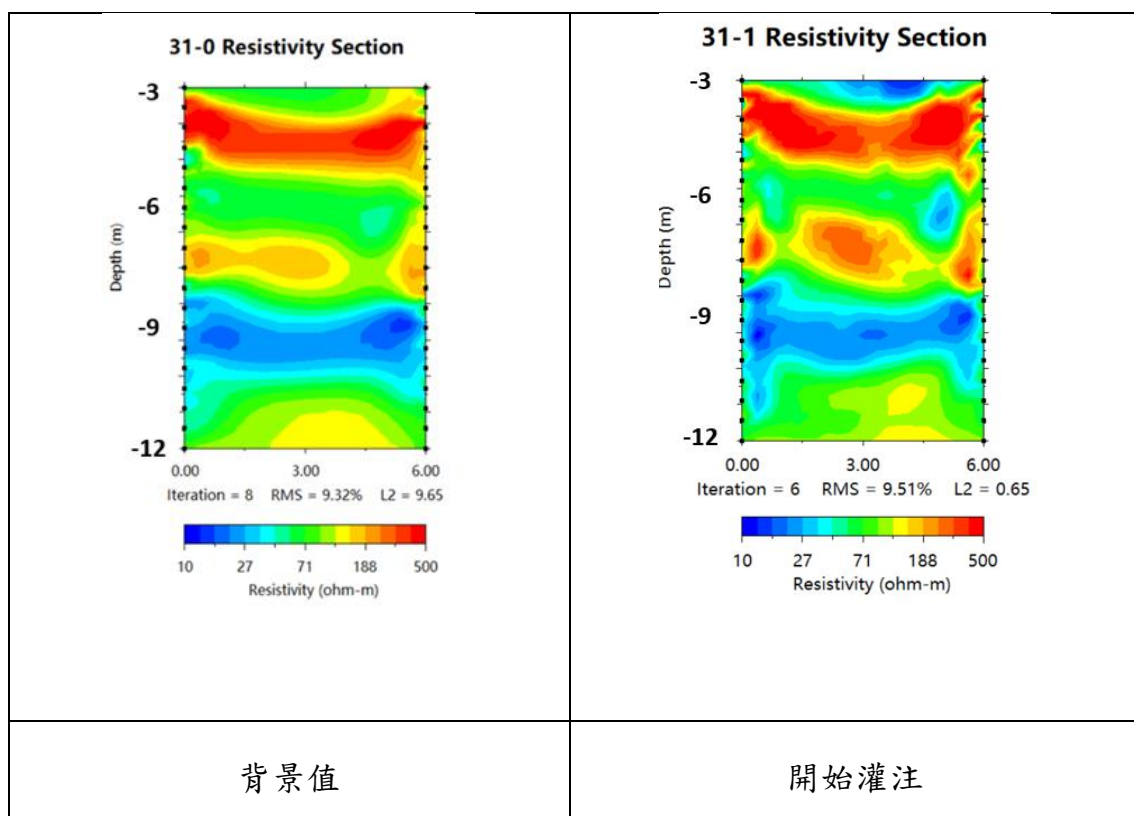


C-2)，監測小蘇打溶液到達時間。

這次大數據監測系統總共分為兩個階段：第一階段為小蘇打灌注監測，上下游兩個斷面各監測 7 次，總共監測 6 個小時。第二階段監測上游斷面 10 天。第一階段監測目的是釐清地下水流方向，與高解析度量測法是否可以監測並捕捉低濃度小蘇打溶液的變化。第二階段監測改為上游測的原因是本模場長期監測井監測結果，上游有時候會出現三氯乙烯超標現象，所以期望透過上游側時序大數據監測法了解電性地層時序變化，以釐清上游側汙染超標現象。

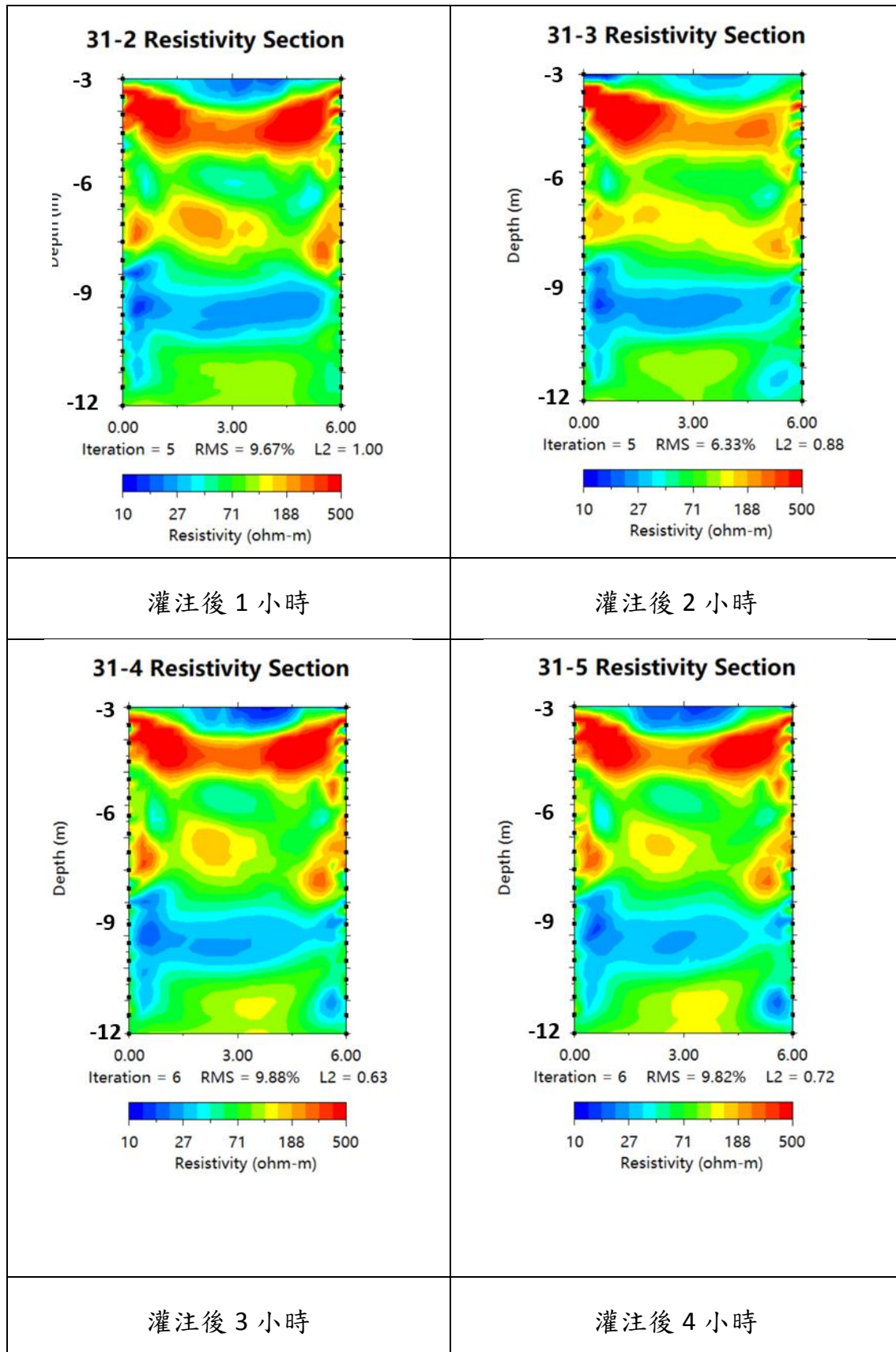
第一階段小蘇打溶液高解析監測井成果：

(a) TL3-TL1 成果(上游側)



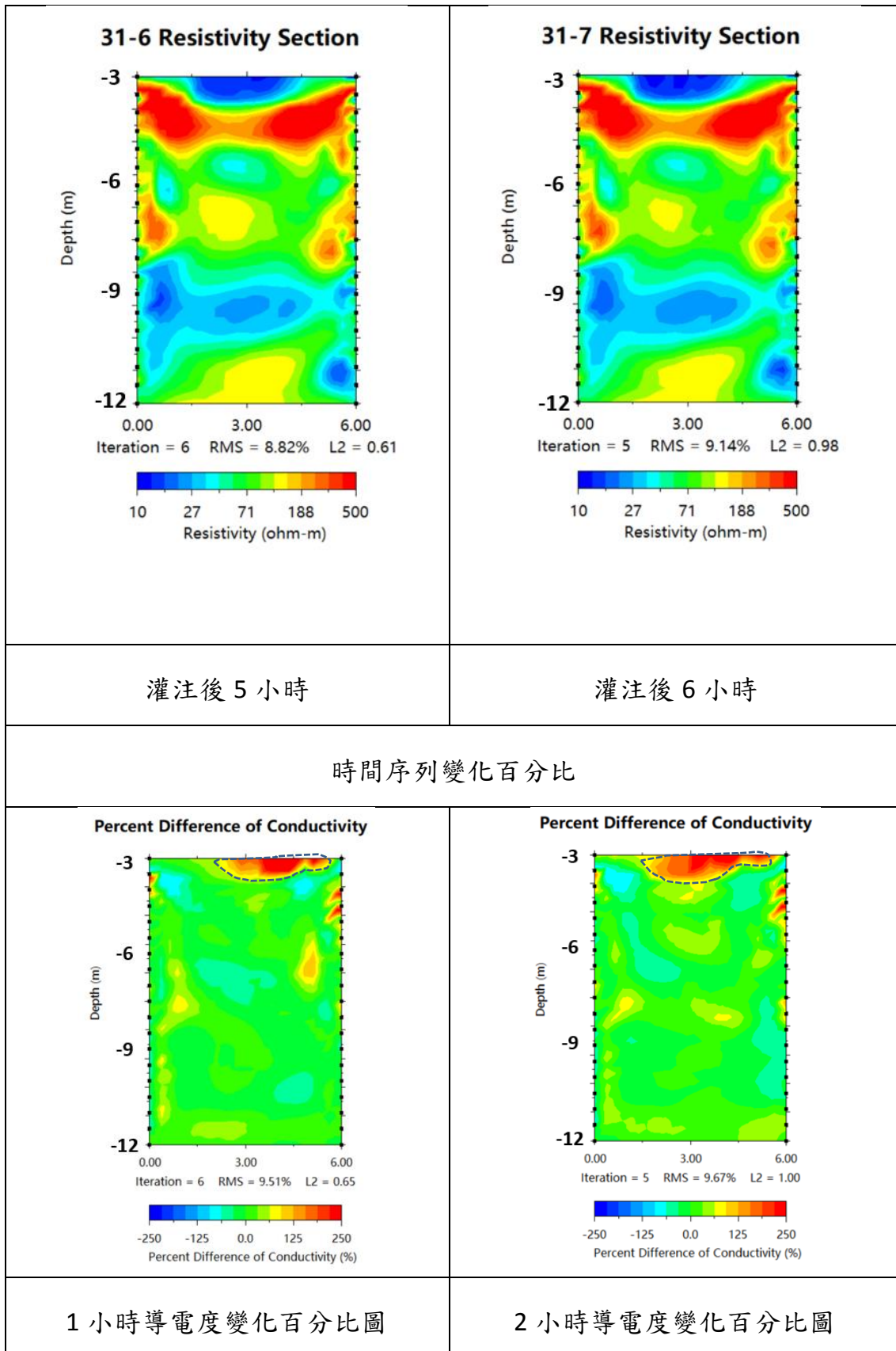


第五章 結果與討論



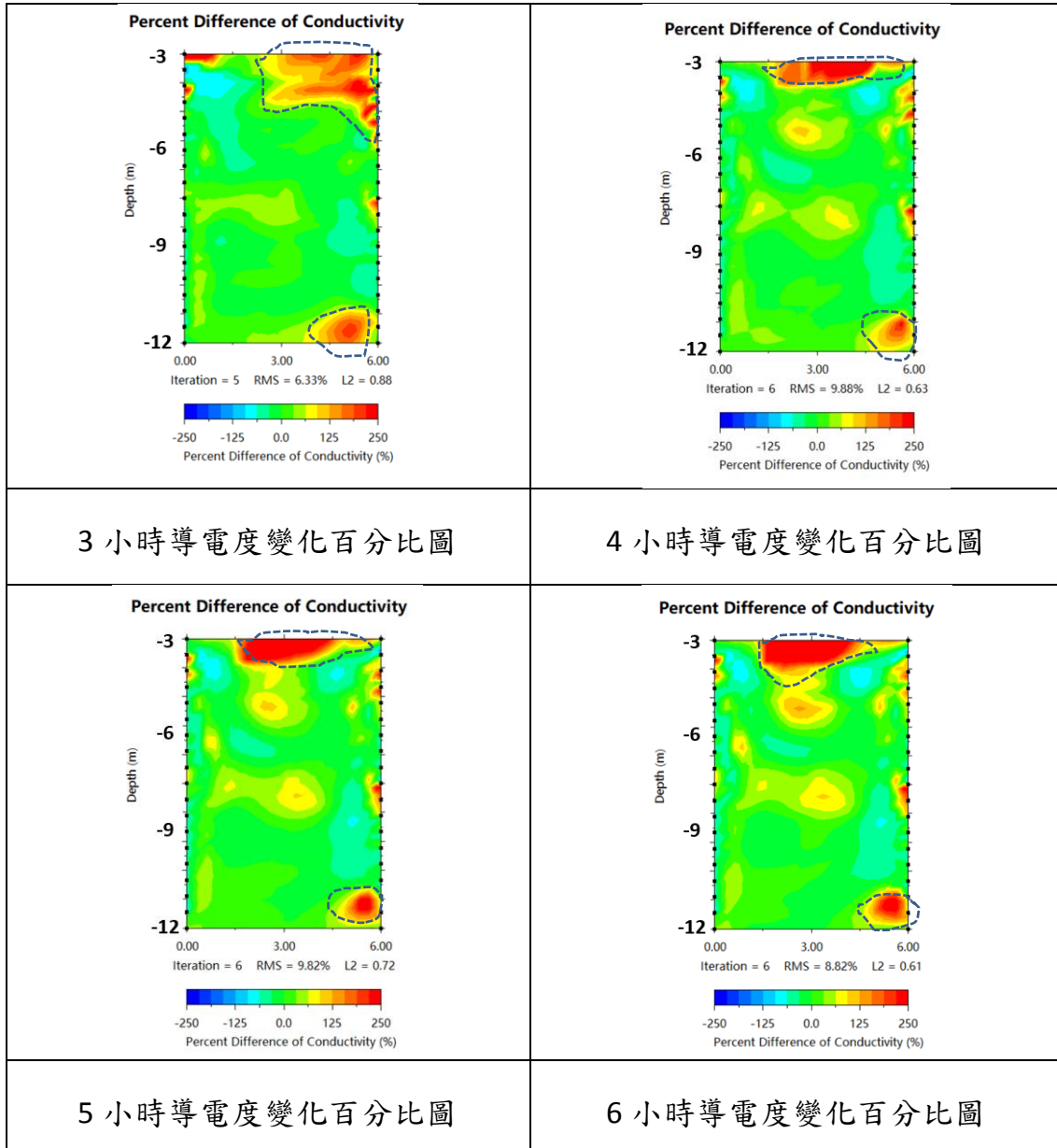


第五章 結果與討論



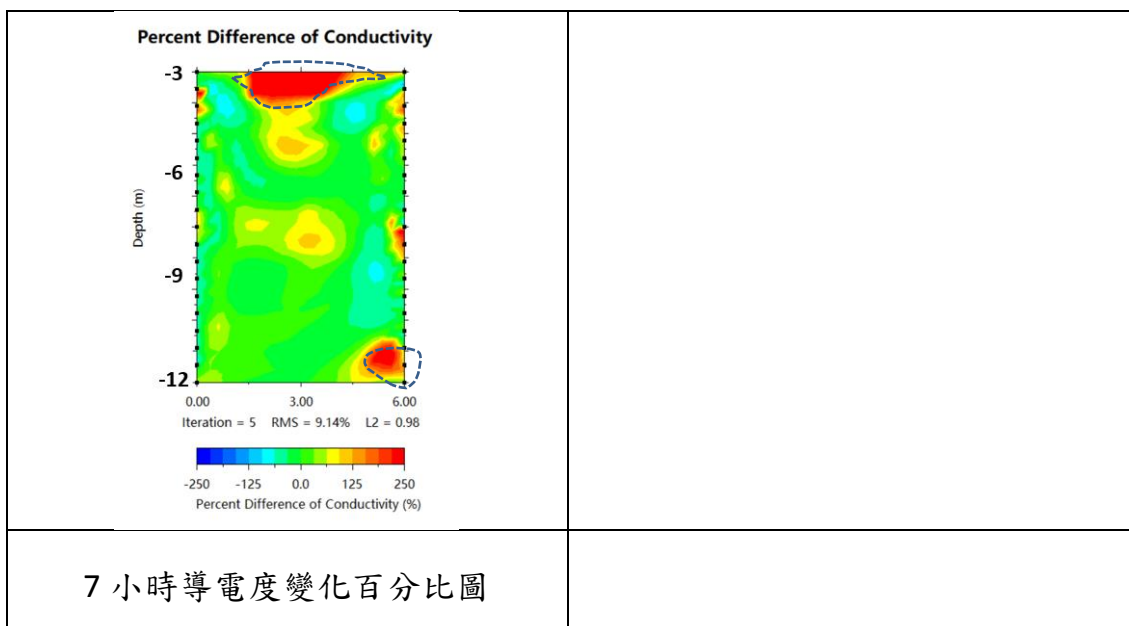


第五章 結果與討論

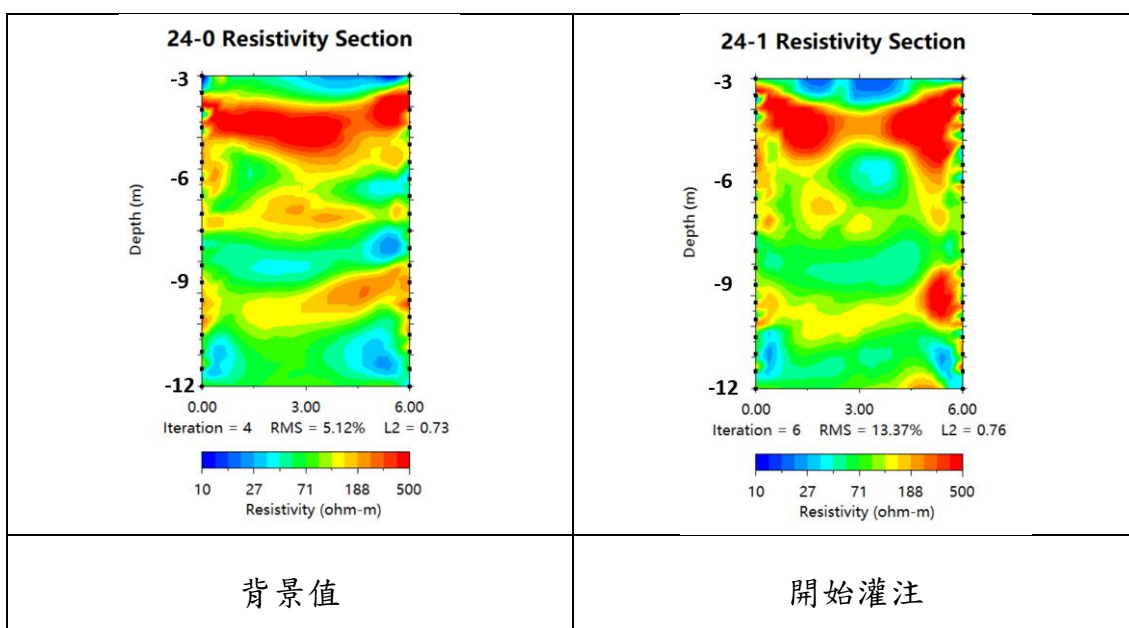




第五章 結果與討論

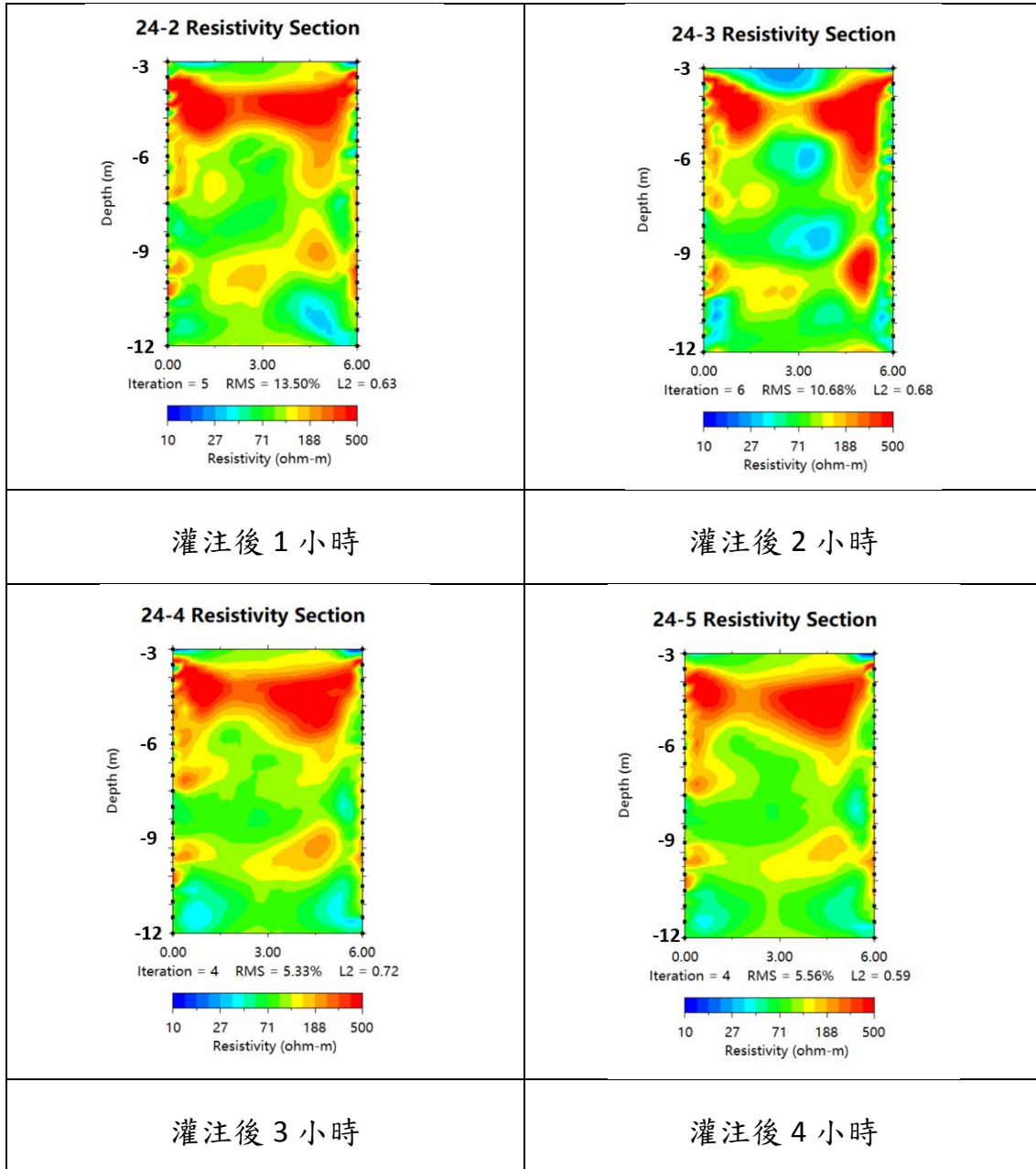


(B)TL2-TL4 成果(下游測)



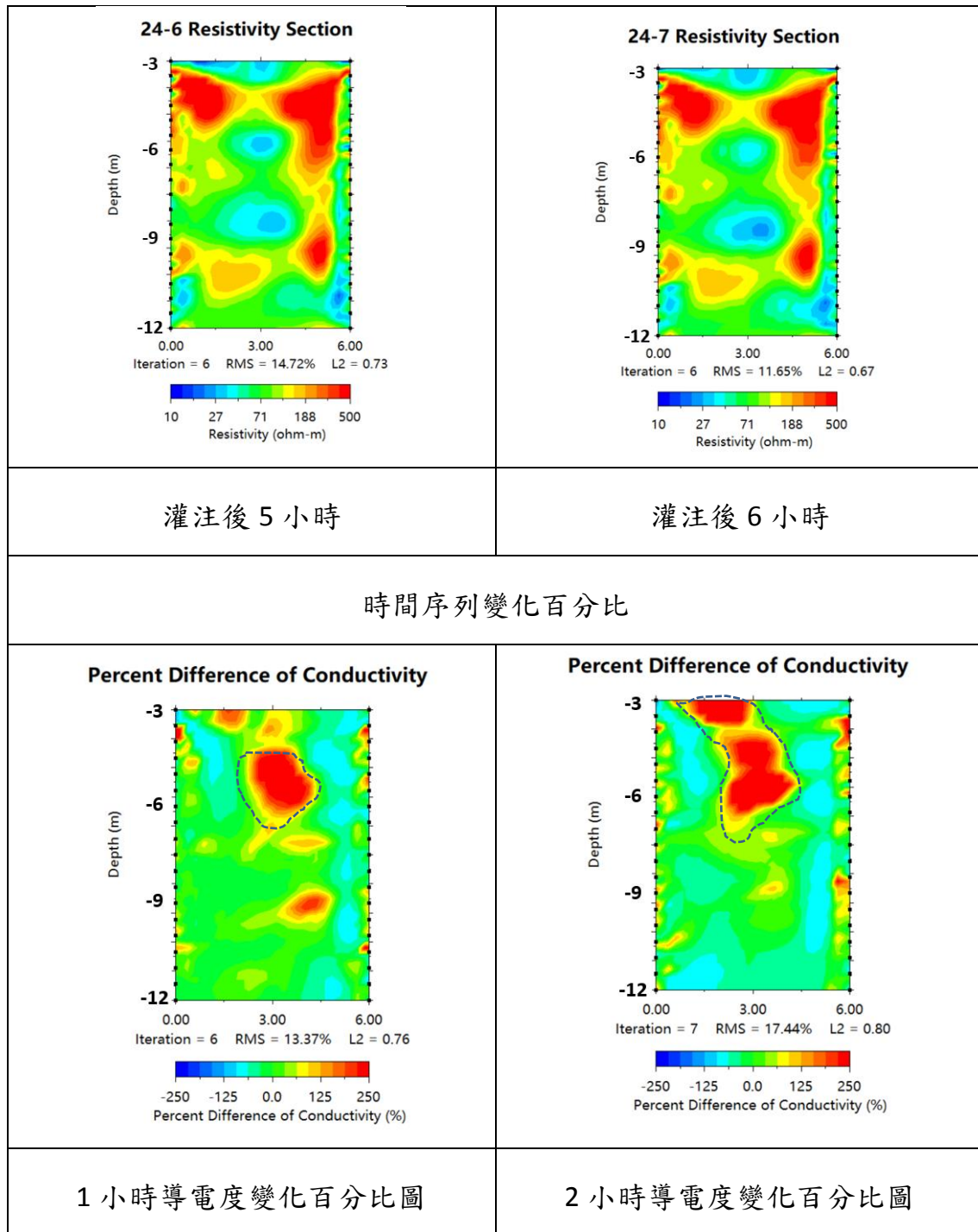


第五章 結果與討論



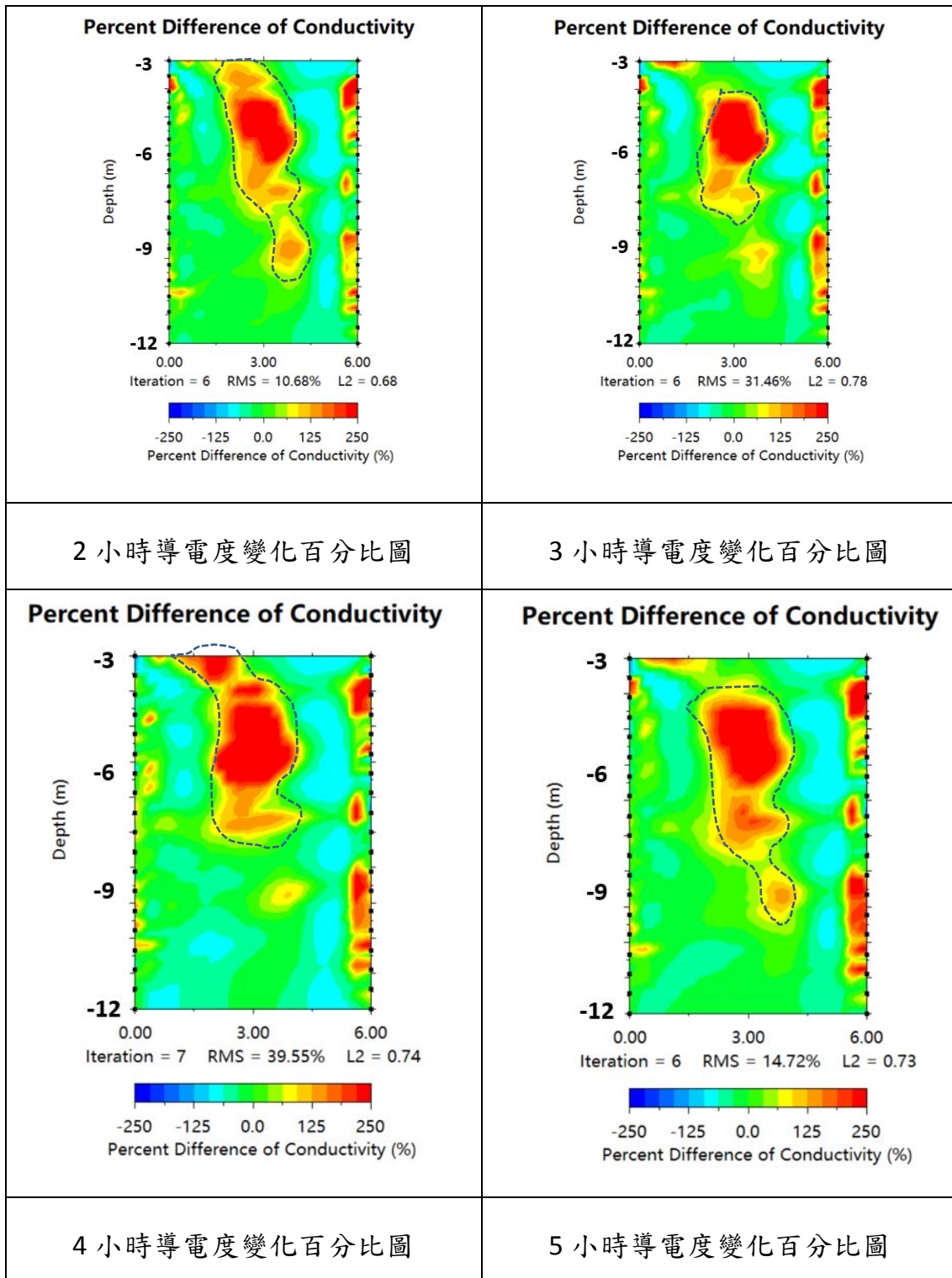


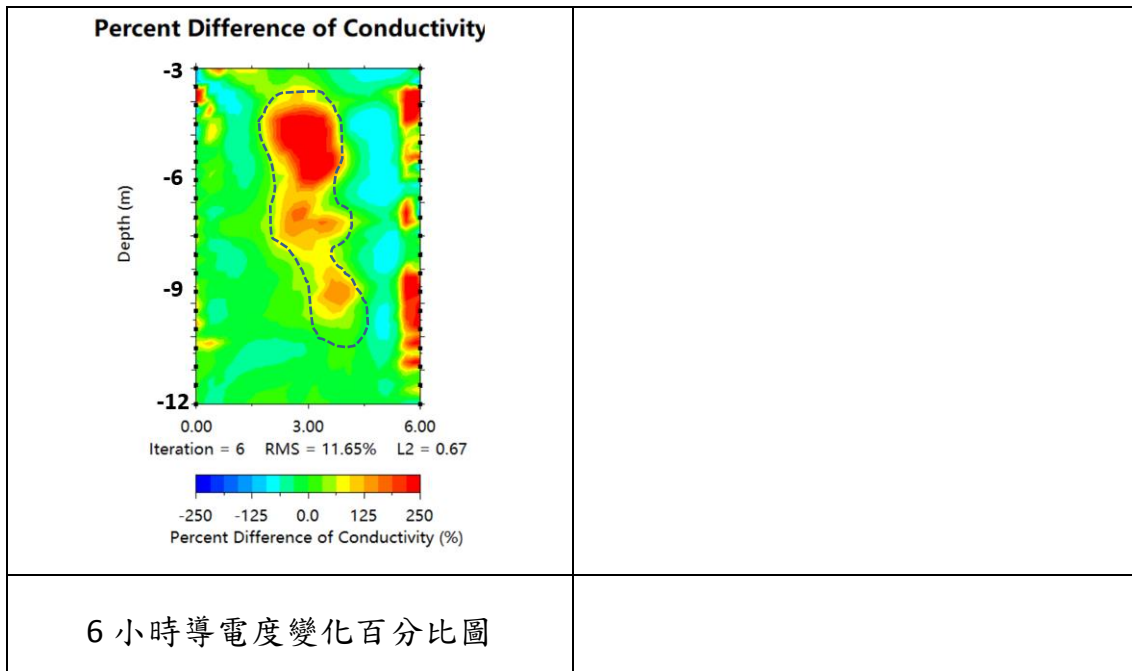
第五章 結果與討論





第五章 結果與討論





綜合兩跨孔資料，很清楚描繪出大範圍地下水流方向為西北往東南方向流動，所以 TL2-TL4 成果很明顯在 1 小時後導電度百分比在兩跨孔間即出現明顯的導電度變化，深度從 3 公尺開始變化，且高導電度包慢慢往深度擴散，2 小時後已擴散到 6 公尺以上，最深超過 10 公尺。反而上游側 TL3-TL1 成果，則無明顯導電度變化，僅淺部 3-3.5 公尺地下水位面附近出現導電度有升高趨勢，推測與濃度擴散有關，而深度電性地層並無明顯出現導電度變化之趨勢。唯一特別地方在 3 小時後，TL1 深部 12 公尺處出現導電度升高 2.5 倍以上，此現象與污染濃度超標位置與深度非常吻合。

需進一步釐清此處變化趨勢，所以大數據監測系統於 TL3-TL1 兩口井進行長期監測。相關監測結果如下說明：

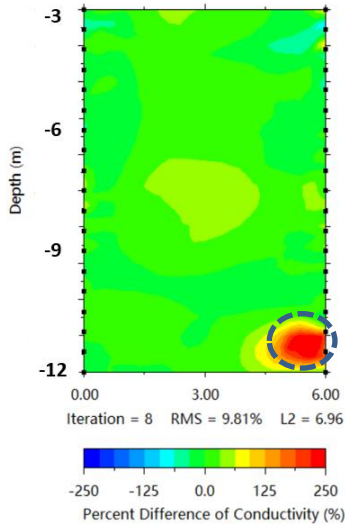
根據 9 天連續量測結果，主要異常位置為 TL1 深部 12 公尺，此異常導電度變化愈來愈小，第九天後幾乎快變成背景值。



第五章 結果與討論

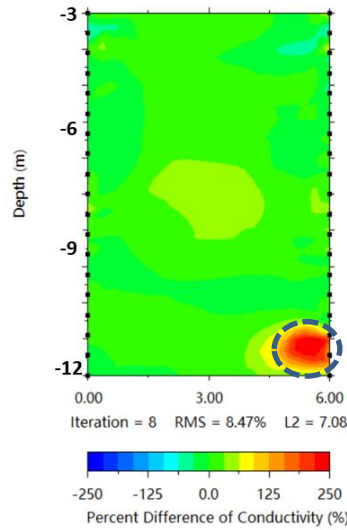
1 天後導電度百分比

Percent Difference of Conductivity



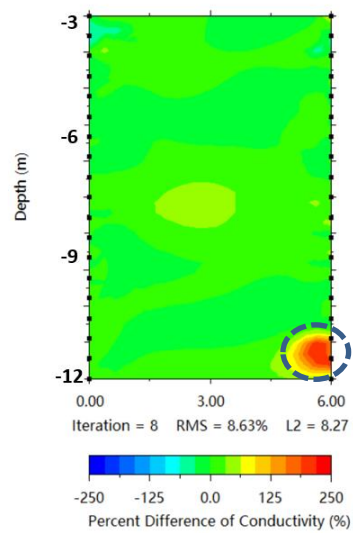
2 天後導電度百分比

Percent Difference of Conductivity



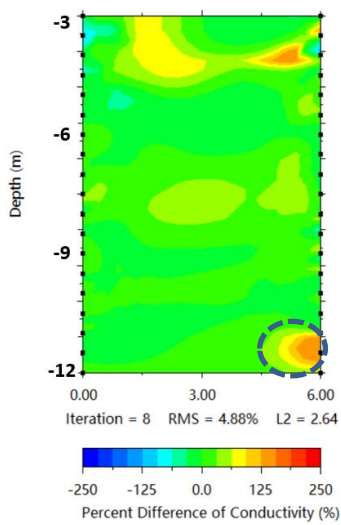
3 天後導電度百分比

Percent Difference of Conductivity



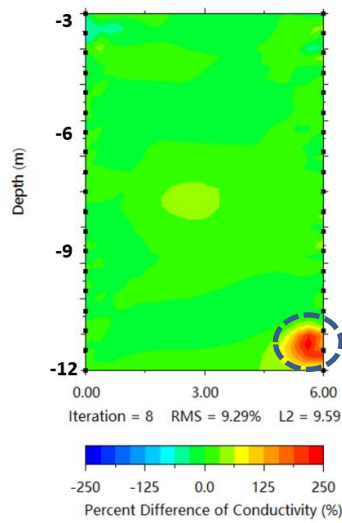
4 天後導電度百分比

Percent Difference of Conductivity



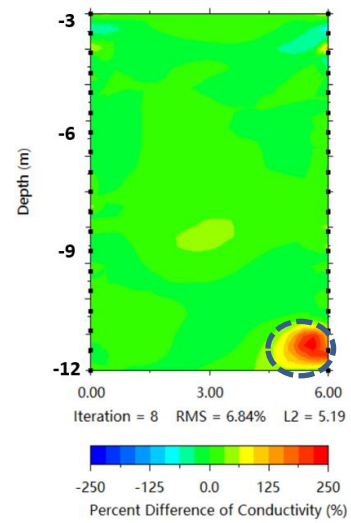
5 天後導電度百分比

Percent Difference of Conductivity



6 天後導電度百分比

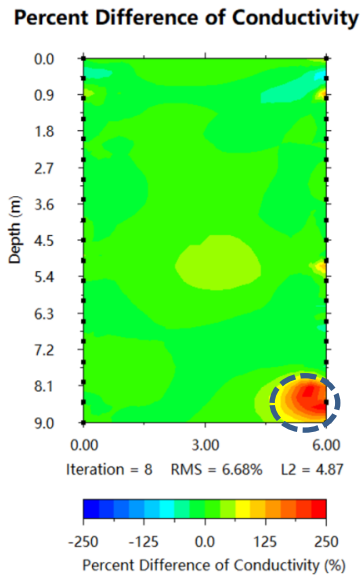
Percent Difference of Conductivity



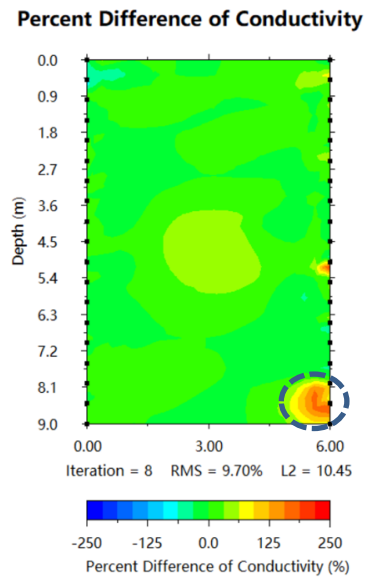


第五章 結果與討論

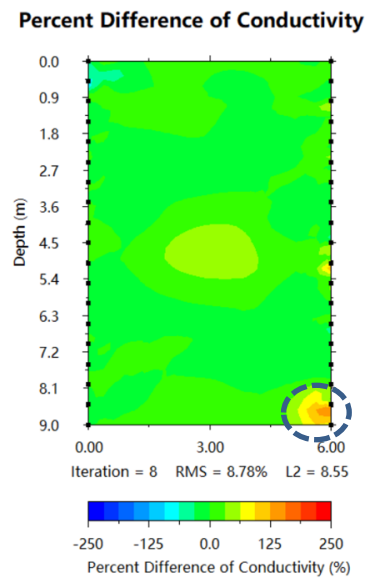
7 天後導電度百分比



8 天後導電度百分比



9 天後導電度百分比





第六章 成果說明與結論

本兩年計畫研究目的在既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。第一年已完成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，第二年重點放在提升汙染物或藥劑整治之監測工作，期望透過最新的時間序列監測方法進行模場高潛勢區監測工作。基於第一年研究所評析具可行性，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，於模場區域進行時間序列量測，監控抽水井水力控制系統之攔截成效與即時監測汙染擴散導致地層電性變化。

本研究完成工作成果包括：

- (1) 藉由數值模擬探討開篩管開口寬度於實務應用對於量測造成之影響，以增加實作可行性與增進高解析度量測之目標。並透過現地不同篩管開口寬度地物井與傳統綁線地物井進行比較。透過本研究發展孔內電極量測法，未來可取代一次性孔內綁線方式，增加現地監測井多功能性。並建立結合井測現場實務應用評估，包括孔內電極之有效性與建議開篩管於模場應用適切性。
- (2) 針對改善井孔施測限制資料分析方法之精進，傳統一次性井測成果與0.1mm 開篩管可移動式電極成果相符合。並評估納入跨孔區域外拓展模型分析方法之成效，得到較佳之拓展分析範圍。
- (3) 地對孔實場成果中應用 Combined data inversion 進行資料組合時主要是依據各序列所對應的 IOS 值，在組合資料時除了要考慮該序列抵抗鏡像效應的能力外，還需考慮該序列之靈敏度問題，根據初步結果，使用 Combined data inversion 在現地 T 字型測線的收錄上有顯著的改善資料品質。研究成果顯示孔對地 T 字形成果，並進行 Combined data inversion 時加入地表的資料，應能解決靠近地表感應盲區的問題。此外單純地表施



測時解析度會隨著深度下降，往往異常區出現在深處時，因反算網格變大而被放大。本研究顯示孔對地 T 字型法成果確保鏡像效應地去除後，可以真實反應出深部異常區的大小，對於整治方可精準描繪出異常區大小，進而減少整治所需的藥劑費用。

- (4) 本監測技術主要藥劑擴散與污染物擴散兩個目標。本研究方法期望建立最佳化的電極排與施測方式，針對不同的目標建立不同的電極排列法與施測模式(跨孔等施模式)，達到高解析度電法優勢。其中最佳化電極排列法在第二年度完成成果目標，目前最佳化電極排列法在實驗室透過數模進行排列組合與第二年大數據監測進行優化，得到現地立即可以使用的最佳化電極排列法。
- (5) 資料處理時使用 Extended Model 對於現地資料的判讀應有一定的幫助，畢竟孔對孔施測在測線的外側仍有靈敏度存在，且在使用 Extended Model 後垂直電性變化與地對孔結果較為接近。此外，結果中沒有明顯的鏡像效應現象發生，但鏡像效應影響並不一定是能從圖中明顯看出，更多的可能是反映在影響電阻率的高低上，因此未來在現地孔對孔資料處理時建議使用 Extended Model 來做分析並謹慎評估其異常區的電阻值。再透過現地模場時間序列量測方法，依訊號評估污染物是否移入，污染是仍有擴散之疑慮，並以初期訊號成果為背景值，比對前後差異，藉 time-lapse(時間序列)資料差值的資料處理方法分析電性差異百分率，藉此評估現地風險指標，將能藉由材料的電性變化，評析藥劑流向與分布範圍，特別係針對環境複雜且地下水污染深度較深的場址，更能較為直接研判地下傳輸現象，對於傳輸模式的建立與推估，將有所助益。所以本研究透過高解析度時間序列 NOPT 排列法與 Extended Model 處理模式，經由小蘇打示蹤劑試驗成功捕捉到優勢流徑與污染容易匯集區域。

(6) 結合井測高解析電法精進改良

本工作已基於第一年模場試驗成果進行綜合歸納與檢討結合井測高解析電法分析方法，並進一步利用簡化模場數值模擬進行最佳化分析方法檢討，最後提出結合井測現地施測與分析方法建議。

(7) 應用孔內地電阻影像探測法模場高潛勢區監測工作



已針對北側有污染潛勢區完成設置四口新設地球物理監測井，設置位置接近台鈴採樣與監測井附近，並結合井測之高解析電法完成監測方法擬定以及監測系統配置規劃。延續上述成果，進行之工作為模場高潛勢區監測，連續監測 10 天，很清楚描繪出地下水流方向，透過高階析度大數據量測法捕捉到優勢流徑，在局部地下水流方向是跟大範圍地下水流不同。

又透過高解析度跨孔地電阻量測法進行模場水力傳導係數 K 值簡單推估，這是因為大數據量測上選擇在示蹤劑灌注前與灌注達穩定後分別各做一次完整的電探量測，藉由小蘇打示蹤劑灌注產生的電阻率變化，並輔以孔內電阻率量測以掌握導電度之时序變化，藉此觀察小蘇打從灌注井抵達監測井的時間作為推估水力傳導係數之依據。利用 Archie's law 中 $F = \rho_o / \rho_w$ (其中 ρ_o 為飽和地層電阻率、 ρ_w 為孔隙水電阻率)，即可獲得地層參數 F 之值介於 15~50 區間，再藉由經驗公式或物理模式的推估進一步推算場址水力傳導係數 K 值。推估本試驗場址 K 值落在 $1.4072 \times 10^{-6} \sim 1.52 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 區間。此成果與場址水文地質試驗吻合。

本研究成果建議推廣在重點工業區邊界、敏感污染區邊界與石化園區邊界設置本模場研發之高解析度大數據監測系統，可以透過每天數次高解析度電性地層差異百分比，建置地下水污染即時監測系統，即時預警地下水污染的發生。



參考文獻

Advanced Geosciences, Inc, 2003. Cross Borehole Electrical Resistivity Tomography (ERT) Measurements.

Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems, 2017. Edited by the Society of the Exploration Geophysicists of Japan, pp.578.

Bellmunt, 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.

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.

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.

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.

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.

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.

Winship, P., Binley, A., Gomez, D., 2006. Flow and transport in the unsaturated Sherwood Sandstone characterization using cross-borehole geophysical methods, Geological Society, London, Special Publications, 263, pp.219-231.



許心蘭(2018)，含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫(第2期)，行政院環境保護署期末報告，財團法人工業技術研究院。

林志平(2018)，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，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-期末報告。

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。

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。



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

109 年度專案成果績效自評表

一、 專案基本資料

填表日期：109 年 12 月 16 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	結合井測之高解析電法於整治場址污染擴散之即時監測技術		
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			
		(2)研討會論文	0	-	0			
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	1	1		100%	相關研究成果，已投稿至是 Journal Applied Geophysics 期刊
		(2)研討會論文	0	-	1		100%	研究成果於 Geophysical aspects of smart cities 研討會發表本期研究成果



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)
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	-	0			
		(2)研究報告	1	-	1		100%	完成結合井 測高解析電 法之現地應 用與評估技 術報告
	4.專著 (本數)		0	-	0			
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	-	0			
		(2)成果發表會	0	-	0			
		(3)論壇	0	-	0			
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	-	1		100%	達成壓抑鏡 像雜訊之反 算方法與電 極排列法
		(2)技術平台	0	-	0			
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	1		100%	培養一位碩 士學生，完 成碩士論文
		(2)博士	0	-	0			
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	-	0			
		(2)跨機構團隊	0	-	0			
		(3)形成研究中 心	0	-	0			
		(4)形成實驗室	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)	已核准	發明	0	-	0			
			新型/設計	0	-	0			
			合計	0	-	0			
		申請中	發明	0	-	0			
			新型/設計	0	-	0			
			合計	0	-	0			
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	-	0			
		授權金(仟元)		0	-	0			
		衍生利益金(仟元)		0	-	0			
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	-	0			
		授權金(仟元)		0	-	0			
		衍生利益金(仟元)		0	-	0			
	4.技術移轉 (應用技術)	件數		0	-	0			
		授權金(仟元)		0	-	0			
		衍生利益金(仟元)		0	-	0			
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		1	-	1		100%	達成可移動式電井測量測纜線研發
		(2)品種/系(件數)		0	-	0			
C 產學研合作	6.促成合作研究	件數		0	-	0			
		金額(仟元)		0	-	0			
	7.促成投資	件數		0	-	0			
		投資金額(仟元)		0	-	0			
	8.促成取得 業界科專	件數		0	-	0			
		業界投資金額(仟元)		0	-	0			
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			
		收入(仟元)	0	-	0			
	2.諮詢服務	次數	0	-	0			
		收入(仟元)	0	-	0			
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策	0	-	0			
		(2)法規	0	-	0			
		(3)規範	0	-	0			
		(4)標準	0	-	0			
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)		0	-	0			
	5.獲得獎項(件數)		0	-	0			
	6.提升能源效率(%)		0	-	0			
	7.節能減碳效率(%)		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 計畫書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	108 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：30
計畫名稱	結合井測之高解析電法於整治場址污染擴散之即時監測技術		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 研發之即時監測技術所使用之設備，設備的操作以及監測數據之解讀，請能系統性的描述，以利參考。 2. 研發之監測技術主要是針對整治的擴散或污染物擴散，請說明清楚或是二者都可適用，但需要不同靈敏度之高解析電法，請能說明。 3. 研發之即時監測技術適用之污染物種類、整治藥劑種類及場地條件，請能說明，並請說明本方法之使用限制。 4. 第一年之成果在摘要中請能予以描述。 5. 第一年已完成透過現場施作參數與分析方法的改善，提升孔內地電阻影像探測成果的成像解析度。 6. 報告 P. 58~59 第二年研究工作概述中，稱「本研究除了增加現地量測解析度外，今年本團隊於模場外潛勢污染區域進行三次高解析度電阻率量測…」，此結果是否為第一年之成果？若是，請移至第一年的成果中描述。		1. 研發即時監測設備為第二年主要工作，會在第二年報告書中詳細介紹設備操作與解讀流程。系統主要由如下模組構成：本團隊自主發展地電阻影像探測模組、地表電極與孔內電、Geomornitor 控制器、電源模組、Geo Could 雲伺服器與用戶端軟體。 2. 本監測技術主要藥劑擴散與污染物擴散兩個目標。本研究期望建立最佳化的電極排與施測方式，針對不同的目標建立不同的電極排列法與施測模式（T 字型或者跨孔等施模式），達到高解析度電法優勢，其中最佳化電極排列法會在第二年計畫中，配合監測設備進行優化。 3. 電法主要為物理性方法，其限制性主要是物性差異不大的材料與場址環境。污染物種類如果與地質環境雷同的場址，便不適用此法；整治藥劑種類如果與地下水雷同便不適用此法，例如某種糖蜜混合藥劑。 4. 謝謝委員指教，會將成果納入摘要中。 5. 謝謝委員肯定與指教	



	6. 第二年工作概述中的成果非本場址結果，目的是凸顯即時監測的重要性，目前國內整治場址在整治完成後，並無即時監測系統，無法即時知悉污染物回彈(rebound)。謝謝委員的指教
委員二： 1. 選擇紅土礫石地層的原因為何？其他類別水文地層可否驗證？ 2. 電阻率量測的污染物敏感度如何？ 3. 本計畫雖歸為整治，但實為監測技術而提供資訊進而提高整治效率。 4. 摘要中且增加說明驗證結果。	1. 選擇紅土礫石地層的原因是在電法探測過程中，紅土礫石層一直是最困難的部分，所以期望透過高解析度電法能夠在污染物物性無法非常凸顯的環境中將污染物的位置描繪出來。本方法於南部細顆粒地層成功驗證成果。 2. 利用電法探測成果研判污染分佈為電學性質(電阻率、導電率、介電常數)之差異，當材料孔隙中的水被高導電度的污染物質侵入甚至替換時，量測電阻率將會明顯降低。電阻率的變化確實可能來自於污染問題，但污染物的濃度與電阻率並沒有可完全轉換的關係式存在，所以需搭配採樣分析進行率定半定量研究。目前針對飽和地層有機物靈敏度最高、土壤重金屬次之、非飽和層污染物最差。其中非飽和層正是目前全世界在研究的重要課題。 3. 謝謝委員肯定與指教 4. 謝謝委員指教，會將成果納入摘要中
委員三： 1. 文獻回顧部分建議針對高解析電法之基本原理、限制及適用範圍等作系統性的介紹以提升報告之可讀性。 2. 本法之解析度與鏡像效應兩者似呈競爭關係，如何優化使其可應用於現場量測應是第二年研發的重點。 3. 第五章「結果與討論」與第六章「初	1. 謝謝委員肯定與指教 2. 謝謝委員肯定與指教 3. 謝謝委員指教，章節安排已修正，第六章的目的透過第一年的研究成果來說明第二年工作計畫



步結論與後續工作說明」之內容有部分錯置，報告之章節安排宜再加強以提升報告之可讀性與流暢性。	
委員四： 1. 如現地地下水井數量不多，運用此方法是否可能需要再設置井，如何評估。 2. 本研究現地模場是台鈴平鎮廠，請先整體說明場址資訊與污染整治情形 (P. 18、P. 36)。 3. 依 P. 59 三個月量測結果，紅色異常團分散且變化無常，運用本量測技術之時機與考量因素，請補充。 4. 台鈴平鎮廠場址是否會持續進行污染整治或監控工作，請說明「現地模場時間序列量測方法」之意涵與目的。	1. 本計畫期望透過現地既有全開篩井進行調查研究工作。新設井評估標準有二：一為進行 T 字形量測時，目標區域必需要有監測井，透過監測井達到高解析度的目的；二為進行跨孔式調查時，兩孔間距建議最佳化為井深的一半，最差則等於監測井深度，若兩孔間距超過井深，建議多增加一孔監測井來達到高解析度調查的目的。 2. 謝謝委員指教，相關模場污染資訊已增列至 P36 頁。 3. 本監測成果非本模場成果，淺層紅色並非異常而是紅土礫石層貢獻的相對高電阻率，其變化主要來自藥劑與地下水變化所造成。而主要關注點在地下 8.4 公尺至 12 公尺之間的地層，原本屬於綠色系均勻不變的地層電阻率，因為污染物回彈(rebound)而造成黑色虛線紅色高電阻率異常，透過次監測系統代表此區域尚未找到污染源且可建議整治單位必須開始投藥因為污染物又出現的現象。運用此技術的時機有二：一為整治階段，透過五技術監測藥劑流佈範圍與深度；二為整治後長期監測污染物是否有回彈現象。考量點仍在藥劑、污染物與地質材料物性分辨率的問題。 4. 目前本場址分為南側與北側兩區域分屬兩個不同污染單元，南側已完成整治，本研究目的在藥劑監測與藥劑是否達到攔截的目的；北側主要是場外污染



	是否會流佈至場區，期望透過時間序列量測，達到廠區邊界即時監測風險評估的概念。 現地模場時間序列量測方法之意涵與目的為藉由整治前、中、後的調查，依訊號評估污染物是否移除，整治藥劑流向，污染是仍有擴散之疑慮透過本研究發展設備於現場定期監測，於整治前、後進行時時探測，並以整治前的訊號成果為背景值，比對前後差異，甚可使用 time-lapse(時間序列)資料差值的資料處理方法分析電性差異百分率，藉此評估現地狀況是否符合設計，同時研判是否有遺漏未處理之疑似污染潛勢區。特別是跨孔式地電阻影像法，具備高解析度成像能力，且係能擴及「面」至「體」的探勘技術，密集 time-lapse(時間序列)探測成果之差異分析，甚至能呈現類 4D 的動態影像成果，如此在整治過程中的持續調查，將能藉由材料的電性變化，評析藥劑流向與分布範圍，若改變空間不如預期時，可立即採樣分析驗證，適時修正整治規劃，特別係針對環境複雜且地下水污染深度較深的場址，以地球物理調查結果，更能較為直接研判地下傳輸現象，對於傳輸模式的建立與推估，將有所助益。
委員五： 1. 第六章結論與建議建請增加檢討章節。	1. 謝謝委員指教，已增訂檢討章節至第六章



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	108 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：30	
計畫名稱	結合井測之高解析電法於整治場址污染擴散之即時監測技術		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 建議未來說明監測井，井篩的位置是否有影響，因為目前之監測井，大部分因考量污染情形，選擇開篩的位置。 2. 建議未來比較目前使用中的監測技術的優勢。		1. 感謝委員建議，將於後續成果中依據開篩管影響問題進行探討。 2. 感謝委員建議建議，在執行計畫時會比較目前監測技術，以增加本技術的優勢與實用性。	
委員二： 1. 針對開篩管於電阻率可能造成影響擬用數值模擬方法，請補充說明具體作法。		1. 感謝委員建議，已補充開篩管影響正算模擬之具體作法。	
委員三： 1. 建議一、二年宜以不同類型(地質、水文條件)之含氣場址進行試驗。 2. 對開篩之適切性是否受限場址其他條件，宜加以評估。 3. 第二年不需設井等費用，建議經費降低。		1. 謝謝委員指教，期望能夠在第二年執行不同的地質條件模場試驗。 2. 感謝委員建議，後續將不同場址電阻率條件納入開篩影響分析。 3. 感謝委員建議，已針對第二年預算進行調整。	



委員四：

1. 主持人的學術研究能力與土水污染技術發展能力均佳，其專業能力足以勝任本計畫。主持人近五年研究與土水污染技術發展績效亦佳。
2. 本計畫執行團隊的學術研究能力與土水污染技術發展能力佳，其研發能力足以勝任本研究計畫。本計畫執行團隊近五年執行與土水污染相關計畫的執行績效佳。
3. 本計畫的執行對國內未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動有其貢獻，但工程實務應用的可行性仍待進一步評估。原計畫書中說明：「…改善…分析方法之精進…」，建議說明原分析方法之限制與擬精進之處。本專案的屬性為"補助研究與模場試驗專案"，本類研究，計畫主持人已研究多年，且是在已有相關研究基礎之前提下，繼續執行本類型的模場試驗專案（土污基金會），建議能具體討論其實場實務應用性與相關操作與驗證流程。
4. 依申請計畫書內所提出的成果績效自評表，可推估本專案所預估的執行成果對國內土水污染的技術研發有其貢獻。
5. 本計畫書撰寫具體，計畫書中對研究方法的說明具可行性。但計畫執行成果對未來土水污染的實場實務應用性仍待評估。建議更具體說明本研究成果的實務應用性，以及實場應用成效。
6. 本計畫書中對相關文獻蒐集尚完整。

1. 感謝委員肯定。
2. 感謝委員肯定。
3. 感謝委員建議，已補充說明原分析方法與精進方向。未來在成果報告中會詳細說明操作與流程。
4. 感謝委員肯定。
5. 感謝委員建議，在執行計畫過程，針對此模場應用成果進行詳細說明，並回饋應用成效
6. 感謝委員肯定。
7. 感謝委員肯定。
8. 感謝委員肯定。
9. 感謝委員肯定。



計畫主持人對國內外本研究領域現況了解。 7. 本計畫書所規畫之執行期限合理，本計畫書對預期成果已有適當的說明。 8. 本計畫屬於延續性計畫，主持人已將所執行過計畫的研發成果彙整，並已有相關的論文發表。 9. 本計畫書已將原初審意見加以說明（或修正）。	
本署意見： 模場第二年人事費及其他研究相關費用加總錯誤，請修正。	已針對署內意見進行修正



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	108 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：30	
計畫名稱	結合井測之高解析電法於整治場址污染擴散之即時監測技術		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 7. 高解析電法於污染場址擴散之驗證請再說明。 8. 建議未來整理電探目前應用上之限制及判斷。		7. 近年國內外文獻透過動態時間序列電阻率法於地下水污染整治成效已有許多成功的案例，本團隊對於中港溪、永康等皆有良好結果。利用最新高解析度量測方法針對污染場址進行三維動態時間序列量測，了解場址污染擴散模式。 8. 本計劃目的即為進行應用既有井孔電探施測方法之潛在問題限制與資料分析方法於模場之實務驗證與精進探討，因此將於本計劃期末報告基於計畫成果整理相關應用限制與分析判斷方法。	
委員二： 4. 本案擬建立一套電法大數據監測系統，請補充說明大數據的具體分析方法。 5. 建議補充說明本案所使用電極的敏感度。		4. 謝謝位員指教，團隊於計畫書內文增加大數據監測系統說明。 5. 電探施測之靈敏度與解析度係與測線配置與電極排序有關，本計畫係基於模場實務探討應用井孔之電探施測潛在問題以及應用於污染場址調查與整治監控時提升資料解析方法，因此將於本計劃期末報告基於計畫成果說明提升施測靈敏度與解析能力之實務作法。	



委員三： 1. 目前除可減少鏡像影響，可否對於方向與角度提出可行性？ 2. 本技術之即時監測多孔、多層影響之可行性對整治技術提升請加說明。	1. 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，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方向性與資料解析能力。 2. 整治技術中藥劑擴散方向、深度與是否停留在預期位置是現場整治方所關心的。本技術目的是即時動態量測土壤與地下水電阻率的變化，由於電探技術隨著深度解析度變小，所以本計劃發展一套高解析度量測法，不會因深度而犧牲了解析度。而且可以利用現場既有的監測井進行地表與井內斷層掃瞄，讓整治方可以即時動態瞭解地下的變化。
委員四： 2. 屬延續性計畫。 3. 原計畫書中說明："…本模場計畫提出近幾年發展出的「可移動式井測之高解析電法即時監測技術」，嘗試透過現場「既設」監測井或整治井，設置可移動式電極並應用最新之資料評估方法，冀能大幅提昇調查與整治評估效益…。已執行類似計畫，實務應用性仍待說明。	5. 本計畫屬與前期相關計畫之延伸模場計畫。 6. 先前發展該技術透過現場「既設」監測井或整治井，設置可移動式電極並應用最新之資料評估方法，係為該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。因此並非以執行類似計畫，本計畫即為將該技術於模場進行進行實務性應用評估並以模場經驗加以精進。



委員五：

1. 請補充說明本計畫預期之產出效益，另即時監測技術其呈現方式能普遍(易讀)化。
2. 本計畫規劃兩年執行是受限於經費或時間等問題？
3. 孔對孔之間是否有距離限制條件？

2. 預期成效為透過本研究成果可提供在已設置有監測井與(或)整治井之污染調查或整治場址，運用並搭配孔內之地電阻影像探測技術，設置可移動式電極，透過現場施作參數與分析方法的改善，有效提升孔內地電阻影像探測成果的解析度，冀能大幅提昇調查與整治評估效益。而且重點在期望能夠善用目前既有監測井進行調查，目的也是希望這個技術能夠普遍化，且透過圖形色皆讓整治方能夠易懂易讀。
3. 謝謝委員指教，除了建置系統經費外，另外是建置系統時間與量測時間，所以規劃兩年的時間。
4. 對於跨孔施測而言，一般兩孔距離建議不超過 0.5 倍單孔測線長度。



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 **審查意見回復對照表**

計畫年度	109 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其它	主持人：林志平 NO：C8	
計畫名稱	結合井測之高解析電法於整治場址污染擴散之即時監測技術		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 文中多處專有名詞之英文縮寫，建議列出縮寫對應清單，俾利閱讀時對照。		遵照辦理。	
委員二 1. 期中報告對計畫執行現況、研究流程及方法已具體說明。 2. 本計畫的後續執行工作項目及內容已於期中報告 p.47 (Chap 6) 中說明。 3. 計畫執行進度與預定進度大致相符 4. 本報告書中未說明計畫執行的困難點，本計畫的執行進度並無落後 (Chap 5) (並對第一年度的成果加以檢討)。 5. 期中報告顯示本計畫的研究內容與計畫目標相符。 6. 期中報告中所提出之討論與建議具體。 7. 計畫剛執行，本期中報告已顯示出部分的研究成果，且符合原預期成果。 8. 計畫剛執行，本期中報告已顯示部分的學術產出(已有論文提出)(Chap 6，		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員，本計畫符合預期規劃，尚無遭遇執行困難點。 5. 感謝委員肯定。 6. 感謝委員肯定。 7. 感謝委員肯定。 8. 遵照辦理，將於期末報告中更為具體說明成果。 9. 感謝委員肯定。	



(1)的成果說明，建議更具體一些)。 9. 本計畫有研究人員與實務工程公司參與，可培育土水污染領域的相關人才。 10. 因為計畫才剛執行，研發的成果已提出專利(屬於本年度或是前一年度的成果?)。 11. 本計畫與土水污染領域的發展有關，當符合政策發展(調查、整治成效監測)。	10. 因本計畫與前一年度相關計畫有部分技術延續性，因此結合該延續性成果已可投稿學術期刊。 11. 感謝委員肯定。
委員三 1. 污染現況者整治基礎，值得嘗試，但是精密度和成本有關，所以控制成本也很重要。 2. 鏡像問題如果是物理性質，那就要增加觀測點，如果是數值問題，應該可以用數值方法降低影響。	1. 感謝委員建議，本計畫除精密度亦探討現場實務應用性如可回收電極之使用，希冀能平衡成本與精密度。 2. 鏡像問題可透過孔內電探序列與資料分析方法降低影響。
委員四 1. 完成結合井測電極序列最佳化探討。 2. 後續持續近行模場高潛勢監測時，建議將枯豐水期的變化納入監測。 3. 期末報告時，建議能說明比較其他方式的驗證。	1. 感謝委員肯定。 2. 謝謝委員的指教，會將地下水位變化納入說明。 3. 謝謝委員的指教，會將相關驗證報告納入說明
委員五 1. 地對孔及跨孔式是否受鄰近金屬管線或其他因素導致電流數據解析誤判? 2. 電阻法對低濃度含氯物質，電導率於	1. 現場實作將避開可能影響之管線進行施作。



環境流場內，如何分辨污染物、整治藥劑或其他水文地層物質。 3. 場址整治藥劑是否會造成數據誤判。 4. 本案擬建立一套大數據電法進行數據注藥監控，未來如何應用於即時數據傳輸解析，以利即時瞭解注藥分佈範圍。 5. 本案跨孔間距約 7 公尺，監控距離是否適合，導致無法有效監控藥劑分佈擴散情形。	2. 可透過監測過程不同電阻率時序變化辨識其特性。 3. 同上回覆，透過時序變化可辨識其種類。 4. 透過本技術之時序電阻率變化判釋，可有效評析整治藥劑之變化與分布。 5. 跨孔間距與深度約為 1:2 可有效解析電阻率變化。
---	--