



## 行政院環境保護署

108 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：108 年 1 月 4 日起至  
108 年 11 月 30 日止

中華民國 108 年 12 月 印製



# 108 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：

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別(單選)	<input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型	
研究主題	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 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 1 月 4 日起 至民國 109 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 (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	100,00	30,000	(1~6 項相加之 5%為限)
	6.	行政管理費	127,273	109,09	(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：林若平 (簽名及蓋章)

日期：108.1.8

申請單位大小章



# 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	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 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
<p>委員二：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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？</li> <li>2. 電阻率量測的污染物敏感度如何？</li> <li>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。</li> <li>4. 摘要中且增加說明驗證結果。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>3. 謝謝委員肯定與指教</li> <li>4. 謝謝委員指教，會將成果納入摘要中</li> </ol>
<p>委員三：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>3. 第五章「結果與討論」與第六章「初步結論與後續工作說明」之內容有部分錯</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝委員肯定與指教</li> <li>2. 謝謝委員肯定與指教</li> <li>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</li> </ol>



<p>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。</p>	
<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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)。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>2. 謝謝委員指教，相關模場污染資訊已增列至 P36 頁。</li> <li>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。</li> <li>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</li> </ol>



	<p>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。</p> <p>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。</p>
<p>委員五：</p> <p>1. 第六章結論與建議建請增加檢討章節。</p>	<p>1. 謝謝委員指教，已增訂檢討章節至第六章</p>



## 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。

本研究成果首先在跨孔電探(Crosshole ERT)方面，以多方向反覆施測方式探討其指向性效果，並找出地下水的優勢流徑與污染物的傳遞方向，成果可提供至地表二維地電阻影像剖面法測線的佈線方位依據。在 T 字型電探(borehole surface)與跨孔電探(Crosshole ERT)方面以兩種不同序列進行聯合反演探討實際應用於現地時抑制鏡像效應之效果，跨孔電探並輔以擴展模型(Extended model)修正邊界條件之問題並探討實際應用於現地時抑制鏡像效應之效果，最後進一步與地表資料結合得出一沒有鏡像效應且深部具有高解析度之剖面。







## 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 .

This study adopted cross-hole electrical resistivity tomography (CHERT) to perform ERT survey iteratively across multiple directions to investigate the directional effect of CHERT. This study also aimed to find the preferential flow paths of groundwater and contaminant transport. The result outcome from this study can serve as a useful reference in the planning of survey line direction for



two-dimensional surface ERT surveys. T-type ERT survey (borehole-to-surface ERT, BSERT) and CHERT utilized two different sets of array configurations to perform joint data inversion, in attempt to investigate the effectiveness in minimizing the in-situ mirror effect due to the sensitivity symmetry of certain array configurations. The inversion of CHERT also implemented an extended model during the inversion, in order to correct for the boundary conditions of the CHERT inversion and to also investigate its capability in suppressing the aforementioned mirror effect. An inverted cross-sectional profile with minimal effect and high resolution in larger depths was eventually generated from the combined data inversion with both borehole and surface ERT survey data.



## 目錄

中文摘要 .....	7
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 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 .....	13
4.1 研究方法 .....	13
4.2 研究流程 .....	17
4.3 工作進度 .....	21
第五章 結果與討論 .....	22
5.1 結合井測高解析電法精進改良 .....	22
5.1.1 結合井測現場實務應用問題探討 .....	22
5.1.2 改善井孔施測限制資料分析方法之精進 .....	27
5.2 應用孔內地電阻影像探測法模場試驗驗證 .....	34
5.2.1 基於模場試驗評估解決井孔施測限制資料分析方法之 適切性 .....	34
5.2.2 基於模場試驗評估解決井孔施測限制資料分析方法之 適切性 .....	36
第六章 第二年工作概述與前期研究成果 .....	58
參考文獻 .....	62



附錄一 專案成果績效自評表.....	1
108 年度專案成果績效自評表 .....	1
附錄二 計畫書審查意見回覆對照表 .....	5
附錄三 期中報告計畫審查意見回覆對照表.....	11





## 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 開篩管影響數值模型示意圖 .....	14
圖 10 跨孔施測之靈敏度範圍示意圖 .....	15
圖 11 本計畫擬定現地模場位置圖 .....	16
圖 12 研究流程 .....	17
圖 13 台鈴平鎮廠平面圖 .....	19
圖 14 南區測線規劃圖 .....	20
圖 15 T 字測線示意圖 .....	20
圖 16 單孔施測示意圖 .....	20
圖 17 Bearce (2016)開篩管影響示意圖 ( a ) 電流不經開篩管阻擋 ( b ) 電流經過標準開篩管 .....	23



圖 18 開篩管影響分析數值模型 .....	25
圖 19 不同開篩管案例模擬結果 .....	26
圖 20 不同開篩管案例模擬影響分析 .....	27
圖 21 跨孔式三維數值模型 .....	28
圖 22 無拓展分析區域之跨孔施測之模擬結果 .....	29
圖 23 跨孔施測之靈敏度分析 .....	30
圖 24 拓展分析區域(1)之跨孔施測之模擬結果 (拓展寬度=0.125 倍孔深).....	32
圖 25 拓展分析區域(2)之跨孔施測之模擬結果 (拓展寬度=0.25 倍孔深).....	33
圖 26 工作井設置照片 .....	34
圖 27 抽水中 1mm 井篩與傳統井測成果比較圖 .....	35
圖 28 停止抽水 1mm 井與傳統井測成果比較圖 .....	35
圖 29 現場試驗測線示意圖(A、全場示意圖;B、調查區域細部示意圖).....	37
圖 30 場址地質柱狀圖與現場工作照 .....	38
圖 31 傳統二維四極法成果 .....	38
圖 32 現地地對孔井測線佈置示意圖 .....	40
圖 33 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 .....	41
圖 34 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 .....	41
圖 35 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.....	42
圖 36 E03 模型加權法結果:(a)MOST (b)WMOST AB-MN:A-MNB=7:3 .....	42
圖 37 E-02 T 字型測線原始收錄反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列 .....	43
圖 38 E-02 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 .....	44
圖 39 E02 聯合反演(Combined data inversion)結果:	
(a)AB-MN123/A-MNB3	
(b)AB-MN123/A-MNB34	
(c)AB-MN123/A-MNB45 .....	44
圖 40 E03 模型加權法結果: (a)MOST (b) WMOST AB-MN:A-MNB=7:3.....	45
圖 41 現場施作照片 .....	45
圖 42 孔對孔施測井關係圖 .....	47
圖 43 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 .....	47
圖 44 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 .....	48
圖 45 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 .....	49
圖 46 單孔施測示意圖: (a)E-02 測線佈置 (b)E-03 測線佈置 .....	50
圖 47 單孔施測剖面示意圖 2.5m.....	51
圖 48 E02 2.5m 收錄結果 (由左上至右下依序是 1 至 8 方向量測結果).....	52
圖 49 E02-5 當做 Base 之導電度變化	
(由左上至右下依序是 1 至 8 方向計算結果).....	53
圖 50 E02 7.5m 施測結果(由左上至右下依序是 3 至 7 方向計算結果).....	54
圖 51 E-03 2.5m 之收錄結果(由左上至右下依序是 1 至 8 方向計算結果).....	55
圖 52 以 E-03-7 方向作為 base 和其他方向相減之結果	
(由左上至右下依序是 1 至 8 方向計算結果).....	56
圖 53 E03 7m 施測成果(由左而右依序是 1、6、7、8 方向計算結果).....	57



## 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 .....	21





## 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。

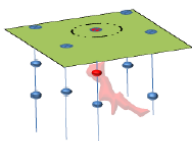
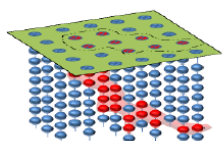


### 第三章 計畫背景與文獻回顧

#### 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。



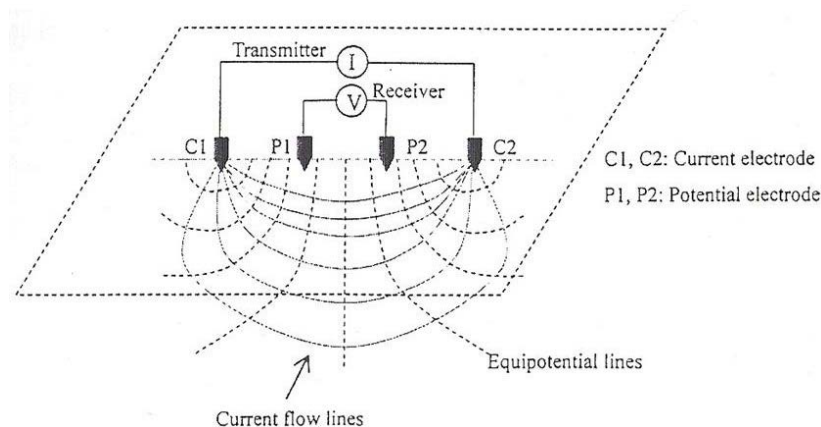


圖 1 地電阻影像探測技術施測示意圖

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

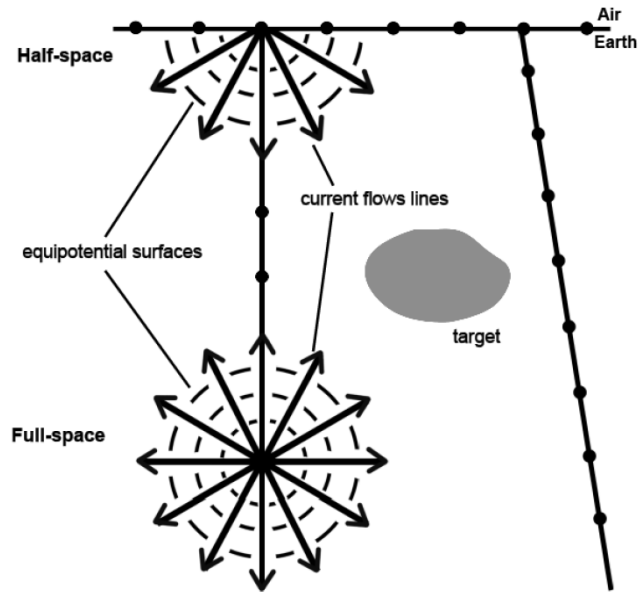


圖 2 孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖

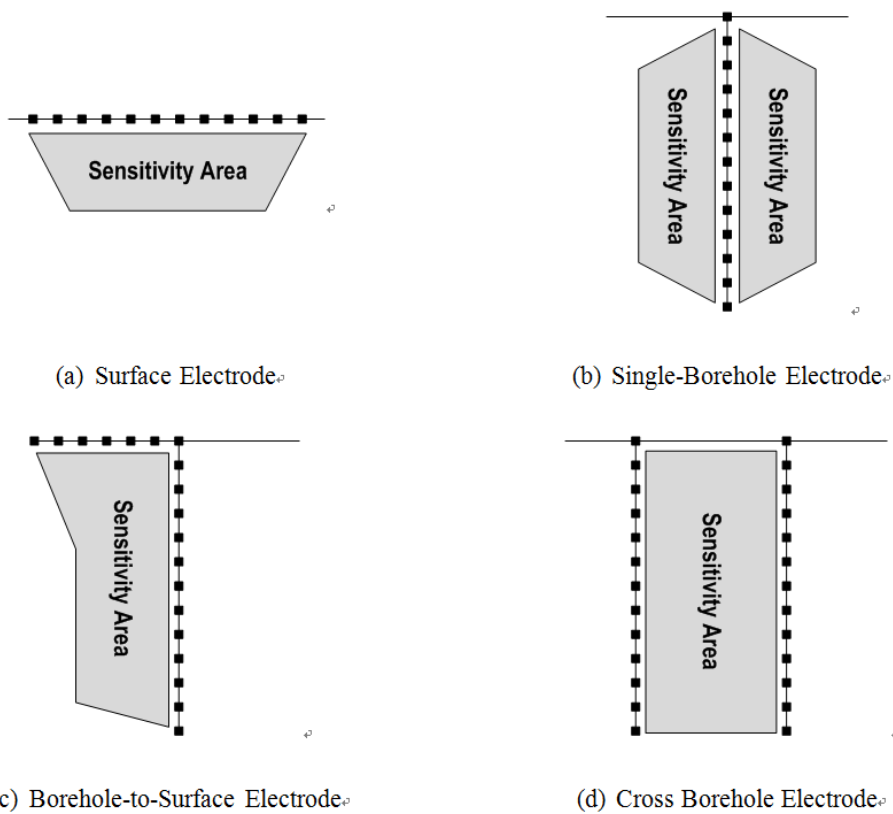


圖 3 地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖



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。

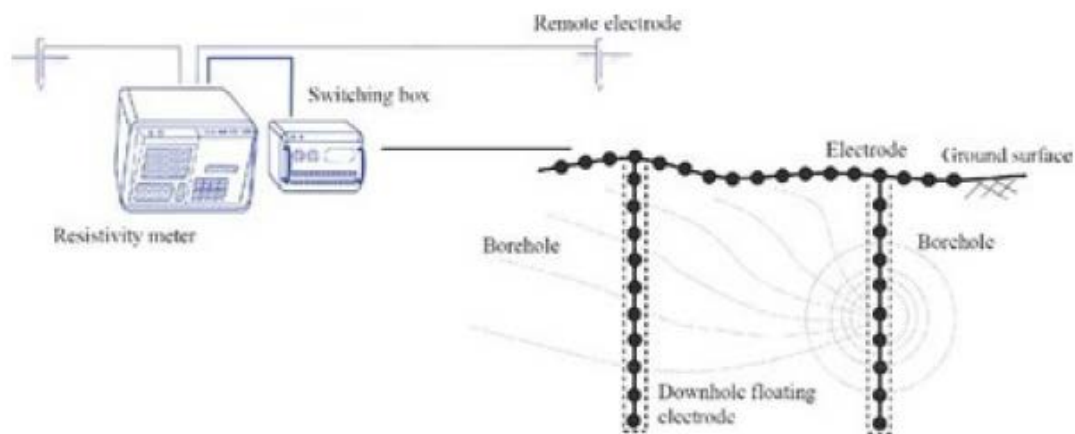


圖 4 地表與孔內地電阻探測聯合運用電極排序示意圖（Pole-Pole electrode array）（ Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014）

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。

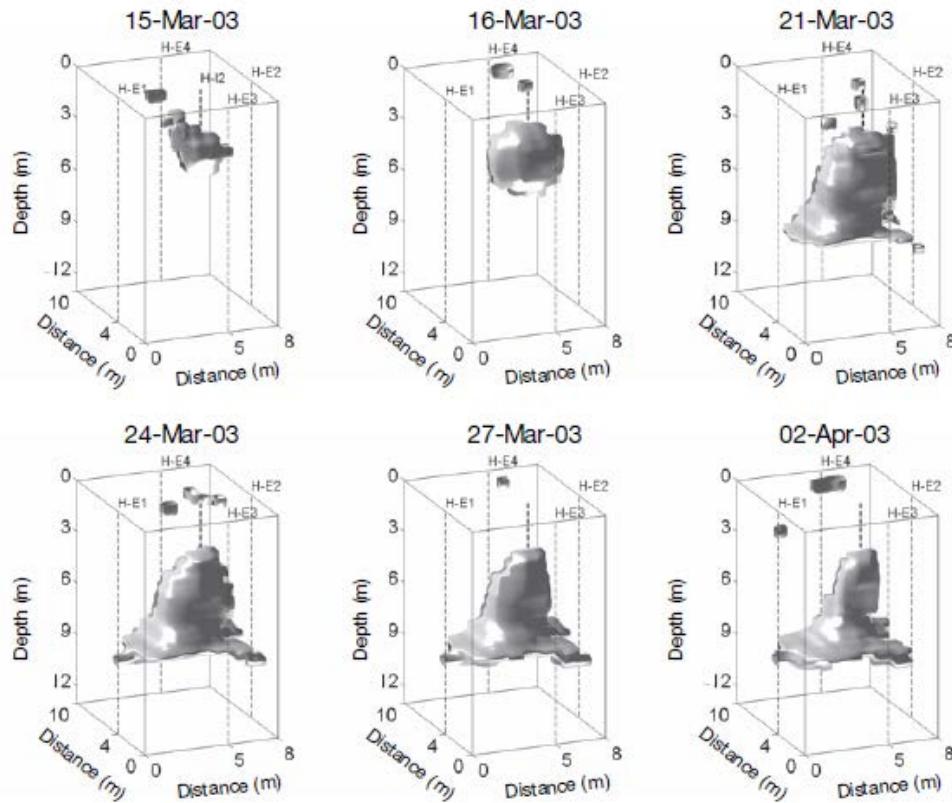


圖5 未飽和層示蹤劑試驗之井中ERT三維電阻率分佈變化(摘自 Winship et al., 2006)

### 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。

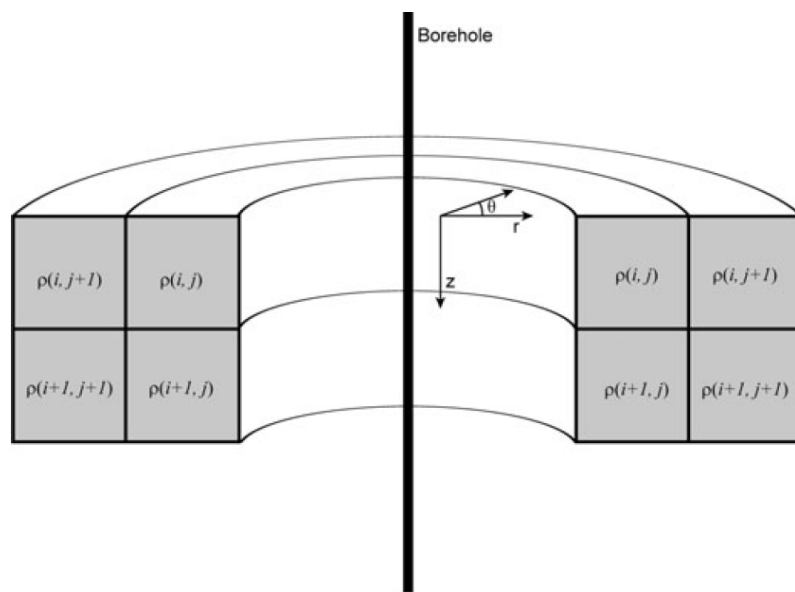


圖 6 單孔（下孔）電探施測範圍示意圖 (Coles et al., 2009)



## 第三章 計畫背景與文獻回顧

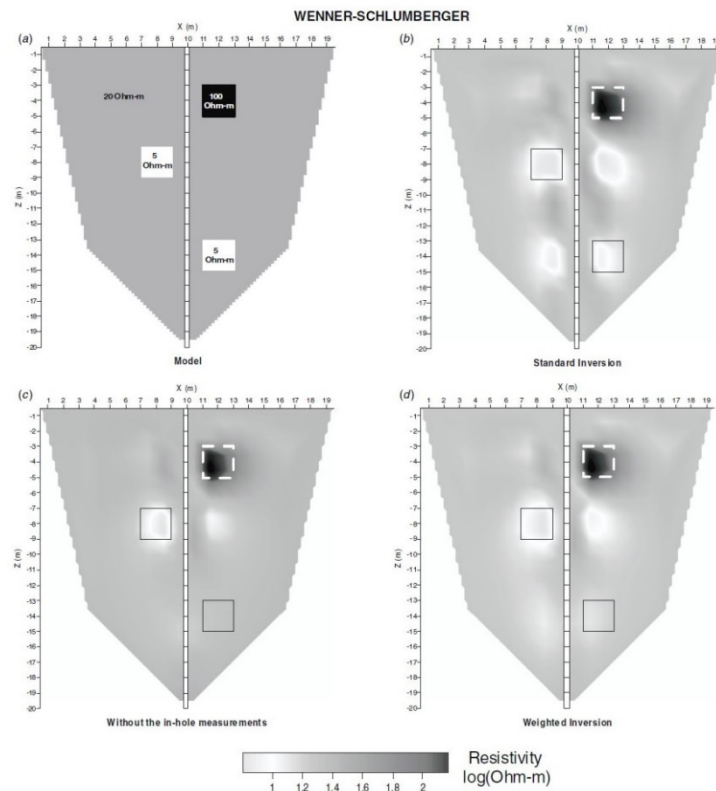


圖 7 文獻孔對地施測法之鏡像問題探討 (Wenner-Schlumberger 序列為例)：  
(a)數值模型;(b)標準反演結果;(c)移除單孔資料;(d)加權反算(Tsourlos  
et al., 2011)

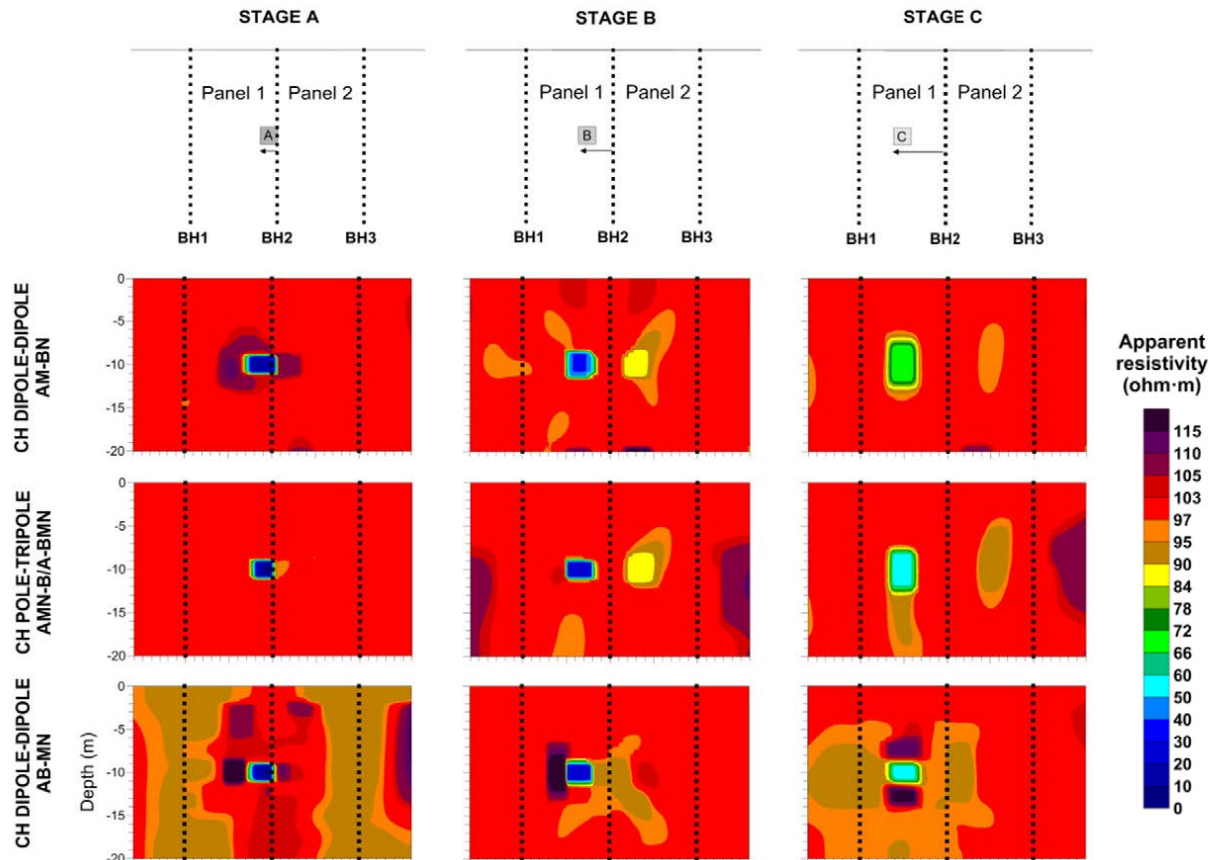


圖 8 文獻跨孔施測法鏡像問題探討：(a) CH dipole-dipole 序列 (AM-BN)；  
(b) CH pole-tripole 序列；(c) CH dipole-dipole 序列 (AB-MN)

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 Bellmund 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污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 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。而後，前年度(林志平, 2018)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。因此初步了解該技術應用井孔評估對於深部解析之提升具有潛在效益，因此本計畫目的在於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。



## 第四章 研究方法與過程

### 4.1 研究方法

本研究最終期望透將「可移動式井測之高解析電法即時監測技術」應用於實場之大數據監測，本年度計畫先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

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，如圖 10 所示，因此本計畫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。

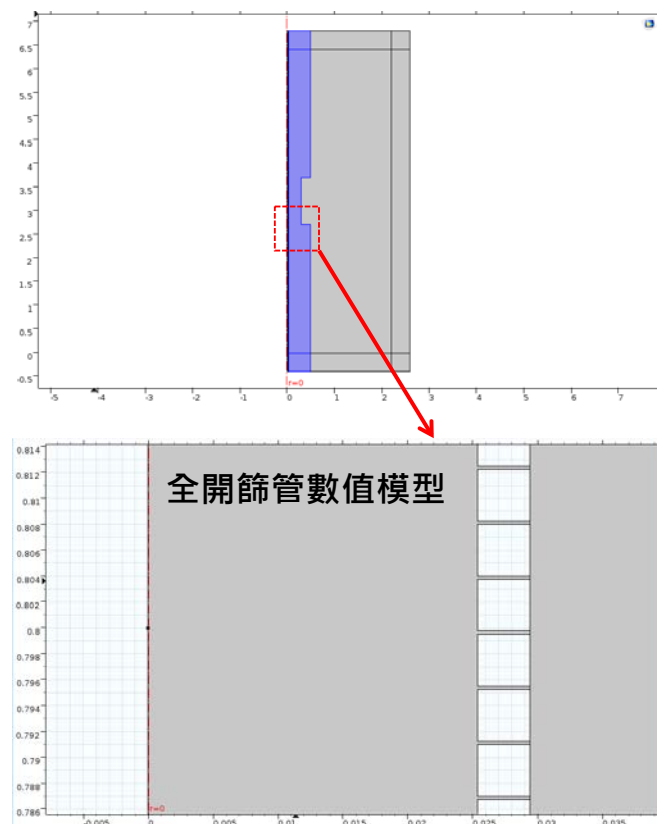


圖 9 開篩管影響數值模型示意圖



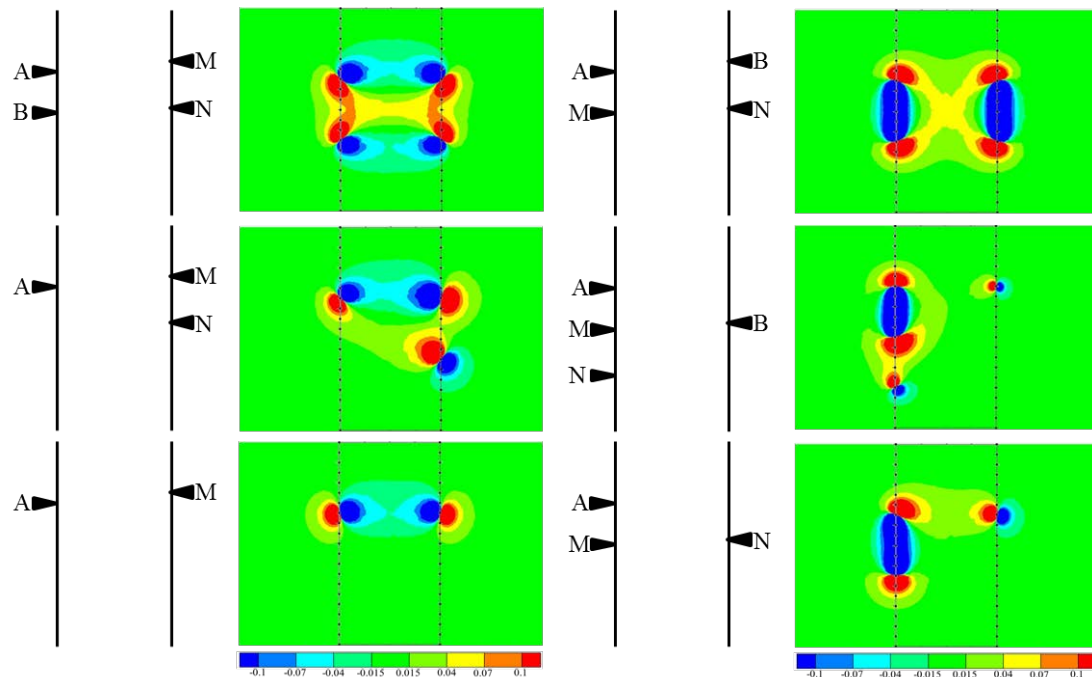


圖 10 跨孔施測之靈敏度範圍示意圖

## (2) 應用孔內地電阻影像探測法模場試驗驗證

本研究計畫選定之模場場址（圖 11）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，因此本團隊將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。另本團隊提出之「可移動式井測之高解析電法即時監測技術」，可利用場址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。

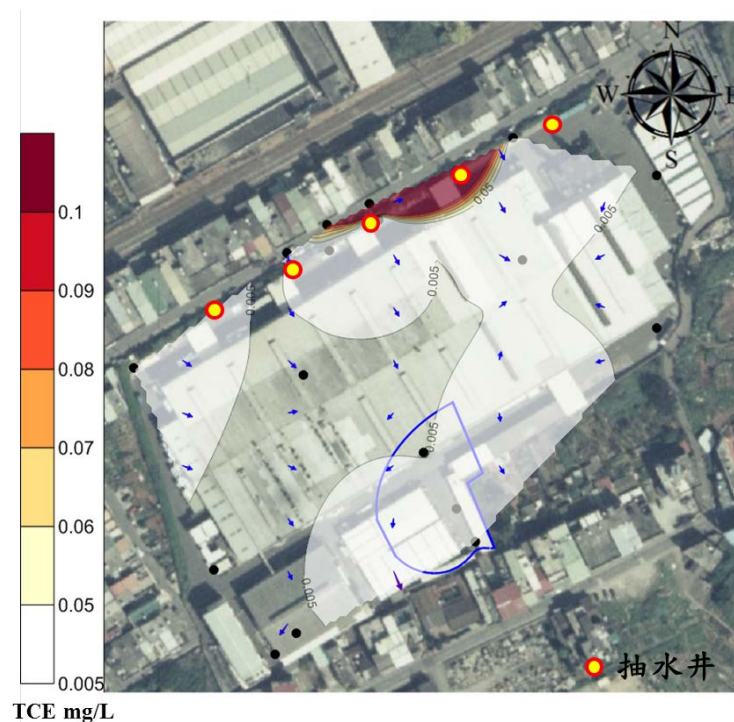


圖 11 本計畫擬定現地模場位置圖

本項目之工作內容如下：

(a) 驗證孔內電極與實務應用開篩管於模場應用之適切性。

基於前項工作評估之結合井測現場實務應用議題，擬將進一步於模場進行有效性評估，包括孔內電極之有效性與建議開篩管於模場應用適切性，以增加實作可行性與潛在效益。

(b) 基於模場試驗評估解決井孔施測限制資料分析方法之適切性

依據前項工作探討與精進之改善井測資料收錄與分析方法成果，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。

## 4.2 研究流程

本研究將先進行結合井測高解析電法精進改良，包括現場實務應用問題探討與改善井孔施測限制資料分析方法之精進，而後將上述評估結果進行模場試驗評估，最後並建構模場邊界大數據高解析井測即時監測系統。本計畫之研究流程如圖 12 所示：

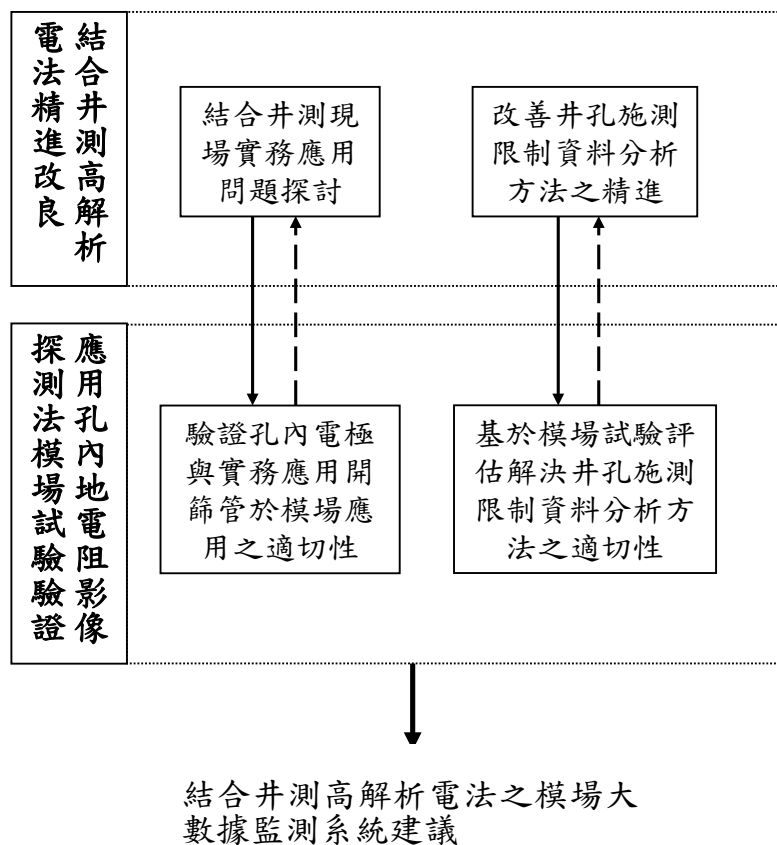


圖 12 研究流程



### 模場試驗工作規劃：

本研究欲進行結合井測高解析電法精進改良，並且在現場實務應用問題探討與改善井孔施測限制資料分析方法之精進。為了驗證前期模擬成果於現地之實用性，以下為現地實驗規劃：

1. 圖 13 為台鈴平鎮廠平面圖，初步將現場分為南區與北區兩個部分，因為南區已有較完整地物監測井可供量測，故第一階段選擇在南區進行模擬結果的驗證，驗證項目主要為孔內鏡像效應的去除效果。且為了協助孔內量測成果判釋，也須進行傳統地表施測進行比對，因此本團隊預計在南區使用施測方法如下：傳統地表施測、單孔施測、地對孔施測等共計 3 種方法。
2. 南區詳細施測規劃如下：本研究選擇圖 14 中 E-02 以及 E-03 兩孔分別地對孔與單孔試驗，兩井深度皆為 12 公尺深，兩井間距 7 公尺。地表施測方面，在南區規劃地表傳統四極法詳細位置如圖 14 中藍線位置，測線間距與長度方面，根據王子賓(2016)建議：「土壤及地下水問題調查時，電極間距應小於 3 公尺，且測線長度應超過目標測深 4 ~ 5 倍以上」，E-02，E-03 兩井深度皆為 12 公尺，地表探測範圍須涵蓋 12 公尺以上，基於以上規劃地表測線長 100 公尺，電極間距 2 公尺進行施測。
3. 在鏡像效應的去除方面，預計就地對孔測線進行探討，地對孔測線採用地表與監測井 T 字方式佈設如圖 15，序列上分別使用沒有鏡像效應但解析度較低的 AB-MN 序列以及有鏡像效應但解析度較高 A-MNB 序列進行收錄，根據其結果選用抵抗鏡像效應能力高的序列進行聯合反演方法(combin data inversion)與加權模型疊加方法(Model stacking technique)，根據其結果評估兩種方法的成效。完成地對孔鏡像效應去除後下一步將結合傳統地表施測與 T 字施測，在施作 T 字測線時同時納入地表施測的資料，可解決傳統地表施測深處解析度不足之問題。
4. 南北區監測井單孔指向性可行性評估：孔指向性施測方法係以前期研究成果中提出的收錄原理，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





## 第四章 研究方法與過程

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。圖 16 為單孔施測示意圖，分別以八個方向進行施測，每個方向相差 45 度，針對南區期望藉由比較不同方向的结果期望能觀察到藥劑的優勢流徑亦或是地層不同方向的變化。北區則是期望透過單孔指向性可行性評估，描繪出北區水文地質異向性。

5. 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，進行實場調查。北區會建置一口不同篩管開口寬度的監測井，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。期望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。



圖 13 台鈴平鎮廠平面圖



#### 第四章 研究方法與過程

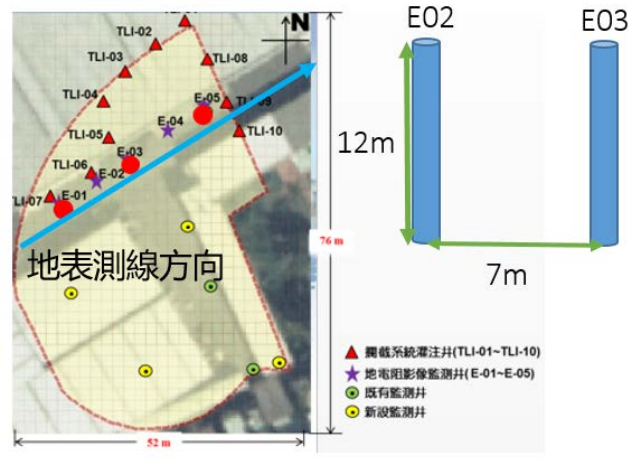


圖 14 南區測線規劃圖

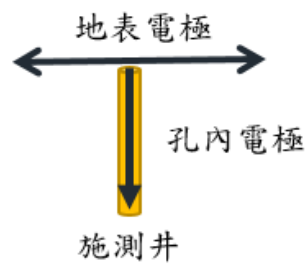


圖 15 T 字測線示意圖

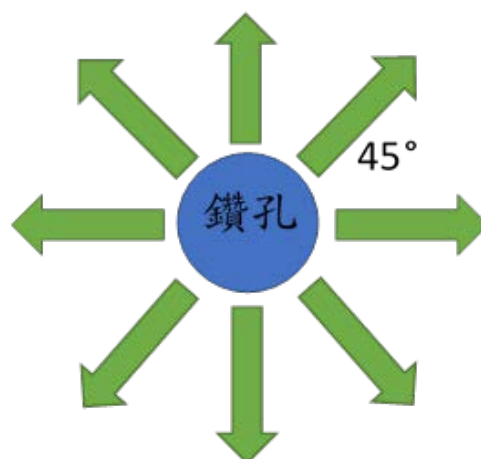


圖 16 單孔施測示意圖





### 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，第一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試驗驗證													
工作進度估計百分比（累積數）	5%	15%	25%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
第一年計劃預定查核點	期中		1. 結合井測現場實務應用問題探討 2. 結合實驗室模擬成果分析，建立最佳化實場執行方法										
	期末		1. 應用孔內地電阻影像探測法模場試驗驗證 2. 改善井孔施測限制資料分析方法精進										
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

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。

#### 5.1.1 結合井測現場實務應用問題探討

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。

Bearce 等人(2016)應用井孔進行孔內電探時, 發現開篩管可能對資料造成之影響。如圖 17 所示, Bearce 等人經由數值電流場分佈發現, 將電極纜線置於標準開篩管內施測, 其電流場分佈經過開篩孔到待測區域時相較於未經由開篩管之案例已經有相當程度之減損, 此結果意味通過標準開篩管之量測對於待測區域之靈敏度已經有相當程度之下降。

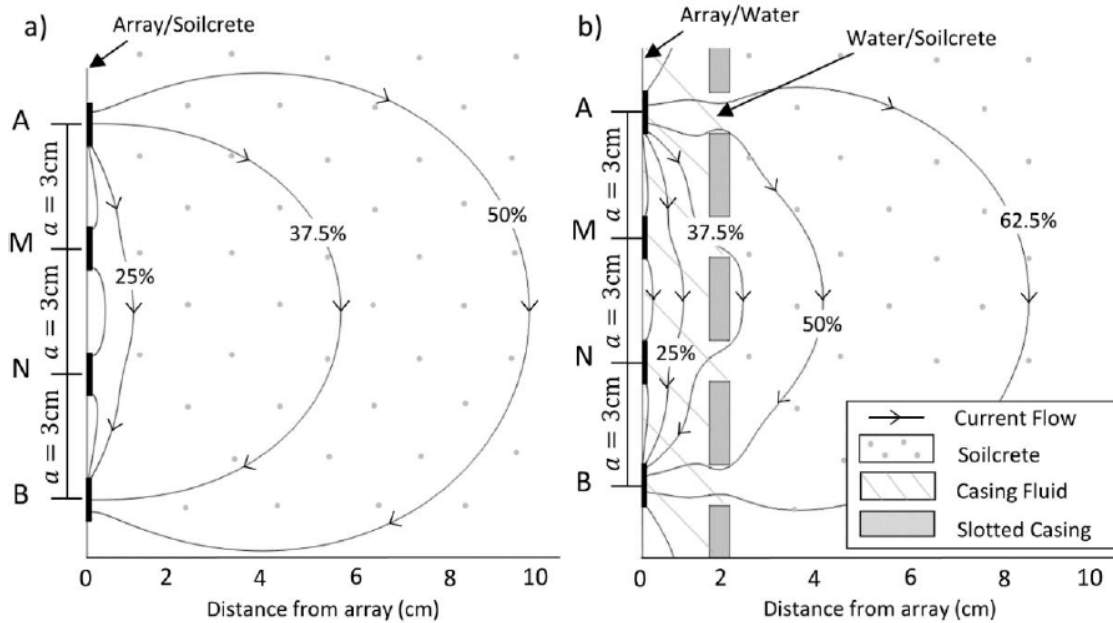


圖 17 Bearce (2016)開篩管影響示意圖 (a)電流不經開篩管阻擋 (b)電流經過標準開篩管

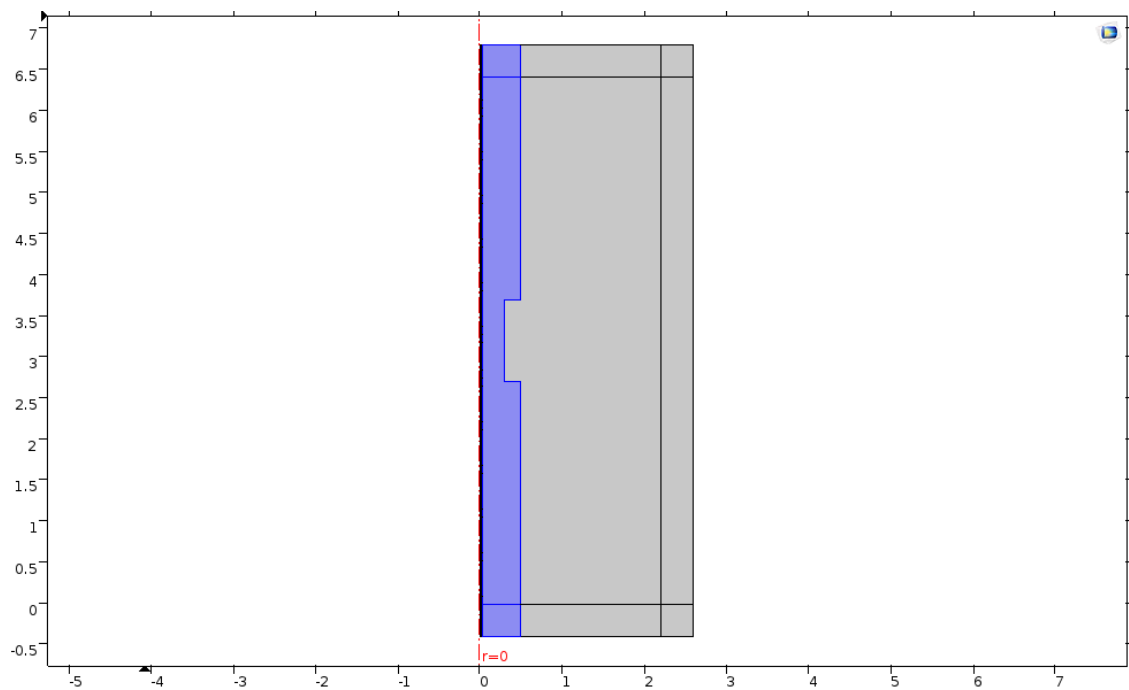
由於文獻指出基於配合井孔施測採用之開篩對管於電阻率可能造成之影響，本研究藉由數值模擬探討開篩管開口寬度於實務應用對於量測造成之影響，以增加實作可行性與增進高解析度量測之目標。正算數值模參考前期相關計畫採用之正算模型建構方法，先依據開篩口寬度等影響因子規畫正算模擬案例，並建構合適之數值模型進行地電阻探測模擬，透過數值模型建構幾何與材料參數，以準確描述施測結果與開篩管影響之相互關係。

本研究藉由數值模擬方法對於目前環保井慣用開篩管進行影響評估，以釐清模場實務應用時必須釐清開篩管所引致之問題，並建議應用井孔電探較為合適之開篩管規格。採用之數值模型如圖 18(a)所示，孔內電極位於對稱軸上；其局部放大圖如圖 18(b)所示，開篩管外具有兩層構造，鄰近處為較低電阻之漿液，較遠處為較高電阻之地層土壤，而位於中央處具有兩公尺長度之斷面缺陷。圖 18(c)為開篩管處再局部放大，基本案例採用標準開篩管之規格，其開篩間距為 0.254mm (0.01inch)；此外為建議影響較小之開篩孔寬度，分別再進行 0.5mm 以及 1mm 開篩孔寬度之分析案例。

數值模擬評估結果如圖 19 所示，圖 19a 為無開篩管之對照案例，可以



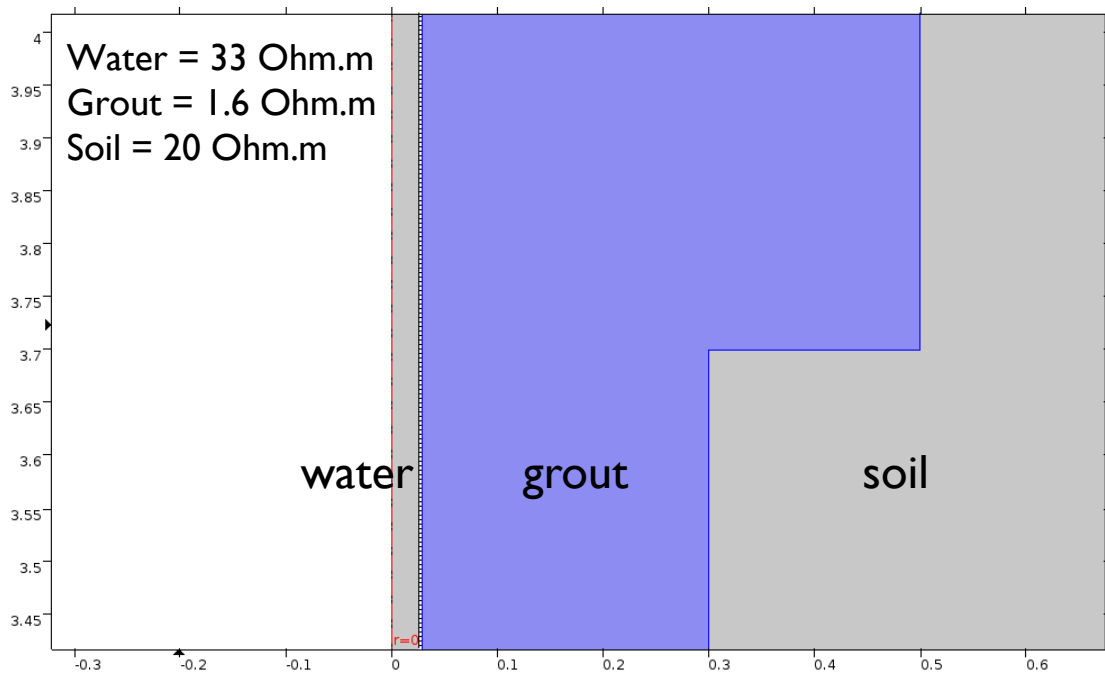
發現當採用標準開篩管時(圖 19b)中央斷面缺陷處將變得不顯著，若將開篩管之開孔寬度放大至 1mm 時(圖 19c)，則其影響甚微。將各開篩管案例最大電阻率與無開篩管案例相除，如圖 20 所示，可以更明確發現當開篩孔放寬至 1mm 時所測得之電阻率即相當貼近無開篩管阻擋之結果。由上述比較可知，標準開篩管對於孔內施測可能造成資料靈敏度降低之疑慮，因此應用時可考慮適度放大開篩寬度至 1mm 為佳。



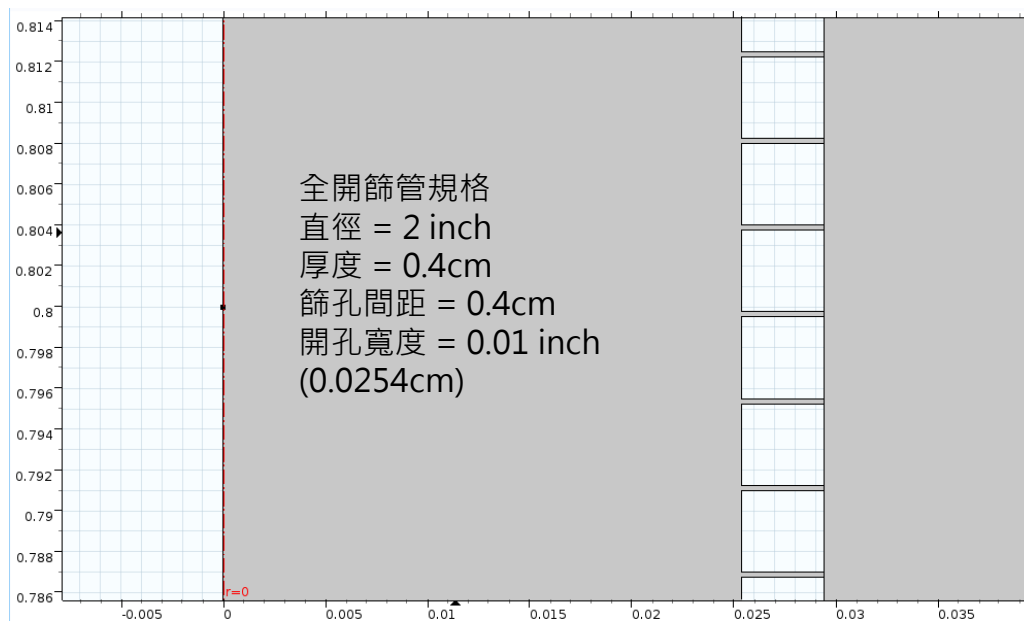
(a) 軸對稱數值模型全貌



第六章 初步結論與後續工作說明



(b) 缺陷處局部放大

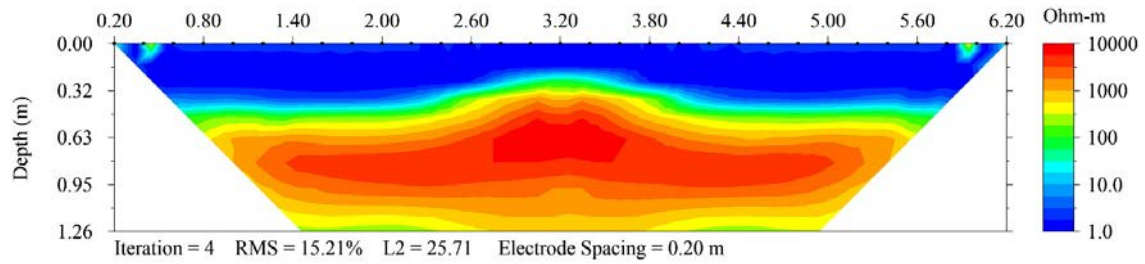


(c) 開篩管處局部放大

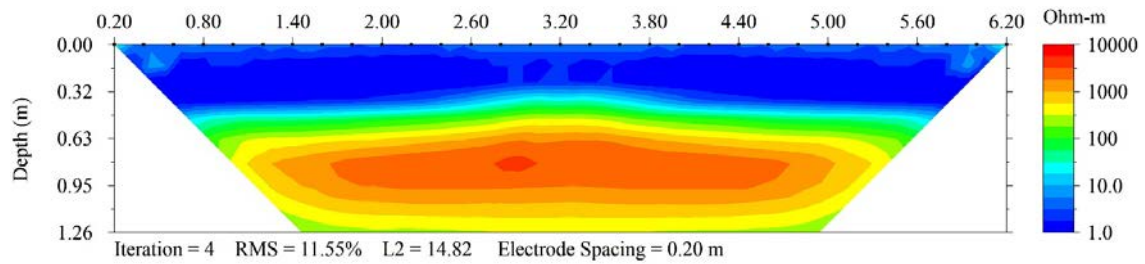
圖 18 開篩管影響分析數值模型



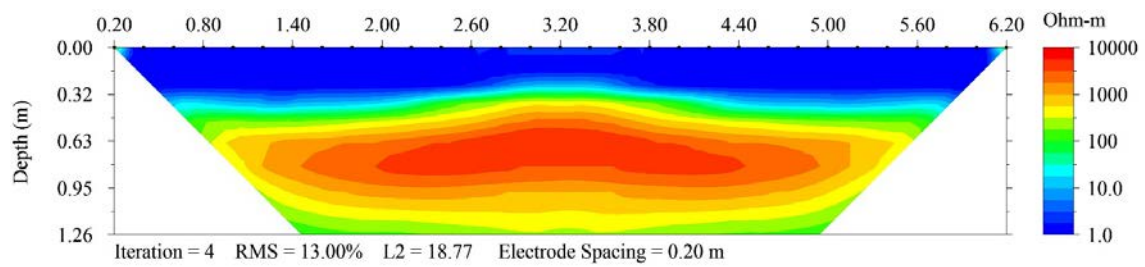
## 第四章 研究方法與過程



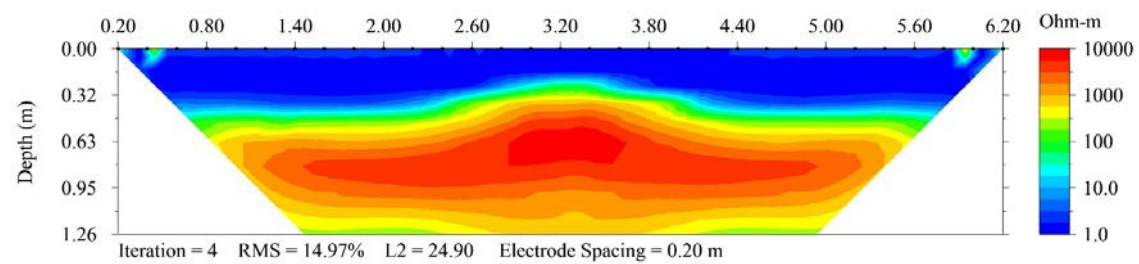
(a) 無開篩管阻擋



(b) 標準開篩管阻擋 (開孔 0.254mm)



(c) 改良開篩管阻擋(開孔 0.5mm)



(d) 改良開篩管阻擋(開孔 1mm)

圖 19 不同開篩管案例模擬結果



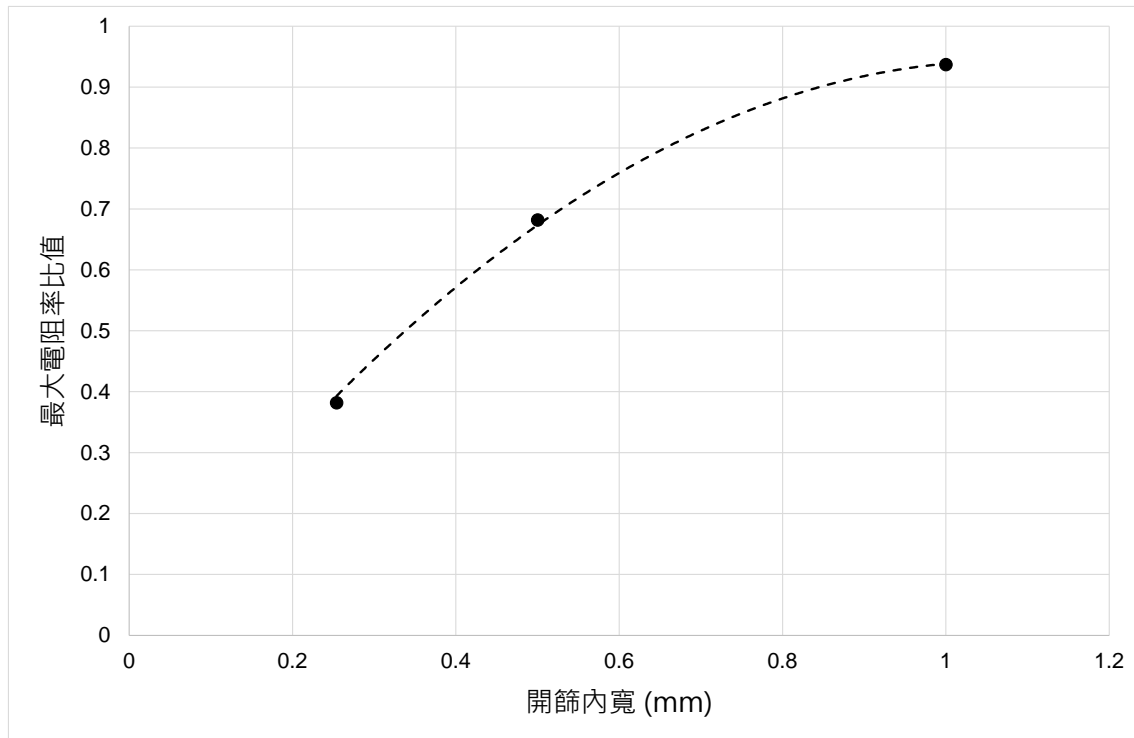
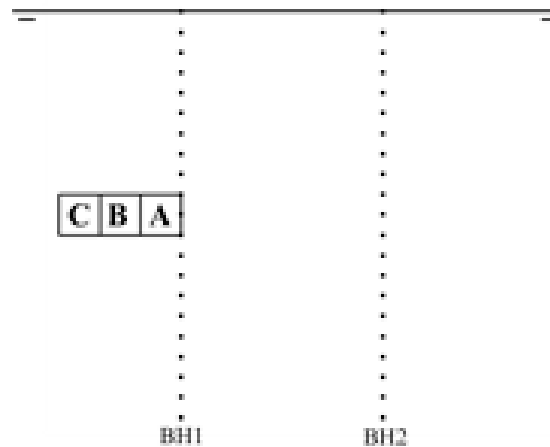


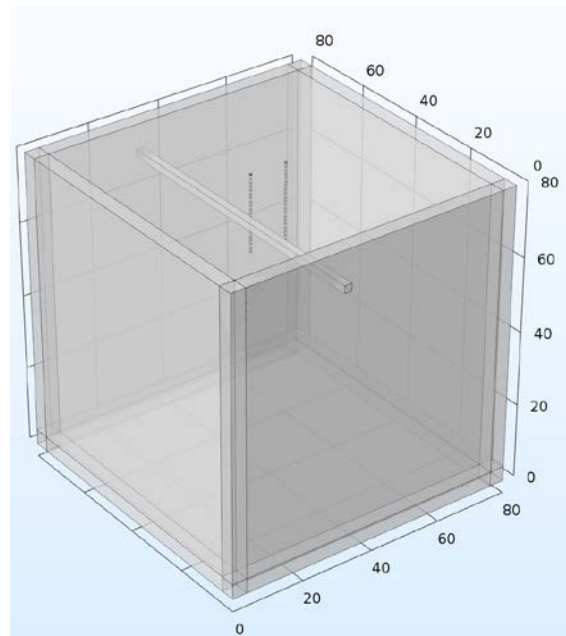
圖 20 不同開篩管案例模擬影響分析

### 5.1.2 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, 因此本計畫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。為確切了解拓展分析範圍之差異, 因此基於跨孔施測的鏡像效應之數值模型進行研究。圖 21 中鑽孔的深度為 20m, 兩鑽孔的距離為 10m, 預設異常位於 10m 的深度, 水平距離分別為 1m、3m、5m。模型中考慮異常電阻率值為 10 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 21 跨孔式三維數值模型

圖 22 顯示不同配置採用標準反算分析範圍的模擬分析結果，亦即兩側不採用拓展範圍分析。可以發現當亦常區域極為靠近測線時，如階段 A，對稱假現象皆出現在剖面中，且隨著逐漸遠離如階段 B 至階段 C 而逐漸淡化。這應是由於反算的非唯一性和不正確的邊界條件造成的。此外，A-BMN / AMN-B 序列中出現的鏡像效應比 Bipole-Bipole 和 OPT (Bellmont) 序列嚴重



得多。這些結果並顯示，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。

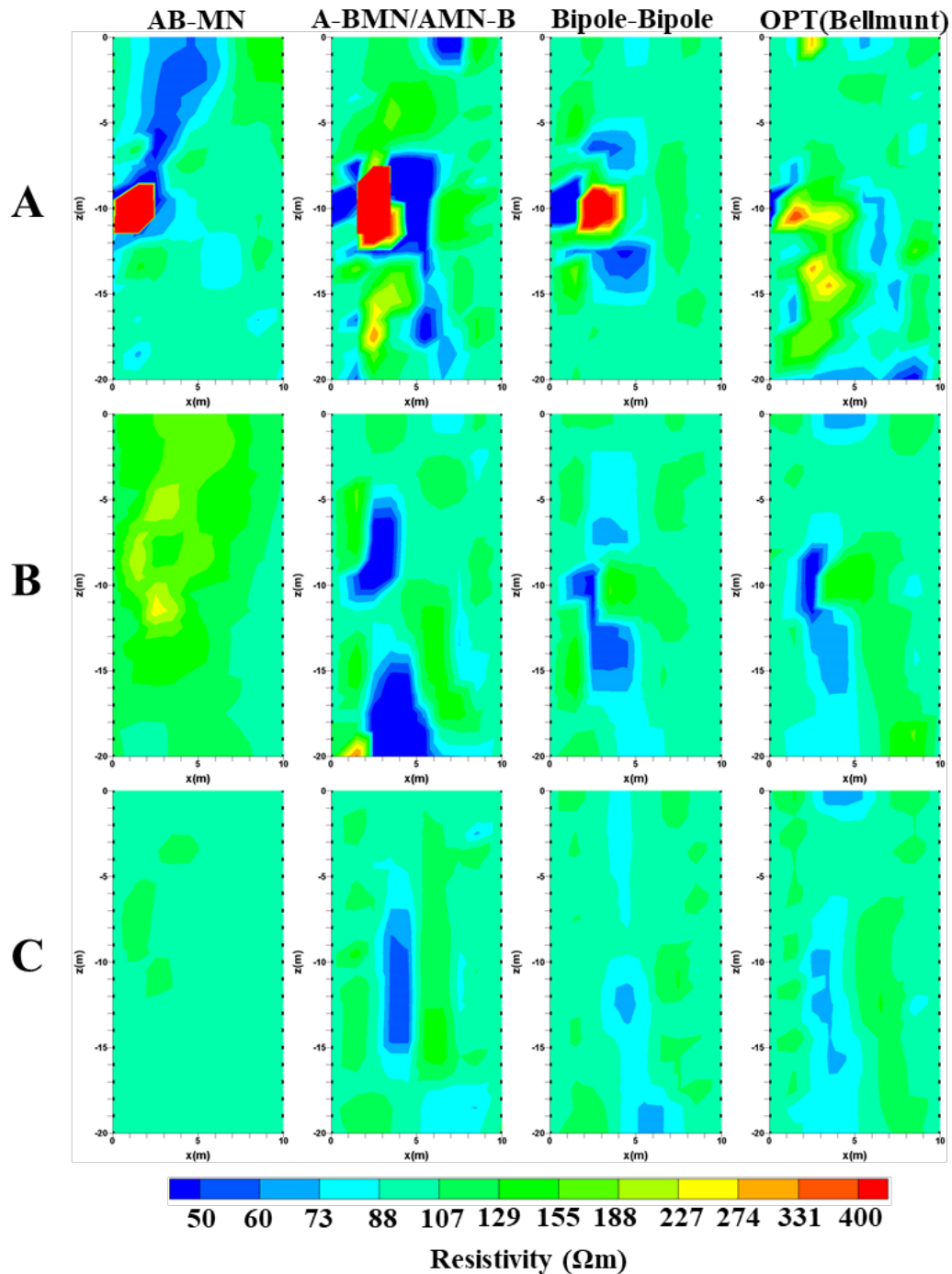


圖 22 無拓展分析區域之跨孔施測之模擬結果



依據上述結果，為了解跨孔系統中不正確之邊界條件之問題，因此評估跨孔配置的靈敏度分析。在圖 24 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，由此可說明鏡像問題於最靠近測線之階段 A 最為嚴重，而且隨著階段 B 與階段 C 逐漸遠離而淡化。

跨孔施測最常用的反算策略是反算兩個井孔之間的區域，基於上述分析，認為擴展反算區域進行反算將有必要性。本研究使用的數值模型在跨孔區域外有一個預設的異常區，若使用擴展反算模型則可以解決該問題。

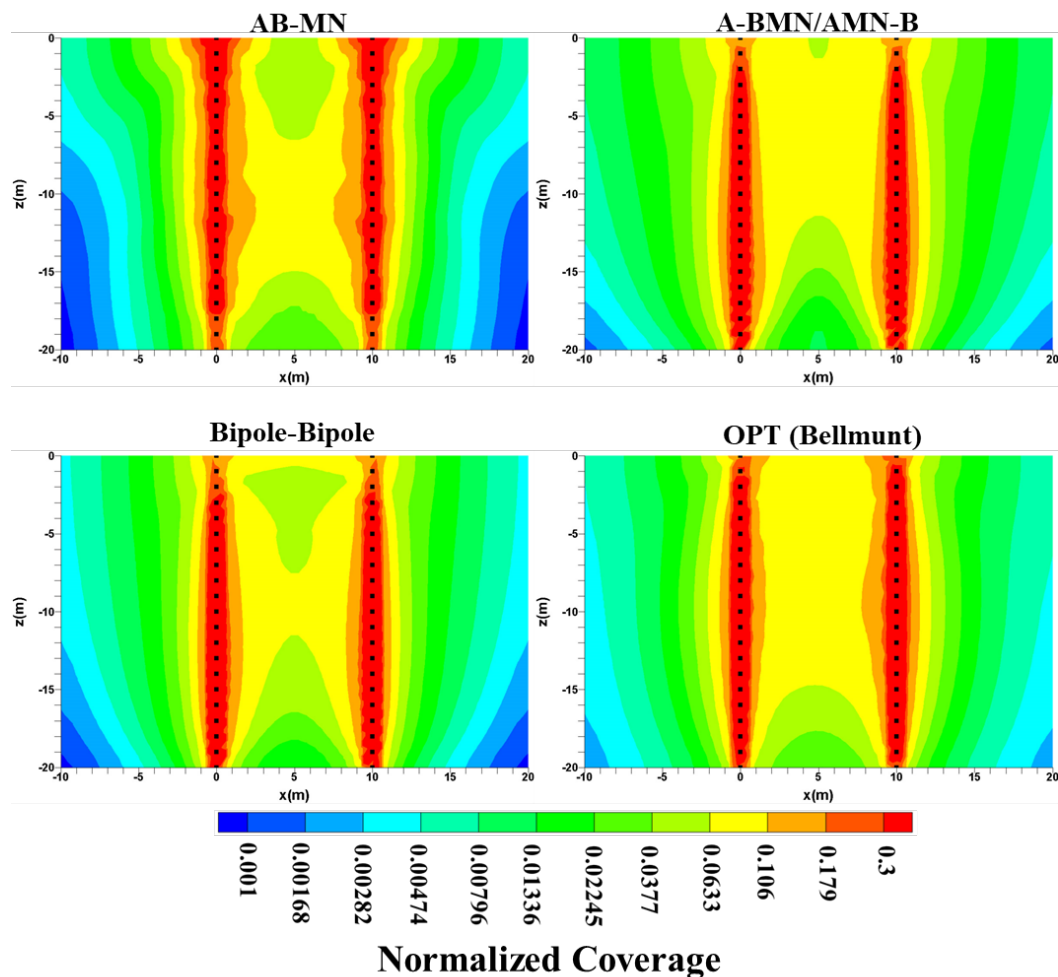


圖 23 跨孔施測之靈敏度分析



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，依據前述分析結果假設跨孔以外對靈敏度貢獻的有效範圍並不容易定義較為恰當之拓展範圍，因此進行兩種拓展區域評估，分別為而納入反算區域為孔深的 0.125 倍及 0.25 倍，亦即分別為兩孔距離之 0.25 倍與 0.5 倍結果如圖 20 和圖 21 所示。

在圖 24 中，很明顯當使用擴展模型(1)時，Bip-Bip(AGI)和 OPT(Bellmont) 配置在模擬區域中仍然存在鏡像假現象，並且在 Bip-Bip(AGI) 中更嚴重，與 A-BMN / AMN-B 配置相比，OPT(Bellmont) 陣列的結果確實具有較低的對稱效應，並且與 AB-MN 相比具有更高的分辨率組態。兩孔配置中的 IOS 計算與三孔系統中的 IOS 計算基本相同(Bellmont, et. al., 2016)。圖 4 和圖 5 可以看出，通過進一步擴展反算模型可以減少鏡像對稱效應。在使用擴展模型 2 的結果中(圖 22)，OPT(Bellmont) 陣列確實具有更好的分辨率，並且兩個鑽孔之間的均勻模型也更好地解決，此時擴展反算區域是一般反算區域的兩倍。

因此，基於 Bellmont 等人的研究處理鏡像對稱效應於跨孔配置時，發現這種應用中對反算結果具有嚴重影響，這個問題是由反算過程中的錯誤邊界條件假設引起的，此時可以通過擴展反演模型來解決。本研究通過比較不同擴展反演範圍的結果，建議反演模型區域應遠離兩個鑽孔延伸 0.25 倍的鑽孔深度。



第四章 研究方法與過程

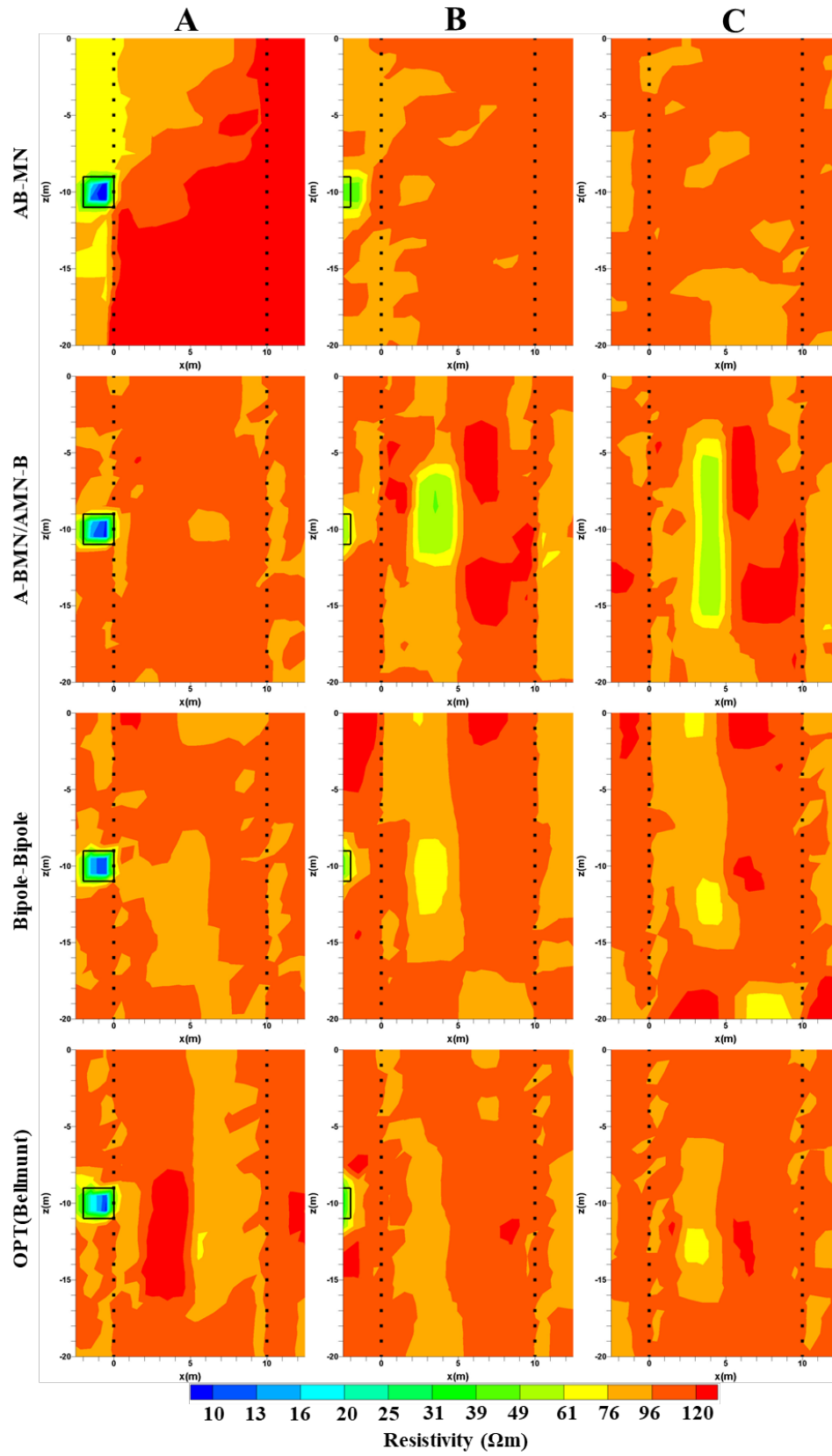


圖 24 拓展分析區域(1)之跨孔施測之模擬結果 (拓展寬度=0.125 倍孔深)





第六章 初步結論與後續工作說明

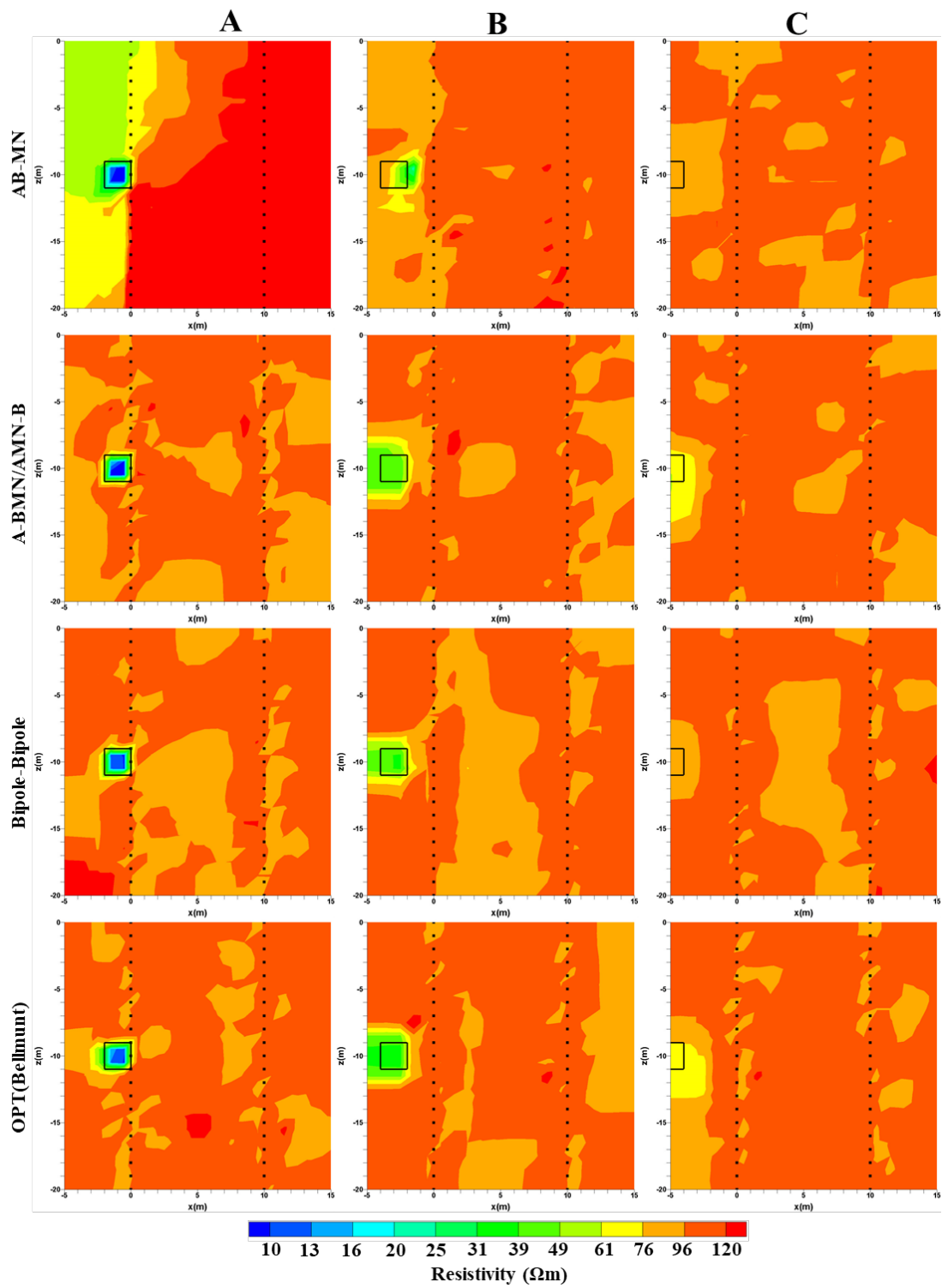


圖 25 拓展分析區域(2)之跨孔施測之模擬結果 (拓展寬度=0.25 倍孔深)



## 5.2 應用孔內地電阻影像探測法模場試驗驗證

### 5.2.1 驗證孔內電極與實務應用開篩管於模場應用之適切性

為了驗證孔內電極與開篩管間的適切性於模場北側設置本研究需要的1mm 開篩孔之監測井，並在井管上建置傳統一次性電極，進行成果驗證。監測井位置設置在場外環保署監測井投影至場內位置。



(A)傳統一次性電極與 1mm 篩管設置 (B) 建置現場工作井位置

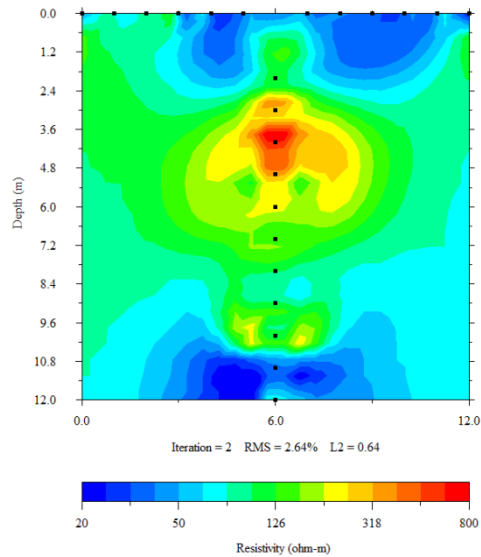
圖 26 工作井設置照片

建置完工作井後總共進行兩階段量測模式，第一階段為抽水井持續進行抽水量測傳統一次性電極成果與本研究建議 1mm 開篩管移動式電極量測成果比較；第二階段則為停止抽水 12 小時後傳統一次性電極成果與本研究建議 1mm 開篩管移動式電極量測成果比較。以下為量測成果：



## 第一階段抽水井持續抽水成果

(A) 1mm 開篩管移動式電極量測成果



(B) 傳統一次性電極成果

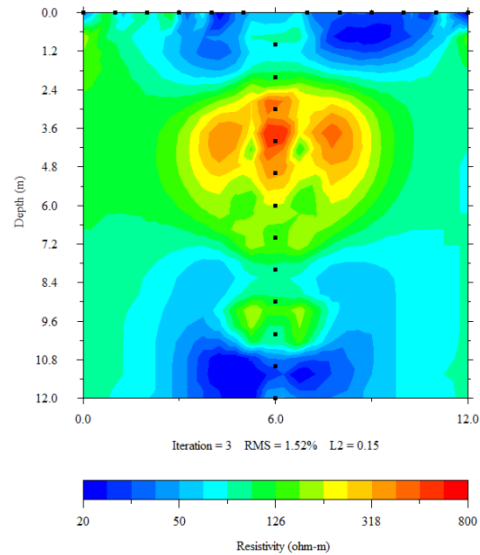
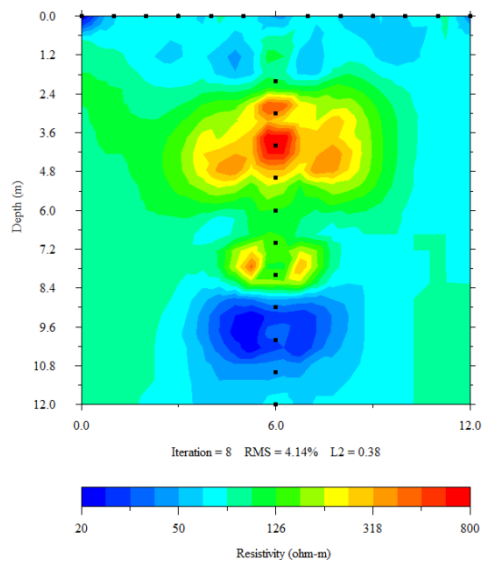


圖 27 抽水中 1mm 井篩與傳統井測成果比較圖

## 第二階段抽水井停止抽水後量測成果

(A) 1mm 開篩管移動式電極量測成果



(B) 傳統一次性電極成果

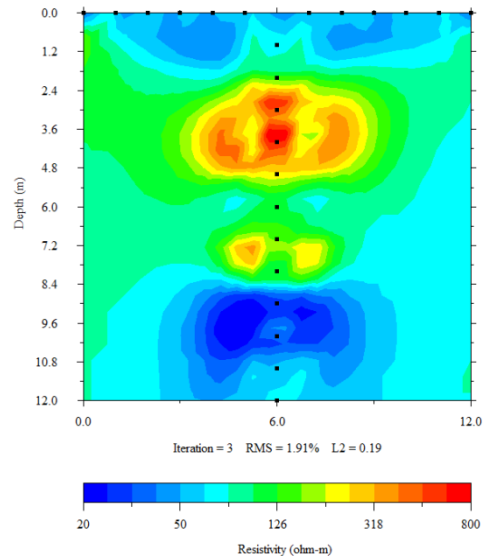


圖 28 停止抽水 1mm 井篩與傳統井測成果比較圖

根據模場試驗結果，如上圖 27、圖 28 所示，不管是抽水中與停止抽水成果，



皆可以驗證 1mm 開篩管與傳統一次性電極成果彼此非常接近，透過高階析度 T 字形電極排列法，也反映出底部低電阻率變化，抽水時底部低電阻率有揚起現象，而停止抽水後低電阻率則呈現水平塊狀現象。本次模場成果主要是驗證 1mm 開篩管現場量測與數值模擬成果。可以更明確發現當開篩孔放寬至 1mm 時所測得之電阻率即相當貼近無開篩管阻擋之結果。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。

### 5.2.2 基於模場試驗評估解決井孔施測限制資料分析方法之適切性

本場址主要生產五金零組件為主，現況為運作中工廠。主要為地下水污染，污染物為三氯乙烯，地質屬於紅土礫石層，0-11.5 米主要為礫石夾砂，11.5-12 米即監測井底部有一層紅棕色的黏土。民國 99 年執行之「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（第 2 期）」，認定台鈴工業股份有限公司（以下簡稱台鈴公司）於桃園縣平鎮市延平路三段 411 巷 75 號（以下簡稱台鈴平鎮廠）地下水三氯乙烯（TCE）已超過第二類地下水污染管制標準之管制值 0.05 mg/L。為釐清污染來源，桃園市政府環境保護局（以下簡稱環保局）於 103 年度執行「103 年度桃園縣地下水含氯場址污染來源鑑識及公告範圍界定計畫」（以下簡稱鑑識計畫），調查結果指出，台鈴平鎮廠內 1 口監測井 MW-11 的地下水 TCE 濃度超標，北邊廠外另有兩口 TCE 超標井（MW-EX-01、MW-EX-02），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 MW11 所屬之 TCE 污染團並非受上游北邊 TCE 污染團所影響。

本計畫模場場址地下水主要污染物為三氯乙烯，採用整治列車觀念，視污染物濃度及可能分佈，選擇採用「加強式現地生物整治法」及「現地化學氧化法」進行污染應變作業。改善規劃採空間上整治列車概念，於場址上游區採加強式現地生物整治法，比較具長效性，可整治場址內之三氯乙烯，亦具有攔截從場址外上游流入之三氯乙烯污染團，規劃優先使用厭氧方式；中、下游區濃度相對較低採化學氧化法，期能短時間將污染物直接氧化分解。目前整治已告一段落，相關污染物濃度已達管制標準。本計畫現地模場試驗期望透過前年度提出之改善井測資料收錄與分析方法；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。

第一階段試驗選擇廠區南側有一封閉式整治區進行地電阻孔對地新型收錄與分析方法實場試驗。施測位置如(圖 29)藍色測線標註，測線北側有藥





劑灌注井，測線上也有數個標準監測井。



圖 29 現場試驗測線示意圖(A、全場示意圖;B、調查區域細部示意圖)

#### 5.2.2.1 傳統地表電阻率影像剖面法

為了瞭解整個南區目前地下電阻概況，故先行進行了地表電阻率影像剖面法的施測。在序列的選擇方面考量因子如下：

- 1.地表成像能力
- 2.淺地表干擾偏差
- 3.側向影響

綜合以上三點因素後選擇 wenner-schlumber 序列進行收錄，圖 31 為傳統二維四極法成果，測現長度為 100 公尺，電極間距 2 公尺，施測方向由西向東施測，主要調查範圍為測線水平距離 38 公尺到 52 公尺間，因為本研究主要的 E-02 孔位與 E-03 孔位在此區間，此區域電性剖面呈現深度 7 公尺以下出現一低電阻團，而 7 公尺以上則出現相對偏高電阻率區塊。距離研究區域最近的地質鑽探井為 TLI-06，位置位於 E-02 邊上。圖 30 為現地鑽探資料與現地照片圖，TWL-06 所示：地層概況如下，淺層為坵土夾礫石，2.5~4 米為礫石夾棕色砂土，4~11.4 公尺為礫石夾紅棕色砂土。所以 11 公尺以內地層主要是礫石為主的地層，電性地層則呈現相對高電阻率形貌出現，而剖面中出現低電阻率則推測為先前灌入之藥劑(高導電度)。藉地表探測可以推估到孔內電阻率探測時的初步形貌，在 E-02 和 E-03 孔探測時，應出現深度 7 公



尺以上會出現相對高電阻率形貌，而深度 7 公尺以下則呈現相對低電阻率。

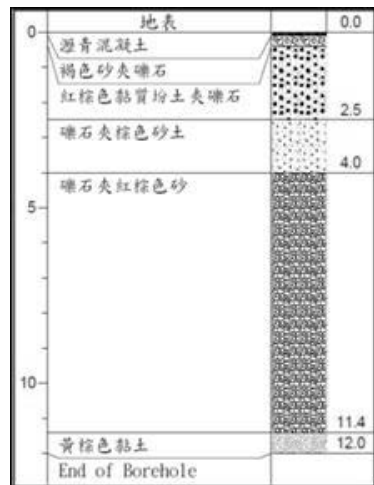


圖 30 場址地質柱狀圖 TLI06 與現場工作照

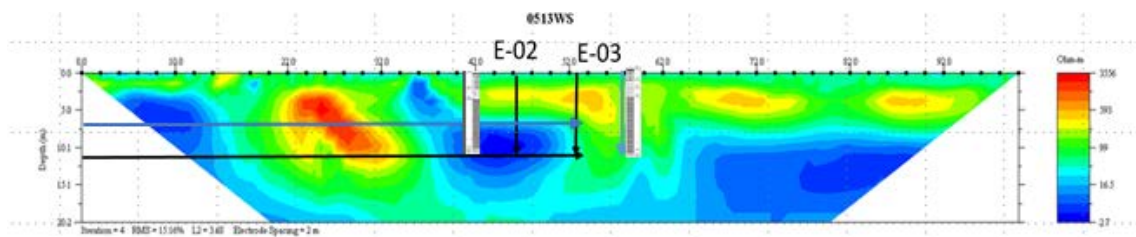


圖 31 傳統二維四極法成果

#### 5.2.2.2 地表結合單孔井測 T 型電阻率剖面法(BSERT)

在地對孔部分分別對 E-02 和 E-03 兩孔進行施測，測線佈設如圖 32 所示：地表測線長度為 10m，電極間距為 1m，而地下電極則為地下 2m 至 12m 為收錄區間，電極間距 1m。本研究收錄的電極排列法分成兩種，一種是孔內只有電位極之序列 AB-MN，AB-MN 是不會發生鏡像效應，但成果解析度為較低之序列型態，另一種是孔內同時有電流極和電位極存在之 A-MNB 序列，A-MNB 序列是有鏡像效應但解析度相對於序列 AB-MN 較高之序列。處理資料方法上採用加權模型疊加方法(Model stacking technique, MOST)以及聯合反演方法(Combined data inversion)，並同時進行討論成果差異。

圖 33 是以 AB-MN 序列和 A-MNB 序列收錄之 E-03 結果，本次現地成果則清楚呈現出 A-MNB 序列出現強烈的鏡像效應，與傳統地表施測成果相同深度 7m 以下是低電阻率區，深度 7m 以上為高電阻率區，而 AB-MN 序列呈





現出高電阻區左右不對稱，左側呈現較為明顯高電阻率形貌。

根據現地兩個序列施測成果分別計算此兩個序列的 IOS 值，因為 IOS 值代表每個序列配置對抗鏡像效應的指標。IOS 越高代表其抵抗鏡像效應的能力越強，計算方法為將左右對稱序列所收錄到的視電阻率代入 IOS 公式進行計算。圖 34 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。

透過兩種電極排列法聯合反演(Combined data inversion)中，依據上述的 IOS 的計算結果來挑選適當的序列進行阻合，本研究挑選了 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 35 所示，共有三種組合結果，分別是 (a)AB-MN123/A-MNB3、(b)AB-MN123/A-MNB4 及(c)AB-MN123/A-MNB34，並與圖 33 的 A-MNB 成果相比，本研究所關心之鏡像效應已得到一定的抑制，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，此高電阻率推測可能是較大顆粒的礫石，而地下 7m 處的低電阻塊推測為先前灌入之整治藥劑後反應之殘留物。

圖 36 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，此方法明顯解析度較低，雖然兩種方法都可大幅抑制鏡像效應，但整體的成像效果較不理想，而現地所關心深度較深的成果有明顯模糊化的趨勢。

圖 37 是另一孔 E-02 的量測結果，E-02 孔施測配置與 E-03 施測配置相同，地上測線為 10m，地下電極配置亦為 12m，整體施測成果顯示地下 7m 處呈現與 E03 一樣的低電阻團，且在 A-MNB 序列的收錄結果中呈現很明顯的鏡像效應，位置和地表電探所量測到的低阻區相符，推測也是藥劑反應後殘留的物質造成。圖 38 為 E-02 之 IOS 計算結果，根據此結果本研究挑選 AB-MN 序列中間距為 1、2、3m 的資料和 A-MNB 序列中間距為 3、4、5m 之序列進行聯合反演(Combined data inversion)，分別得出三種結果，如圖 39 所示，分別是 (a)AB-MN123/A-MNB3、(b)AB-MN123/A-MNB34 與



(c)AB-MN123/A-MNB45 三種組合結果，從 AB-MN 結果顯示在地下 2m 到 4m 的部分左右各有一塊高電阻率團，且出現左側較為明顯。結果的確反應出現地真實電阻率分佈的。圖 40 (a)MOST (b)WMOST 是利用模型加權法的反算結果，在電阻率大小的反應上明顯不及於聯合反演(Combined data inversion)，從縱向變化趨勢上仍與預期結果大致相同。

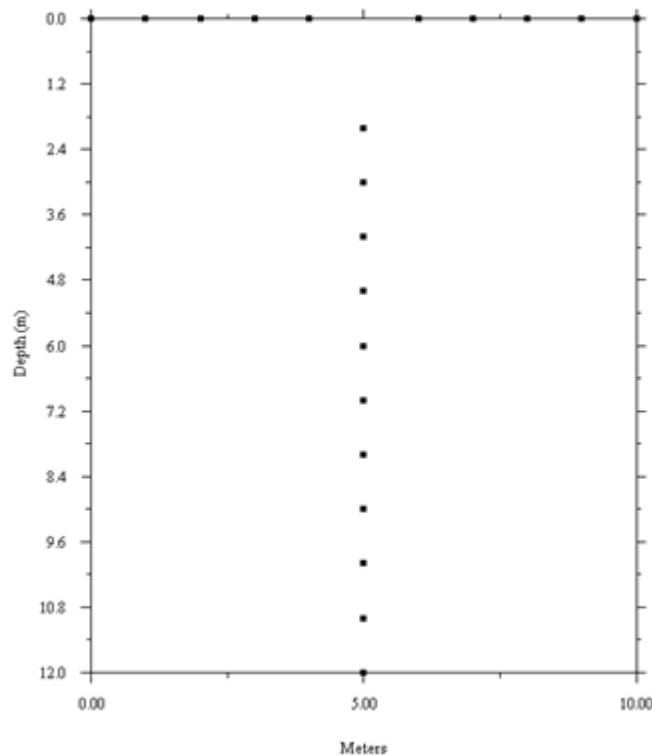


圖 32 現地地對孔井測線佈置示意圖



第六章 初步結論與後續工作說明

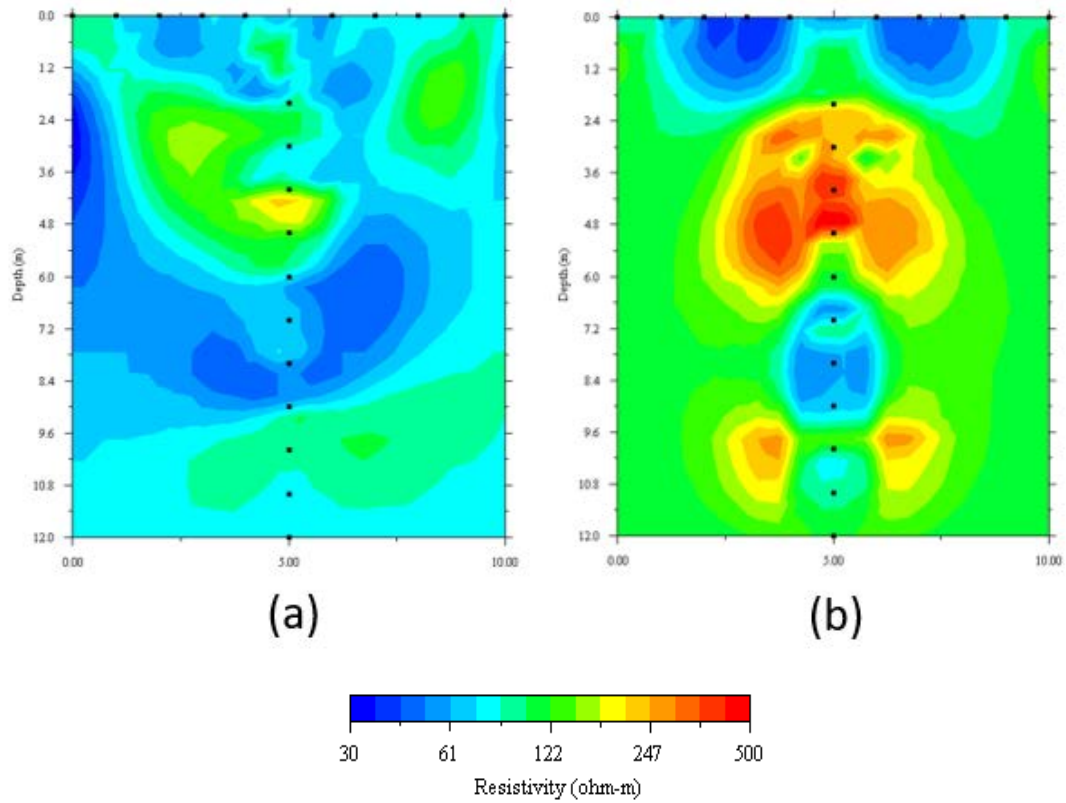


圖 33 E-03 T 字型測線原始收錄反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列

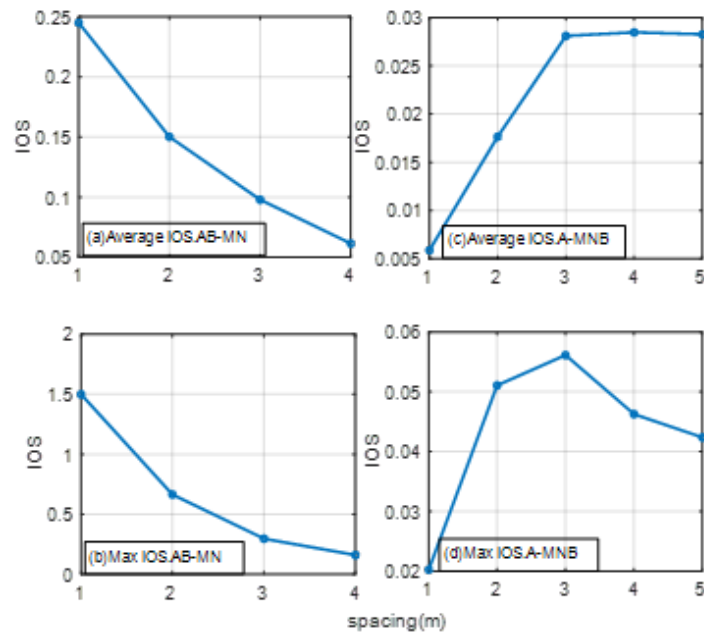


圖 34 E-03 IOS 計算結果:(a)AB-MN avg IOS (b)AB-MN max IOS  
(c)A-MNB avg IOS (d)A-MNB max IOS



第四章 研究方法與過程

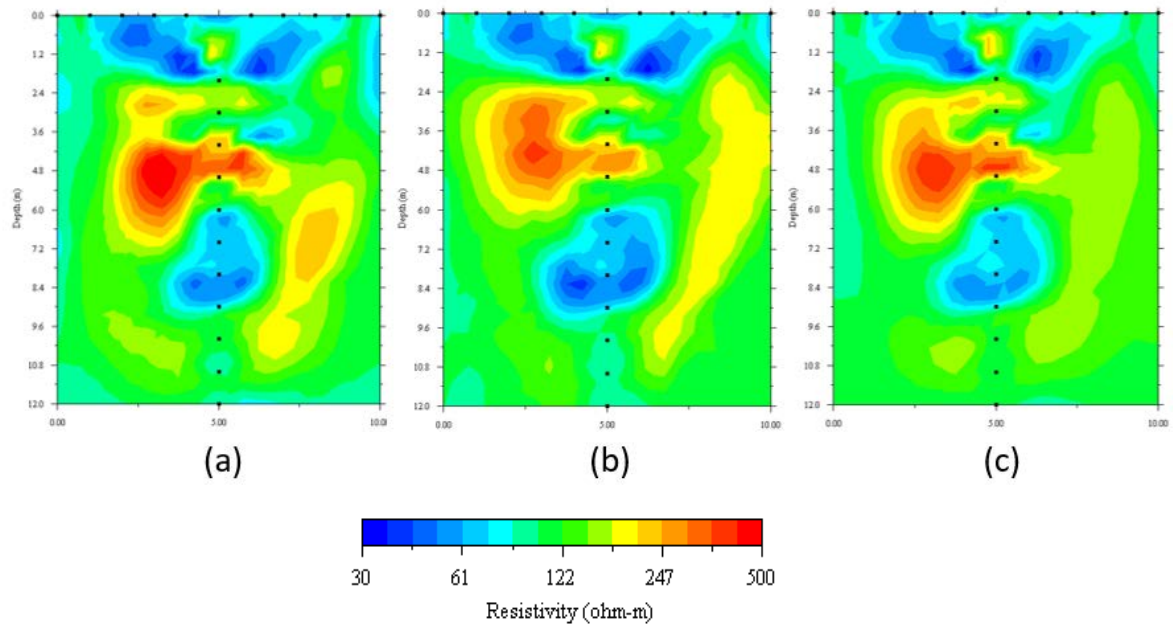


圖 35 E03 聯合反演(Combined data inversion)結果: (a)AB-MN123/A-MNB3  
(b)AB-MN123/A-MNB4 (c) AB-MN123/A-MNB34

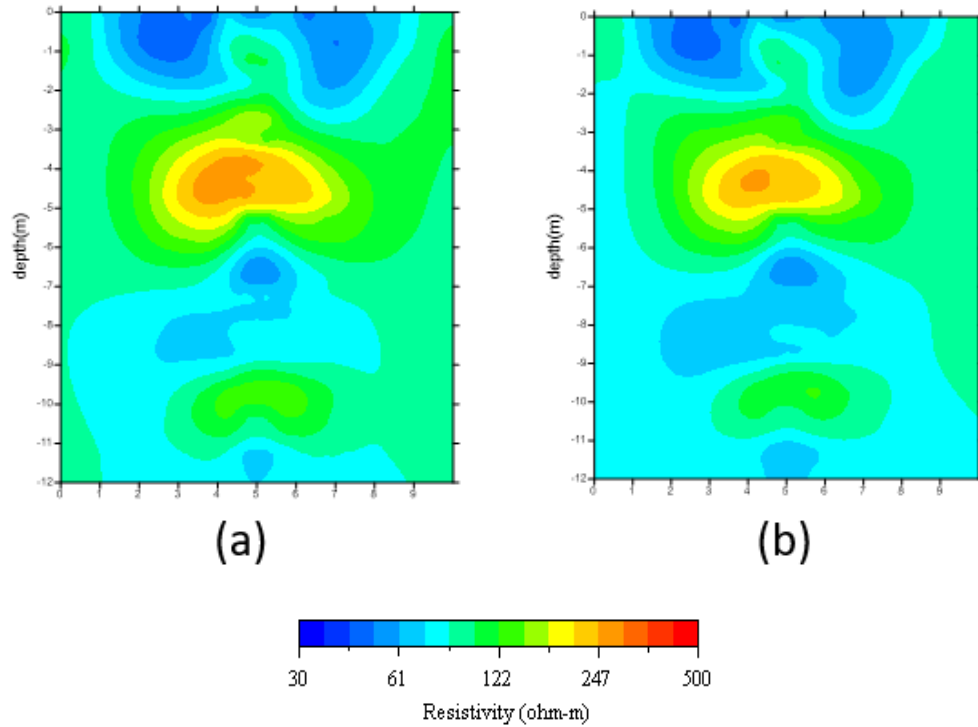


圖 36 E03 模型加權法結果:(a)MOST (b)WMOST AB-MN:A-MNB=7:3



## 第六章 初步結論與後續工作說明

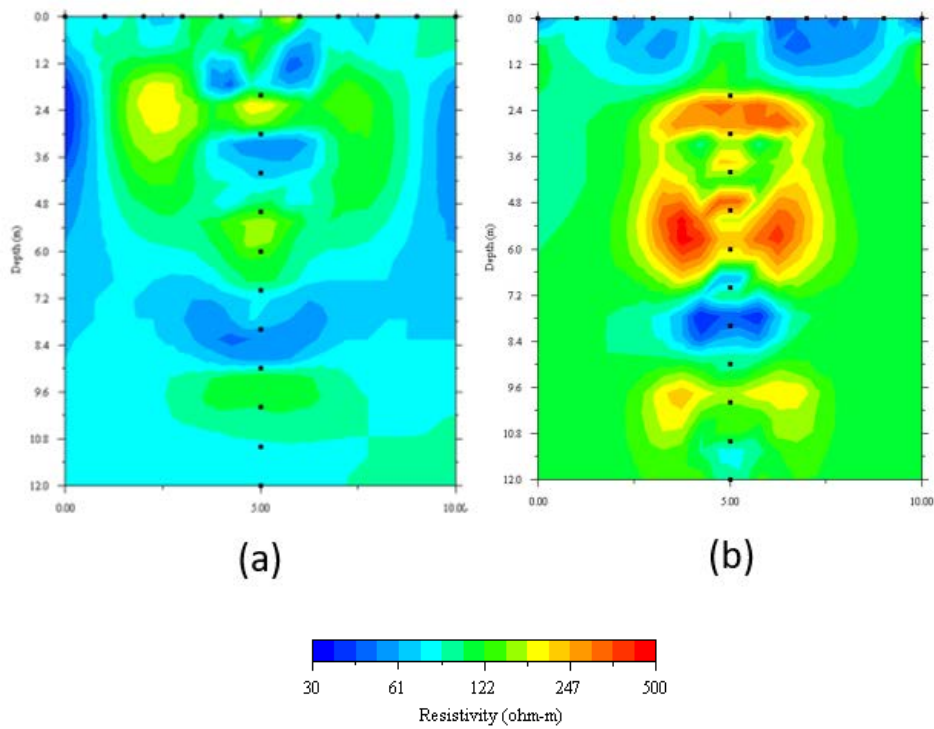
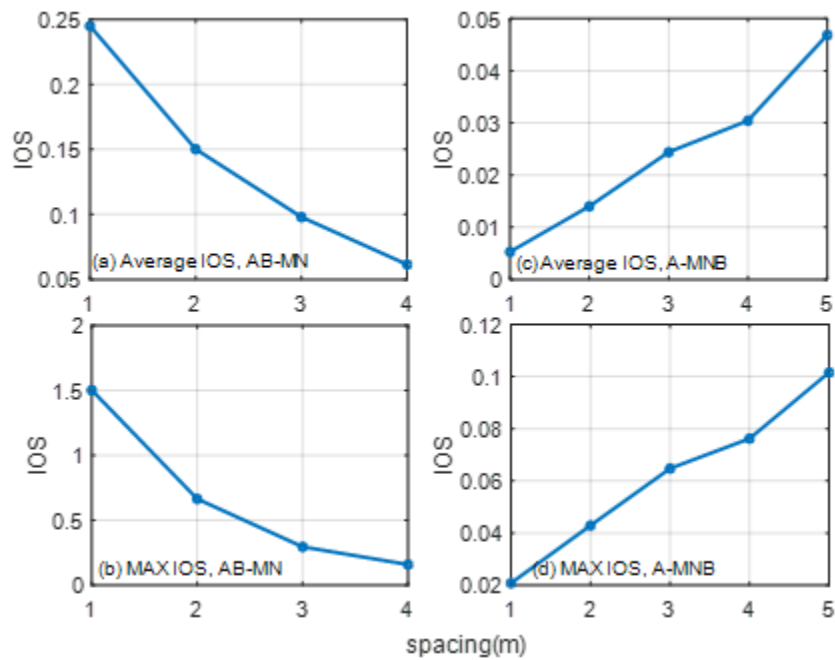


圖 37 E-02 T 字型測線原始收錄反算結果:(a)AB-MN 序列 (b)A-MNB 序列

圖 38 E-02 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





第四章 研究方法與過程

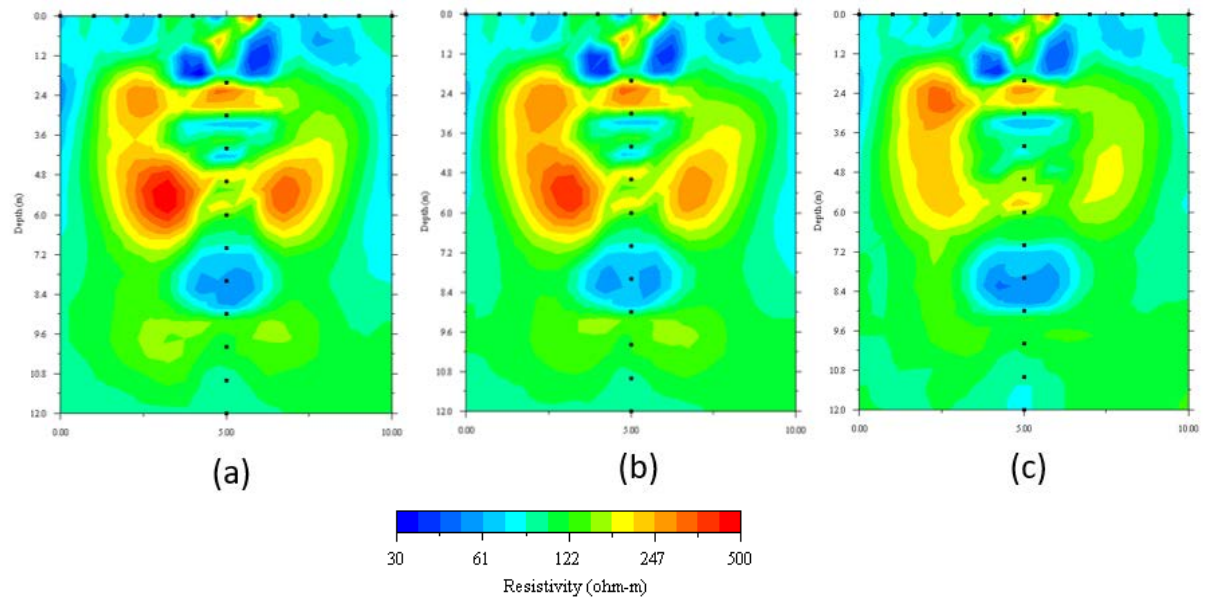


圖 39 E02 聯合反演(Combined data inversion)結果:(a)AB-MN123/A-MNB3  
(b)AB-MN123/A-MNB34 (c)AB-MN123/A-MNB45

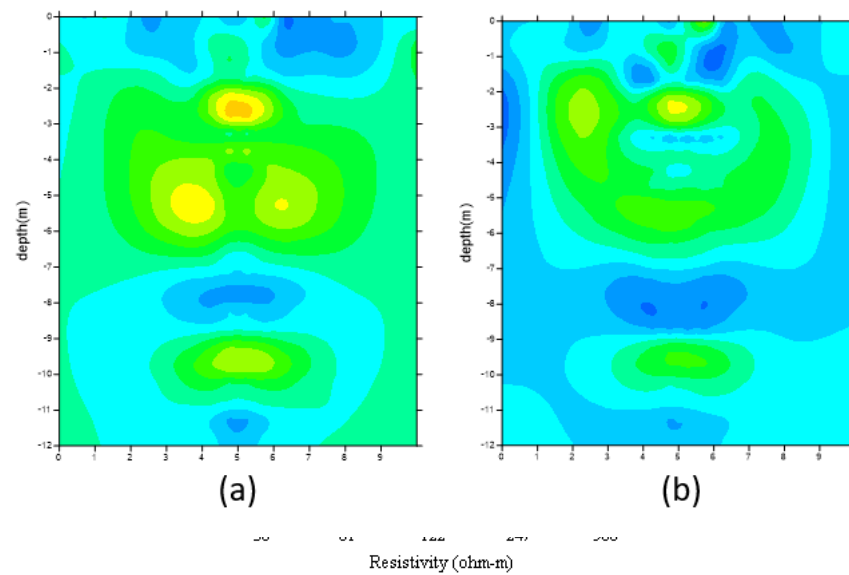


圖 40 E03 模型加權法結果: (a)MOST (b) WMOST AB-MN:A-MNB=7:3

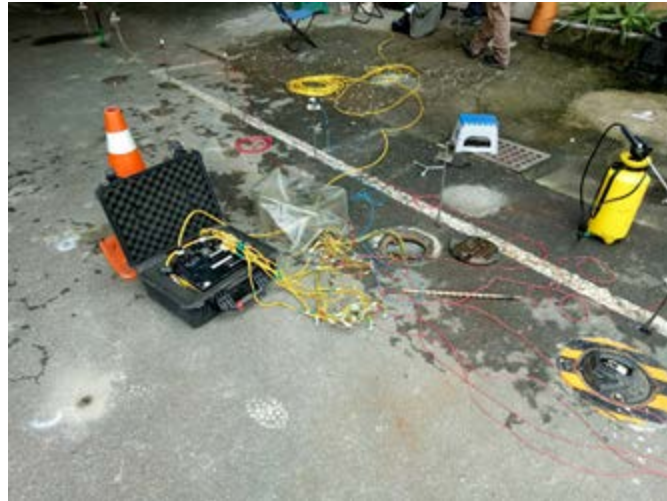


圖 41 現場施作照片

### 5.2.2.3 孔對孔井測電阻率剖面法(CHERT)

本節系主要探討關於王浩然(2018)所提出之 Extended Model 資料處理概念，從王浩然(2018)模擬結果來看，使用 Extended Model 除了給定反算模型正確的邊界條件外，似乎有一定抑制鏡像效應的效果，為了驗證該現象於現地之適用性。施測孔位和地對孔相同是 E02 與 E03 孔，兩孔關係圖如圖 42，兩孔深度皆為 12m，兩孔間距為 7m，施測序列分別使用 AB-MN，A-BMN，Bipole-Bipole 三種序列進行收錄，並分別比較其反算結果，圖 43、圖 44、圖 45 分別三種序列之施測成果，因兩施測孔皆為 12m 深，根據王浩然(2018)之建議，應將反算模型向外拓展 0.25 倍孔深，因此 Extended Model 反算模型左右往外延伸 3m，其中因水位影響，採用地下 3m 以下之電極進行分析，E02 與 E03 分別有 10 個電極。

圖 43 為 Bipole-Bipole 的收錄結果，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 Extend 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 44 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 45 是 A-BMN 的結果，其整體趨勢與 Bipole-Bipole 序列的結果接近。就這三種序列的收錄成果來看，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。

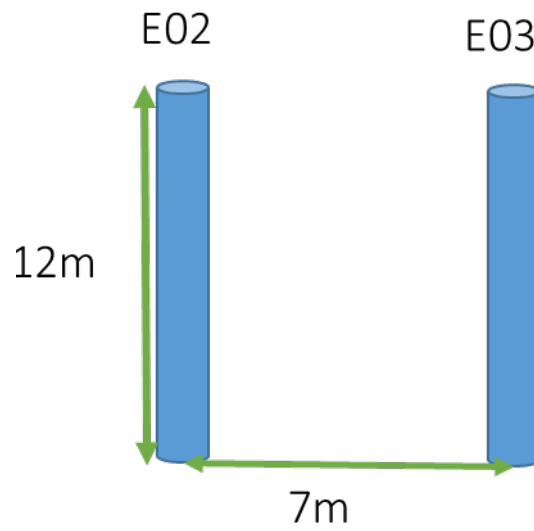


圖 42 孔對孔施測井關係圖

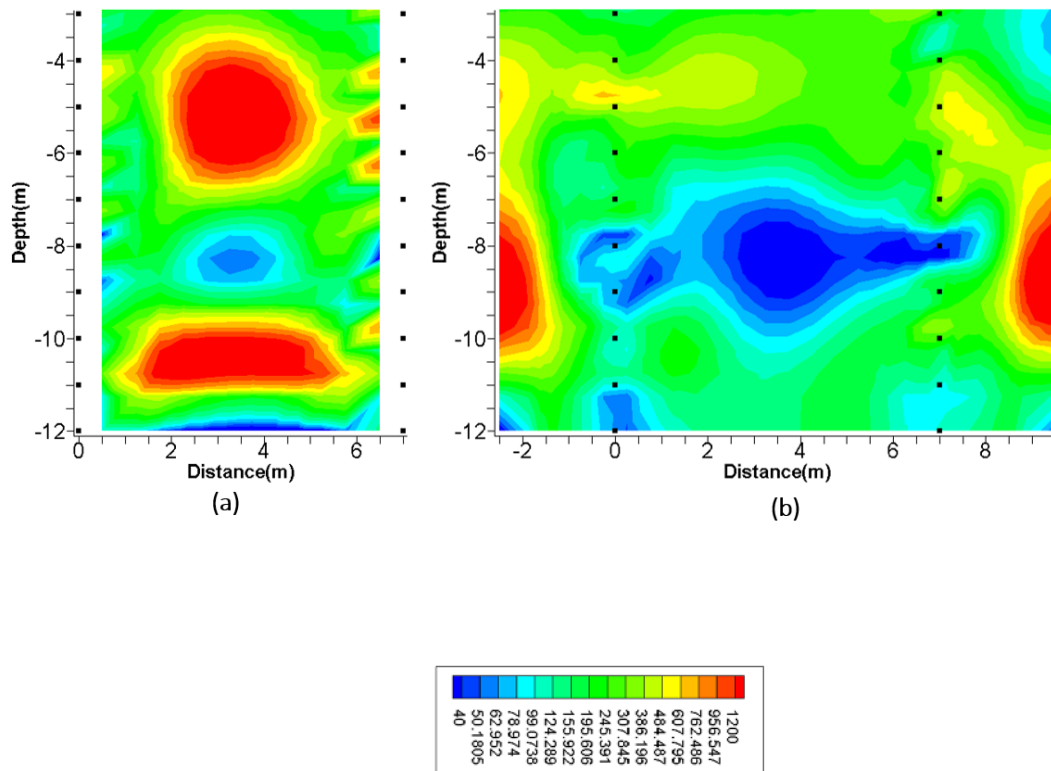


圖 43 孔對孔 Bipole-Bipole 施測成果圖: (a)沒有使用 Extend Model 反算結果, (b)有使用 Extend Model 反算結果



第四章 研究方法與過程

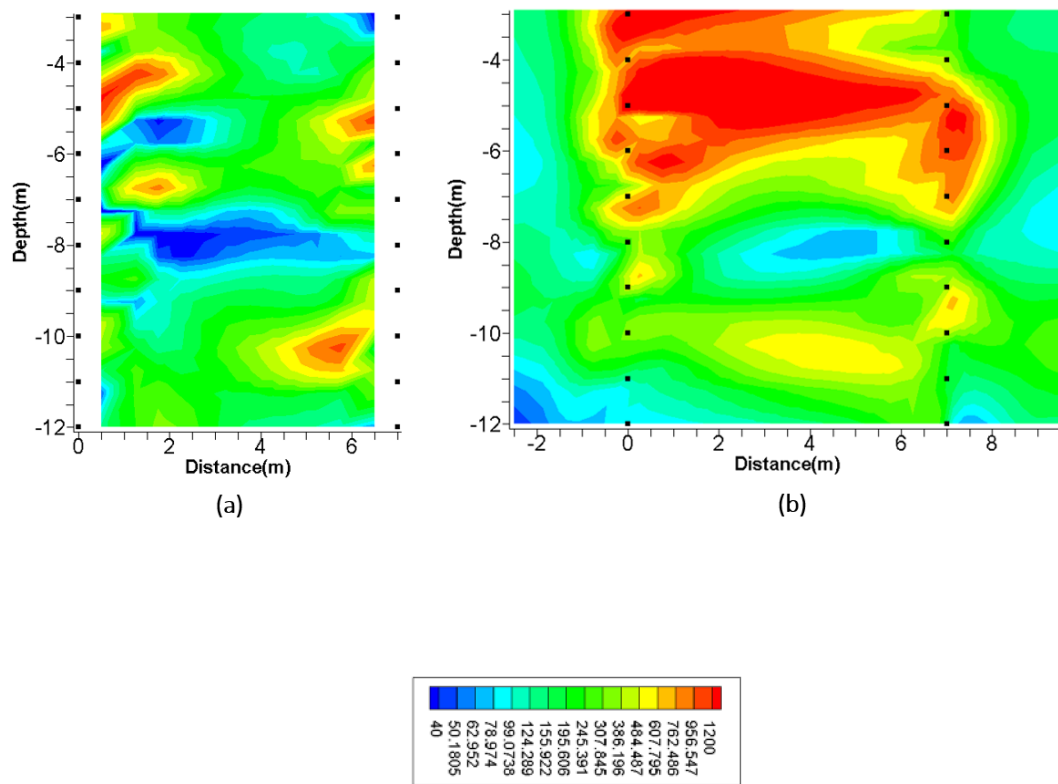


圖 44 孔對孔 AB-MN 施測成果圖：(a)沒有使用 Extend Model 反算結果，(b)有使用 Extend Model 反算結果



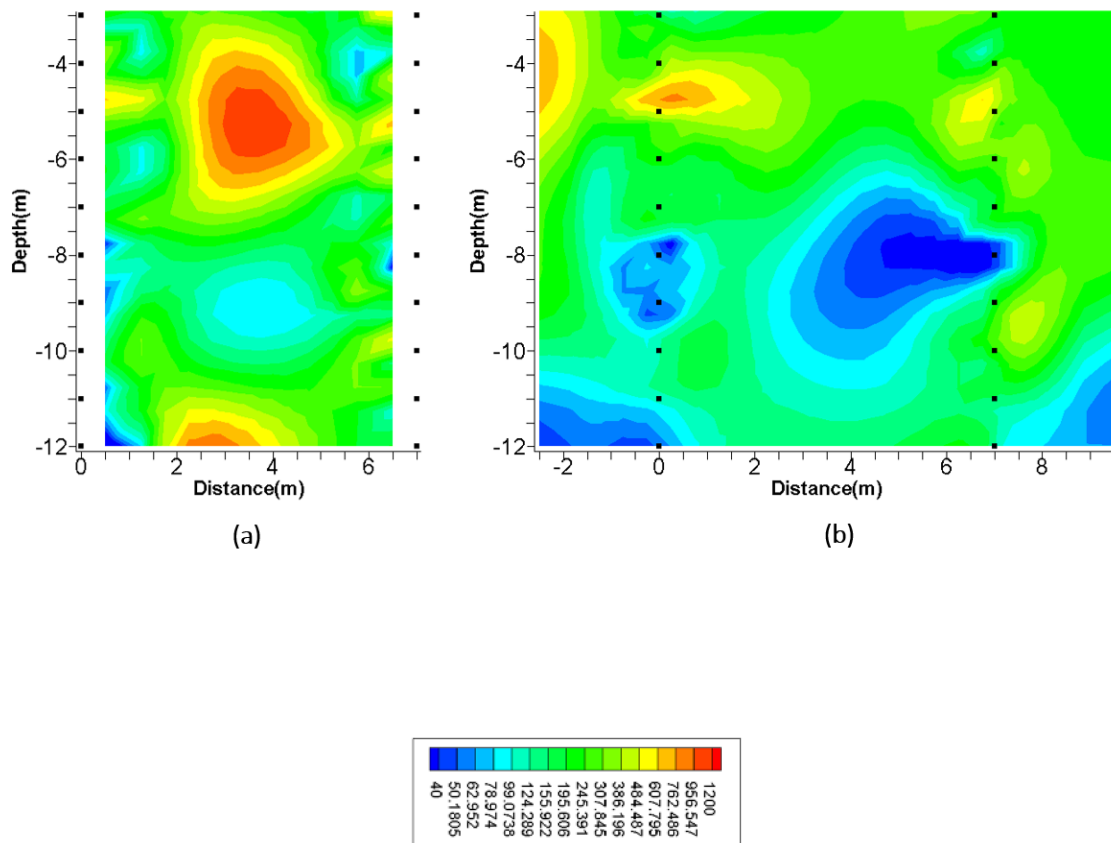


圖 45 孔對孔 A-BMN 施測成果圖：(a)沒有使用 Extend Model 反算結果，(b)有使用 Extend Model 反算結果

#### 5.2.2.4 單孔施測 BHERT 於現地之應用

為了驗證林志平等(2018)所提出的單孔指向性模擬結果於現地的適用性，在南區進行單孔指向性之現地試驗，施測的孔位是 E02 和 E03 孔。序列選擇使用 AM-NB(CP-PC)序列進行收錄。

圖 46 為收錄方法示意圖，1 到 8 方向指針對不同方向進行收錄，把鑽孔前方當作中心點，每 45 度收錄一筆資料，總共 360 度，8 筆資料，一個方向為一個剖面。地表電極佈設方面，根據過去模擬結果建議是地表和孔內測線長度 1:1 為佳，但由於場地限制關係，E-02 和 E03 兩孔在靠廠區部分



的測線無法拉到 12m 長(E-02、E-03 孔皆為 12m 深)，最長僅能拉到 2.5m，因此本次試驗也有分別就兩種地表電極和鑽孔距離進行探討，E02 孔位最遠電極為距離施測井 2.5m 和 7.5m，7.5m 僅部分方向得以收錄(3、4、5、6、7 方向)。E-03 測線佈置如圖 43(b)，其中(2、3、4、5)方向僅能拉出 2.5m 的距離，故僅有(1、6、7、8)方向得以收錄 7m 的資料。

圖 47 為單孔施測剖面示意圖(以 2.5m 為例)，橫軸為水平距離，縱軸為地下深度，橘色箭頭為探測方向。該施測區的區域的地下水流向大致上由北向南流動。

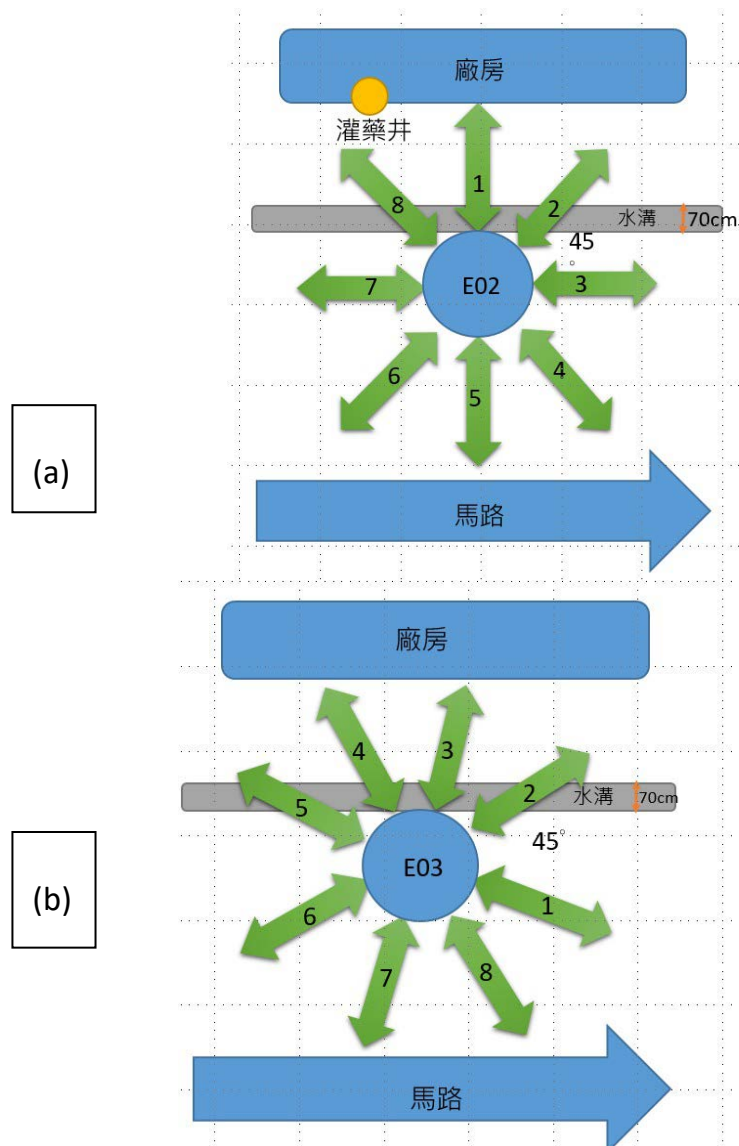


圖 46 單孔施測示意圖: (a)E-02 測線佈置 (b)E-03 測線佈置

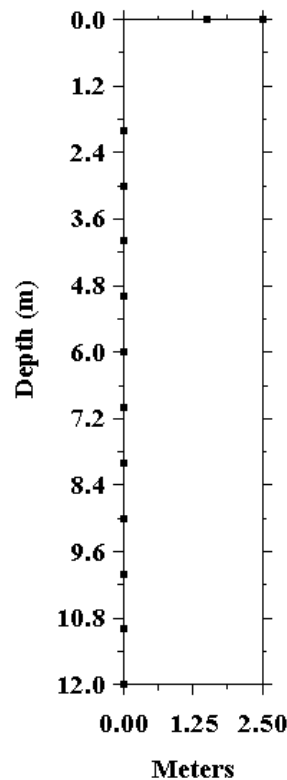


圖 47 單孔施測剖面示意圖 2.5m

### (1) E02 單孔結果討論

圖 48 為 E-02，地表固定電極為距離孔 2.5m 之收錄結果，共分成 1 到 8，8 個方向，在 1.2.8 方向有一寬約 70cm 之水溝。以下是結果之判釋，首先，縱向的電阻值變化和 T 字測線量測解果大致上吻合，7.2m 以上是礫石造成的高阻區，7.2m 以下是低阻區，推測是藥劑反應後之殘留物影響，在初步比較量測結果後發現 1.2.8 方向的變化較為明顯，但其他方向之結果看來十分接近，為了進一步比較每個方向之差異性，圖 49 為 E02-5 當做 Base 導電度變化，可以發現相對於 5 方向而言，3、4、6、7 方向的電阻率變化基本上都和 5 方向相同，推測這幾個方向變化性不大，但 8 方向有較明顯的變化，在此我們特別關注地下 7.2m 的地方，可以發現 8 方向的導電度比其



## 第四章 研究方法與過程

他方向都要高，且此區域的地下水流向大致上是由廠區流向量測井，因此推斷在圖 46(a)中灌藥井灌入藥劑後，經地下優勢流徑傳遞至監測井處，因該方向(8)在此區屬於上游，藥劑反應之目標物較其他方向少，故藥劑殘留可能比其他方向多，進而產生導電度比較高的情況。

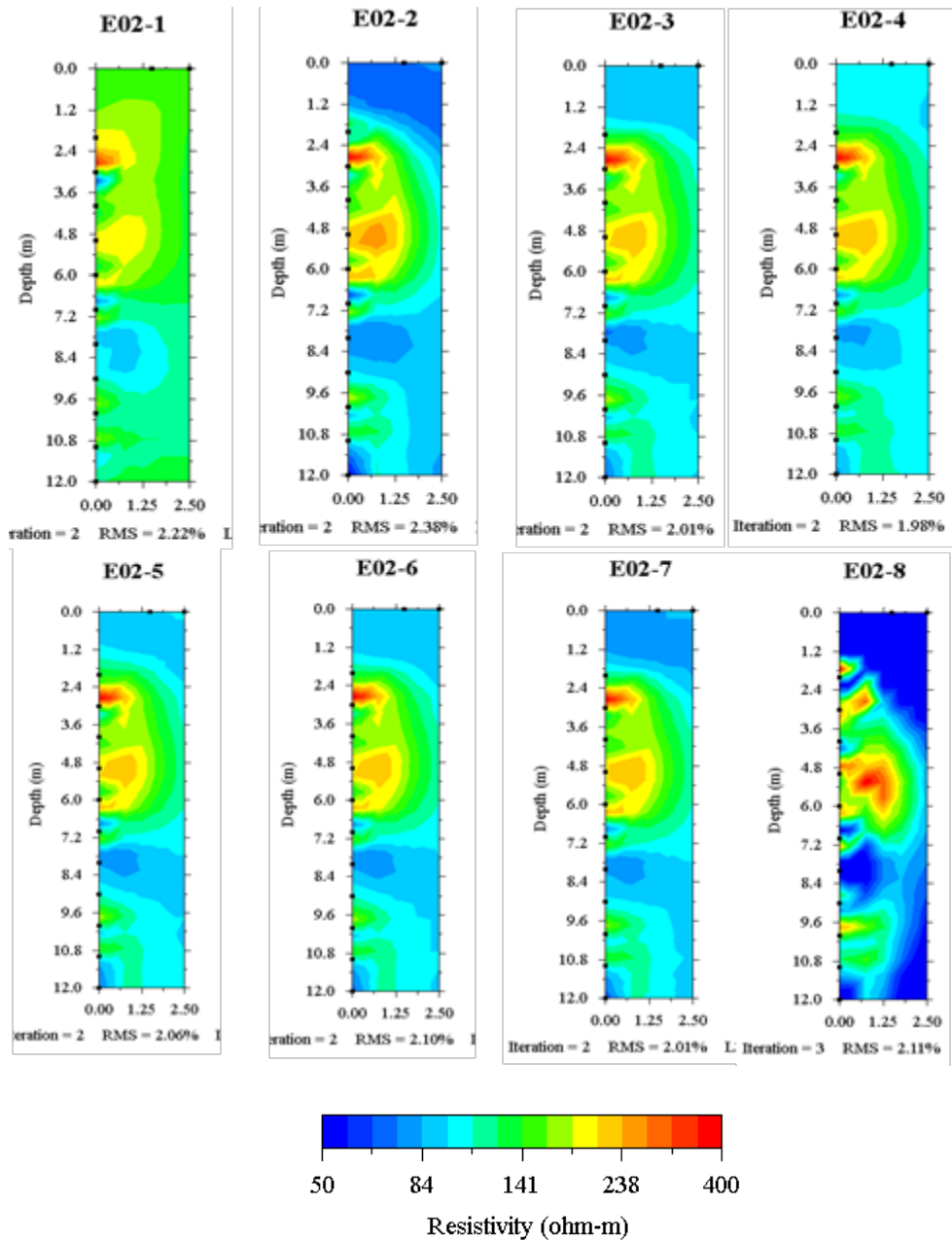


圖 48 E02 2.5m 收錄結果

(由左上至右下依序是 1 至 8 方向量測結果)



## 第六章 初步結論與後續工作說明

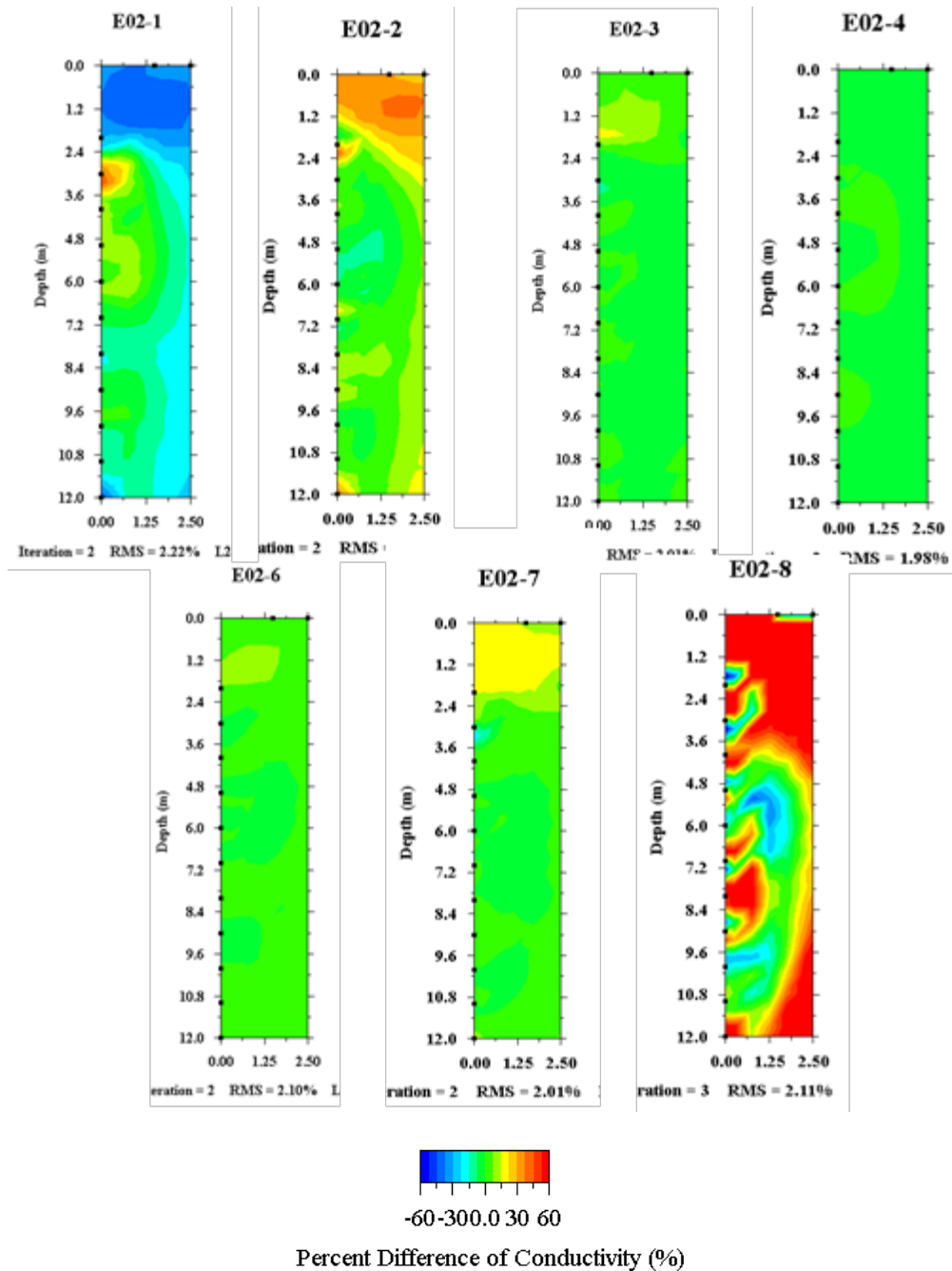


圖 49 E02-5 當做 Base 之導電度變化

(由左上至右下依序是 1 至 8 方向計算結果)

接著是就地表電極距離的探討，前面有提到礙於場地的限制我們沒有辦法把每個地表電極跟施測井的距離拉到與井深 1:1，因此我們分別進行地表電極 2.5m 跟 7.5m 兩種施測方式，在 E-02 有 5 個方向可以進行較遠地表電





## 第四章 研究方法與過程

極施測，圖 50 是地表電極距離施測井 7.5m 的結果，其中 E02-5L 方向因為在距離孔 7.5m 處剛好是障礙物無法移除，故改成 6.5m 進行施測，可以看到 7.5m 施測方式顯現出了該井單孔的探測範圍極限大約在距離孔的 2.8m 處，在 2.5m 施測中並沒有看到探測範圍極限的跡象，和圖 46 的結果相比，圖 47 的結果更為平滑。

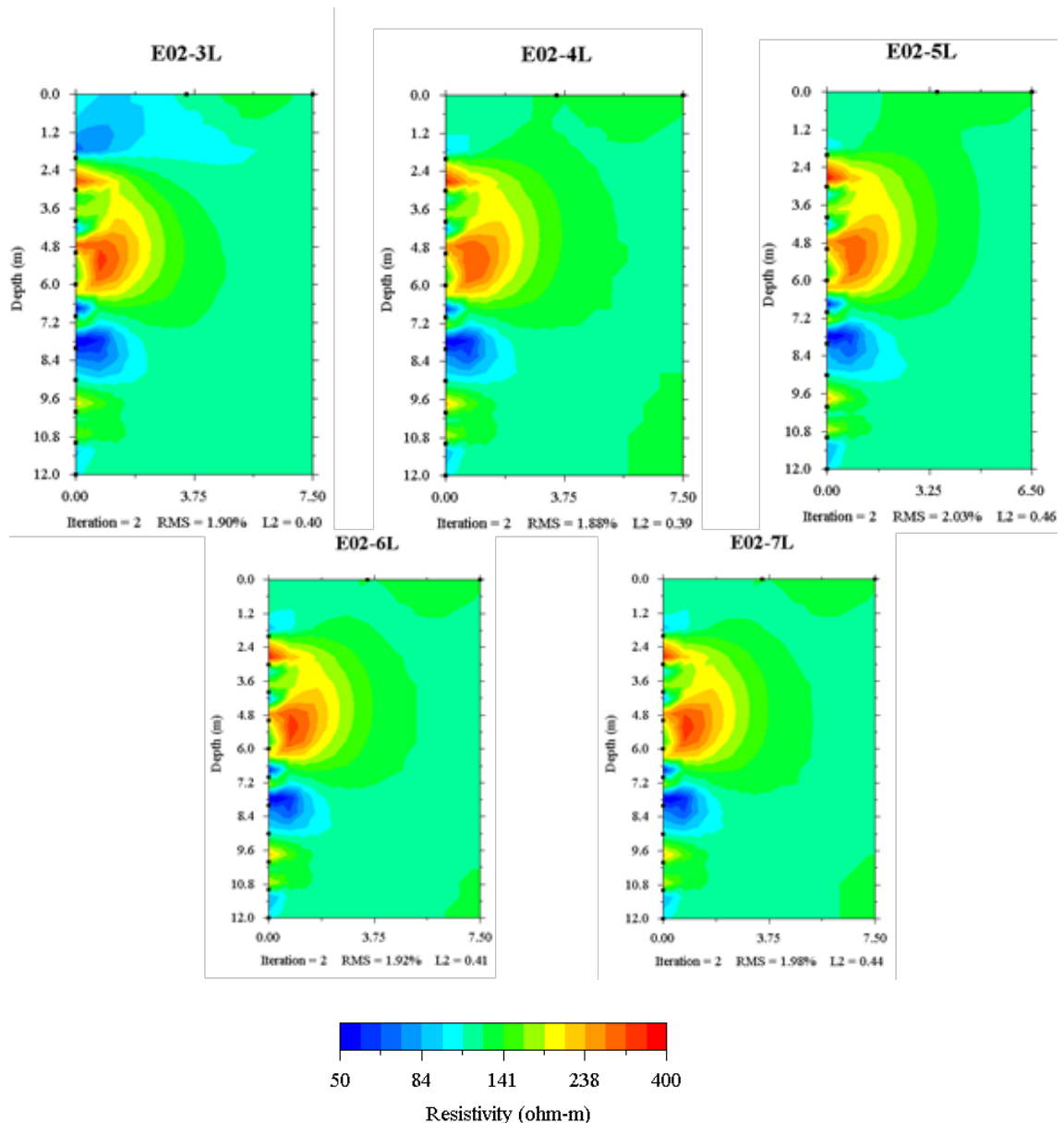


圖 50 E02 7.5m 施測結果

(由左上至右下依序是 3 至 7 方向計算結果)



## (2) E-03 單孔結果討論

圖 51 為 E-03，地表固定電極為距離孔 2.5m 之收錄結果，同樣分成 1 到 8 共 8 個方向，且在 2、3、4、5 方向有一寬約 70cm 之水溝。縱向電阻率變化同樣和 T 字測線 E-03 的結果吻合，其中 E03-2 方向靠近地表處高阻區較其他方向大，推測是在設置地表電極時距離水溝過近造成干擾所致，淺層高阻區大致上應是礫石造成，7.2m 以下之低阻區從圖 51 中看來各方向差異性不大，為了進一步比較各方向之差異性，在圖 52 中我們將 E03-7 作為 base 和其他方向相減進行比較，可以看出各方向變化皆不明顯，推測在 E-03 孔各方向地層差異性不高，且 7.2m 以下推測當藥劑傳遞至此處後在各方向反應程度相差不大，因此在電阻率反應上也較不明顯。

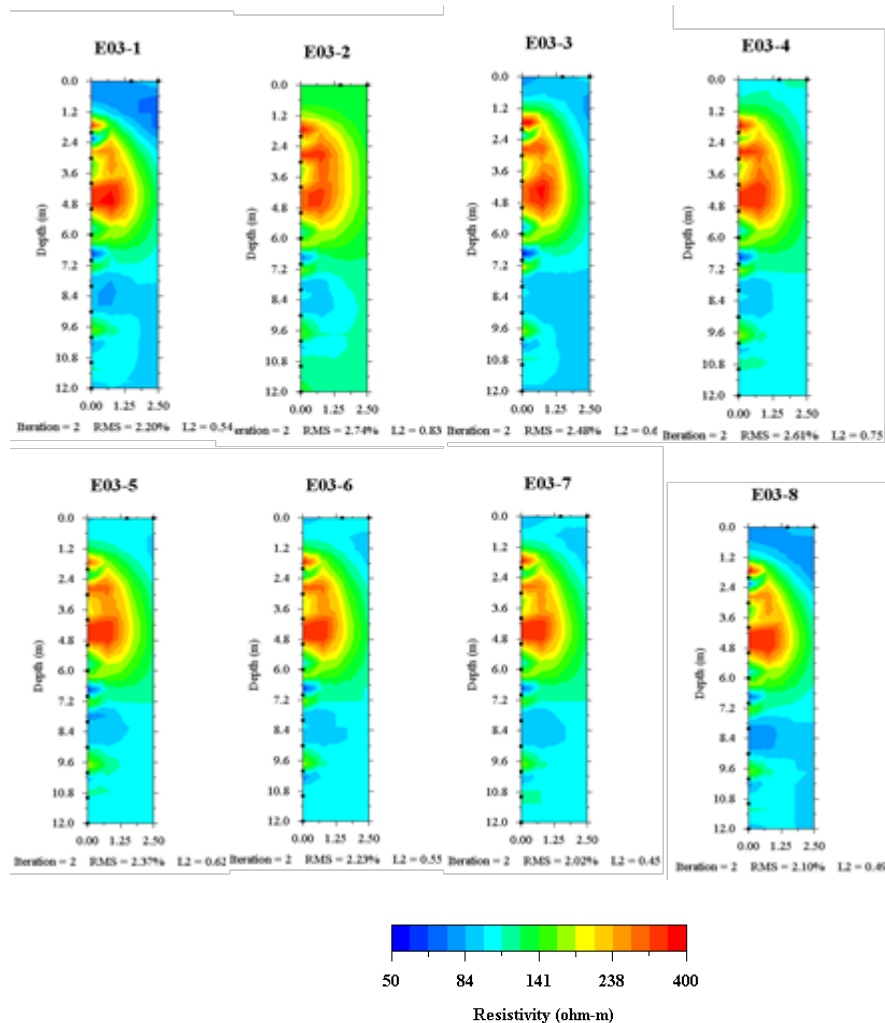


圖 51 E-03 2.5m 之收錄結果(由左上至右下依序是 1 至 8 方向計算結果)



## 第四章 研究方法與過程

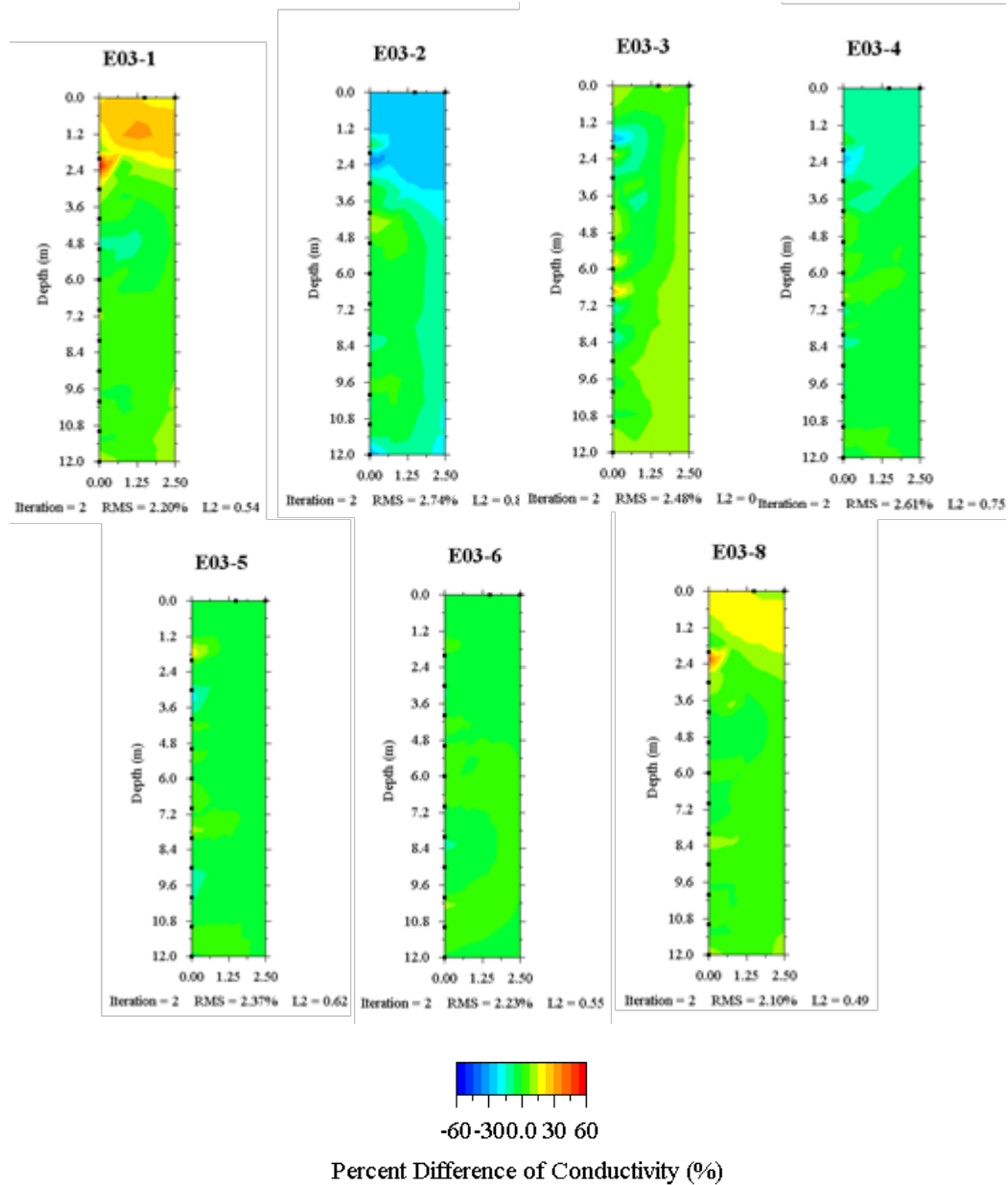


圖 52、以 E-03-7 方向作為 base 和其他方向相減之結果  
(由左上至右下依序是 1 至 8 方向計算結果)

接著說明地表電極距離孔位較遠之施測結果，由於場地限制，我們 E03 孔最遠電極設立在 7m，在 1、6、7、8 四個方向進行測試，結果如圖 53，



可以看到如同 E-02 之結果，在橫向之電阻率變化方面，7m 的橫向解析度大約在距離孔位 2.8m 處，和 2.5m 的量測結果有所不同，7m 的結果探測範圍較完整，縱向變化趨勢仍和 2.5m 相差不大。

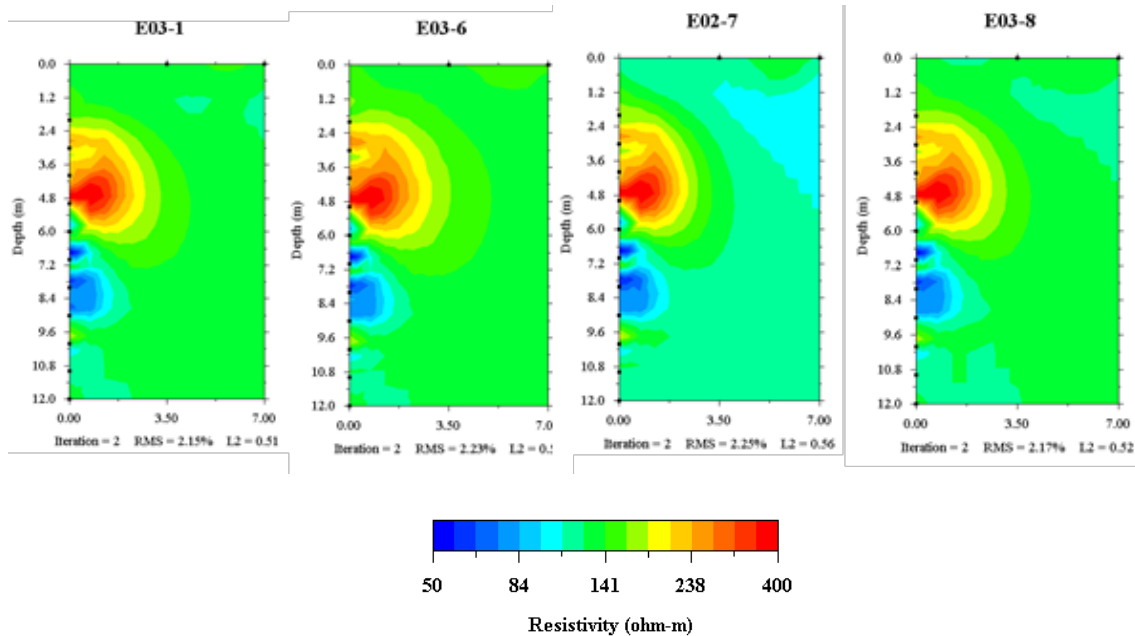


圖 53、E03 7m 施測成果

(由左而右依序是 1、6、7、8 方向計算結果)

綜合本次兩孔進行單孔指向性的結果來看，在地表設立固定兩電極使量測範圍限制在一個方向的量測方法是有一定的效用的，但也有一些限制存在，由本此藉由遠近兩種不同的地表電極施測結果來看，當地表電極距離孔太近會因模型太小而限制其成像，為了讓結果更顯平滑，建議仍需將地表最遠電極拉至 0.5 倍孔深以上為佳。單孔施測法藉由不同方向反覆進施測，觀察其差異性，在結合當地水文地質資料進行綜合判釋，建議未來在污染場址地欲進行初步調查時可以先進行單孔指向性的施測，藉由量測結果，針對反應異常最大的方向進行更加詳細的調查，可以節省調查的時間與經費。



## 第六章 第二年工作概述與前期研究成果

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。

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，已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。
- (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。

第一年計畫成果檢討

- (1) 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在本年度成果仍有努力目標，因為目前最佳化電極排列法必須要在實驗室透過數模進行排列組合，達不到現場即時配置成最佳化電極排列法，期望透過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。

- (2) 模場北側與抽水實驗搭配時間過短，雖已達成研究目: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。期望能夠於第二年計畫進行 T 字型與跨孔電探聯合施測模式，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。
- (3) 在 T 字型電探(borehole surface)與跨孔電探(Crosshole ERT)兩種孔內施測方式與地表聯合反演都有一定成效，其中地對孔在數值模擬單獨反演時經過聯合反演方法(Combined data inversion)已幾乎看不到鏡像效應存在，但在聯合反演結果中卻出現微弱的鏡像效應，目前並不確定時何種原因造成，原因可能是數據量不足，於後續建議透過大數據監測，透過海量數據搭配現地水文地質參數與地質鑽探成果，進行優化期望得到最佳化現地資料處理流程。
- (4) 地對孔 T 字型電探(borehole surface)利用兩種不同的序列進行聯合反演具有優於一般地表量測時的解析度，但本研究於現地配置之測線因現地因素無法達成 1:1(Surface:BH)，於第二年計畫進行時會改進現地因素達成 1:1 的測線配置，並同時使用兩種序列進行收錄，一種不具鏡像效應，一種雖具鏡像效應但可以提供解析度的序列。利用聯合反演方法(Combined data inversion)嘗試得到更精確的剖面。



## 第二年度研究工作概述

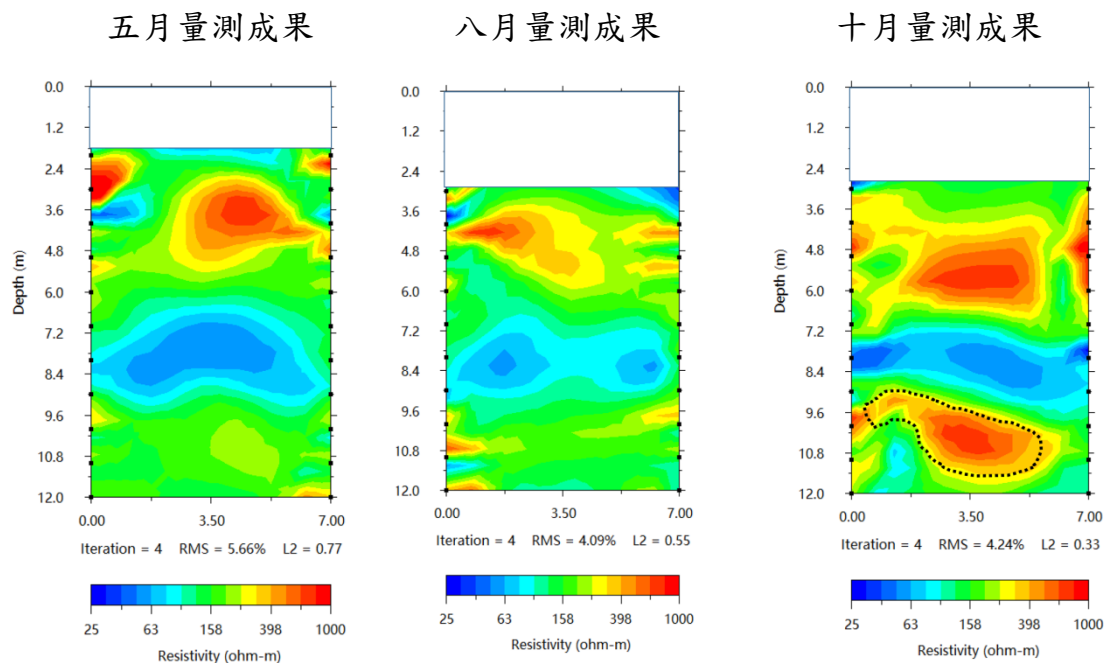
本兩年計畫研究目的在既有監測井之汙染調查或整治場址監測時，運用並搭配既有孔內之地電阻影像探測技術，透過現場施作參數與分析方法的改善，可有效提升孔內地電阻影像探測成果的成像解析度。研究成果之應用價值將可協助提升汙染物或藥劑整治之調查或監測工作，使其可達到設計規劃之效益，有助早日恢復土壤及地下水之生產力。第一年已完成透過現場施作參數與分析方法的改善，可有效提升孔內地電阻影像探測成果的成像解析度，第二年重點放在提升汙染物或藥劑整治之監測工作，期望透過最新的時間序列監測方法進行模場高潛勢區監測工作。

主要針對調查或整治時應用鑽孔之地電監測技術發展，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；基於第一年於現場之跨孔施測經驗，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，尤其當地層具異質異向性高，或深層地下水汙染，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汙染物混合產生作用，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。建議進行電阻率動態量測，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。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汙染深度較深的場地，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汙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。

本研究除了增加現地量測解析度外，今年本團隊於另一潛勢污染區域進行三次高解析度電阻率量測，此區域與模場地質雷同皆為紅土礫石層，目的是為了凸顯動態量測系統的重要性。施測成果如下圖所示：



研究成果依序為高解析度跨孔量測五月、八月與十月成果，可很清楚發現五與八月成果井底無明顯異常高電阻率區域，而十月量測成果則出現一紅色相對高電阻率異常團，根據採樣結果，五月與八月三氯乙烯濃度在管制標準以下甚至 ND，但是十月份三氯乙烯濃度則超過管制標準數十倍以上，所以時間系列量測對於高風險區域是非常重要的，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與系統是非常重要的且刻不容緩的。



### 參考文獻

1. 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。
2. 林志平(2018)，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，行政院環境保護署107年度土壤及地下水汙染整治基金補助研究與模場試驗專案-期末報告。
3. 林志平(2016)，地電阻影像探測監控土壤與地下水汙染整治的技術發展，行政院環境保護署105年度土壤及地下水汙染整治基金補助研究與模場試驗專案-期末報告。
4. 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汙染場址之研究，國立中央大學地球科學學系博士論文。
5. Advanced Geosciences, Inc, 2003. Cross Borehole Electrical Resistivity Tomography (ERT) Measurements.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. 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.
12. 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.







## 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

### 108 年度專案成果績效自評表

#### 一、 專案基本資料

填表日期：108 年 05 月 12 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 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	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input checked="" type="checkbox"/> 期中 <input type="checkbox"/> 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	0	1	100%	相關研究成果，已投稿至 Ground water 期刊
		(2)研討會論文	0	-	0	1	100%	研究成果於 Geophysical aspects of smart cities 研討會發表本期研究成果
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	-	0			
		(2)研究報告	1	-	0	1	100%	完成結合井



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)
								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	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	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	-	0	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成果的成像解析度。研究成果之應用價值將可協助提升污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 計劃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    **審查意見回覆對照表**  
☒修正計畫書    ☐期末報告

計畫年度	108 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 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，在執行計畫時便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)之含氯場址進行試驗。 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。	



<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>6. 本計畫書中對相關文獻蒐集尚完整。計畫主持人對國內外本研究領域現況</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員肯定。</li> <li>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。</li> <li>4. 感謝委員肯定。</li> <li>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</li> <li>6. 感謝委員肯定。</li> <li>7. 感謝委員肯定。</li> <li>8. 感謝委員肯定。</li> <li>9. 感謝委員肯定。</li> </ol>
---	--





<p>了解。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>9. 本計畫書已將原初審意見加以說明（或修正）。</p>	
<p>本署意見：</p> <p>模場第二年人事費及其他研究相關費用加總錯誤，請修正。</p>	<p>已針對署內意見進行修正</p>



# 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	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 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。	



<p>委員三：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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？</li> <li>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。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>
<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. 屬延續性計畫。</li> <li>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。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. 本計畫屬與前期相關計畫之延伸模場計畫。</li> <li>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。</li> </ol>
<p>委員五：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>2. 本計畫規劃兩年執行是受限於經費或時間等問題？</li> <li>3. 孔對孔之間是否有距離限制條件？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ol>



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。

