

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

地電阻影像探測監控 土壤與地下水汙染整治的技術發展

期末報告(定稿)

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

104 年 11 月 17 日起至

105 年 11 月 16 日

中華民國 105 年 12 月 印製

「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」

☐修正計畫書 ☐期中報告

☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展		
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100
審查意見		計畫單位回覆	
委員 1			
1. 圖表建議用彩色印刷,圖表的深淺色分佈無法明確分辨。 2. 錯字請逐頁檢查改正(p25 標題嚴重錯誤)。 3. 結果與討論詳盡,請加入結論與建議章節對研究成果總結。		1. 感謝委員建議,主要成果採灰階呈現,部分彩圖請參酌電子檔。 2. 感謝委員提醒,已更正。 3. 遵照辦理,請參考第六章 結論與建議。	
委員 2			
1. 本計畫針對電極排列方式進行優化探討,並研發移動式孔內電極。本研究利用地電阻影像探測方法監測藥劑在低滲透地層中的傳輸範圍與路徑,並測試移動式孔內電極的現地應用效果。 2. 可說明本技術在實場應用時,如何進行設計、規劃。 3. 說明本技術在實場應用時,如何進行 QA/QC 的控制以及如何掌握準確度。		1. 感謝委員對本研究之目的總提。 2. 請參考結論之內容。 3. 實場應用時之 QA/QC 與既有地表施作並無不同,因此在本研究中未特別進行討論。	
委員 3			
1. 期末報告應檢附歷次審查意見及回覆辦理情形,請補充。 2. 研究方法與過程之章節說明不夠清楚,請詳加說明研究方法之內容。該章節標題,含誤植內容,請修正。 3. 4-2 節內容仍出現期中報告字眼,請加強報告書校正與品質。 4. 砂箱試驗之條件與地電阻測試之結果,應有更明確討論,其中驗證方式為何?請補充。 5. 本計畫之技術限制條件為何?水文、地質及污染物種類等條件,均應有相關之評估與說明。 6. 計畫推論移動式孔內電極具有現地應用之價值,且可進行規模生產,然計畫成果中仍有部分限制因素,如何能得到此結論,應有更完整之論述。請修正。		1. 遵照辦理。 2. 研究方法之內容考量閱讀之整體性,於第五章結果與討論之各小節中說明,請查照。 3. 誤植處已改正。 4. 砂箱試驗結果主要在驗證本研究所提出模組式移動電纜線與孔內施測對於污染物分布範圍(此處採用相近電阻率之水泥漿作為污染物的模擬)調查的可行性,將在砂箱內施測之結果分析後與挖出硬化後之水泥柱實際尺寸比較,作為驗證方法。詳細請見 5.2.2 節。 5. 感謝委員建議,惟委員所提之條件為施測無法預知之環境因素,對量測結果影響具重要性,但其需要根據特定施測配置進行探討。本計畫先以電極幾何排列的狀態(現場施測參數)進行最佳配置探討,未來在此配置上,可進一步對委員所提之環境因素進行影響探討。 6. 感謝委員提問。本研究對所開發之移動式孔內電極具規模生產之結論主要源於 2 點;1. 現場實測可獲得品質良好之資料,2. 可無須依靠 PVC 管外綁紮電極環,直接於全開篩孔中施作,施作完畢還可回收。在此兩點現地應用優勢下,總結其具現地應用價值之結論。	

「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」

☐修正計畫書 ☐期中報告

☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展		
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100
委員 4			
1. 應提供期中審查意見回覆、應說明成果自評表中學術產出未達成之原因或進度，以符合期末報告之要求。		1-2. 遵照辦理。	
2. 應提出綜合完整計畫之結論與建議，與後續應用研究內容及可實場應用之評估。			
委員 5			
1. 執行現況、流程及方法說明具體 2. 計畫執行進度與預定進度相符 3. 整體研究成果符合預期 4. 根據研究內容所提出之討論與建議合理，但部分成果的解讀與應用條件建議進一步討論 5. 研究內容與計畫目的相符 6. 研究成果具體：主要為論文發表 7. 研究成果的說明建議以實務操作參數加以探討，例如：報告中說明本技術可於現地操作，現地操作的主要應用參數如測線長度與鑽孔長度為 1:1，為什麼？是一般的建議值或是依土壤質地而定？或是有其他的必要條件？仍建議具體說明討論 8. 本技術的應用限制條件(5.3.3 節的結果仍待進一步的說明)或是適用條件？建議說明討論。5.3.3 節的結果互異，該如何判斷？5.3.3 節的互異結果是觀察的結果，但原因卻是推測的？實務上，依 5.3.3 節的討論與推測，可能的解釋會是矛盾的，該如何做決策？ 9. 本計畫已有具體的研究成果，但是土污基金模場計畫應是以應用性為主，本研究的成果如何應用？應用的條件為何？…等等，建議說明		1-3. 感謝委員認可。 4. 本研究以施作時的最佳施測幾何配置為研究核心，因此並無應用條件之前提限制。 5-6. 感謝委員認可。 7. 不同土質情況下最佳施測參數會略有差異。本研究以典型材料參數進行施測參數測試，將其最具有效果量測範圍之結果做為建議提出。 8. 不同土質情況下最佳施測參數會略有差異，但本研究目的是提出較為通用的施測參數設定導引，因此以典型材料參數作為幾何排列最佳化研究，此為相關技術開發測試之慣例。至於外在環境對結果之影響，需在提出的特定配置方法下另進行影響探討。 9. 本計畫屬研究專案，非模場試驗，以技術之提升研究為主。本研究之結果有利於採用孔內地電阻影像探測法進行調查時之施測參數設定之用。	

「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」

☐修正計畫書 ☒期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展		
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100
審查意見		計畫單位回覆	
委員 1			
1. 已研發出第一代之移動式孔內電極雛形，將於後續現場測試。		1. 感謝委員肯定。	
2. 建議後續之測試能釐清本計畫研發技術之使用限制，以及其可使用之場址條件。		2. 後續現場實測將測試研發成果之適用性。	
委員 2			
1. 本計畫之目的為電極排列方式的優化探討及移動式孔內電極的研發。本研究將擇一試驗場址，利用地電阻影像探測方法監測藥劑在低滲透地層中的傳輸範圍與路徑，並測試移動式孔內電極的現地應用效果。目前研發出第一代之移動式孔內電極雛形，將於後續現場測試。		1. 感謝委員之肯定。	
2. 目前成果及結論似無法說明此技術如何進行實場應用及可行性。後續可補充如何克服此問題。		2-3. 現場實測及技術之適用性將於現地測試後於期末報告說明。	
3. 建議說明使用之限制，補充如何進行實場應用。		4. 本研究之主要核心在於電極排列方式的優化以及移動式孔內電極的研發，透過此研究提升調查成果之解析度與可靠度，並提升其應用性，但在量測上仍為地電阻影像探測，於 QA/QC 上與既有應用並無差異。	
4. 可說明本方法之 QA/QC 程序。			
委員 3			
1. 摘要內容請清楚說明具體期中成果。報告格式請依規範撰寫。		1. 感謝委員指教，修正摘要如摘要所示。	
2. 現場測試請具體描述試驗場址條件與說明規劃與預計執行設計。		2. 煩請參閱 5.3.2 節。	
委員 4			
1. 已依計畫進度及項目確實執行。		感謝委員之認可。	
2. 已完成成果自評、初步結論及後續工作說明。			
3. 應可達成計畫目標。			
委員 5			
1. 執行現況、流程及方法已說明。		感謝委員之認可，砂箱與成果的實務應用將於期末報告一併呈現。	
2. 計畫後續執行工作項目已說明。			
3. 計畫執行進度與預定進度相符，本計畫至期中報告時執行進度並無落後。			
4. 已有初步成果，初步成果與原計畫目標符合。			
5. 至期中報告時，整體研究成果符合預期。			
6. 已有初步研究成果，且已有初步討論。但對於成果的實務應用與潛在應用性仍待於期末報告時有更進一步的討論。			

「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」

☐修正計畫書 ☒期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展			
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100	
7. 5.2.2 節的砂箱試驗如何將實場的情境於砂箱試驗中呈現出？ （即實驗設計如何將實場應用所需的參數於砂箱中呈現或量測出？...等等）。				
8. 研究內容與計畫目的相符，但研究成果的實務應用性仍待期末時具體討論。				
環保署				
1. 請檢附計畫徵求書附表 4 專案執行績效審核-自評表。		1. 遵照辦理，隨文附上。		
2. 專案基本資料表請更正為計畫徵求書附表 3-2 之格式。		2. 遵照辦理，已更正。		
3. 報告頁數應於 60~100 頁之間。		3. 遵照辦理。原規劃報告內容著重於研發成果的呈現，相關背景內容未完整納入，補充相關資料於原理及現場環境之描述。		

「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」

☒修正計畫書 ☐期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展		
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100
政策性審查意見		計畫單位回覆	
1. 「保密切結書」、「執行同意書」、「專案主持人聲明書」及「專案申請書（第1頁）」，未蓋專案主持人蓋章。 2. 請依專案計畫書標準格式撰寫，勿刪除表單及格式，各項次說明或表格勿跨頁。 3. 研究經費： (1) 請補填（一）人事費用「總計=上述四項合計相加」欄位。 (2) 請修正（四）其它研究相關費用之差旅費（大眾交通工具/雜費）之總價，並於備註欄補充說明人數及天數。 (3) 請修正（五）雜項費用之合計欄，另請於項目名稱欄內拆項（如：報告印刷、碳粉匣、蒐集資料、抽印本費用…等），並於說明欄內說明其用途。 (4) 「雜項費用」之碳粉匣，請依計畫使用覆實編列。 (5) 資料檢索費用不得超過20,000 元。 4. 「雜項費用」之碳粉匣，請依計畫使用覆實編列。 5. 差旅費請依據行政院103 年7 月7 日公告之「國內出差旅費報支要點」編列。 6. 如編列參加成果發表會之相關費用，單據日期需於計畫執行期程內，始得核銷。 7. 本計畫經費編列如有浮編不實之虞，期末檢具核銷審查未通過，將扣除該編列款項，不予以補助（或追繳）。		遵照辦理。	
技術性審查意見		計畫單位回覆	
委員 1			
1. 擬研發之地電阻影響探測監測土壤及地下水污染整治溶液之移動影響半徑，值得開發。 2. 如何驗證開發之地電阻影像探測技術之可靠性，應有所規劃。		1. 感謝委員肯定。 2. 本計畫擬以室內砂箱試驗以及現場試驗兩個 階段，逐步評估所開發之孔內地電阻優化系統之可行性。相關規劃工作說明如研究方法及步驟之第3.2 節及第5 節。	
委員 2			
1. 本計畫研發移動式孔內電，並探討電極排列方式的優化，利用地電阻影像探測方法監測藥劑在低滲透地層中的傳輸範圍與路徑，並測試移動式孔內電極的現地應用效果。 2. 本計畫研究方法及步驟具可行性，本計畫亦具創新性，惟屬研究性質，對未來含氯土壤及地下水污染場址之應用性需再評估。		1. 感謝委員肯定。 2. 本計畫以最後實場之應用性為主要目標，並非單純研究性質導向。開發內容係針對整治場址在藥劑傳輸路徑的監測上，提供利用地電阻影像探測法監測的最佳施測方式，最終亦將於現場實地測試，並對其應用性進行評估。	

「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」

☒修正計畫書 ☐期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展		
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100
3. 主持人曾參與相關計畫，其經驗可勝任本計畫之執行。		3. 感謝委員肯定。	
委員 3			
1. 研究假設合理、研究流程適當、研究內容由沙箱試驗到現地場址的實驗應有具體說明。 2. 創新性整治技術，相關文獻成果與本研究應用關係仍待說明。		1. 感謝委員肯定，砂箱試驗主要目的為驗證優化電級配置之可行性，而後再於現地場址搭配所開發之移動式孔內電極進行測試，相關內容將詳述於期中報告。 2. 煩請參閱計畫目的以及研究方法及步驟中第 2.1 節之文獻回顧。	
委員 4			
本案協同研究人員太多，是否確有必要？ 2. 地表與孔內地電阻影像可了解污染物及藥劑加壓流注造成之移動及位置問題，尤其在導水度較差之黏土層，但如何控制可達到預期之目標？則未說明。 3. 如何有效控制監測藥劑在低滲透地層中之傳輸與分佈，應如何控制才是最重要的，本案尚未提出有效想法。 4. 人事費及消耗費器材編列太高。		1. 本計劃因牽涉學理分析、數值模擬以及現場試驗，因此需結合不同專長研究人員推動計畫工作。 2. 本研究主要專注於模場整治之監測技術發展，過程中配合整治單位藥劑的灌注過程，將藥劑灌注之傳輸狀況有效傳達給整治單位。整治之操作不在本研究內容之中。 3. 同(2)回覆，本研究主要目的在於研發出適用之孔內電極與施測方法，以監測藥劑灌注過程在低滲透地層中的影響半徑。 4. 同(1)回覆，儀器研發工作著重研發人員以及儀器製作驗證等工作，編列之比例實屬合理，且符合計畫申請規範比例。	
委員 5			
1. 已執行 EPA 補助的相關計畫，已執行成果的應用與限制未具體說明。 2. 本計畫與已執行完成的計畫間的關係宜具體說明，是重新開發另一監測技術？或是將既有技術加以優化？若是後者，則原有成果的實場應用性宜先加以檢討，再評估擬克服的待改善因子為何？此部分，計畫書中未具體說明。 3. 協同主持人的專長是否具互補性？ 4. 本計畫的前一部份似乎已完成，是否與已完成的 EPA 計畫類似？ 5. 人事費偏高。 6. 聘請專任助理較不具培育學生參與土水計畫的意義。 7. 已執行過 EPA 計畫，本計畫所需設備與已執行完成的計畫類似，部分設備已購置。		1. 本研究並非延續既有已執行 EPA 補助計畫之執行成果。 2. 本計畫係為開發新式孔內電極並搭配擬定對應之優化孔內地電阻施測模式，而非基於已執行完成之計畫。 3. 本計畫規畫三位協同主持人劉興昌、吳柏林以及林俊宏博士，分別係為現場試驗、數值模擬與學理分析專長，具互補性。 4. 同(1)回覆。 5. 儀器研發工作著重研發人員以及儀器製作驗證等工作，編列之比例實屬合理，且符合計畫申請規範比例。 6. 學生仍有參與投入，惟本計畫須有大量現地測試作業之執行，囿於學生仍有修課之必要，無法長時投入，因此聘請專任助理。 7. 同(1)回覆。	
綜合性審查意見		計畫單位回覆	

「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」

☒修正計畫書 ☐期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	105	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	
計畫名稱	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展			
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922585100	
原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。		遵照辦理。		

專案基本資料表

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂				
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		
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		
協同主持人	林俊宏	職等/職稱	約聘助理研究員		
專案名稱	中文	地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展			
	英文	Development of Electrical Resistivity Tomography Monitoring Technique in Monitoring the Remediation of Soil and Ground Water Contamination			
	關鍵字	地電阻影像探測監測化技術; 孔內電極; 土壤與地下水污染整治			
執行期程	☒ 1 年期 ☐ 2 年期 ☐ 3 年期				
	自民國	104 年	11 月	17 日	起
	至民國	105 年	11 月	16 日	止
專案主持人	姓名：林志平	E-mail：cplin@mail.nctu.edu.tw	專線：03-513-1574 手機：0922-747731		
專任助理	姓名：陳軍韜	E-mail：Ctcmm001@yahoo.com.tw	專線： 手機：0936-354976		
經費分析總表	專案預估總經費	金額	編列說明		
	1. 人事費用	475,970	(1~5 項相加之 50%為限)		
	2. 貴重儀器使用含維護費	0	(與計畫實驗相關)		
	3. 消耗性器材與主要費用	395,000	(與計畫主體相關)		
	4. 其它研究相關費用	100,000	(差旅與租賃費用)		
	5. 雜項費用	29,030	(1~6 項相加之 5%為限)		
	6. 行政管理費	100,000	(1~5 項相加之 10%為限)		
	專案計畫申請總金額	1,100,000			

說明：

1. 模場試驗專案可以多年期計畫申請（3 年為限），應填列下頁各年度經費分析表。
2. 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。
3. 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。
4. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：

林志平

（簽名及蓋章）

日期：

104.11.26

（請蓋上申請單位大小章）

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

105 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：105 年 10 月 13 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 ☐ 評估 ☐ 底泥		
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	地電阻影像探測監控土壤與地下水汙染整治的技術發展		
專案執行期程	☒ 1 年期 ☐ 2 年期 ☐ 3 年期	查核點	☐ 申請 ☐ 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。

(一) 學術面

目標達成程度			申請 預估數	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日期、發表處、發表名稱、影響指數等)
項目							
A 學術產出及活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0		
		(2)研討會論文	1	0	0	0%	今年度無合適之研討會，明年度有較符合主題之研討會。
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100%	
		(2)研討會論文	0	0	0		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0		
		(2)研究報告	1	0	0		
	4.專著 (本數)		0	0	0		
	5.辦理學術會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0		
		(2)成果發表會	0	0	0		
		(3)論壇	0	0	0		
	6.研發改良技術(項數)	(1)已開發技術	1	0	1	100%	
		(2)技術平台	0	0	0		
B 人	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	2	2	100%	
		(2)博士	0	0	0		
	8.研究團隊	(1)跨領域團隊	0	0	0		

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	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日期、發表處、發表名稱、影響指數等)
才 培 育	(個數)	(2)跨國團隊	0	0	0		
		(3)跨機構團隊	0	0	0		
		(4)形成研究中心	0	0	0		
		(5)形成實驗室	0	0	0		
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

目標達成程度 項目				申請 預估數	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	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
		申 請 中	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數	0	0	0			
		授權金(仟元)	0	0	0			
		衍生利益金(仟元)	0	0	0			
	3.技術移轉 (專利)	件數	0	0	0			
		授權金(仟元)	0	0	0			
		衍生利益金 (仟元)	0	0	0			
	4.技術移轉 (應用技術)	件數	0	0	0			
		授權金(仟元)	0	0	0			
		衍生利益金(仟元)	0	0	0			
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)	0	0	0			
		(2)品種/系(件數)	0	0	0			
C	6.促成合作研	件數	0	0	0			

目標達成程度 項目			申請 預估數	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)
產 學 研 合 作	究	金額(仟元)	0	0	0		
	7.促成投資	件數	0	0	0		
		投資金額 (仟元)	0	0	0		
	8.促成取得業 界科專	件數	0	0	0		
		業界投資金額 (仟元)	0	0	0		
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)	0	0	0		

(三) 政策面

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

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)

本研究基於地電阻影像探測法對土壤及地下水汙染場址整治進行藥劑整治時可有效監測藥劑傳輸範圍之潛力，針對目前應用上的兩大問題進行探討與技術改良，研究成果協助藥劑整治之規劃工作，使其檢核設計規劃之效益，有助降低整治期程，早日恢復土壤及地下水之生產力。

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，但其現場施作之最佳參數目前並未有最佳的應用準則，此外，為可採用既有標準監測井進行施測，發展可重複使用的移動式電極具有其實用性，因此本計畫之主要目的有二：1. 電極排列方式的優化探討 2. 移動式孔內電極的研發。本研究最終將前述研發成果擇一試驗場址，利用地電阻影像探測方法監測藥劑在低滲透地層中的傳輸範圍與路徑，並測試移動式孔內電極的現地應用效果。以模組化之方式研發出第一代之移動式孔內電極雛形，具有簡便延長展距，與便利局部更換之優點，現場測試具備現地適用性；電極排列方式之優化由數模之結果顯示孔對地之施測建議採用地表合併孔內 wenner-schlumberger 序列施作，地表測線與鑽孔長度建議以 1:1 為主，增加地表測線長度對施測成效之助益不大。

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) is 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. However, proper application guideline for optimizing field survey parameters is not readily available yet. Moreover, with the intention of utilizing the existing monitoring well for borehole ERT survey, a recoverable borehole electrode and cable should be developed for economical and convenience purpose. Aim of this project is to 1. Study the optimized field parameters of electrode array setup 2. Develop a recoverable and mobile borehole electrode and cable. This project examines the aforementioned study in an in-situ contaminated site, by applying ERT to monitor the dispersed region and path and examine the in-situ application recoverable borehole electrode-cable system.

目錄

專案基本資料表	11
中文摘要	17
Abstract.....	19
目錄	I
表目錄	III
圖目錄	III
第一章 前言	1
第二章 研究目的	2
第三章 文獻探討	3
3.1 地球物理方法與土壤污染成效監測應用	3
3.2 地電阻影像探測法	7
3.2.1 地表與孔內地電阻影像探測法	7
3.2.2 不同孔內電極排序之施測特性	20
3.3 土壤污染整治成效監測之應用問題評析與計畫重點	23
第四章 研究方法與過程	25
4.1 研究流程	25
4.2 工作進度	25
第五章 結果與討論	27
5.1 移動式孔內電極之研發	27
5.1.1 移動式孔內電極研發概念	27
5.1.2 電極尺寸與影響範圍探討	28

5.1.3 移動式孔內電極之設計與離形	31
5.2 地電阻影像探測法施測電極排列的優化	35
5.2.1 數值模擬探討	35
5.2.1.1 數值模擬規劃	35
5.2.1.2 不同電極排列對施測成果之差異	37
5.2.1.3 孔對地施測方式之施測特性	43
5.2.2 室內砂箱探討	47
5.2.2.1 砂箱尺寸設計	47
5.2.2.2 室內砂箱材料選定與試驗規劃	50
5.2.2.3 室內砂箱試驗結果與討論	51
5.2.3 孔對地之現地施測建議	錯誤! 尚未定義書籤。
5.3 現場試驗	53
5.3.1 現場試驗場址介紹	53
5.3.2 現場試驗工作規劃	54
5.3.3 成果與討論	55
第六章 結論與建議	58
參考文獻	60
附錄一 105 年度專案成果績效自評表	13

表目錄

表 1	地質材料電阻率範圍(Reynolds, 2011).....	10
表 2	常見的電極排列法有效探測深度(Loke, 2010)	11
表 3	進度甘梯圖	26
表 4	Cable A 於一維地電阻法之平均值與標準偏差	34
表 5	Cable B 於一維地電阻法之平均值與標準偏差	34
表 6	污染物電阻率分類.....	35
表 7	變半徑固化漿液探測結果比較.....	53

圖目錄

圖 1	地下環境不同介質之電阻率分佈（摘自 Schneider and Greenhouse, 1992）	3
圖 2	砂質含水層電阻率與 DNAPL 飽和度之關係圖（摘自 Greenhouse et al., 1993）	4
圖 3	未飽和層示蹤劑試驗之井中 ERT 三維電阻率分佈變化（摘自 Winship et al., 2006）	5
圖 4	三維電性差異率時間序列法成果圖：左圖為第一批次 24 小時灌注後結果；右圖為第二批次 24 小時後灌注結果	6
圖 5	孔內地電阻影像探測技術監測乳化零價鐵在灌注前後於電性地層的變化	7
圖 6	電阻率量測理論模型(Kearey et al., 2007).....	9
圖 7	地電阻影像探測技術施測示意圖	11
圖 8	地表地電阻電極排序示意圖	12
圖 9	二維 Wenner 排列法靈敏值等值圖	13

圖 10	二維 Dipole-Dipole 排列法靈敏值等值圖	14
圖 11	二維 Schlumberger 排列法靈敏值等值圖	14
圖 12	二維 Pole-Pole 排列法靈敏值等值圖	15
圖 13	二維 Pole-Dipole 排列法靈敏值等值圖	15
圖 14	二維 Gradient 排列法靈敏值等值圖	16
圖 15	地電阻法順推範例	17
圖 16	地電阻法逆推範例	17
圖 17	孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖	18
圖 18	地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖	19
圖 19	地表與搭配孔內地電阻影像模擬結果比較(Rubin et al., 2005)	20
圖 21	常見地表與孔內地電阻探測聯合運用電極排序示意圖 (Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014)	21
圖 22	同線量測與跨線量測(Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014)	21
圖 23	組合型式之跨孔電極配置(Hargery, 2012)	22
圖 24	變異型式之跨孔與地表聯合電極配置(Hargery, 2011)	22
圖 25	不同地表與孔內搭配解析能力範圍評估 (Hagrey et al., 2012)	23
圖 26	跨孔地電阻測線之建議施測參數 (AGI, 2003)	23
圖 27	研究流程圖	25
圖 28	現行孔內地電阻施測之電極種類 (AGI, 2003)	27
圖 29	不同筒內徑之試驗筒	28

圖 30 電極厚度 0.3 公分不同間距之孔內電極	29
圖 31 不同電極間距之孔內電極於不同筒徑試驗結果	29
圖 31 電極厚度 0.05 公分不同間距之孔內電極	30
圖 32 不同電極間距之孔內電極於不同筒徑試驗結果	31
圖 33 電極纜線局部設計圖	31
圖 34 電極纜線示意圖	32
圖 35 電極纜線抽線製作示意圖	32
圖 36 快速插拔型防水接頭	33
圖 37 電極之基座: (a)上視圖(b)側視圖(c)前視圖	33
圖 38 電子芯線與電極銜接處: (a)使用導電膠帶固定(b)使用自融式 絕緣防水膠帶固定	34
圖 39 移動式電極完成圖	34
圖 40 模型規劃示意圖	36
圖 41 三維數值模型示意圖	36
圖 42 T 字測線序列組合 (Tsourlos P, 2011)	37
圖 43 Dipole-dipole 序列模擬結果	38
圖 44 Pole-pole 序列模擬結果	39
圖 45 wenner-schlumberger 序列模擬結果	40
圖 46 三種序列反算結果量化分析圖	41
圖 47 不同異常區域大小模擬結果	42
圖 48 dipole-dipole 序列高電阻率污染物模擬結果	44
圖 49 地表測線為 2 倍鑽孔長度模擬結果	45
圖 50 不同測線比例施測 dipole-dipole 序列靈敏度分佈圖	46

圖 51 不同砂箱數值模型.....	48
圖 52 Dipole-dipole array 於砂箱尺寸 1.0m*1.0m*1.0m 之反算結果	48
圖 53 Wenner array 於砂箱尺寸 1.0m*1.0m*1.0m 之反算結果.....	49
圖 54 Dipole-dipole array 於不同砂箱尺寸差異分析結果	49
圖 55 Wenner array 於不同砂箱尺寸差異分析結果	50
圖 56 砂箱試驗儀器配置.....	51
圖 57 孔內地電阻柱體變柱徑檢測室內砂箱試驗結果: (a)擬視電阻 率圖 (b)電阻率影像圖	52
圖 58 室內砂箱變柱徑試驗極小值與反曲點雙切線法判釋結果..	52
圖 59 變半徑固化漿液開挖外觀: (a)Side View (b)Top View	52
圖 60 模場試驗配合灌注井監測地層電阻率變化配置圖	53
圖 61 A 剖面成果灌藥前後電阻率變化影像圖	56
圖 62 B 剖面成果灌藥前後電阻率變化影像圖	56
圖 63 C 剖面成果灌藥前後電阻率變化影像圖	57

第一章 前言

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

在藥劑傳輸路徑的監測上，利用量測地層電學性質之地電阻影像探測法進行是極具效益的方法，將此技術搭配既有標準監測井進行孔內施測可有助解決其單在地表施測會有深度解析能力較為不足的問題。然而，孔內施測的地電阻影像探測施測成果與現場施測時所採用的電極排列方式極為相關，此電極排列方式眾多，相較地表僅有一個維度的排列情形，孔內施測的 2 維排列使得電極排列選擇複雜度更高，不同電極排列之解析特性目前並不了解，在選擇上尚未有最佳的應用準則；此外，為可採用既有標準監測井進行施測，發展可重複使用的移動式電極具有其實用性，如何對其材料進行設計與使用以確保其耐用度及量測靈敏度為重要課題。為有效提升孔內地電阻在藥劑傳輸路徑上之監測能力，故進行本研究工作。

第二章 研究目的

誠如第一章所述，為有效提升孔內地電阻在藥劑傳輸路徑上之監測能力，進行電極排列之研究以及發展移動式電極有其必要性，在此目標下，本研究之主要目的有二：

1. 電極排列方式的優化探討
2. 移動式孔內電極的研發

本研究最終將前述研發成果擇一試驗場址，利用地電阻影像探測方法監測藥劑在低滲透地層中的傳輸範圍與路徑，並測試移動式孔內電極的現地應用效果。

第三章 文獻探討

3.1 地球物理方法與土壤汙染成效監測應用

目前國內外已有許多實場調查結合地球物理探勘技術輔助建立特徵概念模型(董倫道等, 1995; Zeng and Gorelick, 2003; Bowling et al., 2005, 2006), 特別是近年來 MADE (Macrodispersion Experiment) 場址大量研究以 ERT 探勘剖面逆推大範圍含水層之水力傳導係數(K)值分佈。Niwas and Lima (2003) 指出電阻率變化深受孔隙水質影響, 例如土壤孔隙中水較乾淨, 則電流之傳導主要受土壤-水界面導電性之影響; 若孔隙水含高鹽度(或其他污染物質), 則電流之傳導主要與孔隙水之導電性有關。由於相同地質條件會因水質化性不同而有迥異結果, 因此亦可運用於污染場址調查。

如圖 1 為比較飽和土壤中各種地質材料及 DNAPL 之電阻率分佈, 可發現愈細粒之材質其電阻率愈低(導電性佳), DNAPL 之電阻率一般多超過 1,000 Ohm-Meters, 比礫石、砂質、粉土或黏土之電阻率高出許多, 容易與地層區別開來。現場施測可在同一測線安排不同電極排列(如二極法、四極法、梯度法...等)與解析方法交叉佐證, 以同時獲取地質與污染最佳擬合剖面與具說服力之證據。Schneider and Greenhouse (1992) 於砂質含水層(砂之孔隙率約 0.4)中觀察到 ERT 法之電阻率隨 DNAPL 飽和度增加而迅速增加(參考圖 2)。GPR 法則是根據 DNAPL 之介電常數一般比地質材料低許多的特性, 且 DNAPL 會呈現強反射區而加以界定。

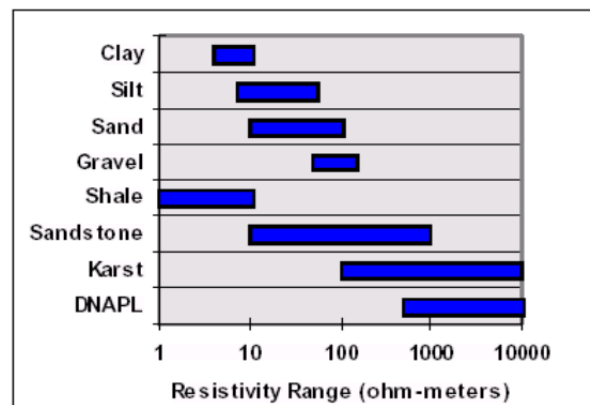


圖 1 地下環境不同介質之電阻率分佈 (摘自 Schneider and Greenhouse, 1992)

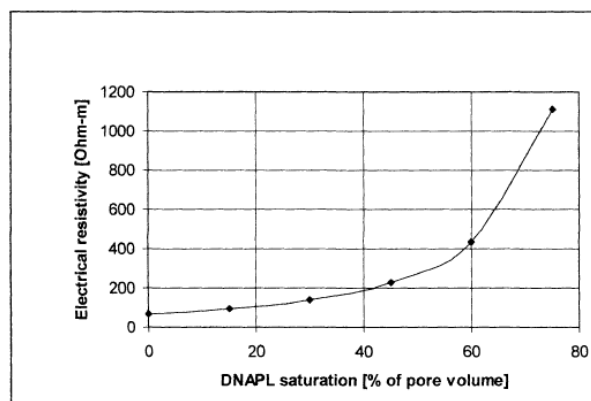


圖 2 砂質含水層電阻率與 DNAPL 飽和度之關係圖(摘自 Greenhouse et al., 1993)

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

整治場址之整治成效評估也多透過採樣或設井評估驗證，而採樣點之間或井間之變化情形或整治成效則未知或僅能透過模擬。而地球物理透過面與空間之探勘則可彌補此種缺口，並可輔助掌握整治不佳區或宜加強整治之區域，可同時評估污染物隨時間與空間之變化。例如圖 3 為 Winship et al.(2006) 運用 ERT 井測評估示蹤劑（氯化鈉溶液）於未飽和層之流動情形，可清楚描繪出三維電阻剖面（電阻率變化達 7.5% 之等電阻剖面）隨時空之變化，並發現電阻率剖面約在地下 8~9 公尺（低滲透性夾層）附近呈現橫向流佈，代表示蹤劑受阻於夾層。

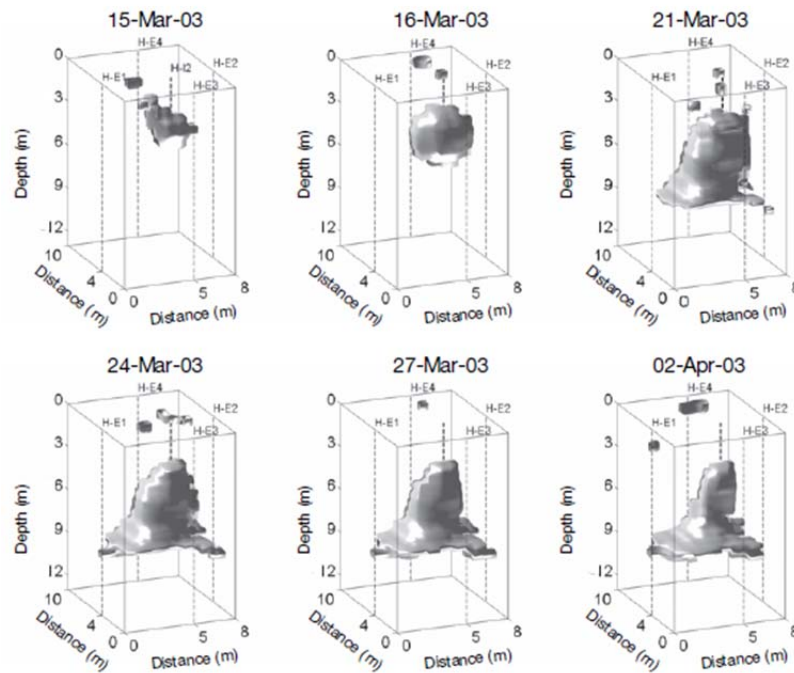


圖3 未飽和層示蹤劑試驗之井中ERT三維電阻率分佈變化(摘自 Winship et al., 2006)

國內對於土壤及地下水的調查及傳輸模擬，多屬大尺度的特徵描述及採簡單或過多的假設條件，對於地下環境小尺度的細部特徵及污染界定的研究則甚少。目前國內地球物理技術於地下環境之運用仍以地面上施測為主，運用井測進行地下環境細部特徵掃描或評估則鮮少有案例，因此本研究期能結合此項新穎井測技術運用在土壤及地下水之污染細部監測，建立井測相關理論及本土化參數，並透過實場調查及驗證評估。

目前國內曾經利用固定式電極監測藥劑傳輸成效評估，為本團隊於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中模場試驗進行初步試驗。本場址位於台灣北部，上游工廠自公告並開始整治已十餘年，主要污染問題為 DNAPL 地下水污染，因污染問題時間久遠，第一含水層及下方之低滲透性滯水層（約地表下 15~35 公尺）均檢出高濃度含氯有機物質，期望透過地球物理技術評估該整治灌注工法之可行性。場址於灌注作業前，先行完成滯水層先導試驗區之地層電性背景探測，並量測整治藥劑導電度、電阻率等基本參數測定，當第一階段第 1 批次灌注後，隨即使用地球物理跨孔地電阻法(CHERT)進行整治藥劑傳輸流布追蹤。第一階段注藥藥劑導電率為 $5,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ （約 $2 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ），並於注藥開始後連續施

測 CHERT，由於探測收集之資料龐大，現場工程師採三班制連續蒐集資料。依第一階段第 1 批次電性成果研判，灌注整治技術能在注藥期間克服低滲透性地質傳輸瓶頸與水力梯度方向，使藥劑能有效往灌注區四周傳輸。灌注之藥劑進入滯水層不同地層中均能持續滲透入地層中，並於不同時間多深度傳輸到達預定之目標污染區。第一階段注第 2 批次藥劑導電率為 $15,000 \mu\text{S/cm}$ (約 0.7 ohm-m)，由於第 2 批次是以較高濃度的藥劑於相近的深度注藥，所以導電率變化率較第 1 批次明顯，圖 4 則進一步以三維電性剖面呈現 2 批次灌注後之電性變化率分布，可發現第 2 批次灌注 24 小時後之深層導電率變化量明顯比第 1 批次大許多。

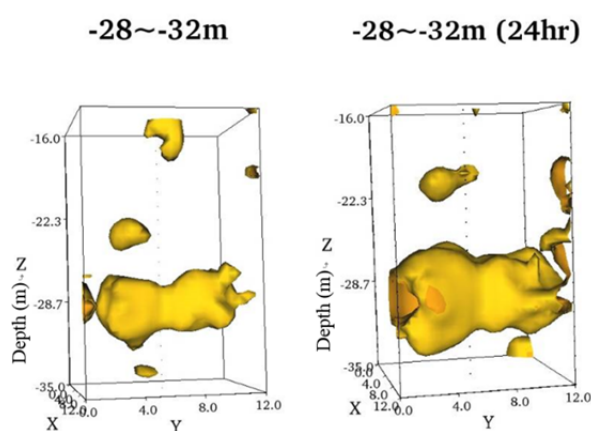


圖 4 三維電性差異率時間序列法成果圖：左圖為第一批次 24 小時灌注後結果；右圖為第二批次 24 小時後灌注結果

第二個案例為本團隊利用固定式電極監測乳化零價鐵在灌注前後於電性地層的變化。乳化零價鐵 (Emulsified Zero-Valent Iron, EZVI)，屬於高電阻的大豆油 (與可生物分解的界面活性劑和水形成乳化液膜)，包覆高導電性的零價鐵 (ZVI) 顆粒形成乳化零價鐵，乳化液與零價鐵可能產生分離作用，根據探測結果零價鐵有可能傳輸較遠 (也可能因反應快而快速沉澱而傳輸相對近) 造成下游井 (如 D00346) 呈現低電阻，乳化液具長效性，且受限毛细作用而傳輸距離可能較近，目前推測乳化液傳輸成效並不好，若乳化液確實傳輸到監測井理論上電阻應會升高。

如圖 5 所示，本案例兩吋監測井共有 EPB-MW8、EPB-MW9、EPB-MW9D、MW4_1、MW4_2、MW7 等 6 口，其中 EPB-MW9 之 PCE、TCE 濃度分別為 0.187 及 0.230 mg/L ，EPB-MW9D 之 TCE 濃度為 $0.001 \sim 0.116 \text{ mg/L}$ ，MW4_1

之 PCE、TCE 濃度分別為 0.0247~0.363 mg/L 及 0.0172~1.24 mg/L，歷次多曾超出管制標準，屬於濃度較高之監測井。以 EPB-MW9 及 MW4_1 兩口監測井為主要高濃度區。利用地電阻井測監測技術了解，藥劑灌注過程，其中上游地球物理監測井為 DD00348，下游兩口為 DD00346 與 DD00347。根據調查結果，灌注藥劑影響至少可達距其下游約 5.5 公尺之監測井(DD00347)，但亦發現零價鐵與乳化液在本場址其他兩口監測井中出現分離現象，造成地層電阻率出現明顯下降趨勢。本場址試驗完後，井內電極出現明顯氧化與腐蝕現象，需要進行維護，不然無法再作使用。所以本研究希望透過新的移動式電極研發與監測電極排列的研發，達到實場應用的價值。

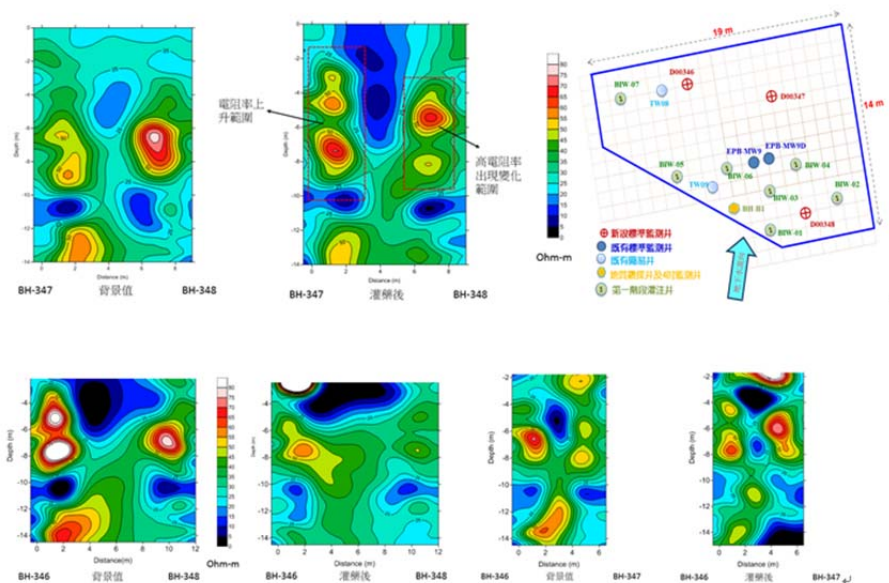


圖 5 孔內地電阻影像探測技術監測乳化零價鐵在灌注前後於電性地層的變化

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

地電阻影像剖面法 (Electrical Resistivity Tomography, ERT) 屬於地球物理學中直流電阻法的衍伸應用，係主動式將直流電通入地層以量測地下材料電位差，反算地層的視電阻率，經由軟體逆推地層之電阻率，再以電阻率描繪地層之電性剖面，即地電阻率剖面 (Resistivity Profiling)，藉此描繪地下環境。

整個直流電阻法的理論與應用主要來自兩個最重要的物理定律與經驗公式，分別是歐姆定律 (Ohm's law) 與阿奇斯定律 (Archie's law)。歐姆

定律 (Ohm's law) :

$$E = \rho J \dots\dots\dots (1)$$

其中, E 為電場強度 (單位電荷所受的牛頓力), ρ 為電阻率, J 為電流密度 (單位面積所穿過的電荷數)。

阿奇斯定律 (Archie's law) :

$$\rho = \alpha \rho_w \varphi^{-m} \dots\dots\dots (2)$$

其中 ρ 為量測電阻率, ρ_w 為孔隙水的電阻率, φ 為孔隙率, α 與 m (膠結因子) 為經驗常數。

歐姆定律描述了電場強度、電阻率與電流密度的關係, 也就是材料的電阻率可藉由電場與電流密度的量測得知; 而 Archie's law 則表示材料的電阻率會因孔隙填充物質改變而改變。而地質材料的電阻率可視為物理性質之一, 也就是不同的材料電阻率有所不同, 可依電阻率的不同進而研判物質的不同, 但因地質材料的組成未必全是純物質, 所以在地球科學的觀點上討論地球材料的電阻率, 經常是以一個區間範圍作為研判物質材料組成的依據, 如表 1 列出各類地質材料之電阻率範圍。

以電場 E 與電流密度 J 來得知電阻率值並不是一個簡單的方式, 因為儀器所能量測得到的是電位差與電流的數值, 所以式 (4-1) 必須略做改寫將使得計算與量測上較為簡便, 電位差單位為伏特 (V) 的意義是指一庫倫 (C) 電荷具有一焦耳能量, 因次分析之後電場可用單位長度的電位差表示單位為 V/m; 電流的單位是安培 (A), 代表每秒流過一庫倫 ($1A = 1C/s$), 電流密度的意義是指某個截面積中單位時間流過的電荷數, 單位為 A/m^2 ; 而電阻 (Resistance, 單位為 ohm 或符號 Ω) 與電位差及電流之間的關係為:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (3)$$

其中 R 為電阻、 ΔV 為電位差、 I 為電流。

如圖 6, 在一個長 L , 截面積 A , 電阻 R 的電阻率量測模型中, 電阻會因材料的大小而有所改變, 因此考量材料通過的截面積 (A) 與長度 (L) 後, 將式 (4-1) 與式 (4-3) 合併後, 電阻率與電阻的關係為:

$$\rho = \frac{RA}{L} \dots\dots\dots (4)$$

電阻率 (Resistivity) 的單位即為 Ohm-m 或 Ω -m，在以公分為長度單位時，可用 Ohm-cm 作為測量單位，1 Ohm-m=100 ohm-cm。式 (4) 所表達的重要涵意是，在不同大小，相同材質的材料所量測的電阻會不同，但考量形狀後，所得到的電阻率會相同，也就是在地電測勘時，主動在地層中通入已知的電流量，可以電位計量測出材料的電位差，而這個電位差值必須再考慮材料的形狀，乘上電極幾何排列形狀因子 (Geometric factor, K) 之後才能得到量測電阻率，以電阻率描繪地下材料才有意義。

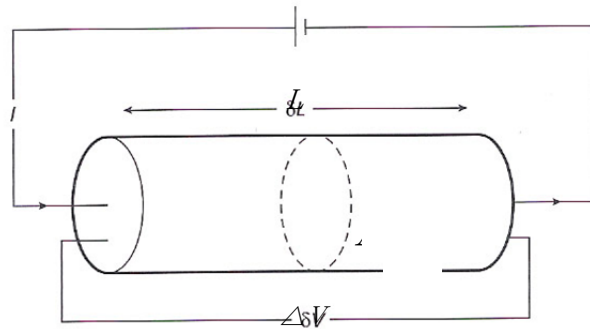


圖 6 電阻率量測理論模型 (Kearey et al., 2007)

A/L 可以說是地電測勘中幾何形狀因子最簡單的表示方式，事實上，在真實地電測勘中， K 值會因為電極排列的不同而有不同計算式，且較為複雜。在實際的測勘所量測到的電阻率通常以「視電阻率」 (Apparent Resistivity) 稱之，意思是量測電位值在考量幾何形狀因子後所計算出的電阻率，這個電阻率並非材料的真實電阻率 (真實電阻率必須經過逆推演算才能得到)，而是一個量測值，故以視電阻率稱之。在野外量測所得之視電阻率可表示為：

$$\rho_a = \frac{K\Delta V}{I} \dots\dots\dots (5)$$

其中 ρ_a 為量測之視電阻率， K 為幾何形狀因子， ΔV 為量測電位差， I 為通入地層之電流量。

表 1 地質材料電阻率範圍(Reynolds, 2011)

Material	Nominal Resistivity (Ohm-m)	Material	Nominal Resistivity (Ohm-m)
硫化物 (Sulphides)		黑侏羅統粘土 (Lias clay)	4~20
黃銅礦 (Chalcopyrite)	$1.2 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-1}$	泥礫 (Boulder clay)	10~15
黃鐵礦 (Pyrite)	$2.9 \times 10^{-5} \sim 1.5$	乾燥黏土 (Clay (very dry))	15~35
磁黃鐵礦 (Pyrrhotite)	$7.5 \times 10^{-6} \sim 1^{-2}$	麥西亞泥岩 (Mercia mudstone)	50~150
方鉛礦 (Galena)	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-2}$	白堊石 (Chalk)	> 100
閃鋅礦 (Sphalerite)	1.5×10^7	焦炭 (Coke)	50~150
氧化物 (Oxides) :		乾礫石 Gravel (dry)	0.2~8
赤鐵礦 (Haematite)	$3.5 \times 10^{-3} \sim 10^7$	飽和礫石 (Gravel (saturated))	1,400
褐鐵礦 (Limonite)	$10^3 \sim 10^7$	第四紀砂 (Quaternary / Recent sands)	50~100
磁鐵礦 (Magnetite)	$5 \times 10^{-5} \sim 5.7 \times 10^3$	火山灰 (Ash)	4
鈦鐵礦 (Hmenite)	$10^{-3} \sim 50$	煤礦渣 (Colliery spoil)	10~20
石英 (Quartz)	$300 \sim 10^6$	煤灰 (Pulverised fuel ash)	50~100
岩鹽 (Rock salt)	$30 \sim 10^{13}$	紅土 (Laterite)	800~1,500
無煙煤 (Anthracite)	$10^{-3} \sim 2 \times 10^5$	紅壤 (Lateritic soil)	120~750
褐煤 (Lignite)	9~200	乾燥沙質土壤 (Dry sandy soil)	80~1,050
花崗岩 (Granite)	$300 \sim 1.3 \times 10^6$	砂質粘土 (Sand clay / clayey sand)	30~215
風化花崗岩 (Granite (weathered))	30~500	砂石 (Sand and gravel)	30~225
正長岩 (Syenite)	$10^2 \sim 10^6$	不飽和垃圾填埋場 (Unsaturated landfill)	30~100
閃長岩 (Diorite)	$10^4 \sim 10^5$	飽和垃圾填埋場 (Saturated landfill)	15~30
輝長岩 (Gabbro)	$10^3 \sim 10^6$	酸性泥炭水 (Acid peat waters)	100
玄武岩 (Basalt)	$10 \sim 1.3 \times 10^7$	酸性礦井水 (Acid mine waters)	20
片岩 (石灰和雲母) (Schists (calcareous and mica))	$20 \sim 10^4$	降雨徑流 (Rainfall runoff)	20~100
片岩 (石墨) (Schist (graphite))	10~100	垃圾填埋場徑流 (Landfill runoff)	<10~50
板岩 (Slates)	$600 \sim 4 \times 10^7$	溫帶冰川冰 (Glacier ice (temperate))	$2 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^8$
大理石 (Marble)	$100 \sim 2.5 \times 10^8$	極地冰川冰 (Glacier ice (polar))	$5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^{5*}$
固結頁岩 (Consolidated shales)	20~2,000	永凍土 (Permafrost)	$10^3 \sim >10^4$
礫岩 (Conglomerates)	$2 \times 10^3 \sim 10^4$	冰磧 (Moraine)	$10 \sim 5 \times 10^3$
砂岩 (Sandstones)	$1 \sim 7.4 \times 10^8$	油氣田 (Hydrocarbon reservoir)	25~27.5
石灰石 (Limestones)	$50 \sim 10^7$	舍伍德砂岩 (Sherwood sandstone)	100~400
白雲石 (Dolomite)	$350 \sim 5 \times 10^3$	沖積土和沙 (Alluvium and sand)	10~800
泥灰岩 (Marls)	3~70	土壤 (Soil (40% clay))	8
黏土 (Clays)	1~100	土壤 (Soil (20% clay))	33
表土 (Topsoil)	250~1,700		

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 7 中電流極 C1、C2 流入地層中，再利用電位極 P1、P2 量測地層所反應的電位差值，由該量測的電壓值與電流值經由靜電學理論計算受測土層之視電阻率（apparent resistivity），每一筆視電阻率其影響深度與其電極棒間距有關，藉由改變電極間距的大小以及空間位置，即可量到不同位置以及不同影響深度的視電阻率值，將所量測得之視電阻率透過反算技巧即可獲得 1 維乃至 3 維之壩體材料地電阻剖面。前述之電流極以及電位極的位置排列並非固定，僅須確保有兩根電極棒放電與兩根電極棒量測電壓即可，而根據其電流與電位極排列的不同，可將其施測模式至少分為五種，包括 Wenner、Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Dipole 及 Pole-Pole 等方式，如圖 8 所示，此些不同排列模式與其水平或垂直解析度及探測深度有關。

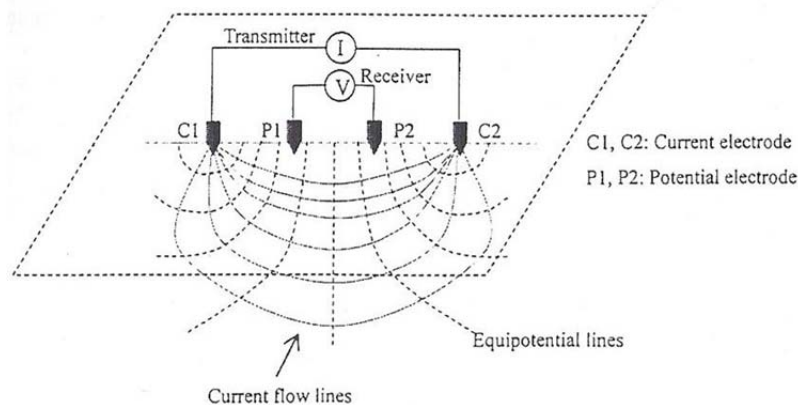


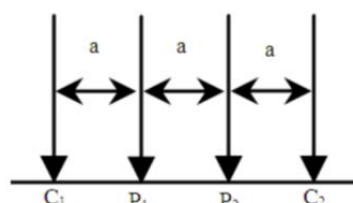
圖 7 地電阻影像探測技術施測示意圖

常見的排列法有效探測深度比值如表 2 所示，這數值表示的是量測點有效深度與測線長度的比值，也就是測線長度乘上比值即為可探測深度，因此表格中的數值是整理現有文獻與實際經驗的整理歸納，可作為評定探測深度是否合理的參考依據。此外，地電阻影像法的成果仍必須經過逆推處理，逆推的演算會依模型網格設定的不同，而在真實電阻率剖面深度上也可能略有增減，但無論如何，結果仍必須符合或接近靈敏值函數才正確，例如，一條 100 公尺的測線，以 Wenner 排列法的探測結果最大深度為 17~25 m 屬合理範圍，但若探測深度達到 50 公尺，過度解釋深部資料，將有所謬誤。

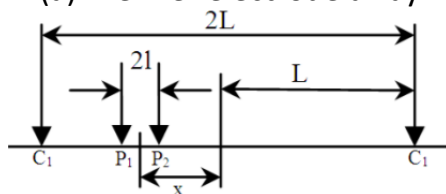
表 2 常見的電極排列法有效探測深度(Loke, 2010)

電極排列方法	量測點響應深度與測線長度比值	逆推剖面合理深度與測線長度比值	備註
Wenner	0.173	0.17~0.25	

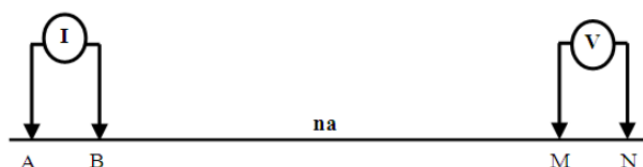
Schlumberger	0.173~0.191	0.17~0.3	
Wenner-Schlumberger	0.173~0.191	0.17~0.3	
Gradient	0.173~0.24	0.17~0.35	特殊變形排列可增加探測深度
Dipole-Dipole	0.139~0.22	0.13~0.3	特殊變形排列可增加探測深度
Pole-Dipole	0.296~0.38	0.29~0.5	
Pole-Pole	0.65~0.867	0.6~1	



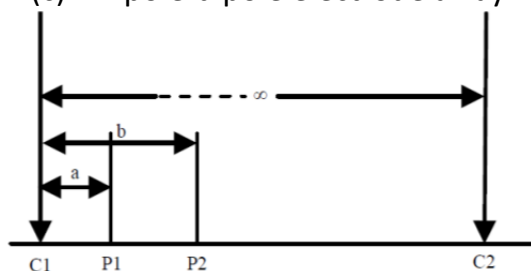
(a) Wenner electrode array



(b) Schlumberger electrode array



(c) Dipole-dipole electrode array



(d) Pole-dipole electrode array

圖 8 地表地電阻電極排序示意圖

靈敏值函數同時也可以評定地電阻影像法各種排列法解析能力，靈敏值意義是指當材料在某個位置的電阻率產生變化時對於量測值將產生影響，當靈敏值越高，表示該處的電阻率產生變化時，量測值將有較顯著的改變；靈敏值越低，則表示該處的材料電阻率變化對於量測值的影響越低。在二維的

靈敏值函數圖形中所對應的響應深度附近的靈敏值越高，就表示這種排列法對於材料電阻率改變時所產生的響應越靈敏，也同時表示排列法的解析能力越佳。圖 9～圖 14 所示為地電阻影像法中常見的電極排列法二維靈敏值等值圖，由圖中的響應深度位置的靈敏值可知，四極排列法的靈敏度多高於二極排列法，而每一種排列法的解析能力略有差異，且各有優劣（Zhou and Dahlin, 2003；Dahlin and Zhou, 2004），這也是近年來極力推廣在地電阻影像法探測時需應用不同排列法併合解釋的原因。依本團隊多年之實際經驗與國外文獻研析發現，**Wenner-Schlumberger** 排列法在實測當中資料品質最為穩定；**Gradient** 排列法對於地下異常區的反應最為明顯；**Dipole-Dipole** 排列法則是最容易受到地表與地下人工構造物的影響，特別是在運作中工廠的環境；**Pole-Dipole** 排列法相對於 **Dipole-Dipole** 排列法所受到的側向反應較小；**Pole-Pole** 則是在受限的測線長度下能達到最大的探測深度，有助於瞭解對於大範圍的地層分布。因此於土壤及地下水污染調查探測上，建議合併使用 Wenner-Schlumberger、Gradient 排列法，必要時可增加 Pole-Pole 或 Pole-Dipole 排列法。

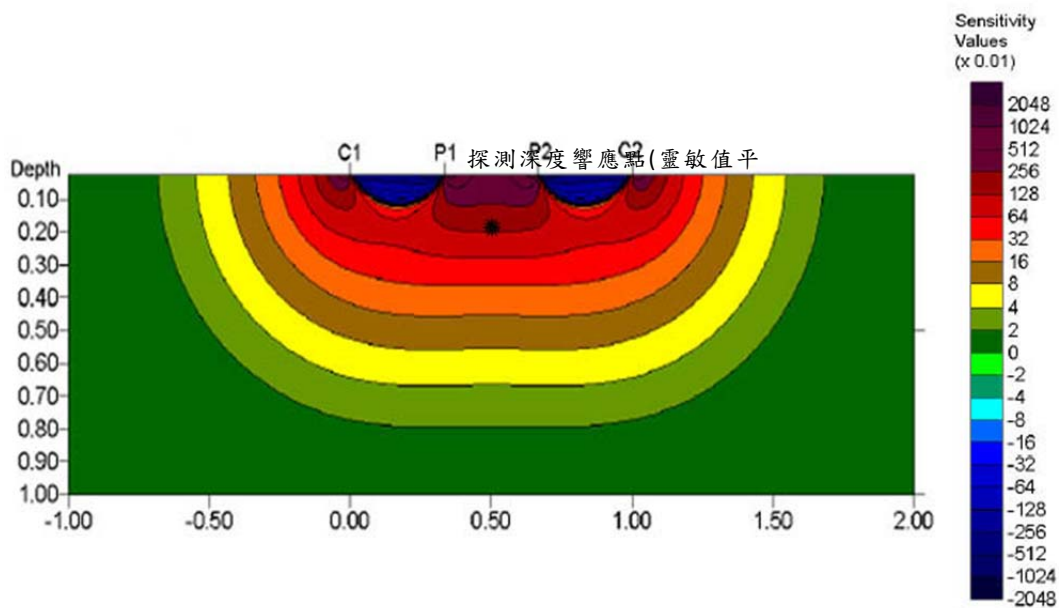


圖 9 二維 Wenner 排列法靈敏值等值圖

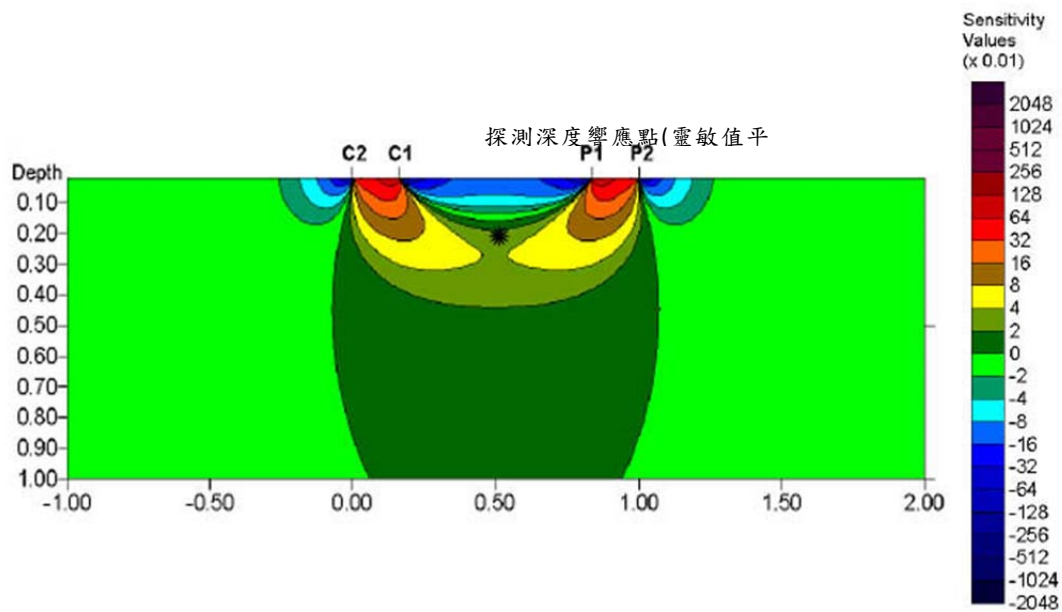


圖 10 二維 Dipole-Dipole 排列法靈敏值等值圖

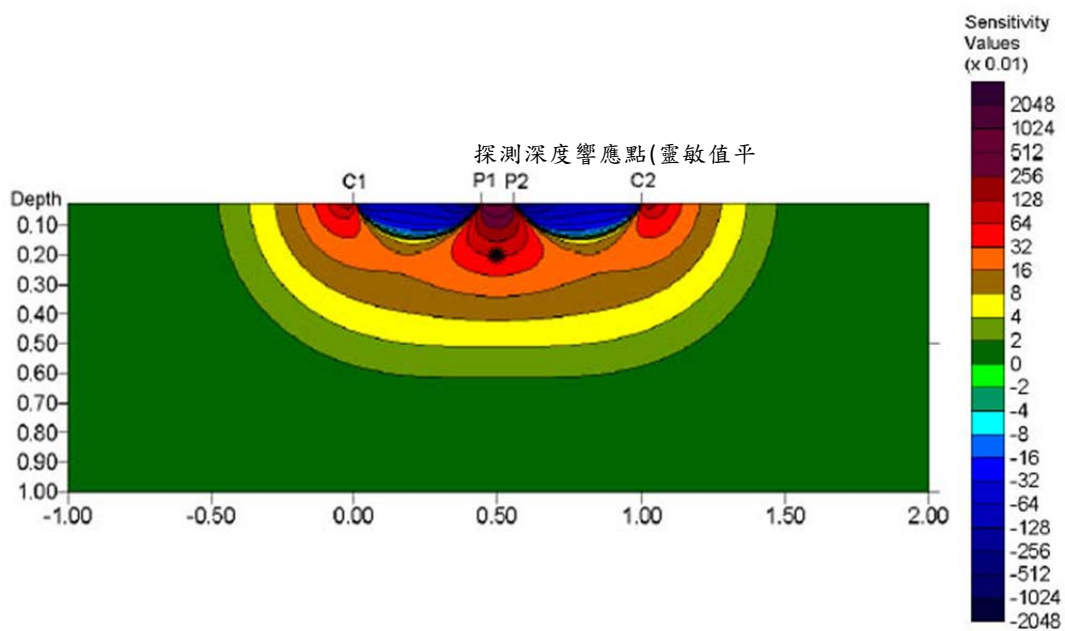


圖 11 二維 Schlumberger 排列法靈敏值等值圖

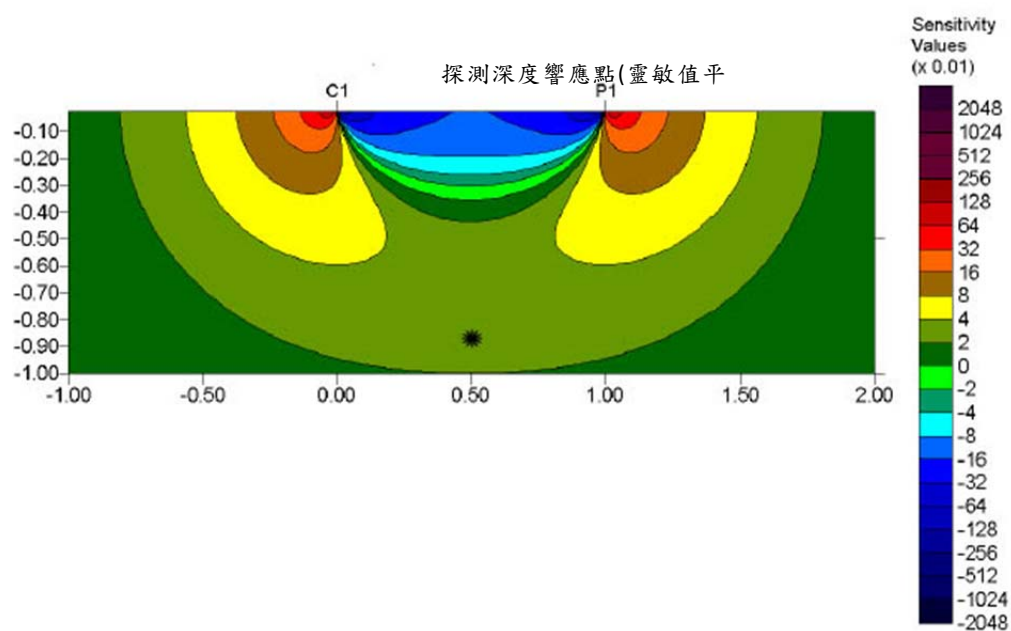


圖 12 二維 Pole-Pole 排列法靈敏值等值圖

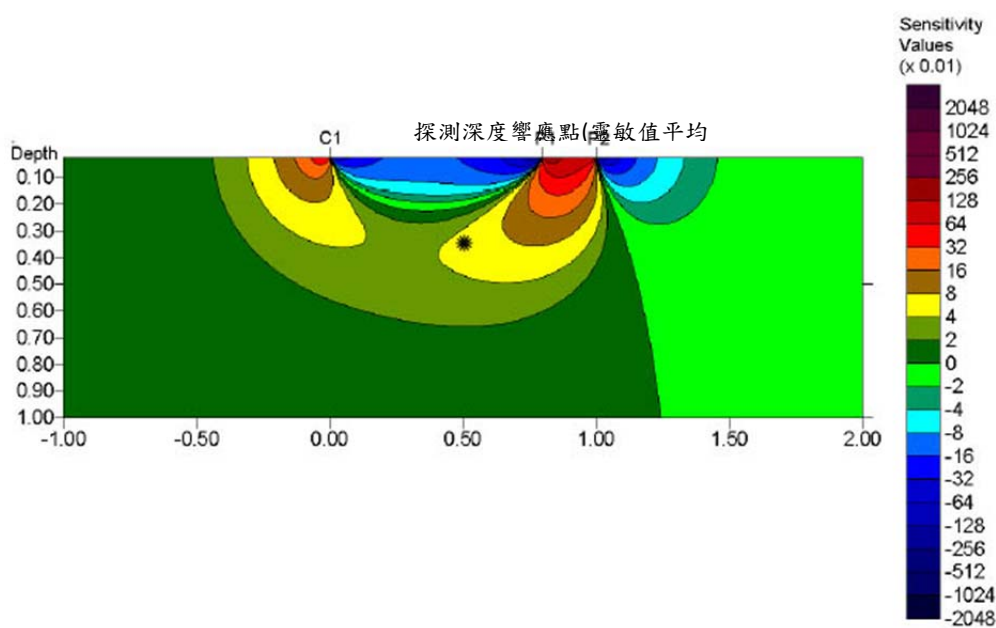


圖 13 二維 Pole-Dipole 排列法靈敏值等值圖

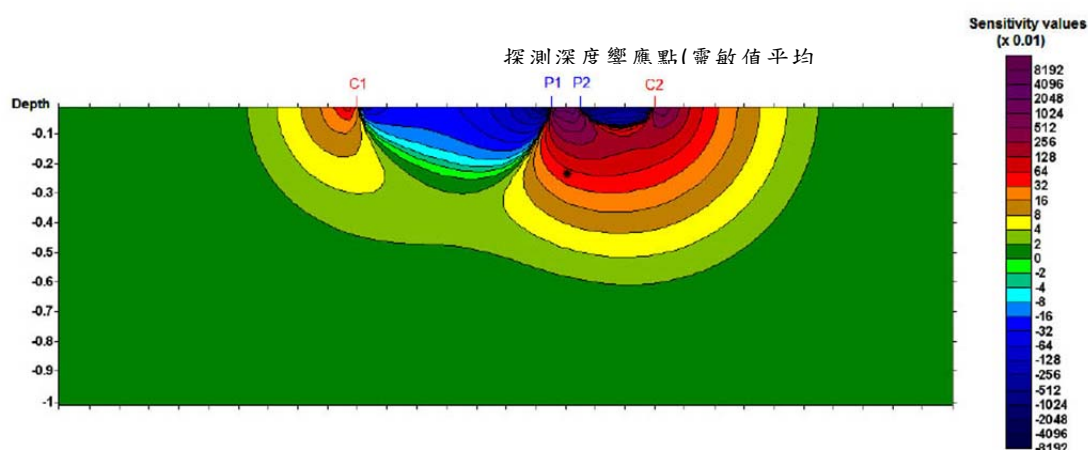


圖 14 二維 Gradient 排列法靈敏值等值圖

整個地電阻影像法原理與模型在初始的假設都是一個簡單的均質等向系統，但事實上真實的地下環境其實是一個非線性的系統，因此，所有的量測資料都必須經過逆推計算 / 反演算 (Inversion)，才能得到較接近地下環境特徵的結果。

逆推的意義是指地下環境構造是真實存在的非線性系統，這個系統中任何微小的改變，或是收集資料的規則不同，都會得到不同的量測值，因此，若是能將量測的規則與方法固定為已知條件，則可將所有的量測資料以數值方法求解而得到一個地質模型；反過來說，如果設計出一個已知的模型，固定收資料的規則與方法，則可以算出一組理論的量測數據，這個過程則稱作順推計算 / 正演算 (Forward)。欲將量測資料與真實系統中的模型相連結，逆推與順推的計算是必須的。地電阻影像法的逆推計算主要以有限差分法 Finite-Difference (Dey and Morrison, 1979) 或有限元素法 Finite-Element (Silvester and Ferrari, 1990) 作為主要的分析方法，由於求解應用的是數值方法，且整個真實地層是一個非線性系統，所以所得到的解並非是唯一解，必須經過數次疊加 / 迭代 (iteration) 才能得到一個近似解。疊加的目的是為了降低誤差值，但過度的疊加運算則可能造成結果的失真，因此在逆推過程必須設定停止條件，這部分可由數據誤差的統計分析、真實鑽探資料比對或資料處理人員的經驗而決定，經由逆推之後，才能將原本量測得到的「視電阻率剖面」處理成「電阻率剖面」。

順推與逆推的成果範例如圖 15 與圖 16 所示，由圖中可知，量測值的電阻率與形貌與真實地層模型有所差異，但經過逆推之後的電阻率剖面與地層

模型的電阻率分布與形貌則相當接近。

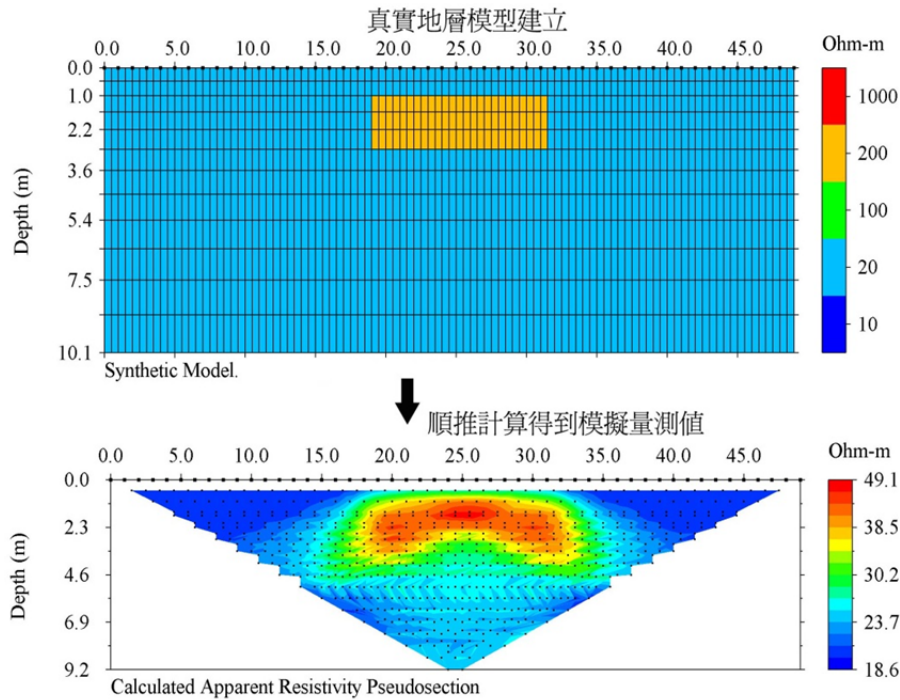


圖 15 地電阻法順推範例

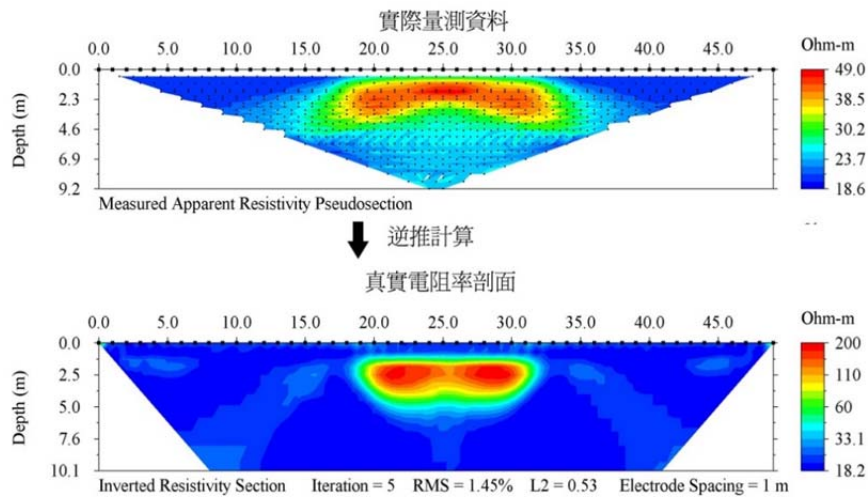


圖 16 地電阻法逆推範例

將地電阻影像法的電極設置井孔內進行探測的方法稱作井內地電阻影像法 (Borehole Electrical Resistivity Tomography)，這樣的配置最初的目的是為了瞭解井和井之間的電阻率影像 (Cross-Borehole Imaging)，為了與地表的探測區隔，且強調成像的目的在於井和井之間，所以井內的地電阻影像法以

跨孔式地電阻影像法(Cross-Hole / Borehole Electrical Resistivity Tomography, CHERT)稱之。跨孔式地電阻影像法於施測理論上與地表施測最大不同在於，地表施測對電流傳遞而言為半無限域空間(Half-Space)，而孔內施測則為全域空間(Full-Space)，如圖 17 示，此點造成在分析尚需考量得假設條件會有所不同，但也顯示其可提供不同之訊息。圖 18 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 18a)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 18b 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(圖 18c 所示)，或兩孔孔內、多孔孔內搭配地表地電阻施作(如圖 18d 所示)，如此可在於有限之地表測線展距空間下，對於地電阻探測之量測結果增加其在深度上之解析度並兼顧其水平量測範圍。

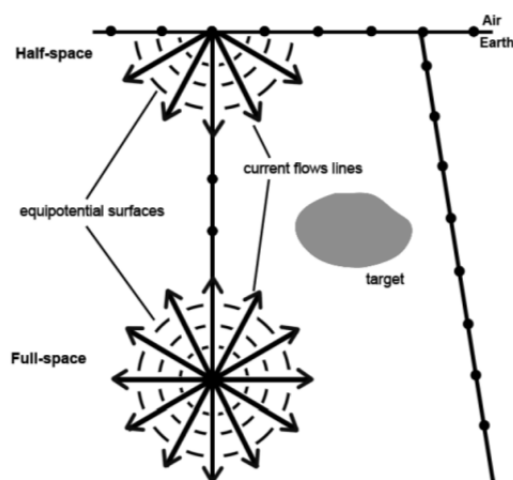


圖 17 孔內與地表地電阻電流傳遞差異示意圖

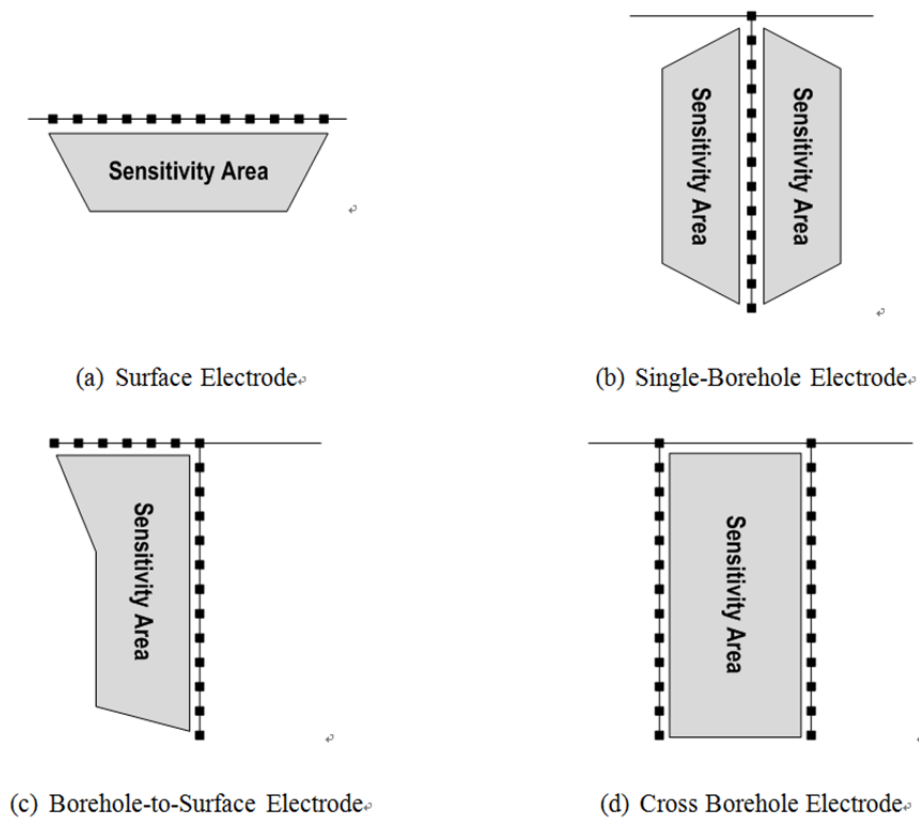


圖 18 地電阻探測地表與孔內電極佈設靈敏度範圍示意圖

根據 Rubin et al.(2005)利用數值模擬進行孔內探測之優點展示，圖 19a 為模擬之正算模型，圖 19b 為僅採用地表電極之模擬施測反算結果，圖 19c 與圖 19d 則分別為搭配兩組與三組鑽孔之孔對地施測法模擬結果。此結果顯示，僅採用地表電極對於低電阻之異常區域於深層之轉折趨勢並不明確，而搭配鑽孔之施測結果由於鄰近孔附近具靈敏度，因此當搭配鑽孔距離越近其量測範圍內之解析能力亦越佳，而可更加有效地獲得鑽孔周邊的空間狀態。

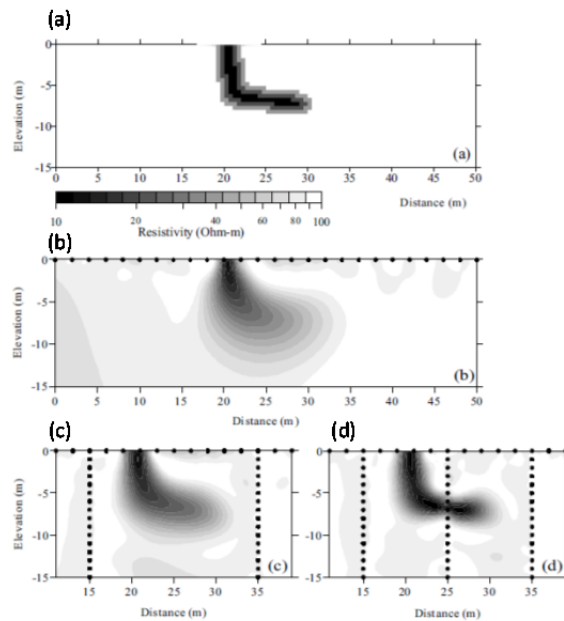


圖 19 地表與搭配孔內地電阻影像模擬結果比較(Rubin et al., 2005)

3.2.2 不同孔內電極排序之施測特性

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，如圖 20 所示，由於 Pole-Pole 排列法在跨孔式地電阻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，目前一般而言，應用於孔內或與地表聯合施測時常用之電極排序概念仍基於地表施測之電極排序為基礎，Society of Exploration Geophysics of Japan 即建議數種常用之應用排序如圖 21 所示，包括 Pole-Pole array、Pole-Dipole array、Dipole-Dipole array 以及 Arbitrary array。而對於在同一施測電極排序中，依據電極位置性質可將孔對孔以及地表間之單組電極配置分類為同線量測 (In-line measurement) 與跨線量測 (Cross-line measurement) 兩種，如圖 22 所示。

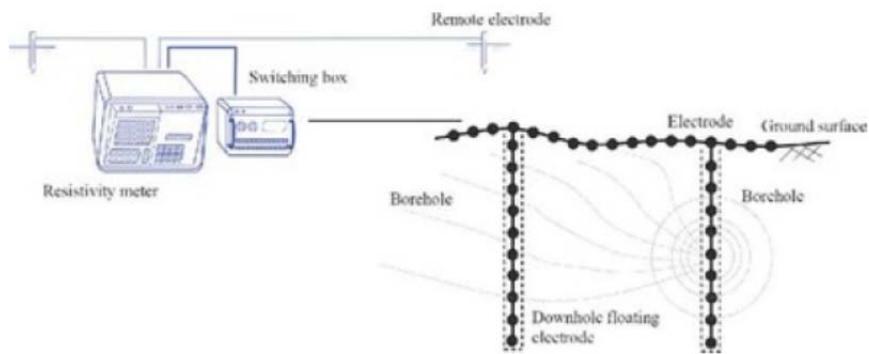


圖 20 地表與孔內地電阻探測聯合運用電極排序示意圖 (Pole-Pole electrode array)(Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014)

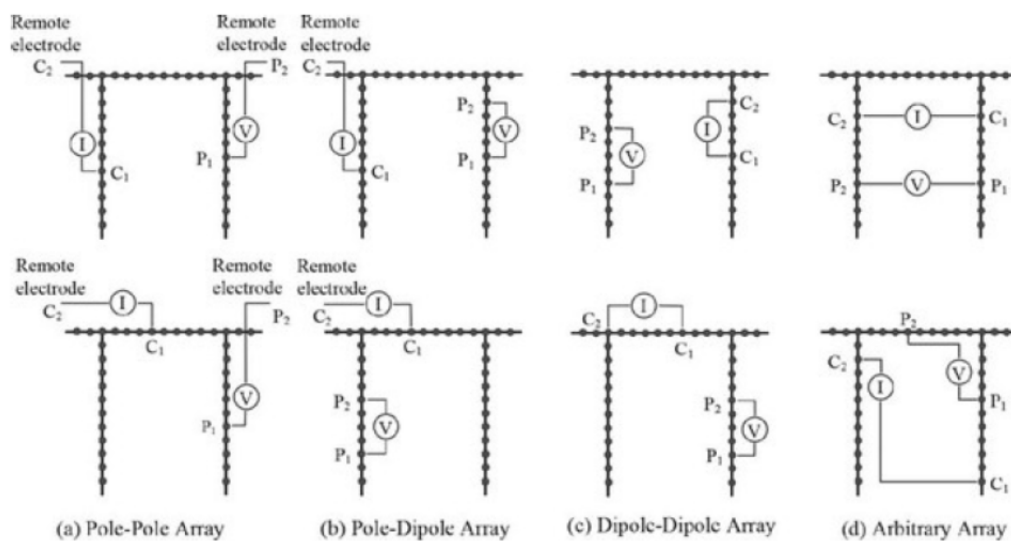


圖 21 常見地表與孔內地電阻探測聯合運用電極排序示意圖(Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014)

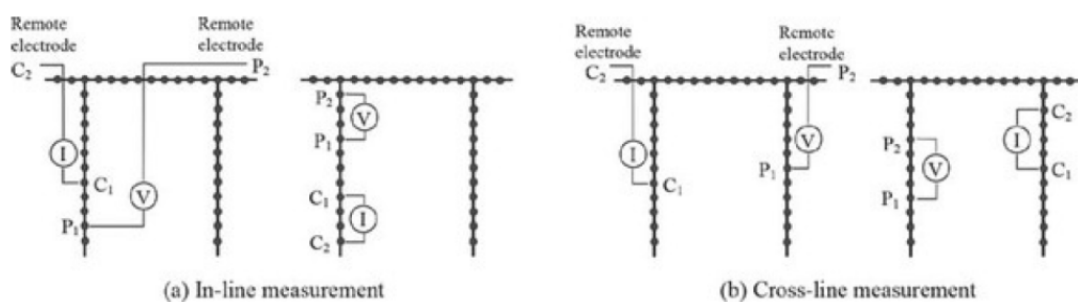


圖 22 同線量測與跨線量測(Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014)

除上述基於地表施測為基礎之孔內電極排序外，另有學者提出組合型式之孔內電極排序組合，依據電流極與電位極相對位置分類，可區分為 α (CPPC)、 β (CCPP)以及 γ (CPCP)，其中 C 為電流級 P 為電位極，如圖 23 與圖

24 所示。

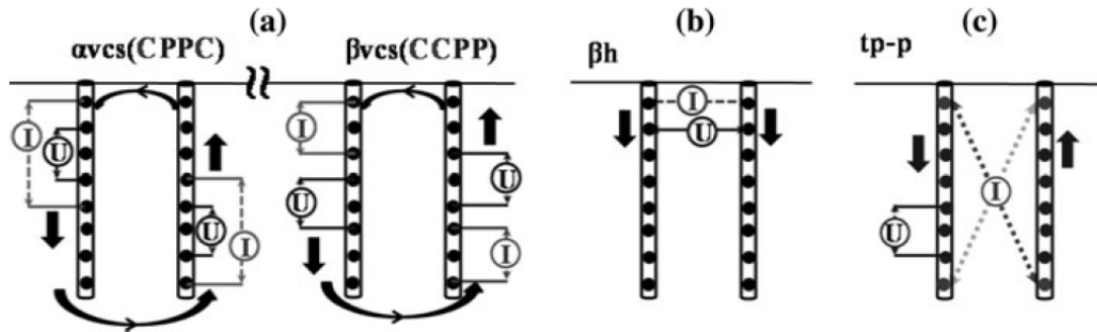


圖 23 組合型式之跨孔電極配置(Hargery, 2012)

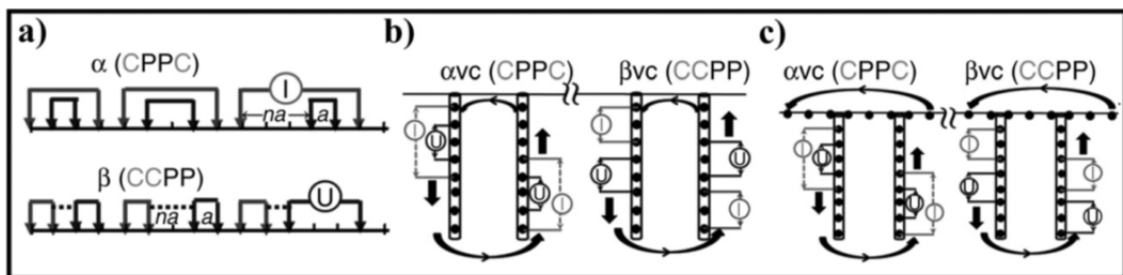


圖 24 變異型式之跨孔與地表聯合電極配置(Hargery, 2011)

然而對於不同地表與孔內電極排序組合，其解析能力通常是透過敏感度方程式(Sensitivity Equation)來評價電極配置之優劣。除此之外，Hargery 等人(2012)以數值模擬評析不同電極配置之特性，並提出一 R 參數，其代表真實模型參數與正演模擬結果之比值，其定義如下：

$$r_{model} = R \cdot r_{true}$$

此值由反算過程中獲得， R 參數之計算如下：

$$R = (G^T G + \lambda C)^{-1} G^T G$$

據此，Hargery 等人依據 R 值評價數種常用電極排序以及優化排序，其結果如圖 25 所示。由圖中可清楚發現在沒有地表電極的跨孔施測(borehole-borehole)中，不同的電極排列在不同的空間位置會有不同的解析能力，更不利的是，在孔與孔的中間並不具有良好的解析能力，無法達到跨孔施測的目的。Hargety et al.(2012)僅針對兩種常見電極排列方式進行探討，本研究將再針對其他電極排列方式進行討論，並納入孔與孔間距離的影響，以利未來在現場應用的選用。

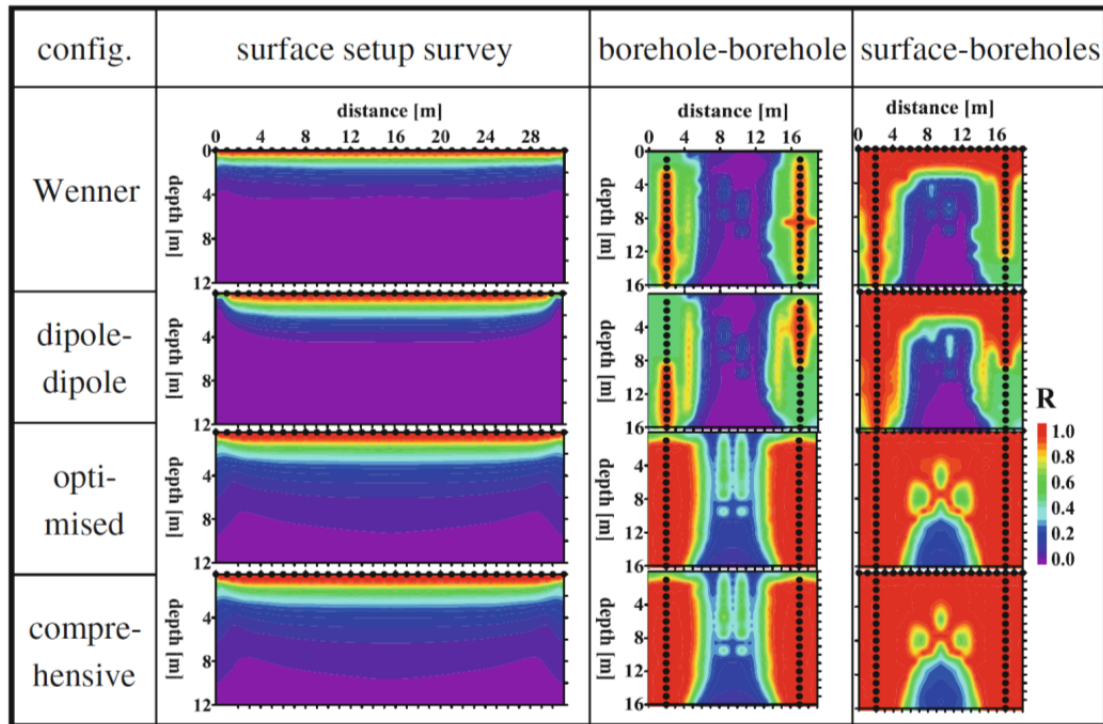


圖 25 不同地表與孔內搭配解析能力範圍評估 (Hagrey et al., 2012)

3.3 土壤汙染整治成效監測之應用問題評析與計畫重點

雖然目前孔內地電阻影像探測已有零星應用案例以及學術研究探討，然而目前對於其現地施測參數與配置之設定卻莫衷一是眾說紛紜；例如在跨孔調查中，孔與孔的間距限制，Goes and Meekes(2004)建議井內電極配置的總長度與兩井之間的間距（D/S）大於 1 可提升資料品質，地電阻儀器製造商 AGI(2003)於跨孔施測作業手冊則建議 D/S 大於 1.5，如圖 26 所示。

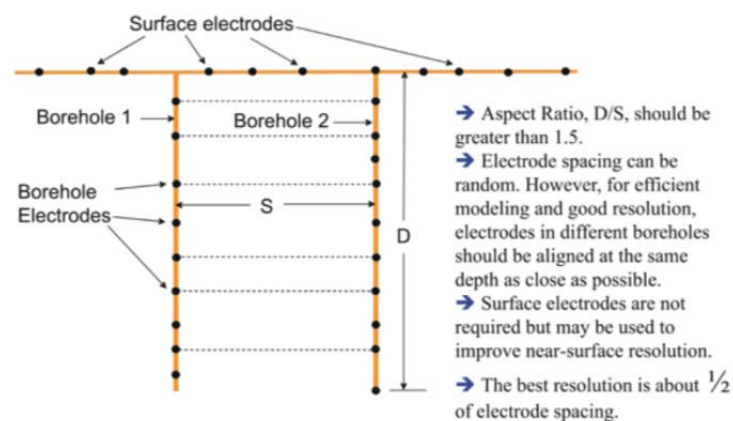


圖 26 跨孔地電阻測線之建議施測參數 (AGI, 2003)

此外，由於應用於土壤汙染整治場址之現場監測井可能具備多種用途，

因此採用移動式孔內電極應為最佳之選擇，且可以避免固定電極耐久性之疑慮。而對地電阻探測而言最重要的施測模式，前述所提及的電極排序若不適用於孔內探測時，那麼對於孔內地電阻探測而言該使用何種施測模式較佳亦為需要探討之問題；更甚者，若既有監測井相距甚遠無法採用跨孔調查而須採用地表對孔之調查方式時，監測井的設置方式對於探測結果會否有所影響？其最佳配合測線位置為何等問題亦值得探討。

因此，本研究對於此跨孔與孔對地面的地電阻影像探測（ERT）技術發展，主要將此其分為兩個子題進行，一個是電極排列的優化探討，包括不同施測策略（含監測井相對位置、間距及電極排列方式）對於深部解析能力的探討與優化；另一方面是移動式孔內電極的研發，對於電極之材料以及形式進行規劃與測試。

第四章 研究方法與過程

4.1 研究流程

本研究之研究流程如圖 27 所示，首先透過文獻回顧對目前地電阻影像探測法應用在汙染物整治監測之問題，綜合過去經驗以及文獻回顧成果明確定義本研究所欲解決與突破之問題，將地電阻影像探測技術在污染場址之監測應用問題鎖定在地電阻影像探測電極排列優化以及移動式孔內電極研發兩個重點之上。對於地電阻影像探測電極排列優化之探討以及研究主要是要先透過數值模擬的方式，將地表對孔內施測之模式中，對於汙染物整治監測可有最佳解析度與探測效果的電極排列方式找出來，而後透過室內砂箱試驗進行實驗驗證工作，比對不同電極排列方式在不同施測配置下的表現。在進行電極排列優化探討的同時，會進行移動式孔內電極的研發工作，針對孔內電極之材料進行耐久以及電壓量測測試，並設計適合現場施作的相對應纜線；在完成電極排列優化以及移動式孔內電極研發後，會將研究成果應用至實際的現地監測工作，除了測試其訊號量測品質外，並提供監測資料協助模場整治之有效範圍監測，最後針對現地試驗的經驗，將其回饋進行移動式孔內電極的改善。

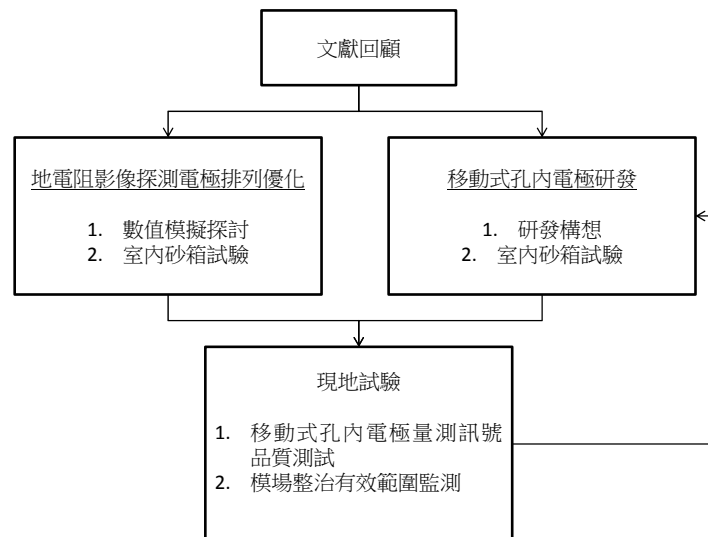


圖 27 研究流程圖

4.2 工作進度

整體工作進度如表一所式，預定查核點如表 3 中說明，整體進度與預期

第五章 結果與討論

5.1 移動式孔內電極之研發

5.1.1 移動式孔內電極研發概念

一般而言，應用孔內或跨孔地電阻施測所採用之電極佈設方式可區分為：

- (1) 裸孔施測方式：利用新設井完成後，將電極纜線置於孔內，進行施測；
- (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；
- (3) 將套管全開篩，放置移動式孔內電極，施測完成將電極取出。

此三種方法各有優劣，但應用於土壤污染整治場址之現場監測井可能具備多種用途，因此採用移動式孔內電極應為最佳之選擇，且可以避免固定電極耐久性之疑慮。目前現地孔內電極採用之重複性使用電極纜，一般而言為石墨材質或不鏽鋼材質之電極，如圖 28 所示，兩者抗腐蝕與極化程度不一。欲應用於土壤污染或整治後評估場址時，由於場址特性可能具有複雜化學組成與程度不一之潛在腐蝕性，既有商用電極相關材料於此環境條件下之抗蝕性及防水狀態亦未有進行測試評估；此外，在有不同電極間距之需求時，商用電極纜線並無法進行調整變更，使得在每種不同施測目標下無法使用。有鑑於此，本研究預期發展能多次使用與施測方便的模組化移動式孔內電極，以解決傳統污染場址施測時的困擾，並擬以電流極與電位極分開設計為目標，讓監測井之應用性大幅提升。

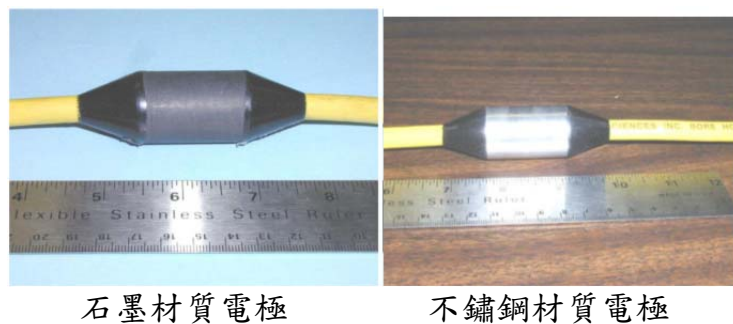


圖 28 現行孔內地電阻施測之電極種類 (AGI, 2003)

基於上述原因，本研究擬研發出具方便性同時具經濟性之模組化移動式電極纜線。主要研發概念核心包括：

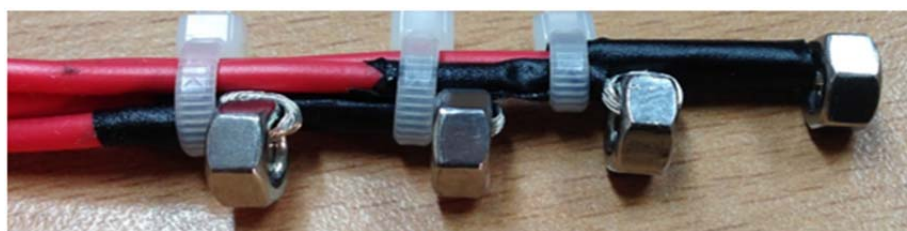
- (1)耐久性：電極材料之選擇
- (2)功能性：電流極、電位極分開
- (3)方便性：電極纜線容易拆解更換
- (4)通用性：模組化可適用各廠牌主機

5.1.2 電極尺寸與影響範圍探討

孔內電極不同的尺寸對於其影響範圍有一定的關係，且單孔電極量測時，電流沒有方向性，故需考慮其邊界之影響，本試驗探討之目的為探討不同尺寸的孔內電極於不同直徑的試驗砂箱量測電阻率時，受其影響程度。據此概念準備不同直徑之試驗筒(如圖 29)，材質均為不導電塑膠，其內直徑分別為 10.8cm、13cm、16cm、32cm、42cm、60cm，待測材料均為自來水。分別製作不同尺寸之孔內電極，電極材料均為不鏽鋼 304，如圖 30 所示，電極厚度均為 0.3cm，電極間距由依序為 1cm、3cm、5cm，施測之排列法為 Wenner array，分別置入先行準備之不同直徑試驗砂箱筒進行電阻率量測之試驗，試驗結果如圖 31 所示。



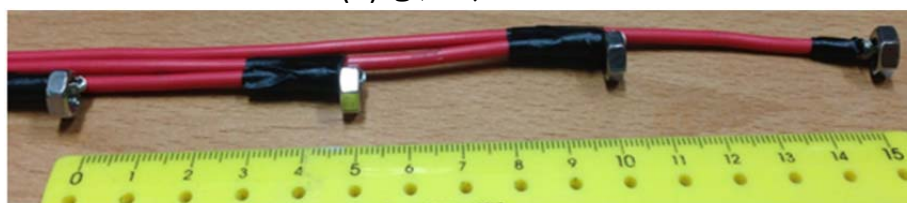
圖 29 不同筒內徑之試驗筒



(a)電極間距 1cm



(b)電極間距 3cm



(c)電極間距 5cm

圖 30 電極厚度 0.3 公分不同間距之孔內電極

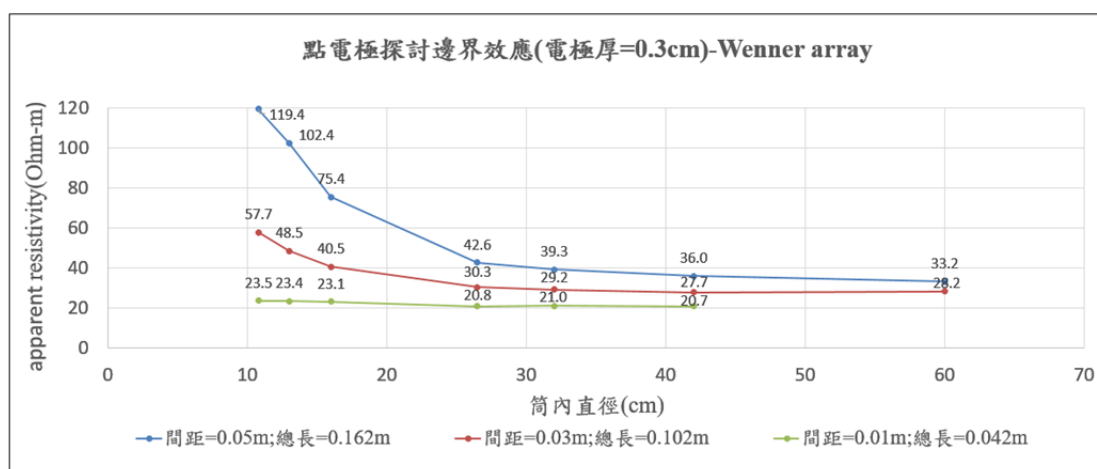


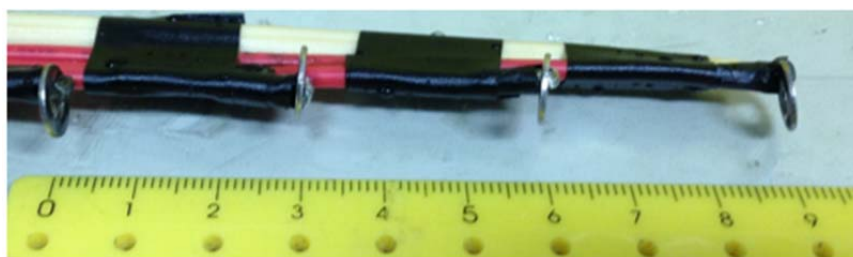
圖 31 不同電極間距之孔內電極於不同筒徑試驗結果

由此圖中會發現，隨著桶內直徑的增加，在不同電極間距下電阻率都同時會下降之某一值後呈現穩定，然而就理論上，在沒有變界效應之影響後三組所量測得之水的電阻率應當極為接近 35ohm-m(採用溶液式水導電度計所得知結果)不同的電極間距下，但由此結果可明顯看到，當間距越小時，穩定後所得到的電阻率有越低的情形，使得此組邊界效應的探討結果不具可靠

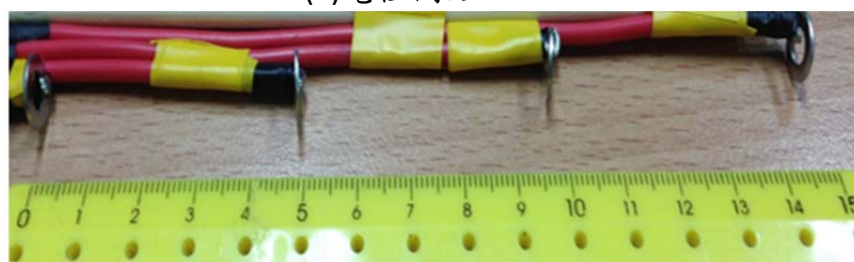
度。經重新檢視本試驗之配置後發現，利用 4 個電極點進行電阻率之量測有一極重要之基本假設，其假定電極需為點電源，而欲使配置接近此假設，須使電極厚度與間距達到一定的差異比例，前述之試驗中未符合此假設而造成最後量測所得電阻率在電極間距越小的情況下，其差異越大。

據此製作更符合點電極理論包括不同尺寸之孔內電極，電極材料均為不鏽鋼 304，如圖 31 所示，電極厚度縮小為 0.05cm，電極間距由上中下依序為 3cm、5cm，施測之排列法為 Wenner array，分別置入先行準備之不同直徑試驗砂箱筒進行電阻率量測之試驗，電極厚度相同為 0.05cm 之孔內電極試驗結果如圖 32 所示，不同間距下之量測結果雖仍略受電極大小之影響，但整體而言其兩者收斂至極為接近的位置。觀察上述兩相同厚度電極，在不同電極間距之孔內電極量測自來水電阻率之結果，歸納出以下之建議：

1. 電極總長度(電極厚度+電極間距)若大於電極厚度約 50 倍以上，其較接近點電極之理論，量測之資料品質影響較佳。
2. 砂箱試驗筒內直徑若大於電極總長度約 3 倍以上 (即若為點電極之假設，筒內直徑若大於電極間距約 9 倍以上)，邊界效應影響較少，量測之資料品質影響較佳。



(a)電極間距 3cm



(b)電極間距 5cm

圖 31 電極厚度 0.05 公分不同間距之孔內電極

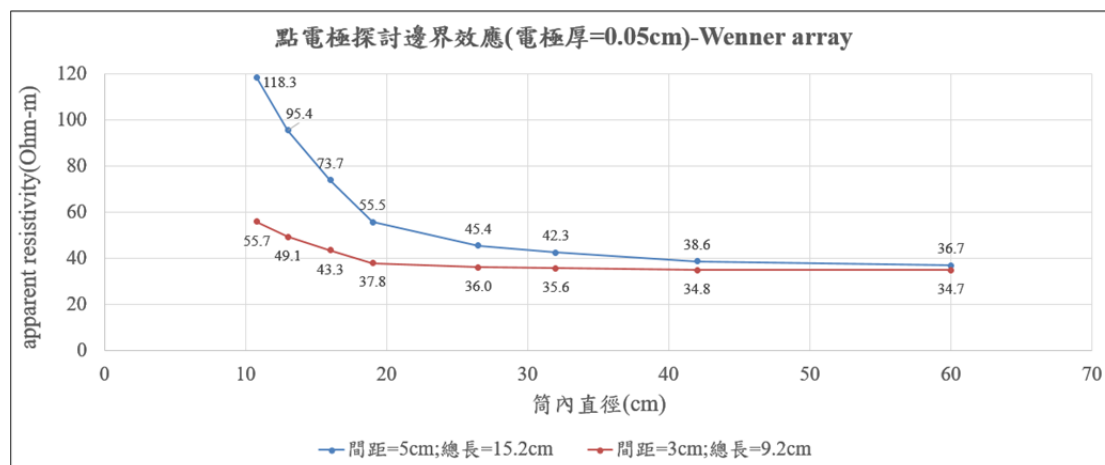


圖 32 不同電極間距之孔內電極於不同筒徑試驗結果

由此電極尺寸之測試結果所獲得之電極尺寸與量測結果間之關係，將做為後續移動式孔內電極研發過程中的電極尺寸設計基準。

5.1.3 移動式孔內電極之設計與雛形

初步設計之移動式孔內電極纜線，可避免因長時間置於井內固定電極耐久性疑慮。一般常見電極材料為不鏽鋼 304、不鏽鋼 316、石墨等材料，兩者材料抗腐蝕與極化程度不一、適用性亦不同，經長時間室內試驗發現電流極氧化極化程度遠快於電位極，故選用電極纜線之電流極採用不鏽鋼 316(含 18%鉻、10%鎳)，抗氧化、耐酸鹼、抗腐蝕能力優於常見之不鏽鋼 304(含 18%鉻、8%鎳)，增加其耐用性。此外，基於應用性之考量，故設計電流極、電位極分開，如圖 33 所示，電流極採用非極化材料-石墨，同時可施作自然電位之量測。

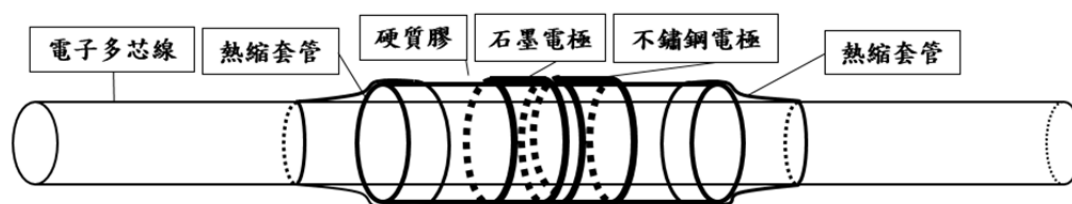


圖 33 電極纜線局部設計圖

基於現地應用時，常有某小段電纜電極部分損壞導致全部電纜無法使用之案例，故此移動式孔內電極設計納入了容易自行拆解更換分段之考量，如圖 34、圖 35 之設計，而各接頭的部分配合採用快速拔插型之防水接頭(圖

36)。此外，基於各廠牌主機並無統一電纜線接頭規格，故此移動式電纜線採用快速接頭之模組更換設計，尾端各剝皮裸芯線插入快速接頭即可連接各廠牌之主機適用接頭。電纜各段因電流極、電位極分開，因此採用 18 芯控制電纜多芯線，採用單一芯線截面積 0.3mm^2 即可達到主機最大施壓 600V 之需求，且降低此移動式電極電纜之總重量，減輕移動負擔。

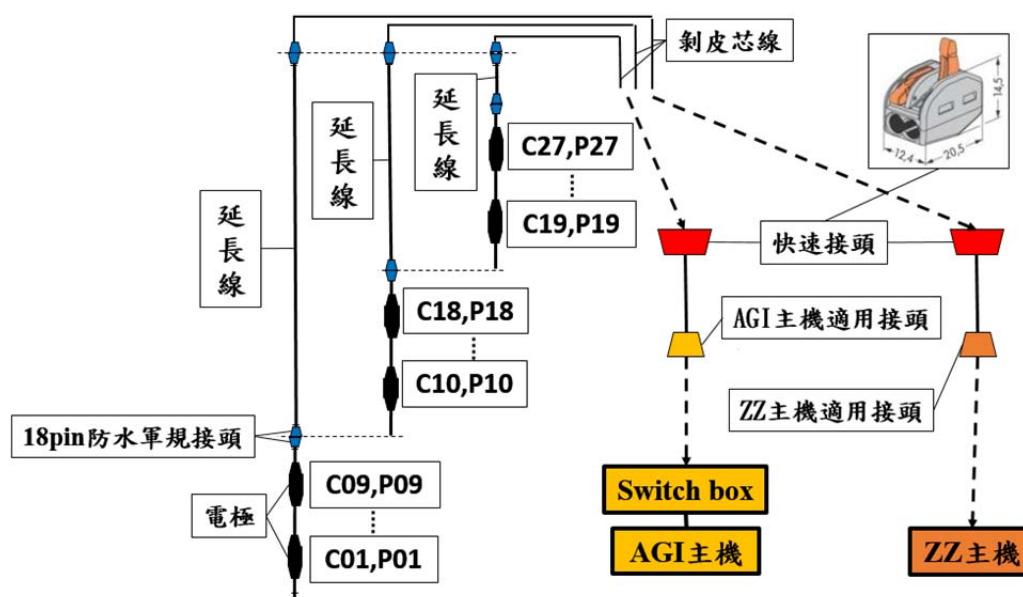


圖 34 電極纜線示意圖

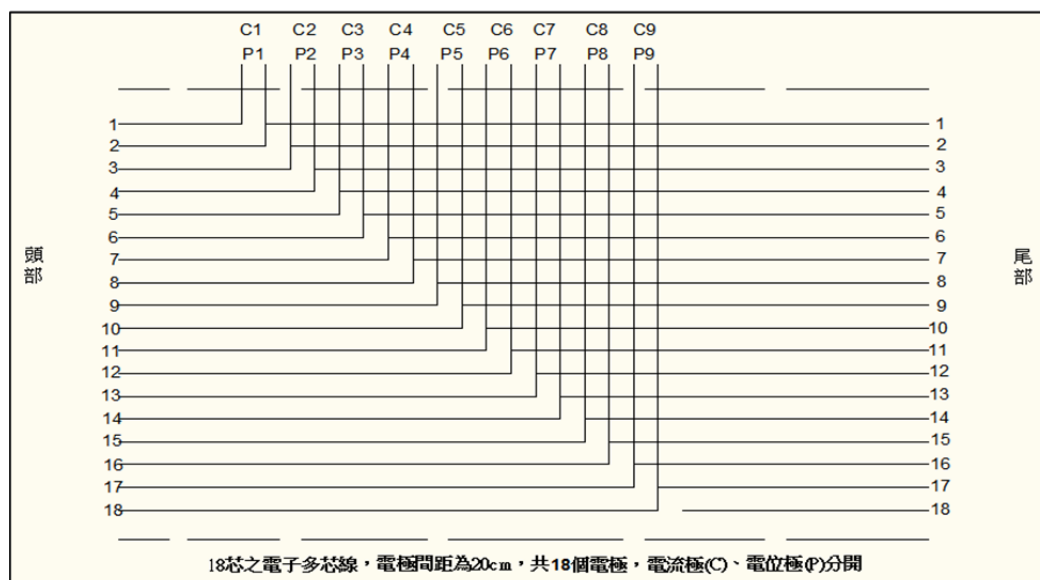


圖 35 電極纜線抽線製作示意圖

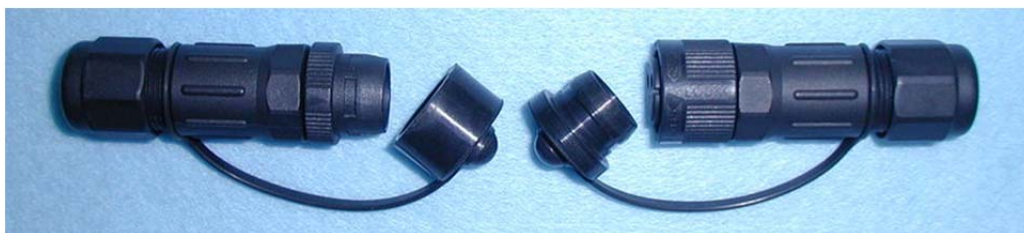


圖 36 快速插拔型防水接頭

根據前述之並於實驗室製作原型電極纜線來驗證其研發概念之可行性，電極纜線之基座參考電子芯線尺寸、電極尺寸、工作性、防水性等進行設計，。包覆材料為 ABS 塑膠，外部以不鏽鋼環與石墨環為導體，如圖 37 所示，分別供電流極與電位極之使用，在電極與非導體基座間需以適當之膠合物做膠合，避免電極導體發生錯位之情形。電子芯線與電極導體需進行導通接合之動作(通常為焊接等)，但電極為圓筒型非一平面，導通接合較為困難。一開始測試導電膠於圓筒型電極之接合效果，其接合效果極差，無法有效固定電子芯線於圓柱型電極上，經多方測試，本研究最終使用導電膠帶成功固定電子芯線於電極上，且在外露之導電膠帶與非導體基座之銜接處使用加壓自融性絕緣防水膠帶進行補強與避免外露導電材料之氧化，如圖 38 所示。在電極與電子芯線間需用不導電材料(如環氧樹脂 epoxy 等)進行填充其空隙。最後在電極導體與非導體基座與電子芯線銜接處套上熱縮套膜以增加其強度與防水性，完成圖如圖 39 所示。

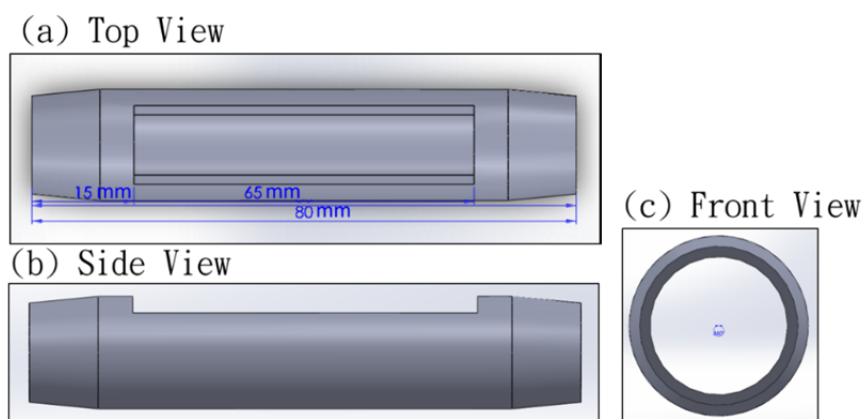


圖 37 電極之基座: (a)上視圖(b)側視圖(c)前視圖

本研究以完成之移動式電極纜線先進行量測一維地電阻探測法之穩定性試驗，試驗結果如表 4、表 5 所示，利用四個點進行電阻率量測，每一斷面皆於自來水中量測 10 筆資料，每筆資料間隔為 30 秒，量測出來自來水之

電阻率標準偏差均在 4 Ohm-m 以內，此結果可觀察到此標準偏差並不大，證明此移動式電極纜線能進行穩定量測。本研究亦進行測試其電極纜線與延長線間之快速插拔型防水接頭防水效果，試驗結果為無滲水或入水之情況。

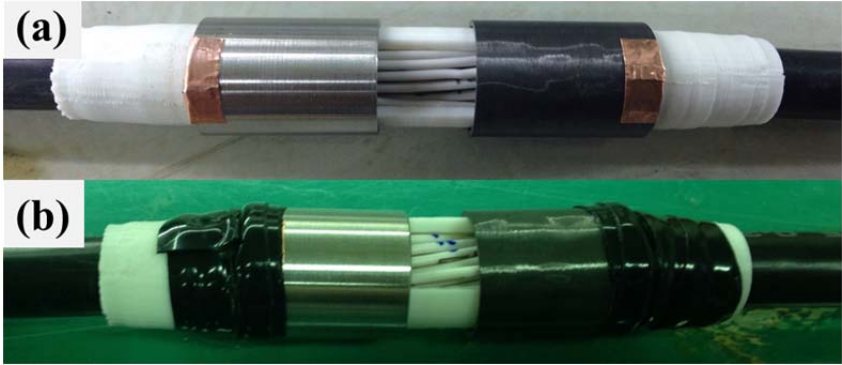


圖 38 電子芯線與電極銜接處: (a)使用導電膠帶固定(b)使用自融式絕緣防水膠帶固定



圖 39 移動式電極完成圖

表 4 Cable A 於一維地電阻法之平均值與標準偏差

Electrode # (C1,C2,P1,P2)	平均電阻率(Ohm-m)	標準偏差(Ohm-m)
#1,#4,#2,#3	1236.67	2.58
#2,#5,#3,#4	37.79	0.94
#3,#6,#4,#5	43.63	0.24
#4,#7,#5,#6	1481.80	3.90
#5,#8,#6,#7	511.67	2.15
#6,#9,#7,#8	516.33	2.33

表 5 Cable B 於一維地電阻法之平均值與標準偏差

Electrode # (C1,C2,P1,P2)	平均電阻率(Ohm-m)	標準偏差(Ohm-m)
#1,#4,#2,#3	1472.67	2.63
#2,#5,#3,#4	25.07	0.53
#3,#6,#4,#5	57.07	1.62
#4,#7,#5,#6	809.53	2.91
#5,#8,#6,#7	1167.73	3.82
#6,#9,#7,#8	442.07	2.37

本研究對於移動式電極纜線之主要研發概念核心為耐久性(電極材料之選擇)、功能性(電流極、電位極分開)、方便性(電極纜線容易拆解更換)、通

用性(模組化可適用各廠牌主機)，經本次一維地電阻探測法測試證實這些研究核心概念已具可行性，此模組化移動式電極之設計與概念經測試顯示具有應用性，現地將採用配合專業廠商製作之成品進行測試。

5.2 地電阻影像探測法施測電極排列的優化

在電極排列的優化工作上，主要分別採用數值模擬以及室內砂箱試驗之方式進行，分別於下兩節中說明。

5.2.1 數值模擬探討

5.2.1.1 數值模擬規劃

在數值模擬探討部分，主要採用 3D 數值模擬方法進行地電阻探測模擬，須透過三維數值模型建構幾何與材料參數，以準確描述施測結果與電極配置條件之相互關係。因此，本計畫採用專長於多物理量有限元素分析軟體 COMSOL (Ver. 4.3a) 建立三維正算模型(COMSOL group, 2013)。由於該軟體與 MATLAB 語言的高度整合性，使其成為完全開放平台，結合 MATLAB 強大的函數庫供使用者自行引入，因此更適合應用於本研究所需多物理量於三維空間之仿真模擬。

本計畫經評估後認為基於場址之鑽孔佈設不一定能夠很好地配合跨孔的施測模式，又期望單一鑽孔能夠幫助調查污染現狀，因此基於現場施作較為可行的方式為採用既有單一鑽孔搭配地表測線，期能透過兩者之結合提升施測可信範圍。因此，數值模擬部分針對地表對單孔的施測模式做了一系列的探討。目前污染物主要分為低電阻率污染物和高電阻率污染物，如表 6。

表 6 污染物電阻率分類

項目	模擬污染物類型	常見電阻率範圍 (ohm-m)
低電阻污染物	無機鹽廢水；重金屬污染	<10
高電阻污染物	含氯有機溶劑；高碳數油品污染	700-2000

數值模擬的部分對高、低電阻率的污染物都進行了探討。在參數設定部分，低電阻污染物設定為 10ohm-m，高電阻率污染物設定為 1000ohm-m，背景值設定為 100ohm-m。如圖 40 為模型規劃示意圖，鑽孔長度為 30m，搭配地表的測線也為 30m，以鑽孔位置為地表測線的中心點。地表測線的主要貢獻在於提供淺層的解析，因此電極間距設定為 1m 足夠。鑽孔測線的電極間距設定為 0.5m，以期望對於較深部有更好的解析能力。異常區（污染

物) 分別設定在地表以下 6m、16m、26m 處，異常區大小為 3m*3m，異常區域距離鑽孔的水平距離 d 考量 6m、5m、4m、3m 四個不同的距離，以探討孔內電極在水平方向的探測範圍。依據上述規畫所完成的三維數值模型如圖 41 所示。

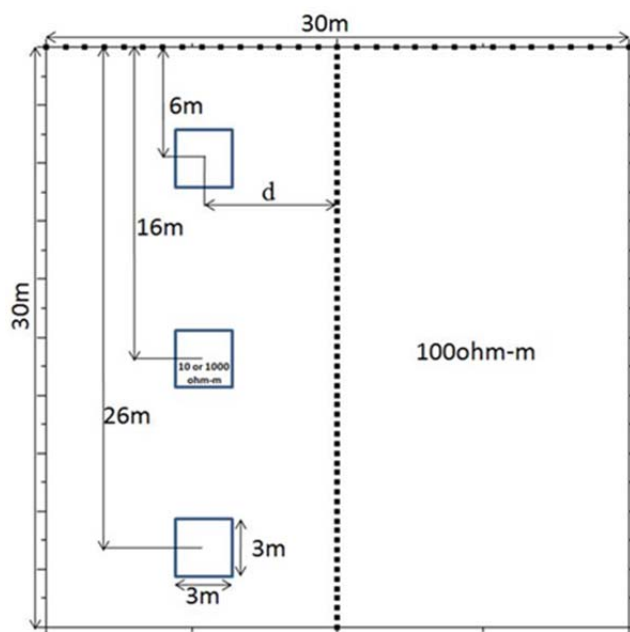


圖 40 模型規劃示意圖

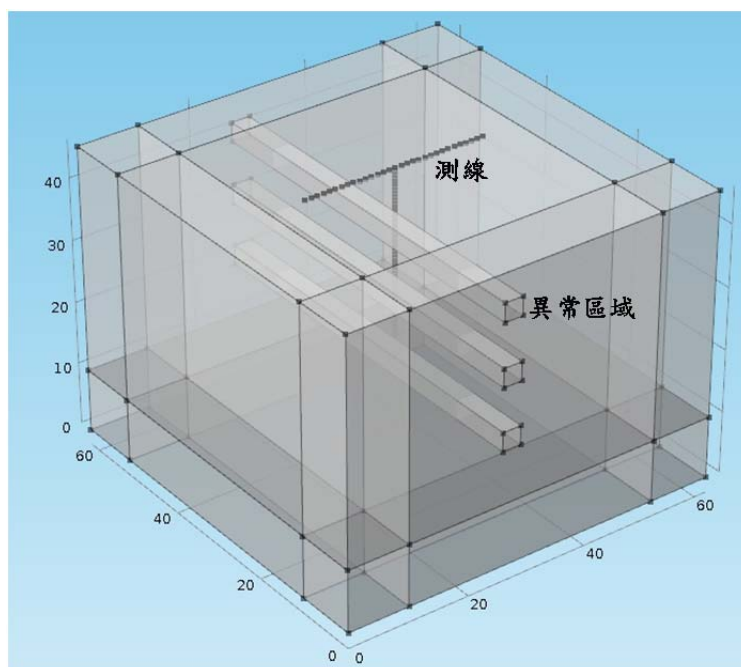


圖 41 三維數值模型示意圖

地表搭配單一鑽孔的施測模式（以下簡稱 T 字測線）沒有一個規定的序列生成方式，根據 Tsourlos et al. 在 2011 年提出的對於 T 字測線施測序列的組合方式，如圖 42，將 T 字測線的序列分為三個部分進行組合。第一部分為單純的地表測線序列，第二、三部分為左右兩個 L 字的部分，在 L 字的部分仍然將其視為一條地表測線，來生成相對應的序列。最後將三者合併，並去掉重複之序列。本模擬採用之序列有三種，包括：dipole-dipole、pole-pole、Wenner-Schlumberger。

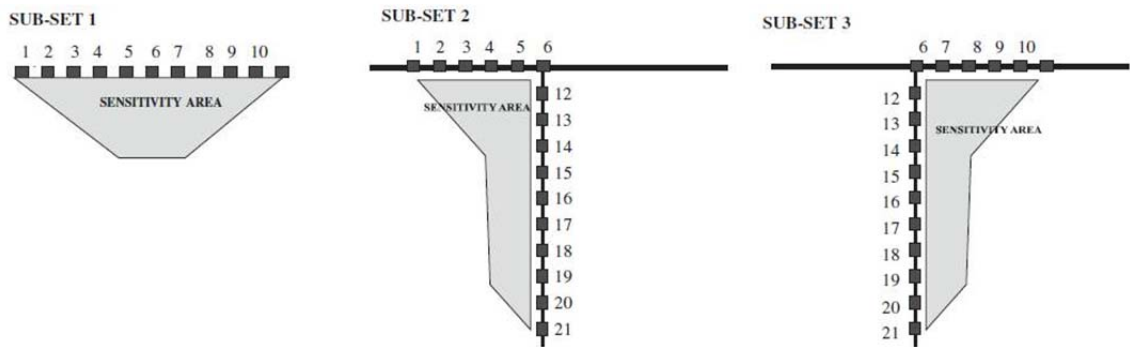


圖 42 T 字測線序列組合（Tsourlos P，2011）

5.2.1.2 不同電極排列對施測成果之差異

正算模擬所收錄之資料採用商業反算軟體 AGI Earthimager 2D 進行反算分析，如圖 43、44、45 分別為 dipole-dipole、pole-pole、wenner-schlumberger 的模擬結果。比較不同序列的結果可以發現，當異常區域到鑽孔的水平距離相同時，dipole-dipole 具有比 pole-pole 和 wenner-schlumberger 更好的成像能力。當距離較遠時，dipole-dipole 序列在這種施測模式下能夠更好的確定淺層的異常區域，當接近鑽孔時，dipole-dipole 又能夠比另外兩種序列更好地反映污染區域的電阻率值。

如圖 46 所示，為不同序列反算結果的量化分析。其橫坐標代表距離鑽孔的水平長度，縱坐標為對應異常區域的反算電阻率值。取異常區域中所有資料點的結果進行平均，來代表一個區域的電阻率值。從結果中可以看出，不論是在哪一個深度的資料，三種序列之間相比較的趨勢都是一致的。從反算結果的量化來看，dipole-dipole 序列的結果始終是最接近真實值（設定值為 10ohm-m）。

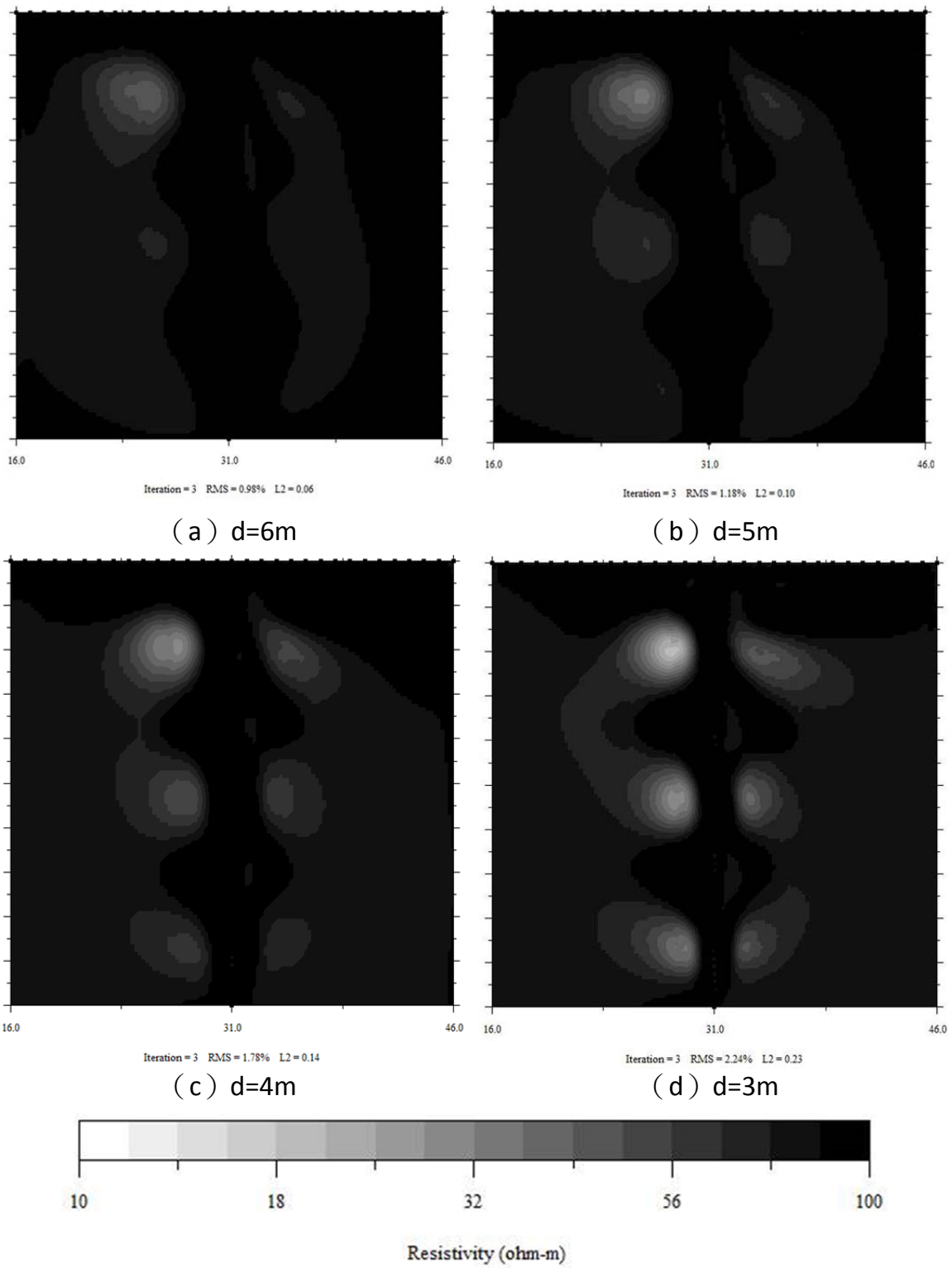


圖 43 Dipole-dipole 序列模擬結果

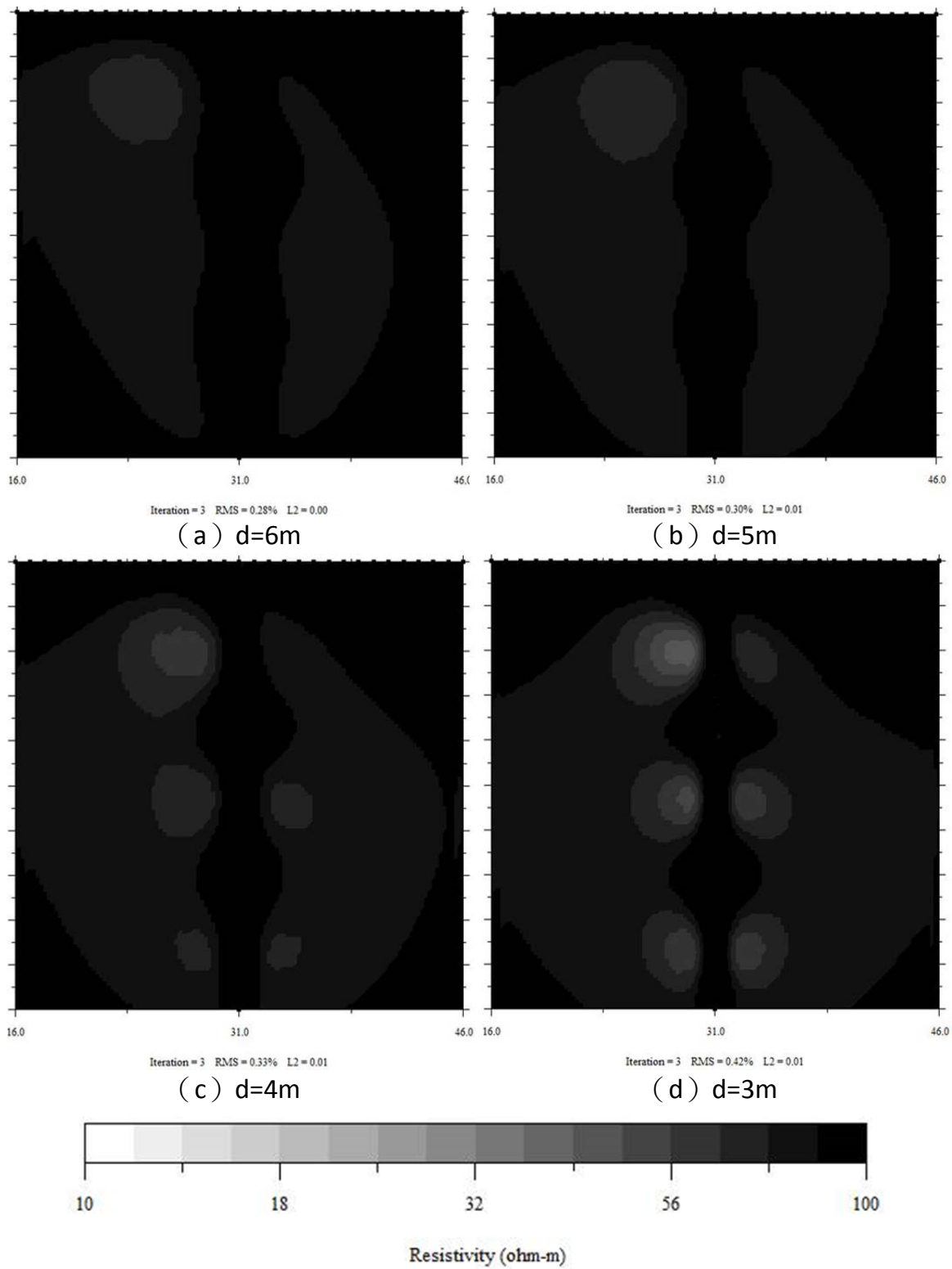


圖 44 Pole-pole 序列模擬結果

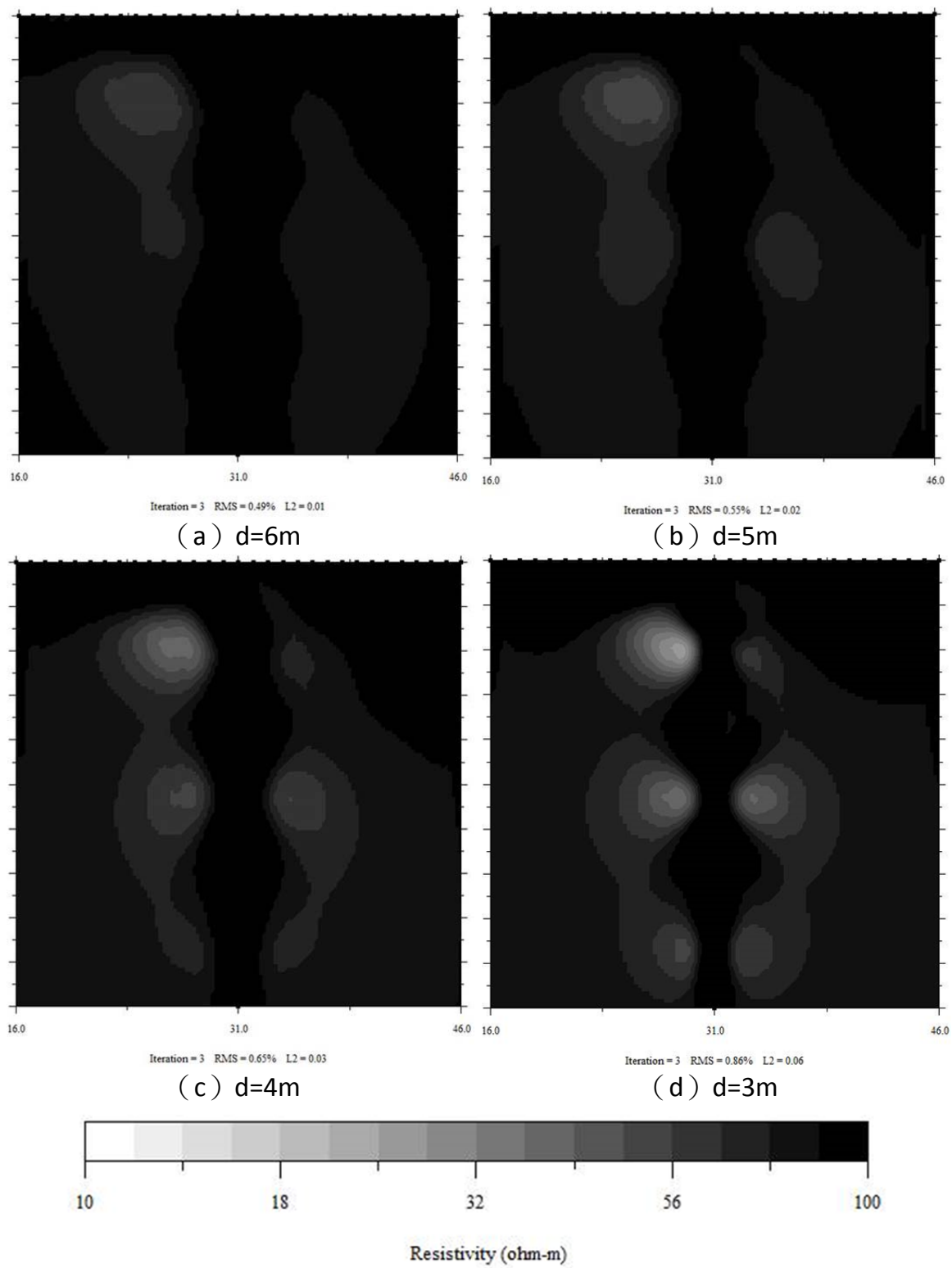


圖 45 wenner-schlumberger 序列模擬結果

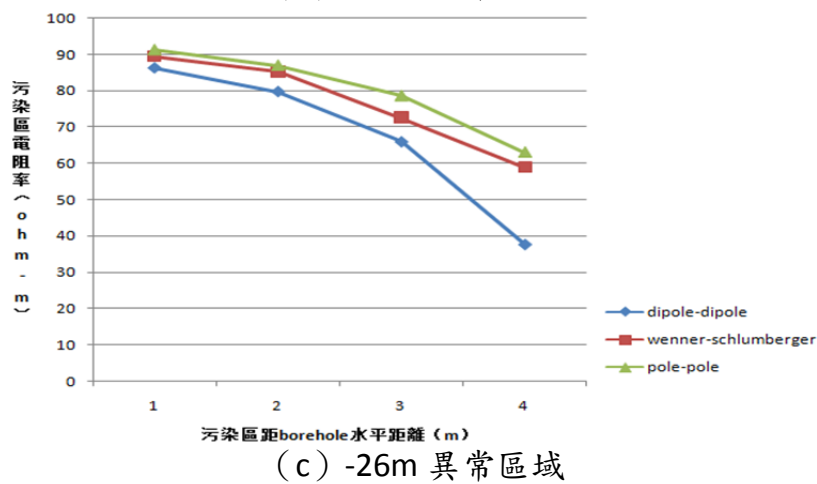
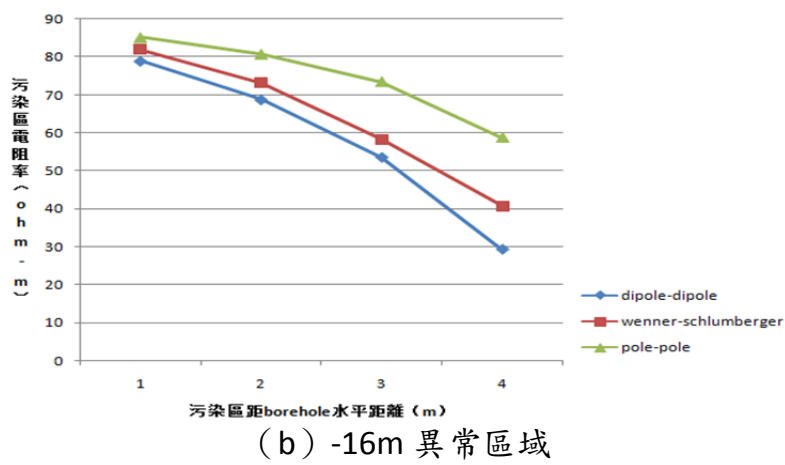
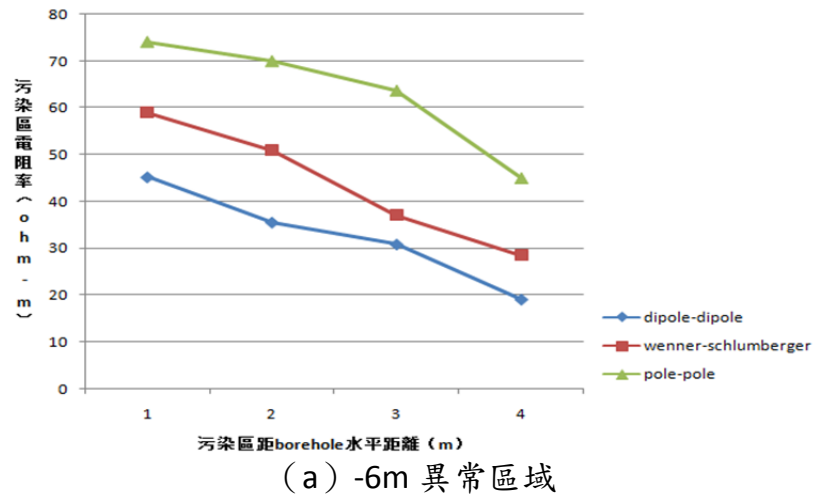


圖 46 三種序列反算結果量化分析圖

三種序列按照前述組合方式生成相應數目的序列。根據各序列生成方式和參數的不同，導致不同序列有不同數目的資料點。在本模擬中，wenner-schlumberger 有 2949 個資料點，pole-pole 有 3110 個資料點，

dipole-dipole 僅有 1764 個資料點。相比較而言，dipole-dipole 具有更少的資料點，但能夠更好地確定污染物的位置及污染物電阻率值的相對大小。但根據在國內現場施作的經驗顯示，wenner-schlumberger 之抗雜訊能力遠佳於 dipole-dipole 序列，因此在其探測成果差異接近的前提下，建議在使用 T 字測線進行污染調查時採用 wenner-schlumberger 序列。

前述的探討是基於模型設定中異常區域大小為 $3\text{m} \times 3\text{m}$ ，考量進一步探討這種施測模式下能夠探測的最小異常區尺寸，將模型中的異常區域調整為 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的大小，以 dipole-dipole 序列、 $d=3\text{m}$ 的模擬結果為例，進行比較說明，如圖 47 所示。

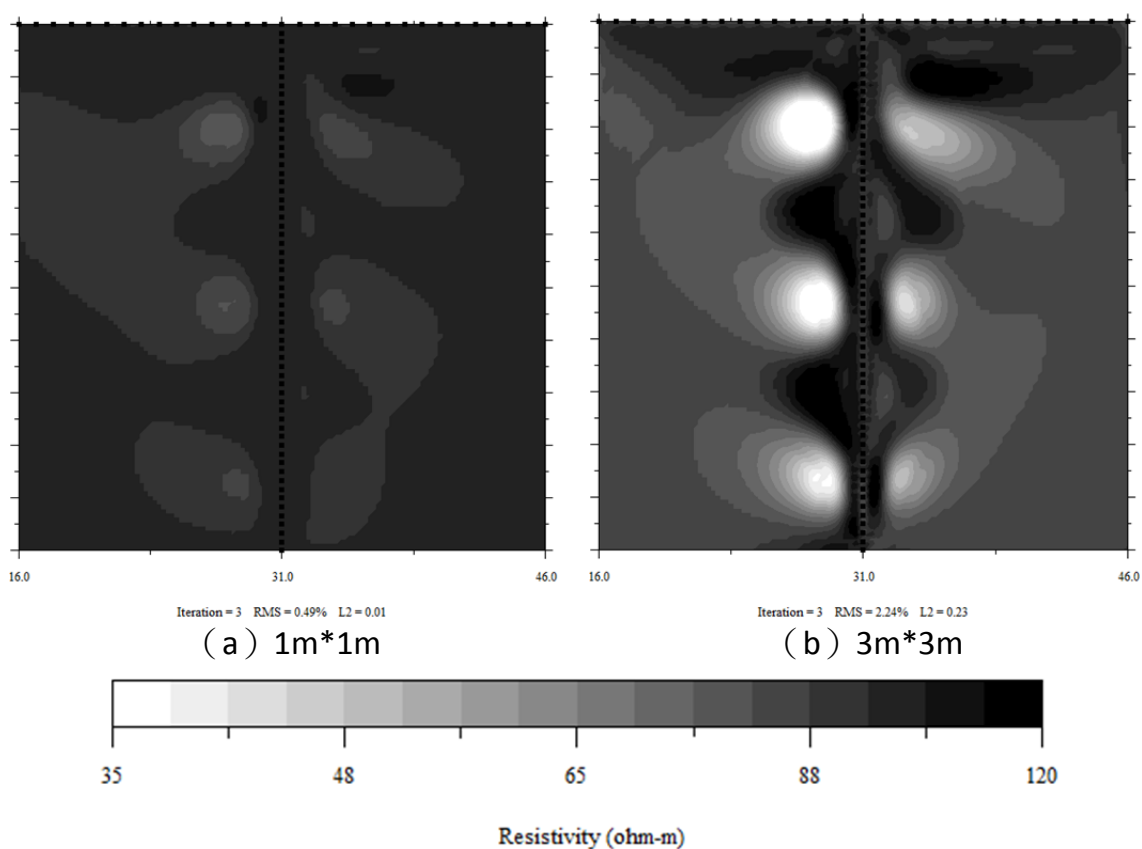


圖 47 不同異常區域大小模擬結果

圖 47(a)是異常區域大小為 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的結果，與圖 47(b)相比較而言，在異常區域位置的確定上，不論異常區域大小，都能夠很好的確定異常區域所在位置。但從模擬結果也可得到另一個方面的認識，即當異常區域的大小很小時，雖然能夠判釋出異常區域的位置，但對於污染規模的確定並不十分準確。在比較深部的異常區域由於受到映射的影響較重，也會使反算得到的

異常區域的大小改變。從理論上來講，孔內電極間距為 0.5m，地表電極間距為 1m，其最小解析能力大約在 0.5m-1m 的幾何尺寸範圍內。但由於資料收錄以及反算所造成的不確定性影響，容易使結果誤判。因此現場作業對於結果的解讀應持保守的原則，不可過度解讀。

5.2.1.3 孔對地施測方式之施測特性

根據 Tsourlos 等人 2011 年對於 T 字測線所做的研究，T 字測線存在的最大的問題是會出現映射的現象，模擬結果很好地證實了這一點。如圖 48 所示，映射現象隨著深度的增加變得更為明顯，這是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。而靠近地表的部分，由於地表資料的貢獻，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。由 Tsourlos 等人在 2011 年提出的權重反算方法，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。但這種方法存在的不足是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。而目前商業化的反算軟體也尚未有可以進行加權反算的模組。因此，利用數值方法，對這種施測模式的特性進行探討，瞭解其影響範圍及規律。

從圖 43、圖 44 和圖 45 的結果來看，不論是 pole-pole，dipole-dipole 和 wenner-schlumberger，都顯示出很一致的趨勢，當異常區域靠近鑽孔測線時，在深部會有更好的解析。當探測對象超出一定範圍後，只有比較靠近地表的部分仍然具有靈敏度。根據結果顯示，三種序列都在距離鑽孔 4m 時仍然能夠探測到較深的異常區域，而到距離 5m 時已經很有困難。因此，建議 T 字測線的水平向的探測範圍（可信區域）約為 0.15 倍鑽孔長度。如圖 48 所示為 dipole-dipole 序列對高電阻率污染物的模擬結果，圖 48 和圖 43 顯示出相似的趨勢。在 T 字測線模式下進行施測，無論是對於高或低電阻率污染物，其可信賴的解讀範圍以及存在的問題都是相同的。

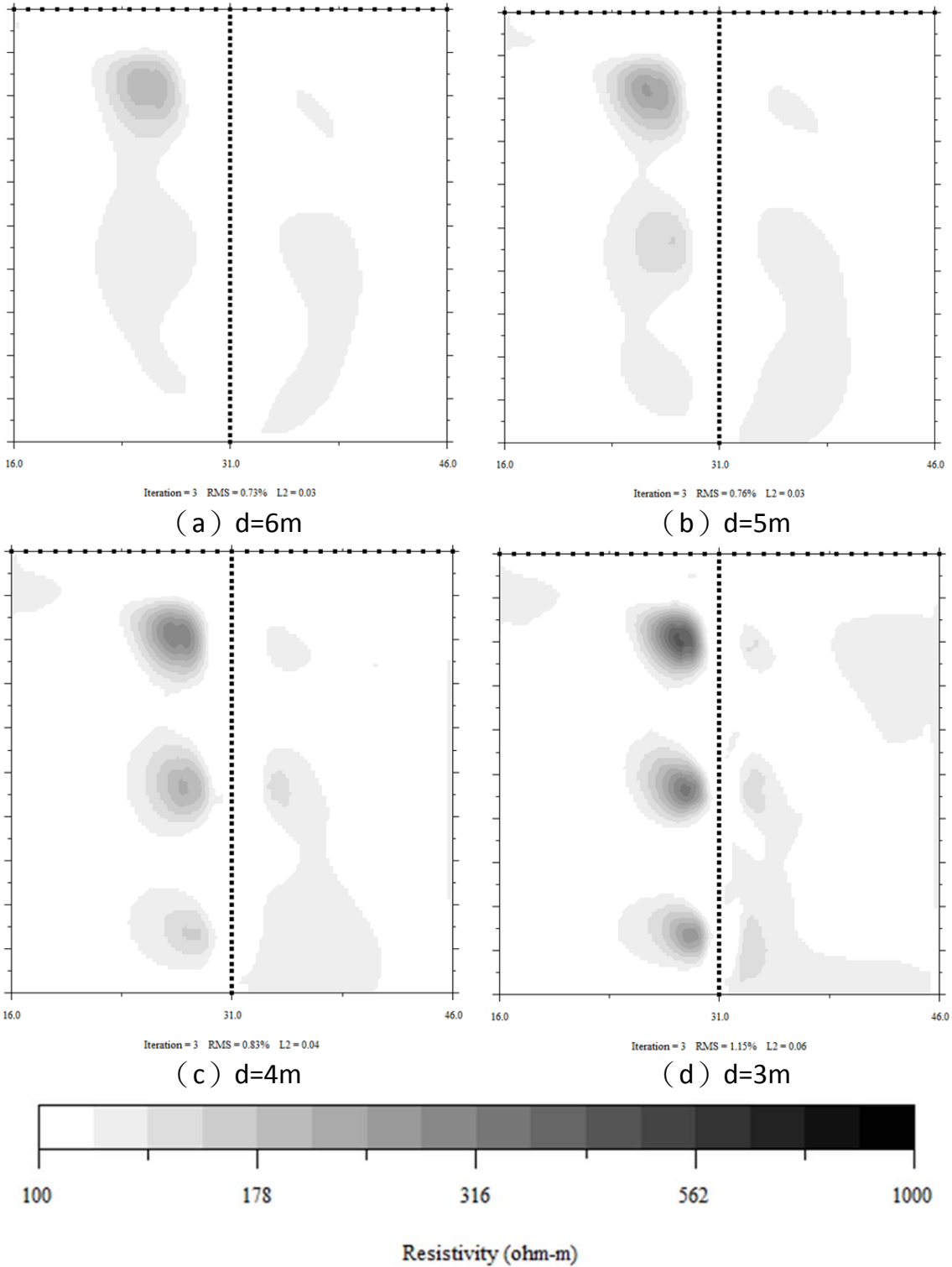


圖 48 dipole-dipole 序列高電阻率污染物模擬結果

考量地表測線能夠幫助消除映射現象，對模型進行進一步的討論，將地表測線增加到兩倍的鑽孔長度。其他部分的設定不變，依照同樣的生成序列

的方式，利用 dipole-dipole 進行施測，如圖 49 為地表測線為兩倍鑽孔長度時的模擬結果。比較圖 49 和圖 43 之結果，對於設定的模型，增加地表測線長度似乎幫助不大。一般來說，四極法的地表測線的探測深度為 0.2 倍的測線長度，若地表測線增加 30m，其增加的影響深度也只有 6m。對於所設定的模型來說似乎幫助不大，而且增加地表測線長度會加入更多的需要納入計算的低敏感度區域如圖 50 所示。因此建議 T 字測線的施測以地表測線與鑽孔長度 1:1 為主。

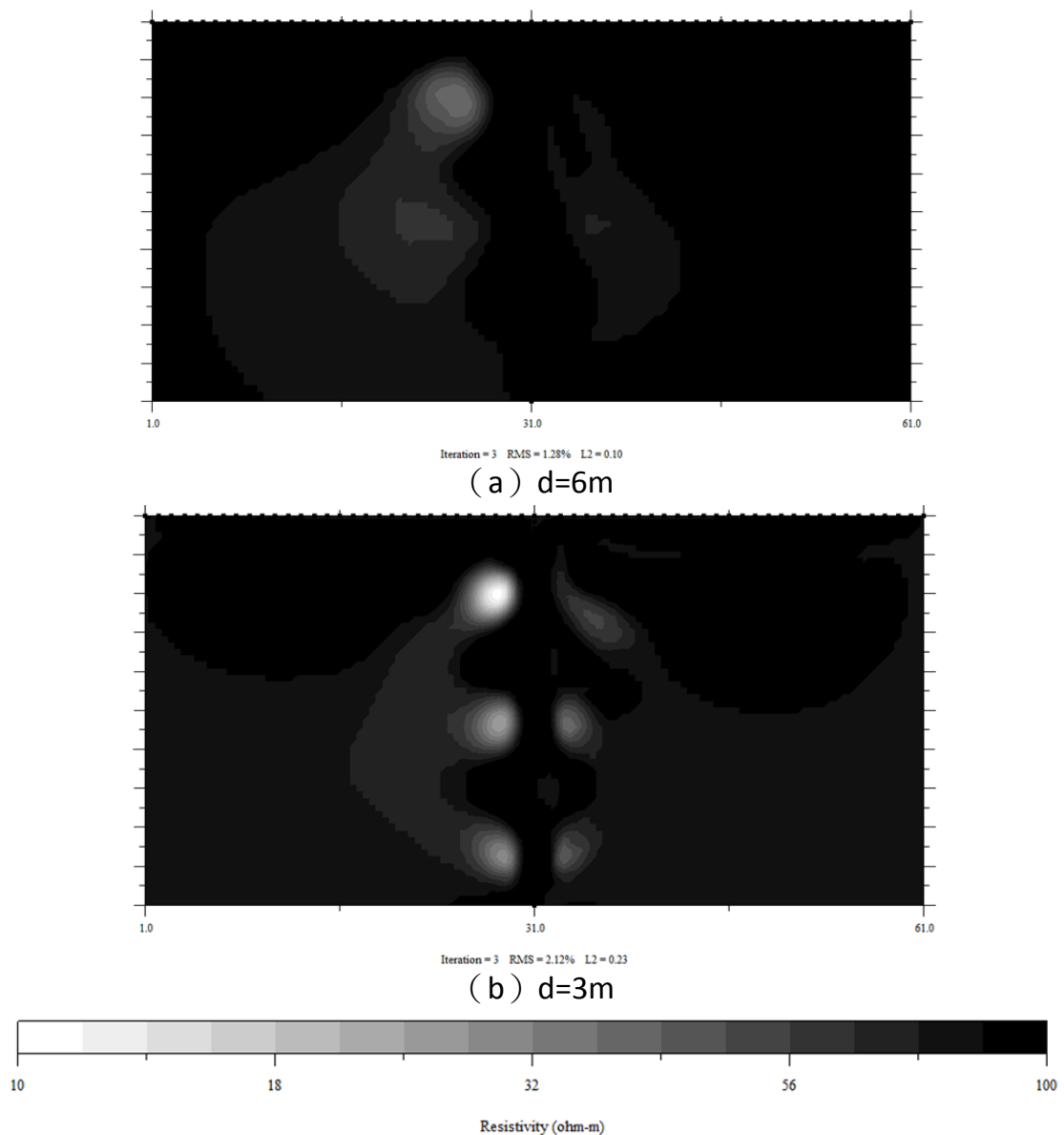
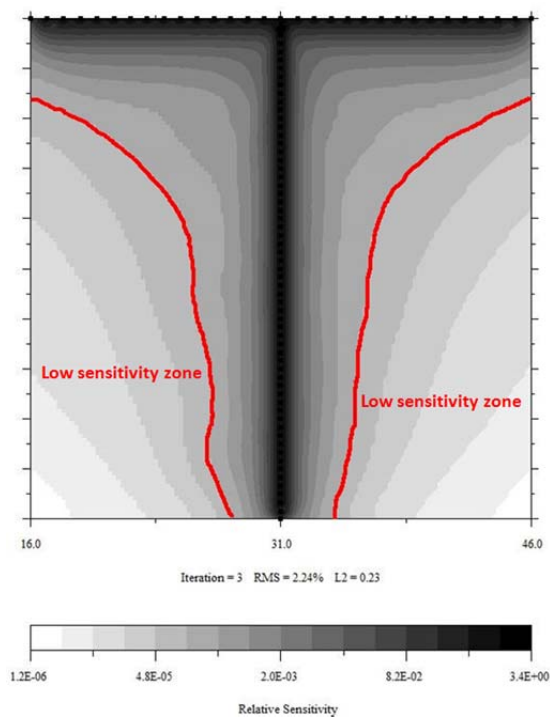
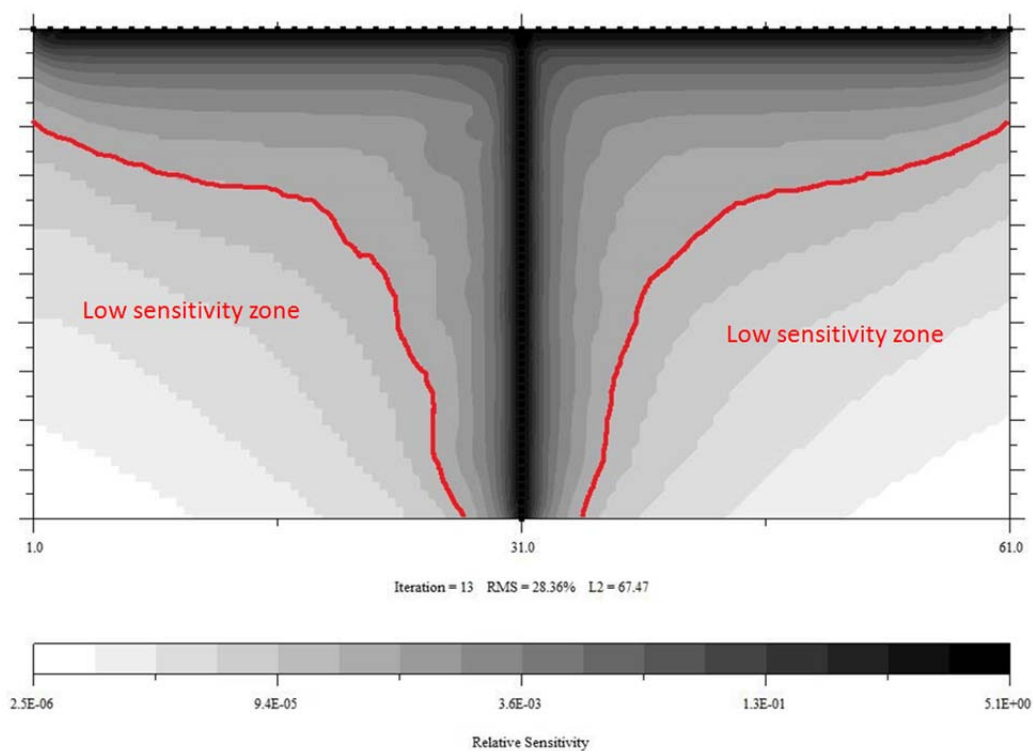


圖 49 地表測線為 2 倍鑽孔長度模擬結果



(a) 地表測線長度：鑽孔長度=1:1



(b) 地表測線長度：鑽孔長度=2:1

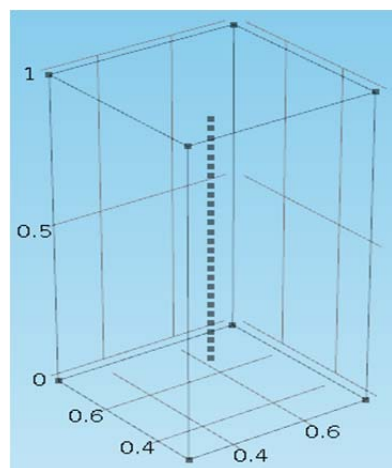
圖 50 不同測線比例施測 dipole-dipole 序列靈敏度分佈圖

5.2.2 室內砂箱探討

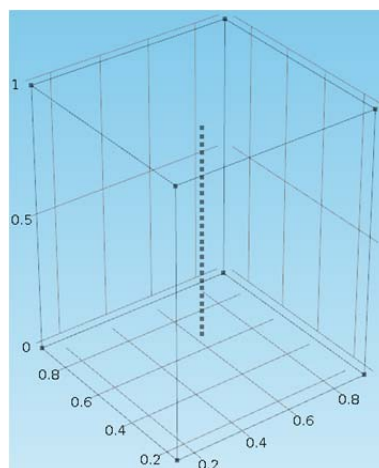
5.2.2.1 砂箱尺寸設計

在砂箱試驗中主要需要注意的是砂箱試驗的邊界條件與現場不同，砂箱相較於野外並非半無限域，若未先評估砂箱邊界效應，將由於邊界條件的不同，而造成最後所得的結論會有所差異。因此，於砂箱試驗進行前先以前述數值模擬方法探討砂箱尺寸之影響，用以決定足夠尺寸之試驗砂箱。

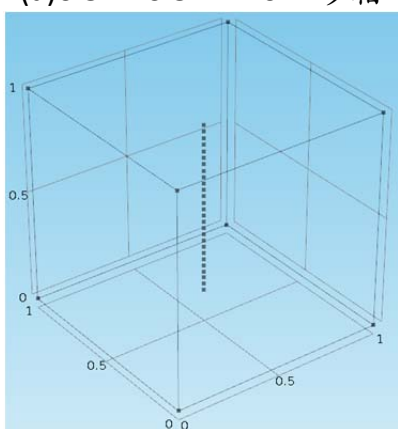
基於前節所述三維分析軟體 COMSOL，施測參數電極數量為 27 個，電極間距為 0.03m，材料導電度為 0.002 S/m。評估四種砂箱尺寸(如圖 51 所示)，長寬高分別為：(1) 0.5m*0.5m*1.0m；(2) 0.8m*0.8m*1.0m；(3) 1.0m*1.0m*1.0m；(4) 1.2m*1.2m*1.0m。施測排序為 Dipole-dipole array 與 Wenner array，正算模型之尺寸為 1.0m*1.0m*1.0m 砂箱反算模擬施測結果如圖 52 與圖 53，可以發現到其反算結果幾乎與建模時給訂之砂箱組成導電度 0.002 S/m (電阻率約 250 Ohm-m)一致。本次模擬之目的為探討不同砂箱尺寸大小對其反算結果之影響，故對其不同尺寸之砂箱模型於施測 Dipole-dipole array 與 Wenner array 進行差異分析比較，當大尺寸砂箱與小尺寸砂箱之反算電阻率差異分析若趨於收斂，即表示此小尺寸之砂箱已不受邊界效應之影響。差異分析結果如圖 54、圖 55，可以發現到當砂箱尺寸為 1.2m*1.2m*1.0m 之電阻率與砂箱尺寸為 1.0m*1.0m*1.0m 之電阻率不同相差百分比已趨近於零，這可以說明當砂箱尺寸為 1.0m*1.0m*1.0m 時邊界效應對於反算之電阻率結果已影響微乎其微，故在所預設之電極間距之下，此尺寸已相當合宜。



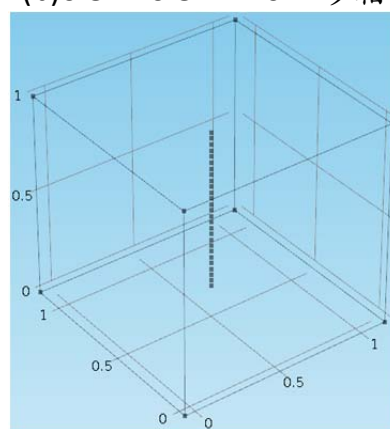
(a) 0.5m*0.5m*1.0m 砂箱



(b) 0.8m*0.8m*1.0m 砂箱



(c) 1.0m*1.0m*1.0m 砂箱



(d) 1.2m*1.2m*1.0m 砂箱

圖 51 不同砂箱數值模型

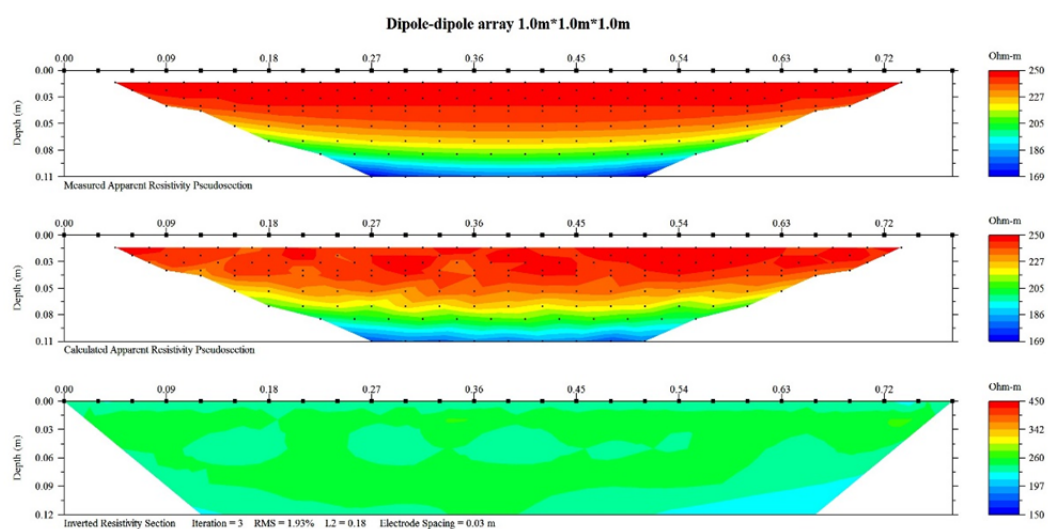


圖 52 Dipole-dipole array 於砂箱尺寸 1.0m*1.0m*1.0m 之反算結果

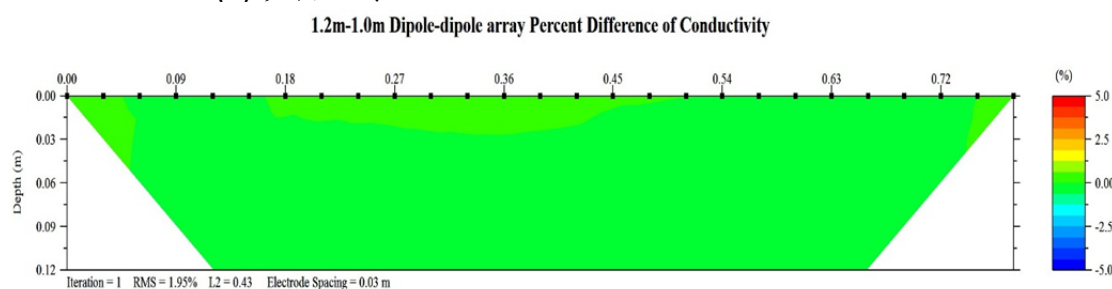
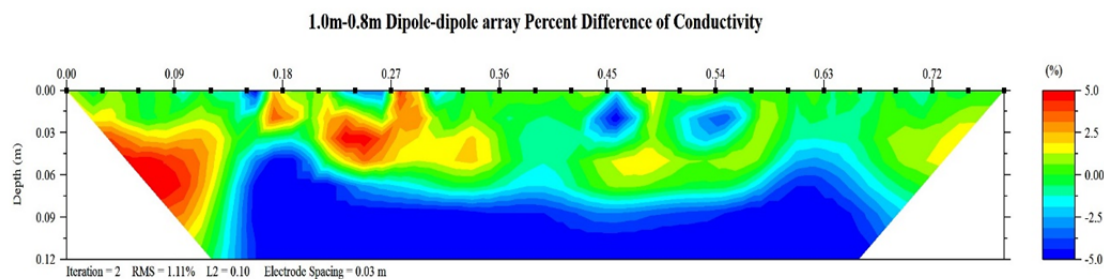
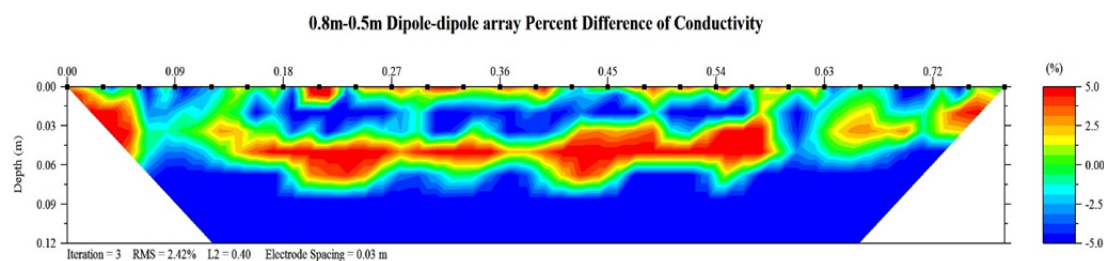
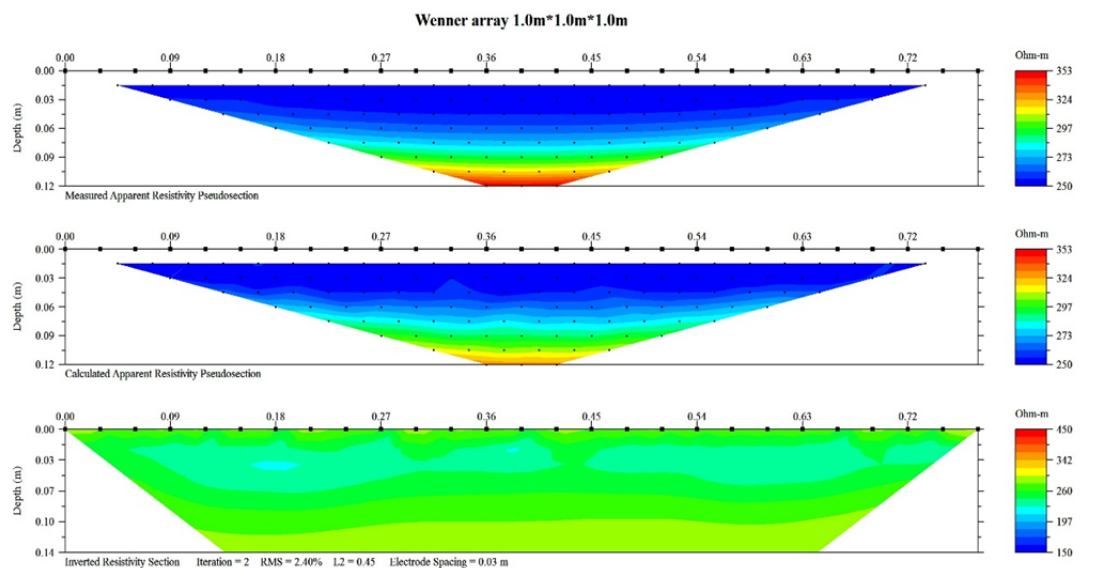


圖 54 Dipole-dipole array 於不同砂箱尺寸差異分析結果

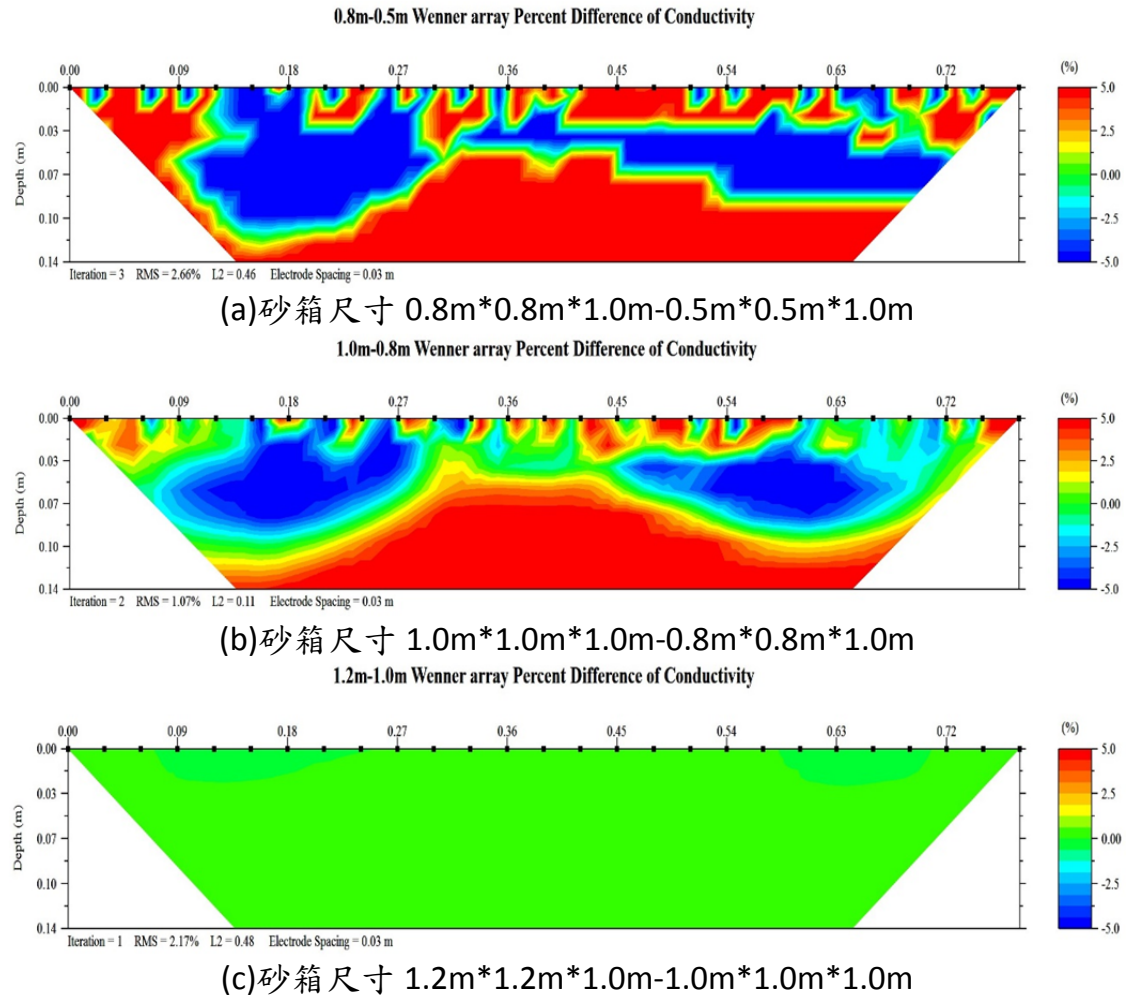


圖 55 Wenner array 於不同砂箱尺寸差異分析結果

5.2.2.2 室內砂箱材料選定與試驗規劃

於前節數值模擬探討得知，當砂箱尺寸為 100cm×100cm×100cm 時，邊界效應對本實驗規劃製作之電極量測之結果影響甚小，故本實驗據以尺寸製作砂箱，使用粒徑大小為 0.147-0.351mm 區間之石英砂為模型地盤介質。此外，模擬污染物則採用水泥系材料灌注，因其具固化成形之特性，易於量測後取出比對驗證真實異常區域尺度。

本試驗根據 5.1.2 節中所提出對於移動式孔內電極之尺寸與間距的設計準則，在砂箱試驗中規劃使用 0.03m 電極間距，電極測線展距為 0.78m，電極數量為 27 個，試驗配置如圖 56，並採用數值模擬結果所建議之 Wenner-Schlumberger 電極排列法進行資料收錄。



圖 56 砂箱試驗儀器配置

5.2.2.3 室內砂箱試驗結果與討論

室內砂箱試驗結果如圖 57 所示，試驗水泥漿液灌注為兩段變化，圖 57(a) 為擬視電阻率圖，其並非土中真實電阻率的分布，但在採用具對稱性特性的 Wenner-Schlumberger 電極排列法，雖在徑向上之距離以及電阻率值並非反映土體真實構造，仍可呈現大致的電阻率分布狀態，可提供良好的初步審視結果，可對地底之電阻率空間分布有快速的了解。反算後的電阻率分布如圖 57 (b)所示，由反算之結果可概略判斷漿液之低電阻率介面(白色部分)，此外未能與最後挖出的固結漿體比較，將圖 57 (b)之結果進行量化分析。

量化分析採用極小值切線與反曲點切線之交點判釋。分析結果如圖 58 所示，測線 0.202 公尺處之漿液半徑判釋結果為 0.048 公尺，測線 0.607 公尺處之漿液半徑判釋結果為 0.073 公尺。經固化後直接開挖驗證結果如圖 59 (a)所示，結果比較如表 7 所示，測線 0.202 公尺處之漿液半徑量測結果為 0.045 公尺，測線 0.607 公尺處之漿液半徑判釋結果為 0.075 公尺，雙切線法判釋結果與直接開挖量測驗證誤差分別為 6.7%和 4%，此結果與量化分析判釋之漿液範圍非常接近。由此可知利用本研究所提出之概念纜線搭配建議之電極排列可對污染分佈有良好的調查成效，此外，此量測成果的正确性亦顯示本研究在 5.1.2 節中提出對於移動式孔內電極尺寸與間距關係的設計準則具參考性，對於移動式孔內電極之設計增添可行性確認。

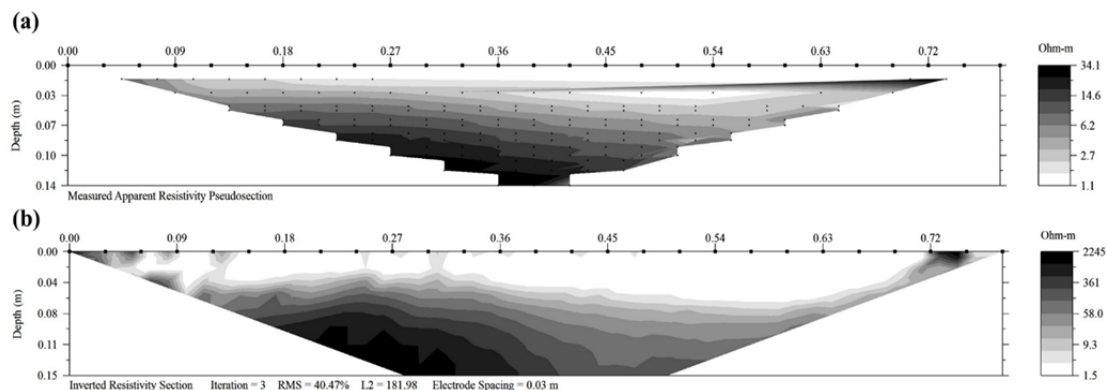


圖 57 孔內地電阻柱體變柱徑檢測室內砂箱試驗結果: (a)擬視電阻率圖 (b)電阻率影像圖

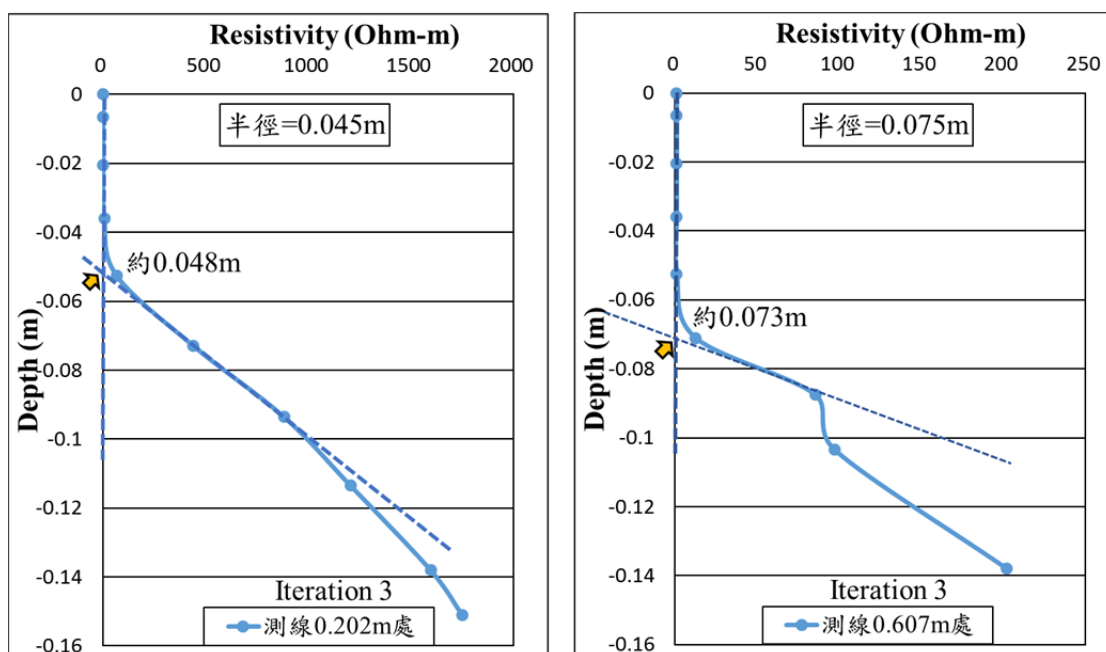


圖 58 室內砂箱變柱徑試驗極小值與反曲點雙切線法判釋結果

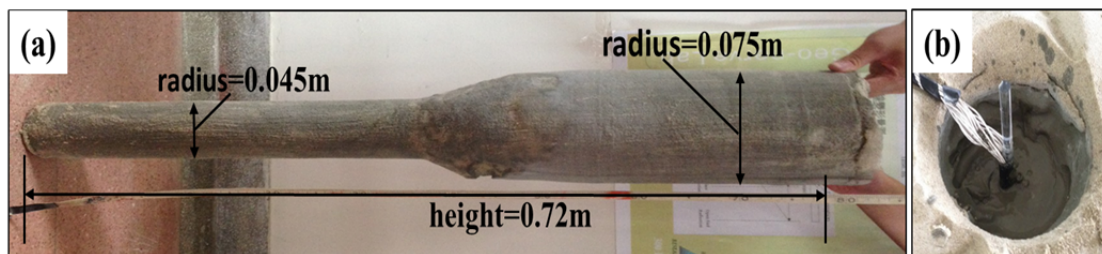


圖 59 變半徑固化漿液開挖外觀: (a)Side View (b)Top View

表 7 變半徑固化漿液探測結果比較

測線位置	雙切線法判釋半徑 結果(m)	直接開挖檢視法量測 半徑結果(m)	差異 (%)
0.202m	0.048 m	0.045 m	+6.7%
0.607m	0.078 m	0.075 m	+4%

5.3 現場試驗

5.3.1 現場試驗場址介紹

現地測試場址配合既有模場進行。本此所選定之場址區該公司曾使用過氯化有機物為溶劑，目前為停車場，本地號因地下水受 PCE 污染而公告為控制場址，該筆土地內目前有 3 口環保局之監測井（EPB-MW8、EPB-MW9 及 EPB-MW9D，如圖 60），地下水上游區有 3 口監測井（MW7、MW8 及 MW9），圖中 D00346、D00347 與 D00348 為新設置監測井，並未在井管設置 BHERT 之電極。所以透過本研究所新研發之可回收式 BHERT 電井測纜線，直接放置於監測井內，預期透過本研究之井測纜線量測出灌藥前後地層電阻率之變化與預期藥劑分布狀況描繪。

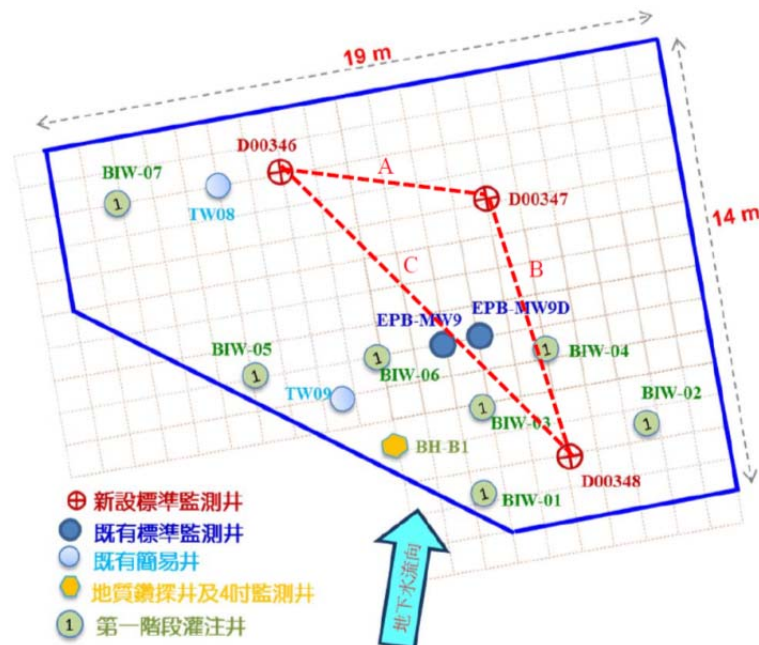


圖 60 模場試驗配合灌注井監測地層電阻率變化配置圖

本區含水層由粉土質砂、砂質粉土及黏質粉土組成，在地表下 3~11 公

尺範圍之 K 值分布約為 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sec，地表下 11~15 公尺之 K 值分布約為 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec。有效孔隙率約 0.01~0.3（可保守假設 0.3），假設處理體積（PV）至少： 217 m^2 （面積） $\times 12$ （厚） $\times 0.3 = 781 \text{ m}^3$ 。考量本區 EPB-MW9 曾測得最高之總 CVOCs 約 2.0 mg/L，考慮地下水中其它可與零價鐵反應物質，如硝酸鹽、硫酸鹽等，經計算結果，每立方公尺受污染地下水所需 EZVI[®]藥劑量約 1.4 kg，1 PV 處理體積之 EZVI[®]需求量为 1,094 kg（ $781 \text{ m}^3 \times 1.4 \text{ kg/m}^3$ ）。依本區之污染深度、地質材料、K 值分布及現地測試經驗，「雙環塞滲透灌注工法」之滲透影響半徑應可達 2.5~8 公尺，保守假設每口井所需 EZVI[®]灌注量至少能達 2.5 公尺影響半徑（實際藥劑擴散影響半徑由現場量測），平均改善厚度 12 m，結合多深度「雙封塞」採階段灌注。每口 / 孔預計灌注量約需 2.5 噸整治溶液，灌注期間持續收集基本水質評估傳輸影響。

灌注井規劃 15 口，每口平均灌注整治藥劑達 12 公尺厚度。模場區內以 EPB-MW9 及 EPB-MW9D 為界，偏西南南側為地下水流上游區，東北北側為下游區，上游側有 6 口第一階段灌注井，設計 2 道灌注井排列，配合監測井由近（2.5 公尺）至遠（7.5 公尺）的監測距離，作為灌注條件測試用途，以瞭解藥劑有效傳輸範圍。灌注方式將採目前國內常用之 1 徑法（1 Slot），即改善藥劑溶液在地面調配混合後由灌注管直接注入地層中。每次灌注長度初步將採目前國內通用之雙封塞灌注管灌注長度 0.33 m，灌注順序採常用之上升法，即由灌注井底部開始往上依序提升灌注，其優點為操作較簡單省時。並可彈性調整合適之雙環塞區段距離，以符合各試驗場址現場狀況。

5.3.2 現場試驗工作規劃

根據民國 102 年起採樣成果顯示污染源發生區以 EPB-MW9 及 EPB-MW9D 附近為主，顯示 EPB-MW9 井深範圍內（地表下 7 公尺）PCE 濃度在 0.0473 mg/L（5.7 公尺處）~0.0860 mg/L（2.6 公尺處）、TCE 濃度在 0.0276 ~0.0486 mg/L，EPB-MW9D 則於地表下 14.1 公尺處測得略偏高之 cis-DCE（0.0343 mg/L）；EPB-MW9 下游約 5 公尺之新設監測井 D00347，則於地表下 4.5 公尺處測得 PCE 濃度（0.0528 mg/L）超標，地表下 4.5~14 公尺均測得超標之 TCE 濃度（0.00647~0.154 mg/L）顯示附近污染源區深度約在地表下 4.5~6 公尺以內，但污染團應已深及地表下 14 公尺或更深。因此模場將以 EPB-MW9 及 EPB-MW9D 中心區域，規劃灌藥。

配合其灌藥之規劃，本計畫之現場試驗預期透過 D00346、D00347 與 D00348 三口監測井所圍起之 A, B, C 三個剖面(如圖 60 所示)，比較此區域在灌藥前後的電阻率變化情形，透過灌藥前與灌藥後的比對，協助定義藥劑流佈範圍並且觀察汙染團在灌藥前後的變化。預計施測深度範圍為地表至地表下 14 公尺，分別在灌藥前與灌藥後進行施作。孔與孔的間距 6-12 公尺不等，電極間距為固定的 50 公分，由於此場址符合採用跨孔地電阻之施測，因此在測試上採用跨孔的方式施作，電極排列為 bipole-bipole 序列。此試驗工作之目的除了回饋試驗模場進行灌藥成效評估外，另方面主要測試本研究所研發之移動式電極的現場適用性。

5.3.3 成果與討論

前述三個剖面灌藥前後之電阻率影像剖面成果如圖 61-圖 63 所示，綜合此三個剖面量測結果會發現 C 剖面結果比較特別(圖 63)，BH-348 電阻率在不同剖面皆出現明顯下降趨勢，結果再現性是一致的電阻率下降，不過特別的是，AB 兩個剖面在灌藥後，出現一坨坨高電阻率團，推測應為藥劑本身外包覆著油酯類乳化劑相對高電阻率之物理特性，但 C 剖面結果在灌藥後電阻率則普遍出現下降趨勢，推測可能是藥劑外包覆乳化劑提前破損導致零架鐵流出，而呈現相對低電阻率現象。

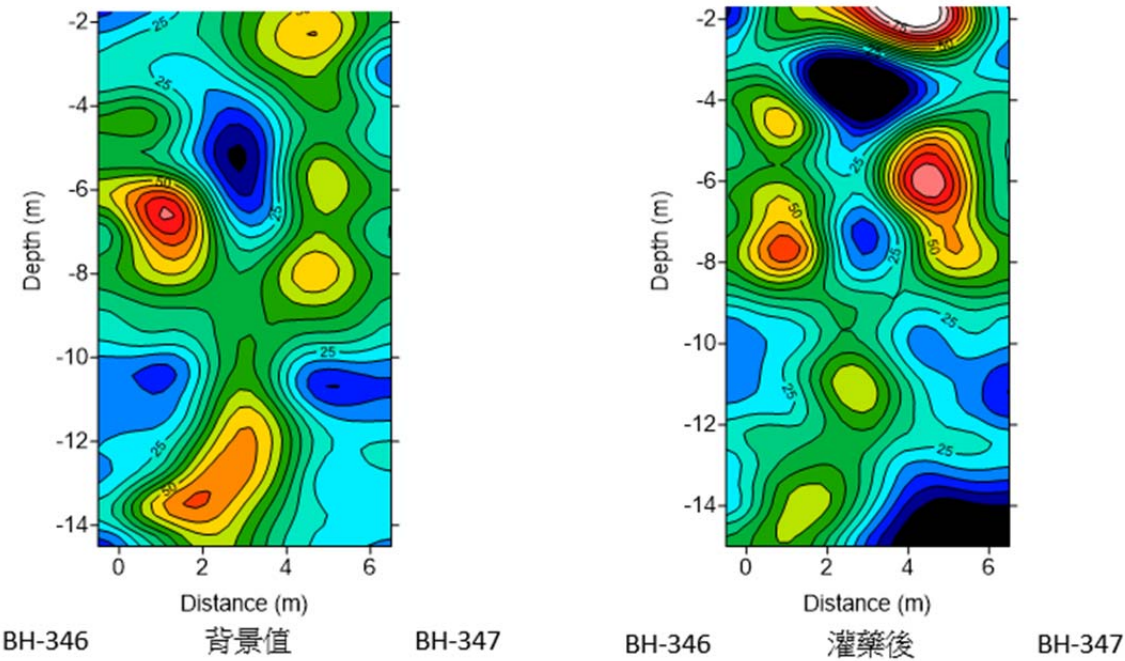


圖 61 A 剖面成果灌藥前後電阻率變化影像圖

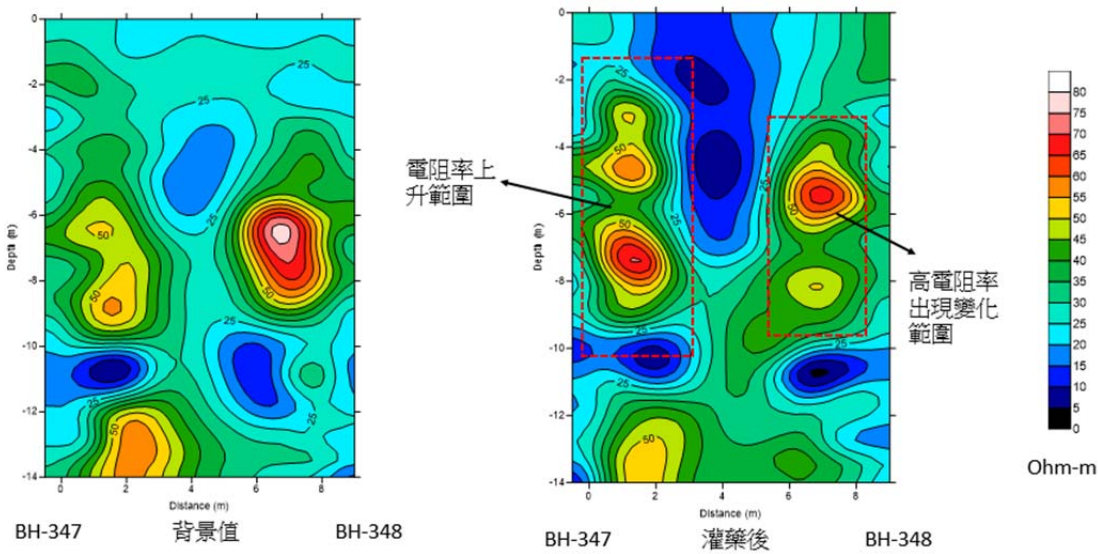


圖 62 B 剖面成果灌藥前後電阻率變化影像圖

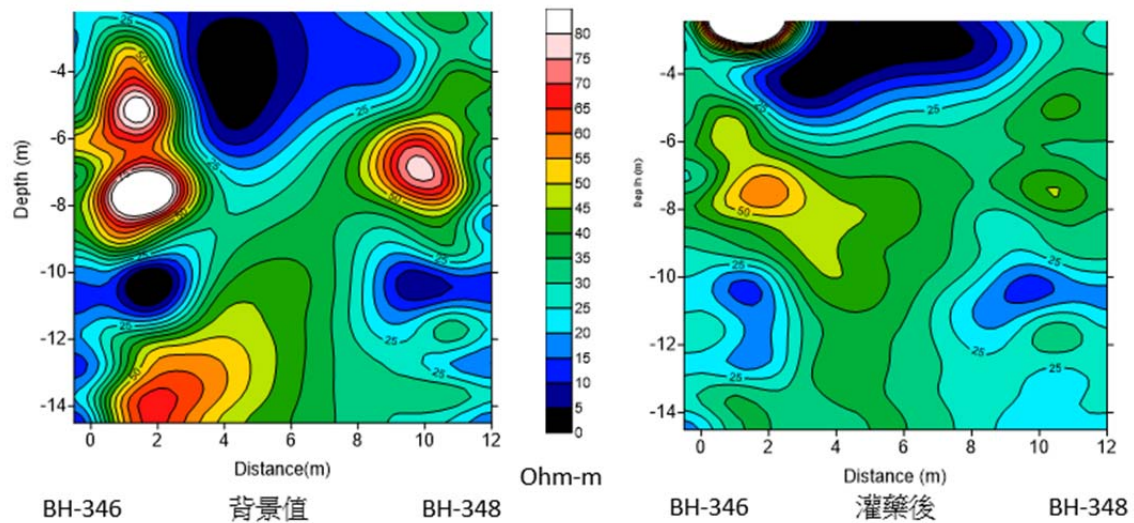


圖 63 C 剖面成果灌藥前後電阻率變化影像圖

而現場的取樣量測顯示，灌注前 TOC 濃度在 $0.8\sim 1.0$ mg/L (除模場區 EPB-MW9 及 EPB-MW9D 外，亦包含其上游之 MW8 及下游之 MW4_2 之 TOC)，灌注後 TOC 濃度在 $2.06\sim 15.73$ mg/L 之間，TOC 濃度明顯上升，表示藥劑灌注效果可以影響至模場區內所有之監測井，這部分與跨孔地電阻影像在三個監測剖面皆呈現電阻率下降而得到的結論一致，而電阻率影像之成果可更進一步協助進行更細部如乳化油與零價鐵之分離現象，提供試驗者參考。而由此成功應用之結果亦顯示，對於採用全開篩管之監測井可免去事先安置電極環之麻煩，且可重複使用，具經濟與時間效率。本研究所研發之移動式孔內電極具有現地應用性，未來可進一步規劃整合廠商進行規模生產。

第六章 結論與建議

6.1 結論

搭配地表以及孔內電極進行地電阻影像探測為此技術於土壤與地下水污染整治應用之趨勢，但其並無明確之現場施測參數規劃之參考，使得應用上須多花費現場測試之時間；此外，孔內電極實務上以環狀纏繞 PVC 管外圍施測，較繁瑣費工且無法回收。本研究針對此兩點應用上之困境進行研發工作，主要工作有兩點：1. 孔對地施作參數的優化探討以及 2. 移動式孔內電極的研發。根據研究成果，結論如下：

1. **孔對地施作之施測參數建議**：根據 3D 數值模擬之結果，採用 T 型孔對地施作方式進行施作時，電極陣列建議採用 Wenner-schlumberger 序列，可具備較佳之靈敏度以及抗雜訊等能力；而在幾何配置上，地表電極有助於降低孔內電極映射的運算假象，考量其有效性，建議採用與孔內測線長度 1:1 之地表測線配置。

2. **移動式孔內電極的研發**：本研究提出模組化且電壓與電流極分列之移動式孔內電極概念，先透過室內砂箱進行概念性驗證，顯示本研究室內測試後總結之電極尺寸與間距設計準則正確，而後製作第一版雛形進行現地測試，現地結果顯示此孔內電極搭配全開篩管可獲得品質良好之資料。由量測品質以及施作便利性(直接採用全開篩管且可回收)，本研究認為此移動式孔內電極具有規模生產之潛力。

6.2 建議

1. **不同孔對地施作之優化施作參數探討**：本研究針對 T 型孔對地施作方式進行施測參數優化探討，提供此議題之探討模式，建議未來可再針對跨孔(孔內電極搭配孔內電極)以及 π 型孔對地施作方式進行優化施作參數的探討，以提供更為完整的規劃準則。

2. **孔對地施作之情境模擬探討**：本研究僅對施測參數進行優化探討，但未論及其在不同外在環境因素(如環境溫度、污染物深度、水質等)可能對探測結果的影響。建議後續可針對現場狀況規劃情境模擬，透過數值模擬以及砂箱試驗的方式探討不同的環境因素影響情形，以更為了解此技術在應用

上的限制以及對結果判釋時應注意的情形。

3. **移動式孔內電極的推廣：**本研究所提出之移動式孔內電極具備耐久性、功能性、方便性以及通用性之優點，建議可在增加多場成功經驗後，進行推廣並規模生產，以降低其製作成本達到開發之目的。

參考文獻

1. Advanced Geosciences, Inc, 2003. Cross Borehole Electrical Resistivity Tomography (ERT) Measurements.
2. Borle, Y., and Jaboyedoff, M., 2007. Phénomènes érosifs dans le bassin versant de Lourtier (Valais, Suisse):étude d'une instabilité rocheuse et établissement d'un bilan sédimentaire à l'aide d'une cartographie de terrain détaillée : méthodologie et application. Master thesis in Engineering Geology. IGAR-UNIL.
3. Chambers, J.E., Meldrum, P.I., Gunn, D.A., Wilkinson, P.B., Kuras, O., Weller, A.L., Ogilvy, R.D., 2009. Hydrogeophysical Monitoring of Landslide Processes Using Automated Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography (ALERT). Extended abstract, Near Surface Conference, Dublin.
4. Goes, B. J. M., and Meekes, J. A. C., 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. JEEG., Vol.9. No.3, pp.127-141.
5. Guo, K., Milkreit, B., and Qian, W., 2014. Geometry factor for near surface borehole resistivity borehole resistivity surveys : a key to accurate imaging and monitoring, GeoConvention 2014: Focus.
6. Hagrey, S. A., 2012. 2D Optimized Electrode Arrays for Borehole Resistivity Tomography and CO2 Sequestration Modelling. Pure Appl. Geophys, Vol.169, pp. 1283–1292.
7. Hagrey, S. A., Petersen, T., 2011. Numerical and experimental mapping of small root zones using optimized surface and borehole resistivity tomography. Geophysics, Vol.76, No. 2, pp. G25-G35.
8. Knödel, K., G. Lange, H.-J. Voigt, 2007. Environmental geology, Handbook for field methods and case studies, Springer Berlin Heidelberg New York.
9. Lin, C. P., Hung, Y. C., Wu, P. L., and Yu, Z. H., 2014. " Application of ERT to Investigation of Abnormal Seepage: A Case Study at the Hsin-Shan Earth Dam in Taiwan," Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 19, No. 2, pp. 101-112.
10. Michoud, C., Abellán, A., Derron, M.-H. and Jaboyedoff, M., 2010. Review of Techniques

for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring. Edited for the SafeLand European project.

11. Palacky, G.J., 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. *Geosciences Journal*, Vol.3, pp.138-144.
12. Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E. and Sdao, F., 2004. High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy). – *Journal of Applied Geophysics*, Vol.56, pp.17-29.
13. Power, C, Gerhard, J. I., Tsourlos, P., Soupios, P., Simyrdanis, K., Karaoulis, M., 2015. Improved time-lapse electrical resistivity tomography monitoring of dense non-aqueous phase liquids with surface-to-horizontal borehole arrays. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 112, pp.1–13.
14. Rønning, J.S., Dalsegg, E., Heincke, B., Tønnesen, J.F., 2007. Geofysiske målinger på bakken ved Åknes og ved Hegguraksla, Stranda og Nordal kommuner, Møre og Romsdal. Geological Survey of Norway, report 2007.26, in Norwegian.
15. Rubin, Y., and Hubbard, S. S., 2005. *Hydrogeophysics*, Springer Press.
16. Qian, W., Milkereit, B., and Gräber, M., 2007. BOREHOLE RESISTIVITY TOMOGRAPHY FOR MINERAL EXPLORATION, EAGE 69th Conference & Exhibition, London, UK.
17. Society of Exploration Geophysics of Japan, 2014, *Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems*, EAGE Publications bv.
18. Wagner, F. M., Möller, M., Schmidt-Hattenberger, C., Kempka, T., Maurer, H., 2013. Monitoring freshwater salinization in analog transport models by time-lapse electrical resistivity tomography, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 89, pp.84–95.
19. Wu, P. L., Lin, C. P., Lin, C. H., and Liu, H. C., 2015. "2D ERT Monitoring of a New Embankment Dam – Monitoring Program and Forward Simulations," 2nd Near Surface Geophysics - Asia Pacific Conference, Hawaii, USA.