

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

以地電阻影像探測技術推估地下水 流速流向：實場驗證

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：逢甲大學／環境工程與科學學系系所
專案主持人：陳建隆教授
專案執行期間：104 年 11 月 17 日起至
105 年 11 月 16 日止

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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證		
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339
政策性審查意見		計畫單位回覆	
本署審查意見			
1. 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。 2. 非多年期計畫，請刪除多年期計畫分析表。 3. 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。 4. 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。 5. 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）。		1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 遵照辦理。 4. 遵照辦理。 5. 遵照辦理。	
技術性審查意見		計畫單位回覆	
委員 1			
1. 本計畫為去年度計畫之延續，進行實場驗證，值得進行。 2. 此技術推估地下水流速流向之可靠性，應有驗證之機制，或和傳統之測試方法結果相比較。		1. 感謝委員支持。 2. 謝謝委員意見。本研究地電阻試驗分為兩階段，第一階段為方法驗證，應用示蹤劑試驗，以抽水井建立人工流場，可藉由控制之設定條件，直接驗證地電阻推估地下水流速流向結果之準確性，並可與傳輸模式相互驗證。當方法確立後，第二階段為無抽水試驗，推估實際的地下水流速流向，應用示蹤劑試驗，並持續量測注入井和第一階段的抽水井中地下水實際的導電度變化，並搭配傳輸模式之模擬值，與地電阻量測的推估值相互驗證。	

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂	
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證			
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339	

委員 2	
1. 本計畫主要目的為在只有一口地下水監測井的限制下，發展一套可靠且有效率之地下水流速流向測定技術，利用單一地下水監測井就可以量測地下水流速流向的技術，以實場示蹤劑濃度分布驗證地電阻技術的準確度。 2. 本計畫成果可作為以地電阻量測地下水流速流向之重要依據，成果可以直接進行地下水流速流向量測。 3. 本計畫具創新性，對污染場址之調查工作應有貢獻。惟地下水文環境複雜，干擾因素多，不易由此結果作較精準分析。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。本計畫發展之地電阻地下水流速流向測定技術，在未來實際運用上，此方法所獲得之地下水流場可靠性將比用地下水頭推估之結果更高，亦可與其搭配，或與其它測定技術互相驗證，除了使場址概念模式更精準外，更可省卻昂貴的設井費用。
委員 3	
1. 延續行評估研究，如何應用先期研究建置之參數與實場應證，應補充說明以選址的原則與驗證流程。 2. 經濟效益分析。	1. 謝謝委員意見。在選址原則方面，根據先期研究結果顯示，地電阻可測得地下水位電阻變化的最大深度約為電極間距的 7-8 倍，由於敏感性會隨深度增加而降低，因此量測深度最好是電極間距的 3-5 倍，如電極間距 5 公尺，適合探測地表下 15-25 公尺之地下水電阻值變化。故若地下水深度過深，則不適合應用此方法。此外，導入示蹤劑的監測井周圍建議應有足夠的空間設置地電阻電極測線，其周圍至少需有 (電極數目-1) × 電極間距 的長度，以及 (測線數目-1) × 測線間距的寬度面積。例如測線數目 5 條，每條測線 16 支電極，電極間距 5 公尺，測線間距 2 公尺，則應有 75 m × 8 m 的面積空間設置電極測線。

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證		
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339
		驗證方式可以傳輸模式進一步驗證，利用地下水模擬軟體 MODFLOW 計算地下水流場，並搭配 MT3D 模式計算氯離子傳輸擴散之現象。驗證流程如下：地下水流場模擬依水文、地質參數、土壤特性和邊界條件等資料輸入後，即可獲得穩態地下水流場分佈情形。再以 MT3D 接續 MODFLOW，利用模擬獲得之地下水頭和水力條件，進一步模擬氯離子受對流、延散和擴散等傳輸狀況。依模擬結果與實際測得之氯離子穿透曲線比對，比較模擬值與觀測值、ERT 推估值之平方差值，即可進一步驗證地電阻的準確性。 2. 謝謝委員意見。經濟效益分析將補充於後續報告內容中。	
委員 4			
1. 此為第二年延續計畫，104 年為砂箱試驗，今 105 年為實場試驗以驗證實場之應用性與準確性。 2. 利用示蹤劑試驗及傳輸模式，在設定 3-5 條地電阻影像探測線應可達預期目標。 3. 消耗性器材費編列 123 萬元，屬浮編。		1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。根據 104 年砂箱試驗結果，設置 3-5 條地電阻影像探測線進行示蹤劑試驗應可推估地下水流速流向。 3. 謝謝委員意見。本計畫已將消耗性器材與主要費用由 1,228,000 元修正降低為 514,069 元，以符合經費編列規範之要求。本研究主要費用編列為地球物理探測-地電阻施測費用與 4 英吋標準監測井之設置費用，以及地電阻儀器實驗相關消耗性器材。 根據「計畫徵求書附表 1 申請經費編列基準 相關規定」，地球物理探測-地電阻每場補助費用估算為 45,000，並以 20 公	

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證		
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339
		尺以上者編列近尺費 500 元/公尺。本計畫為實場試驗研究，每次進行 5 條至少 75 公尺，共 375 公尺以上之地電阻探測。並求研究數據完整與結果精確，故需進行至少 3-5 次以上甚至更多次的現場地電阻探測，因此會有地電阻探測的支出開銷需求。本計畫地電阻探測由本團隊自行施測，此項費用由團隊自行吸收，已將編列項目刪除。 設置一口 4 英吋標準監測井(利用鑽保)補助費用估算為 200,000 元，並以深度 15 公尺以上者，編列近尺費 5,000 元/公尺。由於實場驗證需求，有必要於現場設置一口深度 25 公尺之監測井作為抽水井及監測地下水相關資料作為研究使用，故編列監測井設置費用 200,000 元。地電阻實驗所需消耗性器材為電極、纜線與配線模組，本計畫地電阻探測所需電極數量為 80 支，每支 500 元為必要支出。纜線數量為 5 條，照片、規格及估價單如附錄一所示，每條地電阻纜線單價為 80,000 元，為符合經費編列規範之要求，故編列 3 條地電阻纜線，並修正經費降低至每條纜線 60,000 元，共 180,000 元。地電阻儀電極線配線模組為符合現場施測 5 條測線所訂製，已修正數量由 2 組降低至 1 組。	
委員 5			
1. 前一年度研究成果在實務應用的意義建議與本計畫比對說明。		1. 謝謝委員意見。根據 104 年砂箱示蹤劑試驗結果顯示 ERT 確實可捕捉示蹤劑於地下水中流動造成電阻值改變之訊息，	
2. 監測所得的地下水流向：是一短暫時間			

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證		
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339
內的流向？或是長期的主要流向？之間的關係建議討論。 3. 砂箱試驗的限制因子或不確定因素是否與模廠試驗所可能遭遇的限制條件類似？若有類似的限制條件，能否克服？ 4. 本方法所得的結果與傳統方法所得結果之間的驗證方式？ 5. 是否有既有井可供利用？ 6. 新設井於計畫完成後是否廢井？ 7. 人事與耗材費編列過高。 8. 專任助理：聘請專任助理較不具培育學生參與土水計畫的意義。		進一步推估地下水流速，且透過 Archie's law 修正地下水電阻與含水層的表現電阻的關係，更可以驗證觀測值與推估值結果的準確性。利用 5 條地電阻測線，可提高推估地下水流向判斷的解析力。因此，本計畫為應用 5 條地電阻測線進行實場示蹤劑試驗，執行地下水流速流向測定，分析方法亦以砂箱試驗的經驗為基礎進行。 2. 謝謝委員意見。地電阻試驗當下所測得之電阻變化，反映當下實際流場之流動情形，亦可能為短暫的流場結果。因此，是否為長期的主要流向，應於實場進行數次地電阻試驗，以掌握地下水流速流向之可能變動或穩定情形。本研究地電阻試驗分為兩階段，第一階段為方法驗證，以抽水井建立人工流場，控制設定條件，直接驗證地電阻推估地下水流速流向結果之準確性。第二階段為無抽水試驗，推估實際的地下水流速流向。此兩階段試驗亦可作為短暫時間與長期的流向結果，於後續報告內容討論兩者的關係。 3. 謝謝委員意見。目前砂箱遭遇之限制因子與不確定因素為邊界效應之影響，此影響應不會發生在實場試驗中。另外，因砂箱空間大小限制，地電阻測線長度與間距亦受到拘束，此限制應可在實場試驗中排除。 4. 謝謝委員意見。本研究地電阻試驗分為兩階段，第一階段為方法驗證，應用示	

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂	
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證			
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339	
			蹤劑試驗，以抽水井建立人工流場，可藉由控制之設定條件，直接驗證地電阻推估地下水流速流向結果之準確性，並可與傳輸模式相互驗證。當方法確立後，第二階段為無抽水試驗，推估實際的地下水流速流向，應用示蹤劑試驗，並持續量測注入井和第一階段的抽水井地下水實際的導電度變化，並搭配傳輸模式之模擬值，與地電阻量測的推估值相互驗證。 5. 謝謝委員意見。目前區域內已有一口既有監測井可供利用。 6. 謝謝委員意見。新設井於計畫中作為抽水井以及監測地下水位與導電度。本計畫結束後若無延續，將依環保署內規定，辦理廢井。 7. 謝謝委員意見。本年度 105 年計畫為實場驗證，相較於 104 年計畫實驗室砂箱試驗，更需多次前往現場施測，並設置大範圍的地電阻測線及結果分析，故工作量及人力需求會大幅增加。人事費用依經費編列規範之要求，符合相關費用相加之 50% 為限內。 本計畫已將消耗性器材與主要費用由 1,228,000 元修正降低為 514,069 元，以符合經費編列規範之要求。本研究主要費用編列為地球物理探測-地電阻施測費用與 4 英吋標準監測井之設置費用，以及地電阻儀器實驗相關消耗性器材。根據「計畫徵求書附表 1 申請經費編列基準 相關規定」，地球物理探測-地電阻	

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證		
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339
		每場補助費用估算為 45,000，並以 20 公尺以上者編列近尺費 500 元/公尺。本計畫為實場試驗研究，每次進行 5 條至少 75 公尺，共 375 公尺以上之地電阻探測。並求研究數據完整與結果精確，故需進行至少 3-5 次以上甚至更多次的現場地電阻探測，因此會有地電阻探測的支出開銷需求。本計畫地電阻探測由本團隊自行施測，此項費用由團隊自行吸收，已將編列項目刪除。 設置一口 4 英吋標準監測井(利用鑽保)補助費用估算為 200,000 元，並以深度 15 公尺以上者，編列近尺費 5,000 元/公尺。由於實場驗證需求，有必要於現場設置一口深度 25 公尺之監測井作為抽水井及監測地下水相關資料作為研究使用，故編列監測井設置費用 200,000 元。 地電阻實驗所需消耗性器材為電極、纜線與配線模組，本計畫地電阻探測所需電極數量為 80 支，每支 500 元為必要支出。纜線數量為 5 條，照片、規格及廠商估價單如附錄一所示，每條地電阻纜線單價為 80,000 元，為符合經費編列規範之要求，故編列 3 條地電阻纜線，並修正經費降低至每條纜線 60,000 元，共 180,000 元。地電阻儀電極線配線模組為符合現場施測 5 條測線所訂製，已修正數量由 2 組降低至 1 組。 8. 謝謝委員意見。本計畫將訓練 2 位碩士級學生及 3 位以學士級學生熟悉地電阻探測儀之操作及運用。如上 1 所述，實	

「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	陳建隆	研究類別	□ 整治 ■ 評估 □ 預防 □ 自訂	
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證			
專案連絡人	郭青霖	連絡專線	0914-113-339	
		場驗證之工作量及人力需求會大幅增加，根據 104 年度計畫執行經驗，應有需要聘請專任助理進行計畫之執行與控管以及相關行政事務。本計畫之專任助理與 104 年度相同，具有相關經驗，可協助經驗傳承與培育學生之工作，故本計畫仍保留聘請一位專任助理。		
綜合性審查意見		計畫單位回覆		
確認原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。		謝謝委員意見。已依審查意見提送修正計畫書。		

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期中報告初審意見回覆對照表

計畫年度	105 年度	計畫類型	■ 研究計畫 □ 現地試驗
計畫類別	□ 整治 □ 預防 ■ 評估 □ 自訂		主持人：陳建隆 NO：06
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速向：實場驗證		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 已完成初步實場驗證工作。 2. 初步之結果顯示未能明確掌握示蹤劑之移動變化，建議後續之測試能釐清本計畫研發推估地下水流速流向技術之使用限制，以及其可使用之場址條件。 3. 建議也能將研發之方法，撰寫成方法草案，後續可供環保署進一步評估可否公告為標準方法。		1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。根據本次試驗結果顯示，示蹤劑之移動變化未能掌握之原因，可能為地下水流速過慢的影響。本次試驗抽水流量(Q)為 11~11.5 CMD，以雙抽水井抽水達穩態地下水流場顯示，BH03 井水位高程：43.58 m，井底高程：28.51 m，計算得井管中抽水高度(h_w)：15.07 m；BH11 井水位高程：39.59，井底高程：28.53 m，計算得井管中抽水高度(h_w)：11.06 m。由下公式計算得抽水產生的地下水流速(v)約為 0.1 至 0.14 m/hr，顯示流場流速較低，僅為 0.16 至 0.23 cm/min。 $2\pi r_w \times h_w \times v = Q$ $2\pi(5.08/100) \times 11.06 \text{ 或 } 15.07$ $= 11 \text{ 至 } 11.5 \text{ m}^3/\text{day}$ 故以電極間距 1 m 的地電阻解析 0.16 至 0.23 cm/min 流速下示蹤劑的移動，至少應需監測 7 至 10 小時以上，才能解析 1 m 的移動範圍。本次試驗共進行大約 5 小時的施測時間，顯示未能觀察到示蹤劑在地下水中傳輸擴散的電阻變化。因應對策為增加示蹤劑注入量、延長地電阻監測時間、改變電極間距以增加敏感度或調整電極排列方式。本計畫持續進行示蹤劑與地電阻實場試驗與分析，此技術的使用限制與可使用之場址條件於期末報告中更進一步討論。 3. 謝謝委員意見。未來試驗結果若有成效，將會編寫標準作業程序在期末報告作為參考。	
委員二 1. 本計畫為去年度計畫的延續。本計畫目的為對以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法進行實場驗證。此方法主要目的為在只有一口地下水監測井的限制下，發展一套可靠且有效率之地下水流速流向測定技術。		1. 謝謝委員意見。 2. 目前試驗結果顯示，使用的電極排列法間距為 1 m，在深層地質的探測資料可能敏感度不足，未來會以目前的電極排列法改變電極間距(a)，藉由增加 a 的長度以提高對深層地層電阻資料的敏感度，或測試其它電極排列法比較，作為進一步的評估。本計畫持續進行	

2. 目前初步結果顯示數據受到干擾而無法達到預期目標。因此後續須評估此技術在實場應用可行性。 3. 後續需彙整此技術之準確度、使用時機及使用條件和限制。 4. 本報告文獻收集及相關資料收集完整，可說明本方法之QA/QC程序。	示蹤劑與地電阻實場試驗與分析，此技術在實場應用的可行性於期末報告中更進一步討論。 3. 謝謝委員意見。地電阻測量結果的準確度，可進一步以監測井中地下水導電度作為驗證。此方法的使用時機為地下水流場的流速，對於示蹤劑傳輸移動的快慢有顯著影響，也影響地電阻監測時間的長短。使用條件為示蹤劑注入量的多寡，受到注入井半徑和井篩長度與含水層水力傳導係數影響。使用限制為地電阻測深與示蹤劑注入深度。本計畫持續進行示蹤劑與地電阻實場試驗與分析，於期末報告中更進一步討論。 4. 謝謝委員意見。本計畫藉由背景值的重複量測，探討地層電阻在實驗過程的變化，供QA/QC程序檢定。
委員三 1. 依據104年砂箱示蹤劑試驗結果而設計的本年度研究在地電阻的資料尚無法明確呈現，除了所分析的原因與擬應對策略，建議佐以其他模式作為初步規劃之依據，由未來結果做應證比較。	1. 104 年砂箱試驗控制流場流速約為 0.25 cm/min，並以電極間距 5 cm 之地電阻解析。目前試驗結果顯示實場地下水流速僅 0.16 至 0.23 cm/min，地下水流速相較於砂箱慢，且實場電極間距為 1 cm。若以電極間距 1 m 的地電阻解析 0.16 至 0.23 cm/min 流速下示蹤劑的移動，至少應需監測 7 至 10 小時以上，才能解析 1 m 的移動範圍。本次試驗共進行大約 5 小時的施測時間，顯示未能觀察到示蹤劑在地下水中傳輸擴散的電阻變化。因應對策為增加示蹤劑注入量、延長地電阻監測時間、改變電極間距以增加敏感度或調整電極排列方式。本計畫下半年度進度為以 MODFLOW 建立地下水溶質傳輸模式，根據現場地質條件與地電阻試驗結果進行校正與驗證。
委員四 1. 已依計畫進度及項目確實執行。 2. 已完成計畫成果自評、初步結論及後續工作說明，應可完成計畫目標。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。
委員五 1. 執行現況、流程及方法已說明。 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。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。 4. 謝謝委員意見。 5. 謝謝委員意見。 6. 謝謝委員意見。本計畫持續進行示蹤劑與地

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。 7. 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。 8. 4.1 & 4.2節：設井井深、井篩...等等的適宜性宜先討論（即實驗設計中的試驗規畫與材料的適宜性...等等）。 9. 設井條件對計畫成果的解讀與意義建議說明。 10. 5.3節的關鍵影響因子宜有完整討論，如何克服該影響因子？也建議討論（因為影響本計畫成果的應用性）。	電阻實場試驗與分析，研究成果的實務應用與潛在應用性會於期末報告中更進一步討論。 7. 謝謝委員意見。本計畫持續進行示蹤劑與地電阻實場試驗與分析，研究成果的實務應用性會於期末報告中具體討論。 8. 注入井深度，影響示蹤劑進入含水層中的深度，由於地電阻施測之敏感度受到電極間距與展距增加而降低，而深層地層的探測資料點需要較長的電極間距與展距，故資料的敏感度可能受到影響。注入井篩長度，影響示蹤劑注入的難易度，以及示蹤劑團的大小。在有限的示蹤劑體積下，井篩長度越長，示蹤劑進入含水層的截面積越大，注入速度較快，花費時間較短；而較短的井篩，需要較長的注入時間。然而，井篩長度越長，初始的示蹤劑團厚度越厚，示蹤劑團的起始半徑越小，反之短井篩的示蹤劑團可以有較大的起始半徑。 9. 謝謝委員意見。如上述說明，本計畫實場試驗的注入井為地表下 1.5 m 開篩至 20 m，井篩長度 18.5 m。以體積(V)為 100 L(0.1 m³)的示蹤劑注入監測井中，監測井井篩長度(L)為 18.5 m，井半徑(r_w)為 2 吋(5.08 cm)。假設注入的示蹤劑以高 18.5 m 之圓柱形示蹤劑團完全流出井管進入地下含水層，由下公式計算示蹤劑團的最大半徑(r)約為 10.95 cm。 $\pi(r - r_w)^2 \times L = V$ $= \pi \left(r - \frac{5.08}{100} \right)^2 \times 18.5 = 0.1 \text{ m}^3$ 示蹤劑團的最大半徑僅有 0.11 m，小於地電阻電極間距 1 m。因此在地電阻水平探測的解析範圍內，僅探測到最接近注入井的 1 至 2 點水平測點位置有較大的電阻變化量。 10. 謝謝委員意見。根據本次試驗結果顯示，地下水流速快慢是關鍵的影響因子。本次試驗抽水流量(Q)為 11~11.5 CMD，以雙抽水井抽水達穩態地下水流場顯示，BH03 井水位高程：43.58 m，井底高程：28.51 m，計算得井管中抽水高度(h_w)：15.07 m；BH11 井水位高程：39.59，井底高程：28.53 m，計算得井管中抽水高度(h_w)：11.06 m。由下公式計算得抽水產生的地下水流速(v)約為 0.1 至 0.14 m/hr，顯示流場流速較低，僅為 0.16 至 0.23
--	--

	cm/min。 $2\pi r_w \times h_w \times v = Q$ $2\pi(5.08/100) \times 11.06 \text{ 或 } 15.07$ $= 11 \text{ 至 } 11.5 \text{ m}^3/\text{day}$ 故以電極間距 1 m 的地電阻解析 0.16 至 0.23 cm/min 流速下示蹤劑的移動，至少應需監測 7 至 10 小時以上，才能解析 1 m 的移動範圍。本次試驗共進行大約 5 小時的施測時間，顯示未能觀察到示蹤劑在地下水中傳輸擴散的電阻變化。因應對策為增加示蹤劑注入量、延長地電阻監測時間、改變電極間距以增加敏感度或調整電極排列方式。
本署審查意見	計畫單位回覆
無審查意見。	1. 謝謝委員意見。

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期末報告初審意見回覆對照表

計畫年度	105 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 現地試驗																				
計畫類別	☐ 整治 ☒ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂	主持人：陳建隆 NO：06																					
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估下水流速流向：實場驗證																						
委員審查意見		計畫單位回覆																					
委員一 1. 研究成果詳實。此研究對日後地下水的ERT的有效性提出了具體的建議，在日後的模擬和監測提供很好的資訊，在驗證方面採取兩種不同的方式比對可靠性高。 2. 請說明不同土壤的水力傳導係數對 ERT 的有效性之影響程度。		1. 謝謝委員意見。 2. 土壤的水力傳導係數影響地下水流速，而地下水流速直接影響了示蹤劑的傳輸擴散，也間接影響地電阻施測時間。當水力傳導係數過小，地下水流速過慢，有限時間內示蹤劑移動距離較短，造成地電阻探測不到示蹤劑移動造成的電阻變化，則無法有效判斷地下水流速流向。在較低的地下水流速下，若要提高地電阻對示蹤劑探測的敏感度，則必須縮短電極間距，但有效測深則會變淺，可能導致有效探測深度不足。舉例來說：監測時間 5 小時，地下水流速 0.1 m/hr，表示 5 小時地電阻要能探測到示蹤劑移動 0.5 m 距離所造成的電阻變化，若電極間距為 1 m，則無法有效探測到示蹤劑的移動距離與變化，為了增加敏感度，則電極間距必須設置為 0.5 m。有效測深方面，電極間距 1 m，以單測線 16 根電極佈設，其電極展距為 15m，有效測深約為 4.5 m 內，若電極間距 0.5 m，則其電極展距為 7.5 m，有效測深約為 2.25 m 以內。電極間距、展距、有效測深及建議流速可參考下表： <table border="1"> <thead> <tr> <th>電極間距</th><th>電極展距^a</th><th>有效測深</th><th>建議流速^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.5 m</td><td>7.5 m</td><td>2.25 m</td><td>> 0.1 m/hr</td></tr> <tr> <td>1 m</td><td>15 m</td><td>4.5 m</td><td>> 0.2 m/hr</td></tr> <tr> <td>2 m</td><td>30 m</td><td>9 m</td><td>> 0.4 m/hr</td></tr> <tr> <td>5 m</td><td>75 m</td><td>22.5 m</td><td>> 1 m/hr</td></tr> </tbody> </table> (^a以單測線電極數目 16 根，^b施測時間 5 小時計)		電極間距	電極展距 ^a	有效測深	建議流速 ^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)	0.5 m	7.5 m	2.25 m	> 0.1 m/hr	1 m	15 m	4.5 m	> 0.2 m/hr	2 m	30 m	9 m	> 0.4 m/hr	5 m	75 m	22.5 m	> 1 m/hr
電極間距	電極展距 ^a	有效測深	建議流速 ^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)																				
0.5 m	7.5 m	2.25 m	> 0.1 m/hr																				
1 m	15 m	4.5 m	> 0.2 m/hr																				
2 m	30 m	9 m	> 0.4 m/hr																				
5 m	75 m	22.5 m	> 1 m/hr																				
委員二 1. 本計畫為去年度計畫的延續。主要目的為對		1. 謝謝委員意見。 2. 本技術之實場應用設計規劃步驟說明如下：																					

以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法進行實場驗證。此方法主要目的為在只有一口地下水監測井的限制下，發展一套可靠且有效率之地下水流速流向測定技術。

2. 可說明本技術在實場應用時，如何進行設計、規劃。
3. 請進行成本分析，比較本技術和其他技術是否具成本上的優勢。
4. 說明本技術在實場應用時，如何進行QA/QC的控制以及準確度的提升。

- (1) 蒐集背景資料：包含地形、腹地大小、現場地下水位、水質導電度、土壤水力傳導係數、注入井開篩深度與長度、是否有地下地電設備等。
 - (2) 場址現勘與測線規劃：瞭解現場實際狀況，並記錄供地電阻測線佈設規劃，如測線數量、長度、間距、測深，測線方向等，以及試驗執行時所需水電來源，或需自備發電機與水箱。
 - (3) 電極佈設：根據測線規劃位置設置電極棒插入土壤，並移除地表干擾物或避開障礙物，確認電極棒與土壤有良好的接觸。
 - (4) 背景電阻施測：包含背景值的重複量測，並排除故障或干擾，電極是否能有效放電與收電，以及資料是否有異常等。
 - (5) 示蹤劑的準備及注入：以 NaCl 調配高導電度示蹤劑，以地下水導電度 $600 \mu\text{S/cm}$ ，可考慮使用導電度 $5000 \mu\text{S/cm}$ 的示蹤劑。示蹤劑導電度濃度若過高，則可能因密度過大而下沉。
 - (6) 地電阻監測：示蹤劑注入後，持續監測地電阻，以獲得地下電阻值隨時間的變化資料。
 - (7) 資料處理與分析：監測資料與背景值進行比對，計算地下電阻的變化及分佈，以推估地下水流速流向。
3. 測定地下水流速與流向方法如下，成本費用參考「105 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗」計畫徵求書附表，環保署補助費用估算表：
- (一) 間接推估方式：量測 3 口監測井以上地下水位水頭推測流向，但含水層通常為非均質結構，地下水流向可能與水力梯度方向不相同，而導致錯誤的評估，成本分析來說，設置深度 15 公尺之 2 英吋標準監測井，其單價約為 120,000 至 180,000 元，若現場僅有一口監測井，則另外設置兩口監測井費用需 240,000 至 360,000 元。
 - (二) 直接量測方式：單井地下水流向流速測定儀或以井中攝影技術觀測地下水流向，以單井

	試驗觀察地下水流速流向，受場址不均質程度影響較大，且會受監測井外圍填充層(well skin)的影響，成本分析來說，單井流向流速試驗每口單價約為 12,000 元，井中攝影每口單價約為 20,000 元。 (三) 地電阻示蹤劑試驗：本技術之目標為在僅有一口地下水監測井下，直接量測地下水流速流向，且量測的範圍大，又可省卻昂貴的設井費用，成本分析來說，考量人力與設備等，地電阻示蹤劑試驗每場單價約為 50,000 元。 4. 本技術在實場應用時，QA/QC 係藉由注入示蹤劑前，地電阻儀重複測量土壤背景電阻值，了解地電阻數據之穩定性。此外，紀錄場址現況及電極設置情形，供後續資料異常值判斷及刪除依據。由研究於受限於施測時間冗長，故施測兩次地電阻背景值比對。
委員三 1. 本計畫利用地電阻影像探測方法，推估地下水流向與流速，依示蹤劑試驗得知，本技術似無法明確掌握示蹤劑之移動變化，換言之，地下水之流向與流速均無法有效推估，如何驗證本技術之可行性，建議應有進一步補充說明。 2. 本計畫之建議與檢討事項，提及土壤含水率可能受到降雨影響，然試驗期間應無降雨；場址監測井之型式與導水係數之影響，此均可在計畫執行前予以詳加考量，建議本計畫相關檢討原因，應從地電阻技術面之限制因子，詳加考量與評估，以確認本技術應用之可行性。 3. 自製導電度計律定結果中，斜率值變化甚大(R^2均很高)，建議應檢討不同斜率變化之原因。 4. 第四章page27研究方法與過程，部分文字內容仍以期中報告之方式呈現，請修正。 5. 電阻率變化圖之曲線，部分圖形不易閱讀，請考量文字及圖形之修正，以利讀者閱讀。	1. 目前研究結果顯示，本研究選定之地下水流場流速過慢，以致示蹤劑移動距離過短。本計畫已在多次試驗中將監測時間拉長，電極間距縮短，但地電阻試驗結果仍未能掌握其移動情形，說明地下水流速為一重要影響因子。另一限制因素為，由於本場址監測井為 18.5 m 之全開篩井，因此注入之示蹤劑會垂直充滿井管，以一垂直線性的方式在含水層中傳輸擴散，而 250 L 導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的示蹤劑經大量稀釋後，可能無法顯著影響地下水之電阻。若增加示蹤劑之導電度會造成鹽水濃度過高，密度過大，造成示蹤劑下沉，以及影響地下水質與土壤地下水環境。未來研究建議可使用封塞(packer)，減少注入井開篩長度，及控制注入深度在地下水水位面附近，使示蹤劑能集中為點源擴散，也可考慮以連續式方法注入示蹤劑，以及尋找它處地下水流速較快的流場，以再次驗證本技術之可行性。 2. 本計畫僅在第一次試驗，遇降雨天氣，且開始執行地電阻測量時候已經無明顯降雨，由於第一次試驗結果相較於它場試驗結果顯示，注入高導電度示蹤劑至地下水後，地電阻探測得地下電阻有明顯降低之情形，而它場試驗結果則顯示電阻降低程度較小，故推

	測土壤含水率對地電阻結果有所影響。為避免降雨對地下水流場以及示蹤劑傳輸與地電阻儀放電收電的影響，以及降雨入滲影響含水量及導電度使地電阻背景測值無法達到穩態，甚或施測過程中因與水入滲產生的電阻變異，此技術以無降雨天氣應用為主。場址監測井之型式與導水係數之影響，第一為直接影響探測目標深度，第二為影響示蹤劑的傳輸擴散速度。對地電阻技術面之限制說明如下： (1) 監測井之型式限制主要為井開篩深度與長度的影響，若一監測井開篩長度為 18.5 m，表示注入的示蹤劑會垂直充滿井管，以垂直線性長度 18.5 m 從井管內流出進入含水層中傳輸擴散，此情形可能造成示蹤劑經大量稀釋後，無法顯著影響地下水之電阻。未來研究建議可使用封塞(packer)，減少注入井開篩長度，及控制注入深度在地下水水位面附近，使示蹤劑能集中為點源擴散。此外，若地下水位低於開篩深度頂部，注入之示蹤劑可能有部分會流入未飽和層，以致進入含水層的示蹤劑體積減少，故建議地下水位應高於注入井開篩頂部，以確保示蹤劑僅在飽和含水層中傳輸擴散為主。 (2) 導水係數影響地下水流速，而地下水流速直接影響了示蹤劑的傳輸擴散，當導水係數過低，地下水流速過慢，有限時間內示蹤劑移動距離較短，造成地電阻探測不到示蹤劑移動造成的電阻變化，則無法判斷地下水流速流向。 3. 自製導電度計律定結果顯示其斜率約介於 1.38 至 3.94 之間，其斜率值的變化可能受接觸電阻的差異，造成電壓損失的不同所致。例如電線和螺絲接觸的面積，螺絲露出面積等等，由於各測線律定結果皆為線性，R^2 皆在 0.9 至 0.99 以上，顯示其能有效反應出地下水導電度的變化。 4. 研究方法與過程文字內容已修正為期末報告之方式呈現，謝謝委員提醒。 5. 電阻率變化圖之曲線已做調整，謝謝委員提醒。
委員四 1. 研究內容與計畫目的相符，請補充說明自評	1. 因試驗結果資料需要較多的時間進行分析，學術論文已申請延後投稿，研究成果論文預計於 105 年 12 月 30 日前完成投稿。

表中學術產出未達成之原因。

2. 建議應提出具體應用地下水流（文）條件參數。

2. 應用地下水流（文）條件參數如土壤水力傳導係數，土壤的水力傳導係數影響地下水流速，而地下水流速直接影響了示蹤劑的傳輸擴散，也間接影響地電阻施測時間。各種土壤之水力傳導係數及孔隙率參考值如下表所述。例如水力梯度 0.1，欲以電極間距 1 m 施測 5 小時，其地下水流速建議大於 0.2 m/hr，以達西流速推估孔隙率為 50% 的土壤，其 K 值應大於 1 m/hr。

土壤	K (m/hr)	θ (%)
Gravel	3.6~3600	25~40
Sand	3.6×10^{-4} ~36	25~50
Silt	3.6×10^{-6} ~ 3.6×10^{-2}	35~50
Clay	3.6×10^{-8} ~ 3.6×10^{-4}	40~70

(環保署，2006，「地下水污染擴散模式建立之研究」)

當水力傳導係數過小，地下水流速過慢，有限時間內示蹤劑移動距離較短，造成地電阻探測不到示蹤劑移動造成的電阻變化，則無法有效判斷地下水流速流向。在較低的地下水流速下，若要提高地電阻對示蹤劑探測的敏感度，則必須縮短電極間距，但有效測深則會變淺，可能導致有效探測深度不足。舉例來說：監測時間 5 小時，地下水流速 0.1 m/hr，表示 5 小時地電阻要能探測到示蹤劑移動 0.5 m 距離所造成的電阻變化，若電極間距為 1 m，則無法有效探測到示蹤劑的移動距離與變化，為了增加敏感度，則電極間距必須設置為 0.5 m。有效測深方面，電極間距 1 m，以單測線 16 根電極佈設，其電極展距為 15m，有效測深約為 4.5 m 內，若電極間距 0.5 m，則其電極展距為 7.5 m，有效測深約為 2.25 m 以內。電極間距、展距、有效測深及建議流速可參考下表：

電極間距	電極展距 ^a	有效測深	建議流速 ^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)
0.5 m	7.5 m	2.25 m	> 0.1 m/hr
1 m	15 m	4.5 m	> 0.2 m/hr
2 m	30 m	9 m	> 0.4 m/hr
5 m	75 m	22.5 m	> 1 m/hr

(^a以單測線電極數目 16 根，^b施測時間 5 小時計)

委員五

1. 執行現況、流程及方法說明具體
2. 計畫後續執行工作項目及內容已於5.4節說明
3. 計畫執行進度與預定進度相符
4. 整體研究成果符合預期
5. 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
6. 研究內容與計畫目的相符
7. 研究成果具體，以論文發表為主
8. 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，但現地操作的主要應用限制仍建議具體說明討論(例如：流速過慢致影響本系統的可靠性，合理的流速為何?...等)
9. 本技術的應用限制條件(5.2.4節的討論仍待進一步的說明)或是適用條件(例如：EC值的建議？流速的限制？導電度的干擾與誤判？採樣深度？採樣點數與品管？有最低流速的建議，是否有最高流速的限制？土壤質地的限制？或較適用的質地？示蹤劑的強度？...等等)？建議說明討論
10. 附表3.5請以計畫已完成的方式撰寫
11. 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. 謝謝委員意見。
2. 謝謝委員意見。
3. 謝謝委員意見。
4. 謝謝委員意見。
5. 研究成果的解讀與應用條件進一步討論如問題9，並補充於5.2.4節。
6. 謝謝委員意見。
7. 研究成果論文預計於105年12月30日前完成投稿。
8. 現地操作的應用限制，可由地下水流速與注入井型式兩方面來看。

- (1) 流速過慢則地電阻監測時間需增加，或必須縮短電極間距。以流場流速 0.1 m/hr 來說，要以 5 小時監測到示蹤劑的移動，則電極間距必須小於 0.5 m，但在佈設電極時候較容易受到阻礙，如監測井平台、樹根等，而必須偏移電極的設置位置甚至略過此電極，如此一來電極的排列方式就會受到限制，也無法有效的等間距佈設電極。此外，流速過慢，為提高地電阻在短距離上的敏感性而縮短電極間距，則可能電極展距太短，地電阻有效探測深度不足，例如電極間距 0.5 m，16 根電極，則電極展距為 7.5 m，其有效測深小於 2.25 m，若示蹤劑注入的深度較深，則地電阻無法有效探測。電極間距、展距、有效測深及流速可參考下表：電極間距、展距、有效測深及建議流速可參考下表：

電極間距	電極展距 ^a	有效測深	建議流速 ^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)
0.5 m	7.5 m	2.25 m	> 0.1 m/hr
1 m	15 m	4.5 m	> 0.2 m/hr
2 m	30 m	9 m	> 0.4 m/hr
5 m	75 m	22.5 m	> 1 m/hr

(^a以單測線電極數目 16 根，^b施測時間 5 小時計)

- (2) 注入井開篩位置與長度對地電阻應用的限制為，若注入井開篩深度太深，則示蹤劑在含水層深處傳輸擴散，地電阻有效探測深度不足，則無法感測到示蹤劑的移動造成的電阻變化。
9. 本技術的應用限制條件或是適用條件說明如下：

- (1) 若地下有大型結構物或電力設備，於現勘時應事先調查，規劃電極佈設時則應避開以免干擾。若在背景地電阻施測階段，發現注入井附近或目標探測範圍內有異常電阻情形，應考慮改變測線位置。
- (2) 探測深度建議應較示蹤劑注入深度為深，才能測得示蹤劑對含水層的電阻變化，且因地電阻探測深度愈深，資料點愈少，推估地下水流速流向應在水平方向上有足夠的資料點繪製電阻分佈，故建議探測深度為注入深度的 2 倍以上。
- (3) 地下水最低流速建議為在施測時間內，示蹤劑至少要移動大於電極佈設間距，而最高流速為單次測量時間內，地下水流速不會快到讓示蹤劑離開地電阻的探測範圍皆可，電極間距、展距、有效測深及流速可參考下表：

電極間距	電極展距 ^a	有效測深	流速 ^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)
0.5 m	7.5 m	2.25 m	> 0.1 m/hr
1 m	15 m	4.5 m	> 0.2 m/hr
2 m	30 m	9 m	> 0.4 m/hr
5 m	75 m	22.5 m	> 1 m/hr

(^a以單測線電極數目 16 根，^b施測時間 5 小時計)

- (4) 土壤質地主要為影響地下水流速的主要因素，各種土壤之水力傳導係數及孔隙率參考值如下表所述，根據現場條件的不同，水力梯度等，其狀況不一。例如水力梯度 0.1，欲以電極間距 1 m 施測 5 小時，其地下水流速建議大於 0.2 m/hr，以達西流速推估孔隙率為 50% 的土壤，其 K 值應大於 1 m/hr。

土壤	K (m/hr)	θ (%)
Gravel	3.6~3600	25~40
Sand	$3.6 \times 10^{-4} \sim 36$	25~50
Silt	$3.6 \times 10^{-6} \sim 3.6 \times 10^{-2}$	35~50
Clay	$3.6 \times 10^{-8} \sim 3.6 \times 10^{-4}$	40~70

(環保署，2006，「地下水污染擴散模式建立之研究」)

- (5) 示蹤劑的作用在於注入地下含水層後，應與地下水背景導電度產生較大的電阻差異性，才能由地電阻探測其電阻變化，進而推估流速流向，若示蹤劑導電度與地下水導電度接近，或是地下存在著與示蹤劑導電度接近的結構物，則可能造成干擾或無法辨別電阻變化的程度。若示蹤劑之鹽水濃度過高，

密度過大，可能造成示蹤劑下沉，以及影響地下水質與土壤地下水環境。示蹤劑濃度太低，或與地下水背景導電度差異過小，則無法有效分辨其電阻之差異程度。

(6) 注入井開篩長度過長，例如 18.5 m，表示注入的示蹤劑會垂直充滿井管，以垂直線性長度 18.5 m 從井管內流出進入含水層中傳輸擴散，此情形可能造成示蹤劑經大量稀釋後，無法顯著影響地下水之電阻。未來研究建議可使用封塞(packer)，減少注入井開篩長度，及控制注入深度在地下水水位面附近，使示蹤劑能集中為點源擴散。

(7) 地下水位低於開篩深度頂部，注入之示蹤劑可能有部分會流入未飽和層，以致進入含水層的示蹤劑體積減少，故建議地下水位應高於注入井開篩頂部，以確保示蹤劑僅在飽和含水層中傳輸擴散為主。

10. 附表 3.5 已修正為計畫已完成的方式。

11. 計畫為延續 104 年計畫之砂箱試驗移至實場進行試驗與應用，目前成果顯示地電阻能探測到高導電度示蹤劑注入地下含水層所造成的電阻降低情形，然而，由於選定場址之流場流速不如預期，造成地電阻無法在足夠的時間內監測到示蹤劑移動的距離，故未來應考慮水力傳導係數較高的含水層或是地下水流速較快的場址進行驗證與應用，以進一步篩選此技術應用的條件和限制等等。應用條件進一步討論如問題 9，並補充於 5.2.4 節。

專案基本資料表

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 ☐ 預防 ☒ 評估 ☐ 自訂					
申請機構系所		逢甲大學					
機構地址		台中市西屯區文華路 100 號					
計畫主持人		陳建隆		職等/職稱		副教授	
協同主持人		馮秋霞		職等/職稱		教授	
專案名稱	中文	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證					
	英文	Determining groundwater velocity and direction with electrical resistivity tomography technique: field validation					
	關鍵字	resistivity; groundwater velocity; groundwater flow direction					
執行期程		☒ 1 年期 ☐ 2 年期 (第____年) ☐ 3 年期 (第____年) 自 民 國 1 0 4 年 1 1 月 1 7 日 起 至 民 國 1 0 5 年 1 1 月 1 6 日 止					
計畫主持人		姓名：陳建隆		E-mail：chenjl@fcu.edu.tw		專線：04-24517250x5223 手機：0920-766-920	
專任助理		姓名：郭青霖		E-mail：kuoshinglin@gmail.com		專線：04-24517250x5223 手機：0914-113-339	
經費分析總表	專 案 預 估 經 費		金 額		編列說明		
	1.	人事費用	563,604		(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	514,069		(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	29,600		(差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用	20,000		(1~6 項相加之 5%為限)		
	6.	行政管理費	112,727		(1~5 項相加之 10%為限)		
		專案計畫申請總金額		1,240,000		(多年期計畫請列全程經費)	

專案主持人(簽名及蓋章):

陳建隆



日期:

5/5/2016

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 12 月 8 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	逢甲大學環境工程與科學學系	計畫主持人	陳建隆
專案名稱	以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：實場驗證		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。

(一) 學術面

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)
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	0	0		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		
		(2)研討會論文	1	0	0		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2	2		
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨國團隊					
		(3)跨機構團隊					
		(4)形成研究中心					
		(5)形成實驗室					
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	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、 技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已發明						
		核准新型/設計						
		合計						
		申請發明						
		中核准新型/設計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金 (仟元)						
	4.技術移轉 (應用技術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系(件數)						
6.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	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					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府 制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
4.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）

本計畫目的為驗證實場地電阻技術推估地下水流速流向的準確度。此技術之優點為，利用單一地下水監測井就可以量測地下水流速流向，免去設置額外監測井之費用及時間，可以直接進行地下水流速流向量測。主要優點如下：

1. 直接量測地下水流速流向，而不是由地下水水頭推測。
2. 量測的範圍大，但又不需額外觀測井。
3. 量測的結果較一般單井試驗方法具代表性，因其量測範圍較大且不會受到監測井外圍填充層(well skin)的影響。
4. 示蹤劑為無毒無害之氯化鈉，且注入量不高，不會影響地下水水質。
5. 此方法所獲得之地下水流場可靠性將比用地下水水頭所推估之結果更高。

本研究結果指出，地下水流速為一重要限制因子，地下水流速若過慢，導致示蹤劑在地下水中傳輸擴散較慢，移動距離過短，則在施測時間內可能無法有效探測到示蹤劑的移動，此外，注入井的開篩長度過長或深度太深，以及地下水位若過低，都可能造成地電阻有效探測深度不足而無法有效應用此技術。未來研究建議可使用封塞(packer)，減少注入井開篩長度，及控制注入深度在地下水水位面附近，使示蹤劑能集中為點源擴散。並建議考慮水力傳導係數較高的含水層或是地下水流速較快的場址進行驗證與應用，以進一步篩選此技術應用的條件和限制等等。

若未來驗證能得到預期成果，則可作為以地電阻量測地下水流速流向之重要依據。在未來實際運用上可用於場址調查及地下水流場調查等與污染團傳輸或地下水整治相關工作上，可以快速調查大面積範圍內之地下水流速流向，除了使場址概念模式更精準外，更可省卻昂貴的設井費用。

摘要

本計畫為去年度計畫的延續。主要目的為對以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法進行實場驗證。此方法主要目的為在只有一口地下水監測井的限制下，發展一套可靠且有效率之地下水流速流向測定技術。去年度計畫砂箱實驗結果顯示量測地電阻變化可有效量測地下水流速流向。因此本年度以實場展示此技術之可行性。並藉由實驗建立現場量測基本流程與方法。實驗共可分為五個主要部分：(1)場址及實驗設置；(2)示蹤劑試驗；(3)場址示蹤劑傳輸模式模擬；(4)地電阻試驗；(5)地電阻推估地下水流速流向。

本計畫選擇雲林科技大學校園內做為進行實場示蹤劑及地電阻試驗場址，該場址內既有監測井為 17 口，含水層約 20 m，監測井完全貫穿含水層，開篩長度從地表下 1.5 m 至 20 m。地電阻試驗分為兩階段，第一階段為方法驗證。第二階段為地下水流速流向推估。本計畫搭配雲科大溫志超教授研究團隊進行的抽水試驗，抽水井連續抽水三天，在抽水試驗的第三天流場穩定後，即進行示蹤劑地電阻試驗，以固定體積的高導電度鹽水(NaCl；濃度約 2.45 g/L，導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)的鹽水從上游的注入井注入，同時下游抽水井以固定流量持續抽水。

本計畫地電阻監測共執行六次，分別編號為試驗 No. 1 至 No. 6，試驗 No. 1 至 No. 3 為五測線、試驗 No. 4 為三測線、試驗 No. 5 至 No. 6 為單測線。每 1 m 設置一電極，共設置 16 至 32 支。示蹤劑以脈衝式點源 (instantaneous point source) 注入，成分為濃度約為 2.45 g/L NaCl 水溶液(導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，注入體積為 100 至 250 公升，注入時間約 1 至 2 小時。當鹽水注入後，注入井將停止注水，但抽水井則會繼續抽水。同時開始進行監測井中導電度與地電阻量測，地電阻間測時間分別為 5、5、8、8、23 及 21 小時。

本計畫目前獲得之研究數據指出，地電阻確實能感測到實場地下水受高導電度示蹤劑影響，產生較背景值為低的電阻，且電阻峰值隨時間有降低的趨勢。透過此電阻變化量隨時空變化的趨勢，應能解析地下水流場流速流向等訊息。但目前數據分析結果顯示，地電阻資料未能明確掌握示蹤劑的移動變化，主要原因可能是流場流速太慢，以至於在有限時間內測量的視電阻峰值的移動距離較地電阻電極間距短(1 m)，故無法解析出示蹤劑的移動方向。

地下水流場以 MODFLOW 模擬，而示蹤劑傳輸以 MT3D 模擬，模擬結果顯示抽水產生的人為流場，其地下水流速約為 0.5 至 1.2 m/d，說明地下水流場流速確實較慢。實際監測時間內示蹤劑團移動的距離小於地電阻電極間距 1 m。表示監測時間 8 至 24 小時的地電阻試驗，不足以偵測到示蹤劑團有顯著的移動，然

而，注入井位置基本上仍會有高導電度的示蹤劑團，此現象與實場試驗結果相符。

根據本研究實場試驗結果，發現砂箱試驗與實場規模的試驗結果的不同，注入點及附近除了有電阻較背景值降低的現象，亦會發有電阻較背景值增加情況發生。表示高導電度示蹤劑進入地下水，不止是改變電場的分佈，更可能改變電流的路徑分佈，產生電壓差上升，結果以電阻增加的結果呈現，與一般的定電流的假設有所差異。

Abstract

This research extends the works of last year's project. The main objective is to directly measure groundwater velocity and direction based on electrical resistivity tomography (ERT). The motivation for this technique is to be able to accurately and effectively identify the direction and velocity of groundwater flow with only one monitoring well. Last year's project has validated the feasibility of this technique by conducting sandbox experiments. This research will validate the effectiveness of this technique in a real groundwater flow field. This research includes five main tasks: (1) setup experimental site; (2) conduct tracer tests; (3) construct and validate a numerical model for groundwater and solute transport of the tracer tests; (4) conduct electrical resistivity tomography tests; (5) measure the direction and velocity of groundwater flow of the test site.

The site for this study is located in National Yuanlin University of Science and Technology. The aquifer within the site is about 20 m in depth. There are 17 monitoring wells, each screened between depths of 1.5 and 20 m, within the site. The tracer study is divided into two stages: verification of technique and measurement of groundwater velocity and direction. Concurrent pumping tests were conducted during the ERT experiments. Therefore, the tracer experiments were conducted after the groundwater flow reached equilibrium, which was approximately 2 days after the pumping started. The tracer tests are conducted using an injection approach. Solutions containing 2.45 g/L (5000 S/cm) of sodium chloride was injected into the aquifer. The ERT technique in the test site was consisted of 5 testing lines, each with 16 electrodes of 1 m apart. The 5 testing lines were parallel with each other with a spacing of 1 m. The injection volume is 250 L and the injection process lasted 5 min. One tracer was conducted so far.

The results of the tracer study indicate the change in groundwater electrical conductivity can be detected by the ERT technique. However, the ERT results show insignificant movement of the concentration plume. The main reason is that the groundwater velocity induced by the pumping process is only 0.1 m/h, which means the concentration front moved less than 1 m during the 5 h of ERT monitoring period.

Consequently, the setup of the ERT electrode needs to be modified to address this problem. In future tracer studies, the equilibrium groundwater flow will be analyzed

before the tracer studies and the spacing between each ERT line will be decreased to 0.25 m, whereas the distance between electrodes will be still 1 m.

A model for the groundwater flow within the test site will be constructed using MODFLOW. The model will be calibrated and validated with the data from the pumping tests. Afterwards, the model will be used to generate groundwater flow field for a solute transport model constructed using MT3D.

The expected outcome of this project is to validate the technique for effectively and accurately measuring groundwater velocity and direction.

目次

目次.....	I
圖次.....	II
表次.....	VII
第一章、前言.....	1
第二章、研究目的.....	3
第三章、文獻探討.....	5
3.1 ERT 相關應用領域.....	5
3.2 ERT 基本原理.....	12
3.3 ERT 運用於推估地下水流速流向之先期成果.....	14
3.3.1 ERT 對導電度變化之敏感度.....	14
3.3.2 ERT 推估地下水流速.....	19
3.3.3 ERT 推估地下水流向.....	24
第四章、研究方法與過程.....	27
4.1 試驗場址背景描述.....	29
4.2 示蹤劑試驗.....	32
4.3 地電阻試驗.....	32
4.4 地電阻推估地下水流速流向.....	34
4.5 場址示蹤劑傳輸模式模擬.....	36
4.6 實場試驗流程規劃.....	38
4.6.1 預備工作.....	38
4.6.2 實場示蹤劑地電阻試驗.....	40
4.6.3 資料處理及分析.....	45
第五章、結果與討論.....	46
5.1 自製導電度計率定成果.....	46
5.2 示蹤劑試驗與地電阻試驗.....	49
5.2.1 實場試驗條件說明.....	49
5.2.2 地電阻背景剖面.....	58
5.2.3 地電阻試驗結果分析.....	64
5.2.4 六次地電阻試驗結果綜合討論.....	95
5.3 傳輸模式模擬.....	99
5.3.1 地下水模式建置.....	99
5.3.2 地下水模擬結果.....	102
5.4 結論與建議.....	106
參考文獻.....	107

圖次

圖 1-1、不同介質之電阻率分佈範圍(Samouëlian et al., 2005)	2
圖 2-1、地下水流向在均質與非均質含水層示意圖(Bradbury et al., 1991)	3
圖 3-1、ERT 單電流極和電位極於均質等向之半空間示意圖	12
圖 3-2、ERT 任意四極法排列示意圖	13
圖 3-3、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(深度第 1 層)	14
圖 3-4、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(深度第 5 層)	15
圖 3-5、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(深度第 9 層)	15
圖 3-6、鹽水導電度與含水砂土導電度比較($x=0.7$ m, 深度第 1 層)	16
圖 3-7、鹽水導電度與含水砂土導電度比較($x=0.7$ m, 深度第 5 層)	16
圖 3-8、鹽水導電度與含水砂土導電度比較($x=0.7$ m, 深度第 9 層)	17
圖 3-9、Dipole-dipole 法之 ERT 測量序列關係圖(Zhou et al, 2000)	17
圖 3-10、不同注入深度之電阻率變化圖(電極間距：5 cm)	18
圖 3-11、不同注入深度之電阻率變化圖(電極間距：2cm)	19
圖 3-12、控制流速 0.96 cm/min 之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖	20
圖 3-13、控制流速 0.6 cm/min 之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖	20
圖 3-14、控制流速 0.25 cm/min 之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖	20
圖 3-15、三測線在 $y=15$ cm 測線之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖	21
圖 3-16、三測線在 $y=25$ cm 測線之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖	21
圖 3-17、三測線在 $y=35$ cm 測線之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖	22
圖 3-18、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=20$ cm)	23
圖 3-19、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=25$ cm)	23
圖 3-20、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=30$ cm)	23
圖 3-21、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=35$ cm)	23
圖 3-22、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=40$ cm)	24
圖 3-23、地電阻儀探測示蹤劑於槽體流動之視電阻率變化圖(三測線)	24
圖 3-24、三測線地下水電阻率變化量(ΔR)等高線圖	25
圖 3-25、地電阻儀探測示蹤劑於槽體流動之視電阻率變化圖(五測線)	26
圖 3-26、五測線地下水電阻率變化量(ΔR)等高線圖	26
圖 4-1、雲林科技大學校園內監測井場位置圖(google map)	29
圖 4-2、監測井分布	30
圖 4-3、井叢照片	30
圖 4-4、ERT 測線配置示意圖	33
圖 4-5、地電阻儀	33
圖 4-6、地電阻系統架設完成示意圖	33
圖 4-7、脈衝點源所產生之示蹤劑在不同時間之濃度分布的示意圖 (x - y 方向)	35
圖 4-8、Dipole-dipole 電極排列法電阻資料點位置	38

圖 4-9、地電阻相關器材	39
圖 4-10、鹽水濃度與導電度之檢量線	39
圖 4-11、五測線地電阻設置現場照片(1/2)	41
圖 4-12、五測線地電阻設置現場照片(2/2)	41
圖 4-13、地電阻纜線連結接地電極棒照片	42
圖 4-14、地電阻儀執行畫面	42
圖 4-15、自製導電度計設置井中照片	42
圖 4-16、示蹤劑地電阻試驗流程圖	43
圖 4-17、示蹤劑注入監測井現場照片	44
圖 4-18、地電阻數據分析流程圖	45
圖 5-1、自製導電度計之三用電表電阻讀值與導電度計律定結果(1/3)	46
圖 5-2、自製導電度計之三用電表電阻讀值與導電度計律定結果(2/3)	47
圖 5-3、自製導電度計之三用電表電阻讀值與導電度計律定結果(3/3)	48
圖 5-4、第一次試驗地下水流場分佈情形與測線配置	52
圖 5-5、第二次試驗地下水流場分佈情形與測線配置	53
圖 5-6、第三次試驗地下水流場分佈情形與測線配置	54
圖 5-7、第四次試驗地下水流場分佈情形與測線配置	55
圖 5-8、第五次試驗地下水流場分佈情形與測線配置	56
圖 5-9、第六次試驗地下水流場分佈情形與測線配置	57
圖 5-10、第一次試驗，Line 1 地電阻剖面	58
圖 5-11、第一次試驗，Line 2 地電阻剖面	58
圖 5-12、第一次試驗，Line 3 地電阻剖面	58
圖 5-13、第一次試驗，Line 4 地電阻剖面	59
圖 5-14、第一次試驗，Line 5 地電阻剖面	59
圖 5-15、第二次試驗，Line 1 地電阻剖面	59
圖 5-16、第二次試驗，Line 2 地電阻剖面	59
圖 5-17、第二次試驗，Line 3 地電阻剖面	59
圖 5-18、第二次試驗，Line 4 地電阻剖面	59
圖 5-19、第二次試驗，Line 5 地電阻剖面	60
圖 5-20、第三次試驗，Line 1 地電阻剖面	60
圖 5-21、第三次試驗，Line 2 地電阻剖面	60
圖 5-22、第三次試驗，Line 3 地電阻剖面	60
圖 5-23、第三次試驗，Line 4 地電阻剖面	60
圖 5-24、第三次試驗，Line 5 地電阻剖面	61
圖 5-25、第四次試驗，Line 1 地電阻剖面	61
圖 5-26、第四次試驗，Line 2 地電阻剖面	61
圖 5-27、第四次試驗，Line 3 地電阻剖面	61
圖 5-28、第五次試驗，Line 1 地電阻剖面	62

圖 5- 29、第五次試驗，Line 2 地電阻剖面	62
圖 5- 30、第六次試驗，Line 1 地電阻剖面	63
圖 5- 31、第六次試驗，Line 2 地電阻剖面	63
圖 5- 32、第一次試驗 Line 1 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	66
圖 5- 33、第一次試驗 Line 1 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	66
圖 5- 34、第一次試驗 Line 1 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	66
圖 5- 35、第一次試驗 Line 2 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	67
圖 5- 36、第一次試驗 Line 2 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	67
圖 5- 37、第一次試驗 Line 2 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	67
圖 5- 38、第一次試驗 Line 3 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	68
圖 5- 39、第一次試驗 Line 3 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	68
圖 5- 40、第一次試驗 Line 3 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	68
圖 5- 41、第一次試驗 Line 4 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	69
圖 5- 42、第一次試驗 Line 4 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	69
圖 5- 43、第一次試驗 Line 4 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	69
圖 5- 44、第一次試驗 Line 5 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	70
圖 5- 45、第一次試驗 Line 5 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	70
圖 5- 46、第一次試驗 Line 5 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	70
圖 5- 47、第二次試驗 Line 1 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	73
圖 5- 48、第二次試驗 Line 1 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	73
圖 5- 49、第二次試驗 Line 1 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	73
圖 5- 50、第二次試驗 Line 2 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	74
圖 5- 51、第二次試驗 Line 2 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	74
圖 5- 52、第二次試驗 Line 2 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	74
圖 5- 53、第二次試驗 Line 3 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	75
圖 5- 54、第二次試驗 Line 3 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	75
圖 5- 55、第二次試驗 Line 3 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	75
圖 5- 56、第二次試驗 Line 4 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	76
圖 5- 57、第二次試驗 Line 4 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	76
圖 5- 58、第二次試驗 Line 4 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	76
圖 5- 59、第二次試驗 Line 5 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	77
圖 5- 60、第二次試驗 Line 5 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	77
圖 5- 61、第二次試驗 Line 5 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	77
圖 5- 62、第三次試驗 Line 1 在深度 $n=2$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	79
圖 5- 63、第三次試驗 Line 1 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	79
圖 5- 64、第三次試驗 Line 1 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	79
圖 5- 65、第三次試驗 Line 2 在深度 $n=2$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	80
圖 5- 66、第三次試驗 Line 2 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	80

圖 5- 67、第三次試驗 Line 2 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	80
圖 5- 68、第三次試驗 Line 3 在深度 $n=2$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	81
圖 5- 69、第三次試驗 Line 3 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	81
圖 5- 70、第三次試驗 Line 3 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	81
圖 5- 71、第三次試驗 Line 4 在深度 $n=2$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	82
圖 5- 72、第三次試驗 Line 4 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	82
圖 5- 73、第三次試驗 Line 4 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	82
圖 5- 74、第三次試驗 Line 5 在深度 $n=2$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	83
圖 5- 75、第三次試驗 Line 5 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	83
圖 5- 76、第三次試驗 Line 5 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	83
圖 5- 77、第四次試驗 Line 1 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	86
圖 5- 78、第四次試驗 Line 1 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	86
圖 5- 79、第四次試驗 Line 1 在深度 $n=6$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	86
圖 5- 80、第四次試驗 Line 2 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	87
圖 5- 81、第四次試驗 Line 2 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	87
圖 5- 82、第四次試驗 Line 2 在深度 $n=6$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	87
圖 5- 83、第四次試驗 Line 3 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	88
圖 5- 84、第四次試驗 Line 3 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	88
圖 5- 85、第四次試驗 Line 3 在深度 $n=6$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	88
圖 5- 86、第五次試驗 Line 1 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	90
圖 5- 87、第五次試驗 Line 1 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	90
圖 5- 88、第五次試驗 Line 1 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	90
圖 5- 89、第五次試驗 Line 2 在深度 $n=3$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	91
圖 5- 90、第五次試驗 Line 2 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	91
圖 5- 91、第五次試驗 Line 2 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	91
圖 5- 92、第六次試驗 Line 1 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	93
圖 5- 93、第六次試驗 Line 1 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	93
圖 5- 94、第六次試驗 Line 1 在深度 $n=6$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	93
圖 5- 95、第六次試驗 Line 2 在深度 $n=4$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	94
圖 5- 96、第六次試驗 Line 2 在深度 $n=5$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	94
圖 5- 97、第六次試驗 Line 2 在深度 $n=6$ ，修正後視電阻率變化量曲線.....	94
圖 5- 98、模擬範圍網格及監測井分佈	99
圖 5- 99、第一次試驗模擬流場分佈	103
圖 5- 100、第一次試驗導電度變化情形	103
圖 5- 101、第二次試驗模擬流場分佈	103
圖 5- 102、第二次試驗導電度變化情形	103
圖 5- 103、第三次試驗模擬流場分佈	104
圖 5- 104、第三次試驗導電度變化情形	104

圖 5- 105、第四次試驗模擬流場分佈	104
圖 5- 106、第四次試驗導電度變化情形	104
圖 5- 107、第五次試驗模擬流場分佈	105
圖 5- 108、第五次試驗導電度變化情形	105
圖 5- 109、第六次試驗模擬流場分佈	105
圖 5- 110、第六次試驗導電度變化情形	105

表次

表 3-1、ERT 相關應用領域與文獻(1/3)	9
表 4-1、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	28
表 4-2、監測井座標與高程	31
表 5- 1、實場試驗地電阻施測時間	49
表 5- 2、實場試驗抽水井及注入井條件	50
表 5- 3、實場試驗地電阻施測條件彙整	50
表 5- 4、電極間距、展距及有效測深和建議流速	96
表 5- 5、土壤之水力傳導係數及孔隙率參考值	96
表 5- 6、模擬抽水井水位	101

第一章、前言

本研究為 104 年度「以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：方法建置及驗證」計畫之延續，根據 104 年度計畫之委員審查意見，均顯示實場驗證之重要性。故在實驗室砂箱實驗建立相關方法後，本計畫以實際驗證為目標，透過實場地下水場址試驗，以驗證實場之應用性。本計畫的目的為以實場示蹤劑驗證地電阻技術推估地下水流速流向之準確度，若驗證成功，可在場址調查及地下水流場調查等與污染團傳輸或地下水整治相關議題上有重要貢獻。除了使場址概念模式更精確外，更可省卻昂貴的設井費用。

地電阻影像剖面法(electrical resistivity tomography, ERT)，有的稱 resistivity image profiling (RIP)，由 Schlumberger 首先於 1912 年應用此法進行電阻率量測，屬於非破壞性之地球物理探勘技術，且已廣泛應用於各種工程及環境污染調查。行政院環境保護署 (2006)即指出地電阻為快速場址調查之評估技術，並應用於國內多個場址調查中，如桃園某煉油廠管線破裂案件。

ERT 之優點為簡單、快速，可在短時間內進行大面積之調查作業，且成本低。此法為非破壞性探勘技術，相較於傳統侵入性之調查，如地質鑽探或設置監測井等單點調查結果，僅能反映出調查區定點位置之地質參數情形，若需大面積的調查，則需設置多點，再予與推估各鑽孔、井位之間可能的水文地質狀態。其執行過程不僅耗費時間與金錢，倘若水文地質條件較為複雜或目標物無通過鑽探位置而未被監測得到，則極有可能誤判結果。故應用 ERT 可優先評估大範圍之地層構造及水文環境之連續狀態或異常情形，作為鑽探或設井的參考依據。地電阻探測技術施測速度雖快，但測得數據結果尚須配合相關資料軟體予以解讀及研判。

ERT 之原理為利用直流電或低頻交流電透過一對電流極通入地層，產生人為電場，再藉由一對電位極量測其間的電位差，獲得地層之視電阻率，經由計算反推得地層之電阻分佈，以反映出地層中水平或垂直方向上的電阻率變化。利用不同的電極排列方式，即可得到調查場址地層電阻率的二維剖面甚至三維空間分佈。

地層組成之不同，依其地質土壤特性、含水量、水中含鹽度、孔隙率及溫度等差異，而具有不同的電阻率(導電率的差異)，不同地質材料之電阻率範圍如圖 1-1。不同土壤質地的電阻率差異數倍甚至百倍，而鹽水與淡水的電阻率也有十倍以上之差異，故可藉由量測得電阻率推估地層構造情形、地下水體，甚至地下結構物、管線及污染物等。尤其目標物電阻率相較於地層背景有高對比性時，其判斷結果將更為明確。

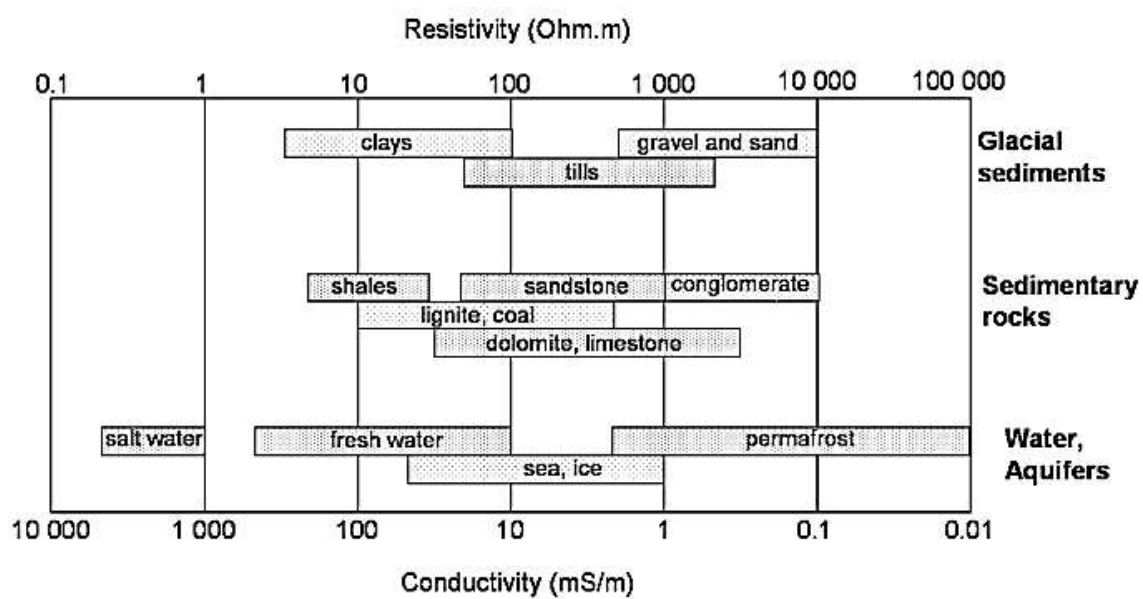


圖 1-1、不同介質之電阻率分佈範圍(Samouëlian et al., 2005)

第二章、研究目的

本研究提出以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法並進行實場驗證。此方法主要目的為在只有一口地下水監測井的限制下，發展一套可靠且有效率之地下水流速流向測定技術。由於污染物在含水層傳輸主要藉由地下水流之對流(advection)及延散而使污染團向下游移動擴大。因此地下水流速流向的掌握對描繪及建構污染場址污染物在含水層傳輸的概念模式有關鍵性影響。而此概念模式正確與否，對於污染團之圍堵攔阻或污染復育對策擬定及執行具有決定成敗之重要性。

地下水流速及流向的判定最常用的方法為量測地下水監測井之水頭，繪出水頭等高線後再利用達西定律並假設含水層為均質而推估出地下水流場。然而含水層通常為非均質，尤其當導水係數會有方向性(anisotropic)，則實際地下水流速流向與推估值會有很大差異。如圖 2-1(a)所示，當含水層為均質結構，水力梯度方向與實際地下水流向為一致，預期抽水得貢獻區(zone of contribution)能與地下水流向相符。然而，若含水層為非均質結構，如圖 2-1 (b)顯示 y 方向之導水係數較大，則地下水水流向與水力梯度方向並不相同，故若以水力梯度判斷地下水水流向，如此預期得抽水貢獻區可能導致錯誤的評估。

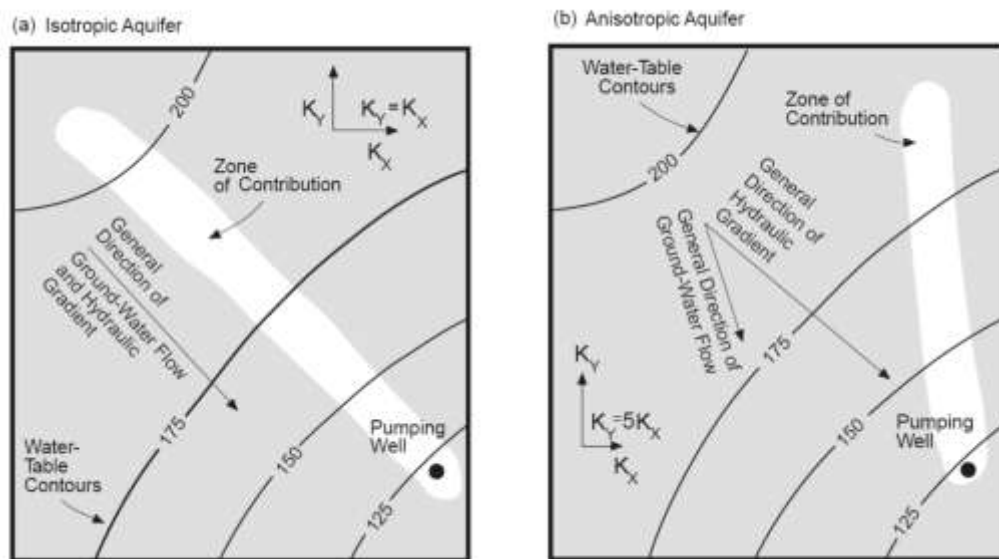


圖 2-1、地下水流向在均質與非均質含水層示意圖(Bradbury et al., 1991)

因此直接量測地下水流速流向才能解決此問題，目前直接量測方法有進行示蹤劑試驗及單井試驗兩種。示蹤劑試驗必須設置觀測井，而單井法則因量測範圍小，容易受監測井井篩周遭條件影響，因此在經濟及準確性上考量，此兩種方法

皆無法廣泛運用。本研究所提出方法則可同時解決以上兩種方法之不足，提供一經濟有效及準確量測地下水流速流向技術。

本計畫利用實場示蹤劑濃度分布驗證地電阻技術的準確度。若驗證得到預期成果，則本計畫結果將可作為以地電阻量測地下水流速流向之重要依據。未來相關實驗將不需要再進行驗證工作，免去設置額外監測井之費用及時間，可以直接進行地下水流速流向量測。本計畫預計發展一個可以利用單一地下水監測井就可以量測地下水流速流向的技術。主要優點如下：

1. 直接量測地下水流速流向，而不是由地下水水頭推測。
2. 量測的範圍大，但又不需額外觀測井。
3. 量測的結果較一般單井試驗方法具代表性，因其量測範圍較大且不會受到監測井外圍填充層(well skin)的影響。
4. 示蹤劑為無毒無害之氯化鈉，且注入量不高，不會影響地下水水質。
5. 此方法所獲得之地下水流場可靠性將比用地下水水頭所推估之結果更高。

在未來實際運用上可用於場址調查及地下水流場調查等與污染團傳輸或地下水整治相關工作上，可以快速調查大面積範圍內之地下水流速流向，除了使場址概念模式更精準外，更可省卻昂貴的設井費用。

第三章、文獻探討

ERT 應用於土地工程、地下水和環境調查上已有諸多研究，國內亦許多案例應用於地質描繪、斷層調查、地下水探勘、污染調查、海水入侵調查等等，其更可應用於長時間監測污染物之擴散與整治情形。以下就蒐集得 ERT 相關文獻、基本原理及其電極排列方式與表現詳述如下。

3.1 ERT 相關應用領域

劉振宇 (1993)即應用 ERT 於工廠污染區之地下水水文地質調查，分析地層結構、透水層及其底部形貌、土壤沉積方向與推估地下水污染之可能分布情形。相關如濁水溪沖積扇水文地質調查(經濟部 2014)，或是台地構造之調查(康晏棋 2005)、導水係數之推估(林海倫 2013)等。

陳可恭 (2002)利用 ERT 探測地下含水層中淡水與鹹水界面型態，並表示以一維模型為基礎的簡易逆推法，計算較簡，但僅較適用於近似水平地層之測勘；而以雙極排列法施測、二維有限元素法逆推，對複雜的地下構造，能有較佳的解析能力。

Binley et al. (2002)藉由地電阻影像剖面法對地下水層進行監測，搭配示蹤劑試驗，並得出土壤水力傳導度在 0.4 (m/day)時，可得到示蹤劑較良好的移動性，並依此作為模型之參數。

梅興泰 (2006)表示地形效應會影響地電阻量測之結果，突起地形如高山，其視電阻率曲線會較水平時之曲線為低，因為電流流經較疏，故得之偏差率也往往小於 1。遇窪地地形如山谷，其視電阻率曲線會較水平時之曲線為高，因為電流流經較密，故得之偏差率也往往大於 1。並建議因地形造成視電阻曲線之異常，可利用縮小尺寸之室內地形實驗，求得該地形下之修正偏差率進行修正。

Wilkinson et al. (2010)利用地電阻影像剖面法對受壓之含水層進行示蹤劑試驗，成功觀測到示蹤劑流向，並推估出滲漏速度，此數據藉由和梯度進行估算之數據對照進行驗證，結果為兩數據吻合。

Farzamian et al. (2015)於不飽和砂岩進行注水試驗並以地電阻影像剖面法進行監測，將監測結果反演算並進行對照，藉此估算飽和狀態之砂岩的水力參數。並成功藉由此方式推算出飽和砂岩之水力傳導率為 0.5~0.7 (cm/min)。

在斷層調查研究中顯示，ERT 能輔助調查之相關工作(陳佑邦, 2001; 洪彥豪, 2004; 洪瑛鈞 等人, 2006)。亦能探測地下結構物如管線、坑道或掩埋物(段偉宗

2000; 李冠樺 2006; 林彥之 2012; 林澤宗 2012)。

在 Samsudin et al. (2006)的研究中，係利用地電阻二維成像技術監測馬來西亞國內垃圾掩埋場滲漏情形，在三座掩埋場監測結果顯示，此技術成功顯示垃圾掩埋場中的廢棄物電阻率分佈，及污染膠羽遷移情形。

針對 ERT 應用於污染調查有諸多研究，如應用於受 DNAPL 污染區進行地電阻探測(鍾進渝 2001; 王子賓 2005; 楊潔豪 2007; 蔡艾迪 2007)，可界定污染圍在地層中的分布情形，除可用於場址污染調查，亦可用於整治場址之監測與整治成效的評估(中興工程顧問股份有限公司 2013)。

黃亦青 (2008)研究得草地實驗場之定點定源的入滲情形可快速的觀察出其變化；而在實驗室槽體入滲實驗中發現較緩慢的物理變化較不易觀察。並由現地實驗發現，回字型電極陣列佈線較容易導致雜訊增加，產生較多的錯誤訊號；而弓字型電極陣列佈線在電極排列上較無此問題產生。

鄭世楠等人 (2013)研究多重電極排列與感應極化法調查砂礫質之地層污染，探討各種電極排列法搭配感應極化法應用於砂礫層之成像能力，以得最有效率之探測方式。其表示在接地電阻大於 100 ohm 以上時，不建議使用 1.2 秒以下之放電時間，以維持資料品質與可信度。而在 1 m 的電極間距下，1.2 秒以上的放電時間，不同的電極排列法皆對地層與異常物有良好的解析度，但隨著電極間距增加為 2 m、4 m，則僅特定排列法能解析出異常物，而地層差異之解析能力無顯著差異。

Auken et al. (2014)認為地下水中的二氧化碳污染是一潛在風險。他們於現地注入二氧化碳並利用地電阻影像剖面法監測淺層地下水中溶解態之二氧化碳的遷移。成功監測到二氧化碳之遷移並藉由驗證證實藉由地電阻影像剖面法監測到之二氧化碳遷移結果為正確之資訊。

Clément et al. (2010, 2011)的研究是在法國東部的一個掩埋場，利用三維地電阻成像技術，觀察該掩埋場之滲出水回灌情形，在反演過程中利用數值模擬並使其數據優化，同時在搭配時間的推移，能夠更清楚的定位滲出水的擴散，並且可用來推估掩埋場中廢棄物堆的水力特性。

游峻一等人(2011)亦應用 ERT 調查竹北地區海水入侵之問題。

陳宜傑 (2004)應用地電阻法於梨山地滑區土石流之地滑研究，得土石流堆積的部分會出現高低電阻率交替出現的現象。而在近地表處的高電阻率區域，即土石濃度較高的部分，其堆積深度有較深的情形。其它相關研究如李正兆 (2009)

以及莫拉克風災後高 133 線不老溫泉區之地滑調查(周允文等人, 2010)。

楊光程 (2009)研究顯示，ERT 測線與斷層走向非平行或垂直時，會產生 3D 效應，並隨夾角度的增加而影響會降低，當角度大於 45 度則可忽略 3D 效應。

Afshar et al. (2015)利用地電阻影像剖面法探查開發中住宅區地面下地下水層之狀況，確定是否有因為開發行為造成地下產生溶蝕窟之狀況，以確保開發行為對於環境之影響以及確保住宅區之安全性。得到探查結果為開發行為並沒有造成地下產生溶蝕窟。

馮正一 et al. (2011)應用 ERT 推估大地工程上之標準貫入試驗的敲擊次數(N 值)來估算土壤的強度，(N 值定義為貫入土體 45cm 時，後 30cm 所需要的敲擊次數)，其研究結果顯示土層特性對於橫截電阻率與 N 值之關係有較大的影響。

洪瑛鈞 (2013)表示由於二維地電阻法為二維條件的假設，其應用常會受到邊界效應及三維效應的影響，可能產生的誤差及解讀上的錯誤。其透過案例分析及數值模擬，探討地層變化對二維地電阻剖面可能的影響。

Gunn et al. (2014)利用地電阻影像剖面法探查土堤中之水分含量，藉此得知土堤中之水分含量等數據，作為預測堤防是否故障之資訊，提供是否對堤防進行養護之參考依據。

採礦與採石作業中的抽水作業往往會造成高度人工化且複雜之地下水環境狀況，以一般之監測方式難以掌握其狀況。因此 Chambers et al. (2015)利用地電阻影像剖面法進行探查，成功得到地下水位升降之資訊。

Slater et al. (2002b)藉由架設實驗槽，並注入氯化鈉作為示蹤劑，搭配地電阻影像剖面法進行監測，研究溶質於槽體內之移動情況。

Lekmine et al. (2012)藉由實驗槽進行示蹤劑試驗，並搭配地電阻影像剖面法進行監測，推估實驗槽內示蹤劑之傳輸參數等訊息。另外藉由高解析度攝影機進行影像監測，作為對照依據，結果兩數據相互吻合。

Leontarakis and Apostolopoulos (2012)在實驗模型中應用 ERT 探討不同鑽孔式電極排列法之分辨率，而較佳分辨率需要良好的測量靈敏度，不同電極排列法有不同靈敏度分布形式，靈敏度分布大小受電極間距影響，所測得正、負靈敏度其分佈形式影響該區域的分辨率，而較好的分辨率為正負參半。而靈敏度分布大小受電極間距影響，其中電極間距小可得較佳的垂直解析能力，信號較弱。而間距大其垂直向分析雖不大準確，但有較佳的信號。

在 Breen et al. (2012)的研究是在實驗室規模的試驗中，評估 ERT 量化超臨界 CO₂ (SC-CO₂) 注入鹽水填充多孔介質的能力，獲得鹽水飽和度不斷變化的空間分佈。結果顯示，ERT 可成為注入 SC-CO₂ 過程中的監測工具，雖然 ERT 無法顯示較精細的尺度，但 ERT 對於主氣流的位置及外形大小的高靈敏度，使 ERT 對於監測主氣流仍具有優勢；然而在長期的監測中，電極腐蝕可能導致的影響，仍需再進一步研究。

SEFEROU et al. (2012)認為環境管理發展趨勢的重點為控制垃圾污染以及其沉積，掌握污染物之移動趨勢為一大重點。利用實驗槽進行模擬試驗，並搭配地電阻影像剖面法檢測槽內污染物之分布，成功繪製出 3D 立體之污染物濃度分布圖。

Slater et al. (2002a)研究透過將示蹤劑注入一大型實驗槽，其實驗槽體內部分別填入不同介質，利用跨孔式電極排列法之地電阻成像技術結合時間，觀察其示蹤劑在實驗槽體中的移動狀況，並與直接監測井偵測結果進行驗證。

以上相關文獻根據其應用領域彙整於表 3-1。

表 3-1、ERT 相關應用領域與文獻(1/3)

應用領域	相關文獻
水文地質調查	● 劉振宇 (1993)污染區地下水水文地質調查分析 ● 陳可恭 (2002)二維地電阻率影像剖面法在地下水測勘 ● 康晏棋 (2005)八卦台地之電阻率構造研究 ● 梅興泰 (2006)地電阻影像剖面法對非均質地下實體之模擬分析 ● 林海倫 (2013)應用一維地電阻於水力傳導係數推估—以濁水溪沖積扇為例 ● 經濟部 (2014)地下水補注地質敏感區劃定計畫書 (G0001 濁水溪沖積扇) ● Binley et al. (2002)應用地電阻影像剖面法以示蹤劑試驗得水力傳導度，作為地下水模型參數以得較準確模擬。 ● Wilkinson et al. (2010)應用地電阻影像剖面法於受壓含水層進行示蹤劑試驗，推估水力傳導度，並以梯度估算結果進行驗證，得結果一致。 ● Farzamian et al. (2015) 應用地電阻影像剖面法於不飽和砂岩進行注水試驗，推估水力傳導度。
斷層調查	● 陳佑邦 (2001)應用地電阻影像剖面法於新城斷層之研究 ● 洪彥豪 (2004)應用地電阻影像剖面法於湖口斷層之研究 ● 洪瑛鈞等人 (2006)地電阻剖面影像探測在新竹斷層調查之應用
地下結構物調查	● 段偉宗 (2000)併合二維、三維地電阻影像法及透地雷達法應用於管線及估計電石渣總量上之研究 ● 李冠樺 (2006)電容耦合地電阻探測系統應用於地下管線與坑道之研究 ● 林彥之 (2012)應用地電阻影像剖面法與水平迴圈電磁法於地下掩埋物調查之研究 ● 林澤宗 (2012)地電法於地下掩埋物調查之研究

表 3-1、ERT 相關應用領域與文獻(2/3)

地下污染調查	● 鍾進渝 (2001)地電阻影像法應用於地層污染檢測之研究 ● 王子賓 (2005)結合地電阻影像剖面法及透地雷達法調查 DNAPLs 之案例研究 ● 楊潔豪 (2007)應用地電阻影像法調查地層中 DNAPL 污染團 ● 蔡艾迪 (2007)應用地電阻影像法偵檢 DNAPL 污染 ● 黃亦青 (2008)應用三維地電阻方法評估污染物的傳輸及分佈之可行性先導研究 ● 鄭世楠等人(2013)應用多重電極排列與感應極化法調查砂礫質地層污染之研究 ● 中興工程顧問股份有限公司 (2013)漢翔台中一廠區地下水污染整治場址整治計畫書 ● Samsudin et al. (2006)應用地電阻影像剖面法，探測垃圾掩埋場中廢棄物分佈以及污染膠羽遷移情形。 ● Auken et al. (2014) 應用地電阻影像剖面法探測於現地注入二氧化碳，並監測淺層地下水中溶解態之二氧化碳的遷移。 ● Clément et al. (2010)、Clément et al. (2011)利用三維地電阻成像技術，觀察掩埋場滲出水隨時間推移之回灌情形，在反演算中利用數值模擬優化，推估掩埋場中廢棄物堆之水力特性。
海水入侵之調查	● 游峻一等人 (2011)地電阻法應用於竹北地區海水入侵之調查
土石流、地滑及崩塌研究	● 陳宜傑 (2004)應用地電阻法於土石流地滑之研究 ● 李正兆 (2009)整合地電阻法與水文地質調查於崩塌地滑動之機制研究 ● 周允文等人 (2010)地電阻影像剖面法應用於莫拉克風災後高 133 線老溫泉區之地滑調查與研析 ● Afshar et al. (2015)利用地電阻影像剖面法探查開發中住宅區是否因為開發行為，造成地下產生溶蝕窟之情形。

表 3-1、ERT 相關應用領域與文獻(3/3)

土地工程之研究	● 楊光程 (2009)二維地電阻影像探測之 3D 效應研究 ● 馮正一等人 (2011)應用地電阻剖面法於土壤地層水份變化與 SPT-N 值比對 ● 洪瑛鈞 (2013)地電阻影像探測在地工調查之應用與問題探討 ● Gunn et al. (2014)利用地電阻影像剖面法探查河堤中含水比例，作為堤防養護之參考依據。 ● Chambers et al. (2015)利用地電阻影像剖面法探查採礦採石抽水作業中，地下水位升降之資訊，以減少人力調查的資源。
砂箱試驗	● Slater et al. (2002b) 應用地電阻影像剖面法於實驗槽中，注入氯化鈉作為示蹤劑，監測示蹤劑於槽體內擴散之情形。 ● Lekmine et al. (2012) 應用地電阻影像剖面法於實驗槽中，注入氯化鈉作為示蹤劑，監測示蹤劑於槽體內擴散之情形。且藉由攝影機進行影像監測作為對照。 ● Leontarakis and Apostolopoulos (2012)在實驗模型中應用 ERT 探討不同鑽孔式電極排列法與靈敏度之關係 ● 在 Breen et al. (2012)於實驗槽中，評估 ERT 量化超臨界 CO₂ (SC-CO₂) 注入鹽水填充多孔介質的能力。 ● SEFEROU et al. (2012)利用實驗槽進行模擬試驗，並搭配地電阻影像剖面法繪製 3D 立體污染物分布。 ● Slater et al. (2002a)利用地電阻成像技術以跨孔式電極排列法，在填入不同介質之砂箱中注入示蹤劑，觀察示蹤劑於槽體中擴散情形，並與監測井進行驗證。

3.2 ERT 基本原理

ERT 之原理為在一個電性均質，電阻率為 ρ 的半空間介質中(如圖 3-1)，其電阻率的定義為：

$$\rho = R \left(\frac{S}{L} \right) \quad (3-1)$$

R 為電阻(Ohm)， L 為此半空間界面的長度(m)， S 為半空間界面的剖面積(m^2)，而此電阻由歐姆定率的定義如下：

$$R = \frac{V}{I} \quad (3-2)$$

其中 V 為電位， I 為電流。透過以點電源通入地下的電流強度 I 的電流，在距離 r 處之一點的電位為：

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3-3)$$

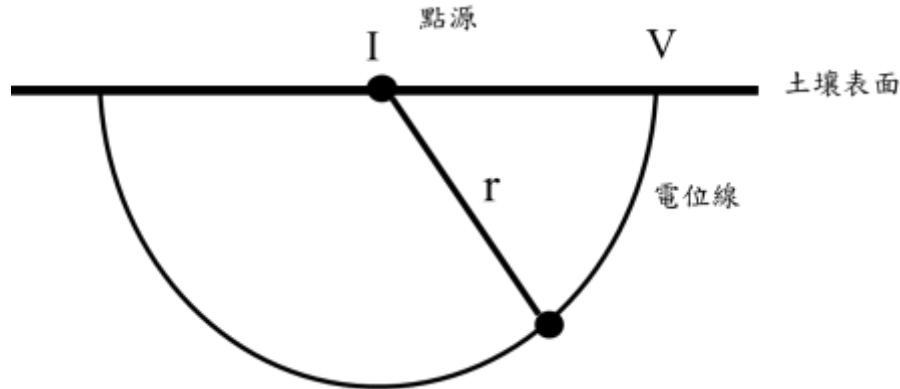


圖 3-1、ERT 單電流極和電位極於均質等向之半空間示意圖

因此由通入地下的電流強度(I)、電位極間的電位差(ΔV)以及電流極與電位極間的相對位置，經數學推導，即可得到 ΔV 、 I 、電極間相對位置與地層參數(厚度與電阻率)之間的關係式。而電阻率的量測通常需要有四個電極，分別為 $C1$ 、 $C2$ 的電流極，以及 $P1$ 、 $P2$ 的電位極，此四個電極排列(如圖 3-2)，以 $C1$ 、 $C2$ 極通入電流， $P1$ 、 $P2$ 極接收電流，量測其電位差(ΔV)，其關係式為：

$$\Delta V = V(\overline{C1P1}) - V(\overline{C1P2}) - V(\overline{C2P1}) + V(\overline{C2P2})$$

$$= \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{\overline{C1P1}} - \frac{1}{\overline{C1P2}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{C2P1}} - \frac{1}{\overline{C2P2}} \right) \right] \quad (3-4)$$

式中 ΔV 為電位極間的電位差、 ρ 為介質的電阻率、 I 為通入地下的電流，而 $\overline{C1P1}$ ， $\overline{C1P2}$ ， $\overline{C2P1}$ ， $\overline{C2P2}$ 分別為不同電流極至電位極間的距離。經由換算後可得到電阻率的計算如下：

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{\overline{C1P1}} - \frac{1}{\overline{C1P2}} - \frac{1}{\overline{C2P1}} + \frac{1}{\overline{C2P2}}} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3-5)$$

其中 K 稱為幾何排列因子(Geometric Factor)，依電極間的相對位置而定。

但由於所要探測的地層並非為均質等向的半空間介質，而是由許多不同介質所組成，因此根據上式所求得的電阻率稱為「視電阻率」(ρ_a)，故其正確表示方式應為

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3-6)$$

而視電阻率是表示在設定的電極排列下，所測得小於與電極排列有關之特定深度範圍內整體地層的綜合效應，因此所測得之視電阻率通常不一定是真實地層的電阻率，必須通過進一步資料的推算處理才獲得較準確的資料。

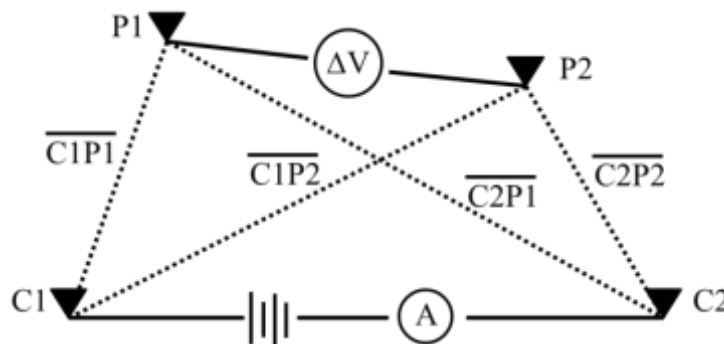


圖 3-2、ERT 任意四極法排列示意圖

3.3 ERT 運用於推估地下水流速流向之先期成果

本節為執行 104 年度計畫：「以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向：方法建置及驗證」截至目前成果，顯示砂箱試驗已驗證此方法之可行性，重要研究成果詳述如下：

3.3.1 ERT 對導電度變化之敏感度

以 ERT 探測地下水中示蹤劑反映在電阻的變化，分別就其解析能力：敏感性與準確性，以及電極間距與探測深度做說明。

1. 解析能力探討

(1) 敏感性

為了解地下水中導電度之變化程度對 ERT 施測結果的改變及其敏感性，以不同導電度(600、800、1000 及 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$)之均勻鹽水充滿砂箱，探究地電阻獲得其變化的訊息及程度。圖 3-3 至圖 3-5 顯示視電阻率在不同深度隨 x 方向之變化情形，可發現相同 ERT 測點位置，隨著鹽水導電度改變，視電阻率皆能反映出其變化情形，且從不同位置及深度測得之視電阻率，隨孔隙水導電度的變化幅度具有一致性。

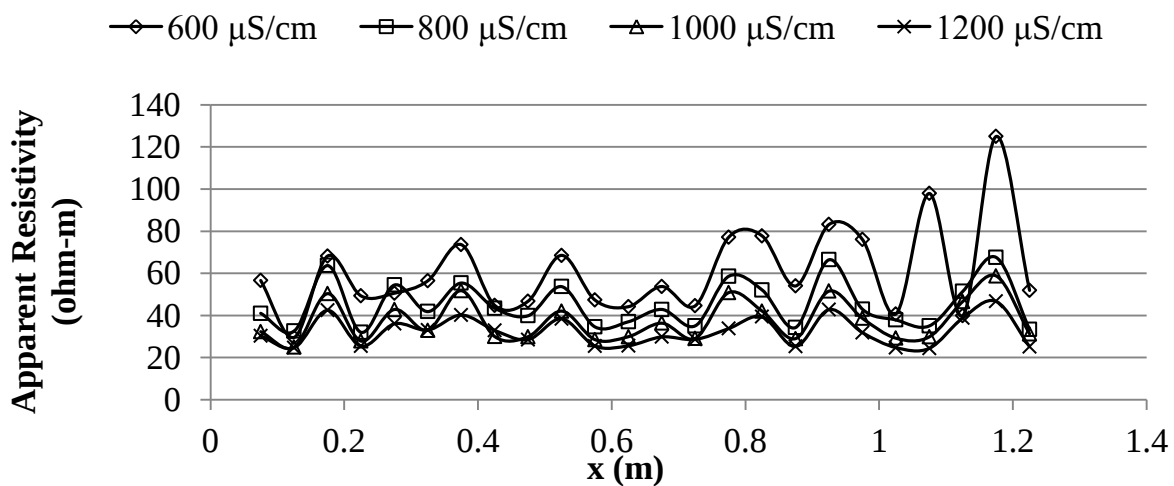


圖 3-3、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(深度第 1 層)

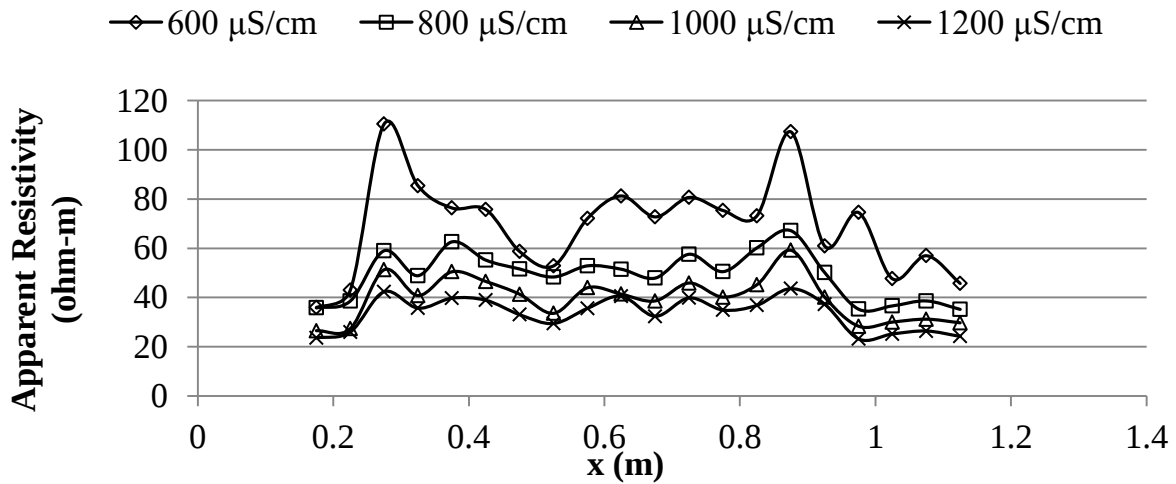


圖 3-4、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(深度第 5 層)

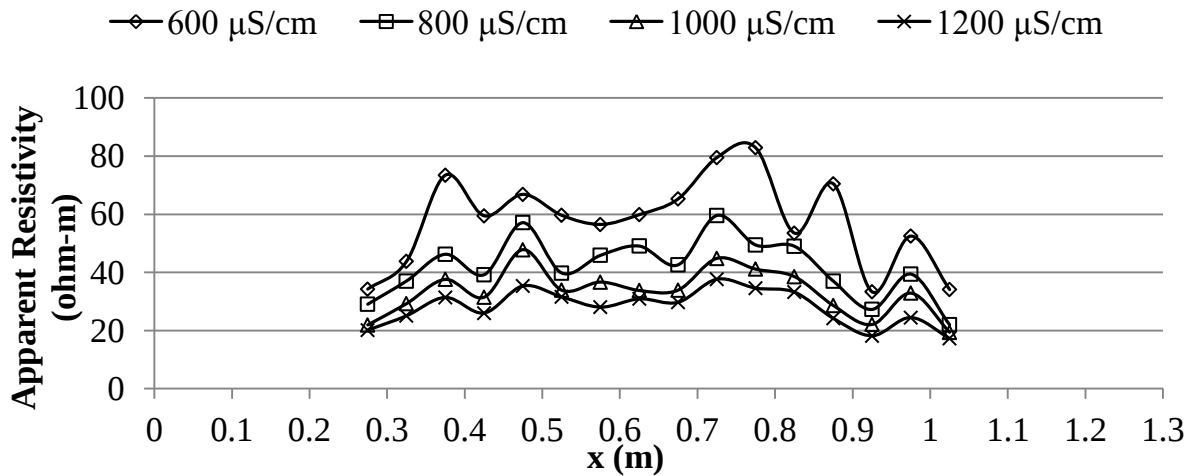


圖 3-5、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(深度第 9 層)

(2) 準確性

準確性試驗先以小型實驗槽實驗建立不同濃度鹽水與砂土之電阻率與導電度之關係。測量結果再與地電阻在大型實驗槽體下測得在不同鹽水導電度下之電阻值進行比較，並透過 Archie's law (式 3-1)建立導電度與地下水(孔隙水)導電度的關係(Archie, 1942)，以驗證地電阻方法之可靠度與準確性。

$$\sigma_w = F\sigma_b \quad (3-1)$$

式中 σ_w 為孔隙水導電度， σ_b 為表現導電度(apparent conductivity)；F為含水層參數(formation factor)。根據Archie's law，可了解孔隙水導電度與含水石英砂之表

現導電度有一正比關係，因此當兩者之coefficient correlation(R^2)愈高，表示地電阻方法之可靠度愈高。

圖 3-6 至圖 3-8 顯示含水砂土與孔隙水導電度之線性關係良好，小型槽體實驗與大型實驗槽測得的趨勢一致，且 R^2 大於 0.9 甚至接近 0.99，故獲得之電阻率結果符合 Archie's law，表示 ERT 施測結果具有準確性。

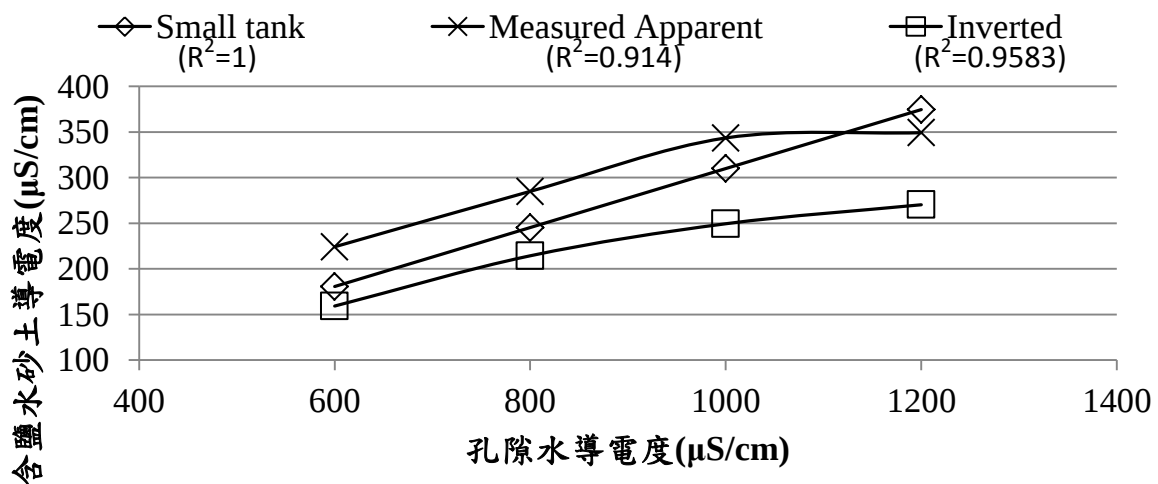


圖 3-6、鹽水導電度與含水砂土導電度比較(x=0.7 m, 深度第 1 層)

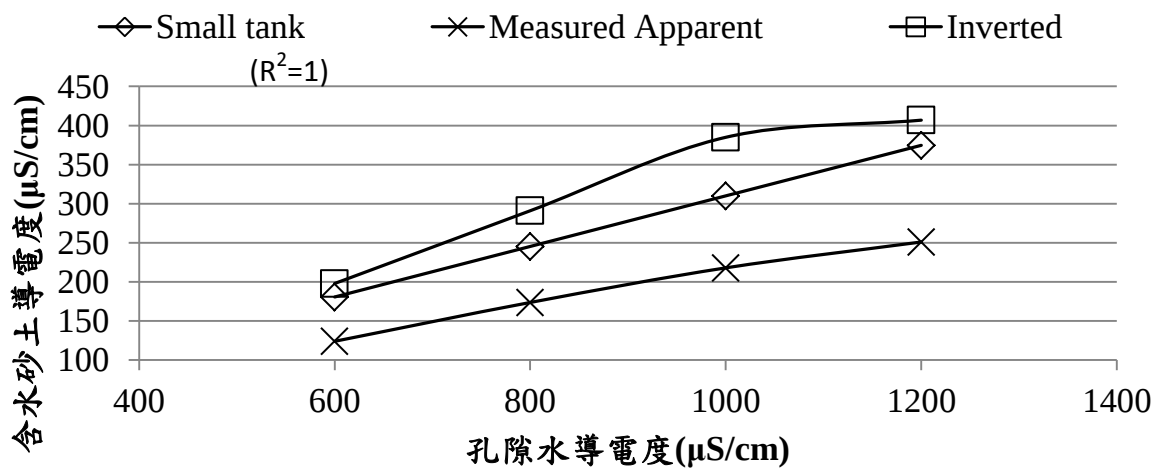


圖 3-7、鹽水導電度與含水砂土導電度比較(x=0.7 m, 深度第 5 層)

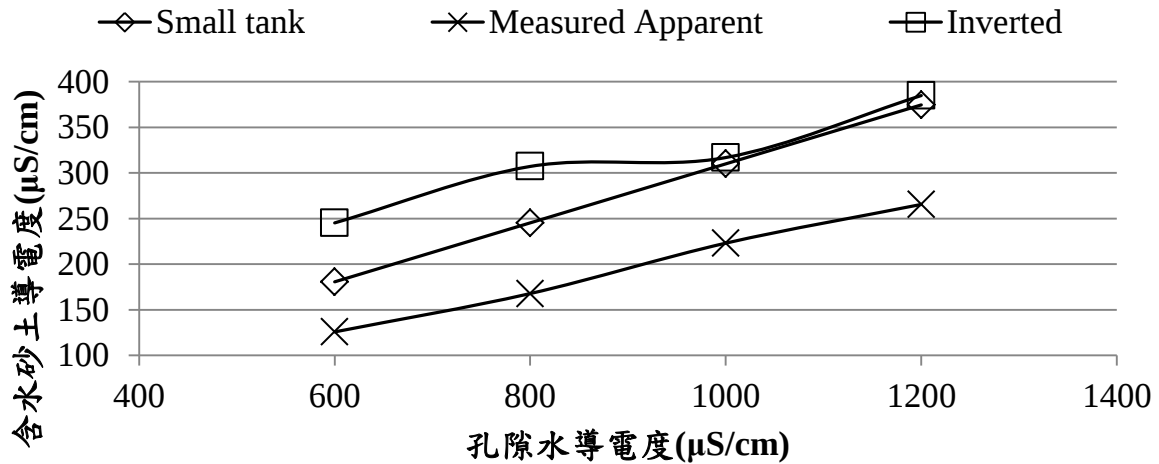


圖 3-8、鹽水導電度與含水砂土導電度比較($x=0.7$ m, 深度第 9 層)

2. 電極間距與探測深度之關係

Zhou et al(2000)指出以 Dipole-dipole 法進行 ERT 施測的層數關係如圖 3-9，層數第一層 $n=1$ ，第二層 $n=2$ ，依此類推。若以外側電極傾角 45° 斜線交點為測深位置，則可由此可推估電極理論測深與間距(a)的關係，如 $n=1, 2, 3, \dots$ ，理論深度為 $a, 1.5a, 2a, \dots$ 以此類推。而 Edwards(1977)則提出以一維靈敏度曲線獲得 Dipole-dipole 法的 ERT 有效深度或擬似深度(pseudo-depth)，深度約為理論深度的一半。為進一步瞭解電極間距與探測深度關係，以作為實場示蹤劑釋放深度之參考依據，本實驗在不同深度位置釋放定量 NaCl 示蹤劑，並以 Dipole-dipole 法進行單測線 ERT 施測，探討電極間距 5 cm 及 2 cm 對於不同深度的示蹤劑釋放造成的電阻變化。

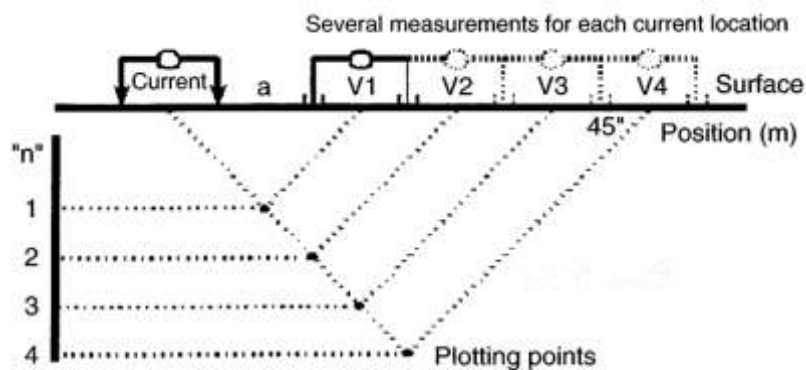


Fig. 2
ERT data measurement sequence using the dipole-dipole array

圖 3-9、Dipole-diopole 法之 ERT 測量序列關係圖(Zhou et al, 2000)

本實驗電極配置詳述如下：電極間距 5 cm，共使用電極數 27 根，總測線長為 130 cm，最大可測層數(n)為 24，理論測深可至 62.5 cm，每層約差距 2.5 cm 深。實驗於測線中心 62 cm 位置，注入示蹤劑深度分別為 10 cm、15 cm、20 cm 及 25 cm。電極間距 2 cm，共使用電極數 32 根，總測線長為 62 cm，最大可測層數(n)為 29，理論測深可至 31 cm，每層約差距 1 cm 深。實驗於測線中心 32 cm 位置，注入示蹤劑深度分別為 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm。

圖 3-10、圖 3-11 顯示示蹤劑注入後，視電阻率與背景值之變化量(ΔR)，高導電度之示蹤劑的電阻較低，故變化量為負值。圖 3-10 顯示電極間距 5 cm 下，示蹤劑注入深度越深， ΔR 變化最大層數越深，而於深度 25 cm 注入示蹤劑，並無測得相應之電阻變化。此外，在 n 大於 11 層，理論測深 30 cm 下的電阻變化有不穩定的現象，推測可能受邊界效應影響所致。圖 3-11 結果可知，在注入深度 5 cm 至 15 cm，ERT 皆可測出明顯之電阻變化，而注入深度 20 cm 的電阻變化量較小。以示蹤劑注入深度與電極間距 2 cm 的關係顯示，地下水電阻值變化的最大深度約為電極間距的 7.5 倍，有較佳的探測能力，且其敏感度會隨深度而降低。

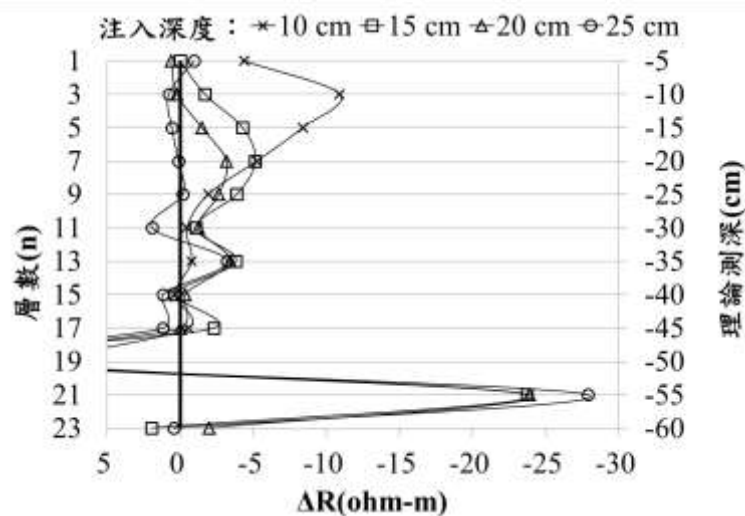


圖 3-10、不同注入深度之電阻率變化圖(電極間距：5 cm)

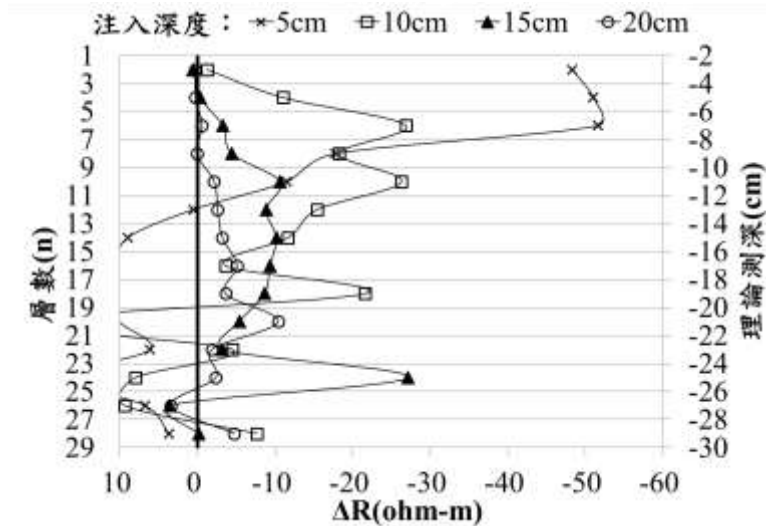


圖 3-11、不同注入深度之電阻率變化圖(電極間距：2cm)

3.3.2 ERT 推估地下水流速

本研究以三種不同電極配置進行示蹤劑試驗，分別為單測線、三測線及五測線，探討電極測線數目增加，所能捕獲之電阻率變化的訊息，藉此評估地下水流場之流速及流向。

1. 單測線

單側線共進行三組不同流速實驗，分別控制流場孔隙流速為 0.96、0.6、0.25 cm/min，於背景導電度 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 槽體注入導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ NaCl 示蹤劑 1 L。結果呈現以電阻率與背景值之變化量(ΔR)表示。由圖 3-12(A)至圖 3-14(A)可見 ERT 可明顯捕捉到示蹤劑於地下水流場中傳輸現象反映於視電阻率的變化。圖 3-12(B)至圖 3-14(B)顯示單測線下 ERT 捕獲之最大電阻變化位置與時間關係，依此可計算流場流速分別為 0.58、0.51、0.24 cm/min。可發現較低流速下，ERT 流場流速與控制流速差異降低。而在 0.96 cm/min 控制流速下，顯示 ERT 流場流速 0.58 cm/min 僅為控制流速的一半，可能表示流場有不均勻的情形，造成單測線 ERT 測得示蹤劑變化的流速為主要流向的分量所致。

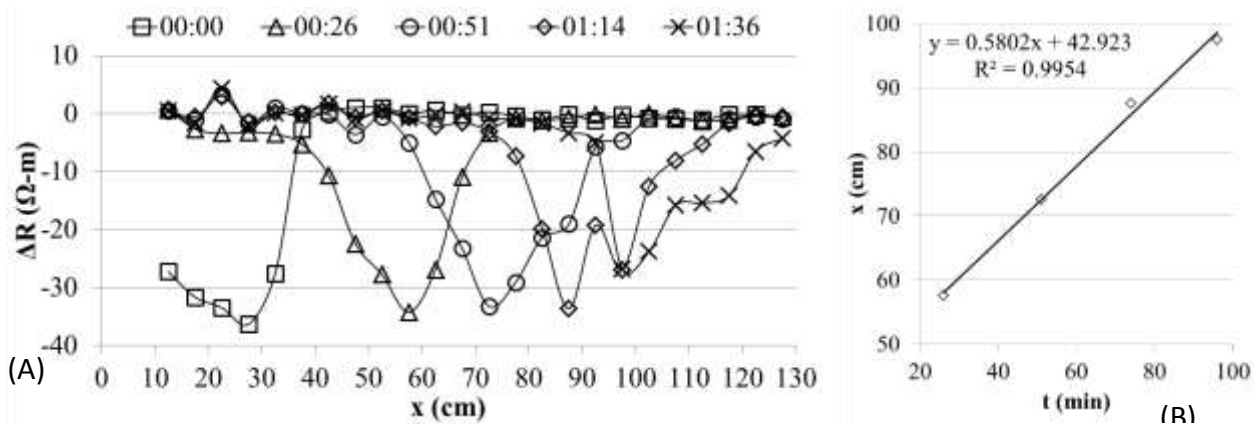


圖 3-12、控制流速 0.96 cm/min 之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖

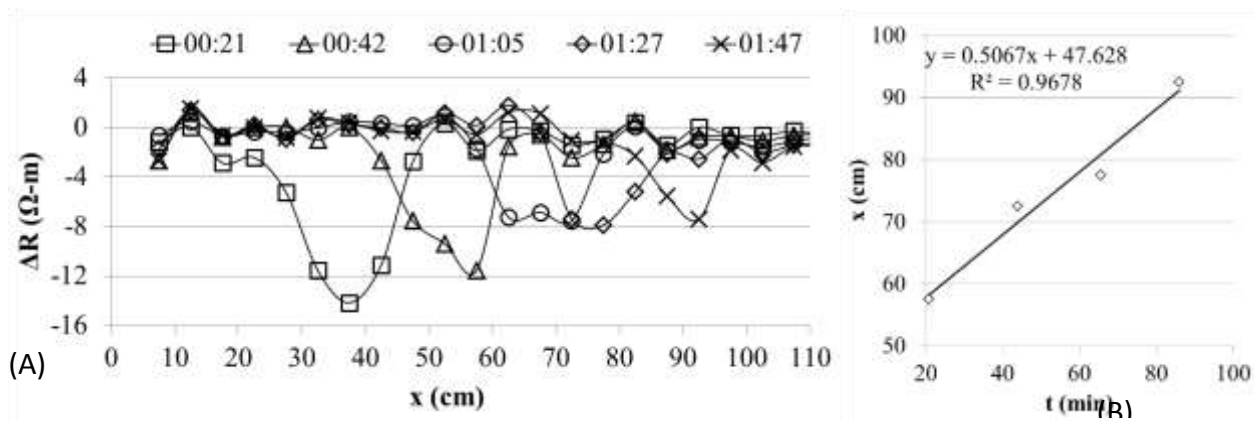


圖 3-13、控制流速 0.6 cm/min 之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖

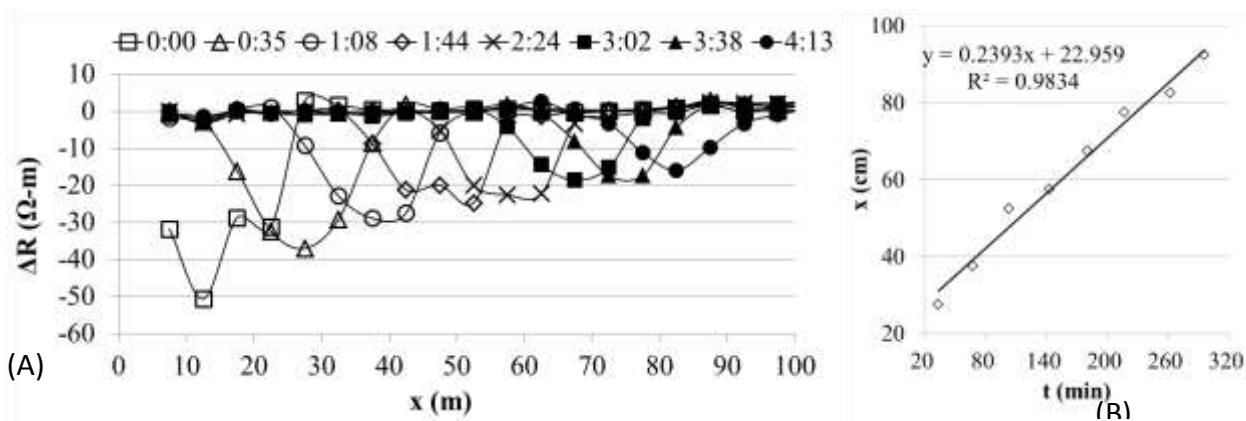
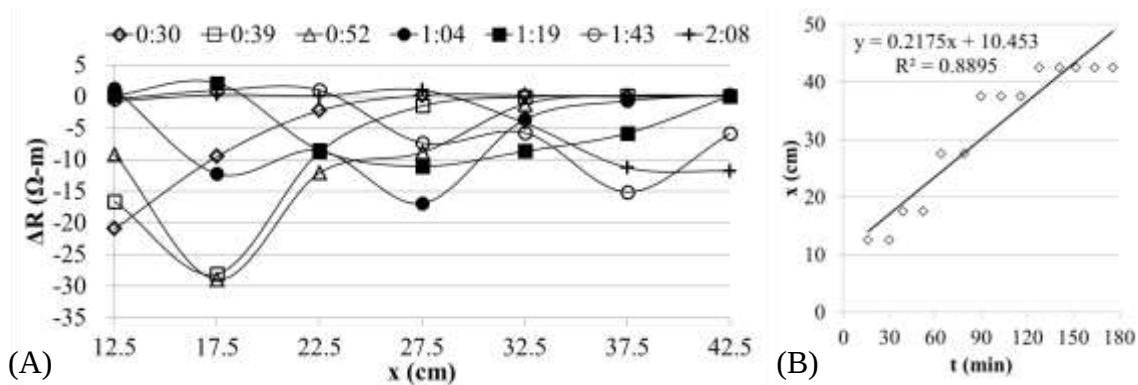
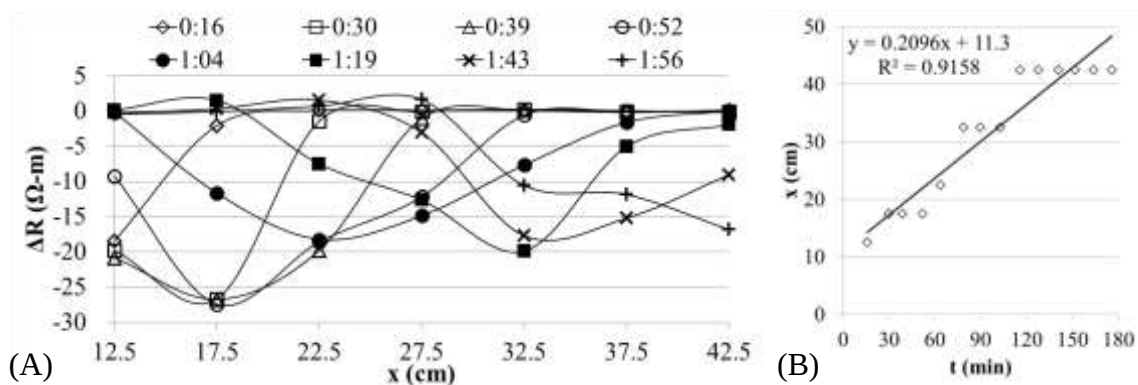


圖 3-14、控制流速 0.25 cm/min 之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖

2. 三測線

控制流場流速(孔隙流速)為 0.20 cm/min ，地下水背景導電度為 $600 \mu\text{S/cm}$ 。分別沿著 x 方向在 $y=20$ 、 25 、 30 cm 設置三條測線，於 $y=25 \text{ cm}$ ， $x=0 \text{ cm}$ 位置設置注入井，注入導電度為 $5000 \mu\text{S/cm}$ 示蹤劑 1 L 。實驗共進行 176 分鐘，共有 15 組結果。結果以電阻率與背景值之變化量(ΔR)呈現，三條測線於深度第一層之 ΔR 隨時間在不同 x 位置的變化情形呈現於圖 3-15(A)至圖 3-17(A)。圖 3-15(A)至圖 3-17(A)可見 ERT 可明顯捕捉到示蹤劑於地下水流場中傳輸現象反映於視電阻率的變化。圖 3-15 (B)至圖 3-17 (B)顯示三條測線下，ERT 捕獲之最大電阻變化位置與時間關係，依此可計算流場流速分別為 0.22 、 0.21 、 0.23 cm/min ，顯示實際流速為控制流速的 105% 至 114% ，實際流速略高於控制流速。此現象顯示槽體流場為非均勻流場，而實際流速大於控制流速的原因可能是實際流場截面積小於槽體設計之截面積。故以實際流速推算實際截面積，實際流場通過截面積為控制流速截面積的 82% 至 95% 之間。

圖 3-15、三測線在 $y=15 \text{ cm}$ 測線之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖圖 3-16、三測線在 $y=25 \text{ cm}$ 測線之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖

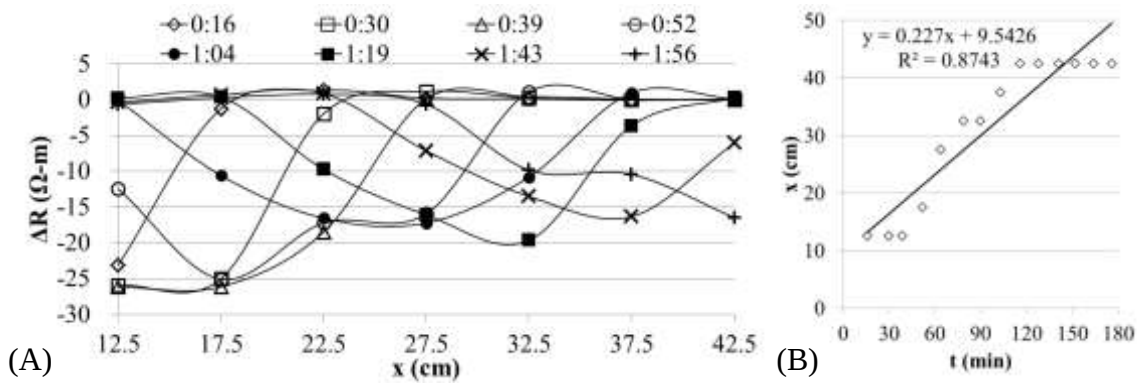


圖 3-17、三測線在 $y=35$ cm 測線之(A)電阻率變化曲線(B)流速圖

3. 五測線

控制流場流速(孔隙流速)為 0.19 cm/min，地下水背景導電度 600 $\mu S/cm$ 。 $y=25$ cm 上游監測井注入導電度 5000 $\mu S/cm$ 示蹤劑 1 L。實驗共進行 162 分鐘，共有 26 組結果。結果呈現以電阻率與背景值之變化量(ΔR)表示。五條測線於深度第一層之 ΔR 隨時間在不同 x 位置的變化情形呈現於圖 3-18 (A)至圖 3-22 (A)。圖 3-18 (A)至圖 3-22 (A)可見 ERT 可明顯捕捉到示蹤劑於地下水流場中傳輸現象反映於視電阻率的變化，且顯示五條測線所測得最大 ΔR 均不同，由於示蹤劑注入於 $y=25$ cm 上游處，故發現在 $y=25$ cm 及 $y=30$ cm 兩條測線上測得之 ΔR ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 ΔR 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 ΔR 為示蹤劑擴散影響。

圖 3-15 (B)至圖 3-17 (B)顯示三條測線下，ERT 捕獲之最大電阻變化位置與時間關係，依此可計算流場流速分別為 0.2 、 0.19 、 0.2 、 0.17 、 0.23 cm/min，顯示實際流速為控制流速的 89% 至 121% 。五條測線所計算之流速不一致可解釋為填充之石英砂於槽體中為非均勻狀態，以及流場可能有短流的現象發生。若以主要流向的實際流速反推流通面積，則實際流通面積為槽體截面積的 93% 至 98% 之間。

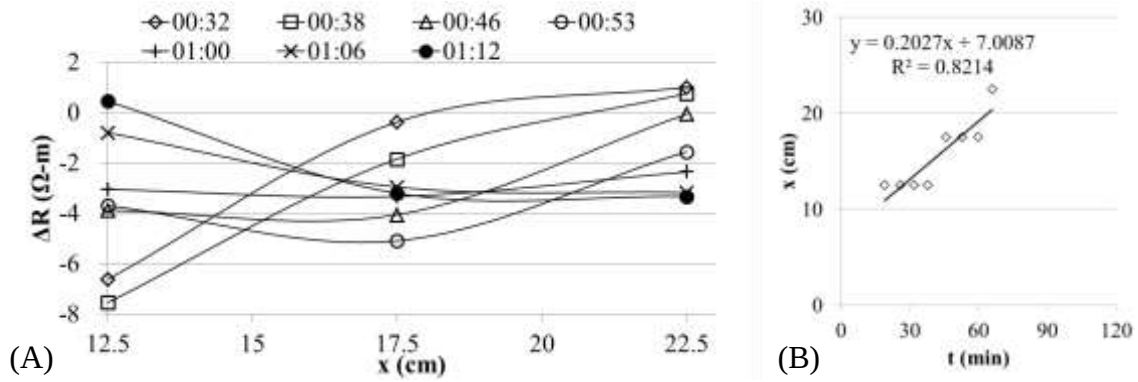


圖 3-18、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=20$ cm)

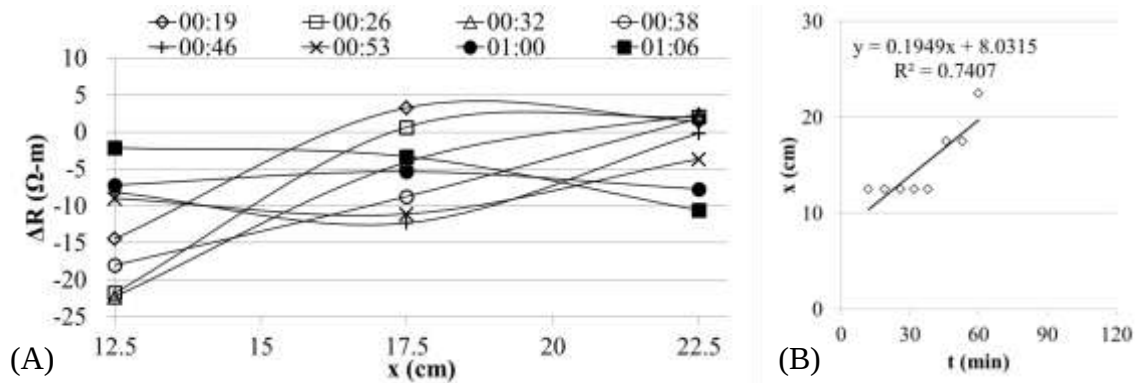


圖 3-19、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=25$ cm)

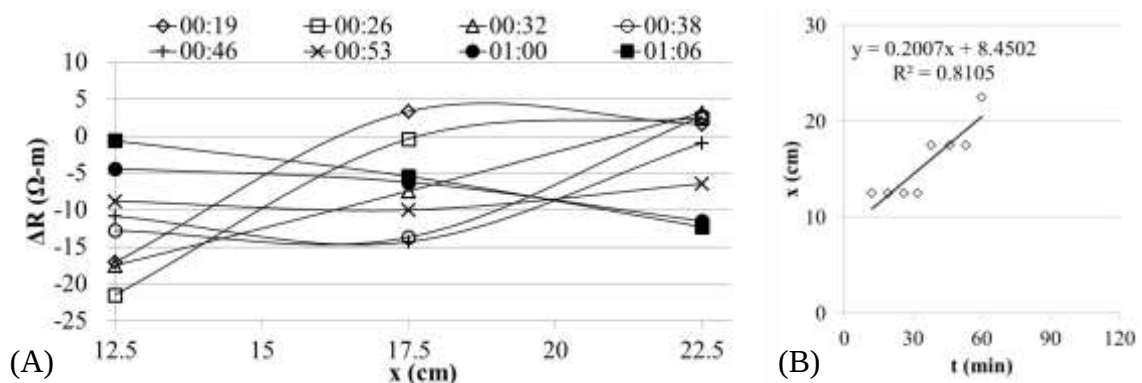


圖 3-20、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=30$ cm)

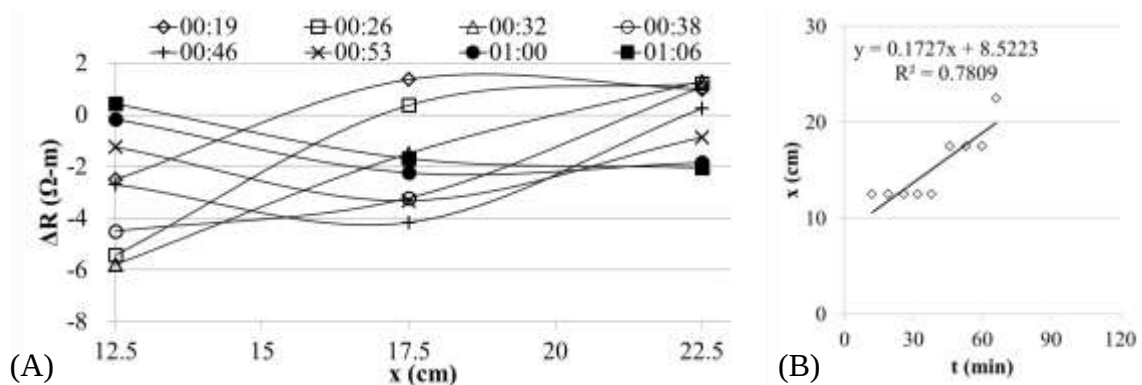
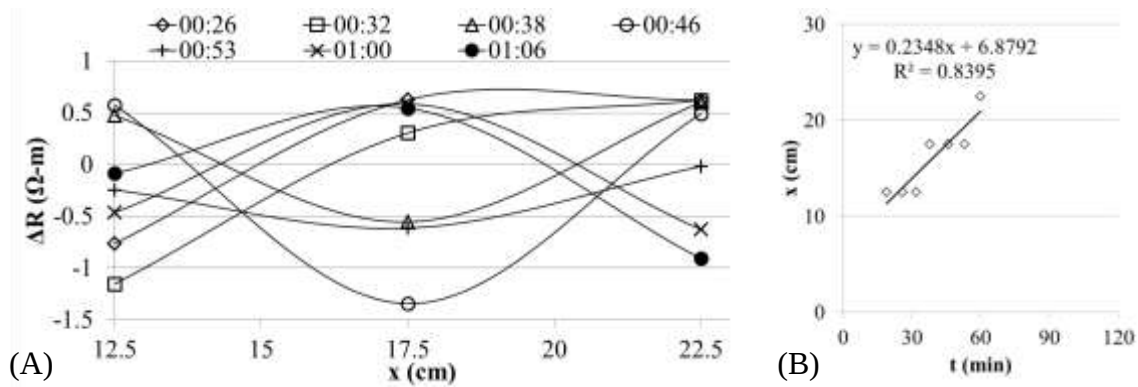


圖 3-21、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=35$ cm)

圖 3-22、不同水平位置視電阻率隨時間之變化(五測線 $y=40$ cm)

3.3.3 ERT 推估地下水流向

1. 三測線

以三測線解析在不同 x 橫斷面，其 y 方向的電阻率變化呈現於圖 3-23。圖 3-23 表示不同 x 位置下測得最大電阻率變化($\Delta R_{\max}$)之電阻率曲線，以 $\Delta R_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示蹤劑主要流向。結果顯示，示蹤劑於流場中主要流動路徑為 $y=25$ cm 及 $y=35$ cm，由於示蹤劑注入點位於 $y=25$ cm 上游處，而結果顯示 $x=12$ cm 的 $\Delta R_{\max}$ 有偏移至 $y=30$ cm 方向，而 $x=17.5$ cm 發現 $\Delta R_{\max}$ 偏移至 $y=20$ cm 方向，於 $x=22.5$ cm 則以 $y=25$ cm 方向為主。此現象亦可說明槽體中流場的非均勻性。圖 3-24 為由 $y=15$ 、25 及 35 cm 三條測線之電阻率變化量繪製之等高線圖，由圖可見示蹤劑從上游注入隨時間向下游傳輸的現象，並可觀察到示蹤劑主要流經方向為 $y=25$ cm 及 35 cm 測線。為進一步解析流場 y 方向之流向訊息，故增加測線數目進行五測線實驗，以觀察 ERT 捕捉 y 方向上的電阻率變化訊息。

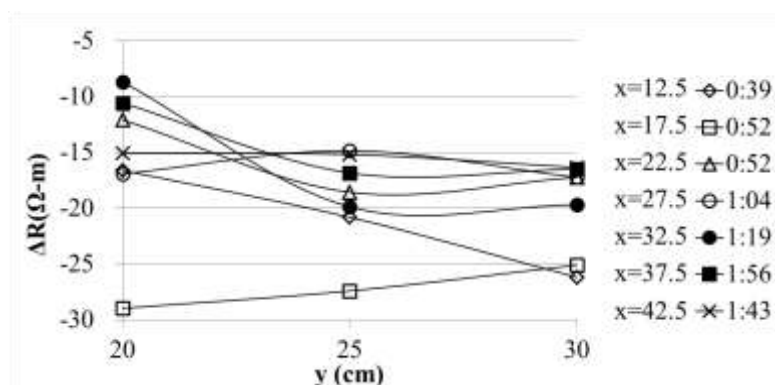
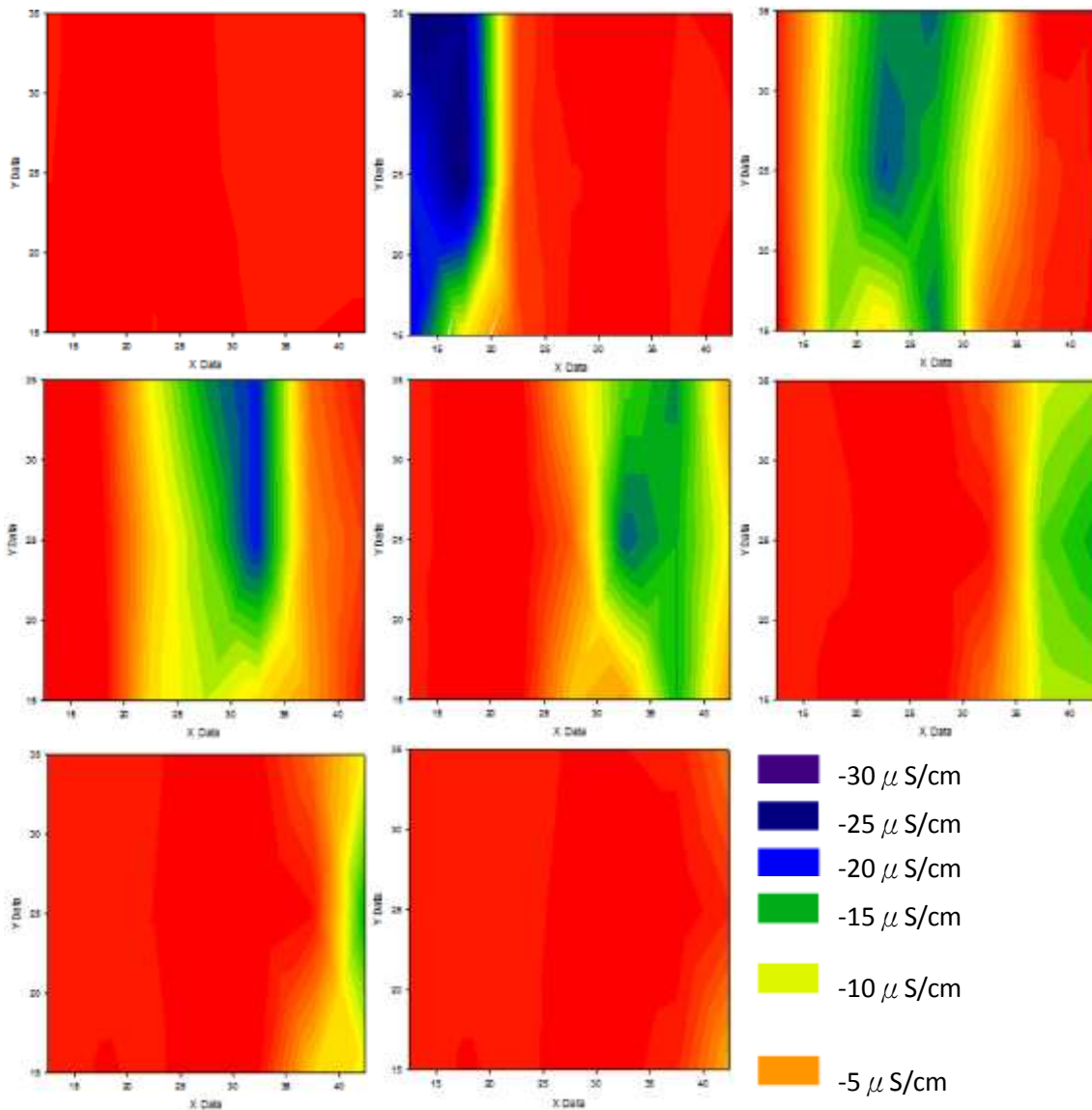


圖 3-23、地電阻儀探測示蹤劑於槽體流動之視電阻率變化圖(三測線)

圖 3-24、三測線地下水電阻率變化量(ΔR)等高線圖

2. 五測線

以五測線解析在不同 x 橫斷面，其 y 方向的電阻率變化呈現於圖 3-25。圖 3-25 表示不同 x 位置下測得最大電阻率變化($\Delta R_{\max}$)之電阻率曲線，以 $\Delta R_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示縱劑主要流向。結果顯示，示縱劑於流場中主要流動路徑為 $y=25$ cm 及 $y=30$ cm，而 $y=20$ cm 及 $y=40$ cm 測線上， ΔR 則變化較小，顯示此測線測得 ΔR 係示縱劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑。由五測線實驗結果證實，測線數目增加，可增加 y 方向上之流場傳輸訊息，提升示縱劑流向解析能力，故可提高流場流向判斷的準確性。由五條測線之視電阻率變化量繪製等高線圖呈現於圖 3-26，可見示蹤劑從上游注入隨時間向下游傳輸的現象，並顯示於 $y=20$ 及

35 cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向。

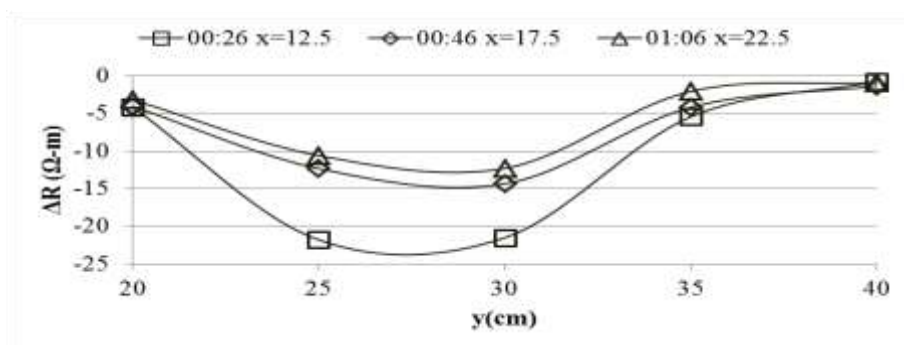


圖 3-25、地電阻儀探測示縱劑於槽體流動之視電阻率變化圖(五測線)

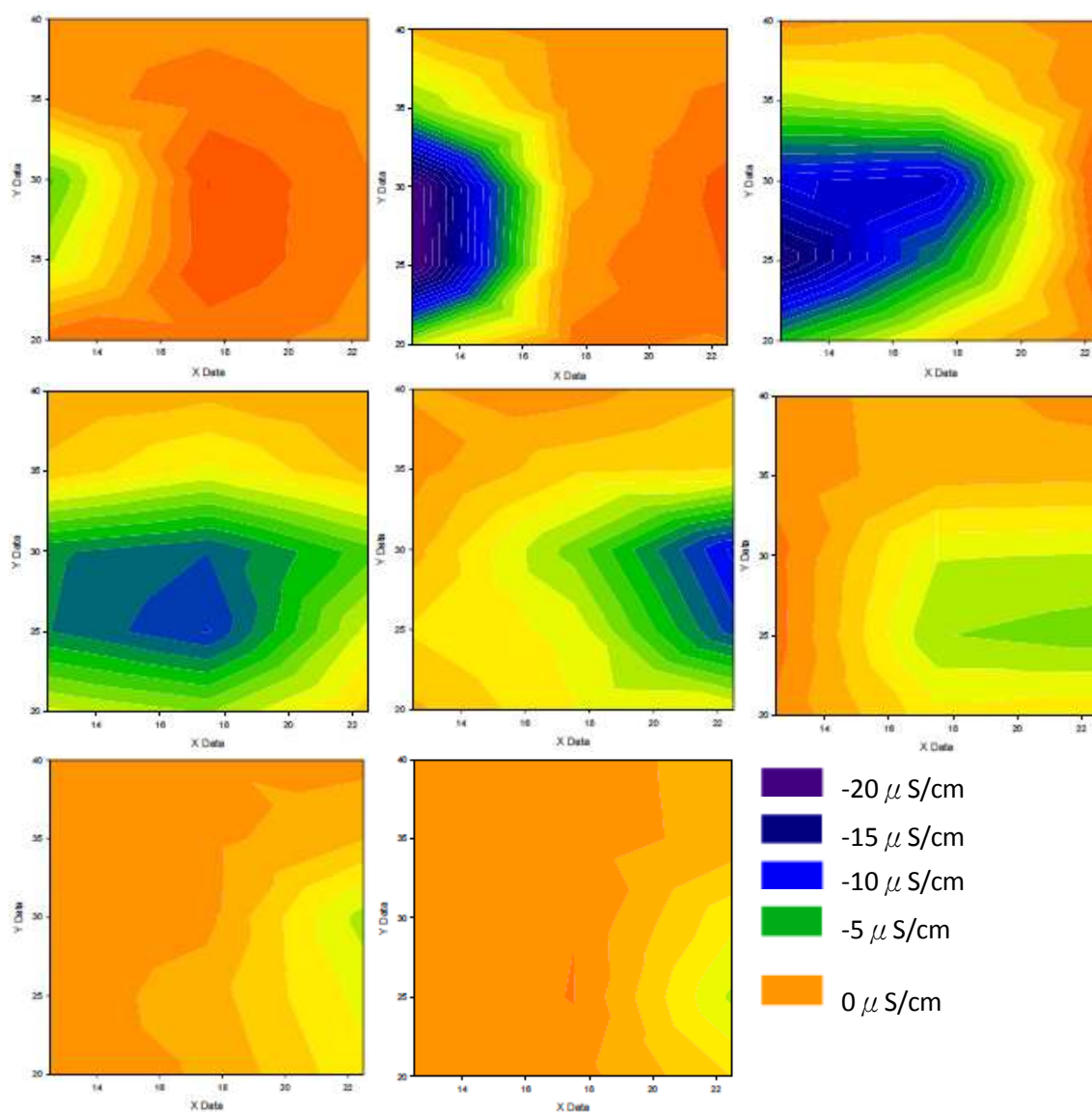


圖 3-26、五測線地下水電阻率變化量(ΔR)等高線圖

第四章、研究方法與過程

本研究於計畫開始持續蒐集相關文獻，並著手進行實驗相關設計與規劃，並採購相關實驗設備與器材，與自製導電度計的製作及測試。並已完成六組組實場示蹤劑地電阻試驗和數據分析討論，以及場址示蹤劑傳輸模式模擬。

本計畫於申請計畫書階段原訂於彰化縣的田中工業區做為進行實場示蹤劑及地電阻試驗場址，後來決定變更至雲林科技大學校園場址內進行試驗，變更原因如下，該場址優點為 1. 雲科大團隊相當熟習當地水文地質，相關水力水文參數，有利於實驗的進行與結果的比對，可增加試驗結果及數據分析的判斷和解析。2. 該場址既有監測井足夠，於 12 m × 12 m 範圍內有多達 17 口密集監測井，有利於示蹤劑地電阻試驗，以及地下水水位和導電度監測，可與地電阻量測值作比對與驗證，且不用新設鑿設監測井。本研究團隊於計畫前便與對方密切聯繫和討論，以及多次現勘。雲科大團隊可協助提供地下水位資料數據等相關資料，此些條件，能使本研究數據更加完整，研究成果提高，故決定於雲林科技大學進行地電阻實場試驗。

由於雲科大既有監測井 17 口已足夠示蹤劑及地電阻試驗使用，故工作項目之「監測井發包設置」及「監測井功能測試」已無需要執行。工作進度與完成項目(✓)呈現於表 4-1，截至目前研究成果已完成 100% 工作進度。包含六次地電阻試驗結果與分析以及場址示蹤劑傳輸模式模擬，撰寫並繳交期中、期末報告。本章節將描述試驗場址的背景，示蹤劑與地電阻試驗方法，地下水流速流向推估理論和地下水流傳輸模式介紹，以及實驗相關規劃與流程。

表 4-1、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

月/日	11/17 ~ 12/16	12/17 ~ 1/16	1/17 ~ 2/16	2/17 ~ 3/16	3/17 ~ 4/16	4/17 ~ 5/16	5/17 ~ 6/16	6/17 ~ 7/16	7/17 ~ 8/16	8/17 ~ 9/16	9/17 ~ 10/16	10/17 ~ 11/16	備 註
工作項目													
文獻蒐集													
	✓	✓	✓	✓									
監測井發包設置	無需要												
監測井功能測試			※ 無需要										
示蹤劑試驗													
				✓	✓	✓	✓	✓	✓				
場址示蹤劑傳輸 模式模擬							※						
			✓	✓	✓	✓	✓						
地電阻試驗													
				✓	✓	✓	✓	✓	✓				
地電阻推估地下 水流速流向													
								✓	✓	✓	✓	✓	
期中/期末報告						※						※	
					✓	✓					✓	✓	
工作進度估計 百分比(累積數)	5%	10%	15%	25%	35%	50%	65%	75%	85%	90%	95%	100%	
預定查核點	期中		1. 監測井設置完成(因無設置監測井，改以第一次示蹤劑與地電阻試驗成果作為查核點) 2. 繳交期中報告										
	期末		1. 校正並驗證地下水及溶質傳輸模式 2. 繳交期末報告										
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。													

本計畫將以實場示蹤劑實驗驗證以地電阻技術推估地下水流速流向之準確度。實驗共可分為五個主要部分：(1)場址及實驗設置；(2)示蹤劑試驗；(3)場址示蹤劑傳輸模式模擬；(4)地電阻試驗；(5)地電阻推估地下水流速流向。各部分詳細內容分述如下：

4.1 試驗場址背景描述

本計畫選擇雲林科技大學校園內做為進行實場示蹤劑及地電阻試驗場址，場址位於雲林縣斗六市大學路3段123號。該場址地勢略呈東北高西北低走向，場址北邊為大學路，東邊為中山路，溪邊及南邊皆為校園內部，其位置如圖4-1。



圖 4-1、雲林科技大學校園內監測井場位置圖(google map)

本研究之實驗場址內既有監測井有 17 口，監測井分佈位置及井號如圖 4-3 所示，實場照片如圖 4-3。監測井之間水平最大距離為 11.55 m，垂直最大距離為 11.62 m。所有監測井都是全長 20 公尺，由井口往下 1.5 公尺處開篩至井底，開篩長度為 18.5 公尺，為全部貫穿含水層之監測水井。圖 4-3 中 BH01~BH11 皆為井徑 4 吋的監測井，BH16~BH21 皆是井徑 2 吋的監測井。監測井詳細之座標位置與高程如表 4-2 所示，最大高程為 49.12 m，最低為 48.41 m。

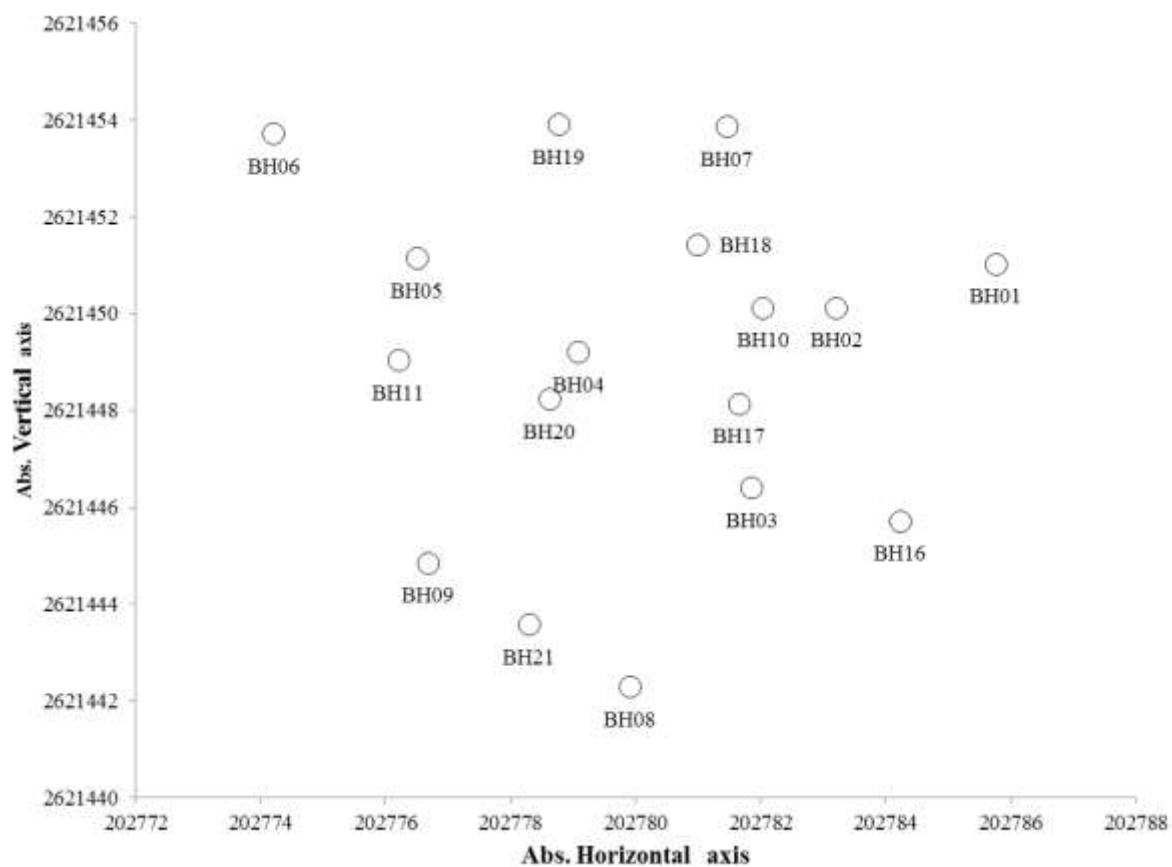


圖 4-2、監測井分布



圖 4-3、井叢照片

表 4-2、監測井座標與高程

Well No.	Abs. Horizontal axis	Abs. Vertical axis	Abs. Elevation(m)
BH01	202785.755	2621451.036	48.89
BH02	202783.206	2621450.132	48.99
BH03	202781.853	2621446.411	48.81
BH04	202779.080	2621449.209	48.85
BH05	202776.490	2621451.150	48.72
BH06	202774.205	2621453.725	48.74
BH07	202781.455	2621453.871	48.89
BH08	202779.909	2621442.297	48.47
BH09	202776.681	2621444.859	48.41
BH10	202782.032	2621450.132	48.85
BH11	202776.204	2621449.043	48.83
BH16	202784.221	2621445.719	49.08
BH17	202781.655	2621448.147	49.11
BH18	202780.990	2621451.435	49.12
BH19	202778.765	2621453.917	49.03
BH20	202778.617	2621448.241	49.04
BH21	202778.295	2621443.578	49.11

4.2 示蹤劑試驗

示蹤劑試驗主要由兩口井組成，一口注入井，另一口為抽水井。在試驗時高導電度鹽水(NaCl；濃度約24.5 g/L)從注入井注入定量體積公升數的鹽水(如100公升)。同時在下游抽水井則以固定的流量抽水(如11-11.5 CMD)。當100公升的鹽水注入後，注入井將停止注水，但抽水井則會繼續抽水直到試驗結束。

本研究計畫使用有完整包覆的銅線自製地下水導電度計，目的為放入監測井中，量測地下水中不同深度的導電度變化，了解實際流場中示蹤劑地傳輸移動方向，以驗證地電阻測量結果。每兩條電線為一組，除電線兩端量測點外，皆做好絕緣包覆，電線末端利用小型螺絲連接電線，並以塑膠板固定兩極距離。其原理係利用兩條為一組的電線，末端置入監測井中欲量測深度的地下水，在地表利用三用電表連接電線的起始端，量測其電阻值，再利用實驗室已知導電度之鹽水律定檢量線，藉此推估實際地下水導電度的變化。

在試驗過程中，監測井的水位、導電度將會持續量測，並將導電度轉換為NaCl的濃度，然後再以此濃度與時間作圖獲得breakthrough curve (穿透曲線)。導電度與NaCl濃度關係將由實驗室中相關性試驗獲得。另外在抽水井將會採取水樣並分析其氯離子濃度。氯離子濃度將會與導電度比對，確定實場導電度與氯離子的關係與實驗室結果相符。

4.3 地電阻試驗

地電阻試驗分為兩階段：第一階段為方法驗證。第二階段為地下水流速流向推估。以下先說明第一階段方法驗證。第二階段之說明則詳載於下節「4.5 地電阻推估地下水流速流向」中。

本研究主要的設備與器材為地電阻儀、纜線與電極棒，地電阻纜線負責連接地電阻儀與接地的電極棒，每條纜線共有 16 個輸出點(Takeout)，可接 16 支電極，材質為鍍鋅銅線，每個輸出點間距 6 公尺，纜線頭至第一個輸出點長度為 10 公尺，纜線總長度為 90 公尺。

本研究地電阻影像探測的電極排列如圖 4-4 所示。電極排列共有 5 條測線。中心測線位於示蹤劑導入點上下游，每 1 公尺設置一電極，共設置 16 支。另外 4 條測線則平行於中心線，每條測線間距 1 公尺線各設置 16 個電極，電極間距為 1 公尺。電極的製作以不銹鋼為材料，直徑約 2 公分，長度約為 60 公分。此 5 條測線將依序編號為 Line 1 至 Line 5。在進行注水及抽水試驗時，也將同時進行地電阻監測，監測的順序則按照測線編號，亦即由測線 1 依序量至測線 5。然後重

複一直到試驗結束。



圖 4-4、ERT 測線配置示意圖

地電阻影像探測使用的儀器為日本 OYO 公司製造的 McOHM Profiler 4XP 32 波道地電阻探測儀，型號為 2140F-XPE(圖 4-5)。此系統包含三大部分：(1)主機；(2)電極棒及外極線；(3)資料處理系統。主機負責電流輸出及電壓量測，最大輸出電流為 120mA，輸出電壓為 400V，主機共有 4 個波道 (channel)，可同時讀取 4 個電流/電壓值，另外可外接 32 支電極棒，根據使用者輸入之電極排列模式 (electrode array)，進行自動量測。電極棒與主機間之聯繫由外極線負責。圖 4-6 為系統架設完成後示意圖。



圖 4-5、地電阻儀

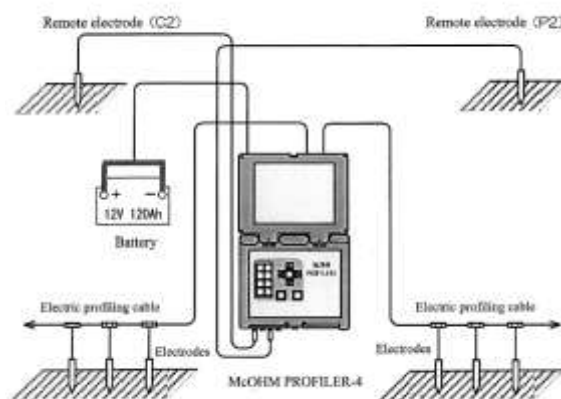


圖 4-6、地電阻系統架設完成示意圖

從地電阻探測儀量測資料必須經過進一步處理才能得到地電阻剖面圖，本計畫將使用 Advanced Geosciences 所出版之 EarthImager 2D/3D 軟體處理所得到之資料。另外資料處理所獲得之地電阻剖面與電極排列模式有關，本研究將使用與砂箱試驗相同之雙偶極排列法。

本計畫假設所測得地電阻的變化值代表地下水受示蹤劑影響而產生的導電度變化。因此導電度變化的多寡代表示蹤劑濃度的大小。從這 5 條測線所獲取之地電阻變化可產生一 2 維之示蹤劑濃度分布圖，在不同時間所測得的分布圖則可呈現示蹤劑污染團(plume)的傳輸路線，而且抽水井亦涵蓋於此污染團範圍內，因

此抽水井的示蹤劑穿透曲線可由地電阻量測結果推估而得。再將推估值與實測值(參考 4.3 示蹤劑試驗)以最小平方差為條件調整吸附及延散係數及完成實場驗證步驟中之校正程序。在後續試驗中再將校正後之模式模擬結果與地電阻結果比對即可完成實場驗證。

4.4 地電阻推估地下水流速流向

實場驗證完成後，利用地電阻技術推估場址區域之地下水流速流向。試驗的方式為在監測井中注入示蹤劑，再量測地電阻隨時間的變化，分析出示蹤劑濃度分布，再推估地下水流速及流向。試驗步驟與前一節相似，但是並沒有抽水，因此示蹤劑傳輸完全受地下水流控制。相關之地電阻測線布置請參考前一節「4.4 地電阻試驗」內容。

示蹤劑的成分為濃度為 24.5 g/L NaCl 水溶液。本計畫以示蹤劑試驗，模擬點源 (point source) 在地下水中傳輸。點源的導入方式則以脈衝式 (instantaneous) 方式。示蹤劑的導入點為既有監測井，以定量體積公升數注入(如 100 公升)。

以下就示蹤劑試驗，探討示蹤劑之理論傳輸分布。若以釋放點為原點構築一 3 維座標系統，其中 x 軸方向與地下水流方向平行，在此座標系統下，x 軸方向傳輸有對流 (advection) 及延散 (dispersion) 兩種機制，而 y 及 z 軸方向則只有延散。假設地下水流速為 v ，x、y 及 z 方向的延散係數分別為 D_x 、 D_y 及 D_z ，另外示蹤劑幾乎沒有吸附，因此其延遲現象 (retardation factor) 可忽略。綜合以上假設，在一均質含水層中釋放後 t 時間的濃度, C_i ，可以式 4-1 表示(Baesle 1969)。

$$C_i = \frac{M}{8\sqrt{\pi^3 t^3 D_x D_y D_z}} \exp \left[-\frac{(x - vt)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t} - \frac{z^2}{4D_z t} \right] \quad (4-1)$$

式中 M = 釋放示蹤劑總質量

由式 4-1 顯示，示蹤劑會因為延散作用而擴張並使其影響範圍隨時間增加而擴大，此現象可以圖 4-7、顯示。圖 4-7、所顯示之濃度範圍是以在各個方向之濃度標準偏差的 3 倍界定。此範圍所涵蓋的質量為 99.7% 而其與傳輸參數關係如式 4-2。

$$3\sigma_x = 3\sqrt{2D_x t}; \quad 3\sigma_y = 3\sqrt{2D_y t}; \quad 3\sigma_z = 3\sqrt{2D_z t} \quad (4-2)$$

式中 σ_x , σ_y , σ_z 分別為濃度在 x, y, z 方向之標準偏差

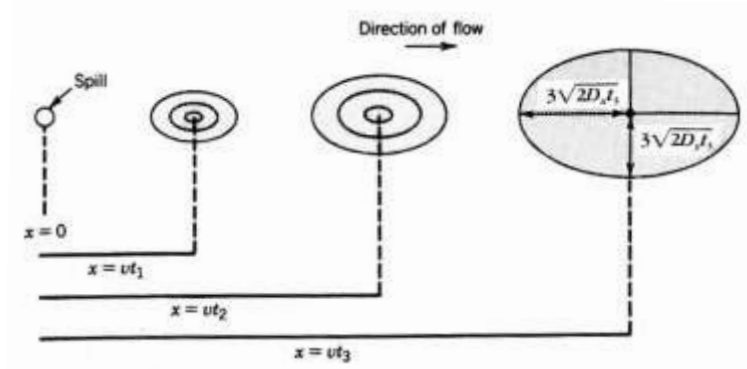


圖 4-7、脈衝點源所產生之示蹤劑在不同時間之濃度分布的示意圖 (x-y 方向)

從圖 4-7、及式 4-2 可得出以下幾點結論：

- 在 x 軸方向的延散度最大，這是因為對流的關係。因此，反過來說，若由濃度分布計算出不同斷面（垂直地表面）標準偏差最大值之斷面即為地下水流之方向。
- 當訂定地下水流向後，在此方向不同時間量測濃度分布並據以計算最高濃度位置，用此位置與時間即可推估地下水流速。
- 在同一斷面但不同時間所計算出濃度標準偏差值，可根據式 4-2 用來推估各個方向之延散係數。

本研究根據以上結論，將根據地電阻剖面推測示蹤劑濃度分布，並藉由量測不同方向之地電阻剖面，比對其濃度分布之標準偏差，先定出地下水流方向，再推估相關之地下水流速及延散係數。

此方法成功與否，取決於地電阻剖面之準確度，而地電阻剖面是否能準確預測示蹤劑濃度除了與電極排列方式 (electrode array) 有關外，也與電極棒間之距離有關。理論上電極棒間距離愈短則其準確度愈高，然而如此所需安插之電極棒數目則愈多，量測時間也就愈久，如此也會影響其推估的準確度。

地電阻探測儀所量測的導電度經過程式(EarthImager) 反推後代表含水層的表現導電度(apparent conductivity)，此數值受地下水導電度及土壤孔隙率等物理性質之影響，若土壤為砂土，則導電度與地下水導電度可以Archie's law (式4-5)來表示(Archie, 1942)。

4.5 場址示蹤劑傳輸模式模擬

本計畫所使用之地下水模擬軟體為 Processing MODFLOW for Windows (PMWIN)，其完整地結合了地下水流模擬與溶質傳輸模式包含：MODFLOW、PMPATH、MT3D、MT3DMS、MOC3D、PEST 和 UCODE，各模式之間可互相搭配或獨立運作。MODFLOW 經美國地質所(USGS)多年的研究與發展的三維有限差分地下水應用模式，該模式適用性佳，且已被國際廣泛使用。本計畫欲採用 MODFLOW 計算地下水流場，並搭配 MT3D 模式計算氯離子傳輸擴散之現象。

模式所需要的參數包括場址相關之水文、地質參數、土壤特性和邊界條件等資料。包括水力傳導係數 K 、土壤孔隙率 θ 、延散度 α 、延遲係數 R 與污染物消減率 λ ，原則以相關文獻提供之建議值與土壤特性之概略值作參數假設。並利用原有之監測井與新設監測井，進行地下水位、水質之監測、分析以及微水試驗以進一步了解地下水相關水力傳導係數 K 。

建立之地下水模擬模式將使用試驗時注入井及抽水井之地下水位進行校正與驗證。首先以第一次試驗時之水位高程進行校正，方法為求取模式結果與實際水頭高程之最小平方差，參數之調整將利用 UCODE 進行參數推估並校正水力傳導係數(K)，使地下水模擬水位與監測水位相符，即完成第一階段地下水水流模擬。校正後之模式將以後續所測得之地下水位高程進行驗證。

地下水模擬模式確認完成，再以 MT3D 接續 MODFLOW，利用模擬獲得之地下水頭和水力條件，進一步模擬氯離子受對流、延散和擴散等傳輸狀況，以及吸附、衰減等化學反應的影響。計算後依模擬結果與實際測得之氯離子穿透曲線比對，調整吸附和延散係數，使模擬值與觀測值之平方差小於預設值。

地下水模式原理說明如下：

PMWIN 為一個三維的地下水流與污染傳輸模擬系統，包含由美國地質調查所發展的 MODFLOW 地下水模式、對流傳輸模式(PMPATH, MT3D, MT3DM, MOC3D 等)、反向參數推求模式(PEST, UCODE)及模式資料前後處理介面。該系統使得模擬三維地下水流與污染傳輸的分析工作較為簡單，以下就本工作所應用的部份僅介紹 MODFLOW 與 MT3D 兩模式的基本原理與功能：

MODFLOW 可以模擬穩態(steady)或非穩態(unsteady)、拘限含水層(confined aquifer)或非拘限含水層(unconfined aquifer)、甚至是拘限含水層與非拘限含水層混合而成的多層地下含水層系統，可加入抽水、河川、排水、水位變化、補助與蒸發散等邊界條件的影響。邊界條件為固定水頭或固定流量。MODFLOW 使用

有限差分法求解格點水頭，而地下水流方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

其中 K_x, K_y, K_z 為沿主軸 x, y, z 方向的水力傳導係數； h 為含水層的水頭； W 為單位體積的體積流通量，代表水進出(sources and sinks)模擬區的流動率； S_s 為比儲存係數。

MT3D 模式中污染邊界條件可設定為固定濃度、固定延散流通量或固定總流入污染量。MT3D 使用 Eulerian-Lagrangian 法分解以下溶解污染物傳輸方程式，並使用 MOC，MMOC 或 HMOC 法求解格點濃度：

$$\begin{aligned} -\frac{\partial(v_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y C)}{\partial y} - \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z}) \\ + \frac{q_s}{\theta} C_s - \lambda(C + \frac{\rho_b}{\theta} S) = R \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned}$$

其中 C 為污染物溶解濃度(M/L^3)； v_x, v_y, v_z 為 x, y, z 方向的平均流速(L/T)； D_{xx}, D_{yy}, D_{zz} 為 x, y, z 方向的水力延散量(hydrodynamic dispersion) (L^2/T)； q_s 為每單位體積水的體積入流或出流量($1/T$)； C_s 為入流水的濃度； θ 為孔隙率； t 為時間； λ 為速率常數。模擬地表入滲污染物至地下含水層所需要的資料與參數如下：

- (1) 地面水文：放流排水路區位、流量與水質(背景) 的季節或月變化、引水灌溉農地區位、範圍與面積、農作種類、灌溉流量、靜水深度與延時等。
- (2) 土壤含水層資料：農地與河床垂直滲漏率、水力傳導係數、含水層分層、深度、比儲存係數等。
- (3) 污染物特性：放流水流量與水質、重金屬於土壤中之吸附、衰減與植物吸收特性，與水溶性污染物延散特性。

以三維模式分析可以呈現放流水在不同區位入滲後，獲得之污染物在空間分布的變化。

4.6 實場試驗流程規劃

地電阻影像探測技術推估地下水流速流向試驗，分別有(一)試驗前的預備工作，包含地電阻設置規劃、地電阻相關器材預備以及鹽水示蹤劑配置；(二)實場示蹤劑地電阻試驗，包括地電阻纜線與電極設置、背景地電阻測試以及示蹤劑傳輸試驗與地電阻試驗；最後為(三)資料處理及分析。以下逐項說明各項工作內容。

4.6.1 預備工作

在前往實場進行地電阻前，需先規劃實場纜線的配置狀態，欲探測深度及電極間距和展距等目的，撰寫地電阻儀執行量測所依循的 Array code。並預備地電阻相關器材如地電阻儀、纜線及電極棒，保持電池電量為充滿狀態，示蹤劑溶液及飽和食鹽水溶液所需鹽量等等。

I. 地電阻設置規劃

本研究之五測線單線電極數量為 16 根，每條測線測點位置大致如圖 4-8，第 1 根電極棒設置在 0.0 m 處，第 2 根設置在 1.0 m，以此類推，電極間距為 1 m，電極總展距為 15 m。根據每條測線所配置之電極數量(n)，每條測線可測得深度層數為 $n-3$ 層，每層獲取資料點數量以 $n-3$ 、 $n-4$ 、...、2、1 遞減。16 根電極可探測 13 層地電阻資料，第 1 層可獲得水平資料點數為 13 點，間距 1 m，第 2 層為 12 點，以此類推，第 13 層為 1 點。依理論深度換算，第 1 層理論測深為地表下 1 m，第 2 層為地表下 1.5 m，每層約增加一半長度的電極間距，故第 13 層理論測深為地表下 7 m。

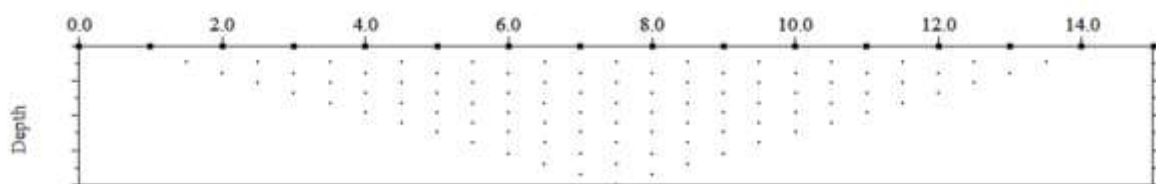


圖 4-8、Dipole-dipole 電極排列法電阻資料點位置

II. 地電阻相關器材預備

圖 4-9 由左至右，由上至下分別為 A. 鉛蓄電池、B. 地電阻儀、C. 鹽巴、D. 水桶、E. 自製導電度計、F. 鉛蓄電池及 G. 充電器。



圖 4-9、地電阻相關器材

III. 鹽水示蹤劑配置

本研究以濃度 2.45 mg/L 配置導電度 5000 的水溶液 100 L 作為第一次試驗所需示蹤劑溶液。鹽水濃度與導電度之檢量線如圖 4-10 所示。示蹤劑濃度不建議過高，否則其密度過大，鹽水太重，可能導致示蹤劑直接往下沉，造成地電阻無法感測到。

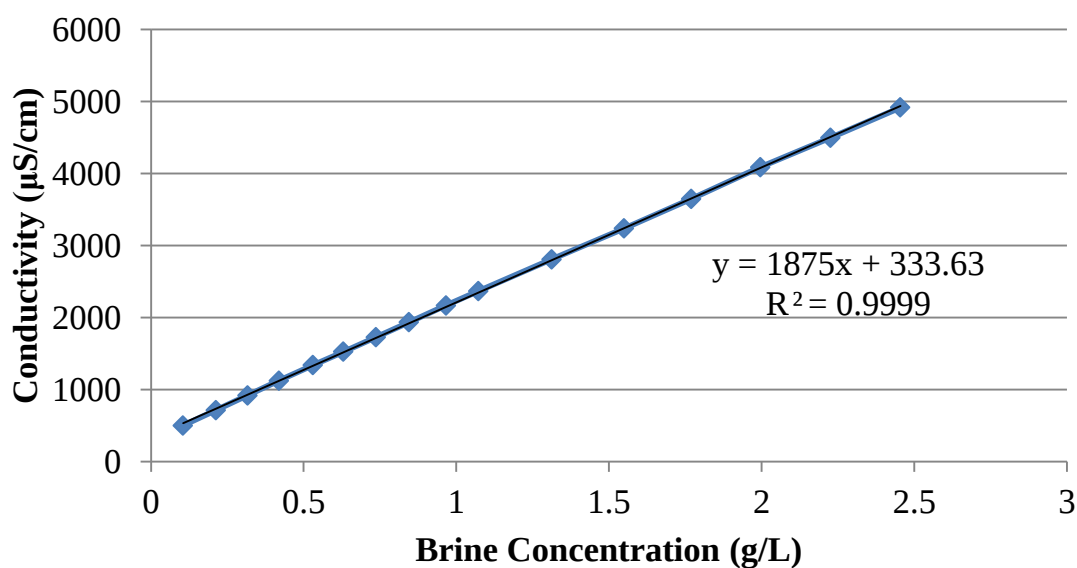


圖 4-10、鹽水濃度與導電度之檢量線

4.6.2 實場示蹤劑地電阻試驗

實場地電阻施測可分為三部分，第一部分為現場纜線與電極設置與測試，第二部分為背景地電阻量測，第三部分為示蹤劑傳輸試驗與地電阻試驗。本計畫搭配雲科大溫志超教授研究團隊進行的抽水試驗，抽水井連續抽水三天，在抽水試驗的第二天或第三天流場穩定後，即進行示蹤劑地電阻試驗，以固定體積的高導電度鹽水(NaCl；濃度約 2.45 g/L，導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)的鹽水從上游的注入井注入，同時下游抽水井以固定流量持續抽水。

I. 地電阻纜線與電極設置

本計畫地電阻監測之電極排列共有 5 條測線。中心測線位於示蹤劑導入點上下游，每 1 m 設置一電極，共設置 16 支。另外 4 條測線則平行於中心線，每條測線間距 1 m 線各設置 16 個電極，電極間距為 1 m。在進行示蹤劑試驗時，同時進行地電阻監測直到試驗結束。示蹤劑的成分為濃度約為 2.45 g/L NaCl 水溶液(導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，本研究目前已進行一組實場脈衝式點源(instantaneous point source)示蹤劑地電阻試驗。示蹤劑注入體積為 100 公升，注入時間約 5 分鐘，當 100 公升的鹽水注入後，注入井停止注水，但抽水井則會繼續抽水。同時開始進行監測井中導電度與地電阻量測，總量測時間約為 5 小時。

五測線地電阻設置現場情形如圖 4-11 和圖 4-12 照片所示，在現場以量尺拉直線延伸，每隔固定間距插入一根電極於土壤，接著將纜線與電擊棒用鱷魚夾連接，如圖 4-13。接著以平行等距的方式設置其它四條纜線及電極棒。纜線與電極設置完成後，再與地電阻儀連接，進行功能測試，了解電極通電情形是否良好。若發現量測值顯示異常，可能是土壤過於乾燥導致電流無法輸出，可以飽和食鹽水澆淋，使其能形成電流迴路。或是電極周圍可能有阻礙物等影響，這時就需要調整電極位置，或進行故障排除等等。



圖 4-11、五測線地電阻設置現場照片(1/2)



圖 4-12、五測線地電阻設置現場照片(2/2)



圖 4-13、地電阻纜線連結接地電極棒照片

II. 背景地電阻測試

地電阻儀及電極纜線功能皆確認正常後，開始進行地電阻背景測量(圖 4-14)，以獲得注入鹽水示蹤劑前，土壤地下水的現況。此步驟可瞭解初始地質地電阻情形與構造，並作為判斷示蹤劑注入地下水後，所造成的導電度變化依據。此結果亦可與自製導電度計量測結果作一比對，如圖 4-15 所示，於監測井中置入自製導電度計，並以三用電表量測地下水背景電阻。本研究每測線 16 電極共五測線，量測一組地電阻約需耗時 50 分鐘。



圖 4-14、地電阻儀執行畫面



圖 4-15、自製導電度計設置井中照片

III. 示蹤劑傳輸試驗與地電阻試驗

現場實場試驗流程可參考圖 4-16，完成地電阻纜線設置與故障排除，以及地下水背景測量後，即進行示蹤劑傳輸試驗，於注入井注入示蹤劑水溶液(圖 4-17)，注入完成後，開始地電阻試驗，每組地電阻量測完成後，即以三用電表量測監測井中自製導電度計的電阻值並記錄。重複地電阻儀與自製導電度計的量測。

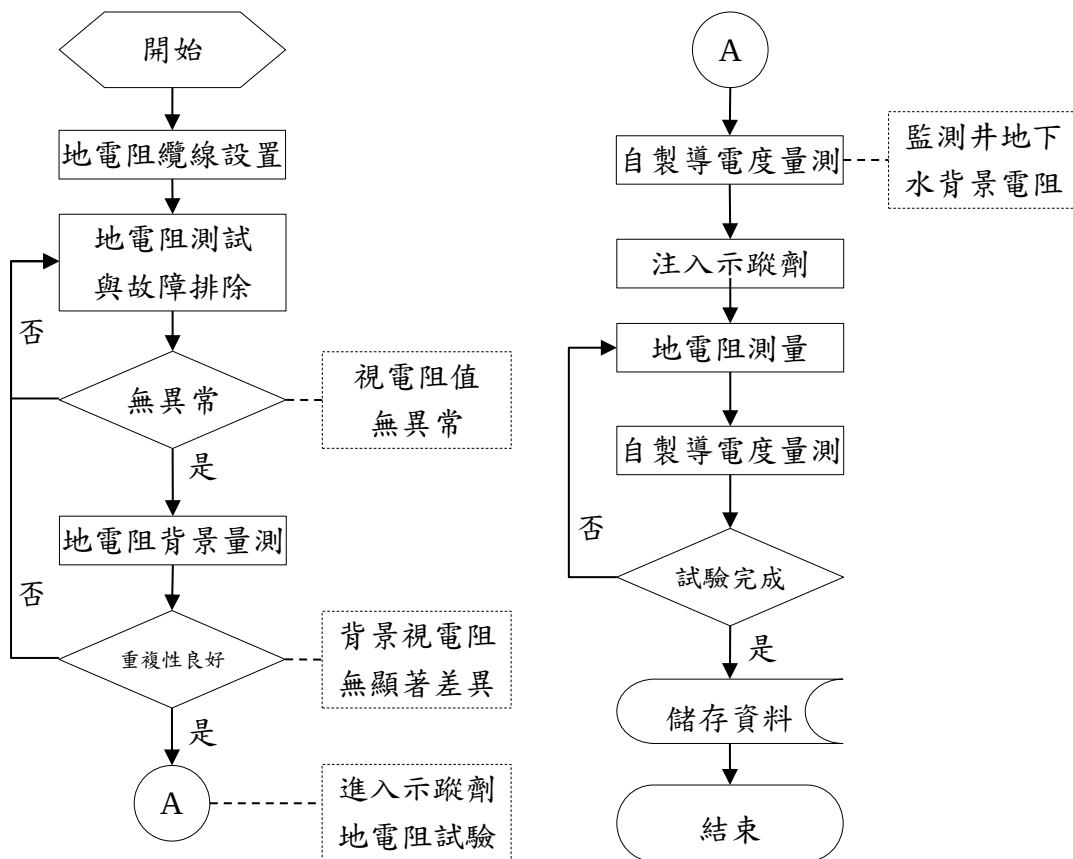


圖 4-16、示蹤劑地電阻試驗流程圖



圖 4-17、示蹤劑注入監測井現場照片

4.6.3 資料處理及分析

完成試驗後，儲存地電阻測得的數據資料，於電腦中進行數據處理及分析，流程如圖 4-18 所示。在進行實場試驗時，若有發生異常狀況或原因，應詳加觀察並紀錄，於後續輸出的地電阻原始數據中剔除可能的異常數據值，避免分析錯誤。移除異常值後的數據，透過 Archie's law 以及地下水的背景地電阻值與實測地下水背景導電度，計算地層因子 F ，此目的為將測得土壤視電阻率以 F 值修正為地下水的電阻率，由於各測點位置之土壤地質結構不盡相同，故因透過 F 值修正後，才能有相同的比較基準。接著，由於實際施測地電阻時，視電阻率為批次量測，本研究使用的地電阻儀有 4 個波道，因此每次最多 4 個電流/電壓值，故同一組時間下五測線不同位置與深度的測點量測時間並不相同，然而，實際流場中的示蹤劑仍隨時間擴散傳輸，若直接進行比較分析，可能會產生錯誤判斷與誤差，此誤差尤其隨著量測時間間隔的增加而提高。因此，本研究以選定各測線每兩組時間下獲得的地電阻率，以內差法推計算在相同時間下的電阻率，再進行視電阻率與背景電阻率差值的比較與分析。

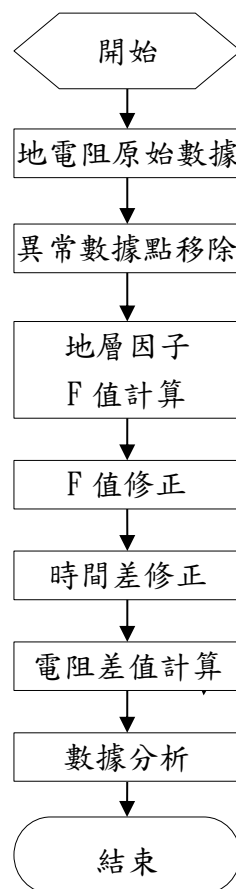


圖 4-18、地電阻數據分析流程圖

第五章、結果與討論

本章節將針對目前為止的實驗結果進行探討，首先為自製導電度計率定成果，其次為呈現第一次示蹤劑地電阻試驗結果，包含流場分布與五測線的配置圖，以及五測線的地電阻剖面 and 示蹤劑試驗的視電阻率變化量分析。

5.1 自製導電度計率定成果

本計畫自製導電度計共五組，編制為 A、B、C、D 及 E，每組共計有 5 個測試深度，分別為 2、4、6、8、10 m，編號 A-2 m、A-4 m、A-6 m、A-8 m、A-10 m，以此類推。於實驗室配置不同濃度的鹽水，以導電度計量測其準確導電度值約為 600、800、1000、2000、4000 及 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之水溶液，以三用電表分別量測五組共 25 條自製導電度電束的電阻與實驗室導電度計進行律定，兩者的關係如圖 5-1 至圖 5-3 所示，兩者之間為線性關係，其斜率約介於 1.38 至 3.94 之間，各測線的 R^2 皆在 0.9 至 0.99 以上，說明自製導電度計能有一定的準確性與敏感性可用於感測地下水中導電度變化引致電阻的變化情形。

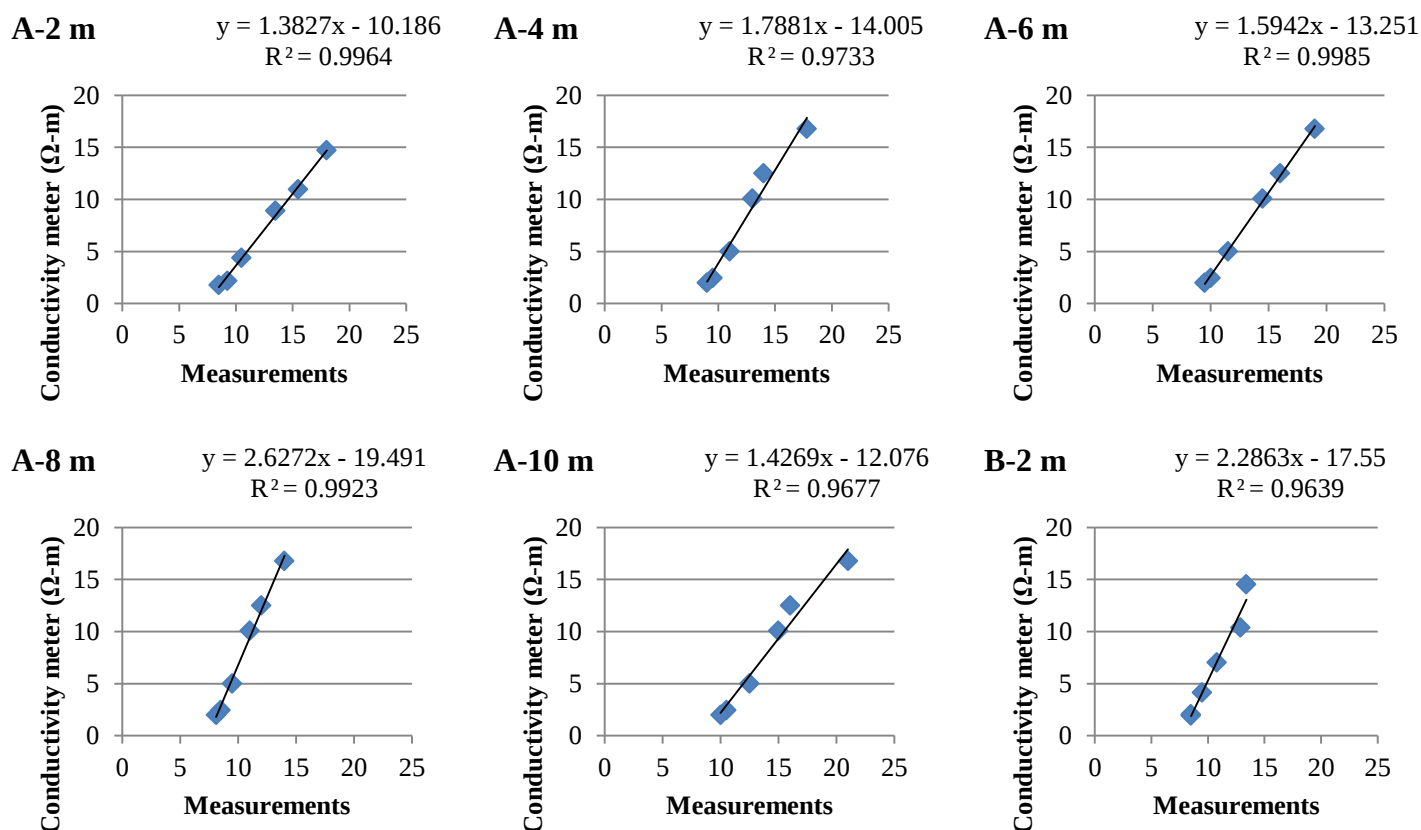


圖 5-1、自製導電度計之三用電表電阻讀值與導電度計律定結果(1/3)

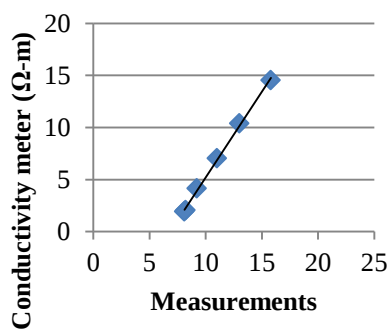
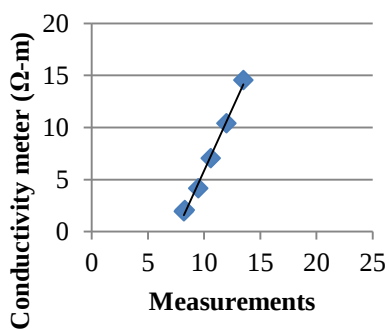
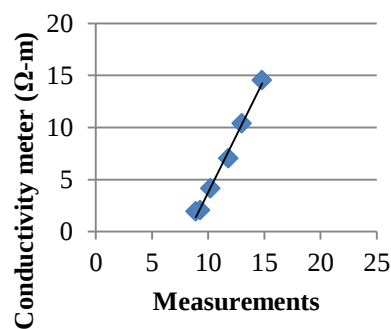
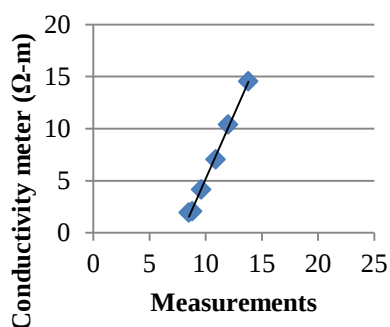
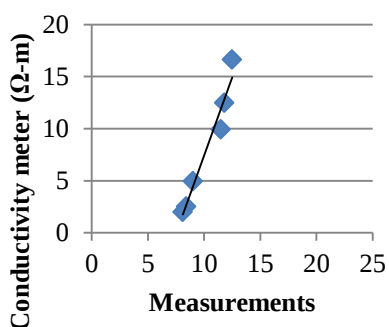
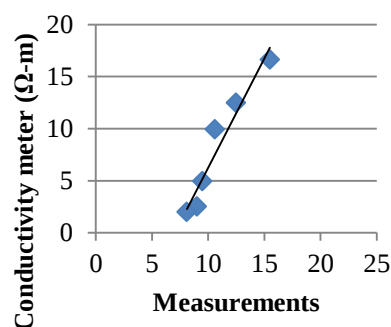
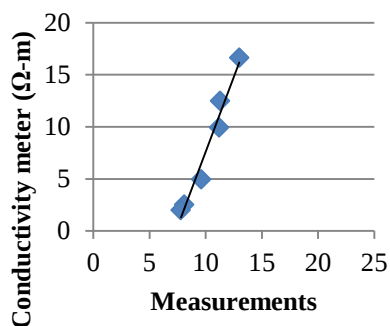
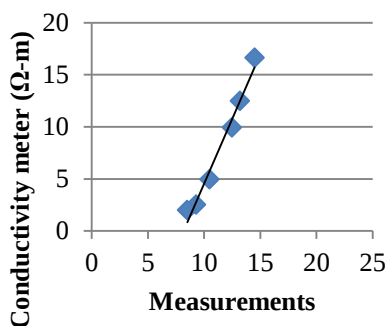
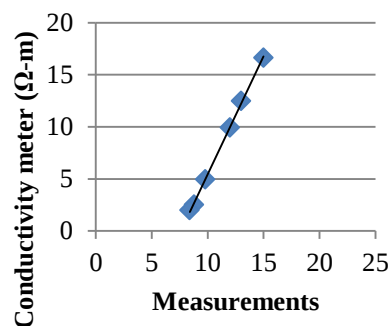
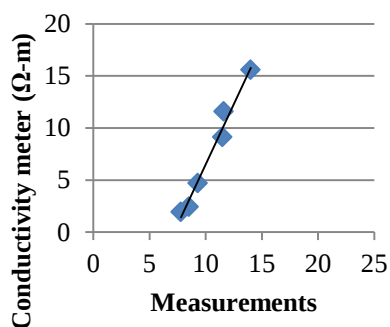
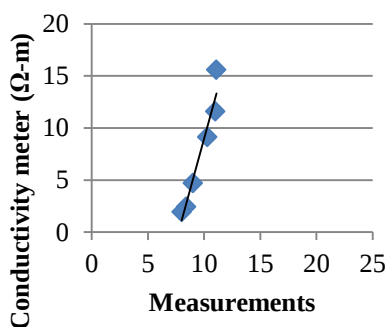
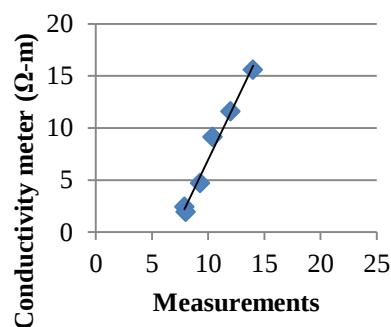
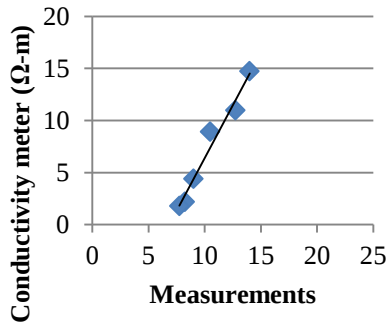
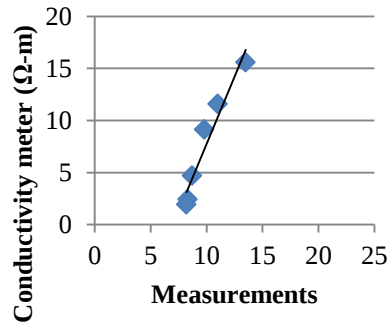
B-4 m $y = 1.6442x - 11.21$
 $R^2 = 0.998$ **B-6 m** $y = 2.3709x - 17.854$
 $R^2 = 0.9943$ **B-8 m** $y = 2.1772x - 17.99$
 $R^2 = 0.9929$ **B-10 m** $y = 2.4469x - 19.253$
 $R^2 = 0.9965$ **C-2 m** $y = 2.9883x - 22.45$
 $R^2 = 0.9572$ **C-4 m** $y = 2.0922x - 14.655$
 $R^2 = 0.9373$ **C-6 m** $y = 2.859x - 20.986$
 $R^2 = 0.9677$ **C-8 m** $y = 2.4787x - 20.218$
 $R^2 = 0.9789$ **C-10 m** $y = 2.2641x - 17.202$
 $R^2 = 0.9992$ **D-2 m** $y = 2.3172x - 16.662$
 $R^2 = 0.9779$ **D-4 m** $y = 3.9372x - 30.377$
 $R^2 = 0.9406$ **D-6 m** $y = 2.2632x - 15.683$
 $R^2 = 0.9829$ 

圖 5-2、自製導電度計之三用電表電阻讀值與導電度計律定結果(2/3)

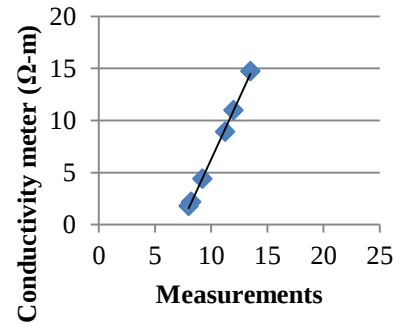
D-8 m $y = 2.0289x - 13.894$
 $R^2 = 0.9724$



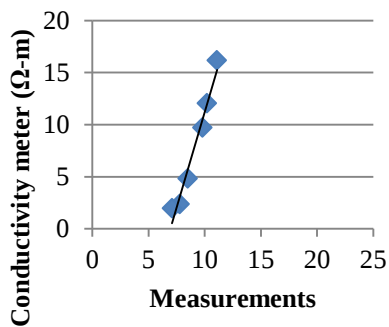
D-10 m $y = 2.5802x - 18.035$
 $R^2 = 0.9401$



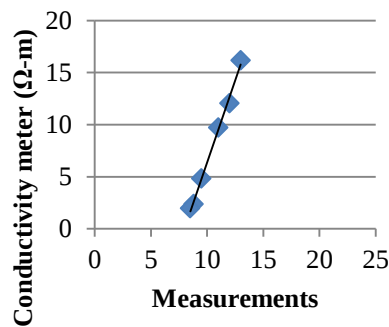
E-2 m $y = 2.3487x - 17.212$
 $R^2 = 0.9986$



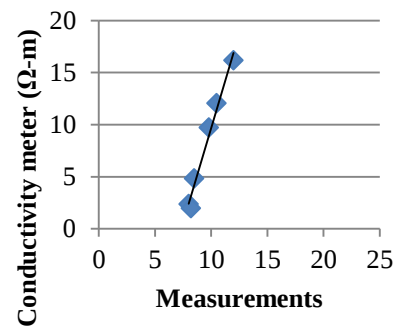
E-4 m $y = 3.6807x - 25.591$
 $R^2 = 0.9715$



E-6 m $y = 3.1319x - 24.938$
 $R^2 = 0.9958$



E-8 m $y = 3.6161x - 26.511$
 $R^2 = 0.9801$



E-10 m $y = 3.5985x - 25.444$
 $R^2 = 0.9844$

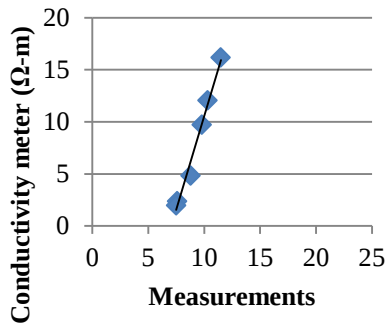


圖 5-3、自製導電度計之三用電表電阻讀值與導電度計律定結果(3/3)

5.2 示蹤劑試驗與地電阻試驗

本研究共進行六場地電阻實場試驗，每次試驗皆根據前次施作經驗與結果進行地電阻纜線設置的修正調整，期能獲得更佳的實驗數據。實場試驗之地下水流場以雙井抽水或單井抽水達到地下水水位穩定後，先以地電阻測量地下水電阻背景值，再選定單一口井注入鹽水示蹤劑後，開始地電阻的連續監測。地電阻施作條件說明如後，包含抽水條件、示蹤劑條件以及地電阻佈置方式等。本研究六場地電阻實場試驗，皆在注入井周圍的監測井放入自製導電度計監測地下水不同深度下的導電度變化，以觀察鹽水示蹤劑是否有經傳輸擴散流至它口監測井，但六次試驗結果顯示，除了注入井導電度在注入過程中，可觀察到注入井地下水導電度由淺至深逐漸增加並達到穩定，然而其它口監測井地下水導電度皆無任何變化，說明示蹤劑的確有進入注入井，並充滿整個井管，由於監測井皆為 18.5 m 全開篩，應可推測示蹤劑在含水層中不同深度可隨地下水流動進行傳輸擴散現象。

5.2.1 實場試驗條件說明

本研究共進行六次抽水既地電阻試驗，依試驗場次順序編號為 No. 1 至 No. 6，試驗開始與結束時間以及示蹤劑注入與停止時間彙整於表 5- 1。六次試驗的監測時間隨計畫執行過程進行調整，分別為 4、6、8、8、22、24 小時。由於示蹤劑注入流速不能太快，避免注入井水位過高，高於原本穩態的地下水位過多，導致示蹤劑大量流入不飽和層，而未順利地進入飽和含水層中。此外，為避免影響對地下水水質產生影響，鹽水示蹤劑的注入體積不能太多，且根據砂箱試驗經驗，注入濃度亦不能過高，否則示蹤劑密度過大造成下沉。前兩次試驗示蹤劑體積為 100 L，之後改為 250 L，受限於含水層水力傳導速度影響，示蹤劑注入時間無法過快，且注入井地下水位亦需要維持在固定的水位高程，故注入總時間約為 1 至 2 小時，平均注入流率約為 0.03 L/s 至 0.07 L/s。

表 5- 1、實場試驗地電阻施測時間

試驗場次	監測時間 (hr)	示蹤劑體積(L)	示蹤劑導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	示蹤劑注入時間	地電阻測量組數
No. 1	5	100	5,000	2	5 × 5
No. 2	5	100	5,000	2	8 × 5
No. 3	8	250	5,000	2	8 × 5
No. 4	8	250	10,000	2	6 × 3
No. 5	23	250	5,000	2	11 × 2
No. 6	21	250	25,000	2	10 × 2

本研究六次試驗的天氣狀況以及抽水井與注入井編號表 5- 2。除了第一次試驗天氣有飄雨的情形外，為了試驗安全以及壁面地表積水等影響抽水或地電阻試驗，實驗皆在晴天或無下雨的天氣進行。地下水流場以抽水進行人為流場的建立，除了第三次試驗係以一口抽水井搭配一口注入井持續將抽水注入，以建立較高的地下水水位洩降條件，其餘五次試驗皆以兩口抽水井進行，以及一口示蹤劑注入井。

表 5- 2、實場試驗抽水井及注入井條件

試驗場次	天氣狀況	抽水井編號	抽水量(CMD)	注入井編號
No. 1	飄雨	BH03 及 BH11	11~11.5	BH10
No. 2	晴天	BH05 及 BH11	11~11.5	BH04
No. 3	晴天	BH11	3.6	BH04
No. 4	晴天	BH06 及 BH11	11~11.5	BH07
No. 5	晴天	BH10 及 BH07	3~4	BH02
No. 6	晴天	BH10 及 BH04	3~4	BH11

本研究六次地電阻試驗皆以 Dipole-dipole 電極排列法施測，放電時間為 1 秒，電極間距固定為 1 m，測線數量與測線間距隨計畫執行過程進行調整，測線編號主要依照距離注入井距離依序編號為 Line 1 到 5 注入井相對於測線電極位置等資訊彙整於表 5- 3，六場次的測線設置的詳細情形以及穩態地下水流場分佈說明如後：

表 5- 3、實場試驗地電阻施測條件彙整

試驗場次	測線數量	測線設置方式	測線間距	電極數量	電極間距	注入井相對位置
No. 1	5	平行注入井與抽水井連線	1 m	16 × 5	1 m	介於 Line 3 的第 7 與第 8 根電極間。
No. 2	5	介於注入井與抽水井之間	0.5 m	16 × 5	1 m	介於 Line 1 與 Line 2 的第 7 與第 8 根電極間。
No. 3	5	介於注入井與抽水井之間	0.5 m	16 × 5	1 m	介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間。
No. 4	3	介於注入井與抽水井之間	0.5 m	32 × 2 及 16 × 2	1 m 及 2 m	介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間。
No. 5	1+1	注入井與抽水井連線上	重疊	16 × 1	2 m	介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間。
No. 6	1+1	注入井與抽水井連線上	重疊	32 × 2	1 m	介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間。

I. 地電阻測線設置說明

由於地電阻測線資料點為倒三角形分佈，因此測線兩端的資料數目會最少，且測深最淺，而愈往測線中心移動，資料數目會愈多，探測範圍會由淺逐漸增加至愈深。因此將測線中心設置於注入井位置，預期能有較多的資料數目。

試驗 No. 1 結果發現，在五小時內的地電阻間測值，測線 Line 1、Line 4 和 Line 5 皆無感測到地下水電阻(導電度)有明顯的變化，因此評估測線間距 1 m 的距離過大，示蹤劑在短時間內的傳輸擴散應該無法傳輸這麼遠的距離。因此於試驗 No. 2 將測線的間距調整為 0.5 m，由於五測線設置方式電極間距為 1 m，若要捕捉示蹤劑造成的電阻變化，根據去年計畫砂箱試驗經驗，表示示蹤劑至少需要在測線方向上土壤地下水中移動 1 m 以上，因此，改變試驗 No. 2 測線設置方式，將測線垂直預估的流場方向(以注入井與抽水井連線作推估)，預期示蹤劑注入監測井後，於上游 Line 1 和 Line 2 測線中心會造成地下水電阻(導電度)的變化，接著隨流場移動往 Line 3、Line 4 和 Line 5。但結果顯示試驗 No. 2 仍未能獲得明顯的地下水導電度變化，推測可能是地下水流場流速過慢，因此在試驗 No. 3 以一口抽水井抽水，並注入至另一口注入井，為產生較大的洩降，藉此提高人為流場的地下水流速，加快示蹤劑的傳輸。結果顯示仍未有明顯的電阻(導電度)變化。而試驗 No. 4 恢復雙口井抽水試驗，由於前幾次試驗未有顯著的變化，推測可能為地電阻探測深度不足，因此，試驗 No. 4 將原本電極間距 1 m，16 根電極的五測線，調整為電極間距 1 m，32 根電極，展距 31 m 的兩條測線以及電極間距 2 m，16 根電極，展距 30 m 的一條測線，希望增加探測深度，來獲得更顯著的電阻變化資訊。而施測結果仍未有。因此，試驗 No. 5 將測線方向調整為平行注入井與抽水井連線，並將兩條 32 根電極的單測線設置在同一連線上，藉由電極 Line 1-1、Line 2-1、Line 1-2、Line 2-2 交錯的方式設置，在各測線電極間距 1 m 的設置下，期望已兩測線交錯的資料點，分析 0.5 m 距離的電阻變化情形，並增加地電阻間測時間由單日跨到隔日，進行連續 24 小時的監測，期望能更明確的掌握示蹤劑造成土壤地下水電阻變化位置的移動。而試驗 No. 6 沿用與試驗 No. 5 相同的設置應用。

II. 地下水位分佈及測線配置

第一次試驗編號為 No. 1，五測線以平行注入井 BH03 與抽水井 BH11 連線的方式設置，其中 Line 3 設置於注入井與抽水井連線上，Line 1、2 及 Line 4、5 平行 Line 3，設置於其兩側，測線間距各為 1 m。五測線分別使用 16 根電極，電極間距為 1 m，各測線展距為 15 m，注入井位置介於 Line 3 的第 7 與第 8 根電極間。此種設置方式，預期示蹤劑由注入井 BH 注入後，Line 3 中心可測得最大深度的資料測點，然後示蹤劑沿著流場方向往抽水井移動，Line 3 測線下游可測得導電度隨時間的變化，而兩側測線可捕捉示蹤劑團向外為擴散造成的導電度變化。

本次地電阻試驗時天氣有飄雨的情形，流場建立以監測井 BH03 與 BH11 以 11~11.5 CMD 進行連續抽水約 48 小時後，於第三天穩定流場進行地電阻試驗，流場分布呈現於圖 5-4，可見監測井 BH03 以及 BH11 水位高程最低，分別為 43.58 m 以及 39.59 m，並以 BH11 周圍有較大的洩降梯度。示蹤劑注入點為監測井 BH10，水位高程約為 45.97 m。五測線分別編制為 Line1 至 Line5，各測線互相平行，測線 0 m 起始處為場址的東邊，末端為場址西邊，注入位置位於 Line2 與 Line3 測線中心。

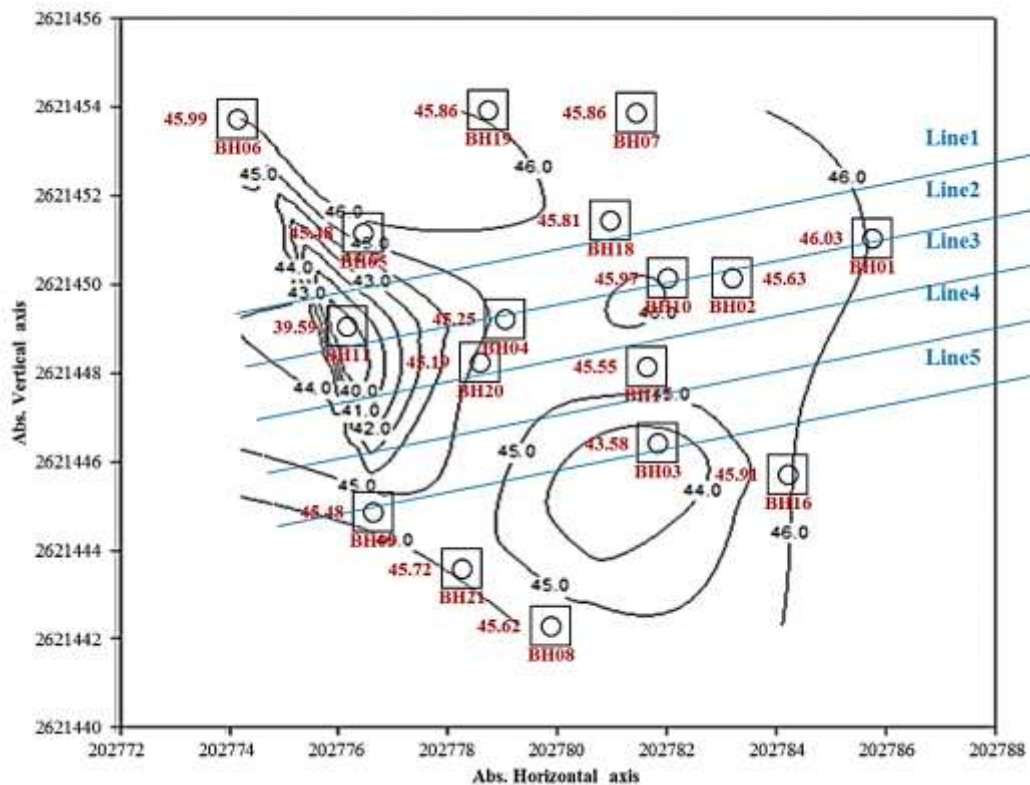


圖 5-4、第一次試驗地下水流場分佈情形與測線配置

第二次試驗編號為 No. 2，五測線以改以垂直注入井 BH04 與抽水井 BH11 連線的方式設置，以測線間距 0.5 m 方式依序設置 Line 1 至 Line 5，最接近注入井 BH04 的上游及下游 0.5 m 分別設置 Line 1 及 Line 2，最接近抽水井 BH11 則設置為 Line 5。五測線分別使用 16 根電極，電極間距為 1 m，各測線展距為 15 m，Line 1 至 Line 5 測線中心在注入井與抽水井連線上，注入井位置介於 Line 1 與 Line 2 的第 7 與第 8 根電極間。此種設置方式，預期示蹤劑由注入井注入後，隨流場向抽水井 BH11 移動，上游的 Line 1 可作為參考背景，示蹤劑應先由 Line 2 感測到，再隨時間移動至 Line 3、Line 4 及 Line 5，各測線間距 0.5 m，預期示蹤劑每移動 0.5 m，下游的測線可依序監測到地下水電阻的變化，來推估地下水流速及流向。

流場建立以監測井 BH05 與 BH11 以 11~11.5 CMD 進行連續抽水約 48 小時後，於第三天穩定流場進行地電阻試驗，流場分布呈現於圖 5- 4，可見監測井 BH05 以及 BH11 水位高程最低，分別為 45.82 m 以及 38.3 m，並以 BH11 周圍有較大的洩降梯度。示蹤劑注入點為監測井 BH04，水位高程約為 44.95 m。五測線分別編制為 Line 1 至 Line 5，各測線互相平行，測線 0 m 起始處為場址的西南邊，末端向東北邊延伸，注入位置位於 Line 1 與 Line 2 測線中心。

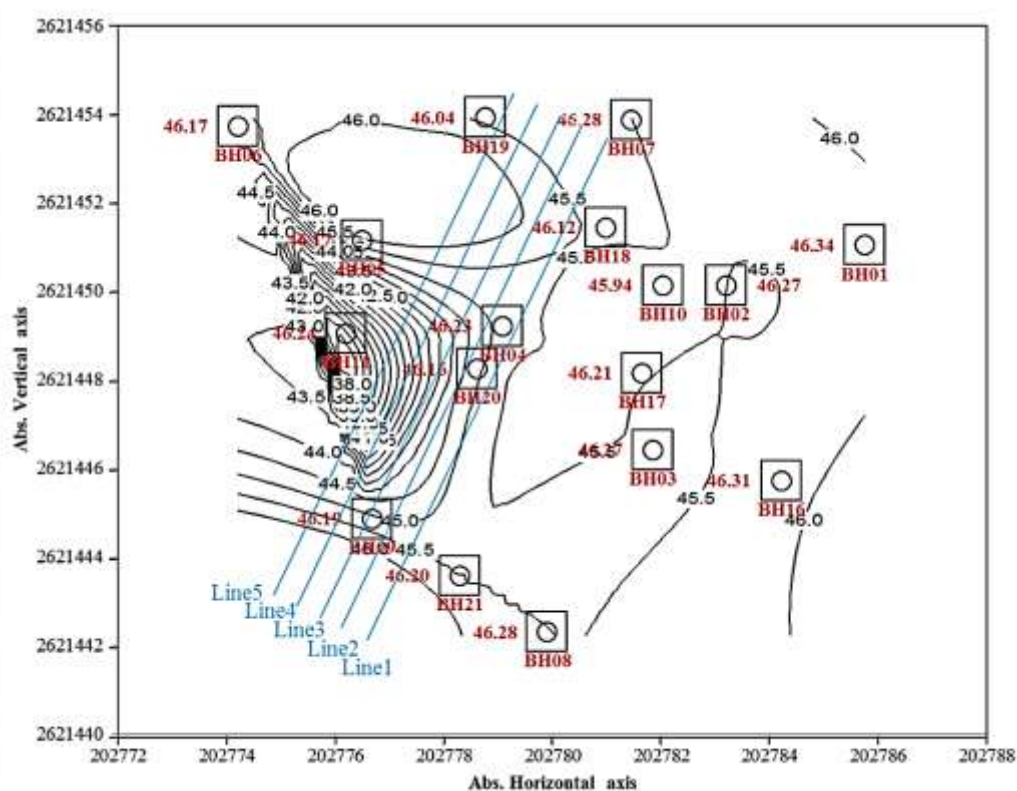


圖 5- 5、第二次試驗地下水流場分佈情形與測線配置

第三次試驗編號為 No. 3，五測線設置方式與 No. 2 類似，以垂直注入井 BH04 與抽水井 BH11 連線的方式設置，以測線間距 0.5 m 方式依序設置 Line 1 至 Line 5，以注入井 BH04 的下游設置為 Line 1，最接近抽水井 BH11 則設置為 Line 5。五測線分別使用 16 根電極，電極間距為 1 m，各測線展距為 15 m，注入井位置介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間。此種設置方式，預期示蹤劑由注入井注入後，隨流場向抽水井 BH11 移動，示蹤劑應先由 Line 1 感測到，再隨時間移動至 Line 3、Line 4 及 Line 5，各測線間距 0.5 m，預期示蹤劑每移動 0.5 m，下游的測線可依序監測到地下水電阻的變化，來推估地下水流速及流向。

流場建立以監測井 BH11 以 3.6 CMD 進行連續抽水，約 48 小時後，於第三天穩定流場進行地電阻試驗，並將抽出來的地下水以連續注入的方式注入 BH04，維持 BH04 有較高的水位高程，增加兩井間的洩降梯度。流場分布呈現於圖 5-6，可見監測井 BH11 水位高程最低，BH04 最高，分別為 44.63 m 以及 47.61 m。流場水位穩定後，將連續注入 BH04 的地下水調整為 250L 的示蹤劑注入，維持原本的注入水位高程直到注入完成再調整回地下水注入 BH04。五測線分別編制為 Line 1 至 Line 5，各測線互相平行，測線 0 m 起始處為場址的西南邊，末端向東北邊延伸，注入位置位於 Line 1 測線中心。

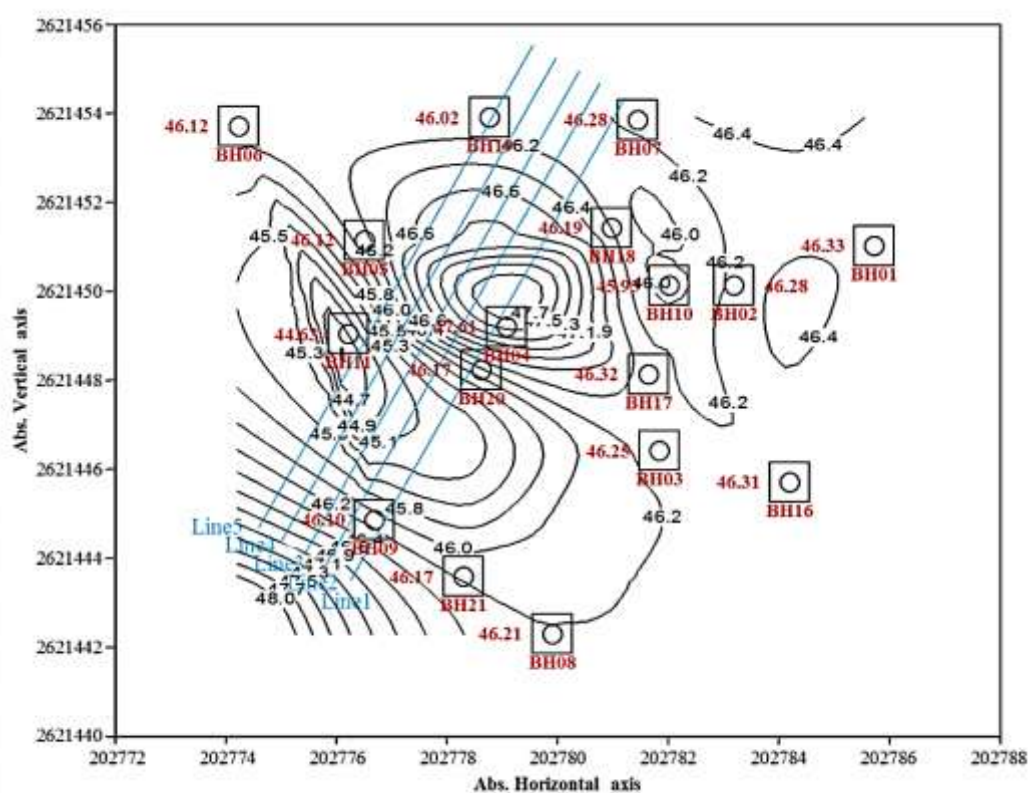


圖 5-6、第三次試驗地下水流場分佈情形與測線配置

第四次試驗編號為 No. 4，三測線設置方式仍以垂直注入井 BH07 與抽水井 BH11 連線的方式設置，以測線間距 0.5 m 方式依序設置 Line 1 至 Line 3，以注入井 BH07 下游設置為 Line 1，下游 0.5 m 及 1 m 分別設置 Line 2 及 Line 3。三測線的 Line 1 及 Line2 的電極數量為 32 根電極，電極間距為 1 m，Line 3 的電極數量為 16 根電極，電極間距為 2 m。Line 1 及 Line2 的測線展距為 31 m，Line 3 的測線展距為 30 m。注入井位置介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間。此種設置方式，預期示蹤劑由注入井注入後，隨流場向抽水井 BH11 移動，示蹤劑應先由 Line 1 感測到，再隨時間移動至 Line 2、Line 3，各測線間距 0.5 m，預期示蹤劑每移動 0.5 m，下游的測線可依序監測到地下水電阻的變化，來推估地下水流速及流向。

流場建立以監測井 BH06 與 BH11 以 11~11.5 CMD 進行連續抽水約 48 小時後，於第三天穩定流場進行地電阻試驗，流場分布呈現於圖 5- 7，可見監測井 BH06 以及 BH11 水位高程最低，分別為 41.31 m 以及 38.71 m，並以 BH11 周圍有較大的洩降梯度。示蹤劑注入點為監測井 BH07，水位高程約為 45.13 m。三測線分別編制為 Line 1 至 Line 3，各測線互相平行，測線 0 m 起始處為場址的西邊，末端向東南邊延伸，注入位置位於 Line 1 測線中心。

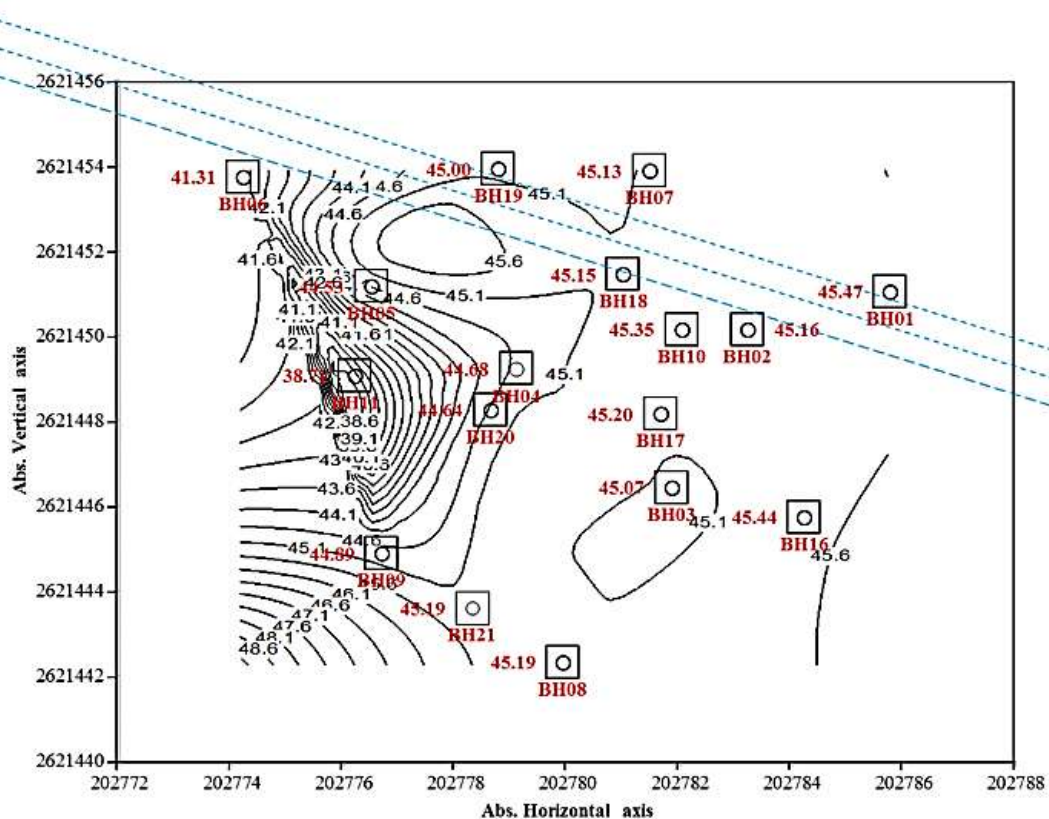


圖 5- 7、第四次試驗地下水流場分佈情形與測線配置

第五次試驗編號為 No. 5，單測線設置方式以平行注入井 BH02 與抽水井 BH10 連線的方式設置，Line 1 與 Line 2 設置於注入井與抽水井連線，兩測線 Line 1 及 Line 2 的電極數量皆為 32 根電極，電極間距為 1 m。兩測線電極以交錯方式設置於同一水平線上，Line 1 第 1 根電極設置後，下游 0.5 m 處設置 Line 2 的第 1 根電極，再下游 0.5 m 處設置 Line 1 的第 2 根電極，接著設置 Line 2 的第 2 根電極，以此類推。Line 1 及 Line 2 的測線展距皆為 31 m。注入井位置介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間以及 Line 2 的第 8 根電極旁。此種設置方式，預期示蹤劑由注入井注入後，隨流場向抽水井 BH10 移動，示蹤劑應先由 Line 1 與 Line 2 的中心位置感測到，再隨時間向下游移動，電極間距以 0.5 m 兩測線交錯設置，預期示蹤劑每移動 0.5 m，測線下游可依序監測到地下水電阻的變化，來推估地下水流速。

流場建立以監測井 BH07 與 BH10 以 3~4 CMD 進行連續抽水約 48 小時後，於第三天穩定流場進行地電阻試驗，流場分布呈現於圖 5- 8，可見監測井 BH07 以及 BH10 水位高程最低，分別為 44.52 m 以及 43.48 m，並以 BH10 周圍有較大的洩降梯度。示蹤劑注入點為監測井 BH02，水位高程約為 46.1 m。兩單測線互相重疊，測線 0 m 起始處為場址的東邊，末端向西北邊延伸，注入位置位於 Line 1 及 Line 2 測線中心。

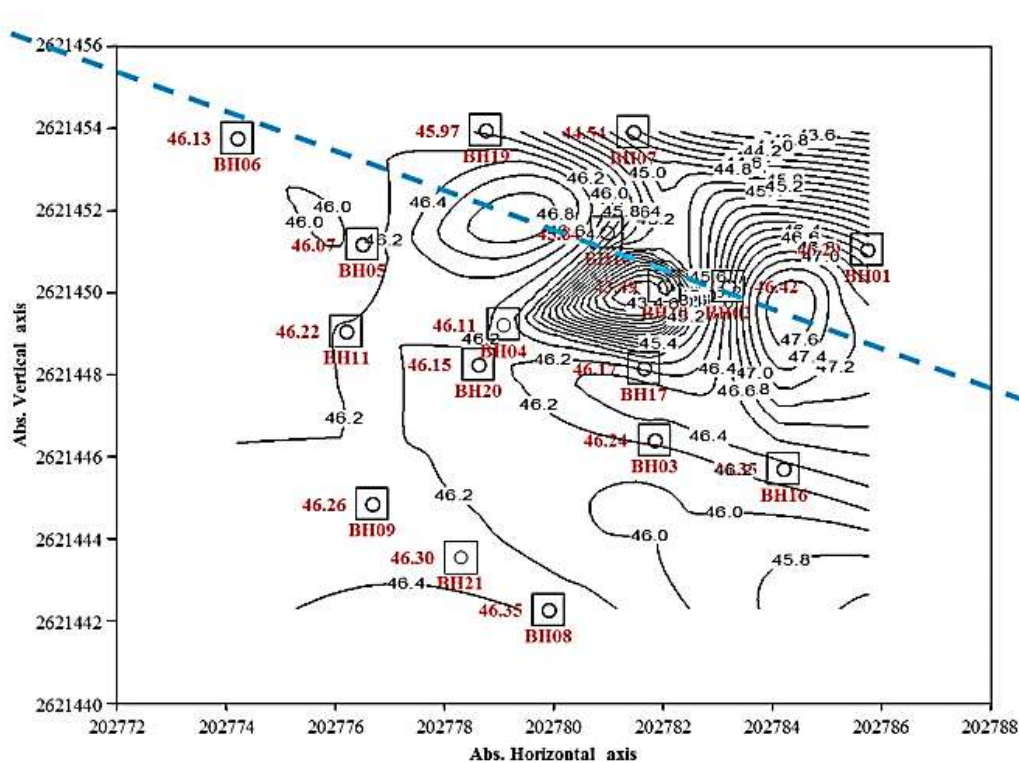


圖 5- 8、第五次試驗地下水流場分佈情形與測線配置

第六次試驗編號為 No. 6，單測線設置方式比照 No. 5，以平行注入井 BH11 與抽水井 BH04 連線的方式設置，Line 1 與 Line 2 設置於注入井與抽水井連線上，兩測線 Line 1 及 Line 2 的電極數量皆為 32 根電極，電極間距為 1 m。兩測線電極以交錯方式設置於同一水平線上，Line 1 第 1 根電極設置後，下游 0.5 m 處設置 Line 2 的第 1 根電極，再下游 0.5 m 處設置 Line 1 的第 2 根電極，接著設置 Line 2 的第 2 根電極，以此類推。Line 1 及 Line 2 的測線展距皆為 31 m。注入井位置介於 Line 1 的第 7 與第 8 根電極間以及 Line 2 的第 8 根電極旁。此種設置方式，預期示蹤劑由注入井注入後，隨流場向抽水井 BH04 移動，示蹤劑應先由 Line 1 與 Line 2 的中心位置感測到，再隨時間向下游移動，電極間距以 0.5 m 兩測線交錯設置，預期示蹤劑每移動 0.5 m，測線下游可依序監測到地下水電阻的變化，來推估地下水流速。

流場建立以監測井 BH04 與 BH10 以 3~4 CMD 進行連續抽水約 48 小時後，於第三天穩定流場進行地電阻試驗，流場分布呈現於圖 5- 9，可見監測井 BH04 以及 BH10 水位高程最低，分別為 41.44 m 以及 43.3 m，並以 BH10 周圍有較大的洩降梯度。示蹤劑注入點為監測井 BH11，水位高程約為 45.74 m。兩單測線互相重疊，測線 0 m 起始處為場址的西邊，末端向東邊延伸，注入位置位於 Line 1 及 Line 2 測線中心。

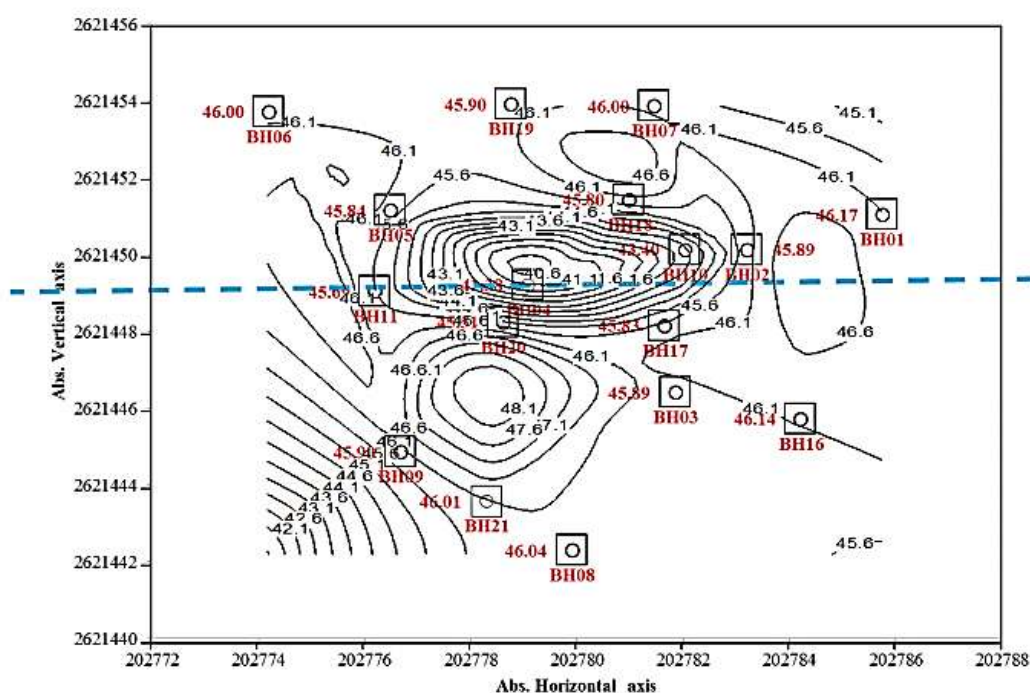


圖 5- 9、第六次試驗地下水流場分佈情形與測線配置

5.2.2 地電阻背景剖面

本節呈現注入示蹤劑前，地電阻量測地下水背景視電阻率經 EarthImager 2D/3D 軟體反演算處理所輸出的資料及地電阻剖面圖。

I. 第一次試驗(五測線)

Line1 至 Line5 這五測線的地電阻背景剖面分別呈現於圖 5- 10 至圖 5- 14。地點阻剖面上游起始處 0 m 大致為場址東邊，而 14 m 則為場址西邊。EarthImager 2D/3D 軟體反演算的深度(Depth)為擬似深度，如圖 5- 10，最深測點位置推估為 3.98 m，相較於理論深度 7 m 的一半，然而，地電阻的量測並非實際空間上的一個點的電阻值，而是三維空間相互影響的結果。圖 5- 10 至圖 5- 14 顯示，五測線剖面皆顯示在擬視深度約 0.99 m 至 1.99 m，有一水平帶狀的低電阻區塊，此與地下水水位相符。五測線以 Line 3 為中心，左右兩側水平設置，上游端為監測井 BH01，中心為注入井 BH10，下游為抽水井 BH11。

在 Line1 地電阻剖面水平方向約 4 m 至 6 m，擬似深度約 1.99 m 至 3.98 m 位置，有高電阻區。而 Line2 地電阻剖面水平方向約 6 m 至 9 m，擬似深度約 1.99 m 至 3.98 m 位置，有一高電阻區。而 Line3 地電阻剖面水平方向約 6 m 至 8 m，擬似深度約 0.92 m 至 2.75 m 位置，有較小範圍的高電阻區。而 Line4 地電阻剖面除地表淺層外，並未有明顯高電阻區。Line5 地電阻剖面水平方向約 8 m 至 1 m，擬似深度約 1.99 m 至 3.98 m 位置，有較高的電阻區。

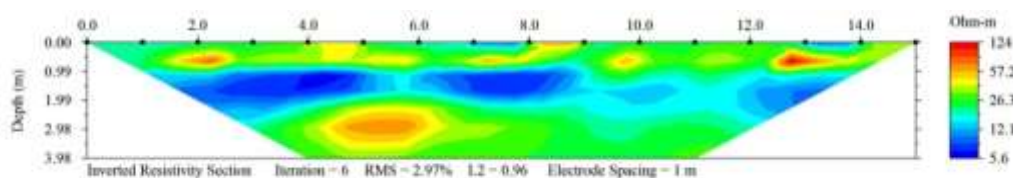


圖 5- 10、第一次試驗，Line 1 地電阻剖面

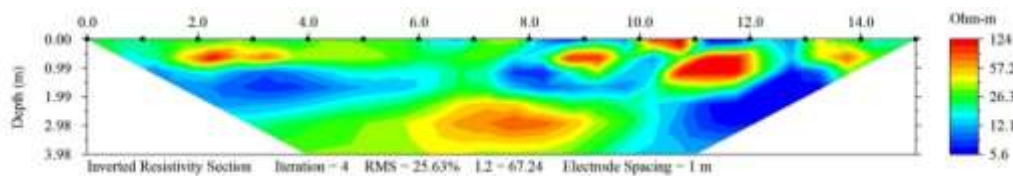


圖 5- 11、第一次試驗，Line 2 地電阻剖面

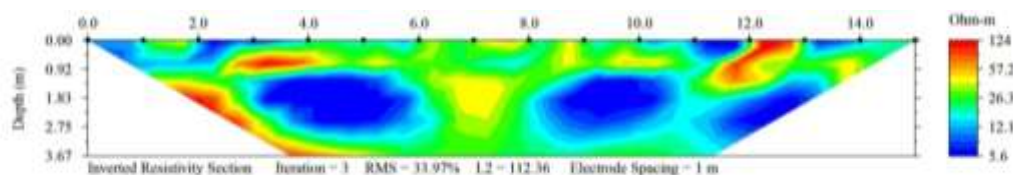


圖 5- 12、第一次試驗，Line 3 地電阻剖面

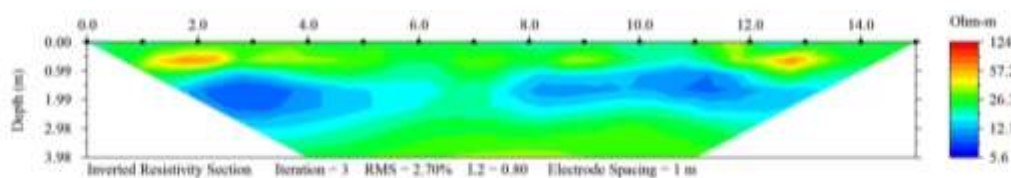


圖 5- 13、第一次試驗，Line 4 地電阻剖面

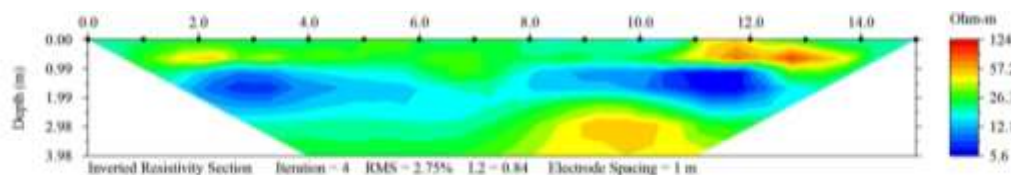


圖 5- 14、第一次試驗，Line 5 地電阻剖面

II. 第二次試驗(五測線)

五條測線互相平行，Line 1 接近注入井 BH 04，Line 4 與 Line 5 則是接近抽水井 BH 11。五測線的電阻反演算剖面圖如圖 5- 15 至圖 5- 19 所示，其電阻值高低分布相似。從 Line 1 至 Line 5 的剖面圖皆可看見擬視深度 0.99 m 至 1.99 m，水平方向有帶狀低電阻團，其深度與監測地下水位相符。另外，於水平位置 3 m 至 5 m 處，擬視深度 1.5 m 至 3.98 m、於水平位置 9 至 12 m 處，擬視深度 2 m 至 3.98 m，測得較高電阻之高電阻團。

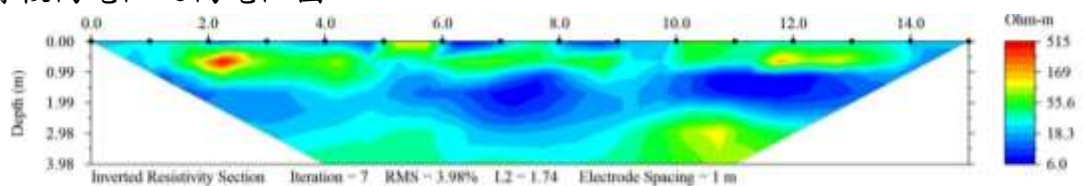


圖 5- 15、第二次試驗，Line 1 地電阻剖面

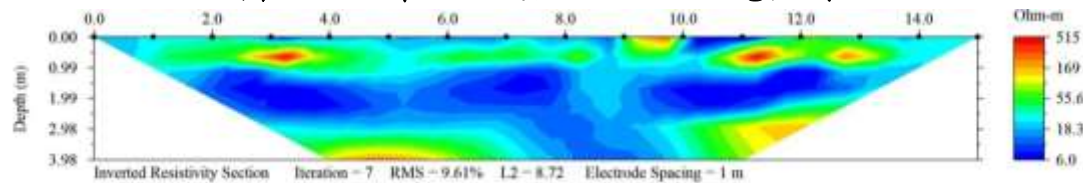


圖 5- 16、第二次試驗，Line 2 地電阻剖面

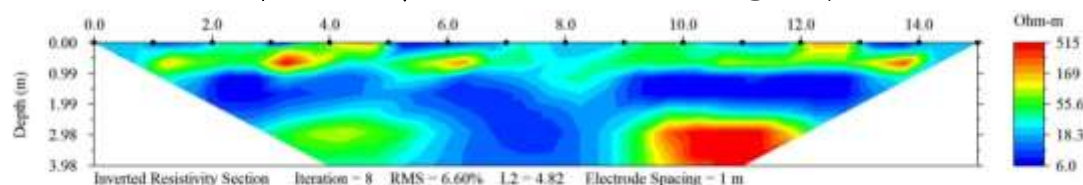


圖 5- 17、第二次試驗，Line 3 地電阻剖面

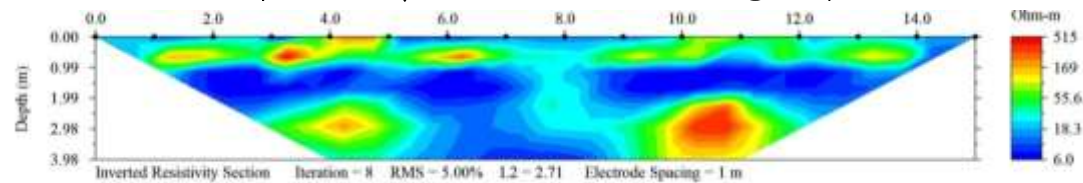


圖 5- 18、第二次試驗，Line 4 地電阻剖面

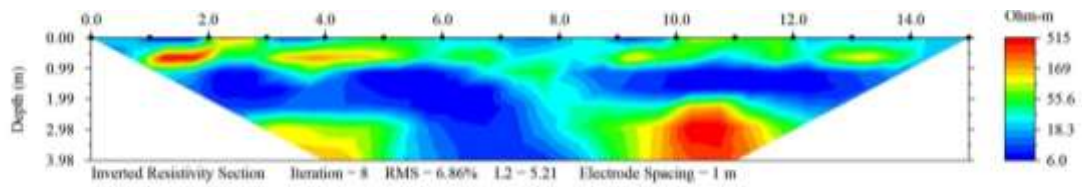


圖 5- 19、第二次試驗，Line 5 地電阻剖面

III. 第三次試驗(五測線)

Line 1 至 Line 5 這五測線的地電阻背景剖面分別呈現於圖 5- 20 至圖 5-24。地電阻剖面上游起始處 0 m 其位置大致為場址西南邊，而地電阻剖面下游處 14 m 則位於場址北邊。觀察圖 5- 20 至圖 5-24 可知其剖面主要可以分為三個水平帶狀區塊，第一區塊為擬視深度 0 m~0.99 m 的高電阻區塊；第二區塊為擬視深度 0.99 m~2.98 m 的低電阻區塊，此區的深度恰好與地下水位符合；而第三區塊為擬視深度 2.98 m~3.98 m 的高電阻區塊，其中 Line 1 及 Line 5 的高電阻區域明顯較 Line 2 至 Line 4 大，推測可能是受到兩旁監測井之影響，Line 1 受到監測井 BH 04 及 BH 20 影響，而 Line 5 受到檢測井 BH 11 影響，導致 Line 1 及 Line 5 的高電阻區塊較其他測線高。

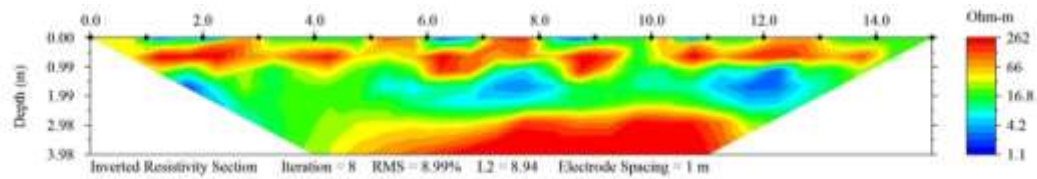


圖 5- 20、第三次試驗，Line 1 地電阻剖面

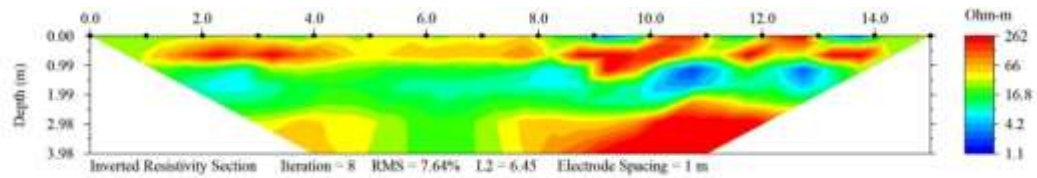


圖 5- 21、第三次試驗，Line 2 地電阻剖面

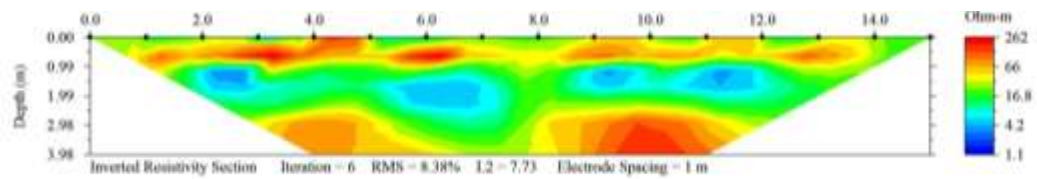


圖 5- 22、第三次試驗，Line 3 地電阻剖面

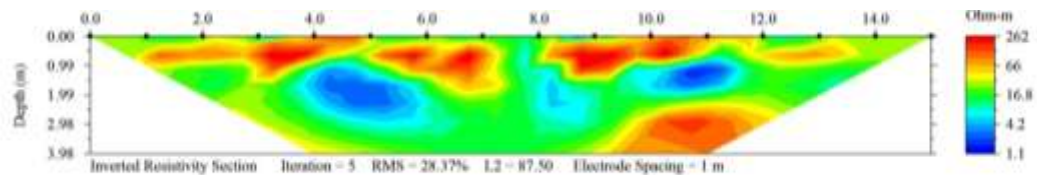


圖 5- 23、第三次試驗，Line 4 地電阻剖面

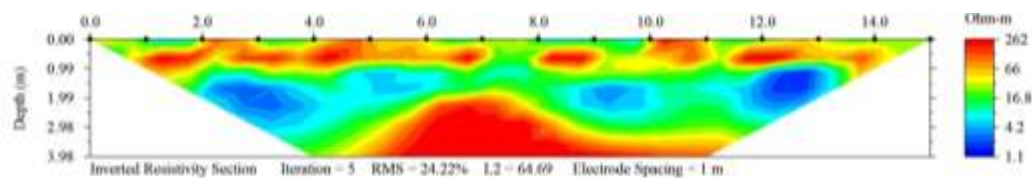


圖 5- 24、第三次試驗，Line 5 地電阻剖面

IV. 第四次試驗(三測線)

三條測線互相平行，Line 1 較上游，接近注入井 BH07，Line 2 與 Line 3 則是較下游，接近抽水井 BH11。三測線地電阻反演算剖面圖相似，分別呈現於圖 5- 25 至圖 5- 27。在 Line 1 與 Line 2 皆可見地下約 2 m 深度上下，有水平帶狀的低電阻團，此深度與監測得地下水位相符。而在 3 至 6 m 處，地下約 3 到 4 m 深度、在 12 至 18 m 處，地下約 3 m 深度以及在 23 m 處左右，地下約 3 到 4 m 深度有幾處較大的高電阻團，由於測線設置上游至下游從場址西邊延伸至東南邊，注入井相對位置在測線中心，而抽水井 BH06 及 BH11 靠近測線上游，推測上游高電阻團有可能是受到抽水井 BH06 影響導致。

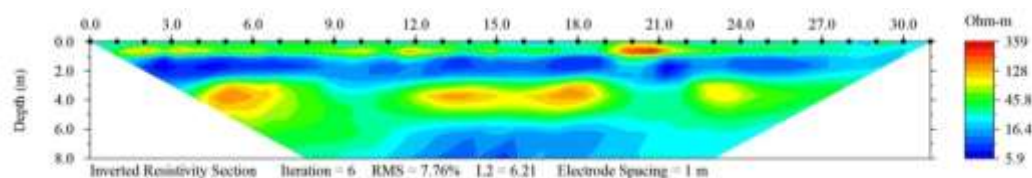


圖 5- 25、第四次試驗，Line 1 地電阻剖面

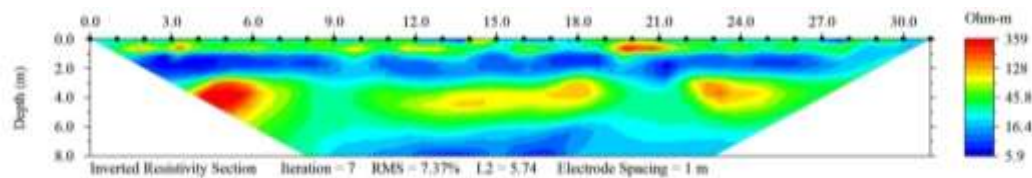


圖 5- 26、第四次試驗，Line 2 地電阻剖面

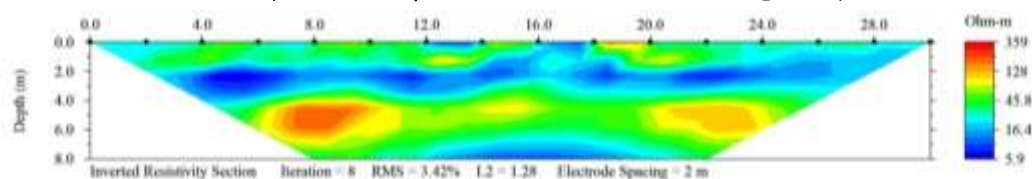


圖 5- 27、第四次試驗，Line 3 地電阻剖面

V. 第五次試驗(兩條單測線)

兩條單測線重疊，兩測線電極間距以交錯方式設置，Line 1 起始點較 Line 2 上游，兩重疊的測線地電阻反演算剖面圖相似是可預期的，分別呈現於圖 5- 28 至圖 5- 29。由 Line 1 地電阻反演算剖面圖，可見 16 至 17 m 處有一處較大的低電阻團，而 Line 2 地電阻反演算剖面圖，可見 15 至 16 m 處亦有一處較低電阻團，這也說明 Line 1 測線較 Line 2 上游的設置條件如預期地反映在地電阻反演算剖面圖。在 Line 1 與 Line 2 皆可見地下約 1.7 m 深度上下，有水平帶狀的低電阻團，此深度與監測得地下水位相符。而在 19 至 20 m 處，地下約 3.3 到 5 m 深度，有一處較大的高電阻團，推測有可能是受到抽水井 BH10 影響導致。

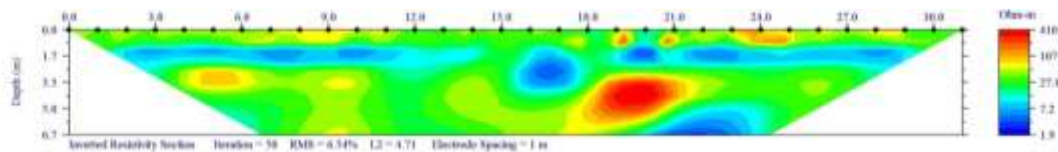


圖 5- 28、第五次試驗，Line 1 地電阻剖面

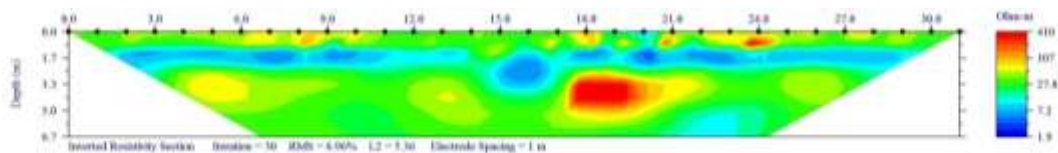


圖 5- 29、第五次試驗，Line 2 地電阻剖面

VI. 第六次試驗(兩條單測線)

兩條單測線重疊，兩測線電極間距以交錯方式設置，Line 1 起始點較 Line 2 上游，兩重疊的測線地電阻反演算剖面圖相似是可預期的，分別呈現於圖 5- 30 至圖 5- 31。由 Line 1 地電阻反演算剖面圖，可見 17 至 21 m 處有一處較大的低電阻團，而 Line 2 地電阻反演算剖面圖，可見 16 至 19 m 處亦有一處較低電阻團，這也說明 Line 1 測線較 Line 2 上游的設置條件如預期地反映在地電阻反演算剖面圖。在 Line 1 與 Line 2 皆可見地下 1 至 2 m 深度，有水平帶狀的低電阻團，此深度與監測得地下水位相符。而在 14 至 15 m 處，地下約 4 到 6 m 深度，以及 23 至 24 m 處，地下約 4 到 5 m 深度，各有一處較大的高電阻團，推測有可能是受到抽水井 BH04 及 BH10 影響導致。

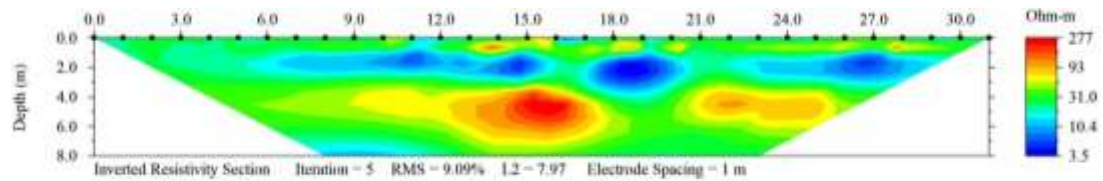


圖 5- 30、第六次試驗，Line 1 地電阻剖面

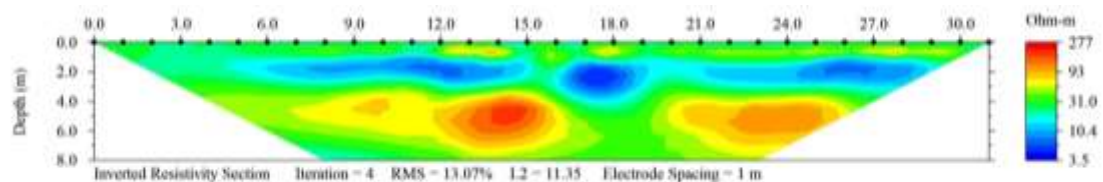


圖 5- 31、第六次試驗，Line 2 地電阻剖面

5.2.3 地電阻試驗結果分析

本節呈現地電阻原始數據經地層因子 F 值與時間差修正後，視電阻率與背景值的變化量隨時空的變化曲線圖。數據修正可參考「4.6.3 資料處理及分析」說明，圖內標記時間為示蹤劑注入後的經過時間，視電阻率與背景值之變化量以 (ΔR) 呈現，高導電度之示蹤劑的電阻較低，故造成的變化量為負值。以下就本研究六次試驗的數據結果進行分析與討論。電極間距為 1 m，16 根電極展開距為 15 m，可獲得 13 層水平方向的地電阻資料，第一層($n=1$)有 13 個資料點，理論測深為 1 m； $n=2$ 有 12 個資料點，理論測深為 1.5 m；以此類推， $n=13$ 理論測深為 7 m，而擬似測深約為理論測深的一半。32 根電極展開距為 31 m，可獲得 28 層水平方向的地電阻資料， $n=1$ 有 28 個資料點，理論測深為 1 m； $n=2$ 有 27 個資料點，理論測深為 1.5 m；以此類推， $n=28$ 理論測深為 15 m，而擬似測深約為理論測深的一半。由於試驗結果發現， n 越大(約為 $n>8$ 或以上)，測得地電阻資料較無顯著趨勢，且水平方向資料點數亦隨 n 增加而遞減。而 $n=1$ 或 2 時，其理論深度應未達監測井開篩在地下 1.5 m，故後續討論內容擷取 $n=3$ 至 5 或 $n=4$ 至 6 的資料繪圖呈現及分析。

I. 第一次地電阻五測線

注入井位置約在 Line 2 至 Line 3 的 $x=7\sim 8$ 處。圖 5-32、至圖 5-34、為 Line1 在不同測深的 ΔR 曲線，顯示 Line1 測線在 $n=3$ ， x 方向上的電阻變化量皆不顯著，最大變化量(ΔR)不超過 $-3\ \Omega\cdot m$ ，顯示示蹤劑的影響範圍應未至 Line1。

圖 5-35、至圖 5-37、為 Line2 在不同測深的 ΔR 曲線，由現場監測水位，可知水位應低於地表 2 m 以下，在 $n=3$ 發現， $x=9\sim 11$ m 處， ΔR 約有 $-9\ \Omega\cdot m$ ，此測點界進示蹤劑注入井，顯示地電阻捕捉到示蹤劑團的影響，此變化量隨著探測深度增加而有變小的趨勢。此外，在監測時間 00:21、02:05 及 03:08 下，其最大電阻峰值皆在相同水平距離處(10~11 m)，未見其有明顯移動的趨勢，顯示流場流速可能過慢，造成在地電阻施測時間內，未能解析其移動方向和距離。

圖 5-38、至圖 5-40、為 Line3 在不同測深的 ΔR 曲線，在示蹤劑注入後 5 分鐘(00:05)，水平距離 7 至 9 m 間， ΔR 約為 $-5\ \Omega\cdot m$ 至 $-10\ \Omega\cdot m$ 。當時間 01:19 時， ΔR 峰值有最大變化量約為 $-16\ \Omega\cdot m$ ，待 01:39 和 01:48， ΔR 降至約為 $-14\ \Omega\cdot m$ 。而 02:52 和 03:44， ΔR 持續降低為 $-10\ \Omega\cdot m$ 和以下，說明示蹤劑應有擴散傳輸稀釋的現象。地下水中導電度先是增加後持續降低，表示反映示蹤劑濃度增加後減少的情形。然而， ΔR 峰值如 Line2 有一樣的現象，未見其有明顯移動的趨勢，說明示蹤劑在這五小時的監測時間內，移動範圍應不超過電極間距 1 m。

最後在 04:42 的 ΔR 在水平距離 7~8 m，有 ΔR 約為 -15 $\Omega\cdot m$ 。此趨勢說明示蹤劑移動方向應是由水平距離 12 m 逐漸移向 7 m，表示附近流場方向為西向東流動，由於該點鄰近監測井 BH10，監測地下水水位高程為流場較高位置，周圍地下水位皆低於此，且距離兩口抽水井較遠，故地下水流向不是由東往西流向抽水井，而是偏向東流動的情形是可接受的，但原因尚須更多實驗數據相互驗證才能做進一步的判斷。隨著深度增加，此變化量亦有變小的趨勢。

圖 5- 41、至圖 5- 43、為 Line 4 在不同測深的 ΔR 曲線，發現 $n=3$ ，注入示蹤劑後， $t=00:13$ ， $x=7\sim 8$ 位置電阻有微量的增加 0.1 $\Omega\cdot m$ ，在 $t=01:57$ ，電阻增加量為 0.2 $\Omega\cdot m$ ，當時間 $t=03:00$ ，電阻稍微降低，與背景變化量約為 0.15 $\Omega\cdot m$ 。而整條測線皆有電阻微幅跳動的現象，變化量約為 -0.1 $\Omega\cdot m$ 至 +0.25 $\Omega\cdot m$ 。

圖 5- 44、至圖 5- 46、為 Line 5 在不同深度的 ΔR 曲線，發現 $n=3$ ，整條測線皆有電阻微幅跳動的現象，變化量約為 -0.05 $\Omega\cdot m$ 至 +0.15 $\Omega\cdot m$ 。由於 Line 4 及 Line 5 皆距離示蹤劑注入點較遠，推估為流場速度較慢，因此示蹤劑的影響範圍未至 Line4 及 Line5，故變化量不顯著。

1st_Line 1

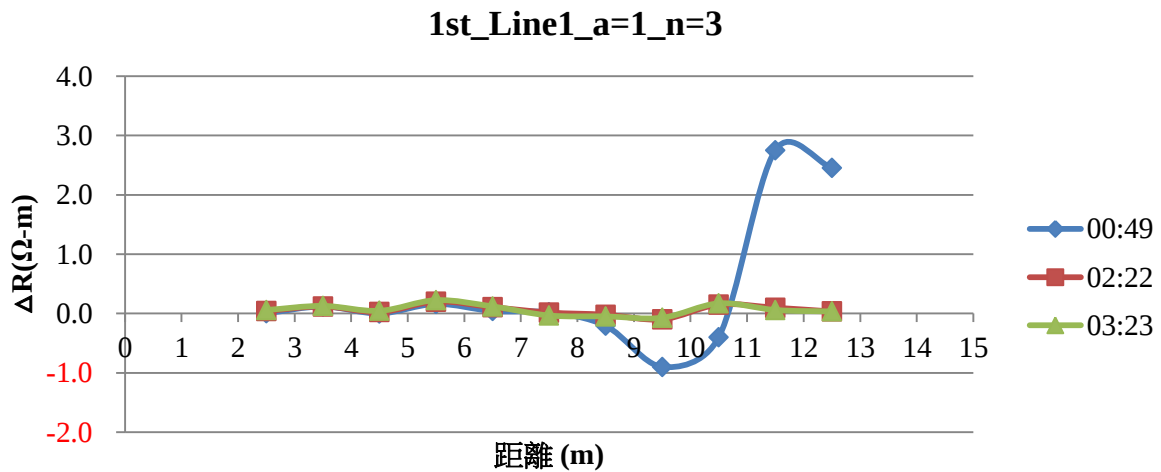


圖 5- 32、第一次試驗 Line 1 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

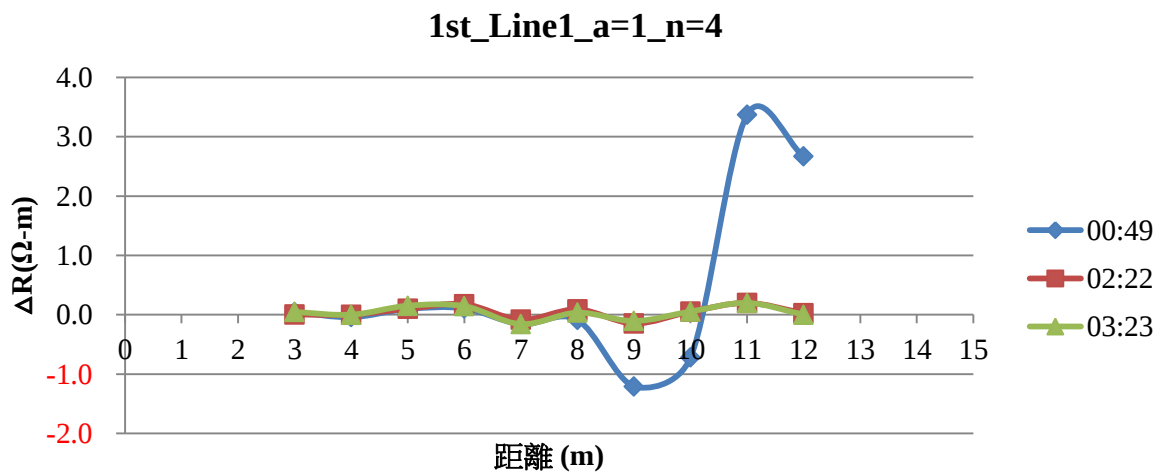


圖 5- 33、第一次試驗 Line 1 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

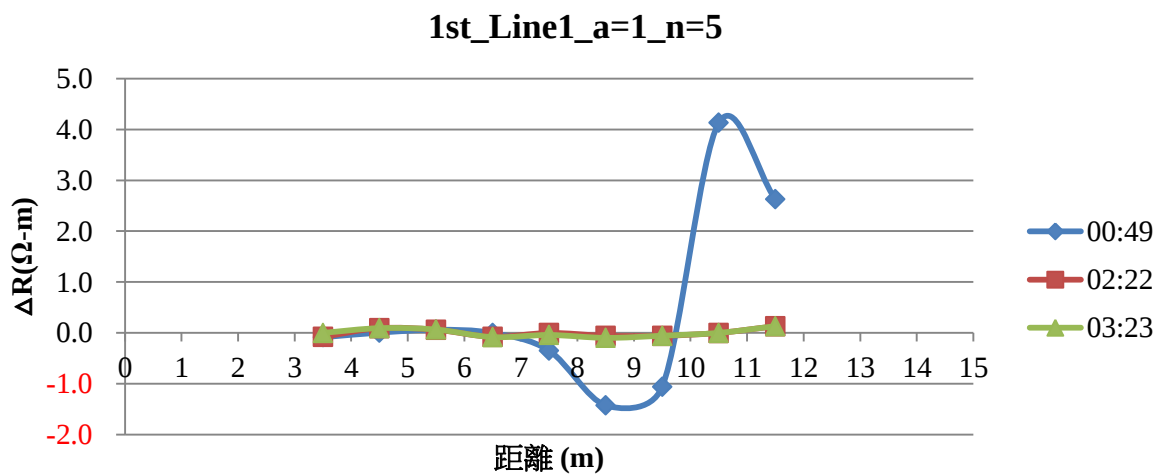


圖 5- 34、第一次試驗 Line 1 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

1st_Line 2

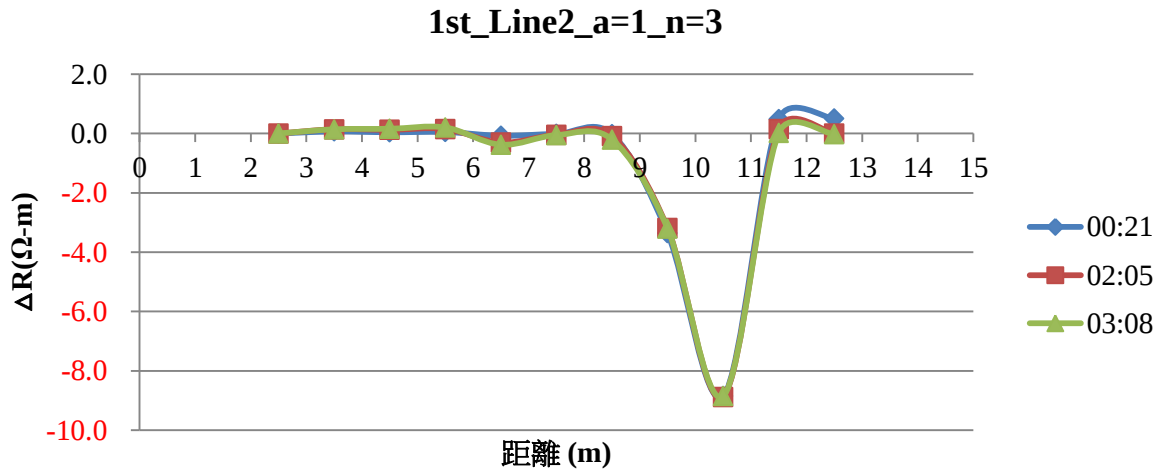


圖 5- 35、第一次試驗 Line 2 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

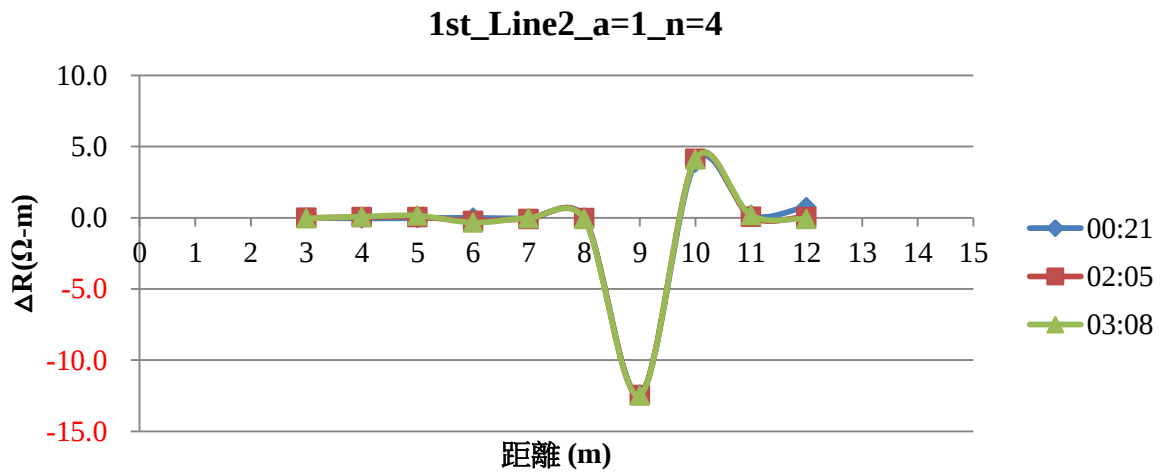


圖 5- 36、第一次試驗 Line 2 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

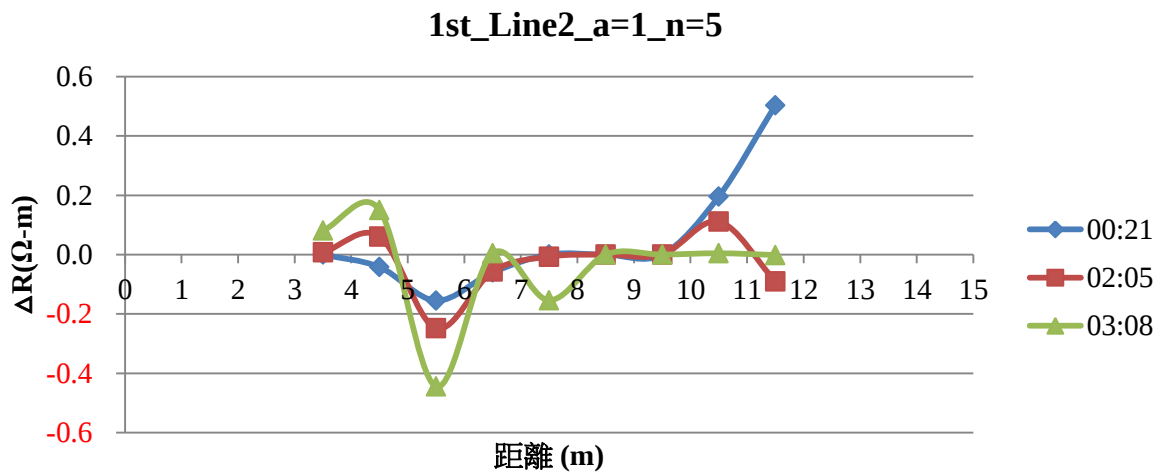


圖 5- 37、第一次試驗 Line 2 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

1st_Line 3

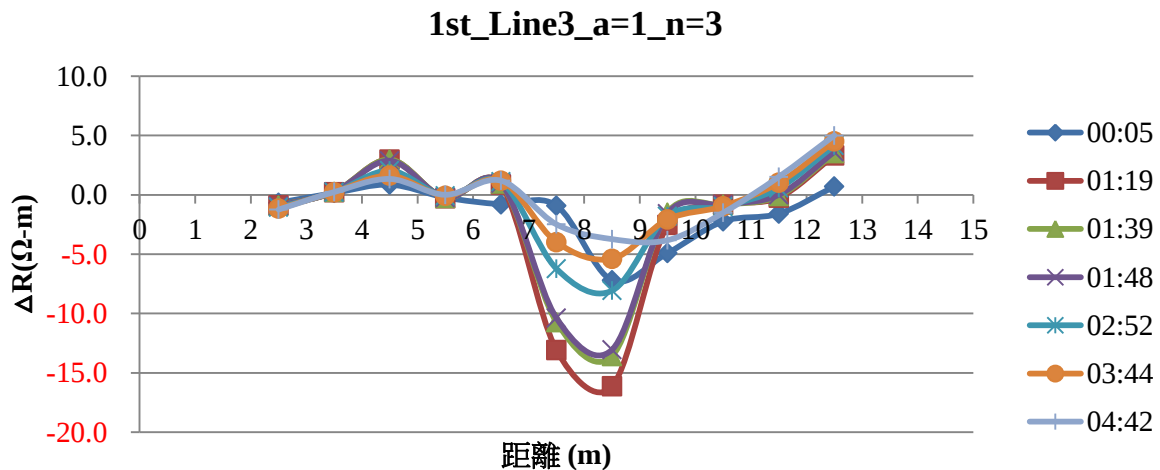


圖 5- 38、第一次試驗 Line 3 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

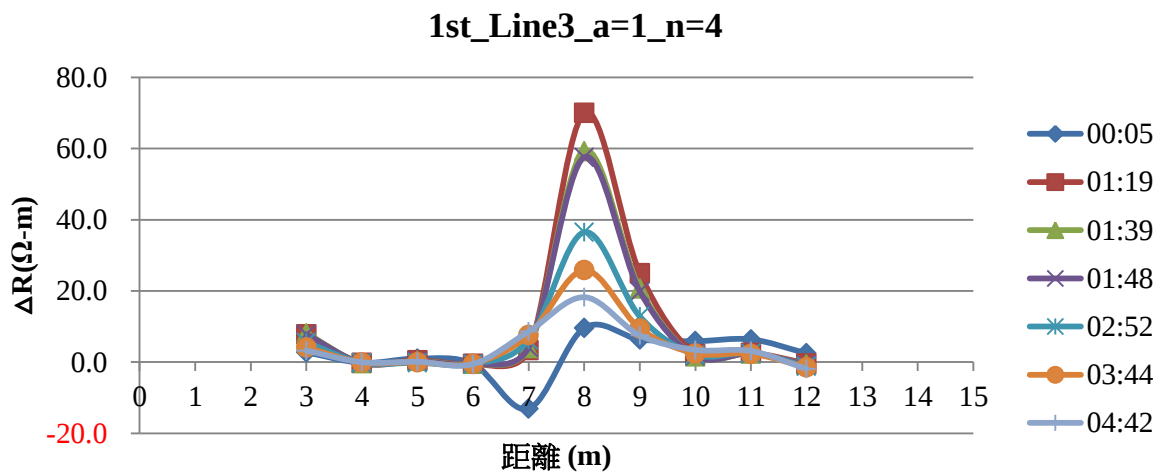


圖 5- 39、第一次試驗 Line 3 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

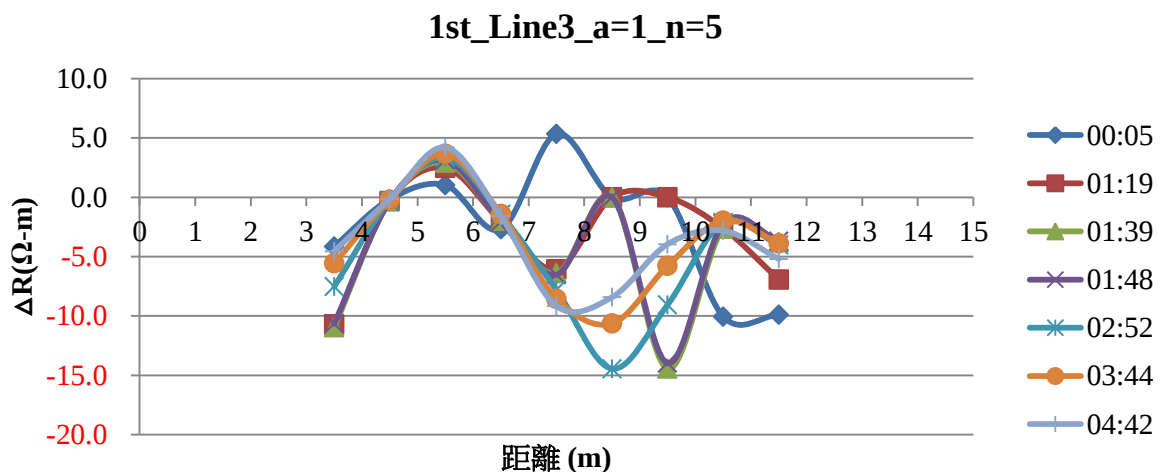


圖 5- 40、第一次試驗 Line 3 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

1st_Line 4

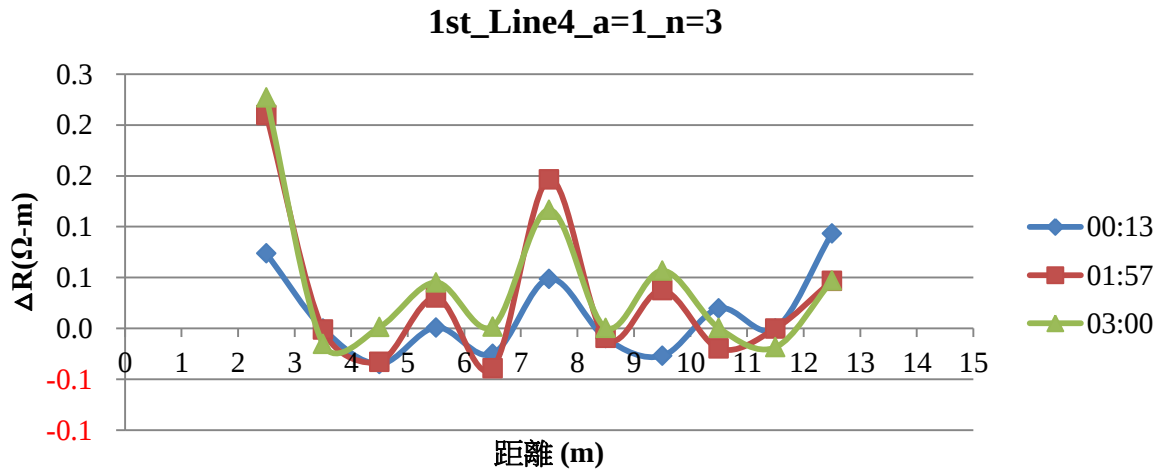


圖 5- 41、第一次試驗 Line 4 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

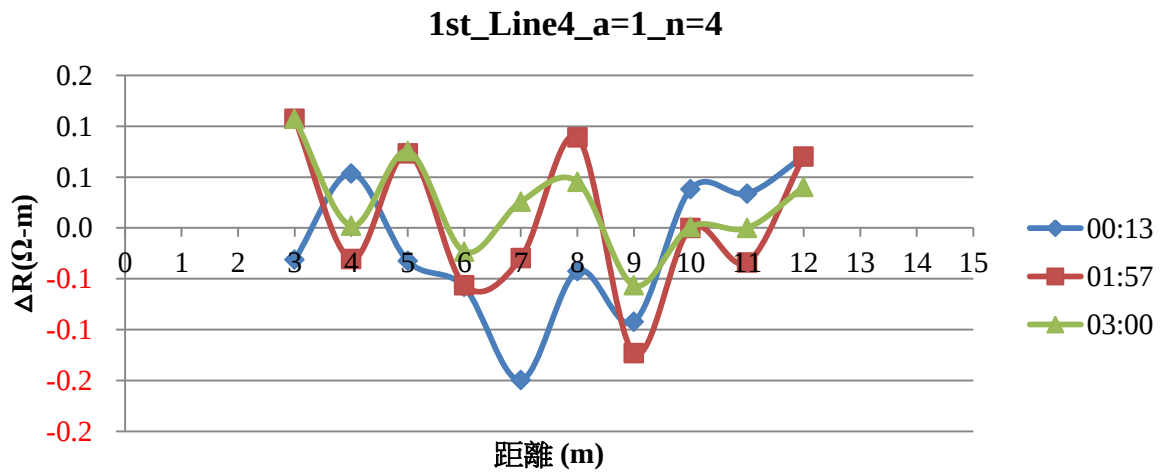


圖 5- 42、第一次試驗 Line 4 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

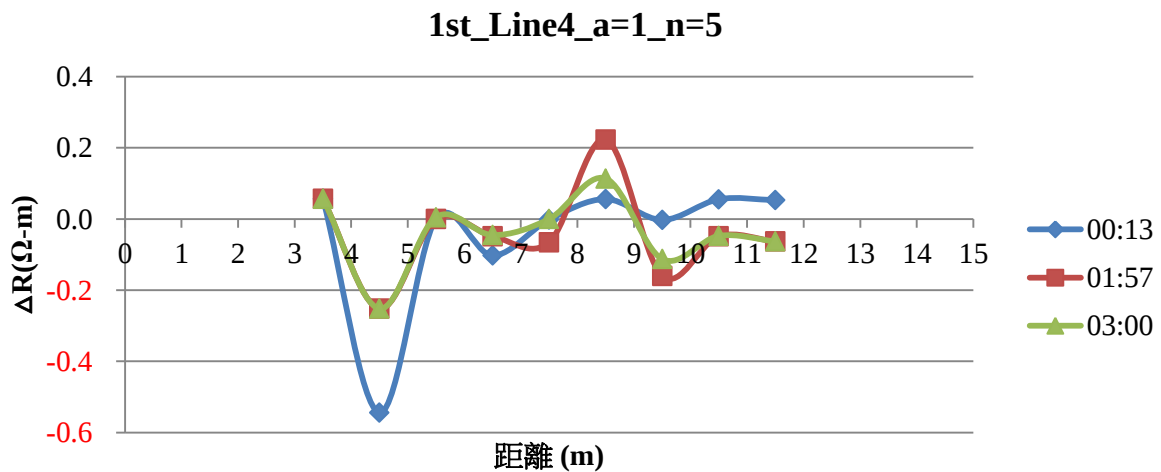


圖 5- 43、第一次試驗 Line 4 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

1st_Line 5

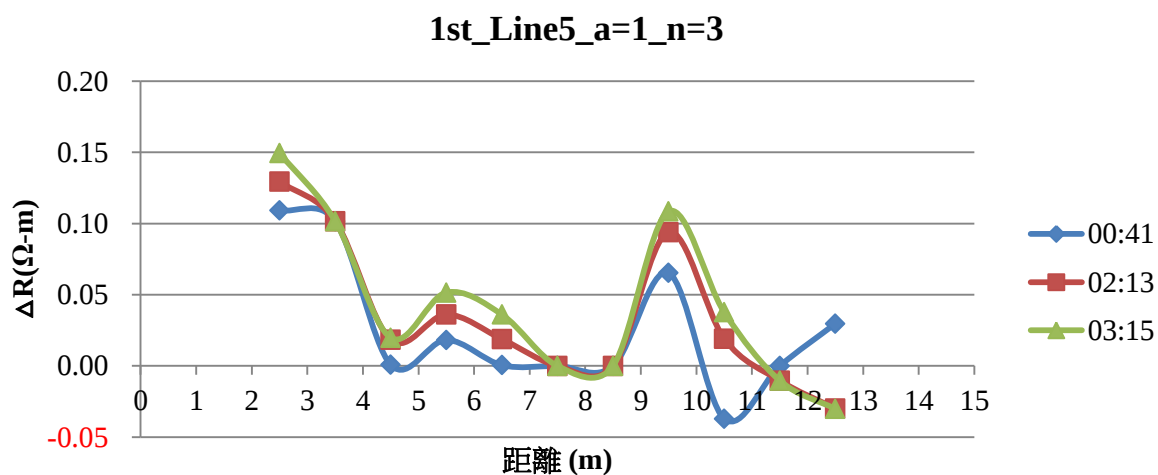


圖 5- 44、第一次試驗 Line 5 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

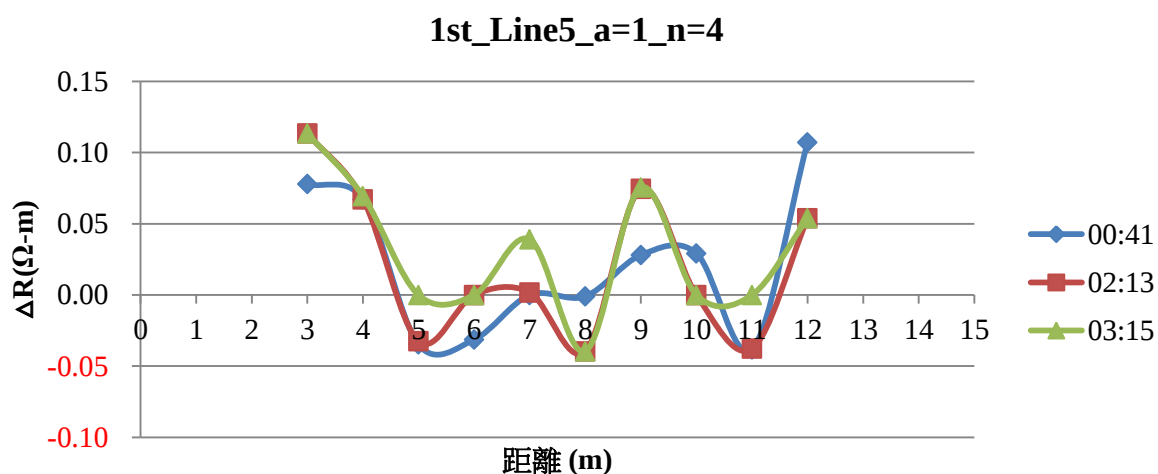


圖 5- 45、第一次試驗 Line 5 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

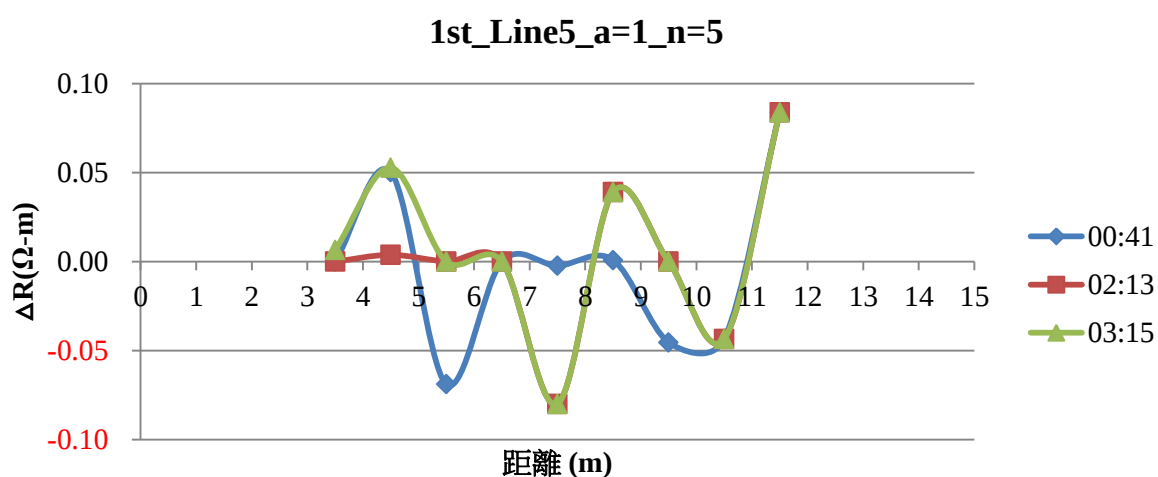


圖 5- 46、第一次試驗 Line 5 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

II. 第二次地電阻五測線

注入井之位置約位於 Line 1 與 Line 2 的 $x=7\sim 9$ 處。圖 5-47 至圖 5-49, Line 1_n=3, $x=5.5\sim 7.5$ m 及 $x=10\sim 11$ m, 有電阻下降的現象。Line 1_n=4, $x=5\sim 7$ m 及 $9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=8$ m 則發現電阻有增加的趨勢。Line 1_n=5, $x=5.5$ m 以及 10.5 m 附近, 有電阻下降的現象, 而 $x=6.5\sim 8.5$ m 則發現電阻隨時間有先減少後增加的趨勢。各層電阻率變化量約為 $-0.2\ \Omega\cdot\text{m}$ 至 $+0.3\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

圖 5-50 至圖 5-52, Line 2_n=3, $x=6\sim 7$ m 及 $8\sim 9$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=7\sim 8$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。Line 2_n=4, $x=5\sim 7$ m 及 $x=9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=7\sim 8.5$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。Line 2_n=5, $x=4.5\sim 6.5$ m 及 $x=8.5\sim 11.5$ m, 有電阻隨時間先下降後回升的現象, 而 $x=6.5\sim 8.5$ m, 則有電阻上升之現象。各層電阻率變化量約為 $-0.2\ \Omega\cdot\text{m}$ 至 $+0.5\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

圖 5-53 至圖 5-55, Line 3_n=3, $x=4\sim 5.5$ m 及 $x=8\sim 9$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=6.5\sim 8$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。Line 3_n=4, $x=4\sim 6.5$ m 及 $x=8.5\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=6.5\sim 8.5$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。Line 3_n=5, $x=3.5\sim 5.5$ m 及 $x=9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=6.5\sim 8.5$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。各層電阻率變化量約為 $-0.1\ \Omega\cdot\text{m}$ 至 $+0.4\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

圖 5-56 至圖 5-58, Line 4_n=3, $x=5\sim 6$ m 及 $x=9\sim 10$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=6\sim 9$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。Line 4_n=4, $x=4\sim 6$ m 及 $x=9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=6\sim 9$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。Line 4_n=5, $x=3.5\sim 7$ m 及 $x=9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=7\sim 9$ m, 則有電阻隨時間上升之現象。各層電阻率變化量約為 $-0.15\ \Omega\cdot\text{m}$ 至 $+0.3\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

圖 5-59 至圖 5-61, Line 5_n=3, $x=5\sim 6$ m, 有電阻隨時間下降的現象, $x=9\sim 10$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=6\sim 9$ m, 則有電阻上升之現象。Line 5_n=4, $x=5\sim 7$ m 及 $x=9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=7\sim 9$ m, 則有電阻上升之現象。Line 5_n=5, $x=4\sim 6$ m 及 $x=9\sim 11$ m, 有電阻下降的現象, 而 $x=7\sim 9$ m, 則有電阻上升之現象。各層電阻率變化量約為 $-0.5\ \Omega\cdot\text{m}$ 至 $+0.5\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

五條測線都可發現有測線中心兩側的電阻率值降低, 而中心的電阻率值增加之現象。理論上 ERT 監測到高導電度示蹤劑時, 測得之視電阻率測值會下降。但由於高導電度示蹤劑會改變地表下電流通過難易程度, 導致示蹤劑附近之電流都集中流經示蹤劑處。造成示蹤劑中心處電位差變大, 而兩旁電位差變小。又因為儀器會將電位差除以固定電流計算出視電阻率, 才會造成中心視電阻率大而兩旁視電阻率小之現象。因此此現象可以說明各測線感應到示蹤劑的主要位置的確位於測線中心。

觀察 Line 1 至 Line 5 的電阻率變化圖可以發現, 其圖中視電阻率值於監測開始並產生反應後並未隨時間回歸至背景值, 此現象表示於監測時間範圍內, 各測線一直都有感應到變化, 顯示示蹤劑團並沒有移動造成各側線電阻值並未回歸背

景值。推測造成此現象的可能原因為現場地下水流速太慢，導致示蹤劑團未於監測時間內流出測線範圍，才會導致上述現象發生。

2nd_Line 1

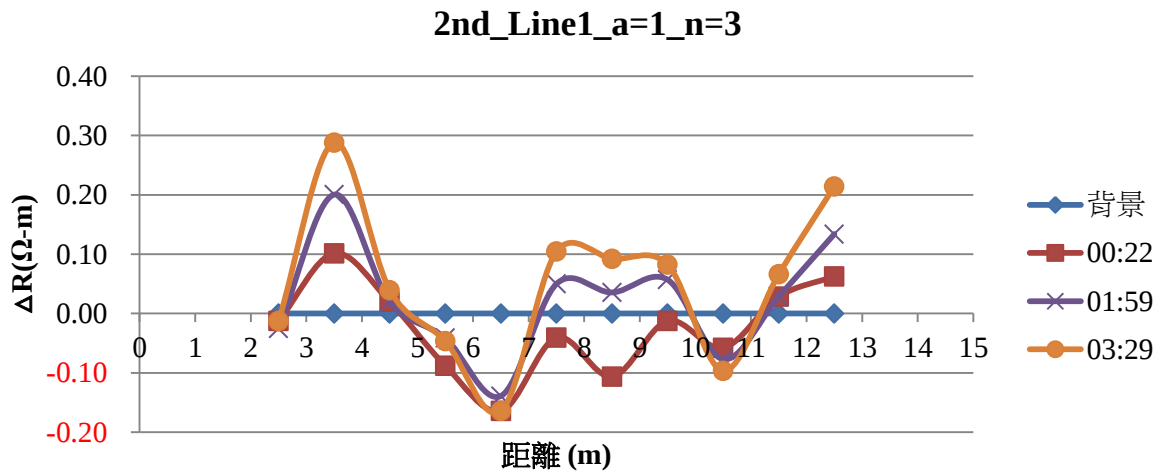


圖 5- 47、第二次試驗 Line 1 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

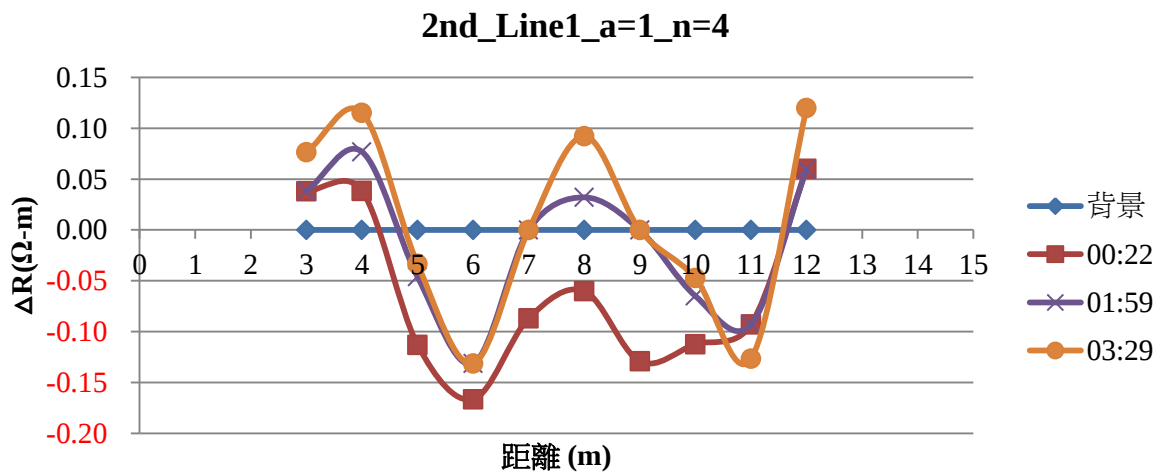


圖 5- 48、第二次試驗 Line 1 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

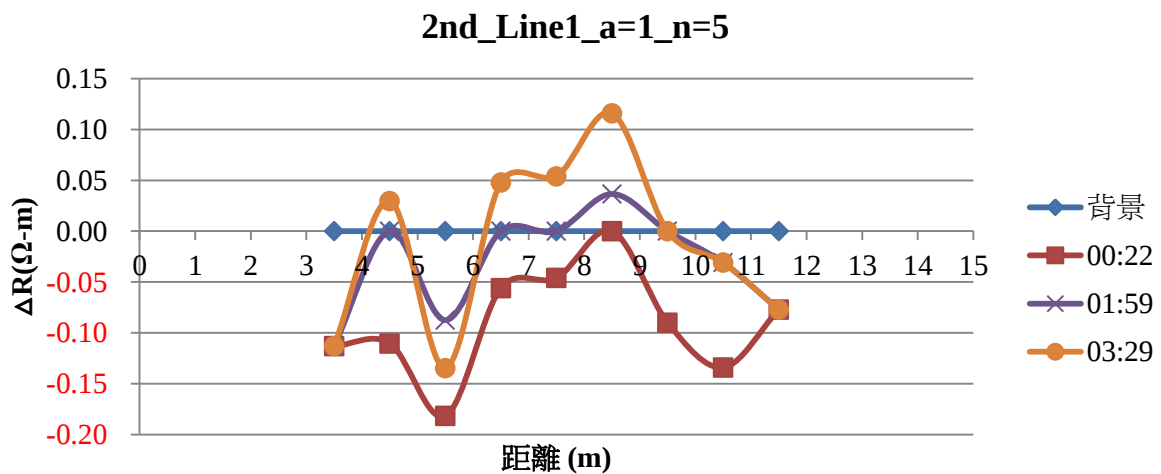


圖 5- 49、第二次試驗 Line 1 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

2nd_Line 2

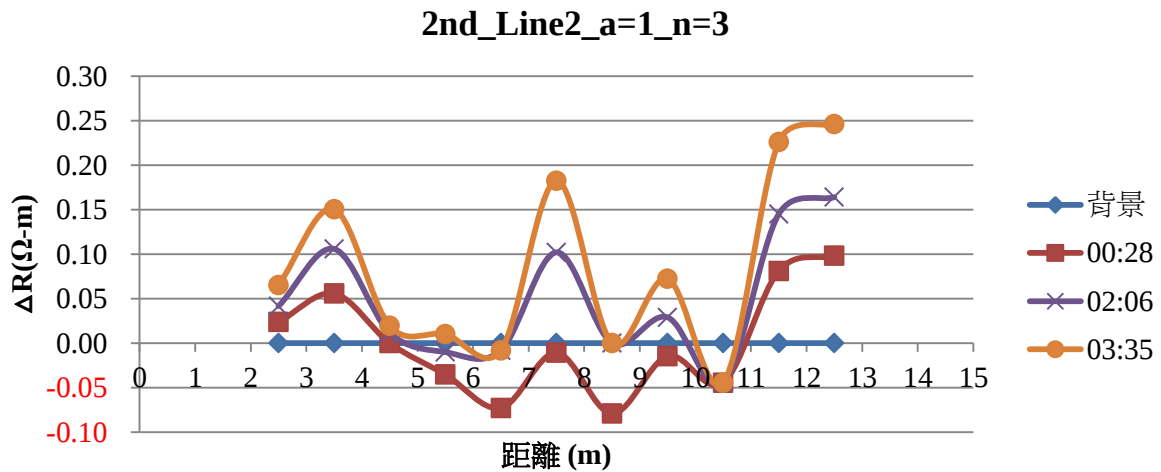


圖 5- 50、第二次試驗 Line 2 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

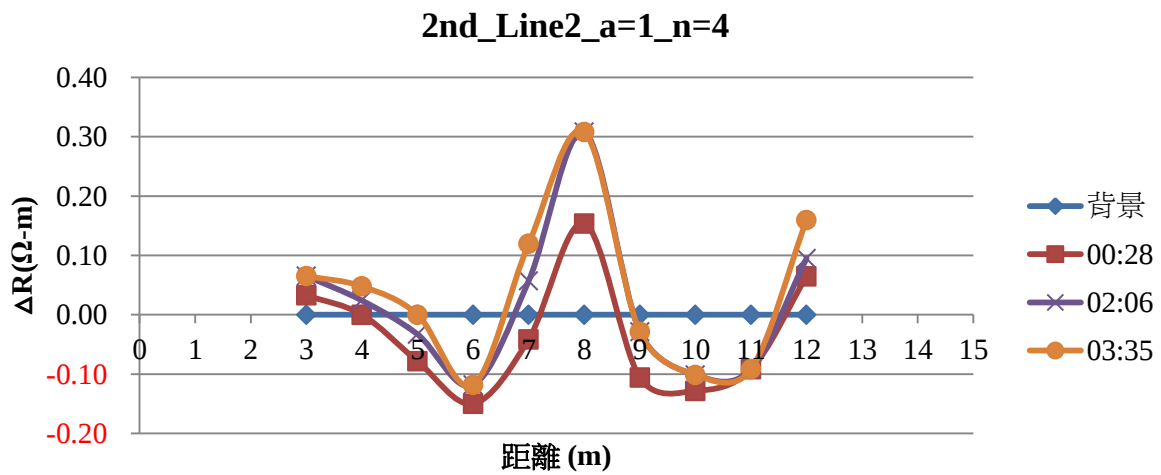


圖 5- 51、第二次試驗 Line 2 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

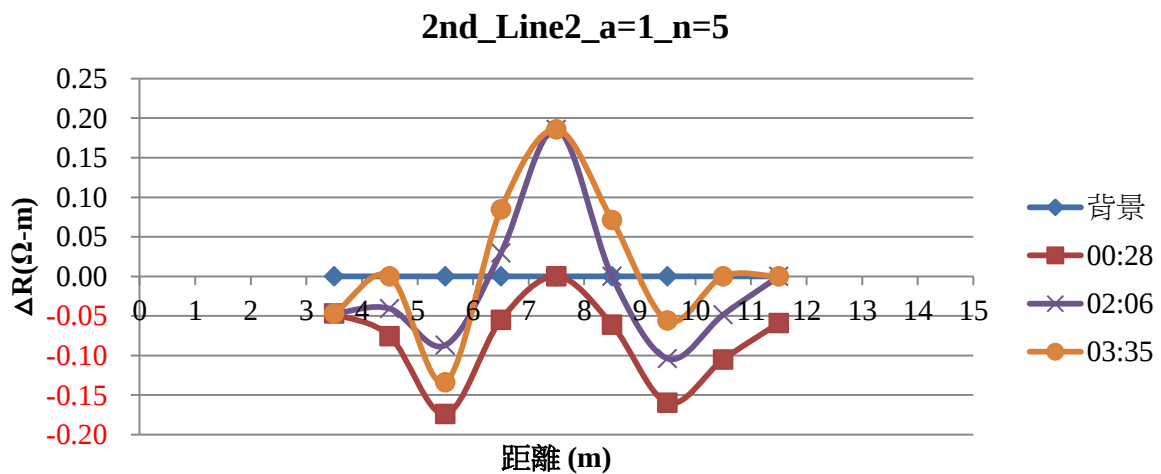


圖 5- 52、第二次試驗 Line 2 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

2nd_Line 3

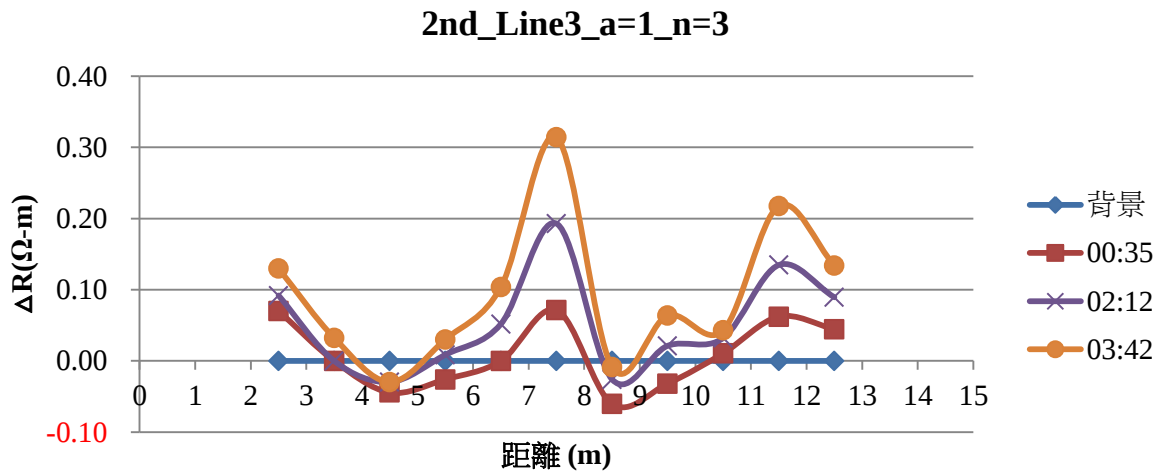


圖 5- 53、第二次試驗 Line 3 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

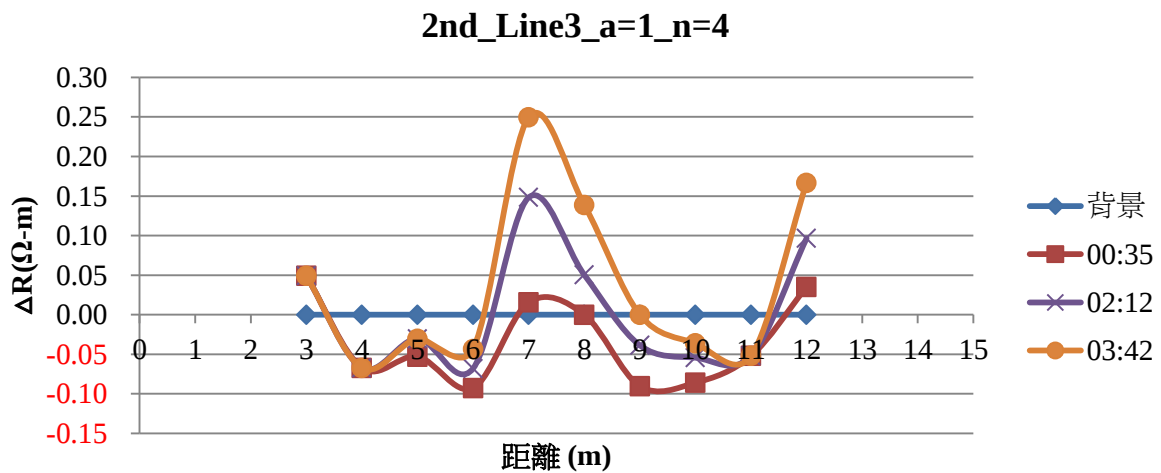


圖 5- 54、第二次試驗 Line 3 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

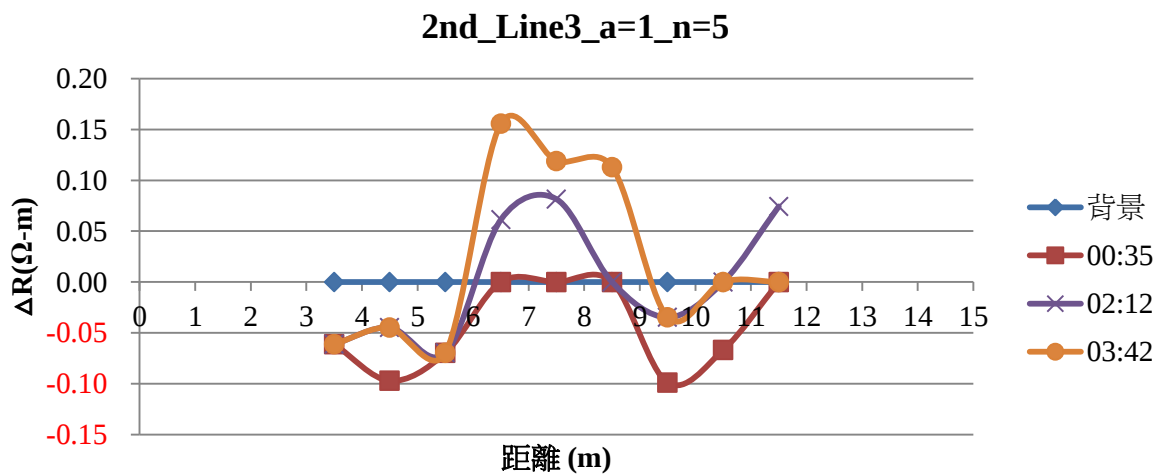


圖 5- 55、第二次試驗 Line 3 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

2nd_Line 4

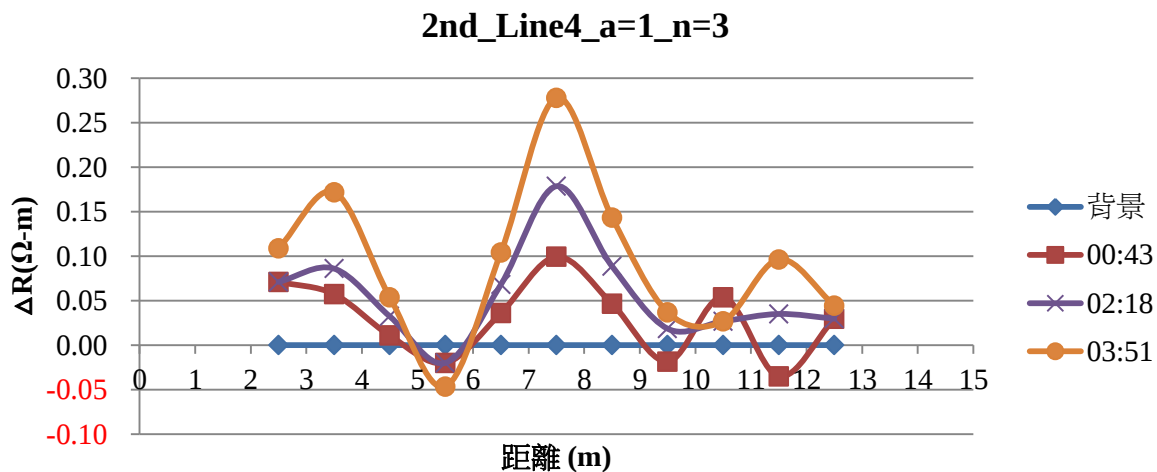


圖 5- 56、第二次試驗 Line 4 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

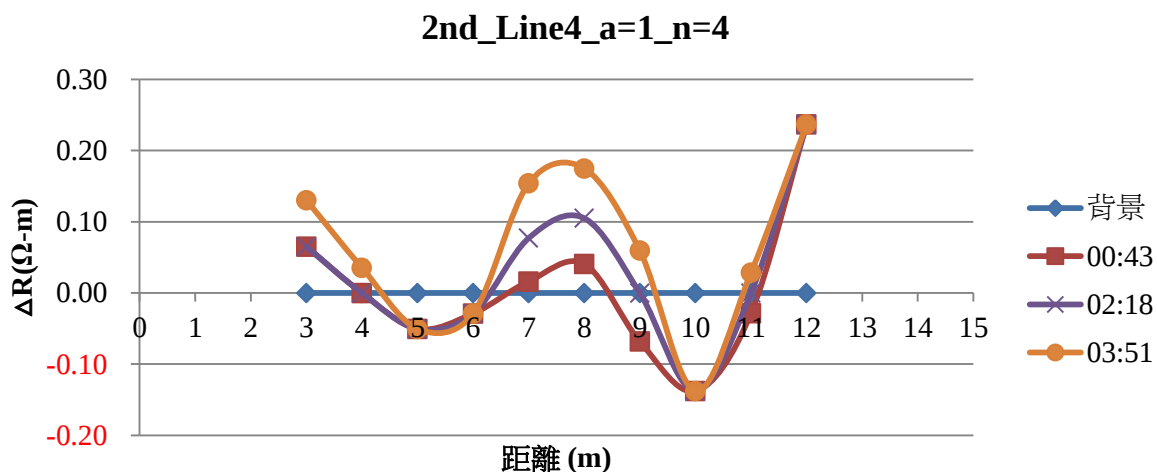


圖 5- 57、第二次試驗 Line 4 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

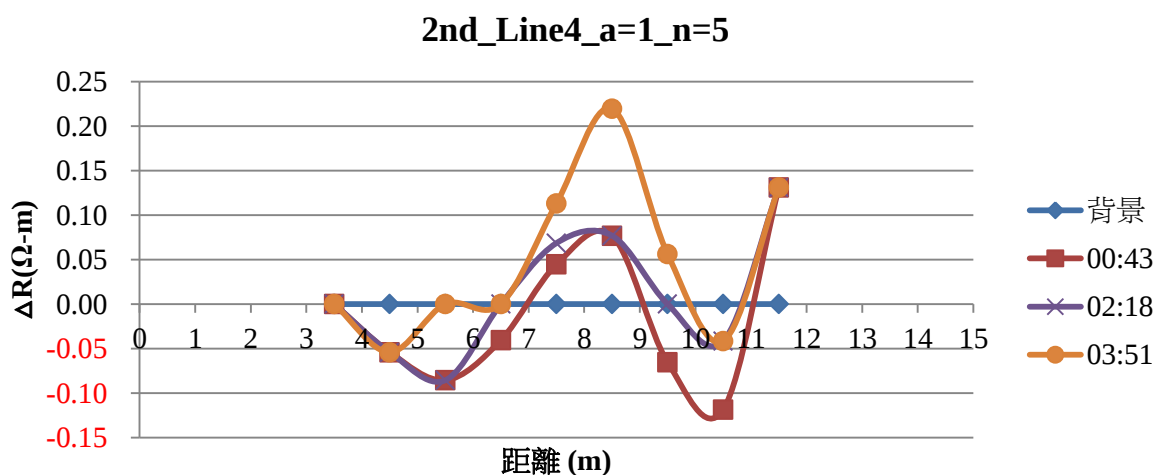


圖 5- 58、第二次試驗 Line 4 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

2nd_Line 5

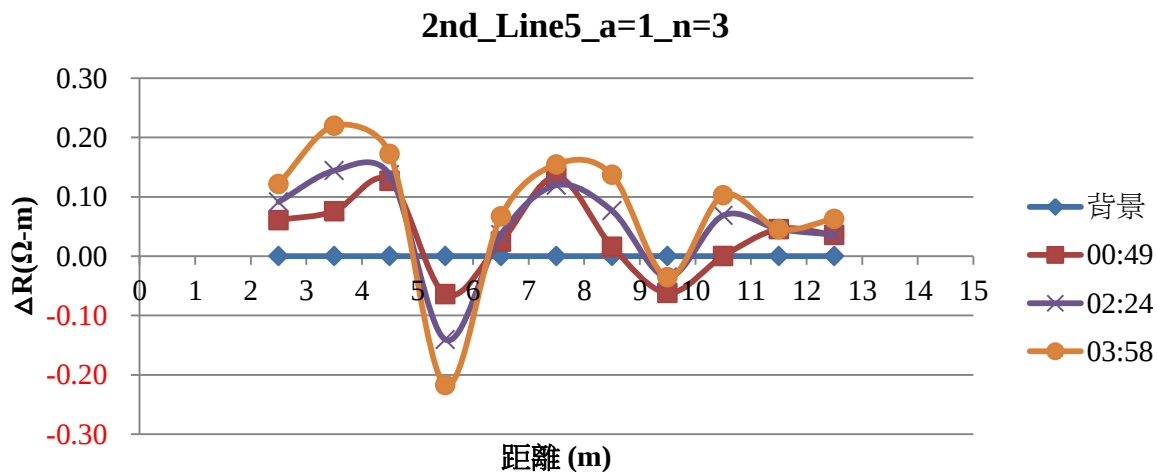


圖 5- 59、第二次試驗 Line 5 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

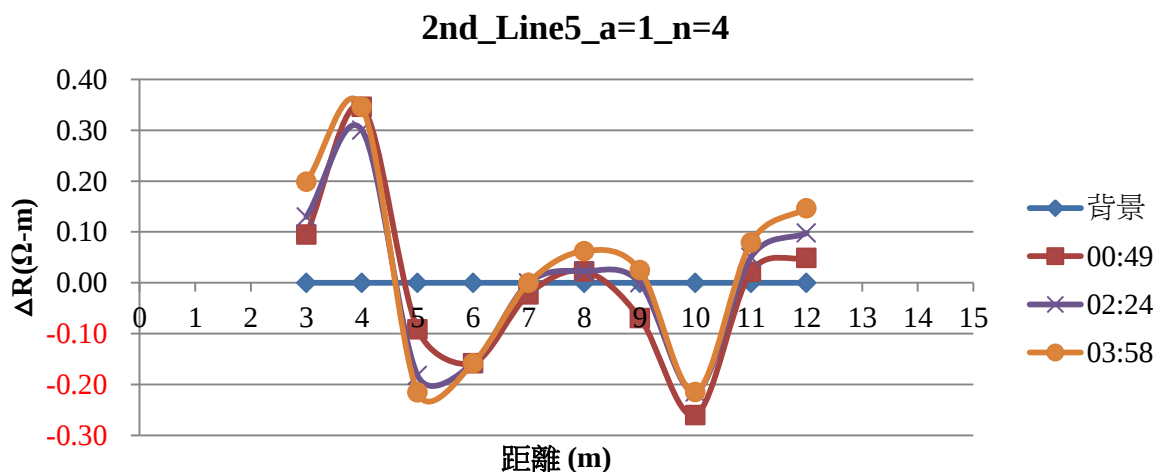


圖 5- 60、第二次試驗 Line 5 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

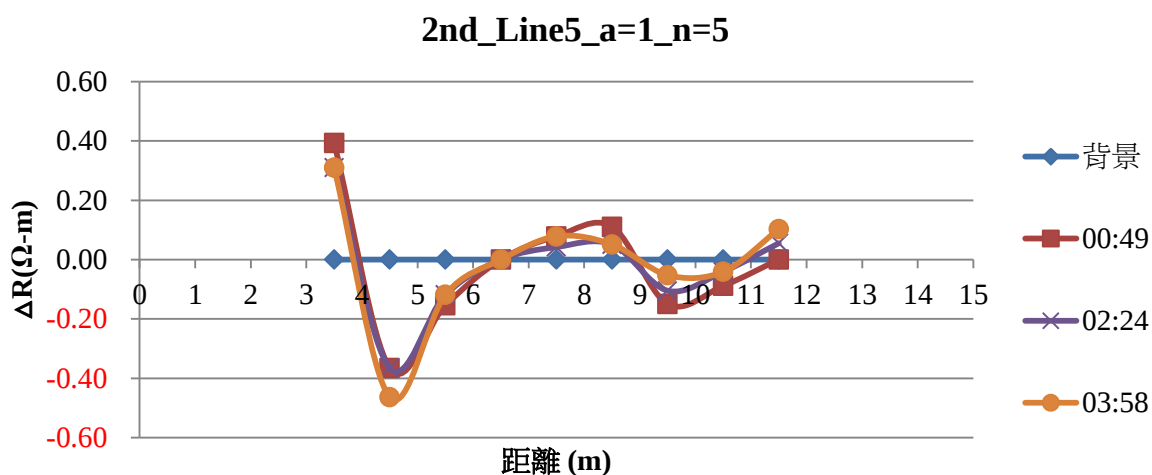


圖 5- 61、第二次試驗 Line 5 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

III. 第三次地電阻五測線

注入井位置約在 Line 1 的 $x=7\sim 8$ 處。圖 5- 62 至圖 5- 64 為 Line 1 在不同測深的 ΔR 曲線，顯示 Line 1 測線在 $n=2$ ， $x=7\sim 9$ ， ΔR 有些微下降至約 $-0.2\ \Omega\cdot m$ ，顯示地電阻有觀察到示蹤劑之情形。

圖 5- 65 至圖 5- 67 為 Line 2 在不同測深的 ΔR 曲線，由現場監測水位，可知水位應低於地表 $0.6\ m$ 以下，在 $n=2$ 及 $n=3$ 發現， $x=7\sim 8\ m$ 處， ΔR 約有 $-0.15\ \Omega\cdot m\sim -0.20\ \Omega\cdot m$ ，此測點界進示蹤劑注入井，顯示地電阻捕捉到示蹤劑團的影響，此變化量隨著探測深度增加而有變大的趨勢，在 $x=8\sim 10$ 及 $X=10\sim 12$ 電阻有明顯的增加，表示示蹤劑影響周圍電流變化導致電阻有上升的趨勢。

圖 5- 68 至圖 5- 70 為 Line 3 在不同測深的 ΔR 曲線，在 $n=2$ 發現示蹤劑注入後在監測時間 0:43 分鐘至 5:20，水平距離 $x=10\sim 12$ 間 ΔR 約為 $0.40\ \Omega\cdot m$ 至 $0.60\ \Omega\cdot m$ ，當時間 6:58 時水平距離 9 至 12m 間 ΔR 約上升至 $8.00\ \Omega\cdot m$ ， $n=3$ 及 $n=4$ 時發現當時間 0:43 分鐘時，在水平距離 $x=8\sim 11$ 間 ΔR 約分別提升 $2.50\ \Omega\cdot m$ 及 $4.50\ \Omega\cdot m$ ，這代表示蹤劑已影響周圍電流變化使電阻有上升的現象。

圖 5- 71 至圖 5- 73 為 Line 4 在不同測深的 ΔR 曲線，發現 $n=2$ ，注入示蹤劑後，在 $x=5\sim 8\ m$ 處 ΔR 約上升至 $3.00\ \Omega\cdot m\sim 4.00\ \Omega\cdot m$ ，在 $x=9\sim 11\ m$ 處 ΔR 下降至約 $-2.50\ \Omega\cdot m$ 說明示蹤劑應有擴散傳輸現象，在 $n=3$ ， $x=8\sim 10\ m$ 處 ΔR 上升至 $50.00\ \Omega\cdot m\sim 80.00\ \Omega\cdot m$ ， $n=4$ 監測時間為 0:50 分 ΔR 約為 $35\ \Omega\cdot m$ ，而在監測時間 1:30 分 ΔR 下降至約 $25.00\ \Omega\cdot m$ ，這代表 ΔR 隨時間增加而有所減少。

圖 5- 74 至圖 5- 76 為 Line 5 在不同測深的 ΔR 曲線發現 $n=2$ ， $x=7\sim 9\ m$ 處 ΔR 明顯下降至約為 $-0.50\ \Omega\cdot m$ ，隨後在 $x=9\sim 11\ m$ 時 ΔR 上升至約 $0.50\ \Omega\cdot m$ ， $n=3$ ， $x=7\sim 8$ ， ΔR 上升至 $1.00\ \Omega\cdot m$ ，隨後在 $x=8\sim 9\ m$ 時 ΔR 下降至約 $-1.50\ \Omega\cdot m$ ， $n=4$ ， $x=7\sim 8$ 時 ΔR 上升至約 $5.00\ \Omega\cdot m$ ，隨後在 $x=8\sim 10\ m$ 時 ΔR 下降至約 $-10.00\ \Omega\cdot m$ ，這代表示蹤劑的傳輸現象影響附近電流提升而使電阻會提升而後下降。

3rd_Line 1

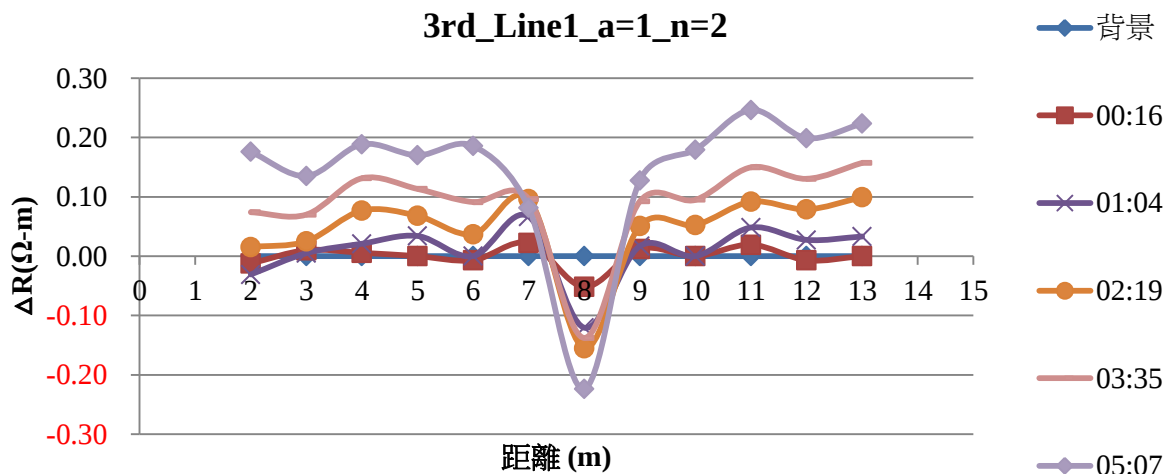


圖 5- 62、第三次試驗 Line 1 在深度 n=2，修正後視電阻率變化量曲線

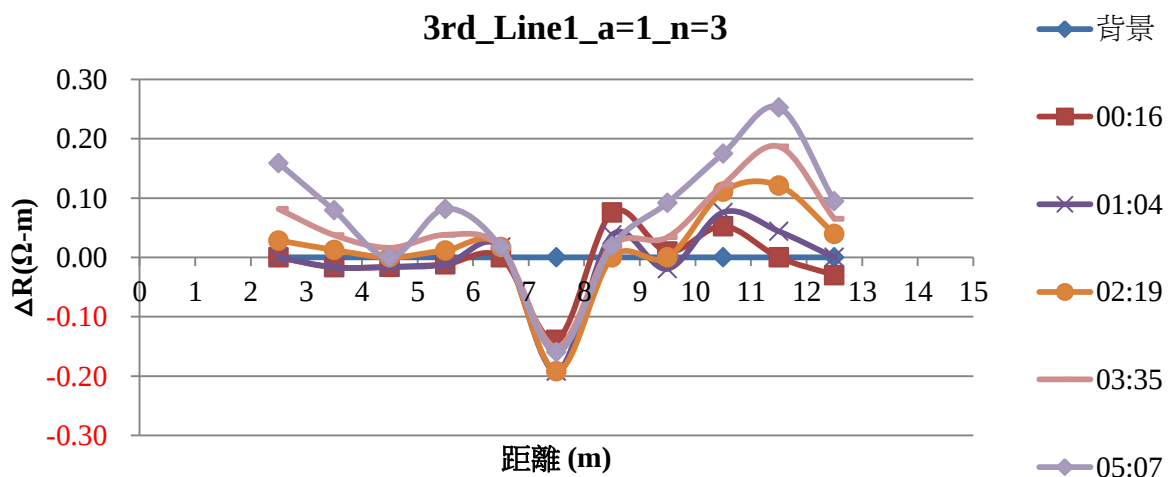


圖 5- 63、第三次試驗 Line 1 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

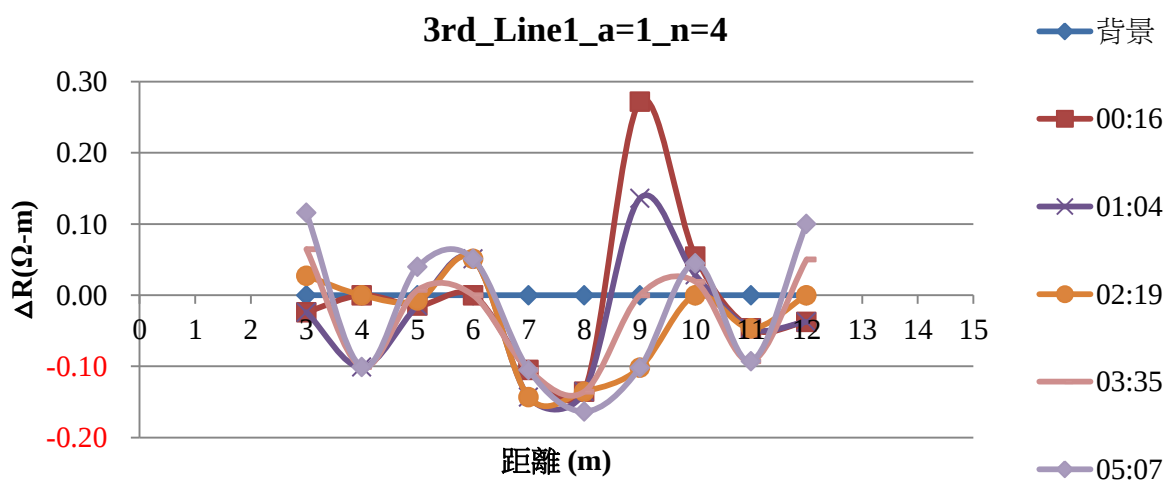


圖 5- 64、第三次試驗 Line 1 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

3rd_Line 2

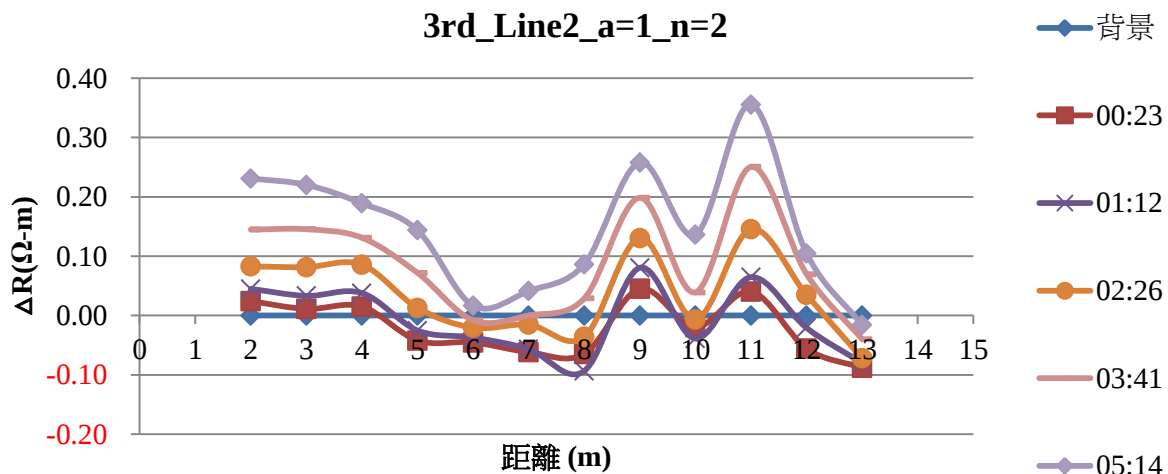


圖 5- 65、第三次試驗 Line 2 在深度 n=2，修正後視電阻率變化量曲線

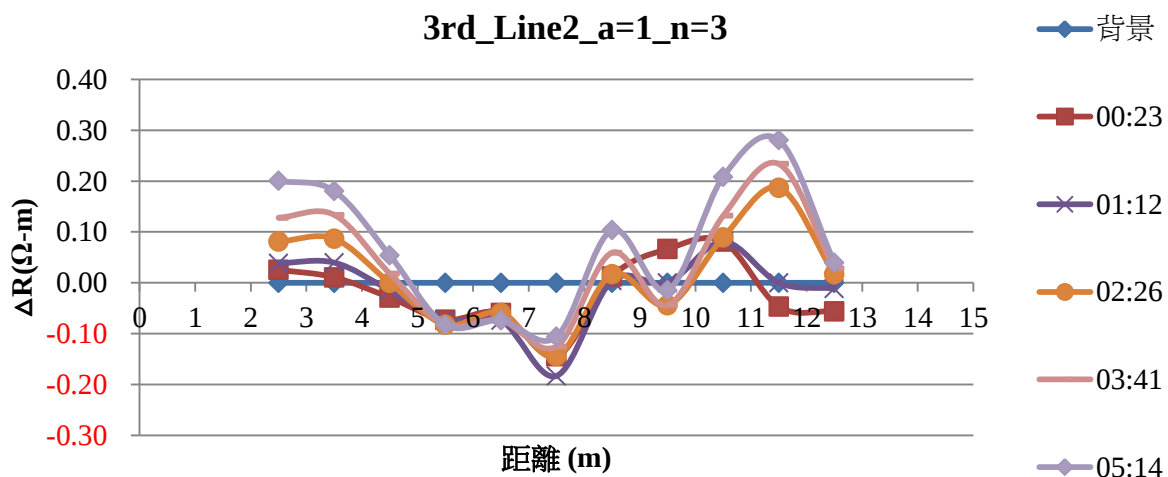


圖 5- 66、第三次試驗 Line 2 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

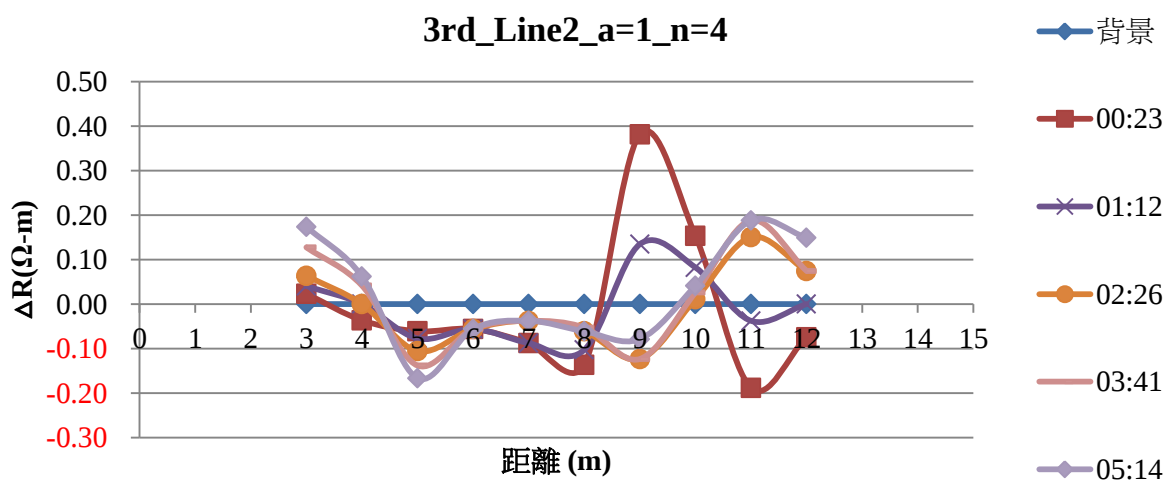


圖 5- 67、第三次試驗 Line 2 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

3rd_Line 3

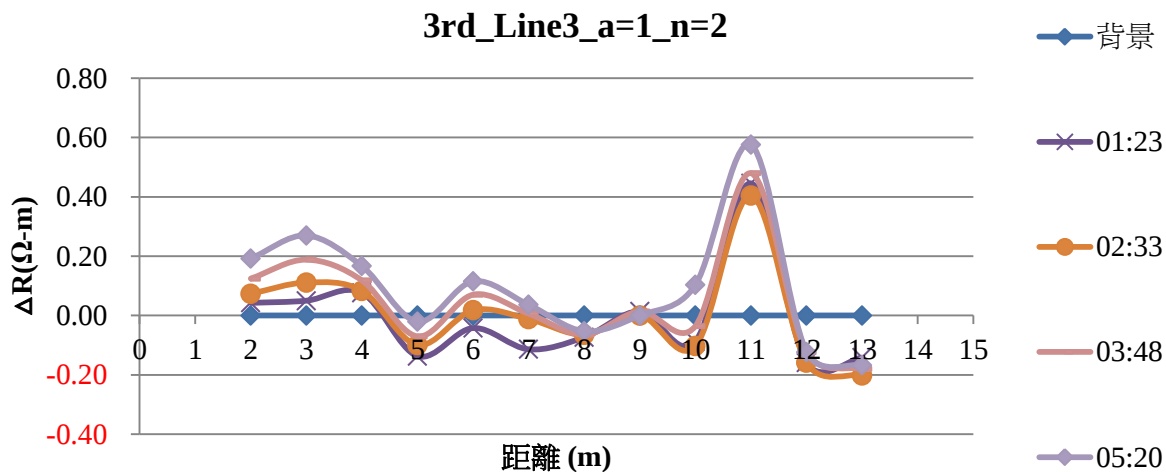


圖 5- 68、第三次試驗 Line 3 在深度 n=2，修正後視電阻率變化量曲線

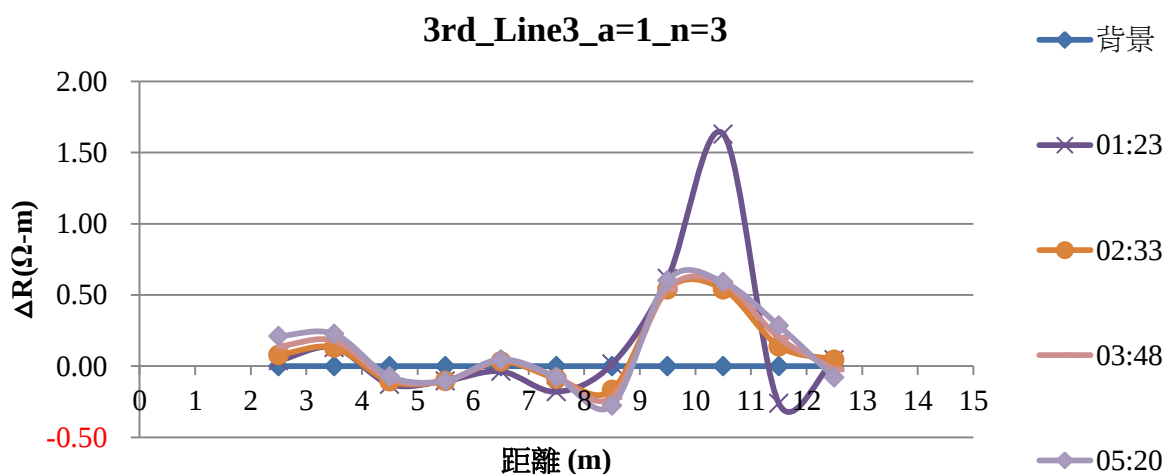


圖 5- 69、第三次試驗 Line 3 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

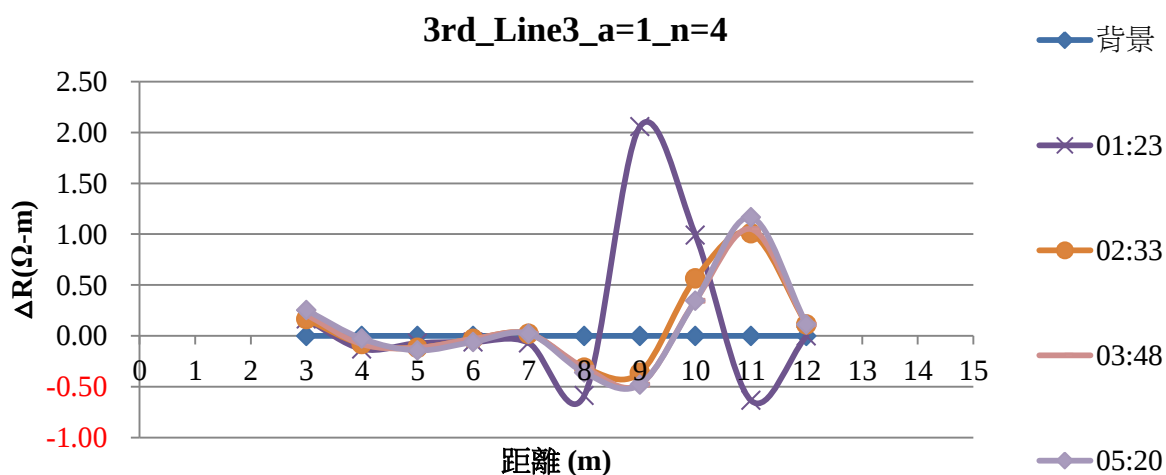


圖 5- 70、第三次試驗 Line 3 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

3rd_Line 4

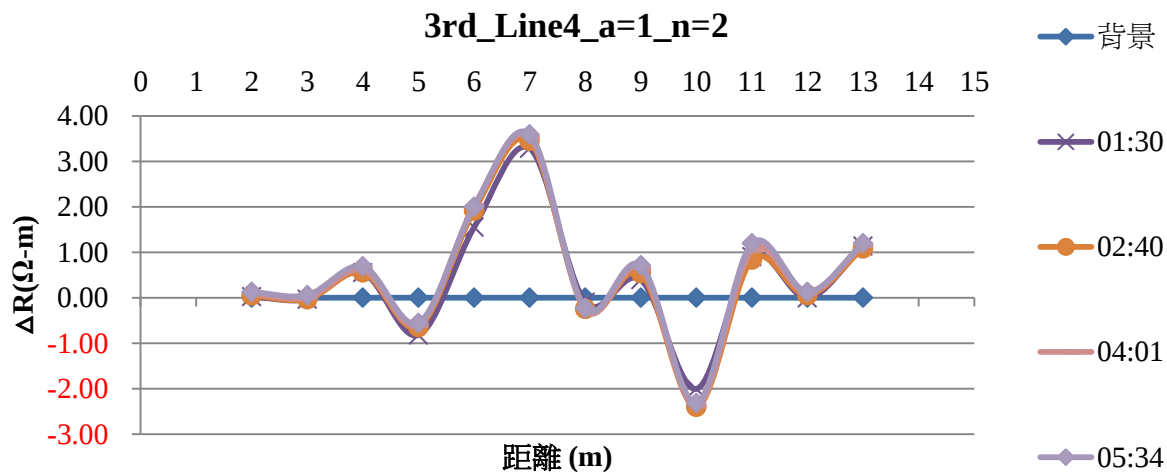


圖 5- 71、第三次試驗 Line 4 在深度 n=2，修正後視電阻率變化量曲線

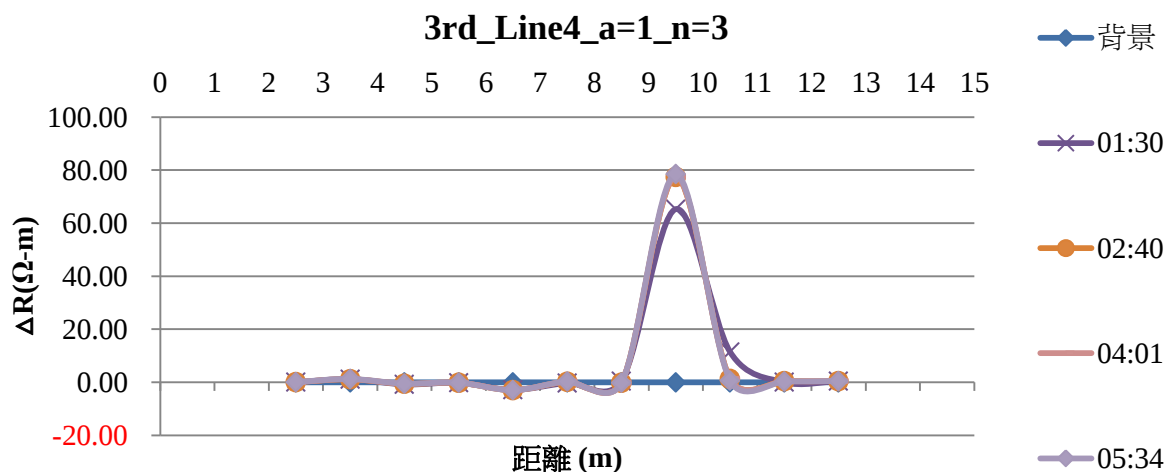


圖 5- 72、第三次試驗 Line 4 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

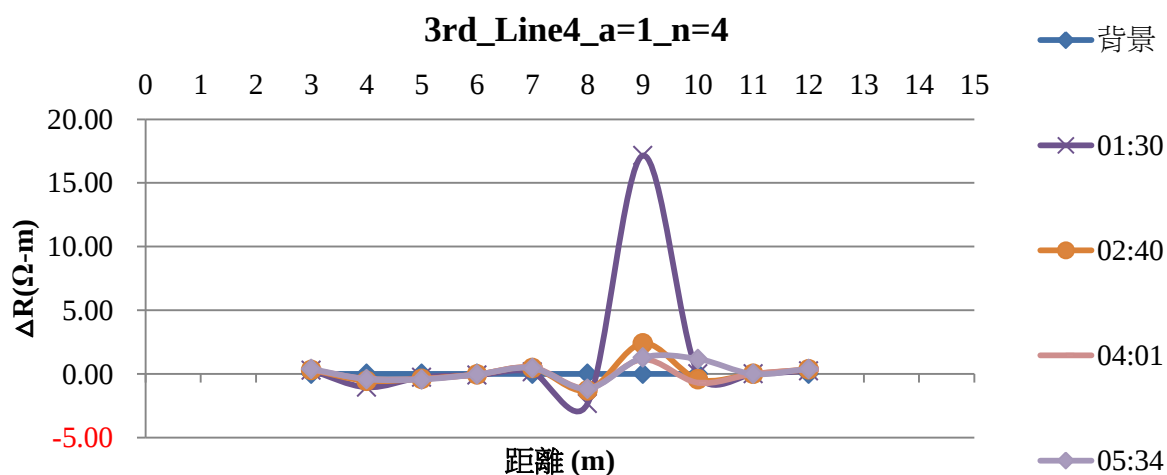


圖 5- 73、第三次試驗 Line 4 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

3rd_Line 5

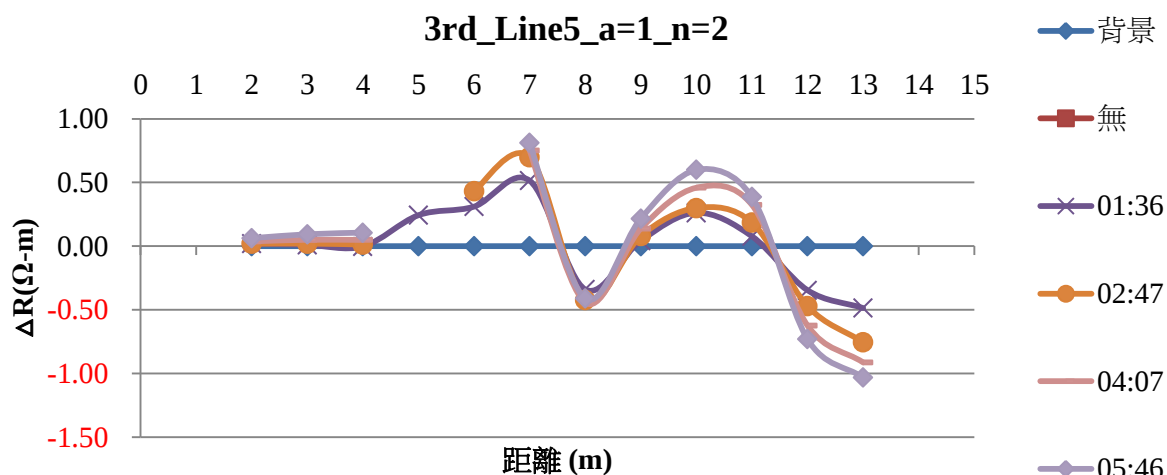


圖 5- 74、第三次試驗 Line 5 在深度 n=2，修正後視電阻率變化量曲線

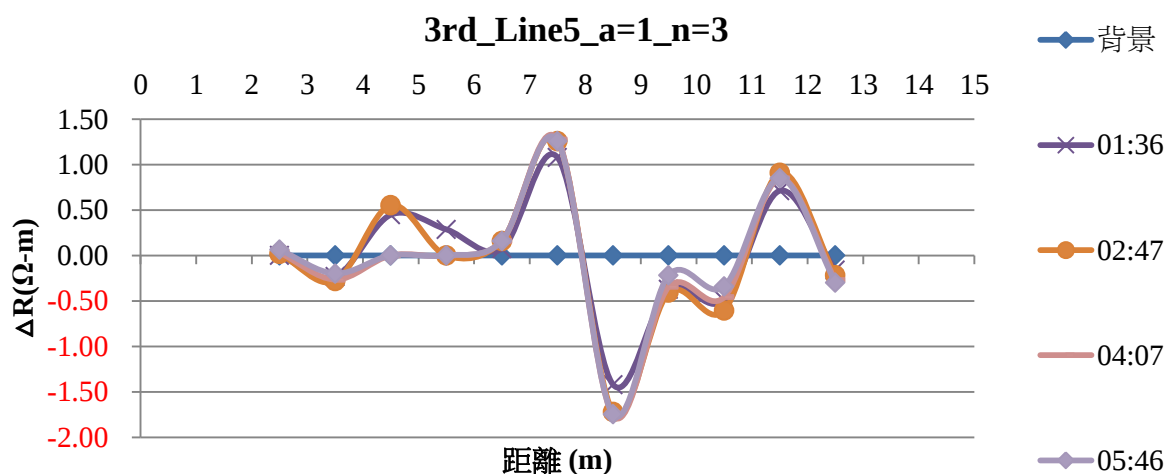


圖 5- 75、第三次試驗 Line 5 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

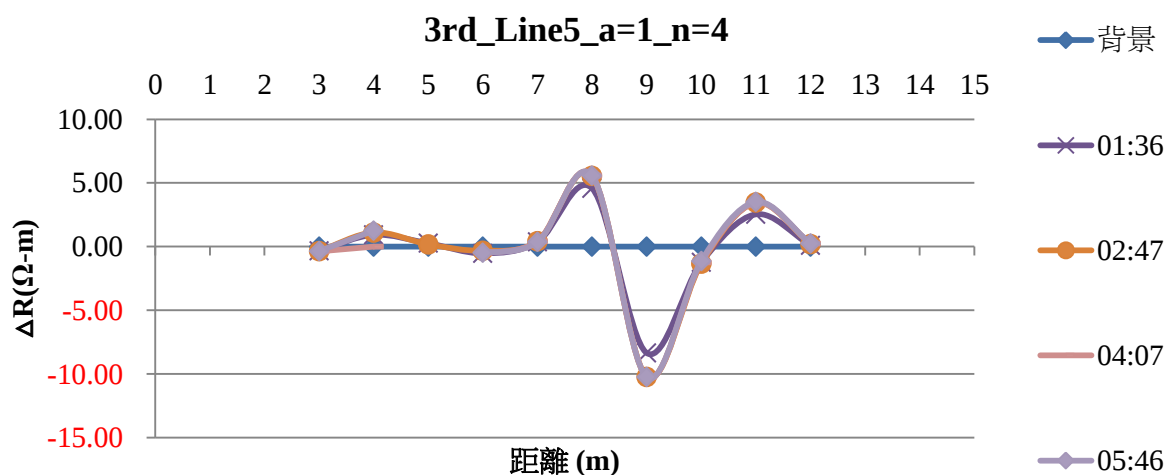


圖 5- 76、第三次試驗 Line 5 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

IV. 第四次地電阻三測線

注入井之位置約位於 Line 1 的 $x=7\sim 8$ m 處。圖 5-77 至圖 5-79, Line 1_n=4, $x=12$ m, 有電阻先下降但於 04:42 後回升之現象, 而 $x=11$ m、15 m 及 17 m 處, 則有電阻隨時間上升現象。Line 1_n=5, $x=12$ m、18 m 及 22 m, 有電阻下降之現象, 而 $x=13$ m, 則有電阻隨時間上升現象, 但此現象只有在監測開始時發現。Line 1_n=6, $x=6$ m、11 m 及 19 m, 有電阻下降之現象, 而 $x=13$ m, 則有電阻隨時間上升現象, 但此現象只有在監測開始時發現。各層電阻率變化量約為 $-0.3\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.4\ \Omega\text{-m}$ 。

圖 5-80 至圖 5-82, Line 2_n=4, $x=8$ m、13 m 及 16 m, 有電阻下降之現象, 而 $x=5$ m、11 m、14 m、17 m 及 25 m, 則有電阻隨時間上升現象。Line 2_n=5, $x=12$ m, 有電阻先下降但於 04:42 後回升之現象, 而 $x=18$ m 及 20 m, 則有電阻先上升但於 04:42 後下降之現象, 而 $x=11$ m 及 14 m, 則有電阻隨時間上升現象。Line 2_n=6, $x=17\sim 21$ m, 有電阻先上升但於 04:42 後下降之現象, 而 $x=13$ m 及 15 m, 則有電阻隨時間上升現象。各層電阻率變化量約為 $-0.15\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.2\ \Omega\text{-m}$ 。

圖 5-83 至圖 5-85, Line 3_n=1, $x=17$ m, 有電阻先下降但於 04:42 後回升之現象, 而 $x=19$ m, 則有電阻先上升但於 04:42 後下降之現象, 而 $x=11$ m 及 23 m, 則有電阻隨時間上升現象。Line 3_n=2, $x=17\sim 22$ m, 有電阻先上升但於 04:42 後下降之現象, 而 $x=4\sim 16$ m 及 24 m, 則有電阻隨時間上升現象。Line 3_n=3, $x=16\sim 23$ m, 有電阻先上升但於 04:42 後下降之現象, 而 $x=11\sim 15$ m 及 25 m, 則有電阻隨時間上升現象。各層電阻率變化量約為 $-0.4\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.2\ \Omega\text{-m}$ 。

觀察三條測線的電阻率變化圖可以發現, 各圖都有電阻率變高與變低之趨勢。理論上 ERT 監測到高導電度示蹤劑時, 測得之視電阻率測值會下降。但由於高導電度示蹤劑會改變地表下電流通過難易程度, 導致示蹤劑附近之電流都集中流經示蹤劑處。造成示蹤劑中心處電位差變大, 而兩旁電位差變小。又因為儀器會將電位差除以固定電流計算出視電阻率, 才會造成中心視電阻率大而兩旁視電阻率小之現象。因此觀察到電阻率變高及變低, 可以視為一種測線感受到變化的指標。

但觀察各測線電阻率變高及變低的位置, 可以發現其位置幾乎都偏離注入井所在的 $x=7\sim 8$, 而且此現象隨 Line 1 至 Line 3 有偏離距離逐漸增加之趨勢。推測造成此現象的原因為水利梯度差異, 觀察監測現場之水位等高線圖(圖 5-7)可發現測線附近的水利梯度會使地下水偏向西側, 其流向正好符合電阻率變化位置偏離距離逐漸增加之趨勢。

觀察 Line 1 至 Line 3 的電阻率變化圖可以發現, 其圖中視電阻率值於監測開始並產生反應後並未隨時間回歸至背景值, 此現象表示於監測時間範圍內, 各測線一直都有感應到變化, 顯示示蹤劑團並沒有移動造成各側線電阻值並未回歸背

景值。推測造成此現象的可能原因為現場地下水流速太慢，導致示蹤劑團未於監測時間內流出測線範圍，才會導致上述現象發生。

4th_Line 1

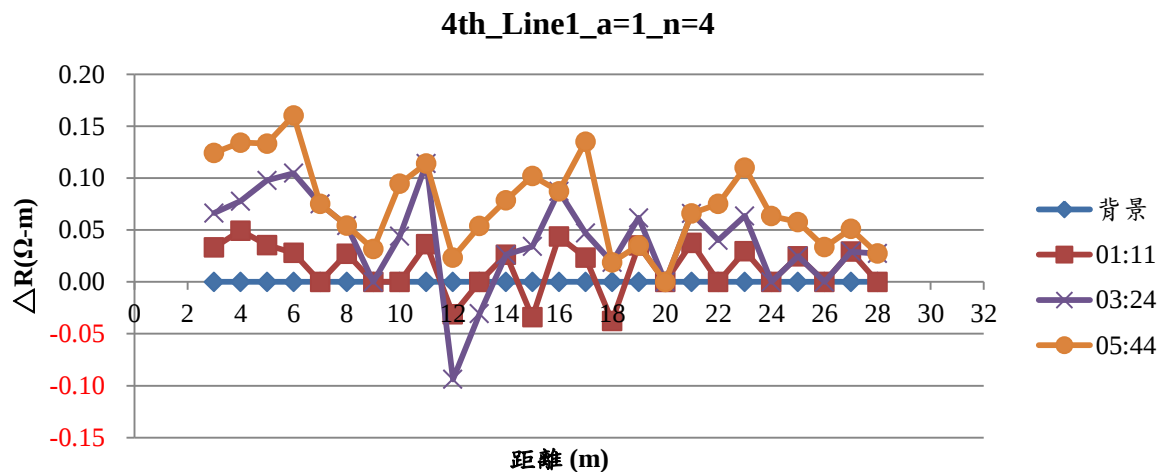


圖 5- 77、第四次試驗 Line 1 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

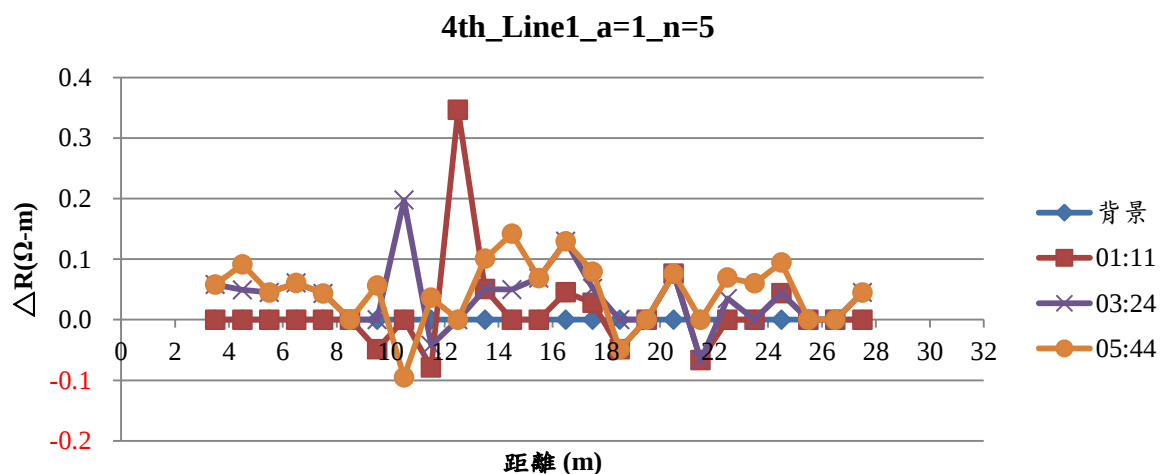


圖 5- 78、第四次試驗 Line 1 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

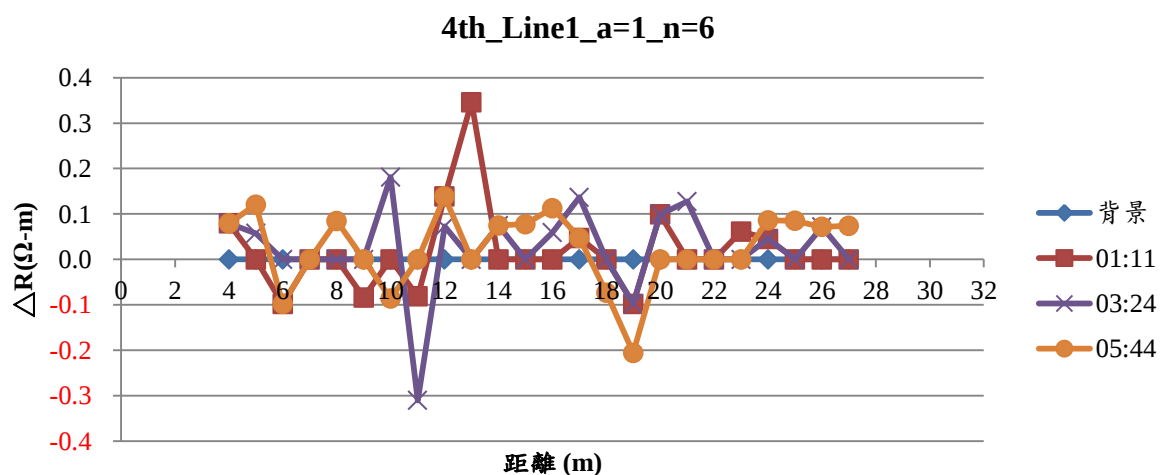


圖 5- 79、第四次試驗 Line 1 在深度 n=6，修正後視電阻率變化量曲線

4th_Line 2

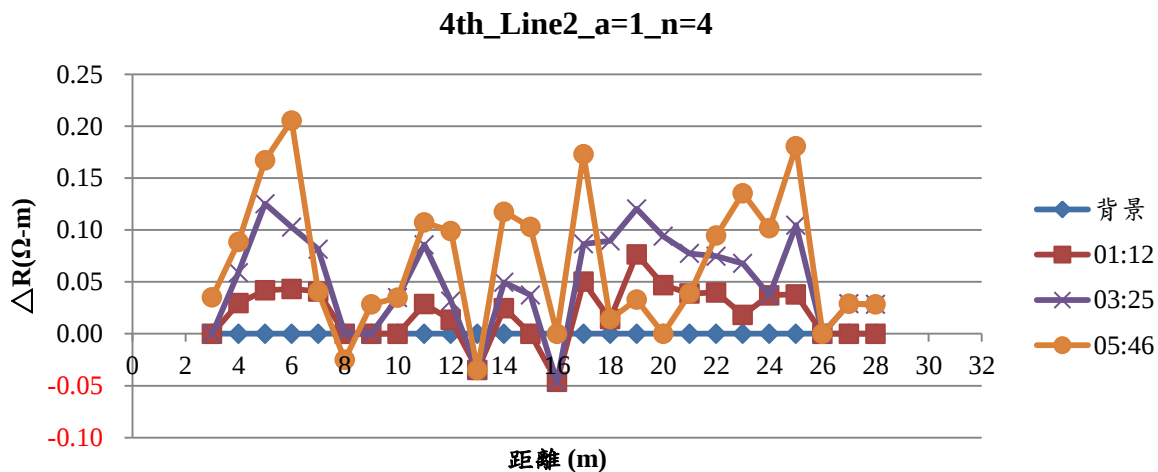


圖 5- 80、第四次試驗 Line 2 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

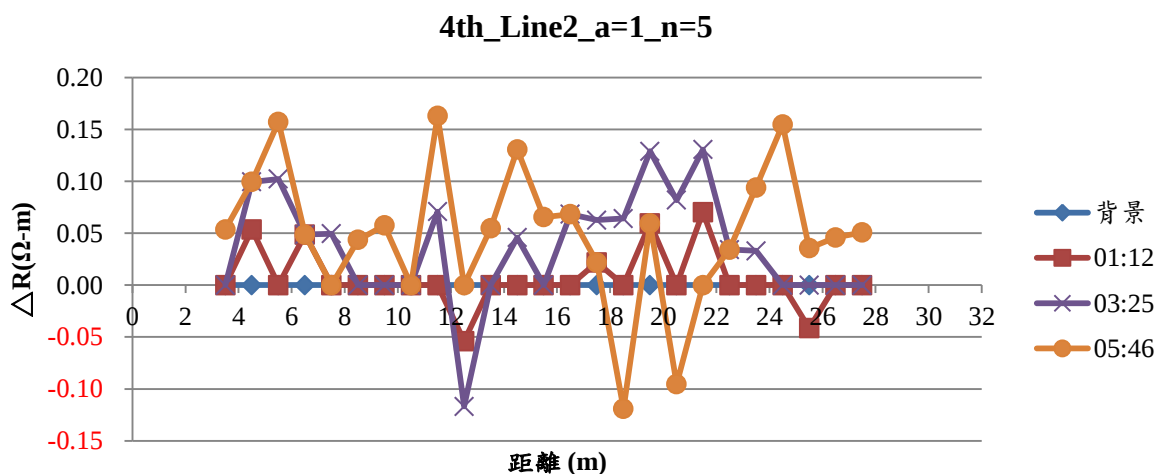


圖 5- 81、第四次試驗 Line 2 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

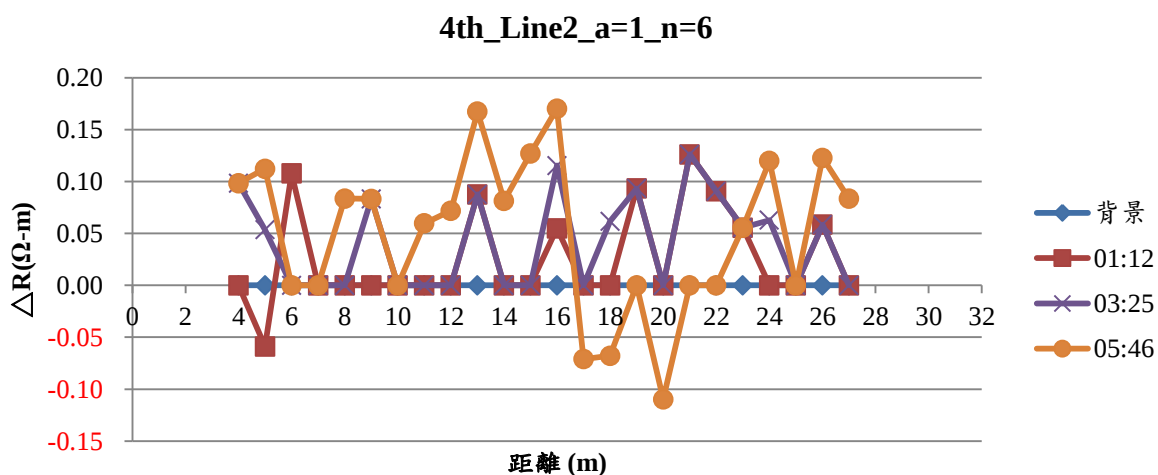


圖 5- 82、第四次試驗 Line 2 在深度 n=6，修正後視電阻率變化量曲線

4th_Line 3

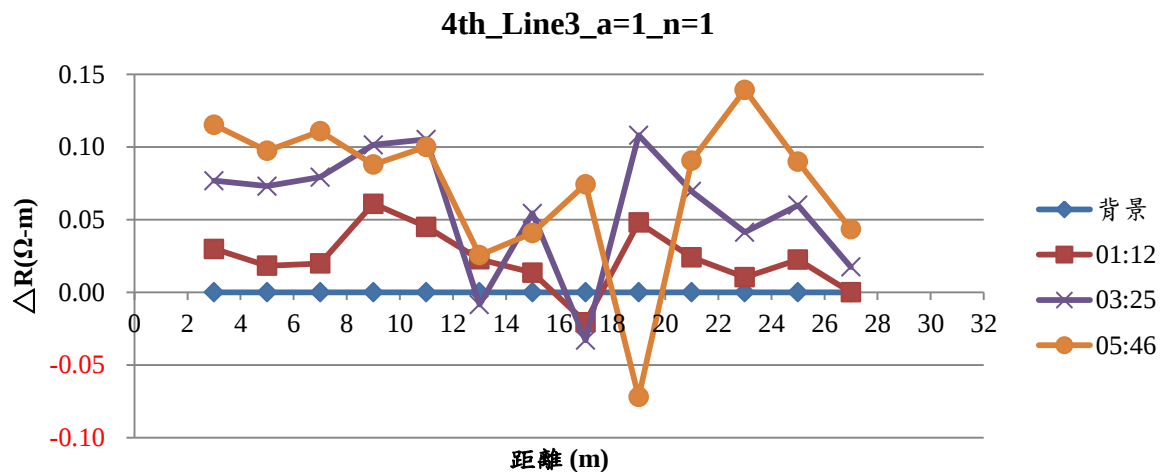


圖 5- 83、第四次試驗 Line 3 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

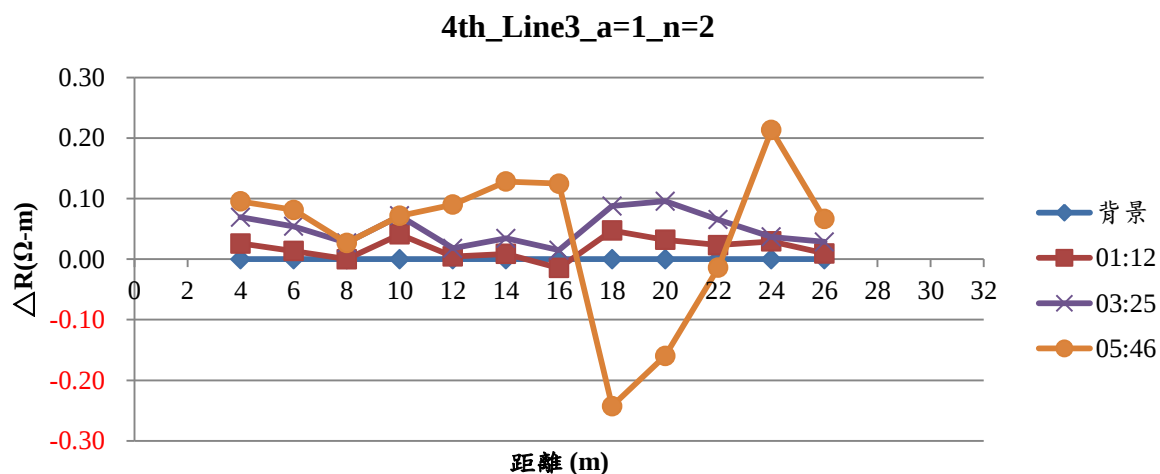


圖 5- 84、第四次試驗 Line 3 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

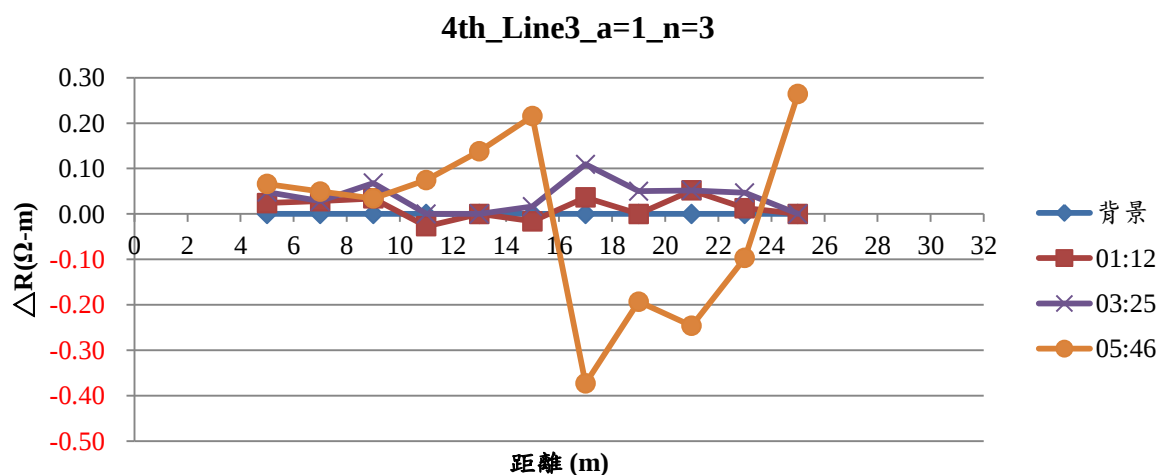


圖 5- 85、第四次試驗 Line 3 在深度 n=6，修正後視電阻率變化量曲線

V. 第五次地電阻雙單測線

注入井約在 Line 1 至 Line 2 的 7~8 m 處，圖 5- 86 至圖 5- 88，為 Line 1 在不同測深的 ΔR 曲線，顯示 Line 1 測線在 $n=3$ ，注入示蹤劑後 $x=8$ 的電阻變化量有明顯變化，當時間 1:59 時，電阻變化量 (ΔR) 達到最大 $-0.6 \Omega\cdot\text{m}$ ，另外在水平距離 $x=10\sim 12 \text{ m}$ ， ΔR 降至約 $-0.6 \Omega\cdot\text{m}$ ，水平距離 $x=14 \text{ m}$ ， ΔR 為 $-0.5 \Omega\cdot\text{m}$ ，水平距離 $x=22 \text{ m}$ ， ΔR 為 $-0.4 \Omega\cdot\text{m}$ ，此現象為電阻震盪效應所帶來的結果，顯示出示蹤劑確實有影響 Line 1 測線，最後因時間的變化，漸漸回到背景值，說明示蹤劑應有擴散傳輸稀釋的現象。隨著深度增加，此變化量亦有變小的趨勢

圖 5- 89 至圖 5- 91 為 Line 2 在不同測深的 ΔR 曲線，發現 $n=3$ ， $x=8 \text{ m}$ 處， ΔR 約 $-0.7 \Omega\cdot\text{m}$ ，此測點注入示蹤劑後，顯示地電阻捕捉到示蹤劑團的影響，此變化量隨著探測深度增加而有變小的趨勢，其最大峰值皆在 $x=8 \text{ m}$ ，另外在水平位置 $x=12 \text{ m}$ 、 14 m 、 16 m 及 20 m ， ΔR 分別為 $-0.6 \Omega\cdot\text{m}$ 、 $-0.4 \Omega\cdot\text{m}$ 、 $-0.3 \Omega\cdot\text{m}$ 及 $-0.4 \Omega\cdot\text{m}$ ，有此現象也是受電阻震盪而有所影響。

綜合 Line 1 與 Line 2 圖片所顯示的結果，示蹤劑確實有影響電阻的變化，但每個時間所測到的電阻變化量相當接近，這說明地下水的流動速度非常慢，故變化量不顯著。

5th_Line 1

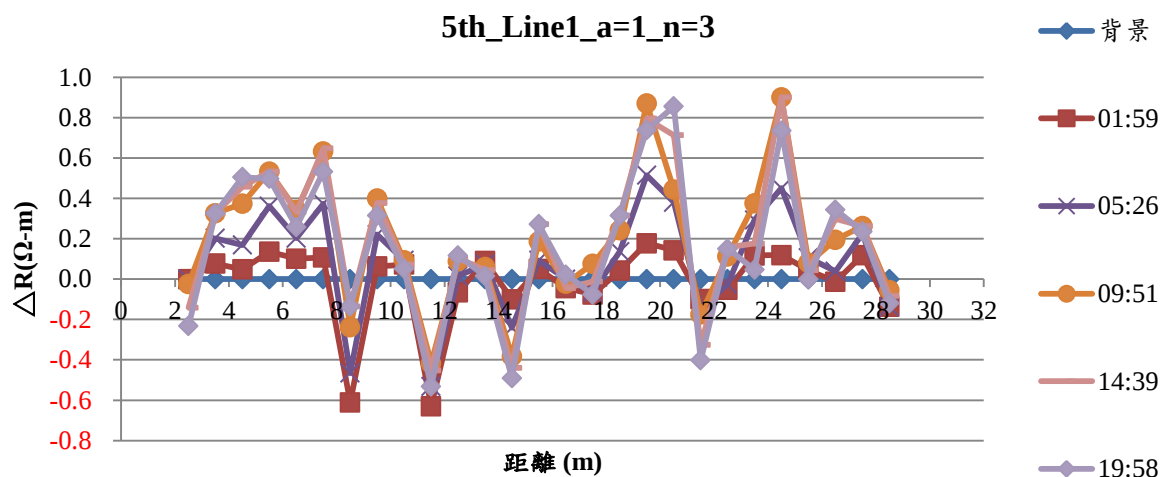


圖 5- 86、第五次試驗 Line 1 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

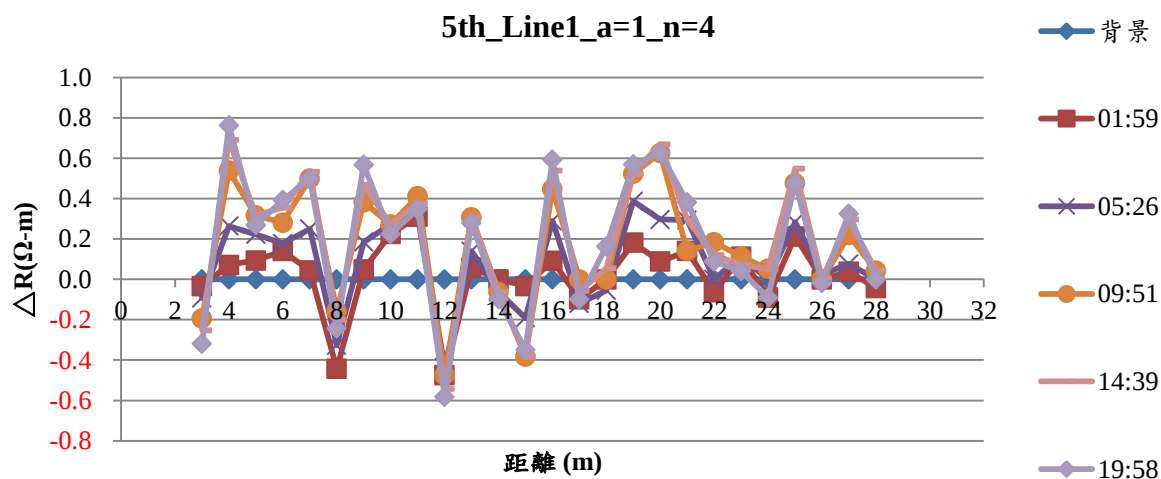


圖 5- 87、第五次試驗 Line 1 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

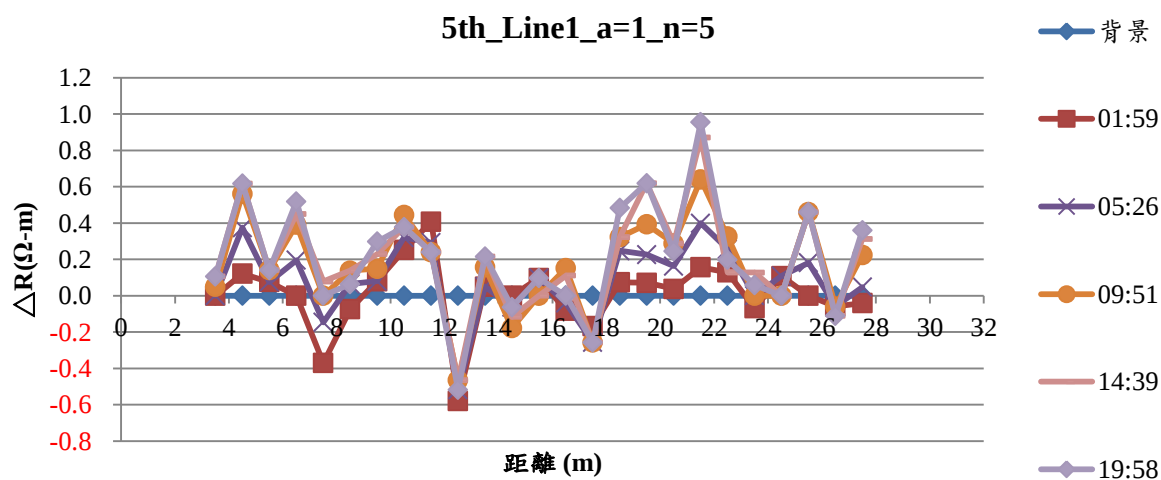


圖 5- 88、第五次試驗 Line 1 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

5th_Line 2

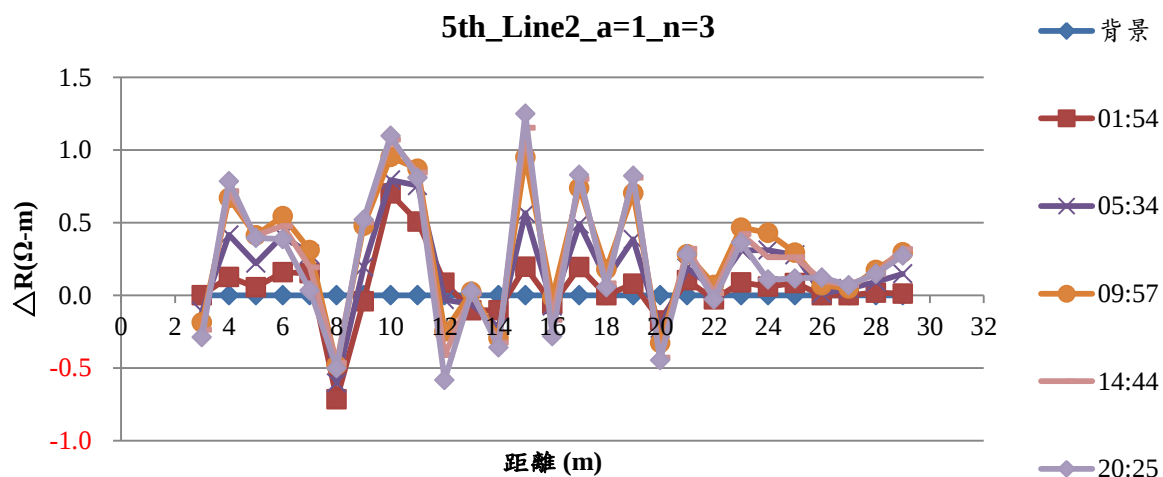


圖 5- 89、第五次試驗 Line 2 在深度 n=3，修正後視電阻率變化量曲線

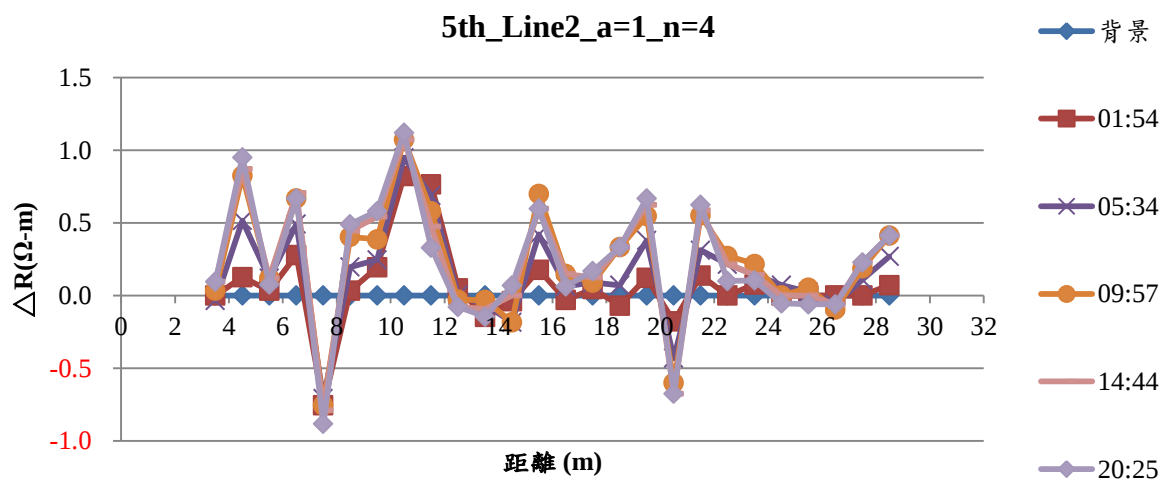


圖 5- 90、第五次試驗 Line 2 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

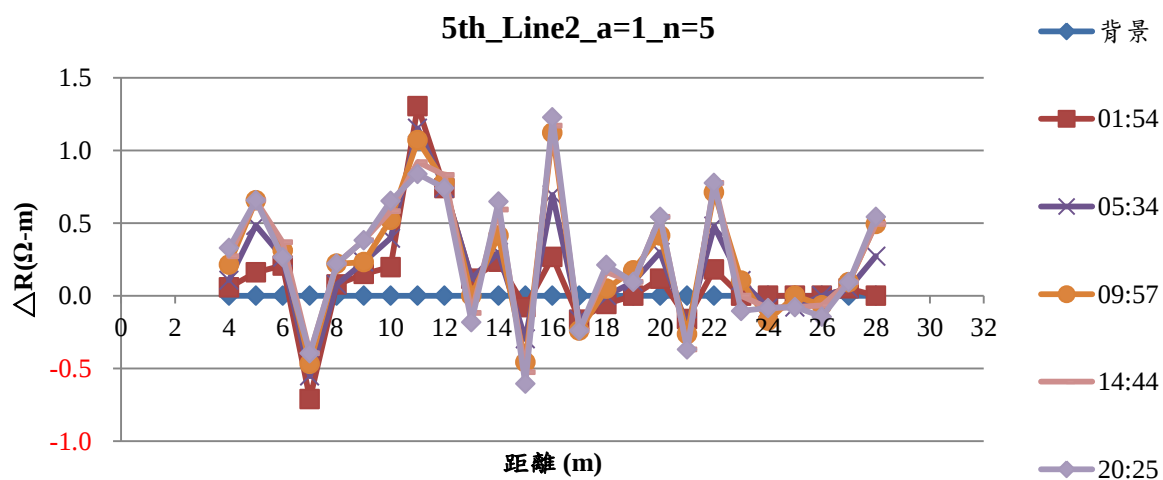


圖 5- 91、第五次試驗 Line 2 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

VI. 第六次地電阻雙單測線

注入井的位置約在 Line 1 的 $x=7\sim 8$ m 之間與 Line 2 的 $x=8$ m 旁，圖 5- 92 至圖 5- 94，Line 1 在不同深度的電阻變化量(ΔR)曲線，顯示 Line 1 測線在 $n=4$ ，電阻變化量不穩定，在 $x=2\sim 10$ m 之間，電阻值有高低不穩定之現象，範圍約在 $-0.1\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.3\ \Omega\text{-m}$ ，而在 $x=10\sim 12$ m 之間出現電阻上升的現象，在 $x=12\sim 28$ m 之間電阻有不穩定之現象，範圍約在 $-0.1\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.3\ \Omega\text{-m}$ ，然而須注意時間在注入示蹤劑後 3 個小時後之 $x=16\sim 20$ m 之間電阻有明顯下降的現象，變化量(ΔR)約為 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.5\ \Omega\text{-m}$ 。

Line1 測線在 $n=5$ ，電阻變化量依然不穩定，在 $x=2\sim 28$ m 之間電阻有不穩定現象，範圍約在 $-0.1\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.3\ \Omega\text{-m}$ ，其中在 $x=10\sim 12$ m 及 $x=20$ m 間出現電阻高峰值約在 $+0.4\ \Omega\text{-m}$ ，須注意時間在注入示蹤劑後 3 個小時後之 $x=15\sim 21$ m 之間電阻有明顯下降的現象，變化量(ΔR)約為 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.4\ \Omega\text{-m}$ 。

Line1 測線在 $n=6$ ，電阻變化量不穩定，在 $x=4\sim 28$ m 之間電阻有不穩定現象，範圍約在 $-0.1\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.3\ \Omega\text{-m}$ ，其中在 $x=6$ m 及 $x=12\sim 14$ m 之間電阻明顯下降的現象，範圍約在 $-0.2\ \Omega\text{-m}$ 至 $-0.4\ \Omega\text{-m}$ ，須注意時間在注入示蹤劑後 3 個小時後之 $x=14\sim 21$ m 之間電阻有明顯的下降的現象，變化量(ΔR)約為 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ 至 $+0.5\ \Omega\text{-m}$ 。

圖 5- 95 至圖 5- 97，Line 2 在不同深度的電阻變化量(ΔR)，Line 2 測線在 $n=4$ ，電阻變化量有顯著的高峰值出現，在 $x=14$ m、 20 m 及 24 m 時，電阻有明顯下降的現象，電阻變化量出現最低點 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ ，然而在 $x=16$ m 時電阻有明顯上升的現象，電阻變化量約在 $+0.5\ \Omega\text{-m}$ ，則在 $x=18\sim 20$ m 之間出現顯著的高峰值，電阻變化量約在 $+1.5\ \Omega\text{-m}$ ，變化量(ΔR)約為 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ 至 $+1.5\ \Omega\text{-m}$ 。

Line 2 測線在 $n=5$ ，電阻變化量有高峰值出現，在 $x=14$ m、 16 m、 18 m、 21 m 及 $x=23$ m 時，電阻有明顯下降的現象，電阻變化量出現最低點 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ ，然而在 $x=14\sim 16$ m 之間電阻有明顯上升，電阻變化量約在 $+0.5\ \Omega\text{-m}$ ，則在 $x=18\sim 21$ m 之間出現電阻最高峰值，電阻變化量約在 $+1.5\ \Omega\text{-m}$ ，變化量(ΔR)約為 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ 至 $+1.5\ \Omega\text{-m}$ 。

Line2 測線在 $n=6$ ，電阻變化量有顯著的高峰出現，在 $x=14$ m、 16 m 及 $x=22$ m 時，電阻有下降的現象，電阻變化量出現最低點 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ ，然而在 $x=14\sim 16$ m 之間電阻有明顯上升，電阻變化量約在 $+1.0\ \Omega\text{-m}$ ，則在 $x=20\sim 21$ m 之間出現電阻最高峰值，電阻變化量約在 $+2.0\ \Omega\text{-m}$ ，變化量(ΔR)約為 $-0.5\ \Omega\text{-m}$ 至 $+2.0\ \Omega\text{-m}$ 。

6th_Line 1

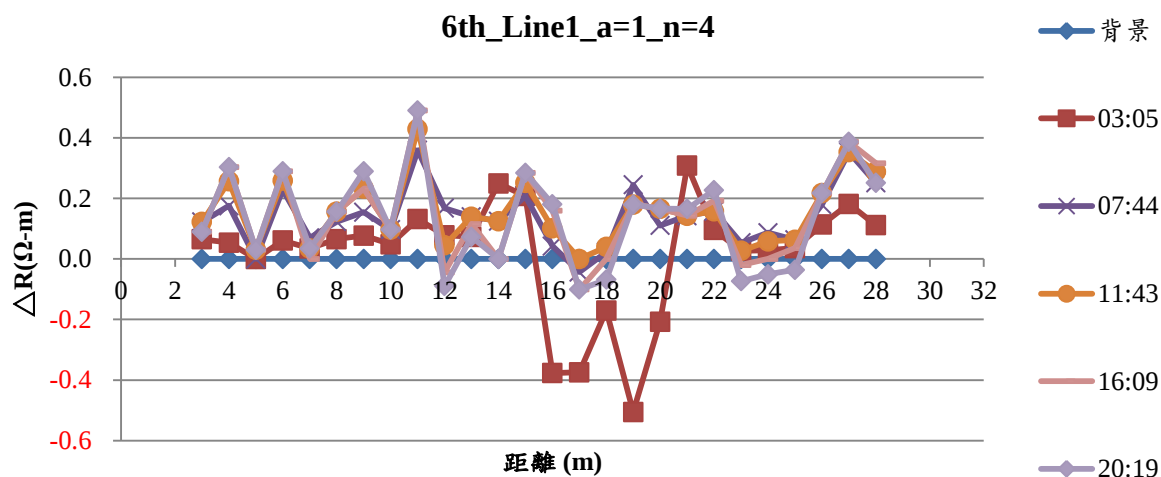


圖 5- 92、第六次試驗 Line 1 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

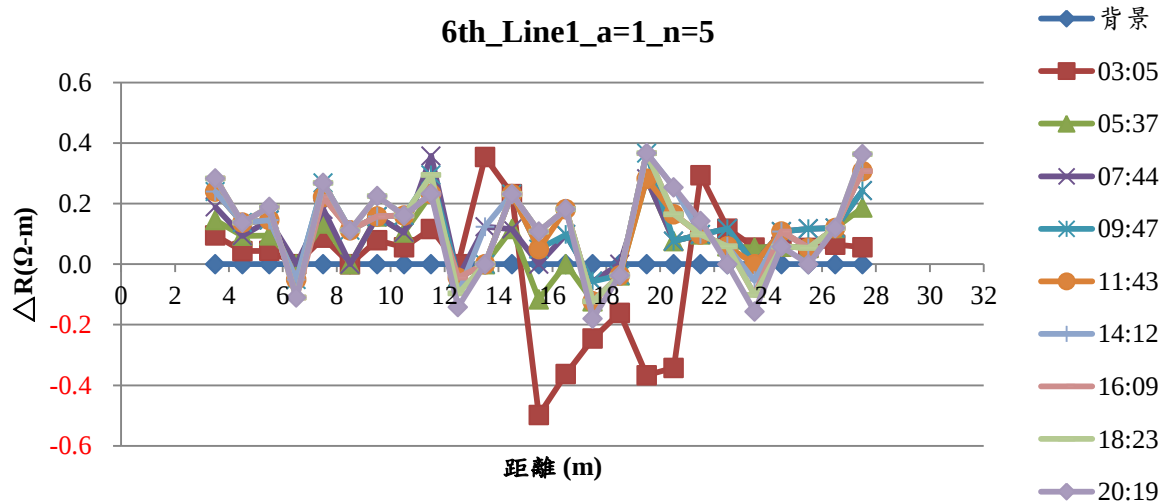


圖 5- 93、第六次試驗 Line 1 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

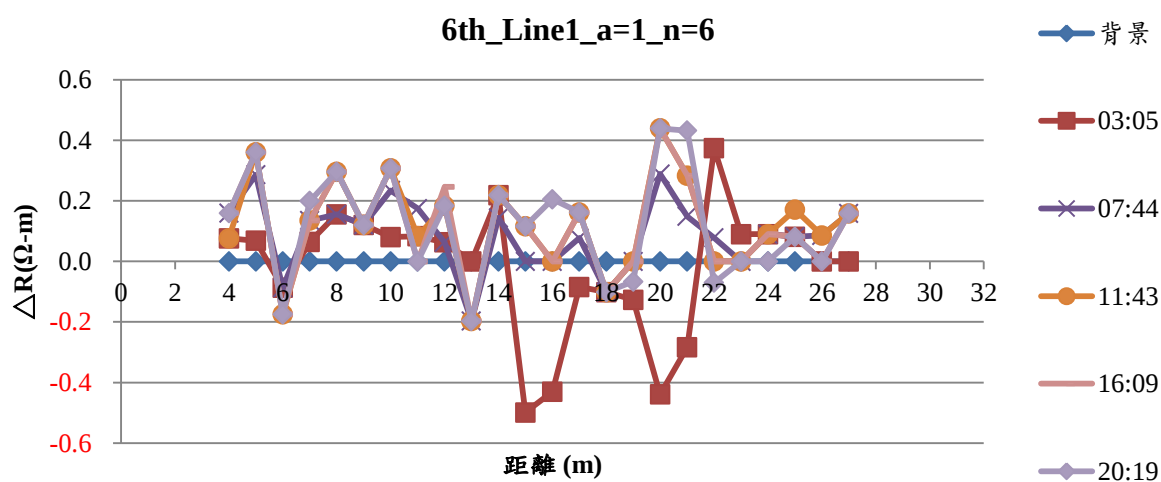


圖 5- 94、第六次試驗 Line 1 在深度 n=6，修正後視電阻率變化量曲線

6th_Line 2

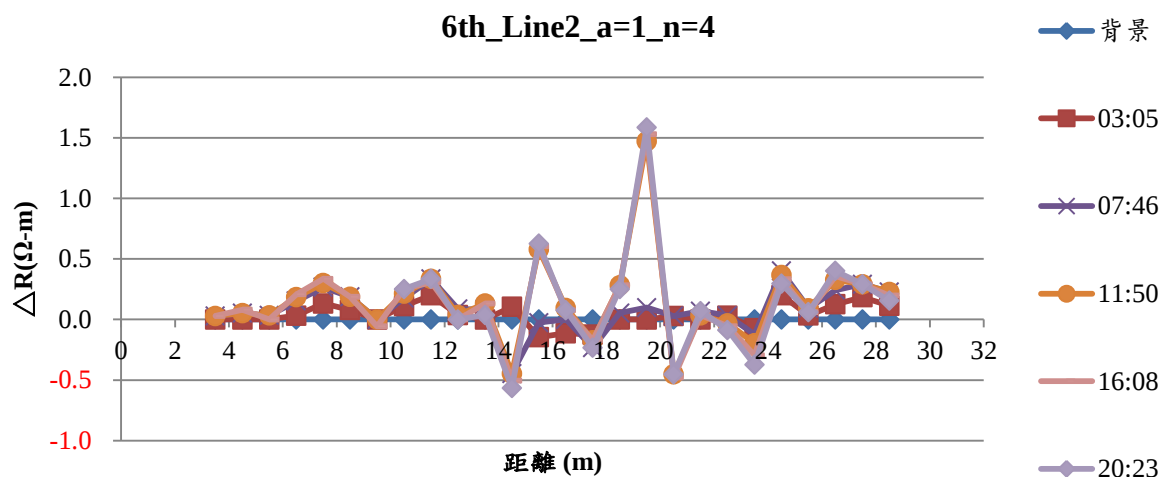


圖 5- 95、第六次試驗 Line 2 在深度 n=4，修正後視電阻率變化量曲線

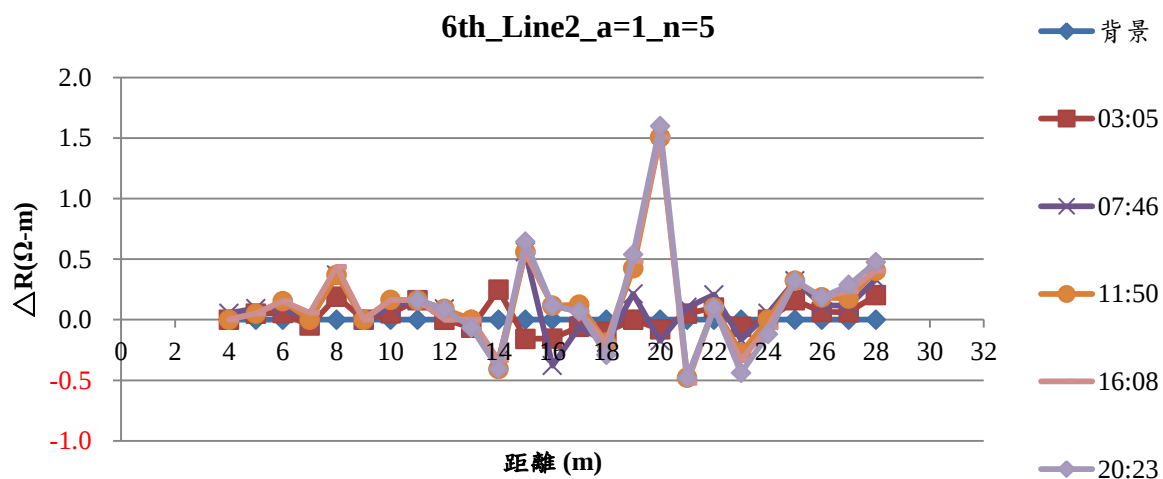


圖 5- 96、第六次試驗 Line 2 在深度 n=5，修正後視電阻率變化量曲線

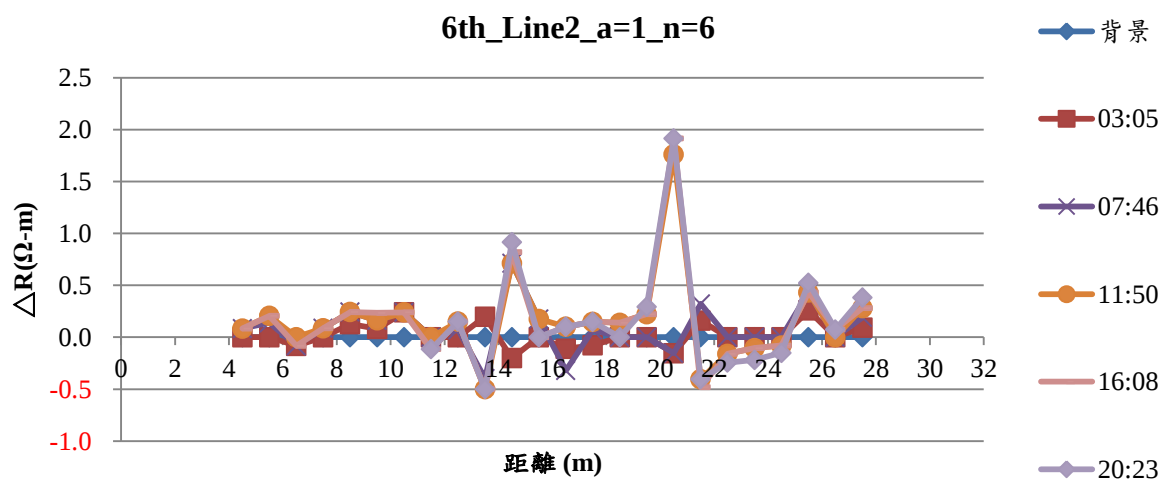


圖 5- 97、第六次試驗 Line 2 在深度 n=6，修正後視電阻率變化量曲線

5.2.4 六次地電阻試驗結果綜合討論

根據六次實場地電阻試驗監測結果顯示，原則上在注入井位置處，可以發現土壤地下水電阻有降低的趨勢，但除了試驗 No. 1 可能受下雨的影響，土壤含水率較高，所以地電阻測值的變化較大，此外，試驗 No. 2 至 No. 6 的地電阻變化明顯較小，變化範圍約在至之間。推測由於高導電度的鹽水進入地下水，造成地電阻電流大量流向示蹤劑團，讓電壓的變化較小，而產生電阻變化量不如預期。此外，注入鹽水示蹤劑體積 250 L 可能太少，亦為造成變化不大的原因，但為避免影響地下水水質，高導電度的鹽水體積也不能注入太多。而且由於注入井為地下 1.5 m 至 20 m 的全開篩井，亦會有示蹤劑分散不集中的現象。

此外，示蹤劑注入地下水後，發現地電阻測值有上升的趨勢，且電阻隨時間穩定增加，對於計畫假設高導電度的鹽水示蹤劑進入地下水後，應會產生電阻降低的情況有相反的趨勢。此現象的可能原因，推測是由於高導電度的鹽水進入地下水，造成地電阻電流大量流向示蹤劑團附近，由於未受示蹤劑影響的地下水電阻應維持背景值，以 $R=V/I$ 來看，儀器通入地下的定電流為固定值，但實際的電流分佈受到示蹤劑影響而增加，產生顯著的電壓上升情形，而有電阻值增加的現象發生。

根據本研究實場試驗結果，發現砂箱試驗與實場規模的試驗結果的不同，高導電度示蹤劑進入地下水，不止是改變電場的分佈，更可能改變電流的路徑分佈，與一般的定電流的假設有所差異。然而，試驗結果皆顯示注入井周圍電阻會有變化發生，說明地電阻的確能捕捉到示蹤劑的影響。而地電阻未能偵測到示蹤劑有明顯的移動情形，應該是地下水的流速太慢，實際上在有限的時間內，示蹤劑仍滯留於注入井或其位置附近。顯示若欲以地電阻推測地下水流速流向，地下水流速不能太慢。由於電極間距為 1 m，表示至少在地電阻監測數小時內，即要有 1 m 以上的移動距離，例如 1 m/hr 或 6 m/d。

彙整本計畫六次試驗結果之經驗，本技術的應用限制條件或是適用條件說明如下：

(1) 若地下有大型結構物或電力設備，於現勘時應事先調查，規劃電極佈設時則應避開以免干擾。若在背景地電阻施測階段，發現注入井附近或目標探測範圍內有異常電阻情形，應考慮改變測線位置。

(2) 探測深度建議應較示蹤劑注入深度為深，才能測得示蹤劑對含水層的電阻變化，且因地電阻探測深度愈深，資料點愈少，推估地下水流速流向應在水平方向上有足夠的資料點繪製電阻分佈，故建議探測深度為注

入深度的 2 倍以上。

(3) 地下水最低流速建議為在施測時間內，示蹤劑至少要移動大於電極佈設間距，而最高流速為單次測量時間內，地下水流速不會快到讓示蹤劑離開地電阻的探測範圍皆可，電極間距、展距、有效測深及流速可參考表 5-4。

表 5-4、電極間距、展距及有效測深和建議流速

電極間距	電極展距 ^a	有效測深	建議流速 ^b ($> \frac{\text{電極間距}}{\text{施測時間}}$)
0.5 m	7.5 m	2.25 m	$> 0.1 \text{ m/hr}$
1 m	15 m	4.5 m	$> 0.2 \text{ m/hr}$
2 m	30 m	9 m	$> 0.4 \text{ m/hr}$
5 m	75 m	22.5 m	$> 1 \text{ m/hr}$

(^a以單測線電極數目 16 根，^b施測時間 5 小時計)

(4) 土壤質地主要為影響地下水流速的主要因素，各種土壤之水力傳導係數及孔隙率參考值如下表 5-5 所述，根據現場條件的不同，水力梯度等，其狀況不一。例如水力梯度 0.1，欲以電極間距 1 m 施測 5 小時，其地下水流速建議大於 0.2 m/hr，以達西流速推估孔隙率為 50% 的土壤，其 K 值應大於 1 m/hr。

表 5-5、土壤之水力傳導係數及孔隙率參考值

土壤	K (m/hr)	θ (%)
Gravel	3.6~3600	25~40
Sand	$3.6 \times 10^{-4} \sim 36$	25~50
Silt	$3.6 \times 10^{-6} \sim 3.6 \times 10^{-2}$	35~50
Clay	$3.6 \times 10^{-8} \sim 3.6 \times 10^{-4}$	40~70

(環保署，2006，「地下水污染擴散模式建立之研究」)

(5) 示蹤劑的作用在於注入地下含水層後，應與地下水背景導電度產生較大的電阻差異性，才能由地電阻探測其電阻變化，進而推估流速流向，

若示蹤劑導電度與地下水導電度接近，或是地下存在著與示蹤劑導電度接近的結構物，則可能造成干擾或無法辨別電阻變化的程度。若示蹤劑之鹽水濃度過高，密度過大，可能造成示蹤劑下沉，以及影響地下水質與土壤地下水環境。示蹤劑濃度太低，或與地下水背景導電度差異過小，則無法有效分辨其電阻之差異程度。

(6) 注入井開篩長度過長，例如 18.5 m，表示注入的示蹤劑會垂直充滿井管，以垂直線性長度 18.5 m 從井管內流出進入含水層中傳輸擴散，此情形可能造成示蹤劑經大量稀釋後，無法顯著影響地下水之電阻。未來研究建議可使用封塞(packer)，減少注入井開篩長度，及控制注入深度在地下水水位面附近，使示蹤劑能集中為點源擴散。

(7) 地下水位低於開篩深度頂部，注入之示蹤劑可能有部分會流入未飽和層，以致進入含水層的示蹤劑體積減少，故建議地下水位應高於注入井開篩頂部，以確保示蹤劑僅在飽和含水層中傳輸擴散為主。

5.2.5 實場應用設計規劃

本技術之實場應用設計規劃步驟說明如下：

- (1) 蒐集背景資料：包含地形、腹地大小、現場地下水位、水質導電度、土壤水力傳導係數、注入井開篩深度與長度、是否有地下地電設備等。
- (2) 場址現勘與測線規劃：瞭解現場實際狀況，並記錄供地電阻測線佈設規劃，如測線數量、長度、間距、測深，測線方向等，以及試驗執行時所需水電來源，或需自備發電機與水箱。
- (3) 電極佈設：根據測線規劃位置設置電極棒插入土壤，並移除地表干擾物或避開障礙物，確認電極棒與土壤有良好的接觸。
- (4) 背景電阻施測：包含背景值的重複量測，並排除故障或干擾，電極是否能有效放電與收電，以及資料是否有異常等。
- (5) 示蹤劑的準備及注入：以 NaCl 調配高導電度示蹤劑，以地下水導電度 $600\ \mu\text{S/cm}$ ，可考慮使用導電度 $5000\ \mu\text{S/cm}$ 的示蹤劑。示蹤劑導電度濃度若過高，則可能因密度過大而下沉。
- (6) 地電阻監測：示蹤劑注入後，持續監測地電阻，以獲得地下電阻值隨時間的變化資料。
- (7) 資料處理與分析：監測資料與背景值進行比對，計算地下電阻的變化及分佈，以推估地下水流速流向。

5.3 傳輸模式模擬

本研究以傳輸模式模擬鹽水示蹤劑在地下水中造成的導電度變化，由於六次地電阻試驗結果皆未能明顯看出示蹤劑的移動，僅在注入井附近有較大的電阻(導電度)變化，因此，本傳輸模式模擬以了解及驗證示蹤劑隨時間的移動情形，對地下水導電度改變的影響為主要目的。

5.3.1 地下水模式建置

I. 模擬分析範圍

模擬網格數量為 140×140 ，網格大小為 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ，如圖 5-98 所示，總模擬範圍長 14 m，寬 14 m。地表高程頂部為 49 m，底部為 29 m，模擬含水層厚度為 20 m。監測井 BH01~BH11、BH16~BH21 依現場實際位置以⊕標示。

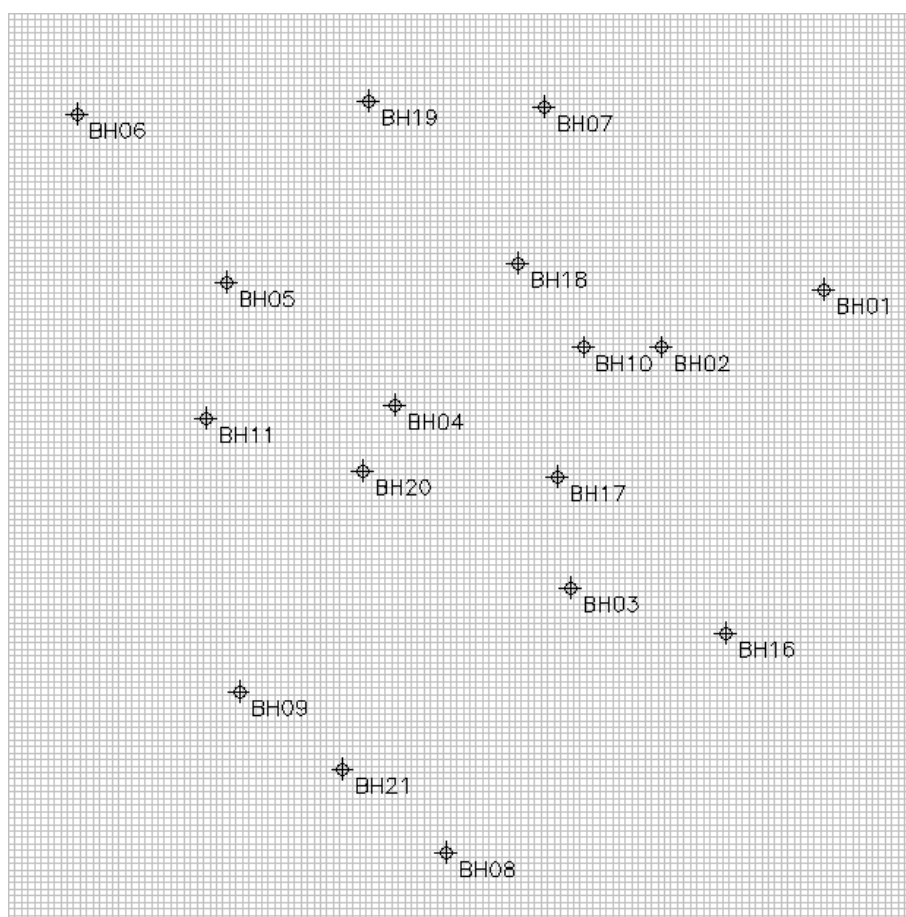


圖 5-98、模擬範圍網格及監測井分佈

II. 模擬參數設定

含水層數為 1 層，含水層類型設置為非拘限含水層(Unconfined)，異向因子 (Anisotropy Factor) 為 1，Transmissivity 及 Leakance 由模式自行計算。含水層頂部

高程為 49 m，底部高程為 29 m，總含水層厚度為 20 m。

初始地下水水頭條件根據每次地電阻試驗前測得實場穩態地下水水位高程設定，地下水位彙整於表 5-6。除抽水井外，其它監測井皆可視為地下水水位觀測井，且距抽水井較遠的外圍監測井，在地下水流場達穩態以後，其水位亦無顯著變化，因此可以外圍監測井水為作為固定地下水水頭邊界條件。邊界條件設定根據每次抽水既地電阻試驗實際的抽水井以及模擬範圍外圍之監測井(BH06、BH19、BH07、BH01、BH16、BH08、BH21 及 BH09，共 8 口觀測水位)作為固定水頭邊界條件，以模擬地下水流場分佈情形。

模擬時間設定分為三階段，第一階段為模擬未注入前地下水穩定流場分佈，第二階段為注入示蹤劑 250 L，注入時間 1 小時，第三階段為示蹤劑停止注入後地下水流場分佈。模擬流場類型為穩態流場(Steady-State)，模擬時間單位為秒(sec)。為單純模擬條件，水力傳導係數(Horizontal Hydraulic Conductivity)假設均勻 K 為 0.001 cm/sec。有效孔隙率(Effective Porosity)設定為 0.25。MODFLOW 模組設定在第一階段穩態流場模擬完成後，於第二階段在注入井注入流率 $69.44 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 的鹽水示蹤劑持續一小時，相當於一小時內共注入 250 L 的水量，作為模擬示蹤劑注入的水量條件。MT3D 模組，設定地下水初始濃度為導電度 600 S/cm，對流項以 HMOC 及混合做計算，相關參數以模式初始值做設定。本次模擬主要目的為了解示蹤劑團高濃度質心的移動距離以及示蹤劑隨流場之移動方向，因此流場延散程度暫不考慮，MT3D 設定為不使用延散套件。Sink/Source concentration 設定第一階段無任何注入濃度，第二階段注入井注入之鹽水示蹤劑為導電度 $5000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，第三階段亦無任何注入濃度。

模式參數設定完成後，根據不同場次之抽水既地電阻試驗觀測得地下水位以及抽水井與注入井位置作調整，模擬各場次地下水流場分佈及地下水導電度變化說明於「5.3.2 地下水模擬結果」。

表 5-6、模擬抽水井水位

監測井編號	地下水水位高程					
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次
BH01	46.03	45.81	46.33	45.47	46.24	46.12
BH02	45.63	45.46	46.28	45.16	46.10	45.86
BH03	43.58	45.35	46.25	45.06	46.19	45.83
BH04	45.25	44.95	47.61	44.68	46.07	41.44
BH05	45.48	45.82	46.12	44.53	46.04	45.80
BH06	45.99	45.21	46.12	41.31	46.11	45.95
BH07	45.86	45.47	46.28	45.13	44.52	46.97
BH08	45.62	45.47	46.21	45.20	46.32	46.01
BH09	45.48	45.12	46.10	44.88	46.23	45.87
BH10	45.97	45.66	45.93	45.35	43.48	43.30
BH11	39.59	38.30	44.63	38.71	46.17	45.74
BH16	45.91	45.81	46.31	45.44	46.30	46.09
BH17	45.55	45.48	46.32	45.20	46.12	45.77
BH18	45.81	45.45	46.19	45.15	45.82	45.74
BH19	45.86	45.36	46.02	45.00	45.96	45.86
BH20	45.19	44.83	46.17	44.64	46.13	45.48
BH21	45.73	45.48	46.17	45.19	46.27	45.97

5.3.2 地下水模擬結果

第一次試驗模擬流場分佈如圖 5- 99，模擬注入井 BH10 周圍地下水導電度變化如圖 5- 100，顯示示蹤劑注入後 24 小時，其高導電度峰值約移動 50 cm，地下水受示蹤劑影響導電度變化從注入後 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐漸將低至 3750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

第二次試驗模擬流場分佈如圖 5- 101，模擬注入井 BH04 周圍地下水導電度變化如圖 5- 102，顯示示蹤劑注入後 24 小時，其高導電度峰值約移動 90 cm，地下水受示蹤劑影響導電度變化從注入後 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐漸將低至 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

第三次試驗模擬流場分佈如圖 5- 103，模擬注入井 BH04 周圍地下水導電度變化如圖 5- 104，顯示示蹤劑注入後 7 小時，其高導電度峰值約移動 80 cm，地下水受示蹤劑影響導電度變化從注入後 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐漸將低至 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

第四次試驗模擬流場分佈如圖 5- 105，模擬注入井 BH07 周圍地下水導電度變化如圖 5- 106，顯示示蹤劑注入後 24 小時，其高導電度峰值約移動 40 cm，地下水受示蹤劑影響導電度變化從注入後 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐漸將低至 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

第五次試驗模擬流場分佈如圖 5- 107，模擬注入井 BH02 周圍地下水導電度變化如圖 5- 108，顯示示蹤劑注入後 12 小時，其高導電度峰值約移動 120 cm，地下水受示蹤劑影響導電度變化從注入後 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐漸將低至 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

第六次試驗模擬流場分佈如圖 5- 109，模擬注入井 BH11 周圍地下水導電度變化如圖 5- 110，顯示示蹤劑注入後 24 小時，其高導電度峰值約移動 80 cm，地下水受示蹤劑影響導電度變化從注入後 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐漸將低至 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

綜合模擬結果，顯示示蹤劑團在模擬注入後 24 小時，影響範圍僅 50 至 120 cm，表示六次抽水產生的人為流場，其地下水流速約為 0.5 至 1.2 m/d，說明地下水流場流速較慢，示蹤劑團移動的距離過短，且小於地電阻電極間距 1 m。對於每小時一筆地電阻監測數據，監測時間 8 至 24 小時的地電阻試驗，不足以偵測到示蹤劑團有顯著的移動，然而，注入井位置基本上仍會有高導電度的示蹤劑團，此現象與實場試驗結果相符。

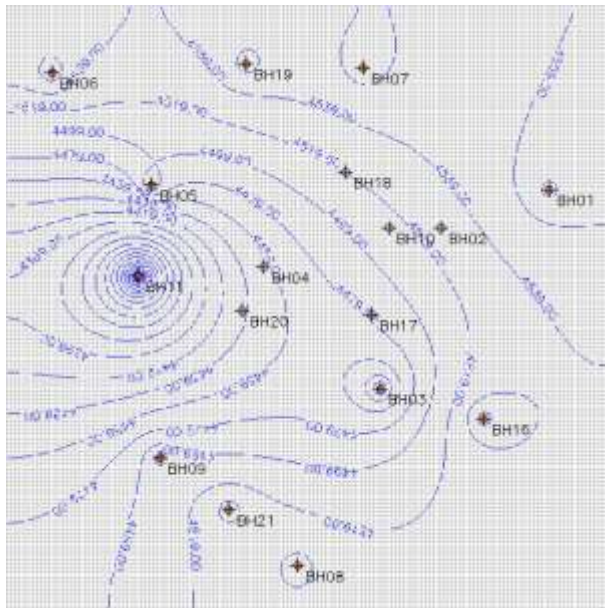


圖 5- 99、第一次試驗模擬流場分佈

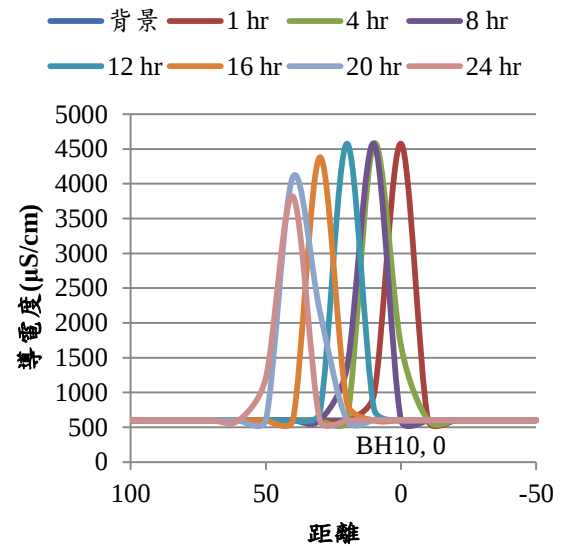


圖 5- 100、第一次試驗導電度變化情形

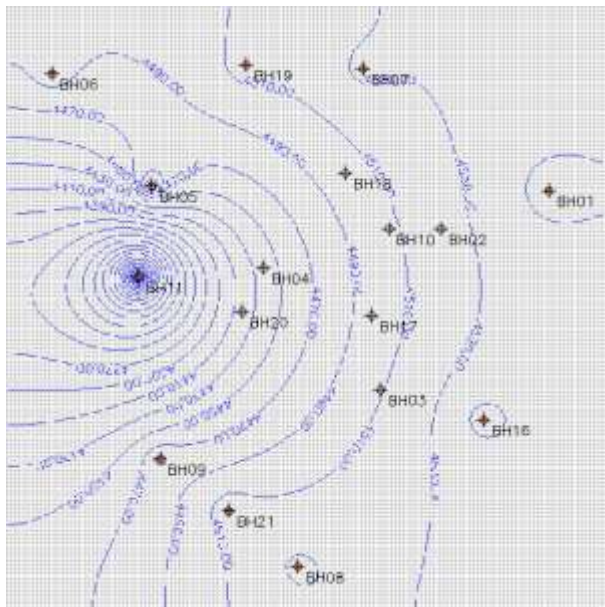


圖 5- 101、第二次試驗模擬流場分佈

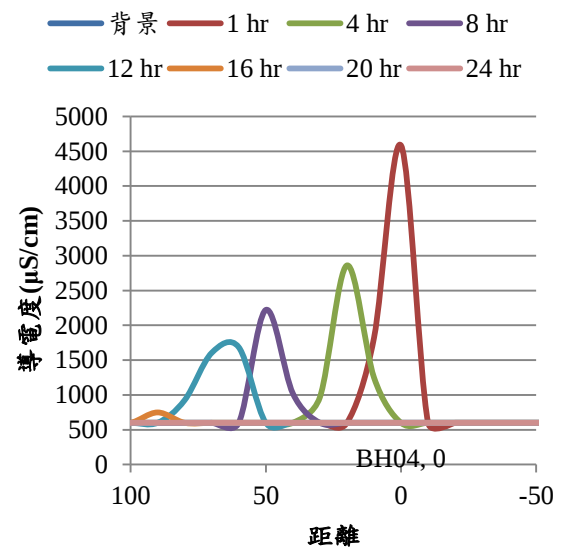


圖 5- 102、第二次試驗導電度變化情形

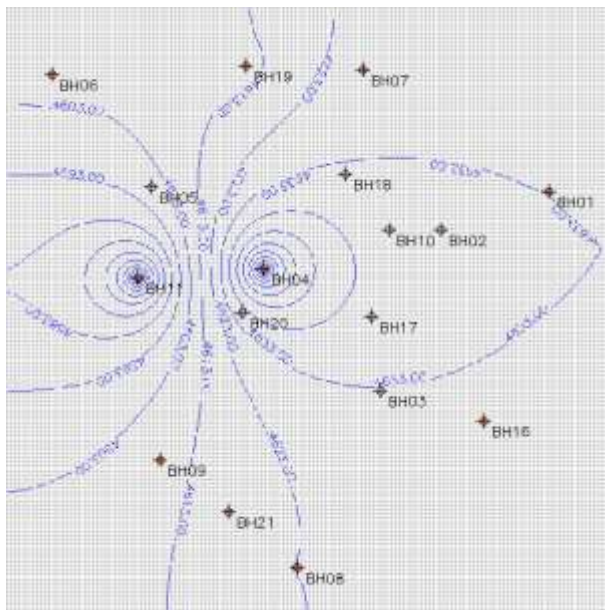


圖 5- 103、第三次試驗模擬流場分佈

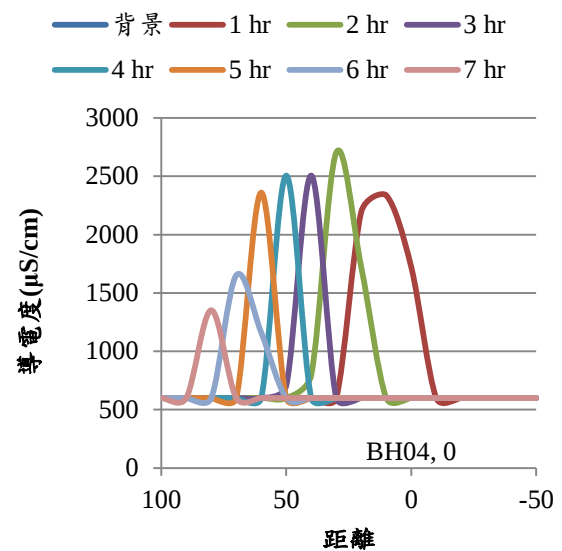


圖 5- 104、第三次試驗導電度變化情形

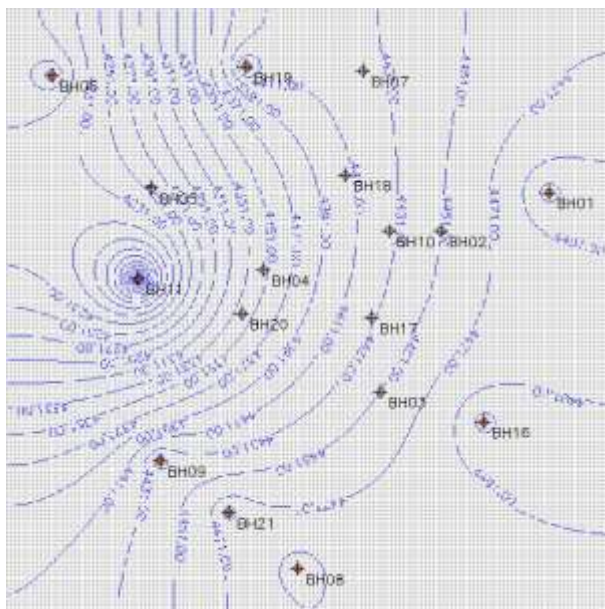


圖 5- 105、第四次試驗模擬流場分佈

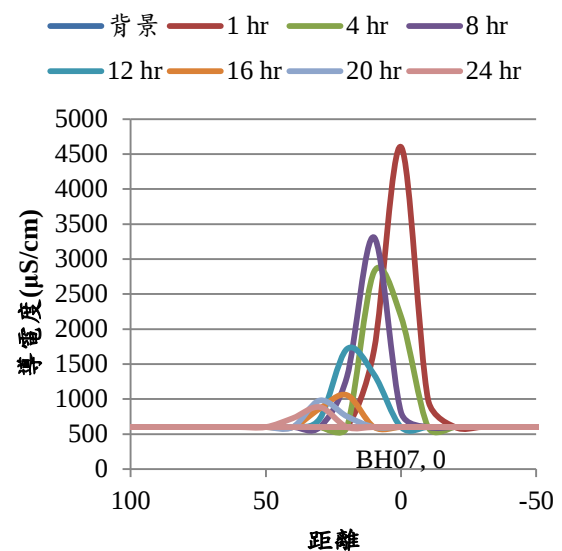


圖 5- 106、第四次試驗導電度變化情形

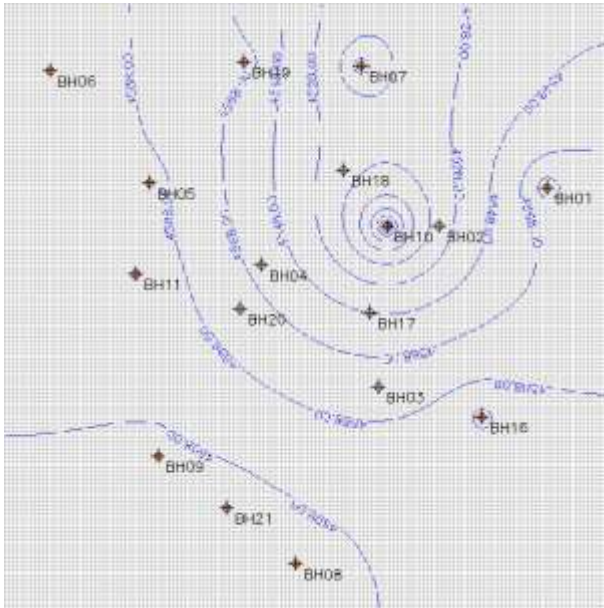


圖 5- 107、第五次試驗模擬流場分佈

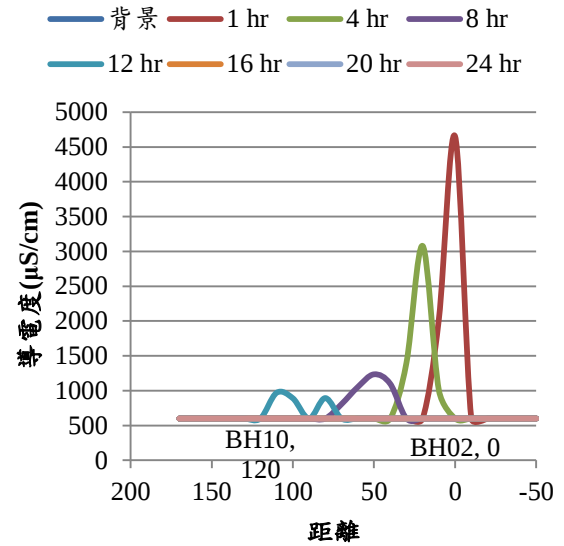


圖 5- 108、第五次試驗導電度變化情形

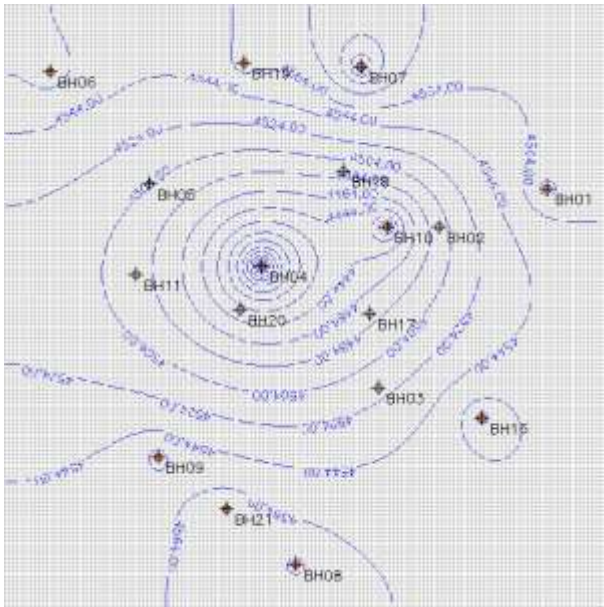


圖 5- 109、第六次試驗模擬流場分佈

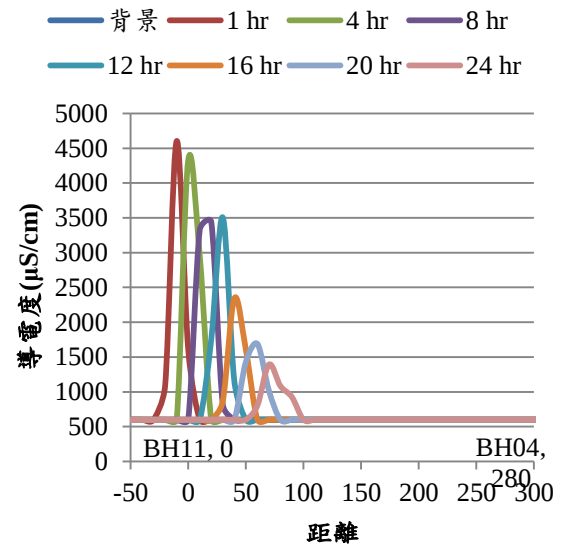


圖 5- 110、第六次試驗導電度變化情形

5.4 結論與建議

本計畫目前獲得之研究數據指出，地電阻確實能感測到實場地下水受高導電度示蹤劑影響，產生較背景值為低的電阻，且電阻峰值隨時間有降低的趨勢。透過此電阻變化量隨時空變化的趨勢，應能解析地下水流場流速流向等訊息。但目前數據分析結果顯示，地電阻資料未能明確掌握示蹤劑的移動變化，主要原因是流場流速太慢，以至於在有限時間內測量的視電阻峰值的移動距離較地電阻電極間距短(<1 m)，故無法解析出示蹤劑的移動方向。本研究有以下幾點結論與建議：

1. 土壤含水率會影響示蹤劑反映在地電阻變化量的大小，下雨後土壤含水率較高，地電阻受示蹤劑影響變化量較大。
2. 為避免影響地下水質，示蹤劑注入濃度與體積不能太多，可能是地電阻變化量不如預期的原因。
3. 本場址監測井皆為 18.5 m 完全貫穿的全開篩井，對於示蹤劑注入進入地下水的深度不易掌握，亦會有示蹤劑分散不集中的現象。
4. 受場址導水係數的影響，示蹤劑完全注入所需的時間需要 1 至 2 小時以上，表示單位時間內進入地下水的示蹤劑體積亦受到限制。
5. 示蹤劑注入地下水後，除了發現地電阻測值降低，亦會有上升的現象。推測是地下水高導電度增加，造成地電阻電流大量流向示蹤劑團附近，影響電流地流動與分佈，產生顯著的電壓上升情形，而有電阻值增加的現象發生。
6. 根據本研究實場試驗結果，發現砂箱試驗與實場規模的試驗結果的不同，高導電度示蹤劑進入地下水，不止是改變電場的分佈，更可能改變電流的路徑分佈，與一般的定電流的假設有所差異。然而，試驗結果皆顯示注入井周圍電阻會有變化發生，說明地電阻的確能捕捉到示蹤劑的影響。

地下水模擬顯示地下水流速較慢，約為 0.5 至 1.2 m/d，表示以目前試驗的監測時間內，示蹤劑團未顯著的移動或移動距離小於電極間距 1m，然而，注入井位置基本上仍會有高導電度的示蹤劑團，此現象與實場試驗結果相符。若欲以地電阻推測地下水流速流向，地下水流速不能太慢。

參考文獻

- 劉振宇，(1993)，污染區地下水水文地質調查分析，中國環境工程學刊。
- 段偉宗，(2000)，併合二維、三維地電阻影像法及透地雷達法應用於管線及估計電石渣總量上之研究，國立中央大學地球物理研究所。
- 陳佑邦，(2001)，應用地電阻影像剖面法於新城斷層之研究，國立中央大學應用地質研究所。
- 鍾進渝，(2001)，地電阻影像法應用於地層污染檢測之研究，國立中央大學應用地質研究所。
- 陳可恭，(2002)，二維地電阻率影像剖面法在地下水測勘，宜蘭技術學報(9)，147-158。
- 洪彥豪，(2004)，應用地電阻影像剖面法於湖口斷層之研究，國立中央大學應用地質研究所。
- 陳宜傑，(2004)，應用地電阻法於土石流地滑之研究，國立中央大學應用地質研究所。
- 王子賓，(2005)，結合地電阻影像剖面法及透地雷達法調查 DNAPLs 之案例研究，國立中央大學應用地質研究所。
- 康晏棋，(2005)，八卦台地之電阻率構造研究，國立中央大學地球物理研究所。
- 行政院環境保護署，(2006)，油品類儲槽系統快速場址調查及評估技術參考手冊，行政院環境保護署。
- 李冠樺，(2006)，電容耦合地電阻探測系統應用於地下管線與坑道之研究，國立中央大學地球物理研究所。
- 洪瑛鈞、尤仁弘、林志平、廖志中、胡賢能、張振成，(2006)，地電阻剖面影像探測在新竹斷層調查之應用，岩盤工程研討會論文集。
- 梅興泰，(2006)，地電阻影像剖面法對非均質地下實體之模擬分析，技術學刊(4)，369-382。
- 楊潔豪，(2007)，應用地電阻影像法調查地層中 DNAPL 污染團，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊。

- 蔡艾迪，(2007)，應用地電阻影像法偵檢 DNAPL 污染，清雲科技大學土木與防災科技研究所。
- 黃亦青，(2008)，應用三維地電阻方法評估污染物的傳輸及分佈之可行性先導研究，嘉南藥理科技大學環境工程與科學研究所。
- 李正兆，(2009)，整合地電阻法與水文地質調查於崩塌地滑動之機制研究，國立中央大學地球物理研究所。
- 楊光程，(2009)，二維地電阻影像探測之 3D 效應研究，國立交通大學土木工程研究所。
- 周允文、謝政璋、蔡同宏、劉振維，(2010)，地電阻影像剖面法應用於莫拉克風災後高 133 線不老溫泉區之地滑調查與研析，中華技術專題報導。
- 游峻一、石宇倫、鄭智鴻、林彥之、陳冠豪、陳博隆，(2011)，地電阻法應用於竹北地區海水入侵之調查，土木工程與物業管理研討會。
- 馮正一、鄒佩蓉、陳奕凱、鄭旭涵，(2011)，應用地電阻剖面法於土壤地層水份變化與 SPT-N 值比對，中華水土保持學報(42)，57-66。
- 林彥之，(2012)，應用地電阻影像剖面法與水平迴圈電磁法於地下掩埋物調查之研究，清雲科技大學空間資訊與防災科技研究所。
- 林澤宗，(2012)，地電法於地下掩埋物調查之研究，國立中央大學地球物理研究所。
- 中興工程顧問股份有限公司，(2013)，漢翔台中一廠區地下水污染整治場址整治計畫書。
- 林海倫，(2013)，應用一維地電阻於水力傳導係數推估 -以濁水溪沖積扇為例，國立交通大學土木工程研究所。
- 洪瑛鈞，(2013)，地電阻影像探測在地工調查之應用與問題探討，國立交通大學土木工程博士班。
- 鄭世楠、劉興昌、林志平，(2013)，應用多重電極排列與感應極化法調查砂礫質地層污染之研究，102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗成果發表會，行政院環保署，88-93。
- 經濟部，(2014)，地下水補注地質敏感區劃定計畫書(G0001 濁水溪沖積扇)。

- Archie, G. E. (1942). *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 146, 54-62. doi: 10.2118/942054-G
- Baesle, L. H. (1969). *Migration of radionuclides in porous media*. In A. M. F. Duhamel (Ed.), Progress in nuclear energy series XII, Health Physics (pp. 707-730). Elmsford, N.Y.: Pergamon Press.
- Bowen, I. R., Devlin, J. F., & Schillig, P. C. (2012). *Design and Testing of a Convenient Benchtop Sandbox for Controlled Flow Experiments*. Groundwater Monitoring & Remediation, 32(4), 87-91. doi: 10.1111/j.1745-6592.2012.01400.x
- Bradbury, K. R., Muldoon, M. A., Zaporozec, A., & Levy, J. (1991). *Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks (pp. 144): Office of Ground Water and Drinking Water*, Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Hunt, B. (1978). *Dispersive sources in uniform ground-water flow*. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 104 (HY1), 75-85.
- Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., & Sandberg, S. (2002). *A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank*. Journal of Applied Geophysics, 49(4), 211-229. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00124-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00124-6)
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). *Electrical resistivity survey in soil science: a review*. Soil and Tillage Research, 83(2), 173-193. doi: 10.1016/j.still.2004.10.