

行政院環境保護署

104 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：方法建置及驗證

期末報告(定稿)

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：103 年 12 月 1 日起至
104 年 11 月 30 日止

中華民國 104 年 11 月 印製

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」

修正計畫書初審意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	專案類型	■ 研究計畫 □ 模場試驗	
計畫主持人	陳建隆	研究類別	□ 調查 □ 整治 ■ 評估 □ 底泥	
計畫名稱	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			
專案連絡人	陳建隆	連絡專線	04-24517250x5223; 0920766920	
政策性審查意見		計畫單位回覆		
資料儲存裝置非本署補助項目，原則不得編列。		已將「資料儲存裝置」項目刪除。		
技術性審查意見		計畫單位回覆		
委員 1		1.感謝委員支持。地電阻儀是以量測之導電度變化轉換成示蹤劑濃度變化。而量測導電度的敏感度則可由兩方面來增加：電極間距及放電時間。因此，本計畫書原來電極佈置間距為 10 公分，但為了提升準確度，本修正計畫書已將電極間距縮短為 5 公分。文獻中建議放電時間 1.2 秒以上可有效減少干擾，因此本研究使用之地電阻儀放電時間將設定為 1~2 秒。如此應可有效呈現示蹤劑之濃度變化。		
1. 本計畫擬探討以 NaCl 為示蹤劑，藉由地電阻探測技術推估地下水流速流向，值得一試。但可能遇到之最大問題是地電阻探測儀量測資料所推估之電阻值變化無法有效呈現示蹤劑之濃度變化。		2.地電阻探測方法之可靠性之驗證呈現於計畫書五、(三) 地下水導電度與阻剖面之關聯性探討。本研究將運用 Archie's Law 來驗證地電阻方法的可靠度。地下水的導電度將以導電度電極在注入井(1 口)及監測井中(11 口)直接量測。量測值將當成是觀測值。而地電阻儀所測得之導電度則為推估值，根據 Archie's Law，觀測值與推估值間有一正比關係。因此當觀測值與推估值之 coefficient of correlation (R ²) 愈高則表示地電阻方法之可靠度愈高。另外，在不同時間所測得之觀測值及推估值”本身的差異”也應呈現正相關，本研究亦將以不同時間所測得之導電度差異相關性評估地電阻方法之可靠度。		
2. 在實驗中，如何驗證所建立之地電阻探測方法之可靠性，未見說明。		3. 土壤以及地下水中也有許多鹽類可能會干擾電阻之測值，在實際應用時如何克服，應加以探討。		
3. 土壤以及地下水中也有許多鹽類可能會干擾電阻之測值，在實際應用時如何克服，應加以探討。		3. 土壤以及地下水中也有許多鹽類可能會干擾電阻之測值，因此所注入之示蹤劑導電度必須遠大於含水層之背景導電度，本研究所使用之示蹤劑導電度為 5000 S/cm，遠超過一般地下水導電度，因此應可探測出導電度之”差異變化”，而此”差異變化”完全是由示蹤劑在地下水流場傳輸下所造成，與原本之土壤或鹽類濃度		

	無關，因此若示蹤劑導電度夠大，就可藉由地電阻探測出變化最大的位置，進而推算出地下水流速及流向。
委員 2 1. 本計畫提出以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法並評估其敏感度及準確度。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。此外本計畫亦將建立地電阻影像探測所得之表面導電度與孔隙水導電度之關係。 2. 本計畫具創新性，對未來特殊土壤及地下水污染場址之水文調查工作之執行應有貢獻。本計畫亦是少數能在地物領域作鑽研的計畫。 3. 計畫書撰寫是否具體詳盡，研究方法及步驟之可行性。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 計畫書內容已盡力達到具體詳盡，研究方法及步驟可行性也已在計畫書中呈現。
委員 3 1. 本案擬以地電阻探測技術建立地下水之流速與流向量測方法，有助掌握污染物在含水層之動態。 2. 為期本案之成果能具實用性，僅採實驗室 1.5 m*0.5 m*1.0 m 砂箱進行，似有不足，應有現場實地驗證。 3. 人力需求高估，經常門費用偏高。	1. 謝謝委員意見。 2. 本計畫的目的為方法建立及驗證。必須實際量測觀測井中地下水導電度分佈及變化。因此以砂箱進行實驗。實場驗證則為下一階段之計畫目標。主要原因為在實場驗證中必須另設置頗多觀測井以採集地下水樣，除了費用昂貴，在方法尚未建立前貿然進行實場驗證也容易失敗。因此，本研究以砂箱試驗為主，並著重在數據的取得與模式的推導驗證。 3. 已將人力需求大幅修正降低，以符合經費編列規範之要求。
委員 4 1. 設計僅用細砂作研究，應以此先作預備試驗，可行後再提計畫，以不同質地剖面作設計。 2. 依可遇到問題評估，預期成效不高。	1. 謝謝委員意見。本計畫的目的為方法建立及驗證。若計畫結果顯示方法可行，則下一階段將依委員建議以不同質地剖面作設計，若條件許可的話，並將提出實場驗證計畫。 2. 謝謝委員意見。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，若結果為可行則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。
委員 5 1. 研究方法對未來實際應用性並不明確，建議宜先評估本技術的限制與干擾因子與可能的克服方式（例如：計畫書中表 4.1 的相關文獻彙整與本計畫的關係的討論...等）。 2. 專案執行的預期成果未具體說明。	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。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，除了使場址概念模式更精準外，更可省卻昂貴的設井費用。另外，表 4.1 中文獻並未有與本計畫相關之研究，因此本計畫之研究為較新穎之議題。 2. 謝謝委員意見。本計畫之主要預期成果如上 1 所述，其他則於計畫書中詳述，修正後計畫書之預期成效也已根據委員意見加強說明。
綜合性審查意見	計畫單位回覆
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。
委員複審意見	計畫單位回覆
委員意見：本計畫為「...方法建置及驗證」，建議研究成果能以實測結果驗證。	謝謝委員意見。本計畫的目的為方法建立及驗證。必須實際量測觀測井中地下水導電度分佈及變化。因此以砂箱進行實驗。實場驗證則為下一阶段之計畫目標。主要原因為在實場驗證中除了注入井外，必須另設置觀測井以採集地下水樣，除了費用昂貴，在方法尚未建立前貿然進行實場驗證也容易失敗。另外在實場試驗中如何得到正確地下水流速流向以供驗證本技術使用，也是另一挑戰性頗高之工作。因此，本研究以砂箱試驗為主，並著重在數據的取得與模式的推導驗證。當砂箱實驗驗證完成後，對再進一步設計進行實場實驗並驗證之動機，將較具有說服力。
本署複審意見	計畫單位回覆
經費無違規編列項目。	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」

期中報告初審意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	■ 研究計畫 □ 現地試驗
計畫類別	□ 調查 □ 整治復育 ■ 評估 □ 底泥		主持人：陳建隆 NO：
計畫名稱	以地電阻影像探測技術推估下水流速向：方法建置及驗證		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 已達預定之工作進度與目標。 2. 除實驗室之測試外，建議能有一實際之地下水污染場址做測試，以驗證實場之應用性。		1. 謝謝委員意見。 2. 感謝委員的建議及鼓勵。團隊也希望將此技術運用到實場以驗證其實用性，但限於本計畫原設定的計畫範疇並未涵蓋實場驗證，因此無論在設備、時間、及經費方面，皆無法負擔實場測試。 在設備上，實場驗證必須有長 60 公分，直徑 1 公分以上之電極棒 32 支，還有 兩電極間的纜線至少 5 公尺，總共約 160 公尺長 (經詢價電極加電纜線約 NT150,000)。團隊目前使用的電極及電纜線皆只能用於砂箱實驗 (電極長 60 公分； 直徑 0.6 公分； 兩電極間電纜長 5 公分)，無法用於實場。在時間方面，本團隊目前正執行後半年度工作，若進行實場驗證，會影響到原訂計畫之執行進度。在經費方面，實場驗證可能必須設置觀測井，設井費用昂貴。且本團隊依據土基會所訂定之地電阻費用訂定標準，假設在實場進行 2 次各 180 公尺之地電阻費用，其總經費為 NT330,000。此經費並未納入本計畫之經費需求內。 基於以上限制，本團隊實無法再進行實場驗證工作。本團隊將在計畫結束後，根據結果針對如何進行實場測試提出初步規劃，內容將涵蓋電極排列方式、資料讀取時間間距、示蹤劑導電度、示蹤劑注入方式及注入量等。	
委員二 1. 本研究以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法並評估其敏感度及準確度。此方法主要目的為在只有一口地下水監測井的限制下，發展地下水流速流向測定技術。本研究亦建立地電阻影像探測所得之表面導電度與孔隙水導電度之關係。 2. 主要成果符合計畫書之內容，目前進度並無落後情形。		1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。 4. 感謝委員的建議及鼓勵。本團隊將在計畫結束後，根據結果針對如何進行實場測試提出初步規劃，內容將涵蓋電極排列方式、資料讀取時間間距、示蹤劑導電度、示蹤劑注入方式及注入量等。 團隊也希望將此技術運用到實場以驗證其	

3. 本報告文獻收集及相關資料收集完整，成果具相當實用性和應用價值。 4. 建議後續工作可補充如何進行實場應用，並和目前常用之方法進行比較。	實用性，但限於本計畫原設定的計畫範疇並未涵蓋實場驗證，因此無論在設備、時間、及經費方面，皆無法負擔實場測試。 在設備上，實場驗證必須有長 60 公分，直徑 1 公分以上之電極棒 32 支，還有兩電極間的纜線至少 5 公尺，總共約 160 公尺長 (經詢價電極加電纜線約 NT150,000)。團隊目前使用的電極及電纜線皆只能用於砂箱實驗 (電極長 60 公分；直徑 0.6 公分；兩電極間電纜長 5 公分)，無法用於實場。 在時間方面，本團隊目前正執行後半年度工作，若進行實場驗證，會影響到原訂計畫之執行進度。 在經費方面，實場驗證可能必須設置觀測井，設井費用昂貴。且本團隊依據土基會所訂定之地電阻費用訂定標準，假設在實場進行 2 次各 180 公尺之地電阻費用，其總經費為 NT330,000。此經費並未納入本計畫之經費需求內。基於以上限制，本團隊實無法再進行實場驗證工作。
委員四 1. 已確實依計畫項目執行。 2. 已完成電阻影像 (ERT) 在實驗槽之功能測試、流場建立、脈衝式點源示蹤劑釋放與監測井之相關功能測試。 3. 後續工作已提出，預期可達成。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。
委員五 1. 執行現況、流程及方法的說明具體詳盡。 2. 計畫後續執行工作項目及內容已於5.6節簡要說明。 3. 計畫執行進度與預定進度相符，已有初步的成果。 4. 未來於現場的設置方式與成效評估方式 (如何評估實際的成效?) 建議討論。 5. 如何驗證本計畫的試驗結果? 準確性? 建議說明。 6. 環境條件的影響與適用條件...等等建議討論 (如: 土壤質地...等等)。 7. 目前的模擬土壤質地似乎屬於”均質”的模擬土壤為。實場土壤的異向性與異質性對試驗結果的影響為何? 建議討論。 8. 關鍵性的現地因子為何? 建議討論。 9. P. 55 “...應用於地下水流速流向之判斷...”,	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。 4. 感謝委員的建議。目前並未討論及評估實場設置原因為尚未完成連續示蹤劑釋放試驗 (連續點源模擬)，瞬間點源試驗亦只完成約 50% 進度。本團隊將在計畫結束後，根據結果針對如何進行實場測試提出初步規劃，內容將涵蓋電極排列方式、資料讀取時間間距、示蹤劑導電度、示蹤劑注入方式及注入量等。 5. 謝謝委員意見。本計畫試驗結果可以量測監測井中導電度與地電阻施測結果進行驗證，如 p55 圖 5-41。此外，後續將以獲得之地層相關參數，帶入溶質傳輸模式以進一步驗證其結果之準確性，並於期末報告補充相關內容。

目前的試驗結果似乎仍未能具體呈現此預期的成果。	6. 感謝委員的建議。根據目前所獲得結果顯示，地電阻量一組數據約需 10-30 分鐘，因此若地下水流速太快，地電阻可能無法及時呈現導電度的變化。土壤質地若屬於砂質土壤，較易發生此情形，因此本團隊正進行如何減少量測時間的研究，主要是藉由改變電極排列等方法，詳細結果及討論會於期末報告呈現。 7. 感謝委員的建議。由目前的砂箱實驗結果，本團隊發現均質性在砂箱中並不存在，例如流速有層化現象（請參閱修定稿 5.4. 脈衝式點源試驗）。但藉由示蹤劑實驗及地電阻變化情形，本團隊發現只要能掌握地電阻變化量（非絕對值）即能掌握土壤的異質性，而地下水流速及方向受到此異質性影響也能藉由地電阻的變化掌握。由於尚未完成連續示蹤劑釋放試驗（連續點源模擬），瞬間點源試驗亦只完成約 50% 進度，因此期中報告中未討論均質性，待計畫完成後於期末報告中討論。 8. 感謝委員的建議。如第 6 點所述，地電阻必須要在量測時間內掌握土壤導電度的變化，因此較重要的現地因子為背景地電阻、水頭梯度、土壤質地、地下水深度。 9. 感謝委員的建議。脈衝式點源試驗結果顯示，ERT 可明顯地捕捉到示蹤劑於地下水中流動造成電阻值改變的訊息。目前研究成果對於地下水流速判斷，已補充相關內容，描述於修定稿 5.4. 脈衝式點源試驗。目前以不同流速條件下，ERT 判定得地下水流速差異與設定流速相差約$\pm 10\%$以內，顯示流速推估結果準確性為可接受，後續將進一步針對流速推估方法進行修正與改良。由於佈設之單測線 ERT 試驗僅能獲得縱向方向之電阻變化資訊，尚無法作為流向判斷依據。因此，本研究已進一步增加 ERT 測線數量，以掌握橫向電阻變化之訊息，目前正在研究中，預期此資訊將可應用於地下水流向的判斷。
本署意見 無意見。	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	104 年度	計畫類型	■ 研究計畫 □ 模場試驗
計畫類別	□ 調查 □ 整治 ■ 評估 □ 底泥		主持人：陳建隆 NO：20
計畫名稱	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		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 「摘要」中請補充說明本研究之主要結果。 2. 期末報告中請補充本研究研發之技術，如何進行實場應用之初步規劃。		1. 謝謝委員意見。已補充說明研究之主要結果於「摘要」中。研究結果顯示，ERT 重複性良好、敏感性佳，可測得鹽水導電度 600、800、1000、1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之差異。由 Archie's law 可驗證鹽水電阻與 ERT 量測含鹽水石英砂電阻之關係，顯示施測結果具有準確性。Dipole-dipole 排列法下，輸出電流大小對於靜態實驗槽之 ERT 視電阻率量測結果無顯著差異。相同電極數量，偶極間距越短，施測時間越長，可探測地層範圍之資料點數越多，解析度越高。改變電極插入地表的深度，可明顯發現越接近地下水，探測得電阻率越低。脈衝式與連續式示蹤劑試驗結果，顯示 ERT 可明顯地捕捉到示蹤劑於地下水中流動造成電阻值改變之訊息，此成果可應用於地下水流速流向之推算。而增加測線數量，可提高流場流向判斷的解析能力。由單測線試驗計算地下水流速與控制流速相差 $\pm 10\%$ 以內，並發現深度增加，流速有降低的趨勢。多測線試驗計算流速高於控制流速，可能受流場非均質性及短流影響，實際流動面積小於槽體截面積，或槽體底部石英砂密度與空隙率受重力壓實影響，導致地下水主要流動發生在上層，亦可能為 ERT 示蹤劑試驗計算流速較高的可能原因。以監測井量測的地下水電阻變化與 ERT 監測結果，透過 Archie' s law 關係修正後比較，顯示觀測值與推估值兩者相近，表示驗證結果良好。 2. 謝謝委員意見。已於補充以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向之實場應用的初步規劃列於「5.6.2 建議」中(p97)。以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向之實場應用的初步規劃，可依循下列步驟進行： (1) 選定欲量測地下水流速流向區域內一	

口監測井，作為示蹤劑的導入點，量測其地下水位深度及水頭高程。若附近有其它口監測井，可搭配量測地下水位水頭高程，繪製地下水水位水頭高程分布，可初步判定地下水流場大致方向，作為地電阻測線設置之參考。

- (2) 規劃測線數量、電極數目，以及決定電極間距。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。
- (3) 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 $(\text{電極數目}-1) \times \text{電極間距}$ 的長度，以及 $(\text{測線數目}-1) \times \text{測線間距}$ 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 $75 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 的面積空間設置電極測線。
- (4) 電極測線設置方式為於示蹤劑導入點監測井正下游設置中心測線，每 2-5 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 2 公尺線各設置 16 個電極，電極間距為 5 公尺。
- (5) 測線設置完成後，就要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，並依此濃度與時間作圖獲得 breakthrough curve (穿透曲線)，再推估地下水流速及流向。示蹤劑的成分為濃度為 10 g/L NaCl 水溶液。以示蹤劑試驗，模擬點源 (point source) 在地下水中傳輸。點源的導入方式則為脈衝式 (instantaneous) 方式，以 0.5-1.0 L/min 的流量注入共 10 公升。

委員二 1. 本研究以地電阻探測技術量測地下水流速流向方法並評估其敏感度及準確度。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。本研究亦建立地電阻影像探測所得之表面導電度與孔隙水導電度之關係。 2. 報告撰寫詳實完整，文獻收集及相關資料收集非常齊全，討論亦相當充實，執行成效佳。 3. 執行現況、流程及方法說明具體詳盡。整體研究成果符合預期。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員意見。
委員三 未參與審查作業。	謝謝委員意見。
委員四 1. 期末報告格式均依規定撰寫，符合規定。 2. 研究項目及進度符合計畫內容，已達到計畫目標。 3. 初步成果已達預期。以地電阻探測技術(ERT)量測地下水流速流向方法並評估其敏感度及準確度。ERT 具有良好之重複性、準確性及敏感性。ERT 能明顯捕捉到示蹤劑在地下水中流動所造成之電阻值變化，此成果達成預期目標。 4. 未來可依初步成果應用於污染實場之操作試驗之可行性。	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。
委員五 1. 本研究屬於初期的實驗室研究階段，研究內容&討論與建議仍屬初期的討論，就研究成果的實務應用性而言，仍未具有實務可行性(仍屬實驗室一維砂箱(且是細砂)的試驗)，宜參考國內的現況加以檢討，討論應用性。 2. 研究內容與計畫目的相符。 3. 如同原本期中審查意見:“如何驗證”? 建議說明。 4. 關鍵影響因子:”...地電阻、水頭梯度、土壤質地...等等”，建議報告書中能具體說明。 5. 計畫執行進度與預定進度相符。 6. 進度並無落後。 執行現況、研究流程及方法說明具體。	1. 謝謝委員意見。國內地下水流速流向常以量測數口地下水監測井水頭，繪製水頭等高線後，再利用達西定律並假設含水層為均質，設定一導水係數(hydraulic conductivity, K)間接推估地下水流速流向。然而含水層通常為非均質，甚至導水係數具有方向性，故若僅以水頭梯度和假設一導水係數來判斷地下水流速流向，可能導致錯誤的評估。而單井流速流向測定為利用井中地下水流速流向儀量測單一定點之地下水流況，其測定範圍僅為單一定點，故適用於局部流場之調查與模擬。本研究利用地電阻直接量測地層的電阻，透過示蹤劑在地下水中造成的電阻變化，追蹤示蹤劑的傳輸情形，並進一步推估地下水流速流向。相較於傳統方法而言，此技術可依測線長度延伸，探測較大範圍的地層電阻變化，達到範圍性的地下水流速流向探測。此外，可藉由示蹤劑實驗及地電阻變化情形，

掌握地電阻變化量（非絕對值）即能掌握土壤的異質性，而地下水流速及方向受到此異質性影響也能藉由地電阻的變化掌握。

本研究目前以細砂進行實驗，常見土壤導水係數砂土（sand）約為 10^{-5} cm/sec、粉土（silt）約為 10^{-7} cm/sec 及粘土（clay）約為 10^{-9} cm/sec。而高導水係數代表地下水流經土壤流速較快，而粉土或粘土中的地下水流速相對較慢。由於地下水流速與導水係數直接相關，根據本研究實驗結果顯示，流速越慢，對於地電阻探測流速流向越有利，越能明顯追蹤電阻變化的情形。故在實場應用中，此地下水流速流向探測技術應為可行之方法。

2. 謝謝委員意見。

3. 謝謝委員意見。本研究地電阻準確性驗證方式以監測井量測值作為觀測值，而地電阻儀所測得之電阻為推估值，根據 Archie's Law，觀測值與推估值間有一正比關係。因此當觀測值與推估值之 coefficient of correlation (R^2) 愈高則表示地電阻方法之可靠度愈高，而在不同時間所測得之觀測值及推估值”本身的差異”亦應呈現正相關。

本研究驗證連續式示蹤劑點源傳輸實驗結果已補充於結果與討論「5.5.2 五測線實驗二」的 Archie's law 討論中(p93-p94)。根據實驗結果顯示，比較監測井與其周圍之 ERT 推估值，其 R^2 可達 0.9 以上甚至 0.99，此結果說明地電阻探測方法之可靠性佳，表示 ERT 測得視電阻率透過 Archie's law 修正後可符合反映出示蹤劑於地下水中傳輸的現象。

由於本計畫最後未能進行溶質傳輸模式，故無進一步之模式驗證結果可比較。未來若要以模式進行驗證，可以地下水模擬軟體 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。

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。此項建議已列於「5.6.2

	建議」中(p97)。 4. 謝謝委員意見。關鍵影響因子說明如下： (1) 背景地電阻：土壤以及地下水中也有許多鹽類可能會干擾電阻之測值，因此所注入之示蹤劑導電度必須遠大於含水層之背景導電度，本研究所使用之示蹤劑導電度為 5000 S/cm，遠超過一般地下水導電度，因此應可探測出由示蹤劑在地下水流場傳輸下所造成導電度之”電阻差異變化”，與原本之土壤或鹽類濃度無關，因此若示蹤劑導電度夠大，就可藉由地電阻探測出變化最大的位置，進而推算出地下水流速及流向。但若地下水流速過快，導致示蹤劑擴散情形過大，造成電阻快速趨於背景電阻，則可能無法明顯偵測出”電阻差異變化”，此時可考慮提高示蹤劑導電度和注入量，或可縮短地電阻放電時間以掌握短時間內的電阻變化，亦可縮短電極間距，以掌握短距離內的電阻變化。 (2) 水頭梯度：水頭梯度造成地下水產生對流現象，並直接影響地下水流速流向，過大的水頭梯度造成地下水流速過快，地電阻可能無法及時呈現導電度(電阻)的變化，解決方法呈如第 1 點說明。 (3) 土壤質地：土壤的導水係數的高低直接影響地下水流速，如第 1 點所述，導水係數砂土>粉土>粘土，若地下水流速太快，地電阻可能無法及時呈現導電度(電阻)的變化。土壤質地若屬於砂質土壤，較易發生此情形，解決方法呈如第 1 點說明。 (4) 地下水深度：根據本團隊研究結果顯示，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。而若地下水深度過深，則地電阻可能無法測得其變化，此時可考慮增加測線長度以及電極間距。 5. 謝謝委員意見。 6. 謝謝委員意見。
本署審查意見 無意見。	謝謝委員意見。

104 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案申請書

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 評估 ☐ 底泥				
申請機構系所	逢甲大學環境工程與科學學系				
機構地址	台中市西屯區文華路 100 號				
專案主持人	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：方法建置及驗證			
	英文	Determining groundwater velocity and direction with electrical resistivity tomography technique: method development and validation			
	關鍵字	Resistivity; groundwater velocity			
執行期程	自民國 103 年 12 月 1 日起 至民國 104 年 11 月 30 日止				
專案主持人	姓名：陳建隆		E-mail：chenjl@fcu.edu.tw		專線：04-24517250x5223 手機：0920766920
專任助理	姓名：郭青霖		E-mail：kuoshinglin@gmail.com		專線：04-24517250x5223 手機：0914113339
經費分析表	專案預估經費		金額	編列說明	
	1.	人事費用	453,400	(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	433,691	(與計畫主體相關)	
	4.	其它研究相關費用	0	(差旅與租賃費用)	
	5.	雜項費用	22,000	(1~6 項相加之 5%為限)	
	6.	行政管理費	90,909	(1~5 項相加之 10%為限)	
專案計畫申請總金額		1,000,000			

說明：

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

專案主持人：

陳建隆



(簽名及蓋章)

日期：11/20/2014

(請蓋上申請單位大小章)

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

104 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：104 年 11 月 20 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：方法建置及驗證		
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	1		
	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						
		申請新型/設計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	合計						
		件數						
		授權金(仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	衍生利益金(仟元)						
		件數						
		授權金(仟元)						
	4.技術移轉 (應用技術)	衍生利益金(仟元)						
		件數						
		授權金(仟元)						
	5.可移轉 產業技術	衍生利益金(仟元)						
		(1)技術(件數)						
6.其他指標 (請自行命名)	(2)品種/系(件數)							
	(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）

本研究提出以地電阻探測技術(ERT)量測地下水流速流向方法並評估其敏感度及準確度。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。

截至目前成果，已評估不同電極排列方式測量結果，並分析 ERT 之重複性、準確性與敏感性，以及脈衝式點源試驗，研究內容與原計畫目的相符。研究結果顯示 ERT 具有良好之重複性、準確性及敏感性。脈衝式點源釋放效果顯示，ERT 能明顯捕捉到示蹤劑在地下水中流動所造成之電阻值變化，此成果達成預期目標。

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。本研究另一個目的為建立地電阻影像探測所得之表面導電度 (apparent conductivity) 與孔隙水導電度之關係。

此項量測地下水流速流向技術為一準確且經濟之新穎方法。主要優點如下：

- 只需要一口地下水監測井。
- 直接量取大範圍具代表性之地下水流速流向。
- 量測時間短。
- 使用示蹤劑為食鹽水，不影響地下水水質。

研究正在持續進行，初步成果良好，未來具體研究結果可發表於學術期刊，對於地下水污染場址調查，地下水污染復育或攔截圍堵等工作之效果皆能有顯著提升。

摘要

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評估其敏感度及準確度。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。本研究另一個目的為建立地電阻影像探測所得之表面導電度 (apparent conductivity) 與孔隙水導電度之關係。

技術研發將藉由在實驗槽中進行示蹤劑試驗。實驗主要步驟如下：(1)在實驗槽中填充細砂，安裝地下水監測井並維持一穩定之地下水流場；(2)以高導電度之氯化鈉溶液為示蹤劑導入至流場中；(3)以地電阻探測儀量測含水層導電度變化並推估示蹤劑濃度分布；(4)分析實驗數據與理論濃度分布值比較推估地下水流速流向；(5)利用 Archie's law 分析地電阻測得導電度與地下水導電度之關係。

實驗槽為一長 1.5 公尺，寬 0.5 公尺，高 1.0 公尺之壓克力槽。槽體長端兩端各有一寬 5 公分之定水頭槽體。細砂填充以飽和填充法以避免造成層化現象。填充完後，將安裝地下水監測井以量測水頭及地下水導電度。本研究之示蹤劑試驗將進行三維之脈衝點源及連續式點源。地電阻電極之排列為溫奈及雙偶極，電極棒之間隔為 5，10 及 20 公分，運用不同之電極排列及間距可以分析評估此方法之準確度及敏感度。另外所測得之地下水導電度與表現導電度，可由 Archie's law 算出含水層之 formation factor。本研究將探討不同之電極排列及間距和輸入電流對 formation factor 之影響。

本研究預期將可研發出一經濟且準確之地下水流速流向測定技術，在未來污染場址調查或場址復育，污染源調查乃至於地下水污染潛勢調查及使用管理都具有重要貢獻。

研究結果顯示，ERT 重複性良好、敏感性佳，可測得鹽水導電度 600、800、1000、1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之差異。由 Archie's law 可驗證鹽水電阻與 ERT 量測含鹽水之石英砂電阻之關係，顯示施測結果具有準確性。Dipole-dipole 排列法下，輸出電流大小對於靜態實驗槽之 ERT 視電阻率量測結果無顯著差異。相同電極數量，偶極間距越短，施測時間越長，可探測地層範圍之資料點數越多，解析度越高。改變電極插入地表的深度，可明顯發現越接近地下水，探測得電阻率越低。

脈衝式與連續式示蹤劑試驗結果，顯示 ERT 可明顯地捕捉到示蹤劑於地下水中流動造成電阻值改變之訊息，此成果可應用於地下水流速流向之推算。而增加測線數量，可提高流場流向判斷的解析能力。由單測線試驗計算地下水流速與控制流速相差 $\pm 10\%$ 以內，並發現深度增加，流速有降低的趨勢。多測線試驗計算流速高於控制流速，可能受流場非均質性及短流影響，實際流動面積小於槽體截面積，或槽體底部石英砂密度與空隙率受重力壓實影響，導致地下水主要流動發生在上層，亦可能為 ERT 示蹤劑試驗計算流速較高的可能原因。以監測井量測的地下水電阻變化與 ERT 監測結果，透過 Archie' s law 關係修正後比較，顯示觀測值與推估值兩者相近，表示驗證結果良好。

Abstract

The main purpose of this research is to develop a technique for directly measuring 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 of groundwater flow and direction with only one monitoring well. Accurate knowledge of groundwater velocity and direction is essential for constructing a conceptual model for groundwater water and soil transport in a contaminated site as advection is the main mechanism for contaminant transport. Without an accurate model for the transport of contaminants, the containment and remediation efforts for groundwater and soil contamination have very little chance of success. The other objective of this research is to evaluate the relationship between the apparent electrical conductivity and groundwater electrical conductivity.

Tracer studies will be conducted to achieve the objectives. The main procedures for the tracer studies are as the following: (1) fill the sandbox with sand, install groundwater monitoring wells, and maintain a steady groundwater flow in the sandbox; (2) inject high electrical conductivity sodium chloride solution into the flow; (3) use ERT to calculate the change in electrical conductivity and use it as the change in sodium chloride concentration; (4) obtain groundwater velocity and direction by comparing the observed concentration with the theoretical values; (5) evaluate the relationship between apparent electrical conductivity and groundwater electrical conductivity using Archie's law.

The sandbox is made of acrylic plates and has dimensions of 1.5 m in length, 0.5 m in width, and 1.0 m in height. One 5-cm-wide compartment is attached to each end of the sandbox for use as a constant head boundary. The packing of sand will be conducted using sequential saturation method to prevent layer formation. Groundwater monitoring wells for water head and pore water electrical conductivity measurements will be installed after packing. The tracer experiments will be conducted under instantaneous point source and continuous point source modes. The ERT will be obtained using two different electrode arrays (Wenner and dipole-dipole array) and three electrode spacing (5, 10, and 20 cm). Results from these different settings of electrodes will be used to evaluate the accuracy and sensitivity of the technique. Archie's law will be used to evaluate the groundwater electrical conductivity and apparent conductivity and obtain the formation factor for the

simulated aquifer. The effect of electrode arrays and spacing and input current on formation factor will be evaluated.

The research will develop a new technique for accurately and cost-effectively measuring groundwater velocity and direction with only one monitoring well. Therefore, it could be very useful in the application of site characterization and site remediation, locating contaminant sources, and even in groundwater management and containment of groundwater pollution plumes.

The results from reliability and sensitivity of the ERT experiments are acceptable. The Archie's law can be validated with the apparent resistivity from the ERT experiments and the solution resistivity, which means the ERT technique can accurately detect the change in solution resistivity. Using a dipole-dipole array setup, the effect of the applied current strength on the apparent resistivity is insignificant. The apparent resistivity decreases with the depth of the electrodes.

The velocity and direction of groundwater was measured using the ERT technique under both impulse and continuous tracer injection schemes. The results from both schemes show the technique can detect the groundwater velocity and direction. The measured groundwater velocity from both schemes is within 10 percent of the actual velocity. It is observed that the flow regime in the sandbox was non-homogeneous although great effort was put into packing the sand during experiment setup; this non-homogeneous flow regime is detected by the ERT technique.

The results indicate that it is feasible to measure groundwater velocity and direction using the ERT technique presented in this report. Additional study in a real test site is needed to further verify the practical and potential use of this technique.

目次

目次.....	I
圖次.....	III
表次.....	VIII
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 原理	8
3.3 電極排列方式	10
3.4 電極排列方式之表現	15
第四章、研究方法與過程	19
4.1 實驗設備與設計	20
4.2 地下水流速流向與地電阻剖面之關聯性探討	26
4.3 地下水導電度與地電阻剖面之關聯性探討	29
4.4 不同電極排列方式探討	30
4.5 Dipole-dipole 法解析能力探討	31
4.5.1 重複性.....	31
4.5.2 敏感性.....	31
4.5.3 準確性.....	32
4.6 操作參數探討	34
4.6.1 輸出電流.....	34
4.6.2 偶極間距.....	34
4.6.3 電極深度	35
4.7 脈衝式點源試驗	36
4.8 連續式點源試驗	36
第五章、結果與討論	38
5.1 電極排列方式施測結果比較	38
5.2 Dipole-dipole 法解析能力探討	40
5.2.1 重複性.....	40
5.2.2 敏感性.....	42
5.2.3 準確性.....	44

5.3 操作參數探討	49
5.3.1 輸出電流.....	49
5.3.2 偶極間距.....	50
5.3.3 電極深度.....	52
5.4 脈衝式點源試驗	54
5.4.1 單測線.....	54
5.4.2 三測線.....	63
5.4.3 五測線.....	66
5.5 連續式點源試驗	80
5.5.1 三測線.....	80
5.5.2 五測線.....	83
5.6 結論與建議.....	95
5.6.1 結論	95
5.6.2 建議.....	96
參考文獻.....	98

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)	4
圖 3-1、ERT 單電流極和電位極於均質等向之半空間示意圖	9
圖 3-2、ERT 任意四極法排列示意圖	10
圖 3-3、溫奈排列法(Wenner array)示意圖	11
圖 3-4、施蘭卜吉排列法(Schlumberger array)示意圖	12
圖 3-5、雙極排列法(Pole-pole array)示意圖	13
圖 3-6、雙極排列法(Pole-pole array)施測示意圖	13
圖 3-7、雙偶極排列法(Dipole-dipole array)示意圖	14
圖 3-8、電極偶極排列法(Pole-dipole array)示意圖	15
圖 4-1、實驗槽體示意圖	20
圖 4-2、T 字型不鏽鋼電極.....	22
圖 4-3、實驗槽設計俯視圖	22
圖 4-4、第一階段實驗槽設計俯視圖	22
圖 4-5、第一階段實驗槽設計側視圖	23
圖 4-6、第一階段實驗槽體設置完成情形	23
圖 4-7、導電度計與地電阻儀	25
圖 4-8、地電阻系統架設完成示意圖	25
圖 4-9、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) 26	
圖 4-10、連續點源固定 t 及 z 的濃度分布示意圖	28
圖 4-11、Wenner 電極排列法電阻資料點位置	30
圖 4-12、Dipole-dipole 電極排列法電阻資料點位置	30
圖 4-13、小型實驗槽照片	32
圖 4-14、一維管柱試驗之濃度貫穿曲線	37
圖 5.1.1、Wenner 電極排列法之各深度視電阻率的水平方向變化圖	38
圖 5.1.2、Dipole-dipole 電極排列法之各深度視電阻率的水平方向變化圖	39
圖 5.1.3、Wenner 電極排列法之視電阻率剖面	39
圖 5.1.4、Dipole-dipole 電極排列法之視電阻率剖面	39
圖 5.2.1、不同施測時間，視電阻率在 x 方向上之變化(n=1)	40
圖 5.2.2、不同施測時間，視電阻率在 x 方向上之變化(n=5)	40
圖 5.2.3、不同施測時間，視電阻率在 x 方向上之變化(n=10)	41
圖 5.2.4、不同導電度鹽水下測得之電阻率分布範圍	42

圖 5.2.5、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=1)	42
圖 5.2.6、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=5)	43
圖 5.2.7、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=9)	43
圖 5.2.8、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=13)	43
圖 5.2.9、小槽試驗之鹽水導電度與鹽水導電度的關係圖	44
圖 5.2.10、小槽試驗之鹽水電阻值與含鹽水石英砂電阻值的關係圖	44
圖 5.2.11、小槽試驗之鹽水導電度與含鹽水石英砂導電度的關係圖	45
圖 5.2.12、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=1)	45
圖 5.2.13、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=5)	46
圖 5.2.14、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=9)	46
圖 5.2.15、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=13)	46
圖 5.2.16、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(x=0.7 m, n=1).....	47
圖 5.2.17、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(x=0.7 m, n=5).....	47
圖 5.2.18、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(x=0.7 m, n=9).....	48
圖 5.2.19、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(x=0.7 m, n=13).....	48
圖 5.3.1、不同輸出電流之視電阻率隨水平方向變化圖(n=1)	49
圖 5.3.2、不同輸出電流之視電阻率隨水平方向變化圖(n=5)	49
圖 5.3.3、不同輸出電流之視電阻率隨水平方向變化圖(n=10)	50
圖 5.3.4、偶極間距 5 cm 之視電阻率剖面.....	50
圖 5.3.5、偶極間距 10 cm 之視電阻率剖面.....	50
圖 5.3.6、偶極間距 15 cm 之視電阻率剖面.....	51
圖 5.3.7、偶極間距 20 cm 之視電阻率剖面.....	51
圖 5.3.8、電極深度 5 cm 之視電阻率剖面.....	52
圖 5.3.9、電極深度 10 cm 之視電阻率剖面.....	52
圖 5.3.10、電極深度 20 cm 之視電阻率剖面.....	52
圖 5.3.11、x=0.44 m，不同電極深度之視電阻率隨深度的變化	53
圖 5.3.12、x=0.74 m，不同電極深度之視電阻率隨深度的變化	53
圖 5.3.13、x=1.04 m，不同電極深度之視電阻率隨深度的變化	53
圖 5.4.1、單測線流速 0.8 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1)	55
圖 5.4.2、單測線流速 0.8 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=2)	55
圖 5.4.3、單測線流速 0.8 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=3)	56

圖 5.4.4、單測線流速 0.8 cm/min，監測井鹽水電阻值與含鹽水之砂視電阻率比較	57
圖 5.4.5、單測線流速 0.6 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1)	59
圖 5.4.6、單測線流速 0.6 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=2)	59
圖 5.4.7、單測線流速 0.6 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=3)	59
圖 5.4.8、單測線流速 0.25 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1)	60
圖 5.4.9、單測線流速 0.25 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=2)	61
圖 5.4.10、單測線流速 0.25 cm/min，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=3)	61
圖 5.4.11、實驗控制之視流速推估孔隙流速範圍	62
圖 5.4.12、脈衝式點源-三測線之 $\Delta\rho$ 等高線圖	64
圖 5.4.13、脈衝式點源-三測線之 y 方向視電阻率變化情形	64
圖 5.4.14、三測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=15 cm)	65
圖 5.4.15、三測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=25 cm)	66
圖 5.4.16、三測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=35 cm)	66
圖 5.4.17、脈衝式點源-五測線實驗一之 $\Delta\rho$ 等高線圖	67
圖 5.4.18、脈衝式點源-五測線實驗一之 y 方向視電阻率變化情形	68
圖 5.4.19、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=15 cm)	69
圖 5.4.20、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=20 cm)	69
圖 5.4.21、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=25 cm)	69
圖 5.4.22、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 (n=1, y=30 cm)	70

圖 5.4.23、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=35\text{ cm}$)	70
圖 5.4.24、脈衝式點源-五測線實驗二之 $\Delta\rho$ 等高線圖	71
圖 5.4.25、脈衝式點源-五測線實驗二之 y 方向視電阻率變化情形	72
圖 5.4.26、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=20\text{ cm}$)	73
圖 5.4.27、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=25\text{ cm}$)	73
圖 5.4.28、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=30\text{ cm}$)	74
圖 5.4.29、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=35\text{ cm}$)	74
圖 5.4.30、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=40\text{ cm}$)	74
圖 5.4.31、脈衝式點源-五測線實驗三之 $\Delta\rho$ 等高線圖	76
圖 5.4.32、脈衝式點源-五測線實驗三之 y 方向視電阻率變化情形	76
圖 5.4.33、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=20\text{ cm}$)	77
圖 5.4.34、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=25\text{ cm}$)	78
圖 5.4.35、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=30\text{ cm}$)	78
圖 5.4.36、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=35\text{ cm}$)	78
圖 5.4.37、五測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=40\text{ cm}$)	79
圖 5.5.1、連續式點源-三測線之 $\Delta\rho$ 等高線圖	81
圖 5.5.2、連續式點源-三測線之 y 方向視電阻率變化情形	81
圖 5.5.3、三測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=4, y=25\text{ cm}$)	82
圖 5.5.4、三測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=4, y=30\text{ cm}$)	83
圖 5.5.5、三測線，(左) $\Delta\rho b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=4, y=35\text{ cm}$)	83
圖 5.5.6、連續式點源-五測線實驗一之 $\Delta\rho$ 等高線圖	84

圖 5.5.7、連續式點源-五測線實驗一之 y 方向視電阻率變化情形	85
圖 5.5.8、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=15 cm)	86
圖 5.5.9、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=20 cm)	86
圖 5.5.10、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=25 cm)	86
圖 5.5.11、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=30 cm)	87
圖 5.5.12、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=35 cm)	87
圖 5.5.13、連續式點源-五測線實驗二之 y 方向視電阻率變化情形	88
圖 5.5.14、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).....	89
圖 5.5.15、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=15 cm)	90
圖 5.5.16、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=20 cm)	90
圖 5.5.17、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=25 cm)	91
圖 5.5.18、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=30 cm)	91
圖 5.5.19、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=35 cm)	91
圖 5.5.20、well-1 周圍 ERT 測點修正後的視電阻率變化	92
圖 5.5.21、well-2 周圍 ERT 測點修正後的視電阻率變化	92
圖 5.5.22、well-1 觀測值與 ERT 推估值之線性關係	93
圖 5.5.23、well-2 觀測值與 ERT 推估值之線性關係	94

表次

表 3-1、ERT 相關應用領域與文獻.....	6
表 3-2、不同電極排列的擬似深度參數.....	16
表 3-3、ERT 電極排列方式之特性比較.....	17
表 4-1、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）.....	19
表 4-2、填充之石英砂規格.....	21
表 4-3、不同電極排列方式的實驗條件.....	30
表 4-4、重複性實驗條件.....	31
表 4-5、準確性實驗條件.....	32
表 4-6、Formation factor with θ and m	33
表 4-7、輸出電流參數的實驗條件.....	34
表 4-8、偶極間距的實驗條件.....	34
表 4-9、電極深度的實驗條件.....	35
表 5-1、不同時間施測視電阻結果之 RMSE 值.....	41
表 5-2、ERT 推估流速與實驗控制之視流速比較.....	62
表 5-3、well-1 觀測值與 ERT 推估值.....	93
表 5-4、well-2 觀測值與 ERT 推估值.....	94

第一章、前言

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評估其敏感度及準確度。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。

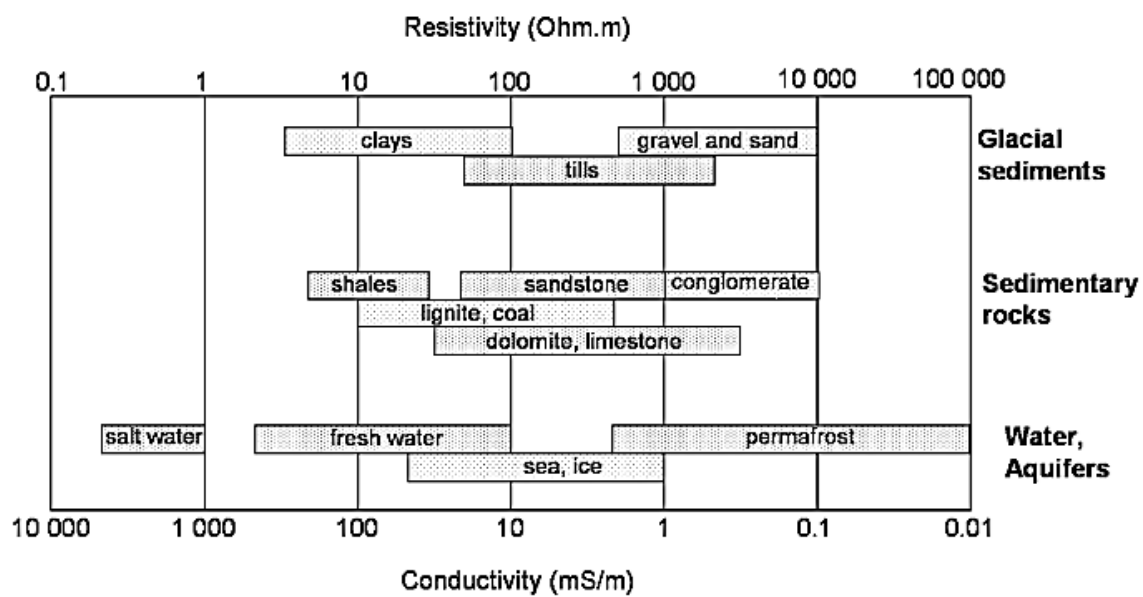


圖 1-1、不同介質之電阻率分佈範圍(Samouëlian et al., 2005)

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評估其敏感度及準確度。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。本研究另一個目的為建立地電阻影像探測所得之表面導電度 (apparent conductivity) 與孔隙水導電度之關係。

此項量測地下水流速流向技術為一準確且經濟之新穎方法。主要優點如下：

1. 只需要一口地下水監測井。
2. 直接量取大範圍具代表性之地下水流速流向。
3. 量測時間短。
4. 使用示蹤劑為食鹽水，不影響地下水水質。

若研究有具體結果，則未來對於地下水污染場址調查，地下水污染復育或攔截圍堵等工作之效果皆能有顯著提升。

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。

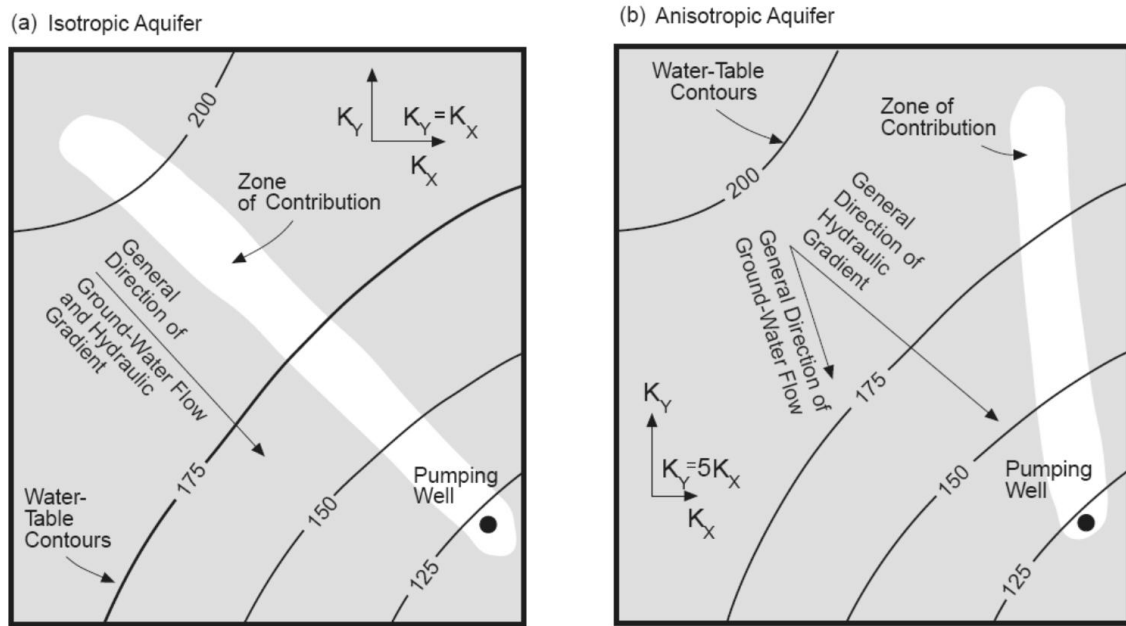


圖 2-1、地下水流向在均質與非均質含水層示意圖(Bradbury et al., 1991)

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。

本研究之目的為 1. 建置以地電阻影像探測技術推估地下水流速及流向之方法流程並驗證其準確度。2. 建立地電阻影像探測所得之表面導電度 (apparent conductivity) 與孔隙水導電度之關係。

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。游峻一等人(2011)亦應用 ERT 調查竹北地區海水入侵之問題。

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)。

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。

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)。

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)。

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。

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。

馮正一等人 (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。

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。

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。

以上相關文獻應用領域彙整於表 3-1 所示。

表 3-1、ERT 相關應用領域與文獻

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)
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
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

應用領域	相關文獻
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
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

3.2 ERT 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：

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

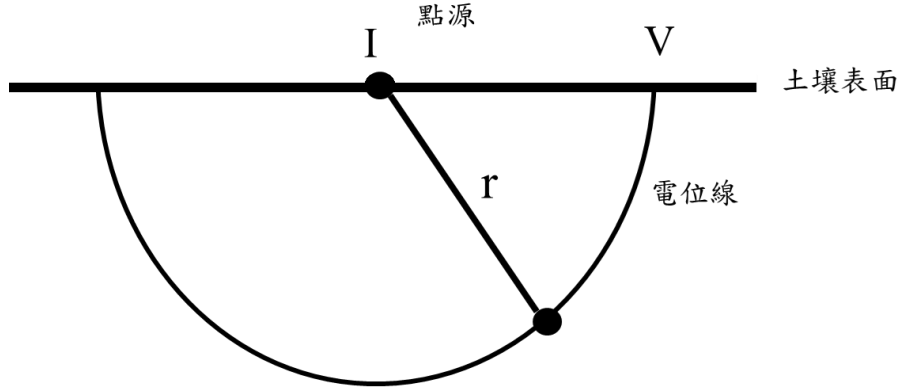


圖 3-1、ERT 單電流極和電位極於均質等向之半空間示意圖

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。

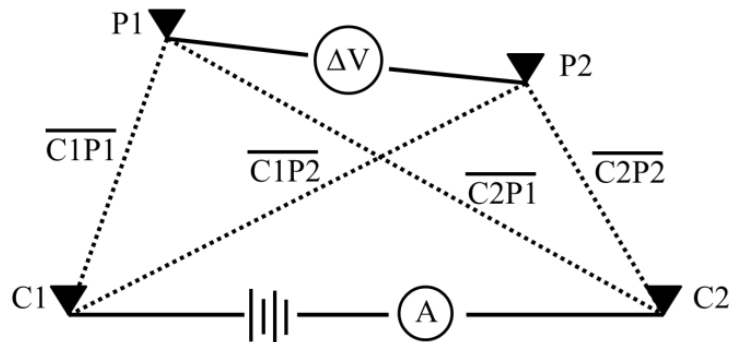


圖 3-2、ERT 任意四極法排列示意圖

3.3 電極排列方式

ERT 於現場施測時，其電極排列有許多方式，常用之電極排列方式有溫奈排列法(Wenner array)、施蘭卜吉排列法(Schlumberger array)、雙極排列法(Pole-pole array)及雙偶極排列法(Dipole-dipole array)等。電極排列的方式不同，以致蒐集的資料點在空間上會有不同分佈，經逆推處理後對於目標物的解析度亦會呈現不同特性，例如(1)水平方向資料點較密，則對於水平方向變化的電性構造靈敏度較佳。(2)垂直方向資料點分布平均，深與淺的落差不大，則對於垂直方向變化的電性構造靈敏度較佳。(3)電極展距越長，則可測得地層越深處的資料，解析較深處的電性構造(林澤宗, 2012)。故施測時需依現場地形、地物與目標物，決定電極排列方式、展距及測線的配置，以上四種電極排列方式詳述如下：

(1) 溫奈排列法(Wenner array)

溫奈排列法是將一對電流極 C1、C2 及一對電位極 P1、P2，四根電極排成一直線。以測線中心點 O 將 C1、C2 兩根電流極對稱放置於兩側，而 P1、P2 兩電位極也以 O 為中心對稱放置於電流極 C1、C2 之間，電流極 C1C2 之間距離為 P1P2 距離的三倍，且 $\overline{C1P1} = \overline{P1P2} = \overline{P2C2} = a$ ，即表示測線展距為 3a(如圖 3-3)。以此排列方式可探測得地下深度約為 $\overline{P1P2}$ 的間距 a，當加大 $\overline{C1C2}$ 及 $\overline{P1P2}$ 的間距為 n 倍時，則測線展距變成 3na，由此可逐次得到由淺至深的地層訊息。此電極排列方式適用於淺層的調查，其優點在於監測所得到

的測值較穩定、對施測資料垂直變化之解析度高，但缺點為施測上較為耗時，以及在探測較深層地層所測得資料所含雜訊較高。

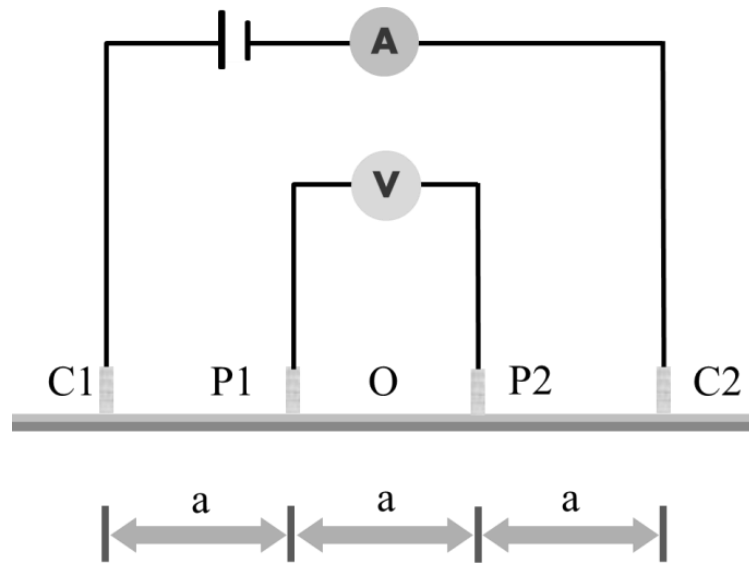


圖 3-3、溫奈排列法(Wenner array)示意圖

(2) 施蘭卜吉排列法(Schlumberger array)

施蘭卜吉排列法同樣是將一對電流極 C1、C2 及一對電位極 P1、P2，四根電極排成一直線，以測線中心點 O 將 C1、C2 兩根電流極對稱放置外圍兩側，而 P1、P2 兩電位極也以 O 為中心對稱放置於電流極 C1、C2 之間(如圖 3-4)，但是施測方法則是將電位極 P1、P2 固定不動，其間距 $\overline{P_1P_2}$ 為 a ，而電流極 C1、C2 逐次向外側移動，如此逐漸加大 $\overline{C_1P_1}$ 與 $\overline{P_2C_2}$ 的距離，即可逐步得到 P1、P2 中心點之地層由淺至深的電阻率變化。當 n 等於 1 時，即為溫奈排列法(Wenner array)的特例。當兩電位極之間電位差太小時，此時需將電流極重複相同位置，並將電位極間距加大後，再逐次加大電流極的間距，重複此動作以獲取地層資料。此方法優點是儀器精度要求不高，且計算視電阻率容易。缺點是探測時較費人工及時間，且每次移動電位極，將使地表淺部的局部不均質與地下訊號混合造成資料品質較差而導致誤判。

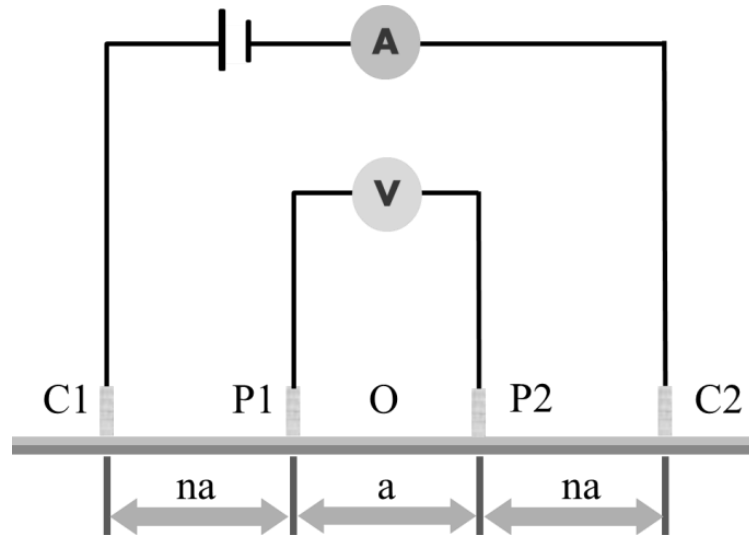


圖 3-4、施蘭卜吉排列法(Schlumberger array)示意圖

(3) 雙極排列法(Pole-pole array)

雙極排列法與傳統四極法相似，但不同的是，雙極排列法係將其中一個電流極 C2 和其中一個電位極 P2 固定放置遠處(如圖 3-5 所示)，C2、P2 分別與 C1、P1 的間距要大於 10 倍(理想為 20 倍)的 $\overline{C_1P_1}$ 間距(a)，可視為無窮遠。而 C2 與 P2 的距離最少為 2.5 倍(理想為 3 倍)的 $\overline{C_1P_1}$ 間距(a)，可避免有負值或零值的錯誤(洪瑛鈞, 2013)。施測時則固定另一個電流極 C1，而只移動另一個電位極 P1，逐步展開，獲得如圖 3-6 所示資料點，當電流極和電位極無法再展開時，再移動電流極 C1 至下一個固定位置，重新展開電位極 P1，重複以上步驟，即可逐步得到地層由淺至深的電阻率變化(如圖 3-6)。此電極排列方式優點為受到的地形限制較小，並在有限範圍內，可獲得最大的探測深度。

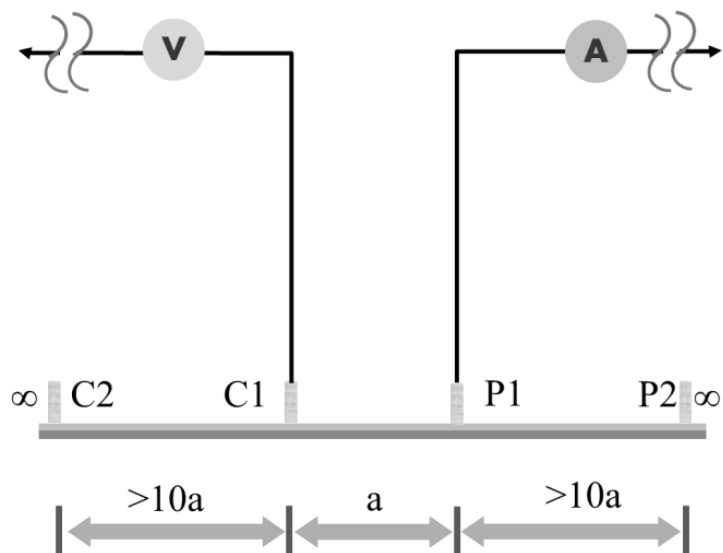


圖 3-5、雙極排列法(Pole-pole array)示意圖

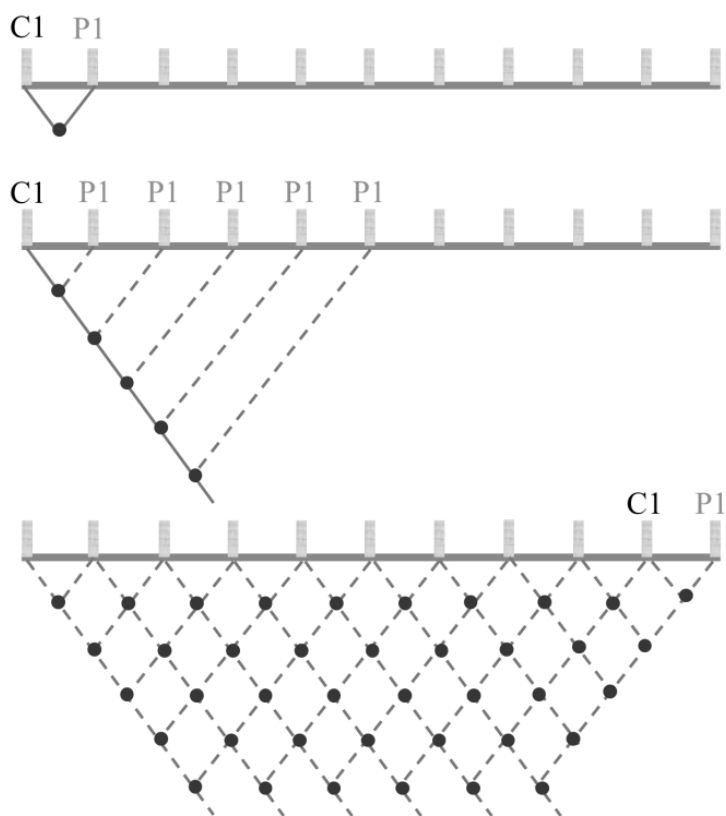


圖 3-6、雙極排列法(Pole-pole array)施測示意圖

(4) 雙偶極排列法(Dipole-dipole array)

雙偶極排列法是以兩根電流極 C1、C2 形成一個電流偶極，以及兩根電位極 P1、P2 形成一個電位偶極(如圖 3-7)，此電流偶極與電位偶極之間的間距($\overline{C_1C_2}$ 、 $\overline{P_1P_2}$)必須大於偶極之間的間距距離 10 倍以上，主要適用於探測較深部的地層。

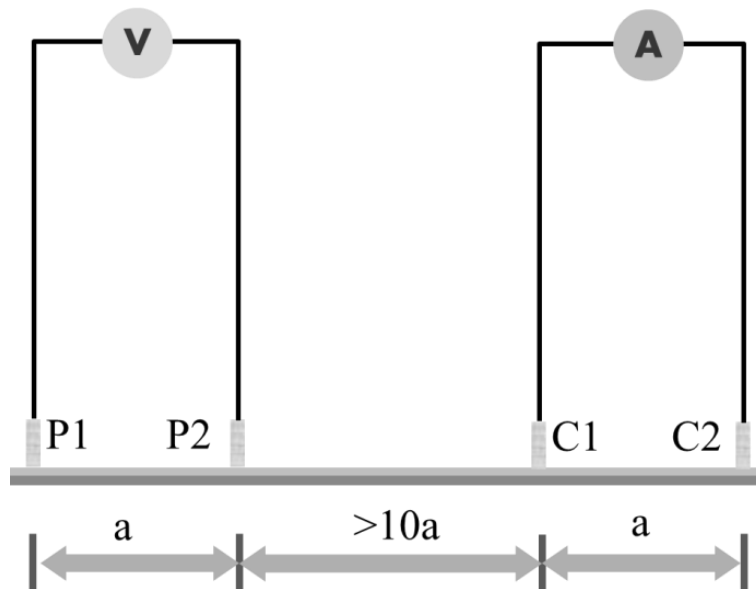


圖 3-7、雙偶極排列法(Dipole-dipole array)示意圖

(5) 電極偶極排列法(Pole-dipole array)

雙偶極排列法，為三極排列法，係將其中一個電流極 C2 固定放置遠處，而兩根電位極 P1、P2 形成一個電位偶極，電位偶極間距($\overline{P_1P_2}$)為 a 。而另一個電流極 C1 與 P1 的間距($\overline{C_1P_1}$)為 na (如圖 3-8)。C2 分別與 C1、P1 的間距($\overline{C_1C_2}$ 、 $\overline{P_1C_2}$)要大於 10 倍(理想為 20 倍)的 $\overline{C_1P_1}$ 測線間距(a)，可視為無窮遠。施測時則固定電位偶極 P1、P2，而只移動電流極 C1，逐步展開，即可逐步得到地層由淺至深的電阻率變化。

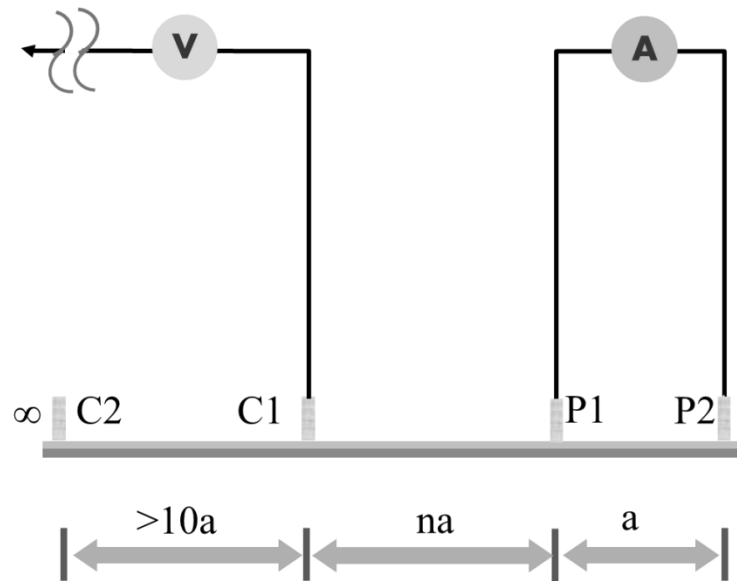


圖 3-8、電極偶極排列法(Pole-dipole array)示意圖

3.4 電極排列方式之表現

現地施測方法的選擇，在同一地層施測不同之電極排列法，會得到不同的視電阻率，其產生之擬似剖面(pseudo-section)並不相同，且對同一地下結構的反應也不同。洪瑛鈞(2013)即針對電極排列方式之解析能力與作一系列之探討。而雜訊對施測排列方式及反算結果解析能力會產生影響。而電極排列方式也會影響探測深度、垂向與水平方向之靈敏度以及訊號的強度三個因素，詳述如下：

(1) 探測深度

在探測深度方面，不同的電極排列法其擬似深度如表 3-2，電極間距為 a ，測線展距為 L 。在相同長度的測線展距下，以雙極排列法(Pole-pole array)可探測至最深 0.867 倍的測線展距；其次為雙偶極排列法(Dipole-dipole array)，其探測深度隨著 n 值增加而增加，探測深度約為 0.224 倍的測線展距；最後溫奈施蘭卜吉排列法(Wenner-Schlumberger array)可測得深度為 0.191 倍的測線展距。而溫奈排列法(Wenner array)可測得深度為 0.173 倍的測線展距。

表 3-2、不同電極排列的擬似深度參數

Array type	Z_e/a	Z_e/L
Wenner	0.519	0.173
Pole-Pole	0.867	
Dipole-Dipole		
n=1	0.416	0.139
n=2	0.697	0.174
n=3	0.962	0.192
n=4	1.220	0.203
n=5	1.476	0.211
n=6	1.730	0.216
n=7	1.983	0.220
n=8	2.236	0.224
Pole-Dipole		
n=1	0.519	
n=2	0.925	
n=3	1.318	
n=4	1.706	
n=5	2.093	
n=6	2.478	
n=7	2.863	
n=8	3.247	
Wenner-Schlumberger		
n=1	0.519	0.173
n=2	0.925	0.186
n=3	1.318	0.189
n=4	1.706	0.190
n=5	2.093	0.190
n=6	2.478	0.191
n=7	2.863	0.191

(洪瑛鈞, 2013)

(2) 垂向與側方向的靈敏度

在垂向與水平方向之靈敏度方面，溫奈排列法(Wenner array)適合用於探測水平層狀構造，而不適合用於狹長垂直的結構，其垂向解析能力優於側向解析能力。

雙極排列法(Pole-pole array)的優點為擁有最深深度以及水平涵蓋範圍最廣的探測能力，但其垂向與側向的解析能力最差，因其視電阻率計算簡單且施測較為容易，故常用於較深地層剖面影像探測之參考及比對。

溫奈施蘭卜吉法排列法(Wenner-Schlumberger array)，當 n 值小時，對垂向變化感受大，反之當 n 值大時，對水平方向變化感受大，電阻敏感值介於溫奈排列法(Wenner array)以及雙極排列法(Pole-pole array)之間，用於探測垂直或水平結構均可適用。

電極偶極排列法(Pole-dipole array)對水平地層變化的探測較佳，且其特性為非對稱結構，可施測於地形起伏較高的不平整地表。

(3) 訊號強度

訊號強度會受到施測周圍的雜訊所影響，如地球的自然電位、地層下的金屬導體與高電阻率絕緣體、地形效應等。一般情況下，訊號強度與電極之幾何排列參數 K 成反比，而訊號強度的衰減係數為 $1/K$ 。

溫奈排列法(Wenner array)為所有方法中訊號最佳，受雜訊干擾低，因此適用於背景雜訊較高之地層，其訊號衰減係數為 $1/2\pi a$ ；溫奈施蘭卜吉法排列法(Wenner-Schlumberger array)的訊號衰減係數為 $1/n^2$ ；雙偶極排列法(Dipole-dipole array)的訊號衰減係數為 $1/n^3$ ；而雙極排列法(Pole-pole array)的訊號衰減係數為 $1/2\pi a$ 、電極偶極排列法(Pole-dipole array)的訊號衰減係數為 $1/n^2$ ，但兩者易受到遠電極間的雜訊所影響，造成訊號強度較差。故訊號強度最佳的排列方式為溫奈排列法(Wenner array)，其次為溫奈施蘭卜吉法排列法(Wenner-Schlumberger array)與雙偶極排列法(Dipole-dipole array)，最後為雙極排列法(Pole-pole array)以及電極偶極排列法(Pole-dipole array)。

以上電極排列方式之表現能力彙整於表 3-3，現場試驗時，可同時施作不同的電極排列法，利用其幾何排列特性，來相互比對施測結果與驗證。

表 3-3、ERT 電極排列方式之特性比較

電極排列 方式 項目表現	溫奈排列法 (Wenner array)	溫奈施蘭卜吉法 (Wenner- Schlumberger)	雙偶極排列法 (Dipole- dipole array)	雙極排列 法 (Pole-pole array)	電極偶極排 列法 (Pole-Dipole array)
水平方向偵測敏感 度	★★★★★	★★	★	★★	★★
垂直方向偵測敏感 度	★	★★	★★★★★	★★	★
較佳解析方向	垂向	垂向與側向	側向	皆較差	側向
探測深度	★	★★	★★★	★★★★★	★★★
測深參數(Z_e/L) (Z_e : 測深, L : 展距)	約 0.17	約 0.17	約 0.22	約 0.86	約 0.36
水平數據 覆蓋範圍	★	★★	★★★	★★★★★	★★★
訊號強度	★★★★★	★★★	★	★★★★★	★★
訊號衰減係數	$1/2\pi a$	$1/n^2$	$1/n^3$	$1/2\pi a$	$1/n^2$

註：★越多表示該項目表現越佳。

(Samouëlian et al., 2005; 楊光程, 2009)

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。地電阻試驗之實驗槽於 104 年 2 月建置完成，接著開始測試實驗槽功能，以及不同電極排列法與操作參數之測試，接著建立地下水流場，並獲得地電阻捕捉脈衝式點源示蹤劑成果。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，預定查核點(※)項目為以脈衝式、連續點源示蹤劑試驗獲得地下水流速之結果以及 Archie's law 驗證評估，並撰寫期中及期末報告完成。本章節將描述實驗相關設計與流程、地下水導電度和流速流向與地電阻剖面之關聯性探討，以及不同電極排列法和不同操作參數之實驗條件。

表 4-1、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

工作項目 \ 年月	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	備註
文獻蒐集	✓	✓	✓	✓	✓	✓							
實驗槽設計發包建置	✓	✓											
實驗槽功能測試，含流場建立、示蹤劑釋放效果、監測井功能			✓	✓									
示蹤劑試驗：脈衝式點源					✓	✓	✓						
示蹤劑試驗：連續式點源								✓	✓	✓			
Archie's law 驗證評估					✓	✓	✓	✓	✓	✓			
期中及期末報告撰寫					✓	✓					✓	✓	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	15%	20%	35%	50%	65%	75%	85%	90%	95%	100%	

※預定查核點	期中	1. 以脈衝式點源示蹤劑試驗獲得地下水流速流向之結果 2. 期中報告撰寫
	期末	1. 連續式點源示蹤劑試驗獲得地下水流速流向之結果 2. Archie's law 驗證評估 3. 期末報告撰寫

4.1 實驗設備與設計

實驗流程可分為實驗槽建置、實驗槽填充、監測井與電極設置、建立地下水流速並導入電解質示蹤劑以及進行參數量測分析，各步驟之詳細內容敘述於後：

I. 實驗槽建置

本研究之實驗將在一大型實驗槽中進行。實驗槽的材料為壓克力，大小尺寸為長 1.5 公尺，寬 0.5 公尺，高 1.0 公尺(圖 4-1)。在實驗槽的長邊兩端各設置有一 5 公分寬槽體與主槽體間以預先鑽孔之壓克力板隔開，此兩端槽體的功能為維持實驗中定水頭的邊界條件。此外分隔板會覆蓋一張細網，以防止砂洩漏到定水頭槽體中。

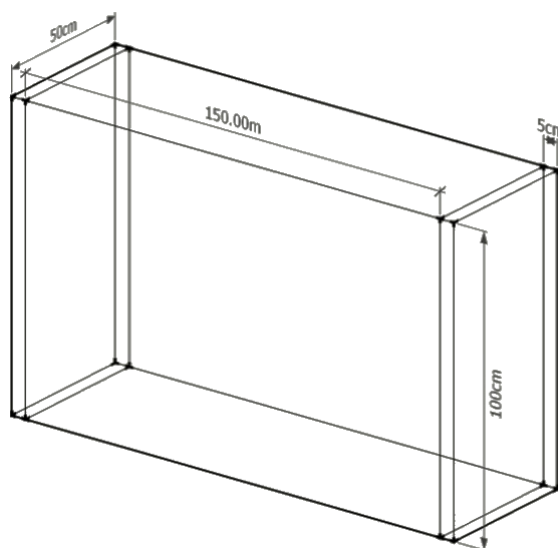


圖 4-1、實驗槽體示意圖

II. 實驗槽填充材料

實驗槽之填充物為細砂，規格如表 4-2 所示，選擇細砂的原因為其導電度較符合 Archie's law，且其導水係數 (hydraulic conductivity, K) 較黏土均勻。本研究使用的填充方法為飽和填充法 (Bowen, Devlin, & Schillig, 2012)，其步驟為每次填 5 公分高的乾砂，再加入去離子水 (DI) 飽和淹沒 1-2 公分，之後再以乾砂填充 5 公分，然後再加 DI 水直到淹沒 1-2 公分，如此重複到砂子達到預設的厚度 (約 70 公分)。此方法與直接填充乾砂後再加水的方法比較，有兩個優點：(1) 不會有氣泡殘餘砂中，而造成流場不穩定；(2) 不會造成砂子在傾洩過程因顆粒不同而產生層化，造成 K 值不均勻 (Slater et al., 2002)。

表 4-2、填充之石英砂規格

編號	A.F.S	主要粒徑範圍 (mm)	主要網目分佈 (Mash)	SiO ₂ (Min%)	Fe ₂ O ₃ (Max%)	Al ₂ O ₃ (Max)%
202v	17-23	0.60~1.18 (Min85%)	20+30 (Min85%)	99.5	0.02	0.1

III. 監測井與電極設置

監測井的功能有兩個：監測地下水導電度及水位。監測井以內徑 2.5 公分 schedule 40 PVC 管製造，在離管底部 3 公分範圍內鑽足夠細孔並以細網包覆。製作完成後，在預定位置直接灌入砂子中約 20-30 公分深度。本研究監測井設置位置如圖 4-3 所示。沿著地下水流方向總共有 3 個斷面，距離示蹤劑導入點分別為 25、45 及 70 公分。在 25 及 45 公分斷面各安裝 3 個監測井，在 70 公分斷面則安裝 5 個監測井 (因為延散效應較前 2 段面顯著)。

施測用的電極為 T 字型不鏽鋼電極直徑 0.6 cm、長 61 cm，電極以不導電之塑膠套管包覆，僅於底端露出一小段金屬以輸出電流。地電阻影像探測的電極排列如圖 4-3 所示。電極排列共有 3 條測線。中心測線位於示蹤劑導入點正下游，每 5 公分設置一電極，共設置 20 支。另外兩條測線則分別與中心線成 15 度角，每線各設置 16 個電極，電極間距為 5 公分。

於第一試驗階段，電極排列方式以單測線排列，並設置四口監測井如圖 4-4 與圖 4-5 所示。沿著實驗槽體之中心線，每 5 cm 設置一電極，電極插入深度為 5 cm，共設置 27 支電極，總測線長度為 130 cm，監測井設置點位於 20 cm、40 cm、65 cm 及 95 cm 處，實際設置完成照片如圖 4-6。



圖 4-2、T 字型不鏽鋼電極

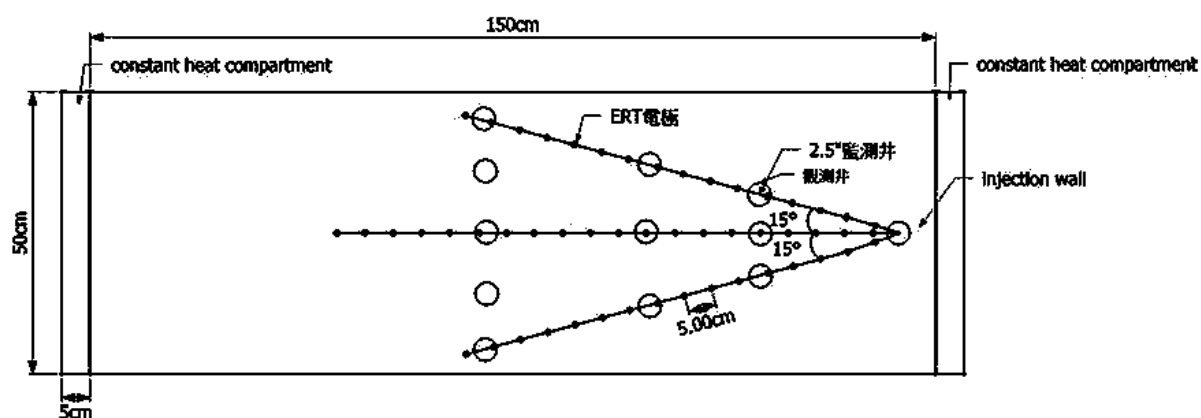


圖 4-3、實驗槽設計俯視圖

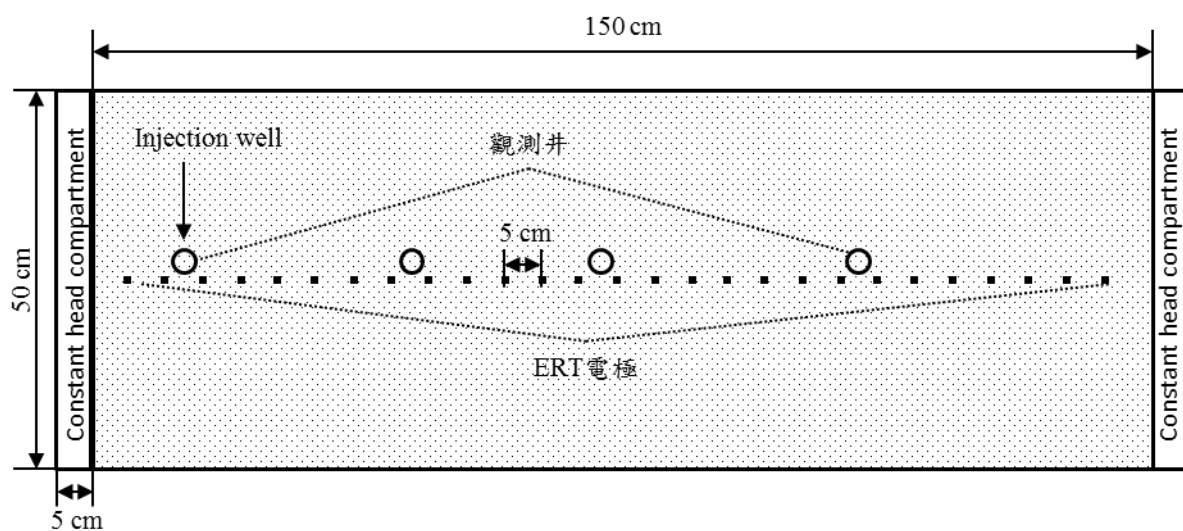


圖 4-4、第一階段實驗槽設計俯視圖

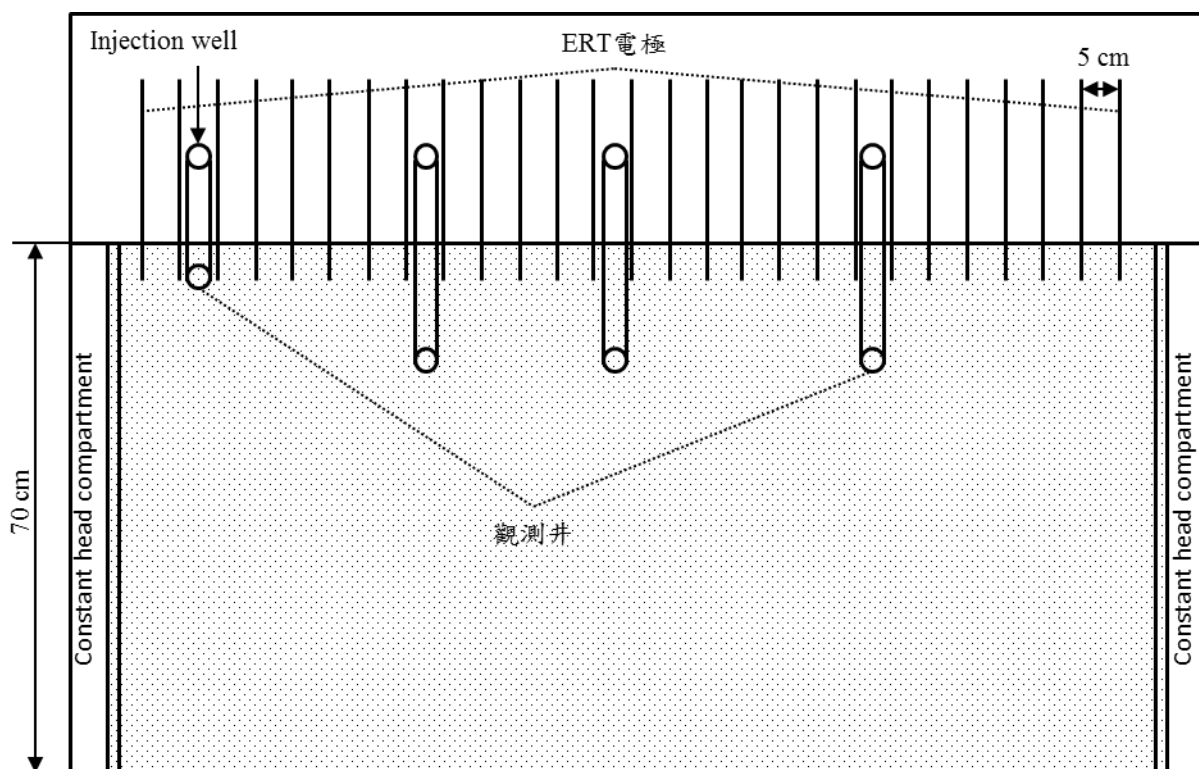


圖 4-5、第一階段實驗槽設計側視圖

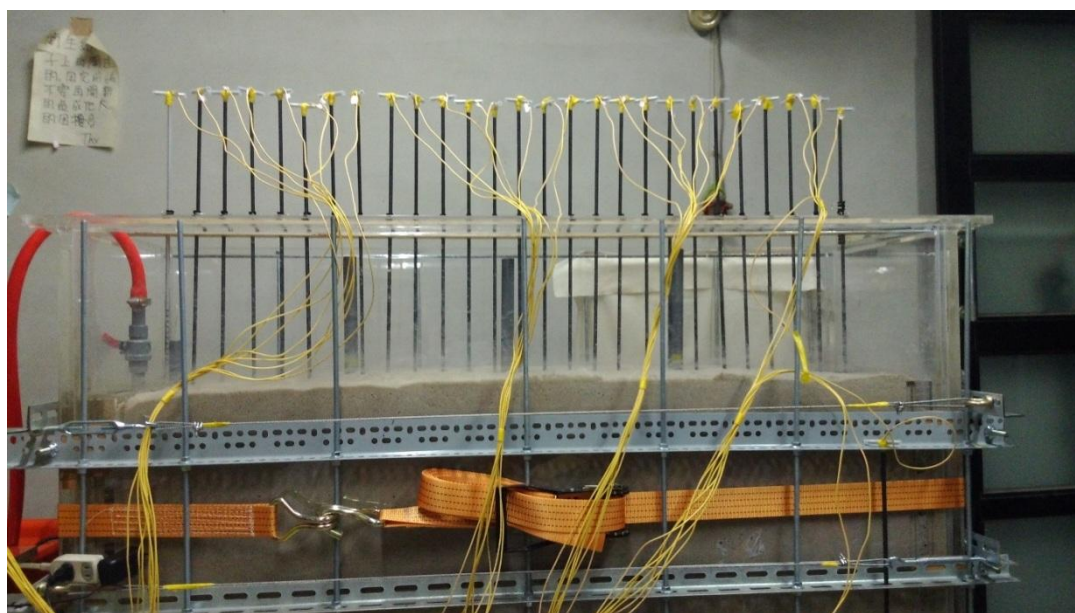


圖 4-6、第一階段實驗槽體設置完成情形

IV. 建立地下水流速並導入電解質示蹤劑

實驗槽中地下水流速將設定為一維定流速。流速由實驗槽兩端定水頭控制。在上游端的水頭由設在 5-公分寬槽體的溢流堰控制，下游端的水頭則由蠕動泵浦抽水控制 5-公分寬槽體的水位。這樣的設計，可以利用蠕動泵浦調整流量進而達到變換邊界條件的目的。必須注意的是兩端水位皆不能高於填充砂的厚度。實驗時會等到流速達穩態時才進行示蹤劑試驗，穩態達到與否，則藉由量測監測井中水位判定，當監測井中水位變化 1 分鐘內小於 0.5 公分時，則判定流場為穩態。

當地下水流場達穩態後，就開始進行示蹤劑試驗。示蹤劑的成分為導電度為 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ NaCl 水溶液。本研究將以示蹤劑試驗，模擬點源 (point source) 在地下水中傳輸。點源的導入方式則有脈衝式 (instantaneous) 及連續式 (continuous) 兩種方式。示蹤劑的導入點位於實驗槽中心線離上游定水頭 30 公分 (圖 4-3)，深度為水位下 20-30 公分處。示蹤劑導入井構造與監測井相同。模擬脈衝式點源時，以針筒注入 50 毫升示蹤劑。模擬連續式點源時，則以蠕動泵浦注入示蹤劑，注入的速率為每分鐘 5 毫升。連續點源持續注入時間為 1-2 小時。

V. 進行參數量測分析

在建立穩定流場過程，將監測各監測井中水位，直到流場達穩態。在示蹤劑試驗過程，進行量測的參數包含監測井水位，監測井中地下水導電度。此外並進行二維地電阻影像探測，探測之電極佈設如 III 所述。地下水導電度監測以 SUNTEX 公司所製造之微電腦電導度計，型號為 SC-2300(圖 4-7 左)。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 4-7 右)。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 4-8 為系統架設完成後示意圖。



圖 4-7、導電度計與地電阻儀

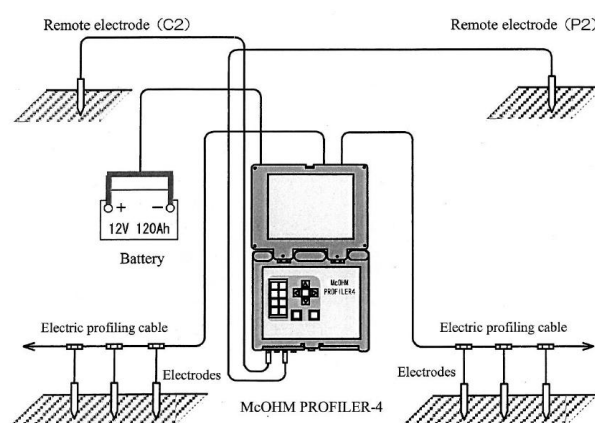


圖 4-8、地電阻系統架設完成示意圖

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，為了獲得水平及垂直方向導電度變化（參考表 3-3），本研究將同時讀取兩種電極排列：溫奈及雙偶極排列法。溫奈排列法在水平方向敏感度較佳，而雙偶極排列法則在垂直方向敏感度較佳，因此整合此兩種電極排列法資料可同時將垂直及水平導電度變化敏感度最佳化。

4.2 地下水流速流向與地電阻剖面之關聯性探討

本研究之目的之一為由地電阻剖面推估地下水流速與流向。由於地電阻變化的主因是由示蹤劑的傳輸所造成，而示蹤劑的傳輸則是由地下水流場決定。因此必須先了解示蹤劑在特定流場下之傳輸現象，以下就(一)中所述之示蹤劑試驗，探討示蹤劑之理論傳輸分布。理論可分為脈衝點源及連續點源兩部分。

I. 脈衝點源 (instantaneous point source)

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 4-9 顯示。圖 4-9 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

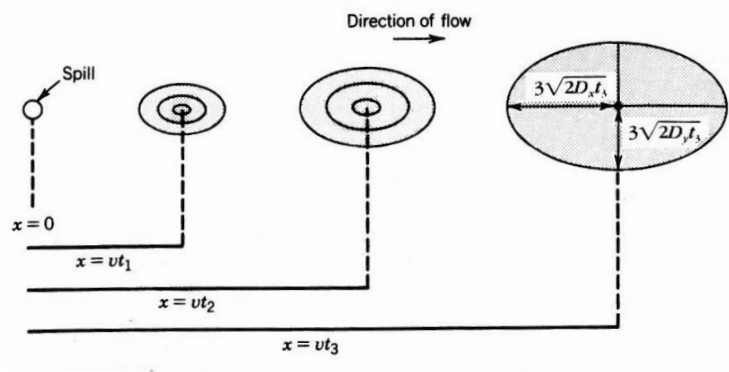


圖 4-9、脈衝點源所產生之示蹤劑在不同時間之濃度分布的示意圖 (x - y 方向)

從圖 4-9 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。為了釐清電極棒間距對結果的影響，本計畫將電極棒間距設為參數，使用的數值為 20、10、5 公分。

II. 連續點源 (continuous point source)

以脈衝點源方式進行示蹤劑試驗，可能因為注入的示蹤劑質量不足而導致濃度變化太小，使得地電阻探測無法得到有效資料而使此方法失效。本研究為因應此問題，將在脈衝點源試驗後，進行連續點源試驗。若延續脈衝點源之座標設定及相同假設條件，注射濃度為 C_0 ，則連續點源的解析解如式 4-3(Hunt, 1978)。

$$C_c = \frac{C_0 \exp\left(\frac{xv}{2D_x}\right)}{8\pi R \sqrt{D_y D_z}} \left[\exp\left(-\frac{Rv}{2D_x}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{R-vt}{2\sqrt{D_x t}}\right) + \exp\left(\frac{Rv}{2D_x}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{R+vt}{2\sqrt{D_x t}}\right) \right] \quad (4-3)$$

$$\text{式中} \quad R = \sqrt{x^2 + y^2 \frac{D_x}{D_y} + z^2 \frac{D_x}{D_z}} \quad (4-4)$$

$erfc$ = 餘補誤差函數 (complementary error function)

$$erfc(x) = 1 - erf(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

erf = 誤差函數 (error function)

式 4-3 中的延散係數可從脈衝式點源實驗中獲得。另外式 4-3 括號內第二項通常數值很小常可忽略不計，如此式 4-3 可簡化。圖 4-10 為式 4-3 在特定時間特定深度 (固定 t 及 z) 的濃度分布示意圖，從圖 4-10 可歸納出下列結論：

- 濃度愈接近排放點愈高。
- 在排放點下游任意 x 位置 (延地下水流方向)，在 y 軸方向濃度呈高斯分布 (Gaussian distribution)，並且其最高濃度位置位於排放點正下游。因此若在排放點下游測得任意垂直於地表 (x - y 平面) 的濃度分布，找出最高濃度位置 (x 及 y 座標)，再將此點與排放點連成一直線，即為地下水流方向。

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，藉由最大濃度位置定出地下水流方向，再藉由量測中心線 ($x = x, y = 0, z = 0$) 濃度隨時間(t)之變化，由式 4-3 推測出地下水流速。

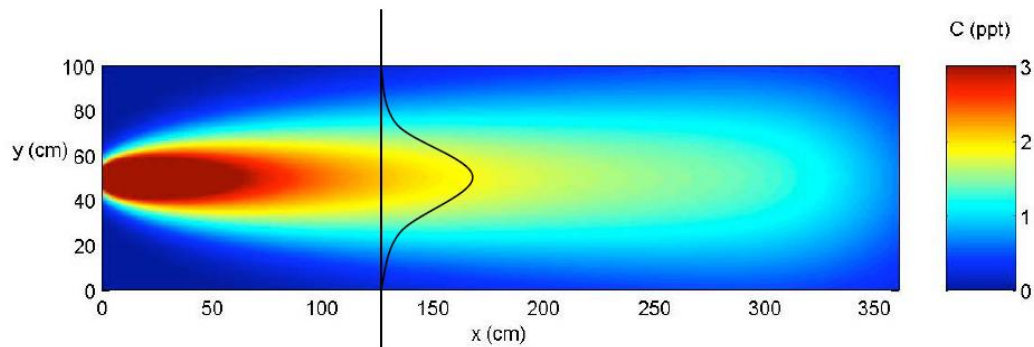


圖 4-10、連續點源固定 t 及 z 的濃度分布示意圖

與脈衝式點源一樣，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。為了釐清電極棒間距對結果的影響，本計畫將電極棒間距設為參數，使用的數值為 20、10、5 公分。

4.3 地下水導電度與地電阻剖面之關聯性探討

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)。

$$\sigma_w = F\sigma_b \quad (4-5)$$

式中 σ_w =地下水導電度

σ_b =表現導電度(apparent conductivity)

F =含水層參數(formation factor)

本研究將在實驗槽試驗中直接將導電度電極放入監測井中量測地下水導電度 (σ_w)，並與地電阻所推估之表現導電度比較回歸推估 F 值。由於推估 F 值會受到電極排列方式影響，本研究將探討用溫奈排列及雙偶極排列法推估 F 值之差異。

另外地電阻探測儀量測所涵蓋之範圍也會影響 F 值，而涵蓋範圍與所輸入電流有關，因此本研究在評估式 4-5 時，將變化輸入電流值，預計使用 20 mA 及 100 mA 兩種電流。

4.4 不同電極排列方式探討

本研究使用 Wenner 與 Dipole-dipole 電極排列法進行第一階段試驗。Wenner 排列法適用於淺層的調查，測值穩定、對垂直變化之解析度高，但缺點為施測耗時及較深地層測得之雜訊較高；而 Dipole-dipole 電極排列法則適用於較深的地層探測，在電流偶極與電位偶極間有較高的靈敏度，對水平變化之解析度較高，但垂直變化則較差。故同時施作不同的排列法，以互相比對施測結果與驗證。

Wenner 電極排列法在 27 根電極排列下，可測得視電阻資料層數為 8 層，推估探測深度範圍為電極深度以下 0.05 m 至 0.23 m(如圖 4-11 所示)。第 1 層資料點約為電極深度以下 0.05 m，第 2 層資料點約為電極深度以下 0.08 m，第 3 層資料點約為電極深度以下 0.1 m...，以此類推，第 8 層資料點約為電極深度以下 0.23 m。Dipole-dipole 電極排列法在 27 根電極排列下，視電阻資料層數為 24 層。推估探測深度約為電極深度以下 0.05 m 至 0.31 m(如圖 4-12 所示)。第 1 層資料點約為電極深度以下 0.05 m，第 2 層資料點約為電極深度以下 0.06 m，第 3 層資料點約為電極深度以下 0.07 m...，以此類推，第 24 層資料點約為電極深度以下 0.32 m。Wenner 與 Dipole-dipole 電極排列法實驗條件如表 4-3 所示，以比較在相同試驗條件下獲取之視電阻率結果。

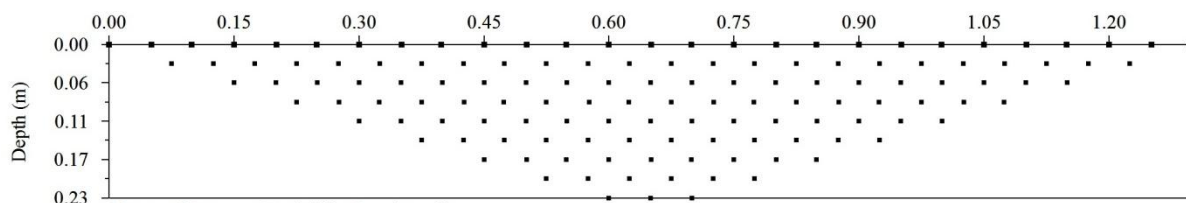


圖 4-11、Wenner 電極排列法電阻資料點位置

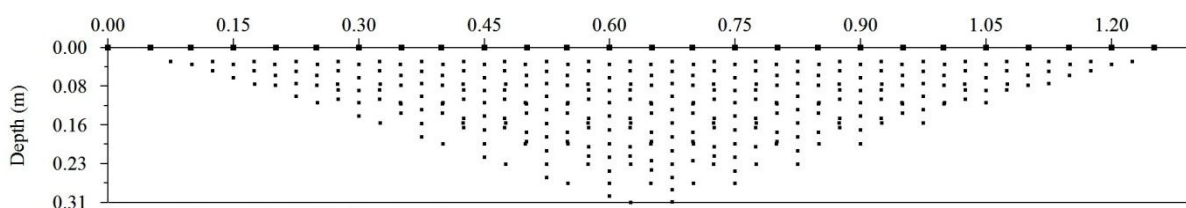


圖 4-12、Dipole-dipole 電極排列法電阻資料點位置

表 4-3、不同電極排列方式的實驗條件

導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Array 方法	水位 (cm)	間距 (cm)	深度 (cm)	電流 (mA)	放電時間 (sec)
4000	Wenner	70	5	20	Auto	1
4000	Dipole-dipole	70	5	20	Auto	1

4.5 Dipole-dipole 法解析能力探討

本節以重複性、準確性與敏感性三方面探討地電阻的解析能力，實驗條件詳述於後：

4.5.1 重複性

重複實驗結果以 Root Mean Squared Error, RMSE (式 4-6) 結果作為檢驗指標，RMSE 值越小，表示重複實驗值無顯著差異，重複性良好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho_2(i) - \rho_1(i)]^2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4-6)$$

其中 $\rho_1(i)$ 為第一次實驗結果值， $\rho_2(i)$ 為第二次實驗結果值， n 為資料點數目。實驗條件如表 4-4，實驗槽以 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之均勻鹽水充滿至水位 70 cm (與地表同高)，再放流至水位達 55 cm (地表下 15 cm) 穩定後，電極深度設置為地表下 5 cm。水位穩定後，於第 0 小時、第 16 小時與第 22 小時，量測相同環境下的電阻率以比較是否有差異。

表 4-4、重複性實驗條件

導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Array 方法	水位 (cm)	間距 (cm)	深度 (cm)	電流 (mA)	放電時間 (sec)
600	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1

4.5.2 敏感性

為了解地下水中導電度之變化程度對地電阻施測結果之敏感性，實驗槽中以不同導電度之均勻鹽水充滿，探究地電阻獲得其變化的訊息及程度。實驗條件如表 4-5，實驗槽體分別以 600、800、1000 及 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之均勻鹽水充滿至水位 55 cm (地表下 15 cm)，電極深度為地表下 5 cm。實驗結果並與小槽體試驗結果互相比較，並以 Archie's law 驗證評估。

表 4-5、準確性實驗條件

導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Array 方法	水位 (cm)	間距 (cm)	深度 (cm)	電流 (mA)	放電時間 (sec)
600	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
800	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
1000	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
1200	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1

4.5.3 準確性

準確性試驗先以小型實驗槽進行實驗，以建立不同濃度鹽水與砂土之電阻率與導電度之關係。小型實驗槽體尺寸為寬度為 15 cm、長度為 25 cm，深度為 10 cm(如圖 4-13)。槽體兩側以石墨板隔於圖中 M、N 位置處，石墨板間均勻填充石英砂，並加入不同導電度之鹽水充滿為飽和狀態。以直流電源供應器於實驗槽兩側石墨板輸入固定電流，並以三用電表測量槽中砂土 A、B 兩點之電壓差，再以式 4-7 計算飽和含鹽水之石英砂的電阻值。

$$R = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} \quad (4-7)$$

其中 R 表示電阻； ΔV 表示 A、B 兩點電壓差； I 為輸入電流大小； A 為； L 為 A、B 兩點距離。測量結果可與地電阻在大型實驗槽體下測得之電阻值進行比較，以比較地電阻施測之準確性。

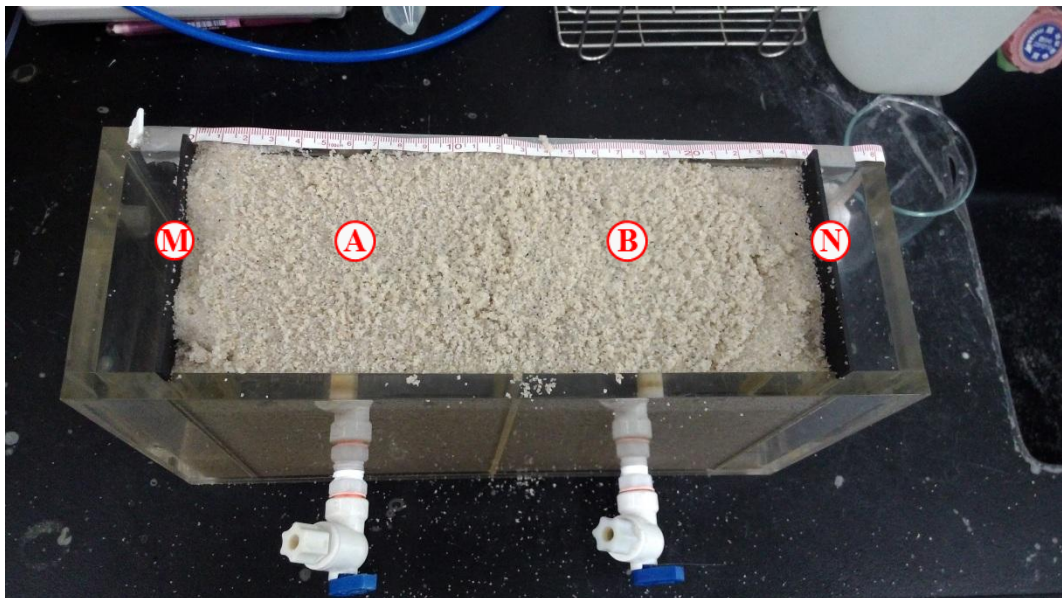


圖 4-13、小型實驗槽照片

地電阻影像剖面法(electrical resistivity tomography, ERT)，藉由地電阻探測儀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計算幾何排列因子 K(Geometric Factor)，經由換算後可得到視電阻率(ρ_a)計算式如下：

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

地電阻探測儀所量測的導電度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 2)來表示(Archie, 1942)。

$$\rho_b = F \rho_w = \theta^{-m} \rho_w \quad (2)$$

式中 ρ_b =視電阻率(apparent resistivity)

ρ_w =地下水電阻率

F =含水層參數(formation factor)

θ =孔隙率

m 是與砂土有關的經驗參數，Archie(1942)指出在綜合砂岩中 m 介於 1.8 至 2 之間。對於實驗室使用的乾淨疏鬆砂，則 m 大約是1.3。表4-6顯示在固定 m 值下，孔隙率愈小，F值愈大。

表 4-6、Formation factor with θ and m

$\theta \backslash m$	1.3	1.8	2
0.3	4.78	8.73	11.11
0.4	3.29	5.20	6.25
0.5	2.46	3.48	4.00
0.6	1.94	2.51	2.78

4.6 操作參數探討

本研究欲以不同輸出電流大小、偶極間距與電極深度等操作參數，比較對 Dipole-dipole 排列法之地電阻施測結果的影響，實驗條件說明如下：

4.6.1 輸出電流

實驗槽體以 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之均勻鹽水充滿至水位 55 cm (地表下 15 cm)，電流大小分別設置為 Auto、20 mA、60 mA 及 120 mA，如表 4-7 所示。目的為測試輸出電流大小對於相同環境條件下，是否影響電阻率量測結果。

表 4-7、輸出電流參數的實驗條件

導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Array 方法	水位 (cm)	間距 (cm)	深度 (cm)	電流 (mA)	放電時間 (sec)
600	Dipole-dipole	55	5	20	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	5	20	20	1
600	Dipole-dipole	55	5	20	60	1
600	Dipole-dipole	55	5	20	120	1

4.6.2 偶極間距

Dipole-dipole 排列法是以一組電流偶極與一組電位偶極進行地電阻之量測，電流偶極與電位偶極的間距(a)為相同，藉由改變兩組偶極之間的距離(na)，可獲得較深部地層的探測資料。本操作參數比較不同偶極間距(a)，從 5 cm 至 20 cm，測試此參數對地電阻量測之結果影響。實驗條件為表 4-8，實驗槽體以 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之均勻鹽水充滿至水位 55 cm (地表下 15 cm)，電極間距分別設置為 5 cm、10 cm、15 cm 及 20 cm。比較不同偶極間距獲得之視電阻率結果，分析其差異及變化。

表 4-8、偶極間距的實驗條件

導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Array 方法	水位 (cm)	間距 (cm)	深度 (cm)	電流 (mA)	放電時間 (sec)
600	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	10	5	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	15	5	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	20	5	Auto	1

4.6.3 電極深度

實驗槽體以 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之均勻鹽水充滿至水位 55 cm (地表下 15 cm)，電極深度分別設置為地表下 5 cm、10 cm 及 20 cm(表 4-9)，當電極深度增加，則電極愈靠近水位面。比較不同電極深度獲得之視電阻率結果及範圍，分析其差異及變化。

表 4-9、電極深度的實驗條件

導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Array 方法	水位 (cm)	間距 (cm)	深度 (cm)	電流 (mA)	放電時間 (sec)
600	Dipole-dipole	55	5	5	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	5	10	Auto	1
600	Dipole-dipole	55	5	15	Auto	1

4.7 脈衝式點源試驗

本實驗條件控制實驗槽中充滿 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之鹽水，於槽體上游持續注入 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之鹽水，並於下游排出，以模擬地下水之流動。實驗共進行三次單測線試驗、一次三測線試驗以及三次五測線試驗。三測線試驗分別沿著 x 方向在 $y=20$ 、25、30 cm 設置三條測線。五測線試驗分別沿著 x 方向在 $y=15$ 、20、25、30、35 cm 或 $y=20$ 、25、30、35、40cm 設置五條測線。

流場之流速控制以維持槽體上游進流端溢流堰水頭高度以及固定槽體下游出水流量(Q)作為控制手段，單測線共有三組試驗， Q 分別為每分鐘 1170、864 及 369 mL。以槽體橫斷面之截面積($A=3290 \text{ cm}^2$)，計算 $Q/A=q$ ，視速度(apparent velocity, q)約為 0.36、0.26 及 0.11 cm/min。孔隙流速(pore velocity, v)比較接近實際於孔隙中之流速，故上述流速須除上孔隙率(θ)，計算 $v=q/\theta$ ，作為槽體中流體流速，依實驗計算得孔隙率約為 0.44，得 v 分別為 0.81、0.6 及 0.25 cm/min。三測線及五測線控制流場流速(孔隙流速)皆為 0.2 cm/min，待流場流速控制穩定後，再於 $y=25 \text{ cm}$ 上游監測井以一次性方式注入導電度 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之氯化鈉示蹤劑 1 L。試驗過程持續以地電阻監測電阻率與觀測井導電度，以 ERT 捕捉示蹤劑於地下流場中之移動傳輸情形，並比較 ERT 量測結果與觀測井監測值。利用 ERT 探測出電阻變化最大的位置與時間差，即可推算地下水流速。實驗結果呈現以電阻率與背景值之變化量 $\Delta\rho$ 表示，而最大電阻率與背景值之變化量以 $\Delta\rho_{\max}$ 表示。

4.8 連續式點源試驗

示蹤劑連續注入地下水後，其濃度愈接近排放點愈高。在排放點下游任意 x 位置 (沿地下水流方向)，在 y 軸方向濃度呈高斯分布(Gaussian distribution)，並且其最高濃度位置位於排放點正下游。因此若在排放點下游測得任意垂直於地表(x - y 平面)的濃度分布，找出最高濃度位置 (x 及 y 座標)，再將此點與排放點連成一直線，即為地下水流方向。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，藉由最大濃度位置定出地下水流方向。再藉由量測中心線 ($x=x, y=0, z=0$) 濃度隨時間(t)之變化，推測出地下水流速。

連續注入示蹤劑於地下水中，其初始相對濃度值為 $C/C_0=1$ ，示蹤劑初始注入濃度可視為階梯函數(step function)分佈，若於空間一固定點監測示蹤劑濃度對時間之變化，由於延散作用影響而形成所謂的濃度貫穿曲線(breakthrough curve)，呈現 S 形分佈，如圖 4-14 所示。濃度之平流傳輸鋒緣(advective front)或質量中心隨著平均流速移動，而平流傳輸鋒緣所發生的時間點可視為 $C/C_0=0.5$ 出現之時。

故推算不同位置發生 $C/C_0=0.5$ 與注入點的相對位置以及時間，即可推算地下水流速。本研究以計算得 $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 作為質量中心用以推估流場流速，而不同 x 位置下測得 $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}$ ，以 $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示縱劑主要流向。

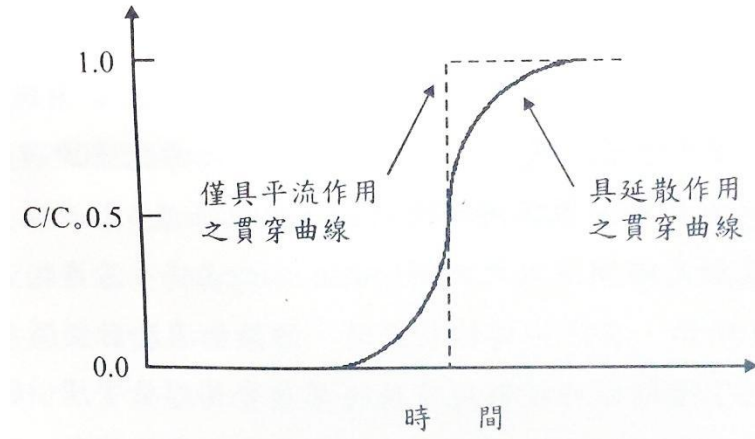


圖 4-14、一維管柱試驗之濃度貫穿曲線

實驗共有一次三測線以及兩次五測線實驗，三測線試驗分別沿著 x 方向在 $y=25$ 、 30 、 35 cm 設置三條測線。五測線試驗分別沿著 x 方向在 $y=15$ 、 20 、 25 、 30 、 35 cm 設置五條測線。控制流場流速為 0.2 cm/min，於 $y=25$ cm， $x=0$ cm 位置設置注入井，以連續點源方式 30 mL/min 注入導電度為 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 示縱劑。

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，首先為測試 Wenner 法與 Dipole-dipole 法，比較兩種電極排列方式獲得的視電阻值差異。接著，探討 ERT 之重複性、準確性及敏感性。重複性試驗在相同環境條件下，測試 ERT 施測是否能獲得相同之結果；敏感性試驗藉由改變槽體砂土中的含水導電度，測試 ERT 量測範圍的敏感性。再進一步改變操作參數，觀察不同操作參數對視電阻量測結果的影響性，如：輸出電流、偶極間距與電極深度。再建立流場試驗，以脈衝式與連續式點源注入高導電度鹽水示蹤劑，測試 ERT 捕捉電阻率變化情形。

5.1 電極排列方式施測結果比較

實驗結果如圖 5.1.1 至圖 5.1.4 顯示，Wenner 施測結果如圖 5.1.1，可見視電阻率隨深度越深而增加，電阻率範圍約為 4.4~38.4(ohm-m)，視電阻剖面(圖 5.1.3)，觀察得 Wenner 結果呈現水平層狀分布。Dipole-dipole 施測結果如圖 5.1.2，視電阻率隨深度越深有稍微降低的情形，電阻率範圍約為 1.0~10.2(ohm-m)，視電阻剖面(圖 5.1.4)，觀察得淺層接近地表之電阻較高，而其餘電阻值分布則較為一致。由於實驗槽由均質的石英砂填充，並充滿均勻導電度之鹽水，故 Wenner 施測方法顯示深度越深，視電阻率越大之原因，可能受槽體邊界效應影響或其它因素影響，導致結果呈現與實際狀況不符，故後續研究先選用 Dipole-dipole 排列法進行實驗方法的建立與探討。

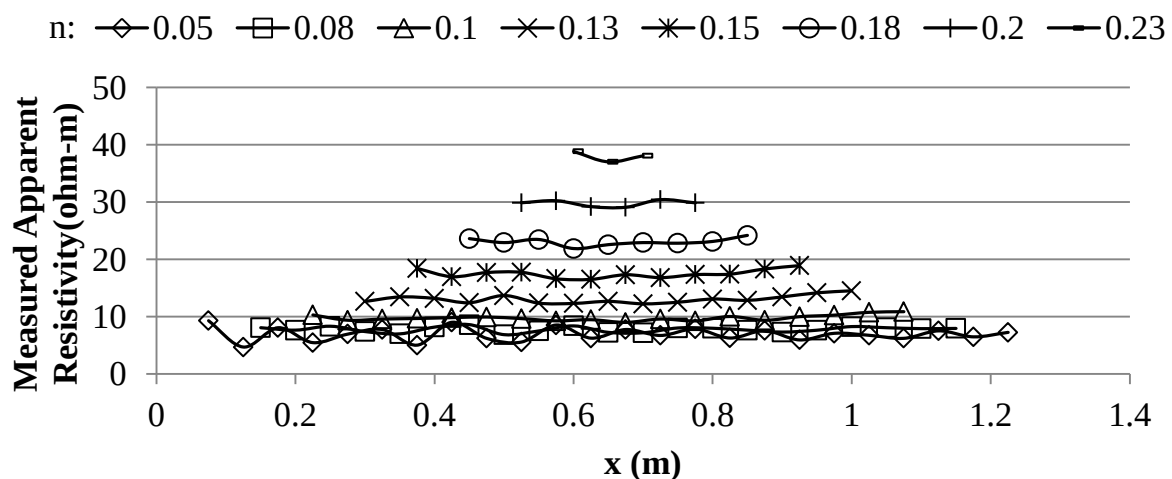


圖 5.1.1、Wenner 電極排列法之各深度視電阻率的水平方向變化圖

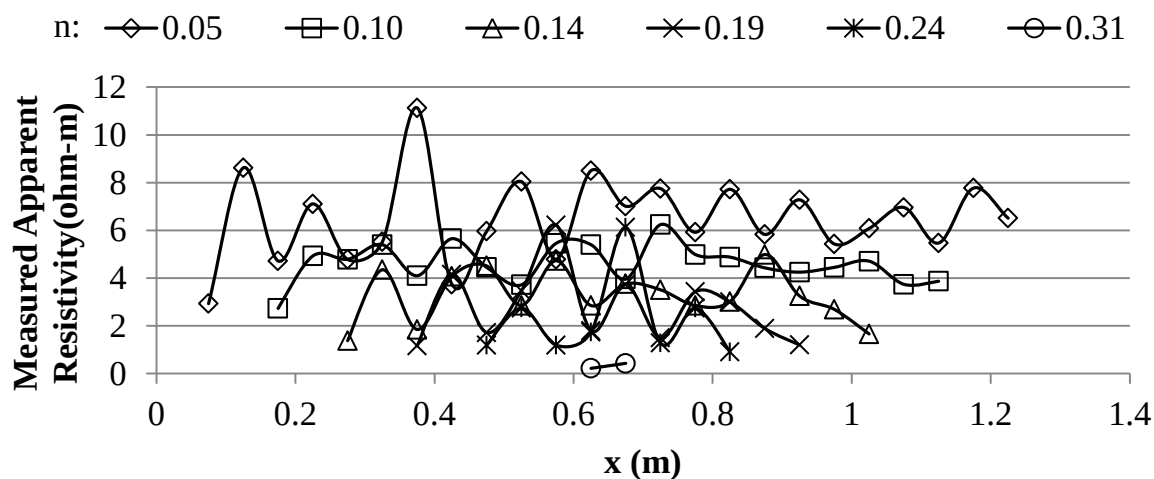


圖 5.1.2、Dipole-dipole 電極排列法之各深度視電阻率的水平方向變化圖

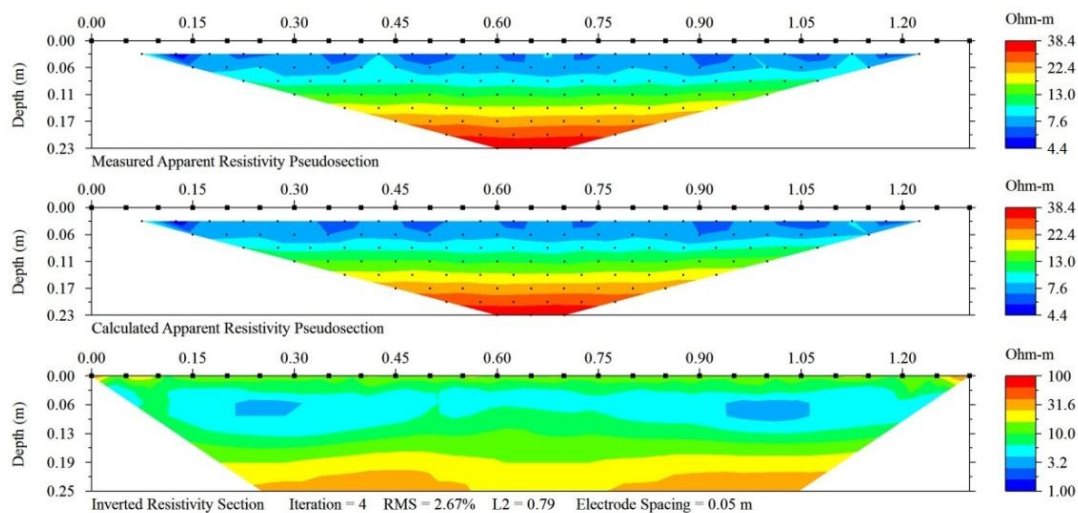


圖 5.1.3、Wenner 電極排列法之視電阻率剖面

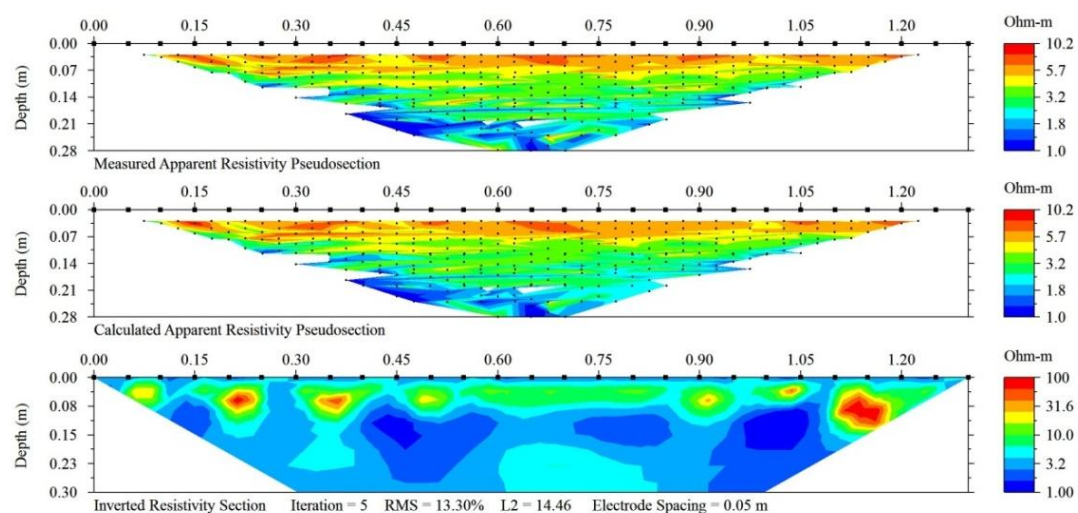


圖 5.1.4、Dipole-dipole 電極排列法之視電阻率剖面

5.2 Dipole-dipole 法解析能力探討

5.2.1 重複性

不同深度電阻率變化結果呈現於圖 5.2.1 至圖 5.2.3，圖 5.2.1 顯示深度第 1 層之視電阻率變化，第 0 小時與第 16 小時施測結果，兩者的資料差異度並不大。而第 22 小時則於 0.3 m 處雖測得較高電阻值，但其它位置的電阻率變化範圍亦不大。在深度第 5 層之視電阻資料顯示，隨時間經過，視電阻有稍微降低的情形。而深度第 10 層亦有相同的趨勢。RMSE 分析結果呈現於表 5-1，顯示第 0 小時分別與第 16 小時及第 22 小時測得電阻率 RMSE 值為 3.63 與 4.82(ohm-m)，其視電阻值相較於背景值變化很小，整體而言，實驗結果顯示 ERT 的重複性良好。

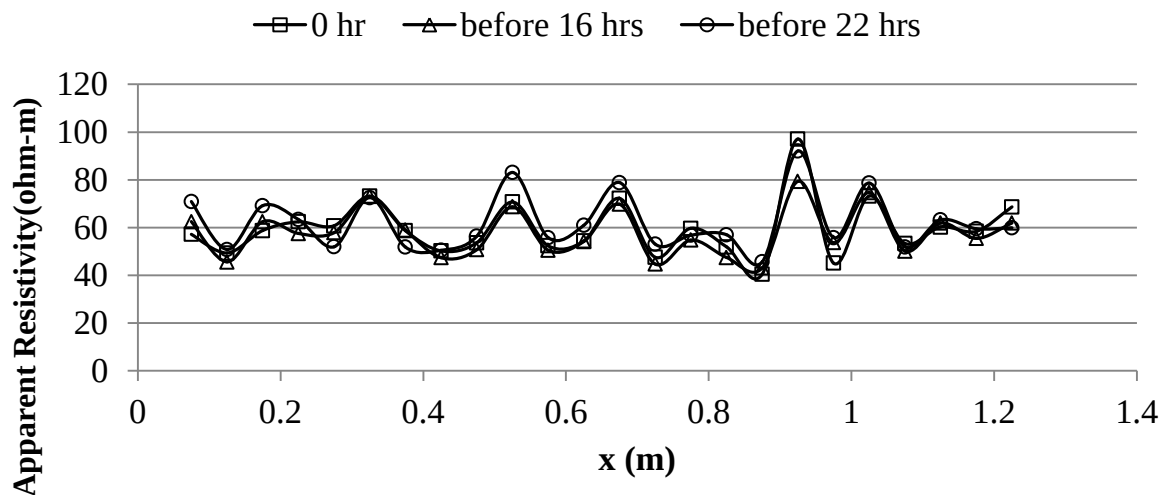


圖 5.2.1、不同施測時間，視電阻率在 x 方向上之變化(n=1)

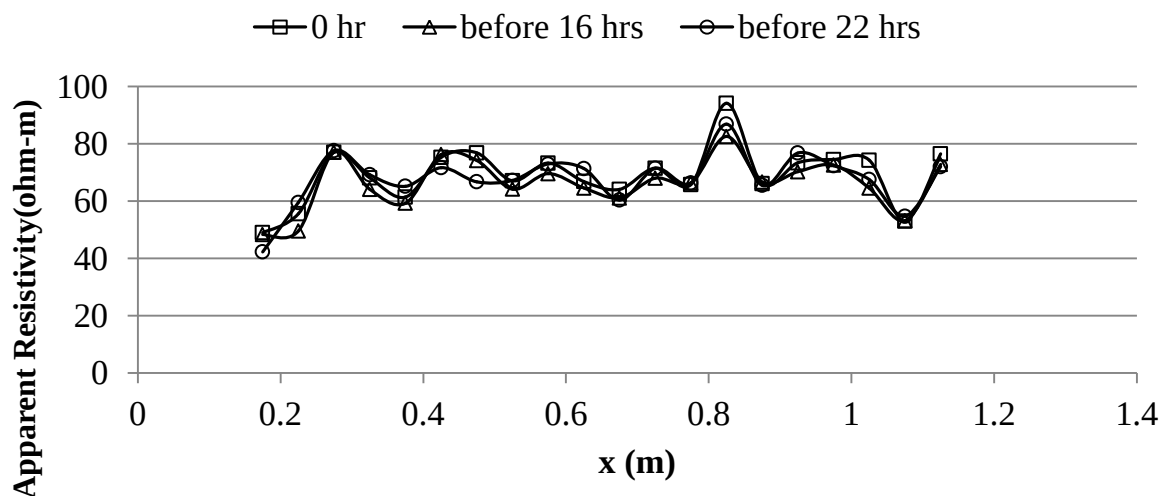


圖 5.2.2、不同施測時間，視電阻率在 x 方向上之變化(n=5)

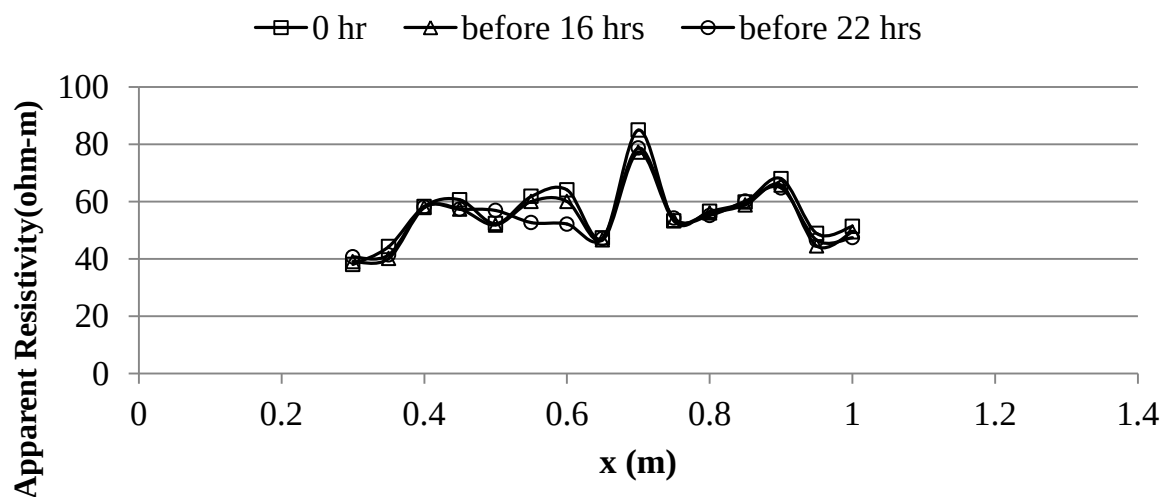


圖 5.2.3、不同施測時間，視電阻率在 x 方向上之變化(n=10)

表 5-1、不同時間施測視電阻結果之 RMSE 值

比較時間點	RMSE
第 0 小時 vs. 第 16 小時	3.63 (ohm-m)
第 16 小時 vs. 第 22 小時	4.61 (ohm-m)
第 0 小時 vs. 第 22 小時	4.82 (ohm-m)

5.2.2 敏感性

將 ERT 測得不同鹽水導電度 600、800、1000、1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之電阻率以區間方式分組，每 5 ohm-m 為一組，至 100 ohm-m。由圖 5.2.4，可看出，隨著鹽水導電度增加，低電阻率資料筆數明顯增加。圖 5.2.5 至圖 5.2.8 表示視電阻率在不同深度隨 x 方向之變化情形，可明顯看出，相同 ERT 測點位置，隨著鹽水導電度增加，視電阻率降低的趨勢具有一致性。

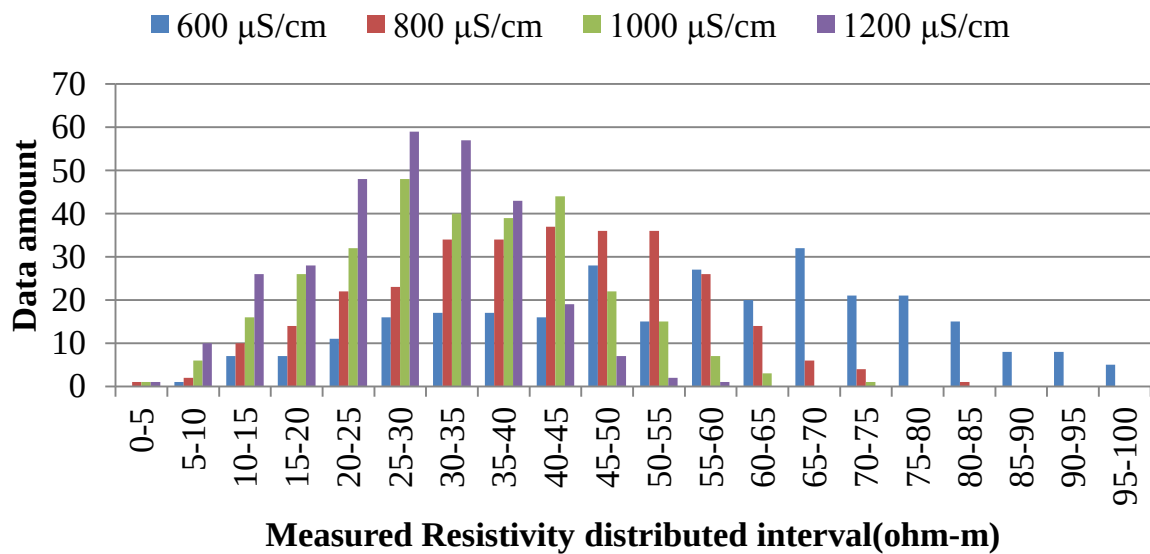


圖 5.2.4、不同導電度鹽水下測得之電阻率分布範圍

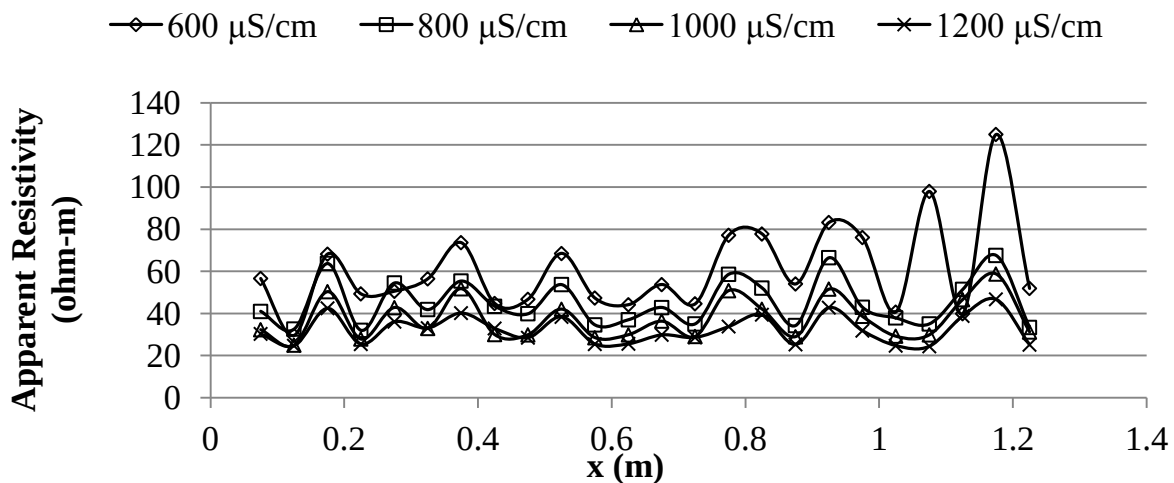


圖 5.2.5、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=1)

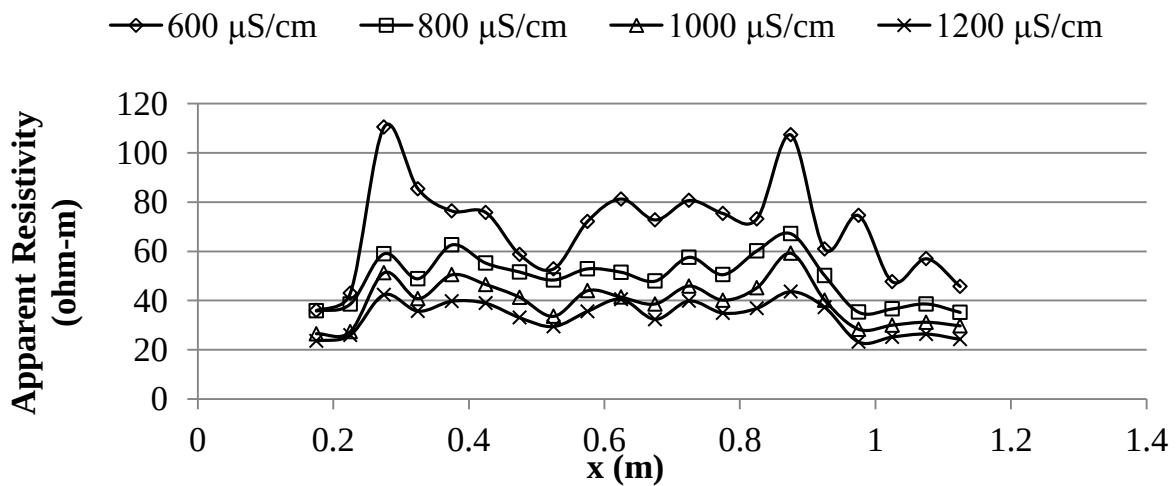


圖 5.2.6、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=5)

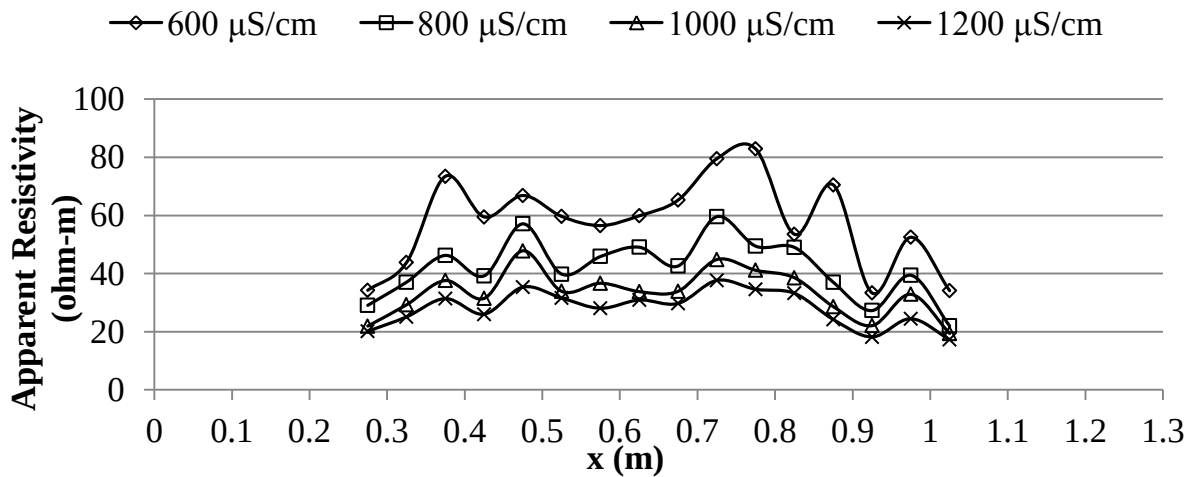


圖 5.2.7、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=9)

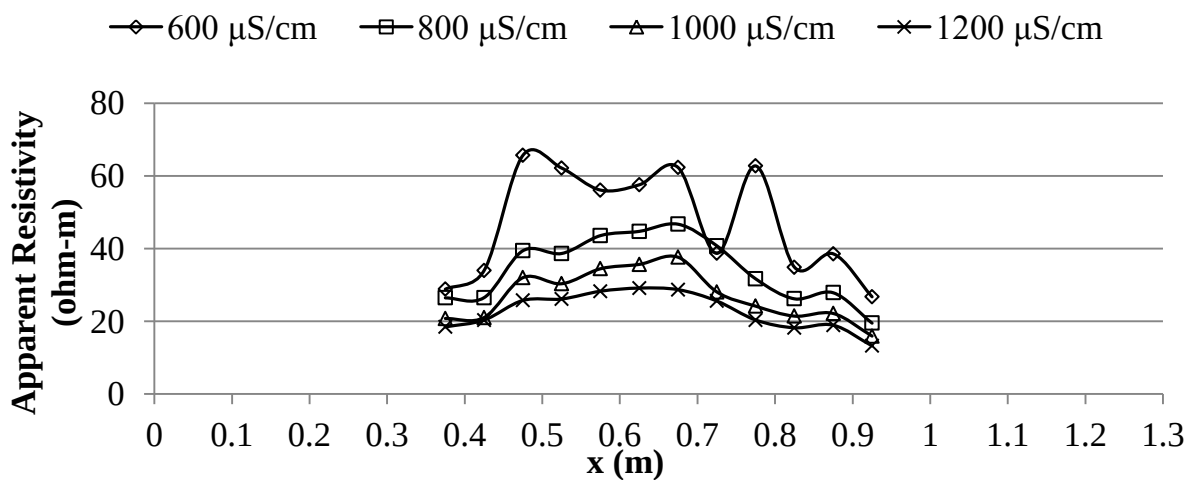


圖 5.2.8、不同鹽水導電度下視電阻率隨水平方向變化圖(n=13)

5.2.3 準確性

I. 小型實驗槽試驗

鹽水導電度與鹽水電阻值的關係如圖 5.2.9 所示，導電度的倒數為電阻值。而在不同導電度鹽水下，測得飽和含鹽水之石英砂電阻與鹽水電阻值之關係呈現於圖 5.2.10，顯示兩者具有良好的線性關係。而 Archie's law 表示砂土導電度與地下水導電度為一正比關係，本實驗得關係如圖 5.2.11，顯示，結果符合 Archie's law。由石英砂導電度(σ_b)與地下水導電度(σ_w)之關係可得含水層參數F(formation factor)即為線性斜率 0.32。

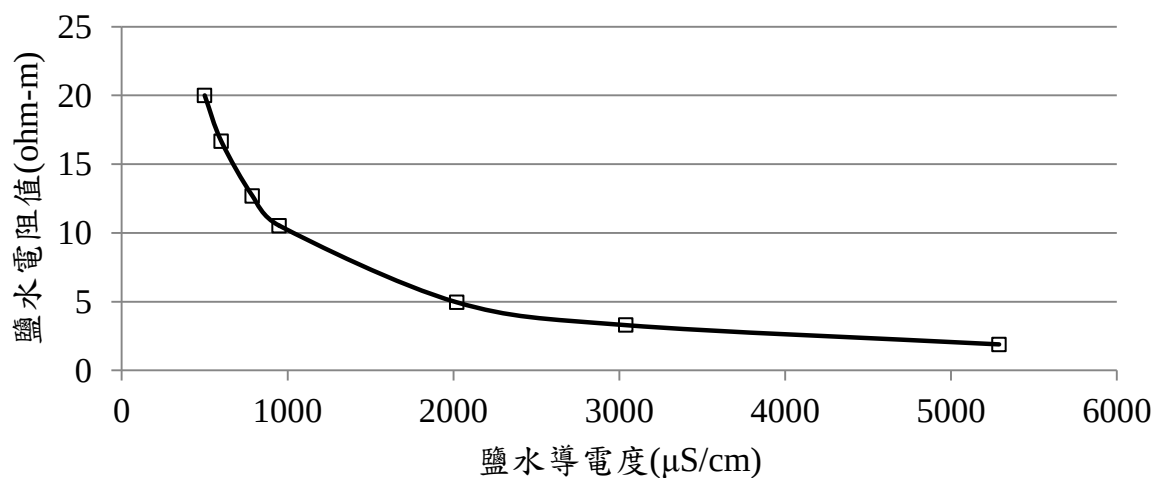


圖 5.2.9、小槽試驗之鹽水導電度與鹽水導電度的關係圖

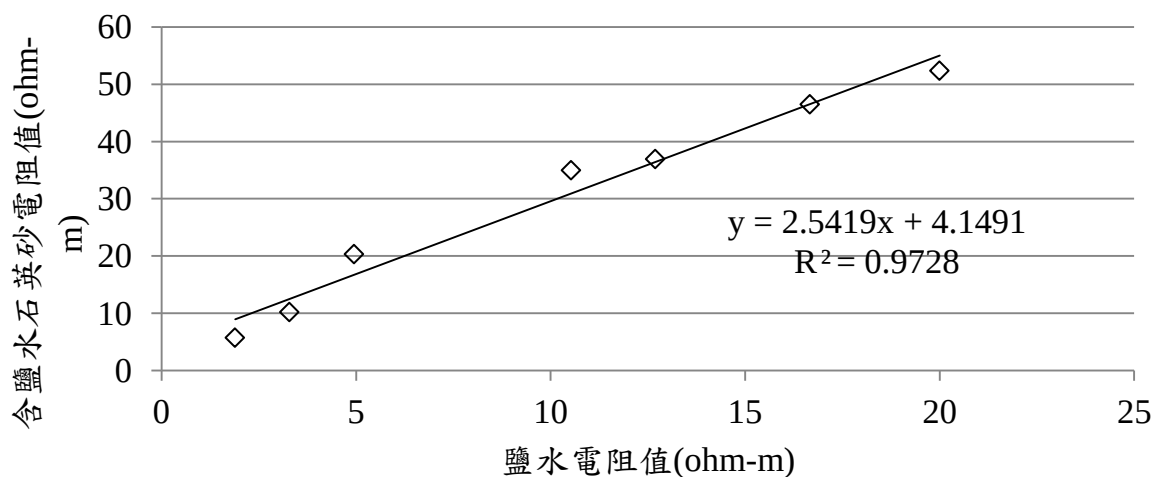


圖 5.2.10、小槽試驗之鹽水電阻值與含鹽水石英砂電阻值的關係圖

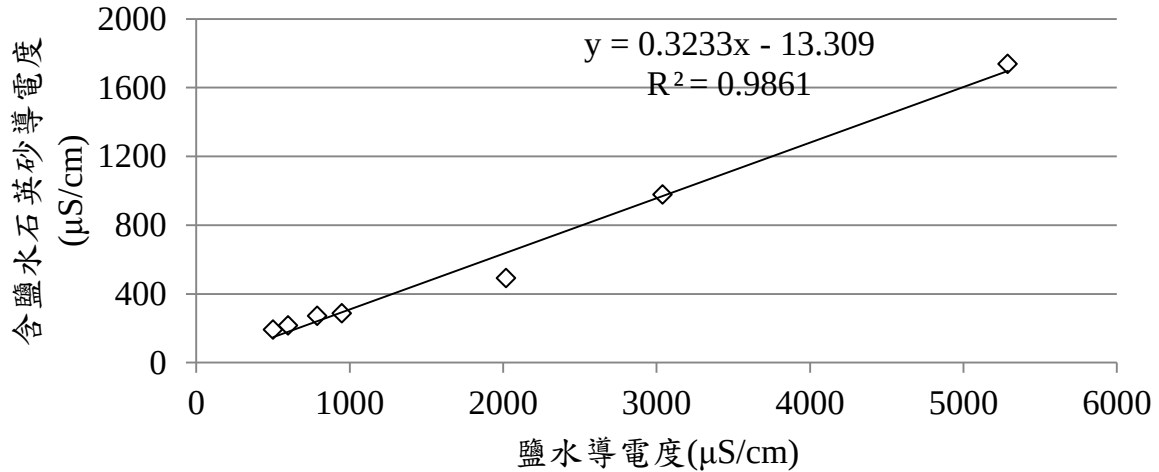


圖 5.2.11、小槽試驗之鹽水導電度與含鹽水石英砂導電度的關係圖

II. 地電阻視電阻率比較

由圖 5.2.12 至圖 5.2.15 顯示，在不同位置下鹽水導電度與含鹽水砂土導電度之關係並與小槽結果比較。結果顯示含鹽水砂土與鹽水導電度之線性關係良好，與小槽體試驗相比，測得大槽體不同位置之斜率趨勢一致。由圖 5.2.12 可見，在測深第 1 層，水平位置 0.575 m 與 0.725 m 之含鹽水砂土導電度較小槽體試驗值略高。而水平位置 0.375 m 與 0.925 m 之含鹽水砂土導電度較小槽體試驗值為低。此差異應為砂土填充之差異造成的結果，如孔隙度。但由於斜率趨勢一致，亦表示結果亦符合 Archie's law，而含水層參數 F 相近。圖 5.2.13 為測深第 5 層(約為電極深度以下 0.1 m)之比較結果，圖 5.2.14 為深度第 9 層(約為電極深度以下 0.14 m)之比較結果，圖 5.2.15 為深度第 13 層(約為電極深度以下 0.19 m)之比較結果，其具有相同之現象。

—◇— Small tank —□— $x=0.375$ —△— $x=0.575$ —×— $x=0.725$ —*— $x=0.925$ (深度第1層)

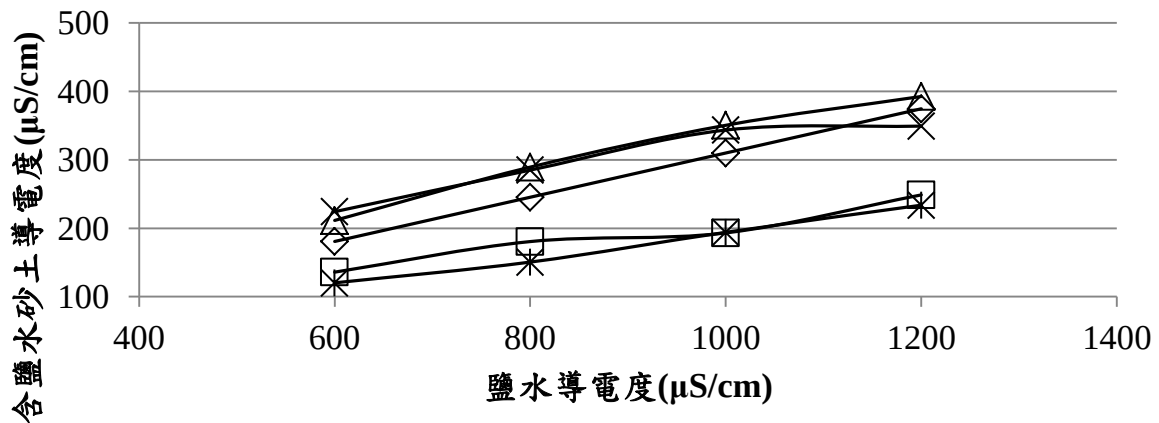


圖 5.2.12、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=1)

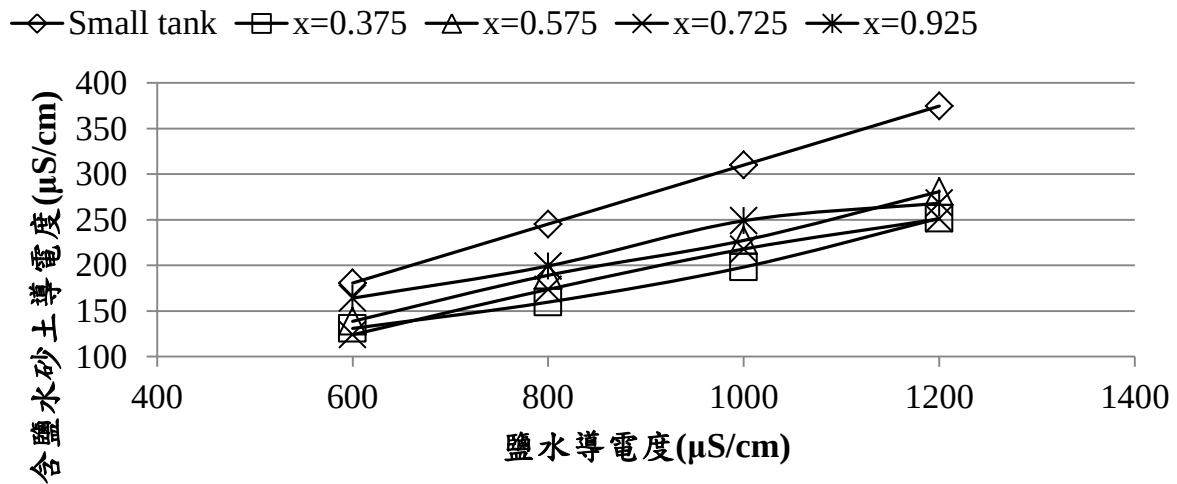


圖 5.2.13、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=5)

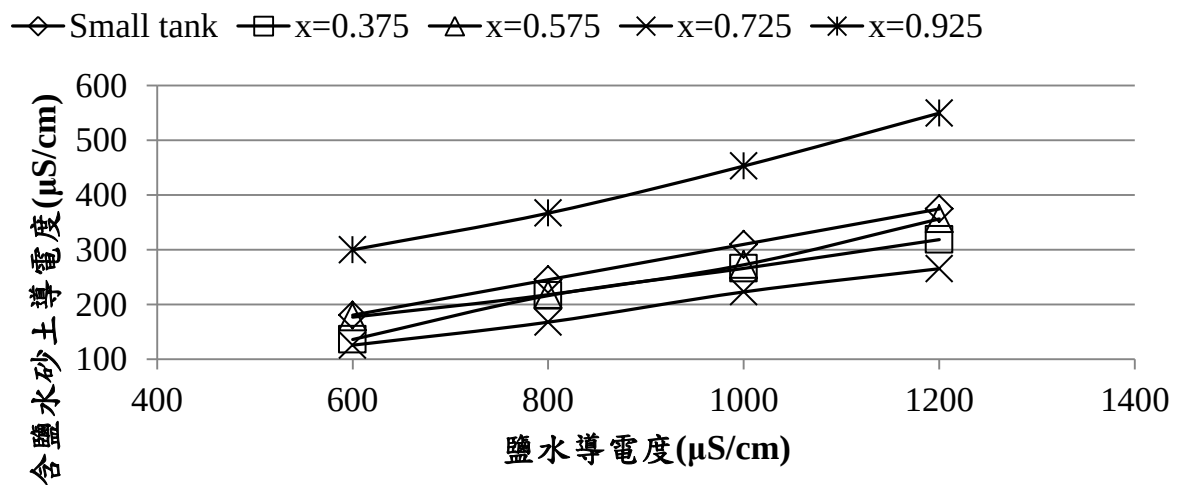


圖 5.2.14、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=9)

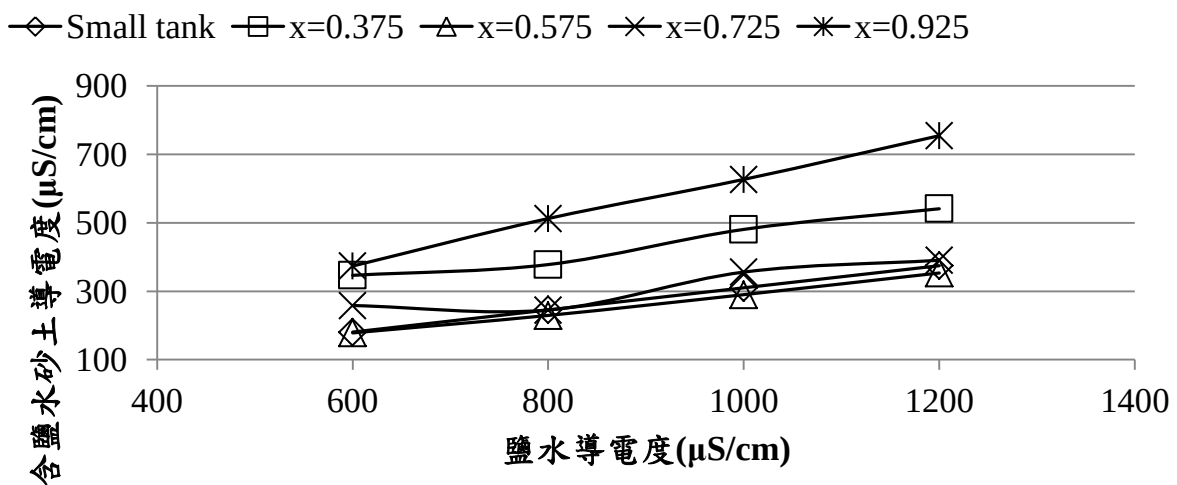


圖 5.2.15、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(n=13)

圖 5.2.16 至圖 5.2.19 顯示視電阻與反演算後，含鹽水砂土與鹽水導電度之線性關係良好，與小槽體試驗相比，可與大型實驗槽不同位置之斜率趨勢一致。表示經由反演算後獲得之電阻率結果亦符合 Archie's law，施測結果具有準確性。

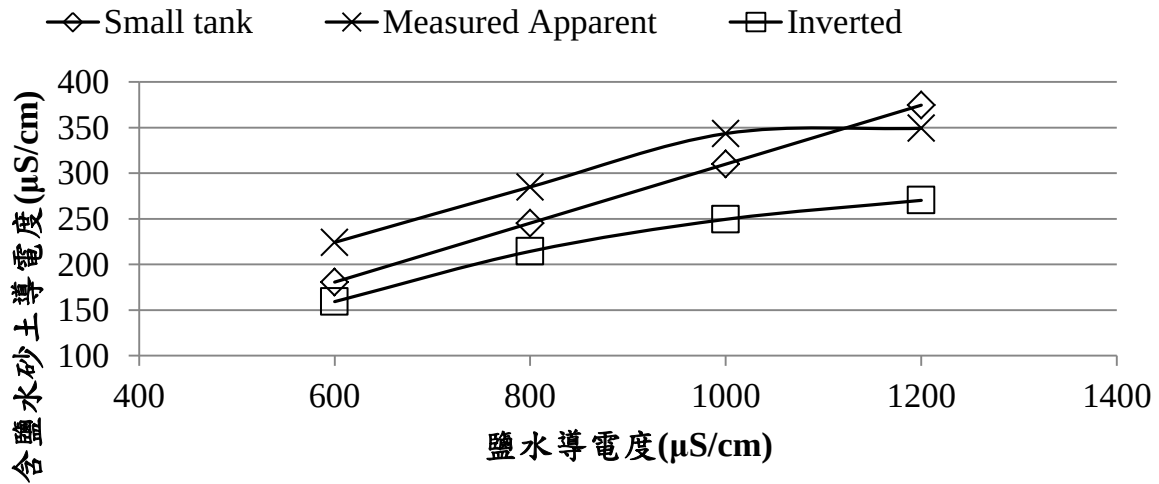


圖 5.2.16、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(x=0.7 m, n=1)

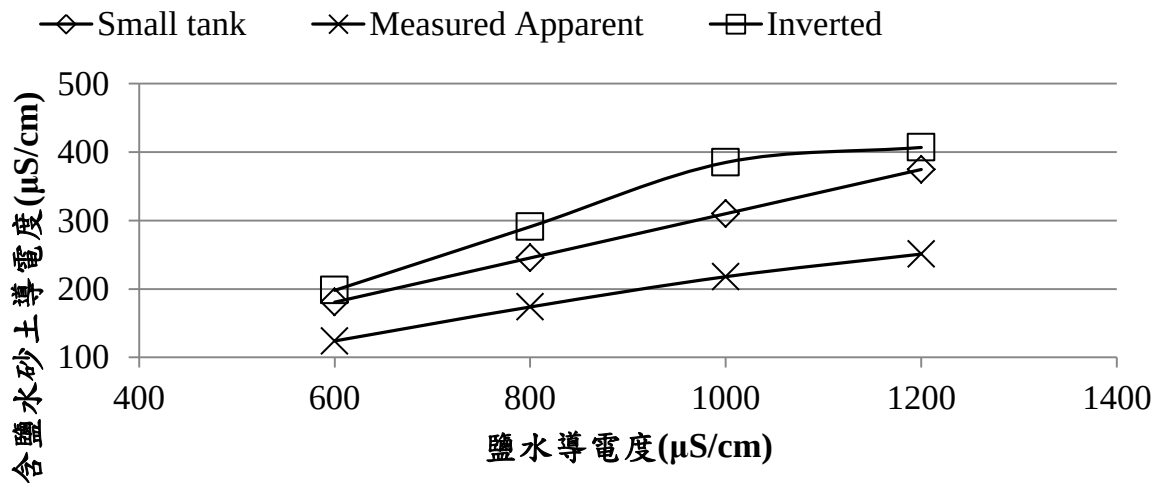


圖 5.2.17、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較(x=0.7 m, n=5)

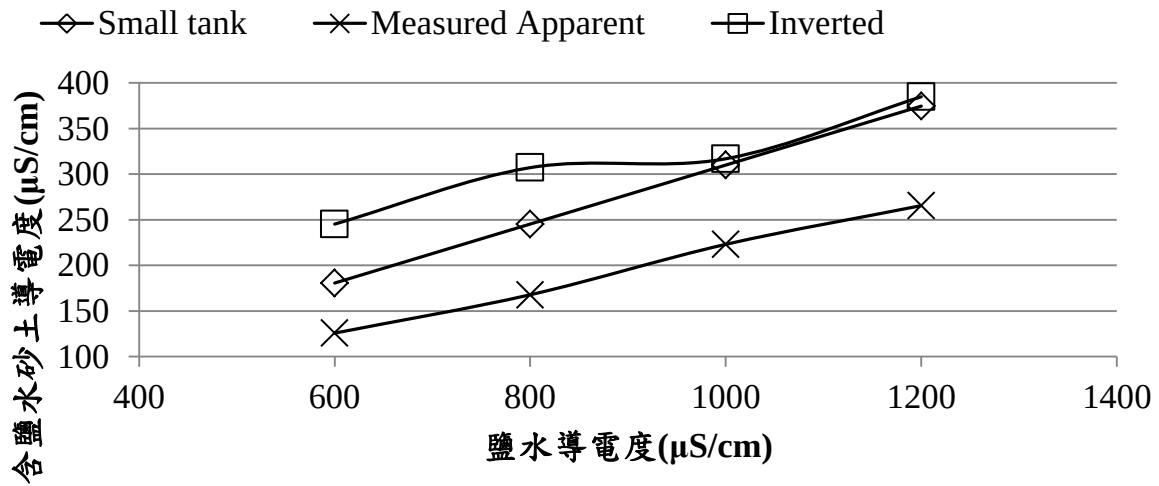


圖 5.2.18、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較($x=0.7\text{ m}$, $n=9$)

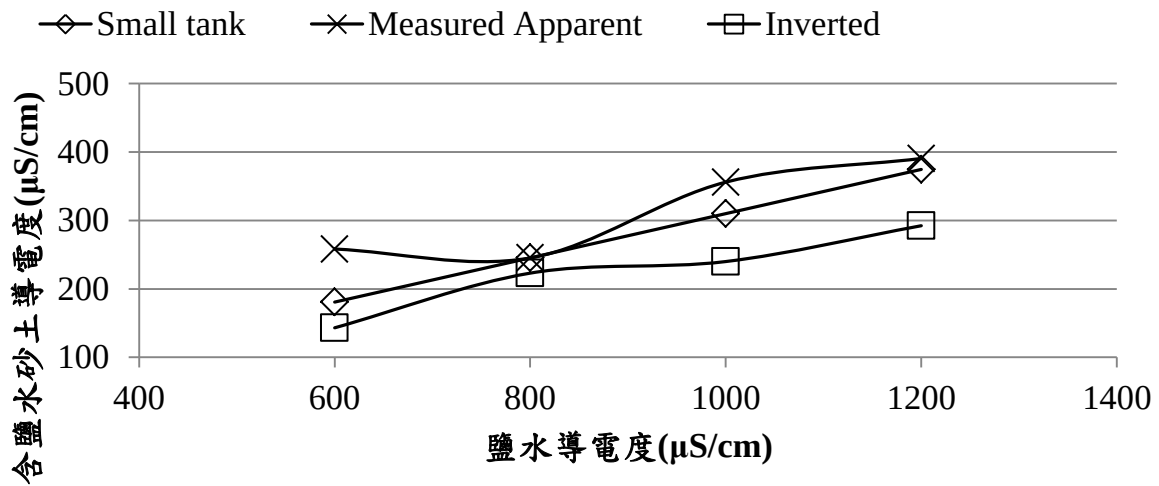


圖 5.2.19、鹽水導電度與含鹽水之砂土導電度比較($x=0.7\text{ m}$, $n=13$)

5.3 操作參數探討

5.3.1 輸出電流

實驗結果如圖 5.3.1，顯示在深度為第一層，不同輸出電流下測得視電阻率值於水平方向上的變化，推測為實驗槽中填充之石英砂並非完全均勻，故視電阻率值受地形因子影響，使得石英砂在充滿均勻導電度的鹽水中，所測得之視電阻率值有所差異。此外，由於 $x=0.2\text{ m}$ 、 0.4 m 、 0.65 m 、 0.95 m 處各設置有監測井，監測井管材本身為不導電，故可能受影響，導致周圍電阻較大。不同輸出電流獲得之視電阻率值與水平變化趨勢差異甚小，表示測得實驗槽中含水砂土的視電阻率量測結果受輸出電流影響較小。而其它深度結果如圖 5.3.2 及圖 5.3.3，亦顯示相同之現象，本研究後續採以 Auto 作為輸出電流參數設定。

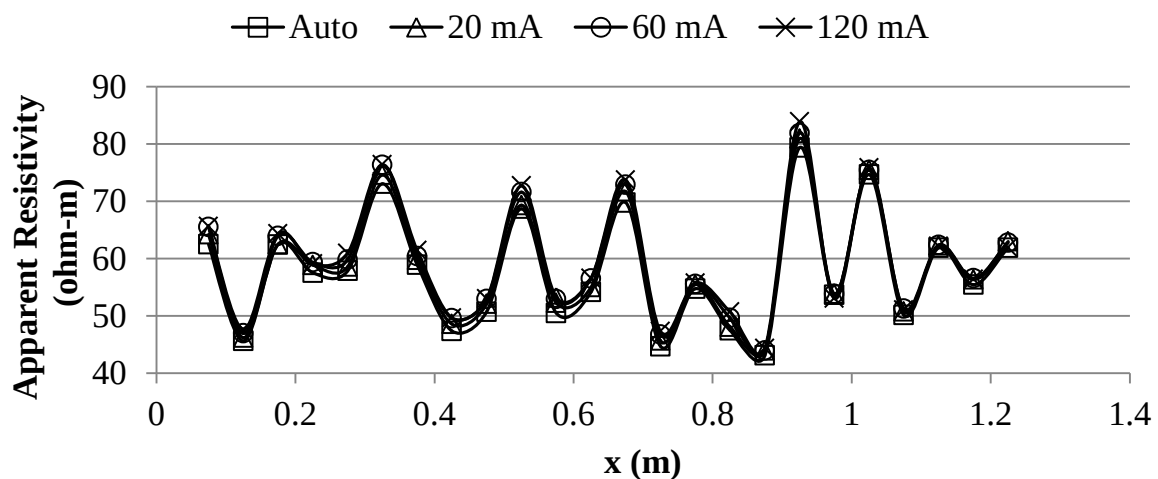


圖 5.3.1、不同輸出電流之視電阻率隨水平方向變化圖(n=1)

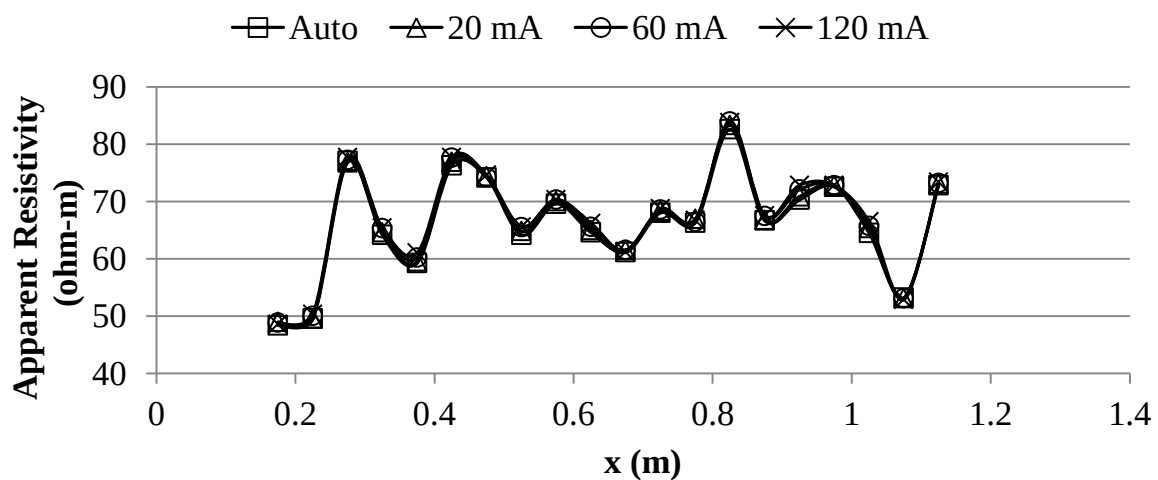


圖 5.3.2、不同輸出電流之視電阻率隨水平方向變化圖(n=5)

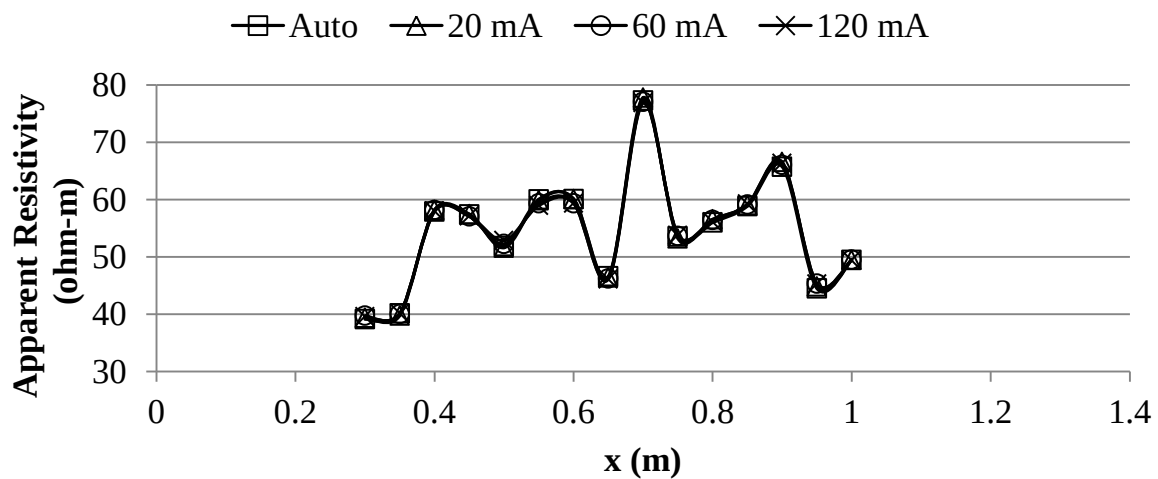


圖 5.3.3、不同輸出電流之視電阻率隨水平方向變化圖(n=10)

5.3.2 偶極間距

偶極間距 5 cm 至 20 cm 的實驗結果如圖 5.3.4 至圖 5.3.7 顯示，此四組偶極間距資料重疊範圍約為水平位置 $x=0.3\text{ m}$ 至 1.0 m ，深度約為 0.08 m 至 0.24 m 。偶極間距愈短，所獲得之電阻資料點亦愈多，施測時間愈長，且相同探測範圍內，可獲得地層電阻之變化愈清晰，解析度越高。故欲探測範圍內有較小區塊且高電阻變化之物體，5 cm 偶極間距能有較佳的探測效果，然而若欲較快獲得地層資料，則可增加偶極間距做快速量測，然而，過大的電極間距所能探測之地層範圍亦越小，且可能較無法得知小範圍的電阻變化訊息。

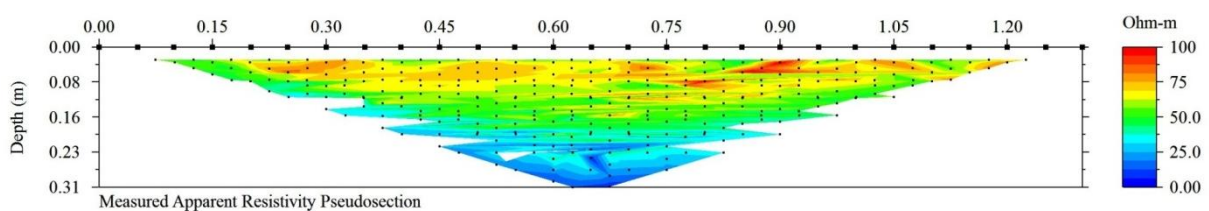


圖 5.3.4、偶極間距 5 cm 之視電阻率剖面

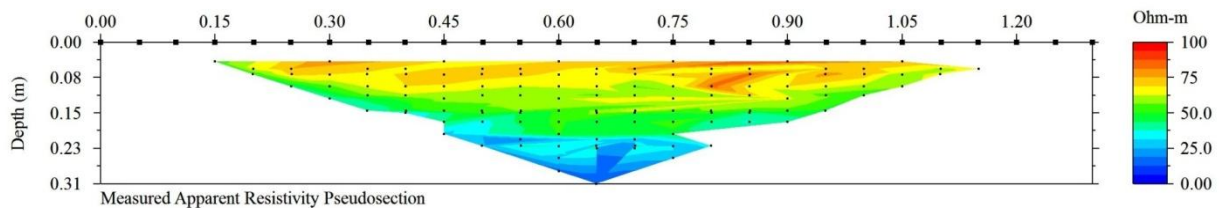


圖 5.3.5、偶極間距 10 cm 之視電阻率面

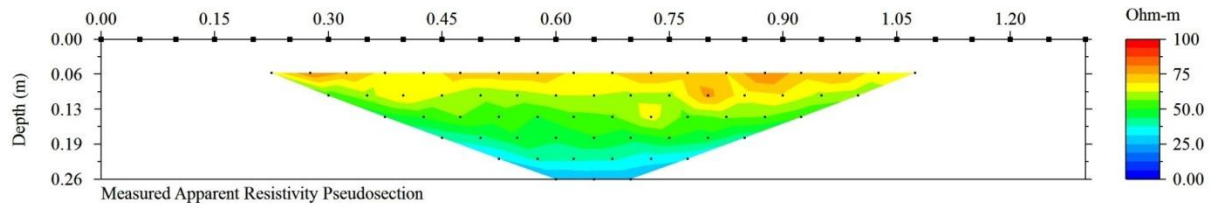


圖 5.3.6、偶極間距 15 cm 之視電阻率剖面

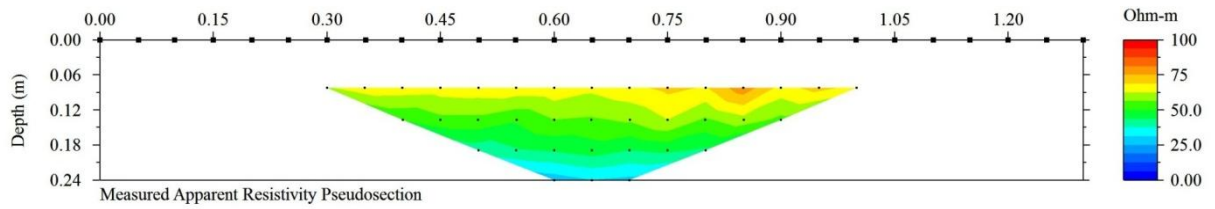


圖 5.3.7、偶極間距 20 cm 之視電阻率剖面

5.3.3 電極深度

電極深度分別設置為地表下 5 cm、10 cm 及 20 cm 之視電阻率剖面如圖 5.3.8 至圖 5.3.10 顯示。電極深度愈淺，所獲得之電阻資料範圍也就較淺層，當電極深度為 5cm，其可獲得之電阻剖面深度約為 0.05 至 0.32 m；當電極深度為 10 cm，則獲得之電阻剖面深度約為 0.1 至 0.37 m；而當電極深度為 20 cm，則獲得之電阻剖面深度約為 0.2 至 0.47 m。由視電阻率剖面可發現隨著電極深度越深，獲取之視電阻率值有降低的趨勢，表示電極探測範圍向下延伸，測得電阻位置愈接近甚至為水面以下。而實驗槽水位設定為地表下 15 cm，然而，從剖面圖來看，並未能明顯判斷出水位面位置。

圖 5.3.11 至圖 5.3.13 顯示不同電極深度在相同 x 位置下，視電阻率隨 z 方向之變化。圖 5.3.11 發現電極深度 5、10、20 cm 下，視電阻率值在相同絕對位置之結果，並未能擬和。圖 5.3.12 及圖 5.3.13，亦顯示相同的情況。其可能是地電阻率受周圍電阻綜合效應或是邊界效應影響，在電阻值呈現上係以相對結果呈現所致。此外，由圖 5.3.11 至圖 5.3.13 結果，可發現電阻率隨深度變化的趨勢具有一致性，此現象可能是 Dipole-dipole 排列法的特性所致。

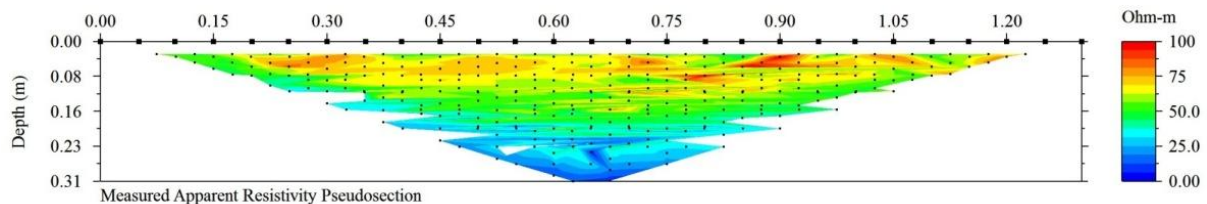


圖 5.3.8、電極深度 5 cm 之視電阻率剖面

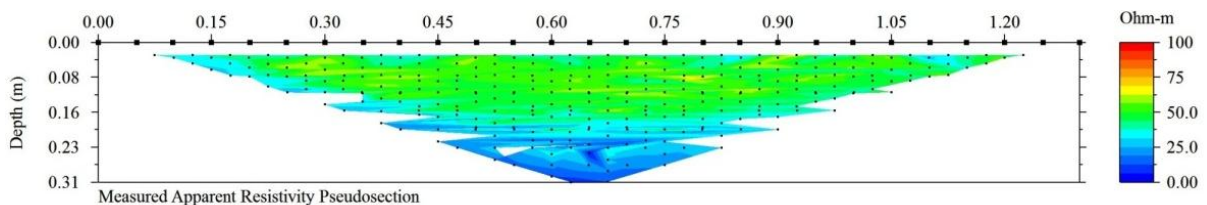


圖 5.3.9、電極深度 10 cm 之視電阻率剖面

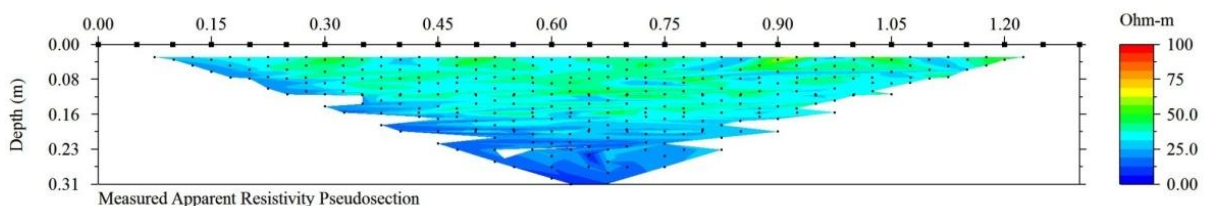
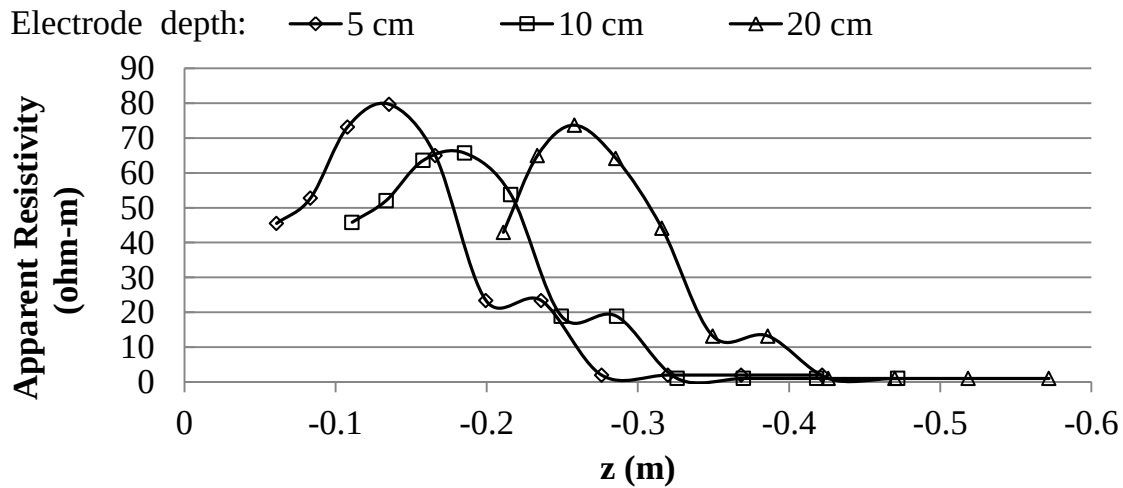
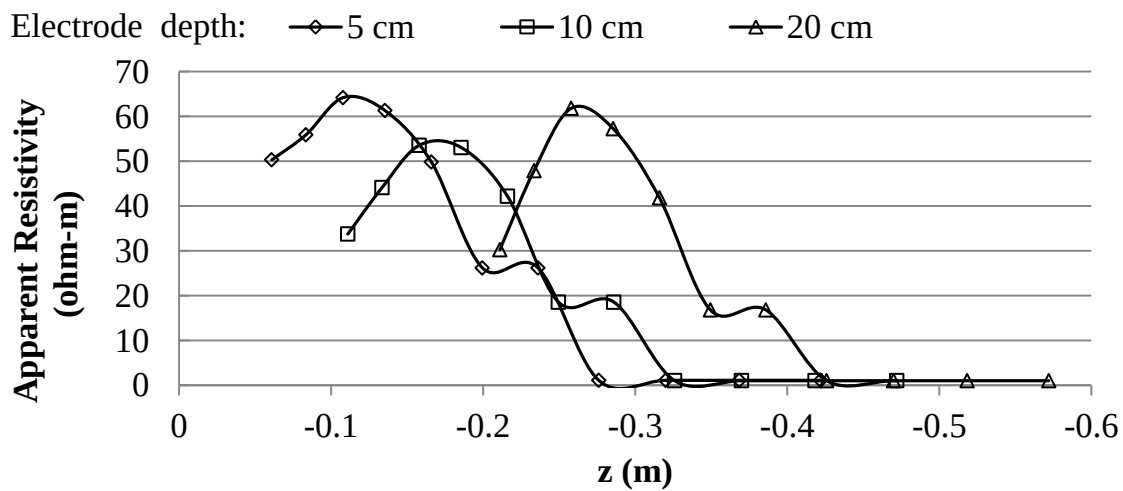
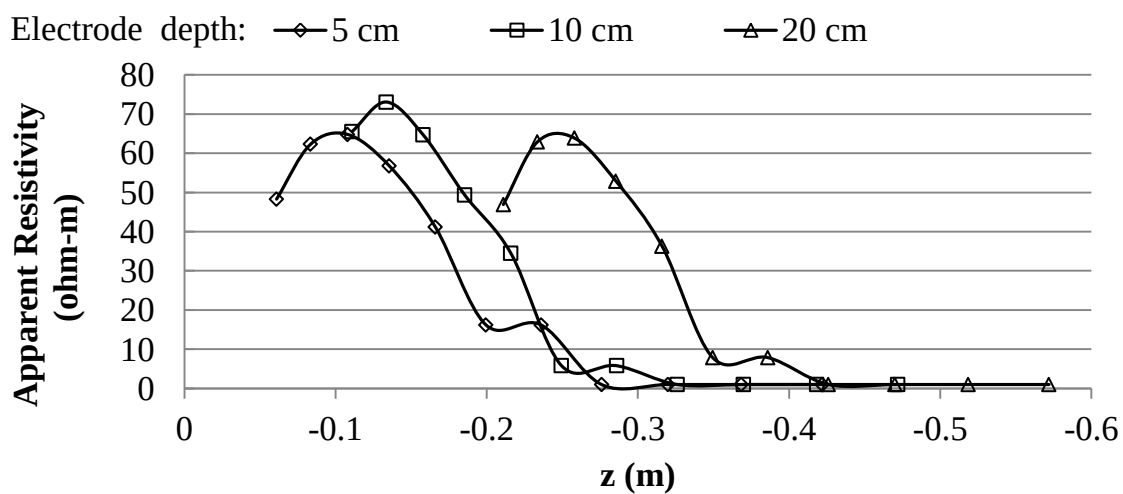


圖 5.3.10、電極深度 20 cm 之視電阻率剖面

圖 5.3.11、 $x=0.44$ m，不同電極深度之視電阻率隨深度的變化圖 5.3.12、 $x=0.74$ m，不同電極深度之視電阻率隨深度的變化圖 5.3.13、 $x=1.04$ m，不同電極深度之視電阻率隨深度的變化

5.4 脈衝式點源試驗

脈衝式點源試驗分別以三種測線配置方式進行實驗，單測線、三測線以及五測線。第一階段脈衝式點源試驗以單測線施測，共進行三種流速條件，分別控制流場視速度約為 0.36、0.26 及 0.11 cm/min，孔隙率以 0.44 計算孔隙流速約為 0.81、0.6 及 0.25 cm/min，比較 ERT 在不同流速下推估流速之差異。第二階段試驗以三測線施測，控制流場視速度約為 0.09 cm/min，孔隙流速約為 0.2 cm/min。第三階段試驗以五測線施測，控制流場視速度約為 0.09 cm/min，孔隙流速約為 0.2 cm/min。以比較 ERT 在不同測線配置下推估地下水流向之情形。

電阻率數據分析係以注入示蹤劑前，ERT 測得槽體充滿導電度 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 地下水之石英砂的電阻率作為背景值。注入示蹤劑後，ERT 監測資料以 F 修正地下水中視電阻率與背景值的變化量($\Delta\rho_b=(\rho_{bt,i}-\rho_{b0,i})/F_i$)作呈現。示蹤劑於上游觀測井注入 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 導電度之氯化鈉示蹤劑 1 公升，注入示蹤劑後即開始進行第一組 ERT 電阻測量，紀錄實驗數據後，再進行第二組 ERT 電阻測量，重複以上流程，持續監測電阻率數小時。監測過程中，視情況以導電度計進行監測井中地下水導電度量測，地下水的電阻率變化量以量測得地下水中電阻率與背景值的變化量($\Delta\rho_w=\rho_{wt,i}-\rho_{w0,i}$)作呈現，而最大視電阻峰值 $\Delta\rho_{max}$ 以表示。ERT 監測結果以及不同測深量得最低電阻峰值位置隨時間(t)的變化， $\Delta\rho_{max}$ 發生位置與 t 的斜率可視為計算得流場流速。

5.4.1 單測線

I. 單測線實驗一

示蹤劑釋放於孔隙流速約 0.81 cm/min 流場，測深 $n=1$ 至 $n=3$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.1 至圖 5.4.3。圖 5.4.1(左)表示在測深第一層($n=1$)，可觀察到 $\Delta\rho_{max}$ 的變化情形，示蹤劑注入 26 分鐘，可發現在 $x=27.5$ cm 處有 $\Delta\rho_{max}$ ，51 分鐘出現在 $x=52.5$ cm 處，隨時間往下游移動，表示高導電度的示蹤劑隨地下水流場被帶往下游，此外， $\Delta\rho_{max}$ 隨時間逐漸降低，說明示蹤劑團於地下水中因擴散傳輸而被稀釋。可由示蹤劑注入後 26、51、74、96 及 120 分鐘， $\Delta\rho_{ma}$ 發生位置如圖 5.4.1(右)， $x=17.5$ 、47.5、67.5、87.5 及 97.5 cm，推估得流場流速為 0.86 cm/min。圖 5.4.2(左)表示在測深第二層($n=2$)的 $\Delta\rho_{max}$ 變化情形，示蹤劑注入 26 分鐘，可發現在 $x=10$ 至 30 cm，有相同 $\Delta\rho_{max}$ 變化。51 分鐘出現在 $x=40$ 至 55 cm，74 分鐘出現在 $x=60$ 至 75 cm，此現象隨時間往下游移動。可由示蹤劑注入後 26、51、74、96 及 120 分鐘， $\Delta\rho_{ma}$ 發生位置如圖 5.4.2(右)， $x=15$ 、45、70、85 及 95 cm，

推估得流場流速為 0.86 cm/min。圖 5.4.3(左)表示在測深第三層($n=3$)的 $\Delta\rho_{\max}$ 變化情形，示蹤劑注入 26 分鐘與 51 分鐘的 $\Delta\rho_{\max}$ 相近，顯示可能由高導電度示蹤劑往深層傳輸的現象，同時又受對流影響造成。可由示蹤劑注入後 26、51、74、96 及 120 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.3 (右)， $x=27.5$ 、37.5、57.5、77.5 及 92.5 cm，推估得流場流速為 0.73 cm/min。

由 $n=1$ 推估得地下水流速約為 0.86 cm/min，與控制流速 0.81 cm/min 相比較高。 $n=2$ 推估得流速約為 0.86 cm/min，亦比控制流速高。而 $n=3$ 推估流速為 0.73 cm/min，相較控制流速為低。與設定流速 0.81 cm/min 之差異約為 6%、6%與-10%。

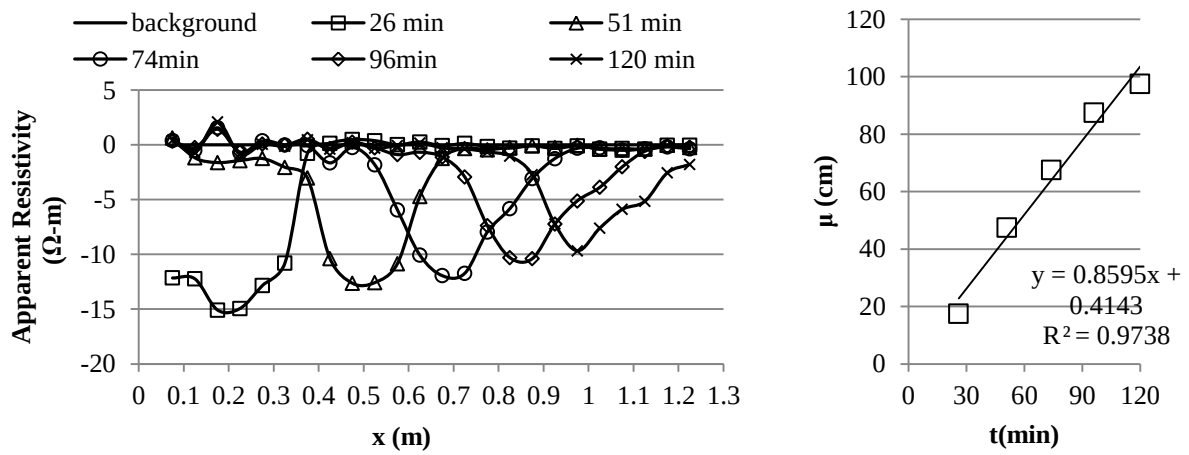


圖 5.4.1、單測線流速 0.8 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置($n=1$)

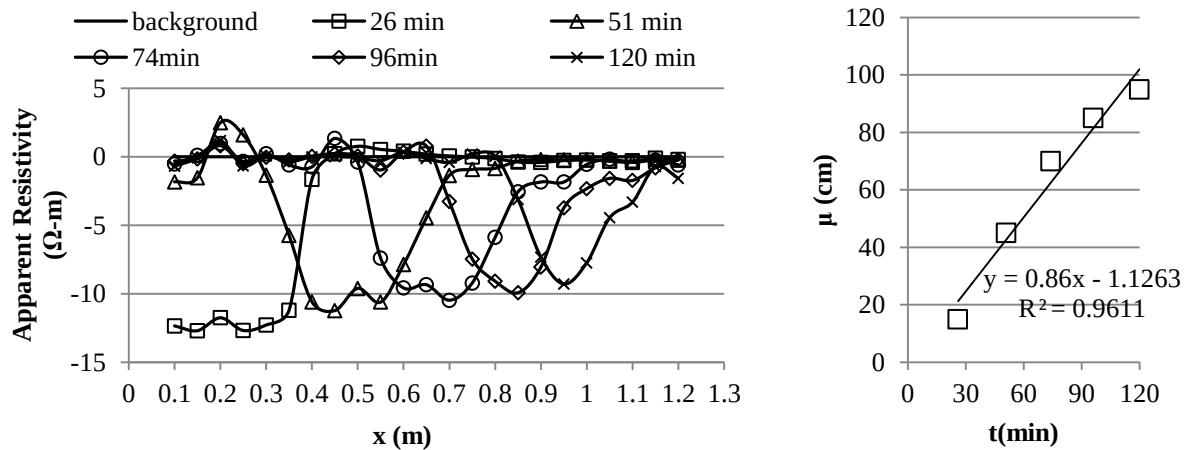


圖 5.4.2、單測線流速 0.8 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置($n=2$)

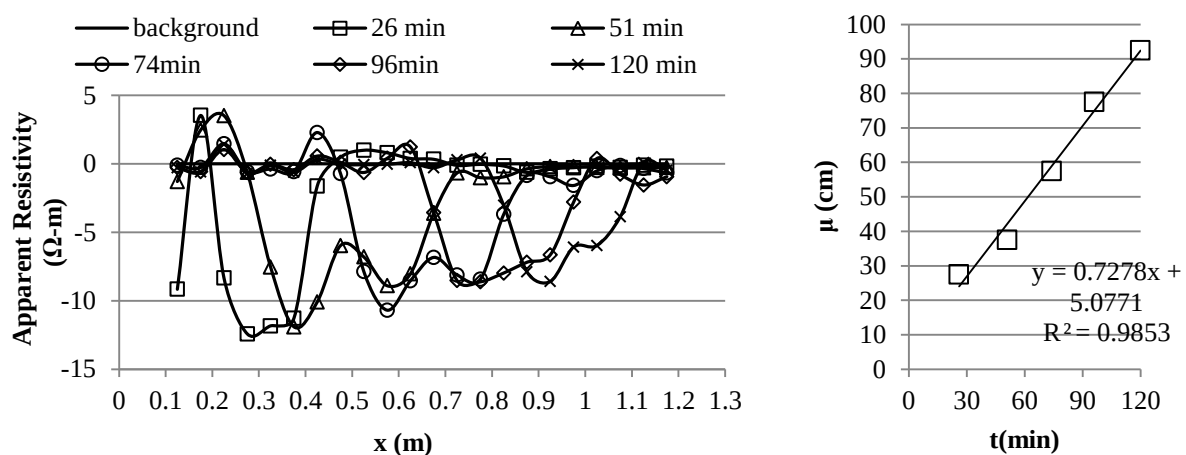


圖 5.4.3、單測線流速 0.8 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=3)

ERT 測得視電阻率與觀測井監測值比較結果如圖 5.4.4，顯示 ERT 與觀測井 1 有相同之變化趨勢。ERT 與觀測井 2 則有些許時間差。觀測井 3 與觀測井 4，顯示兩者之間的差異較大。此現象可是由於地電阻與觀測井施測與監測時，示蹤劑同時在地下水中流動，故比較結果有所差異。

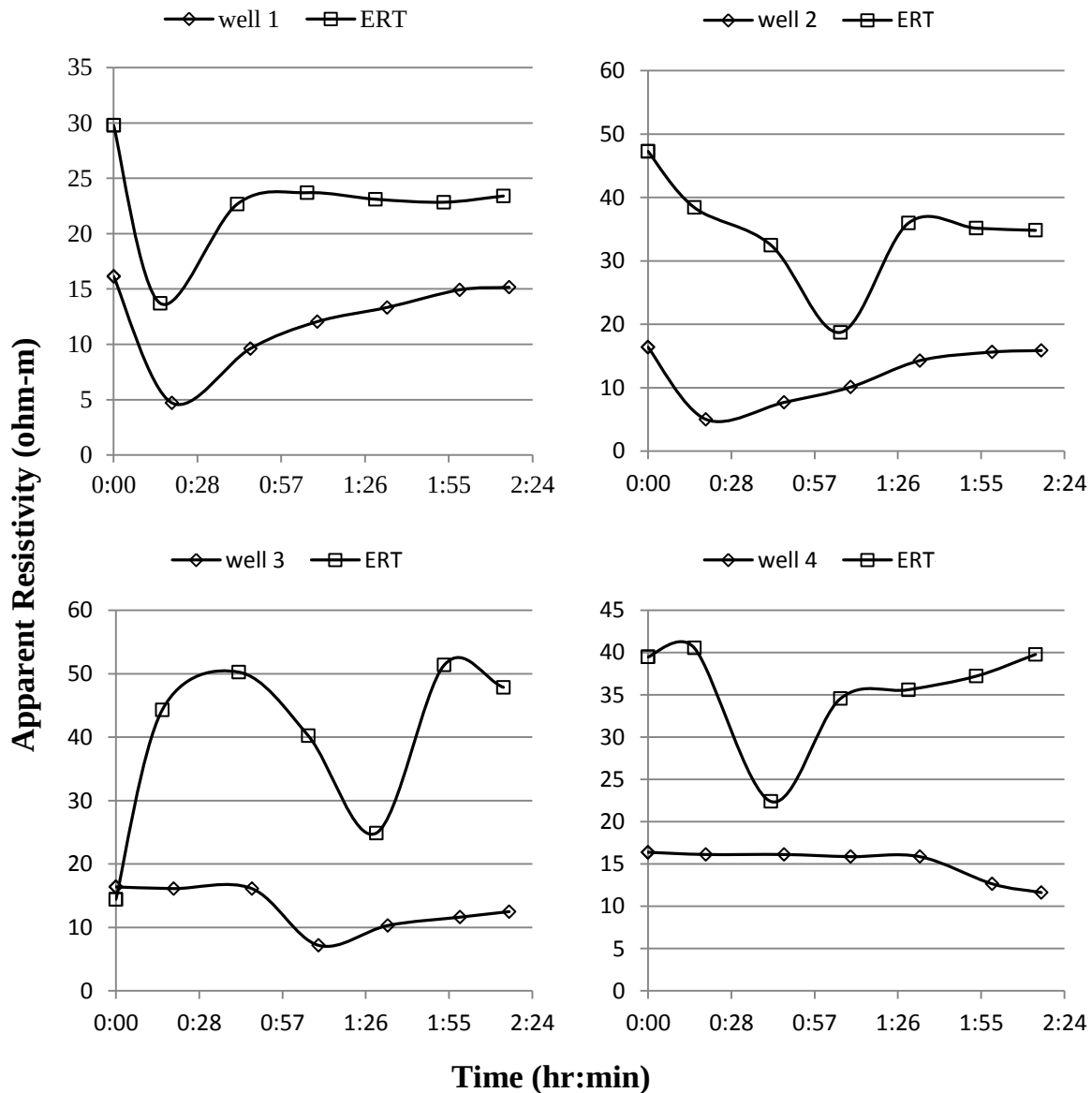


圖 5.4.4、單測線流速 0.8 cm/min，監測井鹽水電阻值與含鹽水之砂視電阻率比較

II. 單測線實驗二

示蹤劑釋放於孔隙流速約 0.6 cm/min 流場，測深 $n=1$ 至 $n=3$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.5 至圖 5.4.7。圖 5.4.5 (左) 表示在測深第一層($n=1$)，可觀察到 $\Delta\rho_{\max}$ 的變化情形，示蹤劑注入 22 分鐘，可發現在 $x=37.5$ cm 處有 $\Delta\rho_{\max}$ ，42 分鐘出現在 $x=47.5$ 至 57.5 cm 處，隨時間往下游移動，表示高導電度的示蹤劑隨地下水流場被帶往下游，此外， $\Delta\rho_{\max}$ 隨時間逐漸降低，說明示蹤劑團於地下水中因擴散傳輸而被稀釋。可由示蹤劑注入後 22、42、66、87 及 108 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.5 (右)， $x=37.5$ 、 57.5 、 72.5 、 77.5 及 87.5 cm，推估得流場流速為 0.55 cm/min。圖 5.4.6(左) 表示在測深第二層($n=2$)的 $\Delta\rho_{\max}$ 變化情形，示蹤劑注入 22 分鐘，可發現在 $x=35$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}$ 變化。42 分鐘出現在 $x=45$ cm，66 分鐘出現在 $x=60$ ，此現象隨時間往下游移動。可由示蹤劑注入後 22、42、66、87 及 108 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.6(右)， $x=35$ 、 45 、 60 、 70 及 90 cm，推估得流場流速為 0.62 cm/min。圖 5.4.7 (左) 表示在測深第三層($n=3$)的 $\Delta\rho_{\max}$ 變化情形，示蹤劑注入 22 分鐘 $\Delta\rho_{\max}$ 發生在 $x=27.5$ cm，42 分鐘的 $\Delta\rho_{\max}$ 相近發生在 $x=42.5$ cm。可由示蹤劑注入後 22、42、66、87 及 108 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.7 (右)， $x=27.5$ 、 42.5 、 57.5 、 67.5 及 77.5 cm，推估得流場流速為 0.58 cm/min。

由 $n=1$ 推估得地下水流速約為 0.55 cm/min，與控制流速 0.6 cm/min 相比較高。 $n=2$ 推估得地下水流速約為 0.62 cm/min，與控制流速相近。而 $n=3$ 推估流速為 0.58 cm/min，相較控制流速為低。與設定流速 0.6 cm/min 之差異約為 -8%、3% 與 -3%。

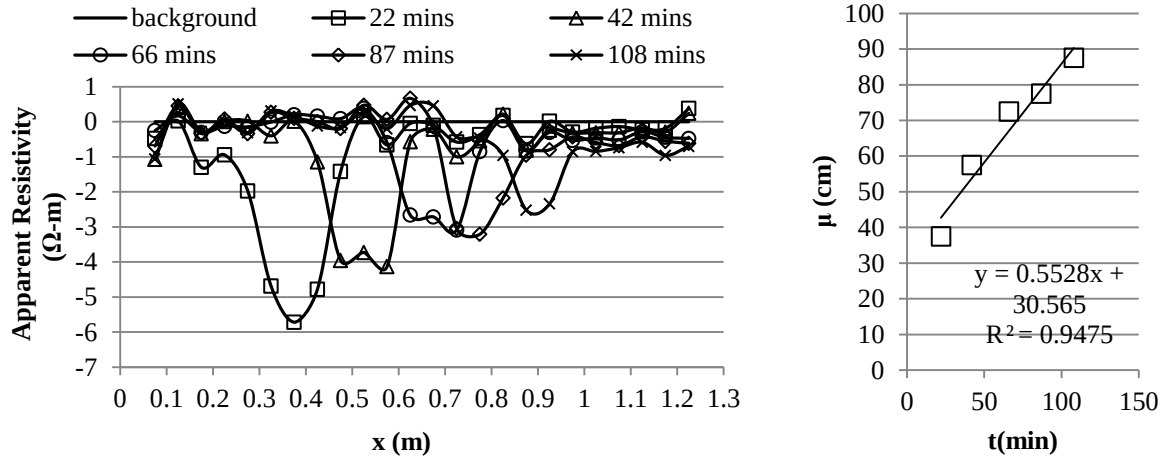


圖 5.4.5、單測線流速 0.6 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1$)

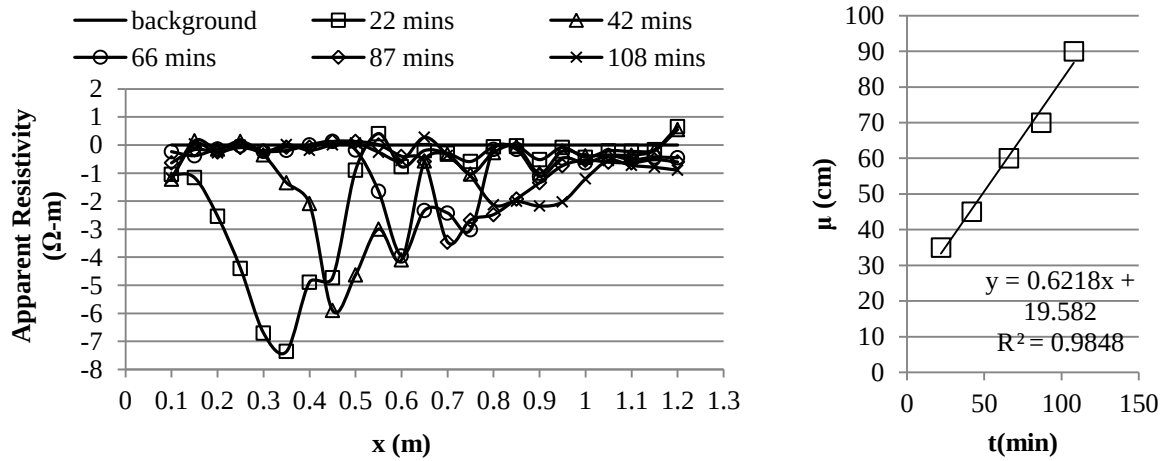


圖 5.4.6、單測線流速 0.6 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=2$)

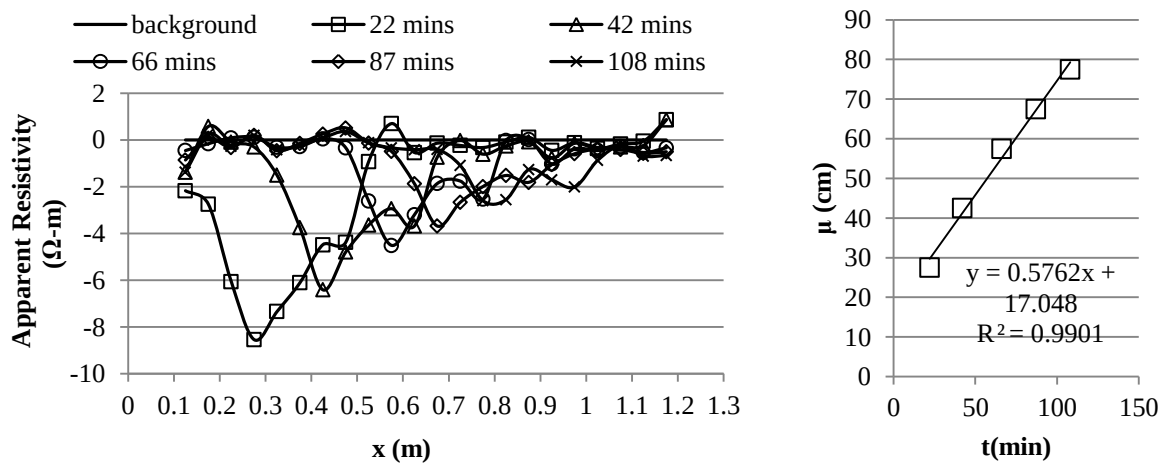


圖 5.4.7、單測線流速 0.6 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=3$)

III. 單測線實驗三

示蹤劑釋放於孔隙流速約 0.25 cm/min 流場，測深 $n=1$ 至 $n=3$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.8 至圖 5.4.10。圖 5.4.8(左)表示在測深第一層($n=1$)，可觀察到 $\Delta\rho_{\max}$ 的變化情形，示蹤劑注入 29 分鐘，可發現在 $x=12.5$ cm 處有 $\Delta\rho_{\max}$ ，62 分鐘出現在 $x=27.5$ cm 處，隨時間往下游移動，表示高導電度的示蹤劑隨地下水流場被帶往下游，此外， $\Delta\rho_{\max}$ 隨時間逐漸降低，說明示蹤劑團於地下水中因擴散傳輸而被稀釋。

可由示蹤劑注入後 29 至 291 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.8 (右)，推估得流場流速為 0.26 cm/min。圖 5.4.9 (左)表示在測深第二層($n=2$)的 $\Delta\rho_{\max}$ 變化情形，示蹤劑注入 29 分鐘，可發現在 $x=20$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}$ 變化。62 分鐘出現在 $x=30$ cm，96 分鐘出現在 $x=45$ ，此現象隨時間往下游移動。可由示蹤劑注入後 29 至 291 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.9(右)，推估得流場流速為 0.25 cm/min。

圖 5.4.10 (左)表示在測深第三層($n=3$)的 $\Delta\rho_{\max}$ 變化情形，示蹤劑注入 29 分鐘 $\Delta\rho_{\max}$ 發生在 $x=17.5$ cm，62 分鐘的 $\Delta\rho_{\max}$ 相近發生在 $x=17.5$ cm。96 分鐘出現在 $x=27.5$ 。可由示蹤劑注入後 29 至 291 分鐘， $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置如圖 5.4.10，推估得流場流速為 0.27 cm/min。

由 $n=1$ 至 3 推估得地下水流速約為 0.25 至 0.26 cm/min，與控制流速 0.25 cm/min 相近，差異約為 4%、0%與 8%。

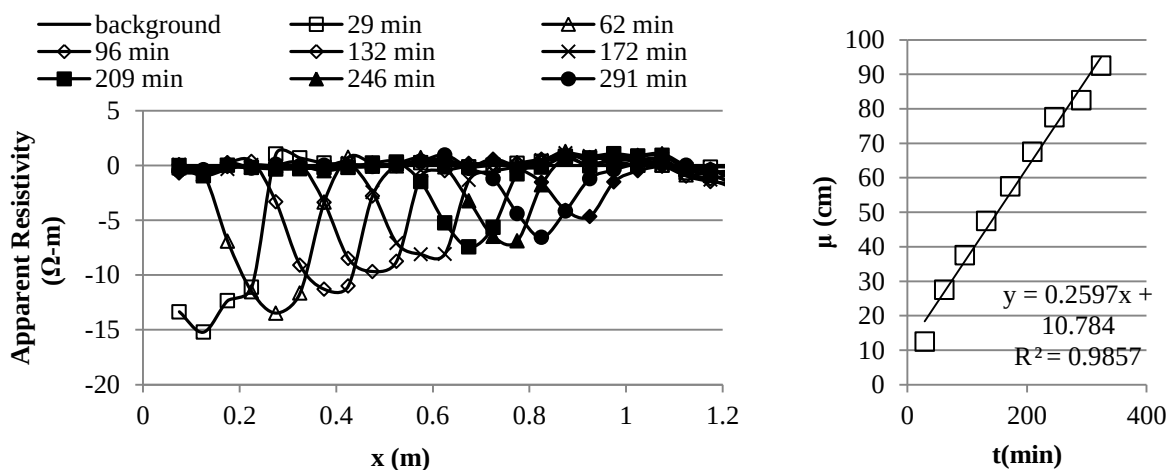


圖 5.4.8、單測線流速 0.25 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置($n=1$)

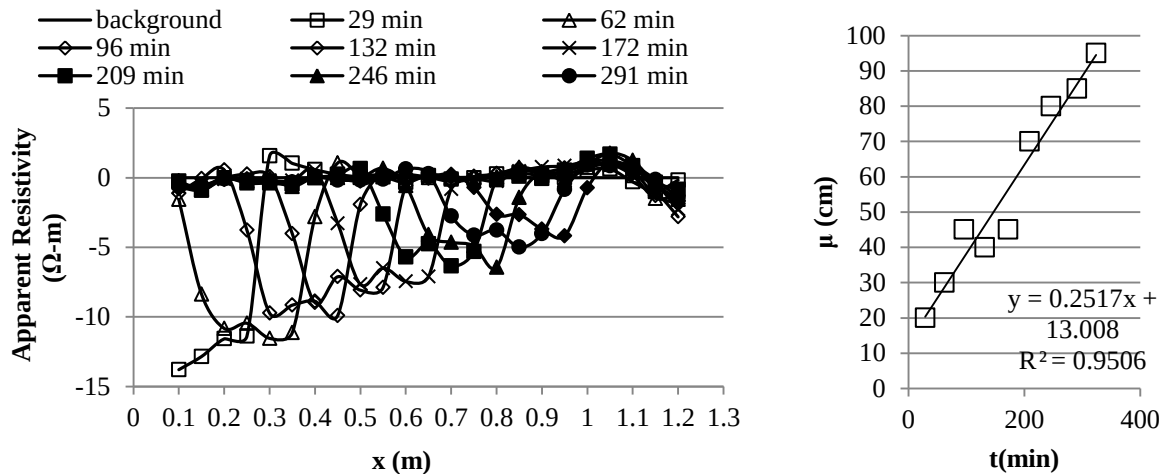


圖 5.4.9、單測線流速 0.25 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=2$)

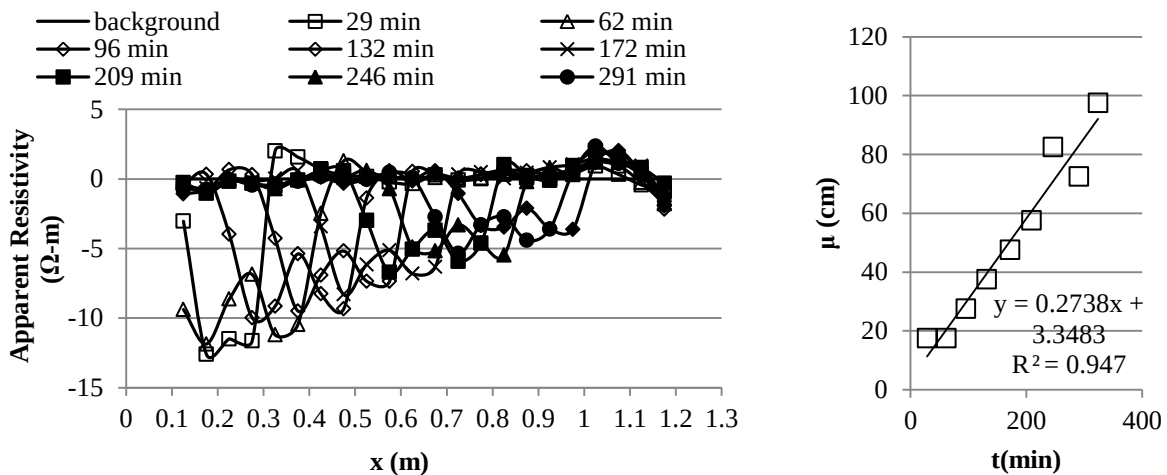


圖 5.4.10、單測線流速 0.25 cm/min，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=3$)

IV. ERT 示蹤劑示驗推估流速之討論

整體而言，實驗結果顯示，以單測線 ERT 監測示蹤劑電阻變化，推估得地下水流速與設定流速相差約為 $\pm 10\%$ 以內，此差異可能為流場通過之截面積計算之誤差，或槽體內孔隙率之不均勻導致與假設流速不同。亦可能測得流速非地下水主要流向，而是側向流速造成。

此外，三種流速條件皆發現深度越深，推估地下水流速有降低的趨勢，推測此現象可能為淺層的石英砂結構較鬆散，而較深層的石英砂受重力壓密影響，因此造成示蹤劑傳輸速率的不同。由於地電阻探測深度越深，所能探測得水平範圍越小，故對於示蹤劑造成電阻變化的追蹤情形有限。此現象也說明，若欲較佳掌

握示蹤劑在水中造成的電阻率變化，示蹤劑釋放位置建議不要太深，以 ERT 測線長度所能涵蓋之淺層水平範圍下較佳。

研究假設實驗槽填充砂體為均質，孔隙率一致。然而，實際砂體孔隙率可能為非均質，故若以單一孔隙率推估地下水流速作為流速推估準確與否的依據，可能不太實際。故若假設孔隙流速為一範圍，再與 ERT 推估流速比較，其結果應較符合實際情況。

單測線流場流速控制之視速度(apparent velocity, q)約為 0.36、0.26 及 0.11 cm/min，實驗量測砂體孔隙率為 0.44，故以孔隙率 0.4 至 0.5 推估本研究三次單測線實驗控制之空隙流速範圍，分別為 0.71 至 0.89 cm/min、0.53 至 0.66 cm/min 以及 0.22 至 0.28 cm/min(圖 5.4.11)，三次試驗推估得地下水流速彙整於表 5-2，顯示 ERT 推估流速皆在此控制範圍內，因此推估地下水流速不均之情形，可能受到非均質影響而有所差異。

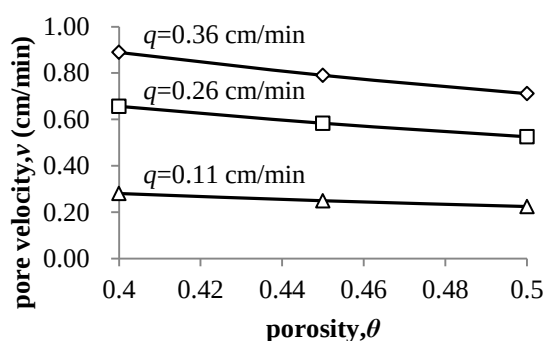


圖 5.4.11、實驗控制之視流速推估孔隙流速範圍

表 5-2、ERT 推估流速與實驗控制之視流速比較

控制視流速		Case 1	Case 2	Case 3
(cm/min)		0.36	0.26	0.11
孔隙流速	$\theta=0.44$	0.81	0.60	0.25
(cm/min)	$\theta=0.4\sim0.5$	0.71~0.89	0.53~0.66	0.22~0.28
推估流場流速	n=1	0.86	0.55	0.26
	n=2	0.86	0.62	0.25
	n=3	0.73	0.58	0.27
(cm/min)				

5.4.2 三測線

(1) 地下水流向推估

圖 5.4.12 為由三條測線在 $n=1$ 的 $\Delta\rho_{\max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=25$ 及 30 cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的兩測線則 $\Delta\rho_{\max}$ 較小，污染團隨時間逐漸擴大並降低濃度。

以三測線解析在不同 x 位置，圖 5.4.13 顯示 $\Delta\rho_{\max}$ 在 $x=12.5、17.5、22.5、27.5、32.5、37.5$ 及 42.5 cm，發生最大電阻變化的時候， $\Delta\rho_{\max}$ 沿著 y 方向的變化情形。 12.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在示蹤劑注入後 15 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -13.53 \Omega\cdot\text{m}$ 。 17.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 30 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -12.24 \Omega\cdot\text{m}$ 。 22.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 30 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -11.18 \Omega\cdot\text{m}$ 。 27.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 45 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -9.96 \Omega\cdot\text{m}$ 。 32.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 60 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -9.55 \Omega\cdot\text{m}$ 。 37.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 90 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -8.35 \Omega\cdot\text{m}$ 。 42.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 105 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max} = -7.17 \Omega\cdot\text{m}$ 。從圖 5.4.13 可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{\max}$ 主要發生在 $y=25$ 及 30 cm 位置，以 $\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示蹤劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往 $y=25$ 及 30 cm 位置向下游流動。

示蹤劑於流場中主要流動路徑為 $y=25$ 及 30 cm，而 $y=20$ cm 測線的 $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示蹤劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑。

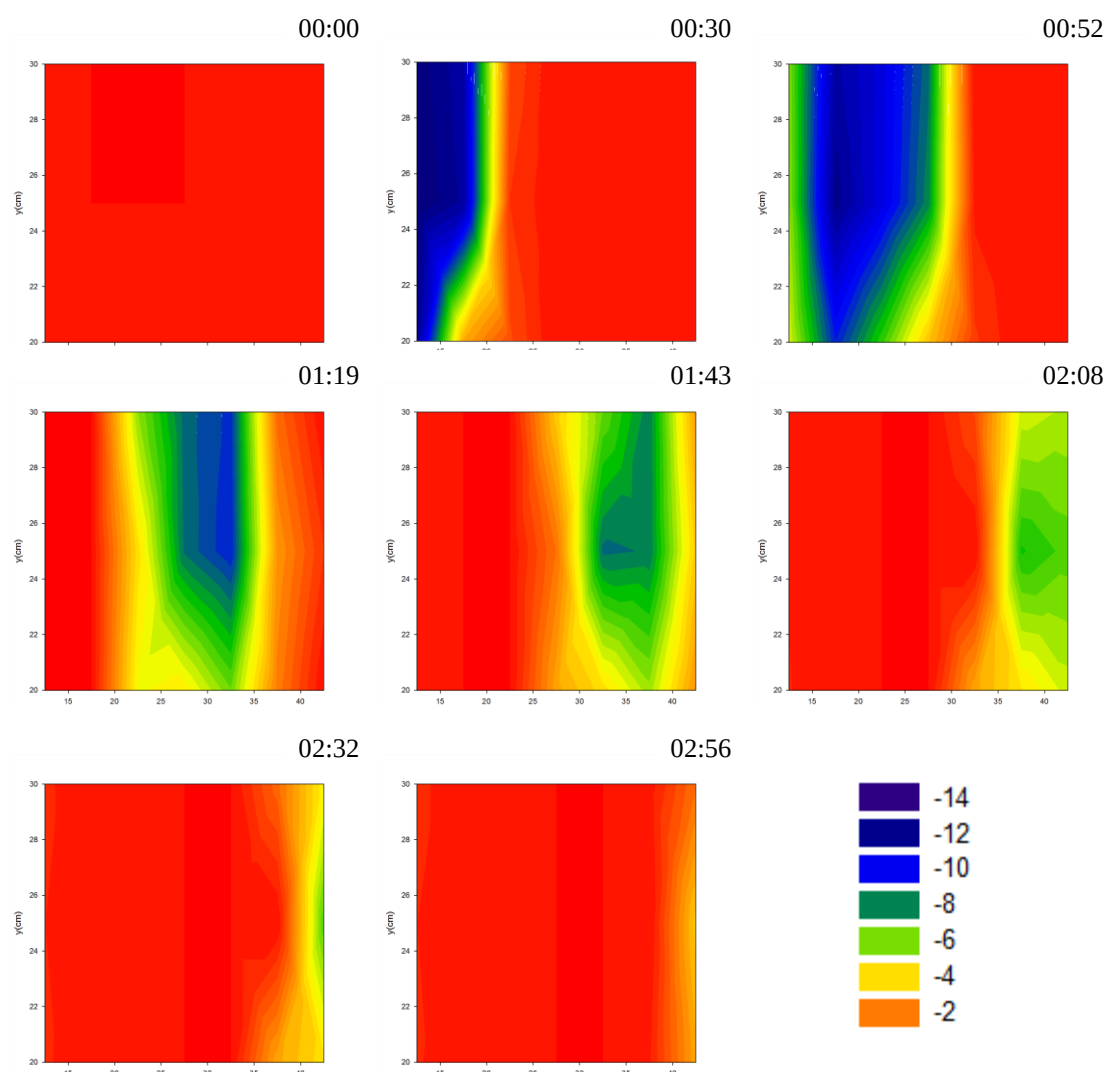


圖 5.4.12、脈衝式點源-三測線之 $\Delta\rho$ 等高線圖

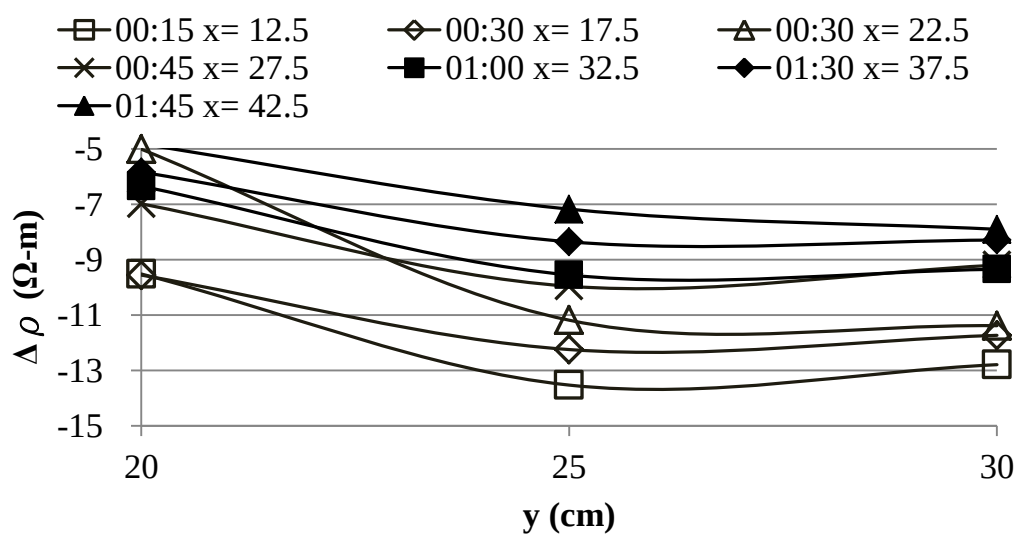


圖 5.4.13、脈衝式點源-三測線之 y 方向視電阻率變化情形

(2) 地下水流速推估

測深 $n=1$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.14 至圖 5.4.16。且顯示三條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.4.14 表示在 $y=20$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 、 22.5 、 27.5 、 32.5 、 37.5 及 42.5 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 分別發生於示蹤劑注入後 20、32、35、51、66、83 及 103 分鐘。推估得流場流速為 0.36 cm/min。圖 5.4.15 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=15$ 、 20 、 25 及 30 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 分別發生於示蹤劑注入後 9、23、34、46、67、83 及 101 分鐘。推估得流場流速為 0.32 cm/min。圖 5.4.16 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=15$ 、 20 、 25 及 30 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 分別發生於示蹤劑注入後 9、23、34、46、63、84 及 106 分鐘。推估得流場流速為 0.31 cm/min。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 $y=25$ 及 30 cm，以主要流向推估得地下水流速約為 0.31 至 0.32 cm/min，與控制流速範圍 0.18 至 0.22 cm/min 相比較高，約為 145%至 172%。此外，由 $y=25$ cm 測線推估得地下水流速約為 0.36 cm/min，亦高於控制流速範圍。

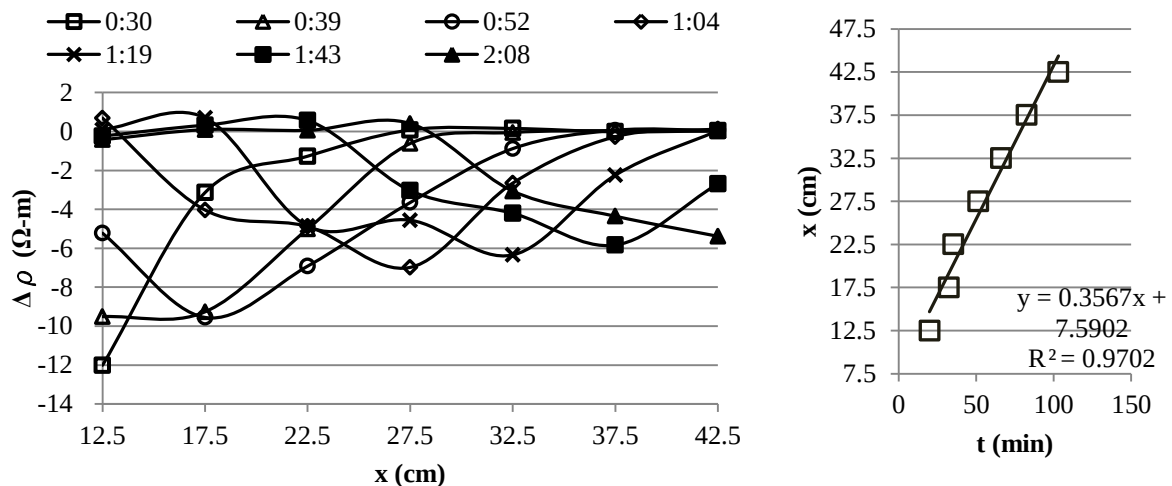


圖 5.4.14、三測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{\text{max}}$ 發生位置 ($n=1$, $y=20$ cm)

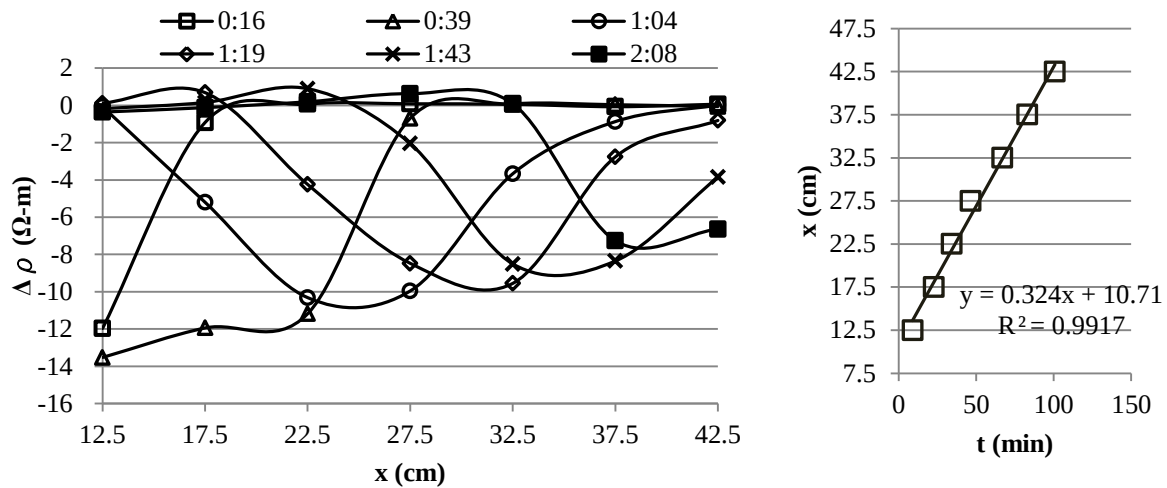


圖 5.4.15、三測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=25$ cm)

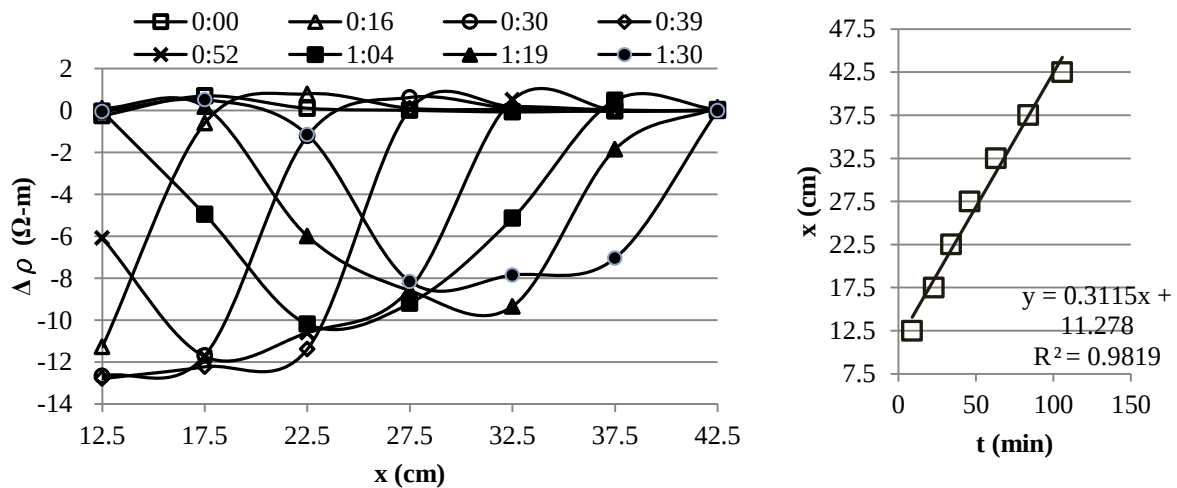


圖 5.4.16、三測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=30$ cm)

5.4.3 五測線

I. 五測線實驗一

(1) 地下水流向推估

圖 5.4.17 為由五條測線在 $n=1$ 的 $\Delta\rho_{max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=30$ cm 測線的變化量較大， $y=25$ cm 次之，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的兩測線則 $\Delta\rho_{max}$ 以五測線解析在不同 x 位置，圖 5.4.18 顯示 $\Delta\rho_{max}$ 在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm，發生最大電阻變化的時候， $\Delta\rho_{max}$ 沿著 y 方向的變化情形。12.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{max}$ 出現在示蹤劑注入後 22 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{max} = -6.37$ Ω-m。17.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{max}$

出現在 36 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}=-3.87\ \Omega\cdot\text{m}$ 。22.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 56 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}=-1.47\ \Omega\cdot\text{m}$ 。從圖 5.4.18 可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{\max}$ 主要發生在 $y=30$ cm 位置，以 $\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示縱劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往 $y=30$ cm 位置向下游流動。

示縱劑於流場中主要流動路徑為 $y=30$ cm，而 $y=25$ cm 測線的 $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示縱劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑，而 $y=15$ 、20 及 40 cm 測線則無顯著的電阻變化。

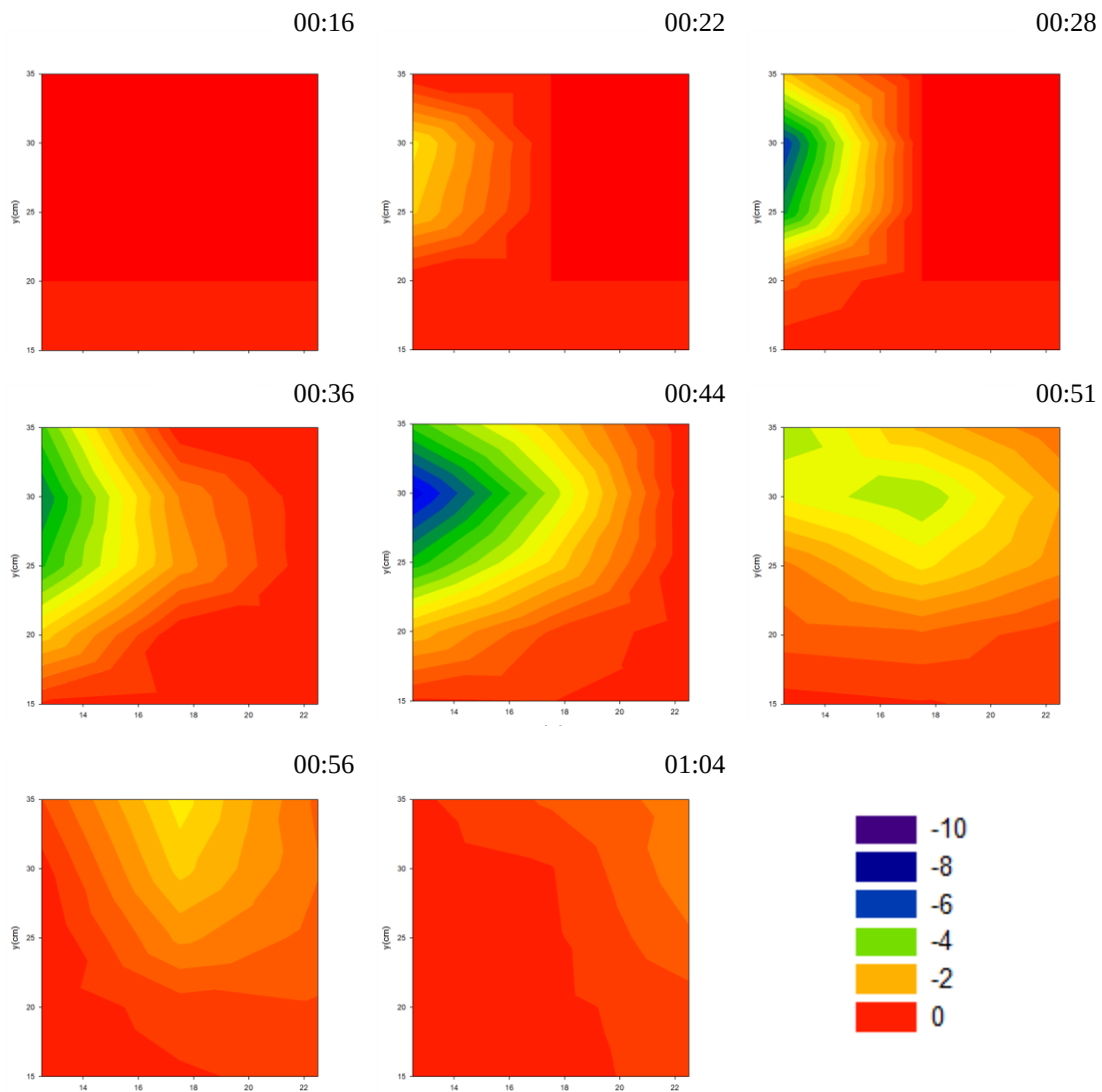


圖 5.4.17、脈衝式點源-五測線實驗一之 $\Delta\rho$ 等高線圖

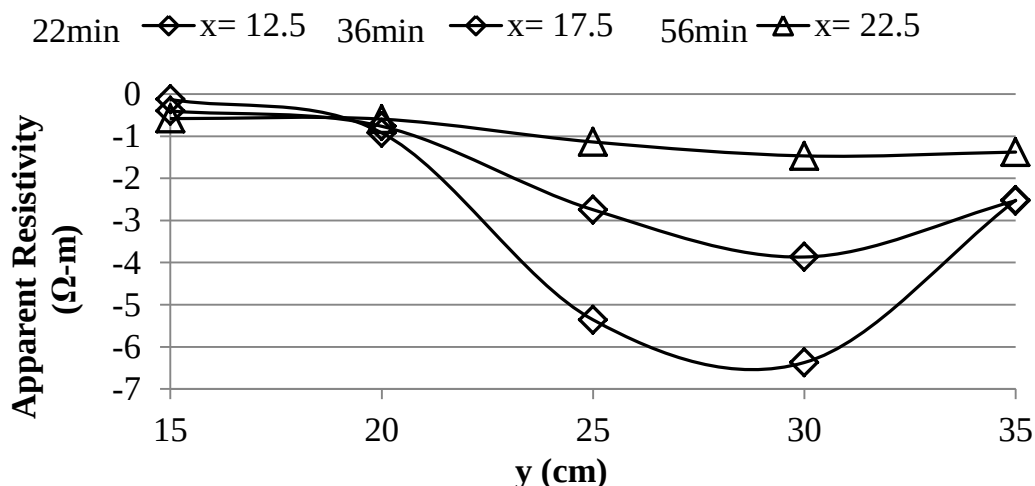


圖 5.4.18、脈衝式點源-五測線實驗一之 y 方向視電阻率變化情形

(2) 地下水流速推估

測深 $n=1$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.19 至圖 5.4.23。且顯示五條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.4.19 表示在 $y=15$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 皆無顯著變化，顯示示蹤劑未能造成該區電阻影響，亦無法推估流場流速。圖 5.4.20 表示在 $y=20$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 皆無顯著變化，顯示示蹤劑未能造成該區電阻影響，亦無法推估流場流速。圖 5.4.21 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 分別發生於示蹤劑注入後 28、44 及 56 分鐘。推估得流場流速為 0.32 cm/min。圖 5.4.22 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 分別發生於示蹤劑注入後 28、44 及 56 分鐘。推估得流場流速為 0.32 cm/min。圖 5.4.23 表示在 $y=35$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\text{MAX}}$ 分別發生於示蹤劑注入後 28、51 及 56 分鐘。推估得流場流速為 0.33 cm/min。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 $y=30$ cm，以主要流向推估得地下水流速約為 0.32 cm/min，與控制流速範圍 0.18 至 0.22 cm/min 相比較高，約為 145%至 178%。此外，由 $y=25$ 及 35 cm 測線推估得地下水流速約為 0.32 至 0.33 cm/min，亦高於控制流速範圍。而 $y=15$ cm 及 $y=20$ cm 則無明顯的

電阻變化。

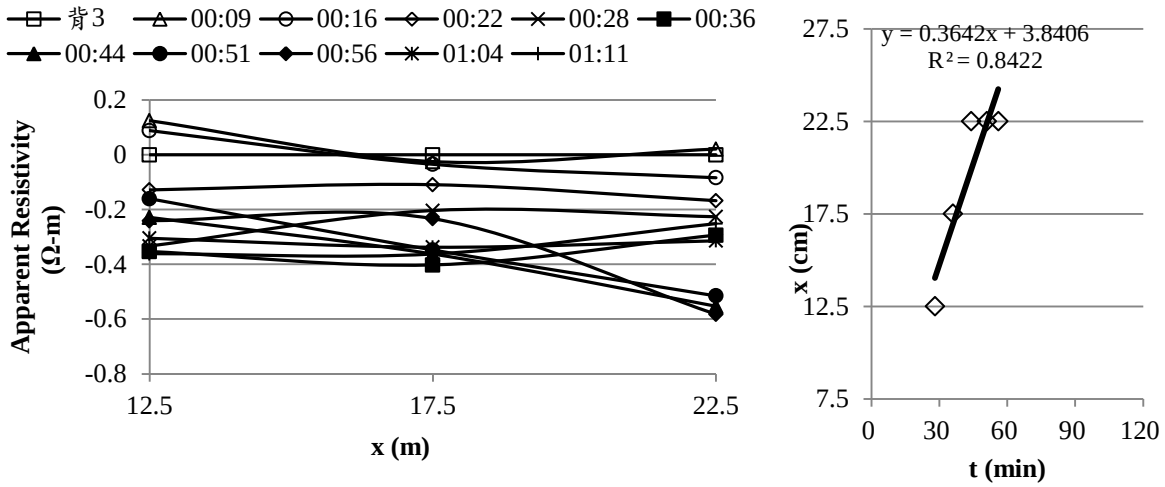


圖 5.4.19、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=15$ cm)

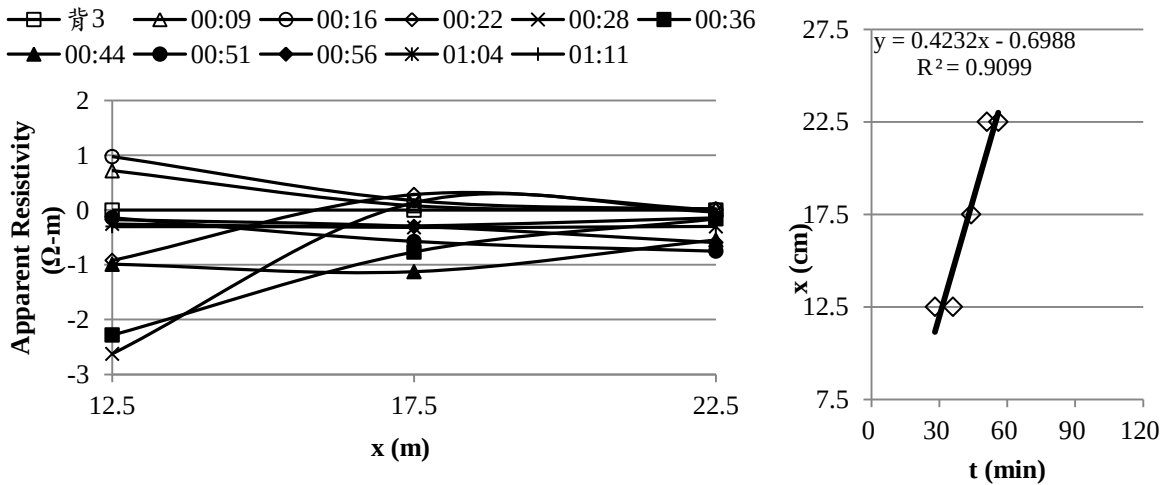


圖 5.4.20、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=20$ cm)

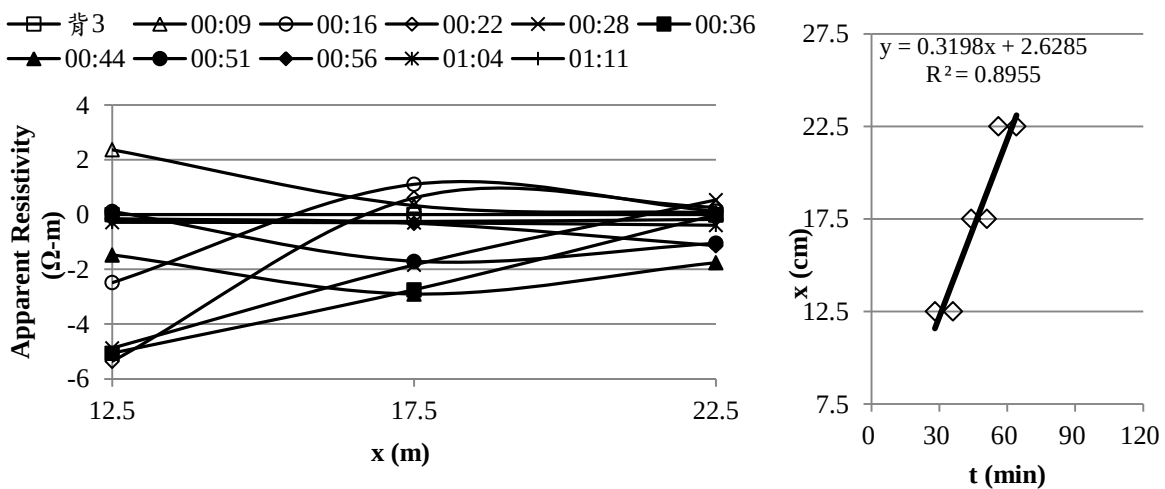


圖 5.4.21、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=25$ cm)

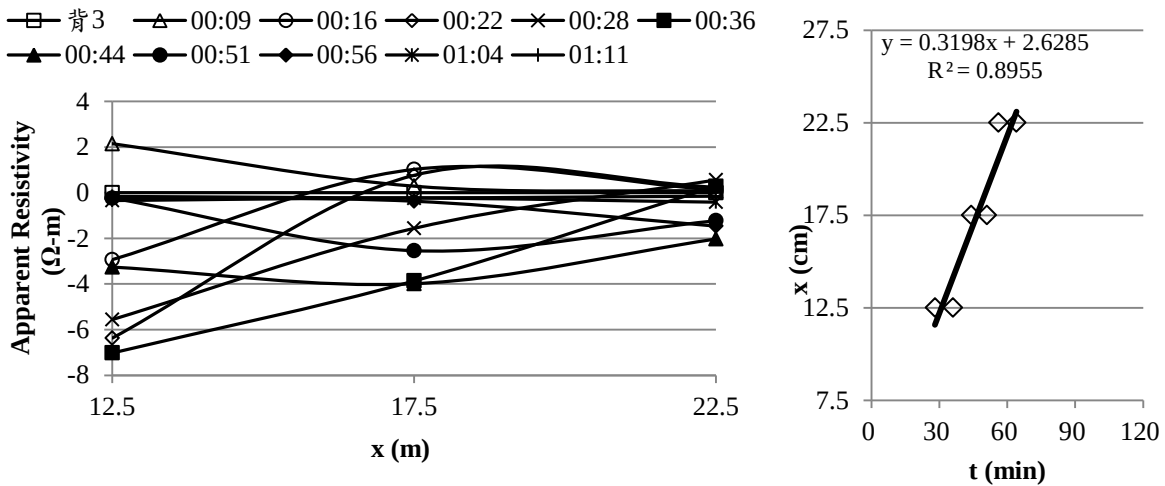


圖 5.4.22、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=30$ cm)

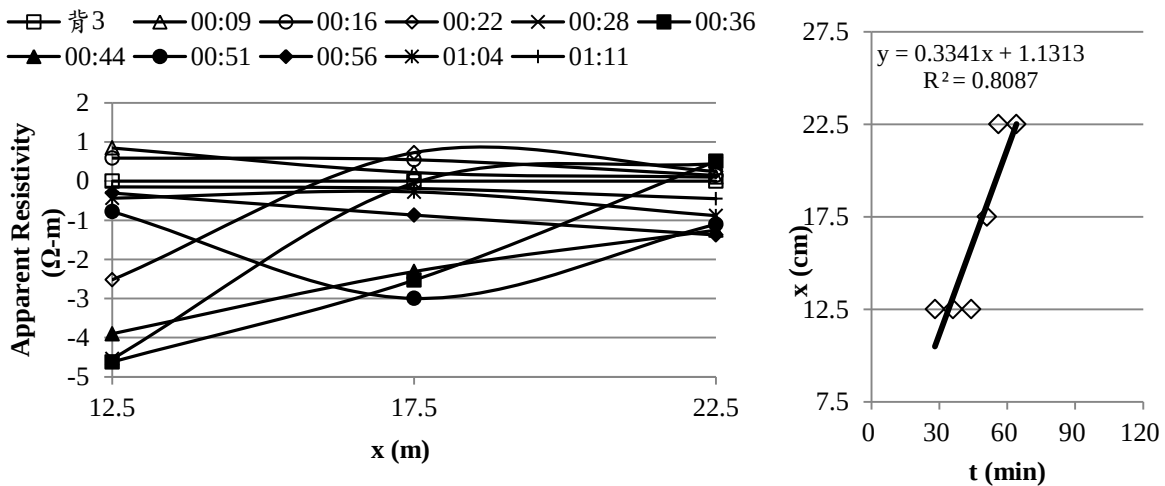


圖 5.4.23、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=35$ cm)

II. 五測線實驗二

(1) 地下水流向推估

圖 5.4.24 為由五條測線在 $n=1$ 的 $\Delta\rho_{max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=30$ cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的兩測線則 $\Delta\rho_{max}$ 較小，污染團隨時間逐漸擴大並降低濃度。

以五測線解析在不同 x 位置，圖 5.4.25 顯示 $\Delta\rho_{max}$ 在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm，發生最大電阻變化的時候， $\Delta\rho_{max}$ 沿著 y 方向的變化情形。 12.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{max}$ 出現在示蹤劑注入後 37 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{max}=-7.45$ $\Omega\cdot m$ 。 17.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{max}$ 出現在 57 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{max}=-3.36$ $\Omega\cdot m$ 。 22.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{max}$ 出

現在 60 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}=-0.74$ $\Omega\cdot\text{m}$ 。從圖 5.4.25 可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{\max}$ 主要發生在 $y=30$ cm 位置，以 $\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示縱劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往 $y=30$ cm 位置向下游流動。

示縱劑於流場中主要流動路徑為 $y=30$ cm，而 $y=25$ 及 35 cm 測線的 $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示縱劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑，而 $y=40$ cm 測線則無顯著的電阻變化。

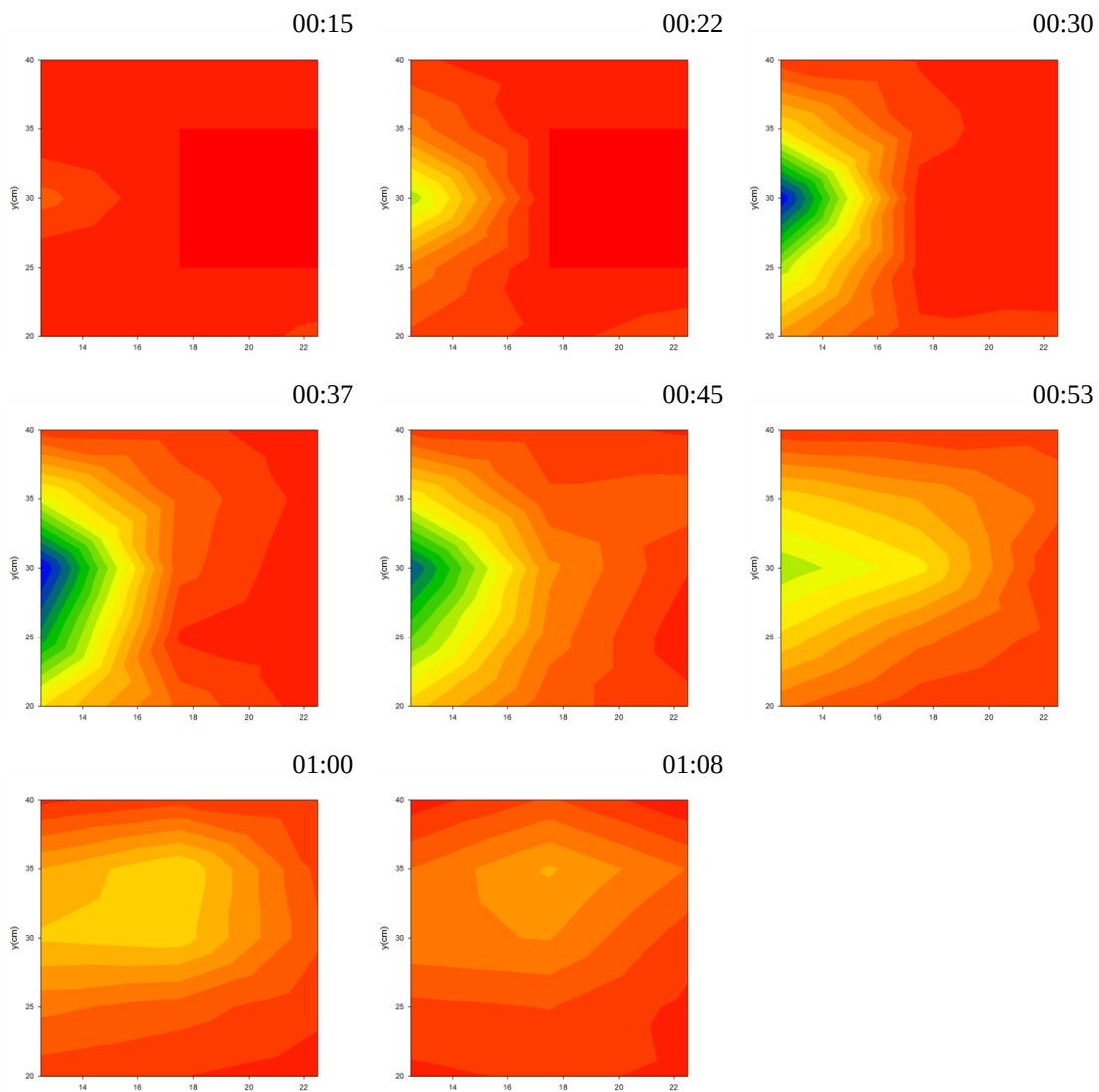


圖 5.4.24、脈衝式點源-五測線實驗二之 $\Delta\rho$ 等高線圖

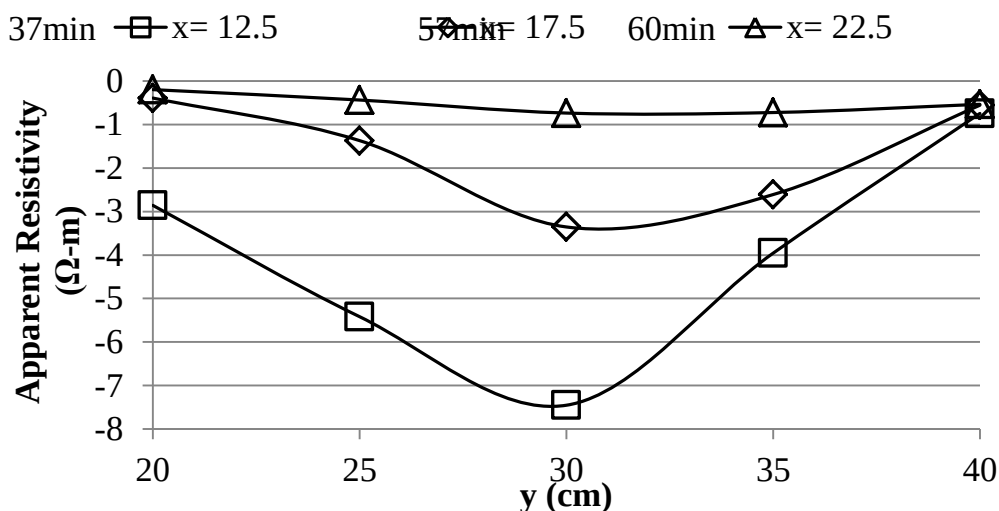


圖 5.4.25、脈衝式點源-五測線實驗二之 y 方向視電阻率變化情形

(2) 地下水流速推估

測深 $n=1$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.26 至圖 5.4.30。且顯示五條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.4.26 表示在 $y=20$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，僅在 $x=12.5$ 有 $\Delta\rho$ 在變化，而 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho$ 皆無顯著變化，顯示示蹤劑未能造成該區電阻影響，亦無法推估流場流速。圖 5.4.27 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 37、49 及 57 分鐘。推估得流場流速為 0.49 cm/min。圖 5.4.28 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 37、57 及 60 分鐘。推估得流場流速為 0.31 cm/min。圖 5.4.29 表示在 $y=35$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 37、60 及 77 分鐘。推估得流場流速為 0.25 cm/min。圖 5.4.30 表示在 $y=40$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho$ 皆無顯著變化，顯示示蹤劑未能造成該區電阻影響，亦無法推估流場流速。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 $y=30$ cm，以主要流向推估得地下水流速約為 0.31 cm/min，與控制流速範圍 0.18 至 0.22 cm/min 相比較高，約為 141%至 172%。此外，由 $y=25$ 及 35 cm 其它測線推估得地下水流速約為 0.24 至 0.49 cm/min，顯示與控制流速範圍差異較大。而 $y=15$ 及 40 cm 則

無明顯的電阻變化。

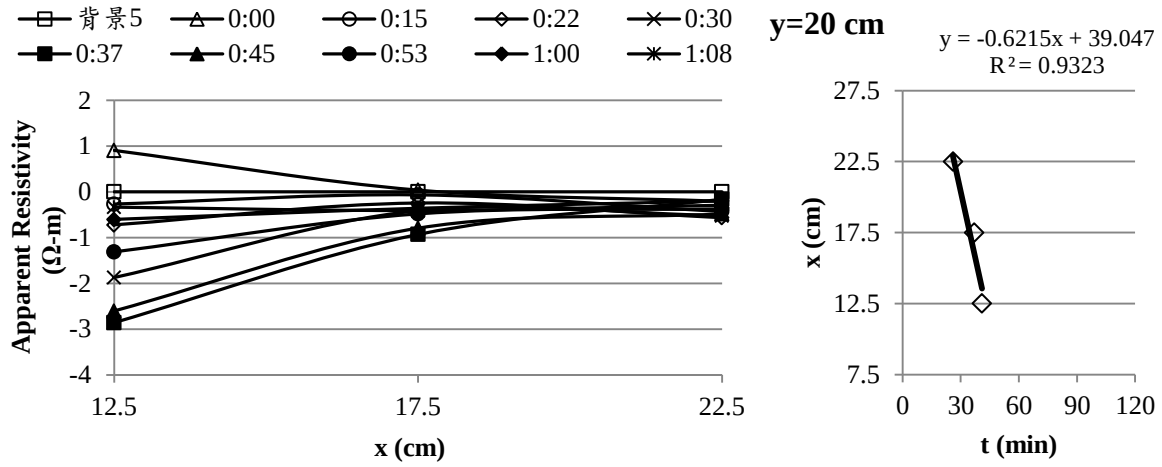


圖 5.4.26、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=20$ cm)

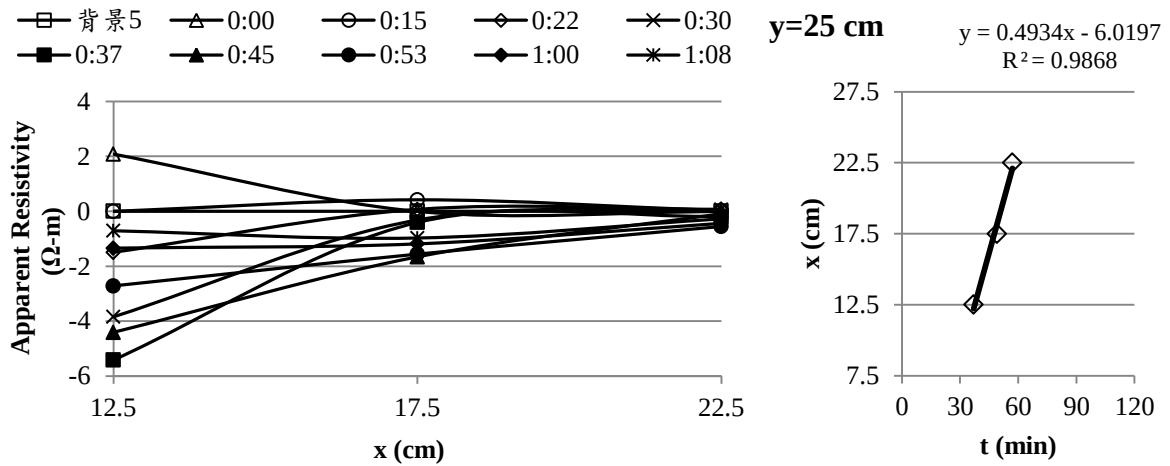


圖 5.4.27、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=25$ cm)

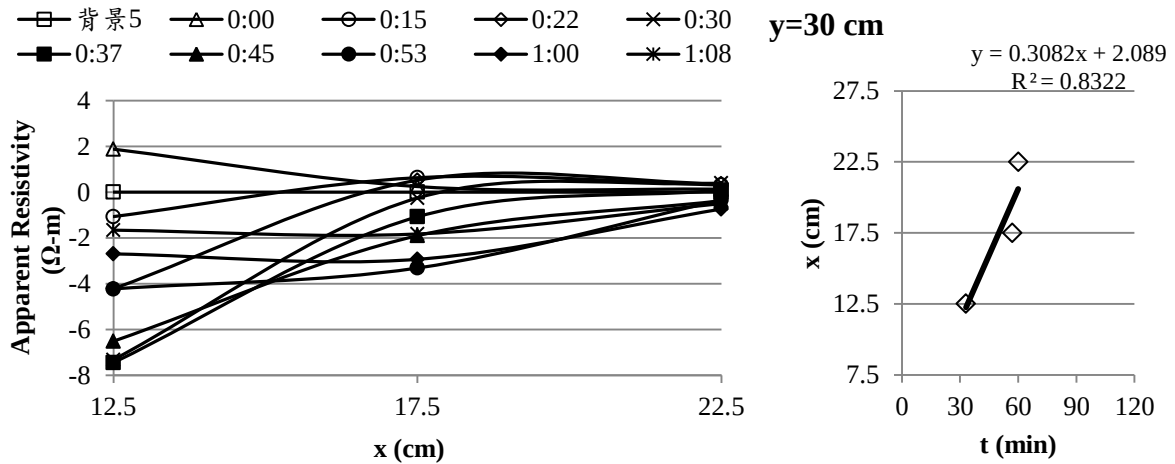


圖 5.4.28、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=30 cm)

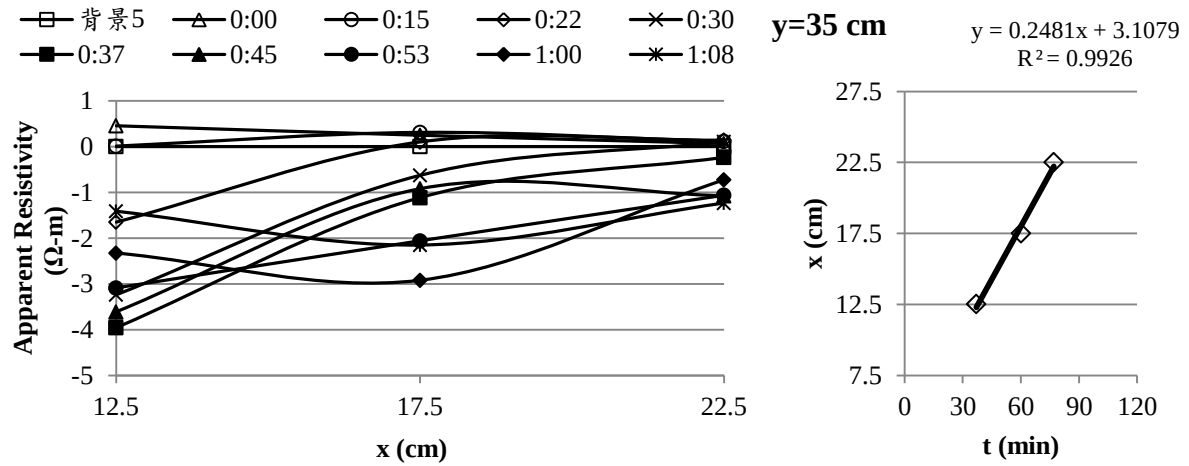


圖 5.4.29、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=35 cm)

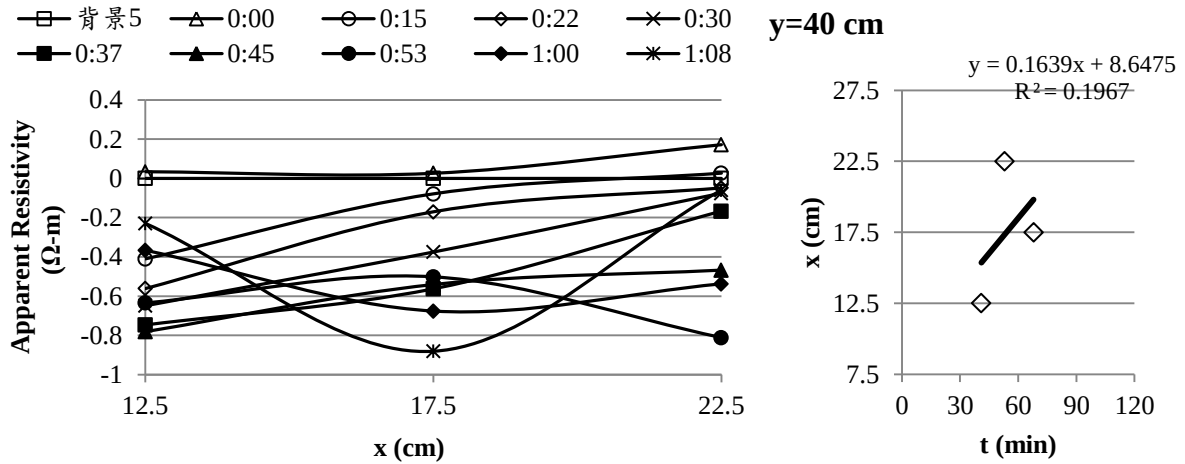


圖 5.4.30、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置(n=1, y=40 cm)

III. 五測線實驗三

(1) 地下水流向推估

圖 5.4.31 為由五條測線在 $n=1$ 的 $\Delta\rho_{\max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=25$ 及 30 cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的兩測線則 $\Delta\rho_{\max}$ 較小，污染團隨時間逐漸擴大並降低濃度。

以五測線解析在不同 x 位置，圖 5.4.32 顯示 $\Delta\rho_{\max}$ 在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm，發生最大電阻變化的時候， $\Delta\rho_{\max}$ 沿著 y 方向的變化情形。 12.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在示蹤劑注入後 26 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}=-9.44$ $\Omega\cdot\text{m}$ 。 17.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 46 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}=-6.56$ $\Omega\cdot\text{m}$ 。 22.5 cm 位置的 $\Delta\rho_{\max}$ 出現在 66 分鐘，在 $y=30$ cm 有 $\Delta\rho_{\max}=-4.14$ $\Omega\cdot\text{m}$ 。從圖 5.4.32 可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{\max}$ 主要發生在 $y=30$ cm 位置，以 $\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示蹤劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往 $y=30$ cm 位置向下游流動。

示蹤劑於流場中主要流動路徑為 $y=25$ 及 30 cm，而 $y=35$ cm 測線的 $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示蹤劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑，而 $y=20$ cm 及 $y=40$ cm 測線則無顯著的電阻變化。

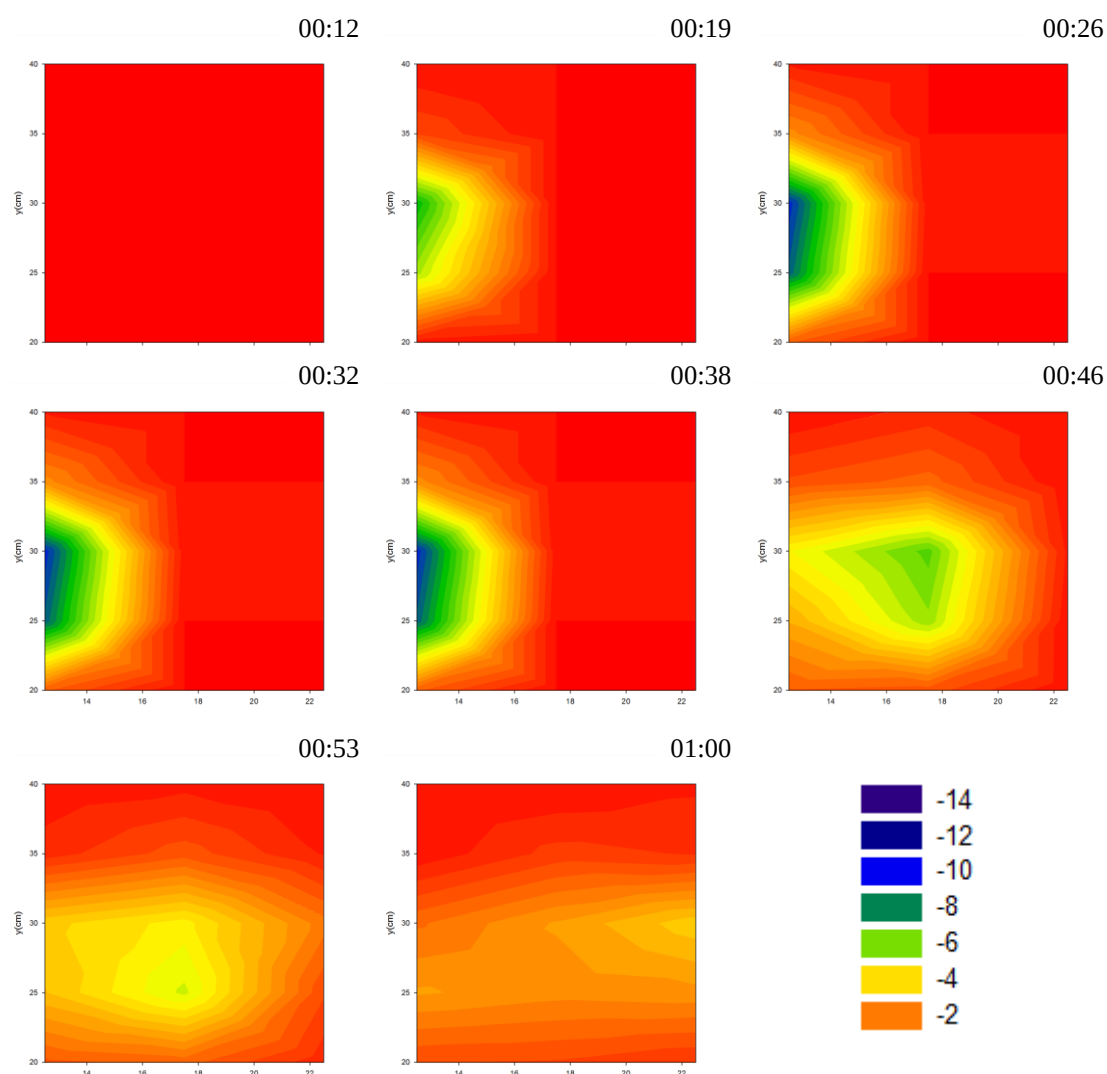


圖 5.4.31、脈衝式點源-五測線實驗三之 $\Delta\rho$ 等高線圖

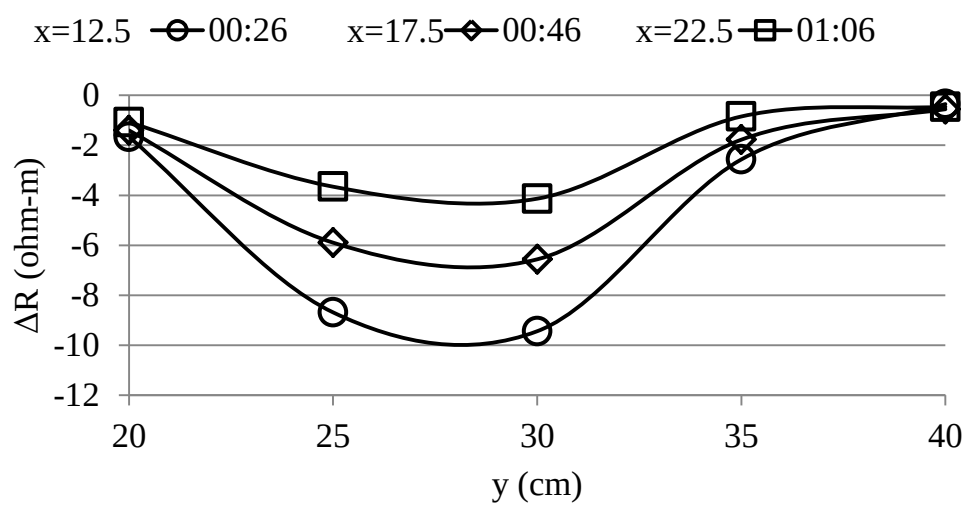


圖 5.4.32、脈衝式點源-五測線實驗三之 y 方向視電阻率變化情形

(2) 地下水流速推估

測深 $n=1$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.4.33 至圖 5.4.37。且顯示五條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.4.33 表示在 $y=15$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 皆無顯著變化，顯示示蹤劑未能造成該區電阻影響，亦無法推估流場流速。圖 5.4.34 表示在 $y=20$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 26、46 及 66 分鐘。推估得流場流速為 0.21 cm/min。圖 5.4.35 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 12、38 及 60 分鐘。推估得流場流速為 0.21 cm/min。圖 5.4.36 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 19、46 及 66 分鐘。推估得流場流速為 0.2 cm/min。圖 5.4.37 表示在 $y=35$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho_{\max}$ 分別發生於示蹤劑注入後 19、38 及 60 分鐘。推估得流場流速為 0.22 cm/min。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 $y=25$ cm，以主要流向推估得地下水流速約為 0.21 cm/min，符合控制流速範圍 0.18 至 0.22 cm/min，約為 95% 至 117% 。此外，由 $y=20$ 及 30 cm 其它測線推估得地下水流速約為 0.2 至 0.22 cm/min，亦接近控制流速範圍。而 $y=35$ 及 40 cm 的電阻變化甚小，其實較不適合推估流速，至於 $y=15$ cm 則無明顯的電阻變化。

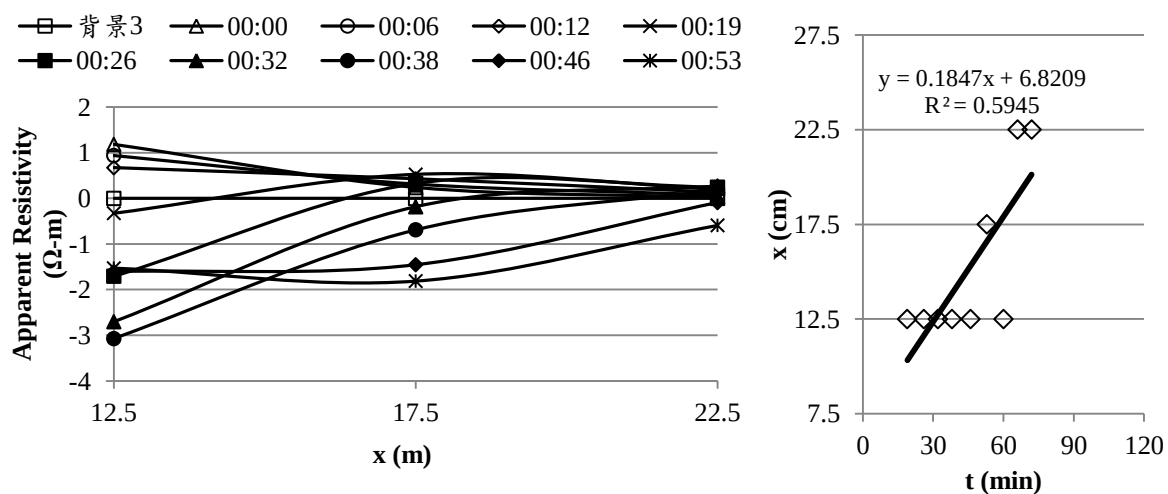


圖 5.4.33、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置 ($n=1, y=20$ cm)

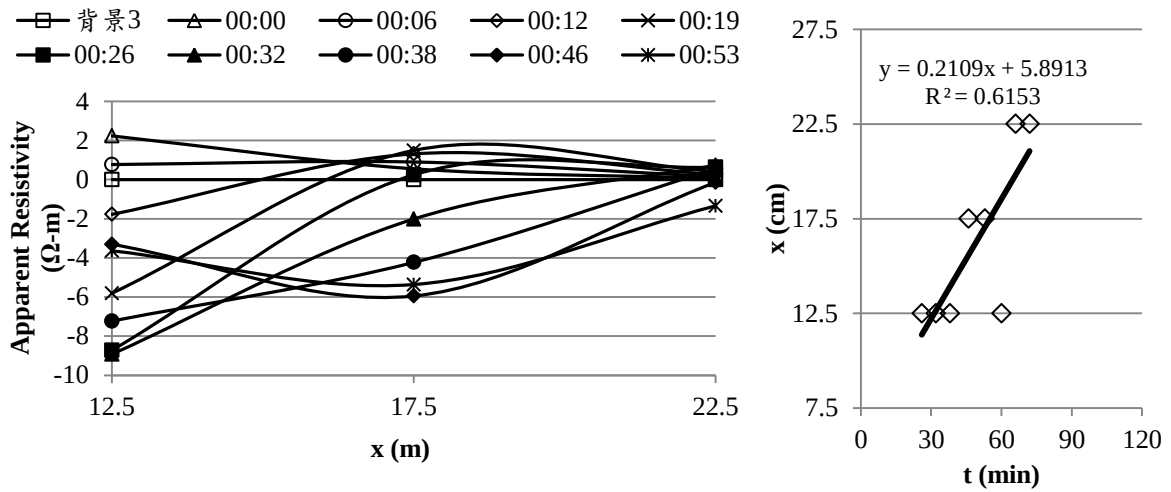


圖 5.4.34、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=25$ cm)

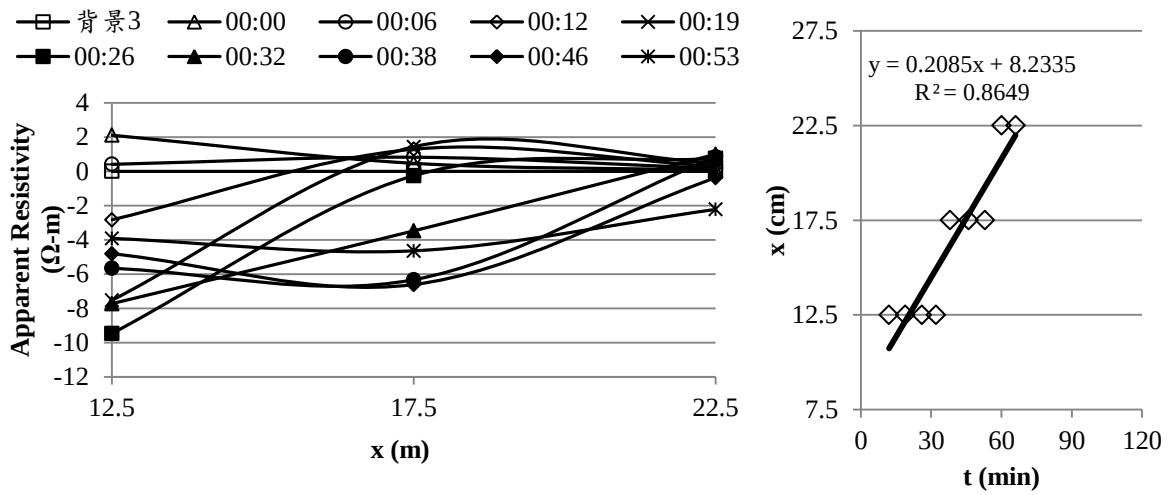


圖 5.4.35、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=30$ cm)

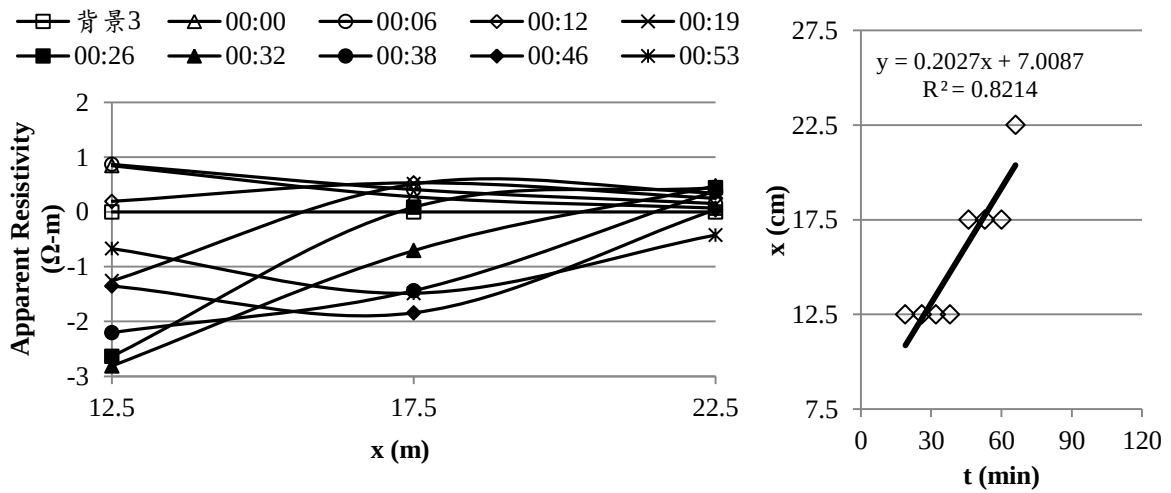


圖 5.4.36、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=35$ cm)

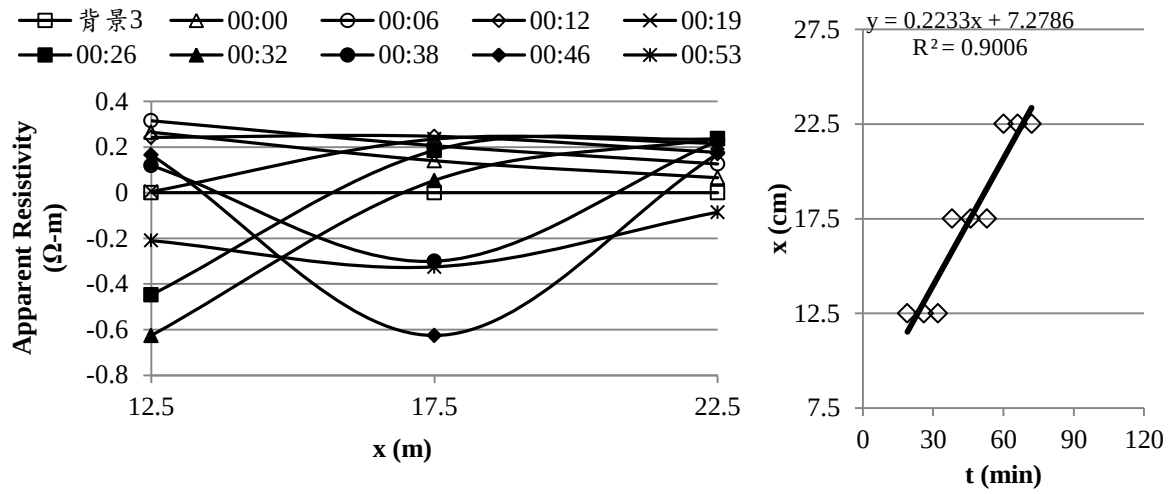


圖 5.4.37、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=40\text{ cm}$)

5.5 連續式點源試驗

第一階段脈衝式點源試驗以單測線施測，

於實場地下水流場中以脈衝點源方式進行示蹤劑試驗，可能因為注入的示蹤劑質量不足而導致濃度變化太小，使得地電阻探測無法得到有效資料而使此方法失效。本研究為因應此問題，將在脈衝點源試驗後，進行連續點源試驗。

5.5.1 三測線

(1) 地下水流向推估

圖 5.5.1 為由三條測線在 $n=4$ 的 $\Delta\rho_{\max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=25$ cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的測線則 $\Delta\rho_{\max}$ 較小。由圖 5.5.1 顯示流場中示蹤劑濃度梯度約在 135 分鐘後呈現穩狀態。

以三測線解析在不同 x 位置，圖 5.5.2 顯示地下水示蹤劑濃度呈現穩態時(約 105 分鐘後)， $\Delta\rho_{\max}$ 在 $x=15$ 、20、25 及 30 cm 沿著 y 方向的變化情形，從圖 5.5.2 可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{\max}$ 主要發生在 $y=25$ cm 位置，以 $\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示蹤劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往 $y=25$ cm 位置向下游流動。

示蹤劑於流場中主要流動路徑為 $y=25$ cm，而 $y=30$ cm 及 $y=35$ cm 測線上， $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示蹤劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑。

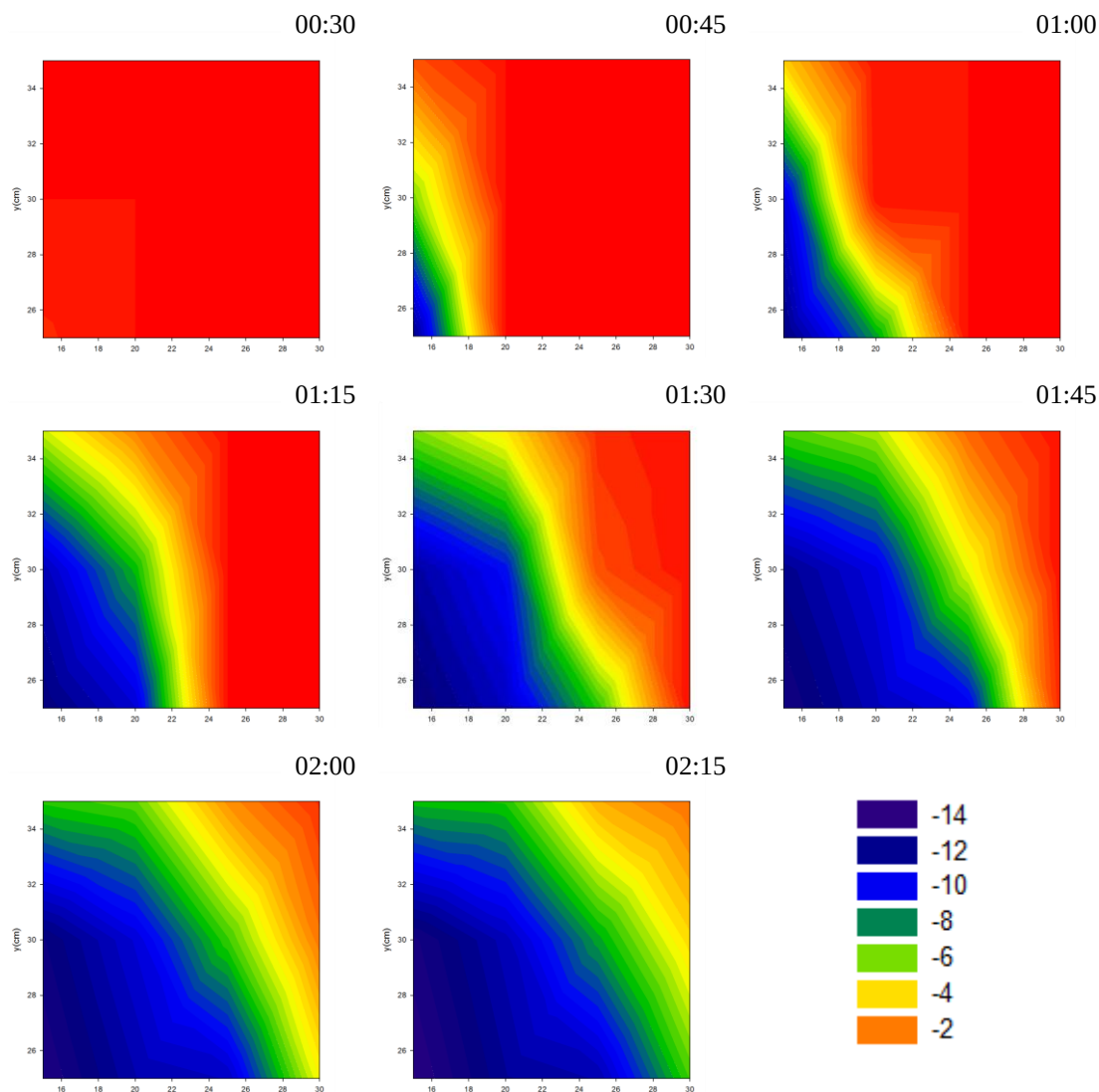


圖 5.5.1、連續式點源-三測線之 $\Delta\rho$ 等高線圖

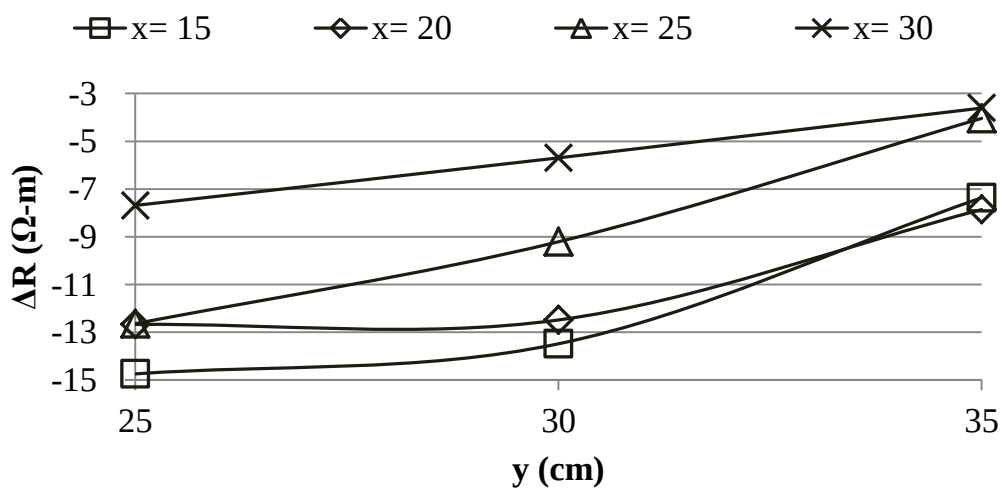


圖 5.5.2、連續式點源-三測線之 y 方向視電阻率變化情形

(2) 地下水流速推估

測深 $n=4$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.5.3 至圖 5.5.5。且顯示三條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.5.3 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=15$ 、20、25 及 30 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 39、59、89 及 119 分鐘。推估得流場流速為 0.18 cm/min。圖 5.5.4 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=15$ 、20、25 及 30 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 47、73、105 及 131 分鐘。推估得流場流速為 0.18 cm/min。圖 5.5.5 表示在 $y=35$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=15$ 、20、25 及 30 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 59、86、111 及 140 分鐘。推估得流場流速為 0.19 cm/min。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 $y=25$ cm，以主要流向推估得地下水流速約為 0.18 cm/min，與控制流速範圍 0.22 至 0.28 cm/min 相當，約為 82%至 100%。此外，由 $y=30$ 及 35 cm 其它測線推估得地下水流速約為 0.18 至 0.19 cm/min，亦於控制流速範圍相當。

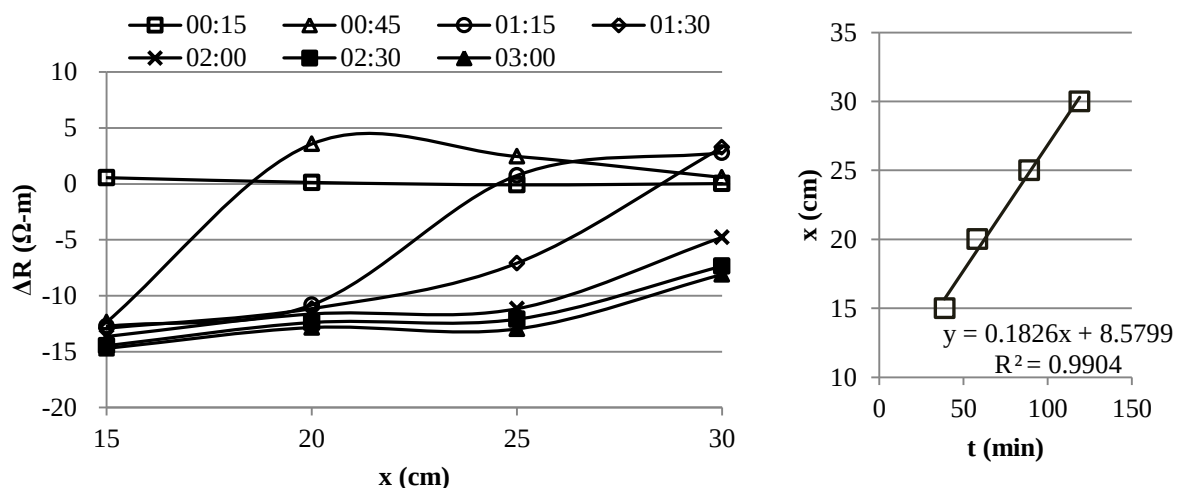
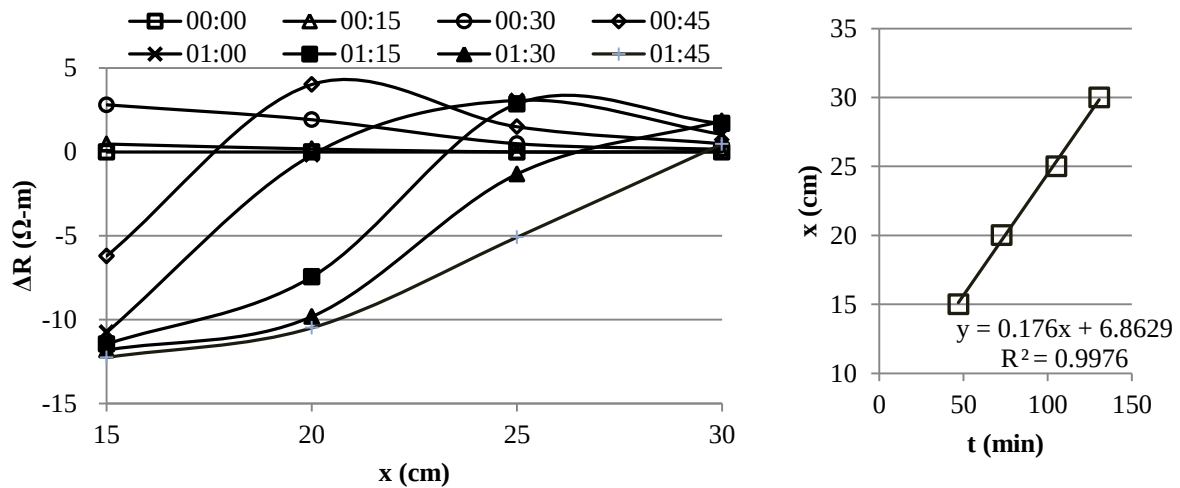
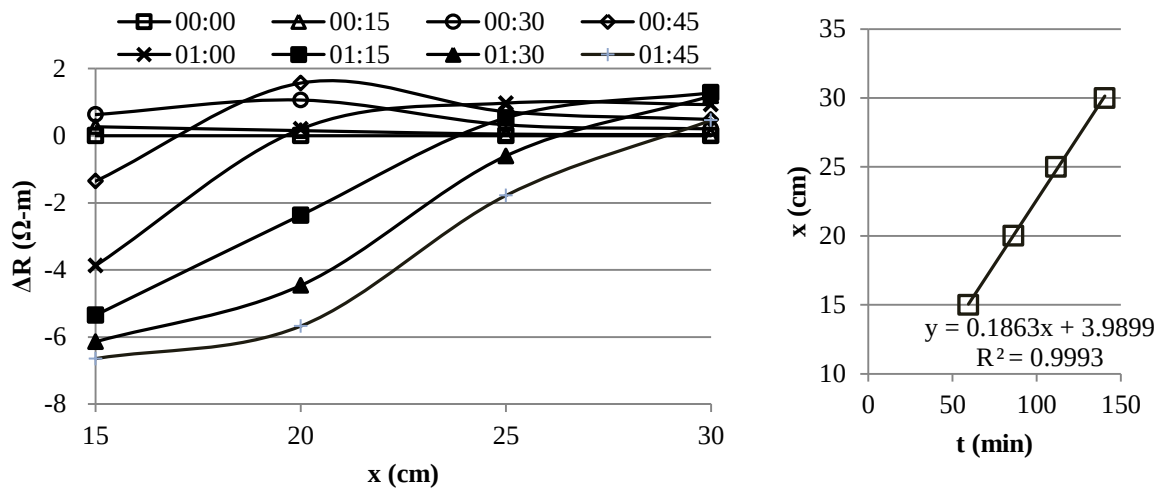


圖 5.5.3、三測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{\max}$ 發生位置 ($n=4$, $y=25$ cm)

圖 5.5.4、三測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=4$, $y=30$ cm)圖 5.5.5、三測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=4$, $y=35$ cm)

5.5.2 五測線

I. 五測線實驗一

(1) 地下水流向推估

圖 5.5.6 為由五條測線在 $n=1$ 的 $\Delta\rho_{max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=20$ 及 35 cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的兩測線則 $\Delta\rho_{max}$ 較小。由圖 5.5.6 顯示流場中示蹤劑濃度梯度約在 102 分鐘後呈現穩狀態。

以五測線解析在不同 x 位置，圖 5.5.7 顯示地下水示蹤劑濃度呈現穩態時(約 102 分鐘後)， $\Delta\rho_{max}$ 在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 沿著 y 方向的變化情形，從圖 5.5.7

可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{\max}$ 主要發生在 $y=25$ 至 30 cm 位置，以 $\Delta\rho_{\max}$ 出現之 y 位置可視為示縱劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往 $y=25$ 至 30 cm 位置向下游流動。

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 $y=35$ cm 測線上， $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示縱劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑。

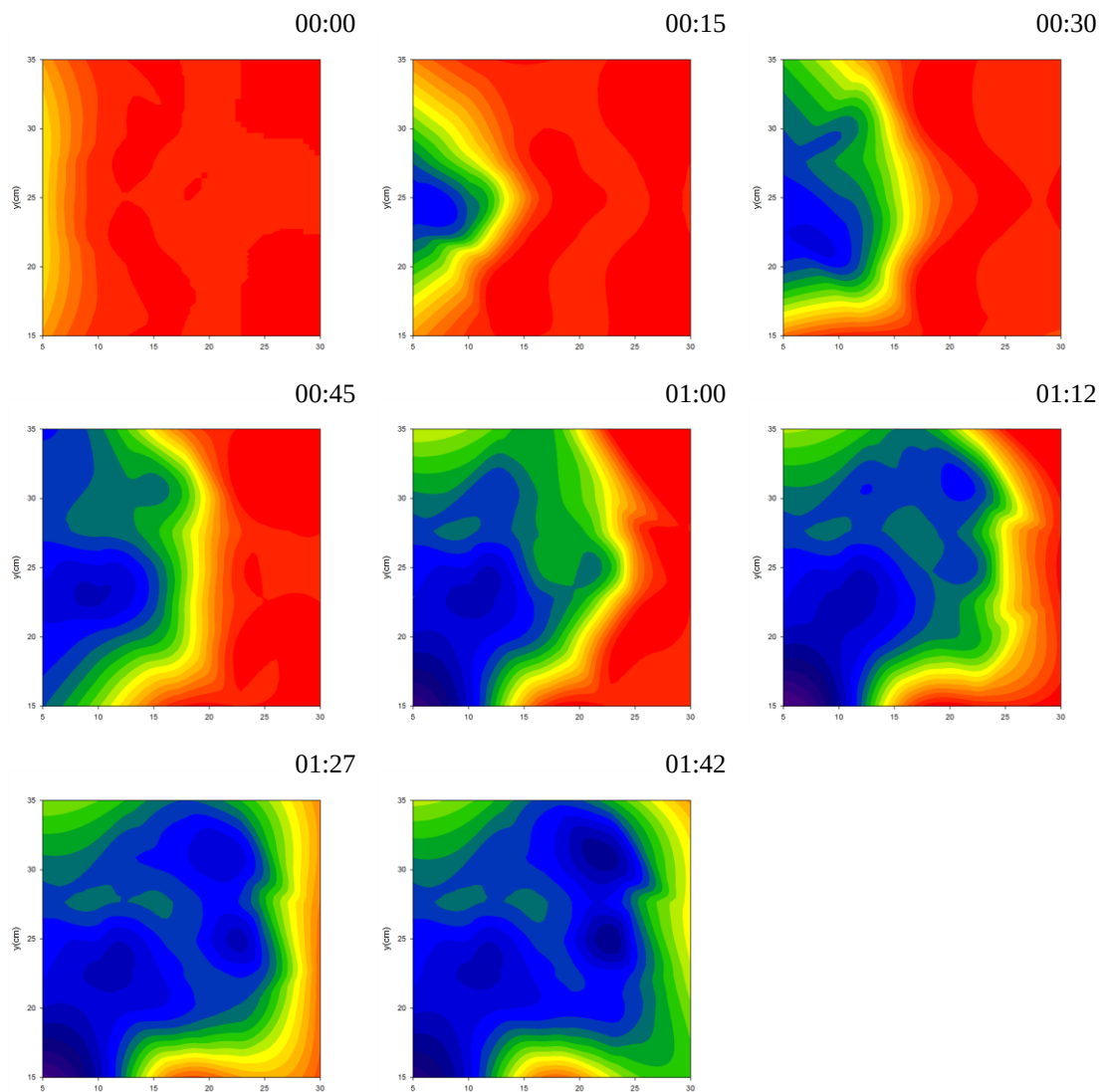


圖 5.5.6、連續式點源-五測線實驗一之 $\Delta\rho$ 等高線圖

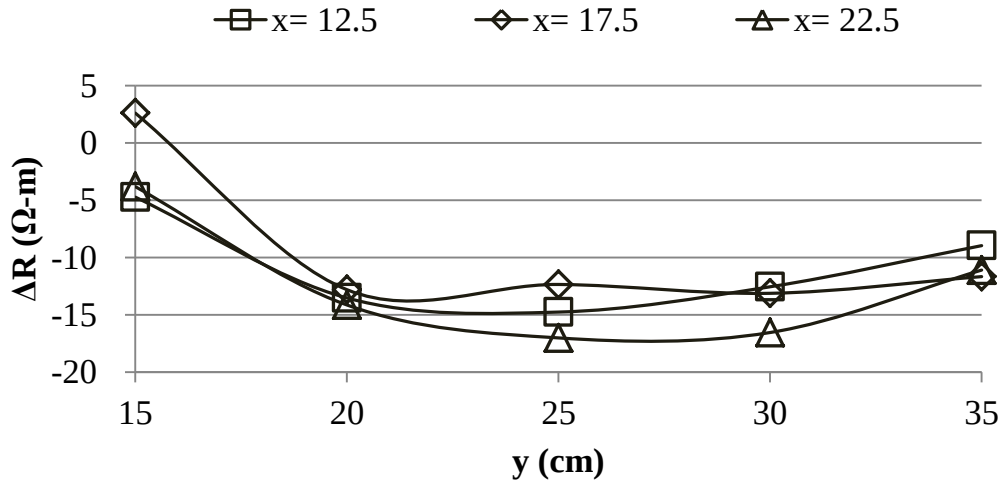


圖 5.5.7、連續式點源-五測線實驗一之 y 方向視電阻率變化情形

(2) 地下水流速推估

測深 $n=1$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.5.8 至圖 5.5.12。且顯示五條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.5.8 表示在 $y=15$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 51、86 及 94 分鐘。推估得流場流速為 0.21 cm/min。圖 5.5.9 表示在 $y=20$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 30、47 及 73 分鐘。推估得流場流速為 0.23 cm/min。圖 5.5.10 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 18、42 及 62 分鐘。推估得流場流速為 0.23 cm/min。圖 5.5.11 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 28、45 及 69 分鐘。推估得流場流速為 0.24 cm/min。圖 5.5.12 表示在 $y=35$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 39、58 及 81 分鐘。推估得流場流速為 0.24 cm/min。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 25 至 30 cm。以主要流向推估得地下水流速約為 0.23 至 0.24 cm/min，與控制流速範圍 0.18 至 0.22 cm/min 較高，約為 105% 至 133%。此外，由其它測線推估得地下水流速約為 0.21 至 0.24 cm/min，亦高於控制流速範圍。

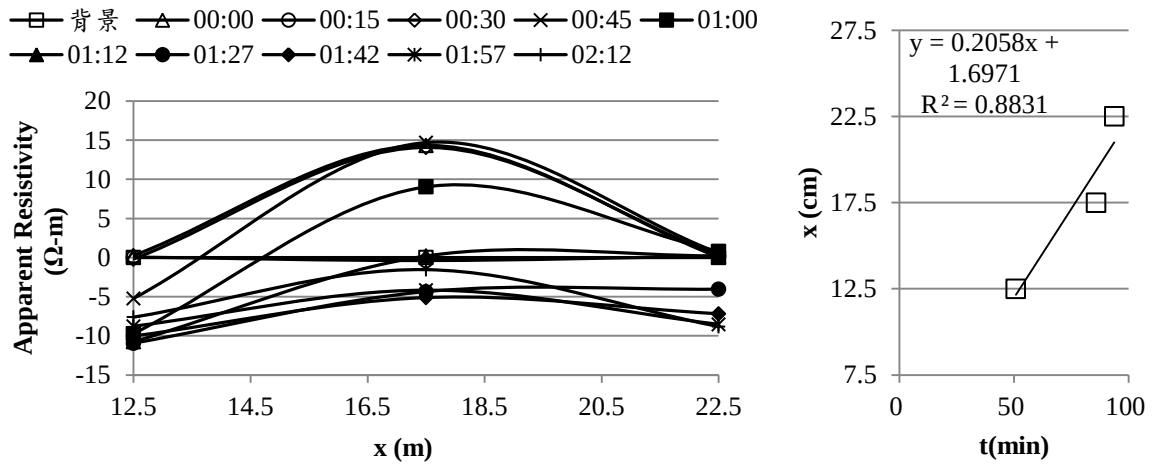


圖 5.5.8、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=15$ cm)

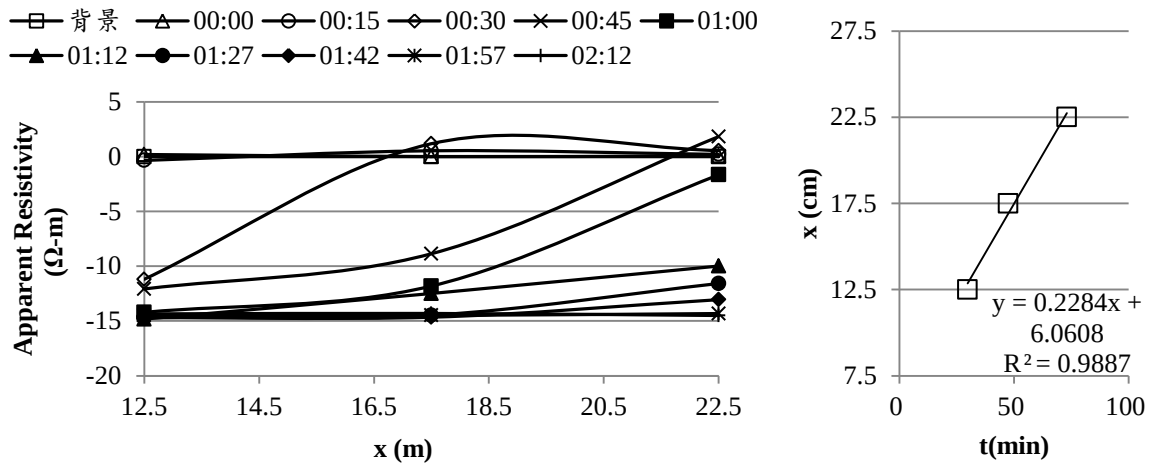


圖 5.5.9、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=20$ cm)

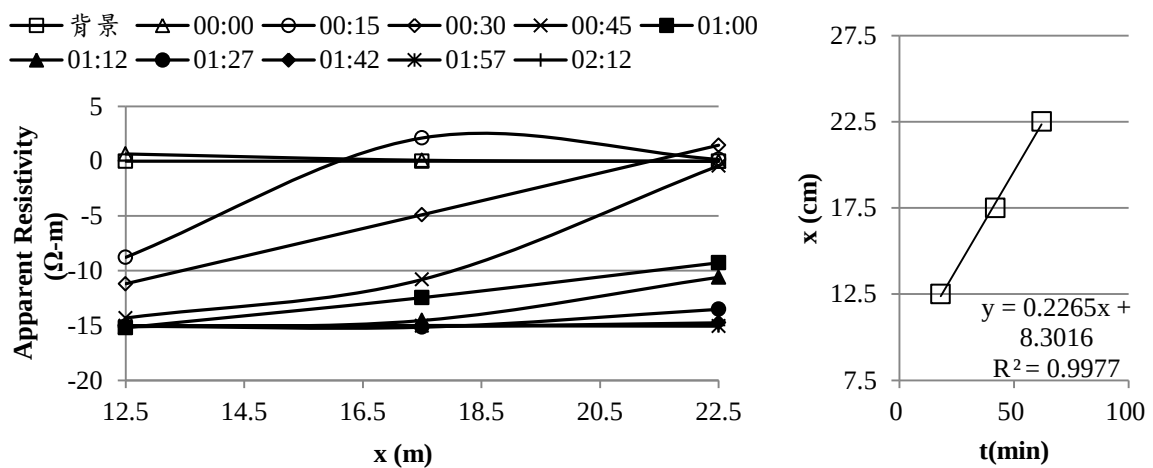


圖 5.5.10、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=25$ cm)

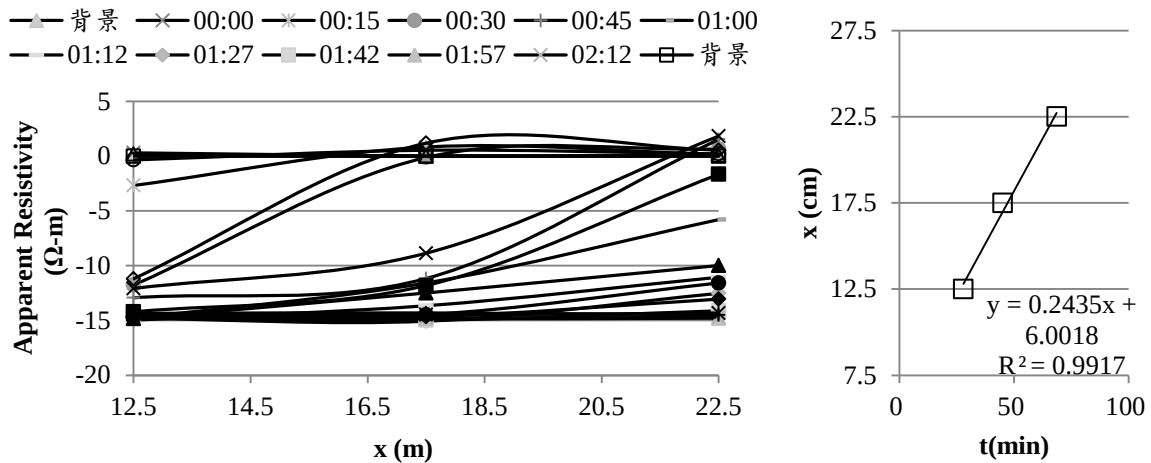


圖 5.5.11、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=30$ cm)

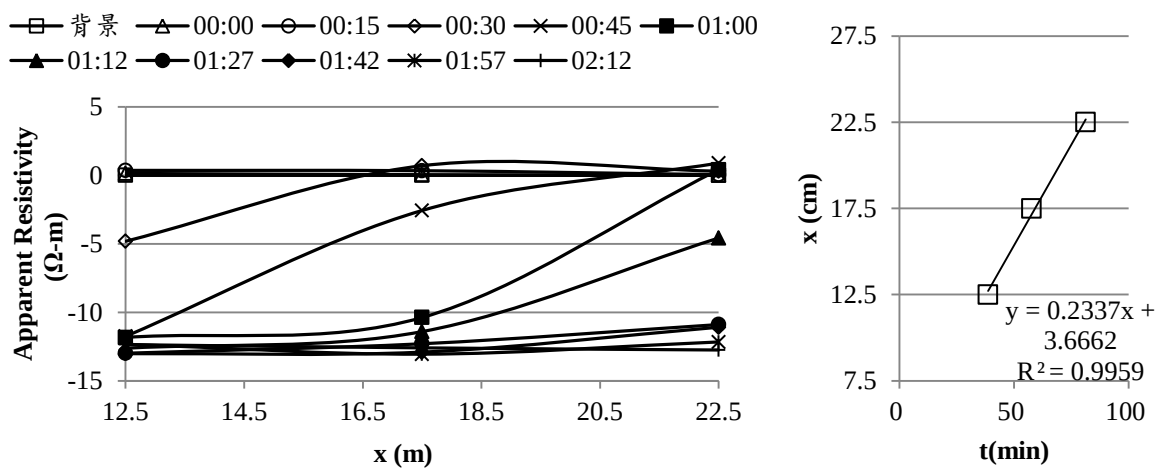


圖 5.5.12、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=35$ cm)

II. 五測線實驗二

(1) 地下水流向推估

圖 5.5.13 為由五條測線在 $n=1$ 的 $\Delta\rho_{max}$ 繪製之等高線圖，可見示蹤劑從上游注入後，污染團隨時間向下游傳輸的現象，並顯示 $y=25$ cm 測線的變化量較大，表示為流場主要流經方向，而離釋放中心線較遠的兩測線則 $\Delta\rho_{max}$ 較小。由圖 5.5.13 顯示流場中示蹤劑濃度梯度約在 110 分鐘後呈現穩狀態。

以五測線解析在不同 x 位置，圖 5.5.14 顯示地下水示蹤劑濃度呈現穩態時(約 95 分鐘後)， $\Delta\rho_{max}$ 在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 沿著 y 方向的變化情形，從圖 5.5.14 可觀察到在不同 x 位置，其 $\Delta\rho_{max}$ 主要發生在 $y=25$ cm 位置，以 $\Delta\rho_{max}$ 出現之 y 位置可視為示蹤劑主要流向，因此判斷地下水主要流向為由注入點 $y=25$ cm 往

y=25 cm 位置向下游流動。

示縱劑於流場中主要流動路徑為 y= 25 cm，而 y=20 cm 及 y=30 cm 測線上， $\Delta\rho$ 則變化較小，顯示此測線獲得 $\Delta\rho$ 主要受示縱劑擴散造成的影響，並非主要流動路徑。

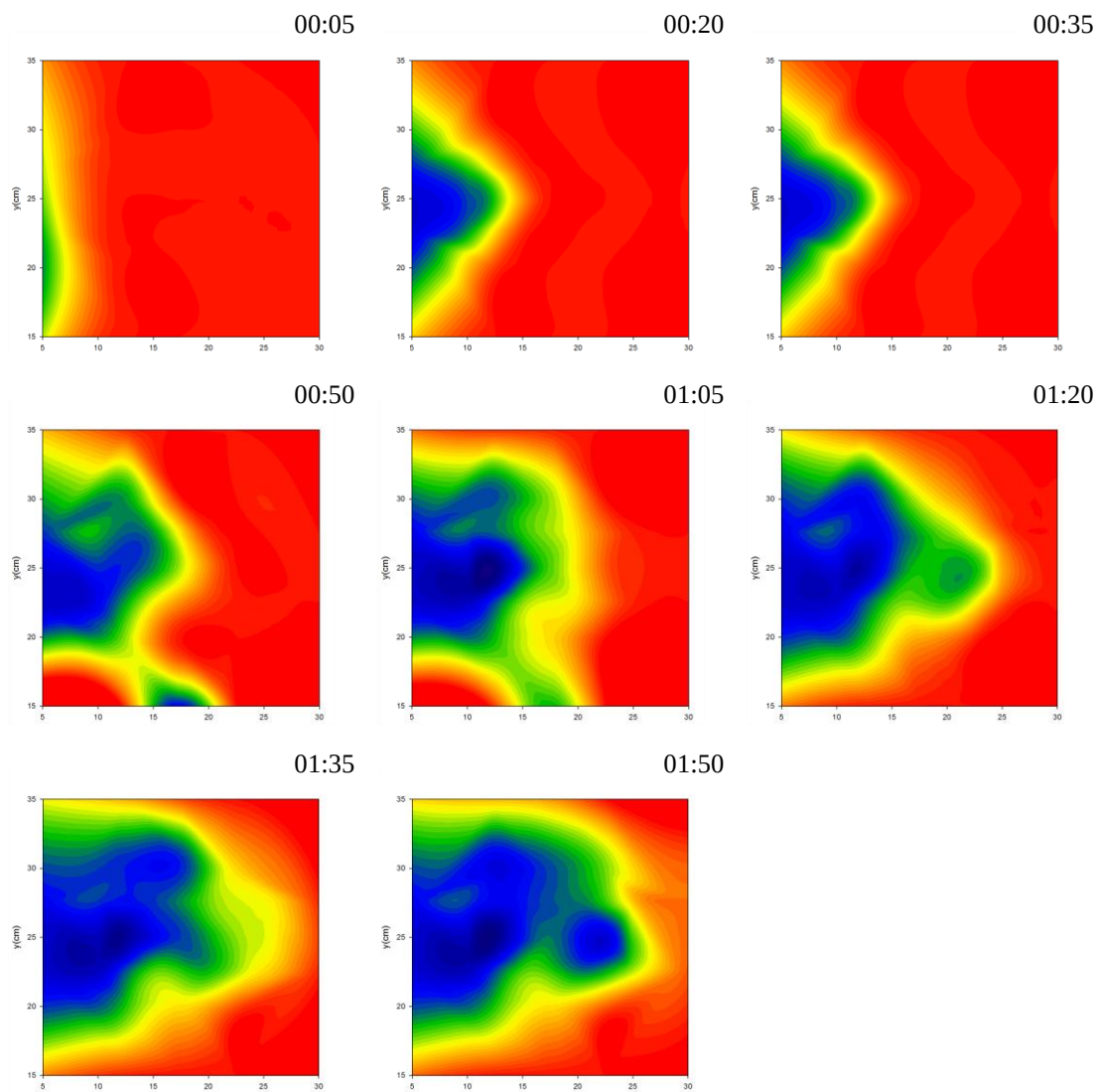


圖 5.5.13、連續式點源-五測線實驗二之 y 方向視電阻率變化情形

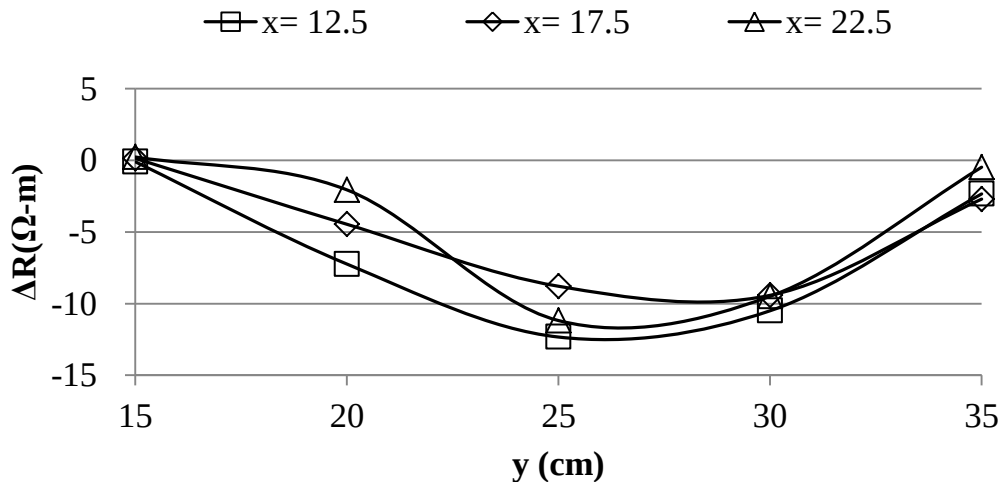


圖 5.5.14、地電阻儀探測示蹤劑於槽體流動之視電阻率變化圖(五測線)

(2) 地下水流速推估

測深 $n=1$ 之 $\Delta\rho$ 隨時間於 x 方向之變化情形呈現於圖 5.5.15 至圖 5.5.19。且顯示五條測線所測得最大 $\Delta\rho$ 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 $\Delta\rho$ ，均大於其他條測線，此現象可解釋為 $\Delta\rho$ 較大者則為示蹤劑主要流經之方向，而周圍測線測得 $\Delta\rho$ 為示蹤劑擴散影響。

圖 5.5.15 表示在 $y=15$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 皆無顯著變化，顯示示蹤劑未能造成該區電阻影響，亦無法推估流場流速。圖 5.5.16 表示在 $y=20$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 29、58 及 87 分鐘。推估得流場流速為 0.17 cm/min。圖 5.5.17 表示在 $y=25$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 18、42 及 75 分鐘。推估得流場流速為 0.17 cm/min。圖 5.5.18 表示在 $y=30$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 29、62 及 100 分鐘。推估得流場流速為 0.14 cm/min。圖 5.5.19 表示在 $y=35$ cm， $\Delta\rho$ 的變化情形，在 $x=12.5$ 、 17.5 及 22.5 cm 處， $\Delta\rho/\Delta\rho_{\max}=0.5$ 分別發生於示蹤劑注入後 81、97 及 118 分鐘。推估得流場流速為 0.27 cm/min。

依前述地下水流向推估結果，顯示地下水主要流向為 $y=25$ cm，以主要流向推估得地下水流速約為 0.17 cm/min，與控制流速範圍 0.18 至 0.22 cm/min 相比較低，約為 77%至 94%。此外，由 $y=20$ 及 30 cm 其它測線推估得地下水流速約

為 0.14 至 0.17 cm/min，亦低於控制流速範圍。而 $y=35$ cm 的電阻變化甚小，不適合推估流速，至於 $y=15$ cm 則無明顯的電阻變化。

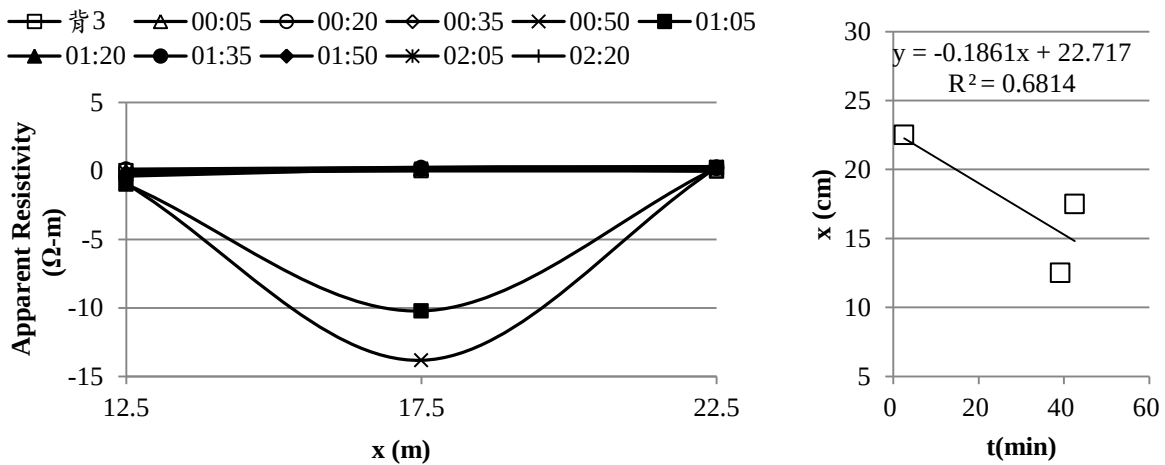


圖 5.5.15、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=15$ cm)

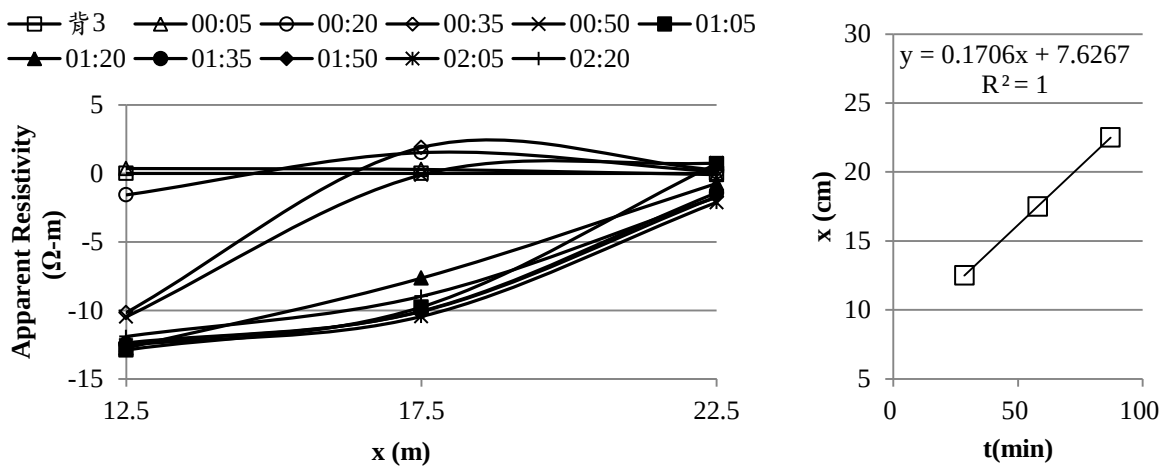


圖 5.5.16、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置 ($n=1, y=20$ cm)

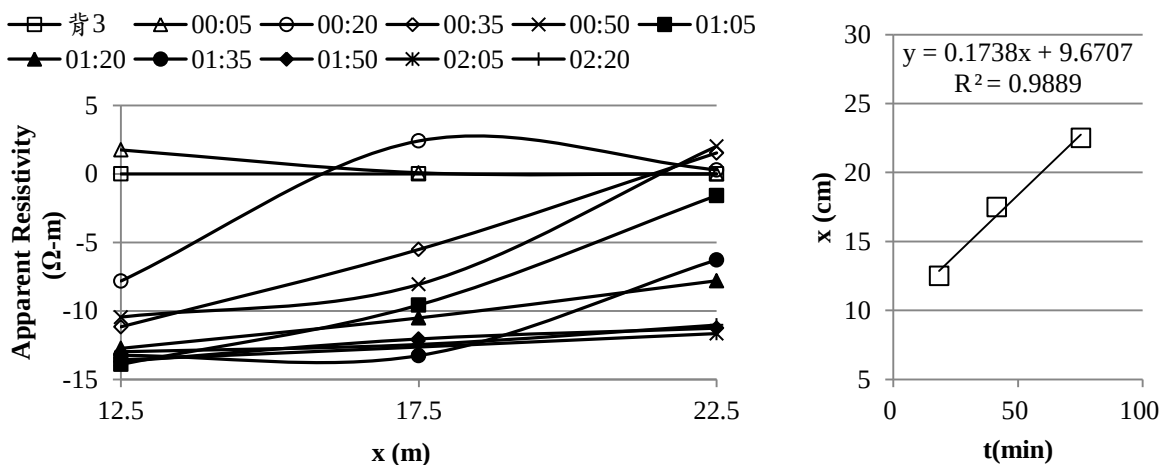
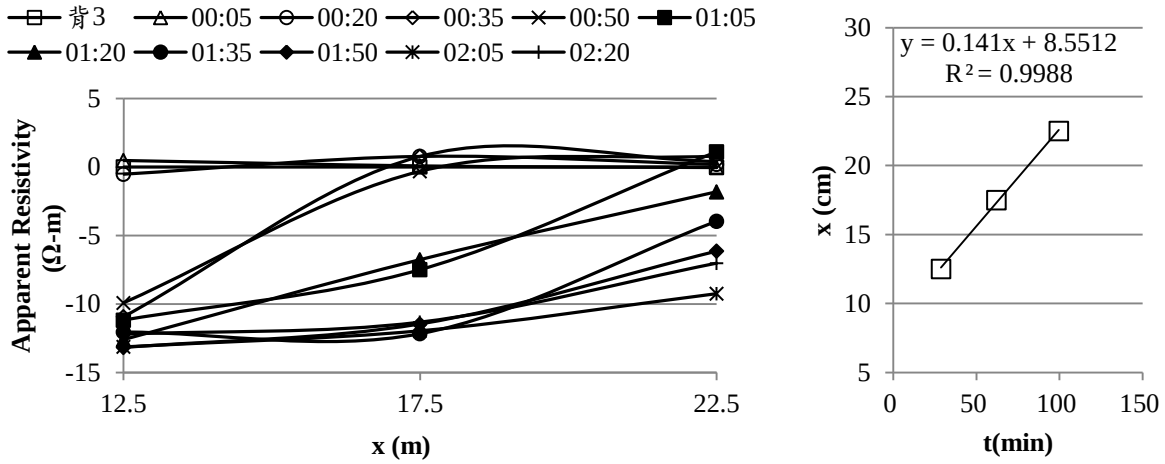
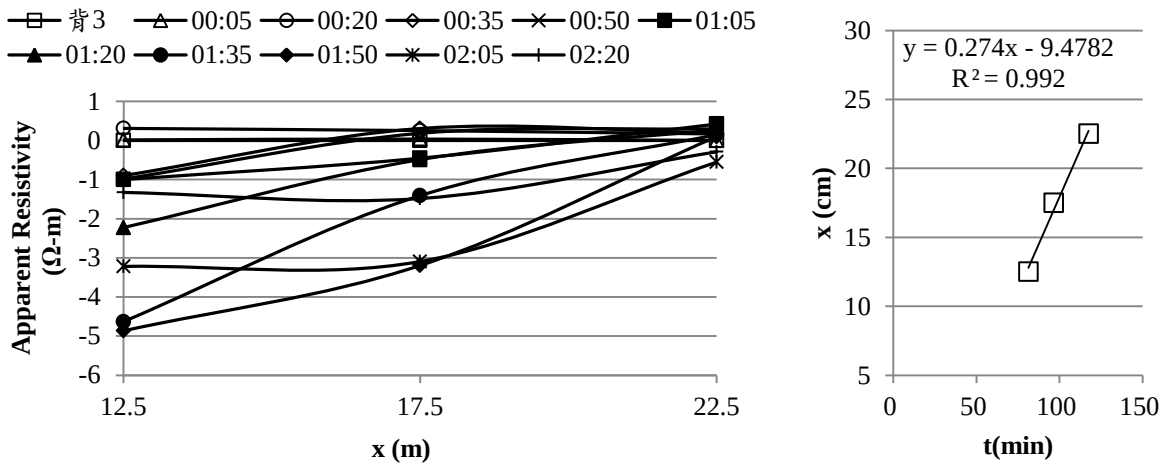


圖 5.5.17、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=25\text{ cm}$)圖 5.5.18、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=30\text{ cm}$)圖 5.5.19、五測線，(左) $\Delta\rho_b$ 隨時空的變化、(右) $\Delta\rho_{max}$ 發生位置($n=1, y=35\text{ cm}$)

(3) Archie's law 驗證

監測井 well-1 及 well-2 的視電阻率經 F 修正後隨時間的變化繪製成穿透曲線 (breakthrough curve)，如圖 5.5.20 及圖 5.5.21 顯示，線段表示 ERT 測值，實心符號表示監測井觀測值。ERT-1U、ERT-1D、ERT-1L、ERT-1R 分別表示最接近監測井 well-1 的上游、下游、左側及右側的 ERT 測點。可發現監測井上游的測點 ERT-1U 與 ERT-2U 的電阻變化與觀測值的變化相近，而 ERT-1D 與 ERT-2D 位於監測井下游，其變化較慢，至於 ERT-1L(ERT-2L)、ERT-1R(ERT-2U)則亦有延遲的現象。

示蹤劑注入初期(00:05)測得地下水中電阻率與背景的變化量很小，接近 0。經過 35 分鐘，於兩口監測井分別測得 $\Delta\rho_{wi}$ 為 -12.87 及 -14.31(ohm-m)，其周圍 ERT 測點之 $\Delta\rho_{bi}/F_i$ 分別介於 -9.06 至 -12.01 以及 -7.69 至 -12.24 (ohm-m)。

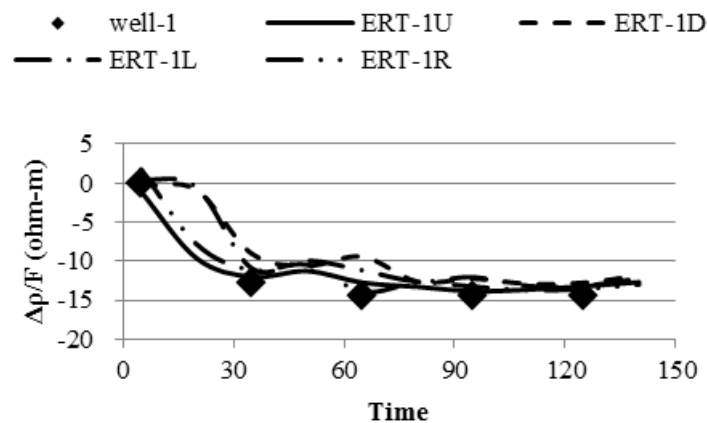


圖 5.5.20、well-1 周圍 ERT 測點修正後的視電阻率變化

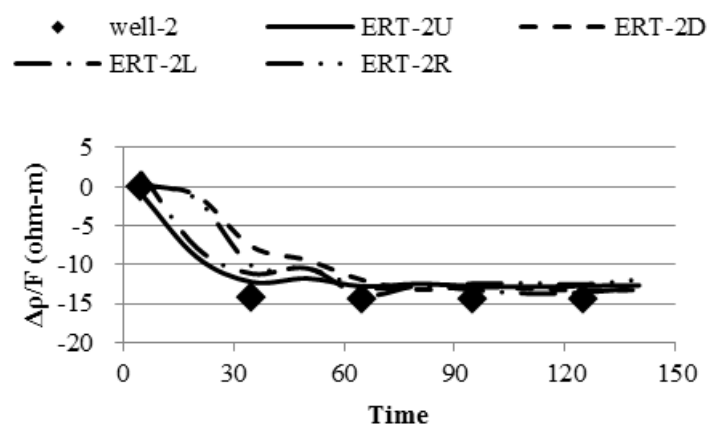


圖 5.5.21、well-2 周圍 ERT 測點修正後的視電阻率變化

將監測井量測值當成是觀測值，而地電阻儀所測得之電阻則為推估值，根據 Archie's Law，觀測值與推估值間有一正比關係。因此當觀測值與推估值之 coefficient of correlation (R^2) 愈高則表示地電阻方法之可靠度愈高，而在不同時間所測得之觀測值及推估值”本身的差異”亦應呈現正相關。

監測井 1 與其周圍之 ERT 推估值，列於表 5-3，其線性關係圖呈現於圖 5.5.22，可見 well-1 上游(ERT-1U)與右側(ERT-1R)的地電阻與其觀測值變化趨勢良好， R^2 為 0.995 至 0.997。而其下游((ERT-1D)與左側(ERT-1L)則較低，但 R^2 也有 0.926 至 0.985。監測井 2 與其周圍之 ERT 推估值，列於表 5-4，其線性關係圖呈現於圖 5.5.23，可見 well-2 上游(ERT-2U)的地電阻與其觀測值變化趨勢一致， R^2 為 0.999。右側(ERT-1R)與左側(ERT-1L)也有良好的趨勢， R^2 為 0.967 至 0.978，此結果說明地電阻探測方法之可靠性佳，表示 ERT 測得視電阻率透過 Archie's law 修正後可符合反映出示蹤劑於地下水中傳輸的現象。

表 5-3、well-1 觀測值與 ERT 推估值

(單位：ohm-m)

監測點 時間(分)	well-1	ERT-1U	ERT-1D	ERT-1L	ERT-1R
5	0.00	-1.13	-0.32	0.48	1.75
35	-12.87	-12.01	-9.06	-10.93	-11.16
65	-14.46	-12.75	-9.42	-11.18	-13.91
95	-14.46	-13.85	-12.24	-12.05	-13.25
125	-14.53	-13.23	-12.77	-13.14	-13.58
R^2	—	0.995	0.926	0.985	0.997

圖 5.5.22、well-1 觀測值與 ERT 推估值之線性關係

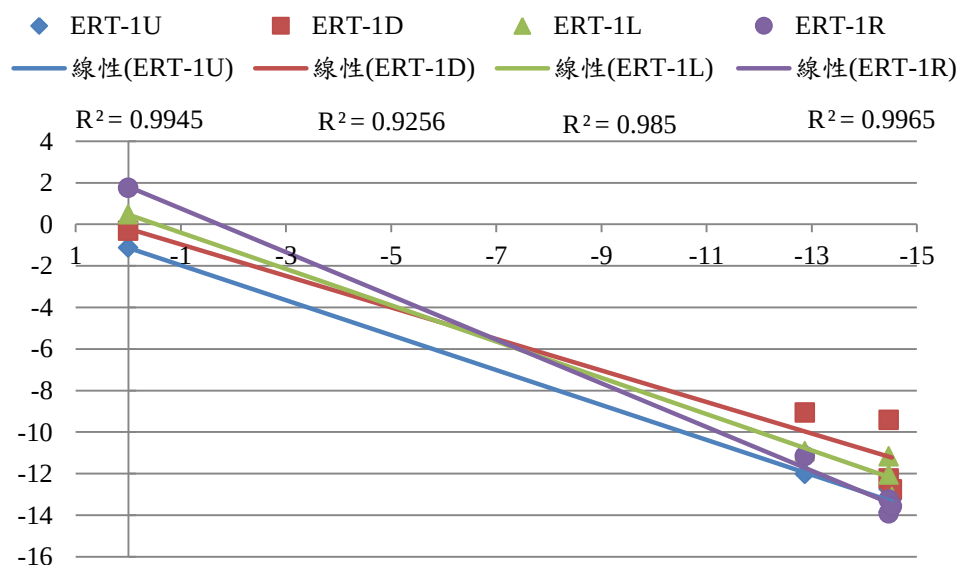
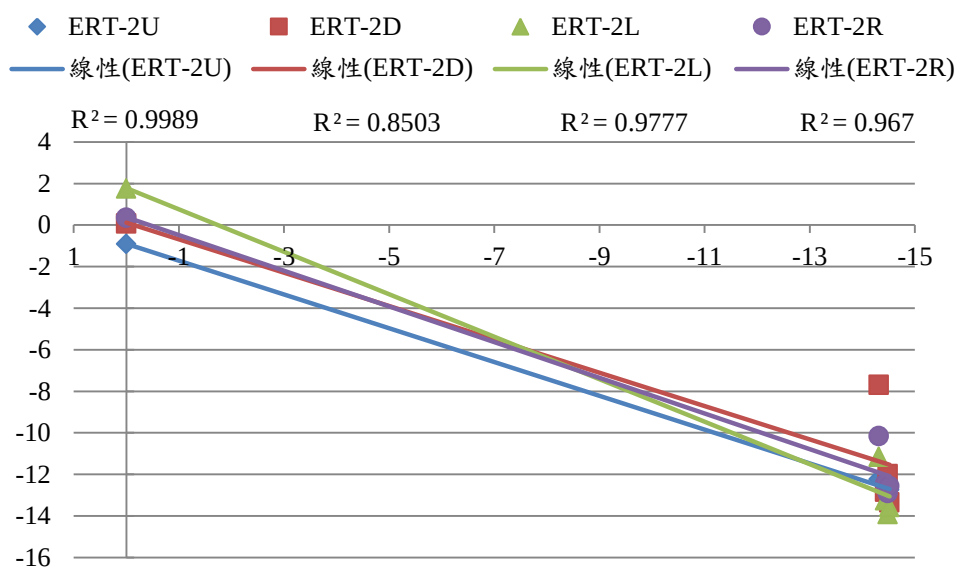


表 5-4、well-2 觀測值與 ERT 推估值

(單位：ohm-m)

監測點 時間(分)	well-2	ERT-2U	ERT-2D	ERT-2L	ERT-2R
5	0.00	-0.91	0.07	1.75	0.36
35	-14.31	-12.24	-7.69	-11.16	-10.16
65	-14.48	-12.79	-11.99	-13.91	-12.90
95	-14.43	-12.77	-12.84	-13.25	-12.45
125	-14.52	-12.75	-13.35	-13.58	-12.55
R^2	—	0.999	0.850	0.978	0.967

圖 5.5.23、well-2 觀測值與 ERT 推估值之線性關係



5.6 結論與建議

5.6.1 結論

研究結果顯示，ERT 重複性良好，相同試驗條件下，第 0 小時與第 22 小時測得電阻率 RMSE 值為 4.82 ohm-m，相較於背景值變化很小。ERT 之準確性顯示，含鹽水砂土與鹽水導電度之線性關係良好，大型實驗槽與小槽體試驗比較，兩者之斜率趨勢一致，結果符合 Archie's law，施測結果具有準確性。ERT 之敏感性佳，可測得不同鹽水導電度 600、800、1000、1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之差異，相同測點位置，隨著鹽水導電度增加，視電阻率降低的趨勢具有一致性。

ERT 輸出電流大小對於靜態實驗槽之視電阻率沒有顯著影響。而 Dipole-dipole 法的偶極間距較短，資料點較多，較能探測小區塊且高電阻變化之物體，但施測時間長。偶極間距增加，施測時間較快，但能探測之地層範圍亦越小，且較無法發現小範圍的電阻變化。Dipole-dipole 法在不同電極深度下，測得垂向視電阻率變化較差。

脈衝式單測線三組流速試驗，流場控制流速為 0.71 至 0.89 cm/min，其計算流場實際流速約為 0.73 至 0.86 cm/min，約為 97%至 103%。流場控制流速為 0.53 至 0.66 cm/min，其計算流場實際流速約為 0.55 至 0.62 cm/min，約為 94%至 104%。流場控制流速為 0.22 至 0.28 cm/min，其計算流場實際流速約為 0.25 至 0.27 cm/min，約為 96%至 114%。

脈衝式點源試驗結果顯示，ERT 可明顯地捕捉到示蹤劑於地下水中流動造成電阻值改變的訊息，此成果將可進一步應用於地下水流速流向之判斷。實驗結果顯示，以單測線 ERT 監測示蹤劑電阻變化，推估得地下水流速與設定流速相差約為 $\pm 10\%$ 以內，並發現深度越深，地下水流速有降低的趨勢。而 ERT 探測深度越深，測得水平資料範圍越小，故對於示蹤劑的追蹤情形有限。因此，示蹤劑釋放位置宜以 ERT 測線長度所能涵蓋之淺層水平範圍下較佳，較能掌握示蹤劑在水中造成的電阻率變化。

以脈衝式、連續式點源以及三測線與五測線進行示蹤劑實驗，其評估地下水流場之流速及流向結果如下：

脈衝式三測線一組試驗，流場控制流速為 0.18 至 0.22 cm/min，以推估主要流向測線之濃度穿透曲線，計算得實際流速為 0.31 至 0.32 cm/min，高於控制流速，約為 145%至 172%。

脈衝式五測線三組試驗，流場控制流速介於為 0.18 至 0.22 cm/min，以推估主要流向測線之濃度穿透曲線，計算得實際流速分別為 0.32、0.21 及 0.31 cm/min，

高於控制流速，約為 95%至 172%。

ERT 示蹤劑試驗計算流速結果顯示，計算流場流速多高於控制流速範圍，可能是受流場非均質影響，此外，流場可能有短流的現象，實際流動面積小於槽體截面積，因此實際流場流速會高於推估控制流速。而槽體底部石英砂密度與空隙率，可能受重力壓實影響而變小，導致地下水主要流動發生在上層，亦是 ERT 示蹤劑試驗計算流速較高的可能原因。比較三測線與五測線實驗結果，顯示增加測線數目，可提高流場流向判斷的解析力。

連續式三測線一組試驗，流場控制流速為 0.18 至 0.22 cm/min，以推估主要流向測線之濃度穿透曲線，計算得實際流速為 0.18 cm/min，與控制流速相當，約為 82%至 100%。連續式五測線兩組試驗，流場控制流速介於為 0.18 至 0.22 cm/min，以推估主要流向測線之濃度穿透曲線，計算得實際流速分別為 0.23 至 0.24 以及 0.17 cm/min，高於控制流速或與其相當，約為 77%至 133%。以監測井量測的地下水導電度變化與 ERT 監測結果，透過 Archie's law 關係修正後比較，顯示觀測值與推估值兩者相近，表示驗證結果良好。

5.6.2 建議

1. 實驗槽試驗，使用 Dipole-dipole 排列法的施測結果較 Wenner 排列法受邊界影響較小，視電阻率測值較合理。Wenner 排列法的限制或影響因子，未來可透過改變電極測線規模，或是砂箱大小，降低邊界效應的影響後，進一步探討其對流場示蹤劑之敏感性和推估地下水流速流向的可行性。
2. 流場示蹤劑推估地下水流向，建議需同時設置五條以上的測線，較能準確判定其地下水流向。未來可進一步改變測線配置方向，以及地下水流向的變化，探討其流向推估的變異性。
3. 流場示蹤劑推估地下水流速，建議需沿著流向有足夠的 ERT 測點，以及能夠有足夠的時間捕獲不同視電阻率最大變化出現的位置，較能準確判定地下水流速。未來可進一步探討施測間隔時間與電極間距對地下水流速推估之敏感性與準確性。
4. 目前 ERT 示蹤劑試驗計算得地下水流速高於控制流速的原因，推測為流場非均質性與短流的影響。因此，未來可進一步探討流場之異質性、流動面積大小與石英砂密度與孔隙率差異對地下水流速推估的影響
5. 以 ERT 推估地下水導電度，需以 Archie's law 修正其 F 值後，其結果才能與觀測值相符。未來可探討不同地下水流速的傳輸情形以及電極間距對 Archie's

law 中含水層因子 F 的推估與以及應用於地下水實際導電度的推估之敏感性與準確性。

6. 由於本計畫最後未能進行溶質傳輸模式，故無進一步之模式驗證結果可比較。未來若要以模式進行驗證，可以地下水模擬軟體 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。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。
7. 以地電阻影像探測技術推估地下水流速流向之實場應用的初步規劃，可依循下列步驟進行：
 - (1) 選定欲量測地下水流速流向區域內一口監測井，作為示蹤劑的導入點，量測其地下水位深度及水頭高程。若附近有其它口監測井，可搭配量測地下水位水頭高程，繪製地下水水位水頭高程分布，可初步判定地下水流場大致方向，作為地電阻測線設置之參考。
 - (2) 規劃測線數量、電極數目，以及決定電極設置的間距。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 倍數，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。
 - (3) 該口監測井周圍建議應有足夠的空間設置電極測線，其周圍至少需有 $(\text{電極數目}-1) \times \text{電極間距}$ 的長度，以及 $(\text{測線數目}-1) \times \text{測線間距}$ 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 $\times$ 8 m 的面積空間設置電極測線。
 - (4) 電極測線設置方式為於示蹤劑導入點正下游設置中心測線，每 2-5 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 2 公尺線各設置 16 個電極，電極間距為 5 公尺。
 - (5) 測線設置完成後，就要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。示蹤劑的成分為濃度為 10 g/L NaCl 水溶液。以示蹤劑試驗，模擬點源 (point source) 在地下水中傳輸。點源的導入方式則為脈衝式 (instantaneous) 方式，以 0.5-1.0 L/min 的流量注入共 10 公升。

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.