

行政院環境保護署

「104 年土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

應用自然電位法檢測迷失電流之研究

期末報告(定稿本)

主辦單位：  行政院環境保護署

計畫執行單位： 國立中央大學／地球科學系所

計畫主持人： 陳建志 教授

計畫執行期間： 103 年 12 月 1 日起至

104 年 11 月 30 日

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 ☐期中報告

☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	專案類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫主持人	陳建志	研究類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥
計畫名稱	應用自然電位法檢測迷失電流之研究		
專案連絡人	黃雪珍	連絡專線	(03)4227151#65609
政策性審查意見		計畫單位回覆	
1. 儲槽設置規範要避免迷失電流，本案可協助偵測。		1. 感謝長官對本案之肯定。	
2. 人事費加總金額計算錯誤。		2. 感謝提醒，計畫預算已重新編列並更正加總計算錯誤。	
技術性審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 本研究擬探討應用自然電位法檢測迷失電流之可行性，並將其應用於評估迷失電流造成地下管線腐蝕作用。		1. (描述式意見，故略)	
2. 迷失電流和管線腐蝕之相關性以及其重要性未見說明，無法說服檢測迷失電流和防止土壤以及地下水污染之相關性。		2. 電力設備之變電箱與大樓的避雷針等設施均會將電流導入地下，使之於土壤中流竄，稱為迷失電流。當電流導入地層後，地層中的金屬管線將可能成為電流傳導的通路，此時，電流流入的地方(漏源)獲得電子，為陰極，不會受到影響；流出的地方(管線)失去電子，為陽極，將會被腐蝕。台灣地區許多產業均有埋設地下輸運材料的管線，例如加油站、石化工業，當管線產生腐蝕導致破損而滲漏，管線中輸運的有機溶劑(NAPLs)可能導致土壤及地下水污染，低燃點的氣體則可能發生氣爆(高雄氣爆事件)，對公共安全造成莫大的危害。	
3. 在研究步驟之內容嫌簡略，只寫出標題而未撰寫如何執行之內容，顯見尚未有具體之規劃。		3. 具體實驗規劃與研究步驟已重新描述補充於計畫書修正版中。	
委員二			
1. 本計畫於實驗室砂箱槽體模擬地層中連續存在或間歇性發生的迷失電流問題，藉由高頻率的量測方式，記錄模型中自然電位場的變化，並以互相關係函數分析自然電位場源的位置，與真實設計之電流洩漏源比較，評估此法應用在真實場址中偵檢迷失電流的可行性。		1. (描述式意見，故略)	
2. 本計畫成果應可增進對於迷失電流處理的能力，進而解決地下金屬管線腐蝕問題。		2. 感謝委員對本案所提概念之肯定。	
		3. 關於模場計畫主軸之關聯性，本案採用高頻率電位觀測偵檢地層中的迷失電流，探討迷失電流源之位置，以評估地下管線的腐蝕事件發生位置及頻率，助益防蝕安全之維護，可在地下環境因管線鏽蝕而滲漏導致大規模土壤及地下水污染前，提供相關科學數據參考，實屬預防性技術之開發。	

3. 本計畫研究方法及步驟具可行性，惟計畫屬研究型計畫，計畫之目的或預期成果似和模場計畫主軸有差異。	
委員三	
1. 本案將藉高頻率量測地層中迷失電流，探討漏電源之位置，以應用於地下管線迷失電流，助益防蝕安全維護，係屬預防型技術。 2. 研究擬以實驗室砂箱進行，結合自然電位與電阻測合併互相關場函數，以時間序列影像化方式探尋漏電源位置，係基礎可行性探討，具創意。 3. 計畫書撰寫簡略，設備租用期程及人力規劃可減少。	1. (描述式意見，故略) 2. 感謝對本案創意之肯定。 3. 具體實驗規劃與研究步驟已重新描述於計畫書修正版中，計畫之儀器、人力配置及相關經費亦已依建議縮減。
委員四	
此計畫內容太簡單，且與土壤及地下水污染領域差異太大，建議不補助。	具體實驗規劃與研究步驟已重新描述補充於計畫書修正版中，所提之儀器租用、人力配置及相關經費亦已縮減。
委員五	
1. 研究成果對未來實場應用未具體說明，是與既有的系統配合（例如：陰極保護成效評估? ...等）或是另外再建立一種不同的評估流程? 計有的監測方式的缺失為何? 本計畫可克服該類缺失? 是否需有可靠的 SOP? 2. 建議計畫主持人宜多評估本計畫與既有調查評估間的關係與差異? 3. 預期成果評估與應用建議多加說明，研究成果的驗證也建議說明? 4. 本技術適用條件與限制條件建議討論，本計畫成果的驗證方式也建議說明。	1. 實場應用以加油站為例，加油站內必定有儲油管線，只要將電位極圍住儲油槽的位置，即可監測自然電位的變化，之後對收集的資料進行互相關分析，就能夠搜尋陽極區，也就是遭受迷失電流腐蝕的位置。須與既有系統配合，既有系統著重於管線埋設前的陽極處理，例如：陰極保護法、外加電流法或犧牲陽極法等，本研究計畫則是監測後續的管線狀態，甚至能夠在陽極腐蝕區發生破損之前檢測。既有系統的 SOP：1.埋設前-陽極處理 2.埋設後之內部-針孔攝影(時程:每日觀察)3.埋設後之外部-緊密電位法(時程:5~10 年作一次測量)，緊密電位法有一限制條件，其只能用在陽極處理為外加電流法的案例。本研究計畫即是為改善既有 SOP 的第 3 點。 2. 感謝委員提醒。本研究計畫之發想，屬於地下各類管線埋設的後續外部處理方法，而既有之迷失電流調查多半著重於管線埋設時的陽極處理與電阻監測手段。因此，本研究計畫冀能補充既有防護手段的處置流程，以提供更完善的防蝕安全維護系統。 3. 本研究計畫的執行步驟中，已補充進行迷失電流之電腦數值模擬，以與原提之砂箱槽體實驗實

	際量測結果相互驗證。在應用上，本案預期之最終成果冀望能在管線破損前，提供因迷失電流所致之腐蝕區的發生位置與頻率，以便管線維護工程可以更準確地定位腐蝕區所在，未來甚至發展出物理攔阻迷失電流手段，以防管線遭持續腐蝕。 4. 如前所述，針對研究構想之驗證方式，本計畫將補充數值模擬，以與槽體實驗相互佐證。所提之概念，一旦經本研究型計畫證實可行，未來在加油站或相關汙染場址皆可嘗試建置所提之監測系統，採行一般之地球物理井下監測技術，一經相關案例積累經驗後，將可更進一步瞭解本監測系統在應用上之侷限性。現階段而言，是類位場技術之理論實已普遍應用於腦醫學與地球物理探勘領域。
綜合性審查意見	計畫單位回覆
1. 原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。 2. 審查結果確認會議意見如下： 說明：計畫書內容不夠詳盡請補充說明，且應著重將自然電位法用於加油站或汙染場址之檢測，請補充說明具體執行方法。	1. 感謝對本案之肯定。 2. 具體實驗規劃與研究步驟已重新描述補充於計畫書修正版中。本案所提之概念，一旦經本研究型計畫證實可行，未來在加油站或相關汙染場址皆可建置所提之監測系統，並於實場採一般地球物理井下監測技術施行之。

期中報告初審意見對照表

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：陳建志 NO：31	
計畫名稱	應用自然電位法檢測迷失電流之研究		
委員一審查意見		計畫單位回覆	
1、已達預定之工作進度與目標。		謝謝。	
2、報告中稱”自然電位法具有觀測環境中微小事件發生的能力，唯自然電位的資料處理較為繁瑣且複雜”，請能補充說明資料處理之程序及要領。另又稱”自然電位法必須收集完整且高精度的現場資料，因此在應用自然電位法在資料收集時必須更為謹慎、精確”，請能補充說明如何謹慎且精確。		感謝委員的指教。 自然電位的訊號來自於材料的本身的物理性質與外在環境之電場變化。針對偶發事件之研究，必須先建立出長期且穩定之背景值信號，方能進行資料比對分析，為求獲得精確之背景值信號，自然電位收集資料之方式必須是長時間近乎即時監測的觀念，如本文中的 p2-13 頁所述，並無法以單次單一時段的資料進行分析，且由於有些環境中的自然電位訊號相當微弱，因此在設備的設計上也需考量靈敏度，才能有效收集到真實的環境自場信號。本研究收集資料的方式即是以長時間的方式進行觀測，再以統計分析的方式定義出背景信號與偶發事件產生的「雜訊」，而後再針對這些「雜訊」進行時頻分析，找出定頻之信號並追溯源頭，以達到本研究之主要目的。未來在所有實驗完成後，將在期末報告中說明資料處理之程序與步驟。 (已於期末報告 3.7，3.8 節說明及第四章、第五章歸納)	
委員二審查意見		計畫單位回覆	
1、本研究以數值模擬與砂箱實驗設計出一套以自然電位法偵測地下迷失電流源的分析方法。主要目的在說明自然電位法與常見之地電阻影像法在應用上與成果輸出上的差異，並闡述自然電位法應用在環境監測上之可行性及優勢。		謝謝。	

2、主要成果符合計畫書之內容，目前進度並無落後情形。	謝謝。
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。	謝謝。
4、建議後續工作可補充如何進行實場應用。	謝謝委員的指教。 本計畫礙於有限的經費，無法於現場進行實驗，但將依據實驗與模擬成果說明於現場工作時的規劃與設計方式。已於後續工作增加第五點。 (已於期末報告第五章說明舉例)
5、建議針對操作成本進行評估，說明使用之限制，並和目前常用之方法進行比較。	謝謝委員的指教。 本研究已與目前常見之地電阻像法成果進行比較，如本文中第三章第一階段砂箱實驗p3-1~13。後續將依據實驗與模擬成果探討可能之限制。已於後續工作增加第五點。惟成本部分在真實場址估算時，仍需考量場址大小、深度、時間、設備維護等因子，故以現階段成果較難以定出制式化之成本規則，同時由於本計畫仍屬於實驗室之砂箱實驗與數值模擬，並無足夠之經費支持真實場址之試驗，故難以探討真實應用上各類型場址之成本支出。 (已於期末報告第五章說明舉例)
委員四審查意見	計畫單位回覆
1、已確實依計畫項目執行。	謝謝。
2、已完成比較地電阻影像法與自然電位法之數據與分析方法上之不同。亦說明自然電位法在污染物監測上之可行性與優勢。	謝謝。
3、已提出後續工作重點與說明。	謝謝。
委員五審查意見	計畫單位回覆
1、執行現況、流程及方法的說明具體詳盡。	謝謝。
2、計畫後續執行工作項目及內容已於第5章簡要說明。	謝謝。
3、計畫執行進度與預定進度相符，已有初步的成果。	謝謝。
4、未來於實際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。	謝謝委員的指教。 本計畫礙於有限的經費，無法於現場進行實驗，

	故無法探討現場環境實際發生之問題與現象。但本研究工續工作將依據實驗與模擬成果比對初始假設，評估其成效。現場工作之建議規劃與設計方式，已於後續工作增加第五點。
5、如何驗證本計畫的試驗結果？可信度？建議說明。	謝謝委員的指教。 未來第二階段之砂箱實驗將依據實驗成果與初始假設及模擬進行比對，評估整體成效。 (已於期末報告第五章說明舉例)
6、環境條件的影響與適用條件…等等建議討論。	謝謝委員的指教。 後續將依據實驗與模擬成果探討可能之限制。已於後續工作增加第五點。
7、“…詳細審視比對每一個異常訊號…”，如何比對？意義又為何？正是本計畫的目的，目前並未看到此成果。	自然電位的訊號來自於材料的本身的物理性質與外在環境之電場變化。針對偶發事件之研究，必須先建立出長期且穩定之背景值信號，方能進行資料比對分析，為求獲得精確之背景值信號，自然電位收集資料之方式必須是長時間近乎即時監測的觀念，如本文中的 p2-13 頁所述，並無法以單次單一時段的資料進行分析，且由於有些環境中的自然電位訊號相當微弱，因此在設備的設計上也需考量靈敏度，才能有效收集到真實的環境自場信號。本研究收集資料的方式即是以長時間的方式進行觀測，再以統計分析的方式定義出背景信號與偶發事件產生的「雜訊」，而後再針對這些「雜訊」進行時頻分析，找出定頻之信號並追溯源頭，以達到本研究之主要目的。未來在第二階段砂箱實驗完成後，亦將於期末報告敘述自然電位法施測之流程。 (已於期末報告 3.7，3.8 節說明及第四章、第五章歸納)
本署審查意見	計畫單位回覆
無意見。	謝謝。

期末報告初審意見對照表

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：陳建志 NO：31	
計畫名稱	應用自然電位法檢測迷失電流之研究		
委員一審查意見		計畫單位回覆	
5、已完成預定之工作項目。		謝謝。	
2、期末報告中請再補充說明本計畫研發之技術於實場應用之初步規劃(目前只在第五章結論與建議中第七點簡略說明)。		感謝委員建議，已新增第五章實場應用與未來展望說明之。	
委員二審查意見		計畫單位回覆	
1、本研究以自然電位法為理論基礎，所提出的創見將使得地球物理方法中的電測技術除了能提供地層環境的電阻率分布之外，還能同收集自然電位資訊，除了對於地下水污染分布調查、污染擴散與整治效益等收集更多的評估資訊，同時能提供造成地下管線腐蝕的迷失電流源可能存在的範圍。		謝謝。	
6、整體研究成果符合預期，主要成果符合計畫書之內容，進度並無落後情形。		謝謝。	
7、本報告文獻收集及相關資料收集完整，成果具實場之應用價值。		謝謝。	
8、計畫執行良好，文獻及方法說明具體詳盡。		謝謝。	
委員三審查意見		計畫單位回覆	
未參與審查作業			
委員四審查意見		計畫單位回覆	
6、期末報告格式均依規定撰寫，符合規定。		謝謝。	
7、研究項目及進度符合計畫內容，已達到計畫目標。		謝謝。	
3、初步成果已達預期。成果說明地電阻影像法較適用於單次的污染調查與 time-lapse 的研究分析，自然電位法則適用於長時間的「觀察監測」。地電阻影像法應用在環境調查上，電性差異約需 20 % 以上較能反應出現象的改變；自然電位的原		謝謝。	

始數據則具有偵檢環境中微小事件發生的能力。	
4、地電阻影像法是目前最常應用於協助土壤及地下水污染問題的地球物理探勘技術，而自然電位法量測之設備與地電阻影像法相似，因此具有同時收集電阻率及自然電位兩種資料之可行性。	謝謝。
5、未來可依初步成果應用於污染實場之操作試驗之可行性。	謝謝。
委員五審查意見	計畫單位回覆
2、本研究的主要成果適應用自然電位的”長期觀測”與”觀察監測”，建議說明本工法所需執行的期距(觀察時間)與環境限制條件(是否有關鍵的干擾因子？如何排除？或是必須具備的環境條...等等)	感謝委員建議，已新增第五章實場應用與未來展望說明之。
2、資料逆推演算：有效範圍為何？建議說明。	逆推範圍常以電極配置作為邊界條件，本研究中電極配置都配置在砂箱兩側或土層表面，且砂箱邊界為等電位面，為故靈敏值分布與逆推範圍皆以砂箱中填入土壤材料的區域計算討論之。實場量測時，邊界條件亦可擴大演算範圍，但電極以外之靈敏值將驟減至零，因此未來若於實場調查，可經由靈敏值分析後以零靈敏值等值線作為逆推時的邊界條件。已於 3.7 節補充說明之。
8、期末報告中：“...產生高電流密度...”的環境條件建議說明。	電流具有流向相對高導性材料的特性，因此「相對高電流密度區」係指環境中電流較易流通(入)的區域，已於 3.8 節說明之。
9、計畫執行進度與預定進度相符。	謝謝。
10、進度並無落後。	謝謝。
6、執行現況、研究流程及方法說明具體。	謝謝。
7、本研究屬於初期試驗研究階段，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，建議說明討論該如何應用與應用所需的配合條件...等等，以及有何需進一步持續探討的方向...。	感謝委員建議，已新增第五章實場應用與未來展望說明之。
本署審查意見	計畫單位回覆

無意見。

謝謝。

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥					
申請機構系所		國立中央大學 地球科學系					
機構地址		(32001)桃園縣 中壢市 中大路 300 號					
計畫主持人		陳建志		職等／職稱		教授	
協同主持人		王子賓		職等／職稱		博士候選人	
專案名稱	中文	應用自然電位法檢測迷失電流之研究					
	英文	Detecting stray current by using SP method					
	關鍵字	迷失電流，自然電位，腐蝕，地電阻					
執行期程		自民國 103 年 12 月 1 日起 至民國 104 年 11 月 30 日止					
計畫主持人		姓名：陳建志		Email：chenc@earth.ncu.edu.tw		專線：03-4227151#65653 手機：0931852389	
專任助理		姓名：黃雪珍		Email：shiuejen0611@gmail.com		專線：03-4227151#65609 手機：0975213366	
經費分析表		專案預估經費		金額		編列說明	
		1.	人事費用	321,575		(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	200,000		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	90,000		(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	8,000		(差旅與租賃費用)	
		5.	雜項費用	32,500		(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費	47,925		(1~5 項相加之 10%為限)	
		專案計畫申請總金額		700,000			

專案主持人(簽名及蓋章)：_____ 日期：_____

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

填表日期：104 年 10 月 12 日

一、專案基本資料

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥		
申請機構系所	國立中央大學地球科學系	計畫主持人	陳建志
專案名稱	應用自然電位法檢測迷失電流之研究		
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					擬將本研究於國際研討會發表， 故不再於國內重複發表。
		(2)研討會論文	1				
	2.國外投稿(篇數)	(1)期刊論文	1		1	100%	已投稿並刊登國際 SCI 期刊 Journal of Applied Geophysics (2015/10) 已於日本 2015 JPGU 國際研討 會發表，(2015/5)
		(2)研討會論文		1		100%	
	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)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							

(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)	已核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申請 中	發明						
			新型/設計						
			合計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金 (仟元)							
	4.技術移轉 (應用技術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)							
		(2)品種/系(件數)							
6.其他指標 (請自行命名)		(請自填)							

(三) 政策面

項目			目標達成程度	申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數						
		收入(仟元)						
	2.諮詢服務	次數						
		收入(仟元)						
B 支援 合作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策						
		(2)法規						
		(3)規範						
		(4)標準						
4.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。(簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限)

國內對於地下管線的維護多以陰極防蝕的方式被動處置之，較無主動偵檢迷失電流源頭的作為。藉由本研究計畫之執行，期可發展出本土化之地下迷失電流偵檢技術，如落實於實際場址，或有機會檢測出迷失電流來源，以攔阻來源，延長地下管線使用壽命，降低土壤及地下水污染與公安事件之發生機率。對於地下長程運輸管線、石化工業、加油站設備的安全性維護作業，將有相當的助益。

本研究以自然電位法為理論基礎，此技術之量測設備與目前地球物理探勘技術中最常應用於土壤及地下水污染問題調查之技術為地電阻影像法幾乎相同，依此，本研究提出的創見將使得地球物理方法中的電測技術除了能提供地層環境的電阻率分布之外，還能同收集自然電位資訊，以應用在環境「長期監測」的觀點而言，除了對於地下水污染分布調查、污染擴散與整治效益等收集更多的評估資訊，同時能提供造成地下管線腐蝕的迷失電流源可能存在的範圍，此將有助於長期地下水管理之成效落實，亦避免管線腐蝕洩漏造成的公安或環境污染問題。

研究成果摘要

中文部分：

本研究以數值模擬與砂箱實驗設計出一套以自然電位法偵測地下迷失電流源的分析方法，闡述自然電位法應用在環境監測之可行性及優勢。第一階段的污染擴散砂箱實驗中，同時以地電阻影像法及自然電位法進行量測，成果說明地電阻影像法較適用於單次的調查與 time-lapse 的研究分析；自然電位法則適用於長時間的「觀察監測」。地電阻影像法應用在環境調查上，電性差異約需 20 % 以上較能反應出現象的改變；自然電位的原始數據則具有偵檢環境中微小事件發生的能力。第二階段以自然電位法於人造迷失電流之砂箱進行實驗，資料逆推演算後的成果可使用電位分布的具體影像及電流密度量指出迷失電流源的位置。地電阻影像法是目前最常應用於協助土壤及地下水污染問題的地球物理探勘技術，而自然電位法量測之設備與地電阻影像法相似，因此具有同時收集電阻率及自然電位兩種資料之可行性，本研究結果擴大了地球物理探勘技術中電測法在土壤及地下水污染之應用層面，除了研判污染分布之外，還可偵檢可能潛在的迷失電流問題，亦有助於長期地下水管理之成效落實。

英文部分：

This study proposes an innovative idea by applying the self-potential (SP) method to detect stray currents throughout the implement of numerical simulations and sandbox experiments. This research also expounds the feasibility and advantage of SP for monitoring in the field. We have conducted the sandbox design, literature and theory review, preliminary simulations on electrical resistivity imaging / tomography (ERI / ERT), together with laboratory sandbox experiments for various conditions of contaminants. The results of experiments illustrated, while the ERI is good for site investigation and time-lapse comparison, the SP method is preferred in the long-term monitoring. Importantly, the criterion for the ERI application could be the contrast in the resistivity larger than 20%. On the other hand, the SP method is capable of detecting a small environmental event in magnitude. We have applied the SP method for synthetic stray currents in sandbox experiments. The results of inversion showed the position of stray currents can be imaged by the electrical potential distribution and current density. ERI is the most popular approach to survey the issue of soil and ground-water contamination. The instrument of SP method is similar to ERI, therefore it also has feasibility to measure the signals of ERI and SP at the same time. The results of this study extend applied range of the electrical methods in geophysical exploration for the problem of soil and ground water pollution. It not only determines the pollution distribution but also detects the potential problem of stray currents benefiting the management of potential leakage of petroleum and natural gas.

應用自然電位法檢測迷失電流之研究 期末報告

目 錄

頁次

期中報告審查意見對照表

專案基本資料表

研究成果績效自評表

研究成果中英文摘要

第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 研究目的	1-1
1.3 研究內容及流程	1-2
1.4 執行成果摘要	1-4
第二章 研究方法	2-1
2.1 地電阻影像法原理	2-1
2.2 地電阻影像法文獻探討	2-12
2.3 自然電位法原理	2-13
2.4 自然電位法資料處理方法與原理	2-25
2.5 自然電位法文獻探討	2-27
2.6 地電阻影像法與自然電位法訊號分析的差異	2-28
第三章 研究成果	3-1
3.1 實驗規劃	3-1
3.2 第一階段砂箱實驗設計	3-3
3.3 地電阻影像法數值模擬成果	3-4
3.4 第一階段地電阻影像法砂箱實驗成果	3-7
3.5 第一階段自然電位法砂箱實驗成果	3-12
3.6 第二階段自然電位法砂箱實驗設計	3-17
3.7 自然電位法數值模擬	3-27
3.8 第二階段自然電位法砂箱實驗成果	3-33

第四章 綜合討論	4-1
第五章 實場應用與未來展望	5-1
第六章 結論與建議	6-1
參考文獻	

圖 目 錄

頁次

圖 1.3-1	研究流程圖	1-3
圖 2.1-1	地電阻影像剖面法概念圖	2-2
圖 2.1-2	電阻率量測理論模型	2-5
圖 2.1-3	直流電阻法初始假設模型	2-6
圖 2.1-4	地電阻法順推範例	2-8
圖 2.1-5	地電阻法逆推範例	2-8
圖 2.1-6	跨孔式地電阻影像法電極配置邏輯概念	2-11
圖 2.1-7	跨孔式地電阻影像法不佳電極與適當電極排列法成果比較	2-12
圖 2.3-1	礦物電位概念圖	2-15
圖 2.3-2	電性雙層構造圖	2-18
圖 2.3-3	散射波場示意圖	2-21
圖 2.3-4	互相關概念示意圖	2-22
圖 2.3-5	邊界噪聲處理實驗裝置圖	2-23
圖 2.3-6	邊界噪聲處理實驗結果	2-24
圖 3.2-1	第一階段實驗砂箱	3-3
圖 3.3-1	電極排列數值模型	3-5
圖 3.3-2	不同電阻率侵入地質模型	3-6
圖 3.3-3	侵入的污染物質電阻率與地質背景相近的模型	3-6
圖 3.4-1	第一階段地電阻影像法砂箱實驗照片	3-8
圖 3.4-2	實驗一地電阻影像法砂箱實驗成果	3-9
圖 3.4-3	實驗二地電阻影像法砂箱實驗成果	3-10
圖 3.4-4	地電阻影像法 time-lapse 電阻率差異率分布圖	3-10
圖 3.5-1	第一階段自然電位法砂箱實驗照片	3-13
圖 3.5-2	自然電位量測電極設定說明	3-14
圖 3.5-3	自然電位實驗量測原始數據成果	3-15
圖 3.5-4	自然電位第一層梯度法分析成果	3-16
圖 3.5-5	漏水事件自然電位觀測之成果	3-16
圖 3.6-1	第二階段實驗砂箱	3-17
圖 3.6-2	DAQ 記錄器	3-18
圖 3.6-3	跨孔等間距電極排列法	3-19
圖 3.6-4	共負電極排列法	3-20
圖 3.6-5	實驗四設計示意圖	3-21
圖 3.6-6	實驗五設計示意圖	3-22
圖 3.6-7	實驗六設計示意圖	3-23

圖 3.6-8	實驗七設計示意圖	3-24
圖 3.6-9	實驗八設計示意圖	3-25
圖 3.6-10	實驗九設計示意圖	3-26
圖 3.7-1	跨孔等間距排列法靈敏值分布	3-27
圖 3.7-2	共負排列法靈敏值分布	3-28
圖 3.7-3	跨孔等間距排列法背景值量測數據	3-29
圖 3.7-4	共負排列法背景值量測數據	3-30
圖 3.7-5	跨孔等間距排列法背景值量測數據逆推成果	3-31
圖 3.7-6	共負排列法背景值量測數據逆推成果	3-32
圖 3.8-1	實驗四原始量測數據	3-34
圖 3.8-2	實驗四逆推成果圖	3-35
圖 3.8-3	實驗五原始量測數據	3-36
圖 3.8-4	實驗五逆推成果圖	3-37
圖 3.8-5	實驗六原始量測數據	3-38
圖 3.8-6	實驗六逆推成果圖	3-39
圖 3.8-7	實驗七原始量測數據	3-40
圖 3.8-8	實驗七逆推成果圖	3-41
圖 3.8-9	實驗八原始量測數據	3-42
圖 3.8-10	實驗八逆推成果圖	3-43
圖 3.8-11	實驗九原始量測數據	3-44
圖 3.8-12	實驗九逆推成果圖	3-45

表 目 錄

頁次

表 1.5-1	預定進度及查核重點(甘特圖).....	1-5
表 1.5-2	執行成果摘要	1-6
表 2.1-1	地質材料電阻率範圍	2-9
表 3.1-1	砂箱實驗規劃分類.....	3-2

第一章 前言

章節摘要

本章說明緣起、目的、研究流程及執行成果摘要。

1.1 計畫緣起

2014 年 7 月 31 日，台灣高雄市發生一起嚴重的地下管線氣爆事件，除了使三多一、二路、凱旋三路、一心一路...等多條市區重要道路嚴重損壞之外，更造成 32 人死亡，321 人受傷。歸咎原因為埋設於地下箱涵內的丙烯運輸管線因自外向內的腐蝕使得管壁逐漸變薄，終於無法負荷管內的壓力而破損，引起本次公安意外。國內在管線埋設工程時，經常出現未按設計圖施工的情況，施工完成時亦未對於每一條掩埋管線精確定位，故台灣的地下管線始終缺乏詳實的建檔資料。而在地下管線維護上雖對於重要的運輸管線定期壓力檢測作業與陰極防蝕等設備，但埋於地下的管線畢竟不若地表上的明管與共同管溝，可以針對每一條管線定期進行目測等直接的檢視作業，所以地下管線經常是出現損毀之後才進行汰換或修繕措施，此時，往往對於整個環境已造成或大或小的傷害。

地下管線的損害問題同時也是土壤及地下水污染的誘發原因。國內多起工業區內、外的土壤及地下水污染事件，經常是地下的原料、污水輸送管線滲漏所造成。造成管線破壞的因素可能來自地震、大型工程機具重壓或是施工不慎挖破，這類的情況管線損壞情況與位置非常明顯，在第一時間能立即處理；另一種損壞情況則是管線受外在環境的腐蝕或內部材料侵蝕所造成局部區域的滲漏，當管線發生微量滲漏時，在壓力的檢測上是較難以偵測判定的，直到滲漏問題逐漸嚴重，可在壓力計或進出原料總量上發現差異時才能察覺，此時管線外洩問題可能已發生一段時間。因此，對於地下管線定期檢測或長期控管監測，特別是能明確定出可能之毀損位置或誘發源的方法是值得深究的。

1.2 研究目的

迷失電流，又稱雜散電流(stray currents)，是造成地下管線自外部腐蝕的原因之一。迷失電流是指當電流被導入地層後，若地下環境、人工構造物存有適當的

傳導通路時，電流會在材料間形成迴路，像是金屬管線，就是地下環境中易形成電流通路的材料，在電流離開金屬管的位置即是電化學中的「陽極」，也是發生管線腐蝕的位置。迷失電流發生的原因與電力設備的漏電或放電有關，埋設於地面下的電力設施，如電管、捷運、鐵道、避雷針...等，持續、間歇的漏電問題，都可能造成地下管線產生腐蝕作用。針對迷失電流的處理機制，國內最常使用的是陰極防蝕，使被保護的管線陰極化，同時定期檢測是否在被保護的管線中出現迷失電流的訊號，一旦出現可疑訊號，則進行開挖檢視作業。此種作業方式存有兩個疑慮，一是陰極防蝕的外加電流可能是其他未受保護管線的迷失電流來源；二是檢測對象為管線本身，並非主動偵檢迷失電流的源頭，迷失電流的源頭未被截斷，管線修繕後腐蝕問題仍可能持續發生，故欲解決迷失電流所導致管線腐蝕的問題，必須有效找出漏電源或漏電問題並加以改善，方能徹底解決迷失電流可能造成的損傷與災害。

本研究目的係透過數值模擬與砂箱實驗，評估自然電位方法(self potential method or spontaneous polarization, SP)探測迷失電流源之可行性及應用性。同時以地球物理技術(geophysical technology)中電探法(electric method)為基礎理論，設計出一套可應用在地下環境之主、被動交互並行之「即時監測」概念模型，除了迷失電流的問題之外，亦可應用在土壤及地下水污染問題，此概念之構思乃鑑於國內近年來經常發生之環境災害與污染問題，傳統之調查或定期探測方式往往只能提供當下之環境現況，較難以在事件發生前提出預警或提早阻斷發生機制，以電探法進行長期之即時監測，並配合妥善之資料處理及信號分析，期能在異常訊號或事件前兆出現時提出警訊，即時阻斷發生源，降低災害發生之機率。對於石化工業、運作中工廠、加油站等經常使用地下管線運送原料或設有地下儲槽的產業，在設備安全性維護作業與污染洩漏問題防制上，應有相當之助益。除此之外，國內對於地下水污染問題未來將走向長期管理之觀念，此模型概念或可有效延伸應用在大型污染場址、工業園區周界，避免污染擴散問題發生。

本研究同時考量了應用在實場之可行性，在真實場址的調查上，總是期望能在有限的空間、經費、設備與時間上獲取最多的資料與最充分的成果，傳統的自然電位法常以定期且單一設備方法進行量測，如此無形中增加了經費與時間的成本支出，但事實上，自然電位的量測設備與目前最常應用在土壤及地下水污染調查的地球物理探勘技術中的地電阻影像法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)其實非常相似，本研究中所設計之量測方式同時具有量測地電阻影像法與自然電位法的能力，因此本研究在實場應用上係可與地電阻影像法

調查同時進行設計與配置，若現存的場址中已具備固定之地電阻影像法量／監測設備，本研究可搭載在現有設備上進行量測，無需重新建立現場之裝置，將可有效節省經費；自然電位在資料處理與研判起初只以量測「當時」的物性反應原始數據呈現，較少以長時間觀測結果及複雜之數學逆推演算綜合評析，如此結果易存有現場環境干擾之不確定因素，本研究因此在自然電位的量測除了以長時間的記錄釐清信號與雜訊之外，更對於可信的資料進行逆推演算，以影像的方式具體呈現，更有利於成果之解釋與判讀。假設應用在具管線洩漏問題潛勢的場址，如加油站、大型工業區、加工區，或可對於污染分布進行調查，也同時監測可能之流向，及偵檢調查範圍內存有之疑似迷失電流源的位置。

1.3 研究內容及流程

地電阻影像法在國內的環境污染調查上近年來有許多成功的案例。現今實務應用上各界對於地電阻影像法較為熟稔，而對於自然電位法則相對較為陌生，故本研究自主增加了跨孔式地電阻影像法(Cross-Hole Electrical Resistivity Tomography, CHERT)進行量測方式、成像、特性與解析方式的比對研究，先以數值模擬及砂箱實驗說明地電阻影像法與自然電位法在應用與成果輸出的差異、適用性及限制，進而再以數值模擬及砂箱試驗探討自然電位應用在探測迷失電流源的可行性。本研究之研究流程如圖 1.3-1 所示。

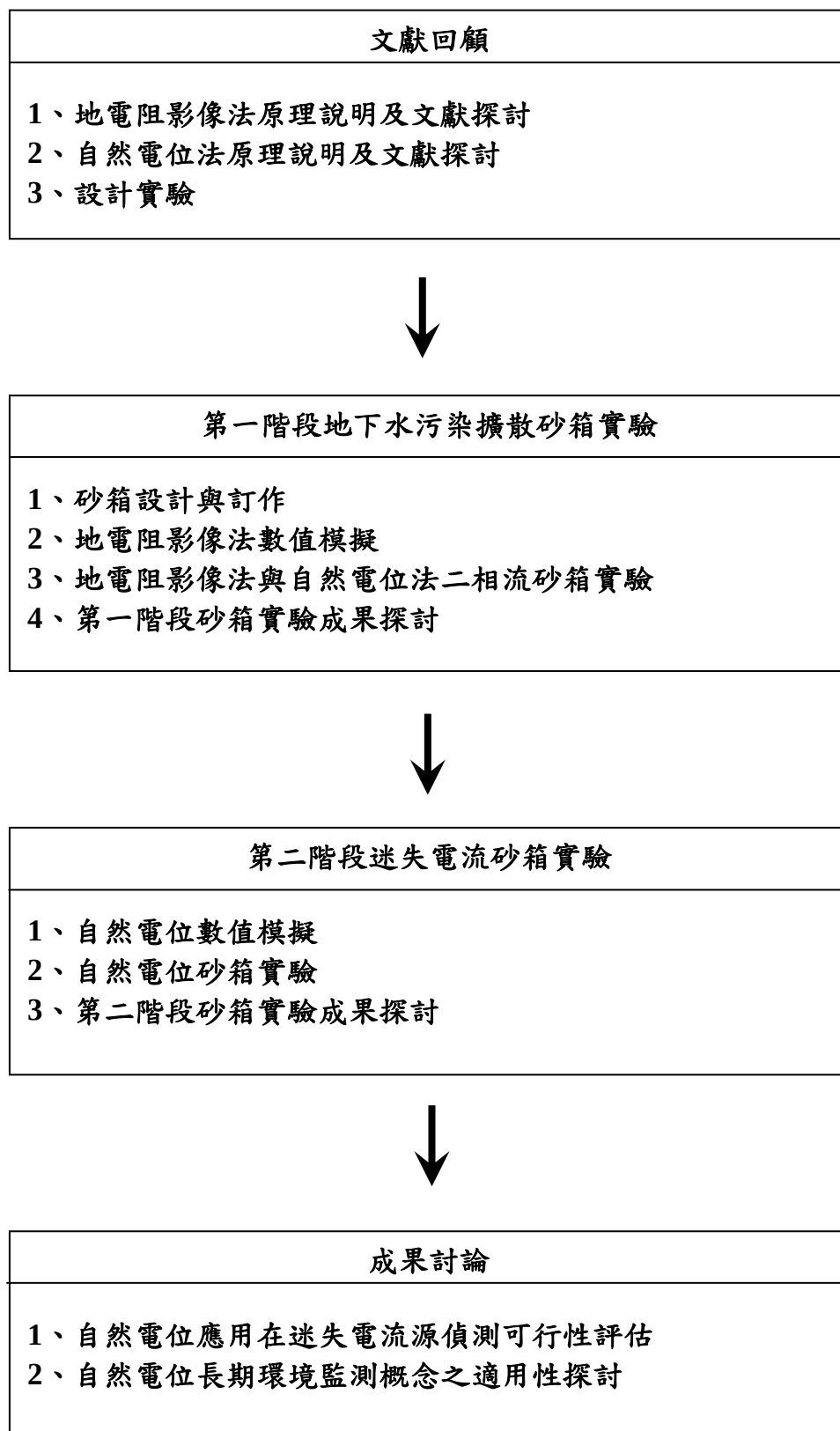
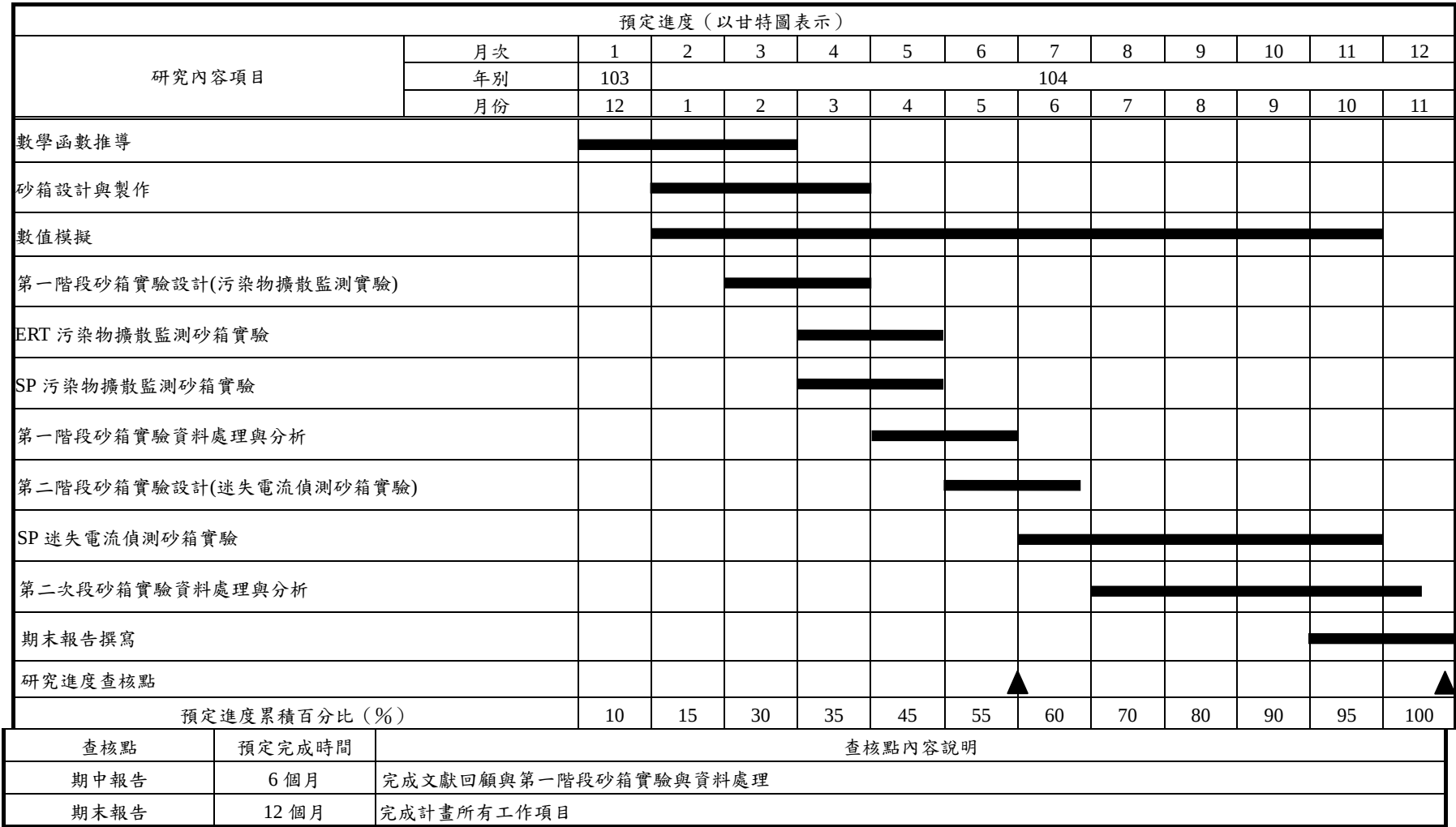


圖 1.3-1 研究流程圖

1.4 執行成果摘要

本研究在計畫提送之初係以自然電位方法之應用研究為主軸，在研究計畫正式開始進行時，收集了電探法相關在台灣環境上應用，發現國內對於自然電位應用性與瞭解程度並不充分，事實上，近年 SP 的理論知識國際期刊發表上已相當成熟，應用面也相當廣泛，為使本研究之內容成果更且實務性及應用價值，且能使讀者瞭解自然電位與其他電探方法的差異，本研究自主增加與地電阻影像法之比較研究，深化了研究工作的項目。本研究完成地電阻影像法與自然電位法文獻回顧與研析，並設計完成兩階段砂箱實驗與數值模擬，其中，第一階段實驗目的在於比較地電阻影像法與自然電位法在資料收集、解析能力與成果呈現上的差異；第二階段實驗則以人造電流源的方式，評析自然電位法偵檢迷失電流的能力與可行性。本研究成果豐碩，已於日本 2015 JPGU(Japan Geoscience Union)國際研討會發表(2015 年 5 月)，同時相關內容也已發表並刊登在國際 SCI 知名期刊，Journal of Applied Geophysics(2015 年 10 月)。整體進度已接近 100%，研究甘特圖如表 1.5-1，詳細之執行成果摘要說明如表 1.5-2。

表 1.5-1 預定進度及查核重點(甘特圖)



註：“ ” 預定執行進度；“ ” 實際執行進度。

表 1.5-2 執行成果摘要

研究內容項目	執行成果摘要	報告章節
一、數學函數推導	1. 地電阻影像法與地然電位法原理說明與文獻回顧	第二章
二、砂箱設計與製作	1. 依據實驗設計之組合式砂箱多組	第三章
三、數值模擬	1. 期中前完成 ERT 數值模擬，探討不同電極排列設計之成像解析能力，依據實驗條件設計出最佳化電極變換規則。	第三章
四、第一階段砂箱實驗設計(污染物二相流擴散監測實驗)	1. 以不同溶度 cis-DCE 注入飽和含水之砂箱，依其擴散行為，測試 ERT 與 SP 偵檢能力。	第三章
五、第一階段砂箱實驗	1. time-lapse ERT 探測污染擴散與流布實驗 2. SP 偵檢污染污染侵入、前緣與滲漏行為實驗	第三章 第四章
六、第二階段砂箱實驗	1. 數值模擬評析 SP 法逆推成果靈敏值分布。 2. SP 偵檢人造電流源實驗	第三章 第四章
七、討論與結論	1. 綜合討 SP 法之成效與應用性	第四章 第五章
第一階段實驗成果於 2015 JPGU 國際研討會中進行發表(2015 年 5 月)。 Time-Lapse 應用概念發表並刊登國際 SCI 期刊，Journal of Applied Geophysics (2015 年 10 月)		

第二章 研究方法

章節摘要

本章敘述主要方法之理論基礎、參數推導及文獻回顧。2.1 節說明地電阻影像剖面法原理；2.2 節探討地電阻影像法文獻回顧；2.3 節說明自然電位法原理；2.4 節說明本研究中自然電位法資料分析方法之原理；2.5 節探討自然電位法文獻回顧；2.6 節說明地電阻影像法與自然電位法在訊號量測與資料分析上的差異。

2.1 地電阻影像法原理

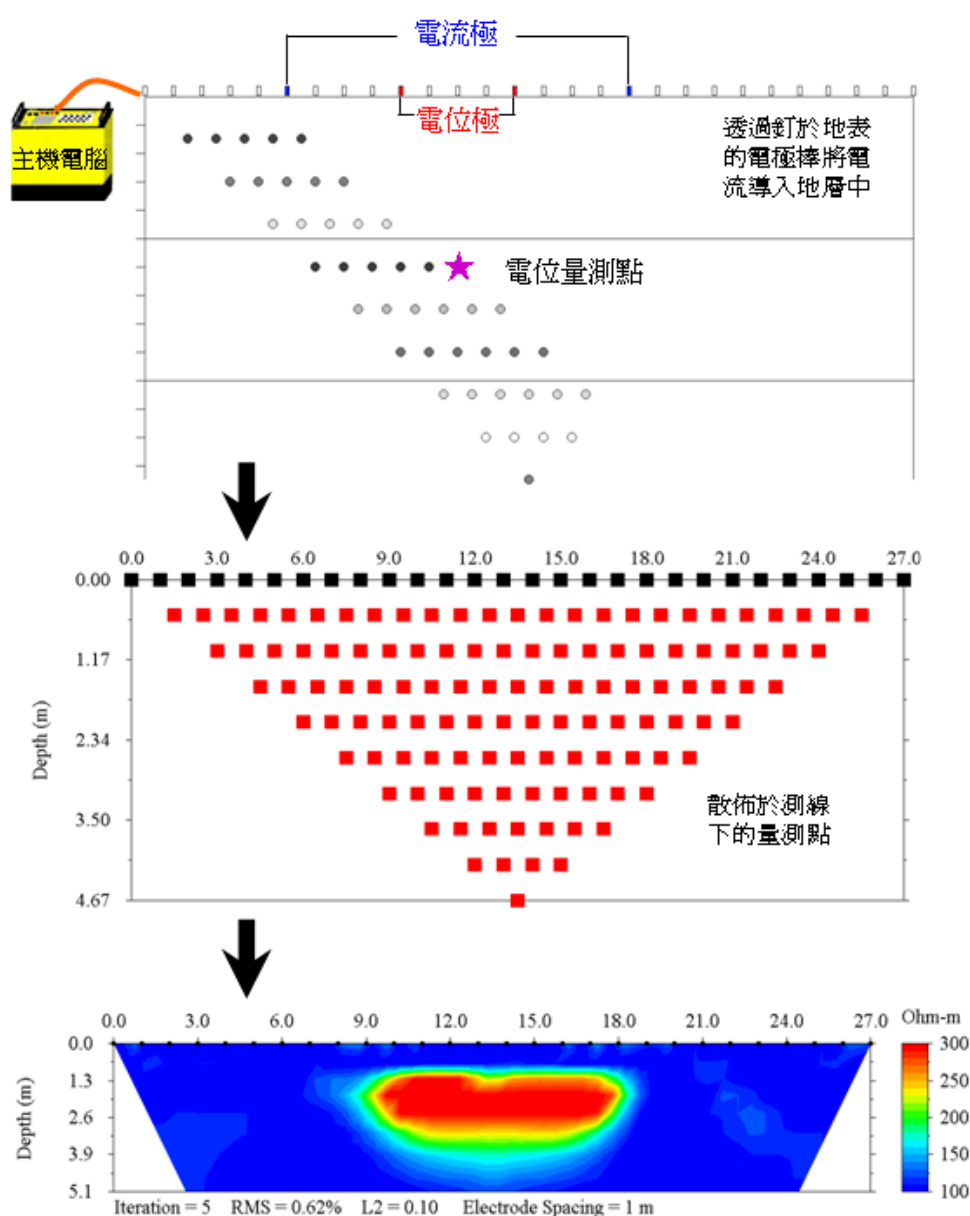
地電阻影像剖面法（Electrical Resistivity Tomography, ERT）屬地球物理探勘技術中電性測勘類的一種方法，原理是將直流電導入地層之中，量測地下材料的電位差，再以電阻率或導電率的分佈描述地層構造。

施作方式是在地表上以「直線」且「等間距」的方式配置若干個電極，每個電極再與電極棒連接，電極棒則釘於地表且與地層有良好的接觸，由探測儀主機電腦控制不同對的電極分別作為電流極與電位極，電流極可主動控制將導入地層中的電流量，再由電位極量測地下某深度的材料電位差響應值並記錄，由於不同對的電流極與電位極可由儀器電腦控制成不同的電極間距與不同的電流電位極展距，因此在一直線上的電極可以量測到此條測線下方材料在不同水平位置與不同深度的電位差，當量測點散佈於此測線下不同水平與垂直深度後即類似形成一個「面」，依地電量測原理，量測點類成一個三角形或倒梯形的分佈，再將所有量測值以數值方法逆推演算後再進行內插即可呈現出測線下電性剖面的等值圖（如圖 2.1-1）。

探測的深度由測線總長決定，測線之長度越長，測深越深，保守最佳的探測深度約為測線總長的 $1/5 \sim 1/2$ ，視電極排列方式不同而不同；量測資料點的密度取決於電極總數，電極數量越多，量測資料點越多。

電流極與電位極的變換規則稱之為「電極排列法」（Array or Configuration），意指電流極對本身的電極間距，電位極對本身的電極間距，及電流極對與電位極對之間的相對位置依循著一定的規則進行變換，雖然探測測線是一次在直線上以等間距配置若干個電極，但透過主機電腦控制不同的電極作為電流極進行放電與

電位極量測電位差，可依循一定的規則（排列法）收集測線下一系列不同位置與深度的資料。早期電極排列的變化是人工的方式移動地表的電極位置，由於儀器的進步，現今只需要一次將所有電極於地表配置完成，再由電腦自動切換控制。電極排列的設定由操作人員在量測前先行建立的控制檔決定之，不同的電極排列方法其資料分佈、探測響應深度、成像解析能力與測線外部干擾源影響性均不大相同。



經過逆推演算後，再以內插的方式繪出地層的電性剖面，習慣上以不同色調的電阻率等值圖呈現之

圖 2.1-1 地電阻影像剖面法概念圖

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

歐姆定律（Ohm's law）：

$$E = \rho J \dots\dots\dots (2-1)$$

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

阿奇斯定律（Archie's law）：

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

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

歐姆定律描述了電場強度、電阻率與電流密度的關係，也就是材料的電阻率可藉由電場與電流密度的量測得知；而 Archie's law 則表示材料的電阻率會因孔隙填充物質改變而改變。而地質材料的電阻率可視為物理性質之一，也就是不同的材料電阻率有所不同，可依電阻率的不同進而研判物質的不同，但因地質材料的組成未必全是純物質，所以在地球科學的觀點上討論地球材料的電阻率，經常是以一個區間範圍作為研判物質材料組成的依據，如表 3.1-1 列出各類地質材料之電阻率範圍。

以電場 E 與電流密度 J 來得知電阻率值並不是一個簡單的方式，因為儀器所能量測得到的是電位差與電流的數值，所以式（2-1）必須略做改寫將使得計算與量測上較為簡便，電位差單位為伏特（V）的意義是指一庫倫（c）電荷具有一焦

耳能量，因次分析之後電場可用單位長度的電位差表示單位為 V/m；電流的單位是安培 (a)，代表每秒流過一庫侖 ($1a=1C/s$)，電流密度的意義是指某個截面積中單位時間流過的電荷數，單位為 a/m^2 ；而電阻 (Resistance，單位為 ohm 或符號 Ω) 與電位差及電流之間的關係為：

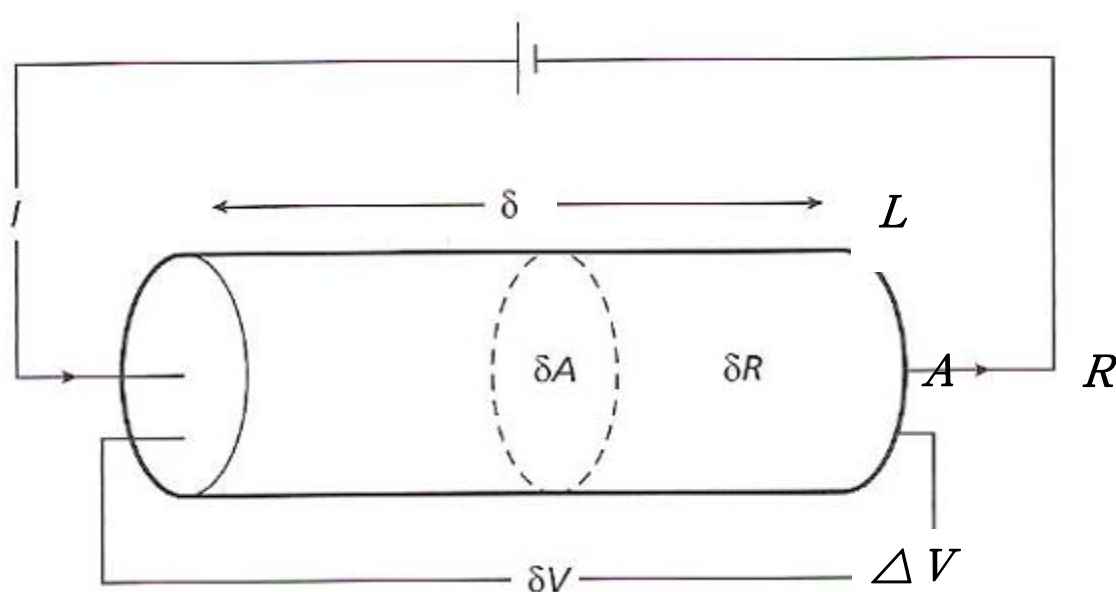
$$R = \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (2-3)$$

其中 R 為電阻、 ΔV 為電位差、 I 為電流。

如圖 3.1-1，在一個長 L ，截面積 A ，電阻 R 的電阻率量測模型中，電阻會因材料的大小而有所改變，因此考量材料通過的截面積 (A) 與長度 (L) 後，將式 (3-1) 與式 (3-3) 合併後，電阻率與電阻的關係為：

$$\rho = \frac{RA}{L} \dots\dots\dots (2-4)$$

電阻率 (Resistivity) 的單位即為 Ohm-m 或 Ω -m，在以公分為長度單位時，可用 Ohm-cm 作為測量單位， $1 \text{ Ohm-m}=100 \text{ ohm-cm}$ 。式 (2-4) 所表達的重要涵意是，在不同大小，相同材質的材料所量測的電阻會不同，但考量形狀後，所得到的電阻率會相同，也就是在地電測勘時，主動在地層中通入已知的電流量，可以電位計量測出材料的電位差，而這個電位差值必須再考慮材料的形狀，乘上電極幾何排列形狀因子 (Geometric factor, K) 之後才能得到量測電阻率，以電阻率描繪地下材料才有意義。



資料來源：摘自 Kearey et al., 2007¹。

圖 2.1-2 電阻率量測理論模型

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

$$\rho_a = \frac{K \Delta V}{I} \dots\dots\dots (2-5)$$

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

地電阻影像法的原理與應用係來自直流電阻法中的垂直測深法，此法是在地

¹ Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. 2007, *An introduction to Geophysical Exploration* 3th ed.

表配置兩個電流極 A 與 B 及兩個電位極 M 與 N ，主動將直流電通入地層後再以電位極 MN 量測地下材料電位差，乘上幾何形狀因子後可以得到地層的視電阻率，地層的模型是假設地質材料為均質（Homogeneous），等向（Isotropic）的半無限空間（如圖 3.1-2），理論上，無論四個電極如何排列，量測之電位差均能表示成：

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\} \dots\dots\dots (2-6)$$

將式（3-5）代入式（3-6），可以得到幾何形狀因子為：

$$k = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots (2-7)$$

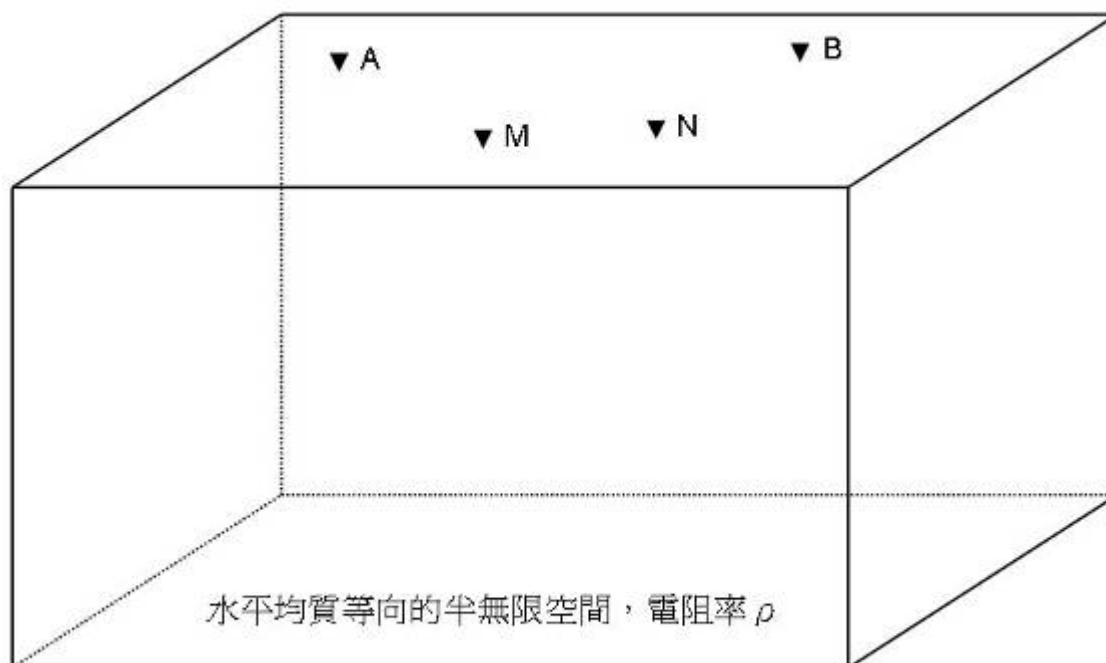


圖 2.1-3 直流電阻法初始假設模型

但事實上，地質材料並非為均質等向分布，真實在探測時，將 $ABMN$ 四極置於同一直線上可以降低一些地質異向性與異質性的影響，量測值因地層電阻率未知，且為探測目的，故以 ρa 表示，如式 (2-5)。理論上來說，當電極間距增加時，所能探測深度越深，在垂直測深法中可藉由電極間距的改變瞭解地層電阻率隨深度的變化。地電阻影像法的儀器設計概念就是在地表一次配置多個電極，然後以電腦控制各電極作為不同的電流極或電位極，如此，一次就能收集到不同深度的電位差，進而推演出不同深度的電阻率變化。

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

逆推的意義是指地下環境構造是真實存在的非線性系統，這個系統中任何微小的改變，或是收集資料的規則不同，都會得到不同的量測值，因此，若是能將量測的規則與方法固定為已知條件，則可將所有的量測資料以數值方法求解而得到一個地質模型；反過來說，如果設計出一個已知的模型，固定收資料的規則與方法，則可以算出一組理論的量測數據，這個過程則稱作順推計算 / 正演算

(Forward)。欲將量測資料與真實系統中的模型相連結，逆推與順推的計算是必須的。地電阻影像法的逆推計算主要以有限差分法 Finite-Difference (Dey and Morrison, 1979²) 或有限元素法 Finite-Element (Silvester and Ferrari, 1990³) 作為主要的分析方法，由於求解應用的是數值方法，且整個真實地層是一個非線性系統，所以所得到的解並非是唯一解，必須經過數次疊加 / 迭代 (iteration) 才能得到一個近似解。疊加的目的是為了降低誤差值，但過度的疊加運算則可能造成結果的失真，因此在逆推過程必須設定停止條件，這部分可由數據誤差的統計分析、真實鑽探資料比對或資料處理人員的經驗而決定，經由逆推之後，才能將原本量測得到的「視電阻率剖面」處理成「電阻率剖面」。

順推與逆推的成果範例如圖 2.1-5 與圖 2.1-6 所示，由圖中可知，量測值的電阻率與形貌與真實地層模型有所差異，但經過逆推之後的電阻率剖面與地層模型的電阻率分布與形貌則相當接近。

² Dey A. and Morrison H.F., 1979b. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures. *Geophysics* 44, 753-780.

³ Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990. *Finite elements for electrical engineers* (2nd. ed.). Cambridge University Press.

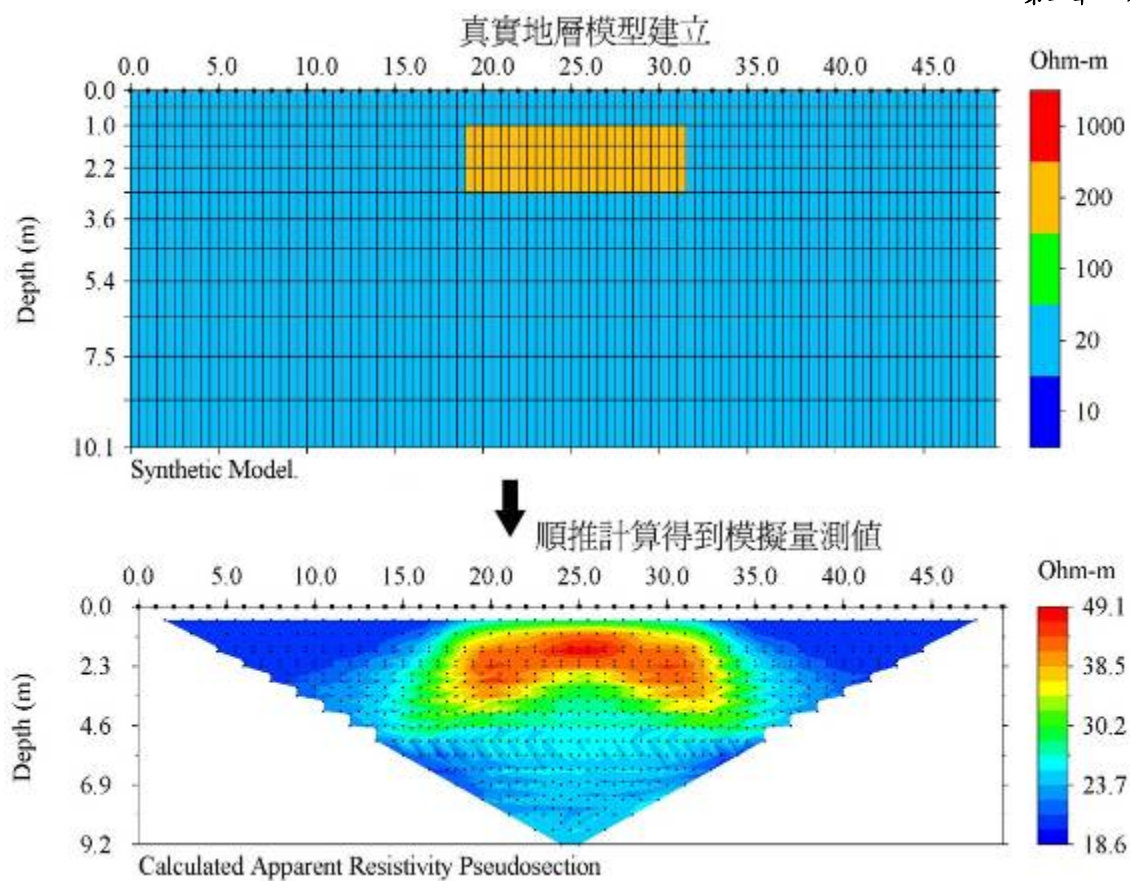


圖 2.1-4 地電阻法順推範例

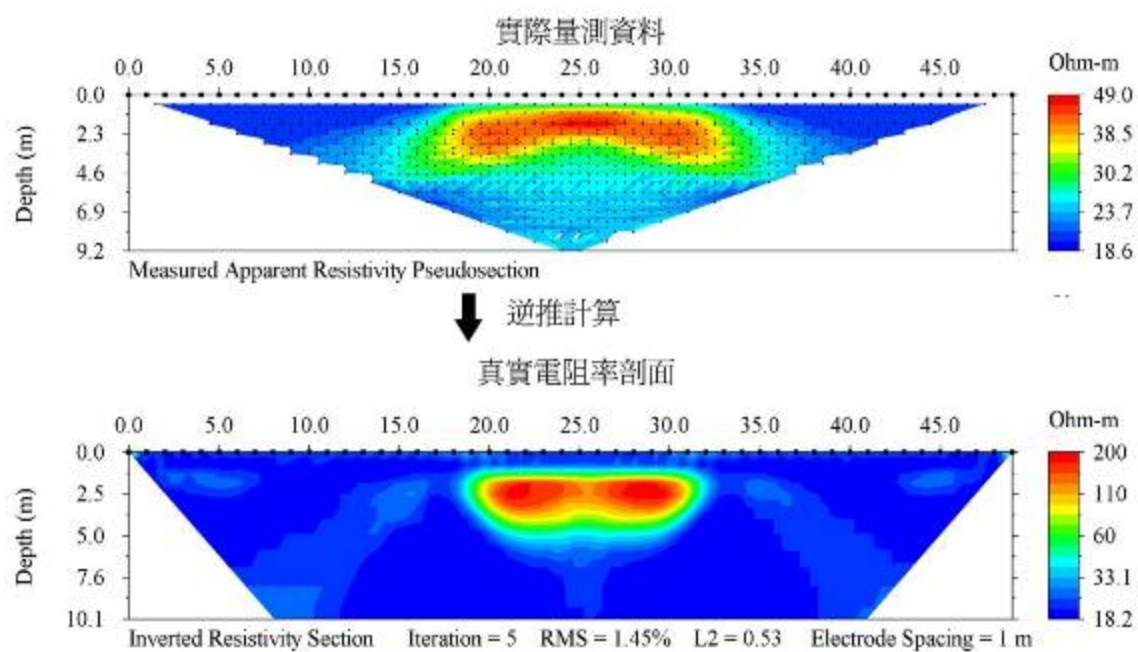


圖 2.1-5 地電阻法逆推範例

表 2.1-1 地質材料電阻率範圍

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

資料來源：摘自 Reynolds, 2011⁴。⁴ Reynolds J.M, 2011, *An Introduction to Applied and environmental Geophysics 2nd* ", Wiley.

基本上在地表上所能施行的各種地球物理探勘方法均能應用於井內。由於鑽井是地層第二維空間的延伸，因此井內施測常因應特殊需求而較地表地球物理探勘有更多的變化，鑽鑿一口井所付出的代價是相當高的，因此當一個鑽井完成後，如何藉既有鑽孔進行現地探測試驗，來求取最多地層及水文地質資訊，為本計畫重要目標。

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

1980 年代，地表二維與三維地電阻探測發展的同時，也同時有學者進行跨孔式地電阻影像法探測的研究，Zhao (1986)⁵以直流電阻法的探測原理，將電流極與電位極分別置於不同井中，並以一個人工導體置於兩極之間作為干擾源，研究對於電性剖面的影響，但當時的探測設備與演算法仍有發展的空間；自動化地電儀器發展之後，Daily and Owen (1991) 首次發表跨孔式地電阻影像法的探測研究，此研究的探測方式與成果呈現是現今跨孔地電阻影像法最早的雛型；整個跨孔地電阻影像法對於電極排列與二維逆推演算則是到 1997 年才有較完備的發展 (Zhou, 1997)⁶。

跨孔式地電阻影像法電極配置的邏輯主要可分為孔對孔電極配置，地表對孔內電極配置，三維式孔對孔電極配置三種概念 (如圖 2.1-7)。而電極排列方法在 1990 年代初期多使用 Pole-Pole 排列法 (Shima 1992⁷; Spies and Ellis 1995⁸)，但 Pole-Pole 排列法在跨孔式地電阻法的應用上存有低解析度與響應位置不明確的疑慮存在，主要的問題在於當電極置於井內時，材料模型的假設不再是半無限空間，而是全無限空間 (Whole-Space)，在這樣的條件下，若要使跨孔地電阻法的量測值響應位置與幾何形狀因子能被正確計算，電極排列的正確性就變得非常關鍵，關於整個跨孔地電阻影像法的理論計算、模擬與電極排列在 Zhou and Greenhalgh, 1997⁹、1999、2000; Zhou, 1998¹⁰一系列的相關研究之後才算完整，以

⁵ Zhao, J.X., Rijo, L. and Ward, S.H., 1986. Effects of geologic noise on cross-borehole electrical surveys. *Geophysics*, 51, 1978-1991.

⁶ Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 1997. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays. *Exploration Geophysics*, 28, 1-5.

⁷ Shima, H., 1992. 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, 55, 682-694.

⁸ Spies, B.R. and Ellis, R.G., 1995. Cross-borehole resistivity tomography of a pilot-scale, in-situ vitrification test. *Geophysics*, 60, 1313-1325.

⁹ Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 1997. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays. *Exploration Geophysics*, 28, 1-5.

¹⁰ Zhou B. 1998. Cross-hole resistivity and acoustic velocity imaging: 2.5D Helmholtz equation modeling and inversion. PhD thesis, University of Adelaide

現場操作的應用面而言，將電流極與電位極配置於同一孔內是不恰當的，在真實的環境中，是無法確定電流是否有流過兩井之間、量測電位值是否反應在兩井之間？這些問題將使得最後產出的逆推結果可能有誤，無法反應出兩井之間的變化。在跨孔地電阻排列法的電極配置，使用將電流極與電位極置於不同井內的特殊排列方式，Bipole-Bipole 或 Pole-Bipole 排列法較為適當且合理，Goes and Meekes (2004)¹¹就建議，電流極最好能配置在不同的井孔中，且以大角度的配置能電流穿過探測目標時產生較明顯的變化，提高解析能力。由於跨孔式地電阻影像法的電極排列並沒有一種固定的設計，必須考量井的數量、深度與總配置電極數，因地制宜設計出適合於不同場址的電極變換規則，若設計上出現錯誤，將導致收集到假訊號的錯誤結果（如圖 2.1-8）。

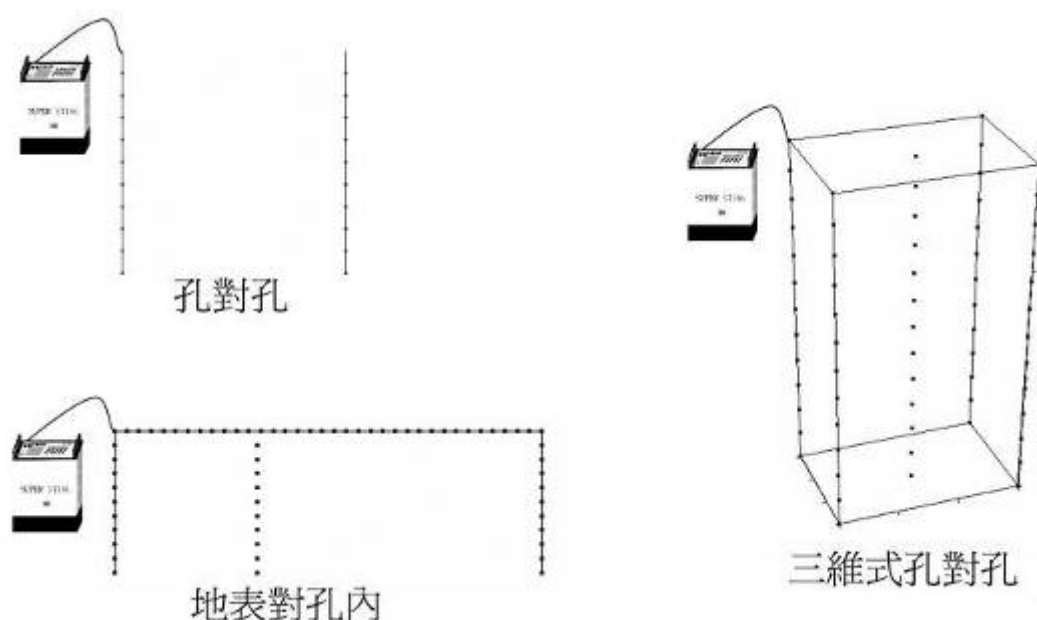


圖 2.1-6 跨孔式地電阻影像法電極配置邏輯概念

¹¹ Goes, B. J. M., and Meekes, J. A. C., 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. JEEG, Vol.9. No.3, pp.127-141.



適當的電極排列

2 - 39

機污染問題的重要參考文獻。Godio and Naldi (2003)¹⁶應用地電阻影像法調查義大利某個地下油槽，並在油槽的上下游進行鑽探採樣，映證了低電阻率區有風化油品污染。Martínez-Pagán et al., (2010)¹⁷應用地表地電阻影像法調查西班牙一個污泥池，這個污染場址在地表上挖了數個坑洞傾倒廢棄污泥，而且沒有鋪設任何的不透水襯墊，研判污泥池之污染物質已滲漏到更深的地層中。Naudet et al. (2011)¹⁸在法國一個新興城市的周圍施測多條地電阻影像法測線，城市東南隅有一個具有 DNAPLs 污染潛勢的污泥池，研判地層中的高電阻率明顯有移動變化，可能已擴大至城市周界，將危害到城市內居民的健康。Wang et al. (2015)¹⁹，應用 Time-Lapse 的觀念，以 ERT 法調查一個土壤重金屬污染場址，釐清污泥的分布，並於整治後再以同樣的方式進行調查，以 Time-Lapse 的資料評估整治成效。國內初期以地球物理探勘技術應用於土壤及地下水污染調查的研究始於民國 86 年桃園南崁發生一起油管滲漏的污染事件，油品擴散範圍達 1 公頃，使用地電阻影像法探測出地層遭受污染的區域，此研究為國內最早以地球物理探勘技術調查土壤與地下水污染問題的論文發表（董倫道，1997²⁰；蘇尚文，1998²¹）。王子賓（2005）²²則曾應用 2D、3D ERT 與 CHERT 於台氣頭份廠的污染進行長期監測研究。

2.3 自然電位法原理

自然電位法 (self-potential method or spontaneous polarization method, SP)，係一種被動式電性測勘的地球物理技術，藉由測量天然電場的變化，研判地下是否存在地下水、天然氣、石油或礦床。自然電位法的優點在於探勘的成本較低，只需要於現場配置電位極、感測器與控制軟體，即可進行測量，並且可以進行長時間的連續觀測，近乎是即時監測的方式，觀察是否有特殊事件使得電場變化與長期測量的背景值有所不同，藉此研判事件發生的可能性，因此，除了傳統地質材料性質的探測之外，可更進一步地應用在山崩、土石流、地震的前兆分析，地下水污染物質侵入，管線洩漏，偶發性電流源出現等自然或人為現象的監測上。惟

¹⁶ Godio, A. and Naldi, M. 2003. Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants. *Near Surface Geophysics*, Vol.1, 131-137

¹⁷ Martí'nez-Pagán, P., Cano, A.F., Silva, G.R. and Olivares, A.B., 2010. 2-D Electrical Resistivity Imaging to Assess Slurry Pond Subsoil Pollution in the Southeastern Region of Murcia, Spain. *JEEG*, Vol. 15, (1), 29-47.

¹⁸ Naudet, V., Gourry, J.-C., Mathieu, F., Girard, J.F., Blondel, A and Saada, A. 2011. 3D Electrical Resistivity Tomography to locate DNAPL contamination in an urban environment. *Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Leicester, UK*, Wang, T. P., Chen, C. C., Tong, L. T., Chang, P. Y., Chen, Y. C., Dong, T. H., ... & Cheng, S. N. (2015). Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 121, 21-30.

¹⁹ Wang, T. P., Chen, C. C., Tong, L. T., Chang, P. Y., Chen, Y. C., Dong, T. H. & Cheng, S. N. (2015). Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 121, 21-30.

²⁰ 董倫道，1997。地球物理技術在環境污染偵測上的應用與案例探討。中國地球物理學會成果發表論文集，中國地球物理學會，pp.207~210。

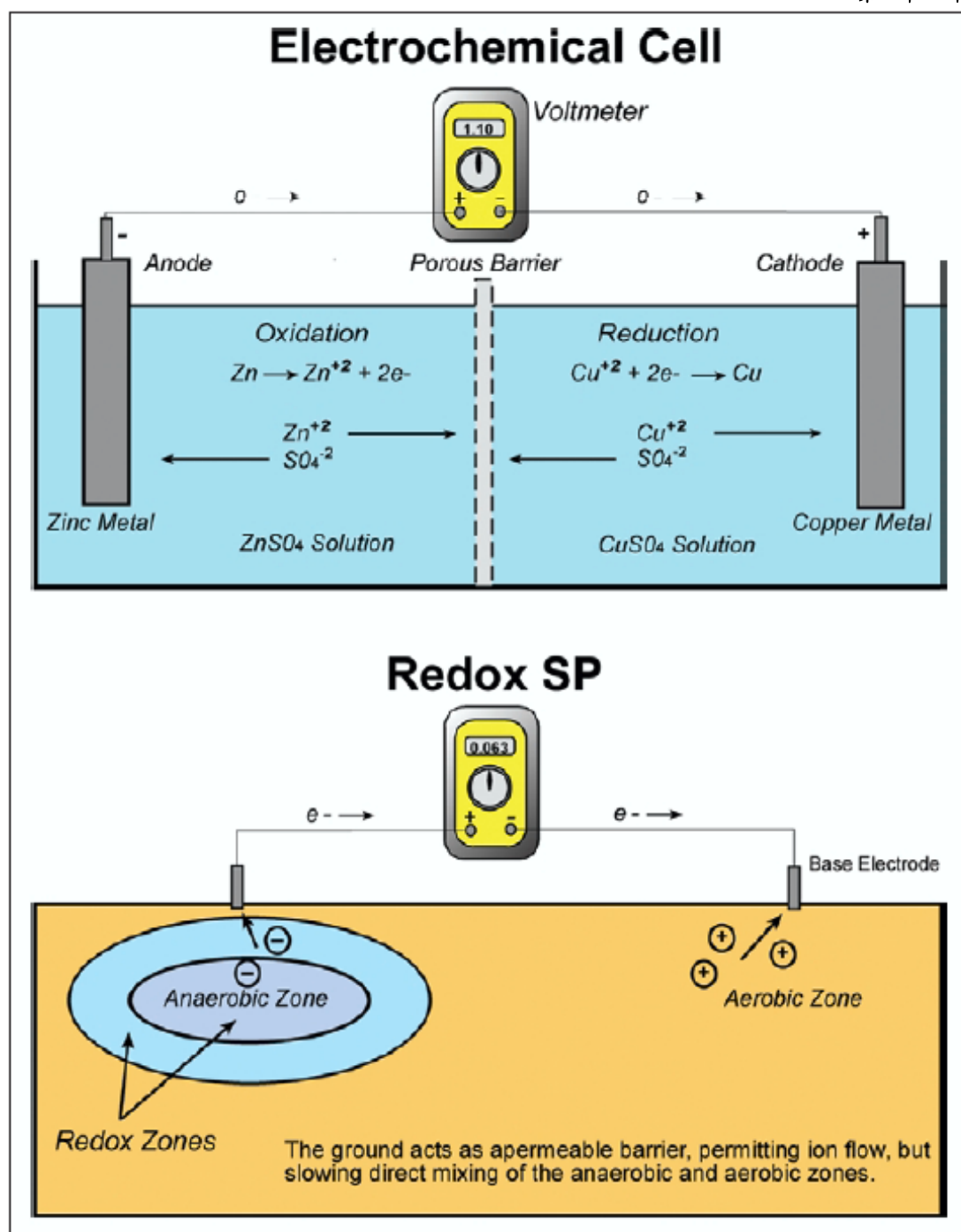
²¹ 蘇尚文，1998，整合地電法應用於地下污染調查之研究，國立中央大學應用地質研究所，碩士論文。

²² 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，碩士論文。

自然電位的資料收集雖簡單容易，但資料處理與分析卻相當複雜，信號與雜訊的區分是最關鍵的課題，因此在偶發性事件的研究上，自然電位必須先建立出長期、穩定且正確的背景值信號，才能有效進行資料分析，取得可信度較高的結果，也因此，在這類型的研究上，連續且長時間的觀測是應用自然電位法最基本的條件。

自然電位的場源分為兩個部分，一個為造成天然電場的電磁波背景場，一個則是電化學反應帶來的電場響應。前者主要是因為太陽風衝擊地球磁層引發低頻大地電場，大氣層與電離層交互作用產生的雷電現象造成高頻電場，由此兩者共同譜成寬頻天然電場的訊號，此外，由於連續監測的關係，降雨事件也可以視為背景場，畢竟大部分的降雨都會改變電場值的大小，而且我們擁有降雨時間的資訊。電化學反應帶來的電場響應主要可以分成下列四個部分：電動電位 (electrokinetic potential)，又稱流動電位 (streaming potential)，礦物電位 (mineral potential)，熱電位 (thermoelectric potential)，薄膜電位 (membrane potential)，又稱擴散電位 (diffusion potential)。

礦物電位是指地表下若有礦床存在，礦床所含的礦物將與周遭環境進行氧化還原作用，類似硫酸銅與硫酸鋅組成的化學電池，其作用就像是地表下有一顆天然電池存在，提供該區域天然電位，如圖 2.3-1。如果是金屬礦物的話，此電位的大小會達到數百毫伏特，若非金屬礦物，如：石英礦脈，只會產生約莫數十毫伏特的電位值。



資料來源：摘自 Nyquist et al., 2002²³。

圖 2.3-1 礦物電位概念圖

圖 2.3-1 上圖表示硫酸銅與硫酸鋅組成的電池，用以說明礦物電位的概念就如同化學電池一般；下圖是礦物電位示意圖，礦物會與周圍環境進行氧化還原作用，如同地表下存在著一顆天然電池。

²³ Nyquist, Jonathan E. and Charles E. Corry, 2002. *Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics*, The Leading Edge.

熱電位即藉由熱的改變而產生的電位，在環境方面的話則是指地表下熱流值造成的電位，通常攝氏溫度改變一度，電位會有-0.09 到 1.36 毫伏特的變化。薄膜電位就像是有一張薄膜在不同介質的交界處，介質間的離子通過薄膜時產生的電位。當頁岩與砂岩接觸時，頁岩會吸引砂岩中的陽離子，如：鈉離子，此時砂岩處會產生電位梯度，阻止陽離子擴散到頁岩。擴散電位與熱電位可合以一個方程式表示如下：

$$E_d = \frac{RT(I_a - I_c)}{nF} \ln(C_1/C_2) \dots\dots\dots (2.8)$$

R：理想氣體常數，T：絕對溫度，n：離子電荷大小，F：法拉第常數， I_a 和 I_c 分別為吸引陽離子與陰離子的能力，C：所含離子的濃度，用以得知擴散電位梯度。若將吸引離子能力項忽略，稱為 Nernst equation：

$$E_d = \frac{RT}{nF} \ln(C_1/C_2) \dots\dots\dots (2.9)$$

由於 R、n、F 皆為常數，所以此式傳達的訊息為：薄膜電位只受到地溫梯度和介質交界處(薄膜)所含離子濃度影響。此外，薄膜電位有另一種形式乃是生物電位，當植物的根部吸收水份時，水分子進入植物維管束的過程也類似通過薄膜，此作用甚至是造成白天的電位大小與夜晚的電位大小相差頗大的原因之一。

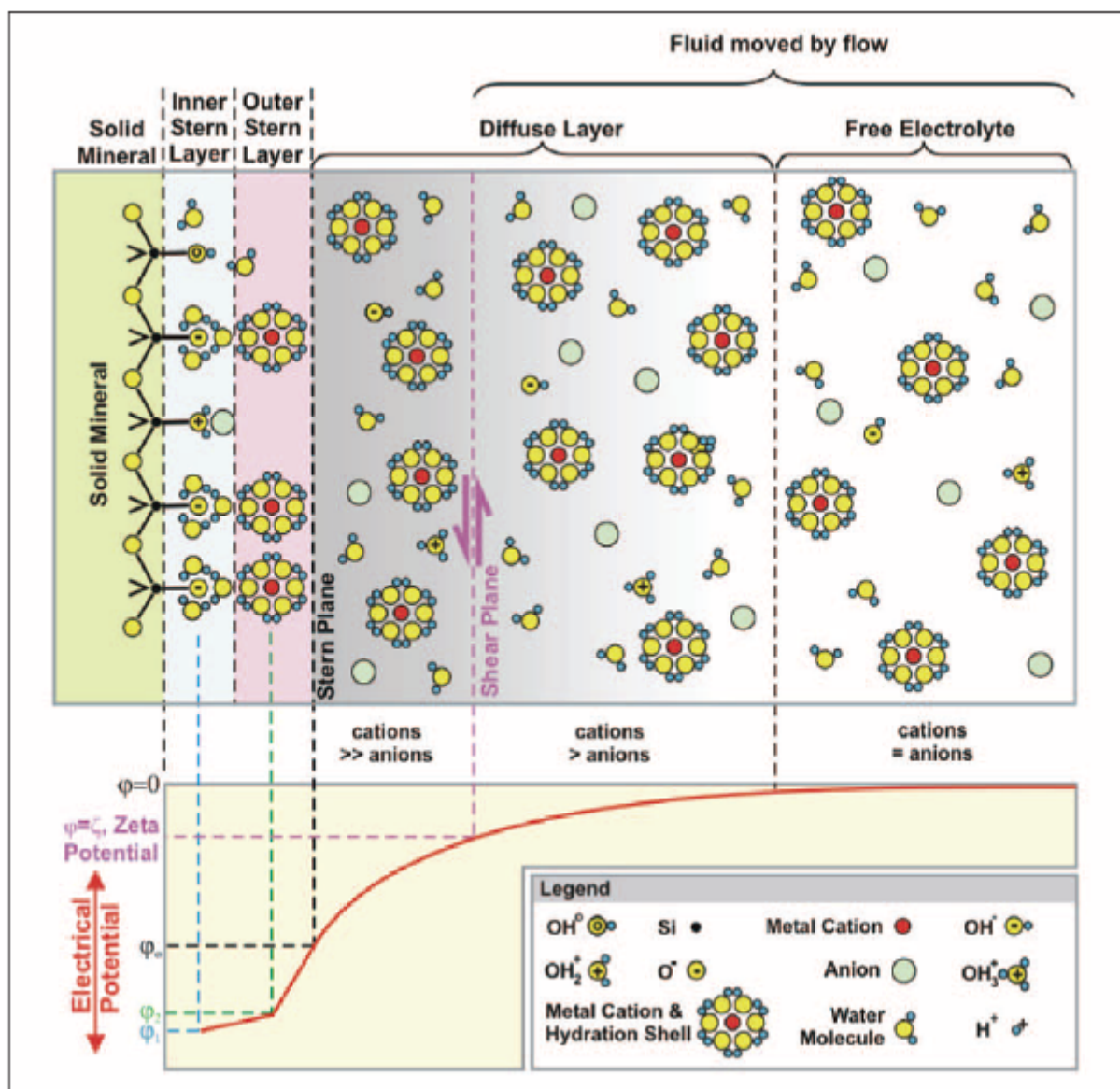
流動電位的核心觀念乃是由壓力差產生電位差的過程，表示如下：

$$\Delta V = C \Delta P \dots\dots\dots (2.10)$$

V：電位，P：壓力，C：流電耦合係數，本研究最重要的出發點就是流動電位的物理機制，藉由此觀念的延伸，可以解釋地震後的電場異常，也就是所謂的震電響應。流動電位的前提是該區域必須有流體存在，形成固體和流體的交界面，方可產生電性雙層構造。

電性雙層構造是微觀尺度下觀察得到的現象，是一種礦物與流體交界面(固流交界面)的電荷分布狀態，如圖 2.3-2 所示，礦物表面通常會附著一層負電荷，該

電荷層稱為 Inner Stern Layer，為了使得該區域達到電中性的狀態，礦物表面的負電荷層會開始吸引正電荷靠近，然而，若此礦物並非金屬，那麼便無法中和抵銷，只能大量吸收正電荷以求達到電中性。Inner Stern Layer 外面第一層的正電荷，稱為 Outer Stern Layer，這兩層總稱為 Stern Layer，是存在固態表面的電性構造，電荷分布的狀態比較乾淨，幾乎一層之內完全為負或為正，並且靜電力非常強，不會輕易地受到外界的力量而分離；接著往外一層，來到 Diffuse Layer，視為固流交界處，此區域的第一層靜電力也同樣偏高的，雖然電荷正負共存的情況明顯可見，但總體來說正電荷數量大於負電荷，並且不容易受外力而分離，此層的盡頭與下一層的交界處我們可以看到一個平面名為 Shear Plane，可以將之體會為『能被剪開的平面』，意味著在該平面之外的電荷，能夠被外力擾動、分離。於剪切面外的第一層，仍然屬於 Diffuse Layer，電性分布也是正電荷多於負電荷，唯一的差別在於此層已是可以較為輕易地被外力分離，最後，最外層的電荷分布是正電荷等於負電荷，因為此層完全不受礦物表面影響，因此可維持一般電解質流體的電中性。



資料來源：摘自 Glover et al²⁴, 2010。

圖 2.3-2 電性雙層構造圖

簡易的概念為礦物內的陰離子會傾向附著在表層，其會吸引陽離子以達到電中性。擴散層(Diffuse Layer)剪切面之外的離子受到礦物的吸引力較弱，因此比較容易受到壓力梯度的作用而產生擾動，進而形成流動電位。

²⁴ Glover, P.W.J and M.D Jackson, 2010. Borehole electrokinetics, The Leading Edge.

關於流動電位在電磁學以及流體動力學的耦合理論由 Pride 於 1994²⁵所提出：

$$\mathbf{J} = \sigma(\omega)\mathbf{E} + L(\omega)(-\nabla P + i\omega^2 d_f \mathbf{u}_s) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$-i\omega \mathbf{w} = L(\omega)\mathbf{E} + \frac{k(\omega)}{\eta}(-\nabla P + i\omega^2 d_f \mathbf{u}_s) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

(2.11)式加號的左邊即為歐姆定律，(2.12)式加號右邊則是達西定律， $L(\omega)$ 就是所謂的電動耦合， $\mathbf{J}$ ：平均傳導電流密度與流動電流密度的總合， $\mathbf{w}$ ：流量， P ：壓力(驅動力)， d_f ：流體密度， $\mathbf{u}_s$ ：孔隙介質顆粒的位移量， η ：流體動黏滯係數， σ ：孔隙介質的導電率， k ：孔隙介質的滲透能力。此兩式雖為流場與電場的耦合，但是如果將壓力 P 視為由震波給予的話，則可以巧妙的將此概念運用於震電響應之上。最後，若將 L 除以孔隙介質的導電率時，

$$C_s = -\frac{L_{ss}}{\sigma_f} = \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

結果將成為流電耦合係數。由此式可發現，只要該區域的壓力發生改變，即可擾動流體的狀態，進而產生電位差。

自然電位的訊號分析的方式可採用邊界噪聲處理及互相關運算。此技術由背景噪聲中提取格林函數，將各成對電極在相同時間內的連續噪聲記錄，即可對兩成對電極進行互相關計算得到彼此的格林函數。理論上，完全擴散場的波形必須是隨機相位和振幅，且任意方向移動，基於此因素，背景地震雜訊若滿足上述兩種假設，那麼包含任意路徑的波線，只要同一波形能夠通過任意兩個測站，即可運用互相關計算提取其格林函數(如圖 2.3-3 與圖 2.3-4)。根據 Weaver 等學者提到

²⁵ Pride, Steve, 1994. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media, *Physical Review B* volume 50, number 21.

有限彈性體內的擴散場可表示為：

$$\phi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n u_n(x) e^{i\omega_n t} \dots\dots\dots(2.14)$$

x ：空間位置， t ：時間， a_n ：模型的振幅， u_n ：特徵方程， ω_n ：特徵頻率，其中，特徵方程可寫成：

$$\int p u_n u_m d^3 x = \delta_{nm} \dots\dots\dots(2.15)$$

p ：機率密度， δ_{nm} ：狄拉克方程，當 $n \neq m$ 時，此項不存在。

振幅項 a_n 在擴散場中是互不相關的隨機變量：

$$\langle a_n a_m^* \rangle = \delta_{nm} F(\omega_n) \dots\dots\dots(2.16)$$

$\langle \rangle$ ：互相關運算符號， F ：頻譜能量密度

將 2.14、2.15、2.16 三式合併可化簡出兩點之間擴散場的互相關運算為：

$$C(x, y, \tau) = \langle \phi(x, t) \phi(y, t + \tau) \rangle = \sum_{n=1}^{\infty} F(\omega_n) u_n(x) u_n(y) e^{-i\omega_n \tau} \quad (2.17)$$

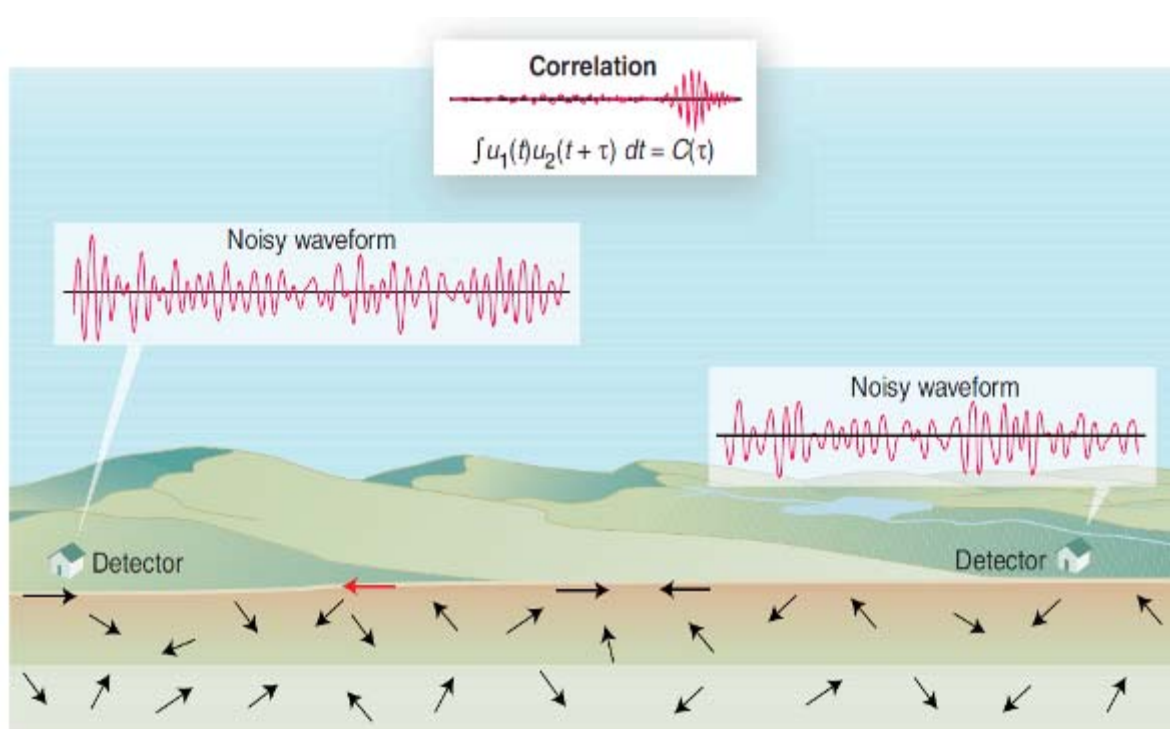
若此處的 F 為常數，把時間段 τ 裡的互相關函數加總起來，得到 x, y 兩點間的格林函數：

$$G_{xy} = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) u_n(y) \frac{\sin(\omega_n \tau)}{\omega_n} \dots\dots\dots(2.18)$$

令 V_x, V_y 為兩測站的連續噪聲記錄，則可由互相關計算得到：

$$C_{xy}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} V_x(m)V_y(m+n) \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

$C_{xy}(n)$ ：第 n 個點的互相關值，對稱於 $n=0(t=0)$

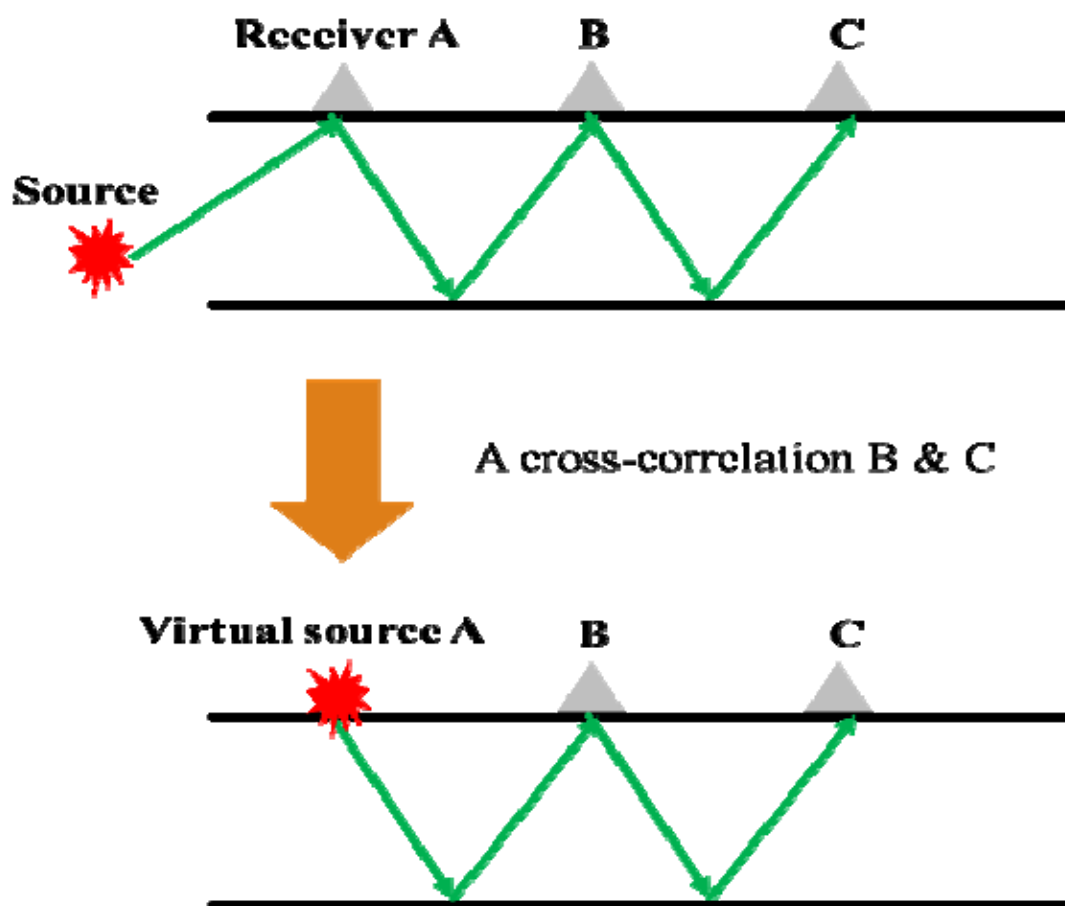


資料來源：Weaver et al. 2005²⁶。

圖 2.3-3 散射波場示意圖

圖中黑色箭頭代表波在地下傳播的情形，紅色箭頭則是邊界噪聲中吾人欲提取的訊息，兩個綠色的小房子表示監測站，接收來自地下擴散場的訊號。箭頭的方向和長度透露出完全散射波場的兩種資訊，1.相當雜亂，2.能量大小近似相等，在眾多邊界噪聲當中，若有波形傳播經過一測站後接著傳至另一測站，如紅色箭頭所示，即可通過互相關計算提取出此波形訊號，也就是格林函數。

²⁶ Weaver, Richard L. and Oleg I. Lobkis, 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L), J. Acoust. Soc. Am. 116 (5).



資料來源：Weaver et al. 2005²⁷

圖 2.3-4 互相關概念示意圖

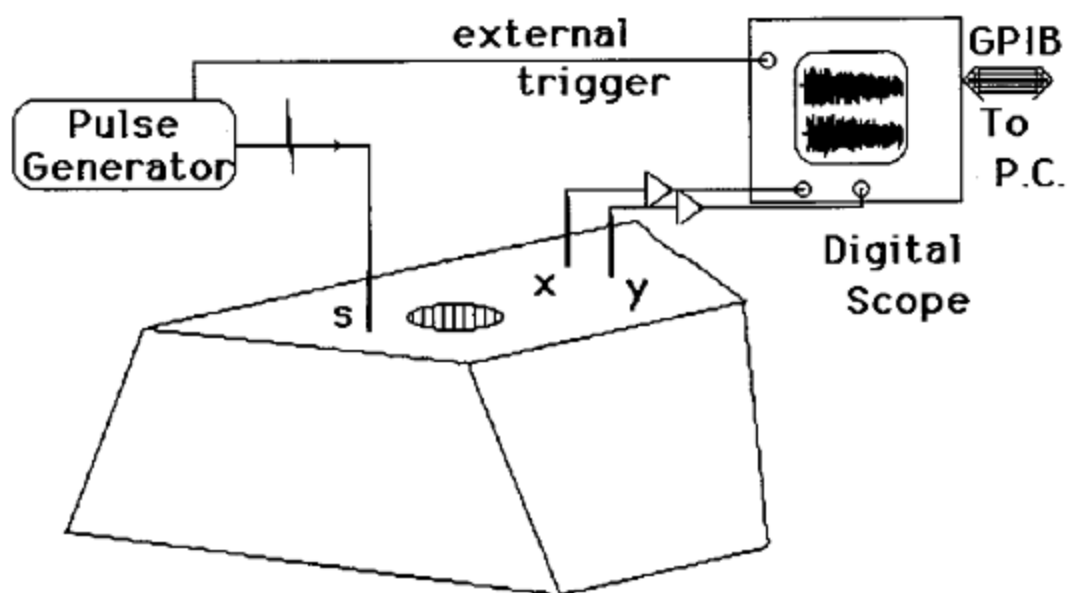
圖 2.3-4 的概念是假設一個源發出能量，並且傳經 A、B、C 三個接收站，此時透過一些資料處理的手段，只留下訊號的相位，接著計算 A 對 B、C 兩站的互相關函數，即可重新獲得一個由虛擬源 A 將能量傳至 B、C 兩站的行為，由此我們可以去研究站對站之間波傳遞的相關訊息。

Lobkis et al., 2001²⁸ 提出了一種測量裝置(圖 2.3-5)，說明互相關計算提取格林函數的可行性。首先，這是一個 $80 \times 140 \times 200 \text{ mm}^3$ 的盒子，可把它視為有限彈性體，s、x、y 是三個波形接收器，s 負責接收直接產生的脈衝訊號，隨後傳進彈性體內，x 和 y 則接收彈性體內的散射波場。圖 2.3-6a. 表示 x、y 兩點的互相關函數，

²⁷ Weaver, Richard L. and Oleg I. Lobkis, 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L), *J. Acoust. Soc. Am.* 116 (5).

²⁸ Lobkis, Oleg I. and Richard L. Weaver, 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, *J. Acoust. Soc. Am.* 110 (6)

圖 2.3-6b.則是直接由 x 傳到 y 點的脈衝訊號，類似由任何事件所造成的偶發信號。由此可見延遲時間約 5~8 微秒時，互相關函數提取出明顯的格林函數，而此延遲時間幾乎等於事件波形由 x 傳至 y 所花費的時間，故驗證通過互相關運算提取有限彈性體內的格林函數是可行的。

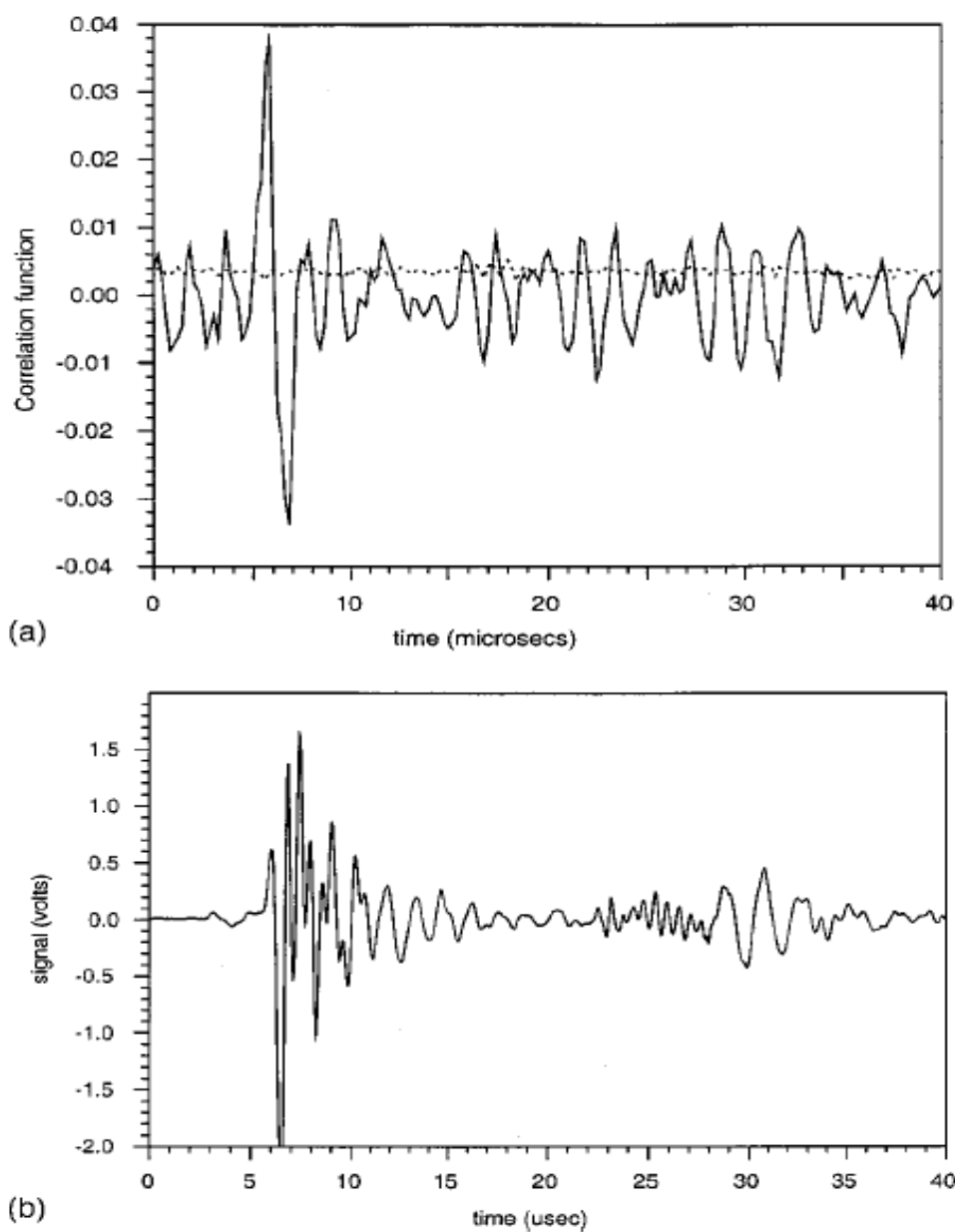


資料來源：Lobkis et al. 2001²⁹

圖 2.3-5 邊界噪聲處理實驗裝置圖

此不規則塊體的大小為 $80 \times 140 \times 200 \text{ mm}^3$ ，其中參雜一個直徑 25mm 的圓柱洞。脈衝訊號產生後由 s 傳入塊體中，x 和 y 則接收此脈衝波在塊體中形成散射波場後的訊號。

²⁹ Lobkis, Oleg I. and Richard L. Weaver; 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, *J. Acoust. Soc. Am.* 110 (6)



資料來源：Lobkis et al. 2001³⁰

圖 2.3-6 邊界噪聲處理實驗結果

圖 2.3-6 (a)由 s 傳入脈衝波造成的帶寬為 160 微秒擴散場的互相關函數，圖中虛線表示其方均根值。圖 2.3-6 (b)直接反應在 x 和 y 上的脈衝波形。簡單的說，(a)表示由噪聲場中提取格林函數的波形，(b)則是類似地震事件的脈衝響應，圖中

³⁰ Lobkis, Oleg I. and Richard L. Weaver; 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, *J. Acoust. Soc. Am.* 110 (6)

清楚可見藉由互相關的運算能夠有效地提取同時經過兩兩測站的擴散場訊號。

2.4 自然電位法資料處理方法與原理

本研究以 Ahmed et al., (2013)³¹開發的 SP2DINV 程式碼為資料處理基礎，修改調整成適合本研究設計之砂箱自然電位實驗所使用之逆推運算及模擬。

物理條件假設在非均向、異質性、飽水層的地下孔隙介質當中，由水流壓力觸發的自然電位順推數學理論如下：

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = Q_s \dots \dots \dots (2.20)$$

$$\mathbf{u} = -\bar{K} \nabla h \dots \dots \dots (2.21)$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_z \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.22)$$

其中， $\mathbf{u}$ 為達西流速(m/s)； h 為水頭高度(m)； S 為儲水係數(1/m)； $\bar{K}$ 為水力傳導係數張量； Q_s 為外部場源(1/s)。孔隙水壓 P (Pa)與水頭高度 h 的關係式為 $P = \rho_f g(h - z)$ ，其中 ρ_f 代表孔隙水的密度(km/m³)； g 為重力加速度(m/s²)； z 為觀測點於基準面以上的高度(m)。而上式的邊界條件和初始條件如下：

$$h = h_D \quad at \Gamma_D \dots \dots \dots (2.23)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \bar{K} \nabla h = q_0 \quad at \Gamma_N \dots \dots \dots (2.24)$$

$$h = h_0, \quad \forall x \quad at \quad t = 0 \dots \dots \dots (2.25)$$

³¹ Ahmed, A. S., Jardani, A., Revil, A., & Dupont, J. P. (2013). SP2DINV: A 2D forward and inverse code for streaming potential problems. *Computers & Geosciences*, 59, 9-16.

其中，在諾伊曼邊界 Γ_D 上的水頭為定水頭 h_D ； q_0 則是在迪利克雷邊界 Γ_N 上的水力通量(m^2/s)； n 則是迪利克雷邊界 Γ_N 上的法向量；式 2.19 為初始條件。

而在非均向、異質性的地下孔隙介質當中，電流密度 $j(A/m^2)$ 可以分解成由歐姆定律倒出的導電電流密度，加上由水流壓力驅動產生的流動電位電流密度 $j_s(A/m^2)$ (Jardani et al., 2007)³²：

$$j = -\bar{\sigma} \cdot \nabla \varphi + j_s \dots \dots \dots (2.26)$$

$$j_s = \bar{Q}_v u \dots \dots \dots (2.27)$$

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.28)$$

$$\bar{Q}_v = \begin{bmatrix} Q_{vx} & 0 \\ 0 & Q_{vz} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.29)$$

其中， φ 為電位強度(V)； $\bar{\sigma}$ 為孔隙介質當中的導電張量(S/m)； Q_v 為每單位體積孔隙水的有效超額電荷密度張量(C/m^3)，有效超額電荷的產生是因為孔隙水的流動造成擴散層的拖曳作用，而產生正負電荷的重新分布； $\bar{Q}_v$ 為電荷密度，是由水力傳導係數張量與電荷密度的經驗式推得($\log_{10} \bar{Q}_v = -9.2 - 0.82 \log_{10} K_s$)。

除此之外，孔隙水的化學作用與溫度效應則在 Ikard et al. (2012)³³ 中有詳細討論，其對自然電位的影響並沒有比流動電位來的顯著。由於式 2.26 的連續方程的總電流密度必須守恆 $\nabla \cdot j = 0$ ，因此可導出下列式子：

$$\nabla \cdot (\bar{\sigma} \cdot \nabla \varphi) = \nabla \cdot j_s \dots \dots \dots (2.30)$$

³² Jardani, A., Revil, A., Bolève, A., Dupont, J.P., Barrash, W., Malama, B., 2007. Tomography of groundwater flow from self-potential (SP) data. *Geophysical Research Letters* 34, L24403, <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031907>.

³³ Ikard, S.J., Revil, A., Jardani, A. et al. 2012. Saline pulse test monitoring with the self-potential method to nonintrusively determine the velocity of the pore water in leaking areas of earth dams and embankments. *Water Resources Research*, 48.

並且滿足下列的邊界條件：

$$\varphi = 0 \quad \text{at } \Gamma_D \dots\dots\dots(2.31)$$

$$-n \cdot [\sigma \nabla \varphi - j_s] = 0 \quad \text{at } \Gamma_N \dots\dots\dots(2.32)$$

其中，在諾伊曼邊界 Γ_D 為空氣與土壤的交界面；迪利克雷邊界 Γ_N 則是假設在半無限空間中，無限遠的電位場為 0。

在本研究當中，藉由沙箱模型模擬野外場址的自然環境，並使用跨孔式的電極進行正負極接收電位極陣列，以及共負極接收電位極陣列進行自然電位的觀測。由人工場源的設置、觀測電位資料的收集與運算、自然電位場的逆推解釋，再進行逆推結果與人工場源的比較結果，可以瞭解到本研究改進後的 SP 逆推技術已經足以達到逆推得到場源的位置和強度，並且解析到埋藏導線的位置，和電場如何在導體附近衰減。

2.5 自然電位法文獻探討

自然電位法的應與直流電阻法是同時期一起發展成形，兩者的觀測值都是電位(Schlumberger, 1920³⁴；1932³⁵)，最初是應用在礦產的調查。而後更常應用在地下水、熱流、熱液、火山、水文地質、海水入侵調查上(Aubert et al., 1996³⁶；Corwin et al., 1979³⁷；Erchul et al., 1987³⁸；Fournier 1989³⁹；Lange 1999⁴⁰；Parker 1973⁴¹；Pengra et al., 1999⁴²；Sill et al., 1982⁴³)。九〇年代之後，自然電位與監測概念結合，使其應用層面更廣，且更能由訊號上研判出偶發的事件，像是應用在山崩、

³⁴ Schlumberger, C. 1920. Etude sur la prospection électrique du sous-sol. (Study on underground electrical prospecting). Gauthier-Villars et Cie, Paris.

³⁵ Schlumberger, C., Schlumberger, M. and Leonard, E. G. 1932. Electrical coring: a method of determining bottom-hole data by electrical measurements. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, technical Publication, 462

³⁶ Aubert, M. and Atangana, Q. Y. 1996. Self-potential method in hydrogeological exploration of volcanic areas. Ground Water, 34, 1010-1016.

³⁷ Corwin, R. F. and Hoover, D. B. 1979. The self-potential method in geothermal exploration. Geophysics, 44(2), 226-245.

³⁸ Erchul, R. A. and Slifer, D. W. 1987. The use of spontaneous potential in the detection of groundwater flow patterns and flow rate in karst areas. Karst Hydrogeology, Proc. 2nd Conference, Orlando, 217-226.

³⁹ Fournier, C. 1989. Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area: case history of the Chaîne des Puys. Geophysical Prospecting, 37, 647-668.

⁴⁰ Lange, A. L. 1999. Geophysical studies at Kartchner caverns State Park, Arizona. Journal of Cave and Karst Studies, 61(2), 68-72.

⁴¹ Parker, R. L. 1973. The rapid calculation of potential anomalies. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, 31, 447-445.

⁴² Pengra, D. B., Li, S. X. and Wong, P. Z. 1999. Determination of rock properties by low frequency AC electrokinetics. Journal of Geophysical Research, 104(B12), 29, 485-508.

⁴³ Sill, W. R. 1983. Self-potential modeling from primary flows. Geophysics, 48, 76-86.

地滑監測(Hutchinson et al., 2003⁴⁴; Lapenna et al., 2005⁴⁵; Schmutz et al., 2009⁴⁶)，水壩滲漏(Boleve et al., 2011⁴⁷; Ikard et al., 2012⁴⁸)都有不錯的成果。在地下水領域的應用上也有應用在抽水試驗(Linde et al., 2007a⁴⁹; Straface et al., 2007⁵⁰)，地下水流(Suski et al., 2006⁵¹; Zhang and Aubert 2003⁵²)，地下水污染調查(Naudet et al., 2003⁵³)，二相流布分析(Linde et al., 2007b⁵⁴)等許多成功的案例。Revil and Jardani 2013⁵⁵年的著作則對於自然電位法的理論與應用作出完整的詮釋與整合。國內近年來也有自然電位應在用地震前兆分析的相關研究(徐, 2013⁵⁶; 楊, 2014⁵⁷)。

2.6 地電阻影像法與自然電位法訊號分析的差異

地電阻影像法與自然電位法雖然是同時發展出的電性測勘技術，且量測之物理量均為電位，但兩者在量測方式上並不相同。地電阻影像法是給予一個控制電流注入地層後，量測材料的響應電位值，所得之資料經由逆推演算後可獲得材料的物理量，電阻率，依此物理量解釋地下環境，屬於主動式量測；自然電位則是被動量測環境的電位值，由於無任何主動源存在，屬於被動式量測。自然電位法所測得之電位可能因環境中的任何變化而產生差異，在單次量測時較難以定性分析的方式研判材料性質，必須以長期觀測的方式，將環境中的雜訊平差消除後才能研判出正常訊號與異常反應。地電阻影像法的成果輸出方式，多以不同顏色的等值圖描繪之，影像化的成果較易辨識環境；而自然電位則多以原始數據的方式檢視，必須包含時間、頻率與位置等資訊，但本研究改良了傳統的成果輸出方式，將原始數據經由逆推演算後同樣可以影像剖面的方式呈現，並包含電流方向與電

⁴⁴ Hutchinson, D. J., Harrap, R., Diederichs, M., Villeneuve, M. and Kjelland, N. 2003. Geotechnical rule development for ground instability assessment using intelligent GIS and networked monitoring sensors. In 3rd Canadian Conference of Geotechnique and Natural Hazards. Edmonton, Alberta, Canada. June 9 and 10.

⁴⁵ Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A. et al. 2005. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine Chain, southern Italy. *Geophysics*, 70(3), B11-B18.

⁴⁶ Schmutz, m., Guerin, R., Andrieux, P. et al. 2009. determination of the 3D structure of an earthflow by geophysical methods, The case of Super Sauze, in the French Southern Alps, *Journal of Applied Geophysics*, 68(4), 500-507.

⁴⁷ Boleve, A., Janod, F., Revil, A., Lafon, A. and fry, J. J. 2011. Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection. *Journal of Hydrology*, 403(3-4), 242-252.

⁴⁸ Ikard, S.J., Revil, A., Jardani, A. et al. 2012. Saline pulse test monitoring with the self-potential method to nonintrusively determine the velocity of the pore water in leaking areas of earth dams and embankments. *Water Resources Research*, 48.

⁴⁹ Linde, N., Revil, A., Boleve, A. et al. 2007a. Estimation of the water table throughout a catchment using self-potential and piezometric data in a Bayesian framework. *Journal of Hydrology*, 334, 88-98.

⁵⁰ Straface, S., Falico, C., Troisi, S., Rizzo, E. and Revil, A. 2007. Estimating of the transmissivities of a real aquifer using self-potential signals associated with a pumping test. *Ground Water*, 45(4), 420-428.

⁵¹ Suski, B., Revil, A., Titov, K. et al. 2006. Monitoring of an infiltration experiment using the self-potential method. *Water Resources Research*, 42.

⁵² Zhang, G. B. and Aubert, M. 2003. Quantitative interpretation of self-potential anomalies in hydrogeological exploration of volcanic areas: a new approach. *Near Surface Geophysics*, 1, 69-75.

⁵³ Naudet, V., Revil, A., Bottero, J. Y. and Begassat, P. 2003. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2091.

⁵⁴ Linde, N., Jougnot, D., Revil, A. et al. 2007b. Streaming current generation in two-phase flow conditions. *Geophysical Research Letters*, 34(3).

⁵⁵ Revil, A., & Jardani, A. 2013. *The self-potential method: theory and applications in environmental geosciences*. Cambridge University Press.

⁵⁶ 徐漢倫，2013，台灣天然電磁場觀測研究，國立中央大學博士論文。

⁵⁷ 楊凱傑，2014，利用互相關方法探討大地電場與地震波的耦合行為，國立中央大學碩士論文。

流密度的展示，如此在訊號研判上將更為清晰。在資料處理方面，地電阻影像法相對較為簡便，而自然電位則複雜許多，原因在於以監測方式所得到的自然電位資料量非常大，必須先分析出信號值，排除或消滅雜訊，再以數值模擬的方式，經由靈敏值分析可信度，才能進入逆推演算的過程，最後方能輸出成果。雖自然電位在各方面的處理上都較地電阻影像法繁瑣，但是以長時間近乎即時觀測的自然電位量測，使其具備偵檢出偶發事件訊號的能力，甚至可追溯出異常訊號的來源位置或方向，此部分在地電阻影像法是較難以達到的，因地電阻影像法量測成果的差異取決於材料物性的差異，許多偶發的「瞬間事件」，若非於探測過程中發生，在材料的物性上並不會出現明顯改變，只可能在事件發生時產生出一些微小的電化學反應造成電位異常，這部分的訊號是地電阻影像法無法探測出的，但在長時間的自然電位量測上卻是可以收集到這些異常信號。當應用在迷失電流調查時，若是以地電阻影像法進行探測，由於地電阻影像法本身存有人工電源，其他任何外部電流對於地電阻影像法都屬於干擾，將影響資料品質，而從地電阻影像法的成果中是幾乎無法推測這些干擾電源來自何處，甚至可能影響整體結果的可信度。而以自然電位進行量測時，由於並不存在任何人造電流的主動源，因此出現的異常訊號，都可藉由資料分析研判來源位置，這也是本研究使用自然電位為主要研究方法的原因。

第三章 研究成果

章節摘要

本章敘述本研究砂箱實驗成果，本研究依目的將實驗分為兩大階段，第一階段主要目的為測試本研究所設計之自然電位法觀測設備與程式是否穩定可信且合宜，將實驗設計於一個已知污染濃度並控制擴散流量的砂箱中進行，同時以地電阻影像法配合觀測，比對兩種方法的結果，並探討兩種方法在訊號研判上的方式及應用之適當時機與資料收集方式；第二階段實驗為本研究之主要目的，在存有人造電流源的砂箱中，以自然電位法進行觀測，評析此法之可行性。實驗整體規劃詳述於 3.1 節；3.2 節說明第一階段實驗設計；3.3 節探討地電阻影像法數值模擬成果；3.4 節說明第一階段地電阻影像法實驗成果；3.5 節說明第一階段自然電位法實驗成果；3.6 節說明第二階段實驗設計；3.7 節探討自然電位法數值模擬；3.8 節探討第二階段自然電位法偵檢迷失電流之實驗結果與成效。

3.1 實驗規劃

本研究共計執行九組砂箱試驗，其中第一階段(期中)執行三組實驗，主要目的在測試本研究所設計之自然電位量測系統軟硬體之穩定性與適用性，依結果進行優化調整，使其更適用於後續實驗量測；第二階段實驗(期末)則為本研究之最主要目的，以自然電位法偵檢迷失電流源實驗。第一階段實驗模擬一個污染源(cis-DCE)擴散情境，以跨孔(井)式的電極配置進行量測，量測方法包含地電阻影像法及自然電位法，除了測試本研究設計之自然電位量測系統軟硬體之穩定度與適用性以進行調整與優化之外，更同時與地電阻影像法成果進行比對，驗證其成效，同時探討地電阻影像法成像能力及兩種方法適用之量測方式。第二階段實驗則以人造電流模擬一個迷失電流源存在的環境，量測方法為自然電位法，同時以兩種不同的電極配置作為實驗及對照組，評析其對於不同位置之迷失電流源的解析能力，最後更於砂箱土層中置入導線仿擬地下管線，測試 SP 法除了調查迷失電流源區域之外，是否能同時探測到管線疑似易發生腐蝕的位置，八組實驗之分類摘要如表 3.1-1。

表 3.1-1 砂箱實驗規劃分類

第一階段 地電阻影像法與自然電位法比較實驗				
名稱	方法	背景電阻率	污水電阻率	備註說明
實驗一	地電阻影像法	300 ohm-m	> 1000 ohm-m	
實驗二	地電阻影像法	70 ohm-m	~ 100 ohm-m	
實驗三	自然電位法	地下水視導電率：534 μ S/cm	污水視導電率：526 ~ 531 μ S/cm	將兩種不同濃度含有微溶相之污水接續注入砂箱中，污水之視導電率與地下水視導電率非常相近，以自然電位法「即時監測」污染傳輸，依電位瞬間的變量研判污染擴散穿過量測電極對的時間，目的在於測試本研究設計之設備之穩定性、可行性及對於「微小」事件的探測能力。
第二階段 自然電位法偵檢地下迷失電流實驗				
名稱	方法	電極配置	迷失電流場源	埋設金屬導體
實驗四	自然電位法	跨孔等間距	地下對地表(場源一)	無
實驗五	自然電位法	跨孔等間距	地下對地下(場源二)	無
實驗六	自然電位法	跨孔等間距	地下對地表(場源一)	有
實驗七	自然電位法	共負不等間距	地下對地表(場源一)	無
實驗八	自然電位法	共負不等間距	地下對地下(場源二)	無
實驗九	自然電位法	共負不等間距	地下對地表(場源一)	有

3.2 第一階段砂箱實驗設計

第一階段的砂箱實驗設計構想為假設微溶相的含氯污染水溶液擴散至乾淨的地下水層時，兩種方法是否能探測出污染侵入的影像或信號，此實驗成果或可應用在污染前緣的調查。

首先設計實驗用砂箱，矩形砂箱長寬高幾何為 40x20x6 cm，有效填充空間為 38x15x3 cm（如圖 3.1-1）。量測方式設定為跨井式量測，因此將電極注入孔設計在砂箱兩側，最大電極數量各為 20 根電極。



圖 3.2-1 第一階段實驗砂箱

實驗方式係將填入粗砂假設為地層材料，後持續注入地下水並使其進流量與出水量相同維持飽和狀態，而後自砂箱上方注入不同濃度的 cis-DCE，使其自砂箱上方向下方移動擴散。地電阻影像法分別於單純地下水時與注入污染物後分別收集前後之資料；自然電位則是自填入砂質材料後即連續觀測 4 小時，過程中包含乾砂、飽和含水砂與不同濃度污染物侵入時的資料。地電阻影像法的實驗目的

為描繪污染擴散分布；自然電位法的實驗目的則時檢測污染前緣擴散出現的訊號與時間。由於兩種實驗的目的與解析度不同，因此污染水溶液的視導電率設計上略有差異。

3.3 地電阻影像法數值模擬成果

地電阻影像法在地表上的探測可以採用許多「標準(化)」型式的電極排列規則(standard electrode array)，像是 Wenner，Schlumberger，Dipole-Dipole(Szalai and Szarka, 2008⁵⁸)。但在 CHERT 探測時，因為不同場址井的深度與距離均不同，所配置的電極數量與間距也不同，並沒有像是在地表 ERT 標準型式的電極排列法。在真實探測時，是不可能量測完所有電極的組合，因為這將花費掉非常多的時間(al Hagrey and Petersen, 2011⁵⁹)。在 CHERT 的探測時，將電流極配置在兩口不同井內為配置準則的 Bipole-Bipole 電極組合具有較高的訊號雜訊比，所量測到的電位讀值較高(Bing and Greenhalgh, 2000⁶⁰)。而兩井內的電流極配置在不同深度呈現有角度而非水平時，也有助於提升高量測資料讀值；相反的，若是將電流極配置在同一井內，會出現許多低讀值，不利於影像結果的呈現。故在 CHERT 探測前必須先依場址中各井的設計與預計配置於井內電極的數量，並考慮量測時間與有效訊號等因素，設計出一套適合於該場址施測的電極排列。

針對本研究，首先以數值模擬的方式找出適合的電極排列，順推(forward) 使用 finite element method，模型網格 grid 為電極間距的一半，逆推(inversion)使用 smoothness constrained method。建立之場址地質背景與電極設置如圖 3.2-1a，圖中的電極分別建立在兩井中深度 16 m-35 m 的位置，電極間距 1 m，兩井的距離 12 m，此設計為案例 2 場址內其中兩口井的配置。模型假設地質條件為三層水平地層，第二層中包含兩塊矩形相對高(紅色色調)與相對低(藍色色調)的異常區。以數值模擬測試不同電極排列，找出最能描繪出原始模型影像的排列法。第一種類似 pole-dipole array，將一個電流極配置在地表無限遠處，另一個電流極與兩個電位極自井內第一根電極依序切換不同的位置與電極間距，模擬結果顯示與假設模型有很大的差異(圖 3.2-1b)，表示這種電極排列設計不適用於 CHERT 探測上。第二種電類似 dipole-dipole array，也稱之為 circulating dipole-dipole array，兩個電流極與兩個電位極自井內第一根電極開始依序切換不同的位置與電極間距，這種排列法同時包含了部分電流極分別設置在兩不同井中的 bipole-bipole 配置，影像成果顯示仍與初始模型仍有些差異(圖 3.2-1c)，特別是低電阻率異常區位置的偏移，

⁵⁸ Szalai, S., Szarka, L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting* 56(2), 159-175.

⁵⁹ al Hagrey, S. A., Petersen, T. 2011. Numerical and experimental mapping of small root zones using optimized surface and borehole resistivity tomography. *Geophysics* 76(2), G25-G35.

⁶⁰ Bing, Z., Greenhalgh, S. A. 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical prospecting* 48(5), 887-912

原因應低讀值的資料造成逆推演算時將會出現 misleading 的情況。第三種電極排列是本研究以 bipole-bipole 為原則設計出的電極配置，將電流極配置在不同井內，包含了水平、低角度與高角度的電流極配置，但在測試過程中發現，對角電極間距太遠時仍會出現低讀值的資料，影響逆推結果，因此將最大電極間距設定在 10 m 左右，約為有效電極配置長度 19 m 的一半，模擬結果如圖 3.2-1d，成果顯示與初始模型相當類似，同時能表現出地層與兩處異常區，後續的實驗與研究將以此電極排列進行資料收集。

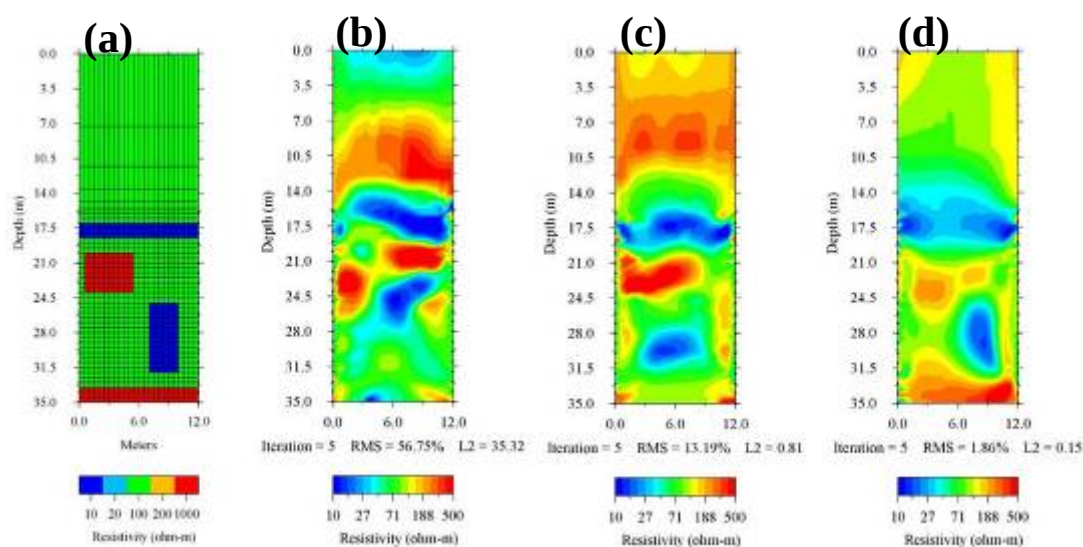


圖 3.3-1 電極排列數值模型。(a)地質模型；(b) pole-dipole array；(c) circulating dipole-dipole array；(d) 本研究設計的電極排列的逆推模型。

地電阻影像法能描繪出侵入地下水中的污染或注入的整治藥劑之分布的先決條件在於這些侵入地下環境的物質之電阻率必須與地質背景電阻率有所差異，當侵入的物質電阻率為地質背景的一倍或 1/2 時，單從電阻率影像就能描繪出分布範圍(圖 3.2-2)。但若是侵入的物質電阻率與地質材料的背景值很相近時，有時單從電阻率影像是較難描繪出分布範圍的，此時，時間序列(time-lapse)的資料處理方式將有助於解析出侵入物質的分布，時間序列的資料處理是將不同時間間隔的探測結果以等值圖方式描繪出電阻率或導電率的差異率，若是能以高頻率短時間間隔的方式收集資料，類似即時監測，則可以用時間序列的資料處理方式描繪出侵入物質的分布與傳輸的變化。假設物質侵入後電阻率變為 25 ohm-m(淺藍綠色色調)(圖 3.2-3a)，比背景(淺藍色色調)電阻率高 25%，此時的電阻率剖面與地質背景相較，難以描繪出污染範圍(圖 3.2-3b 與圖 3.2-3c)，但以時間序列的

資料處理方式，以電阻率差異變化率等值圖就能描繪出侵入物質的分布(圖 3.2-3d)。這樣的量測方式先決條件是地質的背景值幾乎完全沒有改變，以短時間間隔高頻率的方式收集資料最適合描繪出侵入地下物質的變化。在圖 3.2-3d 同時也發現在淺地層也出現了電阻率變化，這是因為模型的電極配置是自地表下 1 m 開始建立，淺層的電阻率差異是因為邊界效應所造成的演算誤差，因此當使用時間序列資料處理表現出電阻率差百分率等值圖時，位在剖面邊界的數值差異不能過度解釋，考慮範圍應是平均布滿電極的剖面中心。

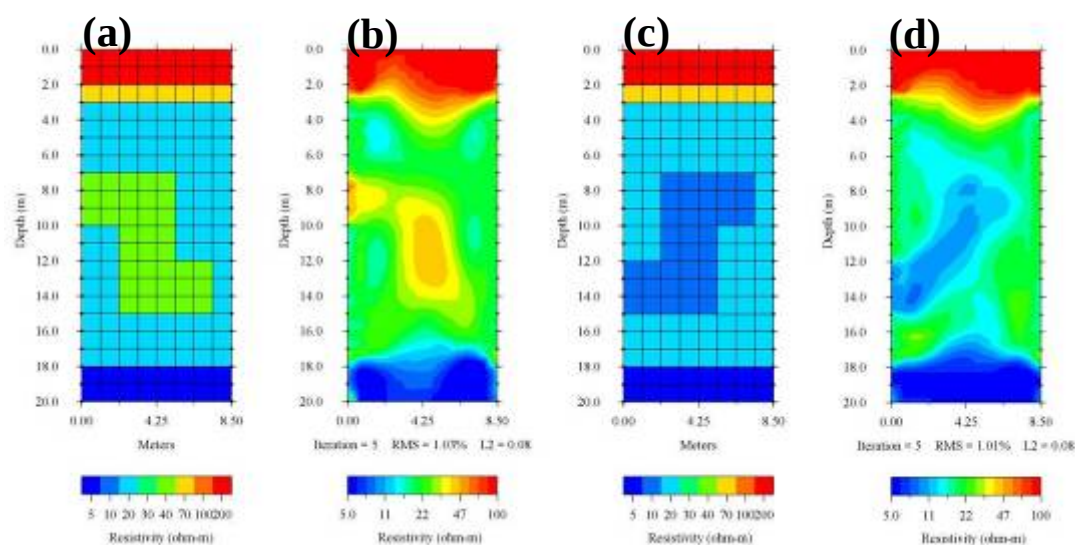


圖 3.3-2 不同電阻率侵入地質模型。(a) 污染物質電阻率為地質背景值 2 倍初始模型；(b) 污染物質為地質背景值 2 倍逆推模型；(c) 污染物質電阻率為地質背景值一半初始模型；(d) 污染物質為地質背景值一半逆推模型

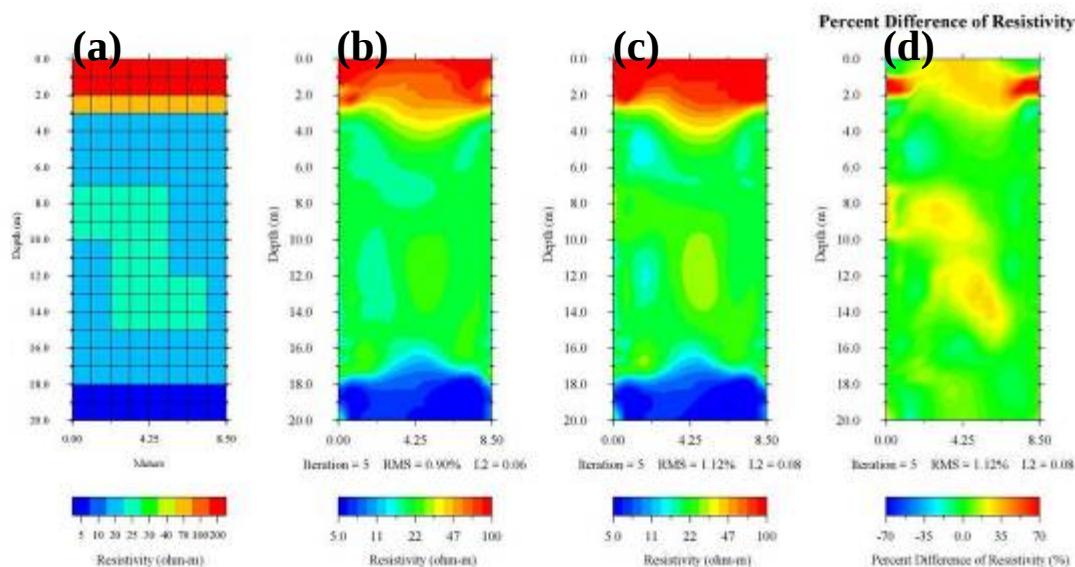


圖 3.3-3 侵入的污染物質電阻率與地質背景相近的模型。(a) 污染物質電阻率為 25 ohm-m，地質背景電阻率為 20 ohm-m；(b) 地質背景逆推模型；(c) 污染物質侵入後的逆推模型；(d) time lapse 資料處理，電阻率差異率等值圖。

3.4 第一階段地電阻影像法砂箱實驗成果

地電阻影像法屬於主動式的調查方式，也就是以一個人工電流注入材料後觀測材料的電性反應，因此，欲探測污染侵入後地層電性的改變，入侵的污染水溶液在電性上必須與背景環境有所差異。所以在第一階段地電阻影像法的砂箱實驗中(實驗一與實驗二)，係將入侵的污染水溶液與環境背景條件設計成不同的電性條件。實驗中砂箱所填入的材料均為粗砂，設定為固定的因子，而使其飽和的乾淨無污染的地下水及注入含氯污染水溶液則為控制變因，將使用不同導電率的地質進行實驗。地電阻影像法共設計兩組實驗，實驗一將背景環境控制在電阻率 300 ohm-m 左右，而注入之水溶液設計為含有 0.01 mg/L cis-DCE 微溶相且包含部分純相含氯有機溶劑的污染物(鄰近洩漏源)，因假設之污染水溶液仍伴隨著難溶相，故污水電阻率設定明顯高於背景環境，使其大於 1000 ohm-m 達 3 倍以上；實驗二則將背景環境控制在 70 ohm-m 左右，注入之水溶液同樣含有 0.01 mg/L 之 cis-DCE，但假設此時之污染水溶液已遠離洩漏源，此時之水溶液所含有的難溶相已減少許多，故控制污染水溶液的電阻率僅高於環境背景值 50%，約 100 ohm-m。地電阻影像法砂箱實驗照片如圖 3.4-1 所示。

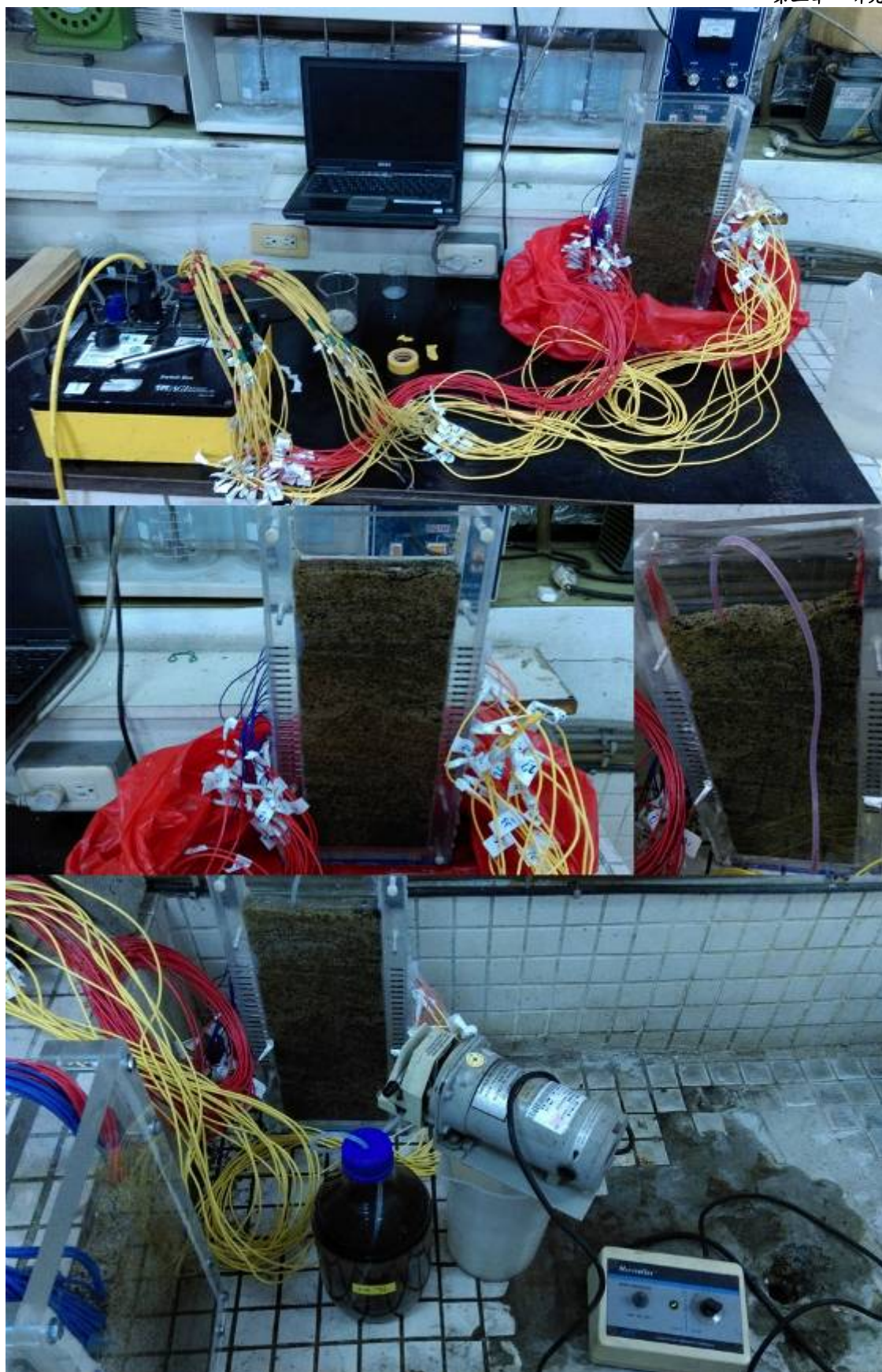


圖 3.4-1 第一階段地電阻影像法砂箱實驗照片

量測方式先量測飽和含水的砂質地層背景值，而後開始自砂層表面注入污染水溶液，污水注入後約 2 分鐘開始收進污染侵入後的地電阻影像法資料，地電阻影像法收集資料的範圍為砂層表面下方深度 7 cm 至 26 cm 的區域剖面，一筆地電阻影像法收集資料時間控制在 15 分鐘左右。污水注入方式為持續灌入，並使砂箱中液體的流進、出量維持相同。第一組實驗成果如圖 3.4-2 所示，結果顯示灌入污染水溶液前的乾淨飽和含水砂層電阻率約在 300 ohm-m (黃色色調)，當高電阻率的污染水溶液注入一段時間後，材料的電阻率明顯上升，平均而言，已超過 800 ohm-m (橙紅色色調)，擴散範圍已超過地電阻影像法有效量測深度的一半以上(>10 cm 深度)。

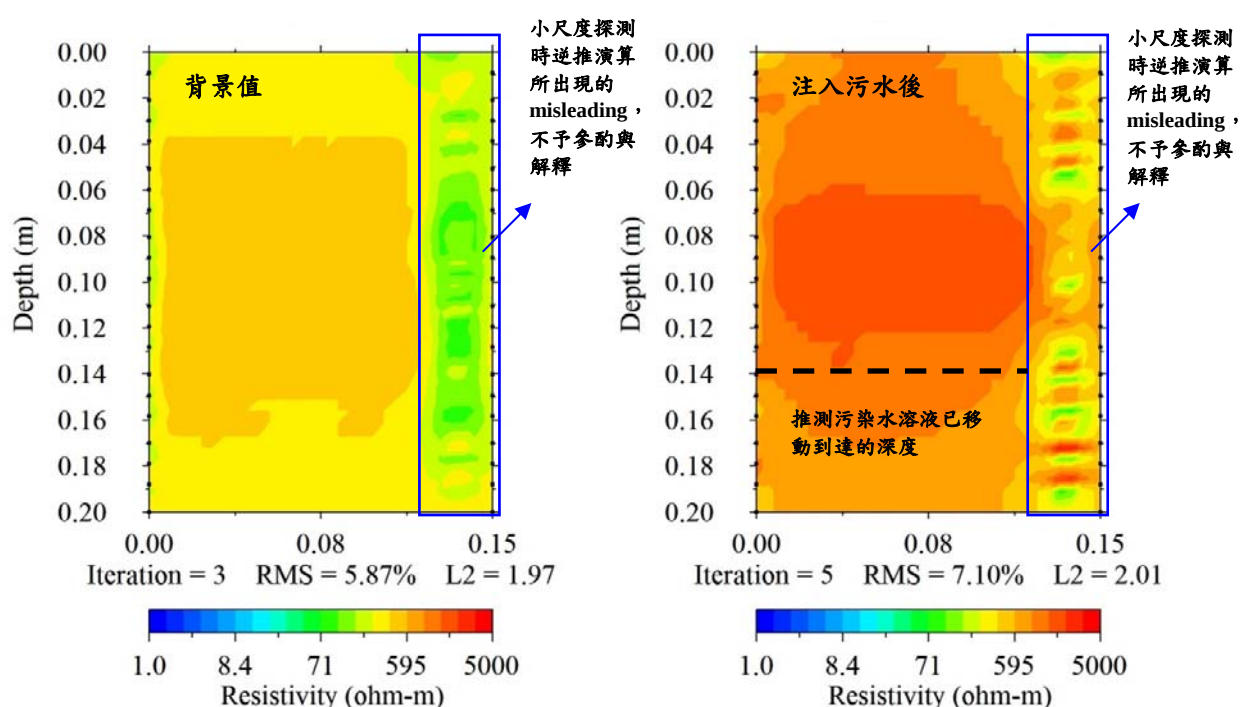


圖 3.4-2 實驗一—地電阻影像法砂箱實驗成果

實驗二成果如圖 3.4-3 所示，結果顯示灌入污染水溶液前的乾淨飽和含水砂層電阻率約在 70 ohm-m (綠色色調)，當高電阻率的污染水溶液注入一段時間後，材料的電阻率略微上升，平均而言，已超過 100 ohm-m (黃綠色色調)，從電阻率分布仍可研判擴散範圍已超過地電阻影像法有效量測深度的一半以上(>10 cm 深度)。實驗結果證明，即使污水中的純相物質已降低許多，使得電阻率下降，但當污染水溶液之電阻率仍與地下水有差異時，在電阻率剖面中仍可界定出污水的擴散移動的分布範圍。

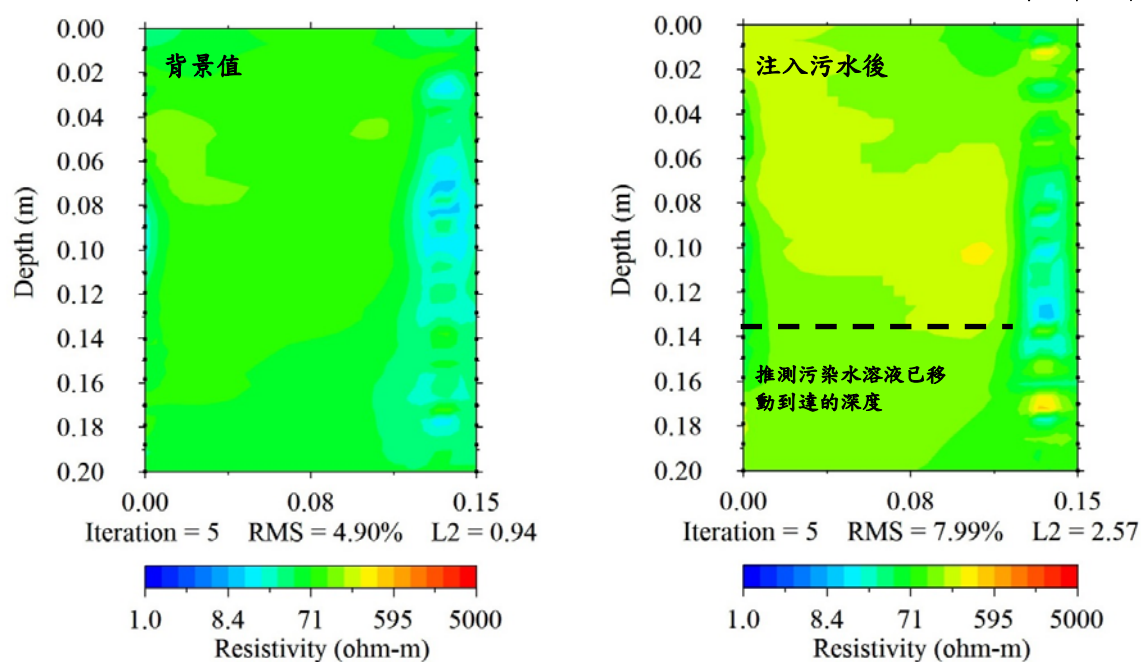


圖 3.4-3 第二組地電阻影像法砂箱實驗成果

地電阻影像法時間間隔序列(time-lapse)的資料處理方式可以電阻率(導電率)的差異率描繪出污水侵入地層後地層電性明顯改變的範圍，藉此更能描繪出污染擴散的分布。實驗一 time-lapse 成果如圖 3.4-4 所示。

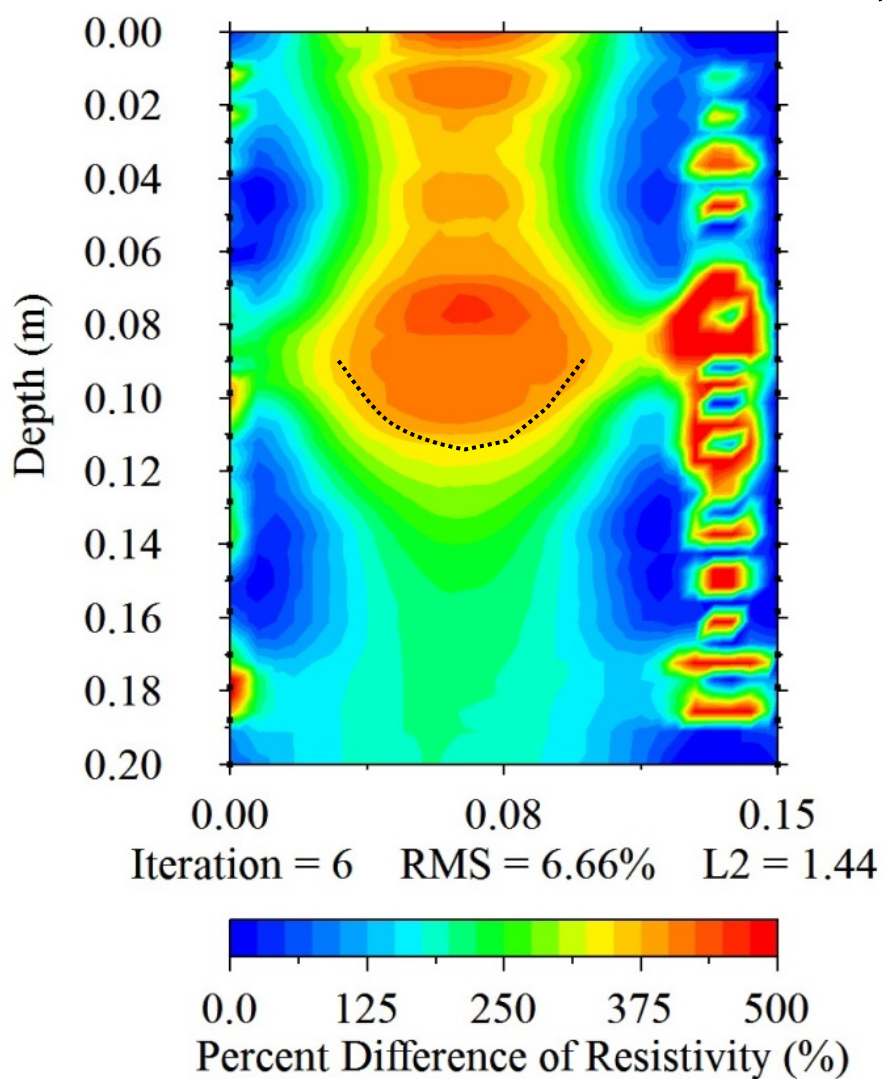


圖 3.4-4 地電阻影像法 time-lapse 電阻率差異率分布圖

從電阻率差異率分布圖更清楚地研判出當污水注入砂箱之後約 17 分鐘後，污水已自砂層表面向下移動超過 20 cm，這結果進而可推估此砂箱所使用的砂質材料水力傳導係數約在 0.02~0.025 cm/s 左右。

3.5 第一階段自然電位法砂箱實驗成果

自然電位法屬於被動式的調查方法，藉由觀測材料中所發生的「事件」引發的電化學反應而導致瞬間的電位變化，以研判環境中存在的現象，因此，當污染物侵入地層時，污染物的電性與背景值的差異並非是調查成功與否的決定因子，這也是自然電位法最大的優勢。也就是說，只要環境中任何可能造成瞬間材料電位的改變，只要是長時間的自然電位量測，都能記錄到這個訊號。這種瞬間的電位異常，並不表示材料的物性改變，而是指出材料中偶發的電場改變，事件結束之後，材料的電位仍會回到一個穩定狀態，這同時也說明，只要是長時間的自然電位「監測」，在精確且深入的資料分析前提下，是能夠獲得事件發生瞬間的訊號，與材料呈現穩定狀態的背景值「定性」結果，相較於地電阻影像法而言，自然電位法更具備了偵檢事件發生之「前兆」及「反應」的能力。應用在環境污染調查上，或可描繪出微量污染物在地層中擴散的情形，因地下水污染的擴散問題，有時並非是污染源(含有純相物質或高濃度的廢污水)直接的擴散，而可能是降解相的移動，這些降解相或微溶相在電性上未必會與原本的地下水有明顯的差異，所以，地電阻影像法未必有良好的探測成果，但使用自然電位法長期監測，則有機會收集到有效的資料，分析出可信度高的結果。故在第一階段自然電位的砂箱實驗中(實驗三)，將實驗情境模擬的更為嚴苛，除了可驗證自然電位法對於微小事件的偵檢能力之外，也同時測試本研究所設計之量測系統及程式界的穩定性與適用性，作為第二階段實驗修正與優化的參考。

實驗三設計條件為假設地下水環境中只有含氯有機溶劑「降解相」的擴散移動行為，也就是原本地下水的導電率與注入之污水的導電率幾乎沒有差異，評估低污染濃度的污水在地層中移動時，是否能藉由自然電位法探測出擴散的邊界範圍，這概念像似大範圍污染場址中污染前緣的調查。填入砂箱的材料同樣為粗砂，填充的水採用真實抽取之地下水，調配合氯有機溶劑所用之溶劑使用相同之地下水。地下水的視導電率為 $534 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，依續將注入之 cis-DCE 濃度為 0.01 mg/L 之導電率約為 $531 \mu\text{S}/\text{cm}$ ；濃度 0.02 mg/L 之導電率約為 $526 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，注入之污水單純為低濃度的微溶相，不包含任何難溶相的 NAPLs。此微小的電性若以地電阻影像法進行調查幾乎無法探測其污染侵入後的地層電性差異，但由於水溶液的化性不同，在擴散過程中仍可能有「極微小」的電位改變的「事件」發生，依此嚴苛的實驗條件，將能有效評估自然電位法的探測能力。自然電位的資料收集方式也與地電阻影像法不同，自砂箱中填入粗砂後即開始連續收集自然電位的資料(real time)，過程中將包含注入乾淨地下水與注入污染水溶液。當砂箱中注入地下水呈現飽和狀態後控制砂箱流進、出的速度維持一定，先持續記錄一段時間

的背景值資料，再切換注入之液體為 0.01 mg/L 之 cis-DCE，再持續記錄一段時的資料，而後切換注入之液體為 0.02 mg/L 之 cis-DCE。實驗三照片如圖 3.5-1 所示。



圖 3.5-1 第一階段自然電位法砂箱實驗照片

自然電位的量測成果以不同深度的訊號隨時間出現的方式表現之，第一階段的砂箱實驗係將電極配置方式設定為跨孔等間距式，配置方式依深度自淺而深共分為7層，其中一層為參考電位(圖 3.4-2)，第1~6層分別表示自淺而深的自然電位訊號。成果圖由深度及時間的展現方式可探測出污染向下擴散時前緣在某深度到達的時間，以單層梯度法分析則能解析出各深度在背景值與污染到達時自然電位的微量差異改變。

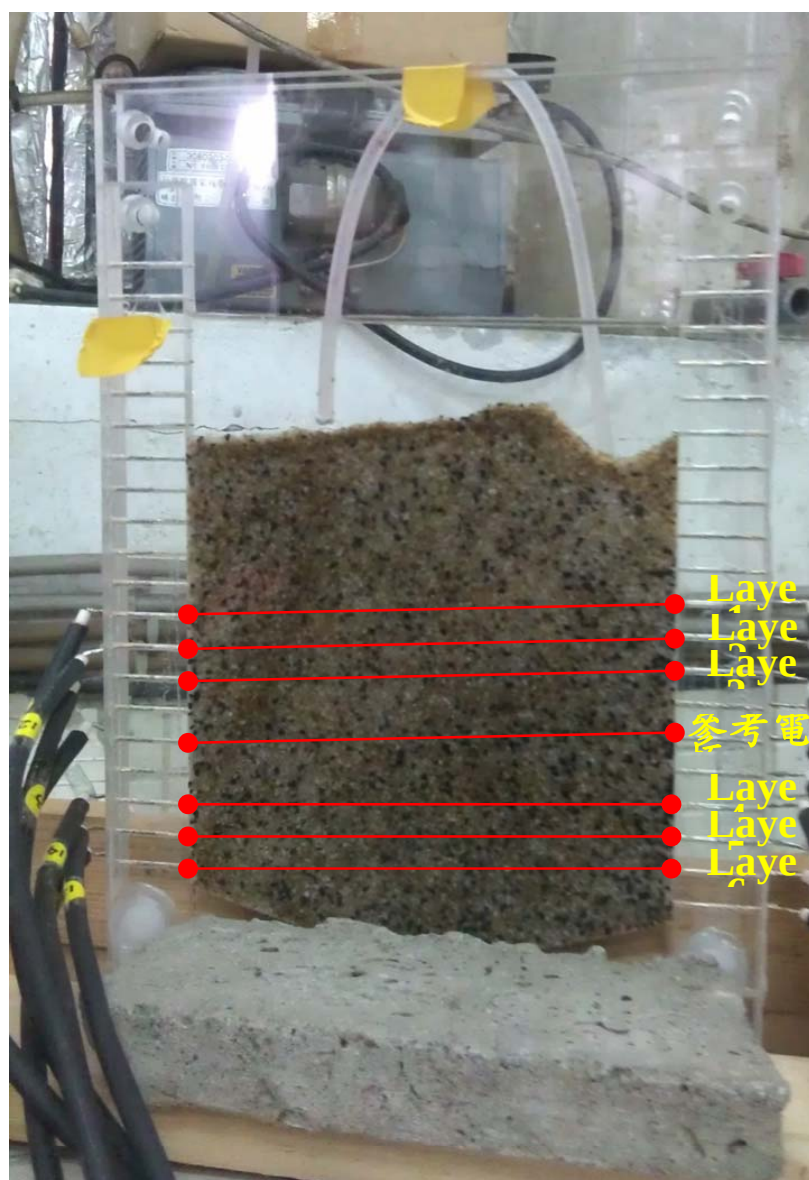


圖 3.5-2 自然電位量測電極設定說明

自然電位實驗量測原始數據成果如圖 3.5-3，結果顯示當污染前緣擴散至各不同深度時，因電化學反應致使各層的自然電位產生微量的峰值，此峰值出現的時間即能指出污染擴散的行為，當峰值回復至原來穩定的訊號時，表示污染水溶液

已完全擴散布滿這個深度。事實上，這些訊號出現的時間非常短，且訊號變化也很微量，但使用長時間且高解析度的自然電位觀測方法，再經過仔細的訊號分析與比對，這些「瞬間事件」的訊號仍是可以有效被定出的，這也是本研究將以自然電位法偵檢迷失電流的原因，因為迷失電流的出現不會是一個固定頻率的長時間訊號，必須仰賴長時間的監測，並配合現場環境的觀察，才能有效界定出現的時間與位置。

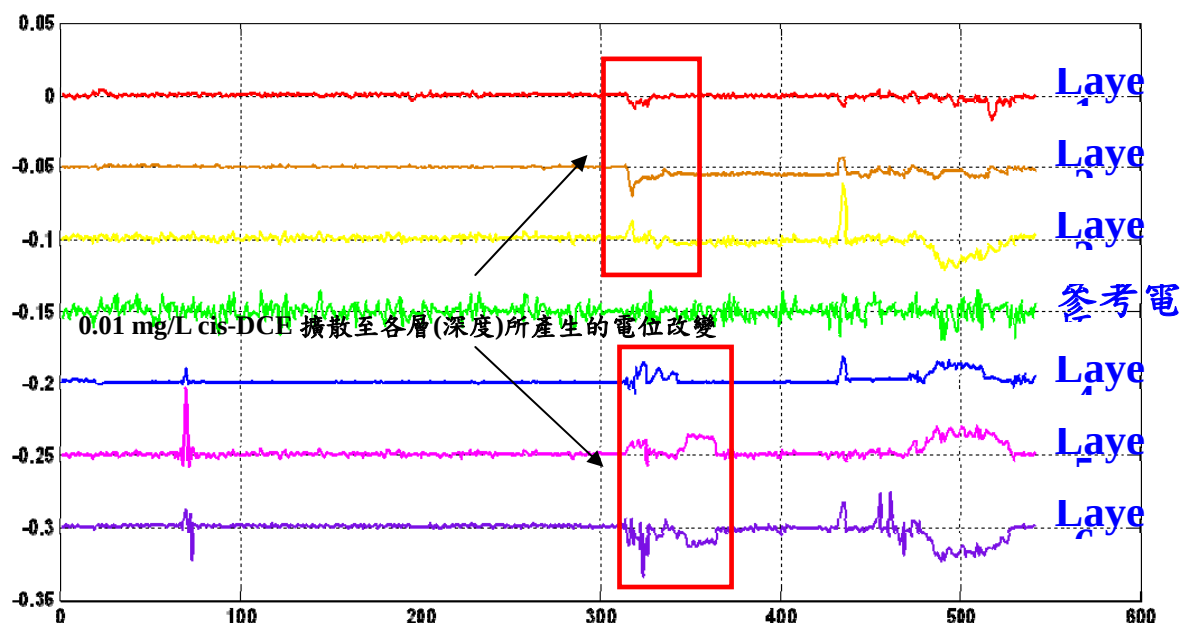


圖 3.5-3 自然電位實驗量測原始數據成果

自然電位梯度法 Layer 1 的資料分析成果如圖 3.5-4 所示。從成果圖也能界定出背景值、0.01 mg/L 與 0.02 mg/L cis-DCE 污染物侵入後的電位值的差異。

在進行污染擴散實驗的同時，另外也觀測到砂箱漏水的訊號，這訊號來自於砂箱側壁接合處的漏水現象(圖 3.5-5)，這訊號出現的時間與漏水的頻率完全契合，這結果同樣也說明了自然電位在監測環境事件上的優勢。

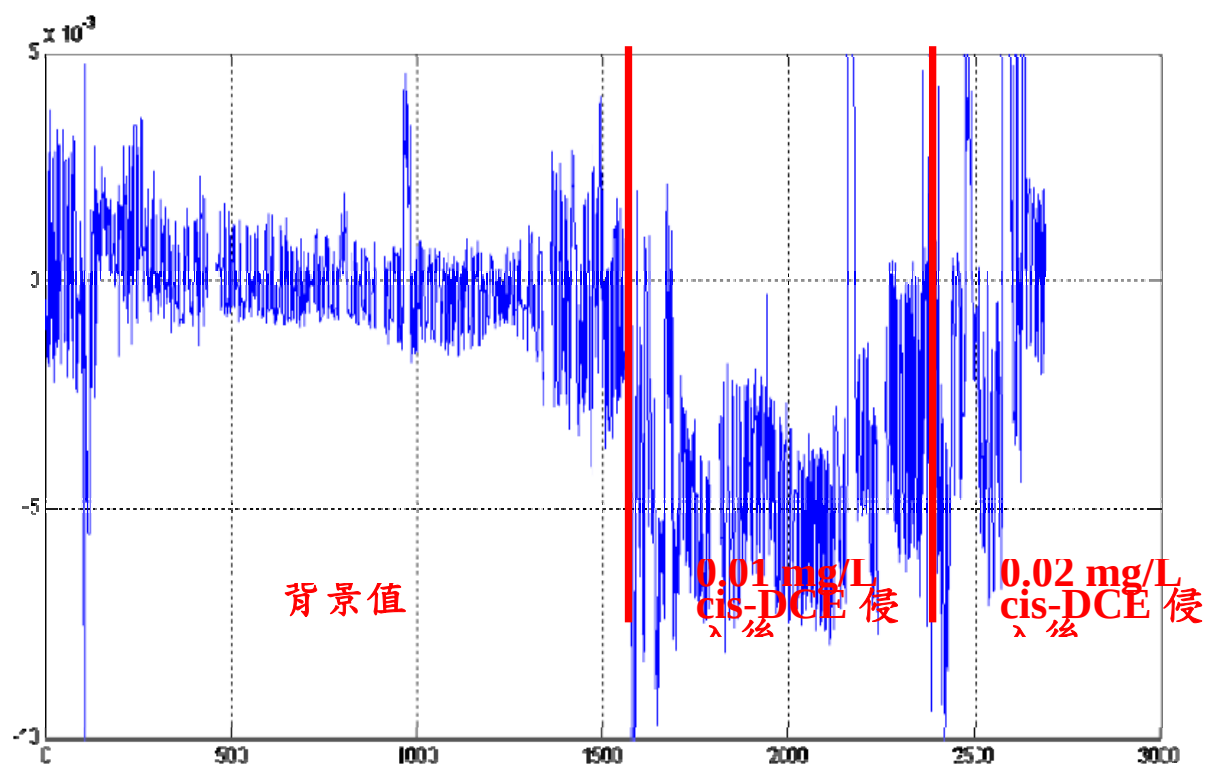


圖 3.5-4 自然電位第一層梯度法分析成果

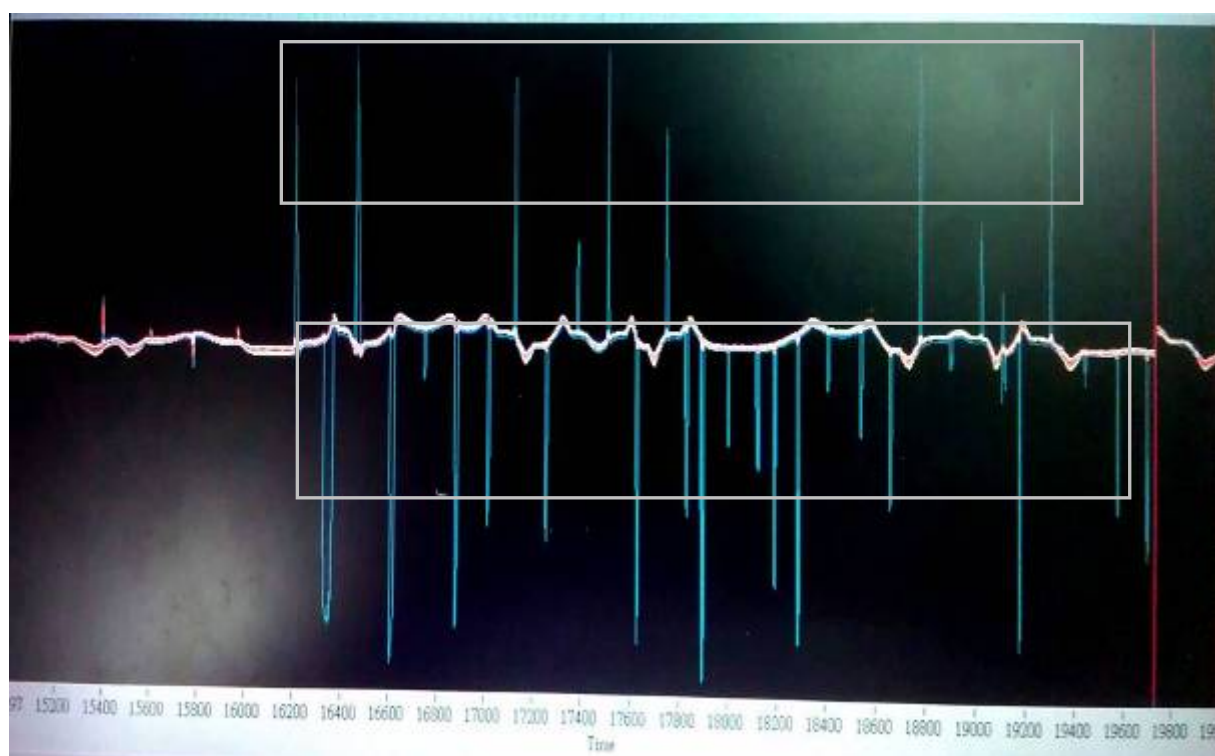


圖 3.5-5 漏水事件自然電位觀測之成果

3.6 第二階段自然電位法砂箱實驗設計

第二階段以自然電位法執行六組砂箱實驗(實驗四~實驗九)，目的為探測砂箱中的人造電流源，以模擬環境中存在的迷失電流。實驗用的矩形砂箱長寬高為20x3x32.5 cm，以紅土填充之，實際填充空間為15x1x22 cm(圖 3.6-1)。兩側各有20個電極插槽，各孔間距為1 cm。觀測資料使用之記錄器為DAQ(圖 3.6-2)

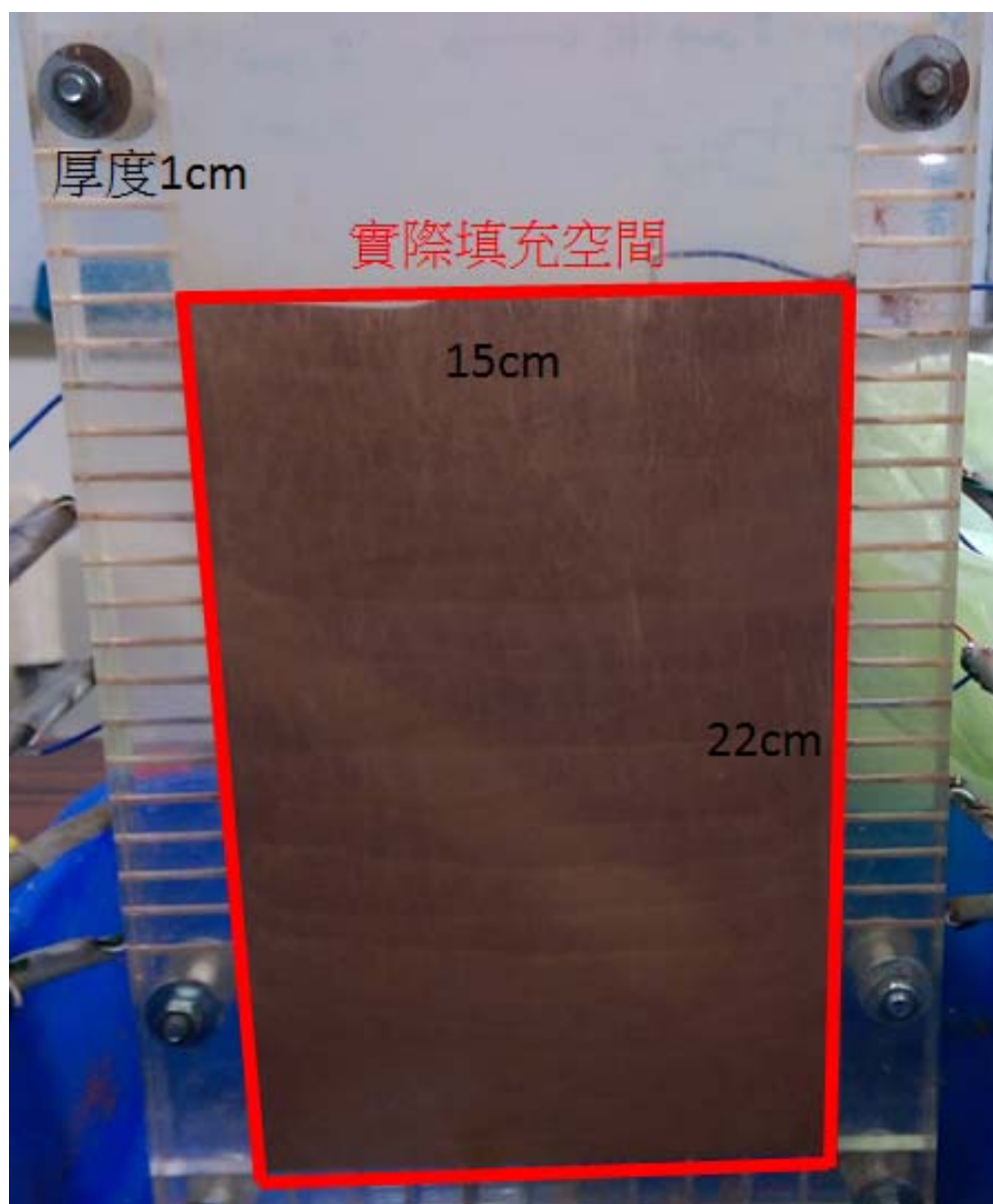


圖 3.6-1 第二階段實驗砂箱

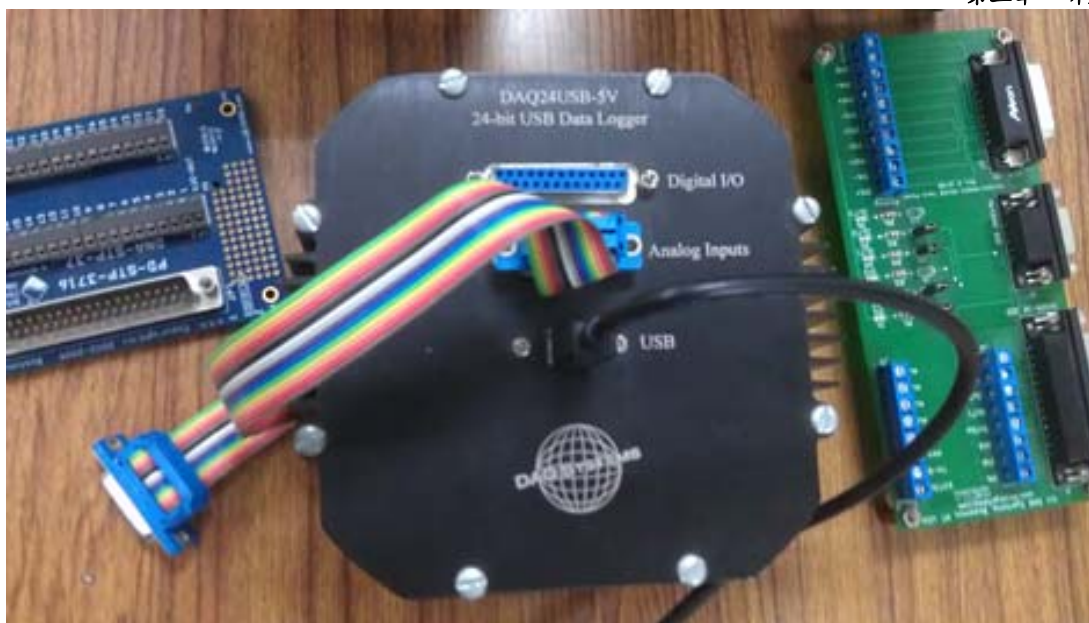


圖 3.6-2 DAQ 記錄器

將實驗設計分成兩種不同的電極排列方式收集資料進行比對，跨孔等間距排列法(實驗四、五、六)與共負排列法(實驗七、八、九)，跨孔等間距排列係指將四組正負電極對分別配置於砂箱左右四個相同深度的位置(圖 3.6-3)；共負排列法則係指將四個正極配置於砂箱一側四個不同深度，再將負極配置於砂箱另一側相同深度位置上(圖 3.6-4)。

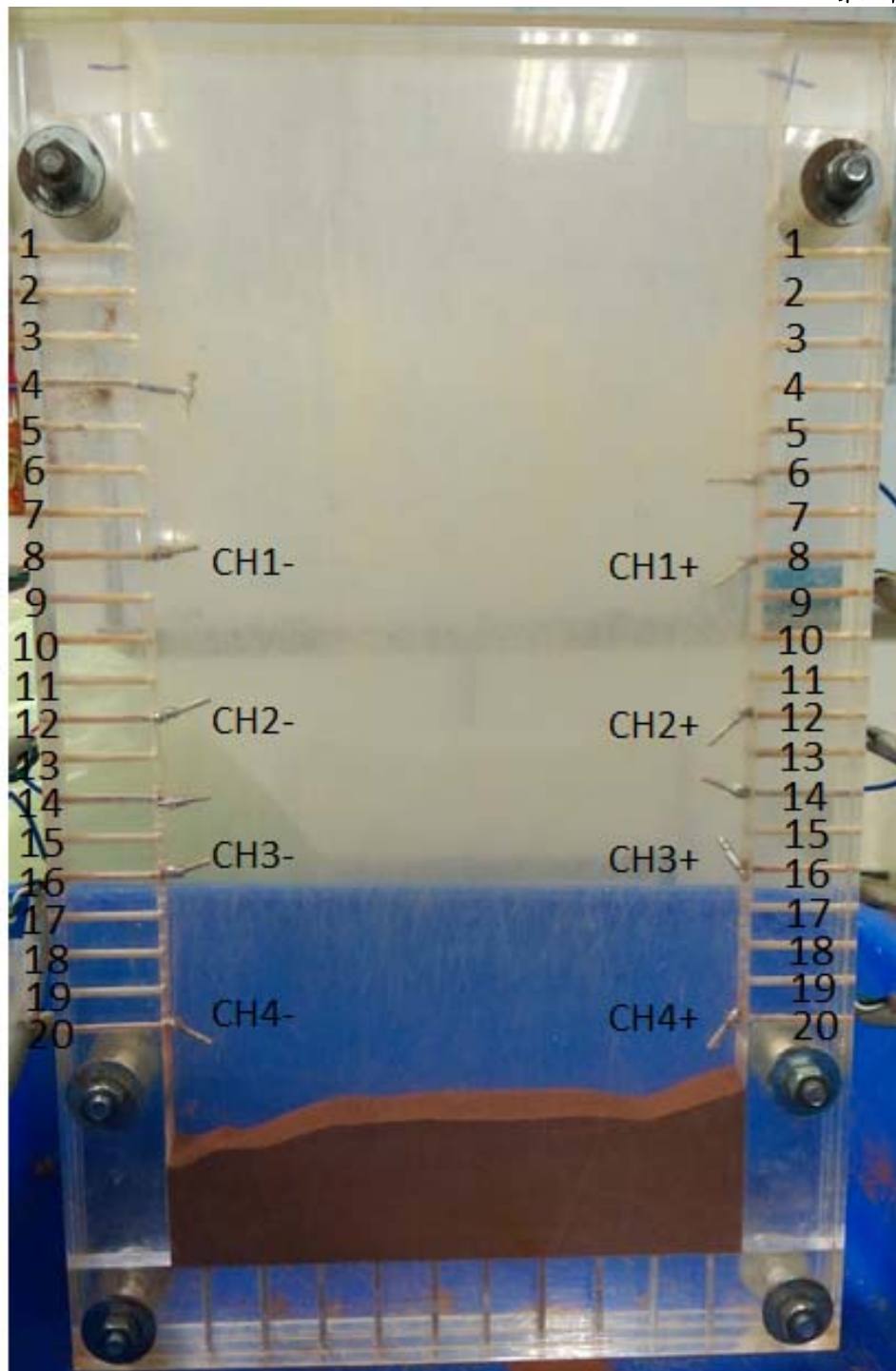


圖 3.6-3 跨孔等間距電極排列法

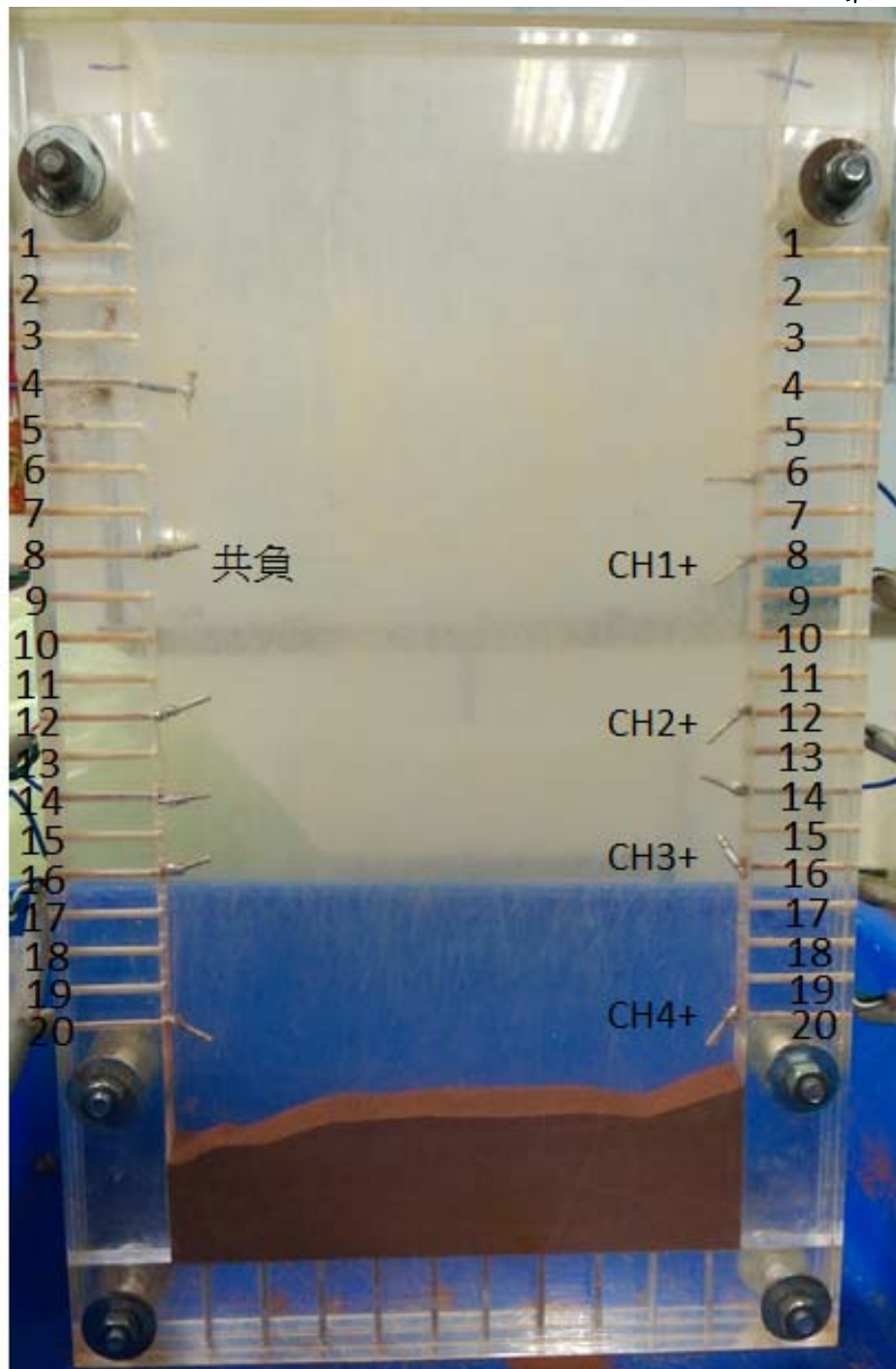


圖 3.6-4 共負電極排列法

兩種電極排列法另各自收集兩種不同位置之迷失電流場源資料，場源一是將人造電流正負極分別置於地下與地表，模擬自地表傳入地層中的迷失電流源(例如：避雷針、鐵軌)；場源二則是將人造電流正負極置於地下，模擬來自地表下的迷失電流源(例如：捷運、具陰極防蝕的管線)，即砂箱左右兩側相同深度的位置。更再針對場源一增加埋設導線於土層中的實驗，模擬地層中存在一金屬地下管

線。第二階段六組實驗之設計與步驟分述如后：

實驗四(圖 3.6-5)

- 1、將場源電極及紀錄器電極前端焊上 1cm 的探針，使其深入土槽 1cm。
- 2、將記錄器正負電極分別置入砂箱兩側的第 8 孔(channel 1)、第 12 孔(channel 2)、第 16 孔(channel 3)、第 20 孔(channel 4)。
- 3、將場源負極置於紅土表面(第 4 個孔)且距負端 4cm 處；正極置於右端第 14 孔。
- 4、將土槽填充粒徑大小為 0.25mm 之紅土至第 4 孔高度，並將紅土壓密。
- 5、通入直流電源(19.24V)後，將紀錄器後端接上 DAQ 開始收集資料。

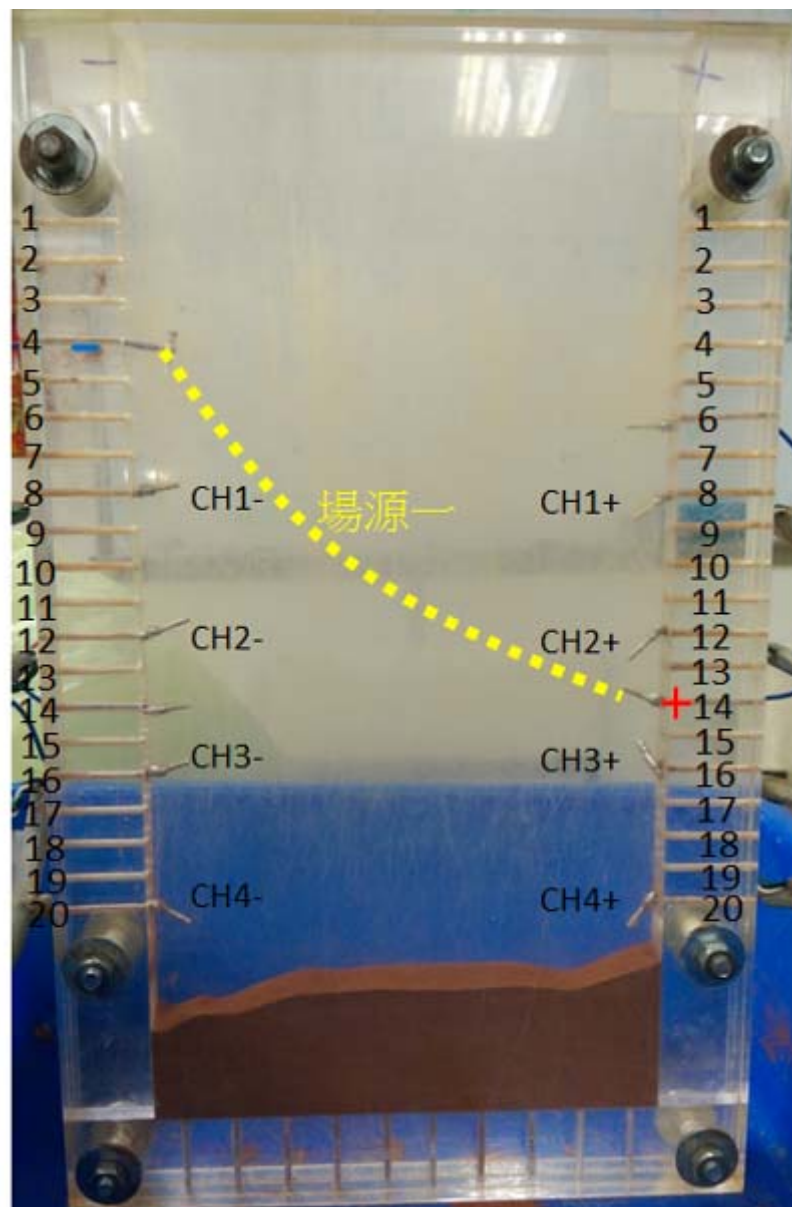


圖 3.6-5 實驗四設計示意圖

實驗五(圖 3.6-6)

- 1、將場源電極及紀錄器電極前端焊上 1cm 的探針，使其深入土槽 1cm。
- 2、將記錄器正負電極分別置入砂箱兩側的第 8 孔(channel 1)、第 12 孔(channel 2)、第 16 孔(channel 3)、第 20 孔(channel 4)。
- 3、將場源正負兩極接在左右兩側的第 14 孔。
- 4、將土槽填充粒徑大小為 0.25mm 之紅土至第 4 孔高度，並將紅土壓密。
- 5、通入直流電源(19.24V)後，將紀錄器後端接上 DAQ 開始收集資料。

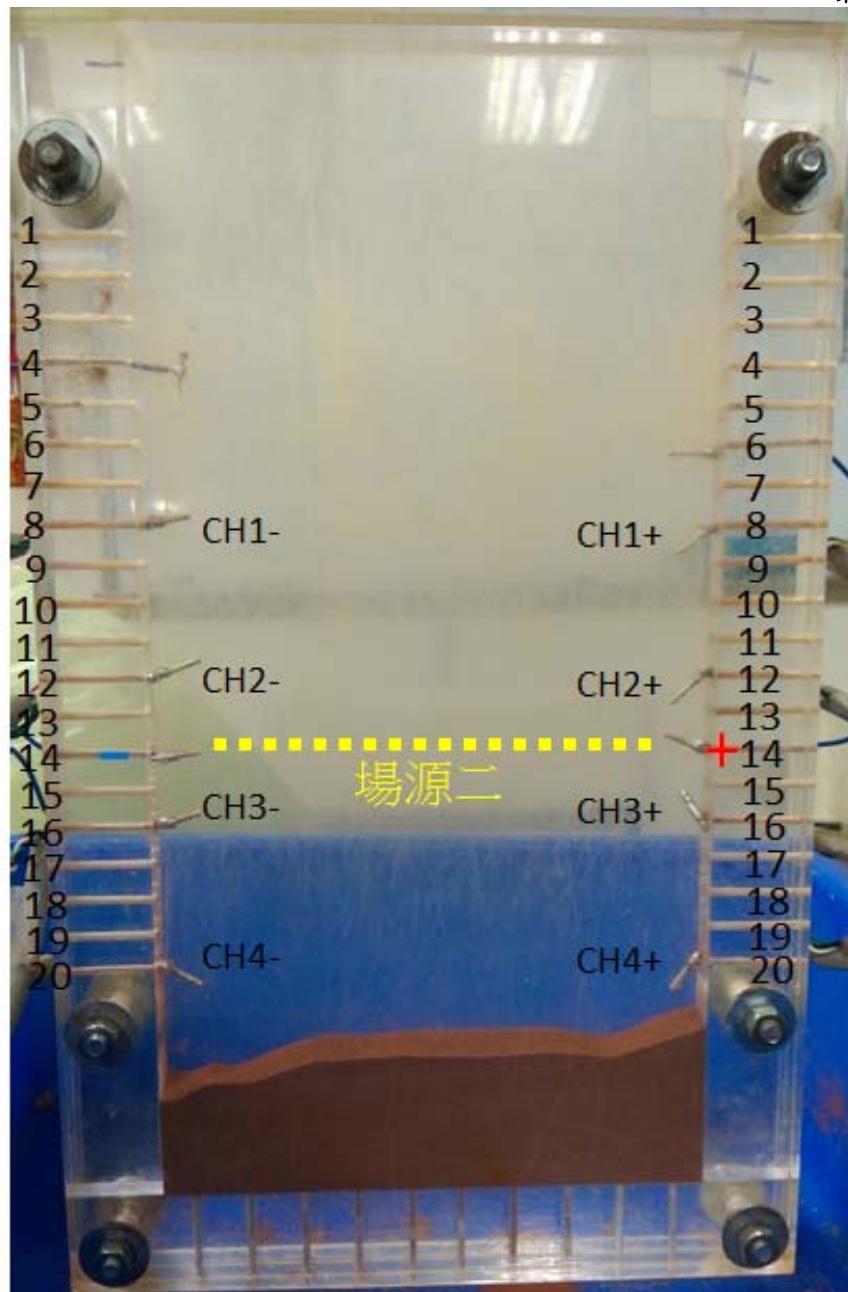


圖 3.6-6 實驗五設計示意圖

實驗六(圖 3.6-7)

- 1、將場源電極及紀錄器電極前端焊上 1cm 的探針，使其深入土槽 1cm。
- 2、將記錄器正負電極分別置入砂箱兩側的第 8 孔(channel 1)、第 12 孔(channel 2)、第 16 孔(channel 3)、第 20 孔(channel 4)。
- 3、將場源負極置於紅土表面(第 4 個孔)且距負端 4cm 處；正極置於右端第 14 孔。
- 4、將一導線埋入砂箱，水平置中。
- 5、將土槽填充粒徑大小為 0.25mm 之紅土至第 4 孔高度，並將紅土壓密。

6、通入直流電源(19.24V)後，將紀錄器後端接上 DAQ 開始收集資料。

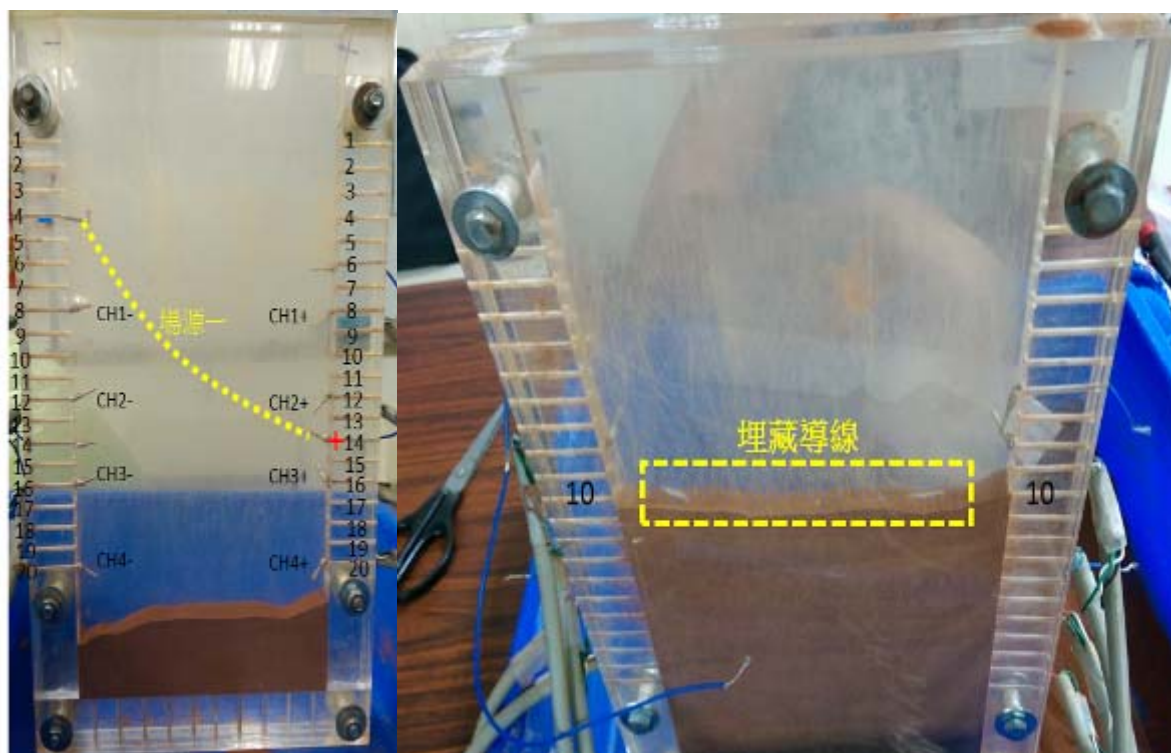


圖 3.6-7 實驗六設計示意圖

實驗七(圖 3.6-8)

- 1、將場源電極及紀錄器電極前端焊上 1cm 的探針，使其深入土槽 1cm。
- 2、將記錄器負極置入左側第 8 個孔(channel 1-4)；正極置入右側第 8 孔(channel 1)、第 12 孔(channel 2)、第 16 孔(channel 3)、第 20 孔(channel 4)。
- 3、將場源負極置於紅土表面(第 4 個孔)且距負端 4cm 處；正極置於右端第 14 孔。
- 4、將土槽填充粒徑大小為 0.25mm 之紅土至第 4 孔高度，並將紅土壓密。
- 5、通入直流電源(19.24V)後，將紀錄器後端接上 DAQ 開始收集資料。

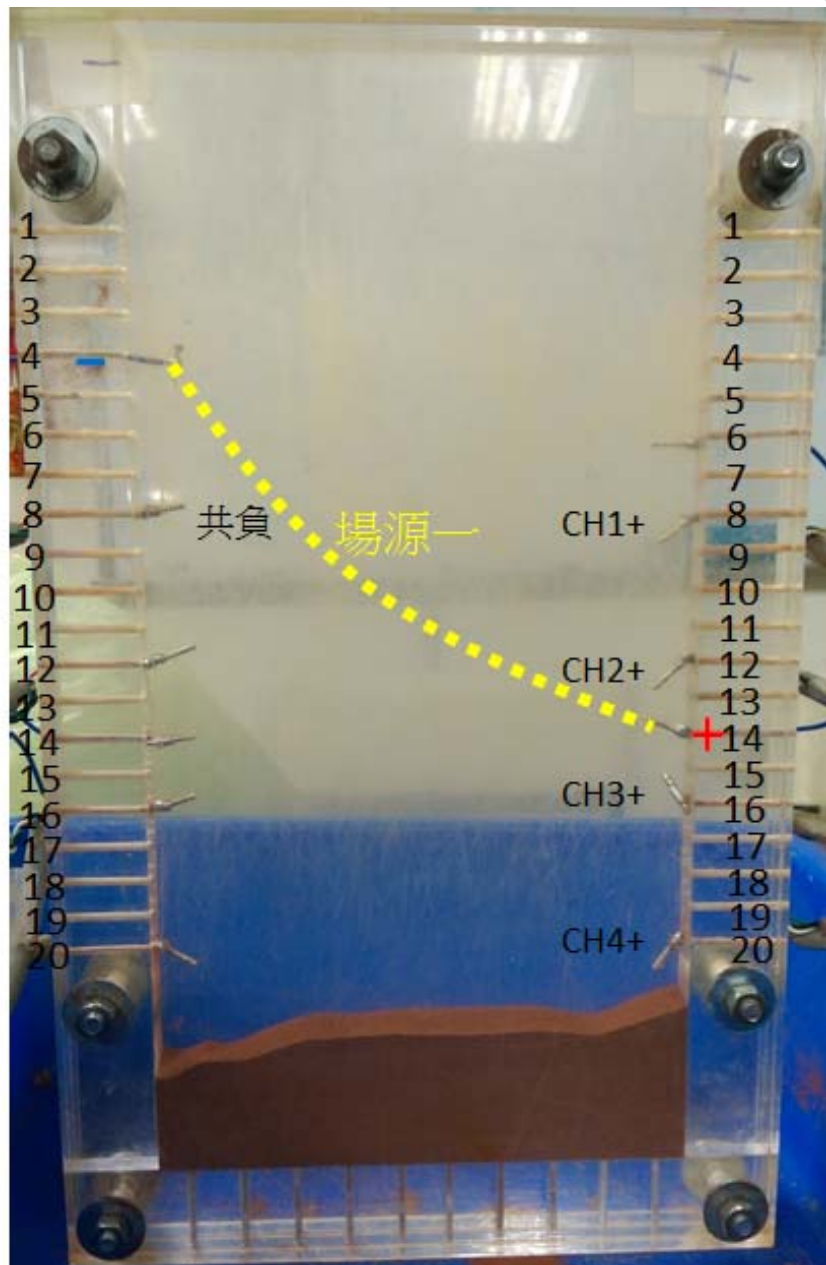


圖 3.6-8 實驗七設計示意圖

實驗八(圖 3.6-9)

- 1、將場源電極及紀錄器電極前端焊上 1cm 的探針，使其深入土槽 1cm。
- 2、將記錄器負極置入左側第 8 個孔(channel 1-4)；正極置入右側第 8 孔(channel 1)、第 12 孔(channel 2)、第 16 孔(channel 3)、第 20 孔(channel 4)。
- 3、將場源正負兩極接在左右兩側的第 14 孔。
- 4、將土槽填充粒徑大小為 0.25mm 之紅土至第 4 孔高度，並將紅土壓密。
- 5、通入直流電源(19.24V)後，將紀錄器後端接上 DAQ 開始收集資料。

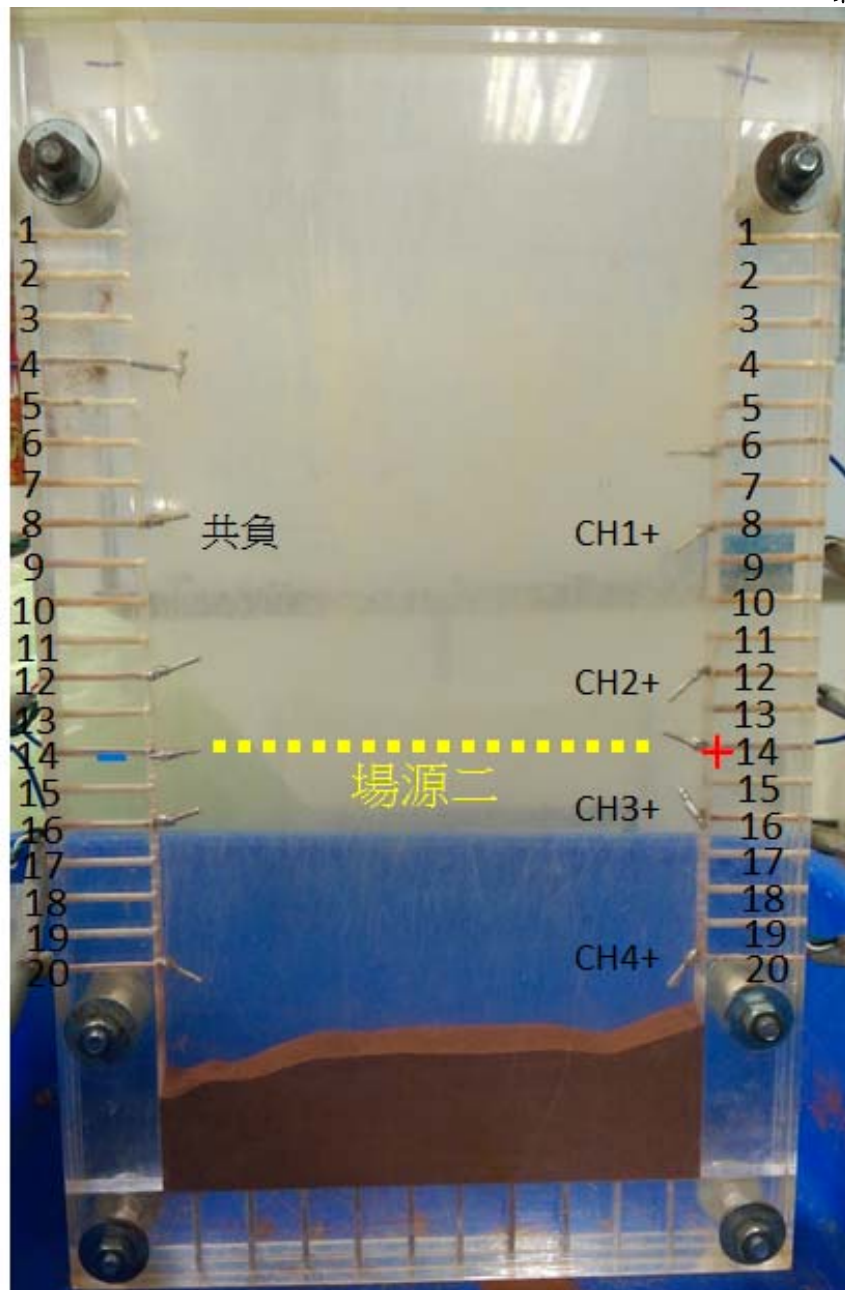


圖 3.6-9 實驗八設計示意圖

實驗九(圖 3.6-10)

- 1、將場源電極及紀錄器電極前端焊上 1cm 的探針，使其深入土槽 1cm。
- 2、將記錄器負極置入左側第 8 個孔(channel 1-4)；正極置入右側第 8 孔(channel 1)、第 12 孔(channel 2)、第 16 孔(channel 3)、第 20 孔(channel 4)。
- 3、將場源負極置於紅土表面(第 4 個孔)且距負端 4cm 處；正極置於右端第 14 孔。
- 4、將一導線埋入砂箱，水平置中。

- 5、將土槽填充粒徑大小為 0.25mm 之紅土至第 4 孔高度，並將紅土壓密。
- 6、通入直流電源(19.24V)後，將紀錄器後端接上 DAQ 開始收集資料。

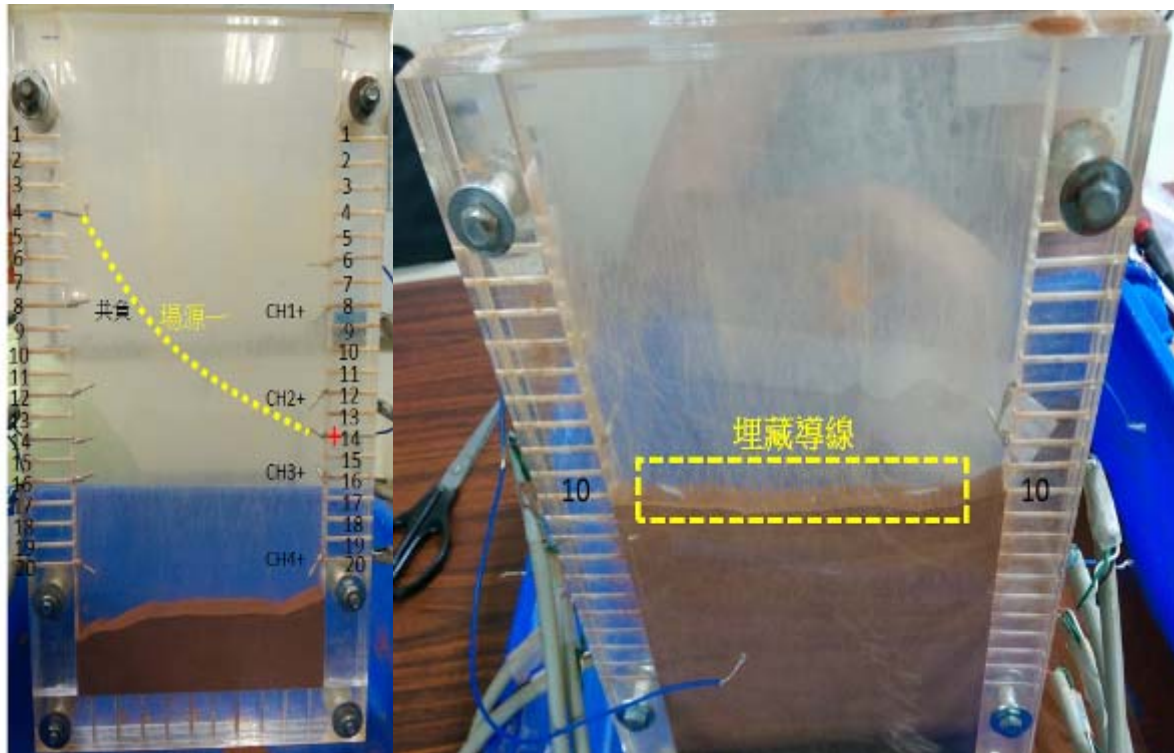


圖 3.6-10 實驗九設計示意圖

分作陣列排列、場源擺放及金屬導線的有無進行比對。以下使用兩種陣列：正負極接收電位陣列及共負極接收電位陣列。設定方式一為將電極排列以正負極接收電位陣列量測，因此將量測 8 根電極分別置入位在兩側正負兩端的第 8 個孔(channel 1)、第 12 個孔(channel 2)、第 16 個孔(channel 3)、第 20 個孔(channel 4) (圖 4.2-3)。

3.7 自然電位法數值模擬

針對第二階段實驗，首先先以數值模擬評析兩種排列法靈敏值分布，瞭解空間解析能力，電極配置之間的範圍屬靈敏值較高的區域，因此逆推範圍常以電極配置作為邊界條件，本研究中電極配置都配置在砂箱兩側或土層表面，故靈敏值分布與逆推範圍皆以砂箱中填入土壤材料的區域計算討論之。跨孔等間距排列法靈敏值分布如圖 3.7-1，共負排列法靈敏值分布如圖 3.7-2。

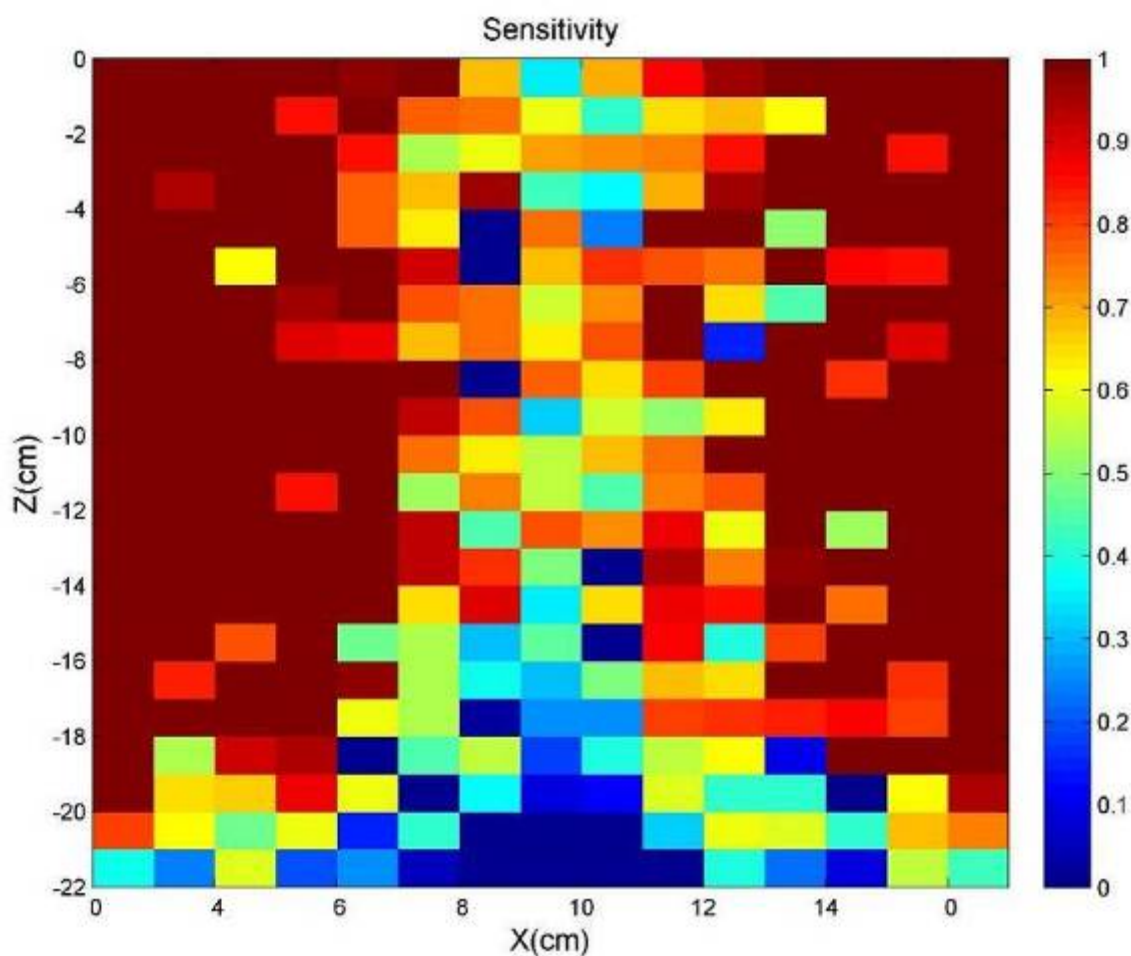
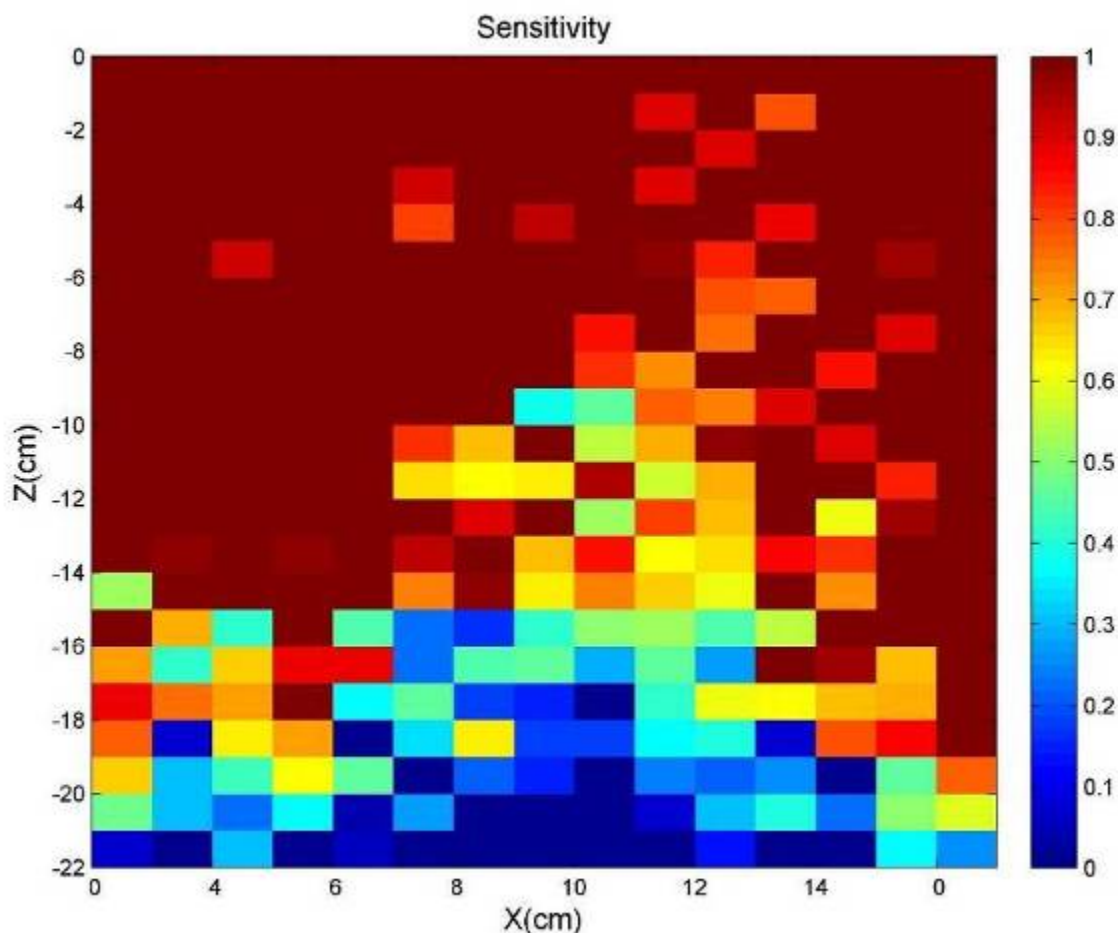


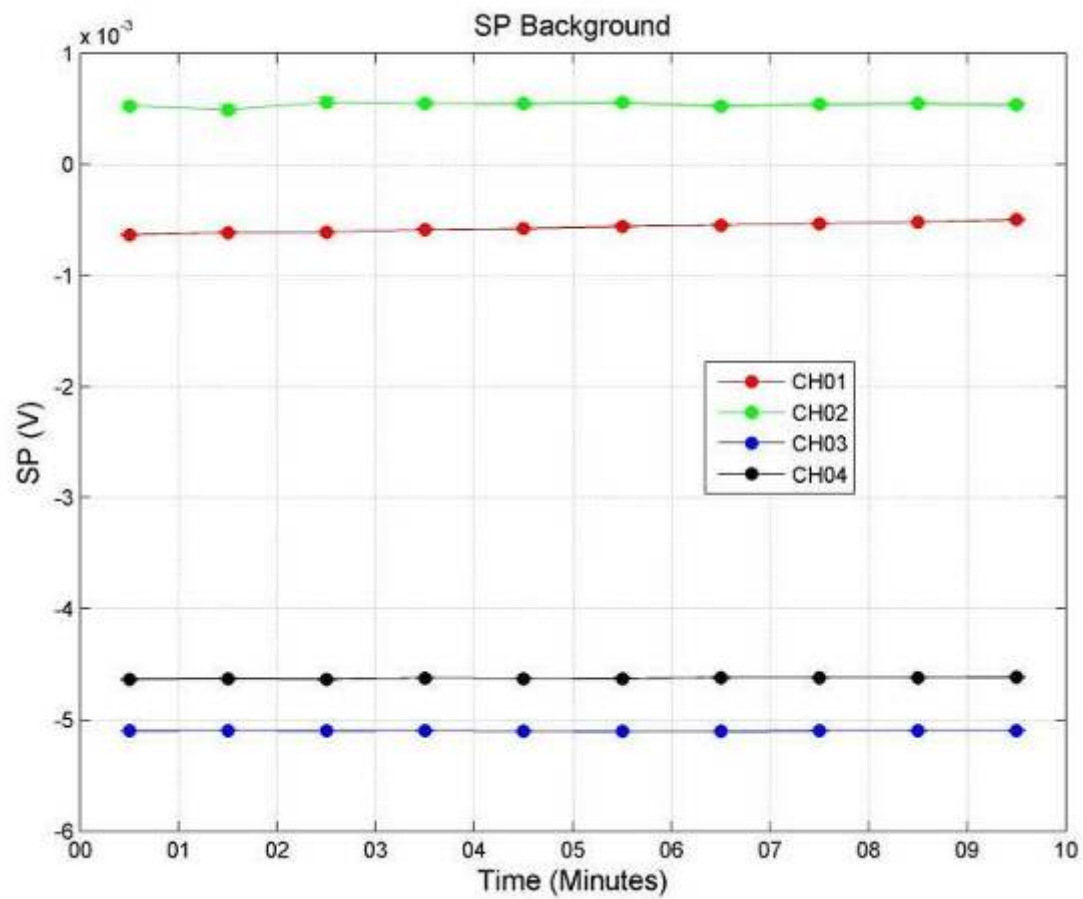
圖 3.7-1 跨孔等間距排列法靈敏值分布



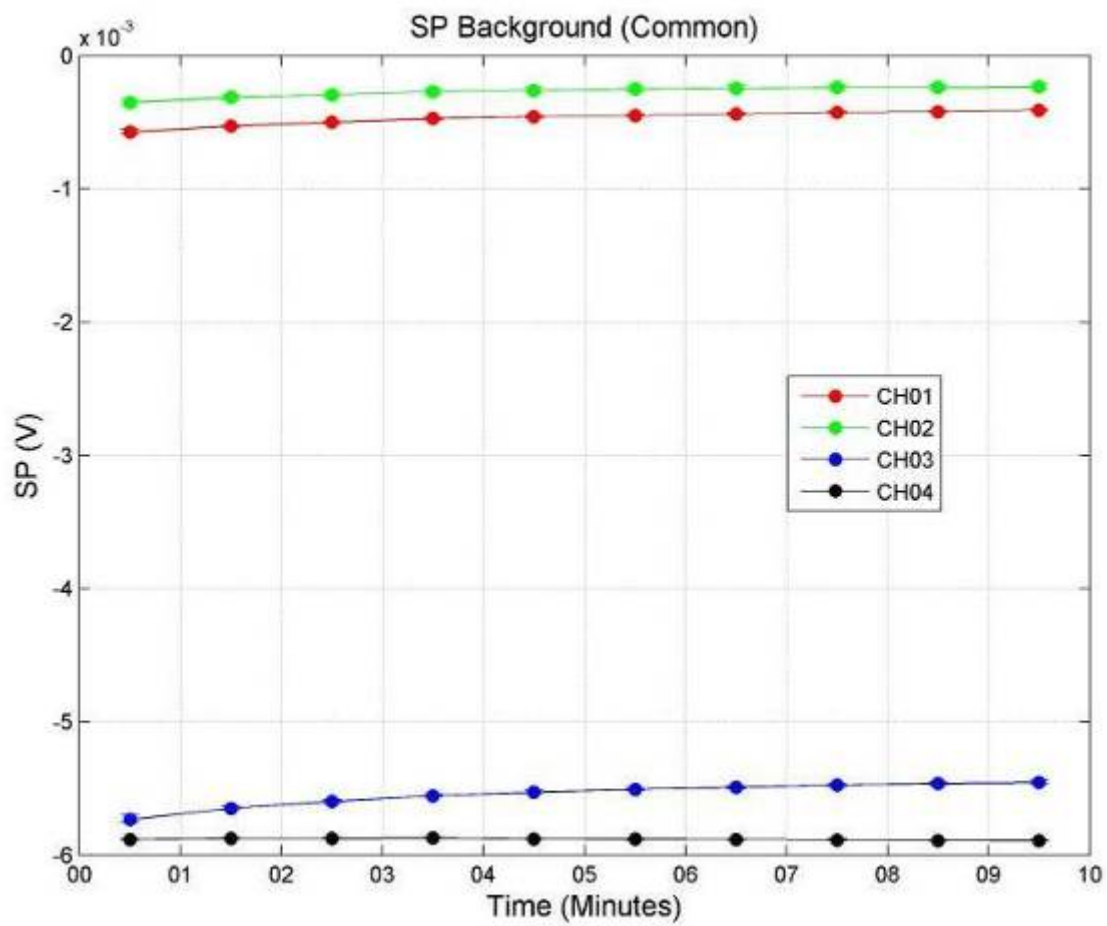
3.7-2 共負排列法靈敏值分布

靈敏值分布圖皆設定左側為負極，右側為正極，大於 0 的區域表示電位的浮動大於 1mV，為可信賴區間。由模擬結果可發現跨孔等間距排列法在兩側有較佳的解析能力；而共負極排列法在右側及左上側具有較高的靈敏值，但相對而言，深部環境的解析能則較低。以靈敏值空間分布而言，跨孔等間距排列法分布較為對稱且平均，且高靈敏值(>0.1)的區間較大，表示在逆推影像的呈現上或較能解析出整體異常訊號的分布，較不易產生偏移量。

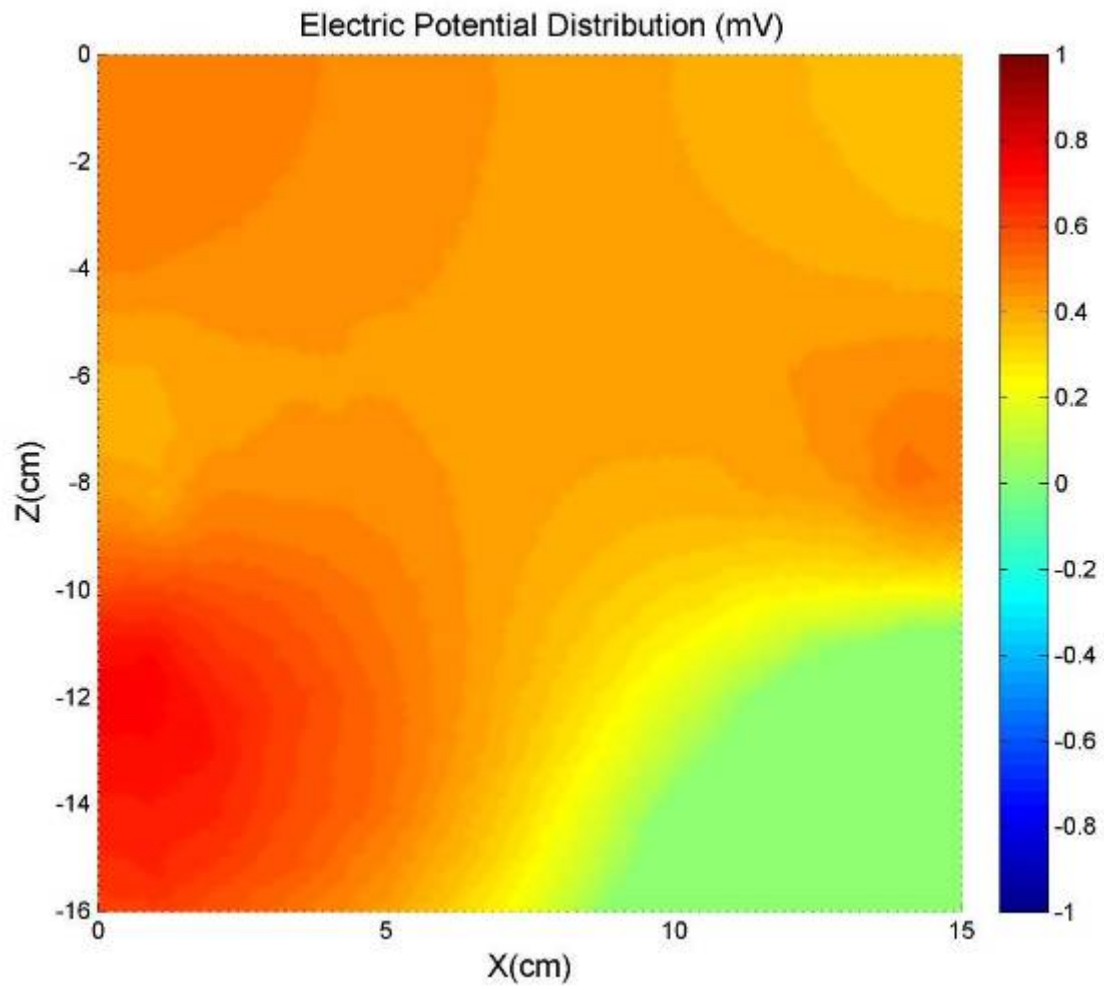
兩種排列法之背景值量測數據如圖 3.7-3 與 3.7-4 所示，逆推演算後的影像如 3.7-5 與 3.7-6。成果顯示跨孔等間距排列法的原始量測數據較為穩定，也較相近；共負排列法的原始數據相對而言，則略有偏移，且 Channel 1、Channel 2 與 Channel 3、Channel 4 具有較明顯的量測位場差異，此結果使得逆推成果也有所差異，從逆推後的影像研判，跨孔等間距排列法對於空間的解析能力應較佳。



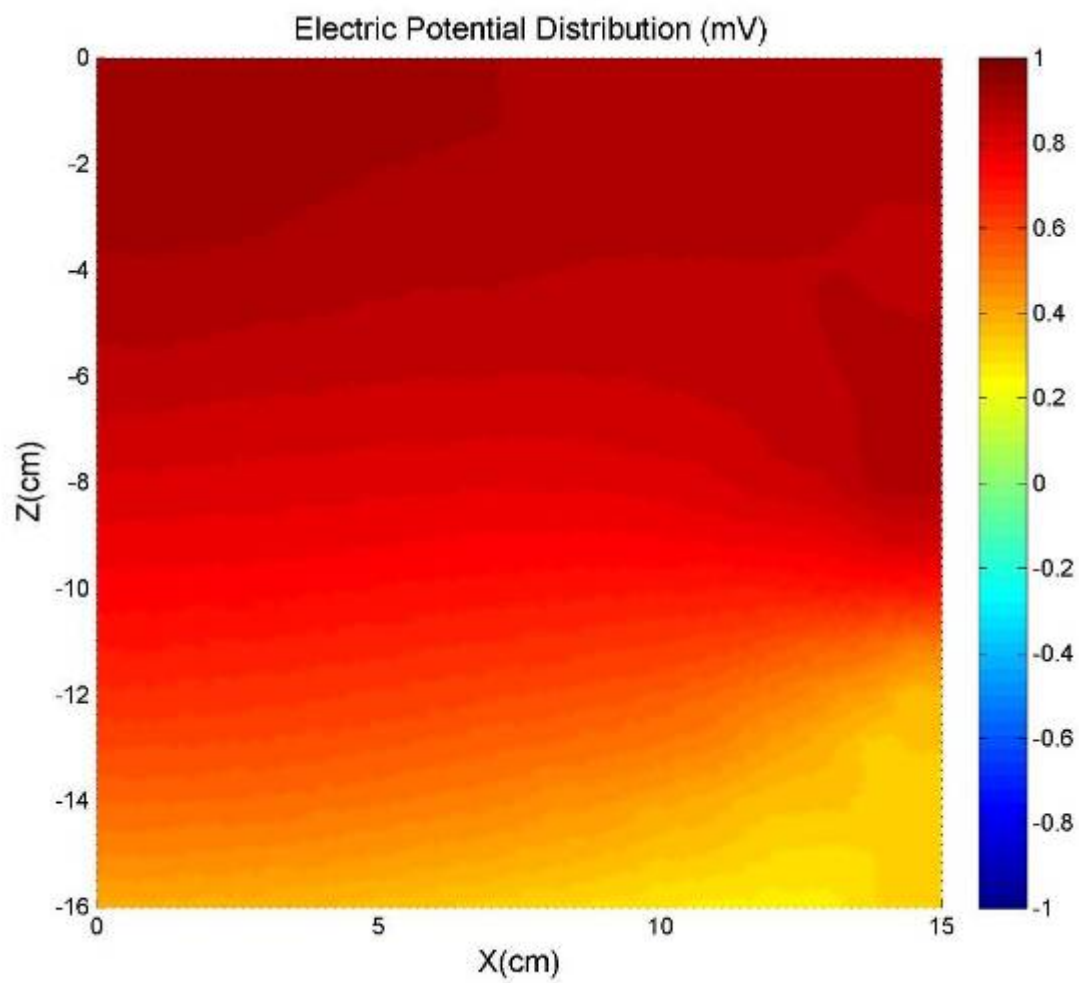
3.7-3 跨孔等間距排列法背景值量測數據



3.7-4 共負排列法背景值量測數據



3.7-5 跨孔等間距排列法背景值量測數據逆推成果



3.7-6 共負排列法背景值量測數據逆推成果

3.8 第二階段自然電位法砂箱實驗成果

將實驗四~九的量測數據經由本研究改良之程式進行逆推演算輸出成果，以電位分布剖面呈現之，剖面中以不同色調表示電位分布，以暖色系表示正電位，冷色系表示負電位，單位為 mV；同時將剖面網格化並以箭頭表示各網格之電流方向及相對電流密度大小，單位為 mA/cm²。由於實驗之設計為均質模型，理論上電位也應呈現均勻分布，但電位量測之原始資料除了與材料本身物性、微觀結構有關之外，也與電極配置有關係，此表示當電極位置不同或正負極對調時，會出現相位不同的情況，這也是本研究在前文中所強調自然電位較不適用於單次的測量，較適合以「監測」的方式執行。

實驗四原始量測數據如圖 3.8-1，逆推成果如圖 3.8-2。逆推成果顯示剖面中出現四個異常的電流分布區，此四個異常區均顯示出電位分布異常(相對高或相對低)，且有較高的電流密度。其中位於右側-14 cm 與左上方的異常區(以方框表示)，為實驗中給予之人造電流源的正位置，表示本研究設計之自然電位量測技術確實能有效偵檢出地層中的迷失電流源。另兩處以圓圈指出的異常區則研判在此砂箱與場源設定的條件下，環境中可能出現電流集中的區域，也表示在這兩個異常區若存有能產生電化學反應的材料，可能具有被腐蝕的潛勢。

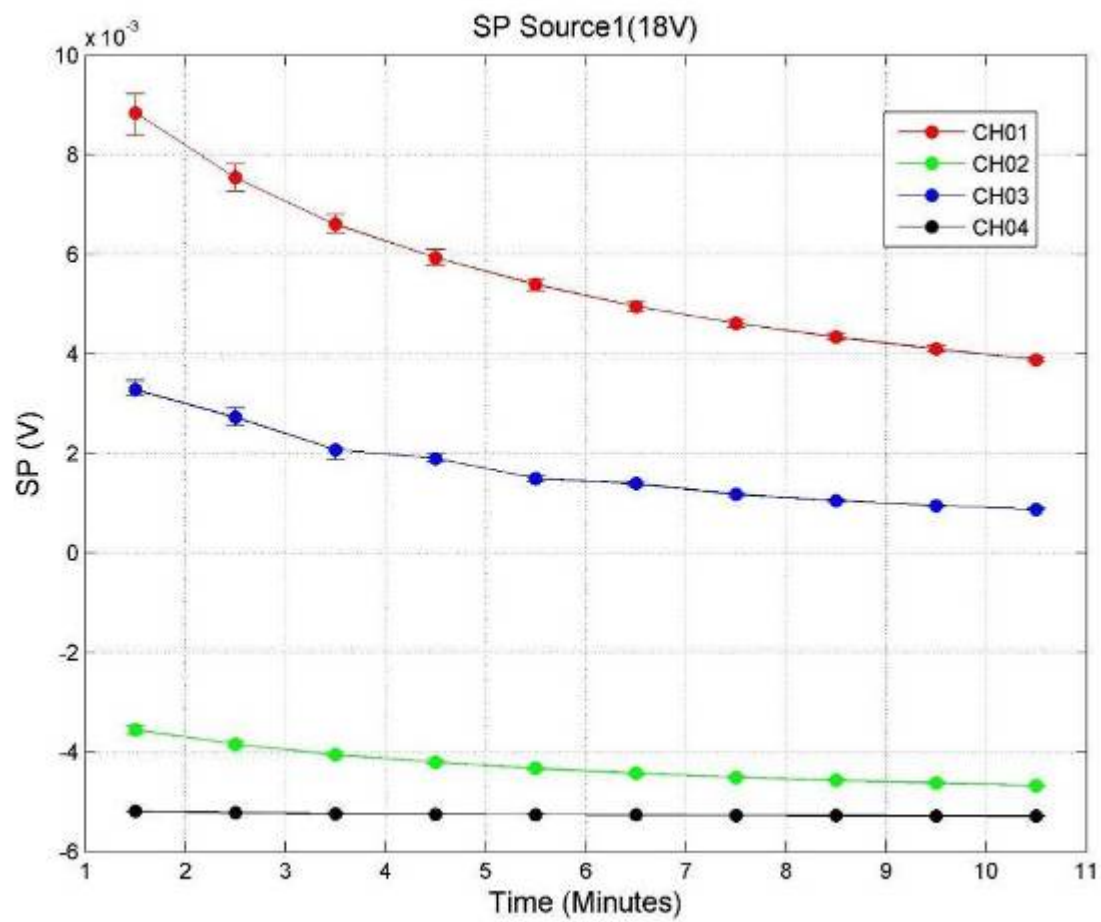


圖 3.8-1 實驗四原始量測數據

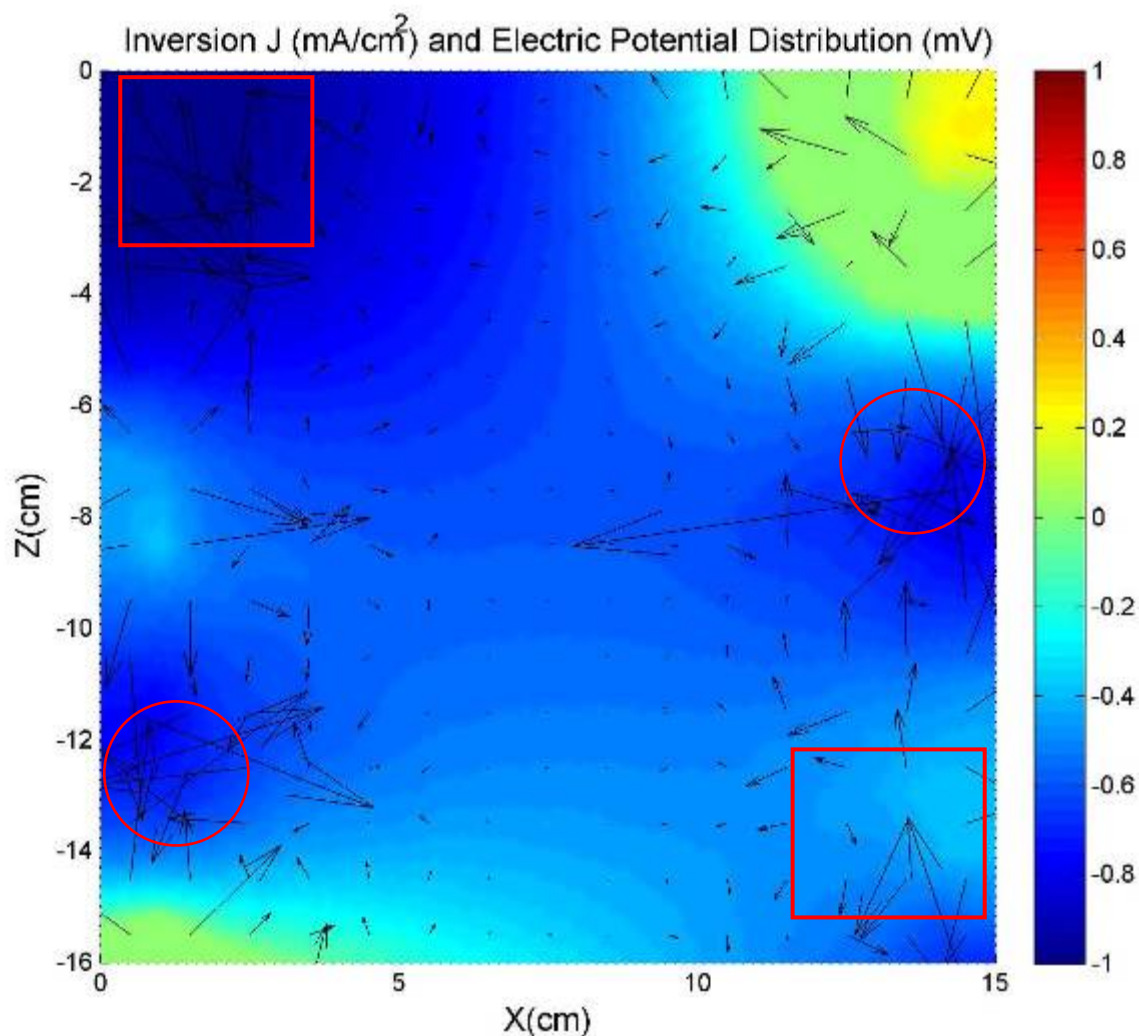


圖 3.8-2 實驗四逆推成果圖

實驗五原始量測數據如圖 3.8-3，逆推成果如圖 3.8-4。逆推成果顯示剖面中出現兩處異常的電流分布區(以方框表示)，此兩處異常區顯示出電位分布異常(相對高或相對低)，且有較高的電流密度。這兩個異常區恰為實驗中給予之人造電流源的正位置，表示本研究設計之自然電位量測技術確實能有效偵檢出地層中的迷失電流源。

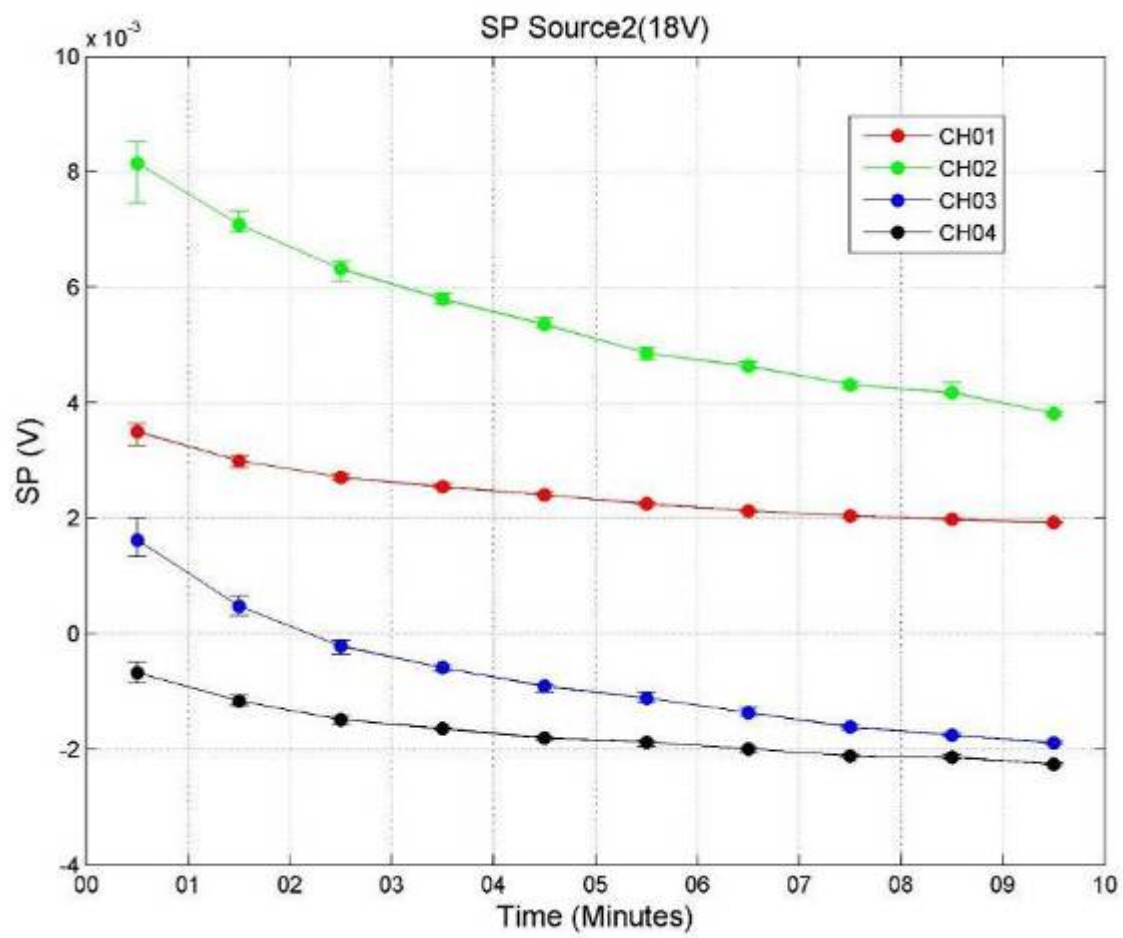


圖 3.8-3 實驗五原始量測數據

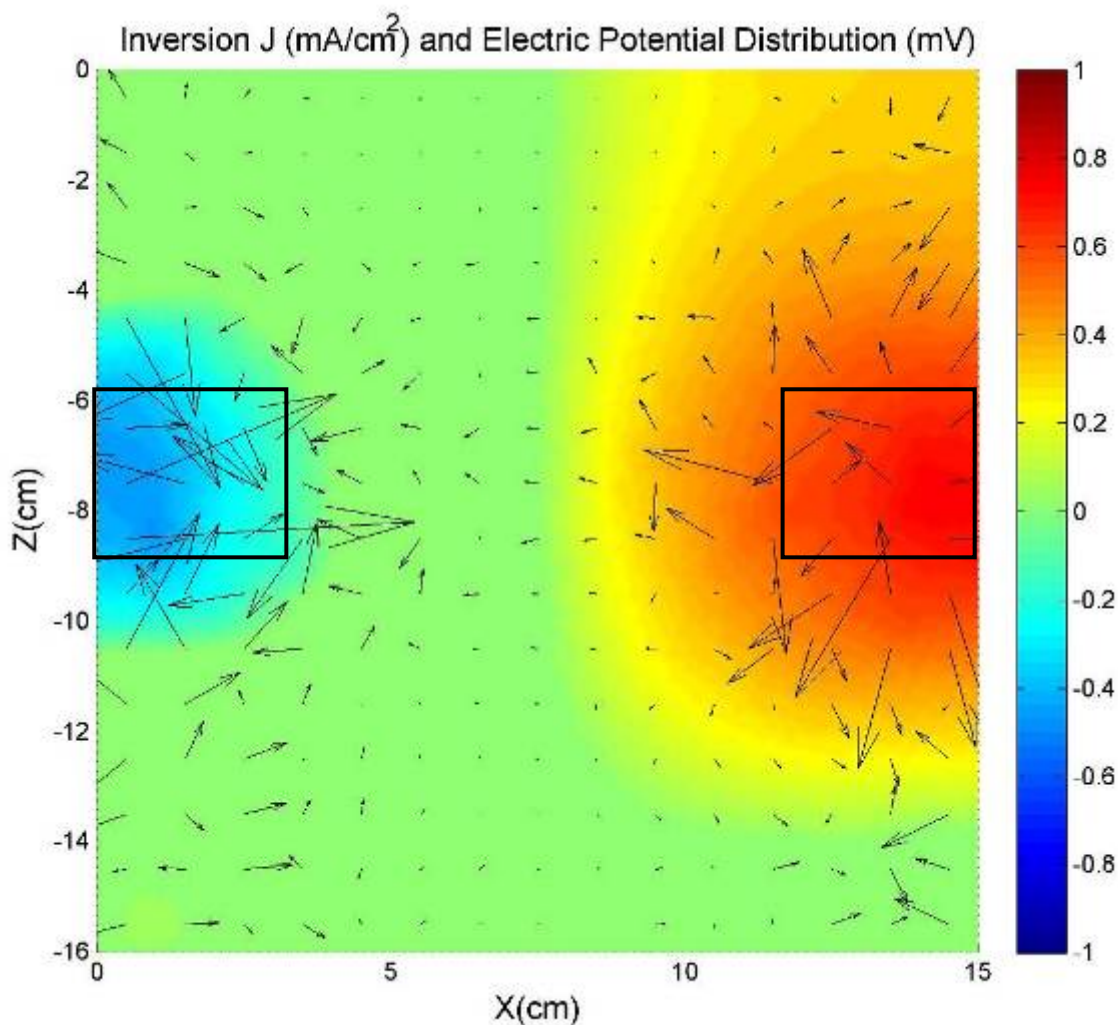


圖 3.8-4 實驗五逆推成果圖

針對實驗四的成果圖所指出在環境中具有地表迷失電流場源時，因地層材料在微觀條件下不可能完全為均質等向，電流具有流向相對高導性材料的特性，因此砂箱環境中可能還會產生其他的相對高電流密度區，因此實驗六在砂箱中置入一個模擬地下金屬管線的導體材料，作為對照。實驗六原始量測數據如圖 3.8-5，逆推成果如圖 3.8-6。從原始數據即能發現量測值整體已有提昇的現象，而逆推成果同樣能指出人造電源位置，如方框所示。而導線所在的位置呈現出顯著的等電位面，而在導線兩端出現明顯的相對高電流密度區，表示電流容易在此集中，可能對於導線(模擬地下管線)造成腐蝕，此結果同時呼應實驗四的成果，當迷失電流從地表流入地層形成迴路時，地層中的場源未必只會出現兩處，有時可能因環境現況，產生其他相對高電流密度的區域，同樣可能造成地下易氧化的材料出現腐蝕現象。

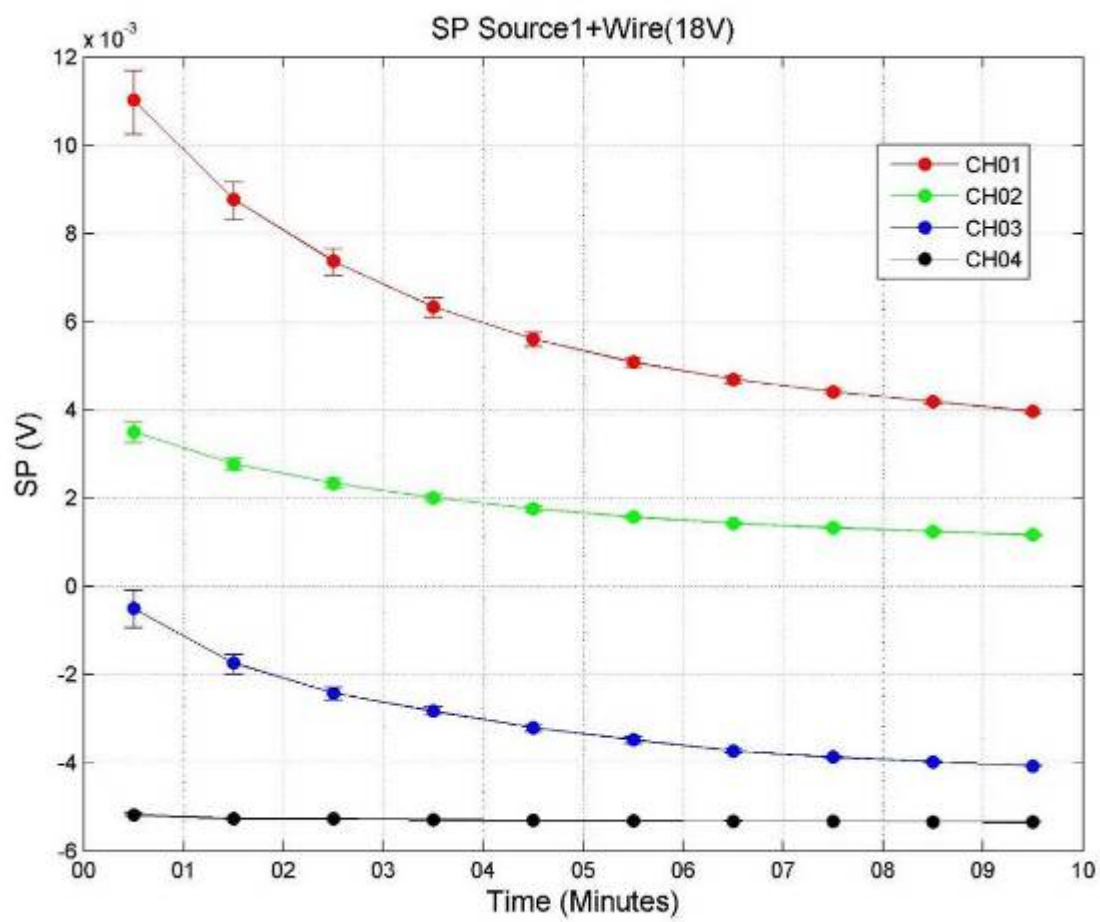


圖 3.8-5 實驗六原始量測數據

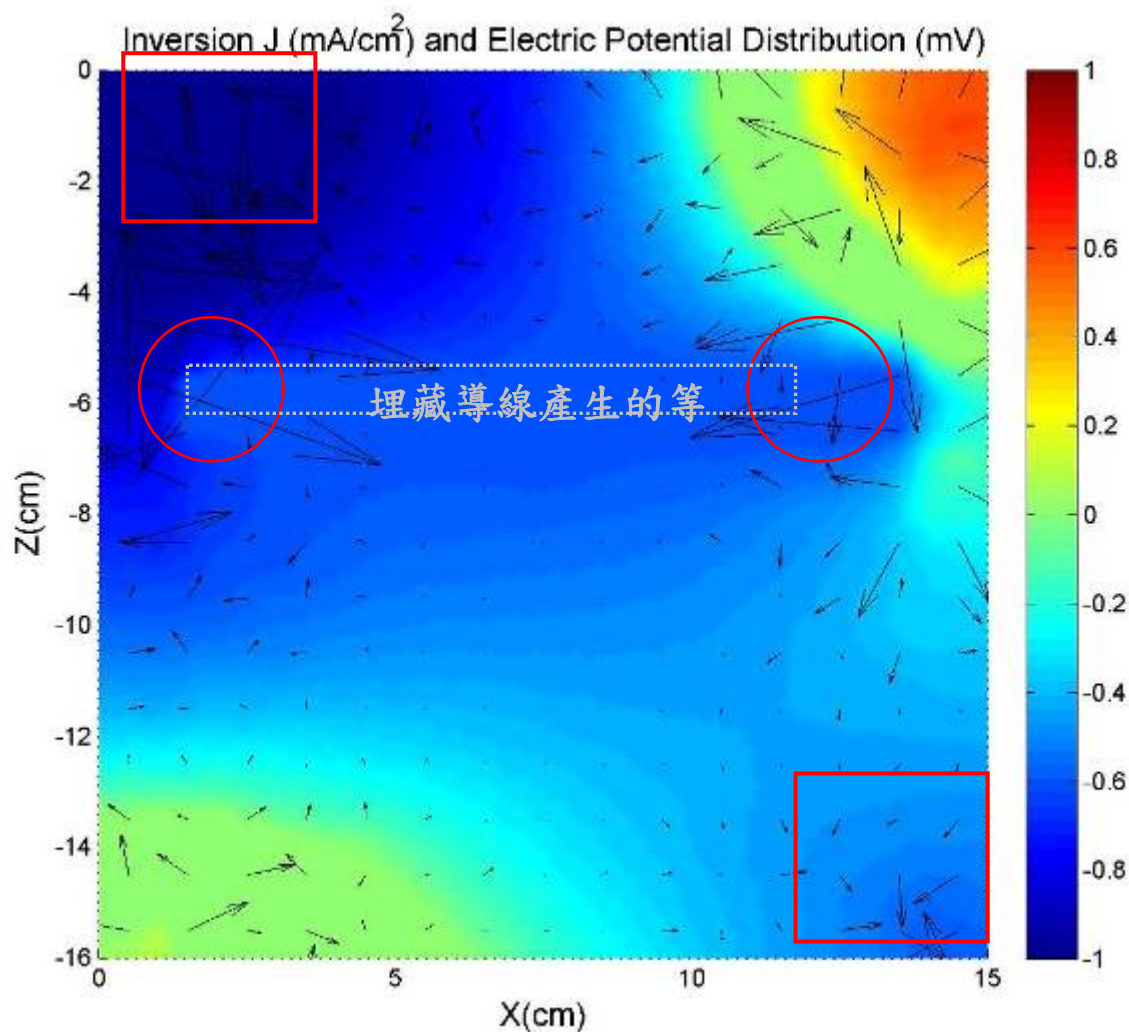


圖 3.8-6 實驗六逆推成果圖

實驗七~九為實驗四~六的對照實驗，目的在測試不同電極排列法(共負排列法)的解析能力。以任何量測的觀點而言，總是期望能收集越多的資料，獲得越充分的資料，但在真實場址中，常有經費、時間與環境限制的考量，未必能建立大量的設備進行量測，因此，實驗七~九的設計將量測設備的負極設為共點，在設備減少情況下，評估其解析能力。實驗七原始量測數據如圖 3.8-7，逆推成果如圖 3.8-8。逆推成果與實驗四相較，只顯示出三處異常的電流分布區，方框表示實驗設定的人造電流源位置，在剖面右側依然清楚顯見，而左側地表的人造負極，雖從電流方向與電流密度相對差異量研判為異常區，但相對實驗四的結果則較微弱，而實驗四中在剖面中另出現兩區異常的電流分布，但實驗七中只能明顯指出右側的訊號(圓圈表示)，左側的異常區在本實驗中並不顯著，表示在電極配置密度較高的區域，其解析能力還是較高，但即使設備減少，自然電位法仍具體偵檢出右側的地下迷失電流源，在環境中，只要能截斷迷失電流的其中一個迴路，就

能阻止其產生。

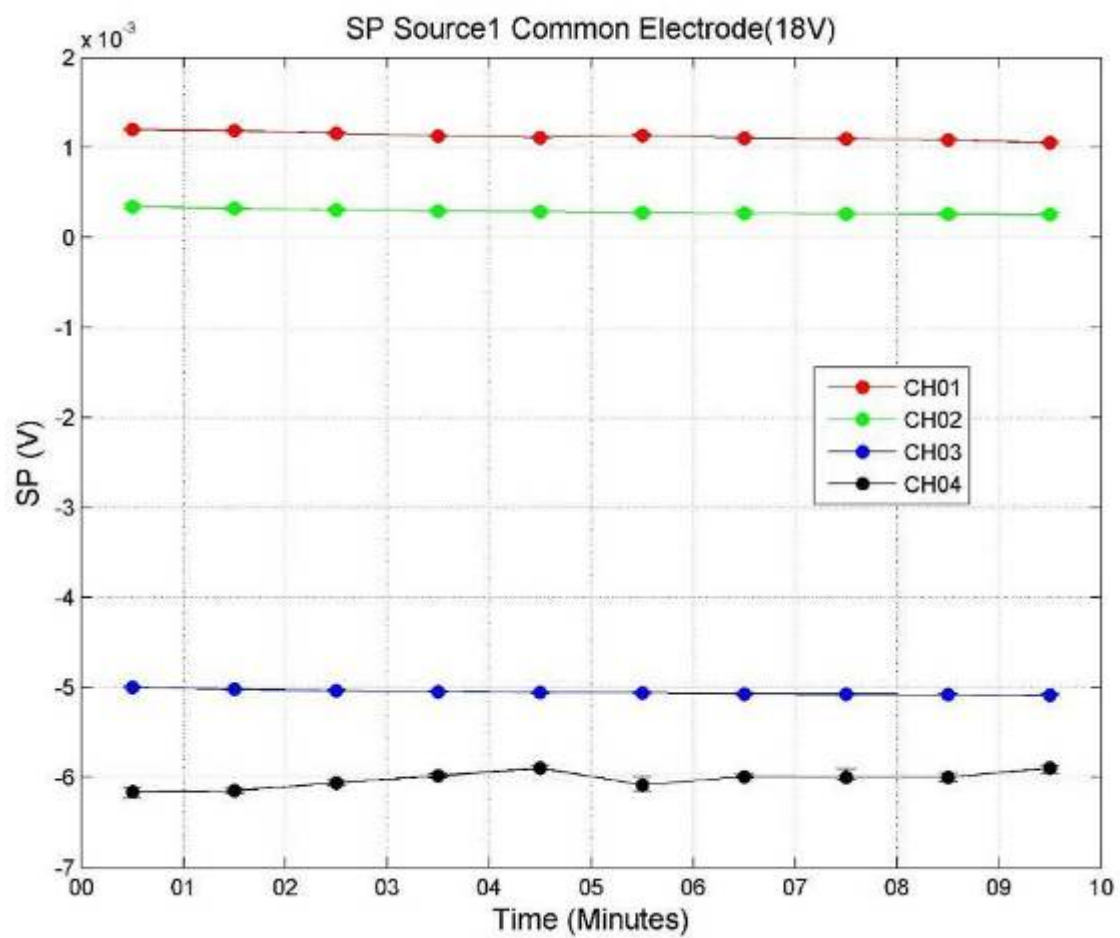


圖 3.8-7 實驗七原始量測數據

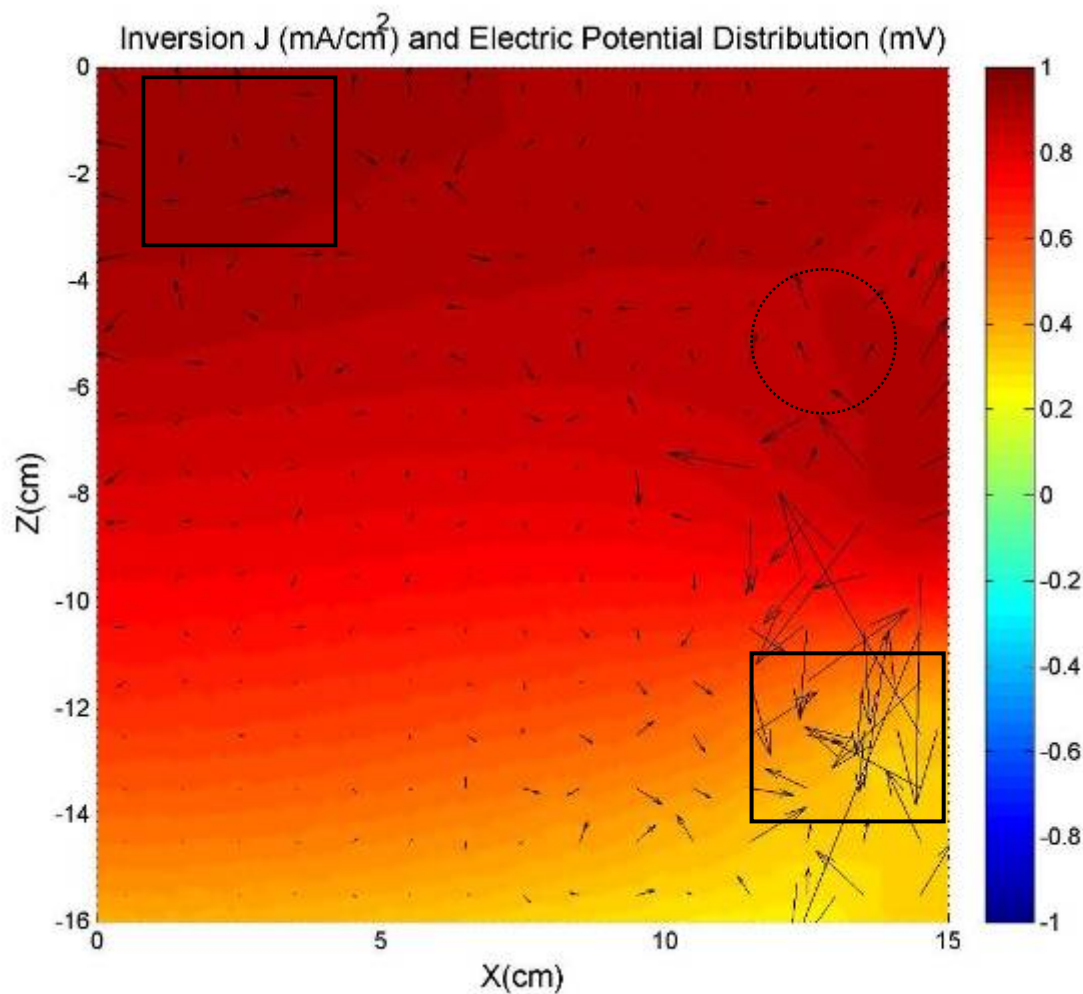


圖 3.8-8 實驗七逆推成果圖

實驗八原始量測數據如圖 3.8-9，逆推成果如圖 3.8-10。逆推成果與實驗五相較只顯示出一處異常的電流分布區(以方框表示)，為實驗設計中人造迷失電流場源的正極位置，而左側的負極則難以顯見，推測仍是受到左側設備較少的因素所致，但在右側的異常區，仍表示本研究的設計，在設備減少的假設下，仍可以自然電位法偵檢出地層中電極跨接範圍內的迷失電流源。

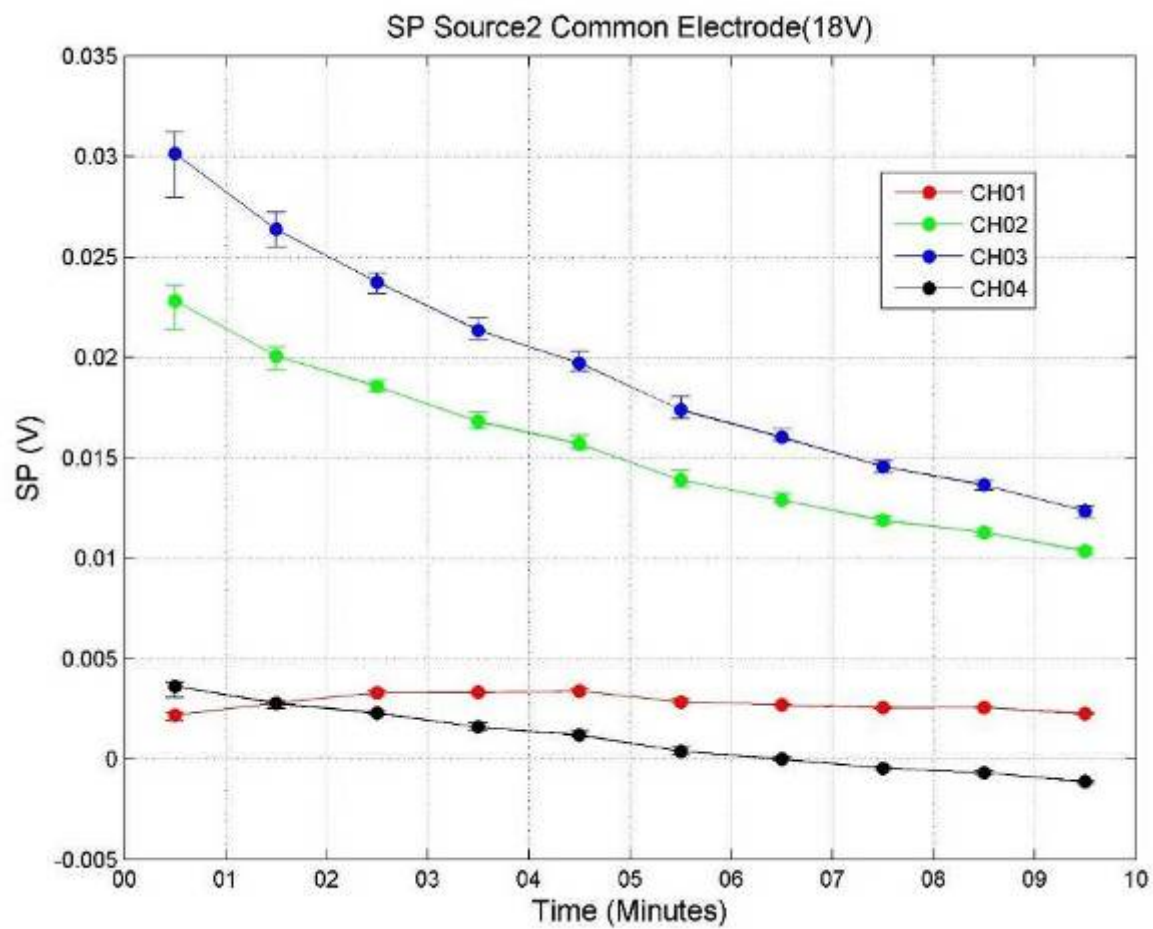


圖 3.8-9 實驗八原始量測數據

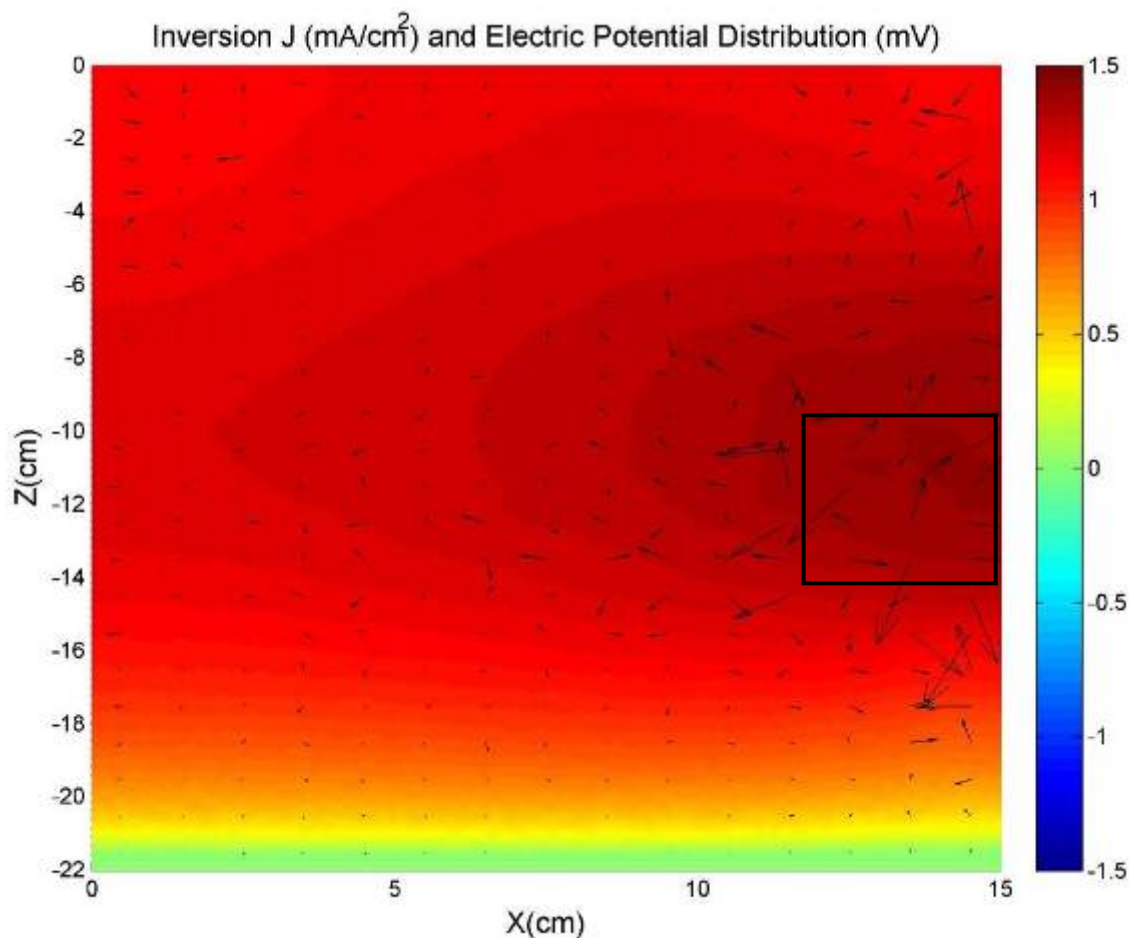


圖 3.8-10 實驗八逆推成果圖

實驗九原始量測數據如圖 3.8-11，逆推成果如圖 3.8-12。逆推成果與實驗六相較亦只顯示出右側的兩處迷失電流源。右側的人造電流正極的位置(方框)仍相當明顯，但導線右側的電流集中區明顯較跨孔等間距排列法的結果為弱。事實上電流源的強度原本就高於氧化環原時的電位，特別是真實環境中的迷失電流，可能來自於捷運、鐵道，甚至是避雷針，強度必大於氧化電位，故此法若未來於真實環境應用上，首先應著眼在偶發性或常態性的高差異電位及電流集中區，也就是電流導入的位置；局部區域，特別是已知地下金屬管線通過的範圍中的高電流密度的出現範圍(疑似腐蝕區)，則可為次要監測目的。

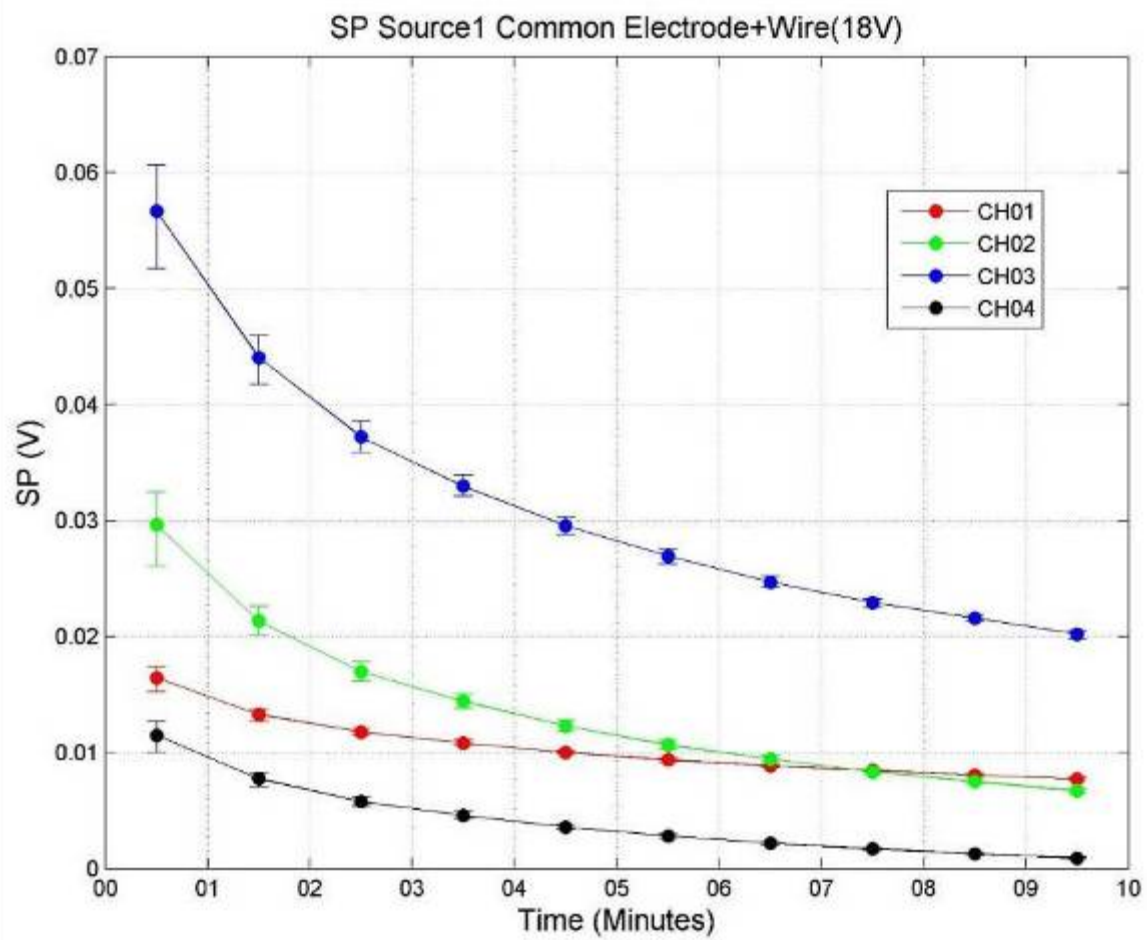


圖 3.8-11 實驗九原始量測數據

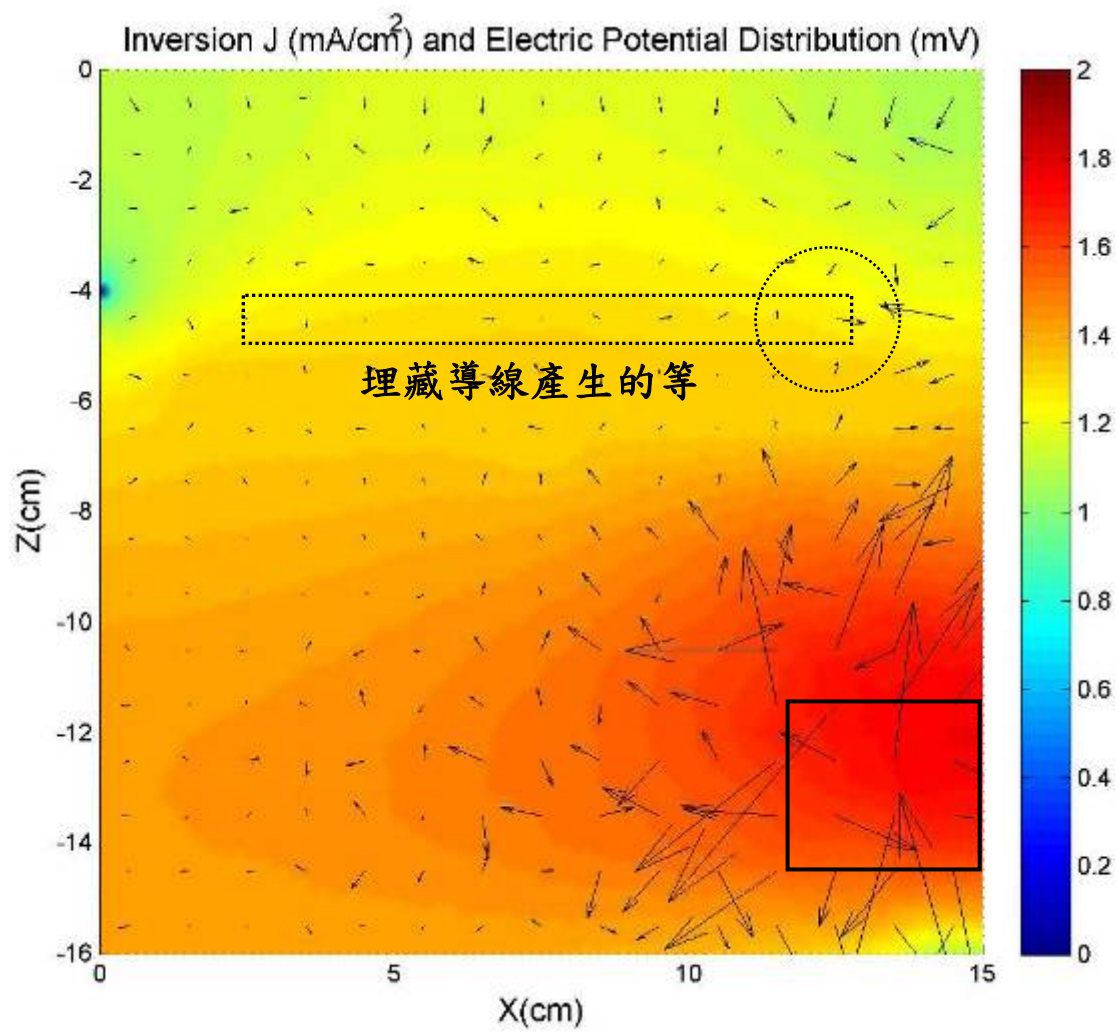


圖 3.8-12 實驗九逆推成果圖

第四章 綜合討論

第一階段的實驗中，同時以地電阻影像法與自然電位法進行之砂箱實驗比較了兩種方法在量測規劃與解析能力上的差異。地電阻影像法與自然電位法所量測之物理量雖同為電位值，但由於量測方式分屬主動式與被動式，因此所得之數據在分析方法上並不相同。在現場應用上，地電阻影像法可應用於單次的調查與 time-lapse 的研究與分析；自然電位法則更適用於長時間的「監測」。地電阻影像法應用之可行性取決於環境材料上電性(導電率或電阻率)的差異。藉由數值模擬與砂箱實驗結果得知，電性差異約需 20 % 以上以地電阻影像法較能具體反應出現象的改變。而自然電位法所得之結果，電性的差異則並非唯一考量因子，主要仰賴的乃是事件發生時所產生的電化學反應，因電荷微觀的反應能使材料的電位產生瞬間的改變，依此結果可研判出地層中可能存在的現象。在檢測迷失電流源的應用上，由於地電阻影像法是主動式的量測技術，也就是以人造電流導入地層後量測材料之物理性質(導電率或電阻率)，地層中偶發的迷失電流源對於地電阻影像法而言將是影響資料品質的干擾，可能改變了理論上點電源流入地層後的電流流向分布，致使最後的結果產生偏差降低可信度，因此並不適用於迷失電流的檢測；而自然電位法屬被動量測，也就是量測過程中並不存在其他人造電流源，單純量測環境的自然電位值，在長時間「監測」所獲得的自然電位資料可加以統計分析研判出環境中的背景電位，依此可研判出異常電位改變發生的現象，藉此指出環境中發生「事件」的時間與位置。

依第一階段實驗結果優化本研究之設備軟硬體後進入第二階段自然電位偵檢迷失電流砂箱實驗，並將量測數據逆推演算後以剖面方式具體呈現，成果顯示自然電位法確實具備偵檢地層中迷失電流源的能力。從數值模擬與實驗結果得知，跨孔等間距排列法的實驗成果解析能力較高，除了正確異定出人造迷失電流場源的位置之外，更同時指出剖面中其他可能存在的高電流密度區，間接推測環境中其他易產生金屬腐蝕的位置；在埋藏導線模擬地下金屬管線實驗中，跨孔等間距排列法的成果可同時定出人工電流場源位置和位於導線接合端點的相對高電流密度區，藉此推測是否有電化學氧化還原的腐蝕現象正在發生。相對而言，共負排列法的解析能力略低，主要原因來自於砂箱一側的電極涵蓋率較低，但在有效的空間範圍內(砂箱右側)，三組實驗結果(實驗七~九)仍可檢測出迷失電流源的其中一極。此表示，在真實現場應用時，受限於環境或其他因素無法均勻配置量測電極設備時，自然電位法或許無法完整指出所有迷失電流源的正負極位置，但阻絕迷失電流的方式只要將其中一極截斷即可，在受限的設備條件下，自然電位法仍具備一定的成效。

地電阻影像法與自然電位法等地球物理探勘技術都具備解析地下環境異常或變化的能力，兩者各有擅場，確實都可協助瞭解地下環境或土壤及地下水污染問題。就迷失電流、偶發或定頻的「微小」事件的調查而言，長期「監測」的自然電位法或具備更佳的探測能力，其訊號的評析方式可從原始數據的連續觀測或

將資料逆推演算後的剖面解釋之，惟自然電位在資料收集與分析上更為繁瑣且複雜，如同本研究一再強調的「監測」觀念，自然電位的觀測數據量其實相當大，在原始數據觀測時，除了儀器設備需具備足夠的穩定度並能有效放大訊號之外，背景場的資料必須先經由統計分析確定後才能研判因發生事件而造成的異常峰值；在逆推演算輸出剖面時，則必須有效截取背景值與事件發生過程的資料才能比對其差異，且逆推演算所設定之邊界條件、網格與採用之演算方法都需先以數值模擬方式決定，除了電位分布資訊之外，再配合電流密度與電流方向的研析，方能產出合理且可信的成果。

第五章 實場應用與未來展望

本研究藉由實驗室砂箱實驗研發設計出以自然電位法偵檢迷失電流源之系統，同時包含完整資料演算、處理與解析方法，研究成果亦具體證明方法之成效。然本計畫礙於經費限制，僅止於實驗室砂箱試驗，無法進行室外模場或真實場址調查，對於真實場址中可能面臨的挑戰、限制、經費、規模與因應對策尚無法確切評估，但可依既有經驗及現場需求，提出未來於實場或模場應用之可行方式及展望，敘述如后：

1、本研究之首要目的為偵檢地下迷失電流源的位置，故最佳且具立即性的調查對象即是曾經或持續發生管線腐蝕之場址，目前管線腐蝕問題經常是由壓力或原料進出記錄判定，或進行管線汰換時發現，針對這些場址，可在埋設新管後於原發現腐蝕的區域附近進行調查，調查方式可設置數口將電極埋入地層中，簡易井包圍的範圍即是管線曾經發生管線腐蝕的偵檢區域，以跨孔方式調查，並配合數個地表電極進行井地探測，交互比對，當可設置之簡易井有所限制時，則可增加地表電極，增加量測資料亦可擴大調查範圍。監測時間則較難以估計，自然電位探測必須長時間連續觀測，且以自動化的持續分析較有效率，迷失電流源常具有固定發生頻率(如捷運、火車)或伴隨自然事件(如雷擊)出現的特性，因此較完整有效的分析方式應將連續性的觀測資料透過電腦伺服器持續演算，並配合自然事件記錄及時頻分析，才能清楚定義背景值與偶發訊號，當調查範圍確實經常或定頻出現明顯高電流密度訊號時，或可以較短的觀測時間偵檢出；但當迷失電流源並非每日、每週出現時，而是因特定季節、事件或氣象才發生時，則需要較長的監測時間。

2、由於本研究屬於實驗室性質，在真實場址調查中仍可能存在許多未知的變數、限制待克服，因此進行現地試驗是必須的，惟有透過真實場址的測試，才能更進一步瞭解現場工作的需求，建立出適當、有效、高解析度的作業流程，只是單純為了進行自然電位實驗所進行的模場試驗並不經濟，因此配合既設之地電阻影像法設備進行實場試驗較為可行，現今無論在環保署、科技部與民間等不同單位執行中或已執行的計畫都有進行地電阻影像法調查，特別是跨孔式地電阻影像法，這種固定存在現場的設備非常適合與自然電位法併合量測，事實上，地電阻影像法與自然電位法量測的儀器設備非常相似，兩者分屬主動式調查與被動式調查，當主動於地層中導入人造電流時為地電阻影像法；未通入電流時所量測的電位值即為自然電位法，因此，配合既有固定式的地電阻量測設備，並以遠端控制設備進行量測，可定時收集到地電阻影像法成果與連續長時間的自然電位觀測成果，此法可大幅提升既有設備的調查效益，且透過不同的設備配置，例如井間距、電極間距、井地電極...等，可歸納出最佳化的自然電位法現場設計，以現階段已完成實驗室砂箱試驗與演算法而言，此舉應屬最佳且必要的第二階段步驟。

3、當現地實驗已完成，並建立出完備之自然電位現場調查方式、資料收集

與分析方法後，未來此法或可更擴大應用於運作中工廠、加油站或長期地下水管理監測之用。如同本研究成果與敘述，地球物理中的地電測勘技術所使用的儀器設備非常相似，地電阻影像法與自然電位法就能以相同的設備收集資料，且以時間序列的方式分析，也能協助評析污染洩漏或擴散的問題，自然電位法更進一步具有偵檢迷失電流源的能力，若在具污染潛勢或存有管線腐蝕危機的運作中工廠、加油站，配合監測用井，設置自然電位量測設備，則可進階協助評析管線腐蝕、洩漏等風險，提升井的效益，甚或在工廠、加油站興建時，於周界埋設量測電極，不失為一種可行的預警系統，惟地球物理調查技術無論在設備配置與資料分析具有其專業門檻，必須仰賴專業之士謹慎確實評估後方能執行，特別是自然電位法，尚需配合遠端自動化收集資料與分析，才能達到即時預警的效果。

第六章 結論及建議

本研究經由數值模擬及砂箱實驗所提出之具體結論及建議如后：

- 1、地電阻影像法與自然電位法均具備解析地下環境的能力，可應用在協助土壤及地下水污染問題的調查與整治評估。
- 2、地電阻影像法較適用於單次的調查與 time-lapse 分析；自然電位法則更適用於長時間的「監測」。
- 3、自然電位法具備檢測地下迷失電流源能力，逆推後的電位剖面及電流密度分布能清楚指出地下迷失電流源的位置。
- 4、均勻配置的跨孔等間距電極排列其解析能力較共負電極排列為佳，但即使在受限條件下所配置的共負電極排列，依然可界定出迷失電流正負極其中之一，截斷其中一極仍可阻絕迷失電流的發生。
- 5、在解析微小事件應用上，自然電位法需具備穩定且能有效放大訊號的設備；資料處理時必須先正確分析出背景值才能界定出事件發生時的異常訊號；在逆推演算過程中必須先經過數值模擬決定出合宜的計算條件。
- 6、就成本分析而言，長期監測的自然電位法所需的費用是高於單次量測的地電阻影像法，但自然電位的量測設備與地電阻影像法的部分設備相同，電極與電纜線可共用，因此若於真實場址應用時，除了自然電位資料之外另可收集地電阻影像成果，可增加經濟效益。
- 7、由於自然電位法較適合長期監測的方式收集資料與評析，應用上應著眼在已發生管線腐蝕或值得被監測的場址，例如具有污染潛勢或已發生污染事件的加油站或工業區。以現階段完成室內實驗與資料演算方法而言，進一步可進行模場或實場試驗，以現地既設有跨井地電阻影像法設備的場址為佳。未來若能配合地球物理方法進行長期地下環境監測時，除了觀測迷失電流可能造成之管線腐蝕問題外，同時可收集地電阻影像與自然電位資料綜合評析污染分布及整治成效，研判是否存在污染擴散問題，並即時處置阻斷以免發生更嚴重的事件，如此之整體規劃方為經濟有效的設計。

參考文獻

- al Hagrey, S. A., Petersen, T. 2011. Numerical and experimental mapping of small root zones using optimized surface and borehole resistivity tomography. *Geophysics* 76(2), G25-G35.
- Ahmed, A. S., Jardani, A., Revil, A., & Dupont, J. P. (2013). SP2DINV: A 2D forward and inverse code for streaming potential problems. *Computers & Geosciences*, 59, 9-16.
- Aubert, M. and Atangana, Q. Y. 1996. Self-potential method in hydrogeological exploration of volcanic areas. *Ground Water*, 34, 1010-1016.
- Bing, Z., Greenhalgh, S. A. 2000. Cross- hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical prospecting* 48(5), 887-912
- Boleve, A., Janod, F., Revil, A., Lafon, A. and fry, J. J. 2011. Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection. *Journal of Hydrology*, 403(3-4), 242-252.
- Corwin, R. F. and Hoover, D. B. 1979. The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, 44(2), 226-245.
- Dahlin, T., Bernstons, C., Gundogdu, B., and Loke, M. H., 2002. A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden, *Geophysics*, Vol 67, No.6, pp. 1692-1700.
- Dey A. and Morrison H.F., 1979b. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures. *Geophysics* 44, 753-780.
- Erchul, R. A. and Slifer, D. W. 1987. The use of spontaneous potential in the detection of groundwater flow patterns and flow rate in karst areas. *Karst Hydrogeology, Proc. 2nd Conference, Orlando*, 217-226.
- Fournier, C. 1989. Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area: case history of the Chaîne des Puys. *Geophysical Prospecting*, 37, 647-668.
- Glover, P.W.J and M.D Jackson, 2010. Borehole electrokinetics, *The Leading Edge*.
- Pride, Steve, 1994. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media, *Physical Review B* volume 50, number21.
- Godio, A. and Naldi, M. 2003. Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants. *Near Surface Geophysics*, Vol.1, 131-137
- Goes, B. J. M., and Meekes, J. A. C., 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. *JEEG*, Vol.9. No.3, pp.127-141.
- Greenhouse, J.P., and Harris, R.D., 1983 Migration of contaminants in ground water at a land fill. *J. Hydrology*, 63, 177-197.
- Hutchinson, D. J., Harrap, R., Diederichs, M., Villeneuve, M. and Kjelland, N. 2003. Geotechnical rule development for ground instability assessment using intelligent GIS and networked monitoring sensors. In 3rd Canadian Conference of Geotechnique and Natural Hazards. Edmonton, Alberta, Canada. June 9 and 10.
- Jardani, A., Revil, A., Bolève, A., Dupont, J.P., Barrash, W., Malama, B., 2007.

- Tomography of groundwater flow from self-potential (SP) data. *Geophysical Research Letters* 34, L24403, <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031907>.
- Ikard, S.J., Revil, A., Jardani, A. et al. 2012. Saline pulse test monitoring with the self-potential method to nonintrusively determine the velocity of the pore water in leaking areas of earth dams and embankments. *Water Resources Research*, 48.
- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. 2007, *An introduction to Geophysical Exploration* 3th ed.
- Lago, A.L., Elis, V.R., Borges, W. R. and Penner, G. C. (2009) Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. *Environ Geol* 58:407-417
- Lange, A.L. 1999. Geophysical studies at Kartchner caverns State Park, Arizona. *Journal of Cave and Karst Studies*, 61(2), 68-72.
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A. et al. 2005. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine Chain, southern Italy. *Geophysics*, 70(3), B11-B18.
- Linde, N., Revil, A., Boleve, A. et al. 2007a. Estimation of the water table throughout a catchment using self-potential and piezometric data in a Bayesian framework. *Journal of Hydrology*, 334, 88-98.
- Linde, N., Jougnot, D., Revil, A. et al. 2007b. Streaming current generation in two-phase flow conditions. *Geophysical Research Letters*, 34(3).
- Lobkis, Oleg I. and Richard L. Weaver, 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, *J. Acoust. Soc. Am.* 110 (6)
- Martínez-Pagán, P., Cano, A.F., Silva, G.R. and Olivares, A.B., 2010. 2-D Electrical Resistivity Imaging to Assess Slurry Pond Subsoil Pollution in the Southeastern Region of Murcia, Spain. *JEEG*, Vol. 15, (1), 29-47.
- Naudet, V., Revil, A., Bottero, J. Y. and Begassat, P. 2003. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2091.
- Naudet, V., Gourry, J.-C., Mathieu, F., Girard, J.F., Blondel, A and Saada, A. 2011. 3D Electrical Resistivity Tomography to locate DNAPL contamination in an urban environment. Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Leicester, UK.
- Nyquist, Jonathan E. and Charles E. Corry, 2002. Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics, *The Leading Edge*.
- Parker, R. L. 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 31, 447-445.
- Pengra, D.B., Li, S. X. and Wong, P. Z. 1999. Determination of rock properties by low frequency AC electrokinetics. *Journal of Geophysical Research*, 104(B12), 29, 485-508.
- Revil, A., & Jardani, A. 2013. *The self-potential method: theory and applications in environmental geosciences*. Cambridge University Press.
- Reynolds J.M., 2011, *An Introduction to Applied and environmental Geophysics 2nd* , Wiley.
- Shima, H., 1992. 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using crosshole data.

- Geophysics, 55, 682-694.
- Schlumberger, C. 1920. Etude sur la prospection électrique du sous-sol. (Study on underground electrical prospecting). Gauthier-Villars et Cie, Paris.
- Schlumberger, C., Schlumberger, M. and Leonard, E. G. 1932. Electrical coring: a method of determining bottom-hole data by electrical measurements. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, technical Publication, 462
- Schmutz, M., Guérin, R., Andrieux, P. et al. 2009. Determination of the 3D structure of an earthflow by geophysical methods, The case of Super Sauze, in the French Southern Alps, Journal of Applied Geophysics, 68(4), 500-507.
- Sill, W. R. 1983. Self-potential modeling from primary flows. Geophysics, 48, 76-86.
- Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990. Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.). Cambridge University Press.
- Spies, B.R. and Ellis, R.G., 1995. Cross-borehole resistivity tomography of a pilot-scale, in-situ vitrification test. Geophysics, 60, 1313-1325
- Straface, S., Falico, C., Troisi, S., Rizzo, E. and Revil, A. 2007. Estimating of the transmissivities of a real aquifer using self-potential signals associated with a pumping test. Ground Water, 45(4), 420-428.
- Suski, B., Revil, A., Titov, K. et al. 2006. Monitoring of an infiltration experiment using the self-potential method. Water Resources Research, 42.
- Vanhala, H., Soininen, H. and Kukkonen, I., 1992. Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment. Geophysics, 57, 1014-1017.
- Wang, T. P., Chen, C. C., Tong, L. T., Chang, P. Y., Chen, Y. C., Dong, T. H. & Cheng, S. N. (2015). Applying FDEM, ERT and GPR at a site with soil contamination: A case study. Journal of Applied Geophysics, 121, 21-30.
- Weaver, Richard L. and Oleg I. Lobkis, 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L), J. Acoust. Soc. Am. 116 (5).
- Weaver, Richard L. and Oleg I. Lobkis, 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L), J. Acoust. Soc. Am. 116 (5).
- Zhao, J.X., Rijo, L. and Ward, S.H., 1986. Effects of geologic noise on cross-borehole electrical surveys. Geophysics, 51, 1978-1991.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 1997. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays. Exploration Geophysics, 28, 1-5.
- Zhou B. 1998. Cross-hole resistivity and acoustic velocity imaging: 2.5D Helmholtz equation modeling and inversion. PhD thesis, University of Adelaide
- Zhang, G. B. and Aubert, M. 2003. Quantitative interpretation of self-potential anomalies in hydrogeological exploration of volcanic areas: a new approach. Near Surface Geophysics, 1, 69-75.
- Szalai, S., Szarka, L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. Geophysical Prospecting 56(2), 159-175.
- 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，碩士論文。
- 徐漢倫，2013，台灣天然電磁場觀測研究，國立中央大學地球科學系，博士論文。

- 楊凱傑，2014，利用互相關方法探討大地電場與地震波的耦合行為，國立中央大學地球科學系，碩士論文。
- 董倫道，1997。地球物理技術在環境污染偵測上的應用與案例探討。中國地球物理學會成果發表論文集，中國地球物理學會，pp.207~210。
- 蘇尚文，1998，整合地電法應用於地下污染調查之研究，國立中央大學應用地質研究所，碩士論文。