



行政院環境保護署

107 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

新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳 參數異質場推估技術之發展

期末報告(定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立交通大學／土木工程系所
專案主持人：張良正 教授
專案執行期間：107 年 01 月 11 日起至
108 年 11 月 30 日止

中華民國 107 年 12 月 印製



專案名稱 新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展
主持人 張良正 教授
期末報告(定稿)



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 ■其他					
申請機構系所		國立交通大學土木工程系所					
機構地址		新竹市大學路 1001 號工程二館					
計畫主持人		張 良 正		職等／職稱		教 授	
協同主持人		王 子 賓		職等／職稱		研 究 員	
協同主持人		何 彥 德		職等／職稱		總 經 理	
專案 名稱	中文	新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展					
	英文	Development of a novel technology to identify the heterogeneous hydrogeological and geothermal parameters by using multi-depths fiber Bragg grating sensors					
	關鍵字	Hydrogeological parameters, geothermal parameters, fiber Bragg grating sensor, heterogeneity, joint inversion					
執行期程		自 民 國 1 0 7 年 0 1 月 1 1 日 起 至 民 國 1 0 8 年 1 1 月 3 0 日 止					
計畫主持人		姓名：張良正 Email：lcchang@g2.nctu.edu.tw 專線：03-5731938 手機：0930785471					
專任助理		姓名：蔡瑞彬 Email：skysky2cie@gmail.com 專線： 手機：0911224352					
經費 分 析 總 表 (僅模場試驗專 案需填寫兩年 度金額)		專 案 預 估 經 費		第一年 金額	第二年 金額	編列說明	
		1.	人事費用	143,648	216,560	(1~5 項相加之 50% 為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	1,490,000	999,600	(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	8,476	39,000	(差旅與租賃費用)	
		5.	雜支費用	75,864	17,550	(1~6 項相加之 5% 為限)	
		6.	行政管理費	171,799	127,271	(1~5 項相加之 10% 為限)	
		專案計畫申請總金額		1,889,787	1,399,981	總金額：3,289,768	

專案主持人(簽名及蓋章)：_____

日期：_____



附錄一 構想書審查意見表



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
107 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
構想書審查意見表

專案類型	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗		申請經費	一：1,889,787 二：1,399,981 共：3,289,768	NO：8
專案主持人	張良正 教授	專案主題	<input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 其它		
服務單位	國立交通大學 土木工程系				
專案名稱	新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展				



委員一：

- | | |
|--|--|
| <p>1. 本技術評估之水力掃描與熱流場是否受加藥時間序影響？其評估方式如何精細度地質場及水文參數確定，宜說明。</p> <p>2. 如何強化後端資料分析，以及熱處理技術運用，宜說明。</p> | <p>1. 本研究主要透過注藥過程中量測溫度與地下水位觀測資料，之後再以 SLE 演算法反演含水層之水力與熱傳參數場。為了蒐集不重複的含水層異質性資訊，注藥井需分批進行注藥，同時以觀測井蒐集每一批貫注井注藥後的水溫與水壓資料，如此才能使推估出符合現地特性之參數場。SLE 演算法在推估參數的過程中會考慮參數的不確定性，因此推估後之參數場的每個網格皆有其對應的不確定性。由此不確定性場的分布，即可得知推估不確定性相對較大的位置，而此位置即為應增加觀測井的位置。</p> <p>2. 完成參數場推估後，本研究將建立場址的三維流場與溫度場。因為在夏天注藥時，地表的藥劑溫度(>35 度)與地下的溫度(25 度)可能會超過十度以上，因此透過熱流傳輸模擬即可得知地下溫度場的變化，如此由溫度變化幅度較小的區域即可視為注藥盲點區域，後續將可調整注藥策略，針對盲點區域加強注藥。熱處理在本場址中並未施行，未來本研究將可針對施行熱處理之場址推估熱傳參數，估算熱處理所需耗費之電量，優化熱處理之規劃，以及選擇較佳之熱處理方法等。</p> |
|--|--|



委員二：

1. 本計畫屬於較為特殊的現地地下水傳輸參數觀測與模擬。
2. FBG...等設施是由本計畫開發，未來將於現地利用？或是利用既有的成果(設施)? 協同主持人之一的主要工作是FBG研發，是採用既有的成果或是由本計畫研發?
3. 現地低溫熱處理技術具應用潛力，但經濟性評估需列入討論
4. 計畫目標之一是”...協助控制菌落分佈...”，就整治現場而言，這將是一件極度困難的工作，且是否有意義？或是否有必要？或期望藉由”...協助控制菌落分佈...”所能達成的目的？或是現場整治有何種困境必須藉由”...協助控制菌落分佈...”才能達到現地的整治目標?..... 建議說明。

1. 謝謝委員意見。
2. FBG 係發展成熟之技術，於坡地防災監測已使用多年，成效卓越，但迄今尚未應用於地下水污染問題，故探討如何整合其他領域發展成熟的新技術妥善整合應用至地下水污染場址，共同解決複雜的地下水污染及整治過程中的面臨的疑難乃本計畫的主要目的之一
3. 本研究發展之熱傳參數推估方法可應用於現地熱處理之評估與規劃，雖然目前場址並未進行熱處理，但將來仍可協助污染場址進行現地熱處理法之能量需求評估，熱處理法選擇，以及加熱地點與深度規劃等。本計畫書內容已進行修正，請見前言第二段與第三段。本計畫將利用溫度作為示蹤劑，透過熱傳模式模擬注藥過程即可知道溫度變化幅度微小區域，這些區域即為高潛勢注藥盲點區域，將可在後續整治階段調整注藥策略，針對盲點區域加強灌注。
4. 謝謝委員寶貴建議，本計畫主要目的為評估藥劑灌注後的流布，若使用生物整治，由藥劑量分布均勻與否或可代表菌落分布多寡，已修正計畫書中前言第三段以及研究成果與效益第四點。



委員三：

- | | |
|--|--|
| <p>1. 應用已成熟之技術與方法解決環工之所面臨之問題，適用性最為關鍵，對欲解決問題為何？</p> <p>2. 有具體之場地與合作對象，時程之配合是否能配合實場核定之方法與期程。</p> | <p>1. 本計畫將利用溫度作為示蹤劑，將藥劑以天然條件加熱(夏天地表溫度高)或冷卻(冬天地表溫度低)，使其與地下水有顯著溫度差，之後透過熱傳模式模擬注藥過程即可知道溫度變化幅度微小區域，這些區域即為高潛勢注藥盲點區域，後續將可調整注藥策略針對盲點區域加強藥劑灌注，提升污染整治成效。</p> <p>2. 目前實場整治第一階段尚餘兩年，符合本計畫期程。</p> |
|--|--|



委員四：

1. 光纖光柵監測系統之靈敏度為何？其中對於熱力掃描系統之應用限制為何？
2. 對於微生物整治場址中，如何利用熱流場之變化，予以反應或監測？其中利用相位差變化，誤差度為何？是否可予以修正？或有具體提升精確度之作法？

1. FBG 感測器在溫度的靈敏度達 0.1 度，符合本研究進行熱力掃描所需精度，單點的代表範圍約為 50 cm(FBG 上下 packer 包夾的範圍)。後續的熱力掃描分析仰賴 FBG 所提供之量測溫度與壓力進行熱傳參數推估，越多的有效溫度與壓力量測值將使得推估結果的正確性越高。然而因為經費有限，因此必須透過現場注藥配置與水文地質調查資料在有限的觀測井群中配置有限的 FBG 感測器，盡力求得最多的有效量測數據，提升熱力掃描的推估精度。
2. 透過溫度變化可改變微生物藥劑之整治效率，而最直接監測溫度對於生物整治成效影響的方式為採樣觀測井內污染物濃度之變化情況。在本研究中，溫度是作為示蹤劑之用，主要用來判定藥劑傳輸之位置以及尋找藥劑無法抵達之區域（注藥盲點區域），之後再針對盲點區域加強灌注。故本研究在溫度的利用上並非直接用來觀測微生物藥劑之整治效率。

本署建議：

請說明本研究與土壤及地下水污染之相關性及用途。

1. 地下水整治過程中藥劑流布經常決定了整治成效，但在複雜非均質等向的地下環境中，藥劑流布相當難以預期，本計畫期望能整合發展成熟的 FGB 技術，評估地下水整治過程中的藥劑分布，針對這些藥劑較難傳輸的範圍，甚至是特定深度，加強整治作業，以達到精確整治的目的，共同解決複雜的地下水污染難題。



附錄二 計畫書審查意見表



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

107 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

計畫書審查意見表

專案主持人：張良正	服務單位：國立交通大學土木工程系	模場類 03
專案名稱：新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展		
<div data-bbox="185 568 300 613">委員一</div> <ol style="list-style-type: none"> 對於適用之地質水文條件及限制可增加不同場址進行測試。 相關監測設備安裝與量測已有相關研究基礎，建議消耗性器材降低經費。 	<ol style="list-style-type: none"> 本研究搭配循序注藥過程由多深度光纖光柵觀測井群搜集水壓水溫資料進行水力掃描，以推估現地之三維含水層熱傳與水力參數場，並求得現場之精確流場與溫度場。水力掃描方法已經在國外進行過多種尺度及不同地質條件的測試，但台灣尚無地下水污染問題之應用，本計畫為國內第一次應用成熟之 FGB 新穎技術整合於地下水整治作業之研究。本場址屬於礫砂層，適合本試驗方法之進行。本計畫若能產出具體成效，未來將應用於台灣其他地下水污染場址。 本計畫為國內第一起應用成熟之 FGB 新穎技術整合於地下水整治作業之研究，必須因應現場環境進行客製化設計，且本研究需要之壓力量測精度較高，同時必須達到單井多深度觀測的目的，並可多次性監測使用，因此編列較高之耗材費用。 	



委員二

1. 主持人(執行團隊)的學術研究能力與技術發展能力足以勝任本計畫
2. 主持人(執行團隊)近五年研究與技術發展績效佳
3. 本專案對未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動的貢獻仍待本計畫未來執行成果的呈現與說明(本計畫屬於模場試驗計畫，補助經費較高，研究成果在實務應用性的說明應更具體完整)
4. 本專案預估之成果績效包含論文發表(研討會或期刊論文)(本計畫屬於模場試驗計畫，研究成果的實務應用性相對重要，但成果說明卻仍以論文發表為主，建議多說明本計畫成果的實務應用)
5. 本研究計畫書撰寫具體
6. 本研究計畫書所擬定的研究方法可行
7. 本研究計畫書所擬定的研究內容與所預期的研究成果，對未來土壤或地下水污染場址調查整治(或評估)的實場應用性仍待說明(計畫書中對研究成果的實務應用性的說明仍不具體，有待未來執行成果的說明)(本試驗模場有多種污染物，淺層地質為粉黏土，成果的說明與呈現是否具參考性，建議評估)
8. 本研究計畫書的文獻蒐集尚完整，對國內外本研究領域的現況了解
9. 本研究專案執行期限合理
10. 本研究計畫書中對研究的預期成果已說明，但對實務應用性的說明卻不具體
11. 本計畫並不是延續性計畫
12. 本研究計畫對預期成果的呈現說明以學術發表為主

1. 感謝委員意見。
2. 謝謝委員意見。
3. 本研究除了將盡力完成原本規劃之三維水力與熱傳參數分析，建立現地流場與溫度場外，另亦將配合現場整治公司（瑞昶科技），透過污染傳輸模式(亦即本研究將藥劑視為污染物進行傳輸模擬)或溫度傳輸模式(藥劑與地下水需有明顯的溫度差的條件下)預測藥劑灌注後之分佈，故可協助評估藥劑灌注時，藥劑可能無法抵達之局部盲點區域，再以分析結果調整注藥策略，針對局部盲點區域加強注藥。另本研究可依照現場整治公司之需求，透過本模式進行分析，擴充本模式之實際應用範疇。實務應用範疇的部分補充於 4.7 節。
4. 已補充實務應用於 4.7 節。
5. 謝謝委員意見。
6. 謝謝委員意見。
7. 本計畫主要係為了評估 FBG 於地下水污染整治實場應用之可行性，除了可利用既有井安裝可重複使用設備的優勢外，水力與熱力掃描分析方法也是本研究之重點，分析成果將配合地電阻影像法及水質分析綜合探討，其成果將提供與整治單位參酌，整治單位可依據成果加強或調整整治設計。
8. 謝謝委員意見。
9. 謝謝委員意見。
10. 謝謝委員意見，已補充實務應用於 4.7 節。



<p>13. 本研究計畫已依原計畫構想書時的審查意見修正</p>	<p>11. 目前本計畫將執行第一年之工作項目。</p> <p>12. 謝謝委員意見，已補充實務應用於4.7節。</p> <p>13. 謝謝委員意見。</p>
<p>委員三</p> <p>1. 有長期學理探討與模式模擬之經驗與成果，團隊另整合民間科技公司負責現場裝設，驗證方法的功效。</p> <p>2. 有明確的模場試驗場址，且為已公告之污染場址。</p>	<p>1. 謝謝委員意見。</p> <p>2. 謝謝委員意見。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 計畫書應增到構想書階段，相關委員建議之回復辦理情形。</p> <p>2. 本計畫對於光纖光柵應用於監測現地污染物之驗證作業或機制，似乎未予以說明。</p> <p>3. 利用溫度變化進行量測，是否會受到環境參數或傳輸之影響，如何確認可信度？請再予以評估說明。</p>	<p>1. 本研究已增加構想書的意見回覆，請見附件一。</p> <p>2. 在本研究中，光纖光柵主要應用於單井多深度的地下水溫與孔隙水壓量測，量測後之水溫與水壓將作為三維含水層水力與溫度參數場推估之依據，藥劑流布成效評估將配合地電阻影像法及水質分析綜合探討，詳細說明請見4.2與4.3小節。</p> <p>3. 本研究將在夏天進行注藥試驗時，利用地面溫度使藥劑加熱(36-37度)，單口井之注藥量達八噸，足以使鄰近觀測井(2-3公尺以上)之地下水溫度(25度)之溫度產生差異，因現場注藥為分區循序注藥且需在一週內完成，故幾乎所有光纖光柵觀測井應皆可量測到注藥後的溫度差異(精度為0.1度)，而由溫度的變化即可觀察到藥劑的傳輸方向與範圍。本研究將進一步透過此溫度</p>



	差異進行熱傳參數反演，推估熱傳參數場。
<div>本署意見</div> <div>1. 請於計畫書修定稿中補充說明與協同主持人之合作方式。</div>	本研究之協同主持人為何彥德博士與王子賓博士。何博士主要負責本計畫中光纖光柵監測網之建置，以量測注藥過程中，觀測井群之多深度水壓水溫變化。王博士則負責協調整治單位與灌注單位安排施測時間，同時依據現場環境及污染分布，建議實驗井規劃配置，並以 TL-CHERT 電性角度評估藥劑流布，其觀測結果將作為本研究推估三維流場之驗證參照。



附錄三 期中報告計畫書審查意見表



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

□申請計畫書 ■期中報告
□修正計畫書 □期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	□ 研究計畫 ■ 模場試驗
計畫類別	□調查 □整治 ■其他		主持人：張良正
計畫名稱	新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 本案績效自評表中，期中未達成部分，請持續努力。 2. 甘特圖(P5)註記詳盡，符合進度，後續工作請積極辦理。 3. 後續需完成地下水流與熱傳耦合模擬模式之開發及驗證，請進一部估算成本效益，尤其光纖光柵感測器之使用壽命。 4. 實場實用性之探討評估可著手準備。		1. 本計劃團隊將持續完成文章投稿以及專利申請，以達到計畫目標。 2. 感謝委員肯定，團隊將持續努力執行後續工作。 3. 模擬模式的開發與驗證屬於軟體開發，開發完成後即可供計畫使用，不會增加額外成本，屬於勞務成本。而光纖光柵感測器則屬於硬體設備開發，雖說期中之前的試驗遭遇強酸等問題，但目前本團隊已著手改良儀器本身材質，提升抗酸鹼與抗腐蝕能力，後續將以能在強酸強鹼環境中長期使用為目標，以提升成本效益及產品之國際競爭力。 4. 目前已與整治單位討論下一階段的注藥井位置與數量，以及三組儀器配置井位，後續的分析結果將搭配跨孔井下電阻成像技術，觀測藥劑流布，並與本計劃的方法所推估之藥劑位置比較，驗證本計劃開發技術之實用性	



<p>委員二</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 實際進度符合預定進度。 2. 計畫申請審查意見回覆情形請附報告。 3. 期中報告無後續工作說明。 4. 後續建議於注藥時進行量測水溫水壓時，建議採樣測試水質實際變化情形，以利未來防腐防蝕之措施考量。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員。 2. 計畫書之審查意見將列於附件供委員參考。 3. 本計劃期中之後需完成水流與熱流耦合模式之開發與驗證，以及配合現地注藥進行多井多深度之水溫與水壓量測。期中之後的工作項目已補充至 4.1 小節中。 4. 謝謝委員建議，本計劃將遵照辦理。
<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫量測地下水之水溫與水壓，進行推估溫度場與流場，有別於傳統的抽水試驗方法不擾動污染團，協助辨識藥劑傳輸途徑，消除注藥盲點，應有驗證方法有證實。 2. 期中預期工作均已完成。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計劃將透過跨孔地電阻像法時序分析作為注藥途徑辨識之依據，並將以本計劃建立之推估方法推估藥劑傳輸路徑，再進一步比較兩者之差異，以驗證本計劃方法之可行性。 2. 感謝委員。
<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 已成功運用 FBG 感測器於污染場址之溫度與壓力量測。 2. 已初步擬訂 FBG 感測器回收再利用流程，以達可重覆回收再利用。 3. 由跨孔地電阻測試，後續可利用溫度作為示蹤劑觀測污染物傳輸路徑及水文地質參數之推估。 4. 已達到期中查核項目之工作。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員。 2. 感謝委員，回收再利用方式將依照現場施測狀況持續調整，以達到保護儀器設備，減少損壞發生的情況。 3. 本計畫係以跨孔地電阻影像法時序分析研判灌注過程中藥劑流布，並以影像化智慧型表徵方式展現空間範圍，其目的係與 FGB 調查成果所建立之水文地質模型綜合討論，以有限的既設井獲得更多元的資料量，提升對地下環境的解析能力，本計畫目的並不包含任何對模場址污染問題的調查與評估，主要係探討已發展成熟的 FBG 技術新穎應用於土壤及地下水污染場址的可行性與適用場合；另地電阻時序分析適用的先決條件在於地質材料的電性必須有超過 10% 以上的改變，溫度改變能造成材料電性變化經驗上需要至少數 10°C 以上的溫度差距，由於



模場屬於整治中的場址，必須配合整治單位的規劃設計，無法以溫度過高的藥劑或沸水進行實驗，否則可能不利於生物試劑的菌種生存，但FBG對於溫度的感應則具有高度靈敏性，以微量溫度及壓力變化推演水文地質參數都是未來將進行的實驗項目。

4. 感謝委員。

委員五

1. 本研究主要量測多井多深度的水位與溫度進行研究場址之三維水文地質參數場推估，以建立精準的流場，協助預測預測污染團未來可能的發展，以提供預警監測管理或建議。
2. 根據計劃書，期中報告已完成相關執行內容。
3. 請補充說明光纖光柵感測器之回收再利用流程。
4. 本研究所開發之技術將應用於桃園某整治中場址，以既有之觀測井網搭配光纖光柵多深度多功能觀測系統，天候因素是否會影響水文地質參數之推估。
5. 圖 30 請再確認。灌注 6 小時後沒有反應？
6. 建議評估，強化 FBG 感測器之抗酸與抗腐蝕能力，對感測器靈敏度的影響。

1. 感謝委員，本計劃主要目的為觀測與預測整治藥劑的流向，以協助判斷藥劑是否能與污染團混合，本研究建立之方法未來將可作為協助規劃整治藥劑灌注位置與數量工具，達到精準整治的目的。
2. 感謝委員。
3. 試驗與回收流程如圖 29(p.32)所示，首先為將 FBG 感測器置入觀測井中，接著將阻隔器以空壓機注入空氣使其膨脹後，在注藥期間量測多深度的水壓與溫度。完成量測後，首先需將阻隔器內的空氣排出進行洩壓，使得皮膜回復原本大小後，即可將感測器從井中取出，取出後須先將感測器以大量清水沖洗，之後拆開相關配件擦乾保養，以避免低 pH 值之地下水留在感測器內，造成持續性的侵蝕。待完成保養後，將配件進行組裝，即可進行下一次量測。回收再利用流程內文請參考 p.32。因本計畫所研發之設備具重覆使用性，將使整體調查更具經濟效益。
4. 若在觀測系統量測當下遇到大量降雨時，將增加了額外的地下水補注來源，造成額外的地下水水位與水溫變動，如此將使得推估結果受到影響。為了



考量大量降雨的影響，將須額外量測地面水溫度以及量測未飽何層的水量變化(如使用 TDR 量測)等，再透過模擬未飽何層入滲的方式量化降雨入滲量，並將之考量到推估系統之中，以減少降雨入滲引起之推估誤差。

5. 灌注 6 小時時確時在 TL-CHERT 分析成果中無發現顯著反應，此也應屬於合理正常的現象，由於灌注井距離 CHERT 調查井超過 10 公尺以上，且 6 小時的總灌注藥劑量約 1500 L，尚無法影響到 CHERT 調查範圍，且 DPI 灌注技術屬於滲透工法，係在不產生地層劈裂的原則下以適當的壓力於特定深度進行灌注，CHERT 調查在 6 小時的成果並未出現顯著反應也間接驗證：CHERT 資料品質穩定，在兩次無事件的調查中並無產生任何電性上的變異；地層中並未因 DPI 灌注造成劈裂而形成渠道短流問題。

委員六

1. 模場試驗之污染場址地下水 PH 值為 3 至 4 左右，恐影響監測儀器，為執行持續監測，解決實際方案為何，請針對感測器抗酸及抗腐蝕能力強化部分說明，或此方法是否不適用過酸之環境
2. 期中報告 P.15 所述之解析度為 15 公尺一筆資料，該資料為地下水水面下 15 公尺之分析資料？另說明其中之後完成兩組多深度感測器組裝(共)6 顆感測器，所以一組為三顆，監測距離為每 5 公尺 1 個？其每顆感測器監測範圍是否大於 5 公尺？

1. 謝謝委員意見。目前本計劃光纖團隊已著手改善儀器之抗腐蝕能力，在灌注膠種的部分，目前改採用尚貫 4313 號膠，而原本使用之不鏽鋼材料由不鏽鋼 304 提升到不鏽鋼 316，以有效提升感測器抗酸鹼腐蝕效果。本計畫後續將斷面放大檢視，發現斷面相當平整，若為腐蝕造成之斷面應較為崎嶇，故本計畫推論應為人為造成之破壞。本計畫目前仍持續調整感測器之材料，並進行室內測試，接著將於現地進行實測與後續改良。FBG 技術乃首次應用於地下水整治場址，本團隊將持續克服許多現場面臨之疑難，以提升設備可適合應用之環境，擴大 FBG 技術在地下水污染場址之應用層面。



2. 若水井的井管為全開篩，其量測的水位則是該井的平均水位。該場址井群井深約 15 米，但實際地水位埋深約 6 米，故應為地表下 6 米到 15 米的平均水位，本計劃已將文字進行修正。

專案主持人：_____ (簽名及蓋章)



附錄四 期末報告計畫書審查意見 表



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		主持人：張良正 NO：
計畫名稱	新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
1. 此 FBG 技術如何比傳統利用水文地質 K 值（水力傳導係數）較好？尤其在土壤上下層土壤質地為黏質土（地下水位上層土壤或地下水下層土壤）如何解決此問題？ 2. 此技術可否改善更瞭解殘留於黏質土壤污染物與注藥是否有較佳之反應效果？ 3. 依目前結果瞭解是否三維空間解析範圍為何？		1. FBG 為量測水位與水溫之感測器，並無法直接量測 K 值。本研究透過 FBG 多深度光纖感測器量測暨有觀測井之多深度水溫與水壓，再透過水力掃描技術推估三維參數場，而非傳統抽水或微水試驗僅能量測單點之參數值。土壤材質對於掃描結果影響相對較小，因為掃描技術主要是將觀測井與灌注井間的水位響應轉換為參數場，因此，除非兩井間毫無響應，否則土壤材質對於推估結果影響有限。 2. FBG 僅能量測水位與水溫，無法量測藥劑與污染物間的實際反應速率。 3. 目前三維參數場的空間解析度為 2m*2m*1m。未來可配合現場需求增加解析度，配合 FBG 感測器的觀測範圍（2 個 packer 間的距離），解析度可調整到 50cm*50cm*50cm。	



<p>4. 本計畫開發新型光纖多深度監測溫度、壓力以取得模式所需參數，較傳統方法能更精準瞭解注藥後流佈狀況，以增加效率。</p> <p>5. 宜參照 TRL 評估技術成熟度。</p> <p>6. 第二年工作項目應增加在不同實場作測試評估效果。</p>	<p>4. 感謝委員。</p> <p>5. 感謝委員意見，本計畫將蒐集 TRL 評估技術內容，充分了解後將納入計畫內容中。</p> <p>6. 目前本計畫以規劃下一年度在台南永康場址進行一次的測試，並將試驗成果納入計畫報告中。</p>
<p>1. 完成溫度與水流場之耦合模擬模式開發。</p> <p>2. 國際期刊完成投稿後與專利申請情形，請於自評表備註說明發表處及申請說明。</p> <p>3. 建議將第二年之甘特圖、第二年的工作重點及專利申請項目納入期末報告定稿本。</p> <p>4. 建議將模擬結果推估與原監測井地質資料比對後，將本模式之優勢列出。</p> <p>5. 建議將本方法之應用是否可以探討模擬污染的擴散。</p>	<p>1. 謝謝委員。</p> <p>2. 謝謝委員意見，本計畫已將專利與預計投稿期刊新增至自評表中，請參閱。</p> <p>3. 謝謝委員意見，本計畫已將第二年之甘梯圖與工作說明新增至 4.1 節，請參閱。</p> <p>4. 謝謝委員意見。因為現場之地質資料顯示土壤分布屬漸進式變化，因此較難與推估之 K 值直接連結。本計畫改以流速流向計之量測記錄比對，結果顯示推估之參數場大小與流速大小一致，此結果以新增至 5.7 節，請參閱。</p> <p>5. 謝謝委員意見。本方法可探討污染物之擴散，但主要以 LNAPL 為主，DNAPL 則因為其密度與流動機制與水流差異太大，無法直接以水流模式進行模擬。本計畫初步仍以灌注藥劑為主要探討對象，未來可再思考進行污染傳輸模擬。</p>



<p>6. 研究進度符合規劃，以 FBG 完成現地注藥試驗及地下水流與熱傳耦合模擬模式之開發與驗證。</p> <p>7. 可強化開發方法與使用跨地電阻量測法的優劣比較，以突顯本方法之優勢，例如：是否可預測注藥的影響/觸及範圍？操作便利性、成本 ...scan resolution？</p> <p>8. 建議可結合現地整治技術成效以驗證開發模式之預測結果，提升實場應用性。</p>	<p>6. 謝謝委員意見。</p> <p>7. 謝謝委員意見。跨孔井下電阻為很好的比較與參照對象，其原理與水力掃描相近，差異在於其觀測到電性特徵，而水力掃描則惟推估水文地質參數，後續再以模擬方式模擬藥劑流徑。兩方法各有其優缺點，最主要的差異在於地電阻法無法觀測到低導電度藥劑的流況，而本方法則可以，不受藥劑導電度影響。目前地電阻探勘於本計畫的定位較偏向輔助驗證性質，未來本計畫將思考如何強化計畫成果之說明。</p> <p>8. 謝謝委員意見。本計畫預期下一年度將配合廠商進行實場整治，協助推估污染熱點之參數場，並預測藥劑灌抵達污染團之劑量，最後可透過污染濃度量測或藥劑濃度量測驗證模式之預測能力。惟採樣費用較高，仍須考量計畫經費允許範圍內方可施作。</p>
<p>1. 本研究主要量測多井多深度的水位與溫度進行研究場址之三維水文地質參數場推估，以建立精準的流場，協助預測污染團未來可能的發展，以提供預警監測管理或建議。</p> <p>2. 期末報告，公式(6)請修正部分符號。</p> <p>3. 第 5.3.2 節，光纖光柵感測器現地測試，期中報告指出 FBG 感測器封裝膠已有嚴重腐蝕，但是期末報告說明為機械力的拉扯所導致的斷裂，請補充說明。</p> <p>4. 請補充說明光纖光柵感測器之回收再利用流程。</p> <p>5. 第 54 頁，請修正溫度單位。</p>	<p>1. 謝謝委員意見。</p> <p>2. 謝謝委員意見。本計畫已將重複使用之符號修正。</p> <p>3. 謝謝委員意見。本計畫後續將感測器斷面放大檢視，因斷面相當平整，應為外力拉扯所造成之損壞，若為酸蝕，則斷面應較崎嶇不平整，此部分內容已進行修正，請參閱 5.3.2 節。</p> <p>4. 已補充目前之回收做法，請參閱 5.4 節。</p> <p>5. 謝謝委員意見，已完成溫度單位修正。</p> <p>6. 網格尺寸代表模擬進行實的控制體積大小，為空間離散的最小單位體積，而模擬水位是地下水系統的狀態變數，其單位為公尺水柱高，但一般研究常用公尺來表示水位較少直接使用公尺水柱</p>



<p>6. 表 3，網格尺寸為 2-5 公尺，但是第 54 頁提及模擬水位誤差介於 0.1m—0.2 m 之間，請補充說明。</p> <p>7. 建議評估，強化 FBG 感測器之抗酸與抗腐蝕能力，對感測器靈敏度的影響。</p>	<p>高表示。因此網格尺寸與模擬水位之間並無直接關係。此外，誤差則是指兩個模式模擬結果的差異，兩模式使用之網格尺寸同。</p> <p>7. 抗酸與抗腐蝕能力主要作用在感測器周邊設備，而核心元件全面改成不銹鋼 316，提升其抗酸性。此更新後之感測器皆須重新進行溫度與壓力率定，結果顯示感測精度未受到不銹鋼材質的影響。</p>
本署審查意見	計畫單位回覆
<p>1. 目前感測器的監測範圍？</p> <p>2. 圖 27 請標註上午 11：30 至下午 1：00 的時間區段，以檢視是否有受當天天氣溫度影響。</p> <p>3. 第 32 頁觀測井 E5 於說明中及第 33 頁表 2 中名稱請一致。</p> <p>4. 圖 35 中之各線段請標示清楚及說明。</p>	<p>1. 溫度精度 0.1 度，壓力精度為 1 公分水柱高。水位與水溫量測範圍分別為 0~200kpa 與 0~100℃。</p> <p>2. 本計畫已將圖 27 標上起始時刻為早上 11:30，共量測 100 分鐘，因此結束時刻為下午 1 點 10 分。</p> <p>3. 本計畫已將所有文章內及表中之井名完成修正。</p> <p>4. 本計畫已完成圖 35 之修正，請參閱。</p>



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

107 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：107 年 10 月 29 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 其他		
申請機構系所	國立交通大學土木工程研究所	計畫主持人	張良正
專案名稱	新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。**(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)**

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出發表名稱)
A 學術產出及活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文						
		(2)研討會論文						
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0	0	0	因為本研究配合廠商在十月底進行注藥，因此短時間內無法立即產出文章。本研究將於第二年完成文章投稿。預計投稿至 Journal of Contaminant Hydrology
		(2)研討會論文						
		(1)技術報告						
	3.報告	(1)技術報告						



項目 \ 目標達成程度			申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因 或學術產出發 表名稱)
	(篇數)	(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	1	1	1	1	1	專利申請案 號為 107142122
		(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	1	1	1	學生張益豪 目前為碩二
		(2)博士						
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	3	3	3	3	3	
		(2)跨機構團隊	3	3	3	3	3	
		(3)形成研究中心						
		(4)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	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細 資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申請中	發明	1	1	1	1	1	專利申請案號為 107142122 (專利 所有權人為奇博 科技, 交大團隊為 共同發明人)
			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)							
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得	件數							



<div> <div>項目</div> <div>目標達成程度</div> </div>			申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細 資料)
	業界科專	業界投資金額 (仟元)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						





(三) 政策面

目標達成程度			申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數						
		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						
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)							
	5.獲得獎項(件數)							
	6.提升能源效率(%)							
	7.節能減碳效率(%)							
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

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



學術成就：本研究以序率方法建立異質熱傳與水文地質參數場之推估方法，目前在國際上屬於領先的研究，完成之成果將發表至國際頂尖期刊。

技術創新：本研究量測注藥時的地下水溫與水壓，再以量測的資料進行三維參數場的推估，進而建立精確的溫度場與流場，在試驗過程中無須額外進行注水或抽水試驗，因此不會擾動污染團，且所得流場與溫度場可協助辨識整治藥劑的傳輸途徑，協助注藥盲點區域辨識。

經濟效益：

- (1)本研究所建立的方法可節省鑿井與抽水試驗的費用，只需蒐集注藥過程的溫度與壓力資料即可建立該區域的三維流場與溫度場，協助注藥盲點區域辨識。
- (2)本研究建立之三維參數場，可預測實場之三維流場與溫度場以及藥劑與污染物之流向與污染團整治現況，提出後續整治規劃建議，進行精準整治，減少無效之藥劑灌注與相關鑿井費用。



修訂報告 內文





摘要

本研究之主要目的為透過注藥時期量測多井多深度的水位與溫度進行研究場址之三維水文地質參數場推估，以建立精準的流場，協助預測預測污染團未來可能的發展，以提供預警監測管理或建議、協助規劃更有效益的整治系統，以及掌握灌注後的整治藥劑分布情形。本年度已完成之工作項目包含（1）以 FBG 觀測系統觀測注藥期間在多井多深度之水溫與水壓變化（2）完成注藥期間以跨孔井下地電阻同步監測藥劑動向，以及（3）完成地下水流與熱傳耦合模式之開發與驗證。本研究目前已完成多深度光纖光柵之溫度與壓力觀測系統開發與完成現地注藥期間之多井多深度觀測，並成功地觀測到注藥期間之水壓變化，而水溫變化則相對水壓變化不明顯。另外本研究已改量感測器的材質，包含不鏽鋼 316 與耐酸性的膠，以增加感測器的耐腐蝕性。此次試驗跨孔井下電阻亦同步觀測到注藥過程中，地層中的電性變化。未來將可作為流場預測之依據。最後，本研究已完成地下水流與熱傳耦合模式開發，並以 Tough2 軟體作為參照，初步完成模式驗證。整體而言，本研究之成果符合工作進度，後續將持續進行 FBG 監測系統的改進，模擬模式精進，與聯合反演算方法的開發。



Abstract

The purpose of this study is to develop the accurate three-dimensional hydrogeological parameters fields based on the head and temperature measurements during the remediation agent injection periods in the selected contaminated site. The accurate flow field enables us to understand and predict the spatial distribution of the plume, provide the necessary information for the design of the monitoring well groups of the early warning system, develop the effective site remediation system, and outline the spatial distribution of the major transmission after the injection of remediating agents. The project tasks needed to be complete this year include (1) complete one field investigation of head and temperature at the multiple depths of the selected multiple wells using FBG multiple sensors during the remediation agent injection, (2) simultaneously investigation of remediation agent transmission using CHERT, and (3) validation of the developed coupled flow and heat transport simulation model. Currently, this study has completed the investigation of the head and temperature at three selected depths of the three observation wells using FBG multiple sensors during the remediation agent injection in the study site, and the head variations were clearly observed by the FBG system, but the temperature observations were relative insignificant. Furthermore, the corrosion resistance of the FBG system was improved by using the corrosion resistance glue and stainless steel 316. The results of cross-hole electrical resistivity tomography show that the remediation agent can be clearly observed, and these images will be valuable reference for the flow field prediction. In the development of the coupled flow and heat transport model, we have developed the mathematical model and used finite element method to solve it by the Fortran codes. To verify our develop model, the simulation output of Tough2 and our model were compared, and the results are consistent. Finally, the results show that all the project tasks are on schedule, and we will continue to improve the developed FBG system and simulation model as well as the development of joint inversion model.



編列目次

(一)前言	1
(二)研究目的	1
(三)文獻探討	2
(四)研究方法與過程	4
4.1 研究執行流程	4
4.2 現地資料蒐集	8
4.3 地電阻影像法原理	12
4.4 光纖光柵量測孔隙水壓與溫度原理	14
4.5 孔隙水壓與溫度量測之試驗配置說明	16
4.6 三維地下水流與溫度場之耦合模擬模式建置	17
(五)結果與討論	22
5.1 多深度水壓與溫度感測系統建立	22
5.2 多深度水壓與溫度感測系統測試	23
5.3 多深度水壓與溫度感測系統現地量測	26
5.4 光纖光柵感測器回收再利用流程建立	42
5.5 TL-CHERT 成果說明	43
5.6 地下水流模與熱流模式驗證	57
5.7 水力掃瞄 (Hydraulic tomography, HT)	63
5.8 結論與建議	66
(六)參考文獻	68
附錄一 水之熱動力性質公式說明	70
附錄二 黏滯係數公式說明	74



圖次

圖 1 研究執行流程圖	5
圖 2 部分研究場址配置圖	9
圖 3 研究場址地下水流向	11
圖 4 雙環塞滲透灌注工法示意圖	12
圖 5 不同性質物質侵入地質假設模型	13
圖 6 TL 差異率分析模型	14
圖 7 光纖光柵感測機制示意圖（李瑞庭, 2005）	16
圖 8 光纖光柵串列反射原理示意圖(Kersey, 1992)	16
圖 9 地下水流與熱傳耦合計算流程圖	19
圖 10 光纖光柵溫度與壓力感測器成品圖	22
圖 11 光纖光柵溫度與壓力感測器示意圖	23
圖 12 FBG 水壓計室內壓力標定	24
圖 13 FBG 水壓計室內溫度標定	24
圖 14 FBG 溫度計室內溫度標定	25
圖 15 FBG 水壓計恆濕恆溫箱環測結果	25
圖 16 FBG 溫度計恆濕恆溫箱環測結果	26
圖 17 現場孔位	27
圖 18 現場安裝設備量測	27
圖 19 分隔器膨脹測試 - 水壓量測	28
圖 20 分隔器膨脹測試 - 溫度量測	28
圖 21 纜線長期浸泡受強力拉扯斷裂	30
圖 22 第二組 FBG 水壓計室內壓力標定	30
圖 23 第二組 FBG 水壓計室內溫度標定	31
圖 24 第二組 FBG 溫度計室內溫度標定	31
圖 25 配合現場灌藥 FBG 感測器水壓與溫度量測	32
圖 26 充氣後之感測器	32
圖 27 現場 FBG 溫度量測結果(2018 年 6 月 1 日)	33
圖 28 現場 FBG 壓力量測結果(2018 年 6 月 1 日)	33
圖 29 第二次 FGB 試驗現場配置圖	36
圖 30 FBG 水溫與水壓計實體圖	37
圖 31 FBG 延長段實體圖	37



圖 32 現場組裝 FBG 水溫與水壓計以及延長段.....	38
圖 33 現場配置 FBG 感測系統於井孔內.....	38
圖 34 現場灌藥時訊號明顯變化	39
圖 35 注藥期間 FBG 觀測系統量測之水壓變化歷線	40
圖 36 注藥期間 FBG 觀測系統量測之水溫變化歷線	41
圖 37 感測器回收再利用流程	42
圖 38 灌注 6 小時後 TL-CHERT 成果圖	45
圖 39 灌注 24 小時後 TL-CHERT 成果圖.....	46
圖 40 灌注 28 小時後 TL-CHERT 成果圖	47
圖 41 灌注 32 小時後 TL-CHERT 成果圖	48
圖 42 灌注 48 小時後 TL-CHERT 成果圖	49
圖 43 灌注 50 小時後 TL-CHERT 成果圖	50
圖 44 灌注 52 小時後 TL-CHERT 成果圖	51
圖 45 灌注 55 小時後 TL-CHERT 成果圖	52
圖 46 第二次 FGB 試驗現場配置圖	54
圖 47 第二次 FGB 試驗 TL-CHERT 成果圖	56
圖 48 驗證之三維模式網格.....	59
圖 49 Tough2 與 VSAFTH 模擬結果比較圖.....	62
圖 50 以水力掃描技術推估之三維水力傳導係數場.....	64
圖 51 以水力掃描技術推估之三維蓄水係數場	64
圖 52 注藥區域內觀測井之流速流向記錄.....	65
圖 53 以水力掃描推估之參數場模擬第四次注藥之流況	66



表次

表 1 第一年研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	5
表 2 第二年研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	6
表 3 FBG 多深度水溫與水壓感測系統暨注藥井注藥時間與流量配置表	35
表 4 模式格網數量與尺寸	58
表 5 模式參數設定	58



(一)前言

污染場址實有必要建立更為精確的場址性流場，以掌握污染團可能的現況流布，並預測污染團未來的可能發展，以提供預警監測管理或建議；同時，精確的流場能協助規劃更有效益的整治系統，並更能掌握灌注後的整治藥劑分布情形。傳統場址性流場推估上多假設現場之水文地質場呈均質(homogenous)分佈，因此僅能推估大致上的主要流場，但局部流場易受地質異質性、異向性或水文地質邊界等影響，使得預測污染團的分佈往往與現場分佈有相當大的落差。為了對水文地質變化或分布有較為精確的掌握，傳統作法可能需大量調查資料（如多深度微水試驗、大量地質鑽探資料或其他調查方法），然而有污染之虞的場址有時不適合執行抽水試驗，因為可能造成污染團重新分布或擴大(即二次污染)。因此建立新的方法來描述水文地質的細部變化或分布將能有效地幫助掌握精確的流場。

除了掌握地下水流場外，地層溫度的調控亦可幫助污染整治之進行。溫度場是熱處理（多用來處理污染源熱區）的重要參數，許多場址預設的溫度，很可能在實場產生相當大的落差，導致整治成效不彰。另外，溫度場也會改變地下水與污染物或相關藥劑之水力傳輸性，因此，溫度場分布的掌握與調控在整治設計上是值得研究的。

為求得精確的流場與溫度場，充分的地下水位與溫度觀測資料是必要的，目前的監測系統多於水井中配置水壓計與溫度計進行量測，而現行的建井方式大多先進行鑽孔、配置套管，再於觀測深度處進行套管開孔並施做上下封層，以阻隔管內水流上下連通，如此即可量測特定深度的水壓與溫度。需注意的是，以此作法量測的水壓與溫度為地下水進入管內後的平衡壓力或溫度，若開孔較長，則其觀測資料代表的是地下水層中特定範圍的平均值而非特定深度，因此開篩較長的觀測井將無法觀測到細部的地下水壓與溫度變化。目前的污染場址之觀測井則多屬全開篩或開孔長度較長的類型，而如何在現有觀測井中量測多深度的水壓與溫度則為當前急需解決的課題。

(二)研究目的

本研究欲發展建立三維地下水流場與溫度場的方法，此方法包括以光纖光柵建立新型態多深度水壓與溫度監測系統以及觀測資料分析方法，其中，觀測資料分析方法為本研究所發展的水力與熱力掃描，可推估污染場址的三維流場與溫度場。研究成果可協助後續污染整治規劃與精準整治的推行。



(三)文獻探討

在與溫度與污染整治的相關研究上，最直接相關的研究為現地熱處理法(In situ thermal remediation, ISTR)，此方法需同時掌握流場與溫度場，方能將目標區域加熱到預定溫度且同時減少額外的能量損耗。Heron et al. (2013)指出 ISTR 可有效地去除 DNAPL，該研究在舊金山的褐地(體積為 5097 m³)整治中，以此方法移除了 99.99% 以上的 DNAPL，耗費 2.2 million kWh 的電力。Banker et al. (2016)則指出透過 ISTR 可有效去除 DNAPL 污染源，同時降低地下水中的溶解相濃度。雖然這些研究均指出 ISTR 可有效整治 DNAPL 場址，但 Lemming et al. (2013)指出在使用 ISTR 的同時應該考慮到如何有效的減少能量損耗，以減少碳排放以及對環境的影響。為了能有效對目標區域進行加熱並減少能量損耗，除了改善 ISTR 整治過程中的導熱相關元件外，透過精確流場與熱場的控制，將能透過水流傳遞能量來加熱目標場址，同時減少水流將熱能傳遞至外圍區域造成的能量損耗。

除了 ISTR 之外，溫度亦可作為示蹤劑，透過地表水與地下水的溫度差異，辨識地表水入滲路徑，裂隙流徑及河川與地下水的交互作用等 (Anderson, 2005)。本研究將利用溫度作為示蹤劑，透過夏季或冬季之地表溫度加熱或冷卻藥劑溫度，使得藥劑與地下水的溫度有明顯差異，藉此觀察藥劑之流向。由此可知，掌握細部地下水流場與溫度場的空間分佈，對於污染場址的整治規劃將有相當大的助益，因此本研究之主要課題為如何預測精確的地下水流場與溫度場，以協助預測藥劑流徑，並辨識注藥盲點高潛勢區域，加強盲點區域注藥，提升整治成效，進而達到精確整治之目標。

為求得精確的流場與溫度場，充分的地下水位與溫度觀測資料是必要的，目前台灣的環保監測井多為淺井且開篩長度較長，故其觀測資料代表的是地下水層中特定範圍的平均值而非特定深度的值，因此開篩較長的觀測井將無法觀測到細部的地下水壓與溫度變化。此外，若欲增加觀測資料在垂直方向的解析度，傳統方法往往需要鑽鑿新井或是在建井時就預留較大的鑽孔，以便埋設數支套管，並在不同深度開孔，同時在井內進行分層封層，如此一來將耗費更多的人力與物力。為了在既有環保監測井求得多深度的溫度與壓力觀測，本研究提出應用新型多深度多功能之光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)觀測系統(Huang et al., 2012; 黃等人, 2013)。此系統以光纖光柵技術為核心，可在單一鑽孔內同時觀測多深度之孔隙水壓與溫度，且因為不需下套管，可裸井建置(兩吋井)，或將觀測系統置於全開篩之井中，可大幅節省鑽井成本，並提升觀測效



益。此外，試驗結束後，FBG 感測器可由井中取出，待參數調校後即可應用在下一場址，可節省觀測成本。

為了預測精確的三維地下水流場與溫度場，求得污染場址內的三維水文地質與熱傳參數場是相當重要的，一旦完成參數場的建置，便可透過數值模擬模式預測現地的水流與溫度場，後續便可以此模式為基礎，進行污染整治規劃，量化藥劑的流佈以及溫度場的空間分佈，並可進一步依據模擬結果，調整藥劑的溫度，注藥的位置與地點，或是規劃現地熱處理法的配置，有效提升整治效益。傳統上，取得水文地質參數(如透水係數 K 場)需透過鑿井進行抽水試驗方能取得一定點的特定深度區間的 K 值，若要以此方法取得三維參數場的空間分佈恐怕不切實際。而傳統取得熱傳參數的方法則需透過鑽取現地岩心，再進行實驗室試驗方能求得，若欲以此方法求得三維熱傳參數場則完全不符成本效益。為了以合乎成本效益的方法求得三維參數場的空間分佈，本研究將以水力掃描技術(Hydraulic Tomography, HT)為基礎，發展三維水文地質與熱傳參數場的推估技術。

水力掃描技術為美國亞利桑納大學葉天齊教授(T.-C. Jim Yeh, The University of Arizona)及其研究團隊對所推廣的一套以序率為基礎的參數反演方法(一般稱為水力掃描)，主要概念為以循序抽水或注水的方式於不同位置與深度刺激含水層，並透過觀測井網觀測地下水位的變動，再以其觀測水位反演水文地質參數(Yeh and Liu, 2000; Zhu and Yeh, 2005 and many others)。此方法已經過實驗室尺度(i.e. 砂箱, Illman & Yeh, 2012)，現地尺度(Tso et al., 2016; Yeh et al., 2017)，以及大尺度(公里等級, Zha et al., 2016)的實地驗證，說明此方法乃實際可行且合乎成本效益之參數推估技術。然本研究除需推估水文地質參數外，尚需推估熱傳參數，而此部份之正反演模式仍有待開發，因此本研究將於此研究中開發三維水流與熱流耦合正演模式(Forward modeling)以及水流與熱流之異質參數場聯合反演模式(Inverse modeling)。

本研究所開發之技術將應用於桃園某整治中場址，以既有之觀測井網搭配光纖光柵多深度多功能觀測系統，量測循序注藥時的溫度與水壓變化，再以觀測資料進行三維熱傳與水文地質參數場推估。目前提出的方法係搭配藥劑灌注，不用額外的抽水或注水，不會擾動既有污染團，因此不會造成二次污染。最後，依據預測之三維流場與溫度場，進行細部地下環境的掌握，配合配合污染團整治現況，提出後續整治規劃建議。此技術未來將可應用至台灣或其他緯度較高國家之污染場址，進行精準整治，以期提升整體整治效益。



(四)研究方法與過程

4.1 研究執行流程

為配合精確整治，本研究提出一方法，可精確預測現地流場與溫度場，以協助規劃污染藥劑的注藥位置與數量，以及量化後續的藥劑流佈，提升整治效益。本研究在執行上，主要搭配瑞昶科技公司在污染場址進行注藥時，同步以 FBG 觀測系統配合鄰近觀測井群量測溫度與壓力，接著再透過本研究發展的聯合反演方法，進行水流與熱流之參數場聯合反演。

本研究執行流程如圖 1 所示，首先調整注藥時的藥劑溫度，之後依序在每一口注藥井注藥，並蒐集觀測井群(含 FBG 觀測井)之水壓與溫度反應，如此即可得到注藥井與觀測井群間的含水層異質性訊息，之後再將蒐集到的多組溫度與水壓觀測記錄輸入聯合反演模式中，求得場址的水文地質與熱傳三維參數場。

本研究分為兩年執行，第一年主要工作在 FBG 感測器的現場安裝與調校，待完成感測器配置後即可與觀測井群進行多個循序注藥試驗的聯合觀測。此外，地下水流與熱流的耦合模擬模式亦規劃在第一年進行開發，工作項目與時程請見表 1。第二年除了繼續進行多個循序注藥試驗的溫度與壓力觀測外，亦需完成水文地質與熱傳參數場之聯合反演模式開發，並以數值試驗方式驗證參數推估模式之正確性。FBG 系統的部分則須完成剩餘兩套系統之建置。最後須完成現地之水文地質與熱傳參數場之推估，並依據推估參數場模擬整治藥劑流況，並對後續污染整治提出建議。第二年之工作項目與時程請見表 2。

目前已完成本年度之進度，包含光纖光柵感測器組裝、現地測試、完成一次注藥期間的溫度與壓力觀測、一次注藥期間的多井多深度的水溫與水壓的觀測，以及地下水流與熱傳耦合模式開發與驗證。目前已完成光纖光柵感測器組裝、室內測試、現地測試，以及注藥期間之水壓與溫度量測，請見 5.3 小節。而數值模式驗證的部分則請見 5.6 小節，整體而言，本研究已完成本年度之工作項目。



研究方法與過程(含工作進度與甘特圖)

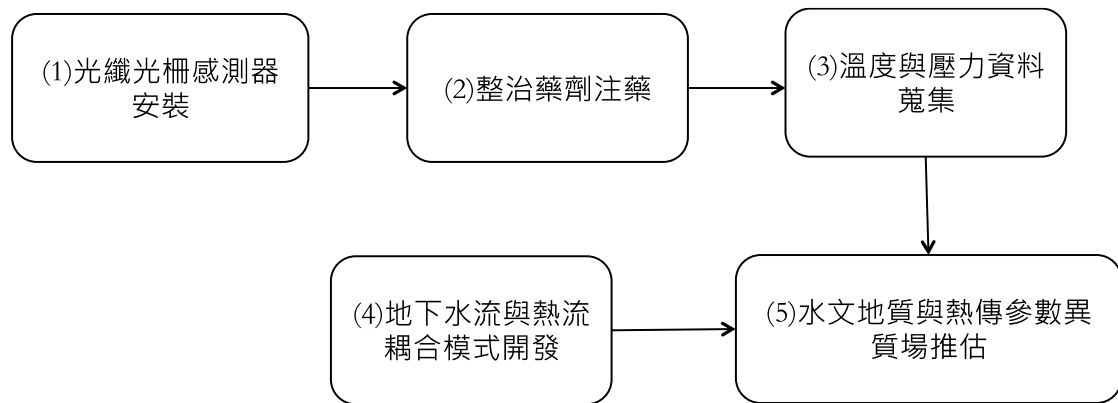


圖 1 研究執行流程圖

表 1 第一年研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
FBG 多功能監測系統於整治場址設置						※						※	
以 FBG 配合注藥監測水壓與溫度變化						※						※	
監測系統回收再利用						※						※	
溫度與水流場之模式開發						※						※	
溫度與水流場之模式驗證												※	
工作進度估計百分比（累 積數）	5%	15%	25%	35%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	100%	



新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展

預定查核點	期中	1. 預計以 FBG 完成一次注藥試驗之溫度與壓力觀測 2. 預計完成 FBG 回收再利用流程建立 3. 預計開發三維地下水流與熱傳耦合模式
	期末	1. 預計以 FBG 完成第 2-3 次注藥試驗之溫度與壓力觀測 2. 預計完成地下水流與熱傳耦合模擬模式開發 3. 預計完成地下水流與熱傳耦合模擬模式驗證

表 2 第二年研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

工作項目	年月												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
FBG 多功能監測系統 於整治場址設置											※		
以 FBG 配合注藥監測 水壓與溫度變化						※					※		
監測系統回收再利用						※							
溫度與水流場之參數 聯合反演模式開發						※					※		
以數值試驗方式，驗 證參數聯合反演模式 之正確性											※		
完成桃園某污染場址 之水文地質與熱傳三 維參數場反演											※		



研究方法與過程(含工作進度與甘特圖)

多尺度觀測資料對於 參數場反演結果之影 響評估											※		
比對模式預測與地電 阻調查之藥劑流布， 檢驗模式模擬細部流 場變化之合理性											※		
工作進度估計百分比 (累 積 數)	10%	20%	30%	40%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	100%	
預定查核點	期中		1. 預計以 FBG 完成兩次注藥試驗之溫度與壓力觀測 2. 預計完成八成參數聯合反演模式程式編程										
	期末		1. 預計以 FBG 完成第三次注藥試驗之溫度與壓力觀測 2. 預計完成參數聯合反演模式程式編程 3. 預計完成參數聯合反演模式之正確性驗證 4. 預計完成桃園某污染場址之水文地質與熱傳三維參數場反演 5. 預計比對模式預測與地電阻調查之藥劑流布，檢驗模式模擬細部流場變化之合理性 6. 預計評估多尺度觀測資料對於參數場反演結果之影響評估										



4.2 現地資料蒐集

4.2.1 研究場址概述

本研究選定之試驗場址為北部某運作中工廠污染控制場址，該研究場址主要生產各式工業助劑，如有機染料與顏料化學製造程序、界面活性劑化學製造程序的工業溶劑等，產品與服務主要為底片相紙沖印液、染料、顏料、塗料中間體、助劑、染料顏料、塗料中間體及助劑製造。場址經由民國 103 年環保署「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫（第 5 期）」調查結果發現污染，於民國 104 年 2 月公告為土壤及地下水污染控制場址，本廠之地下水污染物包括 1,2-DCB 及 1,4-二氯苯（1,4-DCB）等 2 項。場址於 105 年 2 月 17 日核定控制計畫書內容，並開始進行污染改善作業。截至 107 年 5 月為止，場址中的主要污染源已獲得縮限並有效控制。本研究第一階段試驗將配合改善單位於循環蓄水池上、下游雙氧水雙環塞藥劑灌注時進行設備測試（圖 2），並配合跨孔式地電阻影像法時序分析，綜合瞭解地下環境在灌注過程中的物理性質，同時依試驗成效調整精進光纖光柵設備。

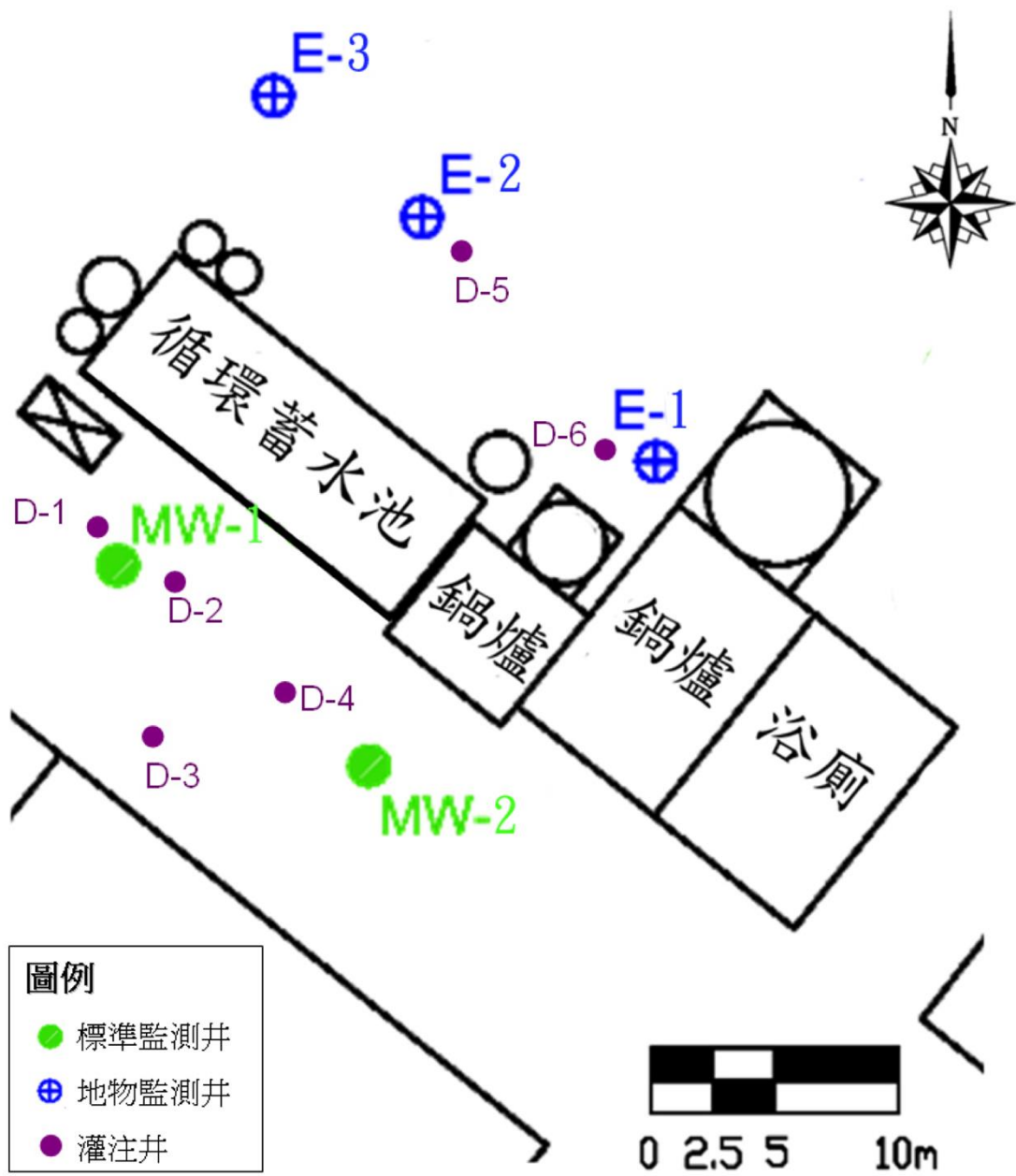


圖 2 部分研究場址配置圖



4.2.2 水文地質特徵

研究場址屬中等滲透性地層條件，組成材料以紅土、砂及礫石為主。由鑽探資料與粒徑分析結果，地下環境地質材料組成與分布依其粒徑顆粒大小與材質比例，大致可區分為兩層。淺層未飽和層為紅土，厚度約 1~4 公尺，於較深層約 4~16 公尺則為砂夾礫石或礫石夾砂，鑽探資料與粒徑分析結果，地下環境地質材料組成與分布依其粒徑顆粒大小與材質比例，大致可區分為兩層。淺層為紅土(厚度約 1~4 公尺，組成比例約以砂 8.1~11.7%、粉土 37.5~45.0%、黏土 43.3~54.4%)，於較深層約 4~16 公尺則為砂夾礫石(組成比例約礫石 17.9~31.5%、砂 60.0~76.8%、粉土 3.7~6.7%、黏土 1.1~4.5%)或礫石夾砂(組成比例約礫石 49.2~70.8%、砂 28.7~45.4%、粉土 0.4~4.0%、黏土 0.1~1.3%)。另多重式井測施測分析結果亦呈現較淺層(3 或 5 公尺以上)泥質含量相對較多，較深層(5 或 7 公尺以下)多為礫石夾砂或砂夾礫石等分布。

場址之地下水位約在地面下 5.1~6.2 公尺，透過微水試驗及土壤粒徑組成經驗公式推估場址 K 值約在 2.43×10^{-4} ~ 2.79×10^{-3} cm/s，平均約 1.90×10^{-3} cm/s。而多深度微水試驗(Multi-Level Slug Test; MLST)結果顯示 MW-1 深度 8.6 m 之 K 值為 8.626×10^{-4} cm/s，深度 11 m 之 K 值為 8.503×10^{-4} cm/s；E-1 深度 7.5 m 之 K 值為 6.953×10^{-3} cm/s，深度 10 m 之 K 值為 4.712×10^{-3} cm/s，深度 12.5 m 之 K 值為 4.577×10^{-3} cm/s；E-3 深度 8.6 m 之 K 值為 1.499×10^{-3} cm/s，深度 11 m 之 K 值為 6.177×10^{-3} cm/s，深度 12.5 m 之 K 值為 5.515×10^{-3} cm/s。由試驗結果得知，部分地下水流向下游區深度 11、12 公尺及深度 7.5 公尺處之 K 值，約為相對 K 值較低處之 10 倍，可能較有利於傳輸。

單井流速流向儀於場址地下深度 8.6 公尺的流向測定趨勢為略偏東北方向(含西北、東北、北等)與大區域地下水水流方向一致，地面下 7.5 m、10 m 與 12 m 之各深度流速約在 0.005~0.093 cm/min 之間，場址之地下水流向如圖 3 所示。

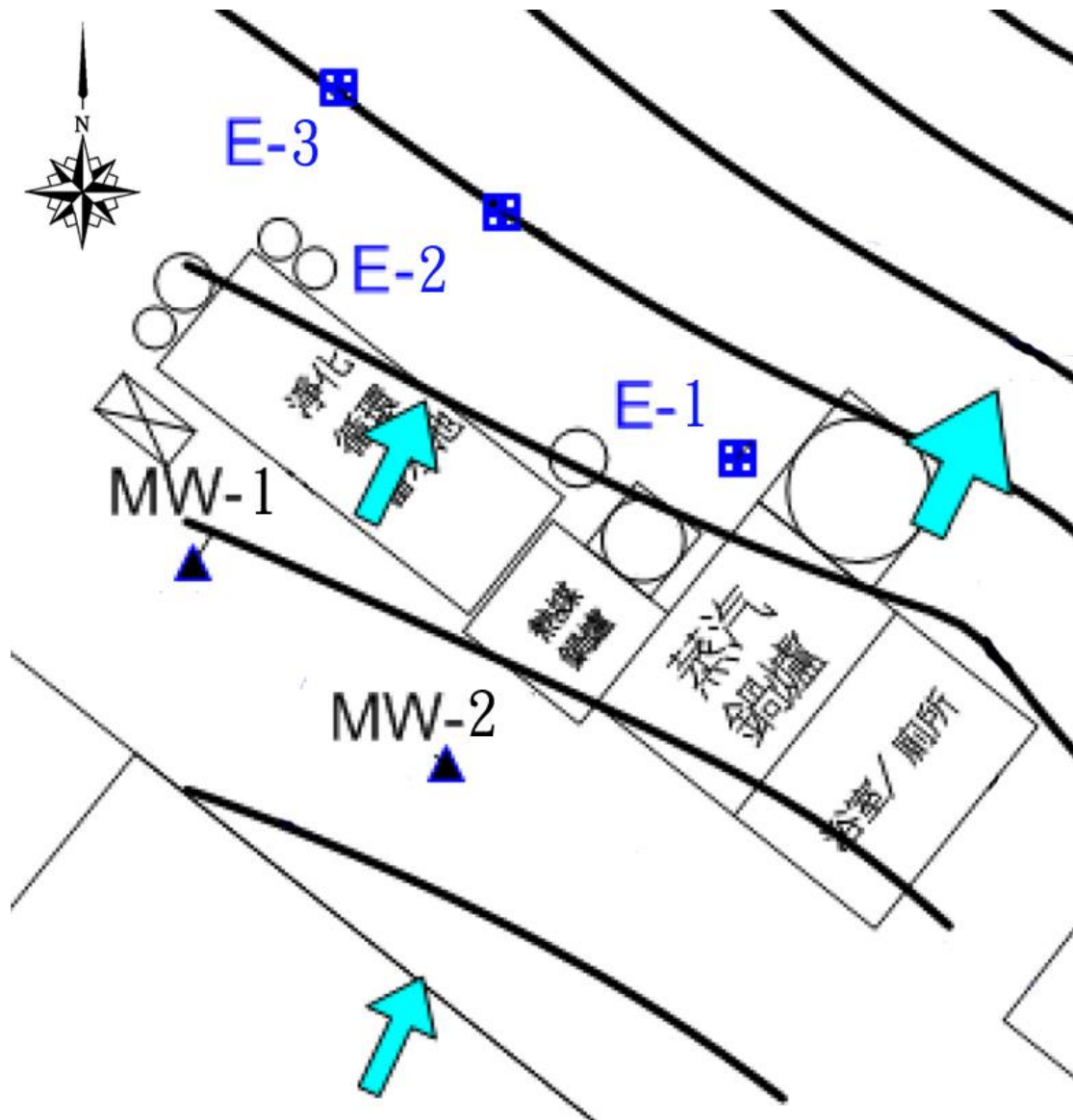


圖 3 研究場址地下水流向

4.2.3 灌注技術

為能使整治藥劑更有效分布在污染區，或能克服化學物質或生物膜屏障等。本場址整治團隊採用日本研發改良地盤灌漿技術應用於整治傳輸灌注之「雙環塞滲透灌注工法」(Double Packer Injection, DPI)，依據場址現況，控制壓力與流量，將整治藥劑於不同深度以數個大氣壓以上穩定進行灌注，促使藥劑在有限灌注區間水平傳輸，可輕易突破灌注井周遭的生物膜或化學物質沉澱等屏障物。DPI 灌注屬多深度 360 度加壓滲透灌注(圖 4)，現場經驗與監測已證實整治藥劑確實可同時處理不同方向之污染團，因此可將地質異質性造成之傳輸問題加以克服或降低，提高控制或整治成效。DPI 灌注傳輸原理係以滲透注入方式



灌注到土壤孔隙中，基本上是在不改變原狀岩土體積與結構，不產生人為裂隙的情況下，進行生物或化學污染整治，但滲透方式的傳輸時間需時較長。本階段現場改善次序係先從上游灌注井 D1~4 進行灌注，後再增加 D5 與 D6 井灌注。

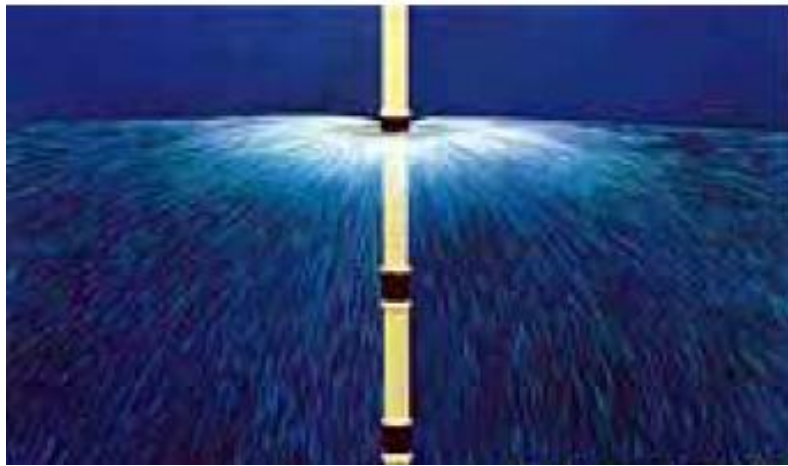


圖 4 雙環塞滲透灌注工法示意圖

4.3 地電阻影像法原理

地電阻影像法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)係將直流電導入地層之中，量測地下材料的電位差，計算出電阻率或導電率後以等值圖分布描述地下電性構造。常見之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，每個電極再與金屬探棒連接，金屬探棒釘於地表且與地層有良好的接觸，由地電儀主機控制不同對的電極分別作為電流極與電位極，地電儀可主動控制電流極導入地層中的電壓或電流量，再控制電位極量測地下材料的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「剖面」，再將所有量測值以數值方法逆推演算後呈現出電阻率等值圖影像。本研究採用的地電阻影像法則是跨孔式地電阻影像法(Cross-Hole Electrical Resistivity Tomography, CHERT)，量測方式是將電極於設井過程中埋入地層，並依據場現況及數值模擬同時參考 Bing and Greenhalgh, 2000 與 Goes and Meekes, 2004 等人之研究改良設計一套 CHERT 電極排列法(新型專利第 M439802 號)，確保資料品質與解析能力。



資料成果係以時序分析(Time lapse, TL)，由電阻率差異率研判地下環境，TL 差異率分析是比較兩次個別逆推的差異率，差異百分率可表示為：

$$(\text{監測模型電阻率} - \text{背景模型電阻率}) / \text{背景模型電阻率} \times 100\%$$

探討整治灌藥過程變異時，電阻率的改變其實非常微量，即使投入的藥劑導電率為地下水的數倍，但藥劑總量相對於地層總體積而言仍是少數，所以不可能改變整個地層的電性構造。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空間分布的先決條件在於這些侵入物質之電阻率必須能改變地層電阻率，電阻率改變後增加一倍或減為 1/2 時，單從電阻率影像就能描繪出分布範圍(圖 5)。但若是侵入的物質無法改變原材料電阻率達倍數以上時，單從電阻率影像則較難描繪出分布範圍的，此時，TL 分析將有助於解析出侵入物質的分布。因整治灌入藥劑後電性的改變約在數~數十%，所以 TL 分析很適用在整治灌藥過程的連續觀測，藉此瞭解藥劑傳輸分布，評析主要流徑，作為修正整治方法的依據。圖 6 的數值模擬係假設物質侵入後電阻率改變為 25 ohm-m(圖 6A)，比背景電阻率高 25%，此時的電阻率剖面與地質背景值剖面相較，成像上的差異較模糊，難以描繪出污染範圍(圖 6B 與 C)，但若以電阻率差異率的方式呈現結果，就能清楚描繪差異範圍，指出侵入物質的分布(圖 6D)。以短時間間隔高頻率的方式收集資料，假設極短時間間隔內環境背景無其他因素造成電性改變，以電阻率差異率等值圖呈現結果，即能單純探討差異所代表的藥劑灌注傳輸現象。由於本階段場址使用藥劑為雙氧水，所釋出的氣體將使得地層電阻率升高，因此將以電阻率增加率評析之。

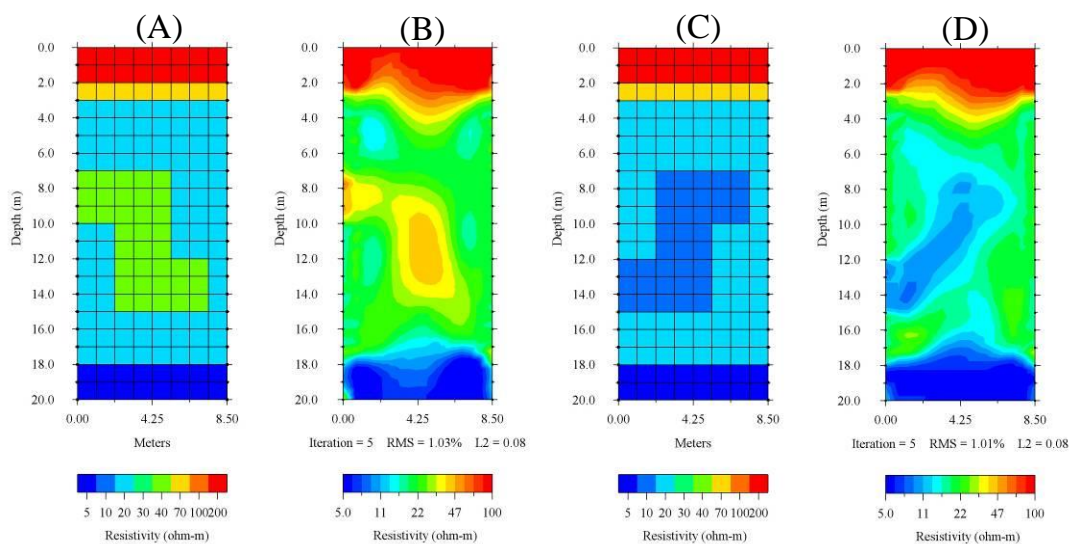


圖 5 不同性質物質侵入地質假設模型。(A) 侵入物質電阻率為地質背景值 2 倍的初始模型；(B) 侵入物質為地質背景值 2 倍的逆推模型；(C) 侵入物質電阻率為地質背景值 1/2 的初始模型；(D) 侵入物質為地質背景值 1/2 的逆推模型

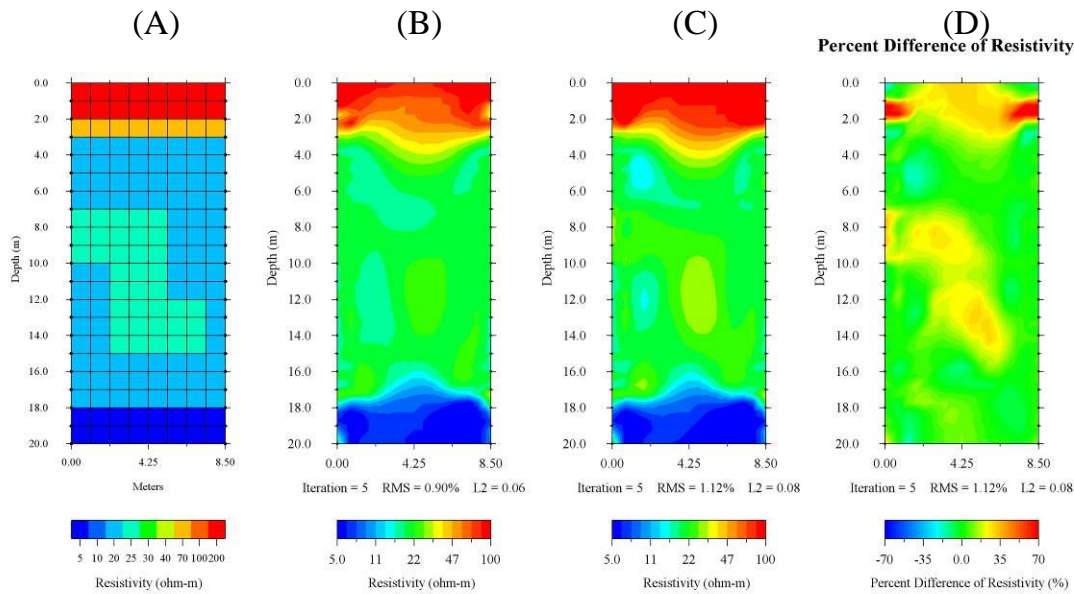


圖 6 TL 差異率分析模型。(A) 藥劑注入後電阻率為 25 ohm-m，地質背景電阻率為 20 ohm-m；(B) 地質背景逆推模型；(C) 藥劑注入後的逆推模型；(D) TL 分析，電阻率差異率等值圖。

4.4 光纖光柵量測孔隙水壓與溫度原理

近年來，有許多光纖感測技術之研發(Dong et al., 2005; Kashyap, 1999; Kojima et al., 2003; Liu et al., 2000; Xu et al., 1993; Zhao et al., 2004)。光纖感測技術相對於傳統電子感測技術的優點包括(1)體積小—光纖直徑一般為 250 μ m 左右；(2)耐久性高—光纖之主要成份是矽(silica)為非金屬，可以長期埋在地下而不易腐蝕或改變其性質；(3)光纖訊號可長(數十公里)距離傳輸而不受電磁波干擾或衰減；(4)可以在同一光纖上做多點分佈式的監測。這些感測器能夠與傳統現地監測系統匹配，同時可以單獨或多種感測器做交互性串接成列，做地層內相關物理量剖面之監測。與電腦及通訊系統結合，監測數據可以做即時傳輸或紀錄。

光纖光柵的製造係利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折射率永久改變，成為一系列週期為 Λ 的明暗條紋，此稱之為光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)的特定波長會產生反射外，其餘波長都會因為相位差而相消(李瑞庭, 2005)。



布拉格反射波長 λ_B 為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中：

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖 7 為光纖光柵反射原理示意圖，光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，造成某特定頻率光波被反射，而其他頻率光波則繼續向前傳導(圖 8)，而這些透鏡的間距不同，則被反射光波頻率亦不相同。

當光柵受到外力產生軸向應變時，則造成光纖光柵原本間距 Λ 的改變增加量為 $\Delta\Lambda$ ，帶入公式(1)式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \quad \dots\dots\dots(2)$$

應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad \dots\dots\dots(3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right) l = \left(\frac{\frac{\Delta\lambda_B}{2n}}{\frac{\lambda_B}{2n}} \right) l \quad \dots\dots\dots(4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad \dots\dots\dots(5)$$

在室溫條件下，攝氏 1 度的溫度變化約使得布拉格波長飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ nm}$ 。基於以上原因，FBG 具有與應變計有同樣反應應變與溫度變化的功能。但與傳統電子式應變計不同的是，FBG 屬於部分分佈式感測器，多個 FBG 可以使用同一光纖做訊號傳遞，只要各 FBG 之 Λ 有足夠差距，既使在有應變的情況下，各 FBG 所反射之波長 λ_B 仍然不會重合，因此可以根據 λ_B 來辨識各 FBG 訊號之來源。但與傳統電子式應變計類似，FBG 必須做溫度變化之修正。

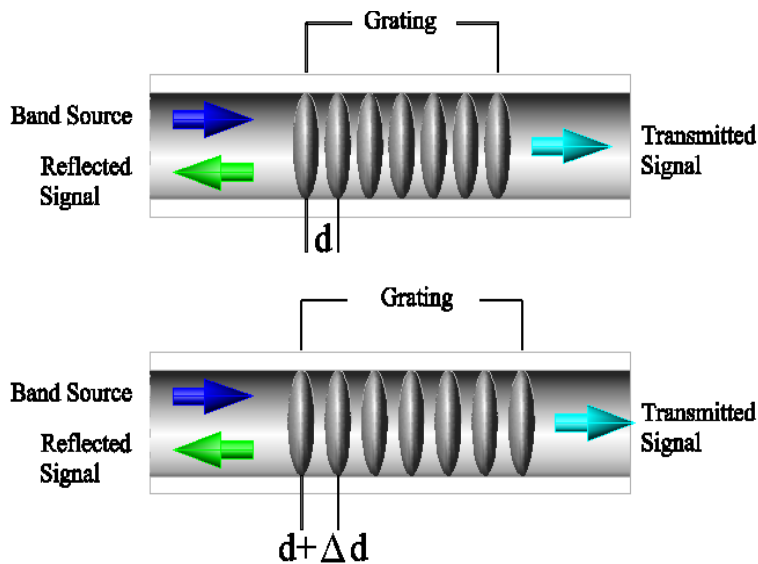


圖 7 光纖光柵感測機制示意圖（李瑞庭, 2005）

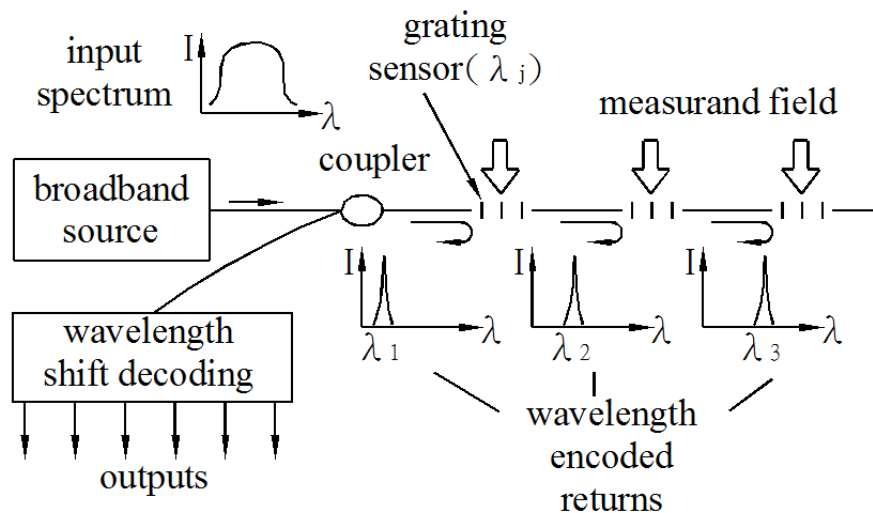


圖 8 光纖光柵串列反射原理示意圖(Kersey, 1992)

4.5 孔隙水壓與溫度量測之試驗配置說明

本研究光纖光柵團隊在五月中時已完成第一組 FBG 感測器開發，除了已完
成室內測試外，光纖團隊已在 5 月 18 日於試驗場址進行現場測試，選取在既
有全開篩兩吋井 E-01 安裝 FBG 感測系統，因地下水位面約在地下六米，因此
本研究選定在地表下 7 米安裝感測器，進行現地(背景)溫度與壓力的量測，且
感測器上下將以本研究開發之皮膜封層阻隔器進行封層，以阻絕上下層間之水
體混合，測試結果說明請見 5.2-5.3 節。在完成現地測試後，本研究繼續在 6 月



1 日配合瑞昶公司注藥進行量測，因注藥藥劑為濃度 3%~5% 的雙氧水，因此本研究仍以一組感測器進行測試，除了量測注藥過程中的水溫與水壓外，同時測試感測器是否受藥劑影響其量測精度。此外，因為雙氧水有產生氣泡的問題，因此本研究同時在鄰近井 E-02 擺設水位計，觀察兩者的數據變動情況是否受到氣泡影響，測試結果請見 5.3 節。此監測系統為可重複利用的設備，在此次測試結束後，FBG 感測器可自井內取出，經過調校後已移至十月底之注藥使用。

在十月底的注藥部分，本團隊配合瑞昶公司安排灌注高導電性藥劑總共兩口次四個深度，每個深度共注藥 200 公升。此次注藥過程中，共三口觀測井配置 FBG 水溫與水壓觀測系統，量測此三口井在三個深度上的水溫與水壓變化歷程。此外，跨孔井下電阻亦同步蒐集注藥過程之電阻變化，以作為下一年度預測藥劑傳輸路徑之參考。

目前已完成現地測試，配合注藥測試一次，以及配合注藥進行多井多深度觀測水溫與水壓一次。除了以 FBG 感測器量測多深度之壓力與溫度外，為了增加溫度與壓力觀測資料，本研究亦同時在其他觀測井配置水壓計，然而需注意的是其他觀測井之井管皆為全開篩，因此僅能量到整個開篩段的平均水位(i.e. 地下水位面以下到井管底部之平均水位)。FBG 量測成果說明請見 5.3 節。

4.6 三維地下水流與溫度場之耦合模擬模式建置

4.6.1 數學模型

本研究將建立地下水流與溫度場之耦合模擬模式，其相關方程式分述如下：式(6)為變飽和度之三維地下水流方程式(Yeh, 2015)，式中下標 $i, j=1-3$ ，代表卡氏座標的三個方向， K 是透水係數， h 是孔隙水壓， δ 是重力項， S_s 是比儲水係數。因為本研究所分析的對象為飽和層，因此含水量函式 $E(h, x)=0$ ，係數 $\beta=1$ 。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{i,j}(h, x) \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \delta_j \right) \right] = (E(h, x) + \beta S_s(x)) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

式(7)為地下水熱傳方程式(Sophocleous, 1979)，式中 C 為土體比熱含量， T 為溫度， C_w 為水的比熱含量， q 是達西流量， λ 為熱傳導度。



$$C(q) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (I_{ij}(q) \frac{\partial T}{\partial x_j}) - C_w q_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

此外，土體的比熱含量可由式(8)求得；而熱傳導度 λ_{ij} 則可由式(9-1)~式(9-8)計算求得，其中 λ_L 與 λ_T 分別為徑向(平行水流方向)延散度與橫向(垂直水流方向)延散度， $b_1 \sim b_3$ 則為迴歸係數。

$$C(\theta) = C_n \theta_n + C_w \theta \approx (1.92 \theta_n + 4.18 \theta) 10^6 \quad (8)$$

$$\lambda_{ij}(\theta) = \lambda_T C_w |q| \delta_{ij} + (\lambda_L - \lambda_T) C_w \frac{q_j q_i}{|q|} + \lambda_o(\theta) \delta_{ij} \quad (9-1)$$

$$\lambda_{xx} = \lambda_L C_w \frac{x_x^2}{|q|} + \lambda_T C_w \frac{x_y^2}{|q|} + \lambda_T C_w \frac{x_z^2}{|q|} + \lambda_o \quad (9-2)$$

$$\lambda_{yy} = \lambda_L C_w \frac{x_y^2}{|q|} + \lambda_T C_w \frac{x_x^2}{|q|} + \lambda_T C_w \frac{x_z^2}{|q|} + \lambda_o \quad (9-3)$$

$$\lambda_{zz} = \lambda_L C_w \frac{x_z^2}{|q|} + \lambda_T C_w \frac{x_y^2}{|q|} + \lambda_T C_w \frac{x_x^2}{|q|} + \lambda_o \quad (9-4)$$

$$\lambda_{xy} = (\lambda_L - \lambda_T) C_w \frac{q_x q_y}{|q|} \quad (9-5)$$

$$\lambda_{xz} = (\lambda_L - \lambda_T) C_w \frac{q_x q_z}{|q|} \quad (9-6)$$

$$\lambda_{yz} = (\lambda_L - \lambda_T) C_w \frac{q_y q_z}{|q|} \quad (9-7)$$

$$\lambda_o(\theta) = b_1 + b_2 \theta_w + b_3 \theta_w^{0.5} \quad (9-8)$$

因為地下水流模式之透水係數會受溫度場影響，而溫度場會受地下水流場影響，本研究將以兩模式交互迭代的方式進行耦合模擬。在兩模式的連結上，地下水流模式中受溫度影響的變數為透水係數，其定義如式(10)所示

$$K = \frac{r(h, T) g k}{m(h, T)} \quad (10)$$

，其中 g 為重力常數 g 、滲透係數 k 、流體密度 ρ 與黏滯係數 μ 之函數。因本研究假設流體（主要為水）的密度與黏滯係數主要受溫度與水壓影響，而溫度與壓力對密度與黏滯係數之關係則參考國際組織 International Association for



the Properties of Water and Steam 1997¹與 2008²相關公式進行計算（詳見附錄一與二）。在熱傳模式中受地下水流場影響的變數為流量，此變數由地下水流模式計算後傳遞至熱傳模式進行溫度場計算。

4.6.2 數值模型

本研究在兩模型的耦合運算上以圖 9 之計算流程進行耦合運算。首先計算時刻 t_0 開始時，在地下水流模式的部分，先由式(8)計算 K 值，接著進行三維飽和地下水流模擬，求解式(6)。完成地下水模擬後即可求得三維流場(達西流速)分布，接著將流場代入熱傳模式，求解式(7)，即可求得溫度場。接著程式會判斷溫度與壓力與上次迭代的最大差值是否皆小於設定的收斂標準，若是，則進入下一時刻(t_0+1)，若否，則由更新後的溫度場重新計算 K 場，再進行上述計算流程，直到前後兩次迭代的溫度場與壓力場之最大差值皆小於收斂標準為止。

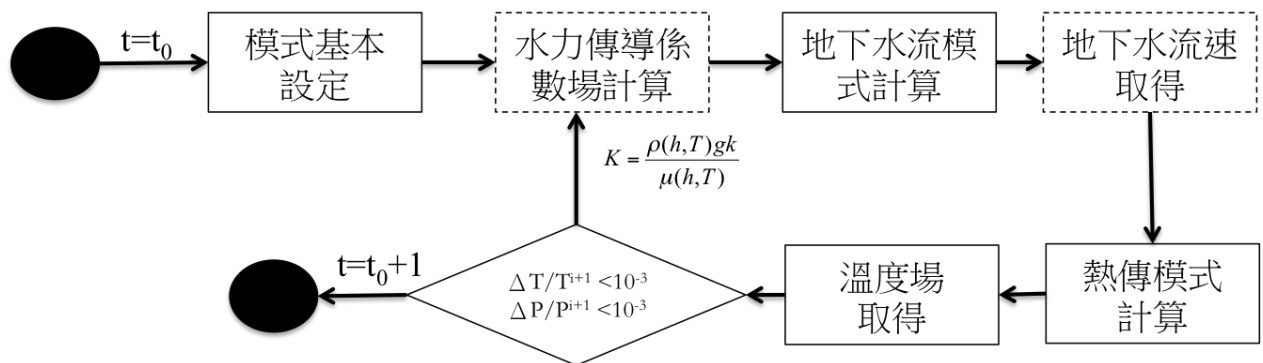


圖 9 地下水流與熱傳耦合計算流程圖

(a)有限元素法之離散方程式建立 - 空間離散

在離散前述地下水流與熱傳方程式上，本研究採用有限元素法(Finite element method, FEM)建立數值模式，其流程為以 Galarkin method 建立水流與熱傳偏微分方程式的近似解(approximation solution)與節點權重方程式(Weighted function)，接著即可建立前述兩偏微分方程式的權重離散方程式，將此方程式以矩陣形式表示，則可得式(11)，其中係數矩陣[A]，[B]，[F]與[Q]之定義如式(12(a))~式(12(d))所示，其中 N 為節點權重方程式， \tilde{h} 地下水位之近似解， V_e 代表有限元網格的體積， A_e 為有限元網格任一面的面積， q_b 則為邊界處給定的流量值。

¹ <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>

² <http://www.iapws.org/relguide/visc.pdf>



$$[A]\{\tilde{h}\} + [B] \frac{\partial}{\partial t} \{\tilde{h}\} + \{F\} - \{Q\} = 0 \quad (11)$$

$$A_{IJ} = \sum_e \int_{V^e} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} ((N_L K_{ij}^L) \frac{\partial N_J}{\partial x_j}) dV \quad (12a)$$

$$B_{IJ} = \sum_e \int_{V^e} ((N_L C^L) + \beta_s S_s) N_I N_J dV \quad (12b)$$

$$F_I = \sum_e \int_{V^e} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} (N_L K_{i3}^L) dV \quad (12c)$$

$$Q_I = \sum_e (\int_{V^e} -N_I q_s dV + \int_{A^e} N_I q_b dA) \quad (12d)$$

在建立與時間項相關的係數矩陣時，本研究以 Lumped Element Formulation 建立，因其定義另外一組權重函數，使得時間項的係數矩陣轉為對角矩陣，有助於求解之穩定度與效率。另外，本研究採用有限差分法建立時間離散項，其概念如式(13)所示。若 $\xi=1$ ，則為全隱式法(Implicit method)， $\xi=0$ 則為全顯示法(Explicit method)。

$$\{h\} = (1-\xi)\{h\}_t + \xi\{h\}_{t+\Delta t} \quad (13)$$

若將前述矩陣式(11)代入式(13)，則可得到有限差分形式之水流矩陣方程式，如下式所示。

$$\left(\xi[A] + \frac{[B]}{\Delta t} \right) \{\psi\}^{k+1} = \left(-(1-\xi)[A] + \frac{[B]}{\Delta t} \right) \{\psi\}^k + \{F\} - \{Q\} \quad (14)$$

在數值模式建立上，本研究以 fortran 程式語言撰寫求解前述矩陣方程式的數值程式。

在熱傳方程式數值求解方面，在傳流項(advective transport)的部分，本研究以特性線法(MMOC)法求解，以 Galarkin FEM method 求解延散項(dispersive transport)。在 MMOC 求解的部分，式(7)的偏微分時間項可以轉換為沿著特性線(characteristic line)的全微分式，如式(15)所示：

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + q_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (15)$$



有限差分型式的時間微分項可表達為下式

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{T^{k+1} - T_n^k}{\Delta t} \quad (16)$$

式中 T_n^k 代表時刻 k 時，沿著特性線上的溫度。

在延散項的部分，本研究使用 Galarkin method 求解，溫度在任一時刻可表達為下式：

$$\left(\xi[A_T] + \left(\frac{1}{\Delta t} \right) [B_T] \right) \{T^{k+1}\} = (-(1 - \xi)[A_T] - [B_T])\{T^k\} + \frac{1}{\Delta t} \times [B_T]\{T_n^k\} - \{Q_T\} \quad (17)$$

其中，

$$A_{Tij} = \sum_e \int_{Ve} D_{ij} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial N_J}{\partial x_j} dV \quad (18a)$$

$$B_{Tij} = \sum_e \int_{Ve} \theta N_I N_J dV \quad (18b)$$

$$Q_{Ti} = \sum_e \left(\int_{Ve} N_I q_s (T - T_s) dV - \int_{Ae} N_I q_{Tb} dA \right) \quad (18c)$$

其中 q_{Tb} 為在邊界給定的流量(dispersive flux)。

在數值模式建立上，本研究以 Fortran 程式語言撰寫求解前述式(17)的數值程式。目前本研究已完成數值程式撰寫，並已完成驗證，驗證結果詳見 5.6 小節。



(五)結果與討論

5.1 多深度水壓與溫度感測系統建立

本研究利用可重複使用多點式光纖光柵壓力與溫度感測系統來量測觀測井內不同深度之溫度與水壓，成品如圖 10 所示。每一套光纖光柵感測系統內包括 1 組光纖光柵水壓計與 1 組光纖光柵溫度計。為了阻隔井內之垂向水流，本研究以橡膠皮膜設計膨脹器，以之作為井內之阻隔器(packer)。如此即可量測特定深度之溫度與壓力值。將單套感測器透過光纖完成串接後，即可建立多深度的光纖光柵感測系統，進行不同深度位置的溫度與壓力量測，其示意圖如圖 11 所示

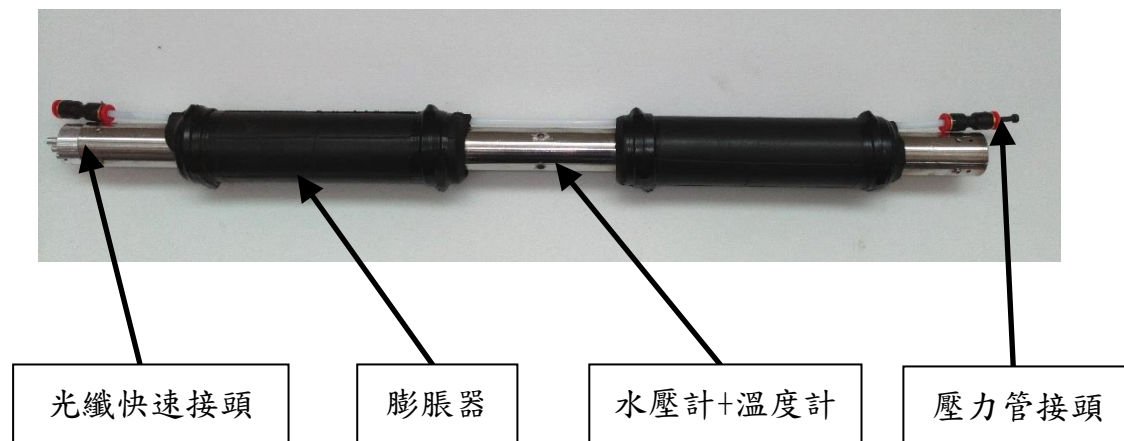


圖 10 光纖光柵溫度與壓力感測器成品圖

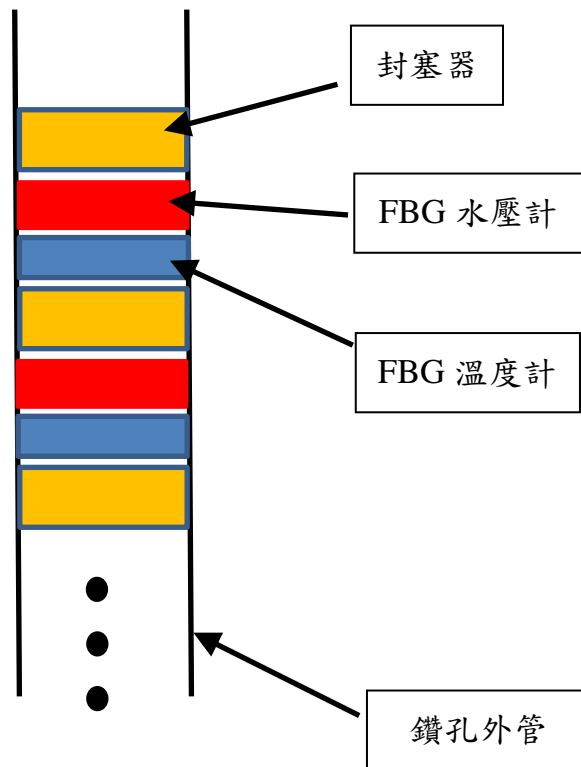


圖 11 光纖光柵溫度與壓力感測器示意圖

5.2 多深度水壓與溫度感測系統測試

FBG 感測器之原理主要是透過光纖受到溫度或壓力造成之應變產生光波長的飄移距離來換算壓力或溫度，因此建立光波長與壓力或溫度之標定曲線是相當重要的，意即量測之光波長需透過此標定曲線換算為溫度或壓力。FBG 水壓計經過室內壓力與溫度系統標定後，其標定曲線如圖 12 與圖 13 所示。圖中顯示，兩標定曲線之 R^2 趨近於 1，標定之壓力範圍由 3 kpa 至 60 kpa ($\sim 0.306 - 6.12$ 公尺水柱高)，水壓計內之溫度計標定範圍在攝氏 $10 - 30^\circ\text{C}$ 之間。需注意的是因為光纖訊號會受溫度所影響，所以本研究之水壓計同時配置溫度計，以做為水壓計之訊號校正之用。FBG 溫度計經過室內溫度系統標定後，其標定



曲線如圖 14 所示，其標定範圍在攝氏 10–30°C 之間。接著本研究將 FBG 水壓計與 FBG 溫度計置入恆濕恆溫箱進行 10~60°C 的環測，量測結果如圖 14 與圖 15 所示，圖中顯示兩者之光訊號相當穩定，在固定循環的溫度區間內呈現幾乎相同幅度光波長的飄移。此 FBG 感測器之水壓與溫度量測範圍分別為 0~200kpa 與 0~100°C。

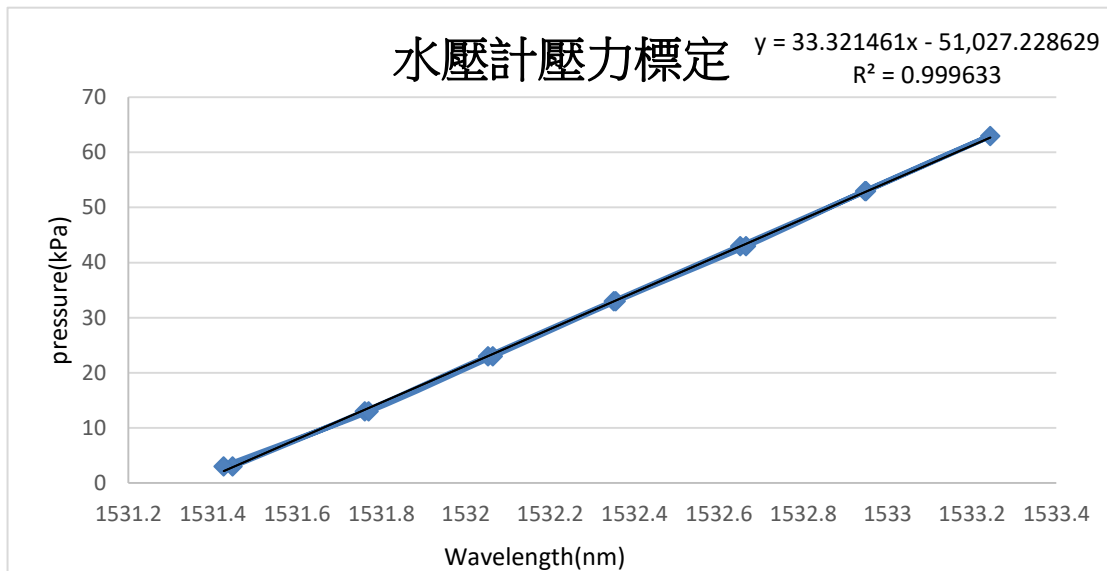


圖 12 FBG 水壓計室內壓力標定

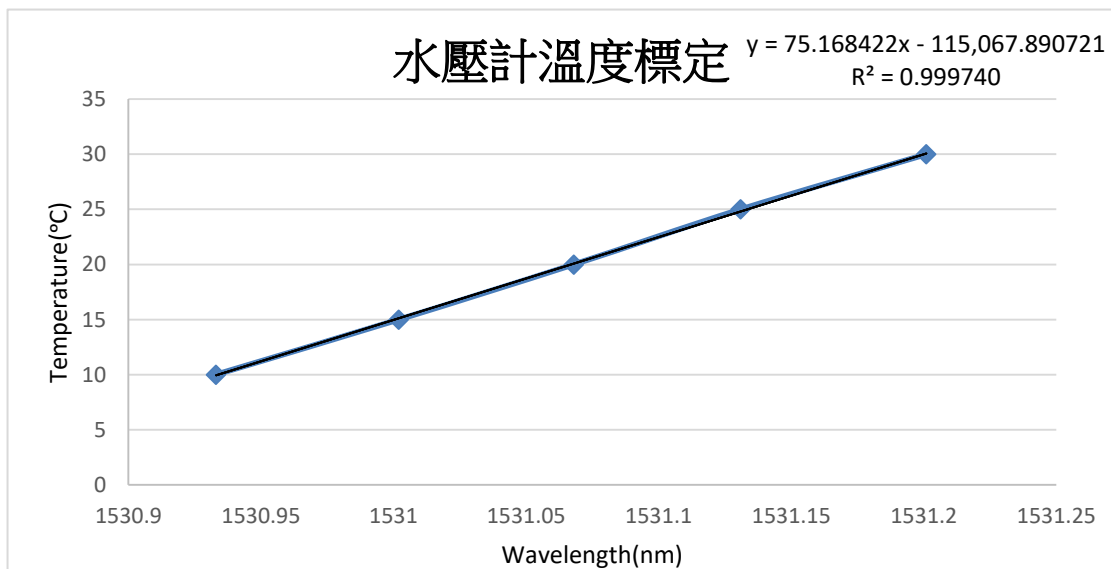


圖 13 FBG 水壓計室內溫度標定

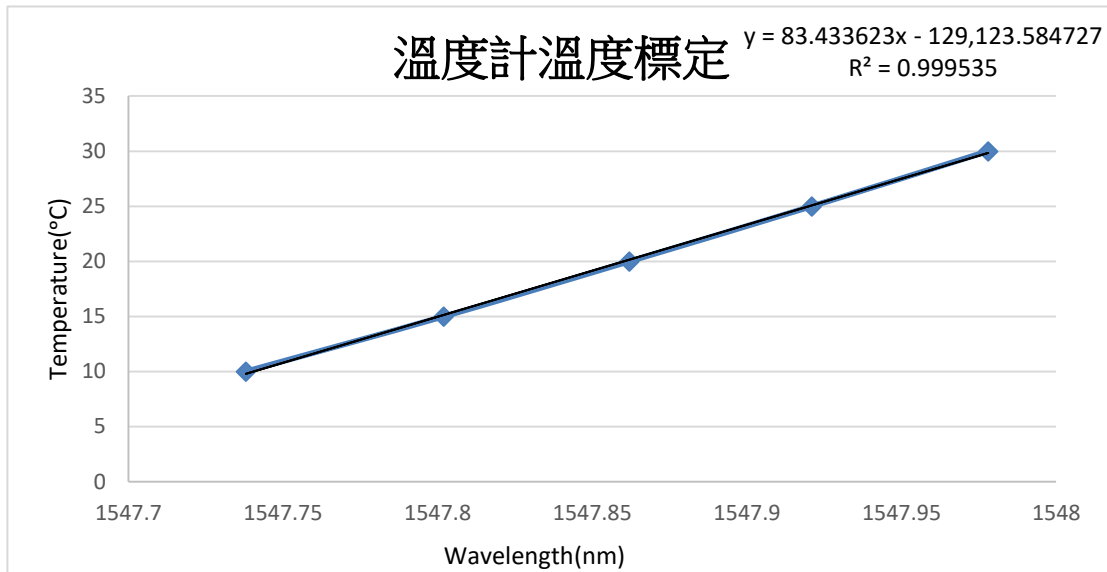


圖 14 FBG 溫度計室內溫度標定

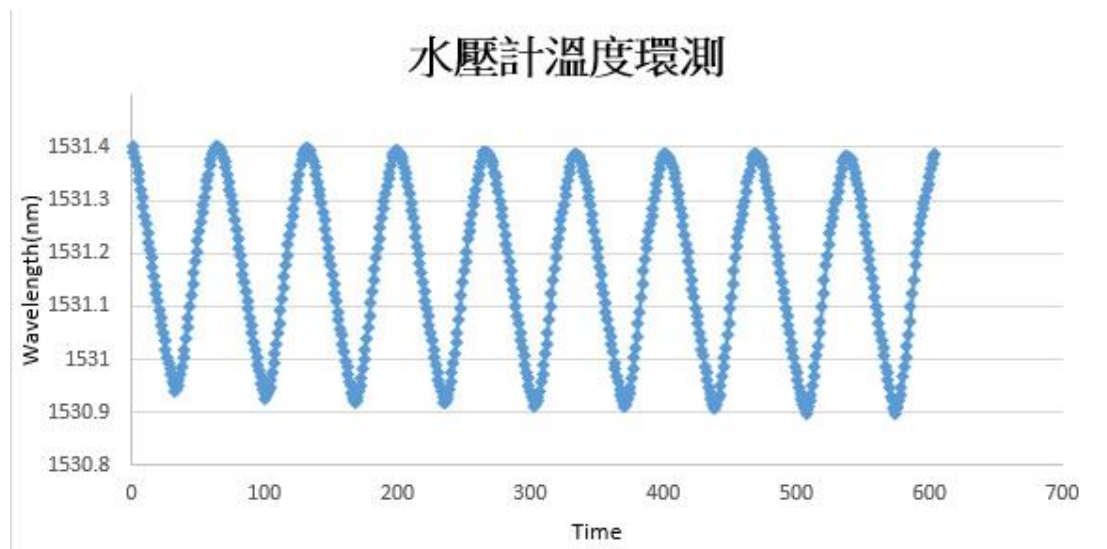


圖 15 FBG 水壓計恆濕恆溫箱環測結果

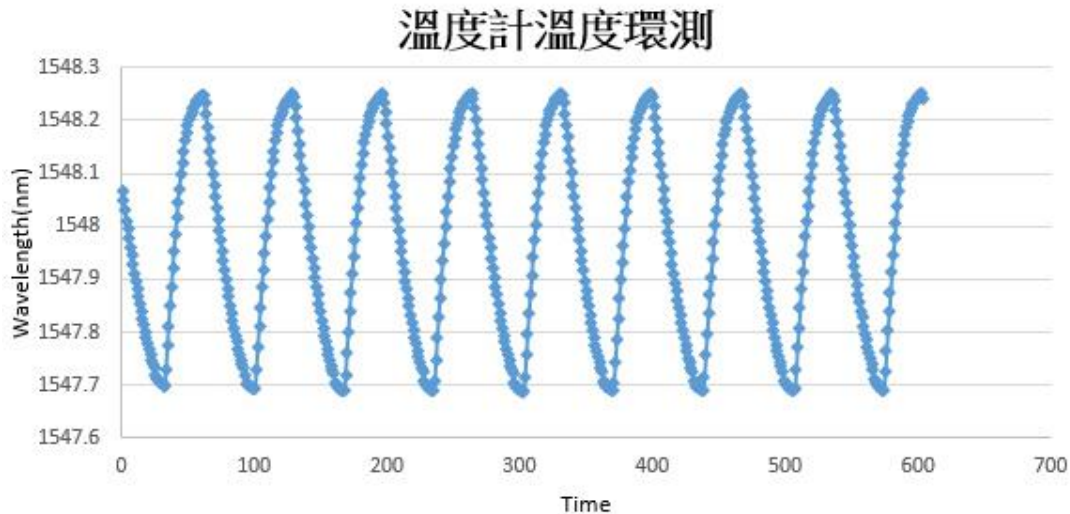


圖 16 FBG 溫度計恆濕恆溫箱環測結果

5.3 多深度水壓與溫度感測系統現地量測

為了測試感測系統可否應用於污染場址，本研究分別在 5 月 18 日，5 月 29 日，6 月 1 日與 10 月 23 日進行現場測試，其中 5 月 18 日測試主要目的為量測背景溫度與壓力，測試訊號之穩定度，以及測試儀器是否能抵抗場址受污染地下水之侵蝕。5 月 29 日，6 月 1 日與 10 月 23 日則配合瑞昶科技現地注藥進行溫度與壓力量測，測試結果請見 5.3.1 與 5.3.2 節。

5.3.1 光纖光柵感測器現地測試 - 非注藥期間溫度與壓力量測

本研究團隊於 2018 年 5 月 18 日在試驗場址進行 FBG 壓力與溫度感測系統測試，量測時間由上午十一點開始，測試時間約一個半小時，其過程為將 FBG 感測器置入 E-01 觀測井中（鑽孔內徑約 50mm，如圖 17 與所示），在其深度達到地下七公尺後（現場水位約地下六公尺）再讓阻隔器膨脹，以達到阻隔垂向水流的效果。在使阻隔器(packer)膨脹方面，本研究使用灌水加壓方式使阻隔器膨脹。現場 FBG 感測器放安裝測試如圖 18 所示，現場量測之水壓與溫度如圖 19 與圖 20 所示。圖中顯示場址之地下水溫緩慢上升，水位亦有稍微上升的趨勢。另外，為了驗證 FBG 感測器之正確性，本研究團隊同時以電子式水壓計量測同一深度之水壓，其結果與 FBG 感測器之量測結果一致。



圖 17 現場孔位

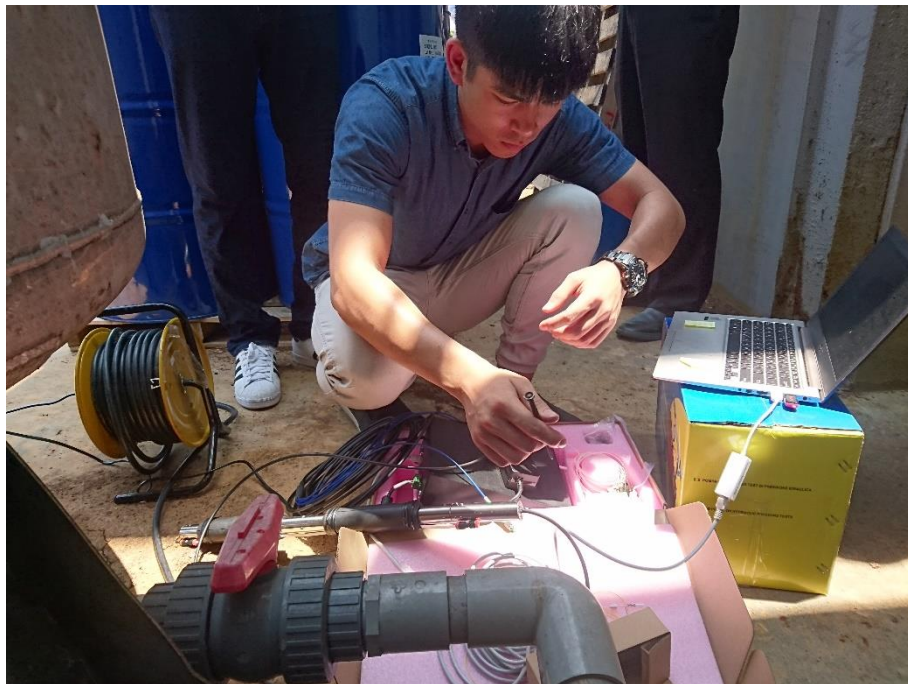


圖 18 現場安裝設備量測

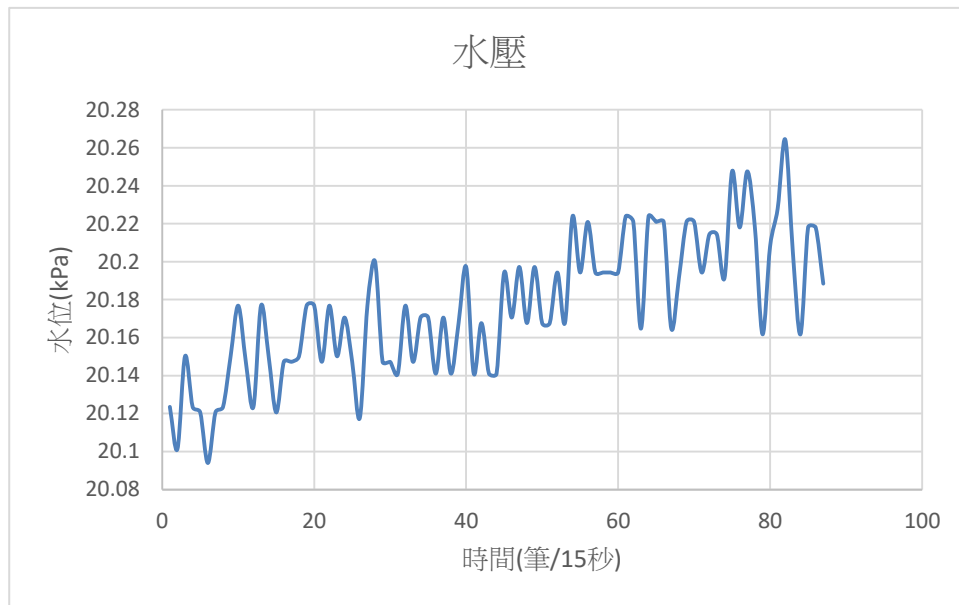


圖 19 分隔器膨脹測試 - 水壓量測

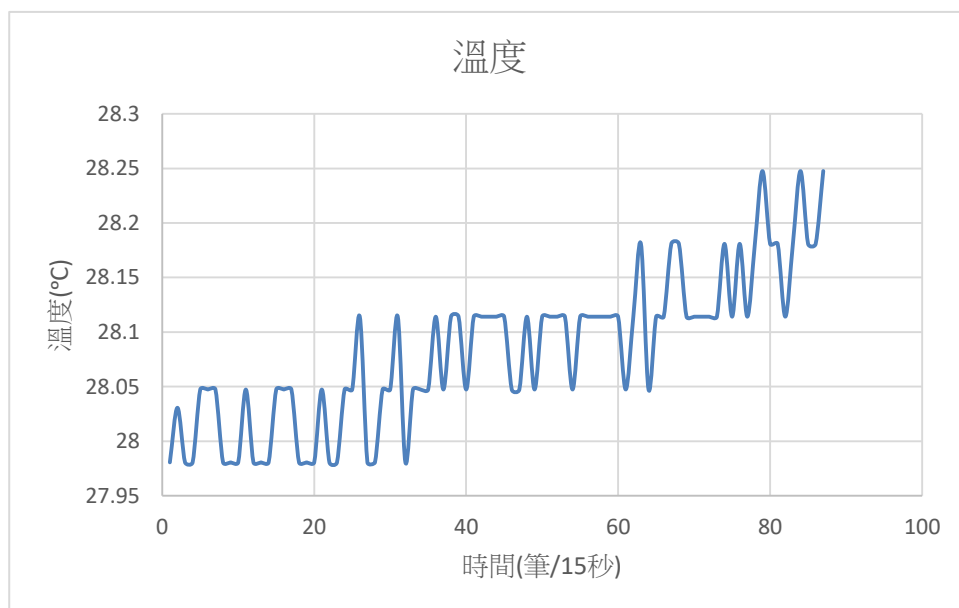


圖 20 分隔器膨脹測試 - 溫度量測

5.3.2 光纖光柵感測器現地測試 - 六月份注藥期間量測

本研究團隊於 2018 年 5 月 21 日將 FBG 感測器取出，初期並未發生異樣，但於 5 月 29 日本研究欲進行現地注藥水溫與水壓量測時，卻發現 FBG 感測器封裝膠已斷裂（如圖 21 所示），造成光纜與 FBG 感測器接頭脫落與斷裂，疑似為強酸所腐蝕之結果。然而，本團隊後續將斷面切口放大分析後，發現斷面相當平整，若為腐蝕造成之斷裂，其斷面則應較不平整，故本計畫推論應為工



作人員直接拉扯光纜造成斷裂。為解決此問題，本研究團隊已將感測器連接鋼纜，避免人員操作 FBG 系統時誤拉光纜接頭，造成接頭處之纜線斷裂。

本研究團隊修復感測器後，於 6 月 1 日配合注藥進行水溫與水壓量測測試。試驗時段現場共有六口井同時進行注藥，為了讓感測器於短時間內能反映注藥之溫度與壓力，本研究於觀測井(E-01)旁之注藥井(D-6)進行注藥。本研究在感測器設置深度(地表下 6.1 公尺)進行注藥 30 分鐘，注藥流量為每分鐘 4 公升。接著注藥深度移至地表下 8.5 公尺進行注藥 30 分鐘，以檢視感測器在不同深度注藥後的反應。

修復之感測器各項標定數據如圖 22 至圖 24 所示，而現場試驗器材之實際配置如圖 25 所示，此次改以空壓機進行充氣，使阻隔器撐開(圖 26)，以達到阻絕垂向水流的目的，並可在試驗完成後快速將阻隔器洩氣，以利將感測器從井中取出。試驗期間之量測讀數如圖 27 與圖 28 所示，由圖可知在量測期間(60 分鐘)溫度變化最大約 1.6°C ，而壓力變化範圍最大約 10kPa (i.e. 1 公尺水柱高)。

在第一階段注藥過程中，因為注藥深度接近地下水位面，因此藥劑容易往未飽和層流動，壓力增加速率相對較緩。注藥深度移至地下 8.5 公尺後，壓力增加速度較為迅速，由圖可知在注藥 30 分鐘前壓力上升斜率較 30 分鐘後緩和，因此量測結果應屬合理。另外，因為量測時間由上午 11 點 30 到下午 1 點左右，藥劑溫度可能因為日曬增溫且 FBG 感測器距井管內水位面僅約 10 公分，故量測溫度略微上升。



新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展

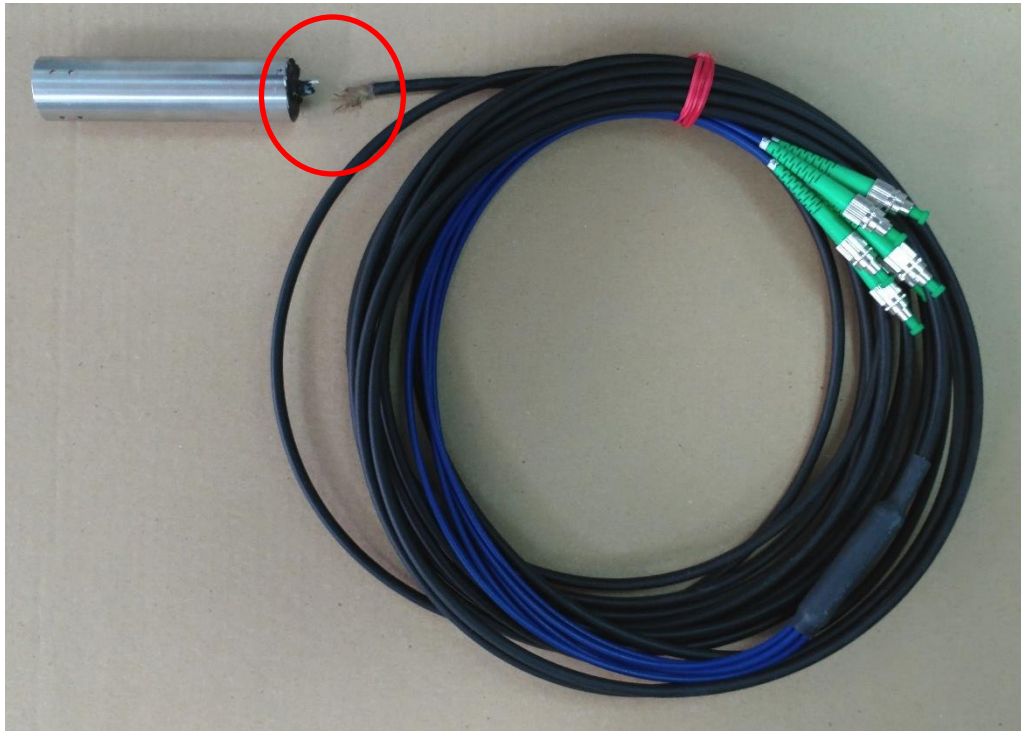


圖 21 纜線長期浸泡受強力拉扯斷裂

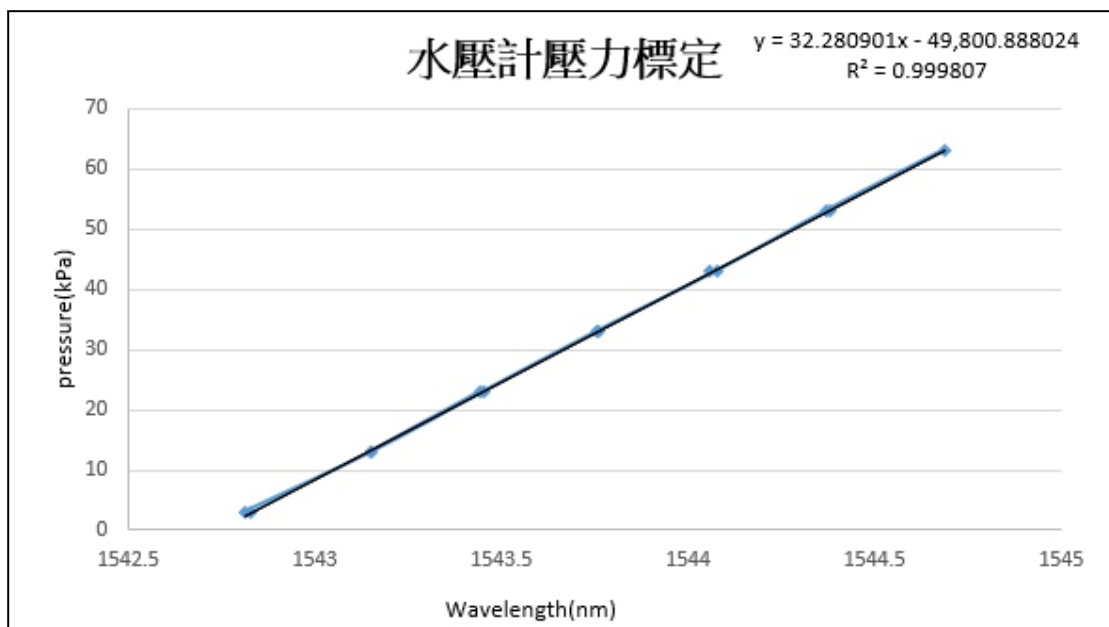


圖 22 第二組 FBG 水壓計室內壓力標定

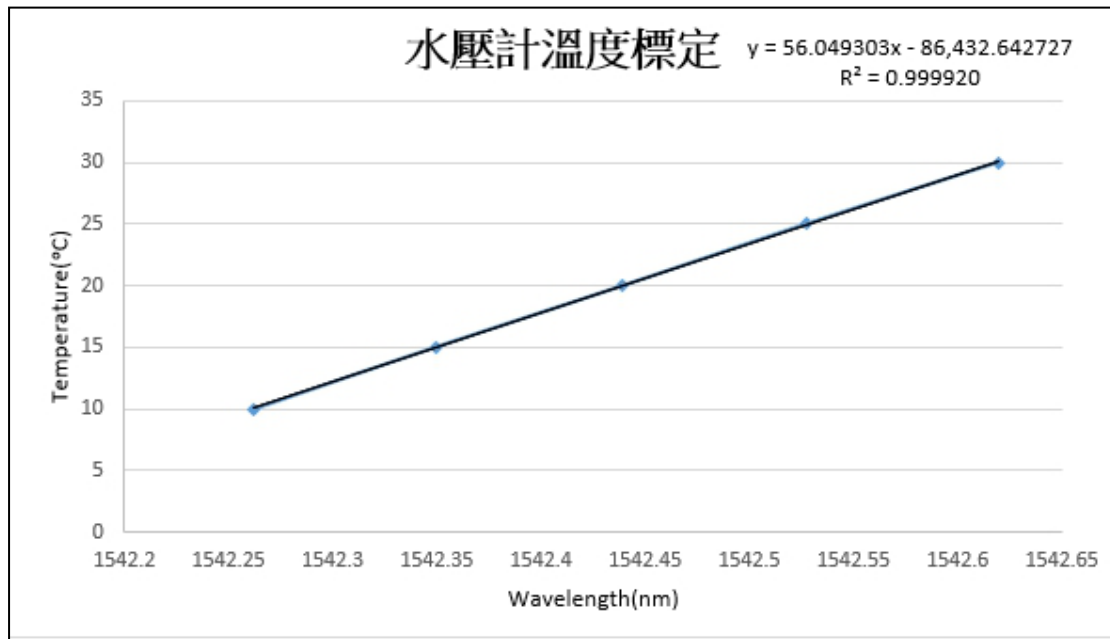


圖 23 第二組 FBG 水壓計室內溫度標定

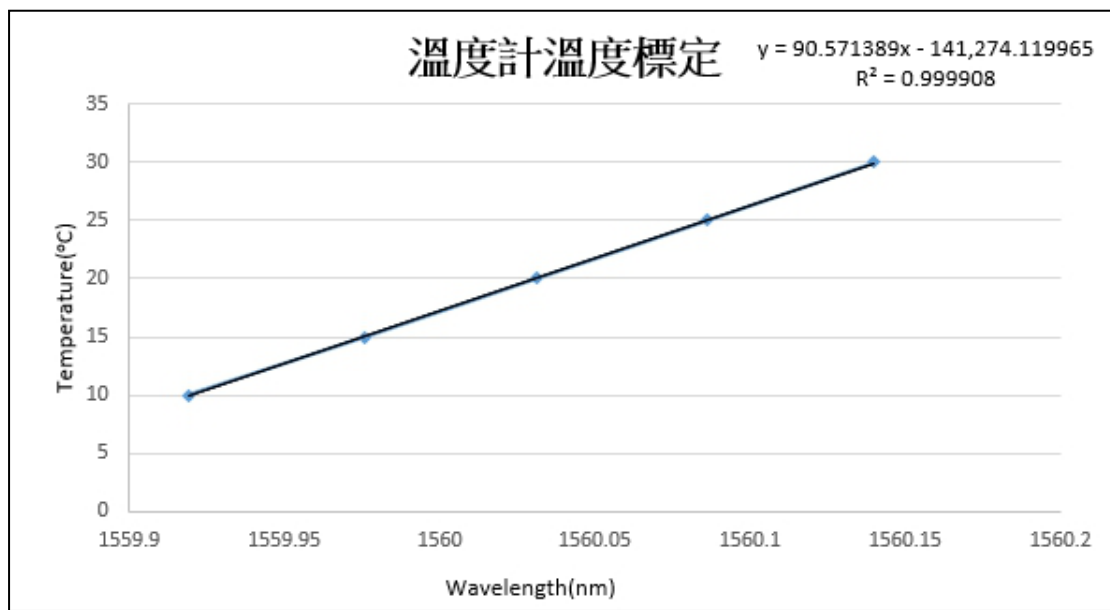


圖 24 第二組 FBG 溫度計室內溫度標定



新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展

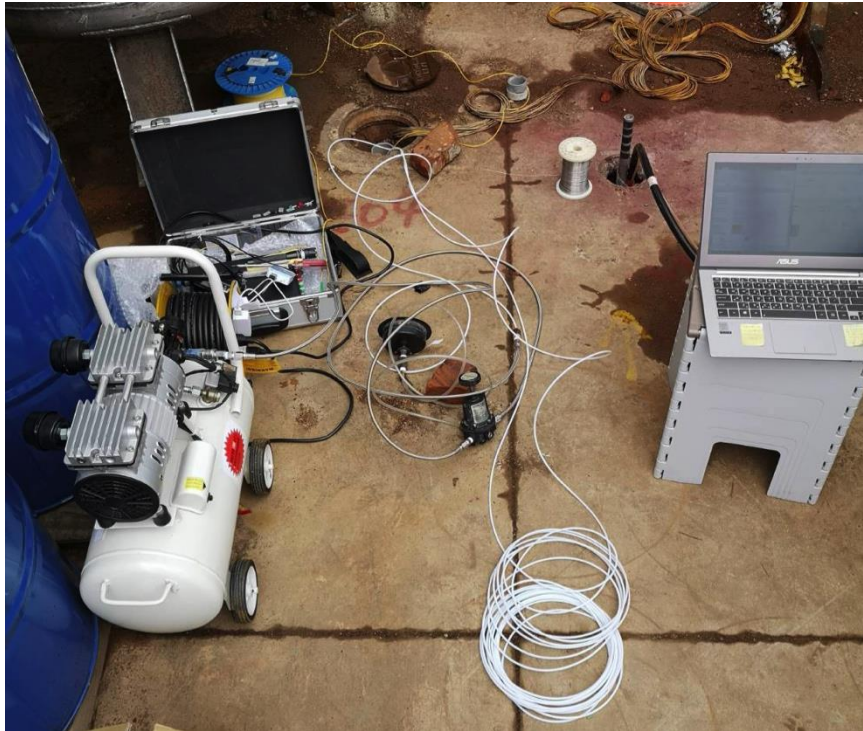


圖 25 配合現場灌藥 FBG 感測器水壓與溫度量測

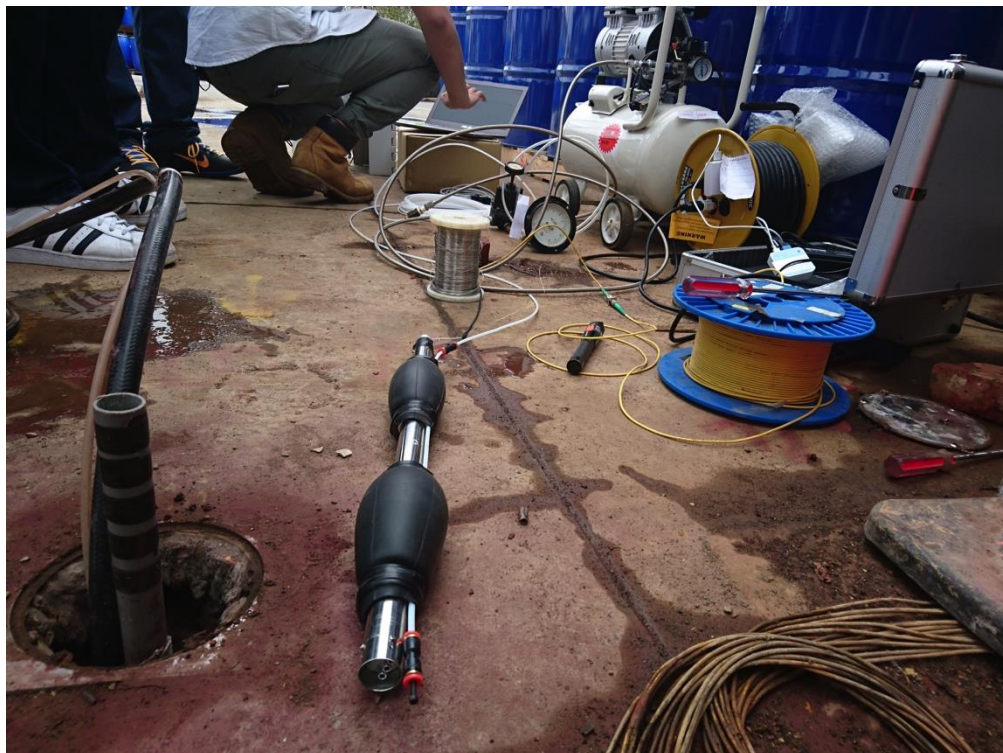


圖 26 充氣後之感測器

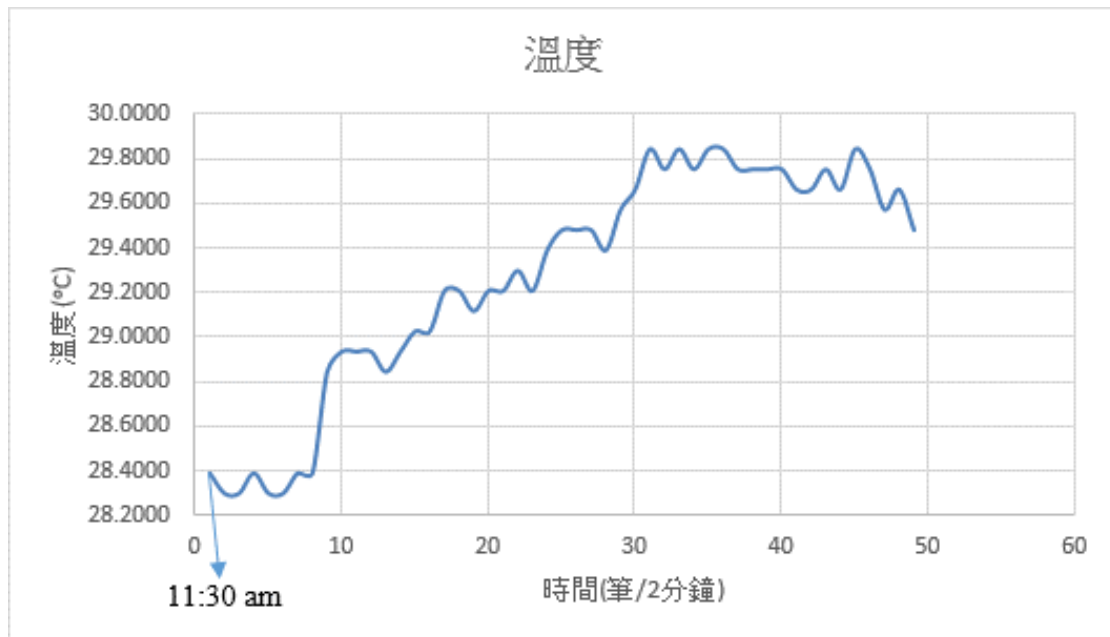


圖 27 現場 FBG 溫度量測結果(2018 年 6 月 1 日)

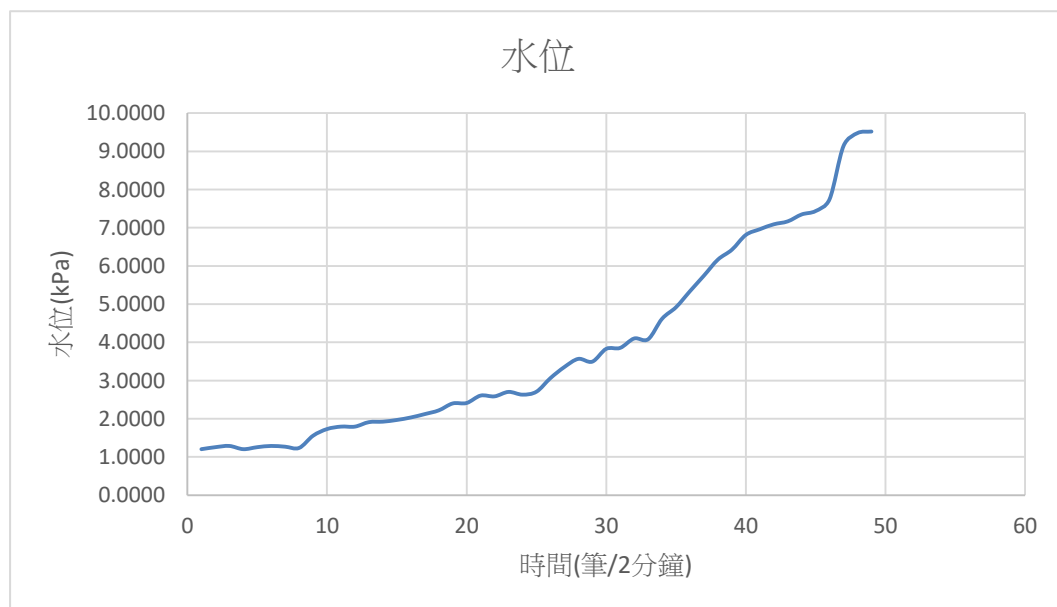


圖 28 現場 FBG 壓力量測結果(2018 年 6 月 1 日)

5.3.2 光纖光柵感測器現地測試 – 十月份注藥期間量測

此次注藥時間在 10 月 22 日，共進行兩口井四個深度的注藥，注藥位置在下圖中 D-7 與 D-8 兩口井中，深度分別為地表下 7 公尺與 10 公尺。而 FBG 感



測器則配置在注藥井周遭的三個觀測井 E-4, E-2 與 E-5 三個井中，配置深度如下表 3 所示。

此次注藥共使用 9 組 FBG 多功能水壓與水溫感測器，每一組感測器具有 1 個 FBG 水壓感測器與 1 個 FBG 溫度感測器，可以同時監測壓力與溫度的變化，其水壓量測精度 $<10\text{mm}$ ，而溫度精度 $<0.1^{\circ}\text{C}$ 。此 FBG 多功能水壓與水溫度感測器具有特別設計的 6 芯 APC 光纖快速接頭，可以於現場快速連接每一組 FBG 水溫水壓感測器。本研究在現場將 9 組感測器分別安裝於既有的 3 個井內(如表 3 所示)，每一孔分別安裝 3 組水溫與水壓感測器 (圖 29)與 2 支 FBG 延長段(圖 30)。每一支 FBG-MPTES 長度為 0.5 公尺，且每一支 FBG 延長段長度為 2.5 公尺，故此系統現場組裝後每一口井中包含 3 組 FBG 感測器外加 2 支 FBG 延長段，其總長度為 6.5 公尺(圖 31)。

將組裝完成好的每 1 套感測系統依據規劃放入 E-2、E-4、與 E-5 孔內(圖 32)，其放置深度請見表 3，之後再以特製的光纖接頭，將訊號分別傳到地表 2 台 4 通道解讀儀器內，訊號解讀頻率為 3Hz，實際數據量測頻率為每 10 秒一筆。圖 33 顯示灌藥期間內，FBG 系統可以觀察到訊號有明顯的變化 (圖 33)。

圖 35(a)-(c)說明 FBG 觀測系統在注藥期間量測的水壓變化歷線(以第一個時刻之水壓為參考點，計算後續之量測水壓變化)。由圖可發現，在第一次注藥時，三口觀測井在不同深度皆可觀測到水壓的變化，此結果說明注藥井 D-7 在地表下 7 公尺深度與其他三口觀測井間的含水層通透性應屬良好狀態。而第二次注藥時，注藥位置在注藥井 D-7 深度 10 公尺處，水壓變化歷線顯示各觀測井均持平，顯示此深度與其他觀測井間之通透性應仍屬良好。第三次注藥位置在注藥井 D-8 深度為 7 公尺處，由水壓變化歷線可知，水壓呈現下滑趨勢，此顯示 D-8 井在 7 公尺左右的通透性應較差，無法將壓力傳遞到其他觀測井上。第四次注藥位置在 D-8 井的 10 公尺深度，無論上游或下游方向之觀測井均呈現水位變化歷線大幅上升的情況，此結果顯示 D-8 井在深度 10 公尺左右之含水層與上、下游方向觀測井間的通透性相當良好。而在此三個觀測井群中，以 E-4 井的水位變化最為劇烈，此結果暗示 D-8 井在 10 公尺深的位置應該與觀測井 E-4 間有通透性特別良好的情況。

圖 36(a)-(c)說明 FBG 觀測系統在注藥期間量測的水溫歷線。由圖可知，三個觀測井之溫度變化區間較小，約在 0.5°C 以內，且大致上的溫度變化方向皆一致，其趨勢皆在注藥期間緩慢上升。惟在 E-5 井，在地表下 6 公尺與 9 公尺處之水溫有明顯的差異，此原因可能為 D-8 井在地表下 7 公尺處注藥，造成下



游方向的 E-5 井在地表下 9 公尺處的水溫上升，而該井在地表下 6 公尺處之水溫則未受影響，顯示在水平方向上，水流方向應為 D-8 往 E-5 井移動，而在垂直方向上，則是由上往下流動，故下層注藥並不會影響到上層地層的水溫，換言之，藥劑不會在短時間內流到上層地層中。

表 3 FBG 多深度水溫與水壓感測系統暨注藥井注藥時間與流量配置表

注藥時間: 10/23 15:00-17:00			
觀測井			
E-4	感測器配置深度為地表下 7m, 10m, 與 13m		
E-2	感測器配置深度為地表下 5.5m, 8.5m, 與 11.5m		
E-5	感測器配置深度為地表下 6m, 9m, 與 12m		
注藥井			
	地表下埋深	時間	劑量
D-7	7 m	15:08-15:28	10L/min
	10m	15:40-16:00	10L/min
D-8	7 m	16:08-16:28	10L/min
	10m	16:48-17:08	10L/min

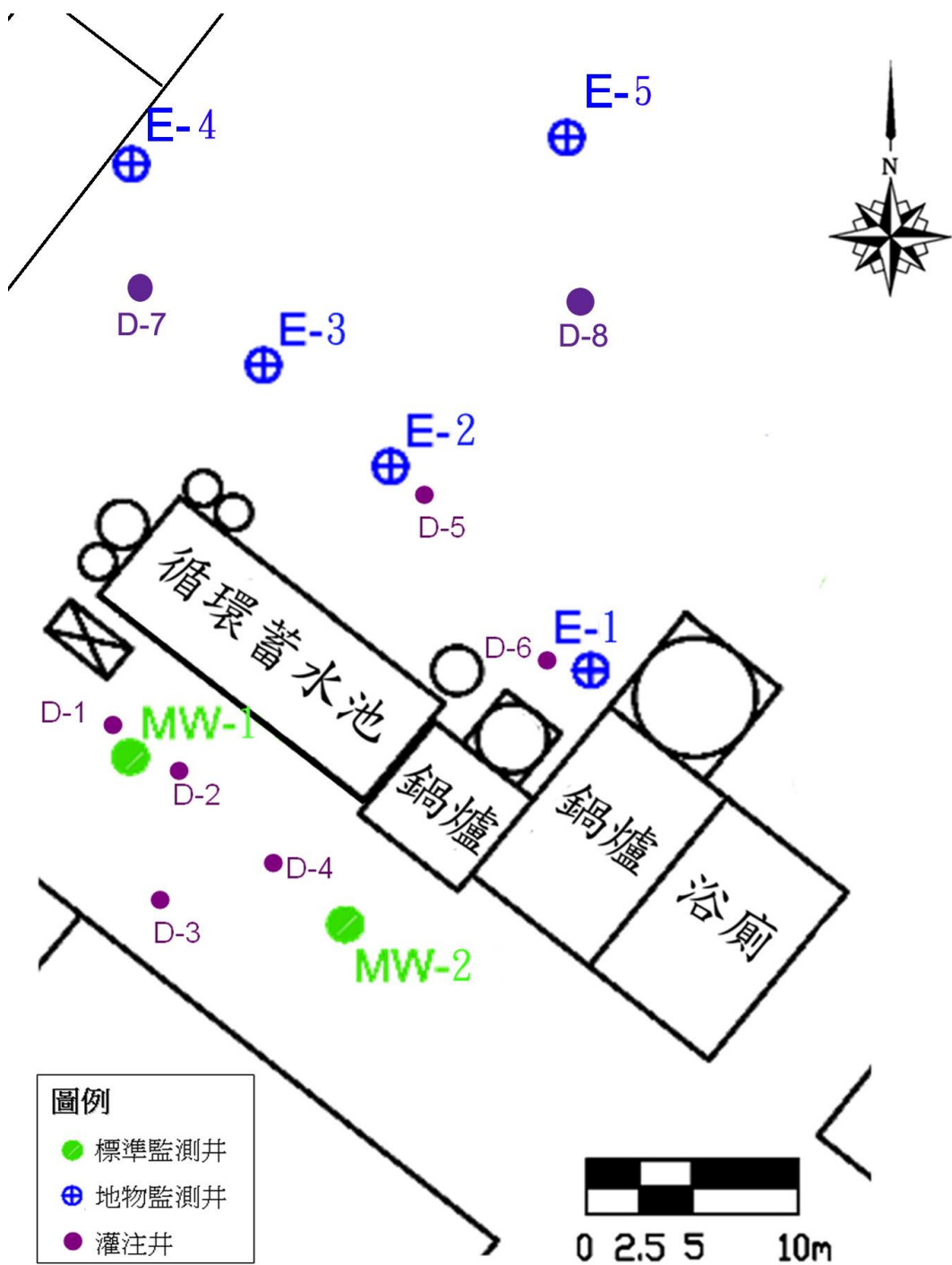


圖 29 第二次 FGB 試驗現場配置圖



圖 30 FBG 水溫與水壓計實體圖



圖 31 FBG 延長段實體圖



新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展



圖 32 現場組裝 FBG 水溫與水壓計以及延長段



圖 33 現場配置 FBG 感測系統於井孔內

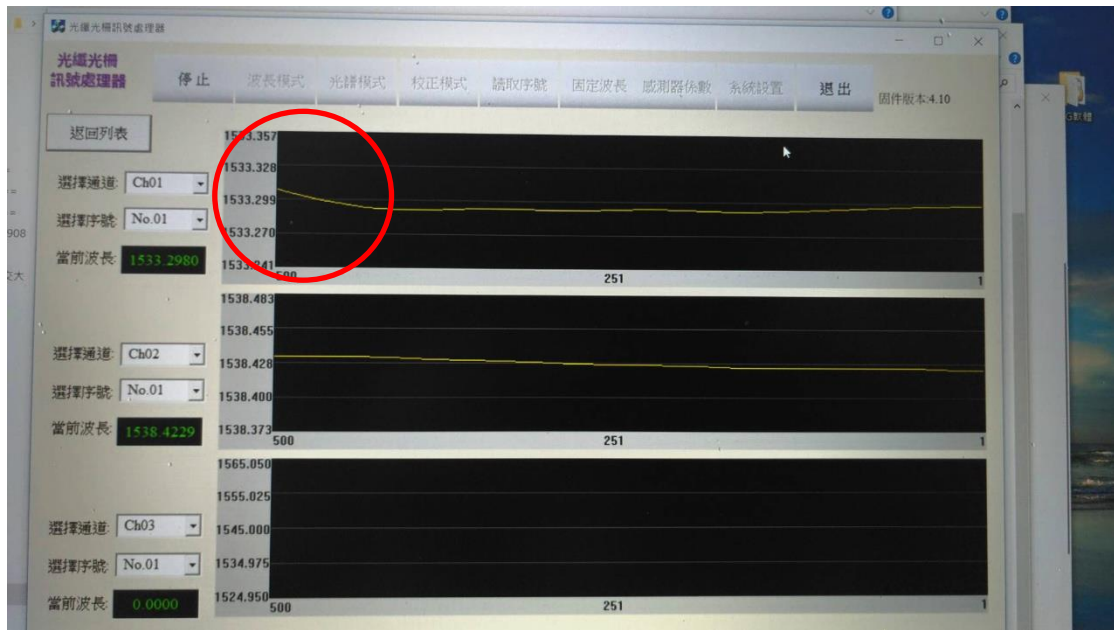
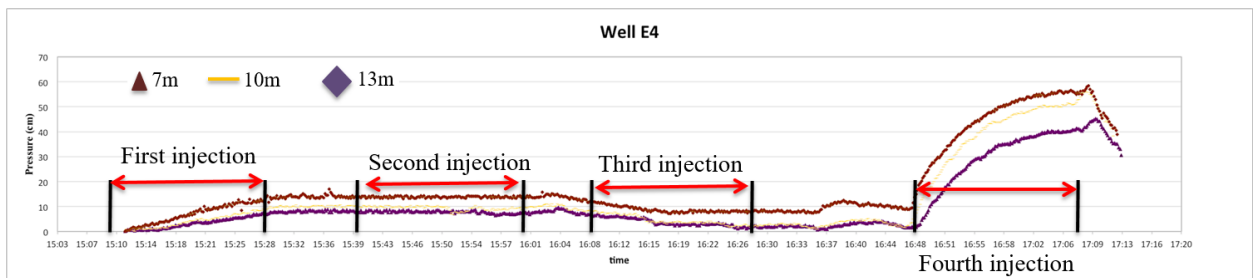
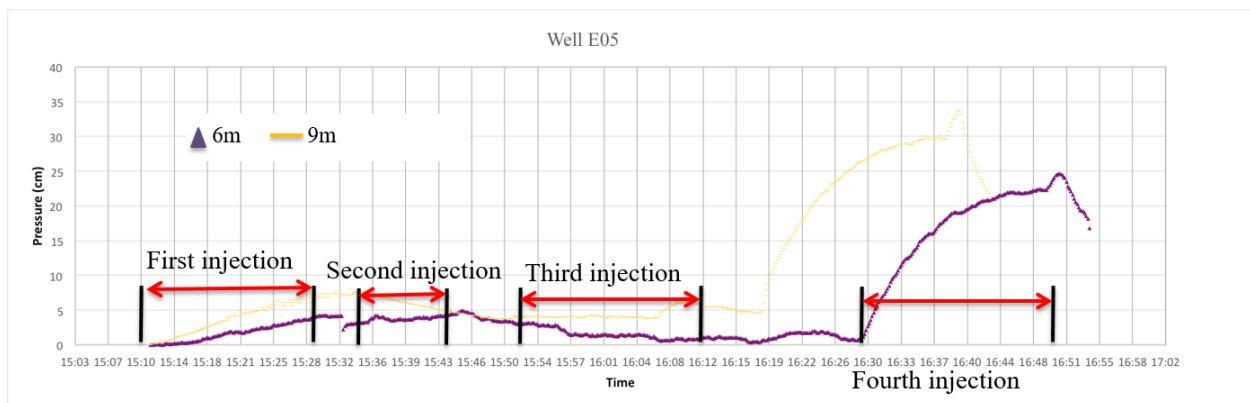


圖 34 現場灌藥時訊號明顯變化



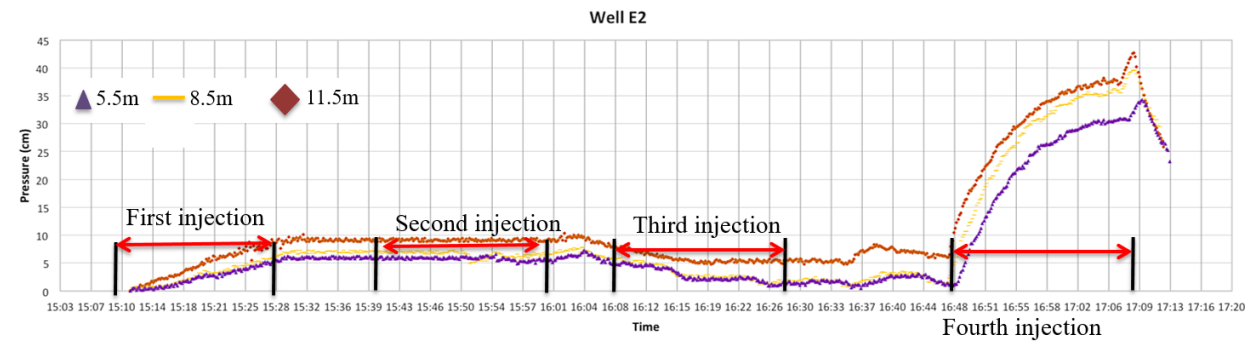
(a)



(b)

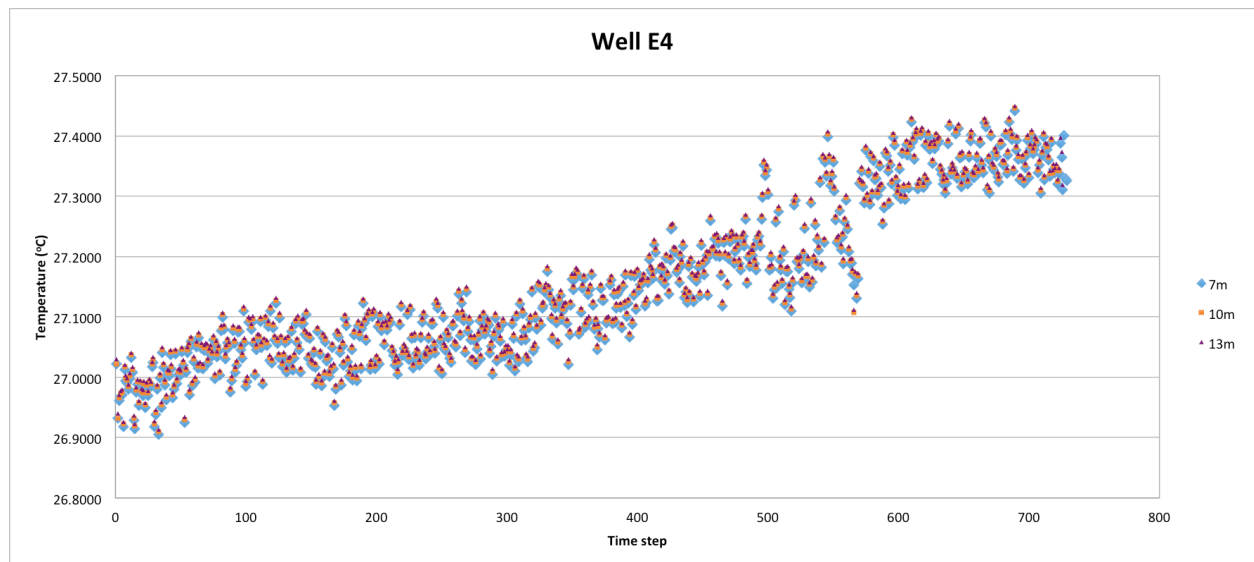


新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展

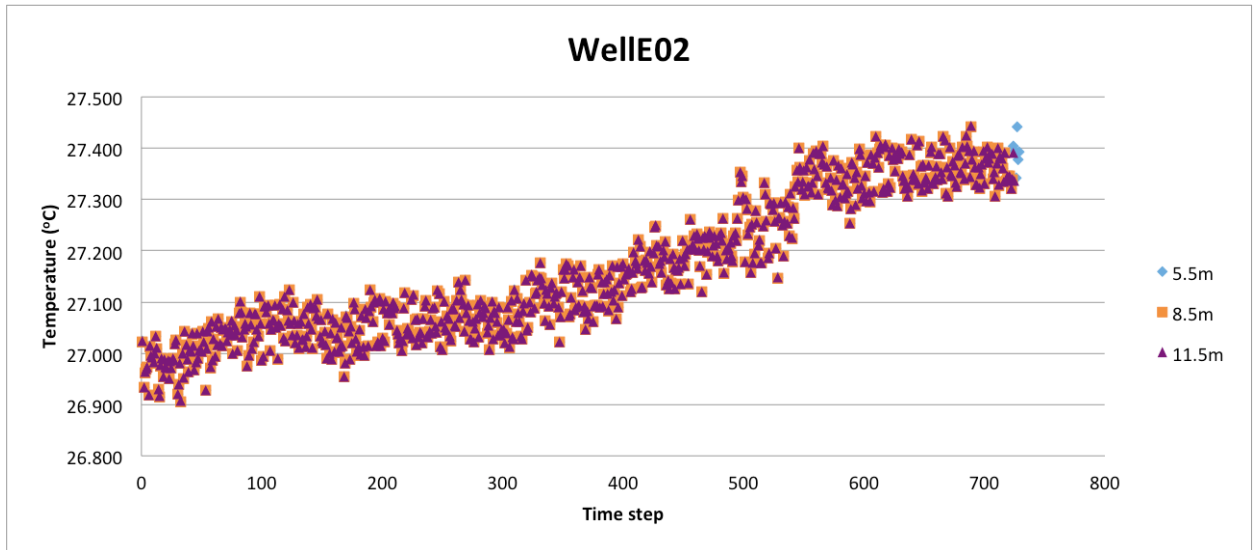


(c)

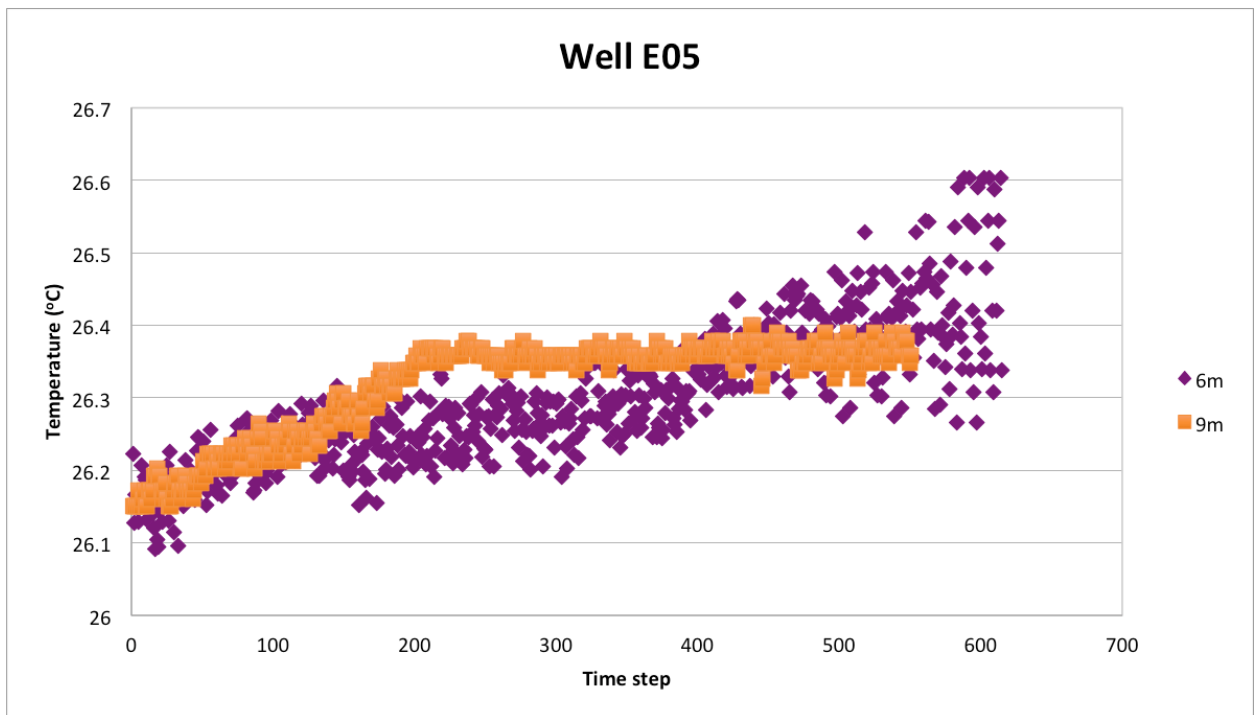
圖 35 注藥期間 FBG 觀測系統量測之水壓變化歷線。(a)E-4 井在地下 7m, 10m, 與 13m 之記錄(b)E-2 井在地下 5m, 8.5m, 與 11.5m 之記錄(c)E-5 井在地下 6m 與 9m 之記錄



(a)



(b)



(c)

圖 36 注藥期間 FBG 觀測系統量測之水溫變化歷線。(a)E-4 井在地下 7m, 10m, 與 13m 之記錄(b)E-2 井在地下 5m, 8.5m, 與 11.5m 之記錄(c)E-5 井在地下 6m 與 9m 之記錄



5.4 光纖光柵感測器回收再利用流程建立

為了降低試驗費用，本研究建立光纖光柵感測器的重複使用流程，避免一次性使用而讓試驗成本增加。試驗與回收流程如圖 37 所示，首先為將 FBG 感測器置入觀測井中，接著將阻隔器以空壓機注入空氣使其膨脹後，在注藥期間量測多深度的水壓與溫度。完成量測後，首先需將阻隔器內的空氣排出進行洩壓，使得皮膜回復原本大小後，即可將感測器從井中取出，取出後須先將感測器以大量清水沖洗，之後拆開相關配件（如不鏽鋼蛇紋管）擦乾保養，以避免低或高 PH 值之地下水留在感測器內，造成持續性的侵蝕。待感測器完全乾燥後，即可將感測器與配件進行收納，待下一次量測時，即可再次組裝量測。

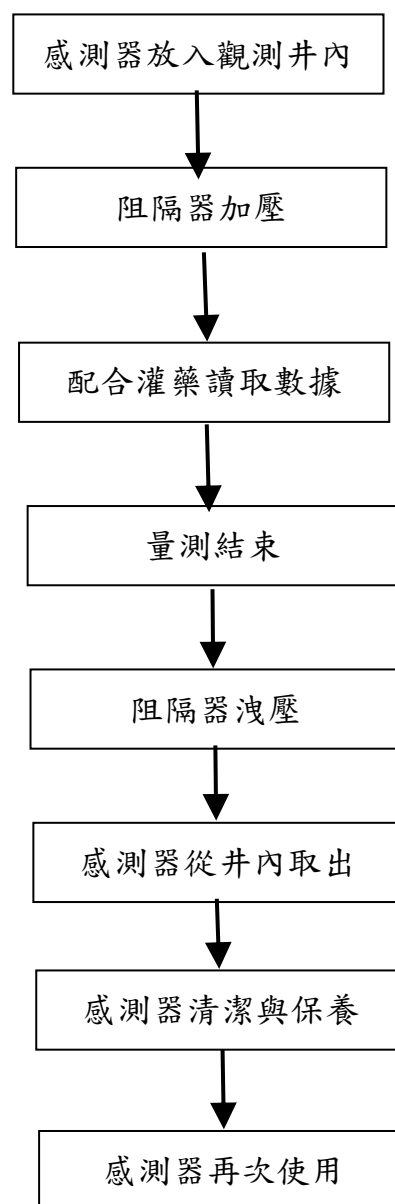


圖 37 感測器回收再利用流程



5.5 TL-CHERT 成果說明

5.5.1 六月份注藥期間量測

CHERT 剖面設置於井 E-1 與 E-2 之間，兩井距離 8.5 m，有效深度 16 m。地下水改善設置先於上游之 D1~D4 井進行灌注，於深度 6~12 m 分階段灌注；D1~D4 井灌注接近完時再於 D-5 井開始灌注，深度同樣為 6~12 m；D1~D5 全數灌注完成後配合光纖光柵系統測試於 D-6 井灌注，深度為 6.1 與 8.5 m。CHERT 於灌注前先收集背景值資料，並配合灌注程序，收集過程中與完成後的資料，由於剖面位置灌注井下游與兩側，可由電性變化評估藥劑流布。由於整治藥劑為雙氧水，釋放之氣體將增加地層中的電阻率(導電率下降)，故時序分析將以電阻率增加率研判之，因雙氧水氣體釋出的反應相當劇烈，電阻率增加的區域研判為氧氣(氣泡)訊號，未必完全代表液態藥劑，特別是在未飽和層中，電阻率增加的現象應是來自於含水層中所釋放出的氧氣所致。

開始灌注 6 小時後的 TL-CHERT 成果如圖 38 所示，剖面中並未發現明顯的電阻率變化，表示此時上游 D1~D4 號井所灌注之藥劑尚未傳至下游 E1-E2 剖面。灌注 24 小時後的 TL-CHERT 成果如圖 39 所示，此時剖面中已略見電阻率上升的訊號，在 E-2 深度 7 m 與 11 m 附近及 E-1 深度 11 m 附近可發現電阻率略上升約 10%，可能是局部區域地質材料孔隙較大，或因設井因素地層中存在易匯流路徑，使得氣泡首先傳至這些區域而產生電阻率增加的訊號。灌注 28 小時後，TL-CHERT 成果如圖 40 所示，此時在剖面中深度 11 m 附近開始發現較大範圍的電阻率上升訊號，研判應有少量的藥劑已傳輸至下游，在一天多的時間藥劑能有如此遠的影響距離，推測原因為：

- 1、上游 DPI 灌注井持續以穩定的壓力進行滲透灌注，存在一些推移作用。
- 2、深度 11 m 地質材料顆粒較大，孔隙較高，較利於傳輸，鄰近 E-3 井深度 11 m 的 K 值為 $6.177 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。
- 3、藥劑本身的擴散作用增加了影響距離，且因採用雙氧水，所釋出的氣體傳輸速度可能更快。

灌注 32 小時後的 TL-CHERT 成果如圖 41 所示，此時 D-5 井開始灌注，剖面中深度 11 m 處的電阻率上升訊號更為顯著，除了受 D-5 井灌注影響之外，也來自上游所灌注之藥劑，表示此深度的地質特性確實較有利於傳輸；而 E-2 井周圍亦出現明顯的電阻率上升反應，特別是深度 6 m 水位面附近，表示氣體垂直上升集中於水位面附近。灌注 48 小時後的 TL-CHERT 成果如圖 42 所示，



此時 D-5 井已完成灌注，從成果圖中可以發現未飽和層也出現電阻率上升的現象，研判係因 D-5 井灌注藥劑的氣體向上溢散所致；而井 E-1 深度 15 m 附近也出現小範圍的電阻率上升訊號，推測此處應是由較通透材料組成局部易匯流的區域。

灌注 50 小時後的 TL-CHERT 成果如圖 43 所示，此時 D-6 井開始配合光纖光柵系統進行灌注，E-1 井周圍開始出現電阻率上升的訊號，由於灌注深度位於淺層，因此地下水位面附近的訊號較為顯著；另此時其他灌注井已停止灌注，原剖面中深度 11 m 的電阻率上升訊號已開始消散。灌注 51 小時後的 TL-CHERT 成果如圖 44 所示，此時 D-6 井已完成灌注，從剖面中可以明顯發現 E-1 井水位面附近至未飽和層電阻率上升訊號相當顯著，反應來自於雙氧水釋出的氣體。D-1 灌注完成後 3 小時的成果如圖 45，與圖 44 相較可發現電阻率下降，也表示停止灌藥之後氣體逐漸溢散。



Percent Difference of Resistivity

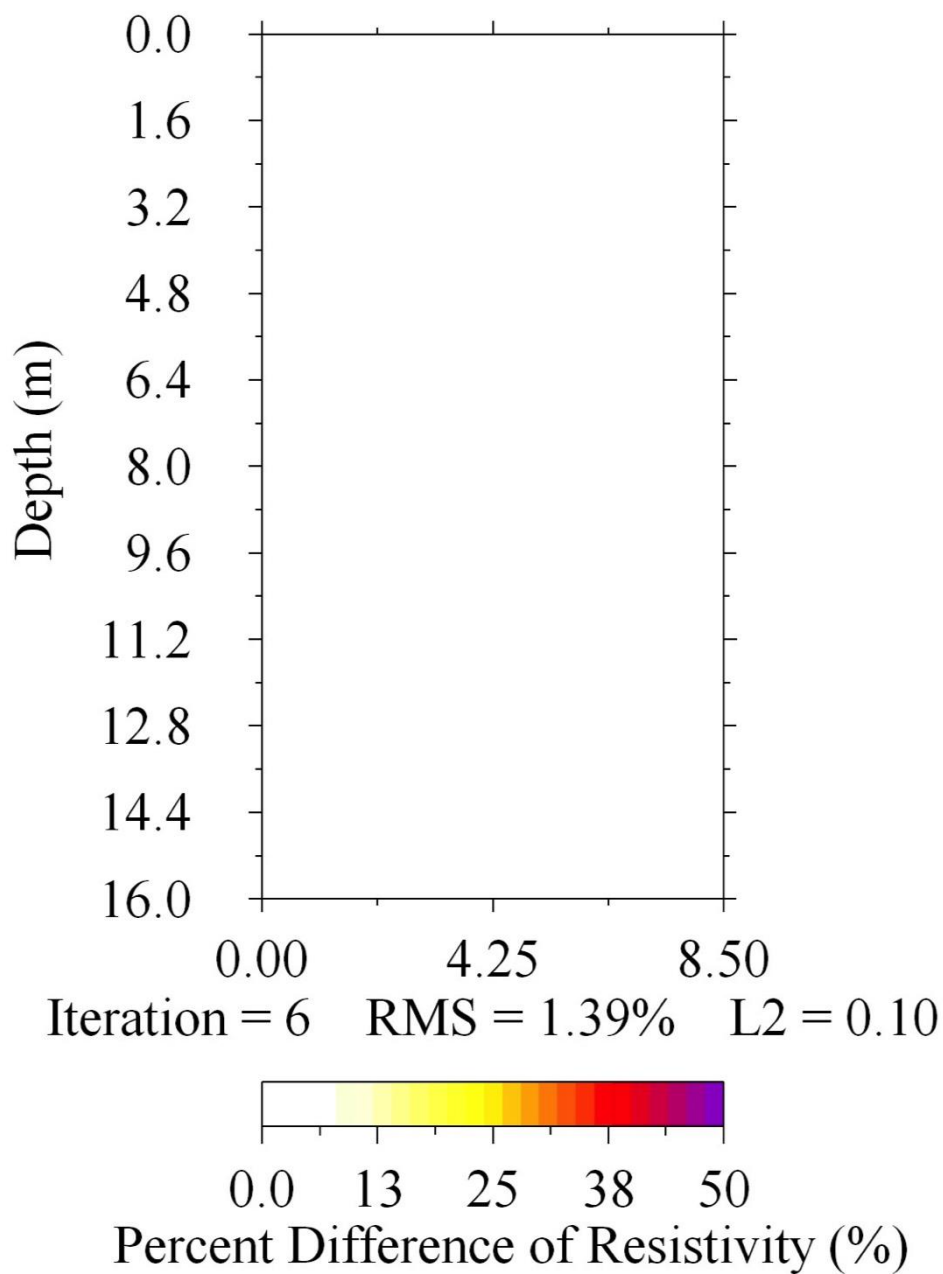


圖 38 灌注 6 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

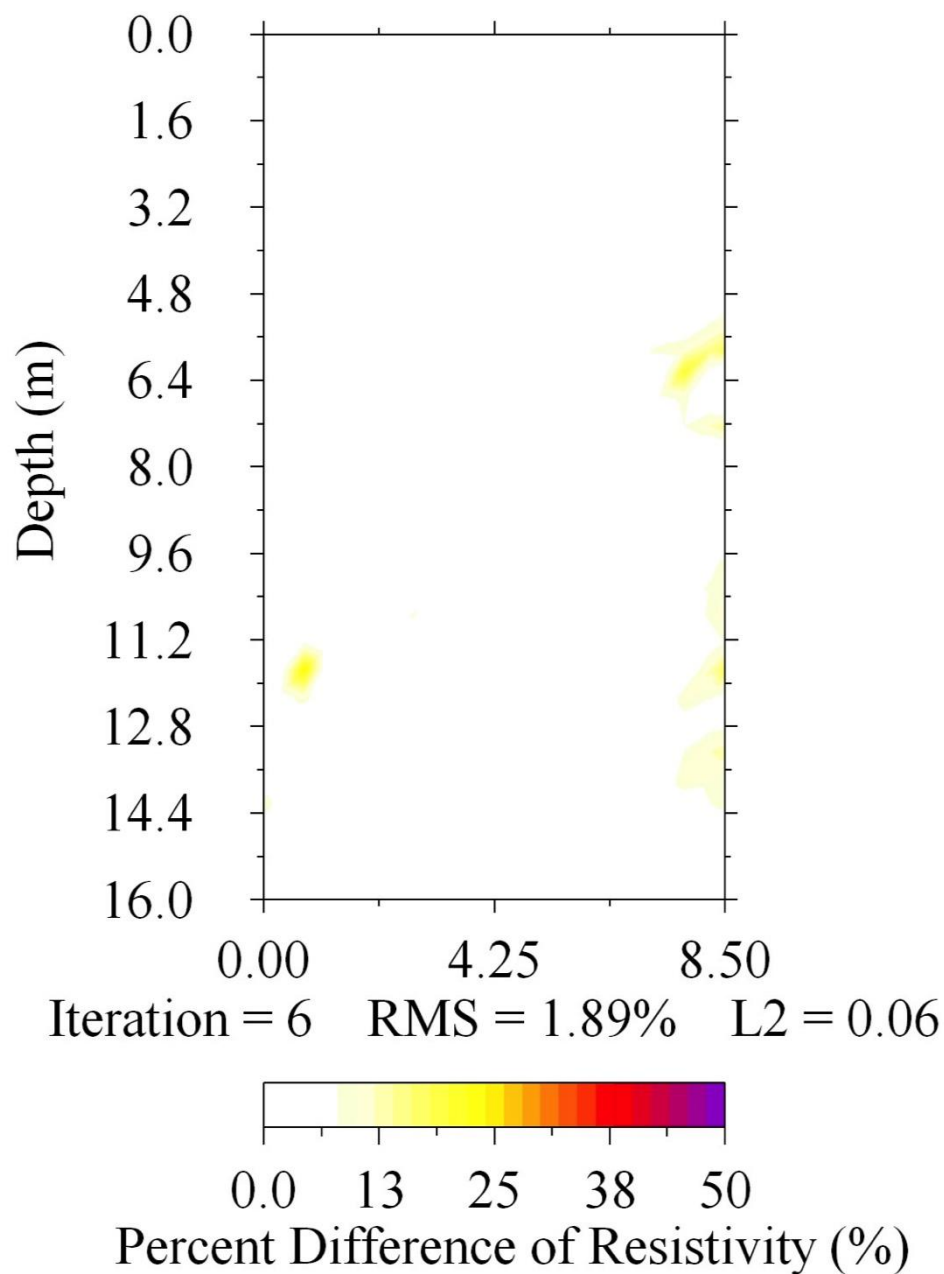


圖 39 灌注 24 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

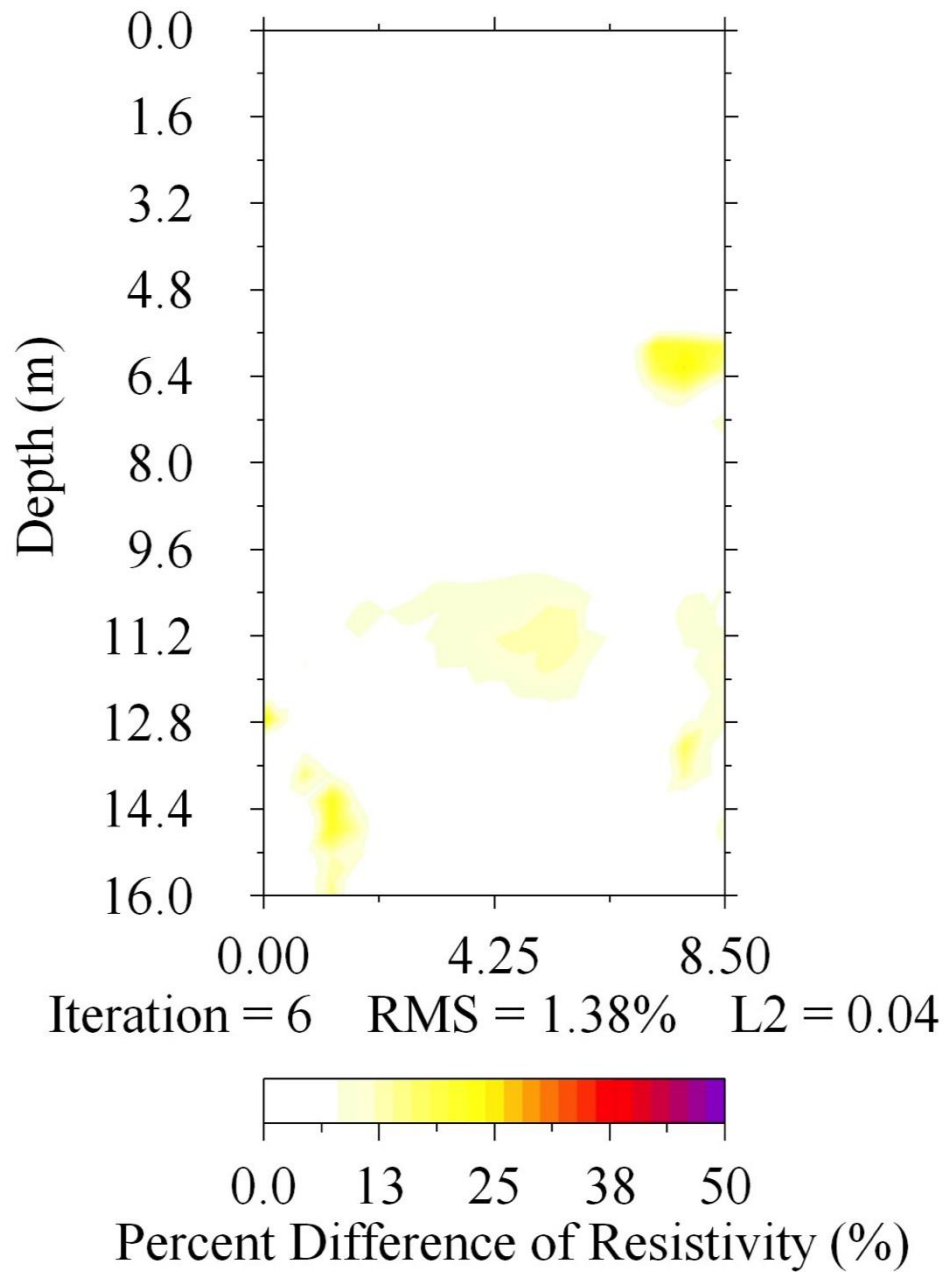


圖 40 灌注 28 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

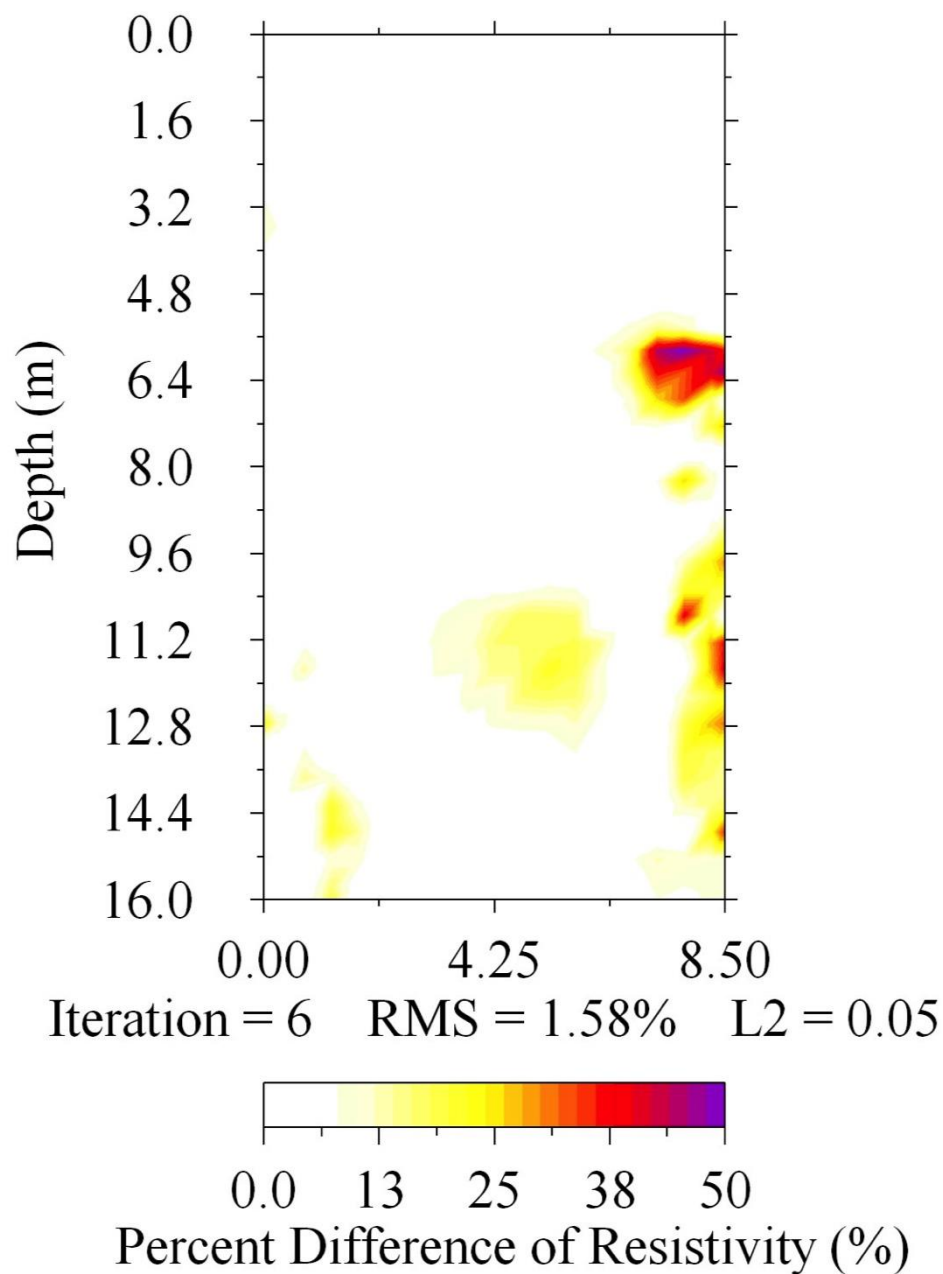


圖 41 灌注 32 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

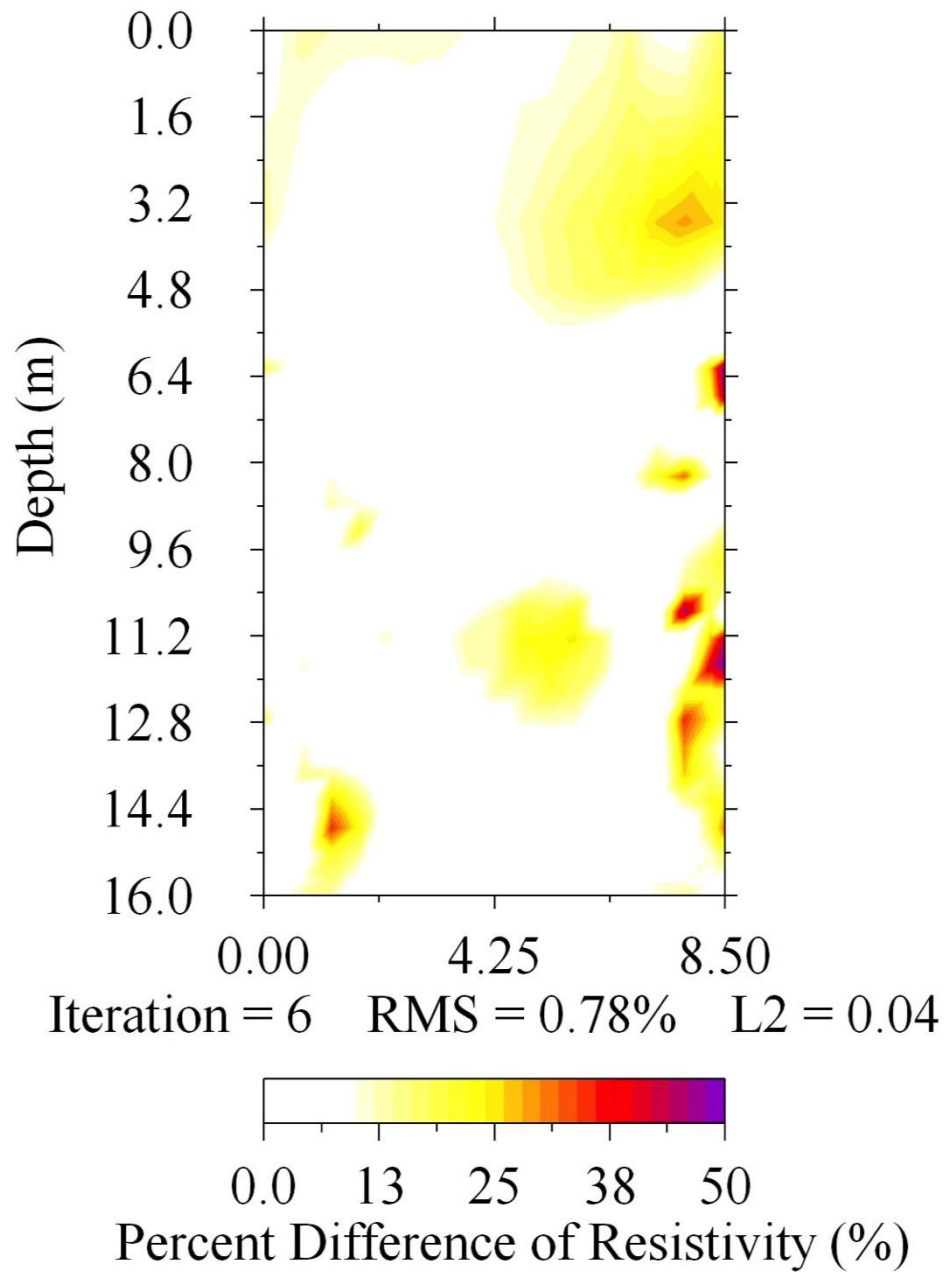


圖 42 灌注 48 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

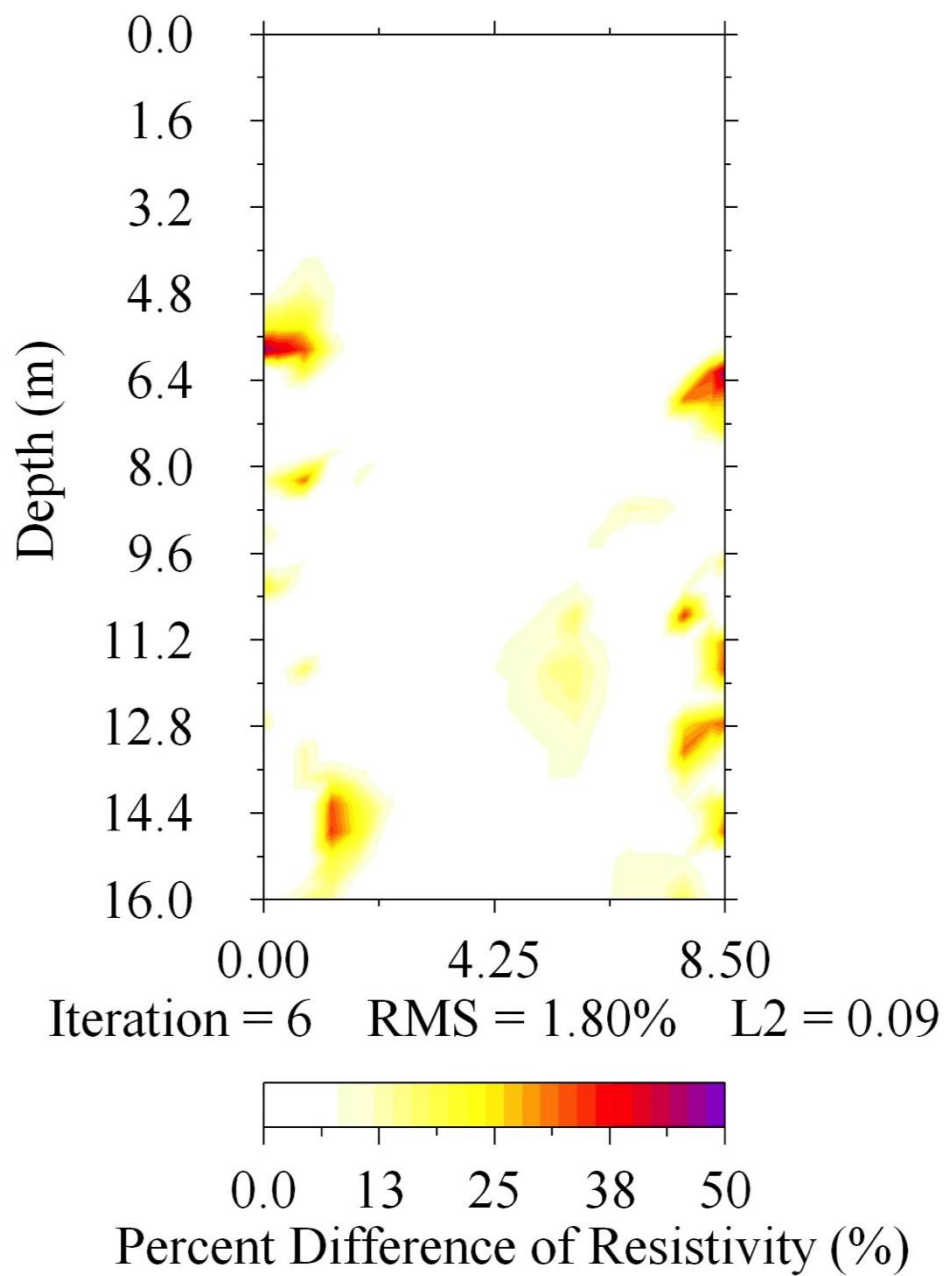


圖 43 灌注 50 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

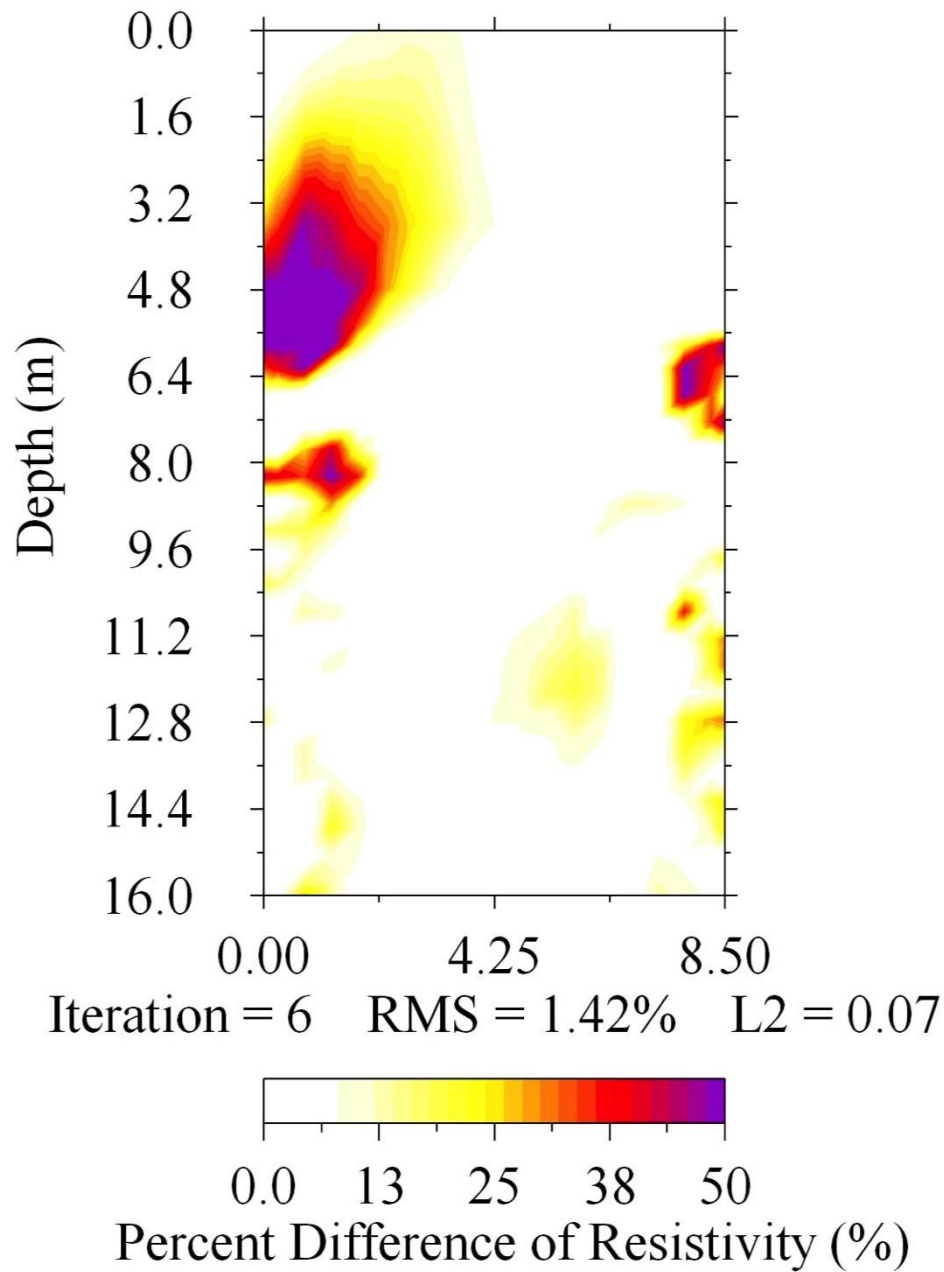


圖 44 灌注 52 小時後 TL-CHERT 成果圖



Percent Difference of Resistivity

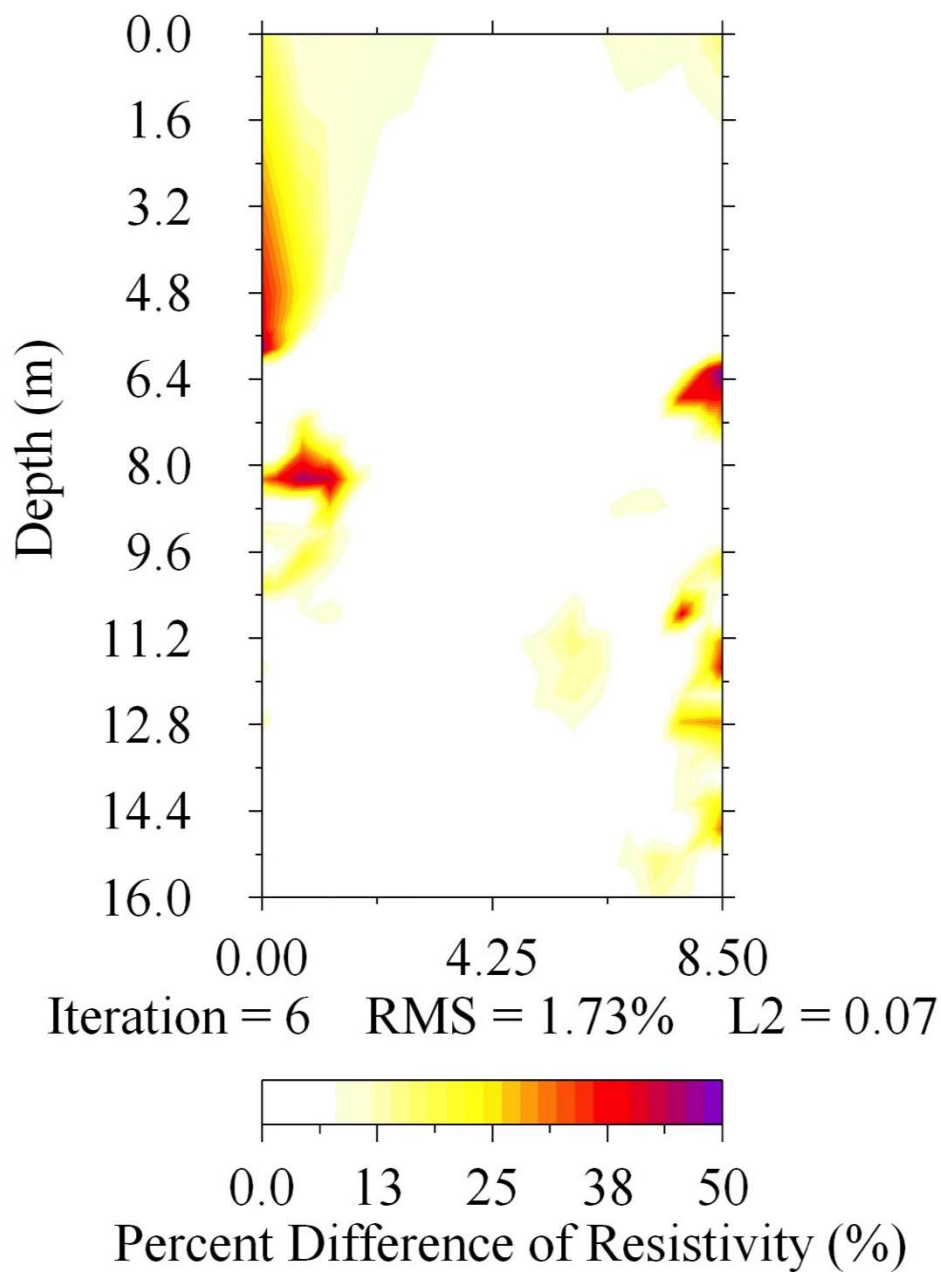


圖 45 灌注 55 小時後 TL-CHERT 成果圖



5.5.2 十月份注藥期間量測

第二次 FGB 實場試驗規劃以三口井進行多深度量測，FGB 感測器配置於 E-2、E-4 與 E-5 三口井中(圖 46)，灌注井選擇 D-7 與 D-8 兩口井，分別於深度 7 公尺與 10 公尺灌注高導電率的調整劑，每個深度各灌入 200 公升，調整劑的導電率高於地下水 10 倍以上，配合實驗的 CHERT 則設置在 E-2 對 E-4 跨孔收集資料輔助比對。

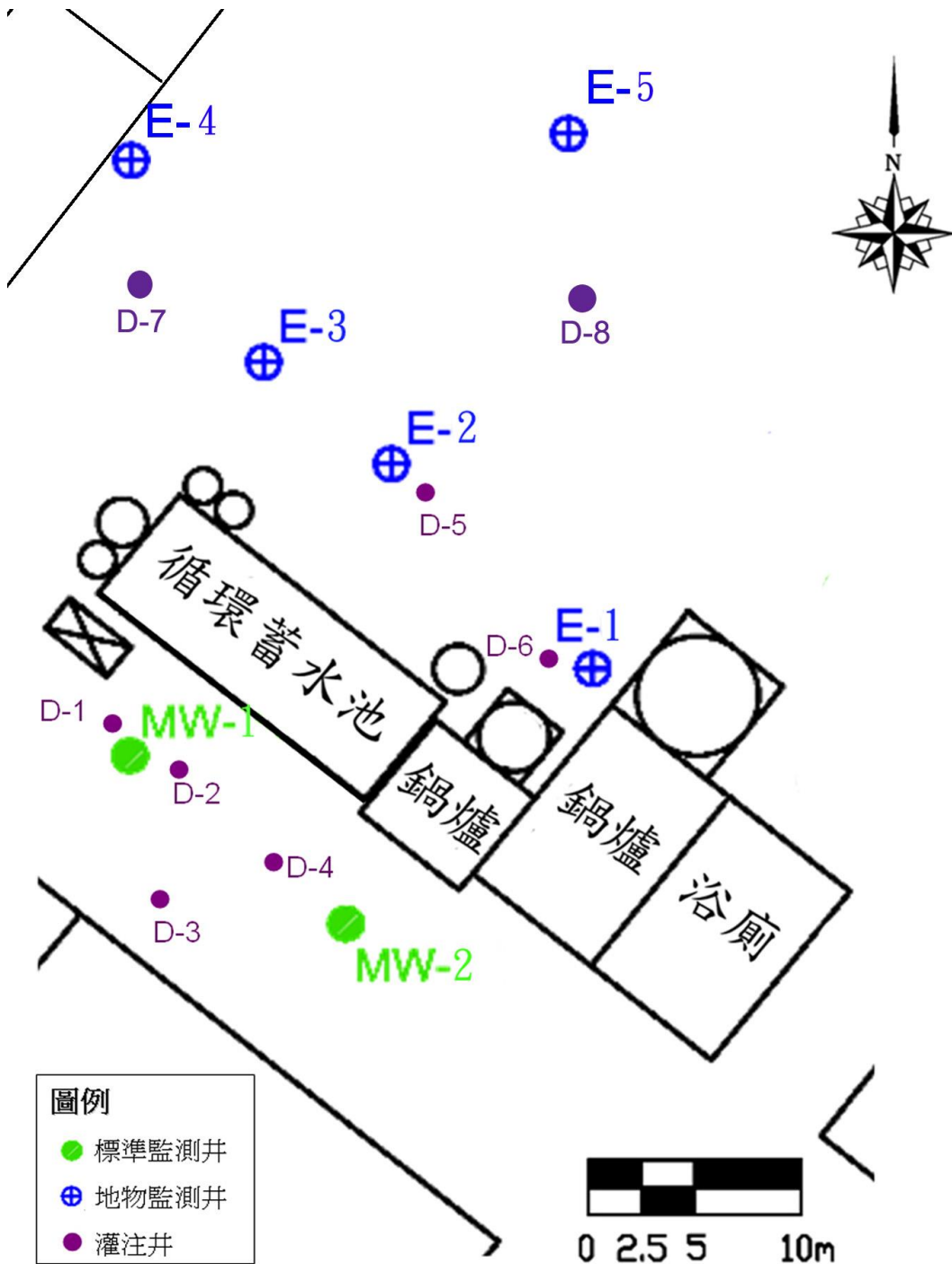


圖 46 第二次 FGB 試驗現場配置圖

由於本次新設計之多深度 FGB 感測器為金屬材料，置於地物井中導致 CHERT 量測過程中雜訊過高，因此 TL-CHERT 僅能於 FGB 感測器拆卸後進行探測，灌注完成後 18 小時的 TL-CHERT 成果如圖 47 所示，圖中右側為 E-2 井，左側為 E-4 井。成果圖中顯示 E-4 井側深度 7~11 m 明顯出現高導電率訊號，導電率上升幅度超過 50%，研判係來自於上游 D-7 灌注的藥劑反應，此訊



號間接驗證藥劑已透過 DPI 灌注傳輸至下游 D-4 井附近，且深度相當符合灌注設計深度(7m 與 10m)，影響深度略深應為重力沉降所致。E-2 井側深度 8~12 m 亦出現微量導電率增加的訊號，惟訊號較弱，導電率僅微量增加 8~10%，可能是環境雜訊或計算誤差，但亦不排除係來自下游 D-8 灌注之藥劑影響，此結果暗示 DPI 灌注在傳輸很好的地層環境確實可以滲透作用將藥劑向上游傳輸，而此訊號與 FGB 成果一致，確認 E-2 存在來自下游之壓力源。

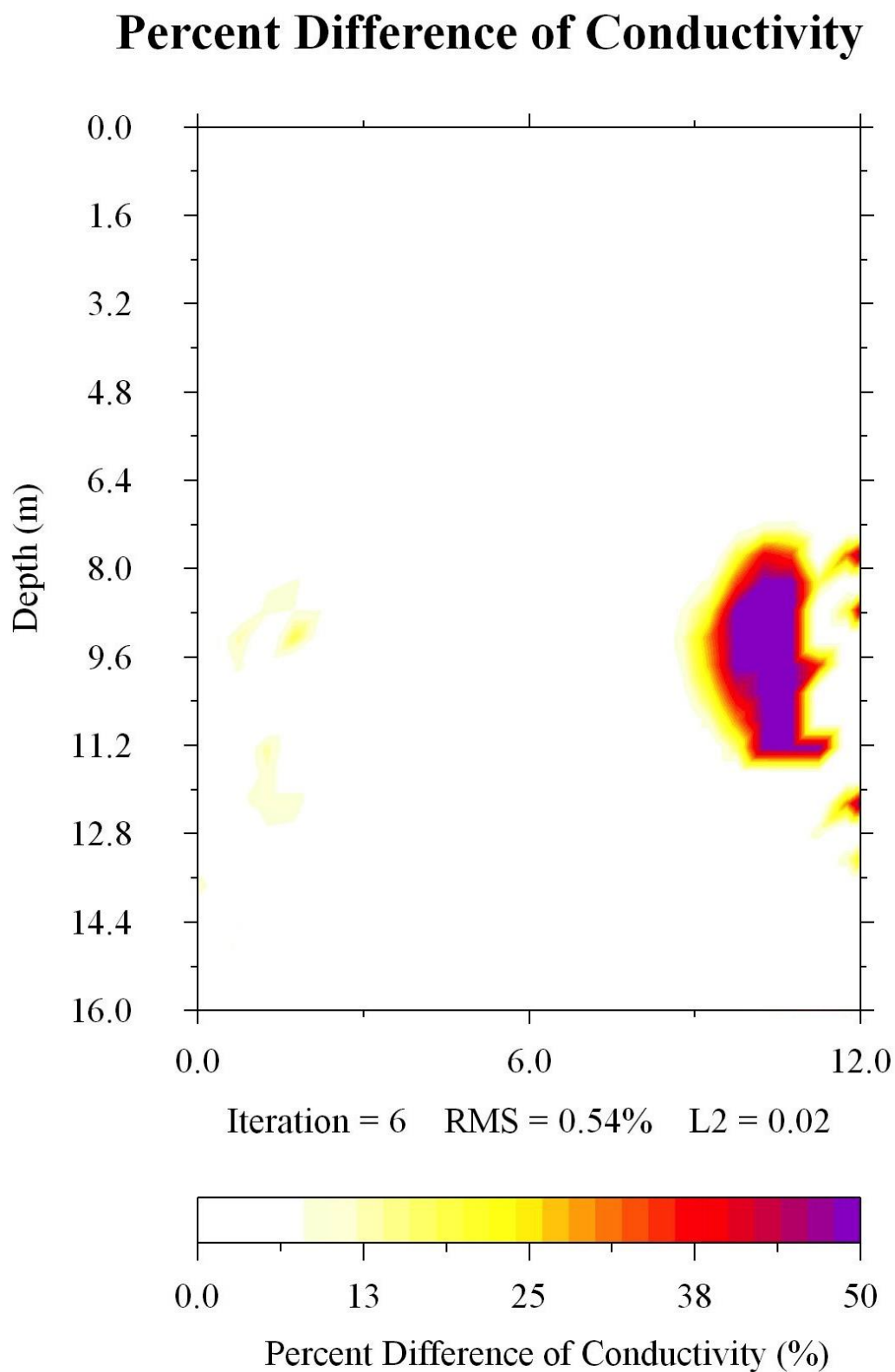


圖 47 第二次 FGB 試驗 TL-CHERT 成果圖



5.6 地下水流模與熱流模式驗證

本研究所開發之地下水流與熱流耦合模式(VSAFTH)以有限元素法(Finite element)開發，驗證的參照對象為美國 Lawrence Lab. 所開發的 Tough2，此軟體以有限體積法(Finite volume)進行開發。兩軟體在數值方法上不同，在處理熱傳的傳流項(advection term)上也略有不同。本研究主要以 MMOC 演算法進行傳流項的處理，此方法主要為 Lagrange 類的計算方法，而 Tough2 則為 Eulerian 的方式進行計算。另外，在計算流場時，每個網格取用的參數計算方式略有不同，Tough2 主要為上風法(upwind scheme)，而本模式則是以所有網格的水力或熱傳參數，面積與流量建立 $AX=B$ 的矩陣，其中 X 矩陣為待解變數流量，透過矩陣求解後，可求得同時考慮鄰近網格參數影響下的三個方向流量值。雖然兩模式在數值方法與傳流項的計算上皆有差異，但最終之目的皆為描述水流與熱傳之物理機制，故其最終之模擬結果應有一致的趨勢，且應不至於有太大的差異，因此本研究仍以 Tough2 作為參照對象進行模式驗證。

在驗證模式的建立上，網格設定與模式參數如表 4 與表 5 所示，初始條件則設定為 100 公尺與 25°C ，邊界條件則在 $X=120$ 公尺處之 $Y-Z$ 平面設定為定水頭 125 公尺與定溫度 30°C ，在 $X=0$ 公尺處之 $Y-Z$ 平面則設定為定水頭 100 公尺與定溫度 25°C 。模擬期距為時刻 33600 秒，模擬時刻為 300 秒。因為有限元素法之計算主要在網格節點上，而有限體積法則在網格中心點，為了讓兩模式之計算格點所在位置一致，本研究在建立 Tough2 的模式時，將其模式範圍進行微調，其 X 方向的範圍由原本的 0~120 公尺調整為 -2.5~127.5 公尺， Y 方向範圍由原本的 0~60 公尺調整為 -2.5~62.5 公尺， Z 軸方向則由原本的 0~40 公尺調整為 -1~41 公尺。

溫度模擬結果如圖 49(a)-(g)所示，圖中紫色點代表本研究開發模式之模擬結果，黃色點代表 Tough2 的模擬溫度。由圖可知，兩模式之模擬結果相當接近，從溫度變化較大的 A 點到溫度變化較小的 G 點都呈現相當一致的溫度模擬結果。在模擬時刻結束時，兩模式之模擬溫度誤差介於 0.013°C ~ 0.150°C 。水位模擬的部分，在模擬時刻結束後，兩模式的模擬水位誤差介於 0.1~0.2 m 之間。此模擬結果顯示兩模式之模擬結果趨勢相當一致，亦顯示本模式具有模擬水流與熱流傳輸等物理行為的能力。



表 4 模式格網數量與尺寸

	X 方向	Y 方向	Z 方向
格網數	24	12	20
格網尺寸 範圍(m)	5	5	2

表 5 模式參數設定

重力加速 度 (m/s^2)	滲透係數 (m^2 , permeability)	孔隙 率	土體熱含量 ($\text{Jm}^{-3}\text{C}^{-1}$)	熱傳導係數 ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)
9.81	9×10^{-11}	0.4	192000	1.102

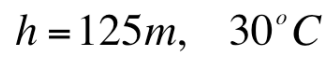
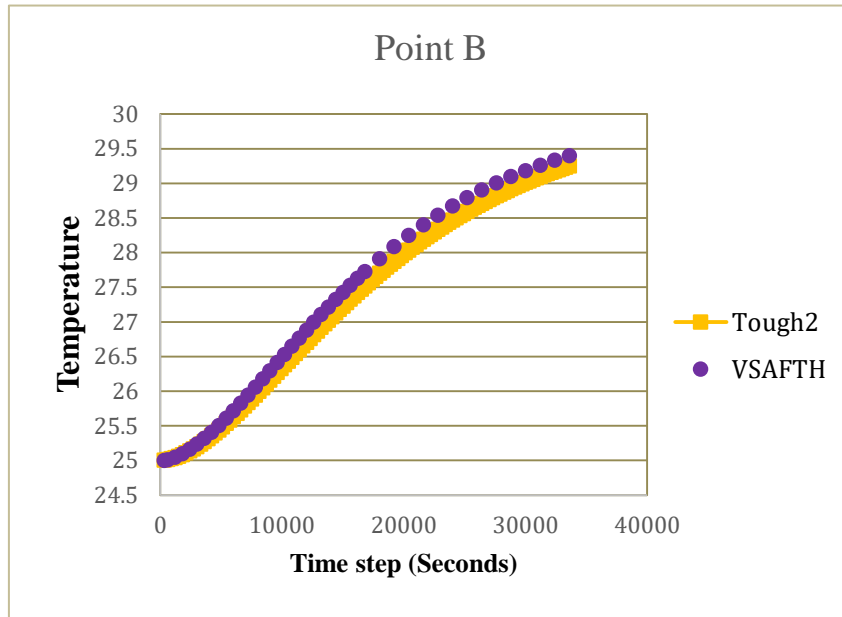


Figure 10 is a line graph titled "Point A" comparing the temperature evolution of two models: VSAFTH and Tough2. The y-axis represents Temperature in degrees Celsius, ranging from 25 to 30 with increments of 0.5. The x-axis represents Time step in seconds, ranging from -5000 to 35000 with major ticks every 10000 units. The VSAFTH model is represented by a purple line with square markers, and the Tough2 model is represented by a yellow line with circle markers. Both models show a rapid increase in temperature, starting around 25.5°C at -5000 seconds and reaching approximately 29.8°C by 35000 seconds. The VSAFTH model shows a slightly higher temperature than the Tough2 model after 15000 seconds.

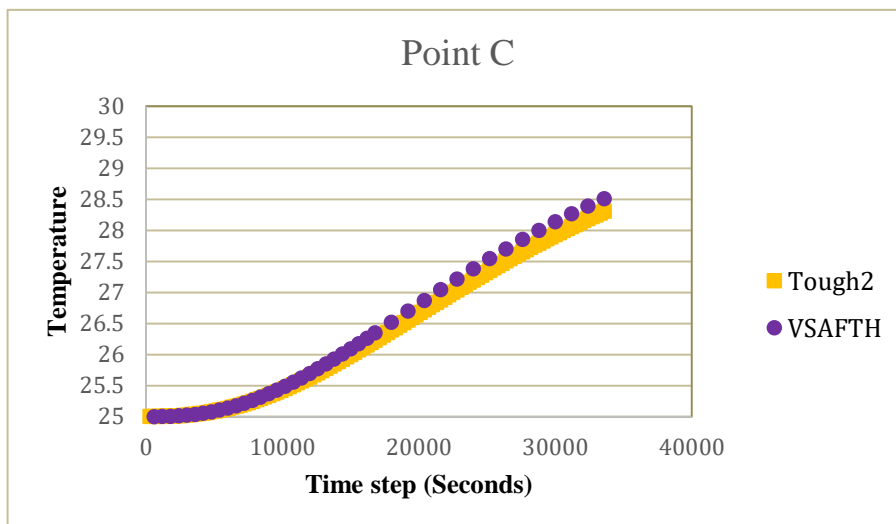
59



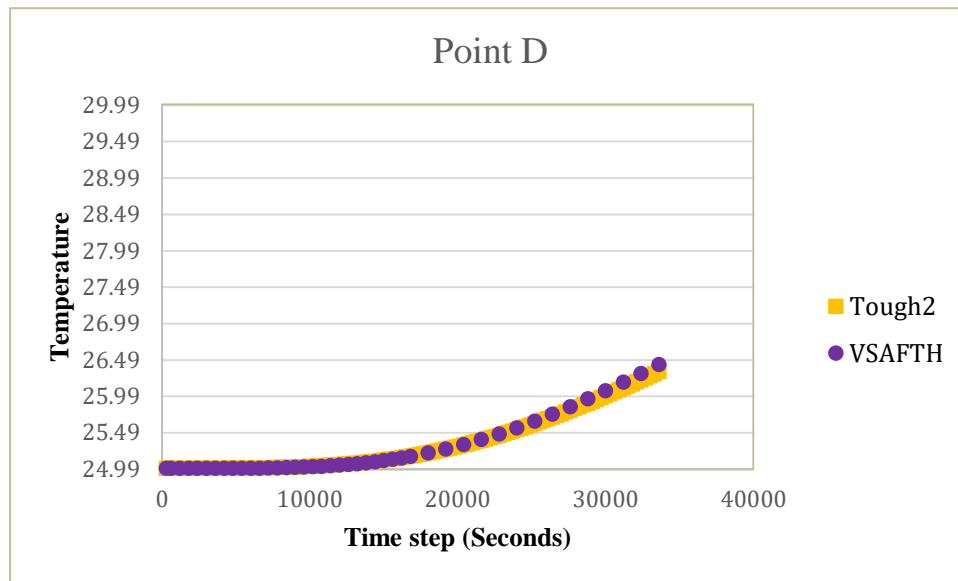
新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展



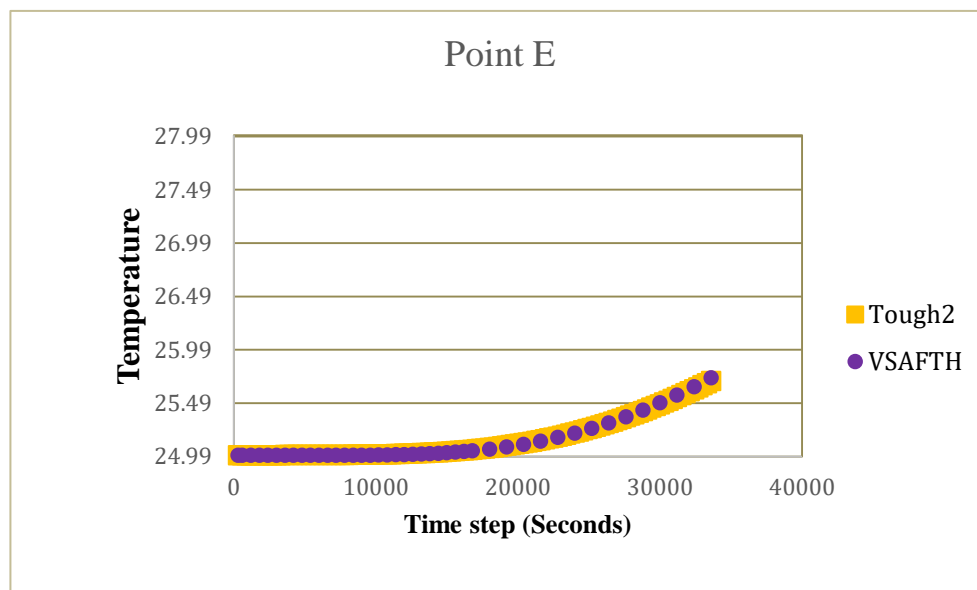
(b)



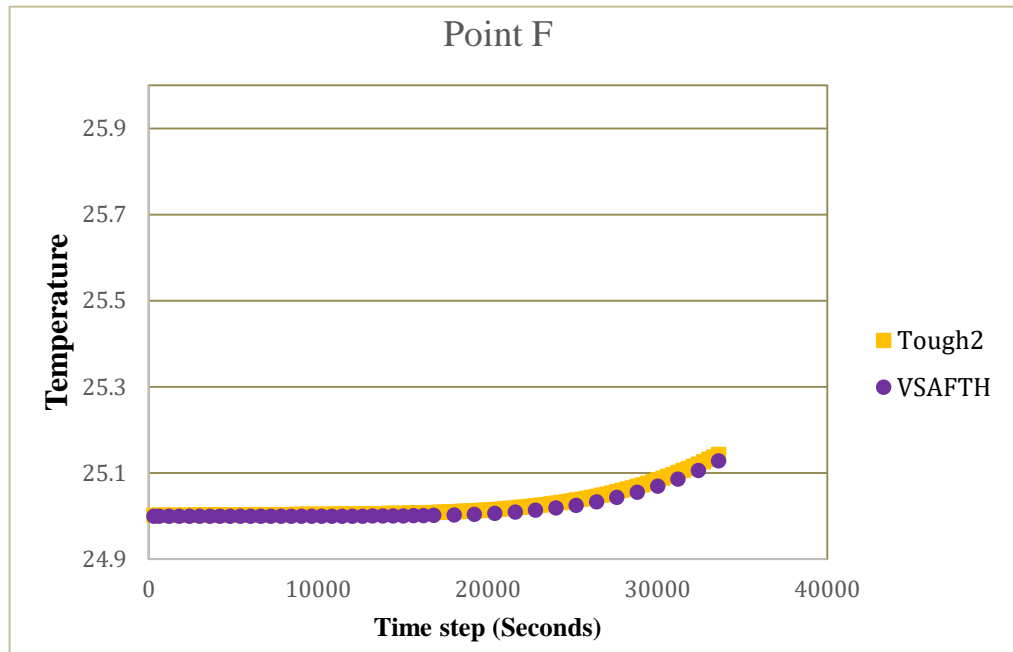
(c)



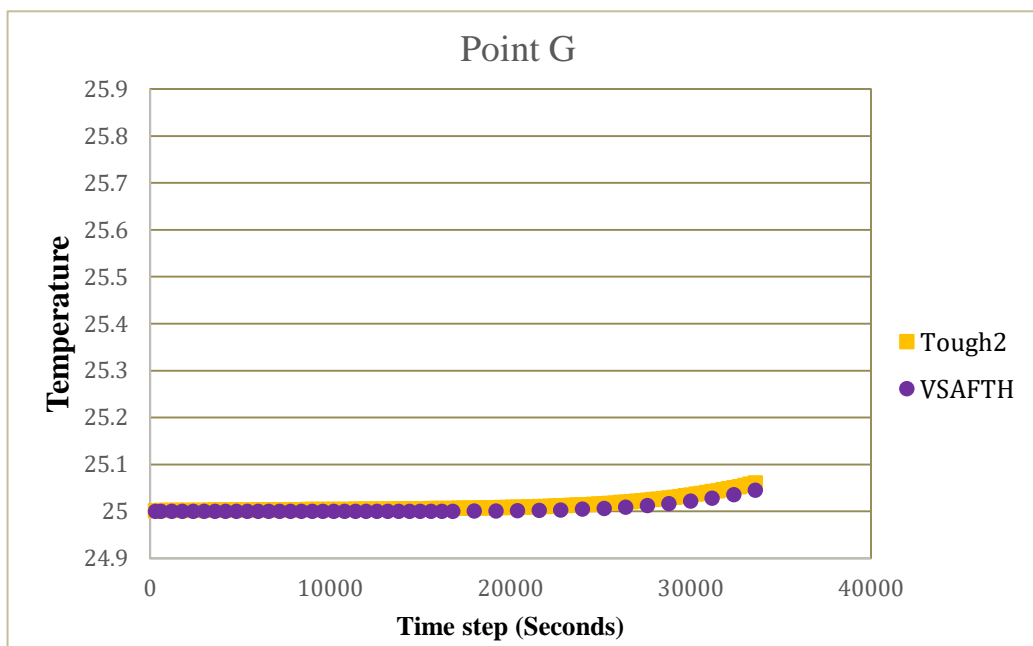
(d)



(e)



(f)



(g)

圖 49 Tough2 與 VSAFTH 模擬結果比較圖。(a)-(g)分別代表兩模式在點 A-G 之
時序溫度模擬結果



5.7 水力掃瞄 (Hydraulic tomography, HT)

水力掃描之概念與 X 光掃描之概念近似，X 光是以放射線作為訊號源，以底片或接受器接收放射線訊號，再透過三維成像技術將二維影像轉換為三維影像。水力掃描之訊號源則為抽水或注水，接收訊號的則是觀測井的水位計，此水位資料包含抽水井到觀測井間的水文地質資訊。例如觀測井與抽水井為黏土層所阻隔，則觀測井將觀測不到抽水擾動引起之水位變化。兩井間若為礫砂層，則觀測井可觀測到顯著的水位變化。而水力掃描技術則透過連續線性推估法(successive linear estimator, SLE)將水位資料轉換為參數場，類比於 X 光掃描的三維成像技術。

本計劃將 FBG 多深度觀測系統蒐集之多深度水位資料，以水力掃描技術轉換為三維水力傳導係數(Hydraulic conductivity, K)場與蓄水係數場(Storage coefficient, S_c)，其推估結果如圖 50 與 51 所示。圖中顯示在淺層與井群外圍屬於 K 值相對較小的區域，而在井群範圍內深度約十公尺以下之 K 場則相對較大。本計劃進一步以注藥區域內觀測井的流速流向計資料（圖 52）比對，發現 11 公尺處之流速約為 7 公尺處之三倍，此結果與 K 場推估結果一致。此分析結果不僅再次說明水力掃描具有刻畫現地三維參數場的能力，亦說明了本計劃開發之 FBG 多深度監測系統確實可準確地觀測到既有井在不同深度的水位，有效改善觀測效率與空間解析度。

本計劃最後利用推估之參數場模擬第四次注藥的流況（圖 53），結果顯示藥劑在注藥位置往上游方向流動，而往下游方向移動時則會先往下流動，遇到底部泥層之後反彈再往下游外圍方向流動。此結果顯示透過水力掃描技術，細部與整體流況都可被清楚地描述與掌握，故此技術將可作為後續注藥時之規劃分析基礎，協助推估明確的注藥量與注藥地點，以達到精準整治的目標。

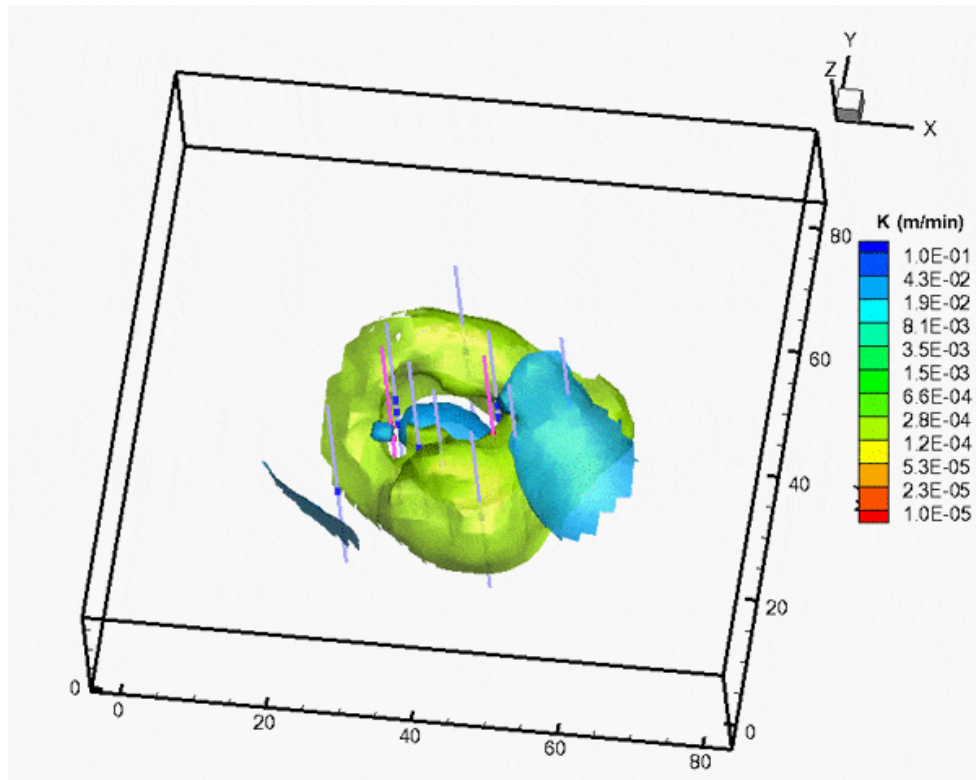


圖 50 以水力掃描技術推估之三維水力傳導係數場

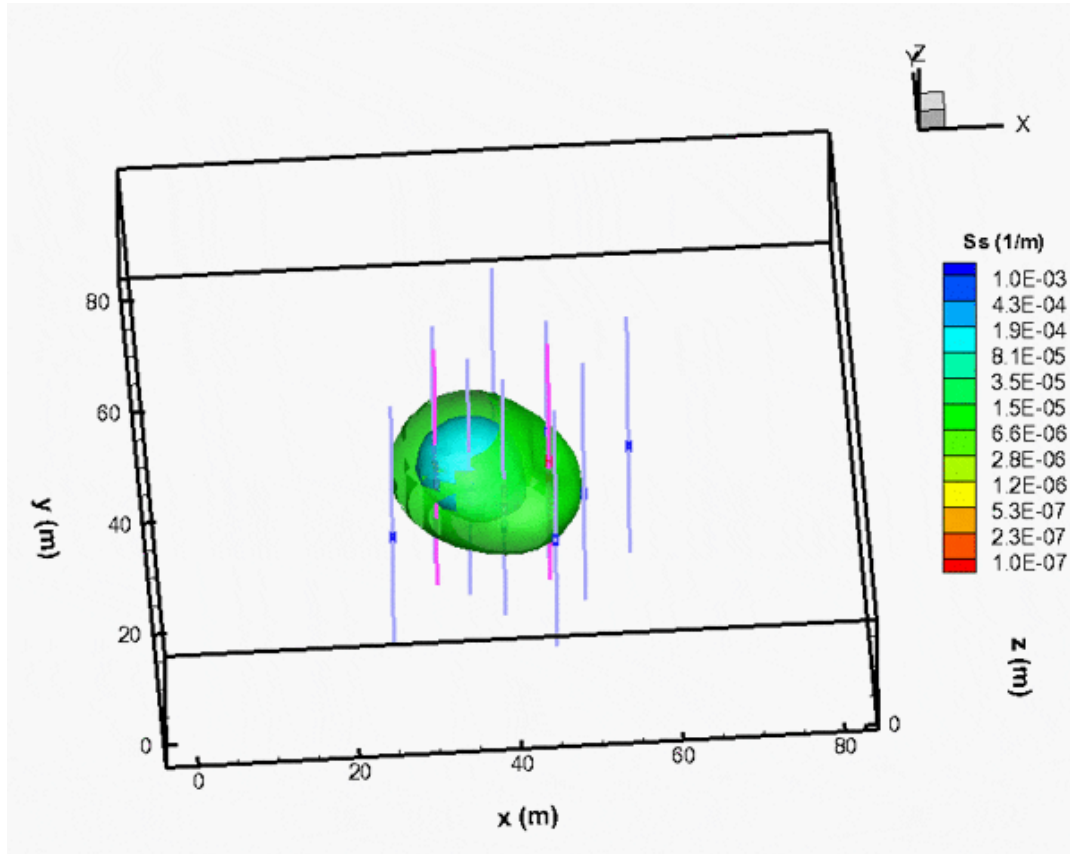
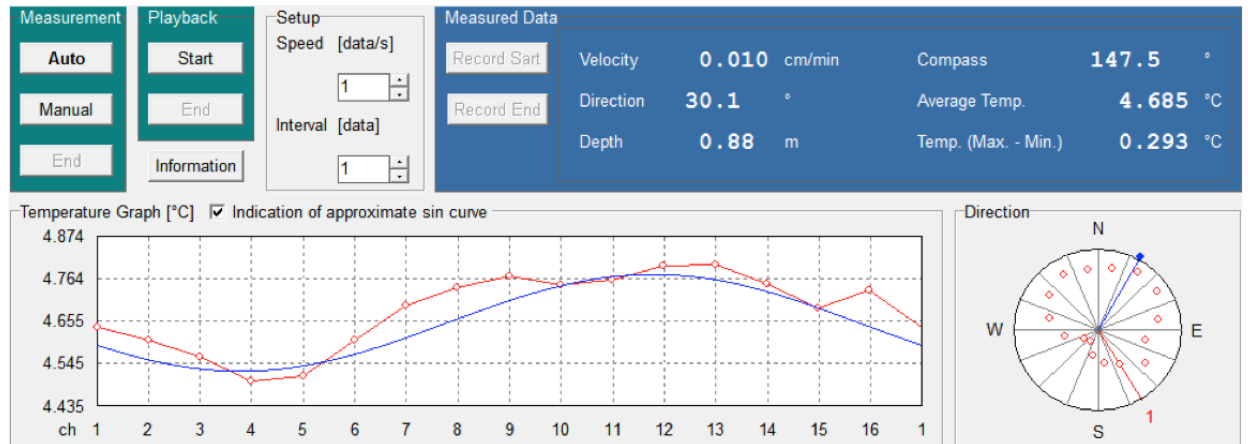


圖 51 以水力掃描技術推估之三維蓄水係數場



E-01 深度6.7米



E-01 深度11米

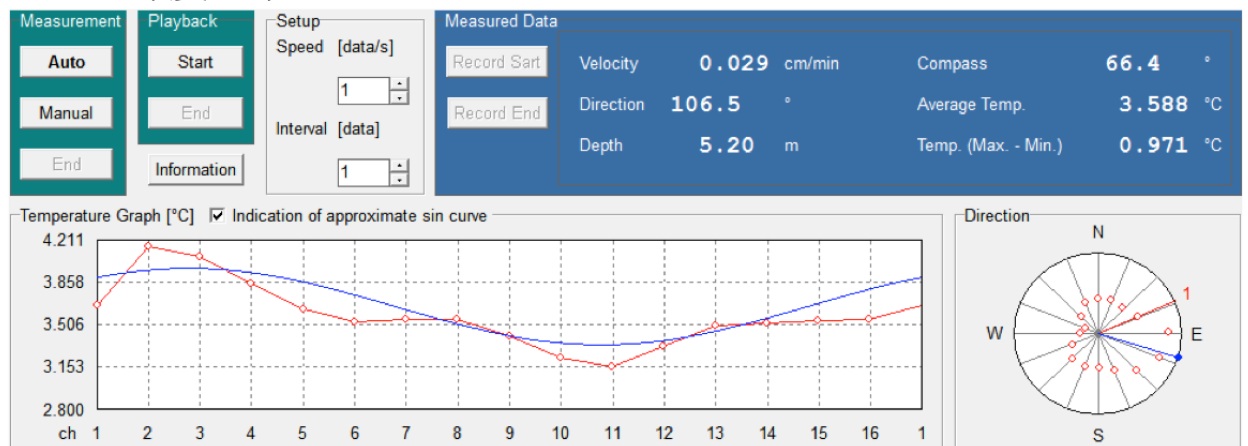


圖 52 注藥區域內觀測井之流速流向記錄

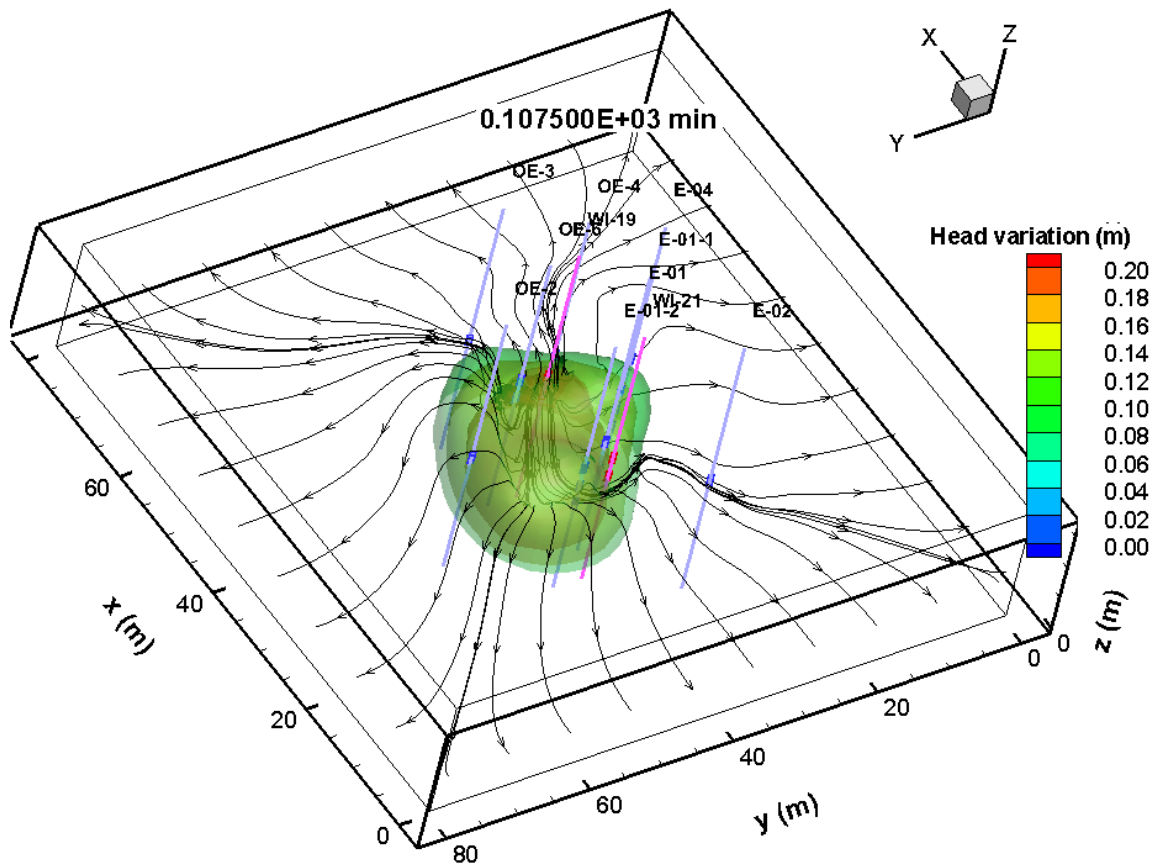


圖 53 以水力掃描推估之參數場模擬第四次注藥之流況

5.8 結論與建議

1. 本研究已成功開發多深度光纖光柵之溫度與壓力觀測系統，並已完成現場注藥量測，可成功同時觀測到多井多深度的水溫與水壓資料，其中，阻隔器以皮膜開發製作，不但節省成本，且能有效阻絕井內之垂向水流，達到分層觀測的目的。
2. 本研究目前已在光纜接頭處連接鋼纜，作為 FBG 感測系統配置於井中或自井中取出時之施力點，以避免直接拉扯光纜而再次拉斷光纜接頭。
3. 綜合跨孔地電阻試驗與 FBG 的試驗成果可知，E-2 三個深度的水位與電阻值變化皆被 D2 深層(10m 處)注藥所影響，說明 DPI 灌注在傳輸很好的地層環境確實可能將藥劑往上游傳輸。
4. 本研究目前已完成地下水流與熱傳耦合模式之數值模式(VSAFTH)開發，並完成與 Tough2 之模擬結果比對驗證，兩者結果趨勢一致，結果



顯示 VSAFTH 具有描述地下水流與熱流傳輸機制的能力。

5. 因為場址廠房內的機械須以冷水進行冷卻，而其排出之冷卻水水溫達 30 度以上，故後續注藥時，建議廠商以此較高溫的水攪拌藥劑再行注藥，本團隊應可觀測到更為明顯的溫度變化。
6. 透過水力掃描技術，本計劃可將 FBG 多深度觀測系統量測之水位轉換為三維參數場，進而模擬注藥後的細部流況。此技術將為達到精準整治目標不可或缺之技術。



(六)參考文獻

1. Liu, Ying, et al. "Bioremediation of nitrate and Fe (II) combined contamination in groundwater by heterotrophic denitrifying bacteria and microbial community analysis." RSC Advances 6.110 (2016): 108375-108383.
2. Bing, Z., and Greenhalgh, S. A. "Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations". Geophysical Prospecting, 48(5), 887-912, 2000.
3. Burden, David S., and Judith L. Sims. "Groundwater issues: fundamentals of soil science as applicable to management of hazardous wastes." Groundwater issues: fundamentals of soil science as applicable to management of hazardous wastes. EPA, 1999.
4. Goes, B. J. M., and Meekes, J. A. C. "An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography." Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 9(3), 127-141, 2004.
5. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y. (2012). "Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides Through Pore Pressure Profile Measurements," Soils and Foundations, Vol. 52, No.4, pp.737-747.
6. Kersey, A. D. (1992). "Multiplexed fiber optic sensors." Proceedings, Fiber Optic Sensors, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp. 200-227.
7. Lemming, Gitte, et al. "Optimizing the environmental performance of in situ thermal remediation technologies using life cycle assessment." Groundwater Monitoring & Remediation 33.3 (2013): 38-51.
8. Yeh, T. C. J., & Liu, S. (2000). Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method. Water Resources Research, 36(8), 2095-2105.
9. Zhu, J., & Yeh, T.-C. J. (2005). Characterization of aquifer heterogeneity using transient hydraulic tomography. Water Resources Research, 41(7).
10. Illman, W. A., Berg, S. J., & Yeh, T.-C. J. (2012). Comparison of approaches for predicting solute transport: Sandbox experiments. Ground Water, 50(3), 421-431.
11. Tso, M., C. H., Zha, Y., Yeh, T.-C. J., & Wen, J. C. (2016). The relative importance of head, flux, and prior information in hydraulic tomography analysis. Water Resources Research, 52(1), 3-20.

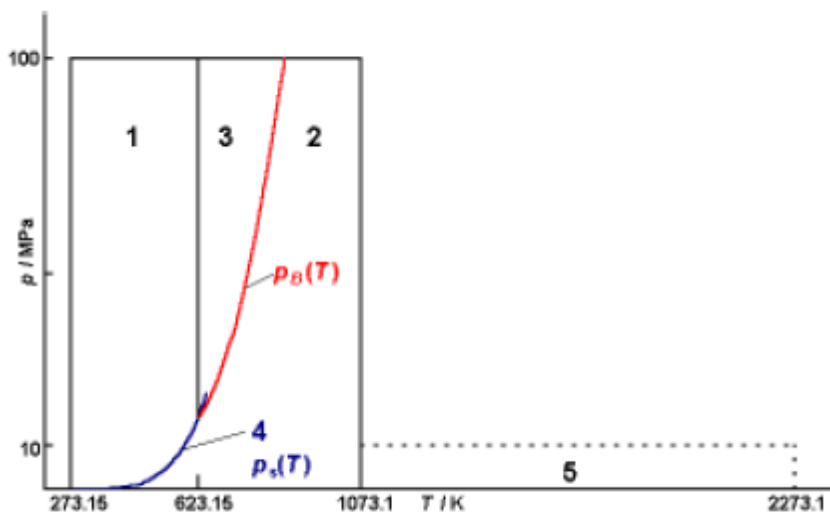


12. Zha, Y., Yeh, T.-C. J., Illman, W. A., Tanaka, T., Bruines, P., Onoe, H., Saegusa, H., Mao, D., Takeuchi, S., & Wen, J. C. (2016). An Application of Hydraulic Tomography to a Large-Scale Fractured Granite Site, Mizunami, Japan. *Groundwater*.
13. 黃安斌; 王建智; 莊子賢; 李瑞庭; 何彥德(2013), 「整合式地層內孔隙水壓與位移剖面量測」, *地工技術*, 136, 83-94.
14. 李瑞庭 (2005), 「光纖光柵讀取系統軟體之研發」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程學系。
15. 王子賓(2012), 「地電阻之井測電極裝置」, 中華民國專利證書新型第 M439802 號, 2012。



附錄一 水之熱動力性質公式說明

在水的熱動力性質計算上，本研究使用國際組織 International Association for the Properties of Water and Steam 所公布之公式。該組織在西元 1997 年公布之熱動力性質公式，依照溫度與壓力範圍劃分為五區，如附圖 1 所示。本研究目前研究範圍主要以液態水為研究對象，其坐落於附圖 1 之第一區中，因此本研究乃採用第一區之公式為主，另外在判斷第一區之適用壓力範圍時需使用到飽和蒸汽壓，因此在公式說明時將僅說明第一區與第四區之公式。以下說明之熱動力性質公式包括密度，比內能(Specific internal energy)，比焓(Specific enthalpy)，黏滯係數(viscosity) 及飽和蒸汽壓(Saturated vapor pressure)，本研究僅使用密度計算之公式，而黏滯係數於西元 2008 年已發佈更新版，將於附錄二說明。



附圖 1 水與水蒸氣之溫度壓力分區示意圖

公式所採用之符號說明如下所式：

符號說明

h ：比焓(Specific enthalpy)

I, J ：指數(Exponents)

n ：係數 (Coefficient)

p ：壓力(Pressure)

p_s ：飽和蒸汽壓(Saturation pressure)

R ：比氣體常數(Specific gas constant)， $R = 0.461\ 526\ \text{kJ}/(\text{kg K})$



T：溫度(Temperature)

u：比內能(Specific internal energy)

v：比體積(Specific volume)

ρ ：密度(Density)

● 第一區之公式說明

本區之適用範圍為溫度介於 273.15K~623.15K 之間，壓力介於飽和蒸汽壓 $p_s(T)$ 及 100MPa 之間，其中飽和蒸汽壓 $p_s(T)$ 則為附圖 1 中之第四區，亦即藍色線條位置處，其求取公式詳見第四區公式說明。第一區之公式如下所示：

1. 密度計算公式

比體積(Specific volume)： $v(p, T) = \pi \gamma_\pi \times \frac{RT}{p}$

$$\rho = 1/v(p, T) \quad (1)$$

2. 比內能計算公式

比內能(Specific internal energy)：

$$\mu(p, T) = (\tau \gamma_\tau - \pi \gamma_\pi) \times RT \quad (2)$$

3. 比焓計算公式

$$\text{比焓(Specific enthalpy): } h(p, T) = \tau \gamma_\tau \times RT \quad (3)$$

上列三個方程式中的 π 、 γ_π 、 τ 、 γ_τ 可由下列四式求得：

$$\gamma_\pi = \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \pi} \right]_\tau = \sum_{i=1}^{34} -n_i I_i (7.1 - \pi)^{(I_i-1)} (\tau - 1.222)^{J_i} \quad (4)$$

$$\gamma_\tau = \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} \right]_\pi = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} J_i (\tau - 1.222)^{(J_i-1)} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1386K}{T} \quad (6)$$

$$\pi = \frac{p}{16.53 \text{MPa}} \quad (7)$$

式(4)及(5)中之係數，詳見附表 1。

附表 1 γ 導數之係數與指數表

i	I_i	J_i	n_i
1	0	-2	0.146 329 712 131 67 E+00
2	0	-1	-0.845 481 871 691 14 E+00
3	0	0	-0.375 636 036 720 40 E+01
4	0	1	0.338 551 691 683 85 E+01
5	0	2	-0.957 919 633 878 72 E+00
6	0	3	0.157 720 385 132 28 E+00
7	0	4	-0.166 164 171 995 01 E-01
8	0	5	0.812 146 299 835 68 E-03
9	1	-9	0.283 190 801 238 04 E-03
10	1	-7	-0.607 063 015 658 74 E-03
11	1	-1	-0.189 900 682 184 19 E-01
12	1	0	-0.325 297 487 705 05 E-01
13	1	1	-0.218 417 171 754 14 E-01
14	1	3	-0.528 383 579 699 30 E-04
15	2	-3	-0.471 843 210 732 67 E-03
16	2	0	-0.300 017 807 930 26 E-03
17	2	1	0.476 613 939 069 87 E-04
18	2	3	-0.441 418 453 308 46 E-05
19	2	17	-0.726 949 962 975 94 E-15
20	3	-4	-0.316 796 448 450 54 E-04
21	3	0	-0.282 707 979 853 12 E-05
22	3	6	-0.852 051 281 201 03 E-09
23	4	-5	-0.224 252 819 080 00 E-05
24	4	-2	-0.651 712 228 956 01 E-06
25	4	10	-0.143 417 299 379 24 E-12
26	5	-8	-0.405 169 968 601 17 E-06
27	8	-11	-0.127 343 017 416 41 E-08
28	8	-6	-0.174 248 712 306 34 E-09
29	21	-29	-0.687 621 312 955 31 E-18
30	23	-31	0.144 783 078 285 21 E-19
31	29	-38	0.263 357 816 627 95 E-22
32	30	-39	-0.119 476 226 400 71 E-22
33	31	-40	0.182 280 945 814 04 E-23
34	32	-41	-0.935 370 872 924 58 E-25



● 第四區之公式說明

本區之適用範圍為溫度介於 273.15K~647.096K 之間，壓力介於 611.213Pa 及 100MPa 之間，飽和蒸汽壓之公式如下所示。

$$p_{s(T)} = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}} \right]^4 \times 1MPa \quad (8)$$

其中

$$A = \vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2 \quad (9)$$

$$B = n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5 \quad (10)$$

$$C = n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8 \quad (11)$$

$$\vartheta = \frac{T}{1K} + \frac{n_9}{\frac{T}{1K} - n_{10}} \quad (12)$$

上述式(8)~ (11)中，係數 $n_1 \sim n_{10}$ 詳見附表 2。

附表 2 飽和蒸汽壓公式之係數表

i	n_i
1	0.116 705 214 527 67 E+04
2	-0.724 213 167 032 06 E+06
3	-0.170 738 469 400 92 E+02
4	0.120 208 247 024 70 E+05
5	-0.323 255 503 223 33 E+07
6	0.149 151 086 135 30 E+02
7	-0.482 326 573 615 91 E+04
8	0.405 113 405 420 57 E+06
9	-0.238 555 575 678 49 E+00
10	0.650 175 348 447 98 E+03



附錄二 黏滯係數公式說明

黏滯係數之適用範圍如式(12)~(16)所示，其中 p_t 為水之固、液及氣態三相共存時之壓力，若溫度為 273.16K，其值為 611.657Pa，而 $T_{m(p)}$ 則是水在一壓力 p 下，由固體融化為液體之溫度，若壓力小於 300 MPa 則其 $T_{m(p)}$ 介於 251.165 K~256.14K 之間，其估算方式詳見 International Association for the Properties of Water and Steam(2008)公佈之報告 “Revised Release on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance”。而本研究之研究對象主要為液態水，且考量可能壓力範圍後，本研究採用之溫度壓力區間約落在式(F-13)所示之區間。

$$0 < p < p_t \text{ and } 273.16 \text{ K} \leq T \leq 1173.15 \text{ K} \quad (13)$$

$$p_t \leq p \leq 300 \text{ MPa and } T_{m(p)} \leq T \leq 1173.15 \text{ K} \quad (14)$$

$$300 \text{ MPa} < p \leq 350 \text{ MPa and } T_{m(p)} \leq T \leq 873.15 \text{ K} \quad (15)$$

$$350 \text{ MPa} < p \leq 500 \text{ MPa and } T_{m(p)} \leq T \leq 433.15 \text{ K} \quad (16)$$

$$500 \text{ MPa} < p \leq 1000 \text{ MPa and } T_{m(p)} \leq T \leq 373.15 \text{ K} \quad (17)$$

黏滯係數之公式如式(17)所示，其中 $\bar{\mu}$ ， \bar{T} ， $\bar{\rho}$ 皆為無因次變數，分別為無因次黏滯係數，無因次溫度與無因次密度，其計算方式如式(18)~(20)所示。式(17)第一個因子 $\bar{\mu}_0(\bar{T})$ 之計算公式如式(21)所示，其係數 H_i 詳見附表 3，第二個因子 $\bar{\mu}_1(\bar{T}, \bar{\rho})$ 之計算公式如式(22)所示，其係數 H_{ij} 詳見附表 4，其中表內若有未列出之數值，其值皆為 0。第三個因子 $\bar{\mu}_2(\bar{T}, \bar{\rho})$ 因其計算公式過於複雜，因此採用報告建議值為 1，如式(23)所示。

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_0(\bar{T}) \times \bar{\mu}_1(\bar{T}, \bar{\rho}) \times \bar{\mu}_2(\bar{T}, \bar{\rho}) \quad (18)$$

$$\bar{\mu} = \mu / (1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}) \quad (19)$$

$$\bar{T} = T / (647.096 \text{ K}) \quad (20)$$

$$\bar{\rho} = \rho / (322 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (21)$$

$$\bar{\mu}_0(\bar{T}) = \frac{100\sqrt{\bar{T}}}{\sum_{i=0}^3 \frac{H_i}{\bar{T}^i}} \quad (22)$$

$$\bar{\mu}_1(\bar{T}, \bar{\rho}) = \exp \left[\bar{\rho} \sum_{i=0}^5 \left(\frac{1}{\bar{T}} - 1 \right) \sum_{j=0}^6 H_{ij} (\bar{\rho} - 1)^j \right] \quad (23)$$

$$\bar{\mu}_2(\bar{T}, \bar{\rho}) = 1 \quad (24)$$

附表 3 $\overline{\mu}_0(\overline{T})$ 之 H_i 係數表

i	H_i
0	1.67752
1	2.20462
2	0.6366564
3	-0.241605

附表 4 $\overline{\mu}_1(\overline{T}, \overline{\rho})$ 之 H_{ij} 係數表

i	j	H_{ij}
0	0	5.20094×10^{-1}
1	0	8.50895×10^{-2}
2	0	-1.08374
3	0	-2.89555×10^{-1}
0	1	2.22531×10^{-1}
1	1	9.99115×10^{-1}
2	1	1.88797
3	1	1.26613
5	1	1.20573×10^{-1}
0	2	-2.81378×10^{-1}
1	2	-9.06851×10^{-1}
2	2	-7.72479×10^{-1}
3	2	-4.89837×10^{-1}
4	2	-2.57040×10^{-1}
0	3	1.61913×10^{-1}
1	3	2.57399×10^{-1}
0	4	-3.25372×10^{-2}
3	4	6.98452×10^{-2}
4	5	8.72102×10^{-3}
3	6	-4.35673×10^{-3}
5	6	-5.93264×10^{-4}



新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展

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

107 年度專案成果績效自評表

四、專案基本資料

填表日期：107 年 10 月 29

日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 其他		
申請機構系所	國立交通大學土木工程研究所	計畫主持人	張良正
專案名稱	新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

五、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文						
		(2)研討會論文						
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1					
		(2)研討會論文						
	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	1					
		(2)技術平台						
B	7.研發人員	(1)碩士	1					



附錄二

項目 \ 目標達成程度			申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
人才 培育	(人數)	(2)博士						
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	3					
		(2)跨機構團隊	3					
		(3)形成研究中 心						
		(4)形成實驗室						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



新型光纖光柵多深度監測於水文地質與熱傳參數異質場推估技術之發展

(二) 產業面

項目			目標達成程度	申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細 資料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申 請 中	發明	1					
			新型/設計	1					
			合計						
B 研 發 技 術 移 轉	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)							
C 產 學 研 合 作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得 業界科專	件數							
		業界投資金額(仟元)							



附錄二

項目 \ 目標達成程度		申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細 資料)
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)						

(三) 政策面

項目 \ 目標達成程度		申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數					
		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					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

六、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)



學術成就：本研究以序率方法建立異質熱傳與水文地質參數場之推估方法，目前在國際上屬於領先的研究，完成之成果將發表至國際頂尖期刊。

技術創新：本研究量測注藥時的地下水溫與水壓，再以量測的資料進行三維參數場的推估，進而建立精確的溫度場與流場，在試驗過程中無須額外進行注水或抽水試驗，因此不會擾動污染團，且所得流場與溫度場可協助辨識整治藥劑的傳輸途徑，協助注藥盲點區域辨識。

經濟效益：

- (1)本研究所建立的方法可節省鑿井與抽水試驗的費用，只需蒐集注藥過程的溫度與壓力資料即可建立該區域的三維流場與溫度場，協助注藥盲點區域辨識。
- (2)本研究建立之三維參數場，可預測實場之三維流場與溫度場以及藥劑與污染物之流向與污染團整治現況，提出後續整治規劃建議，進行精準整治，減少無效之藥劑灌注與相關鑿井費用。