



行政院環境保護署

109 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

新型光纖光柵高解析監測技術於深層 水文地質參數異質場調查技術之發展

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： 109 年 01 月 30 日起至
109 年 12 月 04 日止

中 華 民 國 109 年 12 月 印製



專案名稱 新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數異質場調查技術之發展
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	專案技術編碼	_LAB_-_S_-_I_-_C1_-_P_ (如非實驗性質含氯溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件1-4)
專案類別(單選)	☐ 研究型 ☒ 模場型	研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他
申請機構系所	國立交通大學土木工程研究所		
機構地址	新竹市大學路1001號工程二館		
專案主持人	張良正	職等／職稱	教授
協同主持人	蔡瑞彬	職等／職稱	助理教授
協同主持人	何彥德	職等／職稱	總經理
協同主持人	董天行	職等／職稱	經理
協同主持人	王子賓	職等／職稱	助理教授
專案名稱	中文	新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數質場調查技術之發展	
	英文	Development of a novel technology to identify the heterogeneity of deep aquifer using distributed fiber Bragg grating sensors	
	關鍵字	Hydrogeological parameters, fiber Bragg grating sensor, heterogeneity, joint inversion, deep aquifer	
執行期程	自民國 109 年 1 月 30 日起 至民國 109 年 12 月 04 日止		
專案主持人	姓名：張良正 E-mail：專線：03-5731938 lcchang@g2.nctu.edu.tw 手機：0930785471		
專任助理	姓名：張云馨 E-mail：專線：03-5712121#54954 changyunhsin0626@gmail.com 手機：0933593934		



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 總 經 費		第一年 申請金額	第二年 申請金額	編列說明
	1.	人事費用	433,000	600,000	(1~5項相加之50%為限)
	2.	貴重儀器使用含維護費	0	590,000	(與計畫實驗相關)
	3.	消耗性器材與主要費用	1,540,000	2,460,000	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	41,247	200,000	(含差旅與租賃費用)
	5.	雜項費用	76,662	60,000	(1~6項相加之5%為限)
	6.	行政管理費	209,091	391,000	(1~5項相加之10%為限)
	7.	自籌款	0	0	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助金額(1~6項)		2,300,000	4,301,000	總金額：6,601,000
	計畫總金額(1~7項)		2,300,000	4,301,000	總金額：6,601,000

專案主持人(簽名及蓋章)：_____

張良正

日期：109/11/30



**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**

109 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：109 年 10 月 22 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究專案 ☒ 模場試驗
研究主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 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	新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數異質場調查技術之發展		
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	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	1	1	0	1	100%	投稿國內地下水研討會
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0	0	0	預計投稿至Groundwater
		(2)研討會論文	1	1	1	1	100%	已於7月中發表在日本地球物理聯合會年會發表，此為線上會議
	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						
B 人	7.研發人員 (人數)	(1)已開發技術						
		(2)技術平台						
		(1)碩士	2		2	2	100%	
		(2)博士	5		5	5	100%	



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)
才 培 育	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1		1	1	100%	
		(2)跨機構團隊	1		1	1	100%	
		(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						
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	6.促成合作 研究	件數						
		金額(仟元)						



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)
學 研 合 作	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)						
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)
項目								
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）

1. 本研究提出之多深度 FBG 感測器將應用於深層含水層，新開發之 FBG 系統將具有量測含水層水壓、水溫與導電度之功能，且可提取水樣與注水，功能性將較前年度開發之系統更為完善。目前國際上類似設備多為電子式設備，較少光纖產品，電子式設備對在具有易燃液體或氣體之場址存在較高之安全疑慮，而光纖設備因不需通電，因此較不會引起火災與爆炸之疑慮。此外，電子式產品在高水壓條件下，對於防水封裝之要求甚高，因此設備成本也隨之增加。光纖產品則對防水要求則相對較低，故可在防水處理上節省成本。在具有高強酸強鹼污染物之場址，電子式感測器探頭(probe)與纜線較易受損產生裂縫，在高水壓之情況下，水易進入感測器與纜線中，影響觀測精度；而光纖本身對酸鹼之耐受度較佳，因此在相同的環境下仍可維持一定之觀測精度。因此本系統長期之維護平均成本可較電子式設備為低，安全性較佳。由此可知，此系統將較電子式產品更能適用在環境嚴苛的污染場址。由目前蒐集之文獻可知，本研究在地下環境觀測之光纖光柵感測系統上仍處於相對領先之地位。
2. 本研究提出一改良之水力掃描演算法，可有效減少高維度參數推估時之記憶體需求，亦即有效降低參數矩陣維度，可有效減少硬體需求，使得水力掃描在高維度參數推估問題即可在一般個人電腦執行，無須使用伺服器等級電腦進行運算，可有效節省計算資源與成本。



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

審查意見回復對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	■ 研究型 □ 模場型
計畫類別	■ 整治 □ 調查 □ 其它		主持人：張良正 NO：B7
計畫名稱	新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數異質場調查技術之發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一		1. 謝謝委員建議。已補充 FBG 技術於水溫量測之文章 (Drusová et al., 2019)，惟該研究仍在砂箱試驗階段。	
1. 光纖感測為近年來新興發展之感測技術，報告中這類的文獻停留在 1993-2005 之間是否有較新的進展文獻。		2. FBG 感測器在期中前已完成一組 40 公尺深之水溫與水壓計實作，且已經過室內標定，如圖 14 - 17，但並未放置成品圖片，已補充於修正稿中。另，初步成品可由現地試驗的圖 19 中之 FBG 感測器得知。	
2. 計畫的期中查核點「檢視生產 FBG 感測器之進度」，報告中並未完整呈現。		3. FBG 感測器在期中前已完成一組 40 公尺深之水溫與水壓計實作，而室內測試乃指室內標定與溫度影響消除等工作，結果請見圖 14 - 17。	
3. 計畫的期中查核點「檢視 FBG 感測器室內測試之進度」，報告中並未完整呈現。		4. 目前第一個感測器初步成品已完成室內測試，且已超越期中進度到現地進行測試，惟現地井管傾斜，故無法於期中前完成測試。本研究團隊在苗栗現環保局的協助下，已規劃將於 7/21 永貞國小井群進行測試，後續測試結果將於期末報告呈現。	
4. 本計畫後續將完成 FBG 感測器現地測試，由於是強調深層地下水監測技術所以一定要達到至少 30 公尺深度。		5. 謝謝委員意見，本團隊若可在永貞國小井群完成深部含水層水溫水壓測試，將將灌注藥劑進行測試。若 FBG 感測器仍無法在此處井群抵達 30-40m 深度，本團隊將另尋研究場址進行試驗。	
5. 本年度重點之一為 FBG 系統內增加電子式導電度計，為是要直接量測得到藥劑傳輸的情況，因此現地測試時應該配合實際注藥作業。			
委員二		1. 謝謝委員意見。後續本研究將持續完成所有工作項目。	
1. 本計畫報告內容及已完成之研究工作項目符合預定進度。		2. 謝謝委員意見。後續本研究將持續完	



2. 本計畫整體研究成果符合預期、後續執行工作項目及內容說明具體詳盡。 3. 本計畫未來具實場應用性，後續研究成果具獲得專利潛力。 4. 本研究以「新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數質場調查技術之發展」為主要目標，其初期所獲致之研究成果為(1)完成水力掃描演算法改善(2) 新型 FBG 監測系統設計與開發 (3) FBG 感測器室內測試。其中水力掃描演算法改善以二個設計案例進行數值試驗，已獲得穩定結果；新型光纖光柵(FBG)高解析監測系統之開發與測試亦接近預期功能，後續研究應可在此穩定基礎上持續獲得良好成果。	成所有工作項目。 3. 謝謝委員意見。後續本研究將申請新型專利。 4. 謝謝委員意見。後續本研究將持續盡力完成所有工作項目。
委員三 1. 本研究為模場研究，研究目的明確但應在研究設計與研究執行能明確說明規劃，如何整合分析結果於模場模擬應用，仍待提供較明確之流程。 2. 初步結果與討論請分析討論說明，並說明後續進度以及能否銜接後續計畫。	1. 本研究主要透過 FBG 多深度感測器量測注藥過程之水壓變化，再將量得之水壓資料代入水力掃描演算法推估 K 與 Ss 場。惟本年度主要以擴張 FBG 多深度感測器之功能與改善水力掃描演算法為主，現地之模場注藥試驗與參數場推估則規劃於明年進行，詳細說明請見 4.1 節。 2. 謝謝委員意見，目前工作項目已超前原本規劃工作項目，後續本團隊主要之工作項目為(1)尋找可進行 30-40m 深度之觀測井，且井管無變形，可讓 FBG 感測器進行水溫與水壓量測。(2) 完成 FBG 感測器現地注藥測試。後續計畫將可以目前成果為基礎，持續完成後續工作項目。
委員四 1. 此為延續 107 年與 108 年的計畫，已完成期中報告進度查核項目，技術研究成果具前瞻性。已完成 FBG 感測器之改良與研發、水力掃描演算法、FBG 多深度水壓與溫度感測系統測試及現	1. 謝謝委員意見，本團隊將持續盡力完成所有工作項目。 2. 謝謝委員意見，此部份將於期末報告說明。目前感測器設計為配合環保署既有觀測井，因此需應用在全開篩的兩吋井中，若需應用在較大的井中，則



地量測。 2. 建議在期末報告討論FBG研發技術應用於實場的限制條件及誤差範圍。 3. 建議FBG感測器室內與室外測試地點能涵蓋不同的水文地質特徵及水力條件，以針對未來於不同污染實場的應用及提高預測精確度。 4. 本計畫編列兩年期經費，但第二年之研究規劃內容仍未詳細說明。	分層阻隔器(黑色橡膠模)需再調整方能進行應用。誤差範圍(感測器精度)將於五組水壓與水溫感測器標定曲線完成後進行計算，此部份將呈現於期末報告中。 3. 謝謝委員意見，室內試驗的部分主要是透過恆濕恆溫箱與壓力桶進行感測器的環境變化忍受力測試，而現地試驗主要配合現地注藥進行量測。因本研究預算有限，將先完成本研究之工作項目，若有餘力，則將繼續尋找其他環保署深層觀測井，以進行感測器測試。 4. 第二年初步之工作說明請見4.1節，而第二年之工作項目參考計劃書撰寫說明未置入期中報告中。第二年之細部工作說明將於第二年之工作執行計劃書中呈現。
委員五 本期中報告工作內容及成果符合計畫要求。	謝謝委員意見，本團隊將持續盡力完成所有工作項目。
委員六 1. 光纖光柵觀測系統(FBG)加入注藥功能後，是否能在一般監測井執行水力掃描作業。 2. 圖8藍色數字模糊無法辨識。 3. 於6月中進行30米儀器之測試，現場是否仍有井管變形或因重力影響測試結果。	1. 加入注藥功能後之FBG觀測系統除了擁有原本的水溫與水壓觀測功能外，還可進行注藥，如此將無須另外鑽鑿一口注藥井，可有效降低水力掃描所需成本。因此此系統仍可應用於一般監測井(2吋全開篩觀測井)進行水力掃描，並提升水力掃描之執行效率。 2. 謝謝委員意見，已修正藍色數字之解析度。 3. 目前六月中測試結果呈現永貞宮前方井群皆已變形，FBG感測器均無法抵達30m。目前透過苗栗縣環保局協助，將於7月21日前往永貞國小井群進行現地測試，後續測試結果將呈現於期末報告中。



專案主持人：張良正 (簽名及蓋章)



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 **審查意見回復對照表**

計畫年度	109 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：張良正 NO：B7	
計畫名稱	新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數異質場調查技術之發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 此為延續 107 年與 108 年的計畫，已完成期末報告進度所有查核項目，技術研究成果具前瞻性。已完成 FBG 感測器之改良與研發、水力掃描演算法、FBG 可進行多深度水壓與溫度感測系統測試及現地量測。 2. 期末報告討論 FBG 研發技術可應用於實場的測值，但仍未能克服耐酸與抗腐蝕能力，建議可先測地下水之 pH 值，以免破壞 FBG 儀器。 3. FBG 感測器已進行室內與三場室外測試地點，顯示能涵蓋不同的水文地質特徵及水力條件，可針對未來於不同污染實場的應用及提高預測精確度。 4. 計畫團隊堅強，對結果之解讀有幫助。 5. 成果已完成 FBG 感測器，水力掃描演算法，可執行多深度水壓與水溫，現地量測。 6. 應用於實場測值，在砂土與黏土地層下 K 值變異很大，在現地監測時如何解讀其準確度？ 7. 克服與耐酸與抗腐蝕可作替代方案解決。 8. 商品化之可能性評估及預期之價格(建議在 100 萬元以內)。 9. 建議說明未來所有測值在整治處理中注藥所產生變化解讀之技術。		1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。 3. 謝謝委員建議，本計畫明年度在計畫開始後，將先量測 PH 值，以作為 FBG 感測器改善抗酸鹼之依據。 4. 謝謝委員意見。 5. 謝謝委員意見。 6. 謝謝委員意見，本研究主要透過注水/藥擾動含水層，再透過多深度 FBG 井群蒐集水位資料，之後將水位資料代入水力掃描演算法中，建立三維水文地質參數場。而多深度 FBG 觀測系統可觀測多深度水位，若感測器與注水點之間為高透水性土壤，則其水位反應將比較劇烈，反之，若為低透水性土壤，則其水位反應將較為緩和。故水力掃描演算法將萃取水位資料建立 K 場，並可計算求得推估不確定性，而此推估不確定性即為推估 K 值解讀的準確度。 7. 感謝委員意見，本計畫目前所使用之 FBG 感測器均先經過室內浸泡酸鹼測試後，再於現場進行各項量測實驗，且實驗結果良好。下年度將視現場量測 Ph 值持續進行製程改善與進行耐久性測試。 8. 感謝委員意見，FBG 觀測系統已朝向商品化研發、設計、生產與測試，已經具有可銷售商品化產品之雛形。FBG	



	感測系統的銷售金額將依據研發成本、製造成本、需求數量與市場競爭性來訂定，後續將進行各項成本統計與銷售評估，產品銷售價格將訂在市場可接受範圍內。 9. 感謝委員意見，本研究開發之 FBG 多深度觀測系統在注藥期間所量測之水位資料，在輸入水力掃描演算法後，可將其轉換為三維 K 場，後續工作人員將可依據 K 場結合數值模式，模擬藥劑灌注後的流布，以確保藥劑可與污染團接觸，達到精準整治之成效。
委員二 1. 本年度執行進度及成果應符計畫需求，但本研究重點是要能發展出實用的技術，以供土壤及地下水污染整治之用，故第二年的工作極為重要，但在實驗後感測器發生腐蝕情況需研究解決的改善方案。	1. 感謝委員意見，本計畫目前所使用之 FBG 感測器均先經過室內浸泡酸鹼測試後，再於現場進行各項量測實驗，且實驗結果良好。下年度將視現場量測 Ph 值持續進行製程改善與進行耐久性測試。
委員三 1. 本計畫以「新型光纖光柵高解析監測技術於深層水文地質參數質場調查技術之發展」為標的，進行為期 2 年的研究發展，本計畫已完成第 1 年之工作項目，新開發完成的 FBG 系統具有量測含水層水壓、水溫與導電度之功能，且具有可提取水樣與注水的功能，其研究(實驗)項目、進度與成果報告等符合原訂計畫規劃目標與期程，並如期提出第 1 年度期末報告。 2. 本計畫第 1 年度研發工作獲得下列成	1. 感謝委員意見。 2. 感謝委員意見。 3. (1)感謝委員意見，本系統未來可考慮進行長時間觀測，但仍因為試驗場址緊鄰馬路，在試驗期間往往需要封路，因此在施行上恐有不便。若要進行此測試恐需尋找更合適之場址。下一年度因為需要進行水力掃描與地球物理聯合調查，預計至少可連續觀測兩天到三天。 (2)感謝委員意見，本系統相較於前期計畫已在可彎曲性上進行大幅度改善，目前已將各類感測棒(含 packer)進行模組化，各個感測棒可透過光纖與注水管



果： (1)完成可應用於 40m 深之光纖光柵 (FBG)多深度水壓、水溫與電子式導電度觀測系統之開發，並進行三次現場測試(一次淺層與兩次深層含水層)，以確認此系統確實可於既有之有觀測井進行多深度量測。 (2)本研究現場測試結果發現於注水功能在阻塞之濾管位置應可達到類似洗井之效果，現場測試注水後之多深度水壓變化資料已可初步研判井與井之間的水文地質改變狀況。 (3)本研究水力掃描演算法加入 SVD 降低參數維度與加入系統誤差後，已可大幅降低計算量，且收斂性亦同時改善，使整體之計算性能更提升。 (4)本計畫第 1 年度研發工作成果具體、豐碩，為第 2 年度之研發奠定良好基礎，對於本技術後續應用與推展具有正面意義。 3. 針對本計畫目前之研究成效與第 1 年度期末報告及後續計畫建議考量： (1)新開發完成的 FBG 系統監測井實測時間是否適度延長(放置於井內 1 至數天)，以確認其運作之穩定性。 (2)由於井管彎曲變形導致 FBG 系統設備無法放置到預定深度，是否可藉由 FBG 系統材料(採用可撓性材料)及系統迷你化設計等措施獲得改善。	及鋼纜連接，已大幅增加觀測系統適應彎曲井管的情況，但因為四合一感測棒（溫度、水壓、導電度與注水）長度約 50cm，故對井管彎曲條件的限制較大，其餘感測棒已經改良至 30 公分左右，對於井管彎曲的限制相對較小。
委員四 1. 有實體之物件生產裝配出來。 2. 曾至實場進行三次以上之測試，並進行數據收集與設備參數調校。 3. 以實例展示新的演算法所具優勢，並分析討論。	1. 感謝委員意見。 2. 感謝委員意見。 3. 感謝委員意見。 4. 感謝委員意見，遵照辦理。



4. 於成果發表會設攤，展示成品，並媒合可能的使用場域與客戶。	
委員五 1. 研究進度符合期末報告查核內容。 2. 第二次量測，僅測一井，原因是？結果顯示水壓記載三種深度(14m，24m，34m)的水壓力(4kPa，10kPa，11kPa)，建戲補充說明(1)實驗日前後的氣象降雨資料、(2)24m，及34m水壓呈現的地質條件影響？同時是否有測試溫度，請說明。 3. 第三次量測，進行二個井測量，各井的相對位置是否具有結果關聯性，各井測與第二次結果之間的差異性，若附近有抽水行為發生會影響量測結果，因此可否界定為確保數據有效性周邊地下水文不受擾動的範圍？建議補充說明實驗日前後的氣象降雨資料。 4. 建議結論部分可進一步說明未來實場應用的實用性與限制性，及其他可結合的技術。	1. 感謝委員意見。 2. (1)因為第一次測試時主要目的為測試各種類別感測棒，且以壓力、溫度、導電度量測與灌注系統功能測試為主，故先以一口井進行全系統測試，並透過此次測試建立現場量測 SOP，以作為第三次與下一年度的現場調查之依據。此次試驗並無降雨。 (2)24m 與 34m 呈現的水壓變化一致且壓力差僅 1kPa，代表兩深度之間的水壓連通性佳，此現象應是反應壓力透過濾料層傳遞之結果。當天有同步進行溫度資料觀測，惟部分溫度感測器之光纜遭路過車輛碾壓，訊號損失較為嚴重，故未將溫度資料置於報告中。 3. 此兩井位置相距約五公尺，感測器配置深度相同。第三次試驗觀測到的水位變化與第二次有所差異，主要因為觀測時間不同，第二次觀測時間點主要在下班後，第三次觀測則在下午三點多，因此觀測到水位下降情況。因為其水位下降斜率穩定，可視為背景訊號處理，故對於後續水力掃描的分析影響不大。試驗當日無降雨。 4. 本系統的限制主要需要供電與供水（灌注系統使用），若場域無法穩定供電與穩定供水，則較不利於本系統進行觀測與灌注，但考量污染場址多為工廠，故此限制應相對較小。此外，此系統感測器主要透過光纜進行連接，故場域內若有大型車輛移動，則應避免光纜被車輛碾壓，以避免訊號損失或斷訊情況發生。此系統可視為一多功能井下觀測平台，後續可依據需求進行觀測項目之擴



充，此外亦可進行水質採樣，故可提供地球化學等相關研究分析之用。

專案主持人：

張良正

(簽名及蓋章)



摘要

為了預測藥劑與污染團在深層含水層的移動路徑，求得高解析度的三維水文地質參數場是相當重要的，然而傳統的抽水試驗與微水試驗因為其理論假設與現地特性不符，因此無法求得真實參數異質場。因此，建立一個新技術來調查深層含水層的水文地質參數場實為刻不容緩。本研究將以本團隊於前期土基會計畫「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」之研究成果為基礎，發展新的深層三維參數場調查技術，此技術包含三個部分：(1)光纖光柵(FBG)系統改善：此部分包含修改橡皮膜與感測器以適應深層含水層的水壓、加入水質感測器以直接觀測整治藥劑的移動情況，及加入注藥管以在調查階段即可利用觀測井進行水力掃描。(2)奇異值分解：此方法將用於水力掃描演算法中，以降低現地案例分析時之大量計算量需求。(3)分布式光纖感測器(DTS)：在本計畫第二年時，此設備將用來量測高解析度的井內溫度剖面，這些觀測將用於改善水力掃描的推估結果。目前開發之感測器包含四種不同功能，除了可以依需求串接進行水壓、水溫與導電度的量測外，還可於特定深度注水。本研究已於10月12日與11月2日完成34m深之多深度水壓、水溫與導電度現場測試，且亦同時完成注水測試。現場測試結果顯示水壓呈現明顯分層差異，在注水後水壓、溫度與導電度均呈現顯著變化，顯示系統可達到預期目標。在水力斷層掃描演算法改善部分，本研究已經完成程式開發與數值試驗，數值試驗結果顯示新演算法的穩定度與收斂性更佳，且由設計案例之分析結果可知，新演算法可已改善計算量與提升收斂速度，因此可有效減少反演的時間，提升計算效率。本研究將於下一年度完成水力掃描後，以現場試驗資料進行演算法測試分析。



Abstract

To access and predict the movement of the plume and agent in the deep aquifers, understanding the detailed hydrogeological parameters fields is essential. However, using the traditional pumping test and slug test to develop these three-dimensional parameter fields is impossible due to their unrealistic assumptions. Accordingly, developing new technology to identifying the three-dimensional hydrogeological parameter fields is urgent, and we will develop a new method based on the project results “Development of a novel technology to identify the heterogeneous hydrogeological and geothermal parameters by using multi-depths fiber Bragg grating sensors” funded by Taiwanese EPA. The newly developed technology consists of three parts: (1) Improvement of the fiber Bragg grating sensing (FBG) system: including the adjustment of the rubber packer, piezometer, and thermometer to adapt to the high groundwater pressure. Electronic water quality sensors will also be installed into the FBG system to directly observe the movement of remediation agent. To conduct hydraulic tomography (HT) using groundwater monitoring wells in the early stage of remediation, several injection tubes will be installed in the new FBG system. (2) Singular value decomposition: This method will be used to reduce HT’s computational loading for the field case study. (3) Distributed temperature sensor (DTS): In the second year, we will use DTS to measure the temperature in the wells with high spatial resolution, and the measurements will be used to improve the estimate of hydrogeological parameters from HT using head data. Currently, the developed FBG system has multiple functions, including the measurements of pressure, temperature, electrical conductivity, and liquid injection. We have examined this FBG system in the study site. This system was installed in a monitoring well to measure the groundwater pressure, temperature, electrical conductivity at the depth of 14m, 24m, and 34m. The water injection function was also tested at the depth of 34 m. The change in pressure, temperature, and electrical conductivity is significant during the stress period. This results show the FBG system is practical. For the improvement of HT, we have complete two numerical experiments, and the results indicate that the newly proposed method is more stable and convergent than the original algorithm and has an 18.4% decrease in the computation loading, and about 5 times decrease in the inversion iteration. Accordingly, the performance is much improved. In the next year, we will use the field data to examine the new method after HT is conducted in the study site.



目次

(一)前言	1
(二)研究目的	2
(三)文獻探討	3
(四)研究方法與過程	5
4.1 研究執行流程	5
4.2 現地資料蒐集	8
4.3 光纖光柵原理	13
4.4 光纖光柵感測器改良與研發	14
4.5 水力掃描演算法	16
4.6 水力掃描演算法改善說明	22
(五)結果與討論	24
5.1 多深度水壓與溫度感測系統測試	24
5.2 多深度水壓與溫度感測系統現地量測	29
5.3 水力掃描數值試驗成果	54
5.4 結論與建議	63
(六)參考文獻	64



圖次

圖 1 研究執行流程圖	5
圖 2 模場地理位置圖	8
圖 3 模場井位示意圖	10
圖 4 第一階段灌注完成後 YEW-5 對 YEW-4 導電率時序分析	11
圖 5 光纖光柵感測機制示意圖	14
圖 6 光纖光柵串列反射原理示意圖	14
圖 7 深層光纖光柵多深度監測初步設計圖	16
圖 8 砂箱實體圖	17
圖 9 K 場分佈圖 (a)以克利金內差推估之 K 場 (b)以水力掃描推估之 K 場	18
圖 10 實驗與推估之貫穿曲線比較圖	19
圖 11 美國達拉斯一處污染場址之井位配置圖	20
圖 12 以水力掃描融合水位與流速推估 K 場	21
圖 13 Type A 感測器(水壓計與溫度計)	25
圖 14 Type B 感測器(水壓計、溫度計與灌水(藥)管路)	25
圖 15 Type D 感測器(水壓計、溫度計、導電度與灌水(藥)管路)	26
圖 16 壓力桶	27
圖 17 水壓計標定結果	27
圖 18 水壓計本體 12 小時讀數	28
圖 19 溫度計 12 小時讀數	28
圖 20 水壓計消除溫度影響 12 小時讀數	28
圖 21 監測井孔位定位圖	30
圖 22 現場量測圖	30
圖 23 K00266 壓力	31
圖 24 K00266 溫度變化	31
圖 25 K00262 壓力	32
圖 26 K00262 溫度變化	32
圖 27 K00264 壓力	33
圖 28 K00264 溫度變化	33
圖 29 現地出水管路安裝與位置圖	35
圖 30 YEW-2 感測器孔內安裝完成圖	36
圖 31 導電度計解讀儀連接電腦	36



圖 32	光纖光柵解讀儀與電子式導電度計自動化紀錄	36
圖 33	現場水壓量測結果	37
圖 34	現場導電度量測結果	37
圖 35	實驗後感測器腐蝕情況	41
圖 36	YEW-2 14 米第一次灌水水壓變化圖	42
圖 37	YEW-2 24 米第一次灌水水壓變化圖	42
圖 38	YEW-2 34 米第一次灌水水壓變化圖	43
圖 39	YEW-3 14 米第一次灌水水壓變化圖	43
圖 40	YEW-3 24 米第一次灌水水壓變化圖	44
圖 41	YEW-3 34 米第一次灌水水壓變化圖	44
圖 42	YEW-2 14 米第一次灌水水溫變化圖	45
圖 43	YEW-2 24 米第一次灌水水溫變化圖	45
圖 44	YEW-2 34 米第一次灌水水溫變化圖	46
圖 45	YEW-3 14 米第一次灌水水溫變化圖	46
圖 46	YEW-3 24 米第一次灌水水溫變化圖	47
圖 47	YEW-3 34 米第一次灌水水溫變化圖	47
圖 48	YEW-2 14 米第二次灌水水壓變化圖	48
圖 49	YEW-2 24 米第二次灌水水壓變化圖	48
圖 50	YEW-2 34 米第二次灌水水壓變化圖	49
圖 51	YEW-3 14 米第二次灌水水壓變化圖	49
圖 52	YEW-3 24 米第二次灌水水壓變化圖	50
圖 53	YEW-3 34 米第二次灌水水壓變化圖	50
圖 54	YEW-2 14 米第二次灌水水溫變化圖	51
圖 55	YEW-2 24 米第二次灌水水溫變化圖	51
圖 56	YEW-2 34 米第二次灌水水溫變化圖	52
圖 57	YEW-3 14 米第二次灌水水溫變化圖	52
圖 58	YEW-3 24 米第二次灌水水溫變化圖	53
圖 59	YEW-3 34 米第二次灌水水溫變化圖	53
圖 60	設計之傳導係數 T (m^2/day) 場	55
圖 61	以原始 SLE 演算法與無資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m^2/day) 場	57
圖 62	以新演算法與無資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m^2/day) 場 ...	58



圖 63 以原始 SLE 演算法與含資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m^2/day) 場.....	60
圖 64 以新演算法與含資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m^2/day)場.....	61



表次

表 1	本年度研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	6
表 2	場址鑽探資料與水力分析	9
表 3	第一階段 AIW1~6 井灌注後監測井污染濃度	12
表 4	可模組化 3 種不同功能串列式感測器	24
表 5	感測安裝深度與功能	34
表 6	灌水時間與流量表	35
表 7	灌水期間不同深度感測器最大變化量	35
表 8	感測安裝深度與功能	39
表 9	注水時間與流量表	39
表 10	第一次注水期間不同深度感測器最大變化量	40
表 11	第二次注水期間不同深度感測器最大變化量	40



(一)前言

深層含水層常作為地下水使用的來源，一旦遭受地下水污染將立即影響供水安全性，同時地下水復育亦將面臨極大的挑戰。國內已發現幾處含氯有機物(DNAPL)大尺度深層污染場址，如中港溪南北岸之滯水層(污染深度約達地表下 35 公尺)與第二含水層(污染深度約達地表下 90 公尺)、臺中潭子加工區區內與區外場址(污染深度約達地表下 70~80 公尺)、屏東新埤鄉場址(污染深度超過地表下 80 公尺)等。環保主管機關面對深層含水層遭受污染問題，除進行必要之行政管制措施(如劃定限制使用區或公告為管制區)，依照土污法的立法精神，仍須要求相關污染行為人或土地關係人執行污染改善，或由環保主管機關針對無主污染場址(如中港溪南岸場址、屏東新埤鄉場址)執行相關污染改善與風險控管工作。

由於深層含水層之調查與整治難度均比淺層含水層困難許多，考量整治經費之合理性分配，以及深層含水層整治的門檻難度，一般會優先處理污染熱區或高污染區，及針對局部污染團進行侷限攔截，而大範圍之地下水污染團則多會評估應用加強式自然衰減(Enhanced Natural Attenuation, ENA)或監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)之可行性，亦即結合地下水長期管理與各式監控與降低風險方案。無論改善區域或地下水監測管理區域，均必須能有效掌握污染與水文地質的關係，方能精確界定污染分布與預測後續污染發展。一般而言，越是深層的水文地質變化將越不容易掌握，且相應之調查人力與成本必定越高，傳統之調查方法，如鑽探調查、水文試驗(單深度微水試驗或多深度微水試驗)、單井流速流向測定、多重式井測(γ 射線)、示蹤劑試驗及地電阻影響法等，除調查時間冗長、昂貴，且很可能遇到探測深度受限(如水文試驗或單井流速流向測定等技術)的問題，或僅能獲得點、面或相當侷限範圍的資料。一般抽水試驗雖可獲得較大範圍之水文地質參數(如抽水試驗可獲得流通係數 T 值或水力傳導係數 K 值、比出水量 S_y 值、儲水係數 S 值等)及相關水文地質邊界，然而深層抽水試驗耗時長且昂貴，且可能因大量抽水(抽出水須另行處理)而改變污染團分佈或因地質滲透性不佳而不易維持穩定抽水量，並僅能求得「單一」參數值，亦即無法描述含水層水文地質空間變化。為此，本研究擬透過「研發與改良光纖光柵監測系統」和「改善水力掃描演算法」來建構高解析度的場址深層水文地質調查技術，為後續整治系統之最佳化奠定穩固的基礎。



(二)研究目的

本研究以107-108年度土壤及地下水污染基金管理會模場型研究計畫「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」的研究成果為基礎，發展深層水文地質參數異質場調查技術，此技術包含三個部分：

- 一、研發與改良光纖光柵監測系統：本團隊於前期計畫已發展出適用在淺層含水層的光纖光柵監測系統，本期計畫本團隊將以此成果為基礎，改良該系統的感測器和阻隔器，使該系統能夠適用在30-40公尺之深層含水層。為了直接量測得到藥劑傳輸的情況，本研究將在 FBG 系統內增加電子式導電度計，透過量測地下水導電度以了解藥劑傳輸情形；為了要在調查階段或整治初期就能進行水力掃描求得 K 場，本研究規劃在 FBG 系統增加灌注功能，方能直接在簡易井、觀測井進行特定深度範圍的循序灌注，蒐集水力掃描所需的地下水壓力和溫度觀測。
- 二、改善水力掃描演算法：為了有效減少計算資源（如記憶體）的需求，降低電腦設備的硬體需求門檻，本研究將於水力掃描的演算法中整合 SVD 演算法，以降低水力掃描演算法之變異數與互共變異數參數矩陣維度，有效降低硬體需求。
- 三、高解析度溫度觀測：本研究將使用分散式光纖溫度感測器(Distributed temperature sensor, DTS)於場址中之觀測井進行井內溫度量測，以獲取地層高解析度與高精度之時序溫度剖面資料，提供三維水文地質參數場推估使用。



(三)文獻探討

為求得精確的深層含水層地下水流場，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開篩段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。為了在同一鑽孔求得多深度的溫度與壓力觀測，本研究團隊於 107 年度計畫中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。

光纖感測為近年來新興發展之感測技術 (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 μm 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。若光纖感測系統與電腦及通訊系統結合，監測數據即可以進行即時傳輸或記錄。本團隊執行「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」，已成功開發出多深度光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)監測系統，可同時觀測地下水溫與水壓，惟此系統目前設計之橡皮模(rubber packer)與感測器僅適用於水深 15 公尺以內，若欲應用於深層含水層，則仍須進一步調整方能應用於實場中。此外，此系統需搭配注藥井方能執行水力掃描，因此僅能在整治階段使用本系統，在調查階段因為無注藥井故無法使用此系統。而此系統亦無法直接量測藥劑之導電度或濃度，故無法直接觀察藥劑的傳輸情況。由此可知，若欲在調查階段即進行三維水文地質參數調查，則系統仍需進一步改良。

除了建置可觀測多井多深度之水溫與水壓光纖光柵觀測系統外，尚需建立一個可將水溫與水壓轉換為三維水文地質參數之演算法，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，並可進一步依據模擬結果，調整藥劑的流量，注藥的



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

位置與地點，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為參數場的空間分布恐怕不切實際。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，發展深層三維水文地質參數場的推估技術。

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。惟此技術應用在實場時，往往需要大量的計算資源，因此需要伺服器等級以上的電腦方能完成分析。

為了增加水力掃描推估參數的精度，本研究在試驗過程中將加入分布式光纖溫度感測器，量測高解析度的溫度剖面，並將溫度量測結果加入水力掃描演算法中改善參數的推估結果(以 108 年度計畫中開發之資料融合演算法)。而以溫度來做為示踪劑的作法已經是個相對成熟的作法，可提供水位以外的其他資訊(Anderson, 2005)，例如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。本研究將利用溫度作為示踪劑，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，再以此溫度差異與水壓進行水文地質參數之聯合反演。

為了求得深層含水層的三維水文地質參數場，本研究將以「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」之成果為基礎，進行兩個主軸研究：(1) 改良光纖光柵感測系統，使其可應用於深層含水層，並於調查階段即可進行水力掃描。(2) 改善水力掃描演算法，使其可應用一般電腦進行實場分析。此外，本研究將同時融合水壓與水溫觀測資料，以提高參數推估之精度。



(四)研究方法與過程

4.1 研究執行流程

本研究之研究流程如圖 1 所示。本研究分為兩大部分，第一部分為新型光纖光柵感測器之改良，第二部分為水力掃描演算法之改善。在光纖光柵感測器的改良上，本研究將以 107 年度計畫之研究成果為基礎，開發可應用於深層含水層之光纖光柵感測系統，同時增加藥劑灌注與量測水質（如導電度）之功能，並於第一年度完成實驗室與現地測試。第二年則將此系統應用於注藥試驗，蒐集注藥過程中之水壓、水溫與水質等資料，以作為水力掃描分析之用。第二部分則為改良水力掃描之演算法，將龐大的參數共變異矩陣以 SVD 分解，降低參數矩陣維度，以有效降低計算資源（如記憶體）的需求。本研究第一年將完成水力掃描演算法之改良，並以數值試驗測試改良後的水力掃描演算法，再於第二年以此演算法推估模場之三維水文地質參數場。為了增加推估 K 場之精度，本研究將在第二年注藥試驗加入 DTS 感測器，量測觀測井在垂向上的高解度時序溫度變化，並將此溫度觀測加入水力掃描演算法中，以提升 K 場之推估精度。除了 DTS 量測外，本研究在第二年進行注藥試驗時，將同步進行跨孔井下地電阻量測，以觀測注藥過程藥劑在地下之流動情況。最後，本研究將以時序地電阻變化率剖面與 DTS 時序溫度資料檢驗推估 K 場之合理性。

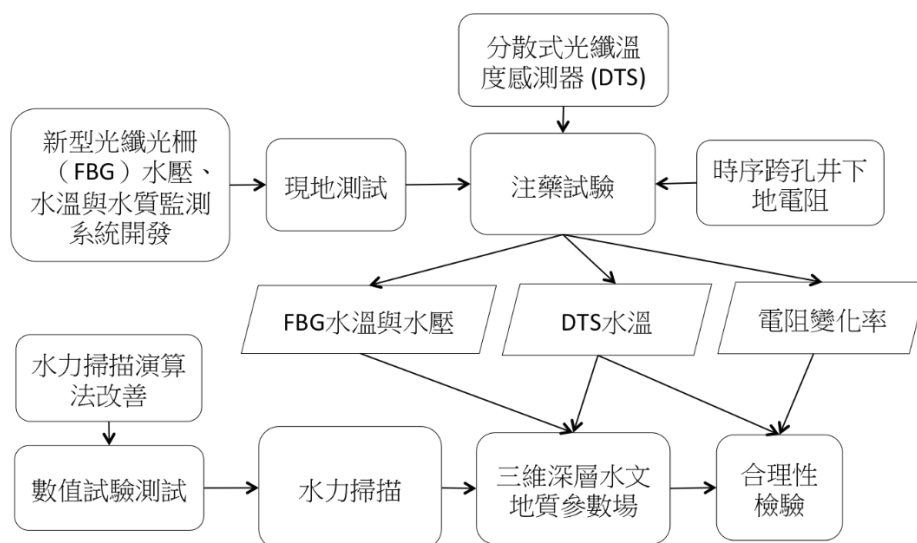


圖 1 研究執行流程圖



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

表 1 本年度研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月	109 1	109 2	109 3	109 4	109 5	109 6	109 7	109 8	109 9	109 10	109 11	109 12	備 註
工作項目													
新型 FBG 監測系統設計 與開發						※					※		
生產 FBG 感測器5支						※					※		
FBG 感測器室內測試						※					※		奇 博 科 技 實 驗 室 內 測 試
FBG 感測器現地測試												※	永 貞 宮 場 址 測 試
水力掃描演算法改善						※							
水力掃描演算法數值試 驗						※					※		
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5 %	15 %	25 %	35 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	100 %	
預定查核點	期中 1. 完成水力掃描演算法改善 2. 檢視新型 FBG 監測系統設計與開發之進度 3. 檢視生產 FBG 感測器之進度 4. 檢視 FBG 感測器室內測試之進度 5. 檢視水力掃描演算法數值試驗之進度												



研究方法與過程(含工作進度與甘特圖)

	期末	1. 完成新型 FBG 監測系統設計與開發 2. 完成 FBG 感測器5支製造 3. 完成 FBG 感測器室內測試 4. 完成 FBG 感測器現地測試 5. 完成水力掃描演算法數值試驗
說明： 1、 工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3、 「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。		



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

4.2 現地資料蒐集

4.2.1 研究場址概述

本場址位於苗栗縣頭份鎮田寮里 134 號永貞宮前方空地(圖 2)，場址東側毗鄰頭份工業區台灣氣乙烯頭份廠。民國 98 年 9 月 28 日環保署已公告本場址(頭份鎮永貞段 281 地號)為地下水為受污染使用限制地區(府環水字第 0987801669 號)。



圖 2 模場地理位置圖

4.2.2 水文地質特徵

場址內之地下水主流方向為東向西流。彙整各計畫於頭份及竹南地區之地質鑽探資料及結果，將地表至地下約 50 公尺之水文地質概況歸納說明如下：

第一層：礫石夾中細砂，偶夾薄泥層—第一自由含水層

本層深度約為地表至地下約 11~22 公尺之間，質地以礫石、礫石夾中細砂為主，部分區域夾有薄泥層或泥質中礫，為此區域之第一自由含水層（非受壓含水層），其水力傳導係數（ K 值）介於 $3.14 \times 10^{-4} \sim 4.08 \times 10^{-3}$ cm/s。

第二層：細砂岩、泥岩、砂質泥岩、泥質砂岩等互層—第一滯水層

本層深度約為第一含水層底部至地表下 18.7~48.9 公尺之間，質地以細粒砂岩與泥岩（粉黏土為主）互層為主，不乏有砂質泥岩、泥質砂岩等夾雜出現，其厚度變化稍大，為典型頭嵙山層之地層質地。本層主要以砂岩、泥岩互層為主，且厚度分布不均，如將各砂岩層視為較有利地下水水平流通之地層，泥岩層視為較有利地下水水平流通之地層，此互為交錯之地層將造成地下水流極其複雜。而本層之地質滲透性相對上下地層而言明顯較



差，但並非屬完全阻水之地層，且下覆之第二含水層已有明顯受壓情形，故應可歸類為半透水層 (semipermeable layer)，或稱為滯水層 (aquitard)，並與上下含水層構成滲漏含水層 (leaky aquifer)。滲漏含水層的上/下（或上與下）界面為滯水層，其滲透性雖比含水層低但仍能讓地下水透過而對含水層形成補注，其 K 值平均值為 1.91×10^{-5} cm/s。

而場址細部鑽探資料與地質材料分析如表 2，可發現深度 20 至 25 m 與 25 至 30 m 的 K 值差約 1000 倍，顯示本場址水文地質複雜程度相當高。

表 2 場址鑽探資料與水力分析

深度(m)	材料粒徑分析(%)			材料分類	水力傳導係數(cm/s)
	Sand	Silt	Clay		
16~18	4	44	52	Silty Clay	3.5×10^{-5}
18~20	75	20	5	Silty Sand	3.2×10^{-3}
20~25	98	2	0	Sand	3.3×10^{-2}
25~26	36	57	7	Sandy Silt	8.4×10^{-5}
26~30	18	60	22	Clayey Silt	7.7×10^{-5}
30~34	62	36	2	Silty Sand	3.4×10^{-4}

4.2.3 污染概述

本場址位於台灣氯乙烯頭份廠下游，上游之台灣氯乙烯頭份廠自公告並開始整治已近二十年，主要污染問題為 DNAPL 地下水污染，因污染問題時間久遠，第一含水層及下方之低滲透性滯水層（約地表下 15 或 20 公尺至 30 公尺）均檢出高濃度含氯有機物質。根據環保署「中港溪地下水污染評估與調查計畫」彙整調查分析結果資料顯示，第一含水層地下水質污染物濃度並未超過管制標準，而滯水層及第二含水層部分，由過去調查資料分析結果證實均已遭受嚴重污染。滯水層監測井 K00266(參照圖 2)過去調查分析數據顯示在地下 18.5、21.5、25.5、28.5、31.0 及 34.4 公尺處均遭受 1,2-DCA ($0.56 \sim 6.84$ mg/L) 及 VC 污染 ($0.078 \sim 13.2$ mg/L)，遍及高/低 K 區地層。

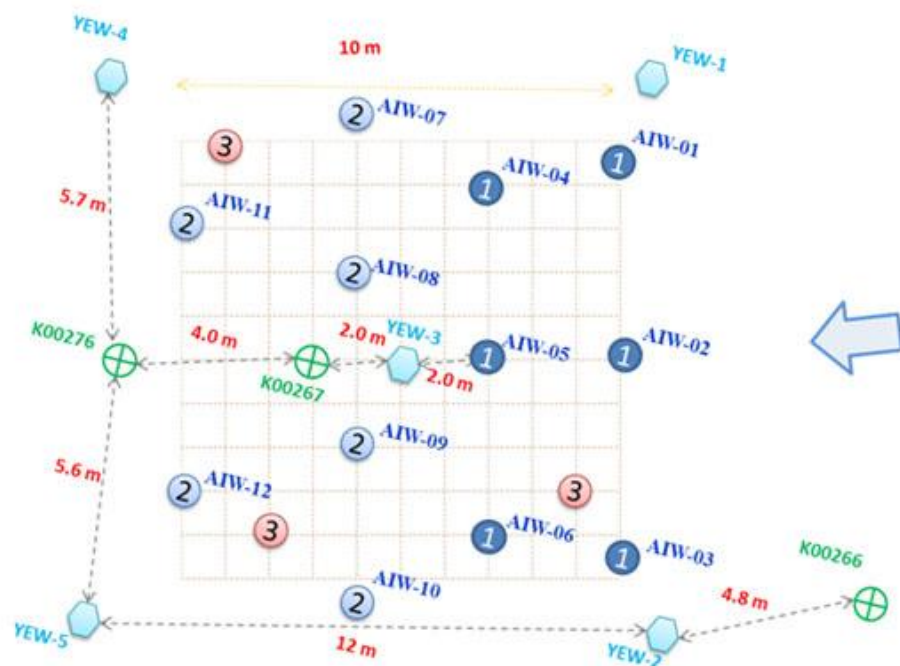


圖 3 模場井位示意圖

環保署「中港溪地下水污染評估與調查計畫」與「地球物理探勘應用於土壤及地下水污染場址之調查驗證作業及整治技術評估計畫」曾於本場址進行滯水層地下水污染改善先導試驗(圖 3)，透過地下水檢測與跨孔式地電阻影像法(Cross-hole Electrical Resistivity Tomography, CHERT)評估雙環塞灌注工法在滯水層灌入整治藥劑後的有效影響範圍。圖 3 中編號 YEW 為地電阻井，AIW 為灌注井，AIW1~6 為第一階段灌注設置，AIW7~12 為第二階段設置。灌注前監測井 K00267 與 K00276 各深度氯乙烯濃度如表 3 所示。由於使用之藥劑配方導電率大於背景地下水五倍以上，故於灌注過程中連續收集 CHERT 資料，可由導電率變化率時序分析評估藥劑流布，第一階段灌注完成後最下游的 YEW-5 對 YEW-4 導電率時序分析如圖 3 所示，圖中顯示深度 18~25 m 導電率明顯增加，但在深度 30 m 附近導電率並未出現顯著增加訊號，灌注後採樣分析亦顯示 K00276 在深度 31.5 m 氯乙烯濃度仍高達 5.687 mg/L，而其他各深度的濃度則顯著下降，研判 AIW1~6 井灌注在深度 30 m 附近無法影響到最下游的 K00276 井。第二階段再增設 AIW7~12 井，灌注後 CHERT 的 YEW-5 對 YEW-4 成果如圖 4 所示，成果顯示在深度 30 m 附近已出現導電率增加的訊號，研判距離 YEW-5 對 YEW-4 剖面約 1 m 的 AIW11 與 AIW12 灌注的藥劑已影響至最下游，後續 K00276 地下水檢測分析各深度的氯乙烯濃度也均降至 0.05 mg/L 以下。

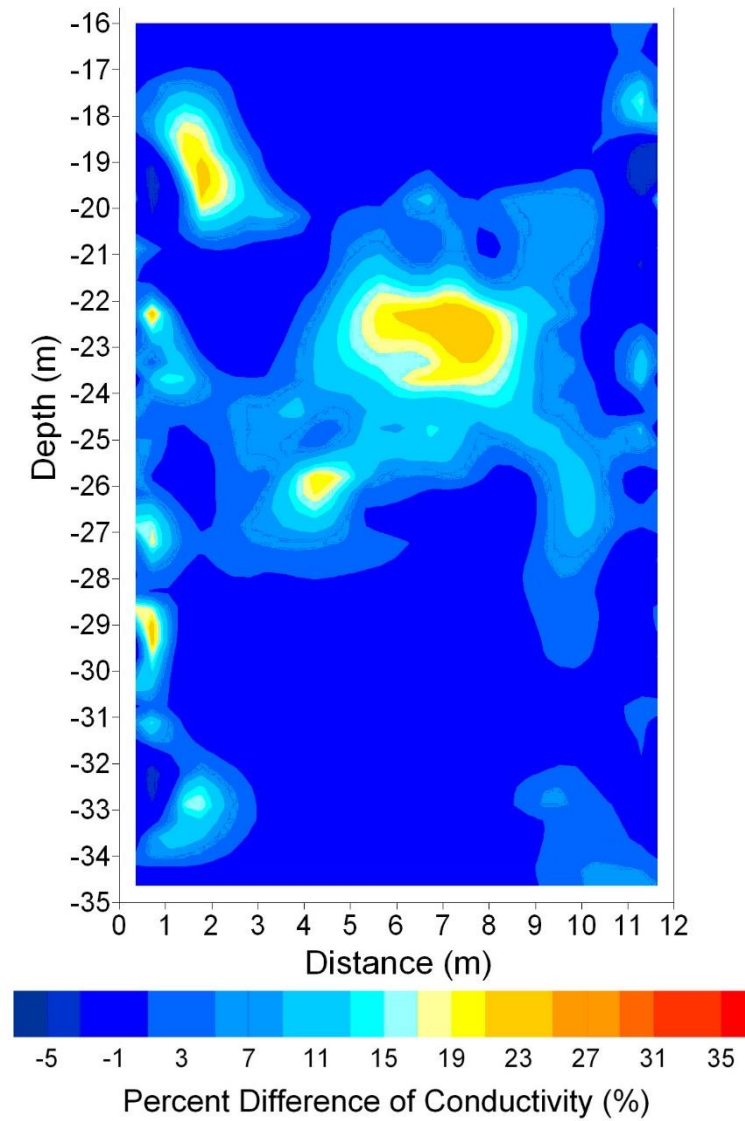


圖 4 第一階段灌注完成後 YEW-5 對 YEW-4 導電率時序分析



表 3 第一階段 AIW1~6 井灌注後監測井污染濃度

分析項目		VC	VC
單位		mg/L	mg/L
管制標準(第二類)		0.020	0.020
井號	深度(m)	第一階段灌注前	第一階段灌注後
K00267-1	17.5	8.328	0.038
K00267-2	19.5	8.631	0.033
K00267-3	21.5	9.841	0.034
K00267-4	23.5	9.267	0.039
K00267-5	25.5	14.341	0.040
K00267-6	27.5	15.839	0.040
K00267-7	29.5	15.391	0.041
K00267-8	31.5	14.257	0.027
K00276-1	17.5	0.524	0.358
K00276-2	19.5	0.896	0.365
K00276-3	21.5	0.978	0.416
K00276-4	23.5	3.494	0.467
K00276-5	25.5	2.368	0.490
K00276-6	27.5	5.658	0.567
K00276-7	29.5	6.891	0.717
K00276-8	31.5	7.769	5.687



4.3 光纖光柵原理

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; Drusová et. al., 2019; 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 μm 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5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 6)，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 $\Delta\Lambda$ ，代入公式(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



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

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

因此

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

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。

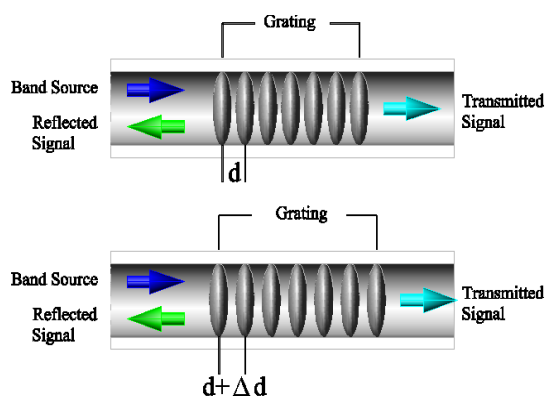


圖 5 光纖光柵感測機制示意圖
(李瑞庭, 2005)

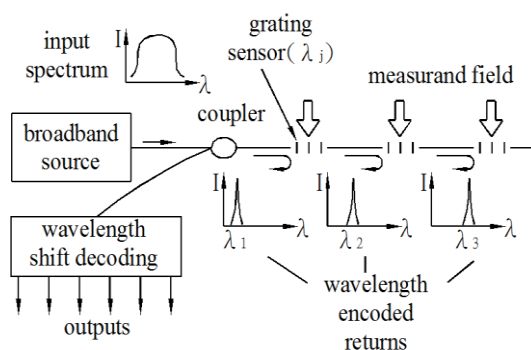


圖 6 光纖光柵串列反射原理示意圖
(Kersey, 1992)

4.4 光纖光柵感測器改良與研發

本研究將改良 107 年度計畫所設計之光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)多功能串列式感測器，以量測深層含水層之水溫、水壓與水質，而此新研發之 FBG 感測器與過去設計最大的不同點共 2 點，分述如下：

第 1 點：FBG 感測器在同一鑽孔特定深度位置可同時進行灌藥(水)與感測器數據量測。

第 2 點：依據目前可使用空間進行規劃與設計，加入電子式水質感測器。

深層 FBG 監測系統之初步設計如圖 7 所示，FBG 感測器各項元件、功能與



安裝方式說明如下：

A. FBG 多功能感測器元件與功能條列如下：

I. FBG 水壓計：用以量測水壓變化	V. 注藥(水)管：灌藥(水)使用
II. FBG 溫度計：用以量測溫度變化	VI. 水質感測器：感測水質變化感測器
III. 充氣管：對皮模加壓充氣使用	VII. 感測器本體：不鏽鋼金屬感測器外殼
IV. 充氣膜：橡皮材質，充氣後撐開隔絕水流流通	VIII. 感測器連接頭：多芯光纖感測器接頭

上述各項元件可以不同數量與深度進行安裝，可依不同現場與量測時間進行不同感測器安裝與應用。灌藥前、灌藥中與灌藥後皆可以進行量測，可得到時序溫度、壓力與水質觀測。

B. 安裝步驟說明如下：

- I. 選擇一既有之水位孔，內有全開節的 PVC 管，PVC 管內徑約 50mm。
- II. 在現場架設空壓機、解讀儀、電腦與電源。
- III. 現地組裝光纖光柵多功能串列式感測器。
- IV. 將組裝完成後之感測器放入現地 PVC 管內之預定安裝深度與位置。
- V. 連接感測器光纜到光纖解讀儀。
- VI. 連接感測器空壓管到空壓機。
- VII. 使用手動或自動空壓機加壓並撐開充氣模、解讀儀訊號讀取與存檔等，進行使用前測試，確認所有系統完善可使用。
- VIII. 在預定灌藥(水)位置進行分段注純水測試，灌入壓力在 $0.01\text{kg/cm}^2 \sim 1\text{kg/cm}^2$ ，確認所有系統反應良好。
- IX. 卸掉空壓機壓力，使得充氣膜壓力歸 0，並等待 10~30 分鐘，使得附近地下水流動趨於穩定。



X. 再次使用手動或自動空壓機加壓並撐開充氣模，設定撐開皮膜壓力約為 $1\sim 2\text{kg/cm}^2$ 。

XI. 進行各項灌藥(水)實驗並且量測相關數據。

此系統除了可進行深層含水層多深度觀測外，還可應用於井管阻塞辨識，可以在單 1 井管某一深度位置進行單點上、下封層的灌水與水壓量測，用以判斷水位管是否堵塞，且可提供日後加藥時，灌藥深度與壓力的參考依據。

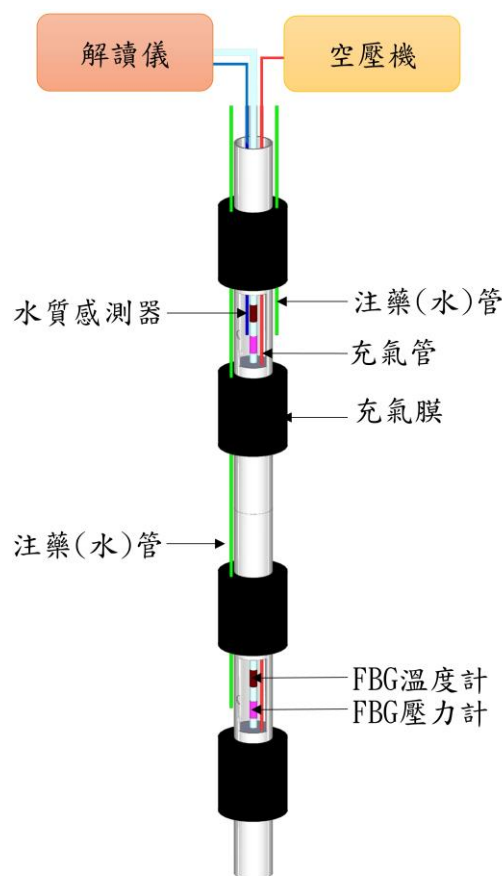


圖 7 深層光纖光柵多深度監測初步設計圖

4.5 水力掃描演算法

在建立三維參數場的推估方法中，水力掃描(Hydraulic tomography, HT)屬於一個理論嚴謹的參數推估方法，其已透過不同尺度的試驗驗證此方法為實際可行，具有能力刻畫現地的參數特徵。HT 為透過抽水井或注水井擾動含水層水位，再由不同位置與不同深度之觀測井群收集水位訊號，如此一來，當一系列之抽水試驗結束後（循序抽水試驗, sequential pumping test），我們將可得到不同抽水井與



研究方法與過程(含工作進度與甘特圖)

觀測井群之水位訊號組合(head dataset)，這些水位組合則包含了抽水井與觀測井間之含水層參數資訊，接著再透過解析程式(Simultaneous successive linear estimate, SimSLE)同時將所有水位訊號轉換為飽和與未飽和含水層參數場，即可完成三維含水層參數場推估。目前 HT 已被廣泛的使用在不同尺度的參數異質場推估中，包含了砂箱尺度(如 Illman et al., 2012)，現地尺度(如 Tso et al., 2015; Zha et al., 2017; Zha et al., 2018)，到盆地尺度(如 Wang et al., 2017)。Illman et al. (2012)以設計砂箱進行污染傳輸實驗(圖 8)，他們依序在不同的位置與深度注入污染物，同時在其他測點量測實驗過程中的水位與污染物濃度，再以 HT 技術推估砂箱內的 K 場分佈(圖 9)，同時再透過觀測的污染物濃度貫穿曲線驗證參數場預測污染物流布的能力。研究結果顯示(圖 10)，HT 相較於其他方法擁有較佳之污染物預測能力，除了點 2 與點 37 靠近砂箱邊界而有較大的推估誤差外，在其餘的觀測點上，無論距離注藥井較遠或較近均能以 HT 推估之參數場準確地預測污染物的貫穿曲線，顯示 HT 相較於其他方法而言，有較佳的參數場推估能力。

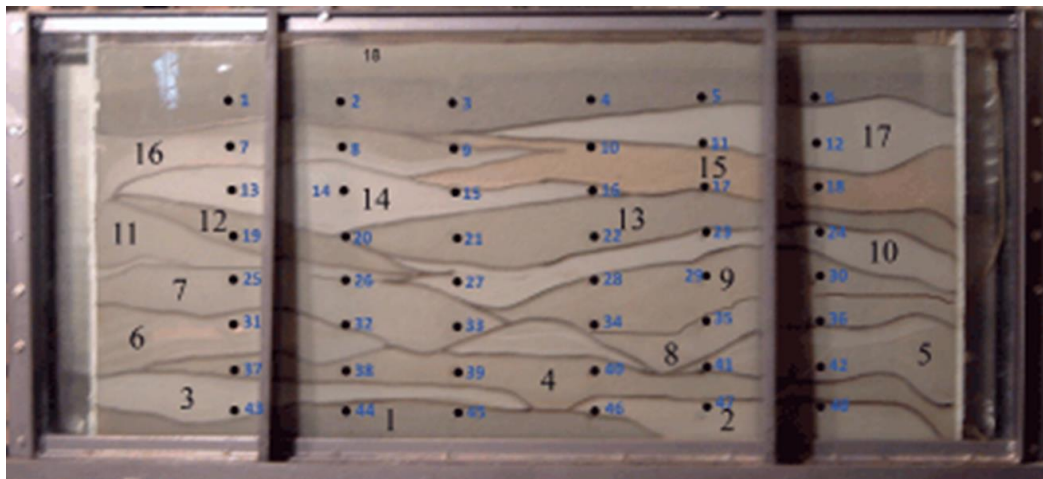


圖 8 砂箱實體圖。黑色數字代表不同的土壤材質。藍色數字為注藥或灌注點的編號，同一點可為觀測或灌注點。

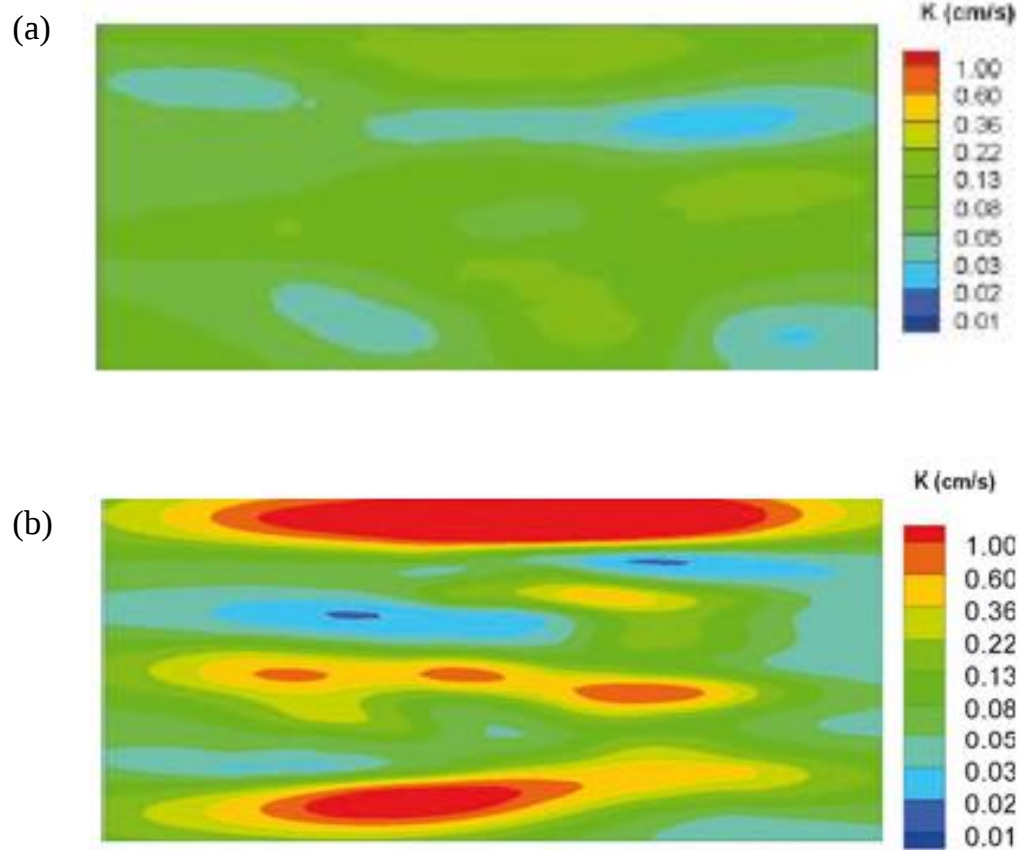


圖 9 K 場分佈圖 (a)以克利金內差推估之 K 場 (b)以水力掃描推估之 K 場

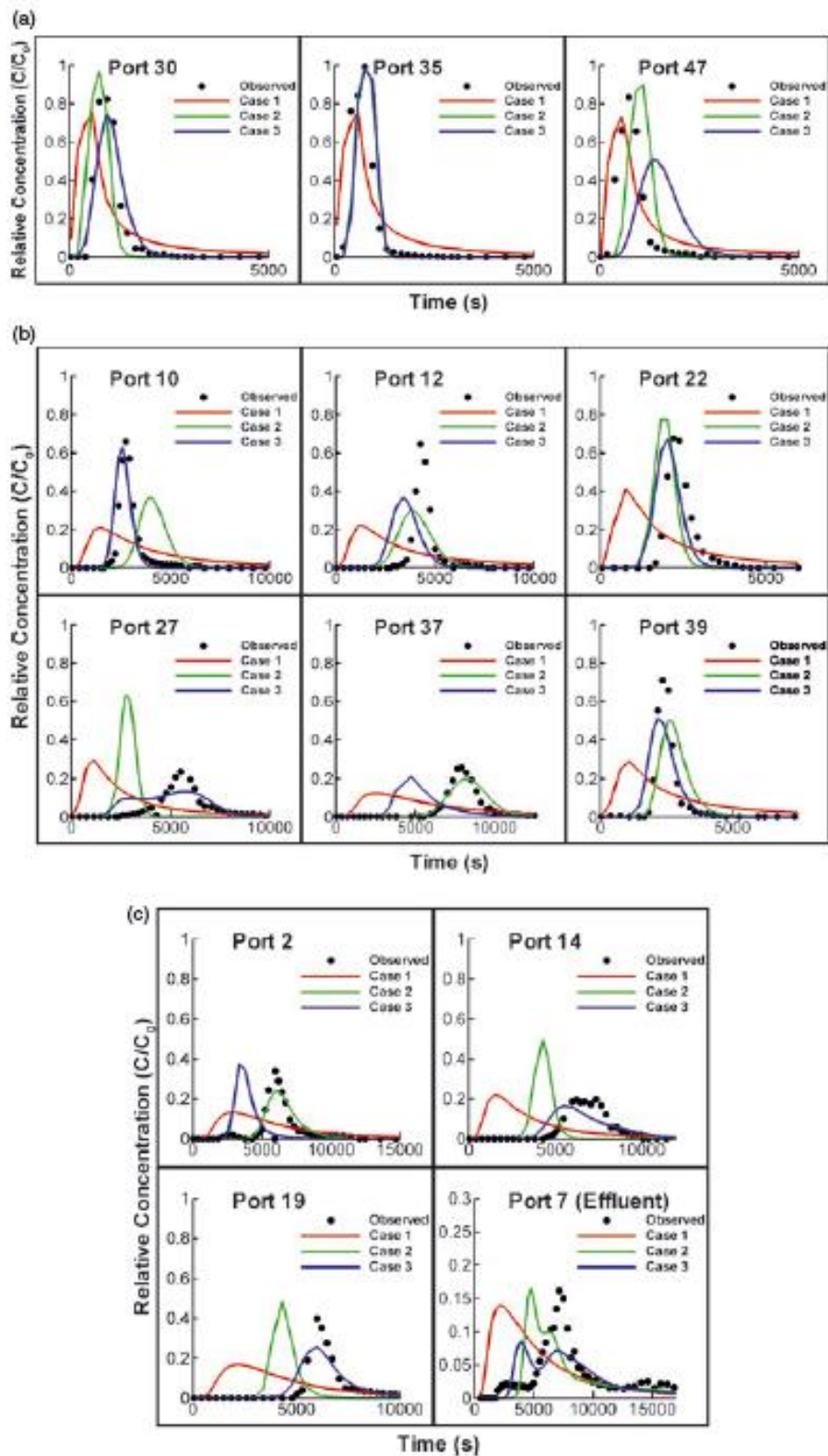


圖 10 實驗與推估之貫穿曲線比較圖。(a)注入井附近觀測點之貫穿曲線比較圖。(b)偏離注入點之貫穿曲線比較圖 (c)離注入點較遠的貫穿曲線比較圖。Case1 代表由 Gelhar and Axness (1983)推導之解所求得之平均K值。Case2 代表由克利金內差求得之K場。Case3 代表由 HT 推估之K場。



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

Tso et al. (2015)則在污染場址(圖11)中量測整治過程中，同時量測觀測井群的水位與流速，再透過 HT 融合這兩種資訊進行參數場推估。該研究發現，因為額外加入流速資訊，使得參數場推估結果更為準確。此外，該研究也指出，給定地質特性(如半變異元等)作為 HT 的先驗條件(prior information)對於觀測數量遠低於參數數量的問題而言是相當重要的，其結果顯示 HT 在加入符合現地特性的地質資訊後，其推估結果有較為顯著的改善(圖12)。

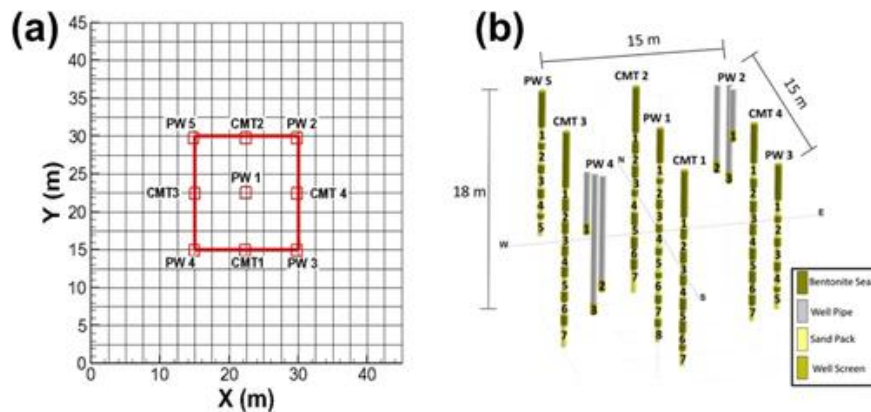


圖 11 美國達拉斯一處污染場址之井位配置圖

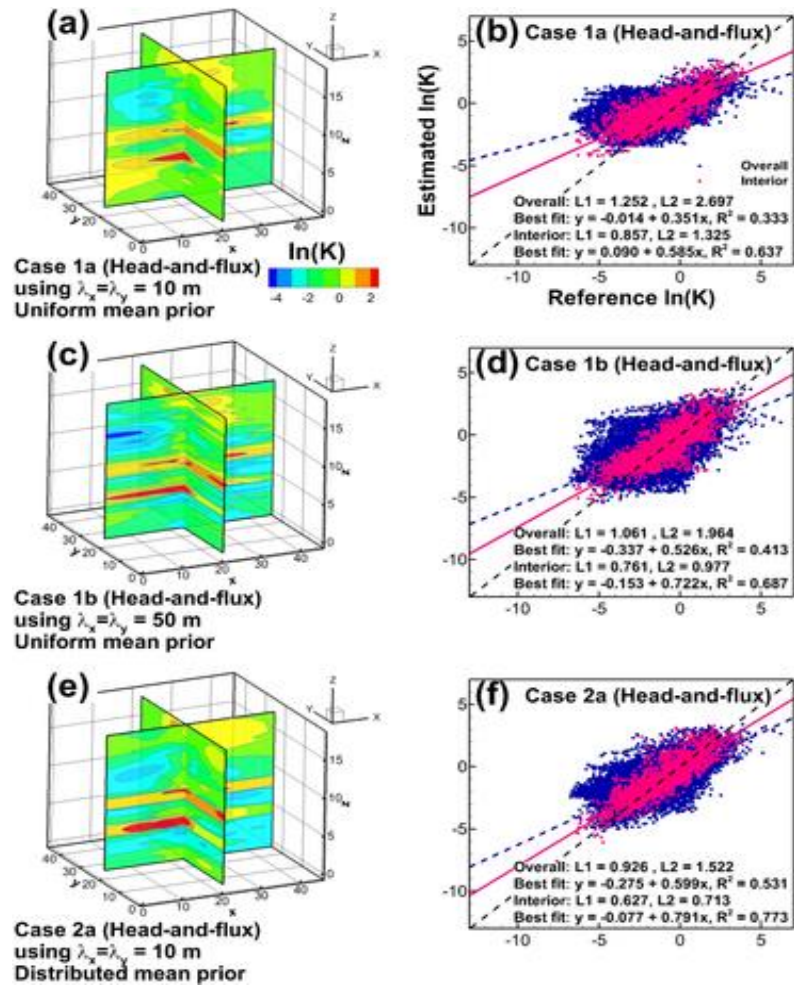


圖 12 以水力掃瞄融合水位與流速推估 K 場。(a)(c)(e)分別代表以不同半變異元作為 HT 的先驗條件所得結果。(b)(d)(f)分別代表(a)(c)(e)的觀測與預測水位與流量分布圖。



本研究擬採用107-108年度「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」計畫所建立之地下水流與溫度耦合模式為基礎，以水力掃描融合溫度與水位推估三維 K 場，本研究之水力掃描主要方程式如下：

SLE 包含兩個主要的元件，線性迭代推估器(linear estimator)與殘差共變異數更新方程式(residual covariance)，如式(6)與式(7)所示。式(6)代表透過參數場的迭代修正使得模擬的水位與溫度與觀測的水位與溫度一致。式(7)則為推估參數之不確定性估計式。在本研究中，待推估之參數包含水力傳導係數 (hydraulic conductivity, K)與比儲水係數(Specific storage, S_s)，在此以參數向量 Y 來代表待推估參數之集合。 ω 與 ψ 是權重， h^* 是觀測水位， $h^{(r)}$ 是模擬水位， T^* 是觀測溫度，而 $T^{(r)}$ 是模擬溫度。 ε_{ff} 代表參數的殘差共變異矩陣， ε_{dy} 則為模擬水位對水力參數之共變異數矩陣。

$$\hat{Y}_c^{(r+1)} = \hat{Y}_c^{(r)} + \omega^T (h^* - h^{(r)}) + \psi^T (T^* - T^{(r)}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\varepsilon_{yy}^{(r+1)} = \varepsilon_{yy}^{(r)} - \omega^T \varepsilon_{dy} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)中參數殘差共變異 ε_{yy} 為前述方程式 (6) 與 (7) 及其他相關運算方程式之核心矩陣，其矩陣維度越大，則相關之共變異矩陣 (如 ε_{dy})亦越大。

4.6 水力掃描演算法改善說明

為了降低水力掃描所需之計算資源需求，本研究將以 SVD 降低所需參數矩陣維度，以有效降低水力掃描演算法執行過程之共變異矩陣與互共變異矩陣 (covariance and cross-covariance)之維度，以有效降低記憶體之需求。

因本研究將推估多種參數，每種參數之殘差共變異矩陣大小皆相同，因此若能降低此類矩陣之維度，則能有效降低整體之記憶體需求。本研究以水位 h 推估 K 為例 (以 f 表示待推估參數之一擾動值(perturbation))，簡要說明水力掃描演算法加入 SVD 之構想：

ε_{ff} 以 SVD 拆解之表示式如式(3)所示：

$$\varepsilon_{ff} = \mathbf{g} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{g}^T \quad \dots\dots\dots (8)$$

其中 $\boldsymbol{\lambda}$ ($n_{kl} \times n_{kl}$) 是特徵值， $\mathbf{g}$ ($n_f \times n_{kl}$) 特徵向量， n_{kl} 是共變異量貢獻較大特徵向量數量，前述式(6)可以表示為下式：



$$\hat{\mathbf{f}}^{(r+1)} = \hat{\mathbf{f}}^{(r)} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r)} \mathbf{J}_{fh}^{(r)} [\mathbf{J}_{fh}^{(r)T} \boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r)} \mathbf{J}_{fh}^{(r)} + \boldsymbol{\varepsilon}_{hh}^{(r+1)}]^{-1} [(\mathbf{h}^* + \hat{\mathbf{e}}^{(r+1)}) - \mathbf{h}^{(r)}] \quad \text{.....(9)}$$

以及式(7)可以表示為下式：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r+1)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r)} - \boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r)} \mathbf{J}_{fh}^{(r)} [\mathbf{J}_{fh}^{(r)T} \boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r)} \mathbf{J}_{fh}^{(r)} + \boldsymbol{\varepsilon}_{hh}^{(r+1)}]^{-1} \mathbf{J}_{fh}^{(r)T} \boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(r)} \quad \text{.....(10)}$$

將式(8)代入式(9)與(10)可得：

$$\hat{\mathbf{f}}^{(r+1)} = \hat{\mathbf{f}}^{(r)} + \mathbf{g}^{(r)} \sqrt{\lambda^{(r)}} \mathbf{H}_{fh}^{(r)T} [\mathbf{H}_{fh}^{(r)} \mathbf{H}_{fh}^{(r)T} + \boldsymbol{\varepsilon}_{hh}^{(r+1)}]^{-1} [(\mathbf{h}^* + \hat{\mathbf{e}}^{(r+1)}) - \mathbf{h}^{(r)}] \quad \text{.....(11)}$$

與

$$\mathbf{g}^{(r+1)} \boldsymbol{\lambda}^{(r+1)} \mathbf{g}^{(r+1)T} = \mathbf{g}^{(r)} \boldsymbol{\lambda}^{(r)} \mathbf{g}^{(r)T} - \mathbf{g}^{(r)} \sqrt{\lambda^{(r)}} \mathbf{H}_{fh}^{(r)T} [\mathbf{H}_{fh}^{(r)} \mathbf{H}_{fh}^{(r)T} + \boldsymbol{\varepsilon}_{hh}^{(r+1)}]^{-1} \mathbf{H}_{fh}^{(r)} \sqrt{\lambda^{(r)}} \mathbf{g}^{(r)T} \quad \text{.....(12)}$$

$$\text{其中，} \mathbf{H}_{fh}^{(r)} = \mathbf{J}_{fh}^{(r)T} \mathbf{g}^{(r)} \sqrt{\lambda^{(r)}} \quad \text{.....(13)}$$

且其維度為 $\mathbf{H}_{fh}^{(r)}$ ($n_d \times n_{kl}$)

因為 $\mathbf{g}^{(1)}$ 必為 $\mathbf{g}^{(0)}$ 之函數，其可表示為下式：

$$\mathbf{g}^{(1)} = \mathbf{g}^{(0)} \mathbf{u}^{(0)} \quad \text{.....(14)}$$

式(13)可進一步簡化如下：

$$\mathbf{u}^{(r)} \boldsymbol{\lambda}^{(r+1)} \mathbf{u}^{(r)T} = \sqrt{\lambda^{(r)}} (\mathbf{I} - \mathbf{H}_{fh}^{(r)T} [\mathbf{H}_{fh}^{(r)} \mathbf{H}_{fh}^{(r)T} + \boldsymbol{\varepsilon}_{hh}^{(r+1)}]^{-1} \mathbf{H}_{fh}^{(r)}) \sqrt{\lambda^{(r)}} \quad \text{.....(15)}$$

因為 SVD 之計算量為維度之三次方，但待解之參數維度往往相當大 (>3000)，為了降低計算量，本研究將透過特徵值與特徵向量的解析解拆解 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ff}$ ，接著將可得到式 (13)，並將之代入式 (15)後，可求得 $\boldsymbol{\lambda}^{(r+1)}$ 與 $\mathbf{u}^{(r)}$ ，而更新的特徵向量將可透過式(14)求得。如此，後續將可透過式 (13)、式 (15)與式(14)之計算流程更新特徵值與特徵向量，無須直接分解原始的 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ff}$ 。



(五)結果與討論

5.1 多深度水壓與溫度感測系統測試

今年度本研究將感測器可量測範圍擴展至 40m 深度，並加入導電度計與注水(藥)功能，發展出可模組化的 3 種多功能可串列式感測器，其功能如表 4 所示，分別敘述如下：

- 1.Type A：具有水壓計與溫度計，同一封隔層（兩個黑色橡皮膜之間）內可同時量測水壓與溫度(圖 13)。
- 2.Type B：具有水壓計、溫度計與導電度計，同一封隔層內可同時量測水壓、溫度與導電度的變化(圖 14)。
- 3.Type C：具有水壓計、溫度計、導電度計與與灌水(藥)功能，同一封隔層內可進行灌水(藥)並同時進行水壓、溫度與導電度的量測(圖 15)。

表 4 可模組化 3 種不同功能串列式感測器

感測器類型	水壓計	溫度計	導電度計	灌水(藥)
Type A	O	O	X	X
Type B	O	O	O	X
Type C	O	O	O	O



圖 13 Type A 感測器(水壓計與溫度計)

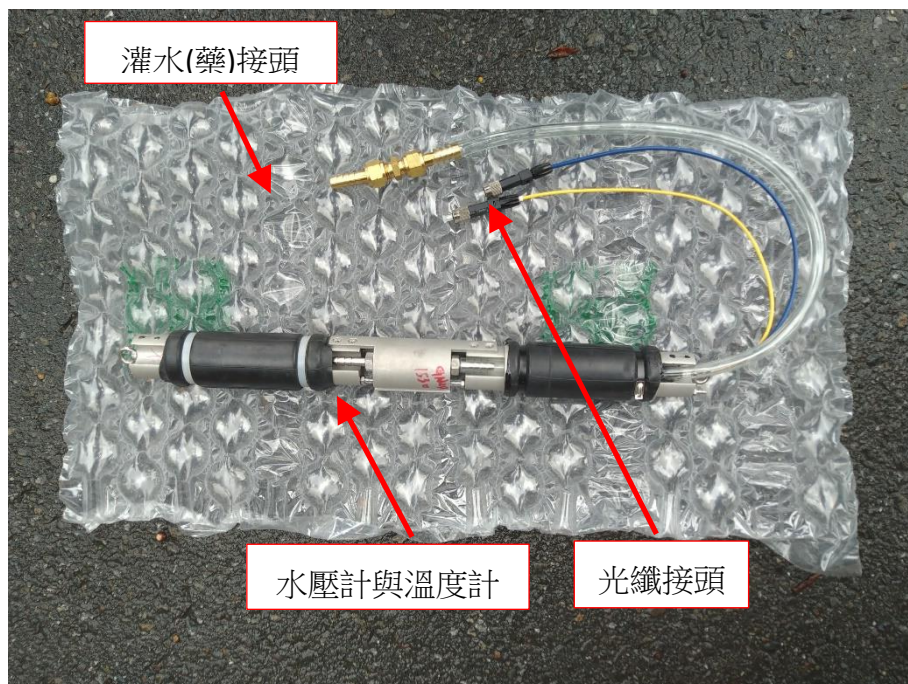


圖 14 Type B 感測器(水壓計、溫度計與灌水(藥)管路)

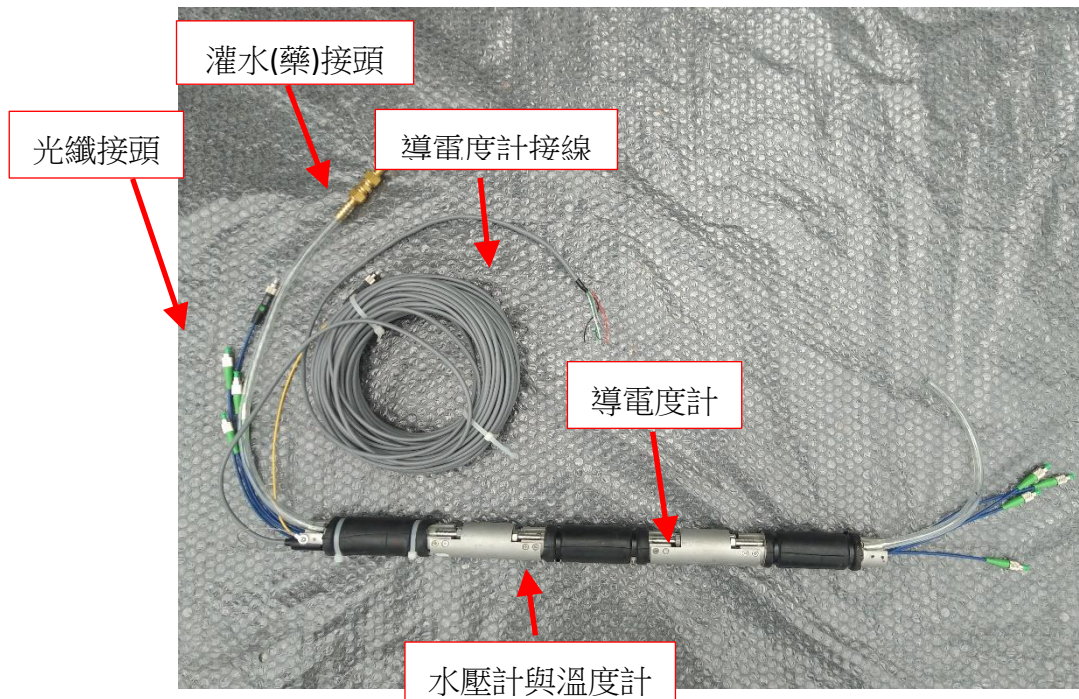


圖 15 Type D 感測器(水壓計、溫度計、導電度與灌水(藥)管路)

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。將回收後的 FBG 水溫水壓計進行彈簧校正後，放入壓力桶(圖 13)與進行壓力與溫度標訂與測試，標定結果如圖 17 所示，每 1pm 波長變化約等於 7.5mm 水位高變化。溫度計的部分，因為光纖光柵受溫度變化 1 °C 時，約會產生 10pm 的波長改變量，因此改變參數為光纖光柵的穩定材料特性，故光纖光柵溫度計不再進行溫度測試。

接著本研究同樣將 FBG 水壓放入壓力桶內進行約 12 小時測試，室溫變化約 6°C，量測結果如圖 14 所示。圖 15 為水壓計本體受溫度影響所造成的波長變化，圖 3b 為水壓計中的溫度計受溫度影響所造成的波長變化，圖 17 為消除溫度影響後水壓計實際的讀數。由圖 15 與圖 16 顯示，2 者變化有相當一致的趨勢，依據量測結果，水壓變化最大誤差會約在 0.22 米，對於設計水深 40 公尺的量測範圍而言，其量測精度則可估算為 0.5% (0.22/40)，可滿足計畫需求。



圖 16 壓力桶

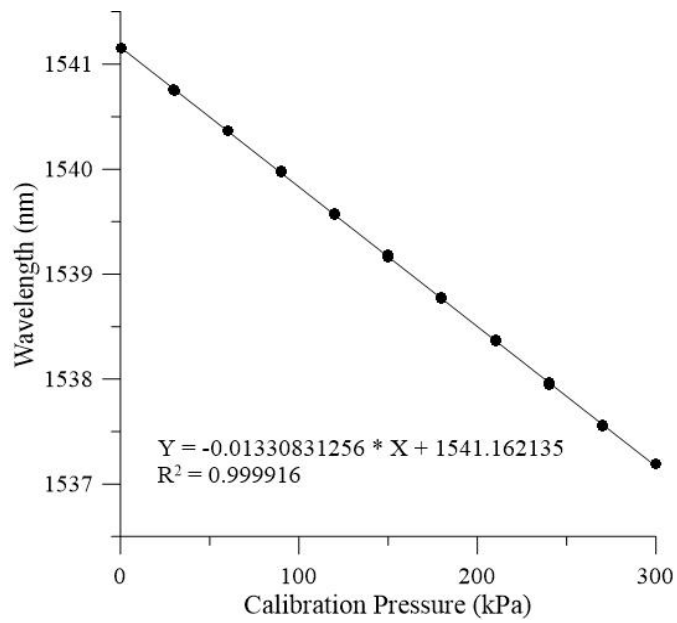


圖 17 水壓計標定結果



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

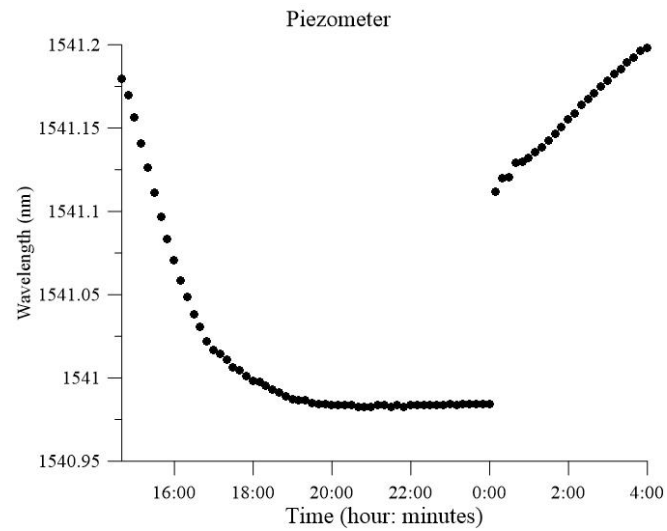


圖 18 水壓計本體 12 小時讀數

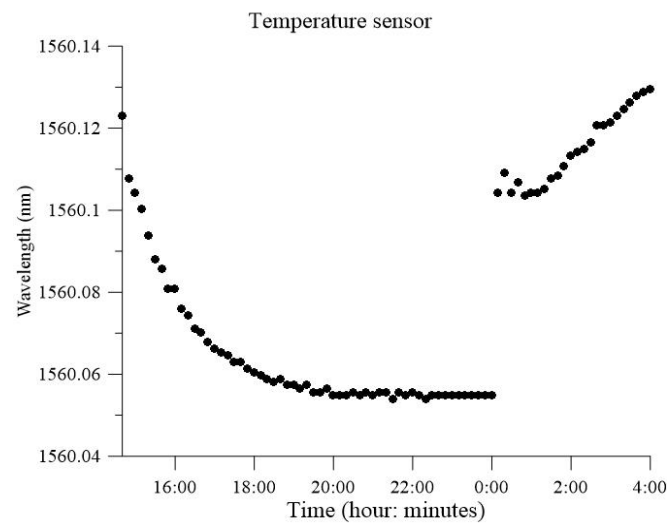


圖 19 溫度計 12 小時讀數

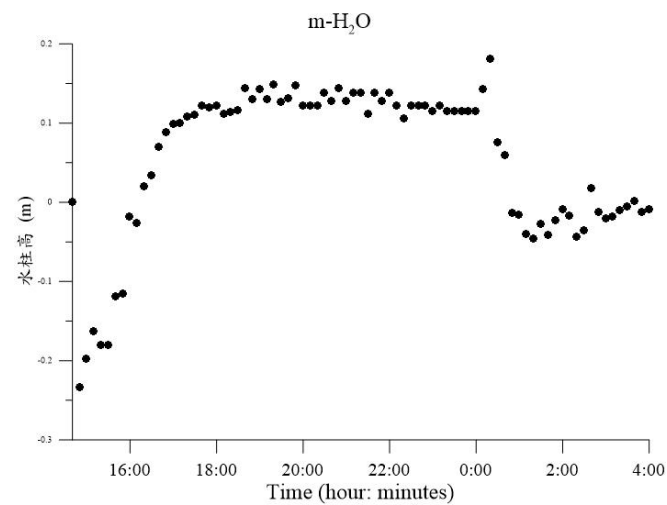


圖 20 水壓計消除溫度影響 12 小時讀數



5.2 多深度水壓與溫度感測系統現地量測

5.2.1 第一次量測

為了測試感測系統可否應用於污染場址，本研究於 5 月 22 日前往污染場址進行現場測試，此次測試主要目的為量測背景溫度與壓力，以及測試深層含水層訊號之穩定度。測試結果說明如下：

本研究團隊於 2020 年 5 月 22 日在試驗場址進行深層含水層之 FBG 壓力與溫度感測系統測試，觀測井之分布如圖 18 所示。因當日梅雨鋒面經過台灣，量測期間受大雨影響，故僅就井蓋未加鎖之觀測井進行 FBG 感測器測試，量測時間由中午十二點五十分開始，總測試時間約半小時，其過程為將 FBG 感測器置入井中進行水溫與水壓量測（如圖 19），但其中兩口井（YEW-2、K00268）因井管變形或其他原因，使得感測器無法到達地下水位面，僅 K00266、K00262 與 K00264 三口監測井（鑽孔內徑約 50mm）可完成溫度及壓力量測，各井之量測時間長度分別為 3、6 與 12 分鐘（圖 20~25）。

在進行 K00266 及 K00262 監測井之量測時原先預計將儀器放置 30 米之深度，但實際操作時皆在約深度約 15 米處即無法再深入，由於此兩口井所在位置相近，初判該區域在深度 15 米處可能發生井管變形，導致感測器無法抵達預定深度。而 K00264 監測井原先井深只有 12.5 米，故僅量測深度 12.5 米之數據。

由圖 20、22 與 24 可知，三口監測井之水壓皆呈現緩慢上升趨勢，此應與試驗過程中發生持續大雨有關，其中 K00264 井溫度(圖 25)在量測過程中呈現明顯下降趨勢，此應與試驗過程中該井井蓋未妥善關閉，使得大雨直接流入井中有關。其他井的溫度則相對穩定，其變化應在儀器之合理觀測誤差範圍內（FBG 溫度計觀測精度約 0.1°C ）。



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

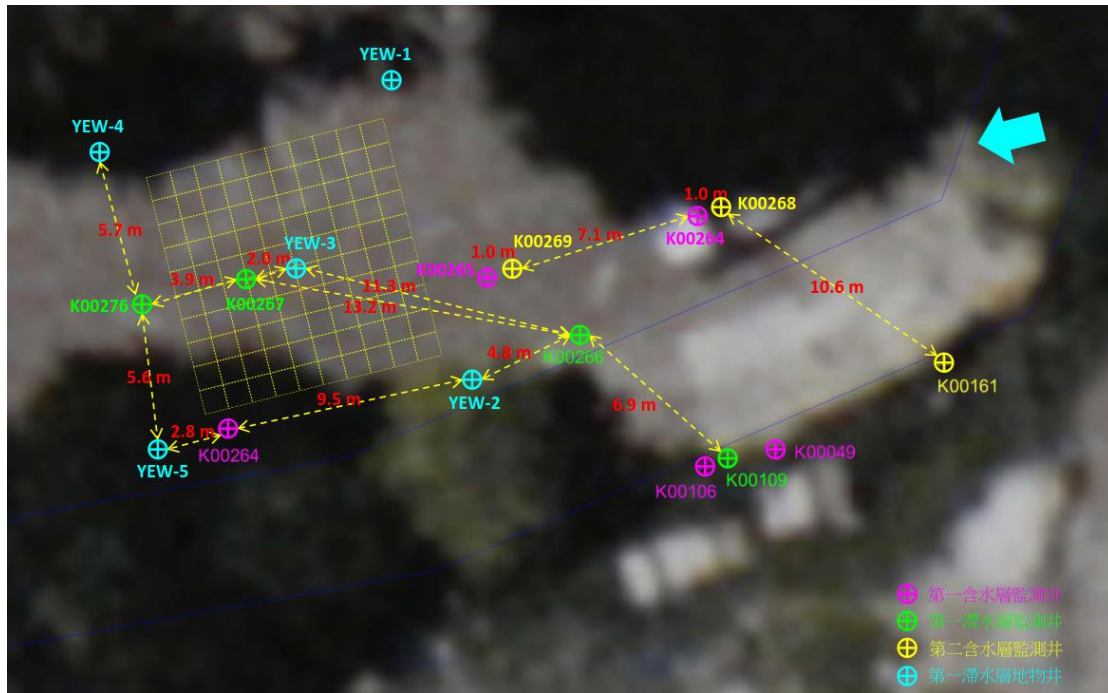


圖 21 監測井孔位定位圖



圖 22 現場量測圖

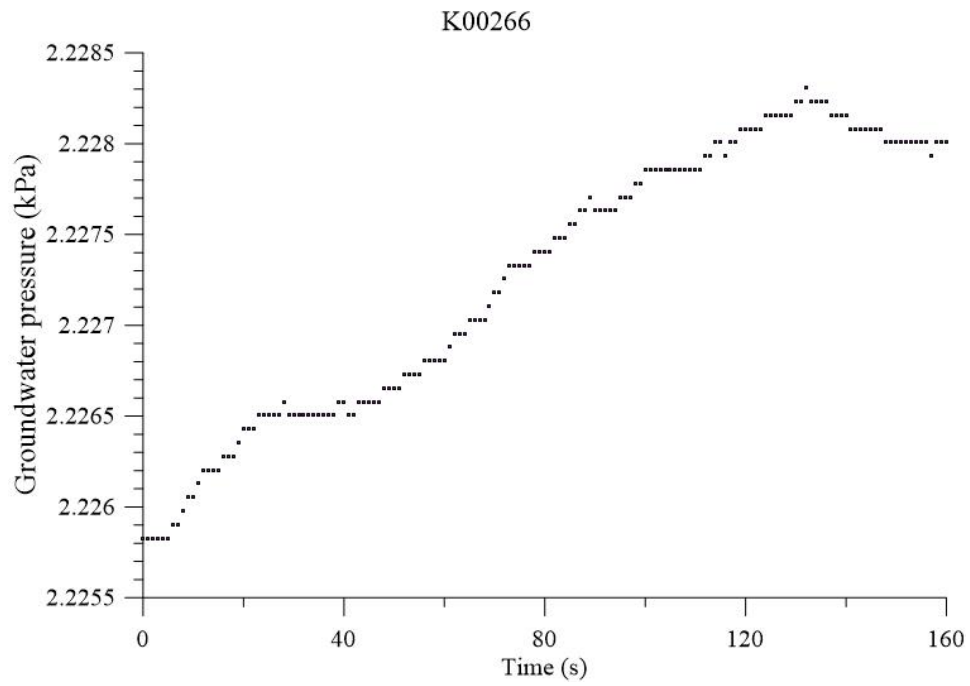


圖 23 K00266 壓力

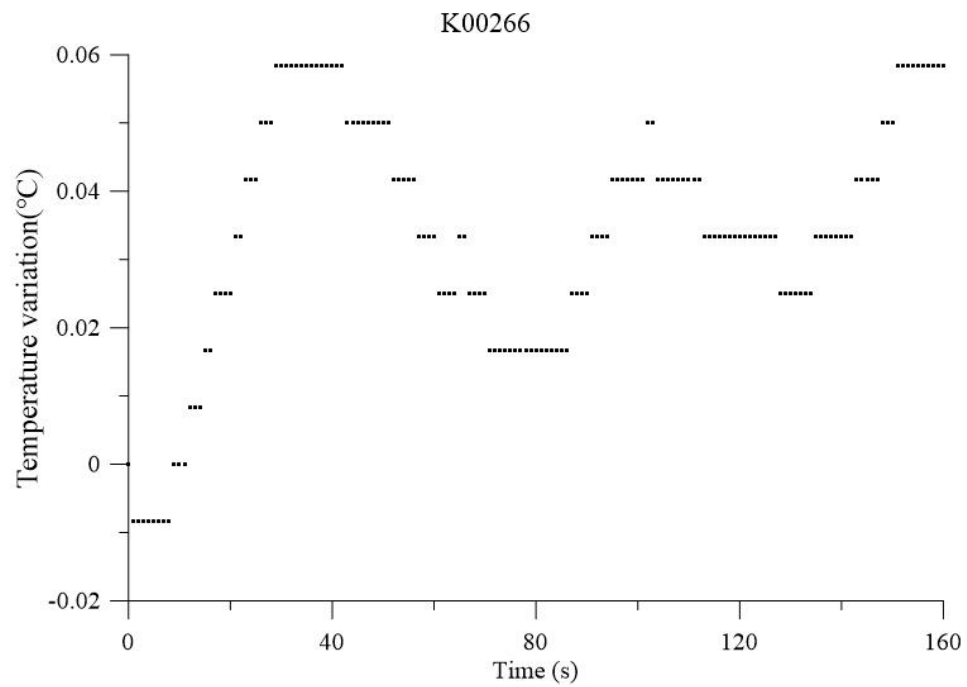


圖 24 K00266 溫度變化



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

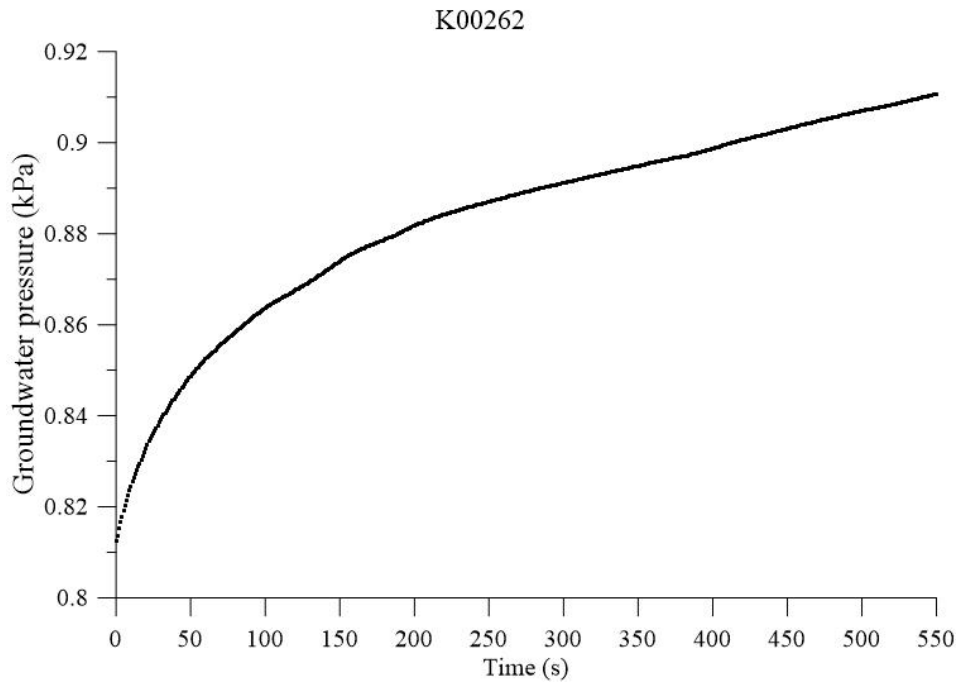


圖 25 K00262 壓力

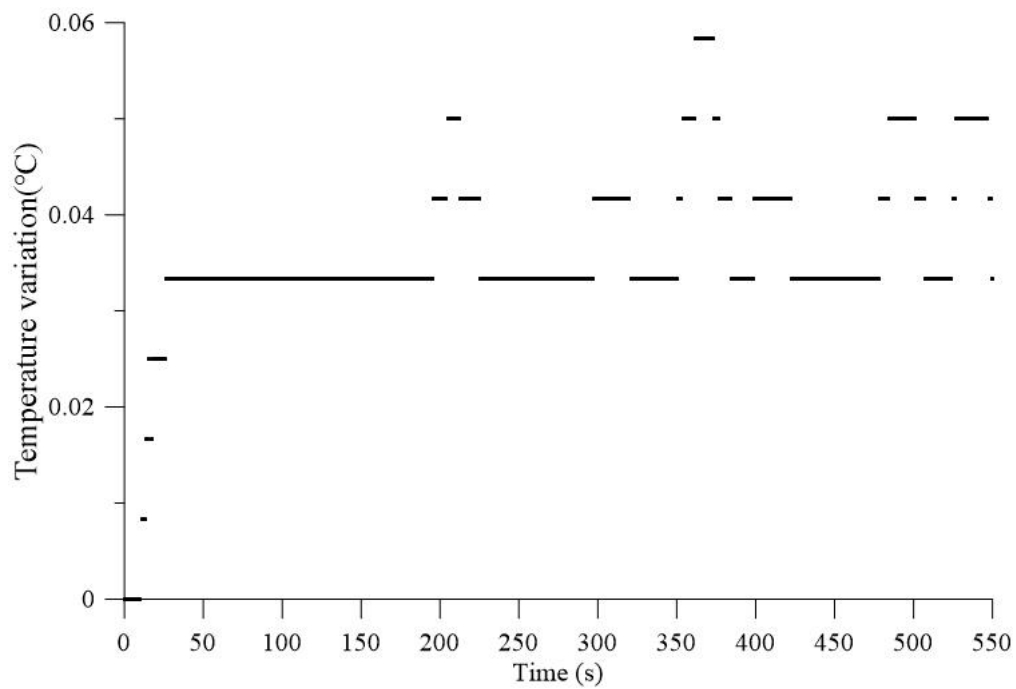


圖 26 K00262 溫度變化

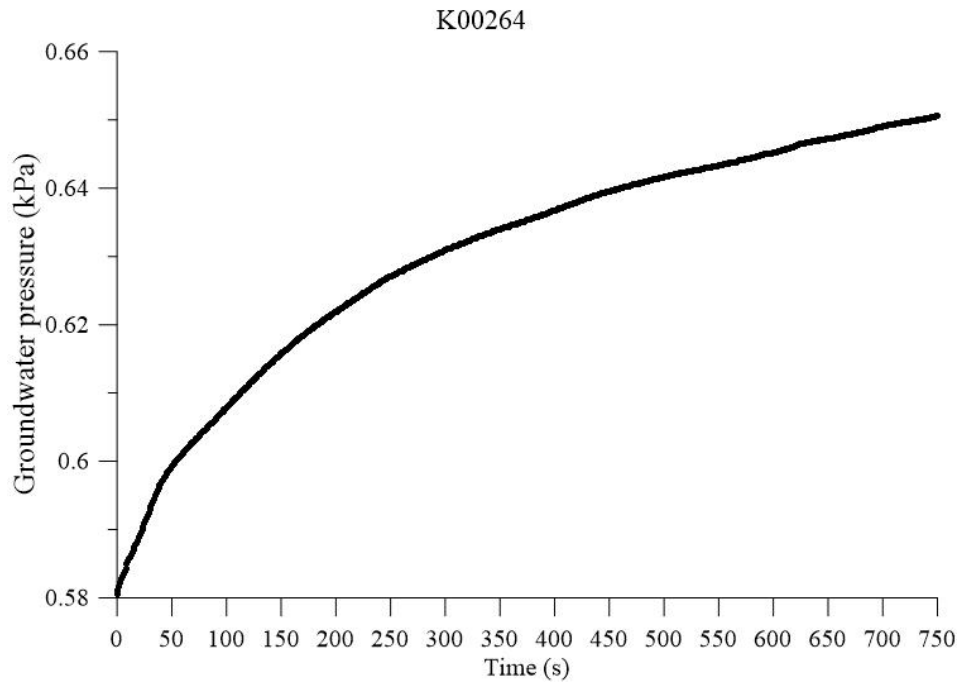


圖 27 K00264 壓力

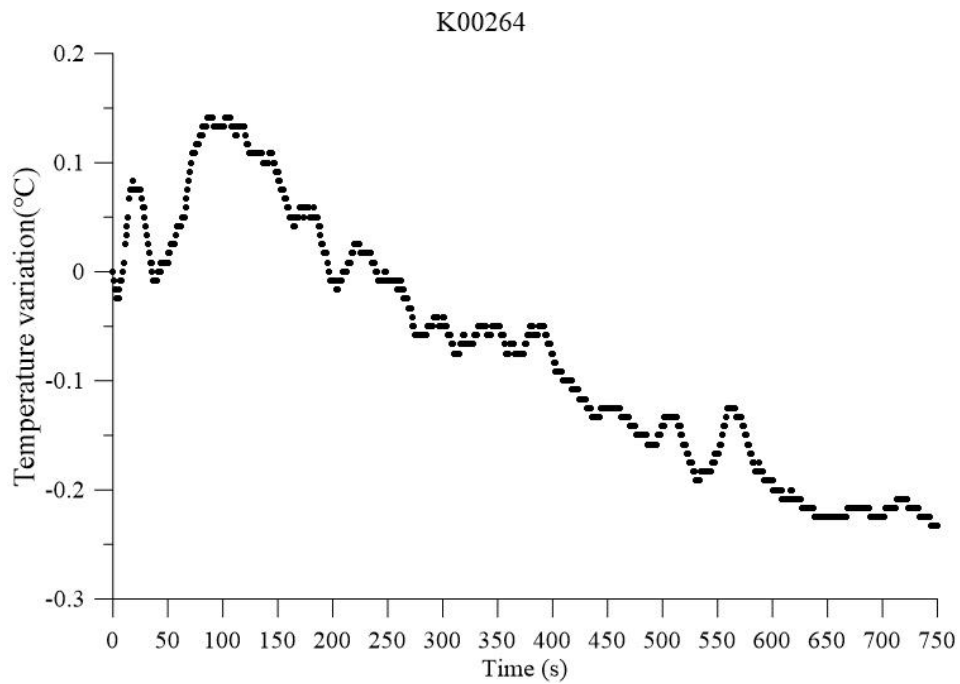


圖 28 K00264 溫度變化



5.2.2 第二次量測

此次測試主要目的為測試系統可否量測場址之地下水溫度、壓力、導電度，以及測試注水(藥)功能。測試結果簡要說明如下：

本研究於 10/12 前往永貞宮進行現場測試，抵達現場後本團隊先進行灌水管路轉接頭與閥門的安裝，安裝完成後之灌水管路與裝置如圖 29 所示。在本次試驗中，本團隊現場總計安裝光纖光柵水壓計 3 組與電子式導電度計 1 組。安裝孔位為 YEW-2。感測器安裝深度與功能如表 5 所示，灌水時間與流量如表 6 所示。圖 30 為 YEW-2 感測器孔內安裝完成圖。感測器安裝完成後，接著進行電腦與解讀儀連接，並進注水測試。圖 31 為電子式導電度計透過導電度解讀儀與電腦連接。圖 32 為 FBG 解讀儀與電子式導電度計現場自動化紀錄。

圖 33 為 FBG 水壓計現場量測結果，由圖可知三個深度的水壓不同，代表本研究選擇的深度可能為不同的水層或局部垂向阻隔較佳，因此產生三個分層的壓力觀測。在注水期間內，水壓計讀數可反映地下水位先上升後下降的趨勢。圖 34 為安裝在孔內 14 m 深的導電度計的量測結果，由圖可知導電度因為注水而有明顯的下降變化，但是當注水停止後，導電度立即回升，代表觀測井周遭水體之導電度應該偏高。表 7 為灌水期間不同深度感測器的最大變化量。在 34 米深度灌水時，不同深度的水壓計量測到的最大壓力變化約為 4kPa、10kPa 與 11kPa。

表 5 感測安裝深度與功能

YEW-2	
深度(m)	感測器
14	水壓計+溫度計+導電度計
24	水壓計+溫度計
34	水壓計+溫度計+灌水(藥)管出口



表 6 灌水時間與流量表

10月12日	
灌水點位	YEW-2
深度	34m
灌水時間	16:55
灌水停止時間	17:07
灌水流量	4.8L/min

表 7 灌水期間不同深度感測器最大變化量

水壓計	
深度14米	約4kPa
深度24米	約10kPa
深度34米	約11kPa
導電度計	
深度14米	約1000us/cm



圖 29 現地出水管路安裝與位置圖



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 30 YEW-2 感測器孔內安裝完成圖

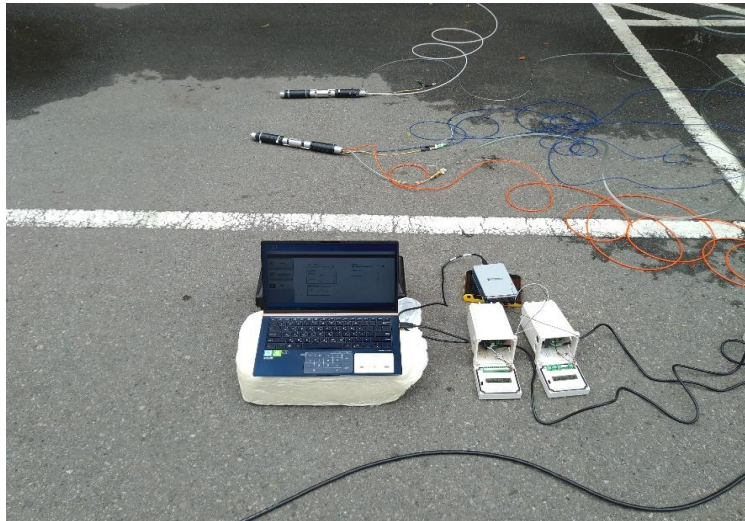


圖 31 導電度計解讀儀連接電腦



圖 32 光纖光柵解讀儀與電子式導電度計自動化紀錄

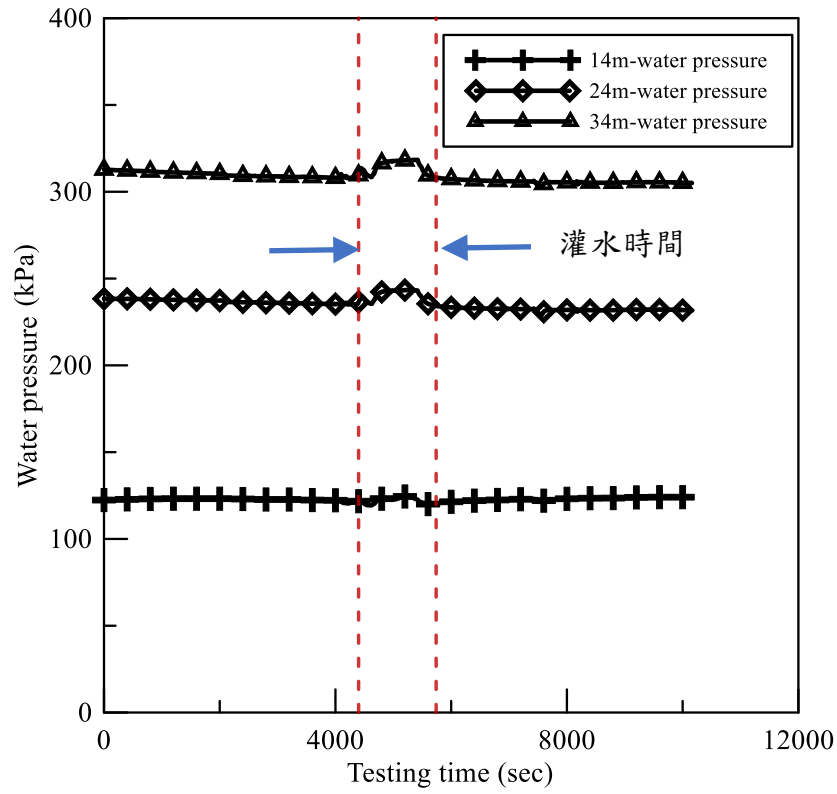


圖 33 現場水壓量測結果

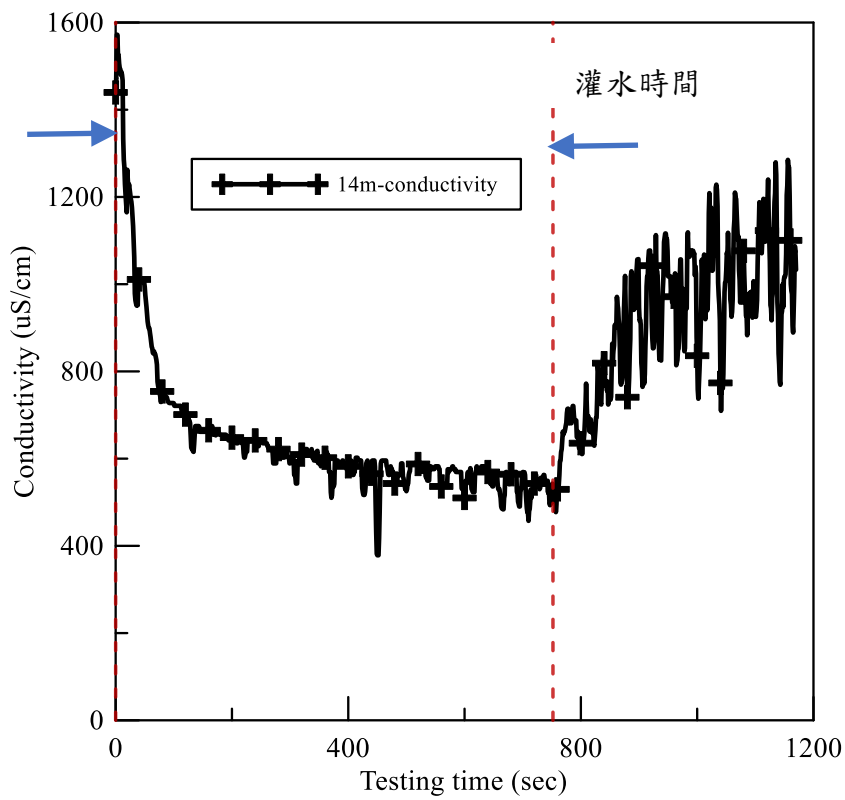


圖 34 現場導電度量測結果。X 軸為以灌水時間做為起始時間。



5.2.3 第三次量測

本研究團隊於 11 月 02 日於永貞宮進行第三次現場測試，現場主要使用 FBG 水壓計、FBG 溫度與新設計灌水系統進行灌水與量測，表 8 與表 9 分別為感測器安裝深度、時間與流量。在本次試驗後，本團隊發現地下水對感測器外部結構體(不鏽鋼 316 與膠體)造成鏽蝕情況，外觀可看出有明顯腐蝕痕跡(圖 35)，雖然在前一年度計畫中，本團隊在鋼材與膠體材料上已選用抗酸與抗腐蝕材質，但此次場址地下水 PH 值似乎較上次試驗場址更低，因此後續本團隊將考慮將感測器外部結構體與膠體進行鍍膜，以減緩鏽蝕的情況。

本研究第一次於 YEW-2 注水後，三個深度壓力計量測之水壓變化如圖 36~圖 38 所示，由圖可知在 34m 深度的注水管進行注水後，水壓首先上升，但隨後壓力快速消散，接著壓力又開始上升，如此循環約三次，因注水點產生了此種水位變化，因此在 14m 與 24m 亦產生類似的水位變化。在此處之地質上，34m 應為滯水層，理論上水壓變化較難傳至含水層，因此本研究推論在 14m 與 24m 之水壓變化應為 34m 處之水壓穿過濾料層到達此兩深度感測器。另外，需注意的 34m 的水位變化並非一般定量注水的水位變化趨勢，因此本研究推測應是 34m 處之濾水管 (Screen) 堵塞，造成加壓到一定程度後達到清除濾管堵塞物質 (如生物膜或細粒料) 的效果因而洩壓，此效果即類似洗井的功效。此外，YEW2-2 之 24m 處呈現一下降之趨勢，雖其壓力歷線變化與其他兩個深度之變化趨勢一致，但整體之趨勢往下，因此本研究推論應是在試驗期間，鄰近區域有抽水行為發生 (此深度亦為透水性相對較佳的細砂層，因此可能發生抽水行為)。而 YEW-3 內壓力感測器所量測之水壓時序變化 (圖 39~圖 41) 則顯示其壓力變化與 YEW-2 之注水無關，此結果說明在 YEW-2 的 34m 深度處至 YEW-3 各深度感測器之間的連線應有較不透水物質阻隔，影響水壓傳遞，意即 YEW-2 的 34m 深度感測器可能被較不透水的土壤包圍。

在溫度的部分 YEW-2 三個深度的溫度觀測顯示類似的變化趨勢 (圖 42~圖 44)，14m 與 24m 深的溫度變化則與 34m 深的溫度變化略有時間滯延 (time lag) 的現象，此一結果亦說明 34m 灌注之自來水透過濾料層傳輸至 14m 與 24m 處。圖 45~圖 47 說明 YEW-3 內溫度感測器的水溫變化趨勢，由圖可知 YEW-2 注水並未影響 YEW-3。

本研究第二次注水位置選擇在井 YEW-3 之埋深 14m 處，由圖 51-53 可知三個深度的水壓變化相當一致，且其壓力分布為注水後的標準壓力變化曲線，惟 24m 處因鄰近抽水的影響而有向下的斜率，但其水位變化仍能反應注水產生的變化趨勢。圖 48~圖 50 為 YEW-2 內壓力感測器所量測到的水壓變化歷線，由圖可知，在



注水期間，其水壓變化皆為往上，雖然 YEW-2 的 24m 深水壓呈現持續下降趨勢（鄰近抽水影響），但在注水期間其水位變化則持平，代表注水後的壓力與鄰近抽水損失的壓力達到平衡。

在溫度的部分，圖 54~圖 56 為 YEW-2 內溫度感測器所量測到的水溫變化歷線，由圖可知 YEW-2 所有溫度計之溫度變化未受 YEW3 注水影響，持續回溫至初始溫度。圖 57~圖 59 為 YEW-3 內溫度感測器所量測到的水溫變化歷線，由圖可知 YEW-3 內各深度溫度皆為下降趨勢，但傳輸至 34m 時已幾乎無影響，主要是熱在長距離（20m）傳輸過程中衰減而降低對 34m 深的溫度計影響。本研究進一步將上述量測期間各個感測器的最大變化量整理成表 10 與表 11 所示。

表 8 感測安裝深度與功能

井 YEW-2		井 YEW-3	
深度(m)	感測器	深度(m)	感測器
14	水壓計+溫度計	14	水壓計+溫度計+灌水(藥)管出口
24	水壓計+溫度計	24	水壓計+溫度計
34	水壓計+溫度計+灌水(藥)管出口	34	水壓計+溫度計

表 9 注水時間與流量表

11月02日		
注水點位	YEW-2	YEW-3
深度	34m	14m
注水時間	15:14	16:27
注水停止時間	15:36	16:50
注水流量	3L/min	3L/min



表 10 第一次注水期間不同深度感測器最大變化量

水壓計		
	注水期間 YEW-2之壓力變化	注水期間 YEW-3之壓力變化
深度14米	約4kPa	—
深度24米	約4kPa	—
深度34米	約3.5kPa	—
溫度計		
	注水期間 YEW-2之溫度變化	注水期間 YEW-3之溫度變化
深度14米	約2°C	—
深度24米	約1.4°C	—
深度34米	約3.5°C	—

註：— 代表未受影響

表 11 第二次注水期間不同深度感測器最大變化量

水壓計		
	注水期間 YEW-2之壓力變化	注水期間 YEW-3之壓力變化
深度14米	約0.8kPa	約7kPa
深度24米	約0.6kPa	約7kPa
深度34米	約0.5kPa	約7kPa
溫度計		
	注水期間 YEW-2之溫度變化	注水期間 YEW-3之溫度變化



深度14米	—	約1°C
深度24米	—	約3°C
深度34米	—	約0.3°C

註：— 代表未受影響

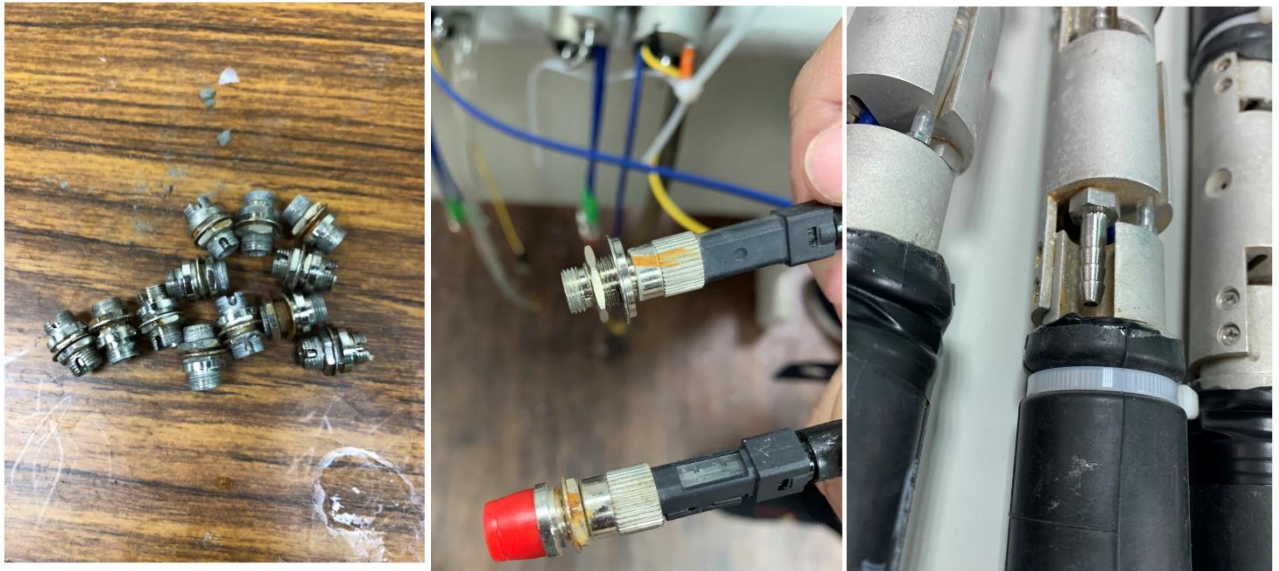


圖 35 實驗後感測器腐蝕情況



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

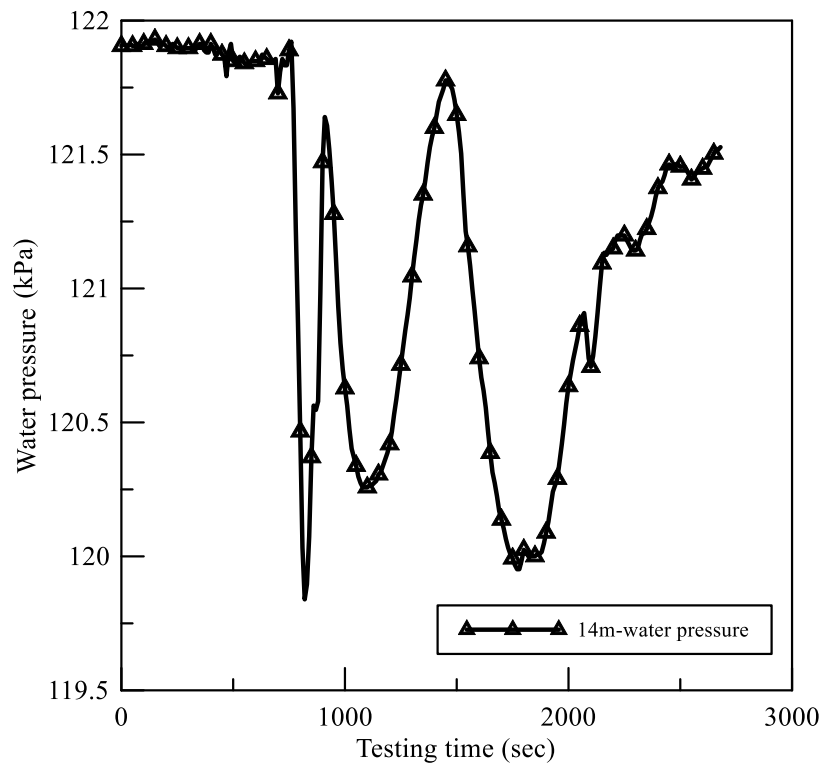


圖 36 YEW-2 14 米第一次灌水水壓變化圖

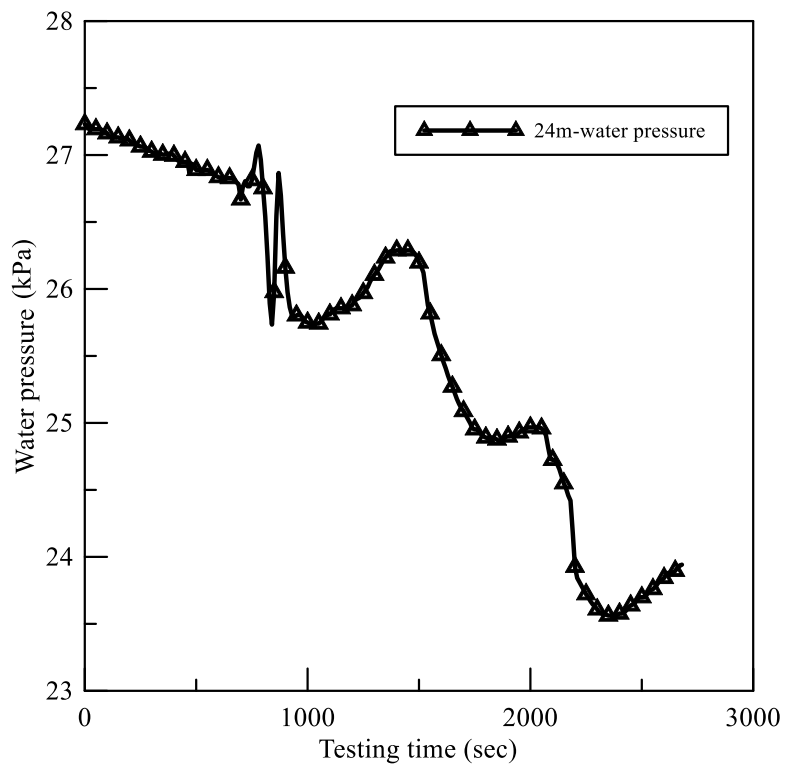


圖 37 YEW-2 24 米第一次灌水水壓變化圖

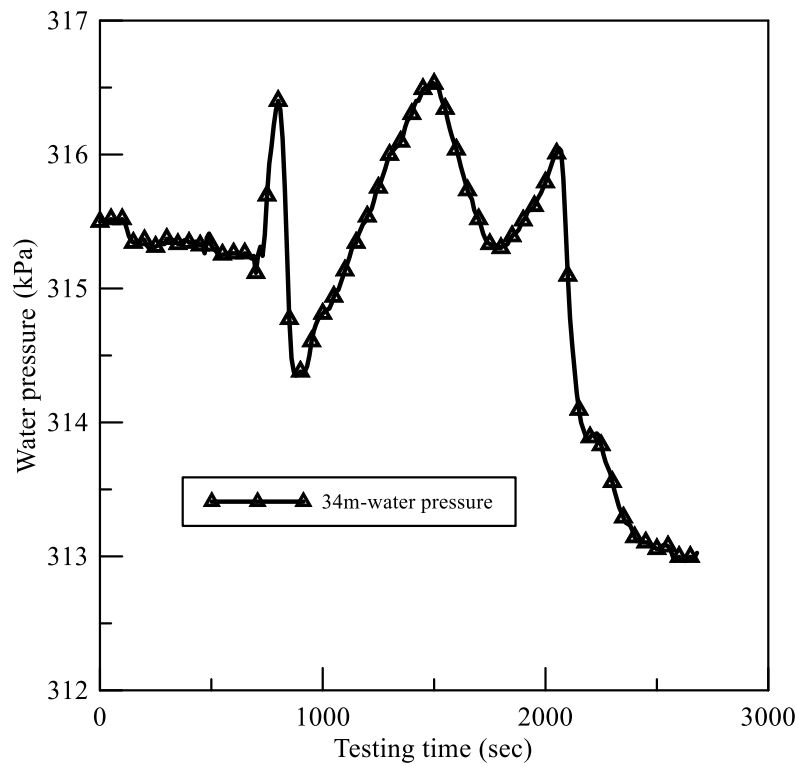


圖 38 YEW-2 34 米第一次灌水水壓變化圖

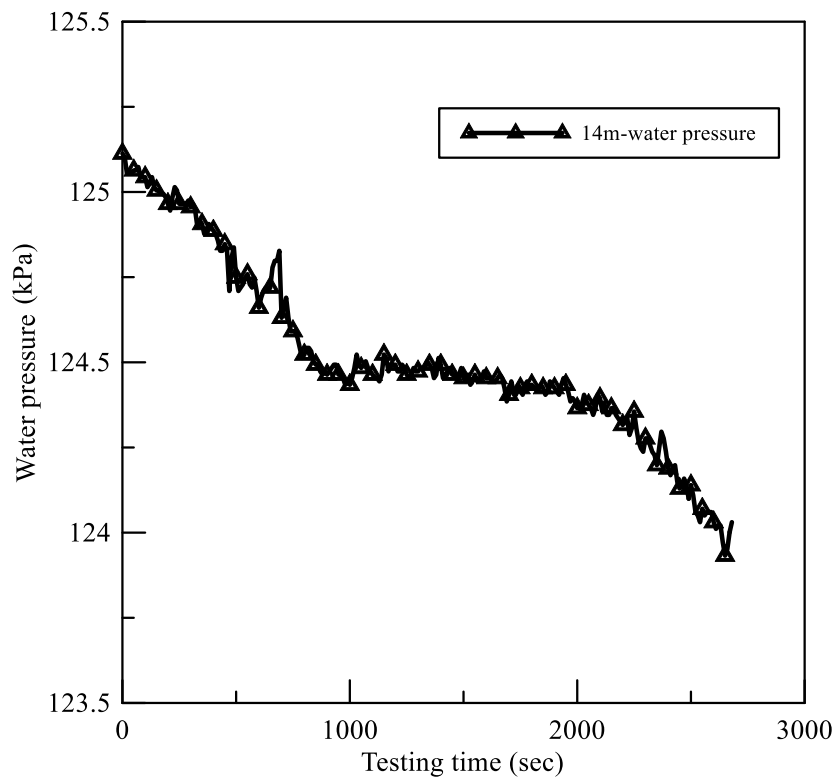


圖 39 YEW-3 14 米第一次灌水水壓變化圖

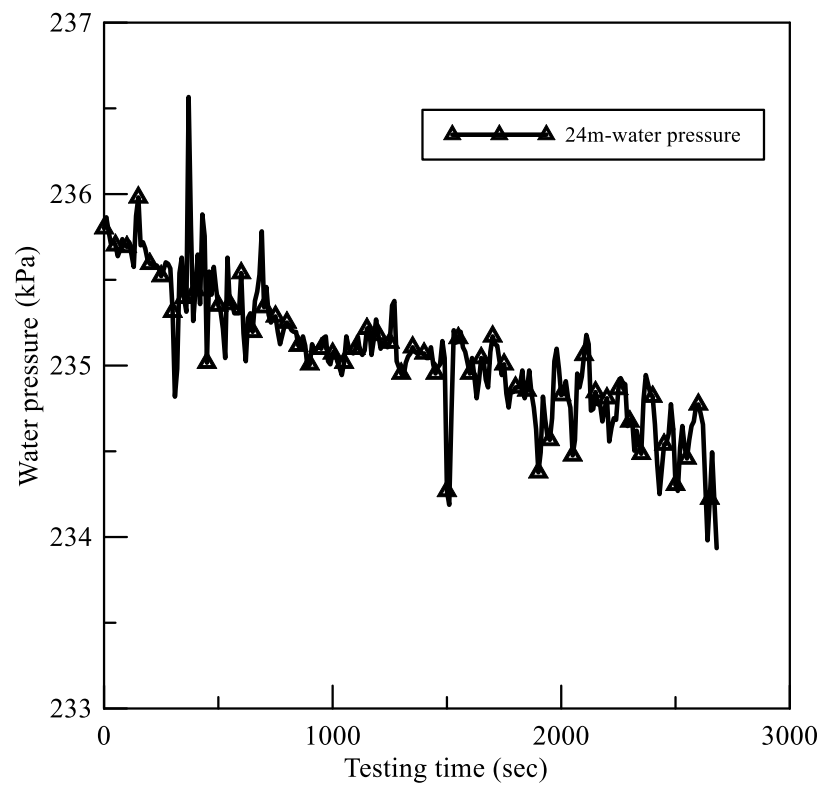


圖 40 YEW-3 24 米第一次灌水水壓變化圖

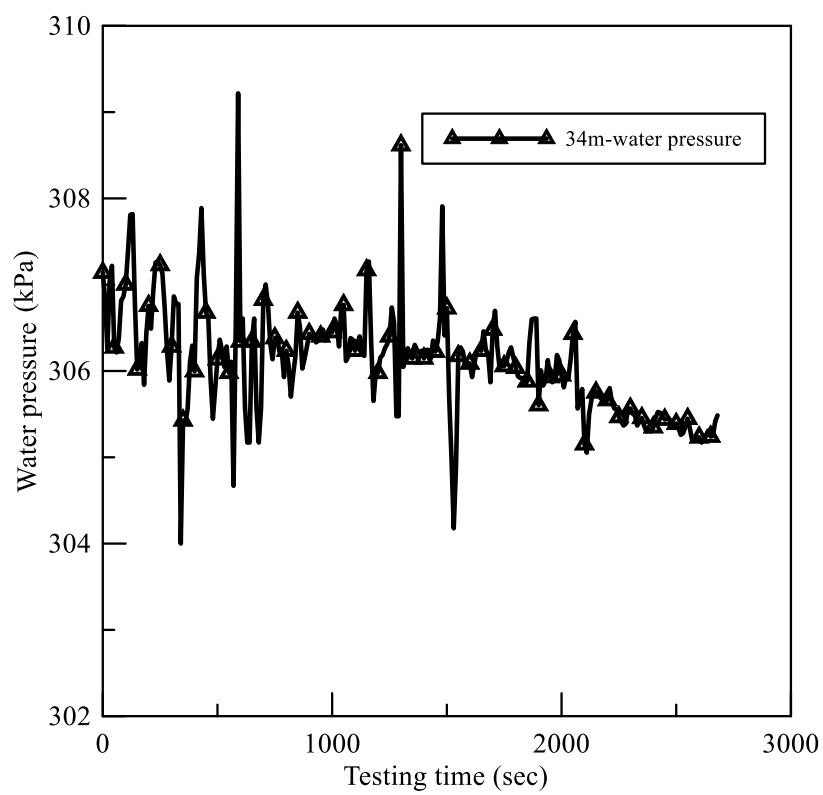


圖 41 YEW-3 34 米第一次灌水水壓變化圖

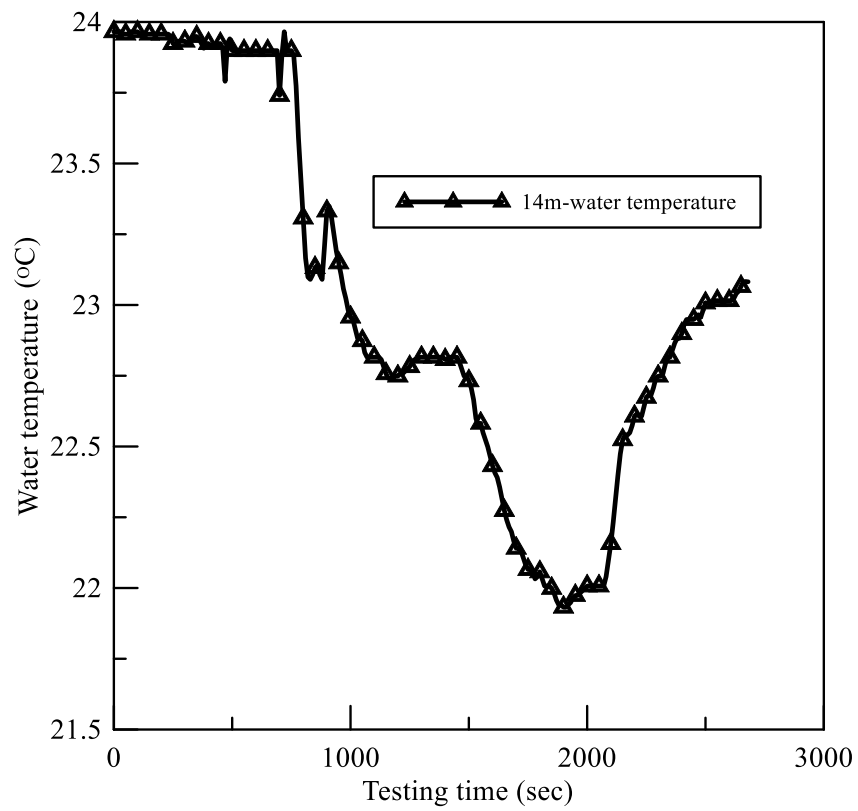


圖 42 YEW-2 14 米第一次灌水水溫變化圖

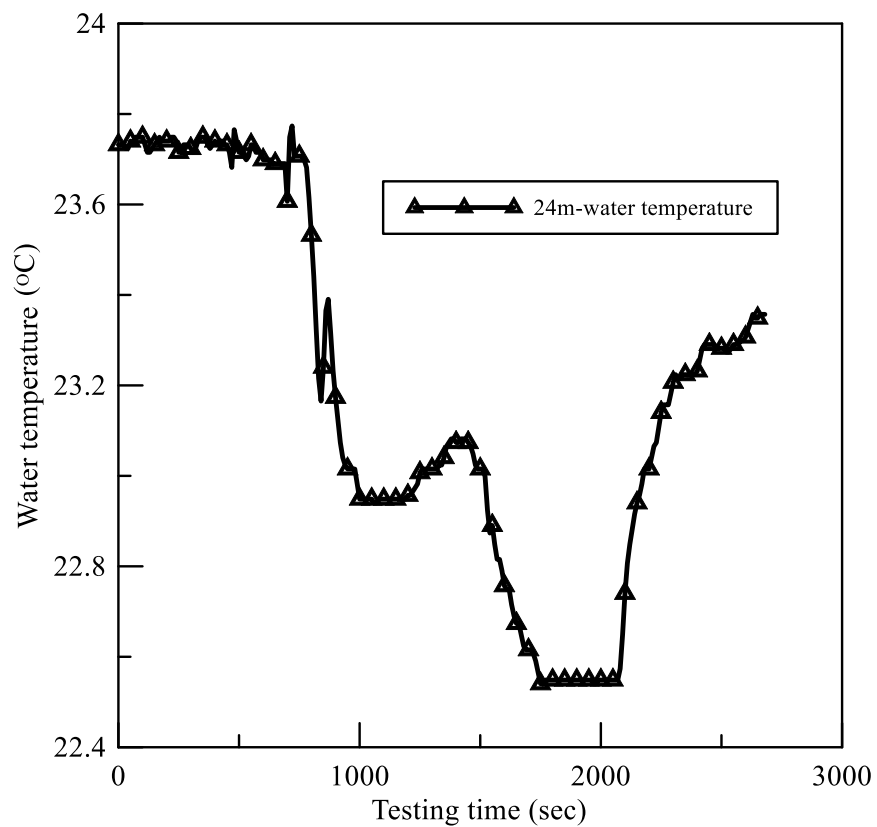


圖 43 YEW-2 24 米第一次灌水水溫變化圖



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

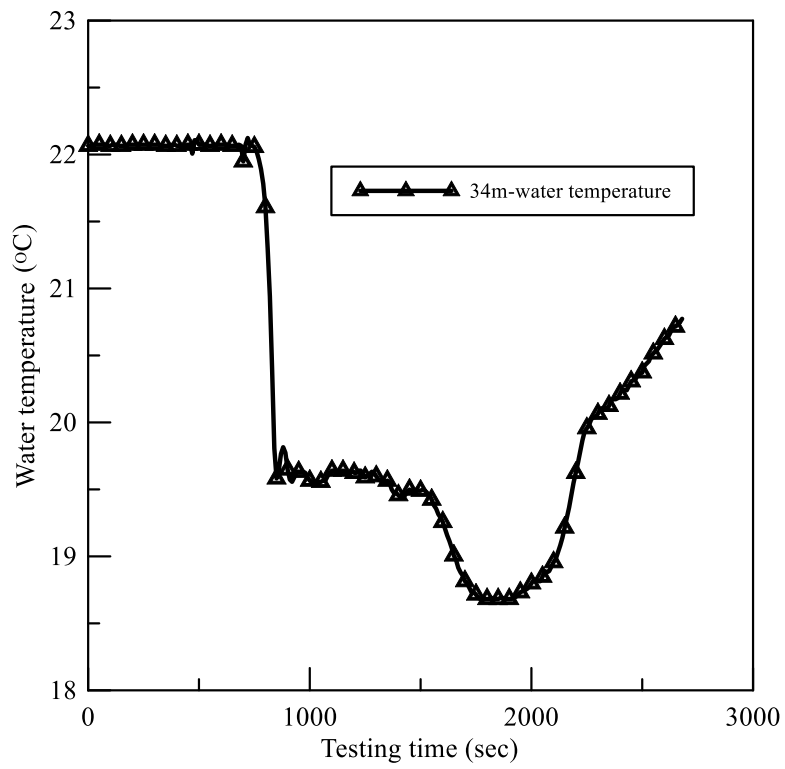


圖 44 YEW-2 34 米第一次灌水水溫變化圖

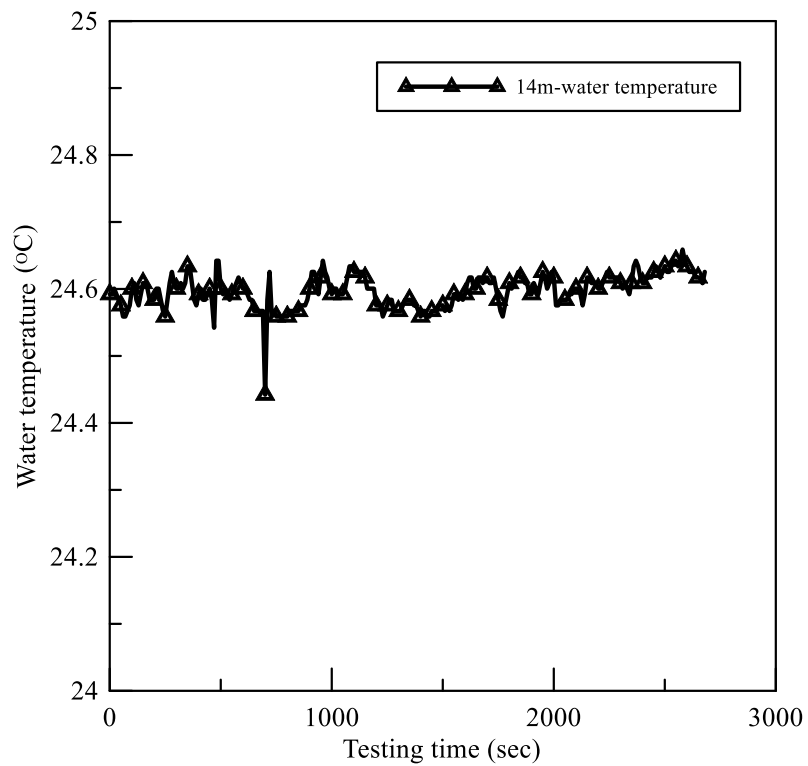


圖 45 YEW-3 14 米第一次灌水水溫變化圖

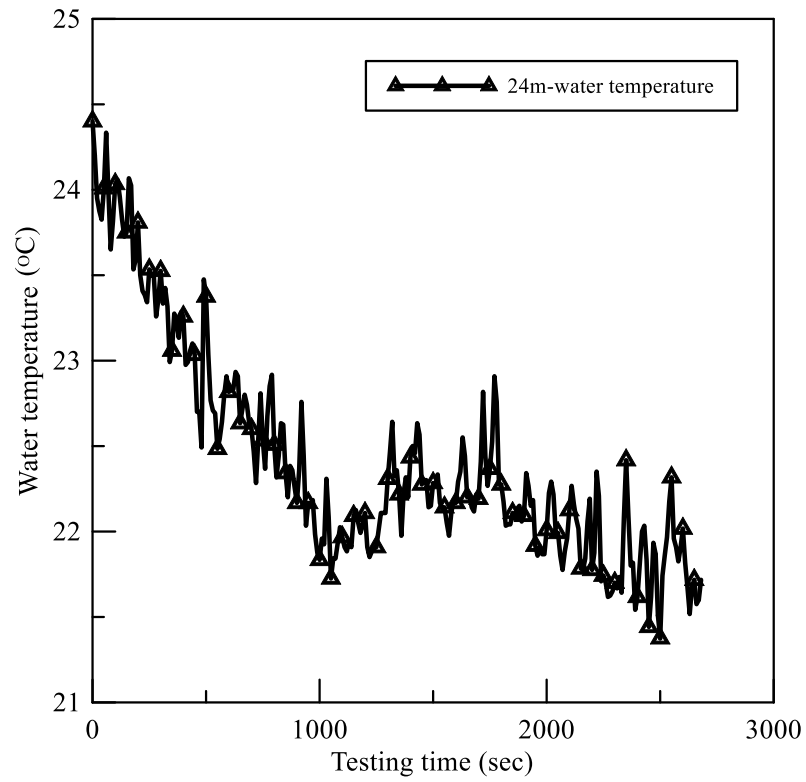


圖 46 YEW-3 24 米第一次灌水水溫變化圖

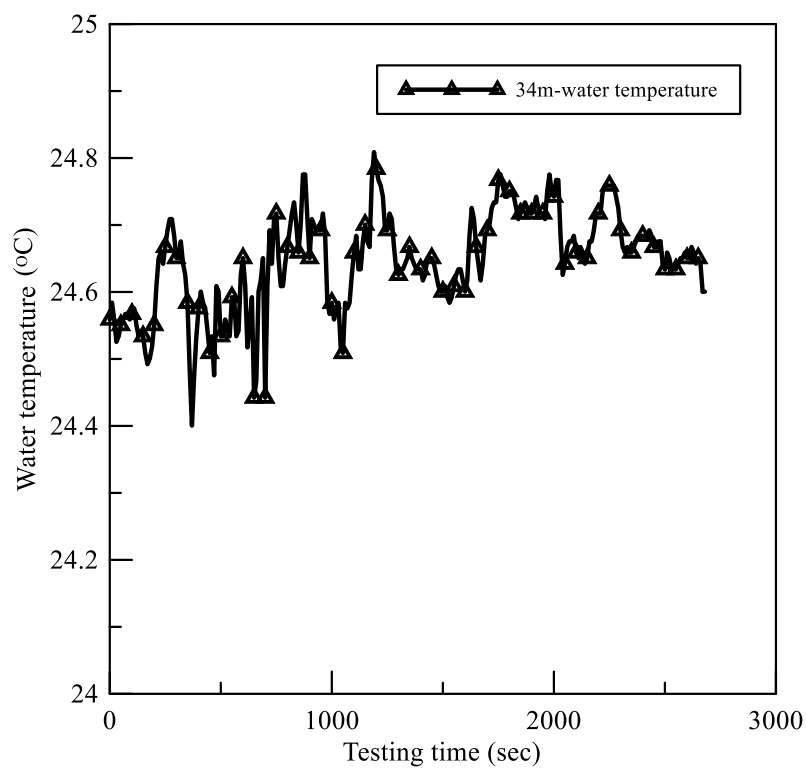


圖 47 YEW-3 34 米第一次灌水水溫變化圖



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

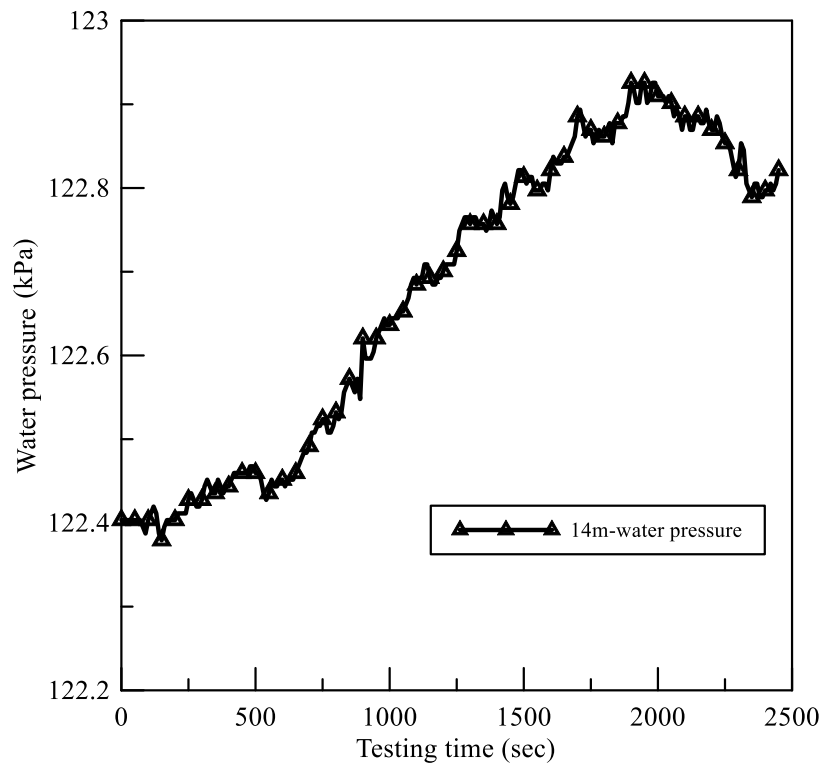


圖 48 YEW-2 14 米第二次灌水水壓變化圖

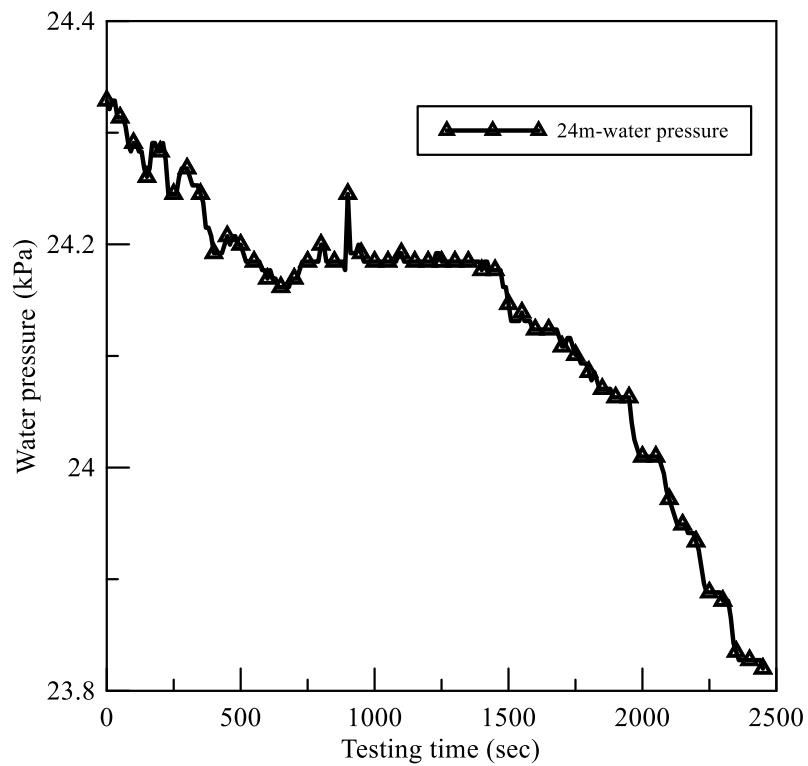


圖 49 YEW-2 24 米第二次灌水水壓變化圖

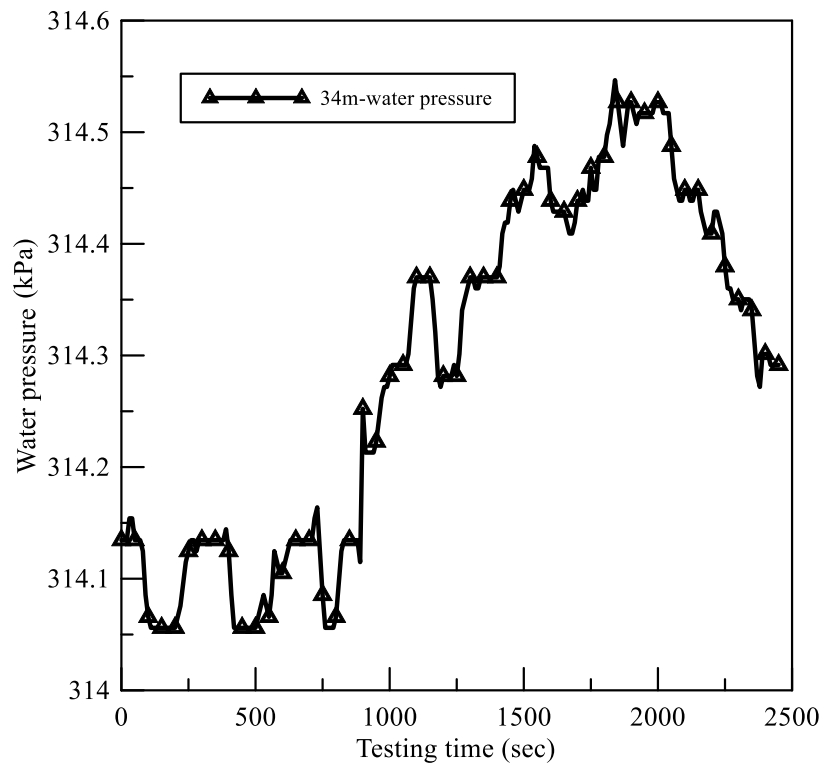


圖 50 YEW-2 34 米第二次灌水水壓變化圖

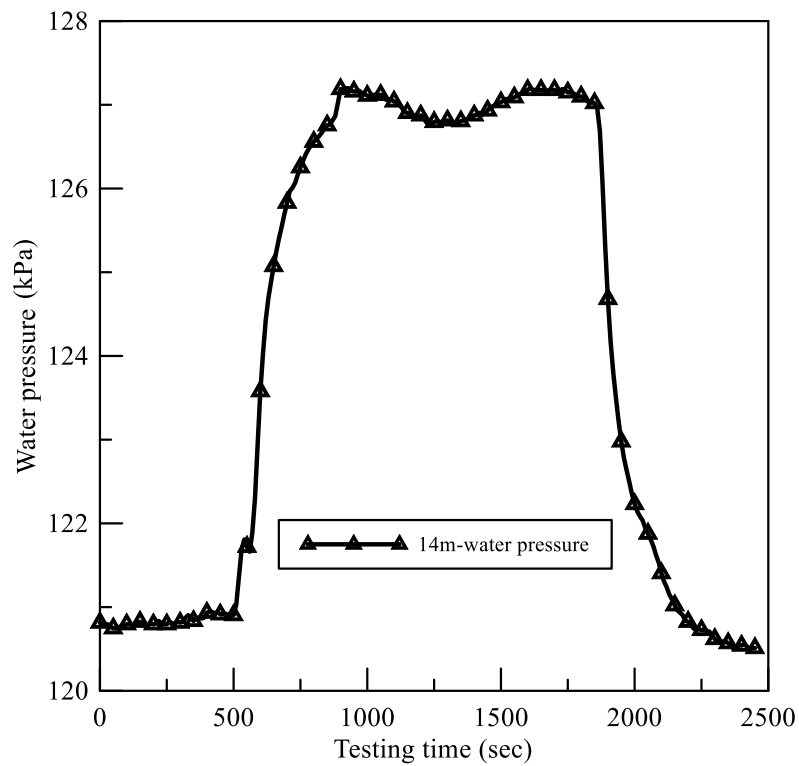


圖 51 YEW-3 14 米第二次灌水水壓變化圖

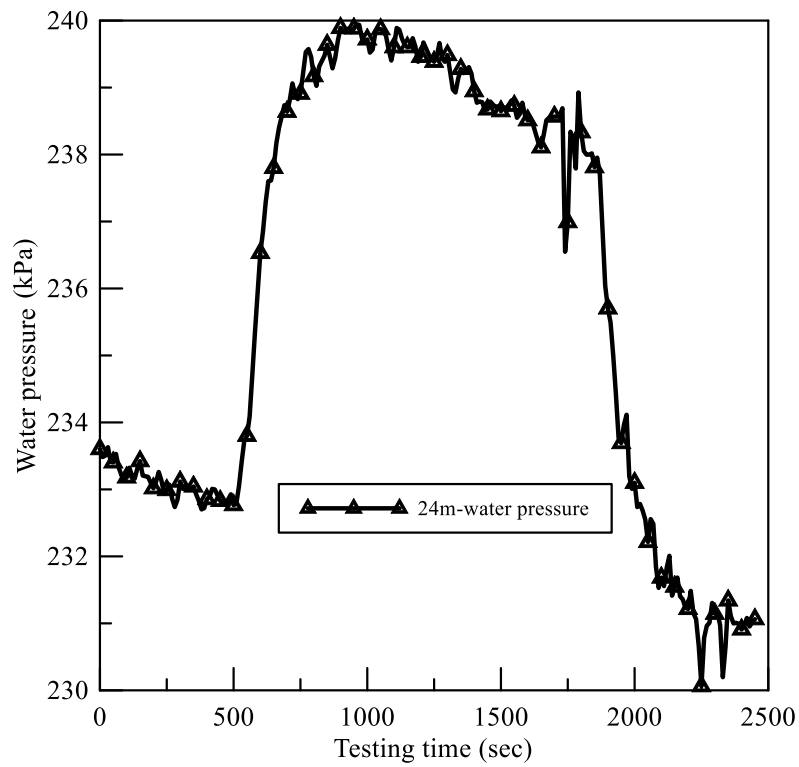


圖 52 YEW-3 24 米第二次灌水水壓變化圖

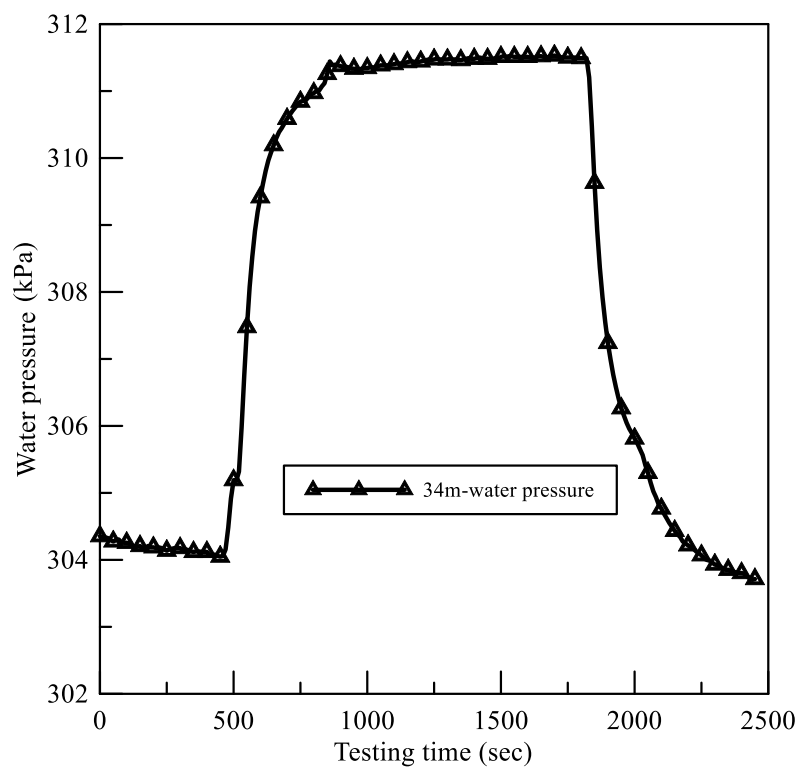


圖 53 YEW-3 34 米第二次灌水水壓變化圖

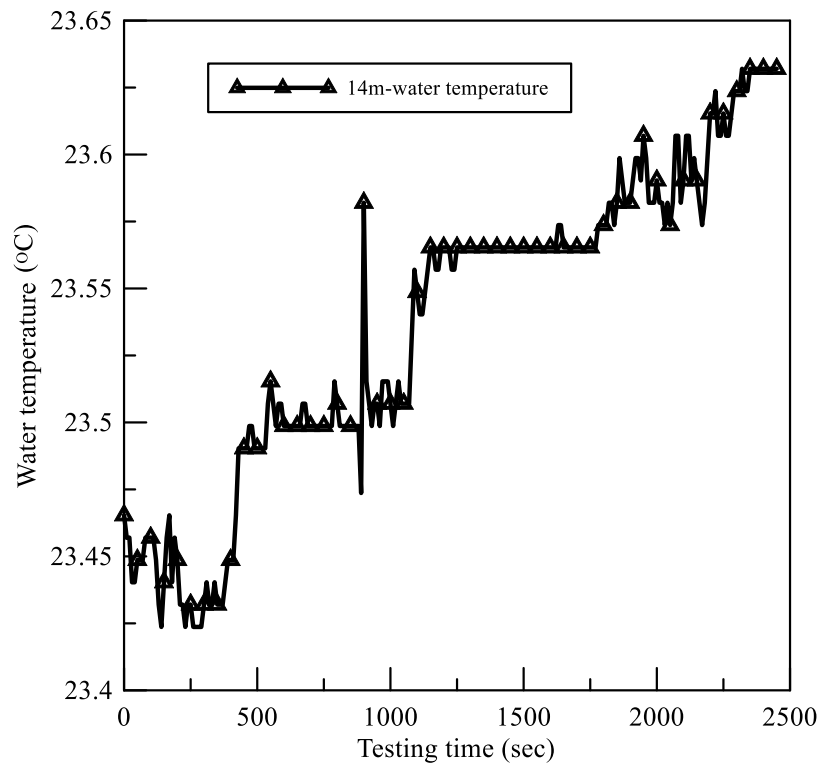


圖 54 YEW-2 14 米第二次灌水水溫變化圖

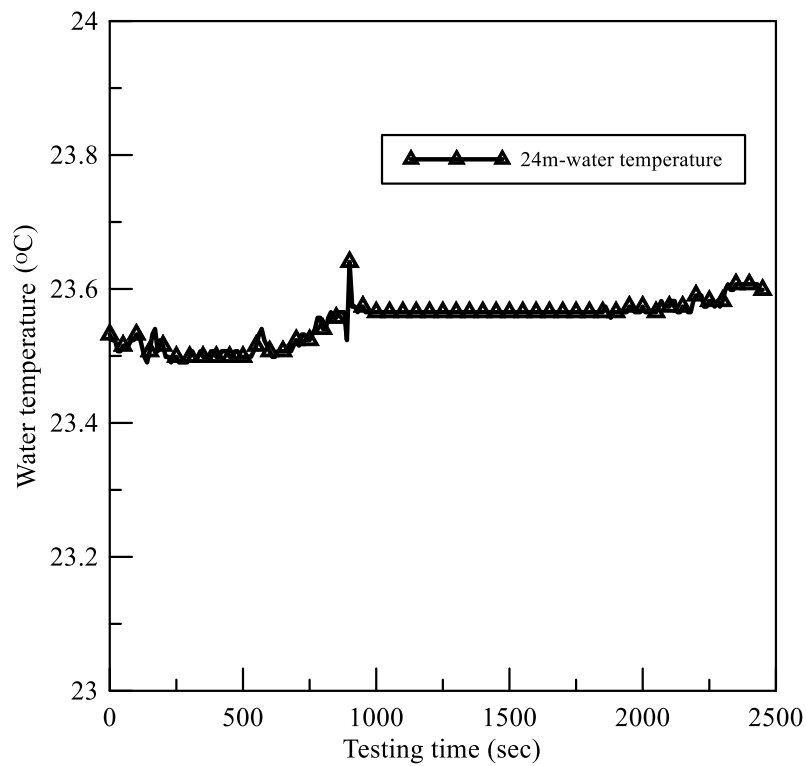


圖 55 YEW-2 24 米第二次灌水水溫變化圖



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

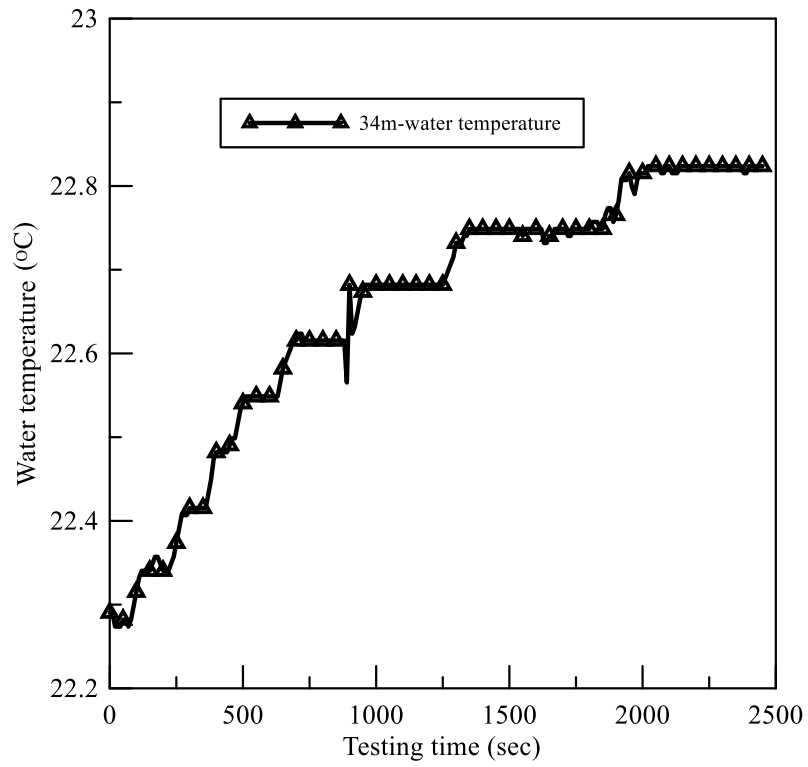


圖 56 YEW-2 34 米第二次灌水水溫變化圖

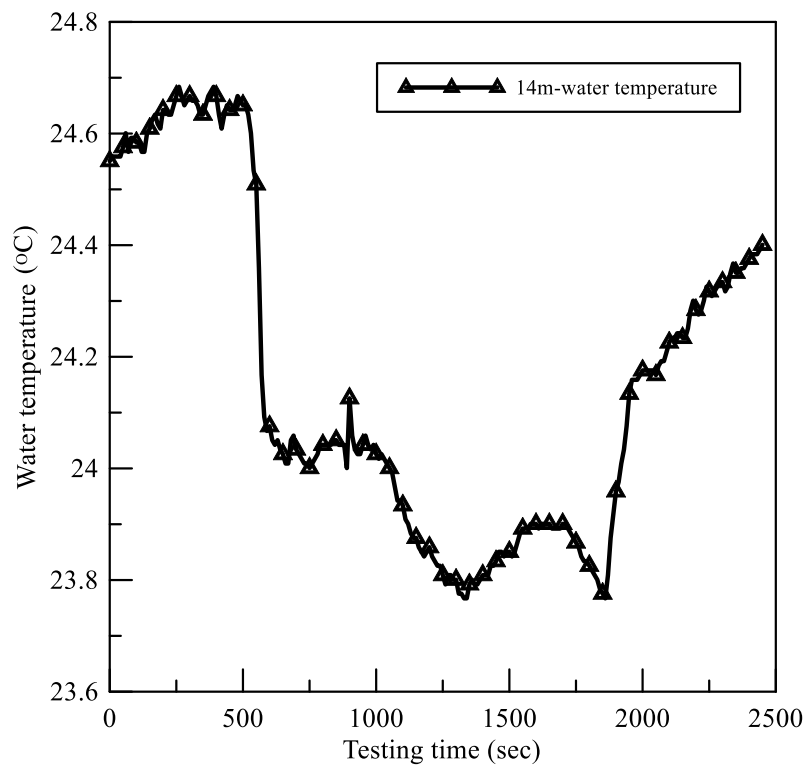


圖 57 YEW-3 14 米第二次灌水水溫變化圖

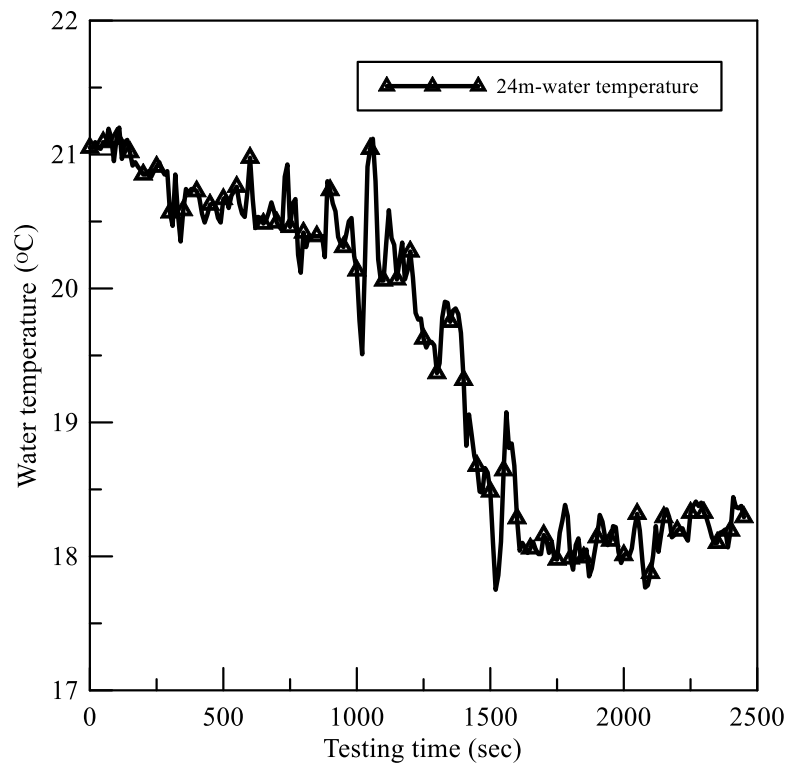


圖 58 YEW-3 24 米第二次灌水水溫變化圖

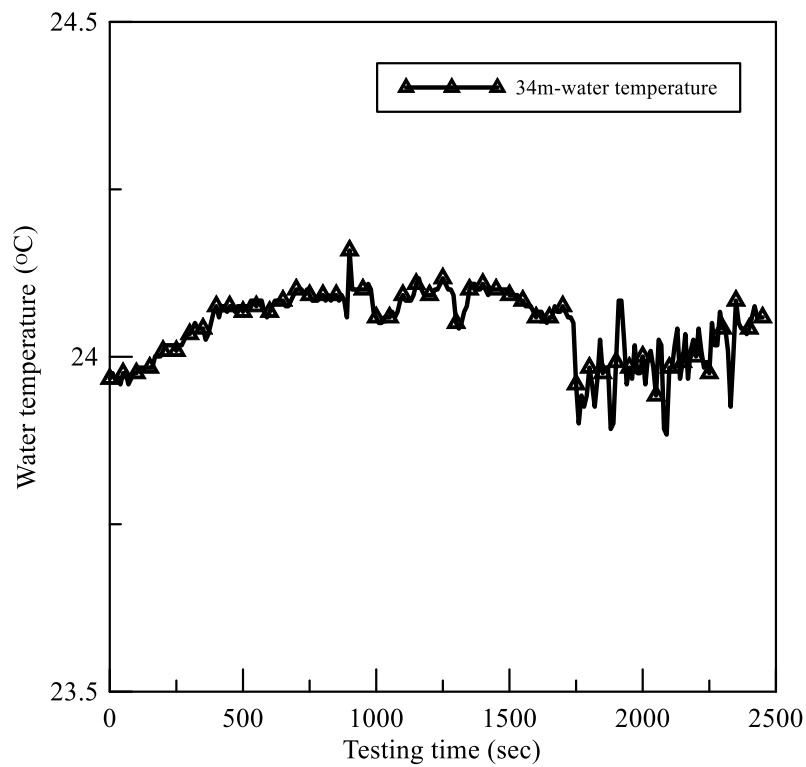


圖 59 YEW-3 34 米第二次灌水水溫變化圖



5.3 水力掃描數值試驗成果

5.3.1 數值試驗研究成果

本研究為了檢視水力斷層掃描演算法的成效，透過兩個設計案例進行數值試驗，第一個設計案例為不考慮資料誤差，第二個設計案例則考慮資料誤差。案例說明與試驗成果如下：

5.3.1.1 設計案例一

(1) 案例說明

第一個案例設計假設為一個暫態的二維水平拘限含水層 (2-D horizontal confined aquifer)，如下圖 60 所示，模擬範圍為 30 m，每個網格大小為 1 m × 1 m，含水層的邊界條件皆設定為定水頭 30 m，初始水頭在模擬區域內為均勻分布且設定為 30m。在隨機參數場設定上，本研究以 spectral method (Gutjahr, 1989; Robin et al., 1993) 產生隨機導水係數 (Transmissivity, T) 場 (如圖 60)，此隨機場之平均 T 值為 1 m²/day，空間變異為 1，參數空間相關性 (correlation scale) 設定在 x 與 y 方向皆為 10 m。在模擬範圍內，含水層共配置 8 個井 (白色圓圈)，其中選取四口井 (方框標記) 進行抽水試驗，每次抽水試驗皆持續抽水直到流場達到穩態為止。蓄水係數 S 值則設定為 0.001，初始時刻與最大時刻步伐分別為 0.001 與 1 天。

在參數推估 (反演) 的部分，本研究假設蓄水係數 S 已知，而導水係數 T 為待推估的參數。在初始 T 值的設定上，本研究假設 $T(\hat{\mathbf{f}}^{(0)})$ 的初始值 1 m²/day，其殘差共變數初值 $\ln T(\boldsymbol{\varepsilon}_{ff}^{(0)})$ 為 1，水位的共變異數 $\boldsymbol{\varepsilon}_{hh}^{(0)}$ 為 10⁻⁴ m²，參數空間關係 (correlation lengths λ_x and λ_y) 均為 10 m。在特徵值與特徵向量的選取上，本研究選用前 250 個特徵值及特徵向量，其可解釋原始資料的 84% 變異程度。

在推估結果的正確性分析上，本研究以 R^2 與均方根誤差 (i.e., L_2 norm) 作為辨識推估參數與設計參數場相似度的指標，其定義如下：

$$R^2 = \left[\frac{(\mathbf{f}^* - \bar{\mathbf{f}}^*)^T (\hat{\mathbf{f}}^{(r)} - \bar{\hat{\mathbf{f}}}^{(r)})}{n_f \text{std}(\mathbf{f}^*) \text{std}(\hat{\mathbf{f}}^{(r)})} \right]^2 \dots\dots\dots (16)$$

與



$$L_2 = \frac{(\mathbf{f}^* - \hat{\mathbf{f}}^{(0)})^T (\mathbf{f}^* - \hat{\mathbf{f}}^{(0)})}{n_f} \dots\dots\dots (17)$$

，其中 $std(\cdot)$ 為標準差， $*$ 代表觀測， $\hat{\cdot}$ 代表推估值， f 為待推估參數， n_f 為參數數量。

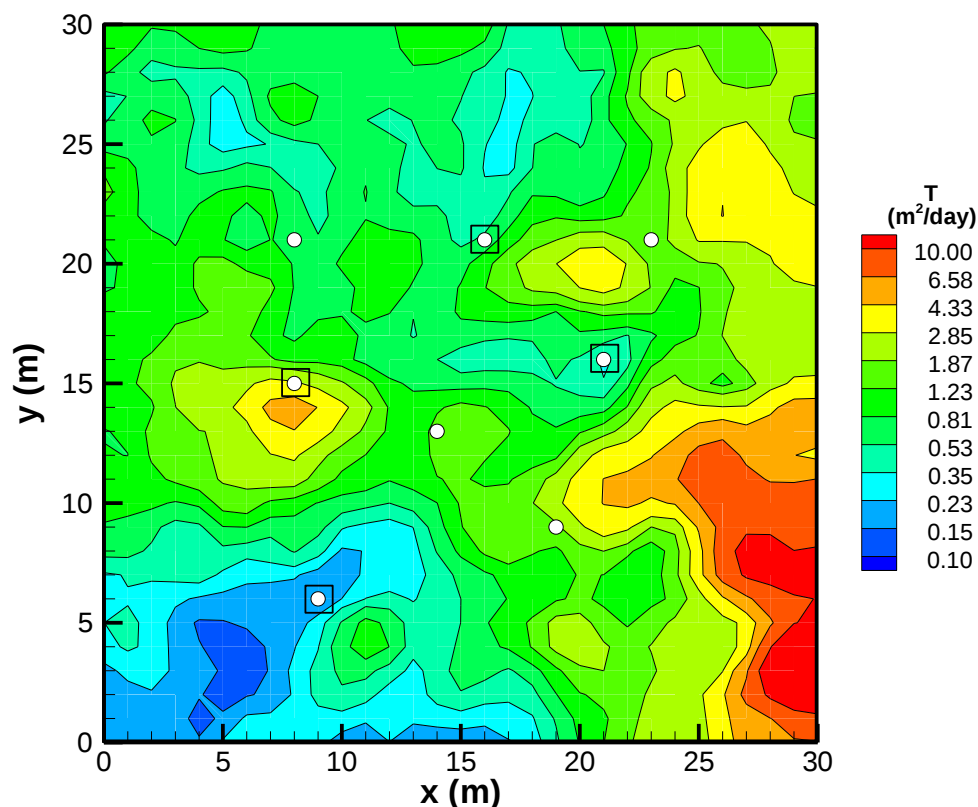


圖 60 設計之傳導係數 T (m^2/day) 場。白色圓圈為觀測井，方框代表抽水井。四個邊界條件皆設定為定水頭邊界條件 30 m。

(2) 參數推估結果

圖 61 為傳統水力掃描演算法 SLE 之推估結果，圖 62 為本研究新開發演算法推估之參數場。圖 27a 顯示觀測水位與模擬水位的均方根誤差 (L_2 norm) 與參數空間變異程度 ($\text{Var} \ln T$) 在推估過程中隨著迭代次數增加而改變的過程。圖 61b 則為最後一次迭代的模擬水位與觀測水位的分佈圖 (Scatter plot)。圖 61c 與 61d 分別為最後一次與最佳之推估 T 場圖。圖 61e 與 f 則為最後一次迭代 (圖 61c) 與最佳推估之 T 場 (圖 61d) 與設計 T 場之分佈圖。圖 61a 顯示 T 場之空間變異 (粉紅線) 在 L_2 norm 穩定後仍以一定的速率增加。此 T 場空間變異不斷增加的現象為過度參數推估 (over-calibrated) 所導致。如果僅以傳統的最小平方法進行參數推估，其目標為讓模擬水位吻合觀測水位，但模擬水位包含了數值誤差，為了彌補數值誤差導致的水位差異，此演算法會不斷的調整參數，使兩者水位吻



合，但也因此造成了推估參數過大與過小的問題。由此可知，相較於最佳推估參數而言，最後一次迭代的推估參數已經發散，其為不合理的參數場推估(圖 61c 與 e)。

相反地，若以本研究之新演算法推估 T 場，則無過度參數推估之問題。圖 62a 顯示 T 場的空間變異（粉紅線）在迭代末期（ L_2 的值減少到 10^{-10} ）收斂至一穩定值，因此最後一次之 T 場推估有效收斂，且其 L_2 及 R^2 值與 SLE 之最佳推估結果一樣好，由此可知新演算法解決了參數過度推估的問題，使得推估結果更加的穩定。

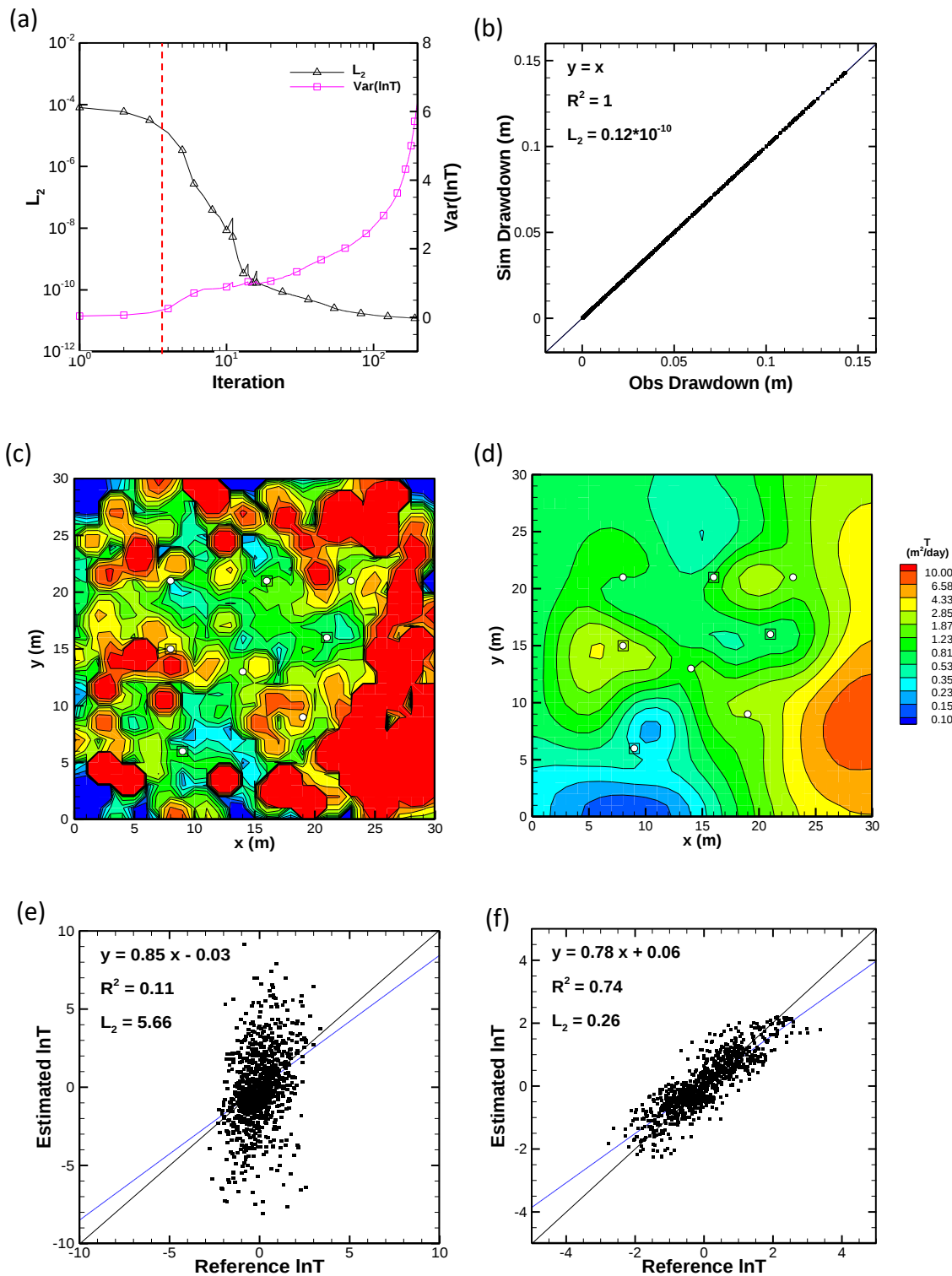


圖 61 以原始 SLE 演算法與無資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m^2/day) 場。
 (a) 參數推估過程中，觀測水位與模擬水位之均方根誤差 (L_2 norm) 與 T 場空間變異 ($\text{Var} \ln T$) 隨著 SLE 迭代過程之變化。垂直虛線代表人工判識之最佳解所在迭代次數。
 (b) 最後一次迭代之模擬水位與觀測水位散布圖。
 (c) 最後一次迭代之推估 T 場。
 (d) 最佳推估 T 場(人工判識為第 7 次迭代)。
 (e) 最後一次迭代之推估與設計 $\ln T$ 值之分佈圖。
 (f) 最佳推估(iteration 7) $\ln T$ 值與設計 $\ln T$ 值之分佈圖。



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

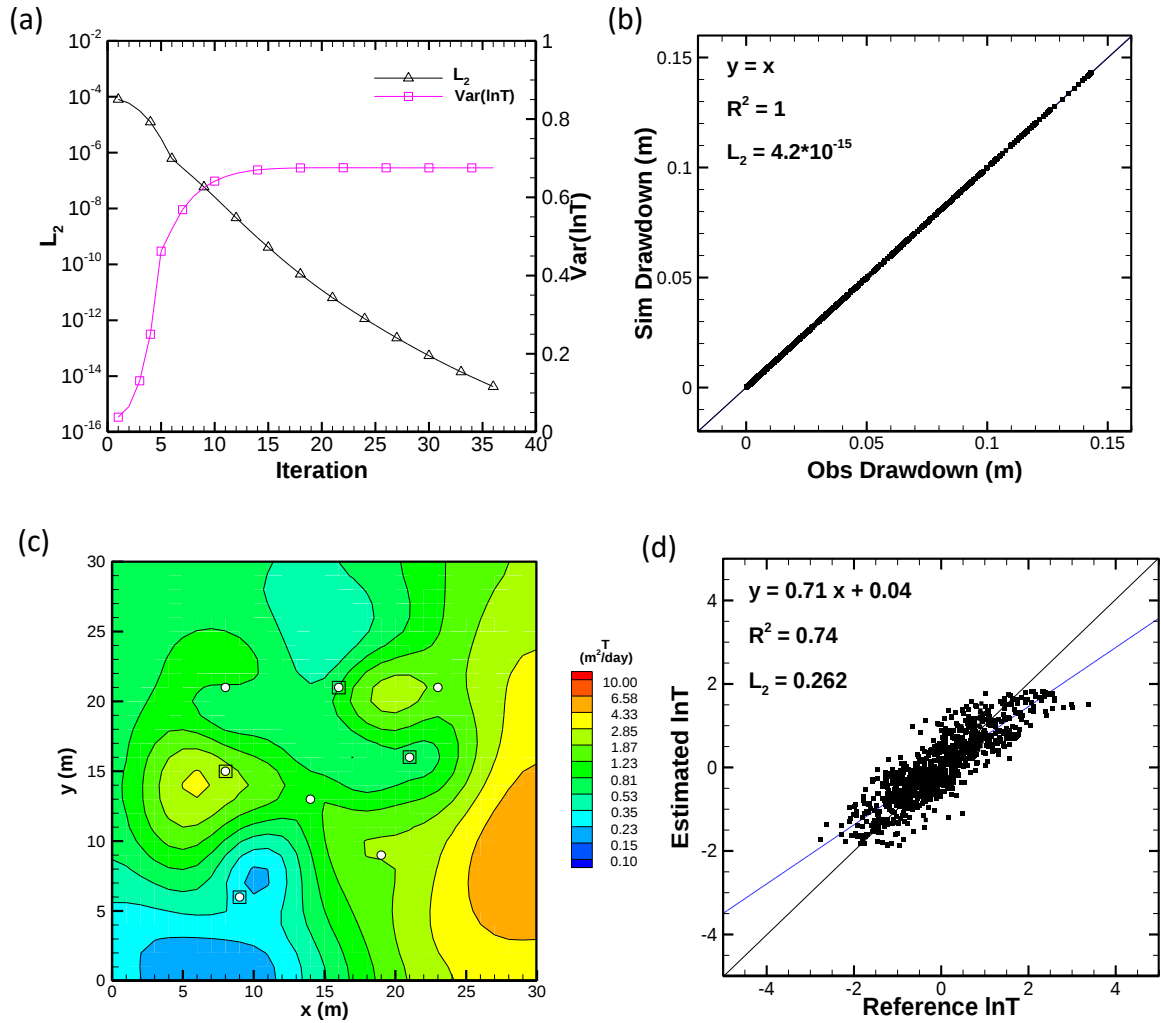


圖 62 以新演算法與無資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m²/day)場。(a)參數推估過程中，觀測水位與模擬水位之均方根誤差（ L_2 norm）與 T 場空間變異（ $\text{Var} \ln T$ ）隨著新演算法迭代過程之變化。垂直虛線代表人工判釋識之最佳解所在迭代次數。(b)最後一次迭代之模擬水位與觀測水位散布圖。(c)最後一次迭代之推估 T 場。(d)最後一次推估 $\ln T$ 值與設計 $\ln T$ 值之分佈圖。



5.3.1.2 設計案例二

這個案例主要目的為展示新演算法的優勢，當考慮資料誤差時，新演算法將不會過度推估參數且仍能穩定地收斂。本研究將標準差為 10^{-3} m 的高斯噪音(Gaussian noises) 加到觀測水位上，並以之作為參數推估之基準。而數值模式的設定與反演的設定皆與前一個案例一致。

圖 63 顯示以原始 SLE 演算法的推估成果，包含參數推估過程 L_2 norm 與 T 場空間變異 ($\text{Var } \ln T$) 在迭代過程中的變化、模擬水位與觀測水位之散布圖與推估 $\ln T$ 值與設計 $\ln T$ 值之分佈圖等。比較最後一次迭代推估之 T 場 (圖 63c 與 e) 與最佳推估之 T 場 (人工判釋) (圖 63d 與 f) 可知，最後之 T 場已經發散，此部份可由 $\ln T$ 逐漸增加的空間變異 (圖 63a 中的粉紅色線)、圖 63c 中顯示的過高與過低的推估值 (圖 63c 中的紅點與藍點)，以及圖 63e 中毫無相關性的推估 T 值與設計 T 值可知。相反地，圖 64 顯示新演算法的推估結果良好，最後一次的推估結果順利的收斂，且推估之 T 場相當合理。由圖 64a 中可知， $\ln T$ 的空間變異 (粉紅線) 最後趨於穩定，並無持續上升的情況，且模擬水位與觀測水位相當一致 (圖 64b)。再者，由最後一次推估的 T 場等值線圖 (圖 64c) 與圖 64d 之推估 $\ln T$ 值與設計 $\ln T$ 值之分佈圖可知，新演算法最後推估 T 場與設計 T 場，以及原始 SLE 之最佳 T 場分布 (人工挑選，圖 64d 與 f) 相當接近。因此，這個案例分析結果可充分支持新演算法不會過度推估參數，且會自動穩定的收斂到最佳解。



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

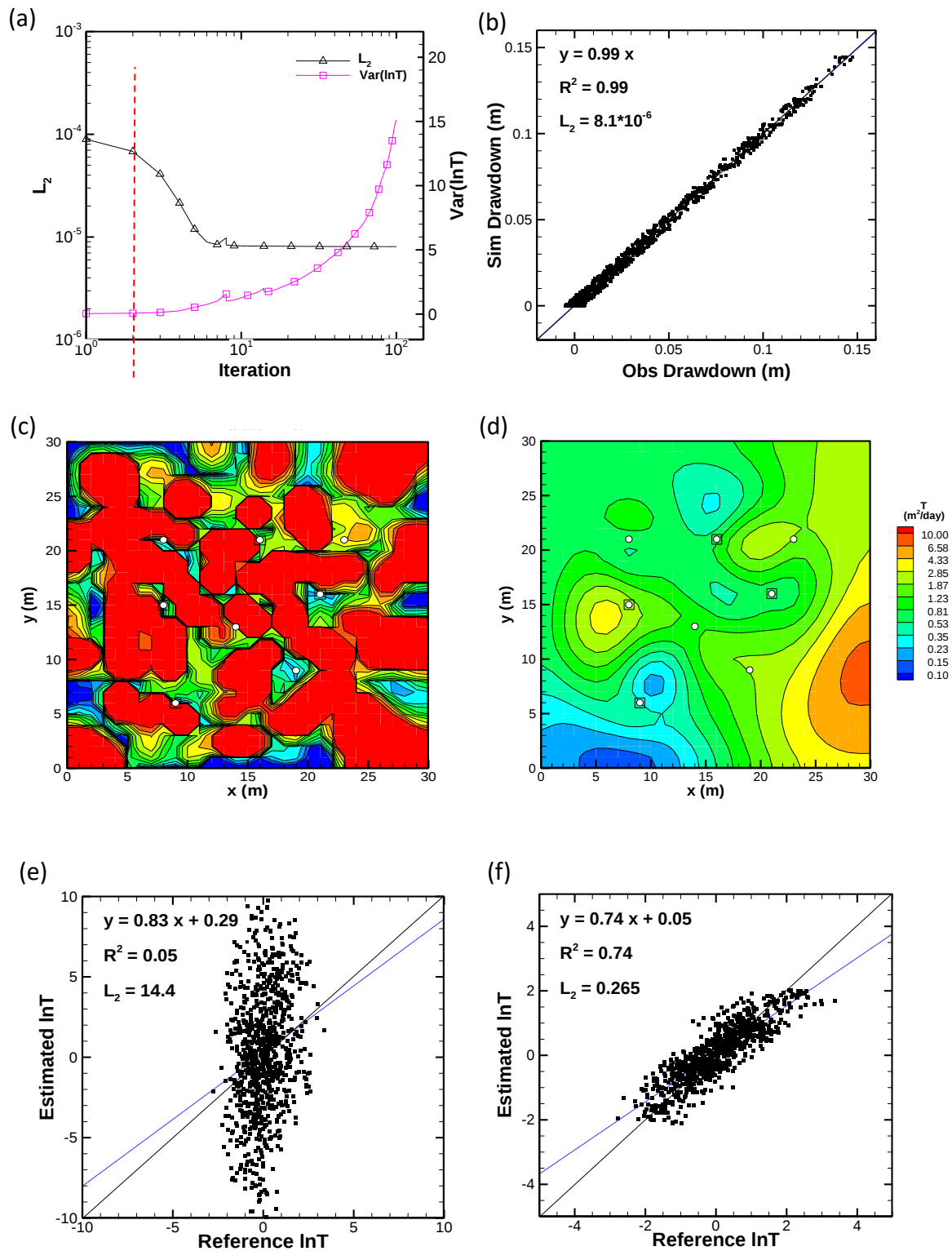


圖 63 以原始 SLE 演算法與含資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m²/day) 場。(a) 參數推估過程中，觀測水位與模擬水位之均方根誤差 (L_2 norm) 與 T 場空間變異 ($\text{Var} \ln T$) 隨著 SLE 迭代過程之變化。垂直虛線代表人工判識之最佳解所在迭代次數。(b) 最後一次迭代之模擬水位與觀測水位散布圖。(c) 最後一次迭代之推估 T 場。(d) 最佳推估 T 場(人工判識為第 6 次迭代)。(e) 最後一次迭代之推估與設計 $\ln T$ 值之散佈圖。(f) 最佳推估(iteration 6) $\ln T$ 值與設計 $\ln T$ 值之分佈圖。

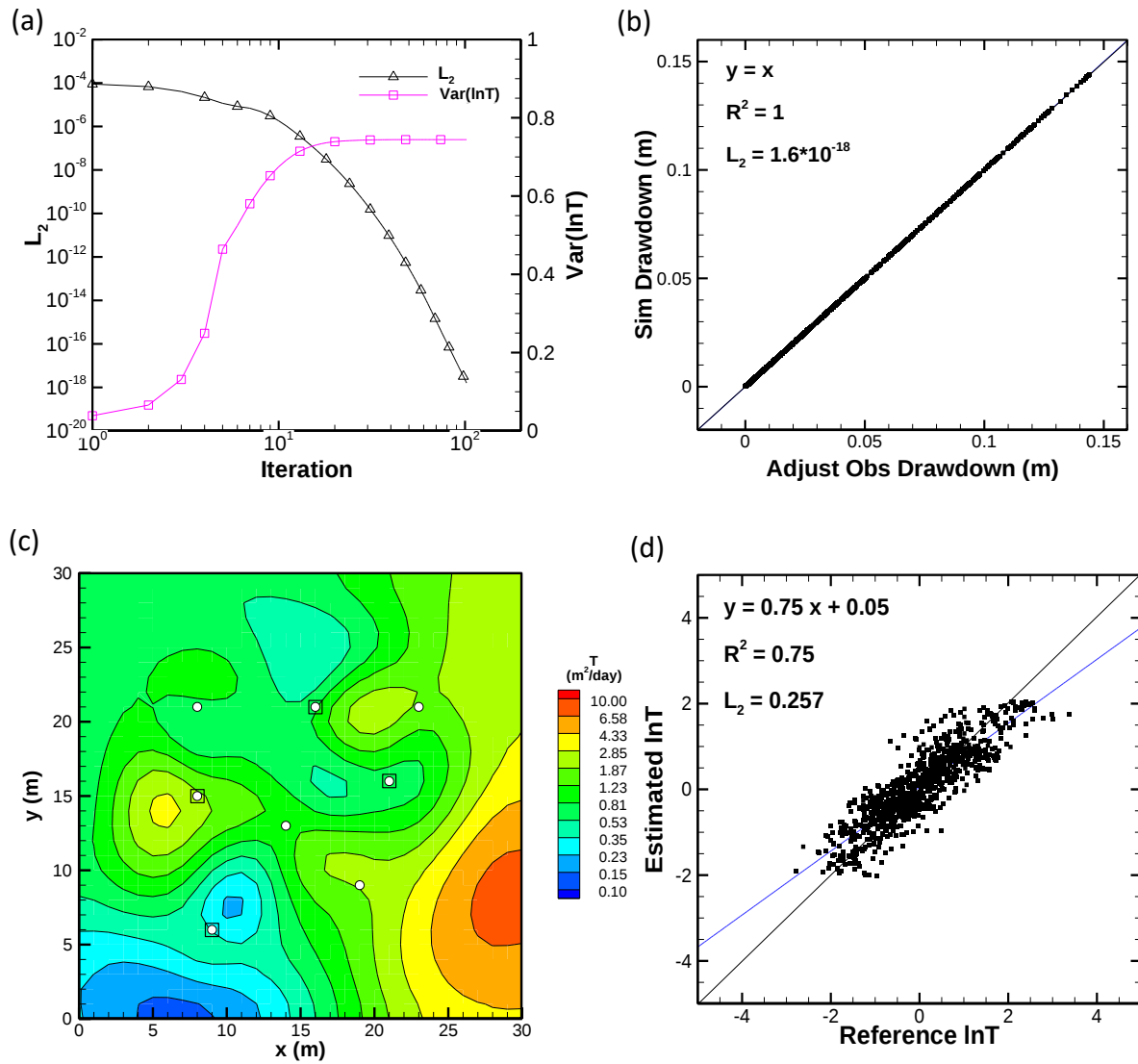


圖 64 以新演算法與含資料誤差之水位資料推估之傳導係數 T (m^2/day) 場。(a) 參數推估過程中，觀測水位與模擬水位之均方根誤差 (L_2 norm) 與 T 場空間變異 ($\text{Var} \ln T$) 隨著新演算法迭代過程之變化。垂直虛線代表人工判識之最佳解所在迭代次數。(b) 最後一次迭代之模擬水位與觀測水位散布圖。(c) 最後一次迭代之推估 T 場。(d) 最後一次推估 $\ln T$ 值與設計 $\ln T$ 值之分佈圖。



5.3.2 計算量與效能分析

本研究所建立之降階反演方法，在進行奇異值分解時，若奇異值數量 (nsvd) 小於 4000 個以下時，透過 intel MKL, MATLAB, 或 numeric recipe 等工具計算奇異值分解相當有效率(Lahabar and Narayanan, 2009)。若研究區域範圍與水文地質參數之半變異元比值越小時，所需取用的奇異值數量 nsvd 越少，計算量的負擔越小，反之，則會以三次方的數量增加。再者，計算時所需呼叫的之前項模擬 (forward models) 次數為 $\text{nsvd} \times \text{nevent}$ (抽水試驗次數)，對於複雜的前項模擬模式 (如飽和變飽和水流或熱傳等非線性系統)，此方法可有效的求解共變異數，不需計算敏感度矩陣，相較於傳統的 adjoint-state method，對於求解飽和變飽和水流或熱傳等非線性系統則需至少呼叫前項模擬 nw (觀測井數量) $\times \text{nstept}$ (觀測時刻數) $\times \text{nevent}$ 次。因此本研究的反演優勢除了矩陣儲存大小相對較小外，在呼叫前項模擬的次數上亦能有效降低。以本案例而言，在一次的反演迭代中，本研究之方法在計算敏感度矩陣時需呼叫前項模擬 1000 次 (250×4)，而原始的 SLE 則需呼叫 1184 ($8 \times 37 \times 4$) 次，共節省了 184 次的前項模擬。若觀測值的數量增加，則前項模擬次數的差距將更大。

在計算效能的分析上，由案例一可知，新演算法僅需進行 36 次反演迭代計算即完成收斂，耗時約 4.89 min，而原本的演算法則進行 200 次反演迭代，耗時約 21.25 min，且最後推估結果發散。在案例二中，新演算法僅需進行 23 次反演迭代計算即完成收斂，耗時約 3.17 min，而原本的演算法則進行 100 次反演迭代，耗時約 8.83 min，且最後推估結果發散。由此比較再次說明新演算法除了可穩定收斂外，其所需之迭代次數更少，計算效率更佳。



5.4 結論與建議

5.4.1 結論

1. 本研究已初步完成開發可應用於 40m 深之光纖光柵 (FBG) 多深度水壓、水溫與電子式導電度觀測系統，此系統已經過三次現場測試 (一次淺層與兩次深層含水層)，證實此系統確實可於既有觀測井進行多深度量測。
2. 由量測結果發現於注水功能在阻塞之濾管位置應可達到類似洗井之效果。
3. 由注水後之多深度水壓變化資料可初步研判井與井之間的水文地質改況。
4. 由導電度資料可知場址之地下水導電度偏高，而由觀測系統之不鏽鋼 316 發生鏽蝕可推測現場地下水 PH 值應相當低。
5. 水力掃描演算法加入 SVD 降低參數維度與加入系統誤差後，不僅大幅降低計算量，且收斂性亦同時改善，使整體之計算性能更佳。

5.4.2 建議

1. 本研究目前之觀測系統應進一步強化抗酸與抗腐蝕能力，以適應研究場址之惡劣環境。
2. 下年度現地試驗時，應同時量測場址內不同深度之 PH 值，以作為觀測系統抗酸能力設計之參考。
3. 下年度現地試驗時，可利用注水功能，對選定觀測井進行選定深度洗井，以利後續試驗進行。另外，亦可針對此功能進行微調，以增加本系統之功能。
4. 本系統的限制主要需要供電與供水 (灌注系統使用)，若場域無法穩定供電與穩定供水，則較不利於本系統進行觀測與灌注，但考量污染場址多為工廠，故此限制應相對較小。
5. 此系統感測器主要透過光纜進行連接，故場域內若有大型車輛移動，則應避免光纜被車輛碾壓，以避免訊號損失或斷訊情況發生。
6. 此系統可視為一多功能井下觀測平台，未來可依據需求進行觀測項目之擴充，此外亦可進行水質採樣，故可提供地球化學等相關研究分析之用。



(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. 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.
3. Drusová, S., Bakx, W., Wexler, A. D., & Offerhaus, H. L. (2019). *Possibilities for Groundwater Flow Sensing with Fiber Bragg Grating Sensors*. Sensors, 19(7), 1730.
4. 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.
5. 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.
6. Lemming, Gitte, et al. (2013). *Optimizing the environmental performance of in situ thermal remediation technologies using life cycle assessment*. Groundwater Monitoring & Remediation 33.3: 38-51.
7. Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van De Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M. and Parlange, M.B., (2006). *Distributed fiber optic temperature sensing for hydrologic systems*. Water Resources Research, 42(12).
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。。