



行政院環境保護署

110 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

加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析 度地下水流速與流向調查

期末報告 (定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立台灣海洋大學／地球科學所
專案主持人：邱永嘉 教授
專案執行期間：110 年 03 月 19 日起至
112 年 02 月 28 日止

中 華 民 國 111 年 02 月 印製



專案名稱 加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查 主持人 邱永嘉 期末報告 定稿



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	110 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：邱永嘉 NO：B9	
計畫名稱	加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 江康鈺委員 1. 請補充說明本計畫應用之條件或限制因子?另外干擾因子為何?此外，未來計畫應用時之作業準則(或手冊)宜建立並供後續應用之參考。		1. 感謝委員建議。本計畫在進行流速推估時，主要透過主動式的加熱方式進行，並假設井內之水溫與井外臨近含水層之水溫達到平衡。地下水流速的判釋主要取決於含水層流速的快慢，當水流速度過快（礫石層，10^{-3} m/s 以上），熱能消散過於快速，導致井內水溫上升不顯著，將造成流速推估上的誤差。若欲克服此一問題，可將加熱功率往上提升，藉此提高溫差以增加流速上之判釋能力，然而加熱功率之提升，現地則需有穩定電源供應之條件配合。此外，本研究主要利用既設井來進行試驗，因此井體的設計亦將影響流速的推估。依據本計畫所設計之量測與分析方式，最適當之井體設計為整口井不開篩，其次為長區段開篩。上述之說明已於期末報告修正版中予以補充。 本計畫所提出調查方法之標準作業流程（包括：加熱時間、加熱空率、光纖種類、光纖佈設方式等）、應用範圍、地質條件及限制預計於第二年期末報告中綜整後提出參考建議。	
2. 對於溫度分層之兩次測試結果，部分深度之溫度分布狀況似有所差異，其		2. 感謝委員建議。本計畫針對井 K00268 進行兩次的主動式加熱試驗，然後兩次試	



中溫度變化之合理或可接受之誤差範圍，宜進一步釐清予說明。	驗所判釋之相對透水區段非常一致。兩次試驗間之溫度變化有些微的差異，其主要原因與光纖受損及「纏繞光纖」的安裝有關。若將此外部因素予以剔除，兩次試驗之溫度變化幾乎相近。DTS 在量測溫度時，有非常高之精度，以本計畫之試驗設計及溫度校正，DTS 量測溫度的準確度達 0.045-0.053°C；而在流速推估上，當溫差高於 0.5°C 以上，即可準確地予以推估(最適當之溫差為 2-6°C)。上述之說明已於期末報告修正版中予以補充。
3. 有關地下水流向之擬合與驗證工作，宜以妥適之實地量測與統計分析予以評估說明。	3. 感謝委員建議。地下水流向之現地驗證工作除了與區域之地下水流向比較分析之外，也將參考霖昌公司的「多深度單井流速流向測定」結果，同時將本研究計畫跨孔試驗所獲得結果及第二年預計執行的 TV-DTS 量測結果一併比較分析，屆時亦將選用適當之統計分析方式評估與驗證地下水流向。上述之說明已於期末報告修正版中予以補充。
委員二 李俊福委員 1. 本研究計畫以自製研發 TV-DTS 量測熱傳導解析之模擬結果，用以測定單井之地下水流向與流速，期末報告內容撰述大致完整，雖調整本年度之工作內容，但結果仍具體符合預期。 2. 應說明應用 TV-DTS 量測與傳統水文試驗產生差異之原因，例如霖昌公司多以試驗之 K 值大於 TV-DTS 量測值。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議。TV-DTS 之目的為利用單井即可獲得流速與流向之資訊，而傳統的水力試驗（例如：微水試驗、單井回復試驗），雖然亦為單井的試驗，但其所獲得的資訊僅有水文地質參數，並無法得知地下水流向，仍須透過鄰近的監測井水位，方可推估水流方向。霖昌公司所提供之數值為水力傳導係數 K 值，然本計畫透過主動式加熱光纖或 TV-DTS 所推估則為流



	速，兩者之間並不相同。若能夠在現地量測多口井的地下水位相關資訊，可將推估之流速透過達西定律換算為水力傳導係數 K 值。上述之說明已於期末報告修正版中予以補充。
3. 光纖之溫差之穩定性如何?最小溫差(與背景溫度)應維持在多少度以上?	3. 感謝委員建議。光纖之溫差(加熱升溫)主要透過自製研發的加熱器(heating pulse controller, HPC)來進行光纖銅線的加熱，而 HPC 中的微處理器(microfusion)為一非常精密之儀器，可針對電流、電壓或功率進行極為細小的設定，一旦設定之後，在發電機穩定供電的前提下，可以提供非常穩定的熱能，相對所的溫差(升溫)亦非常穩定。依據本團隊在本計畫及過去之經驗顯示，在主動式加熱試驗中，當溫差高於 0.5 °C 以上，即可準確的推估流速，一般來說，最適當之溫差約為 2-6°C。
4. 地下水流速最少要多少以上才能獲得正確的流向?	4. 感謝委員建議。以 TV-DTS 進行地下水流向判釋時，除了受水流速度的影響之外，加熱功率、加熱時間以及加熱光纖與周遭光纖之距離均會影響流向之解析。此外，加熱光纖周圍之量測光纖之數量(本計畫所設計之數量為 4 個)亦會影響流向推估之準確性。由於本計畫目前對於 TV-DTS 僅在實驗室進行可行性測試，尚未實際的應用於現地量測，待後續量測資料的持續搜集，並嘗試搭配解析解或數值解量化上述影響因子間之關係，將有機會針對此議題進行探討。
5. P.88 水力傳導係數 $2.5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 是否為誤植?	5. 水力傳導係數 $2.5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 並未誤植。



委員三 李有豐委員

- | | |
|--|---|
| <p>1. 跨孔熱示蹤試驗已具備良好的地下水流向流速判斷能力，若後續 TV-DTS 單孔測試能夠實現，可更精細分析地下水流布，有助於水文調查與污染整治。</p> <p>2. 研究團隊自製之 TV-DTS 未能現地測試，是否已規劃後續補充試驗？</p> <p>3. 水的熱傳導與空氣落差頗大，實驗室試驗採空氣中測試之意義為何？</p> <p>4. 各地區之地質特性與地下水流動時序變化多不相同，本研究二維數值模式 (MODFLOW+MT3DMS) 所使用之水力傳導係數 (2.5×10^{-5} m/s) 與熱延散係數 (0.38m) 均只能代表單一地區之特性，若後續要廣泛使用，需進行各地之係數調查。</p> | <p>1. 感謝委員肯定。單井的 TV-DTS 流速流向測定將為本計畫第二年度之工作重點之一。</p> <p>2. 感謝委員建議。由於第一年度計畫執行受疫情影響，無法於現地進行單井的 TV-DTS 流速流向測定。第二年度將規劃 2-3 次的 TV-DTS 試驗，針對淺部及深部含水層進行流速與流向推估，並與跨孔試驗及相關研究報告之流速分析進行比較，探討 TV-DTS 之可行性與適用性。</p> <p>3. 感謝委員建議。在實驗室進行 TV-DTS 試驗主要目的為測試其可行性，在無法進行現地試驗的同時，嘗試於實驗室內進行儀器之優化，以利後續現地試驗的規劃。至於實驗室採取水與空氣兩個不同介質進行試驗乃因實驗室空間限制，無法放置 3 公尺以上之垂直井管，因此部分 TV-DTS (總長約 2 公尺) 之區段裸露於空氣段中。雖然水與空氣之差異極大，然而透過水流與氣流方向之控制，依然可以初步評估 TV-DTS 用於單井推估流速流向之可行性。</p> <p>4. 感謝委員建議。在進行數值模式率定時，水力傳導係數與熱延散係數的推估係依據 DTS 所量測到之溫度擬合而得，若欲驗證推估數值之可信度，唯有透過現地採樣或試驗來進行驗證。而此推估之參數數值確實會因為模場水文地質條件之不同而有所差異，然本計畫僅提供一方法論來推估水力及熱傳輸相關參數，而參數值仍需透過現地調查或試驗方可獲取。</p> |
|--|---|



委員四 吳一民委員 1. 執行進度及成果符合計畫需求。 2. 計畫進度查核表建議以實際執行年月(110.3.19-111.2.28)撰寫，以利查核。 3. P.22 第二年甘特圖，期末預定查核點項目「4...標準流」，"程"漏缺字，請補充;另說明欄項次錯誤，誤植為4、5、6，亦請修正。 4. 建議評估及說明此技術適用之場址性質為何?是否有相關限制因素?例如土壤透水性、地質構造等，以利瞭解本技術之通用性。 5. 加熱時是否會產生垂直流影響溫度量測之情形?	1.感謝委員肯定。 2.感謝委員建議。計畫進度查核表已依據實際執行年月修正於期末報告中。 3. 感謝委員指證。報告中誤植的部分，已修正於期末報告中。 4. 感謝委員建議。本計畫在進行流速推估時，主要透過主動式的加熱方式進行，並假設井內之水溫與井外臨近含水層之水溫達到平衡。地下水流速的判釋主要取決於含水層流速的快慢，當水流速度過快（礫石層，10^{-3} m/s 以上），熱能消散過於快速，導致井內水溫上升不顯著，將造成流速推估上的誤差。若欲克服此一問題，可將加熱功率往上提升，藉此提高溫差以增加流速上之判釋能力，然而加熱功率之提升，現地則需有穩定電源供應之條件配合。此外，本研究主要利用既設井來進行試驗，因此井體的設計亦將影響流速的推估。依據本計畫所設計之量測與分析方式，最適當之井體設計為整口井不開篩，其次為長區段開篩。上述之說明已於期末報告修正版中予以補充。 本計畫所提出調查方法之標準作業流程（包括：加熱時間、加熱空率、光纖種類、光纖佈設方式等）、應用範圍、地質條件及限制預計於第二年期末報告中綜整後提出參考建議。 5. 感謝委員建議。根據文獻指出，當井內溫差超過 10°C 以上，將容易產生自然對流
---	--



(free convection)，進而形成井內垂向之水流。因此，在進行試驗時，加熱功率應避免設定過大，僅需提供水溫上升達到流速推估分析之門檻即可(約 2-6°C)。此外，自然對流與井徑大小有關，井徑越大，越容易發生自然對流。本計畫所選用的試驗井，其井徑皆為 2 吋，因此，較不易發生自然對流的現象。

專案主持人：_____ (簽名及蓋章)



110 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗

一、專案基本資料表

申請編號： (由本署填寫)

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼	LAB - S - I - C1 - P (如非實驗性質含氣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	國立臺灣海洋大學地球科學研究所				
機構地址	基隆市中正區北寧路 2 號				
專案主持人	邱永嘉		職等／職稱	副教授	
協同主持人	董天行		職等／職稱	經理	
專案名稱	中文	加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查			
	英文	A high-resolution determination of groundwater flow directinos and velocities using active fiber optic distribued temperature sensor in cross-borehole tests			
	關鍵字	地下水污染、熱示蹤劑、光纖溫度感測器、地下水流速、地下水流向			
執行期程	自 民 國 1 1 0 年 3 月 1 9 日 起 至 民 國 1 1 2 年 2 月 2 8 日 止				
專案主持人	姓名：邱永嘉 E-mail：ycchiu@mail.ntou.edu.tw 專線：02-2462-2192#6515 手機：0988612599				
專/兼任人員	姓名：馬嵩哲 E-mail：peterma258@gmail.com 專線：02-2462-2192#6516 手機：0910689462				
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	566,367	1,038,470	(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	600,585	1,200,000	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	333,230	436,200	(含差旅與租賃費用)
	5.	雜項費用	18,000	82,000	(1~6 項相加之 5%為限)
	6.	行政管理費	151,818	275,667	(1~5 項相加之 10%為限)
	7.	自籌款			(申請單位自行籌備款項)
	申請補助金額(1~6 項)		1,670,000	3,032,337	總金額：4,702,337
計畫總金額(1~7 項)		1,670,000	3,032,337	總金額：4,702,337	

說明：

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

專案主持人：_____ (簽名及蓋章) 日期：_____

(請蓋上申請單位大小印)









110 年度專案成果績效自評表

填表日期：111 年 2 月 20 日

一、專案基本資料

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他		
執行機構	國立臺灣海洋大學 地球科學所	專案主持人	邱永嘉 副教授
專案名稱	加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查		
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欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後 半年 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	1	2		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		本計畫為二年期計畫，期刊論文預計於計畫結束後，開始進行撰寫。
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告	1	0	1		
	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	0	1			
	(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	0	2		
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1	0	1		
		(2)跨機構團隊	1	0	1		
		(3)形成研究中心					



項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後 半年 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表名稱)
		(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	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 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	0	0		本計畫為二年期計畫，已於第一年結束前開始申請發明專利。
			新型/設計	1	0	0		本計畫為二年期計畫，已於第一年結束前開始申請新型專利。
			合計	2	0	0		
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	(1)技術(件數)						



目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 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)
項目							
	產業技術	(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)					
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	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 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 政策 推動	3.協助政府 推動(件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研



究成果對本署政策推動之助益。（200 字為限）

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

參與人員可學習分散式光纖溫度感測器的操作技巧及原理，瞭解孔隙介質中熱傳輸與溶質傳輸之基礎知識。預計包含 1-2 篇國內外研討會論文或國際期刊論文發表、研究團隊養成、博碩士培育。

產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)

研究成果可提供產業界創新量測技術在水文地質調查上的應用，亦可進一步瞭解複雜的水文地質環境，掌握污染物傳輸路徑，並針對後續的污染整治工作進行評估。

政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)

此創新技術應用於地質敏感區調查，提供水資源規劃與管理的最佳策略，有效解決台灣水資源匱乏之議題。







研究成果中文摘要

傳統的水文地質調查方式，僅能針對大區域的環境進行試驗，在地下含水層極為複雜的情形下，由於現地資料空間解析度的不足，將導致水文地質狀況掌握不易，產生含水層透水區段及地下水流速、流向推估上的誤判。有鑑於此，本計畫選定於苗栗縣頭份鎮的永貞宮地下水污染場址，以熱能為地下水流示蹤劑，搭配創新的分散式光纖溫度感測器 (fiber-optic distributed temperature sensor, FO-DTS) 量測方法，獲取空間與時間上的高解析度連續性量測資料，進行高精度的水文地質環境調查工作。本年度針對場址內的第一含水層與第一滯水層進行試驗，試驗結果顯示，單井的加熱試驗配合解析解的流速推估，深度 17~19 公尺與 37~40 公尺為流速相對較快的區域，深度 19~35 公尺則為流速相對較低的區域，透水與不透水區段可清楚的於以判釋，流速在空間中垂直方向上的解析度高達 0.5 公尺。跨孔的熱示蹤劑試驗搭配熱傳輸解析解分析結果顯示，第一含水層之流向結果約為東北往西南向，流向在不同季節下變化不大，與文獻報告之大致流向相符，透過跨孔試驗，地下水流向可以明確地予以描繪。透過地下水熱-水耦合數值模式模擬與率定，推估第一含水層的水力傳導係數為 2.5×10^{-5} m/s、熱延散係數為 0.38m，且根據參數敏感度分析結果得知，觀測井溫度變化受水平水力傳導係數影響較為顯著。透過自製研發的高精度纏繞光纖在現地試驗結果，纏繞方式在短距離內大量增加光纖量測點，大幅度提高溫度資料在空間上的解析度，由原來的 25 公分提升至 1.05 公分，高解析度資料詳細記錄了地層中細微的溫度變化，有助於解析微尺度的水文地質資訊。藉由自製研發之 temperature vector DTS (TV-DTS) 實驗室測試與熱傳輸解析解模擬結果，當流體具有顯著性的流動時，TV-DTS 確實能應用於單井的地下水流向測定。本研究後續工作將著重於利用自製研發的「高精度纏繞光纖」及「TV-DTS」，進一步提升光纖溫度感測器在空間上之解析度，解析關鍵細部地質構造，並同時獲得單井的高解析度連續性地下水流向與流速。此外，第二年度亦將針對試驗模場之深部含水層，進行地下水流速與流向之測定，進而推算其水文地質資訊。本研究計畫透過分散式光纖溫度感測器的量測優勢，可提供地下水污染場址一個高解析的井下水文地質調查方法，冀望未來能對於土壤與地下水污染調查及整治帶來新的契機。

關鍵詞：地下水污染、熱示蹤劑、光纖溫度感測器、地下水流速、地下水流向









研究成果英文摘要

When using conventional approaches to explore field hydrogeology, only a relatively large scale of data can be obtained. Due to the complexity of aquifers, the insufficient measured data in terms of space and time could cause the mis-interpretation of permeable zones and groundwater flow velocity and directions. This will lead to the challenge of comprehensively understanding hydrogeological conditions within the aquifers. In this study, the groundwater contaminated site located in Toufen city in Miaoli county is selected to demonstrate the fiber-optic distributed temperature sensor (FO-DTS) technique based on the heat tracer test. The field experiments of single-well heating tests and cross borehole heat tracer tests focus on the first aquifer and the first aquitard this year. The estimated for groundwater velocities based on the analytical solution of heating line source from the single-well heating test shows that the higher velocities located at the depths of 17~19 m and 37~40 m while lower velocities located at the depths of 19~35 m. The permeable/impermeable zones can be clearly identified and the associated spatial resolution can reach to 0.5 m. The cross-borehole heat tracer test with the numerical simulation shows that the hydraulic conductivity and the heat dispersivity is 2.5×10^{-5} m/s and 0.38 m, respectively. According to the sensitivity analysis, the temperature is more sensitive to the horizontal hydraulic conductivity. The results of wrapped DTS experiments shows that due to the observation points increasing, the obtained high resolution of temperature improved from 25 cm to 1.05 cm can be used for further analysis of the hydrogeological information in small scales. Based on the tests of temperature vector-DTS (TV-DTS) in the laboratory and the analytical solution, the results show that TV-DTS has the capability to detect the groundwater flow direction in a single well. The future work will focus on the optimization of high resolution of wrapped DTS design and the implementation of TV-DTS at the field to further accurately estimate groundwater flow velocities and directions by just using a single well. Furthermore, the field experiments will also be conducted in the deeper aquifer to estimate the velocities and directions to further obtain the hydrogeological information next year. The results obtained in this study can provide an alternative to investigate hydrogeology in boreholes with the high-resolution. The application of this innovative technique will open a new window for the field investigation and provide a reference tool for the remediation strategy in groundwater contaminated sites.

Keywords: groundwater contamination, heat tracer, fiber-optic distributed temperature sensor, flow velocity, flow direction





目錄

研究成果中文摘要

研究成果英文摘要

一、	前言	1
二、	研究目的	1
三、	文獻探討	2
四、	研究方法與過程	8
4-1	熱傳輸解析解	8
4-2	地下水熱-水耦合數值模式	9
4-2-1	三維地下水流數值模式 (MODFLOW)	9
4-2-2	三維地下水溶質傳輸模式 (MT3DMS)	10
4-2-3	熱傳輸與溶質傳輸之轉換	11
4-3	分散式光纖溫度感測器基本元件與延伸配件	12
4-4	主動式光纖加熱系統	14
4-5	高精度纏繞光纖試驗	16
4-6	流速與流向試驗	18
4-7	研究進度及預期完成之工作項目 (甘特圖)	21
4-8	模場概況	23
五、	結果與討論	30
5-1	現地試驗設計	30
5-2	溫度剖面分析	36
5-2-1	K00268 單井加熱試驗	36
5-2-2	K00268 單井流速分析	42



5-3	跨孔熱示蹤劑試驗.....	48
5-3-1	第一次試驗（4月）下游觀測井 K00264 溫度剖面量測	48
5-3-2	第二次試驗下游觀測井溫度剖面量測	53
5-3-3	地下水流向分析	58
5-4	數值模式模擬.....	63
5-4-1	模式建置	63
5-4-2	第一次試驗模擬結果	66
5-4-3	第二次試驗模擬結果	67
5-4-4	參數敏感度分析	71
5-5	高解析度纏繞光纖.....	73
5-5-1	高解析度纏擾光纖設計	73
5-5-2	現地初步測試結果	76
5-6	Temperature Vector – DTS (TV-DTS)初步成果	79
5-6-1	TV-DTS 設計	79
5-6-2	TV-DTS 實驗室測試	81
5-6-3	TV-DTS 解析解分析	86
5-7	結論.....	88
5-8	後續工作.....	90
六、	參考文獻	91
七、	附錄	97



圖次

圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖	3
圖 2 (a) 以 direct push 方式安裝光纖 (b) 熱示蹤劑試驗下，井下光纖 所量測之溫度剖面隨時間之變化 (摘自 Bakker et al., 2015)	5
圖 3 (a) 高精度纏繞光纖半徑與能量損失關係圖，(b) 纏繞與筆直光纖 量測結果比較 (摘自 Liu et al., 2013)	6
圖 4 高精度纏繞光纖半徑與能量損失關係圖 (摘自 Hilgersom et al., 2016)	7
圖 5 (a) 地下水流速與流向儀器設計圖，(b) 伏流水區之溫度場變化	7
圖 6 (a) TVP 理示意圖 (b) TVP 儀器照片 (摘自 Pehme et al., 2014)	8
圖 7 MODFLOW 網格劃分元素示意圖 (McDonald and Harbaugh, 1988)	10
圖 8(a)XT-DTSTM, Silixa Ltd (b) Ultima-DTSTM, Silixa Ltd.....	13
圖 9 加熱光纖纜線及其剖面示意圖(祥林科技).....	13
圖 10 光纖加熱控制系統：(a) 系統外觀，(b) 系統內部配置	15
圖 11 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖	15
圖 12 (a) 高精度纏繞光纖示意圖 (摘自 Liu et al., 2013 與 Hilgersom et al., 2016) (b) 纏繞光纖之能量衰減示意圖 (摘自 Hilgersom et al., 2016)	17
圖 13 不能同材質的光纖纏繞管柱：(a) 無開篩管柱，(b) 開篩管柱， (c) 通透柱體.....	17
圖 14 TV-DTS 設計示意圖.....	19
圖 15 座標轉換：(a) 點熱源(實線與虛線分別為 (x,y,z) 與 $(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 正交座 標系統。變化後的 $\tilde{z}$ 方向指向達西通量(藍色箭頭)。座標系統的轉換 主要透過兩次座標軸旋轉所完成，(1)沿著 z 軸逆時針選轉角度 ψ ，	



將 (x,y,z) 座標系統轉換為 (x',y',z') ，(2)沿著 y' 軸逆時針選轉角度 θ ，並以向量 q 對齊新 z' 軸。其中， $\tilde{x}, \tilde{z}$ 與 z 軸坐落於同一平面，座標軸原點為點熱源) (b) 線性熱源(長度 l 的線性熱源沿著 z 方向坐落於座標系統 (x,y,z) 中， $(z = -l/2, z = l/2)$ ，在座標系統 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 中，連接原點兩端的點為 $(-l/2\sin\theta, 0, l/2\cos\theta)$ 與 $(l/2\sin\theta, 0, -l/2\cos\theta)$) (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)	20
圖 16 溫度反應曲線(點位 $x=0.03, y=0, z=0.03$)，(a)達西通量為 10^{-6} m/s，(b) 達西通量為 10^{-5} m/s (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)	20
圖 17 先導試驗區域場址配置規劃與現況示意圖	23
圖 18 永貞宮先導試驗區域 ERT 法調查剖面圖(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	26
圖 19 結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	27
圖 20 第一含水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	28
圖 21 第一滯水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	28
圖 22 第二含水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	29
圖 23 模場監測井配置圖 (藍線為第二次試驗光纖佈設示意圖)	31
圖 24 第一次試驗光纖纜線佈設示意圖	32
圖 25 第二次試驗光纖纜線佈設示意圖	33
圖 26 第一次試驗現地配置照片(A)試驗井配備 (B)井 K00264(左)與 K00268(右).....	34
圖 27 第二次試驗現地配置照片(A)試驗井全範圍 (B)井 K00268(上)與井 K00264(下) (C)井 K00265(上)與井 K00269(下) (D)井 K00266..	35
圖 28 K00268 絕對溫度量測結果 (a) 第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果 (11 月)	39



圖 29 K00286 加熱期間溫度差變化 (a)第一次試驗結果(4月) (b)第二次試驗結果(11月)	40
圖 30 K00268 回溫4小時內溫度差變化 (a)第一次試驗結果(4月) (b)第二次試驗結果(11月)	41
圖 31 絕對流速隨深度變化 (a)間距10公尺 (b)間距5公尺 (c)間距2.5公尺 (d)間距1.25公尺 (e)間距0.5公尺	45
圖 32 絕對流速隨深度變化 (a)第一次試驗(4月)流速分析結果 (b)第二次試驗(11月)流速分析結果 與 (c)結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	46
圖 33 第一次試驗加熱井 K00268 與觀測井 K00264 透破曲線(溫度為實體溫度計量測結果，虛線為降雨事件發生時間)	50
圖 34 第一次試驗觀測井 K00264 的 DTS 絕對溫度量測結果(實線為 K00268 加熱時間，虛線為降雨事件發生時間)	50
圖 35 第一次試驗加熱期間觀測井 K00264 的溫度差變化(實線為 K00268 加熱時間)	51
圖 36 第一次試驗 K00264 溫度剖面與文獻資料比對 (a)K00268 回溫期間的 K00264 溫度差變化(實線為 K00268 停止加熱時間，虛線為降雨事件發生時間)(b)K00264 井測資料(摘自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	52
圖 37 第一次試驗 K00264 各深度累積溫差圖與 K00268 流速解析 ..	53
圖 38 跨孔熱示蹤試驗結果 (a)各井溫差隨時間變化 (b)溫差大於 0.2°C 之接收訊號	56
圖 39 第二次試驗各井水溫變化(以實體溫度計進行量測)	57
圖 40 兩次試驗 K00264 水溫變化比較(以實體溫度進行量測，藍色實線為第一次試驗結果、橘色實線為第二次試驗結果)	57
圖 41 加熱功率與影響半徑關係	58
圖 42 井 K00268 與井 K00264 之相對位置示意圖	60



圖 43 在圖 42 中相應位置的第二次試驗地下水流向校正結果 (a)座標(0.88,0)位置 (b) 座標(-0.88,0)位置 (c) 座標(0,0.88)位置 (d) 座標(0,-0.88)位置 (e) 座標(0.38,0.79)位置 (f) 座標(0.38,-0.79)位置 ...	61
圖 44 在圖 42 中相應位置的第一次試驗地下水流向驗證結果 (e) 座標(0.38,0.79)位置 (f) 座標(0.38,-0.79)位置 (g) 座標(0.2,0.86)位置 (h) 座標(0.2,-0.86)位置	62
圖 45 以熱傳輸解析解推估之地下水流方向 (a)以 e、g 點為 K00264 之井位 (b)以 f、h 點為 K00264 之井位	62
圖 46 第二次試驗數值模式網格劃分	64
圖 47 第二次試驗加熱井 K00268 熱源輸入值 (實驗熱源溫度觀測值由 FO-DTS 所量測獲得)	65
圖 48 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果	67
圖 49 第二次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果 (RMSE = $4.08 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}$).....	68
圖 50 地下水流場模擬結果：(a)初始水位 (b)最終模擬水位	69
圖 51 加熱過程溫度模擬結果：(a)第 0.5 小時，(b)第 8 小時(開始加熱) (c)第 16 小時，(d)第 24 小時	69
圖 52 回溫過程溫度模擬結果：(a)第 32.5 小時(加熱停止)，(b)第 36 小時，(c)第 40 小時，(d)第 64 小時，(e)第 88 小時.....	70
圖 53 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線驗證結果(RMSE= $2.5 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}$)	71
圖 54 參數敏感度分析 (a)水平水力傳導係數 (b)延散係數	72
圖 55 高解析度纏繞光纖示意圖	74
圖 56 高解析度纏繞光纖成品 (a)鐵絲管設計 (b)兩個纏繞光纖裝置串聯方式 (c)纏繞光纖裝置頂端(左)與底部(右).....	75
圖 57 高解析度纏繞光纖現地佈設 (a)將裝置於地表整線以利下井 (b)裝置底部安裝重錘 (c)裝置下井	77
圖 58 現地測試結果 (a)加熱光纖區段一 (b)高解析度纏繞光纖區段一	



(c)加熱光纖區段二 (d)高解析度纏繞光纖區段二	77
圖 59 加熱過程空間解析度比較 (a)加熱光纖區段一 (b)高解析度纏繞光纖區段一 (c)加熱光纖區段二 (d)高解析度纏繞光纖區段二	78
圖 60 TV-DTS 設計概念 (a)TV-DTS 整體 (b)俯視圖 (c)用於兩端之 1 吋 PVC 管 (d)光纖固定於 PVC 管之示意圖	80
圖 61 TV-DTS 成品 (a)TV-DTS 全長 (b)置中之加熱光纖.....	81
圖 62 室內試驗設置 (a)TV-DTS 架設全景 (b)注水示意圖 (c)TV-DTS 於壓克力圓柱內實景	83
圖 63 TV-DTS 加熱光纖與監測光纖相對位置俯視圖.....	84
圖 64 TV-DTS 室內測試結果 (a)水中測試結果 (b)空氣中測試結果 ...	85
圖 65 在不同功率與不同流速下，不同監測光纖方位 (0° 與 180°) 的溫度差異比較	87





表次

表 1 XT-DTS 與 Ultima-DTS	13
表 2 地質鑽探樣本粒徑分析與推估 K 值彙整表(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)	27
表 3 試驗井之基本資訊	34
表 4 熱傳輸解析參數	43
表 5 二次試驗不同深度之流速推估與對應之擬合方均根誤差	44
表 6 常見土壤岩石熱傳導係數(修改自 Feng et al., 2009).....	47
表 7 第二次試驗參數設定	65
表 8 期中報告參數設定	66





前言

一、前言

大部分傳統的水文地質調查方式，僅能針對大區域的環境進行試驗，在空間解析度上受到限制，而水文地質環境的非均質性(heterogeneity)使得含水層的結構非常複雜，在現地資料不足的情形下，也導致水文地質狀況掌握不易，對於地下含水層之透水區段及地下水流速、流向產生判釋上的困難。欲更加瞭解複雜多變的水文地質狀況，對於研究區域在空間解析度上的需求亟需大幅提高，從過往公尺等級調查尺度已提昇至公分等級尺度。

過往許多土壤及地下水污染的研究指出，地下水流向與流速的準確調查與判釋為後續整治工作成敗的關鍵控制因素(Dagan, 1989)，然而，由於地質環境中的非均質性(heterogeneity)加深了調查上的困難。仰賴傳統的水文地質調查方法，往往耗費過多的時間、人力成本下亦無法獲得完整的調查結果，進而影響污染物於地下水含水層中之分布與流動情況的推估及整治工法的選用評估。

水文地質環境受熱能傳輸（包括：太陽輻射、地溫梯度等）的影響，使得溫度的變化無所不在，以熱能為地下水流示蹤劑（groundwater tracer），透過現地溫度量測與解析，可準確的追蹤地下水的流動方向與速度，進而掌握地下水含水層的透水性分佈。早在1960年代開始，以將熱作為地下水流之示蹤劑，追蹤地下水的流動方向與速度（Stallman, 1963; Bredehoeft and Papadopoulos, 1965）；近年來，隨著量測儀器的精進，更廣泛的應用於地下水資源調查、水文地質特徵分析與裂隙岩體地下水流等、相關研究之中（Stonestrom and Constantz, 2003; Anderson, 2005; Briggs et al, 2012; Coleman et al., 2015; Bense et al., 2016）。雖然以熱能作為地下水示蹤劑已是相當成熟的技術，但利用傳統的溫度量測工具進行現地試驗時，受到經費與人力之限制，導致量測資料在空間中之解析度往往過低，無法準確的判釋量測結果，而此現象在土壤及地下水污染場址的環境中則更加顯著，往往由於誤判一關鍵細部地層或構造，導致後續付出極大之整治代價。有鑑於此，在空間上與時間上的高解析度連續性量測無疑成為準確調查與判識污染整治場址細部地質構造的關鍵。

二、研究目的

本專案計畫欲使用創新量測技術分散式光纖溫度感測器進行土壤及地下水污染場址水文地質調查，藉由其在空間與時間上的高解析度連續性量測，可針對井下溫度分布與透水不透水區段進行判釋。以複合式光纖纜線搭配主動式加熱法，



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

提供線性熱源對井中地下水進行加熱，透過單井升溫與回溫過程的溫度變化及跨孔的破透曲線（breakthrough curve）描繪，經由解析解與數值模式之解算，可準確且快速的推估不同深度之地下水流速與流向。而分散式光纖溫度感測器結合高精度的光纖纏繞設計，針對關鍵（薄）地層或交界面進行解析，進一步提高垂向空間解析度至公分等級，大幅提升井下水文地質調查之解析能力。此外，為能克服現地鑽井數量不足或井距過大之限制，透過複合式與傳統光纖纜線的井下空間組合（稱之為 thermal vector DTS, TV-DTS），於單井內進行 TV-DTS 加熱試驗，推估流速與流向在垂向上的分佈，亦為本專案計畫之主要目的之一。

本研究計畫透過分散式光纖溫度感測器的量測優勢，可提供地下水污染場址一個高解析的井下水文地質調查方法，針對井下複雜之水文地質環境，進行高解析度且連續性的溫度量測，在不失準確性的前提下，快速、大量、低成本的獲取現地量測資料，透過熱傳輸的原理分析，進而推估井下透水區段、水文地質分層、地下水流向、流速及優勢水流路徑等進階資訊。研究成果所產出的高精度資料可提供後續污染調查與整治工作之參考依據。此創新量測方法應用於地下水污染場址，冀望未來能對於土壤與地下水污染調查及整治帶來新的契機。

三、文獻探討

近年來，創新的分散式光纖溫度感測器（fiber-optic distributed temperature sensor, FO-DTS）量測方法已被證明可適用於許多水文地質環境調查工作（Selker et al., 2006; Westhoff et al., 2007; Moffett et al., 2008; Tyler et al., 2009; Vogt et al., 2010; Liu et al., 2013; Klepikova et al., 2014; Read et al., 2013, 2015）。分散式光纖溫度感測器之量測原理為藉由分析雷射光束在光纜（fiber optic cable）中的散射（scattering）訊號而獲得環境中的感測溫度（圖 1），其主要優點為空間上與時間上的連續性量測，以10,000公尺長的光纖為例，在空間上的解析度可達到每0.125公尺一個量測點，而在時間上的解析度則為每1秒可獲得一筆量測資料，溫度量測的準確度高達0.1℃。依據 Shanafield et al.（2018）針對 FO-DTS 的發展進行文獻回顧與彙整，經由其統計數據發現，在2010之後，FO-DTS 的相關應用逐漸受到重視，在國際期刊的論文發表數量快速的增加，其中有大部分的論文來自由美國 NSF 支助的 Center for Transformative Environmental Monitoring Programs (CTEMPs) 團隊。由於 FO-DTS 的量測優勢，其應用範圍亦非常廣泛，在水文地質環境上之應用前三名分別為河川水文環境（27%）、井下量測（17%）及土壤水分（10%）。



文獻探討

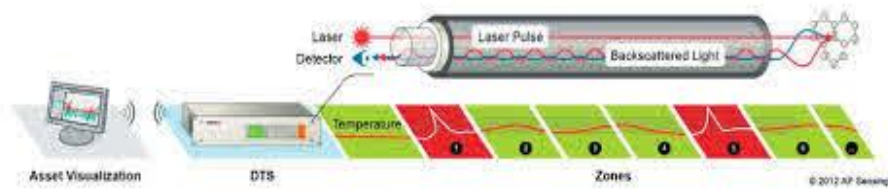


圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖

(摘自 <http://marlinks.com/wp-content/uploads/2019/02/whitepaper-marlinks.pdf>)

在河川水文環境應用中，Westhoff et al. (2007) 將 DTS 應用於河水與地下水交互作用，透過統計分析方法判識地下水向上補注河水的河道區段，並透過能量守恒模式量化地下水對於河水的補注量。Vogt et al. (2010) 與 Briggs et al. (2012) 針對一流失河川，透過以光纖纏繞於 PVC 管壁上之方式提升溫度量測解析度至公分等級，量測河床溫度隨深度之變化，並推估垂直方向上的水流通量及時、空中之變化。Sebok et al. (2013) 利用 DTS 並搭配地表地電阻及冰層厚度，探討丹麥 Vang 湖泊與地下水間之交互作用，研究結果顯示，由於 DTS 在空間上的高解析度，湖底沉積物的非均質特性將會影響地下水的補注量。Halloran et al. (2016) 將 FO-DTS 佈設於澳洲 Maules 河川的河岸邊，透過空間上的連續性溫度資料，嘗試研析量測資料對於一維、飽和且均質的河床模式假設之影響，並以 FO-DTS 所獲得的量測結果驗證所提出數值模式之可靠性。des Tombe et al. (2018) 將 FO-DTS 應用於河岸入滲 (bank infiltration)，透過長時間的溫度監測，推估入滲補注量隨季節性之變化。Gilmore et al., (2019) 利用 DTS 推估地下水自河床出滲之通量，研究中顯示，即便出滲量小於 0.2 m/day，均能透過 DTS 的量測溫度予以解析。Gaona et al. (2019) 利用 FO-DTS 搭配地球物理的電磁感應方法，判釋地下水的出滲及伏流水的交換作用。Arik (2011) 在美國奧勒岡州的 Big Boulder Creek 進行河道的光纖溫度量測，並以統計之方式區分地下水與伏流水，評估地下水或伏流水對於河川流量之貢獻度。爾後，Hall et al. (2020) 將光纖所量測到的高解析度溫度應用於河道復育，並透過一維河道能量模式 Heat Source 評估地下水出滲對於河川降溫之影響。

分散式光纖溫度感測器除了廣泛的運用於地表水與地下水交互作用之外，近年來也逐漸延伸其應用範圍至優勢水流 (preferential flow) 及裂隙岩體的地下水流研究之中 (Read et al., 2014; Coleman et al., 2015; Bense et al., 2016; Kazmierczak et al., 2016)，以 DTS 進行井下溫度監測時，其溫度訊號的變化可用於辨識地層岩性、井體周圍地下水流場，或是井內地下水流動方式。最早將 FO-DTS 應用於井



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

下的為 Großwig et al. (1996)與 Forster et al. (1997)，其團隊以光纖量測取代傳統的溫度井測，針對德國褐煤地區與美國 Kansas 的古生代沉積地層進行量測。Bense et al. (2016) 針對 FO-DTS 的井下量測進行文獻回顧，提出井下 FO-DTS 量測之標準流程，並將量測方式分為被動 (passive) 與主動 (active) 兩種方式。被動與主動之差異主要在於對光纖本身進行加熱與否。被動的量測方式所獲得的資料一般為溫度隨深度變化的剖面資料 (temperature depth profile)，透過解析解或數值解的分析判釋地層中的透水區段或岩體透水裂隙位置 (Wisian et al., 1998; Read et al., 2013)。Leaf et al. (2012) 為觀測井內水體垂直方向流動特性以及流速變化，藉由精準控制熱源施放位置，針對不同特定目標深度進行加熱，實驗結果顯示以井內裂隙位置為界，可分為向上與向下之地下水流動方式，且流速間有明顯之差異。

除此之外，原先被動式 (passive) 監測的 FO-DTS 改良為主動式 (active) 的 FO-DTS，藉由複合式光纖設計 (光纖與銅製導線鑲嵌在一起)，提昇地下水流在空間偵測上之解析度。Bense et al. (2016) 將主動式的量測方式分為三種：(1) thermal advection test，(2) hybrid cable flow logging，(3) heat pulse test。其中，heat pulse test 為主動式量測方式中最為廣泛使用的方法之一，此種量測方式主要是在整條光纖上給予一固定功率熱源，將光纖加熱一段時間後停止加熱，在加熱與回溫的過程中，以光纖量測溫度的升溫與回復變化進行解析，判釋地下含水層的透水區段，其空間中垂向之解析度可高達1公尺 (Coleman et al., 2015; Hausner et al., 2015; Seibertz et al., 2016; des Tombe et al., 2019)。Read et al. (2014) 以主動式的 DTS 探討井下光纖溫度量測在井內垂直水流解析之可行性，由於光纖纜線的熱慣性 (thermal inertia) 較小，在受到水流改變時，可即時反應在溫度變化上，因此可用以取代傳統的井下流速儀，針對井內流速進行量測。Bakker et al. (2015) 將光纖以 direct push 的方式安裝於地下水下游位置，以熱示蹤劑試驗為基礎，搭配 FO-DTS 於觀測井之溫度量測，分析地下水流速與流向 (圖 2)，以此方式進行試驗，將可大幅度降低設置監測井之成本。爾後，des Tomeb et al. (2019) 為解決溫度感測器 (或 FO-DTS) 與線性熱源間之相對距離對於量測溫度之影響，透過參數的無因次化，將相對距離之不確性影響予以消除。Bakx et al. (2019) 利用主動式光纖加熱量測方式，進行現地下水流量測，透過經驗公式，將井溫變化、加熱功率及地下水流速建立其關係式，同時以數值模式模擬驗證經驗公式之正確性。



文獻探討

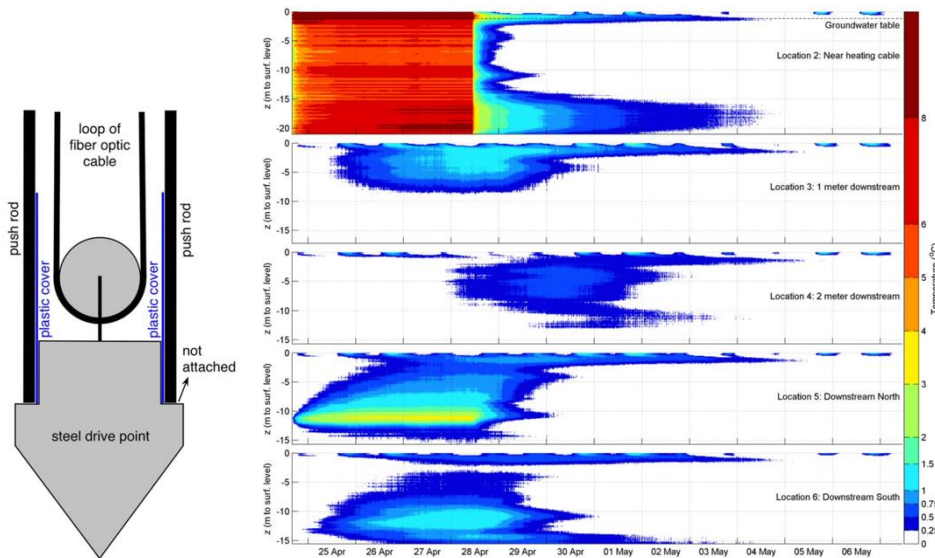


圖 2 (a) 以 direct push 方式安裝光纖 (b) 熱示蹤劑試驗下，井下光纖所量測之溫度剖面隨時間之變化 (摘自 Bakker et al., 2015)

雖然光纖溫度感測器已能提供空間中高解析度的量測資料，然而對於極細微（公分等級）但扮演關鍵角色之地質構造，如：薄黏土層、裂隙（或結構性土壤）等，仍無法完全掌握，因此，若能更進一步提昇光纖在空間之解析度，對於地下水含水層之細部特徵可提供更完整之資訊。過往已有部分學者提出將光纖纏繞於管柱外，將光纖在垂直方向之量測距離予以壓縮，使得空間上之解析度自公尺或數公分等級提昇至公分或公釐等級，並嘗試將其應用於地表水與地下水交互作用及土壤含水量量測之中（Suarez et al., 2011, Briggs et al., 2012; Liu et al., 2013; Hilgersome et al., 2016）。

Suarez et al. (2011) 以完全密封的 PCV 管柱纏繞光纖，並以熱縮管固定光纖，將其應用於溫鹽池中，嘗試區分空氣與水之交介面及異溫層與同溫層之交介面。研究結果顯示，即使在同溫層中，因為熱傳導與密度所造成的細微溫度差異，均可能夠纏繞光纖的量測予以清楚分辨。Liu et al. (2013) 將光纖纏繞於 PVC 管柱上（圖 3a），並透過加熱的方式，應用於美國 Kansas 的一處監測井。研究結果顯示，纏繞後的光纖，可觀察到更多細微的溫度變化，並判釋細小的透水區段（圖 3b）。Hilgersome et al. (2016) 透過實驗室實驗，探討纏繞光纖半徑、纏繞管柱材質及太陽輻射對於溫度量測之影響。研究結果顯示，若以纏繞光纖進行量測，量測後的溫度校正將有其必要性，纏繞半徑越小，雷射光子的能量傳遞損失越大（圖 4），不建議選用 PVC 管柱進行光纖纏繞，量測誤差可能高達 0.7°C 以上，此



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

外，在長期監測下，日夜的溫度週期性變化將產生熱傳輸的時間延遲，進而影響溫度的量測。

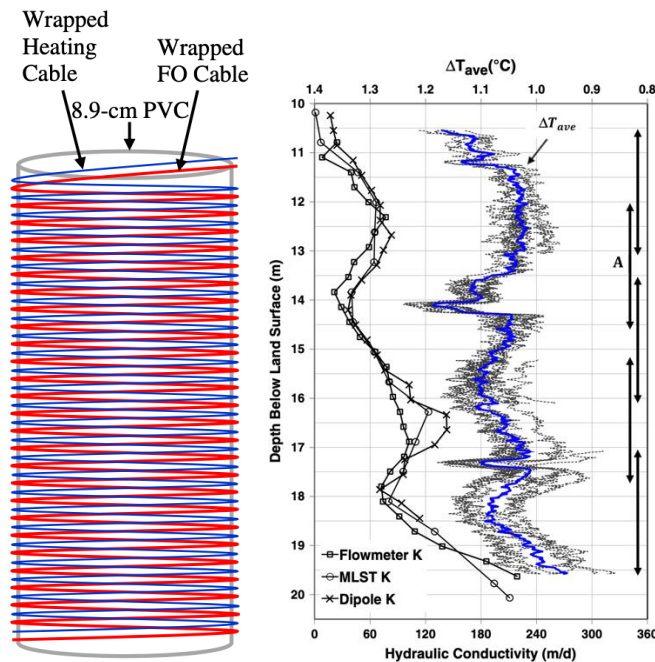


圖 3 (a) 高精度纏繞光纖半徑與能量損失關係圖，(b) 纏繞與筆直光纖量測結果比較 (摘自 Liu et al., 2013)

在地下水污染場址調查時，地下水的流向扮演極為重要的角色，其對於後續的污染物調查與整治規劃影響甚劇，尤其在調查初期階段，如何在鑽井數量有限且距離分散的情形下，準確的判斷地下水流向將是一大挑戰。Angermann et al. (2012) 與 Lewandowski et al. (2012) 利用四根管柱安裝溫度計，形成一溫度陣列，並圍繞於一加熱源，進行熱源傳遞的溫度變化量測，此設計分別於實驗室砂箱與現地伏流水區域進行試驗，成功的推估伏流水的流向與流速 (圖 5)。類似於前人的概念，Pehme et al. (2014) 設計一 thermal vector probe (TVP)，於 TVP 的中心設置加熱器，並將其四周等距之位置裝設三個溫度感應器，透過中心加熱器的加熱及周圍溫度感測器之溫度量測，同時搭配封井材料的使用，可針對井內特定深度之地下水流向與流速進行推估 (圖 6)。研究結果顯示，透過 TVP 的設計，可針對因加熱所產生的水平向溫度梯度有更进一步的解析，相較於過往僅有垂向一維的溫度剖面，能夠更準備的推估地下水流的方向，非常適用於井下或裂隙岩體的水文地質調查。



文獻探討

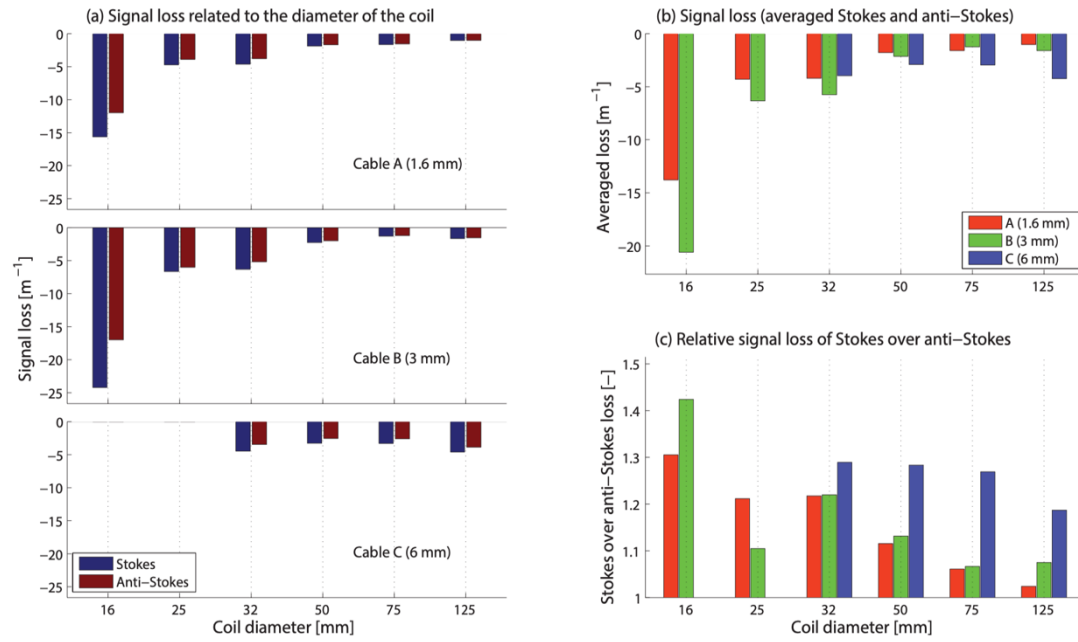


圖 4 高精度纏繞光纖半徑與能量損失關係圖（摘自 Hilgersom et al., 2016）

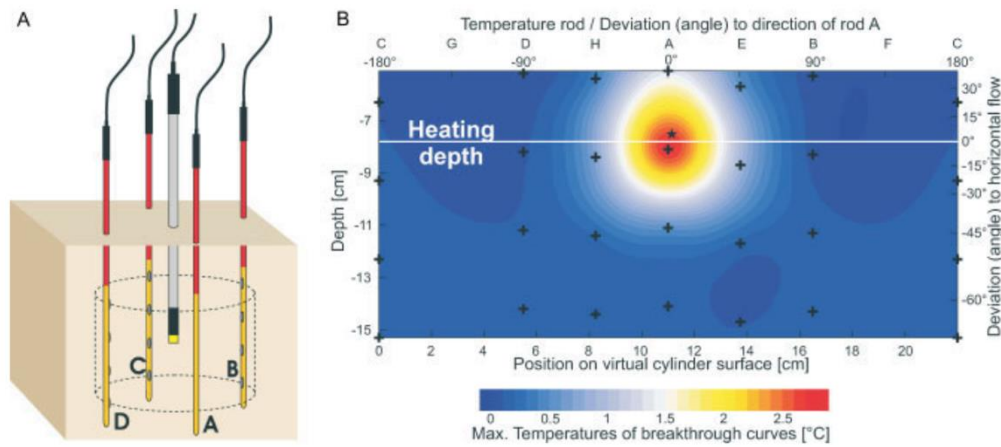


圖 5 (a) 地下水流速與流向儀器設計圖，(b) 伏流水區之溫度場變化



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

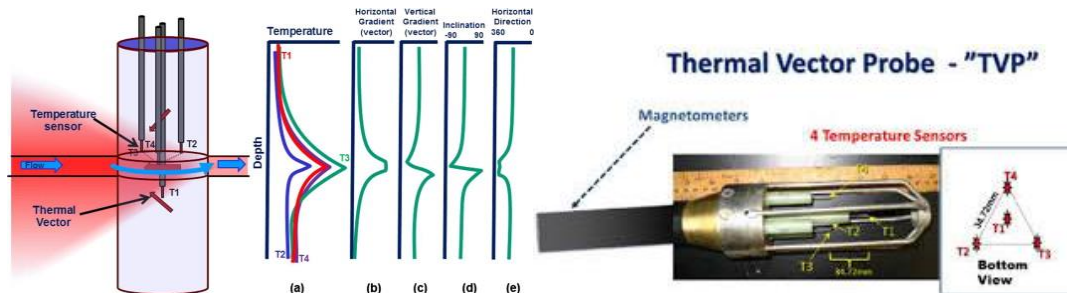


圖 6 (a) TVP 理示意圖 (b) TVP 儀器照片 (摘自 Pehme et al., 2014)

四、研究方法與過程

4-1 熱傳輸解析解

在獲取時空上高解析度的溫度量測資料後，藉由熱-水流傳輸解析公式 (Bakker et al., 2015) 可用以推估井下各深度之地下水流速。假設一水平向延伸的地層中，含水層呈現垂直分布，而地下水流與熱能僅能在單一地層中流動；層與層之間的垂向傳輸則忽略不計。每一地層均假設為均質，且地下水流沿著 X 軸方向上之穩態流動。當黏滯性與密度影響忽略不計，且水和固體的溫度達到瞬間平衡時，考慮地下水流與熱傳輸在水平向無限延伸之含水層中的耦合，地層中溫度變化的控制方程式為 (Kluitenberg and Warrick, 2001)：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{u}{R} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{式 1})$$

(式 1) 中，T 為溫度，t 為時間，D 為熱擴散係數，R 為熱遲滯係數。後兩項參數與水和固體顆粒的特性有關：

$$D = \frac{k}{c\rho} = \frac{nk_w + (1-n)k_s}{nc_w\rho_w + (1-n)c_s\rho_s} \quad (\text{式 2})$$

$$R = \frac{c\rho}{nc_w\rho_w} = 1 + \frac{(1-n)c_s\rho_s}{nc_w\rho_w} \quad (\text{式 3})$$

(式 2) 中，k 為熱傳導係數，c 為比熱容，ρ 為密度，n 為孔隙率。(式 3) 中 s 代表固體，w 則代表水。假設一條和水流方向垂直且無限延伸之熱源，將起點視為坐標系統中原點之位置，當熱源以穩定功率 q，在 t=t* 進行加熱時，溫度的



研究方法與過程

變化的函數式可寫為 (Ren et al., 2000; Kluitenberg and Warrick, 2001)：

$$\Theta(x, y, t, t^*) = \frac{q}{4\pi k} \exp\left(-\frac{ux}{2DR}\right) W\left(\frac{x^2+y^2}{4D(t-t^*)}, \frac{u\sqrt{x^2+y^2}}{2DR}\right) \quad (\text{式 4})$$

W 為 Hantush Well 函數 (Veling and Maas, 2010)

$$W(a, b) = \int_a^\infty \frac{1}{s} \exp\left(-s - \frac{b^2}{4s}\right) ds \quad (\text{式 5})$$

熱源在開始加熱 (t_0) 與結束加熱 (t_1) 之溫度函數可寫成：

$$T(x, y, t) = \Theta(x, y, t, t_0) \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (\text{式 6})$$

$$T(x, y, t) = \Theta(x, y, t, t_0) - \Theta(x, y, t, t_1) \quad t \geq t_1 \quad (\text{式 7})$$

4-2 地下水熱-水耦合數值模式

本專案計畫以分散式光纖溫度感測器監測井下溫度變化，並建置地下水流數值模式推估模擬結果，將模擬結果進行率定後，驗證模場試驗之監測結果。

4-2-1 三維地下水流數值模式 (MODFLOW)

三維地下水流數值模式，全名為 Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process (MODFLOW)，是由 USGS 所發展之地下水流數值模式，最早使用之版本為 McDonald 和 Harbaugh(1988)所建立，經由不斷修改與更新，目前最新版本為 MODFLOW-2005(Harbaugh, 2005)。MODFLOW 使用有限差分法 (finite difference method) 對地下水流統御方程式進行求解。在維度上，MODFLOW 可應用於一維、二維及三維之各式地下水流問題；在時態變化上，穩態 (steady state) 或瞬態模擬 (transient state) 可隨實際模擬情況進行設定，亦可單獨或同時使用。此外，含水層特性與系統的各種外部營力也都可以設定於模式之中進行模擬，如：受壓 (confined) 或非受壓 (unconfined) 含水層、抽注水井設置、特定邊界條件、河川水位變化及蒸發散等。

MODFLOW 模擬地下水流於土壤孔隙介質間的流動主要是依據地下水流統御方程式進行求解得出地下水位變化，此統御方程式為一偏微分方程式，表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{式 8})$$

式中， K_x 、 K_y 、 K_z 分別為沿著 x、y、z 軸之方向上之水力傳導係數 [LT^{-1}]；



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

w 為單位體積之水流通量 $[T^{-1}]$ ； h 為水頭高度 $[L]$ ； S_s 為孔隙介質之比儲水係數 $[L^{-1}]$ ； t 為時間 $[T]$ 。當有限差分法進行地下水流模擬計算時，模擬系統會以塊狀之網格元素（cell）方式表示，塊狀網格主要由列（row, i ）、行（column, j ）及層（layer, k ）所組成，每一列高、行寬、層厚分別為 Δc_i 、 Δr_j 及 Δv_k ，劃分情形如圖 7 所示。有限差分法會根據相鄰的元素網格計算水位變化，計算之方程式如下所示：

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (\text{式 9})$$

式中， Q_i 為流入元素網格的水流速率 $[L^3 T^{-1}]$ ， $\Delta h / \Delta t$ 為地下水位在單位時間內的變化量， ΔV 則為元素網格之體積。

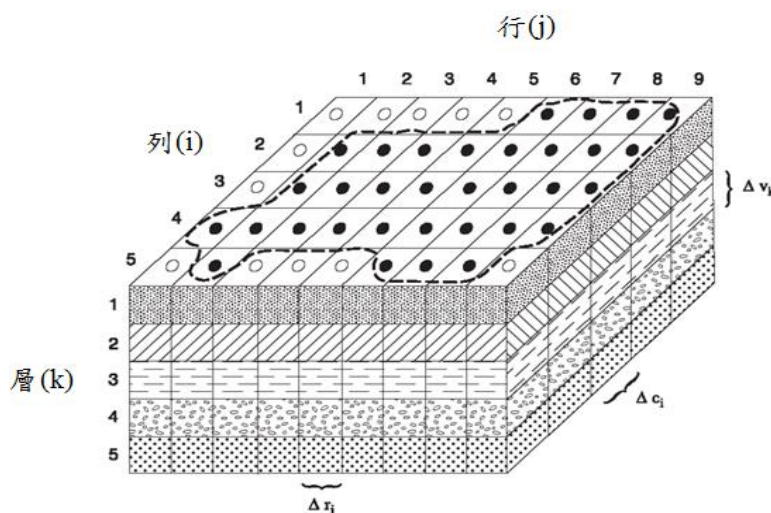


圖 7 MODFLOW 網格劃分元素示意圖（McDonald and Harbaugh, 1988）

4-2-2 三維地下水溶質傳輸模式（MT3DMS）

三維地下水溶質傳輸模式，全名為 Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model（MT3DMS），為 Zheng 和 Wang（1999）所發展，主要目的為模擬地下水流中溶解物質在土壤孔隙介質中的傳輸與移動。MT3DMS 在維度、時態變化和含水層特性等，均與 MODFLOW 模擬之設定相同，因為地下水流場為溶質傳輸的首要建構條件，因此地下水流場的生成需搭配 MODFLOW 模式的模擬方可產生。MT3DMS 可模擬溶質於地下水流中的傳輸機制，包含對流（advection）和延散（dispersion）兩種方式，亦可將溶質間的化學反應納入考慮。

MT3DMS 模擬溶質在地下水流中的傳輸情形亦以有限差分法對偏微分統御



研究方法與過程

方程式進行求解，此溶質傳輸的統御方程式如下：

$$\frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (\text{式 } 10)$$

式中， θ 為土壤孔隙率[-]； C^k 為溶質 k 之溶解濃度[ML^{-3}]； x_{ij} 為 i, j 各自沿著笛卡爾坐標系 (Cartesian coordinate system) 之坐標軸 (直角坐標軸) 上之距離[L]； D_{ij} 為水力延散係數 (hydrodynamic dispersion coefficient) [L^2T^{-1}]； v_i 為孔隙中地下水流速[LT^{-1}]； q_s 為流體於含水層中之單位體積流率[T^{-1}]； C_s^k 為溶質 k 之釋放或降解通量的濃度[ML^{-3}]； $\sum R_n$ 則為化學反應項。

式中，等號左邊所代表的意義為溶質質量隨時間之變化，而等號右邊各項之意義依序為， $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right)$ 為考慮延散 (dispersion) 與擴散 (diffusion) 作用之計算項，擴散作用一般常被忽略，僅在流速極小時，方須考慮； $\frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k)$ 為對流項 (advection)， $q_s C_s^k$ 為溶質的源 (source) 與匯 (sink) 之變化； $\sum R_n$ 則為化學反應項。

4-2-3 熱傳輸與溶質傳輸之轉換

溶質傳輸模式的概念與熱能傳輸相似，其控制方程式亦相似，因此，依據此一概念，將熱能傳輸的過程與溶質傳輸的過程進行類比，溫度的增減可視為溶質濃度的變化，透過適切的熱能與溶質參數轉換，可將(式 10)改寫為：

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d^k}{\theta} \right) \frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta (D_m^k + \alpha \frac{q}{\theta}) \cdot \nabla C^k] - \nabla \cdot (q C^k) - q_s' C_s^k \quad (\text{式 } 11)$$

式中， ρ_b 為總體密度[ML^{-3}]， K_d^k 為分佈係數[L^3M^{-1}]， D_m^k 為分子擴散係數[L^2T^{-1}]， α 為熱延散係數[L]， q 為流速[LT^{-1}]。等號左邊所代表的意義即為溫度隨時間之變化，等號右邊第一項為考慮了熱擴散與熱延散效應的分子擴散係數與熱延散係數，第二項則是考慮熱對流所產生的效應，第三項則是熱源在介質中進出的變化，即源 (source) 與匯 (sink) 之變化。總體密度可視作固體密度與固體孔隙體積的乘積，即 $\rho_b = \rho_s (1 - \theta)$ ；分佈係數 K_d^k 可由固體熱容量與液體熱容量與密度的比例表示，即 $K_d^k = C_{psolid} / \rho C_{pfluid}$ ；分子擴散係數 D_m^k 可表示為由溫度梯度所驅使的熱擴散率，即 $D_m^k = k_{Tbulk} / \theta \rho C_{pfluid}$ ， k_{Tbulk} 為熱傳導係數(thermal conductivity)，將式 11 改寫為：

$$\left(1 + \frac{1-\theta}{\theta} \frac{\rho_s}{\rho} \frac{C_{psolid}}{C_{pfluid}} \right) \frac{\partial (\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\theta \left(\frac{k_{Tbulk}}{\theta \rho C_{pfluid}} + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \cdot \nabla T \right] - \nabla \cdot (q T) - q_s' T_s \quad (\text{式 } 12)$$



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

4-3 分散式光纖溫度感測器基本元件與延伸配件

分散式光纖溫度感測器之基本組成主要為雷射脈衝分析儀主機與光纖纜線兩大部分，本次選用英國 Silixa 公司所出產的 XT-DTS™ 與 Ultima-DTS™ 同步進行井溫監測。主機如圖 8a 所示(型號：Silixa Ltd.)，包括：光纖跳線連接口、參考溫度計連接口、外部電源及電腦傳輸連接孔等，以此型號為例，主機本身配置四個獨立雷射通道(channel)，可接收分析四條不同光纖所反射的訊號。雷射脈衝分析儀主機同時有搭配兩組外部連接實體溫度計(型號：PT-100)，配置纜線長度為 2 公尺；量測溫度範圍為 $-50^{\circ}\text{C} \sim +250^{\circ}\text{C}$ ；溫度解析度則為 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，該組溫度計所量測到之絕對溫度資料可用於後續的溫度校正之參照。圖 8b 為另一型號之分散式光纖溫度感測器主機(型號：Silixa Ltd., Ultima-DTS™)，其控制面板與 XT-DTS™ 大同小異，但主機需連接外接螢幕與操控的鍵盤及滑鼠。另外，如需更為精準之溫度量測資料以增加率定精確度時，可額外搭配外部獨立溫度計如微型水溫量測儀(RBRsolo³T)，其量測範圍為 $-5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，溫度精準度為 $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$ ；量測解析度則為 $< 0.00005^{\circ}\text{C}$ ；量測間隔可於 1 秒內量測 2 筆資料(2Hz)，精準度越高的實體溫度計可增加率定 DTS 量測溫度之可靠性。目前市面上有許多商業化之分散式光纖溫度感測器，如：Agilent Technologies, Inc；SensorNet, Ltd；SensorTran, Inc 及 Silixa Ltd 等，本計劃預計採用 Silixa 所製之 XT-DTS™ 與 Ultima-DTS™ 進行土壤與地下水污染場址之井下現地試驗，XT-DTS™ 其量測最大距離可達 10km，溫度解析度達 0.01°C ，空間解析度為 0.25m，量測間隔為每 5 秒一筆資料；Ultima-DTS™ 其量測最大距離可達 5km，溫度解析度達 0.01°C ，空間解析度為 0.125m，量測間隔為每 1 秒一筆資料(表 1)。

分散式光纖溫度感測器的另一重要組成為光纖纜線(fiber optic cable)，光纖纜線在量測中扮演相當重要的角色，依據量測環境的不同，所選用的光纖纜線也有所差異，一般在野外現地所使用之光纖纜線須能夠承受現地惡劣之試驗環境，主要具備高延展性、金屬鎧裝及充油防水抗氧化等特性。光纖纜線的種類眾多，但其主要的組成包括(由內而外)：光纖芯(optic fiber)、高強度纖維束(Kevlar)、金屬管(Metal tube)、金屬編織層(Braiding)及塑膠被覆層(Jacket)，另可依實驗需求客製化加入可導熱之銅線，用以搭配加熱控制系統，作為主動式加熱試驗之熱源。圖 9 加熱型光纖纜線示意圖(製造商：Kaiphone, Taiwan)，亦為本計畫預計安裝於污染場址之纜線，中心為雙芯多模 50/125 光纖芯，兩側分別客製化多股螺旋銅絞線作為導熱材料。分散式光纖溫度感測器在時間上的敏感度則主要取決於光纖種類，若光纖要確實量測到環境之溫度，光纖必須與環境溫度達到平衡。依據本團隊於



研究方法與過程

實驗室的測試結果，選用一般常用之光纖，期對於外在環境溫度變化之反應時間均在 30 秒以內，以地下水的流速及時間尺度而言，光纖溫度感測器均可準確紀錄並真實呈現現地量測資料。

表 1 XT-DTS 與 Ultima-DTS

	XT-DTS TM	Ultima-DTS TM
量測距離	10km	5km
溫度解析度	0.01°C	0.01°C
空間解析度	0.25m	0.125m
量測間隔	5s	1s



圖 8(a)XT-DTSTM, Silixa Ltd (b) Ultima-DTSTM, Silixa Ltd

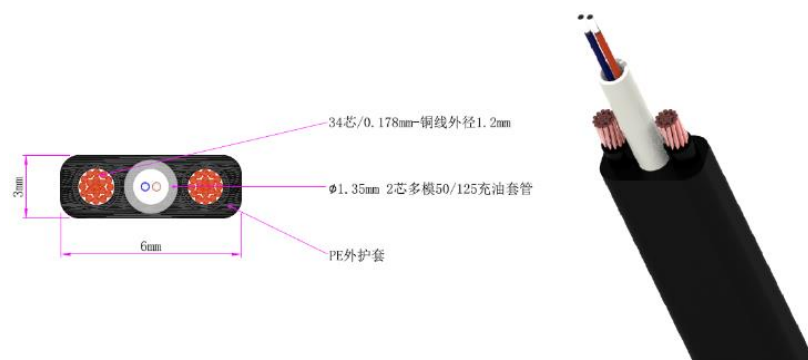


圖 9 加熱光纖纜線及其剖面示意圖(祥林科技)



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

4-4 主動式光纖加熱系統

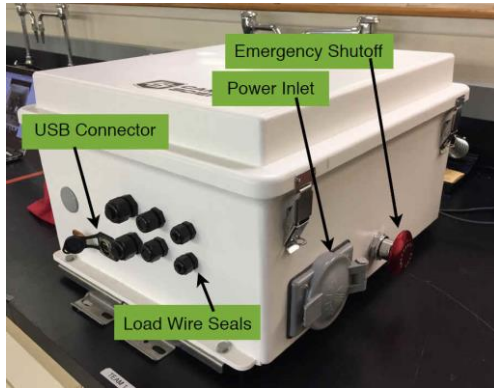
本專案計畫中欲將使用的主動式分散光纖溫度感測器與被動式的感測器相同，皆須使用雷射脈衝分析儀主機與光纖，唯一的差異在於光纖的加熱控制系統（heating pulse controller, HPC），如圖 10。加熱控制系統的組成主要包括：microFusion power controller、relay board、power supply、fuse block、output terminal stripe、circuit break、emergency shutoff、USB connector 及 power inlet。所以的元件都安裝於一防水、可攜式的箱子中（圖 10a），其內部配置如圖 10b。

加熱控制系統針對複合式光纖之特定區段進行通電加熱，可依據不同的量測環境設定不同的加熱功率與加熱時間，在使用上具有非常大的彈性。電纜線的連接的方式則依據試驗需求而有所不同，主要是針對所欲加熱的區間進行連結，如圖 11 所示，microFusion power controller 的主要功能是透過電壓的控制來調整加熱的溫度，而 relay board 的功能則是控制不同區段的光纖分別進行加熱（圖 11 中的 AB 段或 CD 段）。

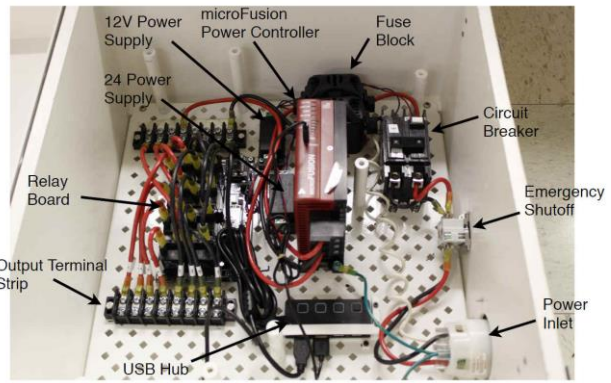
主動式感測器可針對井下地下水流流速較緩慢或溫度變化較不顯著之區段進行加熱，提供一外部熱源，強化熱能傳輸的擴散情形，增加辨識細小優勢水流路徑的能力，提昇井下透水區段的解析能力。主動式感測器量測結果亦可提供更多的量測資訊，並與被動式感測器量測結果進行交互驗證，增加分析結果之可信度。此外，主動式分散光纖溫度感測器可配合汙染場址在生物整治灌藥時進行加熱量測，由於主動式感測器可依據需求調整加熱溫度，因此，可藉此瞭解井下含水層在灌藥過程中對於溫度的影響，並評估加熱含水層是否有助於整治成效的提昇，並可藉此評估最適整治操作溫度。



研究方法與過程



(a)



(b)

圖 10 光纖加熱控制系統：(a) 系統外觀，(b) 系統內部配置

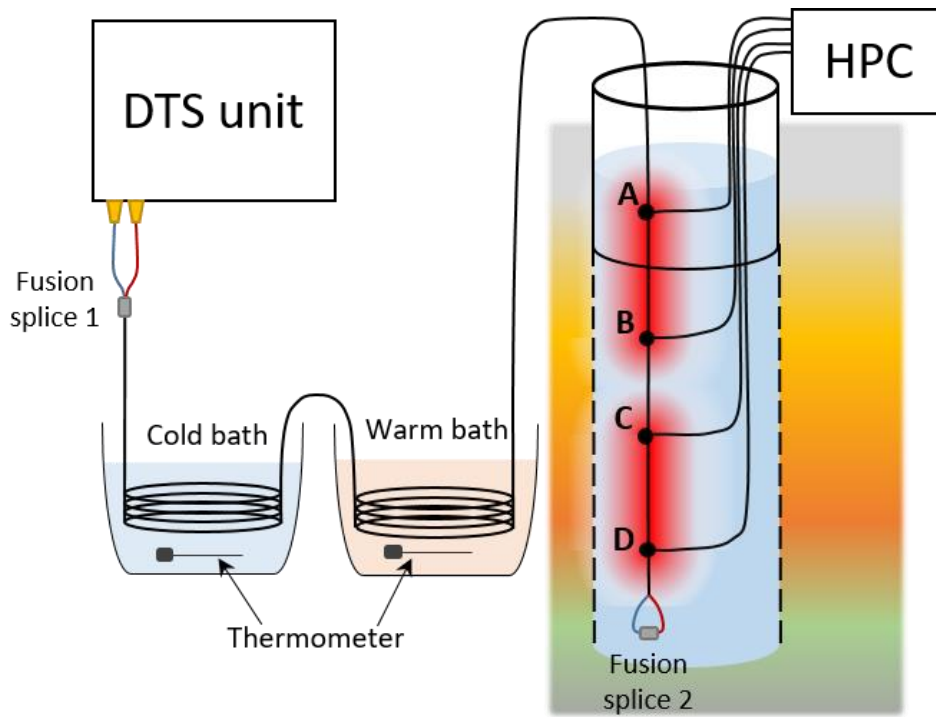


圖 11 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

4-5 高精度纏繞光纖試驗

高精度纏繞高光纖之目的為主要進一步提升空間中量測之解析度，以本研究使用之分散式光纖溫度感測器為例，XT-DTS™ 量測溫度之空間解析度為 0.25 公尺，若將光纖纏繞於直徑 8.9 公分的 PVC 管外側（圖 12a），可大幅提升量測解析度至 0.25 公分。提升後的空間解析度，將可應用於含水層之細部水文特徵判釋，對於細部調查將是一大助益。

雖然將光纖纏繞於管柱外側可大幅度提昇量測之空間解析度，然而因為纏繞之關係，光纖內的訊號傳遞將因光纖的曲折而受損，如圖 12b 所示。依據前人的研究顯示，當纏繞光纖的纏繞直徑夠大（ $> 0.1\text{ m}$ ），光纖訊號的傳遞將不受纜線彎曲所影響，與筆直的光纖所量測到的溫度幾乎一致。然而，在大部分的地下水監測井中，井徑均小於 2 吋，為能夠在井下進行高精度纏繞光纖的量測，光纖訊號的傳遞勢必受到影響。因此，在進行高精度纏繞光纖設計時，有兩點需要予以考慮：（1）空間量測解析度之需求，（2）能夠忍受最大的訊號損失（Hilgersome et al., 2016）。首先，訊號的損失與光纖纏繞的直徑有關，當雷射入射至光纖壁的角度（入射角）大於光纖壁可接受入射之角度時，光纖訊號將無法產生反射而損失（圖 12b）。因此，當光纖纏繞直徑越小，射訊號損失將越大，訊號的損失將導致 Stokes 與 anti-Stokes 的比值產生誤差，進而導致量測溫度上之準確性。依據 Arnon et al. (2014) 的研究顯示，當雷射訊號在進入纏繞光纖的第 100 m 時，將有相對較大的訊號衰減率（differentiate attenuation），隨後衰減率將逐漸降低並達到一定值。有鑑於此，在進行 DTS 溫度率定時，由於訊號衰減率並非一固定值，將建議使用雙端點的方式（double-end calibration, van de Giesen et al., 2012）來進行溫度的校正。

另一影響溫度量測之準確性為光纖纏繞的管柱材質，管柱之主要目的為固定纏繞光纖，然而由於纏繞光纖會緊貼於管柱壁上，不同材質的熱特性將有所差異，其材質的選用將影響熱的傳遞，進而影響溫度的量測，常選用的材質包括：PVC、不銹鋼及鋼絲。管柱的幾何型態差異亦會影響井下水流的流動及熱的傳遞，進而對溫度量測產生影響，常見的型態包括：完全無開篩、部分開篩、全開篩及通透型（圖 13）。因此，如何在光纖訊號受損最低且管柱材質對於溫度量測影響最小的前提下，優化光纖的纏繞設計將是本計畫之主要目的之一。本計畫將會於實驗室進行光纖纏繞設計，評估最適之纏繞半徑，並測試不同之管材，確保所量測之溫度具代表性。



研究方法與過程

此外，以此纏繞方式進行加熱試驗時，可提高井下單位深度加熱時之功率，大幅度的縮短加熱時間，並增加溫度對流速的敏感度，提升對井下透水區段判釋的準確性。優化後之纏繞光纖，將搭配 HPC 與複合式光纖的使用，實際應用於選定的地下水污染場址進行試驗。

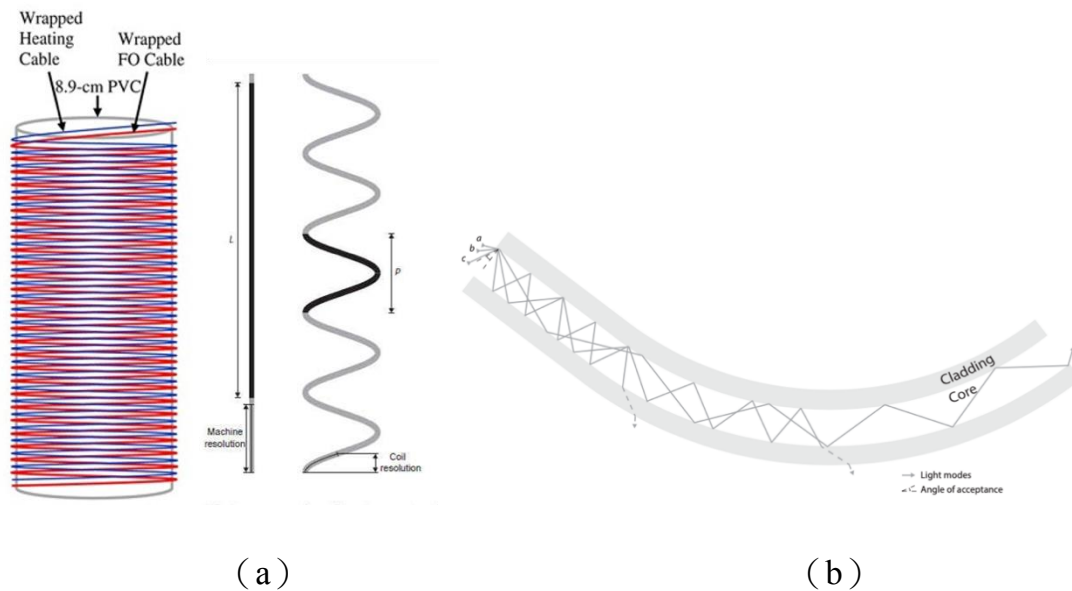


圖 12 (a) 高精度纏繞光纖示意圖（摘自 Liu et al., 2013 與 Hilgersom et al., 2016）(b) 纏繞光纖之能量衰減示意圖（摘自 Hilgersom et al., 2016）

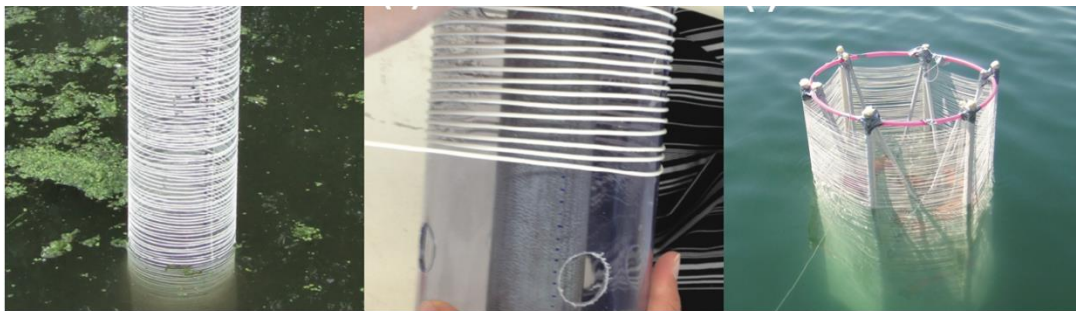


圖 13 不同材質的光纖纏繞管柱：(a) 無開篩管柱，(b) 開篩管柱，(c) 通透柱體



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

4-6 流速與流向試驗

受限於監測井數量之限制，往往無法於現地進行跨孔熱示蹤劑試驗，因而導致地下水流向無法確認，造成後續污染物調查或整治上之困境。不論是 Angermann et al. (2012)、Lewandowski et al. (2012) 或 Pehme et al. (2014)，其設計概念與量測方式能夠僅由單一口監測井，即同時獲得井下之流速與流向，然而，TVP 的概念僅能針對特定深度位置的地下水流向與流速進行量測，僅能針對單一深度進行量測，若欲獲得垂直方向上連續性的流速與流向，將會非常耗時、耗力，在沒有封井或全開篩的條件下，由於自然對流的效應，量測結果之代表性也將有所存疑。為克服此一難題，將此概念應用於光纖溫度感測器，同時搭配複合式光纖的主動式線性加熱，將可同時獲得井下連續性的流向與流速資料，延伸光纖溫度感測器之應用範圍。本研究計畫依據 TVP 的設計，以光纖取代傳統溫度感測器，搭配線性熱源的加熱與熱源周遭的光纖佈設，可提供井下連續性的地下水流速與流向量測，此設計與試驗暫時命名為 temperature vector – DTS (TV-DTS)。TV-DTS 的流速與流向設計如圖 14 所示，垂直佈設於中心點的為複合式光纖，可同時進行井內水溫加熱與溫度量測，距複合式光纖四周相同的距離則佈設一般光纖，依據實驗需求與井徑大小，可垂直佈設 3 – 4 條光纖。當中心位置之複合式光纖加熱釋放熱能時，周遭不同位置之光纖因地下水流向與流速之差異，導致所接收到之熱能不同，而反應在光纖所量測到之溫度變化亦不相同，根據溫度差異可進一步推不同深度位置之地下水流速與確切之地下水流向。Zlotnik and Tartakovsky (2018) 透過座標轉換 (圖 15) 與 Green's function，將熱傳導係數視為一張量，在不同的熱源條件下，推導解析解公式，並推估三維空間中的達西流速。在點熱源及有限的加熱時間下 (finite-duration point source)，其溫度分佈的解析解如下：

$$T(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = \begin{cases} T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) & 0 \leq t \leq t_p \\ T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) - T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t - t_p) & t \geq t_p \end{cases} \quad (\text{式 13a})$$

$$T(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = \frac{E/(\rho c)}{8\pi D_T t_p R} e\bar{z} [e^{-\bar{R}} \operatorname{erfc}(\frac{R-Vt}{2\sqrt{D_L t}}) + e^{\bar{R}} \operatorname{erfc}(\frac{R+Vt}{2\sqrt{D_L t}})] \quad (\text{式 13b})$$

$$R = \sqrt{\frac{D_L}{D_T} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \tilde{z}^2}, \quad \bar{z} = \frac{\tilde{z}V}{2D_L}, \quad \bar{R} = \frac{RV}{2D_L} \quad (\text{式 13c})$$



研究方法與過程

在線性熱源及瞬間的加熱條件下（instantaneous line source），其溫度分佈的解析解如下，其不同流向之流速分佈如圖 16。

$$T = \frac{E/l\rho c}{8\pi\gamma D_T t} \exp\left[-\frac{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}{4D_T t} - \frac{(\tilde{z} - Vt)^2}{4D_L t} + \frac{\beta^2}{\alpha}\right] [\text{erf}(\eta_+) - \text{erf}(\eta_-)], \quad (\text{式 } 14a)$$

$$\text{其中, } \eta_{\pm} = \pm(l\sqrt{\alpha}/2)\sin\theta - \beta/\sqrt{\alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{4D_T t} + \frac{\cot^2\theta}{4D_L t}, \quad \beta = \frac{\tilde{x}}{4D_T t} - \frac{(\tilde{z} - Vt)\cot\theta}{4D_L t},$$

$$\gamma = \sqrt{(D_L/D_T)\sin^2\theta + \cos^2\theta} \quad (\text{式 } 14b)$$

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \beta/\sqrt{\alpha} = (\tilde{z} - Vt)/\sqrt{4D_L t}$$

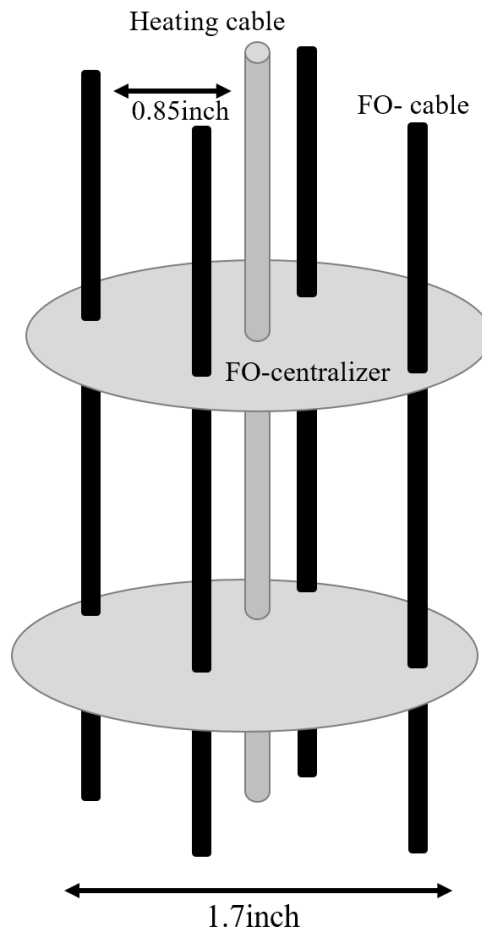


圖 14 TV-DTS 設計示意圖



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

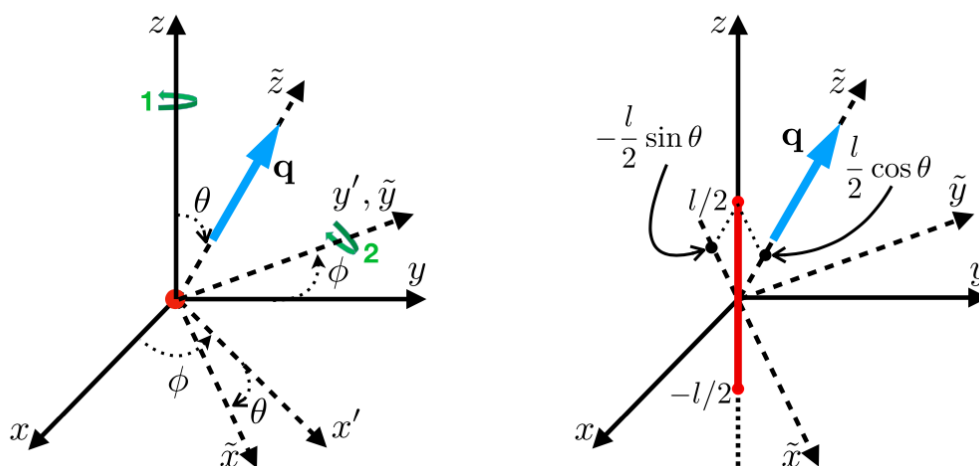


圖 15 座標轉換：(a) 點熱源(實線與虛線分別為 (x,y,z) 與 $(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 正交座標系統。變化後的 $\tilde{z}$ 方向指向達西通量(藍色箭頭)。座標系統的轉換主要透過兩次座標軸旋轉所完成，(1)沿著 z 軸逆時針選轉角度 ψ ，將 (x,y,z) 座標系統轉換為 (x',y',z') ，(2)沿著 y' 軸逆時針選轉角度 θ ，並以向量 q 對齊新 z' 軸。其中， $\tilde{x},\tilde{z}$ 與 z 軸坐落於同一平面，座標軸原點為點熱源) (b) 線性熱源(長度 l 的線性熱源沿著 z 方向坐落於座標系統 (x,y,z) 中， $(z=-l/2, z=l/2)$ ，在座標系統 $(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 中，連接原點兩端的點為 $(-l/2\sin\theta, 0, l/2\cos\theta)$ 與 $(l/2\sin\theta, 0, -l/2\cos\theta)$) (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)

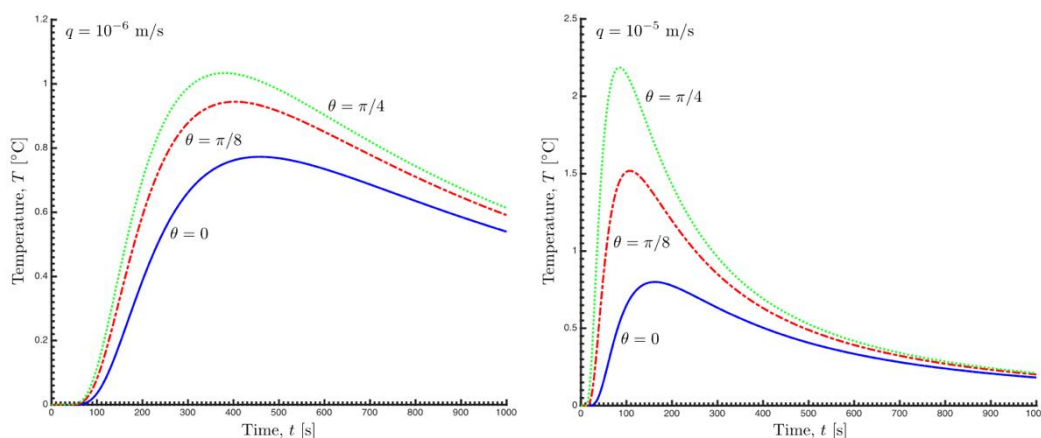


圖 16 溫度反應曲線(點位 $x=0.03, y=0, z=0.03$)，(a)達西通量為 10^{-6} m/s，(b) 達西通量為 10^{-5} m/s (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)



研究方法與過程

4-7 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

第一年

工作項目	年 月												備註
	03月	04月	05月	06月	07月	08月	09月	10月	11月	12月	01月	02月	
污染場址淺部含水層的主動式 DTS 跨孔加熱試驗													
跨孔之熱傳輸解析解分析						※							
數值模式建置、率定、參數敏感度及不確定性分析													
污染場址淺部含水層單井的 TV-DTS 現地測試													
地下水流速與流向推估											※		
跨孔加熱試驗與單井 TV-DTS 試驗結果之比較分析											※		
期末報告撰寫與繳交												※	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	86%	92%	100%	
預定查核點	期中	1. 主動式 DTS 跨孔加熱試驗 2. 跨孔之熱傳輸解析解分析											
	期末	1. 單井的 TV-DTS 現地測試 2. 地下水流速與流向推估 3. 跨孔加熱試驗與單井 TV-DTS 試驗結果之比較分析 4. 期末報告撰寫與繳交。											
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。													



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

第二年

年月 工作項目	03 月	04 月	05 月	06 月	07 月	08 月	09 月	10 月	11 月	12 月	01 月	02 月	備 註
污染場址深部含水層的主動式 DTS 跨孔加熱試驗													
跨孔之熱傳輸解析解分析						※							
不同場址條件下，主動式 DTS 加熱試驗之適用性分析						※							
數值模式建置、率定、參數敏感度及不確定性分析													
高精度纏繞光纖現地試驗、分析與優化									※				
污染場址深部含水層單井的 TV-DTS 現地測試													
地下水流速與流向推估											※		
主動式 DTS 光纖加熱系統量測、高解析度纏繞光纖及單井 TV-DTS 試驗之標準流程											※		
期末報告撰寫與繳交												※	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	86%	92%	100 %	
預定查核點	期 中		1. 主動式 DTS 跨孔加熱試驗 2. 跨孔之熱傳輸解析解分析 3. 主動式 DTS 加熱試驗之適用性分析										
	期 末		1. 高精度纏繞光纖現地試驗、分析與優化 2. 單井 TV-DTS 現地測試 3. 地下水流速與流向推估 4. 建立現地量測、試驗之標準流程 5. 期末報告撰寫與繳交。										
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。													



研究方法與過程

4-8 模場概況

本研究計畫所選定的第二個地下水污染場址為苗栗縣頭份鎮的永貞宮。永貞宮位於苗栗縣頭份鎮田寮里，廟體佔地約 200 平方公尺，東側與頭份工業區相鄰，西側則與永貞國小相隔永貞路，廟口空地為永康街通過，為頭份竹南等地區居民之信仰中心，其周圍有綠地、活動中心、戲台、空地、停車場與大客貨車迴轉道等附屬設施，整體腹地約 7,000 平方公尺。本計畫規劃之試驗區域位於永貞宮東南側之停車場空地（圖 17）。其中，第一含水層/第二含水層試驗區域以有既設不同水層監測井群（K00049、K00106、K00109、K00161 等）作為上游或周遭背景井，並以灌溉排水溝為南側邊界，往北劃設約 10×10 公尺區域，作為兩含水層共同試驗區域；而滯水層試驗模場區域則位於既有監測群井之西北側，同樣位於停車場空地，劃設約 10×10 公尺區域範圍。

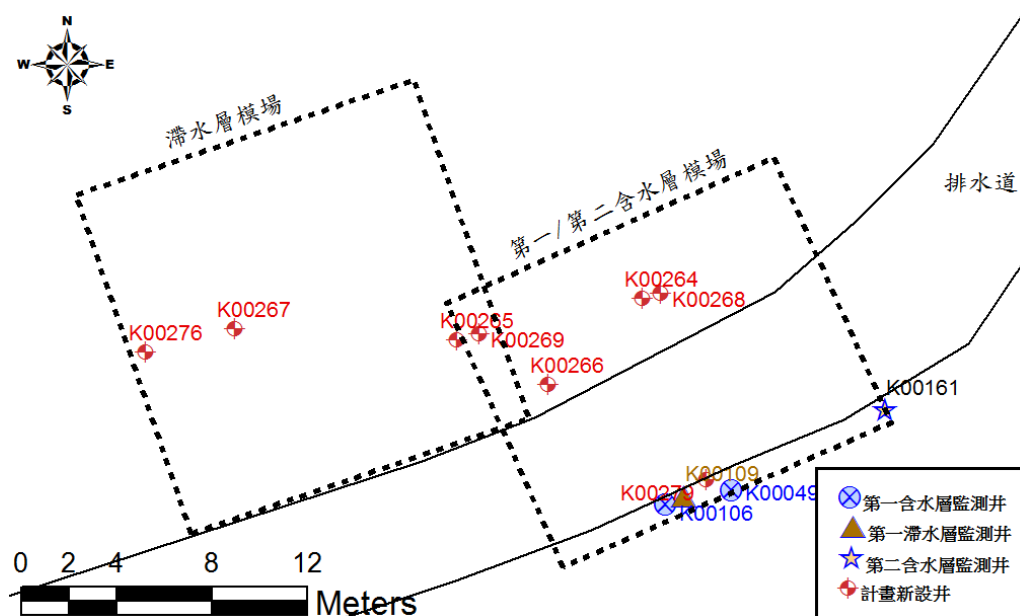


圖 17 先導試驗區域場址配置規劃與現況示意圖



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

根據過去相關調查資料評析結果，頭份工業區及鄰近區域內污染場址包含台灣氯乙烯頭份廠、華夏海灣塑膠頭份廠，兩場址均正執行地下水污染整治計畫，為避免本計畫試驗受到該場址改善作業影響，同時，配合現階段補充調查結果，第一含水層、滯水層、第二含水層試驗模場區域，擇定為永貞宮東南側空地，試驗區域旁既設之不同深度水層監測井（第一含水層之 K00049、K00106；滯水層之 K00109；第二含水層之 K00161），可同時作為試驗成效評估監測井。依據現階段調查成果，目前本區域第一含水層水質已普遍低於污染管制標準，而永貞宮第一含水層監測井水中污染物濃度亦僅測得 TCE 濃度 0.0108 mg/L (K00049)、1,2-DCA 濃度為 0.02 mg/L (K00106)。根據霖昌公司 103 年中港溪地下水污染評估與調查計畫，於模場區域分別進行地球物理 ERT 法、多重式井測、多深度單井流速流向測定、多深度微水試驗，並增設 1 孔達滯水層底部之地質鑽探，透過現場模場區域鑽探與設井過程進行分層判釋，掌握模場區域細部水文地質狀況。

依據模場區域地球物理 ERT 法調查分析結果（圖 18），該區域地質材料電性分界約為在地表下 5 m、30 m、95 m，其中 30~35 公尺之地質材料電性分界，約略即為本區域滯水層底部。由圖中可發現，該層底部自東（或東北）向西（或西南，約往永貞國小方向）略有往深層漸增的趨勢。另外，依據 ERT 法電阻剖面結果顯示，主要電性異常區位（電阻率分布值高於周遭地質材料數倍）在測線水平距離約 90~125 m 處，深度約 30~90 公尺，對映區域或深度範圍即位於既設監測群井附近，而該群井之滯水層（K00109，約在測線 100 公尺處）及第二含水層（K00161，約在測線 110 公尺處）均已證實污染濃度偏高（VOCs 達數十 ppm），推測該電性異常區位可能與高濃度污染團有關。

依據霖昌公司於試驗場址的新設地質鑽探（位置約在滯水層模場區上游約 2 公尺處，約在 ERT 測線 95 公尺處），針對滯水層範圍進行連續取樣，每 2 公尺選取一樣品進行地質材料粒徑分析，共選擇地表下 17.5、19.5、21.5、23.5、25.5、27.5、29.5、31.5 公尺等 8 處深度樣品，並依據粒徑分析與研究文獻經驗公式及多深度水文試驗綜合推估地層水力傳導係數 K 值，各深度推估 K 值彙整如表 2 所示。鑽探結果顯示，在滯水層中應確實存在因地質材料組成比例不同而造成之高/低 K 區分層現象：8 處深度樣品中砂含量比例介於 4~98%；粉土含量比例介於 2~60%；黏土含量比例介於 0~44%，K 值分布約在 10⁻⁵~10⁻² cm/s。地表下



研究方法與過程

約 19.5~21.5 公尺、27.5 公尺附近深度，砂含量比例分別為 85~98%、87%，K 值分布約在 10^{-3} ~ 10^{-2} cm/s，屬於第一滯水層中之主要優勢流徑範圍。

圖 19 為結合地質鑽探、既設與新設井紀錄，ERT 剖面之量化資料，透過地層因子轉換建立地質柱狀剖面。由圖上可看出本區域地表下約 12 公尺至 15 公尺左右為滲透性良好之礫石層夾中細砂，即屬於本區域之第一含水層；而約地表下 15 至 30 公尺或 35 公尺左右則屬於粉土質砂或細砂（滲透性較佳）、砂質粉土或粉黏土（滲透性較差）等互層之中低滲透性地層，屬於本區域之第一滯水層；自地表下約 35 公尺左右往深層（約至地表下 90~100 公尺）之地質材料組成仍為砂、粉土、黏土互層所組成，但也有局部地層出現滲透性較佳的砂夾粉土（細砂為主），整體而言，其地質滲透性優於第一滯水層。依據 K00161 地質鑽探紀錄顯示，直至地表下約 98 公尺方出現較細顆粒含黏土量較高之低滲透性地層，可歸為本區域之第二滯水層。而柱狀剖面同樣顯示滯水層底部約自東北向西南方向（下游）略有往深層漸增的趨勢，亦即地質滲透性較佳的第二含水層有往西或西南側方向傾斜。而滯水層有相當明顯高/低 K 區分層現象，但傾斜方向或厚度分布不一。需特別注意的是，第二含水層顯示存在多層或較厚的砂夾粉土地層，且以細砂為主，有利污染團往下游深層傳輸。

根據霖昌公司多深度水文試驗及鑽探物性分析綜合評析結果，第一含水層屬於礫石夾砂地層，平均 K 值超過 10^{-3} cm/sec；第一滯水層粉黏土之低 K 區及砂層之高 K 區互層明顯，K 值分布約在 10^{-5} ~ 10^{-2} cm/sec；第二含水層為砂、粉土、黏土互層所組成，K 值分布約在 10^{-4} ~ 10^{-2} cm/sec。

地下水流向部分，由於第一含水層屬滲透性較佳之礫石夾砂地層，地質異質性變化較不明顯，模場區域附近之地下水流約往西側及西南側方向流動。根據新設第一含水層 K00264 監測井長期水位觀測與時頻分析結果（如圖 20），顯示遠方應有持續之抽水行為（應與上游台氣頭份廠第一含水層抽水控制有關），但對監測井水位影響僅達 4 mm，對整體流向影響不明顯。

第一滯水層部分，因地質異質性較複雜，以 K00109、K00266 監測井單井流向試驗結果為例，於地表下 28.5 公尺處（低 K 區）之流向約往西南側方向流動，31 公尺處（高 K 區）深度之流向則略偏南側方向流動，29.5 公尺處地質較佳區



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

域流向約往西側方向流動，整體而言，第一滯水層不同深度或互層之流向亦大致符合區域性流場。根據新設第一滯水層 K00266 監測井長期水位觀測與時頻分析結果（如圖 21），顯示略受抽水（約 1 次/天之頻率）影響，但對水位變化影響亦不明顯，對整體流向影響應不大，K00266 不同深度驗顯示地下水流向約往西側或略偏西北方向移動。

第二含水層部分，於既設井 K00161 及新設井 K00269 不同深度之單井流向流速測定，在未受抽水影響時流向約往西南方向移動。根據第二含水層 K00161 監測井長期水位觀測與時頻分析結果（如圖 22），則顯示水位觀測期間明顯受到抽水影響（約 1 次/天之頻率），抽水造成 35.5 公尺處之流向約往東南側流動，48 公尺處之流向則往東側方向流動，流向從西南方向改變為往東側或東南，流速亦增加約 2.3~2.4 倍，明顯受到抽水影響而造成局部流場變化。

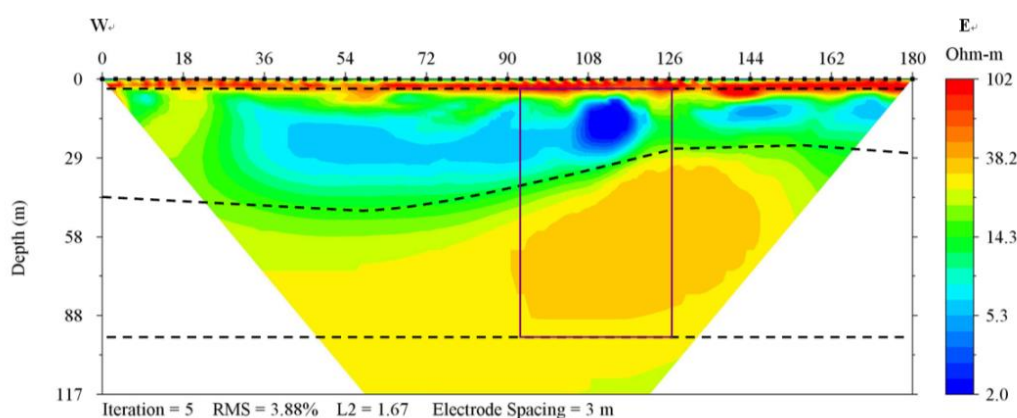


圖 18 永貞宮先導試驗區域 ERT 法調查剖面圖(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



研究方法與過程

表 2 地質鑽探樣本粒徑分析與推估 K 值彙整表(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)

深度 (m)	粒徑分析 (%)				分類	K 值 (cm/s)
	礫石 (Gravel)	砂 (Sand)	粉土 (Silt)	黏土 (Clay)		
17.5	0	4.0	52.0	44.0	CL	3.5×10^{-5}
19.5	0	85.0	15.0	0	SM	3.2×10^{-3}
21.5	0	98.0	2.0	0	SP	3.3×10^{-2}
23.5	0	36.0	57.0	7.0	ML	8.4×10^{-5}
25.5	0	28.0	60.0	12.0	ML	7.7×10^{-5}
27.5	0	87.0	13.0	0	SM	5.1×10^{-3}
29.5	0	22.0	57.0	21.0	ML	7.5×10^{-5}
31.5	0	64.0	36.0	0	SM	1.2×10^{-3}

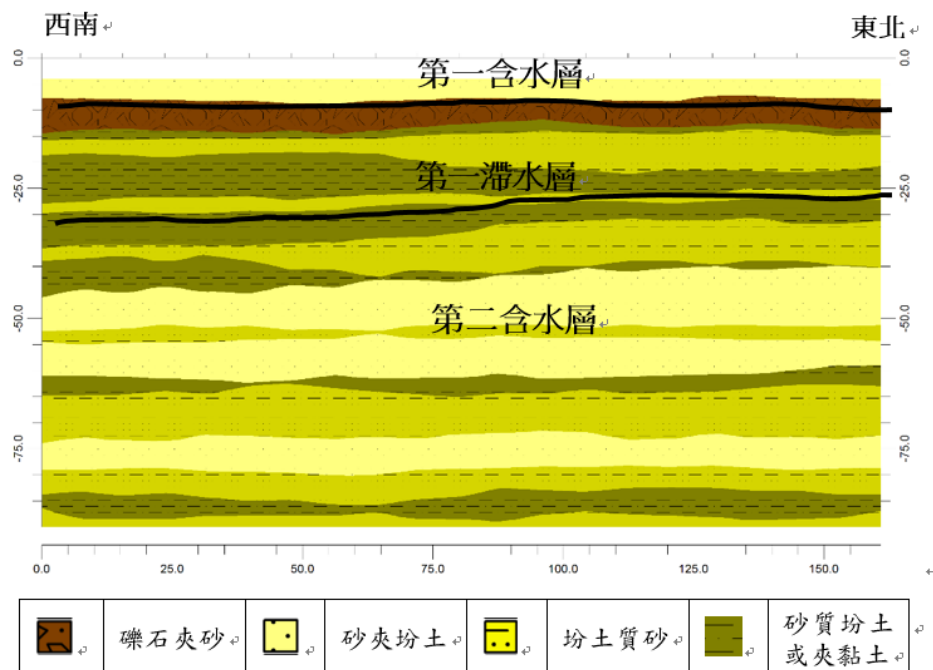


圖 19 結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

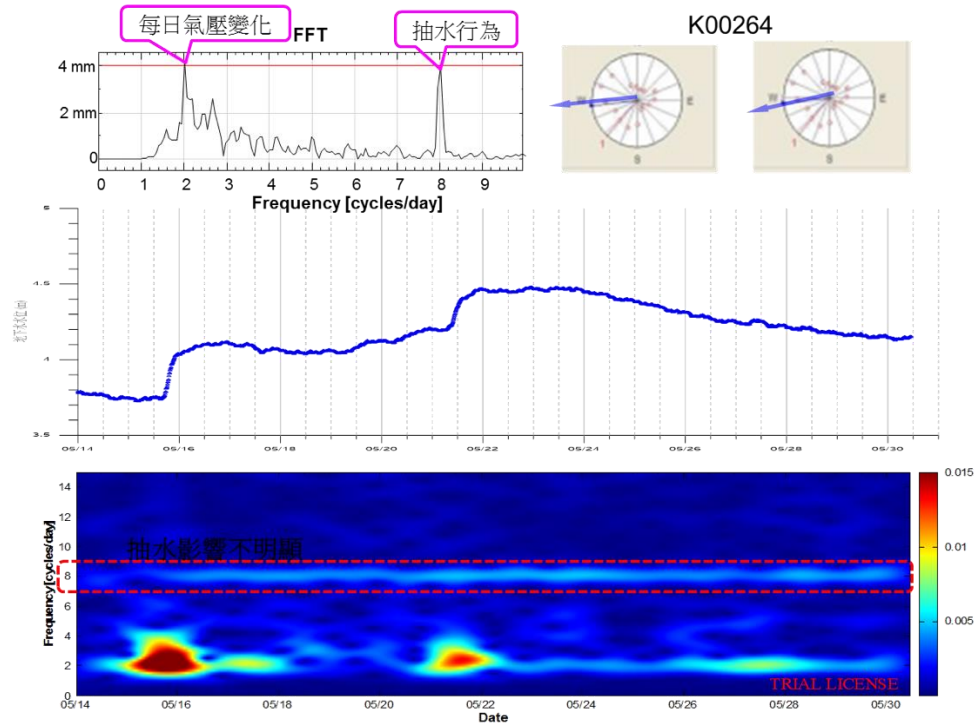


圖 20 第一含水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)

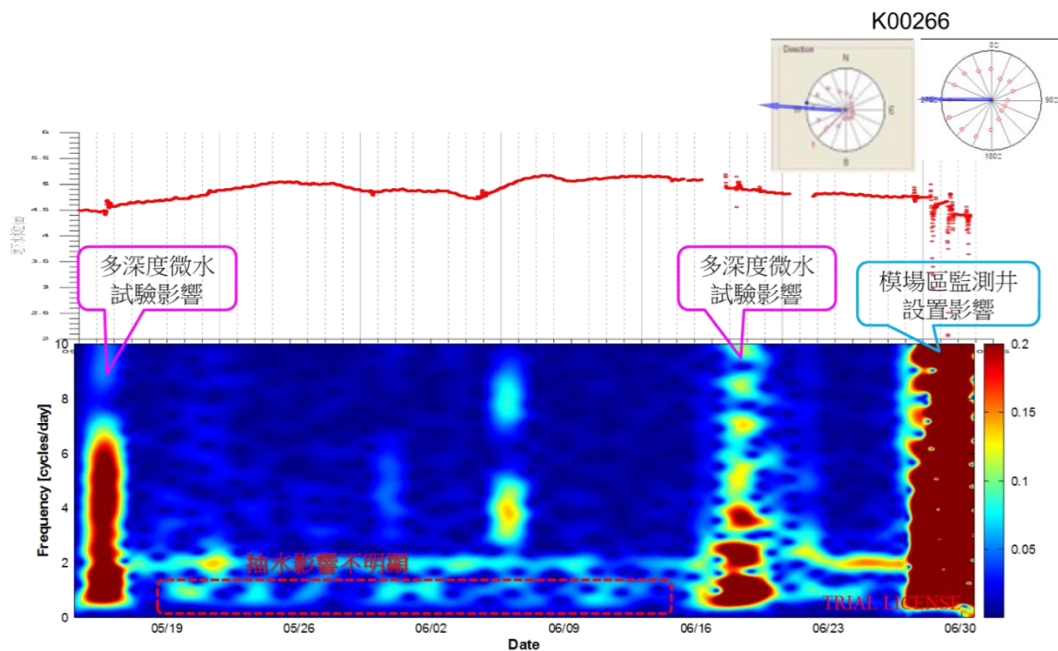


圖 21 第一滯水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



研究方法與過程

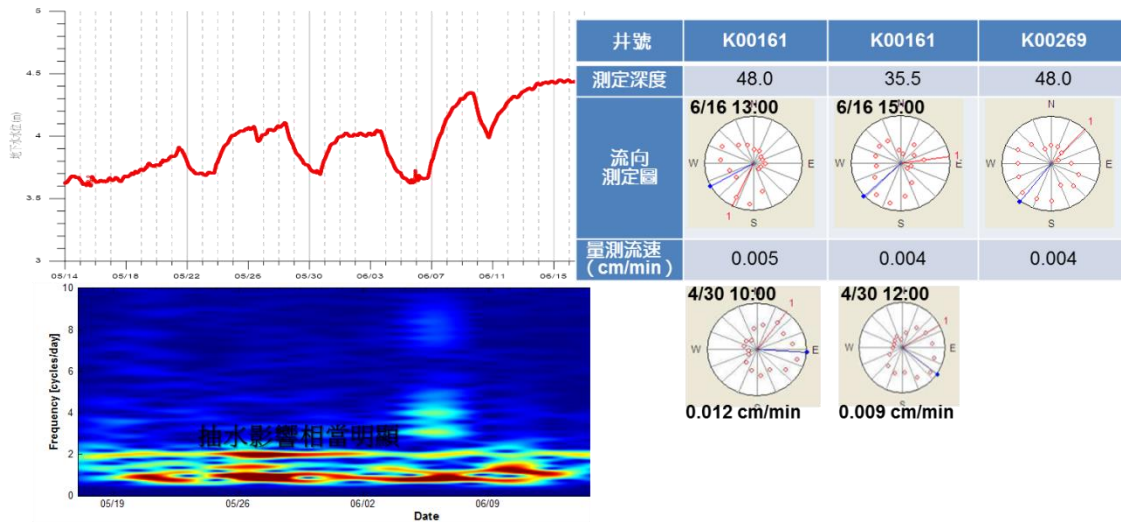


圖 22 第二含水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

五、 結果與討論

5-1 現地試驗設計

根據永貞宮地區歷史調查資料顯示，本區域的地下水流向在第一含水層、第一滯水層與第二含水層大致由東或東北方向西或西南方向流動，因此試驗所選定之監測井皆依照歷史地下水流向資訊進行規劃，今年度的工作項目主要針對淺層（第一）含水層進行試驗與分析，深部（第二）含水層則為明年度之工作項目。

第一次現地試驗設計

本次試驗選定上游之 K00268（井深為 91.9 公尺）為加熱井、下游之 K00264（井深為 12.1 公尺）為監測井，進行跨孔之加熱試驗，兩井間之距離約為 0.7 公尺(圖 23)。圖 25 為本試驗之佈設示意圖，於 K00268 以主動式加熱光纖進行全井之加熱，並使用 Ultima DTS 蒐集光纖溫度變化；另於 K00264 以 XT-DTS 蒐集水溫變化。雖於兩口井分別使用不同的分散式光纖溫度感測器與光纖纜線配置，然而兩口井的光纖纜線皆有部分放置於同樣的參照水體(reference bath，冷水桶、暖水桶與環境溫度水桶)中，並於分析前進行溫度之校正，使兩口井的水溫變化可以交互比較。除了配置分散式光纖溫度感測器監測時間與空間上高解析度的連續溫度資料外，也分別於 K00268 深度 80 公尺位置與 K00264 深度 10 公尺位置安裝實體溫度計 RBRduet³T.D 與 CTD diver，同步監測地下水溫變化。本次試驗期間自 4 月 26 日起至 4 月 28 日止，共進行為期 3 天的跨孔加熱試驗，試驗規劃為首先進行 1 小時之背景溫度監測，隨後進行 20 小時之主動式加熱試驗，加熱之功率給定為 20W/m，停止加熱後，進行 29 小時的回溫監測試驗。DTS 設定以 2 分鐘記錄一筆資料作為時間間隔(time interval)，完整記錄升溫與降溫曲線，並以 0.254 公尺作為取樣間隔(sampling interval)。圖 26 為現地試驗照片。

第二次現地試驗設計

有鑒於第一次試驗針對井 K00268 與井 K00264 間具有跨孔熱傳輸試驗之可行性，本團隊進行第二次現地試驗，以井 K00268 與井 K00264 搭配下游方向的井群進行跨孔熱傳輸試驗，試驗時間為 2021/11/4~2021/11/8。圖 24b 為本次現地光纖佈設示意圖，以 Ultima-DTS 進行模場監測井量測，佈設的井依序為井 K00268、井 K00264、井 K00266、井 K00269 與井 K00265，各井之基本資料列於表 3，其中，井 K00268 為此次試驗之加熱井，餘 4 井皆作為地下水流下游方向觀測井持續監測溫度訊號。為了在加熱與溫度回復過程中能準確獲取溫度變化之訊號，並



結果與討論

與第一次試驗互相比較，Ultima-DTS 設定依然以 2 分鐘為量測間隔，並設定為每 0.254 公尺為取樣間距(sampling interval)。試驗規劃首先進行 1 小時的背景溫度量測後，持續進行 24 小時之主動式加熱（2021/11/4 17:21 開始進行加熱），加熱之功率給定為 32W/m，停止加熱後，持續進行 67 小時下游監測井回溫監測試驗。

地下水流速的判釋之主要條件取決於含水層流速的快慢，為避免水流速度過快（礫石層， 10^{-3} m/s 以上），熱能消散過於快速，導致井內水溫上升不顯著，將造成流速推估上的誤差。因此第二次試驗將加熱功率往上提升，藉此提高溫差以增加流速上之判釋能力。

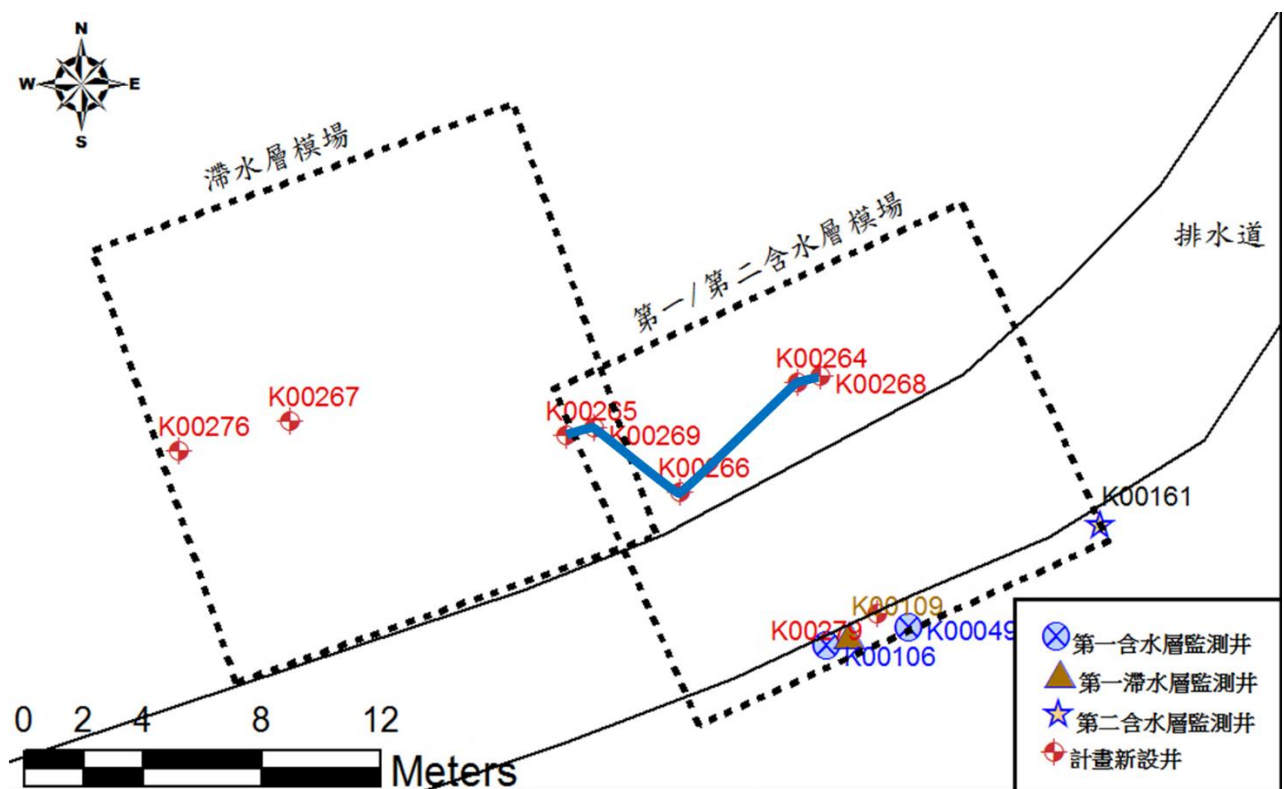


圖 23 模場監測井配置圖（藍線為第二次試驗光纖佈設示意圖）



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

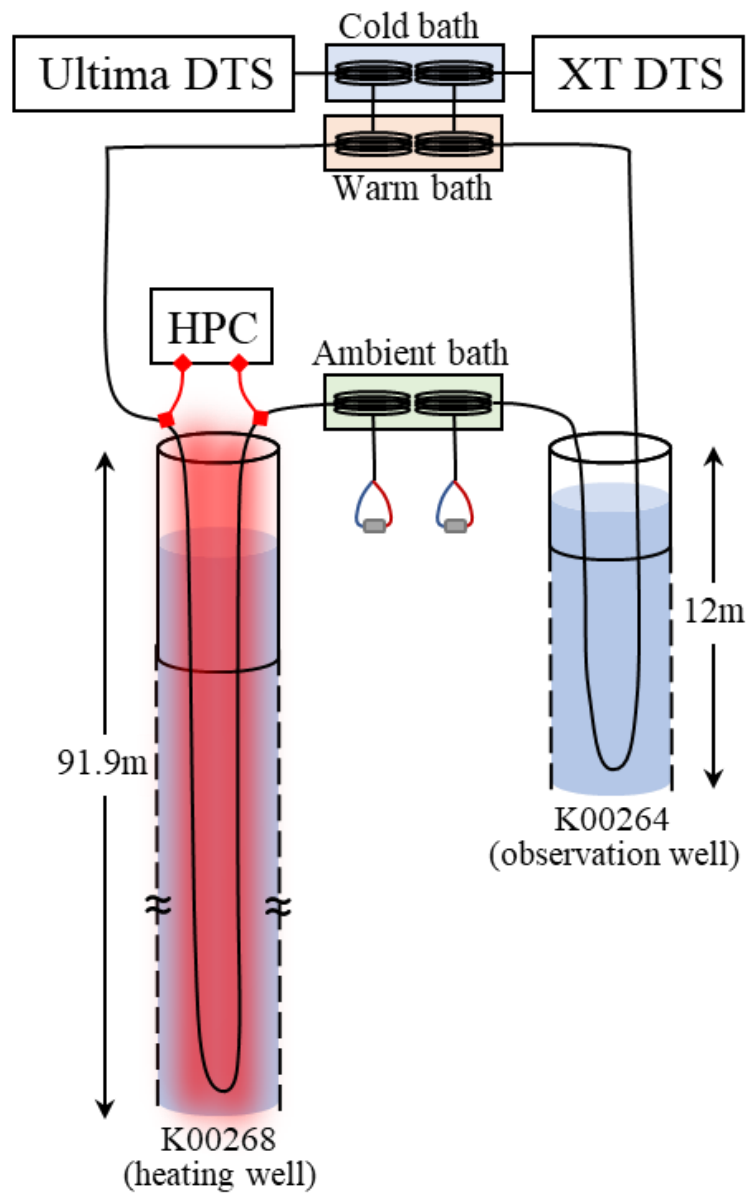


圖 24 第一次試驗光纖纜線佈設示意圖

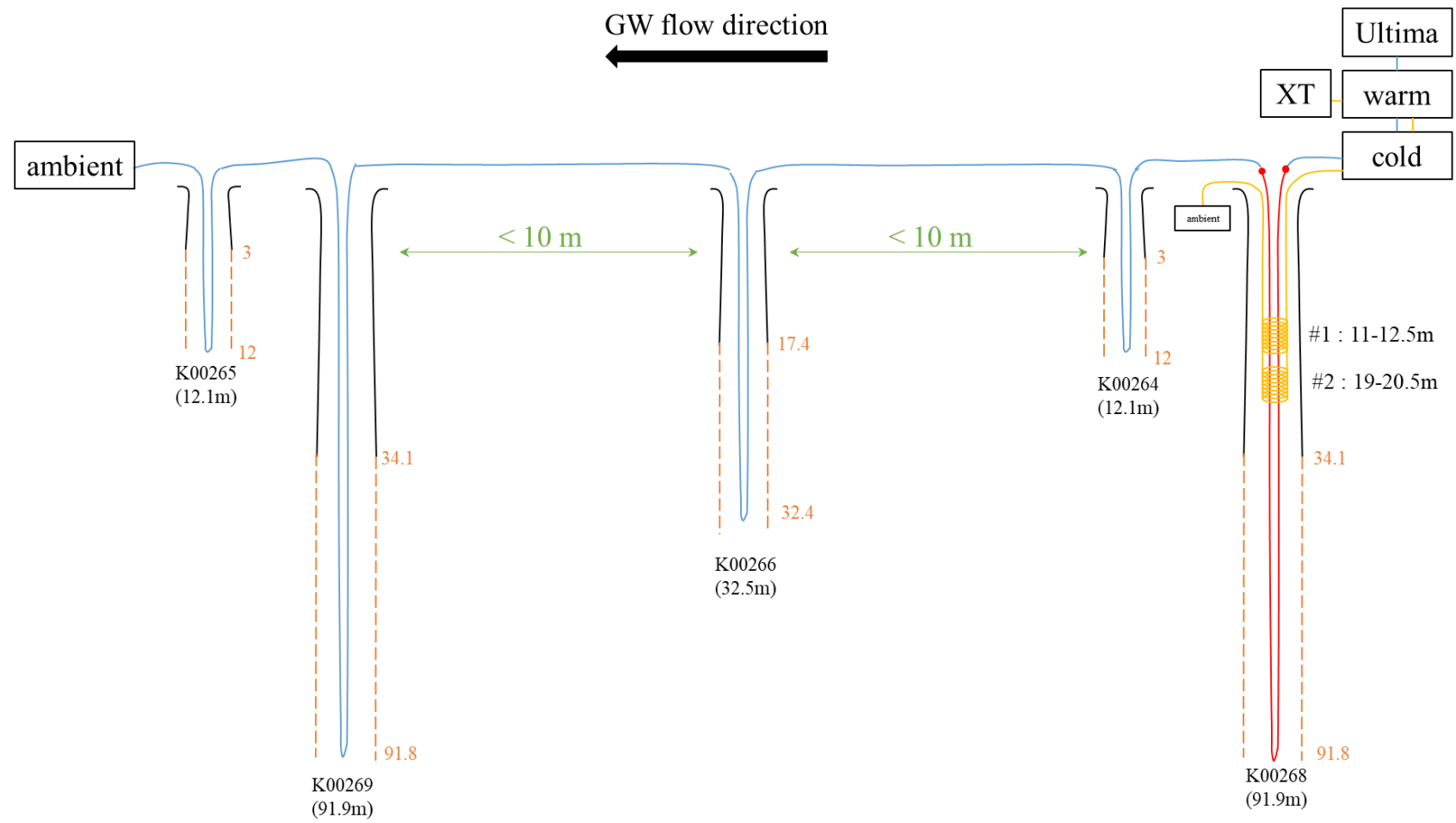


圖 25 第二次試驗光纖纜線佈設示意圖



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

表 3 試驗井之基本資訊

井號	井深(m)	井篩段(m)	與加熱井 K00268 距離(m)	地下水流方向
K00268	91.9	34.8-91.8	0	上游 ↓ 下游
K00264	12.1	3-12	0.7-0.9	
K00266	32.5	17.4-32.4	~ 6	
K00269	91.9	34.8-91.8	~ 8	
K00265	12.1	3-12	~ 9	



圖 26 第一次試驗現地配置照片(A)試驗井配備 (B)井 K00264(左)與 K00268(右)

(C)分散式光纖溫度感測器與參考溫度水桶 (D)加熱控制器



結果與討論



圖 27 第二次試驗現地配置照片(A)試驗井全範圍 (B)井 K00268(上)與井 K00264(下) (C)井 K00265(上)與井 K00269(下) (D)井 K00266



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-2 溫度剖面分析

本次試驗採取主動式加熱的熱示蹤劑試驗，透過分散式光纖溫度感測器技術搭配加熱控制系統，分析連續性之地下水溫變化來剖析細部的水文地質特性。由於接近地下水面之水溫易受氣溫影響而產生誤判，因此在分析時，僅針對地下水位面 1 公尺以下的溫度資料進行後續探討。

5-2-1 K00268 單井加熱試驗

K00268 之井深約為 91.9 公尺，濾水管開篩位置為 34.8 公尺至 91.8 公尺，位於第二含水層。本計畫針對 K00268 進行了二次單井加熱試驗，第一次試驗當日所量測的地下水位面位於井下約 4.03 公尺處，背景之地下水溫約為 25.5°C(井下 80 公尺處)。第二次試驗當日所量測的地下水位面位於井下約 3.59 公尺處，背景之地下水溫約為 25.5°C。本計畫今年度之目標主要針對淺層含水層（深度 40 公尺以上）的資料進行解析。依據 DTS 標準率定程序得知（請參照期中報告），所量測溫度之準確度達 0.045-0.053°C，因此利用加熱試驗使目標試驗井產生高於準確度之溫差即可準確予以判識。而在後續之流速推估上，若溫差高於 0.5°C 以上，即可準確地予以推估（最適當之溫差為 2-6°C）。

第一次加熱試驗

圖 28a 為第一次試驗期間井 K00268 所量測到絕對溫度對深度隨時間的變量量測結果，開始加熱時間為 4 月 26 日 15 時 21 分，停止加熱時間為 4 月 27 日 11 時 32 分。在整個監測期間，井內溫度有非常顯著的升溫與降溫現象。在加熱期間，光纖溫度由背景值 25°C 急遽上升，直到加熱末期光纖溫度最高溫超過 36°C，而且溫度訊號有顯著的分層現象；當加熱停止後，光纖溫度便迅速回復至接近背景值。此外，在整段監測期結束之前(4 月 28 日 12 時左右)有一短時間的低溫訊號，造成此低溫訊號的原因是由於現場發生了降雨事件，雨水的匯集流入井中導致井溫受到影響，由於雨水溫度低於地下水溫度，從而使得溫度訊號受到影響。

為了使溫度訊號更加容易判識，將各深度的溫度扣掉初始溫度，繪製成各深度溫差隨時間的變化圖，圖 29a 為加熱井自背景監測開始至加熱結束的期間溫差隨時間的變化，可以觀察到在加熱 1 小時內，各個深度升溫幅度差異不大，溫度變化介於 4~6°C，而在加熱 1 小時後，溫度變化開始有明顯分層差異。深度 5~17 公尺在加熱 2 小時後，溫差與初始相比增加約 10~10.5°C，直到加熱結束前維持穩定的溫差。深度 17~19 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加 8°C 左右，並維持穩定



結果與討論

溫差直到加熱結束前。深度 19~35 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加 8~10°C，並持續增溫直到加熱結束前達到最高 12.5°C 的溫差。深度 35~40 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加 8~10°C，直到加熱結束前維持穩定的溫差。

圖 30a 為自停止加熱後各深度溫差隨時間的變化，在停止加熱後光纖溫度便快速降溫，在停止加熱後的 4 小時內便已回復至與原始溫度 3°C 之溫差，隨後緩慢降溫至背景溫度，此外，同樣可以觀察到降溫程度差異所產生的明顯溫度分層現象。深度 17~19 公尺、35~40 公尺與 42~50 公尺在停止加熱後的 30 分鐘內，溫度便已回復至與原始溫度 3°C 的溫差。深度 5~17 公尺在停止加熱 1.5 小時後，回復至與原始溫度 3°C 的溫差。最晚回復至背景溫度的位置為深度 19~35 公尺，在停止加熱後的 30 分鐘內仍有 6.5°C 的溫差，直到停止加熱 3.5 小時後才回復至與原始溫度 3°C 的溫差。

第二次加熱試驗

圖 28b 為第二次試驗期間井 K00268 所量測到絕對溫度對深度隨時間的變化量測結果，開始加熱時間為 11 月 04 日 17 時 21 分，停止加熱時間為 11 月 05 日 17 時 31 分，共計約 24 小時的加熱時間。在整個監測期間，井內溫度同樣有非常顯著的升溫與降溫現象。由於本次試驗所給定之加熱功率提高，光纖溫度由背景值 25°C 急遽增溫，直到加熱末期最高溫超過 50°C，且溫度訊號也具有顯著的分層現象。此外，在加熱初期可以觀察到短暫的降溫，是由於試驗期間加熱設備故障，在故障排除期間因無法持續加熱所造成井下溫度短暫的下降。

透過各深度溫差隨時間的變化圖深入分析溫度分層變化，在加熱過程中，(圖 29b)深度 5~18 公尺在加熱第 3 小時後，溫差與初始相比增加約 15~18°C，並維持穩定直到加熱結束。深度 20~37 公尺在加熱第 3 小時後，溫度上升約 16~22°C 持續維持至加熱結束。深度 28~40 公尺則有最小的升溫變化，在開始加熱後升溫至約 10°C 溫差，並緩慢增溫直到加熱停止。第二次試驗結果在深度 18~19 公尺與 26~27 公尺之間有非常顯著的升溫現象，在開始加熱第 1 小時內，此二位置的溫度差已達到 20~23°C，並持續升溫至 25°C 直到加熱結束。

由圖 30b 觀察停止加熱後 4 小時內的溫度變化，在加熱停止後光纖溫度在短時間內迅速回復。在加熱停止半小時後，深度 5~20 公尺已回復至與背景溫度 8~10°C 溫差。深度 21~37 公尺則耗費最長時間回復，在加熱停止 1.5 小時後回復至與背景溫度 5~8°C 溫差。而深度 38~40 公尺則有最迅速的回溫速度，於停止加熱 0.5 小時內溫度便已回復至與背景溫度 5°C 以內的溫差。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

兩次試驗比較

依據兩次試驗（4月與11月）溫度對深度隨時間的變化結果顯示，試驗所得之溫度剖面趨勢非常一致，深度17~19公尺與37~40公尺在加熱過程中，因周圍地層最為透水，地下水流動快速，加熱過程受溫度較低的地下水流影響，熱能散失較快，使得光纖在對地下水流加熱時溫度上升較為緩慢。而在深度5~15公尺與19~35公尺周圍的地層相對較不透水，在深度23~28公尺則為最不透水區域，地下水流流動十分緩慢，在加熱的過程中，受到周圍較低溫之地下水流影響較為緩慢，熱能較易累積，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大。此外，在第二次（11月）之溫度訊號中，可以特別觀察到深度18~19公尺與26~27公尺有不尋常的高溫，根據現場記錄，在18~19公尺之間存在著高精度纏繞光纖所垂掛之金屬重錘，推測可能受到其材質影響，使得此深度的溫度上升顯著（後續將在5-3-1小節詳細分析與討論）。而在26~27公尺則為光纖曾經受損之區域，由於此區段的纜線外皮經過切割後重新包覆，推測可能與披覆層較其他位置厚度更厚，導致熱能容易蓄積，造成溫度顯著上升的原因。雖兩次試驗間之溫度變化有些微的差異，其主要原因與光纖受損及「纏繞光纖」的安裝有關。若將此外部因素予以剔除，兩次試驗之溫度變化幾乎相近，得知兩次試驗所判釋之相對透水區段非常一致。

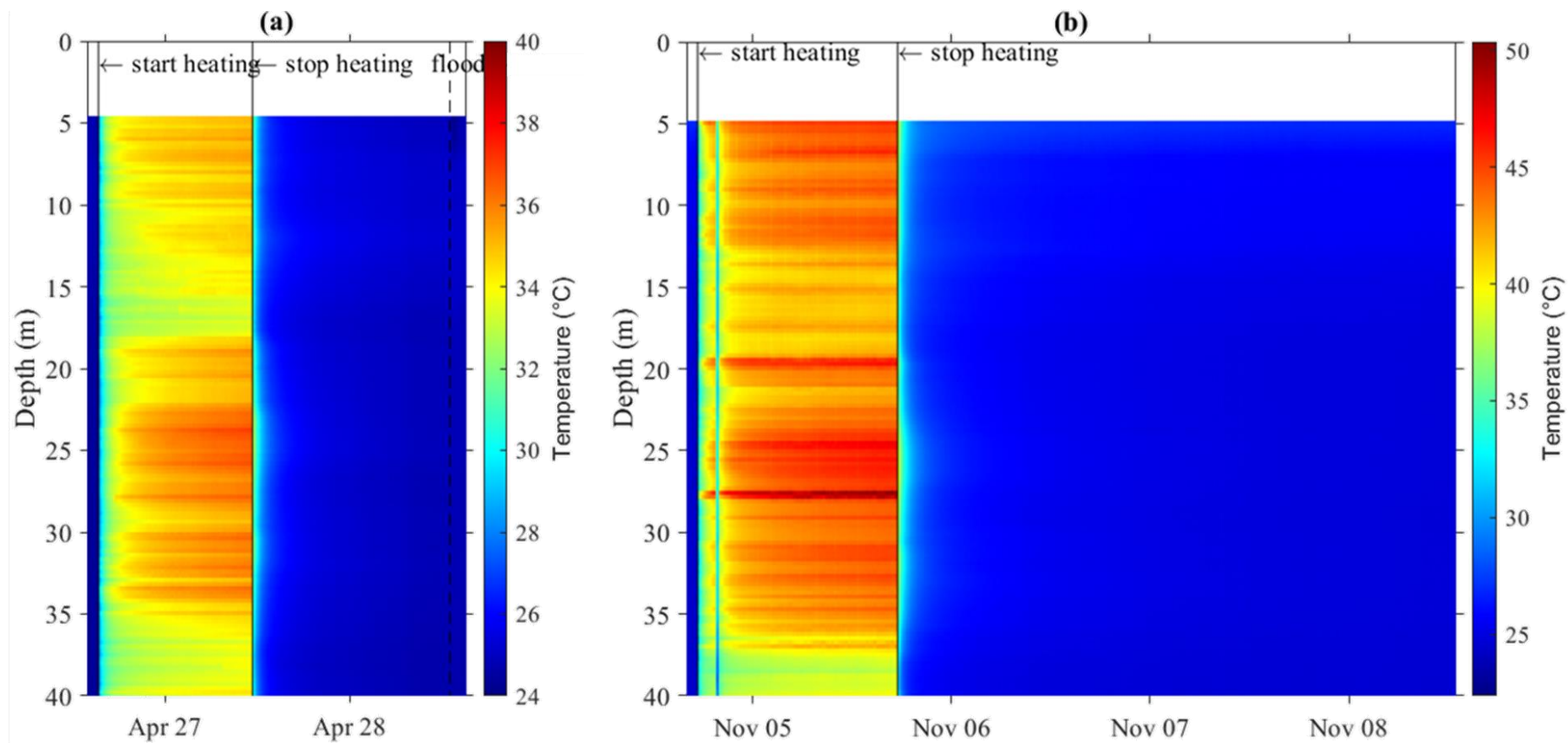


圖 28 K00268 絕對溫度量測結果 (a) 第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果 (11 月)

加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

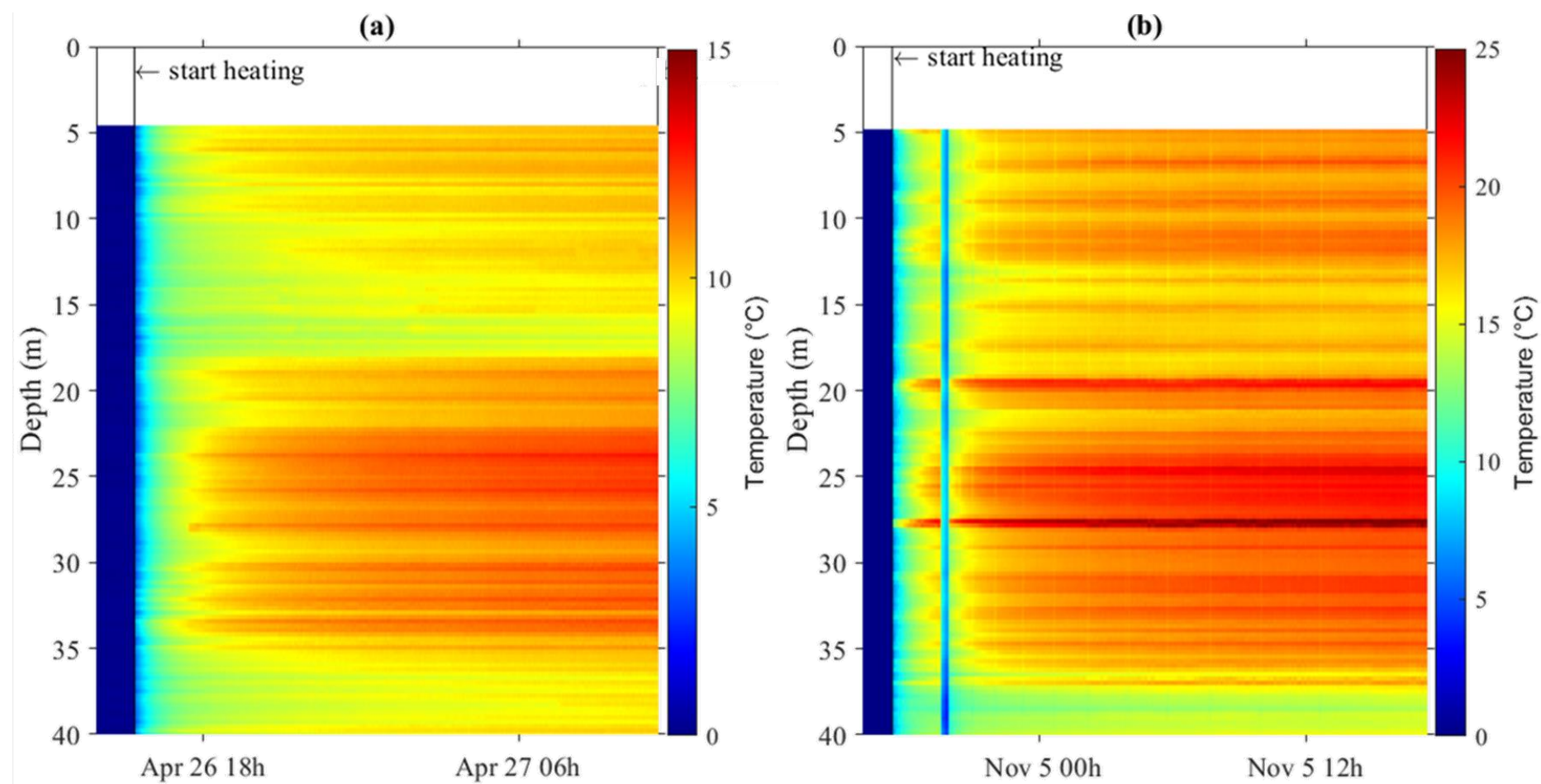


圖 29 K00286 加熱期間溫度差變化 (a)第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果 (11 月)

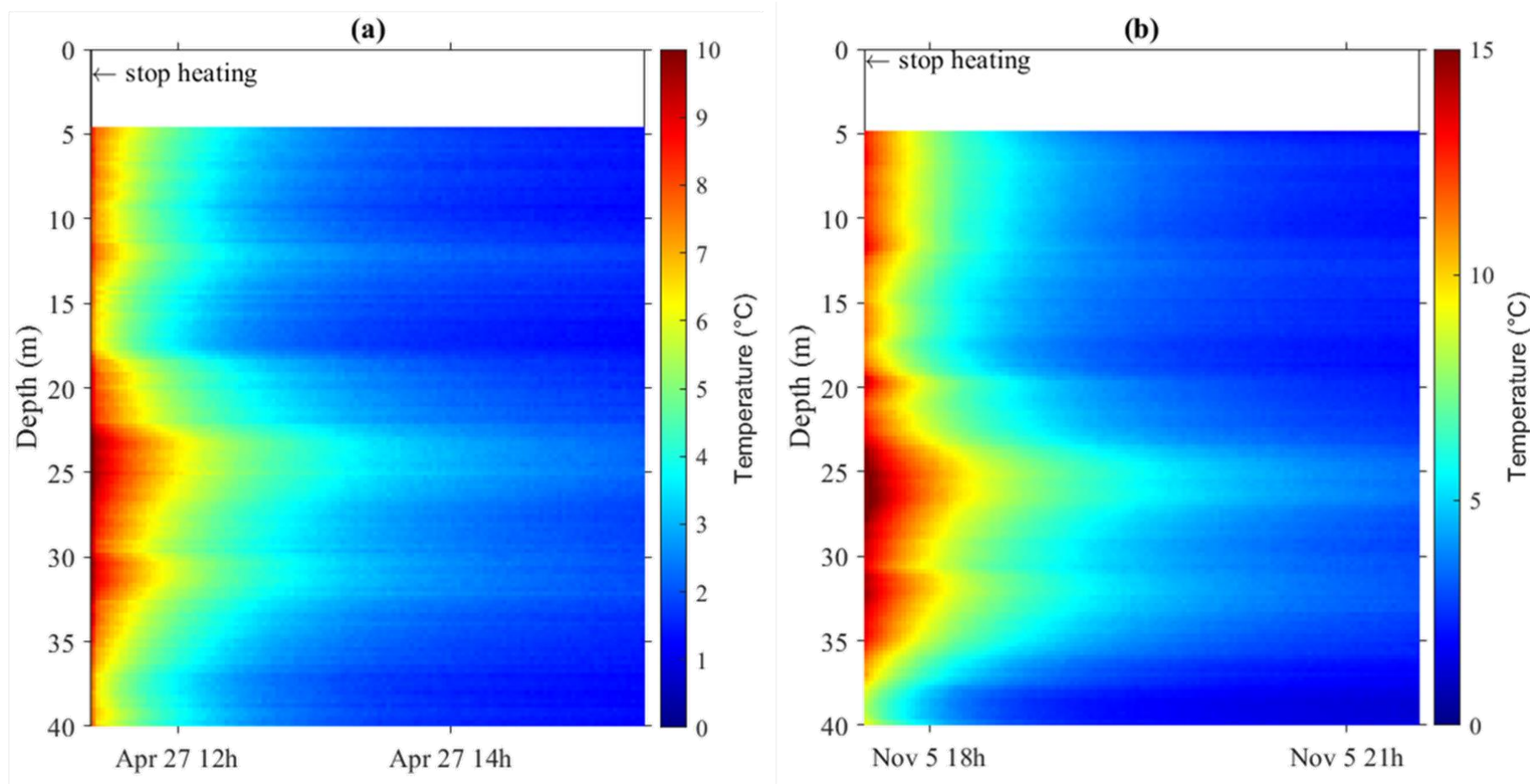


圖 30 K00268 回溫 4 小時內溫度差變化 (a) 第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果 (11 月)



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-2-2 K00268 單井流速分析

兩次試驗結果分別利用熱傳輸解析公式(Bakker et al., 2015)，在同一含水層且岩性組成變化變異性不大的假設前提下，孔隙率、熱傳導係數、熱擴散係數與熱遲滯係數可視為一定值，因此分別設定為 0.4、1.35 w/m/°C、0.06 m²/d 與 2(表 4)，輸出功率則依照各試驗分別設定為每公尺 20 瓦特與每公尺 30 瓦特，進行地下水流速之分析。進行流速分析時，針對每個深度區間的溫度變化進行溫度擬合，以窮舉法嘗試不同地下水流速與熱傳導係數組合，當方均根誤差(root-mean-square-error, RMSE)達到最小值時，此地下水流速與熱傳導係數即為最佳之組合。第一次試驗的擬合結果，方均根誤差介於 0.22~0.93°C 之間，擬合的最大與最小誤差分別為深度 23~24 公尺與 18~19 公尺。第二次試驗的擬合結果，方均根誤差介於 0.58~2.4°C 之間，擬合的最大與最小誤差分別為深度 27~28 公尺與 37~38 公尺。由期中報告所呈現的流速分析結果顯示(圖 31)，分別以 10 公尺、5 公尺、2.5 公尺、1.25 公尺與 0.5 公尺作為流速分析間距時，當分析間距愈短，愈能忠實呈現高流速與低流速的分佈，且以 1.25 公尺作為分析間距時已能完整提供細微的高、低流速帶分佈，因此本次在進行流速分析時，將採用 1.25 公尺的分析間距進行後續流速分析與討論。

圖 32a 為第一次試驗分析結果顯示，淺層(第一)含水層的流速分佈有極大的差異性：深度 5~16 公尺流速約為 0.75~1.4 m/d，深度 16~20 公尺區間包含有最高流速 1.75~1.95 m/d，深度 20~35 公尺有最低流速 0.11~0.31 m/d，深度 35~40 公尺流速約為 0.9~1.45 m/d。圖 32b 為第二次試驗流速分佈結果，與第一次試驗結果相比，其流速的差異相對較小：在深度 5~19 公尺區間流速約為 0.48~0.73 m/d，深度 20~35 公尺區間流速相對較小，約為 0.2~0.5 m/d，深度 35~40 公尺區間流速相對較大，約為 0.8~1.05 m/d。

比較兩次流速分析結果，雖整體流速在第二次試驗時略小於第一次試驗結果，然而兩次試驗所推估之流速分佈特徵趨勢一致，皆可以觀察到深度 20~35 公尺區間的低流速帶，以及深度 35~40 公尺區間的較高流速分佈，且在低流速區段當中(例如 29~30 公尺)，細微流速特徵(微小流速增加)也可見於兩次分析結果中。在第一次試驗的流速分佈中，位於深度 17~20 公尺的高流速區間，卻未在第二次試驗當中觀察到，這是由於 18~20 公尺高溫訊號所影響而導致的流速擬合誤差，使得此深度的流速在第二次試驗之分析有低估的現象(於 5-3-1 小節當中進行分析說明，圖 28b)。



結果與討論

將兩次試驗流速分佈對照文獻報告的地質柱狀剖面圖(圖 32c)，在深度 5~15 公尺岩性主要為砂夾粉土與礫石夾砂為主，判斷為相對最為透水之區段，相對應之流速應較快，與流速分析結果比對，確實於淺層區段有相對較高的流速。深度 15~35 公尺岩性主要為粉土質砂與砂質粉土或夾黏土交錯分佈，且以砂質粉土或夾黏土佔比較多，與其他深度相比應屬最為不透水之區段，在流速分析結果中該區段的流速最低。在深度 35~40 公尺的地層則由粉土質砂為主要組成，而在流速分析結果中，該區段的流速同樣也有增大的趨勢。

根據文獻報告所示，在第一含水層地質組成主要為礫石夾砂，熱傳導係數範圍介於 1.125~2.279 W/m/°C。經由熱傳輸解析解所推估之熱傳導係數 1.35 W/m/°C 落此範圍內，與文獻之理論值相符(表 6)。相較於沉積物之水力傳導係數，其熱傳導係數範圍小，因不同地質組成所造成的不確定性也相對較小。如欲求得更精確各深度之熱傳導係數，則需藉由現地岩心取樣並以實驗室儀器測量熱傳導係數進一步進行修正。

透過兩次試驗分析結果顯示，試驗結果的再現性非常良好，除了驗證主動式的光纖溫度感測器量測方法的可行性，其流速分析成果與地層岩性分佈一致，在提供空間中連續性高解析度資料的同時，甚至可以觀察到更加細微的流速分佈，對於探討細微的水文地質特性將有所助益。

表 4 熱傳輸解析參數

孔隙率	0.4
熱擴散係數	0.06 m ² /d
熱遲滯係數	2
輸出功率	20 W/m (32W/m)
熱傳導係數	1.35 W/m/°C

*括弧內為 11 月現地試驗設定值



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

表 5 二次試驗不同深度之流速推估與對應之擬合方均根誤差

depth (m)	第一次試驗 (4 月)		第二次試驗 (11 月)	
	u (m/d)	RMSE (°C)	u (m/d)	RMSE (°C)
5-6	0.85	0.29	0.65	0.84
6-7	0.80	0.27	0.55	1.08
7-8	0.80	0.26	0.65	0.75
8-9	0.95	0.33	0.50	0.98
9-10	0.95	0.28	0.60	0.82
10-11	1.05	0.45	0.50	1.08
11-12	0.80	0.44	0.40	1.11
12-13	0.75	0.49	0.55	0.66
13-14	1.15	0.63	0.70	0.61
14-15	1.20	0.54	0.70	0.64
15-16	1.40	0.58	0.65	0.65
16-17	1.95	0.66	0.65	0.68
17-18	1.75	0.61	0.75	0.71
18-19	0.65	0.22	0.70	0.68
19-20	0.51	0.28	0.30	1.79
20-21	0.41	0.30	0.45	0.92
21-22	0.41	0.34	0.50	0.70
22-23	0.11	0.63	0.35	1.12
23-24	0.11	0.93	0.20	1.60
24-25	0.11	0.83	0.15	2.24
25-26	0.11	0.87	0.15	2.07
26-27	0.16	0.58	0.15	1.73
27-28	0.16	0.71	0.15	2.40
28-29	0.31	0.36	0.25	1.31
29-30	0.21	0.36	0.30	1.09
30-31	0.16	0.60	0.20	1.48
31-32	0.11	0.52	0.25	1.26
32-33	0.21	0.38	0.20	1.31
33-34	0.26	0.55	0.35	0.96
34-35	0.65	0.24	0.40	0.93
35-36	0.90	0.38	0.70	0.67
36-37	1.40	0.53	0.80	0.66
37-38	1.45	0.52	1.00	0.58
38-39	1.45	0.54	1.05	0.62
39-40	1.15	0.42	1.00	0.65

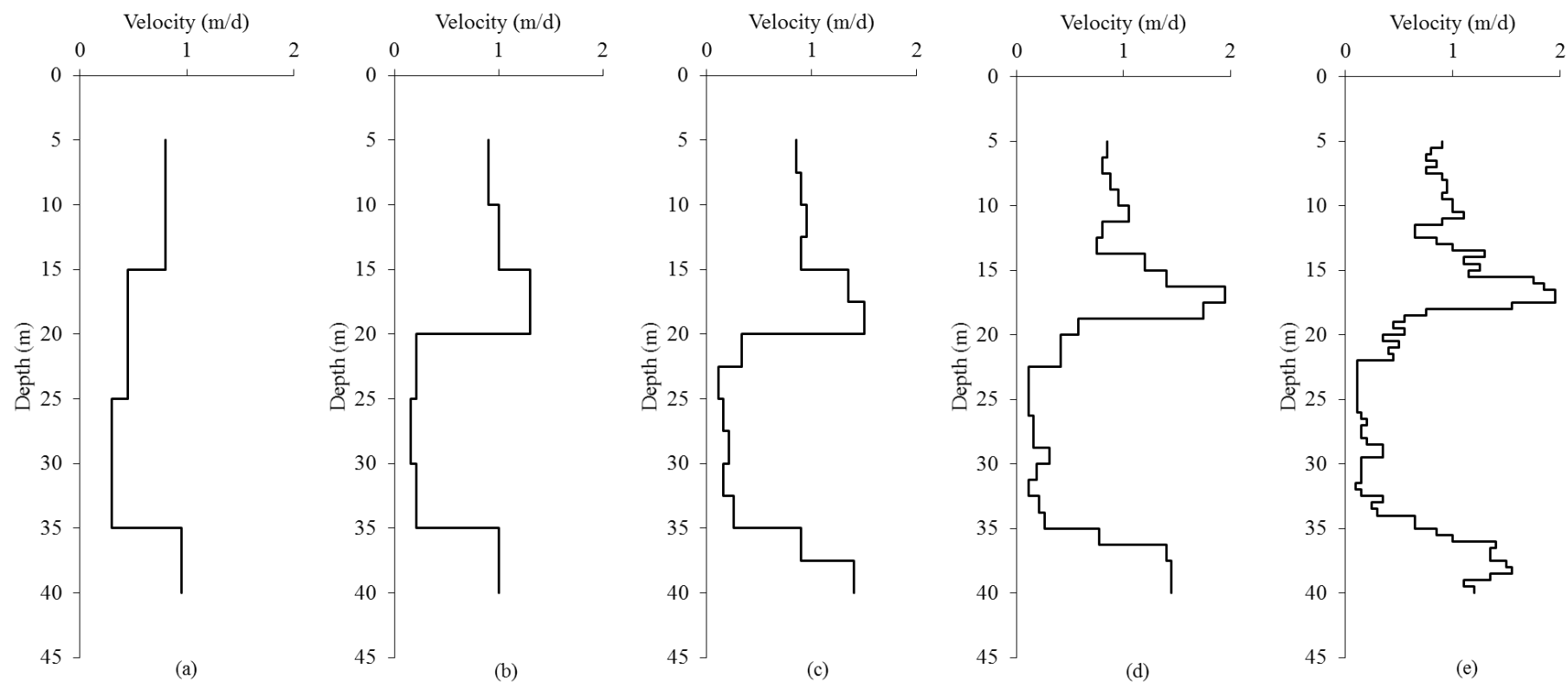


圖 31 絕對流速隨深度變化 (a)間距 10 公尺 (b)間距 5 公尺 (c)間距 2.5 公尺 (d)間距 1.25 公尺 (e)間距 0.5 公尺

加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

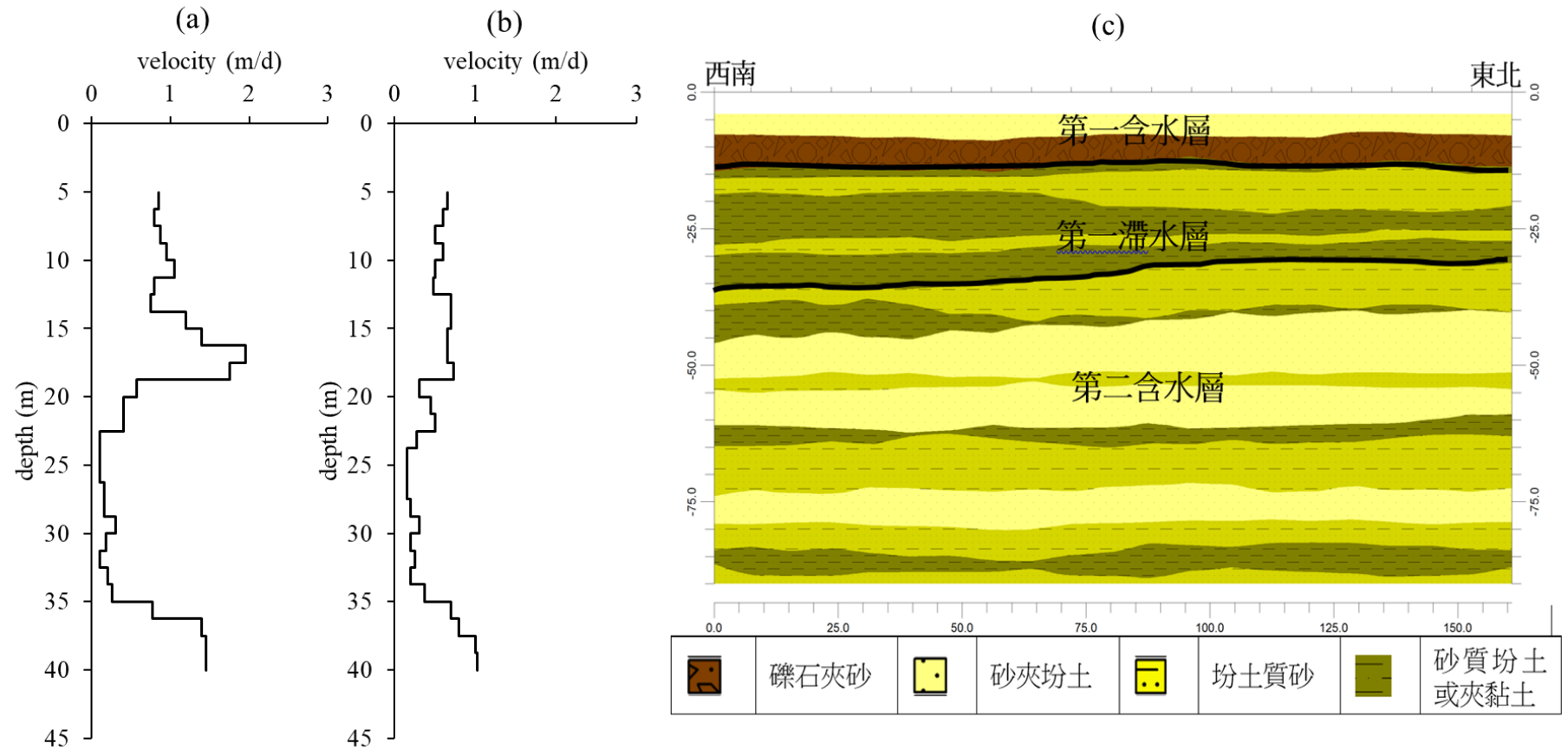


圖 32 絕對流速隨深度變化 (a)第一次試驗 (4 月) 流速分析結果 (b) 第二次試驗 (11 月) 流速分析結果 與 (c) 結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



結果與討論

表 6 常見土壤岩石熱傳導係數(修改自 Feng et al., 2009)

Lithology	Thermal conductivity(W/mk)	Mean± SD(W/mk)
Mudstone	1.042~2.559	1.778±0.372
Sandstone	0.588~3.02	1.68±0.618
Limestone	1.507~1.725	1.58±0.126
Salt rock	4.245~5.121	4.849±0.406
Conglomerate	1.125~2.279	1.901±0.385
Dolomite	3.078~3.996	3.492±0.465
Coal	0.246	0.246



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-3 跨孔熱示蹤劑試驗

5-3-1 第一次試驗（4 月）下游觀測井 K00264 溫度剖面量測

K00264 之井深約為 12.1 公尺，濾水管開篩位置為 3 公尺至 12 公尺，位於第一含水層。試驗當日所量測的地下水位面位於井下約 2.82 公尺處，背景之地下水溫約為 24.9°C(井下 10 公尺處)。因其位於加熱井之下游 1 公尺以內的距離，本次試驗將其設定為跨孔熱示蹤劑試驗的觀測井，嘗試接收上游之熱能訊號，由於 K00264 的井深僅有 12.1 公尺，因此僅能針對第一含水層的上部透水性進行解析。圖 33 為觀測井深度 10 公尺位置與加熱井 80 公尺位置實體溫度計所監測的地下水溫破透曲線(breakthrough curve)，由圖可以觀察到，水溫在 4 月 27 日 12 時開始便逐步上升，在受雨水匯集影響(圖中灰色虛線)前增溫幅度達到 0.03°C。

圖 34 為 DTS 所量測井 K00264 到絕對溫度對深度隨時間的變化量測結果，同樣將加熱區間以及降雨事件影響的時間標記在圖中。由溫度資料可以觀察到，K00264 之地下水溫也具有分層差異的狀態，在井下 3 公尺至約 7 公尺的範圍，水溫約由初始 24.6°C 逐漸升溫至 24.7°C，屬於相對低溫的區域；而在井下 7 公尺至井底 12.1 公尺的範圍，水溫約為 24.7°C 至 24.9°C，屬於相對高溫的區域。在整段監測期結束前，由於井 K00264 位處於較低窪處，因此受到兩次雨水匯流的影響，導致有監測到因為降雨造成的低溫訊號。

由於 K00264 整體井溫變化相對較小，為了使溫度訊號更佳容易判識，同樣將各深度的溫度扣掉初始溫度，繪製成各深度溫差隨時間的變化圖。圖 35 為加熱井自背景監測開始至加熱結束期間溫差隨時間的變化，在深度 4 公尺、6.5~7 公尺、7.5~9 公尺與 12 公尺位置都有升溫的趨勢，在 K00268 加熱期間溫差與初始相比增加約 0.2°C，至 K00268 停止加熱後井溫仍持續增溫，在監測末期增加至 0.25°C 的溫差(圖 36a)，雖然此溫差不大，然而依據本此試驗所做的溫度率定結果 (0.035°C，請參照試驗校正結果一節)，0.25°C 的溫差已遠高於率定結果，因此可視為跨孔熱示蹤劑試驗訊號的抵達。

依據圖 35 與圖 36a 的溫度變化，在試驗結束前，K00264 全井的溫度皆比原始溫度升高超過 0.05°C (已超過 DTS 的溫度解析度 0.035°C)，顯



結果與討論

示 K00264 全深度在試驗期間確實有升溫的現象，加上此井位於加熱井 K00268 的地下水流下游方向，因此溫度的提升應為接收到 K00268 加熱井的熱源訊號影響所致。在深度 6~9 公尺與 12 公尺，因周圍地層相對較為透水，地下水流動快速，因此熱能經由地下水快速的流動由 K00268 傳遞至 K00264，使得此區間有較明顯的升溫現象；在深度 4.5 公尺與 9.5~11 公尺處，因周圍地層相對較為不透水，地下水流動速度較慢，使得熱能較晚抵達，顯現出較少的升溫現象。由圖 37 各深度的溫差累積同樣可觀察到，在深度 6~9 公尺與 12 公尺位置溫度累積量最高，顯示此二位置確實皆收到較多的熱能傳遞；在 3.1 公尺位置由於剛好位於地下水位面以下，受到日夜溫差影響甚巨，試驗過程中的水溫有低於初始溫度的現象，因此在進行溫差累積值會呈現負值的情形。本研究參照了文獻報告中對於 K00264 的井測分析(圖 36b)，其分析資料顯示在深度 8~9 公尺與 14 公尺位置為砂含量增加區域，屬於較透水區段；深度 10~12 公尺為粉黏土含量增加區域，則屬於較不透水區段，此比對間接驗證了本研究所得之分析結果。將 K00264 與 K00268 之透水區段判釋結果進行比較，其結果顯示，K00268 在深度 11 公尺區間有最高流速約 0.55 m/d，在 11.7~12.5 公尺區間有最低流速 0.3 m/d；然而，K00264 在深度 6.6、7.6、11 公尺處有較高的累積溫差 (146~166°C)，在深度 9.7~11.2 公尺區間則有較少之累積溫差 (0~50°C)。根據比較結果，在深度 5.5~9.5 公尺區間的透水性分佈相似，然而在深度 9.5~12.5 公尺，二井的透水區間判釋存在差異性，後需將針對資料進一步進行分析與探討。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

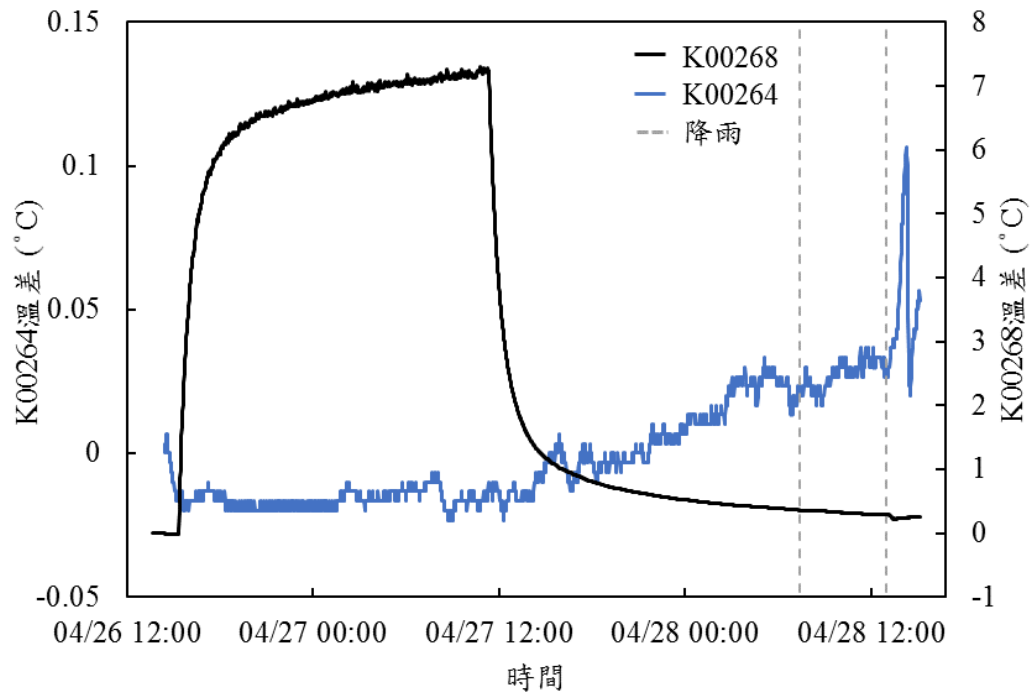


圖 33 第一次試驗加熱井 K00268 與觀測井 K00264 透破曲線（溫度為實體溫度計量測結果，虛線為降雨事件發生時間）

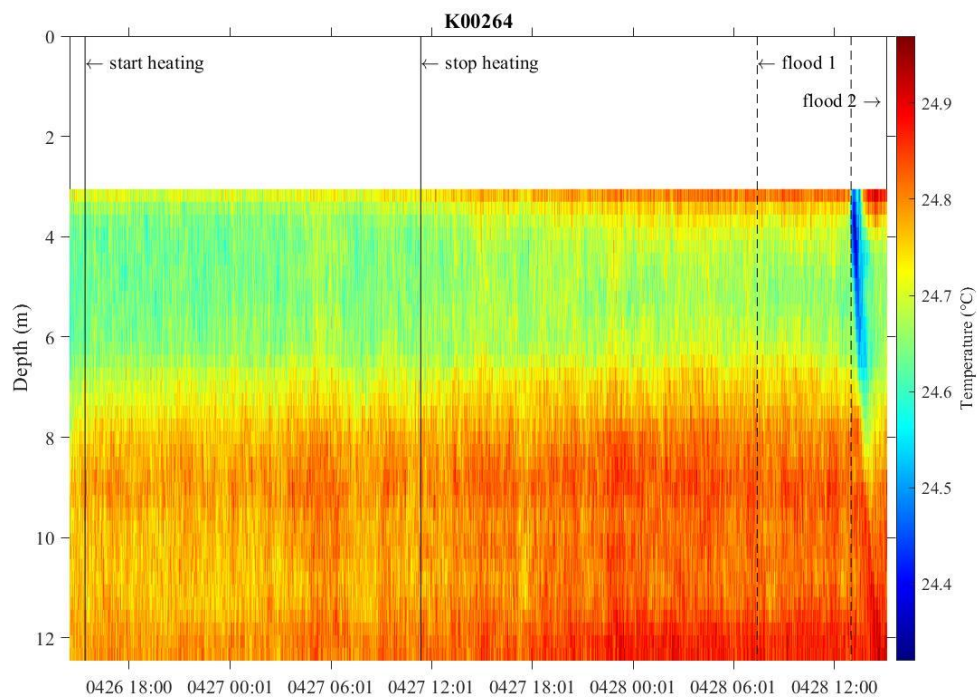


圖 34 第一次試驗觀測井 K00264 的 DTS 絕對溫度量測結果（實線為 K00268 加熱時間，虛線為降雨事件發生時間）



結果與討論

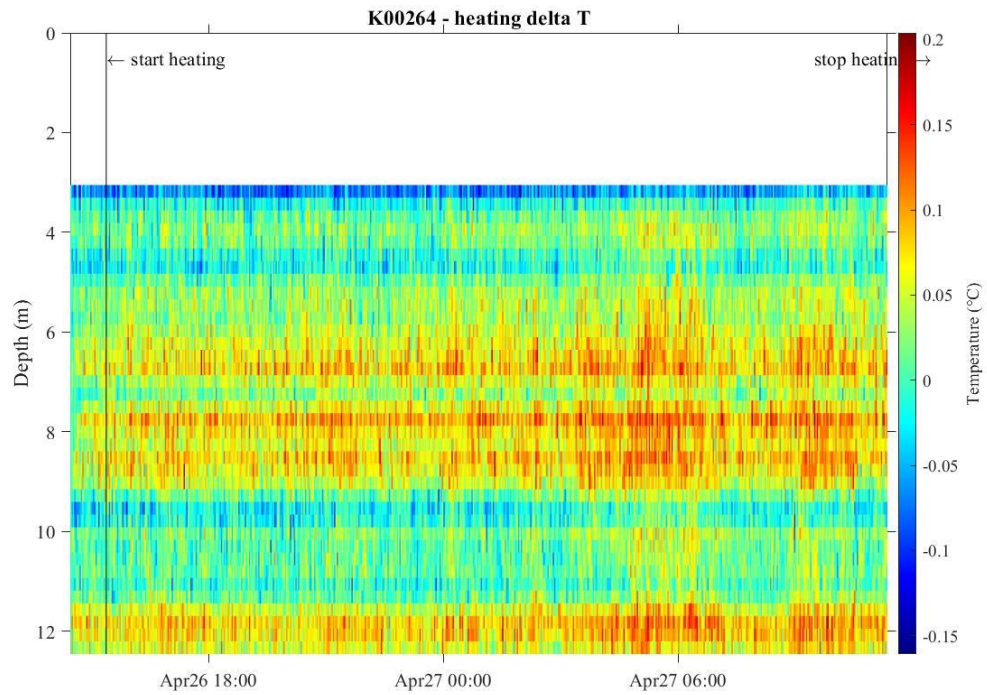


圖 35 第一次試驗加熱期間觀測井 K00264 的溫度差變化(實線為 K00268 加熱時間)

加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

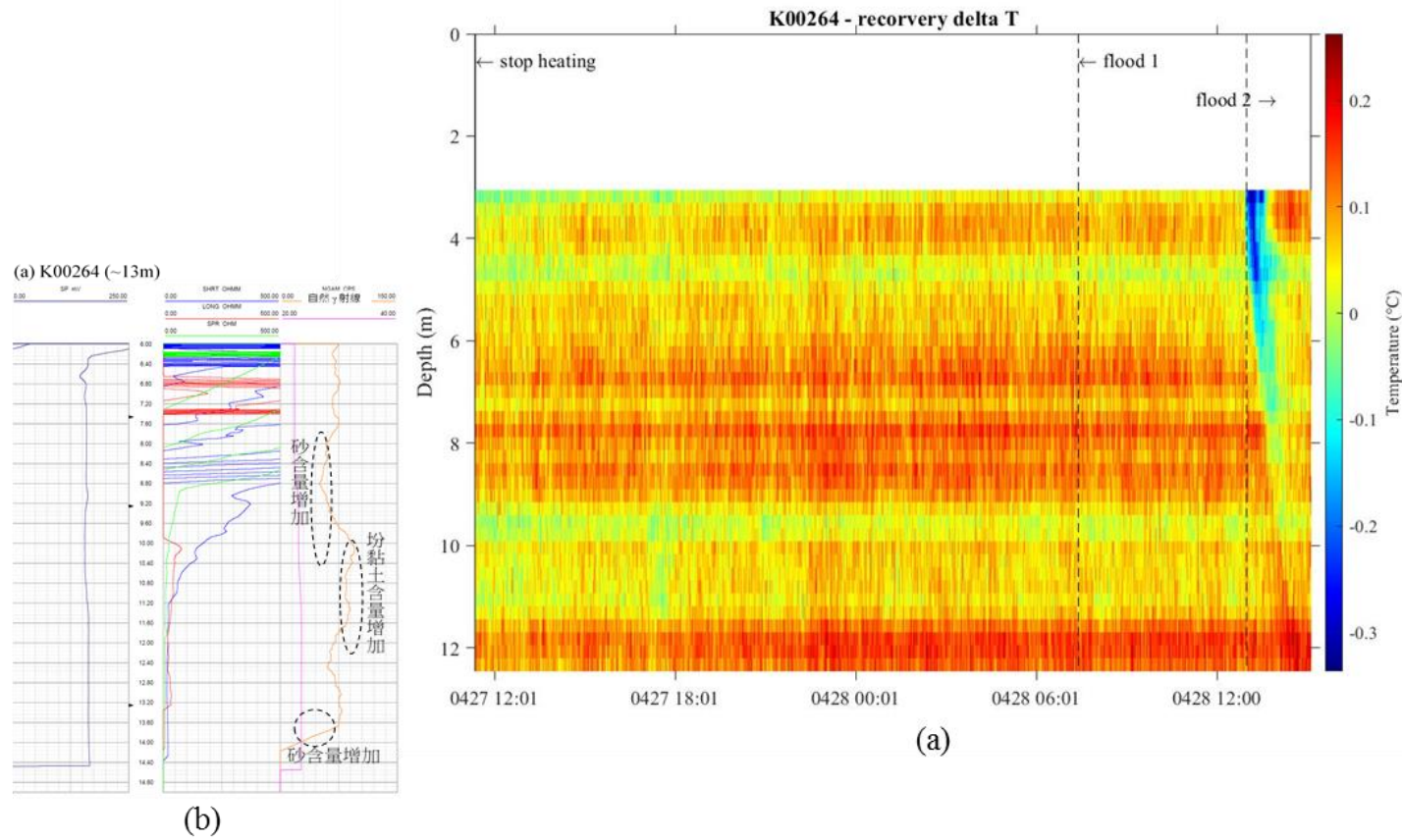


圖 36 第一次試驗 K00264 溫度剖面與文獻資料比對 (a) K00268 回溫期間的 K00264 溫度差變化 (實線為 K00268 停止加熱時間，虛線為降雨事件發生時間) (b) K00264 井測資料(摘自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



結果與討論

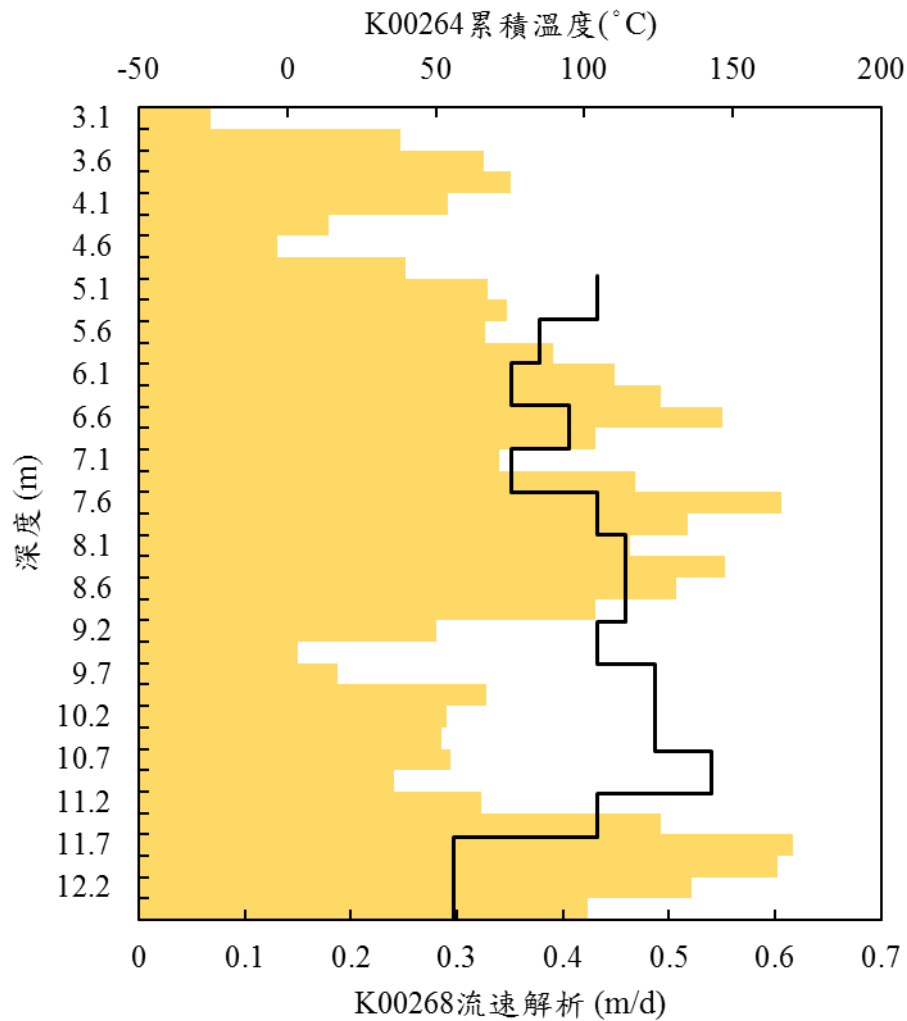


圖 37 第一次試驗 K00264 各深度累積溫差圖與 K00268 流速解析

5-3-2 第二次試驗下游觀測井溫度剖面量測

根據第一次試驗結果，井 K00268 與 K00264 間具有跨孔熱示蹤計試驗之可行性，有鑑於此，於第二次試驗時再度規劃跨孔熱示蹤試驗，同樣選定井 K00268 作為上游加熱井，並且在地下水流下游方向同樣以井 K00264 作為觀測井。此外，增加 K00266、K00269 與 K00265 作為更下游之溫度觀測井，同步進行熱能訊號的監測。在進行第一次試驗時，雖然在下游井 K00264 觀察到熱源訊號，但由於試驗規劃時程僅有三天，直到試



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

驗結束前 K00264 之溫度訊號仍持續升溫，無法在下游觀測井觀察到升溫與降溫的完整訊號，因此在進行第二次試驗時調整試驗規劃，除了將加熱功率提高外，也延長整個試驗的時程，期待能透過提高加熱溫度與持續的監測，在下游監測井獲得更完整的溫度訊號。

圖 38 為第二次試驗所蒐集的各井溫度變化，以井 K00268 為最上游，各井與加熱井 K00268 之距離詳列於表 3。將各井溫度圖依照地下水流向往下游方向排列，由圖 38a 可觀察到在整個監測期間內，觀測井的溫度訊號有幾段明顯的溫度下降，在這些溫度下降的區間皆可對應到差分衰減 ($\Delta\alpha$) 參數數值突然下降，差分衰減受光纖纜線種類、佈設長度與熔接所影響，在光纖纜線長度增加或經過熔接後，皆會使得雷射訊號強度減弱產生皆能損失，然而在實驗進行的過程中並無對於光纖與儀器有任何干擾，因此可能有存在未知的外部因素影響。然而，若對整體溫度變化進行觀察，在 K00264 與 K00265 仍然具有明顯的溫度上升現象，而 K00266 與 K00269 則大約維持於背景溫度左右。

將下游井的溫度量測結果進一步進行濾除，以 DTS 溫度訊號的解析度 0.2°C 作為基準，若溫差小於 0.2°C 視為背景雜訊，而溫差大於 0.2°C 便可視為升溫的訊號。圖 38b 為各井溫差篩選結果，在 K00264 與 K00265 皆有明顯的訊號。透過第二次試驗時安裝在各井內的實體溫度計水溫測量結果互相比對(圖 39)，確實可以觀察到 K00264 與 K00265 水溫有明顯的升溫現象，可知 K00264 在開始加熱後約 24 小時有明顯升溫變化，若將兩次跨孔試驗 K00264 井內實體溫度計所測量之水溫結果進行比對如圖 40，雖然溫度計擺放於不同深度，但是兩次的溫度資料接收到溫度訊號的時間點非常接近，顯示 K00264 井內水溫受到本次試驗熱源影響的可能性更加提高。由圖 39 觀察結果可知，雖然 K00265 也同樣有顯著的溫度升溫，然而其水溫卻是在開始加熱前便持續升溫，根據期中報告針對加熱功率與影響半徑之間關係的分析結果，在本次試驗給定之功率 32W/m 條件下，即便地下水流速達 1.6 m/d ，最遠的加熱影響半徑也僅有約 7 公尺的距離，K00265 與加熱井之間距離為 9 公尺，已超過此影響半徑，顯示其井內水溫增加受本次試驗之熱源釋放所影響之可能性較低。



結果與討論

加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

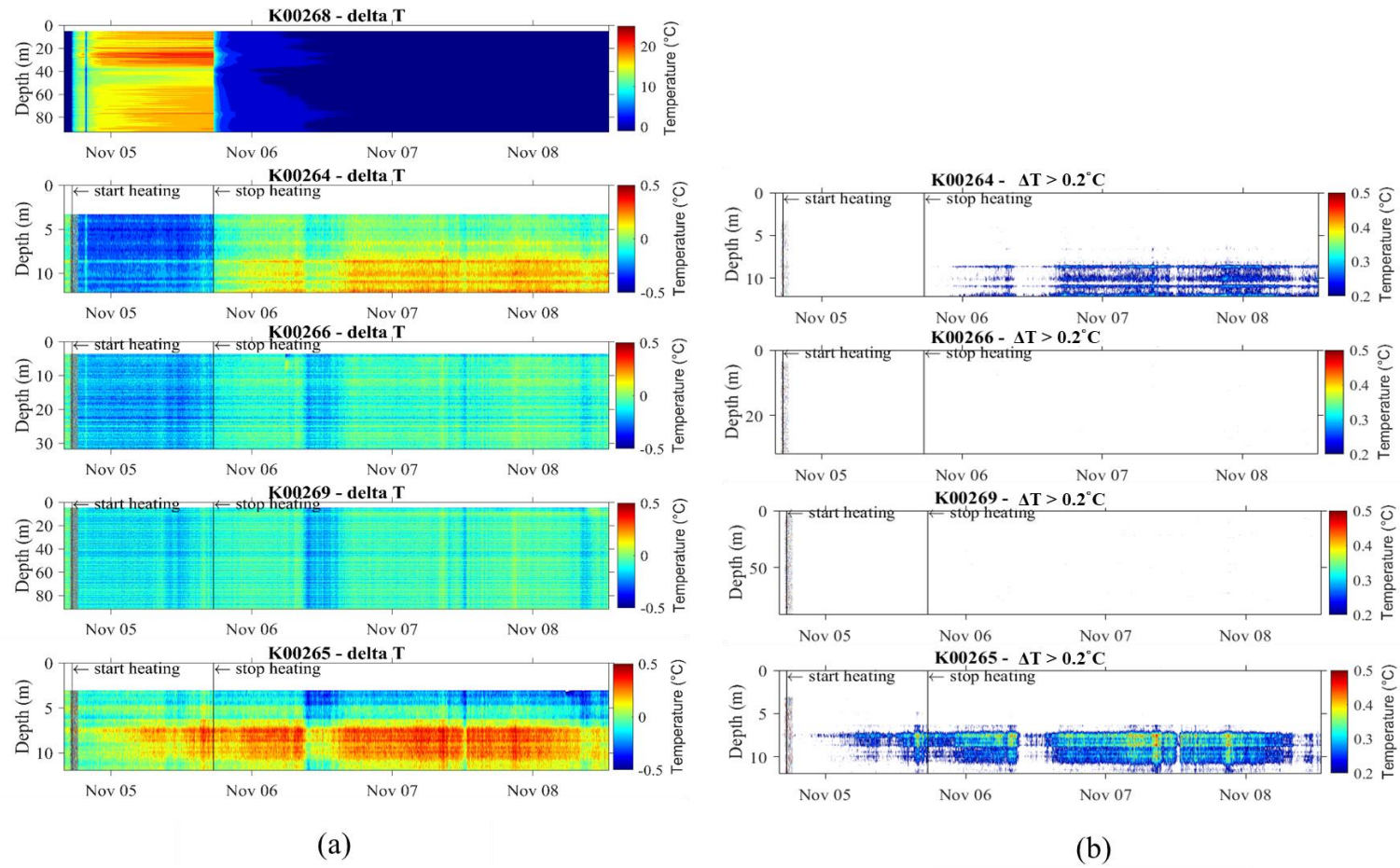


圖 38 跨孔熱示蹤試驗結果 (a)各井溫差隨時間變化 (b)溫差大於 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 之接收訊號



結果與討論

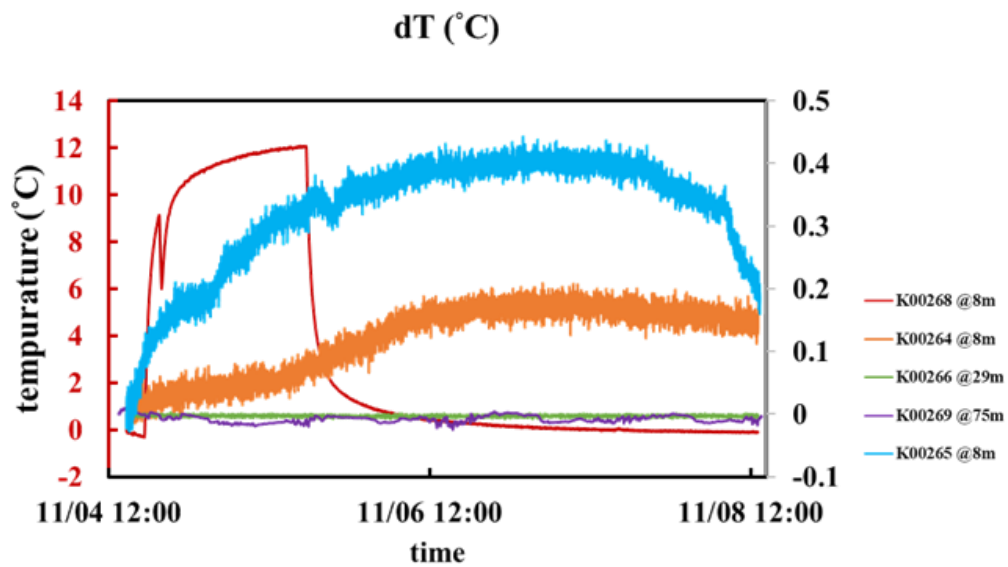


圖 39 第二次試驗各井水溫變化(以實體溫度計進行量測)

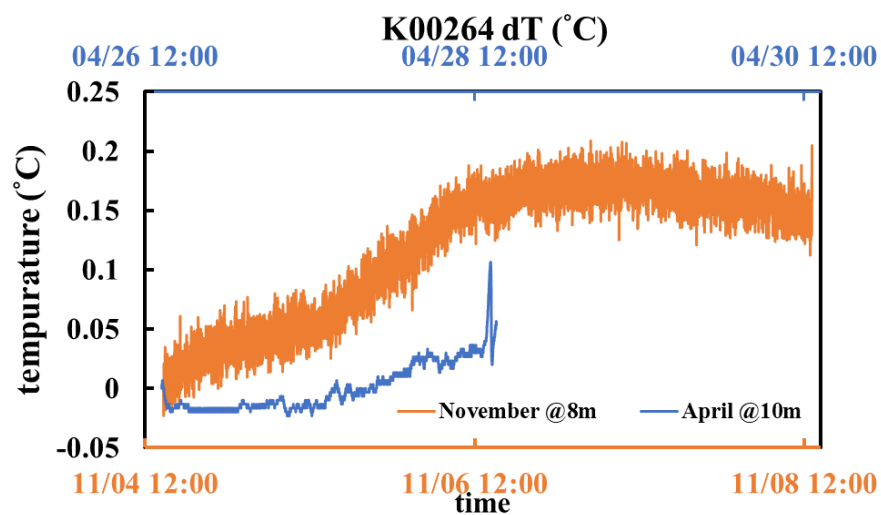


圖 40 兩次試驗 K00264 水溫變化比較(以實體溫度進行量測，藍色實線為第一次試驗結果、橘色實線為第二次試驗結果)



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

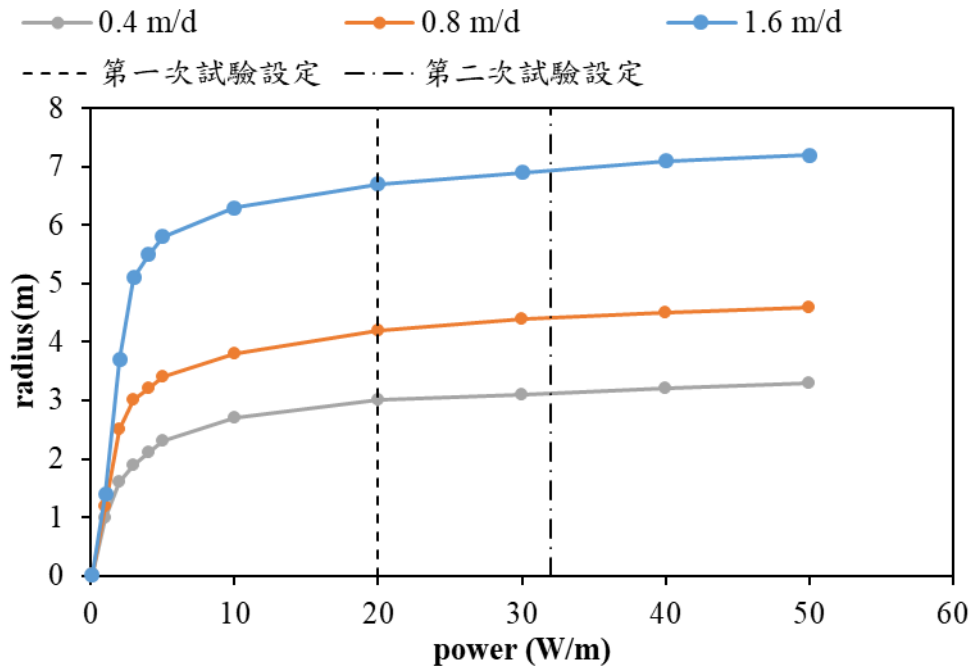


圖 41 加熱功率與影響半徑關係

5-3-3 地下水流向分析

透過 5-3-1 與 5-3-2 小節之溫度分析，可概略性的了解地下水流向。本小節將應用熱傳輸解析解公式(Bakker et al., 2015)，以第二次試驗結果對地下水流向進行校正(calibration)，並以第一次試驗結果進行地下水流向之驗證(validation)，從而定義出明確的地下水流方向。由於兩次試驗所使用的光纖不同，為了消除光纖差異所造成的不確定性，本節分析將以實體溫度計監測結果進行分析。

在熱傳輸解析解公式中，假設熱源 K00268 位於座標系統中的原點(0,0)，以 K00268 與 K00264 的井距作為半徑成一圓，在此圓周上任意點(x,y)即可能為 K00264 之位置(圖 42)。假設地下水流與 X 軸平行，負值為上游方向，正值則為下游方向(由圖 42 中，地下水流由 b 點流往 a 點)。在流向分析中，利用觀測井 K00264 的溫度破透曲線(breakthrough curve)，在兩井間的井距(0.88 公尺)已知的條件下，搭配 5-2 節所率定完成的熱傳導係數(kt)與流速(u)，以試誤法測試(x,y)的不同組合，當方均根誤差最小時的(x,y)即為地下水流的方向。



結果與討論

地下水流向校正-使用第二次試驗結果(11 月)

在第二次試驗中，井 K00264 的實體溫度計擺放於井下 8 公尺深度，以單井流速分析結果中深度 8 公尺位置率定的流速 0.75 m/d 進行設定，首先針對圖 42 中 a 點(0.88,0)、b 點(-0.88,0)、c 點(0,0.88)與 d 點(0,-0.88)四個位置進行測試，測試結果彙整於圖 43。a 點由於位處加熱源的正下游位置，透過熱傳導與熱對流傳遞而接收到的熱量最為集中，因此其溫度差最高，與觀測值進行比較，有明顯高估的現象(圖 43a)。相反的，b 點位處於加熱源的正上游位置，因此接收到最少的熱量，擁有最小的溫度差，相較於觀測值，則是明顯的低估(圖 43b)。c 點與 d 點位於地下水流方向為軸線互相對稱之位置，因此受到地下水流的影响程度相當(圖 43c 與圖 43d)，故其溫度模擬結果具有一致性。透過 a、b、c、d 四個點初步測試，可以判斷 K00264 實際位置應會落在 cad 弧線上的位置。經過試誤法測試後，e、f 點的溫度模擬結果與觀測值擬合最佳，其方均根誤差約為 0.03°C (圖 43e、圖 43f)，座標為 $(0.38, \pm 0.79)$ ，推估為地下水流之方向。

地下水流向驗證-使用第一次試驗結果(4 月)

在第一次試驗中井 K00264 的實體溫度計擺放於井下 10 公尺深度，以單井流速分析結果中深度 10 公尺位置率定的流速 0.95 m/d 進行設定。根據上述校正結果，假設地下水流向維持固定不變的條件下，將 e、f 點的座標位置帶入熱傳輸解析解公式中，驗證結果如圖 44e 與圖 44f 結果所示，模擬之溫度曲線與觀測值趨勢非常接近，其方均根誤差為 0.02°C 。雖然模擬結果顯示，熱抵達的時間比觀測值約略提早 0.5 天，模擬結果對於溫度變化略為高估，可能是由於地下水流速並非完全一致所產生的差異，經由第一次試驗之結果，第二次試驗所得之地下水流向觀測井位置得到驗證。

由於實際的地下水流場可能受到季節性變化影響、或是降雨事件使得地下水流向存在些微變化，因此在前述驗證基礎下，進一步尋找第一次試驗結果方均根誤差最小的位置，測試結果觀察到在 g、h 位置其方均根誤差為 0.01°C ，而模擬結果與觀測值趨勢更為相似(圖 44g、圖 44h)，且其位置與第二次試驗校正結果非常接近，顯示地下水流向在兩次試驗階段有些微的差異。將推測之加熱井與觀測井相對位置對應於試驗井場位置圖，圖 45a 為將 e、g 點作為 K00264 之所在位置下對應的地下水流方向，流向為由東南往西北流；圖 45b 則為將 f、h 點作為 K00264 之所在位置下對應的



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

地下水流方向，流向為由北往南流。將測定結果與文獻報告中井 K00264 微水試驗所測定之地下水流向(由東往西)比較(圖 20)，推估地下水流由北往南流的可能性較大(圖 45b)。明年度的工作將利用 TV-DTS 之設計，針對此兩口井間的地下水流向進行解析與驗證。

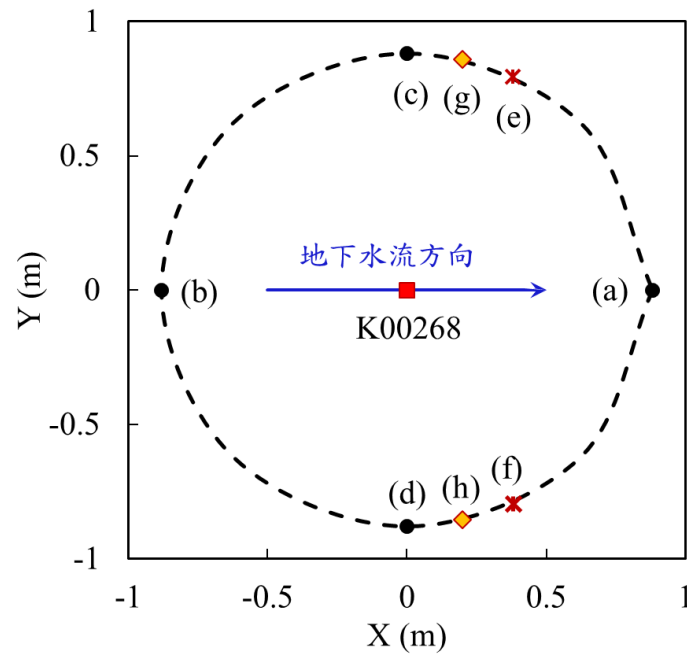


圖 42 井 K00268 與井 K00264 之相對位置示意圖



結果與討論

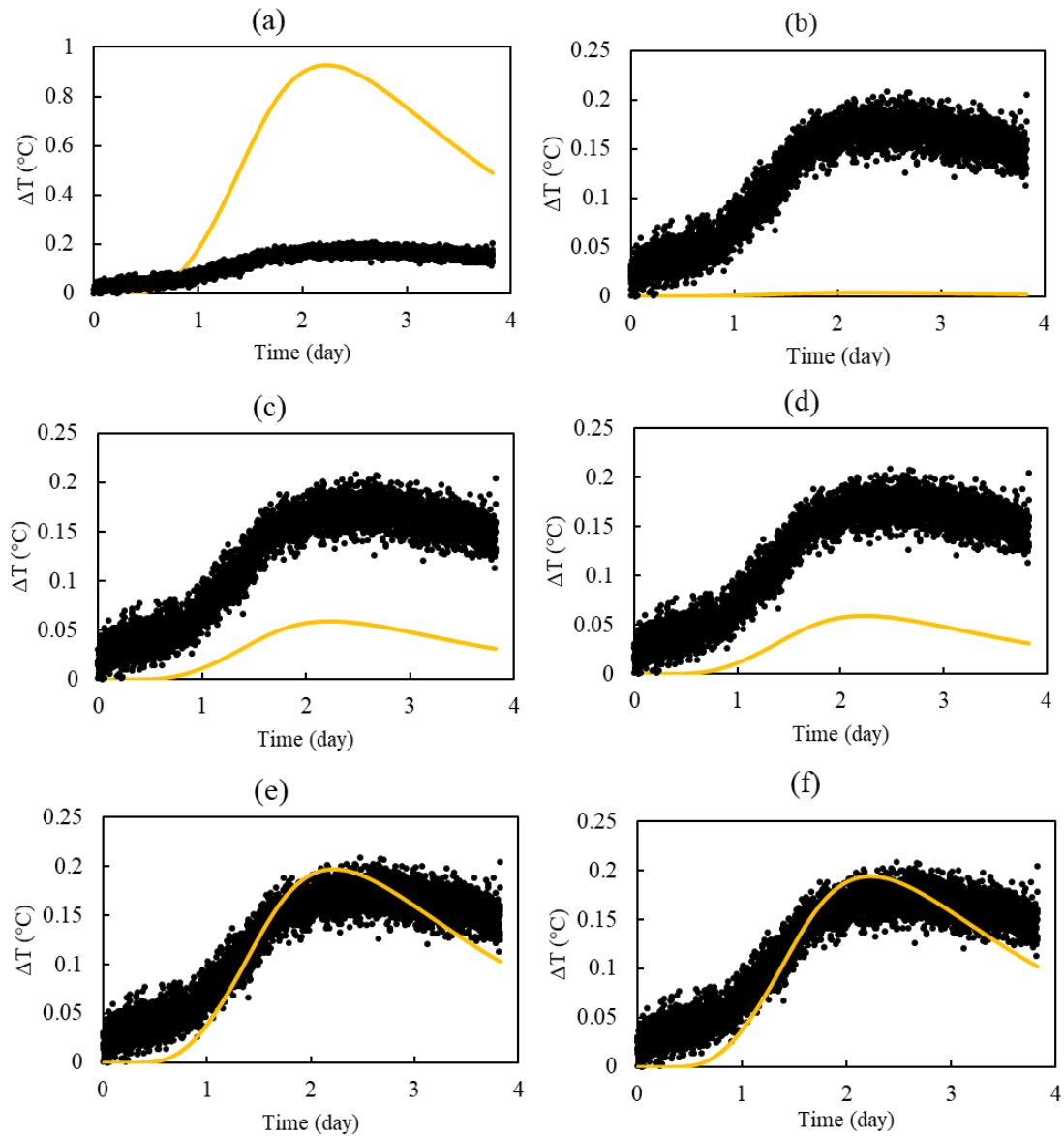


圖 43 在圖 42 中相應位置的第二次試驗地下水流向校正結果 (a)座標(0.88,0)位置 (b) 座標(-0.88,0)位置 (c) 座標(0,0.88)位置 (d) 座標(0,-0.88)位置 (e) 座標(0.38,0.79)位置 (f) 座標(0.38,-0.79)位置



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

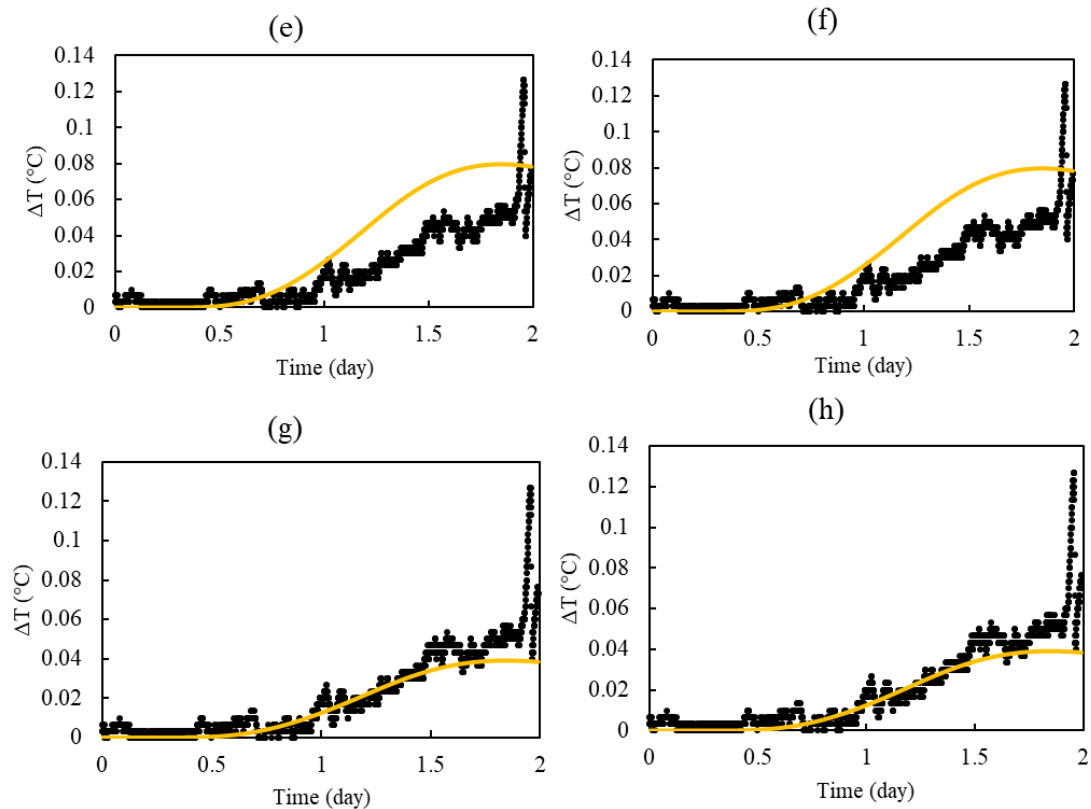


圖 44 在圖 42 中相應位置的第一次試驗地下水流向驗證結果 (e) 座標(0.38,0.79)位置 (f) 座標(0.38,-0.79)位置 (g) 座標(0.2,0.86)位置 (h) 座標(0.2,-0.86)位置

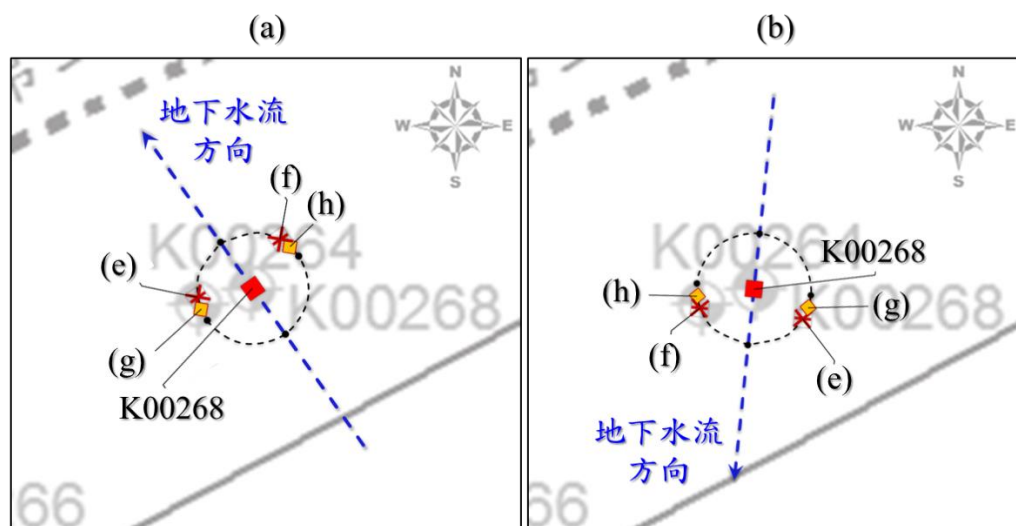


圖 45 以熱傳輸解析解推估之地下水流方向 (a)以 e、g 點為 K00264 之井位 (b)以 f、h 點為 K00268 之井位



5-4 數值模式模擬

本計畫主要針對跨井加熱試驗進行數值模式模擬，MODFLOW-2000 建置地下水流數值模式以獲得穩態之地下水流，再藉由溶質傳輸與熱能參數之轉換，輸入 MT3DMS 搭配 SEAWAT 模擬地下水流中熱能在孔隙介質中的傳導與對流，並透過試誤法初步比對現地溫度量測結果，以獲取不同深度之水力傳導係數與熱延散係數。由於現地的加熱試驗僅針對單井進行分析，因此模式假設為二維方向的熱傳導與熱對流，以模擬 K00268 與 K00264 之地層剖面，模擬範圍為第一含水層與第一滯水層，並假設兩者皆為均質，井管內的熱傳導與熱對流予以忽略，由於加熱井與觀測井假設具有極小井徑，井內水溫與地層水溫度可立即達到平衡，井內的水溫變化僅受地下水流速之影響。

5-4-1 模式建置

圖 46 為數值模式的網格劃分，網格設定為 32 行(row)、1 列(column) 及 86 層(layer)，每個網格大小為 0.1 公尺*0.1 公尺*1 公尺，由於為二維模式，因此將列方向設定為 1 列，以專注於模擬 K00268 與 K00264 之間的水文地質特性，故此節的模擬結果均以 x-z 平面進行呈現。模式設定左邊為下游、右邊為上游，由左至右的第 22 行假設為加熱井所在位置，第 12 行則假設為觀測井所在位置，兩者間距 0.9 公尺。地下水流方向設定為由右至左，模擬地層中地下水流速對於熱能傳輸的影響。模式的分層主要根據文獻報告裡的地質分層設定，井下-4 ~ -20 公尺設定為第一含水層、-20 ~ -35 公尺設為第一滯水層。藉由實際量測的地下水位資料輸入，透過水文地質及熱能傳輸參數的調整，擬合觀測井之溫度變化，藉此量化各層之水文地質參數。

在數值模式中需給定地下水流場與溫度之邊界條件與初始條件，MODFLOW 地下水流場中將模式左右兩邊邊界設定為定水頭邊界，以試驗當時量測的水位作為其上、下游邊界水位，上下游的水位差設定為 0.1 公尺，以此設定進行地下水流的穩態模擬，待獲得穩態時的水位後，提供後續熱能傳輸之模擬。MT3DMS 中，假設兩井之間不存在溫度差異，故將上游邊界溫度與地層的初始溫度設為 0°C，以加熱井的溫度差（FO-DTS 所量測的 K00268 井溫）作為熱源輸入(圖 47)，並且僅考慮加熱後產生的熱能在地層中隨著地下水流動。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

表 7 為模式之參數設定，在 MODFLOW 中依據文獻報告內各層的水力傳導係數資料設定為初始值，並依各層的材質設定比儲水係數(specific storage, S_s)。第一含水層在初始所設定的水力傳導係數為 $5 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ，比儲水係數為 $1.6 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ ；第一滯水層在初始所設定的水力傳導係數為 $2.07 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ，比儲水係數為 $1.6 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$ 。在 MT3DMS 中，需設定網格的熱延散係數(dispersivity)及一階吸附常數(1st sorption constant)。在本試驗的模擬，熱延散係數初始設定為 1m，一階吸附常數為 $0.00021 \text{m}^3/\text{kg}$ 。

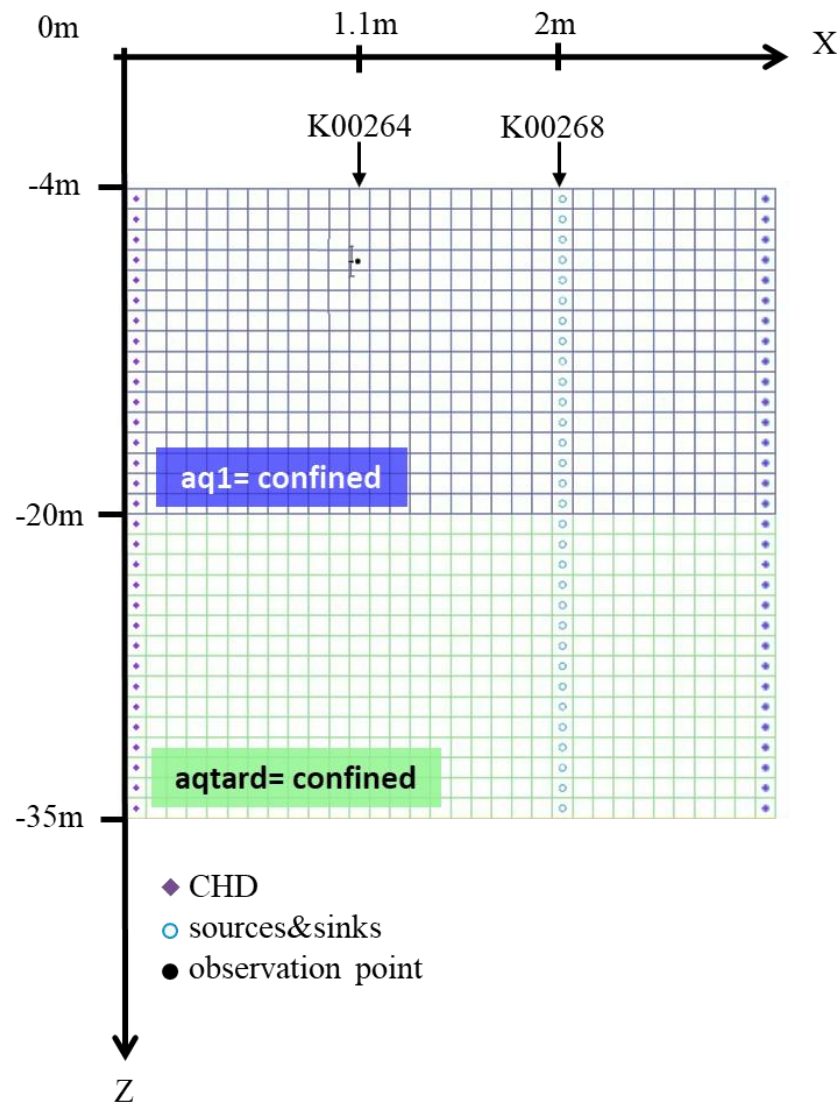


圖 46 第二次試驗數值模式網格劃分



結果與討論

表 7 第二次試驗參數設定

<i>MODFLOW</i>	第一含水層	第一滯水層
水力傳導係數(m/s)	2.5×10^{-5} (5×10^{-6})	2.07×10^{-6}
比儲水量	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-3}
初始水頭(m)	5.42	5.48
<i>MT3DMS</i>		
縱向延散度(m)	0.38 (1)	
吸附常數(m ³ /kg)	2.10×10^{-4}	

*括號內為初始參數設定

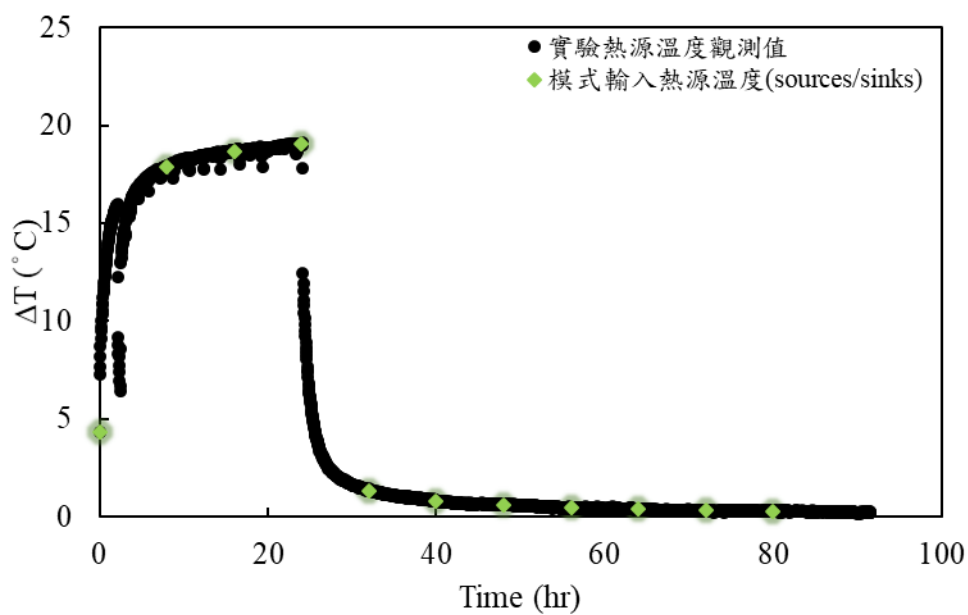


圖 47 第二次試驗加熱井 K00268 熱源輸入值（實驗熱源溫度觀測值由 FO-DTS 所量測獲得）



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-4-2 第一次試驗模擬結果

本計畫於期中報告時，已根據 5-4-1 小節之方式完成第一次試驗結果之數值模式建置，相關參數設定如表 8 所示，將第一次試驗的加熱井溫度差(DTS 所量測的 K00268 井溫)作為熱源輸入，並針對開始加熱後的 40 小時以內溫度變化進行擬合。透過試誤法所得之水力傳導係數為 1.25×10^{-5} m/s、熱延散係數為 0.65m，溫度之模擬值與觀測值之方均根誤差(root mean square error, RMSE)為 $7.89 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ ，擬合結果良好（以上結果摘自期中報告）。由於第一次試驗結果沒有獲得完整的觀測井溫度差破透曲線，在水文地質參數的推估上可能存在較多不確定性，因此將於 5-4-3 小節，藉由第二次試驗較為完整的觀測井溫度破透曲線，進行溫度的擬合與參數推估，並再次將所率定之參數以第一次試驗結果進行驗證。

表 8 期中報告參數設定

<i>MODFLOW</i>	第一含水層	第一滯水層
水力傳導係數(m/s)	1.25×10^{-5} (5×10^{-6})	2.07×10^{-6}
比儲水係數(m^{-1})	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-3}
初始水頭(m)	4.8	4.7
<i>MT3DMS</i>		
縱向延散度(m)	0.65(1)	
吸附常數(m^3/kg)	2.10×10^{-4}	

*括號內為初始參數設定

*期中報告將兩井距離設定為 1 公尺



結果與討論

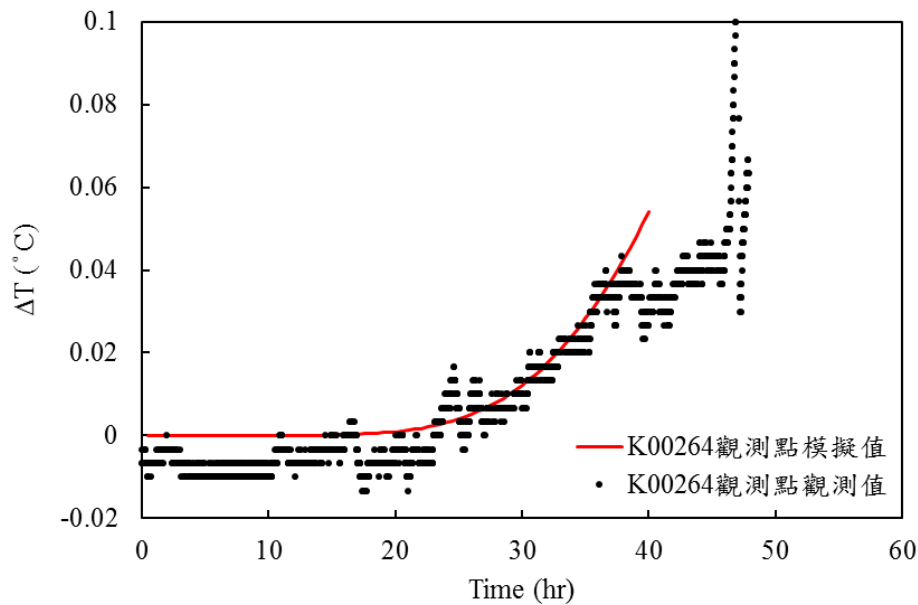


圖 48 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果

5-4-3 第二次試驗模擬結果

由於本年度計畫僅針對淺部地層進行資料分析，因此模式結果聚焦於 40 公尺以內之模擬結果進行分析，透過擬合 K00264 觀測所得之水溫變化以量化第一含水層之水文地質參數。在對觀測井溫度變化進行擬合時，首先透過調整水力傳導係數來擬合破透曲線的溫度訊號抵達時間(arrival time)，接著再調整熱延散係數以擬合溫度訊號升溫的程度。圖 49 為 K00264 觀測井溫度差破透曲線擬合結果，本次僅擬合自開始加熱後 88 小時以內的溫度變化，透過試誤法所得之水力傳導係數為 2.5×10^{-5} m/s、熱延散係數為 0.38m，溫度之模擬值與觀測值之方均根誤差(root mean square error, RMSE)為 $4.08 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ ，擬合結果良好。

圖 50 為地下水流場模擬結果，以不同的顏色分階來顯示水位變化。在第一含水層中，最右側與最左側之水位為 5.42 公尺與 5.32 公尺；而在第一滯水層，最右側與最左側之水位為 5.48 公尺與 5.38 公尺；中間網格之水位由模式模擬所獲得。由圖中可觀察到，無論是第一含水層或是第一滯水層，水位皆穩定由右往左遞減，顯示地下水流場為一穩定由右往左之流場。

圖 51 為加熱過程溫度模擬結果，在第一含水層部分，透過加熱井



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

K00268 熱源的釋放，溫度訊號在地層中以加熱井為中心逐漸向兩側擴展，受到水流方向的影響，使得溫度訊號傳播呈現些微的不對稱性，在加熱井左側部分(下游方向)受到熱對流與熱擴散的綜合影響，溫度傳遞範圍較大，而在加熱井右側部分(上游方向)則受制於水流方向，溫度無法以熱對流方式傳遞，僅透過熱傳導方式向外擴展，因而傳遞範圍較小。圖 52 為回溫過程溫度模擬結果，在回溫階段加熱井熱源停止釋放，地層中的溫度訊號隨著地下水的流動逐漸降溫，在加熱井右側部分因為一直有低溫的水流自右邊界進入，因而使得右側部分有比較顯著的降溫現象。在第一滯水層部分，由於所設定的水力傳導係數較小，使得水的流動能力較弱，無論在加熱過程或回溫過程其溫度僅在小範圍內變化，受到水流影響的溫度不對稱性也相對於第一含水層較不明顯，由於本次試驗並無搜集到第一滯水層之溫度觀測變化，因此無法對其進行水力參數之率定，僅能間接推估第一滯水層之水力傳導係數應該小於 $2.07 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

透過第二次試驗結果對數值模式完成參數校正後，利用第一次試驗結果對數值模式進行驗證，圖 53 為其擬合結果，其溫度訊號的抵達時間(arrival time)擬合極佳，在溫度訊號抵達後模擬值有些微高估現象，溫度之模擬值與觀測值之方均根誤差(RMSE)為 $2.5 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

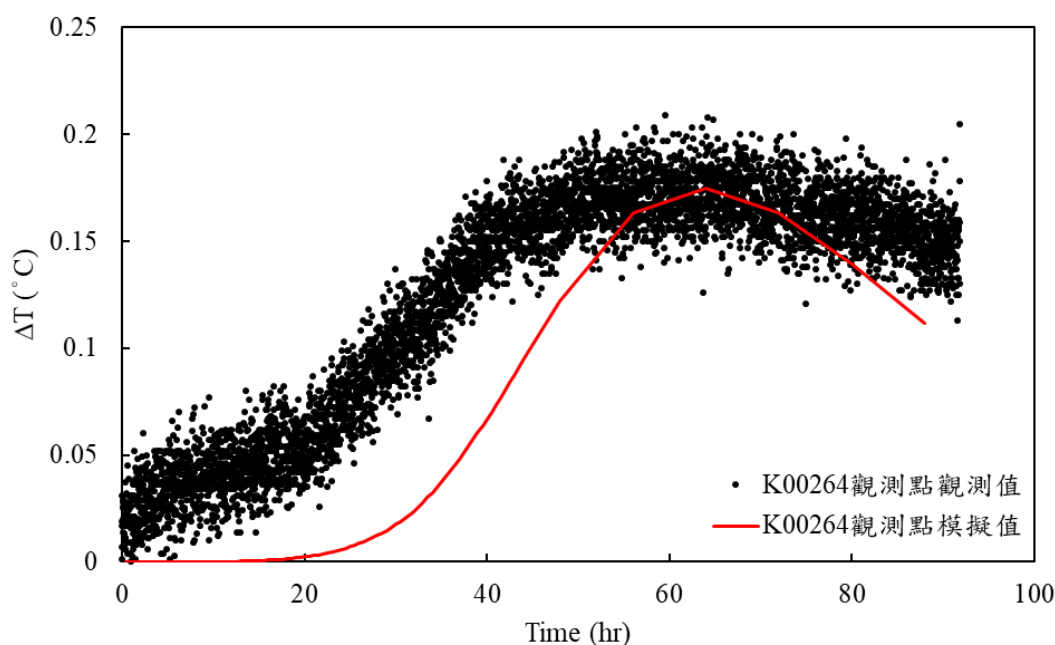


圖 49 第二次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果 (RMSE = $4.08 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}$)



結果與討論

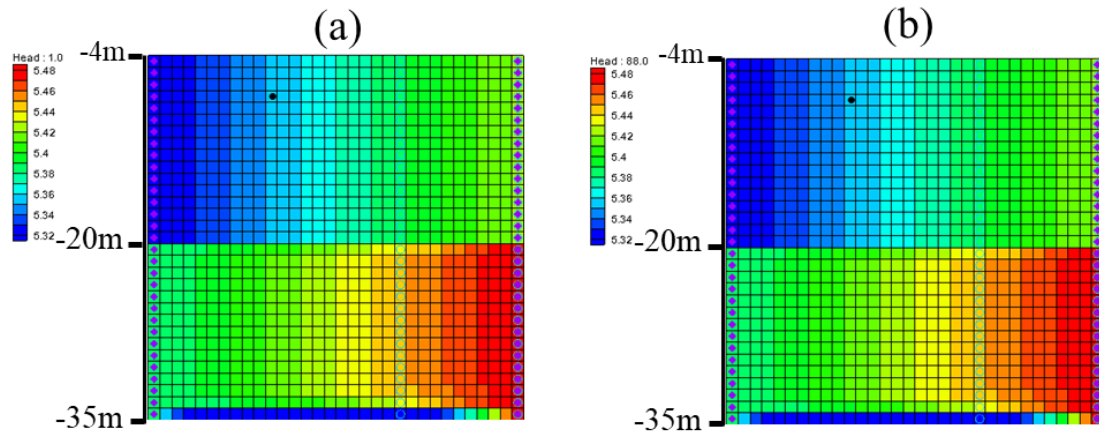


圖 50 地下水流場模擬結果：(a)初始水位 (b)最終模擬水位

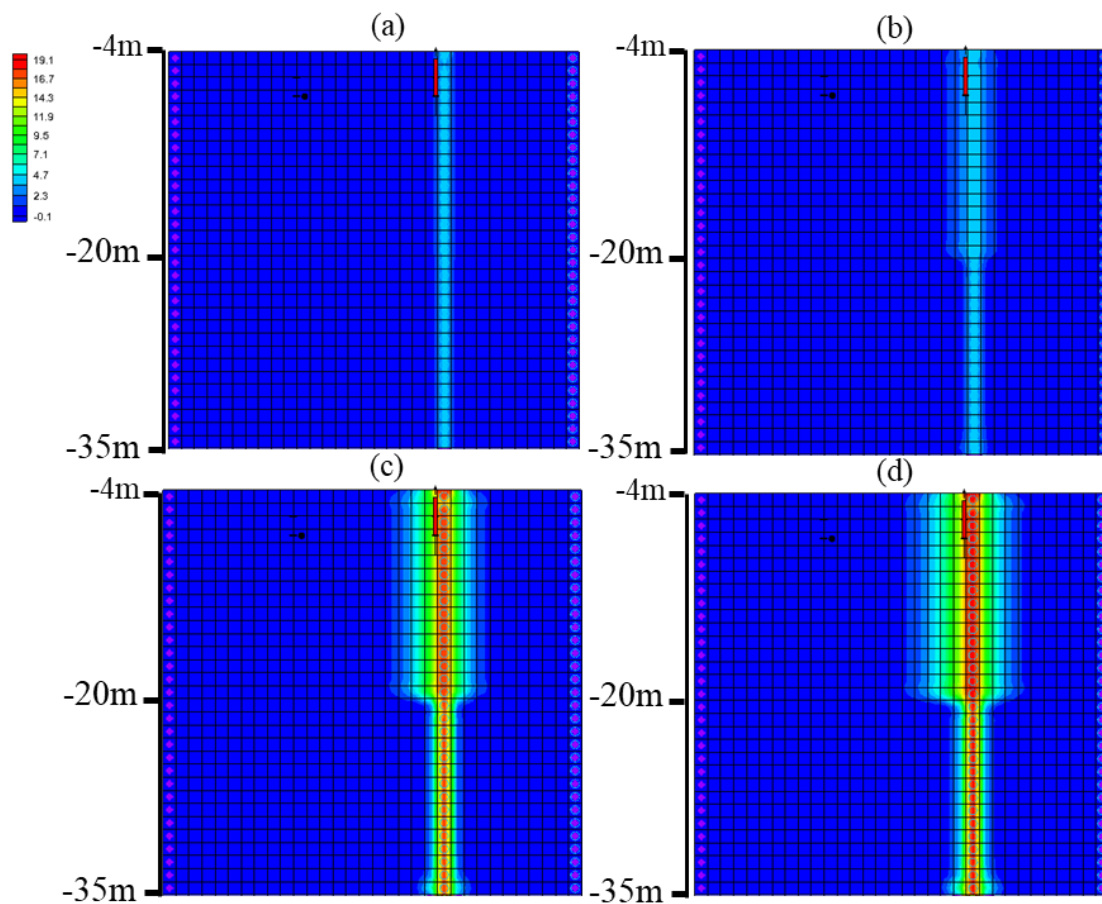


圖 51 加熱過程溫度模擬結果：(a)第 0.5 小時，(b)第 8 小時(開始加熱) (c)第 16 小時，(d)第 24 小時



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

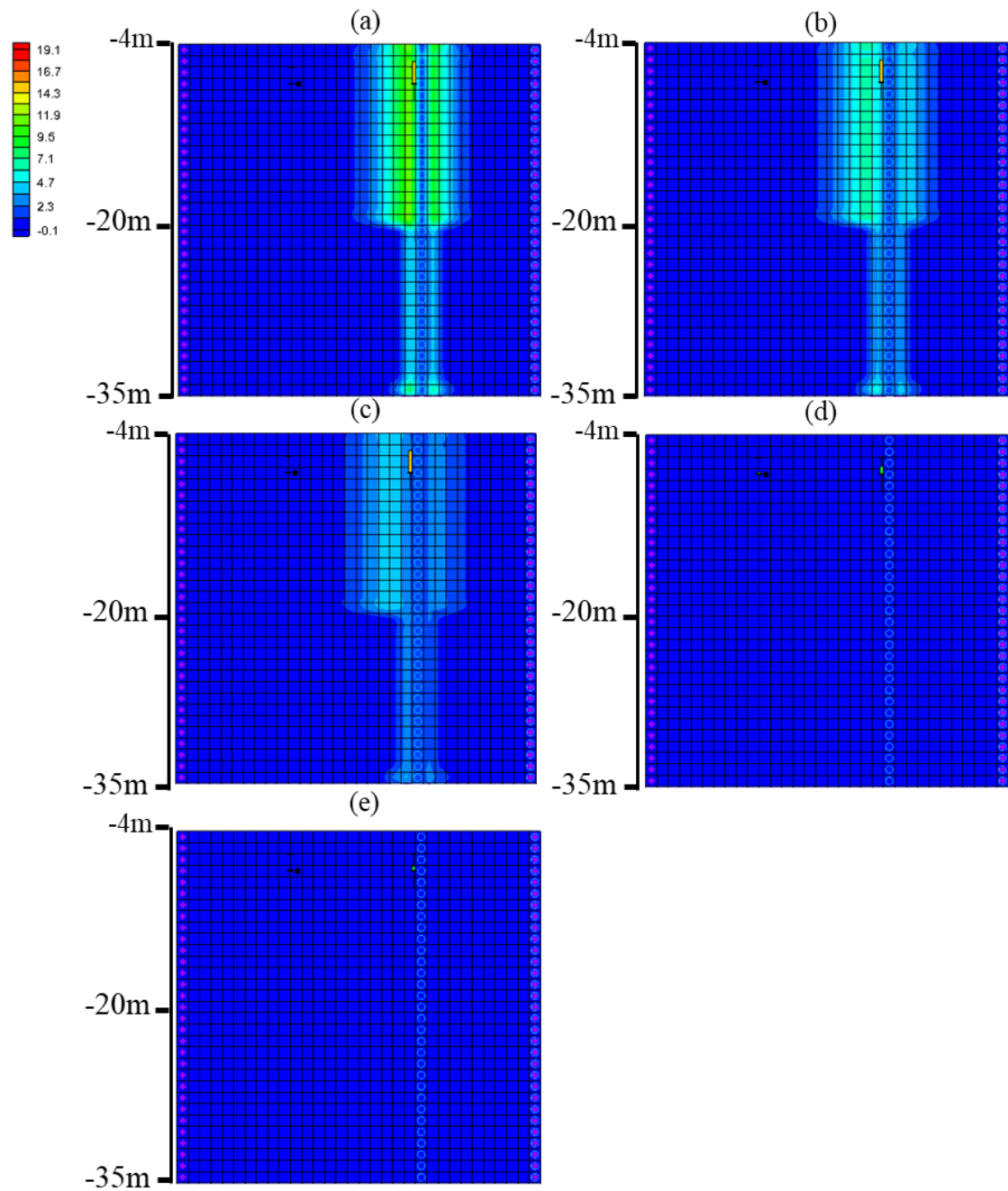


圖 52 回溫過程溫度模擬結果：(a)第 32.5 小時(加熱停止)，(b)第 36 小時，(c)第 40 小時，(d)第 64 小時，(e)第 88 小時



結果與討論

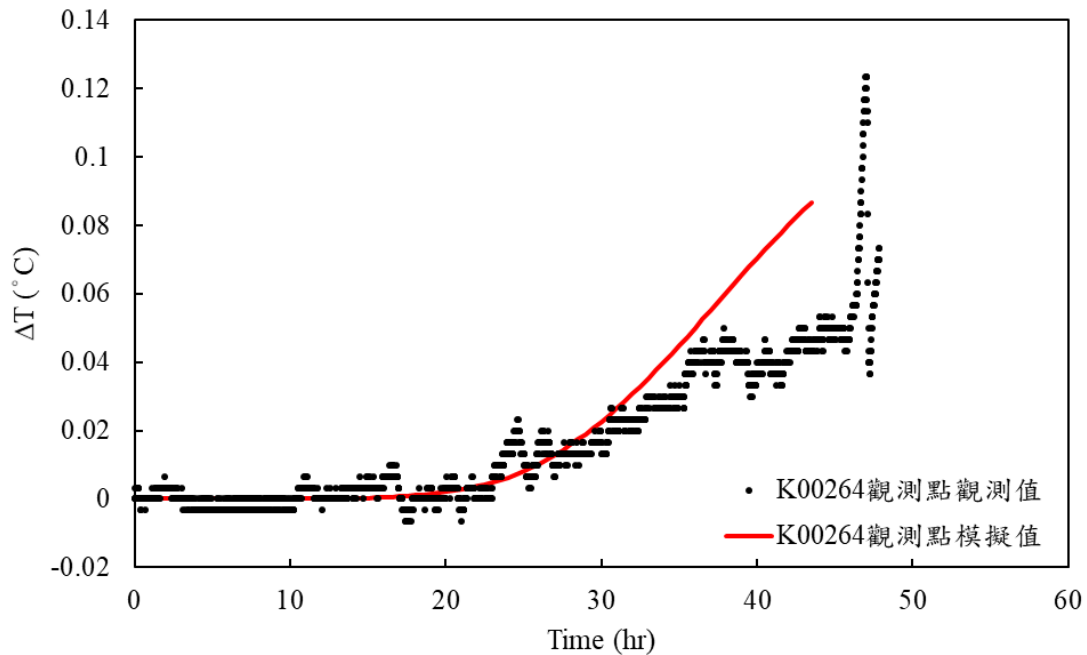


圖 53 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線驗證結果(RMSE= $2.5 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$)

5-4-4 參數敏感度分析

以地下水流數值模式搭配溶質傳輸模式模擬，並藉由擬合加熱井與觀測井之間的溫度變化，進而推估水文地質參數，如水平水力傳導係數(hk)與延散係數(dp)，因此，溫度對於水平水力傳導係數與延散係數的敏感度在擬合過程中極為重要。圖 54 為在不同的水力傳導係數與延散係數的狀態下，對於溫度擬合的敏感度分析，以水平水力傳導係數為 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、熱延散係數為 0.36m 作為基準(best)，並分別將水力傳導係數與延散係數增減 10%與 20%，進行溫度曲線的模擬及敏感度的分析。圖 54a 為固定延散係數，改變不同水力傳導係數的模擬結果，可以觀察到當水力傳導係數改變時，溫度曲線的峰值由最低溫 0.11°C (hk-20%)至最高溫 0.31°C (hk+20%)，溫差達 0.2°C 。圖 54b 為固定熱傳導係數，改變不同延散係數的模擬結果，由圖中可以觀察到溫度曲線的峰值由最低溫 0.14°C (hk-20%)至最高溫 0.26°C (hk+20%)，溫差達 0.12°C 。由分析結果顯示，受到參數設定上之限制，溫度曲線差異微小，然而，溫度對於水平傳導係數的敏感度依然大於延散係數。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

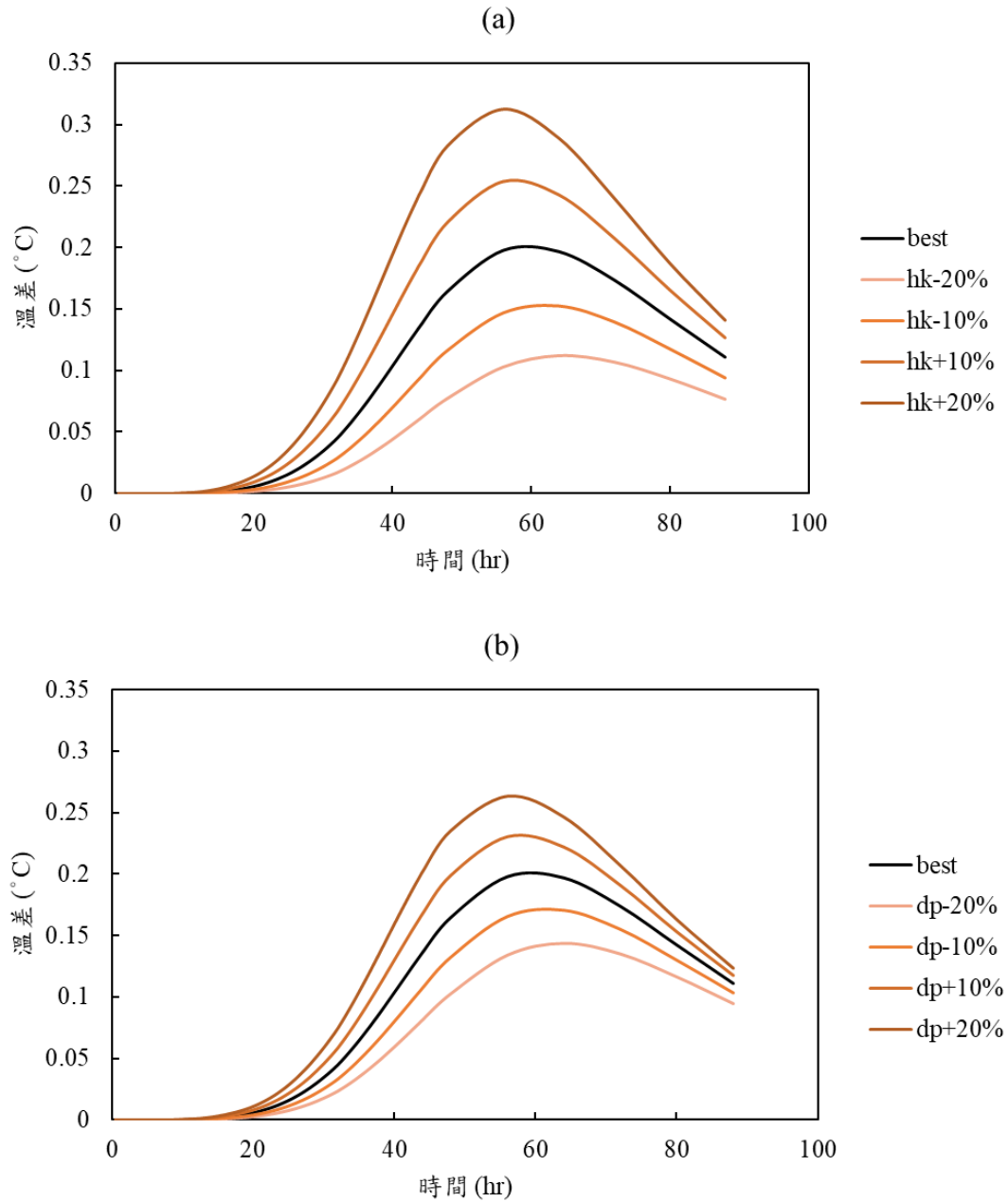


圖 54 參數敏感度分析 (a)水平水力傳導係數 (b)延散係數



5-5 高解析度纏繞光纖

5-5-1 高解析度纏擾光纖設計

高解析度纏繞光纖之設計概念為能夠將光纖以纏繞方式，使在短距離內的光纖量測點增加，以提高溫度資料在空間上的解析度。本計畫自製設計之高解析度纏繞光纖如下，以 1.5 公尺的監測區間為目標區，針對目標區進行高解析度溫度量測。高解析度纏繞光纖之主體以不影響透水性的鐵絲網捲成長度 1.5 公尺、直徑約 1 吋的鐵絲管，將光纖從鐵絲管的一端依序環狀纏繞在管的外側，並以釣魚線固定在鐵絲管上。當光纖纏繞完成，便從鐵絲管底部由管內直線向上拉回到地表(圖 55)。因為此設計以鐵絲管作為主體，因此整個裝置有一定的重量，為避免纏繞光纖過度承重導致變形甚至斷裂，本設計在鐵絲管兩端利用細鋼絲與電線端子製作了拉環(圖 56a)，並外接快拆環與鋼纜，在裝置的頂端可以利用鋼纜連接到地表進行固定，而裝置底部則可以視需求另外串聯其他纏繞光纖裝置，高解析度纏繞光纖可根據實驗需求下放於想要量測的目標深度。

圖 56b 與圖 56c 為高解析度纏繞光纖製作成品，成品為兩個纏繞光纖裝置互相串聯，單一裝置在井下可以量測的高解析度範圍約 1.4~1.5 公尺，兩段纏繞光纖分別使用了 32 公尺長的光纖與 36 公尺長的光纖，此用量差別源自於兩管鐵絲管為手工製作，使其存在些微的尺寸差異，造成每纏一圈所使用的光纖長度不固定而產生的誤差。製作高解析度光纖所使用的光纖種類為一般的傳統光纖，外皮為 PVC 材料的批覆，內包覆凱夫拉纖維(Kevlar)與雙心光纖。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

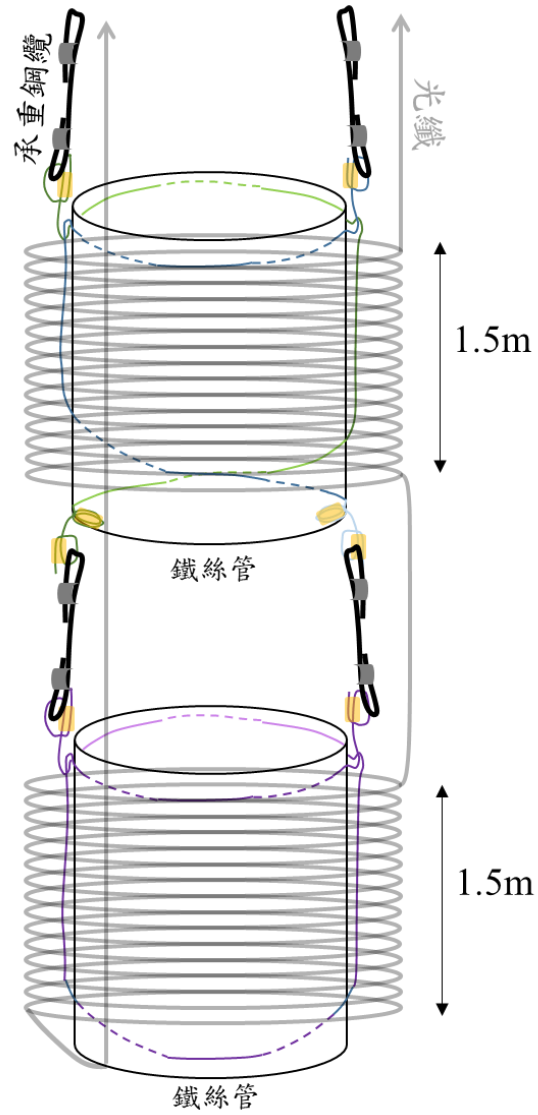


圖 55 高解析度纏繞光纖示意圖



結果與討論

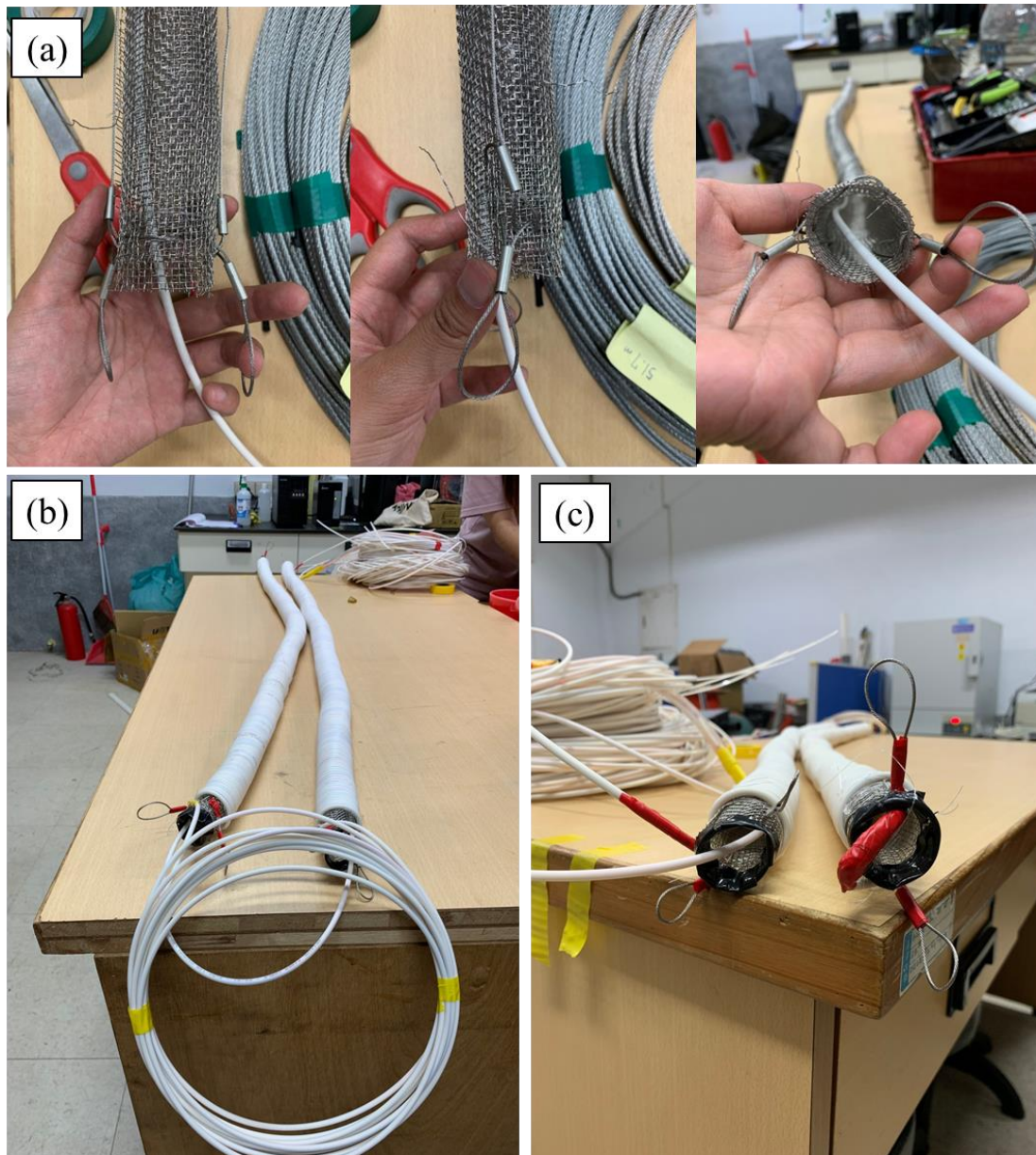


圖 56 高解析度纏繞光纖成品 (a)鐵絲管設計 (b)兩個纏繞光纖裝置串聯方式 (c)纏繞光纖裝置頂端(左)與底部(右)



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-5-2 現地初步測試結果

本計畫將高解析度纏繞光纖應用於第二次現地試驗，高解析度纏繞光纖的量測與單井加熱試驗一同搭配進行，在整個試驗的過程中同步蒐集溫度資料。將高解析度纏繞光纖裝設在加熱井 K00268 之中，兩個纏繞光纖裝置放置深度分別位於井下 11.8~13.4 公尺深度(區段一)，以及 20~21.5 公尺深度(區段二)的位置(圖 25)，加熱光纖由高解析度纏繞光纖管內穿過。由於高解析度纏繞光纖裝置與試驗井尺寸非常接近，因此在下放過程中極容易接觸到井壁，若井管有些微變形便會阻礙裝置下放，本次試驗中於裝置的底部加裝了重錘，以成功下放置井中。未來須將高解析度纏繞光纖的尺寸再減小，以提高其適用性。利用 XT-DTS 進行溫度資料的蒐集，量測方式設定為以 2 分鐘為量測間隔，並設定為每 0.254 公尺為取樣間距(sampling interval)。

圖 58 為試驗初步結果，將高解度纏繞光纖之溫度資料與相同深度位置的加熱光纖溫度資料進行比對，圖 58a 與圖 58c 分別為加熱光纖與高解析度纏繞光纖在區段一的溫度量測結果，圖 58b 與圖 58d 則分別為兩者在區段二的溫度量測結果。由於加熱光纖所反應的是光纖本身的溫度增幅，而高解析度纏繞光纖所反應的則是地下水受到加熱的溫度變化，因此加熱光纖的升溫程度都比高解析度纏繞光纖的升溫程度更高；在停止加熱後，兩種光纖皆以非常迅速的降溫速度回復至接近背景溫度。

由圖 59 放大檢視加熱過程的溫度變化，可以看到以傳統方式佈放光纖時，在約 1.5 公尺內的監測區間僅能提供 6~7 個資料點，因此其空間解析程度相對較為粗糙。而使用高解析度纏繞光纖方式進行量測時，同樣在 1.5 公尺的區間內，可提供高達 127~142 個資料點（實際的光纖長度分別為 32 公尺與 36 公尺），大幅提高了溫度量測結果在空間上的解析度，由 25 公分提升至 1.05 公分，所呈現出的溫度變化資料非常平滑，細微的溫度變化均可被詳盡的描述，而此精緻的變化得以提供非常多的水文地質資訊，若以傳統方式佈放光纖，許多微小但重要的資訊將被忽略。



結果與討論

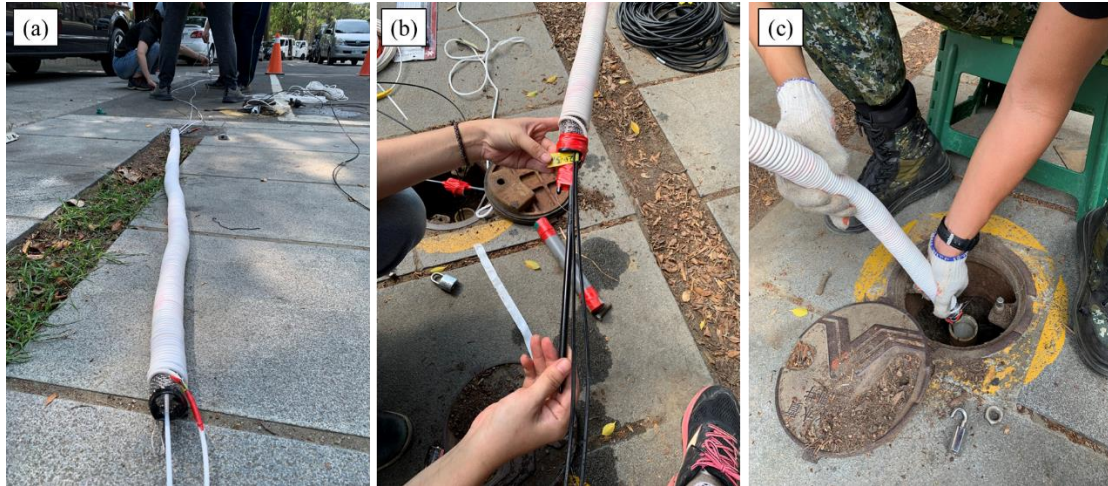


圖 57 高解析度纏繞光纖現地佈設 (a)將裝置於地表整線以利下井 (b)裝置底部安裝重錘 (c)裝置下井

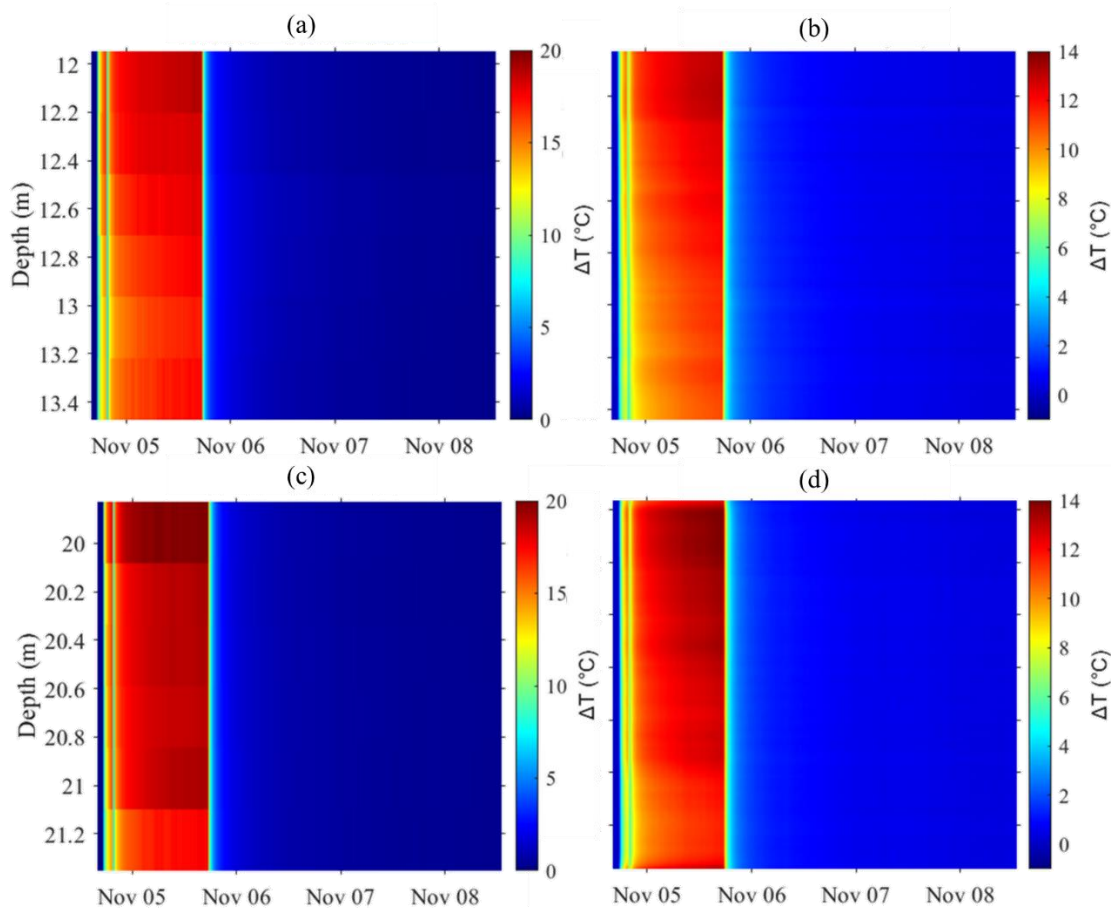


圖 58 現地測試結果 (a)加熱光纖區段一 (b)高解析度纏繞光纖區段一 (c)加熱光纖區段二 (d)高解析度纏繞光纖區段二

加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

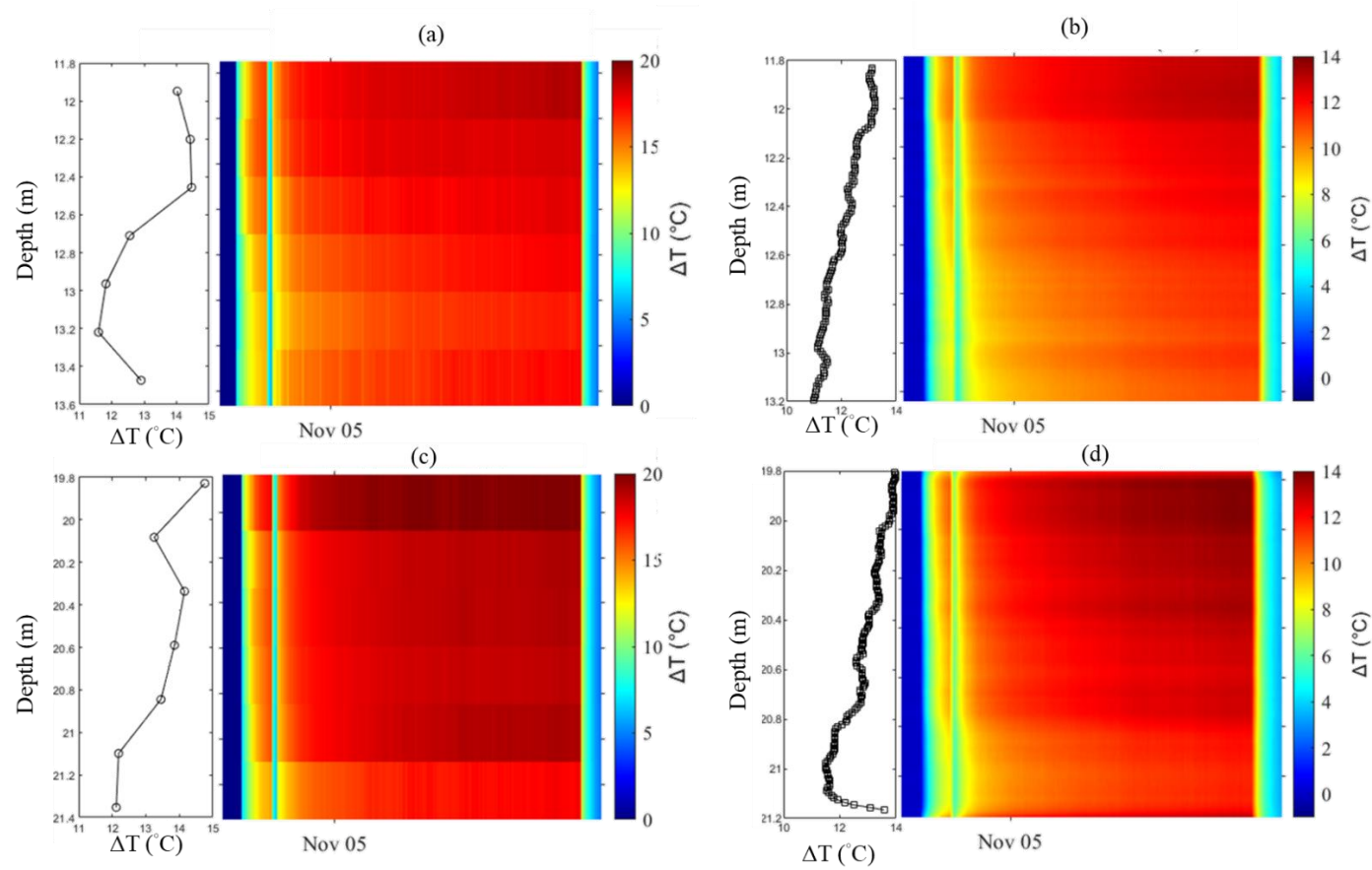


圖 59 加熱過程空間解析度比較 (a)加熱光纖區段一 (b)高解析度纏繞光纖區段一 (c)加熱光纖區段二 (d)高解析度纏繞光纖區段二



5-6 Temperature Vector – DTS (TV-DTS)初步成果

5-6-1 TV-DTS 設計

為進一步獲得地下水流向資訊，本計畫針對主動式加熱 DTS 進行改良，自製研發設計 temperature vector – DTS (TV-DTS)。過去傳統上的水力試驗（例如：微水試驗、單井回復試驗），雖然亦為單井的試驗，但其所獲得的資訊僅有水文地質參數，並無法得知地下水流向，仍須透過鄰近的監測井水位，方可推估水流方向。因此 TV-DTS 之目的為利用單井即可獲得流速與流向之資訊。若能夠在現地量測多口井的地下水位相關資訊，可將推估之流速透過達西定律換算為水力傳導係數 K 值。圖 60 為 TV-DTS 的設計概念圖，TV-DTS 之設計目的為在單口井內同時放入加熱光纖與 X-Y 平面多向分布的感測光纖，透過不同方位的感測光纖所接收到的加熱溫度訊號差異，解析地下水之流向與流速。由於本計畫模場的試驗井皆為 2 吋，因此將 TV-DTS 整體直徑控制於 1.5 吋以內(包含 1 吋 PVC 管與感測光纖之線徑)，提高其通用性同時確保裝置能順利放入井下進行量測。

設計之概念為以 2 個 15 公分 1 吋 PVC 管做為 TV-DTS 的骨幹，安置於 TV-DTS 的頂部與底部，將感測光纖固定於 1 吋 PVC 管上，並將加熱光纖穿入 PVC 管中進行加熱。1 吋 PVC 管之間的距離可以視試驗井場狀況以及量測目標進行長度調整，以最大化 TV-DTS 之適用性。利用 TV-DTS 量測結果進行分析時，其加熱光纖與感測光纖之間的距離須維持固定，以消除距離因素而導致的溫度不確定性，因此加熱光纖以鐵線十字固定於 1 吋 PVC 管的中間，確保其與感測光纖的間距維持於 0.5 吋。感測光纖則分置於以加熱光纖為圓心之圓周上，分別固定於 0° 、 90° 、 180° 與 270° 的方位。

圖 61 為 TV-DTS 實際製作成品，整體長度為 2 公尺，兩端的 1 吋 PVC 管間距約 1.7 公尺，此區間即可作為後續分析時所採納的長度。由於 TV-DTS 所選用的光纖與加熱光纖相同，皆為內包覆單心銅線之光纖纜線，使其可塑性極高，感測光纖容易受內部銅線塑型影響而不易與置中的加熱光纖維持固定距離，因此在 TV-DTS 中段加工，以不影響透水性的鐵絲網捲成 1 吋柱狀，將感測光纖固定於其上。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

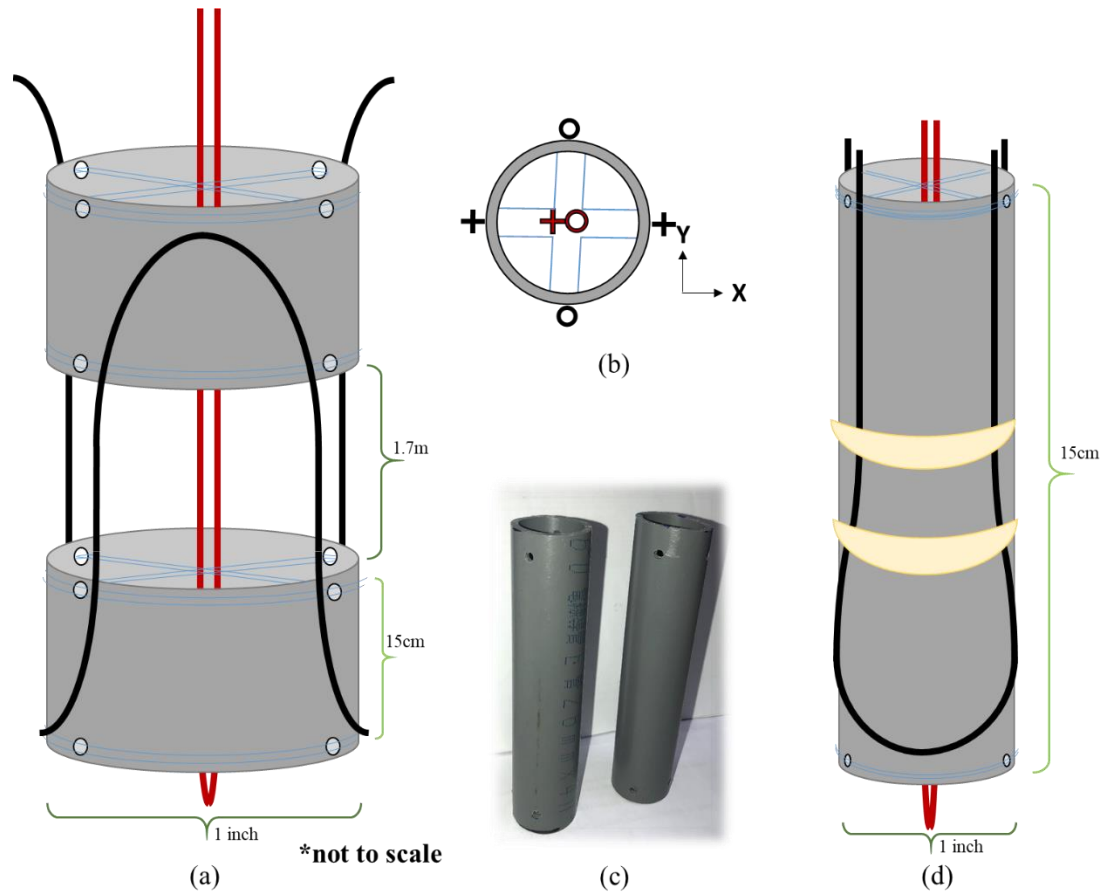


圖 60 TV-DTS 設計概念 (a)TV-DTS 整體 (b)俯視圖 (c)用於兩端之 1 吋 PVC 管 (d)光纖固定於 PVC 管之示意圖



結果與討論

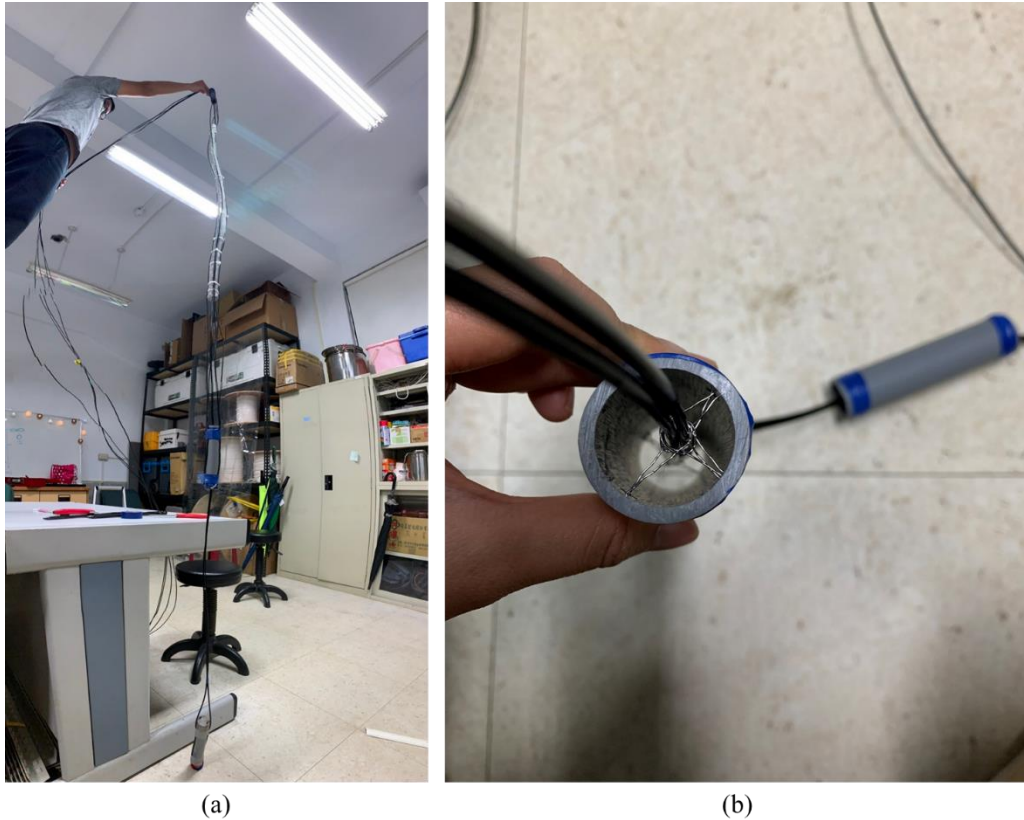


圖 61 TV-DTS 成品 (a)TV-DTS 全長 (b)置中之加熱光纖

5-6-2 TV-DTS 實驗室測試

受到疫情影響，TV-DTS 之現地測試無法順利執行，因此僅先呈現實驗室內之測試結果，且透過測試結果進一步討論進行現地試驗時可能遇到之困難，以優化試驗之設計。

本團隊設計一系列試驗，測試 TV-DTS 在不同功率下溫度感測結果。試驗設計為將 TV-DTS 垂掛於充滿水的壓克力圓柱內，由於壓克力圓柱高度僅約 1 公尺，因此實際沒於水中的 TV-DTS 區段大約僅有 0.7 公尺，其餘的長度皆裸露於空氣中。在水中以水管與壓克力管壁之水閥製造固定水流方向之流場。試驗主要針對不同加熱功率與加熱時間進行測試，試驗內容包括：以每公尺 10 瓦特的功率進行 5 分鐘與 10 分鐘的加熱試驗，以及每公尺 20 瓦特的功率進行 20 分鐘加熱試驗。

各樣顏色對應之方位如圖所示，以加熱光纖為中心(紅色點)，假設水的流向為往 X 為正的方向， 0° 方位代表水流下游方向，以橘色標記； 180°



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

方位代表水流上游方向，以灰色標記；而 90° 與 270° 方位則分別代表垂直於水流方向，且與熱源同在 $x=0$ 軸的方位，以黃色(90°)與藍色(270°)標記。

試驗結果如圖 64，分別顯示水中加熱結果與空氣中加熱結果，由水中試驗結果顯示，加熱光纖的溫度皆有明顯的升溫現象，當給定每公尺 10 瓦特的功率時，經過 5 分鐘加熱時間後加熱光纖溫度可以達到 1.5°C 的溫差，經過 10 分鐘加熱時間後加熱光纖溫度則可以達到 1.8°C - 2.1°C 之溫差。而當給定每公尺 20 瓦特的加熱功率時，加熱光纖溫差則達到 3.5°C - 3.8°C 。觀察此四次試驗下 4 個方位監測光纖的溫度結果，其溫度變化在整個試驗期間都維持於 12.6°C - 13.3°C 之間，且其溫度跳動範圍劇烈，無從確切辨認溫度的變化是否反應接收到加熱訊號之結果。透過加熱光纖的升溫變化，可以發現在這四次加熱過程中，每次加熱的升溫皆在開始加熱後 2 分鐘以內達到穩定的溫度差，顯示水流速度可能過快，導致水溫快速混和而使監測光纖來不及偵測到加熱訊號。

由空氣中試驗結果顯示，TV-DTS 在加熱光纖以及監測光纖有顯著的變化，當給予每公尺 10 瓦特的功率時，加熱光纖溫度可以上升至溫差 35°C ，當給予每公尺 20 瓦特的功率時，加熱光纖溫度則可以上升到溫差 50°C 。在監測光纖的溫度訊號則可以看到四個方位有顯著的差異，溫差最大的為 270° 方位的監測光纖，溫差次大的為 0° 方位的監測光纖，而 90° 與 180° 的監測光纖則有相對較小且較一致的溫度變化。透過空氣中 TV-DTS 測試結果可判斷空氣的流向為往 0° 與 270° 間的方向流動，且較靠近 270° 方位(圖 63)，而其餘不同方位光纖所量測到的相對溫度變化幅度亦符合所推估的氣流方向。



結果與討論

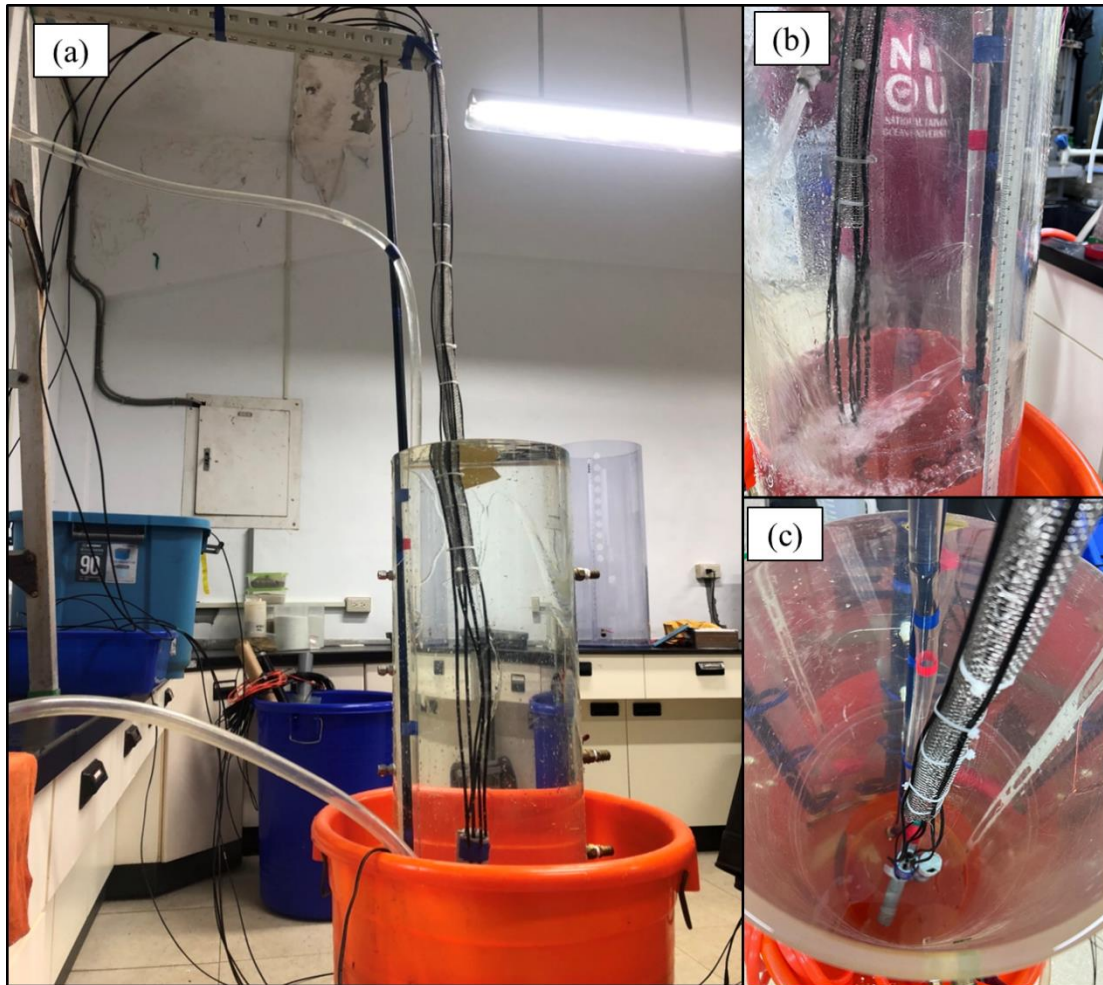


圖 62 室內試驗設置 (a)TV-DTS 架設全景 (b)注水示意圖 (c)TV-DTS 於壓克力圓柱內實景



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

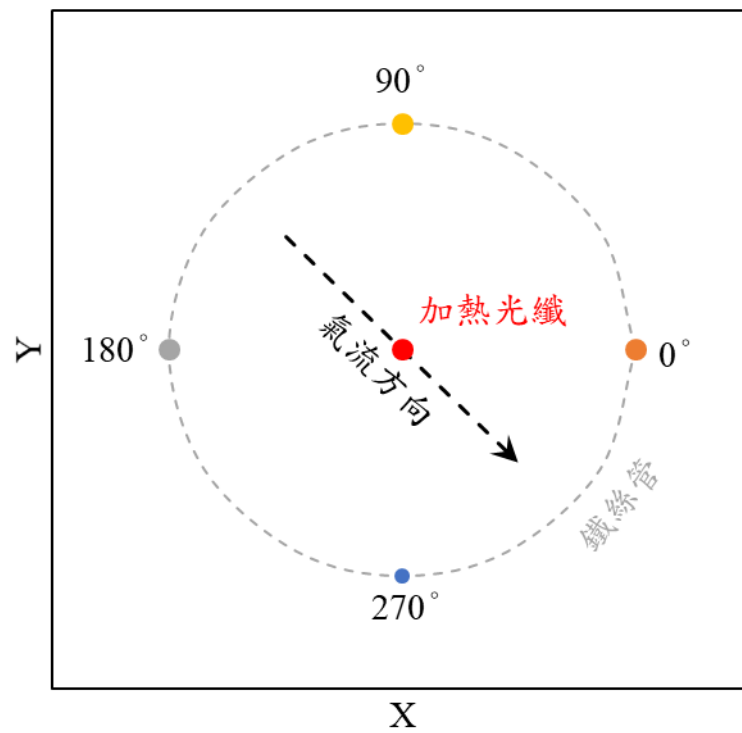


圖 63 TV-DTS 加熱光纖與監測光纖相對位置俯視圖

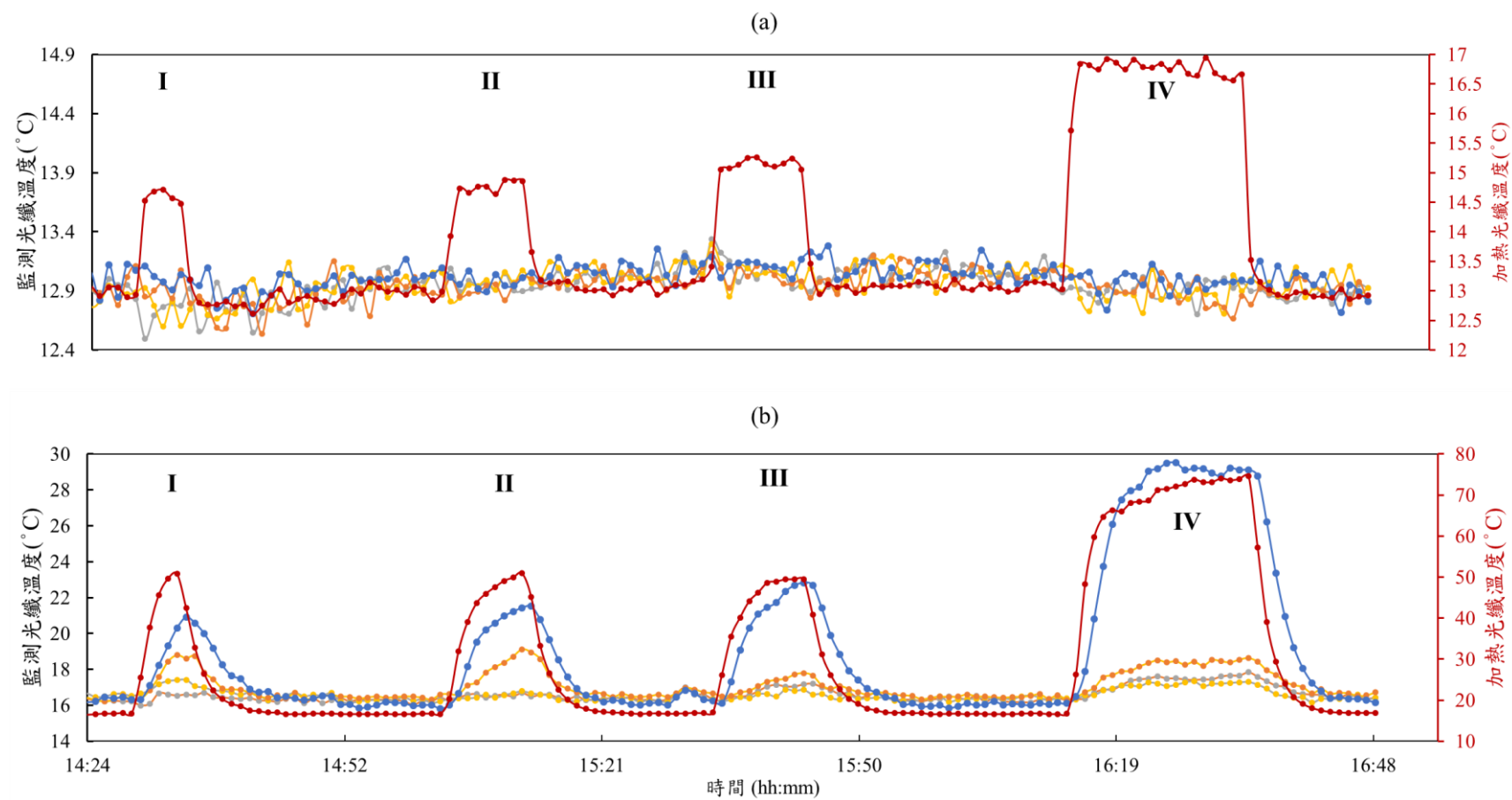


圖 64 TV-DTS 室內測試結果 (a)水中測試結果 (b)空氣中測試結果



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-6-3 TV-DTS 解析解分析

為了解在不同加熱功率及加熱時間下，不同方位光纖可能接到的溫度變化幅度，本計畫預先使用解析解公式進行模擬，以利後續在現地進行試驗之參考依據。假設加熱光纖與監測光纖之距離為 0.5 吋，由於在 TV-DTS 系統中光纖之間溫度傳遞介質以水為主，因此在解析解的設定中將孔隙率 n 設為 1、熱傳導係數設定為水($= 0.6\text{W/m/C}$)。加熱功率以每公尺 10 瓦特與 20 瓦特進行設定，推估在流速較快(0.75m/d)與流速較慢(0.1m/d)的狀態下，不同位置光纖 (0° 方位與 180° 方位) 隨加熱時間 TV-DTS 所測得的溫度變化。

當加熱功率給定於每公尺 10 瓦特時，在流速為 0.75m/d 條件下， 0° 方位與 180° 方位的溫差(ΔT)隨著加熱時間拉長而增加(圖 65)，在加熱時間為 5 分鐘時， ΔT 為 0.12°C ；加熱時間為 10 分鐘時， ΔT 為 0.19°C ；加熱時間為 20 分鐘時， ΔT 增加到 0.22°C 。當流速降低至 0.1m/d 時， 0° 方位與 180° 方位的溫差雖然也隨著加熱時間拉長而增加(圖 65)，然而相較於高流速而言，光纖升溫差異較不明顯，僅有 5.2°C - 7.1°C 。

當加熱功率給定於每公尺 20 瓦特時，在流速為 0.75m/d 條件下， 0° 方位與 180° 方位的溫差(ΔT)隨著加熱時間拉長有顯著的增加(圖 65)，在加熱時間為 5 分鐘時， ΔT 為 0.26°C ；加熱時間為 10 分鐘時， ΔT 為 0.39°C ；加熱時間為 20 分鐘時， ΔT 增加到 0.5°C 。當流速降低至 0.1m/d 時， 0° 方位與 180° 方位的溫差同樣隨著加熱時間拉長而增加(圖 65)，然而相較於高流速而言，光纖升溫差異依然較小，溫差介於 10.5°C - 14.2°C 。

透過解析解分析結果，在較低流速條件下，由於水體幾乎無流動，熱能傳遞主要受到熱傳導影響為主，無論加熱功率高低或加熱時間長短，對於監測光纖所接收到的溫度訊號在各方位上差異性不大，因此，較不易推估水流方向。而當流速增加時，熱能除了透過傳導(conduction)進行傳遞外，也透過對流(convection)方式傳遞，因此即使在較低的加熱功率條件下，不同方位監測光纖所量測到的溫度即呈現出差異性，進而準確的推估水流方向。透過實驗室測試 TV-DTS 之適用性，測試結果顯示，當流體具有顯著性的流動時，TV-DTS 確實能應用於地下水流向之測定，而在流速相對較高的狀態時，加熱功率的提高對於水流速度與方向之判釋將有所提升。



結果與討論

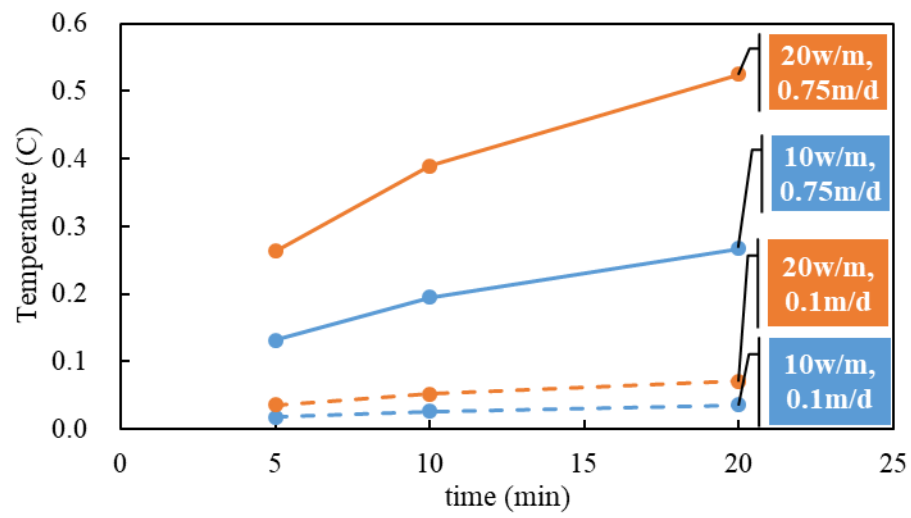


圖 65 在不同功率與不同流速下，不同監測光纖方位（0°與 180°）的溫度差異比較



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

5-7 結論

本計畫以苗栗縣頭份鎮永貞宮地區為模場試驗場址，第一年度針對淺部含水層（40 公尺以內的第一含水層與第一滯水層）進行兩次試驗，第一次試驗於 110 年 4 月進行，以 K00268 作為上游加熱井，K00264 作為下游觀測井，進行單井加熱試驗(K00268)與跨孔熱示蹤試驗。第二次試驗於 110 年 11 月進行，同樣以 K00268 作為上游加熱井進行單井加熱試驗，另選 K00264、K00266、K00269 與 K00265 作為下游觀測井，進行跨孔熱示蹤劑試驗。

根據單井加熱試驗分析結果顯示，在升溫過程中，若地層之透水性較高，地下水流流速較快會使得加熱過程中溫度上升較慢；在降溫過程中，若地下水流流速較快，會使得溫度回復較快。根據兩次試驗所得到的 K00268 溫度剖面結果，其溫度隨地層的分佈趨勢非常一致，深度 17~19 公尺與 37~40 公尺溫度上升較為緩慢，為最為透水之地層；深度 5~15 公尺與 19~35 公尺周圍的地層相對較不透水；在深度 23~28 公尺則為最不透水區域，熱能較易累積，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大。

為避免加熱試驗產生流速推估上的誤差，可將加熱功率往上提升，藉此提高溫差以增加流速上之判釋能力，然而加熱功率之提升，現地則需有穩定電源供應之條件配合。此外，本研究主要利用既設井來進行試驗，因此井體的設計亦將影響流速的推估。依據本計畫所設計之量測與分析方式，最適當之井體設計為整口井不開篩，其次為長區段開篩。

利用熱傳輸解析解公式可針對 K00268 地下水流速隨深度變化進行分析。結果顯示當選定的空間解析度愈高時，更能忠實呈現高流速與低流速之分佈，有利於探討極細部的水文地質特性。透過流速解析比較兩次流速分析結果，兩次試驗所推估之流速分佈特徵趨勢一致，皆可以觀察到深度 20~35 公尺區間的低流速帶，以及深度 35~40 公尺區間的較高流速分佈，且在低流速區段當中（例如 29~30 公尺），細微流速特徵（微小流速增加）也可見於兩次分析結果中。

透過跨孔熱示蹤劑試驗分析結果，在兩次試驗皆可觀察到 K00264 地下水溫受到加熱井影響，而有升溫現象。透過兩次試驗之溫度結果，可以利用熱傳輸解析解公式推測出上游加熱井與下游監測井之相對位置，並進一步得到地下水流向。由測定結果得知，當加熱井 K00268 位於 XY 座標



結果與討論

平面上原點(0,0)位置時，下游觀測井 K00264 的相對位置可能位於 XY 座標平面上(0.38,±0.79)位置(第二次試驗結果)，或位於(0.2,±0.85)座標位置上(第一次試驗結果)，推測得之地下水流向與文獻報告結果吻合。而由於觀測點僅有一個，因此所推測出之地下水流方向包含兩種可能性，進一步增加觀測點才得以獲得明確之流向。

為量化地層之水文地質參數，本計畫針對跨井加熱試驗建置二維數值模式(MODFLOW+MT3DMS)，輸入加熱井所釋放之熱源時序變化，透過水力傳導係數與延散係數等水文地質與熱能參數之調整，以擬合觀測井的地下水溫度。第一含水層中模擬結果顯示，水力傳導係數為 2.5×10^{-5} m/s、熱延散係數為 0.38m 時，有最佳的擬合結果。模擬之溫度訊號因受到水流方向的影響，在地層中呈現些微不對稱性往下游移動。在第一滯水層模擬結果顯示，由於水力傳導係數較小，使得水的流動能力較弱，無論在加熱過程或回溫過程其溫度僅在小範圍內變化，然而本次試驗並無搜集到第一滯水層之溫度觀測變化，因此無法對其進行水力參數之擬合。透過參數敏感度分析結果得知，溫度受水平水力傳導係數影響較為顯著。

透過高解析度纏繞光纖的設計，將光纖以纏繞方式，使在短距離內的光纖量測點增加，以提高溫度資料在空間上的解析度。透過現地初步測試，在相同的監測區間內，使用高解析度纏繞光纖裝置大幅提高了溫度量測在空間上的解析能力，解析度從原來的 25cm 提升至 1.05cm，而解析度提升之結果使得細微的溫度變化均可被詳盡的描述，將有助於提供微尺度的水文地質資訊。

為進一步獲得地下水流向資訊，本計畫針對主動式加熱 DTS 進行改良，自製研發設計 temperature vector-DTS (TV-DTS)。TV-DTS 之設計目的為在單口井內同時放入加熱光纖與 X-Y 平面多向分布的感測光纖，透過不同方位的感測光纖所接收到的加熱溫度訊號差異，解析地下水之流向與流速。受限於疫情之影響，本年度僅先透過室內實驗測試，水中加熱測試結果加熱光纖溫度可達最高 3.5°C-3.8°C，而 4 個方位監測光纖所得之溫度變動劇烈，無從確切辨認溫度變化與接收加熱訊號之關聯性，可能為實驗設計之水流速度過快或流向不穩定所造成之影響。由空氣中試驗結果顯示，TV-DTS 在加熱光纖以及監測光纖有顯著的變化，透過加熱光纖顯著的升溫變化，4 個方位監測溫度有顯著差異，從而明確判斷氣流之方向。

透過熱傳輸解析解針對 TV-DTS 溫度變化與加熱狀態進行模擬，結果



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

顯示在較低流速條件下，無論加熱功率高低或加熱時間長短，對於監測光纖所接收到的溫度訊號在各方位上差異性不大，將無法推估水流方向。當流速增加時，在相對較小的加熱功率條件下，不同方位監測光纖所量測到的溫度依然呈現出差異性，進而可用於水流方向的推估。透過 TV-DTS 之適用性測試結果顯示，當流體具有顯著性的流動時，TV-DTS 確實能應用於地下水流向之測定。

本計畫於地下水污染場址以主動式加熱試驗搭配分散式光纖溫度感測器進行模場試驗，於第一年度針對淺部含水層解析其地下水流速分佈，推估不同深度之透水特性，並以跨孔熱示蹤劑試驗透過線性熱源熱傳輸解析解，有效測定地下水流方向，同時搭配地下水數值模式輔以佐證量測結果。本研究提供之創新量測技術在不擾動地下水流的情況下，避免污染範圍因受到外力影響而擴大，對於地下水污染場址之水文地質調查有極高之適用性，精細的測量結果有助於提供相關單位污染整治評估。

5-8 後續工作

在執行計劃期間恰逢國內疫情嚴峻，使得現地工作受到延宕，因此本團隊微調工作項目，優先執行實驗室可完成的工作項目，並對實驗設計多次進行模擬優化。藉由本年度的工作成果，高解析度纏繞光纖與 TV-DTS 設計已有基礎雛形，未來將繼續對於其設計進行優化，將高解析度纏繞光纖的尺寸再減小以提高其適用性。此外，設計規劃現地試驗，將 TV-DTS 應用於現地試驗中，並針對所量測地下水流向分析結果，與本年度試驗結果互相比較。明年度計畫之執行重點將針對試驗場址深部(第二)含水層，進行地下水流速分析，嘗試將光纖溫度感測器之應用範圍進行延伸，並嘗試透過 TV-DTS 進行深部含水層之地下水流向測定，也將參考過去霖昌公司之「多深度單井流速流向測定」結果，同時將 TV-DTS 量測結果一併比較分析。本計畫所提出調查方法之標準作業流程（包括：加熱時間、加熱空率、光纖種類、光纖佈設方式等）、應用範圍、地質條件及限制預計於第二年期末報告中綜整後提出參考建議。



參考文獻

六、 參考文獻

- Anderson, M.P. (2005). Heat as a ground water tracer, *Ground Water*, 43, 951-968.
- Angermann, L., Lewandowski, J., Fleckenstein, J.H., Nutzmann, G. (2012). A 3D analysis algorithm to improve interpretation of heat pulse sensor results for the determination of small-scale flow directions and velocities in the hyporheic zone. *Journal of Hydrology*, 475, 1 – 11.
- Arik, A. (2011). A study of stream temperature using distributed temperature sensing fiber optic technology in Big Boulder Creek, a tributary to the Middle Fork John Day River in Eastern Oregon. Master Thesis. Oregon State University.
- Bakker, M., R. Calj_e, F. Schaars, K.-J. van der Made, and S. de Haas (2015), An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment, *Water Resour. Res.*, 51, 2760–2772, doi:10.1002/2014WR016632.
- Bakx, W., Doornebal, P.J., van Weesep, R.J., Bense, V.F., Oude Essink, G.H.P., & Bierkens, M.F.P. (2019). Determining the relation between groundwater flow velocities and measured temperature differences using active heating-distributed temperature sensing, *Water*, 11(8), 1619.
- Bense, V.F., Read, T., Bour, O., Le Borgne, T., Coleman, T., Krause, S., Chalari, A., Monsanos, M., Ciocca, F., and Selker, J.S. (2016). Distributed temperature sensing as a downhole tool in hydrogeology, *Water Resources Research*, 52, 12, 9259-9273.
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S. (1965). Rates of vertical groundwater movement estimated from earth's thermal profile, *Water Resources Research*, 1, 325-328.
- Coleman, T.I., Parker, B.L., Maldaner, C.H., and Mondanos, M.J. (2015). Groundwater flow characterization in a fractured bedrock aquifer using active DTS tests in sealed boreholes, *Journal of Hydrology*, 528, 449-462.
- Dagan, G. (1989), *Flow and Transport in Porous Formations*, 465 p., Springer-Verlag, New York.
- des Tombe, B. F., Bakker, M., Schaars, F., & Van der Made, K.- J. (2018). Estimating travel time in bank filtration systems from a numerical model based on DTS measurements. *Groundwater*, 56(2), 288-299. <https://doi.org/10.1111/gwat.12581>



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

FLUTe(<https://www.flut.com/blank-liner>)

Foerster, A., J. Schroetter, D. F. Merriam, and D. D. Blackwell (1997), Application of optical-fiber temperature logging; an example in a sedimentary environment, *Geophysics*, 62(4), 1107–1113, doi:10.1190/1.1444211.

Gaona, J., Meinikmann, K., Lewandowski, J. (2019). Identification of groundwater exfiltration, interflow discharge, and hyporheic exchange flows by fibre optic distributed temperature sensing supported by electromagnetic induction geophysics, *Hydrological Processes*, 33(10). 1390 - 1402.

Gilmore, T.E., Johnson, M., Korus, J., Mittelstet, A., Briggs, M.A., Zlotnik, V., & Corcoran, S. (2019). Streambed flux measurement informed by distributed temperature sensing leads to a significantly different characterization of groundwater discharge. *Water*, 11(11), 2312.

Grosswig, S., E. Hurtig, and K. Kuehn (1996), Fibre optic temperature sensing; a new tool for temperature measurements in boreholes, *Geophysics*, 61(4), 1065–1067, doi:10.1190/1.1444027.

Halloran, L.J., Roshan, H., Rau, G.C., Andersen, M.S., & Acworth, R.I. (2016). Improved spatial delineation of streambed properties and water fluxes using distributed temperature sensing, *Hydrological Processes*, 30, 15, 2686-2702.

Hall A., Chiu, Y.C. & Selker, J.S. (2020). Coupling high-resolution monitoring and modelling to verify restoration-based temperature improvements, *River Research and Application*, 1–12.

Hausner, M. B., L. Kryder, J. Klenke, R. Reinke, and S. W. Tyler (2015), Interpreting variations in groundwater flows from repeated distributed thermal perturbation tests, *Ground Water*, 54(4), 559–568, doi:10.1111/gwat.12393.

Hilgersom, K. P., N. C. van de Giesen, P. G. B. de Louw, and M. Zijlema (2016), Three-dimensional dense distributed temperature sensing for measuring layered thermohaline systems, *Water Resour. Res.*, 52, 6656–6670, doi:10.1002/2016WR019119.

Hopmans, J. W., Šimunek, J., & Bristow, K. L. (2002). Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat pulse probe measurements: Geometry



參考文獻

- and dispersion effects. *Water Resources Research*, 38(1), 1006.
<https://doi.org/10.1029/2000WR000071>
- Klepikova, M. V., Le Borgne, T., Bour, O., Gallagher, K., Hochreutener, R., & Lavenant, N. (2014). Passive temperature tomography experiments to characterize transmissivity and connectivity of preferential flow paths in fractured media. *Journal of Hydrology*, 512, 549–562.
- Klepikova, M. V., Roques, C., Loew, S., & Selker, J. (2018). Improved characterization of groundwater flow in heterogeneous aquifers using granular polyacrylamide (PAM) gel as temporary grout. *Water Resources Research*, 54, 1410–1419.
<https://doi.org/10.1002/2017WR022259>
- Kluitenberg, G. J., and A. W. Warrick (2001), Improved evaluation procedure for heat-pulse soil water flux density method, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 320–323.
- Leaf, A. T., D. J. Hart, and J. M. Bahr (2012), Active thermal tracer tests for improved hydrostratigraphic characterization. *Ground Water*, 50(5), 726–735, doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00913.x.
- Lewandowski, J., Angermann, L., Nutzmann, G., and Fleckenstein, J.H. (2011). A heat pulse technique for the determination of small-scale flow directions and flow velocities in the streambed of sand-bed streams. *Hydrological Processes*, 25, 3244 – 3255.
- Liu, G., Knobbe, S., and Butler, J. J. (2013). Resolving centimeter-scale flows in aquifers and their hydrostratigraphic controls. *Geophysical Research Letters*, 40, 1098–1103. <https://doi.org/10.1002/grl.50282>
- Moffett, K. B., Tyler, S.W., Torgersen, T., Menon, M., Selker, J. S., and Gorelick, S. M. (2008): Processes controlling the thermal regime of saltmarsh channel beds, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 671–676.
- Pehme, P.E., Parker, B.L., Cherry, J.A., Molson, J.W., Greenhouse, J.P. (2013) Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes, *Journal of Hydrology*, 484, 1-15.
- Pehme, P., Parker, B., Cherry, J.A., Blohm, D. (2014). Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

- groundwater flow in fractured rock. *Journal of Hydrology*, 513, 101 – 114.
- Rau, G. C., Andersen, M. S., & Acworth, R. I. (2012). Experimental investigation of the thermal dispersivity term and its significance in the heat transport equation for flow in sediments. *Water Resources Research*, 48, W03511. <https://doi.org/10.1029/2011WR011038>
- Read, T., Bour, O., Selker, J.S., Bense, V.F., Borgne, T.L., Hochreutener, R., and Lavenant, N. (2014). Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes, *Water Resources Research*, 50, 5, 3706-3713.
- Read, T., Bense, V. F., Hochreutener, R., Bour, O., Le Borgne, T., Lavenant, N., et al. (2015). Thermal-plume fibre optic tracking (T-POT) test for flow velocity measurement in groundwater boreholes. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 4(2), 197–202.
- Ren, T., G. J. Kluitenberg, and R. Horton (2000), Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 552–560.
- Sebok, E., Duque, C., Kazmierczak, J., Engesgaard, P., Nilsson, B., Karan, S., & Frandsen, M. (2013). High-resolution distributed temperature sensing to detect seasonal groundwater discharge into Lake Væng, Denmark. *Water Resources Research*, 49(9), 5355-5368.
- Seibertz, K. S. O., M. A. Chirila, J. Bumberger, P. Dietrich, and T. Vienken (2016), Development of in-aquifer heat testing for high resolution subsurface thermal-storage capability characterisation, *J. Hydrol.*, 534, 113–123.
- 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.
- Shanafield, M., Banks, E. W., Arkwright, J. W., & Hausner, M. B. (2018). Fiber-optic sensing for environmental applications: Where we have come from and what is possible. *Water Resources Research*, 54, 8552– 8557. <https://doi.org/10.1029/2018WR022768>
- Smith, L., & Chapman, D. S. (1983). On the thermal effects of groundwater flow: 1. Regional scale systems. *Journal of Geophysical Research*, 88(B1), 593–608.



參考文獻

- <https://doi.org/10.1029/JB088iB01p00593>
- Stallman, R.W. (1963). Methods of collecting and interpreting ground-water data, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 36-46.
- Stonestrom, D.A., Constantz, J. ed. (2003). Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams. USGS Circular 1260. USGS.
- Suarez, F., Aravena J.E., Hausner, M.B., Childress, A.E., and Tyler, S.W. (2011). Assessment of a vertical high-resolution distributed-temperature-sensing system in a shallow thermohaline environment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1081 – 1093.
- Suzuki, S. (1960). Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *Journal of Geophysical Research*, 65, 2883-2885.
- Tyler, S. W., Selker, J. S., Hausner, M. B., Hatch, C. E., Torgersen, T., Thodal, C. E., and Schladow, S. G. (2009): Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods, *Water Resour. Res.*, 45, W00D23, doi:10.1029/2008WR007052.
- Veling, E. J. M., and C. Maas (2010), Hantush well function revisited, *J. Hydrol.*, 393, 381–388.
- Vogt, T., Schneider, P., Hahn-Woernle, L., and Cirpka, O. A. (2010): Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiberoptic high-resolution vertical temperature profiling, *J. Hydrol.*, 380, 154–164.
- Westhoff, M. C., Savenije, H. H. G., Luxemburg, W. M. J., Stelling, G. S., van de Giesen, N. C., Selker, J. S., Pfister, L., and Uhlenbrook, S. (2007): A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1469–1480, doi:10.5194/hess-11-1469-2007.
- Wisian, K. W., D. D. Blackwell, S. Bellani, J. A. Henfling, R. A. Normann, P. C. Lysne, A. Foerster, and J. Schroetter (1998), Field comparison of conventional and new technology temperature logging systems, *Geothermics*, 27(2), 131–141, doi:10.1016/S0375-6505(97)10013-X.
- Zlotnik, V., and Tartakovsky, D.M. (2018), Interpretation of heat-pulse tracer tests for characterization of three-dimensional velocity fields in hyporheic



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查
zone, Water Resources Research, 54(6), 4028 – 4039.
行政院環境保護署 2014 年中港溪地下水污染評估與調查計畫



附錄

七、 附錄

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	110 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：邱永嘉 NO：B9	
計畫名稱	加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 請補充說明計畫執行 20 小時之主動式加熱試驗，是否足以作為掌握地下水流向或流速等資訊？相關地質條件之影響因素，建議宜有相關討論。		1. 主動式加熱試驗的加熱時間長短主要受地下水流速快慢之影響，然而依據本執行團隊過去之經驗，加熱時間設定為 18-24 小時，即可使得井內之水溫顯著上升，在單井的流速分析上亦有一定之可信度。本次試驗以 20 小時進行加熱，對於加熱井各深度已有顯著的升溫效應，亦可有效針對單井的流速進行分析。在地下水流向的測定方面，則需要搭配跨孔試驗，或是透過本計畫預計自制研發的 TV-DTS（只需要單井）進行分析，相關分析結果將於期末報告中呈現。跨孔熱示蹤劑試驗所需時間雖然受到水文地質條件之影響，但是一般而言，所需時間均較單井試驗長。有鑑於此，本計畫才致力於發展 TV-DTS，僅需透過單井的加熱試驗，即可獲得地下水流之流向。 根據文獻報告所示，在第一含水層地質組成主要為礫石夾砂，熱傳導係數範圍介於 1.125~2.279 w/(m·k)。經由熱傳輸解析解所推估之熱傳導係數落在此範圍內，與文獻之理論值相符。將較於沉積物之水力傳導係數，其熱傳導係數範圍小，因不同地質組成所造成的不確定性也相對較小。如	



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

2. 有關光纖溫度感測器之靈敏度分析為何？此外，溫度校正之參考基準為何？此外，試驗井 K00268 及 K00264 使用不同之光纖纜線，其溫度感測之靈敏度及校正方式，應有合理說明。 3. 本計畫對於加熱功率、加熱時間，以及環境與地質條件間，對地下水流向與流速監測之關鍵問題，宜提供後續應用之作業準則，以供參考。	欲求得更精確各深度之熱傳導係數，則需藉由現地岩心取樣並以實驗室儀器測量熱傳導係數進一步進行修正。相關討論將於期末報告中呈現。 2. 試驗所使用的 XT-DTS 與 Ultima-DTS 皆提供 0.01°C 的溫度解析度，其溫度感測能力主要受到光纖外皮材料的熱傳導係數與厚度所影響。在本次試驗雖使用兩種光纖纜線，但其材質皆為 PVC，且包覆方式一致，因此兩種光纖纜線對於溫度感測的靈敏度理論上應該相同。在溫度校正方面，於試驗期間將兩種光纖同時放置於同一個參考水體中，並在水體中安裝高精度之溫度計 (RBR solo³T，最高量測頻率為 2Hz、精確度 $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$、解析度 $< 5 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}$)，其所量測之溫度將用於後續的溫度校正。 3. 根據熱示蹤試驗影響因子分析結果，功率大於 10W/m 或加熱時間超過 0.25 天時，溫度影響已達到一穩定的半徑，但是此半徑也受到流速的影響，當流速增加其影響半徑也隨之擴大。因此在進行跨井試驗時，須考慮到監測井井距以及地下水流速 (或地質資訊)，以評估較為適用的設定。現地試驗的作業準則將嘗試於第二年計畫結束前提出供後續相關作業參考。
委員二 4. 本計畫係以熱能為地下水流示蹤劑，搭配分散式光纖溫度感測器 (FO-DTS) 量測方法，獲取空間與時間上的連續資料，進行高精密度的地下水流速與流向量測，後續將進一步開發高精密度纏繞光纖以提升量測的解析度。期中報告內容撰述大致完整，研究方法說明詳盡，期中進度已完成主動式	1. 感謝委員肯定。本計畫在執行期間並無申請經費自籌款。



附錄

DTS 跨孔加熱試驗和跨孔之熱傳輸解析解分析，符合甘特圖所設定預期完成項目與進度，對未來(期末)與第二年之工作內容亦清楚交待，建議期末報告時對申請經費自籌款之使用情形做詳細說明。	
委員三 5. 加熱式光纖溫度感測器透過加熱試驗與配合解析解的流速推估，跨孔的熱示蹤劑試驗搭配地下水熱-水耦合數值模式模擬，本計畫具有學理基礎與現地試驗可以來相互驗證。 6. 土壤的材料性質非常重要。例如，土壤的熱傳導係數已列入數值分析中，另外，土壤的透水係數與地下水流速與流向有關，是否有考量進入分析中？ 7. 溫度感測器量測到的溫度是否是經由介質(土壤與不流動的水)的熱傳導或是水流動的，二者如何分辨？	1.感謝委員肯定。 2.在所採用的熱傳導解析解公式中，所需設定之參數包括：孔隙率、熱傳導係數、熱擴散係數熱遲滯係數及地下水流速。由於溫度對於地下水流速極為敏感，因此在假設其他參數都已知的情形下，進行地下水流速推估。本計畫僅針對地下水流速進行推估，若欲進一步推估土壤的透水係數，則需搭配地下水位的量測方可推估。此外，本計畫在期末報告時，將會針對熱傳導係數對於溫度之影響，進行敏感度分析。 3.溫度感測器所測量到的溫度變化確實包含了透過熱傳導 (conduction) 以及平流方式 (convection) 傳遞的綜合效應。本計畫所採用的熱傳導解析解公式中，已將兩者的效應納入考量。若欲進一步分辨兩者的個別效應，須針對溫度破透曲線的不同升溫階段進行擬合，方可分離熱傳導及平流的效應。由於本計畫的目的為推估地下水流速，而平流效應的影響主要發生在加熱期間的後半段，以解析解公式在進行溫度



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

8. P14，有”錯誤，找不到資料”出現在報告。 9. 實際進度與預期進度。	擬合時，亦著重於加熱期間後半段的溫度變化，因此所推估的水流速度將具有一定的代表性。針對加熱期間不同的升溫階段進行拆解，並依據不同效應在不同階段之影響性進行分析，將兩者的效應予以分辨，將是未來值得研究的方向之一。 4. 感謝委員指正，將於期末報告進行修正。 5. 感謝委員肯定。
委員四 5. 本計畫以熱能為地下水流示蹤劑，搭配光纖溫度感測器以調查水文地質環境，現地實驗的更多數據，仍待執行。	1.感謝委員建議。第一年度的計畫執行期間，預計進行三次現地試驗，並將試驗成果呈現於期末報告中。
委員五 1. P.8 熱傳輸解析解方程式編號(式 1、式 2、式 3)與文字描述(式 2、式 3、式 4)不符，請調整修正。 2. P.14 主動式光纖加熱系統第三行文字「錯誤！找不到參照來源」，請調整修正。 3. P.22 甘特圖建議補充標題列，以利閱讀。 4. P.26 第三段 K 值分布約在 10^{-5}~10^{-2} cm/s, 應上標為 10^{-5}~10^{-2}cm/s，P.27 第二段 K 值相關描述亦請同步修正。 5. P.31 現地試驗設計中，跨孔之加熱試驗，兩井間之距離約為 0.7 公尺，P.48 數值模式建置卻以兩者間距 1 公	1. 感謝委員指正，將於期末報告進行修正。 2. 感謝委員指正，將於期末報告進行修正。 3. 感謝委員指正，將於期末報告進行補充。 4. 感謝委員指正，將於期末報告進行修正。 5.感謝委員建議。用於跨孔熱示蹤試驗之井距約為 0.7-0.9 公尺，初步在進行模擬時以 1 公尺為基礎設定，確實會由於距離差



附錄

尺模擬，是否造成模擬結果與實際誤差，建議補充說明。 6. P.51 第一段第 9 行「方均跟誤差」，誤繕請修正。 7. P.56 第一段倒數六行，有關流速及熱能傳遞相關描述，與第二段倒數六行重複，建議綜整說明。	而造成水文地質參數推估的誤差。在執行期間有再度進行同一對井的跨孔試驗，並獲得更加完整之觀測資料，將於期末報告再次以正確之井距進行水文地質參數之推論。 6.感謝委員指正，將於期末報告進行修正。 7. 感謝委員建議。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

110 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 ☒申請計畫書☐期中報告 ☐期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 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：邱永嘉 NO：SD7	
計畫名稱	加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 無		感謝委員肯定。	
委員二 可應用場址之限制條件應掌握。		感謝委員建議。本計畫選定苗栗頭份永貞宮為試驗場址的主要目的之一即為測試與驗證所提出之現地量測方式對於不同地質條件之應用情形，及其相對應的限制條件。此方面之討論與研析將會在獲得完整成果之後，於期末報告中予以呈現。	
委員三 一、主持人與計畫執行團隊 1. 主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。 2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。(本計畫應屬於延續性) 二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義 1. 本專案計畫對國內土壤及地下水污染調查或整治工作的發展具有貢獻。 2. 本計畫書撰寫具體(延續性)，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。 3. 本計畫成果的實場應用性，期末報告建議說明。		一、 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 二、 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員建議。本計畫將針對苗栗頭份永貞宮進行現地試驗，其成果將與前一期計畫桃園中壢勝暉場址進行比較分析，研	



附錄

4. 本計畫為多年期的模場試驗計畫之一(如下說明)，具計畫的延續性。 5. 主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的模場(或研究)研究計畫，之前的專案執行績效佳。前期計畫的實務應用建議具體說明。 6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境(例如：土壤質地)與應用的限制條件。(例如：純相的影響) 7. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境及該情境下與其他可行調查工法的成本效益比較。(原計畫書中說明：“...本計畫藉由土壤與地下水污染場址的現地試驗，以創新的分散式光纖溫度感測器量測方式，進行...井下水文地質調查。本計畫的研究成果不僅可提供創新量測技術在水文地質調查上的應用，藉此提昇...水文地質調查之能力，透過空間上及時間	析本計畫所發展的現地量測方式對於不同地質條件之應用情形，及其相對應的限制條件。相關之討論將於期末報告中予以說明。 4.感謝委員肯定。 5.感謝委員建議。前期計畫的實務應用將於計畫書修正稿中予以補充說明。 6. 感謝委員建議。依據前期的計畫執行成果，以主動式線性加熱源搭配光纖溫度量測，可適用在許多不同的地下水流速條件下，由於光纖溫度感測器在溫度量測的準確度，在流速相對較低的情形下（例如：含泥量較高土壤），更能夠凸顯其優勢。本計畫今年度將選定苗栗頭份永貞宮為試驗場址，其主要目的之一即為測試與驗證所提出之現地量測方式對於不同地質條件之應用情形，及其相對應的限制條件。永貞宮試驗場址內有許多深度較深的監測井（深度 > 50m），在此條件下，更能夠發揮光纖溫度感測器之優勢。本計畫所提出方法之實務應用的適用情境與應用的限制條件，在獲得完整成果之後，將於期末報告中予以呈現。 7. 感謝委員建議。如同審查意見 6 的回覆，本計畫所提出方法之實務應用的適用情境與應用的限制條件，在獲得完整成果之後，將於期末報告中予以呈現。本計畫成果亦會與其他可行調查工法進行交互驗證比較及成本效益分析。 依據前一期計畫之成果顯示，雖然光纖溫度感測器已能提供空間中高解析度(50 公
--	--



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

上的高解析度連續資料，可進一步瞭解複雜的水文地質環境，井下透水區段、地下水流向與流速及優勢水流路徑...掌握污染物傳輸路徑，並針對後續的污染整治工作進行評估...”。”...本期計畫將自行設計「高精度纏繞光纖」，更進一步提升光纖溫度感測器在空間上之解析度（預計達到 1-2cm 等級），以提供更細緻之資料 ...”，本論述於實務應用上的具體意義為何？在何種條件下需要如此精準？)	分)的量測資料，然而對於極細微（公分等級）但扮演關鍵角色之地質構造，如：薄黏土層、裂隙（或結構性土壤）等，仍無法完全掌握，因此，若能透過高精度纏繞光纖的量測，更進一步提昇光纖在空間之解析度，對於地下水含水層之細部特徵可提供更完整之資訊。
委員四 計畫主持人去年研究結果僅分析出不同深度的透水性，本年度計畫書提出以針對「跨孔」進行試驗，以線性熱源的加熱方式，判釋地下水流向與透水區段，並瞭解加熱功率與時間所造成之影響半徑，建議確實執行之。	感謝委員指導。基於前一期執行完成之計畫成果，本團隊針對單井溫度變化解析各含水層透水性已有完善且豐富的經驗，在本年度計畫將以此作為基礎，加入跨孔試驗判釋地下水流向與透水區段，在進行跨孔試驗的同時，將可針對加熱功率與時間所造成之影響半徑進行試驗，並將試驗結果與過去解析解的推估進行比較分析。上述工作項目將增列於計畫書修正稿中。
委員五 無	感謝委員肯定。
委員六 前期數據分析合理，可行。	感謝委員肯定。
委員七 本專案對未來土壤及地下水污染整治貢獻度佳。	感謝委員肯定。
委員八 1. 計畫內容與先前研究之連結宜再強化。	1. 感謝委員指導。基於前一期執行完成之計畫成果，本團隊針對單井溫度變化解析各含水層透水性已有完善且豐富的經驗，在本年度計畫將以此作為



附錄

2. 各階段成果內容應清楚說明。	基礎，加入跨孔試驗判釋地下水流向與透水區段，並且計畫以高精度纏繞光纖提升對於極細微地質構造之解析。此外，也將以自行設計之 TV-DTS，優化單井監測之地下水流向辨析能力，祈能提升本研究法在各類場域的應用性。上述說明將於計畫書修正稿中予以補充說明。 2. 感謝委員指導。各階段之預期成果內容將於計畫書修正稿中予以補充說明。
委員九 1. 考量計畫執行期程建議 p.47~50(一)人事費以編列 11 個月為上限。 2. p.54(三)消耗性器材及主要費用，部分相同品項建議參考前年度實際核銷金額修正並酌減。 3. p.58(五)雜項費用建議辦公室文具及雜項費用以 5,000 元為限。	1. 感謝委員建議。原經費以一年度為期進行編列，新的經費修訂將依照實際核定之計畫執行期程予以調整，人事費之編列將以 11 個月為上限。 2. 感謝委員建議。消耗性器材及主要費用將會參考前年度核定經費進行編列，然而，由於試驗場址與方法之差異，將會依據實際需求與狀況進行調整。 3. 感謝委員指正。雜項費用之預算編列將以 5000 元為上限進行編列。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

110 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 ☐申請計畫書 審查意見回復對照表
☐期中報告 ☐期末報告

計畫年度	110 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：邱永嘉 NO：C11	
計畫名稱	加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查		
委員審查意見		計畫單位回覆	
是否需要同步量測可監測的範圍有多大？		分散式光纖溫度感測器之優勢即在於空間中的高解度連續性量測，以本計畫所選用的雷射分析主機，其測量長度可達 30,000 m，空間解析度為 25cm。在此條件下，均可針對所選定廠區內的監測井井下溫度同時進行量測，而監測井所涵蓋的深度與範圍，即為光纖感測器之量測範圍。若欲進行主動式加熱的跨孔試驗，熱的傳遞範圍則取決於加熱功率、加熱時間以及水流速度，而上述因素為本計畫之工作項目之一。	
加熱後之擴散、對流、傳輸外，是否受輻射、傳導的影響，而干擾試驗設計與結果。		熱的傳輸主要受控於輻射、對流與傳導，因此溫度變化將受控於上述三種熱傳遞的方式。由於試驗均在地下水面以下進行，受到太陽輻射之影響甚低，因此可以予以忽略。在熱對流與熱傳導之部分，本團隊已建立一套分析方法，透過解析解，針對不同時間段加熱的溫度變化型態，可區分熱對流與熱傳導的效應。 此外，加熱後所導致的井內垂向的自然熱對流 (free convection) 將會影響井內的溫度量測，然而，依據文獻顯示，若上、下層之溫度差異在 8 - 10°C 以內，垂向的自然熱對流將不顯著。有鑑於此，本團隊在進行試驗時，加熱後的溫度變化均會控制在此範圍以內，以避免自然熱對流造成溫度量測上之影響。	



附錄

對既有監測結果/品質提升有效性，應再釐清。	感謝委員建議。本計畫所使用的光纖溫度量測方式及主動式的線性加熱源，透過解析解的解算，可獲得井下高解析度連續性（解析度高達 50cm）的地下水流速資訊，以過往傳統的調查方式無法達到如此高之解析度。而使熱作為示蹤劑，由於熱傳導係數之誤差範圍相對較小（僅約 1-2 倍），相對於水力傳導係數之不確性（數量級上差異），將可大幅提升所推估地下水流速之準確度。 有鑒於地下水流向之判釋往往需要在多井的條件下才可獲得，雖然過往既有量測技術可透過單井而推估地下水流速，然而此方法僅能針對特定深度進行量測，無法獲得空間上的連續性資料，因此，本計畫預定以自行設計之 TV-DTS，在單井的條件下，進行井下高解析度連續性的地下水流向與流速推估。此試驗之成果，將可大幅提升地下水污染場址調查之精確性，並同時降低人力之成本。
經費編列待釐清。	感謝委員指正。有鑒於在執行前一期的模場計畫時，現地試驗環境惡劣，且充滿許多不確定性因素，因此在計畫執行時，實際經費支出超出原先編列之預估經費。因此，本年度在經費編列上，依據前一期的經費編列進行增減，尤其在耗材方面，因涉及儀器的設計、測試及因應現地環境之不確性，預期在此方面之支出將有所增加。此外，有委員建議應測試光纖溫度感測器在不同場址之通用性，本計畫將修正第二年的試驗場址與工作項目，將暫定於「苗栗頭份鎮永貞宮」進行試驗，而此工作項目修正，預期亦會增加現地試驗經費（差旅與耗材）的支出。修正後的經費將於將於計畫書中予以補充說明。



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

申請模場型計畫，應請檢核執行方法/參數。	感謝委員指正。本計畫中所提到的「高精度纏繞光纖」與「TV-DTS」均已完成原型之設計，並在實驗室完成測試。將透過本計畫之執行，實際測試上述兩種儀器在線地試驗之適用性，同時透過線地試驗之過程，修正其設計，並優化量測流程。
類似計畫已執行多年，相關成果在國內的應用情形建議說明。	感謝委員建議。據本人瞭解，以線性熱源為主動式加熱的光纖溫度感測器應為首次應用於地下水污染場址的井下水文地質調查。過往雖有光纖溫度量測的相關應用，包括：河道水溫量測（本團隊執行科技部計畫）、裂隙岩體地下水流速量測（本團隊執行科技部計畫）、水文地質參數推估（水規所）、地下水入滲量測（水規所）等，然而均未針對量測水體進行加熱。過去光纖溫度量測之相關應用說明將於計畫書中予以補充說明。此外，「高精度纏繞光纖」與「TV-DTS」的設計與應用，雖然仍是以熱傳輸與光纖連續性量測的優勢為基礎，然而，上述兩種設計之成果，可更進一步提升光纖溫度感測器在空間上之解析度，提供更細緻之資料。在單井的條件下，進行井下高解析度連續性的地下水流向與流速推估，將可大幅提升地下水污染場址調查之精確性，並同時降低人力之成本。據本人瞭解，上述光纖之應用在國內過去並無人進行類似之試驗。
本計畫與已執行完成的計畫之間的差異微何？建議說明。	前一期執行完成的計畫，為台灣首次以光纖溫度感測器進行井下水文地質調查，並以加熱方式針對單井之溫度變化進行解析，判釋不同深度含水層之透水性，其空間解析度可高達 50cm。本年度將針對「跨孔」進行試驗，以線性熱源的加熱方式，判釋地下水流向與透水區段。此外，為解析含水層中的細微構造，本期計畫將自行設計「高精度纏繞光纖」，更進一步提升光



附錄

	纖溫度感測器在空間上之解析度（預計達到 1-2cm 等級），以提供更細緻之資料。最後，本計畫將自行設計 TV-DTS，經由多條光纖之幾何排列，並搭配複合式光纖加熱，針對井下「地下水流向與流速」進行連續性量測。
經費編列偏高（尤其第二年的耗材）。	感謝委員指正。有鑒於在執行前一期的模場計畫時，現地試驗環境惡劣，且充滿許多不確定性因素，因此在計畫執行時，實際經費支出超出原先編列之預估經費。因此，本年度在經費編列上，依據前一期的經費編列進行增減，尤其在耗材方面，因涉及「高精度纏繞光纖」與「TV-DTS」的設計、測試及因應現地環境之不確性，預期在此方面之支出將有所增加。此外，有委員建議應測試光纖溫度感測器在不同場址之通用性，本計畫將修正第二年的試驗場址與工作項目，將暫定於「苗栗頭份鎮永貞宮」進行試驗，而此工作項目修正，在現地環境較無法掌握的前提下，儀器設計之修改或優化將依據現地條件進行調整，預期亦會間接導致現地試驗經費（差旅與耗材）的支出增加。修正後的經費將於將於計畫書中予以補充說明。
建議於第二年更換場址，因為原場址已執行過，該法宜評估不同地理現況之場址，以利評估共通用性。	感謝委員建議。由於原先選定之場址，在小區域範圍內已有許多既設井，且背景資料充足，亦有霖昌公司提供過去的水力試驗資料進行比對，經過評估過後，以測試創新的光纖溫度感測器試驗為前提的考量下，為最適當的場址。 為進一步評估主動式光纖感測器在不同地質條件下之適用性，本計畫將修正第二年的試驗場址與工作項目，將暫定於「苗栗頭份鎮永貞宮」進行試驗，並針對此場



加熱式光纖溫度感測器井下跨孔高解析度地下水流速與流向調查

	址內的深井進行量測，以顯示此量測技術之優勢。
計畫主持人去年執行類似計畫，原本工作項目包括井下溫度剖面分佈變化分析、井下透水區段判識、水文地質分層、地下水流向、流速及優勢水流路徑推估等，然而去年研究結果僅分析出不同深度的透水性，本年度又提出以相同場址執行去年未完成的工作項目，因此本案不予推薦。	感謝委員指正。前一期執行完成的計畫，為台灣首次以光纖溫度感測器進行井下水文地質調查，並以加熱方式針對單井之溫度變化進行解析，判釋不同深度含水層之透水性，其空間解析度可高達 50cm。唯一美中不足之處即為地下水流向之判釋，依然需要在多井的條件下方可獲得。 有鑑於此，本年度將針對「跨孔」進行試驗，以線性熱源的加熱方式，判釋地下水流向與透水區段，並瞭解加熱功率與時間所造成之影響半徑。此外，為解析含水層中的細微構造，本期計畫將自行設計「高精度纏繞光纖」，更進一步提升光纖溫度感測器在空間上之解析度（預計達到 1-2cm 等級），以提供更細緻之資料。最後，本計畫將自行設計 TV-DTS，經由多條光纖之幾何排列，並搭配複合式光纖加熱，針對井下「地下水流向與流速」進行連續性量測，並將此試驗之結果與跨孔試驗結果進行比較分析。 雖然兩期計畫均選用同一場址進行試驗，然而，在實質上工作項目上均完全不同，其計畫目的也有所差異。此外，經由前一期計畫執行所累積的經驗，對於場址之狀況較能掌握，經再三評估過後，以測試創新的設計為前提的考量下，應為最適場址。
選擇之場址，請再考量。	感謝委員建議。由於原先選定之場址，在小區域範圍內已有許多既設井，且背景資料充足，亦有霖昌公司提供過去的水力試驗資料進行比對，經過評估過後，以測試創新的光纖溫度感測器試驗為前提的考量下，為最適當的場址。



附錄

	為進一步評估主動式光纖感測器在不同地質條件下之適用性，本計畫將修正第二年的試驗場址與工作項目，將暫定於「苗栗頭份鎮永貞宮」進行試驗，並針對此場址內的深井進行量測，以顯示此量測技術之優勢。
說明清楚，前期進度合理。	感謝委員肯定。
建立之模型宜與場址實測資料比對與驗證。	感謝委員建議。本計畫所建立的數值模式或推估的水文地質參數均會與現地實測或歷史資料進行比對與驗證。
加熱方式應再考量，研究對地下水透水及流向可有細緻調查但可考量測試不同場址之比較。	感謝委員建議。依據地下水污染場址之限制，在無法注水的情形下，以線性熱源進行井下光纖加熱，在不擾動地下水流之情形下，可針對溫度變化進行解析，而線性熱源可提供穩定之熱能，將有助於後續的量化分析，綜合上述優勢，線性熱源可能為目前最佳之加熱方式。本計畫目前僅針對整口井進行加熱，若能克服加熱銅線防水（抗高壓）的問題，將可針對井下不同區段進行加熱（或分段加熱），期能獲得更多的井下資訊。 為進一步評估主動式光纖感測器在不同地質條件下之適用性，本計畫將修正第二年的試驗場址與工作項目，將暫定於「苗栗頭份鎮永貞宮」進行試驗，並針對此場址內的深井進行量測，以顯示此量測技術之優勢。