



## 行政院環境保護署

### 111 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：111 年 05 月 20 日起至

112 年 04 月 30 日止

中 華 民 國 112 年 05 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 邱永嘉教授 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」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

|                                                  |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                   |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計畫年度                                             | 111 年度                                                                                         | 計畫類型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> 先導型 <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別                                             | <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 | 主持人：邱永嘉 NO：A7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                   |
| 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(第2年)                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                   |
| 審查意見                                             |                                                                                                | 執行單位回覆                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| <p>(一) 蔡俊鴻委員</p> <p>1. 研究目的/預期成果之達成度請分點具體展現。</p> |                                                                                                | <p>1. 感謝委員建議。本計畫之研究目的欲(1)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，可透過井下溫度分布進行透水與不透水區段判釋。此外，(2)利用單井加熱與溫度量測，同時推估地下水流向與流速亦為本計畫的重要研究目的之一。</p> <p>預期成果之達成度分點具體說明如下：</p> <p>完成(1)單井主動式加熱複合光纖，提供線性熱源對井中地下水進行之加熱試驗；(2)跨孔主動式加熱複合光纖試驗的破透曲線描繪；(3)經由解析解與數值模式準確且快速的推估不同深度之地下水流速與流向；(4)高精度光纖纏繞設計，針對關鍵地層面進行解析，進一步提高垂向空間解析度至公分等級；(5)克服現地鑽井限制，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；(6)主動式 DTS 加熱試驗綜合運用之適用性分析；(7)建立現地加熱量測方法、試驗工作之標準流程。成果的(1)~(4)主要針對研究目的(1)所規劃設計；而成果的(5)則針對研究目的(2)所規劃。上述研究工作成果與預期計畫目的相符，且達成預期目標之進度。以上分點論述說明將補充於期末報告修正稿中。</p> |                                                                                                   |
| <p>2. 於實驗室測試之數據品質(如:再現性)請說明，並比對現場試驗數據之品質穩定度。</p> |                                                                                                | <p>2. 感謝委員建議。分散式光纖溫度感測器在空間與時間上的解析度與量測頻率與區間有關，高的量測頻率或短的量測區間將導致量</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                   |



|                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>3. 現場試驗於不同深度四方位之溫度測值變異程度不一，請檢視本項技術應用之數據穩定性/變異程度。</p> <p>4. 本計畫之學術/產業/政策面績效請補充。</p> | <p>測溫度準確度的下降。依據廠商儀器實驗室測試報告指出，在空間的解析度為 0.125 公尺，時間的解析度為 1 秒時，具有 0.2°C 的溫度量測精準度，然而，此解析度為在實驗室良好控制下所獲得的結果。經由本研究團隊在現地的評估與實際應用需求，空間的解析度為 0.125 公尺，時間的解析度為 0.5 - 1 分鐘，可達到 0.01°C 以上的溫度量測準確度，此準確度符合本計畫對於資料品質之要求。以上說明將補充於期末報告修正稿中。</p> <p>3. 感謝委員建議。自製研發的 TV-DTS 裝置，主要透過四個方位的光纖溫度量測來判釋水流方向。經由實驗室測試的結果得知，精準調整與確認感測光纖與加熱光纖間之距離，將可提升流速判釋之準確度。此外，藉由結構支架設置，用以固定四個方位的感測光纖及中心加熱光纖之相對位置，可避免後續分析在方位上的誤判。量測數據的穩定性則如審查意見#2 的回覆，空間的解析度設定為 0.125 公尺，時間的解析度為 0.5 - 1 分鐘，可達到 0.01°C 以上的溫度量測準確度。現地試驗結果顯示，不同深度的四個方位感測光纖所呈現的差異性，應該與不同深度地下水流向的些微改變有關。整體而言，判釋的地下水流向均非常一致，亦與前人研究報告相似。以上說明將補充於期末報告修正稿中。</p> <p>4. 感謝委員建議，學術面上，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。參與學生可透過計畫之執行，完成其研究論文。預計包含 1-2 篇國內外研討會論文或國際期刊論文發表及研究團隊養成；產業面上，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。本研究預計完成一項新型專利與一項發明專利的申請，期未來可透過產學合作與技術移轉，提昇產業界在土壤與地下水污染調查與整治的整體能力；政策面上，此創新技術可延伸</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



|                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                          | <p>應用於地質敏感區之水文調查，提供水資源規劃與管理的最佳策略，包括水資源的分配和利用、水源保護、灌溉和排水系統的改進，以及緊急應變計劃等，有效解決台灣水資源匱乏之議題，並減少對環境的干擾。以上說明將補充於期末報告修正稿中。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>(二) 江康鈺委員</p> <p>1. 請補充說明本案加熱式光纖溫度感測器之可信度、靈敏度及穩定度等品質標準，以利瞭解相關技術推廣之參考。尤其是不同場址地質條件，對於熱傳特性之影響，宜予以評析。</p> | <p>1. 感謝委員建議。本研究於現地試驗時，空間的解析度設定為 0.125 公尺，時間的解析度為 0.5 - 1 分鐘，經由外部獨立高精度溫度計校正，可達到 0.01°C 以上的溫度量測準確度。因此，任何溫度變化若大於 0.01°C 以上，均可視為水體流動所導致之溫度變化。此準確度應可符合一般水文地質調查之需求。</p> <p>若將過去本團隊對於兩個不同地質背景條件之地下水污染場址進行模場試驗分析為例，其地質背景分別為紅土坩黏土、礫石夾砂、坩黏土層以及礫石夾砂、坩黏土、砂、坩土、黏土互層。地質條件上之差異，除了反應在水流速度之外，地質材料的熱傳導係數亦為影響熱傳導（或溫度變化）的控制因素之一（兩個場址的地質材料的熱傳導係數範圍分別為 0.51~1.44 W/m/°C 及 0.588~2.279 W/m/°C）。試驗所產出之量測結果顯示，此技術雖然監測井深度、地下水污染物、地質背景略有不同，但在主動式加熱試驗之創新技術依然能有效特徵化地下水層之分層結構，並且能有效分析各深度垂向之流速變化與各深度之透水情形。再納入 ADTS-toolbox 分析軟體後，亦能將地層與光纖纜線之熱傳導係數效應予以濾除，更準確的推估地下水流速。本技術之應用並不受限於單一地下水污染場址之水文地質調查。以上說明將補充於期末報告修正稿中。</p> |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2. 本計畫於現地應用時，有關水力及熱傳相關參數、加熱條件、光纖佈設之原則，以及現地條件之土壤或地質條件等，建議宜研提出標準作業程序供委託單位參考。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p>2. 感謝委員建議。主動式加熱進行試驗時，地質背景無特殊限制，有關水力及熱傳相關參數可參考原始背景岩層資料；光纖設計與製作時，建議可直接加入可導熱之銅線，形成複合式光纖以確保加熱銅線與感測光纖間之距離有一致性。搭配加熱控制系統以提供穩控制之熱源為佳。建議加熱功率為每公尺 20 瓦特以上，以利熱能訊號於地下水層中傳遞，觀測到準確的溫度變化。主動式 DTS 單井加熱與跨井加熱在佈設上應以全井佈設為主以進行透水區段調查，而高解析纏繞光纖與單井 TV-DTS 分別為特定深度細部關鍵構造與深度流速流向調查。詳細的標準作業程序已於期末報告修正稿中補充說明。</p>                                                             |
| <p>(三) 盧至人委員</p> <p>1. 本模場試驗計畫期末報告已說明計畫的執行成果，也已說明計畫的執行流程及試驗方法。</p> <p>2. 本模場試驗計畫期末報告已於 P. 135 說明相關的操作方式，頗具參考意義。</p> <p>3. 計畫執行進度與預定進度相符。</p> <p>4. 研究內容與原訂計畫目的相符。</p> <p>5. 本模場試驗計畫期末報告已依據研究結果提出適當的討論與建議。</p> <p>6. 本模場試驗計畫的整體研究成果符合預期的研究目標。</p> <p>7. 本計畫的執行可以培育土壤/地下水領域的人才(有研究生參與本計畫跨領域與跨機構團隊)。</p> <p>8. 本模場試驗計畫的研究成果:已申請專利或正申請作業中，已有論文發表。</p> <p>9. 本模場試驗計畫符合國內土水污染技術研發的政策，對國內土水領域(整治工程)的發展有所助益。</p> <p>10. 建議說明本技術的限制條件(或不適用的情境)。</p> | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p> <p>4. 感謝委員肯定。</p> <p>5. 感謝委員肯定。</p> <p>6. 感謝委員肯定。</p> <p>7. 感謝委員肯定。</p> <p>8. 感謝委員肯定。</p> <p>9. 感謝委員肯定。</p> <p>10. 感謝委員建議，單井與跨孔加熱試驗過程中，應特別注意加熱系統之供電穩定，以確保單位長度光纖上所提供的加熱功率一致，以利後續的量化分析。在場址的地質條件上，無特殊限制，只要存在既設觀測井，並可全井放置加熱光纖，便可判釋地層中的透水區段或裂隙岩體之透水裂隙位置。以高解析度纏繞光纖進行量測，需特別注意繞光纖半徑與纏繞管柱材質，建議使用開篩透水裝</p> |



|                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>11. 建議蒐集苗栗縣環保局、環保署及顧問公司於永貞宮鄰近區域相關土水調查計畫之資訊，並比對試驗結果，以利驗證本項技術設備之可靠性。</p>    | <p>置，且極不建議使用管徑小於 1.5 吋以下之纏繞光纖；以單井 TV-DTS 試驗並無特殊限制，建議於兩吋以上的既設觀測井且於特定開篩區段間進行試驗，即可判釋地層特定深度之流向與流速。以上說明請參照期末報告 6.1 節。</p> <p>11. 感謝委員建議。模場背景資料參考主要來自於苗栗縣環保局、環保署及顧問公司的相關計畫，包括：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。由於本計畫主要針對含水層之透水區段及地下水流速與流向進行分析研究，因此，霖昌公司多深度水文試驗及鑽探物性分析為主要的參考依據，包括：各個含水層地下水位變動分析與地下水流方向、地質鑽探樣本粒徑分析與推估 K 值彙整、試驗區域 ERT 法調查剖面，以及結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面。</p>                                         |
| <p>(四) 劉沛宏委員</p> <p>1. 相近時期是否有再現性測定的數據，測定時間間隔建議。</p> <p>2. 設備的成本分析資料再補充。</p> | <p>1. 感謝委員建議。雷射分析主機設備為溫度量測的主要分析儀器，依據設備廠商之測試，主機在短時間內（數年內）無需進行任何維護。然而，為求量測溫度之準確性，本團隊均會在進行現地試驗之前，針對雷射分析主機之光子訊號進行測試，確保訊號的品質。在現地試驗時，亦會設立外部獨立高精度溫度計，以利後續的溫度校正。以上說明將補充於期末報告修正稿中。</p> <p>2. 感謝委員建議。本計畫所執行的調查工作，除了人力成本之外，最主要的設備成本為雷射分析主機與光纖纜線。本計畫所使用的光纖纜線均委託國內的相關廠商進行製作，不論在技術上或成本上都領先全球。然而，雷射分析主機的自製研發，經訪查後，國內尚無相關廠商可製造符合科學研究等級需求的分析主機，因此仍須仰賴國外進口。由於此創新調查技術尚未達到商業運轉程度，因此，設備成本的分析仍須等待更多的實測試驗及國內廠商的技術提升，方可準確的進行</p> |



|                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                               | 分析。                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p>(五) 許正一委員(書面意見)</p> <p>1. 本技術之原理似與目標污染物無關，因此建議可在各種水文地質條件下操作，以取得更多數據，至於應用在污染場址的調查，能否以水文調質的破碎程度與否為選址條件，而不是污染物濃度或類別，請參考之。</p> | <p>1. 感謝委員建議。過去曾應用主動式 DTS 加熱試驗調查之某桃園污染場址，本期計畫進一步將其試驗結果與永貞宮場址之主動式加熱試驗相互比較，可發現雖然監測井深度、地下水汙染物、地質背景略有不同，但在此創新技術上依然能在不擾動地下水流的前提下避免影響地下水流，有效高解析度特徵化地下水層之分層結構，並且能有效分析各深度垂向之流速變化與各深度之透水情形。未來若有適合的模場，例如：岩盤或裂隙岩體，可將此技術應用於試驗調查，特徵化其水文地質，延伸此技術於岩體或破碎地質條件之不連續含水層之可行性。</p>   |
| <p>(六) 土污基管會</p> <p>1. 地下水研究中曾經也有用過感測溫度變化的方式，探索污染物的分布，請補充說明水流經過污染物是否會讓水溫產生變化？這些變化是否會造成感測器的干擾？</p>                             | <p>1. 感謝委員建議。過去曾應用主動式 DTS 加熱試驗調查之某桃園污染場址，與永貞宮場址之結果相互比較可發現，兩者皆屬於含氯有機化合物之地下水汙染物場址。目前在現地的測試中並未發現水流經過含氯汙染物會使得水溫產生變化，在數據上也並未出現對溫度感測器的干擾。然目前現地試驗尚未在其他類型之地下水汙染場址進行，未來若需針對此議題進行研析，可事先於實驗室中進行不同汙染物種類在加熱情形下之溫度變化情形，嘗試獲得相關之熱參數，將可進一步評析水流經過汙染物是否會產生水溫變化，進而推估汙染物分布的適用性。</p> |
| <p>專案主持人：_____ (簽名及蓋章)</p>                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                |



# 111 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                        | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質        |                                                                                                                                                              | 專案技術編碼      | LAB - S - I - C1 - P<br>(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)                    | <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型           |                                                                                                                                                              | 研究主題        | <input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 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       | 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 1 年 5 月 2 0 日 起<br>至 民 國 1 1 2 年 4 月 3 0 日 止                         |                                                                                                                                                              |             |                                                                                                |                  |
| 專案主持人                       | 姓名：邱永嘉 E-mail：ycchiu@mail.ntou.edu.tw<br>專線：02-2462-2192#6515<br>手機：0988612599 |                                                                                                                                                              |             |                                                                                                |                  |
| 專/兼任人員                      | 姓名：馬嵩哲 E-mail：peterma258@gmail.com<br>專線：02-2462-2192#6516<br>手機：0910689462    |                                                                                                                                                              |             |                                                                                                |                  |
| 經費分析總表<br>(僅模場試驗專案需填寫兩年度金額) | 專 案 預 估<br>總 經 費                                                               |                                                                                                                                                              | 第一年<br>申請金額 | 第二年<br>申請金額                                                                                    | 編列說明             |
|                             | 1.                                                                             | 人事費用                                                                                                                                                         |             | 688,490                                                                                        | (1~5 項相加之 50%為限) |
|                             | 2.                                                                             | 貴重儀器使用含維護費                                                                                                                                                   |             | 0                                                                                              | (與計畫實驗相關)        |
|                             | 3.                                                                             | 消耗性器材與主要費用                                                                                                                                                   |             | 667,306                                                                                        | (與計畫主體相關)        |
|                             | 4.                                                                             | 其它研究相關費用                                                                                                                                                     |             | 275,893                                                                                        | (含差旅與租賃費用)       |
|                             | 5.                                                                             | 雜項費用                                                                                                                                                         |             | 4,956                                                                                          | (1~6 項相加之 5%為限)  |
|                             | 6.                                                                             | 行政管理費                                                                                                                                                        |             | 163,355                                                                                        | (1~5 項相加之 10%為限) |
|                             | 7.                                                                             | 自籌款                                                                                                                                                          |             | 0                                                                                              | (申請單位自行籌備款項)     |
|                             | 申請補助金額(1~6 項)                                                                  |                                                                                                                                                              |             | 1,800,000                                                                                      | 總金額：1,800,000    |
| 計畫總金額(1~7 項)                |                                                                                |                                                                                                                                                              | 1,800,000   | 總金額：1,800,000                                                                                  |                  |

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，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)





# 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

## 111 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   | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質                          | 專案類別  | <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型 |
| 研究主題   | <input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 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 | <input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末 |       |                                                                      |

### 二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

#### (一) 學術面

| 項目                       |                | 目標達成程度   | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後<br>半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術<br>產出發表名稱)                                                                                                      |
|--------------------------|----------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A<br>學術<br>產出<br>及<br>活動 | 1.國內投稿<br>(篇數) | (1)論文    |           |           |           |                  |                                                                                                                                   |
|                          |                | (2)研討會論文 | 2         | 2         | 2         |                  | 第十四屆地下水資源及水質保護研討會及臺灣地下水暨水文地質學會年會：<br>1. 「高解析度光纖溫度感測於地下水透水分佈之應用」(O-C1-001)<br>2. 「以主動式加熱光纖溫度感測器進行地下水污染場址單井與跨孔地下水流速與流向調查」(P-C1-001) |
|                          | 2.國外投稿<br>(篇數) | (1)期刊論文  | 1         | 0         | 0         | 1                |                                                                                                                                   |
|                          |                | (2)研討會論文 |           |           |           |                  |                                                                                                                                   |
|                          | 3.報告<br>(篇數)   | (1)技術報告  |           |           |           |                  |                                                                                                                                   |
|                          |                | (2)研究報告  | 1         | 0         | 1         |                  |                                                                                                                                   |



| 項目                |                         |           | 目標達成程度 | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後<br>半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術<br>產出發表名稱) |
|-------------------|-------------------------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|------------------|------------------------------|
| B<br>人才<br>培<br>育 | 4.專著 (本數)               |           |        |           |           |           |                  |                              |
|                   | 5.辦理學術<br>會議(場數)        | (1)研討/說明會 |        |           |           |           |                  |                              |
|                   |                         | (2)成果發表會  |        |           |           |           |                  |                              |
|                   |                         | (3)論壇     |        |           |           |           |                  |                              |
|                   | 6.研發改良<br>技 術 ( 項<br>數) | (1)已開發技術  | 1      | 0         | 1         |           |                  |                              |
|                   |                         | (2)技術平台   |        |           |           |           |                  |                              |
|                   | 7.研發人員<br>(人數)          | (1)碩士     | 2      | 0         | 2         |           |                  |                              |
| (2)博士             |                         |           |        |           |           |           |                  |                              |
| 8.研究團隊<br>(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 |        |           |           |           |                  |                              |
|                   |                         | (4)形成實驗室  |        |           |           |           |                  |                              |
| 9.其他指標<br>(請自行命名) |                         | (請自填)     |        |           |           |           |                  |                              |

## (二) 產業面

| 項目          |              |     |       | 目標達成程度 | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或專利、技術<br>轉移相關詳細資料)                                                |
|-------------|--------------|-----|-------|--------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| A 智慧<br>財產權 | 1.專利<br>(件數) | 已核准 | 發明    |        | 1         | 0         | 0         | 1            | 已送出發明<br>專利申請，正<br>在審查中(預<br>計五月得知<br>結果)                                        |
|             |              |     | 新型/設計 |        | 2         | 2         | 0         |              | 1. 新 型 第<br>M631526 號：<br>光纖纏繞水<br>溫量測裝置<br>2. 新 型 第<br>M631579 號：<br>流體監測裝<br>置 |
|             |              |     | 合計    |        | 3         | 2         | 0         | 1            |                                                                                  |
|             |              | 申請中 | 發明    |        |           |           |           |              |                                                                                  |
|             |              |     | 新型/設計 |        |           |           |           |              |                                                                                  |
|             |              |     | 合計    |        |           |           |           |              |                                                                                  |
|             |              |     |       |        |           |           |           |              |                                                                                  |



| 項目 \ 目標達成程度       |                   |                   | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| B 研發技術轉移          | 2.先期技術<br>成果移轉    | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 授權金(仟元)           |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 衍 生 利 益 金<br>(仟元) |           |           |           |              |                               |
|                   | 3.技術移轉<br>(專利)    | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 授權金(仟元)           |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 衍生利益金<br>(仟元)     |           |           |           |              |                               |
|                   | 4.技術移轉<br>(應用技術)  | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 授權金(仟元)           |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 衍 生 利 益 金<br>(仟元) |           |           |           |              |                               |
|                   | 5.可移轉<br>產業技術     | (1)技術(件數)         |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | (2)品種/系<br>(件數)   |           |           |           |              |                               |
| C 產學研<br>合作       | 6.促 成 合 作<br>研究   | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 金額(仟元)            |           |           |           |              |                               |
|                   | 7.促成投資            | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 投資金額<br>(仟元)      |           |           |           |              |                               |
|                   | 8.促 成 取 得<br>業界科專 | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                   | 業界投資金額<br>(仟元)    |           |           |           |              |                               |
| 9.其他指標<br>(請自行命名) |                   | (請自填)             |           |           |           |              |                               |

### (三) 政策面

| 項目 \ 目標達成程度 |         |        | 申請預<br>估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或其他詳細資料) |
|-------------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------------|
| A 服務        | 1. 技術服務 | 次數     |           |           |           |              |                        |
|             |         | 收入(仟元) |           |           |           |              |                        |



|                   |                  |        |  |  |  |  |  |
|-------------------|------------------|--------|--|--|--|--|--|
| 便民                | 2.諮詢服務           | 次數     |  |  |  |  |  |
|                   |                  | 收入(仟元) |  |  |  |  |  |
| B<br>政策<br>推動     | 3.協助政府<br>推動(件數) | (1)政策  |  |  |  |  |  |
|                   |                  | (2)法規  |  |  |  |  |  |
| C<br>技術<br>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<br>(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。參與學生可透過計畫之執行，完成其研究論文。預計包含1-2篇國內外研討會論文或國際期刊論文發表及研究團隊養成。

**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。本研究預計完成一項新型專利與一項發明專利的申請，期未來可透過產學合作與技術移轉，提昇產業界在土壤與地下水污染調查與整治的整體能力

**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)**

政策面上，此創新技術可延伸應用於地質敏感區之水文調查，提供水資源規劃與管理的最佳策略，包括水資源的分配和利用、水源保護、灌溉和排水系統的改進，以及緊急應變計劃等，有效解決台灣水資源匱乏之議題，並減少對環境的干擾。







## 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，本研究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，並以主動式加熱方式，搭配自製研發高解析度纏繞光纖及單井流向與流速測定儀 (thermal vector DTS, TV-DTS)，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，判釋井下透水區段，並推估地下水流流向與流速。前一年度已針對場址內的淺部（第一含水層）進行試驗與分析，本年度將針對深部（第二含水層）進行試驗與分析，並將兩年度之整體成果彙整後進行綜合討論與分析。

單井流速分析結果顯示，深度 17~19 公尺、37~40 公尺及 42~52 公尺為最為透水之地層；在深度 23~28 公尺則為最不透水區域；深度 5~15 公尺、19~35 公尺及 70~80 公尺周圍的地層相對較不透水。流速推估結果顯示，深度 18~20 公尺、35~40 公尺及 40~52 公尺區間的較高流速分佈，最高流速達 1.75-1.95 m/day；深度 20~35 公尺及 53~90 公尺區間則為低流速帶，最低流速為 0.2-0.5 m/day，細微流速特徵（微小流速增加與降低）亦可清楚的顯示於分析結果中。將流速分佈比對文獻報告，其結果與地層岩性分佈一致，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 0.25-0.5 公尺。跨孔熱示蹤劑試驗分析結果顯示，在影響半徑範圍內的下游觀測井水溫，受到加熱井的影響有升溫現象。二維熱-水耦合數值模式模擬與率定顯示，第一含水層的水力傳導係數為  $2.5 \times 10^{-5}$  m/s、熱延散係數為 0.38m。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。高解析度纏繞光纖的現地試驗結果不僅與單井流速分析結果非常一致，同時提升解析度從原來的 25cm 至 1.05cm，使得更細微的溫度變化均可被詳盡的描述。自製研發的 TV-DTS 經過實驗室的優化後成功的應用於現地環境，淺層含水層（深度 8-10 公尺）的地下水流向大致呈現由東北往西南方向流動，深層含水層（深度 38-40 公尺）的地下水流向則大致呈現由北往南方向流動，此結果與前人的調查結果十分吻合。

經由不同污染場址的試驗結果彙整之後，本研究團隊嘗試以主動式 DTS 調查技術，建立水文地質調查方法之標準作業流程，包括：光纖種類、光纖佈設方式、加熱時間、加熱功率、地質條件及限制、試驗流程及應用範圍等，提出參考建議。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，若能夠將此調查技術納入污染場址調查的關鍵技術之一，尤其是針對深層的含水層，更能夠發揮其技術優勢。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, accompanied with the self-developed high-resolution wrapped DTS and thermal vector DTS (TV-DTS, 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 7-19 meters, 37-40 meters, and 42-52 meters, while lower velocities located at the depths of 18-20 meters, 35-40 meters, and 40-52 meters. The associated highest and lowest velocities were 1.75-1.95 and 0.2-0.5 m/day, respectively. The permeable/impermeable zones can be clearly identified and the associated spatial resolution can reach to 0.25 - 0.5 m. The cross-borehole heat tracer test with the numerical simulation shows that the hydraulic conductivity and the heat dispersivity is  $2.5 \times 10^{-5}$  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 resolution of temperature could be improved from 25 cm to 1.05 cm and the device can be used for further analysis of the hydrogeological information in small scales. After testing and optimizing TV-DTS in the laboratory, the results of field experiments show that TV-DTS has the capability to detect the groundwater flow direction and velocity simultaneously in a single well. The groundwater flow direction in the first aquifer (depth of 8-10 meters) is roughly from northeast to southwest, while the flow direction in the second aquifer (depth of 38-40 meters) is roughly from north to south, which is consistent with previous investigations.

After comprehensive analysis of the results from different tested sites, the standard procedures and limintation of applying the active-DTS at the groundwater contaminated sites, including the fiber-optic cable selection, cable deployment, heating



duration and power, geological conditions, and experimental procedures, were addressed. 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

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 111 年度專案成果績效自評表.....            | 1  |
| 研究成果中文摘要 .....                  | 1  |
| 研究成果英文摘要 .....                  | 1  |
| 一、    前言 .....                  | 1  |
| 二、    研究目的 .....                | 1  |
| 三、    文獻探討 .....                | 3  |
| 四、    研究方法與過程 .....             | 9  |
| 4-1 熱傳輸解析解.....                 | 9  |
| 4-2 A-DTS Toolbox 原理與使用介紹.....  | 10 |
| 4-3 地下水熱-水耦合數值模式 .....          | 13 |
| 4-3-1 三維地下水流數值模式（MODFLOW） ..... | 13 |
| 4-3-2 三維地下水溶質傳輸模式（MT3DMS） ..... | 14 |
| 4-3-3 熱傳輸與溶質傳輸之轉換.....          | 15 |
| 4-4 分散式光纖溫度感測器基本元件與延伸配件 .....   | 15 |
| 4-5 主動式光纖加熱系統.....              | 18 |
| 4-6 高精度纏繞光纖試驗.....              | 20 |
| 4-7 流速與流向試驗.....                | 22 |
| 4-8 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖） .....   | 25 |
| 4-9 模場概況.....                   | 26 |
| 五、    結果 .....                  | 33 |
| 5-1 現地試驗設計.....                 | 33 |
| 5-2 溫度剖面分析.....                 | 39 |



|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 5-2-1 K00268 單井加熱試驗 .....                   | 39  |
| 5-2-2 K00268 單井流速分析 .....                   | 46  |
| 5-2-3 K00268 之 ADTS-Toolbox 分析 .....        | 53  |
| 5-2-4 單井流速分析與 A-DTS Toolbox 結果之比較 .....     | 63  |
| 5-3 跨孔熱示蹤劑試驗.....                           | 66  |
| 5-3-1 第一次試驗下游觀測井 K00264 溫度剖面量測(淺層).....     | 66  |
| 5-3-2 第二次試驗下游觀測井 K00264 溫度剖面量測(淺層與深層)<br>72 |     |
| 5-4 數值模式模擬.....                             | 77  |
| 5-4-1 模式建置 .....                            | 77  |
| 5-4-2 第一次試驗模擬結果 .....                       | 80  |
| 5-4-3 第二次試驗模擬結果 .....                       | 81  |
| 5-4-4 參數敏感度分析 .....                         | 85  |
| 5-5 高解析度纏繞光纖.....                           | 87  |
| 5-5-1 高解析度纏繞光纖設計 .....                      | 87  |
| 5-5-2 現地試驗結果 .....                          | 90  |
| 5-5-3 高精度纏繞光纖優化 .....                       | 93  |
| 5-6 Thermal Vector – DTS (TV-DTS).....      | 97  |
| 5-6-1 TV-DTS 結構設計 .....                     | 97  |
| 5-6-2 TV-DTS 實驗室測試結果 .....                  | 100 |
| 5-6-3 TV-DTS 現地試驗設計 .....                   | 103 |
| K00264 現地試驗設計(淺層) .....                     | 103 |
| K00268 現地試驗設計(深層) .....                     | 103 |
| 5-6-4 TV-DTS 試驗結果分析 .....                   | 106 |



|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| TV-DTS K00264 試驗結果(淺層) .....                            | 106 |
| TV-DTS K00268 試驗結果(深層) .....                            | 113 |
| 5-6-5 流向結果分析 .....                                      | 120 |
| TV-DTS K00264 擬合結果(淺層) .....                            | 120 |
| TV-DTS K00268 擬合結果(深層) .....                            | 125 |
| 5-6-6 流速與流向分析綜整 .....                                   | 130 |
| 六、 討論 .....                                             | 132 |
| 6-1 不同場址條件下，主動式 DTS 加熱試驗之適用性分析 .....                    | 132 |
| 地質背景條件 .....                                            | 132 |
| 水文地質條件 .....                                            | 132 |
| 熱傳導係數 .....                                             | 133 |
| 污染物種類 .....                                             | 133 |
| 深淺層的適用性 .....                                           | 133 |
| 流速快慢或分佈 .....                                           | 133 |
| 6-2 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<br>試驗之標準流程..... | 136 |
| 光纖種類 .....                                              | 136 |
| 單井流速分析與跨孔熱示蹤劑試驗 .....                                   | 136 |
| 高解析度纏繞光纖 .....                                          | 137 |
| 單井 TV-DTS 試驗 .....                                      | 138 |
| 七、 結論與建議 .....                                          | 140 |
| 7-1 結論 .....                                            | 140 |
| 現地調查結果 .....                                            | 140 |
| 調查技術發展 .....                                            | 141 |



|               |     |
|---------------|-----|
| 7-2 建議 .....  | 143 |
| 八、 參考文獻 ..... | 144 |
| 九、 附錄 .....   | 151 |



## 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 .....                                                                                                                                                                                                                              | 8  |
| 圖 6 (a) TVP 理示意圖 (b) TVP 儀器照片 (摘自 Pehme et al., 2014) .....                                                                                                                                                                                                             | 8  |
| 圖 7 ADTS 測量期間收集的熱反應曲線 (黑線) 的解釋原理 (Simon et al. 2021)。黑色虛線對應於溫度的對數導數。當 $t_c < t < t_d$ 時，傳導主導期間的溫升 $\Delta T_{PM}$ 在到 $q=0$ m/s (灰線) 可以使用移動瞬時線性熱源 (Moving Instantaneous Line Source, MILS) 模型的重現。接下來在地下水流影響 (紅線) 的情況下，可以使用 MILS 模型重現熱傳導主導以及平流主導時期的 $\Delta T_{PM}$ ..... | 11 |
| 圖 8 MODFLOW 網格劃分元素示意圖 (McDonald and Harbaugh, 1988) .....                                                                                                                                                                                                               | 14 |
| 圖 9(a)XT-DTSTM, Silixa Ltd (b) Ultima-DTSTM, Silixa Ltd.....                                                                                                                                                                                                            | 17 |
| 圖 10 加熱光纖纜線及其剖面示意圖(祥林科技).....                                                                                                                                                                                                                                           | 17 |
| 圖 11 光纖加熱控制系統: (a) 系統外觀，(b) 系統內部配置 .....                                                                                                                                                                                                                                | 19 |
| 圖 12 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖 .....                                                                                                                                                                                                                                         | 19 |
| 圖 13 (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) .....                                                                                                                                                   | 21 |
| 圖 14 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.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 21 |
| 圖 15 TV-DTS 設計示意圖.....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 23 |
| 圖 16 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 $\psi$ ，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 $\theta$ ，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)..... | 24 |
| 圖 17 溫度反應曲線(點位 $x=0.03, y=0, z=0.03$ )，(a)達西通量為 $10^{-6} \text{ m/s}$ ，(b) 達西通量為 $10^{-5} \text{ m/s}$ (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018) ....                                                                                                                                                                | 24 |
| 圖 18 先導試驗區域場址配置規劃與現況示意圖 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 |
| 圖 19 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).....                                                                                                                                                                                                                                                            | 29 |
| 圖 20 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).....                                                                                                                                                                                                                                                        | 30 |
| 圖 21 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).....                                                                                                                                                                                                                                                            | 31 |
| 圖 22 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).....                                                                                                                                                                                                                                                            | 31 |
| 圖 23 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).....                                                                                                                                                                                                                                                            | 32 |
| 圖 24 模場監測井配置圖 (藍線為第二次試驗光纖佈設示意圖) .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 34 |
| 圖 25 第一次試驗光纖纜線佈設示意圖 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 35 |
| 圖 26 第二次試驗光纖纜線佈設示意圖 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 36 |
| 圖 27 第一次試驗現地配置照片(A)試驗井配備 (B)井 K00264(左)與 K00268(右).....                                                                                                                                                                                                                                                       | 37 |
| 圖 28 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..                                                                                                                                                                                                                 | 38 |



- 圖 29 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) ..... 43
- 圖 30 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) ..... 44
- 圖 31 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) ..... 45
- 圖 32 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估第一次試驗的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 ..... 50
- 圖 33 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估第二次試驗的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 ..... 51
- 圖 34 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估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)..... 52
- 圖 35 A-DTS Toolbox 絕對流速與熱傳導係數隨深度變化：第一次試驗 (4 月)(a)流速分析結果 (b) 熱傳導係數分析結果 第二次試驗 (11 月) (c)流速分析結果 (d) 熱傳導係數分析結果 ..... 57
- 圖 36 A-DTS Toolbox 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)..... 58
- 圖 37 試驗流速分析之絕對流速隨深度變化比較(a)第一次試驗 (b) 第二次試驗(黑線為熱傳輸解析公式流速，紅線為 A-DTS Toolbox 流速) ..... 65
- 圖 38 第一次試驗加熱井 K00268(深度 10m)與觀測井 K00264(深度 10m)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) ..... 68
- 圖 39 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)                                                                                                      | 68 |
| 圖 40 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)                                                                              | 69 |
| 圖 41 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) | 70 |
| 圖 42 第一次試驗 K00264 各深度累積溫差圖與 K00268 流速解析                                                                                       | 71 |
| 圖 43 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                                                                               | 74 |
| 圖 44 第二次試驗各井水溫變化(以實體溫度計進行量測)                                                                                                  | 75 |
| 圖 45 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)                                                                  | 75 |
| 圖 46 加熱功率與影響半徑關係                                                                                                              | 76 |
| 圖 47 第二次試驗數值模式網格劃分                                                                                                            | 78 |
| 圖 48 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)                                                                          | 79 |
| 圖 49 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果                                                                                                      | 81 |
| 圖 50 第二次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果 (RMSE = $4.08 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}$ )                                                      | 82 |
| 圖 51 地下水流場模擬結果：(a)初始水位 (b)最終模擬水位                                                                                              | 83 |
| 圖 52 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                                                              | 83 |
| 圖 53 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                                                | 84 |
| 圖 54 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線驗證結果(RMSE= $2.5 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}$ )                                                         | 85 |



|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 圖 55 參數敏感度分析 (a)水平水力傳導係數 (b)延散係數 .....                                     | 86  |
| 圖 56 高解析度纏繞光纖示意圖 .....                                                     | 88  |
| 圖 57 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).....         | 89  |
| 圖 58 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 .....                | 91  |
| 圖 59 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 .....      | 91  |
| 圖 60 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 ..... | 92  |
| 圖 61 高解析度纏繞光纖 (a)纏繞裝置俯視圖(b)纏繞裝置側視圖(c)選管材.....                              | 94  |
| 圖 62 高解析度纏繞光纖試驗設置 (a)不同管徑試驗 (b)不同管材試驗 .....                                | 95  |
| 圖 63 高解析度纏繞光纖試驗結果 (a)不同管徑 (b)不同管材 .....                                    | 96  |
| 圖 64 TV-DTS 新型設計概念 (a)TV-DTS 固定圓盤 (b) TV-DTS 支架(c)光纖固定於聚四氟乙烯支架之示意圖 .....   | 98  |
| 圖 65 TV-DTS 成品 (a)TV-DTS 全長 (b)各方位與置中之加熱光纖.....                            | 99  |
| 圖 66 新型 TV-DTS 結構監測光纖相對位置圖 .....                                           | 99  |
| 圖 67 室內實驗設置 (a) TV-DTS 架設全景 (b)注水示意圖 .....                                 | 100 |
| 圖 68 室內實驗加熱光纖與監測光纖相對位置圖 .....                                              | 101 |
| 圖 69 室內實驗加熱後各方位之溫差 .....                                                   | 102 |
| 圖 70 K00264(淺井)TV-DTS 試驗儀器設置(a) 示意圖 (b)現場照片 ..                             | 105 |
| 圖 71 K00268(深井)TV-DTS 試驗儀器設置 (a) 示意圖 (b)現場照片                               | 105 |
| 圖 72 K00264 第一次試驗深度 8 公尺各方位溫差 .....                                        | 108 |
| 圖 73 K00264 第一次試驗 深度 9 公尺各方位溫差 .....                                       | 108 |



|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 圖 74 K00264 第一次試驗 深度 10 公尺各方位溫差 ..... | 108 |
| 圖 75 K00264 第二次試驗深度 8 公尺各方位溫差 .....   | 111 |
| 圖 76 K00264 第二次試驗深度 9 公尺各方位溫差 .....   | 111 |
| 圖 77 K00264 第二次試驗 深度 10 公尺各方位溫差 ..... | 112 |
| 圖 78 K00268 第一次試驗深度 38 公尺處各方位溫差 ..... | 114 |
| 圖 79 K00268 第一次試驗深度 39 公尺處各方位溫差 ..... | 115 |
| 圖 80 K00268 第一次試驗深度 40 公尺處各方位溫差 ..... | 115 |
| 圖 81 K00268 第二次試驗深度 38 公尺處各方位溫差 ..... | 118 |
| 圖 82 K00268 第二次試驗深度 39 公尺處各方位溫差 ..... | 118 |
| 圖 83 K00268 第二次試驗深度 40 公尺處各方位溫差 ..... | 119 |
| 圖 84 K00264 深度 8 公尺各方位擬和之結果 .....     | 122 |
| 圖 85 K00264 深度 9 公尺各方位擬和之結果 .....     | 123 |
| 圖 86 K00264 深度 10 公尺各方位擬和之結果 .....    | 123 |
| 圖 87 K00268 深度 8 公尺各方位擬和之結果 .....     | 127 |
| 圖 88 K00268 深度 9 公尺各方位擬和之結果 .....     | 128 |
| 圖 89 K00268 深度 10 公尺各方位擬和之結果 .....    | 128 |



## 表次

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 1 XT-DTS 與 Ultima-DTS 資訊 .....                                 | 17  |
| 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) .....               | 30  |
| 表 3 試驗井之基本資訊 .....                                               | 37  |
| 表 4 熱傳輸解析參數 .....                                                | 47  |
| 表 5 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估二次試驗不同深度之流速與對應之擬合均方根誤差 ..... | 48  |
| 表 6 常見土壤岩石熱傳導係數(修改自 Feng et al., 2009) .....                     | 53  |
| 表 7 以 A-DTS Toolbox 推估二次試驗不同深度之流速與對應之擬合均方根誤差 .....               | 59  |
| 表 8 以 A-DTS Toolbox 推估二次試驗不同深度之熱傳導係數與對應之擬合均方根誤差 .....            | 61  |
| 表 9 第二次試驗參數設定 .....                                              | 79  |
| 表 10 期中報告參數設定 .....                                              | 80  |
| 表 11 室內實驗各方位之最大溫差、平均溫差及累積溫度(°C) .....                            | 102 |
| 表 12 K00264 第一次試驗 8-10m 各方位最大溫差(°C) .....                        | 109 |
| 表 13 K00264 第一次試驗 8-10m 各方位累積溫度(°C) .....                        | 109 |
| 表 14 K00264 第二次試驗 8-10m 各方位最大溫差(°C) .....                        | 112 |
| 表 15 K00264 第二次試驗 8-10m 各方位累積溫度(°C) .....                        | 112 |
| 表 16 K00268 第一次試驗 38-40m 各方位最大溫差(°C) .....                       | 116 |
| 表 17 K00268 第一次試驗 38-40m 各方位累積溫度(°C) .....                       | 116 |
| 表 18 K00268 第二次試驗 38-40m 各方位最大溫差(°C) .....                       | 119 |
| 表 19 K00268 第二次試驗 38-40m 各方位累積溫度(°C) .....                       | 119 |



## 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 20 流速與流向解析之相關參數設定 .....                             | 122 |
| 表 21 K00264 模擬 8-10m 各方位最大溫差(°C).....                 | 124 |
| 表 22 K00264 模擬 8-10m 各方位累積溫度(°C).....                 | 124 |
| 表 23 K00264 8-10m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速 .....              | 124 |
| 表 24 K00268 模擬 38-40m 各方位最大溫差(°C).....                | 129 |
| 表 25 K00268 模擬合 38-40m 各方位累積溫度(°C).....               | 129 |
| 表 26 K00268 試驗 38-40m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速.....           | 129 |
| 表 27 不同試驗場址背景比較 .....                                 | 135 |
| 表 28 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 試驗之設定建議..... | 139 |



## 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。

本研究計畫透過本計畫之研究目的欲（1）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，可針對透過井下溫度分布進行與透水與不透水區段進行判釋。此外，（2）利用單井加熱與溫度量測，同時推估地下水流向與流速亦為本計畫的重要研究目的之一。

以下為預期成果之達成度分點具體說明如下：

完成(1) 單井主動式加熱複合光纖，提供線性熱源對井中地下水進行之加熱試驗；(2) 跨孔主動式加熱複合光纖試驗的破透曲線描繪；(3)經由解析解與數值模式準確且快速的推估不同深度之地下水流速與流向；(4)分散式光纖溫度感測器之高精度光纖纏繞設計，針對關鍵地層面進行解析，進一步提高垂向空間解析度至公分等級；(5)克服現地鑽井限制，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；(6)主動式 DTS 加熱試驗綜合運用之適用性分析；(7)建立現地加熱量測方法、試驗工作之標準流程。成果的（1）～（4）主要針對研究目的（1）所規劃設計；成果的（5）則針對研究目的（2）所規劃。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纖（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°C。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%）。

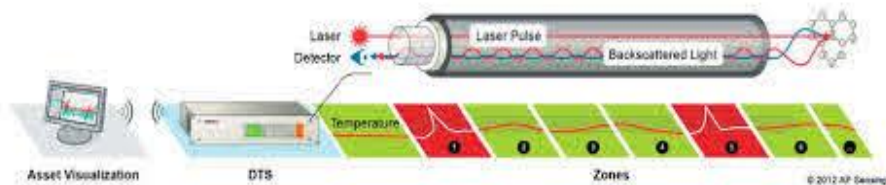


圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖

（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，透過統計分析方法辨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，



## 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

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



## 文獻探討

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。

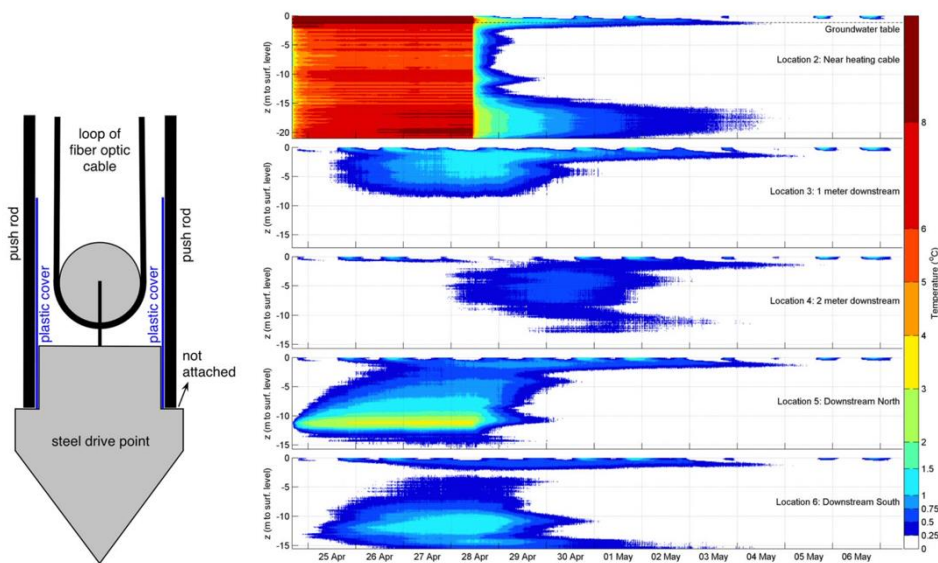


圖 2 (a) 以 direct push 方式安裝光纖 (b) 熱示蹤劑試驗下，井下光纖所量測之溫度剖面隨時間之變化（摘自 Bakker et al., 2015）

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，將光纖在垂直方向的量測距離予以壓縮，使得空間上之解析度自公尺或



## 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

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  $0.7^{\circ}\text{C}$  以上，此外，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。

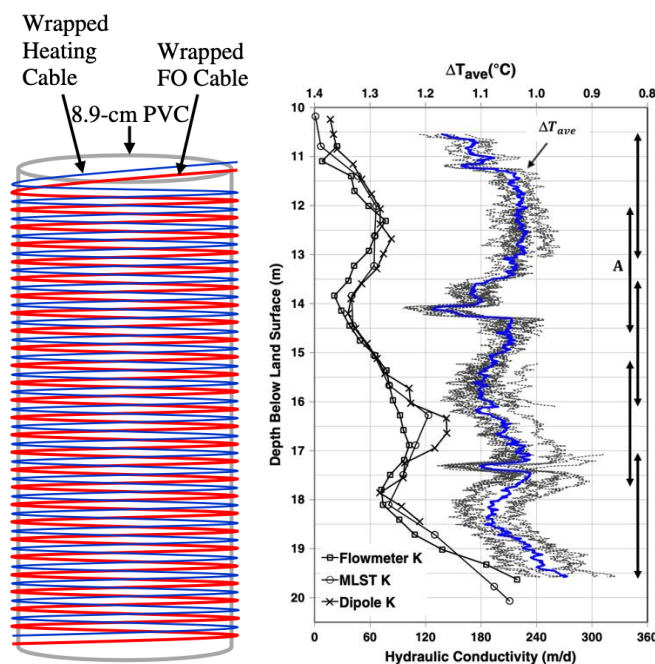


圖 3 (a) 高精度纏繞光纖半徑與能量損失關係圖，(b) 纏繞與筆直光纖量測結果比較 (摘自 Liu et al., 2013)

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



## 文獻探討

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。

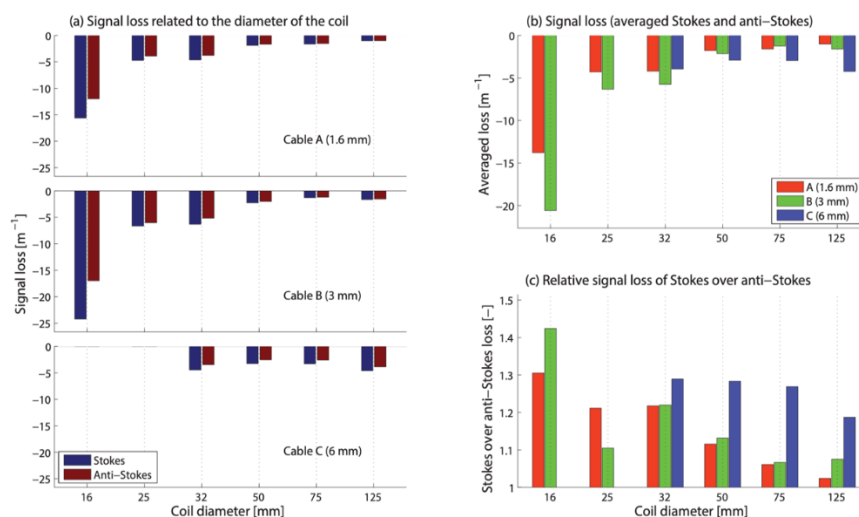


圖 4 高精度纏繞光纖半徑與能量損失關係圖（摘自 Hilgersom et al., 2016）



## 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

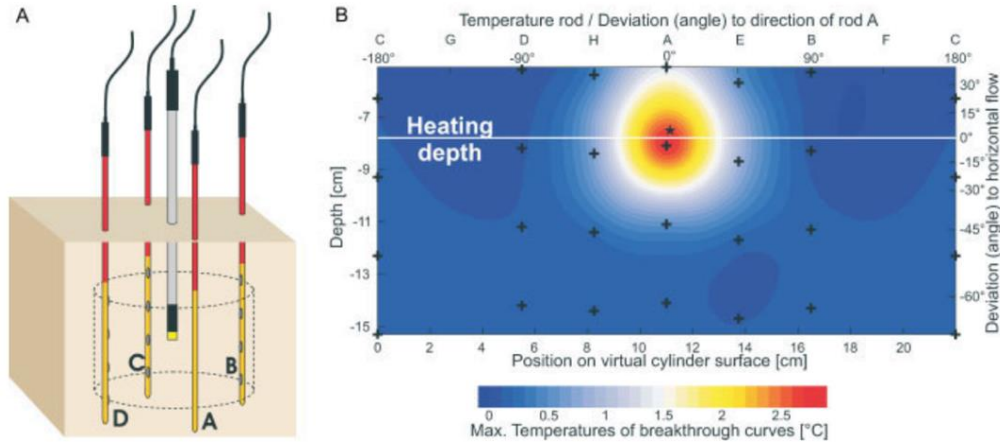


圖 5 (a) 地下水流速與流向儀器設計圖，(b) 伏流水區之溫度場變化

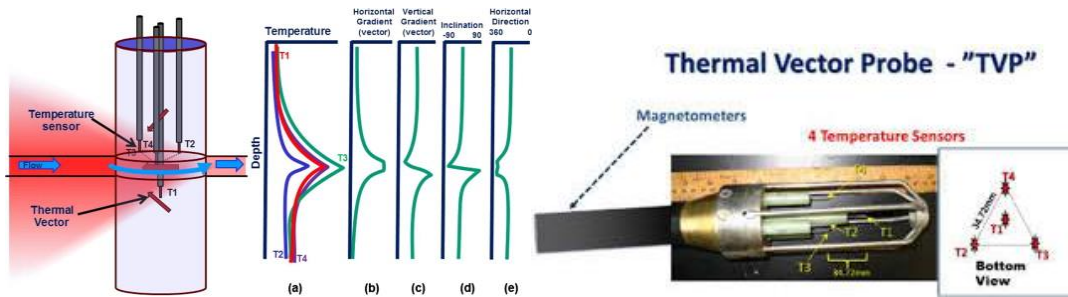


圖 6 (a) TVP 理示意圖 (b) TVP 儀器照片 (摘自 Pehme et al., 2014)



## 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，溫度的變化的函數式(式 4)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)

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



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

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 A-DTS Toolbox 原理與使用介紹

本專案計畫以分散式光纖溫度感測器監測井下溫度變化，並且使用主動式加熱搭配來進行試驗，此主動式分布溫度感測器模式(Active distributed temperature sensing) 對於提供地下含水層特徵化和地下水流之熱傳導係數和空間上的分佈極具潛力(Simon et al., 2021)。除了採用 4-1 節的解析解來量化地下水流速之外，亦採用主動式分布溫度感測器工具箱 (Active distributed temperature sensing toolbox, A-DTS Toolbox) 同步進行分析。A-DTS Toolbox 是由 Simon 和 Bour (2022)所建置開發，利用 Matlab 所編寫而成，可去除光纖纜線批覆層的熱傳導效應，並同時針對井下各深度的熱傳導係數及水流速度進行推估。除此之外，此工具箱可針對推估的熱傳導係數及水流速度進行不確定性分析。

圖 7 為光纖加熱期間，某特定位置預期之典型熱反應曲線(thermal response curve)，溫度變化 ( $\Delta T$ ) 隨時間的演變 (黑線) 及其對數導數 (黑色虛線) 均以對數圖表示。試驗初期所測得的溫度變化( $\Delta T$ )取決於加熱光纖纜線批覆層的熱傳輸特性( $\Delta T_{FO}$ )，並且產生的熱能存儲在光纖纜線內，導致溫度大幅升高 (Simon et al. 2021)，在分析過程中應該予以濾除。一旦熱能自光纖纜線內傳遞至光纖纜線周圍的地質材料時，含水層的多孔介質(porous media)將開始主導熱能傳輸，並以熱傳導(heat conduction)為主。因此，在熱傳導主導影響期間，溫度變化同時受到纜線中的儲熱以及多孔介質中熱傳輸的影響。當  $t > t_c$  時，加熱光纖纜線本身的儲熱不再影響溫度變化，此時，溫度上升完全由多孔介質中的熱傳導和平流(advection)主導。

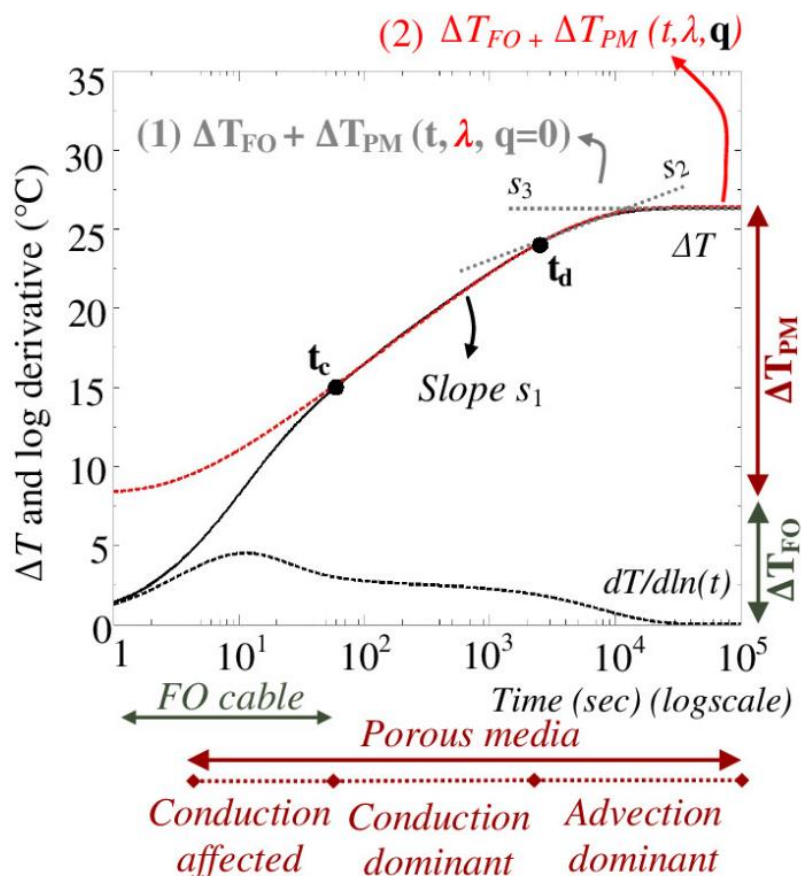


圖 7 ADTS 測量期間收集的熱反應曲線（黑線）的解釋原理（Simon et al. 2021）。黑色虛線對應於溫度的對數導數。當  $t_c < t < t_d$  時，傳導主導期間的溫升  $\Delta T_{PM}$  在到  $q=0$  m/s（灰線）可以使用移動瞬時線性熱源（Moving Instantaneous Line Source, MILS）模型的重現。接下來在地下水流影響（紅線）的情況下，可以使用 MILS 模型重現熱傳導主導以及平流主導時期的  $\Delta T_{PM}$

當  $t > t_c$  時，溫度變化( $\Delta T_{PM}$ )可分為兩個不同的階段：第一階段以熱傳導主導 (conduction-dominant)，自  $t=t_c$  到  $t=t_d$  之間。在此階段可以觀察到溫度逐漸升高（圖 7），溫度升高與地下水流無關，完全由多孔介質的熱傳導係數所主導。第二階段以熱平流主導 (advection-dominant)，發生自  $t > t_d$ 。溫度上升偏離熱傳導時的狀態，溫度上升斜率逐漸下降，表示熱平流主導階段的開始。隨著加熱時間的持續，熱平流限制了溫度上升幅度，導致後期溫度變化逐漸穩定，在溫度穩定並達到最大值  $\Delta T$ （具有斜率為 0 之  $s_3$  的直線）上，表示主動加熱所注入的額外熱能已通過平流完全消散（穩態條件），此時，地下水流速的快慢主導了平衡時溫度的高低。對於固定熱能供給及給定的熱傳導係數中，較高的  $\Delta T$  值可能與較低的地下水通量有關聯，反之亦然（Simon et al., 2021）。



### 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

由於  $\Delta T_{FO}$  在  $t > t_c$  的階段是處於穩定狀態，僅受光纖加熱熱能與光纖纜線特性影響，因此  $\Delta T_{FO}$  數值可以在  $\Delta T_{PM}$  演變出來前利用數學方法先估計出來，一旦設定  $\Delta T_{FO}$  之後，就可以使用移動瞬時線性熱源 (Moving Instantaneous Line Source, MILS) 模型 (Jaeger 和 Carslaw, 1959)，通過考慮初始熱平衡  $T_0$ ，以及沿著 x-y 方向上加熱光纖線性熱源之熱反應  $\Delta T_{PM}(\Delta T = T - T_0)$  給出以下方程式：

$$\Delta T_{PM}(x, y) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \exp \left[ \frac{qx}{2D_t} \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \right] \quad \text{式 8}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp \left[ -\Psi - \left( \frac{x^2 + y^2}{D_t} \right) \frac{q^2}{16D_t\Psi} \frac{\rho_w^2 c_w^2}{\rho^2 c^2} \right] d\Psi}{4tD_t} \quad \text{式 9}$$

其中  $q$  為是給定位置的  $x$  方向地下水通量 (或特定流量) (m/s)； $Q$  是恆定加熱速率功率(W/m)；坐標  $x$  和  $y$  對應於距熱源的距離，而熱源位於  $x=0$  和  $y=0$  處； $\rho c$  為含水層之體積比熱容(J/m<sup>3</sup>/K)而  $\rho_w c_w$  為水之體積比熱容(J/m<sup>3</sup>/K)； $D_t$  為熱延散係數(m<sup>2</sup>/s)； $\lambda$  為體積熱傳導係數(W/m/K)； $\Psi$  為變量。

如圖 7 所示，在假設  $q = 0$  m/s (灰線) 的熱傳導主導期間，首先使用式 8 中對  $t_c < t < t_d$  的升溫進行模型擬合，以推估多孔介質之熱傳導係數。在已知熱傳導係數的情形下，利用熱傳導主導及熱平流主導期間的溫度變化，使用式 9 來估算地下水流速量 (紅線)。



### 4-3 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。

#### 4-3-1 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：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{式 10}$$

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 [ $LT^{-1}$ ]； $w$  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  $\Delta c_i$ 、 $\Delta r_j$  及  $\Delta v_k$ ，劃分情形如圖 8 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：

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad \text{式 11}$$



## 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

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

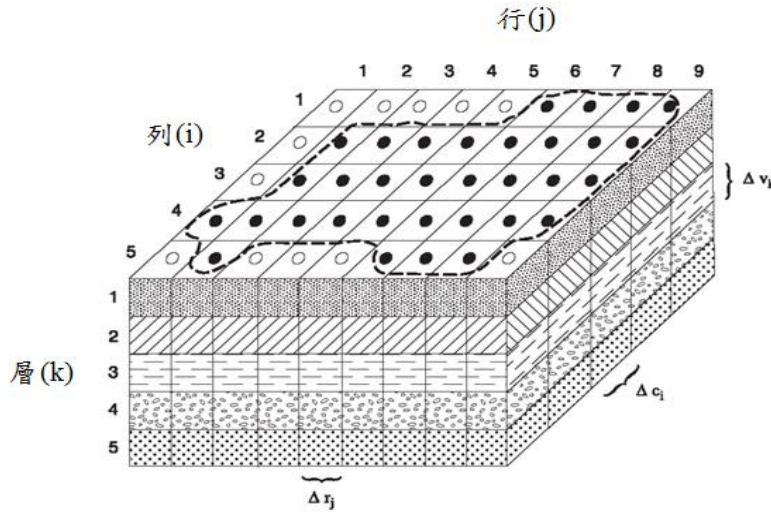


圖 8 MODFLOW 網格劃分元素示意圖 (McDonald and Harbaugh, 1988)

### 4-3-2 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：

$$\frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad \text{式 12}$$

式中， $\theta$ 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



## 研究方法與過程

下水流速[LT<sup>-1</sup>];  $q_s$  為流體於含水層中之單位體積流率[T<sup>-1</sup>];  $C_s^k$  為溶質 k 之釋放或降解通量的濃度[ML<sup>-3</sup>];  $\sum R_n$  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。

### 4-3-3 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 11 改寫為：

$$\left( 1 + \frac{\rho_b K_d^k}{\theta} \right) \frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta (D_m^k + \alpha \frac{q}{\theta}) \cdot \nabla C^k] - \nabla \cdot (q C^k) - q_s' C_s^k \quad \text{式 13}$$

式中， $\rho_b$  為總體密度[ML<sup>-3</sup>],  $K_d^k$  為分佈係數[L<sup>3</sup>M<sup>-1</sup>],  $D_m^k$  為分子擴散係數[[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>],  $\alpha$  為熱延散係數[L],  $q$  為流速[LT<sup>-1</sup>]。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 13 改寫為：

$$\left( 1 + \frac{1-\theta}{\theta} \frac{\rho_s}{\rho} \frac{C_{psolid}}{C_{pfluid}} \right) \frac{\partial(\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \theta \left( \frac{k_{Tbulk}}{\theta \rho C_{pfluid}} + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \cdot \nabla T \right] - \nabla \cdot (q T) - q_s' T_s \quad \text{式 14}$$

### 4-4 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 9a 所示(型號：Silixa Ltd.)，包括：光纖跳線連接口、參



## 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

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 9b 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(RBRsolo<sup>3</sup>T)，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  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，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  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，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 10 加熱型光纖纜線示意圖(製造商：Kaiphone, Taiwan)，亦為本研究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。



## 研究方法與過程

表 1 XT-DTS 與 Ultima-DTS 資訊

|       | XT-DTS <sup>TM</sup> | Ultima-DTS <sup>TM</sup> |
|-------|----------------------|--------------------------|
| 量測距離  | 10km                 | 5km                      |
| 溫度解析度 | 0.01℃                | 0.01℃                    |
| 空間解析度 | 0.25m                | 0.125m                   |
| 量測間隔  | 5s                   | 1s                       |



圖 9(a)XT-DTSTM, Silixa Ltd (b) Ultima-DTSTM, Silixa Ltd

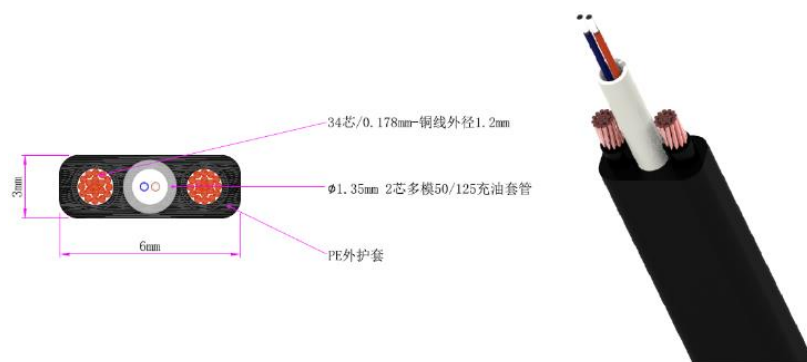


圖 10 加熱光纖纜線及其剖面示意圖(祥林科技)



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

#### 4-5 主動式光纖加熱系統

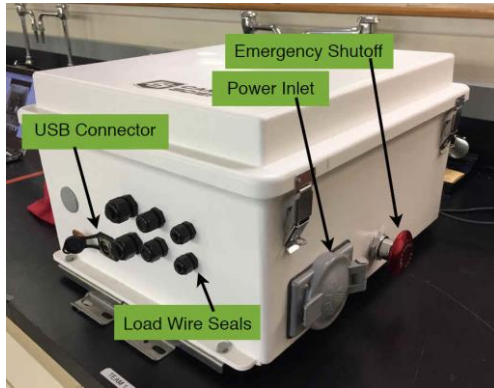
本專案計畫中欲將使用的主動式分散光纖溫度感測器與被動式的感測器相同，皆須使用雷射脈衝分析儀主機與光纖，唯一的差異在於光纖的加熱控制系統（heating pulse controller, HPC），如圖 11。加熱控制系統的組成主要包括：microFusion power controller、relay board、power supply、fuse block、output terminal stripe、circuit break、emergency shutoff、USB connector 及 power inlet。所以的元件都安裝於一防水、可攜式的箱子中（圖 11a），其內部配置如圖 11b。

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 12 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 12 中的 AB 段或 CD 段）。

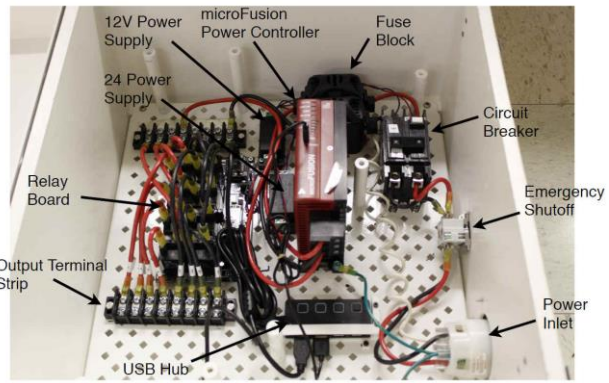
主動式感測器可針對井下地下水流流速較緩慢或溫度變化較不顯著之區段進行加熱，提供一外部熱源，強化熱能傳輸的擴散情形，增加判識細小優勢水流路徑的能力，提昇井下透水區段的解析能力。主動式感測器量測結果亦可提供更多的量測資訊，並與被動式感測器量測結果進行交互驗證，增加分析結果之可信度。此外，主動式分散光纖溫度感測器可配合汙染場址在生物整治灌藥時進行加熱量測，由於主動式感測器可依據需求調整加熱溫度，因此，可藉此瞭解井下含水層在灌藥過程中對於溫度的影響，並評估加熱含水層是否有助於整治成效的提昇，並可藉此評估最適整治操作溫度。



## 研究方法與過程



(a)



(b)

圖 11 光纖加熱控制系統：(a) 系統外觀，(b) 系統內部配置

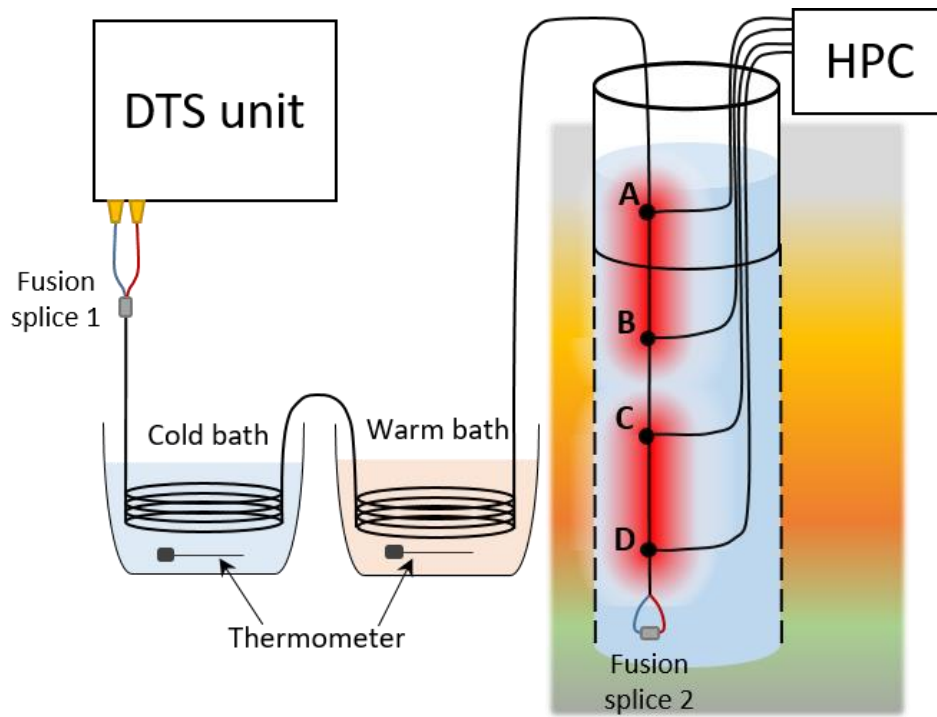


圖 12 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖



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

#### 4-6 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 13a），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住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 13b 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 4 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 13b）。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 14）。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研究之主要目的之一。本研究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。

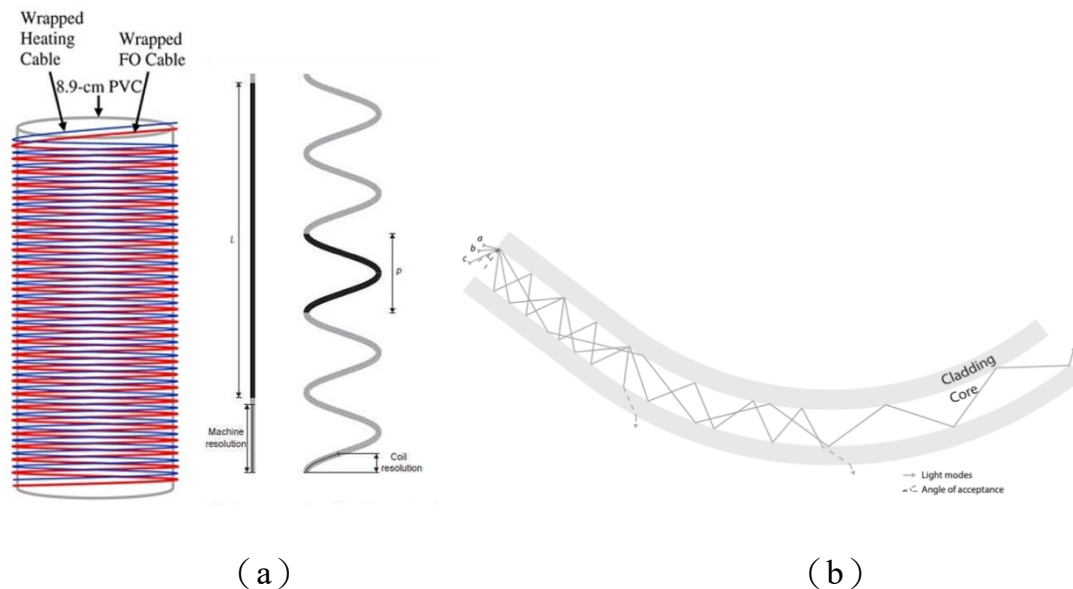


圖 13 (a) 高精度纏繞光纖示意圖（摘自 Liu et al., 2013 與 Hilgersom et al., 2016）(b) 纏繞光纖之能量衰減示意圖（摘自 Hilgersom et al., 2016）



圖 14 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

### 4-7 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，此設計與試驗命名為 thermal vector – DTS (TV-DTS)。TV-DTS 的流速與流向設計如圖 15 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 16) 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：

$$T(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = \begin{cases} T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) & 0 \leq t \leq t_p \\ T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) - T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t - t_p) & t \geq t_p \end{cases} \quad \text{式 15a}$$

$$T(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = \frac{E / (\rho c)}{8\pi D_T t_p R} e\bar{z} [e^{-\bar{R}} \operatorname{erfc}(\frac{R - Vt}{2\sqrt{D_L t}}) + e\bar{R} \operatorname{erfc}(\frac{R + Vt}{2\sqrt{D_L t}})] \quad \text{式 15b}$$

$$R = \sqrt{\frac{D_L}{D_T} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \tilde{z}^2}, \quad \bar{z} = \frac{\tilde{z}V}{2D_L}, \quad \bar{R} = \frac{RV}{2D_L} \quad \text{式 15c}$$



## 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 17。

$$T = \frac{E/l\rho c}{8\pi\gamma D_T t} \exp\left[-\frac{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}{4D_T t} - \frac{(\tilde{z} - Vt)^2}{4D_L t} + \frac{\beta^2}{\alpha}\right] [\text{erf}(\eta_+) - \text{erf}(\eta_-)], \quad \text{式 16a}$$

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

$$\gamma = \sqrt{(D_L/D_T)\sin^2\theta + \cos^2\theta} :$$

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \beta/\sqrt{\alpha} = (\tilde{z} - Vt)/\sqrt{4D_L t} \quad \text{式 16b}$$

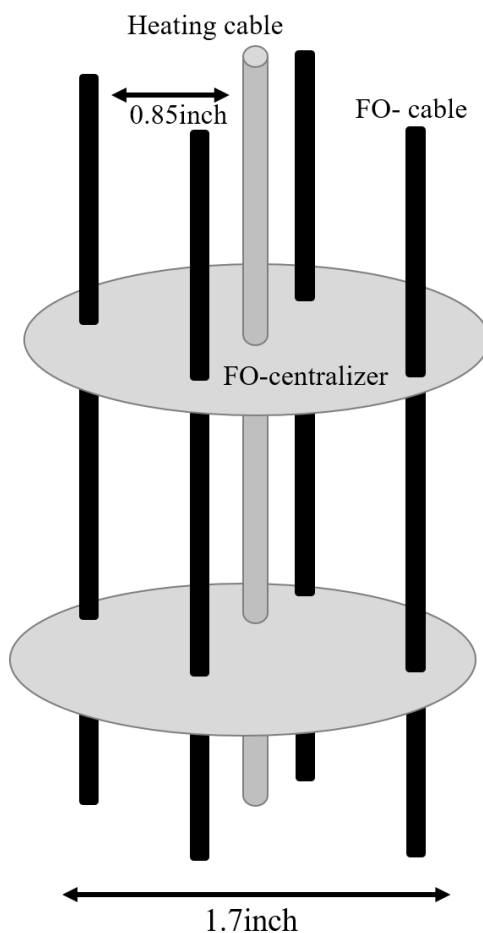


圖 15 TV-DTS 設計示意圖



# 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

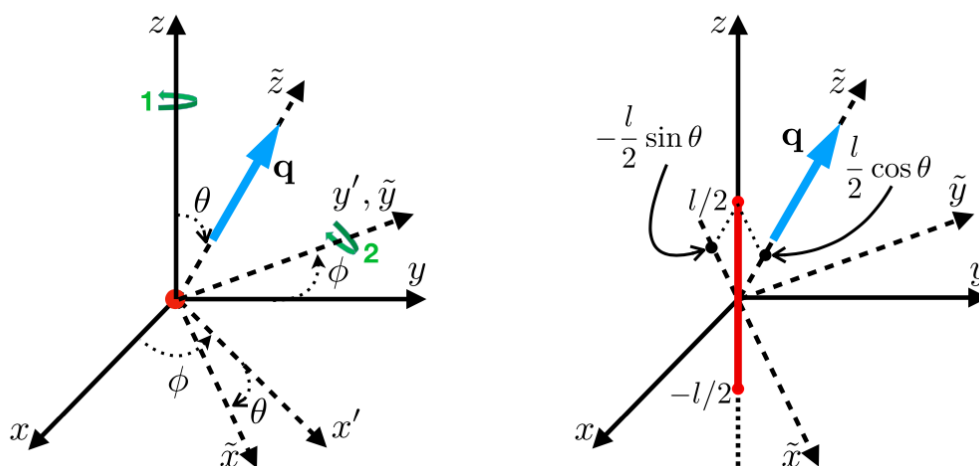


圖 16 座標轉換：(a) 點熱源(實線與虛線分別為 $(x, y, z)$ 與 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 正交座標系統。變化後的 $\tilde{z}$ 方向指向達西通量(藍色箭頭)。座標系統的轉換主要透過兩次座標軸旋轉所完成，(1)沿著 $z$ 軸逆時針選轉角度 $\psi$ ，將 $(x, y, z)$ 座標系統轉換為 $(x', y', z')$ ，(2)沿著 $y'$ 軸逆時針選轉角度 $\theta$ ，並以向量 $q$ 對齊新 $z'$ 軸。其中， $\tilde{x}, \tilde{z}$ 與 $z$ 軸坐落於同一平面，座標軸原點為點熱源)

(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)

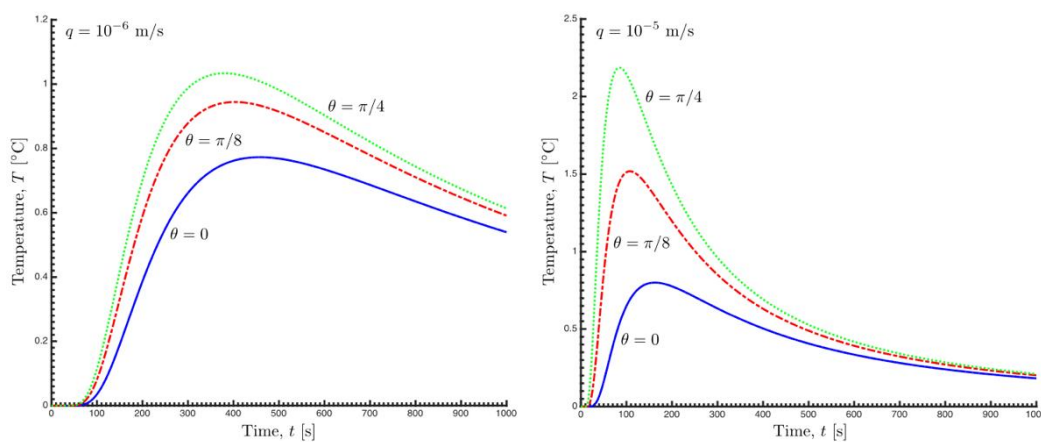


圖 17 溫度反應曲線(點位  $x=0.03, y=0, z=0.03$ )，(a)達西通量為  $10^{-6}$  m/s，(b) 達西通量為  $10^{-5}$  m/s (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)



## 研究方法與過程

## 4-8 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

| 第二年<br>工作項目                                                                             | 年月  |     |                                                                                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |      | 備註 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|
|                                                                                         | 05月 | 06月 | 07月                                                                                              | 08月 | 09月 | 10月 | 11月 | 12月 | 01月 | 02月 | 03月 | 04月  |    |
| 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<br>( 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<br>2. 跨孔之熱傳輸解析解分析<br>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<br>2. 單井 TV-DTS 現地測試<br>3. 地下水流速與流向推估<br>4. 建立現地量測、試驗之標準流程<br>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。                                            |     |     |                                                                                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |      |    |



## 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

### 4-9 模場概況

本研究計畫所選定的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。本研究規劃之試驗區域位於永貞宮東南側之停車場空地（圖 18）。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。

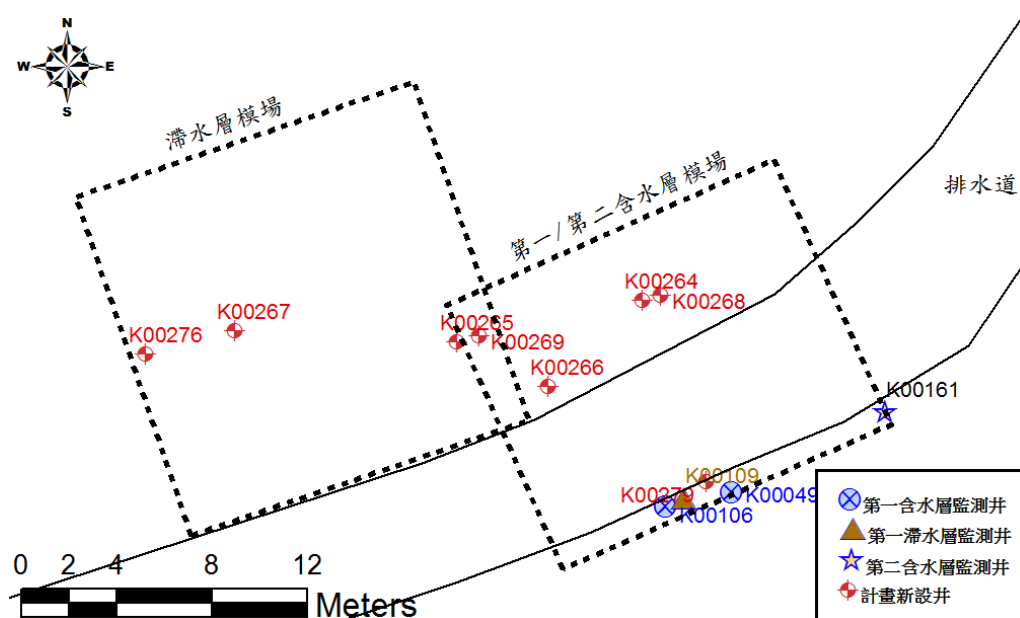


圖 18 先導試驗區域場址配置規劃與現況示意圖



## 研究方法與過程

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，為避免本研究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 19），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<sup>-5</sup>~10<sup>-2</sup> cm/s。地表下



### 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

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  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  cm/s，屬於第一滯水層中之主要優勢流徑範圍。

圖 20 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  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  cm/sec；第二含水層為砂、粉土、黏土互層所組成，K 值分布約在  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  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 21），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



## 研究方法與過程

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 22），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 23），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。

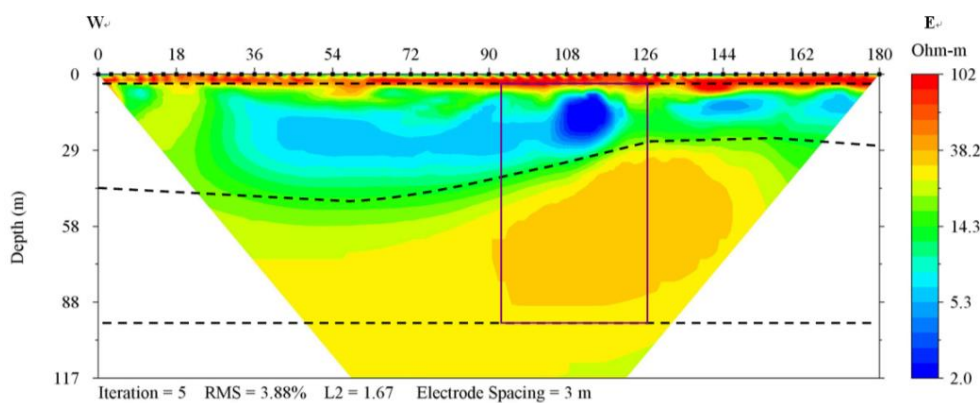


圖 19 永貞宮先導試驗區域 ERT 法調查剖面圖(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



# 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 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<br>(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 | $3.5 \times 10^{-5}$ |
| 19.5      | 0           | 85.0     | 15.0      | 0         | SM | $3.2 \times 10^{-3}$ |
| 21.5      | 0           | 98.0     | 2.0       | 0         | SP | $3.3 \times 10^{-2}$ |
| 23.5      | 0           | 36.0     | 57.0      | 7.0       | ML | $8.4 \times 10^{-5}$ |
| 25.5      | 0           | 28.0     | 60.0      | 12.0      | ML | $7.7 \times 10^{-5}$ |
| 27.5      | 0           | 87.0     | 13.0      | 0         | SM | $5.1 \times 10^{-3}$ |
| 29.5      | 0           | 22.0     | 57.0      | 21.0      | ML | $7.5 \times 10^{-5}$ |
| 31.5      | 0           | 64.0     | 36.0      | 0         | SM | $1.2 \times 10^{-3}$ |

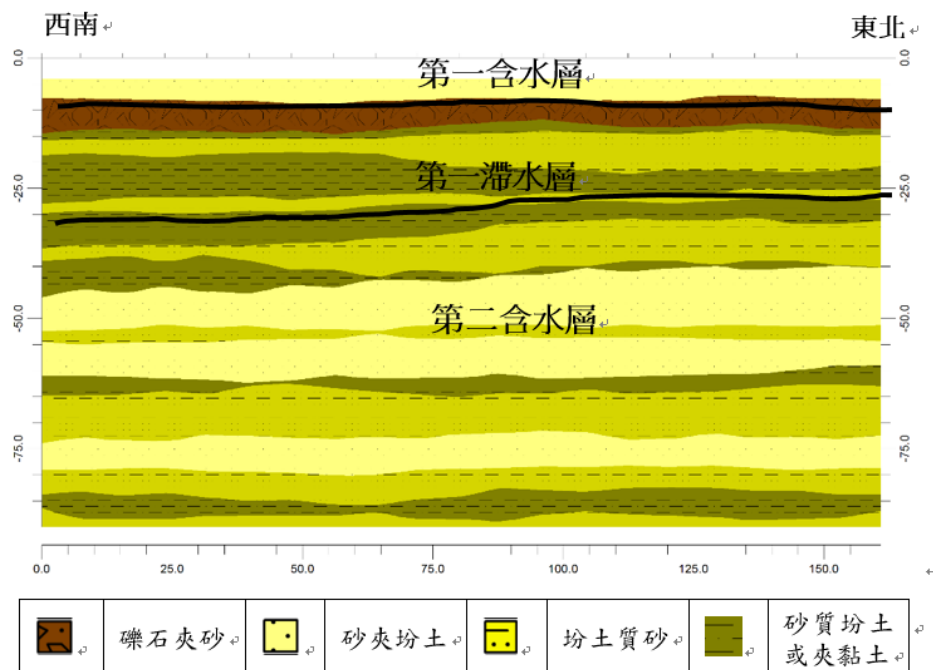


圖 20 結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



## 研究方法與過程

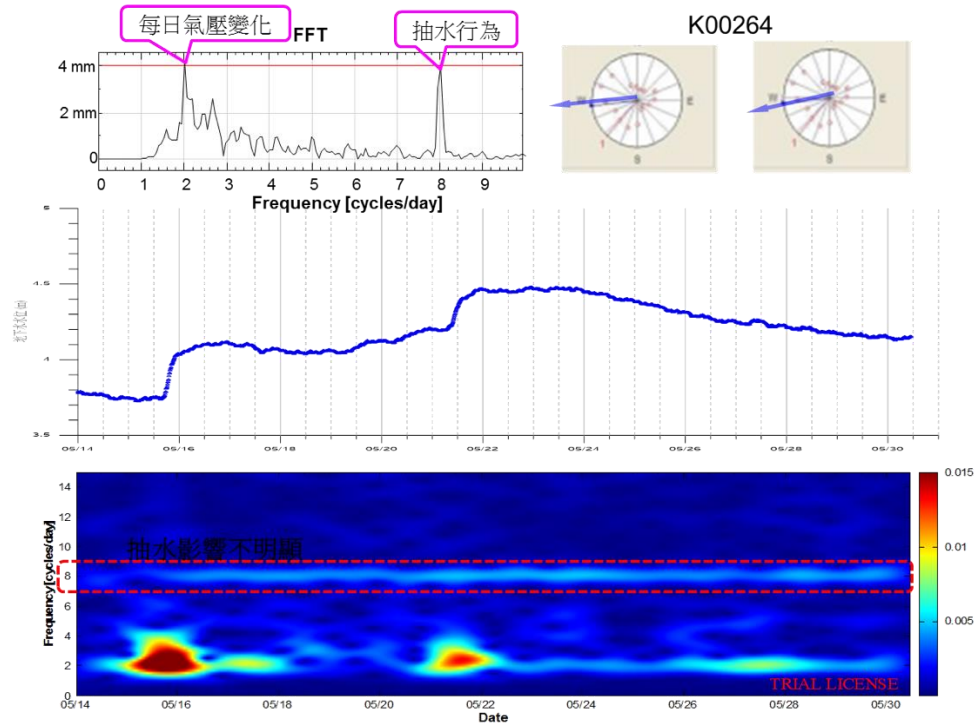


圖 21 第一含水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)

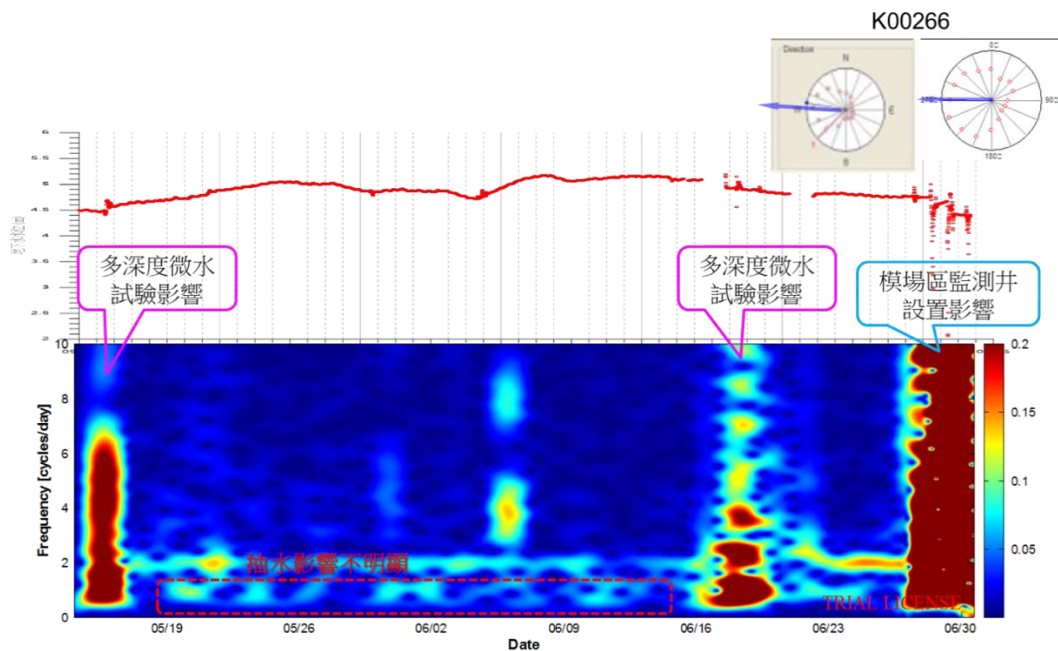


圖 22 第一滯水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



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

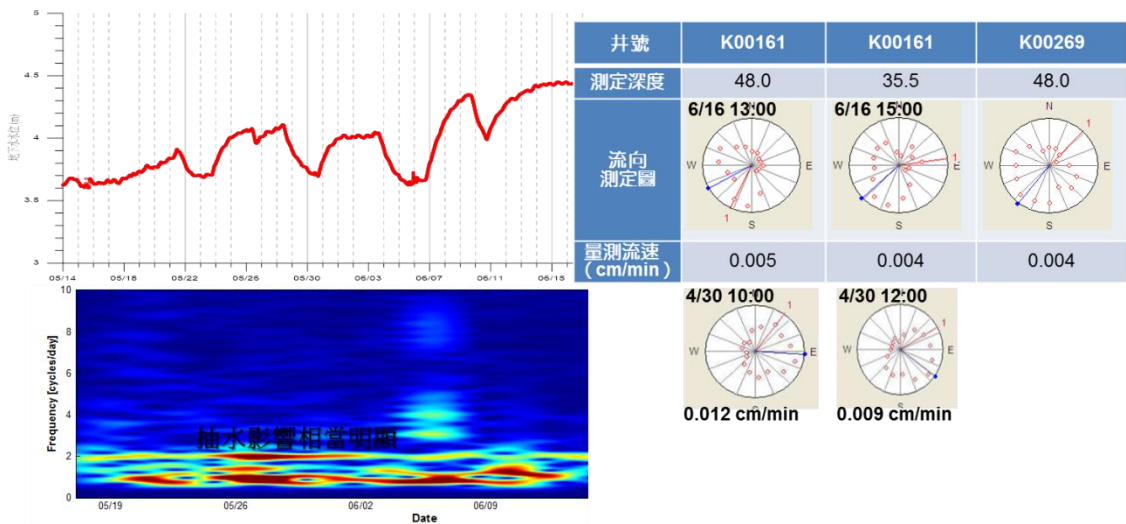


圖 23 第二含水層地下水位變動分析與地下水流方向(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



## 五、 結果

### 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，前一年度已完成淺部含水層（第一含水層與第一滯水層）的分析，今年度的工作項目主要針對深部含水層（第二含水層）進行試驗與資料分析。以下的現地試驗設計所獲得的溫度資料，將用於單井流速分析及跨孔熱示蹤劑試驗分析之用。

#### 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，同時進行單井加熱流速與跨孔熱傳輸試驗，兩井間之距離約為 0.7 公尺(圖 24)。圖 25 為本試驗之佈設示意圖，為針對第一含水層與第一滯水層進行監測。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 RBRduet<sup>3</sup>T.D 與 CTD diver，同步監測地下水溫變化。本次試驗期間共進行為期 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 27 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亦以井 K00268 與井 K00264 搭配下游方向的井群同時進行單井加熱流速與跨孔熱傳輸試驗。圖 26 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、



### 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

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，其餘 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，加熱之功率給定為 32W/m，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。停止加熱後，持續進行 67 小時下游監測井回溫監測試驗。第一與第二次試驗的結果將在後續進行分析與比較，單井加熱流速分析請參照 5-2 節，跨孔熱傳輸試驗分析比較請參照 5-3 與 5-4 節。

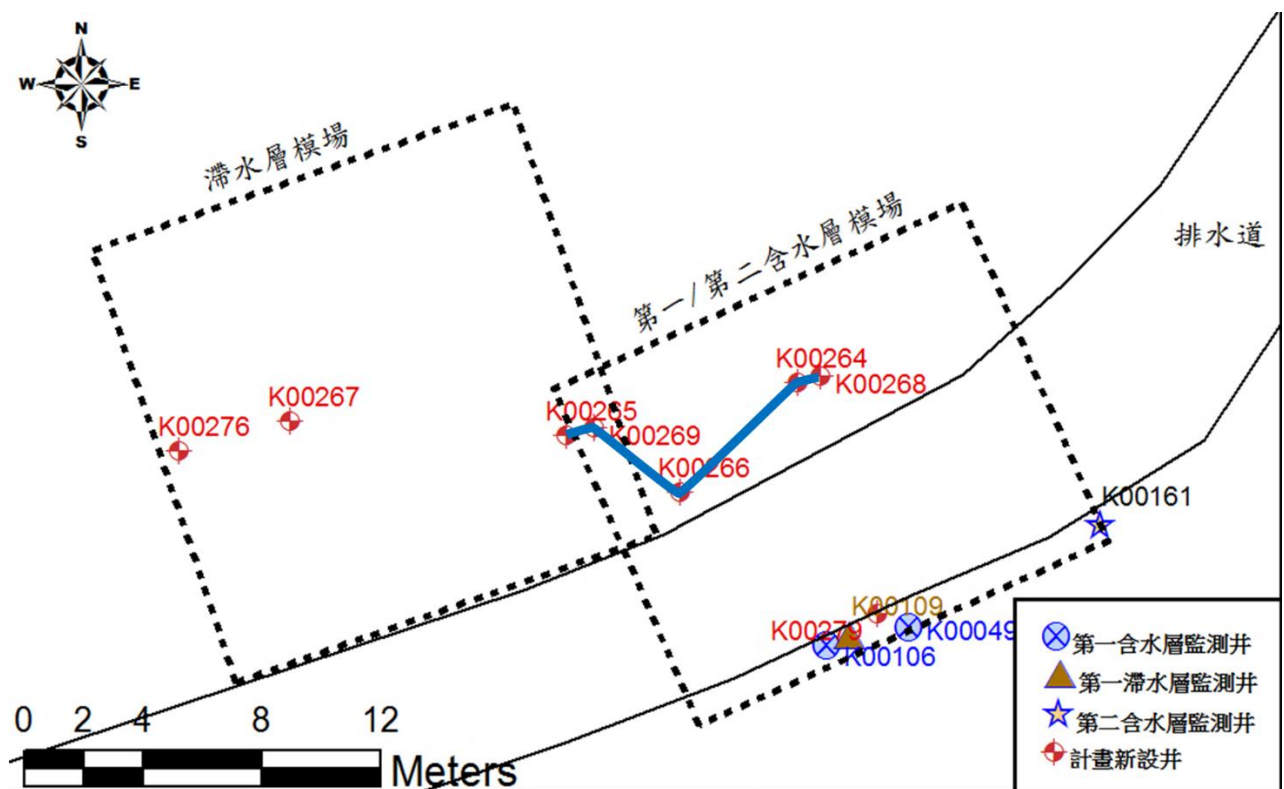


圖 24 模場監測井配置圖（藍線為第二次試驗光纖佈設示意圖）



結果

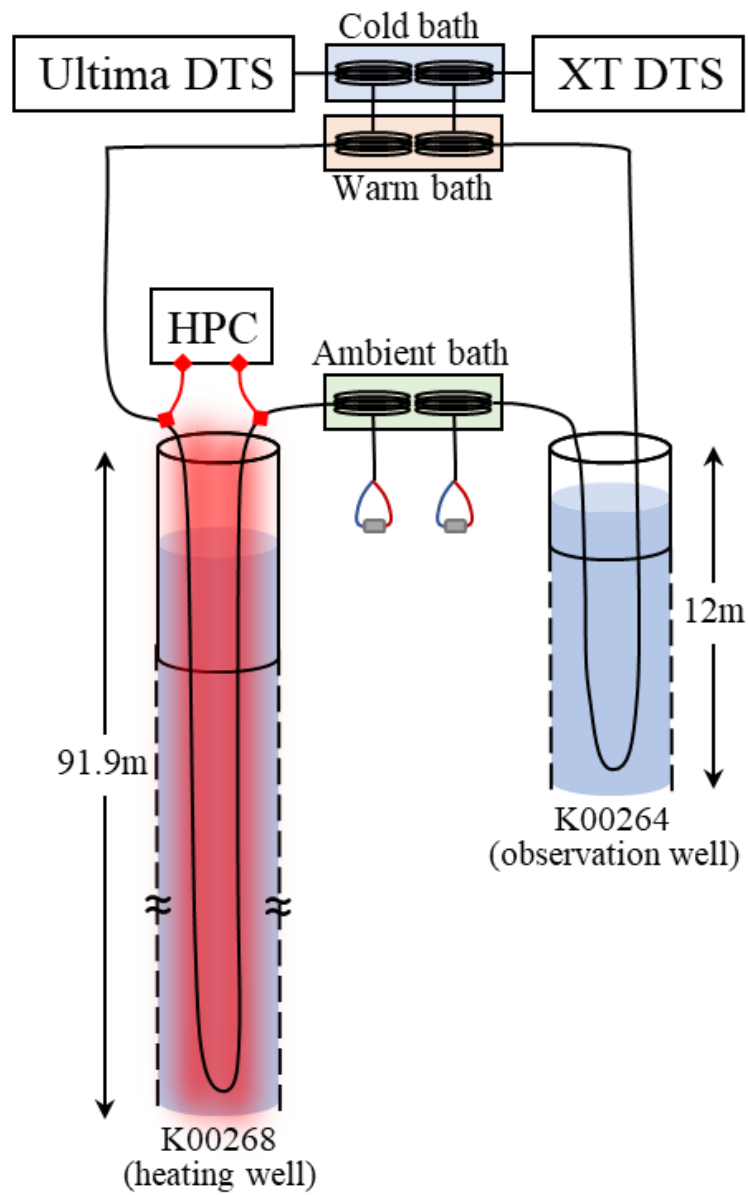


圖 25 第一次試驗光纖纜線佈設示意圖

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

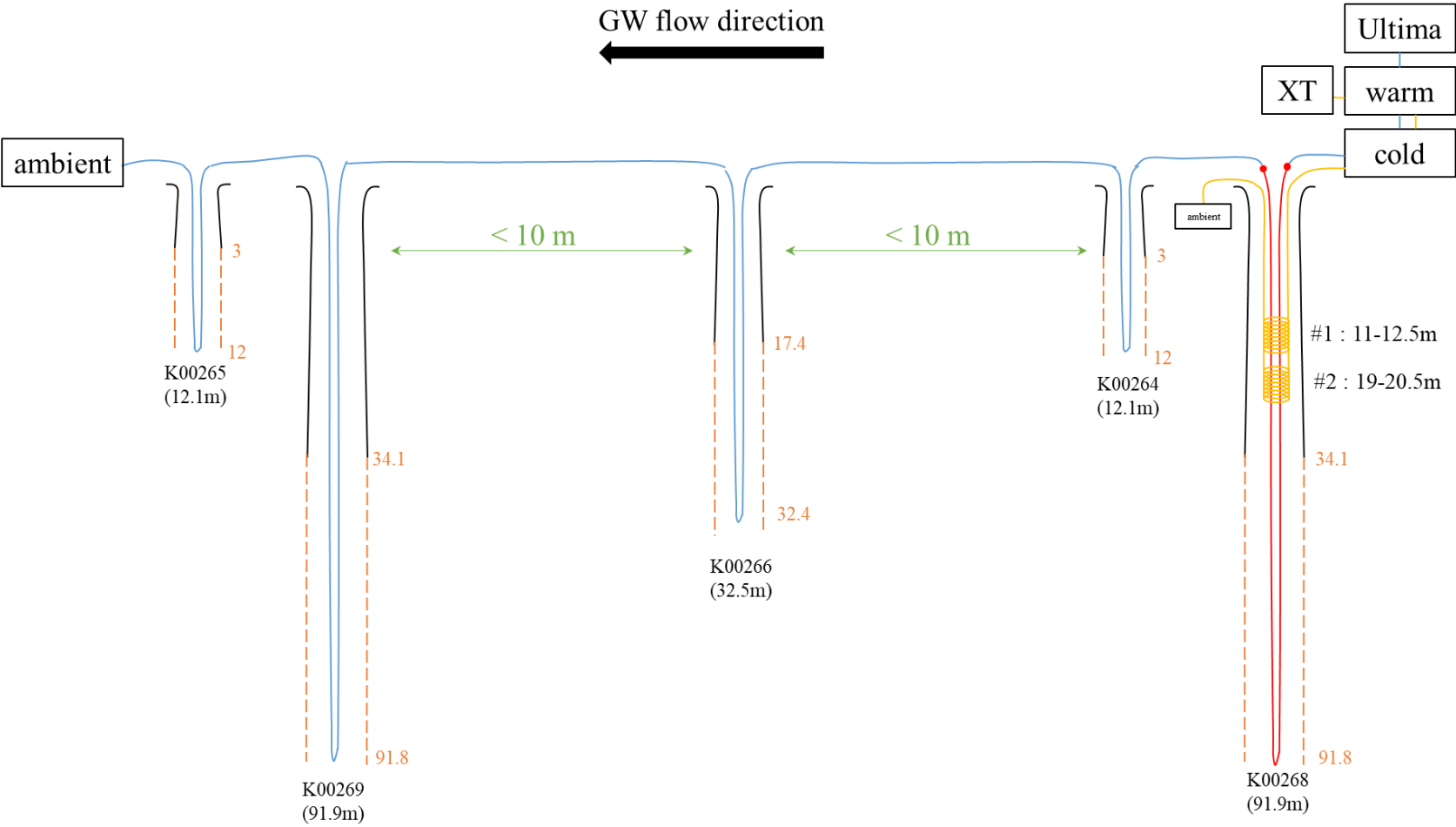


圖 26 第二次試驗光纖纜線佈設示意圖



## 結果

表 3 試驗井之基本資訊

| 井號     | 井深(m) | 井篩段(m)    | 與加熱井<br>K00268 距離(m) | 地下水流方向<br>(推測) |
|--------|-------|-----------|----------------------|----------------|
| K00268 | 91.9  | 34.8-91.8 | 0                    | 上游<br>↓<br>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 27 第一次試驗現地配置照片(A)試驗井配備 (B)井 K00264(左)與 K00268(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

(C)分散式光纖溫度感測器與參考溫度水桶 (D)加熱控制器



圖 28 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



## 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。本研究針對 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。本研究針對淺層以及深層含水層的資料進行解析綜合整理。依據 DTS 標準率定程序得知（請參照第一年期中報告），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 29a 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化量測結果，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)於淺層出現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；當加熱停止後，整體光纖溫度便迅速回復至接近背景值。

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 30a 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



### 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

公尺在加熱 2 小時後，溫差與初始相比增加約  $10\sim 10.5^{\circ}\text{C}$ ，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  $8^{\circ}\text{C}$  左右，並維持穩定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  $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，並持續增溫直到加熱結束前達到最高  $12.5^{\circ}\text{C}$  的溫差。深度 35~40 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加  $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，直到加熱結束前維持穩定的溫差。深度 40 公尺以下區段在加熱 2 小時後，溫差與初始相比增加約  $10\sim 10.5^{\circ}\text{C}$ ，直到加熱結束前維持穩定的溫差。深度 40~42 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加  $8\sim 9^{\circ}\text{C}$  左右，並維持穩定溫差直到加熱結束前。深度 42~52 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加  $7\sim 8^{\circ}\text{C}$  左右，並維持穩定溫差直到加熱結束前，為最小溫差。深度 52~90 公尺在加熱 2 小時後，溫差增加  $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，持續維持至加熱結束。而深度 58 與 60 公尺持續增溫直到加熱結束前達到最高  $10.5^{\circ}\text{C}$  的溫差，推測是因纜線受損包裹披附導致熱能累積。

圖 31a 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  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$  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  $3^{\circ}\text{C}$  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  $3^{\circ}\text{C}$  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  $6.5^{\circ}\text{C}$  的溫差，直到停止加熱 3.5 小時後才回復至與原始溫度  $3^{\circ}\text{C}$  的溫差。深度 42~52 公尺、在停止加熱後的 60 分鐘內，溫度便已回復至與原始溫度  $3^{\circ}\text{C}$  的溫差。深度 52 公尺以下在停止加熱 1.5 小時後，回復至與原始溫度  $3^{\circ}\text{C}$  的溫差。

### 第二次加熱試驗

圖 29b 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  $25^{\circ}\text{C}$  急遽增溫，直到加熱末期最高溫超過  $50^{\circ}\text{C}$ ，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



## 結果

30b)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。深度 40~43 公尺、52~70 公尺與 80~90 公尺在加熱第 3 小時後，溫度上升約 16~20°C 持續維持至加熱結束。深度 42~52 公尺則有最小的升溫變化，在開始加熱後升溫至約 15°C 溫差，並緩慢增溫直到加熱停止。深度 70~80 公尺有明顯的升溫變化，在開始加熱後升溫至約 20°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、26~27 公尺深度 76~177 公尺與 88~90 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 31b 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 公尺則耗費較長時間回復，在加熱停止 2 小時後回復至與背景溫度 5~8°C 溫差。而深度 38~40 公尺與深度 43~50 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。在加熱停止 2 小時後，深度 40 公尺以下大部分已回復至與背景溫度 8~10°C 溫差。深度 76~80 公尺則耗費較長時間回復，在加熱停止約 1.5 小時後回復至與背景溫度 5~8°C 溫差。

## 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，可清楚判釋第一含水層、第一滯水層與第二含水層之分界：深度 17~19 公尺、37~40 公尺與深度 42~52 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 公尺與深度 70~80 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。被認為是第一滯水層之位置。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 5-5-1 小節詳細分析與討論))。而在 26~27



### 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

公尺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。

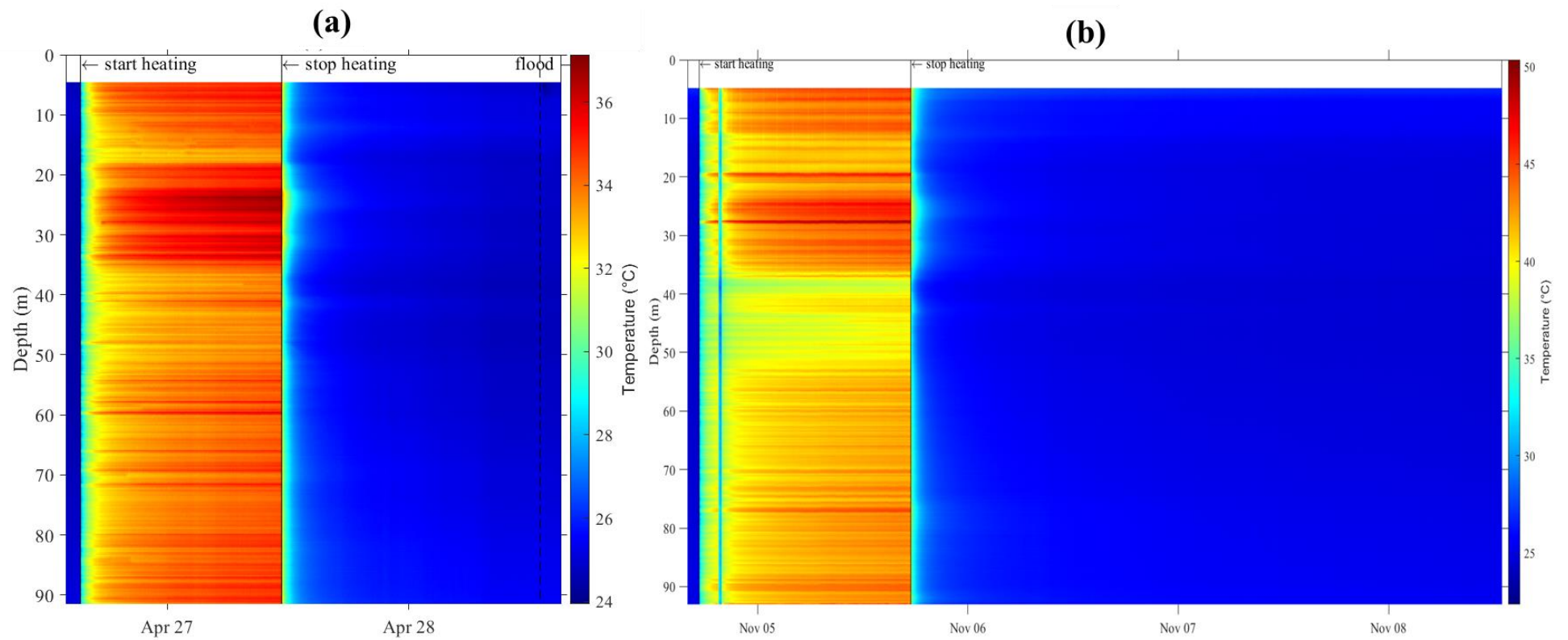


圖 29 K00268 絕對溫度量測結果 (a) 第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果 (11 月)

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

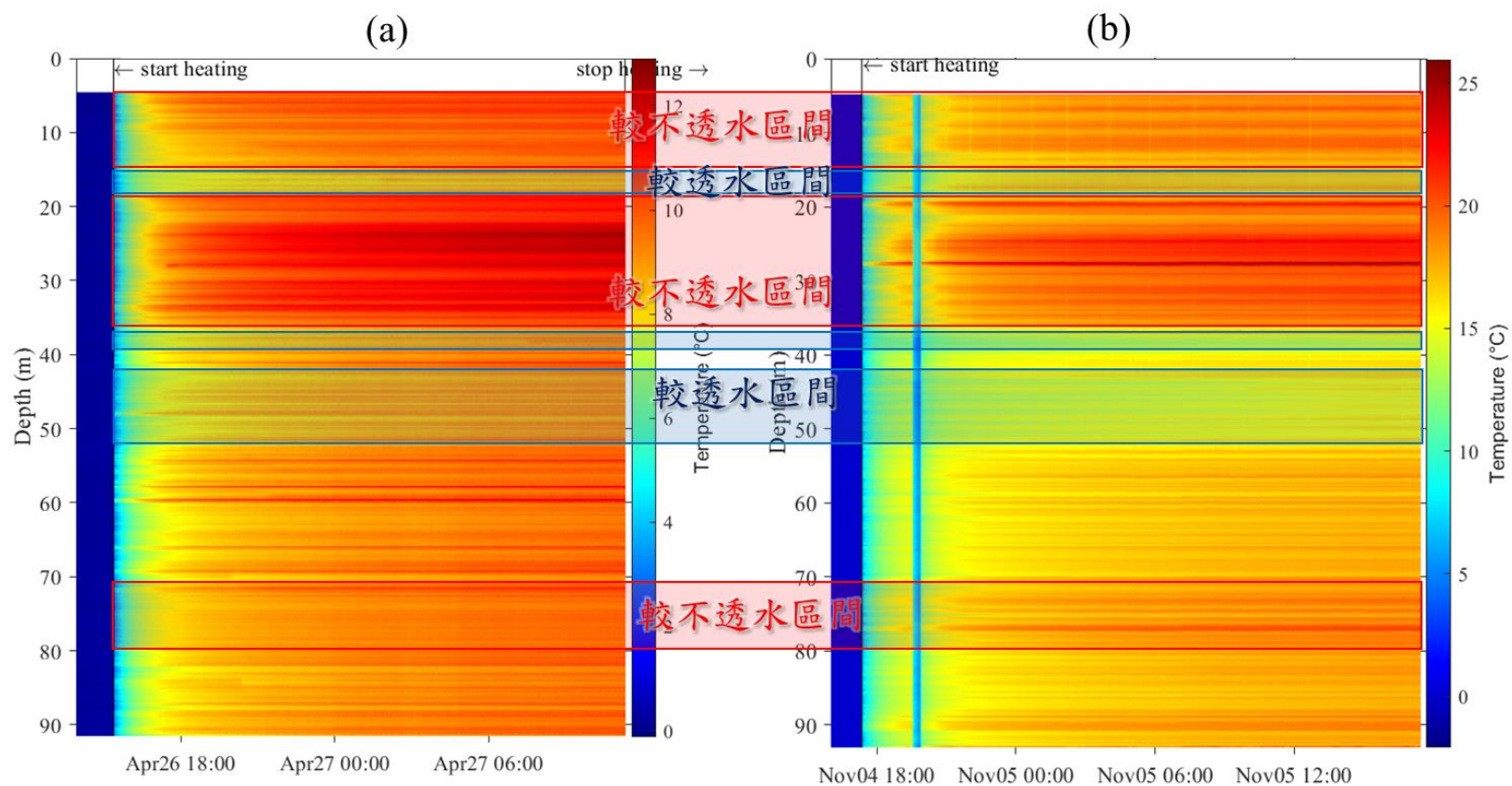


圖 30 K00286 加熱期間溫度差變化 (a)第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果(11 月)

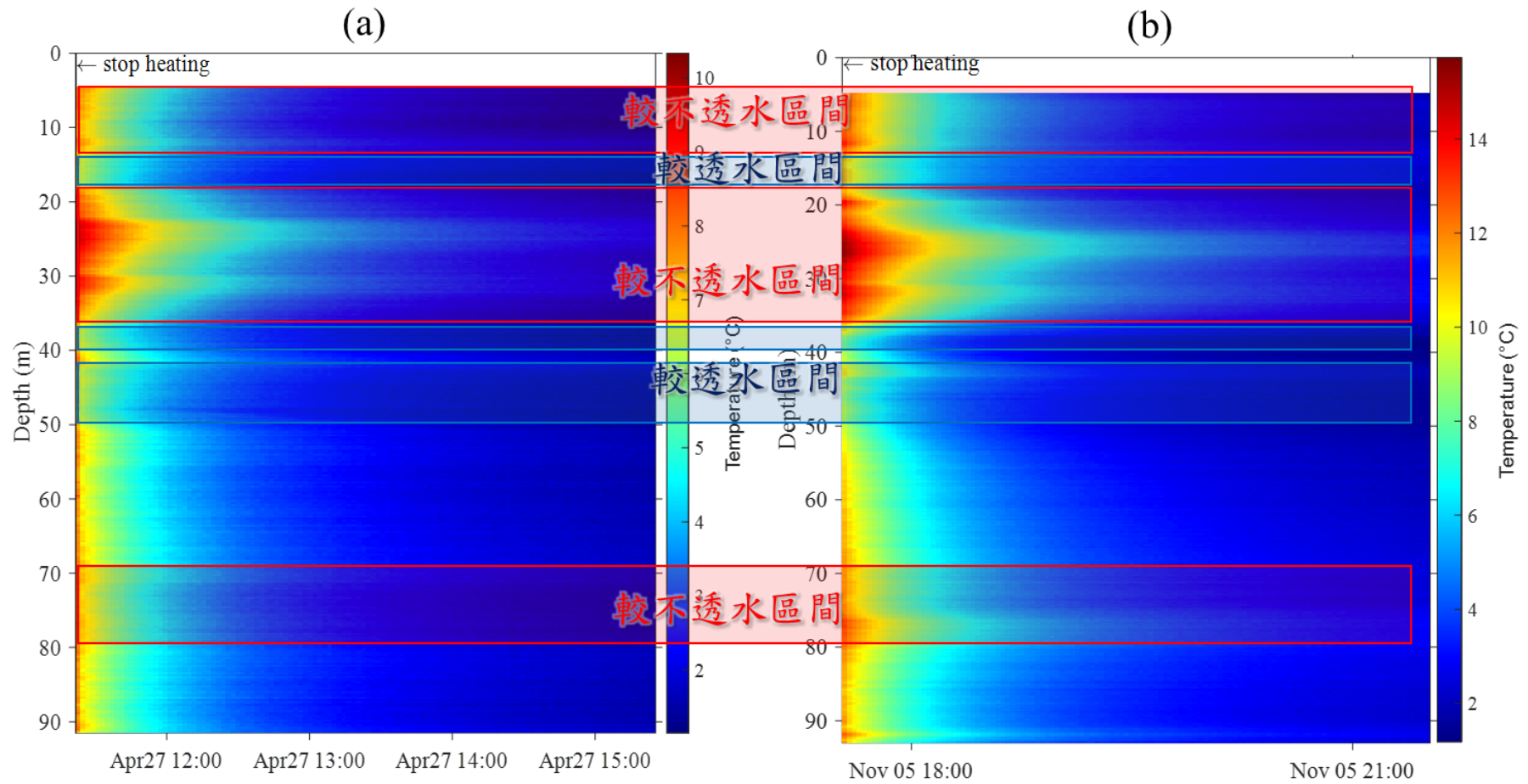


圖 31 K00268 回溫 4 小時內溫度差變化 (a) 第一次試驗結果 (4 月) (b) 第二次試驗結果 (11 月)



## 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 m<sup>2</sup>/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，當均方根誤差(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。如表 5 所示。第一次試驗的擬合結果，均方根誤差介於 0.19~0.93°C 之間，擬合的最大與最小誤差分別為深度 23~24 公尺與 59~60 公尺。第二次試驗的擬合結果，均方根誤差介於 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。由報告所呈現的流速分析結果可由圖 32 與圖 33 顯示，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 34a 為第一次試驗分析結果顯示，淺層（第一）含水層至深層（第二）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 公尺以下流速逐漸增加，深度 35~52 公尺流速約為 0.75~1.45 m/d，而至深度 79~82 公尺有最低流速 0.7~0.9 m/d。圖 34b 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 35~52 公尺區間流速約為 0.80~1.05 m/d，深度 42~44 公尺區間出現最高流速，約為 0.90~1.05 m/d，深度 53~80 公尺隨深度越深區間流速相對越小，約為 0.2~0.65 m/d，深度 73~78 公尺有最低流速，約為 0.2~0.45 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、深度 42~52 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、78~80 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



## 結果

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 5-5-1 小節當中進行分析說明，圖 29b）。

將兩次試驗流速分佈對照文獻報告的地質柱狀剖面圖(圖 34c)，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 35~50 公尺的地層主要由滲透性較佳的砂夾粉土為組成，以上在流速分析結果中，該區段的流速同樣也有些微增大的趨勢。而在深度 50~90 公尺岩性主要為砂質粉土或夾黏土地層所組成，但也有局部地層出現滲透性較佳的砂夾粉土（細砂為主），與其他深度相比應較為不透水之區段，在流速分析結果中該區段的流速較低。

根據文獻報告所示，在此區域含水層地質組成主要為礫石夾砂，熱傳導係數範圍介於 0.588~2.279 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 <sup>2</sup> /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 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估二次試驗不同深度之流速  
與對應之擬合均方根誤差

| 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      |
| 40-41     | 1.15        | 0.41      | 0.95         | 0.66      |
| 41-42     | 0.75        | 0.38      | 0.80         | 0.64      |
| 42-43     | 0.85        | 0.52      | 0.80         | 0.61      |
| 43-44     | 1.45        | 0.67      | 1.05         | 0.65      |
| 44-45     | 1.35        | 0.56      | 0.90         | 0.62      |
| 45-46     | 1.40        | 0.50      | 0.95         | 0.61      |
| 46-47     | 1.30        | 0.46      | 0.95         | 0.62      |
| 47-48     | 1.45        | 0.54      | 0.95         | 0.63      |



## 結果

|       |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
| 48-49 | 1.35 | 0.43 | 0.85 | 0.62 |
| 49-50 | 1.5  | 0.57 | 1.00 | 0.61 |
| 50-51 | 1.45 | 0.62 | 0.95 | 0.63 |
| 51-52 | 1.05 | 0.54 | 0.85 | 0.64 |
| 52-53 | 1.00 | 0.55 | 0.85 | 0.66 |
| 53-54 | 0.90 | 0.43 | 0.75 | 0.68 |
| 54-55 | 0.75 | 0.28 | 0.70 | 0.69 |
| 55-56 | 0.85 | 0.38 | 0.65 | 0.76 |
| 56-57 | 0.95 | 0.41 | 0.70 | 0.70 |
| 57-58 | 0.90 | 0.35 | 0.75 | 0.64 |
| 58-59 | 0.75 | 0.27 | 0.65 | 0.71 |
| 59-60 | 0.65 | 0.19 | 0.65 | 0.70 |
| 60-61 | 0.85 | 0.35 | 0.65 | 0.67 |
| 61-62 | 0.95 | 0.51 | 0.65 | 0.65 |
| 62-63 | 1.10 | 0.62 | 0.65 | 0.64 |
| 63-64 | 1.05 | 0.58 | 0.60 | 0.67 |
| 64-65 | 0.85 | 0.45 | 0.60 | 0.66 |
| 65-66 | 0.95 | 0.54 | 0.60 | 0.66 |
| 66-67 | 0.80 | 0.42 | 0.60 | 0.66 |
| 67-68 | 0.90 | 0.56 | 0.55 | 0.66 |
| 68-69 | 0.65 | 0.35 | 0.55 | 0.64 |
| 69-70 | 0.70 | 0.36 | 0.50 | 0.71 |
| 70-71 | 1.05 | 0.68 | 0.65 | 0.64 |
| 71-72 | 0.70 | 0.37 | 0.45 | 0.74 |
| 72-73 | 0.95 | 0.51 | 0.50 | 0.73 |
| 73-74 | 1.15 | 0.61 | 0.45 | 0.66 |
| 74-75 | 1.15 | 0.61 | 0.45 | 0.65 |
| 75-76 | 0.95 | 0.54 | 0.20 | 1.13 |
| 76-77 | 1.00 | 0.58 | 0.40 | 0.71 |
| 77-78 | 1.10 | 0.60 | 0.35 | 0.69 |
| 78-79 | 1.00 | 0.61 | 0.40 | 0.70 |
| 79-80 | 0.90 | 0.51 | 0.45 | 0.67 |
| 80-81 | 0.75 | 0.43 | 0.50 | 0.67 |
| 81-82 | 0.70 | 0.37 | 0.50 | 0.73 |
| 82-83 | 1.10 | 0.64 | 0.55 | 0.66 |
| 83-84 | 0.95 | 0.55 | 0.60 | 0.64 |
| 84-85 | 1.00 | 0.49 | 0.60 | 0.65 |
| 85-86 | 0.95 | 0.53 | 0.65 | 0.64 |
| 86-87 | 0.90 | 0.46 | 0.55 | 0.69 |
| 87-88 | 1.05 | 0.55 | 0.50 | 0.81 |
| 88-89 | 0.80 | 0.36 | 0.40 | 1.04 |
| 89-90 | 0.95 | 0.51 | 0.50 | 0.69 |

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

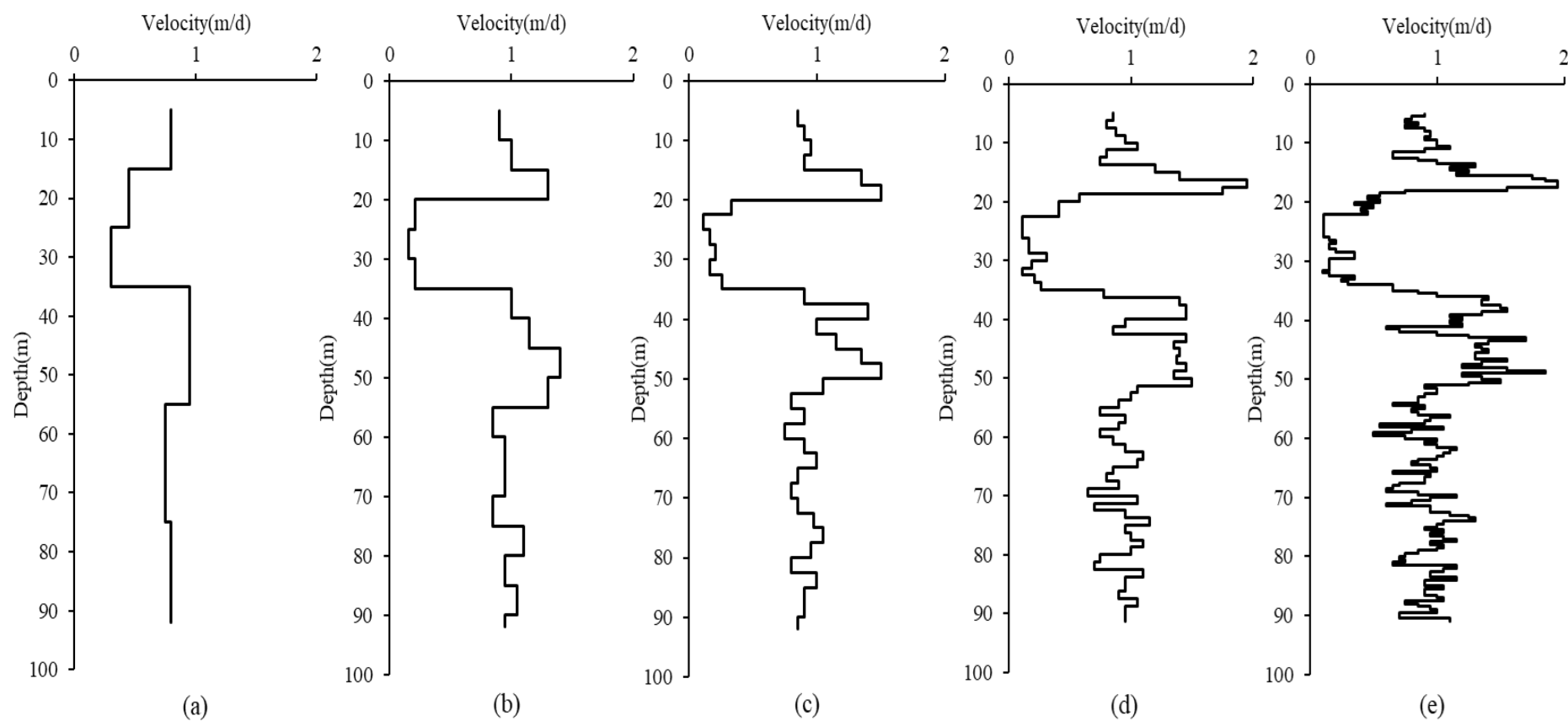


圖 32 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估第一次試驗的絕對流速隨深度變化 (a)間距 10 公尺 (b)間距 5 公尺 (c)間距 2.5 公尺 (d)間距 1.25 公尺 (e)間距 0.5 公尺

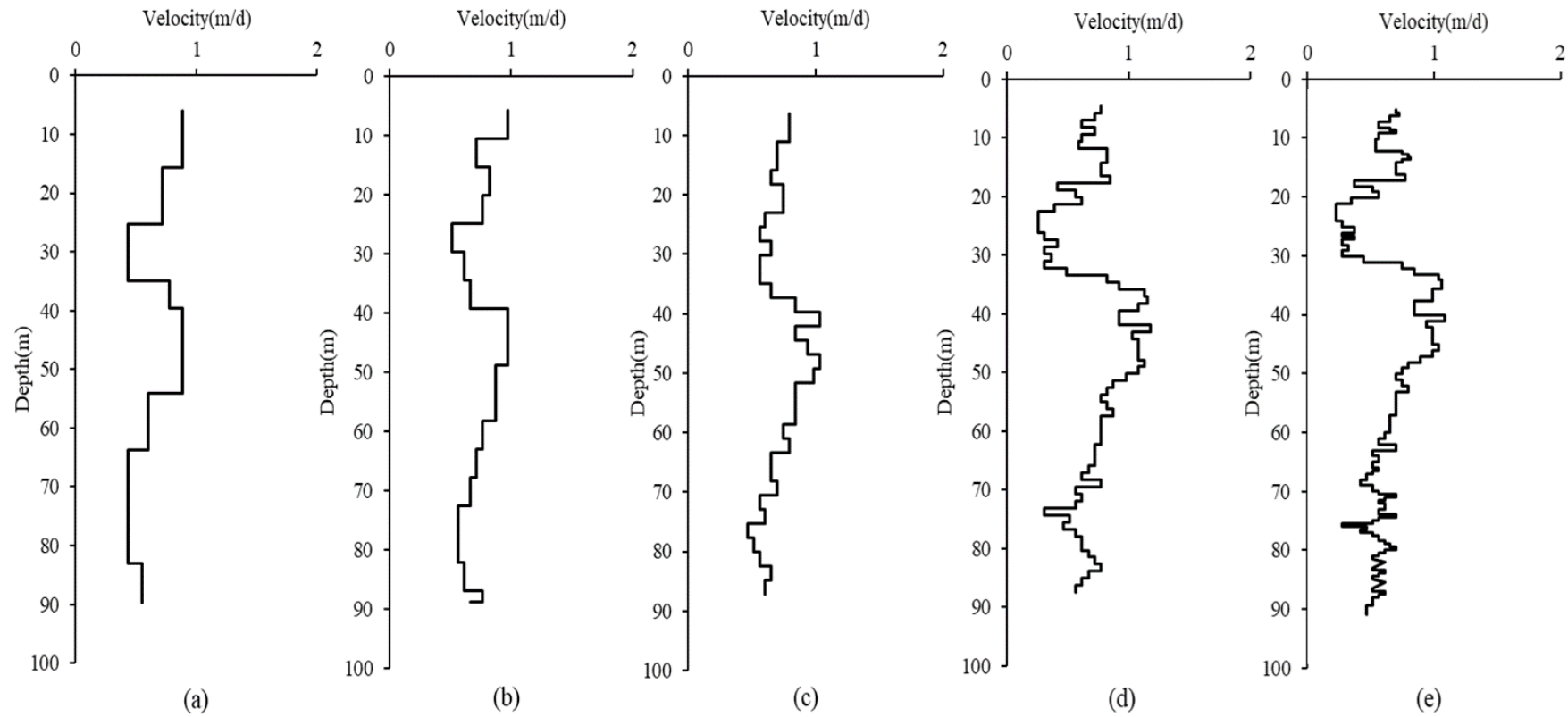


圖 33 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估第二次試驗的絕對流速隨深度變化 (a)間距 10 公尺 (b)間距 5 公尺 (c)間距 2.5 公尺 (d)間距 1.25 公尺 (e)間距 0.5 公尺

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

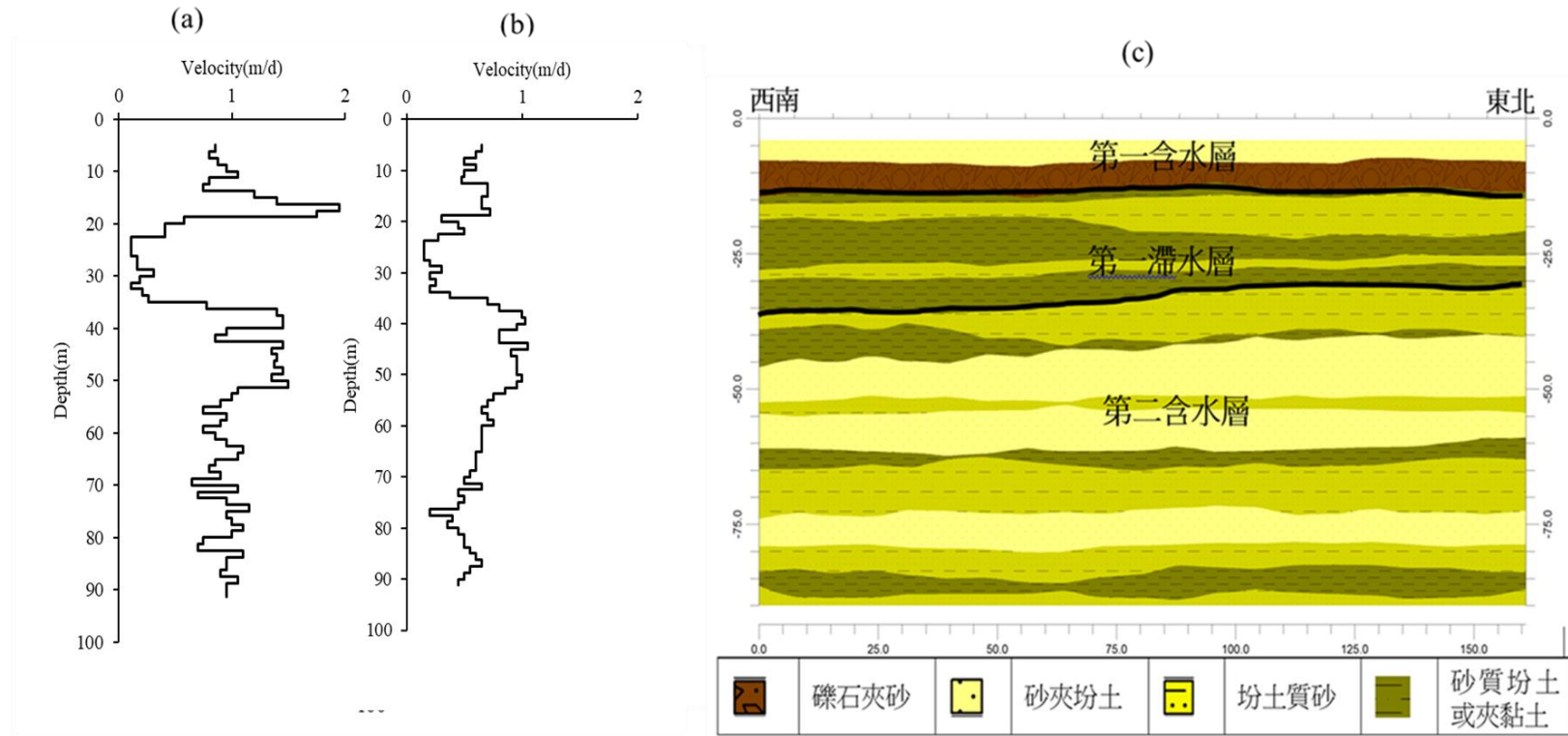


圖 34 以熱傳輸解析解 (Bakker et al., 2015) 推估絕對流速隨深度變化 (a)第一次試驗 (4 月) 流速分析結果 (b) 第二次試驗 (11 月) 流速分析結果 與 (c) 結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



## 結果

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

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

## 5-2-3 K00268 之 ADTS-Toolbox 分析

進一步將兩次試驗結果分別利用 A-DTS Toolbox (Simon et al. 2021)，推估各個測量點周圍地層材質之熱傳導係數和地下水流速，在進行量化分析時，假設多孔隙介質與水之體積比熱容為一定值，分別設定為  $2.5 \times 10^6 \text{ J/K m}^3$  與  $4.1 \times 10^6 \text{ J/K m}^3$ 。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。

在進行熱傳導係數和地下水流速推估時，首先針對光纖纜線批覆層所影響的熱傳輸效應進行濾除，經過資料的篩選與反覆測試，第一次最佳的  $\Delta T_{FO}$  為  $2.0^\circ\text{C}$ ；第二次最佳的  $\Delta T_{FO}$  為  $2.9^\circ\text{C}$ 。在濾除光纖纜線批覆層的效應後，圖 35 為第一次與第二次試驗流速與熱傳導係數之分析結果。分析結果顯示，整體含水層的流速分佈有明顯的差異性：圖 35a 為第一次試驗流速結果，深度 5~16 公尺流速約為 0.25~0.28 m/d，深度 11 公尺以下流速逐漸增加，至深度 15 公尺流速開始下降，至深度 22~25 公尺區間包含有最低流速 0.22~0.23 m/d，深度 38~39 公尺有最低流速 0.21 m/d，深度 39 公尺以下流速逐漸增加，深度 42~52 公尺流速約為 0.26~0.30 m/d，而至深度



### 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

55 公尺以下流速穩定，流速為 0.26~0.28 m/d，模式推估流速之不確定性範圍介於  $5.2 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-2}$  m/d，最大值位於深度 12 公尺，而最小值則位於深度 19 公尺。圖 35c 為第二次試驗流速分佈結果，與第一次試驗結果相比，其流速隨深度變化趨勢相似，整體流速略低於第一次結果：深度 5~16 公尺流速約為 0.28~0.34 m/d，深度 11 公尺以下流速逐漸增加，至深度 16 公尺流速開始下降，深度 25~29 公尺區間包含有最低流速 0.26~0.27 m/d，深度 40 公尺以下流速逐漸下降，深度 42~59 公尺流速約為 0.28~0.33 m/d，而至深度 50 公尺以下流速穩定，深度 53~80 公尺隨深度越深區間流速相對越小，約為 0.26~0.28 m/d，深度 78~79 公尺有最低流速，約為 0.23 m/d，深度 79~90 公尺，約為 0.26~0.28 m/d，模式推估流速之不確定性範圍介於  $5.8 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-2}$  m/d，最大值位於深度 34 公尺，而最小值則位於深度 23 公尺。

表 7 以 A-DTS Toolbox 推估二次試驗不同深度之流速與對應之擬合均方根誤差，第一次試驗均方根誤差介於 0.21~0.60°C 之間，擬合的最小與最大誤差分別為深度 5~6 公尺與 22~23 公尺。第二次試驗的流速擬合結果，均方根誤差介於 0.11~0.76°C 之間，擬合的最小與最大誤差分別為深度 77~78 公尺與 20~21 公尺。

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 42~52 公尺區間的較高流速分佈，且在低流速區段當中（例如 25~26 公尺、78~80 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。

圖 35b 為第一次試驗熱傳導係數分佈結果，顯示整體含水層的熱傳導係數分佈同樣有明顯的差異性：深度 5~16 公尺熱傳導係數約為 0.96~1.16 W/m/K，深度 16~20 公尺區間開始逐漸升高，係數約為 1.17~1.31 W/m/K，深度 20~30 公尺有出現最低係數 0.78~0.99 W/m/K，深度 35 公尺以下係數逐漸趨於穩定，深度 35~82 公尺係數約為 1.01~1.23 W/m/K，模式推估熱傳導係數之不確定性範圍介於  $4.4 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-2}$  W/m/K，最大值位於深度 12 公尺，而最小值則位於深度 23 公尺。圖 35d 為第二次試驗熱傳導係數分佈結果，與第一次試驗結果相比，其係數趨勢變化相近，其整體差異相對略小：在深度 5~16 公尺區間係數約為 0.68~0.85 W/m/K，深度 25~29 公尺區間係數相對較小，出現最低係數約為 0.52~0.63 W/m/K，深度 35~52 公



## 結果

尺區間係數約為 0.71~1.17 W/m/K，深度 42~44 公尺區間出現最高係數，約為 0.90~1.05 W/m/K，深度 53~80 公尺隨深度越深區間係數相對穩定，約為 0.77~0.83 W/m/K，模式推估熱傳導係數之不確定性範圍介於  $4.1 \times 10^{-3} \sim 2.1 \times 10^{-2}$  W/m/K，最大值位於深度 34 公尺，而最小值則位於深度 23 公尺。

而兩次熱傳導係數分析結果設於表 8 以 A-DTS Toolbox 推估二次試驗不同深度之熱傳導係數與對應之擬合均方根誤差，第一次試驗的係數擬合結果，均方根誤差介於 0.19~0.49°C 之間，擬合的最小與最大誤差分別為深度 40~41 公尺與 58~59 公尺。第二次試驗的係數擬合結果，均方根誤差介於 0.11~0.76°C 之間，擬合的最小與最大誤差分別為深度 78~79 公尺與 20~21 公尺。

雖整體熱傳導係數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傳導係數分佈特徵趨勢一致，皆可以觀察到深度 20~35 公尺區間係數偏低，以及深度 42~52 公尺區間的係數偏高，且在各個區段當中（例如 25~26 公尺、78~80 公尺），皆可觀察到細微之傳導係數變化於兩次分析結果中。

將兩次試驗流速分佈對照文獻報告的地質柱狀剖面圖(圖 36)，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 35~50 公尺的地層主要由滲透性較佳的砂夾粉土為組成，以上在流速分析結果中，該區段的流速同樣也有些微增大的趨勢。而在深度 50~90 公尺岩性主要為砂質粉土或夾黏土地層所組成，但也有局部地層出現滲透性較佳的砂夾粉土（細砂為主），與其他深度相比應較為不透水之區段，在流速分析結果中該區段的流速較低。

根據文獻報告所示，在此區域含水層地質組成主要為礫石夾砂，熱傳導係數範圍介於 0.588~2.279 W/m/°C。經由 ADTS toolbox 所推估之熱傳導係數 0.78~1.31 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



### 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

確定性也相對較小。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。

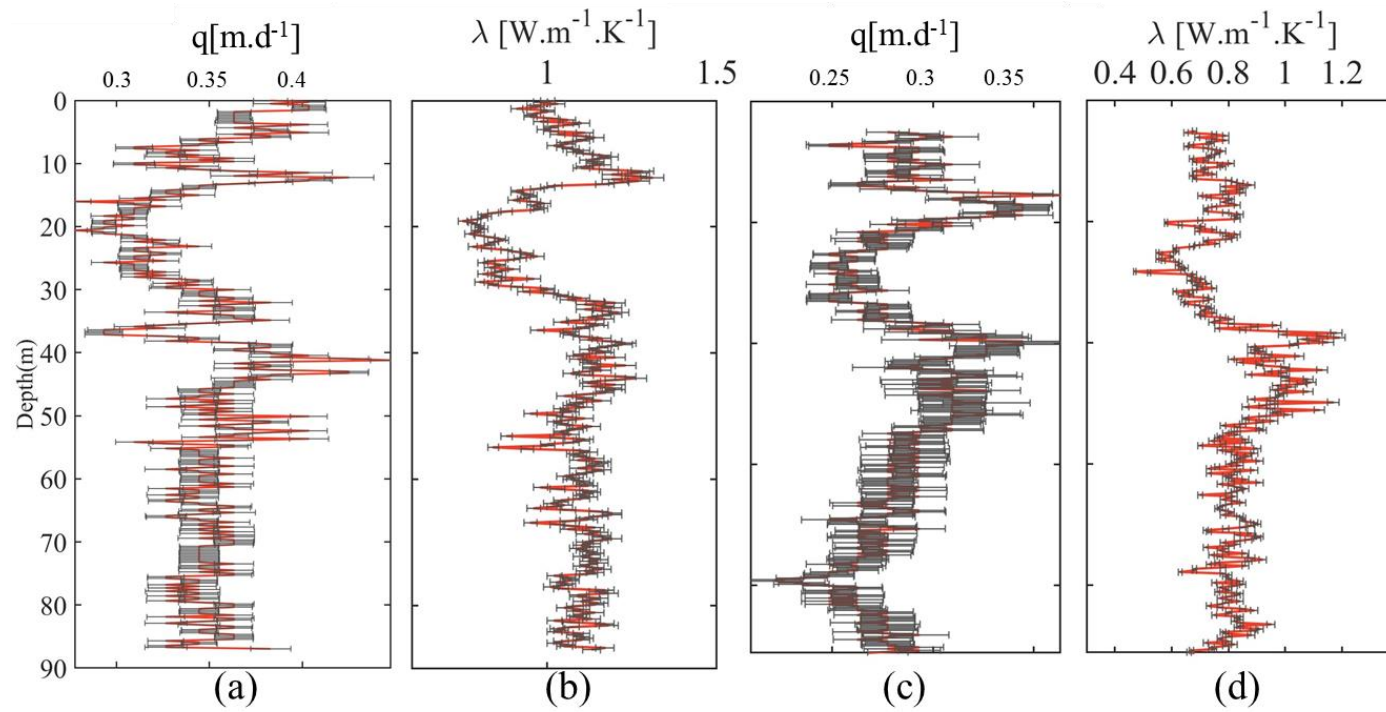


圖 35 A-DTS Toolbox 絕對流速與熱傳導係數隨深度變化：第一次試驗（4 月）(a)流速分析結果 (b) 熱傳導係數分析結果 第二次試驗（11 月）(c)流速分析結果 (d) 熱傳導係數分析結果

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

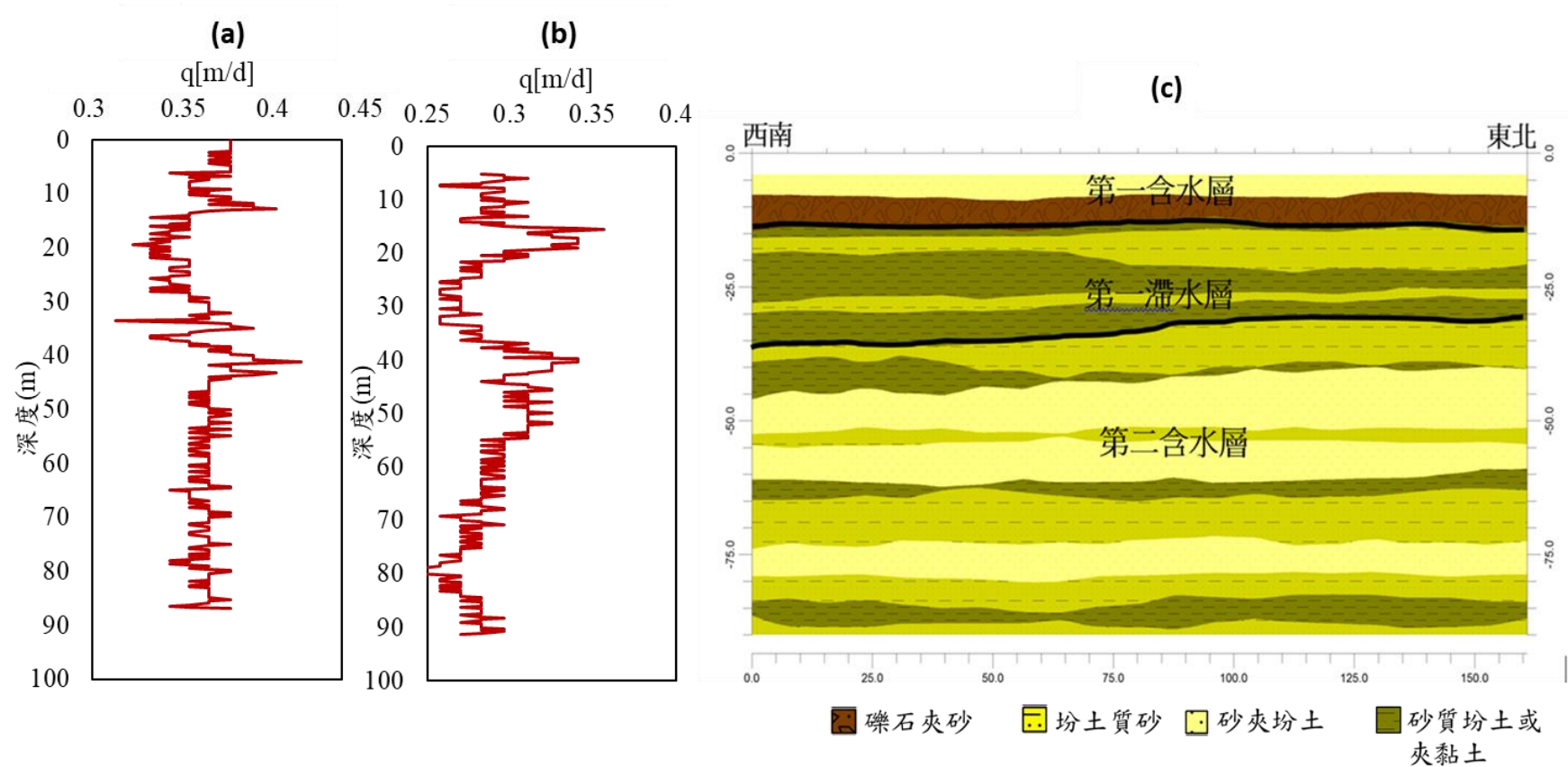


圖 36 A-DTS Toolbox 絕對流速隨深度變化 (a)第一次試驗(4月)流速分析結果 (b) 第二次試驗(11月)流速分析結果 與 (c) 結合鑽探設井及電阻值經地層因子轉換之地質柱狀剖面(摘錄自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



## 結果

表 7 以 A-DTS Toolbox 推估二次試驗不同深度之流速與對應之擬合  
均方根誤差

| depth (m) | 第一次試驗 (4 月) |           | 第二次試驗 (11 月) |           |
|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
|           | q (m/d)     | RMSE (°C) | q (m/d)      | RMSE (°C) |
| 5-6       | 0.28        | 0.21      | 0.28         | 0.54      |
| 6-7       | 0.28        | 0.57      | 0.30         | 0.55      |
| 7-8       | 0.28        | 0.57      | 0.26         | 0.31      |
| 8-9       | 0.28        | 0.45      | 0.30         | 0.42      |
| 9-10      | 0.28        | 0.53      | 0.28         | 0.36      |
| 10-11     | 0.28        | 0.52      | 0.30         | 0.52      |
| 11-12     | 0.25        | 0.38      | 0.30         | 0.50      |
| 12-13     | 0.27        | 0.47      | 0.30         | 0.51      |
| 13-14     | 0.26        | 0.53      | 0.28         | 0.40      |
| 14-15     | 0.28        | 0.51      | 0.30         | 0.44      |
| 15-16     | 0.26        | 0.30      | 0.34         | 0.43      |
| 16-17     | 0.27        | 0.34      | 0.31         | 0.34      |
| 17-18     | 0.30        | 0.44      | 0.34         | 0.41      |
| 18-19     | 0.27        | 0.43      | 0.33         | 0.60      |
| 19-20     | 0.23        | 0.49      | 0.31         | 0.49      |
| 20-21     | 0.26        | 0.51      | 0.28         | 0.76      |
| 21-22     | 0.26        | 0.51      | 0.30         | 0.43      |
| 22-23     | 0.23        | 0.60      | 0.28         | 0.29      |
| 23-24     | 0.23        | 0.42      | 0.28         | 0.36      |
| 24-25     | 0.22        | 0.49      | 0.28         | 0.47      |
| 25-26     | 0.25        | 0.44      | 0.26         | 0.52      |
| 26-27     | 0.25        | 0.44      | 0.27         | 0.63      |
| 27-28     | 0.26        | 0.47      | 0.26         | 0.36      |
| 28-29     | 0.26        | 0.47      | 0.26         | 0.54      |
| 29-30     | 0.26        | 0.47      | 0.27         | 0.34      |
| 30-31     | 0.25        | 0.44      | 0.27         | 0.36      |
| 31-32     | 0.25        | 0.44      | 0.27         | 0.54      |
| 32-33     | 0.23        | 0.42      | 0.26         | 0.31      |
| 33-34     | 0.26        | 0.47      | 0.28         | 0.48      |
| 34-35     | 0.26        | 0.47      | 0.27         | 0.36      |
| 35-36     | 0.27        | 0.46      | 0.28         | 0.48      |
| 36-37     | 0.27        | 0.46      | 0.30         | 0.35      |
| 37-38     | 0.26        | 0.47      | 0.28         | 0.42      |
| 38-39     | 0.21        | 0.44      | 0.33         | 0.35      |
| 39-40     | 0.28        | 0.41      | 0.34         | 0.28      |
| 40-41     | 0.26        | 0.47      | 0.33         | 0.41      |
| 41-42     | 0.23        | 0.42      | 0.33         | 0.40      |
| 42-43     | 0.26        | 0.47      | 0.30         | 0.44      |
| 43-44     | 0.28        | 0.41      | 0.30         | 0.33      |
| 44-45     | 0.28        | 0.41      | 0.31         | 0.50      |
| 45-46     | 0.30        | 0.44      | 0.31         | 0.38      |
| 46-47     | 0.27        | 0.46      | 0.30         | 0.32      |



### 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

|       |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
| 47-48 | 0.28 | 0.41 | 0.33 | 0.46 |
| 48-49 | 0.28 | 0.41 | 0.31 | 0.41 |
| 49-50 | 0.27 | 0.46 | 0.33 | 0.28 |
| 50-51 | 0.27 | 0.46 | 0.31 | 0.33 |
| 51-52 | 0.26 | 0.47 | 0.33 | 0.37 |
| 52-53 | 0.26 | 0.47 | 0.31 | 0.37 |
| 53-54 | 0.27 | 0.46 | 0.30 | 0.40 |
| 54-55 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.43 |
| 55-56 | 0.28 | 0.41 | 0.28 | 0.39 |
| 56-57 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.49 |
| 57-58 | 0.27 | 0.46 | 0.30 | 0.43 |
| 58-59 | 0.27 | 0.46 | 0.30 | 0.35 |
| 59-60 | 0.28 | 0.41 | 0.28 | 0.42 |
| 60-61 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.31 |
| 61-62 | 0.27 | 0.46 | 0.30 | 0.41 |
| 62-63 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.28 |
| 63-64 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.33 |
| 64-65 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.43 |
| 65-66 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.33 |
| 66-67 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.38 |
| 67-68 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.40 |
| 68-69 | 0.27 | 0.46 | 0.26 | 0.28 |
| 69-70 | 0.26 | 0.47 | 0.28 | 0.27 |
| 70-71 | 0.26 | 0.47 | 0.27 | 0.41 |
| 71-72 | 0.26 | 0.47 | 0.27 | 0.24 |
| 72-73 | 0.26 | 0.47 | 0.28 | 0.30 |
| 73-74 | 0.28 | 0.41 | 0.28 | 0.36 |
| 74-75 | 0.27 | 0.46 | 0.27 | 0.34 |
| 75-76 | 0.26 | 0.47 | 0.27 | 0.39 |
| 76-77 | 0.27 | 0.46 | 0.27 | 0.42 |
| 77-78 | 0.26 | 0.47 | 0.26 | 0.25 |
| 78-79 | 0.27 | 0.46 | 0.23 | 0.11 |
| 79-80 | 0.27 | 0.46 | 0.27 | 0.36 |
| 80-81 | 0.27 | 0.46 | 0.26 | 0.25 |
| 81-82 | 0.26 | 0.47 | 0.27 | 0.36 |
| 82-83 | 0.26 | 0.47 | 0.27 | 0.45 |
| 83-84 | 0.26 | 0.47 | 0.28 | 0.37 |
| 84-85 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.32 |
| 85-86 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.25 |
| 86-87 | 0.27 | 0.46 | 0.28 | 0.30 |
| 87-88 | 0.26 | 0.47 | 0.28 | 0.36 |
| 88-89 | 0.26 | 0.47 | 0.28 | 0.47 |
| 89-90 | 0.26 | 0.47 | 0.28 | 0.40 |



## 結果

表 8 以 A-DTS Toolbox 推估二次試驗不同深度之熱傳導係數與對應之擬合均方根誤差

| depth (m) | 第一次試驗 (4 月)       |           | 第二次試驗 (11 月)      |           |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
|           | $\lambda$ (W/m/K) | RMSE (°C) | $\lambda$ (W/m/K) | RMSE (°C) |
| 5-6       | 1.00              | 0.44      | 0.68              | 0.55      |
| 6-7       | 0.97              | 0.36      | 0.69              | 0.31      |
| 7-8       | 0.96              | 0.34      | 0.74              | 0.42      |
| 8-9       | 1.06              | 0.40      | 0.75              | 0.36      |
| 9-10      | 1.01              | 0.35      | 0.73              | 0.52      |
| 10-11     | 1.11              | 0.30      | 0.68              | 0.50      |
| 11-12     | 1.11              | 0.25      | 0.71              | 0.51      |
| 12-13     | 1.02              | 0.27      | 0.75              | 0.40      |
| 13-14     | 1.08              | 0.23      | 0.80              | 0.44      |
| 14-15     | 1.16              | 0.21      | 0.78              | 0.43      |
| 15-16     | 1.16              | 0.22      | 0.85              | 0.34      |
| 16-17     | 1.28              | 0.32      | 0.81              | 0.41      |
| 17-18     | 1.31              | 0.28      | 0.83              | 0.60      |
| 18-19     | 1.17              | 0.38      | 0.72              | 0.49      |
| 19-20     | 0.91              | 0.29      | 0.83              | 0.76      |
| 20-21     | 0.95              | 0.24      | 0.58              | 0.43      |
| 21-22     | 0.99              | 0.25      | 0.75              | 0.29      |
| 22-23     | 0.97              | 0.31      | 0.79              | 0.36      |
| 23-24     | 0.82              | 0.30      | 0.72              | 0.47      |
| 24-25     | 0.78              | 0.29      | 0.61              | 0.52      |
| 25-26     | 0.81              | 0.31      | 0.56              | 0.63      |
| 26-27     | 0.80              | 0.34      | 0.57              | 0.36      |
| 27-28     | 0.84              | 0.34      | 0.63              | 0.54      |
| 28-29     | 0.82              | 0.30      | 0.52              | 0.34      |
| 29-30     | 0.94              | 0.36      | 0.71              | 0.36      |
| 30-31     | 0.83              | 0.32      | 0.68              | 0.54      |
| 31-32     | 0.83              | 0.33      | 0.61              | 0.31      |
| 32-33     | 0.81              | 0.40      | 0.72              | 0.48      |
| 33-34     | 0.88              | 0.34      | 0.65              | 0.36      |
| 34-35     | 0.91              | 0.30      | 0.71              | 0.48      |
| 35-36     | 1.01              | 0.32      | 0.71              | 0.35      |
| 36-37     | 1.06              | 0.24      | 0.74              | 0.42      |
| 37-38     | 1.17              | 0.28      | 0.76              | 0.35      |
| 38-39     | 1.21              | 0.28      | 0.99              | 0.28      |
| 39-40     | 1.17              | 0.21      | 1.10              | 0.41      |
| 40-41     | 1.15              | 0.19      | 0.88              | 0.40      |
| 41-42     | 1.07              | 0.23      | 0.88              | 0.44      |
| 42-43     | 1.16              | 0.25      | 0.81              | 0.33      |
| 43-44     | 1.22              | 0.28      | 0.91              | 0.50      |
| 44-45     | 1.16              | 0.28      | 0.94              | 0.38      |



### 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

|       |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
| 45-46 | 1.20 | 0.27 | 1.00 | 0.32 |
| 46-47 | 1.13 | 0.30 | 1.06 | 0.46 |
| 47-48 | 1.16 | 0.24 | 0.96 | 0.41 |
| 48-49 | 1.23 | 0.26 | 0.98 | 0.28 |
| 49-50 | 1.12 | 0.21 | 1.17 | 0.33 |
| 50-51 | 1.20 | 0.26 | 0.95 | 0.37 |
| 51-52 | 1.05 | 0.26 | 1.01 | 0.37 |
| 52-53 | 1.09 | 0.30 | 0.96 | 0.40 |
| 53-54 | 1.04 | 0.34 | 0.83 | 0.43 |
| 54-55 | 1.02 | 0.33 | 0.79 | 0.39 |
| 55-56 | 1.02 | 0.28 | 0.86 | 0.49 |
| 56-57 | 1.09 | 0.32 | 0.70 | 0.43 |
| 57-58 | 1.07 | 0.34 | 0.80 | 0.35 |
| 58-59 | 1.10 | 0.49 | 0.84 | 0.42 |
| 59-60 | 0.84 | 0.29 | 0.80 | 0.31 |
| 60-61 | 1.08 | 0.26 | 0.89 | 0.41 |
| 61-62 | 1.09 | 0.26 | 0.79 | 0.28 |
| 62-63 | 1.14 | 0.25 | 0.91 | 0.33 |
| 63-64 | 1.11 | 0.27 | 0.86 | 0.43 |
| 64-65 | 1.07 | 0.26 | 0.70 | 0.33 |
| 65-66 | 1.12 | 0.24 | 0.82 | 0.38 |
| 66-67 | 1.13 | 0.26 | 0.77 | 0.40 |
| 67-68 | 1.10 | 0.27 | 0.81 | 0.28 |
| 68-69 | 1.05 | 0.26 | 0.85 | 0.27 |
| 69-70 | 1.15 | 0.22 | 0.88 | 0.41 |
| 70-71 | 1.11 | 0.29 | 0.73 | 0.24 |
| 71-72 | 1.03 | 0.22 | 0.90 | 0.30 |
| 72-73 | 1.13 | 0.25 | 0.83 | 0.36 |
| 73-74 | 1.16 | 0.26 | 0.77 | 0.34 |
| 74-75 | 1.13 | 0.25 | 0.77 | 0.39 |
| 75-76 | 1.11 | 0.25 | 0.76 | 0.42 |
| 76-77 | 1.10 | 0.24 | 0.68 | 0.25 |
| 77-78 | 1.15 | 0.26 | 0.80 | 0.11 |
| 78-79 | 1.16 | 0.30 | 0.84 | 0.36 |
| 79-80 | 1.02 | 0.28 | 0.77 | 0.25 |
| 80-81 | 1.03 | 0.26 | 0.84 | 0.36 |
| 81-82 | 1.04 | 0.28 | 0.80 | 0.45 |
| 82-83 | 1.09 | 0.25 | 0.73 | 0.37 |
| 83-84 | 1.10 | 0.29 | 0.80 | 0.32 |
| 84-85 | 1.05 | 0.26 | 0.84 | 0.32 |
| 85-86 | 1.10 | 0.32 | 0.77 | 0.25 |
| 86-87 | 1.02 | 0.28 | 0.84 | 0.30 |
| 87-88 | 1.07 | 0.27 | 0.80 | 0.36 |
| 88-89 | 1.10 | 0.28 | 0.73 | 0.47 |
| 89-90 | 1.10 | 0.24 | 0.80 | 0.40 |



## 結果

### 5-2-4 單井流速分析與 A-DTS Toolbox 結果之比較

在上述章節中在上述章節中，以 Bakker et al. (2015) 的熱傳輸解析公式與 A-DTS toolbox (Simon et al., 2021) 分別針對單井進行流速分析，兩種不同方式的擬合結果一致性均非常高，亦能夠準確反應含水層之相對透水區段。為能更了解兩者在使用上的差異與功能，在此章節中嘗試討論其使用方式與結果比較。

兩者的程式設計目的皆為加熱光纖所使用之單井加熱溫度訊號，藉由熱能在地下含水層的流動與傳遞，針對每個深度區間的溫度變化進行溫度擬合進行加熱溫度之擬合，以特徵化含水層，獲得地下水之流速。

熱傳輸解析公式在模式上有一個前提為：觀測井設定在同一含水層且岩性組成變化變異性不大的假設下，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，必須先行輸入各個參數以進行擬合。其中 Bakker et al. (2015) 的熱傳輸解析公式，可進行水平方向上的二維模擬，並可對各深度間距之水流速度進行推估。

A-DTS Toolbox 之計算公式亦可進行單井流速分析，其特點是可以去除光纖纜線批覆層的熱傳導效應，並同時針對井下各深度的熱傳導係數及水流速度進行推估，獲得更為細微之流速變化資料。模式在進行設定時僅需輸入多孔隙介質與水之體積比熱容，因此在模式設定與計算上更為便利。相較於 Bakker et al. (2015) 的熱傳輸解析公式，A-DTS Toolbox 僅能針對沿著光纖纜線上量測點的水平流速進行推估。

由



# 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

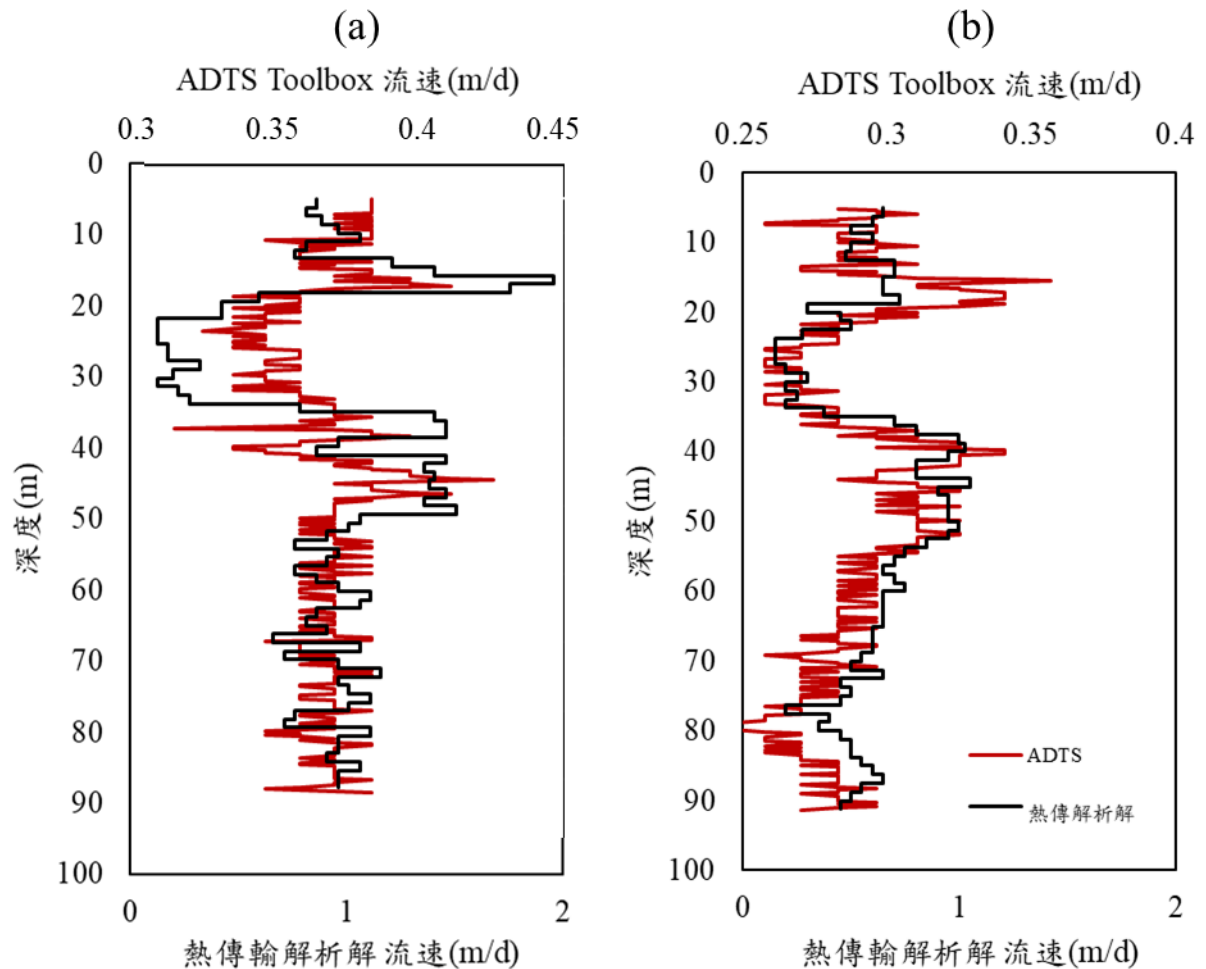


圖 37 之比較可得知，熱傳輸解析公式與 A-DTS Toolbox 之計算公式皆可觀察到深度 20 至 35 公尺之第一滯水層位置的流速變化，且皆可觀察到第一含水層的流速比第二水層要快，符合地質背景調查結果；此外，A-DTS Toolbox 之計算公式在進行熱傳導係數的推算結果，符合各個地層之地質背景材料之熱傳導係數，與先前之地質調查結果相符。



## 結果

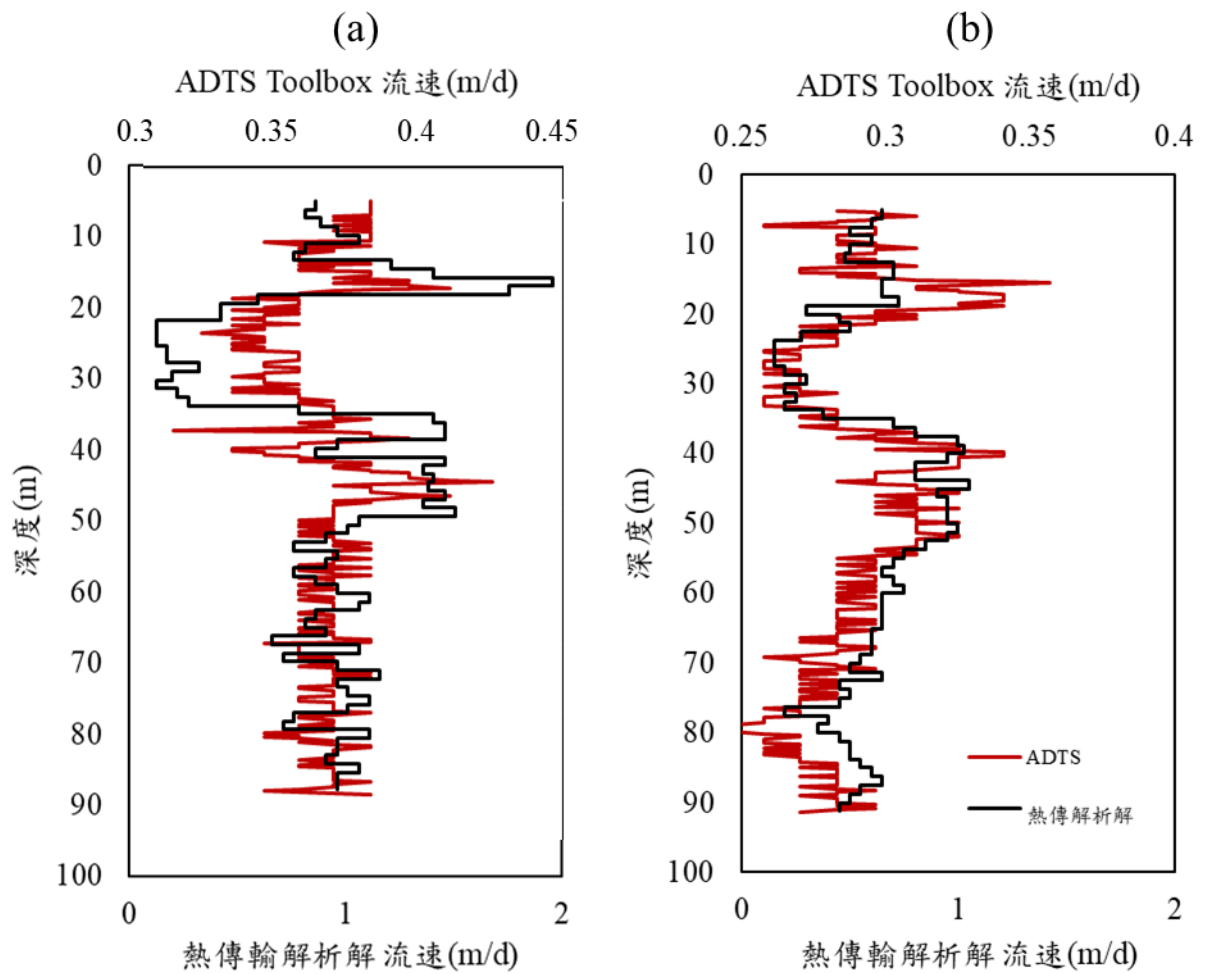


圖 37 試驗流速分析之絕對流速隨深度變化比較(a)第一次試驗 (b)第二次試驗(黑線為熱傳輸解析公式流速，紅線為 A-DTS Toolbox 流速)



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 第一次試驗下游觀測井 K00264 溫度剖面量測(淺層)

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 38 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 39 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 40 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 41a)，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 40 與圖 41a 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



## 結果

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 42 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 41b)，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，二井的透水區段判釋存在差異性，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

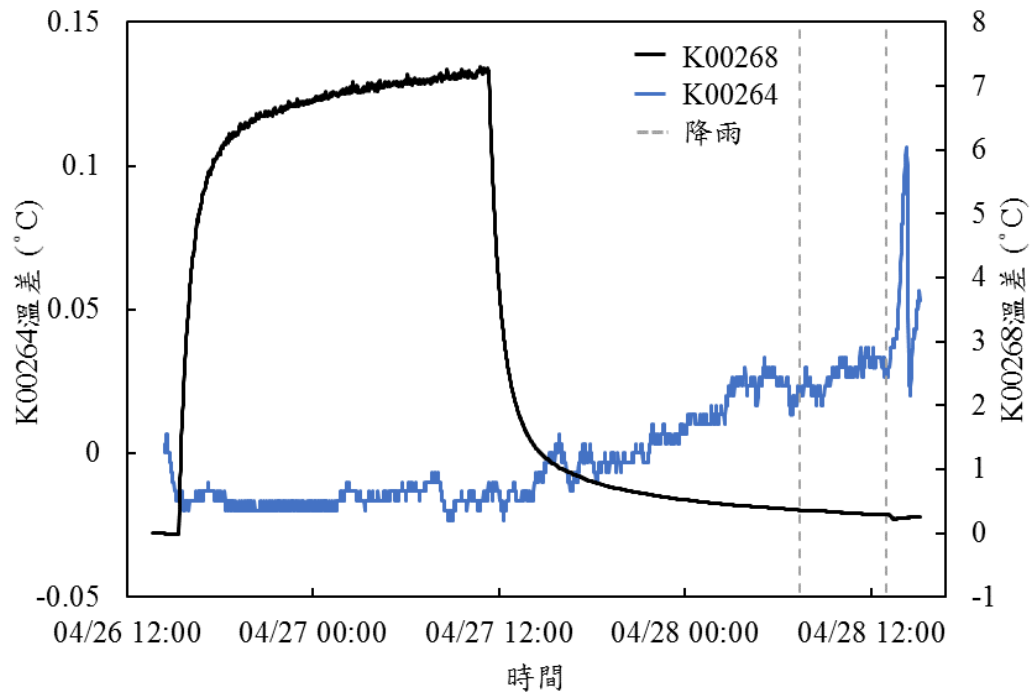


圖 38 第一次試驗加熱井 K00268(深度 10m)與觀測井 K00264(深度 10m)透破曲線 (溫度為實體溫度計量測結果，虛線為降雨事件發生時間)

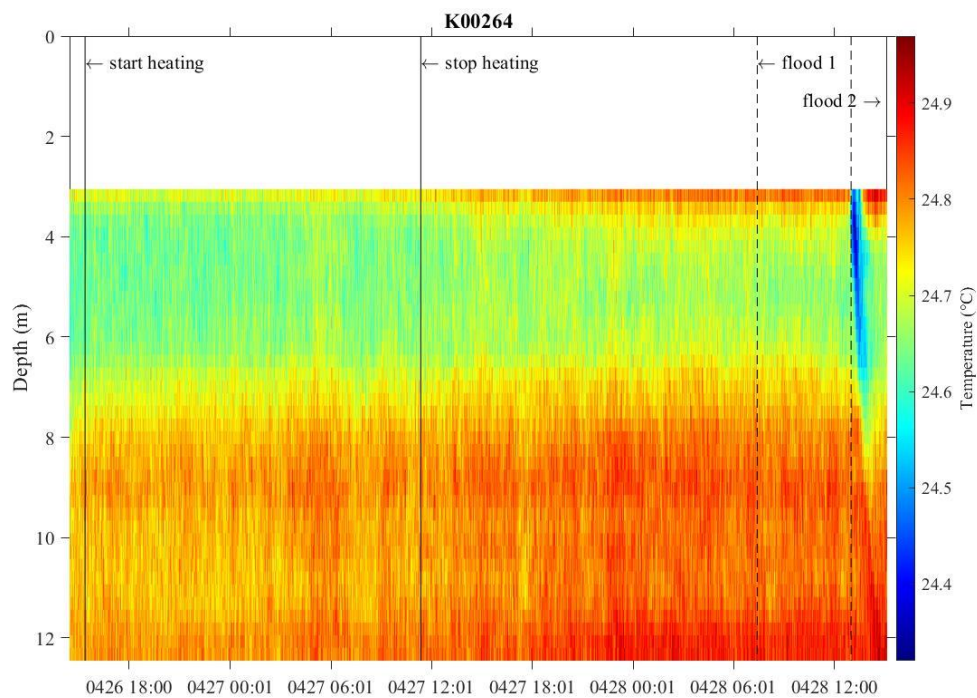


圖 39 第一次試驗觀測井 K00264 的 DTS 絕對溫度量測結果 (實線為 K00268 加熱時間，虛線為降雨事件發生時間)



## 結果

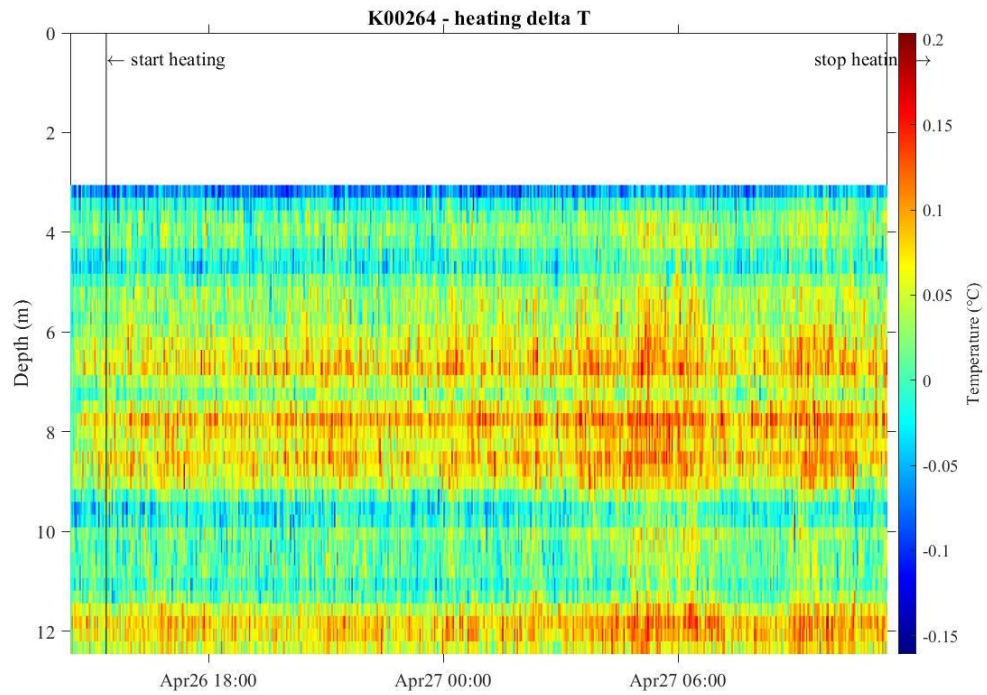


圖 40 第一次試驗加熱期間觀測井 K00264 的溫度差變化(實線為 K00268 加熱時間)

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

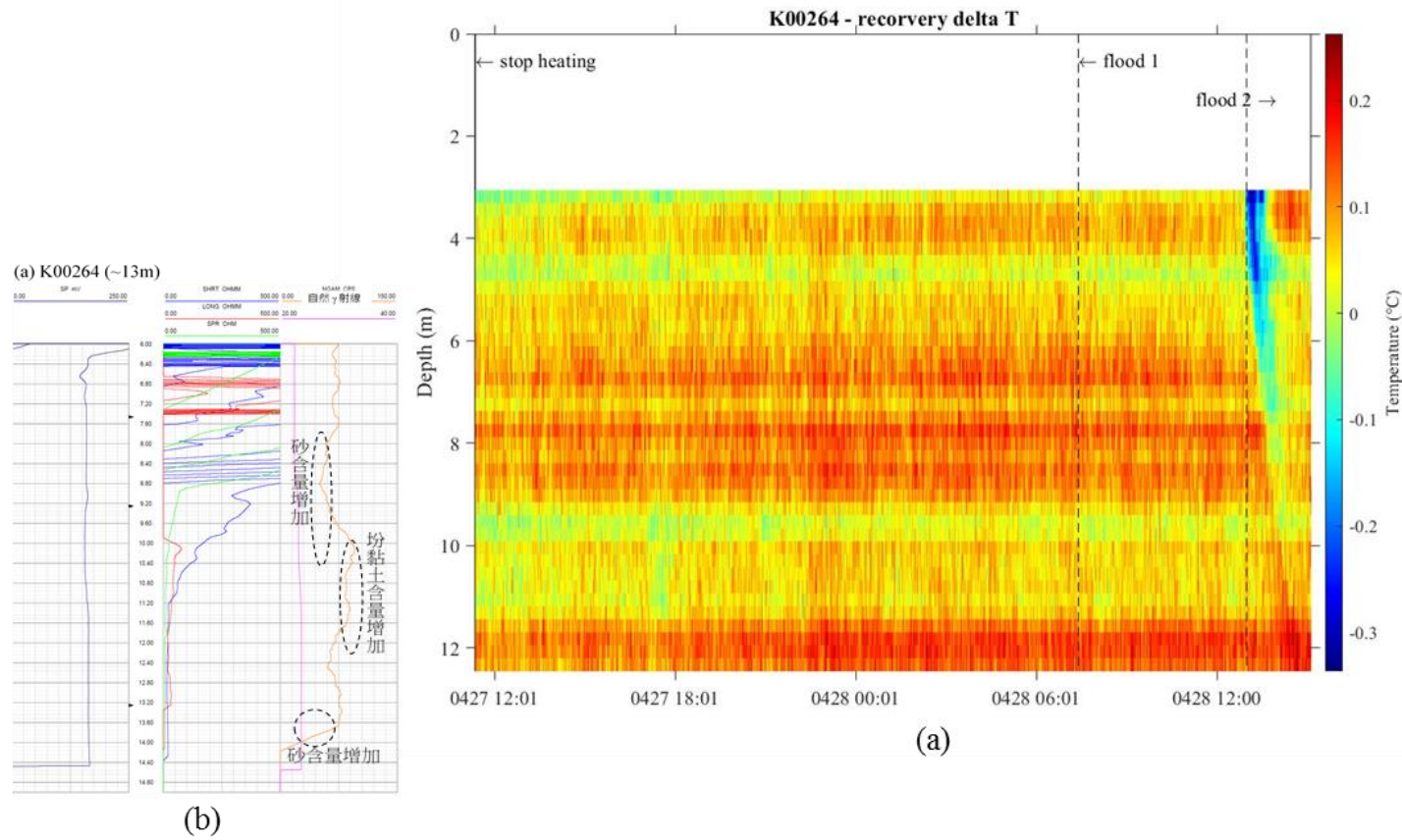


圖 41 第一次試驗 K00264 溫度剖面與文獻資料比對 (a) K00268 回溫期間的 K00264 溫度差變化 (實線為 K00268 停止加熱時間，虛線為降雨事件發生時間) (b) K00264 井測資料(摘自中港溪地下水污染評估與調查計畫)



## 結果

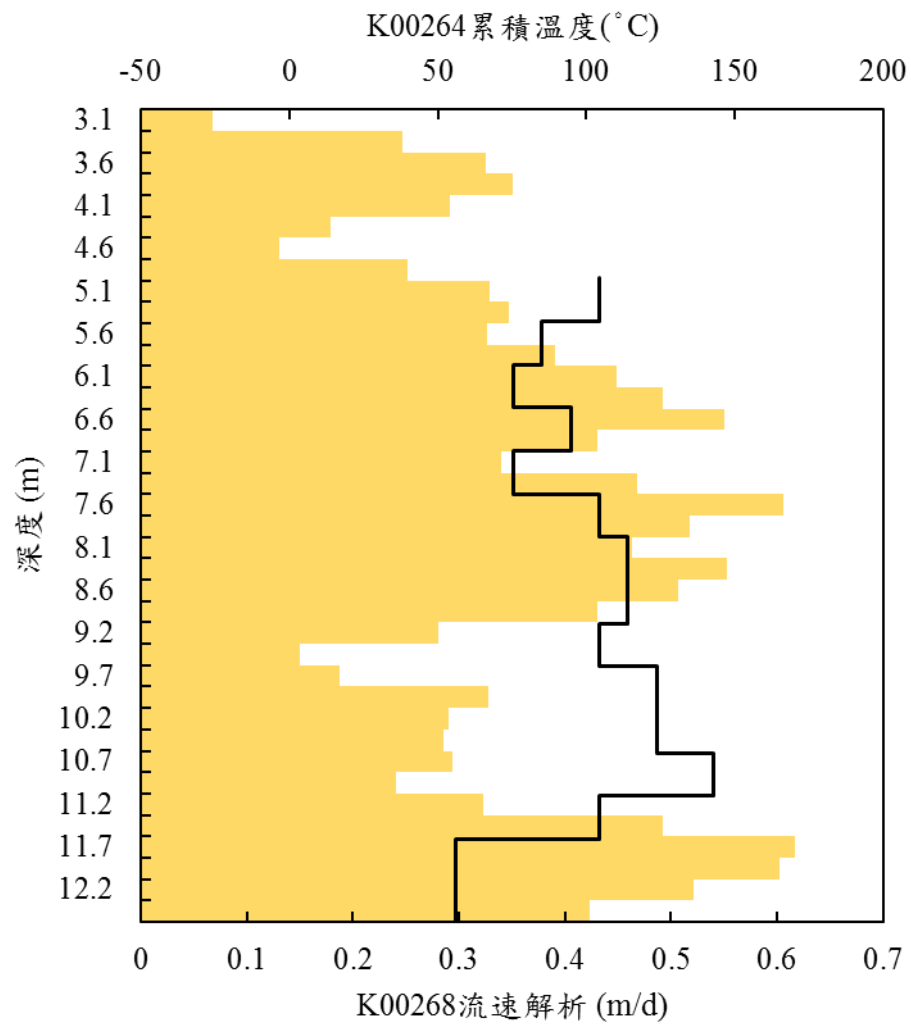


圖 42 第一次試驗 K00264 各深度累積溫差圖與 K00268 流速解析



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

### 5-3-2 第二次試驗下游觀測井 K00264 溫度剖面量測(淺層與深層)

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，因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，並且同樣以井 K00264 作為觀測井，以期在地下水流下游方向或的熱能訊號。此外，增加 K00266、K00269 與 K00265 作為更下游之溫度觀測井，同步進行淺層與深層含水層熱能訊號的監測。

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 43 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 43a 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可以發現，位在第一含水層之 K00264 與 K00265 仍然具有明顯的溫度上升現象，而位在第二含水層 K00266 與位在第三含水層 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  $0.2^{\circ}\text{C}$  作為基準，若溫差小於  $0.2^{\circ}\text{C}$  視為背景雜訊，而溫差大於  $0.2^{\circ}\text{C}$  便可視為升溫的訊號。圖 43b 為各井溫差篩選結果，可以發現位在第一含水層之在 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 44)，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 45，雖然溫度計擺放於不同深度，但是兩次的溫度資



## 結果

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。雖然同為第一含水層的 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，由圖 46 結果可知，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。

然而位在第二含水層之觀測井 K00269，透過試驗時安裝在井內特定深度的實體溫度計水溫測量結果進行驗證，不論是 DTS 或實體溫度計的量測結果，K00269 井內水溫並沒有明顯的升溫現象(圖 44)，根據加熱功率與影響半徑之間關係的分析結果(圖 46)，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，K00269 與加熱井之間距離為 8 公尺，已超過此影響半徑，欲使觀測井內水溫接受到上游加熱井熱源影響之可能性較低。

綜合以上所述，第一含水層之 K00264 收到了顯著的溫度升溫，由於距離較近，溫度資料接收到溫度訊號的時間點符合熱源影響，受本次試驗之熱源釋放所影響之可能性高；第一含水層的 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，且與加熱井之間距離為 9 公尺，超過影響半徑，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；第一滯水層之 K00266 截至試驗結束前，都並未收到溫度訊號，溫度維持於背景溫度左右；第二含水層之觀測井 K00269 截至試驗結束前，同樣未能收到溫度訊號，溫度維持於背景溫度左右，推測與加熱井之間距離為 8 公尺，超過影響半徑，導致並未收到溫度訊號。

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

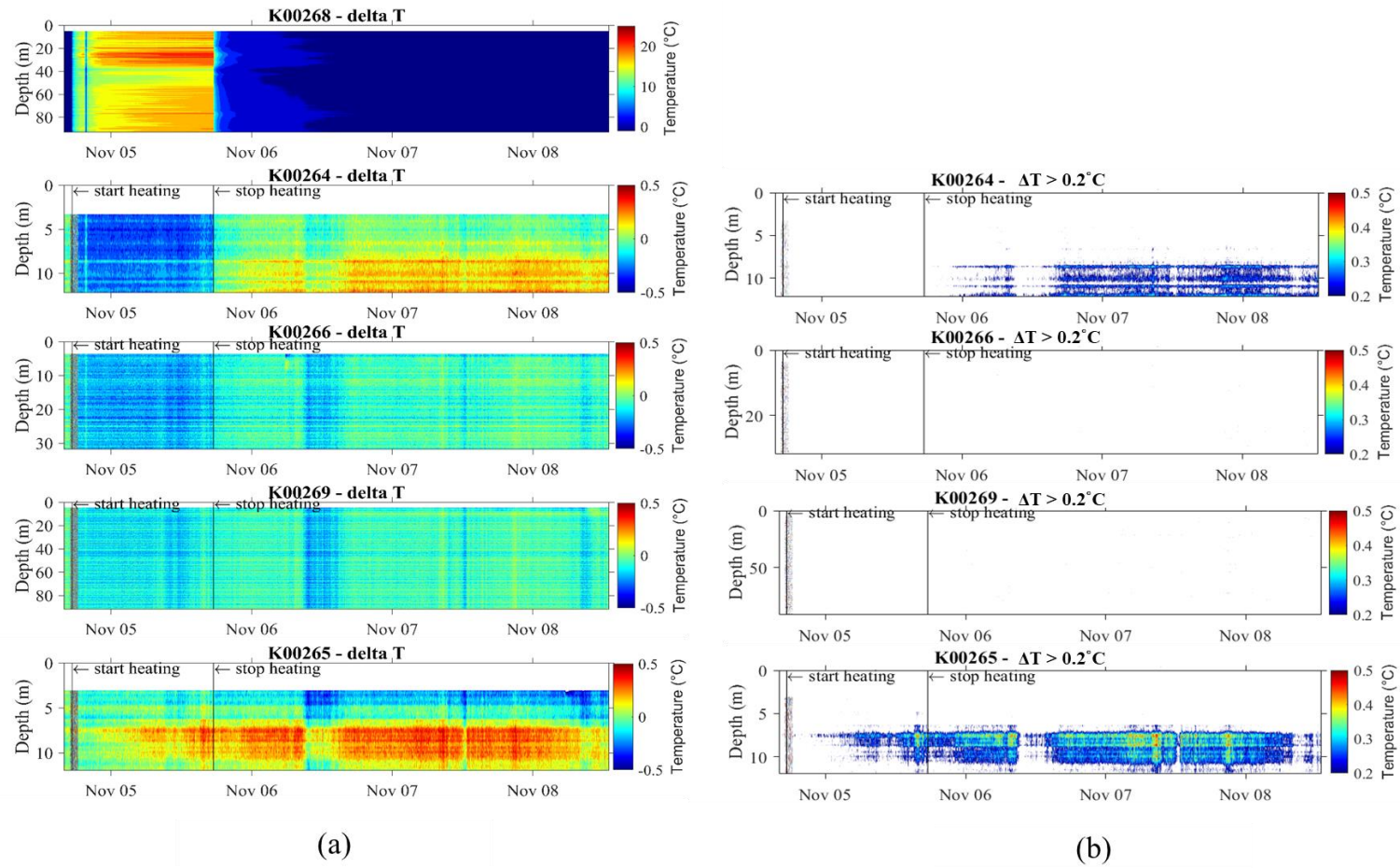


圖 43 跨孔熱示蹤試驗結果 (a)各井溫差隨時間變化 (b)溫差大於  $0.2^{\circ}\text{C}$  之接收訊號



## 結果

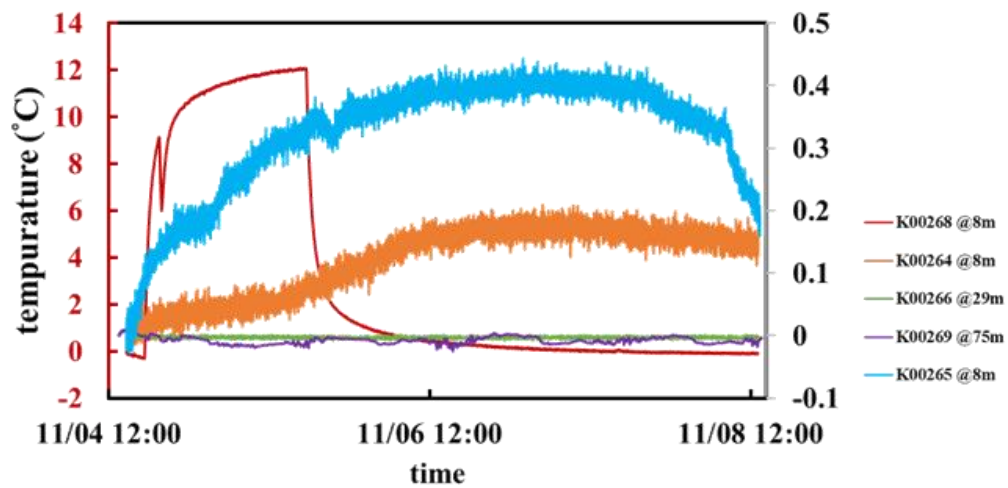


圖 44 第二次試驗各井水溫變化(以實體溫度計進行量測)

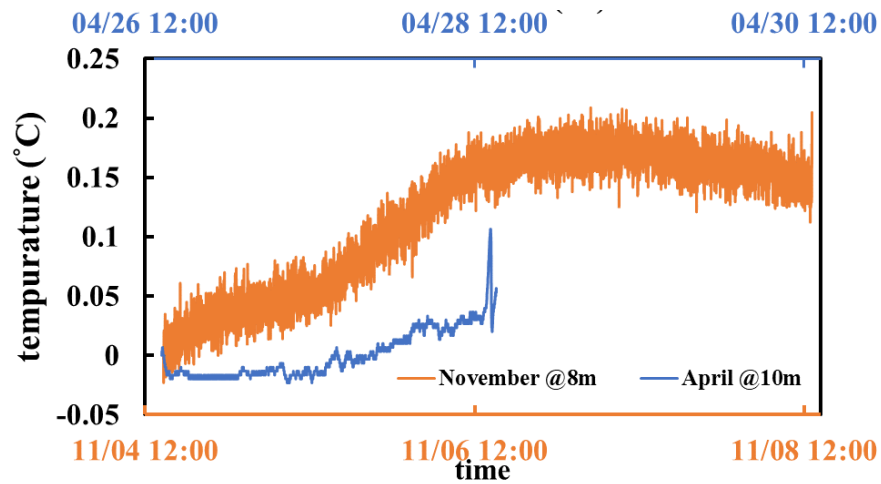


圖 45 兩次試驗 K00264 水溫變化比較(以實體溫度進行量測，藍色實線為第一次試驗結果、橘色實線為第二次試驗結果)



## 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

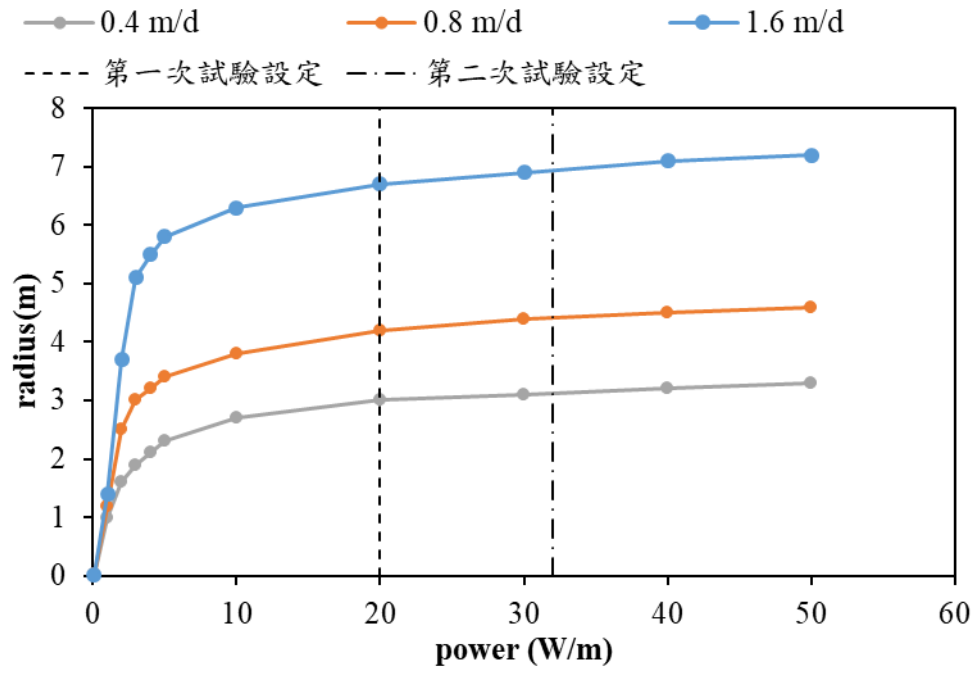


圖 46 加熱功率與影響半徑關係



## 結果

### 5-4 數值模式模擬

本研究於第一年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、第一滯水層與第二含水層，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，由於第二含水層並未接收到來自跨井的資料，故僅討論各參數之敏感度分析。

#### 5-4-1 模式建置

圖 47 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 48)，並且僅考慮加熱後產生的熱



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  
能在地層中隨著地下水流動。

表 9 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(1<sup>st</sup> 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  $0.00021 \text{m}^3/\text{kg}$ 。

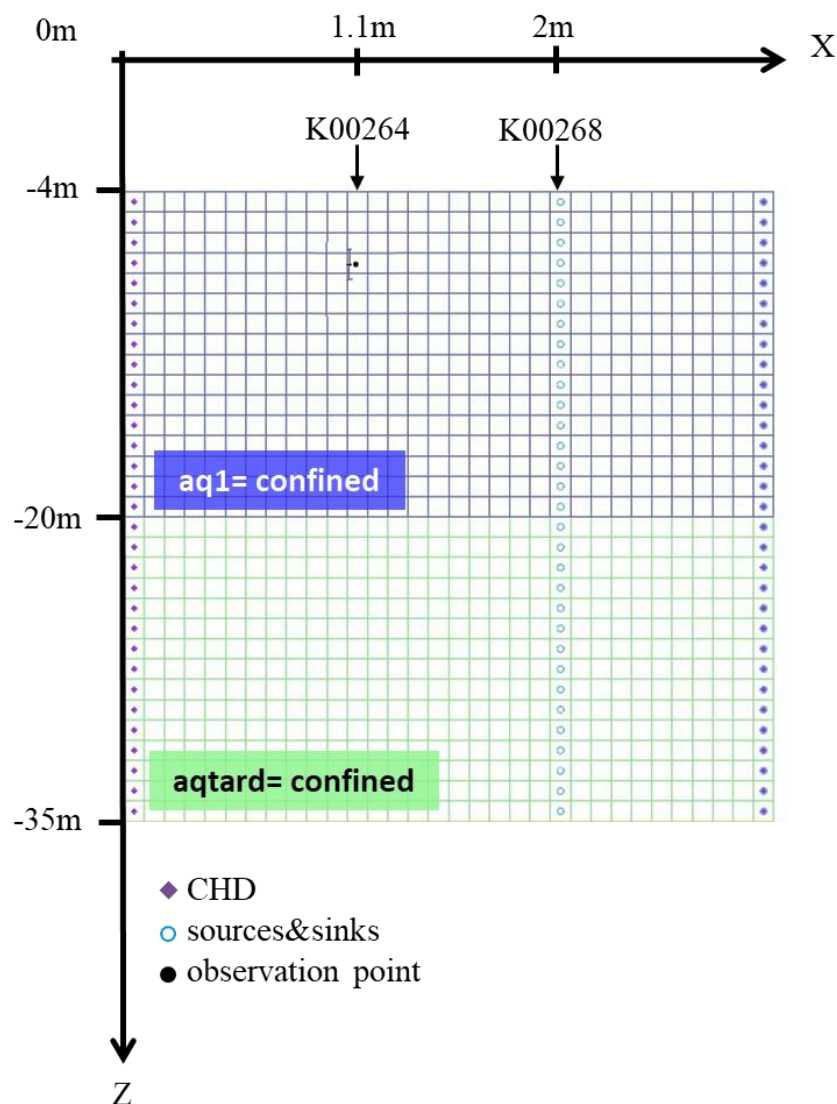


圖 47 第二次試驗數值模式網格劃分



## 結果

表 9 第二次試驗參數設定

|                                | 第一含水層                                          | 第一滯水層                 | 第二含水層                |
|--------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>MODFLOW</b>                 |                                                |                       |                      |
| 水力傳導係數(m/s)                    | $2.5 \times 10^{-5}$<br>( $5 \times 10^{-6}$ ) | $2.07 \times 10^{-6}$ | $2 \times 10^{-6}$   |
| 比儲水量                           | $1.6 \times 10^{-4}$                           | $1.6 \times 10^{-3}$  | $1.6 \times 10^{-4}$ |
| 初始水頭(m)                        | 5.42                                           | 5.48                  | 3.61                 |
| <b>MT3DMS</b>                  |                                                |                       |                      |
| 縱向延散度(m)                       | 0.38 (1)                                       |                       |                      |
| 吸附常數( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) | $2.10 \times 10^{-4}$                          |                       |                      |

\*括號內為初始參數設定

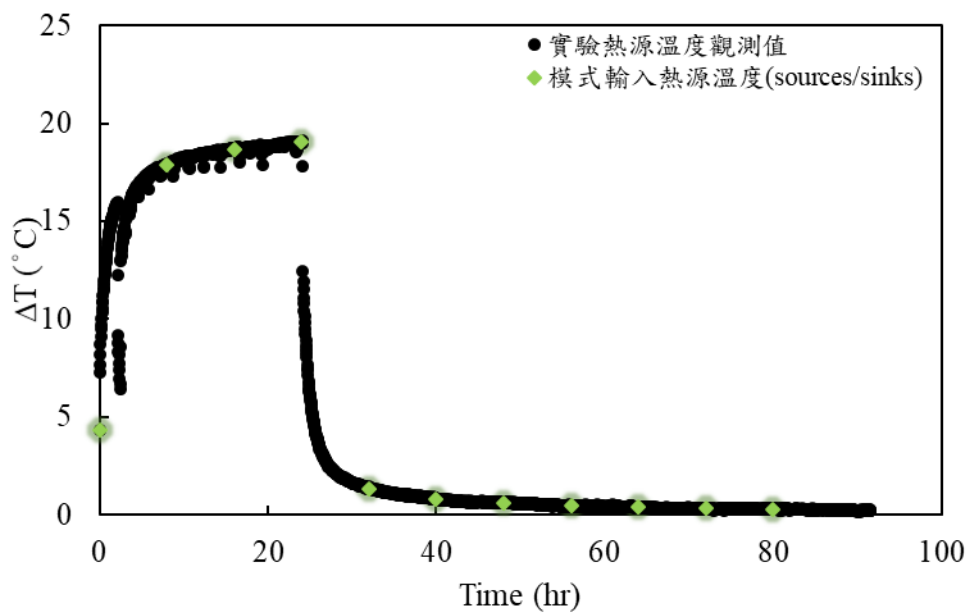


圖 48 第二次試驗加熱井 K00268 熱源輸入值（實驗熱源溫度觀測值由 FO-DTS 所量測獲得）



## 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

本研究於第一年期中報告時，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 10 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  $1.25 \times 10^{-5}$  m/s、熱延散係數為 0.65m，溫度之模擬值與觀測值之均方根誤差(root mean square error, RMSE)為  $7.89 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ ，擬合結果良好（以上結果摘自第一年期中報告）。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 10 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)                    | $1.25 \times 10^{-5}$<br>( $5 \times 10^{-6}$ ) | $2.07 \times 10^{-6}$ |
| 比儲水係數( $\text{m}^{-1}$ )       | $1.6 \times 10^{-4}$                            | $1.6 \times 10^{-3}$  |
| 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( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) | $2.10 \times 10^{-4}$                           |                       |

\*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

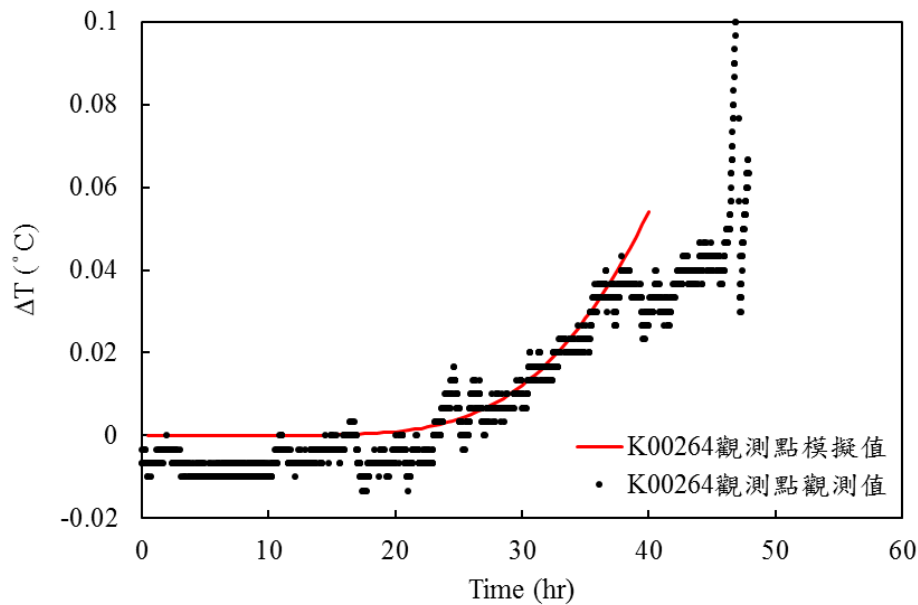


圖 49 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果

## 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 50 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  $2.5 \times 10^{-5}$  m/s、熱延散係數為 0.38m，溫度之模擬值與觀測值之均方根誤差(root mean square error, RMSE)為  $4.08 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，擬合結果良好。

圖 51 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 52 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 53 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 54 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均方根誤差(RMSE)為  $2.5 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

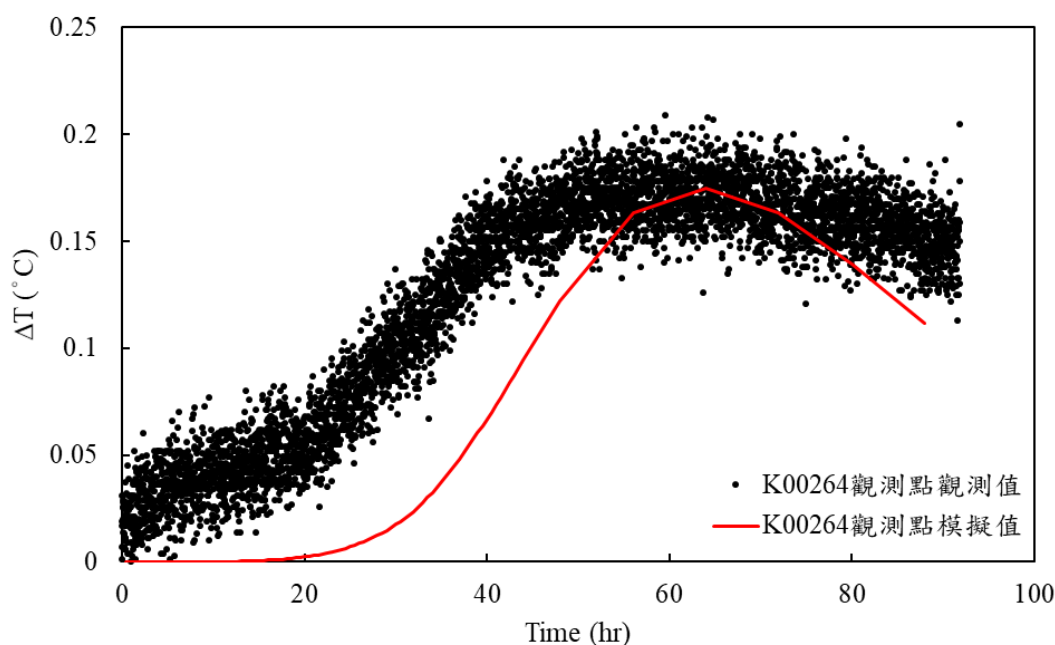


圖 50 第二次試驗觀測井溫度差破透曲線擬合結果 (RMSE =  $4.08 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}$ )



## 結果

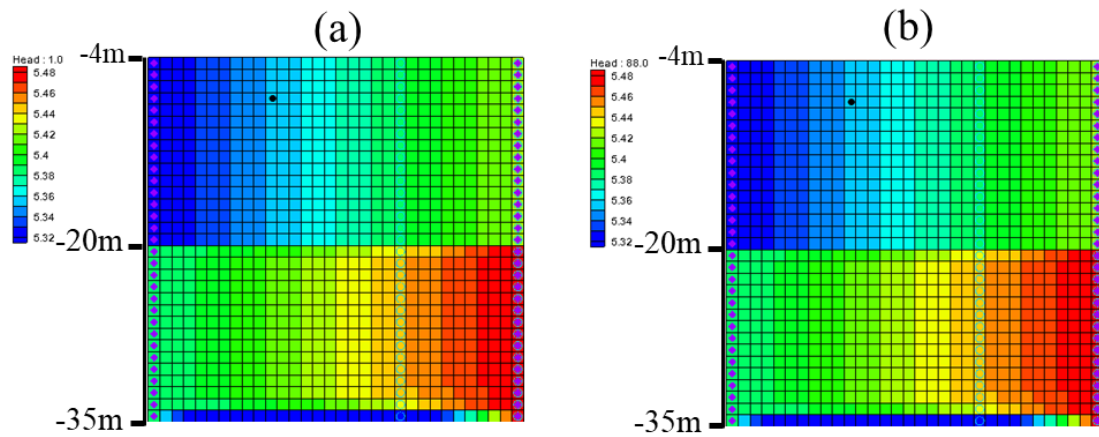


圖 51 地下水流場模擬結果：(a)初始水位 (b)最終模擬水位

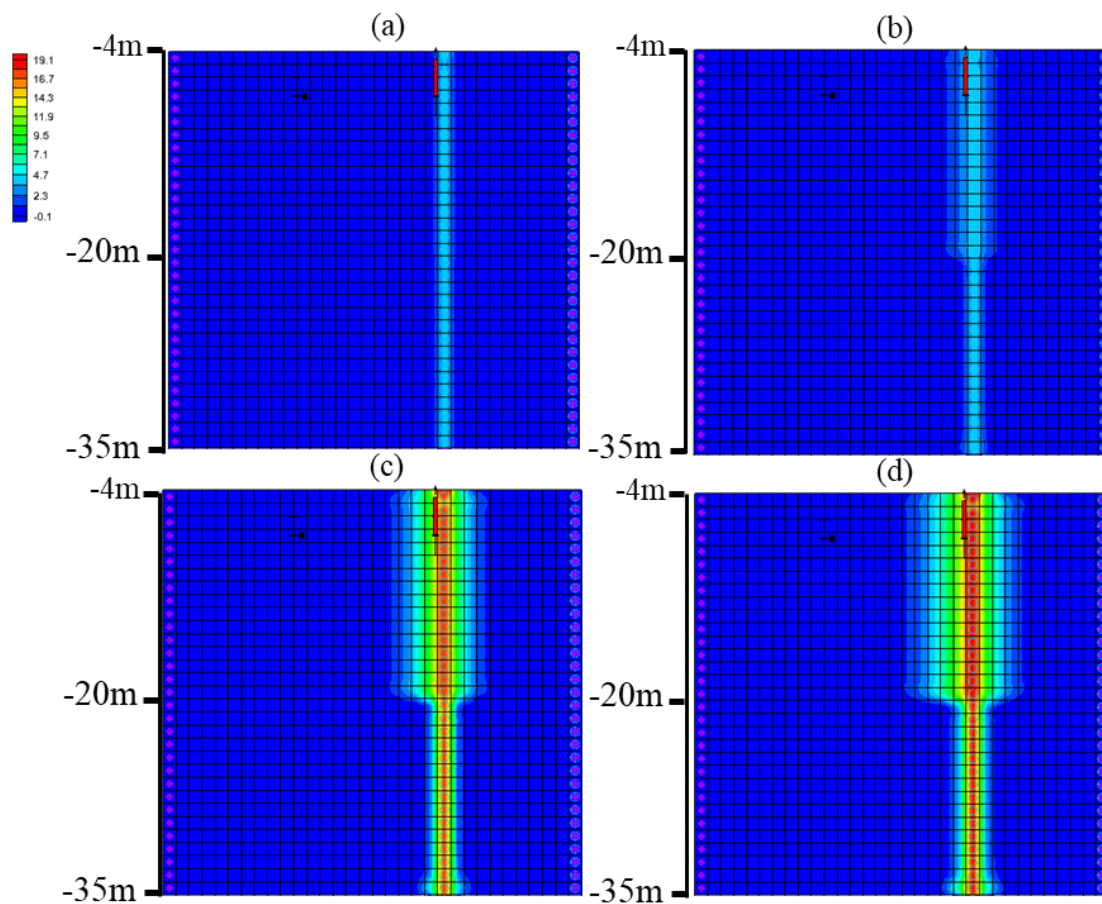


圖 52 加熱過程溫度模擬結果：(a)第 0.5 小時，(b)第 8 小時(開始加熱) (c)第 16 小時，(d)第 24 小時



# 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

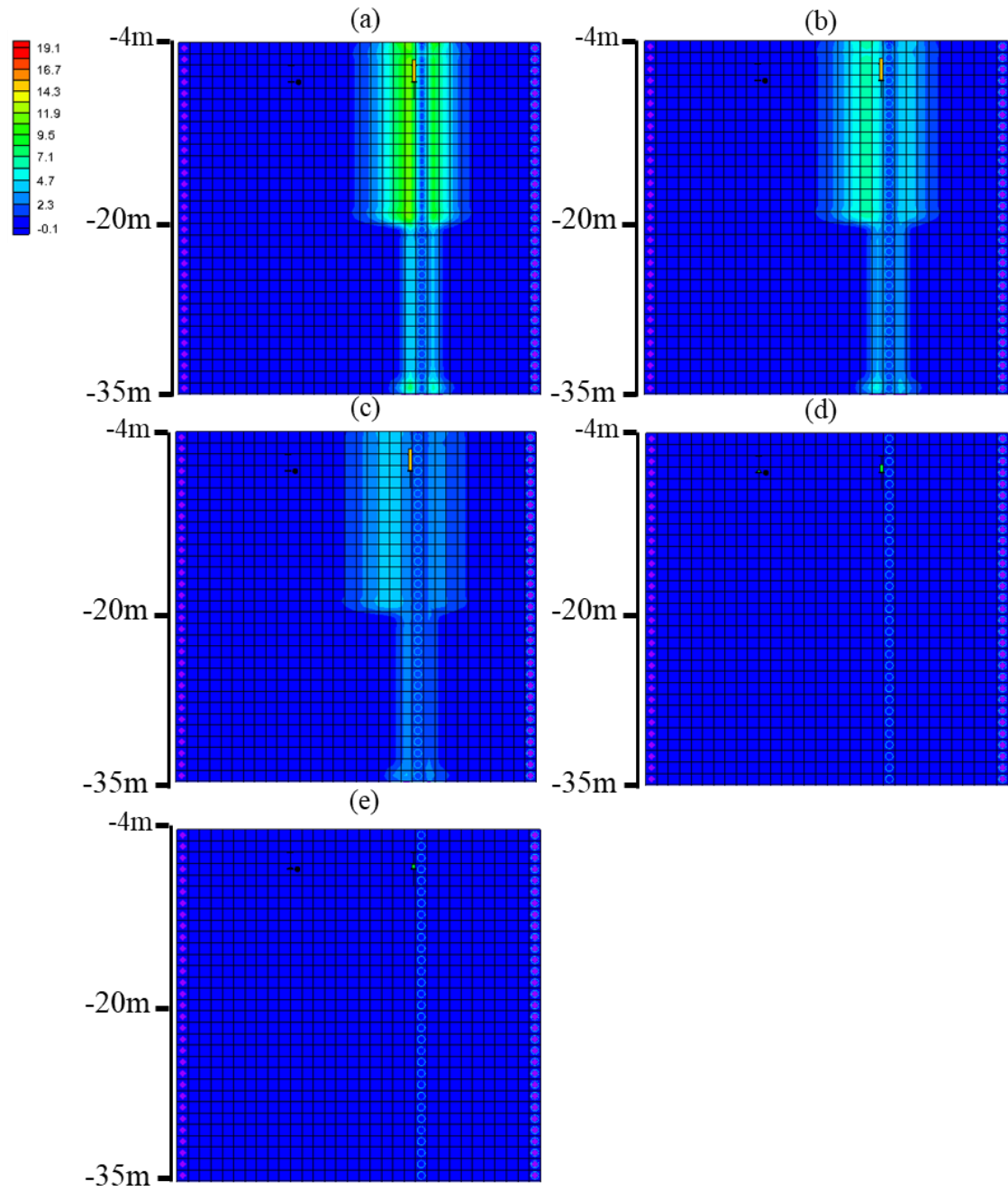


圖 53 回溫過程溫度模擬結果：(a)第 32.5 小時(加熱停止)，(b)第 36 小時，(c)第 40 小時，(d)第 64 小時，(e)第 88 小時



## 結果

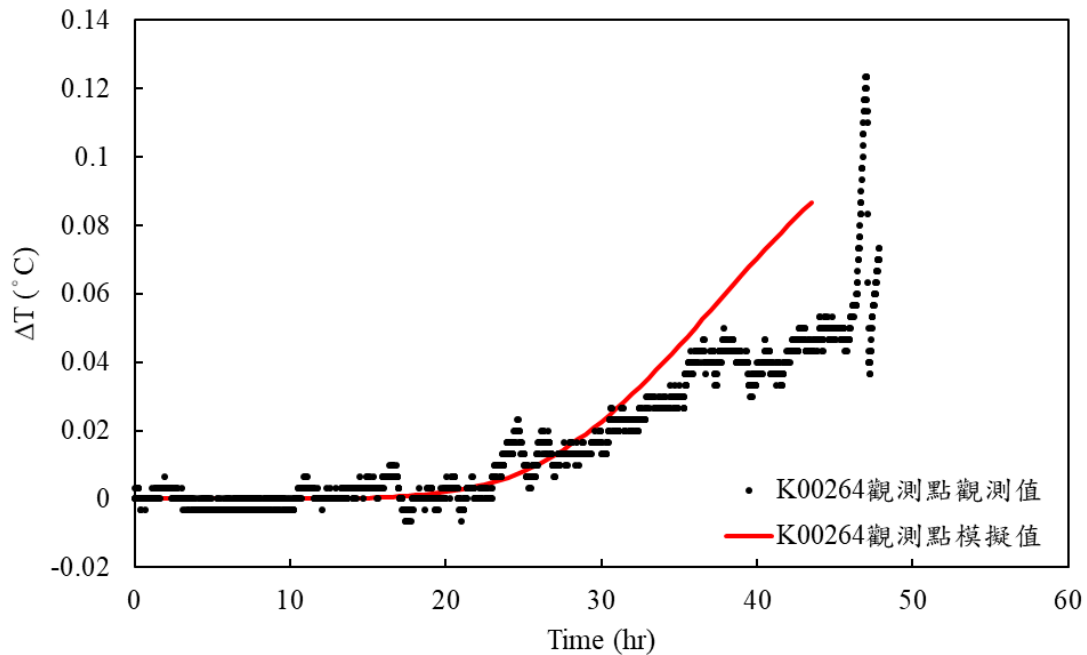


圖 54 第一次試驗觀測井溫度差破透曲線驗證結果(RMSE= $2.5 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}$ )

#### 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 55 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 55a 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  $0.11^{\circ}\text{C}$ (hk-20%)至最高溫  $0.31^{\circ}\text{C}$ (hk+20%)，溫差達  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。圖 55b 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  $0.14^{\circ}\text{C}$ (hk-20%)至最高溫  $0.26^{\circ}\text{C}$ (hk+20%)，溫差達  $0.12^{\circ}\text{C}$ 。由分析結果顯示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

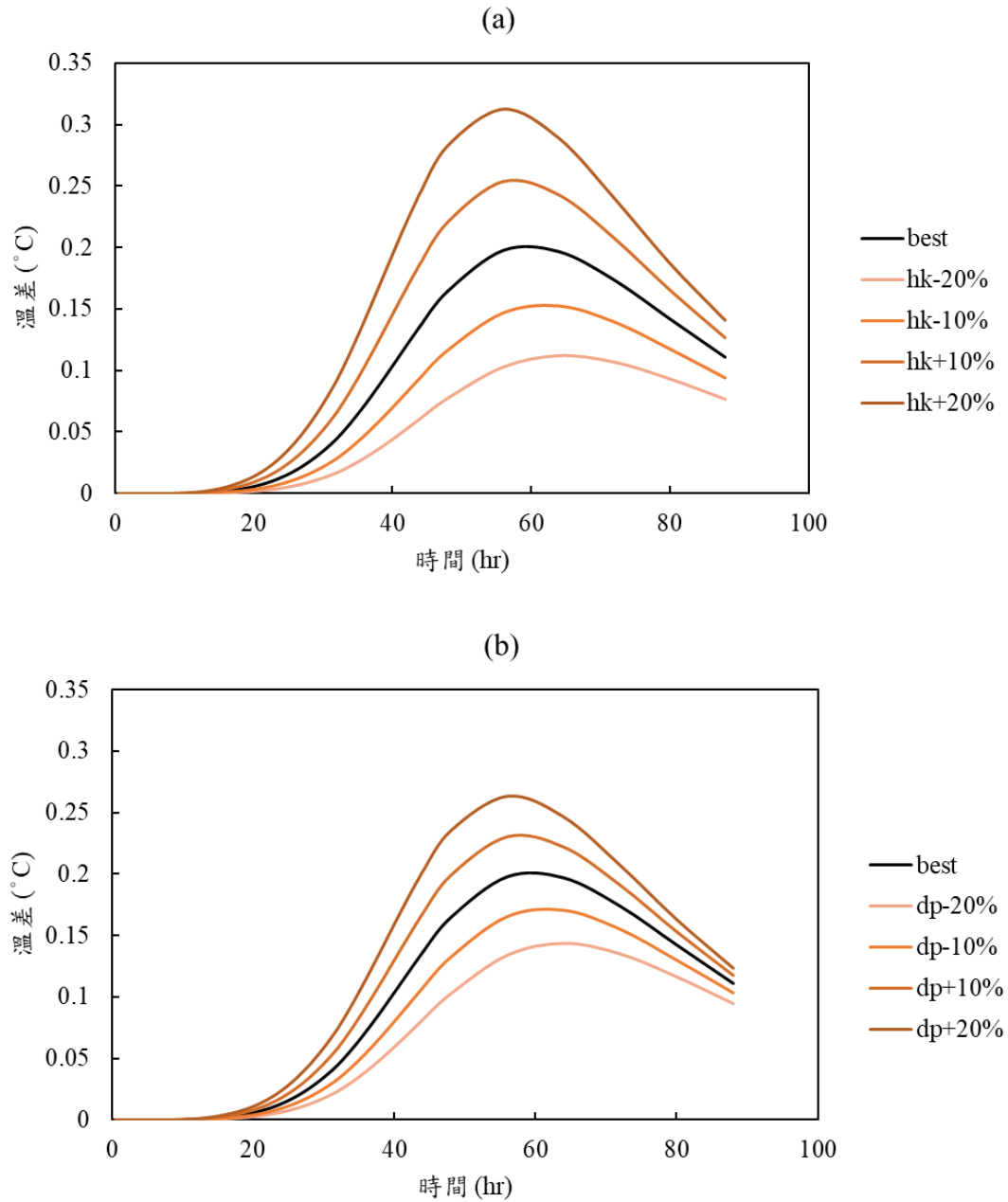


圖 55 參數敏感度分析 (a)水平水力傳導係數 (b)延散係數



## 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。本研究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 56)。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 57a)，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 57b 與圖 57c 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)與雙芯光纖。



# 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

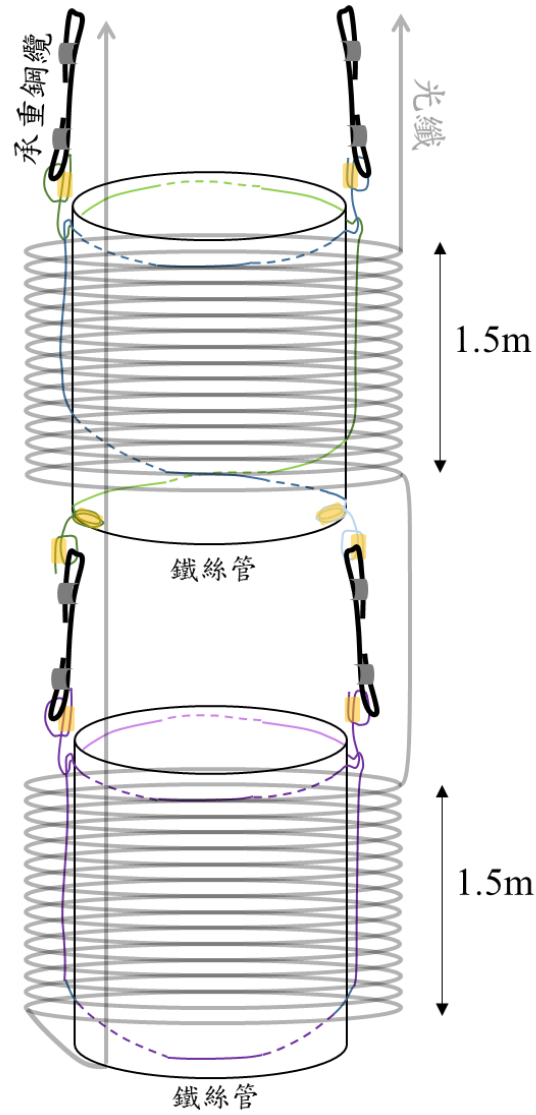


圖 56 高解析度纏繞光纖示意圖



## 結果

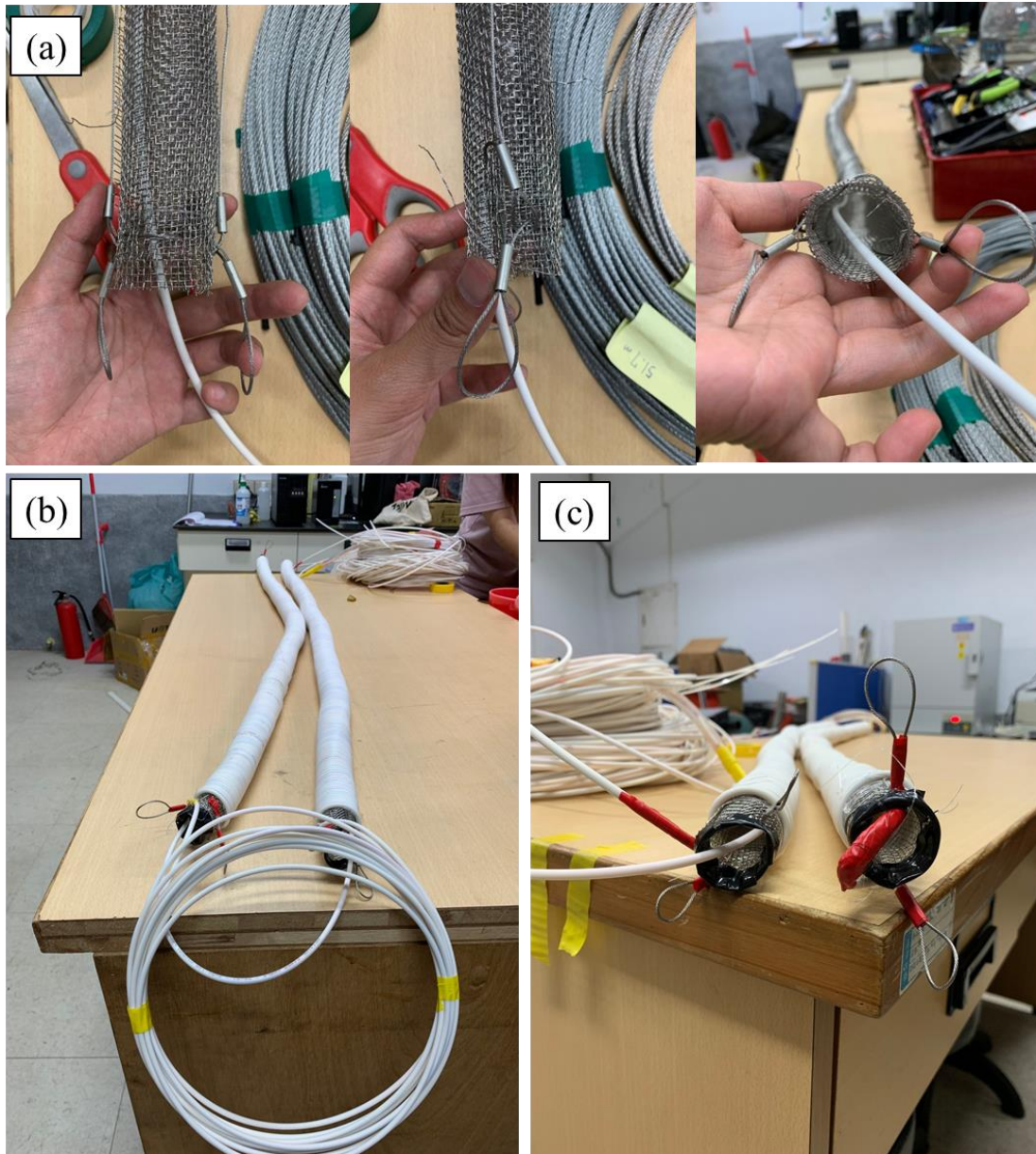


圖 57 高解析度纏繞光纖成品 (a)鐵絲管設計 (b)兩個纏繞光纖裝置串聯方式 (c)纏繞光纖裝置頂端(左)與底部(右)



## 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 現地試驗結果

本研究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 26)，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 59 為試驗結果，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 59a 與圖 59c 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 59b 與圖 59d 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 60 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

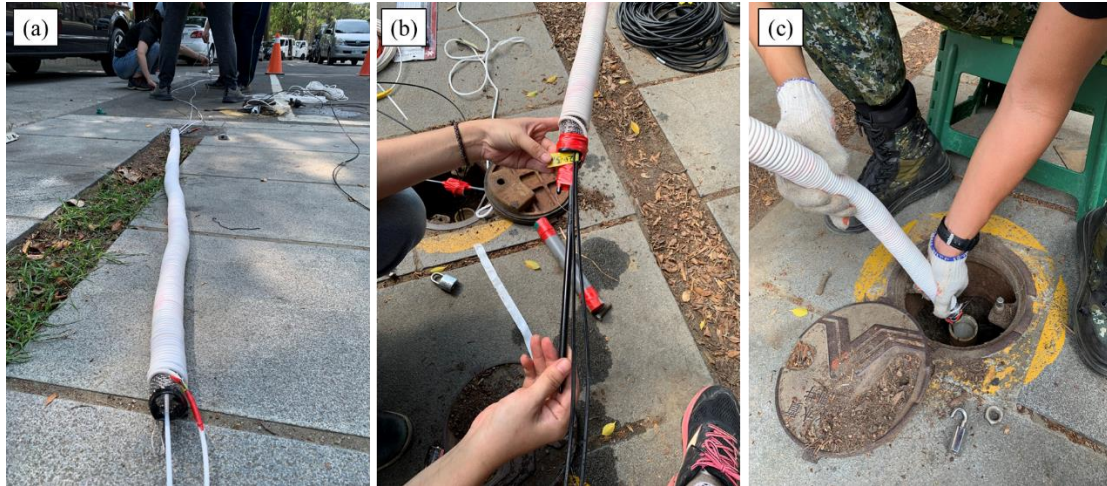


圖 58 高解析度纏繞光纖現地佈設 (a)將裝置於地表整線以利下井 (b)裝置底部安裝重錘 (c)裝置下井

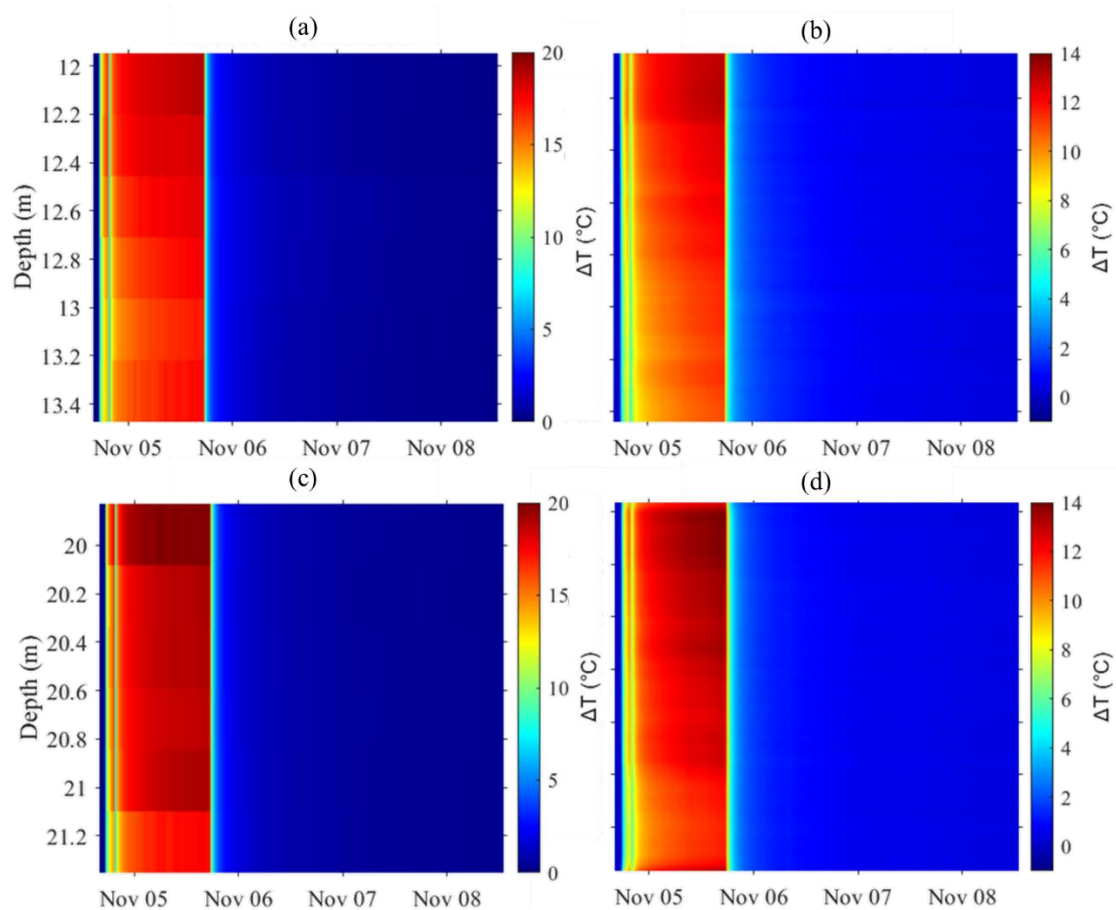


圖 59 現地測試結果 (a)加熱光纖區段一 (b)高解析度纏繞光纖區段一 (c)加熱光纖區段二 (d)高解析度纏繞光纖區段二

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

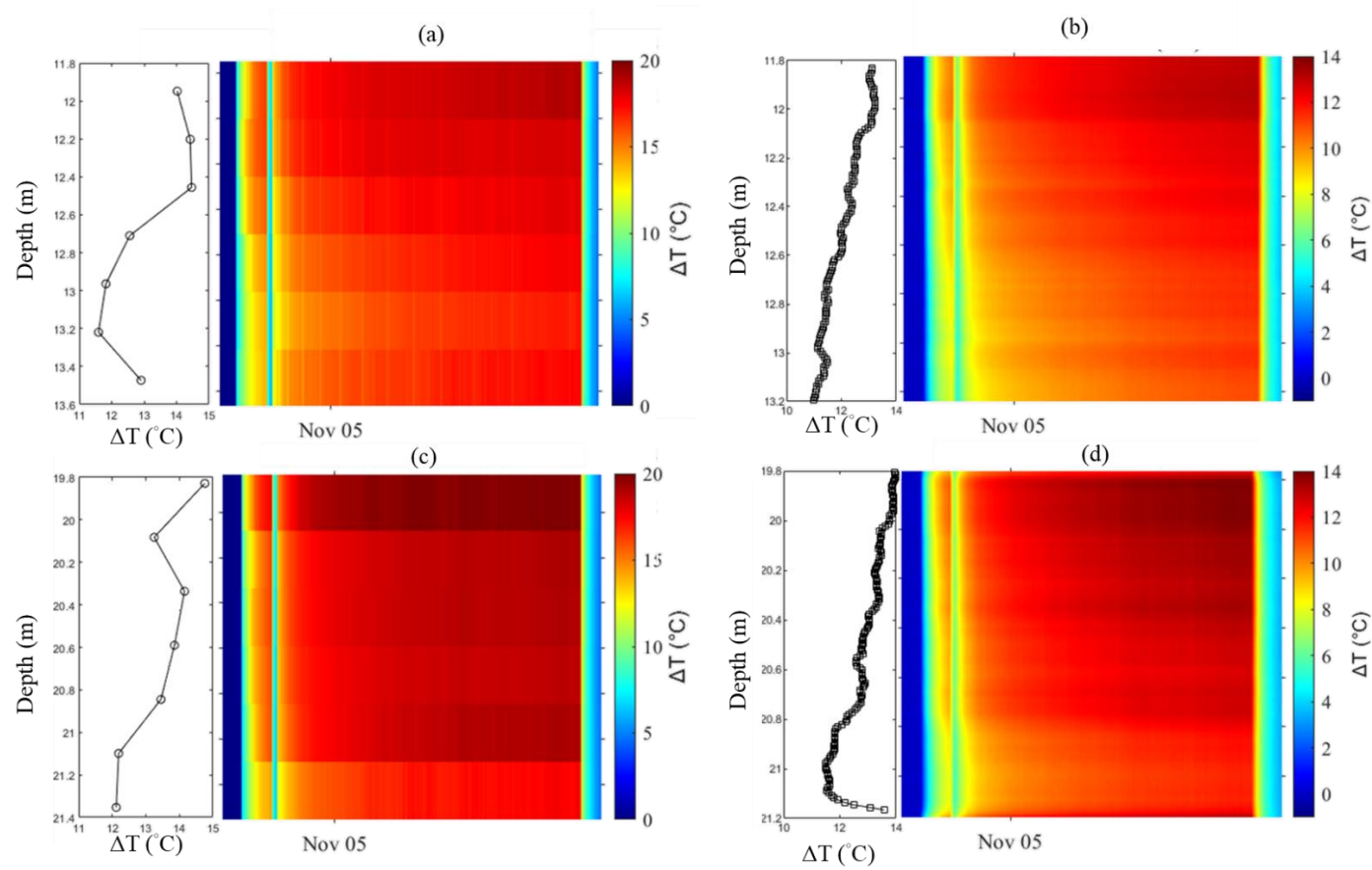


圖 60 加熱過程空間解析度比較 (a)加熱光纖區段一 (b)高解析度纏繞光纖區段一 (c)加熱光纖區段二 (d)高解析度纏繞光纖區段二



## 結果

### 5-5-3 高精度纏繞光纖優化

光纖量測的空間解析度會隨著不同的分散式光纖溫度感測器而有所差異，以 Ultima DTS 為例，其解析度可以來到 0.125 公尺，但對於極細微的水文變化觀測仍稍嫌不足，若將光纖纏繞於特定直徑之管材，光纖上各量測點之間的長度有所縮短，進而大幅提高空間解析度，對於細部的水文特徵調查與判釋有著極大的助益。

光纖纏繞雖對於空間解析度有著顯著的提升，然而受到纏繞的影響，光纖內傳遞的雷射訊號會受到一定程度的衰減，影響溫度量測的結果。根據前人研究顯示，當纏繞直徑越大，訊號傳遞受到的影響會逐漸減少，當直徑足夠大時，訊號能與筆直的光纖訊號幾乎一致。實際運用上，依據量測環境的限制，能夠用於纏繞的管材直徑也會有所考量，為了能在量測獲得最佳的效益，必須考量到以下兩點：試驗對於溫度量測之空間解析度需求，以及試驗所能容忍之能量訊號損失上限。如前所述，光纖訊號的衰減與纏繞半徑有關，雷射光的入射角度大於光纖線管內壁所能接受的角度時，訊號將無法反射而產生損失。因此半徑越小，訊號損失就越大，訊號的損失會造成 stoke 跟 anti-stoke 之比值產生偏差，進而影響溫度量測的準確性。

除了管材直徑會影響溫度量測的準確性外，管材材質與其幾何形式也是影響因素之一，由於光纖會透過纏繞緊密貼於管壁上，不同的材質其熱傳導特性也不同，進而影響熱的傳遞使得溫度量測有所影響，常見的管材有 PVC，不鏽鋼及鐵絲等。管材的幾何形式差異對於水流變化以及熱的傳遞亦會使得溫度量測造成影響，常見的形式包括：完全無開篩管、部分開篩管、全開篩管以及通透型網管。為了將光纖纏繞對於溫度量測的影響降到最低，將在實驗室內進行纏繞設計試驗，並透過不同直徑與管材的測試，找尋最佳組合，以確保量測的準確性。

高解析度纏繞光纖的設計目的是為了透過纏繞縮短量測點之間的距離，特定範圍內的量測點提升以達到提高空間解析度的效果，進而獲得更加精密的溫度剖面；透過纏繞雖然能讓解析度大幅提升，但纏繞造成的額外訊號損耗會產生溫度準確度的疑慮。為了能找到纏繞半徑與訊號衰減的最佳組合，進行了不同管徑與管材的試驗。用於調查水文地質特徵的井大多為 2 吋，少部分為 4 吋或以上，因此測試的管材直徑將針對小於 2 吋跟 4 吋的尺寸來進行，選擇的尺寸有 1.25、1.5、2.5、3.0 及 3.5 吋，將光纖沿



### 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

著管材一端進行環狀纏繞於外側管壁，並以釣魚線將其固定避免滑動，光纖纏繞完成時如圖 61(a)(b)所示，圖 61(a)由右至左分別為 1.25、1.5、2.5、3.0 及 3.5 吋。不同管材與其幾何型態對於溫度量測具有一定程度的影響，因此選擇了數個較為常見的管材進行試驗，選用之種類除了 PVC 管外，還有透明鋼絲管(wired hose)、PVC 軟管(PVC hose)以及全開篩 PVC 管(open hole pipe)(圖 61(c))。所有高解析度纏繞光纖光纖所使用的光纖種類皆為一般的傳統光纖，外皮為 PVC 材料的批覆，內層包覆凱夫拉纖維(Kevlar)與雙心光纖。為了能比較相同外在環境下不同管徑或材質對於訊號衰減的差異，所有高解析度纏繞光纖會放置於一穩定的水體，該水體會於底部放入幫浦減少溫度分層的現象，並利用紙箱固定纏繞光纖避免互相碰撞造成訊號額外的衰減(圖 62)。除了纏繞光纖之外，還有一段未纏繞的光纖置於相同水體中，後續與纏繞光纖進行衰減比對。



圖 61 高解析度纏繞光纖 (a)纏繞裝置俯視圖(b)纏繞裝置側視圖(c)選用管材



## 結果

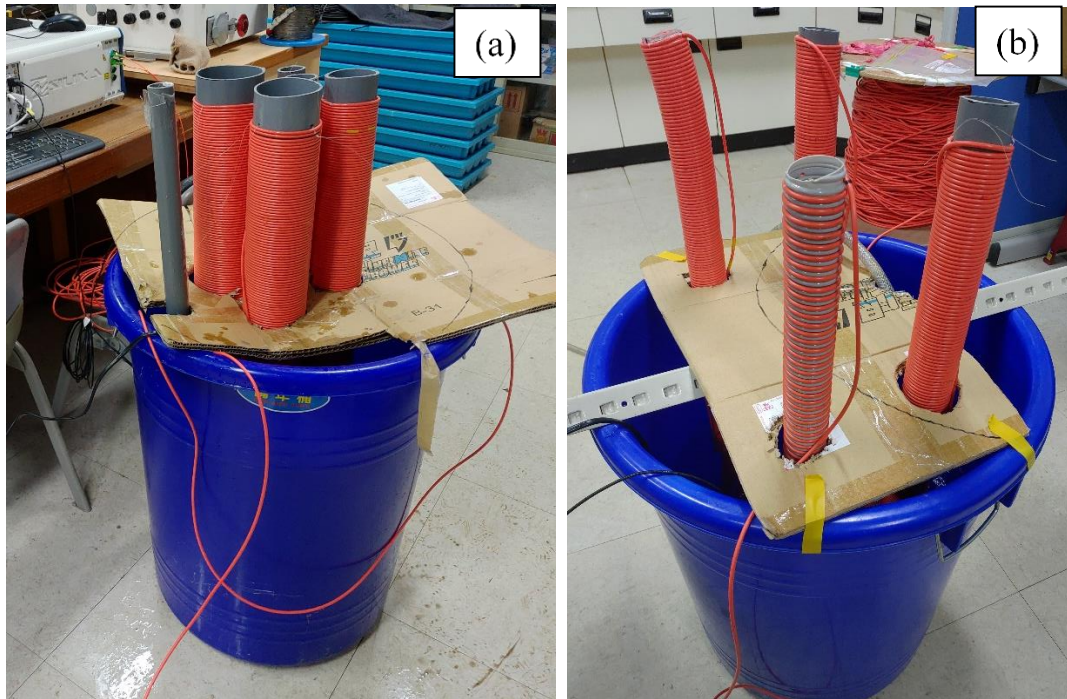


圖 62 高解析度纏繞光纖試驗設置 (a)不同管徑試驗 (b)不同管材試驗

本試驗目的為不同管徑與管材建立之高解析度纏繞光纖對於溫度量測時的訊號衰減差異比較，尋找最適合之組合。使用 Ultima DTS 進行溫度資料的採樣，量測方式設定為以 1 秒鐘為量測間隔，並設定為每 0.254 公尺為取樣間距。圖 63 為試驗結果，將置於穩定水體內的各纏繞光纖與未纏繞光纖在相同溫度下所獲得的訊號衰減進行比對。

圖 63(a)為各管徑與未纏繞的每公尺訊號強度衰減的比對，不論是 stoke 或是 anti-stoke，兩者受到纏繞都產生了比未纏繞時更多的衰減，尤其纏繞尺寸越小，衰減越為強烈；反之纏繞尺寸越大，衰減越小，3.5 吋的訊號甚至與未纏繞的訊號差異甚微。因此在外在環境許可下，較大的管徑可以產生較少的衰減，足夠大的尺寸甚至能跟未纏繞時相差無幾，達到最少衰減下獲得最高的解析度。

圖 63(b)為不同管材的試驗結果，常見的地下水觀測井多為 2 吋管，因此選擇了 1.5 吋進行試驗，4 種不同材質或幾何型態可以看到，除了 PVC 軟管(PVC hose)外，其餘三種的訊號衰減差異不大，PVC 軟管(PVC hose)本身質地較軟，纏繞過程中容易受到外力而收縮，使得實際纏繞的尺寸較小於 1.5 吋，導致光纖內雷射光反射角度不足產生訊號喪失。根據圖 59 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

結果顯示，管徑越大，訊號衰減越少，測試的管材中，對於相同溫度情形下的量測訊號相差甚微，在井徑的外在環境限制之下，盡可能的挑選能夠下放至井內的最大尺寸會是最好的選擇，能夠在訊號損失最少的情況下，獲得最多的資料點，大幅提升了特定區域內的空間解析度，所呈現的溫度資料將變平滑許多，細微的溫度變化都能被詳細記錄，有利後續的水文地質特性的判讀與觀察。

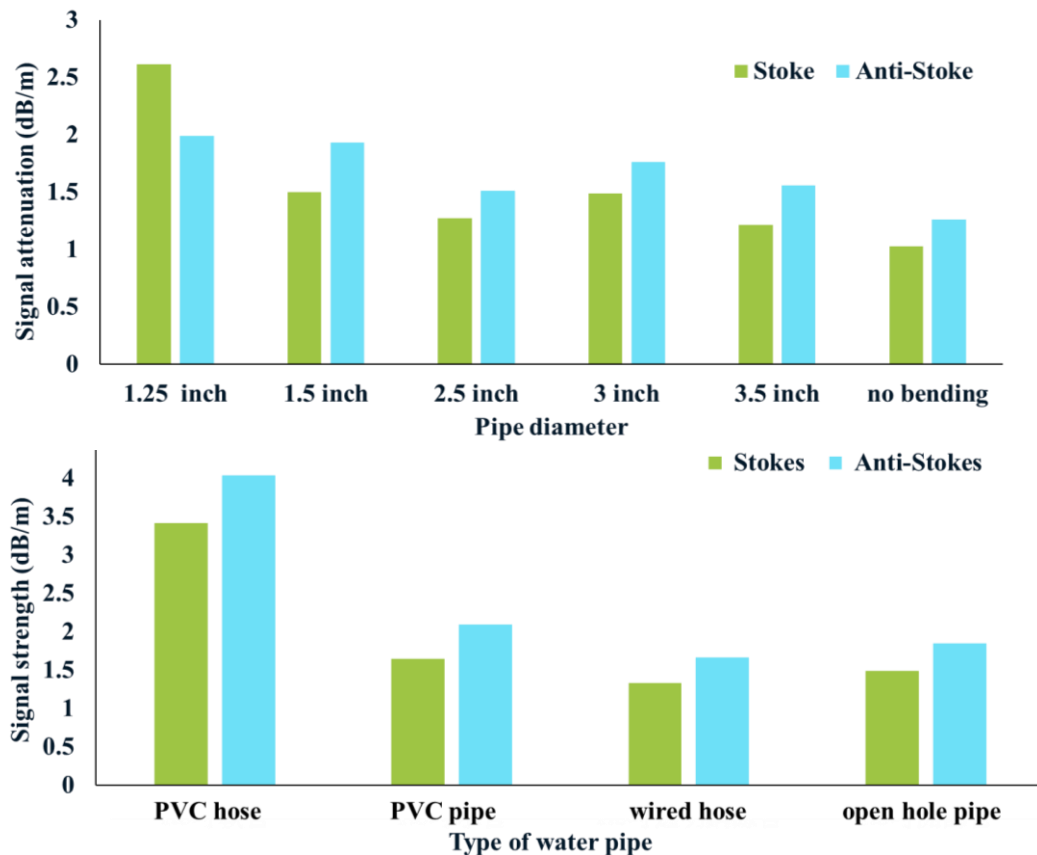


圖 63 高解析度纏繞光纖試驗結果 (a)不同管徑 (b)不同管材



## 結果

## 5-6 Thermal Vector – DTS (TV-DTS)

### 5-6-1 TV-DTS 結構設計

為進一步獲得地下水流向資訊，本研究針對主動式加熱 DTS 進行改良，自製研發設計 thermal 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。由於本研究模場的試驗井皆為 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。

裝置設計之概念如圖 64 所示，以 3 個直徑 3.5 公分，厚度 2.5 公分，以聚四氟乙烯製作而成的圓盤做為 TV-DTS 的主體(圖 64a)，安裝於 TV-DTS 的頂部、中間、底部，圓盤上有五個打洞處，一個在圓盤的中心，另外 4 個均勻分配在圓盤上，和圓盤中心保持 0.458 公分。每個圓盤的邊緣都具有 3mm 的切口，將感測光纖固定於 4 個聚四氟乙烯圓盤上的切口上，並將加熱光纖穿入圓盤中心之打洞處進行加熱。圓盤之間利用 4 根聚四氟乙烯支撐棒(圖 64b)，直徑為 0.6 公分，長度為 96.25 公分，將 4 根支撐棒安裝在 4 個打洞處，圓盤之間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。TV-DTS 整體長度為 2 公尺(圖 64c)，聚四氟乙烯圓盤和圓盤之間間距為 96.25 公分，此區間即可作為後續分析時所採納的長度。

圖 65 為 TV-DTS 實際製作成品，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，因此在圓盤之間進行加工，以釣魚線將感測光纖固定在支撐棒之間，如圖所示，使得四個方位之感測光纖和支撐棒、加熱光纖之間保有空間，使得水流能夠順利通過，提升量測之準確性。

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，因此將加熱光纖放置在圓盤中心之打洞處，使得加熱光纖和感測光纖之間之距離約維持 14.5 mm，以消除距離因素而導致的溫度不確定性。感測光纖則置於以加熱光纖為圓心之圓盤邊緣，分別固定於 0°、90°、180°與 270°的方位。在放置時將光纖位置對準四個方位，各樣顏色對



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

應之方位如圖 66 所示，以加熱光纖為中心(紅色點)， $0^\circ$ 方位代表北方， $90^\circ$ 方位代表東方， $180^\circ$ 方位代表南方， $270^\circ$ 方位代表西方。

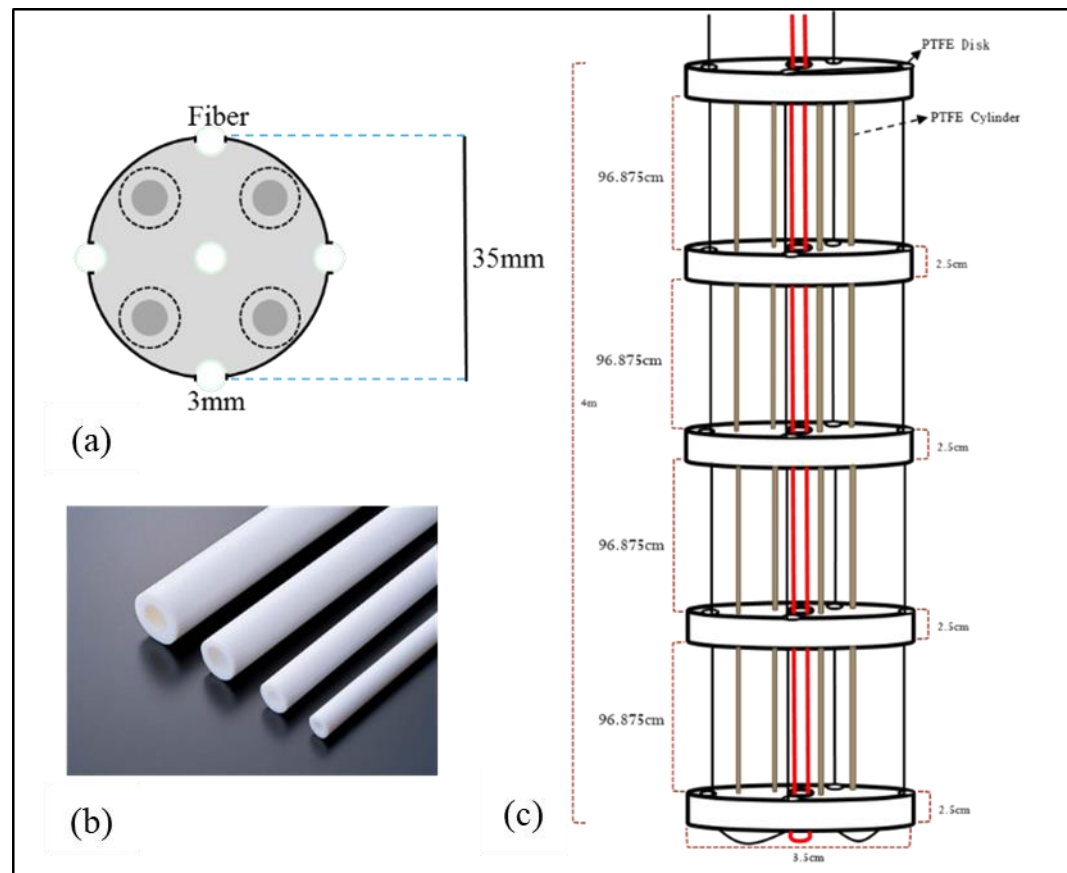


圖 64 TV-DTS 新型設計概念 (a)TV-DTS 固定圓盤 (b) TV-DTS 支架  
(c)光纖固定於聚四氟乙烯支架之示意圖



## 結果

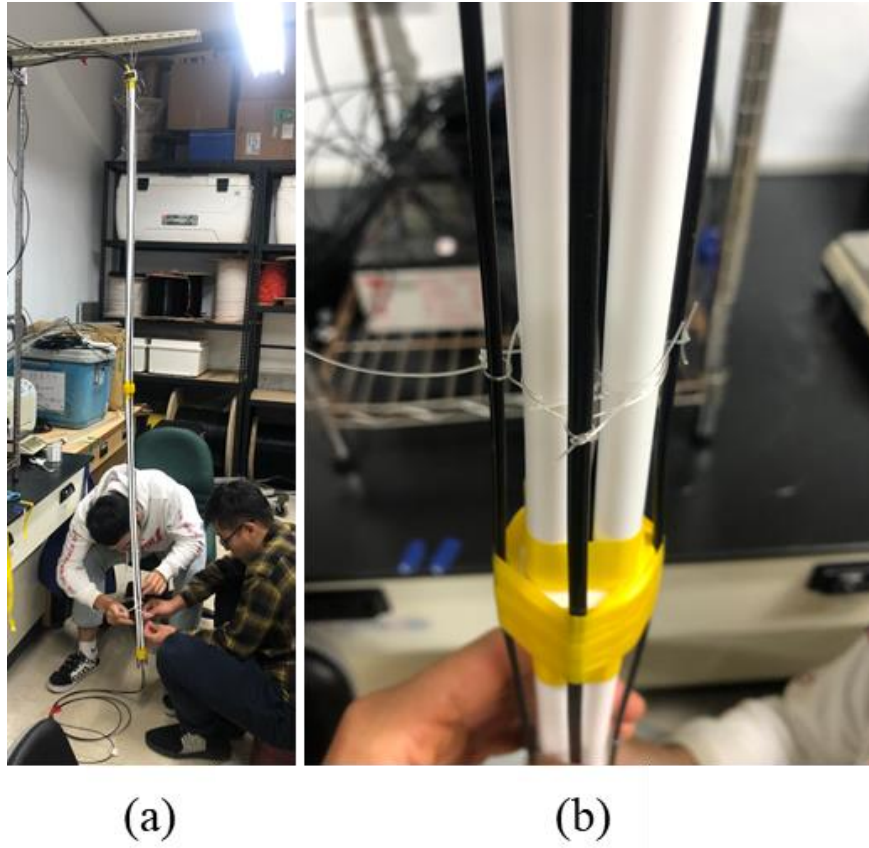


圖 65 TV-DTS 成品 (a)TV-DTS 全長 (b)各方位與置中之加熱光纖

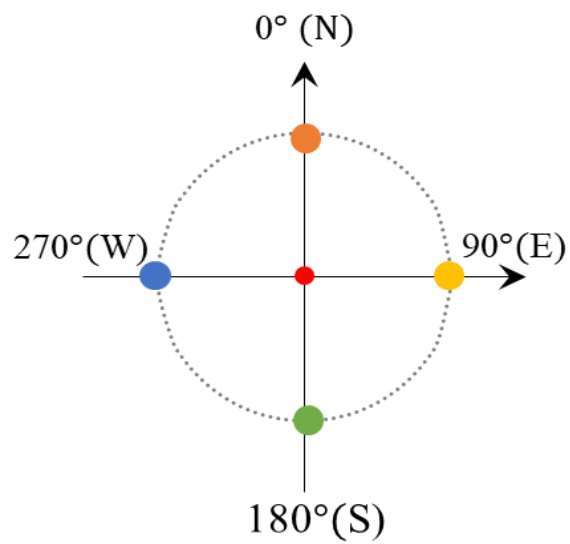


圖 66 新型 TV-DTS 結構監測光纖相對位置圖



## 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

### 5-6-2 TV-DTS 實驗室測試結果

為了評估 TV-DTS 對於溫度之量測效果，設計一系列試驗，測試新型 TV-DTS 在不同功率下溫度感測結果，且透過測試結果進一步討論進行現地試驗時可能遇到之情形，以優化試驗之設計。試驗設計為將 TV-DTS 放置在直徑 2 吋，長度為 1 公尺之開篩管中，並將橘色水桶裝滿水，水深為 48.5 公分，由於測試用的 TV-DTS 高度僅約 50 公分，因此實際沒於水中的 TV-DTS 區段為 48.5 公分，剩餘的長度則裸露於空氣中。在水中以水管與抽水幫浦製造固定水流方向之流場，為北向南流動，並以流量計控制水流流速，流速為 7L/min，如圖 67 所示。試驗主要針對兩種加熱功率與不同的加熱時間進行測試，試驗內容包括：以每公尺 15 瓦特和每公尺 30 瓦特的功率進行 5 分鐘、10 分鐘、15 分鐘、20 分鐘、25 分鐘、30 分鐘等不同時段的加熱試驗。DTS 設定以 1 秒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 0.124 公尺作為取樣間隔(sampling interval)。各樣顏色對應之方位如圖 68 所示，以加熱光纖為中心(紅色點)，設定水的流向為由 0°(北方)往 180°(南方)其中 0°方位代表北方，以橘色標記。0°方位代表北方，以橘色標記；90°方位代表東方，以黃色標記；180°方位代表南方，以綠色標記；270°方位代表西方，以藍色標記。

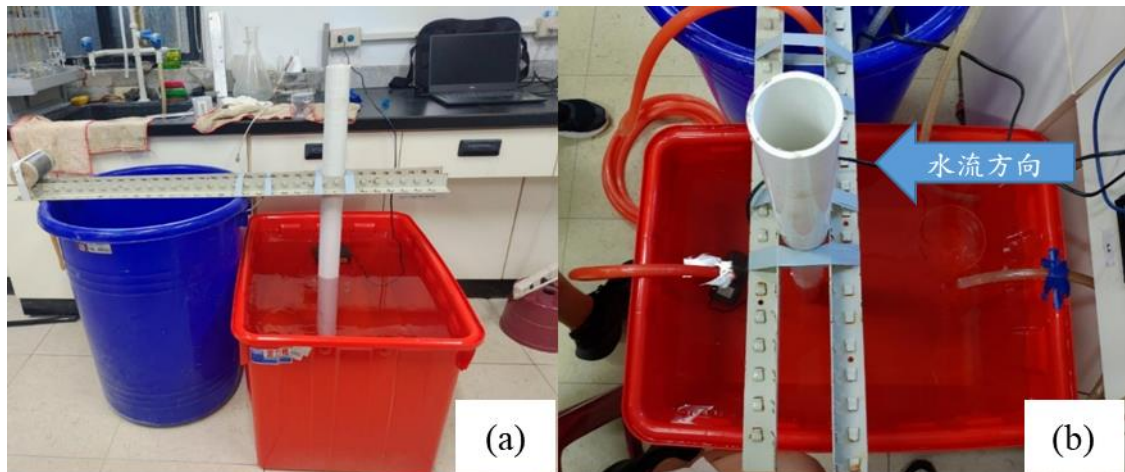


圖 67 室內實驗設置 (a) TV-DTS 架設全景 (b)注水示意圖



## 結果

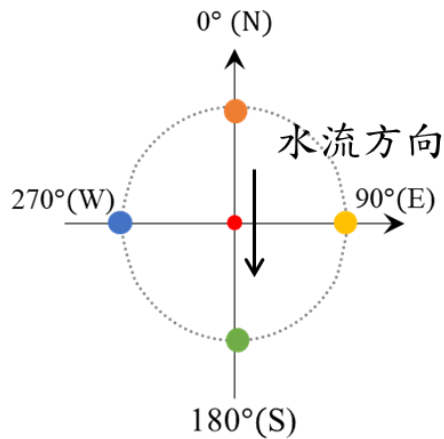


圖 68 室內實驗加熱光纖與監測光纖相對位置圖

經過室內實驗得知，較長的加熱時間與較高的加熱功率有更明顯的溫度變化，因此使用以每公尺 30 瓦特加熱 30 分鐘之結果進行分析，當給定每公尺 30 瓦特的功率時，經過 30 分鐘加熱時間後，感測光纖溫度可以提升到 0.2-3.2 °C 的溫差，為了更準確的判斷四個方位的監測光纖的溫度變化情況，去除背景溫度影響，計算四個方位的感測光纖在加熱過程中的溫度變化 ( $\Delta T$ )，溫度變化如圖 69 顯示，可以觀察到 180° 南方方位溫度變化值和累積溫度值都是四個方位當中最高的，最大溫差可到 3.23 °C，平均溫差可到 1.32 °C，累積溫度可到 1047.86 °C；次大的為 90° 東方方位，最大溫差可到 1.82 °C，平均溫差可到 0.52 °C，累積溫度可到 410.31 °C，0° 北方方位和 270° 西方方位則有相對較小的溫度變化值和累積溫度值，最大溫差分別為 1.81 與 1.47 °C，平均溫差分別為 0.31 與 0.25 °C，而累積溫度值為 247.14 與 194.33 °C。不論從最大溫差、平均溫差或累積溫度，均可以顯示四個觀測方位光纖的溫度變化值差距，根據室內試驗之結果圖可以判斷出水流方向為 0° 北方方位往 180° 南方方位，大致的流向為往南，符合試驗前所設定之水流流向。



# 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

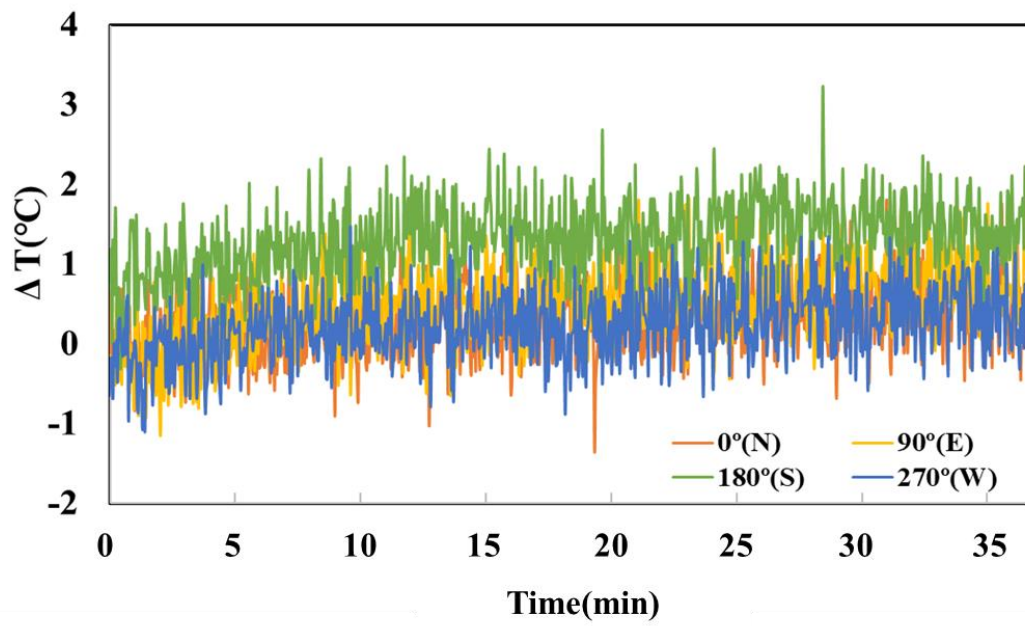


圖 69 室內實驗加熱後各方位之溫差

表 11 室內實驗各方位之最大溫差、平均溫差及累積溫度(°C)

|         | 最大溫差 | 平均溫差 | 累積溫度    |
|---------|------|------|---------|
| 0°(N)   | 1.81 | 0.31 | 247.14  |
| 90°(E)  | 1.82 | 0.52 | 410.31  |
| 180°(S) | 3.23 | 1.32 | 1047.86 |
| 270°(W) | 1.47 | 0.25 | 194.33  |



## 結果

### 5-6-3 TV-DTS 現地試驗設計

為測試 TV-DTS 裝置在現地中對溫度感測的效果，本次試驗分別選定 K00264（井深為 12.1 公尺）與 K00268（井深為 91.9 公尺）為試驗井進行 TV-DTS 裝置之加熱試驗井，測試並檢驗不同含水層之流向。根據前人研究顯示：第一與第二含水層附近之地下水流約往西側及西南側方向流動。為驗證 K00264 與 K00268 之流向，分別進行兩次新型 TV-DTS 試驗。

#### ➤ K00264 現地試驗設計(淺層)

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收到的溫度變化，並測試 TV-DTS 裝置在現地淺井中對溫度感測的效果，本次試驗首先選定 K00264（井深為 12.1 公尺）為試驗井進行 TV-DTS 裝置之加熱試驗。

圖 70 為 TV-DTS 試驗於 K00264 之佈設示意圖，TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，將其放置在 K00264 深度 8 至 10 尺處，以主動式加熱光纖進行加熱，並使用 Ultima DTS 蒐集光纖溫度變化。於 K00264 井一共進行兩次 TV-DTS 加熱試驗：第一次試驗為找出最適合之加熱功率、加熱時長與量測時間頻率，以每公 15 瓦和 30 瓦兩種不同的功率進行 15、20、25、30 分鐘的加熱試驗。與先前試驗相比，縮短了加熱時間，目的是希望可以藉由高功率、短時間和低功率、短時間之間的相互比較。在嘗試多種組合之後，以 30W/m 的加熱功率進行 30 分鐘可獲得最佳結果，清楚辨識溫度差異。第二次試驗為了重現第一次試驗之量測結果，並測試提升加熱成果，進行以 30 分鐘、60 分鐘、240 分鐘的加熱試驗，最後發現以 30W/m 的加熱功率進行 240 分鐘進行試驗可以獲得長時間加熱之最佳結果，清楚辨識溫度差異。目的是希望可以在 4 個不同方位的光纖上，獲得更加顯著的溫度差異結果，更準確判釋地下水流。DTS 以設定 1 分鐘記錄一筆資料作為時間間隔，完整記錄升溫與降溫曲線，並以 0.124 公尺作為取樣間隔。

#### ➤ K00268 現地試驗設計(深層)

為了測試 TV-DTS 裝置在在深井當中的量測效果，本次試驗選定 K00268（井深為 91.9 公尺）為試驗井進行 TV-DTS 裝置之加熱試驗，圖 71 為本試驗之佈設示意圖，TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，將其放置在 K00268 深度 38 至 40 公尺處，以主動式加熱光纖進行加熱，並使用 Ultima DTS 蒐集光纖溫度變化。於 K00268 井一共進行 2 次 TV-DTS 加熱試驗：



### 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

第一次試驗為找出最適合之加熱時長與量測時間頻率，在嘗試多種組合之後並綜合先前之測試，以每公尺 15 瓦和 30 瓦兩種不同的功率，分別進行 15、20、25、30 分鐘的加熱試驗，與先前試驗相比，縮短了加熱時間，目的是希望可以藉由高功率、短時間和低功率、短時間之間的相互比較。在嘗試多種組合之後，以 30W/m 的加熱功率進行 30 分鐘可獲得最佳結果組合進行試驗，清楚辨識溫度差異。DTS 設定以 1 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 0.124 公尺作為取樣間隔(sampling interval)。第二次試驗為了重現第一次試驗之量測結果，並以每公尺 30 瓦的功率進行 30 分鐘、60 分鐘、120 分鐘的加熱試驗，和第一次試驗相比，使用了較長的加熱時間，並發現以加熱 120 分鐘之試驗資料進行呈現為最佳結果。其使用 XT DTS 蒐集光纖溫度變化，DTS 以 1 分鐘記錄一筆資料作為時間間隔(time interval)設定，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)。



結果

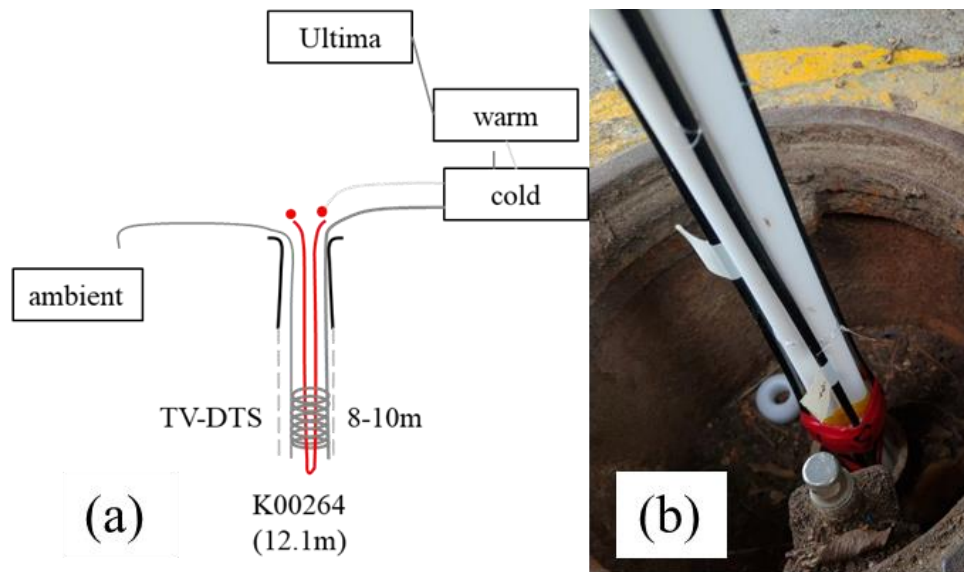


圖 70 K00264(淺井)TV-DTS 試驗儀器設置(a) 示意圖 (b)現場照片

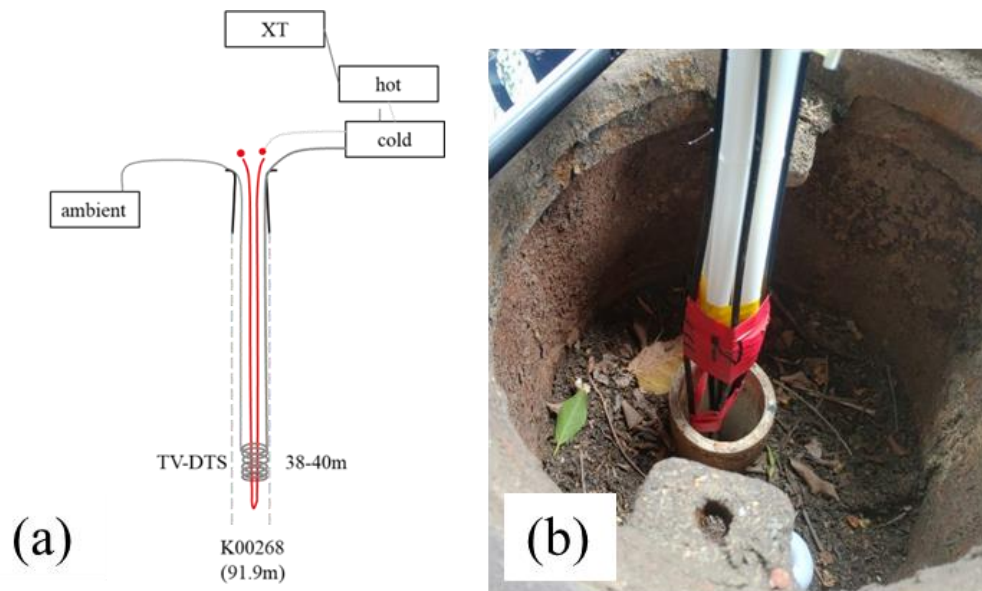


圖 71 K00268(深井)TV-DTS 試驗儀器設置 (a) 示意圖 (b)現場照片



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

#### 5-6-4 TV-DTS 試驗結果分析

經由多次實驗室此次試驗後，前將 TV-DTS 裝置優化後進行兩次現地試驗，並分別針對淺部與深部的含水層進行試驗（先前已針對淺部含水層進行初步試驗，請參閱期中報告，並與後續的試驗結果進行比較），測試新型 TV-DTS 裝置的可行性與適用性了改良，使用不同的材質製作和設計，為了測試新型 TV-DTS 裝置在現地試驗的效果，並與先前的試驗進行比較（請參閱期中報告）。裝置方位顏色對應之方位如圖 65 所示，以加熱光纖為中心(紅色點)，0°方位代表北方，90°方位代表東，180°方位代表南方，270°方位代表西方。

##### ➤ TV-DTS K00264 試驗結果(淺層)

此次試驗於 K00264 進行單井的加熱試驗，主要目的為判釋淺層的地下水流向。TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，將其放置在深度 8 至 10 公尺處，在此兩次試驗中分別以每公尺 30 瓦的功率進行 30 分鐘的加熱試驗與 240 分鐘的加熱試驗。為了獲得更為準確的溫度變化結果，計算四個方位的感測光纖在加熱過程中的溫度變化值(delta  $\Delta T$ )。

##### 第一次現地試驗

第一次的試驗結果如圖 72 至圖 74，顯示井 K00264 深度 8 至 10 公尺加熱之結果，由試驗井整體試驗結果顯示，在每公尺 30 瓦的加熱功率下，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 8-10 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於 0°C - 2°C 之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 12 與 13 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。

圖 72 為深度 8 公尺加熱期間各方向感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖出現變化，大約為在 1.45°C 左右，累積溫度為 95.20°C；90°方位(E)的監測光纖上升接近 0.81°C，累積溫度為 39.19°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 1.35°C，累積溫度為 89.35°C；270°方位(W)的監測光纖變化至 -0.5°C，最大溫差則上升至接近 0.3°C，累積溫度為 -31.50°C，在停止加熱後，四個方位的監測光纖溫度皆以非常迅速的回復至接近背景溫度。

圖 73 為深度 9 公尺加熱期間各方向感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖有出現變化，大約為在 0.52°C 左



## 結果

右，累積溫度為  $22.51^{\circ}\text{C}$ ； $90^{\circ}$ 方位(E)的監測光纖上升至接近  $0.31^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $12.17^{\circ}\text{C}$ ； $180^{\circ}$ 方位(S)的監測光纖則上升至接近  $0.66^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $36.81^{\circ}\text{C}$ ； $270^{\circ}$ 方位(W)的監測光纖上升至接近  $0.88^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $54.97^{\circ}\text{C}$ 。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆以非常迅速的回復至接近背景溫度。

圖 74 為在深度 10 公尺加熱期間各方向感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到  $0^{\circ}$ 方位(N)的監測光纖溫度變化，大約為在  $-0.8^{\circ}\text{C}$  左右，累積溫度為  $-54.70^{\circ}\text{C}$ ； $90^{\circ}$ 方位(E)的監測光纖溫度變化至接近  $-0.63^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $-39.41^{\circ}\text{C}$ ； $180^{\circ}$ 方位(S)的監測光纖沒有明顯升溫，接近  $-0.23^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $-19.06^{\circ}\text{C}$ ； $270^{\circ}$ 方位(W)的監測光纖溫度上升至接近  $0.54^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $0.19^{\circ}\text{C}$ 。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆以非常迅速的降溫速度回復至接近背景溫度。

綜合以上結果得知，井 K00264 深度 8 至 10 公尺之最大溫差與累積溫度較不一致：雖然井 K00264 深度 8 公尺位置的升溫之最大溫差與累積溫度為  $0^{\circ}$ (N)方位，由於次高溫為  $180^{\circ}$ 方位(S)，兩個方位的最大溫差與累積溫度差異甚小，導致無法直接判斷 8 公尺的地下水流變化。然而，井內深度 9 公尺與 10 公尺各方位升溫之最大溫差與累積溫度皆為  $270^{\circ}$ 方位(W)，溫差次高的為  $180^{\circ}$ 方位(S)，而溫差最小的則是  $90^{\circ}$ (E)和  $0^{\circ}$ (N)方位，因此由升溫幅度可以初步判斷，井 K00264 深度 9 至 10 公尺深度的地下水流向主要為往  $270^{\circ}$ (W)方位流動，且些微的偏向  $180^{\circ}$ 方位(S)。



# 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

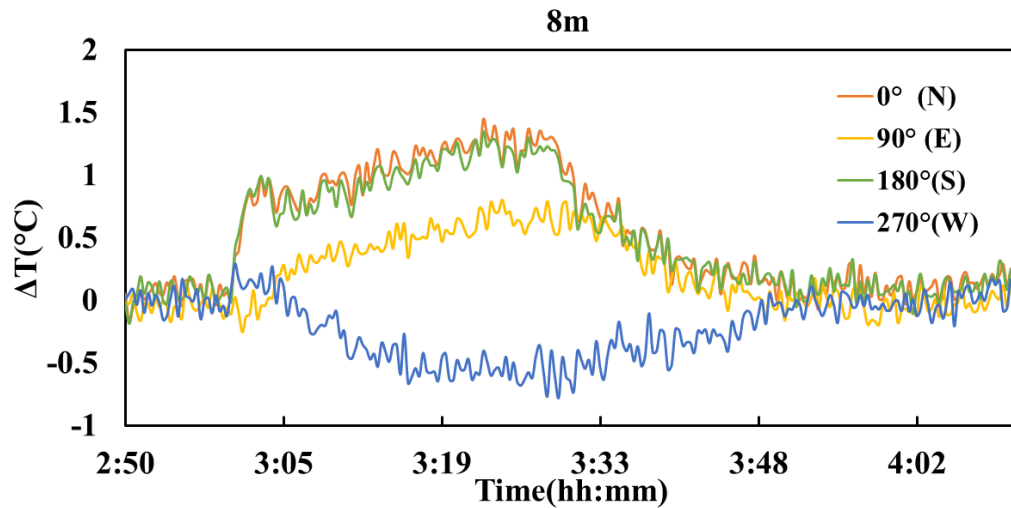


圖 72 K00264 第一次試驗深度 8 公尺各方位溫差

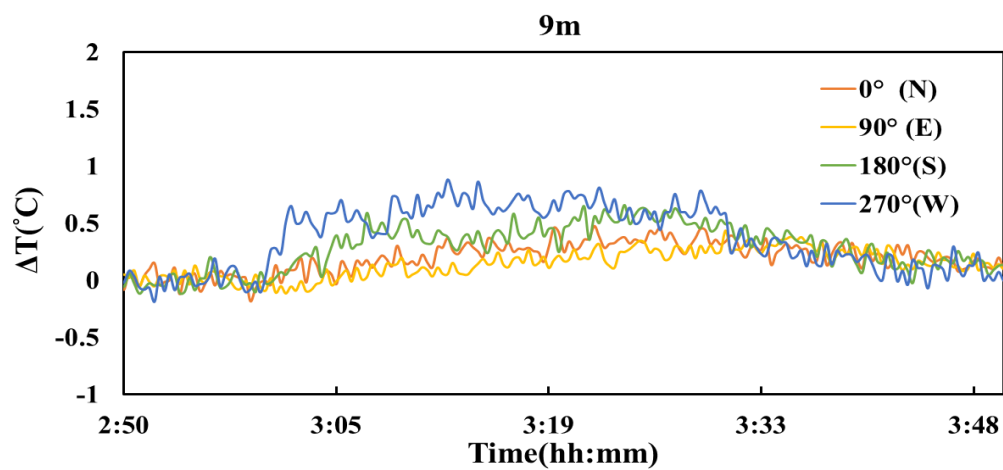


圖 73 K00264 第一次試驗 深度 9 公尺各方位溫差

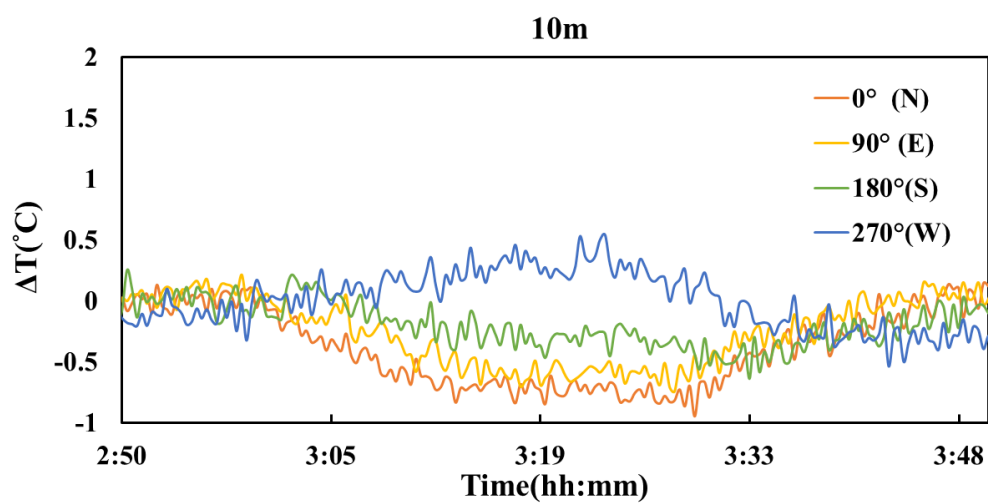


圖 74 K00264 第一次試驗 深度 10 公尺各方位溫差



## 結果

表 12 K00264 第一次試驗 8-10m 各方位最大溫差( $^{\circ}\text{C}$ )

|                         | 8 公尺 | 9 公尺 | 10 公尺 |
|-------------------------|------|------|-------|
| $0^{\circ}(\text{N})$   | 1.45 | 0.52 | -0.8  |
| $90^{\circ}(\text{E})$  | 0.81 | 0.31 | -0.63 |
| $180^{\circ}(\text{S})$ | 1.35 | 0.66 | -0.23 |
| $270^{\circ}(\text{W})$ | 0.30 | 0.88 | 0.54  |

表 13 K00264 第一次試驗 8-10m 各方位累積溫度( $^{\circ}\text{C}$ )

|                         | 8 公尺   | 9 公尺  | 10 公尺  |
|-------------------------|--------|-------|--------|
| $0^{\circ}(\text{N})$   | 95.20  | 22.51 | -54.70 |
| $90^{\circ}(\text{E})$  | 39.19  | 12.17 | -39.41 |
| $180^{\circ}(\text{S})$ | 89.35  | 36.81 | -19.06 |
| $270^{\circ}(\text{W})$ | -31.50 | 54.97 | 0.19   |

**第二次現地試驗**

為了重現新型 TV-DTS 裝置在現地第一次試驗的結果，並且為了得到更明顯的加熱訊號，同樣在井 K00264 進行單井的加熱試驗。TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，將其放置在深度 8 至 10 尺處，以每公尺 30 瓦的功率進行 240 分鐘的加熱試驗。表 14 與 15 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。

第二次的試驗結果如圖 75 至圖 77，顯示井 K00264 深度 8 至 10 公尺加熱之結果，由試驗井整體試驗結果顯示，在每公尺 30 瓦的加熱功率下，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 8-10 公尺其溫度變化在整個試驗期間都介於  $5^{\circ}\text{C}$  -  $7^{\circ}\text{C}$  之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。

圖 75 為深度 8 公尺加熱期間各方向感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到  $0^{\circ}$  方位(N)的監測光纖出現變化，大約為在  $6.79^{\circ}\text{C}$  左右，



### 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

累積溫度為 306.72°C；90°方位(E)的監測光纖上升接近 6.39°C，累積溫度為 288.83°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 6.96°C，累積溫度為 312.56°C；270°方位(W)的監測光纖變化至 7.11°C，累積溫度為 325.60°C，在停止加熱後，四個方位的監測光纖溫度緩慢的回復至接近背景溫度。

圖 76 為深度 9 公尺加熱期間各方向感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖有出現變化，最大溫差大約為在 6.12°C 左右，累積溫度為 22.51°C；90°方位(E)的監測光纖上升至接近 6.34°C，累積溫度為 12.17°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 6.46°C，累積溫度為 36.81°C；270°方位(W)的監測光纖上升至接近 6.63°C，累積溫度為 54.97°C。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆以非常迅速的回復至接近背景溫度。

圖 77 為深度 10 公尺加熱期間各方向感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖溫度變化，最大溫差大約為在 5.22°C 左右，累積溫度為 228.08°C；90°方位(E)的監測光纖上升至接近 5.33°C，累積溫度為 235.61°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 5.36°C，累積溫度為 233.23°C；270°方位(W)的監測光纖上升至接近 5.92°C，累積溫度為 261.52°C。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆以非常迅速的回復至接近背景溫度。

綜合以上結果得知，井 K00264 深度 8 至 10 公尺之最大溫差與累積溫度十分一致，溫差最大的為 270°方位(W)，溫差次高的為 180°方位(S)，而溫差最小的則是 90°(E)和 0°(N)方位，因此可由升溫幅度可以初步判斷此深度的地下水流向主要為往 270°(W)方位流動，並且些微的偏向 180°方位(S)。若與第一次試驗比較，可以發現第二次的結果更為一致，且升溫幅度更大，各方位溫度變化更為明顯，可達 6-7°C，其不同的原因在於第二次試驗使用較長時間的加熱，使得各方位溫差明顯，更容易判釋地下水流的流向。



## 結果

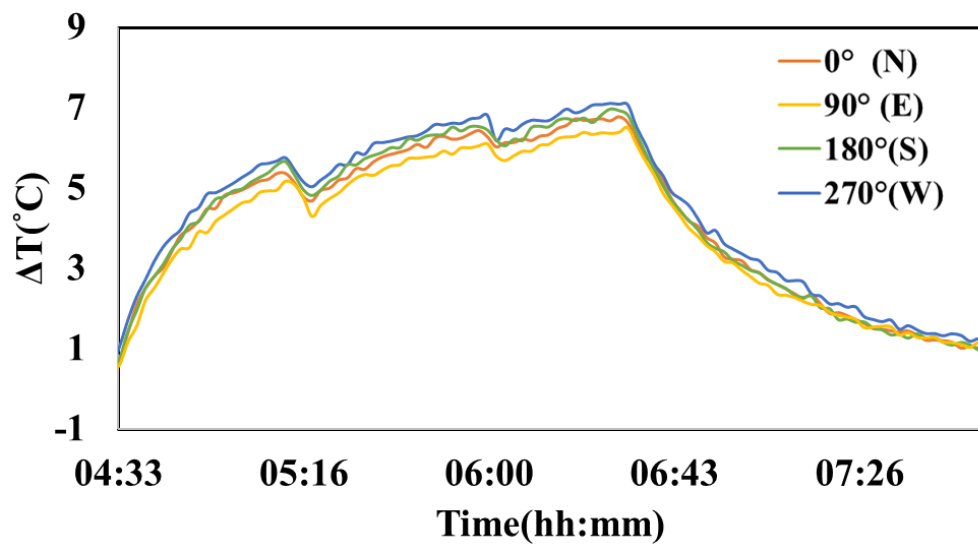


圖 75 K00264 第二次試驗深度 8 公尺各方位溫差

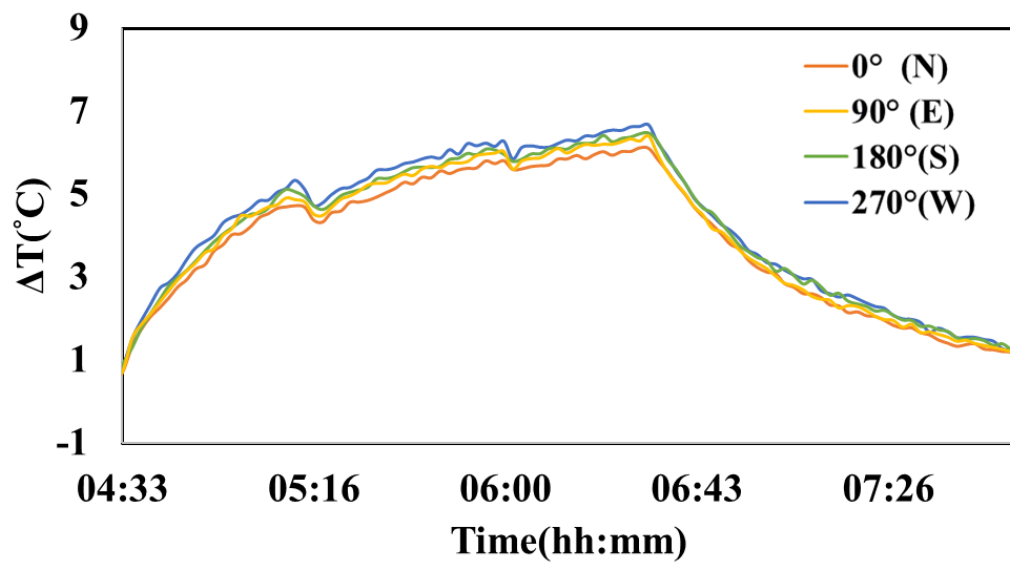


圖 76 K00264 第二次試驗深度 9 公尺各方位溫差



# 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

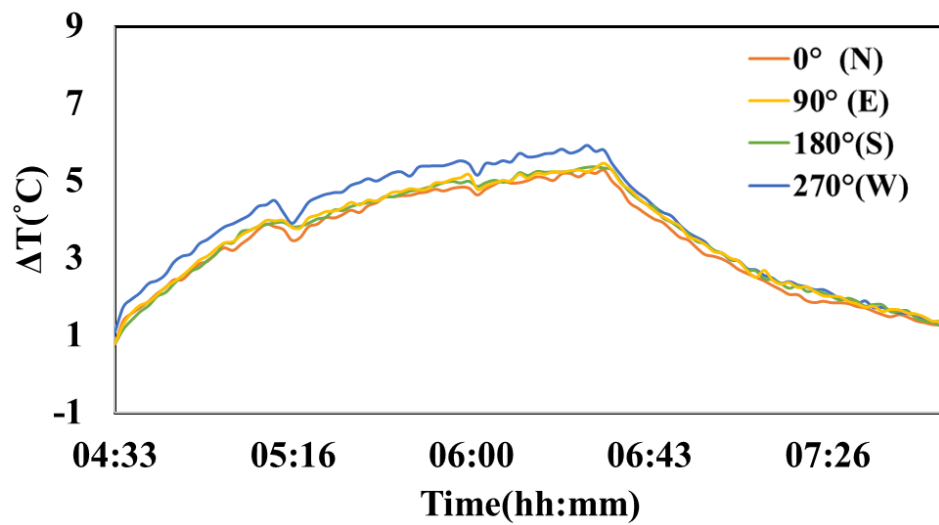


圖 77 K00264 第二次試驗 深度 10 公尺各方位溫差

表 14 K00264 第二次試驗 8-10m 各方位最大溫差( $^{\circ}\text{C}$ )

|                   | 8 公尺 | 9 公尺 | 10 公尺 |
|-------------------|------|------|-------|
| $0^{\circ}$ (N)   | 6.79 | 6.12 | 5.22  |
| $90^{\circ}$ (E)  | 6.39 | 6.34 | 5.33  |
| $180^{\circ}$ (S) | 6.96 | 6.46 | 5.36  |
| $270^{\circ}$ (W) | 7.11 | 6.63 | 5.92  |

表 15 K00264 第二次試驗 8-10m 各方位累積溫度( $^{\circ}\text{C}$ )

|                   | 8 公尺   | 9 公尺   | 10 公尺  |
|-------------------|--------|--------|--------|
| $0^{\circ}$ (N)   | 306.72 | 273.01 | 228.08 |
| $90^{\circ}$ (E)  | 288.83 | 284.22 | 235.61 |
| $180^{\circ}$ (S) | 312.56 | 288.30 | 233.23 |
| $270^{\circ}$ (W) | 325.60 | 298.41 | 261.52 |



## 結果

### ➤ TV-DTS K00268 試驗結果(深層)

此次試驗於 K00268 進行單井的加熱試驗，主要目的為判釋深層的地下水流向。TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，將其放置在深度 38 至 40 公尺處，在此兩次試驗中分別以每公尺 30 瓦的功率進行 30 分鐘的加熱試驗與 120 分鐘的加熱試驗。為了獲得更為準確的溫度變化結果，計算四個方位的感測光纖在加熱過程中的溫度變化值( $\Delta T$ )。

#### 第一次現地試驗

第一次的試驗結果如圖 78 至圖 80，顯示井 K00268 深度 38 至 40 公尺加熱之結果，由試驗井整體試驗結果顯示，在每公尺 30 瓦的加熱功率下，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 8-10 公尺其溫度變化在整個試驗期間都介於  $2^{\circ}\text{C}$ - $8^{\circ}\text{C}$ ，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 16 與 17 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。

圖 78 為深度 38 公尺加熱期間各方位感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到  $0^{\circ}$  方位(N)的監測光纖出現變化，大約為在  $6.25^{\circ}\text{C}$  左右，累積溫度為  $386.97^{\circ}\text{C}$ ； $90^{\circ}$  方位(E)的監測光纖上升接近  $5.72^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $307.00^{\circ}\text{C}$ ； $180^{\circ}$  方位(S)的監測光纖則上升至接近  $6.93^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $421.15^{\circ}\text{C}$ ； $270^{\circ}$  方位(W)的監測光纖變化至  $4.09^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $217.51^{\circ}\text{C}$ ，在停止加熱後，四個方位的監測光纖溫度緩慢的回復至接近背景溫度。

圖 79 為深度 9 公尺加熱期間各方位感測光纖溫度上升的情況如，加熱開始後可以觀察到  $0^{\circ}$  方位(N)的監測光纖有出現變化，最大溫差大約為在  $5.83^{\circ}\text{C}$  左右，累積溫度為  $328.84^{\circ}\text{C}$ ； $90^{\circ}$  方位(E)的監測光纖上升至接近  $5.63^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $315.26^{\circ}\text{C}$ ； $180^{\circ}$  方位(S)的監測光纖則上升至接近  $6.05^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $342.36^{\circ}\text{C}$ ； $270^{\circ}$  方位(W)的監測光纖上升至接近  $5.90^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $355.45^{\circ}\text{C}$ 。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆回復至接近背景溫度。

圖 80 為深度 10 公尺加熱期間各方位感測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到  $0^{\circ}$  方位(N)的監測光纖溫度變化，最大溫差大約為在  $4.89^{\circ}\text{C}$  左右，累積溫度為  $272.81^{\circ}\text{C}$ ； $90^{\circ}$  方位(E)的監測光纖上升至接近  $4.05^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $213.69^{\circ}\text{C}$ ； $180^{\circ}$  方位(S)的監測光纖則上升至接近  $5.30^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $296.98^{\circ}\text{C}$ ； $270^{\circ}$  方位(W)的監測光纖上升至接近  $5.71^{\circ}\text{C}$ ，累積



### 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

溫度為  $319.34^{\circ}\text{C}$ 。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆以非常迅速的回復至接近背景溫度。

綜合以上結果得知，井 K00268 深度 38 至 40 公尺之最大溫差與累積溫度較不一致：除深度 38 公尺的溫差最大的為  $180^{\circ}$  方位(S)，溫差次高的為  $0^{\circ}$  (N)，而溫差最小的則是  $90^{\circ}$  (E)和  $270^{\circ}$  (W)方位；深度 39 公尺溫差最大的為  $180^{\circ}$  方位(S)，溫差次高的為  $270^{\circ}$  (W)，而溫差最小的則是  $90^{\circ}$  (E)和  $0^{\circ}$  (N)；與深度 40 公尺溫差最大的皆為  $270^{\circ}$  (W)，溫差次高的為  $180^{\circ}$  方位(S)，而溫差最小的則是  $90^{\circ}$  (E)和  $0^{\circ}$  (N)，因此綜合判斷下，地下水流向於深度 38 至 39 公尺主要為往  $270^{\circ}$  (W)方位流動，而深度 40 公尺主要為往  $180^{\circ}$  方位(S)偏  $270^{\circ}$  (W)的方位流動。

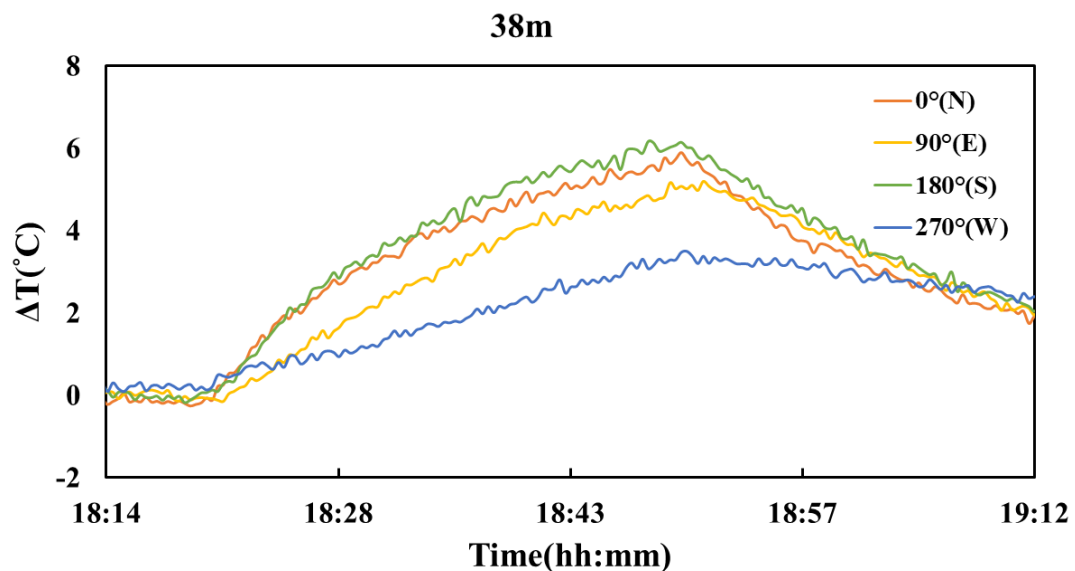


圖 78 K00268 第一次試驗深度 38 公尺處各方位溫差



## 結果

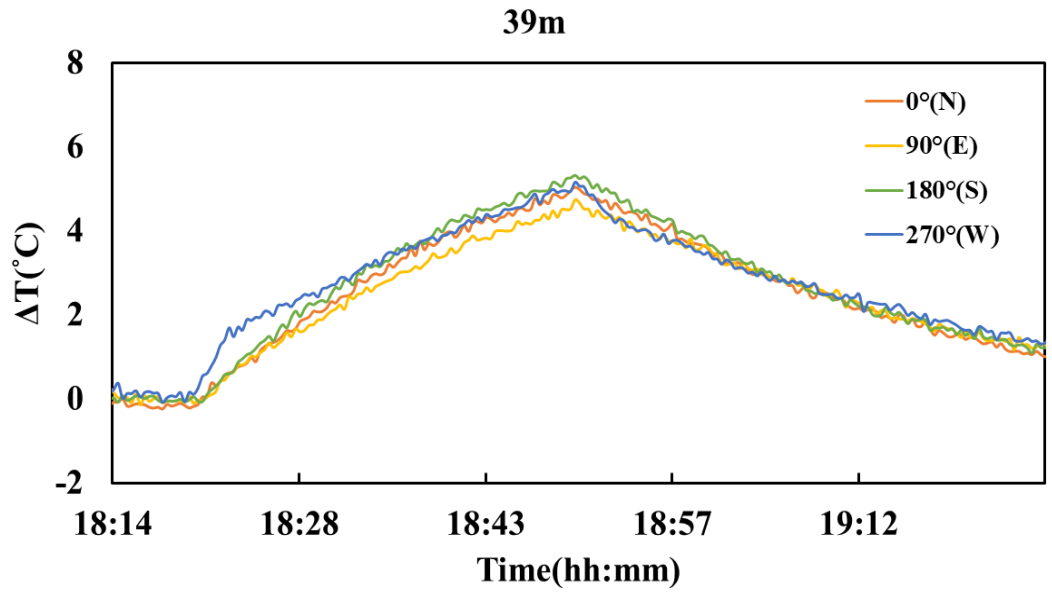


圖 79 K00268 第一次試驗深度 39 公尺處各方位溫差

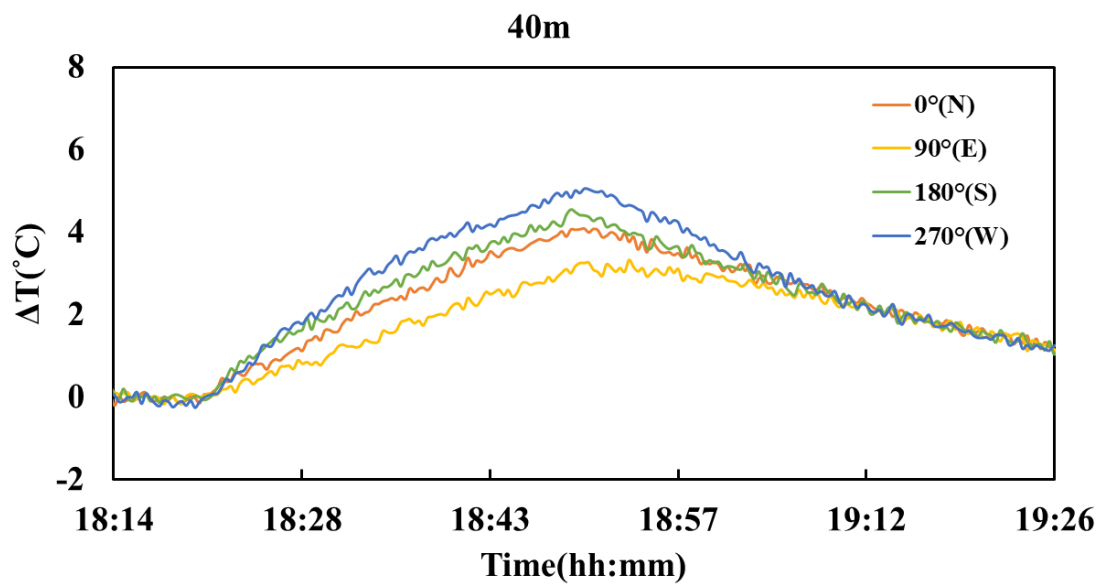


圖 80 K00268 第一次試驗深度 40 公尺處各方位溫差



# 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

表 16 K00268 第一次試驗 38-40m 各方位最大溫差(°C)

|         | 38 公尺 | 39 公尺 | 40 公尺 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0°(N)   | 6.55  | 5.83  | 4.89  |
| 90°(E)  | 5.72  | 5.63  | 4.05  |
| 180°(S) | 6.93  | 6.05  | 5.30  |
| 270°(W) | 4.09  | 5.90  | 5.71  |

表 17 K00268 第一次試驗 38-40m 各方位累積溫度(°C)

|         | 38 公尺  | 39 公尺  | 40 公尺  |
|---------|--------|--------|--------|
| 0°(N)   | 386.97 | 328.84 | 272.81 |
| 90°(E)  | 307.00 | 315.26 | 213.69 |
| 180°(S) | 421.15 | 342.36 | 296.98 |
| 270°(W) | 217.51 | 355.45 | 319.34 |



## 結果

### 第二次現地試驗

第二次的試驗結果如圖 81 至圖 83，顯示井 K00268 深度 38 至 40 公尺加熱之結果，由試驗井整體試驗結果顯示，在每公尺 30 瓦的加熱功率下，加熱 120 分鐘，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 8-10 公尺其溫度變化在整個試驗期間都介於 7°C-12°C，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。

圖 81 為深度 38 公尺加熱期間各方位感測光纖溫度上升的情況如，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖出現變化，大約為在 10.65°C 左右，累積溫度為 501.78°C；90°方位(E)的監測光纖上升接近 10.27°C，累積溫度為 491.94°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 11.79°C，累積溫度為 575.45°C；270°方位(W)的監測光纖變化至 10.79°C，累積溫度為 508.17°C，在停止加熱後，四個方位的監測光纖溫度緩慢的回復至接近背景溫度。

圖 82 為深度 39 公尺加熱期間各方位感測光纖溫度上升的情況如，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖有出現變化，最大溫差大約為在 10.58°C 左右，累積溫度為 499.46°C；90°方位(E)的監測光纖上升至接近 9.17°C，累積溫度為 432.22°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 11.03°C，累積溫度為 531.64°C；270°方位(W)的監測光纖上升至接近 8.94°C，累積溫度為 421.88°C。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆回復至接近背景溫度。

圖 83 為深度 40 公尺加熱期間各方位感測光纖溫度上升的情況如，加熱開始後可以觀察到 0°方位(N)的監測光纖溫度變化，最大溫差大約為在 9.17°C 左右，累積溫度為 425.99°C；90°方位(E)的監測光纖上升至接近 8.11°C，累積溫度為 381.88°C；180°方位(S)的監測光纖則上升至接近 9.58°C，累積溫度為 448.50°C；270°方位(W)的監測光纖上升至接近 7.70°C，累積溫度為 357.88°C。在停止加熱後，四個方位的監測光纖皆以非常迅速的回復至接近背景溫度。

綜合以上結果得知，井 K00268 深度 38 至 40 公尺之最大溫差與累積溫度十分一致，溫差最大的皆為 180°方位(S)。其中深度 38 公尺溫差次高的為 270°方位(W)，而溫差最小的則是 90°(E)和 0°(N)方位；深度 39 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

溫差次高的為  $0^{\circ}$ (N)，而溫差最小的則是  $90^{\circ}$ (E)和  $270^{\circ}$ 方位(W)；深度 40 公尺溫差次高的為  $0^{\circ}$ (N)，而溫差最小的則是  $90^{\circ}$ (E)和  $270^{\circ}$ 方位(W)。雖然各個深度溫差高低不同，但仍可由升溫幅度可以初步判斷此深度的地下水流向主要為往  $180^{\circ}$ 方位(S)方位流動。若與第一次試驗比較，可以發現第二次的結果更為一致，且升溫幅度更大，各方位溫度變化更為明顯，可達 6-7 $^{\circ}$ C，其不同的原因在於第二次試驗使用較長時間的加熱，使得各方位溫差明顯，更容易判釋地下水流的方向。

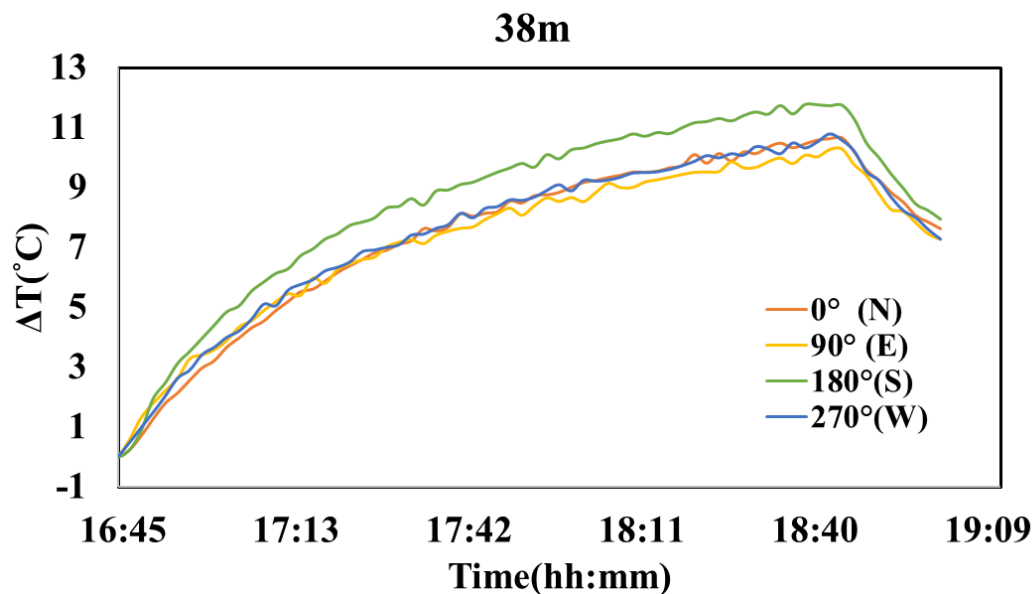


圖 81 K00268 第二次試驗深度 38 公尺處各方位溫差

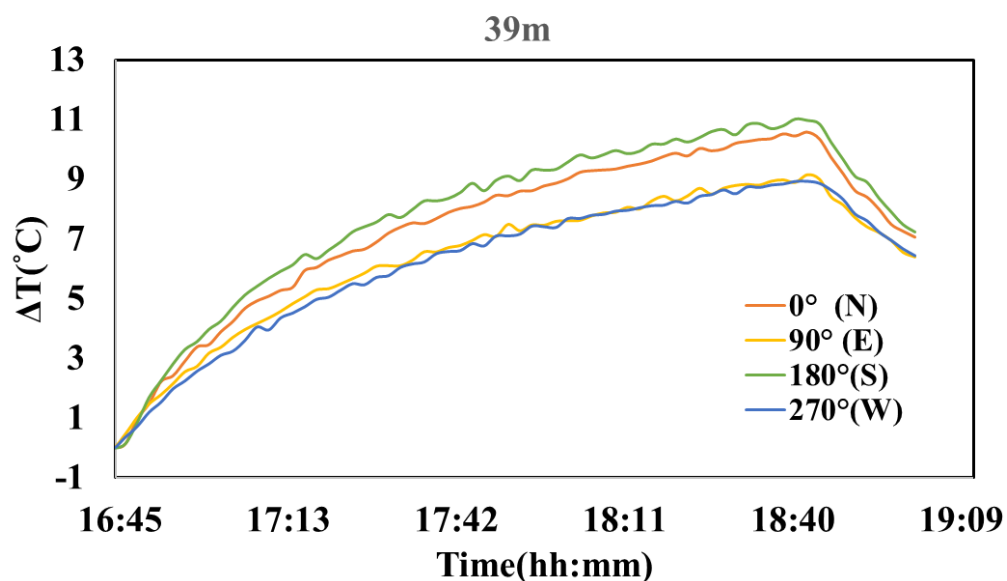


圖 82 K00268 第二次試驗深度 39 公尺處各方位溫差



## 結果

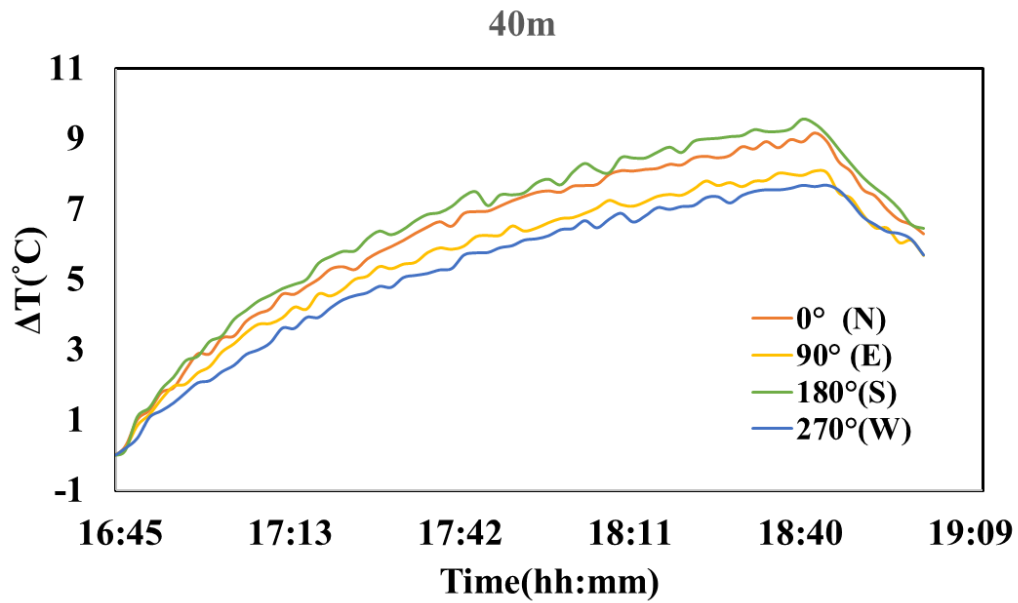


圖 83 K00268 第二次試驗深度 40 公尺處各方位溫差

表 18 K00268 第二次試驗 38-40m 各方位最大溫差(°C)

|         | 38 公尺 | 39 公尺 | 40 公尺 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0°(N)   | 10.65 | 10.58 | 9.17  |
| 90°(E)  | 10.27 | 9.17  | 8.11  |
| 180°(S) | 11.79 | 11.03 | 9.58  |
| 270°(W) | 10.79 | 8.94  | 7.70  |

表 19 K00268 第二次試驗 38-40m 各方位累積溫度(°C)

|         | 38 公尺  | 39 公尺  | 40 公尺  |
|---------|--------|--------|--------|
| 0°(N)   | 501.78 | 499.46 | 425.99 |
| 90°(E)  | 491.94 | 432.22 | 381.88 |
| 180°(S) | 575.45 | 531.64 | 448.50 |
| 270°(W) | 508.17 | 421.88 | 357.88 |



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

### 5-6-5 流向結果分析

為進一步量化不同深度位置之地下水流向與流速，本研究利用 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 之座標轉換公式，利用點熱源及有限的加熱時間下溫度分佈的解析解，推估三維空間地下含水層的地下水流向與達西流速。利用章節 4-7 所述，首先設定相關之參數，並於擬合過程中予以固定，包含加熱時間、加熱功率、孔隙率，水和地層材質之密度、熱容量、熱傳導係數及極角度  $\psi$  (假設水流為水平)，並以式 15 的座標轉換。四個觀測點位於加熱點源之東南西北四個方位，皆與加熱點相距約 0.05 公尺，並將此數值設定為觀測點與加熱線間之距離。所有參數設定彙整於表 20。

模型建立完畢後，本研究嘗試利用試誤法，試圖獲得最佳之  $\theta$  方位角之流向角度，以及地下水流之流速，藉由此兩個參數的溫度變化擬合以挑選出最佳之流向角度與流速組合。

本次分析利用 K00264 與 K00268 兩口井的第二次單井 TV-DTS 加熱試驗結果進行擬合。除了 K00264 與 K00268 分別處於淺層與深層含水層外，第二次之 TV-DTS 加熱試驗使用每公尺 30 瓦特的功率，進行 240 分鐘的加熱效果。因加熱時間較長，產生溫度差異高，溫度訊號較明顯，利於模型擬合。

#### ➤ TV-DTS K00264 擬合結果(淺層)

第一含水層的擬合結果如圖 84 至圖 86 所示，顯示井 K00264 深度 8 至 10 公尺加熱之擬合結果，整體試驗結果顯示，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 8-10 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於  $0^{\circ}\text{C}$ – $7^{\circ}\text{C}$  之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 21 與表 22 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。

圖 84 為 K00264 深度 8 公尺各方位擬和之結果，由圖觀察可知，K00264 深度 8 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線近乎一致，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬和之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 21 與表 22：模式中  $0^{\circ}$  方位(N)擬合之最大溫差為  $6.70^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $281.62^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差(RMSE)為 0.511； $90^{\circ}$  方位(E) 擬合之最大溫差為  $6.04^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $253.46^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.376； $180^{\circ}$  方位(S) 擬合之最大溫差為  $6.62^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $278.16^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.467； $270^{\circ}$  方位(W)的擬合之最大溫



## 結果

差為  $6.72^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $283.18^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.503，以上結果顯示西方溫度最高，南方次之。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為  $211.5^{\circ}$  方位(西偏南)以及  $0.021\text{ m/d}$ 。

圖 85 為 K00264 深度 9 公尺各方位擬和之結果，由圖觀察可知，K00264 深度 9 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線近乎一致，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬和之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 21 與表 22：模式中  $0^{\circ}$  方位(N)擬合之最大溫差為  $5.76^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $241.22^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差(RMSE)為 0.287； $90^{\circ}$  方位(E) 擬合之最大溫差為  $5.97^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $250.13^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.299； $180^{\circ}$  方位(S) 擬合之最大溫差為  $5.87^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $245.69^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.251； $270^{\circ}$  方位(W)的擬合之最大溫差為  $6.07^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $254.53^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.324，以上結果顯示西方溫度最高，南方次之。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為  $225.9^{\circ}$  方位(西偏南)以及  $0.022\text{ m/d}$ 。

圖 86 K00264 深度 10 公尺各方位擬和之結果，由圖觀察可知，K00264 深度 10 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線近乎一致，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬和之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 21 與表 22：模式中  $0^{\circ}$  方位(N)擬合之最大溫差為  $4.67^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $194.20^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差(RMSE)為 0.176； $90^{\circ}$  方位(E) 擬合之最大溫差為  $4.71^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $196.00^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.130； $180^{\circ}$  方位(S) 擬合之最大溫差為  $4.69^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $195.10^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.121； $270^{\circ}$  方位(W)的擬合之最大溫差為  $5.33^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $222.49^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.249，以上結果顯示西方溫度最高。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為  $226.4^{\circ}$  方位(西偏南)以及  $0.021\text{ m/d}$ 。

綜合以上結果，顯示 K00264 深度 8-10 公尺流向方位角度相似，介於  $211.5-226.4^{\circ}$  方位(西偏南)，流速約為  $0.021-0.022\text{ m/d}$ 。根據前人之試驗報告，K00264 之第一含水層流向約往西偏南側流動，符合前人之研究結果。



# 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

表 20 流速與流向解析之相關參數設定

|            |                       |
|------------|-----------------------|
| 加熱時間       | 120 分鐘                |
| 加熱功率       | 30 W/m                |
| 孔隙率        | 0.4                   |
| 密度(水)      | 998 kg/m <sup>3</sup> |
| 比熱(水)      | 4184 J/(kg°K)         |
| 熱傳導係數      | 0.6 W/(m°K)           |
| 縱向熱分散率     | 0.35 J/(kg°K)         |
| 橫向熱分散率     | 0.35 J/(kg°K)         |
| 極角度 $\psi$ | 90°                   |

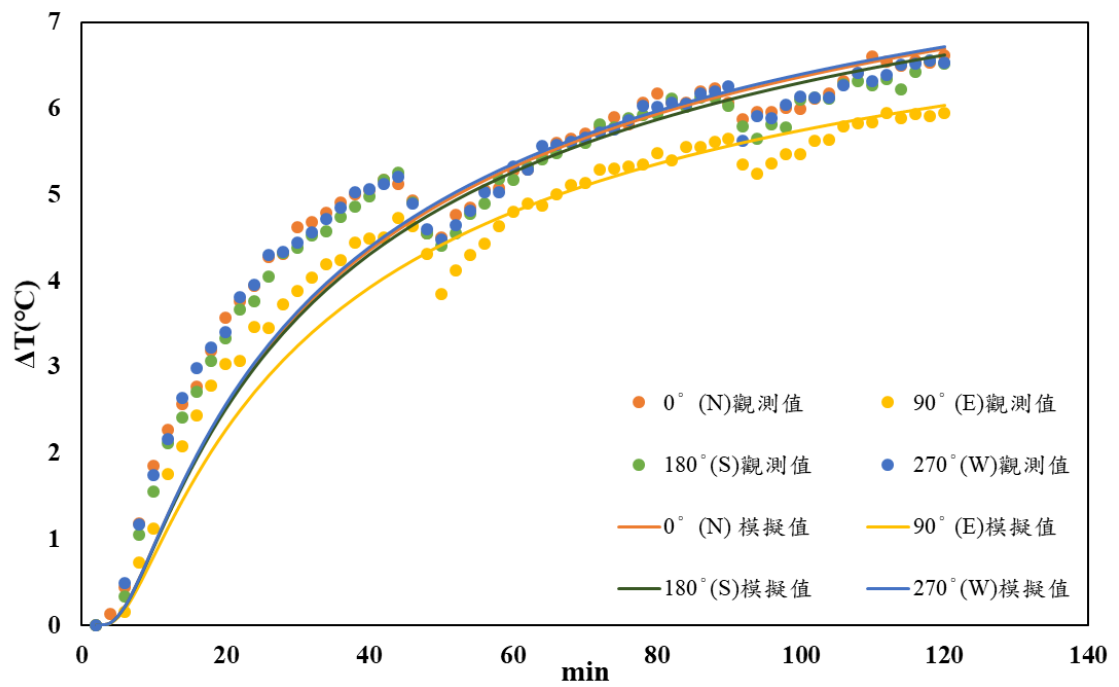


圖 84 K00264 深度 8 公尺各方位擬和之結果



## 結果

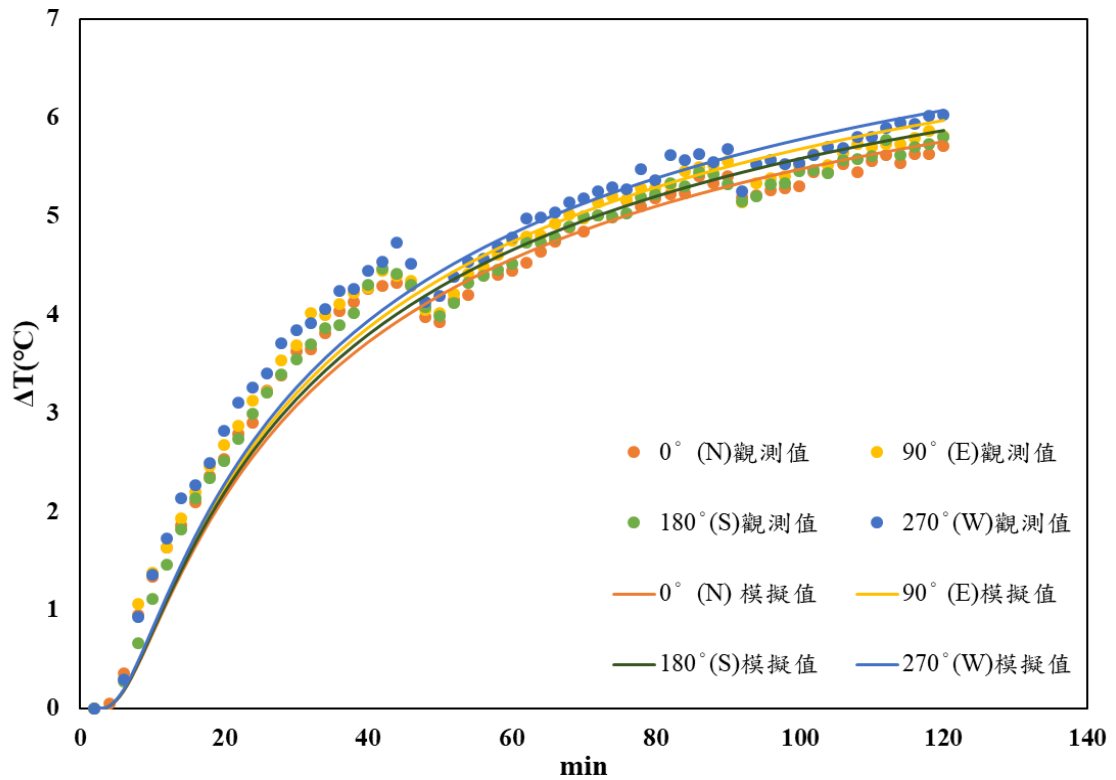


圖 85 K00264 深度 9 公尺各方位擬和之結果

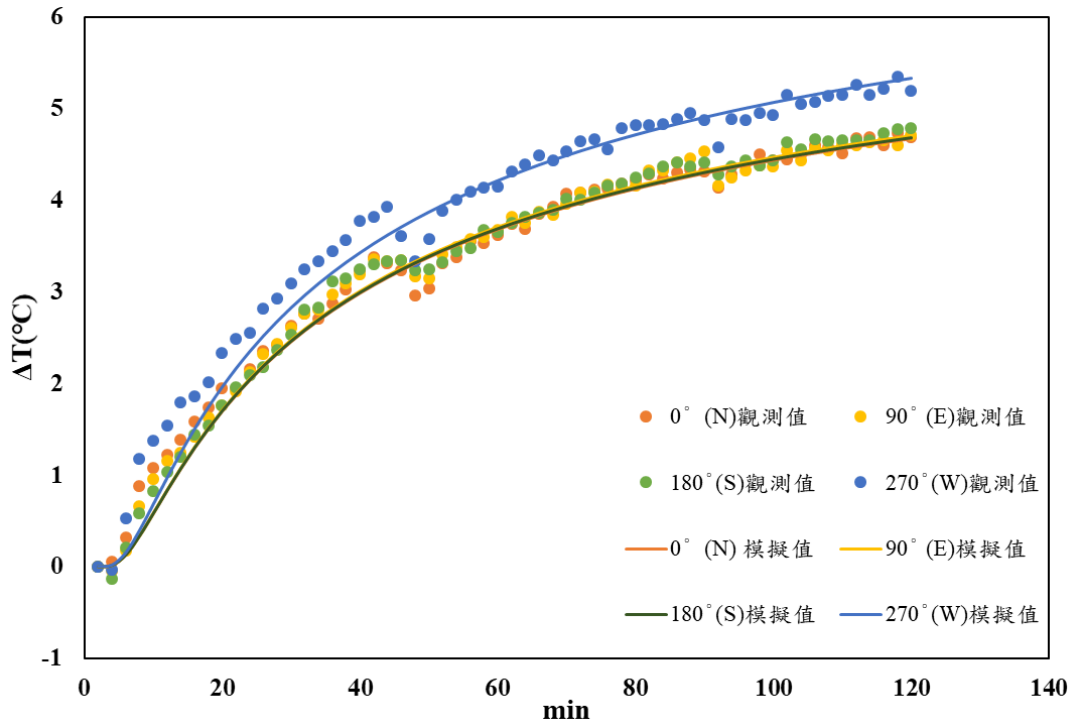


圖 86 K00264 深度 10 公尺各方位擬和之結果



# 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

表 21 K00264 模擬 8-10m 各方位最大溫差(°C)

|         | 8 公尺 | 9 公尺 | 10 公尺 |
|---------|------|------|-------|
| 0°(N)   | 6.70 | 5.76 | 9.17  |
| 90°(E)  | 6.04 | 5.97 | 8.11  |
| 180°(S) | 6.62 | 5.87 | 9.58  |
| 270°(W) | 6.72 | 6.07 | 7.70  |

表 22 K00264 模擬 8-10m 各方位累積溫度(°C)

|         | 8 公尺   | 9 公尺   | 10 公尺  |
|---------|--------|--------|--------|
| 0°(N)   | 281.62 | 241.22 | 194.20 |
| 90°(E)  | 253.46 | 250.13 | 196.00 |
| 180°(S) | 278.16 | 245.69 | 195.10 |
| 270°(W) | 283.18 | 254.53 | 222.49 |

表 23 K00264 8-10m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速

|          | 8 公尺  | 9 公尺   | 10 公尺  |
|----------|-------|--------|--------|
| 方位角      | 211.5 | 225.9° | 226.4° |
| 流速 (m/d) | 0.021 | 0.022  | 0.021  |



## 結果

## ➤ TV-DTS K00268 擬合結果(深層)

第二含水層的擬合結果如圖 87 至

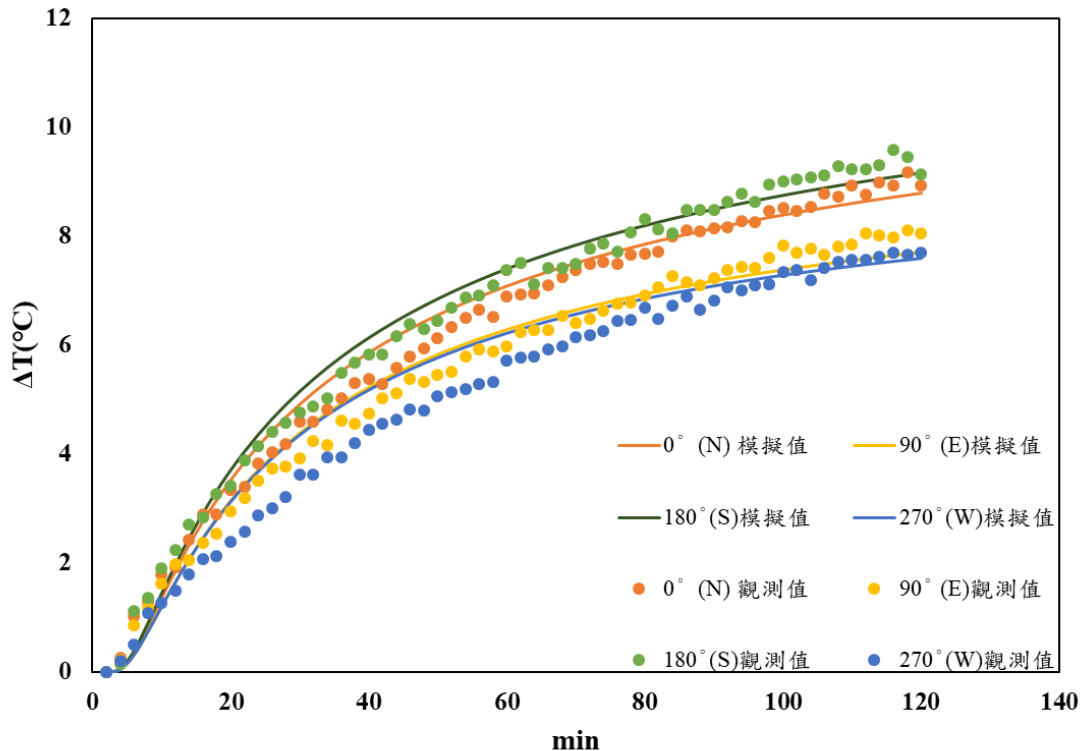


圖 89，顯示井 K00268 深度 38 至 40 公尺加熱之擬合結果，整體試驗結果顯示，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 38-40 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於 0°C – 10.4°C 之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 24 與表 25 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。

圖 87 為 K00268 深度 38 公尺各方位擬和之結果，由圖觀察可知，K00268 深度 38 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線近乎一致，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬和之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 24 與表 25：模式中 0° 方位(N)擬合之最大溫差為 9.92°C，累積溫度為 441.98°C，均方根誤差(RMSE)為 0.579；90° 方位(E) 擬合之最大溫差為 9.81°C，累積溫度為 423.87°C，均方根誤差為 0.321；180° 方位(S) 擬合之最大溫差為 10.38°C，累積溫度為 487.14°C，均方根誤差為 0.795；270° 方位(W)的擬合之最大溫差為 10.32°C，累積溫度為 444.02°C，均方根誤差為 0.316，以上結果顯示南方溫度最高，西方次之。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 225.9° 方位(西偏南)以及



# 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

0.05m/d。

圖 88 為 K00268 深度 39 公尺各方位擬和之結果，由圖觀察可知，K00268 深度 39 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線近乎一致，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬和之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 24 與表 25：模式中  $0^\circ$  方位(N)擬合之最大溫差為  $10.01^\circ\text{C}$ ，累積溫度為  $431.06^\circ\text{C}$ ，均方根誤差(RMSE)為 0.331； $90^\circ$  方位(E) 擬合之最大溫差為  $8.53^\circ\text{C}$ ，累積溫度為  $374.34^\circ\text{C}$ ，均方根誤差為 0.356； $180^\circ$  方位(S) 擬合之最大溫差為  $10.71^\circ\text{C}$ ，累積溫度為  $458.41^\circ\text{C}$ ，均方根誤差為 0.264； $270^\circ$  方位(W)的擬合之最大溫差為  $8.81^\circ\text{C}$ ，累積溫度為  $385.94^\circ\text{C}$ ，均方根誤差為 0.555，以上結果顯示南方溫度最高。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為  $219.15^\circ$  方位(南偏西)以及 0.05m/d。

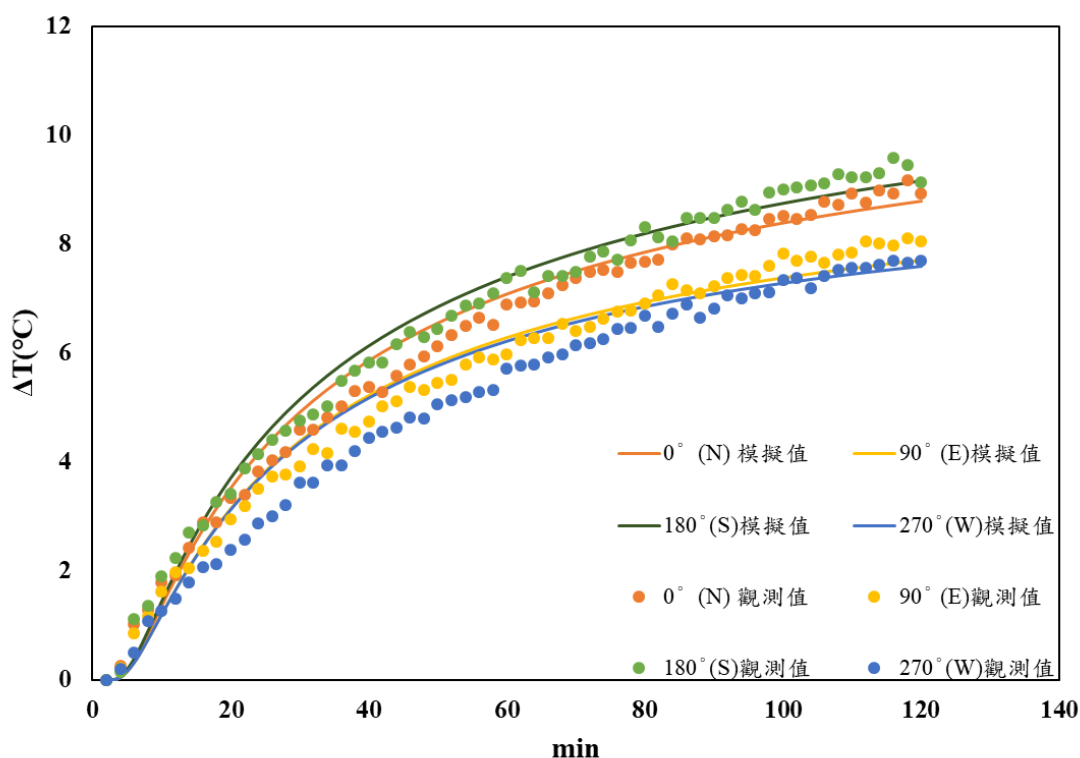


圖 89 為 K00268 深度 40 公尺各方位擬和之結果，由圖觀察可知，K00268 深度 40 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線近乎一致，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬和之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 24 與表 25：模式中  $0^\circ$  方位(N)擬合之最大溫差為  $8.78^\circ\text{C}$ ，累積溫度為  $374.33^\circ\text{C}$ ，均方根誤差(RMSE)為 0.317； $90^\circ$  方位(E) 擬合之最大溫差為  $7.70^\circ\text{C}$ ，累積溫度為  $331.18^\circ\text{C}$ ，均方根誤差為 0.299； $180^\circ$  方位(S) 擬合之最大溫差為  $9.16^\circ\text{C}$ ，



## 結果

累積溫度為  $391.54^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.293； $270^{\circ}$  方位(W)的擬合之最大溫差為  $7.59^{\circ}\text{C}$ ，累積溫度為  $327.58^{\circ}\text{C}$ ，均方根誤差為 0.526，以上結果顯示南方溫度最高。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為  $213.3^{\circ}$  方位(南偏西)以及  $0.0325\text{m/d}$ 。

綜合以上結果，顯示 K00268 深度 38-40 公尺流向方位角度十分接近，約為  $213.3-225.9^{\circ}$  方位(南偏西)，流速約為  $0.0325-0.05\text{m/d}$ 。根據前人之試驗報告，此 K00268 之第二含水層流向約往西偏南側流動，符合前人之研究結果。

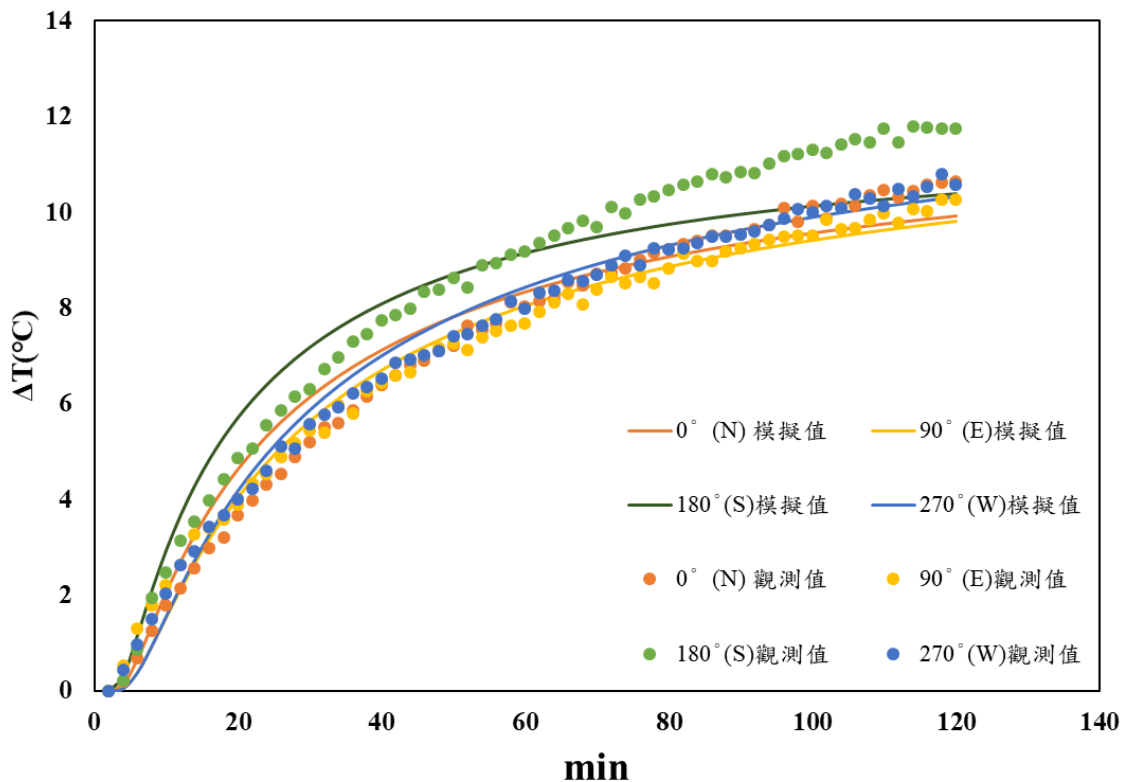


圖 87 K00268 深度 38 公尺各方位擬和之結果



# 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

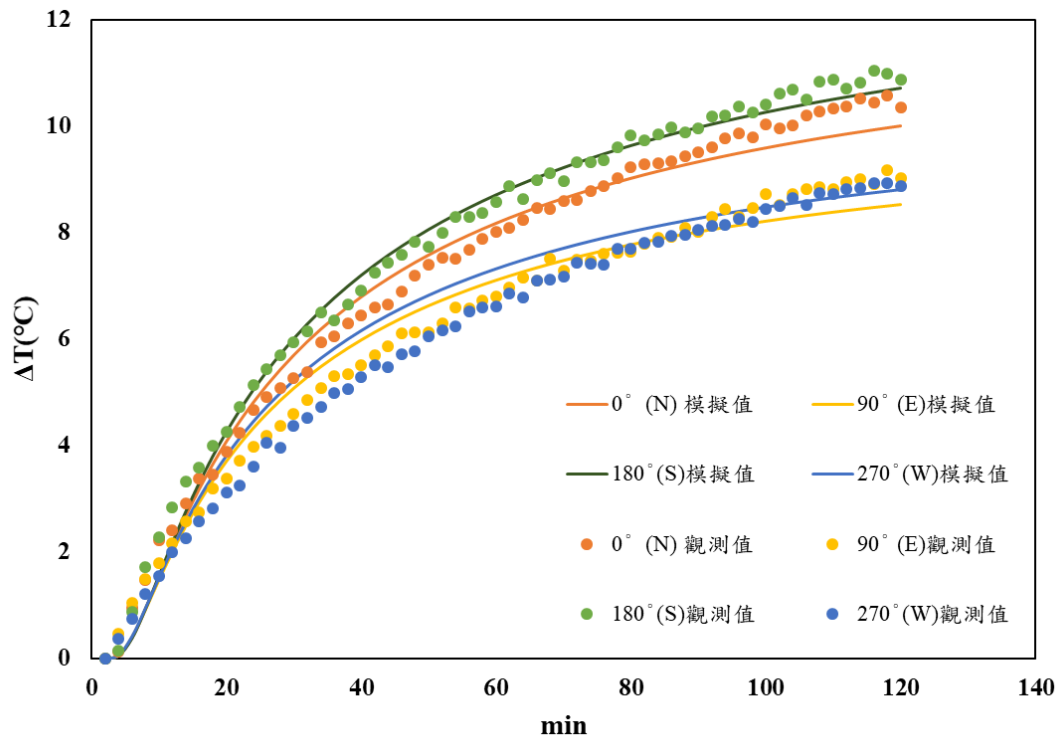


圖 88 K00268 深度 39 公尺各方位擬和之結果

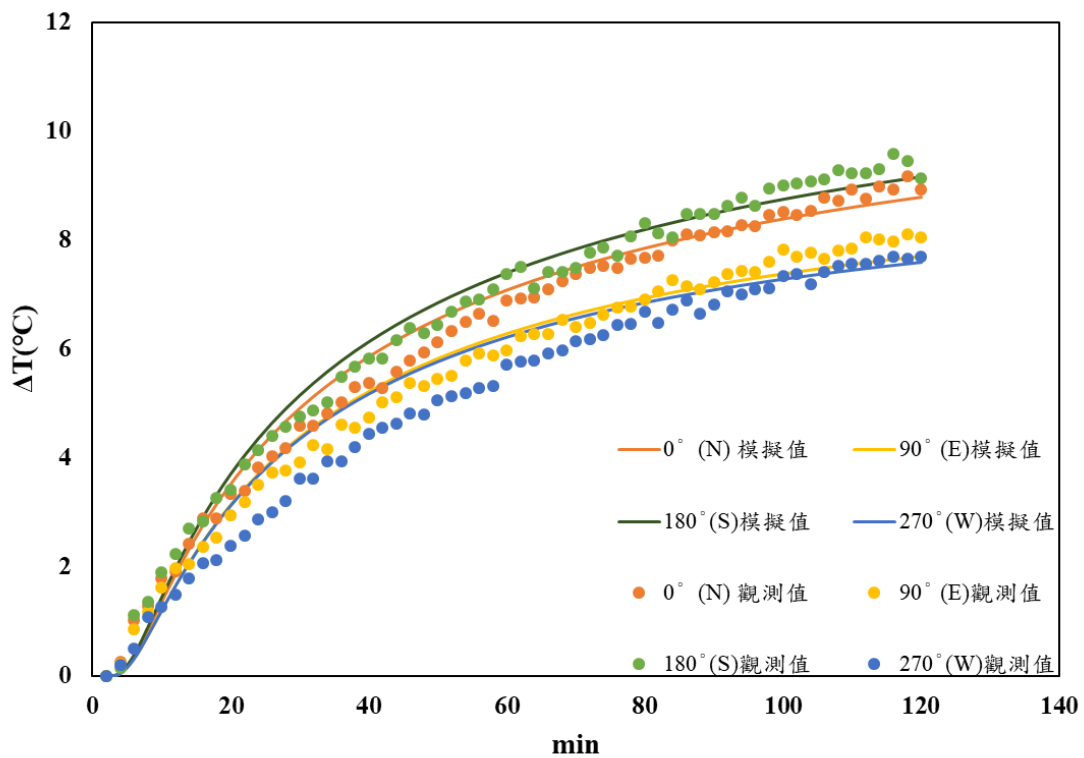


圖 89 K00268 深度 40 公尺各方位擬和之結果



## 結果

表 24 K00268 模擬 38-40m 各方位最大溫差(°C)

|         | 38 公尺 | 39 公尺 | 40 公尺 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0°(N)   | 9.92  | 10.01 | 8.78  |
| 90°(E)  | 9.81  | 8.53  | 7.70  |
| 180°(S) | 10.38 | 10.71 | 9.16  |
| 270°(W) | 10.32 | 8.81  | 7.59  |

表 25 K00268 模擬合 38-40m 各方位累積溫度(°C)

|         | 38 公尺  | 39 公尺  | 40 公尺  |
|---------|--------|--------|--------|
| 0°(N)   | 441.98 | 431.06 | 374.33 |
| 90°(E)  | 423.87 | 374.34 | 331.18 |
| 180°(S) | 487.14 | 458.41 | 391.54 |
| 270°(W) | 444.02 | 385.94 | 327.58 |

表 26 K00268 試驗 38-40m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速

|          | 38 公尺  | 39 公尺   | 40 公尺  |
|----------|--------|---------|--------|
| 方位角      | 225.9° | 219.15° | 213.3° |
| 流速 (m/d) | 0.05   | 0.05    | 0.0325 |



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

### 5-6-6 流速與流向分析綜整

為測試 TV-DTS 裝置在現地中對溫度感測的效果，除了在室內實驗室進行試驗優化 TV-DTS 裝置之外，分別選定永貞宮場址 K00264（井深為 12.1 公尺）與 K00268（井深為 91.9 公尺）為試驗井進行 TV-DTS 裝置之加熱試驗井，測試並檢驗不同含水層之流向，並同時於試驗過程中找出最適合之加熱功率、加熱時長與量測時間頻率，嘗試建立現地量測的標準流程。

在室內實驗中，利用水桶製造自製流場並固定其流速，並且測試其加熱功率、加熱時長與量測時間頻率，發現以每公尺 30 瓦特的功率進行 30 分鐘的加熱效果最佳。依據廠商儀器實驗室測試報告指出，在空間的解析度為 0.125 公尺，時間的解析度為 1 秒時，具有 0.2°C 的溫度量測精準度，然而，此解析度為在實驗室良好控制下所獲得的結果。雖然以 1 秒記錄一筆資料作為時間間隔雖可量測到大量資料，但容易因雜訊過多而不易辨識，其中空間的解析度為 0.125 公尺，時間的解析度為 0.5 - 1 分鐘，可達到 0.01°C 以上的溫度量測準確度，因此建議資料取樣頻率以 1 分鐘最佳，以符合本計畫對於資料品質之要求。經由實驗室測試的結果得知，精準調整與確認感測光纖與加熱光纖間之距離，將可提升流速判釋之準確度。此外，藉由結構支架設置，用以固定四個方位的感測光纖及中心加熱光纖之相對位置，可避免後續分析在方位上的誤判。

針對 K00264 的兩次試驗結果，第一次試驗當中，由於 30 分鐘加熱時間較短，使得升溫最高只有 2°C，但仍可藉由溫度判斷流向為東往西方流動；第二次試驗中，由於 240 分鐘加熱時間使熱能訊號得以順利傳遞，升溫最高可到 5-7°C，且可清楚判釋的地下水流向為東往西方向流動，與前人認為之第一含水層中，地下水流向約往西側及西南側方向流動相符，並且在此試驗得知在現地加熱試驗每公尺 30 瓦特的功率進行 240 分鐘的加熱效果最佳。

針對 K00268 的兩次試驗，除了第一次試驗中由於 30 分鐘加熱時間較短，但升溫也有 2-8°C，但仍可藉由溫度判斷流向為北往南方流動；和第二次試驗中為增進試驗效率，將加熱時間改為 120 分鐘，熱能訊號仍得以順利傳遞，升溫最高可到 7-12°C，且可清楚判釋的地下水流向為北往南方向流動，可直接由溫度資料判斷地下水流向。



## 結果

而後，為進一步量化不同深度位置之地下水流向與流速，利用點熱源及有限的加熱時間下溫度分佈的解析解，推估三維空間地下含水層的地下水流向與達西流速。擬合結果顯示 K00264 深度 8-10 公尺流向方位角度約為  $211.5-226.4^{\circ}$ ，流向約往西偏南側流動，流速約為 0.021-0.022m/d；K00268 深度 38-40 公尺流向方位角度約為  $213.3-225.9^{\circ}$  方位，流向約往西偏南側流動，流速約為 0.0325-0.05m/d。

綜合在 K00264 和 K00268 兩口井所分別進行的兩次 TV-DTS 試驗結果與擬合結果，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，此處第一含水層與第二含水層的地下水流約往西側及西南側方向流動，試驗中對於地下水流向判斷的結果十分吻合，不同深度的四個方位感測光纖所呈現的差異性，應該與不同深度地下水流向的些微改變有關，整體而言，判釋的地下水流向均非常一致。並且現地加熱試驗需以每公尺 30 瓦特的功率加熱，加熱時間需為 120 分鐘以上，設定時間間隔以 1 分鐘記錄一筆資料，方可進行流向的特徵化。



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

## 六、 討論

### 6-1 不同場址條件下，主動式 DTS 加熱試驗之適用性分析

主動式 DTS 加熱試驗的出現使得傳統之熱示蹤劑試驗在特徵化地下水層中有了更細緻的成果，其優點如下：加熱熱源溫度之恆定高溫，使熱示蹤劑在傳輸過程中之溫度訊號不致散失；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；藉由分散式光纖溫度感測器之雷射脈衝分析儀主機與光纖纜線的搭配，可在短時間量測大量且精準之空間上與時間上之溫度資料。

為理解主動式 DTS 加熱試驗在各個不同場址條件下之適用情形，本研究嘗試進行對相同試驗在不同場址之適用性分析。本研究計畫所選定過去曾應用主動式 DTS 加熱試驗調查之某桃園污染場址，進一步將其試驗結果與永貞宮場址之主動式加熱試驗相互比較，如表 27 所示，

#### ➤ 地質背景條件

桃園污染場址地質背景材質為其深度大約地下 1 公尺至地下 3-5 公尺處為以粉黏土為主之紅土層，地下 3-5 公尺至地下 15-16 公尺為礫石層，其主要為礫石夾砂並夾雜少量粉土(第一含水層)，其下則轉變為緻密連續之粉黏土層(第一滯水層)。地下水水位約在深度 5.1-6.0 公尺處。地下水流方向主要為由西南往東北。

永貞宮地質背景材質為地表下約 12 公尺至 15 公尺左右為滲透性良好之礫石層夾中細砂(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以及砂質粉土或粉黏土等互層(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細砂夾粉土(第二含水層)。地下水水位約在深度 2.2-3.5 公尺處。地下水流方向主要為由東北往西南。

#### ➤ 水文地質條件

兩個污染場址的含水層材質皆為礫石夾砂，且滯水層材質皆為粉黏土。桃園污染場址水文地質背景：第一含水層平均  $K$  值約在  $5.202 \times 10^{-4} \sim 6.953 \times 10^{-3}$  cm/s。



## 討論

永貞宮水文地質背景：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。由於桃園污染場址的鑽探深度與永貞宮比較相對較淺，針對第一含水層而言，兩者  $K$  值相當。

### ➤ 熱傳導係數

地質材料的熱傳導係數亦為影響熱傳導（或溫度變化）的控制因素之一，兩個場址的地質材料的熱傳導係數範圍分別為 0.51~1.44 W/m/°C 及 0.588~2.279 W/m/°C。以 ADTS-toolbox 分析軟體進行流速分析後，能將地層與光纖纜線之熱傳導係數效應予以濾除，更準確的推估地下水流速，不受限於異質性的地下水污染場址之水文地質調查。

### ➤ 污染物種類

桃園污染場址經調查曾發現土壤與地下水污染，污染物包括：1,2-二氯苯（1,2-DCB）及 1,4-二氯苯（1,4-DCB）等氯苯類污染物；永貞宮場址經調查曾發現三氯乙烯(TCE)、1,2-二氯乙烷(1,2-DCA)等揮發性有機污染物(\*VOCs)與含氯污染物。兩者皆屬於含氯有機化合物之地下水污染物場址。

### ➤ 深淺層的適用性

適用性評估以分析瞭解是否儀器可繼續於深淺井進行調查，而試驗結果證明主動式加熱試驗搭配分散式光纖溫度感測器可於深度將近 100 米的深井有效進行調查試驗。

### ➤ 流速快慢或分佈

以桃園污染場址為例：進行單井加熱試驗之測量結果顯示在深度 6.5~10 公尺透水性較高，其次為深度 10~13 公尺，而深度 13 公尺以下至井底的透水性最差。而後根據所測量之溫度資料，以線性熱源之熱傳輸解析解解析加熱光纖在井內溫度之變化。以流速相對快慢來看，試驗推估之流速是以深度 8~9.5 公尺最快，約為 3.0m/d，其次為 10.5~12 公尺，約為 2.8~2.1m/d，最慢則是深度 13~14.5 公尺，約為 1.45~0.95m/d。

以永貞宮場址為例：進行單井加熱試驗之測量結果顯示在深度 17~19 公尺之第一含水層透水性較高，其次為深度 42~52 公尺之第二含水層，而



### 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

深度 19~35 公尺之第一滯水層的透水性最差。而後根據所測量之溫度資料，以線性熱源之熱傳輸解析解析加熱光纖在井內溫度之變化。以流速相對快慢來看，試驗推估第一含水層之流速是以深度 16~20 公尺之區間最快，約為 1.75~1.95 m/d；第一滯水層深度 20~35 公尺流速緩慢，約為 0.11~0.31 m/d，深度 35~52 公尺流速約為 0.75~1.45 m/d，而至深度 79~82 公尺有最慢流速，約為 0.7~0.9m/d。

整體來說，桃園污染場址之監測井深度較淺、流速較快；永貞宮場址監測井深度較深、流速較慢。

綜合以上所述，可發現不論監測井深度、地下水汙染物、地質背景略有不同，但在主動式加熱試驗搭配分散式光纖溫度感測器的創新技術依然能在不擾動地下水流的情況下避免造成汙染擴大的前提下，有效高解析度特徵化地下水層之分層結構，並且能有效分析各深度垂向之流速變化與各深度之透水情形。此方式亦可提供場址在進行改善或整治上重要的參考依據，並針對現地需求採行不同的策略。例如：針對低透水區段、流速較慢之深度區間應如何妥善處理，高透水區段、流速較快之深度區間是否需加強整治等。

總結來說，本研究將地下水汙染場址以主動式加熱試驗搭配分散式光纖溫度感測器，進行模場試驗所產出之量測結果不僅可適用於單一地下水汙染場址之水文地質調查。此外，對於地下水汙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汙染整治評估，進而提升水文地質調查能力與整治效率。



## 討論

表 27 不同試驗場址背景比較

| 試驗場址    | 桃園污染場址                                           | 苗栗永貞宮                                            |
|---------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 地下水汙染物  | 1,2-DCB、1,3-DCB、TPH                              | TCE、1,2-DCA、VOCs                                 |
| 地質背景    | 紅土坭黏土；礫石夾砂；坭黏土層                                  | 礫石夾砂；坭黏土；砂、坭土、黏土互層                               |
| 試驗井最大深度 | 14.8m                                            | 91.9m                                            |
| 地下水位    | 深度 5.1-6.0 m                                     | 深度 2.2-3.5 m                                     |
| 地下水流向   | 由西南往東北                                           | 由東北往西南                                           |
| 水力傳導係數  | $5.2 \times 10^{-4}$ - $6.9 \times 10^{-3}$ cm/s | $1.0 \times 10^{-5}$ ~ $1.0 \times 10^{-2}$ cm/s |
| 熱傳導係數   | 0.51~1.44 W/m/°C                                 | 0.588~2.279 W/m/°C                               |
| 推估流速    | 0.95-3.0 m/d                                     | 0.7- 1.95m/d                                     |



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

## 6-2 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

本研究團隊過去藉由熱作為示蹤劑，並以 FO-DTS 來進行水文地質調查及地下水流特徵化，在經過兩個不同污染場址的試驗結果彙整之後，並搭配現地的實務經驗，嘗試以主動式 DTS 相關技術在水文地質調查方法之標準作業流程，包括：光纖種類、光纖佈設方式、加熱時間、加熱功率、地質條件及限制、應用範圍等，提出參考建議。所提出的流程中，將考量試驗資料的可靠性、現地試驗施行之可行性與便利性高、試驗耗費之人力成本等因素，以下建議內容綜整於表 28。

以下之光纖都必須具備高延展性及充油防水抗氧化耐高溫腐蝕等特性，主要能符合一般在野外現地能夠承受現地惡劣之試驗環境，另可加入可導熱之銅線，用以搭配加熱控制系統，作為主動式加熱試驗之熱源。

### ➤ 光纖種類

由於試驗場址均為污染場址，因此所選用的光纖材質都必須具備高延展性及充油防水抗氧化耐高溫腐蝕等特性，主要能符合一般在野外現地能夠承受現地惡劣之試驗環境。另外，由於是以主動式加熱的方式進行試驗，因此，在光纖設計與製作時，建議可直接加入可導熱之銅線，形成一複合式光纖，確保加熱銅線與感測光纖間之距離有一致性。若能夠搭配加熱控制系統，提供一穩定且能夠控制之熱源，將會提高整個試驗過程後續量化分析之準確性。

### ➤ 單井流速分析與跨孔熱示蹤劑試驗

在進行單井流速分析時，無需考慮地下水流上下游間之關係，而是以井體的設計為主要考量，通常會選定全開篩（或長開篩）的地下水井；然而，在進行跨孔熱示蹤劑試驗時，通常會選定上游之監測井為加熱井，下游為觀測井，並且根據其開篩深度進行後續跨井試驗規劃。不論是單井流速分析與跨孔熱示蹤劑試驗，所使用的光纖必須為包覆銅線作為導熱材料之多模光纖纜線，以便進行通電加熱。量測後的光纖溫度校正有其必要性，量測溫度解析度須達  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，空間解析度須為  $0.25\text{m}$ ，資料取樣頻率可視試驗而定，通常每 1 分鐘一筆資料可滿足大部分的試驗需求。光纖佈設方式為全井布設，在跨孔熱示蹤劑試驗時，可依試驗需求布設於下游多孔觀測



## 討論

井，以利進行跨井熱示蹤試驗。建議加熱功率為每公尺 20 瓦特以上，以利觀測到準確的溫度變化；單井流速分析時，加熱時間通常為 10 小時以上，以利熱能訊號於地下水層中傳遞，而後加熱停止後應等待加熱井溫度冷卻，回復背景溫度約 95% 以上，以利收取完整之溫度訊號。跨井加熱則建議為 24 小時以上，試驗時間則須視加熱井與觀測井間之距離、水文地質條件而不同，一般而言，跨孔試驗的時間通常會長達數天或數週，以確定下游觀測井有接受到熱能訊號。試驗過程中，應特別注意加熱系統之供電穩定，以確保單位長度光纖上所提供的加熱功率一致，以利後續的量化分析。地質背景並無特殊限制，只要存在既設觀測井，並可全井放置加熱光纖，便可判釋地層中的透水區段或裂隙岩體之透水裂隙位置。其應用範圍廣泛，可作為常態性地下含水層或水文地質調查項目之一。

### ➤ 高解析度纏繞光纖

主要目標為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。

通常會選定特定監測井之開篩段，並且通常搭配已進行過主動式 DTS 光纖加熱的監測井，針對特定深度再進一步深入調查。量測溫度解析度須達  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，空間解析度須為  $0.25\text{m}$ （纏繞後解析度可達公分等級），量測間隔可視試驗而定，通常為每 1 分鐘一筆資料。所使用的光纖可分為兩部分：一為中心之加熱光纖，必須為包覆銅線作為導熱材料之多模光纖纜線，以便進行通電加熱；一為纏繞光纖，材料並無特殊限制，需特別注意繞光纖半徑與纏繞管柱材質，建議使用開篩透水裝置，而非 PVC 水管。研究結果已顯示，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，因此在現有監測井的管徑大小下，3 吋以上之纏繞光纖幾乎沒有能量耗損之問題，然極不建議使用管徑小於 1.5 吋以下之纏繞光纖，量測誤差可到  $0.7^{\circ}\text{C}$  以上；建議加熱功率為每公尺 20 瓦特以上，以利觀測到準確的溫度變化；加熱時間通常為 10 小時以上，加熱停止後應等待加熱井溫度冷卻，回復背景溫度約 95% 以上，以利收取完整之溫度訊號；地質背景並無特殊限制，只要存在既設觀測井（兩吋以上）並可放置加熱光纖，便可判釋地層。其應用特殊，可作為加強性地下含水層細部結構調查之技術。



## 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

### ➤ 單井 TV-DTS 試驗

主要目標為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，同時推估流向與流速在垂向上的分佈。

通常會選定特定監測井之開篩段，並且搭配主動式 DTS 光纖加熱試驗。針對監測井特定深度再進一步深入調查。所使用的光纖可分為兩部分：一為中心之加熱光纖，必須為包覆銅線作為導熱材料之多模光纖纜線，以便進行通電加熱；一為 TV-DTS 光纖，材料並無特殊限制，做為四個方位之溫度感測裝置，需特別注意四個光纖方位位置是否正確，以利後續試驗工作。TV-DTS 可藉由試驗需求設置結構支架，用以固定四個方位以及中心加熱光纖之位置，避免造成方位上的誤判。量測溫度解析度須達  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，空間解析度須為  $0.25\text{m}$ ，量測間隔可視試驗而定，通常為每 1 分鐘一筆資料。建議加熱功率為每公尺 20 瓦特以上，以利觀測到準確的溫度變化；加熱時間通常為 2 小時以下，加熱停止後應等待加熱井溫度冷卻，回復背景溫度約 95% 以上，以利收取完整之溫度訊號；地質背景並無特殊限制，只要設有觀測井(兩吋以上)並可放置加熱光纖，即可判釋地層特定深度之流向。研究結果顯示，當地下水流體具有顯著性的流動時，TV-DTS 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。TV-DTS 的應用以單井試驗為主，井體必須具有開篩區段。若為長開篩井管，則可進行分段試驗，TV-DTS 裝置可彌補跨孔熱示蹤劑之不足，作為地下水流向與流速調查的關鍵技術之一。



## 討論

表 28 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 試驗之設定建議

|            | 主動式 DTS<br>單井加熱 | 主動式 DTS<br>跨井加熱     | 高解析纏繞<br>光纖          | 單井 TV-<br>DTS        |
|------------|-----------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 地質背景       | 無特殊限制           |                     |                      |                      |
| 試驗時間       | 24-50 小時        | 48-72 小時            | 24-50 小時             | 5-10 小時              |
| 加熱時間       | 10-24 小時        | 24 小時               | 10 小時                | 2 小時                 |
| 加熱功率       | 每公尺 20 瓦特以上     |                     |                      |                      |
| 資料取樣<br>頻率 | 1-2 分鐘/筆        | 1-2 分鐘/筆            | 1-2 分鐘/筆             | 0.5-1 分鐘/筆           |
| 地質條件<br>限制 | 無               | 不適用於極<br>低流速        | 無                    | 不適用於極<br>低流速         |
| 井體限制       | 無               | 加熱井與觀<br>測井距離過<br>遠 | 不適用於 2<br>吋以下觀測<br>井 | 不適用於 2<br>吋以下觀測<br>井 |
| 光纖佈設       | 全井佈設            | 全井佈設                | 特定深度區<br>段           | 特定深度區<br>段           |
| 適用調查<br>項目 | 透水區段調<br>查      | 透水區段調<br>查          | 特定深度細<br>部關鍵構造<br>調查 | 特定深度流<br>速流向調查       |



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

## 七、 結論與建議

### 7-1 結論

本計畫以苗栗縣頭份鎮永貞宮地區為模場試驗場址上一年度針對淺部含水層（第一含水層與第一滯水層）進行試驗，今年度則針對深部含水層（第二含水層）進行試驗，並且進行二年執行成果資料的綜合整理。以下將針對現地調查結果及技術發展進行綜整。

#### ➤ 現地調查結果

第一次試驗以 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。

根據單井流速分析結果顯示，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。分別針對淺部與深部含水層的試驗溫度剖面進行探討（K00264 與 K00268），兩次試驗的相對透水性分佈趨勢非常一致，深度 17~19 公尺、37~40 公尺及 42~52 公尺為最為透水之地層；在深度 23~28 公尺則為最不透水區域；深度 5~15 公尺、19~35 公尺及 70~80 公尺周圍的地層相對較不透水。以熱傳輸解析解進行流速分析，其結果顯示，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 18~20 公尺、35~40 公尺及 40~52 公尺區間的較高流速分佈，最高流速達 1.75-1.95 m/day；深度 20~35 公尺及 53~90 公尺區間則為低流速帶，最低流速為 0.2-0.5 m/day，且在低流速區段當中（例如 29~30 公尺、78~80 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。將兩次試驗流速分佈對照文獻報告的地質柱狀剖面圖，其流速分析成果與地層岩性分佈一致，除了驗證主動式的光纖溫度感測器量測方法的可行性，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。

根據跨孔熱示蹤劑試驗分析結果顯示，在兩次試驗皆可觀察到下游觀測井 K00264 的水溫受到加熱井（K00268）的影響，而有升溫現象。其餘的下游井（K00265、K00266、K00269）均大於加熱試驗的影響半徑（約



## 結論與建議

7 公尺)，無法觀察到上游加熱井熱源之影響。

為量化地層之水文地質參數，透過建置二維數值模式 (MODFLOW+MT3DMS)，經由水力傳導係數與延散係數之率定，以擬合觀測井的地下水溫度。模擬結果顯示，最佳的水力傳導係數為  $2.5 \times 10^{-5}$  m/s、熱延散係數為 0.38m。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，用以解析關鍵的細部構造。試驗結果顯示，與單井流速分析結果非常一致，然而解析度從原來的 25cm 提升至 1.05cm，使得更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，以彌補跨孔熱示蹤劑試驗之不足，自製研發設計 TV-DTS，進行單井的流速與流向測定。首先透過室內實驗測試，優化 TV-DTS 設計及現地試驗流程。針對淺部及深部含水層分別進行各兩次的試驗，其結果顯示，在淺層含水層部分，深度 8-10 公尺的地下水流向大致呈現由東北往西南方向流動；在深層含水層部分，深度 38-40 公尺的地下水流向則大致呈現由北往南方向流動。根據前人的多深度水文試驗及鑽探物性分析綜合評析結果，污染場址的第一與第二含水層的地下水流約往西及西南方向流動，與試驗結果的判釋流向結果十分吻合。以 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 的解析解進行流向與流速量化分析，其結果顯示，淺層含水層部分，深度 8-10 公尺的地下水流向為  $211.5-226.4^\circ$ ，流速介於 0.021-0.022 m/day；深層含水層部分，深度 38-40 公尺的地下水流向為  $213.3-225.9^\circ$ ，流速介於 0.0325-0.05 m/day。

### ➤ 調查技術發展

由於試驗場址均為污染場址，因此所選用的光纖材質都必須具備高延展性及充油防水抗氧化耐高溫腐蝕等特性，主要能符合一般在野外現地能夠承受現地惡劣之試驗環境。以主動式加熱的方式進行試驗，建議可直接加入可導熱之銅線，形成一複合式光纖。試驗時的加熱控制系統需能夠提供一穩定且能夠控制之熱源，試驗過程中的加熱功率提升，可提昇流速上之判釋能力。依據本計畫所設計之量測與分析方式，最適當之井體設計全開篩或長區段開篩。量測後的光纖溫度校正有其必要性，量測溫度解析度



### 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

須達  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，空間解析度須為  $0.25\text{m}$ ，資料取樣頻率可視試驗而定，通常每 1 分鐘一筆資料可滿足大部分的試驗需求。

在進行單井流速分析時，無需考慮地下水流上下游間之關係，然而，在進行跨孔熱示蹤劑試驗時，選定上游之監測井為加熱井，下游為觀測井，為最佳的跨井試驗規劃。在一般的情形下，建議加熱功率為每公尺 20 瓦特以上，以利觀測到準確的溫度變化；單井流速分析時，加熱時間通常為 10 小時以上，以利熱能訊號於地下水層中傳遞，而後加熱停止後應等待加熱井溫度冷卻，回復背景溫度約 95% 以上，以利收取完整之溫度訊號。跨井加熱則建議為 24 小時以上，試驗時間則須視加熱井與觀測井間之距離、水文地質條件而不同，試驗的時間通常會長達數天或數週。

纏繞光纖通常搭配主動式 DTS 進行試驗，材料並無特殊限制，需特別注意纏繞光纖半徑與纏繞管柱材質，建議使用開篩透水裝置。研究結果已顯示，極不建議使用管徑小於 1.5 吋以下之纏繞光纖，建議加熱功率為每公尺 20 瓦特以上，以利觀測到準確的溫度變化。

自製研發的 TV-DTS 裝置，可於單井內同時推估流向與流速在垂向上的分佈。TV-DTS 裝置亦須搭配主動式 DTS 進行試驗，TV-DTS 光纖材料並無特殊限制，僅需特別注意四個光纖方位位置是否正確，以利後續分析工作。加熱時間通常為 2 小時以下，加熱停止後應等待加熱井溫度冷卻，回復背景溫度約 95% 以上，以利收取完整之溫度訊號。TV-DTS 的應用以單井試驗為主，井體必須具有開篩區段。若地下水流速較低，在無法產生溫度訊號在各方位上之差異性時，所推估的水流方向不確定性較高。TV-DTS 裝置可彌補跨孔熱示蹤劑之不足，作為地下水流向與流速調查的關鍵技術之一。



## 7-2 建議

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、第二年針對深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。此外，透過自製研發的高解析度纏繞光纖及TV-DTS裝置，以增加空間上之解析度及彌補跨孔熱示蹤劑之不足。

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。建議可將此調查技術納入污染場址調查的關鍵技術之一，尤其是針對深層的含水層，更能夠發揮其技術優勢。

污染場址的適用性中，目前主動式加熱試驗已可成功應用於含氯有機化合物之污染物場址，且成功解析不同含水層之結構調查與地下水流速分佈，此方式亦可提供場址在進行改善或整治上重要的參考依據，並針對現地需求採行不同的策略。例如：針對低透水區段、流速較慢之深度區間應如何妥善處理，高透水區段、流速較快之深度區間是否需加強整治等。然目前尚未對不同型態之污染物場址之適用性分析(如高揮發性、重金屬、農藥等)，未來值得更多的測試與調查。



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

## 八、 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.
- Briggs, M. A., Buckley, S. F., Bagtzoglou, A. C., Werkema, D. D., & Lane, J. W. (2016). Actively heated high-resolution fiber-optic-distributed temperature sensing to quantify streambed flow dynamics in zones of strong groundwater upwelling. *Water Resources Research*, 52(7), 5179-5194.
- 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,



## 參考文獻

- 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>
- 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



# 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

- thermohaline systems, *WaterResour. 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 and dispersion effects. *Water Resources Research*, 38(1), 1006. <https://doi.org/10.1029/2000WR000071>
- Jaeger, J. C., & Carslaw, H. S. (1959). *Conduction of heat in solids*. Oxford, United Kingdom: Clarendon P.
- 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.*



## 參考文獻

- 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 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.



## 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

- 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>
- Simon, Nataline, and Olivier Bour. "An ADTS Toolbox for Automatically Interpreting Active Distributed Temperature Sensing Measurements." *Groundwater* (2022).
- Simon, N., Bour, O., Lavenant, N., Porel, G., Nauleau, B., Pouladi, B., ... & Crave, A. (2021). Numerical and experimental validation of the applicability of active-DTS experiments to estimate thermal conductivity and groundwater flux in porous media. *Water Resources Research*, 57(1), e2020WR028078.
- 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. <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



### 參考文獻

- 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 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

## 九、 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                                                                                                                                                  | 111 年度                                                                                         | 計畫類型                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別                                                                                                                                                  | <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 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. 對原計畫書的建議已回覆說明。                                                                                                                                     |                                                                                                | 1. 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |
| 2. 本期中報告已說明計畫的執行狀況與試驗流程，研究方法也已具體說明(Chap. 4&5)。                                                                                                        |                                                                                                | 2. 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |
| 3. 本研究無自籌款。                                                                                                                                           |                                                                                                | 3. 感謝委員肯定，本研究並無自籌款然實驗相關設備均為本團隊自行添購，計畫執行之相關事宜皆依相關規定辦理。                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                      |
| 4. 本次報告為期中報告，計畫後續的執行工作項目已於 P. 63 中簡要說明 (建議:條列說明)。                                                                                                     |                                                                                                | 4. 感謝委員建議。由於毋須繳交期中報告修正稿，因此，有關計畫後續的執行工作項目將儘量以條列式說明於申請計畫書修正稿期末報告中進行補充。                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
| 5. 計畫進度已經說明，並無明顯落後(對後續擬執行工作項目及內容已有具體規劃)。                                                                                                              |                                                                                                | 5. 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |
| 6. 期中報告所說明的研究內容與原計畫目的符合。                                                                                                                              |                                                                                                | 6. 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |
| 7. 本報告為期中報告，已提出初步的研究成果，建議期末報告能依研究內容提出在實務上的應用潛力，以及實務上適用的情境(永貞宮鄰近地區的污染改善作為(或是地下水調查作業)對本研究是否有影響?)(5.5 節，本研究的施作對地下水中 VOC 是否有影響?)(本研究成果是否可以與傳統方式所獲的結果比對?)。 |                                                                                                | 7. 感謝委員建議。未來會持續精進相關之技術。根據初步之研究結果，顯示出其對於地下水污染場址之水文地質調查有一定程度的適用性，能為地下水汙染之整治作業提供參考之依據。針對實務應用， 本研究所提出調查方法之標準作業流程（包括：加熱時間、加熱功率、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期末報告中綜整後提出參考建議。由於本研究主要針對水文地質進行調查，並未針對污染物之化學特性進行分析，依據現地試驗之經驗，VOC 濃度對於量測結果之影響甚微，而試驗過程的加熱是否對 VOC 的遷移或衰減，可以做為後續的研究議題之一。本研究研究成果與傳統方式所獲的結果比對將於期末報告中予以呈現。 |                                                                      |



### 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. 期中報告所提出的研究成果尚符合預期。                                                                                                                              | 8. 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 委員二<br>符合期中規劃進度。                                                                                                                                   | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 委員三<br>本研究有助提供正確的地下水污染場址之水文地質調查資料，內容完整、目標明確，期待此技術能有更多推廣。                                                                                           | 感謝委員肯定。未來將持續精進此調查技術，獲得更為準確的資料，延伸其應用範圍。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 委員四<br>1. 根據期中執行成果，有關加熱式光纖量測之應用，於現地應用時，可能受到土壤特性、地質條件以及加熱效率等因素影響，是否有相關因應或解決對策？<br><br>2. 目前驗證地下水流向方式係以前人研究檢測結果相符與否，作為評估之依據；然地下水流向之變化，是否宜有其他驗證機制之規劃？ | 1. 感謝委員建議。加熱式光纖量測的理論基礎為熱傳輸原理，除了水流速度之外，會影響熱傳輸的因素包括：土壤特性、地質條件等。因此，在進行水流資料分析的同時，已經一併將上述的影響因素納入考量。加熱功率會因為現地的地質條件、土壤特性及地下水流速之不同，而有不同的設定，本團隊依據過往之經驗，在進行現地試驗之前，均會對加熱功率與加熱時間先進行測試及優化。本研究之主要目的旨在提供一高解析度調查方法，用以推估水力及熱傳輸相關參數，調查方法之標準作業流程（包括：加熱時間、加熱功率、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期末報告中綜整後提出參考建議。<br><br>2. 感謝委員建議。TV-DTS 裝置目前已有初步成果，與前人調查結果有一定程度之一致性，初步驗證裝置之可行性。未來可考慮在進行加熱試驗時，搭配 time lapse ERT 及即時的水位監測，針對試驗結果進行驗證及比較。 |
| 委員五<br><br>1. 計畫執行期程請檢視是否與前期成果亦納入?(依甘特圖/本報告為第二年計畫，結果討論亦有 111 年 4 月數據)<br><br>2. 本年度試驗為期三天，相關監測數據之時序趨勢、特徵，應請掌握呈現，並檢視與預測趨勢/特                         | 1. 感謝委員建議。由於本研究執行期間為兩年，第一年計畫之目標為淺部含水層，主要針對淺層資料進行分析。第二年計畫之目標則為深部含水層，待深部含水層之相關試驗執行完成後，將其結果和前一年度的深層資料相互比較，藉此判斷結果之準確性，故在本報告中有 4 月數據的呈現。<br><br>2. 感謝委員建議。為更加清楚呈現溫度資料時序上的變化，因此於期中報告中僅節錄部分資料                                                                                                                                                                                                                         |



## 附錄

|                                          |                                                                                       |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 徵之差異性。                                   | 進行呈現。完整的試驗資料呈現與分析將補充說明於期末報告中。                                                         |
| 3.現場測試結果與環境潛在影響數據之關聯性，應請說明(兩次實驗期間之環境條件)。 | 3. 感謝委員建議。兩次試驗期間之外在水文條件均相似，並無顯著差異，因此，試驗結果比較結果的一致性具有一定的可信度。有關調查方法之適用現地環境條件說明將補充於期末報告中。 |
|                                          |                                                                                       |



## 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

## 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                                                       | 111 年度                                                                                         | 計畫類型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別                                                       | <input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它 | 主持人：邱永嘉                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | NO：S2-7                                                              |
| 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（第二年）                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |
| 委員審查意見                                                     |                                                                                                | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                      |
| 委員一                                                        |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |
| 1. 有關地下水流向之實地量測，與預測擬合，本年度之驗證作業與執行方法，應予以規劃與說明。              |                                                                                                | 1. 感謝委員建議。利用 TV-DTS 進行單井的地下水流向實地量測，現地量測的溫度變化結果可快速的初步判釋可能的水流方向，而透過 Zlotonik and Tartakovsky (Water Resources Research, 2018) 所提出的解析解可進一步準確量化水流方向與流速。而現地試驗結果將透過現地的跨孔加熱試驗（兩口井以上）以及數值模式（SEAWAT）模擬來進行驗證。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。                                                                                                                                                                                          |                                                                      |
| 2. 請補充說明本年度對於光纖現地測試，與前年度之差異點及精進作為？其中深層與淺層污染場址之規劃，宜先予以釐清說明。 |                                                                                                | 2. 感謝委員建議。本年度所規劃的工作項目主要針對深層含水層進行試驗，而前一年度則為淺層含水層。第一年度著重於方法的可行性測試與交互驗證；第二年度則著重於方法的應用，尤其在深井的試驗部分。其中，深層含水層由於深度較深（>50 公尺），在光纖佈設上以及 TV-DTS 設計上均與淺層不同，例如：長光纖佈設須考量是否於井內置中、長光纖的重量負荷是否影響光纖訊號的傳遞、TV-DTS 的井下方位確認等。在現地試驗規劃上，前一年度針對淺層含水層進行試驗，因此選用的試驗井主要為 K00268、K00264、K00266、K00265；本年度針對深層含水層進行試驗，預計所選用的試驗井則大部分為深井，包括：K00268、K00269、K00279。在 TV-DTS 的試驗部分，首先透過主動式加熱試驗判釋較為透水區段，隨後再利用 TV-DTS 於開篩區段推估地下水流向。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。 |                                                                      |



## 附錄

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>委員二</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫藉由土壤與地下水污染場址的現地試驗，以分散式光纖溫度感測器量測方式，進行高解析度的井下水文地質調查。</li> <li>2. 建議於模場試驗時，具體評估分散式光纖溫度感測器在空間與時間上的高解析度。</li> <li>3. 建議於模場試驗時，具體評估分散式光纖溫度感測器設置位置對於水文地質的推估方式。</li> <li>4. 建議模場試驗時探討天候溫度差異如何反饋溫度感測測量結果的修正。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員建議。分散式光纖溫度感測器在空間與時間上的解析度與採樣頻率與區間有關，高的採樣頻率或短的採樣區間將導致量測溫度準確度的下降。因此，在評估感測器在空間與時間上的解析度時，可分為兩部分進行討論。第一為儀器本身的解析度，另一個則為現地試驗設計所需求的解析度。儀器本身的解析度，依據儀器廠商的儀器規格書，0.2°C 的溫度量測精準度，在空間的解析度為 0.125 公尺，時間的解析度為 1 秒，然而此解析度為在實驗室良好控制下所獲得的結果；在現地試驗設計所需求的解析度方面，經由本研究團隊的實際評估，若欲獲得 0.01°C 以上準確度的溫度量測值，空間的解析度為 0.250 – 0.375 公尺，時間的解析度為 1 分鐘。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</li> <li>3. 感謝委員建議。依據本研究團隊過去光纖溫度感測器在污染場址的應用情形，以單井僅行主動式加熱試驗時，會儘量選用無開篩或長開篩區段進行試驗，儘量維持井下條件一致的情形下進行試驗。在 TV-DTS 的試驗部分，由於將針對地下水流速與流向進行測定，需選擇井下有開篩的區段進行試驗。此外，由於 TV-DTS 的試驗需有顯著的地下水流，方能提高流向測定的準確性，因此，流速較快的區段(亦為場址中的重要區段)，將為首要目標。目前受限於 TV-DTS 的設計，可量測區段長度僅為 2 公尺，須透過主動式加熱試驗判釋較為透水區段，隨後再利用 TV-DTS 推估地下水流向。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</li> <li>4. 感謝委員建議。依據過去本研究團隊在進行試驗時，天候溫差（或日夜或季節週期性變化）對於井下溫度之影響僅止於地面下數公尺（約 3-5 公尺），而在進入地下水位面以下之後，其影響即快速遞減。本研究所選用的試驗井，地下水位面</li> </ol> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



## 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

|                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>5. 建議於計畫完成後，評估本技術的成本。</p>                                                                                                                                                                      | <p>均在 5 公尺以下，因此，天候溫差對於實驗數據之影響甚低。此外，天候溫差對於光纖雷射主機亦有影響，溫度之高低將會影響主機內部光子感應元件對於光子數量之讀取，進而影響量測溫度之高低。有鑑於此，本團隊在進行試驗時，均會額外佈設參考水體，水體中會放置高精度的溫度計（精度達 0.002°C），提供後續溫度校正之用，以確保量測溫度之準確性。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</p> <p>5. 感謝委員建議。本計畫將於第二年執行結束前，針對所提出的調查技術成本進行評估，並呈現於期末報告中，以利後續在應用此技術進行調查時的參考依據。</p>                                                                                                                      |
| <p>委員三</p> <p>1. 本計畫開發加熱式光纖溫度感測器調查地下水流速及流向，整體計劃書撰寫明確且研究方法可行。</p> <p>2. 建議說明本計畫開發之技術與先前計畫開發之技術(分散式光纖溫度感測器) 的差異及優勢為何?先前計畫開發之技術(分散式光纖溫度感測器)目前應用狀況如何？</p> <p>3. 建議是否能多進行幾個現地測試已確認本計畫開發技術未來的實用可行性。</p> | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員建議。先前所開發之技術為主動式加熱的分散式光纖溫度感測器量測，僅能針對井下的透水區段進行高解析度的解析（0.5 公尺）。本期的計畫則在於利用所自製研發的 TV-DTS，利用單井的量測，同時獲得地下水流速與流向，其優勢在於僅用單井即可獲得多重重要資訊，尤其在面對深部含水層進行調查時，將可節省許多設井的成本。前期計畫開發之技術已應用於許多竹同的水文地質環境之中，包括：數個地下水污染場址的水文地質調查、山區的水文地質調查、裂隙岩體的地下水流調查等。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</p> <p>3. 感謝委員建議。本計畫將會於永貞宮場址進行同一個口井的重複試驗，以確認試驗結果的再現性，亦將會於同一場址，挑選不同的試驗井來驗證所提出技術之可行性。最後，在經費允許及主管單位許可的前提下，將會嘗試選擇一處適合的</p> |



## 附錄

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>4. 是否有檢測或顧問公司對此技術有意願參與研發？</p>                                                  | <p>污染場址來進行本技術之驗證。上述成果相關說明預計於期末報告中進行呈現。</p> <p>4. 感謝委員建議。本計畫所合作的廠商霖昌工程公司對此調查技術表達高度的興趣，將願意提供適當的污染場址來進行此技術的現地測試，一同參與技術的研發與優化。此外，中興工程顧問社對於此技術亦表達高度的興趣，也有意參與技術的研發，並應用於各種不同的水文地質環境中。</p>                                                                                                                                                                                               |
| <p>委員四</p> <p>1. 建議本年度計畫對象為第二含水層，應先確認不同水層間的影響，避免有垂直流的干擾，所選用的井式 4 吋或 2 吋，亦先確認。</p> | <p>1. 感謝委員建議。本計畫將會參考前人的研究成果，確認第二含水層是否受到第一含水層之影響，且鄰近地區的抽水行為亦將一並予以考慮。在選取試驗井的時候，將會事先確認井徑的大小，依照目前的規劃，所選用的試驗井均為口徑較小的 2 吋井，且監測井的開篩區段均位於第二含水層內，因此，應可避免垂直水流的干擾。</p>                                                                                                                                                                                                                      |
| <p>委員五</p> <p>1. 本計畫應以技術開發、驗證為導向；第一年計畫成果並未具體證明本項技術應用於場址之可靠性與監測數據品質。</p>           | <p>1. 感謝委員建議。本計畫確實以技術開發、驗證為導向，以兩年期的時間，分別針對淺層與深層含水層進行試驗。第一年度主要針對淺層含水層，重於方法的可行性測試與交互驗證（請參照前一年度期末報告）。第二年度則針對深層含水層，著重於方法的應用，尤其在深井的試驗部分。本計畫的現地試驗成果將與其他多重的試驗結果進行比較分析，確認試驗結果的可信度。關於量測數據品質，所使用的儀器或光纖均會在現地試驗前進行實驗室的測試與校正，而現地試驗數據，均有透過額外佈設的參考水體，並於水體中放置高精度的溫度計（精度達 0.002°C），提供後續溫度校正之用，以確保量測溫度之準確性。依照第一年的現地試驗結果，所量測溫度的均方根誤差（root mean square error, RMSE）均小於 0.05°C。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</p> |



## 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

- |                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2. 本年度(111 年)亦於頭份/永貞宮第二場址以相同技術執行，研究預期價值(技術開發驗證)待釐清。</p> | <p>2. 感謝委員建議。如同上述審查意見回覆，本計畫預計以兩年期的時間，分別針對淺層與深層含水層進行試驗。第一年度主要針對淺層含水層，重於方法的可行性測試與交互驗證（請參照前一年度期末報告）。第二年度則針對深層含水層，著重於方法的應用，尤其在深井的試驗部分。過往在污染場址的水文地質調查方面，大部分均針對較為淺層的含水層進行試驗，然而深部含水層卻鮮少琢磨。而本計畫所發展的調查技術，其優勢在長距離或深層井的量測將能夠更加凸顯其優勢，而光纖溫度感測器在時空中的高解析連續性資料，勢必能夠提供更進一步的水文資料，有助於後續場址污染物調查或整治的參考依據。此外，本期的計畫以自製研發的 TV-DTS，利用單井的量測，同時獲得地下水流速與流向，其優勢在於僅用單井即可獲得多重重要資訊，尤其在面對深部含水層進行調查時，將可節省許多設井時的成本。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</p> |
| <p>3. 研究方法(淺層、深層)未釐清兩年計畫之關鍵技術差異性。</p>                      | <p>3. 感謝委員指正。本計畫所提出的研究方法中，不論對淺層與深層含水層，均建構在相同的理論基礎（耦合水流與熱傳輸）之上。主要的關鍵技術差異則在於現地試驗的不確定性。本研究所選定的模場，其深層含水層深度較深（&gt;50 公尺），在光纖佈設上以及 TV-DTS 設計上均與淺層含水層有所不同，例如：長光纖佈設須考量是否於井內置中、長光纖的重量負荷是否影響光纖訊號的傳遞、長複合式光纖纜線（銅線+光纖）在加熱時的穩定熱源提供、TV-DTS 的井下方位確認等。深層含水層的調查相較於淺層含水層，更具挑戰性，若能將此技術逐漸優化，並適用於任何水文環境，對於未來污染場址的調查（尤其是含有 DNAPL）將會帶來新的契機。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</p>                                                              |
| <p>4. 研究步驟、影響參數掌控、數據品質管控、解析皆未具體說明。</p>                     | <p>4. 感謝委員建議。前一年度針對淺層含水層進行試驗，而本年度針對深層含水層進行試驗，預計所選用的試驗井則大部分為深井，包括：K00268、K00269、K00279。主要工作項目將是 TV-DTS 在深層含水層的測試與驗證，而現地試驗結果將透</p>                                                                                                                                                                                                                                                                       |



## 附錄

|                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                      | <p>過現地的跨孔加熱試驗（兩口井以上）以及數值模式（SEAWAT）模擬來進行驗證。第二年度的詳細研究步驟補充說明於申請計畫書修正稿中。</p> <p>在影響參數掌控方面，第一年度已經針對部分參數進行敏感度分析（請參照第一年度期末報告），第二年度將持續針對重要參數進行分析，尤其在TV-DTS 試驗方面，並將於期末報告中予以呈現。</p> <p>在數據品管方面，如審查意見1之回覆，由於此方面的說明與分析已於第一期（108-109 年度）計畫執行時，詳述於期中與期末報告中，因此並未在此進行呈現。為求技術發展之完整性，數據品管方面將於期末報告中具體說明。</p> <p>在數據解析方面，主動式加熱光纖溫度感測器試驗結果，已於第一年度期末報告中進行量化分析說明，第二年度將針對熱示蹤劑跨孔試驗與單井的 TV-DTS 地下水流速與流向測定進行量化分析。相關的數據解析亦將於期末報告中具體呈現。</p> |
| <p>委員六</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 有關研究場址之流速、流向及優勢水流路徑，由於颱風或梅雨季節影響水位變動及水流方向，恐造成模擬結果誤差，建議宜考量各資料可能隨季節性影響而造成之變化，有助於現地資料之完整性。</li> <li>2. 有關分散式光纖溫度感測器，由於儀器光源不穩定、光纖損耗及老化等問題，是否導致其應用可行性降低，建議宜說明之，以利瞭解技術之可行性。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議。豐、枯水期對於地下水位變動確實會有所影響，也將間接影響地下水流向。因此，在進行現地試驗時，會針對同一口（或組）井重複進行多次試驗，評估因季節性影響所造成的流向變化，以利後續提供現地資料的完整性。</li> <li>2. 感謝委員建議。儀器光源確實會受到儀器老化或外在天候變化而影響其量測結果。因此，本研究團隊在每次進行現地試驗前，均會在實驗室進行事前的測試與校正，以確定量測溫度的準確性。量測光纖耗損與老化亦存在同樣的問題，在每次進行現地試驗前，均會在實驗室進行事前的測試與校正，在現地試驗時，均會額外佈設參考水體，水體中會放置高精度的溫度計（精度達0.002°C），提供後續溫度校正之用。由於光纖纜線屬於耗材，若在實驗室測試時發現有顯著耗損或</li> </ol>                 |



### 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

|                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>3. 有關研究經費部分，針對第一年及第二年使用經費情形，建議宜說明需增加之各項經費，其涵蓋之具體工作項目及範圍，以瞭解經費運用之妥適度。</p>                                                                                                                                                                    | <p>老化的現象，會將其汰換，重新裁剪一條全新的光纖纜線用於現地試驗。以上說明將補充於申請計畫書修正稿中。</p> <p>3. 感謝委員建議。本計畫所規劃的第二年工作項目主要針對深層含水層進行調查，由於井深較深，所需實驗耗材將大幅增加，且相較於淺層含水層，深層含水層調查的不確定性將大幅提升，因此，預估經費將高於第一年。本研究團隊依據貴署補助上限經費重新進行經費的編列，並依據 111 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徵求書規定製作經費分析表，詳情請參照申請計畫書修正稿。</p>                                                      |
| <p>委員七</p> <p>1. 本計畫係採用光纖電纜加上熱源加熱法透過溫度感測進行地下水流向調查，俾瞭解污染場址的水文分佈以利於整治工程。本計畫擬以苗栗頭份場址進行分析，為一模場型調查計畫。</p> <p>2. 本計畫申請費用約為 302 萬元，其中，人事費用約為 103 萬元，約占 34%;消耗性器材為 120 萬元，約占 40%，主要用於光纖纜線、溫度感測與溫度控制等器材。</p> <p>3. 本計畫主持人近年研究成績佳，除本署計畫外，亦獲科技部多年期計畫。</p> | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員建議。本計畫所規劃的第二年工作項目主要針對深層含水層進行調查，由於井深較深，所需實驗耗材將大幅增加，且相較於淺層含水層，深層含水層調查的不確定性將大幅提升，因此，在經費預預計將高於第一年。本研究團隊依據貴署補助上限經費重新進行經費的編列，並依據 111 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徵求書規定製作經費分析表，詳情請參照申請計畫書修正稿。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p> <p>4. 感謝委員建議。雖然商霖昌工程公司資本額不大，然而在地下水污染場址調查與整治有多年的經驗，對於苗栗頭份永貞宮場址亦有許多現地經</p> |



## 附錄

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>4. 本計畫合作廠商霖昌工程公司為一資本額 200 萬元經營環境檢測的小型公司。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <p>驗，準確掌握現地狀況。此外，該公司對於此調查技術表達高度的興趣，未來願意提供適當的污染場址來進行此技術的現地測試，一同參與技術的研發與優化。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <p>委員八</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫為擬應用分散式光纖溫度感測器，量測井中地下水流速與流向。該技術在 際上已有應用案例，國內則屬創新應用，對於提升國內地下水調查儀器發展，有其價值，研究主題有其重要性。</li> <li>2. 本計畫在應用上，建議與其他類似熱感應技術做成本、精度及量測時間比較，並說明在國際上之競爭力。</li> <li>3. 計畫目前已累積相當執行成果，後續執行應可以順利。</li> <li>4. 主持人在相關此研究主題，已執行多件相關計畫，累積一定經驗。主持人發表之期刊文章，建議等級可以再提升。</li> <li>5. 建議第二年經費編列可以適度降低。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員建議。本計畫所提出的現地試驗方法與結果，後續將與理論基礎相似的熱傳輸感應技術進行相互驗證與比較分析，凸顯所提出方法之優勢，相關說明預計於期末報告中進行呈現。</li> <li>3. 感謝委員肯定。</li> <li>4. 感謝委員肯定。主持人將持續精進研究方法，彙整資料後深入分析，期能將整體成果投稿至國際著名的 SCI 期刊發表。</li> <li>5. 感謝委員指正。本計畫所規劃的第二年工作項目主要針對深層含水層進行調查，由於井深較深，所需實驗耗材將大幅增加，且相較於淺層含水層，深層含水層調查的不確定性將大幅提升，因此，在經費預估上勢必比第一年提高。本計畫將依據環保署補助上限經費重新進行經費的編列，詳情請參照申請計畫書修正稿。</li> </ol> |
| <p>本署業務單位</p> <p>請依本署補助上限經費及 111 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徵求書規定調整本計畫經費分析表。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將依據貴署補助上限經費重新進行經費的編列，並依據 111 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徵求書規定製作經費分析表，詳情請參照申請計畫書修正稿。</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |



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  
新型專利證書：光纖纏繞水溫裝置



# 中華民國專利證書

新型第 M631526 號

新 型 名 稱：光纖纏繞水溫量測裝置

專 利 權 人：國立臺灣海洋大學

新 型 創 作 人：邱永嘉、潘庭馨、吳承翰

專利權期間：自 2022 年 9 月 1 日至 2032 年 5 月 5 日止

上開新型業依專利法規定通過形式審查取得專利權  
行使專利權如未提示新型專利技術報告不得進行警告

經濟部智慧財產局 局長

洪淑敏

中華民國



111 年 9 月 1 日



注意：專利權人未依法繳納年費者，其專利權自原繳費期限屆滿後消滅。



附錄

## 新型專利證書：流體監測裝置



# 中華民國專利證書

新型第 M631579 號

新 型 名 稱：流體監測裝置

專 利 權 人：國立臺灣海洋大學

新 型 創 作 人：邱永嘉、潘庭馨、馬嵩哲、劉承瀚

專利權期間：自 2022 年 9 月 1 日至 2032 年 5 月 22 日止

上開新型業依專利法規定通過形式審查取得專利權  
行使專利權如未提示新型專利技術報告不得進行警告

經濟部智慧財產局 局長

洪淑敏

中華民國 111 年 9 月 1 日



注意：專利權人未依法繳納年費者，其專利權自原繳費期限屆滿後消滅。