

新型光纖光柵高解析監測技術於污染場址 水文地質參數異質場調查

Application of Novel Fiber Bragg Grating Multilevel Monitoring System on Characterizing Hydrogeological Heterogeneity for a Contaminated Site

葉欣瑋

SIN-WEI YEH

國立臺灣大學生物環境
系統工程學系 碩士生

何彥德

YEN-TE HO

國立臺灣大學生態工程
研究中心 副研究員

王子賓

TZU-BIN WANG

健行科技大學空間資訊與
防災研究中心 研究員

張良正

LIANG-CHENG CHANG

國立陽明交通大學土木
工程學系 教授

董天行

TIEN-HSING TUNG

瑞昶科技股份有限公司
經理

王昱力

YU-LI WANG

國立臺灣大學生物環境
系統工程學系 助理教授

蔡瑞彬*

JUI-PIN TSAI

國立臺灣大學生物環境
系統工程學系 助理教授

ABSTRACT

To access and predict the movement of the plume and remediation agent in the aquifers, it is essential to understand the detailed hydrogeological parameters fields. However, the unrealistic homogenous assumptions in traditional pumping and slug tests hardly convey these three-dimensional parameter fields accurately. To characterize the aquifer heterogeneity of contaminated site (hydraulic conductivity K and specific storage S_s), a new technology is investigated on the basis of Hydraulic Tomography (HT). The newly developed technology consists of two parts: (1) A multilevel observation well consists of rubber packers and fiber Bragg grating (FBG) piezometer and thermometer. (2) Integrating singular value decomposition (SVD) into successive linear estimator (SLE). This method reduces the dimension of covariance matrix of the parameters that need to be estimated. Thus, the SLE's computational loading could be reduced effectively. The proposed method is verified by conducting an HT field test through agent injection during a site remediation event. Besides the FBG experiments, a cross-hole electrical resistivity survey (CHERT) was conducted to understand the sediment structure of the study site, and the CHERT profiles are used to validate the estimated K fields. The results show that the obtained resistivity image profiles are consistent with the estimated K fields. Finally, we utilized the estimated K and S_s fields to simulate the movement of remediation agent. Once the spatial distribution of the remediation agent is obtained, the area where the agent is unable to reach could be observed, we can thus adjust the remediation agent injection strategy to guarantee the agent contact the plume.

* 通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系 助理教授，106台北市羅斯福路四段1號，jptsai@ntu.edu.tw

Keywords: Hydraulic Tomography (HT), Fiber Bragg Grating (FBG), Surgical Remediation, Multi-Level Observation Well.

摘 要

求得整治場址高解析度的三維含水層參數場，以預測藥劑與污染團在含水層的移动路徑是非常重要的。傳統的水力試驗因均質參數場的假設，往往無法反映現地土壤之異質性。為了求得污染場址之水文地質參數異質場(水力傳導係數 K 與比儲水係數 S_s 場)，本研究以水力掃描為基礎，發展新型三維參數場調查技術，此技術包含兩大部分：(1) 光纖光柵(FBG)多深度觀測系統：此部分包含橡皮膜封層阻隔器與光纖光柵水溫水壓感測器(2) 循序迭代推估器(Successive linear estimator, SLE)結合奇異值分解(Singular value decomposition, SVD)：本研究以SVD降低原SLE演算法中之參數共變異矩陣維度，以降低現地案例分析時之大量計算資源需求。本技術透過現地試驗驗證，以光纖光柵多深度測器搭配現地整治藥劑灌注進行水壓變化量測(水力掃描)，再將量測水壓變化以SLE轉化為三維水文地質參數場，所得 K 場再與跨孔井下電阻率剖面比較，結果顯示兩者趨勢一致，可支持本研究方法之可行性。最後，本研究以推估參數場模擬藥劑灌注後的流向與無法抵達之區域，分析結果將可作為污染整治之重要參考，最終達到精準整治之目標。

關鍵詞：水力掃描，光纖光柵，精準整治，多深度觀測井。

一、前 言

地下水含水層為地下水儲蓄的空間，一旦遭受污染則地下水供水的安全性將有疑慮，同時地下水復育亦將面臨極大的挑戰。一般而言，深層含水層(指第二含水層以下之含水層)因為無地表入滲，故不會直接受到地面污染物影響，因此其水質相對較佳，為重要的潔淨地下水源，然而國內目前已發現幾處含氯有機物(DNAPL)大尺度深層污染場址，如環保署「中港溪地下水污染評估與調查計畫」彙整調查分析結果資料顯示中港溪南北岸之滯水層(污染深度約達地表下35公尺)與第二含水層(污染深度約達地表下90公尺)、民國102年環保署執行「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第4期)」進行調查之結果顯示桃園龍潭部分工廠中，地下水1,1-二氯乙烯項目超過第二類地下水污染管制標準、以及民國103年環保署「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第5期)」調查結果發現桃園中壢部分區域含有1,2-二氯苯及1,4-二氯苯等。環保主管機關面對深層含水層遭受污染問題，除進行必要之行政管制措施(如劃定限制使用區或公告為管制區)，依照土污法的立法精神，仍須要求相關污染行為人或土地關係人執行污染改善，或由環保主管機關針對無主污染場址執行相關污染改善與風險控管

工作。

由於深層含水層之調查與整治難度均比淺層含水層困難許多，考量整治經費之合理性分配，以及深層含水層整治的門檻難度，一般會優先處理污染熱區或高污染區，及針對局部污染團進行侷限攔截，而大範圍之地下水污染團則多會評估應用加強式自然衰減(Enhanced Natural Attenuation, ENA)或監測式自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)之可行性，亦即結合地下水長期管理與各式監控與降低風險方案。無論改善區域或地下水監測管理區域，均必須能有效掌握污染團與水文地質的關係，方能精確界定污染分布與預測後續污染發展。一般而言，越是深層的水文地質變化將越不容易掌握，且相應之調查人力與成本必定越高，傳統之調查方法，如鑽探調查、水文試驗(單深度微水試驗或多深度微水試驗)、單井流速流向測定、多重式井測(γ 射線)、示蹤劑試驗及地電阻法等，除調查時間冗長、昂貴，且很可能遇到探測深度受限(如水文試驗或單井流速流向測定等技術)的問題，或僅能獲得點、面或相當侷限範圍的資料。一般抽水試驗雖可獲得較大範圍之水文地質參數(如抽水試驗可獲得流通係數 T 值或水力傳導係數 K 值、比出水量 S_y 值、儲水係數 S 值等)及相關水文地質邊界，然而深層抽水試驗耗時長且昂貴，且可能因大量抽水(抽出水須另行處理)而改變污染團分

佈或因地質滲透性不佳而不易維持穩定抽水量，並僅能求得「單一」參數值，亦即無法描述含水層水文地質空間變化，故無法用以精準預測污染團的移動與藥劑流佈。為此，本研究擬透過「研發光纖光柵監測系統」和「降維度水力掃描演算法」來建構高解析度的場址型深層水文地質調查技術，為後續整治系統之最佳化奠定穩固的基礎。

為求得精確的深層含水層地下水流場，充分的地下水位與溫度觀測資料是必要的，目前台灣的環保監測井多為淺井且開篩長度較長，故其觀測資料代表的是地下水層中開篩段的平均值而非特定深度的值，因此開篩較長的觀測井將無法觀測到細部的地下水壓與溫度變化。此外，若欲增加觀測資料在垂直方向的解析度，傳統方法往往需要鑽鑿新井或是在建井時就預留較大的鑽孔，以便埋設數支套管，並在不同深度開孔，同時在井內進行分層封層，如此一來將耗費更多的人力與物力。為了在同一鑽孔求得多深度的溫度與壓力觀測，本研究提出應用新型多深度多功能之光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)觀測系統(Huang *et al.*, 2012; 黃等人, 2013; Ho *et al.*, 2021)。此系統以光纖光柵技術為核心，可在單一鑽孔內同時觀測多深度之孔隙水壓與溫度，若將此系統安裝於污染場址之既有全開篩井中，將可大幅節省施行水力掃描所需之鑽井成本，有效提升觀測效益。此外，試驗結束後，FBG觀測系統可由井中取出，待參數調校後即可應用在下一場址，可節省觀測成本。

光纖感測為近年來新興發展之感測技術(Alvarez-Botero *et al.*, 2017; Dong *et al.*, 2005; Drusová *et al.*, 2020; Ho *et al.*, 2021; Kashyap, 1999; Kojima *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 2004)。光纖感測技術相對於傳統電子感測技術的優點包括(1)體積小—光纖直徑一般為250 μm 左右；(2)耐久性高—光纖之主要成份是矽(silica)為非金屬，可以長期埋在地下而不易腐蝕或改變其性質；(3)光纖訊號可長(數十公里)距離傳輸而不受電磁波干擾或衰減；(4)可以在同一光纖上做多點分佈式的監測。這些感測器能夠與傳統現地監測系統匹配，同時可以單獨或多種感測器做交互性串接成列，

做地層內相關物理量剖面之監測。若光纖感測系統與電腦及通訊系統結合，監測數據即可以進行即時傳輸或記錄。

除了建置可觀測多井多深度之水溫與水壓光纖光柵觀測系統外，尚需建立一個可將水溫與水壓轉換為三維水文地質參數之演算法，一旦完成參數場的建置，便可透過數值模擬模式預測現地的水流與溫度場，後續便可以此模式為基礎，進行污染整治規劃，量化藥劑的流佈，並可進一步依據模擬結果，調整藥劑的流量，注藥的位置與地點，有效提升整治效益。傳統上，取得水文地質參數(如透水係數K場)需透過鑿井進行抽水試驗方能取得一定點的特定深度區間的K值，若要大量施行此方法以取得三維參數場的空間分佈恐怕不切實際。為了以合乎成本效益的方法求得三維參數場的空間分佈，本研究將以水力掃描技術(Hydraulic Tomography, HT)為基礎，發展深層三維水文地質參數場的推估技術。

水力掃描技術為美國亞利桑納大學葉天齊教授(T.-C Jim Yeh, The University of Arizona)及其研究團隊對所推廣的一套以序率為基礎的參數反演方法(一般稱為水力掃描)，主要概念為以循序抽水或注水的方式於不同位置與深度刺激含水層，並透過觀測井網觀測地下水位的變動，再以其觀測水位反演水文地質參數(Yeh and Liu, 2000; Zhu and Yeh, 2005 and many others)。此方法已經過實驗室尺度(i.e. 砂箱, Illman & Yeh, 2012)，現地尺度(Tso *et al.*, 2016; Yeh *et al.*, 2017)，以及大尺度(公里等級, Zha *et al.*, 2016)的實地驗證，說明此方法乃實際可行且合乎成本效益之參數推估技術。惟此技術應用在實場時，往往需要大量的計算資源，因此需要伺服器等級以上的電腦方能完成分析。

為了降低水力掃描推估參數的計算量與記憶體需求，同時在既有環保署監測井內進行多深度(Depth-discrete)觀測，本研究提出(1)以光纖光柵技術建立井下多深度觀測系統(2)以SVD結合水力掃描之核心演算法Successive linear estimator (SLE)，降低其參數矩陣維度，使其可應用一般電腦進行實場分析。本研究於污染場址施行現地試驗，搭配整治注藥進行多井多深度水壓觀測，再以降維度之SLE演算法將水位資料轉換為水文

地質參數場，最後再以跨孔井下地電阻剖面檢驗水文地質參數場之推估正確性。

二、研究方法

2.1 新型光纖光柵水溫水壓監測系統

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

布拉格反射波長 λ_B 為

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

其中：

n = 光纖纖心的有效折射率

Λ = 折射率週期性改變的間距

圖1為光纖光柵反射原理示意圖，光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，造成某特定頻率光波被反射，而其他頻率光波則繼續向前傳導(圖2)，而這些透鏡的間距不同，則被反射光波頻率亦不相同。

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

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

由應變的定義可得：

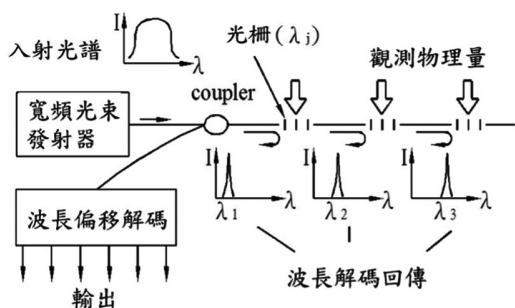


圖1 光纖光柵串列反射原理示意圖(李瑞庭，2005)

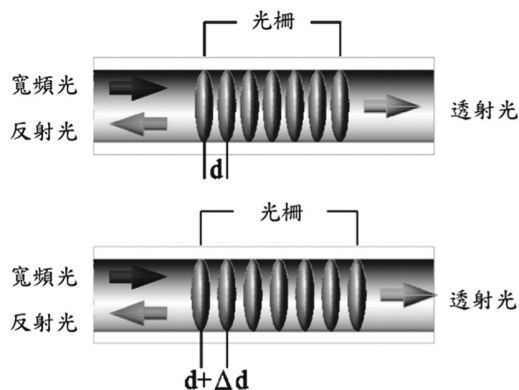


圖2 光纖光柵感測機制示意圖(Kersey, 1992)

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

整理(3)式可得：

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

因此由式(3)與(4)可得：

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

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

本研究為了使感測器能夠在現場更方便操作與更容易安裝在直徑2吋PVC管內，故將水壓計與雙封塞設計為2種單獨元件，分別為水溫水壓計與單封塞，故多深度FBG水壓水溫多深度感測器之基本模組由1個水壓計與2個單封塞所組成。

水壓計可量測範圍為40 m，封塞的部分則是優化製作方法與材質。第一代多深度FBG水壓與溫度感測器封塞採用內部含有鋼絲之特製品(圖3)，厚度變為7 mm氣囊，可以承受較高的壓力、對封塞膠有更好的附著性與對現場礫石等雜

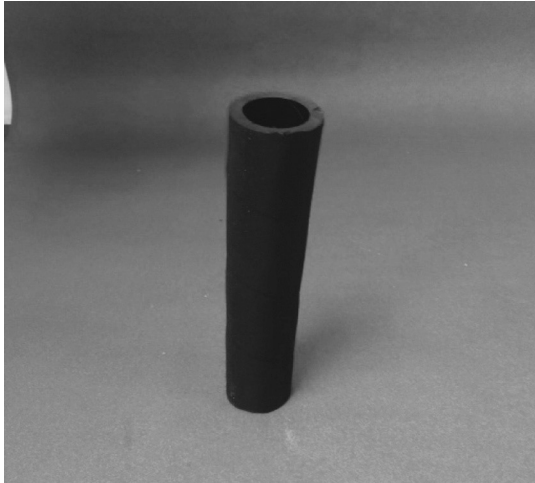


圖3 封塞氣囊

質有更好的耐磨性，可提高封塞整體的氣密性、耐用性與壽命。

為了檢驗此觀測系統在污染場址之耐受性，將FBG感測器分別置於酸鹼以及丙酮溶液中進行測試，方法為將感測器分別泡於pH4、pH10及丙酮溶液中，放置一周後再將感測器重新標定，確認標定係數改變小於0.3% (感測器設計精度為0.5%)，可知感測器確認通過檢核。

本研究另外進行了往復耐用度測試，將水壓計反覆加壓、洩壓來回100次，來回100次後重新標定，確認標定係數改變小於0.3% (感測器設計精度為0.5%)，結果如圖4所示，顯示感測器具有可重複使用的特性。

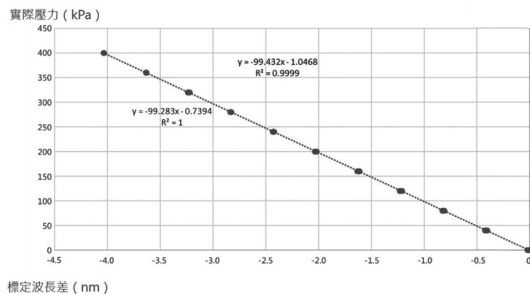


圖4 往復耐用度測試

2.2 降維度水力掃描演算法

在建立三維參數場的推估方法中，水力掃描 (Hydraulic tomography, HT) 屬於一個理論嚴謹的參數推估方法，其已透過不同尺度的試驗驗證

此方法為實際可行，具有能力刻畫現地的參數特徵。HT為透過抽水井或注水井擾動含水層水位，再由不同位置與不同深度之觀測井群收集水位訊號，如此一來，當一系列之抽水試驗結束後(循序抽水試驗，sequential pumping test)，我們將可得到不同抽水井與觀測井群之水位訊號組合(head dataset)，這些水位組合則包含了抽水井與觀測井間之含水層參數資訊，接著再透過解析程式(Simultaneous successive linear estimate, SimSLE)同時將所有水位訊號轉換為飽和與未飽和含水層參數場，即可完成三維含水層參數場推估。

SLE之主要方程式包含：

$$\hat{f}^{(r+1)} = \hat{f}^{(r)} + \omega^T (h^* - h^{(r)}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ff}^{(r+1)} = \varepsilon_{ff}^{(r)} - \omega^T \varepsilon_{fh}^{(r)} \quad (7)$$

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

SLE包含兩個主要的元件，線性迭代推估器(linear estimator)與殘差共變異數更新方程式(residual covariance)，如式(6)與式(7)所示。式(6)代表透過參數場的迭代修正使得模擬的水位與觀測水位一致。式(7)則為推估參數之不確定性估計式。在本研究中，待推估之參數包含水力傳導係數 (hydraulic conductivity, K)與比儲水係數 (Specific storage, Ss)。f表示待推估參數之一擾動值(perturbation) ω^T 是權重， h^* 是觀測水位， $h^{(r)}$ 是模擬水位。 ε_{ff} 代表參數的殘差共變異矩陣， ε_{fh} 則為模擬水位對水力參數之共變異數矩陣。

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

因本研究將推估多種參數，每種參數之殘差共變異矩陣大小皆相同，因此若能降低此類矩陣之維度，則能有效降低整體之記憶體需求。以下簡要說明水力掃描演算法加入SVD之構想：

ε_{ff} 以SVD拆解之表示式如式(8)所示：

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

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

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

以及式(7)可以表示為下式：

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

將式(8)代入式(9)與(10)可得：

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

與

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

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

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

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

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

式(12)可進一步簡化如下：

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

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

2.3 地電阻影像法原理

地電阻影像法係將直流電導入地層之中，量測地下材料的電位差，計算出電阻率或導電率後以等值圖分布描述地下電性構造。量測方式係由

地電主機控制不同對的電極分別作為電流極與電位極，地電儀可主動控制電流極導入地層中的電壓或電流量，再控制電位極量測地下材料的電位差響應值並記錄，再將所有量測值以數值方法逆推演算後呈現出電阻率等值圖影像。

直流電阻法的理論與應用主要來自兩個最重要的物理定律公式，分別是Ohm's law與Archie's law。以電場E與電流密度J來得知電阻率值並不是一個簡單的方式，因為儀器所能量測得到的是電位差與電流的數值，所以Ohm's law必須略做修改，使得計算與量測上較為簡便，電位差單位為伏特(V)的意義是指一庫倫(C)電荷具有一焦耳能量，因次分析之後電場可用單位長度的電位差表示單位為V/m；電流的單位是安培(A)，代表每秒流過一庫倫(1 A = 1 C/s)，電流密度的意義是指某個截面積中單位時間流過的電荷數，單位為A/m²；而電阻(resistance，單位為ohm或符號Ω)與電位差及電流之間的關係為：

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

其中R為電阻、 ΔV 為電位差、I為電流。

考量材料通過的截面積(A)與長度(L)後，電阻率(ρ)與電阻的關係為：

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (17)$$

電阻率(resistivity)的單位即為Ohm-m或Ω-m，在以公分為長度單位時，可用Ohm-cm作為測量單位，1 Ohm-m=100 ohm-cm。如式(17)所示，在相同材質但體積形狀不同的材料所量測的電阻會不同，但考量形狀後可求得相同之電阻率。故在進行地電阻影像法測勘時，主動導入地層的電流量為已知數據，量測之電位差必須再乘上電極幾何排列形狀因子(geometric factor, k)之後才能得到量測電阻率，如此以電阻率描繪地下材料才具有意義。

A/L是幾何形狀因子最基礎的表示，在地電阻影像法探測時，k值會因為電極排列與地層分布有不同公式。現場測勘所量測之電阻率稱為「視電阻率」(apparent resistivity, ρ_a)，即量測電位值在考慮幾何形狀因子後所計算出的電阻率，

$$\rho_a = \frac{k\Delta V}{I} \quad (18)$$

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

在假設均質(homogeneous)且等向(isotropic)的半無限空間地質模型中，任意配置兩個電流極 A 與 B 及兩個電位極 M 與 N，由電流極對 AB 導入直流電進入地層後以電位極對 MN 量測地下材料電位差(圖5)，無論四個電極如何排列，量測之電位差均能表示成：

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (19)$$

即幾何形狀因子的通式為：

$$k = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (20)$$

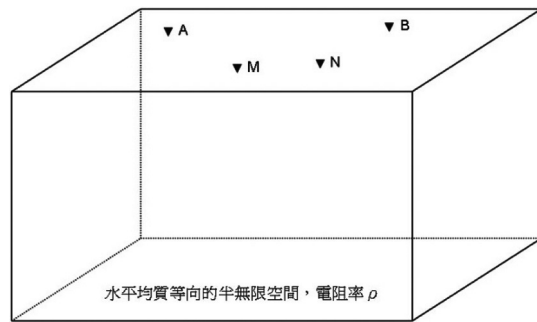


圖5 直流電阻法初始假設模型

但事實上，地質材料是一個非線性系統，並非均質等向，視電阻率將會因電極配置與地質構造不同而有所差異，故量測之視電阻率最終仍必須經由逆推反演算(inversion)求得真實電阻率後，才能依電性分布解釋地下環境。本研究之地電阻反演算以 AGI EarthImager 3D 軟體進行電阻率反演。

跨孔式地電阻影像法(cross-hole electrical resistivity tomography, CHERT)是將電極置於井下的地電阻法延伸技術(圖6)。跨孔式地電阻影像法的電極排列並無規則式標準化的配置，必須考量井的數量、距離、深度與總配置電極數設計量測方式，且當電流埋設於井內時，必須修正電流分布模型為全無限空間(whole space) (Zhou, 1997)。

為了瞭解場址的背景雜訊，首要必須先收集

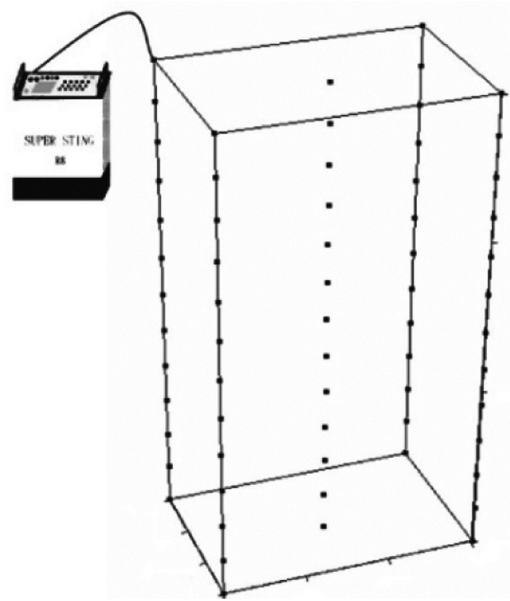


圖6 跨孔地電阻影像法示意圖

一筆高品質的背景值，在收集與資料處理過程中排除或降低雜訊，將更有利於後續的時序分析，因此，本研究CHERT部分的第一步驟即是進行背景值量測，除了排除外在干擾源之外，場址的背景電性結構也能與既有地質材料資料綜合比對，確認模場區細部材料特徵。

2.4 研究場址概述

本場址於104年6月26日開始進行土壤及地下水污染整治作業，環保局於106年6月26日解除本場址土壤污染控制場址之公告。然地下水整治成效無法於核定期限內達到污染控制目標，場址所有權人於110年提送土壤及地下水污染控制計畫書(第三次變更)，改善工法由抽水處理變更為現地生物復育工法。

本場址(圖7)就地形分布狀況而言，大部分位於台地上，地勢較高，海拔的高度大約是在 150 m~230 m 之間，本場址之地質材料屬於紅土台地堆積層，為更新世店子湖層，主要是由下部的礫石層與上部的紅土層組成，並偶夾砂、坩土、泥等無膠結材料。

依設井時地層記錄，本場址之水文地質可概分為棲止水層(僅場址南側靠近邊界區域，地下約1~10 m)、第一含水層(地下約10~55 m)、滯水層(地下約55~65 m)、第二含水層(地下約65~130



圖7 模場地理位置圖

m)等4層。兩層含水層皆主要由卵礫石所構成，材料組成多為坩土質砂夾礫石；滯水層則屬坩黏土互層。監測井微水試驗結果顯示本場址含水層K值約介於 $2.1 \times 10^{-4} \sim 3.6 \times 10^{-3}$ (cm/sec)之間，棲止水層K值稍高、兩層含水層K值則無明顯差異，透水性尚屬一般。

本場址超過管制標準之物質為1,1-二氯乙烯($C_2H_2Cl_2$)及三氯乙烯(C_2HCl_3)，南側垃圾場為一處高濃度區，抽水處理階段此區曾設有2口深約120 m之抽水井，目前亦為現地生物復育改善藥劑主要灌注區範圍，南側垃圾場為本研究之實驗模場。

三、結果與討論

3.1 多深度水壓與溫度感測系統現地量測成果

本研究於2021年12月14日在試驗場址進行深層含水層之模組化FBG壓力感測系統測試，井群之分布如圖8所示，各井位詳細資訊如表1所示。本次水力掃描之施行方式，主要透過整治廠商進行藥劑灌注時，同時以FBG觀測系統進行多井多深度水壓量測。在現場配置上，以TW1、TW2作為FBG觀測井，以IW02、IW03、IW06作為雙封塞灌注井，進行不同深度之分次灌注：IW02

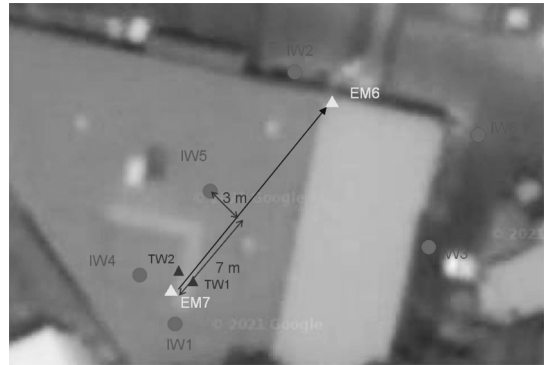


圖8 監測井孔定位圖

主要進行50-55 m之灌注，IW03主要進行85-100 m之灌注，IW06主要進行60-75 m之灌注；灌注時程如表2所示。本研究在TW1安裝5組FBG感測器，其安裝深度分別為35 m、40 m、45 m、50 m及55 m，在TW2安裝1組FBG感測器，其安裝深度為55 m。

本次試驗之水壓變化如圖9所示，圖上所示為實際量測之壓力水頭，TW1、TW2因距離接近，兩井之壓力變化相近。TW1之各深度FBG感測器由於位於同一含水層，壓力變化趨勢幾乎一致，符合預期。本次量測在11:30-13:30期間水壓有較為明顯之抬升，此段時期為三井同時進行灌注，包含了位於灌注深度在淺層含水層的IW02，而在此段時間之後的灌注則僅有灌注區域位於深層含水層(60 m以下)之IW03、IW06兩井，由此可判斷較深層的灌注壓力傳遞至相對淺層感測器所在深度時，因為阻水層阻隔，使得水位反應較不明顯，故可推論11:30-13:30之水位變化主要貢獻來自於IW02。FBG感測器溫度變化如圖10所示，本次試驗各深度之溫度較為穩定皆維持於 $\pm 0.1^\circ C$ 以內，此結果顯示感測期間由於灌注井與觀測井距離較遠，溫度尚無法傳遞至感測井。

表1 觀測井井群資訊表

	井編號	井深(m)	開篩區間(m)
FBG觀測井	TW1	55.5	25.5~55.5
	TW2	61.5	55.5~61.5
CHERT量測井	EM7	120.1	60.1~120.1
	EM6	120.3	60.3~120.3

表2 雙封塞灌注時程表

階段 (Step)	灌注井 編號	灌注時間	灌注深度	灌注壓力(kg/cm ²)	灌注流量	灌注量	備註 (日期)
		起~迄	G.L.-(M)	初壓~終壓	(L/min)	(L)	
批次：第 1 批次							
IW-02		11:33~12:15	53.00	4.7~5.2	6	250	12/14
		12:43~13:25	52.00	3.2~5.2	6	250	12/14
IW-03		11:33~12:06	101.00	4.9~5.2	6	200	12/14
		12:43~13:16	99.00	5.0~4.8	6	200	12/14
		13:19~13:52	97.00	6.1~5.2	6	200	12/14
		14:25~14:58	95.00	5.1~4.8	6	200	12/14
		15:07~15:40	92.00	5.6~5.2	6	200	12/14
		15:43~16:16	90.00	4.8~5.1	6	200	12/14
		16:17~16:50	88.00	5.6~4.6	6	200	12/14
IW-06		16:52~17:25	96.00	4.1~4.7	6	200	12/14
		17:26~17:59	84.00	5.1~5.6	6	200	12/14
		11:33~12:06	75.00	3.1~1.3	6	200	12/14
		12:32~13:05	73.00	2.8~3.0	6	200	12/14
		13:25~13:58	71.00	2.2~1.3	6	200	12/14
		14:25~14:58	69.00	2.5~2.7	6	200	12/14
		15:32~16:05	67.00	3.2~1.9	6	200	12/14
		16:06~16:39	65.00	0.4~0.6	6	200	12/14
		16:40~17:13	63.00	0.3~0.9	6	200	12/14
		17:14~17:47	61.00	4.9~3.3	6	200	12/14
		17:50~18:23	59.00	2.4~3.6	6	200	12/14

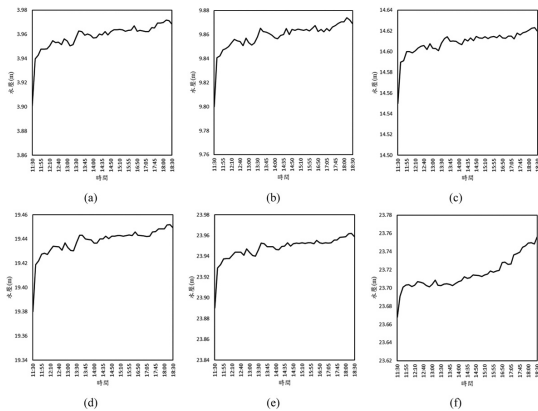


圖9 灌注期間多深度光纖光柵分層水壓量測結果。(a)~(e)分別代表TW1深度35 m、40 m、45 m、50 m、55 m之水壓歷線圖、(f)代表TW2深度55 m之水壓歷線圖

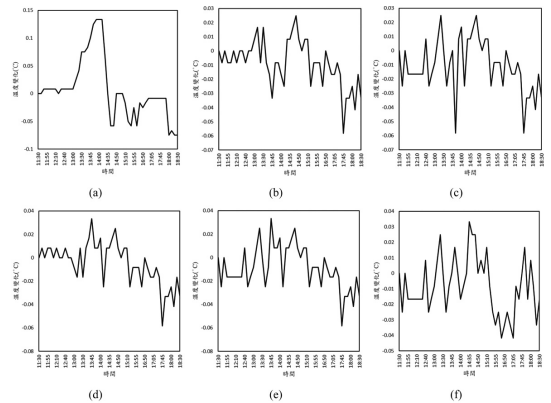


圖10 灌注期間多深度光纖光柵分層水溫量測結果。(a)~(e)分別代表TW1深度35 m、40 m、45 m、50 m、55 m之水溫歷線圖、(f)代表TW2深度55 m之水溫歷線圖

3.2 水力掃描成果

在進行水力掃描時，須先建立場址之地下水

流模式，本研究將模擬區域設定為長寬高為30 m × 20 m × 80 m之區域(圖11)，並以1 m × 1 m × 1 m之立方體網格切割。模式之邊界條件設定為定水

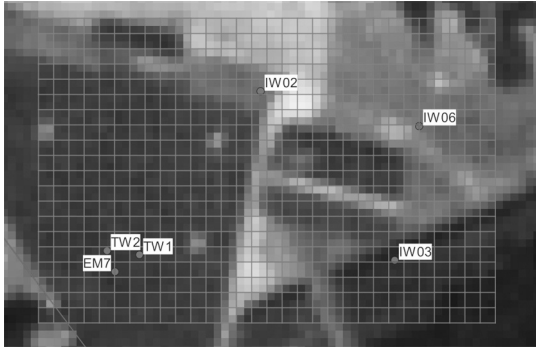


圖11 模式網格劃分示意圖

頭邊界條件，定水頭水位求得方式為先在场址邊界處之三口水位井設置電子式水位計，因為量測期間此三口井之水位幾無變化，故將水位內插作為模式邊界條件與初始條件，進行暫態模擬，而水力傳導係數K與比儲水係數Ss之初始值分別給定為0.005 (m/min)與0.0001 (1/m)，模擬時刻設定為分鐘(min)，模擬期距依照注藥時程設定，共420分鐘。完成模擬模式設定後，本研究接著以水力掃描演算法(請見2.2節)搭配FBG系統量測所得水位與注藥資料進行水力參數推估，再以推估後之參數場進行水位模擬。以推估參數模擬之水位與觀測水位繪製之散佈圖如圖12所示，由圖可知模擬水位與觀測水位之迴歸曲線斜率趨近於1，此結果代表推估之參數場具有描述場址含水層水力特性的能力。圖13與圖14分別為場址之三維K場與Ss場，由圖可知，井群中央部分K場透

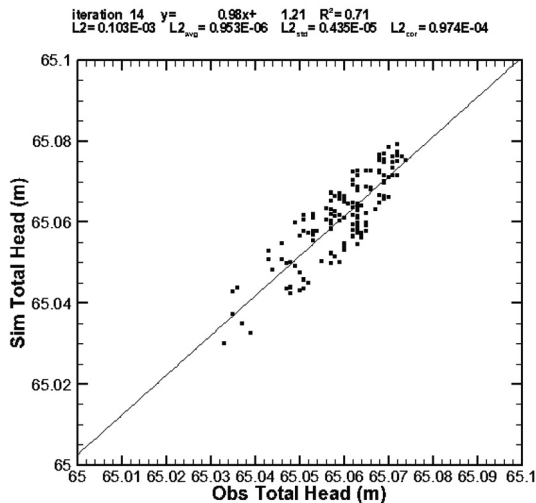


圖12 模擬水位與觀測水位散佈圖

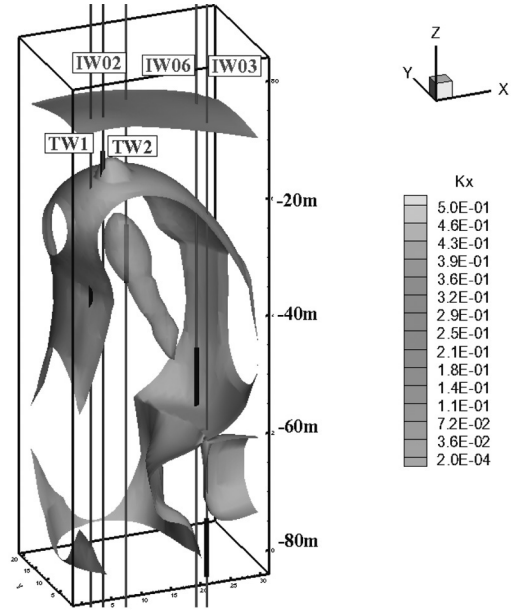


圖13 場址之三維水力傳導係數場分佈(K單位為m/min)

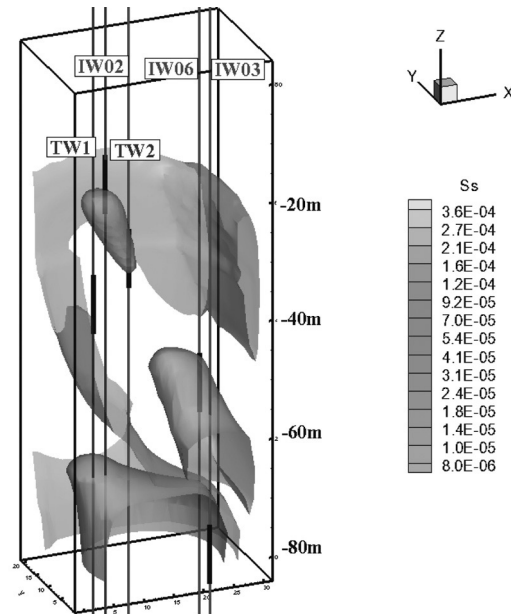


圖14 場址之三維比儲水係數場分佈

水性相對較佳(亮綠色區域)，部分為相對較不透水(青綠色區域)，而鄰近井群外圍部分則透水性較差(藍色與淺藍色區域)。Ss場亦呈現類似之空間分佈。

本研究所建立之降階反演方法，在進行奇異值分解後，可以有效降低共變異數矩陣所占

用之記憶體空間，本案例中ff原始矩陣大小為26112*26112換算成記憶體空間約為5.2 GB，並為了加快求解速度，本次採用8核心平行運算整體佔用41.6 GB，於本案例中SVD降解將矩陣大小由26112*26112降階為18000*18000，佔98.8%解釋比例，降解後之矩陣換算成記憶體空間約為2.5 GB，採用8核平行運算時則佔20 GB，本案例將ff進行SVD降維可節省21.6 GB，約52%記憶體空間，大幅降低記憶體之佔用量。

在計算效能的分析上，降階之演算法僅需進行23次反演迭代計算即完成收斂，耗時約6.5小時，而原本的演算法則需進行30次反演迭代，耗時約9小時，才能推估至相近之結果。由此比較再次說明新演算法除了可穩定收斂外，其所需之迭代次數更少，計算效率亦更佳。

3.3 CHERT試驗場址背景值成果

本場址深度30~105 m地層背景的CHERT成果如圖15所示，以電性地層角度而言，依電阻率分布將地層分為深度45 m以上，45~65 m，65 m以下三種電性特徵。深度45 m以上地層電阻率約在200~220 ohm-m，以綠至黃綠色色調表示，分布均質，研判地質材料為粉土質砂夾礫石，

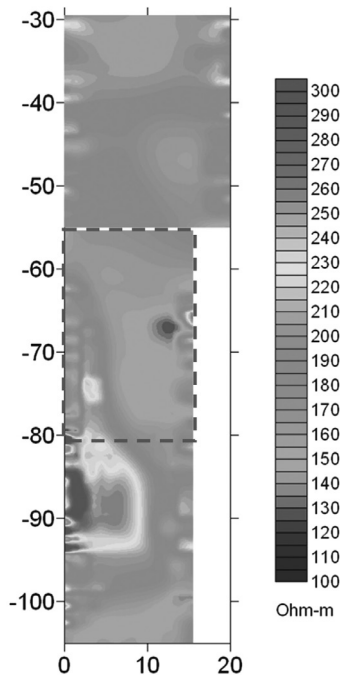


圖15 地層背景CHERT成果圖

屬於第一含水層；深度45~65 m地層電阻率約在130~210 ohm-m，以淺藍至綠色色調表示，此電性特徵研判地層中細顆粒材料增加，因此電性分布較廣較不均質，本場址中的滯水層即出現在此深度，此深度範圍亦為FBG水力掃描試驗觀測的目標深度，因材料的不均質，瞭解此深度的K場分布將更有利於未來的地下水整治設計；深度65 m以下，可以發現地層電阻率隨深度明顯上升，研判地層中的粗顆粒材料逐漸增加，電阻率在深度65~80 m約在120~250 ohm-m，以藍至黃色色調表示，深度80 m以下電阻率逐漸高於250 ohm-m（紅色色調），且分布較為均質，為本場址中的第二含水層。

3.4 水力掃描成果驗證

本研究由三維K場中輸出電極井對應之剖面位置之K場剖面，並與該剖面之電阻率(圖15之紅色框線區域)進行比較，兩種剖面之交集深度在55-80 m，如圖16所示。由圖可知，虛線以上為較通透之土壤，多以粗顆粒為主，故其對應之電阻率也較高，而虛線以下則大致上有左右分區之情形，左區亦為較通透之粗顆粒土壤，而右區則為透水性較差之細顆粒土壤，左方為相對高阻與高K，右方為相對低阻與低K。由地電阻率與K場剖面比較可知，因為試驗區域之觀測井有限(僅兩口相鄰井)，使得推估之K場特徵相對較為圓滑，若能再搭配其他位置之觀測井，理論上應能更加強化推估K場特徵。整體而言，在多口注藥井的多深度灌注搭配本研究之FBG多深度觀測系統進行水力掃描仍可掌握場址K場之空間分佈趨勢，合理反映場址含水層之流通特性。

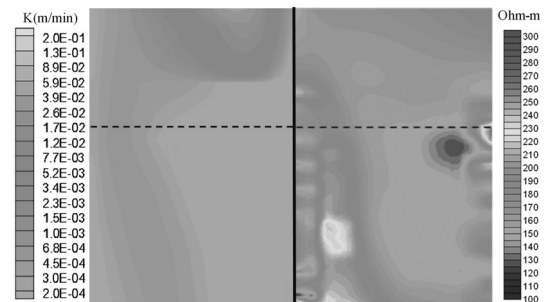


圖16 EM6與EM7間之K場剖面(左)與電阻率(右)比較圖

3.5 藥劑灌注策略與注藥不易到達區域分析

本研究進一步以廠商本次實際注藥規劃模擬藥劑流布，亦即透過本研究推估之參數場搭配注藥規劃即可模擬藥劑之流布，可作為整治廠商規劃注藥策略之重要參考。此次注藥模擬考慮單一次的注藥事件，藥劑傳輸模擬結果如圖17所示，圖中藍色區域顯示藥劑之流布，由圖可知雖然注藥井之間僅有幾公尺距離，但實際上仍有藥劑無法抵達之區域，例如IW02下方，該區因為上方灌注口的下方存在透水性較差的地層，故上方藥劑難以傳輸到下方區域，意即即為注藥不易到達區域，而透過三維視覺化呈現藥劑分布即可輕易找出注藥不易到達區域；廠商即可參考模擬結果調整注藥井的位置與注藥劑量，再透過模式模擬輔助，求得可行的注藥井配置與灌注劑量，讓灌注的藥劑可確實流抵污染團位置。假若廠商現地經驗不足或無法掌握藥劑流況，則仍可透過本模式模擬藥劑流布，再修正注藥規劃，意即透過此模擬模式，污染整治工程師可以反覆測試每一種注藥規劃後的藥劑流布，再搭配三維視覺化呈

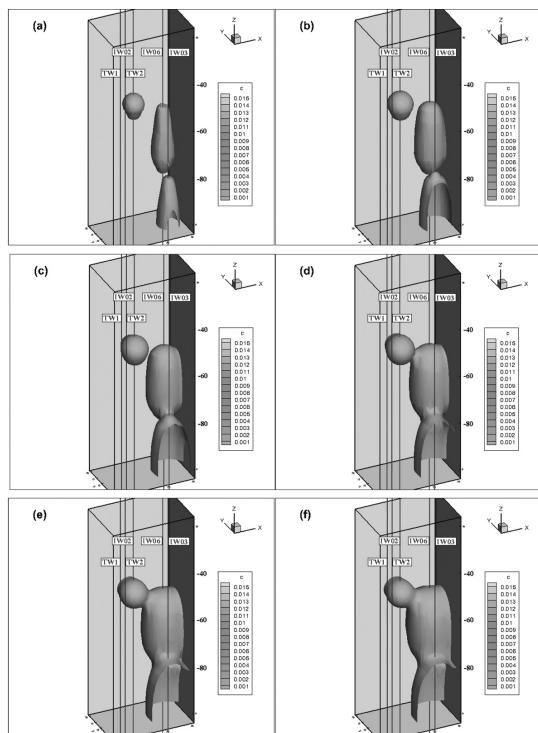


圖17 藥劑傳輸流佈圖。(a)~(f)依序為灌注後8、16、24、32、40、48小時之藥劑分布

現，即可找到最佳的注藥策略，讓藥劑可充分與污染團混合，以達到精準整治的目標。

四、結論與建議

本研究成功開發可應用於40 m深之光纖光柵(FBG)多深度水壓、水溫多深度觀測系統，此系統已經過多次現場測試，證實此系統確實可於既有環保署觀測井進行多深度量測。由抗酸鹼試驗可知，FBG感測器在pH4、pH10及丙酮溶液中，放置一周後重新標定，感測器之標定係數改變皆小於0.3%。此結果顯示FBG感測器可適應研究場址之惡劣環境。此外，此系統已應用於污染場址，透過量測整治注藥時之多深度水壓變化，即可完成水力掃描試驗，無須進行額外鑿井、注水或抽水，故不會擾動污染團，可大幅降低水力掃描成本。由掃描成果可知，由多口灌注井配合少數多深度FBG觀測井仍可求得場址含水層K場之主要空間趨勢。本研究未來將持續驗證水力掃描推估成果的可靠度，包括採樣分析與時序跨孔地電阻變化率分析，以驗證注入藥劑的擴散情形，是否符合預期。

謝 誌

本研究感謝行政院環保署土壤及地下水污染整治基金管理會在經費上(EPA. 110C004376)與場地上的支持，亦感謝科技部在經費上的支助(MOST 108-2116-M-002 -029 -MY3, MOST 108-2811-M-002 -642, MOST 110-2622-E-002 -017, MOST 110-2116-M-002 -024)。另外，特別感謝瑞昶科技股份有限公司在雙封塞灌注與試驗場址協調上的協助，以及感謝奇博科技股份有限公司在觀測設備開發上的協助與現場安裝光柵系統的技術支援。

參 考 文 獻

行政院環境保護署，中港溪地下水污染評估與調查計畫 期末報告，EPA-102-6A12-03-A292，2015。
行政院環境保護署，地球物理探勘應用於土壤及地下水污染場址之調查驗證作業及整治技術評估計畫(第二期)期末報告，EPA-105-GA13-03-A271，

- 2017。
- 行政院環境保護署，運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第4期)期末報告，EPA-101-GA12-03-A235，2012。
- 行政院環境保護署，運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第5期)期末報告，EPA-102-GA12-03-A124，2013。
- 李瑞庭，2005，「光纖光柵讀取系統軟體之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程學系。
- 黃安斌、王建智、莊子賢、李瑞庭、何彥德，2013，整合式地層內孔隙水壓與位移剖面量測，土工技術，136, 83-94。
- Alvarez-Botero, G., Baron, F.E., Cano, C.C., Sosa, O., & Varon, M. 2017. Optical sensing using fiber Bragg gratings: fun-damentals and applications. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 20(2), 33-38.
- Burden, David S., and Judith L. Sims. Groundwater issues: *fundamentals of soil science as applicable to management of hazardous wastes*. Groundwater issues: fundamentals of soil science as applicable to management of hazardous wastes. EPA, 1999.
- Drusová, S., Wagterveld, R.M., Keesman, K.J., & Offerhaus, H.L. 2020. Temperature and consolidation sensing near drinking water wells using fiber bragg grating sensors. *Water*, 12(12), 3572.
- Ho, Y.T., Wang, Y.L., Chang, L.C., Wang, T.P., & Tsai, J.P. 2021. Optical system for monitoring groundwater pressure and temperature using fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 29(11), 16032-16045.
- Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Cheng, S.Y. 2012. *Stability Monitoring of Rainfall Induced Deep Landslides Through Pore Pressure Profile Measurements*. Soils and Foundations, Vol. 52, No.4, pp.737-747.
- Illman, W.A., Berg, S.J., & Yeh, T.-C.J. 2012. Comparison of approaches for predicting solute transport: Sandbox experiments. *Ground Water*, 50(3), 421-431.
- Kersey, A.D. 1992. *Multiplexed fiber optic sensors*. *Proceedings, Fiber Optic Sensors*, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp. 200-227.
- Lemming, Gitte, *et al.* 2013. Optimizing the environmental performance of in situ thermal remediation technologies using life cycle assessment. *Groundwater Monitoring & Remediation* 33.3: 38-51.
- Liu, Ying, *et al.* "Bioremediation of nitrate and Fe (II) combined contamination in groundwater by heterotrophic denitrifying bacteria and microbial community analysis." *RSC Advances* 6.110 (2016): 108375-108383.
- Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van De Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M. and Parlange, M.B., 2006. Distributed fiber optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research*, 42(12).
- Tso, M., C.H., Zha, Y., Yeh, T.-C.J., & Wen, J.C. 2016. The relative importance of head, flux, and prior information in hydraulic tomography analysis. *Water Resources Research*, 52(1), 3-20.
- Yeh, T.C.J., & Liu, S. 2000. Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method. *Water Resources Research*, 36(8), 2095-2105.
- Zha, Y., Yeh, T.-C.J., Illman, W.A., Tanaka, T., Bruines, P., Onoe, H., Saegusa, H., Mao, D., Takeuchi, S., & Wen, J.C. 2016. *An Application of Hydraulic Tomography to a Large-Scale Fractured Granite Site*, Mizunami, Japan. Groundwater.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays. *Exploration Geophysics*, 28(1), 1-5, 1997.
- Zhu, J., & Yeh, T.-C. J. 2005. Characterization of aquifer heterogeneity using transient hydraulic tomography. *Water Resources Research*, 41(7).

收稿日期：2022年04月06日
 修正日期：2022年05月15日
 接受日期：2022年07月13日