

異質性水文地質特徵調查技術 及案例分析

王茂松

高雄縣政府環境保護局局長

馬振耀

高雄縣政府環境保護局第三科科长

潘時正

中興工程顧問股份有限公司技術經理

劉志忠

中興工程顧問股份有限公司計畫主任

蔡昀達

中興工程顧問股份有限公司工程師

摘 要

天然含水層常因地質材料組成錯綜複雜，造成透水性空間上的異質性(Heterogeneity)，此含水層的異質性，常常形成地下水優勢水流路徑(Preferential Flow Pathway)，對於污染物傳輸與流布具有很大的影響，並且造成調查與整治工作之瓶頸。本文提出異質性水文地質調查工具，建議依大範圍至小區域、間接至直接、面至點細化等原則依序進行，例如可先利用地球物理大尺度的探測，再以其其他直接貫入方法，初判水文地質構造，最後獲得最經濟性之位置與數量，進行全層地質鑽探與設井等，得到場址水文地質特徵。此外，本文以南部某場址為案例，依據此原則，建構異質性場址水文地質特徵。

關鍵字：異質性、水文地質、地球物理、直接貫入

一、前 言

近年來如何掌握地下水水文地質特徵，為從事土壤及地下水污染調查與整治重要關鍵課題，尤其針對含氯有機溶劑污染場址。然而，天然含水層常因地質材料組成的變化，造成透水係數空間的變異性，此種結合地質錯綜與透水性空間上



的變化，廣泛稱之為異質性(Heterogeneity)。含水層的異質性，常常形成地下水優勢水流路徑(Preferential Flow Pathway)，對於污染物傳輸與流布具有很大的影響，造成調查與整治工作之瓶頸⁽¹⁾。此外，由於地下環境地質之異質性，可能形成幾個不同透水性的間層，在透水性較好的地區，污染物形成溶解相的污染帶(Plume)，經一段時間擴散作用後，可能驅使污染物進入其他低透水性區域；另外在低透水性區域，污染物則可能另外殘留或吸附至土壤有機固體內，變成吸附相，更甚揮發至未飽和層內，形成揮發相，形成具有多相流污染特徵⁽²⁾。在過去的整治案例上，常常發現場址污染源移除後，不均質性的粉黏土所形成之低透水區，會因吸附或殘留之污染物，持續溶解至高透水性區域，再度使地下水產生污染團，導致地下水污染物濃度回升(Rebound)現象發生。因此，掌握場址水文地質之變化，瞭解空間分布上水文地質異質性的特徵，對污染物流布、污染調查與整治等是極其重要的資訊，往往也是成敗的關鍵因素。

本文茲彙整目前常見且已廣泛應用之各種水文地質調查方法，並以實際案例進行說明整合運用各項調查工具之成果，建構場址水文地質特徵，提供改善或整治工作之重要參考。

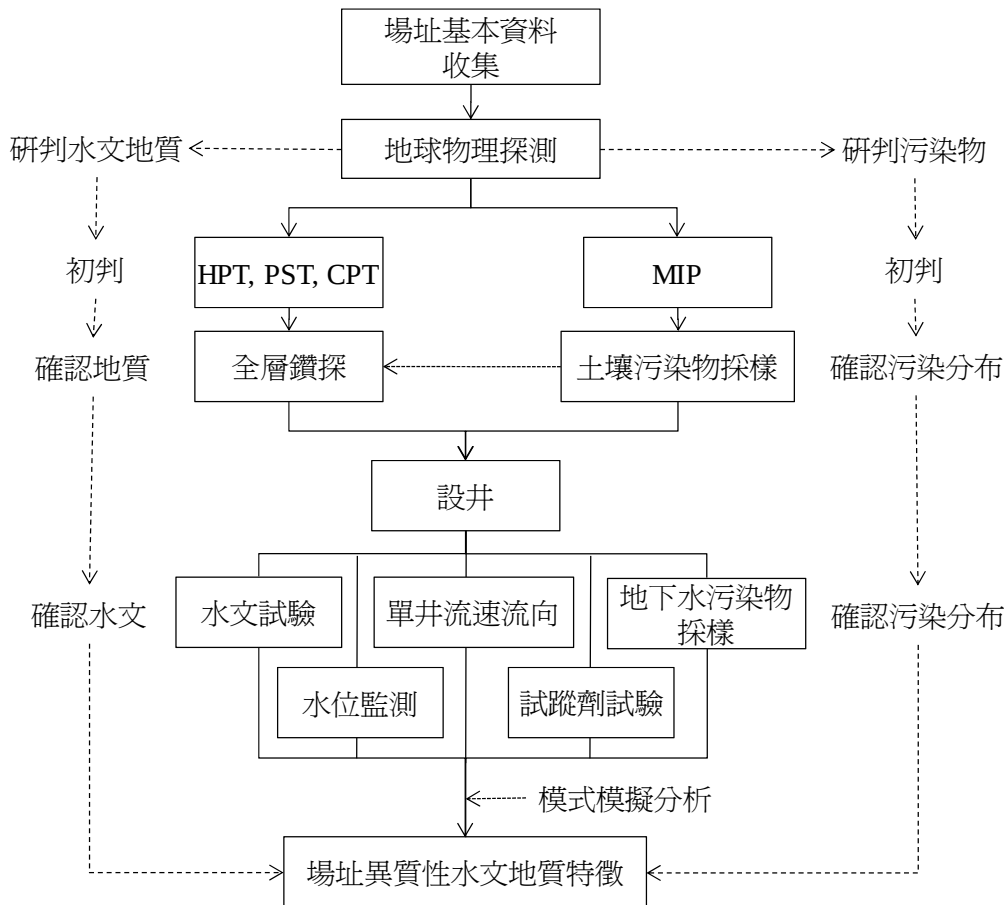
二、水文地質調查工具簡介

傳統上水文地質調查與分析，不外乎直接進行地質鑽探，並且設置地下水井，再進行水文試驗等一系列工作，然而，在未知的污染場址內，該進行幾點次的地質鑽探？如何決定鑽探深度或是設井位置？常常是水文地質調查分析首先遇到的難題。

工作團隊根據現有常用之工具，彙整如圖 1 之調查流程。如圖 1 所述，為有效及簡省經費，水文地質的調查方式可先由大範圍至小區域、間接至直接、面至點細化等原則依序進行。例如可先實施大範圍方式及非侵入性的普查，常見如地球物理方法，如此可初步研判場址水文地質與污染物分布情形，接續可針對偵測到變異的區域，進行侵入性，且直接之點位的調查，如在水文地質分析方面，進行水文地質剖析儀(Hydraulic Profiling Tool, HPT)、氣壓式微水試驗儀(Pneumatic Slug Test, PST)及錐體貫入儀(Core Penetration Test, CPT)試驗，污染物方面，則可進行薄膜界面碳管系統(Membrane Interface Probe, MIP)工具調查。

根據前述面與點的訊息，即可較有把握選點，從事土壤全層取樣及污染物採

樣分析，取得直接證據，同時決定地下水井設置位置，最後再進行水文試驗分析及地下水採樣，建構場址概念模型(Site Conception Model, SCM)，並可加入水文與污染物傳輸模式模擬，完成場址水文地質污染特徵。以下針對幾項重點調查工具，分別說明：



- 註：1.水文地質剖析儀(HPT)
 2.氣壓式微水試驗儀(PST)
 3.錐體貫入儀(CPT)
 4.薄膜界面碳管系統(MIP)

圖 1 水文地質調查流程與常見工具

(一)地球物理探測

地球物理方法可概分為地電阻法、透地雷達法及感應電磁法，主要係利用不同地層岩性與污染物對電流或電磁感應不同，通常搭配輔助使用，因施作時間短、範圍大，因此適合事先先期調查工作。以下分別說明：



1.地電阻法

地電阻法(Electrical Resistivity Tomography, ERT, 又稱 Resistivity Image Profiling, RIP), 其方法原理係利用直流電, 經電極棒通入地下量測地層電阻率, 並以電性區分地層。舉凡地層岩性、組成礦物、顆粒大小、地層含水狀況、水中之含鹽度, 皆為影響地層電阻率之因素。故所測得之電阻率資料, 配合地質狀況及鑽探的分析結果, 可正確研判水位、含水層、阻水層(或滯水層)分佈、地層岩性構造及地層中之異常區(如污染訊號), 例如飽和土壤中各種地質材料及 DNAPL(Dense Non-aqueous Phase Liquid)之電阻率分佈如圖 2 所示。

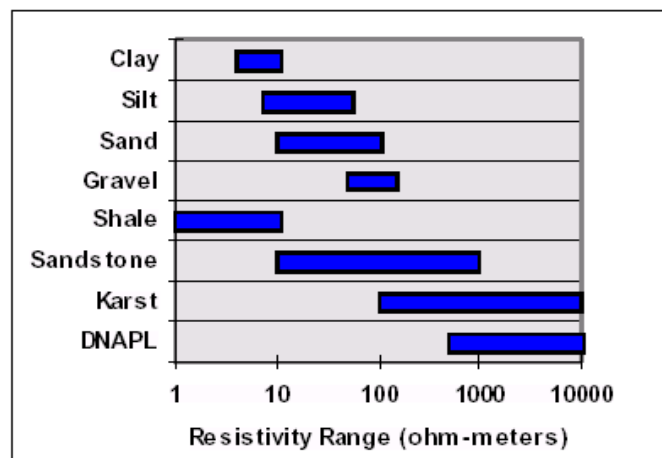


圖 2 地下環境不同介質之電阻率分佈

2.透地雷達法

透地雷達法(Ground Penetrating Radar, GPR)主要藉著發射雷達波(Radar Wave)訊號, 當碰到地層中介電常數差異而產生反射波, 分析反射波來回所需要的時間、波型、振幅等資料, 來判別反射體的性質與位置, 並經資料處理後, 可以研判地下構造、地下水位、層面、地下異常物分佈狀況。GPR 所使用天線的頻率愈高, 波長愈短, 解析度相對提高但探測深度則較小; 反之天線頻率愈低, 波長愈長, 則探測深度加深, 但解析度較差。依照國內多起探測經驗, 低頻(12.5~50 MHz)約可探測至地下 10 公尺; 中頻(100~400 MHz)約可探測至地下 1~6 公尺; 高頻(1,200~1,600 MHz)可探測地下 1 公尺內。

3.感應電磁法

感應電磁法(Electromagnetic Method, EM)係利用電磁感應原理, 於地表發射線圈中通以變頻式交流電, 造成隨時間變動之主電磁場 (Primary EM

field)，因地層導電程度（受污染多寡）不同繼而引發強度不同之次電磁場（Secondary EM field），並在地表離發射線圈不遠處以另一接收線圈記錄次電磁場，獲得地表下地層導電率分布情形。近年來 EM 法開始應用於重金屬甚至 NAPL 類之調查。

(二)透水性分析儀

透水性分析儀(Hydraulic Profiling Tool, HPT)為近年來發展的新工具，係利用裝置在鑽機上之壓力與電性探測棒，以直接貫入方式(Direct Push, DP)，經由探測棒上壓力感測器，測量注入壓力水的土壤反應壓力，進而反映土壤的水力特性。當土壤反應壓力較低時，表示土壤顆粒度較大(如砂或是礫石)，水的透水能力較強，反之，則表示土壤顆粒度較小(如粉土或是黏土)，傳導性較低。此外探測棒裝置的電性感測器，可同步獲得土壤電導值資料，輔助佐證壤心的解釋，例如粉黏土地層因土壤表面電性較大，土壤電導值較高。因此相較於地球物理方法，可獲得較直接之地層透水性垂直剖面變化。

(三)薄膜界面探管系統

薄膜界面探管系統(Membrane Interface Probe, MIP)為裝置在鑽機之探管，其上有金屬與高分子聚合物所組成之半透性薄膜，以直接貫入方式將土壤及地下水中之揮發性有機化合物，經探管薄膜界面後，以高溫氣化揮發性有機化合物，並即時傳送至地面，進入氣相層析儀(GC)，搭配 ECD、FID 或 PID 進行分析，據以取得不同深度之污染物分布，可半定性及半定量方式，初步研判污染物分布情形。

(四)全層地質鑽探

全層地質鑽探係指於地表往下進行鑽孔，遵循 ASTM D1586⁽³⁾之劈管取樣方式及操作，以連續取樣鑽孔之完整樣品，並置入於岩心箱中，而現場水文地質師將進行記錄，包含土壤連續取樣及地下水位等，土壤取樣結果依 ASTM D2488⁽⁴⁾統一土壤分類標準進行土壤描述，其中記錄內容包含土壤之粒徑分布及形狀、排列情形、顏色、結構、緊密度或稠度及相對含水量等，並對照土壤取樣記錄繪製土壤柱狀圖。此外，通常搭配土壤粒徑分析結果，以提高地質剖面之正確性。此方法可直接方法判斷地質分布情形。

(五)水文測試與參數分析

傳統上為瞭解含水層特性及地下水流系統流動現象，微水試驗及抽水試驗為最常使用之現地試驗方法，以獲得含水層相關水文參數。其中微水試驗可得到水井周圍透水係數。抽水試驗需搭配 1~2 口水位觀測井，利用洩降-



時間曲線，求得導水係數(T)、透水係數(K)以及儲水係數(S)參數等。然而前述之方法僅能獲得平均含水層參數，近幾年來，已發展單井流速流向儀或多深度雙封塞式微水試驗(Double-Packer Slug Test, DPST)⁽⁵⁾，解析垂直面之地下水流方向及透水係數，建立異質性水文資訊。

三、案例分析

本場址位於高雄縣大寮鄉，民國 90 年發現地下水井(編號 OG 井)中三氯乙烯(TCE)濃度不符合地下水污染管制標準。本場址過去曾執行相關污染改善工作，已將本場址之 TCE 分布範圍及濃度大幅減小，惟 TCE 可能存在殘餘相或吸附相，持續溶解至地下水中，使水中濃度仍持續高於地下水管制標準。爰此，環保局研擬利用各種水文地質調查工具，進行場址全面性補充細密調查工作，以精確掌握本場址污染狀況，作為未來整治復育方案規劃之依據。以下主要利用圖 1 建議之流程與調查工具，針對水文地質調查結果，分述說明。

(一)地球物理探測

如圖 3 所示，本場址地電阻規劃測線以 OG 井為主，向下游設置測線，並在西側佈置一條標準剖面以瞭解此區域地質分布狀態，總共完成五條地電阻測線，施測長度超過 400 公尺，依地層的電阻率值與分布形貌配合地質資料，與土壤及地下水污染採樣補充調查資料，綜合研判地下水文地質及可能受污染地層分布範圍。

根據五條地電阻影像剖面法結果，參考圖 2 之電阻率分析，出現相對偏紅色之高電阻區塊，表示區域地質主要以礫石層為主，部分藍色區塊，表示夾厚度不一之粉黏土層。此外，OG 井前為主要礫石層分布，而礫石往南北向漸減，而夾黏土成份增加。本區域最特別為深度 6-8 公尺可能為很好之地質通道，另一為 OG 井附近地層垂直向為透水性佳之地層，推測污染物可能利用此地質特性往深部地層移動(如圖 3(a)(b))。總觀施測結果推估，污染最嚴重之區域在 OG 附近，推測污染物利用地下水流往東北方向移動。

根據地球物理非破壞性與大範圍的探測，已初步掌握本場址水文地質及污染物特性，但為確認實際狀況，在部份區域進行直接貫入之點的探測，獲得直接且具垂直剖面的數據。不過因為本場址以礫石層為主，MIP 的測試較不適用，因此接續主要以進行透水性分析(HPT)為主。

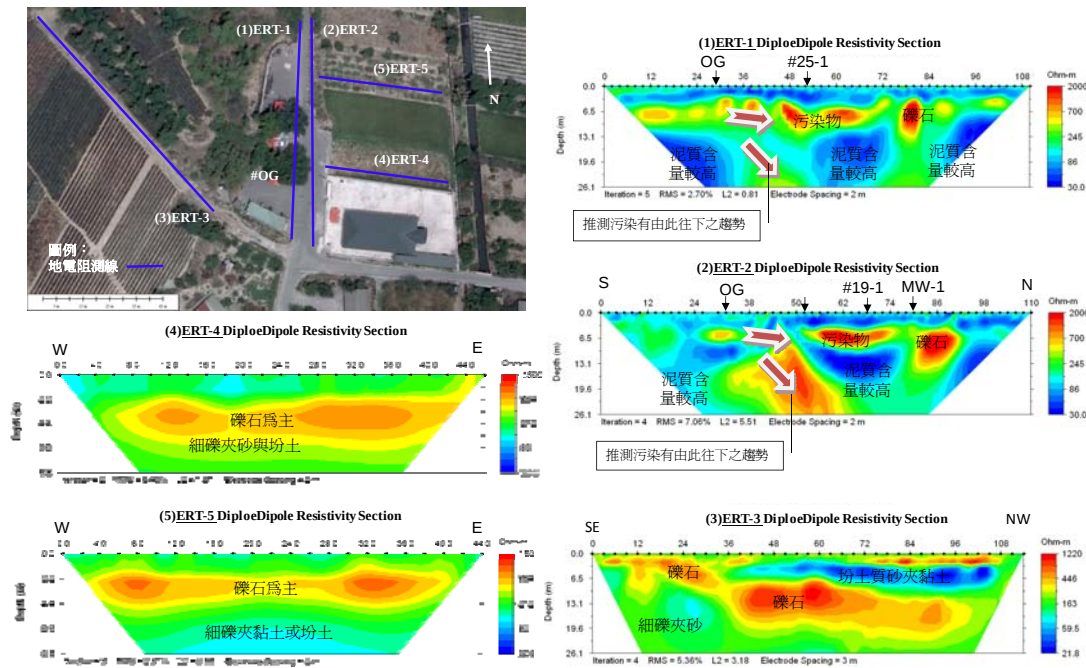


圖 3 本場址航照圖及地電阻探測結果

(二)HPT 施作成果

本場址共施作 10 點 HPT 試驗點，如圖 4 為各試驗點位之地層反應壓力及導電度結果，當地層反應壓力及導電度越大，則地層性質越接近不透水性材質，反之則為高透水性地層。由結果可知，靠近馬路及田地之試驗點位之地下 0~7m 之間，主要為砂層偶夾黏土或粉土薄層，而靠近山壁之點位編號 9 及 11 之地下 0~7m 之間，則主要為黏土層或粉土層。然各試驗點於地下 7m~8m 左右，鑽機遇硬物無法以壓入式，表示可能遇到礫石層。本場址各點試驗深度最多僅能至地下 10~14 m 之間。

(三)地質鑽探

為釐清圖 3 之地球物理探測結果，本場址挑選 4 個地質鑽探點，主要確認礫石層與粉黏土層分布情形。成果如圖 5 所示，由現場地質鑽探結果分析，表層部份為回填及與山壁露頭土壤性質接近之黃棕色土壤，西側及南側靠近山壁之淺層 6~7m 處，夾有透水性較差之粉黏土層，厚度不一，越往東面農田，此層漸漸消失，形成不連續之透鏡體，本部份與圖 3 地球物理與圖 4 之 HPT 結果相同，其他地方偶可發現其他不連續之不透水薄層。接續往下之地質分布大都為中粗細砂夾不同粒徑大小之礫石層，直到第一含水層底部。不過在靠近北側，20m 附近發現約 2m 厚的粉黏土層，此層並未發現與其它層連接，呈現單獨存在，目前無法判斷該層之橫向分布範圍。

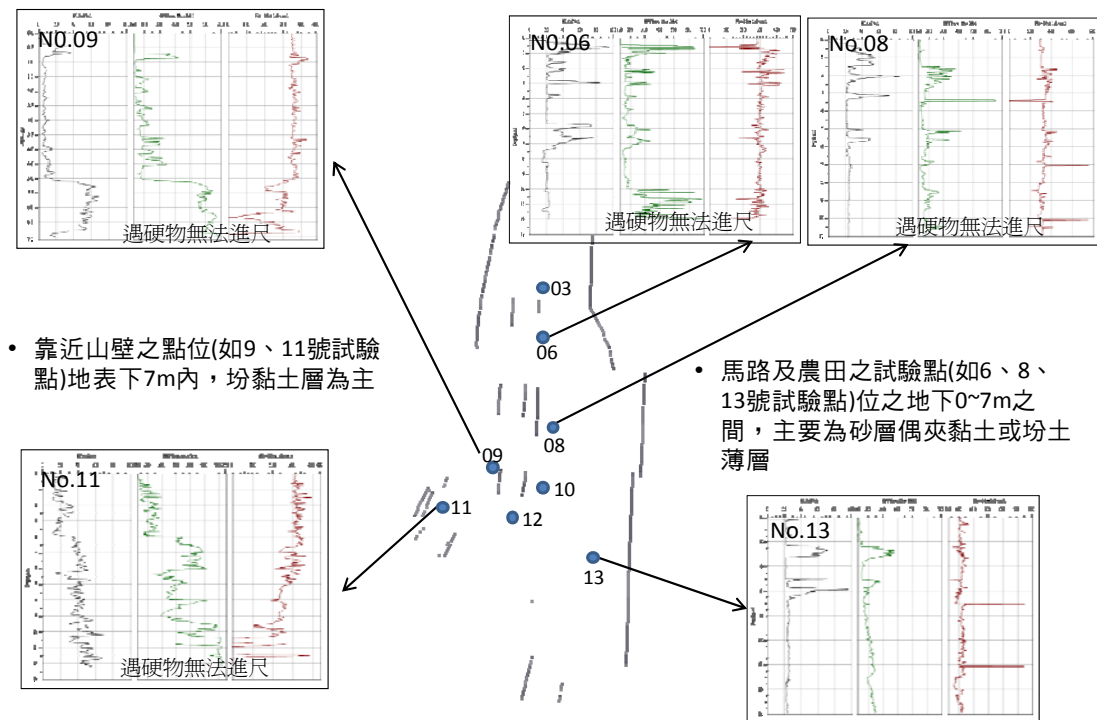


圖 4 本場址 HPT 施作結果

另外，就第一含水層厚度分析，本場址第一含水層底部深淺不一，在靠近西側山壁之第一含水層最淺，距地表約為 32m，在 OG 井東側第一含水層約在 51m，越往南側、東側及北側方面，含水層位置提升至 48m 左右，整體而言，本場址含水層底部高程形狀，起伏超過 15m，呈現畚箕型，並在 OG 井東側為最低點，往東及北側升高之後，向外輻射出去，本場址之地質模型如圖 6 所示。綜合而言，本場址地層分布複雜，有些區域夾雜十層以上不同地質構造，且存在許多不連續之薄層，明顯存在地質的異質性現象。此外，就地層分布與含水層底部構造分析，在 OG 井東側可能存在垂直向下之優勢地下水流路徑。

(四)水文分析

瞭解本場址地下水文流場，本場址設置自計式水位計，長期監測監測井之地下水位，監測顯示場址西北邊為山脈，地勢較高，所以地下水流方向主要是由西向東流動及西北往南流動，其中在場址的東南邊有部分水流方向是由東往西流動。

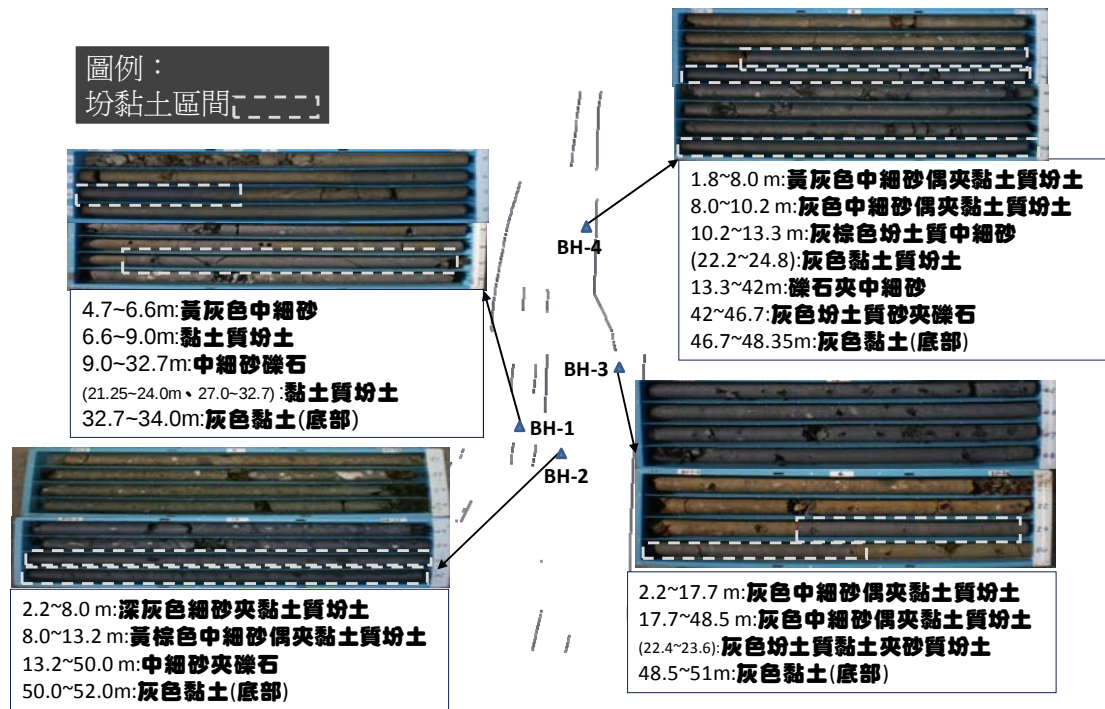


圖 5 本場址地質鑽探結果

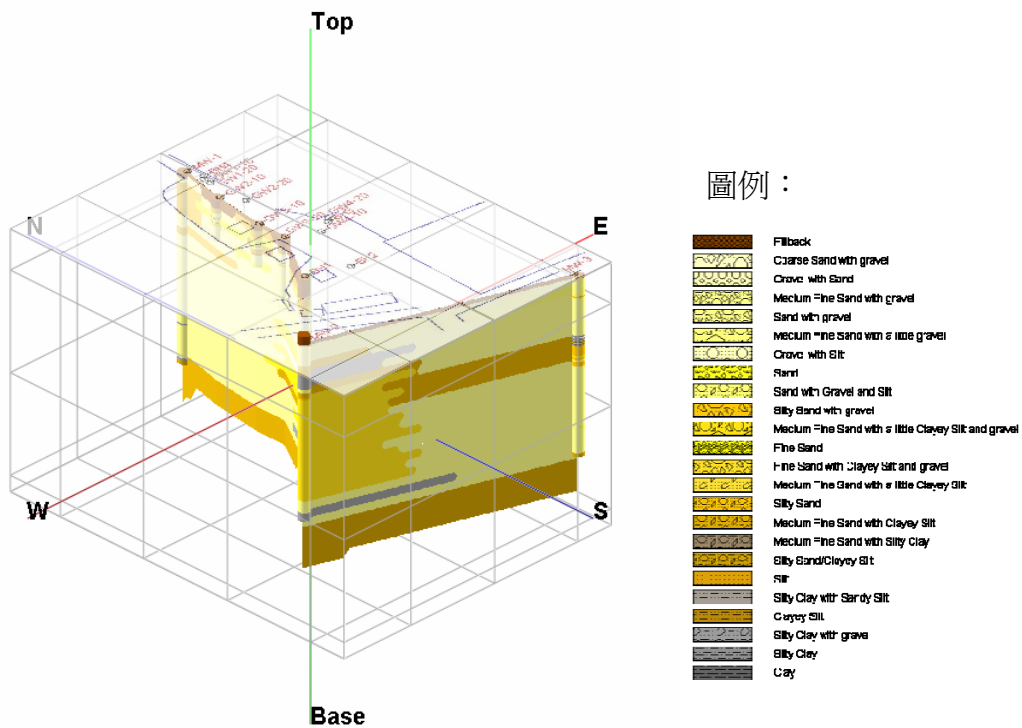


圖 6 本場址地質剖面圖



但是根據鑽探得到之壤心剖面圖，本場址具有地質異質性，不同區域與位置地質構造差異性甚大，若水流經過透水性較差的土壤，可能導致水流產生變化。因此基於本場址地質構造複雜因素，選定 4 口井進行不同深度之井內流向量測。圖 7 為本場址距地表下 10m、20m、30m 及 40m 處之地下水流向量測結果，由結果顯式，不同深度流向並無一致之方向性，研判造成此種原因，應是地質夾層分布所形成之異質性，形成垂直剖面不同深度之地下水流方向不等向性。

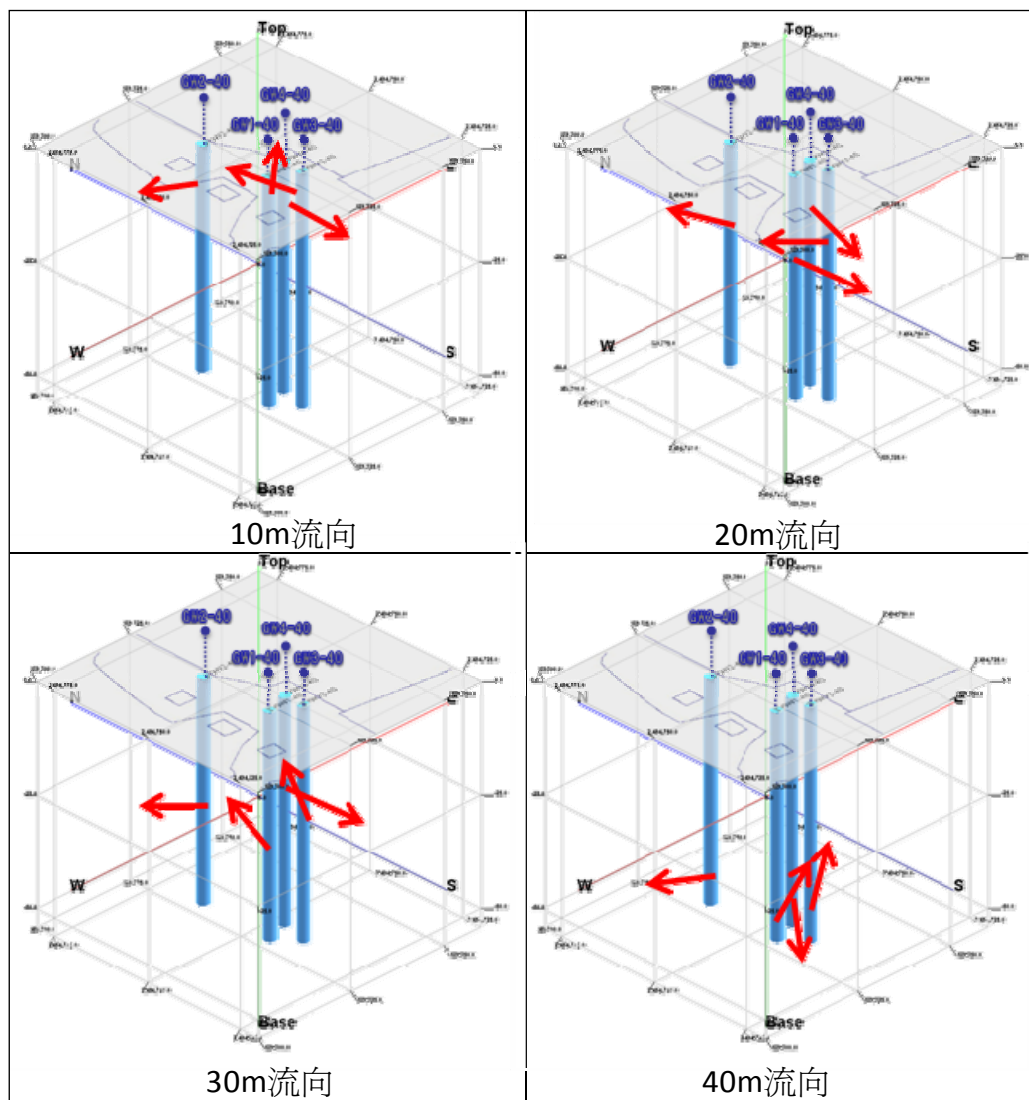


圖 7 本場址距地表深 10m、20m、30m 及 40m 處之地下水流向

四、結論

場址地質之變異性主導地下水流場及污染物傳輸流佈，若不能明確掌握場址地下水環境及污染團流動途徑，將會造成後續污染監測及整治工作之成效。雖然水文地質存在有一定程度之不確定性，惟藉由大尺度、大範圍之面的探測，再經由詳實的小尺度之場址水文地質調查，亦能以定性定量方式呈現符合實際場址之水文地質特徵。

本文係舉南部某污染場址之水文地質細部調查工作，首先利用非破壞性地球物理探勘，初步研判場址水文地質構造，並使用傳統地質鑽探方法及其他先進調查技術與工具，以多重交叉分析比對傳統調查之成果，建構具符合場址水文地質特徵之場址模型，提供後續規劃污染調查與整治方案研擬之參考。

五、參考文獻

1. Sale T., Newell C., Stroo H., Hinchee R., Johnson P., (2008) Frequently asked questions regarding management of chlorinated solvents in soil and groundwater, Department of Defense Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP).
2. Bedient P.B., Rifai H. S., Newell C.J., (1999) Ground water contamination: transport and remediation, 2nd ed, Prentice Hall PTR.
3. ASTM D1586 (2008), Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils, American Society of Testing and Material, West Conshohocken, PA, USA.
4. ASTM D2488 (2009), Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure), American Society of Testing and Material, West Conshohocken, PA, USA.
5. 謝云珺、林雅婷、陳家洵，多深度雙封塞為水試驗方法與結果，第五屆海峽兩岸土壤及地下水污染整治研討會，台北，2010 年 10 月 25 日。