

# 行政院環境保護署

## 「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

### 應用地球物理方法運用於污染場址與底泥電性反應之 研究 期末報告

主 辦 單 位：  行政院環境保護署

計 畫 執 行 單 位： 清雲科技大學／空間資訊與防災研究中心

計 畫 主 持 人： 鄭世楠 教授

計 畫 執 行 期 間： 100 年11 月26 日起至

101 年11 月25 日

中 華 民 國 101年10 月 印製

## 摘要

現場調查已發現 DNAPL 仍具有穿透低滲透性地層（如黏土層或矽黏土）之風險；或低滲透性地層經長年累月所累積的大量溶質回擴至高滲透性地層，造成調查與整治之高度不確定性。而地下水污染團很可能透過滲漏機制而影響至上／下含水層，因此在調查或採樣設計上很可能需跳脫傳統僅採集至第一含水層底部或僅整治第一含水層的思維；同時界定高、低滲透性地層分佈與評估周遭污染情形，才能確實達到污染防堵與監控。傳統鑽孔調查技術所獲致之成果均屬於“點”的污染情形，DNAPL 移動分佈之高度不確定性，或地下水溶解相在高、低滲透性地層之實際分佈，在實場運用上不太可能鉅細靡遺地調查，也造成其污染界定上的困難。近年來，非破壞性地球物理探勘技術已逐漸運用在污染場址之地下環境調查，搭配較少量的鑽孔資料可獲得“面與空間”資訊。目前地球物理最廣泛運用之污染調查技術為地面式之地電阻掃瞄法及透地雷達法。但地電阻掃瞄法施測會因建物阻擋或其他地面干擾物致施測距離不足，造成測深受限；透地雷達法之測深則更是受限，特別是存在厚層鋪面或鋼筋網的施測環境。而新穎之地球物理井測技術已開始應用於地下環境特徵調查，其在探測深度上更具優勢，並增加監測井或鑽孔之利用效益。井測法可透過跨孔調查建立高、低滲透性地層、優勢流徑及可能污染分佈等，並掃瞄評估不同時間序列之污染分佈、整治溶劑分佈及整治成效等。

本計畫除了運用新穎地球物理井測技術，調查含氯有機溶劑在地下環境之複雜分佈，另利用感應電磁波與水上地電阻影像剖面法進行河川底泥沈積物調查，評估水上地球物理方法之適用性與初步成果。

關鍵詞：地電阻影像剖面法、透地雷達法、電磁法、底泥

# ABSTRACT

Many site investigations have found that DNAPL is able to penetrate the low permeable layer such as clay or silt-calylayer in subsurface environment. The cumulated DNAPL within the low permeable Layer will gradually diffuse to the high permeable layer to affect the accuracy of investigation and remedial design. As to the deeper zone affected by the penetration of DNAPL, the conventional sampling design investigating only the first unconfined aquifer is no longer suitable for DNAPL investigation. Precisely define the boundary and the distribution of high and low permeable layer is the key to conduct a successful DNAPL investigation.

“Point” information derived from the conventional bore-hole sampling is difficult to be used for locating the DNAPL pollution due to the uncertainty of DNAPL migration and the soluble-phase distribution of the DNAPL partitioned into ground water between the low and high permeable layer. Recently, non-invasive technologies such as geophysical technology have been introduced to provide the “plane and space” information of pollution in subsurface by integrating few bore-hole data. The most common used geophysical technologies are ground-penetrating radar method (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT). Both methods have their limitations on the pollution investigation when there are interferences exist such as building structure or heavy pavement. A new geophysical technology, geophysical well logging has been developed to overcome above limitations. The information of multi-wells logging could be used to interpret the permeability of subsurface, the dominant flow path and the hot-spot for evaluating the distribution of pollution and the efficiency of remediation in different time sequences.

This study would first discuss how DNAPL and its soluble-phase components invade into the low permeable layer based on the field observation. Then, the importance of geophysical technology is introduced with comparing to the limitations of bore-hole investigation. Last, the case studies on using geophysical technologies including geophysical well logging are introduced to snapshot the complex profile of DNAPL distribution for improving future application.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography (ERT)、Ground Penetrating Radar (GPR)、Horizontal Loop Electromagnetic Method (HLEM)、Sediment

# 第一章 緒論

## 1.1 計畫背景

地下環境中之含氯有機溶劑污染在調查及整治上均屬相當棘手的問題。含氯溶劑屬比水重之非水相液體 (Dense Non-Aqueous Phase Liquid, 簡稱 DNAPL), 溶劑本身與地下水不互溶、比水重及低黏滯度的特性, 造成其污染純相的移動分佈深受地質變化的影響, 因地質變化的不確定性致污染源界定甚為困難。至於溶解於地下水中之溶質污染團則跟隨地下水流擴大分佈, 而地下水流場變化亦與地質變化直接相關, 污染團的縱向(平行水流方向)、垂向或橫向(垂直水流方向)分佈與地層分層、不同地質材料夾層、優勢流徑或裂隙等息息相關。因此未能掌握地下水文地質特徵, 污染範圍的界定便相當困難, 同時會誤判污染程度並造成污染流佈或污染風險的預測失當。

傳統侵入性調查, 如鑽探或其他直接灌入機具調查均屬“點”之調查, 雖具有直接指示地下環境特徵之證據, 但其執行費時、花錢, 取樣未必完整(礫石層不易採樣), 且難以具體客觀描繪不同鑽孔間之連續狀態。抽水試驗可掌握較大範圍之水文地質特徵, 但欲取得代表性數據, 需有較多的水位觀測井, 不易於運作中工廠或人口稠密區施作; 而抽出之地下水須經處理避免二次污染問題, 且抽水恐有破壞污染團分佈之虞。

近年來, 非侵入性(非破壞性)地球物理探勘技術已逐漸運用在污染場址之地下環境調查, 搭配較少量的鑽孔資料可獲得“面與空間”資訊。目前使用最為廣泛之技術為地電阻掃瞄法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)及透地雷達法(Ground Penetrating Radar, GPR)。此兩種技術均屬沿地面佈設電極測線(ERT 法)或接/發收之天線頻率(GPR 法), 透過電流或雷達波的傳遞掃瞄地下環境特徵。

## 1.2 計畫工作內容概述與預期效益及成果

目前國內外已有許多實場調查結合地球物理探勘技術輔助建立特徵概念模型（董倫道等，1995；Zeng and Gorelick, 2003; Bowling et al., 2005, 2006）。特別是近年來 MADE（Macrodispersion Experiment）場址大量研究以 ERT 探勘剖面逆推大範圍含水層之水力傳導係數（K）值分佈。Niwas and Lima（2003）指出電阻率變化深受孔隙水質影響，例如土壤孔隙中水較乾淨，則電流之傳導主要受土壤-水界面導電性之影響；若孔隙水含高鹽度（或其他污染物質），則電流之傳導主要與孔隙水之導電性有關。由於相同地質條件會因水質化性不同而有迥異結果，因此亦可運用於污染場址調查。

圖 1 為比較飽和土壤中各種地質材料及 DNAPL 之電阻率分佈，可發現愈細粒之材質其電阻率愈低（導電性佳），DNAPL 之電阻率一般多超過 1,000 Ohm-Meters，比礫石、砂質、粉土或黏土之電阻率高出許多，容易與地層區別開來。現場施測可在同一測線安排不同電極排列（如二極法、四極法、梯度法…等）與解析方法交叉佐證，以同時獲取地質與污染最佳擬合剖面與具說服力之證據。Schneider and Greenhouse（1992）於砂質含水層（砂之孔隙率約 0.4）中觀察到 ERT 法之電阻率隨 DNAPL 飽和度增加而迅速增加（如圖 2）。GPR 法則是根據 DNAPL 之介電常數一般比地質材料低許多的特性，且 DNAPL 會呈現強反射區而加以界定。圖 3 為一利用 GPR 法探勘 PCE 移動分佈的現地試驗場址，可清楚發現 PCE 隨時間往下移動直至遭遇底層之滯水層（Aquitard）。

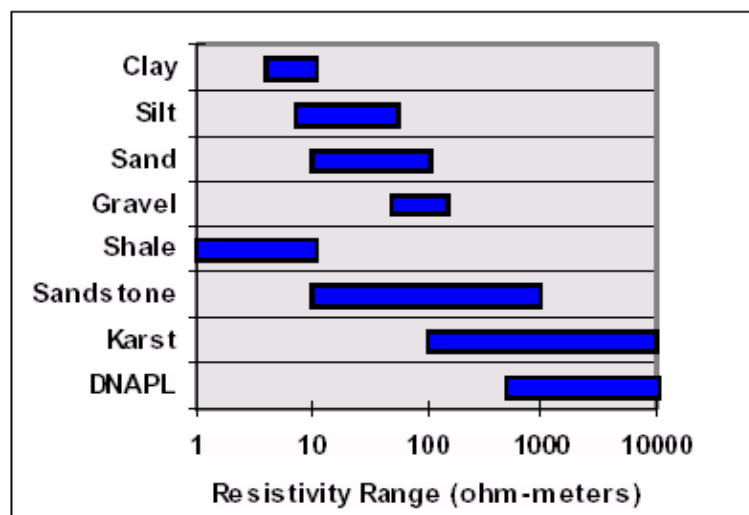


圖 1、地下環境不同介質之電阻率分佈（摘自 Keller, 1966）

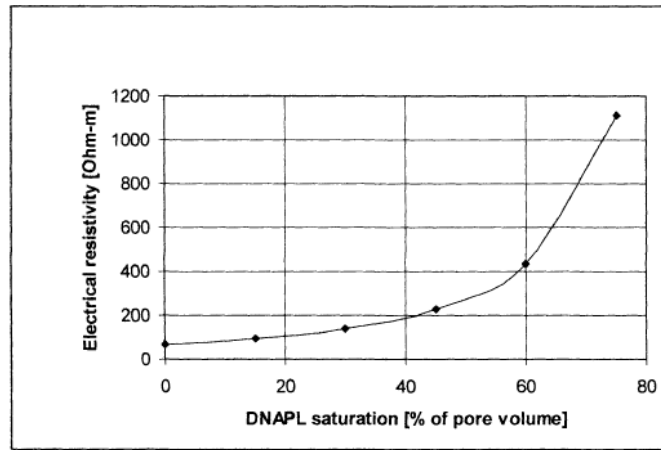


圖 2

圖 2、砂質含水層電阻率與 DNAPL 飽和度之關係圖（摘自 Schneider and Greenhouse, 1992）

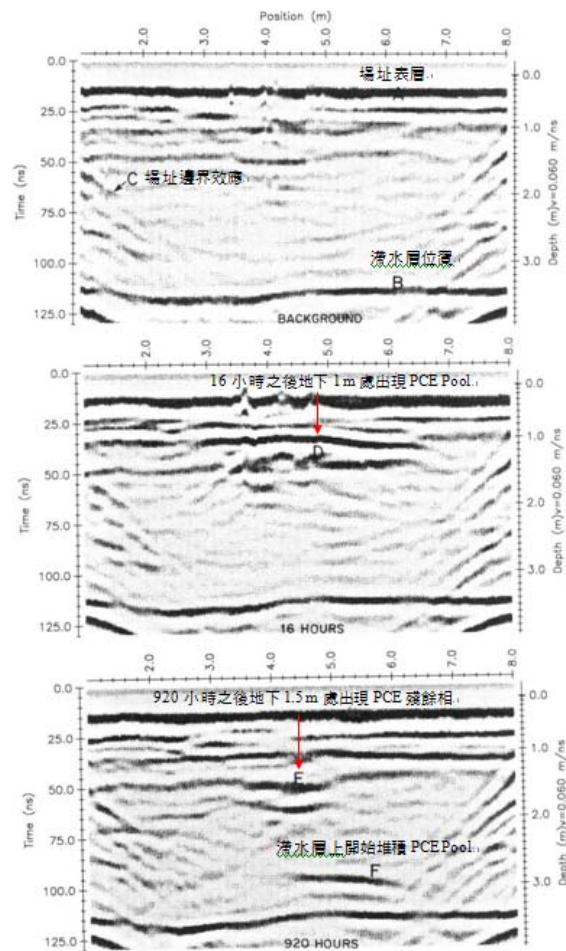


圖 3、PCE 移動分佈之雷達波剖面示意圖（摘自 Greenhouse et al., 1993）

而 ERT 法施測深度隨測線展距增加測深，若可施作之直線距離不足（如建物阻擋或其他地面干擾物）會造成測深受限；GPR 法測深與天線頻率有關，一般約 1~10 公尺，愈往深層其解析度愈差。而 GPR 井測（雷達波井測）及 ERT 井測（地電阻井測）則可隨著井深或鑽孔深度施作單井/孔周遭或多井/孔間之空間特徵調查，其在探測深度上更具優勢，並增加監測井或鑽孔之利用效益。

而早期的井測主要運用在地下深層的石油及天然氣工程中，研究油氣蘊藏量及地質構造。近來已開始應用於地下水、工程地質及岩石力學等相關研究。而地下淺部地層之井測法則有別於傳統深層井測（探油）方法，深層井測必須配合鑽孔、穩定液，僅能於單孔施作，結果僅能說明鑽孔周遭特徵與一維剖面，且無法確認方位；淺層井測則可於不同井或鑽孔中施作，確認特殊地質或污染方位，建立井/孔間之連續二維及三維剖面。

整治場址之整治成效評估也多透過採樣或設井評估驗證，而採樣點之間或井間之變化情形或整治成效則未知或僅能透過模擬。而地球物理透過面與空間之探勘則可彌補此種缺口，並可輔助掌握整治不佳區或宜加強整治之區域，可同時評估污染物隨時間與空間之變化。例如圖 4 為 Winship et al. (2006) 運用 ERT 井測評估示蹤劑（氯化鈉溶液）於未飽和層之流動情形，可清楚描繪出三維電阻剖面（電阻率變化達 7.5% 之等電阻剖面）隨時空之變化，並發現電阻率剖面約在地下 8~9 公尺（低滲透性夾層）附近呈現橫向流佈，代表示蹤劑受阻於夾層。

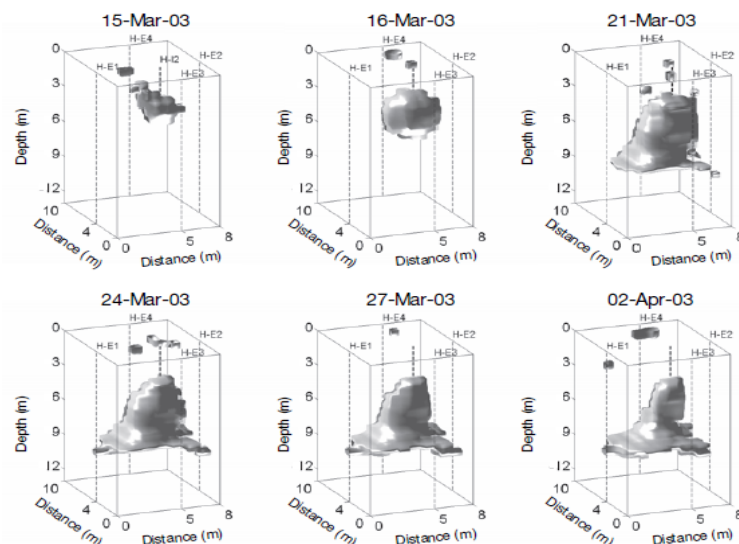


圖 4、未飽和層示蹤劑試驗之井中 ERT 三維電阻率分佈變化（摘自 Winship et al., 2006）



而國內對於土壤及地下水的調查及傳輸模擬，多屬大尺度的特徵描述及採簡單或過多的假設條件，對於地下環境小尺度的細部特徵及污染界定的研究則甚少。目前國內地球物理技術於地下環境之運用仍以地面上施測為主，運用井測進行地下環境細部特徵掃描或評估則鮮少有案例，因此本論文研究期能結合此項新穎井測技術運用在土壤及地下水之污染細部調查，建立井測相關理論及本土化參數，並透過實場調查及驗證評估。

由於目前國內利用地球物理調查技術於底泥污染調查，正屬於開發階段。底泥為許多水棲生物之棲息地，同時也是諸多表面水體中持久性污染物質的主要蓄積處。在水體中，大多數合成化學物質及廢棄物包括毒性有機及無機物終究會累積在底泥之中。諸多文獻顯示，許多環境劣質化(degraded)的地區雖然其水質並沒有明顯高於水質污染管制標準，但棲息底泥或接近底泥的生物卻明顯受到不利影響，可見底泥毒性檢測之必要性。本團隊於石門水庫利用水上地電阻方式，施測示意圖如圖 5 所示，將電纜利用船載方式拖曳在水面上，利用四極（Dipole-Dipole array）八波道接收可得到圖 5 所示，圖 6 中暖色系為水體之反應呈現相對高電阻率現象，而底泥沉積則呈現相對低電阻率現象，由於石門水庫水深較深超過 10 公尺，所以電流探測深度受到壓抑，所以在執行本計畫時會選用水深較淺處施測，目的在瞭解河川底泥深度，在根據電阻率變化來判斷是否受到重金屬污染，再搭配透地雷達(如圖 7、圖 8 所示)與感應電磁波法(如圖 9、圖 10 所示)，根據不同物理量，研究底泥污染之最佳調查技術與方法。

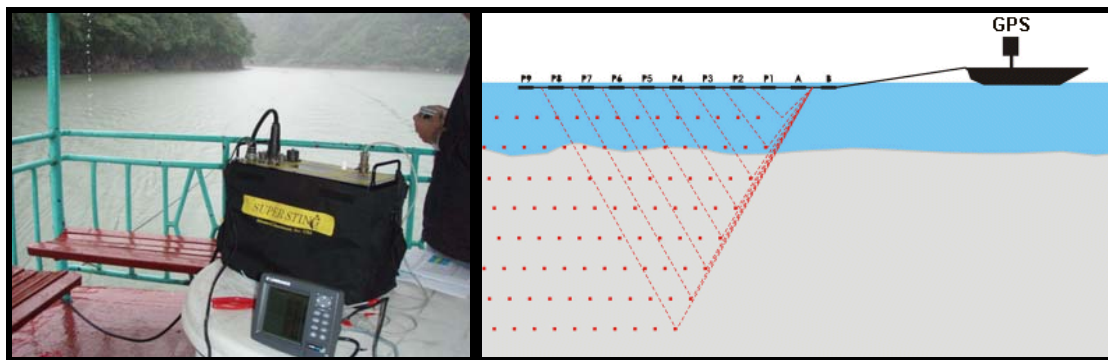


圖 5、水上地電阻法施測示意圖



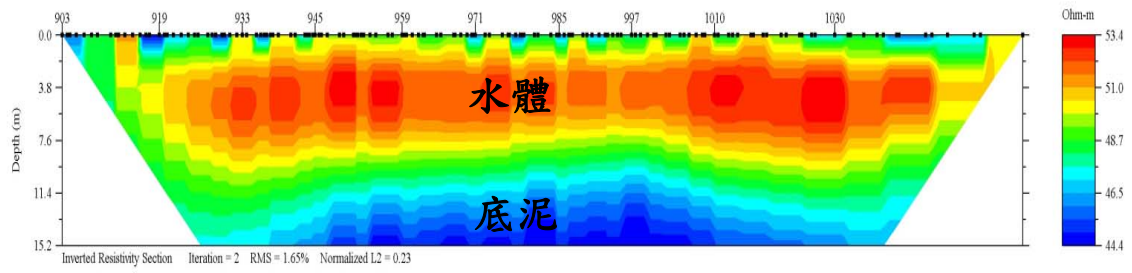


圖 6、水上地電阻成果圖（施測位置石門水庫）



圖 7、水上透地雷達施測圖（施測位置於景美溪上）

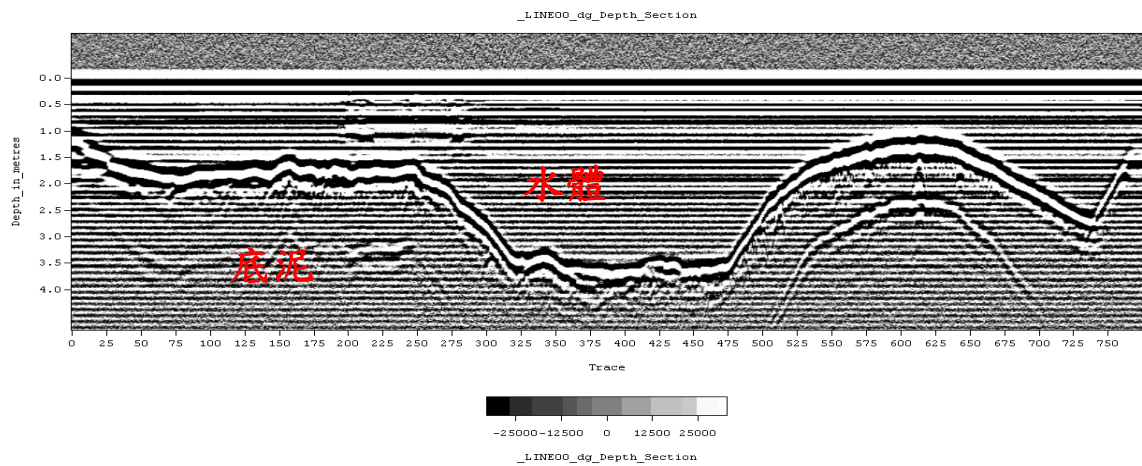


圖 8、水上透地雷達成果圖（施測位置於景美溪上）

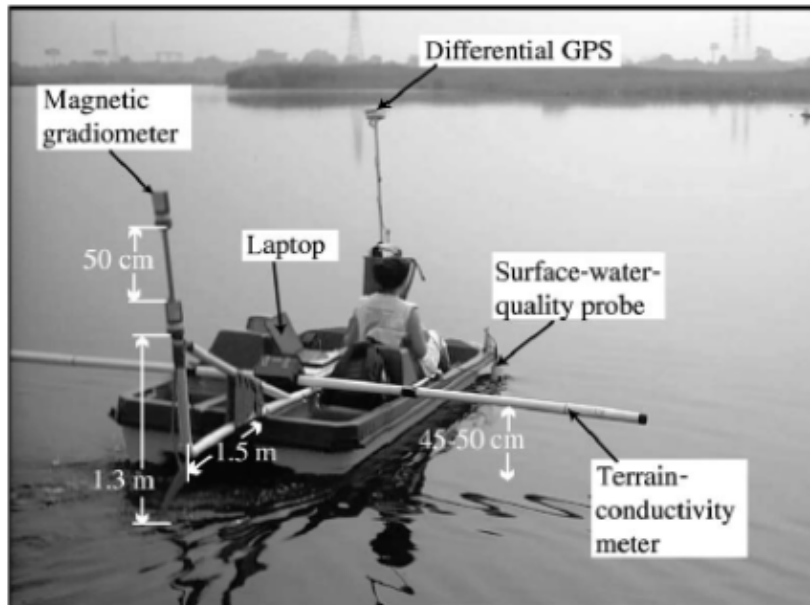


圖 9、應用水上感應電磁波法於重金屬調查（摘自 Nasser Mansoor、2006）

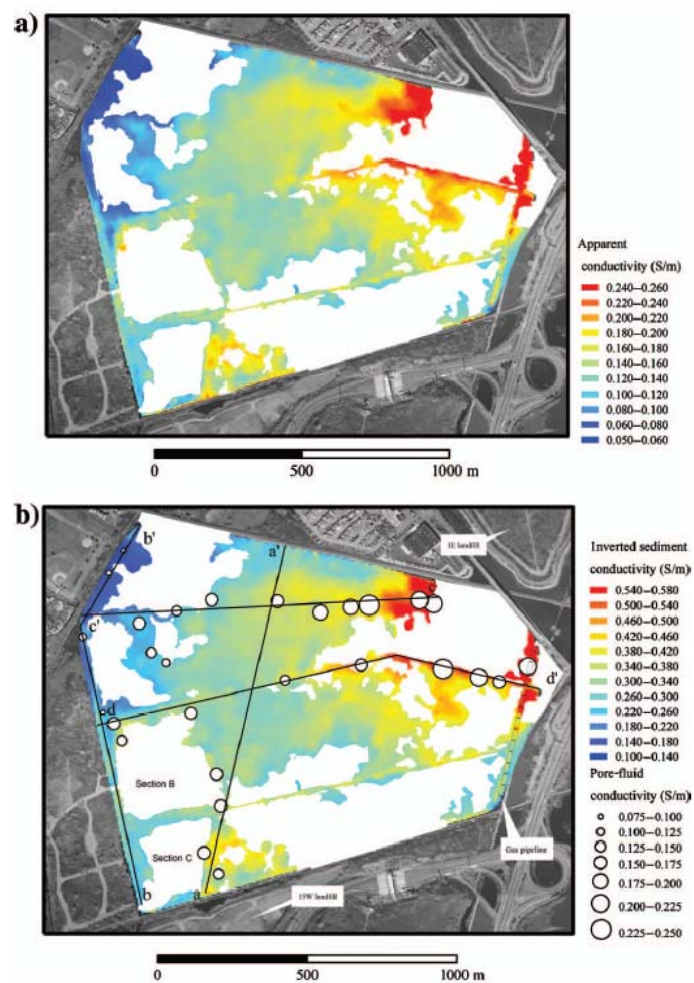


圖 10、水上感應電磁波法成果圖（摘自 Nasser Mansoor、2006）

### 1.3 計畫工作架構與流程

本計畫研究時間為期一年，主要研究於重點場址與重點河川進行相關調查研究及實驗分析評估工作，依據所釐訂之計畫工作項目，將本計畫之工作內容綜與執行成效整列述如下，圖 11 為工作計畫流程圖：

#### （一）預期完成之工作：

1. 利用透地雷達井測與電阻井測進行相關污染場址資料收集。
2. 選擇河川進行小面積底泥調查，利用水上透地雷達、地電阻法與感應電磁波法，進行底泥深度與相關電性變化研究，進而進行可行性評估。

#### （二）執行成果方面之貢獻及成果效益

1. 利用井測方法進行含氯污染物調查研究，目的在評估地面無法進行淺層地球物理施測時與展距不長，無法達到預計深度時，利用井測方法是否可得到地層直接物理參數，而瞭解污染物流動模式。
2. 利用水上地球物理探測方法，進行底泥調查研究，以評估底泥相關物理性質，與調查方法可行性評估，以用於未來大規模河川底泥調查。

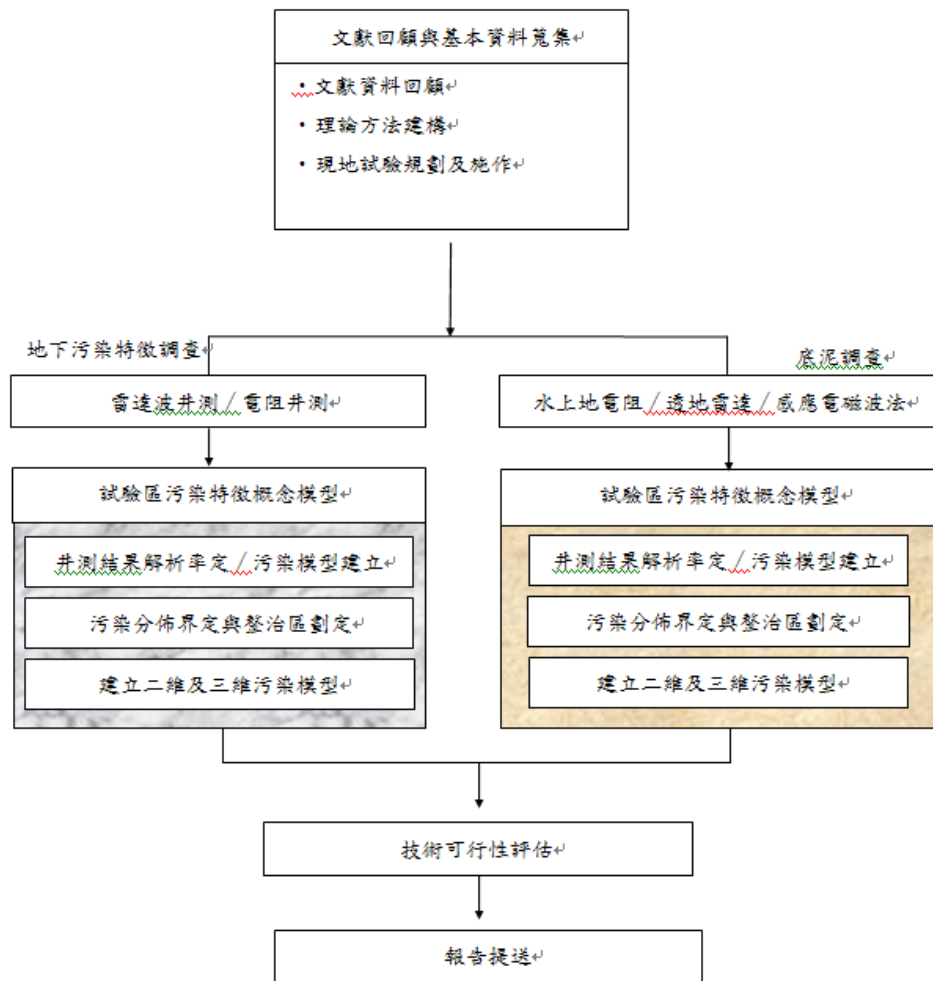


圖 11、計畫工作流程圖

## 1.4 研究目的

1. 評估井測法於不同水文地質狀況探測含氯有機物之可行性。
2. 選定含氯有機物污染場址，建立地下環境特徵。
3. 利用水上地電阻影像剖面法、水上透地雷達法與感應電磁波法研究底泥調查之可行性評估。

## 1.5 計畫工作進度

本調查研究計畫 100 年度工作期程預計 12 個月（100 年 11 月至 101 年 11 月止），研究進度及預期完成之工作項目如表 1.1 所示。

表 1、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月 工作項目	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	備註
文獻回顧													
相關資料收集													
理論方法建構													
井測資料 規劃與收集													
底泥資料 選取與收集													
期中報告撰寫													
底泥技術評估													
污染模型建立													
期末報告撰寫													
報告修改與結案													
工作進度估計 百分比（累積數）	8%	20%	28%	35%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	98%	100%	
預定 查核點	期中：		1.查核點一，完成相關文獻收集與開始進行野外工作。 2.查核點二，開始底泥野外工作與期中報告撰寫。										
	期末：		3.查核點三，完成所有野外資料收集並進行技術評估。 4.查核點四，開始進行期末報告撰寫。										

根據研究工作進度表與工作期程，目前完成文獻收集、井測資料選取並收集完資料、底泥資料完成部分與完成期中報告。計畫目前工作執行率已完成百分之百。

## 1.6 補助經費

計畫執行經費編列包刮人事費用、耗材藥品費用、其他研究相關費用與行政管理費；相關貴重儀器本研究中心均有，不需額外或與貴重儀器中心租用；現地資料收集，可利用本研究中心相關建教計畫進行現地資料收集，可省去相關模場建置費用。經費明細詳如下表（表 1.2）：

表 2、研究補助經費明細

經費概算	計畫預估經費		核定金額	核銷金額	核銷比例
	計畫經費計算	人事費用	624,528	624,528	100%
		資料蒐集	0	0	0
		消耗性器材藥品費用	100,000	100,000	100%
		貴重儀器使用費	0	0	0
		其他研究有關費用	200,000	200,000	100%
		行政管理費	55,472	55,472	100%
		合計	980,000	980,000	100%

## 第二章 文獻回顧

法國 Schlumberger 兄弟於 1912 年首先著手研究井中地球物理探勘之可行性，並於 1927 年在法國 Pechelbronn 油田進行了史上第一次地電阻井測，從此展開井測技術之運用。目前拜電腦快速處理分析之能力，及各式電子科技配件，可將繁複的資料量、高精度且複雜的超音波電視掃瞄（Acoustic Televiewer）、雷達波探測、地層微細掃瞄（Formation Microscanner）及地球斷層掃瞄（Geotomography）等各式技術應用在井中或鑽孔之探勘。而近幾年已開始運用 GPR 法及 ERT 法等井/孔探勘技術定量評估淺層（含未飽和層及含水層）水文地質及污染特徵（Rubin and Hubbard, 1995）。

有關未飽和層特徵之井測調查研究，1998 年起英國自然環境研究協會（UK Natural Environment Research Council）及英國環境署（UK Environment Agency）共同投資地下水資源保護計畫，利用地球物理井測技術評估點源污染通過 UK Sheerwood Sandstone 未飽和層的擴散情形及到達含水層的時間。如 Binley et al. (2001) 採用跨孔（Cross-Borehole）GPR 法評估未飽和層注入示蹤劑後之含水量變化；Binley et al. (2002) 整合 GPR 井測雷達波剖面及 ERT 井測之電阻率剖面合理解釋未飽和層含水量隨季節之變化；並進一步利用地球物理探勘結果發展未飽和層之三維數值預測模式（Binley et al., 2002; Binley and Beven, 2003; Binley et al., 2004; Winship et al., 2006）。

有關含水層特徵之井測調查研究，Niva et al. (1988) 使用 GPR 井測調查一處廢棄物棄置場址之含水層流動行為。Day-Lewis et al. (2003) 結合示蹤劑試驗及 GPR 井測評估岩盤之裂隙分佈。Grégoire and Joesten (2006) 於一採用蒸汽加強整治之現地試驗模場，於蒸汽注入前、注入期間及注入結束後運用 GPR 井測評估污染整治成效。而 ERT 井測則常運用在地下水探勘、海水入侵評估及污染傳輸等研究（LaBrecque, 1989; LaBrecque and Yang, 2001; Loke, 1999）。

而地物井測運用在 DNAPL 之調查，如 Greenhouse et al. (1993) 於 Borden 場址運用各式地球物理探勘技術評估 PCE 移動分佈情形。該場址以鋼板樁圍籬現地試驗範圍：9 m×9 m×3.3 m，試驗區之含水層地質為細砂，平均孔隙率為 0.36，K 值約 10<sup>-4</sup>~10<sup>-3</sup> cm/s，地下 3.3 公尺屬低滲透性的滯水層。選擇 2 口相距 1.5 公尺的試驗井分別施作 GPR 井測及 ERT 井測，並於與 2 口井各相距約 1 公尺之注入井灌注 PCE 溶劑，於 2 口試驗井觀測雷達波及電阻率剖面隨時空之變化。圖 12 為 GPR 井測介電常數剖面隨時空之變



化，縱軸為地表下深度，橫軸為探勘時間（取對數），其中暖色系（紅色）代表介電常數變化大（因 PCE 通過導致），冷色系（藍色）代表介電常數無甚變化（接近背景地層），可發現 PCE 注入後 3 小時即移動至地下 1 公尺，10 小時後已到達地下 1~2 公尺範圍，30 小時後 PCE 已到達地下 3.3 公尺之滯水層；圖 13 則是 ERT 井測電阻率剖面隨時空之變化（縱軸為地表下深度，橫軸為探勘時間），可發現地層電阻率隨著 PCE 移動經過而增加，並顯示 PCE 約在 200 小時後到達滯水層。而 GPR 井旁之 PCE 移動速度明顯高於 ERT 井測，顯示 GPR 井測之周遭地質滲透性良好或存在優先流徑。

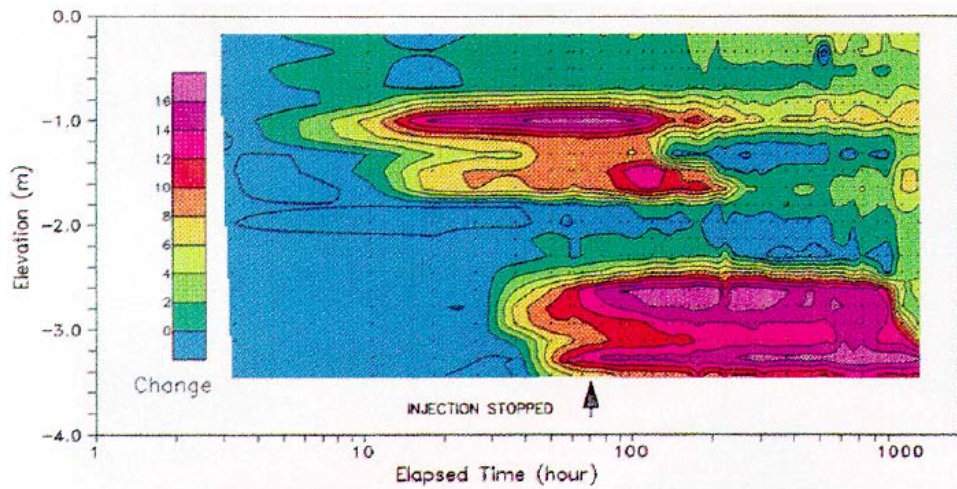


圖 12、井中 GPR 法介電常數變化剖面

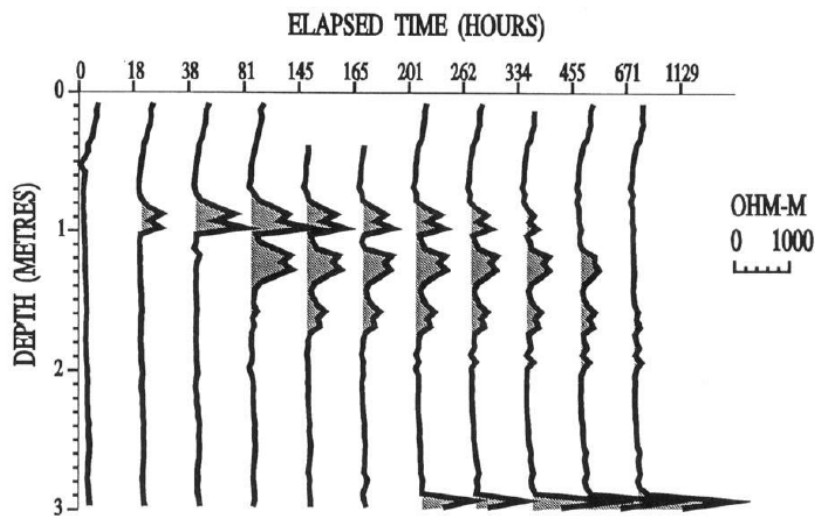


圖 13、井中 ERT 法電阻率變化剖面

而有關 GPR 井測於一般非固結性地層（砂、砂土、黏土等）因雷達波傳遞會快速衰減，其跨孔調查多以 5~6 公尺範圍為限，但於固結性地層（如花崗岩）因雷達波衰減較小，跨孔距離可能達 10 公尺以上，而不同水文地質最大跨孔距離之解析極限有必要進一步研究。而 ERT 井測之空間解析品質與井測深度、污染物（或目標物）與背景地質之電阻率差異，及井/孔間距等直接相關。Ramirez et al. (1995) 推導出經驗值為孔中之電極排列長度（V，接近井深）與跨孔距離（D）之比值（V/D）接近 1.5 時，可獲得最佳之解析度；而 Goes and Meeks (2004) 運用不同電極排列施測結果，顯示 V/D 在 1~1.4 的範圍仍可獲得清楚的電阻率解析剖面。而目前在不同水文地質條件及污染物特性之環境下，V/D 之最佳比例仍無定論。

美國地質調查所（USGS）於 2002 年 OGW 研究團隊利用水上連續性掃描系統（continuous resistivity profiling, CRP）進行近岸水資源調查，位置於北美 Niantic River。此研究希望利用 CRP 系統瞭解 submarine groundwater discharge (SGD)，並針對 CRP 資料擷取系統進行可行性評估與改良。

圖 14 為聲納系統與 CRP 系統進行 Coventry Lake 調查結果圖，與其他地球物理調查方法比較，CRP 法可快速且清楚將湖泊底部與岩石分佈狀況描繪出來。併合聲納與連續性地電阻掃描系統(CRP)可明顯探測出湖泊底部高電阻率異常區域的分佈與底泥分布狀況。此聲納系統使用的 Bandwidth 為 500-2200 Hz，音鼓頻率為 25 kHz，訊號強度並無利用疊加增強。

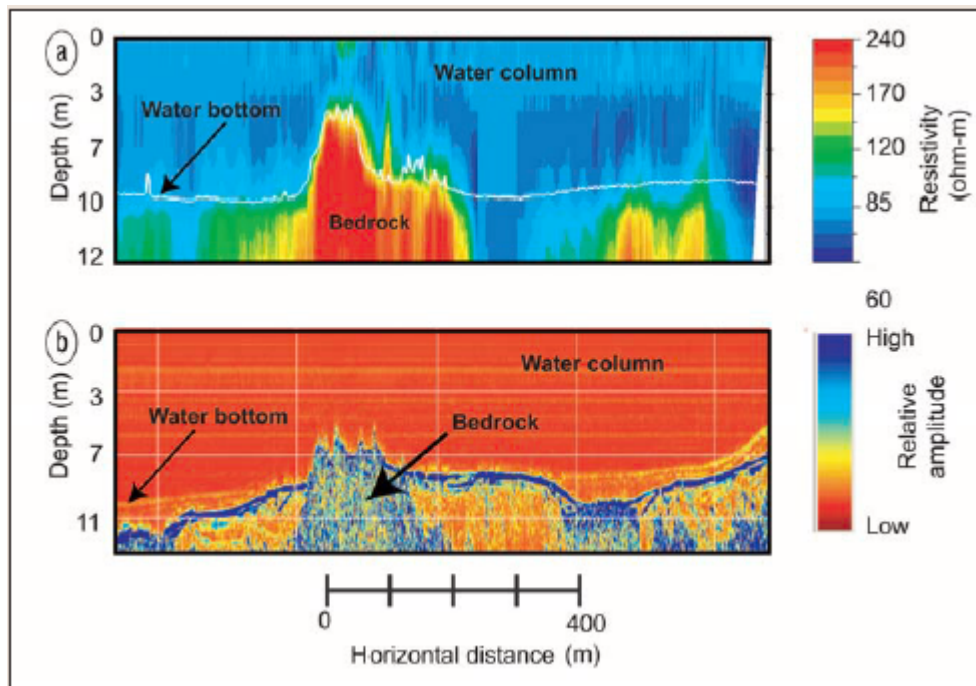


圖 14、(a)連續性地電阻掃描系統(b)聲納探測系統於 Coventry Lake, Connecticut 探測結果圖。

## 第三章 研究方法

本調查研究主要工作項目，有：現地資料收集、底泥調查、地下污染特徵調查、底泥技術評估與污染模型建立。其中，現地資料收集，可利用本研究中心長期調查之高潛勢工業區內進行資料收集，可省去實驗模場之建置費用。而底泥調查則選擇相關環保署監測之河川，進行技術可行性評估。相關貴重儀器本研究中心均有，不需額外採購或與貴重儀器中心租用。

### 3.1 地電阻剖面法（ERT）

地電阻剖面法是利用直流電通入地層以量測地下地層電阻率，並依此判定不同性質之地層界面，所測得的結果即地層電阻率剖面。影響地層電阻率的因子有地層之組成礦物、顆粒大小、組態、以及含水量與水中所含物質。當地層有明顯的電阻率對比，就適用於直流電阻法。地電阻法原理是利用直流電或低頻交替直流電經由一對電流極 A、B 將電通入地下，建立人為電場。藉由地層間介質不同，其導電性之差異，可利用另一對電位極 M、N 測量電場在 M、N 之間造成的電位差，求出地層視電阻率（Apparent Resistivity），進而估算地下地層的導電性分佈。本研究將地電阻剖面法用於水上施測，藉由電阻率分佈評估 ERT 法界定河川深度與底泥厚度之可行性，並探討其解析極限。圖 14 為地電阻法於陸地上之施測示意圖，本研究係使用美國製造之 SUPER STING R8 地電測勘儀。





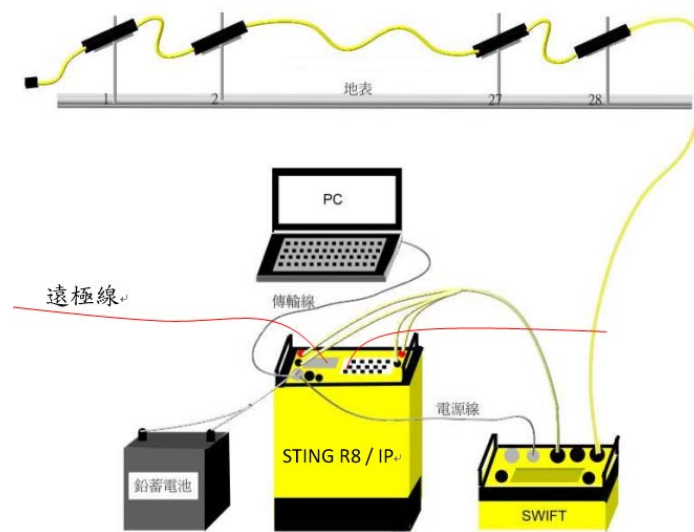


圖 15、地電阻剖面法施測示意圖

直流電阻法有多種排列方式，常用的有溫奈排列法（Wenner Array）、施蘭卜吉排列法（Schlumberger Array）、雙極排列法（Pole-Pole Array）及雙偶極排列法（Dipole-Dipole Array）等，這些方法各有其地形及施測環境的使用限制，當然結果也各有優劣，本文之研究所採用的方法為連續性電阻率掃描法，由於在水中施測必須壓抑雜訊與快速擷取資料的特性，故選用偶極偶極法(Dipole-Dipole Array)。經由一對電流極 A、B 將電通入地下，建立人為電場。利用另一對電位極 M、N 測量其間的電位差，電極展距越大，反應的地層深度越深。不同展距，反應不同深度的地層。在一個測點為了獲得由淺至深之地層反應訊號，可將電流極展距逐次加大並測量。此方式之探測稱為垂直電探，垂直電探資料須經適當的逆推及分析方能獲得地下各層的真实電阻率與厚度。

#### 工作流程：

- ✓ 根據現場地形地貌與目標物(預計測量深度)決定測線長度與測線間距。
- ✓ 根據目標物特性與量測深度決定施測方法與佈及排列方式。
- ✓ 佈設電極位置與量測座標，本研究利用衛星定位系統量測各資料點位置。
- ✓ 建立測線控制檔案(command file)，並 install 至主機中，開始量測。
- ✓ 測試各電極接地電阻，期望值在 1,000 ohm 以下。
- ✓ 決定施測電流大小、放電時間與施測次數。
- ✓ 完成施測，並檢查各資料點電位差下降曲線，必要時重新施測，維護資料擷取品質。

### 3.2 透地雷達法 (GPR)

透地雷達技術，原理類似聲納技術或反射震測(Reflection seismic method)。係藉由雷達發射短脈衝之高頻電磁波(1MHz-3000MHz)進入地表下，此電磁波於探測體內部傳播特性取決探測體內之電性變化，故探測體內含水量多寡及成分之改變皆會影響電磁波的特性。當入射電磁波進入探測體中，遇到介質電性之改變或有異常時，導致入射波會被反射、折射、或散射，此訊號經由地表接收器接收、放大、疊加及數位化後由磁片(如記憶體)記錄成原始資料，透過資料處理後，再代入介質傳遞雷達波之速度，即可求得被探測體實際深度，並依結果加以判讀及解釋被探測體之內部狀況。

透地雷達法利用極高頻電磁波反應地層介電常數的差異，不同之處在於震測法為利用物質的傳遞波速差異為理論依據，而透地雷達法則利用地層之電性差異為施測基礎，也就是說當地層介電常數改變或有異常出現時，會影響電磁波訊號反射、折射或散射。本研究將透地雷達法用於水上施測，藉由介電常數變化評估GPR法界定河川深度與底泥厚度之可行性，並探討其解析極限。圖15為透地雷達，本研究係使用加拿大Sensors & software公司之pulse EKKO 100a型測勘儀。擁有天線頻率分別為50 MHz、100 MHz、200 MHz、 225 MHz、450 MHz、900 MHz。



圖 16、pulse EKKO 100a 型測勘儀

#### 工作流程：

- ✓ 測區基本資料蒐集及研判。
- ✓ 針對測勘目標選定測線方向。
- ✓ 針對測勘目標大小及深度決定使用之天線頻率、天線間距、施測時訊號重合數、濾波方式、各測點記錄時間範圍、測點間距及工作船大小。

- ✓ 測量控制點選定。
- ✓ 將整套測勘設備架於船上(或是其他載用設備)，固定發射及接收天線位置，以資料傳輸線連接主機、發射天線控制器、接收天線控制器天線及控制電腦。
- ✓ 固定測點位置進行施測試驗，操作員必須注意螢幕上之雷達波影像剖面反應，以確保或修正最佳記錄範圍、調整增益、濾波、訊號重合數及天線發射頻率等重要施測參數。
- ✓ 沿測線方向循序逐點施測。衛星定位系統可架設於透地雷達主機上，並以衛星定位系統作測點位置施測。
- ✓ 施測時操作員必須注意螢幕上之雷達波影像剖面反應，必要時調整施測參數或重新施測。

### 3.3 電磁法 (EM)

電磁波法 (Electromagnetic Method；簡稱：EM Method) 係應用電磁感應原理，在地表發射線圈 (Transmitter Coil) 中通以可變頻率之交流電 (通常其頻率為聲頻範圍)，造成隨時間變動的原生電磁場 (Primary EMField)，由於地層導電程度的差異，依據冷次定律 (Lenz's Law) 此變動的原生電磁場會引發強度不同之變動渦電流 (Eddy Current)，再引發次生電磁場 (Secondary EM field)；在地表離發射線圈不遠處，以一接收線圈 (Receiver Coil) 記錄次生電磁場強度，可藉以獲得地下地層導電率分佈情形。電磁法係應用電磁感應原理，在地表發射線圈中通以可變頻率之交流電 (通常其頻率為聲頻範圍)，造成隨時間變動的原生電磁場，由於各地層之導電度各有差異，依據冷次定律，此變動的原生電磁場會引發不同強度的變動渦電流，並再次產生次生電磁場；在地表之發射線圈另一端，以一接收器記錄次生電磁場的強度，可藉以此資料得知地底下之地層導電性分佈的情況。

電磁波法(EM)依發射原生電磁場及記錄次生電磁場的方式差異，可以區分為：時間域電磁法 (Time Domain EM) 及頻率域電磁法 (Frequency Domain EM) 二種。時間域電磁法具有野外量測便利，但訊號／雜訊比 (Signal to Noise Ratio) 則嫌太低；頻率域電磁法則兼具操作簡單與訊號／雜訊比高的優點。電磁波法係應用電磁感應原理 ( 附圖16 )， 在地表發射線圈 (Transmitter Coil) 中通以可變頻率之交流電 (通常其頻率為聲頻範圍)，造成隨時間變動的原生電磁場 (Primary EM Field)，由於地層導電程度的差異，依據冷次定律 (Lenz's Law) 此變動的原生電磁場會引發強度不同之變動渦電流 (Eddy

Current)，再引發次生電磁場（Secondary EM field）；在地表離發射線圈不遠處，以一接收線圈（Receiver Coil）記錄次生電磁場強度，可藉以獲得地下地層導電性分佈情形，在工程及環境污染偵測等方面應用相當廣泛。

本研究將電磁法用於水上施測，藉由EM法快速探測大範圍河川導電度變化，以節省取樣數量與時間。圖16為電磁探測儀，本研究係使用捷克GF Instruments公司出產之CMD電磁探測儀。

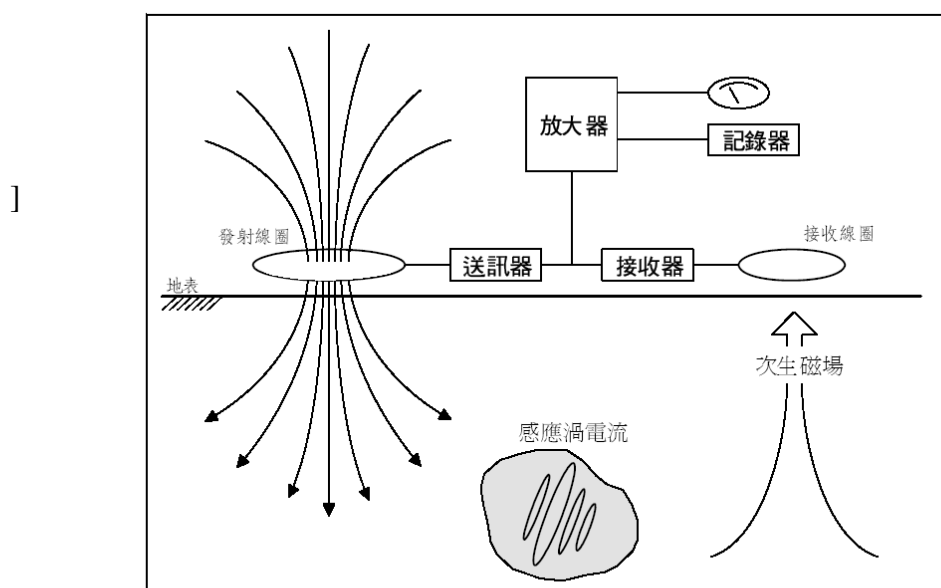


圖 17、電磁波探測原理示意圖



圖 18、CMD 電磁探測儀



### 3.4 GPR 井測

傳統透地雷達之探測方法為利用高頻電磁波自探測物表面發射進入待測物內部，因物體內不同介質電性變化而產生反射波，此一訊號經反射後為表面接收器所接收、放大、數位化後，紀錄成原始資料，帶回室內資料處理後，便可進行分析待測物之內部結構，此種探測方式稱為反射式透地雷達法，若利用於井內，則為雷達波井測或 GPR 井測。

GPR 井測之單孔井測為發射器與接收器同放在一口井內，其施測方式類似傳統的反射式透地雷達；跨孔井測為發射器與接收器放在不同的井中，依其發射器與接收器之幾何關係的不同，又可細分為四種施測方法，分別是零支距剖面法（Zero Offset Profile, ZOP）、多支距剖面法（Multiple Offset Gather, MOG）、垂直雷達剖面法（Vertical Radar Profile, VRP）及反射法剖面法（Reflection Profile, RP）等。雷達波井測之施測原理示意如圖 17 所示，由探測器發射高頻率雷達波並接收其反射訊號，依據反射訊號的特性及速度掃描分析土壤特徵（如含水量、密度等）及污染異常區等。雷達波井測必須在 2 吋（含）以上之監測井中施測，跨孔井測可運用在不同方位之雙井。本研究希望透過不同水文地質條件評估 GPR 井測界定 DNAPL 污染分佈及評估改善成效之可行性，並探討井測法之適用性。

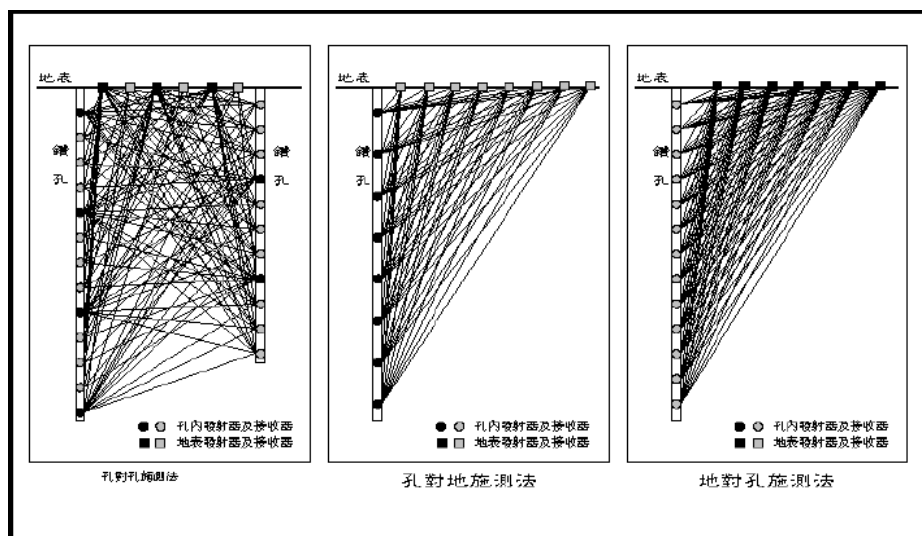


圖 19、跨孔井測法示意（資料來源：工研院能資所）

### 3.5 ERT 井測

ERT 井測屬直流電阻法，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，並以電性區分地層中各種物理特性，其探測剖面可利用不同色階（不同電阻率分佈）表示不同地層分佈。ERT 井測需水等介質傳遞電流，並須搭配鑽孔或新設井（電纜線繫於井管）施測，孔間距則視孔深而定，可同時於多孔施測。

跨孔式 ERT 井測有多種施測方式及專利技術，目前較成熟之方法有：跨孔井測偶極-偶極法（Cross-Hole Dipole-Dipole, CHDD）、迴圈式偶極-偶極法（Circulating Dipole-Dipole, CDD）及跨孔井測三極法（Cross-Hole Tripole-Pole, CHTP）等。ERT 井測之施測原理示意如圖 18 所示，依據兩端電極之間的電位差及通過電流計算地層中視電阻率分佈，並據以釐清地層及污染可能分佈。本研究希望透過不同水文地質條件評估 ERT 井測界定 DNAPL 污染分佈及評估改善成效之可行性，並探討不同環境下之 V/D 最佳比例。

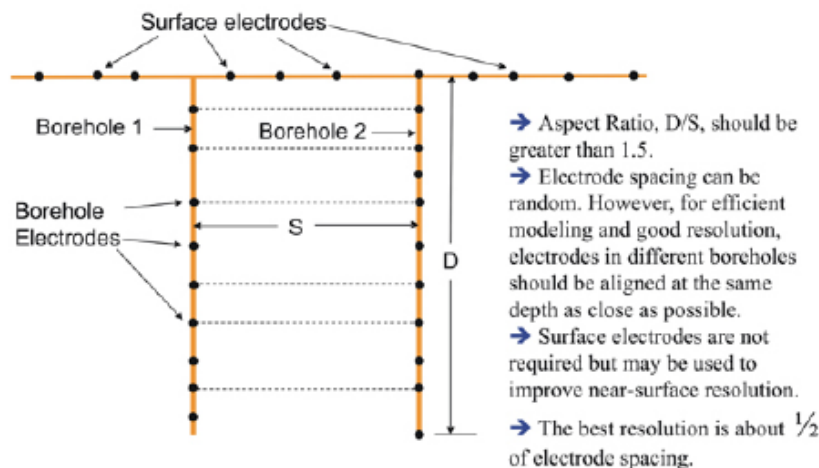


圖 20、跨孔井測法示意

## 第四章 研究成果

### 4.1 ERT 井測探測結果

本計畫試驗場址四周道路先利用傳統地表地電阻影像剖面法施測，發現場址四周道路中南側與東側均發現異常電阻率包，推測此兩處地層孔隙率佳，亦讓污染物質匯集而形成高電阻率異常區。經檢驗結果兩處地下水均超過土壤地下水管制標準。為了釐清試驗場址是否為污染關係人或是行為人，便利用地球物理井測調查技術，以建立污染物傳輸路徑與方向。本研究利用既設井花費最少情況下，共完成 2 處 ERT 井測，1 組二維跨孔 ERT 井測及 1 組三維跨孔 ERT 井測。ERT 井測探測方法及井位等基本資料如表 4.1，探測位置如圖 19。ERT 井測主要之電極排列方法採用四極法並搭配二極法或三極法，依據不同電極排列，可增加蒐集兩端電極之間的電位差及通過電流計算地層中視電阻率空間分佈範圍，並據以釐清地層及污染可能分佈。依據施測結果共分為兩個區域來說明探測成果：（1）三維 ERT 井測區域；（2）二維 ERT 井測區域。

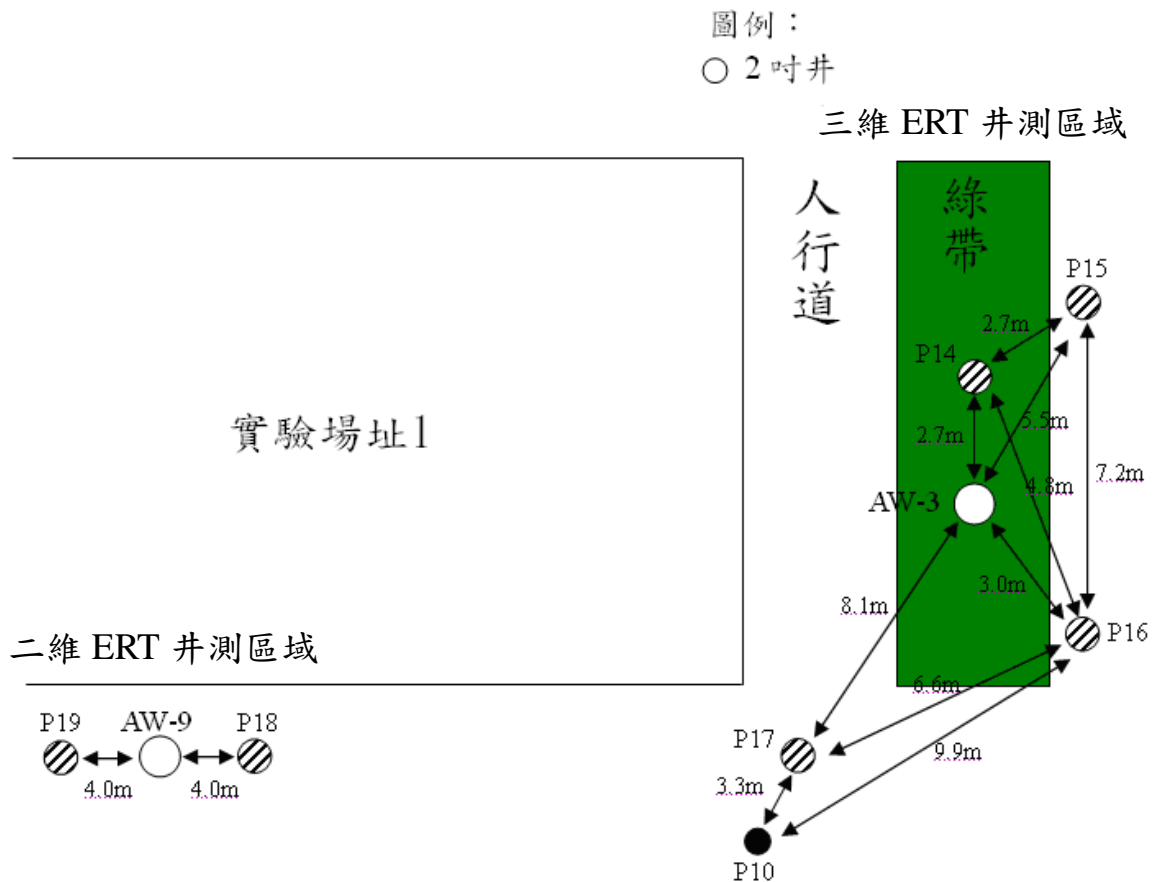


圖 21、ERT 井測施測位置示意圖

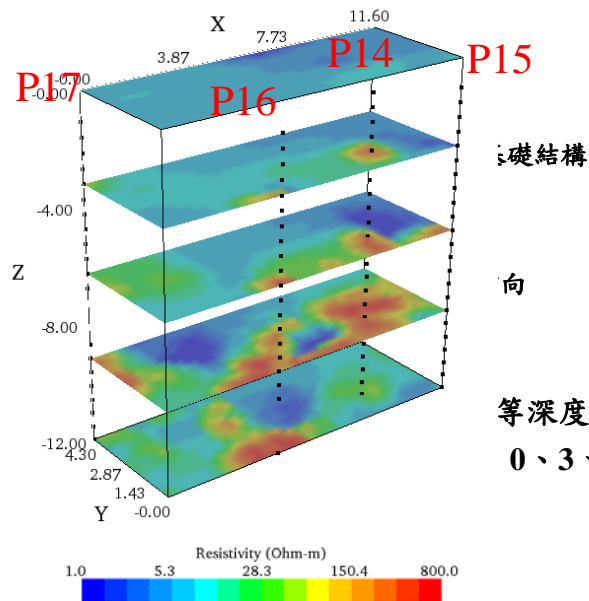
表 3、ERT 井測基本資料表

井測施測方法	施測井號	最大跨孔距離 (公尺)	井下電極位置 (公尺)	探測排列方法
三維 ERT 井測	P14、P15、P16、P17	13.6	1~12	四極法、二極法
二維 ERT 井測	P18、P19	8	1~12	四極法、三極法

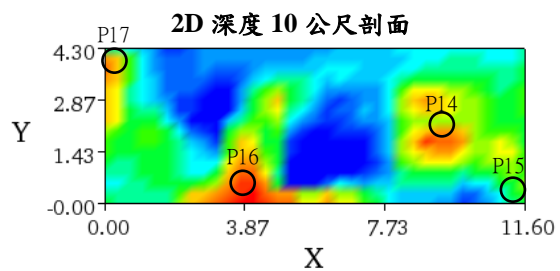
#### 4.1.1 三維 ERT 井測區域

本處電阻井測位於試驗場址西側人行道綠帶，以人行道上監測井 AW-3 為中心，設置四口井（P14~P17）施作 ERT 井測。由於鄰近路口下方有管線或排水設施通過，電極位置之起始深度自井下 1 公尺開始設置，以降低管線設施干擾。根據 AW-3 與 P14、P16 及 P17 之土樣剖面紀錄，含水層約在地下 7.5~11 公尺或 12 公尺屬中高滲透性的細至粗砂（靠近水位附近夾雜細礫）；地下 11 或 12 公尺以下以低滲透性之粉土及黏土為主。施測階段之地下水位面約在深度 8 公尺，根據現地地質材料之電阻率特性，可能導致電阻率偏高因素，包括：地質材料乾燥（未飽和層區域）、緊密地質材料、級配礫石、人工結構物，薄層礫石、DNAPL 污染等。本區域 ERT 三維探測結果如圖 22 及圖 23，並分別呈現三維等深度剖面及三維模擬剖面示意。

## Z Slices of Inverted Resistivity



### 二極法 (Pole-Pole)



### 四極法

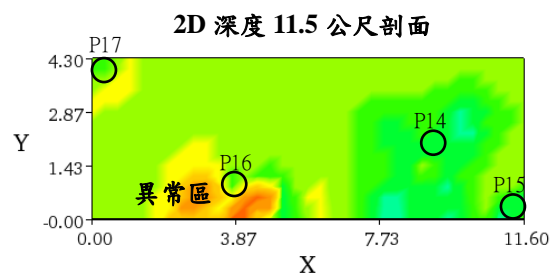
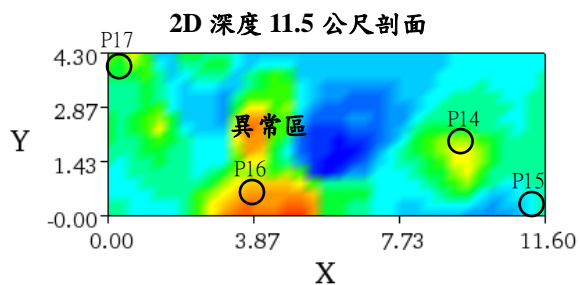
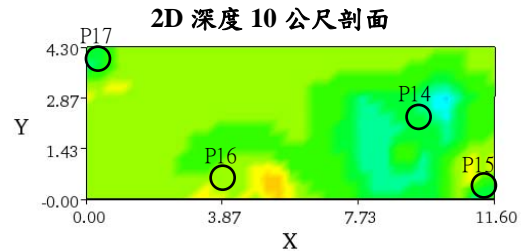


圖 22、三維 ERT 井測等深度探測剖面

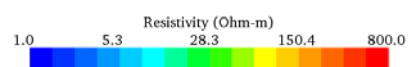
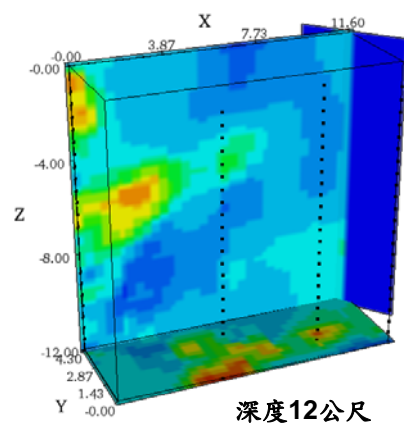
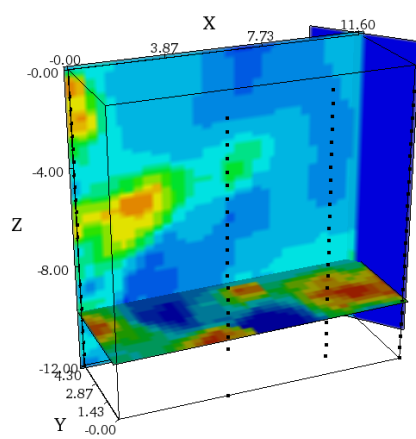
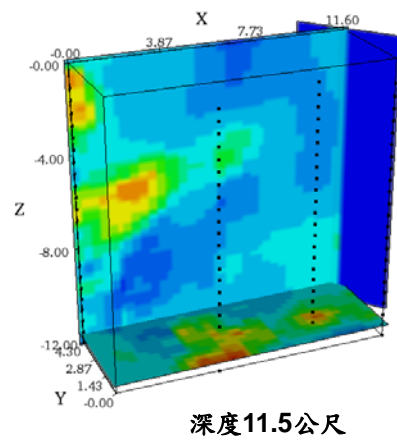
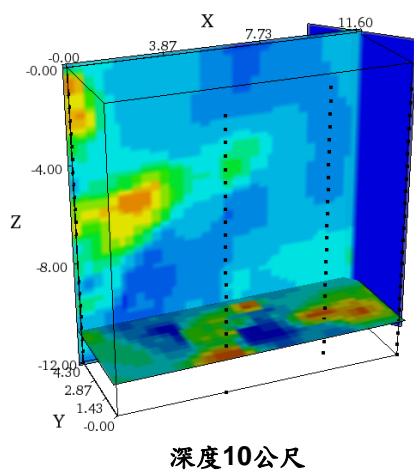
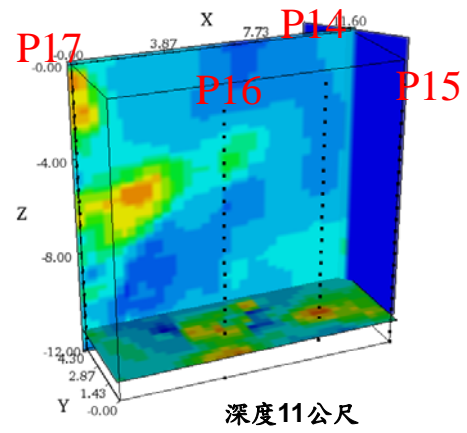
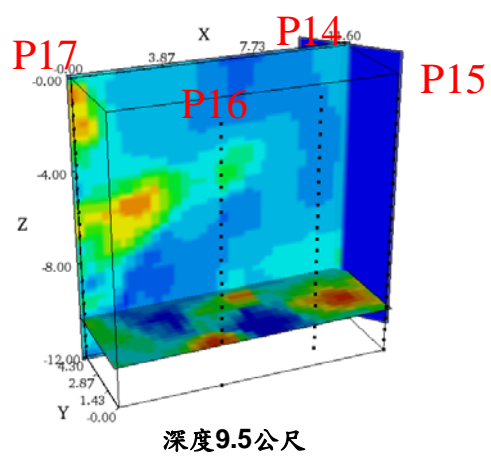


圖 23、三維 ERT 井測探測剖面

圖 22 之上圖為二極法之三維等深度剖面，下圖為二極法與四極法等深度二維剖面。顯示位於地下水位下之異常區多集中在 P14 至 P16 之間，其中三維等深度剖面之 12 公尺處及等深度二維剖面之 11.5 公尺處，高電阻率（200~500 Ohm-m）集中於 P16 井周遭。由於 P16 之鑽探資料顯示地下 10.8~12 公尺範圍屬於黑色粉土夾黏土，而粉土、黏土之電阻率理論上應偏低，而 ERT 探測結果顯示此範圍之電阻率反而高過周遭地層，不排除與 DNAPL 污染團有關。至於 P14 在 12 公尺處之電阻率明顯低於 P16，經查 P14 之鑽探資料顯示地下 10.7~11.7 公尺範圍屬於黑色粉質砂，其地質滲透性相對高於 P16 同深度之地質條件，因此同深度之污染團移動至 P16 附近之速度較為緩慢或易受阻於該處之粉土、黏土地層。

圖 23 探測成果屬於三維多深度電阻率模擬，可依據異常區域及深度呈現 XYZ 軸不同方向之剖面或切面，可明顯看出不同深度之高電阻率區域變化趨勢。其中在 P14 及 P15 井的高電阻率區域，在地下 11 公尺範圍明顯減少；P16 井的高電阻率區域，由地下 9.5 公尺至 10.5 公尺多維持不變（地下 9.4~10.8 公尺之鑽探漏失，研判屬相當疏鬆之中粗砂）；在地下 11 公尺範圍之電阻率稍減少，但在地下度 11.5 及 12 公尺範圍（地質鑽探記錄地下 10.8~12 公尺為粉土、黏土）之電阻率又上升且範圍明顯擴大。

根據 AW-3、P14~P17 之水質分析結果顯示 TCE 濃度均超過地下水管制標準，濃度集中 AW-3 周遭各井，特別是 P16 之濃度（0.295 mg/L）高於其餘各井 1~2 倍，而 ERT 井測也顯示 P16 在各深度均呈現較高電阻率，不排除 P16 井附近之污染團受地質影響有集中累積的情形。另外，ERT 井測結果亦顯示高電阻區有往下游（P17 與 TW-1 附近）降低趨勢，水質分析結果 P17 與 TW-1 濃度明顯低於上游各井（TW-1 濃度僅為 0.07 mg/L）。

#### 4.1.2 二維 ERT 井測區域

本處電阻井測位於實驗場址旁道路上，電極位置之起始深度自井下 1 公尺開始設置。根據 AW-9 鑽探紀錄，地下 3.4~8 公尺以粉質砂至中細砂為主；地下 8~8.5 公尺為粗砂夾礫石；地下 8.5~10.4 公尺以細砂夾粉土為主；地下 10.4~10.6 為灰黑色粉土、黏土。本處 ERT 井測共施測 2 種電極排列方法（三極法、四極法），



ERT 井測探測成果如圖 22。

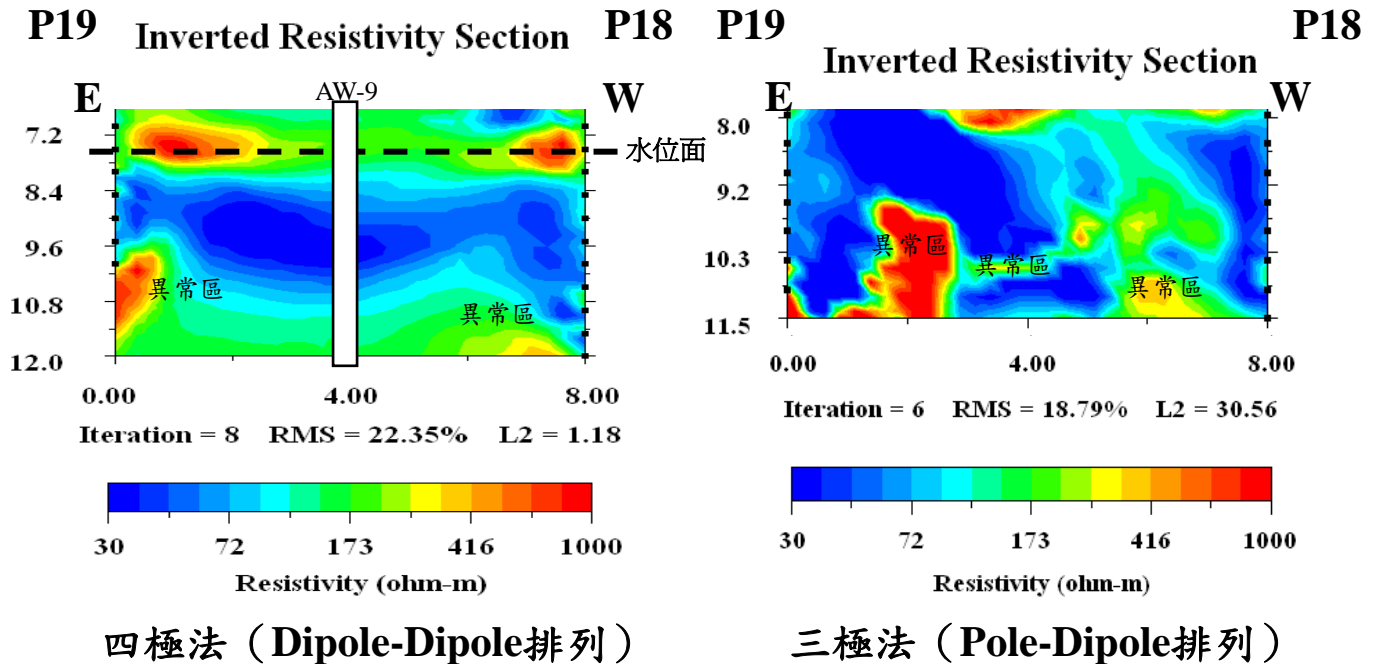


圖 24、二維 ERT 井測施測成果圖

圖 22 之探測成果顯示電阻率偏高處位於 P19 與 AW-9 之間。其中四極法 (Dipole-Dipole 排列) 顯示地下約 7.2 公尺處呈現接近水平層狀高電阻率，應為乾燥之疏鬆地質材料所造成，地下接近 8 公尺處研判受地下水位面影響，電阻率開始有遞減趨勢。而四極法發現一處可疑之異常區，接近 P19 井，約在地下 9.5~11.5 公尺範圍，電阻率約在 500 Ohm-m。而三極法 (Pole-Dipole 排列) 所探測之異常區深度接近四極法，但較靠近中央之 AW-9 監測井。

根據 AW-9、P18 及 P19 之水質分析結果顯示 TCE 濃度均超過地下水管制標準，其中 AW-9 之 TCE 濃度約在 0.46~0.49 mg/L，P18 及 P19 之 TCE 濃度分別約為 0.067 mg/L 及 0.25 mg/L。水質分析結果顯示 TCE 濃度集中 AW-9 與 P19 之間，與 ERT 井測結果吻合。並研判三極法在本次探測對污染解析度較高，與 Goes and Meekes et al. (2003) 現場之探測成果一致 (DNAPL 調查以三極法之解析最佳)。

## 4.2 GPR 井測探測結果

本計畫共完成兩條 GPR 跨孔井測，GPR 井測探測方法及井位等基本資料如表 4.2，施測位置如圖 23。GPR 井測可彌補傳統地面 GPR 法測深之限制，可隨井深探測較深層地下環境特徵。

表 4、GPR 井測基本資料表

井測施測方法	施測井號	跨孔距離 (公尺)	井深 (公尺)	資料收集方法
二維 GPR 井測	EW-1、EW-1-E	3.4	12、11	MOG
二維 GPR 井測	EW-1、EW-1-W	3.7	12	MOG

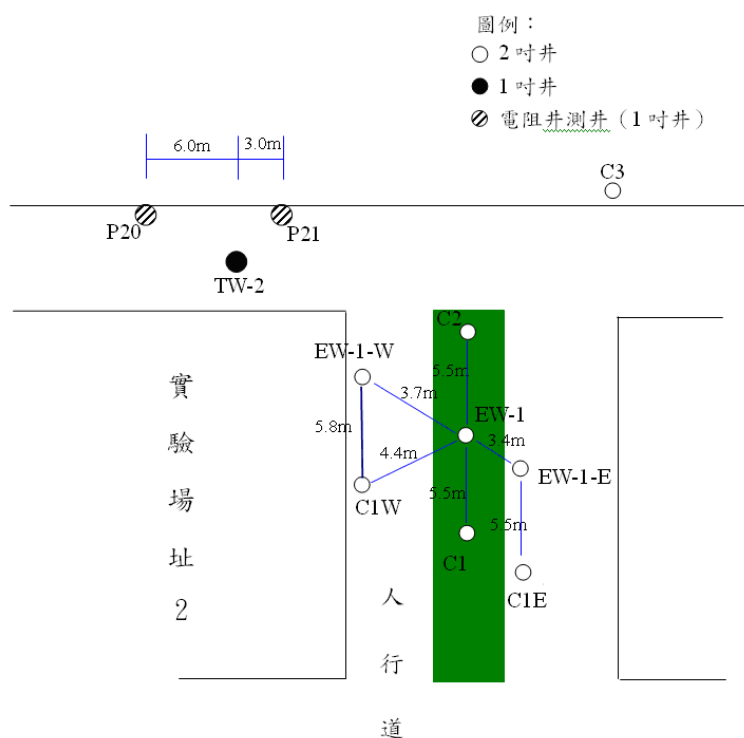


圖 25、GPR 井測施測位置示意圖

EW-1 區域以 EW-1 井為中心，分別對 EW-1-E 及 EW-1-W 進行 1 組孔對孔 GPR 井測施測。EW-1 歷年 TCE 濃度約在 0.3~0.9 mg/L，施測前之濃度約在 0.67 mg/L，水位約位在地下 7.5 公尺。而本區域曾於 EW-1 上游之灌注整治藥品。本研究希望利用多方向透地雷達井測針對污染井進行調查污染移動方向，進而瞭解污染源或是灌注藥品之成果。

#### 4.2.1 二維 GPR 井測測線一〈EW-1、EW-1-E〉

EW-1 區域以 EW-1 井為中心，分別對 EW-1-E 及 EW-1-W 進行 1 組孔對孔 GPR 井測施測。EW-1 對 EW-1-E 施測結果如圖 24。施測井深由井底約 11 公尺處至井口 6 公尺處，施測方式採用 MOG 法。發射天線放置在 EW-1，接收天線置於 EW-1-E，兩井間距 3.4 公尺。圖 24 之顏色代表電磁波在地層傳遞速度，偏藍色代表低速層，代表施測區域地層背景值，而偏紅色代表高速層，根據 DNAPL 不導電或高濃度污染物較不導電的物理特性，在含 DNAPL 或污染團的地層中，雷達波傳輸速度會增快。而當地層黏土及粉土含量增加，雷達波傳輸速度會遞減，因此雷達波高速層區域可能屬於污染潛勢區域或反應滲透性較佳地層（有利污染匯集）。

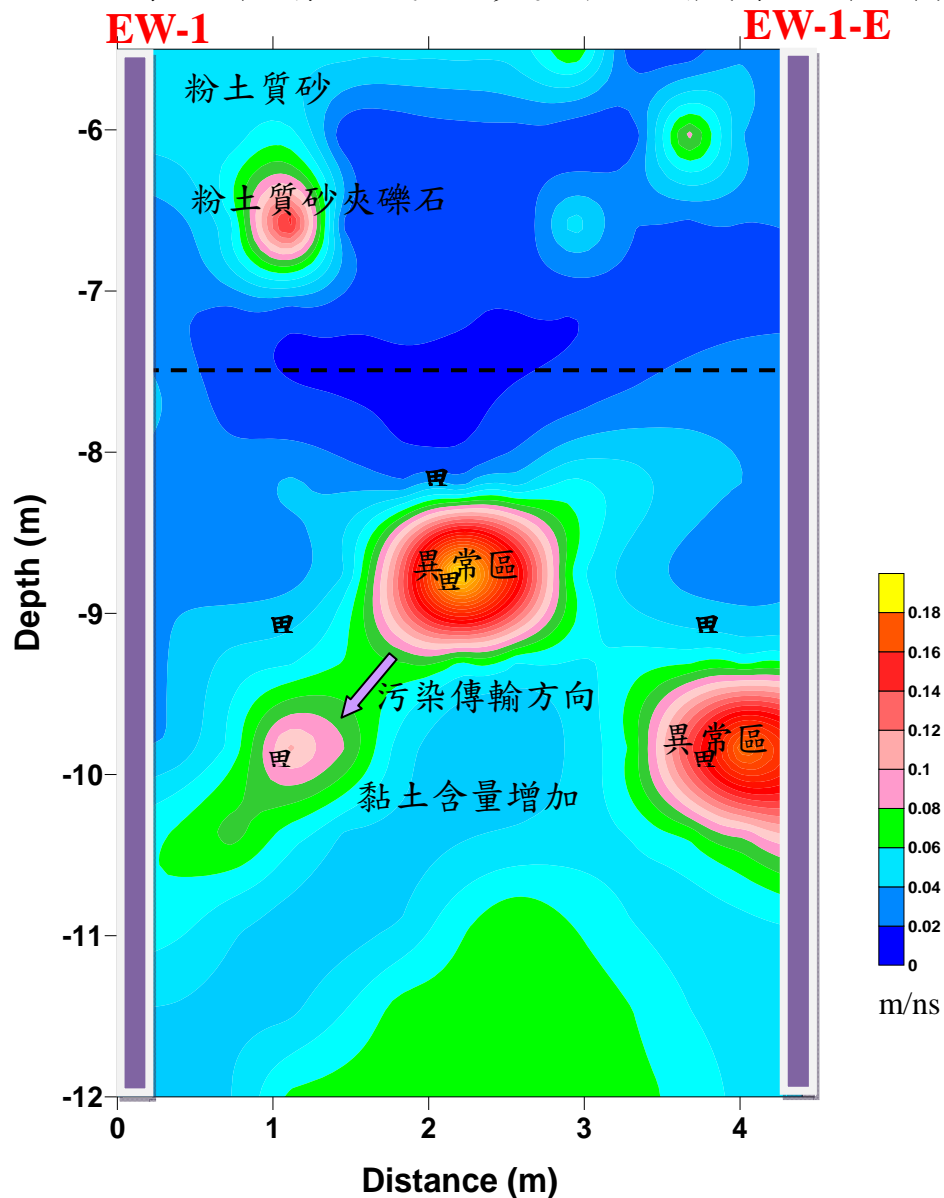


圖 26、GPR 井測施測成果（EW-1 & EW-1-E）

圖 24 之雷達剖面總共可分為三個電磁波速度區塊：(1)0.6 ns/m 以下，推測此地層為背景地層之速度，應為含粉土及黏土之地層；(2)0.6~0.8 ns/m，推測屬含砂量較高及夾礫石之地層；(3)0.8 ns/m 以上，推測可能為異常高速區。圖 24 之剖面總共有兩處異常高速區（粉紅色區塊），第一處為地下 6.5 公尺處，接近 EW-1 發射天線區，推測可能為局部礫石造成；第二處則是地下 8 至 10 公尺間，位於跨孔中間及 EW-1-E 接收天線區，正常雷達波速度在此範圍應受粉土及黏土含量增加而遞減速度，因此這範圍之高速區反應研判可能與地層中之污染有關。

#### 4.2.2 二維 GPR 井測測線一〈EW-1、EW-1-W〉

第二組施測為 EW-1 對 EW-1-W，施測結果如圖 25。施測井深同樣由井底約 11 公尺處至井口 6 公尺處，施測方式亦採用 MOG 法。發射天線放置在 EW-1，接收天線置於 EW-1-W，兩井間距 3.7 公尺。本組 GPR 井測剖面出現兩處異常高速區，深度皆在 8 公尺以下，且較接近 EW-1-W 井。第一處異常區接近兩孔間，在水平距離 2 公尺位置，約在地下 8.5 公尺處；第二處異常區則接近 EW-1-W，深度較深，約在地下 9.5~10 公尺處。根據此範圍之地質條件，研判此兩處高速區可能與地層中污染有關。

由二組井測探測結果顯示，研判本區域在 EW-1-E 及 EW-1-W 之間約地下 8~10 公尺可能存在污染區，污染深度受限地下 10 公尺以下之粉土、黏土，並無往下分佈情形。建議後續的改善範圍可集中在地下 8~10 公尺。另外，由電性地層評估此區域地質滲透性似有往西北側漸增趨勢，將有污染物往西北側下游流佈（如 TW-2 井區附近）。

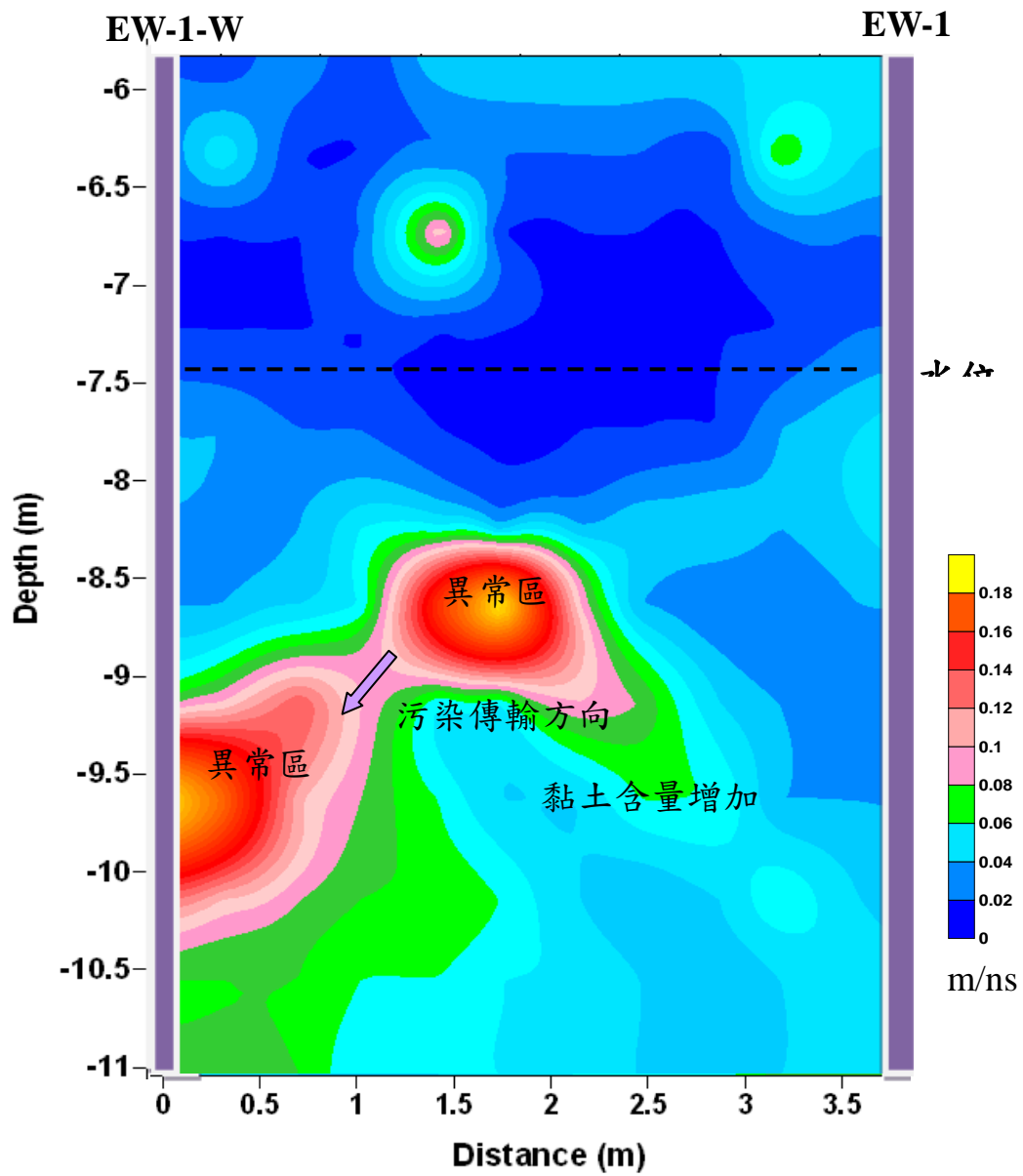


圖 27、GPR 井測施測成果 (EW-1&EW-1-W)

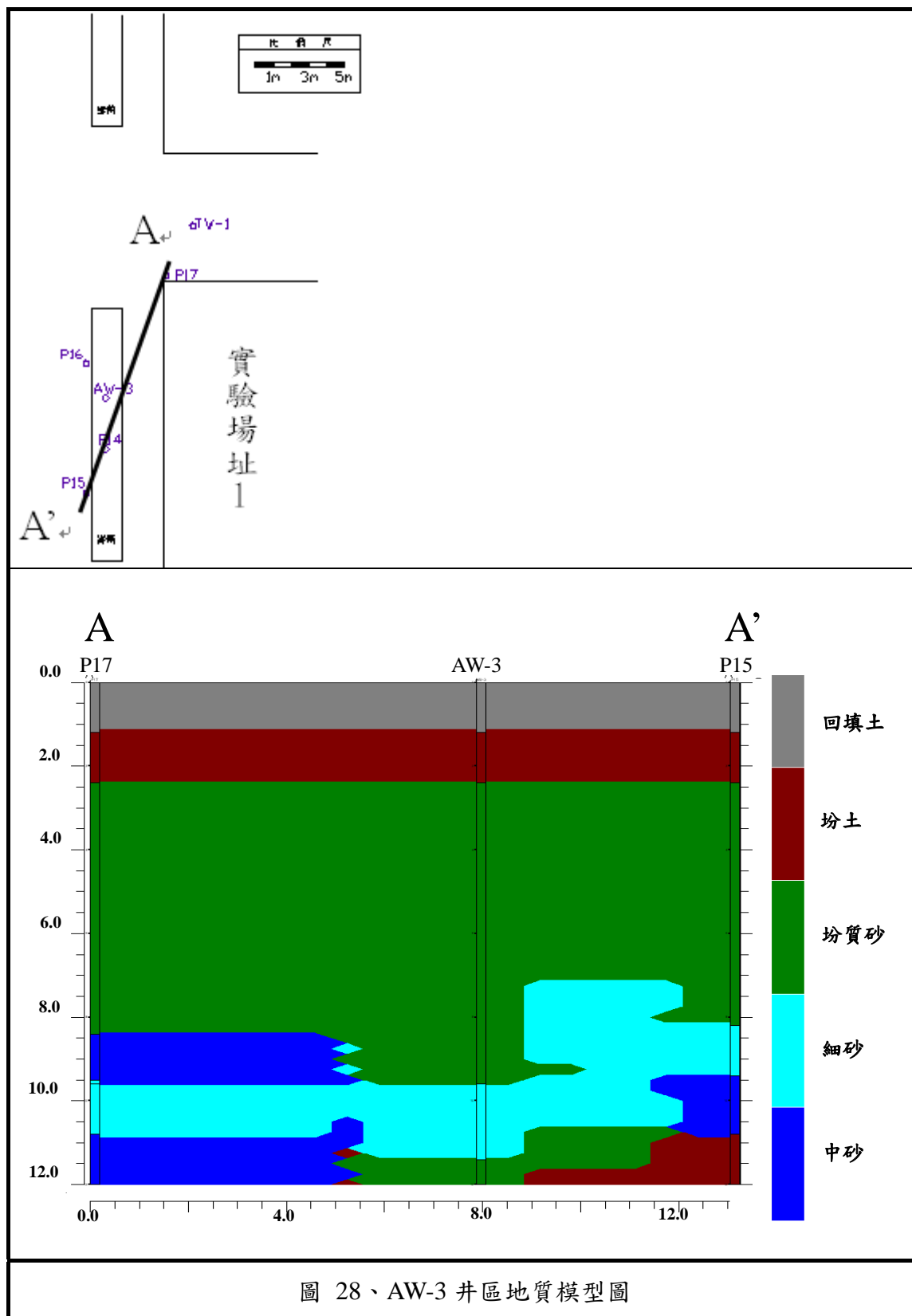
### 4.3 模場試驗區之特徵概念模型建立

根據先前地質調查結果所建立之地質概念模型發現，場址北半部淺層含水層滲透性較佳範圍分佈在地下 6~10 公尺；場址南半部滲透性較佳範圍則分佈在地下 6~15 公尺範圍，其  $K$  值分佈約在  $10^{-6} \sim 10^{-2}$  cm/s，異質性相當大。本年度將針對小範圍試驗區建立地質模型，由於抽水試驗或微水試驗僅能評估大範圍平均地質特徵（抽水試驗）或垂直深度平均地質特徵（微水試驗），並無法評估不同深度之  $K$  值分佈，亦即難以呈現各分層之流場變化，一般對於改善或整治範圍有必要先瞭解其污染濃度隨深度之變化與地質在垂直剖面上的分佈，因此可根據鑽探之粒徑組成分析不同位置、深度之  $K$  值（請參照圖之 Rawls and Brakensiek 圖解法）並配合微水試驗結果建立模場試驗區或邊界之局部地質分佈模型。

根據地質調查結果，A-A'剖面（如圖 26）可看出實驗場址 1 上游 P15 至 AW-3 附近含水層夾雜較多粉土或粉質砂，地質滲透性大致由南往北遞增。

含水層之滲透性除水平分佈外，垂直分佈亦非常重要，經調查及模擬結果，初步獲得 AW-3 井  $K$  值隨深度變化於地下 8~10 m 時為  $5 \times 10^{-3}$ ；地下 10~12m 時為  $2.5 \times 10^{-3}$ 。將含水層地質分為地表下 8~10 公尺及 10~12 公尺，地下 8~10 公尺屬於污染團主要分佈範圍（視阻水層深度而定），其  $K$  值約  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  cm/s。AW-3 井之  $K$  值由南（P15）往北（P17）漸增，有利污染團加速往下游移動。





## 4.4 河川底泥調查評估

大漢溪流域約有 133 萬人口，主要集中在三重、板橋、中和與新莊等區域，且因污水下水道普及率偏低，大部分家庭污水均未經妥善處理，即排入河川中造成污染，又流域中工業廢水流入至大漢溪者約有 900 餘家，主要以電鍍業者居多，金屬表面處理及染整業居次，成為大漢溪流域最大之污染源。

大漢溪的新海橋及華江橋底泥 Cr、Cu、Zn 均明顯偏高，中鼎公司調查大漢溪有 570 家電鍍、染整及金屬表面處理工廠有關（環保署，1998）。楊等（1998）分析大漢溪底質金屬發現 Cr 介於 32.1~149ppm(平均 57.7 ppm)，Ni:18.6~98.2ppm(平均 45.6ppm)，Cd: <0.02~0.16ppm(平均 0.07ppm)，Zn:56.9~362ppm(平均 133ppm)，Pb:13.5~54.0ppm(平均 22.9ppm)，Cu:8.6~379ppm(平均 78.5ppm)。

大漢溪為淡水河系中最長之支流，下游河川沿岸多屬工業區，中游段河床採砂場林立，現今新莊、板橋間廢水竄流與砂石濫挖，沿河下游兩岸之樹林、新莊板橋等鄉鎮大量都市污水與工業廢水排入，構成河川水質嚴重污染。淡水河與大漢溪流經大台北都會區，大量人口所產生之廢污，可能對淡水河與大漢溪沈積物重金屬產生重大之影響。

本研究屬於評估可行性計畫，主要利用感應電磁波法（EM）、水上地電阻影像連續掃描法（CRP）等技術進行底泥電性反應調查工作，於期中報告，已完成台北橋至鐵路橋間感應電磁波法探測，未來根據 EM 技術調查結果，選定區域進行細部水上地電阻影像連續掃描法 CRP 法與透地雷達法（GPR）調查底泥深度與其電性地層反應。

台北大漢溪上游及下游施作地球物理法作底泥調查，目前已完成電磁法（EM）的資料收集，本場址使用低頻率之線圈，探測 10 m 內之導電度的綜合效應，可快速且有效的界定出異常區域與範圍。依據施測結果共分為兩個區域來說明探測成果：（1）下游 EM 區域；（2）上游 EM 區域。

#### 4.4.1 下游 EM 區域

本區感應電磁法位於大漢溪下游高速公路橋至臺北大橋間之河道施測，以臺北大橋為起點以 N 字型來回轉反覆接收資料，圖 27 黃色虛線處為下游之施測範圍。圖 28 為 EM 探測成果圖，圖上顯示測區範圍之導電度在 15~120 mS/m 間，其中河道可因導電度對半分為左右兩側，河道右側導電度相對較低約 5~40 mS/m 間；河道右側導電度逐漸升高至 80~120 mS/m 間，研判此處為下游堆積區相較於河道右岸材料明顯不同於左岸。



圖 29、下游測區施測範圍

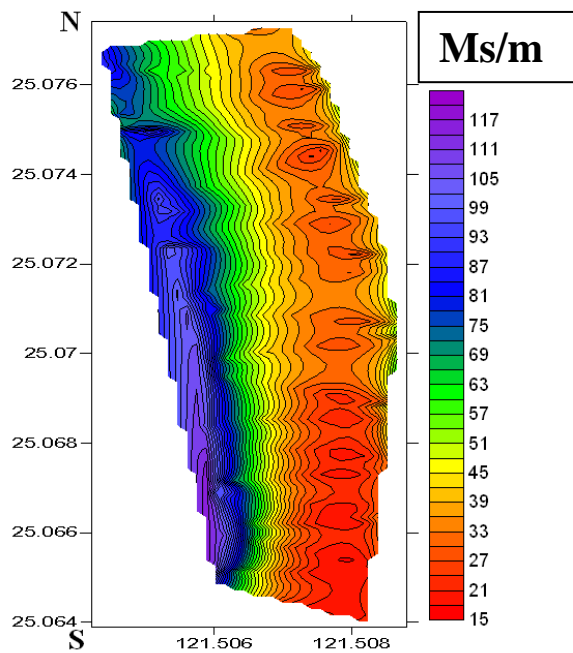


圖 30、下游 EM 施測成果圖

#### 4.4.2 上游 EM 區域

本區電磁法位於大漢溪上游大漢橋至鐵路橋間之河道施測，以鐵路橋為起點以 N 字型來回轉反覆向下游行進並接收資料，部份區域因水勢較低，船隻無法通行故無法進行檢測，圖 29 黃色虛線處為上游之施測範圍。圖 30 為 EM 探測成果圖，圖上顯示測區範圍之導電度在 20~70 mS/m 間，導電度相較於下游低，河道兩側導電度均較高約在 50~70 mS/m 間，河道中間導電度在 20~30 mS/m 間，相對於較穩定。由此結果研判，河道兩側因異物堆積造成導電度的改變，而河道中間因導電度變化穩定。

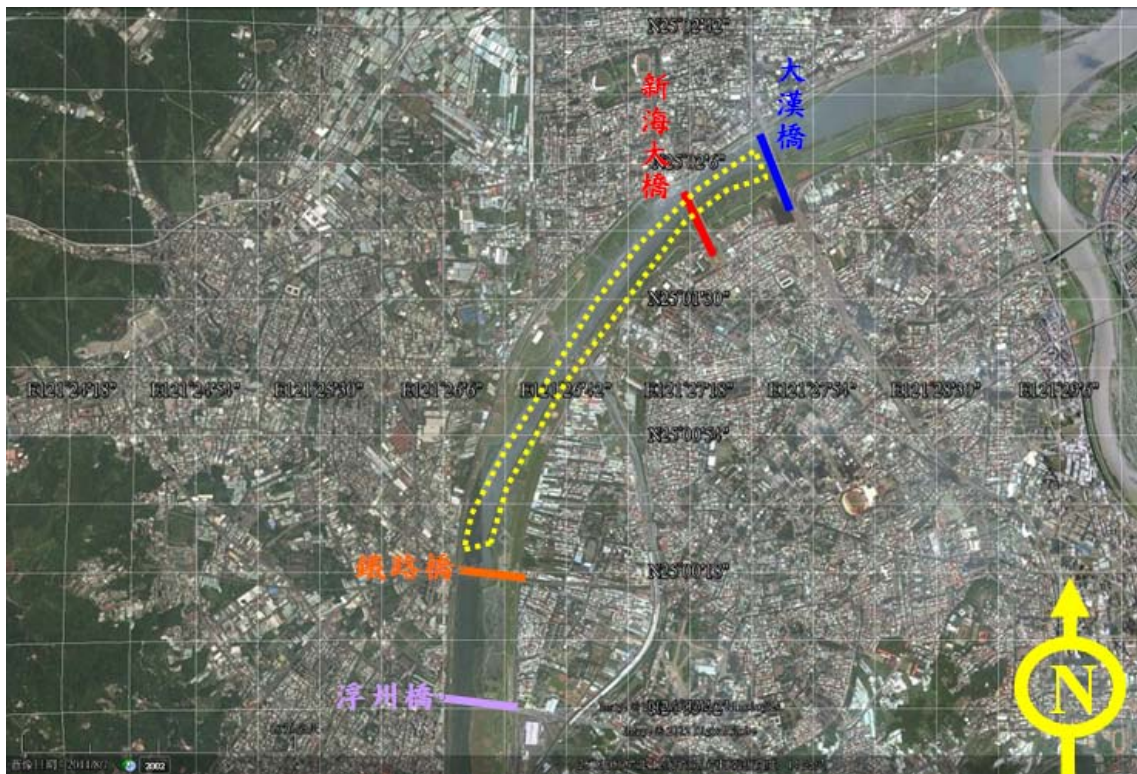


圖 31、上游測區施測範圍

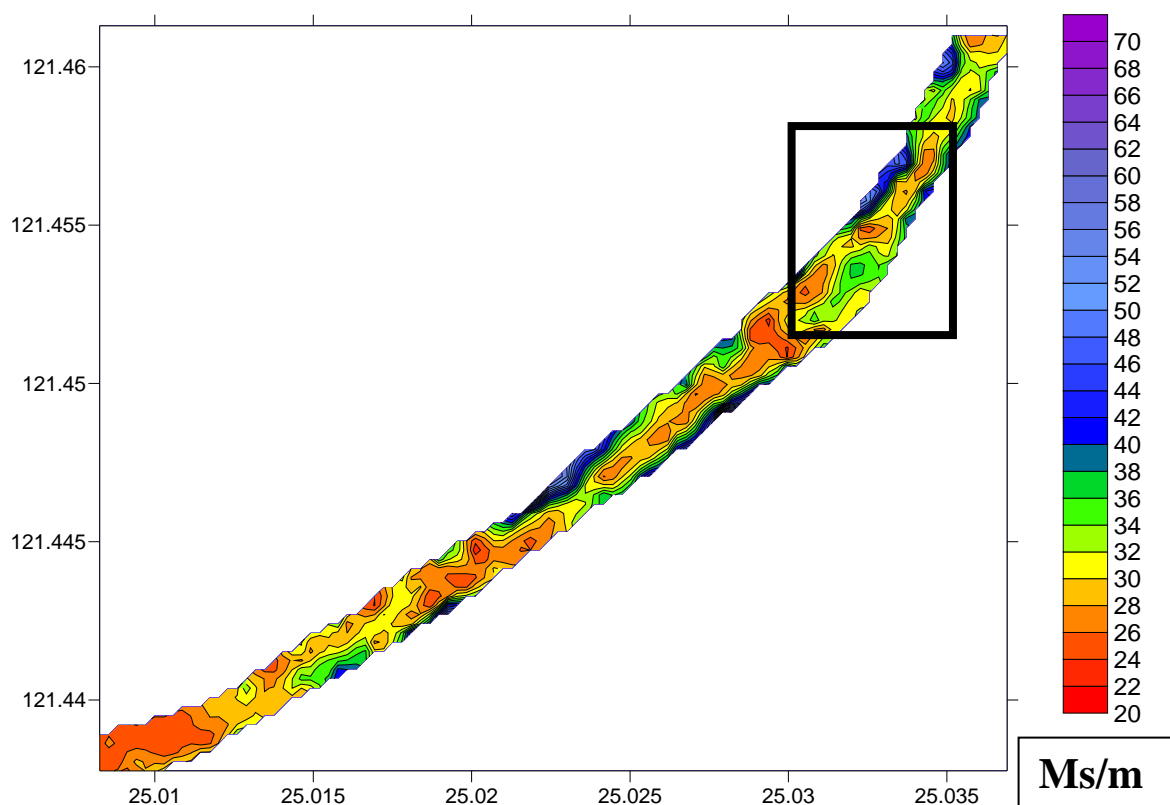


圖 32、上游測區 EM 探測結果(黑框推測為較為異常區域)

根據上下游 EM 探測結果，本探測河流在高速公路橋與台北橋間導電度分布明顯西岸遠高於東岸，上游 EM 探測導電度曲線較為異常且梯度大的地方黑色方框位置，推測接近新海橋至塔寮坑溪間流域。下表為採樣結果。

表 5、底泥採樣分析結果

測站名稱	導電度( $\mu$ mho/cm)	生化需 氧量 (mg/L)	化學需 氧量 (mg/L)	Pb(mg/L)	Cr(mg/L)	Cu(mg/L)	Zn(mg/L)	Ni(mg/L)
塔寮坑溪	806	33.7	110	0.01	0.23	0.91	0.39	0.41
新海抽水 站	479	31.3	87.5	ND	0.01	0.01	0.04	<0.005
新海大橋	319	3.6	16.8	ND	0.01	0.03	0.04	0.03

故選擇此區域施作 CRP 與透地雷達法了解此處地下環境形貌。



#### 4.4.3 透地雷達探測結果

塔寮坑溪口

新海抽水站

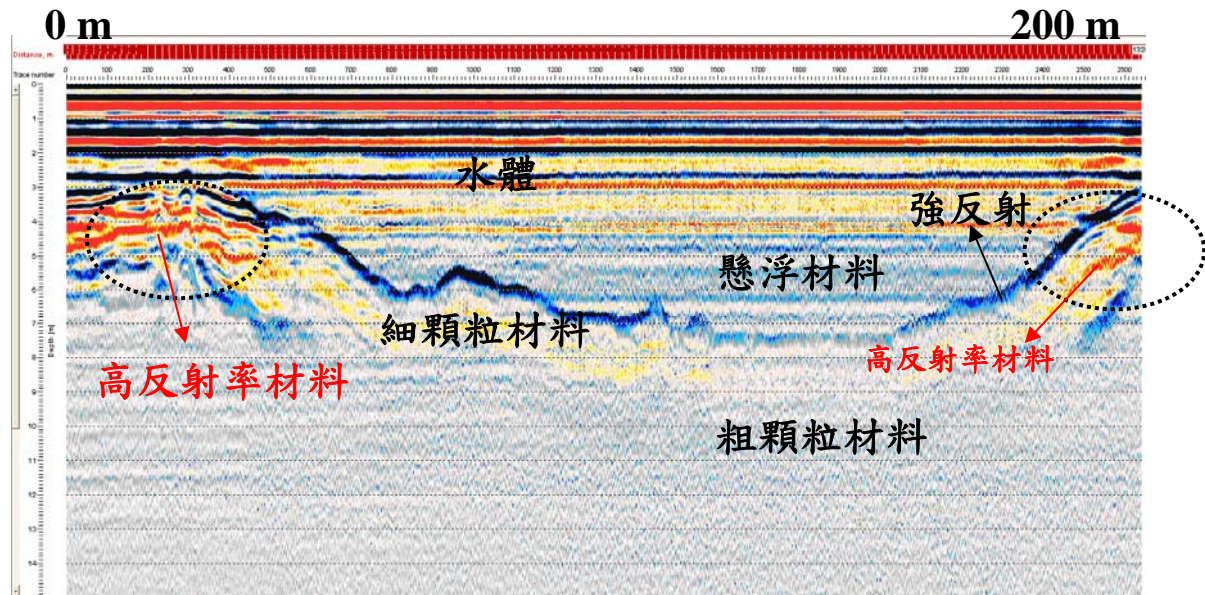


圖 33、新海段透地雷達施測結果圖

本研究使用加拿大系統 EKKO PRO 50Mhz 天線施測，激發電壓 1000V，Sampling Interval 為 1600，疊加次數為 8 次，天線間距 1 公尺，使用美國 Trimble 公司圓盤型 GPS 天線進行定位。施測位置由西向東施測，起點為塔寮坑溪口向新海抽水站。測線長度總長為 200 公尺，可信深度約 10 公尺。由圖 33 知整體透地雷達剖面由深度可以分為四層，第一層為水體深度約在 3-4 公尺，第二層為懸浮材料與水體混合厚度 1.5-2 公尺。夾在河床底部強反射與水體間之過渡帶。第三與第四層則在透地雷達強反射以下之河床材料。在測線起點位置深度約在 3-6 公尺出現一紅色強反射高振幅，測線尾段亦出現相同物理性質之材料，但強度明顯較低。與採樣結果相符合，推測此處地層材料含有重金屬，所以出現金屬般之強反射。此強反射愈往河床中段愈不明顯。





圖 34、透地雷達現場施測照片

#### 4.4.4 水上連續性地電阻掃描法(CRP)探測結果

本計畫利用路上地電阻法施測原理，將電纜線裝置在船的尾端，利用船的動力拖曳纜線，利用超高取樣率設備，每次收取八筆資料，而合成一連續性剖面。由於拖曳式連續剖面施測有別於路上施測，根據本研究建議使用偶極\_偶極法(Dipole-Dipole Array)施測，可快速得到解析度高之電性剖面。其特性施測時電流極 A 及 B 與電位極 M 及 N 各據一方，AB 與 MN 間有一段距離，AB 及 MN 可在一直線上或不在一直線上，非常適用於水上施測。由於 CRP 此在反演計算時必須利用水深資料，所以本設備搭配了簡易型聲納，希望得到淺水深資料，施測示意圖如圖 35 所示：

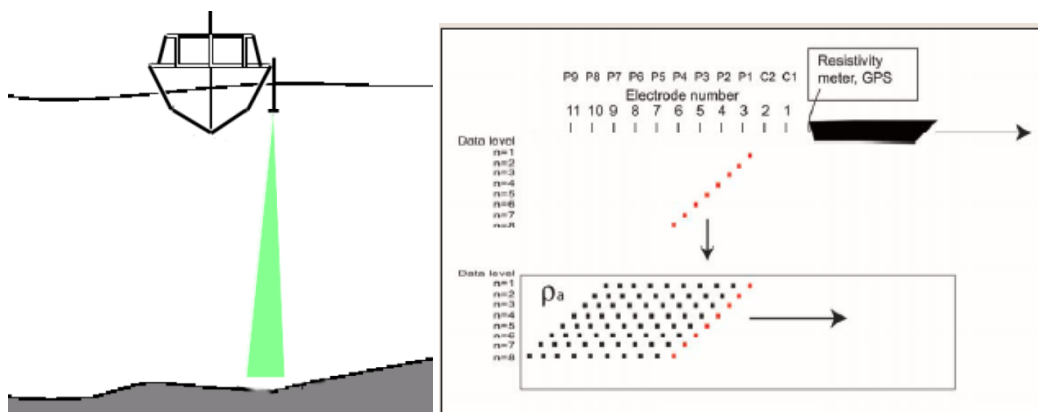


圖 35、水上連續性地電阻掃描法(CRP)施測示意圖

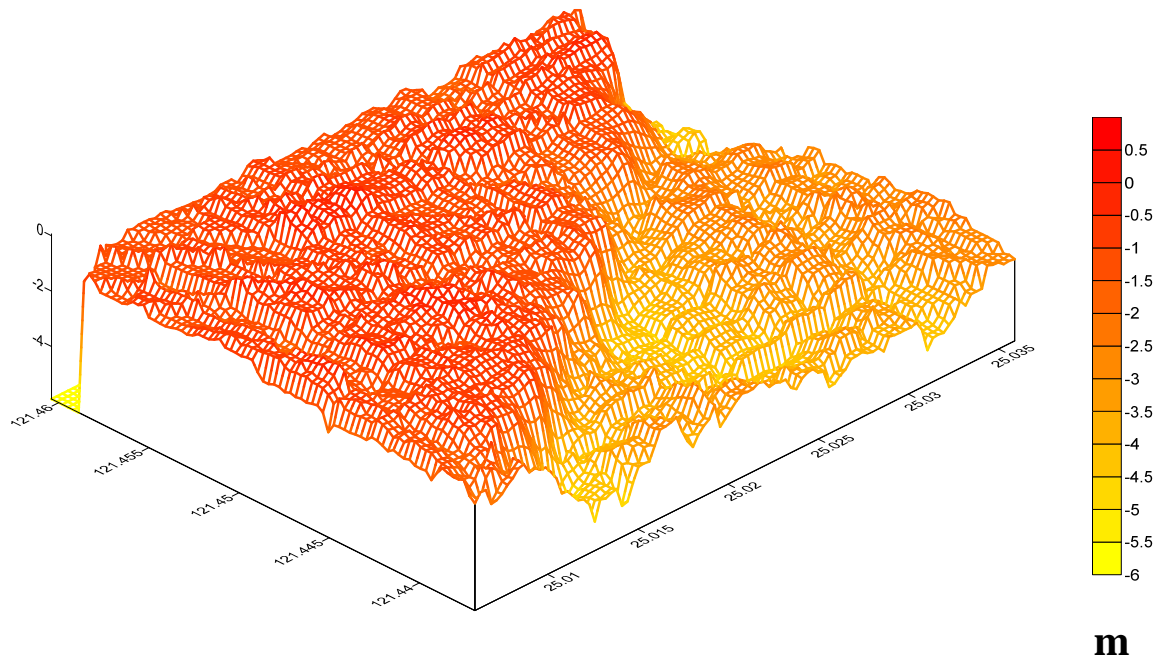


圖 36、研究區域河床等深度圖

圖 36 為研究區域等深度圖，此聲納設備為 Lowrance Electronics 系統，聲納 (Sonar) 為 Sound Navigation Ranging 之縮寫，意思為利用聲波做為導航與測距的工具。聲納偵測目標物的原理，是利用聲納儀器上之發射器 (Transmitter) 的發音設備發出脈波 (Pulse)，再由接收器 (Receiver) 接受目標物之反射波，由於水中聲速約為每秒 1500 公尺，可量測出聲波在水中來回之時間差進而推算出目標物的距離。本計畫採用單音束測深系統是把儀器架在工作母船上，採固定式向下發射，探測距離是以母船作為基向下探測，而測深儀之音鼓 (Transducer) 以電力為動力來源，由電壓大小控制音鼓產生形變，藉此形狀的改變產生壓力波震動水體發出聲波訊號。音鼓之作用除發射聲波外亦接收反射訊號，當音波穿透水體到達海底反射後由音鼓接收，此時音鼓感受水體的震動將波能轉換成電能，即可計算出聲波往返於船底與河床之所需時間，以時間之半乘以聲速即可得知當地河床之垂直水深。明顯看出河床西岸淤積較為明顯，且較容易出現沙洲，東岸河床深度明顯較深。



圖 37、水上連續性地電阻掃描法(CRP)現場施測照片

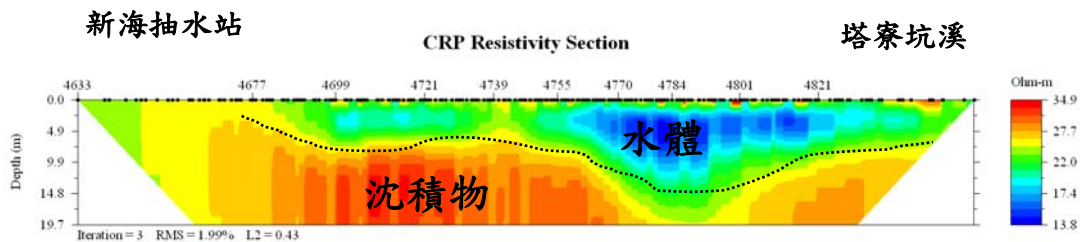


圖 38、水上連續性地電阻掃描法施測成果圖

圖 38 為 CRP 施測結果圖，本剖面綜合聲納系統所量測結果加上 CRP 所量測電阻率成果，綜合反算所到的成果。施測方向為由東向西施測，圖中黑色虛線即聲納系統所繪製底層結果。整體電性地層結果，根據聲納與電阻率曲線分佈知，淺層約 2-8 公尺為水體電阻率，此區域結果明顯與透地雷達結果同，此區域水體電阻率明顯東側高於西側，推測兩側注入河川物質電阻率明顯不同。第一層材料，主要出現在測線中間，推測此材料應與河川回淤沈積物有關。此區域電阻率則與水體電阻率接近，在此區域有出現一高電阻率包，電阻率大約超過 30 歐姆-公尺以上，此異常區應為沙洲或是有機物所造成之高電阻率現象。超過此層至第二材料層，電阻率在左右岸則呈現明顯不同，東岸呈現相對高電阻率材料所組成電阻率大約在 30-35 歐姆-公尺，而水道中間至左岸呈現相對低電阻率材料組成。建議在此兩處採取樣本來釐清是否有受到污染的潛勢。採樣結果與透地雷達方法成果相當吻合。

## 第五章 主要發現與結論

### 5.1 地球物理井測於污染調查

本研究利用地電阻法井測與透地雷達井測兩種方法，目的是在傳統地球物理調查後，以清楚描繪出污染傳輸路徑，或是補足傳統調查方法深度不足的問題。以調查案例一，利用群井地電阻調查技術，可完整描繪出污染物容易匯集區域，利用三維實測資料展現出污染流動路徑，由於非模擬結果，相關地層資訊亦可提供建立水文地質模型，而描繪出真實地層構造。另在使用地電阻井測時，建議使用三極與四極法進行資料收集，因為井測電極在地層中，幾何位置以不同於地表施測位置，電流極與電位極的排列會讓二極法施測時，量測出現不準確現象，且容易量測之電位差非真正地層電位差，而是自然電位，此結果容易造成誤判。

透地雷達井測主要是補足傳統調查方法深度不足之資訊，且可利用設井位置，描繪出污染從何處匯集。此種方法主要是利用跨孔或是單孔方式調查。本研究主要是利用跨孔方式，進行雷達井測調查之適用性評估，以本研究案例知，透地雷達井測利用 MOG 探測方法可清楚描繪出污染物在地層中流動之路徑。建議使用透地雷達井測時，建議使用斷層掃描方式之探測方法，如 MOG 與 VRP 探測方法，盡量不要使用 ZOP 探測方法，因為 ZOP 法為等間距調查技術，資料點少，且只點取直接波位置，不易掌握地層污染物資訊。如果純粹調查地層材料分佈，此種方法是最快速且經濟的方式。

綜合地電阻井測與透地雷達井測使用時機，例如在工業區探測污染範圍時，路上地球物理探測位置主要是在公有道路上，無法明顯界定出污染方向，建議在此時使用地球物理井測。如果是舊設井且井深在 20 公尺內，建議使用透地雷達井測，且使用 VRP 法，單井 360 度旋轉施測，以界定出污染物傳輸路徑。本方法以試用在含氯工廠探測計畫，成功界定出污染位置與方向，並公告污染行為人。而新設井且井深超過 10 公尺，污染範圍較大者，建議使用地電阻井測，且井深與兩井間距離建議大於 1.5 倍可壓抑雜訊，增加施測資料可信度。最佳資料解析度為二分之一電極間距。

## 5.2 地球物理法於河床沈積物調查

綜合感應電磁波法(EM)、透地雷達法(GPR)與連續性地電阻掃瞄法(CRP)結果知：推測本研究區域河床沈積物主要為砂質地層，含泥量甚低。且河床深度東西兩岸明顯不同，河床深度西岸明顯比東岸深。沈積物電阻率分佈亦不相同，可檢測出新海抽水站至四汴頭抽水站間，東西兩側沈積物電阻率出現明顯變化。需要進行進一步調查工作。

本研究目的在提供河床底泥調查一個快速且經濟的粗篩工具。因為河床沈積物採樣要一定困難地方，因為採樣深度因採樣機具架設受限且費用昂貴，所以利用兩階段水上地球物理調查是可以將點資料擴及至面資料，可以將採樣點設置在高潛勢區域上。

兩階段水上地球物理調查：

- (一) 第一階段利用水上感應電磁波(EM)探測技術，將施測區域作全範圍沈積物導電度調查，繪製導電度異常平面圖。並利用少許採樣進行資料校正與率定使用。
- (二) 第二階段利用感應電磁波(EM)率定結果，選擇高潛勢區域進行水上透地雷達(GPR)及連續性地電阻掃瞄法(CRP)兩種方法，目的在得到真實電阻率電性地層分佈與高反射率及異常界墊常數物質分佈，提供有重金屬污染及有機物匯集區域。提供業務單位進行採樣驗證。另透地雷達結果提供 0-10 公尺高解析度資料，而深度超過 10 公尺以上地層資訊則需要連續性地電阻掃瞄法(CRP)提供，此兩種方法相輔相成，缺一不可。

## 參考文獻

1. 董倫道、梁敬豪、楊潔豪、陳平護、陳洲生，1995，台灣地下水觀測網第一期計畫水文地質調查研究及建檔 83 年度報告—地球物理探側及應用，中央地質調查所，共 91 頁。
2. 環保署，1998，淡水河體環境分析研究，3-20 頁。
3. 楊莫雄、吳先琪、楊平世，1998，河川底質監測調查技術研究，EPA-87-E3L1-03-02。
4. Binley, A., Winship, P., Middleton, R., Pokar, M. and West, J, 2001, High resolution characterization of vadose zone dynamics using cross-borehole radar. *Water Resources Research*, 37, 2639-2652.
5. Binley, A., Winship, P., West, L.J., Pokar, M. and Middleton, R, 2002, Seasonal variation of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles. *Journal of Hydrology*, 267, 160-172.
6. Binley, A. and Beven, K., 2003, Vadose zone flow model uncertainty as conditioned on geophysical data. *Ground Water*, 41, 119-127.
7. Binley, A., Cassiani, G. and Winship, P., 2004. Characterization of heterogeneity in unsaturated sandstone using borehole logs and cross-borehole tomography. In: BRIDGE, J.S. & HYNDMAN, D.W. (eds) *Aquifer Characterization by SEPM*. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, OK, 129-138.
8. Bowling, J. C., A. B. Rodriguez, D. L. Harry, and C. Zheng, 2005, Delineating alluvial aquifer heterogeneity using resistivity and GPR data, *Ground Water*, 43(6), 890-903.
9. Day-Lewis F.D., Lane J. W. Jr., Harris J.M. and Gorelick S.M, 2003, Time-lapse imaging of saline tracer tests using cross-borehole radar tomography, *Water Resources Research* 39 (10), 1290, doi:10.1029/2002WR001722.
10. Goes, B.J.M. and Meekes, J.A.C, 2004, An Effective Electrode Configuration for



the Detection of DNAPLs with Electrical Resistivity Tomography, TNO – Netherlands Institute of Applied Geoscience (TNO-NITG), P.O. Box 80015, 3508 TA Utrecht, Netherlands, JEEG, 9(3), 127-141.

11. Grégoire, C. and Joesten, P.K., 2006, Use of borehole radar tomography to monitor steam injection in fractured limestone. European Association of Geoscientists & Engineers. Near Surface Geophysics, 2006, 355-365.
12. Greenhouse, J., Brewster, M., Schneider, G., Redman, D., Annan, P., Olhoeft, G., Lucius, J., Sander, K. and Mazzella, A., 1993, Geophysics and solvents: The Borden experiment.[http:// segdl.org/](http://segdl.org/)
13. Keller, G.V.; Frischknecht, F.C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting, Oxford, 184pp.
14. LaBrecque, D.J., 1989, Cross-borehole resistivity modeling and model fitting. Ph.D thesis, Univ. Utah, Salt Lake City, UT.
15. LaBrecque, D. J. and Yang, X., 2001, Difference inversion of ERT data: a fast inversion method for 3-D in situ monitoring. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 5. 83-90.
16. Loke, M. H., 1999, Time lapse resistivity imaging inversion, Proceedings of the 5<sup>th</sup> Meeting of the Environmental and Engineering European, Em 1, Budapest, Hungary.
17. Niva, B., Olsson, O. and Bluming, P., 1988, Radar crosshole tomography with application to migration of saline tracer through fracture zones, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA) Technical report 88-31, Baden, Switzerland.
18. Niwas, S., and Lima, O. A. L., 2003, Aquifer parameter estimation from surface resistivity data, Ground Water, 41(1), 94-99.
19. Ramirez, A.L., Daily, W.D., and Newmark, R.L., 1995, electrical Resistance Tomography for steam injection and process control: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 0, No.. 1, 39-51.

20. Rubin, Y. and Hubbard, S.S., 2005, Hydrogeophysics, Springer, New York.
21. Schneider, G. W., and Greenhouse, J. P., 1992, Geophysical detection of PCE in a sandy aquifer using resistivity and nuclear logging techniques: in Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP) Proceedings 1992, 619-628.
22. Winship W., Binley, A. and Gomez, D., 2006, Flow and transport in the unsaturated Sherwood Sandstone: characterization using cross-borehole geophysical methods. Departments of Environmental Science, Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK, 219-231.
23. Zheng, C., and S. M. Gorelick, 2003, Analysis of solute transport in flow fields Influenced by Preferential flowpaths at the decimeter scale, Ground Water, 41(2), 142-155.
24. Nasser,M.,Lee,S.,Francisco,A., and Esben,A.,2006, High-resolution geophysical characterization of shallow-water wetlands, Geophysics, V.71,No.4, B101-109.