

行政院環境保護署

103 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

現場底泥電學性質感測貫入器研發

期末報告

主 辦 單 位： 行政院環境保護署

計畫執行單位：國立交通大學／防災與水環境研究中心

計畫主持人：林志平 教授

計畫執行期間：102年11月25日起至

103年11月24日

中 華 民 國 103 年 11 月 印製

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案 計畫成果自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒ 達成目標

☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐ 實驗失敗

☐ 因故實驗中斷

☐ 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☐已發表____篇； ☒未發表之文稿 1 篇； ☒撰寫中 1 篇；☐無

專利：☐已獲得____件； ☐申請中____件； ☒無

技轉：☐已技轉； ☐洽談中； ☒無

其他：(100 字為限)

3. 請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限）

本研究之兩項產出現場底泥電學性質感測貫入器以及TDR現地寬頻複介電度量測技術，前者可協助地球物理方法進行更準確、快速之底泥厚度調查工作，有助對底泥之管理，而該項技術未來亦可進一步應用在河川或水庫泥沙濃度之檢測、山坡地未飽和區含水量監測以及精緻農業管理等跨領域工作上，且此項技術為國內自行研發，將有助於國內產業競爭力之提升；而後者屬於基礎研究工作，其將打破目前尚無良好現地寬頻複介電度量測技術之困境，為眾多複介電度潛在應用問題提供量測工具，不僅具學術價值，亦將帶動不同產業之進一步發展。

中文摘要

由於國內各主要河川於相關法令公告後，每年應至少於豐水期及枯水期各進行底泥定期檢測及品質狀況調查，建立「底泥品質基線資料檔」，以便適時更新河川水體底泥的基線資料檔。相關底泥調查與量測需求，除現有規定之相關取樣標準作業可能受限於取樣空間代表性以及其作業效率，國內外研究計畫均初步建議配合地球物理調查方法，以可大範圍輔助底泥範圍、厚度，甚至污染潛勢等相關特性之調查，但目前其技術限制因子為探測深度以及實際量化(Quantification)方法。本研究的目的是在於發展一現地可直接貫入底泥之感測桿，該量測系統具備容易組裝及操作的特性，有助於探討底泥厚度與對應之電學特性，並配合時域反射技術(Time Domain Reflectometry, TDR)於時域分析的介電度、導電度量測優勢，以及寬頻介電頻譜量測方法研擬，據以作為電學探測結果解讀與量化分析的依據，並延伸至地球物理試驗結合，提供其電學性質參數率定與驗證使用，以可充分達到快速檢測底泥範圍、厚度與對應可能污染潛勢調查。根據現場驗證的經驗，本研究研發之 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器具有高空間解析、可於高導電度環境施作以及現場簡單操作等優點，但根據目前之設計其仍有四點使用限制，其一，在底床為較堅硬之材料時以致無法貫入時，會有約 5 公分的量測盲區，其二，由於其具高空間解析因此其感應量測之空間較小，易受不恰當之貫入影響，其三，對於低視介電度(<35)的量測靈敏度較差，其四，目前不建議在延長桿無側向支撐時使其超過 2 公尺進行貫入，以避免感測器受損。建議未來在本研究基礎上再行加以改善。

Abstract

According to recent regulations, sediment properties of major rivers should be conducted at least once during wet season and dry season to establish the sediment quality data base and update the baseline for each major river. Current standard practice of sediment sampling may be limited in terms of spatial representativeness and working efficiency. Geophysical methods are often suggested to complement sampling for investigation of sediment coverage, thickness, and even pollution potential in large scale. However, current geophysical practice has limited investigation depth and lacks quantification approach. The difference in physical and electrical properties of sediment affects electrical current flow and electromagnetic wave propagation in sediment, providing the basis for the application of geophysical methods in sediment investigation. Therefore, there is a need to better understand the electrical properties of sediments to improve interpretation of geophysical methods. The objective of this study is to develop a field measurement penetrometer that is easy to assemble and operate for measuring sediment thickness and profiling electrical properties. The measurement will take advantages of time domain reflectometry (TDR) technique to simultaneously provide apparent dielectric constant and electrical conductivity estimation by time domain analysis. Wide-band dielectric spectroscopy method will also be developed based on TDR measurement. Penetrometer measurements developed in this study will serve the basis for quantitative interpretation of electrical geophysical method and facilitate fast investigation of sediment coverage, thickness, and pollution potential. According to the experience gaining during field examination, the developed TDR penetrometer can easily provide high space resolution data even in highly conductive environment. However, 4 limitations should be considered in this prototype. First, 5cm blind zone would be in the bottom if the hard-to-penetrated bedrock existing. Second, un-proper penetrating control would influence the results because of the small sampling volume. Third, sensitivity would be lower for measuring apparent dielectric below 35. Last, in case of buckling, the clear section for extending rods should be less than 2m. Further modification is suggested to optimize the TDR penetrometer.

目錄

目錄.....	I
表目錄.....	III
圖目錄.....	III
第一章 前言	1
第二章 研究目的	3
第三章 文獻探討	5
3.1 地球物理方法於底泥調查簡介	5
3.1.1 地球物理方法介紹	5
3.1.2 地球物理方法應用於底泥調查案例介紹.....	7
3.1.3 地球物理方法應用於底泥調查問題評析.....	13
3.2 TDR 量測技術	14
3.2.1 TDR 電學性質量測方法	14
3.2.3 TDR 技術應用之利基與介電頻譜於底泥污染調查之潛力	21
3.2.3 TDR 於底泥應用潛在問題.....	22
3.3 研究重點說明.....	23
第四章 研究方法與過程	25
4.1 研究流程.....	25
4.2 工作進度.....	26
第五章 結果與討論	27
5.1 現場底泥調查用 TDR 貫入器系統建置.....	27
5.1.1 視介電度分析方法改善	27

5.1.2 高解析 TDR 貫入式感測器研發	31
5.2 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器搭配地球物理方法之驗證工作 .	35
5.2.1 現地驗證工作	35
5.2.2 室內全尺度 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器驗證	39
5.2.3 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器與地球物理方法搭配調查 之建議步驟	40
5.3 現地寬頻複介電度量測技術研發	41
5.3.1 改良式現地寬頻複介電度量測技術構想	41
5.3.2 數值方法驗證	44
5.3.3 室內試驗驗證	50
5.4 結論與建議	55
5.4.1 結論	55
5.4.2 建議	56
參考文獻	57
附錄一 申請計劃書進度甘特圖	71

表目錄

表 1 TDR 能量指數法室內試驗規劃	29
表 2 數值模擬驗證規劃表	45
表 3 碾壓土壤寬頻介電頻譜性質室內實驗量測材料參數表	51
表 4 改良式現地寬頻複介電度量測技術室內試驗規劃表	51

圖目錄

圖 1 電阻率影像剖面圖(環保署，2012)	6
圖 2 透地雷達 2D 影像(環保署，2012).....	6
圖 3 電磁探測法平面影像圖(改繪自邱維宣等，2009).....	7
圖 4 應用透地雷達探測方法於美國新罕布夏州鹼氣工廠汞污泥場址河川底泥特性調查成果(Degnan et al., 2009).....	8
圖 5 應用頻率域電磁探測法於美國新罕布夏州鹼氣工廠汞污泥場址河川底泥特性調查成果(Degnan et al., 2009).....	8
圖 6 應用地球物理方法於美國新罕布夏州鹼氣工廠汞污泥場址河川底泥特性調查成果(Degnan et al., 2009).....	9
圖 7 透地雷達於大漢溪新海橋底泥厚度調查調查成果(環保署，2012)	10
圖 8 聲納探測方法於大漢溪新海橋底泥厚度調查調查成果(環保署，2012)	10
圖 9 水上直流電阻法於大漢溪新海橋底泥厚度調查調查成果(環保署，2012)	11
圖 10 應用地球物理方法於大漢溪底泥厚度調查調查成果(環保署，2012).....	12
圖 11 TDR 量測系統示意圖	14
圖 12 TDR 感測器型式: a) 同軸式；b) 多棒式；c) 貫入式 (Lin et al., 2006)	

.....	15
圖 13 典型 TDR 量測波形.....	16
圖 14 TDR 波傳模擬波譜法 (Spectral method)	19
圖 15 TDR 頻率相位速度分析方法所需之反射特徵訊號(鐘志忠, 2008)	20
圖 16 TDR 頻率相位速度分析結果(鐘志忠, 2008).....	20
圖 17 多種商品化 TDR 感測器	22
圖 18 高導電度材料之 TDR 量測波形(修改自 Chen et al., 2007).....	23
圖 19 研究流程圖	25
圖 20 工作進度甘特圖	26
圖 21 TDR 能量指數 T_p 之分析說明	27
圖 22 室內試驗正規化 TDR 能量指數 T_p 與體積含水量關係圖(林俊宏, 2013)	28
圖 23 TDR 能量指數法室內試驗用感測器設計圖與實體照.....	29
圖 24 TDR 能量指數與視介電度關係之土壤種類影響.....	30
圖 25 TDR 能量指數與視介電度關係之水導電度影響.....	30
圖 26 TDR 多叉波導貫入式感測器 (Lin et al. 2006a; 2006b)	31
圖 27 TDR 串接貫入感測器 (楊士輝, 2011).....	32
圖 28 加強型 TDR 串接貫入感測器(鄭志峰, 2013).....	32
圖 29 螺旋式探針感測器 (Vaz and Hopmans 2001).....	33
圖 30 高空間解析度貫入感測器.....	34
圖 31 高空間解析度貫入感測器測試訊號.....	34
圖 32 高空間解析度貫入感測器延長桿.....	34
圖 33 高空間解析度貫入感測器 nT_p 與視介電度標定結果	35

圖 34 現地驗證測試場址與試驗規劃示意圖	36
圖 35 現地驗證現場施作情形	36
圖 36 TDR 高空間解析度貫入器現地量測成果	37
圖 37 透地雷達現地探測結果	38
圖 38 透地雷達現地探測結果(TDR 資料輔助深度轉換)	38
圖 39 水上地電阻探測結果	39
圖 37 TDR 高空間解析度貫入器室內全尺度試驗成果	40
圖 38 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器與地球物理方法搭配調查之建議施 作流程	41
圖 39 TDR 簡化多段式傳輸線電路理論模型	43
圖 40 TDR 量測訊號數值模擬模型：(a)物理模型(b)電路模型	45
圖 41 數值模擬介電頻譜量測結果：Known 自來水，量測材料(a)空氣，(b) 正丁醇，(c)乙醇，(d)Soil 1，(e)Soil 2	48
圖 42 數值模擬介電頻譜量測結果：Known 純水，量測材料(a)空氣，(b)正丁 醇，(c)乙醇，(d)Soil 1，(e)Soil 2	49
圖 43 數值模擬介電頻譜量測結果：Known 空氣，量測材料(a)自來水，(b) 純水，(c)正丁醇，(d)乙醇，(e)Soil 1，(f)Soil 2	50
圖 44 改良式現地寬頻複介電度量測技術室內試驗感測器設計圖	52
圖 45 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 純水，量測材料(a)空氣，(b)乙醇	53
圖 46 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 鹽水，量測材料(a)空氣，(b)乙醇	54
圖 47 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 自來水，量測材料(a)空氣，(b)乙 醇	54

圖 48 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 空氣，量測材料(a)純水，(b)鹽水，
(c)自來水，(d)乙醇..... 55

第一章 前言

「底泥」係水體中因重力作用而沉降堆積於水域底部，由砂礫、黏土、粉土及其它物質混合而成的軟質混合物；由於具污染複雜性與長期累積性、與水中生物直接接觸、易透過生態系及食物鏈傳布、整治工作難度高不易周全，因此過去整治或濬渫都缺乏可判準之依據。

為因應《土污法》修法後的授權與管理執行，環保署於 100 年 9 月 8 日發布『土壤底泥及地下水污染物檢驗測定品質管制準則』，11 月起更公告『底泥品質指標、分類管理及用途線制辦法』及『各目的事業主管機關定期檢測底泥品質狀況及申報備查作業辦法』二項草案，未來有關底泥定期檢測及品質狀況調查的實施，在相關法令公告施行的最初三年，各主要河川每年應至少於豐水期及枯水期各檢測一次，以建立「底泥品質基線資料檔」，依據此普查所得基線資料，規畫為期四年的「污染潛勢區細部檢測調查計畫」；完成之後，每五年必須普查一次，再釐定新的「污染潛勢區細部檢測調查計畫」；如此週而復始，以便適時更新河川水體底泥的基線資料檔。

基於上述相關底泥調查與量測需求，有鑑於現有規定之相關取樣標準作業可能受限於取樣空間代表性以及其作業效率，因此透過更具效率、可快速且大範圍施作之地球物理調查方法(Degan et al., 2009; Bates, 2011;環保署, 2012)作為輔助調查底泥範圍、厚度以及相關特性之工作，成為目前調查工作主要發展之趨勢。然而，雖然地球物理方法可有效作為輔助調查工作，但受限於施測方法本身，在其探測深度以及實際定量上受到一定的侷限。

底泥為多相孔隙介質，包括顆粒固相及孔隙液相，其整體電學性質（包括複介電常數與導電度）主要受到液相的含量與電性性質所影響。常見的污染物，如重金屬、非水相液體（Non-Aqueous Phase Liquid）等，會改變土壤孔隙水的特性，進而影響土壤整體的電學性質(Ajo-Franklin et al, 2006; Moroizumi and Sasaki, 2008; Son et al, 2009)，因此做為調查應用也以電磁特性為基礎之地球物理方法為主，例如透地雷達、電磁法以及直流電阻法等，欲克服其探深與定量之問題亦由此下手。具有同時量測電磁波速與導電度能力之電磁波時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)無疑是最佳方式。

TDR 為一重要的電學性質量測技術，以纜線及導波器(探針)進行探測，又稱為纜線雷達（Cable Radar）。一般 TDR 探針僅能量測表層土壤之電磁波

速，由分析電磁波在感測器段的視走時（Apparent Travel Time）決定視電磁波速，其有效頻率因系統配置及底泥組成物不同而異，一般而言在數百 MHz 的程度(與底泥調查用之透地雷達頻率接近)。TDR 導波器若採複合式設計，將金屬導體透過絕緣材構成圓柱體，形成可量測不同深度的 TDR 貫入器(Vaz and Hopmans, 2001; Persson and Wraith, 2002)，將可有效提供隨深度變化之電學性質剖面，作為地球物理方法定量上修正之依據。但目前 TDR 在視電磁波速的決定上，受限於時域之分析，其至少需要 10 公分的導波器長度，量測結果是 10 公分的某種權重平均，這將造成量測結果在空間解析度上恐無法達到底泥調查的需求。

此外，底泥受污染後，污染物對其電學特性的影響在複介電度(Complex Dielectric Permittivity)中有更細部的呈現，透過對污染土壤的介電特性之研究，已可針對複介電度與污染成分的關係進行模擬(劉豪睿等，2010)，而可望進一步應用在現場污染物辨識上。但現有的寬頻介電特性實驗室量測技術，量測儀器複雜，試體準備不易，不適合例行性的試驗，且不易延伸拓展為現地量測之技術。TDR 具有量測寬頻複介電度之潛力，但目前現地感測器的訊號分析侷限於時域的視介電度，尚無法提供寬頻的介電特性。

因此，本研究將針對 TDR 貫入器在空間解析度上進行提升，研發高空間解析度之底泥用貫入器；此外，將針對寬頻複介電度之量測研發具現地應用潛力之量測分析方法，為未來進一步應用至污染物辨識提供技術工具。最後，延伸此技術至地球物理方法試驗的結合，提供其電學性質參數率定與驗證使用，以可達到檢測底泥範圍、厚度與對應可能污染潛勢調查。

第二章 研究目的

底泥的電學性質為調查極為重要的資訊，其提供地球物理方法資料判釋的基準，並可望更進一步作為污染物調查之關鍵指標，據此，本研究的目的有二：

1. 發展現地可直接貫入底泥之高空間解析時域反射技術(Time Domain Reflectometry, TDR)感測桿。該量測系統需具備容易組裝及操作的特性，有助於探討底泥厚度與對應之電學特性(介電度、導電度)。

2. 以時域反射技術為基礎，發展具現地量測寬頻複介電度之量測方法，以提供未來進行底泥可能污染調查與監測之需求。

第三章 文獻探討

3.1 地球物理方法於底泥調查簡介

3.1.1 地球物理方法介紹

地球物理方法是一種非破壞性的檢測技術，其可快速且大量地在檢測物體表面上或孔內進行施作，因此近來年已漸漸廣泛應用至土木、地工、環境與水利工程等領域，在應用上，地球物理方法主要於施測後獲得檢測物體之不同物理量，而後由不同問題所反應之物理量變化間接推估工程問題之解答。

目前地球物理探測技術可測得之物理量大致有電阻率、介電度、電容、磁化率、重力、彈性波速以及地層反射性等，由此些不同之物理量以及不同之分析理論，已成熟可應用之地球物理探測技術有直流電阻法(Electrical Resistivity Method)、自然電位法(Self-potential method)、感應極化法(Induced Polarization Method)、透地雷達探測法(Ground Penetrating Method)、電磁探測法(Electromagnetic Method)、重力探測法(Gravity Method)、彈性波層析成像法(Elastic Waves Tomography Method)、表面波震測法(Seismic Surface-wave Method)以及反射震測法(Seismic Reflection Method)等九種，這些方法主要有於表面上進行施測的非破壞性方法，亦可應用於孔內施測，而針對底泥之調查，又以直流電阻法、透地雷達探測法以及電磁探測法等電學參數量測技術為主要應用。本小節將就此三種方法進行基本介紹與說明。

直流電阻法：直流電阻法是在地表上利用兩根電極棒將直流電灌入地下，而後在地表上量測另兩根電極棒間的電壓差，此法是量測大範圍的電阻值，此電阻與土層的組成、飽和度以及土層孔隙中流體的導電度有關，透過反算技巧可獲得電阻之深度 2D(如圖 1 所示)或 3D 剖面。若將電極進行適當處理，可使電極漂浮於水面並使用船隻拖曳進行水上量測，可有效獲得水體下之電阻分布狀況。

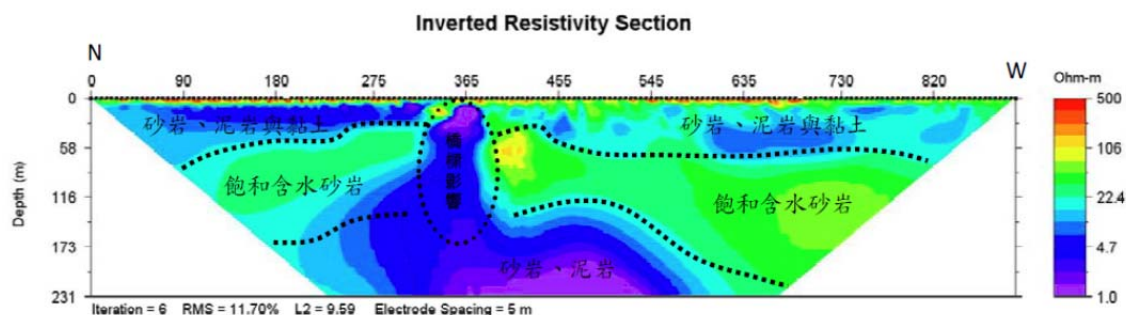


圖 1 電阻率影像剖面圖(環保署，2012)

透地雷達探測法：透地雷達主要可提供測線地表下高解析度之二維反射面影像(如圖 2 所示)，其檢測原理是利用發射天線發出高頻電磁波(10-3000MHz)用以穿透地層或被探測體，電磁波在兩個不同電性介質的界面(如：地層層面、空洞與岩層等等)產生反射訊號，再由接收天線接收反射訊號進而分析處理。將多個 2D 影像依空間位置整合後可得 3D 之立體影像，由所得之地層構造可應用於地層、壩體內部異常區域偵測，亦可應用於底泥厚度調查。透地雷達檢測技術施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，惟其探測深度受導電環境(如黏土礦物)影響甚鉅，一般小於 10 公尺，且其不易估計電磁波速以得到構造深度。

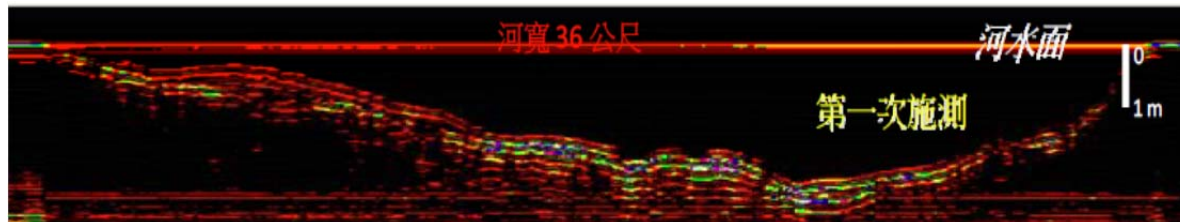


圖 2 透地雷達 2D 影像(環保署，2012)

電磁探測法：電磁探測法是在地表利用線圈使其通過一週期性電流，當電流在降至零的過程中，根據法拉第定律(Faraday's Law)會使得在線圈中所產生的磁通量有所變化，而產生有電磁波向下傳遞，地層的材料亦會受到此電磁波所產生的磁通量變化，而又引發另一個電磁發向上下傳遞，當位於地表的接收線圈感應到此感應電流，便可量測得其感應電位，而此一感應電位與地層材料之電阻率或導電率相關，透過接收此一電位值便可獲得地表下電阻率之分布情形，對於探測之結果可直接以所測得之電壓平面分布進行判釋(如圖 3 所示)，或在必要時可將所得之電壓值換算為視電阻率再進行剖面之反算。

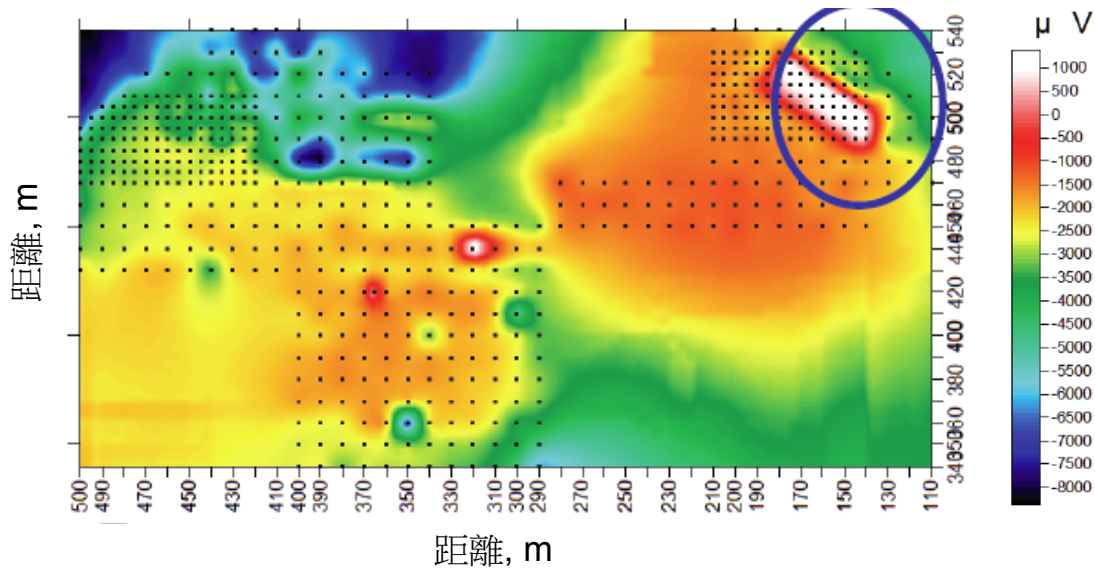


圖 3 電磁探測法平面影像圖(改繪自邱維宣等，2009)

3.1.2 地球物理方法應用於底泥調查案例介紹

美國新罕布夏州鹼氯工廠汞污泥場址河川中底泥分布狀況調查：美國地質調查所（USGS）受美國環保署（U.S. EPA）於超級基金場址所列管之新罕布夏州鹼氯工廠汞污泥場址，利用地球物理方法（包括有：水上透地雷達以及頻率域電磁波法）進行河川中底泥分佈情況調查(Degnan et al. 2009)。

水上透地雷達之結果作為底泥厚度以及底泥可能顆粒性質之判釋，如圖 4 所示，透過對透地雷達影像反射訊號的辨識，可對砂礫介面、卵礫石介面以及河床底岩進行定位；而頻率域電磁波法之結果則可將多頻率的結果進行反算後獲得現地電阻率分布(如圖 5 所示)，而後透過現場取樣室內試驗之方式以現地導電度與試驗室導電度進行比對，輔助底泥顆粒性質與底泥深度位置之確認。

其綜合調查成果如圖 6 所示，其可在平面上將礫石、底岩區以及細粒料區標示出來，並建立不同材料的深度剖面位置，有效量測出河床底部深度與底泥厚度調查，並簡單分析材料的特性與粒徑的差異，提供未來整治所需之基本資料。

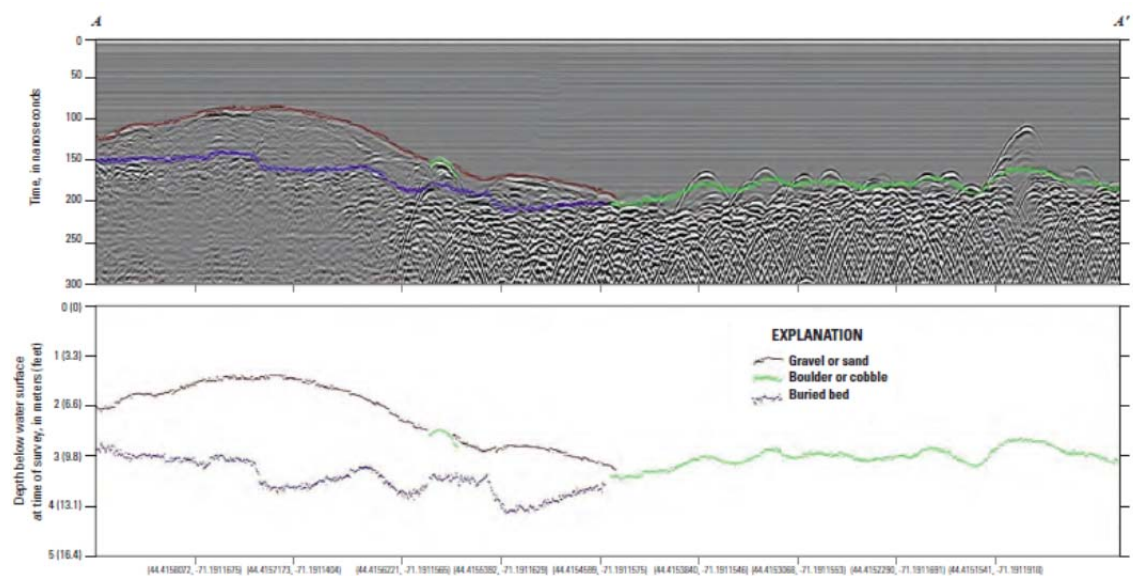


圖 4 應用透地雷達探測方法於美國新罕布夏州鹼氯工廠汞污泥場址河川底泥特性調查成果(Degnan et al., 2009)

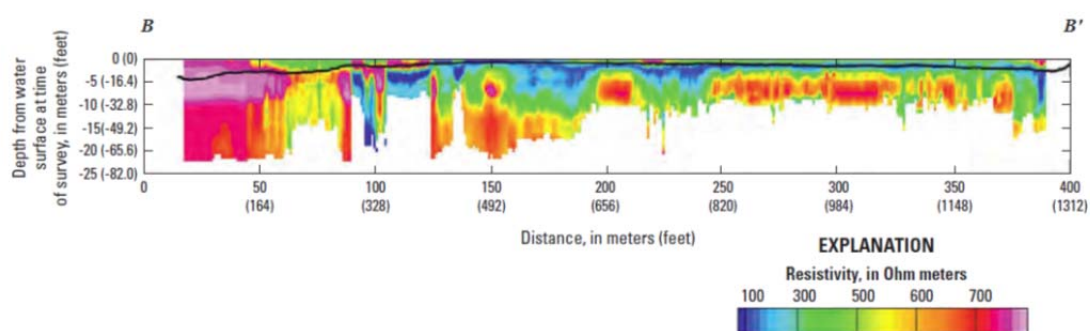


圖 5 應用頻率域電磁探測法於美國新罕布夏州鹼氯工廠汞污泥場址河川底泥特性調查成果(Degnan et al., 2009)

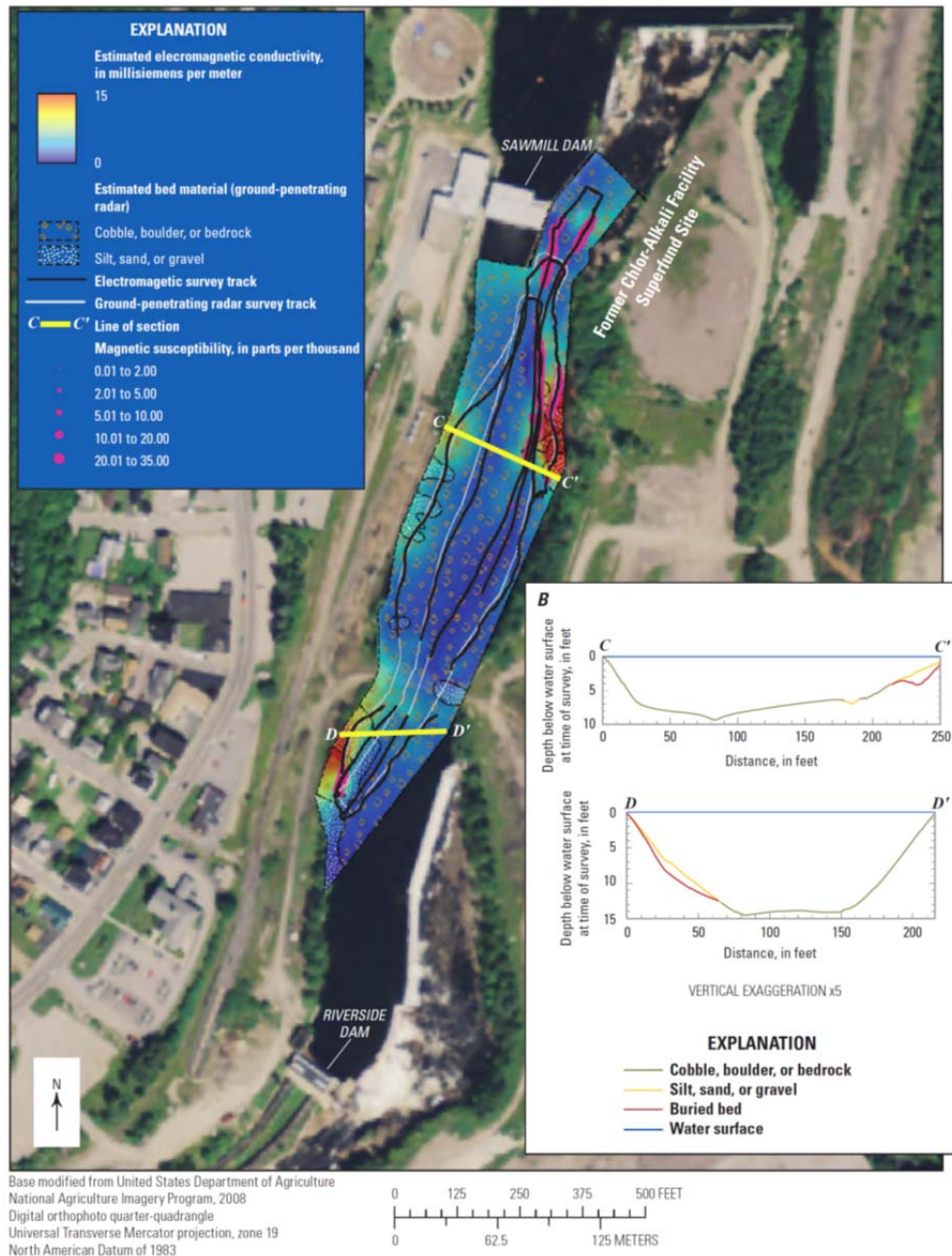


圖 6 應用地球物理方法於美國新罕布夏州鹼氣工廠汞污泥場址河川底泥特性調查成果(Degnan et al., 2009)

大漢溪新海橋底泥厚度調查：環保署(2012)為測試不同地球物理方法應用於底泥厚度調查之適用性針對直流電阻法、透地雷達探測法以及聲納系統進行測試，測試場址位在大漢溪新海橋上游，由右岸施測至左岸，測線長度約 250 公尺。

透地雷達斷面結果如圖 7 所示，上方紅-藍線條為在水中產生水波反射

的現象，往下之紅-藍線條，研判為遇質地相同地層之反射現象，在該線條以下為同一地層(第二層材料)。另外在圖中左半側第二層材料上方，出現了一層不明顯的地層材料，研判此應為細顆粒第一層材料，或是因調查擾動而起的懸浮層。

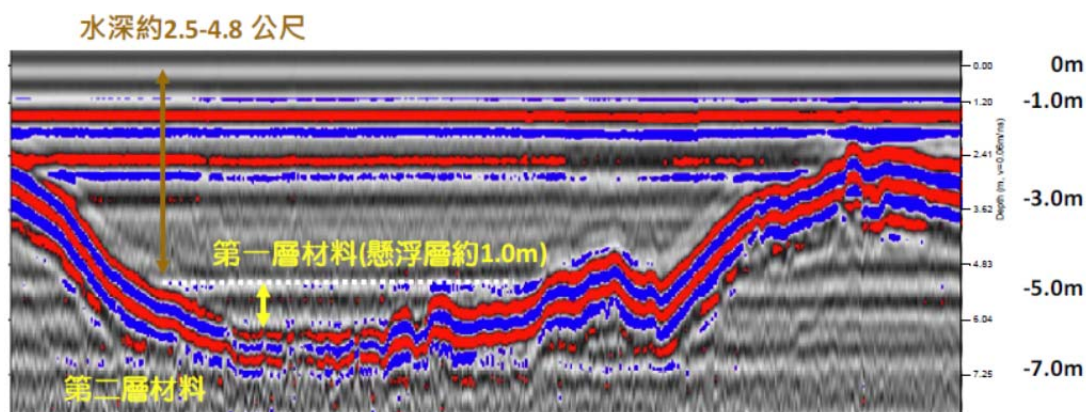


圖 7 透地雷達於大漢溪新海橋底泥厚度調查調查成果(環保署，2012)

聲納法斷面資訊如圖 8 所示，因潮差關係使水深與透地雷達相差約 1 公尺，河床底部黑色虛線上方有一處反射訊號，研判應為細顆粒懸浮層，或是因施作過程中受擾動揚起之底泥，最大厚度約 0.7m。反射訊號過了黑色虛線後，訊號減弱一路至 5 公尺後，出現一強反射面，在此之間的夾層研判第二層材料，且河左岸厚度遠高於右岸。過了 5 公尺深度後應為顆粒較大且含砂較多的第三材料層，惟震測訊號已衰減，第三層分布不具意義，但仍可視為原始河床面。整體而言，施測結果與透地雷達成果相近。

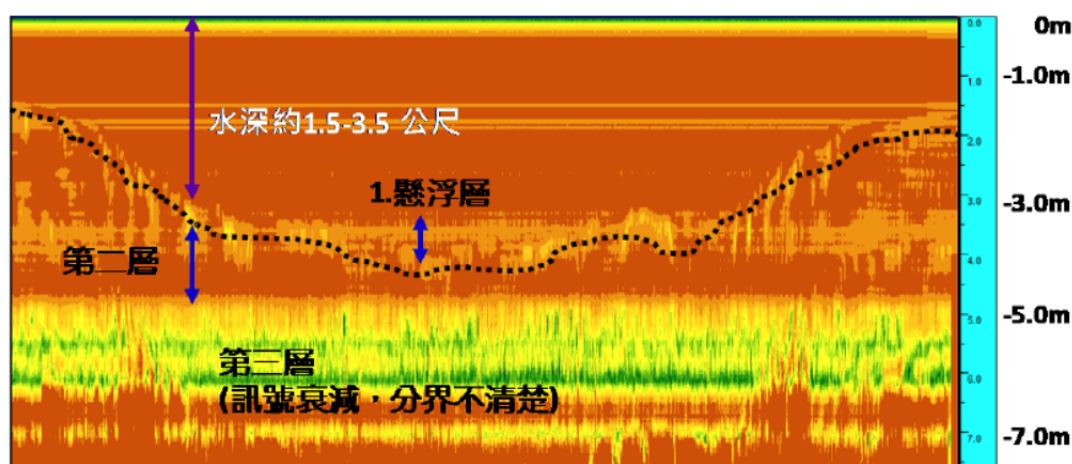


圖 8 聲納探測方法於大漢溪新海橋底泥厚度調查調查成果(環保署，2012)

水上直流電阻法探測結果如圖 9 所示，由圖面資訊雖可研判水體與淺層

底質所受孔隙水影響的狀態，但此斷面電阻結果的整體差異性並不大，在電阻訊號判別上的意義，皆可視為同一質地而無法進行底泥厚度之判釋。

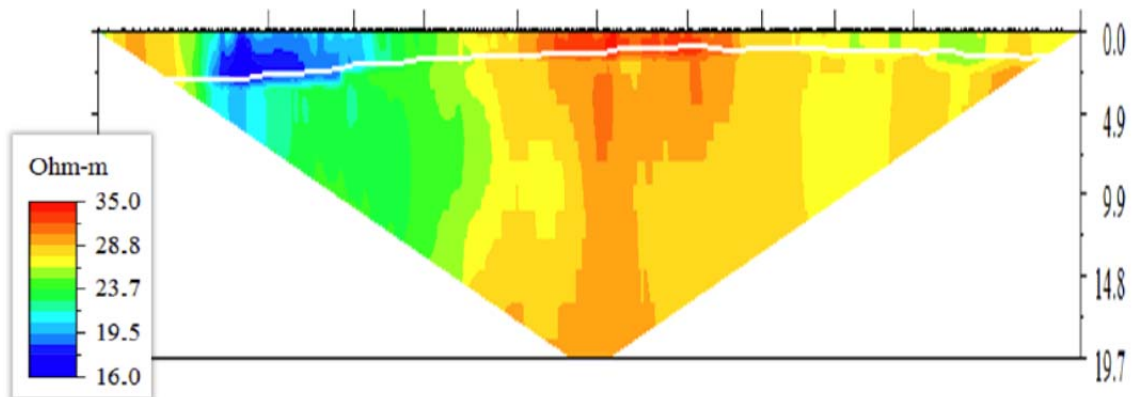


圖 9 水上直流電阻法於大漢溪新海橋底泥厚度調查調查成果(環保署，2012)

整體而言，新海橋測線透地雷達與聲納探測結果具有一致性，可有效對底泥厚度進行判釋，但反觀水上直流電阻法，由導電度並無法有效的分辨底岩與底泥的差異，為未來應用上需注意之處。

大漢溪台北橋下游底泥厚度調查：環保署(2012)為測試地球物理方法應用於底泥厚度調查之鑑別度，於台北橋下游處進行地球物理方法(包括透地雷達與聲納)以及鑽孔取樣之比對，此鑽探取樣過程應用岩心管取樣方式，於岩心取樣器內部預先放入透明之 PVC 內視管，當到達預定鑽探深度時，採用靜壓法將採樣器往下壓，使土壤直接進入採樣器內之透明 PVC 管，取得不擾動之土壤樣品，期望盡可能保留淺層底泥及其上方水樣。鑽探結果顯示在施作之斷面處之底泥層呈現灰色，其厚度約為 0.3~0.6m 之間。

施作斷面之底床地形測量，透地雷達與聲納探測結果如圖 10 所示，其中聲納法施作潮位較低，因此水深較淺。由河床底部分布來看，透地雷達左側較崎嶇，可能是受到水深及鹽度干擾所致，但整體趨勢仍與測量結果相近，聲納法則是與測量結果一致；如再以底泥層分布來看，透地雷達顯示約有 30~50cm 之底泥層存在，聲納法顯示 30~70cm 之底泥層存在，分層現象與鑽探結果一致，這顯示此二種地物技術的確具有探測底泥厚度的能力。

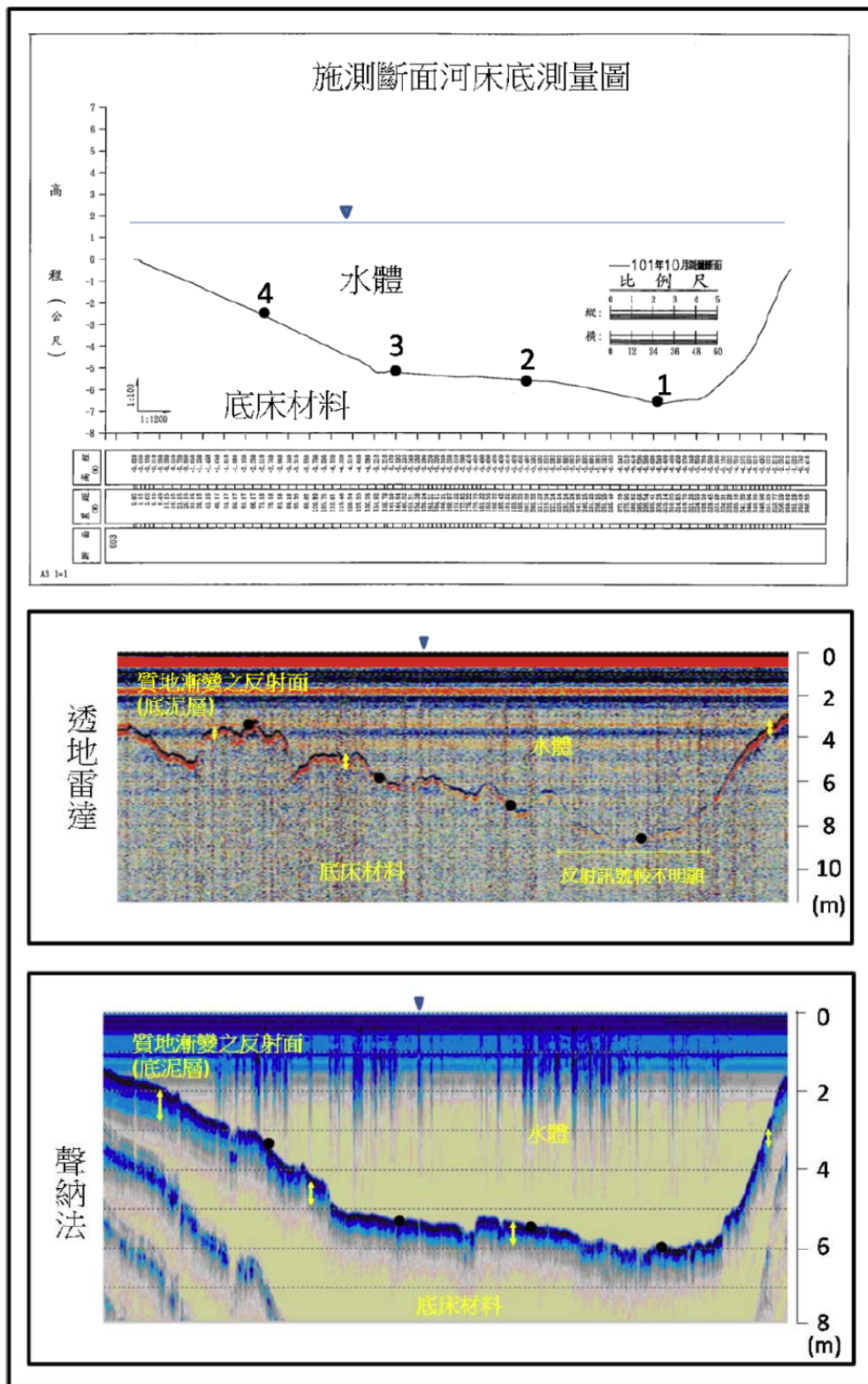


圖 10 應用地球物理方法於大漢溪底泥厚度調查成果(環保署，2012)

3.1.3 地球物理方法應用於底泥調查問題評析

透過前一小節中的案例可初步了解目前地球物理方法應用於底泥調查的狀況，並可針對透地雷達、聲納探測以及直流電阻法歸納出幾點問題：

在**透地雷達**之應用上，除了方法本身之限制外(如高導電度情況下之探深不足、高頻天線探深淺、低頻天線解析度不足等)，透地雷達探測結果之原始資料如圖 4 上圖所示，其 y 軸之座標為時間單位，其表示所收到之反射訊號是為電磁波的來回走時，欲將其轉換為如圖 4 下圖 y 軸所示之深度單位，需要有電磁波波速的資料，而在不同的材料中電磁波波速會有所差異。目前的做法是採用材料的可能速度進行轉換，此種作法無法對細部不同的材料進行可靠的深度或厚度換算，而使得估計誤差增大；此外，底泥層常是水土介面的漸變層，會使得其在透地雷達訊號上的反射不明顯，而不易判斷底泥所在的位置。

在**聲納探測**之應用上，其與透地雷達問題類似，只是由電磁波變為音波，如圖 8 所示，同樣會有深度轉換精準度差以及不易判斷底泥所在之問題。

在**直流電阻法**之應用上，受限於方法本身，其解析度常不足以解析僅數十公分厚之底泥，即使底泥厚度足夠被探測到，底泥之土水界面過度特性使其電阻(導電度之倒數)的差異不明顯，在缺乏可供比對之電阻值下，將不易判斷其位置及厚度，而僅能仰賴取樣比對，但對於底泥材料來說，其極易受到擾動影響而改變其組成狀態，對於存在有非液相污染物時更可能使得其與土壤顆粒分離，造成取樣量測所得之電阻率常會有與現場無法比對之困難。

總結上述應用問題歸納，專注本研究主題暫不考慮聲納探測之應用，可以將目前電磁類地球物理方法應用於底泥調查的問題更聚焦地表示為**水體各部(包含水、底泥以及底岩)電磁波波速以及電阻率的現地量測**。

同時具備量測電磁波波速(介電度)以及導電度(電阻率之倒數)的時域反射儀技術(TDR)，無疑是最佳解決方式。下節中將就 TDR 技術進行詳細之說明。

3.2 TDR 量測技術

3.2.1 TDR 電學性質量測方法

時域反射法 (time domain reflectometry, TDR) 為目前進行材料電學行為最為正確、有效率之量測方法。時域反射儀(time domain reflectometer, 如圖 11 所示)主要由階躍脈衝產生器(step pulse generator)、取樣器(sampler)與示波器(oscilloscope)組成,其基本原理與雷達相同,由階躍脈衝產生器發射一電磁波進入同軸纜線(coaxial cable)及感測器(sensor)所組成電磁波傳輸系統(transmission line system),由取樣器記錄感測器內阻抗(impedance)不連續所造成反射並顯示於示波器。感測器可為同軸纜線延伸,同時作為訊號傳輸與感測之用,感測器設計主要將感測內材料電學變化轉換成傳輸阻抗變化,如此可藉由反射訊號得知材料電學特性。

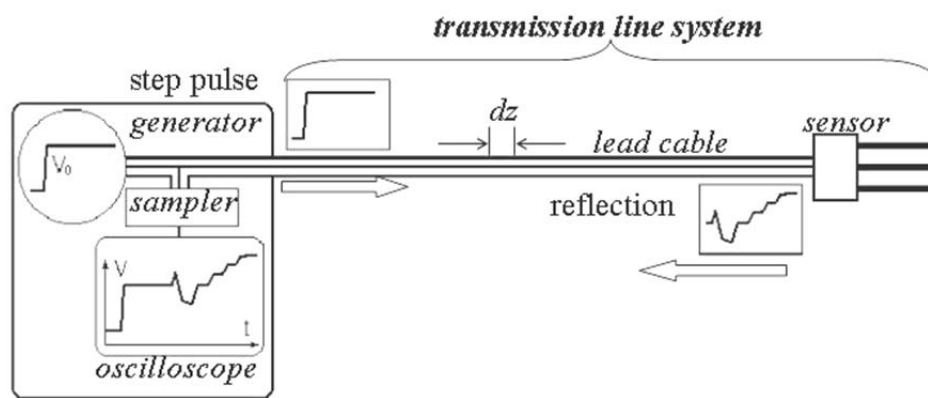


圖 11 TDR 量測系統示意圖

利用不同感測器設計與分析方法，TDR 技術可量測不同物理量，依其分析原理可分為：

界面型式：利用定位 TDR 反射訊號量測例如水位監測(空氣與水界面) (Dowding, et al., 1996)、位移監測 (Lin and Tang, 2005)、沖刷監測 (Yankielun and Zabilansky, 1999)。

變形型式：已知傳輸線組抗由纜線斷面幾何控制，若將纜線埋設於邊坡岩石或土體中，利用傳輸線變形與否監測岩石或土體邊坡位移(Dowding, 1988; Lin et al., 2009)。

介電分析型式：介電度即電磁波波速與光速比值之平方，將待測材料置入幾何固定的感測器內，利用反射訊號走時分析推估與含水量、乾密度相關的視介電度(Lin et al., 2000)；或利用反射波形穩態值計算材料導電度(electrical conductivity, EC) (Robinson et al. 2003; Lin, 2003; Lin et al., 2007)。

在介電分析型式之應用上，用於與量測土壤接觸之 TDR 感測器基本有三種常見類型：同軸式(coaxial)、多棒式(multiple rod)以及貫入式(penetrometer)，不同型式的感測器在空間上有不同的電磁分佈，因而有不同的感測範圍。同軸式感測器如圖 12a 所示，中間的電極棒被外圍環狀的金屬環所圍繞，其感應區域侷限於內外導體之間；多棒式的感測器如圖 12b 所示，中間的電極棒被外圍均勻分佈的電極棒圍繞，其感應區域大部份在內外電極棒之間，但對於電極棒所包圍區域外的土壤亦具有感應能力；而貫入式之感測器如圖 12c 所示，其僅採用兩支電極棒，中間以非導體填充絕緣，其電磁波向兩側逸散，兩極之電磁波波場並不形成封閉的空間範圍。不同的感測器類型因上述之不同電磁波波場分佈特性以及其幾何形狀差異之而有其不同的適用情形，一般而言，同軸式感測器較常見用於室內試驗，而多棒式以及貫入式較常見用於現地試驗之用。

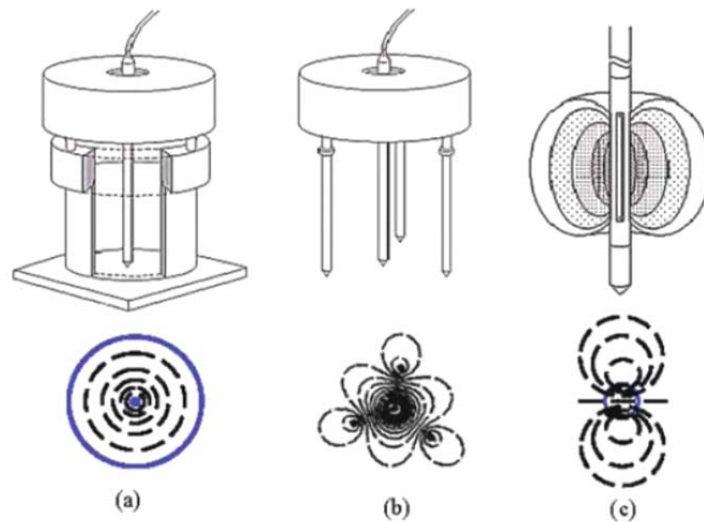


圖 12 TDR 感測器型式: a) 同軸式；b) 多棒式；c) 貫入式 (Lin et al., 2006)

下面將就介電分析型式之應用說明 TDR 用於視介電度、導電度以及介電頻譜之量測分析方法：

1. 視介電度量測

TDR 所得之典型反射波形如圖 13 所示，在 t_{cable} 處為電磁波自感測器在空氣與土壤的交界面的反射，當經過 t_0 的時間後，可得到電磁波自感測器尾端所反射回之訊號，若已知感測器在土中之長度為 L ， t_0 即為電磁波的來回走時，由此便可得到電磁波在土中之波速，再將其與光速相比，則其視介電常數 Ka 可以下式獲得：

$$Ka = \left(\frac{V_c t_0}{2L} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

其中， V_c 為光速， L 為感測器與土壤接觸的長度。

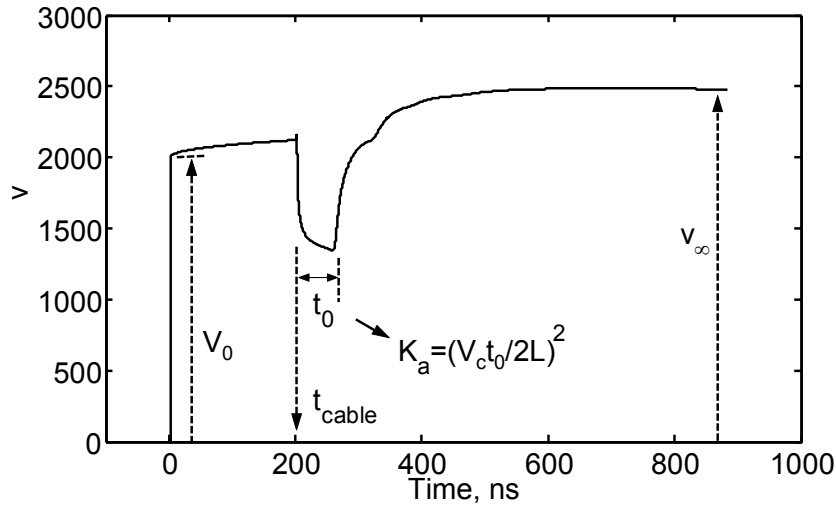


圖 13 典型 TDR 量測波形

2. 導電度量測分析

Lin et al. (2007) 則考慮纜線電阻的 DC 串聯電阻電路，重新推導導電度計算方式如：

$$\sigma = \beta \left(\frac{1 - \rho_{\infty}}{1 + \rho_{\infty}} \right) k (R_{cable} \cdot \rho_{\infty}) \dots\dots\dots (2)$$

其中 ρ_{∞} 為 TDR 波形末端穩態反射係數， β 為 TDR 感測器探頭形狀因數，而 k 則為纜線阻抗修正因數，可由 TDR 感測器末端為短路時所測得穩態反射係數求得，如下所示：

$$k = \frac{1}{1 - \left(\frac{R_{cable}}{R_s} \frac{1 - \rho_{\infty}}{1 + \rho_{\infty}} \right)} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_{cable} = \frac{R_s}{\left(\frac{1 - \rho_{\infty, SC}}{1 + \rho_{\infty, SC}} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

Lin et al. (2008) 亦發現除了纜線電阻的影響之外，TDR 儀器在轉換電壓為反射係數時，無法準確反應電壓源的大小。因此藉由式(5)，TDR 所測得穩態反射係數 ρ_{sample} 應由感測器在空氣中的量測值修正為 $\rho_{corrected}$ ，其中 ρ_{air} 為空氣中該探頭所測得穩態反射係數，再將 $\rho_{corrected}$ 代入式(2)，可求得更接近待測體的真實導電度。

$$\rho_{corrected} = 2 \frac{\rho_{sample} + 1}{\rho_{air} + 1} - 1 \dots\dots\dots (5)$$

3. 介電頻譜分析

要量測 TDR 導波器介質之介電頻譜，首先必須掌握 TDR 波傳模式，TDR 波傳模擬可採用波譜法 (Spectral method)，如圖 14 所示，詳細的計算方法參考 Lin and Tang (2007)。TDR 傳輸線之波傳系統函數可以圖 14 所示之電路模型推導得到，傳輸線波動控制方程式通解中的主要參數為傳遞常數 (propagation constant γ) 與特徵阻抗 (characteristic impedance Z_c)，傳遞常數控制波傳的速度與衰減，特徵阻抗控制阻抗不連續面的反射量。在頻率域 (f)，傳遞常數(γ)與特徵阻抗(Z_c)經推導為 (Lin and Tang 2007)

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} * A \dots\dots\dots (6a)$$

$$Z_c = Z_p / \sqrt{\epsilon_r^*} * A \dots\dots\dots (6b)$$

$$A = \sqrt{1 + (1 - j) \left(\frac{\eta_0}{Z_p} \right) \frac{\alpha_R}{\sqrt{f}}} \dots\dots\dots (6c)$$

其中 c 是光速， ϵ_r^* 是複介電度 (complex dielectric permittivity)，

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' - j \left(\epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \epsilon_0} \right) \dots\dots\dots (7)$$

其中 f 為頻率， ϵ_0 為真空之介電常數 (相當於 8.854×10^{-12} F/m 於 MKS 系統)。因此，介電度與導電度可整合以複介電度 (ϵ_r^*) 表示。 Z_p 是幾何特徵阻抗 (真空的特徵阻抗)， A 是考慮纜線電阻之修正因子， j 是 $\sqrt{-1}$ ， $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \approx 120\pi$

(μ_0 為真空的磁導率)， $\alpha_R (sec^{-0.5})$ 是電阻衰減因子（為纜線的特性）。

TDR 量測系統之傳輸線至少包括延長線段及感應段，不同段之傳遞常數與特徵阻抗不同，可以多段模式模擬（如），每一段可以參數化為傳輸線幾何特性（ Z_p ）介質電學性質（ ϵ_r^* ）、傳輸線電阻衰減因子（ α_R ）及段落長度（ L ），一旦各段落的這四個參數得知，即可完整模擬 TDR 訊號。波傳的模擬首先將不同段落的整體效應以起始端的輸入阻抗（input impedance Z_{in} ）表示，起始端的輸入阻抗可由末端阻抗（ Z_L ）及各段落之特徵阻抗以下式之遞回方式求得：

$$\begin{aligned} Z_{in}(z_n) &= Z_L \\ Z_{in}(z_{n-1}) &= Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} \tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L \tanh(\gamma_n l_n)} \\ Z_{in}(z_{n-2}) &= Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(z_{n-1}) \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\ &\vdots \\ Z_{in}(0) &= Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} \tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1) \tanh(\gamma_1 l_1)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

其中下標 i 代表各段落。一般之 TDR 量測系統邊界條件為（ $Z_L = \infty$ ），TDR 波形在頻率域之反應可由輸入阻抗與起始端之邊界條件推導得到（Lin and Tang 2007）：

$$V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s = H V_s \quad \dots\dots\dots (9)$$

其中 $V(0)$ 是 TDR 波形的富立葉轉換， V_s 是 TDR 輸入方波的富立葉轉換， Z_s 是源頭阻抗（source impedance），通常 TDR 儀器之 $Z_s = 50 \Omega$ ， $H = Z_{in}(0) / (Z_{in}(0) + Z_s)$ 為系統函數。TDR 波形 $v(t)$ 之模擬可由 $V(0)$ 之富立葉反轉換得到。本研究將以此模型標定傳輸線參數及反算介質電學性質，將量測到反射訊號之富立葉轉換（ $Y(f)$ ）除以脈衝產生器之入射訊號（ $X(f)$ ）可得 TDR 量測系統之實驗系統函數量測值，

$$H_m(\epsilon_r^*, f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

此量測值必須等於量測系統之理論系統函數（公式(10)之 H ），由已知介電度之材料進行量測，利用此等式可進行傳輸線參數的標定，標定完成後，

同樣利用此等式可進行介電頻譜的估計。

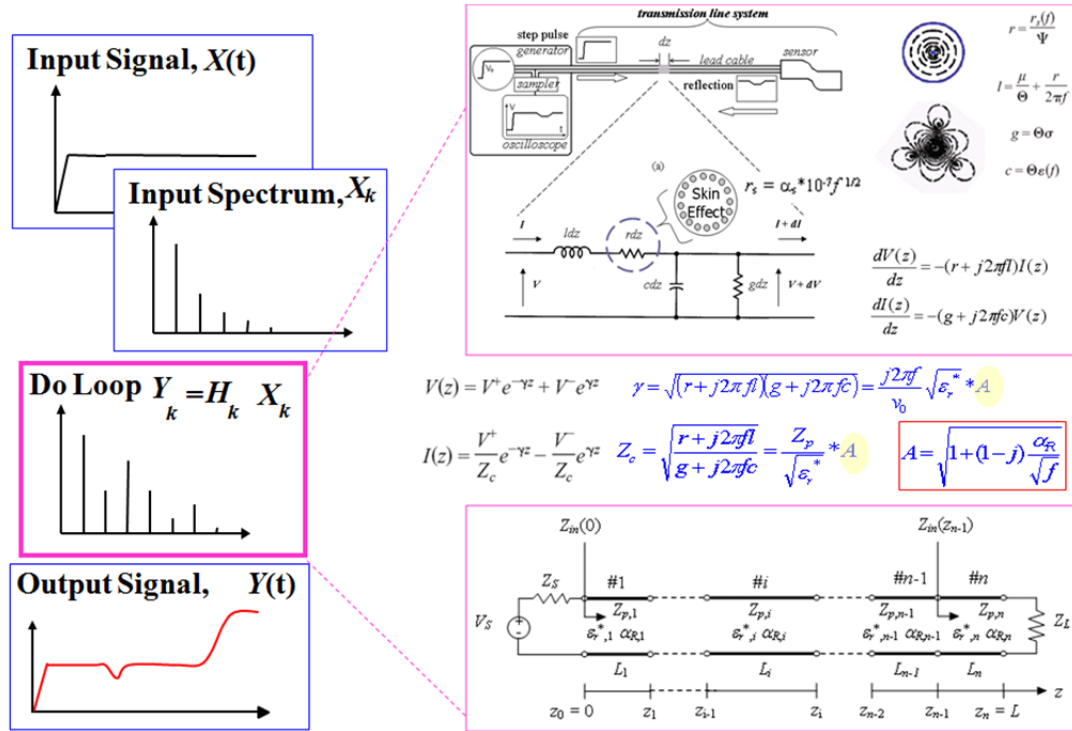


圖 14 TDR 波傳模擬波譜法 (Spectral method)

為了準確量測寬頻的介電度，必須要能夠準確的率定圖 14 所示之傳輸線參數。但除非類似文獻中的實驗室複介電度量測方法一樣，仔細的設計感測器，使其阻抗與延長纜線及接頭匹配，否則勢必會有許多不連續段，段數越多，所須率定的參數越多。而實務上，事先並不清楚在儀器端與感應端的接頭，應以多少不連續段表示方足夠，因此造成率定模式設定與反算收斂上的困難。

鐘志忠(2008)為能提供快速介電頻譜分析方法，發展出一種由 TDR 訊號在頻率域決定介電度的分析方法，其將 SASW 相位角速度分析之概念應用至 TDR 波形分析，只需利用局部時間域的波形資料（只需涵蓋感測器前後的第一次反射資料）及訊號頻譜分析，不必透過複雜的 TDR 傳輸線與全波形波傳模擬理論，便可獲得高頻率域的波速資料。

其作法是將 TDR 量測所獲得時間域之波形進行微分(如圖 15 所示)，當其微分後可見於感測器起點與末端的反射特徵（為一突波反應），將此突波反應拆解成兩組獨立訊號，將第一反射訊號倒置處理（抵銷負反射造成的 π 相位角），如此可計算兩者突波反應的相位差異為 $\Delta\phi$ ，即可求得不同頻率之

相位速度結果，如圖 16 所示。圖 15 之波形是採用水做為介質之數值模擬結果，圖 16 為該波形之相位波速結果，虛線為理論值，實線為採用此方法所得之量測值，[鐘志忠\(2008\)](#)根據圖 16 之結果說明此方法僅適用於獲得頻率於 100MHz 至 1.5GHz(TDR 之頻率上限)之介電頻譜，而造成此結果之主要原因在於，用於分析用之突波僅為整段波形之一部份，使得波形受到斬截(truncation)之影響，而致使在較低頻之結果會有較大之誤差。

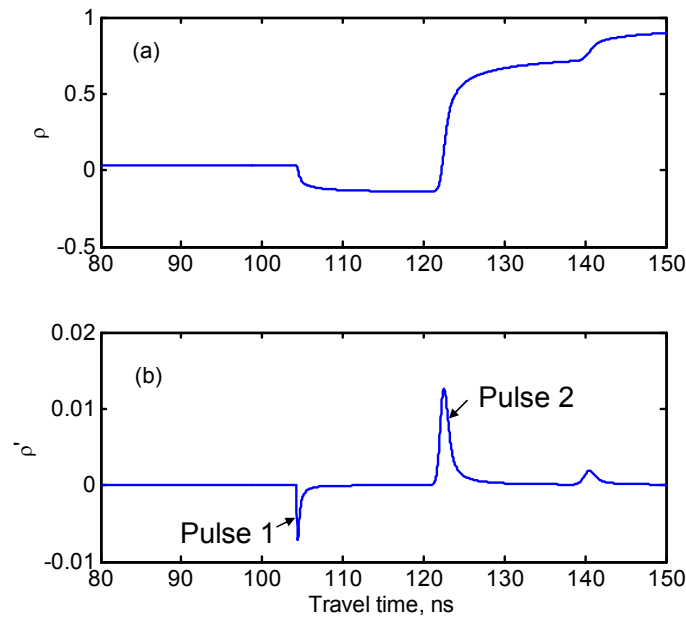


圖 15 TDR 頻率相位速度分析方法所需之反射特徵訊號(鐘志忠，2008)

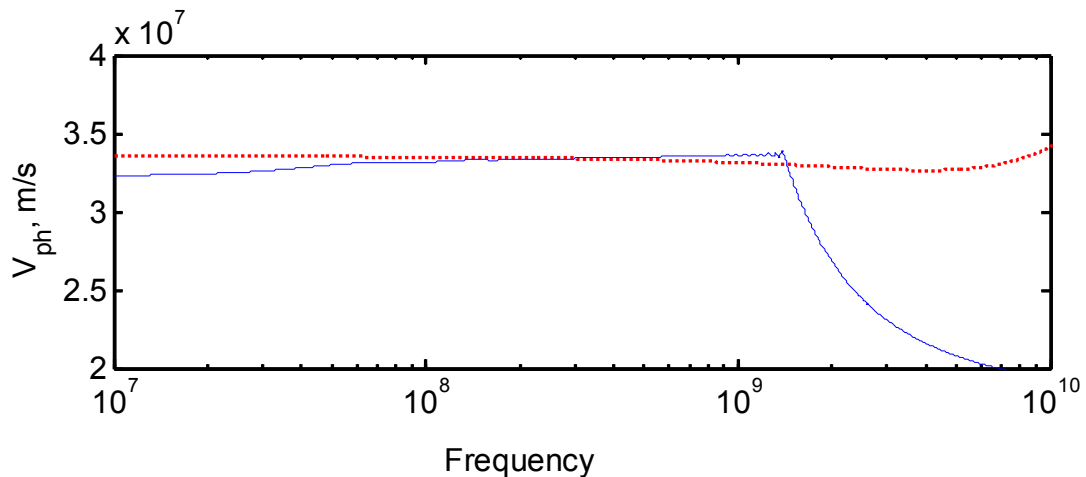


圖 16 TDR 頻率相位速度分析結果(鐘志忠，2008)

3.2.3 TDR 技術應用之利基與介電頻譜於底泥污染調查之潛力

底泥為多相孔隙介質，包括顆粒固相及孔隙液相，其整體電學性質（包括複介電常數與導電度）主要受到液相的含量與電性性質所影響。常見的底泥污染物有重金屬及、非水相液體（Non-Aqueous Phase Liquid）等，此些污染物改變土壤的電學特性，進而影響電流或電磁波在污染區域內傳輸產生異常。TDR 量測技術可同時量測導電度與介電度，水的介電度約為 81，一般土壤之介電度約為 15，兩者間差異明顯（空氣介電度為 1），在深度剖面上同時有介電度與導電度之資料比對，可有效協助判斷進入不同材料的位置，且在飽和的狀態下，透過介電度量測，其更可量測泥沙濃度（Chung and Lin, 2011），對於底泥層的厚度以及其實際含土量可更精準地掌握。此外，由於其本身即具有協助辨識各介面層位置之能力，即使對於透地雷達無法應用的超過 10 公尺的深度區域（環保署，2012），其資料仍可提供給雷達探測結果作為各介面層位置分析比對校正之用。

然而，透過 TDR 所進行之電學量測在潛力上遠不僅止於此，對於底泥調查之目標除了對於底泥厚度與數量的調查外，其污染程度與污染物亦同樣為調查重點，在此議題上，相較於前述不含頻率訊息的視介電度，與頻率相關之複介電度更形重要。由於與頻率相關之複介電度其所反映的是底泥中多相物質中的極化行為（Dielectric Polarization），不同頻率下所對應之極化程度是屬於不同相間的極化狀態，適當的利用此一特性，將可透過對不同頻率下的複介電度與材料不同相的組成進行量測，譬如在頻率約 100MHz 左右即以對自由水的極化較為明顯，用此頻率段之複介電度進行含水量量測即可有良好的估計。目前國內外對污染土壤的介電特性已進行了大量研究，並且已有複介電度與污染成分的關係模型提出（刘豪睿等，2010），利用此些已建立或待建立的關係模型，由現地所量測得之寬頻複介電度值將可協助對底泥污染程度的檢測甚至是對污染物的辨識與污染量的量測。

可是，在面對複介電度之優點與潛力的吸引上，目前在技術上卻面臨現有的寬頻介電特性量測技術僅侷限於實驗室進行的可能性。此些量測方法主要採用固定頻率的頻率域量測法，較適合土壤試體的量測方法有電橋法（Lee et al. 2003）、終端開路同軸線法（Rowe et al. 2001; Francisca and Rinaldi 2003; Amegashie et al. 2006; Saltasa et al. 2007）和傳輸線法（陈彦等 2008）。此些實驗室量測技術可提供介電頻譜，並且在文獻中應用其針對某些污染物質，

在某些土壤種類、土壤含水量及土壤密度的條件下，進行污染土壤電學特性的探討，但量測儀器複雜或試體準備不易，且不易延伸拓展為現地量測之技術，而無法將其更加務實地應用於現場。

3.2.3 TDR 於底泥應用潛在問題

綜合前述內容，TDR 在底泥的應用上具有眾多優勢，目前 TDR 應用於介電度與導電度量測已十分成熟且有眾多商業化產品，但欲將其應用在底泥電學性質量測上，在實務上尚有四項問題有待解決：

1. **深度貫入之問題：**目前商業化之 TDR 感測器設計因為主要提供給地表 20 公分以內之土壤量測，因此多採用多棒式感測器設計(如圖 17 所示)，此類感測器改裝後可有用於水下底泥調查之可能性，但是在貫入底泥之過程中，若底泥所含之礫石料較多時，其可能因為遭受強行貫入而有損壞之虞。



圖 17 多種商品化 TDR 感測器

2. **空間解析度不足之問題：**如底泥調查應用案例中所提，在台灣之河川的底泥厚度可能在數十公分之等級，目前 TDR 介電度的分析囿限於走時分析，倘若欲有合理視電磁波速結果，感測器長度至少需要 10 公分，此即表示每一筆量測之結果是為至少 10 公分範圍內的平均，對於僅數十公分厚度之底泥恐有嚴重的空間解析度不足的問題。
3. **高導電環境無法分析之問題：**底泥本身含高細粒料的可能性高，使其導電度就有偏高之情況，再加上其受到重金屬污染之可能性亦大，因此遭遇高導電度底泥是不可避免的問題。在採用走時分析法進行

視介電度分析的前提下，眾多文獻(Topp et al., 1980; Jones and Or, 2004; Chen et al., 2007)已指出在高導電度土壤的環境下，由於高導電度將使得 TDR 波形的末端反射不明顯，將可能造成無法使用走時分析法進行分析的問題，如圖 3.4 所示，低導電度的材料其量測之結果與 W6 相似，在訊號上可見到最後會有往上跳起的狀況，稱為末端反射，而在較高導電度的狀態下，W4 及 W5 為同種土樣，此種土樣之導電度偏高，在 W4 波形中可見其末端反射並不明顯，隨著含水量的增加其整體導電度下降，而使得原本勉強可進行走時分析的 W4 在含水量增加成為 W5 後而沒有明顯的末端反射，造成無法進行走時分析，相同的狀況可在高導電度的鹽水量測訊號 W7 中見到。當遭遇受重金屬污染嚴重之底泥時將可能造成既有 TDR 系統無法正常分析的情形。

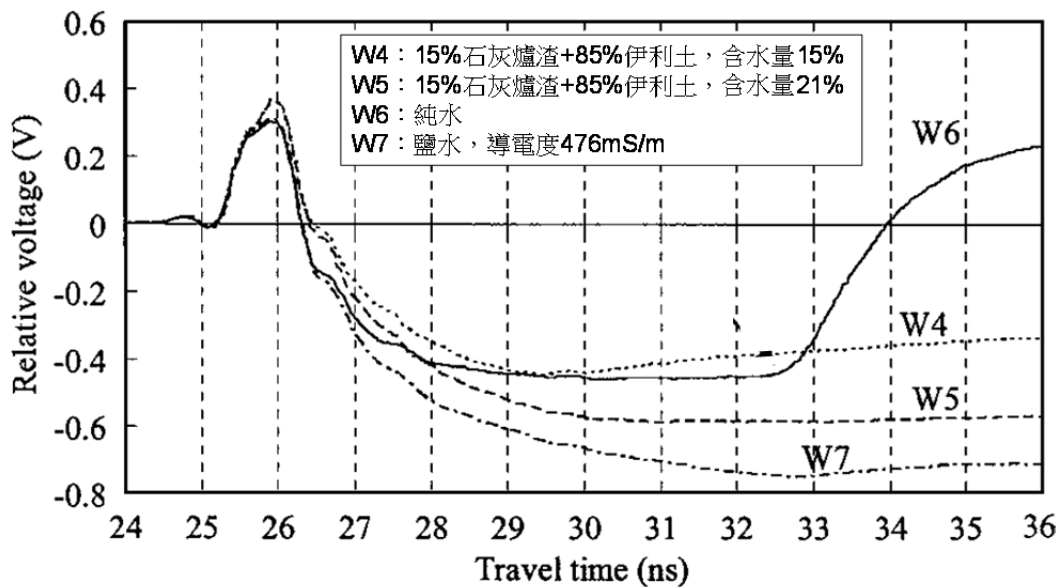


圖 18 高導電度材料之 TDR 量測波形(修改自 Chen et al., 2007)

4. 現地寬頻複介電度量測技術：TDR 既有寬頻複介電度量測方法中，量測成果良好的方法，有過於複雜而不易在現場應用的問題，而分析簡便的方法卻有低頻準確度不足的困擾。

3.3 研究重點說明

本研究之重點即在於根據上一節中對於 TDR 應用於底泥量測之潛在問題進行解決，整體研究可分為兩個部分，一是 TDR 現場底泥電學性質感測貫

入器系統之建置，另一是 TDR 現地寬頻複介電度量測技術研發。

在 **TDR 現場底泥電學性質感測貫入器系統之建置**上，將針對貫入深度、空間解析度以及高導電環境之應用問題進行解決，發展一容易組裝及操作之貫入器系統，有助於探討底泥厚度與對應之電學特性，並延伸至地球物理方法之結合，提供其電學性質參數率定與驗證使用。

而在 **TDR 現地寬頻複介電度量測技術之研發**上，主要是針對現地寬頻複介電度量測之問題進行解決，如前章節中所述，寬頻複介電度可進精細的呈現底泥組成物的差異，透過適當的污染物與底泥土顆粒及水體的組合關係建立，將可有助於底泥污染程度檢驗以及污染物辨識應用上，只是在此之前，如何有效且快速於現地獲得寬頻複介電度資料是此應用是否具有實務可行性的關鍵，因此，在本計畫中將先行建立一完整之現地寬頻複介電度量測方法作為後續將寬頻複介電度應用於底泥污染調查上之有利工具。

第四章 研究方法與過程

4.1 研究流程

本研究工作之工作流程圖如圖 19 所示，首先進行文獻回顧與問題評析，由文獻回顧與問題評析中所獲得之問題總結，對 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器系統之研發建置與 TDR 現地寬頻複介電度量測技術研發之工作進行恰當之工作規劃。在 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器系統之研發建置中，將針對目前之視介電度分析法進行改良，並研發高空間解析貫入器，最終進行量測系統之整合建置，而對於所建置完成之 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器系統將搭配地球物理方法進行現地驗證之工作，而現地驗證所得到之系統操作、資料比對分析以及搭配使用之應用成果將回饋至貫入器量測系統之設計上，以求達到本研究之目的。此外，為為後續將寬頻複介電度應用至底泥污染調查之上，另進行有 TDR 現地寬頻複介電度量測技術之研發工作，本研究將提出量測技術構想，並進行數值與室內試驗驗證工作，為後續之實際應用建立可供使用之技術工具。

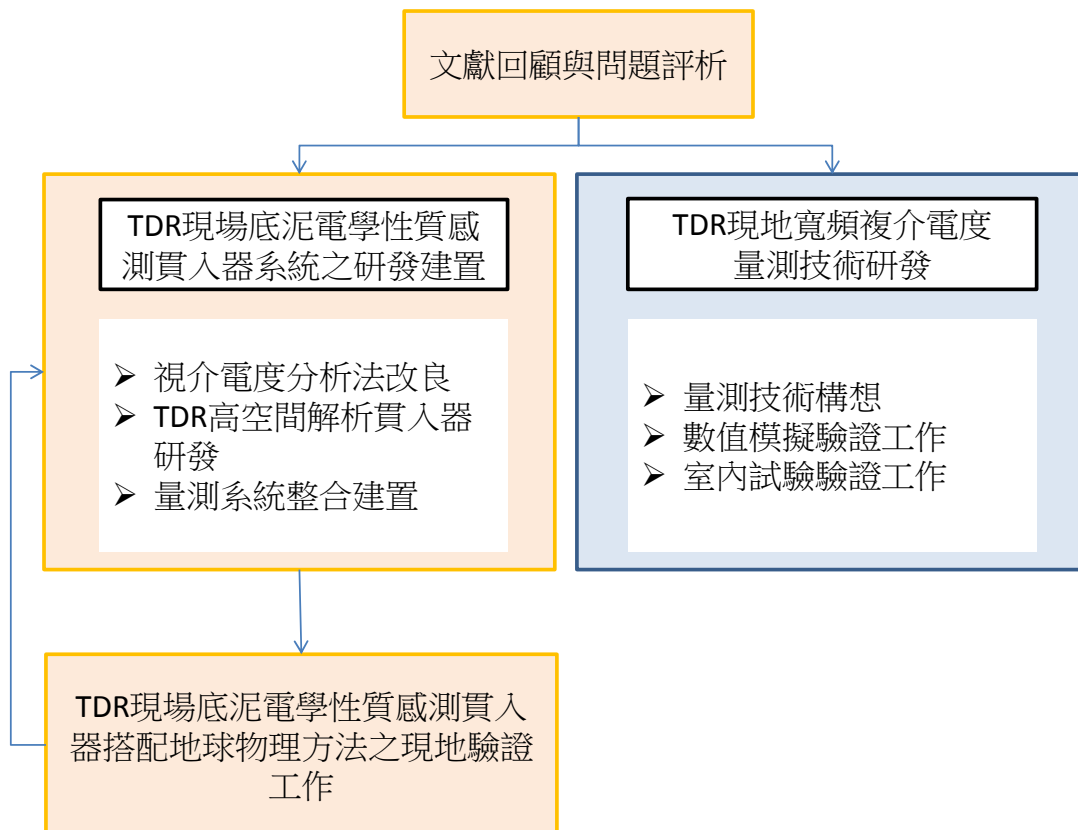


圖 19 研究流程圖

4.2 工作進度

本研究計畫之工作進度有鑑於申請計畫書中之工作內容較不明確，因此略有修改，使其更為明確且符合本計畫之目的，目前工作進度甘特圖如圖 20 所示，原申請計畫書之進度甘特圖請參見附錄一。目前所有工作項目皆已完成。

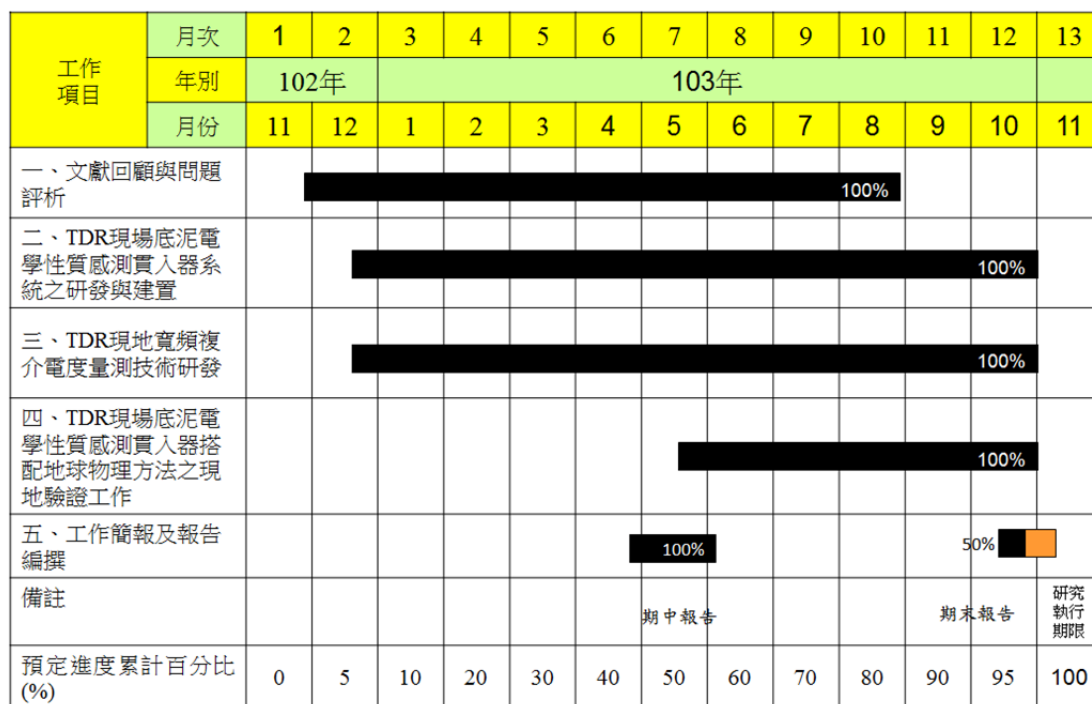


圖 20 工作進度甘特圖

第五章 結果與討論

5.1 現場底泥調查用 TDR 貫入器系統建置

5.1.1 視介電度分析方法改善

5.1.1.1 TDR 能量指數法

在對 TDR 應用於底泥之潛在問題評析中提及，進行視介電度量測使採用走時分析，此分析對於在高導電度土壤之量測將造成困難，因此對於在高導電度土壤中的量測技術需進行改良以便避免在高導電底泥中無法量測的問題，因此在本節中提出新的分析方法以確保本研究之現場底泥調查用 TDR 貫入器系統在高導電度底泥中的應用。

林俊宏(2013)針對 TDR 應用於高導電度土壤含水量量測的改良分析方法，其不同於以往 TDR 分析主要著重在走時上之介電分析，以 TDR 訊號之反射量大小做為分析的標的，新發展此一能量指數 T_p 之分析方法。對於 T_p 之分析如圖 21 所示，首先由 TDR 量測系統進行量測後可得其典型波形如圖 21a 所示，當訊號開始進入土樣時可見到波形有一明顯之下降，將此所得之訊號進行微分後可得圖 21b 之結果，由此圖可見到在進入土樣後會有一個明顯的突波存在，而此一突波之最大值便定義為能量指數 T_p 。

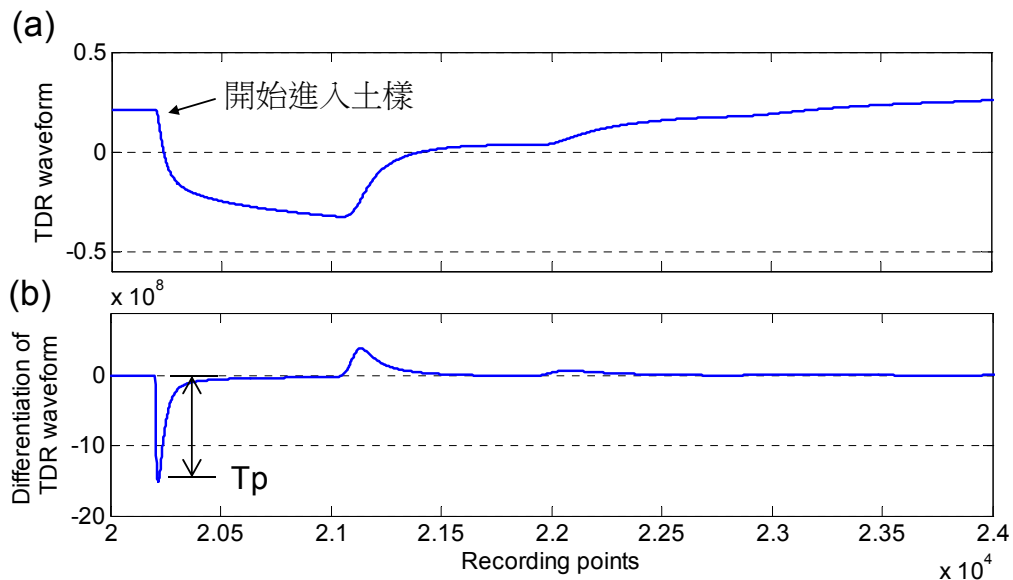


圖 21 TDR 能量指數 T_p 之分析說明

根據林俊宏(2013)以室內試驗針對 B2(SP-SM)、HS(ML)、HN(CL-ML)以及

KL(CL)四種土樣所獲得之資料顯示(如圖 22 所示)，其不考慮土壤種類情況下之最大體積含水量誤差為 1.8%，與採用走時分析之結果(2%)相接近，但此分析方法較走時分析更為單純，且可有效應用在高導電度土壤的量測中，惟其有效量測範圍僅在進入感測段 2 公分以內，在應用上應注意此感測範圍可能造成的量測誤差。

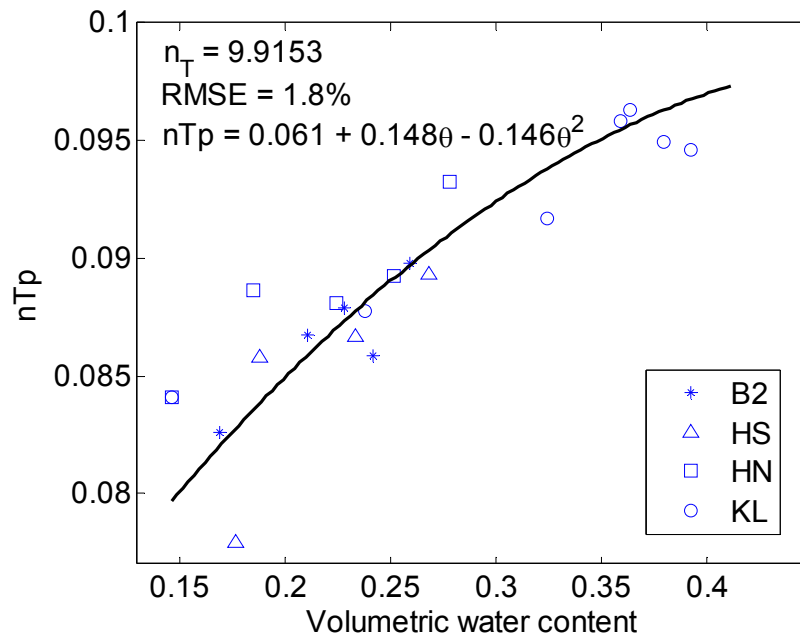


圖 22 室內試驗正規化 TDR 能量指數 T_p 與體積含水量關係圖(林俊宏, 2013)

由此方法之分析標的與室內試驗結果來看，此分析方法僅需要完整獲得感測器剛進入材料的下降段訊號，因此感測器不受到走時長度的需求而可盡可能地縮短，若參考其 2 公分的有效感應寬間，將有可能在感測器段僅 2 公分的長度下進行有效的量測作業，提升其量測解析度，此外，由於其主要採用反射係數之大小作為分析標的，並不會有能量削減過快而無法獲得尾端資料的困擾，使得此分析方法可克服高導電度的環境進行施測。

採用此種分析方法可協助本研究達到研究目標，然而，在林俊宏(2013)中其是針對 T_p 與體積含水量之關係探討而非視介電度本身，當然，由眾多文獻已知體積含水量與視介電度有極良好之關係存在，因此有足夠之信心相信 T_p 可與視介電度進行關聯，但為使其更具可靠度，將規劃室內試驗工作進行驗證與檢視；此外，採用本研究主要欲研發貫入式感測器，此種感測器屬於複合式感測器，其量測所得之視介電度需進行標定以獲得真實視介電度，

目前對於走時分析法之貫入式感測器已有較為可靠之修正式，但其是否適用在此 TDR 能量指數分析法中規劃有室內試驗進行驗證。

5.1.1.2 TDR 能量指數法視介電度量測室內試驗

在 TDR 能量指數法之室內試驗中，主要是欲確定 TDR 能量指數與視介電度間之關係，在室內試驗規劃上，考量土壤種類、含水量以及水導電度之影響因子，規劃試驗如表 1 所示。本試驗採用 TDR 3000 進行量測工作，而其以 Labview 所撰寫之控制程式透過嵌入式系統作為作業平台進行資料收錄。試驗用感測器如圖 23 所示，試驗用土壤將採用規劃含水量夯實於標準夯實模中後，在其正中灌入 0.8 公分直徑鋼棒，而後置上感測器頭進行量測。

表 1 TDR 能量指數法室內試驗規劃

土壤種類	水導電度(S/m)	含水量
寶二土	0.03 (自來水)	8,10,12,14,16
	0.05 (鹽水)	8,10,12,14,16
80% 寶二土+20%高嶺土	0.03 (自來水)	8,10,12,14,16
50% 寶二土+20%高嶺土	0.03 (自來水)	12,14,16,18,20

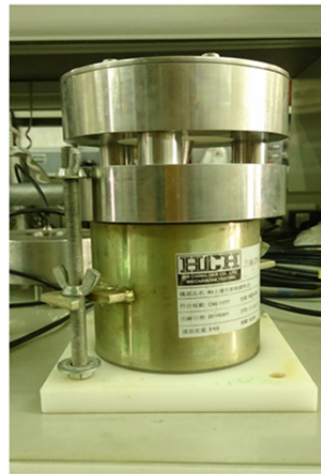
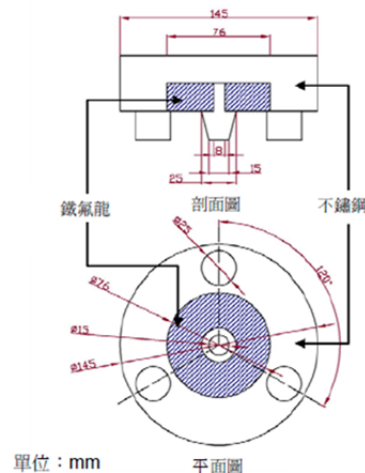


圖 23 TDR 能量指數法室內試驗用感測器設計圖與實體照

圖 24 為土壤種類影響之結果，其中 n_{Tp} 為將 T_p 針對正規劃之系統本身進行之正規劃之值，首先由圖中可發現，各種土壤在視介電度 k_a 和 n_{Tp} 分佈圖上呈現線性正比狀態，亦即視介電度的增加(含水量增加)也會使得 n_{Tp} 增加，反之亦然，且由不同種類來看，其相互平行彼此間差異並不大，相同 n_{Tp} 對不同土壤種類來說，視介電度誤差僅約 2°。水導電度影響如圖 25 所示，

當水導電度增加時，並不影響 nTp 與視介電度間的線性關係，而當水導電度增加時，會使 nTp 有所上升，由此圖中來看，增加 $0.02S/m$ 的水導電度使得相同 nTp 下的視介電度下降約 2.5，與土壤種類之影響相當。

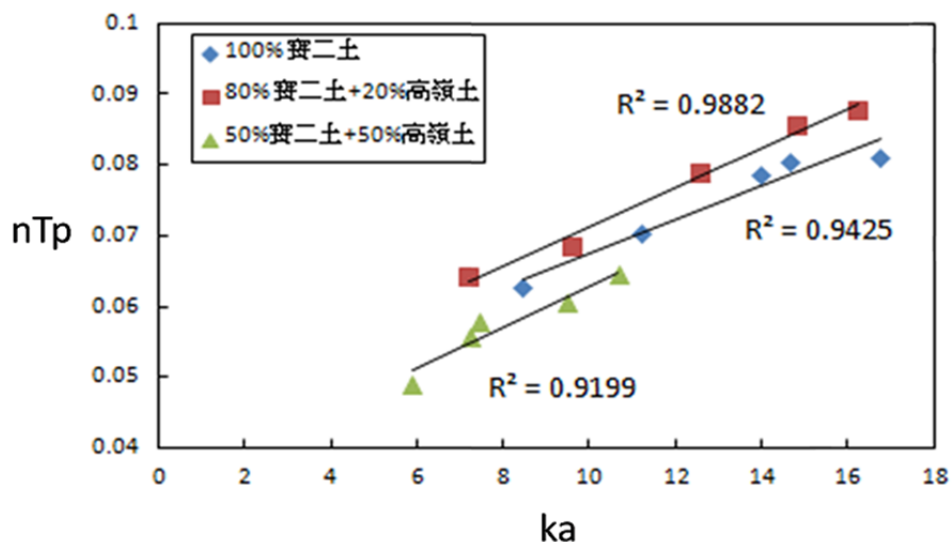


圖 24 TDR 能量指數與視介電度關係之土壤種類影響

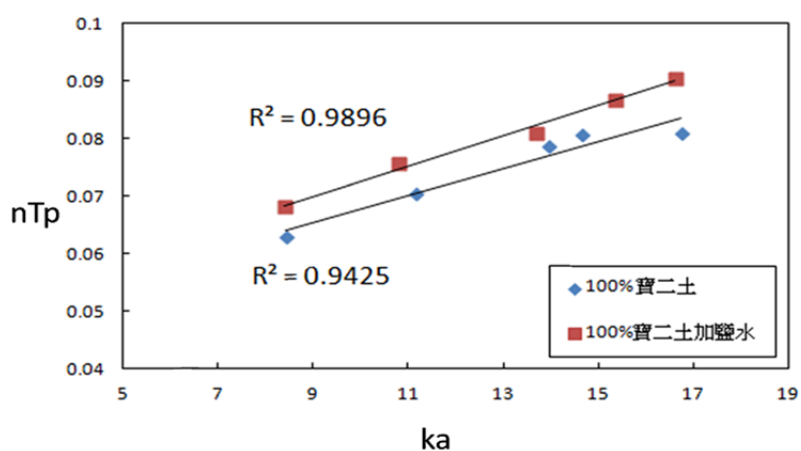


圖 25 TDR 能量指數與視介電度關係之水導電度影響

由室內試驗之結果可得知，TDR 能量指數與視介電度有明確的線性關係，且土壤種類與水導電度對視介電度估計的影響約 ± 2 ，透過 nTp 的量測確實可進行視介電度的推估，如此即使在高導電度短感測器長度的環境與設計條件下亦可達到進行視介電度量測的目的。

5.1.2 高解析 TDR 貫入式感測器研發

5.1.2.1 高解析 TDR 貫入式感測器設計

根據上述相關初步文獻探討與評析，本研究主要將基於 TDR 技術，研發一可於現場進行底泥電學性質量測之貫入器。在貫入式感測器的設計上，大多以圓錐狀為主，但是在其波導上卻可有不同的設計情形。[Lin et al. \(2006a; 2006b\)](#) 所研發的 TDR 圓錐貫入器模型，如圖 26 所示，可結合 CPT 試驗，主體以鋼管為主，套上塑鋼將作為內導體之鋼管與外圍 4 個鋼片的外導體進行絕緣，感測段長度為 30cm，直徑為 3.6cm。然而其感測器主要為初步模型，其防水機制與現地適用尚未進行後續測試。

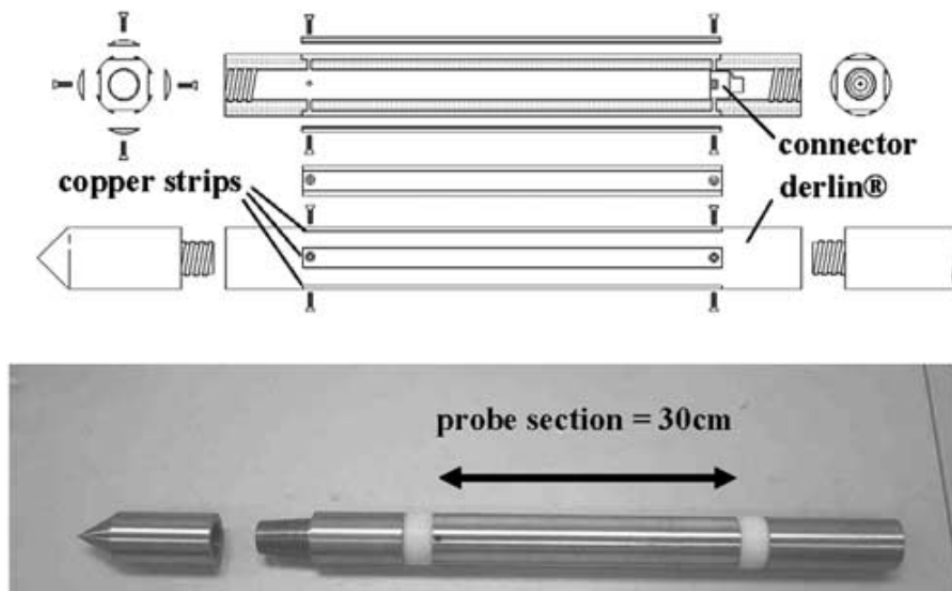


圖 26 TDR 多叉波導貫入式感測器 ([Lin et al. 2006a; 2006b](#))

在 [Lin et al.\(2006a,b\)](#)的基礎上，為增加貫入器的強度與降低貫入時的損壞可能，[楊士輝\(2011\)](#)將多叉波導的感測器調整為雙叉波導，如圖 27 所示，並且使其具有串接進行多點量測的功用，其每個感測單元主要是由兩個銅件組成，以進行對外部周遭材料感測，然而此感測器研發在功能性已相當成功，但因感測器直徑僅約 1 公分，於實際貫入土層遭遇礫石時產生挫曲，串接後整體強度有待加強。[鄭志峰\(2013\)](#)調整此感測器之尺寸至 3 公分，如圖 28 所示，此一改善式 TDR 串接貫入感測器可配合既有 CPT 鑽桿進行串接，藉以提供不同水深條件下之量測，且根據其現地貫入測試，此設計可成功貫入含礫石之地層至少 3 公尺。



圖 27 TDR 串接貫入感測器 (楊士輝,2011)

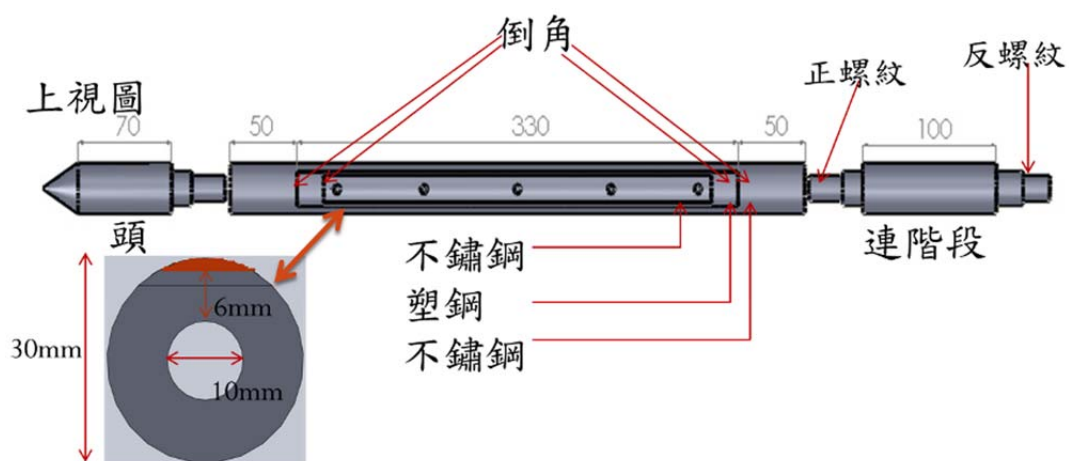


圖 28 加強型 TDR 串接貫入感測器(鄭志峰，2013)

在此之外，[Vaz and Hopmans \(2001\)](#)採用螺旋探針之型式設計貫入式感測器，如圖 29 所示，此種感測器除了提供貫入之用外，透過螺旋探針的設計降低感測器所需之實際直線長度達到提升 TDR 量測空間解析度的目的。

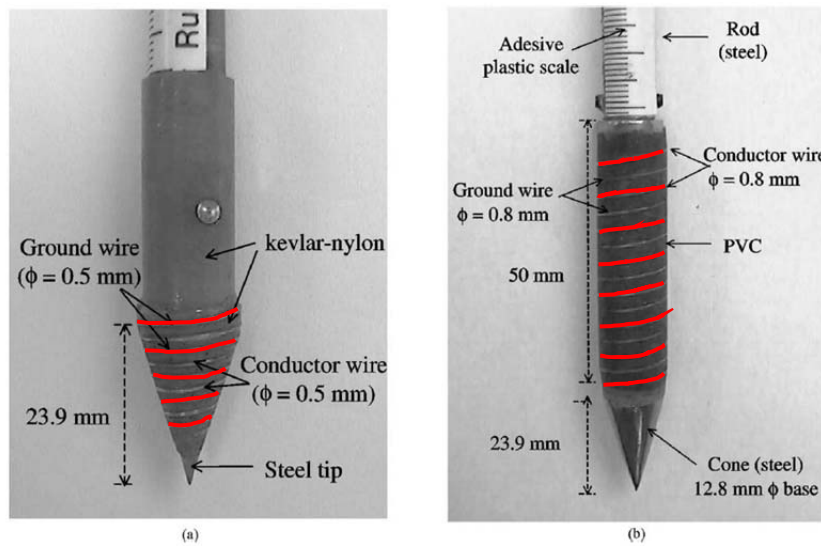


圖 29 螺旋式探針感測器 (Vaz and Hopmans 2001)

根據之前對 TDR 感測器在底泥應用的潛在問題歸納，本研究所欲研發之 TDR 貫入器須具備有 1. 可貫入底泥及土中之能力，2. 量測結果具高空間解析度，3. 可適用高導電度環境。初步檢視前述兩款不同貫入式感測器之設計，螺旋式探針感測器的設計除螺旋探針不易固定在圓錐段外，其還會有外露於圓錐表面而容易在貫入時剝落的問題，此外，由於其設計主要針對走時分析，在高導電底泥中仍無法進行有效量測，因此在本研究中的設計中將暫時不考慮此類貫入式感測器設計，選擇採用雙叉貫入感測器。由於鄭志峰(2013)所設計之雙叉貫入感測器已成功在現地貫入應用，因此，本研究將在其設計上進行調整。

初步之設計調整主要針對量測之空間解析度，鄭志峰(2013)之貫入器感測段長度達 33 公分，根據林俊宏(2013)對於感應空間的估計以及感測器製作的需求，將貫入器感測段之長度降低至 4 公分，如圖 30 所示，測試其波形(如圖 31)可符合 TDR 能量指數法分析需要。另外，為使其可作為貫入使用，另設計有相配合之延長桿()，相互間採用螺牙相接，可有效阻水，並可視需求逐段增長。

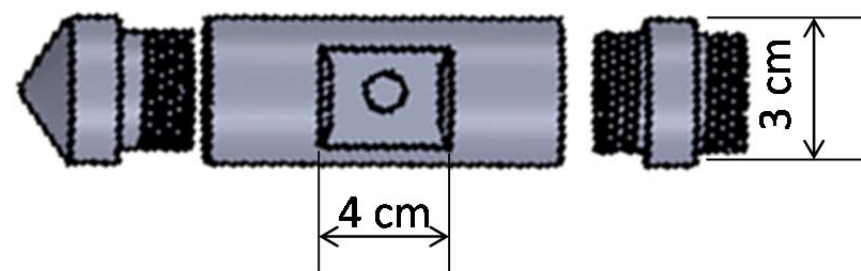


圖 30 高空間解析度貫入感測器

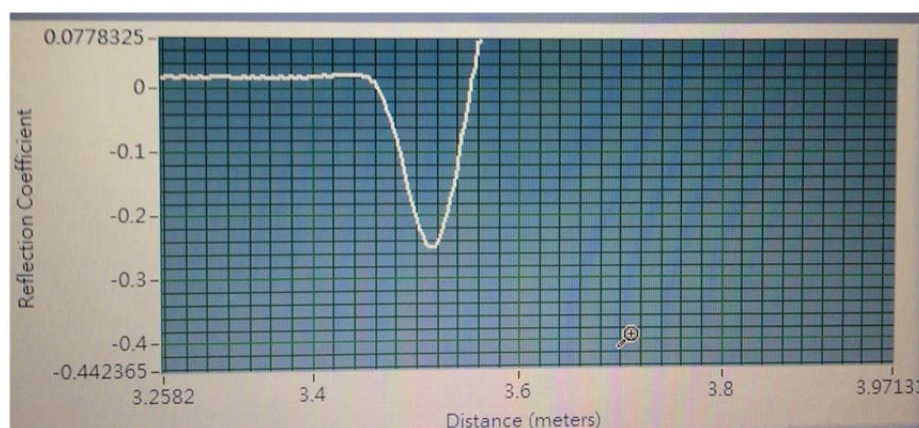


圖 31 高空間解析度貫入感測器測試訊號



圖 32 高空間解析度貫入感測器延長桿

5.1.2.2 高空間解析度貫入感測器室內標定

本研究所設計之高空間解析度貫入器，由於其正負導體間存在有進行絕緣用之德爾林材料，使其在量測時不單僅是量測感測器外部之材料，為將德爾林材料之影響排除，其在進行量測前有必要先行進行標定工作。本標定工作是在室內利用自來水與酒精採用不同比例調配而成之酒水混和液，其將有不同之視介電度存在，而此酒水混和液的視介電度是另外採用長度 17 公分之三叉式感測器進行量測，以提供做為高空間解析度貫入器所量測得之 n_{Tp}

與視介電度的標定。圖 33 為高空間解析度貫入器標定結果，由圖中可見其有非線性的情形產生，此部分經檢討主要是受到本研究所設計使用之貫入式感測器型式所引起，在此，建議以 K_a 為 40 處作為分界採用雙線性回歸作為後續量測使用。而在導電度量測標定上，根據(2)式進行計算，採用自來水進行標定所得參數 $\rho_{\text{air}}=0.8409$ 、 $\rho_{\infty, \text{SC}}=-0.9117$ 、 $\beta=0.1855$ 。

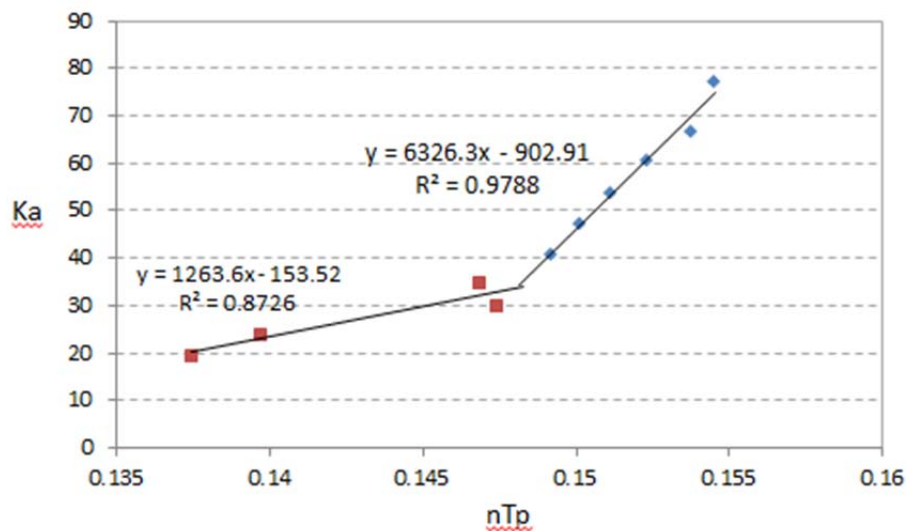


圖 33 高空間解析度貫入感測器 nTp 與視介電度標定結果

5.2 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器搭配地球物理方法之驗證工作

5.2.1 現地驗證工作

現地驗證工作於國立交通大學光復校區內之人工湖竹湖進行，如圖 34 所示，試驗進行位置主要在竹湖之東北端的一個灣內，共佈設有一處 TDR 試驗點、一條水上地電阻影像探測以及一條水上透地雷達測線，現場施作情形如圖 35 所示，水上地電阻影像探測採用電極間距 2 公尺，Wenner-Schlenger 電極排列法施作，而水上透地雷達採用 270MHz 天線進行施作，施作時將其放置於橡皮艇上拖行，測線長度為 42 公尺。

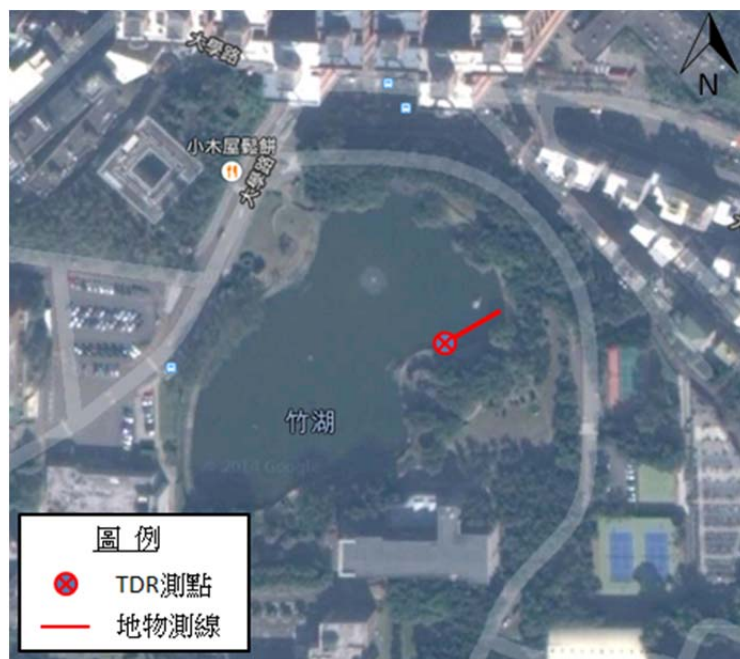


圖 34 現地驗證測試場址與試驗規劃示意圖

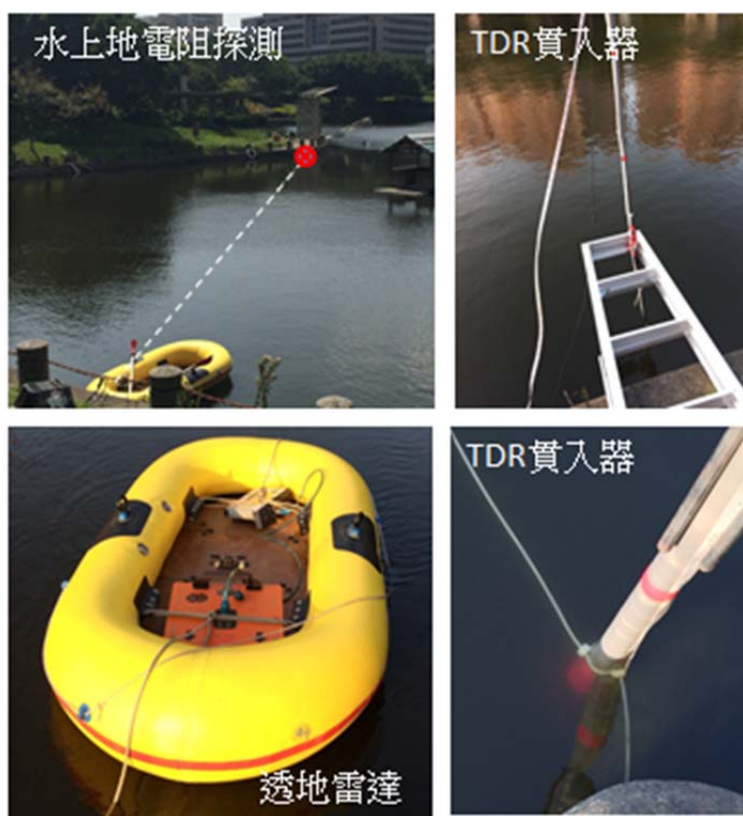


圖 35 現地驗證現場施作情形

TDR 試驗點採用本研究研發之高空間解析貫入器進行量測，每 5 公分一

個測點，同時量測視介電度(由 n_{Tp} 推估)以及導電度，量測結果如圖 36 所示，整體而言， K_a 隨著深度沒有明顯的變化狀況，而導電度有略微降低的情形，但綜合兩者之結果判斷，此處應無底泥存在，惟竹湖是人工湖，底部被混凝土封住造成貫入器底部一旦碰觸底部便無法繼續貫入，因此在此測試場址會有約 7.5 公分的無法量測段(以感測器下方 0.5 公分處作為零點)，若扣除至少約 2 公分的感應範圍，則有 5 公分的不確定段存在。而 TDR 在底泥探測之輔助上除可透過視介電度與導電度兩者電學性質量測成果判釋可能之底泥厚度外，其所得之電磁波波速(與視介電度有關)以及電阻率(為導電率之倒數)亦可提供地物探測之結果進行透地雷達深度轉換以及地電阻影像輔助判釋之用。

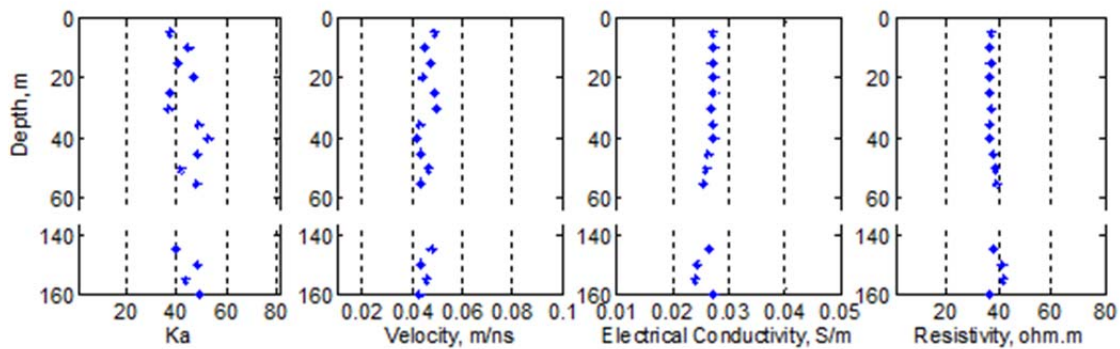


圖 36 TDR 高空間解析度貫入器現地量測成果

透地雷達探測結果如圖 37 所示，由圖中可見在測線中段較深兩側較點的情況，且在測線尾段其存在有較緩的坡度，根據對此探測結果的判釋，在測線尾段 37 公尺後的緩升坡上並沒有明顯的底泥存在的跡象，自 37 公尺處往起點延伸底泥略有增加，至 32 公尺後約以厚度 5 公分存在。TDR 貫入器施作位置約在測線 41 公尺處，該處由透地雷達探測結果亦同樣顯示並無底泥存在，但 TDR 之貫入資料即使在此情況下亦可提供電磁波波速以及底部實際深度之訊息，精化深度的估計，使工程師由透地雷達之結果可更進一步精準掌握底泥所在深度，深度轉換後之透地雷達訊號圖如圖 38 所示。

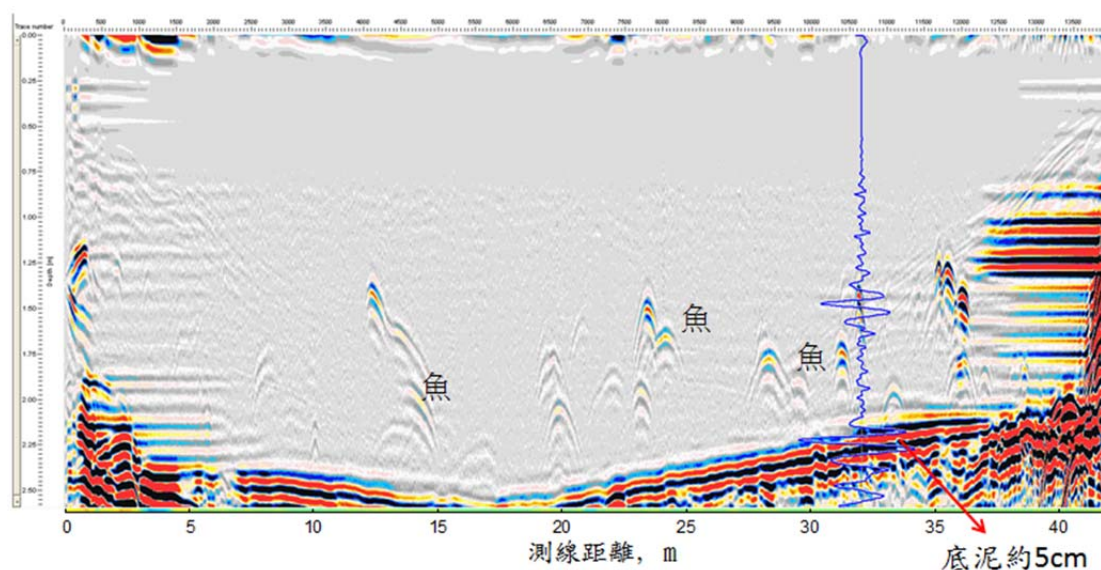


圖 37 透地雷達現地探測結果

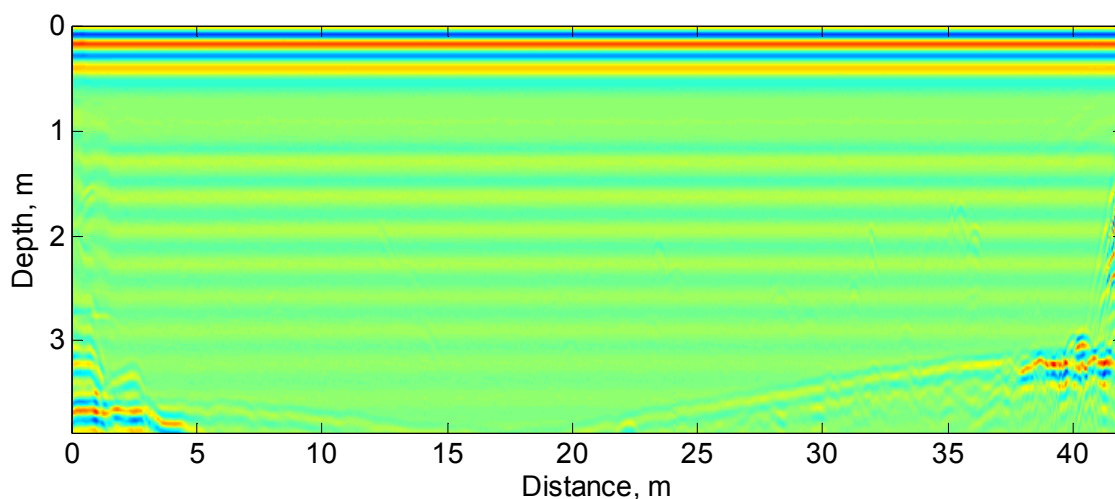


圖 38 透地雷達現地探測結果(TDR 資料輔助深度轉換)

水上地電阻影像結果如圖 39 所示，由圖中可知，如 3.1.3 節所總結出的問題，在此水上地電阻影像結果無法提供足夠解析度對底泥進行判釋，主要僅能判斷可能的水體底部所在，由圖中來看，其深度位置約在 3 公尺左右之深度，在測線末端會較為緩慢的上升之地表，與透地雷達之結果吻合，然而在此中較為特別的是，雖然同為一個湖中的水體，但是在測線 16 公尺以前的水電阻率約僅有 15ohm.m 左右，但過此之後之水電阻率提升至約 40ohm.m，如此不均勻的水體電阻率分布會使人不禁對此反算結果的可靠度存疑，在此時透過 TDR 貫入器所量測得之水體電阻率便可提供做為佐證輔助，

如圖 36 所示，在測線末端處之水體電阻率確實在 40ohm.m 左右，可確定此分析成果的可靠性。

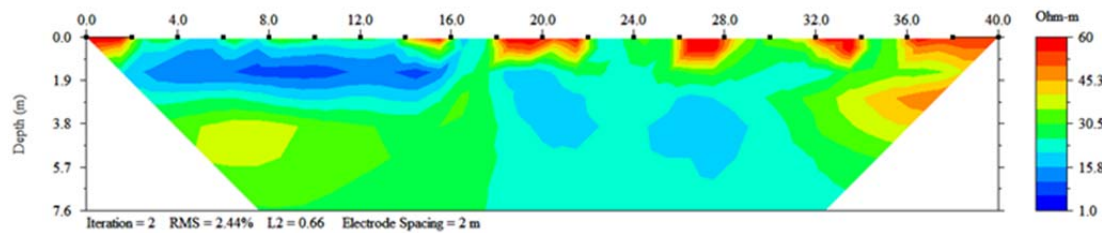


圖 39 水上地電阻探測結果

此現地驗證之結果，三者之結果皆可互為映證比對具一致性，且由 TDR 貫入器之電學量測成果可提供地物調查不同的協助，但由於現地驗證所選擇之場址底泥為較稀薄之存在且水泥底部造成 5 公分之盲區無法量測，因此為確實驗證本研究於底泥調查上之可行性，另規劃進行室內全尺度之試驗。

5.2.2 室內全尺度 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器驗證

現地驗證之場址無法控制其底泥之狀況，且本研究之現地驗證處底泥僅是稀薄的存在，難以驗證本研發工作之成效，因此規劃室內全尺度之試驗模擬現場環境進行驗證工作。在此室內全尺度試驗中，使用長寬各 30 公分高約 45 公分之壓克力箱進行試驗，在壓克力箱中分別由下往上鋪設細礫石(直徑約 2 公分)以及細砂(直徑在 3mm 以下)，而後添加自來水至八分滿，靜置一日使其完全飽和後進行 TDR 高空間解析度貫入試驗。試驗採用 TDR3000 進行資料收錄，每 1 公分收錄一筆資料，收錄所得之資料同時進行 nTp 以及導電率分析，所獲得之 nTp 採用前述標定所得之標定式進行 Ka 推估，整體試驗成果如圖 40 所示，由圖中可見，在水中區段，不論視介電度或是導電度都明顯較高，當接近細砂層時，兩者都有一漸變之過度段，而後再隨著深度的增加進入細礫層，視介電度的變化並不明顯，但在導電率的結果上可見其開始有略微上升的趨勢，由此一室內全尺度驗證可更加瞭解，透過視介電度與導電度的同時量測，將可更有利於進行精確的底泥厚度調查。而在此試驗中可發現，相較於 Ka 的資料，導電率的資料顯得較為平滑，且跳動較輕微，主要原因在於透過 nTp 推估 Ka 值其取樣空間較小，容易受局部狀況的影響，受到貫入造成擾動而產生的可能誤差就會較為明顯，而導電率的量測是使用 TDR 訊號的穩態值，其相對所量測的取樣空間就較大，因而會有較

為平滑的結果產生；此外，在細砂與細礫層間的介電度差異不大的原因可能來自於本研究目前感測器的設計，由標定之結果可知，在較低介電度的範圍(視介電度約小於 35 的部分，即為一般砂土的範圍)其量測會有鈍化的現象，亦即同樣一單位的 nTp 量測差異在此範圍內所推估出的 Ka 差異會較小，如此就可能造成目前在同為孔隙較明顯的細砂與細礫層中無法量測到明顯視介電度差異的原因，此部分將須透過感測器設計型式的改良以獲得提升。

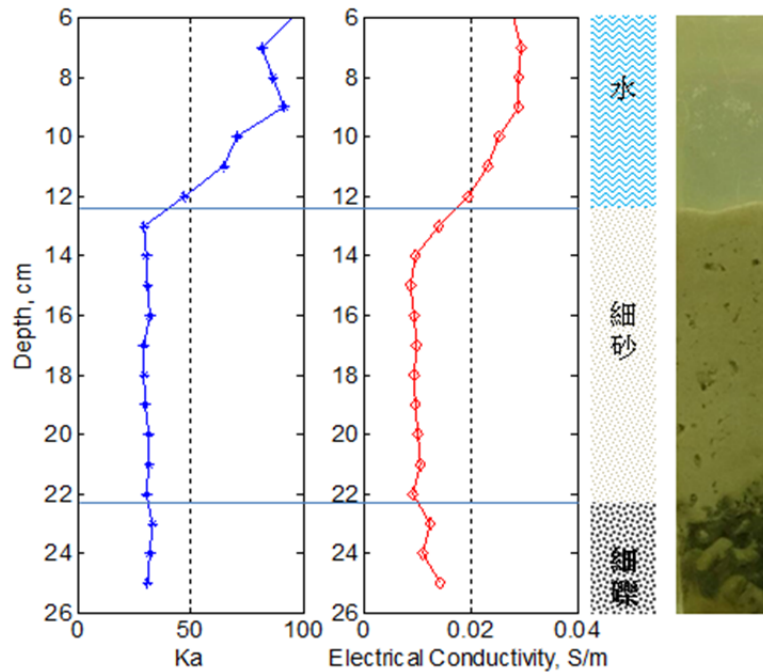


圖 40 TDR 高空間解析度貫入器室內全尺度試驗成果

5.2.3 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器與地球物理方法搭配調查之建議步驟

TDR 現場底泥電學性質感測貫入器之主要優點在於可同時量測視介電度與導電率，且可提供高空間解析度，因此在與地球物理方法的搭配上應就此點進行發揮。如 3.1.3 節中對地球物理方法之檢討，透地雷達應用上無法獲得電磁波速的缺陷可由視介電度提供，而地電阻探測解析度較為不足的問題可由導電率提供，此外，由 TDR 之視介電度與導電率所判釋出的底泥厚度可提供透地雷達以及地電阻探測進行標定調整用，因此，在配合調查工作上建議如所示，首先由透地雷達以及地電阻探測進行調查，而後根據兩者的初步結果選定至少兩處位置，一處是訊號較明確處，可由 TDR 提供其所需參數

以及提升準確度，另一處是具有疑慮處，透過 TDR 的輔助以及由前一處所得到的比對成果進行釐清。目前透地雷達與地電阻探測的設備皆已十分進步，可做到現場快速分析獲得初步成果的需求，而 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器的施作，就目前建議採用配重的靜態加壓方式，其所需之協助工具基本與透地雷達及地電阻探測需求相同，最主要是載具(例如船)以及夾具(以利貫入器伸出船外貫入水體)，因此可在獲得初步結果進行簡易判釋後即進行施作，操作上可謂簡便。惟在較堅硬的底泥或河床上貫入時應要注意，就目前經驗，當延長桿長度有 2 公尺以上無側向支撐時，其產生挫曲破壞螺牙而傷害到感測器本身的危險性就會增加，可能需要有其他設備協助會較佳。

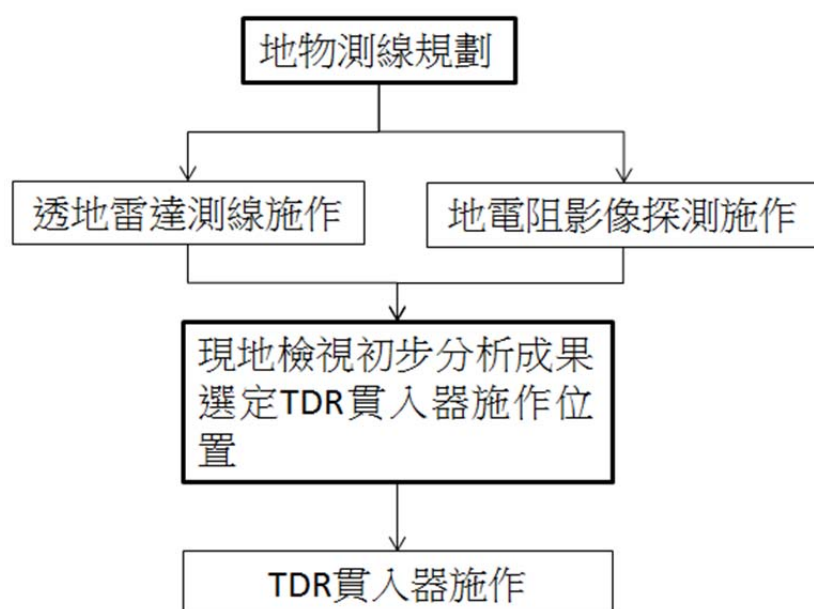


圖 41 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器與地球物理方法搭配調查之建議施作流程

5.3 現地寬頻複介電度量測技術研發

5.3.1 改良式現地寬頻複介電度量測技術構想

在 3.2.2 節中所介紹的兩種介電頻譜分析方法前者反算分析法在進行分析時，先不論其需較多之時間，在其方法本身之應用上便有幾點問題，首先在進行分段的過程中，因整個傳輸線系統，自主機開始至感測段結束，其會有不同纜線、接頭以及可能存在的阻抗不連續，而使得不易決定分成幾個段落進行分析會較為合適，而當段落的數目增加，其所需反算的參數便隨之增

加，使得反算所得之結果的可靠性會有所降低，再者，當段落數量增加時，其可能會有非惟一解之情況產生，此將造成反算結果不具參考性；而後者頻率域相位波速分析法受限於方法本身，其可適用之頻寬較窄，且主要在高頻段(100-1500MHz)，無法用於寬頻介電頻譜分析之需求，因此，基於此些問題，在進行寬頻介電頻譜行為研究前，本研究先進行改良式寬頻介電頻譜分析方法之研究。

目前已有許多矩陣運算方法用於非均質傳輸線系統之訊號模擬，例如散射矩陣法(scattering matrix)、傳輸矩陣法(transmission matrix)以及 ABCD 矩陣法(ABCD matrix)(Proponotarios and Wing, 1967; Claerbout, 1976; Frolik and Yagle, 1997)，此些矩陣方法在數學上具有相關性，而其中 ABCD 矩陣法在推導以及式子型式上最為簡便，本研究之改良式寬頻介電頻譜分析方法將由此方法進行提出改良概念。

ABCD 矩陣法對圖 14 之多段式傳輸線理論模型定義第 i 個段落之 ABCD 矩陣 Φ_i 為

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i L_i) & -Z_c \sinh(\gamma_i L_i) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma_i L_i) & \cosh(\gamma_i L_i) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

則整體多段式傳輸線理論模型之 ABCD 矩陣 Φ 為

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \Phi_n \Phi_{n-1} \dots \Phi_1 \dots\dots\dots (12)$$

一旦獲得 Φ 矩陣後，TDR 波形在頻率域反應便可由下式獲得

$$V(0) = \frac{Z_L D - B}{(Z_L D - B) - Z_s (Z_L C - A)} V_s \dots\dots\dots (13)$$

然而，由此雖可在已知傳輸線中各個段落之參數時進行 TDR 波形模擬之用，但在應用上，此法並無法獲得在感應段中的土壤介電頻譜，因此為可獲得感應段之土壤介電頻譜，可將圖 14 中之多段式傳輸線理論模型，透過 ABCD 矩陣法將其簡化為兩個段落的傳輸線理論模型(如圖 42 所示)，將感測段自其它傳輸纜線中分離，並將其視為新的阻抗輸入 $Z_L = Z_{in}(z_{n-1})$ ，則(13)式可改寫為

$$V(0) = \frac{Z_{in}(z_{n-1})D - B}{(Z_{in}(z_{n-1})D - B) - Z_s(Z_{in}(z_{n-1})C - A)} V_s \dots\dots\dots (14)$$

採用此一改良自 ABCD 矩陣法之分析方法目的主要是希冀透過事前之標定可將非感測段之其它段落之 ABCD 矩陣求出，而後將現場資料透過反算技巧獲得 $Z_{in}(z_{n-1})$ ，而進一步獲得土壤之介電頻譜資料，然而需注意，若單只僅具有量測所得之 TDR 反射波形是無法解算獲得(4)式中的 A、B、C、D 四個未知參數，如此欲採用(14)式達到量測土壤介電頻譜之目的便無法達成，幸而，若進一步整理(14)式可得

$$V(0) = \frac{Z_{in}(z_{n-1}) - \frac{B}{D}}{(Z_{in}(z_{n-1}) - \frac{B}{D}) - Z_s(Z_{in}(z_{n-1})\frac{C}{D} - \frac{A}{D})} V_s \dots\dots\dots (15)$$

由此一整理後之式子中可發現，計算 TDR 頻率域反應之獨立參數僅需 $\frac{B}{D}$ 、 $\frac{C}{D}$ 以及 $\frac{A}{D}$ 三個，如此，在標定上便可採用 SOL(short-open-load)標定法(即在感測段初始處進行短路量測-移除感測段量測-採用已知材料量測)，便可將非感測段之量測系統參數標定完成，進而可用於現場進行介電頻譜量測。

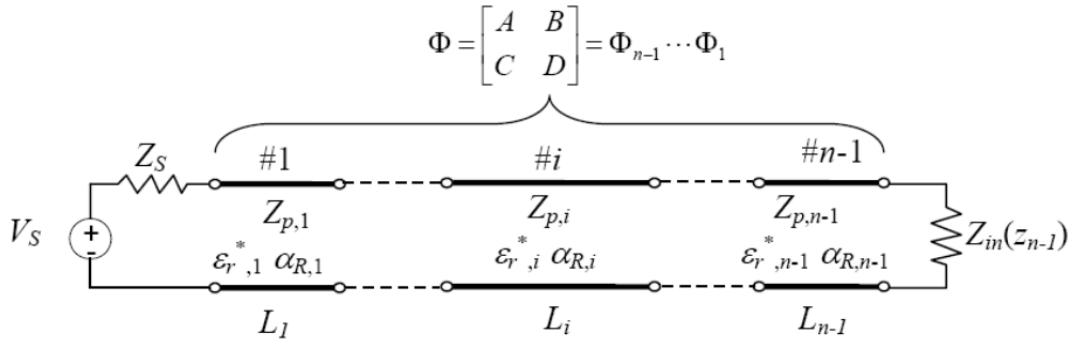


圖 42 TDR 簡化多段式傳輸線電路理論模型

若進一步定義量測之系統參數(system function)H

$$H = \frac{Y}{X} \dots\dots\dots (16)$$

其中，X 為 TDR 主機所產生之方波波源訊號傅立葉頻譜，Y 為 TDR 量測訊號之傅立葉頻譜，定義

$$H' \equiv \frac{H-1}{HZ_s} \dots\dots\dots (17)$$

$$Z'_s = \frac{1}{Z_s} \dots\dots\dots (18)$$

$$Y'_i = \frac{1}{Y_i Z_s} \dots\dots\dots (19)$$

為區別不同狀態下所量測之 TDR 訊號，在 y 、 Y 、 H 以及 H' 增加下標表示，其中 m 表示為待測材料之 TDR 訊號、 k 為已知介電頻譜材料之 TDR 訊號、 o 為移除感測段量測之 TDR 訊號(即採用 open 的量測)、 s 為在進入感測段處短路之 TDR 訊號(即採用 short 的量測)，則，將(16)、(17)、(18)以及(19)式代入(15)式，則

$$\tanh(j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_m^*} \cdot l_n) \sqrt{\epsilon_m^*} = \frac{Y'_s - Y'_k}{Y'_o - Y'_k} \cdot \frac{Y'_o - Y'_m}{Y'_s - Y'_m} \tanh(j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_k^*} \cdot l_n) \sqrt{\epsilon_k^*} \dots\dots\dots (20)$$

本研究所提之改良式 ABCD 矩陣法之最終演算式即如(20)式所示，(20)式等式之左側為未知之待測材料介電頻譜，而等式右側為已知之 TDR 採用 SOL 標定以及量測自待測材料之訊號，只要透過最佳化之演算式在每個頻率下使其所得到之介電頻譜待入未知之等式左側會得到與等式右側最接近的值，即為該頻率下之介電常數，獲得各頻率之值即可獲得完整之介電頻譜。而在此(20)式中可發現，其不包含有 TDR 之方波波源訊號 X ，亦不包含感測器在空氣中之阻抗 Z_p 。

就方法上而言，此一改良式寬頻介電頻譜之量測法利用 ABCD 矩陣法將較複雜之多段式傳輸線電路理論參數簡化，並透過標定過程將非感測段之系統固定參數事先標定完成，不但降低應用時反算分析上的時間需求，且增加反算後所得介電頻譜之可信度，本計畫中將先以數值模擬以及室內試驗之方式進行構想之初步驗證。

5.3.2 數值方法驗證

為驗證此新提出之改良式 ABCD 矩陣介電頻譜量測法，先行採用數值模擬之方式進行驗證。在此數值模擬中，模擬之 TDR 量測系統模型如圖 43 所示，將 TDR 量測系統分為四個段落，分別是 TDR 主機段、同軸纜線段、感

測器頭段以及感測器段，在 TDR 主機段其 Z_s 設定為 50Ω ，末端 Z_L 設定為 $10^{12}\Omega$ ，採用理論 RC 電路模擬方波；在模擬量測之材料有自來水、純水、正丁醇(Butanol)、乙醇(Ethynol)以及兩種土壤，在自來水、純水、正丁醇以及乙醇的介電頻譜在模擬上採用 Cole-Cole Equation，而土壤之模擬採用混和模型，兩種土壤所設定之 A_{es} 為 $50\text{m}^2/\text{g}$ ，約為粉土過渡至低塑性黏土的土壤種類，其含水量與乾密度分別設定為 10%、15%、 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 以及 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，取樣頻率為 20psec ，總擷取時間為 $6.67 \times 10^{-6}\text{sec}$ ，相對應之 Nyquist frequency 為 24.7GHz ，頻率解析度為 74950Hz 。

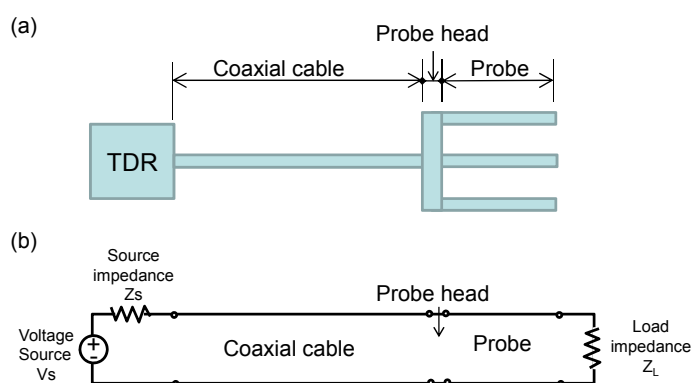


圖 43 TDR 量測訊號數值模擬模型：(a)物理模型(b)電路模型

在數值模擬驗證中，根據此改良式 ABCD 矩陣介電頻譜分析法，在系統參數標定上除了需要量測系統之 Short 以及 open 訊號外，另需要有一已知介電頻譜知材料，考量在實際試驗中最為便利取得之已知材料為空氣(Air)、純水(Deionized water)以及自來水(Tap water)，因此在此驗證中將採用此三種做為標定用之已知材料(如表 2 所示)，另外分別以自來水、純水、正丁醇、乙醇以及兩種土壤做為量測材料，以驗證此法之可行性。

表 2 數值模擬驗證規劃表

Measured Known \	Tap water	Deionized water	Air	Butanol	Ethynol	Soil 1	Soil 2
Tap water	--	--	○	○	○	○	○
Deionized water	--	--	○	○	○	○	○
Air	○	○	--	○	○	○	○

在分析程式上，使用 MATLAB 進程式撰寫，最佳化採用其內建之單純型搜尋法(Simplex search method, Lagarias et al., 1998)求解(20)式，如前所述，在此式中僅量測材料之介電常數 ε_m^* 未知，則在每個頻率下之介電常數可令其為

$$\varepsilon_{m,i}^* = a_i + b_i j \dots\dots\dots (21)$$

其中， $\varepsilon_{m,i}^*$ 是在頻率 f_i 下的介電常數， $f_i = (i-1) \cdot \Delta f$ ， Δf 為頻率解析度， a_i 為頻率 f_i 下介電常數的實部， b_i 為頻率 f_i 下介電常數的虛部，在進行此最佳化求解中，求解頻率範圍在 10-1000MHz 間，而其目標函數(cost function)定義如下：

$$Error_i = |M_i^{Cal} - M_i^{Mea}|^2 \dots\dots\dots (22)$$

其中，下標 i 表示頻率 f_i 下之值，real() 表示取實部，imag() 表示取虛部，

$$M_i^{Cal} = \tanh(j \frac{2\pi f_i}{c} \sqrt{\varepsilon_{m,i}^*} \cdot l_n) \sqrt{\varepsilon_{m,i}^*} \dots\dots\dots (23)$$

$$M_i^{Mea} = \frac{Y_s' - Y_k'}{Y_o' - Y_k'} \cdot \frac{Y_o' - Y_m'}{Y_s' - Y_m'} \tanh(j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_k^*} \cdot l_n) \sqrt{\varepsilon_k^*} \dots\dots\dots (24)$$

如此，以單純型搜尋法在頻率 f_i 下針對 a_i 與 b_i 進行最佳化搜尋，使得 $Error_i$ 最小。而在初始值的設定上，對於第一個頻率進行最佳化之介電常數初始值設為 $\varepsilon_{m,1}^* = 1 - 20j$ ，而後的頻率皆令其 $\varepsilon_{m,i+1}^* = \varepsilon_{m,i}^*$ 。

數值模擬之分析結果如圖 44 至圖 46 所示，其分別是採用自來水、純水以及空氣做為系統參數標定之材料，並以之進行其他材料之量測，每個圖的副圖號(a,b,c 等)表示不同的量測材料，各副圖的最上方是介電頻譜的實部，中間為虛部，最下方是理論與量測值的差異，顏色較深者為實部，較淺者為虛部。

圖 44 為採用自來水進行標定之量測結果，圖中可見採用改良式 ABCD 矩陣介電頻譜分析法，對於空氣、Soil 1 以及 Soil 2(圖 44a、d、e)的介電頻譜量測結果雖然在某幾個頻率下會有明顯的跳動情形(如圖 44d 中在頻率約 50MHz、100MHz、150MHz、200MHz 等處)，但基本上在頻率 10-1000MHz 範圍中，其最大誤差不超過 10%，且此最大誤差點主要是在跳動的頻率處，

而在正丁醇與乙醇的量測上(圖 44b、c)，除了在部分特定頻率會有明顯跳動外，其在頻率 600MHz 後之量測結果誤差大於 10%，且其誤差有持續增加的傾向。

圖 45 為採用純水進行標定之量測結果，圖中可見採用改良式 ABCD 矩陣介電頻譜分析法，對於空氣、Soil 1 以及 Soil 2(圖 45a、d、e)的介電頻譜量測結果雖然在某幾個頻率下會有明顯的跳動情形(如圖 45d 中在頻率約 50MHz、100MHz、150MHz、200MHz 等處)，但基本上在頻率 10-1000MHz 範圍中，若不論在跳動頻率處之誤差，其最大誤差皆不超過 10%，而在正丁醇與乙醇的量測上(圖 45b、c)，除了在部分特定頻率會有明顯跳動外，與採用自來水進行系統標定之結果相似，其在頻率 600MHz 後之量測結果誤差大於 10%，且其誤差有持續增加的傾向。

圖 46 為採用空氣進行標定之量測結果，圖中可見採用改良式 ABCD 矩陣介電頻譜分析法，對於自來水、純水、Soil 1 以及 Soil 2(圖 46a、b、e、f)的介電頻譜量測結果，其在頻率 500MHz 以及 1GHz 的位置有明顯的跳動產生而有較大的誤差，但基本上在頻率 10-1000MHz 範圍中，若不論純水介電頻譜虛部之結果，其最大誤差皆不超過 10%。對於純水的量測，雖然其虛部量測值與實際值差異僅在 2 以內，但因為純水沒有導電度，其介電頻譜虛部之值較小(在頻率 10-1000MHz 範圍內最大尚小於 5)，所以誤差百分比相對較高。而在正丁醇與乙醇的量測上(圖 46b、c)，除了在部分特定頻率會有明顯跳動外，其在頻率 500MHz 後之量測結果誤差大於 10%，且其誤差有持續增加的傾向。此外，對於採用空氣作為系統標定之所有模擬量測結果皆顯示其介電頻譜之虛部皆有低估的現象。由數值模擬之結果可知此方法雖有誤差產生之情形，但其具有可行性，且可達到便利寬頻介電頻譜量測之成果，因此規畫進行室內試驗進行驗證。

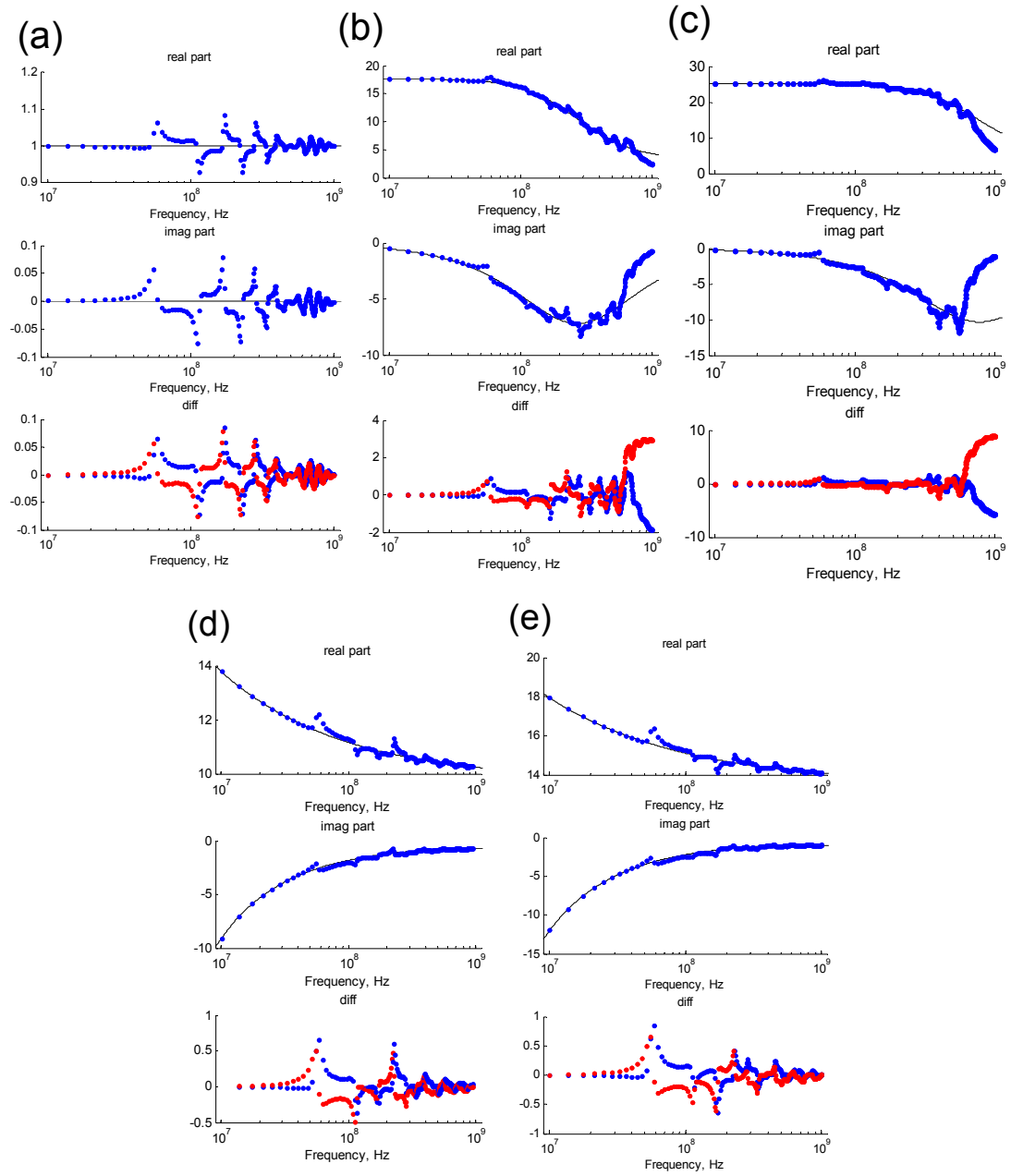


圖 44 數值模擬介電頻譜量測結果：Known 自來水，量測材料(a)空氣，(b)正丁醇，(c)乙醇，(d)Soil 1，(e)Soil 2

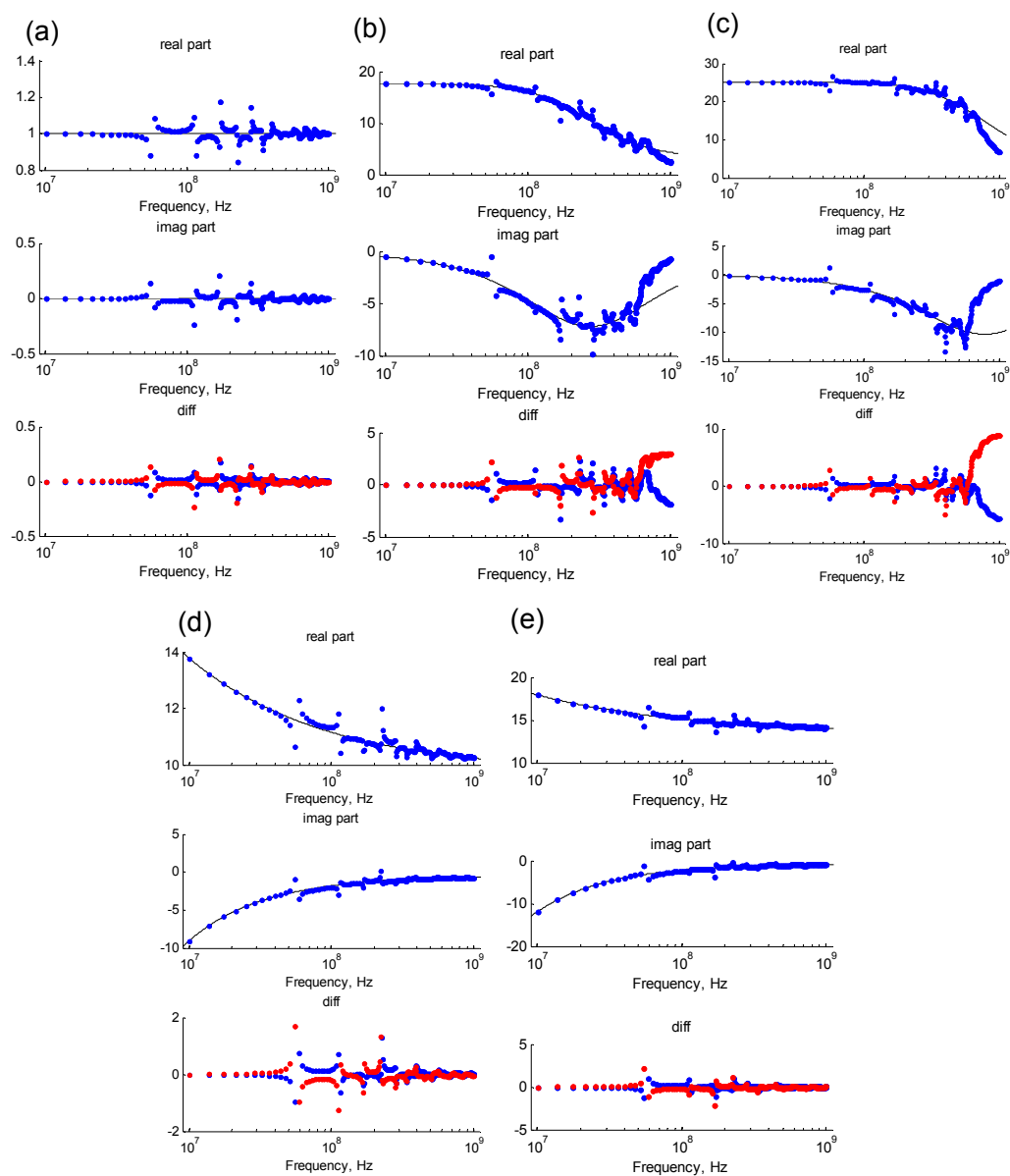


圖 45 數值模擬介電頻譜量測結果：Known 純水，量測材料(a)空氣，(b)正丁醇，(c)乙醇，(d)Soil 1，(e)Soil 2

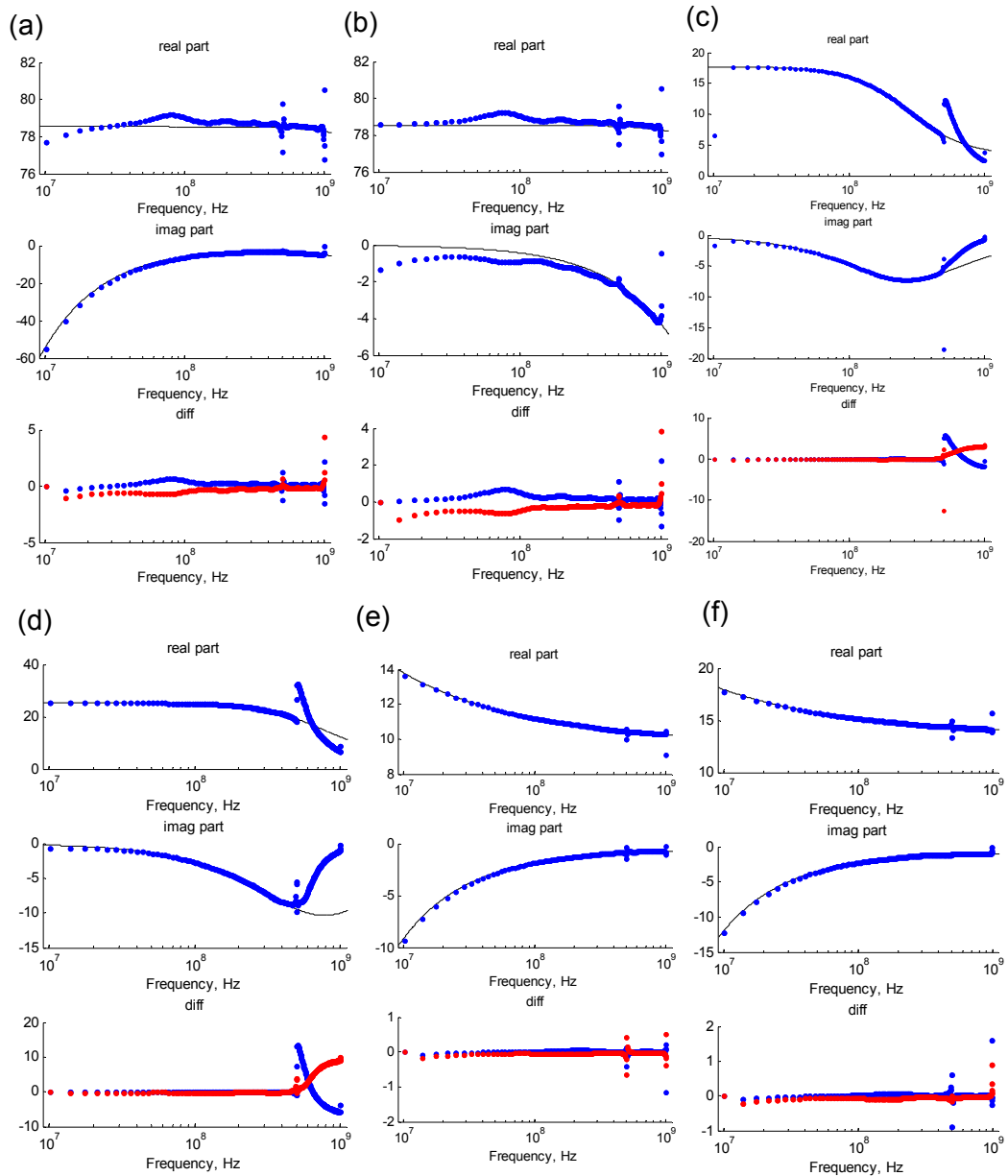


圖 46 數值模擬介電頻譜量測結果：Known 空氣，量測材料(a)自來水，(b)純水，(c)正丁醇，(d)乙醇，(e)Soil 1，(f)Soil 2

5.3.3 室內試驗驗證

寬頻介電頻譜行為探討之試驗規劃如表 3 所示，試驗規劃以已知介電頻譜之液體為主，計有純水(Deionized Water)、自來水(Tap Water)、鹽水(Salty Water)、空氣(Air)以及乙醇(Ethynol)，而其中較易取得之純水、自來水、鹽水以及空氣(Air)將分別作為 TDR 系統參數標定用之材料，在量測時，液體類材料皆盛裝於寬 30 公分見方高 50 公分的壓克力箱中，液體盛裝的高度使感

測器外露的鋼棒可隱沒在液體表面下 5 公分，且鋼棒之末端距地板至少 10 公分，以避免有效感應範圍超越量測材料所存在範圍。

在量測分析上，純水、自來水以及鹽水考量皆為水，因此其相互標定量測之組合暫不納入考量(如表 4 所示)，量測分析程式與 5.3.2 節中所描述者相同，且已知介電頻譜材料之介電頻譜對於純水、自來水以及鹽水之參數中導電度的部分採用實際以導電度計量測所得之結果代入，此外，同時考量溫度對水參數中 ϵ_{dc} 之影響，採用下式進行溫度修正

$$\epsilon_{dc} = 78.54 *$$

$$\left[1 - 4.58 * 10^{-3} * (T - 25) + 1.19 * 10^{-5} * (T - 25)^2 - 2.8 * 10^{-8} * (T - 25)^3 \right] \dots\dots\dots (25)$$

其中， T 為溫度，單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 3 碾壓土壤寬頻介電頻譜性質室內實驗量測材料參數表

物理性質 (量測法)	材料 種類	導電度(S/m)	溫度($^{\circ}\text{C}$)
寬頻介電性質 (TDR)	純水	0.0006	26.6
	自來水	0.0195	26.2
	鹽水	0.281	26.1
	乙醇	0	27.2
	空氣	0	26.2

表 4 改良式現地寬頻複介電度量測技術室內試驗規劃表

Measured Known	Deionized water	Tap water	Salty water	Air	Ethynol
Deionized water	--	--	--	○	○
Salty water	--	--	--	○	○
Tap water	--	--	--	○	○
Air	○	○	○	--	○

根據數值模擬之結果，本文所提出之改良式 ABCD 矩陣介電頻譜量測法具有其可行性，為更進一步實際驗證其可行性以及瞭解其量測表現能力，規劃有室內試驗。本試驗採用 TDR 3000 進行量測工作，而其以 Labview 所撰寫之控制程式透過嵌入式系統作為作業平台進行資料收錄。

其次，在室內試驗所使用的感測器上，由於此改良式量測方法其需要量測感測器前端的 open 以及 short 訊號，且為保持標定之 TDR 系統參數的一致，系統與量測材料相交界的位置須保持固定，此需求在前所使用之感測器中欲控制較為困難，因此另行設計，設計概念圖如圖 47 所示，在一直徑約 10 公分金屬殼中置入外露 20.28 公分之三根鋼棒，此三根鋼棒在金屬殼之外的部分以螺牙與埋入金屬殼的部分(約 1 公分)連接，金屬殼內填充黑色環氧樹脂做為固定用，如此之設計在量測感測器前端之 open 與 short 訊號時，只需將外露鋼棒轉出即可。此三根感測用之鋼棒以單心銅線與 QR-320 同軸纜線連接，外側兩根鋼棒與同軸纜線外殼連接，中心鋼棒與同軸纜線中心線連接，而此 425 公分之 QR-320 同軸纜線透過一 QR320 轉 BNC 接頭與 100 公分之 75Ω 同軸纜線相接，此纜線又透過 BNC 轉 SMA 接頭與 TDR 3000 連接。

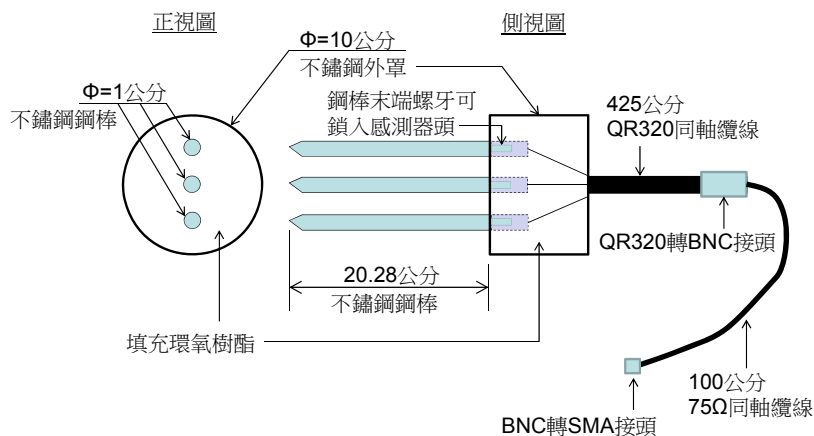


圖 47 改良式現地寬頻複介電度量測技術室內試驗感測器設計圖

室內試驗之分析成果如圖 48 至圖 51 所示，圖 48 為採用純水作為 TDR 系統參數標定，並以其量測空氣(圖 48a)以及酒精(圖 48b)之介電頻譜結果，圖中最上方為介電頻譜實部，中間為介電頻譜虛部，最下方為理論值與量測值的誤差，淡色點為虛部，深色點為實部，由圖中可見介電頻譜的有效量測頻率約至 150MHz，此頻率之後之誤差突然跳躍式增加，而在量測範圍內在特定頻率下(如 40MHz、80MHz 等位置)亦有輕微的跳動產生，相較數值模擬採用純水標定所得之量測結果，其有效量測頻率僅達 150MHz(數值模擬結果可達 600MHz)，且在乙醇之量測上誤差偏大。

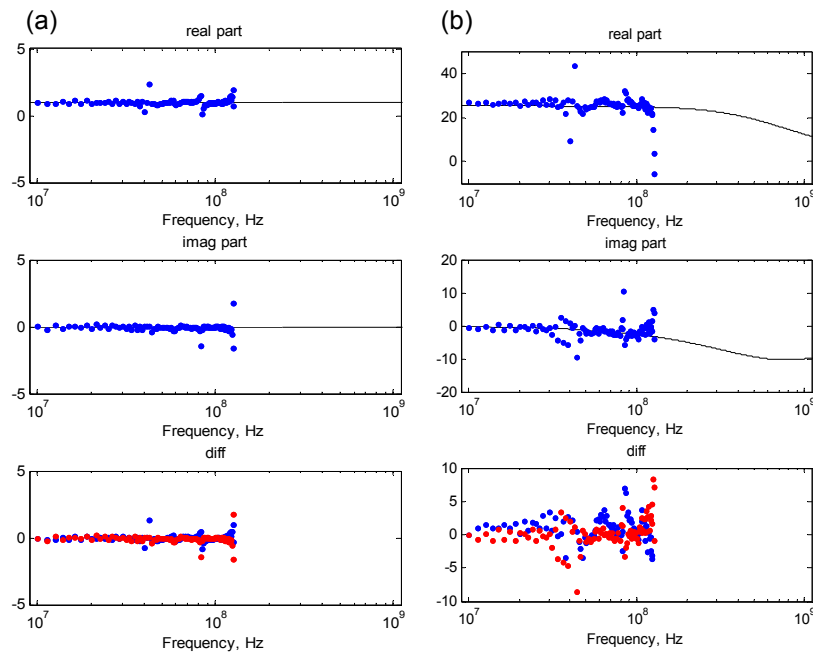


圖 48 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 純水，量測材料(a)空氣，(b)乙醇

圖 49 為採用鹽水作為 TDR 系統參數標定，並以其量測空氣(圖 49a)以及酒精(圖 49b)之介電頻譜結果，由圖中可見介電頻譜的有效量測頻率至少可至 300MHz，此頻率之後之誤差持續明顯增加，而在量測範圍內雖略有跳動，但其頻率之特定性較不明顯，相較採用純水標定之結果，其有效量測頻率不但可達到較高的頻率，且其整體量測誤差皆較小。圖 50 為採用自來水作為 TDR 系統參數標定，並以其量測空氣(圖 50a)以及酒精(圖 50b)之介電頻譜結果，由圖中可見介電頻譜的有效量測頻率僅至 150MHz，此頻率之後實部之誤差突然跳躍增加，與採用純水量測之結果雷同的，在量測範圍內在特定頻率下(如 40MHz、80MHz 等位置)亦有輕微的跳動產生，相較數值模擬採用自來水(數值模擬之導電度較高為 0.03S/m)標定所得之量測結果，其有效量測頻率僅達 150MHz(數值模擬結果可達 600MHz)，且在乙醇之量測上誤差偏大。

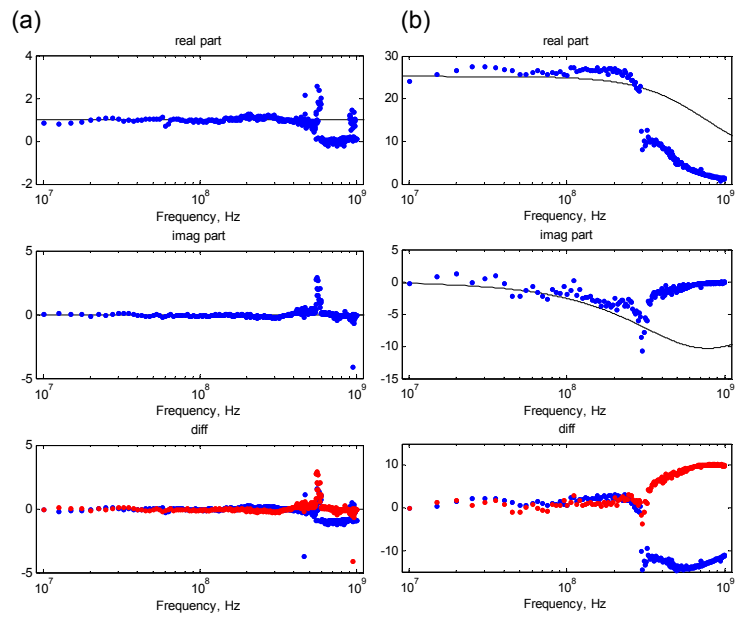


圖 49 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 鹽水，量測材料(a)空氣，(b)乙醇

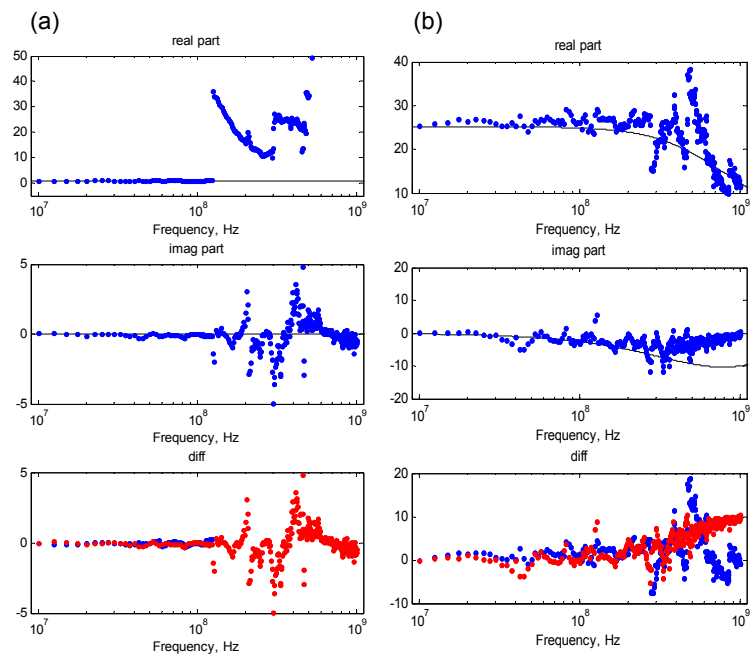


圖 50 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 自來水，量測材料(a)空氣，(b)乙醇

圖 51 為採用空氣作為 TDR 系統參數標定，並以其量測純水(圖 51a)、鹽水(圖 51b)、自來水(圖 51c)以及酒精(圖 51d)之介電頻譜結果，由圖中可見介電頻譜的有效量測頻率至少可至 200MHz，但其較為特別不同於前三項標定

材料之結果者在於採用空氣標定的量測結果在低頻段(約 10-60MHz)會有較明顯的震盪情形，此與數值模擬中皆為高頻段才会有量測不佳結果的情形不同，此外，其有效量測範圍內之誤差皆偏大，此與數值模擬中採用空氣標定會有最佳成果之情形亦有所不同。

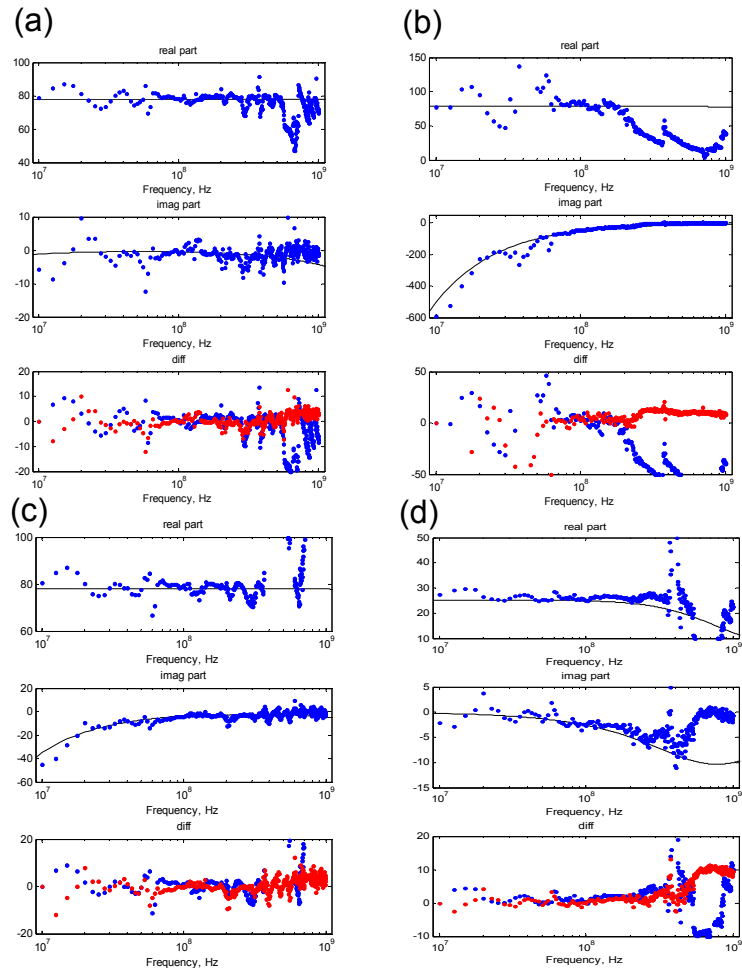


圖 51 室內試驗介電頻譜量測結果：Known 空氣，量測材料(a)純水，(b)鹽水，(c)自來水，(d)乙醇

根據室內試驗之測試結果，透過恰當的標定材料選用(例如鹽水)，其可有效量測 10-300MHz 間之介電頻譜(包含虛部與實部)，且若設計更為良好之感測器應可再次提高其有效量測頻率。

5.4 結論與建議

5.4.1 結論

1. 針對文獻回顧歸納採用 TDR 技術於底泥厚度可能之潛在問題有：深

度貫入、空間解析度不足、高導電度施測環境以及無法量測寬頻複介電度等四項。

2. 在 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器系統之研發與建置上，考量潛在問題，透過使用 TDR 能量指數法改良既有視介電度分析方法，並配合貫入式感測器，可達到具高空間解析度並可在高導電度環境量測之目標，未來搭配現地寬頻介電頻譜之量測將可更進一步應用於汙染物辨識上。

3. 根據現場驗證的經驗，本研究研發之 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器具有高空間解析、可於高導電度環境施作以及現場簡單操作等優點，但根據目前之設計其仍有四點使用限制，其一，在底床為較堅硬之材料時以致無法貫入時，會有約 5 公分的量測盲区，其二，由於其具高空間解析因此其感應量測之空間較小，易受不恰當之貫入影響，其三，對於低視介電度(<35)的量測靈敏度較差，其四，目前不建議在延長桿無側向支撐時使其超過 2 公尺進行貫入，以避免感測器受損。

4. 而在 TDR 現地寬頻複介電度量測技術研發上，本研究提出改良式 ABCD 矩陣分析法概念，簡化 TDR 量測系統在寬頻複介電度量測上之標定過程，使其具備現地應用性。此概念在理論以及數值模擬與室內試驗之驗證下皆顯示具可行性。

5.4.2 建議

1. 本研究所研發之 TDR 現場底泥電學性質感測貫入器具有現場可行性，建議可擴大應用增加其現地應用經驗，收集在不同狀態下之底泥環境的量測成果，以利針對可能的應用現制進一步改善，做為將其規模化標準化推廣應用的準備工作。

2. 如結論第三點所提目前貫入器之限制，建議後續可再行針對此些限制就感測器設計、現地操作配合器具等項目進行進一步的改善工作，以提升此技術之應用性。

3. TDR 現地寬頻複介電度量測技術研發目前已初步完成驗證工作，但仍以針對單分子液體為主，且在特定頻率仍會有明顯誤差跳動情形，建議未來可就水砂等混和物材料進行量測驗證工作，並針對介電頻譜上誤差跳動的原因進行探討與改善。

參考文獻

1. 林俊宏(2013)，應用時域反射法於碾壓土壤檢測之電學性質量測技術改良，國立交通大學土木工程學系博士論文。
2. 環境保護署 (2012)，底泥污染來源及傳輸模式調查計畫－以重點河川為例，受託單位：美商傑明工程顧問(股)台灣分公司。
3. 楊士輝 (2011)，地層電學性質與含水特性關係探討-現地尺度探討，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
4. 鐘志忠 (2008)，時域反射量測技術改良及於水土混和物之應用，國立交通大學土木工程學系博士論文。
5. 刘豪睿、能昌信、王聪、董路、刘玉强 (2010)，基于介电特性获取污染土壤中污染物含量的研究，地球物理学进展，25(6): 2184~2192。
6. Amegashie, F. Shang, J. Q., Yanful, E. K. (2006), "Using complex permittivity and artificial neural networks to identify and classify copper, zinc, and lead contamination in soil," Canadian Geotechnical Journal, 43 (1), 100~109.
7. Archie, G. E. (1942), "Electrical-Resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics," Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 146, 54-62.
8. Arulanandan, K. and Smith, S. S. (1973), "Electrical disperison in relation to soil structure," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM12), 1113-1133.
9. Auerswald, K., Simon, S., and Stanjek, H., (2001), "Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes," Soil Science, 166, 382-390.
10. Bates, D. T. (2011), *Characterizing River and Lake Sediments Using Geophysical Methods in Urban Impacted Areas within Summit County Ohio*, Thesis of The University of Akron.
11. Campanella, R.G. and Weemees, I. (1990), "Development and use of an electrical

- resistivity cone for groundwater contamination studies,” *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 557–567.
12. Degan, J. R., Teeple, A. P., Johnston, C. M., Marvin-DiPasquale, M. C., and Luce, D. (2009), *Geophysical Bed Sediment Characterization of the Androscoggin River from the Former Chlor-Alkali Facility Superfund Site, Berlin, New Hampshire, to the State Border with Maine*, U.S. Geological Survey.
 13. Dirksen, C., and S. Dasberg. (1993). “Improved calibration of time domain reflectometry of soil water content measurements,” *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 660–667.
 14. Dobson, M.C., Ulaby, F. F., Hallikainen, M.T., and El-Rayes, M.A. (1985), “Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 23, 35–46.
 15. Dowding, C. H., Huang, F-H., and McComb, P. S. (1996). "Water pressure measurement with time domain reflectometry," *Geotechnical Testing Journal*, 19, 58-64.
 16. Dowding, C. H., Su, M. B., and O'Connor, K. M. (1988). "Principles of time domain reflectometry applied to measurement of rock mass deformation." *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 25, 287-297.
 17. Durlless, H. and Stanjek, H., (1997), “Capability and limits of a DGPS supported EM38 survey for the fast estimation of the spatial variation of clay and water contents of soils,” In *Field Screening Europe*, J. Gottlieb, et al., Eds., Wolters Kluwer, Dordrecht, 73–76.
 18. Feng, W., Lin, C.P., Deschamps, R.J. and. Drnevich, V.P (1999), “theoretical model of a multisection time domain reflectometry measurement system”, *water resource research*, 35:2321-2331.
 19. Francisa, F. M. and Rinaldi, V. A. (2003), “Complex dielectric permittivity of soil-organic mixtures (20 MHz~1.3 GHz),” *Journal of Environmental Engineering*, 129(4), 347~357.

20. Gray, J.S. (2002), Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist, *Marine Pollution Bulletin*, 45, 46-52.
21. Heimovaara, T. J. (1994). "Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms: 2 a four-component complex dielectric mixing model for soils," *Water Resources Research*, 30(2), 201-209
22. Hightower, J. M., and Moore, D. (2003), "Mercury levels in high-end consumers of fish," *Environmental Health Perspectives*, 111(4), 604-608.
23. Holsbeek, L., Das, H.K., and Joiris, C.R. (1997), "Mercury speciation and accumulation in Bangladesh freshwater and anadromous fish," *Science of the Total Environment*, 198, 201-210.
24. Jackson, D. B., (1973). Map showing percent lateral effect of total field resistivity, Marysville area, Lewis and Clark Co., Montana, open file report U.S. Geol. Surv., Menlo Park, Calif.
25. Jacobsen, O.H., and P. Schjønning. (1993), "A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture," *J. Hydrol.* 151, 147-157.
26. Klein, K. and Santamarina J.C. (2003), "Electrical conductivity in soils: underlying phenomena," *Journal of Environmental Engineering Geophysics*, 8(4), 263-273.
27. Lee, J.H., Oh, M.H., Park, J., Lee, S.H., and Ahn, K.H. (2003), "Dielectric dispersion characteristics of sand contaminated by heavy metal, landfill leachate and BTEX (02-104B)," *Journal of Hazardous Materials*, 105, 83-102.
28. Lin, C.P. (1999). Time domain reflectometry for soil properties. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
29. Lin, C.-P. (2003), "Frequency domain versus traveltime analyses of tdr waveforms for soil moisture measurements," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67(3), 720-729.
30. Lin C.-P., and Chang T.-S. (2004), "Multi-station analysis of surface wave dispersion," *Soil dynamics and earthquake engineering*, 24, 877-86.

31. Lin, C.-P., and Tang, S.-H. (2005), "Development and calibration of a TDR extensometer for geotechnical monitoring," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 28,(5), 464-471.
32. Lin, C.-P.; Tang, S.-H., and Chung, C.-C. (2006a), "Development of TDR penetrometer through theoretical and laboratory investigations: 1. Measurement of soil dielectric permittivity". *Geotech. Test. J.*, 29(4), 306-313.
33. Lin, C.-P., Chung, C.-C., and Tang, S.-H., (2006b) "Development of TDR Penetrometer through Laboratory Investigations: 2. Measurement of Soil Electrical Conductivity," *Geotech. Test. J.*, 29(4), Paper ID: GTJ14315.
34. Lin, C.-P., Chung, C.-C., and Tang, S.-H. (2007), "Accurate TDR measurement of electrical conductivity accounting for cable resistance and recording time," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71(4), 1278-1287.
35. Lin, C.-P., Chung, C.-C., Huisman, J. A., and Tang, S.-H., (2008) "Clarification and calibration of reflection coefficient for electrical conductivity measurement by time domain reflectometry," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1033-1040.
36. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, W.-C., and Chung, C.-C. (2009), "Quantification of cable deformation with tdr: implications to localized shear deformation monitoring," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, (1), 143-152.
37. Mojid, M.A., Rose, D.A., and Wyseure, G.C.L. (2007). "A model incorporating the diffuse double layer to predict the electrical conductivity of bulk soil," *European Journal of Soil Science* 58, 560-572.
38. Persson, M. and Wraith, J. M., 2002, "Shaft-mounted time domain reflectometry probe for water content and electrical conductivity measurements", *Vadose Zone J.*, V. 1, pp. 316-319.
39. Rhoades, J. D., Raats, P. A. C., and Prather, R. J., (1976), "Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity," *Soil Science Society of America Journal*, 40, 651-655.

40. Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., and Friedman, S. P. (2003). "A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry," *Vadose Zone Journal*, 2, 444-475.
41. Rowe, R. K., Shang, J. Q., and Xie, Y. (2001), "Complex permittivity measurement system for detecting soil contamination," *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 498~506.
42. Saltasa, V., Vallianatosa, F., Soupiosa, P., Makris, J. P., and Triandis, D. (2007), "Dielectric and conductivity measurements as proxy method to monitor contamination in sandstone," *Journal of Hazardous Materials*, 142(2), 520~525.
43. Shan, P. H. and Singh, D. N., (2005), "Generalized Archie's law for estimation of soil electrical conductivity," *Journal of ASTM International*, 2(5), 145-164.
44. Siddiqui, S.I. and Drnevich, V.P. (1995), *Use of Time Domain Reflectometry for the Determination of Water Content and Density of Soil*, FHWA/IN/JHRP-95/9, Purdue University.
45. Solimene R., Prisco, G., and Soldovieri, F. (2008), "GPR based soil electromagnetic parameters determination for subsurface imaging," *Advances in Geosciences*, 19, 39~44.
46. Tetra Tech, Inc. (2012) *Feasibility Study for the Remediation of the Sediments Adjacent to Lockheed Martin Middle River Complex*, December 17.
47. Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980), "Electromagnetic determination of soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry," *Water Resour. Res.*, 16 (3), 574~582.
48. Urish, DW, (1981). "Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial aquifers", *Water Resour Res* 17, 1401-1407.
49. Vaz, C. M. P. and Hopmans, J. W. (2001), "Simultaneous measurements of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe," *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 65 (1), 4-12.

50. Williams, B. G., and Hoey, D., (1987), "The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils," Australian Journal of Soil Research, 25, 21–27.
51. Worthington, P. F., (1993), "The uses and abuses of the Archie equations, 1: The formation factor-porosity relationship," Journal of Applied Geophysics, 30, 215–228.
52. Yankielun, N. E. and Zabilansky, L. (1999),"Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour," Journal of Hydraulic Engineering, 125, 1279-1283.

附錄一 申請計畫書進度甘特圖

工作項目	年月												備 註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
文獻回顧與資料蒐集													
時域反射現地貫入器系統研發與建置													
底泥土壤電學性質與土壤物理性質關係探討													
地球物理方法於底泥輔助調查初步規劃與測試													
現地試驗場址選擇與測試評析													
報告撰寫													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	100%	
預定查核點	期中：		提出現地貫入器之量測系統建置及初步底泥土壤電學性質與土壤物理性質關係探討。										
	期末：		完成地球物理方法於底泥輔助調查初步規劃與測試，並進行現地試驗場址選擇與測試評析。										
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。													