

行政院環境保護署

104 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

好/厭氧環境整治工法於 滯水層氣體分布調查技術研發

期末報告(定稿)

主辦單位



行政院環境保護署

專案執行單位

國立交通大學防災與水環境研究中心

專案主持人

林志平 教授

專案執行期間

103 年 12 月 1 日起至

104 年 11 月 30 日

中華民國 104 年 10 月 印製

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期末報告初審意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 現地試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：林志平 NO：3	
計畫名稱	好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體分布調查技術研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 期末報告請補充現地試驗之結果。		請見第 5.4 節之補充。	
2. 使用 TDR 和透地雷達兩種技術於滯水層氣體分布調查，現地試驗之結果之可靠性如何評估，請在期末報告中詳細說明。		由於無其他方法可直接互為驗證，因此以合理之推估進行可靠性評估，請見第 5.4 節對結果之討論。	
委員二			
1. 本研究利用具發展性之時域反射技術 (TDR)，採用單棒式三叉感測器設計，而訊號分析採用頻率域相位波速分析法進行，建立快速且便捷可量測監測井周邊氣體含量量測技術，並提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，透過孔內透地雷達進行飽和土體中 2 維氣體分布之調查評估，建立有效之滯水層中氣體含量分布調查工具。本報告撰寫詳實完整，文獻收集及相關資料收集非常齊全，討論亦相當精闢，執行成效佳。		感謝委員認可。	
2. 整體研究成果符合預期。		感謝委員認可。	
3. 主要成果符合計畫書之內容，進度並無落後情形。		感謝委員認可。	
4. 本報告針對研究進度、查核點及預期完成之工作項目有完整說明。		感謝委員認可。	
委員四			
1. 期末報告格式均依規定撰寫，符合規定。		感謝委員認可。	
2. 研究項目及進度符合計畫內容，已達到計畫目標。		感謝委員認可。	
3. 初步成果已達預期。TDR 井內氣體含量量測及時序性空氣含量研發等可再加強分析與評估。		感謝委員認可，未來將持續在此方面精進。	

4. 未來可依初步成果應用於污染實場之操作試驗之可行性。	感謝委員認可。
委員五	
1. 實務應用條件的建議(距離、深度、產氣量與精確度…等等)，建議討論。	本研究尚屬概念研發驗證中，未來將持續對其實務應用條件進行實地測試建議。但由於本技術採用跨孔透地雷達技術，其距離、深度與精確度基本受到跨孔透地雷達技術之應用限制。除會受到透地雷達天線平率之影響外，水體與土體之導電度為其重要環境因素，未來在討論上需要考慮導電度在此中之角色。
2. 是否受到不同氣體飽和溶解度不同的影響？例如釋氧劑與釋氮劑。	氣體飽和溶解度的影響不大，但對於會改變水體或土體導電度之氣體可能會有所影響。
3. 整治的添加物可轉化成氣體，但同時也必須配合添加物而有不同的緩衝劑與營養鹽…等等，此類物質是否影響本計畫成果的解讀與判定？建議討論。	對於會改變水體導電度之添加物將會影響計畫成果的解讀，而其影響主要在於定量的分析上，請見第 5.4 節之結果討論。
4. 干擾因子的判定與排除？	請見 5.4 節對於結果之討論。
5. 計畫執行進度與預定進度相符。	感謝委員認可。
6. 進度並無落後。	感謝委員認可。
7. 執行現況、研究流程及方法說明具體。	感謝委員認可。
8. 如果實務上要應用本成果，建議提供一可供參考的評估與操作流程，及必要的操控檢測參數。	本研究尚屬概念研發驗證中，未來累積足夠之實地應用經驗後將陸續建立相關操作流程。
環保署意見	
請檢附修正計畫書、期中報告審查意見表。	已附。

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期中報告初審意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 現地試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：林志平 NO：3	
計畫名稱	好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體分布調查技術研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 摘要請補充初步之研究成果。		已補充如摘要所示。	
2. 已達預定之工作進度與目標。		感謝委員之認可。	
3. 期中報告撰寫清楚完整，後續工作也有具體規劃。		感謝委員之認可。	
委員二			
1. 本研究之目標在於利用具發展性之時域反射技術（TDR）建立快速、便捷且可定量之監測井中氣體含量量測技術，並提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，建立有效之滯水層中氣體含量分布調查工具。		感謝委員之認可。	
2. 摘要未說明目前成果。		已補充如摘要所示。	
3. 文獻及介紹多屬舊資料，可予以更新。		感謝委員之建議。本技術所採用之原理已於農業工程以及大地工程發展多年，因此採用之文獻資料距今有些時間，雖為舊資料但本計畫中之應用概念具創新性。	
4. 後續須釐清及說明此技術之適用層面、方向及限制。		感謝委員指教，將於現地測試後於期末報告進行說明。	
委員四			
1. 確實已依計畫書項目執行。		感謝委員之認可。	
2. 所提時序性介電度量滯水層氣體含量確具可行性，後續將應用於現場。		感謝委員之認可。	
3. 已提出完整後續工作說明，無困難點。		感謝委員之認可。	
委員五			
1. 執行現況、流程及方法的說明具體詳盡		感謝委員之認可。	
2. 計畫後續執行工作項目及內容已於第 6 章簡要說明		感謝委員之認可。	
3. 計畫執行進度與預定進度相符		感謝委員之認可。	

4. 初步的成果（可偵測滯水層的氣體含量）與原計畫書所述一致，是否可能區分所偵測的氣體是擬營造的好氧條件時，人為所添加的氣體（如氧氣）所致，或是擬營造好氧條件，卻因傳輸不當致而有厭氧氣體生成所致（如氮氣、甲烷氣…等等）？建議討論（尤其是目前的成果仍是實驗室的條件下所得，現場的其他環境因子干擾仍待討論）。	就本技術之應用理論而言，目前所開發之技術無法分辨好氧或是厭氧環境，僅可確認其氣態氣體含量。但就前瞻性而言，未來結合現地介電頻譜的量測(本研究團隊在本計畫之外的另一研發重點工作)，將具潛力達到此目的。
5. 研究的成果能否定量？期末時建議說明。	本計畫規劃有室內定量之驗證工作，將於期末報告中根據室內試驗成果進行評估。
環保署意見	
請檢附缺失項目自評表。	已隨文另附。

「104 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」

☒修正計畫書 ☐期中報告 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	專案類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫主持人	林志平	研究類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥
計畫名稱	好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體分布調查技術研發		
專案連絡人	林俊宏	連絡專線	0922-585100
政策性審查意見		計畫單位回覆	
技術性審查意見		計畫單位回覆	
綜合性審查意見		計畫單位回覆	
委員複審意見		計畫單位回覆	
本計畫研究成果與傳統檢測方法所得的結果的關係宜建立（成果驗證）。		本研究主要以氣體分布之範圍為主要調查標的，在成果的驗證上除了利用 TDR 與 BGPR 兩種方法外，還會利用附近監測井多深度水質採樣數據、導電度分佈與污染物降解狀況，來比較本研究所描繪出氣體分佈狀況之可靠性。	
本署複審意見		計畫單位回覆	
〔消耗性器材及主要費用〕項下感應器訊號傳輸線之單價金額有誤。		已修訂。	
〔其他研究相關費用〕項下差旅費大眾交通工具為實報實銷，應註明搭乘次數、單價、起迄地點。		已修訂。	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

計畫書初審意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 現地試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：林志平 NO：3	
計畫名稱	好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體分布調查技術研發		

委員審查意見	計畫單位回覆
第一階段（環保署審查意見）	政策性審查意見說明
專任助理勞健保費編列錯誤	已修正至計畫書內
〔其他研究相關費用〕項下差旅費大眾交通工具為實報實銷，應註明搭乘次數、單價、起迄地點	遵照規定辦理
行政管理費金額超出編列基準	已修正至計畫書內
總金額計算錯誤	已修正至計畫書內
第二階段	技術性審查意見說明
【委員 1】	
本研究將提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，並進一步將此結果與 TDR 監測井中之結果進行比對，以釐清地中氣體分佈與監測井中氣體分佈之關聯後，對於好/厭氧環境整治工法有頗大之助益	謝謝委員指教與鼓勵
如何驗證所提方法測定氣體分佈之可靠性，請補充說明	氣體分佈之可靠性除了利用 TDR 與 BGPR 兩種方法外，還會利用附近監測井多深度水質採樣數據、導電度分佈與污染物降解狀況，來比較本研究所描繪出氣體分佈狀況之可靠性
【委員 2】	
本計畫利用時域反射技術，建立可定量之監測井中氣體含量量測技術，並提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，透過孔內透地雷達進行飽和土體中氣體分布之調查評估，建立滯水層中氣體含量分布調查工具	謝謝委員指教與鼓勵

本計畫之執行將有助於地下氣體含量分析技術之建立，對整治工法之選用應有助益	謝謝委員指教
主持人曾參與相關之計畫，其經驗可勝任本計畫之執行	謝謝委員指教
本計畫具創新性，對未來特殊土壤及地下水污染場址之調查工作之執行應有貢獻。本計畫亦是少數能在地質化學領域作鑽研的計畫	謝謝委員指教與鼓勵
【委員 3】	
本案擬藉 TDR 量測技術，建立污染場址氣體含量作為評估有機污染物於土水中有效整治區域界定之工具，有助於污染物調查及整治之監測	謝謝委員指教與鼓勵
研究中計畫以有機類污染場址為對象，並以可具有之個監測井之場址為主，惟以 TDR 量測所得標的氣體及其含量，應輔以其他可靠採測分析比對，以增其實用性	謝謝委員指教，本計畫會輔以附近監測井多深度水質採樣數據、導電度分佈與污染物降解狀況，來比較本研究所描繪出氣體分佈
【委員 4】	
計畫書內容完整，目的清楚，值得發展的新技術	謝謝委員指教與鼓勵
儘量朝污染場址可測試或驗證方式去執行，將來可直接應用於模場	謝謝委員指教，本計畫會利用實驗室與團隊之建教合作計畫進行模場的初測
【委員 5】	
研究成果對未來實場應用未具體說明，是與既有的系統相互配合？或是另外再建立一種不同的評估流程？生物整治採取好氧或厭氧程序並不一定是依“...所產生氣體的範圍...”而定（計畫書中所說明的），簡易的 ORP 量測相對更為快速有效	謝謝委員指教。研究成果應可提供未來實場應用相互配合的工具，提供更直接反應（地下水中不同介質如氣體或污染物質或整治藥劑到達監測井，不同介質之介電度之改變）的證據。 誠如委員所說，好氧或厭氧反應屬污染團所在地下環境條件，一般可直接以 ORP 進行量測，也可透過溶氧或溶氫量測，但相關測值僅能反應監測井周遭含水層可能之好氧或厭氧環境，不能直接反應不同介質是否抵達。本計畫預定搭配試驗之場址含厭氧或好氧處理工法（產生氫氣或氧氣為主之氣體傳輸工法），測試研發之 TDR 井內氣體含量量測系統及井內透地雷達法首先為評估氣體傳輸之「空間」分布（有別於傳統「點」之監測）；並進一步以時間序列方式評估監測井內氣體含量與含水層中氣體含量分布之關係性。

建議評估檢討國內既有的監測成效（正確性與即時性）的缺點，本計畫所擬開發的技術所能改善既有程序中的缺點項目為何？所擬改善的缺點對系統的即時調整的關鍵因子為何？（即若不即時調整是否可能喪失生物整治的成效？所以本計畫才會是一關鍵技術？）建議計畫主持人宜多評估本計畫與既有調查程序間的關係與差異。若與傳統的 ORP 比較，本系統所擬呈現的效益（經濟性、即時性與可靠性）為何？	謝謝委員指教。既有的監測系統主要反應監測井內水質或土壤孔隙介質之綜合效應（如導電度反應水、氣、土壤乃至污染物質之綜合變化），並不能反應或評估特定介質（如氣體或污染物質或整治藥劑）之變化。結合時間序列監測可進一步評估氣體或污染物質到達監測井周遭之空間-時間分布情形。 例如生物整治需維持或營造厭氧或好氧環境，因此含水層是否能有效分布灌注之氣體或藥劑便成為關鍵。不當的灌注傳輸技術可能造成氣體或藥劑分布不均，或未能到達預定之目標區。傳統的監測系統透過點的監測容易誤判或失真，特別是中低滲透性滯水層中因地層分布複雜，傳統點之量測容易誤判或失真（氣體可能僅沿著地質優勢流徑傳輸），而 TDR 井內多深度之氣體含量量測系統及井內透地雷達法可進一步評估氣體或藥劑之傳輸分布情形，可供後續整治工法之調整或修正（如調整灌注井位置、深度或數量）。而 TDR 系統在未來可結合相關直接灌入式機具（如 MIP 系統），在工廠污染查證上或整治評估上均可提供更多之即時直接量測結果（即時性研判），減少採樣分析數量（經濟性），並提高量測結果之可靠性。
預期成果評估與應用建議多加說明，研究成果是否以既有的調查結果驗證？	氣體分佈之可靠性除了利用 TDR 與 BGPR 兩種方法外，還會利用附近監測井多深度水質採樣數據、導電度分佈與污染物降解狀況，來比較本研究所描繪出氣體分佈狀況之可靠性
研究目標之一是建立一 TDR 技術，其適用條件與限制條件建議討論，其驗證方式也建議說明	TDR 對於介電性質差異甚大的材料混和物具有良好的量測成果，就目前在氣泡量測的限制性上主要在於高導電度環境下量測資料分析方法的克服以及感應空間主要集中在感測器正極周邊，可能受到局部區域的變異影響。其驗證利用附近監測井多深度水質採樣數據、導電度分佈與污染物降解狀況，來比較本研究所描繪出氣體分佈狀況之可靠性

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥					
申請機構系所		國立交通大學/防災與水環境研究中心					
機構地址		新竹市大學路 1001 號					
計畫主持人		林志平		職等/職稱		教授	
協同主持人		林俊宏 劉興昌		職等/職稱		約聘助理研究員 約聘助理研究員	
專案名稱	中文	好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體分布調查技術研發					
	英文	Development of Air Content Distribution Investigation Technology in Aquitard During Groundwater Remediation					
	關鍵字	TDR; 孔內透地雷達; 氣體含量量測					
執行期程		自民國 103 年 12 月 1 日起 至民國 104 年 11 月 30 日止					
計畫主持人		姓名：林志平		Email：cplin@mail.nctu.edu.tw		專線：03-5131574 手機：0922747731	
兼任助理		姓名：陳軍韜		Email：Ctcmm001@yahoo.com.tw		專線： 手機：0936354976	
計畫經費概算	專案預估經費		金額		編列說明		
	1.	人事費用	473,376		(1~5 項相加之 50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費	0		(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用	403,000		(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	54,000		(差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用	24,169		(1~6 項相加之 5%為限)		
	6.	行政管理費	95,455		(1~5 項相加之 10%為限)		
	專案計畫申請總金額		1,050,000				

專案主持人(簽名及蓋章): 林志平 日期: 6/29/2015

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

104 年度專案成果績效自評表

專案基本資料

填表日期:104 年 10 月 22 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥		
申請機構系所	國立交通大學防災與水環境研究中心	計畫主持人	林志平
專案名稱	好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體分布調查技術研發		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

一、 成果績效自評

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

(一) 學術面

目標達成程度 項目			申請 預估 數	期中 達成 數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0	0	
		(2)研討會論文	1	0	0	0	本年度尚未有適合的研討會可供投稿，將於明年投遞。
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0	0	稿件準備中。
		(2)研討會論文	1	0	0	0	本年度尚未有適合的研討會可供投稿，將於明年投遞。
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0	0	
		(2)研究報告	1	0	1	100%	
	4.專著 (本數)		0	0	0	0	
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0	0	
		(2)成果發表會	0	0	0	0	
		(3)論壇	0	0	0	0	
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	0	1	100%	
		(2)技術平台	0	0	0	0	

目標達成程度 項目			申請 預估 數	期中 達成 數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
B 人才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	0	1	100%	
		(2)博士	0	0	0	0	
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0	0	
		(2)跨國團隊	0	0	0	0	
		(3)跨機構團隊	0	0	0	0	
		(4)形成研究中 心	0	0	0	0	
		(5)形成實驗室	0	0	0	0	
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

目標達成程度 項目			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細資 料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已核准	發明	0			
			新型/設計	0			
			合計	0			
		申請中	發明	0			
			新型/設計	0			
			合計	0			
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數	0				
		授權金(仟元)	0				
		衍生利益金(仟元)	0				
	3.技術移轉 (專利)	件數	0				
		授權金(仟元)	0				
		衍生利益金(仟元)	0				
	4.技術移轉 (應用技術)	件數	0				
		授權金(仟元)	0				
		衍生利益金(仟元)	0				

目標達成程度 項目		申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細資 料)
5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)	0				
	(2)品種/系(件數)	0				
6.其他指標 (請自行命名)		(請自填)				

(三) 政策面

目標達成程度 項目			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數	0				
		收入(仟元)	0				
	2.諮詢服務	次數	0				
		收入(仟元)	0				
B 支 援 合 作	3.協助政府 制定 (件數)	(1)政策	0				
		(2)法規	0				
		(3)規範	0				
		(4)標準	0				
4.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

二、 請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。(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)

本研究將開發快速、便捷且可定量之監測井中氣體含量之 TDR 量測技術，並提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，透過孔內透地雷達進行飽和土體中 2 維氣體分布之調查評估，建立有效之氣體含量分布調查工具。利用調查氣體產生的範圍作為採用好/厭氧環境營造整治工法之有效整治區域得界定，相較於直接監測污染物的降低趨勢，為一極為有效且快速的方式，並可回饋作為整治中厭氧或充氧環境營造手段的評估與調整之用，可有效提升整治成效。此外，未來若再進一步透過控制系統的排程開發，可將 TDR 量測技術提升為單孔多點的氣體含量監測技術，更有甚者，透過不同感測器形式設計，開發貫入式感測系統，將可由既有的監測井中氣體含量的量測進展到飽和土壤中的氣體含量監測，若再整合目前已由本團隊同樣利用 TDR 技術開發成功之底泥厚度調查貫入器(環保署，2014)以及其在污染物辨識的潛力，TDR 技術將成為污染物調查以及整治監測的綜合應用技術，應用層面廣泛，具有極大的發展潛力。

中文摘要

生物整治為目前進行汙染場址整治的常用技術，其主要採用厭氧菌與好氧菌對汙染物進行降解，以破壞、轉化或移動／遲滯汙染物，以達到污染整治之目標。然而好/厭氧環境之營造成效檢驗為一具有技術重點之工作，相較於直接調查汙染物之降解狀態，調查營造好/厭氧環境過程所產生氣體的範圍，以此作為有效整治區域得界定為一極為有效且快速的方式，並可回饋作為整治中厭氧或充氧環境營造手段的評估與調整之用。介電度之量測為進行氣體含量量化量測之高潛力技術，有鑑於此，本研究利用具發展性之時域反射技術(TDR)，採用單棒式三叉感測器設計，而訊號分析採用頻率域相位波速分析法進行，建立快速且便捷可量測監測井周邊氣體含量量測技術，並提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，透過孔內透地雷達進行飽和土體中 2 維氣體分布之調查評估，建立有效之滯水層中氣體含量分布調查工具。室內試驗已驗證本計畫所提兩項技術之可行性，而在台南市的電極電解水生物整治工法試驗模場所進行之測試，相隔 15 天的監測結果顯示土體無明顯氣體變化，反饋與模場試驗方，使其發現設備電源損壞之問題，間接顯示相關監測之重要性。

Abstract

On site bioremediation is one the most popular technique applied in treatment of groundwater contamination. Usually, aerobic and anaerobic condition would be created to increase the efficiency of biological treatment. Assessment of the treatment directly from monitoring the concentration of the sources of contamination is not efficiency and it probably may slow down the process to adjust the design of the remediation. Comparing to this, measuring the distribution of air in aquitard would be an alternative method to evaluate the performance of the design. Dielectric constant measurement of the multiphase material has high potential to measure the air concentration. Accordingly, the purpose of the project is to develop an efficient air content distribution investigation technology in aquitard. A system based on time domain reflectometry (TDR) technique was developed to measure the air content around the monitoring well and borehole ground penetrating radar system was applied to investigate the distribution of air content in 2D which is based the a time-lapes model proposed by the project.

目錄

104 年度專案成果績效自評表

中文摘要

Abstract

目錄	I
圖目錄	IV
第一章 前言	1
第二章 研究目的	3
第三章 文獻探討	4
3.1 水中溶氧量量測及氣體含量量測技術介紹與評析	4
3.1.1 水中溶氧量量測技術	4
3.1.2 水中氣體含量量測技術	4
電磁法	7
3.1.3 問題評析	9
3.2 滯水層氣體含量之介電度行為	9
3.2.1 水、空氣與土顆粒三項混和物之介電行為(滯水層中之狀態)	9
3.2.2 時序性介電度量測於滯水層氣體含量量測概念	12
3.2.3 氣水混和物之介電行為(監測井中之狀態)	14
3.3 滯水層介電性質量測技術	14
3.3.1 TDR 量測技術與其應用潛力	15
3.3.1.1 時域反射法技術介紹	15
3.3.1.2 TDR 電學分析量測方法	16

3.3.1.3 TDR 技術應用之應用潛力	23
3.3.2 孔內透地雷達探測技術與其應用潛力	24
3.3 研究重點說明	28
3.3.1 孔內 TDR 氣體含量量測系統研發	28
3.3.2 氣體含量與介電度關係室內試驗探討	29
3.3.3 好/厭氧環境整治場址氣體分布調查現地測試.....	29
第四章 研究方法與過程	30
4.1 研究流程	30
4.2 工作進度	30
第五章 結果與討論	32
5.1 介電度時序分析法於滯水層中氣體含量量測技術之應用	32
5.1.1 水、氣、土壤顆粒三相混和物視介電度行為探討	32
5.1.1.1 室內試驗儀器、材料與配置	32
5.1.1.2 介電度時序性跨孔雷達井測之可行性評估	34
5.2 孔內 TDR 氣體含量量測系統研發	38
5.2.1 孔內 TDR 氣體含量量測系統建置	38
5.2.2 TDR 氣體含量量測可行性評估	39
5.2.2.1 視介電度分析方法於氣體含量量測之影響	40
5.2.2.2 感測器型式於氣體含量量測之影響	43
5.2.3 孔內 TDR 氣體含量量測感測器設計	47
5.2.3.1 原型感測器設計與測試	47
5.2.3.2 孔內 TDR 氣體含量量測感測器設計與性能測試	49

5.3 水氣二相混和物之視介電度行為探討	53
5.3.1 氣水混合物室內定量量測方法	53
5.3.2 試驗步驟	57
5.3.3 試驗結果	58
5.4 現地測試	61
5.4.1 場址介紹與現場試驗配置	61
5.4.2 現地成果	63
5.5 結論與建議	70
5.5.1 結論	70
5.5.2 建議	71
參考文獻	72
專案執行績效審核－自評表	75

表目錄

表 1 排水集氣法之平均值與標準偏差.....	60
表 2 泥砂濃度各濃度量測之標準偏差.....	61

圖目錄

圖 1 導電度式氣泡含量量測感測器探頭(Lamb and Killen, 1950)	6
圖 2 探頭量測與機械式取樣器量測比較圖(Lamb and Killen, 1950)	7
圖 3 溫度對 FDR 反射頻率的影響(a)溫度在 8.2 度~26.1 度(b)溫度在 9 度~22 度(Valle and Pasternack, 2002).....	8
圖 4 取樣空間直徑大小對反射頻率之影響(Valle and Pasternack, 2002).....	8
圖 6 TDR 量測系統示意圖	15
圖 7 TDR 感測器型式: a) 同軸式; b) 多棒式; c) 貫入式 (Lin et al., 2006).16	
圖 8 典型 TDR 量測波形.....	17
圖 9 TDR 脈衝係數 T_p 分析圖	18
圖 10 室內試驗正規化 TDR 脈衝係數 T_p 與體積含水量關係圖(林俊宏, 2013)	19
圖 11 TDR 波傳模擬波譜法 (Spectral method)	22
圖 12 TDR 頻率相位速度分析方法所需之反射特徵訊號(鐘志忠, 2008)	23
圖 13 TDR 頻率相位速度分析結果(鐘志忠, 2008).....	23
圖 14 透地雷達施測原理示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)	24
圖 15 透地雷達單孔井測示意圖.....	25
圖 16 零支距剖面法示意圖(摘自高千平, 2001)	25
圖 17 多支距剖面法示意圖(摘自高千平, 2001)	26

圖 18 垂直雷達剖面法示意圖(摘自高千平，2001)	26
圖 19 透地雷達井測層析成像法反算示意圖	27
圖 20 研究流程圖	30
圖 21 進度甘梯圖	31
圖 22 三相混和物視介電度行為探討用感測器：(a) ASTM D6780-05 感測器轉接蓋剖面圖與平面圖；(b) 感測器組裝完成圖	34
圖 23 寶二土(B2)、湖山土(HS)、湖南土(HN)及高嶺土(KL)之 K_a 與體積含水量之關係圖	35
圖 24 綜合回歸參數之體積含水量量測誤差	35
圖 25 氣體含量差值與介電度變化之關係圖	37
圖 26 修正後氣體含量差值與介電度變化之關係圖	37
圖 27 修正後氣體含量差值與介電度變化之關係圖(綜合回歸)	38
圖 28 不同參數之氣體含量量測誤差	38
圖 29 TDR 量測系統	39
圖 30 TDR 三叉式(左)與雙叉式(右)感測器	40
圖 31 氣泡產生器：空氣壓縮機(左)透水石(右)	40
圖 32 雙切線法	41
圖 33 頻率域相位波速法	42
圖 34 頻率域相位波速法所得之相位波速頻譜	42
圖 35 不同視介電度分析方法之穩定度影響	43
圖 36 感測器型式之穩定性試驗與重複性試驗之試驗配置	44
圖 37 不同感測器型式之量測穩定度測試成果圖	45
圖 38 三叉式感測器重複性試驗測試成果圖	46

圖 39 清水區重複性不佳之問題排除測試成果圖	47
圖 40 孔內 TDR 原型感測器實體	48
圖 41 孔內 TDR 原型感測器量測靈敏度測試；單棒式雙叉感測器	48
圖 42 孔內 TDR 原型感測器量測靈敏度測試；單棒式三叉感測器	49
圖 43 孔內 TDR 感測器設計圖	49
圖 44 單棒式三叉感測器完成圖	50
圖 45 (a)以三片式單棒感測器量測材料之視介電度 (b)以同軸式感測器量測材料之真實介電度	50
圖 46 有效視介電度與修正後視介電度關係圖	51
圖 47 單棒式感測器與雙叉及三叉感測器穩定性比較	52
圖 48 單棒式感測器之重複性試驗	52
圖 49 室內水中氣泡含量影像量測示意圖	54
圖 50 高/兩管、高/一管、低/兩管及低/一管出氣量	54
圖 51 Fastec imaging™ 公司所生產之高速攝影機	55
圖 52 試驗儀器架設位置	56
圖 53 高速攝影機拍攝之照片	56
圖 54 拍攝視窗示意圖	57
圖 55 室內試驗流程圖	58
圖 56 排氣量與氣體濃度比較圖	59
圖 57 TDR 感測器室內定性氣泡量測試結果	60
圖 58 泥沙濃度量測測試結果	61
圖 59 現地試驗孔位圖	62
圖 60 Sensors & Software 公司之 pluseKKO PRO 主機	62

圖 61 電磁波之發射器與接收器.....	63
圖 62 100MHz 之天線.....	63
圖 63 監測剖面之電磁波波速影像圖(透地雷達)	64
圖 64 監測剖面之氣體含量影像圖(由介電度時序性量測技術獲得).....	64
圖 65 放電前後於監測井之 Ka 變化(左：#1；右：#2).....	65
圖 66 放電前後之監測井內導電度變化(左：#1；右：#2).....	65
圖 67 導電度變化對介電度量測造成之影響.....	66
圖 68 於 Tx：4m、Rx：3m 之電磁波訊號圖	67
圖 69 Tx、Rx 等深度之跨孔雷達資料	68
圖 70 TDR 現地量測成果行為驗證	69

第一章 前言

隨著近年環保意識抬頭以及相關環境法規之落實，陸續發現多起因工業活動所造成的土地污染事件，對於國土資源與國民生活環境造成莫大威脅。在各類型污染物種類及污染介質中，尤其以含氯有機溶劑造成的地下水污染問題最為棘手，當含氯有機溶劑一旦洩漏造成污染，其移動分布深受水文地質變化所影響，往往在地下水中發現污染時，已造成相當程度的環境危害。為有效改善前述危害，近期環保署土污基管會積極調查國內具有高潛勢工業區與相關石化產業園區，其要求污染行為人或是污染關係人，進行初步緊急應變動作與相關整治工程，降低居民風險，成果豐碩。

在進行地下水整治上有幾項重大挑戰，包括污染源區分布複雜或來源未知、複合式（來自多處污染源區）且屬大尺度之污染團、污染物已入滲或擴散至低滲透性地層（如滯水層）、污染已達第二含水層或更深。以滯水層為例，利用主動整治概念：灌入整治藥劑常發生短流現象，而且無法順利將藥劑灌入至污染物的位置，所以目前國內最新發展出被動整治概念，其不但成效較佳且符合綠色整治的精神，根據現地的菌種與條件，利用物理方法增加其化學反應，讓不同的污染物在厭氧或是好氧環境下進行降解，以破壞、轉化或移動／遲滯污染物，進而達到污染整治之目標。

在此類整治方法中，營造厭氧或是充氧之環境為其重要手段。達到厭氧或是充氧環境之方法眾多，大部分採用添加有機營養源的方式於地下水體，亦有透過灌入氣體、電化反應等方式，而不論其採用何種方式進行，其目的皆是使地下水位面以下之飽和土體中產生氫氣、二氧化碳(厭氧環境)或是氧氣(充氧環境)等氣體以增加微生物的處理效率，因此，相較於監測土中污染物的下降情形，利用調查氣體產生的範圍作為有效整治區域得界定為一極為有效且快速的方式，並可回饋作為整治中厭氧或充氧環境營造手段的評估與調整之用。

基於此一概念，本研究嘗試發展水中氣泡含量之量測技術。在氣水混和物中進行氣體含量量測之技術眾多，但此中較適用於現地之用者僅有導電度法以及電磁法(Valle and Pasternack, 2002)，此中更以導電度(Cain, 1978)量測為主流，然而，氣水混和物中之導電度除了與其氣體含量有關外，溫度、氣泡大小、氣泡連結狀態等皆會有所影響而造成量化的困難，相較而言，以視

介電度為進行量測應用之技術較不受水及氣泡含量以外的因子影響。時域反射技術(TDR)以及孔內透地雷達為視介電度於現場應用的重要技術，本研究基於此兩種技術進行氣泡含量量測技術之研發。

第二章 研究目的

時域反射技術(TDR)為一較不受土壤種類影響之電磁波量測技術(Topp et al., 1980; Lin, 2003),其有效頻率因系統配置及土壤種類與含水量不同而異,一般而言在數百 MHz,此技術已廣泛應用於現地土壤含水量量測(Topp et al. 1980)。其基本原理與透地雷達(GPR)雷同,但以纜線及導波器(探針)進行探測,且一般發射的脈衝為連續寬頻的方波,又稱為纜線雷達(Cable Radar),可由分析電磁波在導波器段的視走時(Apparent Travel Time)決定視介電度(Apparent Dielectric Constant, 即光速與電磁波於材料中波速之比值的平方)(Topp et al. 1980)。Chung and Lin(2011)利用此技術,透過介電度之混和模型理論成功有效地量測水土混和物之混水泥沙濃度。混水泥砂濃度主要是水與土顆粒兩相物質之體積比量測,與監測井中氣體含量之水與空氣兩相物質之體積比量測具有極大相似性,由此可知,應用 TDR 技術於氣體含量量測具有發展性。

除此之外,透過監測孔進行氣體在飽和土體中深度上之分布範圍評估與其實際在飽和土體中的分布是否具有一致性並不十分明確,有進一步確認之必要。前文已有提及,採用 TDR 所量測得知有效頻率為數百 MHz 之視介電度可有效獲得土壤含水量(亦即土體中水與土顆粒之體積比),若在飽和環境下,其變動值將可反映氣體含量。孔內透地雷達為一極為有效之現地大範圍介電度調查工具,透過電磁波之波傳理論進行調查成果反算可獲得孔與孔之間之介電度分布影像圖,就土壤調查所使用之天線頻率 50-200MHz 而言,其所獲得之成果可轉化做為氣體分布之影像調查工具。

因此,本研究之目的在於

1. 利用更具發展性之時域反射技術(TDR)建立快速、便捷且可定量之監測井中氣體含量量測技術。

2. 提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法,透過孔內透地雷達進行飽和土體中 2 維氣體分布之調查評估,建立有效之氣體含量分布調查工具。

第三章 文獻探討

3.1 水中溶氧量量測及氣體含量量測技術介紹與評析

3.1.1 水中溶氧量量測技術

對於水中溶氧量之現有量測技術，在「水及廢水檢測標準方法」(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA 19TH Edition, 1995)中，溶氧分析法列有碘定量法、疊氮化物修正法、高錳酸鹽修正法、明礬膠凝修正法、硫酸銅-胺基磺酸膠凝修正法及薄膜電極法等。其中以碘定量法最為精確可靠，但其限制為水樣中不能含有懸浮微粒、顏色及其他化學性(具氧化或還原能力)的干擾物質。而疊氮化物修正法、高錳酸鹽修正法、明礬膠凝修正法及硫酸銅-胺基磺酸膠凝修正法即為針對不同干擾物質模擬加以修正，最終以碘定量法決定樣品的溶氧量。

碘定量法的方法為在現地取水樣採集裝於 BOD 瓶中先後加入硫酸亞錳及鹼性碘化物—疊氮化鈉溶液，立即於現場測定，或加入濃硫酸與疊氮化鈉溶液以水封方式保存，測定時再加入硫酸亞錳及鹼性碘化物溶液。亞錳離子於鹼性下生成氫氧化亞錳。水中溶氧會將氫氧化亞錳的沉澱物氧化成高價錳氧化物，當水樣酸化後，高價錳氧化物氧化碘離子生成與溶氧相同當量之碘分子，再以硫代硫酸鈉溶液滴定，由其消耗量即可求得水樣中之溶氧量。

而薄膜電極法為較不受干擾物質的方法，且其優點為方便攜帶、可連續、立即得到溶氧量。薄膜電極法的方法為利用選擇性薄膜讓水中之溶解氧通過，使其與液體、離子及其他干擾物質隔離，透過薄膜之分子態氧於電極陰極端還原。由於在穩定狀態下產生之電流強度正比於溶氧濃度，故由電流值可換算為水中溶解氧之濃度。薄膜電極法適用於飲用水水質、飲用水水源水質、地面水體、地下水、放流水及廢(污)水中溶氧檢測。但若使用於海水或含鹽度較高的水體測定時，應進行鹽度校正。

3.1.2 水中氣體含量量測技術

在氣水混和物中進行氣體含量量測之技術眾多，其包含有導電度法(Electrical conductance)、輻射衰減法(Radiation attenuation)、光學法(Optical

probe)、熱流法(Thermal anemometer)以及電磁法等(Naghash,1994)，但此中較適用於現地之用者僅有導電度法以及電磁法(Valle and Pasternack, 2002)，此中更以導電度(Cain, 1978)量測為主流。

聲學與光學法

在外海設立風力發電機時，由於會在打樁過程中產生一些噪音，為了保護海洋生態常使用氣泡幕來降低海洋中的噪音，因此發展出透過聲學及光學的方法來分析氣泡幕的氣泡大小、顆粒數及體積分率。

Medwin (1970 & 1977)在沿海使用聲學的方法測量當時的氣泡數量，測量結果會受實驗環境及晝夜的變化。隨後 Farmer et al. (1998)、Leighton et al. (1996)及 Terrill and Melville (1997)以聲學的方法進行氣泡研究，藉由水下麥克風測得氣泡噪音頻率並加以分析。

Walsh and Mulhearn (1987)及 Johnson and Cooke(1979)以光學方法研究氣泡特性，藉由攝影機拍攝水中氣泡情形，分析其氣泡單位密度及氣泡其他相關特性，Su et al. (1994)以聲學、光學進行氣泡分析，利用聲學所測得資訊與光學拍照所分析的資料進行比對，其結果相當不錯。光學量測氣泡數量及體積分率主要方法為影像法。藉由影像處理氣泡照片，分析照片上氣泡的變化、氣泡粒徑分布和體積分率。

在處理二維影像氣泡時，需要找出適當門檻值(Threshold)，將氣泡與液體的邊界區分出來，稱為影像分割。利用門檻值可將影像分成兩種灰階值，得到二元數位影像，即可清楚判斷出氣泡與液體兩界面輪廓線，再經由邊界輪廓線的像素值估算氣泡周長。

導電度法

Lamb and Killen (1950)利用兩電極量測電阻來計算氣水混合物中空氣濃度。此量測方法是基於 Maxwell (1873)所推導的計算式

$$c = \frac{\frac{R_E}{R_{EO}} - 1}{\frac{R_E}{R_{EO}} + 1} \dots\dots\dots (1)$$

其中 c 為氣體濃度， R_E 為在兩電極中間之氣水混合物之電阻， R_{EO} 在相同電極下只有水的情況之電阻。在此式中假設每個氣體大小一樣、氣泡間的距離大於氣體直徑且空氣之導電度為 0。而實驗證明當氣體間的距離大於氣體直徑時，會對此公式造成為小的誤差。Lamb and Killen 基於上述公式設計出一感測探頭(如圖 1)並在自產器的水流中進行測試，與其機械式取樣做比較，如圖 2，實驗結果發現其兩者間差距甚小，驗證其量測具可靠度。

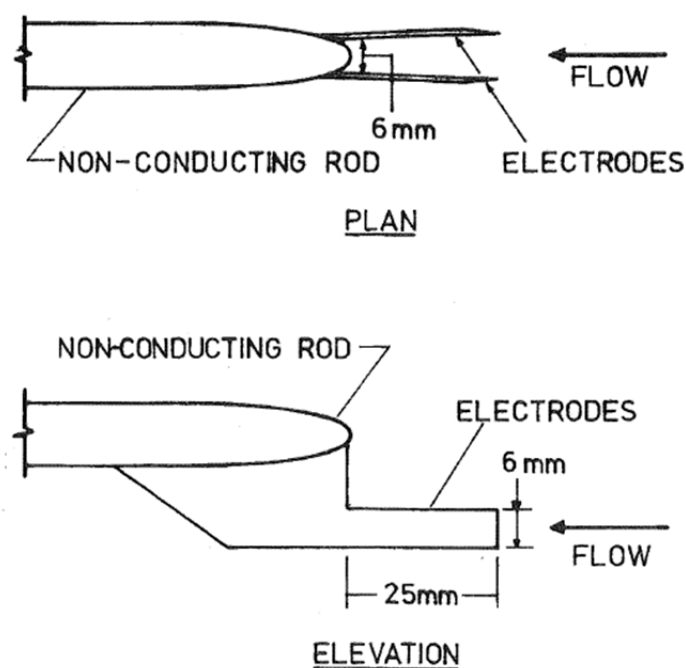


圖 1 導電度式氣泡含量量測感測器探頭(Lamb and Killen, 1950)

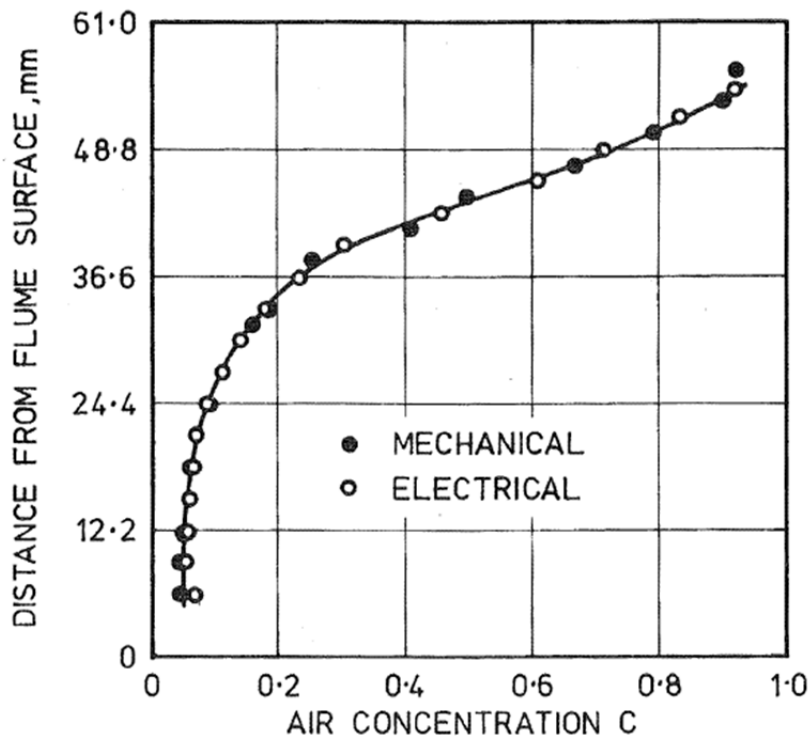


圖 2 探頭量測與機械式取樣器量測比較圖(Lamb and Killen, 1950)

電磁法

Valle and Pasternack(2002)利用頻率域反射儀(FDR, Frequency Domain Reflectometry)量測反射波的頻率，進而推估紊流中氣體產生的濃度。在其研究中發現，量測之反射頻率會受到紊流、溫度及取樣體積所影響。如圖 3 顯示，在溫度 8.2 度到 26.1 度時，其溫度和頻率之間呈現非線性狀態，但在 9 度到 22 度之間卻呈現線性，每一溫度頻率變化為 1.0884Hz，其結果顯示在 18 度內其頻率變化不會超過 3%。如圖 4 顯示，當取樣空間直徑大小由 7.62 變化到 20 公分時，TDR 反射頻率由 771 降至 731Hz(或是 5.2%的影響)，因此在量測氣體濃度時需要做溫度的修正。

綜合紊流、溫度及取樣體積的影響，如式(2)，在 727~999Hz 時，氣體濃度和 TDR 反射波之頻率關係可以以一三次式表示；在 999~1423Hz 時關係則為線性，如式(3)。

$$C = 2.7388 \times 10^{-8} \lambda^3 - 7.766 \times 10^{-5} \lambda^2 + 0.073822 \lambda - 23.148, \\ \text{for } 727 \leq \lambda < 999\text{Hz} \dots\dots\dots (2)$$

$$C = 0.0014264 \lambda - 1.0299 \dots \dots \dots (3)$$

for $999 \leq \lambda < 1423\text{Hz}$

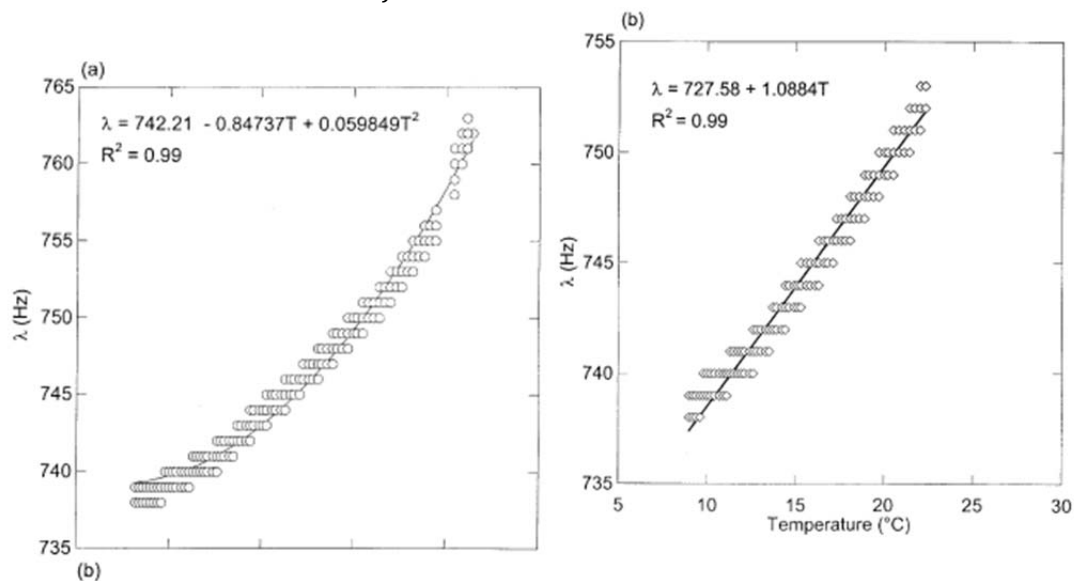


圖 3 溫度對 FDR 反射頻率的影響(a)溫度在 8.2 度~26.1 度(b)溫度在 9 度~22 度(Valle and Pasternack, 2002)

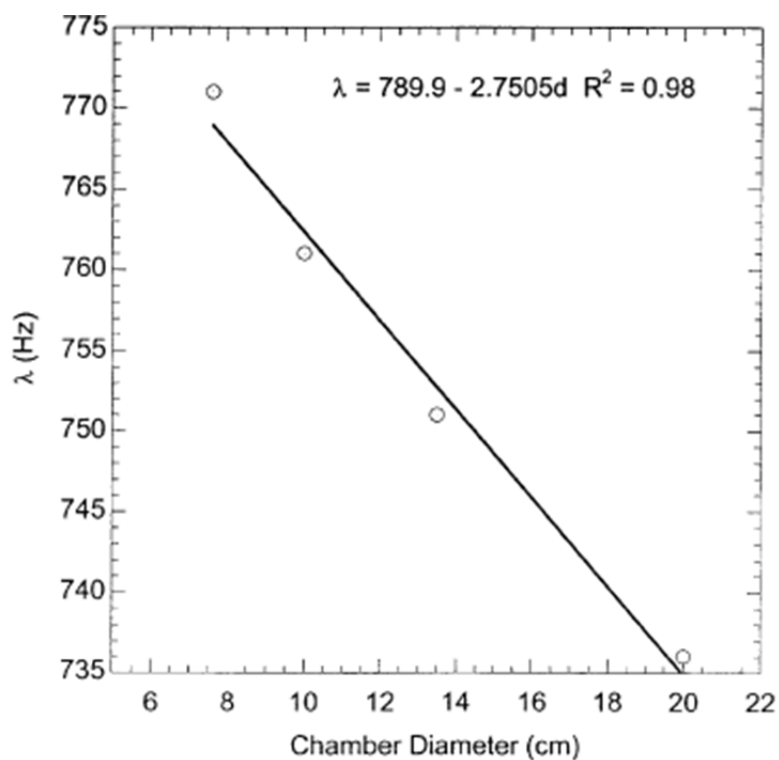


圖 4 取樣空間直徑大小對反射頻率之影響(Valle and Pasternack, 2002)

3.1.3 問題評析

對於營造厭氧或是充氧之環境的工法成效，在整治場址進行鑽孔後，透過水中溶氧量的量測進行是目前應用最為廣泛的方式，然而姑且不論不同檢測法之正確性以及進行影響因子修正後的正確性，就其應用上主要仰賴鑽孔的存在，其所獲得之資料亦僅能代表鑽孔所在位置，對於充氧環境在土體內的空間分布狀況並無法掌握；而退一步，以針對水中氣體(氣泡、非溶於水中之氣體)之聲學與光學法以及導電度法亦有同樣的缺點存在。其中，導電度法除了無法獲得空間分布種況外，由於導電度除了與其氣體含量有關外，溫度、氣泡大小、氣泡連結狀態等皆會有所影響而造成量化的困難。

相對而言，應用視介電度之電磁法，在原理上，其較不受氣泡大小以及排列狀態所影響，適合現場量測應用；而在施測上，其可透過對於感測器的設計達到可貫入土體的施作型態，無須完全仰賴鑽孔的存在，具有較大的應用潛力。Valle and Pasternack(2002)利用電磁法基礎之頻率域反射儀(FDR, Frequency Domain Reflectometry)作為量測方式，雖然其具成效但理論基礎較為薄弱，且採用之電磁波頻率較低，在氣水混和物中雖可有足夠之準確度，但當進一步欲應用在飽和土體中的氣體含量量測時將會出現受土壤種類影響明顯之困難(Lin, 2003)。

基於視介電度在水中以及土體中氣體含量量測之應用潛力，本研究為改良 FDR 應用上的問題，對於同樣可應用於視介電度量測之時域反射儀技術(TDR)以及孔內透地雷達技術進行進一步的研發工作。在本章中，後續將先針對視介電度應用在水中以及土體中進行氣體含量量測的理論基礎回顧，而後進一步進行 TDR 與透地雷達井測的介紹與應用潛力說明。

3.2 滯水層氣體含量之介電度行為

3.2.1 水、空氣與土顆粒三項混和物之介電行為(滯水層中之狀態)

介電度量測已被廣泛應用於土壤體積含水量之量測上(Topp et al., 1980; Ledieu et al., 1986; Siddiqui and Drnevich, 1995)，土壤可視為是土顆粒、空氣以及水的三項混和物，因此，進行含水量量測與進行滯水層中氣體含量量測是屬於一體兩面之技術，因此在此先行借鏡目前利用介電度量測土壤含水量之狀況。

Topp et al.(1980)由時域反射儀(Time Domain Reflectometry, TDR)實驗結果提出時間域土壤之視介電常數與土壤之體積含水量(volumetric water content)可以以三次式進行描述：

$$\theta = -5.3 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \dots\dots\dots (4)$$

其中， θ 為土壤體積含水量，表示每單位體積土壤中所含之水的體積； K_a 為視介電常數(Apparent dielectric constant)，此常數 Topp et al.(1980)將定義為光速 V_c 與電磁波在土壤中傳遞速度 V_{sl} 比值之平方，可寫作

$$K_a = \left(\frac{V_c}{V_{sl}} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

可由 TDR 量測之波形獲得(詳細分析方式請參閱下節內容)。在此式中，Topp et al.(1980)並未考慮不同土壤所可能造成的差異，亦未考量乾密度差異所可能造成的誤差。Siddiqui and Drnevich(1995)進一步考量土壤乾密度所可能造成的影響，利用土壤乾密度 ρ_d 將視介電常數進行正規化後，以其對土壤重量含水量 w 之關係進行描述：

$$\frac{\sqrt{K_a \rho_w}}{\rho_d} = a + bw \dots\dots\dots (6)$$

其中， a 以及 b 為標定參數， ρ_w 為水之密度。然而實際上，介電度並非為單一常數，其為電磁波頻率之函數(利用 TDR 所量測得之視介電度可視為是在 100MHz 以上之介電度)，在不同頻率之電場下，材料因不同介電極化作用 (Dielectric Polarization) 呈現不同之介電度。在頻率域，介電度可以表示為複數，實部 (ϵ_r') 表示外部電場能量在材料中之儲存，虛部 (ϵ_r'') 表示介電極化之能量消散。電磁波波動方程式在頻率域之解析中，介電度與導電度兩項材料性質可合併為等值介電度 (ϵ_r^*) 如下式所示

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

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。

Dobson et al.(1985)與 Heimovaara(1994) 基於各材料之介電頻譜特性, 提出一混合模型(mixing model)用以描述具頻散現象的土壤介電性質, 其模型認為濕土之介電度與土顆粒、自由水(free water)、束限水(bond water)以及空氣四種材料有關, 將其以土壤物理參數表示, 其數學式可表示為(Lin, 2003)

$$\epsilon_m^\alpha = \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \epsilon_s^\alpha + (\theta - \delta A_s \rho_d) \epsilon_{fw}^\alpha + \delta A_s \rho_d \epsilon_{bw}^\alpha + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} - \theta \right) \epsilon_{air}^\alpha \dots\dots\dots (8)$$

其中, ϵ_m 、 ϵ_s 、 ϵ_{fw} 、 ϵ_{bw} 以及 ϵ_{air} 分別是與頻率相關之土體總介電度、土顆粒介電度、自由水介電度、束限水介電度以及空氣介電度; δ 為束制水厚度; A_s 為顆粒比表面積(specific surface area of soil); θ 為體積含水量; ρ_d 為土體乾密度; ρ_s 為平均土顆粒密度; α 為迴歸係數。

相較於(6)式之純迴歸關係式, (8)式之混合模型更加具有理論背景且亦更為廣泛適用, (6)式可說是(8)式的一個特例情形, 倘若將 α 訂為 0.5, 並將視介電度 K_a 視為某頻率之 ϵ_m , 則(8)式可化為

$$\sqrt{K_a} = \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \sqrt{\epsilon_s} + (\theta - \delta A_s \rho_d) \sqrt{\epsilon_{fw}} + \delta A_s \rho_d \sqrt{\epsilon_{bw}} + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} - \theta \right) \sqrt{\epsilon_{air}} \dots (9)$$

在(9)式中, 對於單純材料之介電係數 ϵ_s 、 ϵ_{fw} 、 ϵ_{bw} 以及 ϵ_{air} 可視為常數, 另忽略土壤種類可能造成的誤差(即將 δ 、 A_s 以及 ρ_s 視為常數), 則(9)式更可簡化為

$$\sqrt{K_a} = a^* \rho_d + b^* \theta + c^* \dots\dots\dots (10)$$

其中, a^* 、 b^* 以及 c^* 為常數。又

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_w} \omega \dots\dots\dots (11)$$

將其代入(10)式, 整理可得

$$\frac{(\sqrt{Ka} - c^*)\rho_w}{\rho_d} = a^* + b^*w \dots\dots\dots(12)$$

如此，可得與(6)式相近之(12)式，而此兩者之最大差別是在於 c^* 存在與否。根據 Lin(1999)由實驗數據採用兩者進行迴歸之結果所做之結論顯示， c^* (此值一般為 1)之採用與否對迴歸所得影響不大，可予忽略。

3.2.2 時序性介電度量測於滯水層氣體含量量測概念

在前述之文獻整理中可獲得兩個重要訊息，其一是高頻(>100MHz)的視介電度量測可準確獲得土壤中之含水量，其二是高頻的視介電度所獲得之含水量主要是土壤中水與土的體積比，由此可初步提供採用透地雷達井測應用於現地氣體分布的可行性。透地雷達井測於土壤量測應用以 50MH-200MHz 之電磁波頻率為主，其可提供土壤之介電度 2 維剖面，雖然視介電度對於水之存在較為靈敏，但如圖 5 所示，對於位於地下水位面以下之土壤，其在氣體未產生前的狀態如施測點 t_0 ，孔隙皆由水所填充，但在進行好/厭氧環境營造一段時間後，氣體的存在將影響孔隙中水體積的含量，因此在施測點 t_1 、 t_2 時，對於同一個施測地點，在土顆粒體積沒有變化的前提下，透過視介電度所獲得的含水量變化相對來說即是氣體的變化情況，利用此一原理，將可利用透地雷達井測的時序分析進行土中氣體變化分布的調查工作。

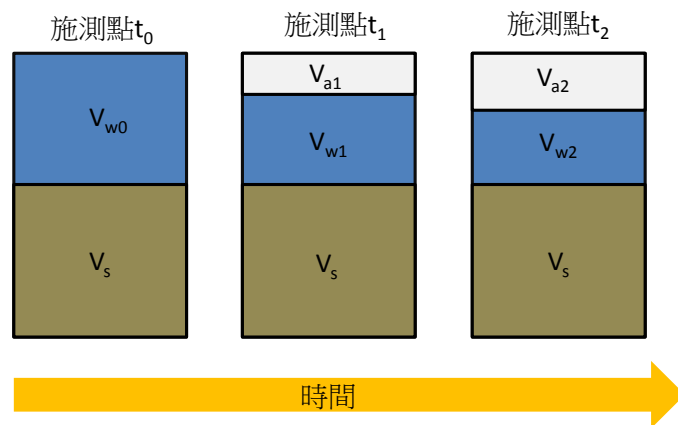


圖 5 透地雷達井測時序分析應用於氣體分布調查原理示意圖

根據此一應用概念，利用 Ledieu et al.提出一二次式描述視介電常數與土壤體積含水量之關係

$$\sqrt{K_a} = a_L + b_L \theta \dots\dots\dots (13)$$

其中 a_L 和 b_L 為標定參數，同種土壤會有相同之 a_L 和 b_L 。假設第一次土體之顆粒土之體積為 V_s ，水和氣體之體積分別為 V_w 及 V_a ；第二次土體內水份減少，其減少量 ΔV_w 由氣體所取代，而總土體體積 V 保持不變。則第一次土壤體積含水量 θ_1 為

$$\theta_1 = \frac{V_w}{V}$$

第二次土壤體積含水量 θ_2 為

$$\theta_2 = \frac{V_w - \Delta V_w}{V}$$

則兩次之土壤體積含水量變化為

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{V_w - \Delta V_w}{V} - \frac{V_w}{V} = -\frac{\Delta V_w}{V}$$

定義氣體濃度 AC 為氣體體積與土體總體積之比值

$$AC = \frac{V_a}{V} \dots\dots\dots (14)$$

則第一次及第二次量測氣體濃度分別為

$$AC_1 = \frac{V_a}{V}$$

$$AC_2 = \frac{V_a + \Delta V_w}{V}$$

其氣體濃度變化量則為

$$\begin{aligned} \Delta AC &= AC_2 - AC_1 = \frac{V_a + \Delta V_w}{V} - \frac{V_a}{V} \\ &= \frac{\Delta V_w}{V} = -\Delta\theta \end{aligned}$$

量測之兩次介電度分別為 Ka_1 及 Ka_2 ，因為同一種土體，其標定參數 a_L 、 b_L 為相同，其差值為

$$\begin{aligned}\sqrt{K_{a2}} - \sqrt{K_{a1}} &= a_L + b_L\theta_2 - (a_L + b_L\theta_1) \\ &= b_L(\theta_2 - \theta_1) = b_L\Delta\theta = -\Delta AC \times b_L \dots\dots\dots (15)\end{aligned}$$

由式(15)可明確的看出，利用時序性之視介電度量測，可計算土體中氣體含量之改變量。此式之應用十分簡便，主要重點在於此式中有標定係數 b_L ，對於此標定係數之行為與特性將透過室內試驗進行了解。

3.2.3 氣水混和物之介電行為(監測井中之狀態)

前小節之文獻已顯示，假定綜合介電度為材料介電度體積比之總和所提出的混和模型(即(8)式，[Dobson et al., 1985](#); [Heimovaara, 1994](#)) 在採用 α 為 0.5 得形況下可合理模擬材料之介電度行為，本研究團隊在此前提下，以此混和模型針對水與土顆粒兩相體所組成之混水泥砂濃度([Chung and Lin, 2011](#))提出理論式，僅考慮水與懸浮土顆粒兩相物質之介電度作用，並成功利用 TDR 技術進行現地量測，該理論式如下

$$\sqrt{\varepsilon_a} = (1-SS)\sqrt{\varepsilon_w} + SS\sqrt{\varepsilon_s} \dots\dots\dots (16)$$

其中，SS 為水體中之泥沙體積比， ε_a 、 ε_w 、 ε_s 分別為含砂混水、水以及土顆粒之介電度。在此中，由於水及土顆粒的介電度可視為已知，水之介電度為 81，土顆粒之介電度在 3-5 之間，兩者的介電度有明顯的差別，也因此可有足夠的靈敏度，相比於此，應用在水與氣體的混和材料中，僅需將土顆粒介電度的部分換為空氣介電度 1 即可，與土顆粒相同，水與空氣的介電度亦有明顯的差別，因此可初步評估利用 TDR 量測介電度進行水中氣體量化量測具有可行性。

3.3 滯水層介電性質量測技術

在介電性質量測技術上，時域反射儀技術以及透地雷達井測技術為具有現地應用之高潛力發展技術，本研究採用兩種技術之搭配應用，與本計畫中將時域反射儀技術應用在孔內氣體含量量測上，而透地雷達井測應用在土體含量空間分布調查上。在此，將針對兩種技術進行介紹，並指出其應用潛力。

3.3.1 TDR 量測技術與其應用潛力

3.3.1.1 時域反射法技術介紹

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 6 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。

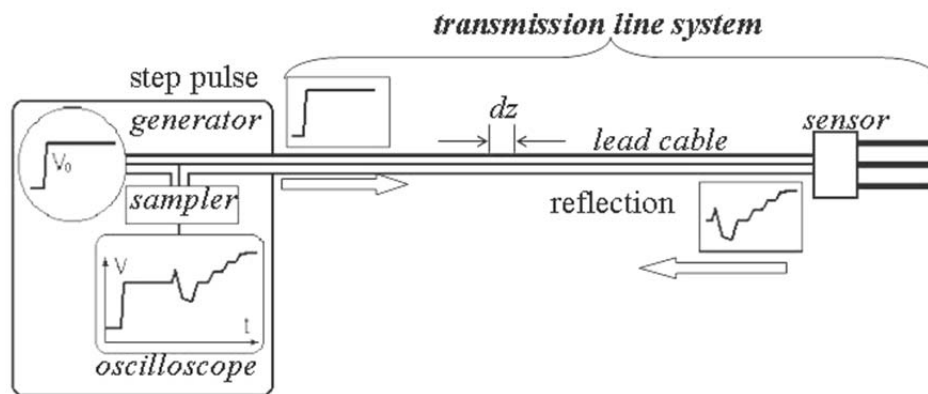


圖 6 TDR 量測系統示意圖

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 7a 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 7b 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 7c 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。

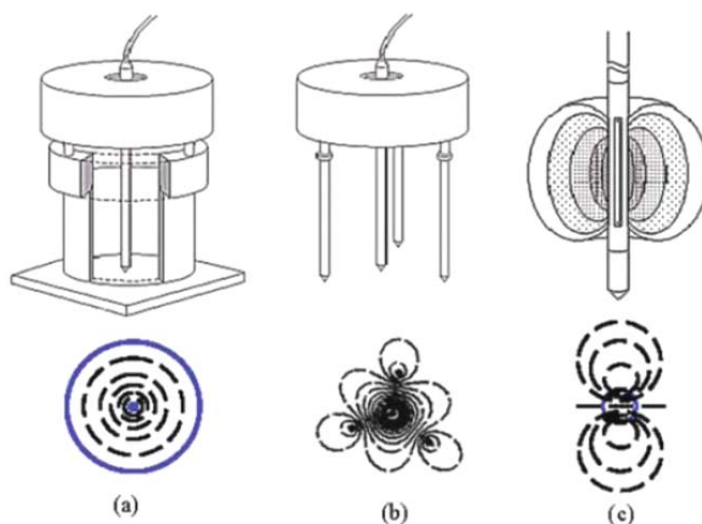


圖 7 TDR 感測器型式: a) 同軸式；b) 多棒式；c) 貫入式 (Lin et al., 2006)

3.3.1.2 TDR 電學分析量測方法

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 8 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：

$$Ka = \left(\frac{V_c t_0}{2L} \right)^2 \dots\dots\dots (17)$$

其中， V_c 為光速， L 為感測器與土壤接觸的長度。

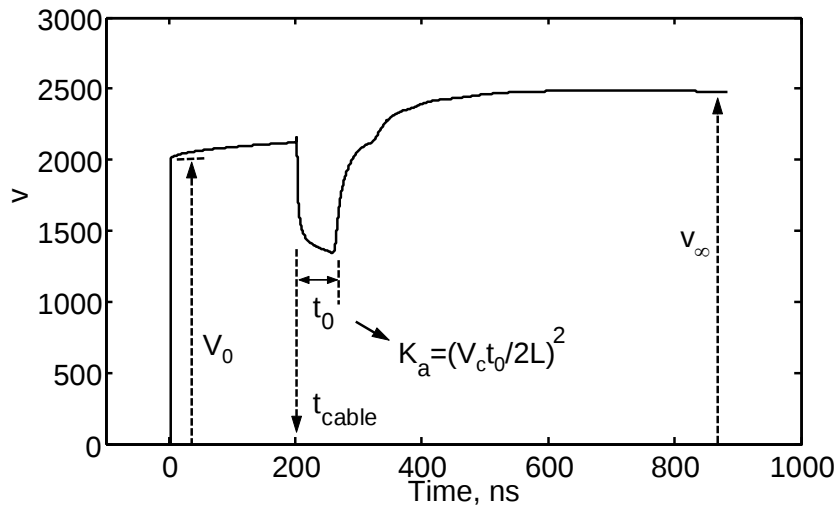


圖 8 典型 TDR 量測波形

2. 脈衝反射係數法介紹

利用走時分析進行視介電度量測高導電度材料時能量消散過快，而無法從波形上分析其走時，造成無法量測其視介電度。林俊宏(2013)針對 TDR 應用餘高導電度土壤含水量量測的改良分析方法，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，新發展此一脈衝反射係數 T_p 之分析方法。

由 TDR 系統量測後之波形如圖 9(a)，當訊號進入土樣後可見到波形有一明顯之下降。將此訊號微分後得到圖 9(b)，進入土樣後之下降波形微分後為一明顯之突波，將此突波之最大值定義為脈衝反射係數 T_p 。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 9 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。圖中 nT_p 為 T_p 之正規化公式，主要目的為讓容易受到外界環境影響的 rise time 間接影響到 T_p ， T_{p0} 為 rise time 的微分。

$$nT_p = \frac{T_p/T_{p0}}{(1+T_p/T_{p0})^2} \dots\dots\dots (18)$$

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，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。

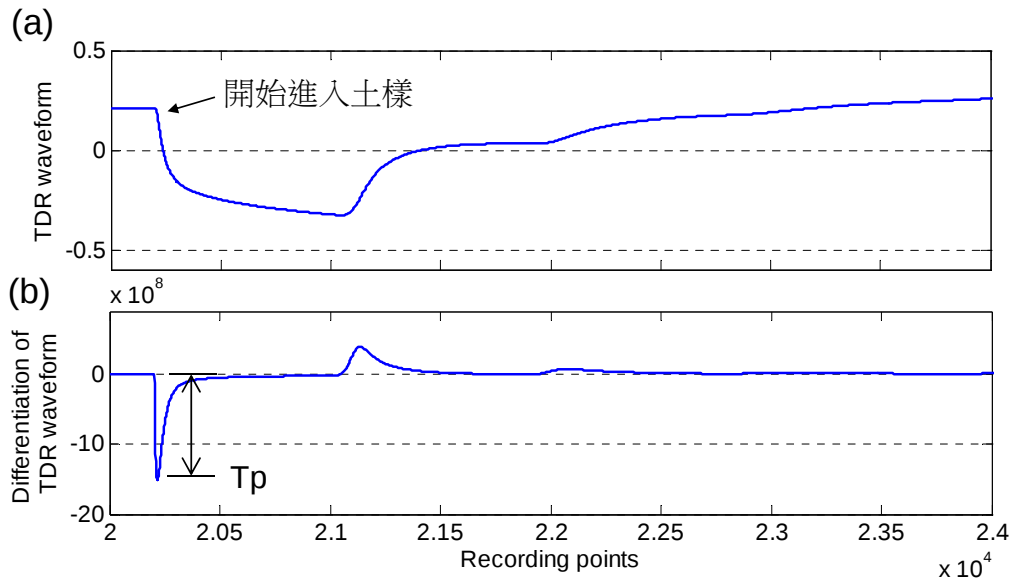


圖 9 TDR 脈衝係數 T_p 分析圖

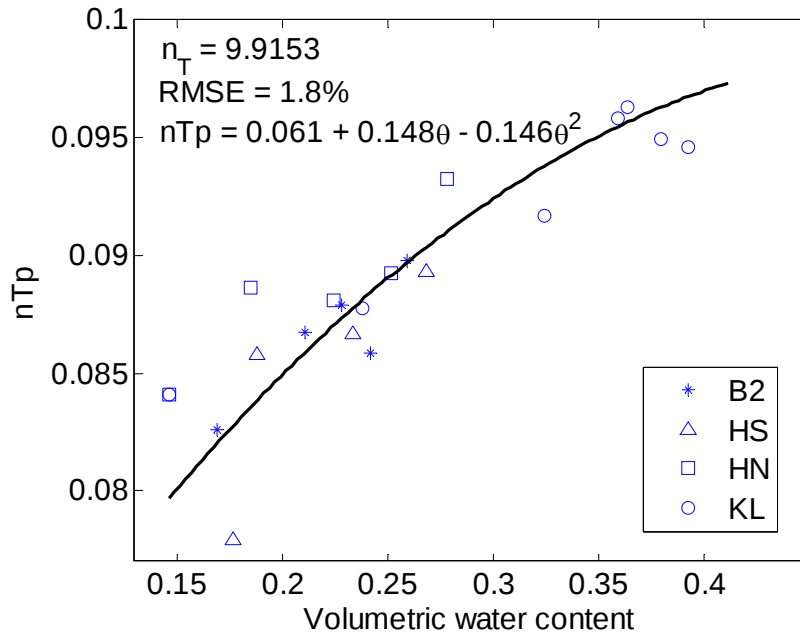


圖 10 室內試驗正規化 TDR 脈衝係數 T_p 與體積含水量關係圖(林俊宏, 2013)

3. 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：

$$\sigma = \beta \left(\frac{1 - \rho_{\infty}}{1 + \rho_{\infty}} \right) k (R_{cable}, \rho_{\infty}) \dots\dots\dots (19)$$

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：

$$k = \frac{1}{1 - \left(\frac{R_{cable}}{R_s} \frac{1 - \rho_{\infty}}{1 + \rho_{\infty}} \right)} \dots\dots\dots (20)$$

$$R_{cable} = \frac{R_s}{\left(\frac{1 - \rho_{\infty, SC}}{1 + \rho_{\infty, SC}} \right)} \dots\dots\dots (21)$$

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，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 $\rho_{\text{corrected}}$ ，其中 ρ_{air} 為空氣中該探頭所測得穩態反射係數，再將 $\rho_{\text{corrected}}$ 代入式(19)，可求得更接近待測體的真實導電度。

$$\rho_{\text{corrected}} = 2 \frac{\rho_{\text{sample}} + 1}{\rho_{\text{air}} + 1} - 1 \dots\dots\dots (22)$$

4. 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 11 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 11 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)

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} * A \dots\dots\dots (23a)$$

$$Z_c = Z_p / \sqrt{\epsilon_r^*} * A \dots\dots\dots (23b)$$

$$A = \sqrt{1 + (1 - j) \left(\frac{\eta_0}{Z_p} \right) \frac{\alpha_R}{\sqrt{f}}} \dots\dots\dots (23c)$$

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

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r' - j \left(\epsilon_r'' + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \epsilon_0} \right) \dots\dots\dots (24)$$

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)， α_R ($\text{sec}^{-0.5}$) 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：

$$\begin{aligned}
 Z_{in}(z_n) &= Z_L \\
 Z_{in}(z_{n-1}) &= Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} \tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L \tanh(\gamma_n l_n)} \\
 Z_{in}(z_{n-2}) &= Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(z_{n-1}) \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\
 &\vdots \\
 Z_{in}(0) &= Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} \tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1) \tanh(\gamma_1 l_1)} \dots\dots\dots(25)
 \end{aligned}$$

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](#)）：

$$V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s = H V_s \dots\dots\dots(26)$$

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，

$$H_m(\epsilon_r^*, f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \dots\dots\dots(27)$$

此量測值必須等於量測系統之理論系統函數（公式(27)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。

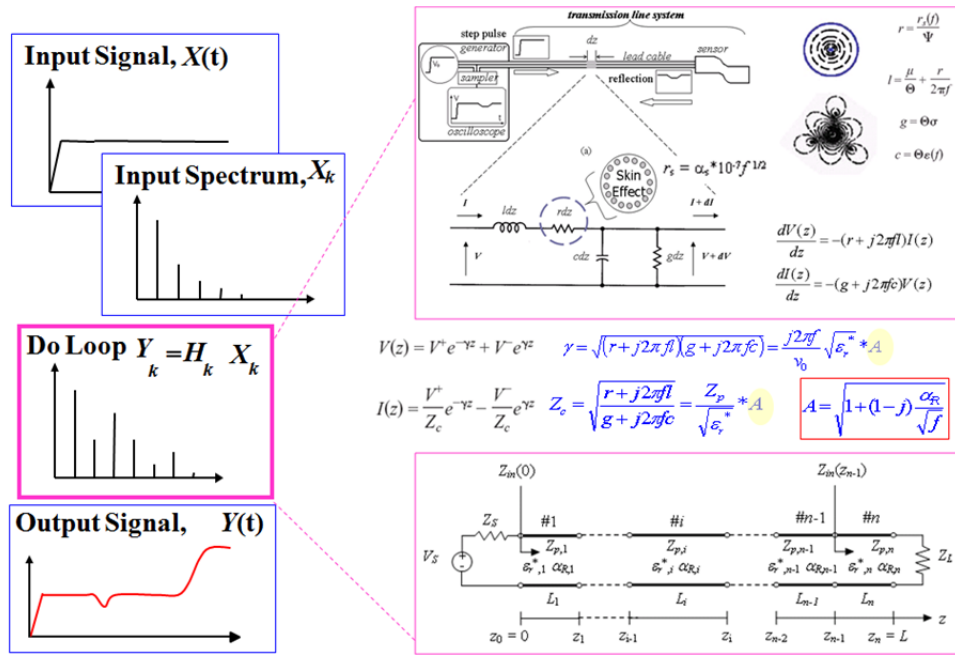


圖 11 TDR 波傳模擬波譜法 (Spectral method)

為了準確量測寬頻的介電度，必須要能夠準確的率定圖 11 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 12 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 13 所示。圖 12 之波形是採用水做為介質之數值模擬結果，圖 13 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 13 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。

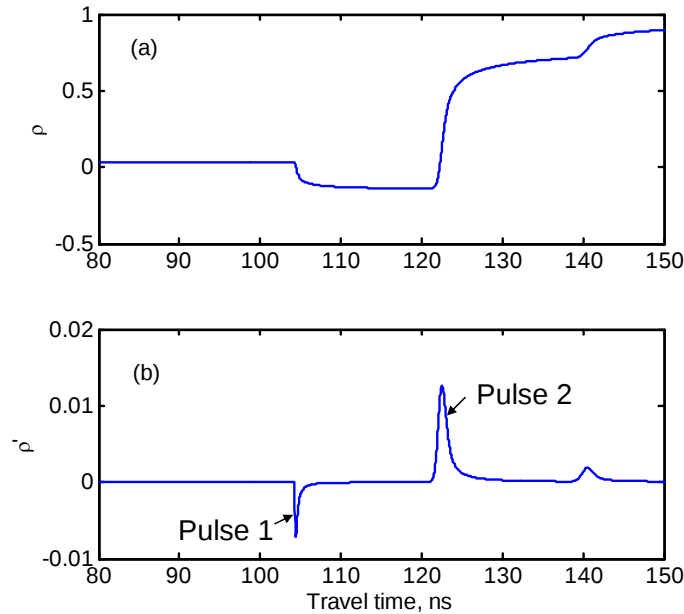


圖 12 TDR 頻率相位速度分析方法所需之反射特徵訊號(鐘志忠，2008)

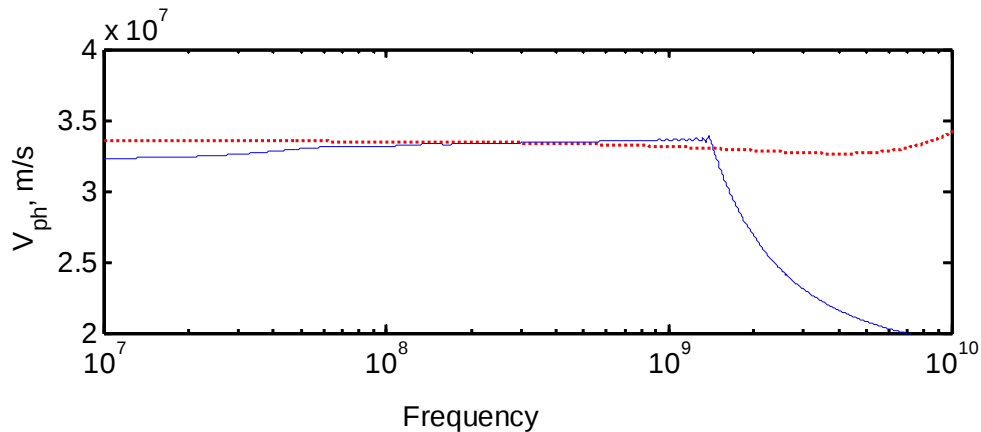


圖 13 TDR 頻率相位速度分析結果(鐘志忠，2008)

3.3.1.3 TDR 技術應用之應用潛力

TDR 可有效應用於現地材料之介電度以及導電度的量測，綜合前述之文獻可知，在氣體含量之量測上，藉由開發 TDR 量測系統其可同時採用介電度進行定量之氣體含量量測，並且其同樣可採用導電度之量測與既有應用導電度量測技術進行兩相比對，不僅提供更多之量測結果訊息，亦增加互相補充

提高量測結果之可靠度。除此之外，未來若再進一步透過控制系統的排程開發，可將此技術提升為單孔多點的氣體含量監測技術，更有甚者，透過不同感測器形式設計，開發貫入式感測系統，將可由既有的監測井中氣體含量的量測進展到飽和土壤中的氣體含量監測，若再整合目前已由本團隊同樣利用 TDR 技術開發成功之底泥厚度調查貫入器(環保署，2014)以及其在污染物辨識的潛力，TDR 技術在成為汙染物調查以及整治監測的綜合應用技術，應用層面廣泛，具有極大的發展潛力。本年度將研發工作集中於 TDR 技術於氣體含量量測之方法發展上，除將進行室內試驗評估應用介電度混和模型理論式進行氣體含量量化量測的可行性，另將針對監測井中的氣體含量量化量測系統進行開發。

3.3.2 孔內透地雷達探測技術與其應用潛力

透地雷達系統主要由一產生電磁脈衝之電磁波源以及可接收電磁波之接收天線組成。如圖 14 所示，當由含有數百伏特線圈組成之電磁波源產生一脈衝波（頻率在 1MHz-10GHz）射入地表下後，電磁波以地表下材料之電磁波波速向下傳遞，一旦遭遇有電磁波波速改變之材料界面時(如層面、孔洞位置、地下結構物、介電度變化等)，其將有反射之現象發生，此一反射之波將返回地面而被位於地表之接收天線接收。透過在一直線上不斷移動電磁波源與接收天線，可獲得測線地表下高解析度之 2 維或 3 維反射面影像，藉由對此一高解析 2 維或 3 維反射面影像之訊號分析後，可獲得地表下之構造分佈情形。此種探測方式稱為反射式透地雷達法，若利用於井內，則為雷達波井測或透地雷達井測。

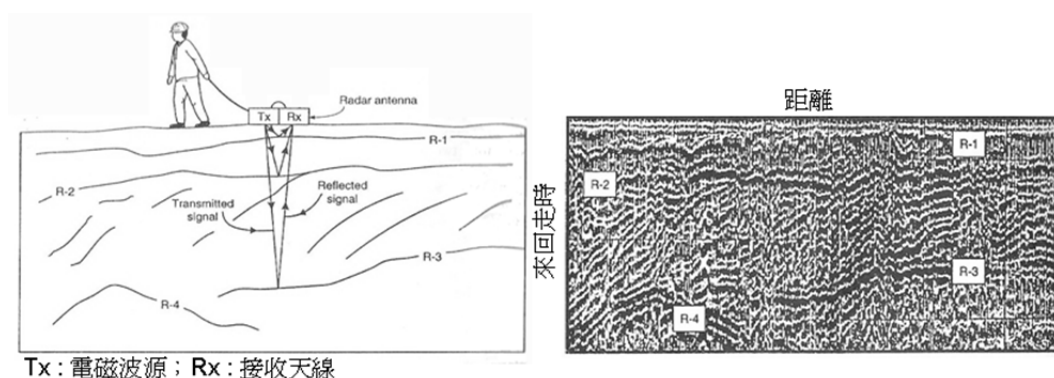


圖 14 透地雷達施測原理示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

GPR 井測之單孔井測為發射器與接收器同放在一口井內，其施測方式類似地表的反射式透地雷達，如圖 15 所示，相較此法，將發射器與接收器放在不同井中之跨孔井測具有較大的自由度，依其發射器與接收器之幾何關係的不同，又可細分為三種施測方法：零支距剖面法 (Zero Offset Profile, ZOP)、多支距剖面法 (Multiple Offset Gather, MOG) 及垂直雷達剖面法 (Vertical Radar Profile, VRP) 等。

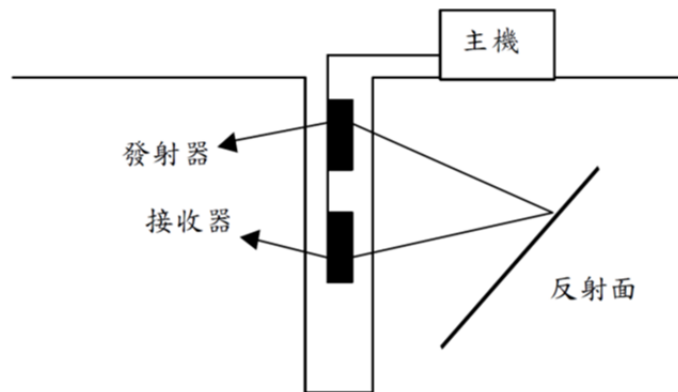


圖 15 透地雷達單孔井測示意圖

零支距剖面法 (Zero Offset Profile, ZOP)：為最快速的施測方式，透過透地雷達的發射天線 (Tx) 和接收天線 (Rx) 分別在不同的井中同時做等間距的移動 (如圖 16 所示)，藉著所收集到雷達波資料走時和振幅的變化，能夠指出兩井間地層的變化。

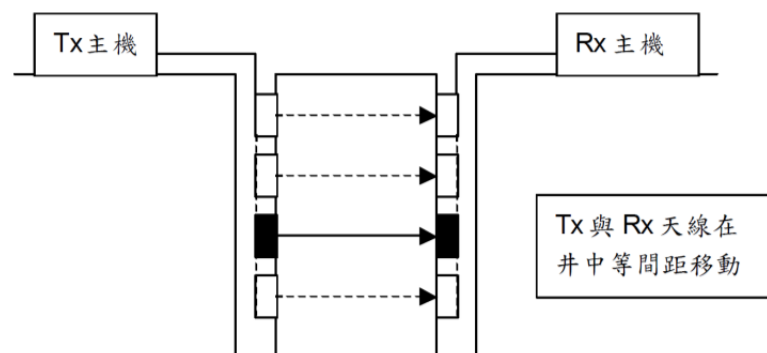


圖 16 零支距剖面法示意圖(摘自高千平，2001)

多支距剖面法 (Multiple Offset Gather, MOG)：此法可獲得更詳細的地層資料，利用雷達波不同的路徑和入射角度來獲取兩井間地層更多的資訊。當施測時，固定發射天線的深度位置，改變接收天線的位置，由井的頂部移

動至底部，再將發射天線移至另一深度，再次移動接收天線由井口至井底，重複施測，直至發射天線移至井的底部（如圖 17 所示）。

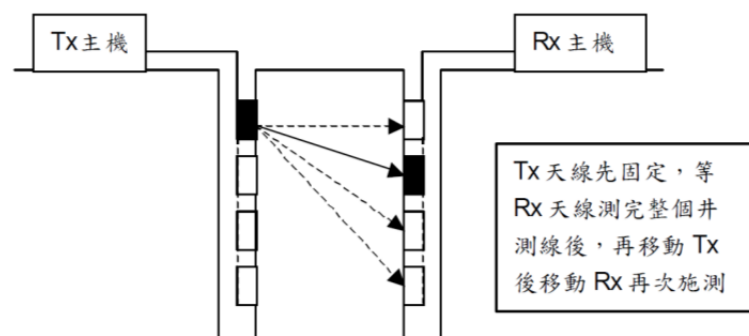


圖 17 多支距剖面法示意圖(摘自高千平，2001)

垂直雷達剖面法 (Vertical Radar Profile, VRP)：當現場只有一口井可資利用時，或為了得到兩口井間與地表之間的射線資料，增加雷達波入射的路徑和角度變化，以便獲得更多資訊時，可使用 VRP 施測，此時可將發射天線放置地表固定位置，移動在井中的接收天線，由井口至井底，接著再移動地表發射天線至另一位置，重複進行到施測結束（如圖 18 所示）。

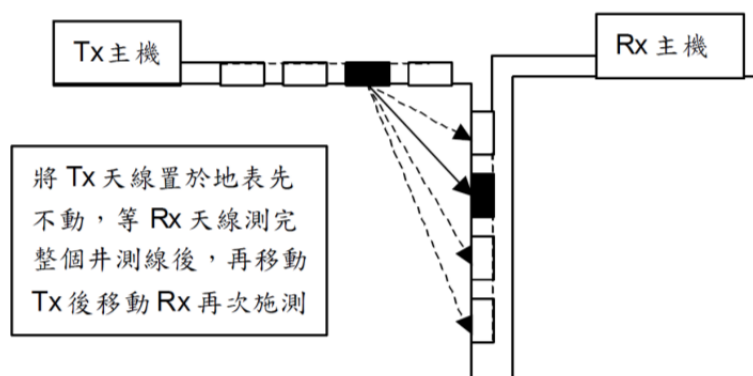


圖 18 垂直雷達剖面法示意圖(摘自高千平，2001)

而其中多支距剖面法及垂直雷達剖面法累積有大量通過不同待側區域之資料，在資料分析上可採用層析成像法(Tomography)進行解析，其作法是挑選每筆資料之走時曲線，其表示每個發射天線至接收器間距離所需之來回傳遞時間(如圖 19 所示)，而後先將待測地層分割成眾多小區域，針對各個小區域進行波速假設(圖中顏色方塊)，在利用射線追蹤理論(Ray tracing)將相對

之走時曲線算出，進行比對，最後獲得與現地資料最為接近之電磁波速分布結果。

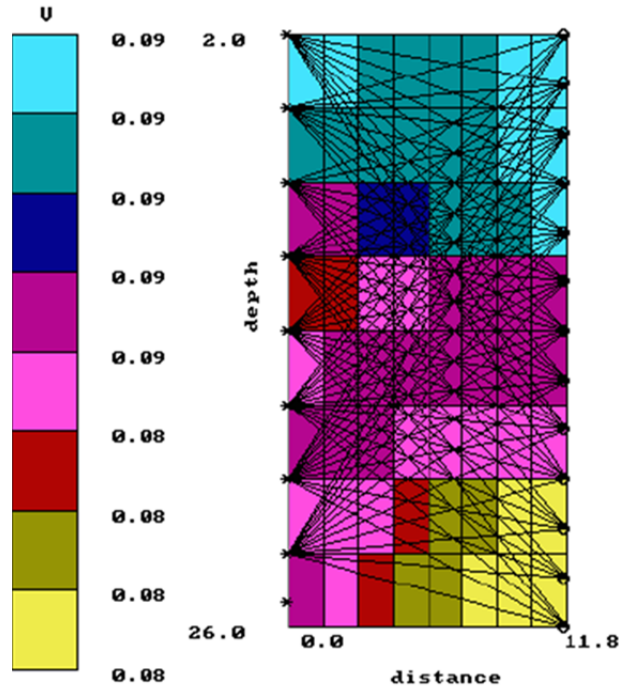


圖 19 透地雷達井測層析成像法反算示意圖

井測法之接收／發射器或電極陣列或排列（Array）相較於傳統之地面施測更顯複雜，由探測器發射高頻率雷達波並接收其反射訊號，其可獲取來自不同方位（井間或孔內）、不同深度之資料點，因收取之資料繁複致其數學理論及分析方法亦更為複雜。當然，其分析結果可獲致更具代表性之掃描剖面。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雷達波訊號可達之雙井。

在本研究中，欲透過多支距剖面法之跨孔雷達井測進行層析成像分析，將所獲得之電磁波速剖面轉換為介電度分布剖面，由於在此類調查中之雷達天線頻率主要在 50-200MHz，與過去成功量測土壤含水量之 TDR 技術的有效頻率十分接近，預期可獲得具有可靠度之土壤含水量剖面。如此，藉由跨孔雷達井測可使監測井之資料由原有之 1 維成果進一步跨大為 2 維之連續分布結果，可更為有效地了解地下氣體的分布狀況。當然，若僅採用單一次之量測僅可獲得土壤含水量分布，若欲由此土壤含水量分布影像進一步獲得氣體

分布影響則需要透過時序性的分析，對於地下水位以下之地層，其含水量的變化將會來自於氣體的增加，由此將可進一步掌握氣體的狀態，本研究將提出採用時序性的跨孔雷達井測進行氣體含量調查之分析方法，並進一步將此結果與 TDR 監測井中之結果進行比對，以釐清地中氣體分布與監測井中氣體分布之關聯性。

3.3 研究重點說明

根據文獻回顧以及本研究之目的，本研究之研究重點主要有三方面，分別是孔內 TDR 氣體含量量測系統研發、氣體含量與介電度關係室內試驗探討以及好/厭氧環境整治場址氣體分布調查現地測試，就此三方面將其研究重點說明於下列各小節中。

3.3.1 孔內 TDR 氣體含量量測系統研發

在 TDR 量測系統建置中，感測器之設計為一重要內容，其形式可能影響未來應用上的擴充性以及訊號之訊雜比程度。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，對於具有貫入土中需求者以多棒式以及貫入式較恰當，但其感應範圍較大且可能不均勻，容易受到感測器外圍環境以及材料的影響，而同軸式感測器其感測範圍較無方向性，且不會受到感測器外部材料以及環境的影響。根據本研究之目的：監測井中之氣體含量量化量測以及考量未來進一步提升為多深度監測之擴充性，在感測器之設計上基本考量五項要點：

1. 感測器的氣泡黏著性：監測井中的氣體可能以為小氣泡的形式存在，根據過去本團隊在泥沙濃度感測器製作過程的經驗顯示，感測器之設計將影響水中氣泡附著或是累積的情形，若無法有效排除，其將對量測成果造成誤差。
2. 感測器體積：目前常見的監測井大多採用 2 英吋之 PVC 管，感測器體積需較其小，此外，若考量未來多深度監測的擴充性，其另需要考量在井中容許多條訊號傳遞纜線的空間。

3. 感測器的氣體量測靈敏度：不同的感測器長度在量測所得之介電度上會有不同的靈敏度，需考量氣體量測量上所需的解析度進行恰當的感測器長度設計。
4. 高導電度對感測器量測的影響：由於在好/厭氧環境的營造中常會透過添加鹽類等具導電作用的添加劑，會使水中導電度增加，而此高導電度將造成感測器中訊號衰減明顯，在感測器設計上應避免高導電環境而造成無法解析成果的潛在問題。
5. 外部環境對感測器的影響：未來若欲進行多深度監測的擴充，訊號線將在監測井內存在，若感測器量測結果會受到外部環境之影響，將不利於未來之擴充。

對於最為恰當之感測器設計，本研究將在室內試驗時即透過室內試驗測試可符合上述五點考量之感測器，而後於現場應用實際檢驗其適用性。

3.3.2 氣體含量與介電度關係室內試驗探討

本研究提出兩個利用介電度在現場進行井中以及在土體中氣體含量量測之應用方法，將先行於室內試驗對於提出之理論式進行可行性評估，此外，亦將針對感測器設計的部分測試不同的感測器設計，並綜合上節感測器設計中的考量項目進行比較，以利最後提出最適合用於現地監測井中應用之感測器以及氣體量測理論；此外，在進行視介電度量測應用的同時，亦將同時透過 TDR 量測導電度的不同，藉以在更客觀的控制條件中比較採用介電度量化與導電度量化的適用性。

3.3.3 好/厭氧環境整治場址氣體分布調查現地測試

現地測試之目的有三：

1. 測試研發之 TDR 井內氣體含量量測系統之適用性。
2. 測試井內透地雷達用於飽和層中量測之可行性。
3. 監測井內氣體含量分布與飽和土層中氣體含量分布之關係性。

第四章 研究方法與過程

4.1 研究流程

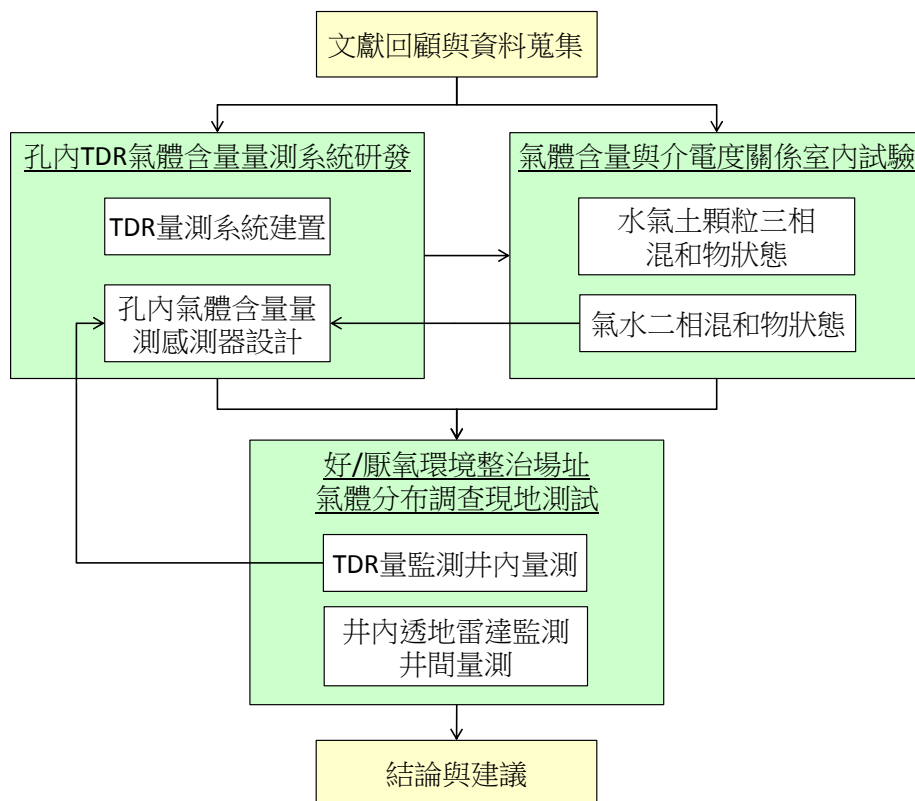


圖 20 研究流程圖

4.2 工作進度

本研究之進度甘梯圖如圖 21 所示，目前進度接近期末預定查核點，目前所有室內工作皆已完成，惟現地試驗須配合模場工作尚在進行中，在計畫結束前可完成現地工作。整體執行進度符合預定進度。

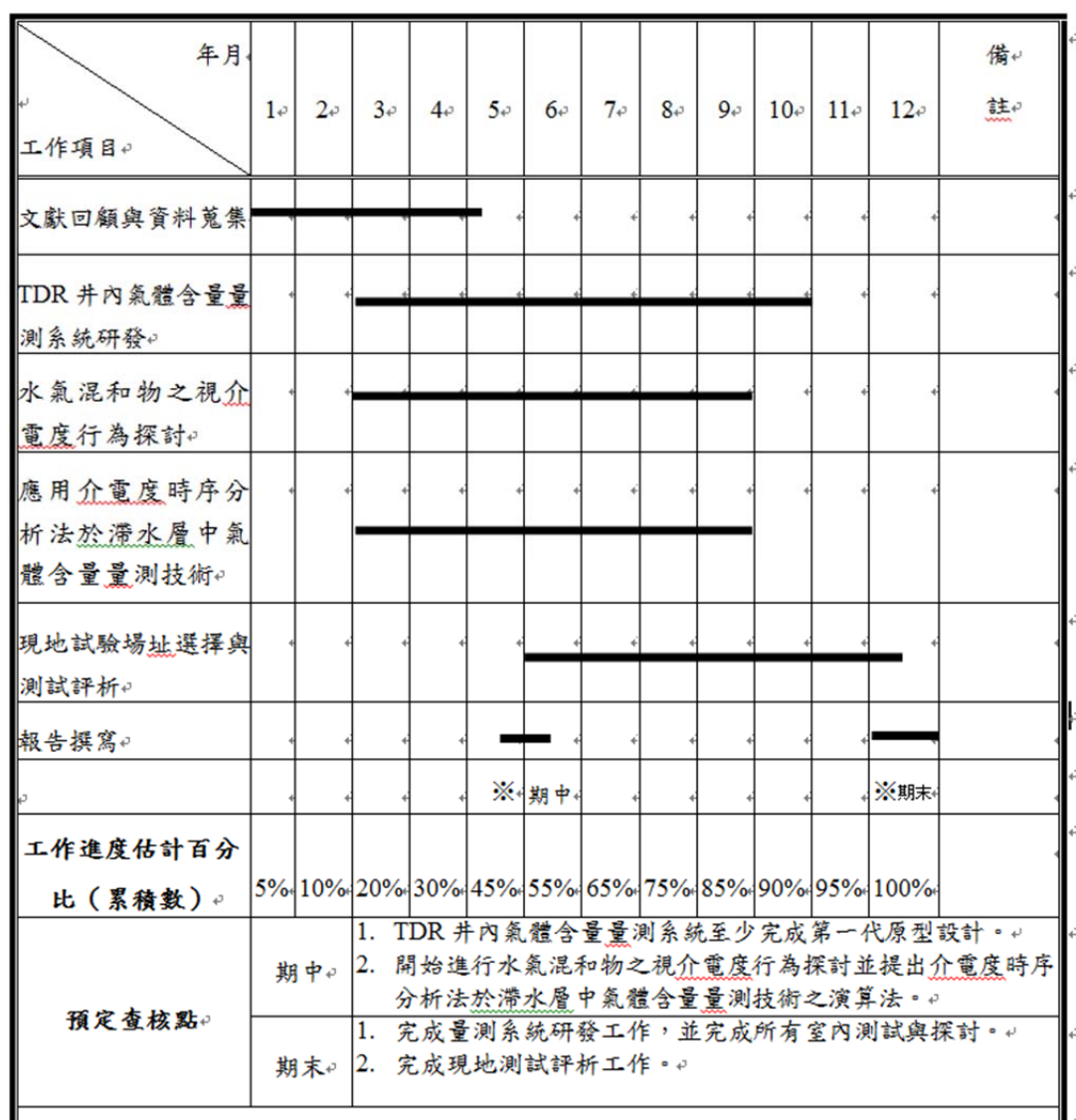


圖 21 進度甘梯圖

第五章 結果與討論

5.1 介電度時序分析法於滯水層中氣體含量量測技術之應用

5.1.1 水、氣、土壤顆粒三相混和物視介電度行為探討

在進行現地介電度時序分析法前，先於室內進行此分析法之評估與誤差估計。在室內試驗的部分採用寶二砂土及高嶺土進行之參數標定中除了進行前述兩種土樣的標定外，同時亦採用正在興建中的湖山水庫壩體所採用的湖山土與湖南土。

5.1.1.1 室內試驗儀器、材料與配置

TDR 量測系統可概括分為五個部分，分別是 1.感測器，2.時域反射儀(TDR)，3.資料擷取器(datalogger)，4.資料儲存器(storage)，5.電源供應系統(power supply)。各儀器元件的功能詳述如下：

1. 感測器：與待量測物直接接觸，用以感應待測物之介電性質。
2. 時域反射儀：TDR 為一脈衝電壓產生器，產生之脈衝電壓傳至同軸電纜線，由訊號採樣器擷取 TDR 波形，以做為分析使用。
3. 資料擷取器：資料擷取器是為一便於攜帶的小型數據處理器(可以是 PDA 或是嵌入式系統等視需求而可有不同)，可透過擷取器商業控制程式軟體進行資料擷取器的操控與上傳下載資料，並在此中置入分析用軟體做為分析之用。
4. 資料儲存器：資料儲存器其目的為擴充資料擷取器之內建暫存記憶體，將擷取資料另外備份。
5. 電源供應器：提供上述儀器之用電，一般而言，現場設備使用直流電源較為便利。

在室內採用之土樣分別為 SP-SM 之寶二砂土(Bao2)、ML 之湖山土(Hushan)、CL-ML 之湖南土(Hunain)以及 CL 之高嶺土(Kaolinite)。寶二砂土是新竹寶山第二水庫庫區砂岩將其碾碎成粉質砂土後使用(後續以寶二砂土稱之)，其比重為 2.63，均勻系數 C_u 為 2.56，級配系數 C_c 為 1.76，再針對本砂土細粒部分進行阿太堡試驗得到液性限度(LL)為 29、塑性指數(PI)為 6，統

一土壤分類法分類中粉土質不良級配砂(SP-SM)。此外，採用五組不同含水量將寶二砂土試體進行標準夯實試驗，其最佳含水量 $OMC=13\%$ ，最大乾單位重為 $17.3kN/m^3$ 。

湖山土是湖山水庫湖山主壩上游擋水壩置於料區的預定用土，其比重為 2.69，200 號篩通過百分率為 18%，而阿太堡試驗結果顯示，其液性限度為 18，塑性指數為 3，根據統一土壤分類法是為低塑性粉土(ML)。此外，採用五組不同含水量將湖山料土試體進行標準夯實試驗，其最佳含水量 $OMC=12.6\%$ ，最大乾單位重為 $18.13kN/m^3$ 。

湖南土是湖山水庫湖南壩上游擋水壩置於料區的預定用土，其比重為 2.69，200 號篩通過百分率為 16%，而阿太堡試驗結果顯示，其液性限度為 23，塑性指數為 5，根據統一土壤分類法是為低塑性粉土至黏土(CL-ML)。此外，採用五組不同含水量將湖山料土試體進行標準夯實試驗，其最佳含水量 $OMC=12.5\%$ ，最大乾單位重為 $17.7kN/m^3$ 。

高嶺土為含水之鋁矽酸鹽礦物，多由長石、雲母或其他鋁矽酸鹽類礦物，經熱水的變化風化而來。本計畫中所使用之高嶺土其通過#200 號篩(0.075 公釐)者佔約 98%，通過#200 號篩者使用雷射粒徑分析儀進行分析，粒徑主要分佈於 0.003 至 0.04 公釐之間，D50 為 0.006 公釐。由阿太堡試驗所得之高嶺土液性限度 (LL) 及塑性限度 (PL) 分別為 48.2 與 29.4，採用統一土壤分類法，其分類為低塑性之黏土(CL)。此外，採用六組不同含水量將高嶺土試體進行標準夯實試驗，其最佳含水量 $OMC=28.3\%$ ，最大乾單位重為 $13.4kN/m^3$ 。

	-#200	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	LL (%)	PI (%)	USC	OMC (%)	$\gamma_{d,OMC}$ (kN/m^3)
Bao2	6%	0.08	0.17	0.21	29	6	SP-SM	13	17.3
Kaolinite	98%	--	--	--	48	19	CL	28.3	13.4
Hunain	16%	--	--	--	23	5	CL-ML	12.5	17.7
Hushan	18%	--	--	--	18	3	ML	12.6	18.1

室內參數標定使用之感測器如圖 22 所示，其為同軸式感測器型式，其可分為下上兩部份，上部份為感測器轉接蓋(根據 ASTM D6780-05 之設計，其尺寸與材料如圖 22a 所示)，用以連接 TDR 量測儀器，而下部是為 ASTM

D698 之標準金屬夯模，以夯模本身做為感測器中電磁波傳導負極，並在模具中有一短鋼釘(長約公分，直徑約 0.8 公分)，用以貫入夯模內之土體中，做為感測器中電磁波傳導正極。而在夯模之頂部，為使做為外導體之夯模本身與感測器轉接蓋之外導體接觸良好，設計有一鋼套環，當模具中之土樣夯實完後，再將其套於夯模頂部即可。

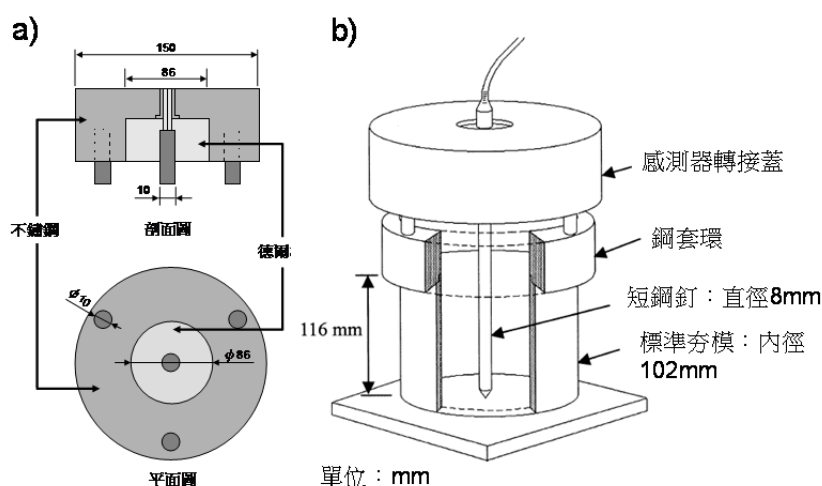


圖 22 三相混和物視介電度行為探討用感測器：(a) ASTM D6780-05 感測器轉接蓋剖面圖與平面圖；(b) 感測器組裝完成圖

5.1.1.2 介電度時序性跨孔雷達井測之可行性評估

以 TDR 量測系統量測試體之視介電度，並同時量測試體的體積含水量，試體之視介電度與體積含水量之關係為

$$\sqrt{K_a} = a_L + b_L \theta$$

其中 a_L 與 b_L 為標定係數，也就是其關係圖之斜率與截距。TDR 量測四種土壤之視介電度與體積含水量的關係如圖 23 所示。寶二土之 a 、 b 值分別為 1.82 及 8.81；湖山土之 a 、 b 值為 1.54 及 9.73；湖南土之 a 、 b 值為 1.94 及 8.88；高嶺土之 a 、 b 值為 1.72 及 9.23。四種土壤之 a 、 b 值相差不遠，若將四種土壤之數據取綜合回歸線，其綜合之 a 、 b 值為 1.79 與 9.05，整體線性度良好，採用此參數進行體積含水量預估，所得之體積含水量誤差(如圖 24 所示)皆在 3%以內，95%的資料誤差僅達 1.5%，也就是說不同土壤的 a 、 b 值差異不大，如此可以避免現地量測時需要針對土壤進行標定的困擾。

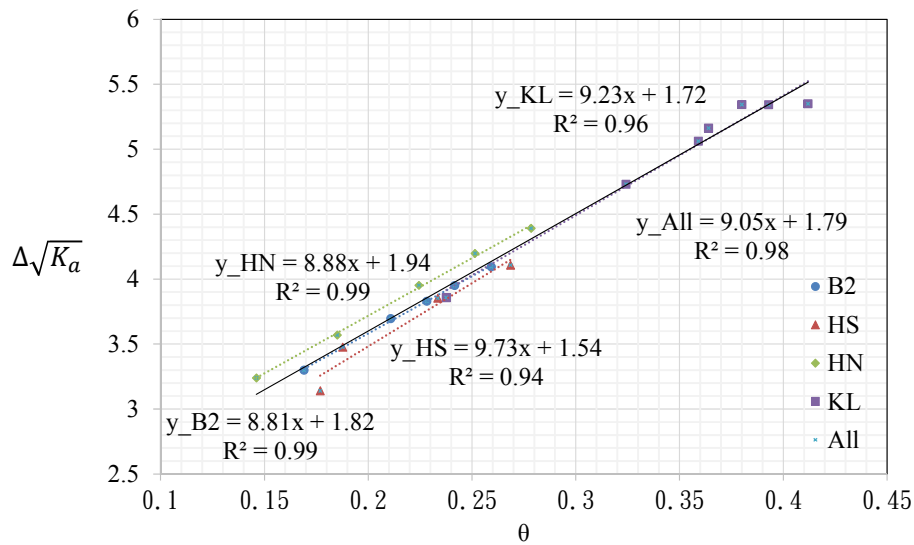


圖 23 寶二土(B2)、湖山土(HS)、湖南土(HN)及高嶺土(KL)之 K_a 與體積含水量之關係圖

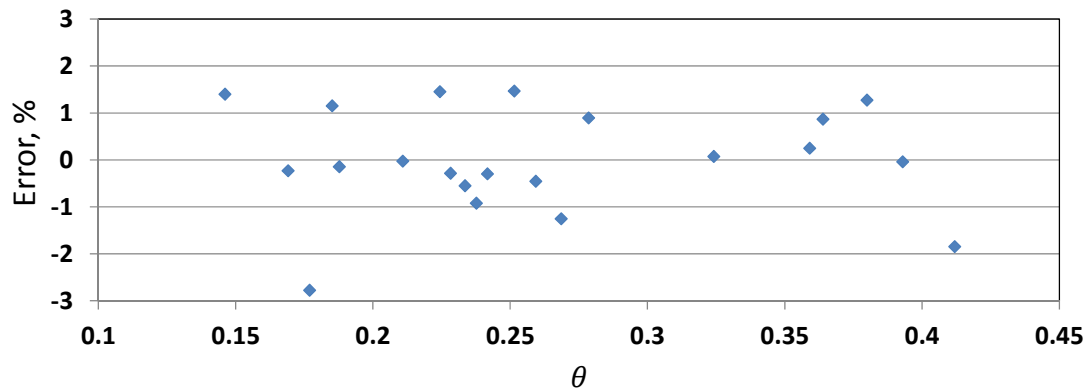


圖 24 綜合回歸參數之體積含水量量測誤差

根據前述之介電度時序分析法之公式

$$\sqrt{K_{a2}} - \sqrt{K_{a1}} = -\Delta AC \times b_L \dots\dots\dots (28)$$

氣體含量變化量與時序性介電度之關係圖應為一通過原點之直線，且其斜率應為前述標定之負 b 值。將前項四種土壤之量測結果以氣體含量差值及介電度差異進行呈現，其兩者之關係如圖 25 所示，以四種土壤中之氣體含量來看，各土壤資料之回歸線截距雖然不大，但皆未通過原點，造成這各結果的主要原因在於，推導式(28)時假定在氣體變動的過程中，土體組構並未因此產生變化，因而在推導過程中將乾密度假定為一樣而相互抵銷，然而在此試驗中，不同含水量之土體是以各種不同含水量夯實而成，會使得各試體即使

是相同土樣其乾密度意有所不同，因此在此應將乾密度的參數放回，則式(28)在考量乾密度後須調整為

$$\sqrt{K_{a2}} - \sqrt{K_{a1}} = -b_L(\Delta AC + (\gamma_{d2} - \gamma_{d1})/\gamma_s) \dots\dots\dots(29)$$

調整後之關係圖如圖 26 所示，四種土壤之資料回歸線，除了湖山土音資料點數較少且其量測所得誤差較大致使其顯示出之行為與其他三者差異較大外，大致上其截距皆十分接近零，且斜率與-b 相當接近，其會有所差異的原因可能在於其資料點的分布相對來說較為集中，並沒有完全涵蓋在原點兩側，而使得斜率會有所偏差；但若進一步同時將四種土壤一同考慮，如圖 27 所示，綜合回歸的資料其斜率-8.65，截距-0.01，與前述綜合回歸之 b 值 9.05 的負值十分接近，符合式(28)的預測，而由於其應通過原點，在此截距較小的情況下，將其強迫截距為零，則如圖 27 所示，其斜率為-8.73，與標定之-b 值更為接近。然而，不論採用之參數為前述三者中的何者，如圖 28 所示，其所估計得到的氣體含量變化誤差差異並不大，95%的資料點皆落在正負 3%以內，建議未來進行現地試驗時，並不需要取樣標定其土壤之 a、b 值，可以此處標定所得之-8.73 作為標定係數進行量測作業即可。而由此一室內試驗之結果亦可驗證本研究在 3.2.2 節中所提出的時序性介電度量測於滯水層氣體含量量測的量測概念是為可行，後須將應用在現地透地雷達井測之資料解讀中。

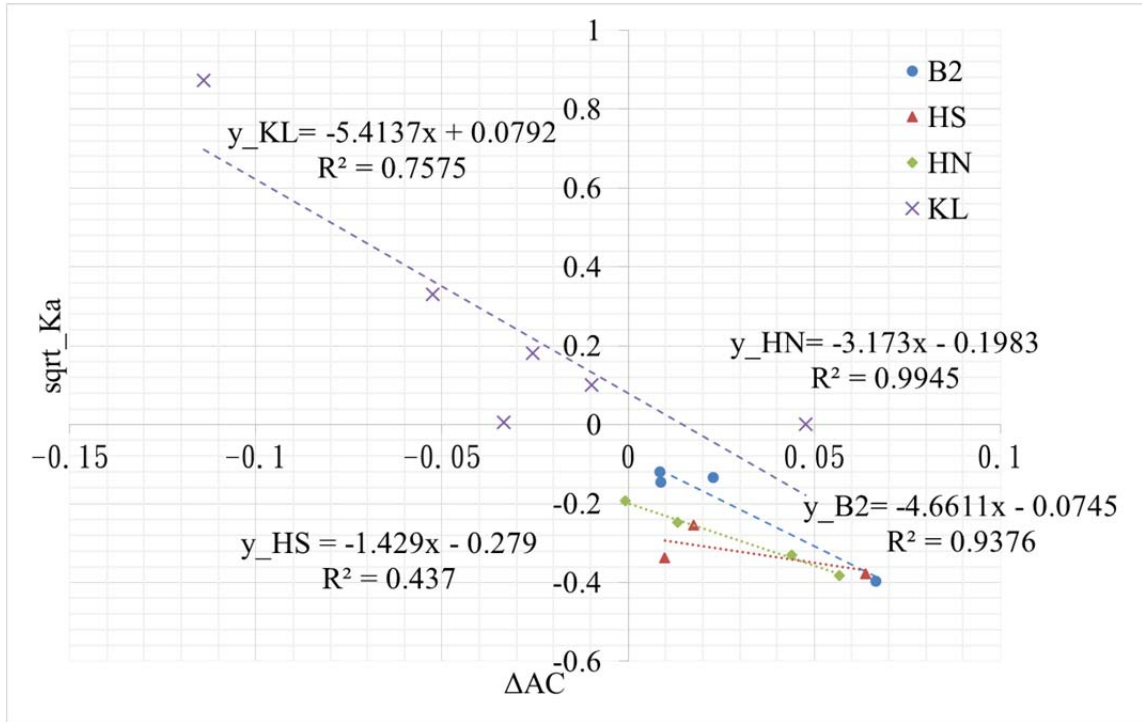


圖 25 氣體含量差值與介電度變化之關係圖

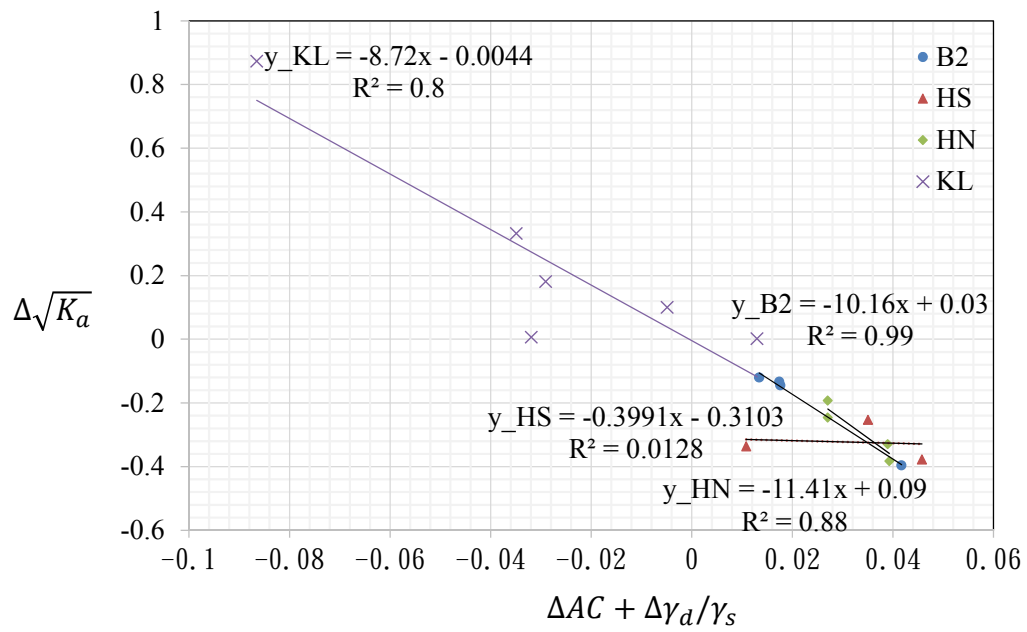


圖 26 修正後氣體含量差值與介電度變化之關係圖

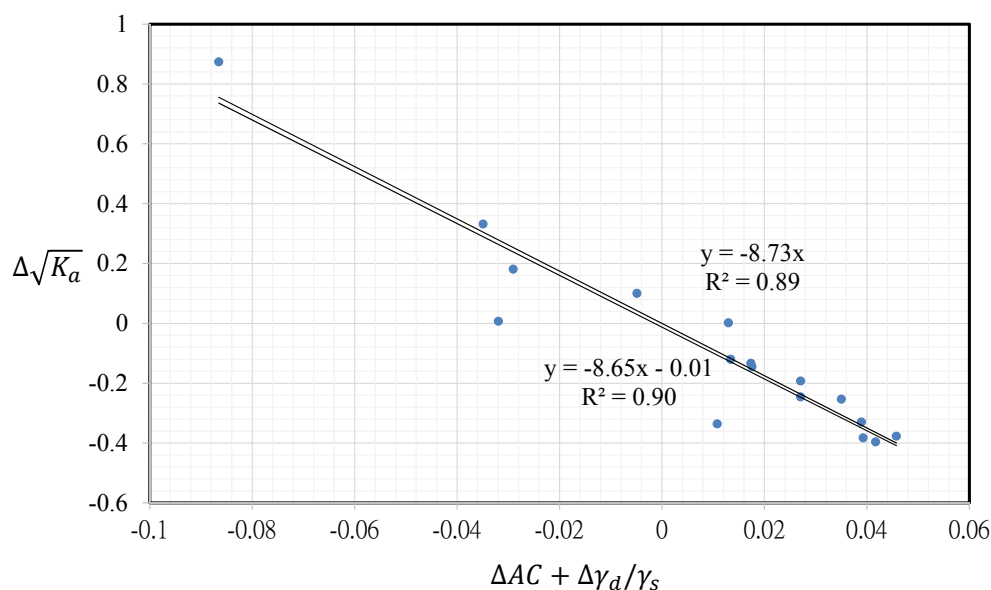


圖 27 修正後氣體含量差值與介電度變化之關係圖(綜合回歸)

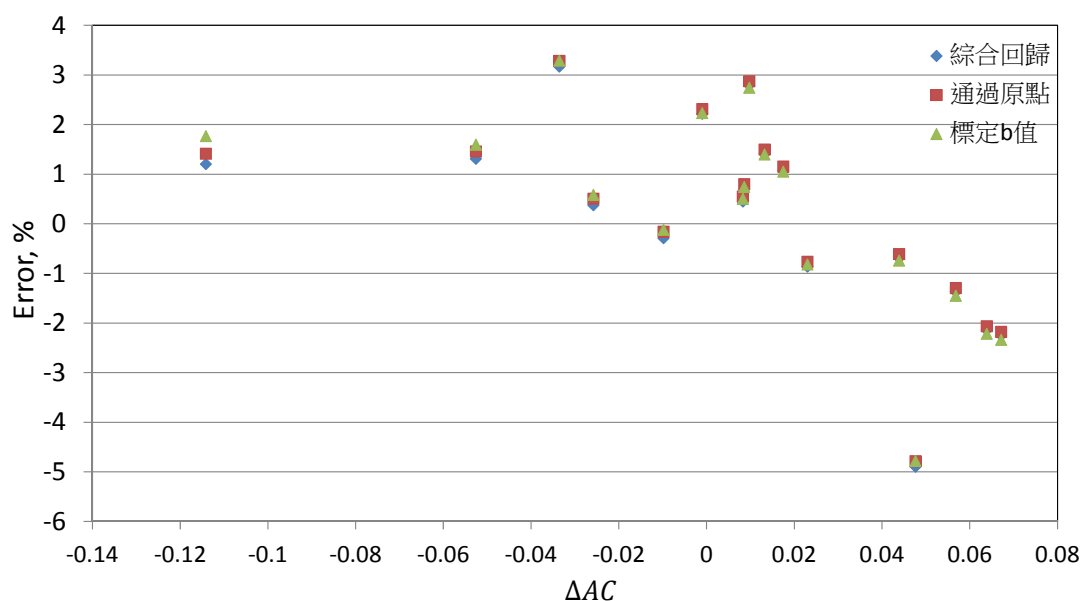


圖 28 不同參數之氣體含量量測誤差

5.2 孔內 TDR 氣體含量量測系統研發

5.2.1 孔內 TDR 氣體含量量測系統建置

如同 5.1.1.1 節中所述，TDR 量測系統可概括分為五個部分，分別是 1. 感測器，2.時域反射儀(TDR)，3.資料擷取器(datalogger)，4.資料儲存器(storage)，5.電源供應系統(power supply)。本研究在孔內 TDR 氣體含量量測系統建置上

採用德國 SYMPULS 公司生產的 TDR3000 做為 TDR 量測主機(如圖 29 所示)，其所產生電磁脈衝的 risetime 可少於 100×10^{-12} 秒，並搭配具有嵌入式系統之資料擷取器。該資料擷取器作業系統採用 Microsoft 公司所發展之 Windows Embedded 運作，其可執行控制程式並具有自動化量測的功能。為使後續現地分析以及整合其它不同物理量量測系統之便利，本研究以 LabVIEW 撰寫含資料擷取與分析程式之圖形化界面之儀控軟體，安裝於資料擷取器，由儀控軟體對資料擷取器下達擷取資料之指令，而後由資料擷取器趨動時域反射儀，送出一電磁脈衝並擷取反射波形，再由分析軟體對波形結果進行介電度分析，根據訂定的分析方法計算水中氣體含量。



圖 29 TDR 量測系統

5.2.2 TDR 氣體含量量測可行性評估

量測系統之建置除了前述硬體與硬體控制外，訊號分析方法以及量測感測器為量測系統中的主要內容，在實際進行現地儀器之開發前，先行於室內進行與訊號分析方法以及量測感測器的可行性評估，用以加速並降低量測系統的開發成本增加開發效率。

在可行性評估中，TDR 感測器型式以自製雙叉式及三叉式感測器為主，如**錯誤！找不到參照來源。**所示，導體直徑皆為 5mm，雙叉式感測器感測長度約為 18 公分；三叉式感測器長度則約為 17 公分。由於視介電度會受溫度影響，因此每個感測器配有溫度計以利進行溫度補償。溫度計擺設位置於感測器上方，避免溫度計位於 TDR 量測範圍內影響量測之結果。



圖 30 TDR 三叉式(左)與雙叉式(右)感測器

而氣泡產生方式是以空氣壓縮機(如錯誤! 找不到參照來源。所示)將空氣排出，以管子將氣體導至圓盤狀之透氣石後釋放至水中，氣體排放之多寡可由空氣壓縮機上調整出氣量，或由空氣壓縮機連結至管子時之節流閥調整之。經由透水石排出之氣泡可控制其大小並有利於在水體中的均勻分布。



圖 31 氣泡產生器：空氣壓縮機(左)透水石(右)

5.2.2.1 視介電度分析方法於氣體含量量測之影響

在視介電度的分析上，可加以應用分析的方法眾多，較為常見者為雙切線法，然而雙切線法較有分析不穩定的不利因素存在且無法得知其量測值的有效頻率，因此本研究擬以可有明確有效頻率的頻率相位速度分析法進行。在此以雙切線法及介電頻譜分析法分析三叉式TDR感測器在水中之穩定性，以評估適當的分析方法。

(1.) 雙切線法

如圖 32 所示，在波型進入水中時會有明顯之下降，以此為走時之起點 t_0 ；電磁波於 TDR 感測器終點時會有一上升之反射波型，於此上升段之區域極小值兩側的切線相交會處做為感測器終點 t_1 。TDR 感測器之走時即為 $t_1 - t_0$ 。

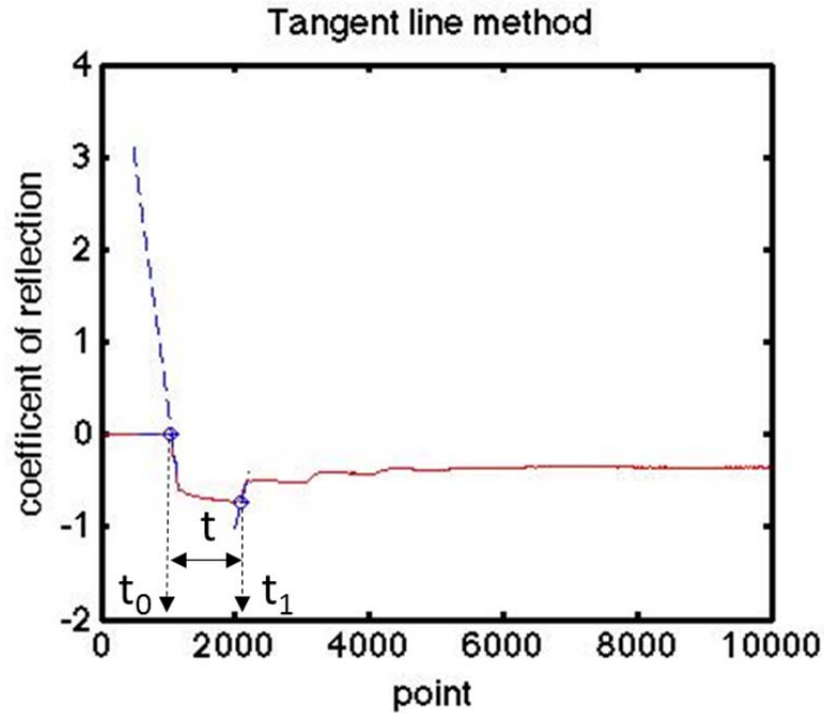


圖 32 雙切線法

(2.) 頻率域相位波速分析法(SASW)

如圖 33 所示，在進行頻率域相位波速分析法時，需選取特徵波形加以進行分析，在本試驗中，將波型進行微分後以第 1000 點到第 2000 點資料為第一突波(sec1)，第 2000 點至 3000 點資料作為第二突波(sec2)，將兩突波進行富立葉轉換後進行相位速度之計算，得到頻散曲線如圖 34 所示，根據鐘志忠(2008)之研究顯示，此法較適用於頻率 100-900MHz 之範圍，根據本研究團隊過往之經驗，300-400MHz 於土體中與水可有良好的相關性，因此本研究利用頻散曲線在 300 至 400MHz 時約呈現線性作為介電度的取用範圍，得到視介電度。

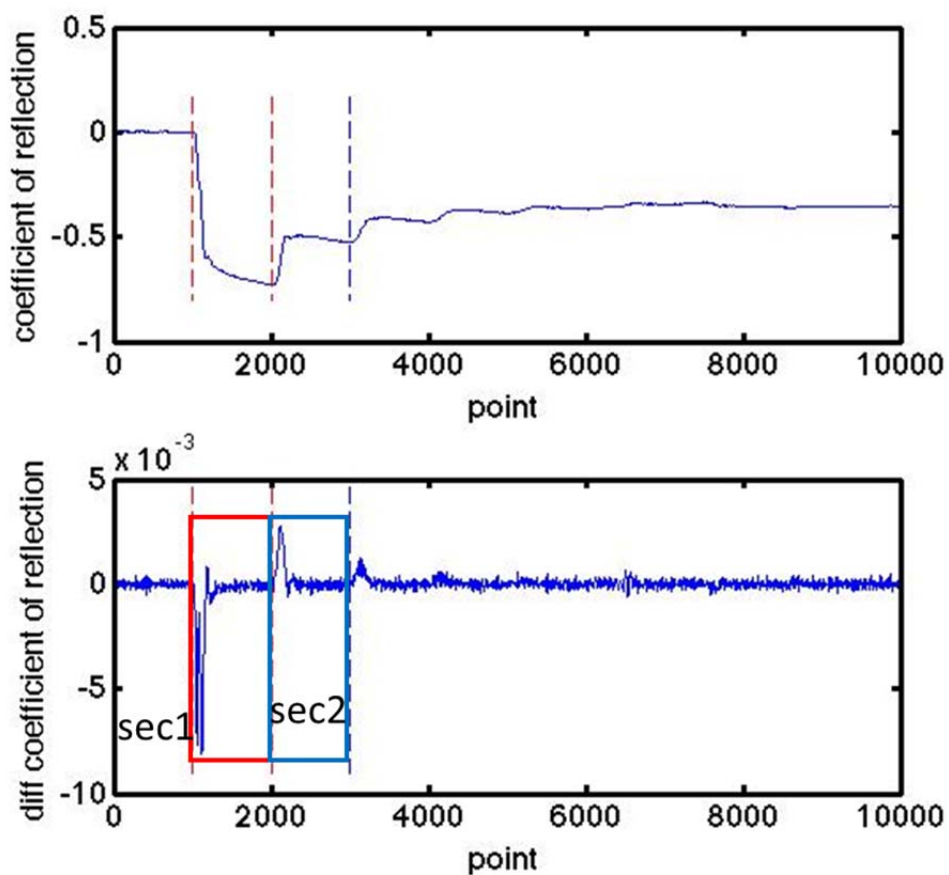


圖 33 頻率域相位波速法

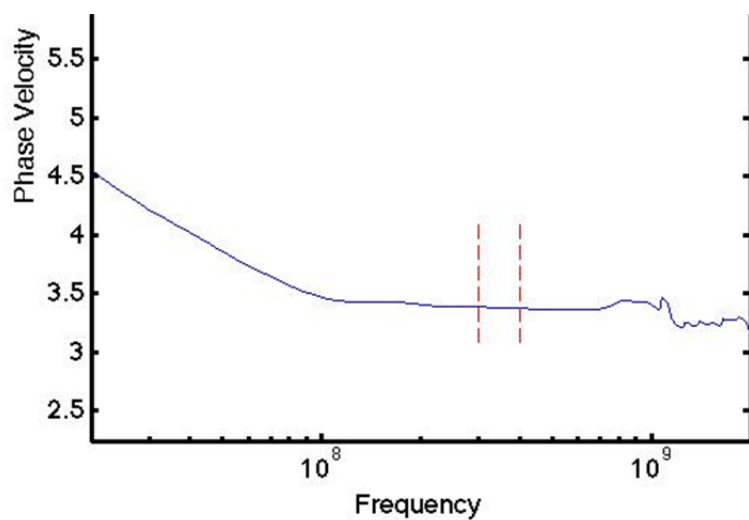


圖 34 頻率域相位波速法所得之相位波速頻譜

在水中穩定性試驗結果如圖 35 所示，使用雙切線法的分析方法量測氣

體濃度之標準偏差為 0.0015，使用介電頻譜分析法之標準偏差則為 0.0003，相較起來，使用頻率域相位波速分析法可獲得較為精準之量測成果。進一步檢討會造成雙切線法穩定性較低的主要原因在於，使用切線法時，會因為上升區域前極小值切線位置不確定而較容易有偏差，此外，其切線位置以訊號進入試體中下降段的最大微分值作為切線位置，而由脈衝反射係數法已知道此一直值會受到試體的介電度影響，而使切線法的分析結果較為不穩定。爰此，後續將採用頻率域相位波速法作為量測系統中視介電度的分析方法，且其分析所採用之頻率範圍為 300-500MHz 之資料。

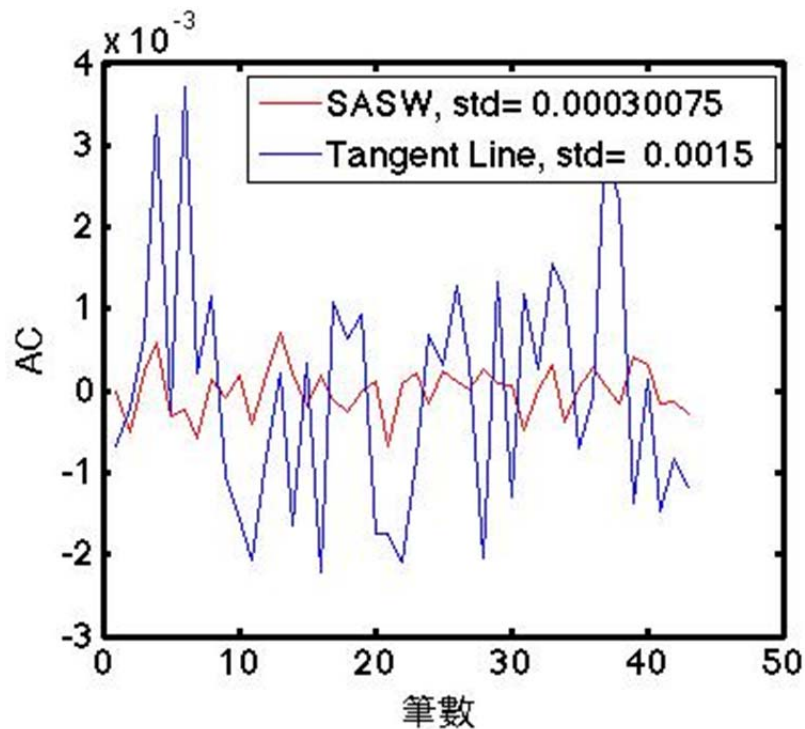


圖 35 不同視介電度分析方法之穩定度影響

5.2.2.2 感測器型式於氣體含量量測之影響

在介紹 TDR 之技術時已有提及，透過不同的設計，TDR 感測器可有多種不同形式，且根據不同的形式會有不同的感應特性，因此在量測系統進行組件前，決定感測器形式為後續現場應用成功與否的一項重點。為確定具可行性之感測器形式，在此利用 5.1 節中所製作的雙叉感測器以及三叉感測器進行穩定性試驗及重複性試驗。

穩定性試驗之目的為測試 TDR 感測器在氣水混合物中長時間的量測是

否有足夠的穩定性，並且了解量測之誤差範圍；重複性試驗為測試 TDR 感測器在清水中及氣水混合物中是否有足夠之靈敏性。

試驗方法如下：

1. 穩定性試驗：如圖 36 所示，將 TDR 感測器標定後置於清水中，長時間量測氣體濃度，觀察氣體濃度之變化。

2. 重複性試驗：如圖 36 所示，將 TDR 感測器標定後，先置於清水中量測，量測一段時間後換至氣水混合物中量測氣體濃度，觀察氣體含量之變化，而後再移回無氣泡區域量測，觀察其變化的狀況。

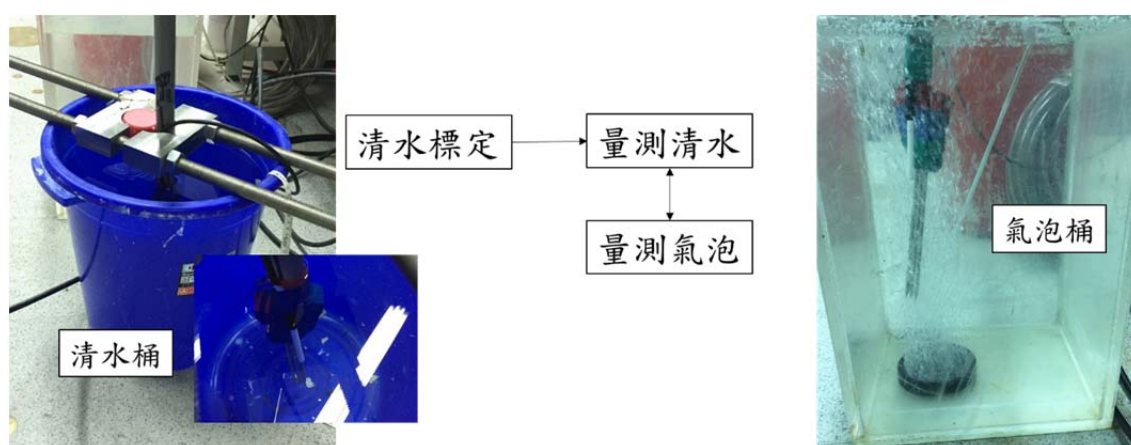


圖 36 感測器型式之穩定性試驗與重複性試驗之試驗配置

根據前一小節對分析方法影響的探討結論，在此以頻率域相位波速法分析雙叉式及三叉式 TDR 感測器之穩定性試驗及重複性試驗量測成果，分析成果分別說明如下：

1. 穩定性試驗

如圖 37 所示，雙叉式感測器於清水中量測 33 筆資料，每筆資料間隔為 1 分鐘，氣體濃度平均為 0.0009，其標準偏差則為 0.001；三叉式感測器於清水中量測 44 筆資料，每筆資料間隔 1 分鐘，氣泡濃度平均為 0.00023，其標準偏差為 0.0003。結果顯示雙叉式感測器之標準偏差約為三叉式感測器之標準偏差的 30 倍，在量測穩定性上，採用雙叉式設計的穩定性不如三叉式感測器，其原因主要是因為雙叉式感測器之雙棒為非對稱系統，會如同天線般接收到外界存在的電磁波雜訊，導致雜訊

較大，穩定性不如三叉式感測器。爰此，量測系統之感測器設計將以三叉式感測器作為主要考量。

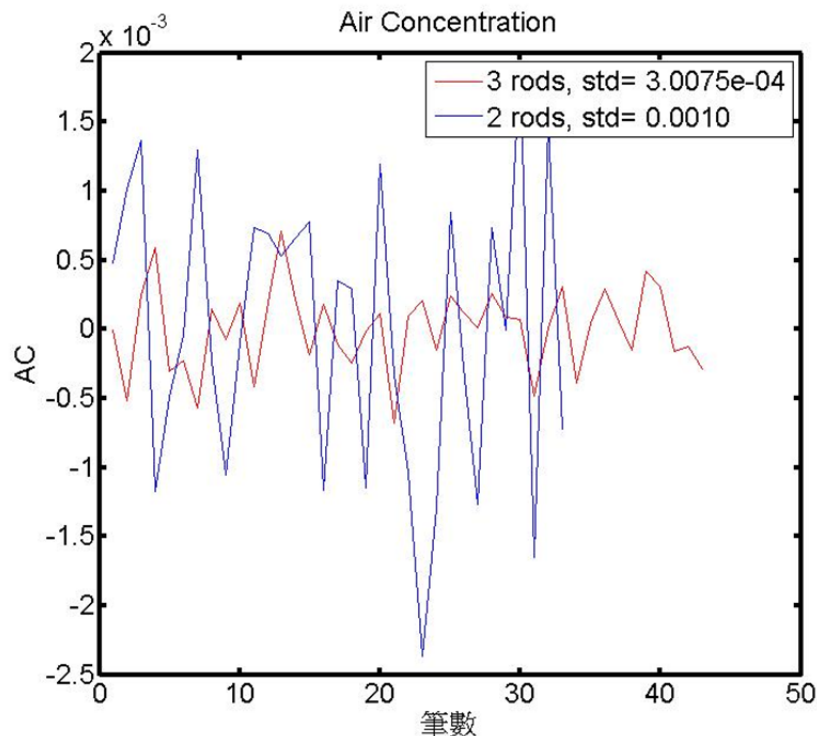


圖 37 不同感測器型式之量測穩定度測試成果圖

2. 重複性試驗

以三叉式感測器進行重複性試驗，試驗成果如圖 38 所示，剛開始在清水中顯示氣體含量為零，將感測器移入至有氣泡產生區，其氣體含量明顯上升，但將其再移回清水區的時候發現，其量測結果無法回到清水的值，再將其移至氣泡區，氣體含量明顯又提升至約略相同的位置，但再移回清水時，其仍然無法回到清水的值，且此次的值與前次的值又有所不同，顯示出其重複性並不十分理想，但特別的是，由圖中看來，清水區的量測不存在重複性，但在氣泡區的量測重複性卻十分良好，顯示在由氣泡區移回至清水區時發生了一些非系統本身問題的狀態改變而造成在清水區的量測不具有重複性。

經過多次的測試以及檢查後發現，由於目前感測器的設計(如**錯誤! 找不到參照來源。**所示)在其頂部會有一水平段，此水平段在進入氣泡區再移出後會有細小的氣泡停留，為確認此停留之氣泡是否是造成上述重複性不佳的原因，再進一次重複性測試，此次測試結果如圖 39 所示，在試驗中仔細觀

察確實發現當 TDR 感測器在氣水混合物中量測時，感測器頂端會有氣泡聚集堆積(b)，當移至清水中量測時(c)，仍有極微小的小氣泡依然在感測器頂端堆積，造成氣體濃度無法降為清水值，若在水中手動將頂端氣泡移除，TDR 量測之氣體濃度則降為清水值(d)。

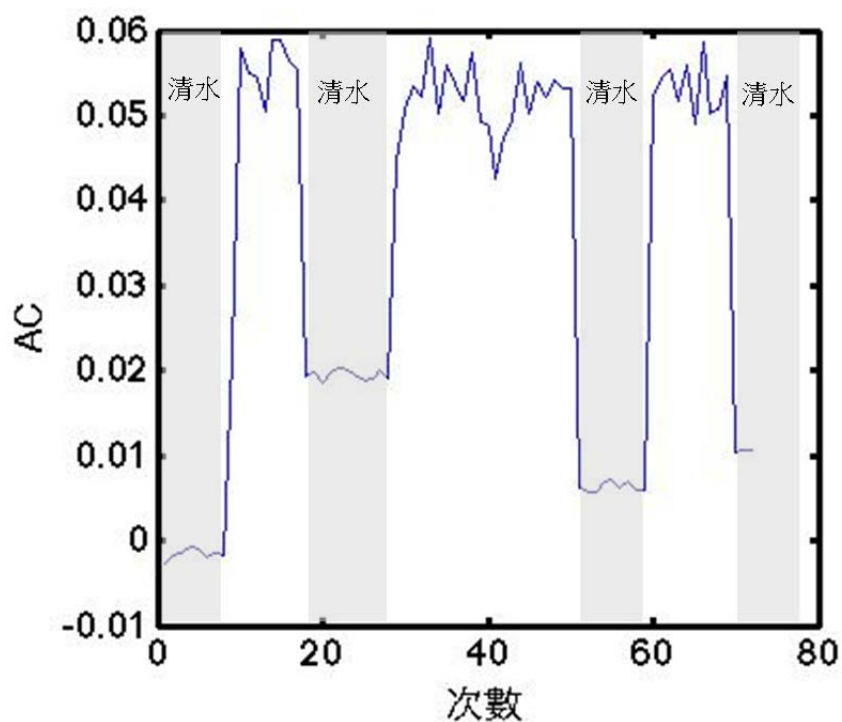


圖 38 三叉式感測器重複性試驗測試成果圖

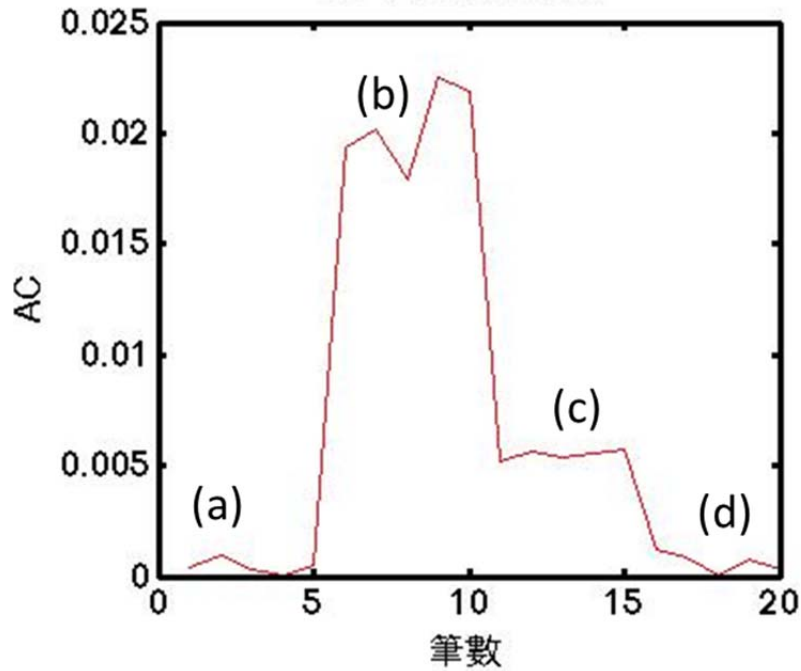


圖 39 清水區重複性不佳之問題排除測試成果圖

由此測試成果顯示，此量測系統具有重複性，但是感測器頂端會有小氣泡累積的問題將造成在低氣體含量時的量測誤差，為避免現地量測時也發生氣泡堆積的問題造成量測上的錯誤，後續量測系統感測器之設計將改為單棒式(如棒狀，無感測器頂部的水平區)的三叉感測器設計。

5.2.3 孔內 TDR 氣體含量量測感測器設計

5.2.3.1 原型感測器設計與測試

根據上述可行性評估之結果，TDR 於氣水混合物量測用之感測器以單棒式為佳，且其電極數應為三個。但在設計單棒式 TDR 感測器上，為達到棒狀之目的，在電極間需用不導電材料(一般採用塑鋼材料，如德爾林)加以填充，此填充物會造成 TDR 感測器對感測器外圍材料之靈敏性下降，若欲保持其具有足夠的量測靈敏度僅能犧牲其量測穩定度改採用單棒式雙叉感測器。由於此原因，在實際進行精密加工製作感測器前，先於實驗室製作原型感測器以 PVC 管先行測試三片式感測器及雙片式感測器於水中之靈敏性，以確定最終之感測器設計之方向。

如圖 40 所示，測試之 PVC 管直徑為 1inch，外部以鋁片作為導體，鋁片寬度為 1 公分，長度則為 15 公分；雙片式之鋁片夾角為 180 度，三片式則

為 120 度；PVC 管上下兩端不開孔且進行防水，使得感測器內部為空心。當感測器放入水中，若其主要量測範圍是在 PVC 管內側(即空氣)，則其在空氣中以及水中的量測結果差異就會極小，但若其對於 PVC 管外側仍有足夠的量測靈敏度，則其在水中與空氣中就會有明顯的差異出現，測試結果如圖 41 圖 42 所示，由圖中結果發現，雙叉感測器及三叉感測器之波型在空氣與水中皆有明顯的差異存在，明顯呈現出進入水中之量測反應。

由此原型感測器之測試結果顯示，在目前單棒式三叉感測器原型的尺寸設計下，其量測靈敏度仍能符合量測需求，而無靈敏性不足的問題。爰此，量測系統之感測器設計型式將以單棒式三叉感測器為主要設計方向。



圖 40 孔內 TDR 原型感測器實體

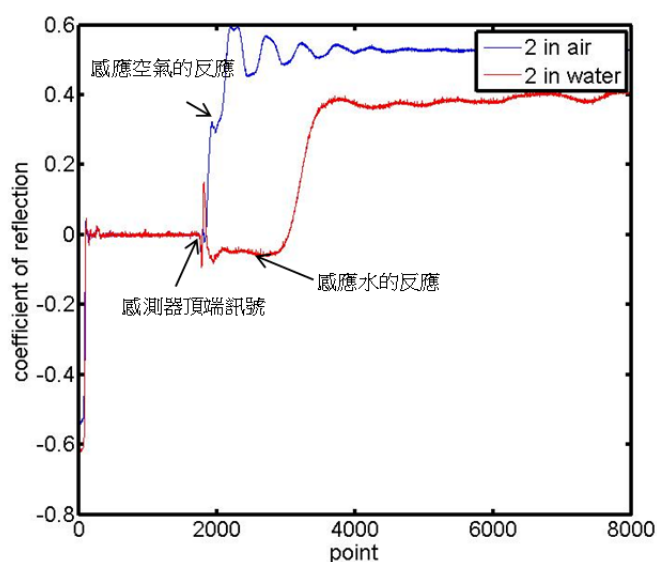


圖 41 孔內 TDR 原型感測器量測靈敏度測試；單棒式雙叉感測器

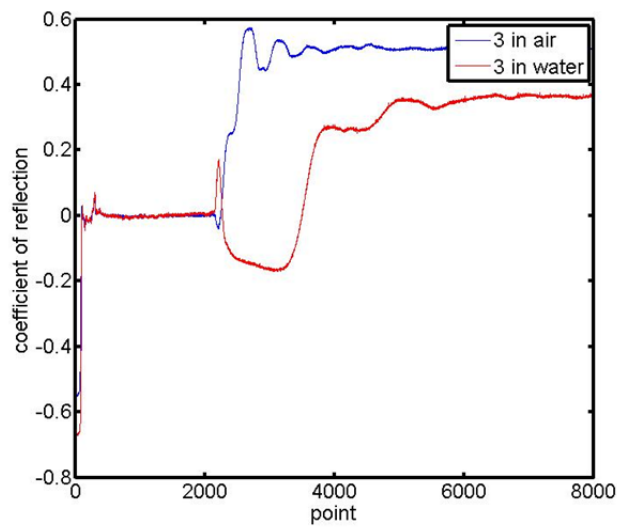


圖 42 孔內 TDR 原型感測器量測靈敏度測試；單棒式三叉感測器

5.2.3.2 孔內 TDR 氣體含量量測感測器設計與性能測試

根據前述測試成果，設計孔內 TDR 感測器如圖 43 所示，感測器整體呈現棒狀，直徑最大處為 21mm，感測器感應段長度為 203mm，其上下會配置有使其量測時可維持在孔中央的置中器。感測器整體材質以塑鋼材料為主，在邊緣上鑲有不銹鋼製成的電極，電極在最外緣長度為 5mm，將會採用適當之膠合物使其與塑鋼間無空隙存在。製作完成之實體感測器如圖 44 所示。

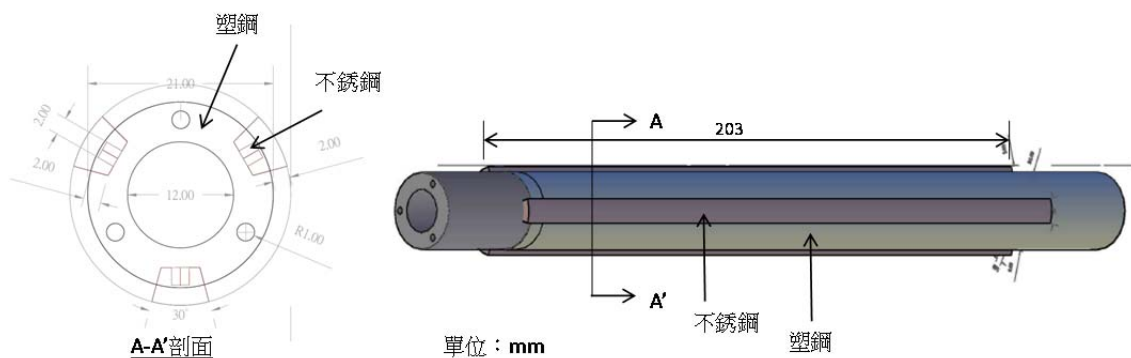


圖 43 孔內 TDR 感測器設計圖



圖 44 單棒式三叉感測器完成圖

由於單棒式三叉感測器之中間以德爾林做材料，因此感測器之電學性質會受到中間德爾林的影響，必須進行系統參數之率定才能確定感測器之外材料真正的電學性質。率定工作分為視介電度之率定與導電度率定兩部分。視介電度率定於室內以不同比例之乙醇及水進行視介電度量測，透過()式進行標定，而其實際視介電度以不存在隔絕材料影響的同軸式感測器(如圖 45b 所示)進行量測。

$$(K_{a,eff})^n = \alpha(K_{a,true})^n + (1 - \alpha)(K_{a,probe})^n \dots\dots\dots ()$$

其中， $K_{a,eff}$ 為採用單棒是三叉感測器直接量測所得之有效視介電度； $K_{a,true}$ 為量測物實際之視介電度(由同軸式感測器獲得)； $K_{a,probe}$ 為德爾林存在所產生的視介電度，為待標定值； α 為權重比在 0-1 之間，為待標定值； n 為待標定值。

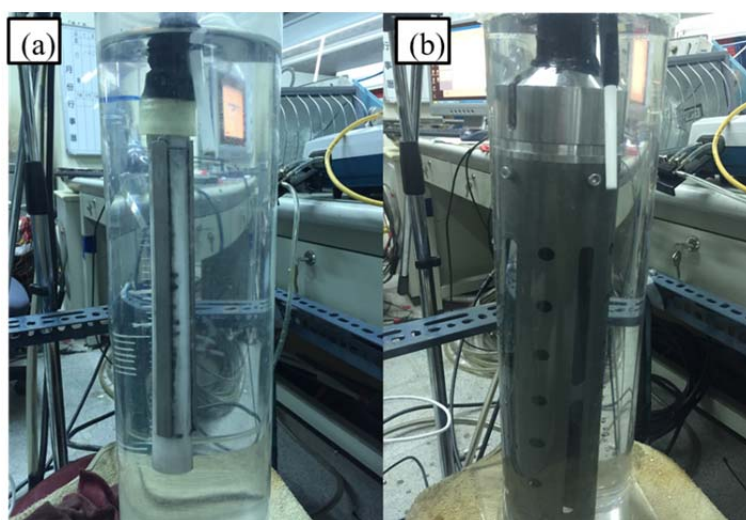


圖 45 (a)以三片式單棒感測器量測材料之視介電度 (b)以同軸式感測器量測材料之真實介電度

標定之參數 $K_{a,probe}$ 為 2.2399； α 為 0.6001； n 為 1.1131。標定成果如圖 46 所示，標定值與量測值接近 1:1 線，標定成果良好。導電度率定參考 3.3.1.2 節中所述，將單棒式感測器量測某濃度之食鹽水，由導電度計量測食鹽水之真實導電度來率定參數 β ，並藉由末端短路及空氣中之穩態反射係數修正 TDR 系統所造成之反射係數誤差。標定之 β 值為 0.00064。

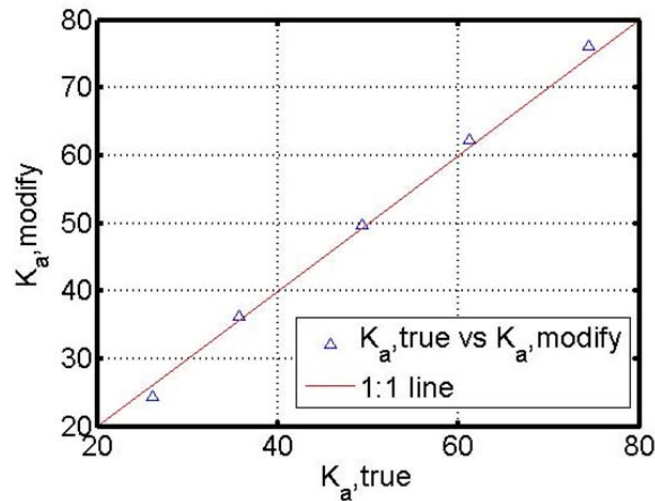


圖 46 有效視介電度與修正後視介電度關係圖

製作完成之單棒式感測器以相位速度分析法進行穩定性及重複性之測試。

穩定性試驗：如圖 47 所示，連續量測 30 筆單棒式感測器之氣泡濃度，每筆間隔為 1 分鐘。量測出來之標準偏差為 0.00308，與雙叉式感測器與三叉式相比，其標準偏差與三叉式感測器差異雖有但其值不大，代表新製之三片式單棒感測器保有三叉式感測器之穩定度，並不會如雙叉式感測器量測到外界過多之雜訊。

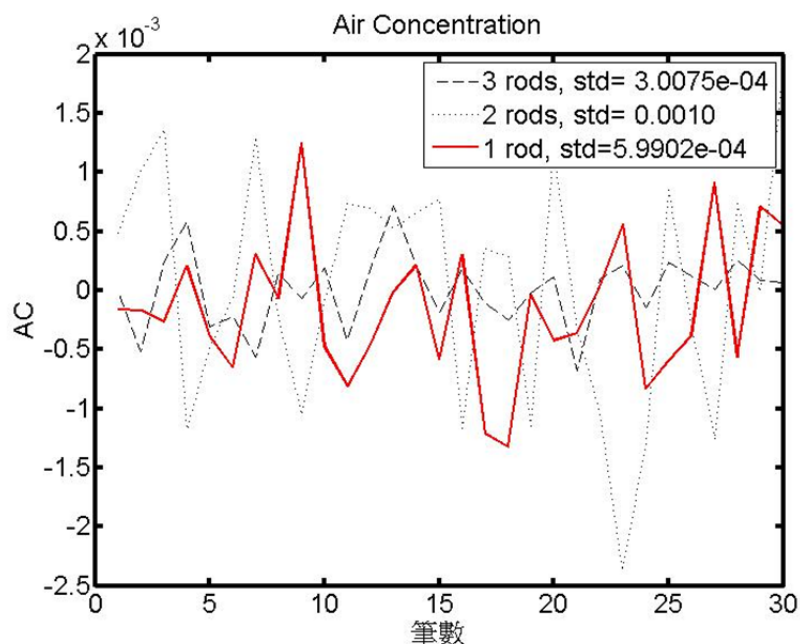


圖 47 單棒式感測器與雙叉及三叉感測器穩定性比較

重複性試驗：如圖 48 所示，新製之單棒式感測器同樣剛開始於清水中量測，其量測值同樣接近 0，經過氣水混合物量測後，移至清水的環境中其量測值並不會因為頂部堆積之關係，量測值與開始時量測清水之氣體濃度一致。

由此穩定性以及重複性之試驗結果顯示，新設計之感測器性能可符合本計畫應用於氣泡量測之目的，後續將採用此一新設計之感測器進行室內試驗。

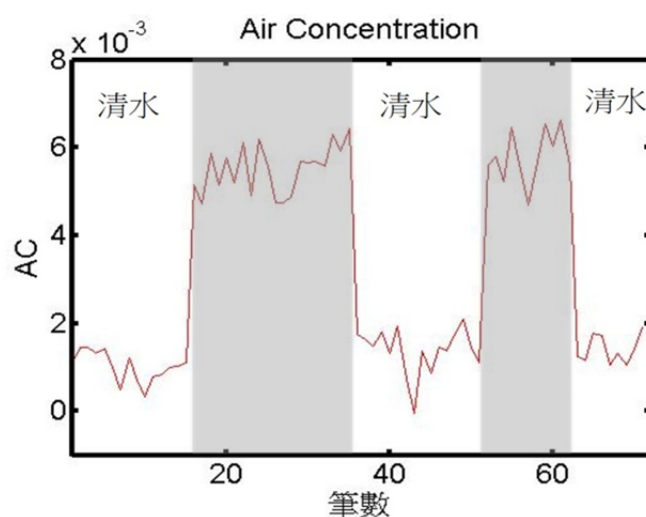


圖 48 單棒式感測器之重複性試驗

5.3 水氣二相混和物之視介電度行為探討

5.3.1 氣水混合物室內定量量測方法

為確定採用 TDR 於井中進行氣泡量測具有可靠度，因此在進行室內行為探討上需有另一套不同理論基礎的量測方法提供比對值。嚴謹的定量氣泡控制設備所費不貲，在經費有限的情況下，本研究採用一般氣泡產生器(如第 5.2.2 節所述)，而在此情形下本研究提出一採用高速攝影機配合排水集氣之方法進行氣泡含量之量測，方法說明如下：

對於氣泡產生器所產生的氣體，利用高速攝影機進行拍攝，影像中之距離和高速攝影機影格間的時間差可計算氣泡上升速度 v (如圖 49 所示)，可間接得到氣泡於感測器長度 L 內停留之時間 t ：

$$t = \frac{L}{v} \dots\dots\dots (31)$$

接著以直徑 D 約 4.5 公分(估計之 TDR 量測範圍)之量杯浸於水中，開啟出氣開關，以排水集氣法量測此斷面之單位時間出氣量 a 。此斷面之大小約與 TDR 之感應範圍相當，可適當假設於此斷面中氣泡為均勻且可代表 TDR 之量測範圍中之氣體含量。於此斷面之氣泡體積 V_a 則為：

$$V_a = a \times t \dots\dots\dots ()$$

而量測範圍之體積 V 與氣體含量 AC 則為：

$$V = \frac{\pi}{4} D^3 \times L \dots\dots\dots ()$$

$$AC = \frac{V_a}{V} \dots\dots\dots ()$$

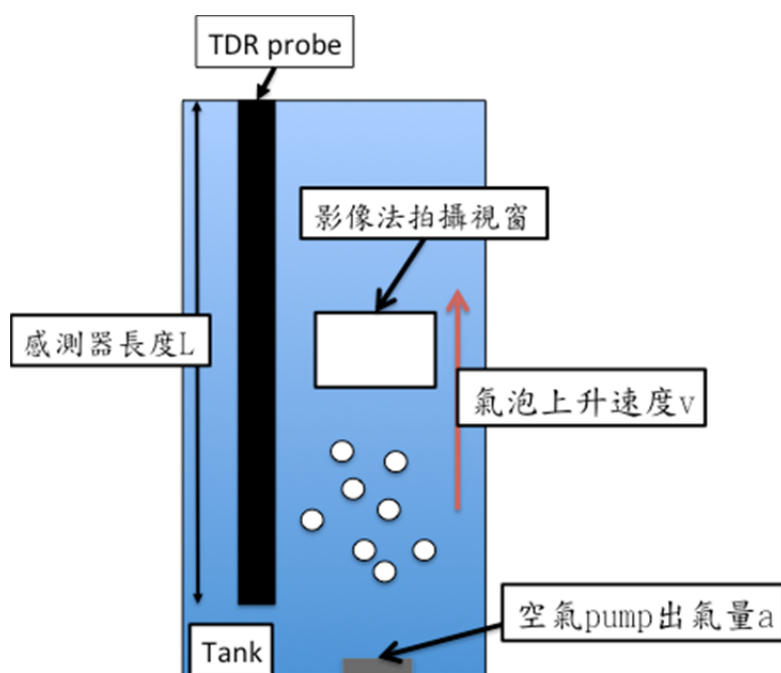


圖 49 室內水中氣泡含量影像量測示意圖

於試驗中，所使用之氣泡產生器(如第 5.2.2 節所述)可將出氣量調整至高或低，其出氣口之節流閥可將出氣量以一管或兩管排出，即是可將排氣量由高而低可調整為：高/兩管、高/一管、低/兩管及低/一管四種。以直徑 4.5 公分之量杯置於透水石正上方，進行排水集氣法量測一分鐘四種出氣量，如圖 50 所示，同一種出氣控制的出氣量在不同量測下略有差異，但變化不大，而其中低/兩管及低/一管兩者之出氣量相差不多，意即可用之實際進行測試時出氣量的調整僅有高/兩管、高/一管及低/兩管三種。

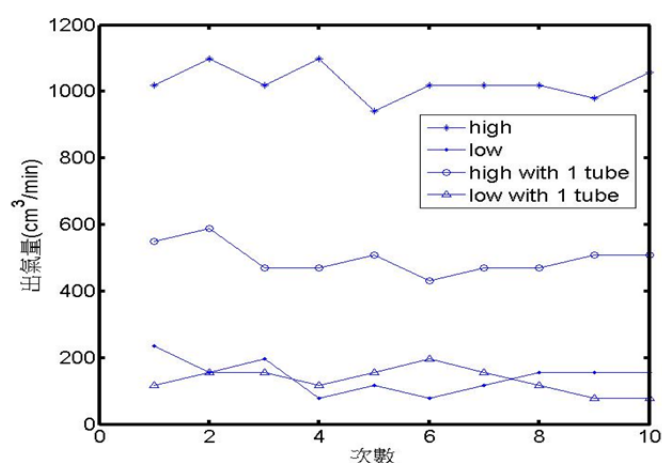


圖 50 高/兩管、高/一管、低/兩管及低/一管出氣量

進行氣泡拍攝用的高速攝影機是使用 Fastec imagingTM 公司所生產之 TroubleShooter，影像感測器使用互補性氧化金屬半導體(Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS)，可變換使用多種解析度，最高解析度可到 1280*1024，fps(frame per second)最高可使用到 16000，本研究使用 640*480 之解析度，fps 為 1000。搭配使用之鏡頭為 Nikkor AI 50mm f1.4，光圈使用 f16。



圖 51 Fastec imagingTM 公司所生產之高速攝影機

為使在高速攝影機拍攝下的氣泡可與背景及水有明顯的差異，在高速攝影機鏡頭的另一側需進行補光，如圖 52 所示，採用高亮度的燈源照射量測之試體，增加氣泡的反差，拍攝所得之影像如圖 53 所示，而在影像中，為可進行氣泡速度的計算，因此在氣泡桶的表面上標示有刻度，以作為氣泡移

動距離的計算，而在此距離內移動所花費的時間，可直接由影片中的時間獲得，如此即可計算氣泡上升的速度。

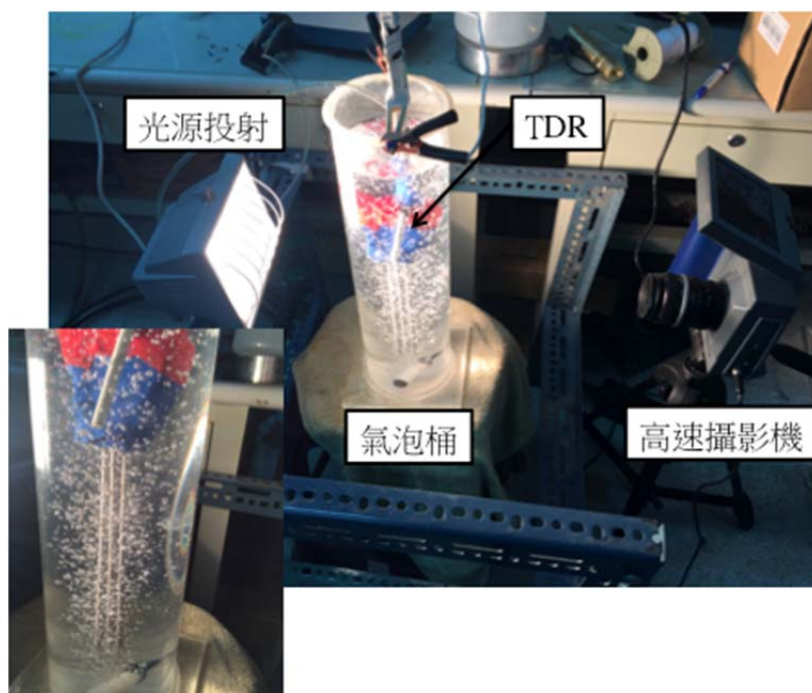


圖 52 試驗儀器架設位置

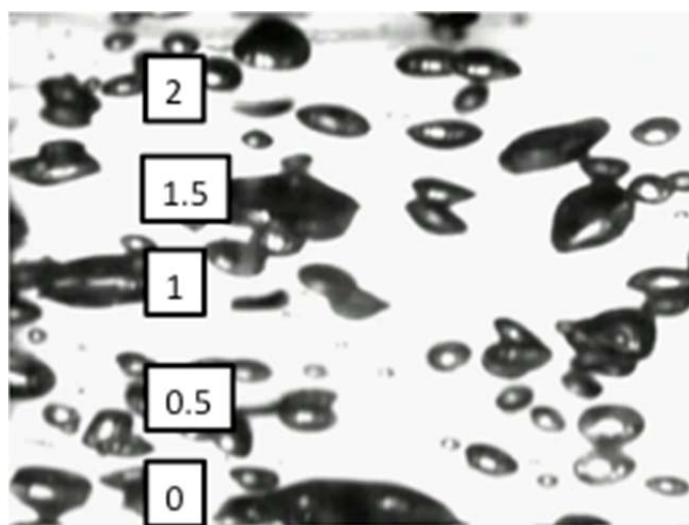


圖 53 高速攝影機拍攝之照片

由於高速攝影機為獲得高清晰影像採用較大的倍率進行拍攝，因此其視窗範圍較小，考量氣泡在不同深度位置的上升速度會有所差異，氣泡上升速度的計算因要涵蓋整支感測器的範圍，因此如圖 54 所示，在感測器上中下的位置皆進行氣泡上升速度的拍攝，在每次攝影中挑選 50 顆氣泡人工計算

其上升速度，最後以此 50 顆氣泡之平均速度為此次攝影氣泡之上升速度。

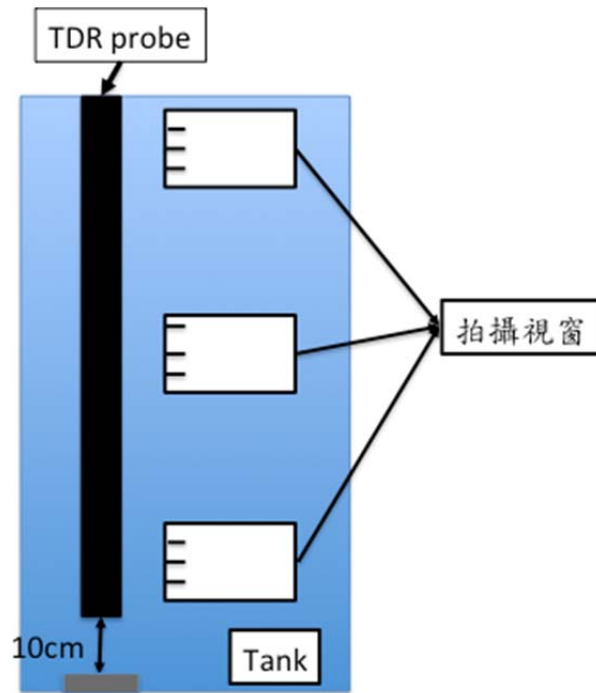


圖 54 拍攝視窗示意圖

由前述所獲得之數據，使用(32)-()式即可獲得該次試驗中的水中空氣含量。

5.3.2 試驗步驟

試驗步驟如圖 55 所示，試驗開始前決定一出氣量，以量杯量測各高程之出氣量並計算，接著將 TDR 放入氣泡桶內並架設高速攝影機。再來用高速攝影機拍攝各高程之氣泡上升過程，同時進行 TDR 之量測，採用頻率域相位波速法進行分析，採用 300-500MHz 的平均值進行視介電度計算，獲得之視介電度以(16)式進行空氣含量計算，另以上節中所述之影像法計算方式計算含氣量與 TDR 量測之值做比對。

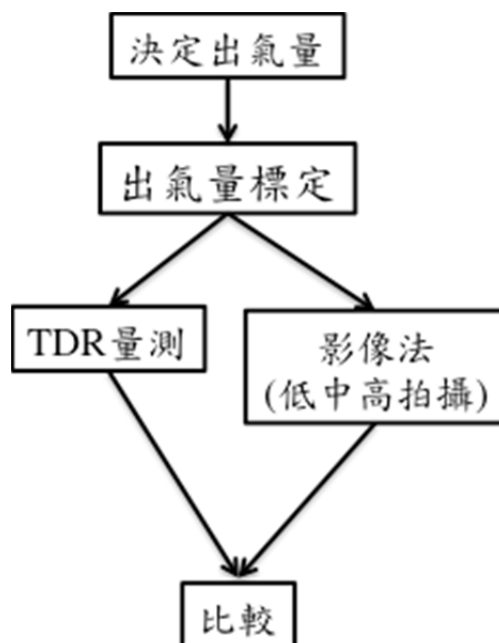


圖 55 室內試驗流程圖

5.3.3 試驗結果

室內定量試驗排氣量大小使用高/兩管與低/兩管兩種，在開始試驗前先以排水集氣法量測兩種排氣量，其排氣量分別為 $1.5667 \text{ cm}^3/\text{s}$ 與 $0.24 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，接著利用高速攝影機拍攝並計算其氣泡上升速度，其平均上升速度分別是 32.221 cm/s 與 20.608 cm/s ，使用此影像法計算之氣體含量分別為 0.31% 與 0.07% 。如圖 56 所示，無論是影像法量測之結果或 TDR 量測之結果，皆隨排氣量之上升量測之氣體含量也有上升之趨勢，有高度之正相關，因此於定性上本研究所研發之感測器確實可以量測到氣泡之多寡變化。

而在量測的量上，影像法與 TDR 量測兩者間有一平移的差異存在，TDR 所量測到之氣體含量較影像法量測到之氣體含量為高。此差異來源可能是影像法在推導其理論時做了三點假設：其一為氣體含量為均勻，其二是氣泡上升速度均勻，其三為直徑 4.5cm 之量杯大約為感測器之感應範圍。然而氣泡在底部產生後，在上升的過程中會向外擴散，使得透水石上方的氣泡量度實際上在徑向上越往外含量越低，因而使得影像法的氣體含量有偏低的狀況。

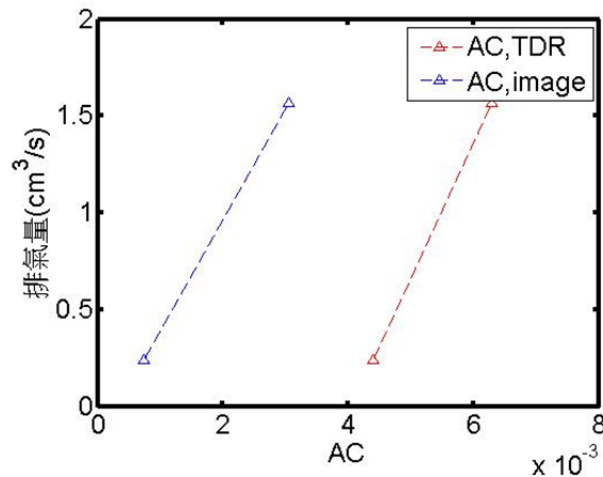


圖 56 排氣量與氣體濃度比較圖

有鑒於此法在進行 TDR 感測器之定量量測上並無法提供有效的比對，因此，在定量量測之驗證上，本研究改採兩階段之方式進行，首先將再進行排氣量與 TDR 量測結果的定性關係試驗，在確認其兩間者的第性關係後，再改採相對較容易控制之泥沙濃度進行定量測試。

在此次的定性試驗上，有鑑於調整出氣口所產生的氣體差異有限，因此在此次的定性試驗上透過調整水頭高控制出氣量，並使用排水集氣法以量杯收集空氣幫浦排出之氣體，每一水頭皆量測 5 次，量測之平均值與標準偏差如表 1 所示，其標準偏差幾乎皆約在 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ 之間，可觀察到此方法產生的出氣量變動並不大。於室內以新制之三片式單棒感測器進行氣泡量測，其結果如圖 57 所示，TDR 量測之值與空氣幫浦之排氣量之線性關係十分良好，R 平方值有 0.9436，截距為 -0.0027 與理論之 0 值十分接近，證明此感測器於氣水混和物中量測於定性上可以有效量測氣體含量的多寡。

為進行定量量測之驗證，在不易進行準確氣泡控制的狀況下，此試驗改以泥砂濃度之量測作為驗證，泥砂顆粒的視介電度與空氣十分接近，且較易使其懸浮於水體中，因此估計可作為氣體含量量測之替代物。在本試驗中的泥沙將採用石門水庫庫區之底泥，而測試濃度將在 $0 \sim 25000 \text{ ppm}$ 間。而分析方法如第 5.2.2 節之討論，將使用更具穩定性的頻率域相位速度分析法。如圖 4.2 10，兩突波段選擇第 900 至 1800 點與 1800 至 2500 點。一般而言，採用的頻率段主要在 $100 \sim 300 \text{ MHz}$ 間，但針對不同的材料量測可以由資料本身以多筆量測之統計方式進行最佳頻率段選取，經測試選取 180 至 230 MHz 進行視介電度之平均進行計算。

表 1 排水集氣法之平均值與標準偏差

出氣量平均(cm^3/s)	標準偏差(cm^3/s)
4.31912	0.11560
4.67929	0.09329
5.12366	0.16163
5.90667	0.09085
7.90661	0.34872
8.24559	0.19729
8.79379	0.11969
9.67091	0.21115

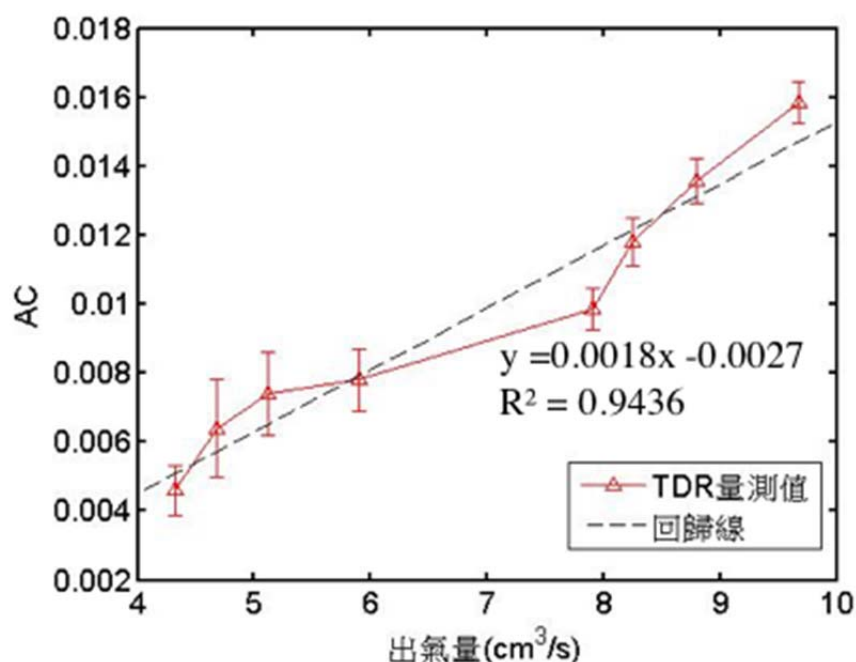


圖 57 TDR 感測器室內定性氣泡量測試驗結果

其結果如圖 58，虛線為真實值與量測值之 1:1 線，圓點則為同一濃度下多次量測之結果，實線則為各濃度多點量測之平均值連線。各濃度量測之標準偏差如表 2，其標準偏差約在 2000ppm 左右，相當於約 0.06% 的氣體含量，由此結果，本研究所研發之 TDR 井內量測系統對於土水混和物之量測效果良好，對於相等之氣水混和物的介電度可合理推測有同樣的量測準確度。

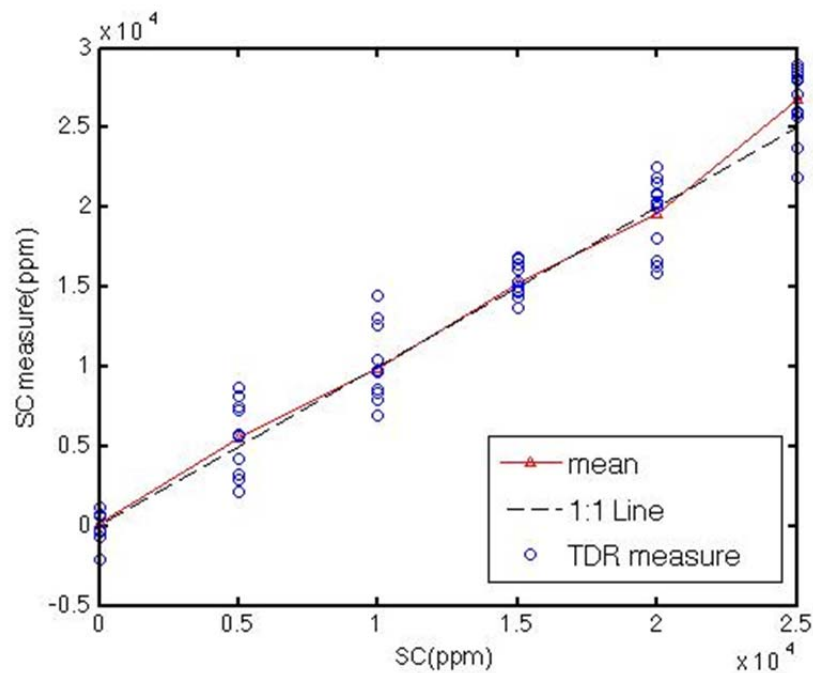


圖 58 泥沙濃度量測測試結果

表 2 泥沙濃度各濃度量測之標準偏差

SC(ppm)	0	5000	10000	15000	20000	25000
Standard Deviation(ppm)	928.23	2313.8	2352.7	1045.5	2278.3	2201.7

5.4 現地測試

5.4.1 場址介紹與現場試驗配置

現地試驗施作場址之位置位於台南市永康區，其孔位圖如圖 59 所示，現地為含氯有機物之污染場址，並現場施作預計架設正負電極進行好厭氧還原系統之整治，電極位置於圖中之紅點，由於電解水產生之氣泡將可能依地下水由上游往下游帶，因此側線位置約位於放電井下游、平行兩電極 1m 處(1 號井、2 號井)進行量測，觀察氣泡產生。電極放置於地下 7m 處。場址最近之主要地表水體為鹽水溪，其主流距場址直線距離約 1 公里。依經濟部中央地質調查所工程地質探勘資料庫，場址附近之鑽探報告顯示地表下 7m 內地質為粉土。

於現地使用之孔內透地雷達將使用 Sensors & Software 公司所開發之 pluseEKKO PRO(圖 60、圖 61)，並使用 100MHz 之天線(圖 62)，分別於 1 號井

與 2 號井內放置接收端與發射端，發射端之天線於監測井內每次移動 0.5m；接收端之天線於監測井內每次移動 0.2m。兩口井距為 1.4m，地下水位面皆位於 1.5m 左右，施測深度將由 1m 量測至 6.5m，以利觀察氣泡上升之過程。TDR 則於 2m 至 6m 量測氣體之變化，每次間距 1m。

施作規劃上，預計將於放電前先行施作一次背景值之量測，有利於對比後續量測之差異，並根據現場之透水性推估約 12 天可由地下水將氣體推送至監測孔位處，因此預計在第 15 天進行第二次量測，以獲得其間差異。

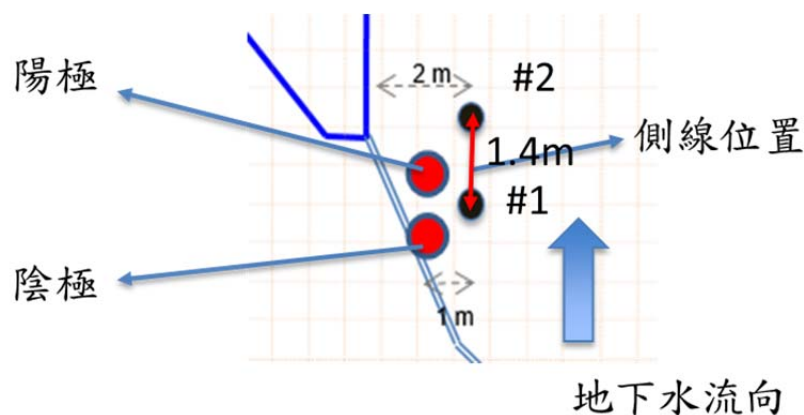


圖 59 現地試驗孔位圖



圖 60 Sensors & Software 公司之 pluseKKO PRO 主機



圖 61 電磁波之發射器與接收器



圖 62 100MHz 之天線

5.4.2 現地成果

於現場監測剖面之調查成果如圖 63 所示，其透過層析成像之反算分析，圖中影像的部分為透地雷達施測結果，顏色表示電磁波波速的大小。由圖中可清楚見到影像在地下水位面(地表下 1.5 公尺)上下有明顯的差異，地下水位面上的乾燥土壤電磁波波速較快，飽和的土壤其電磁波波速較慢，顯示透地雷達所得道之資料確實可明確反應土壤中氣體含量的差異。兩個時間點的速度成果整體差異不大，若將兩個時間點的資料根據本研究所提出之介電度時序分析法進行氣體含量變化分析，其結果如圖 64 所示，其空氣含量變化約在 10%至-10%中，此結果略顯不合理，其不合理處主要在於負值的氣體含量變化。若就土壤組構不變的前提下，則負的空氣含量變化表示原來土體中的水變多，但由圖 64 來看，水變多的區域多位在地下水以下的區域，此些區域已呈現飽和狀態，不會有水的含量在行增加的可能性，因此並不合理。關於此點，後面將在進一步進行討論。

而在井中的 TDR 量測成果如圖 65 及圖 66 所示，在視介電度之值上(圖 65)，兩孔所得結果十分相近，在基準值時約為 59，不同深度的差異不大，而在放電 15 天後皆上升到約 66，兩者略有差異，但較為異常的是，在水體中的介電度應當在 78 附近，而非在 60 附近，是否有其他可能之影響因素需

討論；而在導電度之值上(圖 66)，井內水體的導電度由 0.02S/m 上升至約 0.07S/m，此導電度變化頗為明顯，由現場水體取樣之量測以顯示相同的狀況，造成此導電度變化之主要原因有待進一步討論。

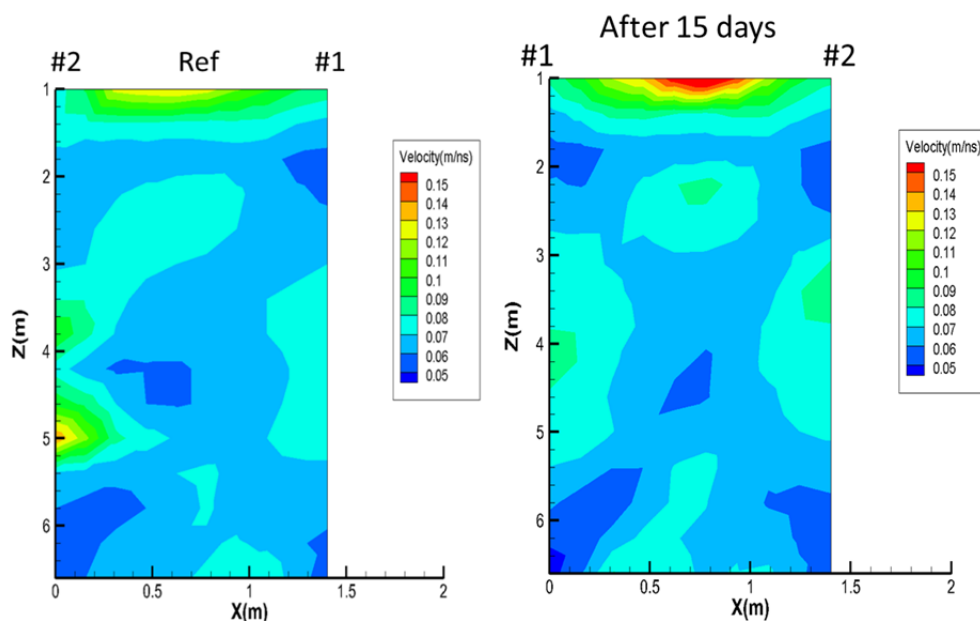


圖 63 監測剖面之電磁波波速影像圖(透地雷達)

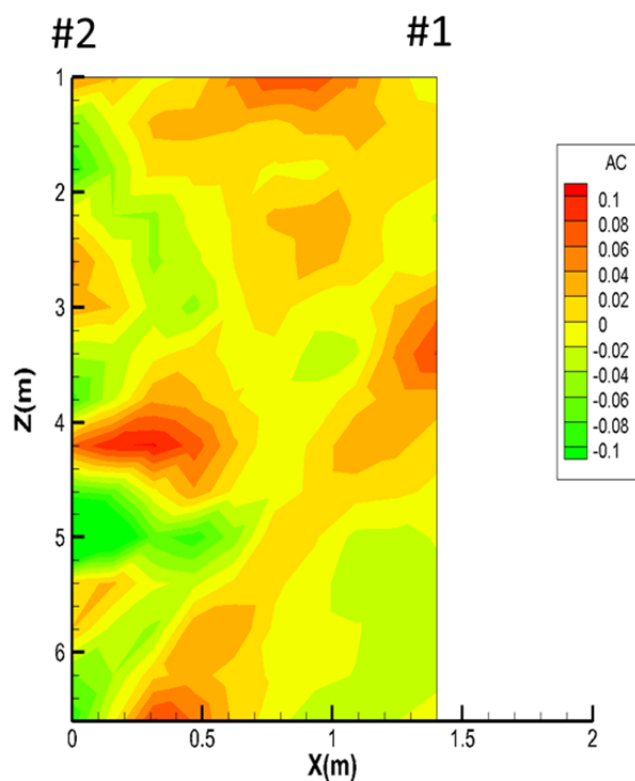


圖 64 監測剖面之氣體含量影像圖(由介電度時序性量測技術獲得)

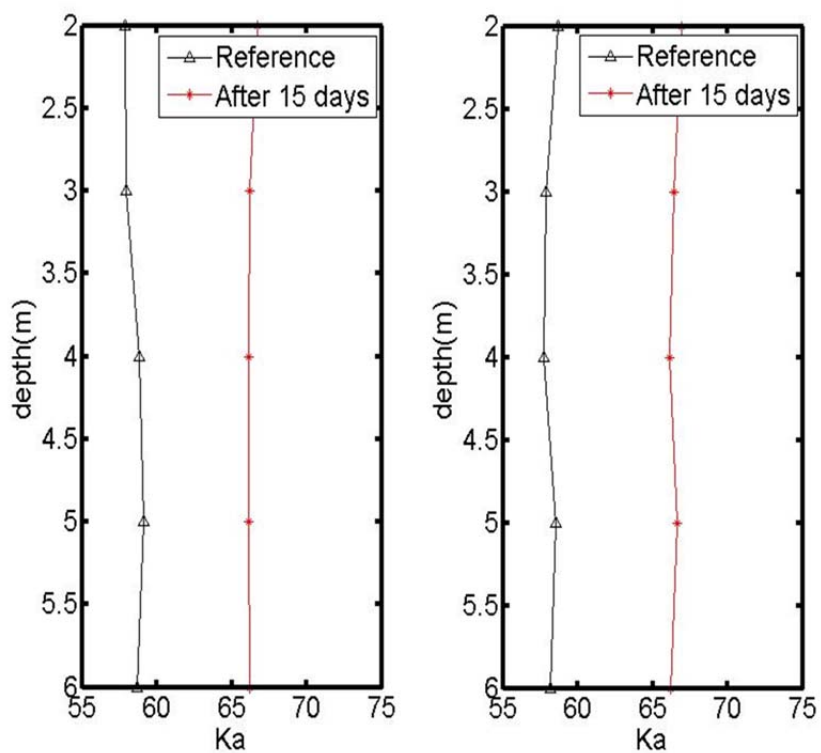


圖 65 放電前後於監測井之 Ka 變化(左：#1；右：#2)

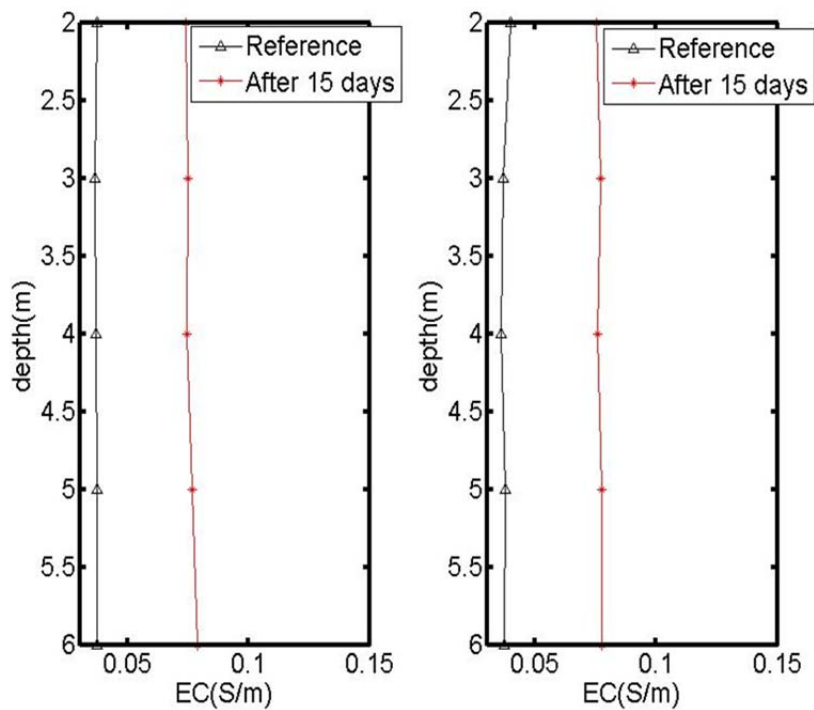


圖 66 放電前後之監測井內導電度變化(左：#1；右：#2)

在前述所獲得的成果中，在進行資料成果判釋前，有三件事應當先行釐清，分別是 1. 飽和土層中空氣含量減少的異常資料；2. TDR 井水所得之介電度與預期的 78 附近有所差異；3. 水體導電度提升的成因。在此將就此三點進行討論後再進行成果判斷。

先就飽和土層中空氣含量減少的異常資料進行討論。對於此點可能產生的原因預期有兩項，其一是導電度升高的影響，另一是反算的誤差所產生的假現象。對於導電度升高的影響，由井中 TDR 量測資料以及取樣量測資料皆客觀的顯示放電前後水體導電度升高的事實，而此狀態的改變根據採用理論模擬之資料(如圖 67)顯示，在相同的氣體含量下，導電度的變化確實會影響介電度之量測結果，且隨著導電度的增加，介電度亦有增加的情形，而此介電度的增加就會反應出空氣含量呈現負值的情況，與現場所觀測到的結果相符合。然而，我們須注意的是，在這裡所提到的導電度是土體的導電度，而我們所觀測到的僅是水體中的導電度增加，尚無法確定水導電度的增加是否連帶的造成土體導電度有同樣明顯的增加狀況，因此在做此解釋前應當先行確認土體導電度的變化狀況。

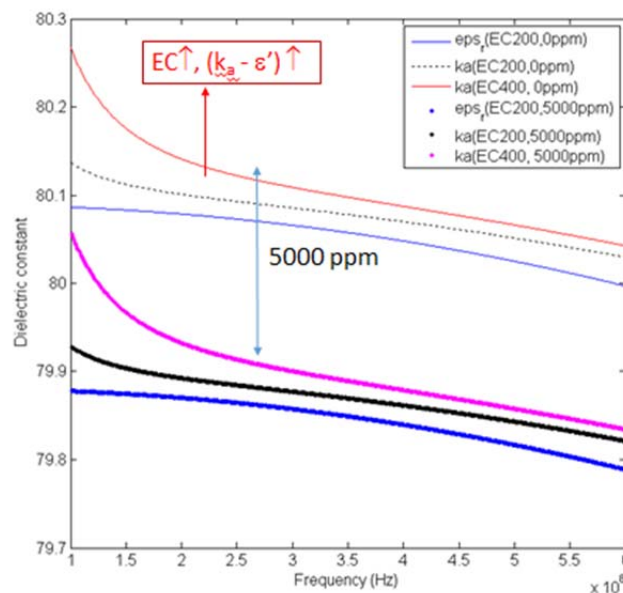


圖 67 導電度變化對介電度量測造成之影響

對於土體中的導電度變化狀況，在事前規劃中未考慮到此需求，因此沒有適合定量量測的現地技術及量測資料，但就定性來說，透地雷達資料本身可協助達到顯示土體導電度變化之目的。透地雷達是採用電磁波在土體中傳遞，土體的導電度對於電磁波能量在傳遞中有衰減的作用，因此只要觀察兩

次量測間透地雷達資料的振幅大小差異即可得知土體中是否有明顯的導電度變化情形。如圖 68 所示，對於相同發射源與接收器位置之透地雷達資料顯示，其兩者間的振幅大小十分接近，並無明顯的差異存在，如若土體導電度之變化如同水體導電度那麼大，其應當會有明顯的衰減，但在這裡並沒有觀察到此現象，因此認定出現負的空氣含量變化的異常現象並非是水導電度上升所造成。

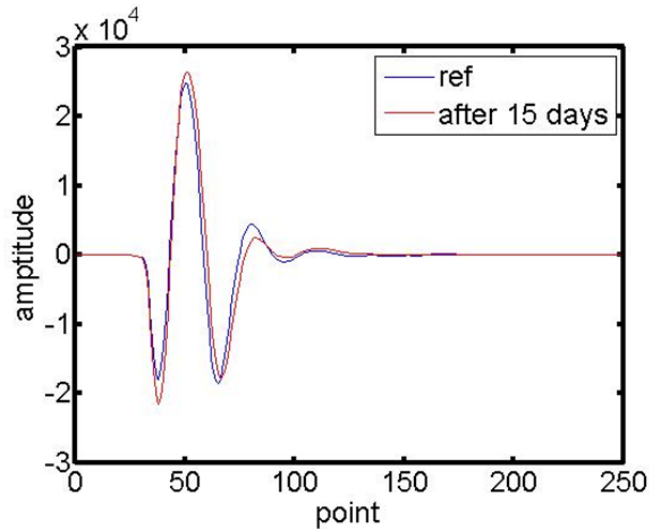


圖 68 於 Tx：4m、Rx：3m 之電磁波訊號圖

而另一個可能性則可能是來自於反算過程所產生的假現象。在此囿於時間並未進行反算軟體的反算誤差程度驗證，而是轉由資料本身進行一些基本驗證的工作。在圖 63 中的成果是採用層析成像法進行，其優點是可獲得土體電磁波波速的空間分布，但缺點就在於其牽涉到反算的過程，或存在有非唯一解以及可能受到演算法而衍伸的假現象問題，因此，為對此技術所分析得到之結果進行一些基本的驗證工作，我們可採用等深度的資料，直接比較不同深度中波形的差異。如圖 69 所示，兩次所得到的透地雷達資料波形十分接近，尤其是波一開始到達的位置(反映的是波速)幾乎重疊，此外，兩次的波形亦十分接近，顯示整體土體的變化極為輕微。由此我們認為，圖 64 中所顯示的氣體含量差異是由反算所造成的假現象的可能性較大，實際土體中的氣體含量並沒有太大的變化。

而在此判斷下，根據鑽探報告顯示場址之地層屬粉土質地層，其滲透係數約為 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，若電解後產生之氣泡依靠地下水流傳遞，則傳遞至 1m 外之監測斷面位置估計約需 12 天左右，因此於預計在放電後 15 天量測應當

有氣體傳遞至測線，但是於監測斷面並無觀察到氣體之產生，經前述之分析確認無誤後將此狀況回饋給模場進行電解試驗之研究人員，經其進行現場確認後發現電解之通電電線在未知時刻已於現場斷掉，導致電解試驗停止，現場並不如預期的已有 12 天以上持續產生氣體，因此才會觀測到在監測斷面無氣體含量明確變化的結果。

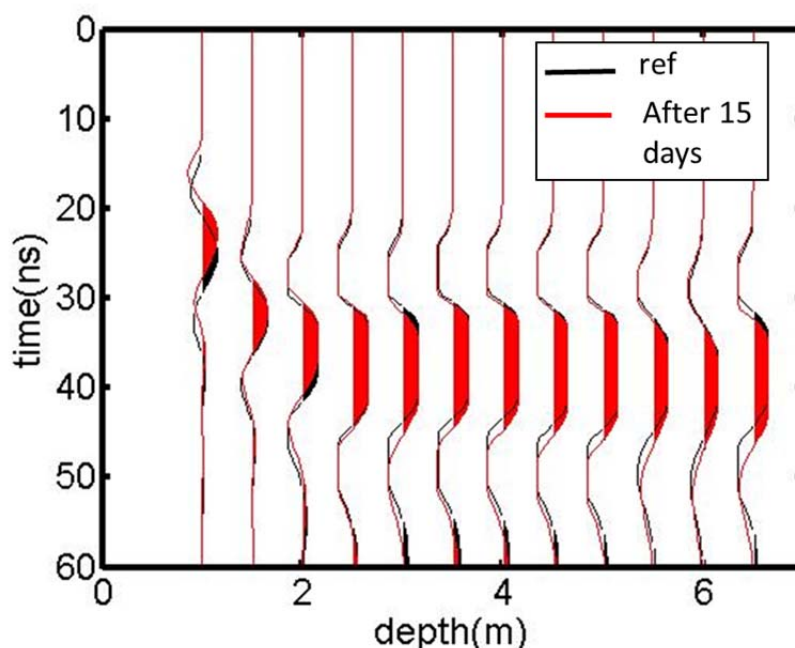


圖 69 Tx、Rx 等深度之跨孔雷達資料

由於此事件而使得本研究最終之現地驗證無法確實獲得空氣含量變化的成果，但由另個角度來說，此事件結果雖無法確實監測到監測斷面土體中的氣體分布變化位置，然而，其卻也顯示出此氣體分布監測的必要性。建議未來在電解試驗之現地配置重新建立完成後，再繼續進行時序性的量測工作，以利確實驗證本技術之可行性。

接著，關於前面提到井中的 TDR 量測結果，其視介電度值應當接近 78，但實際僅有約 60 的問題。在確認分析與標定皆無誤後，猜想誤差原因在於 TDR 感測器量測之感測範圍可能超出觀測井之範圍而進入到土層，導致量測所得視介電度偏低。為釐清此一問題在室內進行行為驗證的工作，如圖 70 所示，在室內採用與現場相同尺寸之 PVC 管，將其內部充滿水，而在其外填入乾砂，經量測後獲得之視介電度為 55.7，由於在量測前已先確認此感測器在水中所得之視介電度約 78，因此可驗證前述猜想。而這結果顯示在井中

利用 TDR 進行量測，由於目前的量測範圍將涵蓋井中水以及井外回填料的部分，並無法確實定量的獲得空氣含量。但這是否顯示目前的感測器量測範圍過大，應當將其尺寸進一步縮小使其量測範圍侷限在井中？

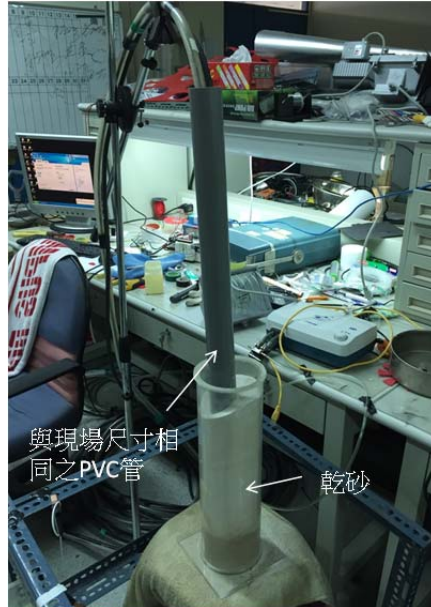


圖 70 TDR 現地量測成果行為驗證

在先前的構想中確實認為應當將感應範圍侷限在井內，但透過與模場現場人員之交流後發現，此些採用灌入氣體或產生氣體之工法，氣體極少在監測井中被觀察到，主要原因可能是因為氣體在土體中傳輸後，到達井壁的位置會有累積，而後直接浮上井口，但其一些相關地物試驗顯示，在監測井外圍的回填料(一般是石英砂)中反而可以在合理位置觀察到氣體的存在，因此在概念上，反而並非將量測範圍侷限在井內，而是要盡量讓量測範圍至少擴大到井外的回填料區。而這樣的差異使得在利用 TDR 進行氣泡量測時將無法提供定量的氣體含量，但是在定性上仍可提供主要氣體的存在深度位置，並不影響其應用。

而由於其感應範圍已超過井體本身，因此在此再補充本研究所研發之感測器的另一項特性。如第 5.2.3 節中本研究所研發之感測器採用三片導電片作為感應體，其中一個接正極另兩個接負極，為使其成棒狀之結構，因此在構成感測器的時候會呈現出三角形的排列狀況，而此排列的方式使得其量測的感應範圍呈現有方向性，目前在現場的量測中所有採用置中器確保感測器量測時並不偏向某側，但由於並無法固定其量測方位，而會使得每次得感應

方位會有所差異，而無法進行不同時間點量測結果得比較。因此對於圖 65 中兩次量測結果所產生的差異，並無法去實際比較或顯示水體介電度的差異。雖然水導電度的提升扮演了一定的角色，但其影響應不至於產生到介電度 5 的差異，此差異會傾向是由於感應方位的不同所造成。此問題是未來後續應用上須再行進一步克服之處。

而最後一點是關於水體導電度變化之問題，為何在放電前後會有導電度上升的狀況？就此問題，根據水的電解過程所發生的化學反應顯示，在電解的過程中其陰陽極確實會有局部的酸鹼值變化，而此變化就會造成導電度的變化，但其影響範圍是否可遠及 1 公尺外的監測剖面實有待進一步探討，最重要的是，其屬於短暫性的現象，當電解的程序停止後，其酸鹼值變化的狀態就會慢慢恢復，而如同前述，現場之電解已因供電問題而停止，因此此導電度的變化應當並非電解所產生。根據與模場試驗方的了解，本試驗並未進行添加物添加的動作，但緊鄰的周邊模場卻有加入鹽類等營養劑，雖然位於下游側，但受其影響的可能性並非沒有。之所以欲了解此導電度變化的原因主要是因為由前面的討論可知，導電度的變化會對介電度量測造成一定的影響，對於導電度變化來源的釐清將可對於未來應用在不同工法上時編制更精細的操作與分析流程。當然，導電度的變化可透過 TDR 的量測以及透地雷達本身之波形進行率定與修正的工作，因此在應用本研究之技術上僅需注意此環境因子的變化即可，只是，就對工法應用的掌握來說，建議模場試驗方或未來相關的應用方都應當對此進行瞭解為佳。

5.5 結論與建議

5.5.1 結論

基於上述之研究成果，結論分為兩點進行說明：

TDR 井內氣體含量量測系統建置：在介電度分析方法上，本研究將 TDR 獲得之波形轉換至頻率域後以 300~500MHz 之頻率進行分析，獲得之視介電度相較於以切線法獲得之視介電度量測上較為穩定，因此以頻率域相位速度分析法為較可靠的分析方法；於井內氣體含量量測感測器之設計上，為解決氣體堆積與雙叉式感測器雜訊過高兩點主要問題，設計出一三片式單棒感測器。該感測器其量測穩定度良好，尺寸可符合常見之監測井大小，並且無氣泡堆積之情況影響量測，符合現場量測需求。而現場應用顯示 TDR 量測時其

感應範圍超過監測井(2" PVC 管)進入回填材料範圍，此結果雖不利於定量量測，但可更加明確的顯示氣體存在的位置(根據現場氣體產生之工程師表示，監測井中不易存在氣體，反而回填砂之位置較為良好)。

時序性介電度監測法：室內試驗之評估顯示氣體含量與視介電度有良好線性關係，且受土壤種類影響不大，具有可行性；而利用透地雷達於現地試驗場址所得之結果顯示此法可確實反映空氣含量的差異(地下水位面以上與以下的明顯介面存在)，於整治後進行氣體差異之量測，發現氣體並未被傳輸至監測斷面，後發現是電解設備並未正常運作所造成，此結果雖無法明確顯示此技術之氣體含量監測效果，但另一方面來說，卻顯示現場氣體含量監測的必要性。

5.5.2 建議

基於本研究之結論，提出下列建議：

TDR 貫入式空氣含量量測器研發：相較於單純僅在井中監測，未來可將 TDR 更改為貫入式感測器，直接貫入飽和土體內量測，並以時序性視介電度分析即可獲得氣體含量之變化，在毋須有鑽井的情況下進行有效整治範圍的快速調查。相較於現有之監測井內量測更具有經濟性與方便性。

其他領域之氣體含量量測應用：現今海洋工程如離岸風機等蓬勃發展，為了避免工程造成之噪音對海洋生態造成影響，開始有許多研究氣泡幕對噪音之衰減，而氣體的含量攸關著衰減量之多寡。以本研究中 TDR 對於氣體含量定量量測之潛力，在未來可供其現地監測之可行性。

參考文獻

1. 高千平(2001), 斷層攝影應用於透地雷達測勘之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
2. 林志平、林俊宏、劉興昌、鐘志忠(2014), 現場底泥電學電學性質感測貫入器研發, 環保署土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案。
3. CAIN, P. (1978). "Measurements within Self-Aerated Flow on a Large Spillway." Research Report No. 78-18, Univ. of Canterbury, New Zealand.
4. Chung, C.-C; Lin, C.-P. (2011). High Concentration Suspended Sediment Measurements using Time Domain Reflectometry. Journal of Hydrology, 401, P.134-P.144.
5. 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.
6. 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, Vol. 30, No. 2, pp. 201-209
7. Ledieu, J., P. De Ridder, P. De Clerck, and S. Dautrebande. (1986). A method for measuring soil moisture content by time domain reflectometry. J. Hydrology (Amsterdam) 88:319–328.
8. Lin, C.P. (1999). Time domain reflectometry for soil properties. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
9. 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.
10. Lin, C.-P.; Tang, S.-H., and Chung, C.-C. (2006), "Development of TDR penetrometer through theoretical and laboratory investigations: 1. Measurement of soil dielectric permittivity". Geotech. Test. J., 29(4), 306-313.

11. 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.
12. 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.
13. Naghash, M., 1994. Void fraction measurement techniques for gas-liquid bubbly flows in closed conduits; a literature review. In: Pugh, C.A. (Ed.), *Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*. American Society of Civil Engineers, Buffalo, NY, pp. 278– 288.
14. Nakasone, H., 1987. Study of aeration at weirs
15. Reynolds J.M., " An introduction to applied and environmental geophysics", Wiley Inc., 1997.
16. 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.
17. 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.
18. Vallé, B. L., and G. B. Pasternack (2002), TDR measurements of hydraulic jump aeration in the South Fork of the American River, California, *Geomorphology*, 42, 153–165.

好/厭氧環境整治工法於滯水層氣體量測技術研發

專案執行績效審核—自評表

項次	類別	缺失點數	自評項目	執行單位檢核		本署審核
				是	否	
一	計畫書核定修正	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內繳交電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含 GRB 系統與本署專案系統）	☒	☐	
二	期中及期末	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內繳交電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含 GRB 系統與本署專案系統）	☒	☐	
三	結案及核銷	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		4 點	結案提送原始憑證清冊及相關資料完整且無補件情況	☒	☐	
四	其他	3 點	計畫主持人配合出席本專案成果發表活動（或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等，備文經本署同意者）	☒	☐	
		1 點	發表期刊論文、專利、技轉等，註明補助單位及中英文致謝，備文副知本署。	☒	☐	
		1 點	計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好，行政作業效率良好。	☒	☐	
合計		20 點				

註：執行單位於計畫執行期間進行缺失檢核於期中期末送本署審核，並於期末統一計算。

未依實況登錄者，由本署補登依各階段執行紀錄進行缺失點數扣款。

缺失扣款機制：

1. 依結案標準，於專案執行期間，視各執行單位行政作業配合度，依「專案執行績效審核—自評表」（附表 4）進行績效缺失記點，缺失點數達扣款規定者，依核定第三期款項（總金額 20%）按比例扣款（或追繳）。

2. 缺失點數達 5 點者第三期款項扣 5%，缺失點數達 7 點者第三期款項扣 10%，每增加缺失 1 點，加扣 1%至滿 20%為限。