



行政院環境保護署

110 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

電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測 技術評估與發展 期末報告（定稿本）

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立陽明交通大學／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：110 年 3 月 19 日起至
111 年 2 月 28 日止

中華民國 111 年 3 月 印製



110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案技術編碼	LAB - R - I - OI - P <small>(如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件1-4)</small>	
專案類別(單選)	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型	研究主題	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他	
申請機構系所	國立陽明交通大學防災與水環境研究中心			
機構地址	300 新竹市大學路1001號			
專案主持人	林志平	職等/職稱	特聘教授兼中心主任	
協同主持人	吳柏林	職等/職稱	約聘助理研究員	
專案名稱	中文	電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展		
	英文	Evaluation and Development of Leakage Monitoring Technology for Storage Tank and Pipeline by Electromagnetic Wave Time Domain Reflectometry Method		
	關鍵字	電磁波,時域反射法,滲漏監測		
執行期程	自民國 110 年 3 月 19 日起 至民國 111 年 2 月 28 日止			
專案主持人	姓名：林志平	E-mail： cplin@mail.nycu.edu.tw	專線：03-5131574	手機：0922-747731
專/兼任人員	姓名：陳軍韜	E-mail： Ctcmm001@yahoo.com.tw	專線：	手機：0936-354976
費 分 析 表 <small>(僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)</small>	專案預估費	第一年申請金額	第二年申請金額	編列說明
	1. 人事費用	389,685	-	(1~5項相加之50%為限)
	2. 貴重儀器使用含維護費	-	-	(與計畫實驗相關)
	3. 消耗性器材與主要費用	400,000	-	(與計畫主體相關)
	4. 其它研究相關費用	-	-	(含差旅與租賃費用)
	5. 雜項費用	19,406	-	(1~6項相加之5%為限)
	6. 行政管理費	80,909	-	(1~5項相加之10%為限)
	7. 自籌款	-	-	(申請單位自行籌措款項)
申請補助金額(1~6項)		890,000	-	總金額：890,000
計畫總金額(1~7項)		890,000	-	總金額：890,000

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利查覈。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：林志平 (簽名及蓋章) 日期：

校長林奇宏 留用



中文摘要

自「土壤及地下水污染整治基金管理委員會」成立以來，積極推動污染源稽查管制，污染區改善整治，並建立相關之監測制度。相較於工業儲槽與管線滲漏後之調查、土壤與地下水監測、整治改善，若能更積極推動儲槽與管線之防漏與滲漏監測技術，應可將防治工作更往源頭推動，達到土壤與地下水污染預防的效果。

為了克服滲漏監測的問題，近年來提出了基於電磁波時域反射法的新滲漏監測方法，TDR 技術的適用性獲得實驗室與一系列現地測試實驗之驗證。TDR 滲漏監測技術的基本原理主要是利用漏水造成感應纜線對應位置電學性質的改變，造成傳輸線在漏水處因電學阻抗改變而產生反射訊號，如同沿著感應纜線的漏水雷達。目前 TDR 滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，然而，工業液體如油品等非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，因此 TDR 滲漏監測技術是否可適用在不同的監測環境需求，需要進一步的研究與調適。本計畫發展 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，完成評估不同感應元件(纜線)偵測的適用性與感應元件的優化，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。

關鍵字：電磁波，時域反射法，滲漏監測





Abstract

Compared with the investigation, soil and groundwater monitoring, and improvement of industrial storage tanks and pipelines after leakage, if the leakage prevention and leakage monitoring technologies of storage tanks and pipelines can be promoted more actively, the prevention and control work should be promoted to the source. Achieve the effect of soil and groundwater pollution prevention.

In order to overcome the leakage monitoring problems, a new leakage monitoring method based on electromagnetic wave time domain reflectometry has been proposed in recent years. The applicability of TDR technology has been verified by the laboratory and a series of on-site testing experiments. The basic principle of TDR leakage monitoring technology is mainly to use the leakage of water to cause the electrical properties of the corresponding position of the induction cable to change, which causes the transmission line to produce a reflected signal due to the change of electrical impedance at the water leakage, just like along the induction cable Leakage radar. At present, the development purpose of TDR leakage monitoring technology is mainly to monitor the leakage of water supply pipelines. However, industrial liquids such as oil or other non-aqueous liquids have very low dielectric properties and the electrical properties of industrial wastewater are also more complicated. Therefore, whether the TDR leakage monitoring technology can be applied to different monitoring environmental requirements requires further research and adjustment.

Keyword: Electromagnetic, Time Domain Reflectometry, Leakage monitoring





目錄

中文摘要	3
Abstract.....	I
目錄	I
圖目錄	IV
表目錄	VII
第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
第二章 計畫背景與文獻回顧	3
2.1 既有地下儲槽滲漏監測方法回顧與問題評析	3
2.2 法令規範和執行狀況	6
2.2.1 國內的法令規範和執行狀況	6
2.2.2 國外的法令規範和執行狀況	7
2.3 自來水管線的滲漏監測方法	7
2.3.1 基於聲學方法	8
2.3.2 基於非聲學方法	9
2.4 時域反射法之滲漏監測方法	10
2.4.1 時域反射儀基本原理	10
2.4.2 時域反射儀量測技術分類	12
2.4.3 目前時域反射儀滲漏監測應用	13
2.5 影響 TDR 滲漏監測因素	18
2.5.1 滲漏物擴散之影響	18
2.5.2 多點滲漏之影響	20
2.6 計畫關鍵問題	21
第三章 研究方法與流程	23



3.1 研究方法	23
3.1.1 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式	23
3.1.1.1 數值模擬流程與規劃	26
3.1.2 物理實驗	28
3.1.2.1 實驗儀器	29
3.1.2.2 實驗材料	34
3.1.2.3 記號及其他項目	35
3.1.2.4 實驗流程與規劃	37
3.1.3 分析方法	41
3.1.3.1 差異分析法(Difference analysis method)	41
3.1.3.2 走時分析法(Travel time analysis method)	43
3.1.3.3 分析方法討論	45
3.2 研究流程	46
3.3 工作進度	48
第四章 研究結果與討論	49
4.1 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式	49
4.1.1 TDR 滲漏監測模型參數標定	49
4.1.2 TDR 滲漏監測模型資料判釋與適用性評估	50
4.1.2.1 長距離污染物滲漏模擬	52
4.1.2.2 多點污染物滲漏模擬	57
4.2 不同感應元件之準備或研製	64
4.2.1 感應元件靈敏度評估	64
4.3 環境影響因子與量測限制之實驗評估	67
4.3.1 長距離滲漏監測實驗	67



4.3.1.1 感應元件阻抗影響	67
4.3.1.2 環境影響因子評估	71
4.3.1.3 土壤孔隙影響	74
4.3.2 多點滲漏監測實驗	77
第五章 結論與建議	81
5.1 結論	81
5.2 建議	82
參考文獻	83
附錄一 專案成果績效自評表	附 1-1
附錄二 計劃書審查意見回覆對照表	附 2-1



圖目錄

圖 2.1 地下儲槽監測裝置示意圖.....	5
圖 2.2 儲槽自動計測系統.....	5
圖 2.3 聲學式滲漏偵測方法(a)聽音桿;(b)聲學互相關法.....	9
圖 2.4 透地雷達檢測地下管線漏水.....	9
圖 2.5 TDR 量測設備的組成與量測架構.....	12
圖 2.6 不同之阻抗不連續所產生之反射波形.....	12
圖 2.7 TDR 管線滲漏監測原理之示意與其對應之量測波形示意.....	14
圖 2.8 TDR 監測管線滲漏前和滲漏時獲之反射圖差異.....	14
圖 2.9 液壓控制系統與 TDR 技術結合.....	15
圖 2.10 TDR 分析不同 CuSO ₄ 濃度的走時分析.....	16
圖 2.11 PermAlert 纜線.....	17
圖 2.12 纜線有無海綿之擴散情形.....	20
圖 2.13 增設參考點實驗配置圖.....	21
圖 2.14 (a)平行雙導體傳輸線;(b)平行三導體傳輸線;(c)附有吊線之同軸 纜線.....	22
圖 3.1 (a)單位長度傳輸線之等效電路以及(b)整體 TDR 監測系統之多段傳輸 線電路模型.....	25
圖 3.2 模擬現地之物理實驗示意圖.....	28
圖 3.3 實驗槽設計示意圖(a)連接處法蘭(b)分段固定式實驗槽與隔板.....	31
圖 3.4 模擬現地之壓克力實驗槽.....	31
圖 3.5 AWG16 平行雙導線構造圖.....	32
圖 3.6 附有吊線之同軸纜線示意圖.....	32
圖 3.7 AWG20-4P 排線構造圖.....	33
圖 3.8 AGW-Gold 纜線構造圖.....	33
圖 3.9 細砂(左)及七厘石(右).....	35
圖 3.10 記號(左:AWG16-2P;右:附有吊線之 P3-500).....	35
圖 3.11 延長線.....	36
圖 3.12 記號(圓圈處)及滲漏位置(矩形處)波形.....	36
圖 3.14 差異分析法步驟一.....	42
圖 3.15 差異分析法步驟二.....	42
圖 3.16 差異分析法步驟三.....	42
圖 3.17 走時分析法步驟一.....	44
圖 3.18 走時分析法步驟二.....	44
圖 3.19 分析資料筆數差異圖.....	45
圖 3.20 研究流程圖.....	47



圖 4.1 TDR 在水中模擬波形與量測波形比較	50
圖 4.2 自來水滲漏監測室內實驗示意圖與對應多段傳輸線模型	51
圖 4.3 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏量測結果	53
圖 4.4 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏量測結果	53
圖 4.5 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果	54
圖 4.6 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果	54
圖 4.7 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果	54
圖 4.8 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果	55
圖 4.9 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果	55
圖 4.10 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果	55
圖 4.11 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果	56
圖 4.12 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果	56
圖 4.13 附吊線之 P3-500 纜線模擬單點滲漏比較結果	56
圖 4.14 模擬 10m 附吊線之 P3-500 自來水多點滲漏之量測結果	58
圖 4.15 模擬 10m 附吊線之 P3-500 汽油多點滲漏之量測結果	58
圖 4.16 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果	59
圖 4.17 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果	59
圖 4.18 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果	60
圖 4.19 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果	60
圖 4.20 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果	61
圖 4.21 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果	61
圖 4.22 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果	62
圖 4.23 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果	62
圖 4.24 附吊線之 P3-500 纜線模擬多點滲漏比較結果	63
圖 4.25 附有吊線之 P3-500 纜線靈敏度	65
圖 4.26 AWG16-2P 線材靈敏度	65
圖 4.27 AWG20-4P 線材靈敏度	65
圖 4.28 乾七厘石中汽油滲漏 800ml 之線材靈敏度	66
圖 4.29 附有吊線之 P3-500 纜線接頭處焊接鐵絲	66
圖 4.30 附有吊線之 P3-500 纜線細砂中自來水滲漏差異分析圖	68
圖 4.31 AWG16-2P 線材細砂中自來水滲漏差異分析圖	68
圖 4.32 AWG20-4P 線材細砂中自來水滲漏差異分析圖	68
圖 4.33 附有吊線之 P3-500 纜線細砂中汽油滲漏差異分析圖	69
圖 4.34 AWG16-2P 線材細砂中汽油滲漏差異分析圖	69
圖 4.35 AWG20-4P 線材細砂中汽油滲漏差異分析圖	69
圖 4.36 細砂中自來水滲漏差異分析比較圖	70



圖 4.37 細砂中汽油滲漏差異分析比較圖	70
圖 4.38 附有吊線之 P3-500 纜線細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析圖	72
圖 4.39 AWG16-2P 線材細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析圖	72
圖 4.40 AWG20-4P 線材細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析圖	72
圖 4.41 細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析比較圖	73
圖 4.42 附有吊線之 P3-500 纜線七厘石中汽油滲漏差異分析圖	75
圖 4.43 AGW-Gold 纜線七厘石中汽油滲漏差異分析圖	75
圖 4.44 七厘石中汽油滲漏差異分析比較圖	75
圖 4.45 細砂與七厘石中汽油滲漏差異分析比較圖	76
圖 4.46 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點滲漏原始波形	78
圖 4.47 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點(第一點)滲漏差異分析圖	78
圖 4.48 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點(第二點)滲漏差異分析圖	78
圖 4.49 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點滲漏原始波形	79
圖 4.50 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點(第一點)滲漏差異分析圖	79
圖 4.51 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點(第二點)滲漏差異分析圖	79
圖 4.52 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點滲漏差異分析比較圖	80
圖 4.53 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點滲漏差異分析比較圖	80



表目錄

表 3.1 TDR3000 規格	29
表 3.2 感應元件規格	34
表 3.3 感應元件靈敏度評估實驗	38
表 3.4 長距離滲漏實驗	39
表 3.5 多點滲漏實驗	40
表 3.6 進度甘梯圖	48





第一章 前言

由於全球資源有限，地下儲槽系統之營運將直接影響人類生活所需土壤與地下水環境，如何讓地下儲槽系統之經營與管理達到相依互存，降低對生存環境之污染風險，係為各國管理與污染預防之最高理念。台灣自「土壤及地下水污染整治基金管理委員會」成立以來，積極推動污染源稽查管制，污染區改善整治，並建立相關之監測制度。相較於工業儲槽與管線滲漏後之調查、土壤與地下水監測、整治改善，若能更積極推動儲槽與管線之防漏與滲漏監測技術，應可將防治工作更往源頭推動，達到土壤與地下水污染預防的效果。因此發展適合台灣之儲槽管線滲漏監測技術是非常重要的。

1.1 研究動機

我國目前的儲槽滲漏監測主要仍以儲槽周圍的測漏管(監測井)定期監測，若能發展槽間或槽外表面的自動化監測系統，將有助於預防滲漏對於環境的影響；另一方面，相較於集中的儲槽，網絡分布管線的滲漏監測，其難度更高。因此，發展可因地制宜、經濟有效的儲槽與管線滲漏監測技術，雖然極具挑戰性，對於土壤與地下水污染的防治有很大的意義。

為了克服滲漏監測的問題，近年來提出了基於電磁波時域反射法(Time Domain Reflectometry, 簡稱 TDR)的新滲漏監測方法，TDR 技術的適用性獲得實驗室與一系列現地測試實驗之驗證。TDR 滲漏監測技術的基本原理主要是利用漏水造成感應纜線對應位置電學性質的改變，造成傳輸線在漏水處因電學阻抗改變而產生反射訊號，如同沿著感應纜線的漏水雷達。目前 TDR 滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，然而，工業液體如油品等非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，因此 TDR 滲漏監測技術是否可適用在不同的監測環境需求，需要進一步的研究與調適。



1.2 研究目的

綜合上節所述，為評估工業液體如油品等非水相液體滲漏監測技術之問題，本研究擬發展 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，完成評估不同感應元件(纜線)偵測的適用性與感應元件的優化，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。

本研究的目的是在於探討 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，將透過更全面性的考量，評估不同感應元件(纜線)在不同液體偵測的適用性與感應元件的優化，並探討地下環境變化對於監測之影響以及量測空間解析度與感應距離的限制，再進一步針對影響因子與量測限制之探討結果，研擬精進的對策，希冀發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。

欲瞭解 TDR 技術運用不同感應元件(纜線)在監測不同液體滲漏之適用性，本研究先透過小型實驗箱與各種感應元件探討纜線的靈敏度與空間解析度，再透過數值模擬探討 TDR 與纜線監測滲漏之間的關係，根據模擬結果設計一個長距離壓克力實驗槽，評估感應距離的限制。



第二章 計畫背景與文獻回顧

儲槽與管線滲漏監測目的為將防治工作更往源頭推動，達到自動化監測的準確與便利性，達到土壤與地下水污染預防的效果；此外，污染物的滲漏會對環境與經濟造成嚴重影響。因此本文首先針對現有地下儲槽與管線滲漏監測方法，作一全面性的探討，以瞭解既有滲漏監測技術之優缺點，作為 TDR 污染物滲漏監測技術研發之參考。

2.1 既有地下儲槽滲漏監測方法回顧與問題評析

圖 2.1 是採用雙層式地下儲槽的加油站，圖中其他的配備為目前典型的加油站滲漏監測系統，儲槽最少必須要設置以下七種偵測方式之一。根據美國國家環境保護局(EPA,2020)，地下儲槽(Underground Storage Tanks,USTs)滲漏監測方式包括：

(一) 二次阻隔層和間隙偵測(Secondary Containment and Interstitial Monitoring)

在儲槽和周遭環境間設置阻絕層：混凝土窰、襯砌或是雙層儲槽的外層，自儲槽滲漏出的污染物被引至位於儲槽和外層障壁間之監測設施。由測桿(Dip Stick)至複雜的自動氣液體感測器形成監測裝置。當污染物發生滲漏時，不會直接對土壤與地下水造成污染，能夠有足夠的時間進行防漏作業，因此當儲槽盛裝有害物質時，相關法規規定必須要使用此法之滲漏監測系統。二次阻隔層和間隙偵測法當有物質滲漏時，無法直接確認滲漏點的位置，只能監測到滲漏的發生，且此監測非即時監測。

(二) 儲槽自動計測系統(Automatic Tank Gauging,ATG)

儲槽自動計測系統(ATG)如圖 2.2 所示，利用固定裝置於槽中的感測裝置。此裝置連接至電子控制設備，可量測槽中之液面高和溫度。儲槽自動計測系統在槽體密閉測試時，在幾小時中油品未注入或移出儲槽，此裝置可自動計算槽中物之體積變化，從而得知是否有滲漏。此法只適用於地下或地上之儲槽裝置，不適用於管線。



(三) 土壤氣體監測(Vapor Monitoring)

土壤氣體監測可以量測在儲槽與管線周遭土壤孔隙中物體爭氣的濃度，以監測是否有滲漏。此法需要設置監測井。蒸氣監測可以用人工取樣設備定期採樣或用自動監測裝置連續量測。

土壤氣體監測須滿足條件：

1. 回填材料孔隙大，足以讓氣體由滲漏處擴散至開挖區域
2. 儲存物質之揮發濃度需足以產生致使監測儀器可量測之氣體濃度
3. 監測儀器不致陰雨或溼度大而失效
4. 開挖區域的污染背景濃度需不致於影響測漏方法的進行
5. 監測系統需足以監測任何顯著增加的濃度
6. 有足夠測點已確定滲漏來自何座儲槽和運輸管

(四) 地下水監測井(Groundwater Monitoring)

地下水監測設備感測浮在地下水位上的游離物品存在。此法必須要靠設置在儲槽或沿管線鄰近適當位置的監測井。定期人工取樣或用自動感測裝置確認是否有滲漏物品到達地下水位。只在地下水位深度在 6 公尺內有效，否則無法及時偵測到滲漏。

(五) 存量統計(Statistical Inventory Reconciliation,SIR)

存量統計(SIR)利用複雜精細的電腦軟體以判斷儲槽是否有滲漏。電腦對一定期間內由操作者提供給測試者的油品存量、進出量資料作統計分析。

(六) 人工儲槽計測(Manual Tank Gauging)

人工儲槽計測只能用在 2000 加侖以下的小型儲槽。對於容積大於 2000 加侖的儲槽和管線，此法無法作用。使用此法必須要每星期中儲槽暫停使用 36 小時來量測儲槽內的油品體積。容積 1000 加侖或以下的儲槽可以只用這個方法。容積在 1001 至 2000 加侖的儲槽只有在核定期槽體密閉性測試時，且當儲槽在新設或升級的 10 年中，才可以使用。在 10 年過後，地下儲槽必須要用上述 1-5 偵測方法。



(七) 儲槽槽體密閉測試和存量控制(Tank Tightness Testing and Inventory Control)

此方式由兩種方法組成。儲槽槽體密閉性測試需由測試業者定期在儲槽中暫時裝設特殊的設備以測試槽體之密閉性。槽體密閉性測試必須伴隨存量控制。存量控制式即時的統計系統，用以偵測滲漏。存量控制必須靠每日精確量測槽內物品體積和每月的計算以證明儲槽沒有滲漏。儲槽槽體密閉測試和存量控制只能在新設或升級的 10 年中，才可以使用。在 10 年過後，地下儲槽必須要用上述(一)至(五)偵測方法。

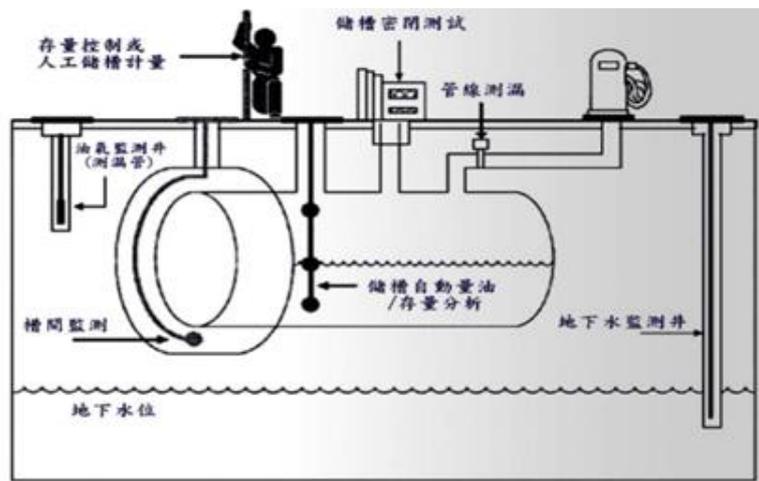


圖 2.1 地下儲槽監測裝置示意圖

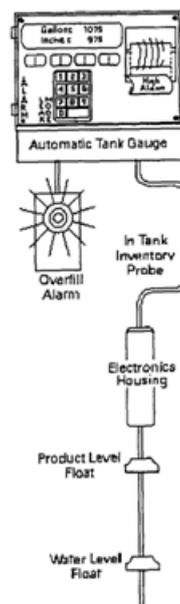


圖 2.2 儲槽自動計測系統



2.2 法令規範和執行狀況

2.2.1 國內的法令規範和執行狀況

目前國內的法令規定(環保署, 2021), 新設之地下儲槽系統應設置下列防止汙染地下水體之設施:儲槽加注口處裝設具有防止濺溢功能之設施。而地下儲槽系統依下列方法之一, 採取防止腐蝕或物質滲漏之材質或措施:

(一) 使用非腐蝕材料建造

(二) 使用下列方法之一保護鋼材:

1. 包覆以適當之不導電物質
2. 裝設陰極保護系統
3. 裝設加壓電流系統

(三) 使用二次阻隔層(Secondary Containment)保護

在監測系統方面, 依據地下儲槽防污設施及監測設備的法規要求新設之地下儲槽系統必須設置符合下列規範之監測設備及監測措施:

1. 儲槽每三年一次及壓力式或吸取式輸送設備每年一次之密閉測試(Tank Tightness Test)
2. 每月一次之自動儲槽量計及下列監測方式之一:土壤氣體監測、地下水監測、槽間監測或其他經中央主管機關認可之測漏方式

我國目前僅針對新設之地下儲槽系統, 若採用鋼材建造則須包覆不導電物及陰極防蝕, 但卻未規範監測方式之適用性分級。監測方式都採被動方式而非即時監測。目前的儲槽滲漏監測方法主要包括夾層監測(e.g., 槽間監測)、儲槽內部檢測(e.g., 密閉測試)與儲槽外部監測(e.g., 土壤氣體監測、地下水監測)(EPA, 2020)。儲槽外部的土壤氣體或地下水監測較不容易有全面性的覆蓋, 且偵測到的時機通常已經造成土壤或地下水一定程度的污染; 若能定期進行儲槽內部檢測或進行夾層監測, 可以達到更早期的預警效果。



2.2.2 國外的法令規範和執行狀況

國外環保先進國家均規範貯存設施需設置計量設施，朝向「源頭監控」管制；貯存設施及管線有適當之防腐蝕措施；防溢堤建造形式、材質、高度、容量、警報、排水等規範，國內外法規大致原則相同，主要著重防腐蝕、防溢功能。加拿大針對地下儲槽系統之監測規範方面，新設之地下儲槽系統均為雙層槽得採用槽間監測，地下管線依設置形式應進行安裝後、運作期間之滲漏檢測，以及定期性設漏檢查。澳洲政府規章要求，地下儲槽周邊必須設置儲槽坑監測井(Tank pit observation wells)，且設置時需符合 1 個儲槽至少應單獨設置 1 個儲槽坑，有 2 個(含)以上地下儲槽則應至少設置 2 口儲槽坑監測井。此外，儲槽坑監測井設計及安裝應能夠確認儲槽坑內油氣及品自由相，且至少應低於儲槽底部 15 公分等規定，也針對吸取式或壓力式管線均有設置規範。澳洲政府針對各項防污設施規範有定期檢查之頻率，包括壓力管線洩漏檢測、陰極防蝕系統檢查，以及儲槽及管線設備的完整性測試等要求。英國滲漏監測系統在前端洩漏監測採用雙層體設備壓力(真空)滲漏監測、各式感知器滲漏監測而後端滲漏監測則採用在儲槽外採取土壤氣體及地下水油品的監測與壓力管線滲漏監測及機械式管線測漏器，僅限於設置加油機系統的雙層管中來量測壓力是否滲漏。

探究各國地下儲槽系統之污染預防機制，管理對策係採用污染前端之阻絕、污染後端之監控等方案，如何監控便是核心技術。彙整各國污染預防與監測制度資訊，顯示先進國家在地下儲槽系統之監測管理方面強調在「污染前端阻絕」之管理政策。此外，各國研訂地下儲槽系統之監測規定方面，均考量國情，並以逐步淘汰不適用之監測設施與監測方式，酌以法令規範地下儲槽系統相關設施之更新時限，或以地下儲槽設置之站齡為基礎，逐漸將監測效果不彰之監測設予以淘汰，並朝向新穎之地下儲槽系統建造技術，以及「污染前端阻絕」概念之監測法，提供民眾擁有最高之土水生活品質。所以發展適合台灣之儲槽管線滲漏監測技術是非常重要的。

2.3 自來水管線的滲漏監測方法

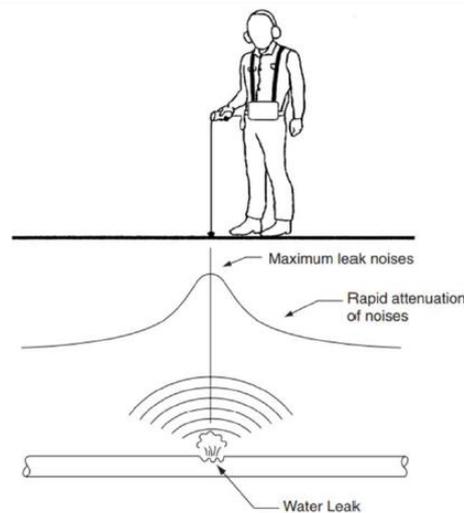
管線的滲漏監測在原水與自來水分配系統也是一個很重要的課題，根據國際供水協會(International Water Supply Association, IWSA)統計，所有生產的水有高達 20~30% 因為滲漏的因素而無法供給的使用者端(Moe and Rheingans, 2006; Thornton et al., 2008)，因此有許多自來水管路滲漏監測相關的技術發展。地下管線的滲漏監測不是一項簡單的問題，Puust et al.



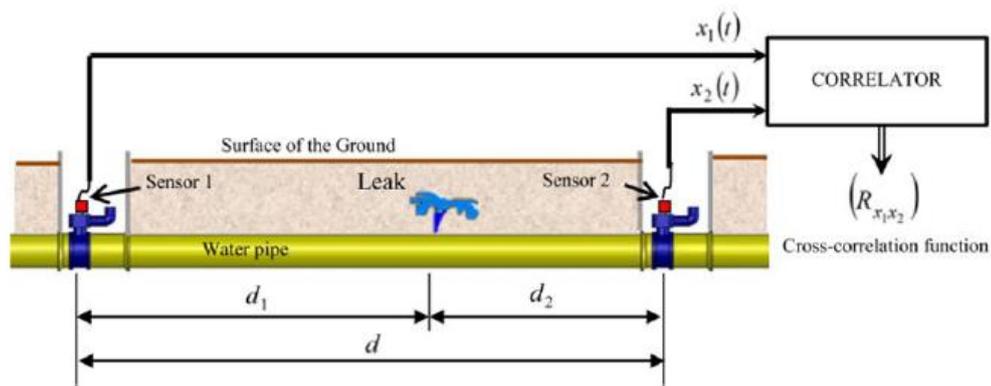
(2010)與 Liu et al. (2013)較全面性的回顧了供水管路監測與狀態評估的方法。

2.3.1 基於聲學方法

最常見的滲漏偵測方法為基於聲學(acoustic techniques)的方法，例如聽音桿(Listening rod or listening stick)與滲漏聲學互相關法(leak correlators)(Gao et al., 2004; Li et al. 2015)，如圖 2.3 所示。聽音桿為一個聽筒帶一根鋼釘，聲音通過鋼釘傳入聽筒，一般用在大範圍檢測時，先用聽音桿探測管道暴露位置，探測到初步信號之後縮小檢測範圍，再使用精密儀器檢測。聲學互相關法此裝置可以精確定位滲漏源的噪聲，用於確定信號與傳感器之間時間延遲的技術。聲學式滲漏偵測方法為國內外應用最為普遍的方法，但此方法容易受噪音與地下水液壓壓力低干擾，造成監測誤差，且不適用大範圍監測。



(a)



(b)

圖 2.3 聲學式滲漏偵測方法(a)聽音桿; (b)聲學互相關法

(from Fuad et al. 2019)

2.3.2 基於非聲學方法

非聲學的方法如透地雷達(ground penetration radar, Demirci et al., 2012)，如圖 2.4 所示。然而，這些方法的表現取決於管材、管徑、深度、土層種類等因素，較常見的聲學方法當水壓力較小或環境振動噪音較高時效果不彰；此外，這些方法不適用大範圍的監測，主要針對特定有疑慮的區域進行檢測，也尚不適合即時的在線監測。



Figure 2 | GPR can be used to detect leaks in water pipes by detecting anomalies created by leaking water in the pipe depth (Hunaidi 1998) thermal infrared imaging.

圖 2.4 透地雷達檢測地下管線漏水

(Li et al., 2015)



2.4 時域反射法之滲漏監測方法

為了克服上述滲漏監測的問題，近年來提出了基於電磁波時域反射法 (Time domain reflectometry, TDR) 的新滲漏監測方法 (Cataldo et al., 2012a, 2012b, 2014, 2015, 2017; Fatemi Aghda et al., 2018; Woo et al., 2018)，TDR 技術的適用性除了獲得實驗室與一系列現地測試實驗之驗證，根據 Cataldo et al. (2015) 的報告，此類技術已經被歐洲最大的水操作公司 Acquedotto Pugliese S.p.A. 實際安裝於 10 km 的地下供水管線上。TDR 滲漏監測技術的基本原理主要是利用漏水造成感應纜線對應位置電學性質的改變 (主要是介電度, dielectric constant)，造成傳輸線在漏水處因電學阻抗改變而產生反射訊號，如同沿著感應纜線的漏水雷達。目前 TDR 滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，水有最高的介電度 80，因此在漏水處造成土壤的濕潤與整體介電度的明顯改變。然而，工業液體如油品或其他非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，因此 TDR 滲漏監測技術是否可適用在不同的監測環境需求，需要進一步的研究與調適。以下先進一步說明 TDR 監測技術的原理，再進一步探討目前 TDR 監測滲漏的應用。

2.4.1 時域反射儀基本原理

時域反射儀 (time-domain reflectometry) 一般由脈衝電壓產生器 (pulse generator)、訊號採樣器 (sampler) 與示波器 (oscilloscope) 組成，TDR 之基本原理與雷達相同，由脈衝電壓產生器發射一電磁脈衝進入同軸電纜 (coaxial cable) 及感測導波器 (sensing waveguide)，並由示波器記錄由於感測導波器內阻抗不連續所造成之反射，如圖 2.5 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線 (同軸纜線) 與感測導波器，導波器可為同軸纜線之延伸，同時做為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可藉由反射訊號得知環境變化參數。TDR 儀器發展的起源為纜線的檢測，俗稱「纜線雷達」，TDR 儀器的空間解析度 (能分辨最小的阻抗不連續段) 由脈衝與回波的 rise time 所決定，發射脈衝的 rise time 可能因為纜線電阻或周圍材料導電度造成的衰減，使得訊號振幅衰減與 rise time 變長，而降低其空間解析度。TDR 之量測範圍，則由發射脈衝之間隔 (即為單一脈衝的回波收錄時間) 所決定。

電磁波於傳輸線內 (包括同軸電纜與感測導波器) 傳遞行為之主要控制參數為傳遞常數 (propagation constant, γ) 及傳輸線之電學特徵阻抗 (characteristic



impedance, Z_c)；而其纜線主要由內外導體及絕緣層組成，其材料基本電學性質包含介電度(dielectric permittivity, ϵ_r)與導電度(conductivity, σ_{dc}):

- a. 傳遞常數(γ)為介電度之函數，控制電磁波在纜線中之傳遞速度與衰減，受到傳輸線內介質之電學性質所影響:

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} * \sqrt{\epsilon_r} * A \quad (2-1)$$

- b. 特徵阻抗(Z_c)為纜線幾何形狀與介電度之函數，決定反射訊號的大小:

$$Z_c = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r}} * A \quad (2-2)$$

其中 ϵ_r 為介電度； Z_p 為介質真空時($\epsilon_r = 1$)之阻抗，可稱為幾何阻抗(geometric impedance)； A 為電阻修正係數(resistance correction factor)； j 為虛數單位； f 為頻率； c 為光速。

電纜阻抗不連續之反射(電纜阻抗不連續原因可能為纜線或感測器的幾何斷面變形，又或者是內部介質的介電度改變)；TDR 典型反射訊號如圖 2.6，當入射方波(V_i)遇到不連續之阻抗面(Z_0 與 Z_t 交界)時，會產生反射與透射，反射波(V_r)與入射波(V_i)可表示為：

$$V_r = \rho V_i \quad (2-3)$$

其中反射係數(ρ)為電纜阻抗之函數，定義如下，用以描述反射行為

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad (2-4)$$

如圖 2.6 顯示電磁波經過阻抗 Z_0 遇到不同阻抗 Z_t 時產生不同之反射，當 $Z_t > Z_0$ ，會產生正方波($\rho > 0$)；當 $Z_t < Z_0$ ，會產生負方波($\rho < 0$)；若 $Z_0 = Z_t$ ，則不會產生反射訊號($\rho = 0$)，TD 即為反射訊號所需來回走時(Addrews,1994；Dworak et al.,1977)。

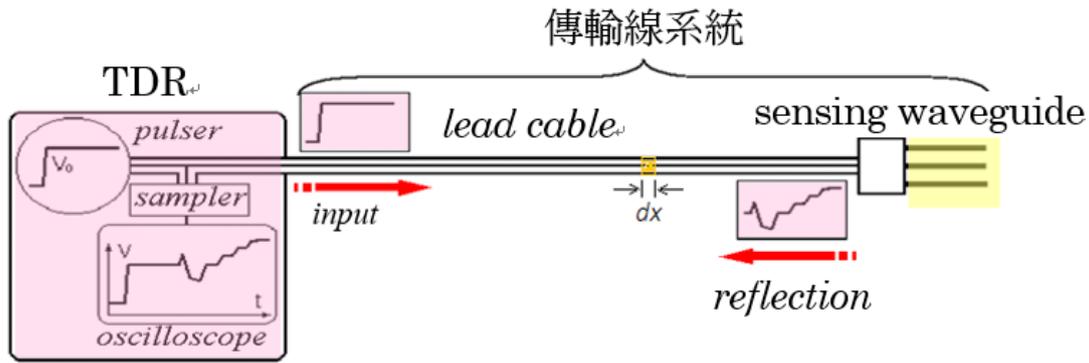


圖 2.5 TDR 量測設備的組成與量測架構

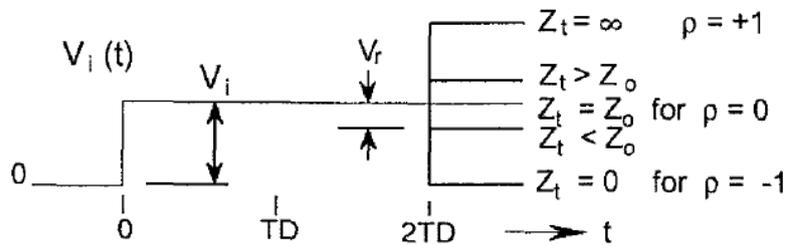


圖 2.6 不同之阻抗不連續所產生之反射波形

(Address,1994)

2.4.2 時域反射儀量測技術分類

透過不同感測導波器之設計與分析方法，TDR 技術可應用在不同的監測項目，依其分析原理大致可區分為下列三大類：

1. 界面型：係利用 TDR 之反射訊號量測不同介質之界面位置，例如水位之監測(空氣與水界面) (Chung et al., 2013)、土釘與地錨的檢測(Chung et al., 2016)、土壤沖蝕監測(Lin et al., 2017; Wang et al., 2019; Wang and Lin, 2020)。
2. 變形型：由於傳輸線阻抗受其幾何斷面控制，因此利用傳輸線可監測纜線變形或壓痕位置，若將纜線埋設於邊坡岩石或土體中，則可以監測岩石或土體邊坡位移 (Lin, 2009; 林等人, 2011; Lin et al., 2009; Chung and Lin., 2019)。
3. 介電性質分析型：係將所欲研究之材料作為感測導波器內部介質，利用反射訊號之走時與導波器之長度計算電磁波速及相對應之視介電度



(apparent dielectric constant)，以進一步推估土壤之含水量(Lin et al., 2000; Lin et al., 2006a, 2006b; Lin et al., 2012; Chung et al., 2019)或懸浮固體濃度(Chung et al. 2011; Lin et al., 2016)；利用反射訊號之穩態值及電磁學理論計算材料之導電度 (Lin et al., 2007; Lin, et al., 2008)。而反射訊號頻譜分析技術，則可量測不同頻率之電學性質，可藉以探討土壤與孔隙水之交互作用(Lin 2003a; Lin 2003b; Lin et al., 2017; Lin et al., 2018; Ngui et al., 2019)。

TDR 滲漏監測方法與上述之界面型與變形型類似，其量測原理之示意如圖 2.5 所示，將感應纜線沿著欲監測的位置鋪設，並監測沿著感應纜線是否產生因滲漏造成的回波。滲漏反射訊號的產生，類似 TDR 界面型監測方法，因滲漏造成介質性質改變，但局部滲漏所造成的反射訊號，又如同纜線局部受力變形所產生之局部反射訊號一般。由監測纜線的總長與頭尾反射訊號位置，可以標定纜線埋設於地下的傳輸速度，當滲漏造成局部反射訊號，由傳輸速度與反射訊號的走時可以決定滲漏位置。

2.4.3 目前時域反射儀滲漏監測應用

1. TDR 監測水的滲漏

目前 TDR 滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，由於水有較高的介電度為 80，因此在漏水處造成土壤的濕潤與整體介電度會有明顯改變，且全球水資源有限，地下管道滲漏的定位是優化水資源利用的關鍵步驟之一。根據 Cataldo et al. (2015)的報告，TDR 滲漏監測方法已實際安裝於供水管線，其原理如圖 2.7 所示，因滲漏造成左側一下凹的反射訊號，其中 L_E 為滲漏位置距離， L_{SE} 為感應纜線(感應元件 SE)的總長。下圖橫坐標可以表示為時間，或相當於光速下的距離 L_{app} ，如式 2-5 所示：

$$L_E = (L_E^{app}) / (L_{SE}^{app} / L_{SE}) \quad (2-5)$$

當漏水發生時纜線阻抗會改變，在漏水處造成反射係數(ρ)的變化。可以找出水滲漏點，如圖 2.8 所示。



第二章 計畫背景與文獻回顧

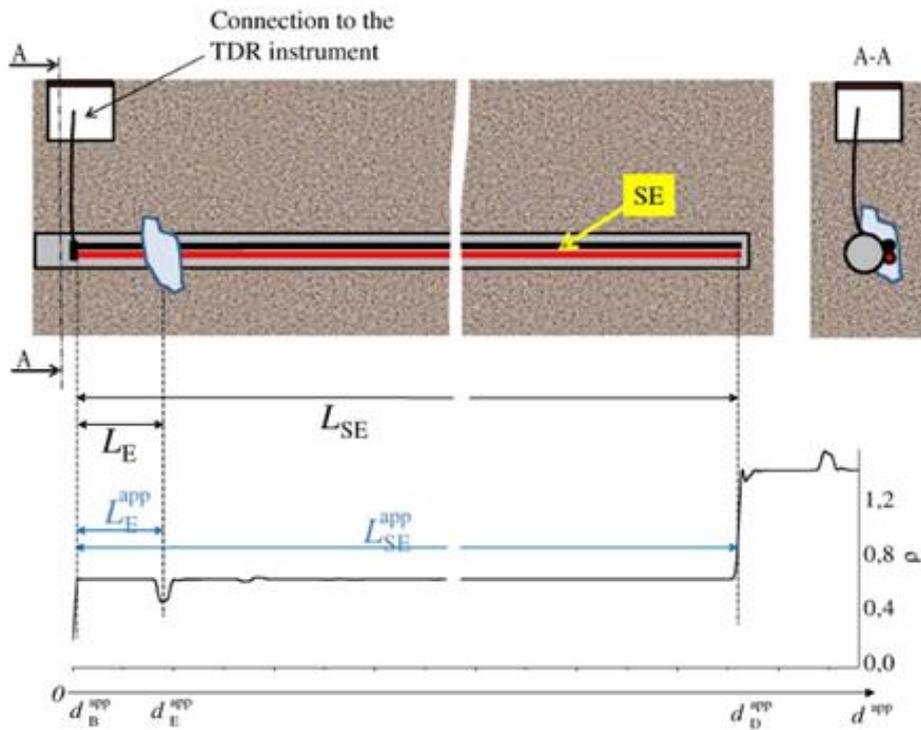


圖 2.7 TDR 管線滲漏監測原理之示意與其對應之量測波形示意

(from Cataldo et al., 2015)

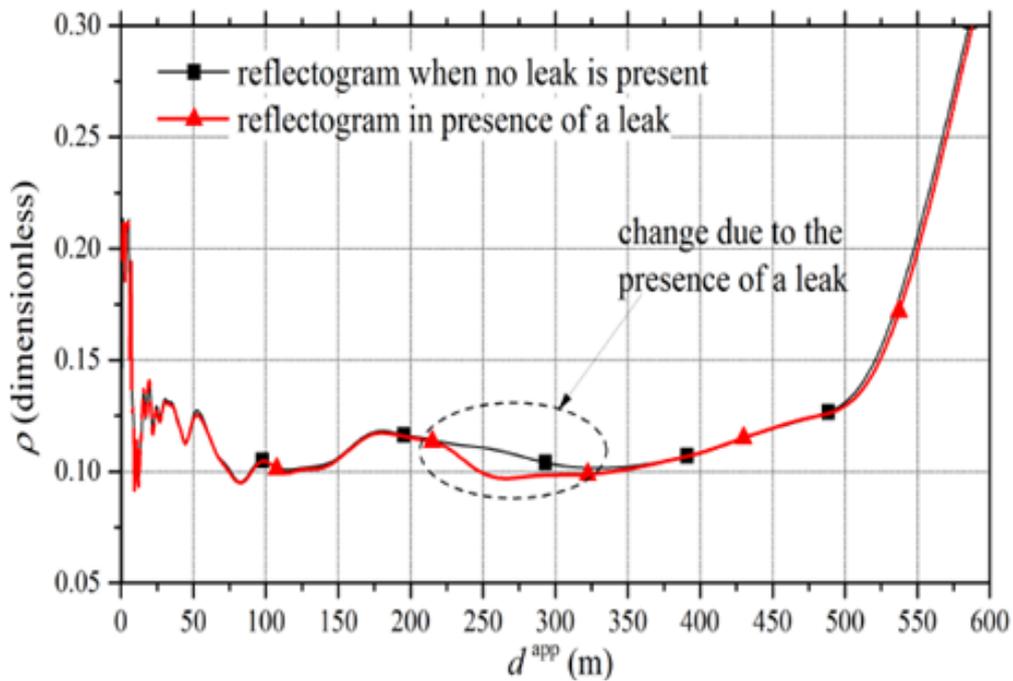


圖 2.8 TDR 監測管線滲漏前和滲漏時獲之反射圖差異

(from Cataldo et al., 2015)



2. TDR 監測油品的滲漏

儲槽與管線中大多是油品或化學物質，因此本研究將更進一步評估 TDR 在油品與化學物質上的應用。監測地下儲罐周圍土壤中的石油污染是有效修復土壤和地下水的重要問題。Lee et al. (2019)開發了一種使用液壓控制系統與 TDR 檢測地下儲油罐漏油的方法，如圖 8 所示。此法藉由油品不導電(電阻高)因此單用 TDR 監測靈敏度低，透過搭配電解液(NaCl)提高導電度，此方法類似水可以導電而加了鹽的水導電度會再提高，而油品導電度低但是加了電解液的油品導電度也會明顯提高。因此初始汽缸內底部填好定量的電解液，當油滲漏時電解液會被擠壓排出，此時 TDR 監測到的電阻會突然變大，以此偵測到油品滲漏情形。

油品滲漏檢測的靈敏度主要取決於液壓控制系統的配置。故此方法單純使用導電度計即可監測油的滲漏，若是要測得油品滲漏的厚度才需利用 TDR 的技術進行偵測。

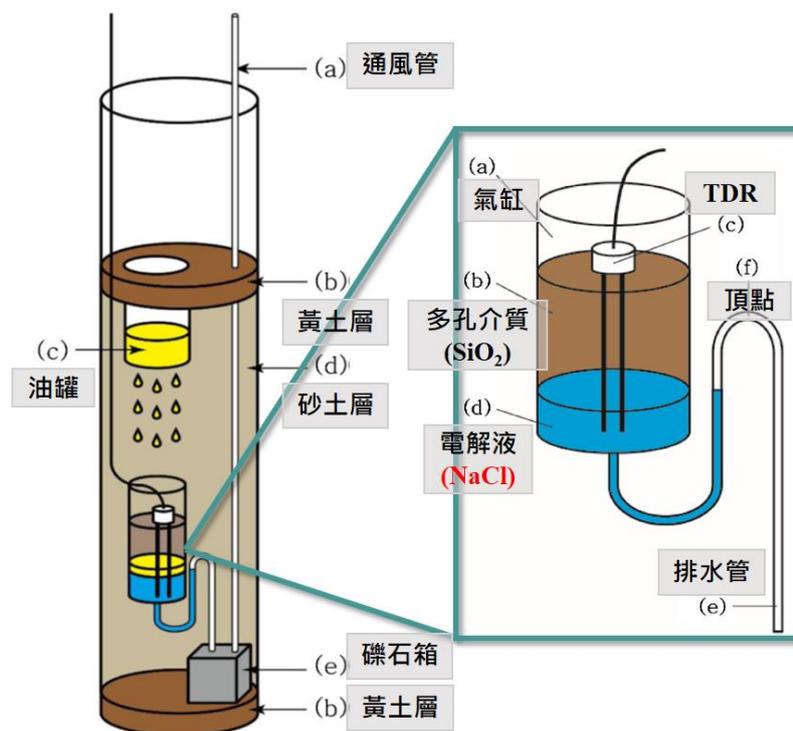


圖 2.9 液壓控制系統與 TDR 技術結合

(修改自 Lee et al., 2019)



3. TDR 監測化學物的滲漏

化學物品對土壤與地下水污染是難以發現和避免的問題。Pashtun and Sargand (2017)利用 TDR 分析不同 CuSO₄ 濃度的走時分析，如圖 2.10 所示，該技術可檢測土壤中是否存在已知化學物質和污染物的濃度變化。由於每種材料都有其特定的介電常數，因此可以通過土壤電導率的變化來分析地下土壤中不同材料的存在，如式 2-6 所示：

$$K_a = (La/(Vp * L))^2 \quad (2-6)$$

上式中，Ka 為介電常數，也可以稱為相對介電常數、La 為表觀長度、Vp 為視波傳速度、L 為已知量測探頭探針長度。

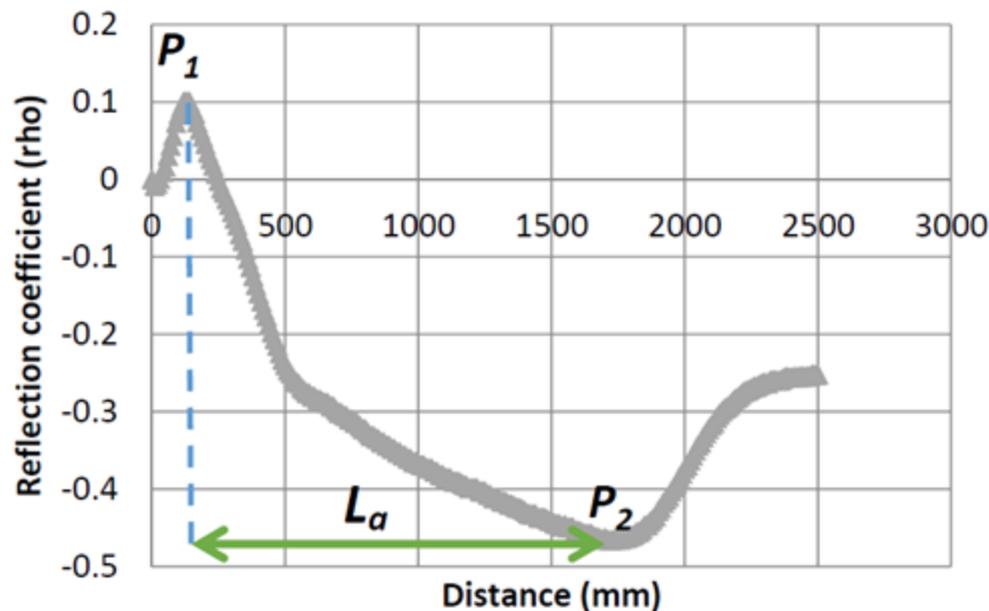


圖 2.10 TDR 分析不同 CuSO₄ 濃度的走時分析

(from Pashtun and Sargand, 2017)

4. PermAlert 液體滲漏偵測系統

PermAlert 成立於 1988 年，是洩漏檢測系統開發的全球領導者。隨著 24 小時運作的資料中心和對環境敏感的輸油管道等基礎設施的要求日益複雜，設施管理人員不得不尋求一種超越常規液體洩漏感測器智慧、有效的檢測解決方案。PermAlert 卓越的系統可靠性、耐塵性及可重複使用的感應



電纜技術，可降低總體擁有成本，提供一種無憂的解決方案，再加上靈活的服務產品，PermAlert 洩漏檢測系統將遠遠超出其預期之使用壽命。

目前 PermAlert 液體滲漏偵測系統已有效應用於危險化學品儲存、溶劑滲漏檢測、酸滲漏檢測、汙水下水道管線、地上/地下油庫、地下儲油罐等。監測設備分為監測系統與感應纜線，此監測系統具備智慧處理器的高階液漏檢測系統，原理為測量感應電纜（TDR）的能量脈衝反射的時間延遲。感應纜線分為三種分別為 AGW-Gold、AGT-Gold 與 TFH-Gold 纜線，如圖 2.11 所示，各纜線特性與適用場所如下：

- (1) AGW-Gold 纜線:是一種快乾型感應電纜，用於檢測高腐蝕性液體的洩漏，例如酸、鹼和溶劑。典型的應用在雙層管外管、資訊機房、無塵室高架地板及高溫場所等。
- (2) AGT-Gold 纜線:專門用於偵測逐漸蓄積液漏的高滲透型感應電纜，該電纜具有較高的靈敏反應度，可檢測水、強腐蝕性酸、鹼和溶劑的洩漏。
- (3) TFH-Gold 纜線:專門用於偵測有機化合物液體（不受水性溶液的干擾）的高滲透型感應電纜線。典型的應用在單壁管路和儲油槽。

以上三種都具有耐化學腐蝕特性，其中 AGW-Gold 纜線具重複使用性，而其他兩種纜線則有滲漏物接觸後即無法重複使用，因此本研究後續會以可重複使用之 AGW-Gold 纜線做滲漏實驗評估。

PermAlert(1995)埋設特殊設計纜線於油槽四周，當油料漏出，將滲入並蓄積於該纜線內，形成阻抗不連續面，據以施作測漏檢核與定位。因該纜線利用特殊材質製作，成本較其他纜線來的高，因此本研究希冀利用單價相對低之纜線，達到滲漏監測目的。



圖 2.11 PermAlert 纜線



2.5 影響 TDR 滲漏監測因素

滲漏監測纜線之量測限制(包括感應靈敏度、感應空間解析度、多點滲漏之之波形相互干擾、感應距離之限制等)與其他環境因子之影響(如監測環境土壤含水量與導電度的可能變化與影響)。以下進一步說明：

1. 感應靈敏度:電磁波若在具有良好導電的環境無法長距離傳輸，如透地雷達的量測限制，TDR 感應纜線為了保持導體間的間距並阻隔導電度造成的訊號衰減，以絕緣材分離導體。因此，影響感應纜線電磁波傳輸特性之介電度為絕緣材與纜線周圍很小範圍的介質，兩者的綜合效應，又以越接近導體的材料影響權重越大。因此，由於絕緣材的存在，將使得對於周圍介質感應的靈敏度下降。當所偵測的滲漏液體不是高介電度的水，而是非水相有機液體時，相較於水，其具有甚低之介電度，與一般傳輸的絕緣材料相近，目前供水管線滲漏監測所採用的感應元件是否足以偵測滲漏，需要進一步試驗評估。
2. 感應空間解析度與感應距離：TDR 感應空間解析度取決於設備規格(脈衝 rise time)，但亦受到纜線電阻衰減的影響，雖然感應纜線之導體間已經用絕緣材阻隔 DC 導電度(使得兩導體間 DC 絕緣)，但絕緣材周圍的導電度仍可能造成高頻訊號的衰減，造成空間解析度與感應距離的限制。因此，在纜線電阻(纜線電阻的大小取決於導體的大小)與周圍土層具一定程度的導電度環境下，TDR 滲漏監測的空間解析度需要以實驗評估。
3. 多點滲漏之波形相互干擾：若傳輸線僅有一處滲漏，其波形的判釋相對單純，但當臨近有多處滲漏時，雖然 TDR 可偵測到多點的回波，但滲漏段與滲漏段之間的多重反射亦會出現在第一處滲漏之後，造成多點滲漏情況滲漏點判釋的困難。
4. 其他環境因子之影響：埋設於地下之感應纜線，除了偵測滲漏，亦可能受到土體含水量變化的影響，需考慮實場可能的環境變化，評估其可能的影響，並視情況提出相關的導波器設計或分析對策。

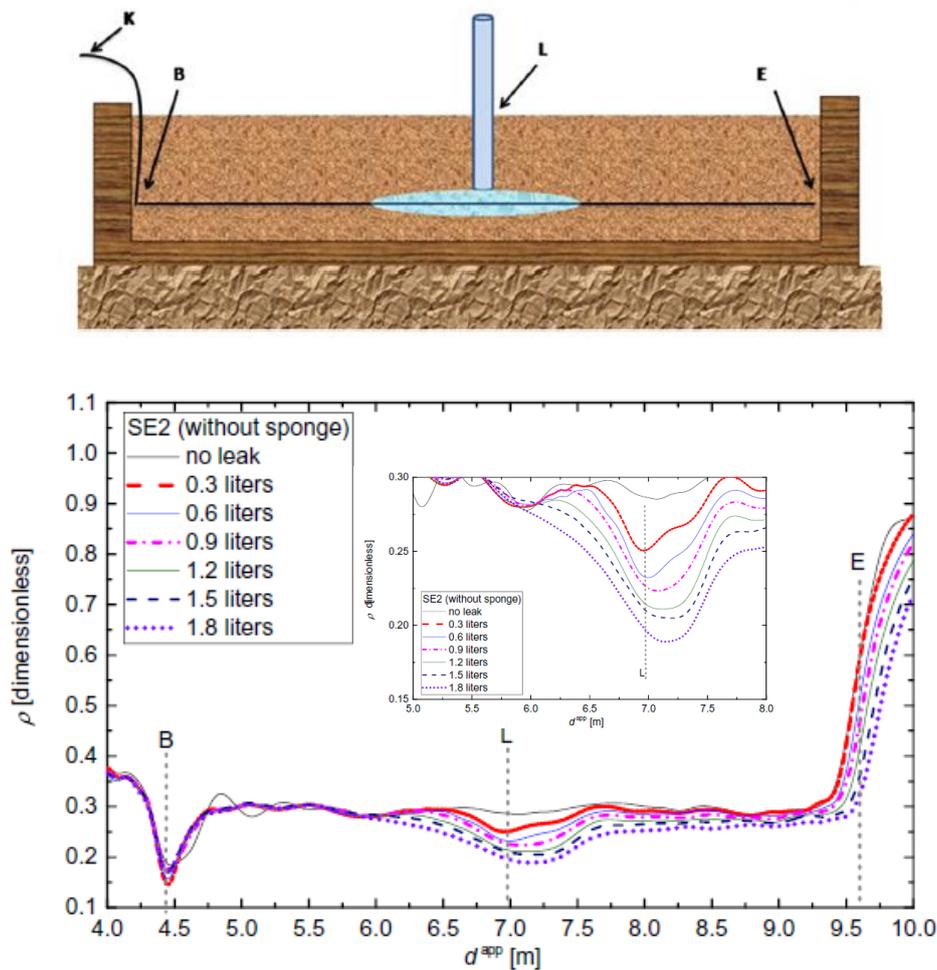
2.5.1 滲漏物擴散之影響

目前 TDR 應用在水的滲漏有較完整的監測方式，而其中影響因素為滲漏物擴散之影響。當管線發生滲漏而沒及時處理會造成滲漏物在土壤中持續擴散，並遠離實際滲漏位置。因此 Cataldo et al. (2016)將 TDR 感應元件

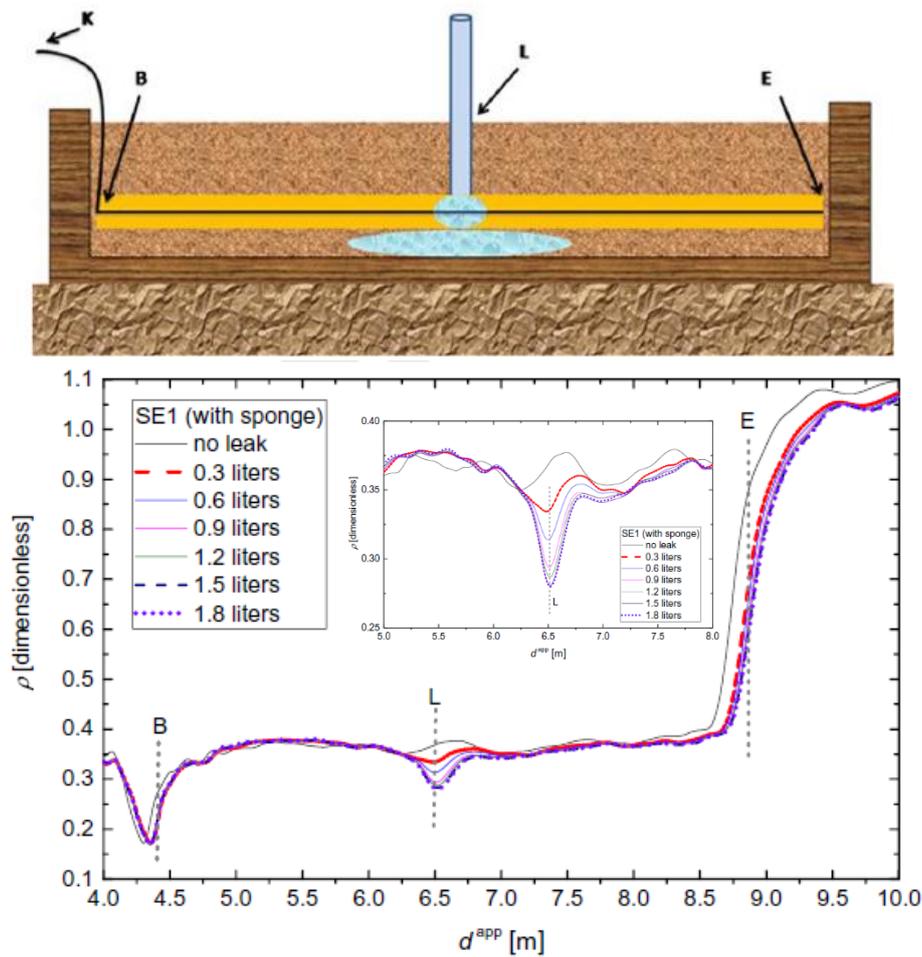


第二章 計畫背景與文獻回顧

安裝在吸水海綿內進行實驗，如圖 2.12 所示，在還沒加裝海綿的情況下，當漏水量持續增加，無法利用反射係數精確計算實際滲漏位置，誤差會隨漏水量增加而越來越不準確。若將感應元件裝在海綿裡面，發現隨著漏水量持續增加，利用反射係數變化去計算漏水位置的誤差是持續降低的。因此加裝海綿能夠降低滲漏位置測量誤差也能降低土壤中介電不均勻的問題。



(a)無加裝海綿時滲漏物擴散情形



(b) 加裝海綿時滲漏物擴散情形

圖 2.12 纜線有無海綿之擴散情形

(from Cataldo et al., 2016)

2.5.2 多點滲漏之影響

當 TDR 傳感器與水接觸時，電磁波的速度會降低，所以自然地，增加滲漏點的數量與滲漏面積會使系統的精度下降得更多。因此當管線漏水處增加時，會造成滲漏監測系統的錯誤率增加。Aghda et al. (2018) 利用實驗評估滲漏定位系統的準確性，並研發一種設計多個已知位置之參考點以監測和定位多點滲漏，如圖 2.13 所示。該方法在 TDR 波形上可以很容易監測到參考點的反射，當任何位置發生滲漏時，則使用鄰近之參考點來換算滲漏位置，能有效提升判斷滲漏位置之精準度。

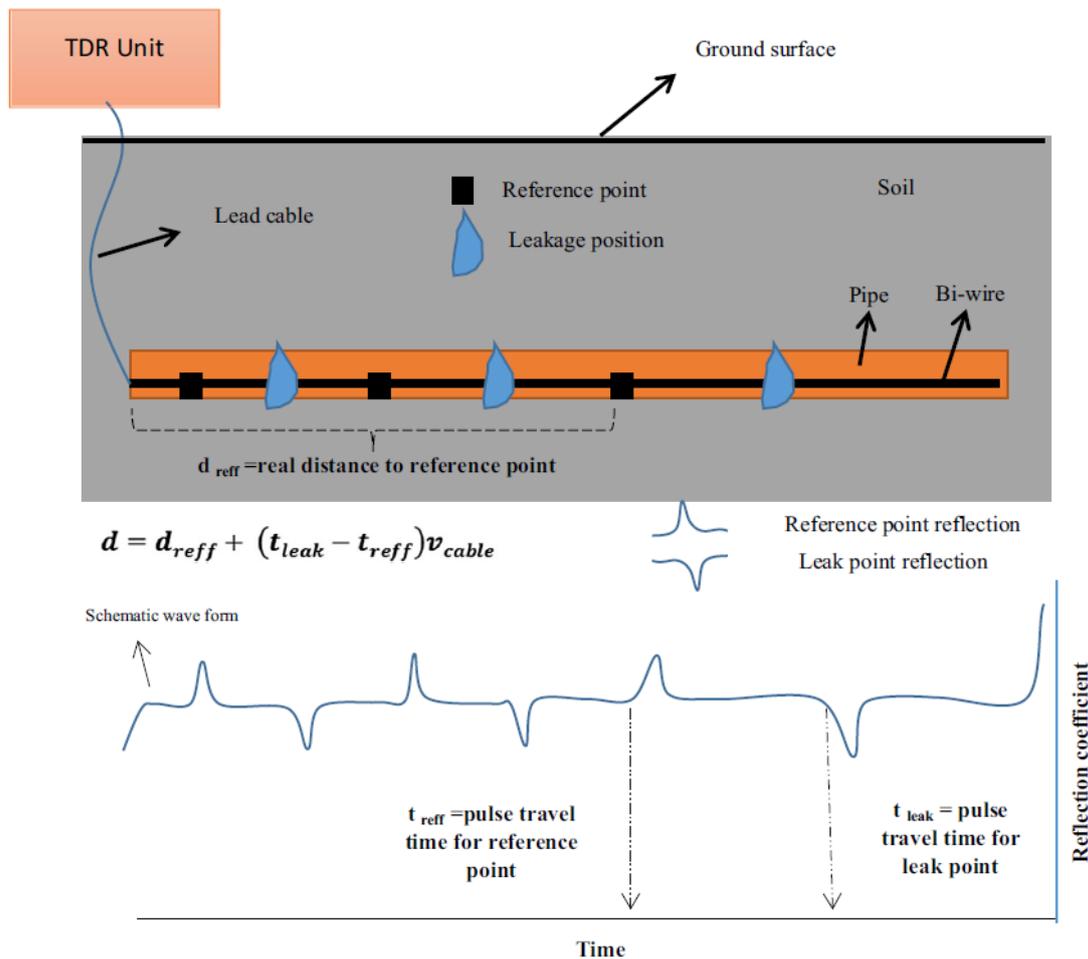


圖 2.13 增設參考點實驗配置圖

(from Aghda et al., 2018)

2.6 計畫關鍵問題

透過以上文獻可知，TDR 滲漏監測在概念上其實非常簡單，但在儲槽與管線滲漏監測的應用實績尚不多見，尚有以下課題需要進一步探討與發展：

1. 感應元件的型態:傳輸線依其兩極導體的配置可以有不同的形態，例如同軸纜線、平行雙導體、平行三導體等，如圖 2.14 所示，感應纜線的型態不同，其量測敏感度與受環境電磁雜訊的影響不同。當所偵測的滲漏液體不是水，而是非水相有機液體時，相較於水，其具有低介電度與低導電度，目前供水管線滲漏監測所採用的感應元件是否足以偵測滲漏，需要進一步試驗評估。



2. 環境變化之影響:埋設於地下之感應纜線，除了偵測滲漏，亦可能受到土壤含水量變化的影響，需考慮實場可能的環境變化。
3. 量測的距離限制:目前文獻中 TDR 供水管線所提出之感應元件主要為平行雙導體，雖然導體之間已經絕緣，且 TDR 儀器回波的收錄範圍可達公里以上，但根據在 TDR 河川沖刷監測技術的發展，當感應元件(亦即傳輸線或導波器)周遭材料具有導電度時，仍會有高頻的衰減，使得訊號強度與空間解析度隨距離增加而降低。因此，必須考慮實場可能遭遇的環境，探討 TDR 監測技術的極限。

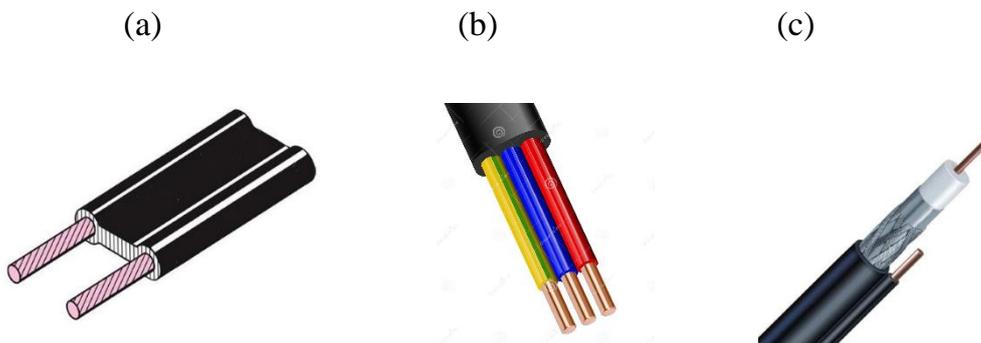


圖 2.14 (a)平行雙導體傳輸線；(b)平行三導體傳輸線；(c)附有吊線之同軸纜線



第三章 研究方法與流程

3.1 研究方法

本研究的目的是在於探討 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，將透過更全面性的考量，評估不同感應元件(纜線)在不同液體偵測的適用性與感應元件的優化，並探討地下環境變化對於監測之影響以及量測空間解析度與感應距離的限制，再進一步針對影響因子與量測限制之探討結果，研擬精進的對策，希冀發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。研究方法將包括數值模擬方法與實驗評估，茲說明如下：

3.1.1 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式

除了實驗評估，搭配數值模擬方法，可以減少實驗數量，進行各種情境之探討，有利於資料分析方法之對策研擬。此外，除了簡易的雷達回波判釋，以預測模式為基礎的貝氏反算推論(Bayesian inverse inference)對於長距離與多點滲漏的自動偵測可能有所助益(Schuet et al., 2011; Wang et al., 2012; Kim et al., 2015; Woo et al., 2018)。因此，本研究將基於過去對於 TDR 量測技術的學理基礎，發展可完善與快速模擬 TDR 滲漏量測的模式。

TDR 傳輸線之波傳控制方程式由圖 2.5 取傳輸線一微小均勻段落 dz ，以圖 3.1(a)之單位長度等效電路模型可推導得到描述電壓與電流在傳輸線中變化的微分方程，經傅立葉轉換至頻率域後較容易求解，頻率域的控制方程如下：

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(r + j2\pi fl)I(z) \quad (3-1a)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(g + j2\pi fc)V(z) \quad (3-1b)$$

其中 z 為傳輸線之位置， V 及 I 分別為電壓與電流，單位長度電路參數包括電容 c 、電導 g 、電感 l 及電阻 r ，這些電路參數彼此不完全獨立，為介質電學性質與傳輸線斷面幾何的函數。材料電學性質包括磁導率 (magnetic permeability)、介電度 (dielectric permittivity) 及導電度 (electrical conductivity)，除了磁性材料，一般材料之相對磁導率可取為常數 1；材料介電度又稱為電容率，為材料受電磁場極化的特性，在頻率域中可以複數 $\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon''$ 表示，實部為極化之能量儲存而虛部為極化導致之能量損耗，材



料介電度在控制方程中可與導電度性質結合在一起，完整的電學性質可用複介電度(complex dielectric permittivity) ϵ^* 表示，包含介電度及導電度之性質：

$$\epsilon^* = \epsilon' + j[\epsilon'' - \sigma / (2\pi f \epsilon_0)] \quad (3-2)$$

其中 f 為頻率， ϵ_0 是真空的介電度。電路參數 g 、 c 、 l 及 r 互有關係，求解過程有一些幾何項可以整併，因此其與材料電學性質及傳輸線斷面幾何的關係暫無須在這裡表示出來。波動控制方程式之通解可整理為：

$$V(z) = V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{\gamma z} \quad (3-3a)$$

$$I(z) = \frac{V^+}{Z_c} e^{-\gamma z} - \frac{V^-}{Z_c} e^{\gamma z} \quad (3-3b)$$

通解的兩項分別可解讀為正向與反向的波傳， V^+ 與 V^- 兩項的待定係數。TDR 量測系統之傳輸線至少包括延長線段及感應段，感應段內還可能因為幾何阻抗或介質改變而區分為不同的均質段落，各段落之通解均可以公式(3-3)表示。公式(3-3)通解中的參數有傳遞常數(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。傳遞常數主要由介質電學性質(ϵ^*)決定，特徵阻抗則受到 ϵ^* 與導波器導體幾何的影響，後者的影響可合併為一項，稱之為幾何阻抗(Z_p)，相當於導波器在真空中的特徵阻抗。 γ 與 Z_c 可精簡的表示為：

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{v_0} \sqrt{\epsilon^*} A(\alpha_R) \quad (3-4a)$$

$$Z_c = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon^*}} A(\alpha_R) \quad (3-4b)$$

其中 v_0 為電磁波在真空中的速度(即光速)， A 為電纜電阻效應的修正因子(為纜線電阻衰減因子 α_R 與頻率的函數，詳 Lin and Tang (2007))，若傳輸線不是很長，分析時常忽略電阻效應則 $A=1$ 。當傳輸線不同段落之傳遞常數與特徵阻抗不同時，電磁波在段落界面因需滿足連續條件(continuity condition)而會產生反射(反向傳遞波)與透射(正向傳遞波)成分，反射量與透射量由阻抗不連續面兩側之阻抗比例決定。TDR 的量測訊號為各反射(包含段落間的多重反射)回到發射端的訊號總和。

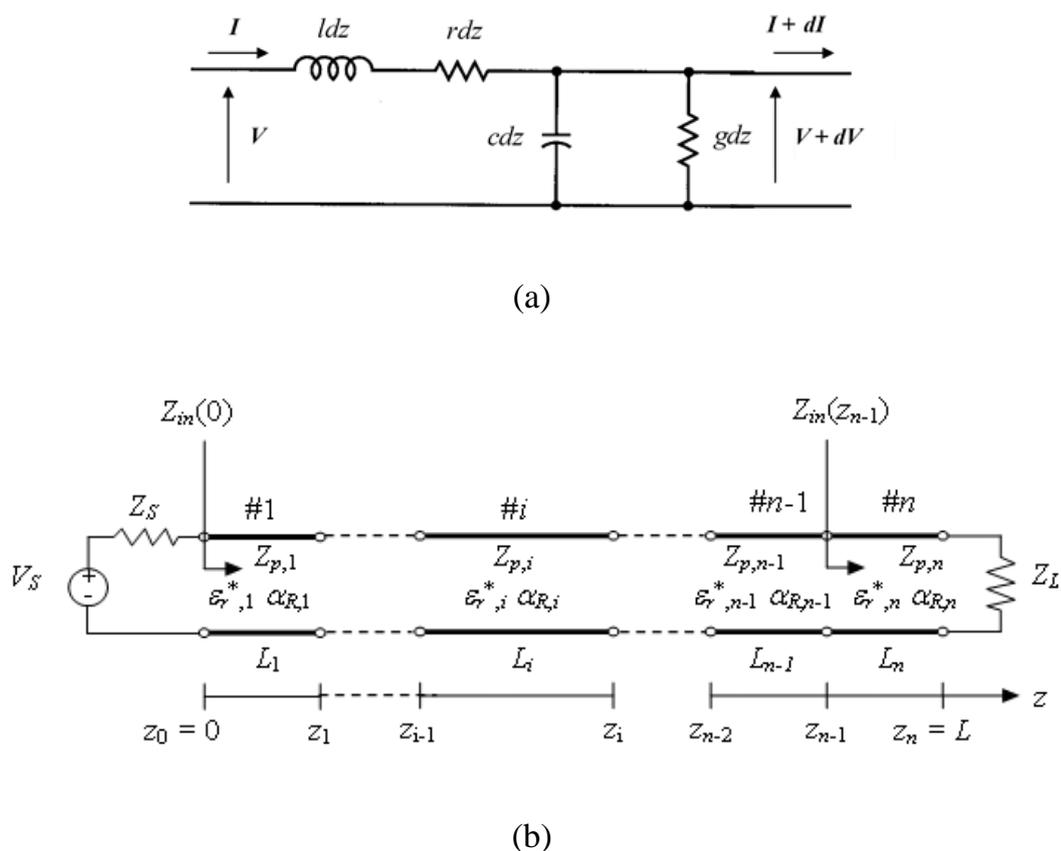


圖 3.1 (a)單位長度傳輸線之等效電路以及(b)整體 TDR 監測系統之多段傳輸線電路模型

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（如圖 3.1(b)），每一段可以參數化為傳輸線幾何阻抗 (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 TDR 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：



$$\begin{aligned}
Z_{in}(z_n) &= Z_L \\
Z_{in}(z_{n-1}) &= Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} \tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L \tanh(\gamma_n l_n)} \\
Z_{in}(z_{n-2}) &= Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(z_{n-1}) \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\
&\vdots \\
Z_{in}(0) &= Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} \tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1) \tanh(\gamma_1 l_1)}
\end{aligned} \tag{3-5}$$

其中下標 i 代表各段落。一般之 TDR 監測系統邊界條件為 ($Z_L = \infty$ ，即末端開路)。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：

$$V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s = H V_s \tag{3-6}$$

其中 $V(0)$ 是 TDR 波形的富立葉轉換， V_s 是 TDR 輸入脈衝的富立葉轉換， 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。本研究以 TDR 滲漏監測系統的情境，實現上述 TDR 量測波形預測模式之數值計算方法，並研擬模擬參數率定之方法，實際模擬監測系統所獲得之量測波形，以利相關參數研究。

3.1.1.1 數值模擬流程與規劃

公式 3-5 與 3-6 所提供系統函數可模擬以不同形式傳輸線與介電材料所組成任一時域反射量測系統。對於給定時域反射量測系統，須了解傳輸系統各均勻分段長度 L_i 、幾何阻抗 $Z_{p,i}$ 、代表纜線電阻的電阻衰減因子 $\alpha_{R,i}$ 、等值相對介電度 $\epsilon_{r,i}^*$ 、以及裝置來源阻抗 Z_s 與終端阻抗 Z_L ，方能估算對應時域反射波形。在此，令 $v_s(t)$ 表示為時域反射儀輸入方波電壓 (step pulse)， $v_{TDR}(t)$ 為時域反射儀取樣電壓反應，而函數 $\text{FFT}()$ 代表快速傅立葉轉換演算法 (FFT algorithm)，時域反射波形則可由下述步驟流程模擬：

1. 定義各均勻分段長度 L_i 、幾何阻抗 $Z_{p,i}$ 、纜線電阻參數 $\alpha_{R,i}$ 、以及等值相對介電度 $\epsilon_{r,i}^*$



2. 定義適當時間與頻率視窗長度以避免離散傅立葉轉換(discrete Fourier transform)失真混疊問題(aliasing)。
3. 以快速傅立葉轉換 $v_s(t)$ 到頻率域(frequency domain)， $V_S=FFT(v_S)$
4. 依序代入公式 3-4、5、6，定義頻率域反應 $V(f)$
5. 以快速傅立葉反轉換(inverse FFT)獲得 $v_{TDR}(t)=IFFT(V(f))$

上述演算過程相當有效率，傳輸線僅需要在線段特性改變之處分段，特別是對於相當常但性質均勻的纜線，僅需要一個分段(與對應模型參數 $L_i, Z_{p,i}, \epsilon_{r,i}^*, \alpha_{R,i}$)。

本研究數值模擬主要模擬長距離滲漏與多點滲漏之監測，探討以下相關問題:1.不同感應元件是否能監測長距離滲漏；2.不同感應元件是否能監測多點滲漏；3.模擬之波形趨勢與實驗波形是否吻合，將針對以上三點進行數值模擬，藉以了解纜線滲漏監測之限制。



3.1.2 物理實驗

室內物理實驗以自製壓克力實驗儲槽模擬現地地下儲槽與管線滲漏情形，實驗中使用之儀器、滲漏物與其他配置項目，茲說明如下：

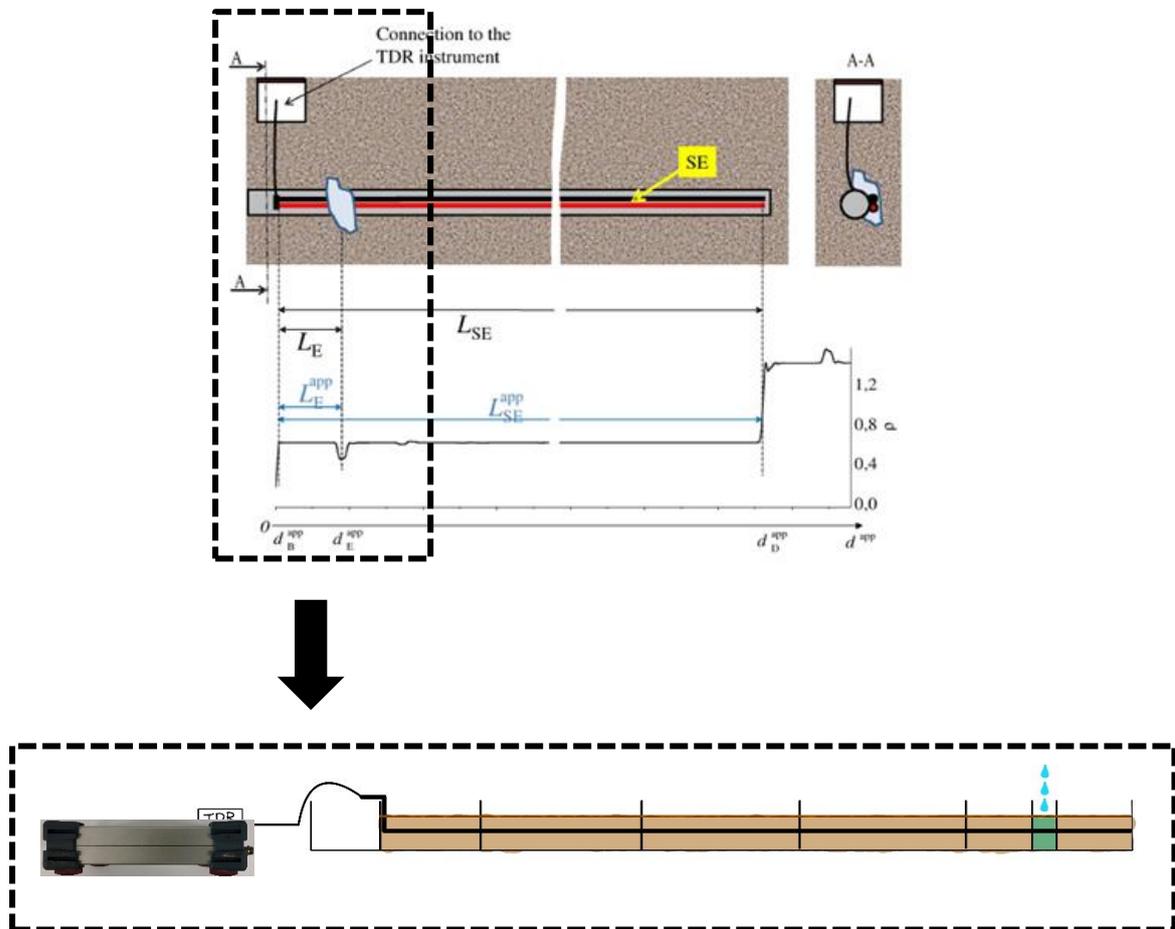


圖 3.2 模擬現地之物理實驗示意圖



3.1.2.1 實驗儀器

實驗儀器包含 TDR3000、壓克力實驗槽以及感應元件(纜線)，以下將逐一介紹:

1. TDR3000

TDR3000 為德國 SYMPULS 公司製造，其可以產生一階脈衝進入纜線，若搭配多工器，則可以同時量測多個頻道 TDR 感測器，若是搭配資料擷取器，則能夠具有可程式化及自動化量測的功效，詳細規格如表 3.1，可用於量測土壤體積含水量、土壤體積電導率與岩石變形監測等。本研究將 TDR3000 連接現有的資料擷取器(筆記型電腦)，並透過本研究團隊自行研發撰寫的程式進行資料擷取與分析。

表 3.1 TDR3000 規格

垂直系統(Vertical System)	
輸入(Input)	50 Ω,SMA-Connector
上升時間(Rise Time)(10-90%)	80 ps
帶寬(Bandwidth)(3dB)	5 GHz
線路阻抗範圍(Range of Line Impedance)	0 to 1000 Ω
解析度(Resolution)	0.01%
顯示解析度(Display Resolution)	40 dots/div, 400 dots/screen
水平系統(Horizontal System)	
時間解析度(Time Resolution)	1 ps
顯示解析度(Display Resolution)	50 dots/div, 500 dots/screen
距離尺度(Distance Scale) (/div)	1 cm, 2 cm, 5 cm ... 100 m
內部測量 TDR 脈衝發生器(Internal Pulse Generator for TDR-Measurement)	
脈衝形狀(Pulse Shape)	Rectangular 24.4 kHz, app. 0.5V into 50 Ω
上升時間(Rise Time)	< 80 ps
雜項(Miscellaneous)	



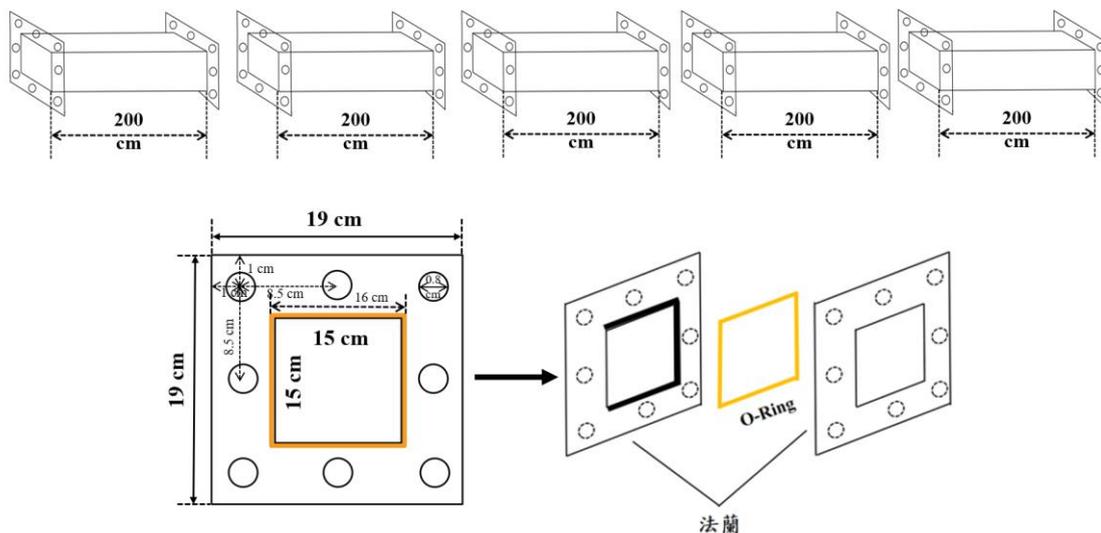
電源供應(Power Supply)	4.5V ... 5.5V / 0.5A Powered over USB-port
尺寸(Dimensions)	Aluminium Case, W x H x D = 115mm x 55mm x 175mm

2. 壓克力實驗槽

實驗槽設計理念為模擬現地實場環境，因現地實場之環境因子變化無常，可能受到土體含水量變化或其他因素影響，因此實驗採用壓克力製作分段固定式之實驗槽評估感應元件適用性，實驗槽各段內部長寬高訂為 200cm*15cm*15cm，如圖 3.3(a)。後續實驗可針對不同污染物做分段滲漏與加砂加水的變化進行評估，滲漏段長度為 30cm，如圖 3.3(b)。

實驗前，為了預防污染滲漏物外洩，先在底部鋪設帆布，避免污染環境，又預防實驗槽中間段受力太大產生斷裂，在實驗槽下方墊磚塊，使受力均勻分布，模擬現地之壓克力實驗槽如圖 3.4。

(a)



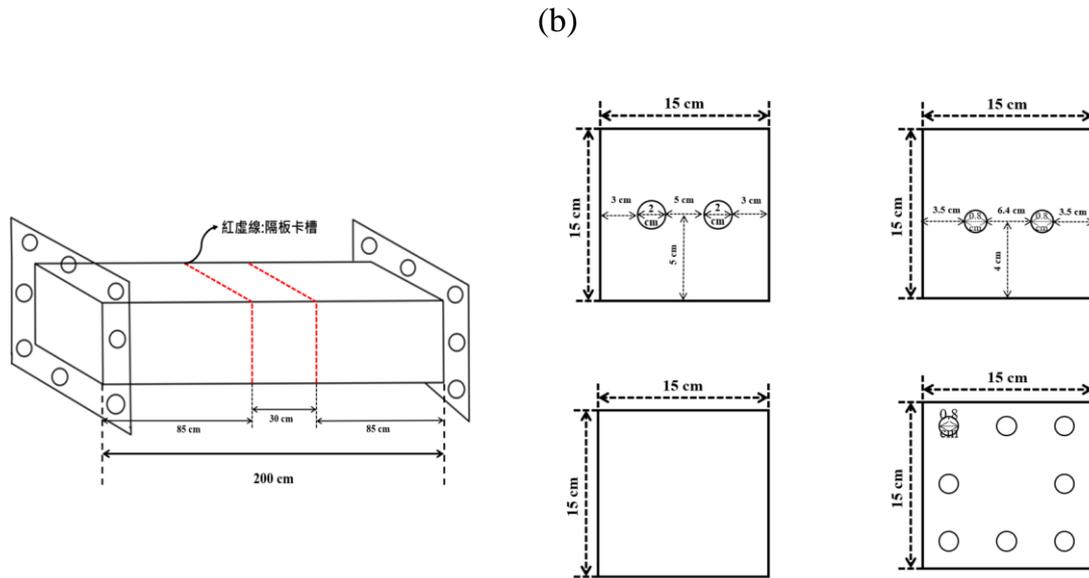


圖 3.3 實驗槽設計示意圖(a)連接處法蘭(b)分段固定式實驗槽與隔板



圖 3.4 模擬現地之壓克力實驗槽



3. 感應元件

市面上纜線種類繁多，導體材質、線徑大小與衰減特性皆有所不同。本研究使用四種不同型態之感應元件，分別為：平行雙導體、附有吊線之同軸纜線、乙太網路線、排線與特殊材料製成之 AGW-Gold 纜線，各元件其構造說明如下：

(1) 平行雙導線

平行雙導線如圖 3.5 所示，由兩條線規為 AWG16 之多芯線構成，內部多芯線直徑為 1.4mm，外部絕緣材厚度為 0.8mm。



圖 3.5 AWG16 平行雙導線構造圖

(2) 附有吊線之同軸纜線

同軸纜線(Coaxial Cable)構造由內至外分別為內導體、絕緣介質、遮蔽層、外導體與外殼保護層，本研究以常使用於 TDR 監測應用的 CommScope 公司生產的 P3-500 同軸纜線之外導體(當作內導體)與吊線之導體(當作外導體)，監測感應元件周圍之環境變化，附有吊線之同軸纜線剖面示意圖如圖 3.6 所示。



圖 3.6 附有吊線之同軸纜線示意圖



(3) 排線

排線種類有許多種，由不同線材規格組成之排線各不相同，本研究利用圖 3.8AWG20-4P 組成之排線作為感應元件，並進行實驗評估。

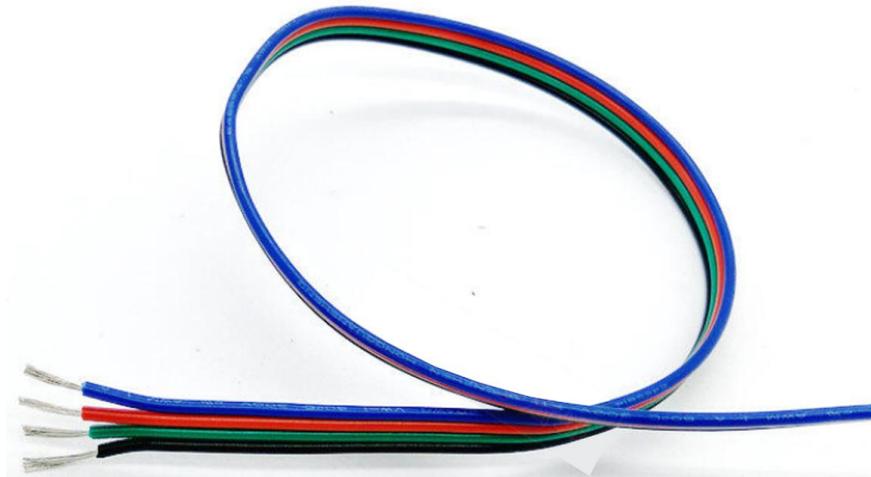


圖 3.7 AWG20-4P 排線構造圖

(4) AGW-Gold 纜線

AGW-Gold 纜線是由 PERMA-PIPE International Holdings, Inc.公司旗下的 PermAlert 部門生產的特殊纜線，此傳感器電纜是一種高度通用的傳感電纜，可以監測水、碳氫化合物和高腐蝕性化學。此纜線材料為快乾型可重複使用的傳感器電纜，因此本研究會使用此線材進行實驗比對評估。

此線材與前三種線材之監測滲漏方式不同，前三種感應元件是藉由電磁波感應元件周圍環境變化而偵測滲漏發生位置；AGW-Gold 纜線則是藉由滲漏物滲入並蓄積於纜線內，形成阻抗不連續面，據以偵測滲漏發生。

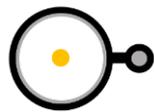


圖 3.8 AGW-Gold 纜線構造圖



上述(1)-(3)種感應元件監測滲漏方式相同，統整此三種感應元件之規格進行比對，如表 3.2 所示。

表 3.2 感應元件規格

感應元件	導體直徑 (mm)	導體距離 (mm)	導體線材	示意圖
附有吊線之 P3-500	2.9	5.7	實芯	
AWG16-2P	1.4	3.2	多芯	
AWG20-4P	0.75	5.4	多芯	

3.1.2.2 實驗材料

實驗材料分為滲漏物與回填材料，本研究實驗評估之滲漏物為自來水與 92 無鉛汽油；回填材料為細砂與七厘石。

在台灣污染物滲漏事件以石化原料工廠之污染物滲漏造成之污染為大宗，且全島境內之加油站數量約 2400 家，數量眾多，因此加油站地下汽油儲槽之預防滲漏作業尤為重要，故後續實驗將以台灣中油股份有限公司製造之 92 無鉛汽油作為污染物滲漏之監測物。目前自來水滲漏監測之發展已成熟，故會以自來水滲漏監測結果與汽油滲漏監測之結果比較分析與評估。

回填材料以孔隙較小、可保水之細砂，與孔隙較大、保水效果不佳之七厘石進行實驗，兩種材料特性不同，可評估材料孔隙率對滲漏監測之影響。

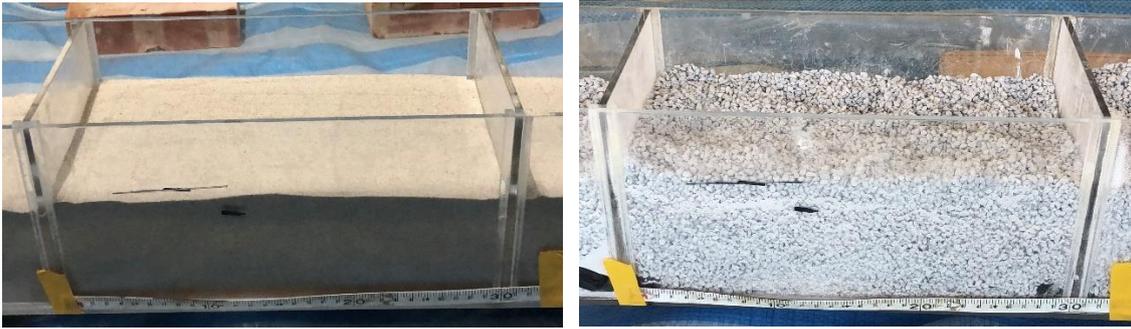


圖 3.9 細砂(左)及七厘石(右)

3.1.2.3 記號及其他項目

分析多點滲漏之滲漏位置時，滲漏段與滲漏段之間的多重反射亦會出現。現在第一處滲漏之後，造成多點滲漏情況滲漏點判釋的困難，因此滲漏段之監測起點至關重要。本研究於感應元件上製作固定之記號，造成感應元件之感應介質改變，從圖 3.12 可以明顯辨別出記號所在位置，至此，監測起點標定完成。

本研究使用之 AGW-Gold 纜線長度僅 2m 長，因此在纜線前端連接 9m 的延長線，以模擬 TDR 監測長距離滲漏之情形。



圖 3.10 記號(左:AWG16-2P;右:附有吊線之 P3-500)



圖 3.11 延長線

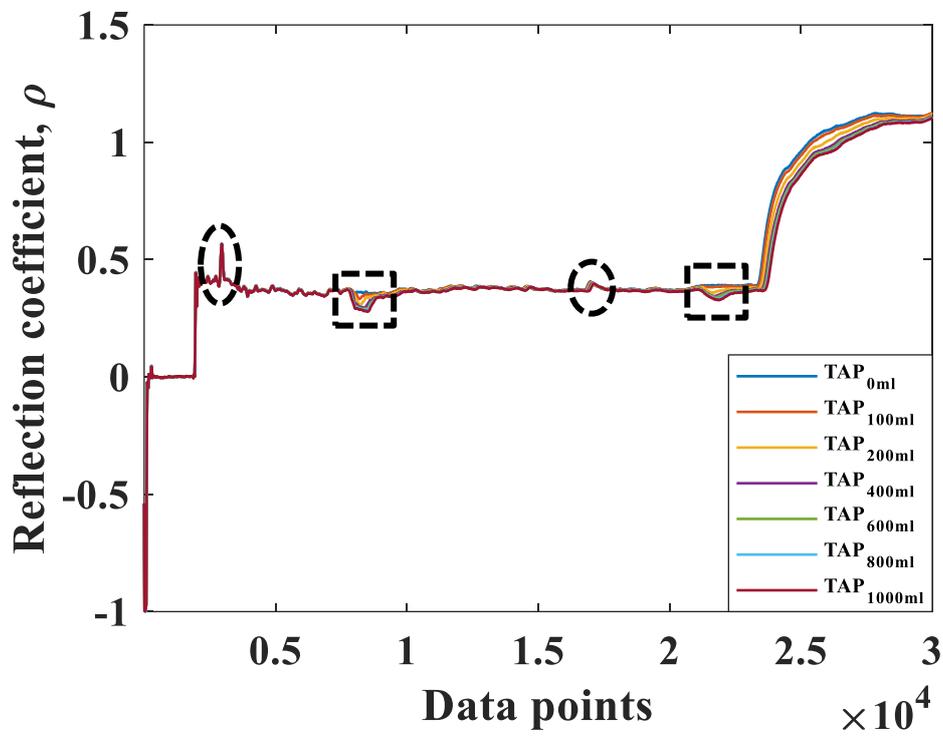


圖 3.12 記號(圓圈處)及滲漏位置(矩形處)波形



3.1.2.4 實驗流程與規劃

本研究自行設計製作一可適當模擬在現地中地下管線或儲槽滲漏之壓克力實驗槽，觀察感應元件因滲漏所引致 TDR 反射訊號(ρ)之變化與距離之定位，以利進一步分析滲漏發生與定位滲漏位置，茲將滲漏實驗流程表示如圖 3.13 並敘述如下：

1. 壓克力實驗槽組裝:將製作好之壓克力板組裝，在連接處利用法蘭相連接，橡膠環放入凹槽並用螺絲鎖緊，避免連接處有間隙。
2. 放入感應元件:在組裝好之實驗槽中，將符合纜線尺寸之隔板放入並固定，再將感應元件放入隔板以固定位置。
3. 回填材料:將細砂或七厘石填入實驗槽中，以模擬現地之回填材。
4. 倒入滲漏物:將要監測之滲漏物倒入實驗槽內，每次倒入量為 100ml。
5. 收錄資料:收錄滲漏前與滲漏後的資料，滲漏物倒入時，為了讓滲漏達到穩態值，因此間隔 1-2 分鐘再收取資料。
6. 資料分析:將滲漏前後之 TDR 波形正規化，再進行比較。

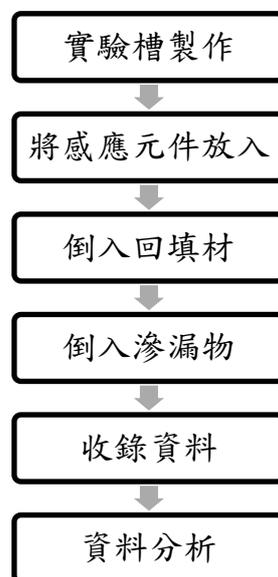


圖 3.13 實驗流程圖



實驗規劃包含三個主題，分別為(1)感應元件靈敏度評估、(2)長距離滲漏監測、(3)多點滲漏監測，由於實驗空間限制，因此壓克力實驗槽總長度僅 10m，故長距離與多點滲漏實驗先以 10m 評估監測效果，而後再以數值模擬更長距離之滲漏監測，以下將逐一說明此三個主題之實驗規劃：

- (1) 實驗前期先利用小型置物箱(14 cm *20 cm *30cm)評估多種感應元件之靈敏度(表 3.3)，透過在細砂中分別加入水與汽油，進行評估不同感應元件之靈敏度。
- (2) 關於長距離滲漏監測實驗(表 3.4)，主要探討 AWG20-4P、AWG16-2P 與附有吊線之 P3-500 纜線在以細砂當作回填材時，水與汽油之滲漏監測；因 AGW-Gold 纜線外層具有孔洞，為避免細砂卡入縫隙清理不易而影響監測，故利用七厘石當作回填材，並與在細砂環境中靈敏度較佳的附有吊線之 P3-500 纜線在相同滲漏環境下進行比較分析。
- (3) 多點滲漏實驗(表 3.5)，探討在長距離滲漏監測效果較佳之 AWG16-2P 與附有吊線之 P3-500 纜線，進一步評估在細砂中水與汽油多點滲漏情況下纜線之監測效果。

表 3.3 感應元件靈敏度評估實驗

感應元件	滲漏環境	感應元件長度(m)	滲漏段長度(m)
AWG16-2P	乾砂+水	1.5	0.3
	乾砂+汽油		
	七厘石+汽油		
附有吊線之 P3-500	乾砂+水	1.5	
	乾砂+汽油		
	七厘石+汽油		
AGW-Gold	七厘石+汽油	2	



表 3.4 長距離滲漏實驗

感應元件	滲漏環境	感應元件長度 (m)	Lead cable (m)	滲漏點距離 (m)
AWG20-4P	乾砂+水	10	1	9.85
	乾砂+汽油			
	濕砂+汽油			
AWG16-2P	乾砂+水			
	乾砂+汽油			
	濕砂+汽油			
附有吊線之 P3-500	乾砂+水			
	乾砂+汽油			
	濕砂+汽油			
	乾七厘石+水			
	乾七厘石+汽油			
AGW-Gold	乾七厘石+水			
	乾七厘石+汽油			



表 3.5 多點滲漏實驗

感應元件	滲漏環境	感應元件 長度(m)	Lead cable (m)	滲漏點 1 距離(m)	滲漏點 2 距離(m)
AWG16-2P	乾砂+水	10	1	3.85	9.85
	乾砂+汽油				
附有吊線之 P3-500	乾砂+水				
	乾砂+汽油				



3.1.3 分析方法

物理實驗所得的數據，主要使用 MATLAB 程式軟體，透過程式的撰寫，進行資料處理及分析計算滲漏發生時反射係數(ρ)的變化，將透過下面各小節中逐一介紹本研究開發之兩種分析方法，兩種方法皆利用附有吊線之 P3-500 纜線的長距離滲漏實驗資料進行分析。

首先針對 TDR 波形圖的 x 軸進行說明，根據 TDR 原理，收錄資料為時間域資料，x 軸應為時間，然而為了容易判讀波形，透過程式改寫分析，會將 x 軸以點數表示，點數是 TDR3000 所收錄的所有資料點，本研究物理實驗一律收錄 40000 個點數，點數間隔(dt)為 5 皮秒(picosecond, ps)。

3.1.3.1 差異分析法(Difference analysis method)

差異分析法是對資料之間的差異或某段落之間的差異進行分析的方法。此方法利用電磁波在不同介質中介電常數的改變，來獲得波形在不同介面的反射訊號。在滲漏監測的應用上，利用在實驗槽中量測到的回填材環境與滲漏物滲漏後環境之間介電度的不同，來分析污染物滲漏情形及滲漏位置。分析作法為先以回填材之環境收錄資料，當作原始波形，再將欲監測之滲漏物倒入，收錄滲漏發生時資料，將兩資料相減後，得出分析結果。資料分析過程可分為三步驟，利用附有吊線之 P3-500 纜線在長距離自來水滲漏之 TDR 波形進行詳細說明：

- 一、圖 3.14:對原始資料做濾波，使波形平滑(lowpass frequency=1.5GHz)；並做 xshift 將資料量測起點對齊。
- 二、圖 3.15:將在回填材環境下之資料當作原始波形，再將不同滲漏量之波形與原始波形相減，得出反射係數差值($\Delta\rho$)。
- 三、圖 3.16:將反射係數差值($\Delta\rho$)與資料點數關係圖中，滲漏段之資料取最小值繪製出反射係數差值($\Delta\rho$)與滲漏物滲漏量之關係圖。



第三章 研究方法與流程

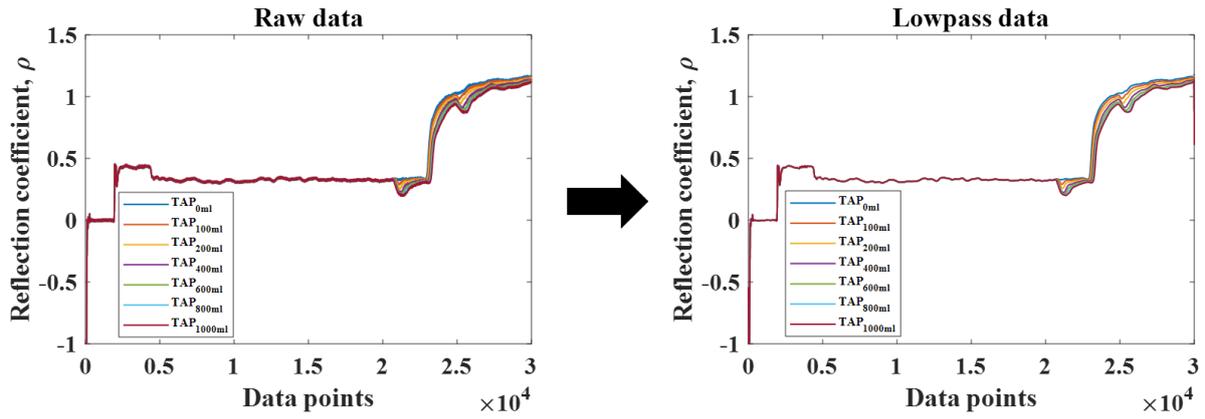


圖 3.14 差異分析法步驟一

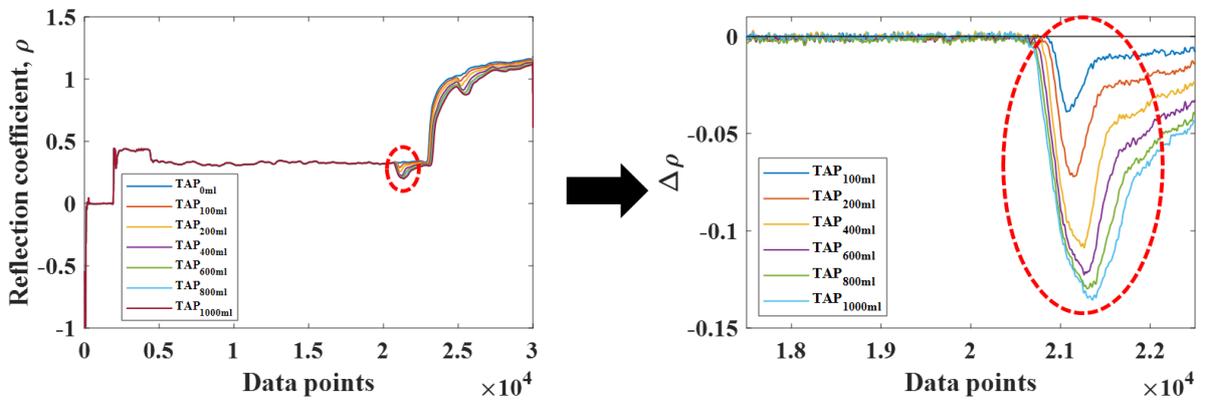


圖 3.15 差異分析法步驟二

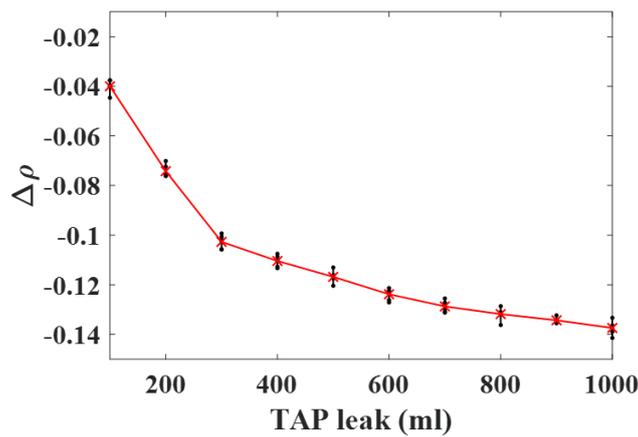


圖 3.16 差異分析法步驟三



3.1.3.2 走時分析法(Travel time analysis method)

利用走時分析法能有效評估感應元件之靈敏度，而此方法之正確性與波形品質有關，其中感應元件品質與 TDR 儀器皆會影響波形之品質。因此本研究固定感應元件之長度下，利用走時分析法進行靈敏度之評估。作法為對終點波形做切線，得到切線與在原始環境中之反射係數之交點，計算原始波形與最大滲漏量之間的點數差，再換算走時差，可分為兩步驟，下面利用附有吊線之 P3-500 纜線在長距離自來水滲漏之 TDR 波形進行詳細說明：

- 一、 圖 3.17:對原始資料做濾波，使波形平滑(lowpass frequency = 1.5 GHz)；並做 xshift 將資料量測起點對齊。
- 二、 圖 3.18:將終點兩波形微分，取微分最大值前後各 20 點進行一次回歸作為切線，計算兩切線與在環境中反射係數值之交點的差值，稱為點數差，點數差乘上資料點數間隔(dt)為 5 皮秒(picosecond, ps)，最終得走時差。



第三章 研究方法與流程

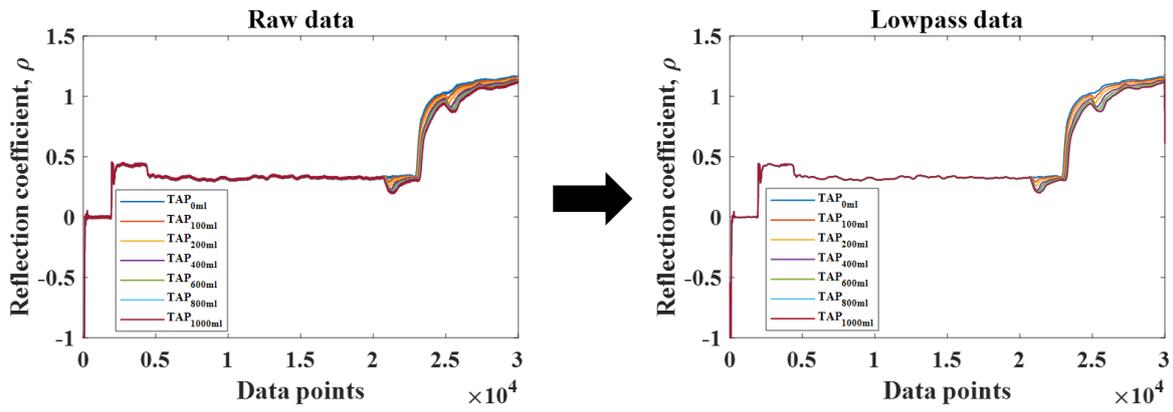


圖 3.17 走時分析法步驟一

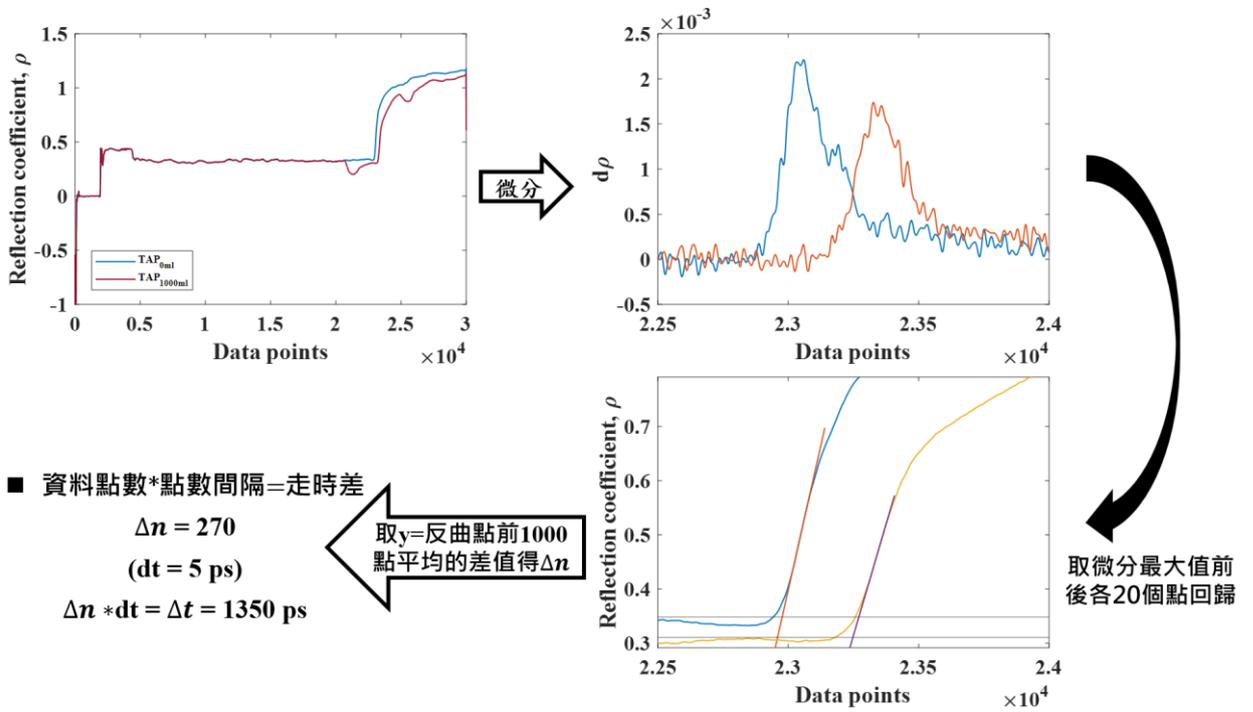


圖 3.18 走時分析法步驟二



3.1.3.3 分析方法討論

在上一小節中分別介紹了兩種資料分析方法，並繪出同組實驗之分析結果，差異分析法能夠定位出污染物滲漏位置，且波形之反射係數差值 ($\Delta\rho$) 隨污染物滲漏量增加而遞增。資料筆數分為 72 筆與 12 筆資料進行分析(圖 3.19)，比較分析後，得出資料筆數越多並沒有增加分析之準確性，反之以資料筆數較少 12 筆即可有效監測滲漏之發生與定位滲漏位置，因此後續會以 12 筆資料進行資料之判釋。

走時分析法能評估感應元件之靈敏度，走時之差異主要顯示感應元件整體之變化，而差異分析法為局部段落間感應元件之變化，因此兩種分析方法互相搭配能夠更有效且精確判斷滲漏之發生。

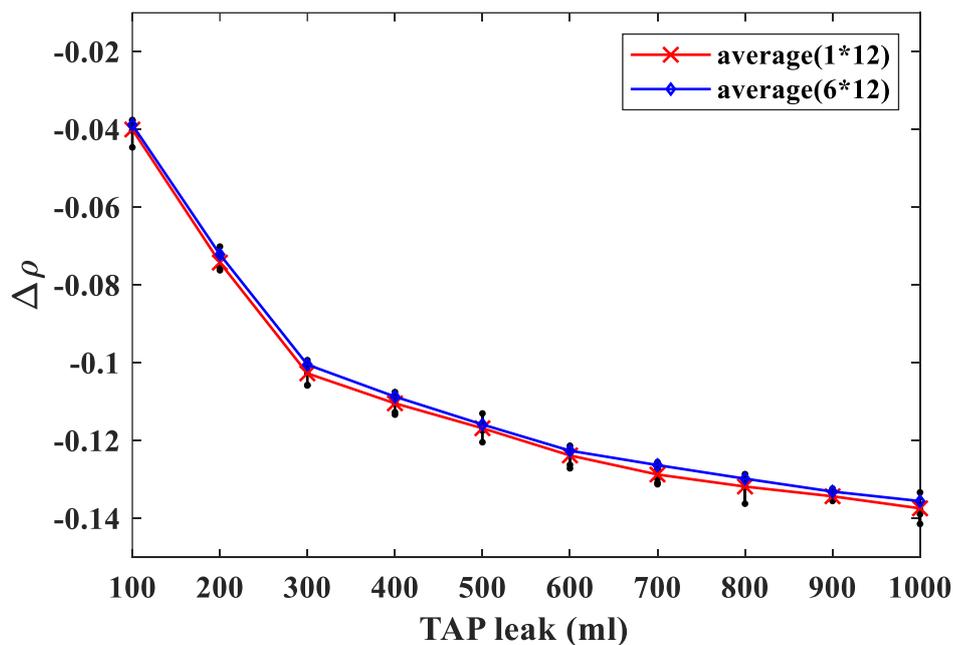


圖 3.19 分析資料筆數差異圖



3.2 研究流程

本研究之研究流程如圖 3.20 所示，主要探討 TDR 纜線反射係數變化與推估滲漏位置之間的關聯性，TDR 滲漏監測系統之量測波傳模擬波譜法模擬出虛擬波形，在理想狀態下進行數值探討，驗證此量測技術之可行性與其限制。而後，基於 TDR 之量測系統在室內試驗環境中擷取待測材料之實際 TDR 滲漏反射訊號，分別以兩種分析方法:差異分析法(Difference analysis)與走時分析法(Travel time analysis)進行分析，驗證所量測滲漏位置的準確性和穩定性；最後並探討環境影響因子與量測限制之評估。

本研究研發之感測器，於室內實驗之評估工作中預計將分兩個部分進行，一個部分是針對自來水的滲漏，評估感應元件在土壤中監測自來水的滲漏之使用性以及量測的準確性，而另一部分將針對台灣常見之污染物(92 無鉛汽油)進行滲漏監測評估，找出污染物之介電度與敏感度，之後再進行長距離之試驗，來評估空間解析度與長距離的可行性，將模擬實場之配置沿用到現地進行污染物滲漏監測。

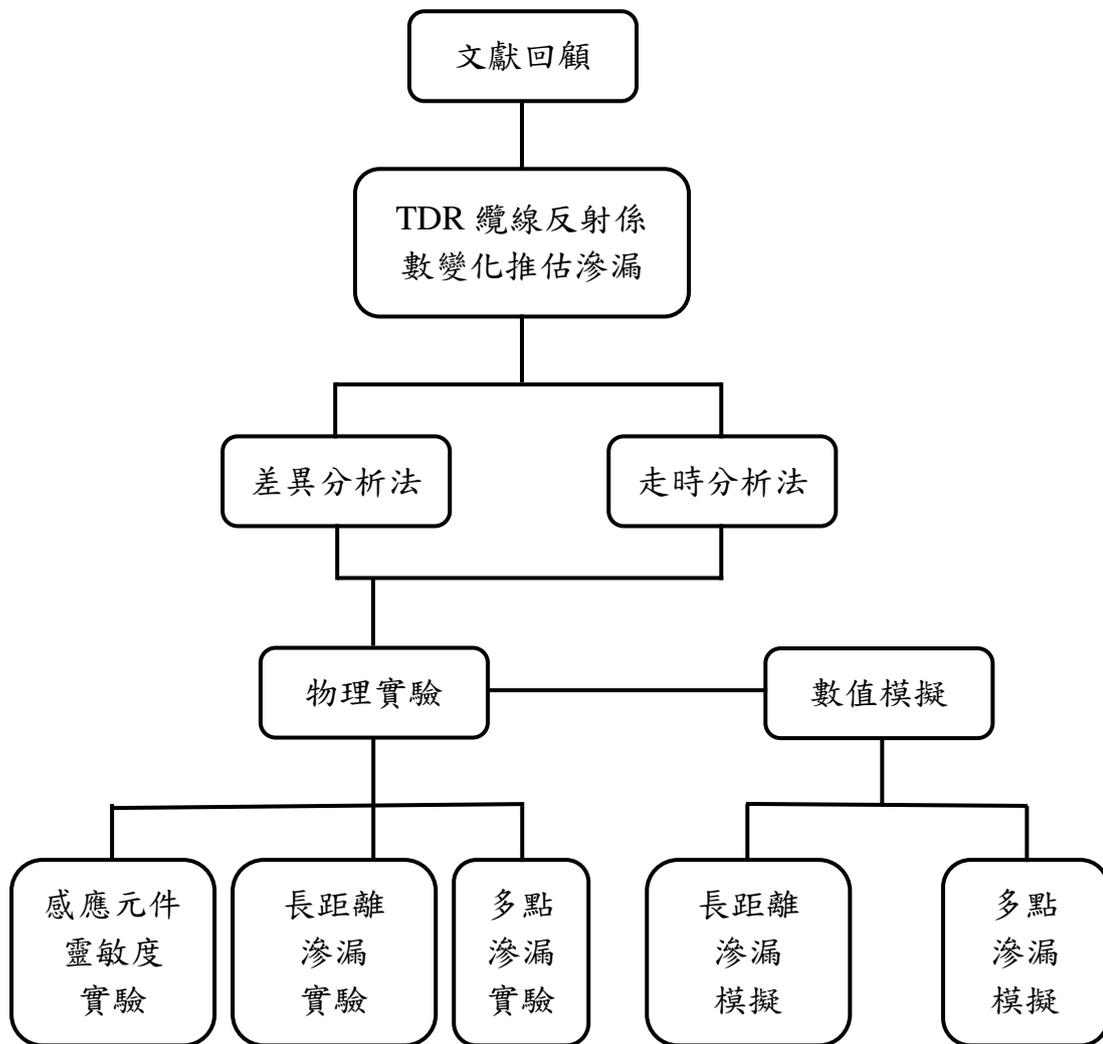


圖 3.20 研究流程圖



第四章 研究結果與討論

本研究利用室內物理實驗模擬現地情形，初步探討感應元件監測污染物滲漏之靈敏度，與環境因子對滲漏監測之影響，評估現有滲漏監測技術之可行性與監測污染物滲漏之限制。利用 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式與室內物理實驗之結果，探討 TDR 技術在滲漏監測之應用與發展。

4.1 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式

本研究基於過去對於 TDR 量測技術的學理基礎，發展可完善與快速模擬 TDR 滲漏量測的模式，搭配數值模擬方法減少實驗數量，進行各種情境之探討，有利於資料分析方法之對策研擬。

4.1.1 TDR 滲漏監測模型參數標定

時域反射系統在實際用於量測前，除了可由傳統資料判釋獲得部分系統參數進行假設，藉由適當標定可定義該系統相關參數。三個參數 (L, Z_p, ϵ_r^*) 其中一個須已知或固定，其餘兩個參數與纜線電阻參數 α_R 可由實際量測時域反射波形定義。在滲漏監測中，長度 L 通常先被決定並固定，然而由量測波形標定其餘 $Z_p, \epsilon_r^*, \alpha_R$ 參數。

已知 ($Z_p, \epsilon_r^*, \alpha_R$) 與反向計算法 (back calculation) 能決定 L 連續變化 (由污染物滲漏導致)。透過已知 (ϵ_r^*, α_R) 與反向計算法可量化因局部滲漏引致 Z_p 與 L 變化。透過實驗得到環境介電性質 (ϵ_r^*) 與試誤法 (Try and Error) 能決定纜線電阻參數 α_R 。

由於纜線電阻強烈影響短路波形穩態值，建議由終端波形進行反算，可獲得纜線各參數。圖 4.1 顯示斷路時利用反算所得參數值模擬的波形與量測波形，模擬與量測波形相當一致，顯示通用時域反射波傳模型與全波形反算 (full-waveform inversion) 相當有效。忽略纜線電阻的模擬波形亦表示與圖 4.1，與量測波形相差頗大，正時考慮纜線電阻的重要性。明顯地，上升時間與穩態反應受到長纜線相當大影響，如不考慮纜線電阻，將增加利用走時 (travel time)、穩態反應 (steady-state response)、反射量大小 (magnitude of reflection spike)、頻譜反應 (spectral response) 等分析方法錯誤。下一小節將展示通用時域反射波傳模型在滲漏監測應用適用性。

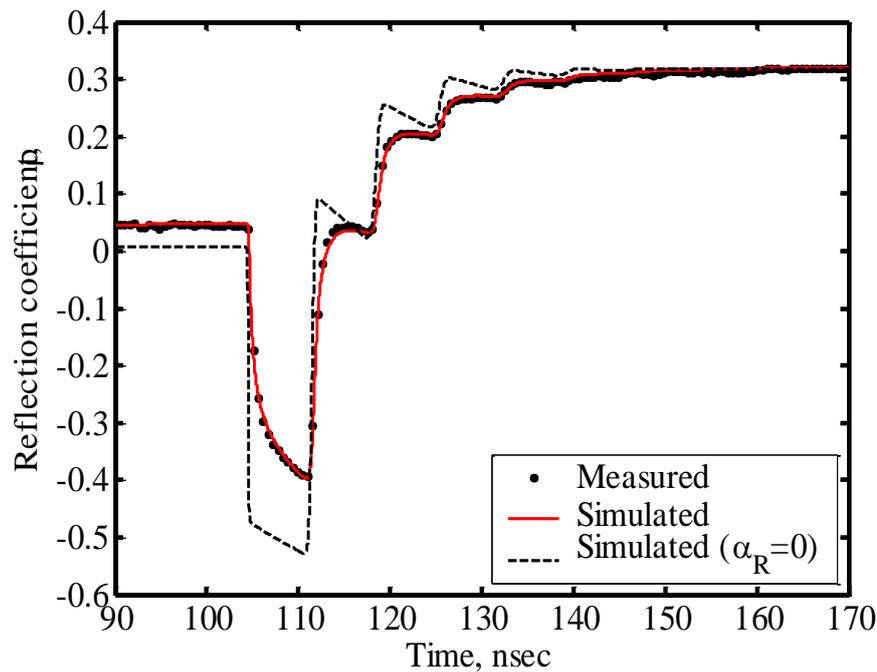


圖 4.1 TDR 在水中模擬波形與量測波形比較

4.1.2 TDR 滲漏監測模型資料判釋與適用性評估

滲漏反射訊號的產生，類似 TDR 界面型監測方法，因滲漏造成介質性質改變。本節將以介面形式為例，展示時域反射波傳模型之滲漏監測資料判釋。在介面形式應用中，填充材料介電度可能會沿著傳輸線變化，介面形式所關心的是何處介電性質開始改變(如滲漏造成回填材-受污染之環境界面所構成污染物污染位置)。一般而言，以時域反射波傳模型為基礎的反算是能夠同時決定界面位置與介電特性，圖 4.2 顯示自來水滲漏監測室內實驗示意圖，該感應元件為附有吊線之 P3-500 纜線(10m)，並連接 CFD-200(50Ω)之延長線(1m)。

傳統上原始環境與受污染界面藉由差異分析法(Difference analysis method)定位，以反射係數劇烈變化之位置為界面反射位置，當纜線長度增加，反射波形將因為纜線電阻而平滑化，使得差異分析法無法精確決定滲漏位置；又當污染物為低介電度或與原始環境之接電度相近時，滲漏發生時介電度變化極小，利用差異分析也無法精確監測滲漏位置。因此藉由時域反射波傳模型進行模擬，評估現有纜線之限制。



透過實驗資料推得知感應元件參數($Z_{ps}, \epsilon_{rs}^*, \alpha_{Rs}$)，以波傳模型反算量測波形，可以獲得精確滲漏位置。感測導波器分為三部分，一部份內填材料為細砂，中間為自來水滲漏段，末端為乾細砂。以全波形模擬能力，是可以反算同時定義滲漏位置與 $\epsilon_{rw}^*(f)$ ，在此範例中，監測系統分為四段均勻傳輸線，分別代表延長線、乾細砂段、自來水滲漏段及乾細砂段(見圖 4.2)。

傳統資料判釋方法受到幾個因素影響，如介電頻散、多重反射及纜線電阻。而本研究提出之時域反射波傳模型則可以有效改善上述各種因素之影響，將以長距離污染物滲漏模擬與多點滲漏模擬評估 TDR 滲漏監測模型之適用性。

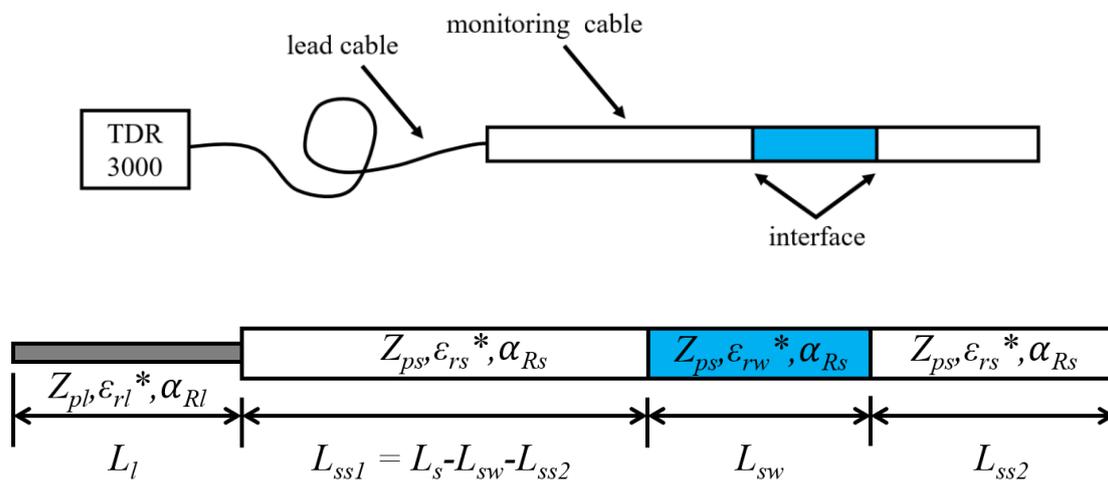


圖 4.2 自來水滲漏監測室內實驗示意圖與對應多段傳輸線模型



4.1.2.1 長距離污染物滲漏模擬

長距離滲漏模擬監測之滲漏物分兩種，自來水與 92 無鉛汽油，首先以實驗資料在感應元件長度 10 米，資料收錄點數間隔(dt)為 5 皮秒 (picosecond, ps)之滲漏監測波形，並利用試誤法決定 TDR 滲漏監測波傳模擬波形之參數($Z_p, \epsilon_r^*, \alpha_R$)。欲模擬更長距離之滲漏波形，僅需變更長度(L)即可呈現模擬滲漏情形之波形。

圖 4.3 與圖 4.4 分別為附有吊線之 P3-500 纜線長度 10 米，在乾砂環境中自來水與 92 無鉛汽油滲漏之量測與模擬波形，利用實驗量測資料進行滲漏監測波傳模型參數之標定，後續再利用得到之參數模擬 20、50、100 米等更長之距離。

自來水有較高介電度 80，汽油介電度甚低約 2-3，因此在 TDR 滲漏監測上，汽油滲漏後介電度差異不大，較不易監測滲漏之發生，且感應元件之絕緣材周圍的導電度仍可能造成高頻訊號的衰減，造成空間解析度與感應距離的限制。圖 4.5 至圖 4.12 為利用 TDR 滲漏監測波傳模擬模式進行模擬與差異分析法分析之長距離自來水與汽油滲漏之情形，綜合比較如圖 4.13，附有吊線之 P3-500 纜線在自來水滲漏監測可達 100 米以上；在汽油滲漏監測當長度達 100 米時，則無法監測滲漏之發生位置，因汽油介電度低，與周圍環境(細砂)之介電度差異不大，導致反射係數差值($\Delta\rho$)不明顯，又感應元件會隨距離增加造成空間解析度與感應強度降低，因此在監測汽油滲漏會有其距離限制。

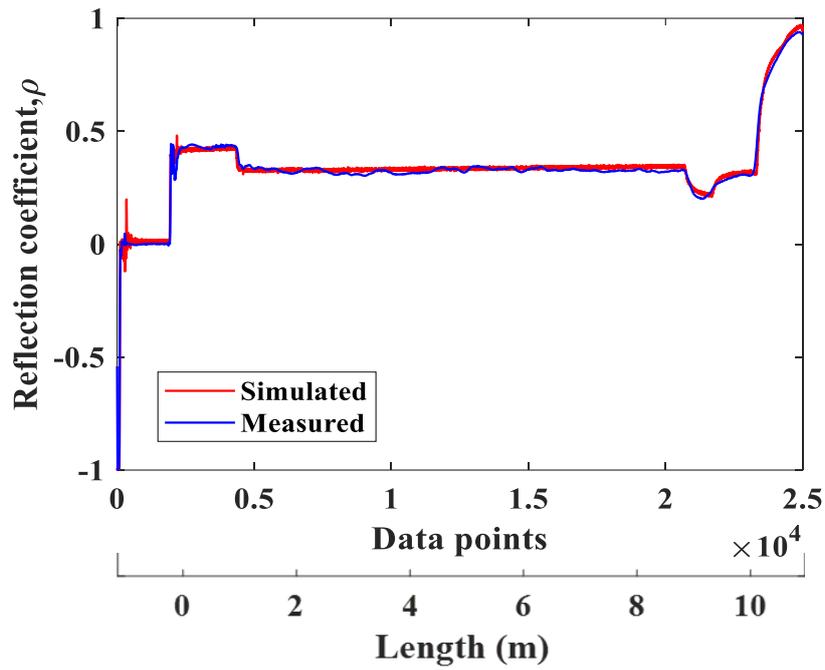


圖 4.3 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏量測結果

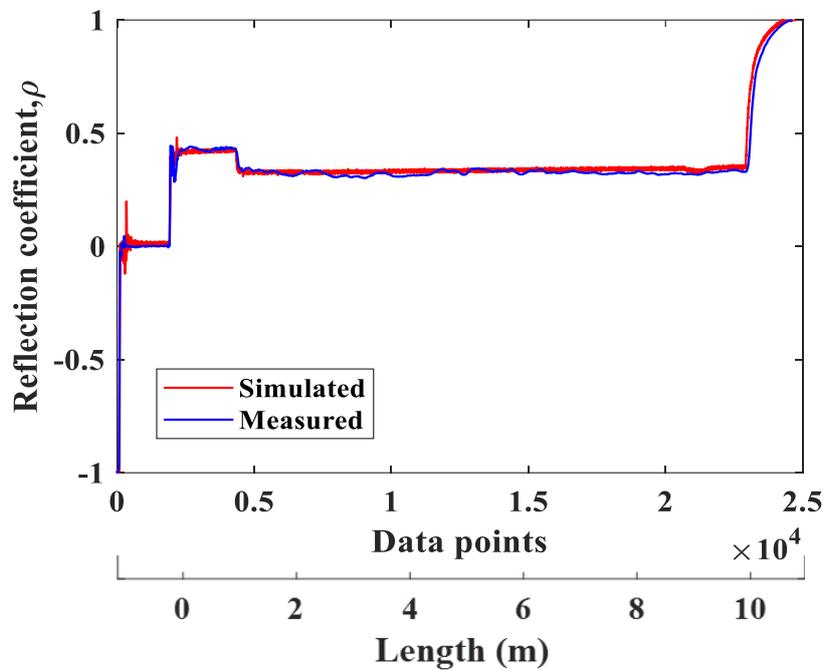


圖 4.4 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏量測結果



第四章 研究結果與討論

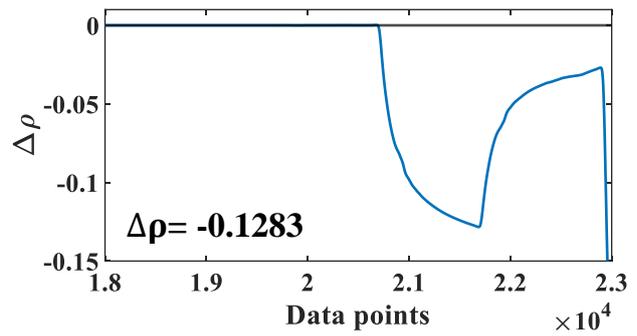
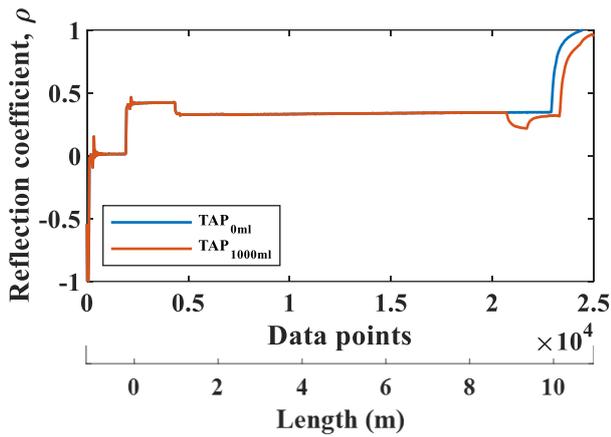


圖 4.5 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果

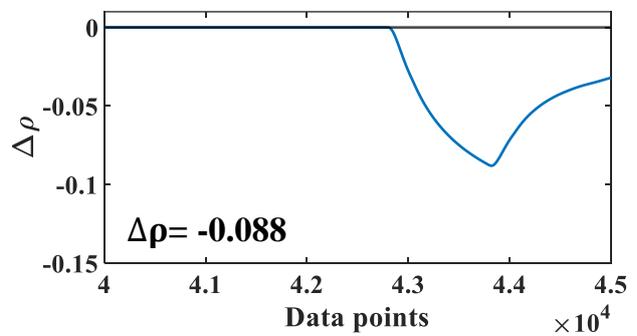
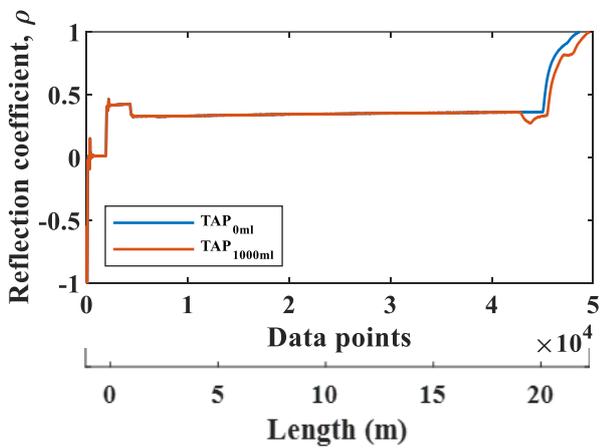


圖 4.6 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果

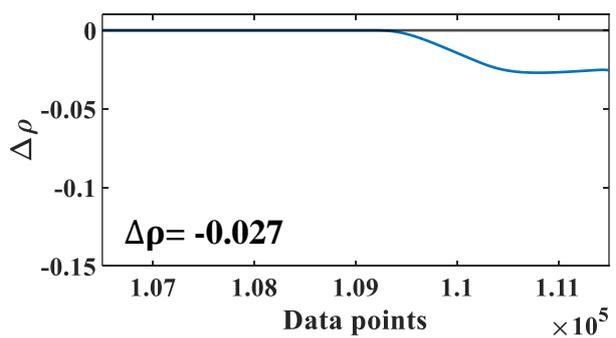
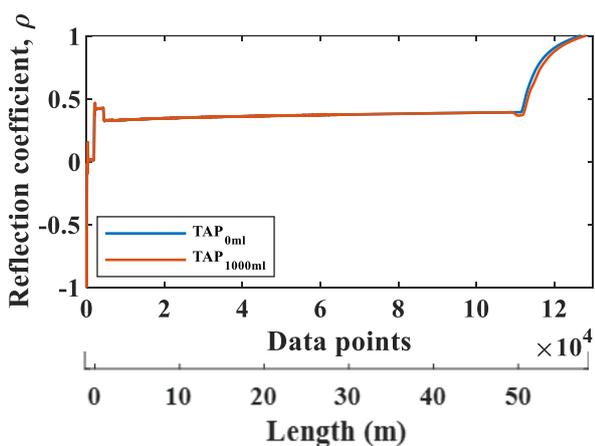


圖 4.7 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果



第四章 研究結果與討論

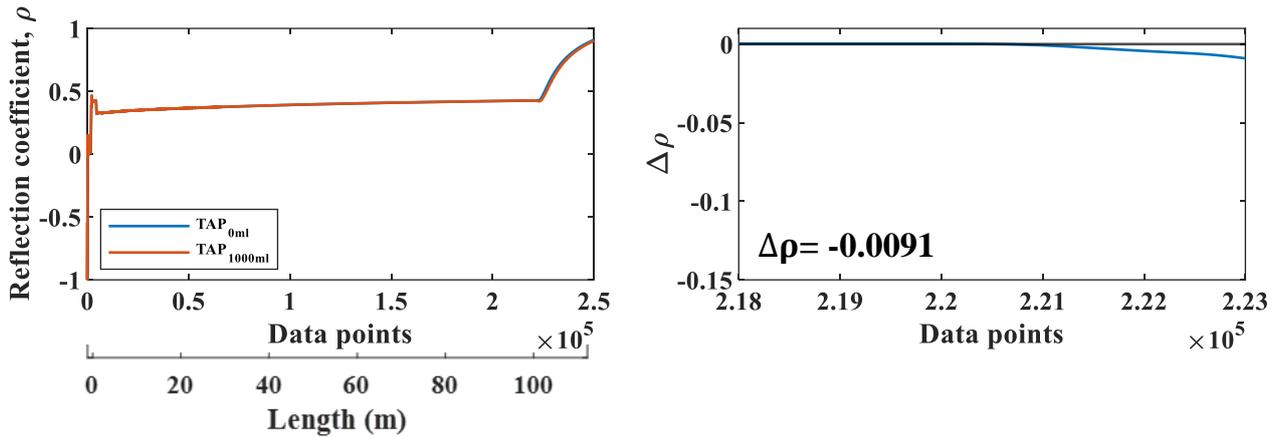


圖 4.8 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線單點自來水滲漏結果

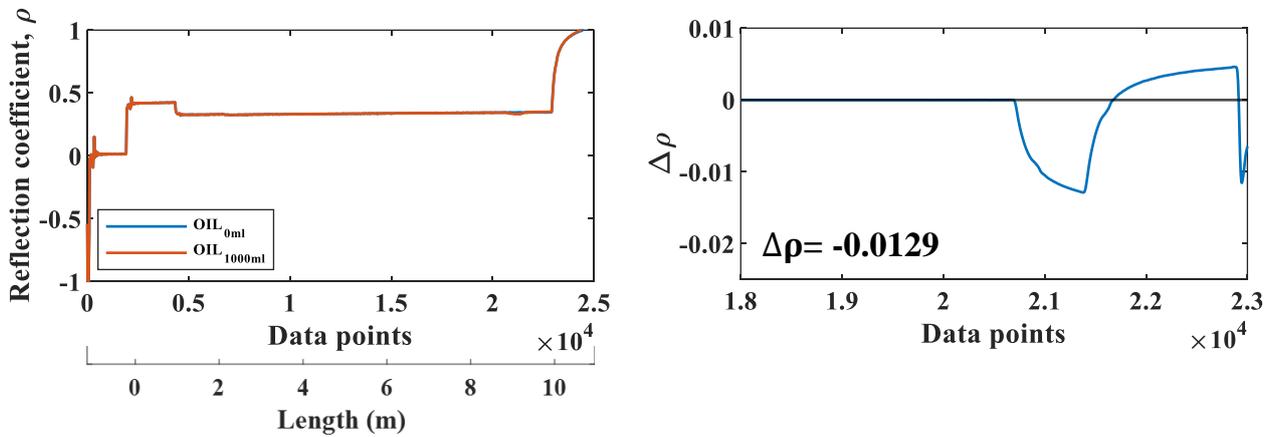


圖 4.9 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果

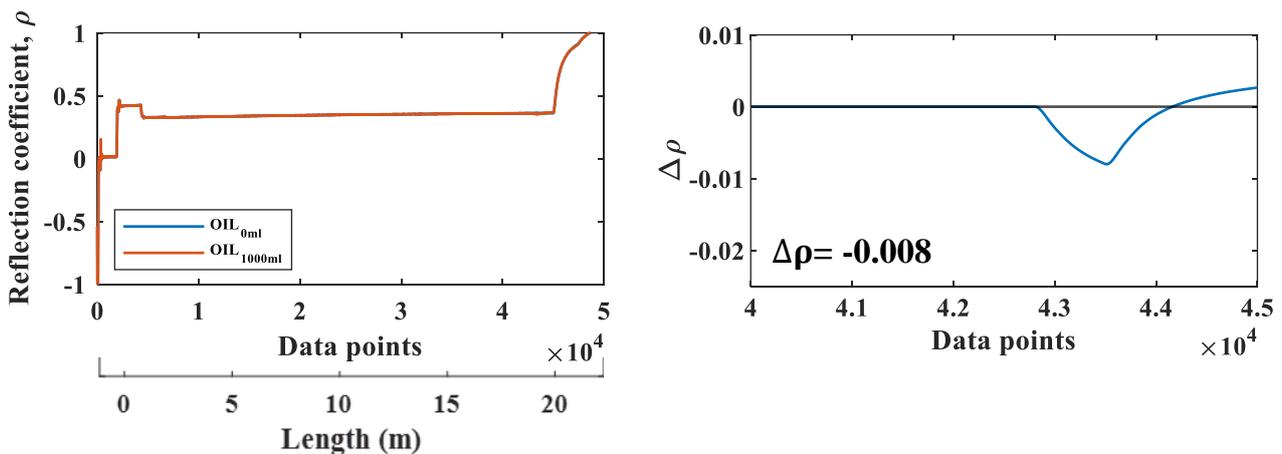


圖 4.10 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果



第四章 研究結果與討論

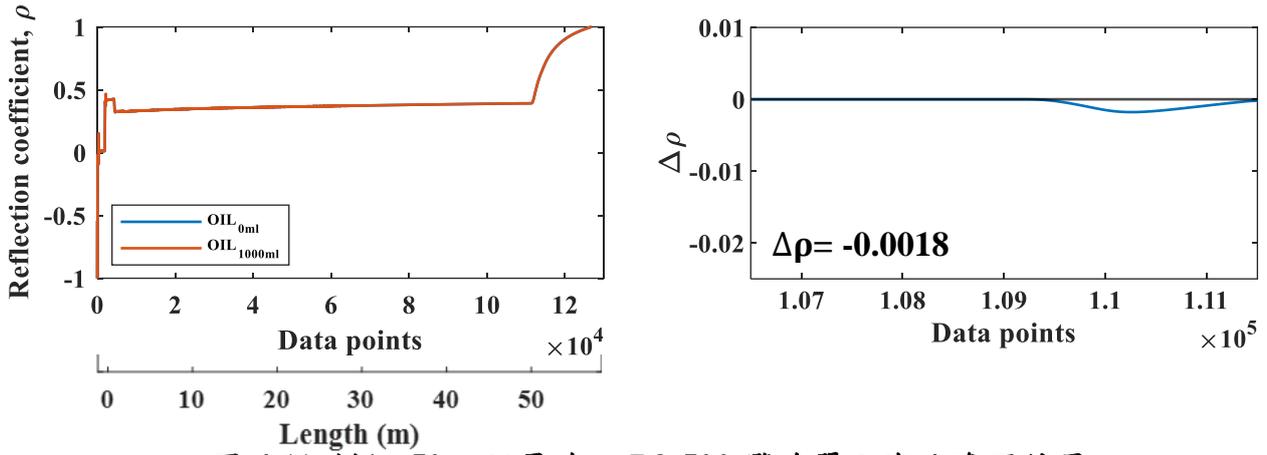


圖 4.11 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果

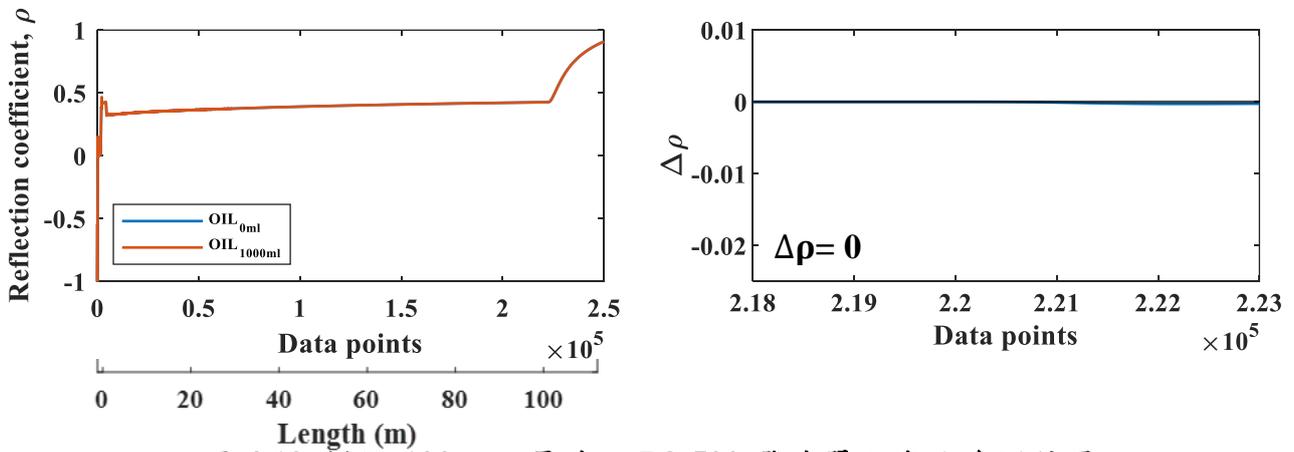


圖 4.12 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線單點汽油滲漏結果

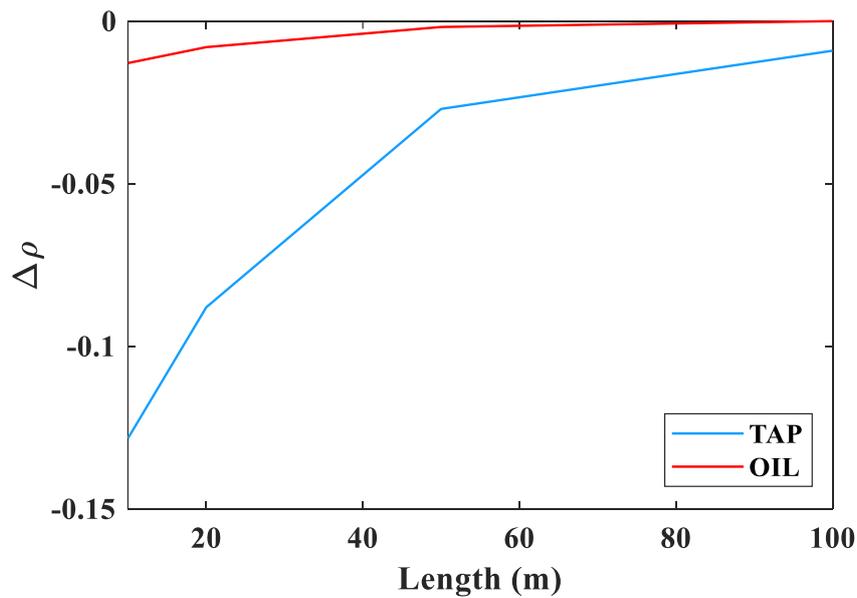


圖 4.13 附吊線之 P3-500 纜線模擬單點滲漏比較結果



4.1.2.2 多點污染物滲漏模擬

多點滲漏模擬監測之滲漏物一樣分為自來水與 92 無鉛汽油，首先以實驗資料在感應元件長度 10 米、資料收錄點數間隔(dt)為 5 皮秒(picosecond, ps)之滲漏監測波形，並利用試誤法決定 TDR 滲漏監測波傳模擬波形之參數($Z_p, \epsilon_r^*, \alpha_R$)。欲模擬更長距離之多點滲漏波形，僅需變更長度(L)即可呈現模擬多點滲漏情形之波形。

圖 4.14 與圖 4.15 分別為附有吊線之 P3-500 纜線長度 10 米，在乾砂環境中自來水與 92 無鉛汽油多點滲漏之量測與模擬波形，利用實驗量測資料進行滲漏監測波傳模型參數之標定，後續再利用得到之參數模擬 20、50、100 米等更長之距離。

圖 4.16 至圖 4.23 為模擬自來水與汽油多點滲漏之不同距離情形，當發生多點滲漏時，距離監測點越遠之滲漏位置，會受距離與纜線阻抗影響，導致訊號強度降低與頻散現象發生。由圖 2.24 模擬分析比較評估，當自來水多點滲漏發生時，滲漏點距離監測位置之遠近，造成反射係數差值($\Delta\rho$)變化相當明顯；而汽油多點滲漏位置遠近造成反射係數差值($\Delta\rho$)變化較小，評估此結果與滲漏物之介電度與導電度有關，自來水介電度高，又具有良好導電度，因此訊號在傳遞過程中受到的影響較大。

圖 4.19 與圖 4.23 為模擬附有吊線之 P3-500 纜線長度 100 米，在乾砂環境下自來水與汽油多點滲漏之情形，從 TDR 滲漏監測波傳模型之模擬結果得出，TDR3000 在資料收錄點數間隔(dt)為 5 皮秒(picosecond, ps)時，能夠監測自來水多點滲漏達 100 米以上，監測汽油多點滲漏監測，當滲漏點達 100 米時，反射係數差值($\Delta\rho$)變化已微乎其微，因此汽油滲漏監測距離限制為 100 米以下。

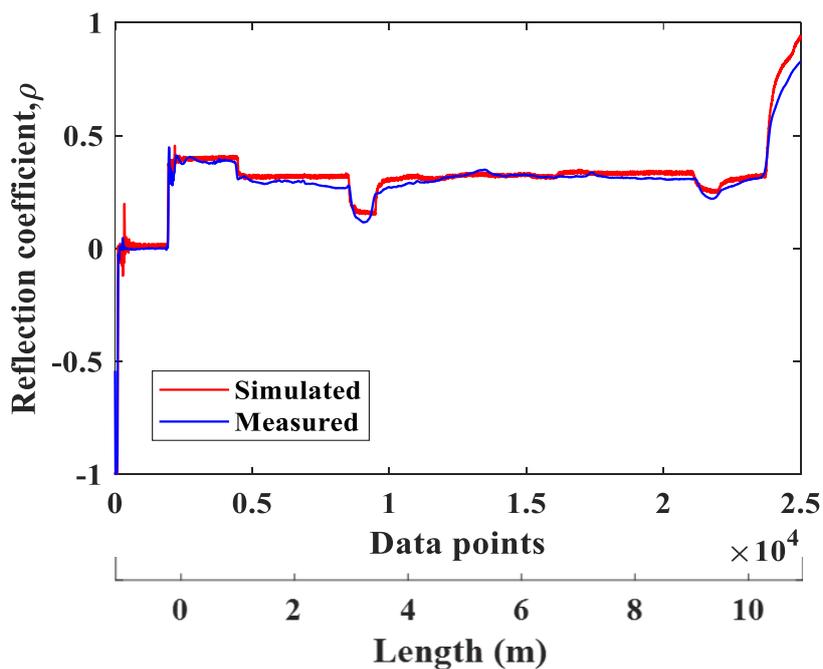


圖 4.14 模擬 10m 附吊線之 P3-500 自來水多點滲漏之量測結果

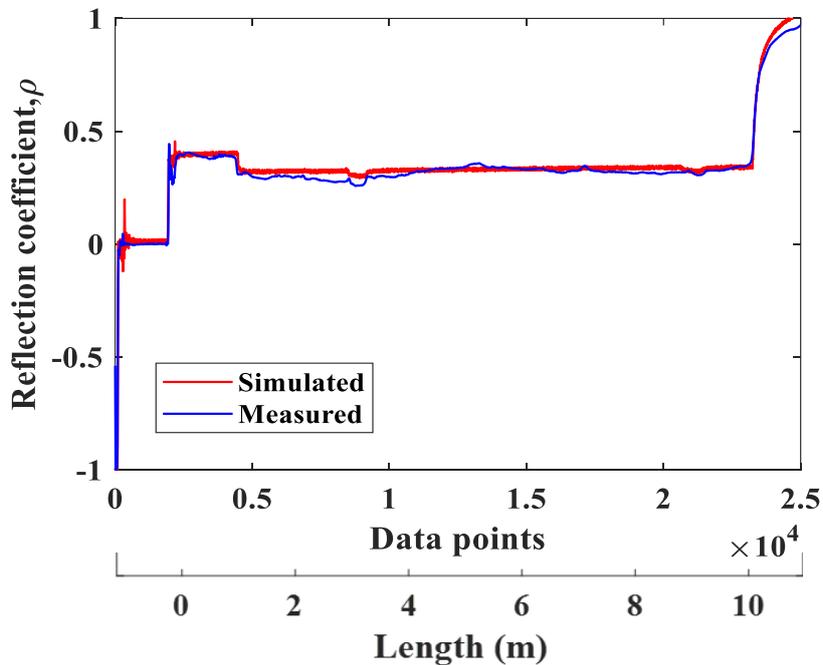


圖 4.15 模擬 10m 附吊線之 P3-500 汽油多點滲漏之量測結果



第四章 研究結果與討論

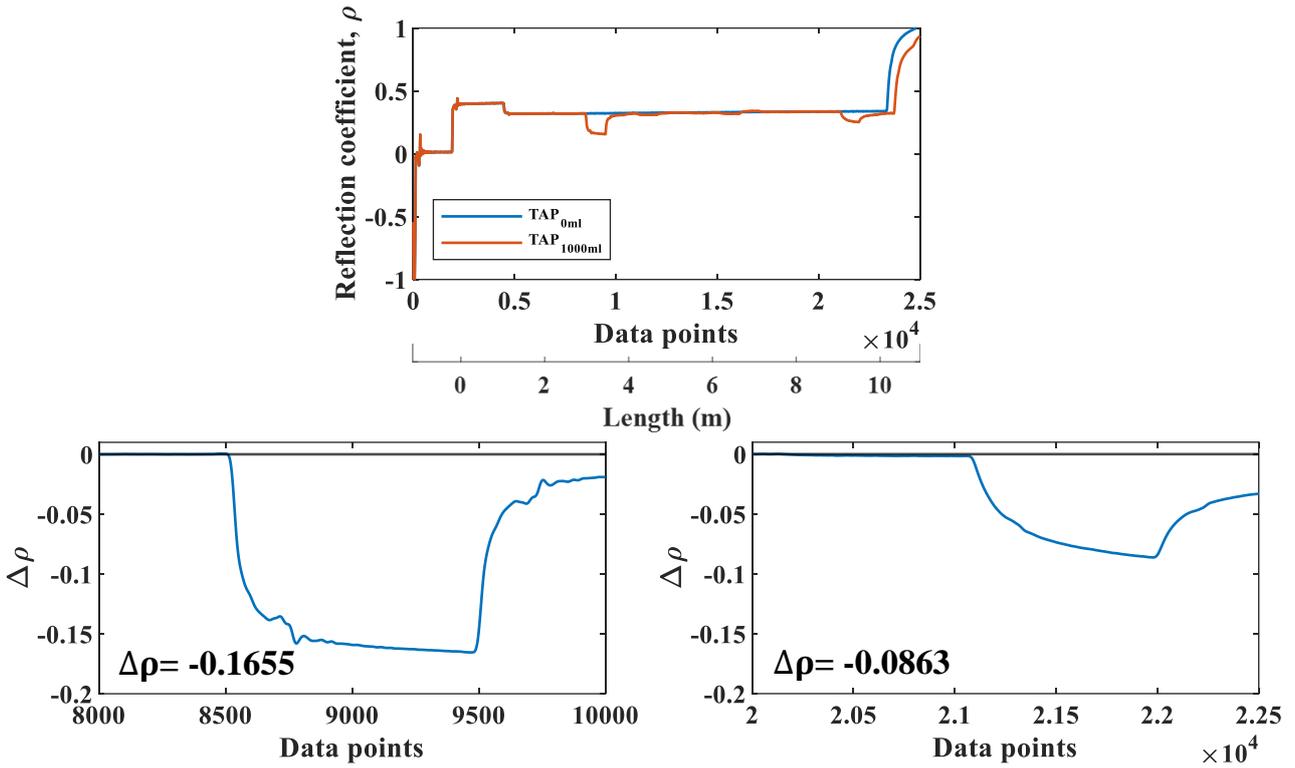


圖 4.16 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)

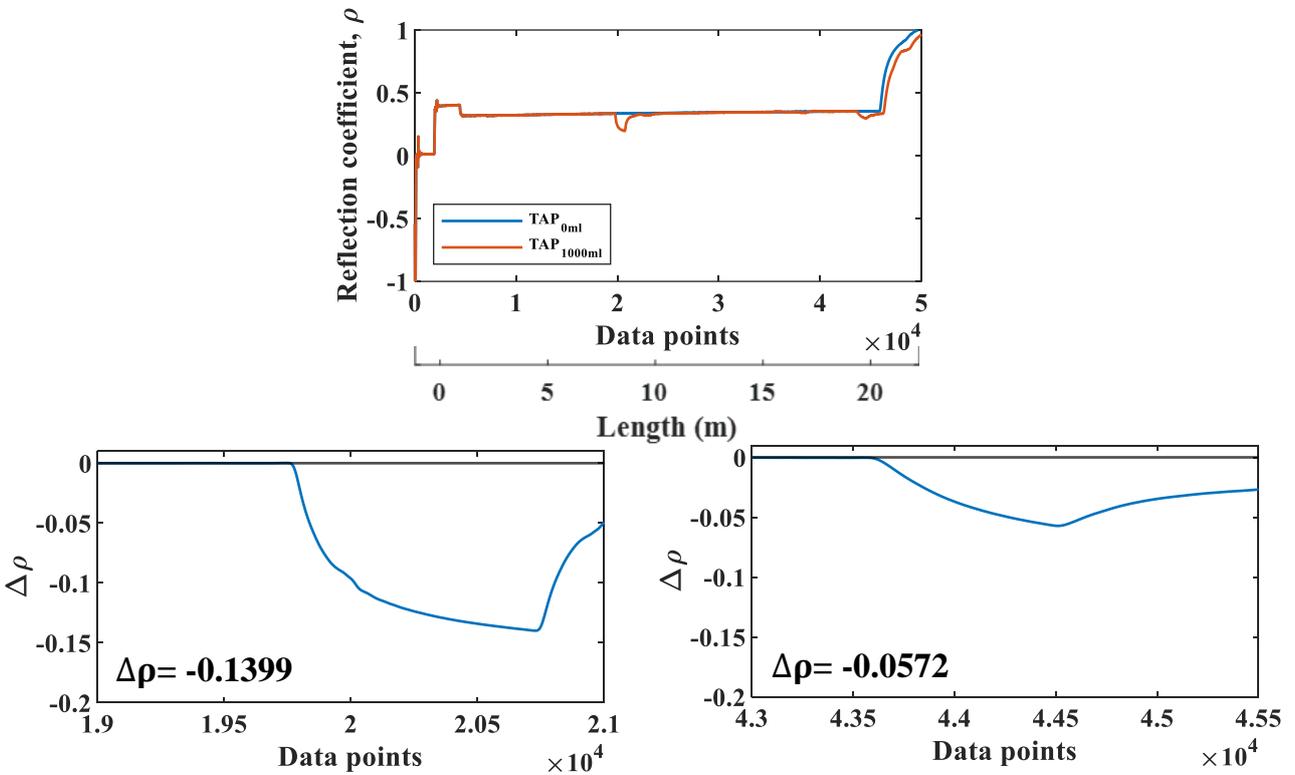


圖 4.17 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)



第四章 研究結果與討論

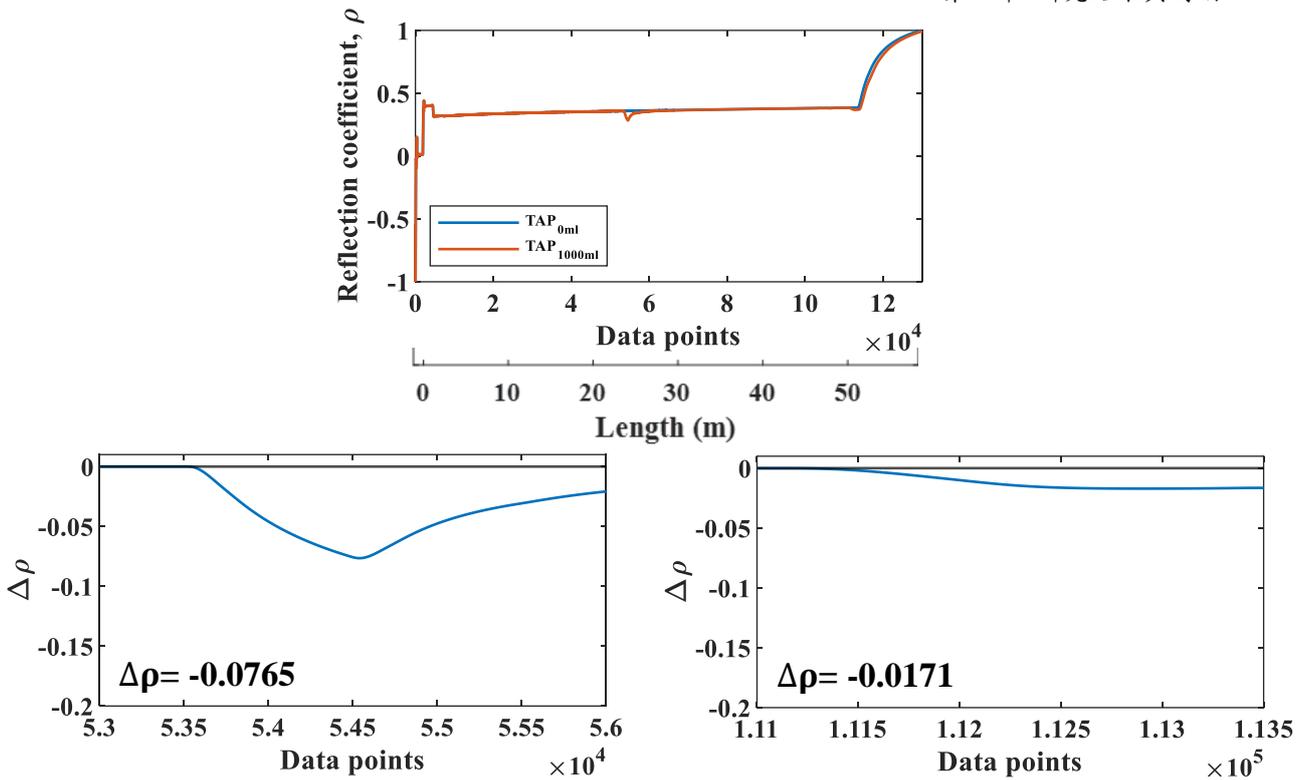


圖 4.18 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)

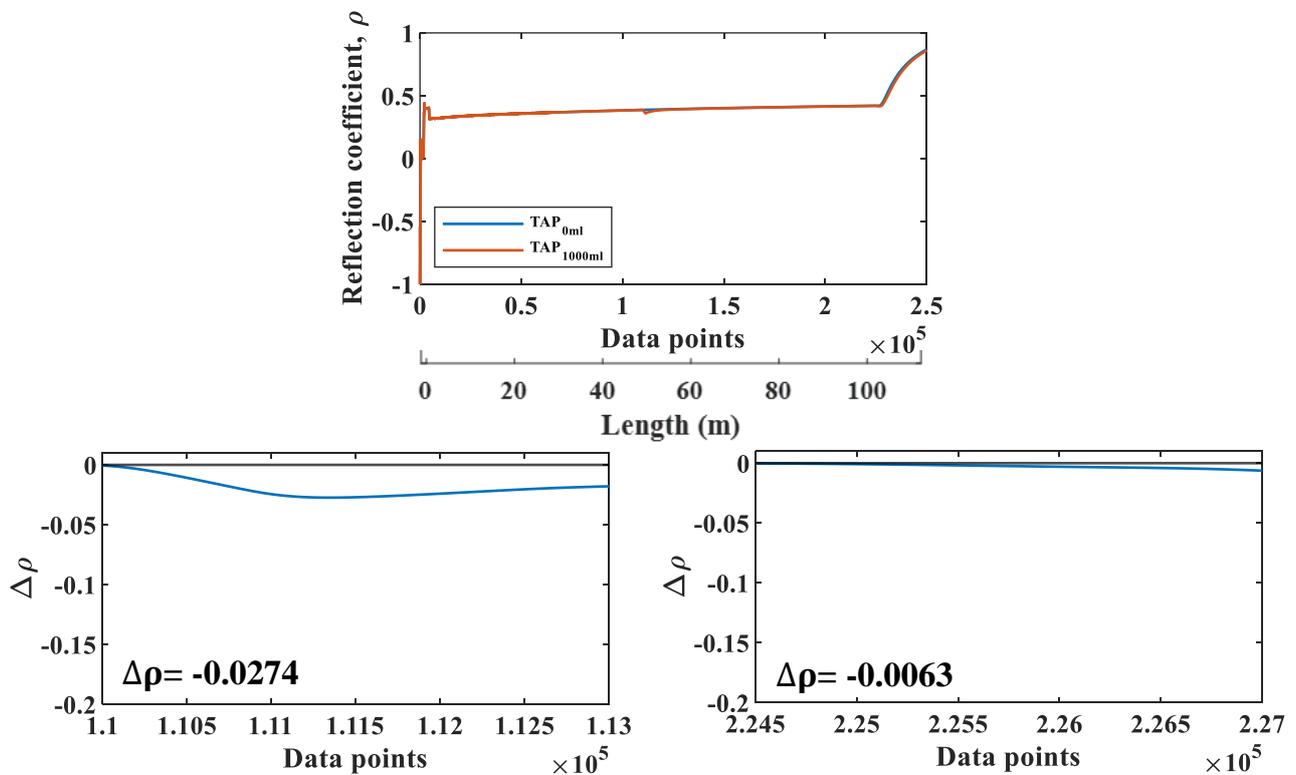


圖 4.19 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線多點自來水滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)



第四章 研究結果與討論

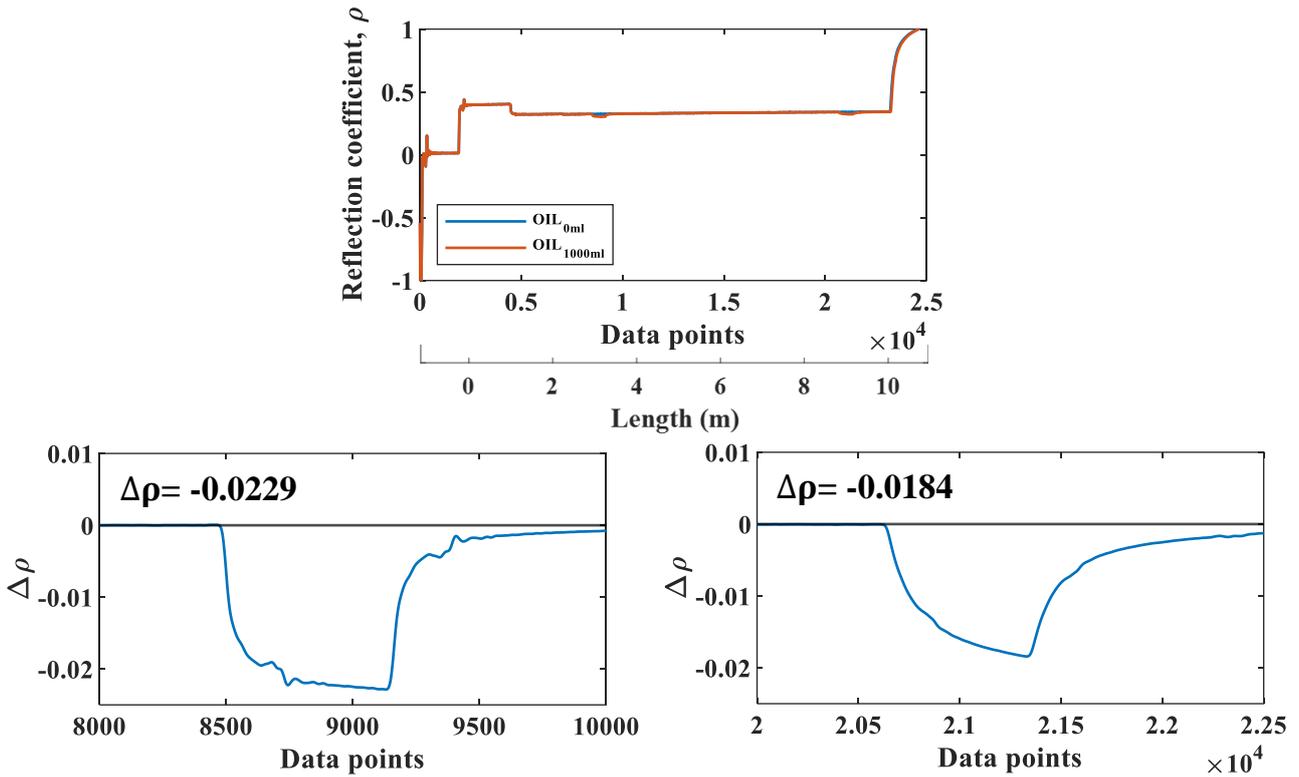


圖 4.20 模擬 10m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)

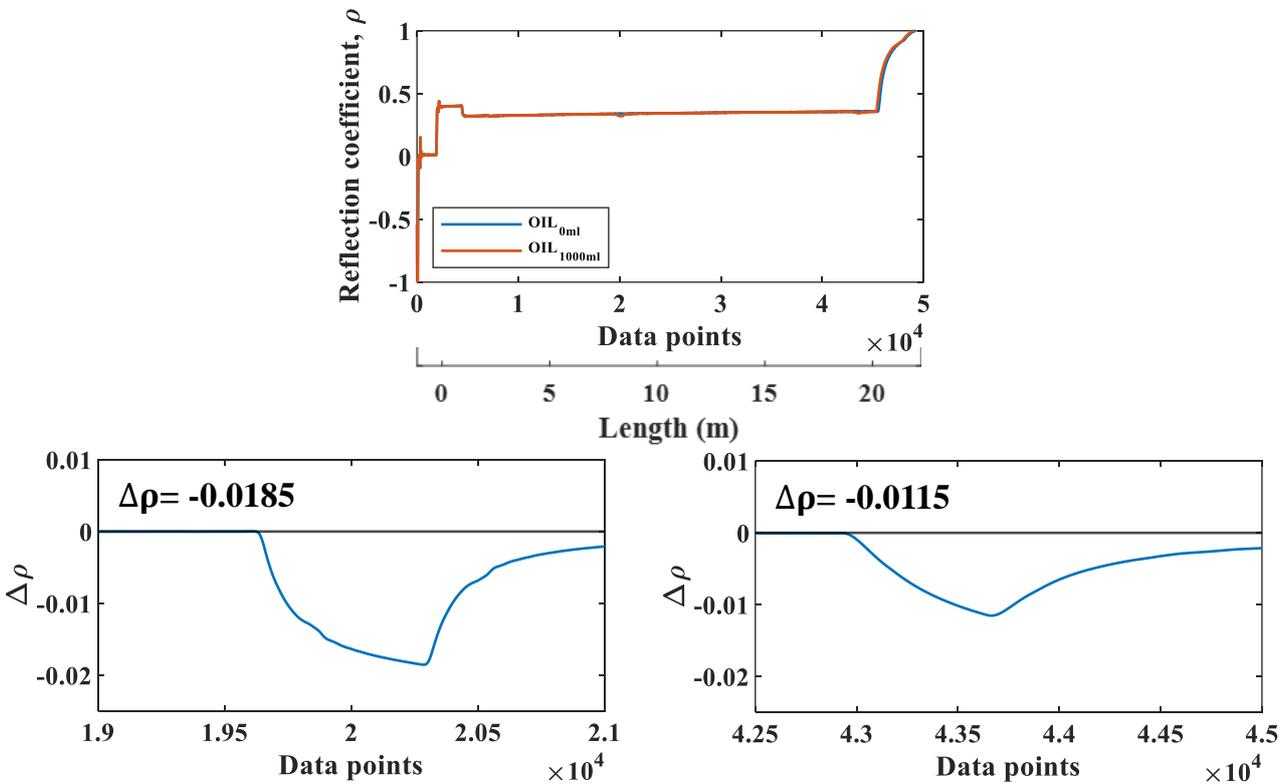


圖 4.21 模擬 20m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)

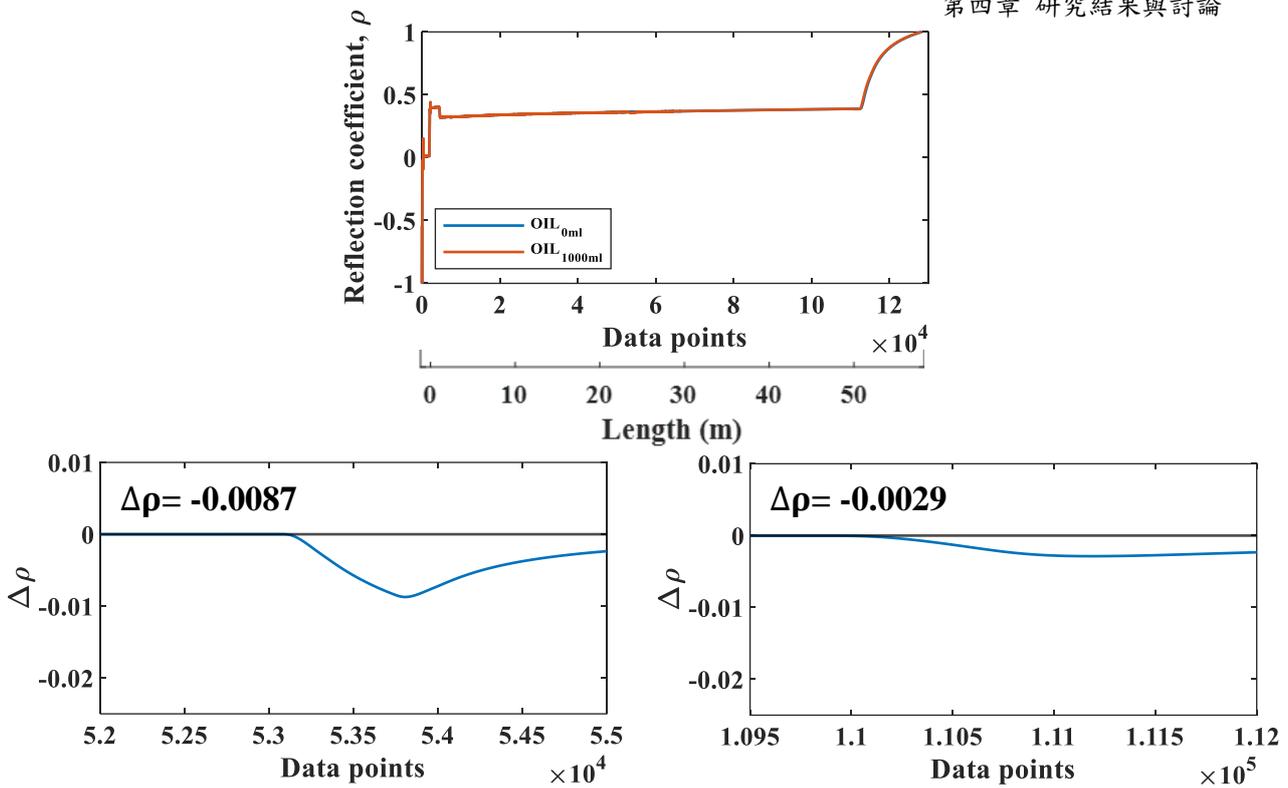


圖 4.22 模擬 50m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)

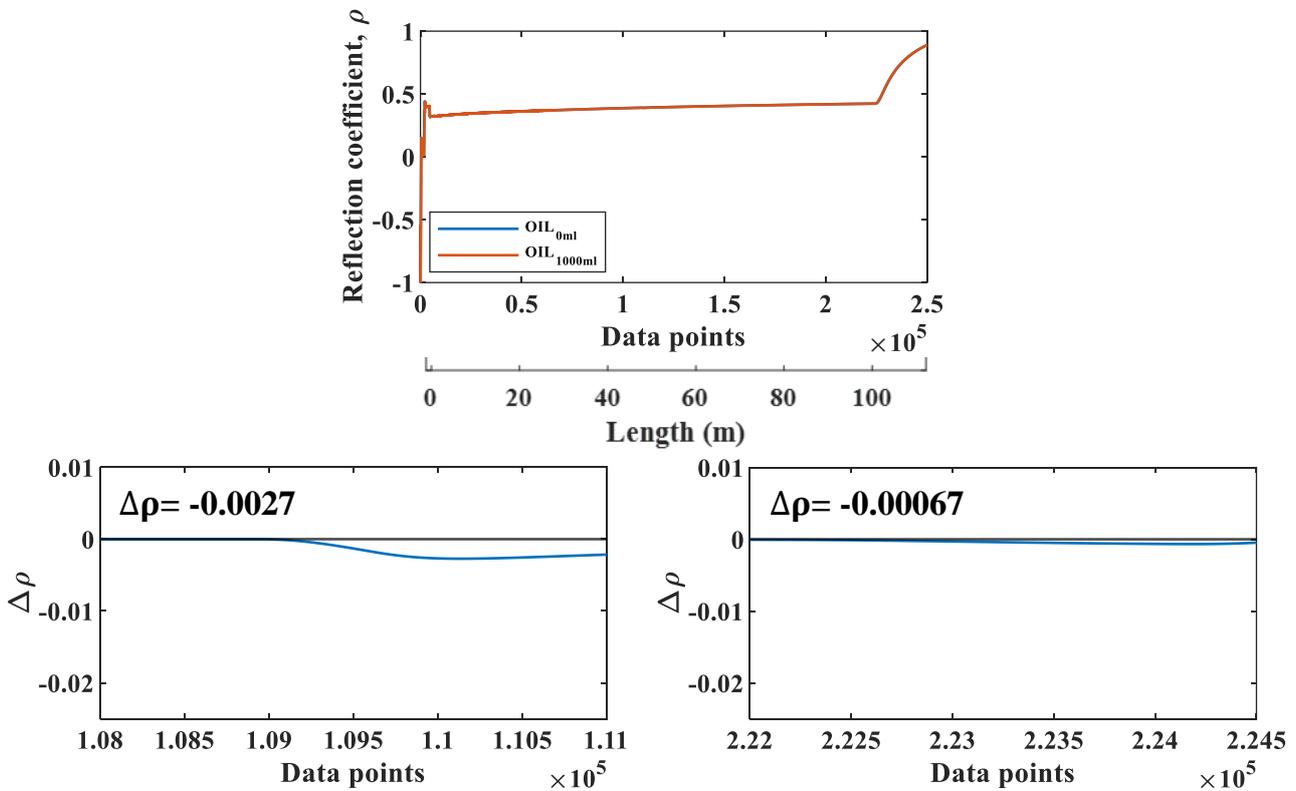


圖 4.23 模擬 100m 附吊線之 P3-500 纜線多點汽油滲漏結果

(上:原始波形；下左:滲漏點 1 之 $\Delta\rho$ 值；下右:滲漏點 2 之 $\Delta\rho$ 值)



第四章 研究結果與討論

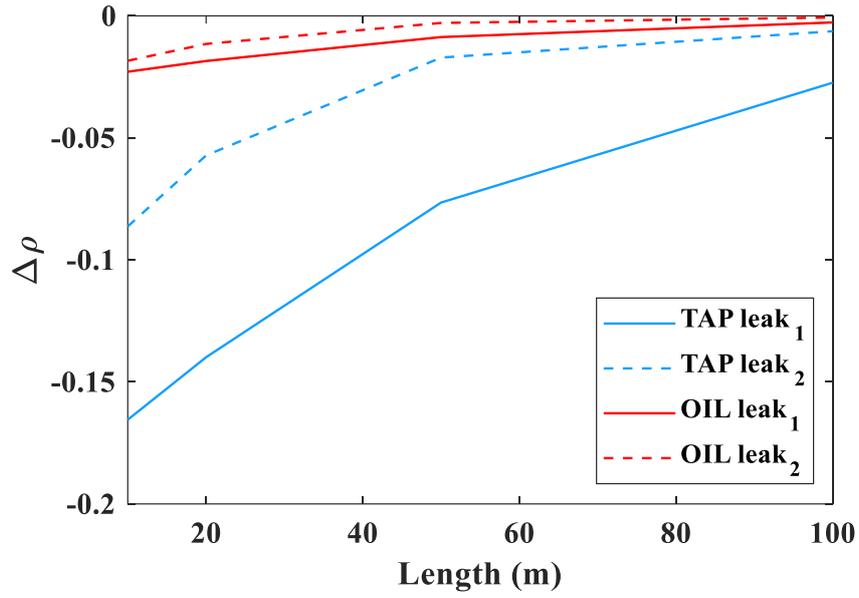


圖 4.24 附吊線之 P3-500 纜線模擬多點點滲漏比較結果



4.2 不同感應元件之準備或研製

感應元件依其兩導體的配置不同有不同的型態，感應纜線型態不同，其量測靈敏度與受環境電磁雜訊的影響不同。本研究主要以平行雙導體型態做滲漏監測實驗，準備之感應元件有四種：附有吊線之 P3-500 纜線、AWG16-2P 線材、AWG20-4P 線材與 AGW-Gold 纜線。

4.2.1 感應元件靈敏度評估

感應元件滲漏監測之靈敏度主要受到以下因素影響：(1)感應元件種類，包括兩導體內徑、絕緣材厚度與兩導體間距，當兩導體內徑越大、絕緣材厚度越小、導體間距愈大，感應元件之靈敏度越佳。(2)滲漏物之介電度，當滲漏物之介電度低與周圍環境介電度相近時，感應元件之靈敏度會相較於滲漏物介電度高時差。

利用滲漏監測實驗收錄之波形末端開路(open end)段作走時分析，當走時差越大代表在此滲漏環境下感應元件之靈敏度越佳。圖 4.25、4.26、4.27 分別為附有吊線之 P3-500 纜線、AWG16-2P 線材與 AWG20-4P 線材在乾砂中自來水與汽油滲漏環境下之靈敏度差異。自來水介電度約 80，在乾砂環境中滲漏時會有明顯的介電度差異，使感應元件之監測靈敏度佳；汽油介電度甚低約 2-3，因此在乾砂環境中，感應元件之監測靈敏度靈敏度較差。三種感應元件中又以附有吊線之 P3-500 纜線之滲漏監測靈敏度最佳，因該纜線之內導體直徑較大且兩導體間距也較大。故將此纜線與 AGW-Gold 纜線在乾七厘石環境中做感應元件之滲漏監測靈敏度評估。

在乾七厘石中汽油滲漏之環境下，評估附有吊線之 P3-500 纜線與 AGW-Gold 纜線滲漏監測之靈敏度，從走時分析資料(圖 4.28)中，得出在汽油滲漏量皆為 800ml 時，附有吊線之 P3-500 纜線之靈敏度較 AGW-Gold 纜線佳。最終得出四種感應元件中附有吊線之 P3-500 纜線之靈敏度最佳。

實驗中發現附有吊線之 P3-500 纜線在接頭處波形會有跳動之雜訊，影響分析結果，因此在該纜線之接頭處焊接鐵絲(圖 4.29)，減少訊號雜訊之影響。



第四章 研究結果與討論

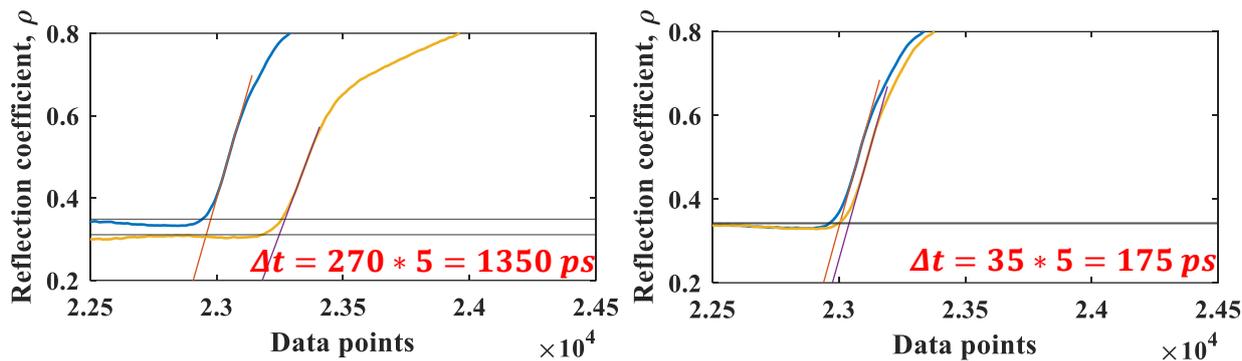


圖 4.25 附有吊線之 P3-500 纜線靈敏度

(左:自來水滲漏 1000ml ; 右:汽油滲漏 1500ml)

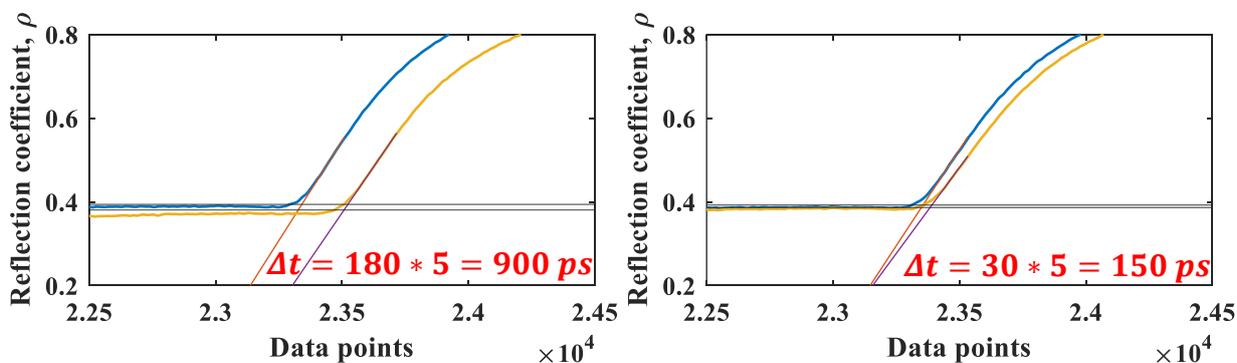


圖 4.26 AWG16-2P 線材靈敏度

(左:自來水滲漏 1000ml ; 右:汽油滲漏 1500ml)

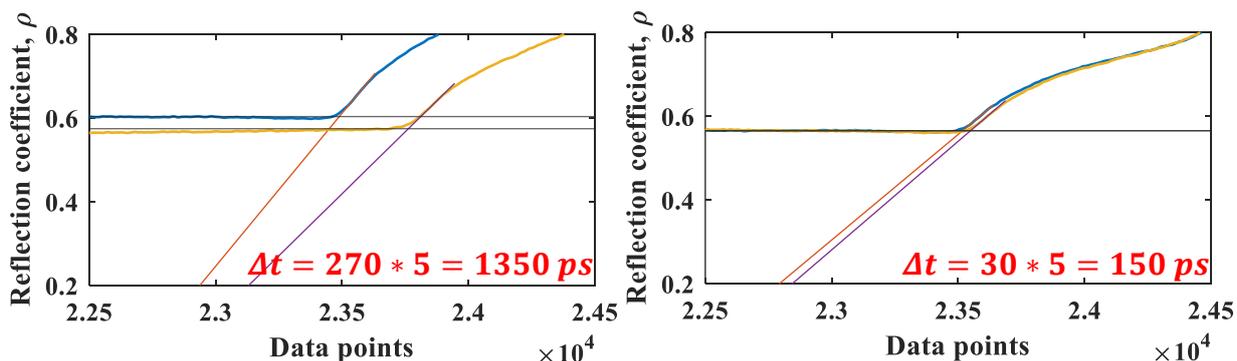


圖 4.27 AWG20-4P 線材靈敏度

(左:自來水滲漏 1000ml ; 右:汽油滲漏 1500ml)



第四章 研究結果與討論

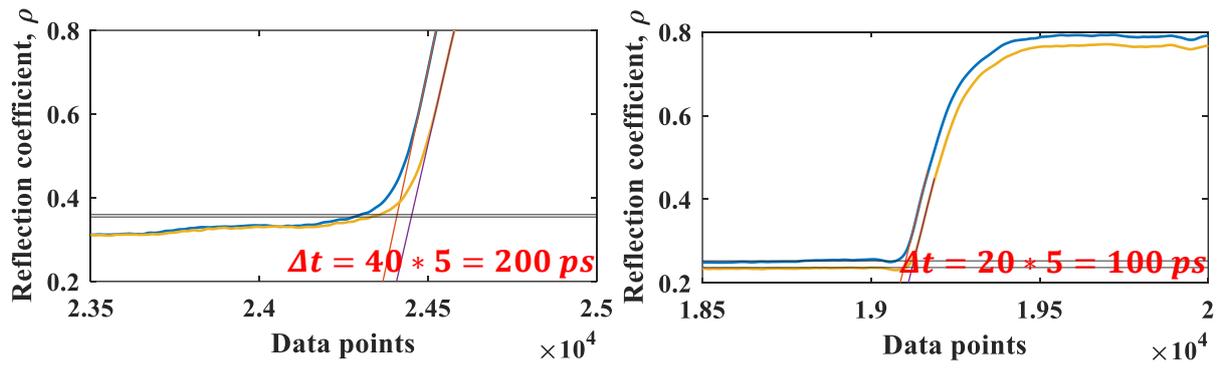


圖 4.28 乾七厘石中汽油滲漏 800ml 之線材靈敏度
(左:附有吊線之 P3-500 ; 右:AGW-Gold 纜線)



圖 4.29 附有吊線之 P3-500 纜線接頭處焊接鐵絲



4.3 環境影響因子與量測限制之實驗評估

感應元件(亦即傳輸線或導波器)內導體材質不同，纜線阻抗造成之影響也不同，當感應元件周遭材料具有導電度時，仍會有高頻的衰減，使得訊號強度與空間解析度隨距離增加而降低。又埋設於地下之感應元件，除了偵測滲漏，亦可能受到土體含水量變化的影響，而回填材孔隙大小也會對滲漏監測之結果有影響。因此以下小節將以長距離滲漏實驗與多點滲漏實驗之結果，詳細評估 TDR 滲漏監測之限制。

4.3.1 長距離滲漏監測實驗

長距離滲漏監測實驗主要利用差異分析法評估感應元件滲漏監測之波形，其中搭配資料筆數 12 筆做反射係數差值($\Delta\rho$)與滲漏量之關係圖，進行各感應元件在 TDR 滲漏監測之比較與評估。

4.3.1.1 感應元件阻抗影響

特徵阻抗是感應元件介質材料等值介電度與傳輸線幾何形狀之函數。若傳輸線內存在特徵阻抗不連續，電磁波則會在該不連續介面處產生反射訊號(reflection)。本小節評估之感應元件為:附有吊線之 P3-500 纜線、AWG16-2P 線材與 AWG20-4P 線材。

感應元件之品質與監測儀器皆會影響纜線阻抗，以上三種感應元件中，附有吊線之 P3-500 纜線品質(導波器電極為實芯線且直徑較大)較好，另外兩種線材之品質(導波器電極為多芯線且直徑較小)相比之下較差；監測之儀器皆為 TDR3000，上升時間(rise time)為 97 ps。從實驗資料圖 4.30、4.31、4.32 之左圖差異分析結果，得出附有吊線之 P3-500 纜線受纜線阻抗損耗(resistance lose)較低，使得在相同的滲漏環境下，該纜線監測滲漏效果較佳；而 AWG16-2P 線材與 AWG20-4P 線材受纜線阻抗損耗(resistance lose)較高，使得監測滲漏效果較差。圖 4.33、4.34、4.35 為感應元件監測汽油滲漏之資料，受汽油介電度低與環境之影響，相同感應元件監測汽油滲漏之位置較困難。

圖 4.36 與圖 4.37 為在乾細砂環境中自來水滲漏與汽油滲漏各感應元件監測之比較圖，三種感應元件中，以附有吊線之 P3-500 纜線監測滲漏效果最佳，其次為 AWG16-2P 線材，而 AWG20-4P 線材監測汽油滲漏時較不理想。



第四章 研究結果與討論

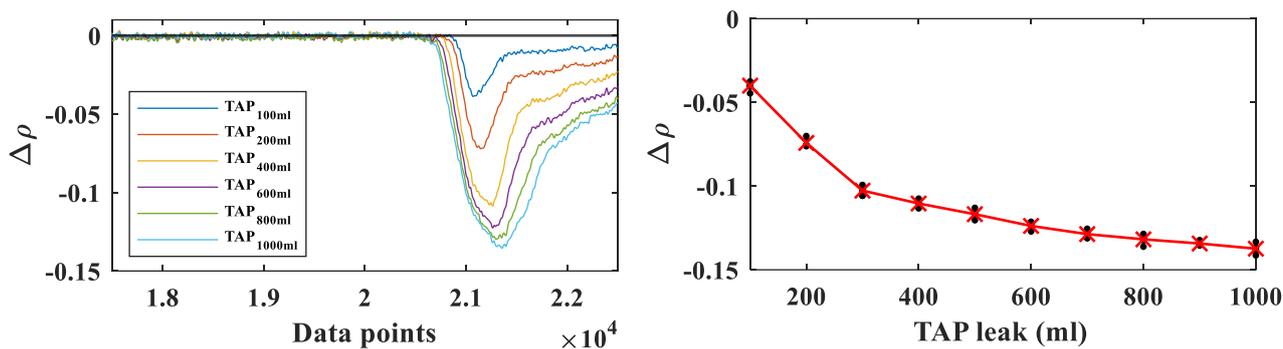


圖 4.30 附有吊線之 P3-500 纜線細砂中自來水滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

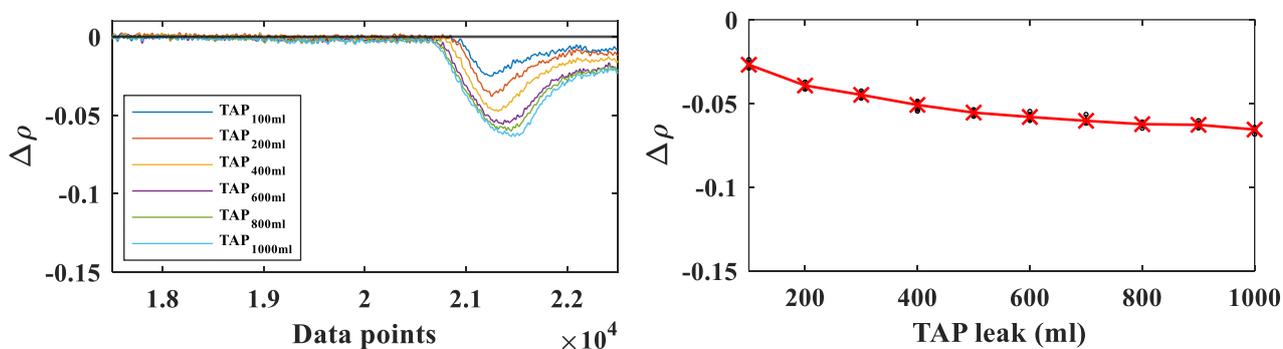


圖 4.31 AWG16-2P 線材細砂中自來水滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

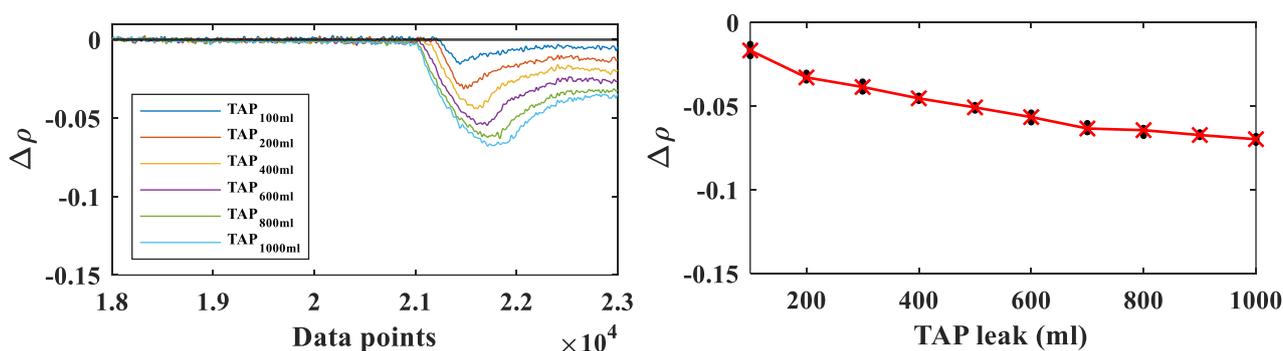


圖 4.32 AWG20-4P 線材細砂中自來水滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

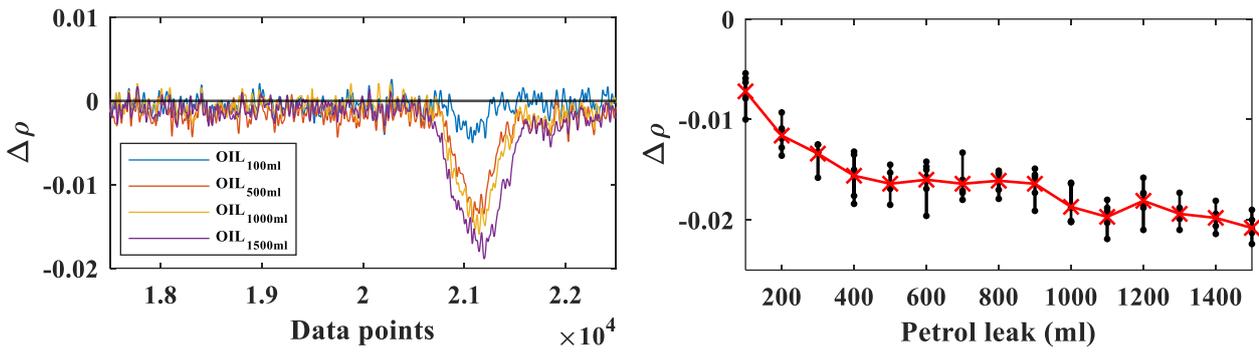


圖 4.33 附有吊線之 P3-500 纜線細砂中汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

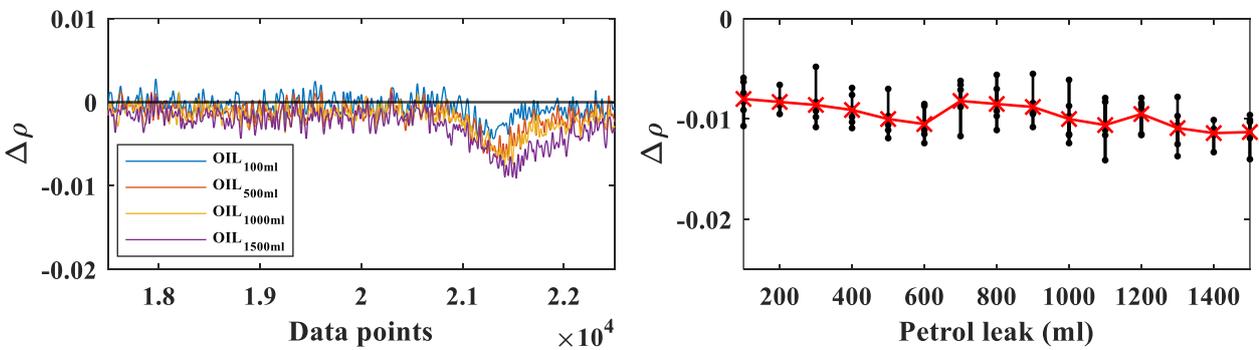


圖 4.34 AWG16-2P 線材細砂中汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

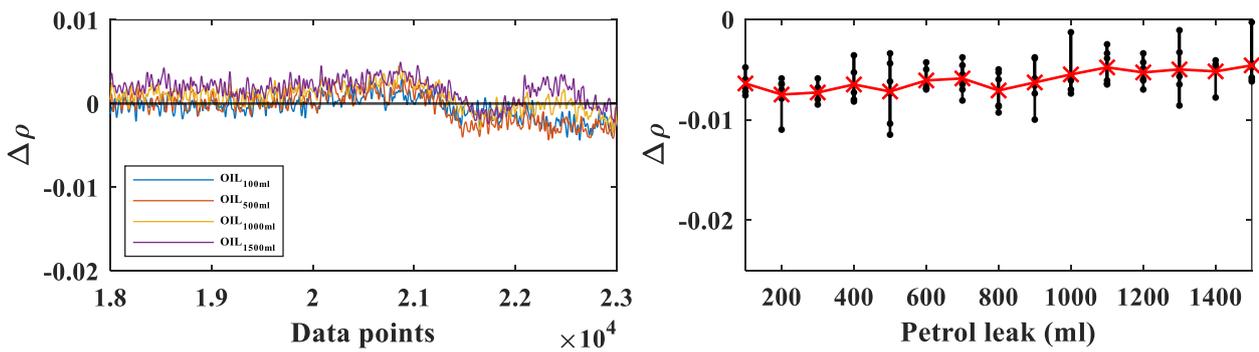


圖 4.35 AWG20-4P 線材細砂中汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)



第四章 研究結果與討論

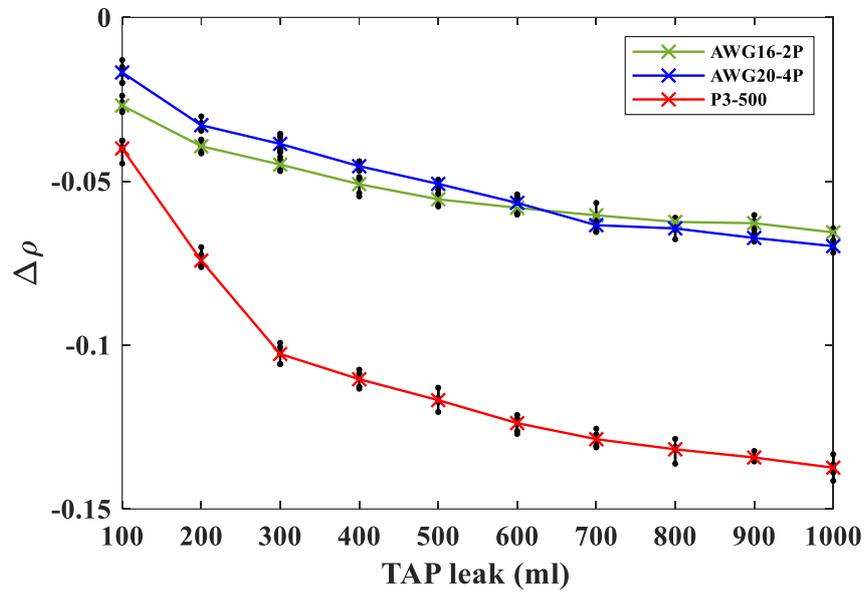


圖 4.36 細砂中自來水滲漏差異分析比較圖

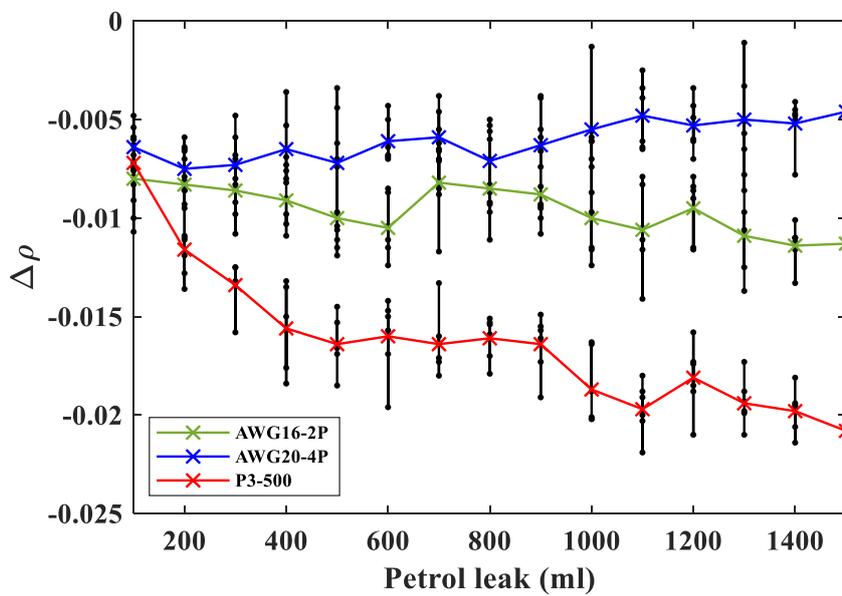


圖 4.37 細砂中汽油滲漏差異分析比較圖



4.3.1.2 環境影響因子評估

考慮現地實場施作地下儲槽與管線之滲漏監測時，須將感應元件埋設於地表下，此時地下環境除了受到回填材影響，也會因地表雨水滲入或其他因素影響滲漏監測之結果。又臺灣每年降雨量變化很大，而土壤含水率變化主要是受到季節降雨特性所影響，1~5月含水率相對較低，平均約10%左右；5月開始的梅雨季與相繼而來的颱風季節帶來的降雨使土壤含水率普遍偏高，約20~30%左右；冬季11~12月土壤含水率偏低，平均約10%左右。因此本研究實驗評估含水率約為10%左右，來模擬現地之環境變化，實驗利用含水率約10%之細砂當作回填材，監測92無鉛汽油滲漏之發生位置，評估之感應元件為附有吊線之P3-500、AWG16-2P線材與AWG20-4P線材。

圖4.38左圖有兩個峰值，因實驗過程中滲漏物擴散所造成的，但此結果並不影響實驗分析。從圖中附有吊線之P3-500纜線能夠利用差異分析精確監測滲漏發生之位置，但相較在乾細砂環境中，在含水率10%環境下，對汽油滲漏之監測還是有影響，反射係數差值($\Delta\rho$)變化較小。

圖4.39左圖AWG16-2P線材利用差異分析還能夠評估汽油滲漏位置，但圖4.40左圖AWG20-4P線材就無法評估滲漏之位置。因原始環境(含水率10%)與汽油滲漏時介電度差異不大，幾乎沒變化，因此造成無法監測汽油滲漏之位置。

圖4.41為三種感應元件在細砂含水率10%環境下，汽油滲漏監測之反射係數差值($\Delta\rho$)比較圖，其中附有吊線之P3-500纜線 $\Delta\rho$ 值隨汽油滲漏量增加遞減，代表該纜線監測較果較佳，另外兩種感應元件 $\Delta\rho$ 值並沒有隨汽油滲漏量增加而遞減，而是在固定區間中跳動，因此評估AWG16-2P線材與AWG20-4P線材無法在含水率10%之細砂環境中監測汽油滲漏之位置。



第四章 研究結果與討論

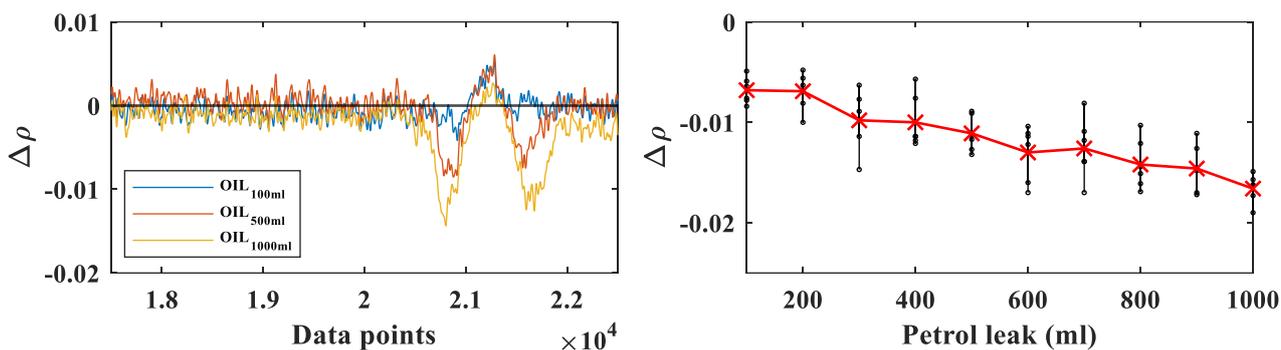


圖 4.38 附有吊線之 P3-500 纜線細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

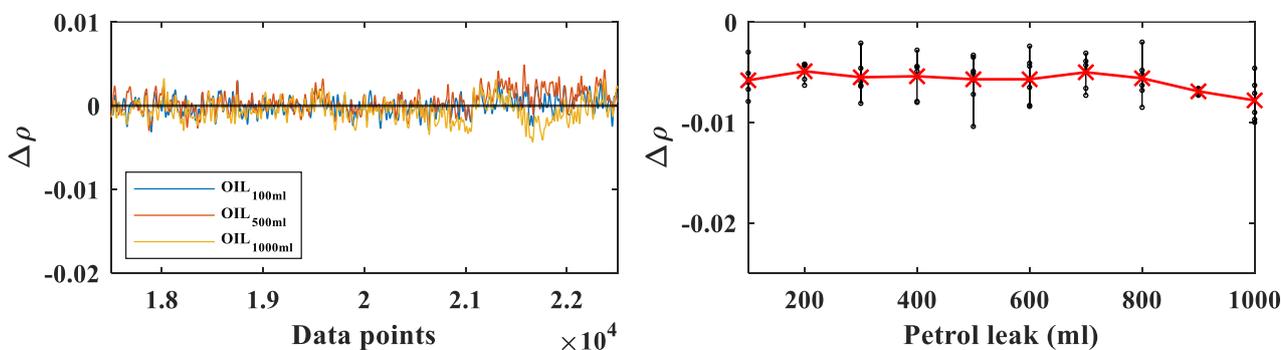


圖 4.39 AWG16-2P 線材細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

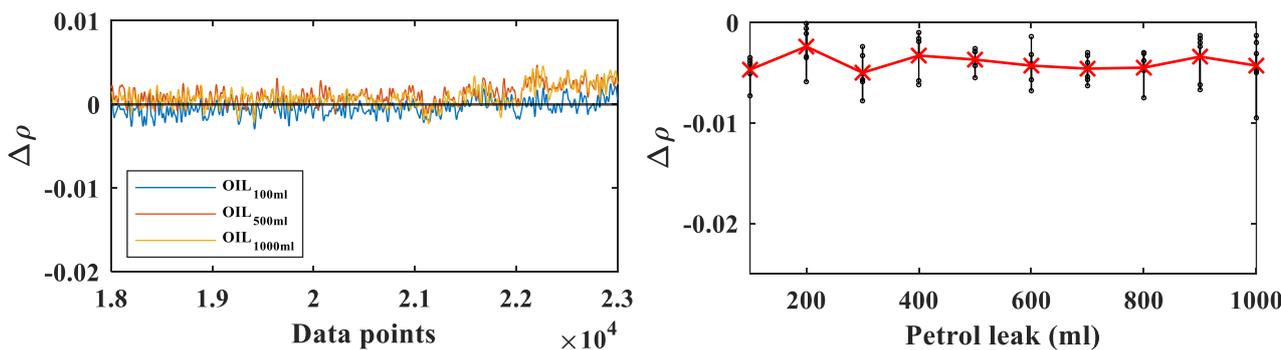


圖 4.40 AWG20-4P 線材細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)



第四章 研究結果與討論

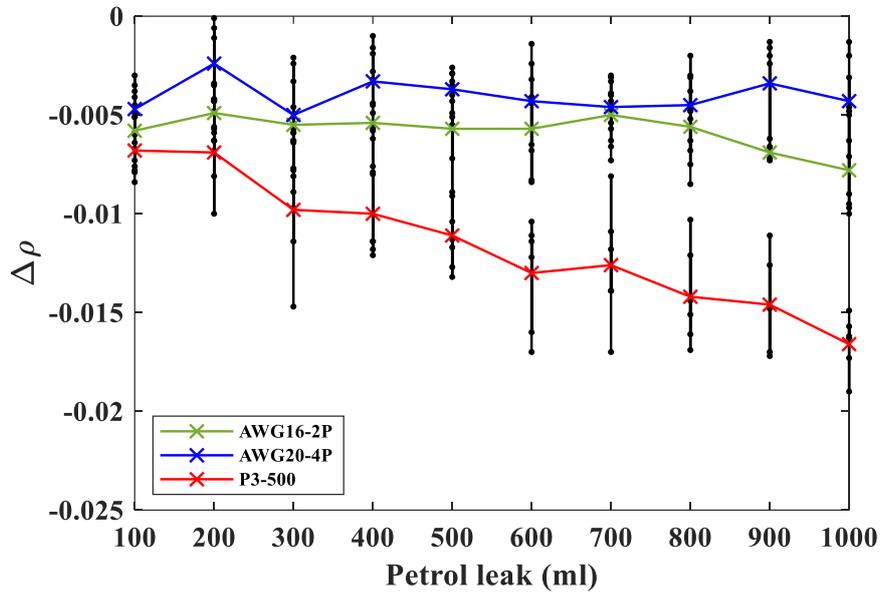


圖 4.41 細砂中含水率 10%汽油滲漏差異分析比較圖



4.3.1.3 土壤孔隙影響

現地實施地下儲槽與管線滲漏監測須將感應元件埋入地下，因此需先挖洞並固定感應元件安裝位置，因此後續也須把空洞補滿。利用回填材將孔洞補滿，當作原始感應元件之環境，而回填材種類眾多，本研究利用孔隙小之細砂與孔隙較大之七厘石作為回填材，進行孔隙大小對滲漏監測影響之比較，評估之感應元件為附有吊線之 P3-500 纜線與 AGW-Gold 纜線 (PermAlert)。

統整前兩小節評估之結果，以附有吊線之 P3-500 纜線監測滲漏效果最佳，因此將該纜線與市面上滲漏監測正在使用之 AGW-Gold 纜線，進行在七厘石環境中，汽油滲漏監測比較。

圖 4.43 為 AGW-Gold 纜線在七厘石中汽油滲漏之差異分析圖，從波形可以看出此纜線訊號品質佳、雜訊小，對滲漏波形分析較精確，因該纜線為同軸纜線，波形不受外在環境之影響，當滲漏物為液態滲入纜線內並達飽和時，能夠精確評估滲漏之發生位置

圖 4.44 為兩感應元件在七厘石環境中監測汽油滲漏之反射係數差值 ($\Delta\rho$) 對應不同滲漏量之比較圖，得出在相同滲漏環境下，附有吊線之 P3-500 纜線監測效果比 AGW-Gold 纜線佳，此現象與滲漏監測時間有關，因 AGW-Gold 纜線為同軸纜線，纜線內包覆特殊材質，因此在監測滲漏時反應較慢需較長的時間讓此纜線做監測。

圖 4.45 為附有吊線之 P3-500 纜線在細砂與七厘石中汽油滲漏之反射係數差值 ($\Delta\rho$) 對應不同滲漏量之比較圖，得出空隙大小會影響滲漏監測之結果，孔隙越大，感應元件監測周圍介電度變化越大，因此監測效果越佳。



第四章 研究結果與討論

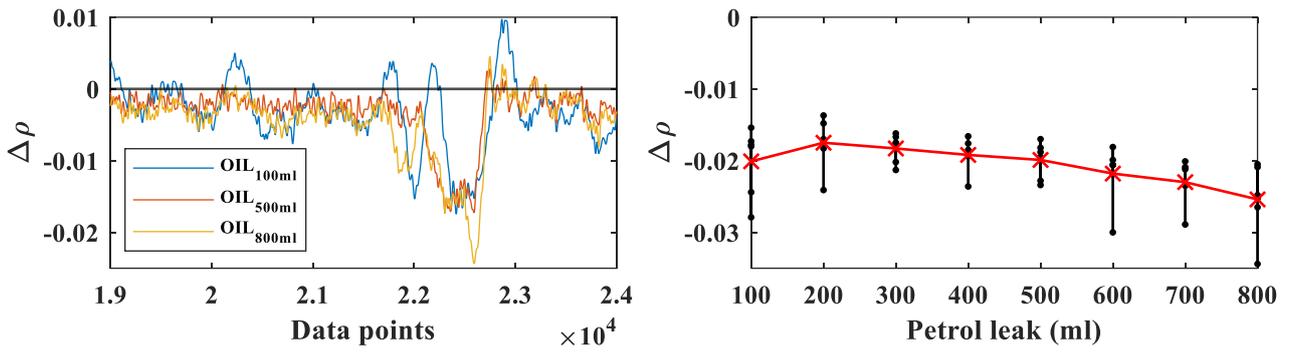


圖 4.42 附有吊線之 P3-500 纜線七厘石中汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

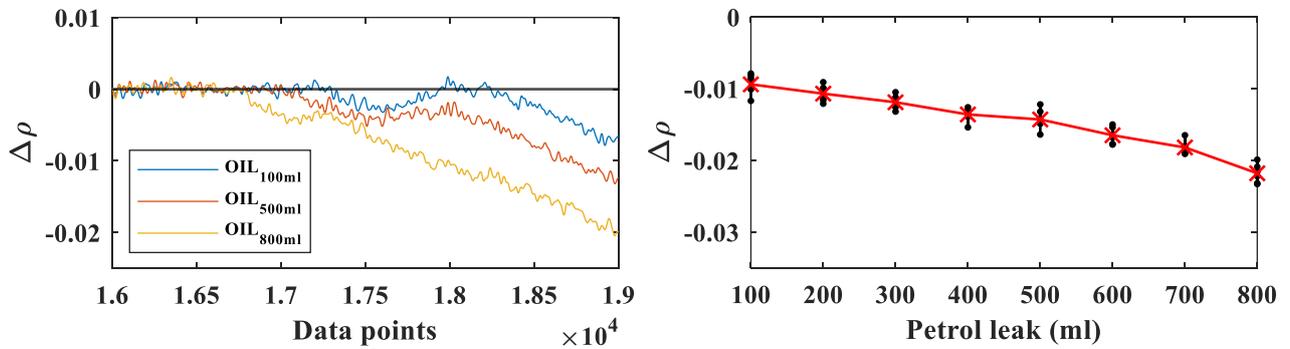


圖 4.43 AGW-Gold 纜線七厘石中汽油滲漏差異分析圖

(左: $\Delta\rho$ -Data points ; 右: $\Delta\rho$ -滲漏量)

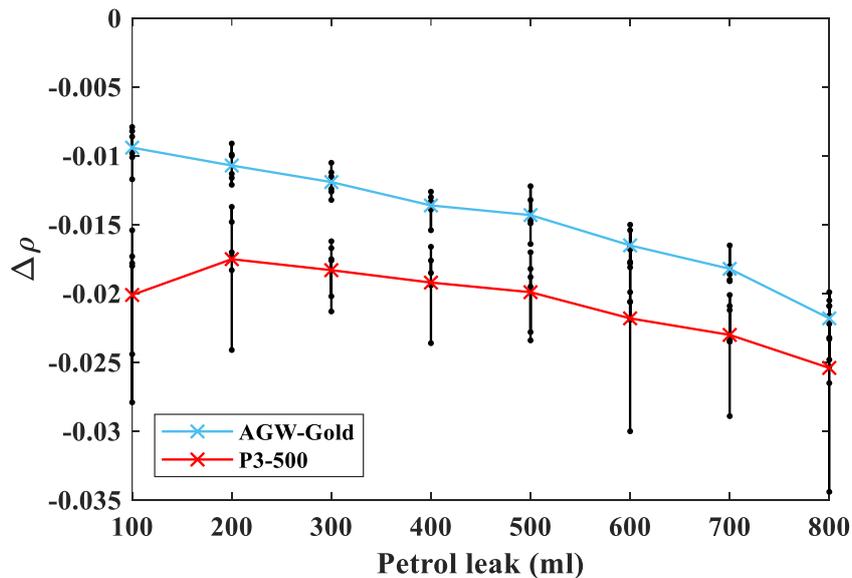


圖 4.44 七厘石中汽油滲漏差異分析比較圖



第四章 研究結果與討論

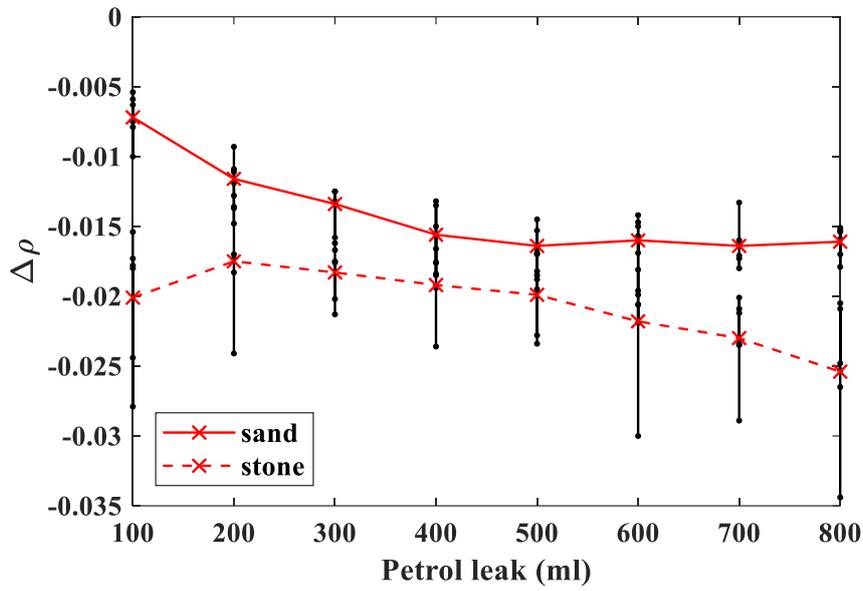


圖 4.45 細砂與七厘石中汽油滲漏差異分析比較圖



4.3.2 多點滲漏監測實驗

現地當地下管線與儲槽滲漏時，可能為單點滲漏或多點滲漏，因此本研究為了評估 TDR 滲漏監測技術之限制，搭配大型壓克力儲槽，模擬多點污染物滲漏情形，進一步評估滲漏監測適用性。

多點滲漏監測實驗利用在長距離監測較佳的附有吊線之 P3-500 纜線做實驗評估，實驗監測滲漏環境為在乾細砂中，自來水與 92 無鉛汽油分別在兩點同時滲漏做監測評估。分析方法是將兩點滲漏資料分開做分析，當第一點滲漏時，波形訊號會受到干擾(延遲)，而影響第二點分析結果，因此在分析第二點滲漏時會先將資料對齊(在兩滲漏點間做記號，如圖 4.46 與圖 4.49 紅圈處)，再作後續分析，評估滲漏發生之精確位置。

圖 4.47、4.48、4.50、4.51 為附有吊線之 P3-500 纜線在乾細砂環境中自來水滲漏與汽油滲漏差異分析之波形，可以評估在多點滲漏的環境下，當滲漏點距離監測位置越遠，監測效果會遞減，訊號強度與空間解析度隨距離增加而降低，由圖 4.52 與圖 4.53 也可驗證此現象，在自來水多點滲漏中，兩滲漏點反射係數差值($\Delta\rho$)差異較大，與自來水導電度高有關係，而汽油多點滲漏中，因汽油不導電，兩滲漏點反射係數差值($\Delta\rho$)差異不大。



第四章 研究結果與討論

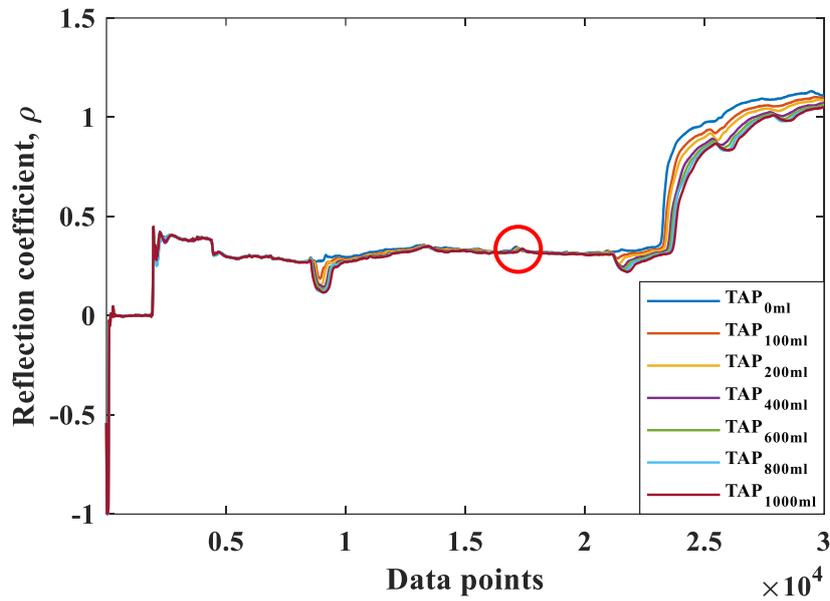


圖 4.46 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點滲漏原始波形

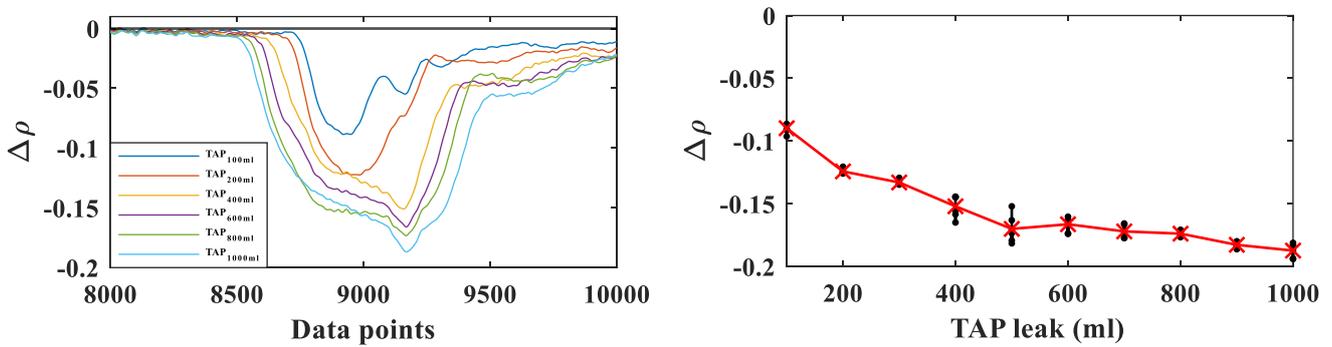


圖 4.47 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點(第一點)滲漏差異分析圖

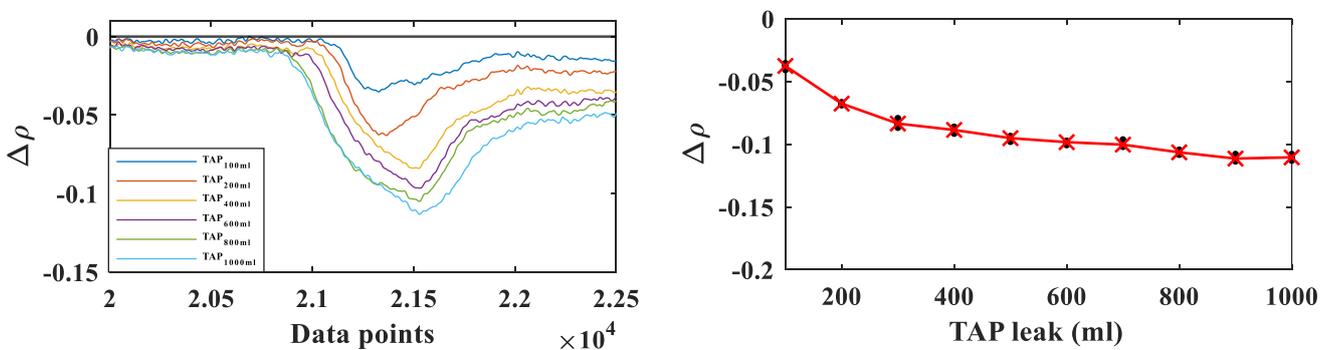


圖 4.48 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點(第二點)滲漏差異分析圖

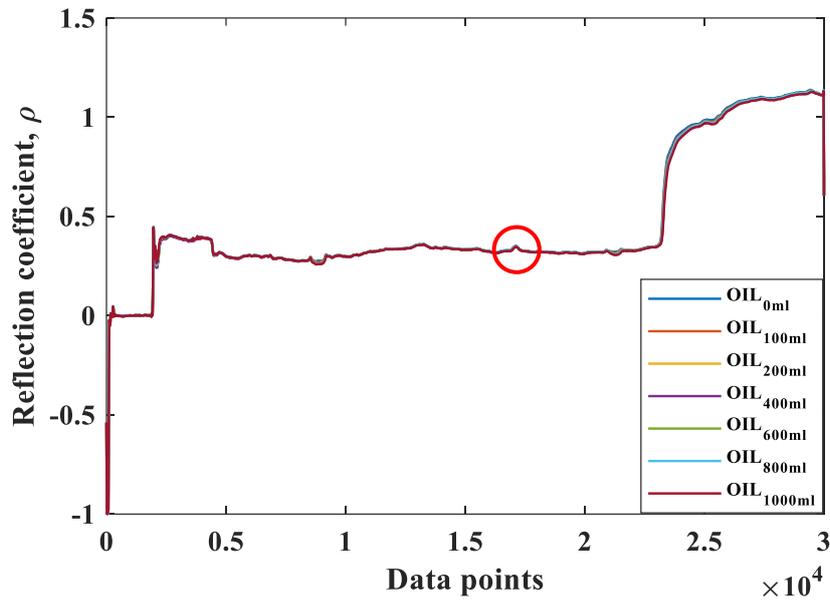


圖 4.49 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點滲漏原始波形

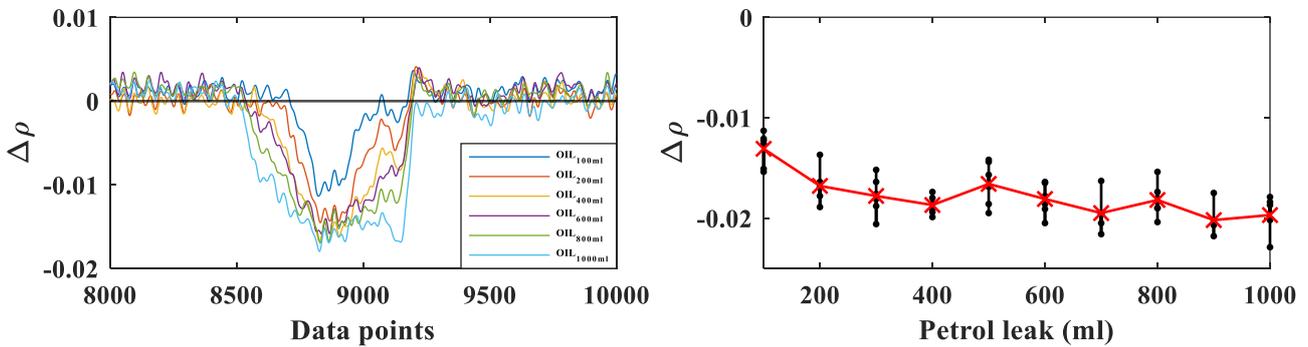


圖 4.50 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點(第一點)滲漏差異分析圖

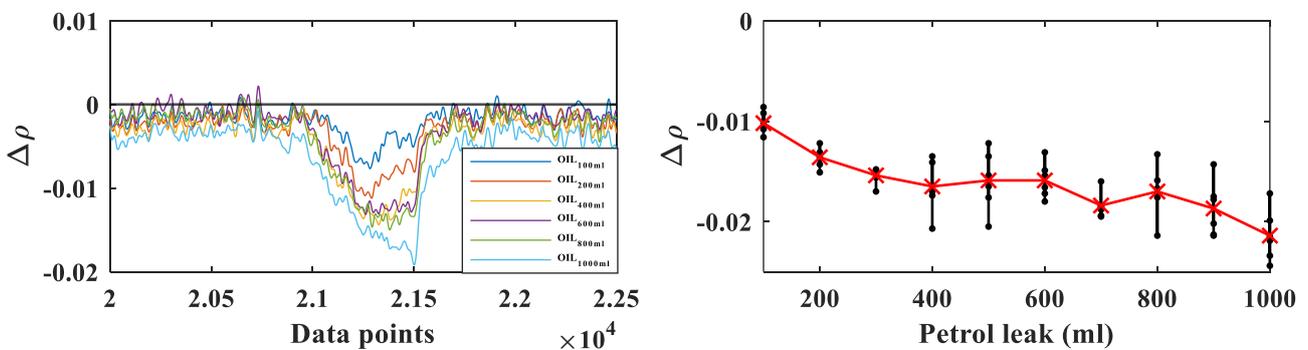


圖 4.51 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點(第二點)滲漏差異分析圖



第四章 研究結果與討論

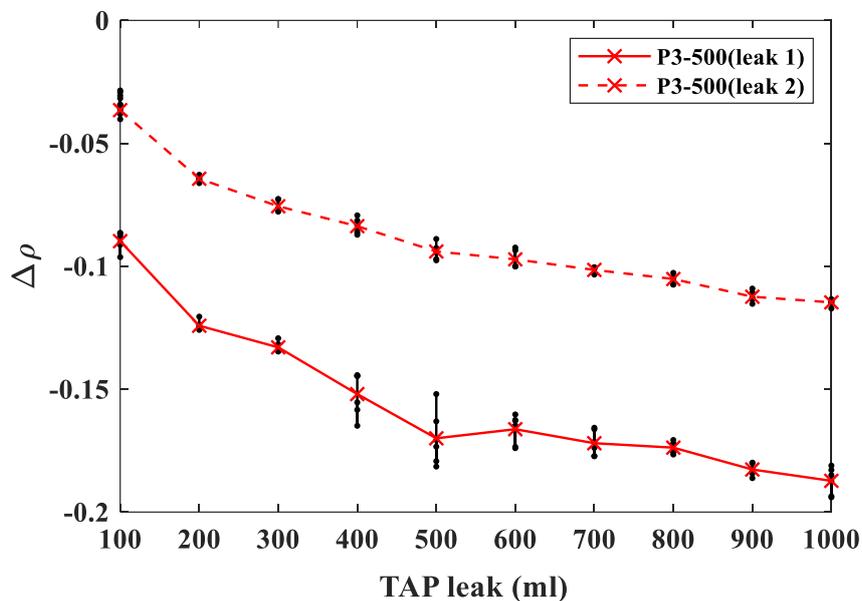


圖 4.52 附有吊線之 P3-500 纜線自來水多點滲漏差異分析比較圖

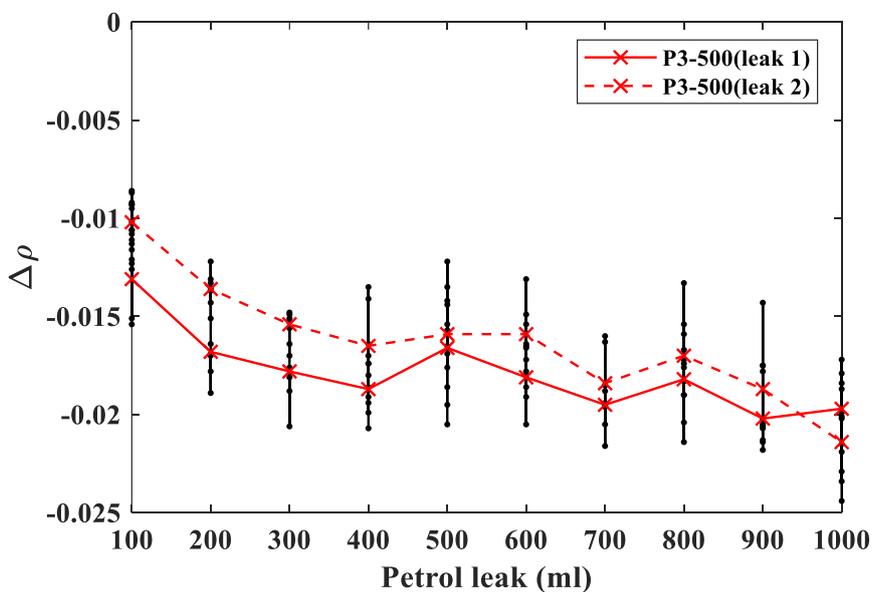


圖 4.53 附有吊線之 P3-500 纜線汽油多點滲漏差異分析比較圖



第五章 結論與建議

現有之現地地下管線與儲槽滲漏監測技術均有其監測限制且非即時監測，現今 TDR 滲漏監測技術發展主要在於供水管線之滲漏監測，已應用於實際供水管線上。而目前 TDR 應用在污染物之滲漏監測上案例較少，因此本研究為了更有效且經濟快速的監測管線與儲槽的污染物滲漏，利用 TDR 滲漏監測技術，將防治工作更往前緣推動，達到土壤與地下水污染預防的效果。

5.1 結論

本研究利用 TDR 滲漏監測技術進行一系列室內實驗並搭配本團隊研發之 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式評估現有之儀器與感應元件適用性與限制，TDR 應用於滲漏監測實務上主要評估介電度差異是否具有監測之靈敏度，當所偵測的滲漏液體不是高介電度的水，而是非水相液體時，在眾多污染物中，汽油與柴油的介電度在 TDR 頻率範圍內甚低，約為 1.8~2.2，故本研究先以汽油作為污染物之評估，確認感應元件在低介電度之環境下是否能夠在此相對極端條件下監測滲漏情況發生。本研究針對可適用於現地監測之最佳感應元件影響因子評估結果，可歸納為以下幾點：

一、 TDR 滲漏監測系統之量測模擬模式

1. 透過波傳模擬能初步利用實驗得到之監測結果設定參數，並進行更遠距離之滲漏監測分析，其結果顯示附有吊線之 P3-500 纜線能夠監測自來水滲漏達 100 米以上，汽油滲漏監測距離限制約 50 米以內。
2. 本團隊研發之波傳模擬模式能有效預測並評估滲漏發生之情形與結果，可適用於後續滲漏監測實務上。

二、 室內實驗

1. 監測儀器本身之解析能力與量測誤差間之變異性並隨著擷取時間解析度增加而趨於較佳狀態。因此，為了資料處理方便，建議選擇適合之視窗大小作為監測之用。
2. 利用差異分析法(Difference analysis method)可有效監測汽油滲漏發生之位置；走時分析法(Travel time analysis method)可評估感應元件之靈敏度。



3. 感應元件靈敏度與纜線阻抗之評估與分析結果顯示，靈敏度與纜線阻抗有關，受感應元件品質影響，當導波器之電極直徑越大，絕緣材厚度越小，導波器間距越大，感應元件品質越好，監測效果越佳，其中最佳之感應元件為附有吊線之 P3-500 纜線。
4. 環境影響因子實驗之評估與分析結果顯示，在含水率約 10% 之環境下汽油滲漏監測效果相較於無含水率環境下不易監測，因水的介電度大影響甚鉅，當現地受雨水影響而造成土壤含水率變化下，TDR 滲漏監測技術之不確定性需再評估。
5. 土壤孔隙之評估與分析結果顯示，當回填之土壤孔隙越大，監測滲漏效果越佳。因滲漏物可蓄積停留於孔隙中，使感應元件監測到較多之滲漏物，而提高環境介電度之變化。
6. 多點滲漏監測實驗之評估與分析結果顯示，當滲漏點距離監測位置越遠，監測效果會遞減，訊號強度與空間解析度隨距離增加而降低。其中因自來水導電度高，因此滲漏點受距離之影響較大；汽油不導電，因此滲漏位置距離之遠近對其影響不大。

5.2 建議

針對本研究後續可進一步執行方向提出以下建議：

1. 本研究先以汽油作為非水相污染物之評估，確認感應元件在低介電度之環境下是否能夠在此相對極端條件下監測滲漏情況發生。後續評估感應元件污染物滲漏監測之廣泛適用性，可以更多種不同污染物做室內實驗監測之評估。
2. 後續可應用此監測方法與分析方法，於模場現地真實環境中執行現地測試與實證。



參考文獻

1. 林志平、鐘志忠、吳瑋晉、陳弘宇(2011)，"利用時域反射技術建構地工結構損傷感應神經"，土木水利，Vol. 38, No. 3。
2. Ahmad Fuad z., Eddy, H.S., Badronnisa Y., and Syazwani, I. (2019), "Water leak detection method in water distribution network," Sustainable Civil and Construction Engineering Conference, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 357 (2019) 012033
3. IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/357/1/012033.
4. Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E., & Giaquinto, N. (2012). A TDR-based system for the localization of leaks in newly installed, underground pipes made of any material. *Measurement Science & Technology*, vol. 23, p. 9.
5. Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E., & Giaquinto, N. (2012). A new method for detecting leaks in underground water pipelines. *Sensors Journal, IEEE*, vol. 12, pp. 1660-1667.
6. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Giaquinto, N., Savino, M., and Adamo, F. (2014), Leak detection through microwave reflectometry: from laboratory to practical implementation, *Measurement* 47(1), 963-970, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.010>.
7. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Masciullo, A., Giaquinto, N., D'Aucelli, G.M., Costantino, N., De Leo, A., and Miraglia, M. (2015), "Large-scale Implementation of a New TDR-based System for the Monitoring of Pipe Leaks," XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry" August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic.
8. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Masciullo, Giaquinto, N., D'Aucelli, G.M., Costantino, N., De Leo, A., and Miraglia, M. (2017), "Recent Advances in the TDR-based Leak Deteciton System for Pipeline Inspection," *Measurement*, 98, p. 347-354.
9. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Yang, S.-H., Lin, J.-Y., and Lin, C.-H. (2019), "Investigation of Non-unique Relationship between Soil Electrical



- Conductivity and Water Content due to Drying-Wetting Rate using TDR," *Engineering Geology*, 252, 54-64.
10. Chung, C.-C., and Lin, C.-P. (2011), "High Concentration Suspended Sediment Measurement using Time Domain Reflectometry," *Journal of Hydrology*, Vol. 401, 134-144.
 11. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Wang, K., Lin, C.-S., and Ngui, J. (2016), "Improved TDR Method for Quality Control of Soil-Nailing Works," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(1), 06015011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001372](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001372)
 12. Chung, C.-C., Lin, C.-P. (2019), "Development of Advanced TDR Landslide Monitoring as an Early Warning System Validated by Field Implementations," *Engineering Geology*, 262, 105330. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105330>.
 13. Demirci, S., Yigit, E., Eskidemir, I. H., and Ozdemir, C. (2012), "Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method," *NDT & E International*, vol. 47, pp. 35-42.
 14. EPA (2020), <https://www.epa.gov/ust/release-detection-underground-storage-tanks-usts>, browsed in November, 2020.
 15. Fatemi Aghda, S.M., GanjaliPour, K., and Nabiollahi, K. (2018), "Assessing the Accuracy of TDR-based Water Leak Detection System," *Results in Physics*, 8, p. 939-948.
 16. Gao, Y. Brennan, M., Joseph, P., Muggleton, J., and Hunaidi, O. (2004) "A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 277, pp. 133-148.
 17. Kim, T., Woo, S., Youn, B. & Huh, Y. (2015), TDR-based Pipe Leakage Detection and Location using Bayesian Inference. *Prognostics and Health Management (PHM)*, 2015 IEEE Conference on, pp. 1-5.
 18. Liu, Z., and Kleiner, Y. (2013), State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes, *Measurement* 46 (1) (2013) 1-15, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.05.032>.



19. Li, R., Huang, H., Xin, K., and Tao, T. (2015), A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems, *Water Sci. Technol.: Water Supply*
20. 15 (3) (2015) 429-441, <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2014.131>.
21. Lin, C.-P., Drnevich, V. P., Feng, W., and Deschamps, R. J. (2000), "Time Domain Reflectometry for Compaction Quality Control," *Use of Geophysical Methods in Construction, Geotechnical Special Publication, No. 108*, pp. 15-34.
22. Lin, C.-P. (2003a), "Frequency Domain versus Traveltime analyses of TDR Waveforms for Soil Moisture Measurements," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67(3): 720-729.
23. Lin, C.-P. (2003b), "Analysis of a Non-uniform and Dispersive TDR Measurement System with Application to Dielectric Spectroscopy of Soils," *Water Resources Research*, 39 (1): art. no. 1012.
24. Lin, C-P, Chung, C.-C., and Tang, S.-H. (2006), "Development of TDR Penetrometer through Theoretical and Laboratory Investigations: 1. Measurement of Soil Dielectric Permittivity" *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 306-313.
25. Lin, C-P, Chung, C.-C., and Tang, S.-H. (2006), "Development of TDR Penetrometer through Theoretical and Laboratory Investigations: 2. Measurement of Soil Electrical Conductivity" *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 314-321.
26. Lin, C.-P. and Tang, S.-H. (2007), "Comprehensive Wave Propagation Model to Improve TDR Interpretations for Geotechnical Applications," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 30, No. 2, pp. 90-97.
27. 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.
28. Lin, C.-P., Chung, C.-C., Huisman, J.A., and Tang, S.-H. (2008), "Clarification and Calibration of Reflection Coefficient for TDR Electrical Conductivity Measurement", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72(4): 1033-1040.



29. 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*, Vol. 135, No. 1., pp. 143-152.
30. Lin, C.-H., Lin, C.-P., Drnevich, V. P. (2012), "TDR Method for Compaction Quality Control: Multi Evaluation and Sources of Error," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 35, No. 5, p. 817-826.
31. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, C.-H., and Chung, C.-C. (2015), "An Improved Modeling of TDR Signal Propagation for Measuring Complex Dielectric Permittivity," *Journal of Earth Science*, 26 (6), p. 827-834. DOI: 10.1007/s12583-015-0599-7.
32. Lin, C.-P., Ngui, Y.J., Lin, C.-H. (2017), "A Novel TDR Signal Processing Technique for Measuring Apparent Dielectric Spectrum," *Measurement Science and Technology*, 28, No. 1, 015501.
33. Lin, C.-P., Wang, K., Chung, C.-C., and Weng Y.-W. (2017), "New types of TDR sensing waveguides for bridge scour monitoring," *Smart Materials and Structures*, 26(7), 075014 <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa71f9>.
34. Lin, C.-P., Ngui, Y.-J., and Lin, C.-H. (2018), Multiple Reflection Analysis of TDR Signal for Complex Dielectric Spectroscopy, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(11), p. 2649-2661, DOI 10.1109/TIM.2018.2822404
35. Ngui, YJ, Lin, C.-P., Wu, T.-R. (2019), "Dielectric Spectroscopy using Dual Reflection Analysis of TDR Signal," *Sensors*, 19, 1299; doi:10.3390/s19061299.
36. Wang, K., Lin, C.-P., and Chung, C.-C. (2019), "A Bundled TDR-based Sensing Cable for Monitoring of Bridge Scour," *Structural Control and Health Monitoring*, 26:e2345. <https://doi.org/10.1002/stc.2345>.
37. Wang, K. and Lin, C.-P. (2020), "Applicability and limitations of time domain reflectometry bridge scour monitoring system in general field conditions," *Structural Health Monitoring*, DOI: 10.1177/1475921720944587.



38. Puust, R. Kapelan, Z., Savic, D., and Koppel, T. (2010), A review of methods for leakage management in pipe networks, *Urban Water J.* 7 (1), 25-45, <http://dx.doi.org/10.1080/15730621003610878>.
39. Schuet, S., Timucin, D., & Wheeler, K. (2011). A Model-Based Probabilistic Inversion Framework for Characterizing Wire Fault Detection Using TDR. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 1654-1663.
40. Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water loss control* : McGraw Hill Professional.
41. Wang, P. F., Youn, B. D., & Hu, C. (2012). A generic probabilistic framework for structural health prognostics and uncertainty management. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 28, pp. 622-637.
42. Woo, S., Kim, T., Lee, J., Oh, H., Youn, B., and Kwon, D. (2018), "TDR-based Multiple Leak Detection System using an S-parameter Transmission Line Model for Long-Distance Pipelines," *International Journal of Prognostics and Health Management*, ISSN 2153-2648, 2018 017.





附錄一 專案成果績效自評表

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

110年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：111年1月5日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
研究主題	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他		
執行機構	國立陽明交通大學防災與水環境研究中心	專案主持人	林志平 特聘教授
專案名稱	電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input checked="" type="checkbox"/> 期中 <input type="checkbox"/> 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。(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)

(一) 學術面

項目	目標達成程度		申請	期中	期末	結案	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表名稱)
			預估 數	達成數	達成數	達成率	
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	0	0	0	0	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0	0	相關研究成果可於 結案後規定時間內 達成投稿。
		(2)研討會論文	0	0	0	0	
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0	0	
		(2)研究報告	1	0	1	1	完成電磁波時域反 射法之儲槽管線滲 漏監測技術評估與 發展成果報告
4.專著 (本數)		0	0	0	0		



項目		目標達成程度		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 產出發表名稱)
	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	1	發展電磁波時域反 射法之儲槽管線滲 漏監測技術
		(2)技術平台		0	0	0	0	
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士		1	1	1	1	
		(2)博士		1	1	1	1	
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊		0	0	0	0	
		(2)跨機構團隊		0	0	0	0	
		(3)形成研究中 心		0	0	0	0	
		(4)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

項目		目標達成程度		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)
		已	核					
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已	發明	0	0	0	0	
		核	新型/設計	0	0	0	0	
		准	合計	0	0	0	0	
		申	發明	0	0	0	0	
		請	新型/設計	0	0	0	0	
		中	合計	0	0	0	0	
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉		件數	0	0	0	0	
			授權金(仟元)	0	0	0	0	
			衍生利益金(仟元)	0	0	0	0	
	3.技術移轉 (專利)		件數	0	0	0	0	
			授權金(仟元)	0	0	0	0	
			衍生利益金 (仟元)	0	0	0	0	
	4.技術移轉 (應用技術)		件數	0	0	0	0	
			授權金(仟元)	0	0	0	0	
			衍生利益金(仟元)	0	0	0	0	
5.可移轉 產業技術		(1)技術(件數)	0	0	0	0		
		(2)品種/系(件數)	0	0	0	0		
C 產 學 研 合 作	6.促成合 作研究		件數	0	0	0	0	
			金額(仟元)	0	0	0	0	
	7.促成投 資		件數	0	0	0	0	
			投資金額 (仟元)	0	0	0	0	
	8.促成取得 業界科專		件數	0	0	0	0	
			業界投資金額 (仟元)	0	0	0	0	



項目	目標達成程度	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)
	9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)				



(三) 政策面

項目		目標達成程度	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	0	0	0	
		收入(仟元)	0	0	0	0	
	2.諮詢服務	次數	0	0	0	0	
		收入(仟元)	0	0	0	0	
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策	0	0	0	0	
		(2)法規	0	0	0	0	
		(3)規範	0	0	0	0	
		(4)標準	0	0	0	0	
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)		0	0	0	0	
	5.獲得獎項(件數)		0	0	0	0	
	6.提升能源效率(%)		0	0	0	0	
	7.節能減碳效率(%)		0	0	0	0	
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

二、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200字為限)

學術面 (如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)
相較於工業儲槽與管線滲漏後之調查、土壤與地下水監測、整治改善，若能更積極推動儲槽與管線之防漏與滲漏監測技術，應可將防治工作更往源頭推動，達到土壤與地下水污染預防的效果。因此將以研究期刊投稿一篇與國際研究接軌並培育專精研究之人員碩士博士各一名。
產業面 (如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)



本計劃發展 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。本計畫執行結束後，已初步證實可行性，可進入真實環境不同污染物條件驗證與執行現地測試與實證，並推動業界的技術移轉。

政策面 (如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染場址管理等政策及法規研訂之參考)

目前 TDR 滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，然而，工業液體如油品或其他非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，本計畫執行結束後，已初步證實可行性，後續可進入真實環境不同污染物條件驗證與執行現地測試與實證，提供政府作為監測/管制、污染場址管理等政策及法規研訂之參考。



附錄二 計畫書審查意見回覆對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

申請計畫書 期中報告
修正計畫書 期末報告 審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：林志平 NO：A3	
計畫名稱	電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 期末報告摘要不宜出現「本計畫擬發展 TDR 技術」而應該是經年一年執行以後所產出之適用條件與限制結論。 2. 附件一所提供之專案成果績效自評表，所選取之執行期應修正為「期末」，所對應填寫之學術面、產業面、政策面成果也因以執行至期末的結果為依據。		1. 感謝委員建議，已修訂為“本計畫發展 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用...”。 2. 感謝委員建議，自評表已依據期末結果修訂學術面、產業面、政策面之內容。	
委員二 1. TDR 洩漏偵測受到土體含水量變化影響大，實驗結果顯示，相較於乾燥環境，含水率 10%時的偵測效果就變得不佳，實際應用時土壤含水率尚可能隨時不均勻地降低(蒸發)或增加(降雨)，未來將如何克服不穩定的土壤含水率？目前實驗 10 公尺內皆使用同一單一介質如細砂或七厘石。實際應用時不同位置之土壤的成份可能皆為不同，對監測將有何影響？		1. 為單純化監測環境避免土層變因，監測方式主要考慮採用回填材方式包覆監測纜線，考慮材料為細砂或七厘石。而當現地受雨水影響而造成土壤含水率變化下，TDR 滲漏監測技術之不確定性需再評估。	
委員三 1. 建議補充說明本計畫發展之 TDR 滲漏監測技術，其具體之「偵漏」成效定量評估方式。		1. 目前本計畫初步評估結果建議採用 P3-500 纜線，結果顯示附有吊線之 P3-500 纜線能夠監測自來水滲漏達 100 米以上，汽油滲漏監測距離限制 50 米以內。	



<p>委員四</p> <p>1. 介電度低的油品和水的性質差異大，應該是針對這個差異找對策，而非重複對水監測技術，來評估對非水物質滲漏的監測。</p>	<p>1. 本研究主要評估介電度差異是否具有監測之靈敏度，當所偵測的滲漏液體不是高介電度的水，而是非水相液體時，在眾多污染物中，汽油與柴油的介電度在 TDR 頻率範圍內甚低，約為 1.8~ 2.2，故本研究以汽油作為污染物之評估，確認感應元件在低介電度之環境下是否能夠在此相對極端條件下監測滲漏情況發生。</p>
<p>委員五</p> <p>1. 專案基本資料表關鍵字，請補充英文關鍵字?</p> <p>2. 中英文摘要請補關鍵字?</p> <p>3. 期末報告建請依署內格式編寫?</p>	<p>1. 感謝委員建議，專案基本資料表格式中為中文關鍵字，因此將英文關鍵字補充於英文摘要中。</p> <p>2. 遵照修訂。</p> <p>3. 感謝委員，已依署內格式編寫。</p>



110 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

構想書 申請計畫書
 期中報告 期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：林志平教授 NO：SA3	
計畫名稱	電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 3. 目前計畫已經完成五種平行雙導線與同軸纜線透過監測水的滲漏進行初步測試，後續將進行其他污染物的檢測如油品或化學品，以及是埋設在沙或土壤當中之環境進行模擬，篩選適用感應元件。 4. 期中報告完成度符合預期規劃進度。		1. 感謝委員肯定，將依據預期規劃進行。 1. 感謝委員肯定。	
委員二 2. 計畫原規劃不同感應元件在不同的非水相液體的偵測適用性。目前進行二種感應元件：同軸纜線與平行雙導線的實驗評估。非水相液體目前只進行 92 無鉛汽油之實驗評估，後續宜篩選具代表性之液體執行偵測適用性評估。 3. 計畫書審查時建議評估感應靈敏度，感應空間解析度，感應距離，多點滲漏之干擾等等優化設計參數，目前計畫期中只討論感應靈敏度，後續應陸續納入其他參數之討論。		1. 感謝委員建議， TDR 應用於滲漏監測實務上主要評估介電度差異是否具有監測之靈敏度，當所偵測的滲漏液體不是高介電度的水，而是非水相有機液體時，相較於水，其具有甚低之介電度，與一般傳輸的絕緣材料相近，在眾多污染物中，汽油與柴油的介電度在 TDR 頻率範圍內甚低，約為 1.8~2.2，故本研究先以汽油作為污染物之評估，確認感應元件在低介電度之環境下是否能夠在此相對極端條件下監測滲漏情況發生。因此本階段先以汽油進行完整纜線型式、回填材料等因子評估試驗，若評估結果具有可行性再於後續計畫作延伸探討。 2. 感謝委員建議，相關靈敏度、空間解析度、感應距離、多點滲漏之干擾等等參數已於期末報告作詳細評估探討。	
委員三 2. 建議概要說明 TDR 之基本原理，並於報告啟始單元標註 TDR 之英文全稱。		1. 感謝委員建議，相關基本原理說明於 2.4.1 節，並補充英文全稱於 1.1 節第二段中。	



<p>3. 建議彙整主持人自 2000 年以來發表之 TDR 相關學術論文，以彰顯 TDR 技術之重要性。</p> <p>4. 後續研究建議聚焦不同儲存液體之偵測能力，並強化實驗設計，感應元件之類別建議儘量控制於較低數量。</p> <p>5. 研究流程圖號錯植，請更正。建議宜補充說明較詳細之「研究流程」。</p>	<p>2. 感謝委員建議，主持人發表相關學術論文彙整於 2.4.2 節。</p> <p>3. 感謝委員建議，同委員二之回覆，本階段先以汽油進行完整纜線型式、回填材料等因子評估試驗，若評估結果具有可行性再於後續計畫作延伸探討。</p> <p>4. 感謝委員建議，已更正研究流程圖號，並於期末報告詳細說明研究流程。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 構想很好，但是有點太理想化，還看不到實場應用的期待。期末報告請說明實場應用的時程。</p>	<p>1. 感謝委員建議，本階段擬先評估可行性，若評估結果具有可行性再於後續計畫作實場應用延伸探討。</p>
<p>委員五</p> <p>4. 期中報告有依委員意見參採執行。</p> <p>5. 期中報告已完成 TDR 滲漏監測系統之量測模式，及感應元件之規劃準備。</p> <p>6. 未來若能利用 TDR 技術於工業管線之滲漏測試，將可減少 103 年 7 月底高雄石化管線滲漏造成大爆炸之事件發生。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p>
<p> </p>	<p> </p>



110 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

構想書 申請計畫書

期中報告 期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：林志平教授 NO：SA3	
計畫名稱	電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一：</p> <p>1. 試驗與設計配置應先考量將來推廣使用時之場域條件與設施規範標準。</p> <p>2. 宜與有儲槽及管線之業者交流，瞭解需求性與關鍵點。</p>		<p>2. 感謝委員建議，將參考相關設施條件設計試驗配置。</p> <p>3. 感謝委員建議，將了解相關需求性納入考量。</p>	
<p>委員二：</p> <p>應具發展潛力。</p>		<p>感謝委員肯定。</p>	
<p>委員三：</p> <p>一、主持人與計畫執行團隊</p> <p>1. 主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。</p> <p>2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。(延續性)</p> <p>二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義</p> <p>1. 本專案計畫對國內土壤及地下水污染調查工作的發展具有貢獻。</p> <p>2. 本計畫書撰寫具體(應屬於延續性)，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。</p>		<p>一、</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>二、</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p> <p>4. 感謝委員肯定，本計畫屬單一年度研究型計畫。</p> <p>5. 感謝委員肯定。</p> <p>6. 本計畫擬將基於實驗探討 TDR 技術應用於工業儲槽與管線滲漏監測的適用條件與限制，並於期末進行評估說明。</p> <p>7. 感謝委員肯定。</p>	



<p>3. 本計畫的成果具有潛在的實場應用性。(原計畫書中說明：“…本計畫擬發 TDR 技術在儲槽 與管線滲漏監測的應用，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術…”)</p> <p>4. 計畫應屬於多年期的模場試驗計畫的一部分，具計畫的延續性。(建議說明與前期計畫的關係)</p> <p>5. 主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的模場(或研究)研究計畫，之前的專案執行績效佳</p> <p>6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境(例如：是否有適用土壤質地的限制？是否有介電係數上的範圍限制?...等等)與應用的限制條件。(例如：是否必須有純相…等等)</p> <p>7. 初期計畫構想書的意見已說明。</p>	
<p>委員四：</p> <p>2. 現有監測方式都採被動方式而非即時監測，若能發展槽間或槽外表面的自動化監測系統，將有助於預防滲漏對於環境的影響，本案的研究動機頗具說服力；</p> <p>3. 以實驗槽進評估感應靈敏度、感應空間解析度與感應距離、多點滲漏之波形相互干擾及其他環境因子之影響，將有助於找出儲槽及相關管線滲漏監測最優化設計。</p> <p>4. 期末報告內容不夠完整，建議今年報告加以注意改善。</p>	<p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p> <p>4. 感謝委員建議，本年度擬將加以注意改善期末完整性。</p>



<p>委員五： 過去多年以土污基金經費研究類似領域，未來宜就應用面進行模場型研究為宜。</p>	<p>本計劃擬發展 TDR 技術在儲槽與管線滲漏監測的應用，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術。預期於本計畫執行後，後續計畫可進行真實環境執行現地測試與實證之模場計畫。</p>
<p>委員六： 期待以可靠即時監測為目標。</p>	<p>感謝委員肯定，將盡力達成目標。</p>
<p>委員七： 研究方法依未來實場應用性規劃與設計。 本專案對未來土壤及地下水污染預防工作具高度實用性。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>委員八： 改善現有監測方式，提升即時監測之可能，值得期待成果。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>委員九： 1. (一)人事費用，考量補助計畫以培育人才為目的，建議專任人員任職以 5 個人月為限，優先聘任兼任人員。 2. 建議(三)消耗性器材及主要費用部分品項，參考前年度計畫實際核銷費用修正並酌減。 3. (五)雜項費用：報告書印刷編列上限建議為 40 本(300 元/本)共 12,000 元。</p>	<p>1. 遵照辦理，人事費用編列已降低專任人員至 5 人月，並增聘兼任人員兩名。 2. 遵照辦理，已酌減相關消耗性器材費用。 3. 遵照辦理，已調整報告書印刷編列為 40 本(300 元/本)共 12,000 元。</p>



110 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

構想書 申請計畫書
 期中報告 期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它	主持人：林志平教授 NO：C2	
計畫名稱	電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. TDR 對油品及化學品的測試應顧慮到不同對象滲漏後之電磁波之特徵之差異。 2. 對於儲槽系統已公告設施標準，必須放置將來應用時可按裝設置的位置。		1. 感謝委員建議，實驗將考慮具不同介電度滲漏物之電磁波靈敏度差異。 2. 感謝委員建議，將依據實驗結果評估可設置位置。	
委員二： 1. 研究主題符合範疇領域。 2. 研究關鍵參數（環境+滲漏物染物）未釐清，預期成果變數/支援應用待釐清。		1. 感謝委員肯定。 2. 本計畫主要非針對特定滲漏污染物，將考慮具不同介電度滲漏物特性，評估其電磁波靈敏度差異，並研究最適合之感測器配置。	
委員三： 1. 本團隊已執行過類似計畫，既有研究成果在國內的應用潛勢為何？建議說明。 2. 本計畫與過去執行過的計畫（土污基金補助）的關係為何？建議說明。		1. 前期類似計劃「土壤污染現地寬頻電性量測技術研發」主要探討時域反射介電頻譜量測系統與現地介電頻譜量測技術研發，以及有機污染物及非污染土壤介電頻譜與土壤物理性質關係探討。本計畫擬針對實務層面應用於滲漏監測技術評估其可行性。相關差異性分析說明於計畫主持人近五年執行本署補助計畫表中。 2. 同上回覆，其關連性與差異說明於「專案主持人、協同主持人學經歷與相關研究說明—本署補助計畫」表格。	



<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 現有監測方式都採被動方式而非即時監測，若能發展槽間或槽外表面的自動化監測系統，將有助於預防滲漏對於環境的影響，本案的研究動機相當具有說服力。 2. 以實驗槽進評估感靈敏度、感應空間解析度與感應距離、多點滲漏之波形相互干擾及其他環境因子之影響，將有助於找出儲槽及相關管線滲漏監測最優化設計。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。
<p>委員五：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 國際上目前發展情況，水的部分或油的部分。 2. 土壤滲漏監測實務上有些什麼問題，管線之鋪設的配合，其可行性如何。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 目前國際上應用主要於水的滲漏監測，說明於計劃目的中。 2. TDR 應用於滲漏監測實務上主要需評估污染物與土壤之介電度差異，是否具有監測之靈敏度，並據以設計合適之感測器系統以及安裝與鋪設方式。
<p>委員六：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 原有技術，不同場域試用，可試。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議，本計劃擬先於實驗室探討感測器靈敏度並設計合適之感測器系統，於後續階段再於不同場域進行測試。
<p>委員七：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 建議於實場測試，並搭配採樣分析滲漏量來驗證訊號。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 同上回覆，本計劃擬先於實驗室探討感測器靈敏度並設計合適之感測器系統，於後續階段再於不同場域進行測試。
<p>委員八：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 利用 TDR 技術於工業管線，儲槽滲漏監測，未來可於實場測試，並有業界技轉，成果值得期待。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。



