

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

時域反射頻率域相位速度分析法應用於 TDR 含砂濃  
度量測技術之改良

Improved TDR Suspended Sediment Concentration Measurement By Frequency  
Domain Phase Velocity Method

研究生：張智棟

指導教授：林志平 博士

中華民國九十八年七月

時域反射頻率域相位速度分析法應用於 TDR 含砂濃  
度量測技術之改良

Improved TDR Suspended Sediment Concentration Measurement By Frequency  
Domain Phase Velocity Method

研究生：張智棟

Student: Chih-Tung Chang

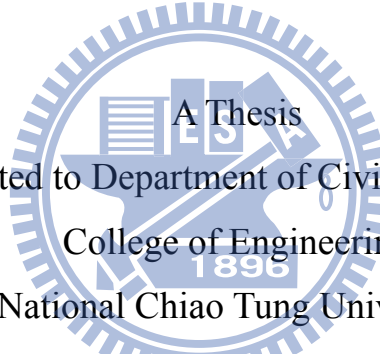
指導教授：林志平 博士

Advisor: Dr. Chih-Ping Lin

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



A Thesis  
Submitted to Department of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
In  
Civil Engineering

July 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

# 時域反射頻率域相位速度分析法應用於 TDR 含砂濃度量測 技術之改良

學生：張智棟

指導教授：林志平 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

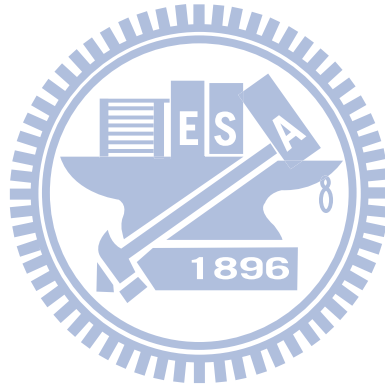
## 中文摘要

含砂濃度觀測為河川輸砂及水庫排砂一重要參考指標。時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)應用於含砂濃度觀測具有經濟、維護性、高濃度觀測、不易受鹽度及粒徑大小影響等特性，符合現今含砂濃度觀測需求。前期 TDR 含砂濃度觀測分析方法研究已將含砂濃度量測精度提升至約 1500 ppm，但前期方法皆建立於時間域分析，易受外在雜訊干擾。最近相關研究提出新式頻率域相位速度分析方法，透過頻率域之分析方法可避免雜訊的干擾，大幅提昇量測穩定性及其便利性，但此分析方法目前僅在數值模擬驗證階段，並無實驗證明其適用性。

因此本研究目的為基於頻率域相位速度分析法進行 TDR 含砂濃度量測技術之改良，探討此分析方法的適用性。實驗結果顯示頻率域相位速度分析法應用於含砂濃度量測，不受水質鹽度、纜線長度以及泥砂種類影響。另本研究配合頻率域相位速度分析法研發一新式同軸

感測器，其量測精度維持一致，且又具有不受雜物干擾的優點。現場測試也證明新式訊號分析方法配合新式同軸感測器於現場量測的穩定性。唯現場測試發現量測結果之變異與 TDR 主機周圍溫度有關，推測為 TDR 主機擷取時距(sampling interval)有溫度效應進而影響泥砂濃度量測準確度，建議未來進一步探討該溫度效應並提出修正方法。

**關鍵字：**含砂濃度、時域反射法、頻率域相位速度分析法



# **Improved TDR Suspended Sediment Concentration Measurement By Frequency Domain Phase Velocity Method**

Student: Chih-Tung Chang

Advisor: Chih-Ping Lin ph.D

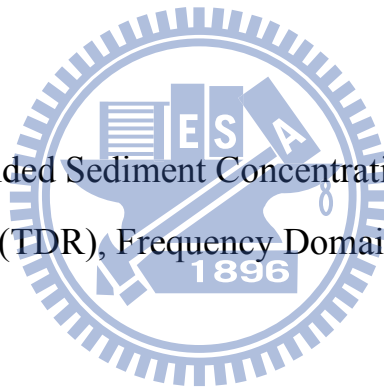
## **Abstract**

Due to the complex geology and rapid weathering changes in Taiwan, suspended sediment concentration (SSC) measurement is important for sediment discharge and desilting operation in reservoirs during heavy rainfalls.. Time domain reflectometry method (TDR) has been developed recently for SSC monitoring with advantages of economy, maintainability, high SSC monitoring, and relative independence of water salinity and particle size. According to the previous study, TDR SSC measurement accuracy has been improved to 1500 ppm. However, the algorithm for estimating SSC of the existing TDR SSC method utilizes time domain analysis, thus the in-situ SSC monitoring results are often interfered by electronic and environmental noise. To avoid the effect of noise in the time domain analysis, a new frequency domain algorithm called the Frequency Domain Phase Velocity (FDPV) method was recently proposed.. But the proof of concept for the FDPV method was only performed with numerical simulations without experimental verification.

Consequently, the objective of this study was to implement the Frequency Domain Phase Velocity (FDPV) method and experimentally investigate its performance for TDR SSC measurement. Experimental results show that SSC measurement based on the FDPV method is

relatively independent of water salinity, cable resistance, and sediment type. Furthermore, this research developed a new TDR SSC coaxial probe, to go along with the FDPV method which provides higher measurement stability in-situ. The applicability of the FDPV method and new coaxial probe was also verified by field testing. However, some measurement variation with air temperature was revealed in the field testing. The temperature effect was attributed to temperature dependency of the sampling interval in the TDR device. Further study is suggested to investigate the temperature effect and compensation method.

**Key words:** Suspended Sediment Concentration (SSC), Time Domain Reflectometry (TDR), Frequency Domain Phase Velocity Method



## 誌謝

本論文得以順利完成，首先感謝恩師 林志平教授平日對我的指導與提攜，亦師亦友，除了在學業上的指導之外，在待人處事及做研究應有的態度方面也讓我獲益良多，在此致上萬分謝意。

在學期間，承蒙 方永壽博士、潘以文博士、廖志中博士、單信瑜博士，於課業、研究與生涯規劃上的指導與建議，使得學生受益良多，在此獻上萬分感謝。

論文口試期間，承蒙經濟部水利署 謝勝彥副署長、陳春宏課長、成功大學資源工程系 余騰鐸教授與交通大學 鐘志忠博士，對於本論文提供諸多非常寶貴之意見，使得本論文更臻完善，在此表達由衷謝意。

研究期間，幸蒙志忠、俊宏、浚昇、岳勳及瑋晉學長的協助，尤其感謝志忠學長，在研究實驗及論文撰寫上提供相當寶貴的意見與建議，在此表達由衷的感謝；同時感謝同學永政及哲毅，在我最需要幫忙的時候鼎力相助，我不會忘記與你們上山下海，同甘共苦的這些日子；此外，感謝學弟妹玉紋、儒錚及子奕平常的幫忙。

感謝大地組同窗兩年的伙伴及學長，潘門佩鐸、里泉、偉欽、國維，廖門俊文、炳宏，黃門彥琅、意婷、瑞陽，方門聖峯、奕蓁、柏碩，有你們的相伴，讓我這兩年的求學增添許多色彩，在此致上最真

誠的謝意。

最後，感謝父母對我的栽培及時常的關心，也謝謝妹妹平日生活上的照顧，讓我可以順利的完成學業，僅以此文獻給我最親愛的家人及幫助過我的朋友們。

張智棟 僅誌於新竹 2009 年 11 月





## 目錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	iii
誌謝.....	v
圖目錄.....	x
表目錄.....	xv
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 既有泥砂濃度觀測方法技術回顧與問題評析.....	5
2.2 泥砂濃度量測電學方法.....	28
2.3 TDR含砂濃度量測技術及其發展演繹.....	35
2.3.1 TDR泥砂濃度量測基本原理.....	35
2.3.2 TDR泥砂濃度感測器設計回顧.....	40
2.3.3 走時分析方法.....	46
2.4 頻率域速度分析法.....	53
第三章 研究方法.....	60
3.1 頻率域相位速度分析法之含砂濃度量測與標定.....	60

3.2 頻率域相位速度分析法量測含砂濃度影響因子探討.....	61
3.2.1 TDR感測器設計.....	61
3.2.2 水質鹽度影響試驗.....	62
3.2.3 纜線電阻影響試驗.....	62
3.2.4 含砂濃度率定試驗評估.....	63
第四章 試驗結果與討論.....	66
4.1 TDR含砂濃度量測效能評估與影響因子探討.....	66
4.1.1 水質鹽度影響.....	66
4.1.2 纜線電阻影響.....	73
4.1.3 含砂濃度試驗結果討論.....	78
4.2 現場實測結果討論.....	82
4.2.1 石門大圳測試結果.....	83
4.2.2 集集攔河堰測試結果.....	84
4.3 溫度效應之初步探討.....	87
4.3.1 溫度效應影響來源分析.....	87
4.3.2 rise time於頻率域相位速度分析法含砂濃度量測之影 響.....	91
第五章 結論與建議.....	95
5.1 結論.....	95

5.2 建議.....	96
參考文獻.....	97



## 圖目錄

圖 1.1 研究流程圖 .....	4
圖 2.1 各式取樣瓶 .....	7
圖 2.2 幫浦取樣器 .....	8
圖 2.3a) Acoustic backscatter method, b) Range gating method (Wren, et al. 2000) .....	10
圖 2.4 雷射束反射法 (Wren, et al., 2000).....	11
圖 2.5 雷射繞射法 (Wren, et al., 2000).....	13
圖 2.6 Optical Backscatter, OBS (D&A Instrument Company).....	16
圖 2.7 遙測光譜反射法 (Wren, et al., 2000).....	18
圖 2.8 光纖透光度法示意圖 (Campbell, et al., 2004) .....	19
圖 2.9 Density meter .....	21
圖 2.10 差壓式密度儀，左右圖分別為現地與實驗室的設計 (Calhoun, 2000) .....	23
圖 2.11(a) 水中設置式 (b) 岸上幫浦循環式 .....	23
圖 2.12 Suspended solid density monitoring (Untrasonic) ..	25
圖 2.13 現地實際洪水事件(Starr, 2005).....	30
圖 2.14 TDR監測儀器配置(Starr, 2005).....	30
圖 2.15 (a)大洪水，(b)中洪水，(c)小洪水事件時河床基底濃	

度與洪水流量關係 (Starr, 2005).....	31
圖 2. 16 平板式與圓柱型電容 (Li et al., 2005).....	33
圖 2. 17 泥砂濃度(<70%)與電容輸出關係(a)平板式 (b)圓柱 型 (Li et al., 2005).....	34
圖 2. 18 溫度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005).....	34
圖 2. 19 水質鹽度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005).....	35
圖 2.20 TDR量測系統示意圖.....	39
圖 2.21 典型TDR波形及走時與穩態值分析示意圖.....	40
圖 2. 22 TDR 感測器形式 (張育嘉, 2006).....	43
圖 2. 23 Ansoft HFSS <sup>®</sup> 電磁場有限元素分析軟體其操作介面 .....	44
圖 2. 24 Ansoft HFSS <sup>®</sup> 感測器探頭部分元件組合模型示意	44
圖 2. 25 30cm兩根探針型式感測器電場分析模擬結果(左)感 測器探頭加上金屬遮罩(右)未加上金屬遮罩 (鐘志忠, 2008).....	45
圖 2. 26 30cm三根探針型式感測器電場分析模擬結果(左)感 測器探頭加上金屬遮罩(右)未加上金屬遮罩 (鐘志忠, 2008).....	45
圖 2. 27 切線法示意圖 (張育嘉, 2006).....	47

圖 2.28 參考線法示意圖 (張育嘉, 2006).....	48
圖 2.29(a)shorted-uncoating感測器於不同鹽度之原始波形,(b) 波形微分後結果 (張育嘉, 2006).....	48
圖 2.30 改良後典型水-泥砂混合物之TDR量測波形(林志平等, 2007).....	52
圖 2.31 TDR走時與含砂濃度體積比SS率定關係(林志平等, 2007).....	53
圖 2.32 SASW資料擷取分析示意圖(修改自Foti, 2000).....	57
圖 2.33 TDR單段傳輸模型與對應反射係數.....	58
圖 2.34 利用TDR傳輸模型所得到之相位差結果.....	58
圖 2.35 利用TDR傳輸模型所得到之相位速度結果.....	59
圖 3.1 土壤種類粒徑分析結果.....	64
圖 4.1 不同形式感測器.....	70
圖 4.2 25cm同軸感測器照片.....	70
圖 4.3 70公分感測器在不同鹽度下之相位速度.....	71
圖 4.4 70公分感測器之鹽度實驗結果.....	71
圖 4.5 25公分同軸感測器在不同鹽度下之相位速度.....	72
圖 4.6 25公分同軸感測器之鹽度實驗結果.....	72
圖 4.7 45cm 3-rods不同鹽度之頻率域相位速度結果 (纜線為 20m QR320).....	75

圖 4.8 45cm 3-rods不同鹽度影響結果 (纜線為 20m QR320)	75
圖 4.9 45cm 3-rods不同鹽度之頻率域相位速度結果 (纜線為 140m QR320)	76
圖 4.10 45cm 3-rods鹽度測試結果 (纜線為 140m QR320)	76
圖 4.11 25cm同軸式感測器不同鹽度之頻率域相位速度結果 (纜線為 140m QR320)	77
圖 4.12 25cm同軸式感測器鹽度測試結果(纜線為 140m QR320)	77
圖 4.13 45cm 3-rods感測器泥砂率定曲線	79
圖 4.14 40cm同軸感測器泥砂率定曲線	80
圖 4.15 45cm 3-rods感測器泥砂率定曲線誤差分析	80
圖 4.16 40cm同軸感測器率定曲線誤差分析	81
圖 4.17 25cm同軸感測器泥砂率定曲線	81
圖 4.18 25cm同軸感測器率定曲線誤差分析	82
圖 4.19 石門大圳明渠段現場狀況	83
圖 4.20 石門大圳明渠段TDR SSC感測器量測歷時資料	84
圖 4.21 超音波、TDR、比重瓶法泥砂濃度量測方式結果比較	86
圖 4.22 TDR SSC與比重瓶法泥砂濃度量測結果差異	86

圖 4. 23 幫浦取樣變異性測試結果 .....	87
圖 4. 24 溫度影響含砂濃度實驗配置圖 .....	88
圖 4. 25 溫度效應對於含砂濃度影響(加熱TDR100 主機) (a) 溫度變化圖(b)含砂濃度變化圖.....	89
圖 4. 26 溫度效應對含砂濃度影響(加熱多工器)(a)溫度變化 圖(b)含砂濃度變化圖.....	90
圖 4. 27 TDR主機脈衝方波Rise time 示意圖 .....	92
圖 4. 28 溫度對rise time的影響 (a) TDR主機內部溫度(b) rise time變化圖 .....	93
圖 4. 29 Rise time對於含砂濃度影響數值模擬結果.....	93





## 表目錄

表 2.1 各種懸浮質觀測儀器優缺點比較表 .....	26
表 2.2 常見物質介電常數(Curtis and Defandorf, 1929) .....	39
表 4.1 各式感測器受鹽度影響誤差範圍 .....	69
表 4.2 不同長度同軸感測器受鹽度影響誤差範圍 .....	69
表 4.3 不同纜線長度時之鹽度影響誤差範圍 .....	74



# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

台灣地區受氣候變遷及地質條件影響，大多數河川具有流域小、坡度陡峻、流量快速反應降雨、洪枯流量懸殊等特徵，在颱風或暴雨來襲時由於山區源頭處大量沖蝕崩塌，下游易挾帶大量泥砂沖刷造成路基損毀、房屋倒塌與民眾生命安全受到威脅，若能即時觀測泥沙濃度，便能事前預防下游可能造成的災害。而水庫也常因為颱風來襲，泥沙大量帶入庫區造成民生用水短缺，而庫區內泥沙淤積也使水庫壽命減短，若能利用泥沙濃度觀測資料作為水庫排砂防淤的參考，便能有效延長水庫壽命，民生用水的問題也可得到解決，因此觀測泥沙濃度有其必要性。目前含砂濃度雖然可以由人工觀測，但重大暴雨事件不容易預測，而且颱風或暴雨發生期間要動員人力進行觀測有其困難性，因此自動化觀測泥沙濃度有其必要性。

現今許多自動化監測方法中，電磁波時域反射法(Time Domain Reflectometry，簡稱 TDR)已被應用於泥砂濃度量測，而隨著 TDR 分析方法的演繹及感測器型態研發改善，已大幅降低泥砂濃度量測誤差範圍，並不受水質鹽度及泥砂種類影響。但是由於既有分析方法仍著重在時間域上的分析，包括儀器誤差或現場雜訊干擾等微小改變可能造成量測結果的不穩定；現有感測器的外觀也因為在河川中易掛雜物

或石頭撞擊等，實務量測上無法避免外物干擾。

TDR 頻率域相位速度分析法(Frequency Domain Phase Velocity Method)是以計算 TDR 反射訊號之頻率相位速度，以求得材料之高頻介電行為 (1MHz~1GHz)。相較於傳統 TDR 時間域分析，TDR 頻率域相位速度分析法除可提供頻率域資訊外，並可減少時間域之雜訊影響 (鐘志忠，2008)。但此一分析方法目前僅有理論基礎及泥砂濃度量測數值模擬測試

本研究回顧以上問題，企圖藉由新式分析方法應用及感測器型態改善，期以提升含砂濃度量測的準確度及穩定性。

## 1.2 研究目的

本研究企圖嘗試基於 TDR 頻率域相位速度分析法，進一步由實驗驗證此方法的適用性，並探討此方法用於量測泥砂濃度的影響因子，配合新式泥砂濃度感測器的研發，進而提升含砂濃度量測的準確度及穩定性。

### 1.3 研究流程

本研究之流程圖如圖 1.1，主要是針對頻率域相位速度分析方法及新式感測器的改良進行室內實驗，探討各影響因子對於此分析方法的影響程度及感測器的量測效能，其中包含水質鹽度影響實驗、纜線電阻實驗及泥砂種利率定試驗。最後則是對於頻率域相位速度分析法的適用性與感測器改良後的量測準確度及穩定性進行現場實測評估。



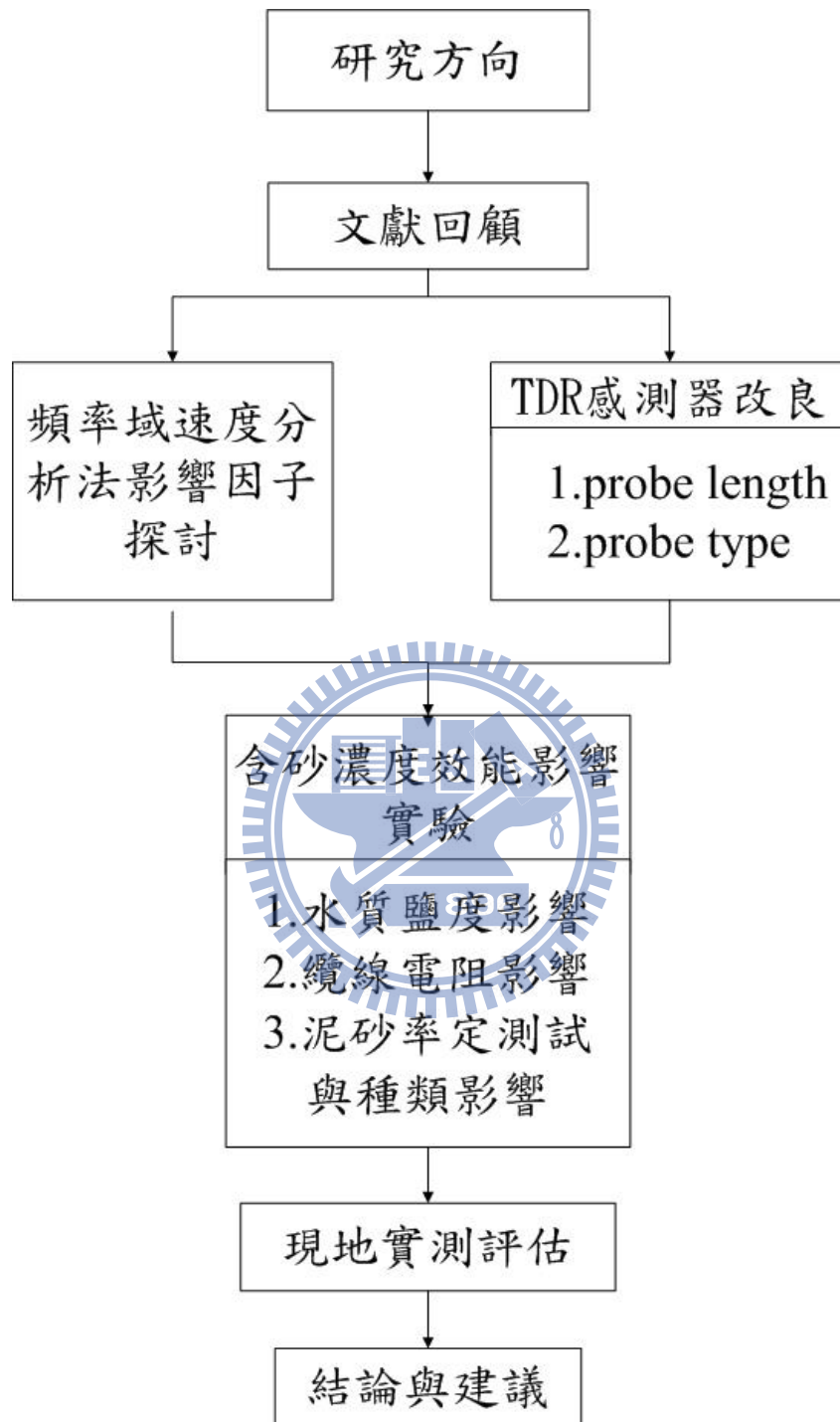


圖 1.1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 既有泥砂濃度觀測方法技術回顧與問題評析

傳統泥砂濃度量測技術方法主要可分為直接量測法及間接量測等兩種方法，而直接取樣包括取樣瓶取樣與幫浦取樣法等兩種，但其不易自動化、試體樣本易受擾動且耗費人力，無法在颱風或豪雨期間即時反應現地泥砂之濃度。間接量測方法主要利用光學或音波等物理性質與濁度之關係推估泥砂濃度，量測容易自動化，但其量測關係常受泥砂粒徑大小、礦物成分組成等其他因素影響，因此量測時需針對觀測目標特別標定。本節參考 Wren et al. (2000) 及 Wren and Kuhnle (2002) 所做各種含砂濃度量測的量測技術回顧，與 Campbell et al. (2004) 提出利用光纖透光度(Fiber optic In-stream Transmissometer, FIT) 之量測方法，並回顧張育嘉(2006)整理其操作原理與優缺點如下述所示：

#### 直接量測方法

##### (1) 懸浮質取樣器(bottle sampling)

原理：

懸浮質取樣器為一最簡單之取樣方法，其目的在於希望能在取樣器周圍混水中，取得較有代表性的樣本，以瞭解垂直或橫斷面的懸移質濃度。而原理係採用取樣瓶置於水中進行取樣，取樣

器具如圖2.1所示，利用取樣瓶則需注意取樣瓶口之水流速度需等同現地水中流速，否則其取樣之泥砂將不具現地代表性。為控制瓶口之水流速度能與外界環境達到平衡狀態，已有許多整合性之取樣裝置可進行使用。一般取樣瓶之操作準則，乃下降取樣瓶至取樣深度之下約一倍取樣瓶高度之深度進行取樣，然後取樣順序則由水底向上分層取樣。而採樣則須取回試驗室進行烘乾法或秤重法求得泥沙濃度。

優點：

取樣瓶法具採樣之可靠性以及普遍性。累積式(integrated type)之取樣器可進行全深度量測。另外，取樣瓶法可作為所有泥砂量測方法之標定參考。

限制：

取樣瓶在時域上之解析度差，且無法採用自動化方式，得需以人工方式量測，時間及人力成本耗費極大，且試體可能因人為擾動而失去代表性，無法確定量測之準確度。此外，人為取樣無法連續觀測泥沙含量，不能有效反映大雨洪水、颱風時的現地狀況。

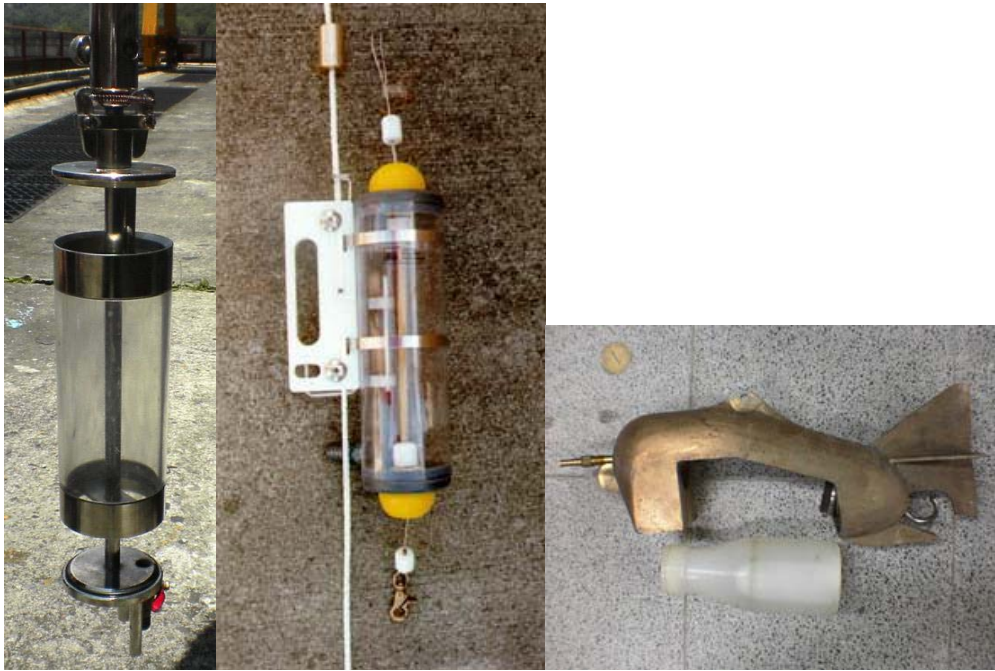


圖 2.1 各式取樣瓶

## (2) 幫浦取樣(pump sampling)

原理：

幫浦取樣利用真空原理進行取樣，通常幫浦之吸入口需面向上游。如同取樣瓶法，使用幫浦取樣時，其吸入口之水流速度須與現地水流速度相同。而取樣後之試體則於試驗室進行泥砂濃度以及粒徑分佈試驗。

優點：

幫浦取樣提供一可靠之取樣法，特別是針對小顆粒(< 0.062mm)之泥砂樣本。自動化幫浦取樣法可事先程式化，針對不同時間與量測高程進行設定，以減少人為操作。一般可自動化商業性產品可參考圖2.2 所示。



限制：

與其他量測方法比較，幫浦取樣之時間域解析度較差，主要由於幫浦取樣之過程耗時所導致。另外，試驗室分析將會增加其量測費用。而取樣之泥砂顆粒尺寸會因為幫浦之取樣口於水中之方位而有所變化。不過，目前之研究發現在取樣口之相對流速非小於80%或非大於200%時，其取樣口方位所造成之泥砂濃度變化不會超過20%。一般可自動化之取樣器其揚程僅有8 至9m，得需利用沈水式幫浦以採取更深之泥砂樣本，但沈水式幫浦目前仍無自動化。

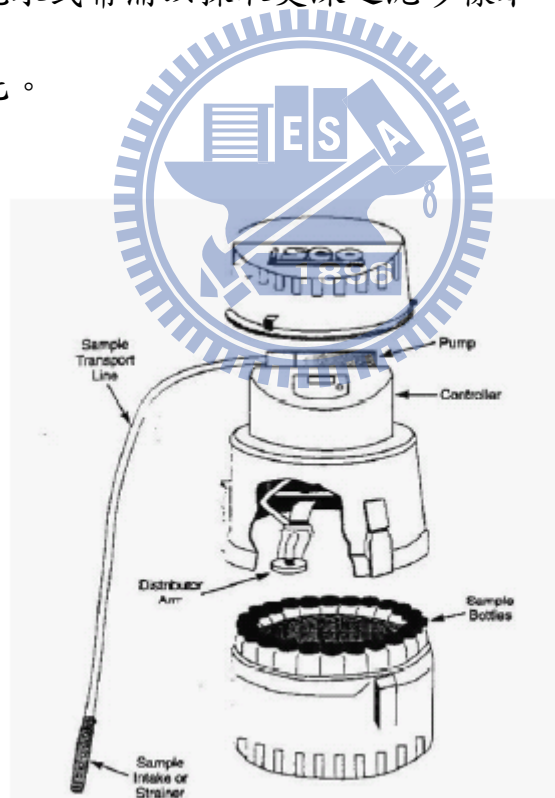


圖 2.2 幫浦取樣器

### 間接量測方法

(1) 聲波背散射法(acoustic backscatter methods)

原理：

聲波背散射法由傳感器發射一高頻(1-5 MHz)之聲波，透過聲波進入水中感測。若水中之懸浮質屬於一均勻尺寸之顆粒材質，則由反射回傳之聲波訊號(backscattered signal)可計算水中泥砂含量濃度，量測方法如圖2.3 所示。此方式所得到訊號之強度取決於水中泥砂顆粒之大小及濃度；另外，聲納法可選擇不同頻率聲波以探測不同尺寸之泥砂顆粒。但當使用高頻訊號時，backscattered 接收器之量測範圍約1-2 公尺，因此，當量測預定深度大於2 公尺以上時，則其傳感器得需潛入水下進行探測。聲波背散射法另有Range Gating 的量測方式，主要透過聲波回響之反射時間探測不同深度之泥砂濃度，如圖2.3 所示。

優點：

在所有泥砂濃度量測法中，聲波背散射提供了一非破壞式之量測方法，並可進行垂直向之量測。而高時間( $\approx 0.1$  s)與高空間( $\approx 1$  cm)之解析度，則可觀察擾動泥砂之運動狀況，以提供擾動泥砂之運動機制之研究資訊。而一般傳統之取樣瓶或是幫浦取樣，則無法提供即時之訊息。

限制：

建立聲波背散射法所擷取資料與泥砂濃度間之率定關係，是

相當困難且繁瑣，通常由室內標定泥砂濃度與量測訊號強度，以建立其相對關係，但如何準備可供超音波背散射法標定的試體準備設備是一件相當困難的工作。而在高泥砂濃度之狀況下，聲波之衰減量將是一嚴重問題。因此在計算泥砂濃度時，必須考量其訊號之衰減量，但考慮訊號衰減需要知道泥砂濃度(被量測的未知數)，為克服這項問題，需假設在靠近接收器第一個range bin 內的現地泥砂濃度，這項假設方法，會使得量測距離之增加而使量測誤差擴大。

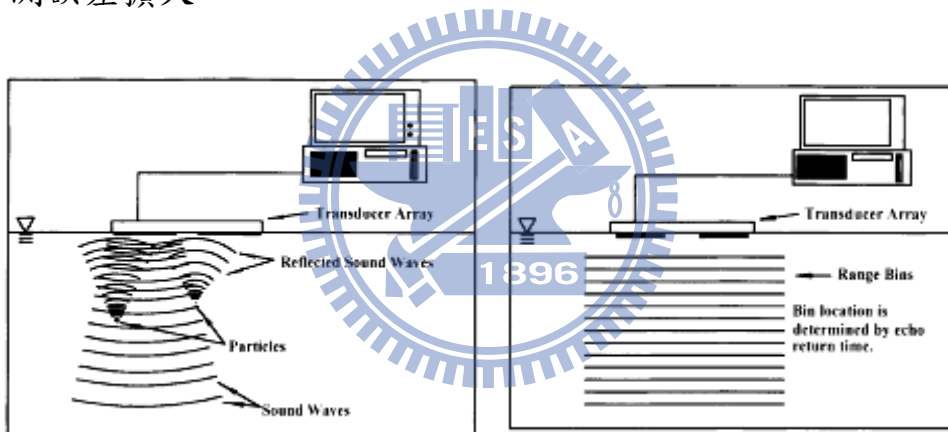


圖 2. 3a) Acoustic backscatter method, b) Range gating method (Wren, et al. 2000)

## (2)雷射束反射法(focused beam reflectance)

原理：

本方法使用一雷射束投射至水下小型取樣區塊( $< 2\mu\text{m}^2$ )並快速旋轉，爾後水中之泥砂顆粒反射使部分之雷射束，如圖 2-4 所示。而從反射之時間走時，可計算顆粒之弦長(chord length)。此

量測結果通常用於計算水中泥砂之體積含量。

優點：

雷射束反射法不受到泥砂顆粒粒徑之影響。通常雷射訊源可量測之泥砂顆粒粒徑範圍為1-1000 $\mu\text{m}$ ，甚至粒徑超過1000 $\mu\text{m}$ 大小之泥砂顆粒也可適用。而其泥砂濃度量測範圍為0.01 g/L 至50 g/L。此儀器重量輕，易於攜帶。且有許多現場量測之文獻報告可提供參考。

限制：

若水中之泥砂顆粒不具反射效應，如高有機含量的顆粒，則雷射束反射法之量測效果偏差。而在低泥砂濃度(0.001 g/L)之狀況，雷射束反射法須較長之擷取時間。由於雷射束反射法中，泥砂顆粒尺寸取決於顆粒之弦長，因此需事先假設顆粒之幾何形狀。若泥砂顆粒幾何形狀不一，則會大幅影響其量測值。另外，雷射束反射法屬於侵入式量測法，且其儀器成本昂貴。

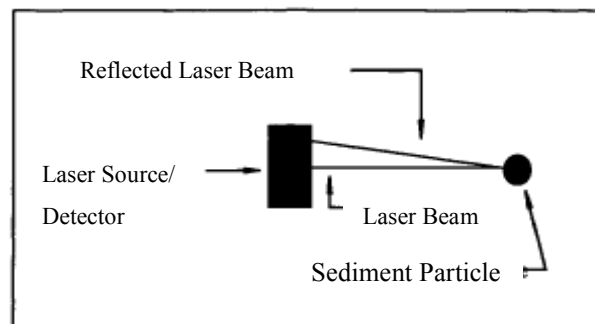


圖 2.4 雷射束反射法 (Wren, et al., 2000)

### (3)雷射繞射法(Laser Diffraction)

原理：

此方法乃投射雷射束進入水中後，水中之懸浮顆粒將散射、吸收或反射投射之雷射束，如圖2.5所示。而散射後之雷射將由一多重元素偵像儀(multielement photodetector)所接收，而多重元素偵像儀主要由環狀偵測器所組合，主要功用為量測雷射之散射角度。而泥砂顆粒之粒徑則可藉由量測之散射角，透過Fraunhofer近似公式或Lorenz-Mie理論解計算得知。透過此方法可不受顆粒粒徑之影響，然而需事先假設顆粒之密度。

優點：

由於雷射繞射法以量測泥砂顆粒粒徑大小為主，因此雷射繞射法不受到泥砂顆粒粒徑之影響，也不受到泥砂組成成分之影響。此方法也應用於量測水泥、巧克力或是微生物中顆粒粒徑大小。另外，雷射繞射法也不受到泥砂顆粒之折射係數影響。

限制：

如同雷射束反射法，雷射繞射法之儀器成本也相當昂貴；而其泥砂顆粒尺寸之量測限制約為250  $\mu\text{m}$ ，泥砂濃度量測範圍上限為5 g/L。根據上述限制，若需量測較大尺寸之泥砂顆粒，其需較長雷射之焦距。另外，由於多重元素偵像儀距需靠近雷射訊源，

故所能量測之空間範圍較小。而雷射繞射法本身屬於一高度技術，因此需要專業訓練人員負責操作及資料分析。此外，雷射繞射法之資料經過統計演算後，與泥砂濃度間並非為一對一之關係，除非現地之泥砂顆粒分佈較為均勻，才可提供較好之量測結果。

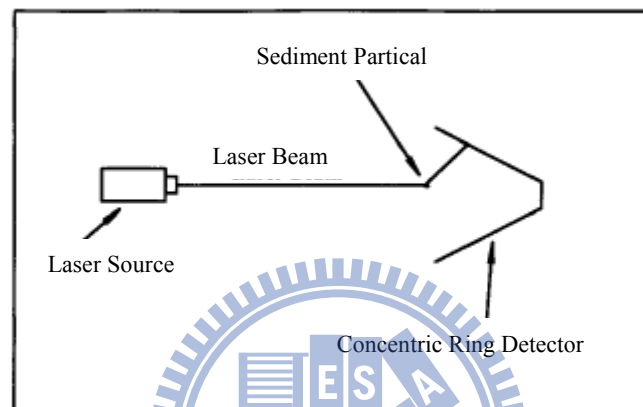


圖 2.5 雷射繞射法 (Wren, et al., 2000)

#### (4)核能法(Nuclear Measurement)

原理：

核能法主要量測輻射之衰減或反射訊號。量測之儀器分為下列三種形式：a)量測人為訊源之反射(backscatter)輻射、b)量測人為訊源之穿透(transmission)輻射，以及 c)量測泥砂顆粒之自然輻射。其中第一種方式乃採用一人造輻射訊源，將輻射投射至欲量測試體中，而輻射接收器通常置於與訊源同一平面。而第二種方法，其輻射接收器通常置於訊源對面，量測因通過濁水後之輻射

衰減量，並比對通過純水後之輻射衰減量。透過上述兩者之比值，則可計算水中泥砂之含量。上述方法一般利用儀器內部之電子模組，修正因水質溫度變化及輻射訊源能量衰減之影響。

優點：

此方法因耗能小，適於長時間之觀測。另外，此方法之泥砂濃度量測範圍為50~12000 ppm，且不受到水的顏色或是水中生物影響。

限制：

由於人造輻射源會自然衰減，因此需要時常替換輻射源。而泥砂之化學成分為影響量測讀數之主因。另外，使用核能法之操作需要具合格執照之專業人員。由於核能法本身之靈敏度限制，此方法較適用高於1000 ppm之泥砂濃度。另一方面，現地水質本身之化學成分不一，因此室內標定參數不能適用於現地量測結果；而核能法因人造輻射源會自然衰減之關係，則需要定期性重新標定量測儀器，故核能法之現地標定程式較為困難。而核能法每次量測需費3-5 分鐘，因此核能法無法反應水中泥砂濃度之即時變化。

#### (5)光學反射法(Optical Backscatter, OBS)

原理：

OBS 採用紅外線或是可見光直接投射於水中進行量測，而部分光線會因懸浮顆粒而反射。OBS 透過數組光電二極管 (photodiode) 量測反射之光線。接收之反射光線能量則用於計算泥砂含量多寡(如圖 2.6 所示)。OBS 需於量測前對於已知濃度之泥砂進行標定程式。

優點：

OBS 量測值與均質之泥砂濃度成一線性關係，且此一關係可適用超過 OBS 所能量測之泥砂濃度範圍極限。OBS 提供一高時域與空間域之解析度，且 OBS 模組已經大量商業化。透過遠端操控及資料傳輸，OBS 可輸出即時資料以提供相關參考使用。

限制：

光學反射法量測結果受到泥砂顆粒尺寸影響。在相同泥砂濃度但不同泥砂顆粒尺寸之狀況下，其兩者泥砂濃度量測結果相差約十倍。而光學反射法於小泥砂顆粒粒徑之量測具有較高之靈敏度；通常 20  $\mu\text{m}$  至 50 $\mu\text{m}$  之泥砂顆粒尺寸變化下，其量測值 (V/(g/L)) 變化達 70%，而 200  $\mu\text{m}$  至 400  $\mu\text{m}$  之變化時，其量測值變化為 30%。一般光學反射法適用於均勻之泥砂顆粒粒徑或是其粒徑維持在 200-400  $\mu\text{m}$  範圍內。



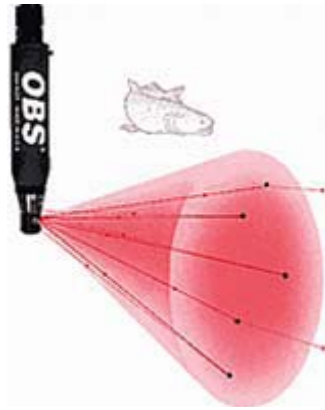


圖 2. 6 Optical Backscatter, OBS (D&A Instrument Company)

#### (6)光學穿透法(Optical Transmission)

原理：

如同OBS 法，光學穿透法也是直接將光源投射至水中進行量測。而水中之泥砂顆粒將部分吸收或反射其光線。而光線接收器將置於光源之對面以量測光線之衰減量。透過事先的標定程式，則可了解量測衰減量於泥砂濃度之關係。

優點：

光學穿透法承繼OBS 之多項優點，尤其是在低濃度之狀況，光學穿透法提供了比OBS 更為精確之解析度。同樣地，光學穿透法之儀器也模組已經大量商業化。

限制：

光學穿透法如同OBS 也面臨相同之量測問題，但泥砂顆粒粒徑之影響較OBS 小，而泥砂顆粒之折射係數亦會影響其量測

結果。光學穿透法之量測讀數與泥砂濃度間並非成一線性關係，在濃度量測範圍上限時，很大的泥砂濃度改變僅會造成儀器訊號輸出很小的改變量，可採用較短之光學傳輸路徑以修正上述之問題，但水流的干擾較大。若遇到泥砂含量之變化量較大時，需採用多組光學穿法儀器進行量測。

### (7)遙測光譜反射法

原理：

光譜反射法主要量測經由水中泥砂顆粒所反射之紅外線或是可見光，如圖2.7所示。光輻射經由攜帶式、空照式或是衛星式之光譜儀(spectrometer)量測。而泥砂濃度與反射光輻之關係取決於泥砂顆粒之光學性質、感測器接收角度、日照最高點角度以及量測之空間解析度。

優點：

光譜反射法能進行大範圍地域之量測，而且能持續觀察大範圍地域之變化，特別是高泥砂濃度或侵蝕淘刷等問題之觀察，可提供需進行沖蝕防制工作的重點區域。

限制：

通常增加 0.05 g/L 之泥砂含量，光譜反射法量測之反射量僅增加約 1%，但是感測器因外來光源、水位或是大氣影響之誤差

量則大於 1%。而光譜反射法因受到泥砂組成礦物成分之影響甚大，因此在泥砂組成成分未明狀況下，所量測之泥砂濃度具有相當大之誤差。另一方面，光譜反射法也受到泥砂顆粒尺寸之影響。

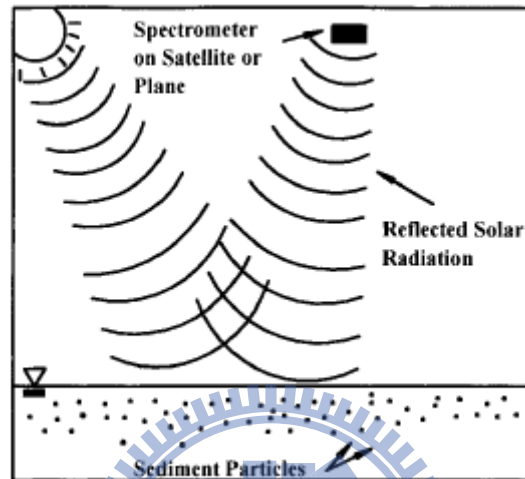


圖 2.7 遙測光譜反射法 (Wren, et al., 2000)

#### (8) 光纖透光度法 (Fiber optic In-stream Transmissometer, FIT)

Campbell, et al. (2004) 提出光纖透光度法，主要利用光纖製成之感測器，由一端利用 LED 輸入強光，再由感測器之另一端利用影像偵測器 (Photodetector) 記錄其接收到的光源衰減強度，如圖 2.8 所示。此方式所得到訊號之強度取決於水中泥砂種類及顆粒之大小，當泥砂濃度升高或顆粒粒徑越大，將使訊號有明顯程度衰減。

優點：

光纖透光度法量測範圍約從 0~10 g/L，可兼顧低濃度與高濃

度，相較現有光學濁度計量測範圍較大，且若能經由標定之修正，可量測渾水濃度之顆粒徑大小最大可至710  $\mu\text{m}$  最小至45  $\mu\text{m}$ ，亦可達到即時監測用；且此法可透過調整光學的路徑長(optical pathlength)或改變光源之強度，便可以較低的儀器成本來增加其量測效能，。

限制：

此法量測效能僅於室內試驗室測試，尚未應用於現地監測用；且其量測系統受懸浮粒子粒徑影響大，若使用於現地量測時，則需加入精密的感測器系統，能即時量測及計算懸浮粒子之粒徑大小，以作為修正之用。

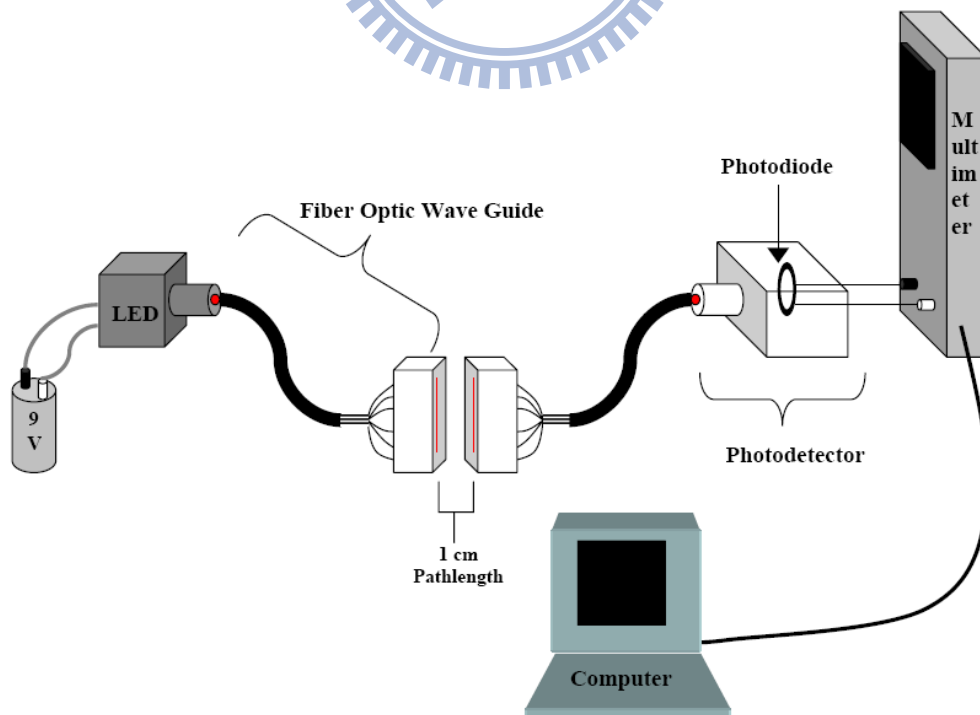


圖 2.8 光纖透光度法示意圖 (Campbell, et al., 2004)

## 其他方法：

### 1. 震動式密度儀(Vibrating Tube & Density meter)

本方法將水引至岸邊或水中定點設置固定之 Vibrating tube，Vibrating tube 不斷震動並由電子儀器紀錄震動頻率，其使用原理則靠：(1)泥砂濃度與泥水混合物之單位重，(2)泥水混合物之單位重與 Vibrating Tube 之震動週期這兩種關係，以決定泥砂濃度。然而，此方法具有以下幾點誤差來源：不溶解之固體濃度所造成之平移誤差、水溫、流速及 Vibrating Tube 中其他雜質等。前面三種誤差可透過感測器進行校正，而最後一項則比較難以解決。

而 Density meter (Vibration element technology) 方法採用一 Vibration element (如圖 2.9 所示)，可量測於溶液之自然震動頻率。當溶液中之泥砂濃度增加或減少時，而使得整體的溶液比重改變，因此在不同泥砂濃度狀態下之自然共振頻率隨之改變，但此方法仍須透過室內標定程式，以決定各種影響因素。

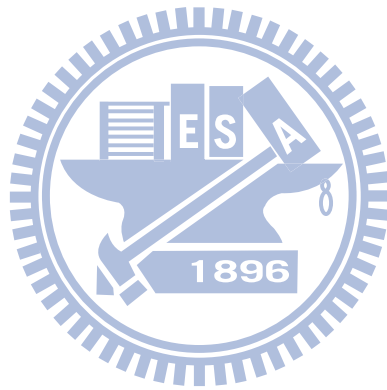


圖 2.9 Density meter

## 2. 差壓式(Differential Pressure)

Lewis與Rasmussen (1996)提出差壓法 (differential pressure) 量測方式，其利用兩個壓力計量測出泥水混合物之比重差，進而推算出水中含砂濃度（如圖 2.10所示），但此方法易受水的溫度、水流擾動、水流流速以及水中溶解成分等因素影響。 Prof. Rasmussen 研究群經過 10 年的陸續研究，在Tollner 等(2005)中回顧差壓式量測方法，實驗室試驗量測精確度可達 10 到 1000mg/L，但在現地量測時因水中時有漂流物體經過感測器，其會造成水流擾動進而導致瞬時水壓分佈不平均，造成感測器所量測到之壓力與真實值差異頗大大，造成之誤差可高達 65,000mg/L，因此結論指出該方法應不適合in-stream條件下的量測。

角哲也 (2003)之現地測試較為成功，但須配合水循環系統或浮台系統製造非in-stream的條件，如圖 2.11所示。其中浮台系統僅適用於水體表面之量測，且儀器可能受河流衝擊而損壞；水循環系統利用抽水幫浦引水至裝置內進行循環式長期監測，然而該裝置在長期監測時，存在抽水幫浦管路淤砂問題，需定期將水槽中淤積的泥砂排除。



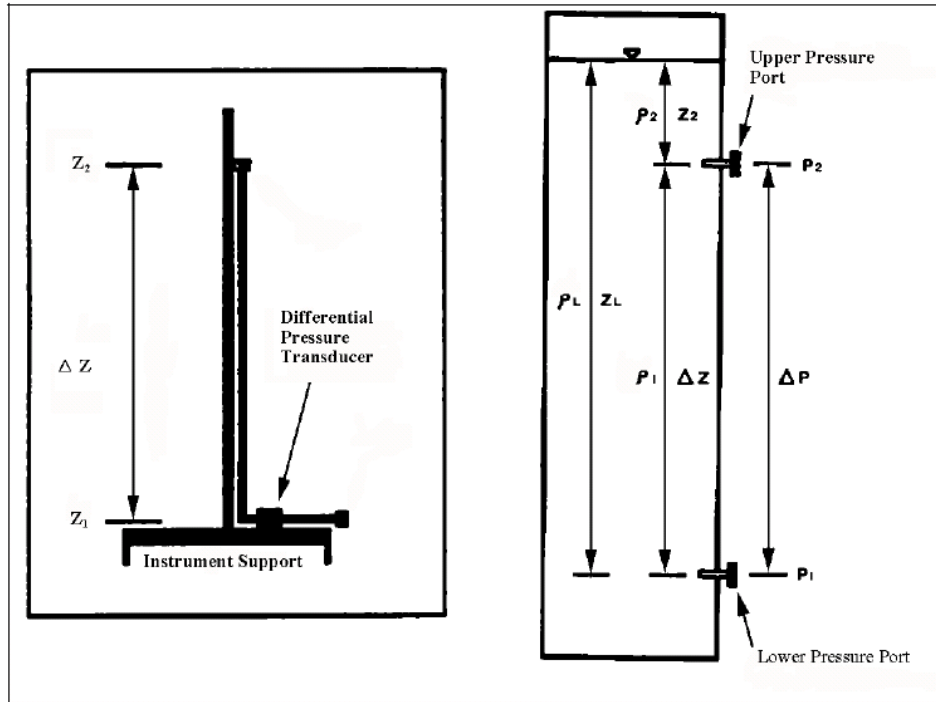


圖 2.10 差壓式密度儀，左右圖分別為現地與實驗室的設計 (Calhoun, 2000)

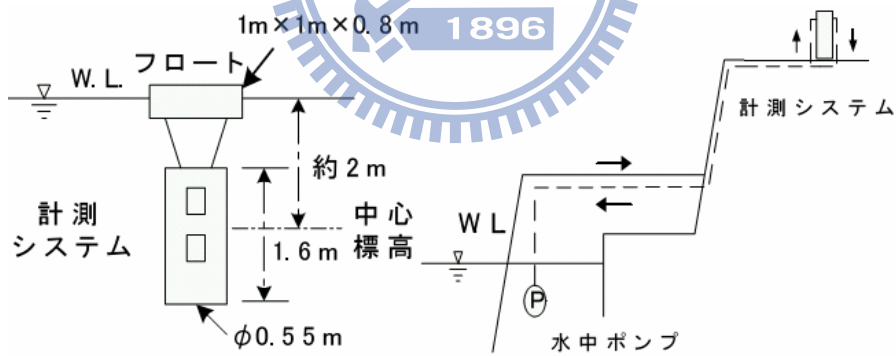


圖 2.11(a) 水中設置式 (b) 岸上幫浦循環式



### 3. Impact sampler

此方法之原理基於動量之轉移。泥砂顆粒撞擊頻率透過傳感器紀錄，而撞擊頻率則取決於重量、速度以及泥砂顆粒撞擊之角度。

### 4. Video microscopy

本方法採用一影像攝影機以拍攝現地泥水混合物，影片可用於勘查泥砂之實況；影片透過電腦自動處理，則可分析泥砂之顆粒大小、形狀以及數量。此方法影響因素包含光源之種類、攝影系統之靈敏度以及影像處理方法。然而本方法較不適用於泥砂變遷之行為。



### 5. 超音波傳輸衰減( Accoustic transmission attenuation)

此方法主要原理採用一對音波探頭，以一探頭髮射超音波 (Untrasonic) 另一探頭接收其能量的方式進行量測，如圖2.12 所示。藉由超音波之衰減量，估計泥水混和物之比重。該量測方法常用於工業上，在天然河川中之應用需要進一步評估，包括洪水期間觀測的實務問題。

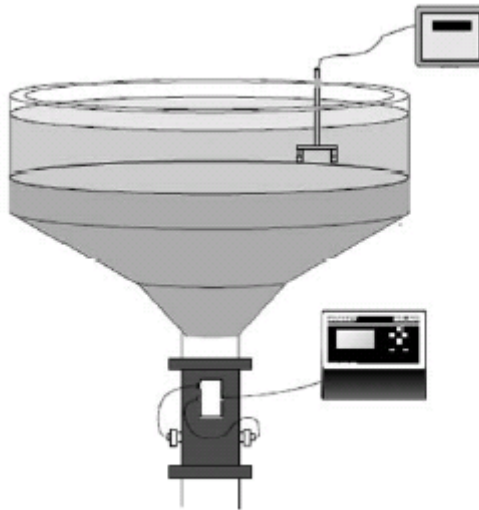


圖 2. 12 Suspended solid density monitoring (Ultrasonic)

依據上述各項量測方法，簡單將各項方法之特徵及優缺點列表於表 2.1。由表 2.1 得知，大多數的現地監測方法，其量測範圍遠小於泥砂運移觀測之需求(至少 10 萬ppm)及需多點觀測，且多數之量測儀器甚為精密貴重，因此，這些電子儀器在洪水期間之使用堪虞。此外，以水理輸砂的觀點考量，含砂濃度在不同深度與位置之變化也很重要，而大多量測方法僅能針對單一點量測，礙於成本以及現場安裝考量，多點量測的效率與經濟性差，無法有效的大範圍量測。

表 2.1 各種含砂濃度自動化觀測儀器功能比較表

方法	操作原理	設置成本	操作性	濃度量測範圍	量測準確度 (誤差範圍)	量測誤差來源	耐用性	
較易取得商業儀器	Optical (光學式)	利用可見光或紅外線之穿透或散射反射進行含砂濃度量測	已商業化，單點儀器成本約為 10-30 萬。	操作簡易、具有良好時間解析度，可遠端自動化量測，屬於入侵式	取決於散射量測角度與光源及接受器型態，亦受粒徑分佈影響。90 度散射之量測範圍一般小於 5000 ppm，大角度回散射儀器可達 10~20 萬 ppm	在特別率定的情形下，90 度散射量測靈敏度高，量測準確度約為 100 ppm。大角度回散射儀器量測準確度隨量測濃度增加而增加，誤差約在 100 ~ 5000 ppm 之間	受顆粒顏色與粒徑大小影響大，率定工作困難	儀器感測面易受污染。於洪水條件下之耐用性堪虞
	SuperSonic (超音波法)	利用超音波傳輸能量之衰減探測含砂濃度	已商業化，單點儀器成本約為 20 萬。	操作簡易、具有良好時間解析度，可自動化量測，屬於入侵式	取決於感測器尺寸、頻率及粒徑分佈。在感測器間距 10cm 及含泥量大於 20% 狀況下，量測範圍一般小於 15 萬 ppm	在特別率定的情形下，量測準確度隨量測濃度增加而增加，誤差約在 1000 ~ 5000 ppm 之間	受感測器尺寸、泥砂顆粒大小、種類影響大，率定工作困難	於洪水條件下之耐用性堪虞
	雷射繞射 (Laser diffraction)	利用雷射之折角探測淤砂顆粒	已商業化，但儀器成本為目前所有方法中最高	操作複雜，需專業訓練。具有良好時間解析度，屬於侵入式量測法	一般量測範圍小於 5000ppm	量測靈敏度高，量測準確度約 10 ppm	不受粒徑影響，但由於探測空間範圍小，易受局部性擾動	於洪水條件下之耐用性堪虞

其他儀器	核能法 (Nuclear)	利用透射或反射之 gamma 或 X-rays 進行量測	尚未商業化	操作複雜，需專業訓練。耗能小，適於長時間觀測，屬於入侵式	一般量測範圍約為 500-12000ppm	取決於核能法本身之靈敏度限制，此方法較適用高於 1000ppm	受泥砂化學成分影響，因人造輻射源會自然衰減之關係，需定期性重新率定量測儀器	維護性差，且現地標定程式較為困難
	差壓式 (Differential pressure)	利用兩個壓力計（或差壓計）由不同高度壓力差計算出泥水混合物之比重，進而推算出水中含砂濃度	尚未商業化	操作簡單，屬於非侵入式量測	實驗室試驗量測精確度可達 10 到 1000ppm	受水中漂流物影響，量測誤差可高達 65,000ppm	易受溫度、水流擾動、水流流速以及水中溶解成分等因素影響	儀器易受水流影響而損壞，耐用性堪虞
	電容式 (Capacitance)	利用平板或圓柱型電容感測器，基於輸出之電容量與濃度成正比關係之原理	尚未商業化	操作簡單，屬於非侵入式量測	量測技術具有高濃度量測的能力，但黏土和砂的粒徑大小會影響濃度之輸出結果	泥砂濃度量測在低濃度量測時，其準確性不足	受溫度、水質導電度及泥砂種類所影響大，前者可以修正補償，但後兩者無法即時量測補償	耐用性有待商榷

## 2.2 泥砂濃度量測電學方法

由前小節所述，於泥砂濃度量測現有技術方法有諸多的限制，無法實際達到實際量測之需求，例如能兼顧低濃度與高濃度泥砂之量測，故近年來學者紛紛研究並嘗試以電學方法作為量測，目前主要利用電學方法量測可分為電磁波時域反射法 (Time Domain Reflectometry，簡稱 TDR)及電容量測方法，因此分別於此節敘述此兩種量測方法之優缺點及量測限制。

近年來由於先進監測技術的發展，因此將電磁波時域反射法用於大地工程監測技術上，已有多項成果，而Starr (2005)將TDR 監測技術應用於河床基底泥砂濃度量測上，其量測方法為使用三根長 55cm 不鏽鋼棒與 2.5cm 厚之德爾林塑膠(Derlin<sup>®</sup>)所組成之探頭，並且分別於流量為 5、70 及 130 CMS 三個不同大小之洪水事件(如圖 2.13)所示中，監測河流基底濃度之變化，其研究監測配置如圖 2.14。

實際監測結果如圖 2.15 所示，當感測器未做泥砂種類的標定時，量測水砂混和物濃度之標準偏差約在 20 g/L 的範圍內，而當感測器完全埋入河道 0~2.5 cm 底泥材質時，量測標準偏差約在 200 g/L 之範圍內。

除此之外，監測結果顯示在中、大規模洪水事件中，河床基底所量得之濃度值高達 1500 到 1900 g/L 之間與試驗室率定有一良好相

關性，但在小洪水事件中，所量得得濃度值較大洪水事件稍低僅 200 到 800 g/L。

但若河床基底出現高濃度的現象時，研判可能為河床基底產生超高濃度流，而這種現象是傳統儀器無法在河床基底可量測到的。由 Starr (2005) 研究所提出之電學泥砂濃度量測技術，主要為解決高濃度量測的技術，研究結果顯示當感測器埋在河床基底約 0~2cm，發現大、中規模洪水事件，基底濃度從 400 升至 1200 g/L 之間，且過流量尖峰後，穩定在 1500 至 1900 g/L 之間，最後則又回到 400 升至 1200 g/L 間；小洪水歷時之濃度變化則僅約 200 至 800 g/L 之間，這些結果吻合高濃度泥砂運移與河道侵蝕之關係。而其量測主要限制，為在低濃度的環境中量測，以河川之泥砂濃度變化範圍考量，量測誤差還是遠超過能容許的最大範圍；甚且其所研究對象為河床基底超高濃度(甚至已快接近土壤含水狀態)，並不能代表河川或於蓄水設施中懸浮濃度量測之參考。因此，若為滿足低濃度量測需求，則需再作進一步研究。



圖 2.13 現地實際洪水事件(Starr, 2005)



圖 2.14 TDR 監測儀器配置(Starr, 2005)

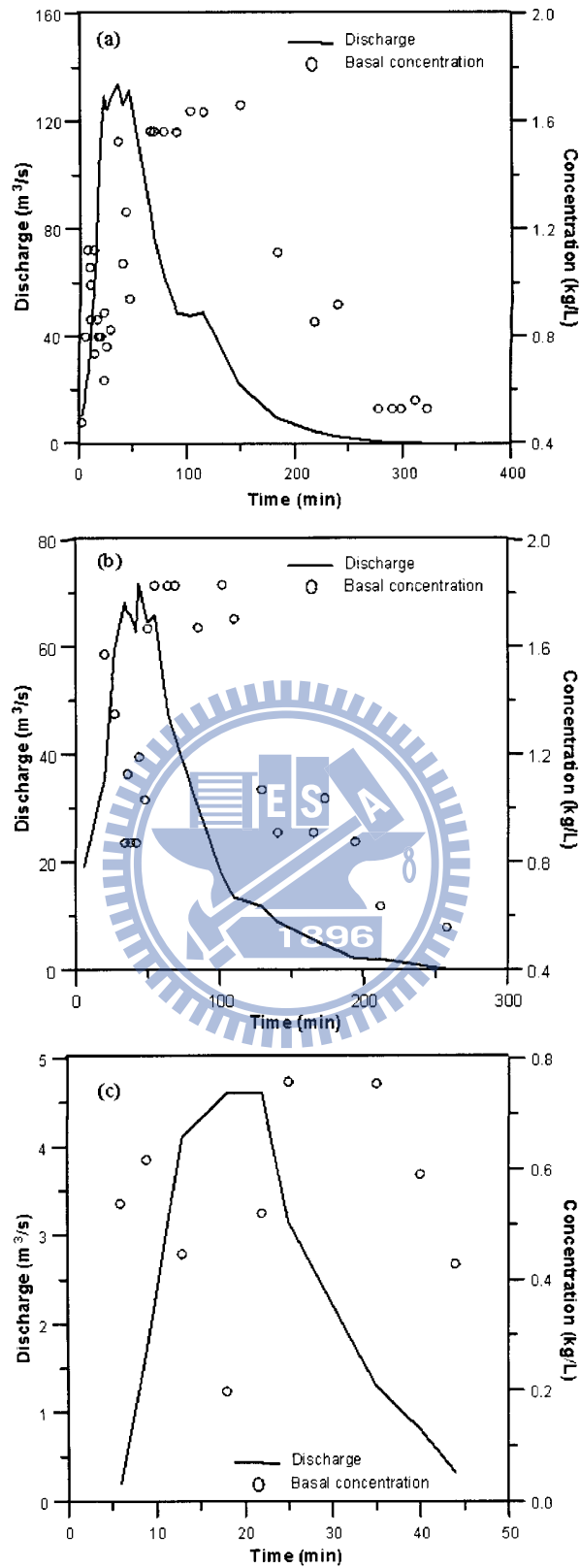


圖 2.15 (a)大洪水，(b)中洪水，(c)小洪水事件時河床基底濃度與洪水  
流量關係 (Starr, 2005)



而Li et al. (2005)提出以電容方式量測含砂濃度，其方法主要利用平板及圓柱型電容感測器，如圖 2.16 所示，當泥砂濃度增加時，Li 等學者基於輸出之電流容量與濃度成正比關係之原理，施作相關影響試驗來驗證電容感測器的效能。試驗測試所用之土樣分別為兩試驗場址農田裡之表土與含砂較多之表土，其影響因子探討分為以下五種：(1)泥砂濃度、(2)溫度影響、(3)水流速度、(4)土壤組構及(5)水質鹽度。

研究結果顯示：

(1)當泥砂濃度體積百分比 $\leq 70\%$ 及其密度在  $0\sim 1150\text{ kg/m}^3$  時，所量得輸出之濃度與電容之關係有一線性良好相關性，如圖 2.17 所示；當泥砂濃度體積百分比 $\geq 70\%$ 或其密度為  $1150\text{ kg/m}^3$  時，結果將趨於非線性化。

(2)在相同濃度下，量測輸出結果隨著溫度升高而提高，但其線性度稍差，如圖 2.18 所示。

(3)在水流流速  $0\sim 2\text{ m/s}$  下，感測器量得結果並未受影響。

(4)土壤組構不同對量測結果影響非常小。

(5)水質鹽度會使所量得值升高，如圖 2.19 所示，但發現當鹽度濃度在小於  $0.2\%$  時，量測誤差約於 $\pm 0.3\%$ ，但若當鹽度濃度在大於  $0.2\%$  時，則將使量測誤差上升約達到 $\pm 1.1\%$ 。

綜合上述測試結果，電容式泥砂濃度量測技術具有高濃度量測的

能力，但黏土和砂的粒徑大小會影響濃度之輸出結果及當在高濃度(大於 70%)時，因沉澱物與水已經很難再流動，將導致無法量測；除此之外，電容式泥砂濃度量測在低濃度量測時，其準確性不足等，因此尚需進一步研究。

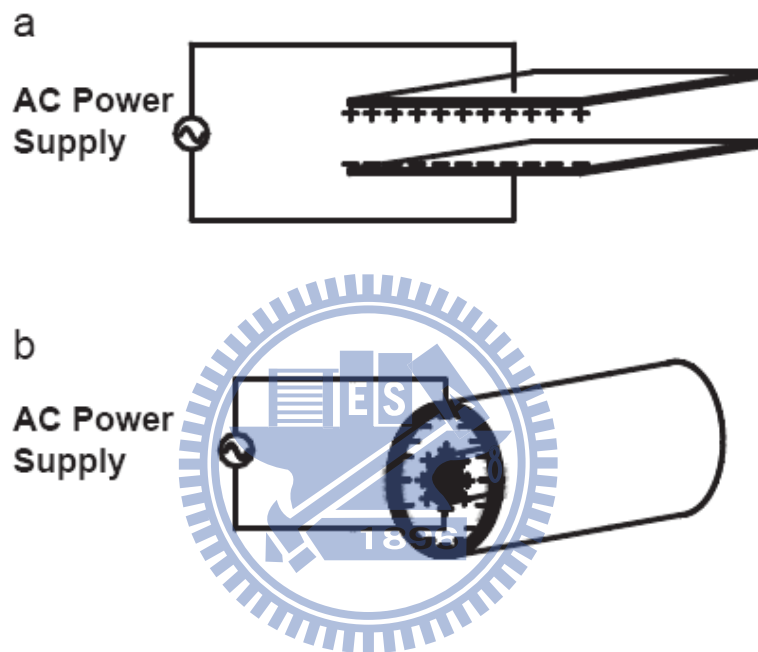


圖 2. 16 平板式與圓柱型電容 (Li et al., 2005)

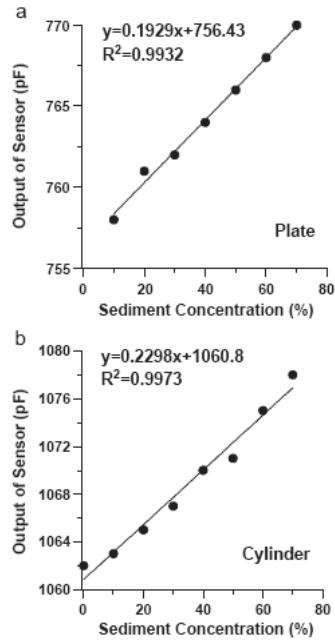


圖 2.17 泥砂濃度(<70%)與電容輸出關係(a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005)

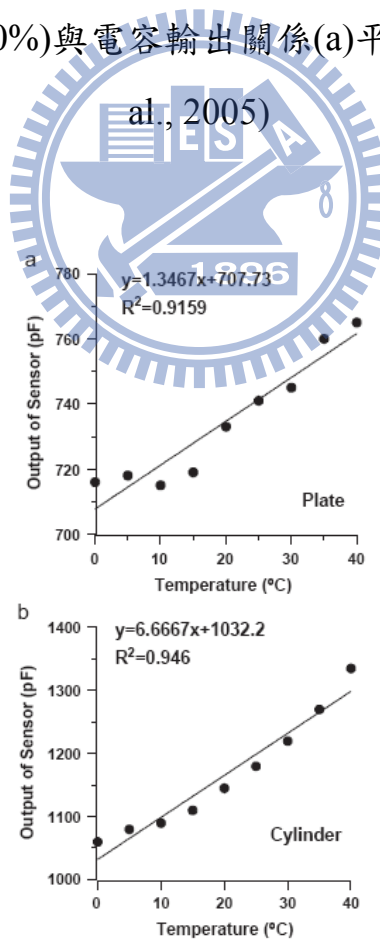


圖 2.18 溫度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005)

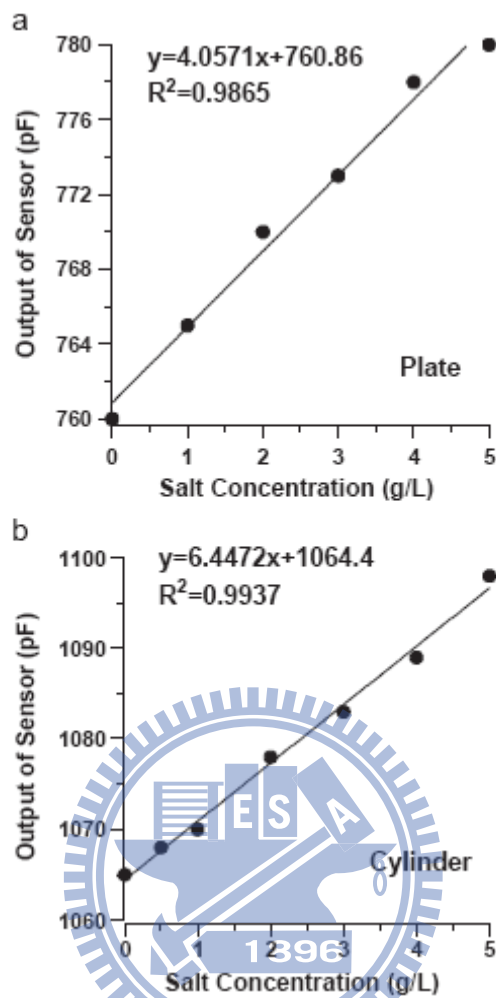


圖 2.19 水質鹽度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005)

## 2.3 TDR 含砂濃度量測技術及其發展演繹

### 2.3.1 TDR 泥砂濃度量測基本原理

時域反射儀(Time Domain Reflectometry)是以電磁波為基礎之探測技術，基本原理與雷達相同，但屬於一維的電磁波波傳問題。圖 2.20 為 TDR 量測系統之示意圖，主要由階躍脈衝電壓產生器(step generator)、訊號取樣器(sampler) 與示波器 ( oscilloscope)組成，傳輸

系統包括同軸纜線(coaxial cable)與感測器(measurement waveguide)。  
感測器為同軸纜線之延伸，同時作為訊號傳輸與感測元件。TDR 量測主要由階躍脈衝電壓產生器發射一電磁脈衝進入同軸電纜及感測器，並由示波器記錄感測器內阻抗(impedance)不連續所造成之反射，而感測器之設計主要將監測之環境變化轉換為感測器之傳輸阻抗變化，如此便可藉由反射訊號得知環境變化參數。

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) 及特徵阻抗(characteristic impedance)。傳遞常數控制波之傳遞速度與衰減，受到傳輸線內介質之電學性質所影響；特徵阻抗是由傳輸線導體之斷面幾何與傳輸線內介質所決定，控制波傳之反射訊號率大小。

典型的TDR訊號如圖 2.21所示。圖中  $T_R$  為感測器感受外界物質改變之走時  $V_\infty$  為感測器之末端穩態值，由走時於末端穩態值之反射訊號可決定感應導波器內介質的電學性質，包括介電度(dielectric permittivity)與導電度(electrical conductivity)。介電度控制電磁波之傳遞速度，相反地，可由量測電磁波速度計算介電度。Topp (1980)等學者定義視介電常數(apparent dielectric constant,  $\epsilon_a$ )可由反射訊號之來回走時( $T_R$ )及感測器長度(L)以下式決定：

$$\epsilon_a = \left( \frac{cT_R}{2L} \right)^2 \quad (2-1)$$

其中， $C$  為光速， $T_R$  為走時， $L$  為感測器長度。

導電度  $\sigma$  則是由末端穩態值  $V_\infty$  求得(Lin, et al., 2007a)，而研究發現水土混合物之導電度隨泥砂濃度增加而增加，因此利用此一正相關係藉由導電度求得泥砂濃度有其可能性，但林志平等(2006)發現除了泥砂種類之外，導電度與泥砂濃度的關係也受到泥砂種類與溶解鹽度之影響，然而現地監測技術尚無法於現場分離水相導電度  $\sigma_w$  的影響，因此 TDR 導電度利用於泥砂濃度量測上有其困難性。由於導電度法受到泥砂種類與水體導電度影響甚大，因此希望能由較不受土壤種類影響的介電度法求得含砂濃度。

因組成土壤組構之各種物質之介電常數(Dielectric constant)會隨著其本身特性而各有不同，常見組成物質之介電常數如表 2.1 所示。而泥砂濃度量測之原理主要基於水與土壤顆粒之介電度的差異性，水的介電度為 80，土壤顆粒之介電度為 3~5，水土混合物之整體介電度則受到水與土的體積含量比例所控制。因此水土混合物之視介電常數隨泥砂濃度之增加而減少，視介電常數與泥砂濃度之關係可以介電性質之組構率為基礎進行標定。電磁波於感測器內之來回走時與介電性質有一定的關係，故於實務上可以視介電常數來決定泥砂濃度。而水土混合物的整體介電度受水與土的體積含量比例所控制(Dobson et al., 1985; Sihvola, 1999)因此渾水的介電度可由下式描述之

$$\sqrt{\varepsilon_a} = (1 - SS)\sqrt{\varepsilon_w} + SS\sqrt{\varepsilon_{ss}} \quad (2-2)$$

其中  $\varepsilon_a$  為渾水的視介電常數，SS 為泥砂濃度體積比，範圍從 0~1 之間， $\varepsilon_w$  為水的視介電常數(約為 80)， $\varepsilon_{ss}$  為砂土顆粒的視介電常數(約在 3~10 之間)。若已知感測器長度 L，根據視介電常數  $\varepsilon_a$  的定義(2-1) 即可得知 TDR 含砂濃度量測走時與泥砂濃度的關係式如下：

$$\Delta t = (1 - SS)(\Delta t_w) + (SS)(\Delta t_{ss}) \quad (2-3)$$

其中  $\Delta t$  為感測器於渾水中的走時， $\Delta t_w$  與  $\Delta t_{ss}$  為感測器於水中及土中之走時。感測器在水中及土中的走時可由標定得知，而根據 (2-2) 及 (2-3) 式中泥砂濃度體積比可由下式表示之：

$$SS = \frac{\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_a}}{\sqrt{\varepsilon_w} - \sqrt{\varepsilon_{ss}}} = \frac{\Delta t_w - \Delta t}{\Delta t_w - \Delta t_s} \quad (2-4)$$

得知泥砂濃度體積比 SS 後便可轉換成含砂濃度 ppm (milligram per liter, or mg/l)

如下式：

$$ppm(mgl^{-1}) = \frac{SS \cdot G_s}{1 - SS} 10^6 \quad (2-5)$$

表 2.1 常見物質介電常數(Curtis and Defandorf, 1929)

Material	Dielectric constant
Air	1
Water	80 at 20°C
Ice	3 at -5°C
Basalt	12
Granite	7-9
Sandstone	9-11
Dry loam	3.5
Dry sand	2.5

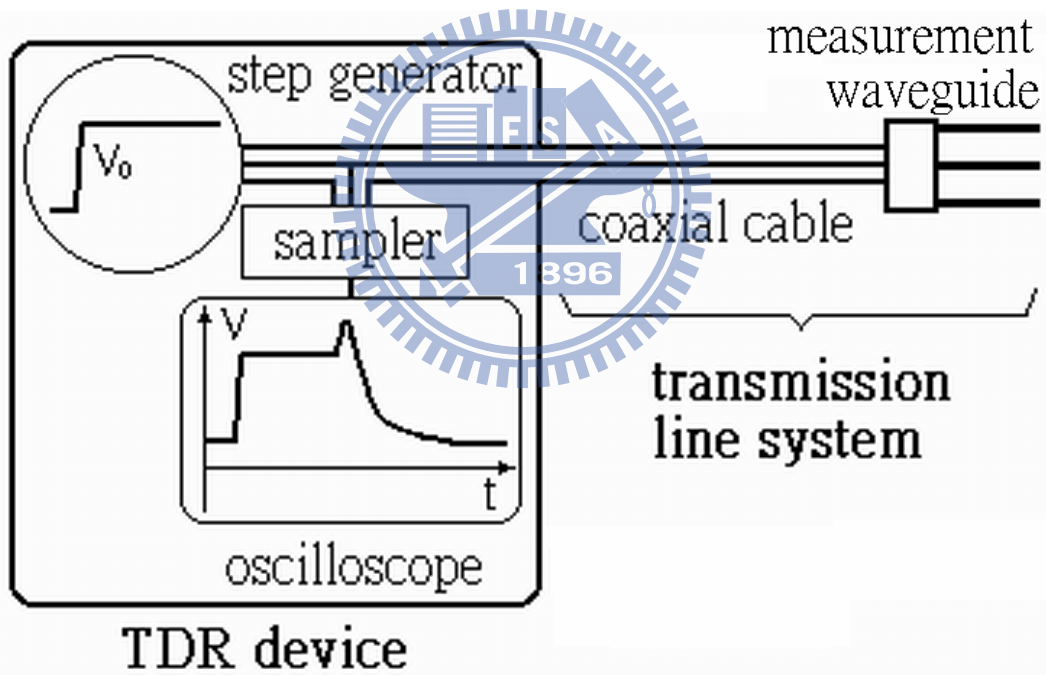


圖 2.20 TDR 量測系統示意圖



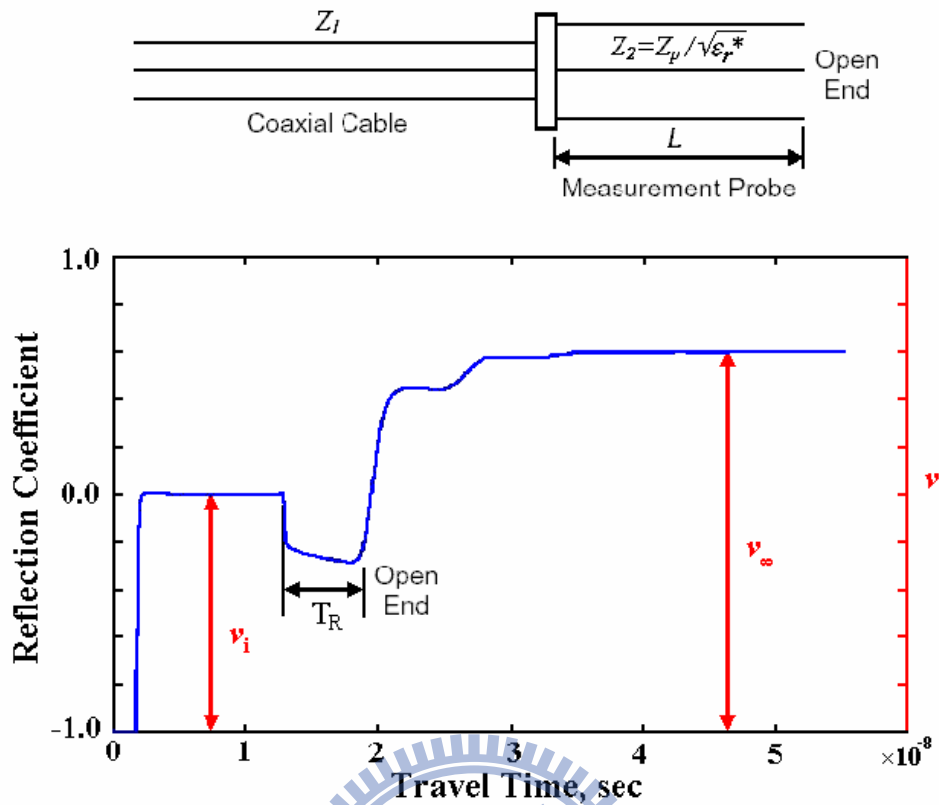


圖 2.21 典型 TDR 波形及走時與穩態值分析示意圖

### 2.3.2 TDR 泥砂濃度感測器設計回顧

張育嘉(2006) 為提昇介電度量測精度，藉由系統參數與介電度理論量測靈敏度之關係來區分影響因素，系統參數包括感測器幾何參數及傳輸延長線之電阻，感測器幾何參數包括感測器長度(L)及幾何阻抗( $Z_p$ )，而量測靈敏度則是單位元物理變化量所造成之量測量變化，亦即量測量對於物理量的偏微分。由於視介電常數( $\epsilon_a$ )之計算來自於電磁波於感測器內走時分析而得，因此將視介電常數之量測靈敏度  $S_{ka}$  定義為電磁波走時對其視介電常數之微分，由於走時  $T_R = 2L\sqrt{\epsilon_a}/c$ ，將此結果帶入上述視介電常數靈敏度參數中可得下列

式子

$$S_{ka} = \frac{dT}{d\varepsilon_a} = \frac{L}{c\sqrt{\varepsilon_a}} \quad (2-6)$$

由(2-6)可知，理論上視介電常數之量測只受感測器長度 L 影響，幾何阻抗並不會影響量測靈敏度。

透過上述理論，張育嘉(2006)將影響因子區分為以下三類，並分別說明設計概念，感測器設計示意圖如圖 2.22 所示：

(1) 感測器長度(Probe length, L)：

由系統參數對介電度量測靈敏度可得知，隨感測器長度增長時，對  $\varepsilon_a$  量測靈敏度將逐漸提昇。

(2) 絕緣或未絕緣(coating or uncoating)：

導電度與介電度分別控制反射訊號之衰減與走時，當介電度維持不變但導電度改變時，波形受到導電度的影響使得走時分析亦會受到影響，另外，但欲以較長的感測器增加介電度量測靈敏度時，水中的導電度將使得訊號衰減而無法辨識長感測器末端之反射訊號。因此本研究將嘗試感測器導體絕緣，以瞭解是否能於高導電狀態下，將導電度影響分離，並避免長感測器無法分辨末端反射訊號之問題。

(3) 短路處理或開放式(short or open)：

由量測原理得知，導電度控制電磁波之衰減，而一般傳統開放式

感測器受量測物體導電度影響程度顯著。Cereti et al.(2003)曾嘗試以 TDR 短路方式提昇介電度量測之準確性,另外 Lin and Tang (2005) 也利用短路方式進行 TDR 伸張計感測器研發。

張育嘉(2006)利用此感測器配合參考線分析方法進行含砂濃度室內實驗,量測到的最大誤差為 14825 ppm,其分析方法將於下小節詳述之。

由於感測器量測準確度與感測器型式與探針有關,鐘志忠(2008)針對感測器外部型式與探針部分進行數值模擬及討論,所使用軟體為 Ansoft HFSS<sup>®</sup> 電磁場有限元素分析軟體,以有限元素數值模擬方式,藉以分析不同探針形式之感測器其 3D 電磁場分佈情形。Ansoft HFSS<sup>®</sup> 電磁場有限元素分析軟體其操作介面如同圖 2. 23 所示,藉由元件構成方式,可針對研究需求進行感測器模型建置。圖 2. 24 則為感測器探頭部分元件組合模型示意,藉由模型建立與邊界設定,便可進行 3D 電磁場模擬動作。圖 2. 25 以及圖 2. 26 分別為兩根探針形式以及三根探針形式感測器,模擬於探頭部分進入水中之電磁場能量分佈結果。圖 2. 25 右方模擬感測器探頭部分若無金屬外罩,由於兩根探針形式為非對稱結構,則會因邊緣效應造成電磁場外洩,反之加上金屬外罩,則可隔絕洩漏電磁場(圖 2. 25 左);三根探針形式屬於對稱結構,探頭部分電磁場外洩效應較低(圖 2. 26 左),但加上金屬外罩效

果較佳(圖 2. 26右)。於探針形式比較方面，雖然兩根探針形式雖然量測範圍較廣，但三根探針形式之電磁場量測分佈集中於探針部分，可降低天線效應所產生之干擾，提高走時量測之穩定性。透過感測器長度補償，增加量測範圍，以及泥砂濃度環境較於土壤含水量量測環境均勻，三根探針形式加金屬遮罩可能提供一較好的泥砂感測器參考。

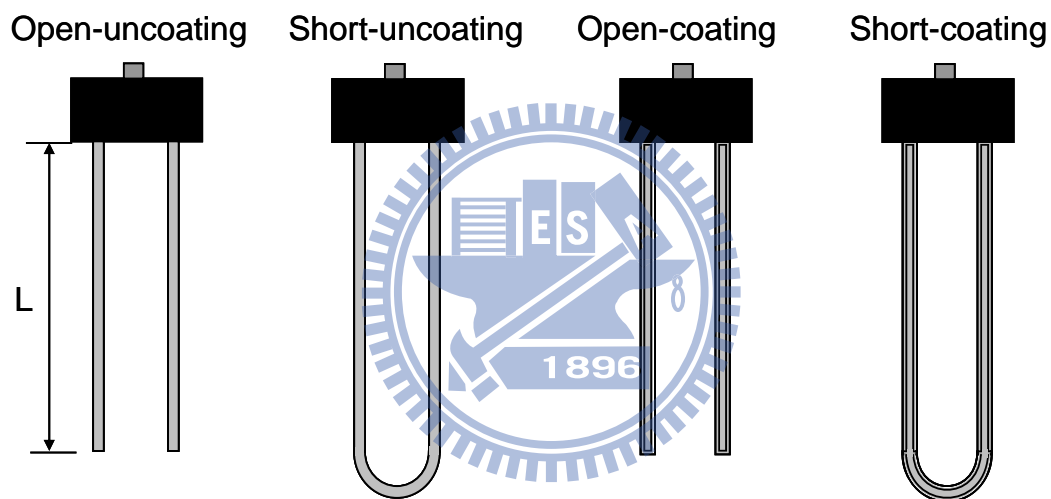


圖 2. 22 TDR 感測器形式 (張育嘉，2006)

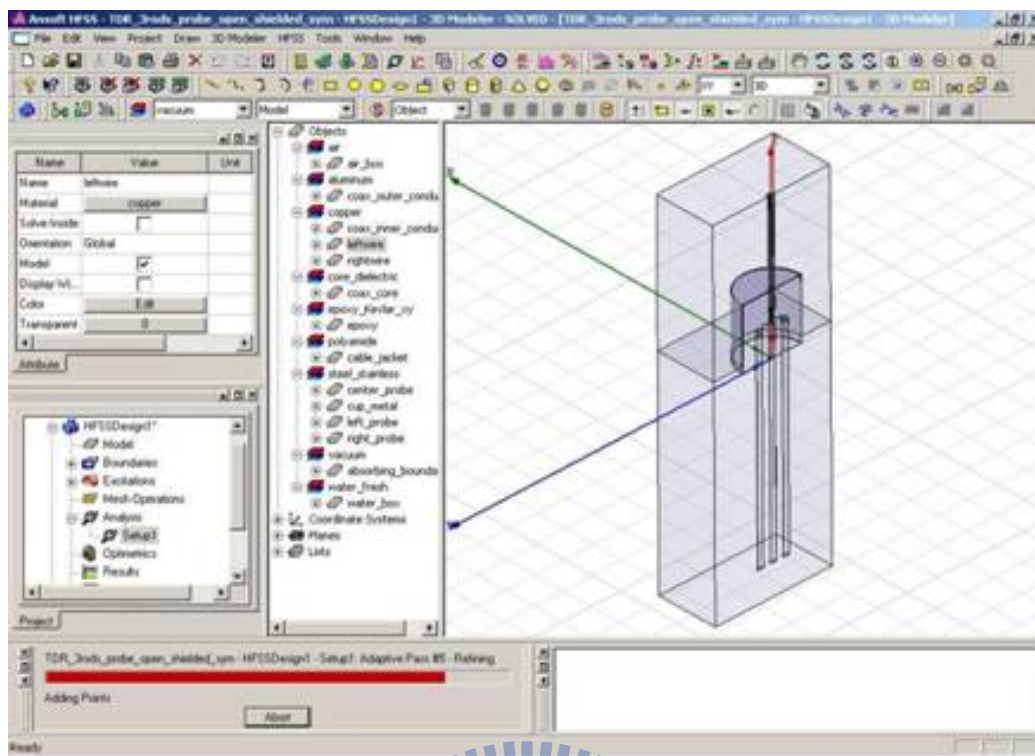


圖 2.23 Ansoft HFSS<sup>®</sup> 電磁場有限元素分析軟體其操作介面

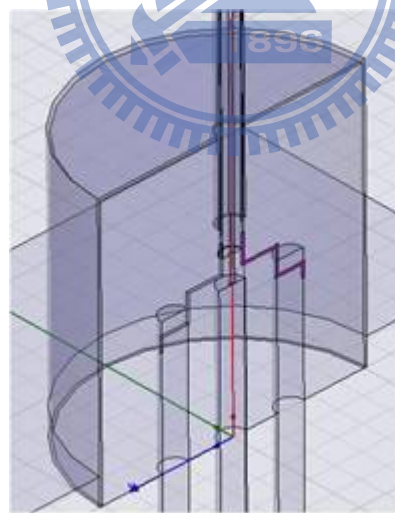


圖 2.24 Ansoft HFSS<sup>®</sup> 感測器探頭部分元件組合模型示意

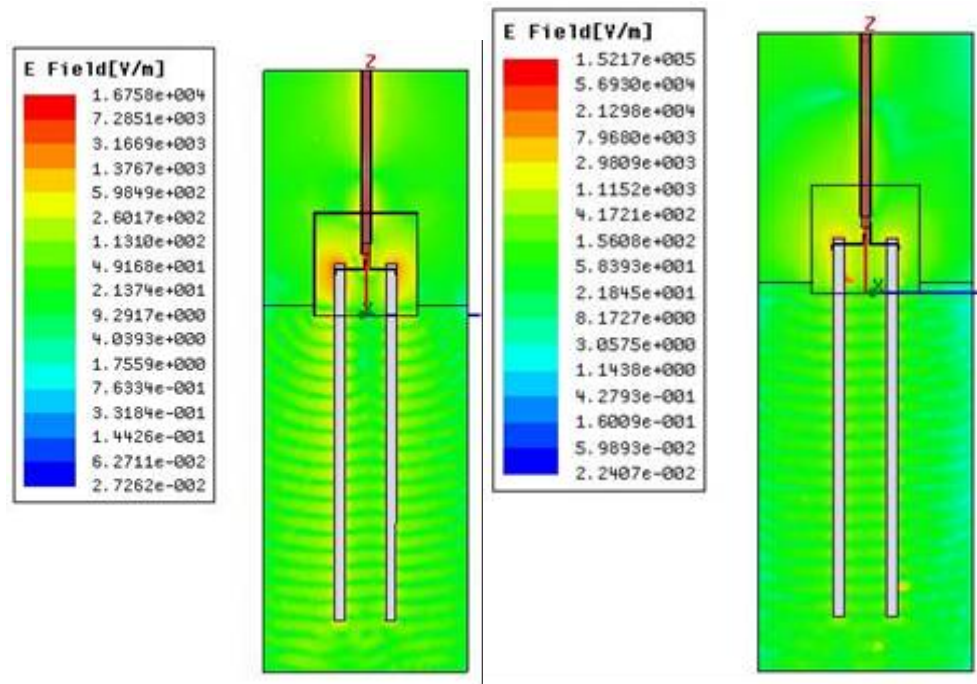


圖 2.25 30cm 兩根探針型式感測器電場分析模擬結果(左)感測器探頭

加上金屬遮罩(右)未加上金屬遮罩 (鐘志忠, 2008)

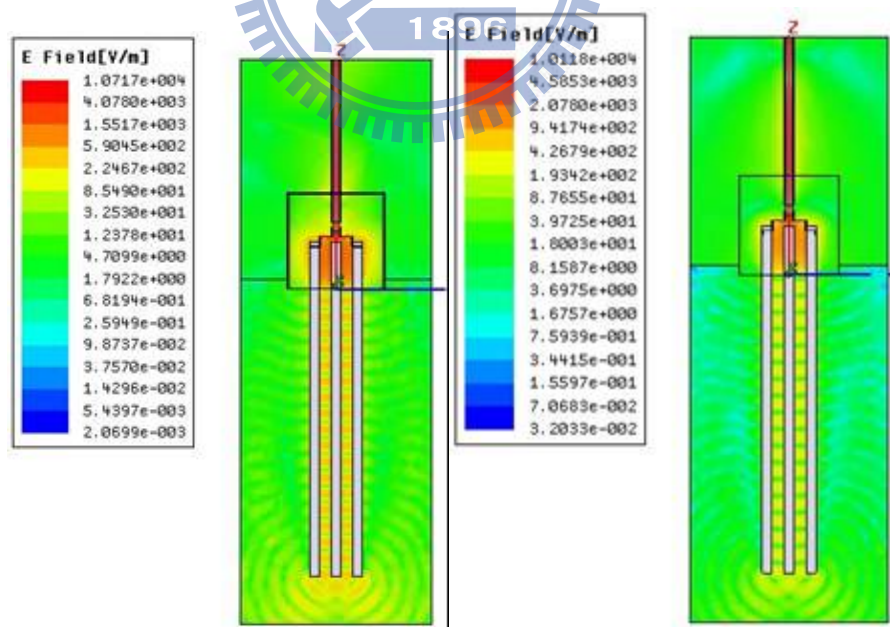


圖 2.26 30cm 三根探針型式感測器電場分析模擬結果(左)感測器探頭

加上金屬遮罩(右)未加上金屬遮罩 (鐘志忠, 2008)

### 2.3.3 走時分析方法

#### 切線及參考線走時分析法

根據TDR泥砂濃度量測原理得知可利用介電常數求得泥砂濃度，因此可利用電磁波於感測器來回走時，以瞭解泥沙濃度變化。張育嘉(2006)所提出之走時分析方法可分為切線法(tangent line method)與參考線法(reference line method, Lin and Tang,2005)兩種，如圖 2. 27與圖 2. 28所示。切線法主要是計算由TDR感測器波形之起始點至末端反射之走時，而末端反射點通常較難決定，故利用感測器末端訊號反射特性，以切線方式求得其末端反射點，作為計算電磁波於感測器走時之依據。而參考線法主要是由Lin and Tang(2005)在研發TDR伸張計時首次提出，利用前期研發之新式走時分析方法配合末端短路處理之感測器，原理主要採用感測器末端訊號反射處，選擇固定之反射係數與波形之交點作為走時分析之起始與終點。

張育嘉(2006)實驗結果指出，在使用short-uncoating感測器下，兩種不同分析方法所得的結果顯示切線法最大誤差範圍約在 30000 ppm，而參考線法最大誤差範圍為 10000 ppm，顯示參考線法較適合用於分析TDR波形走時，但由於參考線法中參考線的選擇易受到感測器形式、纜線電阻及環境溫度影響，需事先透過標定以決定參考線位置。張育嘉(2006)後續研究發現末端短路處理之感測器，其量測不同

水質鹽度波形交會位置約為感測器區段TDR波形之反曲點。圖 2.29(a) 為不同鹽度於 0、80000 以及 150000 ppm 濃度之 TDR 波形，經過微分處理後，圖 2.29(b) 發現波形轉折點，也就是斜率最大點不受導電度影響。透過實驗驗證後，張育嘉(2006)將shorted-uncoating感測器實驗以轉折點法重新分析，其泥砂濃度量測最大誤差約為 10000 ppm，量測精度約等同於參考線法，但克服了參考線選擇的缺點。不過此方法在低濃度下準確度仍較差。

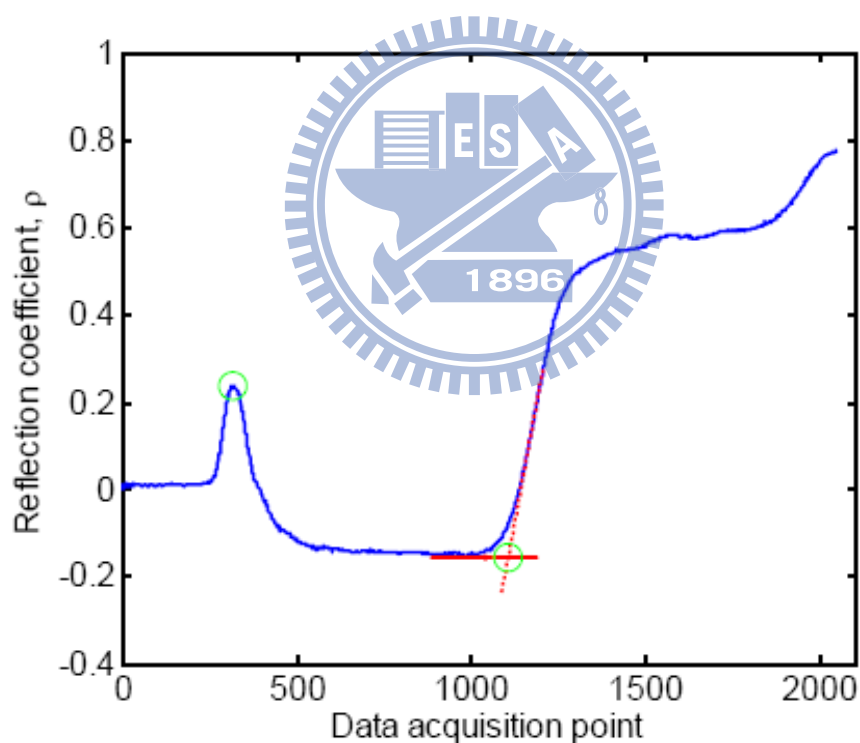


圖 2.27 切線法示意圖 (張育嘉, 2006)



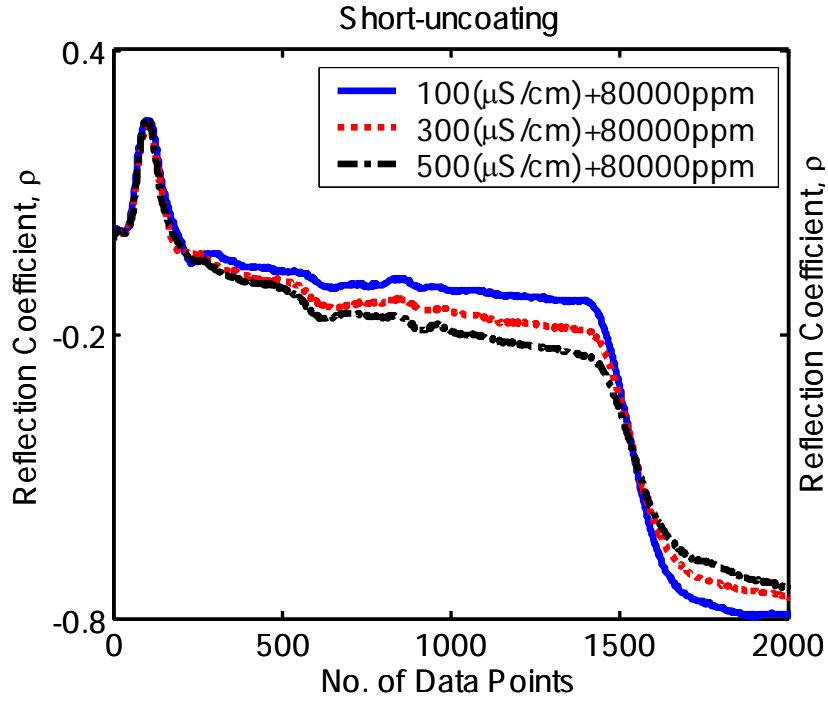


圖 2.28 參考線法示意圖 (張育嘉, 2006)

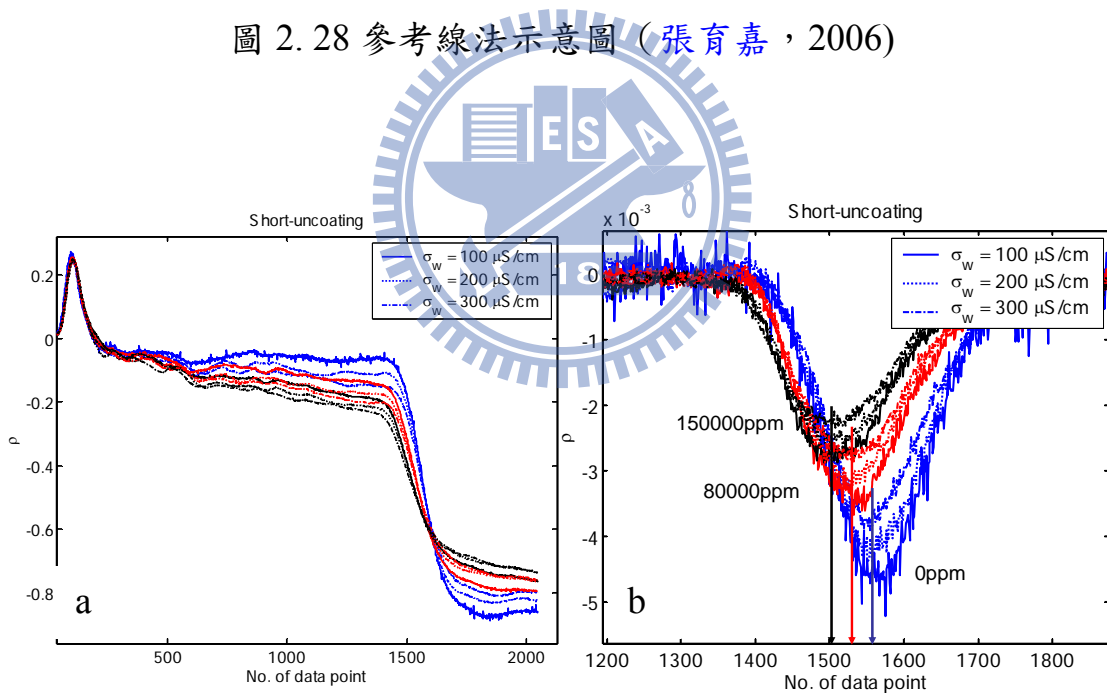


圖 2.29(a)shorted-uncoating 感測器於不同鹽度之原始波形, (b)波形微

分後結果 (張育嘉, 2006)

## Cross-correlation走時分析法

林志平等(2007)根據轉折點法，並配合泥砂量測理論推導，提出一新式改良分析法。圖 2.30為改良分析方法中典型水-泥砂混合物之 TDR量測波形，其中T1 反射訊號之特徵點，主要透過纜線或探測器標示走時起點，可去除因現場纜線受到溫度變化或是儀器本身所造成之訊號走時偏移，以提升量測準確度。T2 為感測器末端反射訊號微分後之極值。將T2-T1 定義為走時 $\Delta\tau$ ，而電磁波於導波器中實際的來回走時為 $\Delta t$ ， $\Delta t$ 與 $\Delta\tau$ 之差異為 $t_0$ ，因此走時 $\Delta\tau$ 可寫為：

$$\Delta\tau = t_0 + \Delta t = t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon_a} \quad (2-7)$$

其中  $\epsilon_a$  為待測體之介電度。

而此分析方法的標定方式採用空氣與水做為標定物，水與空氣的 TDR 走時 ( $\Delta\tau_{air}$  與  $\Delta\tau_w$ ) 可表示為

$$\begin{cases} \Delta\tau_a = t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon_{air}} \\ \Delta\tau_w = t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon_w(T)} \end{cases} \quad (2-8)$$

其中  $\epsilon_{air}$  為空氣介電度 (=1)， $\epsilon_w(T)$  為水之介電度，為溫度 T 之函數，如以下(Peping, et al., 1995)

$$\varepsilon_w(T^\circ C) = 78.54 \cdot \left(1 - 4.58 \cdot 10^{-3}(T^\circ C - 25) + 1.19 \cdot 10^{-5}(T^\circ C - 25)^2 - 2.8 \cdot 10^{-8}(T^\circ C - 25)^3\right) \quad (2-9)$$

藉由此一公式，可以修正溫度造成之水介電度差異。由 2-7 式，便可利用空氣與水之量測結果，以標定系統參數 L 及  $t_0$ 。

基於上述的 TDR 系統參數標定過程，則在不同之溫度下量測渾水走時結果可改寫為：

$$\Delta\tau_T = t_0 + \left(\frac{2L}{c}\right) \left[ \sqrt{\varepsilon_w(T)}(1-SS) + \sqrt{\varepsilon_{ss}}(SS) \right] \quad (2-10)$$

$\Delta\tau_T$  為 TDR 於混水中之走時，SS 為懸浮質濃度。準備幾個不同已知濃度的懸浮液，並量測其 TDR 走時  $\Delta\tau_T$  及溫度 T，即可以最小平方差法標定泥砂介電度  $\varepsilon_{ss}$ 。

若得到上述之系統參數以及泥砂之介電度  $\varepsilon_{ss}$  參數，則基於 2-10 式，量測一未知泥砂濃度渾水走時以及其溫度 T，則可透過以下式子求得渾水中泥砂濃度  $SS_{estimated}$ ：

$$SS_{estimated} = \frac{(\Delta\tau_T - t_0) - \frac{2L}{c} \sqrt{\varepsilon_w(T)}}{\frac{2L}{c} (\sqrt{\varepsilon_{ss}} - \sqrt{\varepsilon_w(T)})} \quad (2-11)$$

上述過程由此新式走時分析方法之基礎理論，但實際應用時，由於 TDR 反射波形易受到雜訊干擾，微分後 T1 與 T2 極值不易取得穩定

結果，因此T1 與T2 位置的決定方式是利用交互相關(Cross-correlation) 函數。交互相關函數為一訊號處理分析方法，主要是比較兩相似的訊號波形，以瞭解兩波形間的相關程度。林志平等(2007)提出之新式分析方法，事先先取一筆波形當參考值，而後量測的結果皆與此參考值做交互相關函數比較，便可知每次量測結果與參考值的相關程度，進而求得實際T1 與T2 之位置。

新式走時分析方法的優點在於走時起始點由人工給定，較不易受到現場溫度或儀器誤差影響，且配合溫度補償以及交互相關(Cross-correlation)函數分析，其泥沙濃度量測精度可達 1500 ppm，且大幅減少本身水質鹽度影響。而在不同土壤粒徑影響測試方面，實驗土壤分別為石門水庫沈澱池之細料粉土、集集攔河堰上游泥砂、及砂土，實驗結果如圖 2.31，結果顯示當土壤種類不同時，石門與集集的率定結果幾乎重疊，表示Cross-Correlation走時方法並不受泥砂種類影響。不同礦物成分的介電度對於率定關係略有影響，但其率定結果相差約在 15%以內，遠小於現有量測儀器，且礦物成分較能事先率定，使影響降至最低。

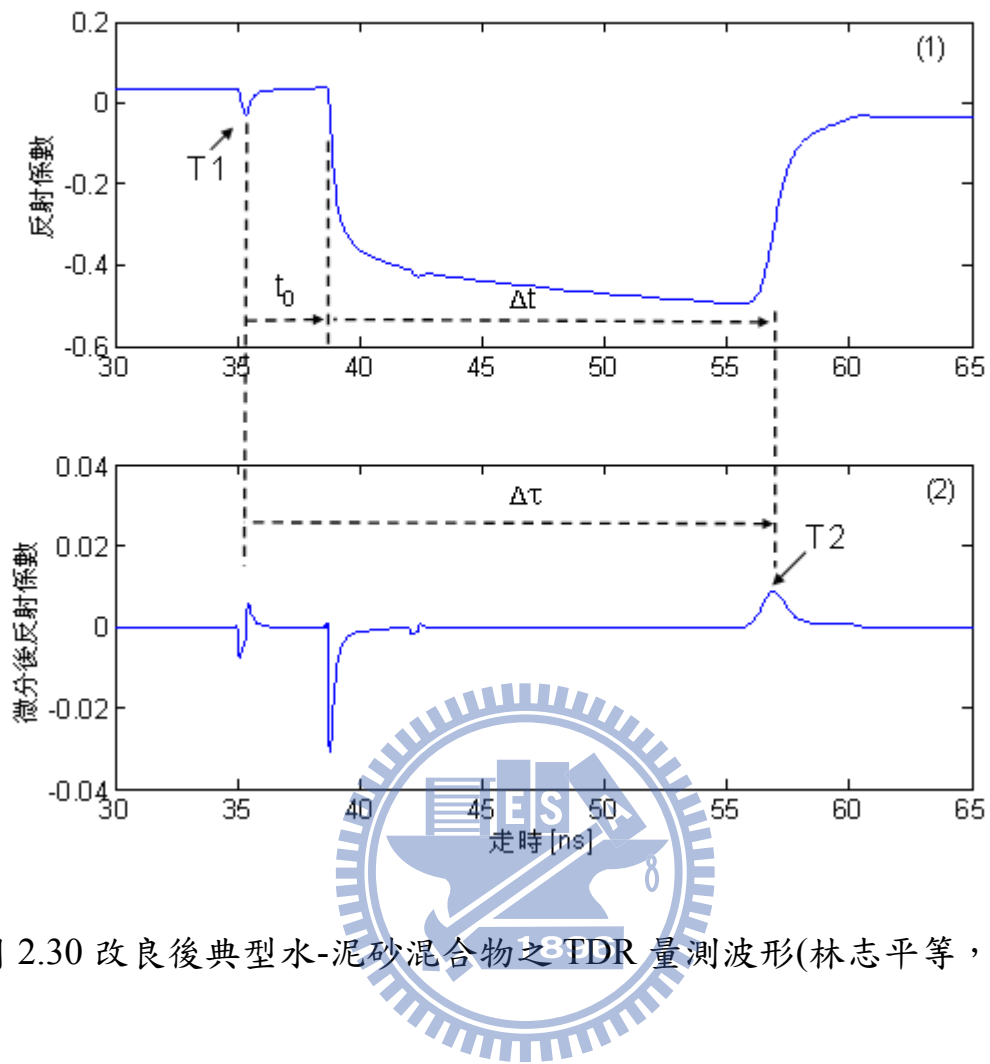


圖 2.30 改良後典型水-泥砂混合物之 TDR 量測波形(林志平等，2007)

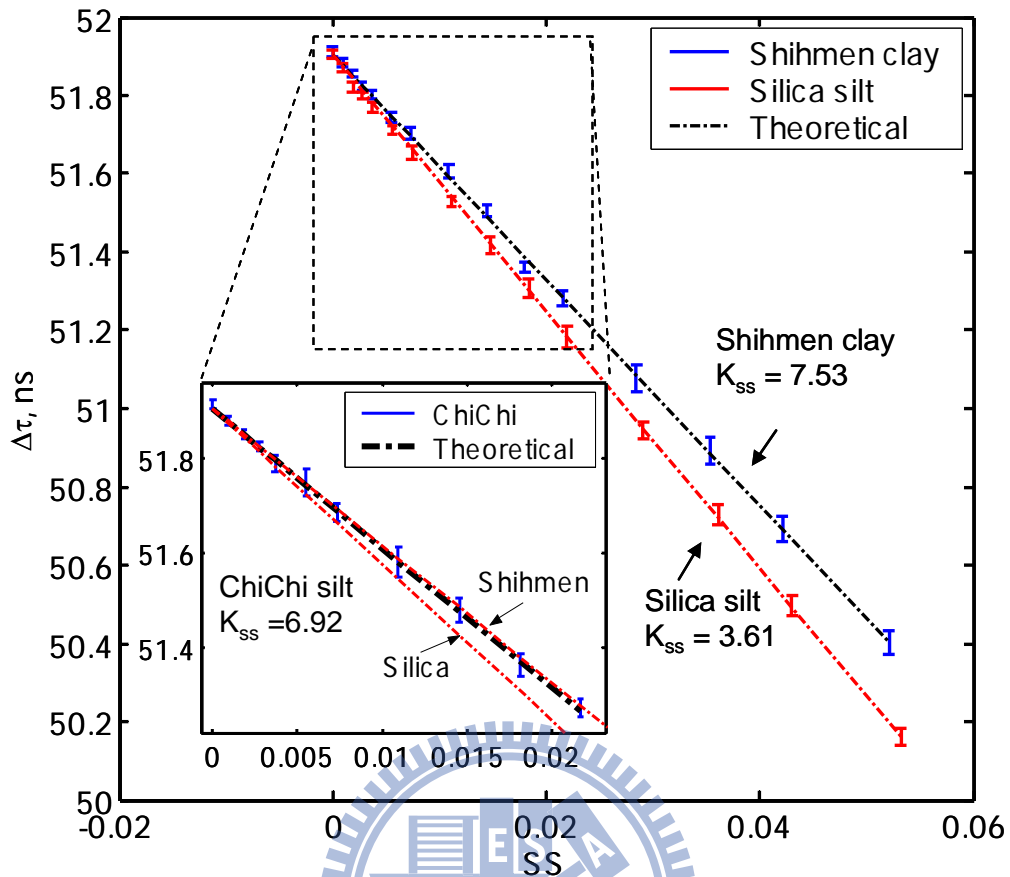


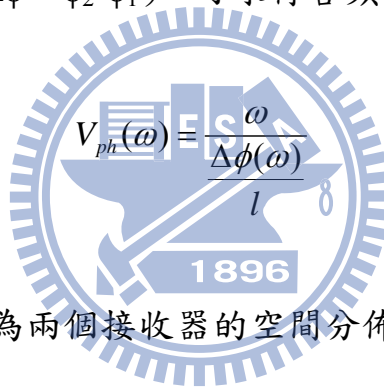
圖 2.31 TDR 走時與含砂濃度體積比 SS 率定關係(林志平等，2007)

## 2.4 頻率域速度分析法

上述的走時分析方法不論是切線法、參考線法或 cross-correlation 走時分析法皆是以走時分析以得到混水的介電度，但時間域的資料分析，可能受到外在雜訊或是系統穩定性影響，使得量測資料穩定性不佳。鐘志忠(2008)發展出一種在頻率域決定介電度的分析方法，概念是採用類似表面波譜法 (Spectral Analysis of Surface Wave, SASW) 的相位角速度分析 (Phase velocity analysis)，將反射訊號進行富立葉轉換 (Fourier transform) 並分析前後反射訊號之相位角差，由相位角

差可決定量測材料高頻率範圍之電磁波速度或介電度。頻率域的分析有助於避免雜訊的干擾，且不需要在纜線上製造時間起點的裝置，避免該裝置受損而影響走時分析結果。

表面波譜法SASW為表面震波之頻散曲線（波速與頻率或波長的關係）量測法 (Nazarian and Stokoe, 1984)，主要由表面波之頻散特性反求其地層剪力波速剖面，試驗方法如圖 2.32所示。其原理為擷取兩受波器之收錄震波資料，分別進行富立葉轉換後，分析兩個收錄訊號間各頻率之相位差（ $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ ），可求得各頻率之有效相位速度


$$V_{ph}(\omega) = \frac{\omega l}{\Delta\phi(\omega)} \quad (2-12)$$

其中  $\omega$  為角頻率， $l$  為兩個接收器的空間分佈距離。

藉由上述的基本原理，鍾志忠(2008)將 SASW 分析概念引用至 TDR 波形分析，企圖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，以求解高頻率域的波速資料。

假設TDR以一延長線連接一長度L的感測器，如圖 2.33所示。前端延長線之特徵阻抗 $Z_{c1}$ 為  $50\Omega$ ，感測段之幾何特徵阻抗（當介質為真空的特徵阻抗）為 $Z_{p2}$ ，感測段介質在各頻率的介電度 $\epsilon_r^*$ 以下式描述：

$$\varepsilon_r^*(f) = \varepsilon_r'(f) - j \left( \varepsilon_r''(f) + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \right) = \varepsilon_r'(f) - j \varepsilon_r^{ii}(f) \quad (2-13)$$

其中  $\varepsilon_r'$  為介電度實部， $\varepsilon_r''$  為介電度虛部， $\sigma$  為材料導電度， $f$  為頻率， $\varepsilon_0$  為真空時介電常數，則感測段的特徵阻抗  $Z_{c2} = Z_{p2} / \sqrt{\varepsilon_r^*}$ 。而感測段的傳輸函數  $H$  可寫成 (Feng et al. 1999)

$$H(f, x) = \exp(-\alpha x + j\beta x) \quad (2-14a)$$

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon^{ii}}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]} \quad (2-14b)$$

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon^{ii}}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]} \quad (2-14c)$$

其中  $x$  為傳輸距離，波傳之相位速度取決於傳輸函數之虛部，可表示為

$$V_{ph} = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon^{ii}}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (2-15)$$

由公式(2-12)及(2-15)式可得到電磁波在感測器內來回傳輸的理論相位角差 ( $l=2L$ )，以  $\Delta\phi_{\text{Theoretical}}$  表示，即為  $H(f, 2L)$  的相位角。基於傳



輸線的波傳理論 (Ramo et al., 1994)，第一個接收的反射訊號經入射波之正規化後以反射係數  $\rho_1$  表示，等於

$$\rho_1 = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (2-16)$$

第二次接收的反射訊號經入射波之正規化後以反射係數以  $\rho_2$  表示，等於

$$\rho_2 = (1 + \rho_1) \cdot H(2L) \cdot (1 - \rho_1) \quad (2-17)$$

藉由 SASW 分析概念，可藉由量測此兩個反射訊號  $\rho_1$  與  $\rho_2$  的相位角差  $\Delta\phi = \phi_{\rho_2} - \phi_{\rho_1}$ ，推估電磁波在感測器內來回傳輸的相位角差，進而利用(2-12)式決定各頻率域的波速資料。由  $\Delta\phi = \phi_{\rho_2} - \phi_{\rho_1}$  所得到之相位角差除了電磁波來回傳輸所造成的相位角差，另包含感測器頭尾兩個介面所造成的反射與折射相位角。

為探討  $\Delta\phi = \phi_{\rho_2} - \phi_{\rho_1}$  是否能準確估計理論相位角差，假設以不同導電度的水作為介質，圖 2.34 為兩個反射訊號的相位角差  $\Delta\phi$  與理論相位角差  $\Delta\phi_{\text{Theoretical}}$ ，可明顯發現  $\Delta\phi$  在低於 1GHz 頻率下就與理論值相異(既使導電度為 0，仍然與理論值差異甚大)，除了介面反射與折射的干擾，主要原因在於  $\phi_{\rho_1}$  在反射過後其相位角為一反相狀態(一般而言  $Z_{c2}$  小於  $Z_{c1}$ ，因此  $\rho_1$  為負反射)。因此若將  $\phi_{\rho_1}$  減  $\pi$ ，相當

於將時域波形資料的第一反射訊號乘上-1 反轉，則修正過後的相位角差  $\Delta\phi + \pi$  (以  $\Delta\phi_m$  表示) 在導電度為 0 時與  $\Delta\phi_{\text{Theoretical}}$  便無差異，但當導電度不為 0 時，反射與折射所造成的相位角干擾不為  $\pi$ ，在低頻將影響理論相位角差的估計，但在高頻時，因相位角較大，因此該微小之干擾影響不大，由分析結果顯示並可準確估計至 100MHz (隨導電度而異)。圖 2.34 對應的相位速度  $V_{ph}$  如圖 2.35 所示，由此圖可驗證以兩反射訊號量測相位角差所得到之相位速度，可視為一量測高頻相位速度依據，高頻之相位速度不受導電度的影響，也正是含砂濃度量測所需要之頻率範圍。

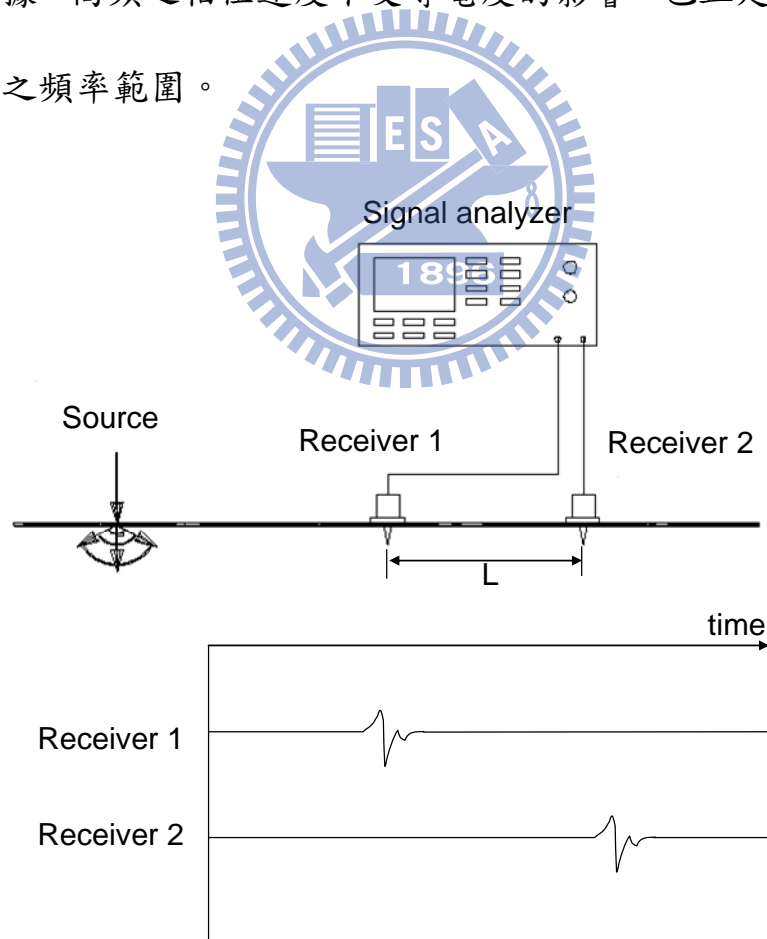


圖 2.32 SASW 資料擷取分析示意圖(修改自 Foti, 2000)

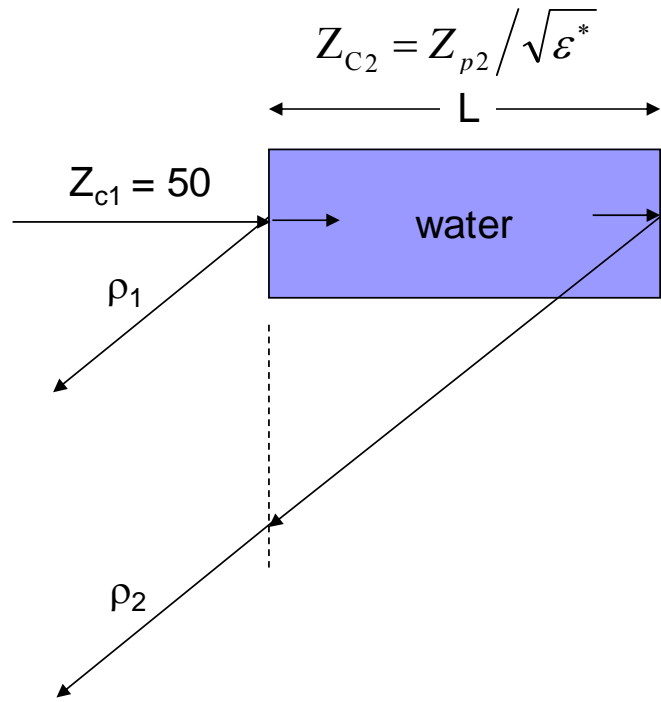


圖 2.33 TDR 單段傳輸模型與對應反射係數

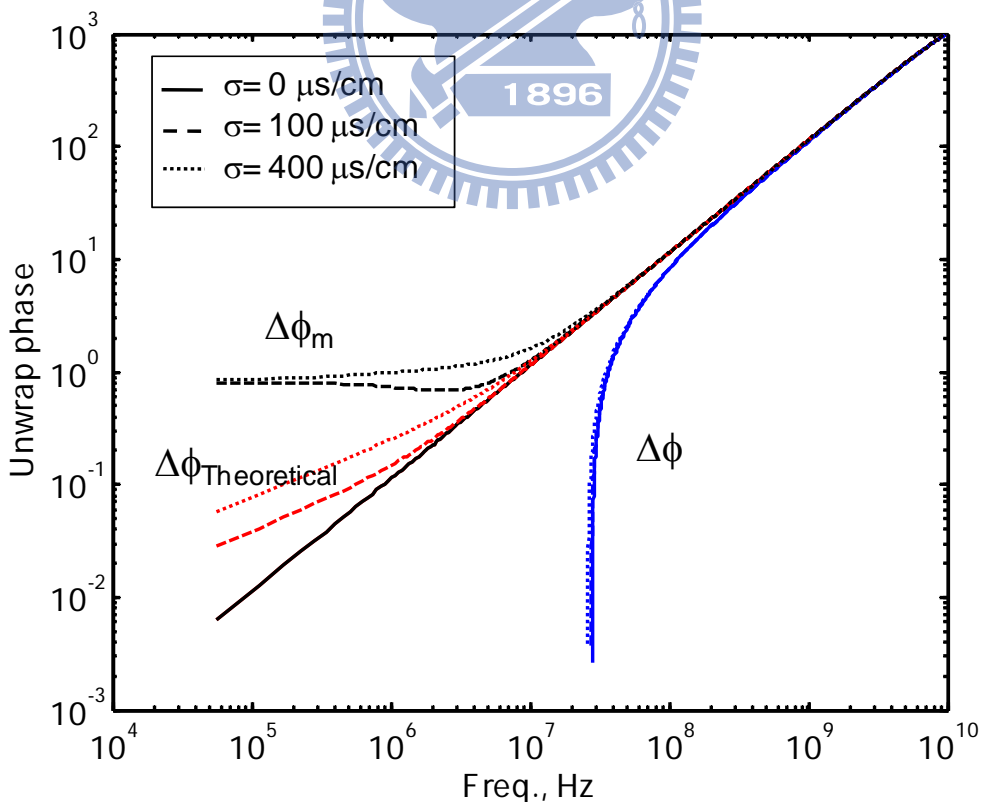


圖 2.34 利用 TDR 傳輸模型所得到之相位差結果

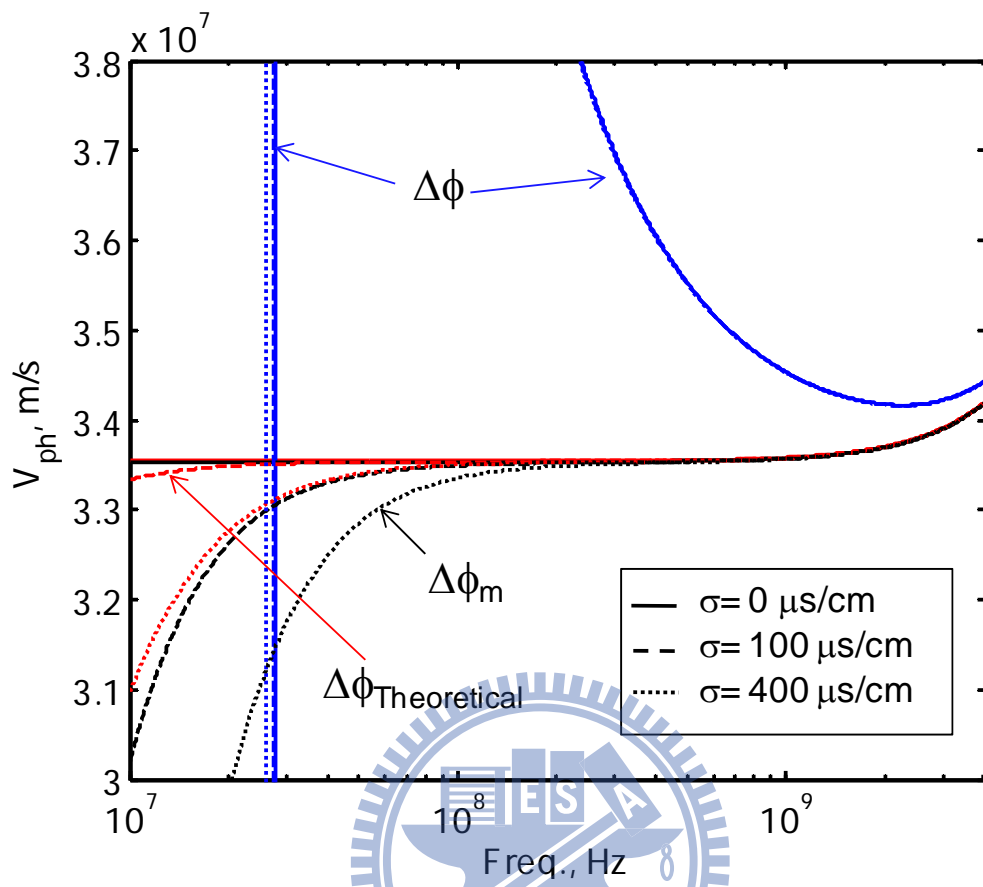


圖 2.35 利用 TDR 傳輸模型所得到之相位速度結果

## 第三章 研究方法

### 3.1 頻率域相位速度分析法之含砂濃度量測與標定

基於上述的頻率域相位速度分析法原理，本研究將此方法應用在含砂濃度量測上，根據公式(2-12)指出要將相位角差轉換為相位速度時，必須知道感測器長度  $L$ ，因此根據前章節敘述之走時分析率定方法可知要得到感測器長度可利用水的量測來標定，改寫公式(2-12)可得下列相關式：

$$V_{ph} = \frac{2\pi f}{\frac{\Delta\phi}{2L}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_w(T)}} \quad (3-1)$$

其中  $\epsilon_w(T)$  為水之介電度，為溫度  $T$  之函數，其公式如 (2-9)。經由水的頻率域相位速度量測得到相位差，再量測溫度之後，則可利用(3-1)及(2-9)式得到感測器長度  $L$ 。

根據含砂濃度介電混合理論，若知道感測器長度  $L$  及泥砂顆粒介電度之後，便可利用下列公式量測未知的含砂濃度  $SS_{estimated}$ 。

$$SS_{estimated} = \frac{\frac{c}{V_{ph}} - \sqrt{\epsilon_w(T)}}{\sqrt{\epsilon_{ss}} - \sqrt{\epsilon_w(T)}} \quad (3-2)$$

使用頻率域相位速度分析方法進行 TDR 波譜分析的優點是基於頻率域上進行分析，較不受時間域上雜訊的干擾，而在標定系統參數

時，只需進行感測器長度  $L$  的標定，所以不需空氣的波形進行走時起始點分析，節省許多時間，且也無需在纜線末端製造走時起始點，破壞纜線完整性。

### 3.2 頻率域相位速度分析法量測含砂濃度影響因子探討

由於頻率域相位速度分析法目前僅進行數值模擬的研究，尚未針對此方法進行影響因子的探討，於是本研究將針對此方法進行實驗討論影響因子。第一部份是針對感測器的長度及型態做討論，第二部份則是針對纜線長度進行探討，決定感測器形式及影響因素之後再進行實驗室含砂濃度實驗討論感測器的適用性，最後則是現場實測評估。



#### 3.2.1 TDR 感測器設計

TDR 感測器屬於侵入式量測技術，必須將感測器放入水中進行感測動作，雖然目前現有的 70cm 及 45 cm 開放式感測器在實驗室測試能有良好的量測結果，但根據目前現場的觀測經驗，TDR 泥砂濃度感測器(包含感測器與溫度計)容易因受外物撞擊損壞，或是常有異物(如石塊或雜草)纏繞干擾而誤判量測資料，或是可能因侵入式感測器使得流場改變，影響量測代表性與穩度性，以上的實務量測問題，可能需從感測器本身型式外表進行改良方能避免。

本研究希望能以室內實驗驗證，在不影響量測精度下，嘗試將

TDR 感測器由兩方面進行改善。第一是減短 TDR 感測器之長度，可能利用新式分析方法，大幅減少 TDR 感測器外露長度，使得外物不容易撞擊或纏繞，也可能減少對流場干擾。第二是將原有三根探針形式，轉換成同軸式，盡可能減少外物撞擊損壞以及異物纏繞干擾。

以上兩種改善方案將利用鹽度影響試驗與含砂濃度率定試驗結果加以評估，以瞭解並驗證其可行性。

### 3.2.2 水質鹽度影響試驗

水庫或現地河川之水質鹽度或導電度有一定變化範圍，前期的走時分析方法，主要是利用走時分析以求得渾水介電度，但時間域的分析容易受到外在雜訊或系統穩定性影響，使得量測資料穩定性不佳。因此本研究希望以頻率域相位速度分析方法，在此方法不受外在雜訊或走時偏差影響之下，進行鹽度試驗，在 0 ppm 無泥砂之純水環境下進行不同型式與長度的感測器對於導電度影響之評估。

### 3.2.3 纜線電阻影響試驗

由於現地觀測需利用接續纜線以連接感測器，Lin et al. (2007b) 指出一般利用 TDR 走時分析得到介電度均可能受到纜線長度(電阻)影響。前期研究證實基於改良走時方法並使 TDR 系統參數均獨自標定，則可去除纜線電阻影響。此一特點對於現地儀器架設以及標定過

程，可減少不同感測器之泥砂率定過程，僅需要標定各感測器之 TDR 系統參數，在效率上有顯著助益。

基於上述理念，本研究將針對新式頻率域相位速度分析法，驗證纜線電阻是否為影響量測準確度之影響因素，以開放式感測器及同軸感測器為基準，測試不同長度纜線下在 0 ppm 的純水中不同鹽度範圍的量測結果。

#### 3.2.4 含砂濃度率定試驗評估

一般河川內泥砂土壤來源不同，主要泥砂組成差異在於礦物及其粒徑大小，若水砂混合物係由不同土壤種類組成時，可能影響電學量測結果。目前利用 2.4 節敘述之新式走時分析方法，已證實不受土壤粒徑影響，土壤礦物成分差異造成之量測誤差則在 15% 以內(如圖 2.31 所示)，遠小於現有量測儀器(如光學及超音波)量測受土壤種類之影響程度。

而為驗證新式頻率域相位速度分析法於泥砂率定及其泥砂種類影響，本研究選擇以石門水庫沉澱池之細料粉土(Shihmen clay) 以及矽砂土(Silica silt)為材料，其泥砂粒徑分佈曲線如圖 3.1 所示。

實驗流程為採用固定量的自來水，其導電度為 400( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )，加入不同濃度(ppm)之砂土，分別量測不同濃度狀態之 TDR 波形及對應之電學性質，除了討論頻率域相位速度分析法之適用性之外，也針對感



測器量測效能進行討論。

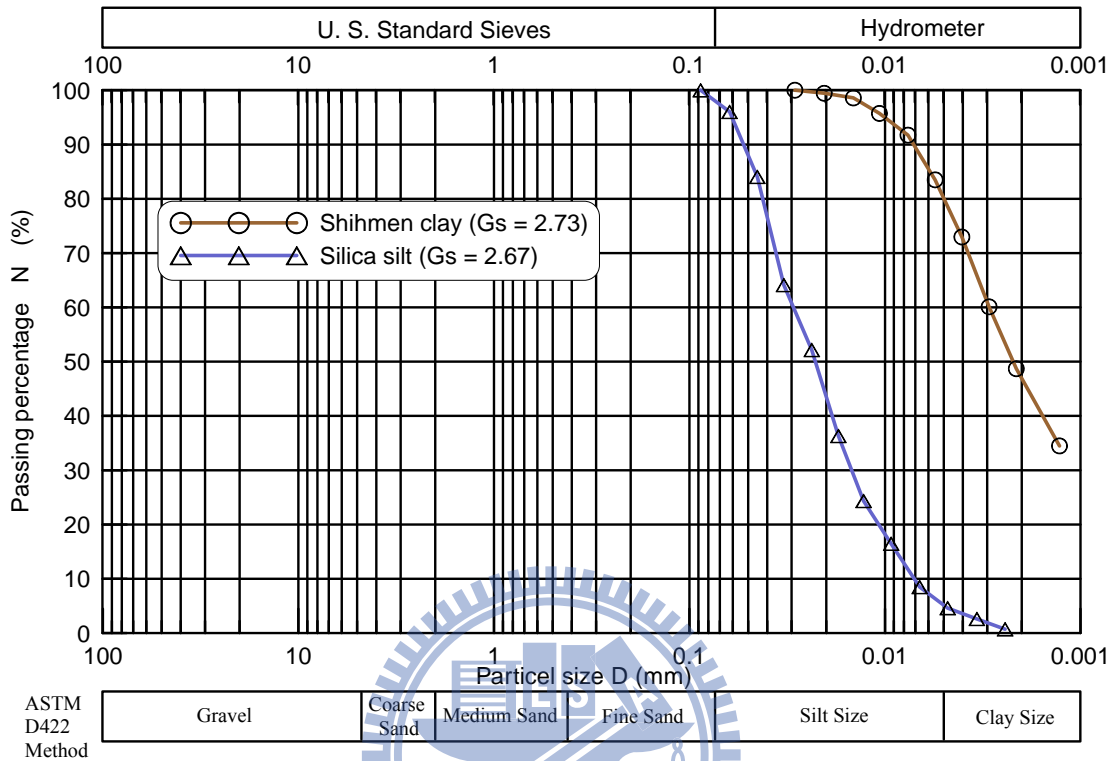


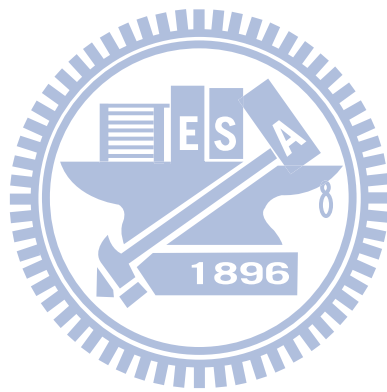
圖 3.1 土壤種類粒徑分析結果

### 3.3 現地實測與評估規劃

在討論完影響因素及進行完實驗室泥砂濃度率定試驗，確定感測器形式之後，本研究將進一步施作 TDR 現場驗證測試，並配合現場取樣量測泥砂濃度，以評估 TDR 量測準確性。

現場測試選定的場址為石門大圳明渠段與集集攔河堰，石門大圳為一開放式管道，水質清澈，可測試低濃度時量測準確度及穩定性。而集集攔河堰為一排沙河道，常有高濃度的泥砂渾水，因此利用 TDR 量測結果，同時配合自動化幫浦取樣器取樣做比重瓶試驗，評估現場

泥砂量測的準確性。



## 第四章 試驗結果與討論

### 4.1 TDR 含砂濃度量測效能評估與影響因子探討

根據前章節提出的研究方法，本章節將針對實驗結果進行討論，包括影響因子及感測器的適用性探討兩方面，最後則是現地測試的結果討論。

#### 4.1.1 水質鹽度影響

為評估頻率域相位速度分析法對於感測器形式不同的影響，本研究提出幾種不同型態的感測器如圖 4.1 進行 0 ppm 鹽度試驗，其中同軸感測器如圖 4.2，其外觀與其他形式感測器較不相同，使得電磁波在內外導體之間進行傳遞，而設計此一感測器的好處為外導體可直接形成保護罩，使得感測器在現場較不易受到雜物干擾。

圖 4.3 以 70 cm-3rods 感測器為例，利用頻率域相位速度分析法計算 0 ppm 純水之不同鹽度下的相位速度。由圖 4.3 可發現在頻率大於 0.5GHz 時，高頻有明顯雜訊。因此相位速度選取的依據是依照不同頻率下選擇變化幅度最小的範圍，並以多次量測結果進行鹽度實驗結果分析。假設水與泥砂之介電度以及泥砂之比重均已知狀況下，針對感測器長度，推估 70 cm 開放式感測器其走時對應之泥砂濃度變化，如圖 4.4 所示。Error bar 表示單一鹽度下之量測誤差變化，而 0~600 us/cm 範圍內的量測跳動範圍，即為鹽度影響之誤差範圍。

表 4.1 為各感測器進行鹽度試驗得到的誤差範圍，選定的頻率範圍即是利用上述得到的相位速度圖，選取變化幅度較小的頻率，而儀器解析度則是定義為儀器時間擷取解析度  $dt$  所對應之泥砂濃度，其式子如下：

$$SSC \text{ resolution} = \frac{dt}{\frac{2L}{c}(\sqrt{\epsilon_{ss}} - \sqrt{\epsilon_w})} \quad (4-1)$$

配合感測器長度  $L$  以及量測時間擷取解析度  $dt$ ，可推算量測解析度，進一步得知誤差範圍相對於量測設定解析度比值，以及重複量測之標準偏差平均值。

根據表 4.1 的實驗結果顯示 45cm 3-rods 感測器效能約等同於 70cm 3-rod 感測器效能，當感測器長度縮短至 25cm，雖然透過擷取參數維持約略相同之泥砂濃度感應解析度，但量測誤差有較 45cm 及 70cm 感測器大的趨勢，可能是感測器較短時，其兩個特徵反射訊號未能有效分離。不同型態的感測器方面，2-rods 感測器的實驗結果不佳，主要此一方法仍然受到天線效應影響。40 cm 同軸 (Coaxial) 感測器在鹽度變化下的量測穩定性與 3-rods 探針式感測器大約相同。因此以上述結果顯示，3-rods 感測器與同軸式感測器的實驗結果較穩定，但由於相位速度會隨頻率而變動，所以選擇不同的頻率範圍做分析對於量測結果也會有些微影響，而大部分的感測器適合的範圍座落

在 0.1~0.3GHz 之間。

根據實驗結果顯示，同軸感測器的結果與 three-rods 差異不大，而同軸感測器的外導體又可發揮保護內導體在現地不受雜物的干擾，因此本研究將針對同軸式感測器的適用性進行進一步的探討。

依據上述鹽度試驗方法，在 0 ppm 純水環境下，評估不同長度同軸感測器對於鹽度影響。本研究共製作 40cm、35cm、30cm 以及 25cm 的同軸感測器進行實驗，由於含砂濃度理論解析度為取樣時距與感測器長度之函數，若感測器長度縮短至小於 25 cm，在現有 TDR 儀器之取樣時距範圍內將無法維持較佳的含砂濃度解析度，因此目前最短感測器長度僅維持在 25 cm。鹽度試驗結果顯示，不同長度的感測器雜訊比高的頻率範圍約有不同，以 25cm 為例，雜訊比高之範圍約在 1GHz 左右，如圖 4.5。四種不同長度的感測器都選擇 0.2~0.3GHz 的範圍進行鹽度實驗分析，25cm 為例的鹽度實驗結果如圖 4.6 所示，顯示在導電度 0~600 $\mu$ s/cm 下的實驗誤差範圍約在 2000 ppm。而根據表 4.2 顯示不同長度的同軸感測器，鹽度實驗誤差範圍結果大約一致，可瞭解配合同軸感測器，其長度非主要影響因子。基於上述成果，本研究選用最短的 25cm 同軸感測器，可增加空間解析度及減少現場量測受外物干擾之影響，短的感測器亦較為堅固。而後續將選擇一組鹽度試驗結果良好的開放式感測器及 25cm 同軸式感測器進行纜線電阻影響及

不同種類的泥砂率定試驗討論頻率域相位速度分析法的影響性及感測器的適用性。

表 4.1 各式感測器受鹽度影響誤差範圍

Error range (ppm)	25cm open 3-rods	45cm open 2-rods	45cm open 3-rods	70cm open 3-rods	40cm Coaxial probe
選定頻率範圍 Frequency range	0.2~0.3GHz	0.5~0.6MHz	0.1~0.2GHz	0.2~0.3GHz	0.2~0.3GHz
儀器解析度 Resolution	2806	2303	2303	2423	2728
量測誤差範圍 Deviation range	4030	27530	1648	1597	1863
誤差範圍/儀器解析度 Deviation/Resolution	1.43	25.4	0.71	0.7	0.75
平均量測標準偏差 Mean Standard Deviation	960	1176	419	543	340

表 4.2 不同長度同軸感測器受鹽度影響誤差範圍

Error range (ppm)	40cm coaxial probe	35cm coaxial probe	30cm coaxial probe	25cm coaxial probe
選定頻率範圍 Frequency range	0.2~0.3GHz	0.2~0.3GHz	0.2~0.3GHz	0.2~0.3GHz
儀器解析度 Resolution	2468	2765	2576	3016
量測誤差範圍 Deviation range	1863	2006	2414	2087
誤差範圍/儀器解析度 Deviation/Resolution	0.75	0.72	0.93	0.69
平均量測標準偏差 Mean Standard Deviation	340	251	464	1066

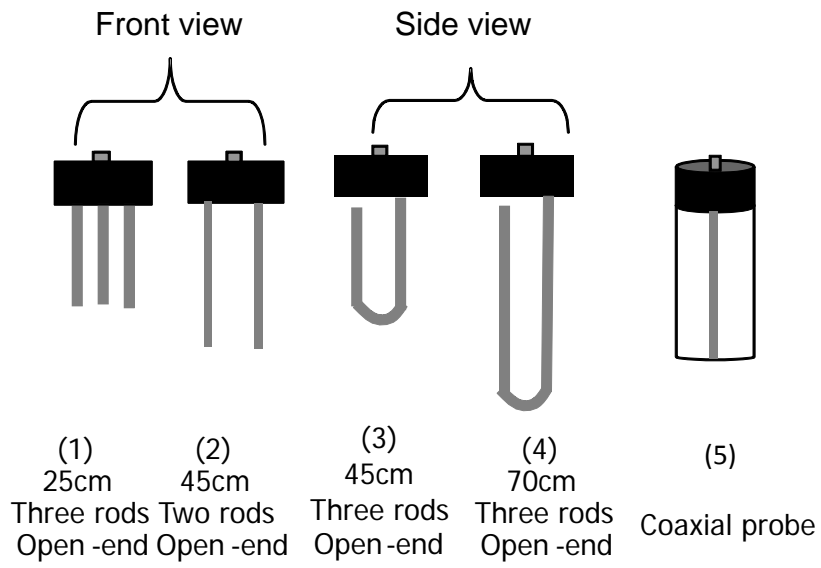


圖 4.1 不同形式感測器



圖 4.2 25cm 同軸感測器照片

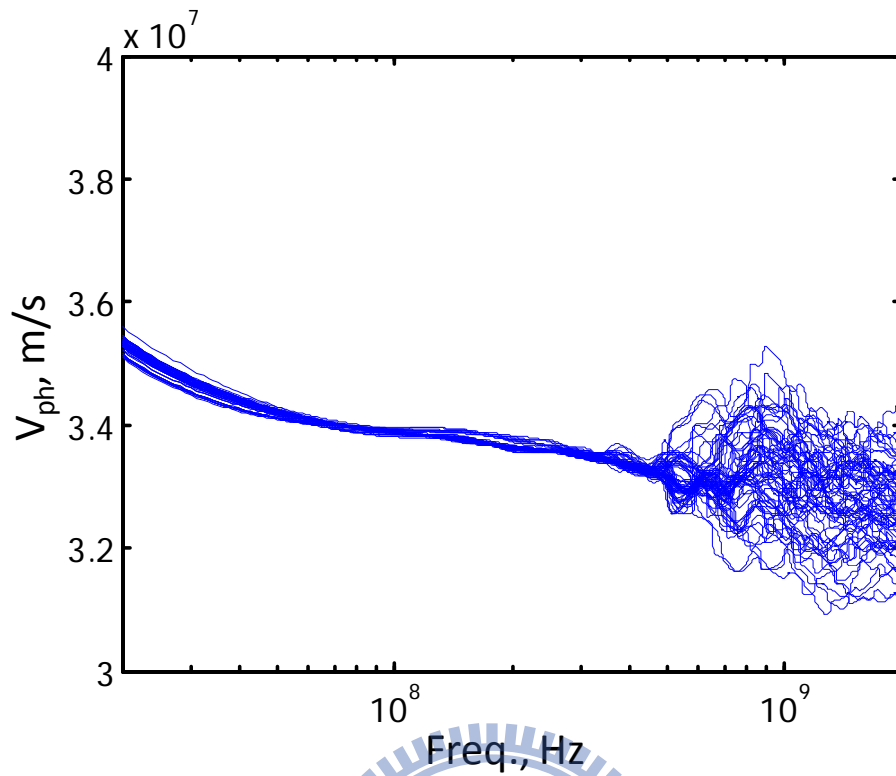


圖 4.3 70 公分感測器在不同鹽度下之相位速度

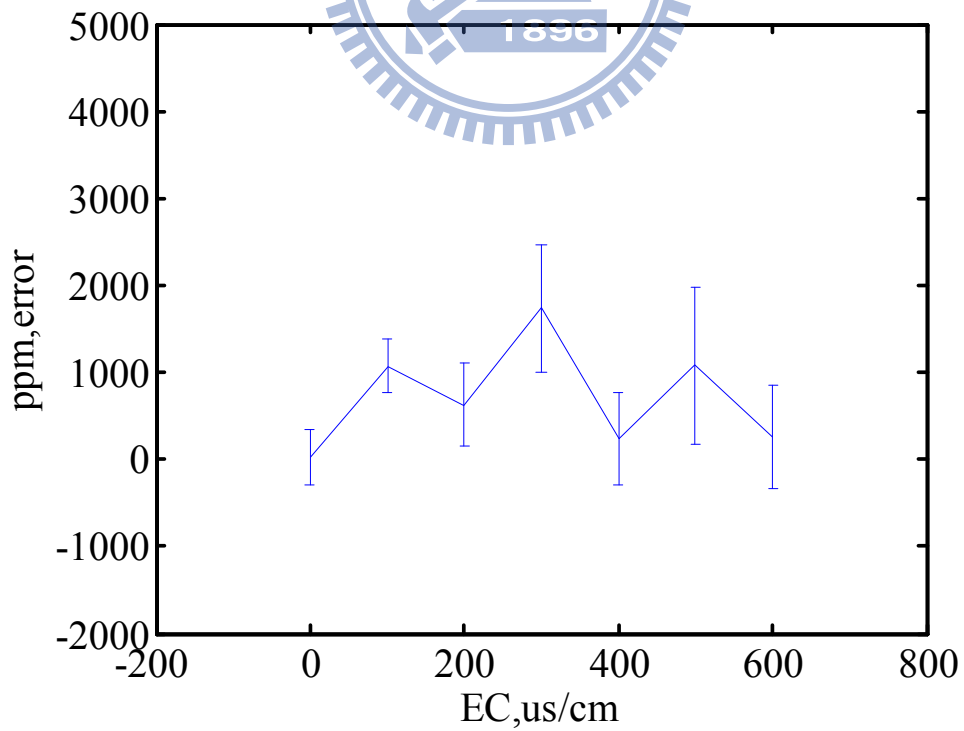


圖 4.4 70 公分感測器之鹽度實驗結果



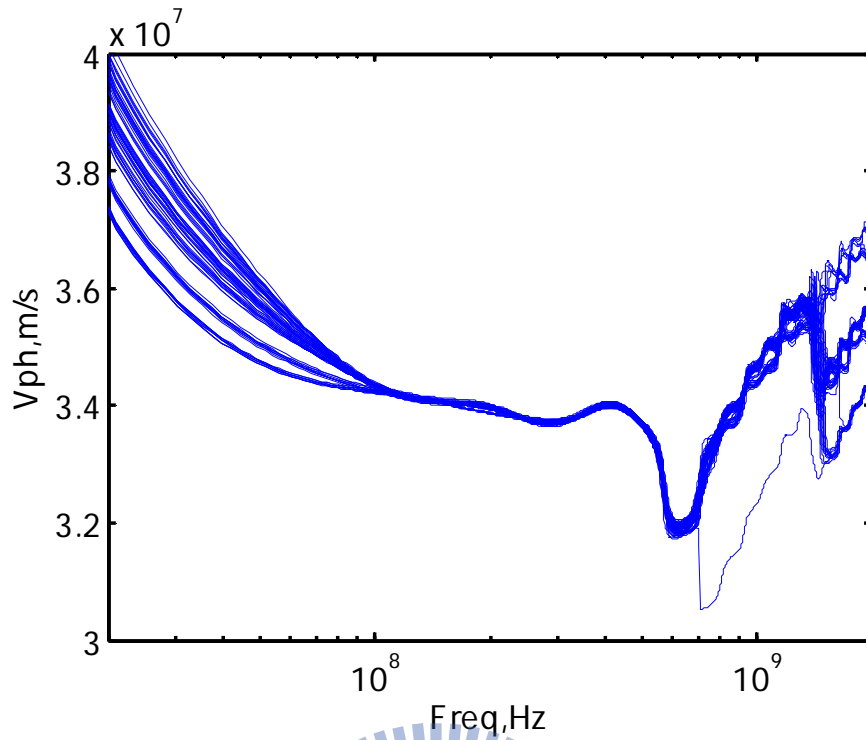


圖 4.5 25 公分同軸感測器在不同鹽度下之相位速度

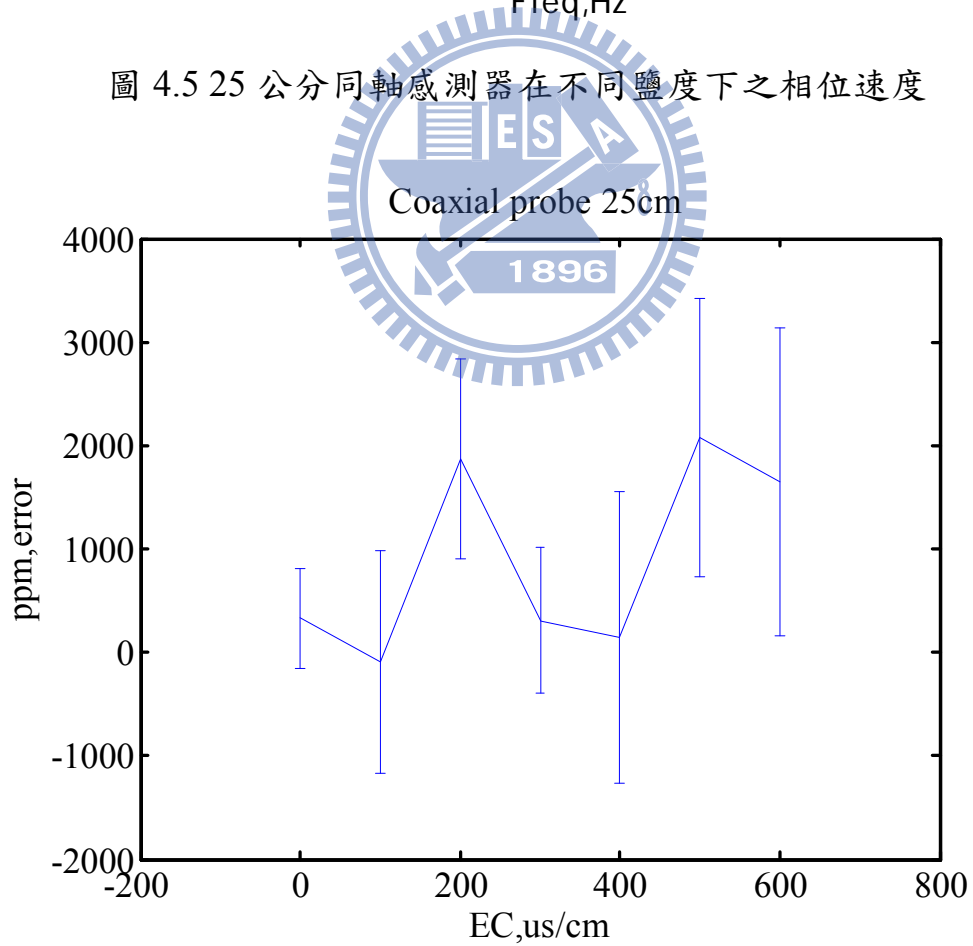


圖 4.6 25 公分同軸感測器之鹽度實驗結果

### 4.1.2 纜線電阻影響

基於上述鹽度試驗結果，選出一開放式感測器及同軸感測器利用頻率域相位速度分析法進行進纜線電阻(長度)影響試驗。感測器的選擇以水質鹽度試驗結果作為依據，於是本研究將以 45cm-3rods 開放式感測器及 25cm 同軸感測器進行纜線長度影響試驗。

圖 4.7 為 45cm three-rods 感測器(纜線為 20m QR320)不同頻率下的相位速度，而採用 0.1~0.2GHz 範圍所計算之鹽度影響結果如 圖 4.8。在延長纜線的結果之下，圖 4.9 為纜線加長至 140m 下不同鹽度之頻率域相位速度結果(感測器長度 L 分別率定)。相較於圖 4.7 結果，圖 4.9 之雜訊影響範圍原本由 0.6GHz 向下延伸至 0.3GHz，顯見纜線長度(電阻)影響，使得高頻接收能量衰減，雜訊比提高之情況下，降低高頻資料正確。另一方面纜線長度(電阻)影響下，水質鹽度為 600 $\mu$ s/cm 時之感測器末端反射訊號，因電阻關係而平滑化，不利於訊號分析。若以 0.1~0.2GHz 範圍所計算纜線 140m 實驗之鹽度影響結果，如圖 4.10 所示。表 4.3 列出 45cm three-rods 感測器配合 20m 與 140m 其量測誤差範圍與標準偏差等比較，可發現纜線長度增加約略提高影響量測誤差範圍，但大約控制在儀器量測解析度，亦即纜線長度影響於頻率域速度分析方法可忽略，唯水質鹽度量測上限受到纜線長度影響。

在同軸感測器方面，選用 25 cm 同軸感測器以進行纜線電阻影響測試。在延長纜線至 140m 之下的結果如圖 4. 11 所示，雜訊影響範圍由原本的 1GHz 向下延伸至 0.5GHz。透過圖 4. 12 鹽度試驗結果，表 4.3 整理 25 cm 同軸感測器之纜線長度增長至 140m 的量測結果與 20m 的結果差異不大，亦即纜線長度影響於頻率域速度分析方法可忽略。

表 4.3 不同纜線長度時之鹽度影響誤差範圍

Error range (ppm)	45cm open 3-rods 20m cable	45cm open 3-rods 140m cable	25cm coaxial probe 20m cable	25cm coaxial probe 140m cable
選定頻率範圍 Frequency range	0.1~0.2GHz	0.1~0.2GHz	0.2~0.3GHz	0.2~0.3GHz
儀器解析度 Resolution	2303	2765	3016	3394
量測誤差範圍 Deviation range	1648	3169	2087	2089
誤差範圍/儀器解析度 Deviation/Resolution	0.71	1.15	0.69	0.61
平均量測標準偏差 Mean Standard Deviation	419	745	1066	1264

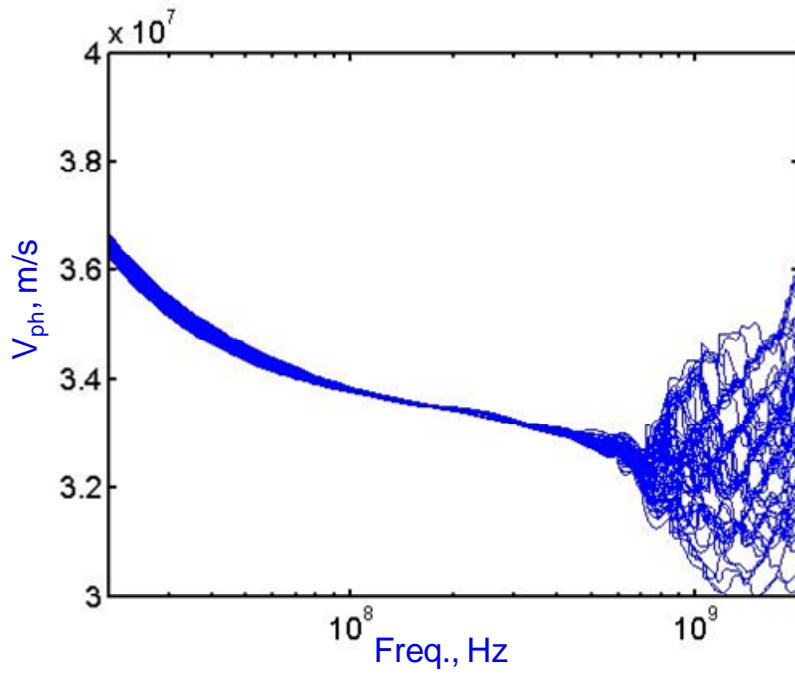


圖 4.7 45cm 3-rods 不同鹽度之頻率域相位速度結果 (纜線為 20m QR320)

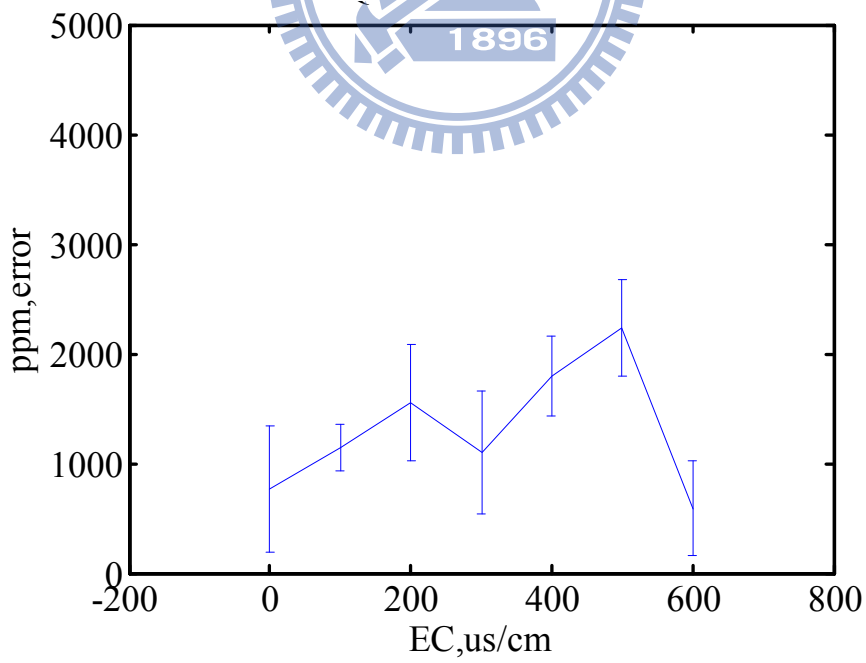


圖 4.8 45cm 3-rods 不同鹽度影響結果 (纜線為 20m QR320)

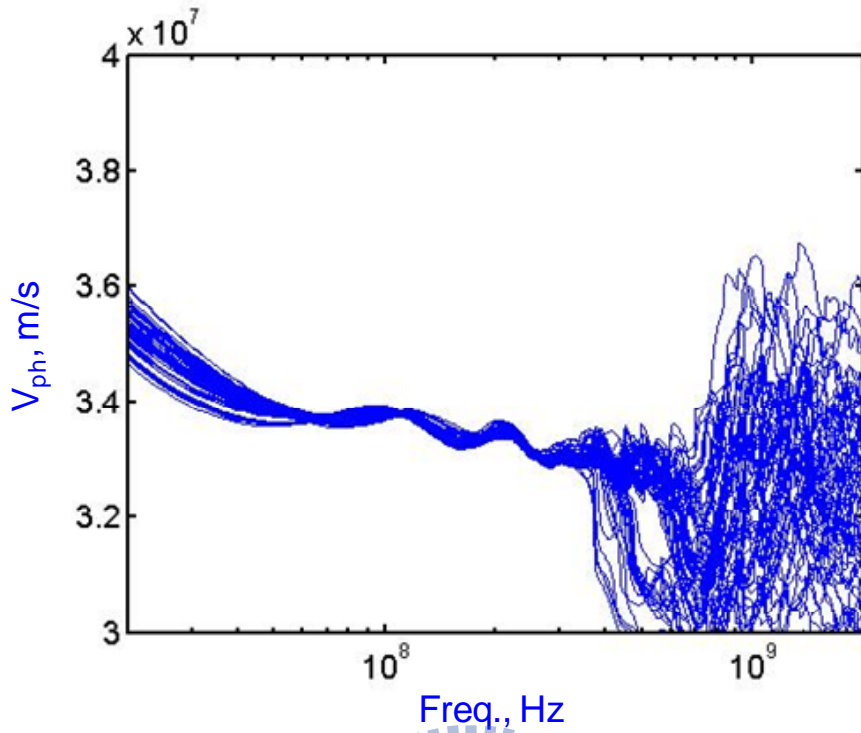


圖 4.9 45cm 3-rods 不同鹽度之頻率域相位速度結果 (纜線為 140m QR320)

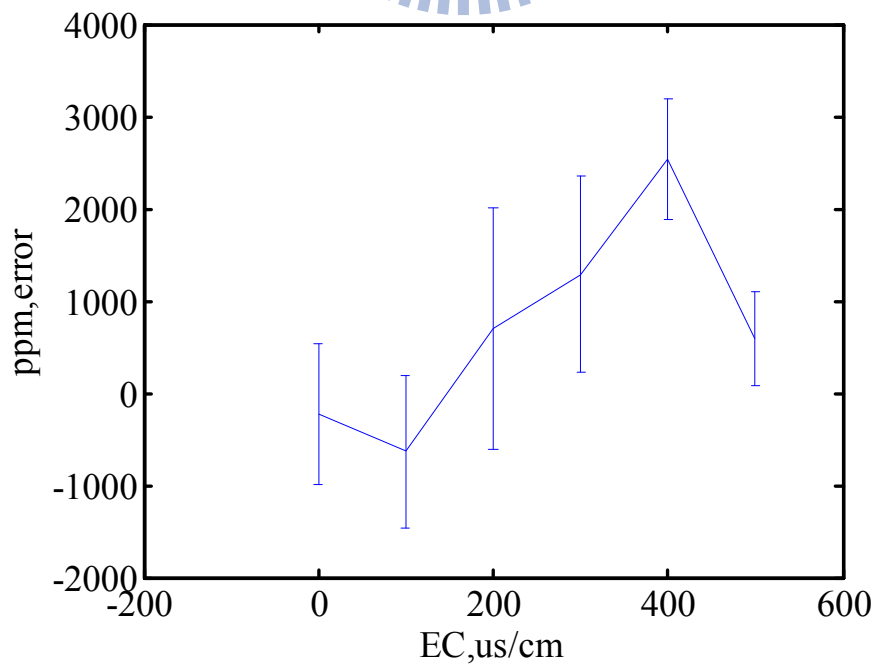


圖 4.10 45cm 3-rods 鹽度測試結果 (纜線為 140m QR320)

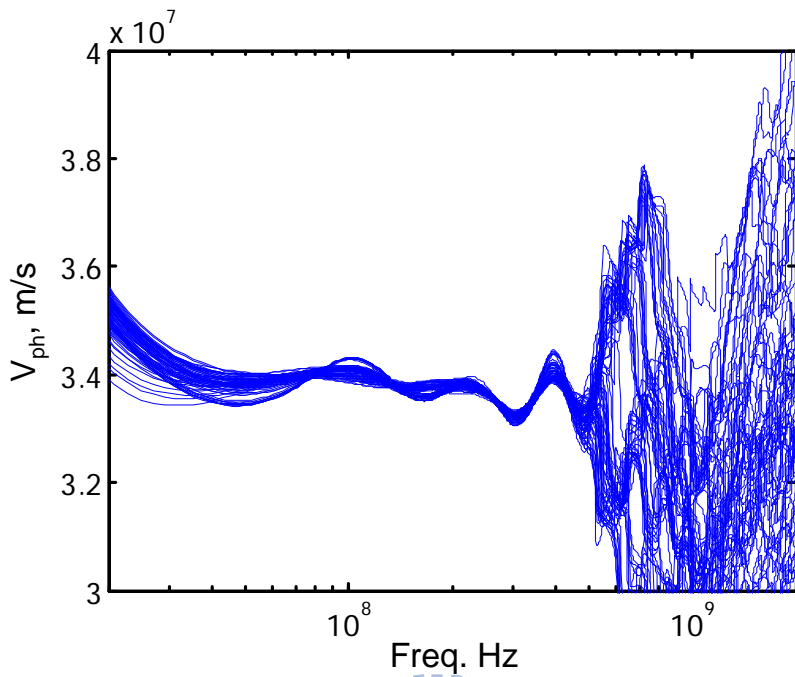


圖 4.11 25cm 同軸式感測器不同鹽度之頻率域相位速度結果 (纜線為 140m QR320)

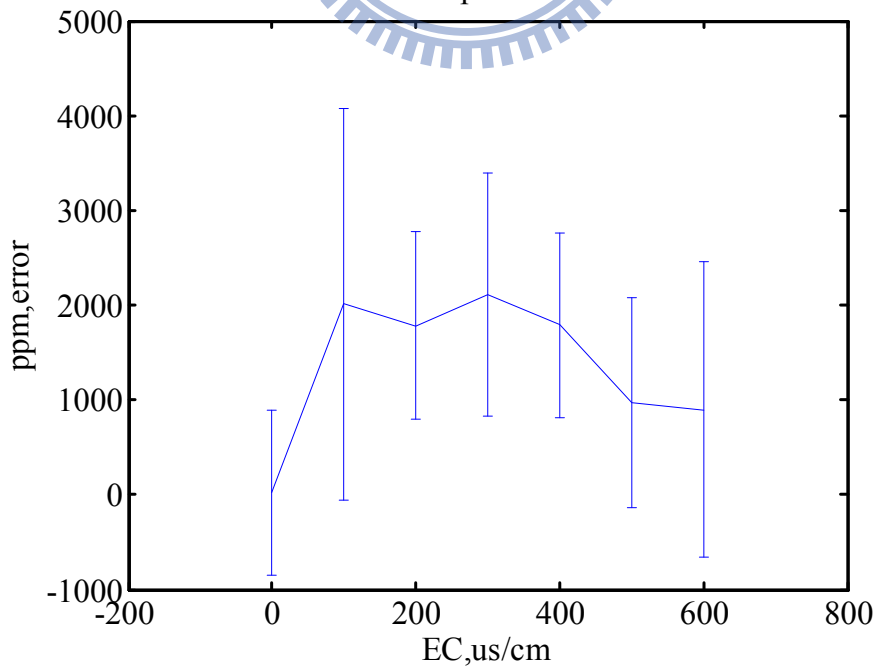


圖 4.12 25cm 同軸式感測器鹽度測試結果(纜線為 140m QR320)

### 4.1.3 含砂濃度試驗結果討論

為驗證頻率域相位速度分析法於泥砂種類率定影響，本研究依照纜線長度驗證之感測器，分別採用 45cm 3 rods 與類似長度(40 cm)之同軸式感測器施作含砂濃度率定試驗，結果分別如圖 4.13 與圖 4.14 所示。其中率定回歸結果係利用公式(3-2) 計算石門沈泥與矽砂之泥砂本身  $\varepsilon_{ss}$ 。45cm 3 rods 及 40 cm 同軸式感測器兩者得到的率定結果大約一致，且泥砂種類影響所造成之差異也甚小，顯示除非特別單一礦物質，否則無需特別率定。

45cm 3 rods 與 40 cm 同軸式感測器率定曲線之誤差分析如圖 4.15 以及圖 4.16 所示。45cm 3 rods 感測器之量測誤差在正負 1500 ppm 範圍內，而同軸式感測器之量測誤差在石門泥砂低濃度時，可能因同軸式感測器外導體開孔有限影響內外材料之均質性及可能有氣泡未排出而造成較顯著誤差外，其餘誤差約在正負 2000 ppm 範圍內。

在同軸外導體開孔方式改良後，同軸式感測器穩定性提高，並發現新式感測器與分析方法在維持相同理論解析度(取樣時距與感測器長度之函數)條件下並不受感測器長度影響，本研究最終選用最短的 25cm 的同軸感測器，以降低現場量測受外物干擾之影響。評估改良後 25cm 同軸感測器，其泥砂率定曲線(以石門沈泥為例)如圖 4.17 所示，圖 4.18 則顯示量測誤差在正負 2000 ppm 之內。顯見利用改良式

25cm同軸感測器，在感測器長度減少下，仍可得到相同之量測準確度，大幅提昇於河川環境實地量測應用性。

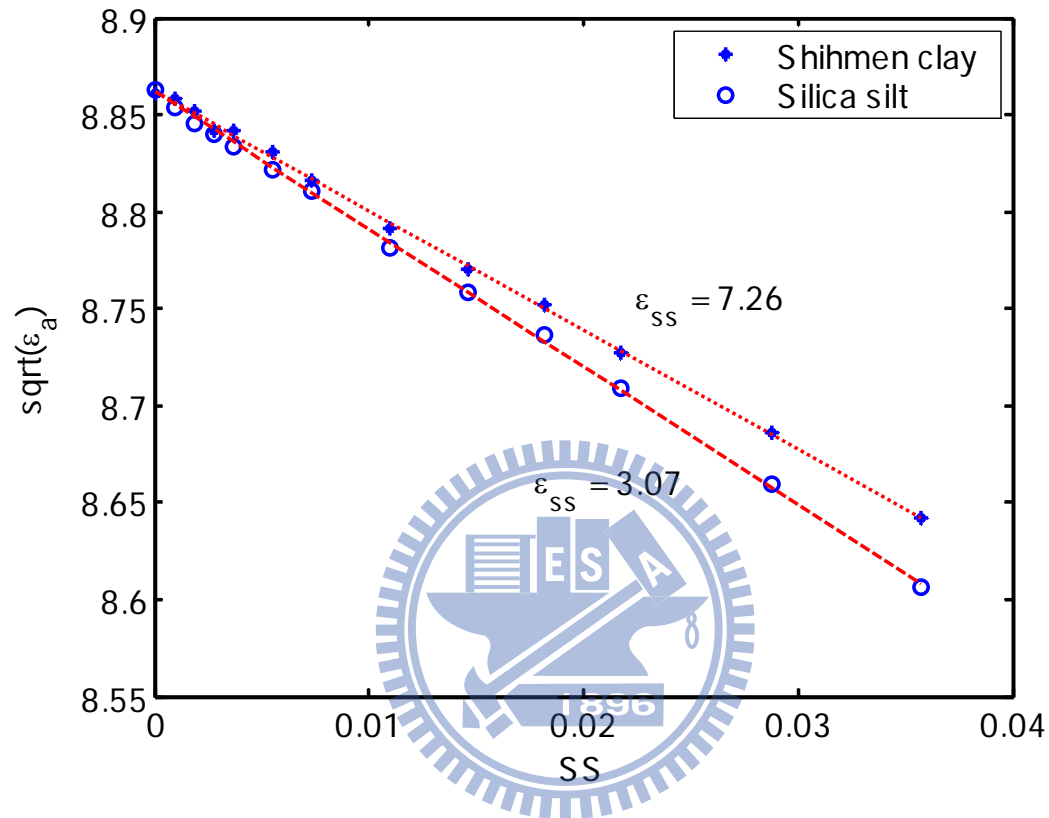


圖 4.13 45cm 3-rods 感測器泥砂率定曲線



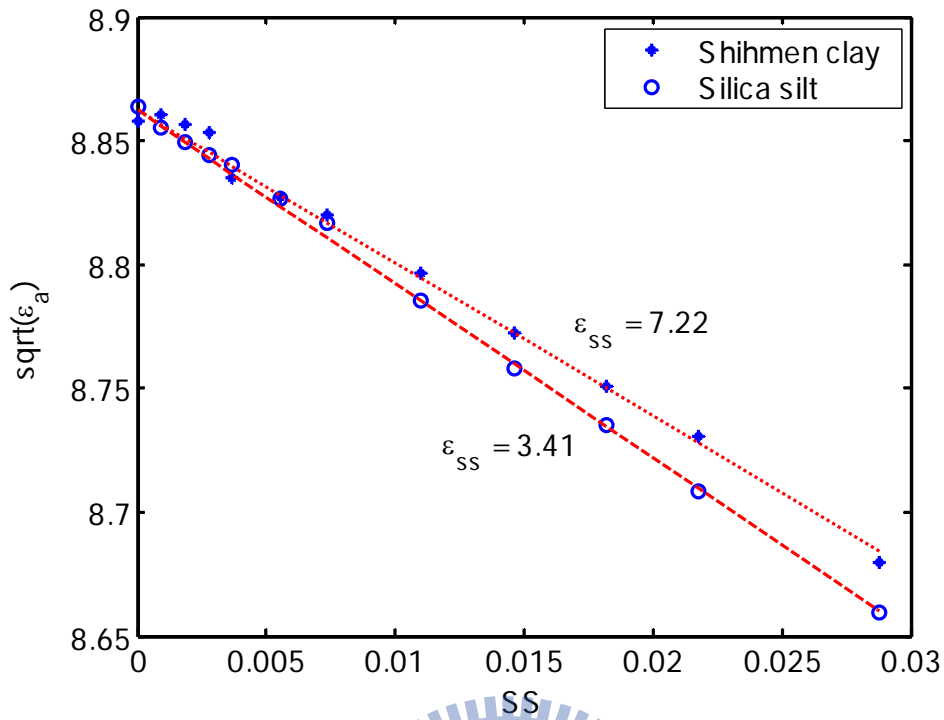


圖 4.14 40cm 同軸感測器泥砂率定曲線

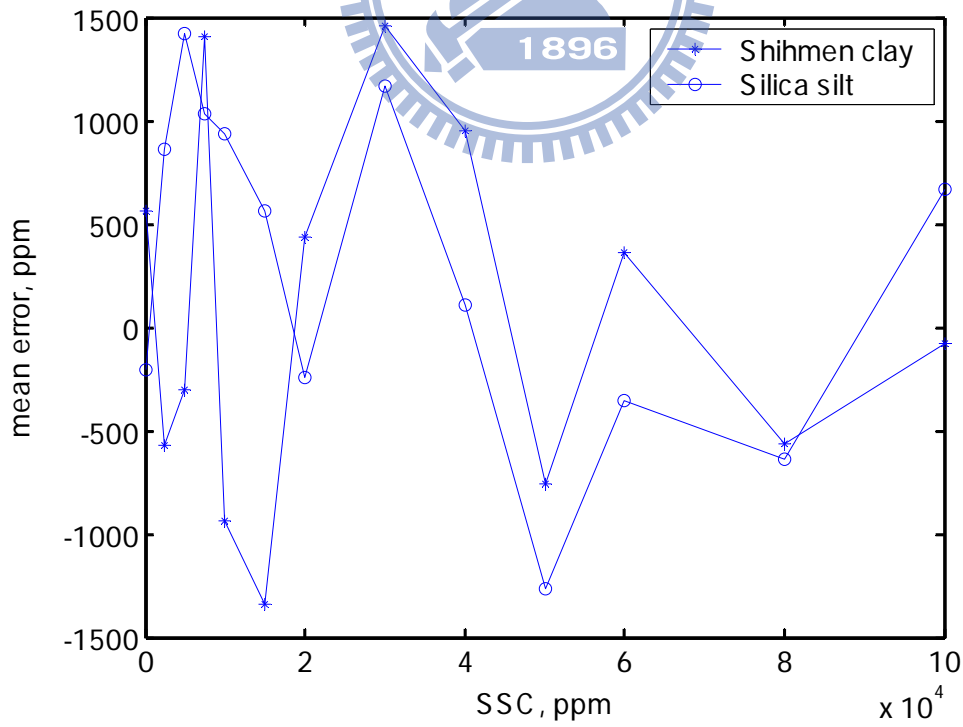


圖 4.15 45cm 3-rods 感測器泥砂率定曲線誤差分析

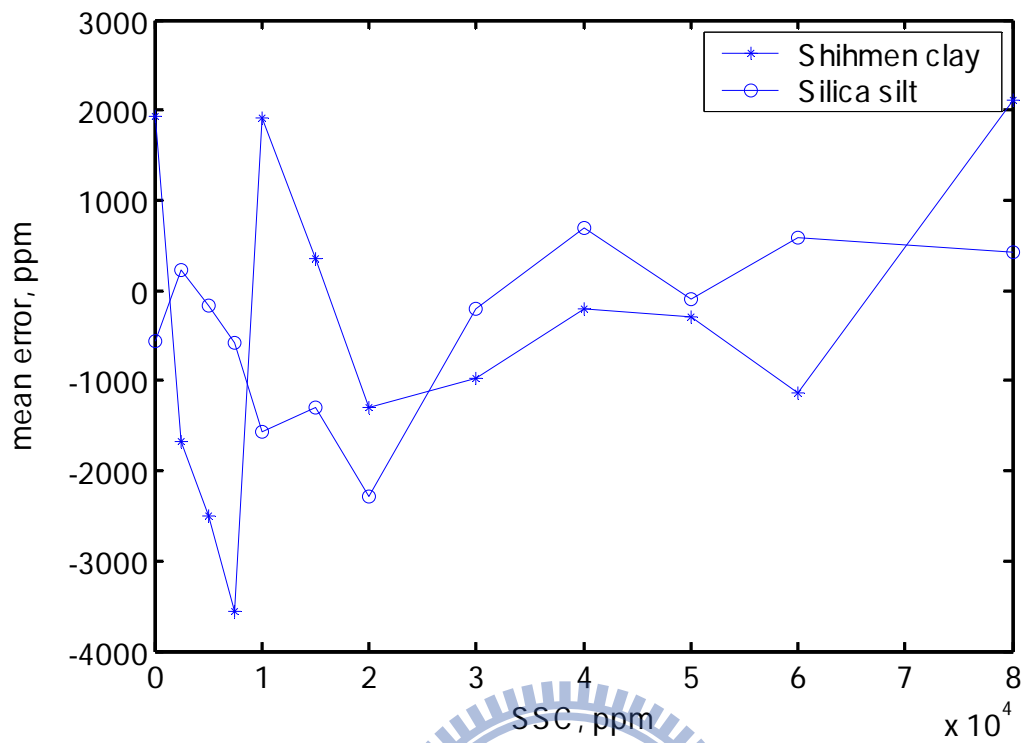


圖 4.16 40cm 同軸感測器率定曲線誤差分析

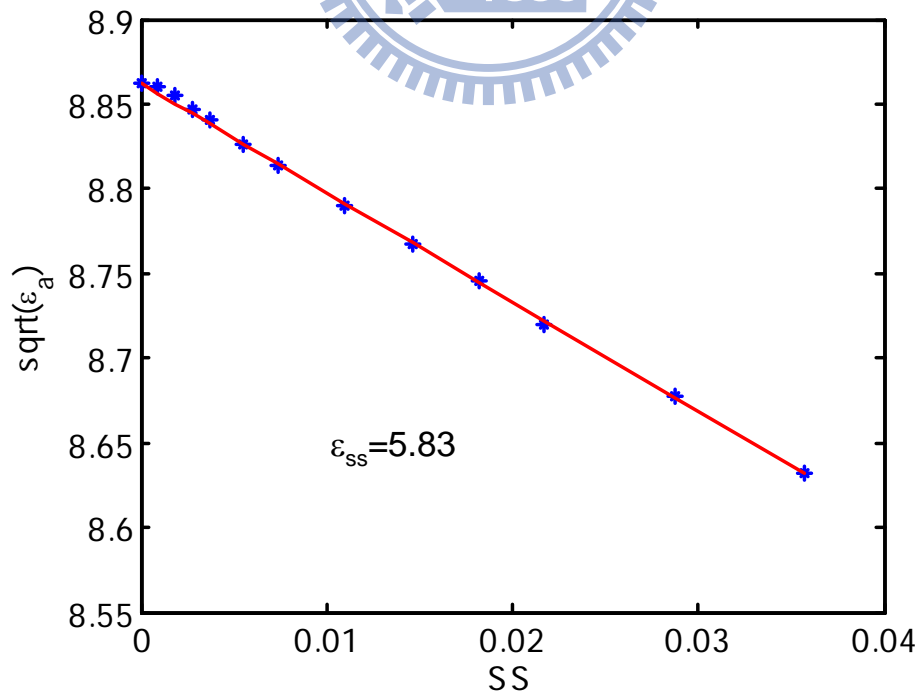


圖 4.17 25cm 同軸感測器泥砂率定曲線

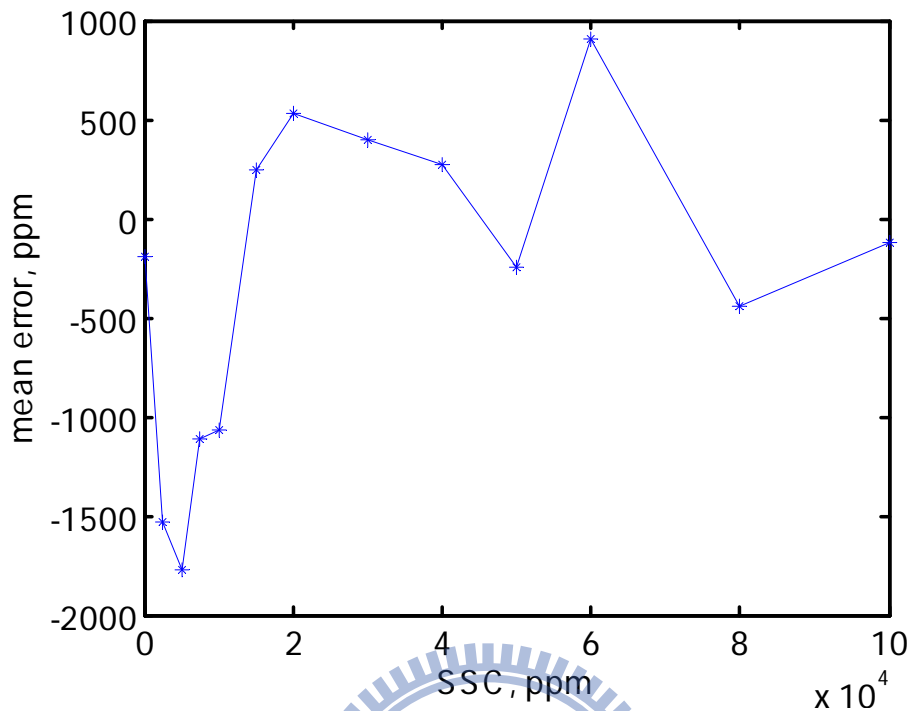


圖 4.18 25cm 同軸感測器率定曲線誤差分析

## 4.2 現場實測結果討論

進行完室內實驗驗證頻率域相位速度分析法的適用性之後，本研究將利用此方法進行現場實測評估以探討頻率域相位速度分析法於現場是否會受到雜訊干擾影響量測準確度，同時也將測試同軸感測器在現場量的測準確度及穩定性。

### 4.2.1 石門大圳測試結果

石門大圳的測試場址，如圖 4. 19所示，現場水質清澈，泥沙濃度不高於 500 ppm，於是本研究將同軸感測器與一 45cm 3-rods感測器安裝至現場，配合自動化擷取系統，定時量測資料並以無線GPRS方式回傳。

自動化測試過程中，同軸感測器較 45cm-3rods感測器明顯提供較為穩定的量測資料，如圖 4. 20所示，假設水質為清水條件下，同軸感測器量測之偏差範圍約在正負 2000 ppm範圍，約同於室內實驗量測準確度。因此本實驗可驗證同軸感測器量測誤差範圍與室內一致外，也較不受外在環境干擾。

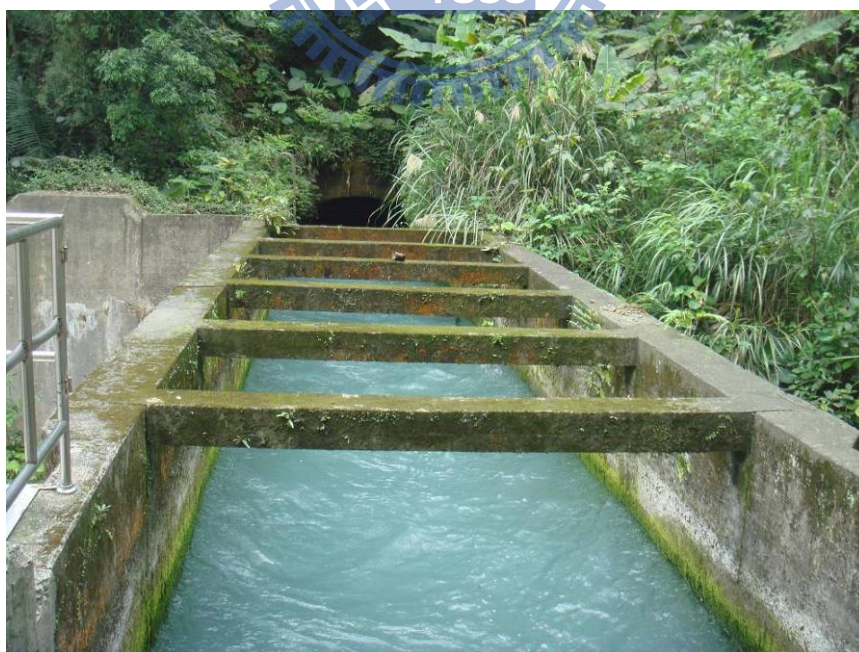


圖 4. 19 石門大圳明渠段現場狀況

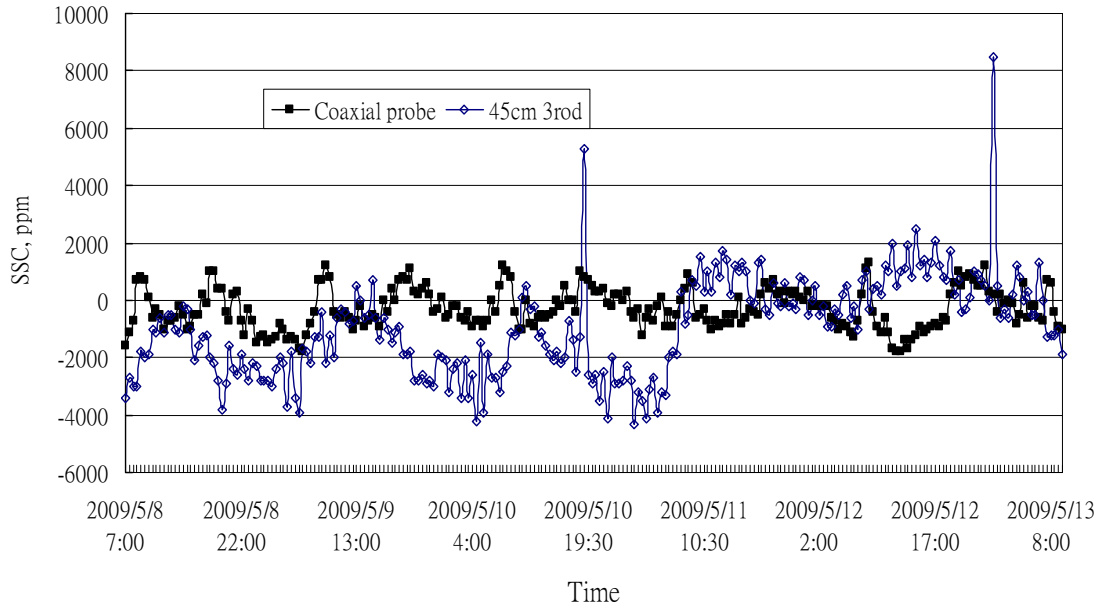


圖 4. 20 石門大圳明渠段 TDR SSC 感測器量測歷時資料

#### 4.2.2 集集攔河堰測試結果

集集攔河堰為現場測試場址為一人工排砂開放式渠道，本研究將 25cm 同軸感測器以人工方式進行 TDR 含砂濃度量測，並配合現場自動幫浦取樣施做比重瓶法比對同軸感測器的量測資料。圖 4. 21 為 TDR、超音波以及比重瓶法的量測結果，由實驗結果可以得知 TDR 量測資料與比重瓶法較接近，超音波量測結果誤差較大，可能是系統基準值偏差導致。若將比重瓶法與 TDR 量測結果單獨做比較如圖 4. 22 所示，可知誤差範圍約在 2000ppm 左右，與實驗室結果相同，而中間有幾筆利用 TDR 量得之濃度較比重瓶法高出許多。根據前期研究發現可能為自動化幫浦在高濃度狀況時取樣結果較實際狀況偏低，於是本研究進行室內自動化幫浦測試，將自動化幫浦取樣器放置在約 3m 高

程差的位置，底下用攪拌桶設置一已知濃度試體，重複取樣量測以瞭解自動化幫浦取樣器的誤差。實驗結果如圖 4. 23 所示，在已知濃度於 2000~6000 ppm 之間，自動幫浦取樣器的結果跟實際濃度約略一致。但當濃度超過 6000 ppm 時，幫浦取樣結果比實際結果來的低，且誤差隨實際濃度增加而增加。配合此一測試結果，比對集集現地測試資料，當 TDR SSC 濃度超過 8000ppm 時，與幫浦取樣差異介於 1000~2000ppm，符合高濃度狀況時幫浦取樣偏低之情形。因此研判此一 TDR SSC 現場測試結果應符合實際濃度變化狀況。

根據集集攔河堰的測試結果可知利用頻率域相位速度分析法進行現場 TDR 含砂濃度量測誤差範圍與室內實驗結果大致相同，而同軸感測器的量測誤差範圍也與實驗室相同，且同軸感測器較開放式感測器更能有效阻隔外在雜物干擾導致量測準確度下降，因此現場含砂濃度量測感測器的選擇可考慮使用同軸感測器進行量測工作。

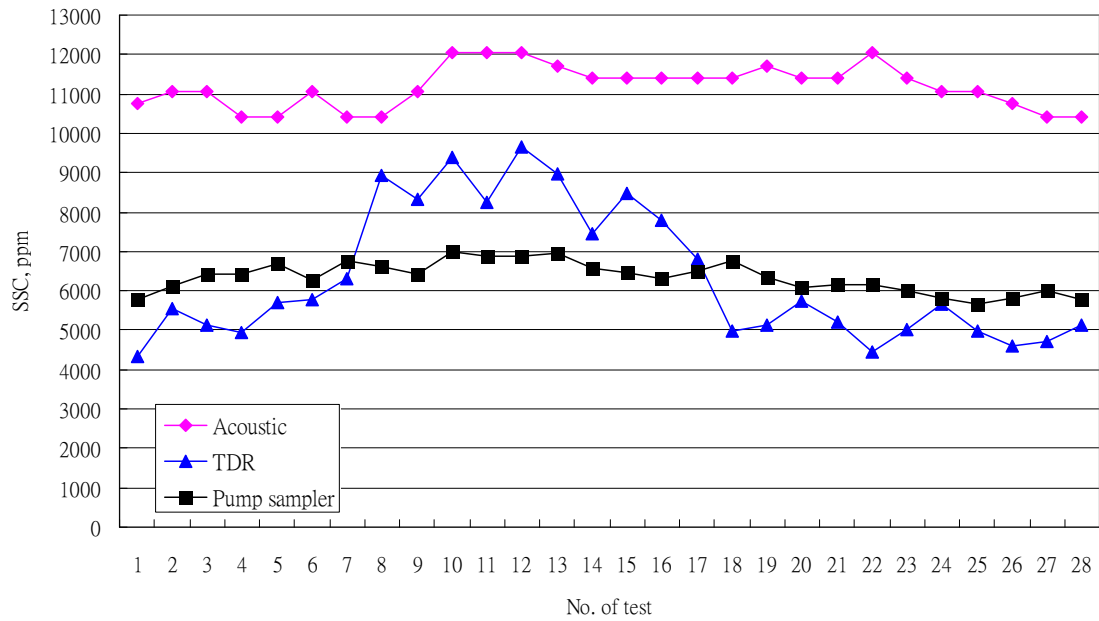


圖 4.21 超音波、TDR、比重瓶法泥砂濃度量測方式結果比較

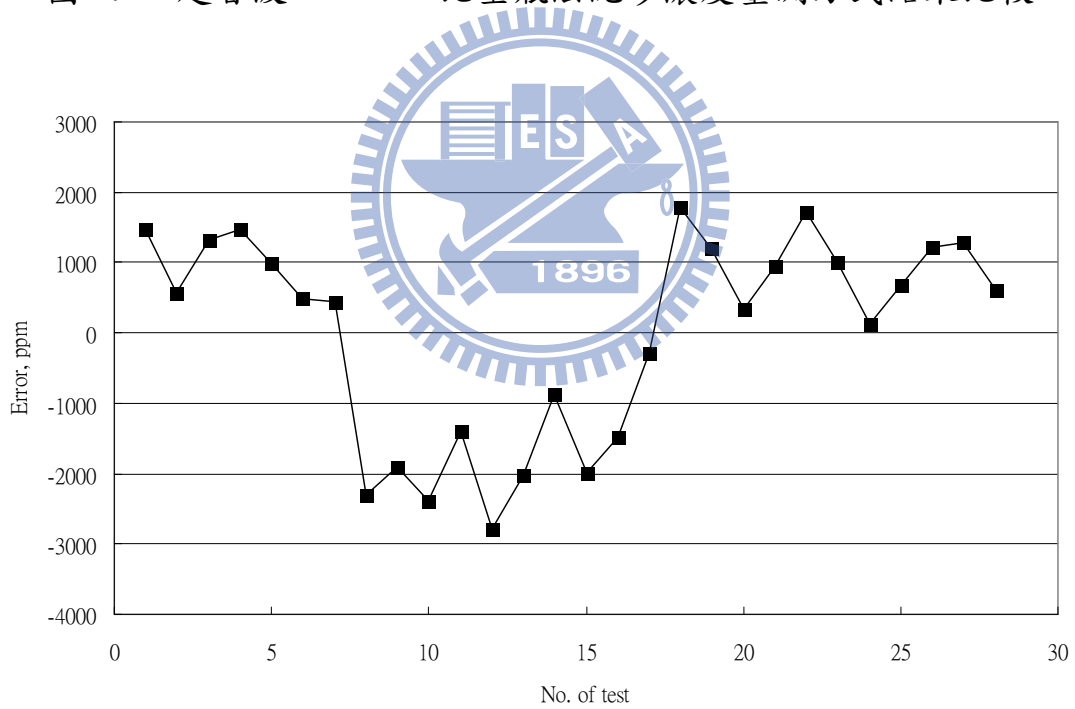


圖 4.22 TDR SSC 與比重瓶法泥砂濃度量測結果差異

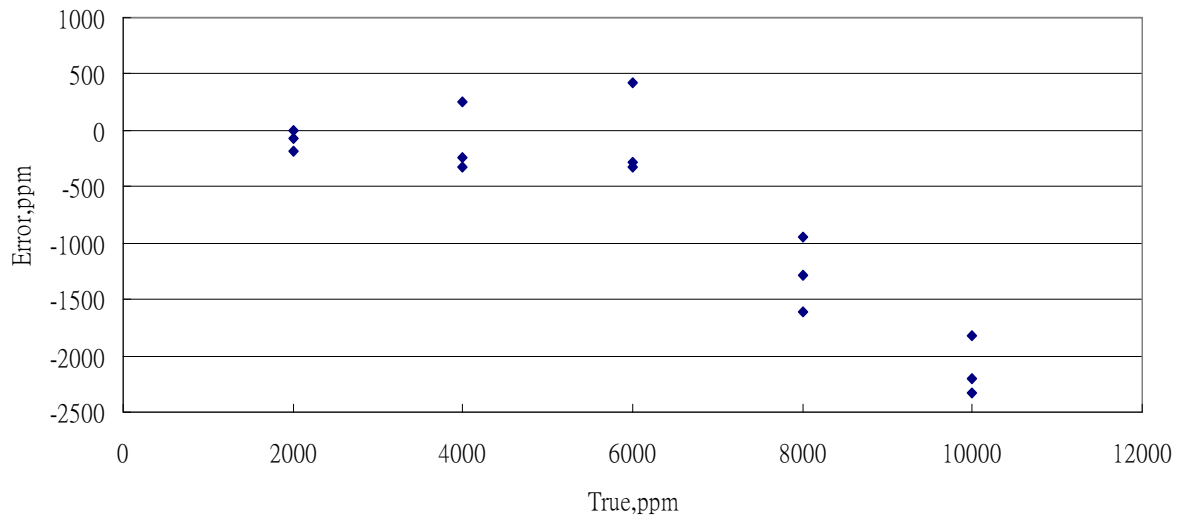


圖 4.23 幫浦取樣變異性測試結果

### 4.3 溫度效應之初步探討

由前述石門大圳實驗結果可知，在接近中午時間泥砂濃度量測結果都較低，到晚上又回復正常，其含砂濃度結果有一個規律的升降現象，偏差範圍約為 3000 ppm。對於此現象，本研究懷疑是否因為中午時儀器箱受太陽直射導致溫度偏高，使得 TDR 儀器受到影響。因此本研究針對 TDR100 主機及多工器進行測試，希望能對溫度影響含砂濃度量測有一初步探討。

#### 4.3.1 溫度效應影響來源分析

本研究針對 TDR100 主機及多工器進行溫度影響含砂濃度實驗，其配置如圖 4.24。本研究連續量測 500 筆波形且計算含砂濃度，並



在 150~200 筆之間對TDR100 主機進行加熱，結果如圖 4.25 所示。結果顯示當TDR100 主機溫度升高時，含砂濃度計算結果明顯有偏低的趨勢，而在停止加溫之後，由於TDR100 主機溫度下降使得含砂濃度結果又恢復正常，因此研判TDR100 主機會受溫度影響使得含砂濃度量測結果受到影響。

另一方面，同樣如圖 4. 24的配置，但這次只加熱多工器，以討論多工器溫度改變對量測結果的影響程度，其結果如圖 4. 26所示，可發現多工器溫度升高時期，含砂濃度量測結果並無明顯變化，因此研判多工器並不受溫度效應的影響而改變量測結果。

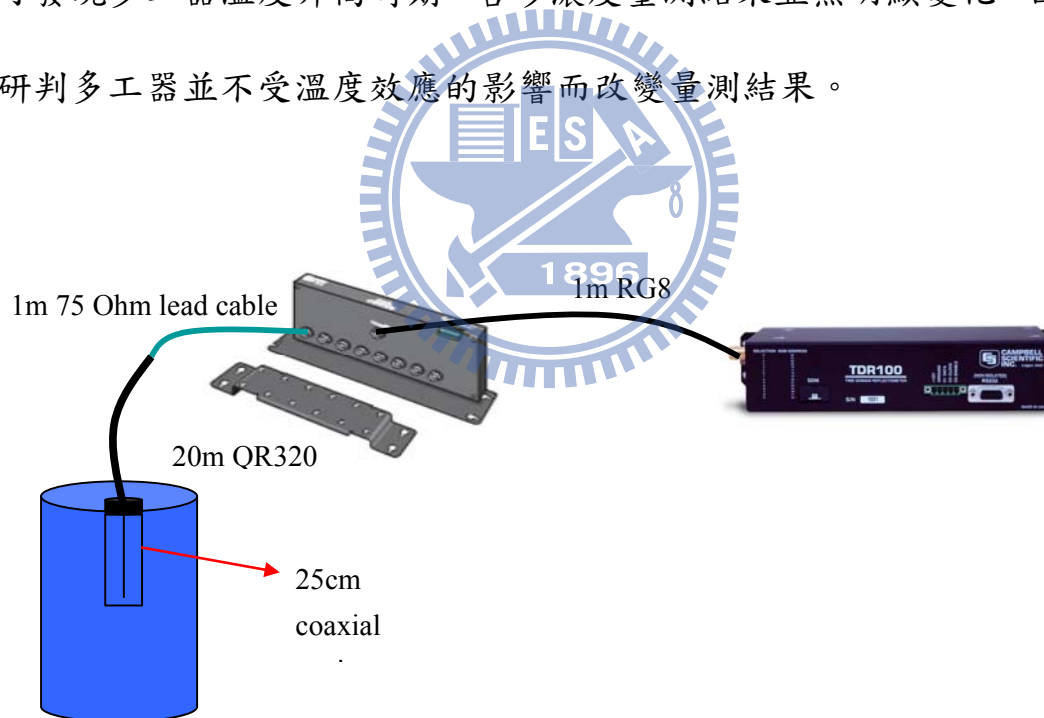


圖 4. 24 溫度影響含砂濃度實驗配置圖

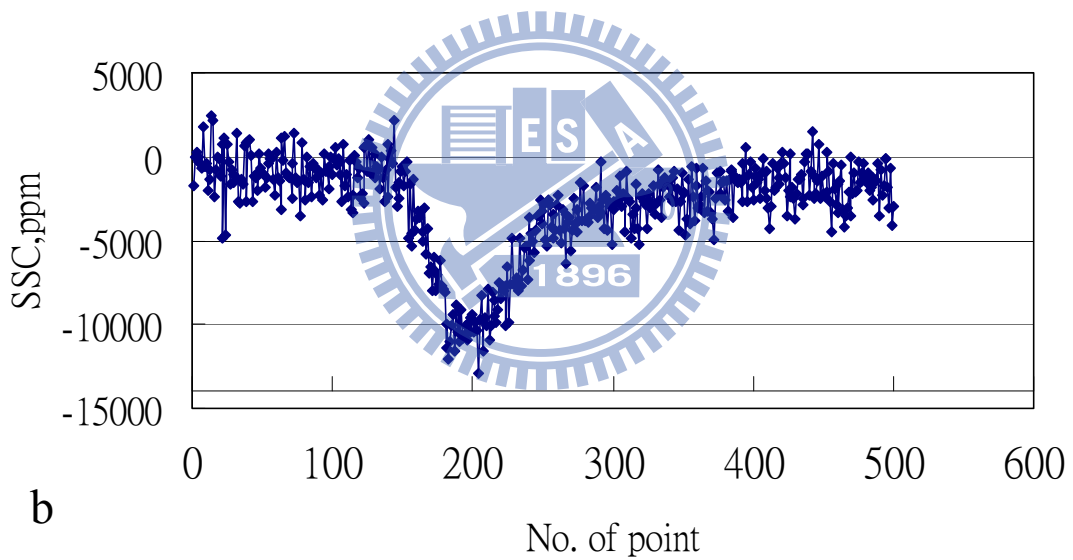
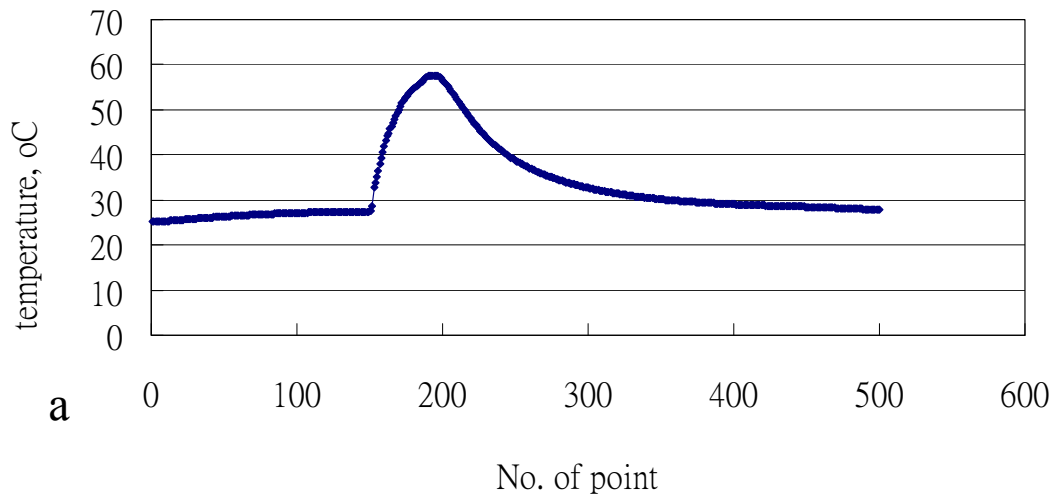


圖 4.25 溫度效應對於含砂濃度影響(加熱 TDR100 主機) (a)溫度變

化圖(b)含砂濃度變化圖

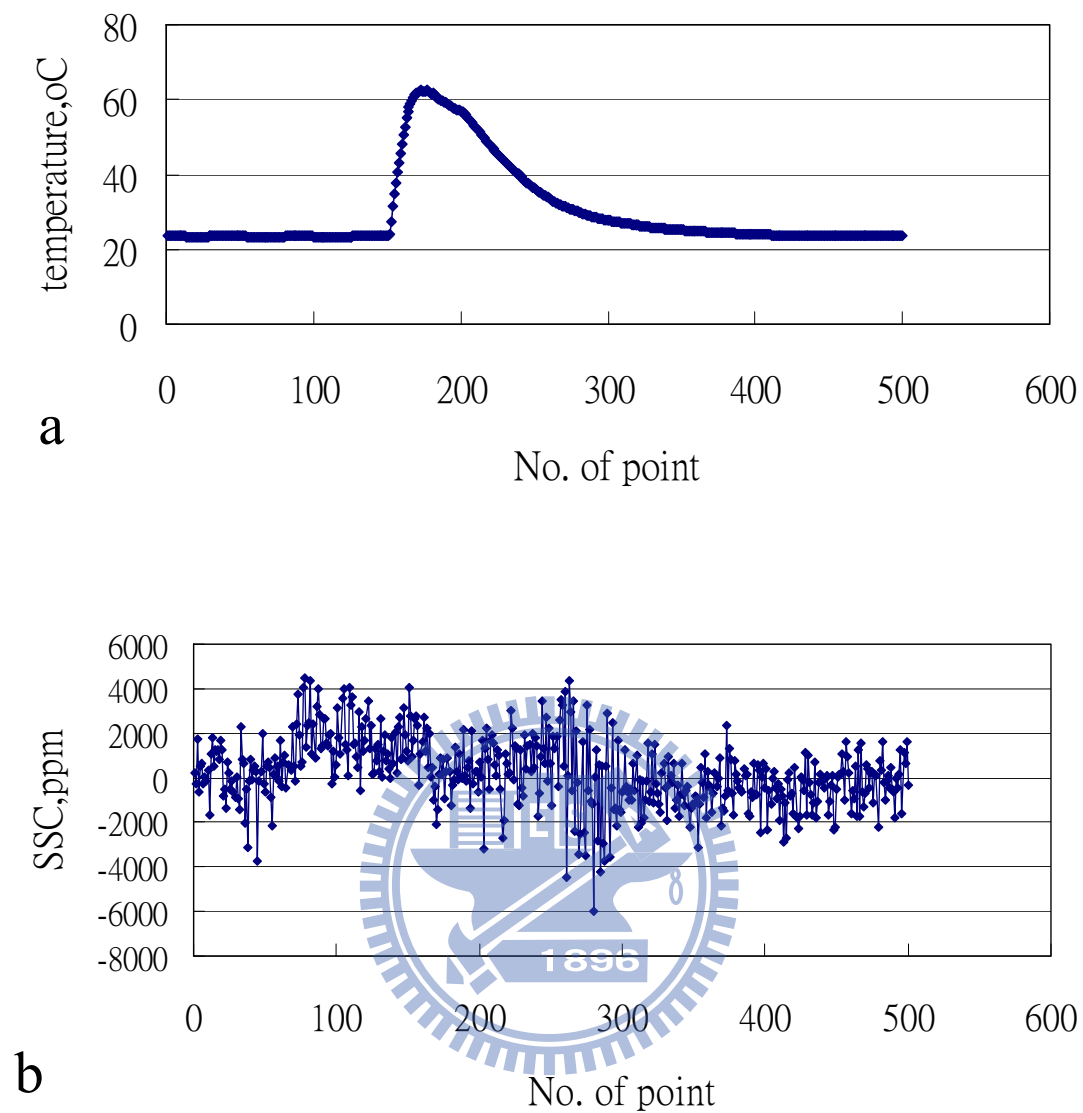


圖 4.26 溫度效應對含砂濃度影響(加熱多工器)(a)溫度變化圖(b)含砂濃度變化圖

試驗結果顯示 TDR 主機內部溫度變化會影響含砂濃度量測結果，TDR 的量測主要包括訊號產生與資料擷取，因此猜測可能訊號產生器之 rise time，與資料採樣器之取樣時距 (sampling interval) 可

能因為電子元件的溫度效應而產生受溫度之影響，取樣時距不易直接量測，但 TDR 輸入方波之 rise time 可由前端訊號決定，下一節將探討 rise time 對於 TDR 含砂濃度量測之影響，以釐清溫度效應之主要來源。

#### 4.3.2 rise time 於頻率域相位速度分析法含砂濃度量測之影響

經由前一節實驗結果可知 TDR 主機內部溫度升高會影響含砂濃度量測結果，但影響原因可能有二，一是 TDR 主機本身因為溫度升高造成擷取時距 (sampling interval)  $dt$  改變，進而影響含砂濃度量測值，另一可能原因是 TDR 主機之脈衝方波的 rise time 影響。

Rise time 定義為 TDR 主機發射之脈衝方波在儀器內部有一上升段，取上升後穩態之 10~90% 時間間格定義為 rise time 如圖 4.27 所示。在加熱過程中同時記錄溫度變化與 TDR 輸入訊號之 rise time，結果如圖 4.28 所示，由結果可看出似乎 rise time 受溫度之影響與含砂濃度溫度效應具有高度相關性，溫度升高會使得 rise time 上升，但不知含砂濃度結果改變是因為 rise time 本身造成的影響或是因為  $dt$  改變造成的影響。因此本研究針對 rise time 改變進行頻率域相位速度分析法的數值模擬，結果如圖 4.29 所示。當模擬之 rise time 走時從 200ps 增長到 300ps 時，含砂濃度造成的誤差僅僅只有 120 ppm，因此可以說明造成含砂濃度結果下降的原因應為  $dt$  改變，而造成後端含砂濃度量測波

形變化所致，並非rise time的改變造成影響。

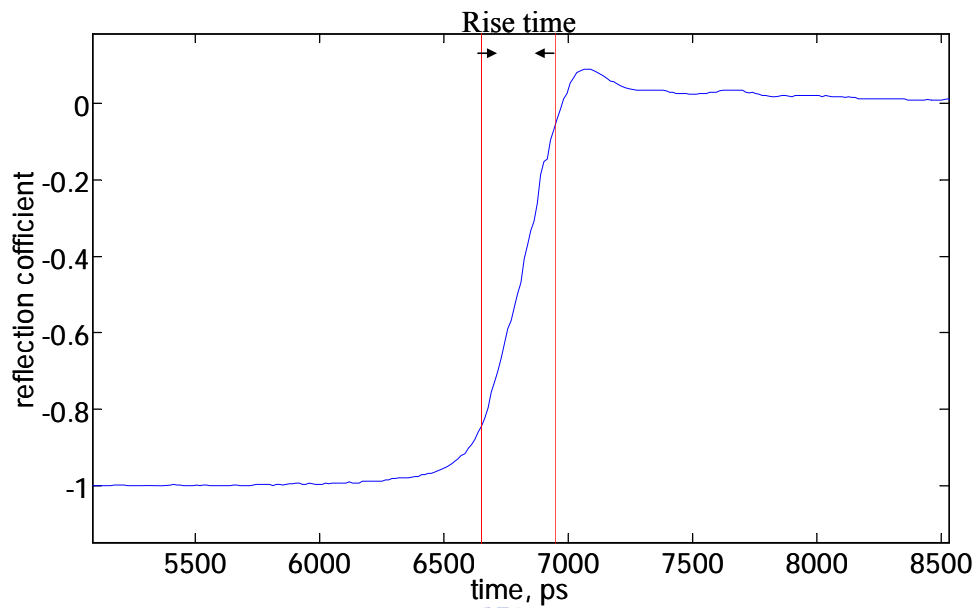
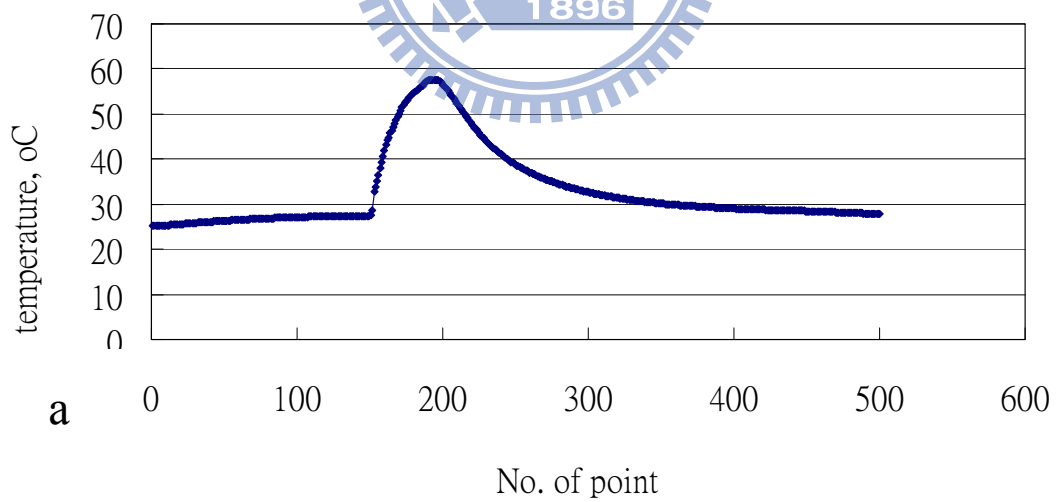


圖 4.27 TDR 主機脈衝方波 Rise time 示意圖



a

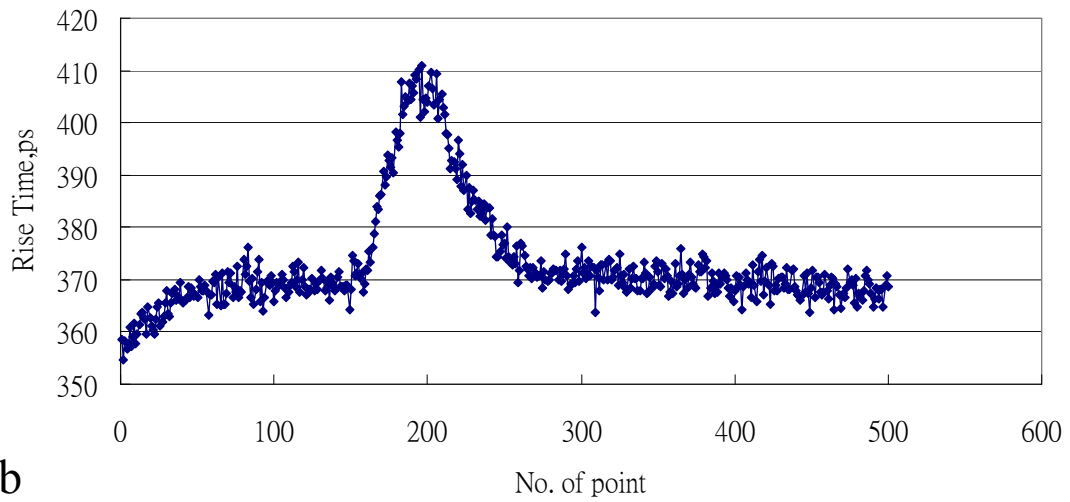


圖 4. 28 溫度對 rise time 的影響 (a) TDR 主機內部溫度(b) rise time 變

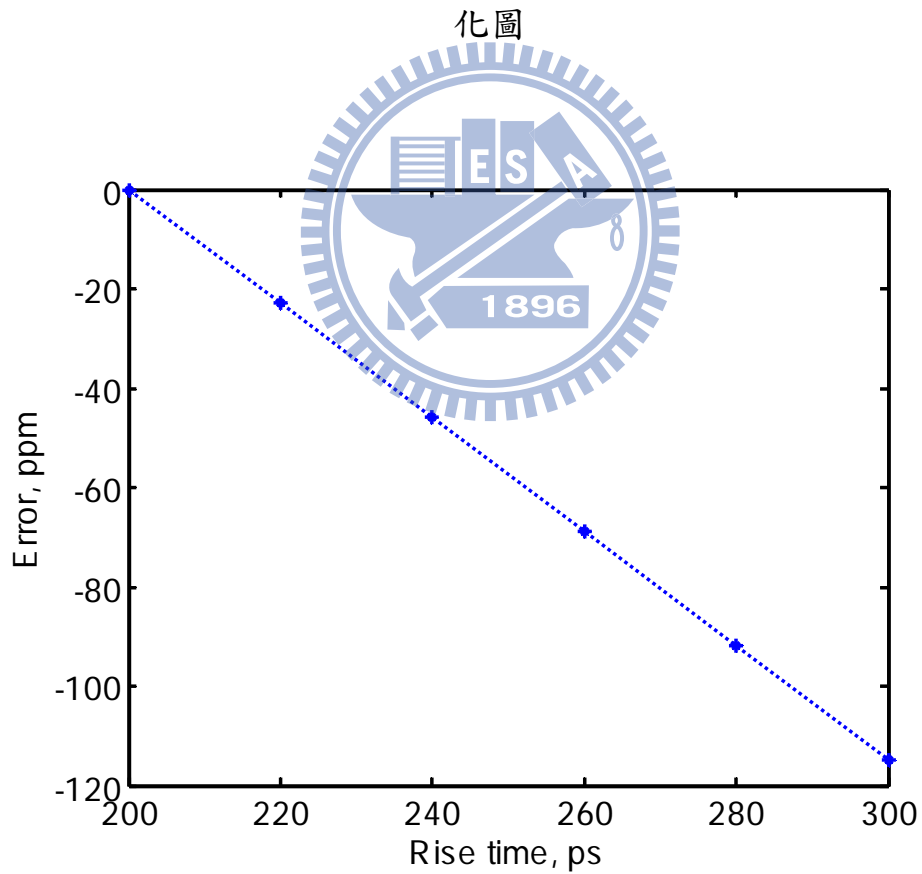


圖 4. 29 Rise time 對於含砂濃度影響數值模擬結果

綜合上述討論結果，發現 TDR 主機溫度變化確實會對含砂濃度

造成影響，而由數值模擬指出前端 rise time 改變並不會顯著影響含砂濃度量測結果，因此推測 TDR 量測結果之主機溫度效應可能為溫度升高造成 TDR100 主機擷取時距 (sampling interval)  $dt$  之改變造成的影響。因此若能針對 TDR100 之取樣時距進行溫度修正，應能降低溫度效應的影響，由於取樣時距不易直接量測，因此建議後續探討利用量測 rise time 進行溫度修正之方法與流程。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

目前現有的泥砂濃度量測方法不論是直接人工取樣或是商業化儀器，皆無法有效且長時間的監測含砂濃度，TDR 應用於含砂濃度量測上具有低成本、可自動化等優點。前期 TDR 量測方法皆建立於時間域分析，易受外在雜訊干擾。最近相關研究提出新式頻率域相位速度分析方法，透過頻率域之分析方法可避免雜訊的干擾，大幅提昇量測穩定性及其便利性，但此分析方法目前僅在數值模擬驗證階段，並無實驗證明其適用性。本研究目的為基於頻率域相位速度分析法進行 TDR 含砂濃度量測技術之改良，並包括感測器改良及進行室內實驗與現地實測，以驗證新方法的適用性，其結論如下：

1. 經由實驗結果顯示利用新式頻率域相位速度分析法除繼承以往不受水質鹽度、纜線長度以及泥砂粒徑影響之優點，其量測精度與走時分析法相同，約為 1500 ppm，且此分析方法在頻率域上做分析，相較於走時分析法較不受現場雜訊影響，且只需用水做標定，無須額外再在纜線進入感測器前，製作波形起點，使得感測器製作與標定上更加便利。
2. 新式同軸感測器在現地實測驗證其適用性，且同軸感測器不受現場雜物干擾而影響量測準確度的功能，因此更適合於現



場濃度觀測使用。

3. 在現地測試過程中亦發現，量測結果似乎受到 TDR 主機周圍溫度之影響而有所變動，經實驗證實 TDR 主機溫度會影響量測結果，推測可能為溫度升高造成 TDR 主機擷取時距之改變造成的影響。

## 5.2 建議

1. 由於 TDR 電磁波傳輸需靠同軸纜線，而同軸纜線與感測器接續界面為一易受損之弱面，可考慮如何加強纜線與感測器間的接續。另外感測器部分可往更穩固為改良方向進行研發。
2. 目前發現的溫度效應初步研判為主機之擷取時距（sampling interval）受溫度影響，未來應仔細討論此問題並進修正，藉此提升量測準確度。但由於取樣時距不易直接量測，建議後續探討利用量測 rise time 進行溫度修正之方法與流程。
3. 感測器長期置於水中是否會有青苔與污垢附著而影響量測結果尚須長期測試及研擬相關對策。

## 參考文獻

1. 角哲也 (2003), 「差圧センサーによる微細土砂濃度計測システム (SMDP) を用いた流砂系土砂動態観測」, 環境水理部会研究集会
2. 許盈松、劉傑立(2006), 「壓差測砂裝置及其方法」, 中華民國專利, 公告號: I259269
3. 李小昱、雷廷武、王為(2001) 「一種電容式水流泥砂含量感測器」, 中國人民共和國專利, 公告號: CN2454777。
4. 李小昱、雷廷武、王為、趙軍、王輝 (2002) 「一種壓力式水流泥砂含量測量儀」, 中國人民共和國專利, 公告號: CN2503478。
5. 林志平、鐘志忠、張育嘉、楊錦釧、葉克家、洪銘堅、曾君敏 (2006), 「高泥砂濃度觀測: 時域反射技術」, 2006 水利工程研討會, 中壢。
6. 林志平、鐘志忠、侯沛霖、洪銘堅、蘇俊明、李仲卿 (2008), 「時域反射泥砂濃度觀測技術之研發與應用」, 2008 水利工程研討會, 台中。
7. 鐘志忠, 「時域反射量測技術改良於水土混合物之應用」, 博士論文, 國立交通大學土木工程研究所, 新竹, (2008)

8. 張育嘉,「高含砂濃度觀測技術之研發:時域反射法」,碩士論文,國立交通大學土木工程研究所,新竹(2006)
9. Cereti, Annamaria; pettinelli, Elena; Galli, Alessandro and Bella,Francesco. (2003), Shorted-end probes for accurate permittivity measurements with time-domain reflectometry. *Applied Physics Letters*,v 83, n 5, Aug4, p 1050-1052.
10. Curtis, H.L., Defandorf, F.M. (1929), Dielectric constant and dielectric strength of elementary substances, pure inorganic compounds, and air. In: Washburn, E.D. (Ed.), *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry, and Technology*, vol. 6. McGraw-Hill, New York, pp. 73–107.
11. Feng, W., Lin, C.-P., Deschamps, R. J., and Drnevich, V. P. (1999), “Theoretical Model of a Multisection Time Domain Reflectometry Measurement System,” *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 2321-2331. Li, X., Lei, T., Wang, W., Xu, Q., and Zhao, J. (2005). “Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentration,” *Catena* 60: 227–237.
12. Foti, S., 2000, multisation Method for Geotechnical Characterization using surface waves, ph. D. thesis, Politecnico di Torino.
13. Lin, C.-P. and Tang, S.-H. (2005),Development and calibration of a TDR extensometer for geotechnical monitoring, *Geotechnical Test Journal*, Vol. 28, No. 5, Paper ID:GTJ12188
14. Lin, C.-P., Chung, C.-C., and Tang, S.-H. (2007a) “Accurate TDR Measurement of Electrical Conductivity Accounting for Cable Resistance and Recording Time,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71: 1278-1287
15. Lin, -C.-P., Chung, C.-C., Tang, S.-H. (2007b) “Apparent Dielectric Constants from TDR Waveforms: Influencing Factors and

Comparison,” Soil Moisture Sensing Technology Conference: Current and future research directions in soil moisture sensing, March 19-21, 2007- Waikiki, Hawaii.

16. Li, X., Lei, T., Wang, W., Xu, Q., and Zhao, J. (2005). Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentration. *Catena* 60: 227–237.
17. Nazarian S, Stokoe II KH. In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves. *Proceedings of Eighth Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, vol. 3; 1984. p. 38–45.*
18. Pepin, S., N. J. Livingston, and W. R. Hook (1995), Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 38-43.
19. Ramo, S., Whinnery, J. R., and Duzer, T. V. (1994), *Fields and Waves in Communication Electromagnetics*, 3rd edition, John Wiley & Sons.
20. 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 Resources Research*, Vol. 16, pp. 574-582.
21. Wren, D.G., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R. A., and Derrow, R. W. (2000), “Field techniques for suspended-sediment measurement,” *J. Hydr. Engng., ASCE* , 126(2): 97-104.
22. Wren, D. G. and Kuhnle, R. A. (2002), “Surrogate techniques for suspended-sediment measurement,” *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV.