

國立交通大學
土木工程學系
碩士論文

高含砂濃度觀測技術之研發：時域反射法

Development of Monitoring Technique for High Suspended
Sediment Concentration Using TDR



研究生：張育嘉

指導教授：林志平 博士

中華民國九十五年七月

高含砂濃度觀測技術之研發：時域反射法

Development of Monitoring Technique for High Suspended Sediment Concentration Using TDR

研究生：張育嘉

Student: Yu - Chia Chang

指導教授：林志平 博士

Advisor: Dr. Chih - Ping Lin



A Thesis

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

Civil Engineering

July 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年七月

高含砂濃度觀測技術之研發：時域反射法

學生：張育嘉

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

含砂濃度觀測為水資源利用、防洪排砂、河川輸砂之基本參考資料，觀測資料品質良好與否，將影響水利工程與應用之成效。回顧現有之泥砂濃度觀測儀器，考量其量測效能以及設置成本，尚無有效之高濃度泥砂觀測自動化系統。本研究企圖以被動式電磁波時域反射法(Time Domain Reflectometry，簡稱 TDR)，作為高含砂濃度觀測方法之研發，期能提高泥砂濃度量測準確度與量測範圍，提供一高空間與時間解析度力自動化泥砂濃度觀測技術。

透過 TDR 量測技術，可利用感測器反射波形之走時及穩態反應分別決定受測體之介電度及導電度，而電學性質與泥砂含量具有高度相關性，因此本研究針對泥砂種類、粒徑、水質鹽度及溫度等對 TDR 影響量測參數，設計不同型態的感測器及分析方法，以室內實驗評估各種感測器量測效能。研究結果顯示，利用導體短路且無絕緣(Short-uncoating)感測器，配合參考線法(Reference line method)之走時分析，其泥砂含量率定結果能大幅減低水質影響，可克服傳統感測器以及分析方法受水質影響

的瓶頸。以石門水庫之底泥為例，其率定實驗的結果顯示，泥砂濃度量測誤差平均值為 4300 ppm，標準偏差為 950 ppm。爾後實驗結果顯示溫度對感測器之走時影響為線性關係，可利用溫度量測進行補償。此外，TDR 濃度量測受土壤種類與粒徑之影響不大，相較於傳統光學與超音波方法，TDR 方法具有良好優勢。

本研究顯示，TDR 泥砂量測技術具有高泥砂濃度量測優點，且成本低廉，易提供高空間和時間解析自動化泥砂觀測系統。未來建議進行含溫度補償之參考線最佳化及 TDR 頻譜分析方法，藉以進一步提升量測準確性。

關鍵字：含砂濃度、時域反射法(TDR)、介電度



Development of Monitoring Technique for High Suspended Sediment Concentration Using TDR

Student: Yu-Chia Chang

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

**Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University**

Abstract

Suspended sediment concentration (SSC) measurement is critical for water resource, flood control, and sediment discharge. However, an efficient and automated technique for high SSC monitoring are yet to be discovered. This thesis introduces a new method based on time domain reflectometry (TDR) that may lead to an effective solution for high SSC monitoring with high spatial and temporal resolution.

TDR method measures apparent dielectric constant from travel time and electrical conductivity from steady state response, both have high correlation with SSC. Considering the influence of parameters, such as soil type, soil particle size, water salinity, and temperature, various probe types and analyses methods are designed to evaluate the TDR measurement performance. Experimental results reveal that using short-uncoating probe with reference line travel time analysis can greatly reduce water salinity effect on dielectric estimation. The laboratory calibration result of Shihmen sediment showed that the mean error of SSC estimation from travel time is 4300 ppm with a standard deviation of 950ppm. The maximum SSC measurement range is theoretical unlimited. The travel time decreases linearly with increasing temperature. But this temperature dependency can be compensated by a simultaneous temperature measurement. Furthermore, the TDR SSC measurement is relatively independent of soil type and particle size, making it much more advantageous than optical and supersonic method.

TDR has the advantage of high SSC measurement ability, low-cost, and high spatial and temporal resolution. Future research is directed to optimizing reference line analysis with temperature compensation and dielectric spectroscopy for further improving the SSC measurement accuracy.

Key words : Suspended Sediment Concentration (SSC), Time Domain Reflectometry (TDR), Dielectric constant.



致 謝

本論文承蒙指導教授 林志平博士於研究所求學期間悉心指導，使本論文得以順利完成，除了在論文研究、專業知識上的教誨及指導，協助學生突破研究的瓶頸及獲得學識的增長外，亦讓學生在研究所兩年的求學過程中獲得寶貴的收穫、成長及茁壯，在此致上最誠摯的敬意及感謝。

於求學期間，承蒙廖志中教授、潘以文教授、黃安斌教授、單信瑜教授以及方永壽教授在學識上的指導，在此致上萬分謝意。

口試期間，良受經濟部水利署謝勝彥總工程司、蔡光榮教授、陳昭旭教授及古志生教授撥冗審閱本論文並提供許多寶貴的意見及建議，使本文得以更加完善，於此表示由衷感謝。

研究期間，幸蒙宗盛、志忠、士弘等博士班學長給予的協助，尤其志忠學長於撰寫論文期間的鼎力相助，更是感激不盡。文欽學弟於實驗期間的幫忙、亦全學弟及同窗好友仁宏、忠良等諸多同學給予研究上的協助及經驗分享，僅以此謝文獻上致謝意。

最後，感謝家人對我的栽培，一路上走來得包容及關心，僅以此文獻給我最親愛的家人及所有關心我的朋友們。

目 錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	iii
致 謝.....	v
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
1.3 研究流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 既有泥砂濃度量測方法技術回顧與問題評析.....	4
2.1.1 直接量測方法.....	5
2.1.2 間接量測方法.....	7
2.2 泥砂濃度量測電學方法.....	23
2.3 TDR 原理與應用.....	30
2.3.1 TDR 基本原理.....	31
2.3.2 泥砂濃度量測原理.....	33

2.4 水質鹽度對電學方法量測影響.....	35
2.5 溫度對電學方法量測之影響.....	37
2.6 TDR 泥砂濃度量測測試及限制.....	40
第三章 研究方法.....	46
3.1 TDR 量測系統參數靈敏度.....	48
3.2 量測儀器解析度.....	51
3.3 TDR Probe 感測器最佳化設計與效能評析.....	51
3.3.1 感測器最佳化設計.....	52
3.3.2 濃度試驗評估.....	54
3.3.3 水質鹽度.....	54
3.3.4 試驗分析方法.....	55
3.4 溫度影響.....	57
3.5 土壤種類與粒徑影響.....	57
第四章 試驗結果與討論.....	59
4.1 儀器解析度與量測變異性.....	59
4.2 感測器最佳化設計與效能評估.....	61
4.2.1 濃度試驗評估.....	61
4.2.2 感測器長度.....	73
4.2.3 水質鹽度.....	77

4.2.4 溫度影響.....	84
4.2.5 土壤種類與粒徑影響.....	87
4.2.6 水流流速影響.....	91
4.3 光學及超音波泥砂觀測技術評估.....	92
4.3.1 光學式泥砂觀測技術評估.....	92
4.3.2 超音波泥砂觀測技術評估.....	94
第五章 結論與建議.....	96
5.1 結論.....	96
5.2 建議.....	98
參考文獻.....	99



圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 各式取樣瓶	6
圖 2-2 幫浦取樣器	7
圖 2-3 a) Acoustic backscatter method, b) Range gating method (Wren, et al., 2000).....	9
圖 2-4 雷射束反射法 (Wren, et al., 2000).....	10
圖 2-5 雷射繞射法 (Wren, et al., 2000).....	12
圖 2-6 Optical Backscatter, OBS (D&A Instrument Company).....	14
圖 2-7 遙測光譜反射法 (Wren, et al., 2000).....	16
圖 2-8 光纖透光度法示意圖 (Campbell, et al., 2004).....	18
圖 2-9 Density meter.....	19
圖 2-10 Suspended solid density monitoring (Untrasonic).....	20
圖 2-11 現地實際洪水事件 (Starr, 2005).....	25
圖 2-12 TDR 監測儀器配置 (Starr, 2005).....	25
圖 2-13 (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).....	26
圖 2-14 平板式與圓柱型電容 (Li et al., 2005).....	28
圖 2-15 泥砂濃度(<70%)與電容輸出關係(a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005).....	29

圖 2-16 溫度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005).....	29
圖 2-17 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).....	30
圖 2-18 TDR 量測系統示意圖	33
圖 2-19 典型 TDR 波形及走時與穩態值分析示意圖	33
圖 2-20 水質鹽度對電學量測之影響	37
圖 2-21 溫度對介電常數之影響	39
圖 2-22 溫度對導電度量測之影響	40
圖 2-23 試驗土樣粒徑分佈圖	43
圖 2-24 泥砂種類對視介電常數(K_a)量測之影響.....	44
圖 2-25 泥砂種類導電度(σ)量測之影響	44
圖 2-26 TDR 水質感測器.....	45
圖 3-1 研究流程圖	47
圖 3-2 介電度量測靈敏度	50
圖 3-3 TDR 感測器設計示意圖	54
圖 3-4 切線法示意圖	56
圖 3-5 參考線法示意圖	56
圖 4-1 原始波形比較	60
圖 4-2 Open-uncoating 原始波形.....	62

圖 4-3 Open-uncoating 切線法分析結果.....	63
圖 4-4 Short-uncoating 參考線法分析結果.....	64
圖 4-5 Short-uncoating 切線法分析結果.....	65
圖 4-6 Open-coating 參考線法分析結果.....	66
圖 4-7 Open-coating 切線法分析結果.....	67
圖 4-8 Open-coating 參考線法分析結果.....	68
圖 4-9 Open-coating 切線法分析結果.....	69
圖 4-10 感測器效能比較圖	72
圖 4-11 重複性量測誤差比較圖.....	73
圖 4-12 Short-uncoating 感測器增長示意圖	75
圖 4-13 Short-uncoating 感測器增長分析結果	76
圖 4-14 Short-uncoating 量測誤差比較圖.....	76
圖 4-15 Open-uncoating 水質鹽度影響.....	78
圖 4-16 Short-uncoating 水質鹽度影響.....	79
圖 4-17 Open-coating 水質鹽度影響.....	80
圖 4-18 Short-coating 水質鹽度影響.....	81
圖 4-19 Short-uncoating 水質鹽度影響.....	83
圖 4-20 Short-uncoating 整體效能.....	83
圖 4-21 溫度影響試驗原始波形	86

圖 4-22 溫度影響走時差分析回歸結果	86
圖 4-23 土壤種類影響	89
圖 4-24 土壤種類粒徑分佈圖	90
圖 4-25 土壤粒徑影響	91
圖 4-26 試驗土樣粒徑分佈	93
圖 4-27 光學式 YSI 以及 OBS 率定結果	94
圖 4-28 超音波試驗率定結果	95

表目錄

表 2-1 各種懸移質觀測儀器優缺點評估表	22
表 2-2 常見物質介電常數(Curtis and Defendorf, 1929).....	34
表 4-1 分析方法比較	60
表 4-2 解析度比較表	61
表 4-3 感測器效能比較表	72

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，大多數水庫集水區周遭環境先天不良，加上人為的濫墾濫伐使得區域內水土保持遭受破壞，導致每當颱風或豪雨來襲，造成山坡地大量沖蝕崩塌，原水挾帶大量泥砂進入庫區，使水庫過度淤積而減少庫容，導致防洪能力降低、給水能力不足且造成重要民生供水系統異常等問題。

泥砂問題已儼然成為台灣蓄水庫壽命的頭號殺手，為使水庫能永續經營或延續壽命，便需要一套有效之排砂方案。目前國內針對水庫淤積現象，多以蓄清排洪為手段，以期有效地於洪氾事件中，將入庫泥砂隨著大量入流進行排砂操作。然而，蓄清排洪之操作時程則受到上游河川以及庫區內泥砂運移行為控制，因此著手對上游河川以及庫區內泥砂運移及沈積行為之研究，便顯的相當重要。為瞭解泥砂於庫區運移及分佈行為，常搭配數值模擬進行評估，而數值模擬得配合實際現地泥砂濃度參數，提供數值邊界輸入或驗證使用。泥砂運移之觀測可提供上游邊界之流量與泥砂濃度資料，可估計入庫泥砂量及提供泥砂運移模式之邊界條件。水庫中適當位置之垂直含砂濃度分佈與流速，可分析泥砂分佈、運移之時間與空間行為，可據以了解泥砂運移機制並提供模式參數率定及模式驗證之用。最後，藉由數值模擬之預測模擬功能，則可進一步輔

助解答水庫蓄清排渾方案評估所需的相關資訊，並據此擬定較佳的排淤方案，提供相關單位參考。為了解泥砂運移的機制，泥砂觀測必須具備足夠的空間與時間解析度，然而現階段泥砂濃度量測所遇到的問題可大致分為以下六點：

- 1、人工觀測受天候影響
- 2、洪水時期觀測困難
- 3、量測受取樣方法與儀器限制
- 4、取樣空間與時間不定
- 5、量測與流量觀測非同步進行
- 6、實驗室分析時效差

針對上述各種缺點，本研究擬提出一套高空間、時間解析度之泥砂自動化量測方法，藉以改善現有泥砂濃度量測方法，提供未來水庫蓄清排渾方案評估參考使用。

1.2 研究目的

綜合上節所述，為解決現階段泥砂濃度觀測技術之問題，本研究擬採用電磁波時域反射法(Time Domain Reflectometry，簡稱 TDR)於室內進行泥砂濃度與電學性質間關係探討，並瞭解影響 TDR 泥砂量測相關因子及其程度，基於 TDR 為被動式監測儀器及其技術易自動化之優點下，評估 TDR 於泥砂濃度量測之適用性。

1.3 研究流程

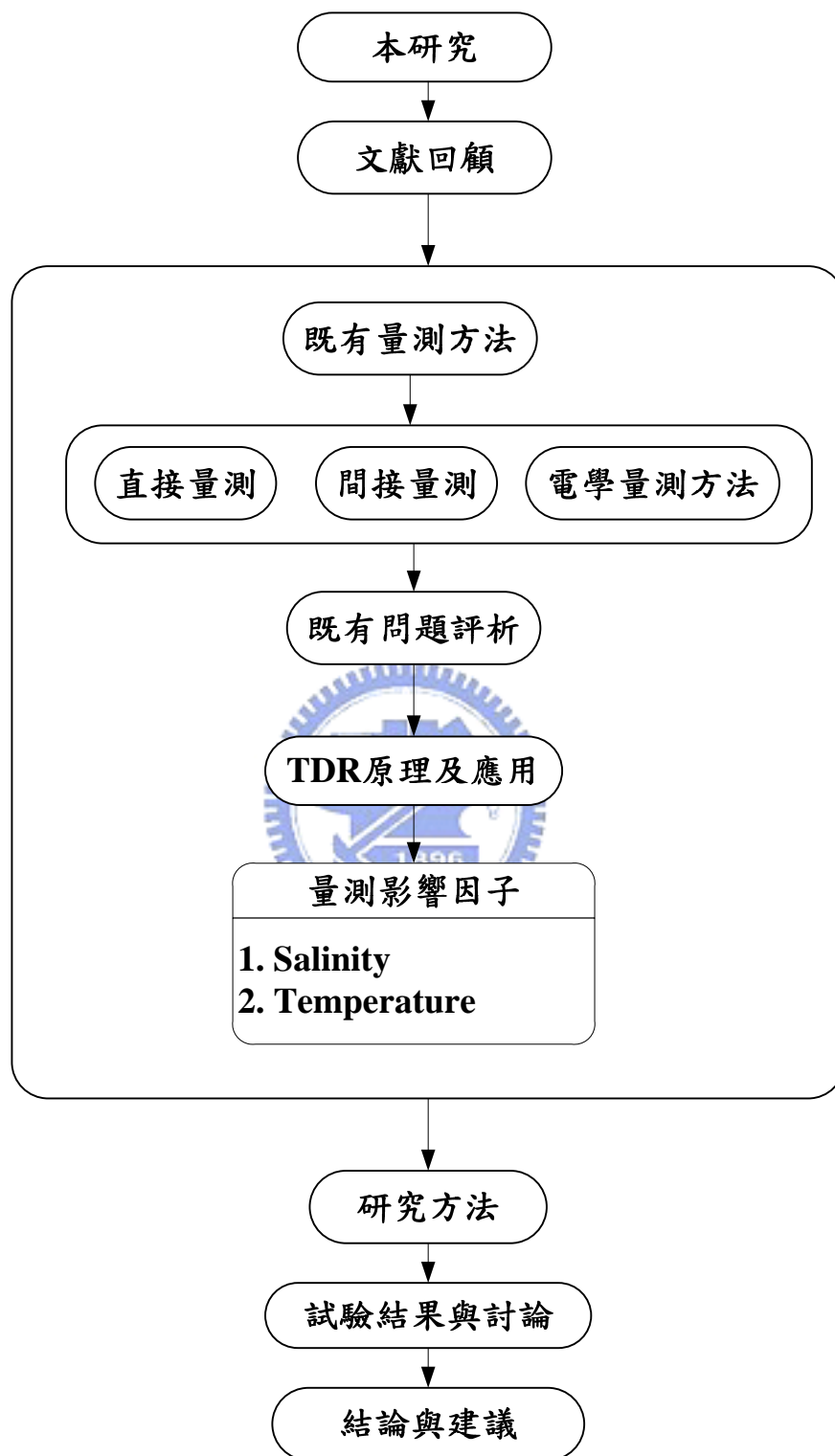


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

泥砂濃度量測目的為瞭解蓄水庫或河川中泥砂運移行為機制，以提供水庫排淤策略之擬定；此外，泥砂濃度量測資料於農田之土壤侵蝕或水土保持監測上亦扮演一相當重要之角色。因此，本文首先針對現有泥砂濃度量測方法，做一全面性的探討，以瞭解既有泥砂濃度量測技術之優缺點，作為 TDR 泥砂濃度量測技術研發之參考。

2.1 既有泥砂濃度量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子影響，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，整理其操作原理與優缺點如後所示。

2.1.1 直接量測方法

(1) 取樣瓶(bottle sampling)

原理：

取樣瓶為一最簡單之取樣方法，一般常見之取樣器如圖 2-1 所示。主要原理採用取樣瓶置於水中進行取樣。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。而採樣則須取回實驗室進行相關試驗分析。

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。另外，在大雨或颱風過後之取樣會增加額外之費用。由於大多數取樣瓶之瓶口並非是儀器裝置之最低點，因此在水底約 0.1-0.15m 之範圍無法進行泥砂取樣。取樣瓶屬於侵入式方法，而使用 streamline 取樣

器則可減少侵入後造成之影響。

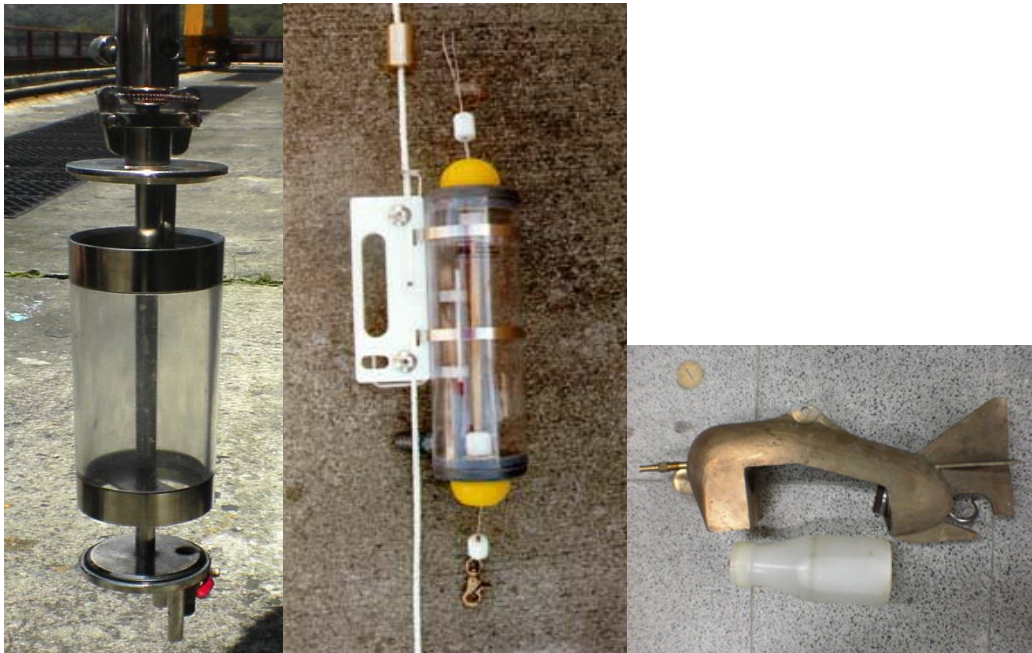


圖 2-1 各式取樣瓶

(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($< 0.062\text{mm}$)之泥砂樣本。自動化幫浦取樣法可事先程序化，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。

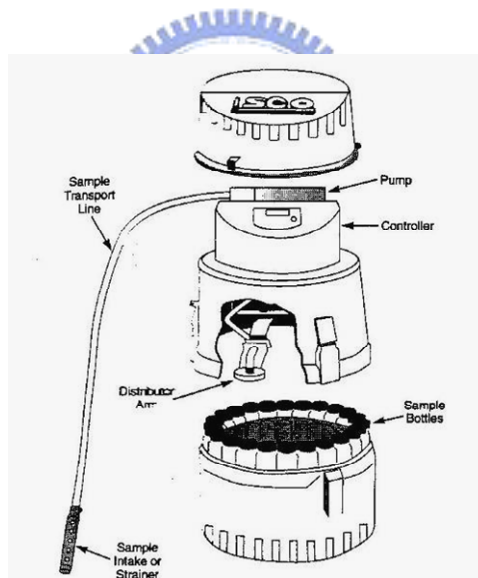


圖 2-2 幫浦取樣器

2.1.2 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 2-3a 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 2-3b 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(≈ 0.1 s)與高空間(≈ 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。

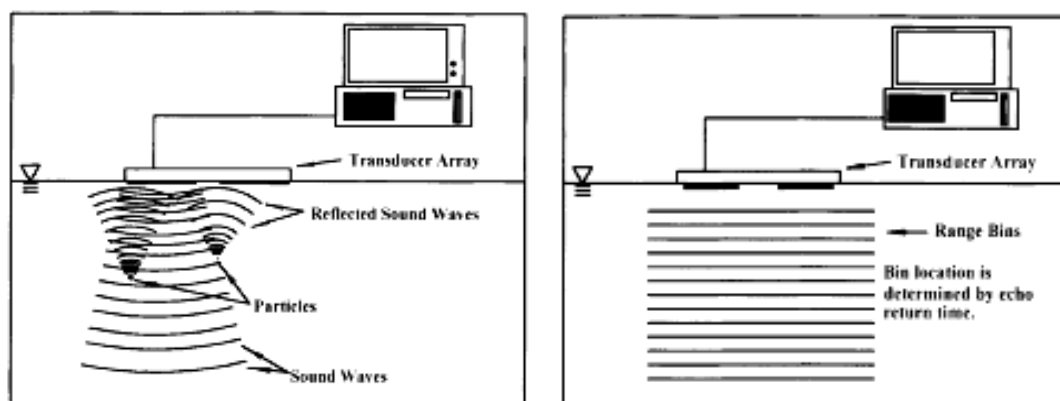


圖 2-3 a) Acoustic backscatter method, b) Range gating method (Wren, et al., 2000)

(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 μm ，甚至粒徑超過 1000 μm 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。

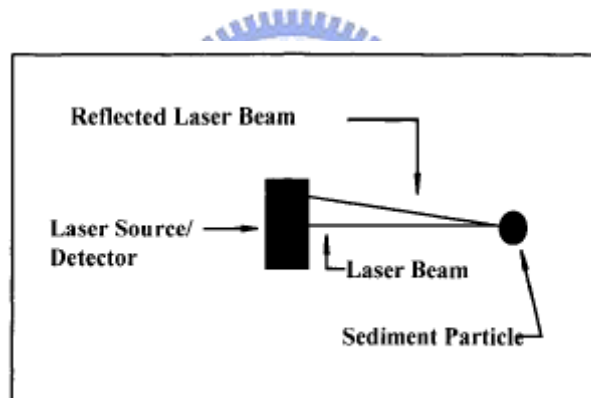


圖 2-4 雷射束反射法 (Wren, et al., 2000)

(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 μm ，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。

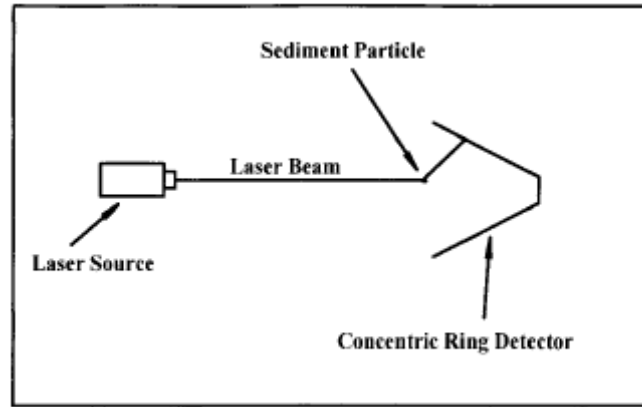


圖 2-5 雷射繞射法 (Wren, et al., 2000)

(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 0.05-12 g/L，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 1 g/L 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序較為困難。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序。

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 μm 至 50 μm 之泥砂顆粒尺寸變化下，其量測值(V/(g/L))變化達 70%，而 200 μm 至 400 μm 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 μm 範圍內。

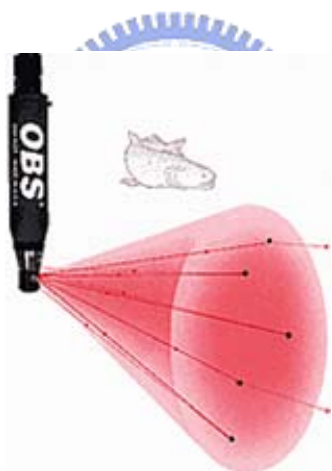


圖 2-6 Optical Backscatter, OBS (D&A Instrument Company)

(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。透過事先的標定程序，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。

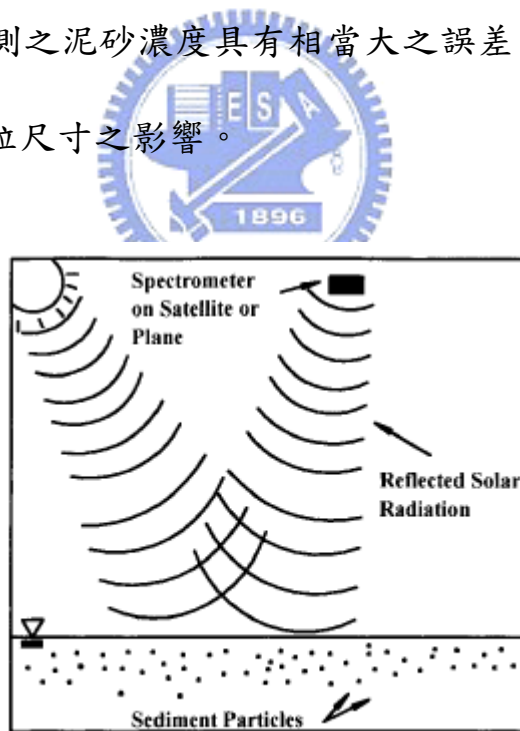


圖 2-7 遙測光譜反射法 (Wren, et al., 2000)

(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 μm 最小至 45 μm ，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。

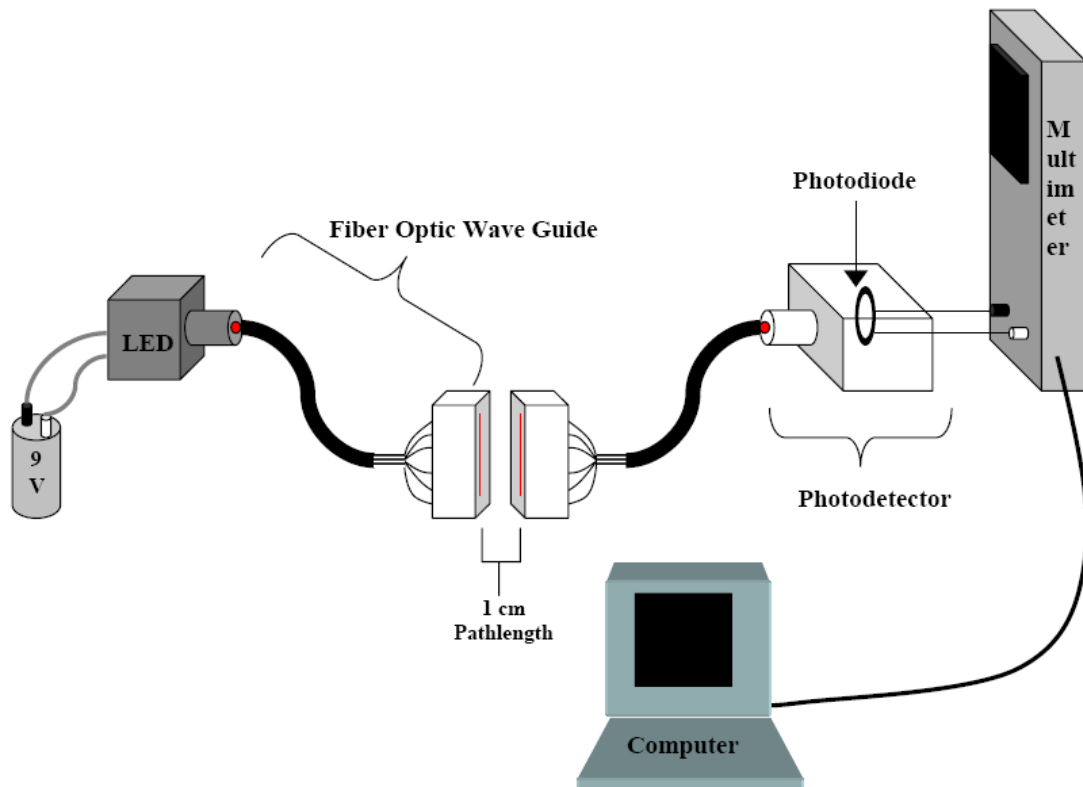


圖 2-8 光纖透光度法示意圖 (Campbell, et al., 2004)

其他方法：

1. 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序，以決定各種影響因子。



圖 2-9 Density meter

2. Differential Pressure

此方法利用兩個壓力計以計算泥水混合物之比重差，不過此方法仍尚未於應用於現地施測。

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。此方法影響因子包含光源之種類、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. Accoustic transmission

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 2-10 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。

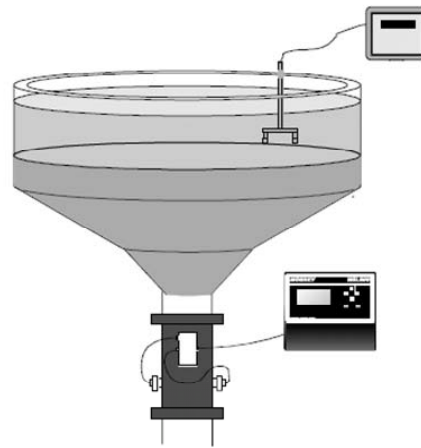


圖 2-10 Suspended solid density monitoring (Untrasonic)

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 各種懸移質觀測儀器優缺點評估表

方法	操作原理	優點	缺點
Bottle sampling	利用取樣瓶取樣分析	可決定濃度與粒徑分布、試體可供其他試驗使用	空間及解析度差、具破壞性、試體須在實驗室分析，需要人員操作
Pump sampling	利用幫浦取樣分析	可決定濃度與粒徑分布	空間解析度差、具破壞性、資料須在實驗室分析、試體擾動性大
Acoustic	利用反射聲波探測粒徑分布以及濃度	對於垂直向具有良好的時間與空間解析、且非破壞性	反射訊號與泥砂參數之關係不易解讀；高濃度、訊號衰減量大
Focused beam reflectance	利用雷射在時域反射探測淤砂顆粒	不受粒徑大小影響、濃度量測範圍大	昂貴、僅能單點量測，為入侵式量測
Laser diffraction	利用雷射之折射角探測淤砂顆粒	不受粒徑大小影響	昂貴、可靠度低、入侵式，僅能點量測。
Nuclear	利用透射或反射之gamma 或 X-rays進行量測	粒徑大小及濃度量測範圍大、省電	靈敏度低，僅能點量測，入侵式量測，輻射原衰減問題
Optical	利用穿透或折射之可見光進行量測	操作簡易、具有良好空間解析度，可資料自動化	受顆粒大小影響、屬於入侵式量測、儀器易受污染
Remote spectral reflectance	從水中反射及散射之光線分析	可量測大範圍區域	解析度低、受顆粒大小影響、且不易應用於河流環境
Fiber optic In-stream Transmissometer	由水中透光度之衰減訊號分析	較光學量測方法，量測濃度較高，可資料自動化	受顆粒大小及種類影響、尚未應用於現地量測

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[®])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 2-11)所示中，監測河流基底濃度之變化，其研究監測配置如圖 2-12。

實際監測結果如圖 2-13 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 2-11 現地實際洪水事件 (Starr, 2005)



圖 2-12 TDR 監測儀器配置 (Starr, 2005)

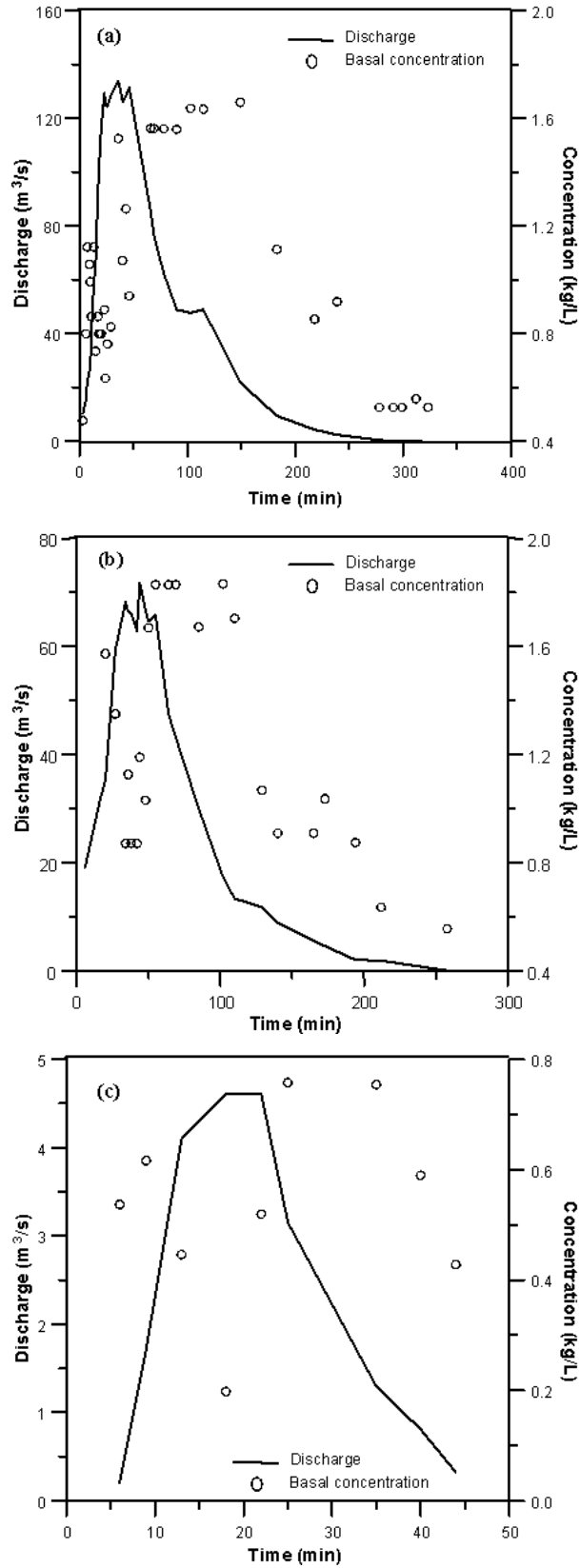


圖 2-13 (a)大洪水，(b)中洪水，(c)小洪水事件時河床基底濃度與洪水流量關係 (Starr, 2005)

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 2-14 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 2-15 所示；當泥砂濃度體積百分比 $\geq 70\%$ 或其密度為 1150 kg/m^3 時，結果將趨於非線性化(資料未展示)。

(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 2-16 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 2-17 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。

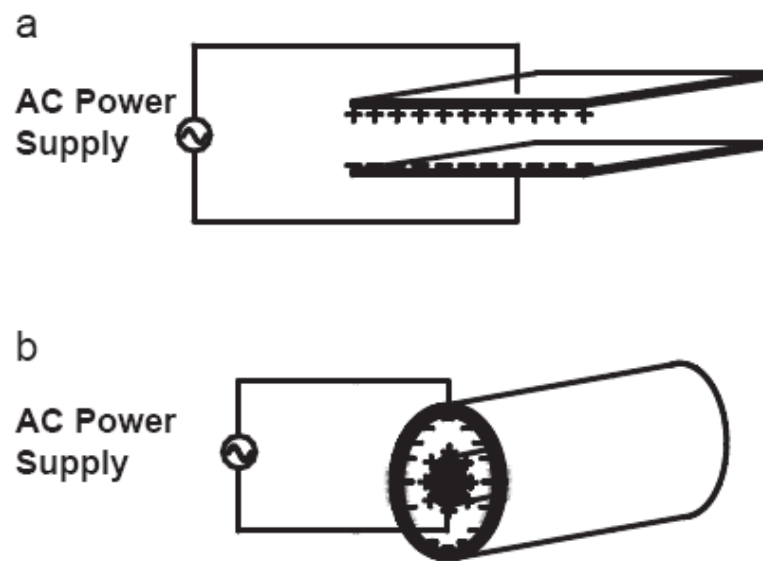


圖 2-14 平板式與圓柱型電容 (Li et al., 2005)

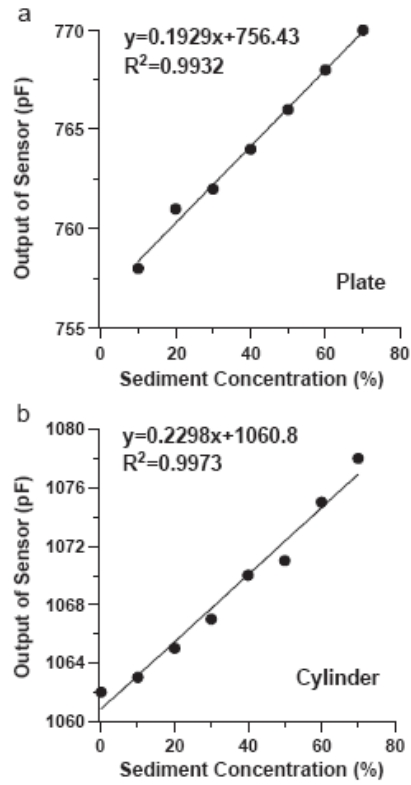


圖 2-15 泥砂濃度(<70%)與電容輸出關係(a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005)

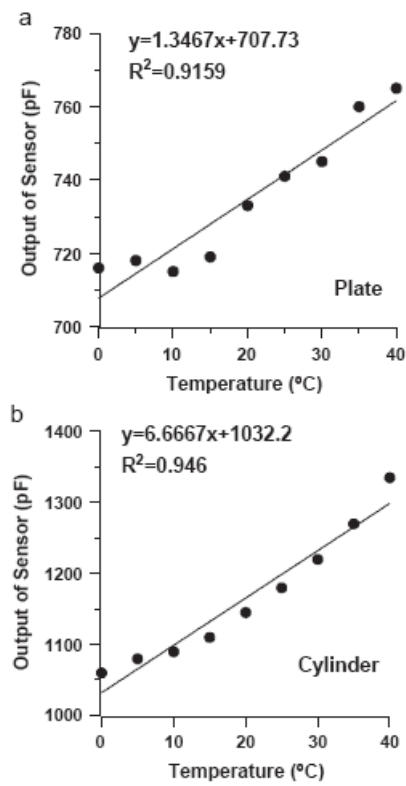


圖 2-16 溫度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005)

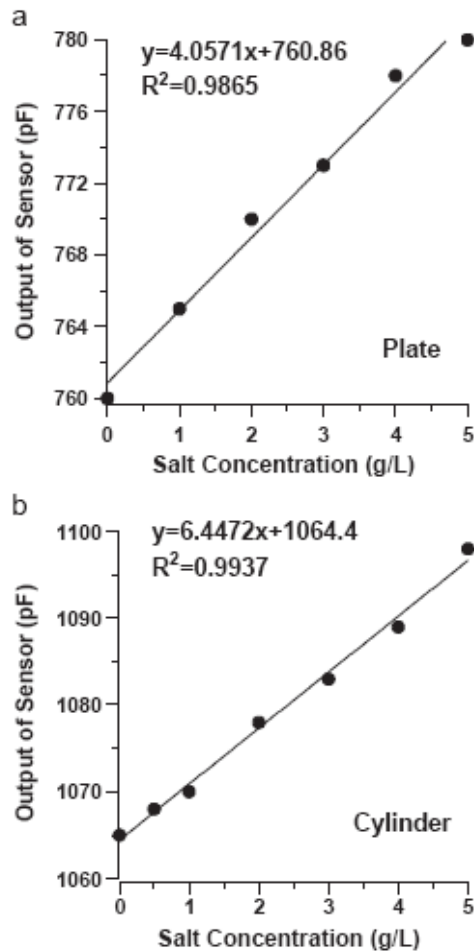


圖 2-17 水質鹽度影響電容輸出之關係 (a)平板式 (b)圓柱型 (Li et al., 2005)

2.3 TDR 原理與應用

綜和上述之技術回顧，現有泥砂濃度量測技術大多無法達到高濃度、耐久性、一機多點觀測之需求，有實務應用上之瓶頸。時域反射法 (Time Domain Reflectometry，簡稱 TDR) 屬於電學方法的一種，可一機多點監測，達到空間解析度，其傳感器為簡單的被動元件，具有經濟性、耐久性及易維護性，但目前電學泥砂濃度量測方法之量測靈敏度不足，且容易受水質鹽度的影響，本研究擬改良以 TDR 量測泥砂濃度的方法，

並透過相關試驗評估 TDR 量測泥砂技術之適用性，以期克服上述之問題。本章將 TDR 之量測原理及可能影響量測因素分別敘述如後。

2.3.1 TDR 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 2-18 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，並由示波器記錄由於感測器內阻抗(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 量測訊號如圖 2-19 所示。圖中 T_R 為感測器感受外界物

質改變之走時， V_{∞} 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 等學者(1980)定義視介電常數(apparent dielectric constant, K_a)可由反射訊號之來回走時(T)及感測器長度(L)以下式決定：

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

其中， c 為光速， T 為走時， L 為感測器長度。Topp 等學者(1988)基於 Giese 和 Tiemann(1975)之研究，發現量測物體之導電度可由 TDR 反射訊號之穩態值(v_{∞})決定

$$\sigma = \left(\frac{\epsilon_0 c}{L} \right) \left(\frac{Z_p}{Z_s} \right) \left(\frac{2V_0}{V_{\infty}} - 1 \right) = \alpha \left(\frac{2}{V_{r,\infty}} - 1 \right) \quad (2-2)$$

其中 ϵ_0 為真空中之介電度， c 為光速， L 為 TDR 感測器感測器之長度， Z_p 為感測器於空氣之阻抗(稱為幾何阻抗)， Z_s 為 TDR 訊源之輸出阻抗(通常為 50 ohm)， V_0 入射方階脈衝之大小， V_{∞} 為反射訊號之穩態值， $V_{r,\infty} = V_{\infty}/V_0$ ， α 為總體形狀因子，包含了探測器長度(L)與幾何阻抗(Z_p)的影響。由於探測器之幾何阻抗值不易直接量測，因此實務上可直接利用一些已知導電度之液體標定總體形狀因子。

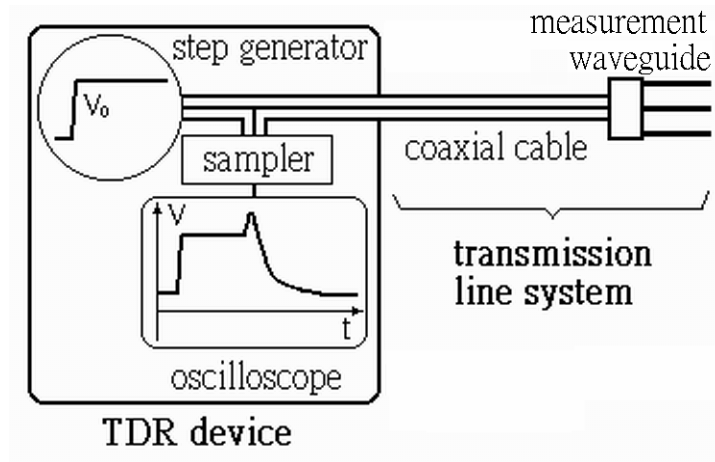


圖 2-18 TDR 量測系統示意圖

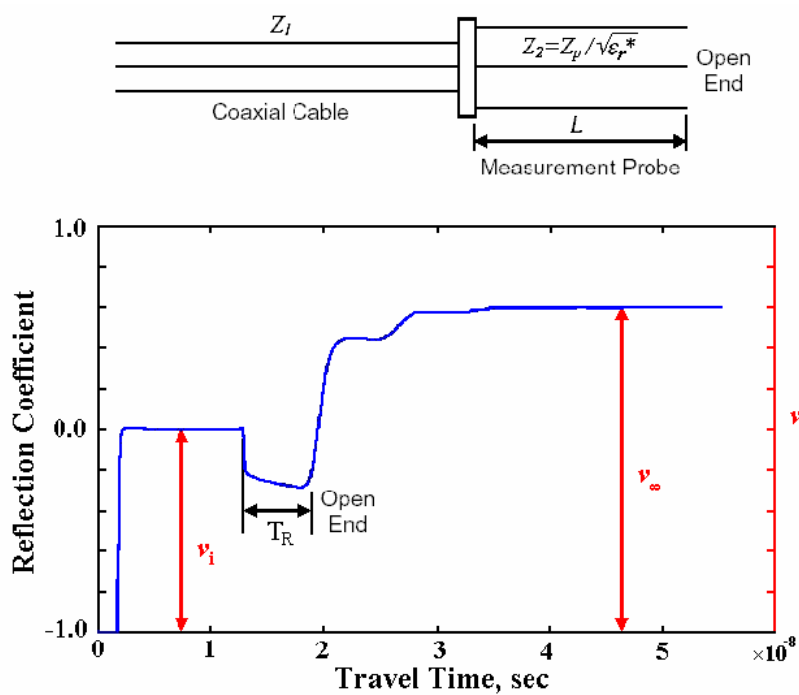


圖 2-19 典型 TDR 波形及走時與穩態值分析示意圖

2.3.2 泥砂濃度量測原理

因組成土壤結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 2-2 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。此外，水土混合物會因土壤本身顆粒帶電荷(如黏土：擴散雙層效應)，當濃度增加土顆粒增多造成整體導電度上升，因此導電度將隨泥砂濃度增加而增加，但導電度與泥砂濃度之關係可能受到泥砂種類與溶解鹽度之影響。若泥砂種類與鹽度可視為常數，或實測標定導電度與泥砂濃度之關係，則以導電度推估泥砂濃度亦有其可行性。

表 2-2 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

Starr (2005)首先將 TDR 用於河床基底泥砂濃度量測，其量測使用之分析方法，為利用 Linear mixing model 推導出線性方程式(忽略邊界水影響)如公式(2-3)所示：

$$C = \rho_s \frac{(n - n_w)}{(n_s - n_w)} \quad (2-3)$$

上式中，C 為濃度(g/L)、 ρ_s 為泥砂單位重(g/L)、n 為量得混水的折射率

(refractive index：為視介電常數開根號， $\sqrt{K_a}$)， n_w 在某一溫度下，所量得水的折射率， n_s 為固體的折射率。其中 n_s 可設為等於 2，而 n_w 則可經由量測所得到之溫度，使用經驗公式(2-4)計算而得知。

$$n_w = \left\{ 78.54 \left[1 - 4.58(10)^{-3}(T - 25) + 1.19(10)^{-5}(T - 25)^2 - 2.8(10)^{-8}(T - 25)^3 \right] \right\}^{1/2} \quad (2-4)$$

上式中 T 為溫度(°C)。

經由上述公式之計算，便可經由量得之視介電常數而反求其泥砂濃度含量之關係。

2.4 水質鹽度對電學方法量測影響

一般自然界的狀態下存在的水，可能含水溶解離子(如 NaCl 及 KCl)，而造成水質導電度上升。由於使用電學方法量測主要為求得介電度與導電度等兩參數，待測物體本身介電特性受到導電度影響(Topp et al., 2000)。因此，如將電學方法用於高水質鹽度勢必需作進一步研究。

Klein and Swift, (1977)提出水之 ϵ_{sw0} (頻率等於零之介電常數，約等於 81)在鹽度為 4 ppt 至 35 ppt (parts per thousand)及溫度影響之關係，如公式(2-5)所示：

$$\epsilon_{sw0}(T, S) = \epsilon_{sw0}(T, 0) \cdot a(T, S) \quad (2-5a)$$

$$\epsilon_{sw0}(T, 0) = 87.134 - 1.949 \times 10^{-1}T - 1.276 \times 10^{-2}T^2 + 2.491 \times 10^{-4}T^3 \quad (2-5b)$$

$$a(T, S) = 1.0 + 1.613 \times 10^{-5}TS - 3.656 \times 10^{-3}S + 3.210 \times 10^{-5}S^2 - 4.232 \times 10^{-7}S^3 \quad (2-5c)$$

上式中，S 為水質鹽度，T 為溫度。將此公式整理以 S=0 時代入計算所得為 ε_{ri} ，再以 S=5~30 分別計算出 ε_r ，最後以 $(\varepsilon_r - \varepsilon_{ri})/\varepsilon_{ri} * \%$ 表示當鹽度改變時之影響百分比，如圖 2-20 上半部所示。由圖中可觀察出，當水質鹽度由 5 ppt 升至 30 ppt 時，將會造成 ε_{sw0} 減少約為 5~7 %。

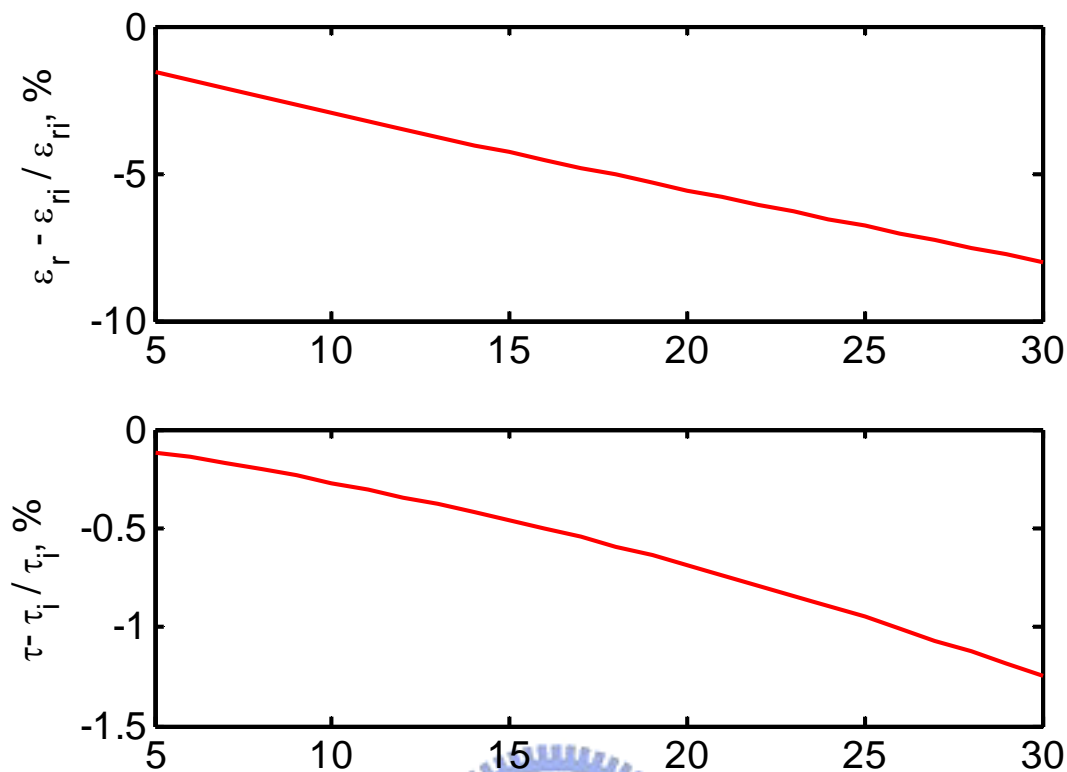
Klein and Swift, (1977)也提出 τ_{swr} (水之 relaxation time，為 relaxation frequency 所對應之時間)於鹽度為 0 ppt 到 157 ppt 之關係，如下公式所示：

$$\tau_{swr}(T,S) = \tau_{swr}(T,0)b(S,T) \quad (2-6a)$$

$$\tau_{swr}(T,0) = 1.768 \times 10^{-11} - 6.086 \times 10^{-13}T + 1.104 \times 10^{-14}T^2 - 8.11 \times 10^{-17}T^3 \quad (2-6b)$$

$$b(S,T) = 1.000 + 2.282 \times 10^{-5}ST - 7.638 \times 10^{-4}S - 7.760 \times 10^{-6}S^2 + 1.105 \times 10^{-8}S^3 \quad (2-6c)$$

將 2-6 式整理可得鹽度對 relaxation time 影響關係，如圖 2-20 下半部所示。由圖中觀察得知，鹽度對 relaxation time 造成影響之行為為一非線性之關係遞減，而水質鹽度由 5 ppt 升至 30 ppt 時，relaxation time 減少約為 1%。然而水之 relaxation frequency 遠高於 TDR 儀器之量測範圍，因此鹽度對於水之 relaxation frequency，以及未來泥砂濃度量測之影響尚須進一步評估。



Salinity, PPT
圖 2-20 水質鹽度對電學量測之影響

2.5 溫度對電學方法量測之影響

以電學作為量測之方法與應用，已經越來越多用於工程監測上，然而當季節變化或因現地工作溫度不同，將對量測結果造成相當的誤差。由先前多位學者研究溫度對電學性質量測影響之既有文獻中，可得知溫度將影響介電常數(Dielectric constant)與導電度(Electrical conductivity)等電學性質量測。由 Persson (1997)以及 Pepin et al. (1995)之研究證實於 TDR 量測時，當溫度在 0~50°C 時對介電常數之量測影響關係，可由公式(2-7)描述：

$$\epsilon_w(T) = 78.4 \left[1 - 4.579 \times 10^{-3} \Delta + 1.19 \times 10^{-5} \Delta^2 - 2.8 \times 10^{-8} \Delta^3 \right] \quad (2-7)$$

上式中 ϵ_w 為水的介電常數， $\Delta = T - 25^\circ\text{C}$ ，吾人將公式整理如圖 2-21 所示，由圖中上半部觀察得知，當溫度由 $5\sim 40^\circ\text{C}$ 的狀態下，則將造成 ϵ_w 誤差 10 以上；圖中下半部為以 $(\epsilon_w - \epsilon_{w25})/\epsilon_{w25} * \%$ 表示其他溫度下所量得之 ϵ_w 與溫度 25°C 時之差異百分比，發現溫度變化範圍區間造成整體最大誤差約為 15%。

而導電度值如同介電度，也因外在環境溫度而導致量測誤差。因此有 Stogryn (1971) 以及 Ulaby et al. (1986) 藉由試驗室量測結果，回歸出導電度受溫度影響率定關係，如公式(2-8)所示：

$$\begin{aligned} \sigma_w(T) &= \sigma_{w(25^\circ\text{C})} \exp\left[-\Delta \left(2.033 \times 10^{-2} + 1.266 \times 10^{-4} \Delta' + 2.464 \times 10^{-6} \Delta'^2\right)\right] \\ &\approx \sigma_{w(25^\circ\text{C})} [1 - 0.02\Delta'] \end{aligned} \quad (2-8)$$

上式中 σ_w 為水質導電度， $\Delta = T - 25^\circ\text{C}$ 。將公式整理如圖 2-22 所示。由圖中上半部可看出，當溫度由 $5\sim 40^\circ\text{C}$ 時，則 σ 將隨著溫度而上升，造成誤差約為 0.0007 S/m ；圖中下半部為以 $(\sigma_w - \sigma_{w25})/\sigma_{w25} * \%$ 表示在其他溫度下所量得之 σ_w 與溫度 25°C 時之差異百分比，溫度變化範圍區間造成整體最大誤差將達約 70%，可見量測導電度將受溫度影響甚巨。而 Wraith and Or, (1999) 證實以公式(2-8)作為溫度修正較為合理。

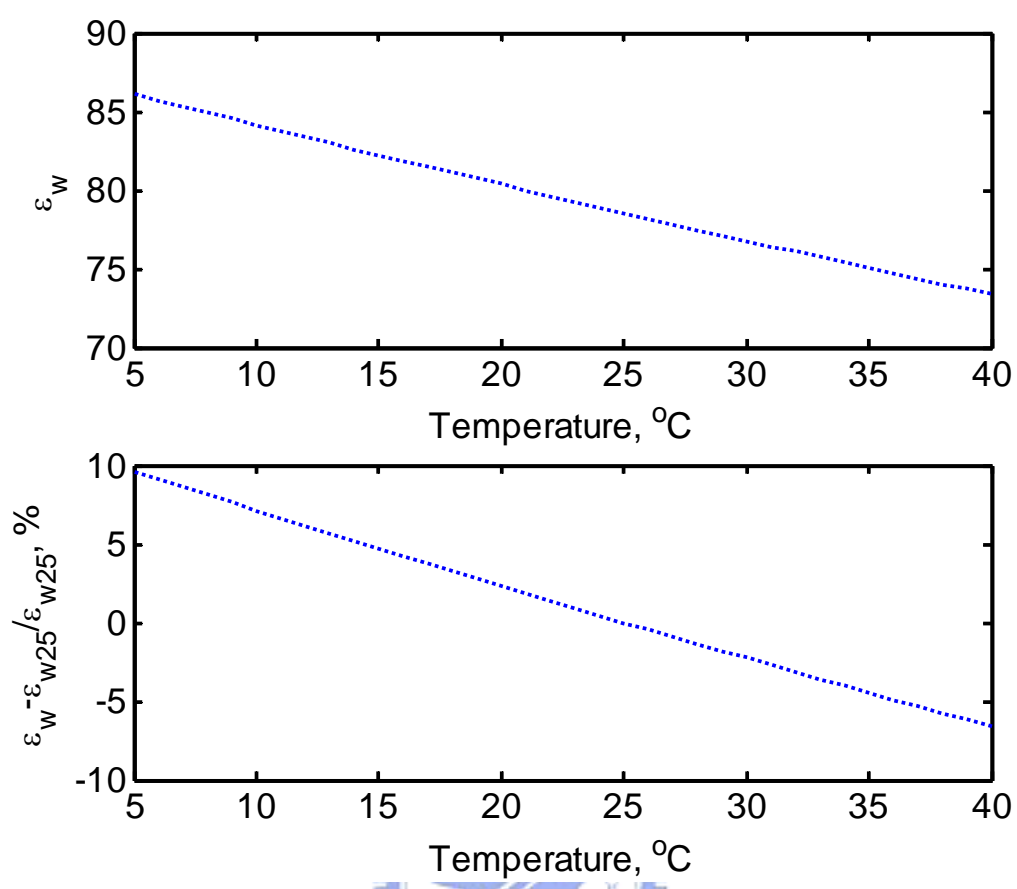


圖 2-21 溫度對介電常數之影響

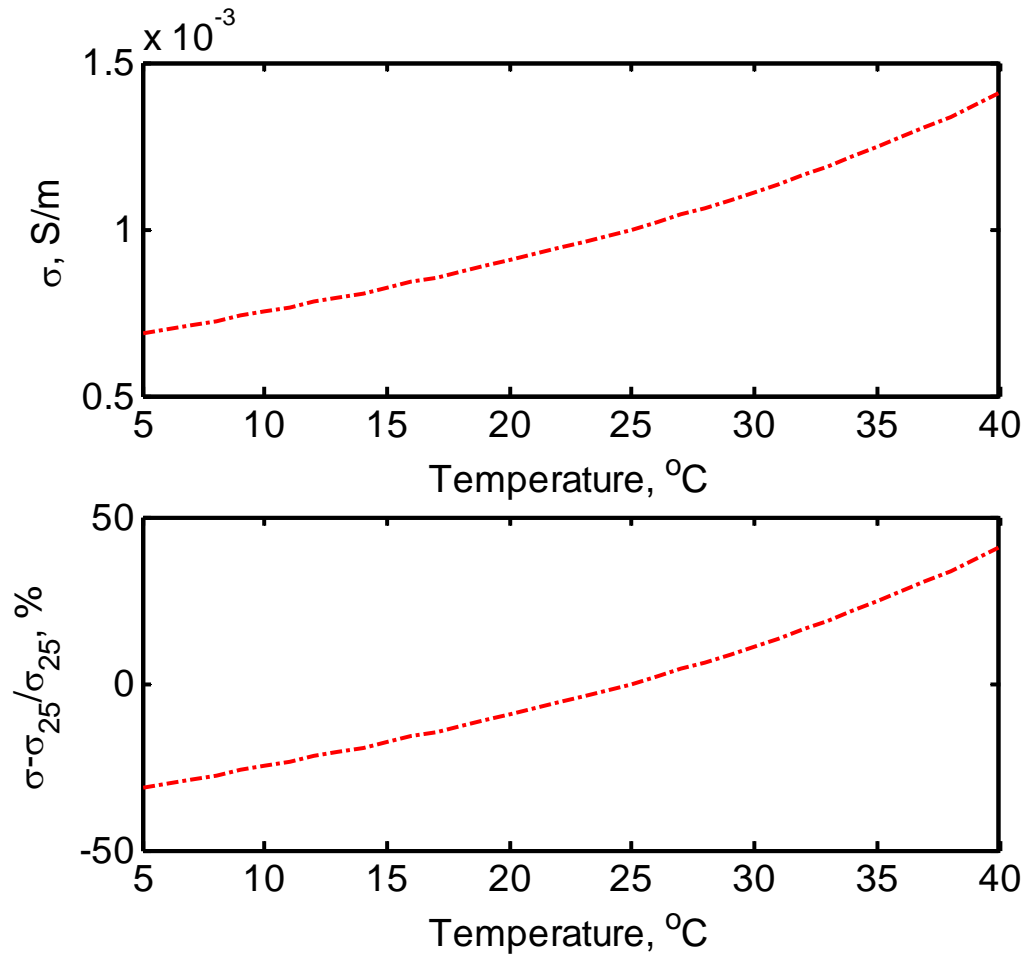


圖 2-22 溫度對導電度量測之影響

2.6 TDR 泥砂濃度量測測試及限制

為初步探討 TDR 量測方法於泥砂濃度量測之效能，本研究於前期試驗中採用三種土樣作為測試，包含交通大學校園內紅土(NCTU red soil)、寶山第二水庫庫區附近的黃色粉土(Bosan yellow silt)及石門水庫沉澱池之沈泥(Shihmen sediment)，量測不同濃度狀態之 TDR 波形，以了解泥砂濃度量測之結果及其效能(林等，2006)。

前期試驗中各種土壤均烘乾且過 200 號篩(孔徑為 0.075mm)作為試驗材料，三種土樣過 200 號篩粒徑分佈曲線如圖 2-23 所示。試驗流程採用

固定重量之純水為溶劑，加入各種不同濃度(ppm)之土壤，其單位公式如下：

$$C_m = \frac{\text{sediment mass}}{\text{volume of water}} = \frac{\rho_s V_s}{V_v} (\text{mg/L} = C_{r, \text{ppm}} \text{ or } \text{g/L}) \quad (2-9)$$

圖 2-24 為泥砂種類對視介電常數(K_a)量測之影響結果，圖中顯示出當泥砂濃度越高時，其整體的視介電常數隨之遞減，且受土壤種類之影響。此外，本試驗結果顯示，視介電常數於 30,000 ppm 以上之泥砂濃度率定關係較為線性，因此適合高濃度泥砂含量之量測，符合 Starr (2005) 之實驗結果，但於低泥砂濃度靈敏度較差。

泥砂種類於導電度(σ)量測之影響結果如圖 2-25 所示。由圖中顯示水中整體之導電度值隨泥砂濃度增高而遞增，但其關係為二次函數曲線。此外，導電度也受到了土壤種類不同而影響。圖中也顯示出在低濃度下之導電度值與泥砂濃度成良好之線性關係。相較於視介電常數之量測結果，此一結果提供了在低泥砂濃度下高精度量測方法之選擇。

然而在影響因子探討試驗中，針對水質鹽度對於 TDR 導電度之影響，其試驗認為泥砂濃度之量測可以透過整體之導電度扣減水質導電度($\sigma - \sigma_w$)後，求得泥砂所提供之額外導電度值，進而推估泥砂濃度，因此，準確量測泥砂濃度有賴水質導電度 σ_w 之量測。而現場採用透水石或透水膜之機制(如圖 2-26 所示)以量測水質導電度之構想有其限制，濾水石或濾水膜其本質上為過濾機制，一方面需抵擋外在之泥砂細顆粒，一方面

須讓水分子通過，其過濾之水量與過濾所需時間與濾水器之孔隙成反比，加上在現場施測之狀況下，由於透水石或透水膜須在水中長期量測，內外並無壓力差，僅能藉由擴散作用替換濾水石中之水樣，無法及時反應外在環境水質的變化。因此於現地渾水中直接量測水相之電學性質仍有實務上困難，有待進一步的突破。



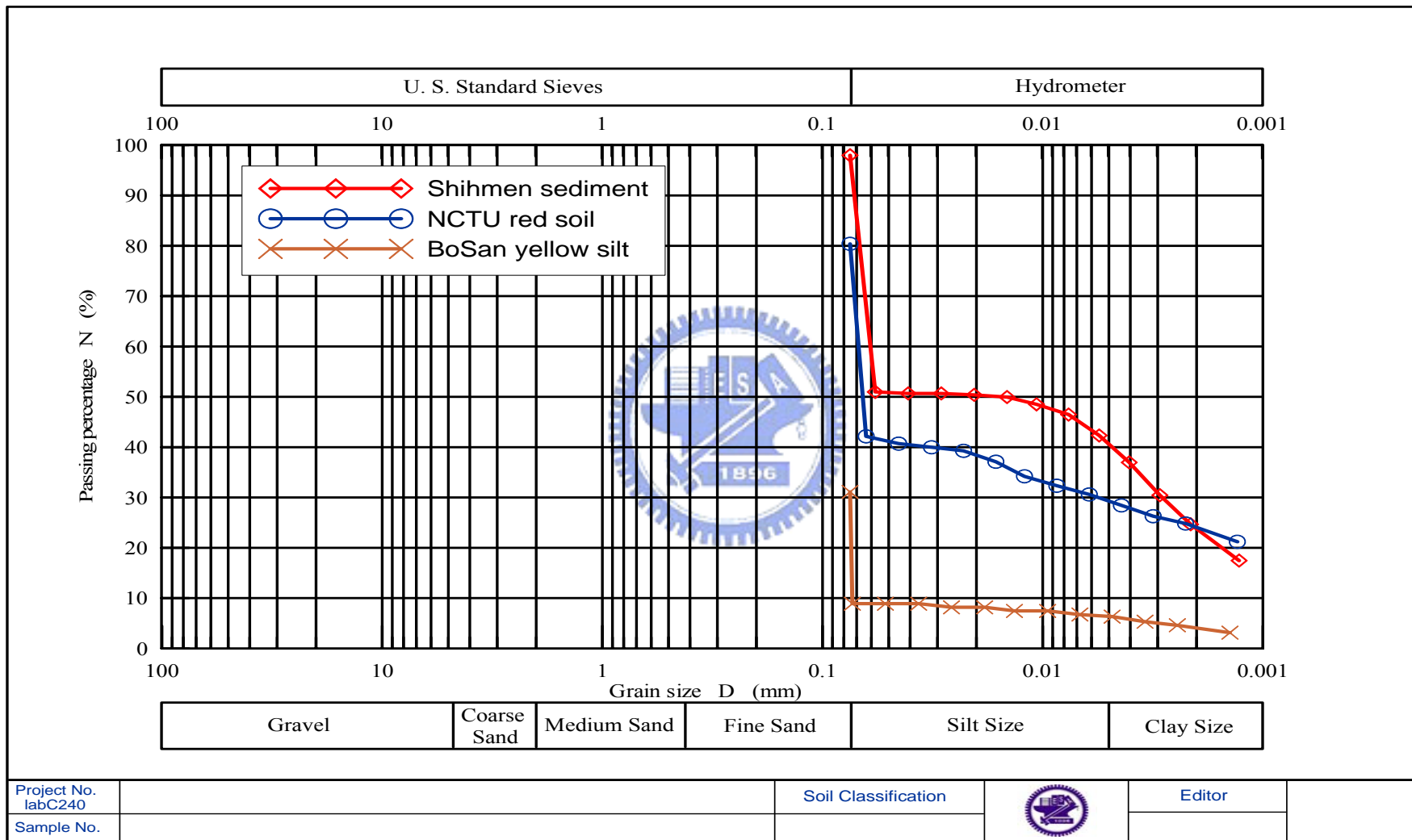


圖 2-23 試驗土樣粒徑分佈圖

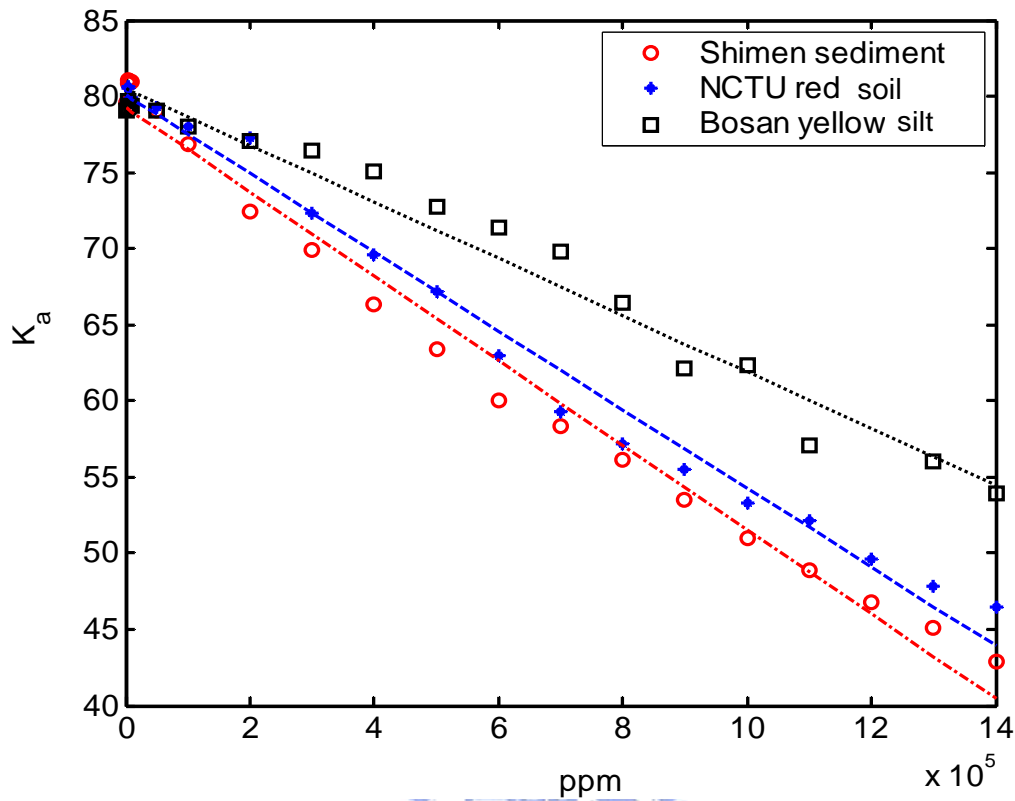


圖 2-24 泥砂種類對視介電常數(K_a)量測之影響

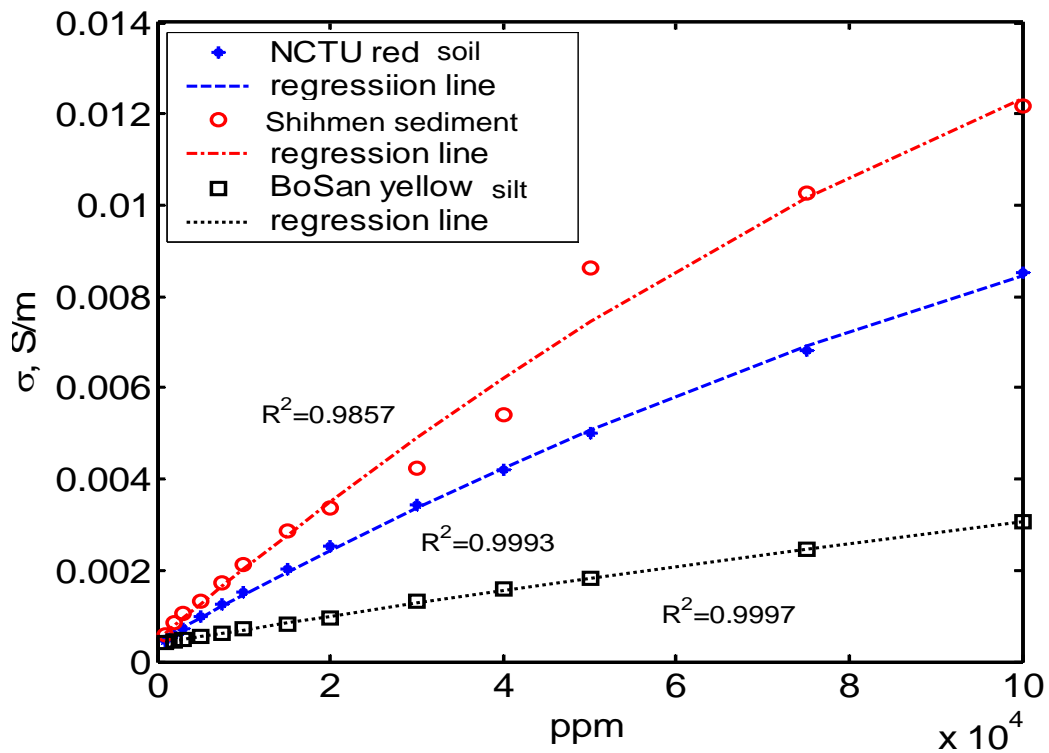


圖 2-25 泥砂種類導電度(σ)量測之影響



圖 2-26 TDR 水質感測器



第三章 研究方法

近年來因氣候變遷，加上水土保持不佳及人為的濫墾與濫伐，每當豪雨或颱風來襲時，山坡地的侵蝕、沖刷及土石流發生事件頻繁，伴隨河川原水挾著大量泥砂，進入蓄水設施中，進而影響民生供水系統。據此，泥砂濃度量測資料便對蓄水庫之蓄清排洪時程及河川輸砂產量扮演一重要角色。本研究針對先前各學者所提出之方法比較後，提出一能達到高空間與高時間解析之泥砂濃度電學量測方法。

本研究主要探討利用 TDR 量測技術應用於泥砂濃度之量測評估，以期能達到解析低濃度與高濃度，而由前期測試結果顯示所遭遇主要之問題為：一、以 K_a (視介電常數)量測時，於低濃度量測靈敏度不足；二、若以 σ (導電度)量測時，實務上為求得現地背景水質導電度，有相當的難度。針對上述兩點於量測初步測試時所遭遇之問題，提出一系列朝向提高低濃度量測靈敏度之設計參數以及解決導電度對量測造成影響之方法，期能使系統量測能力涵蓋高濃度與低濃度之範圍，作為蓄水庫或天然河川泥砂運移觀測及洪水期間濃度變化觀測之用。本研究流程如圖 3-1 所示，詳細研究過程將於後續各小節說明之。

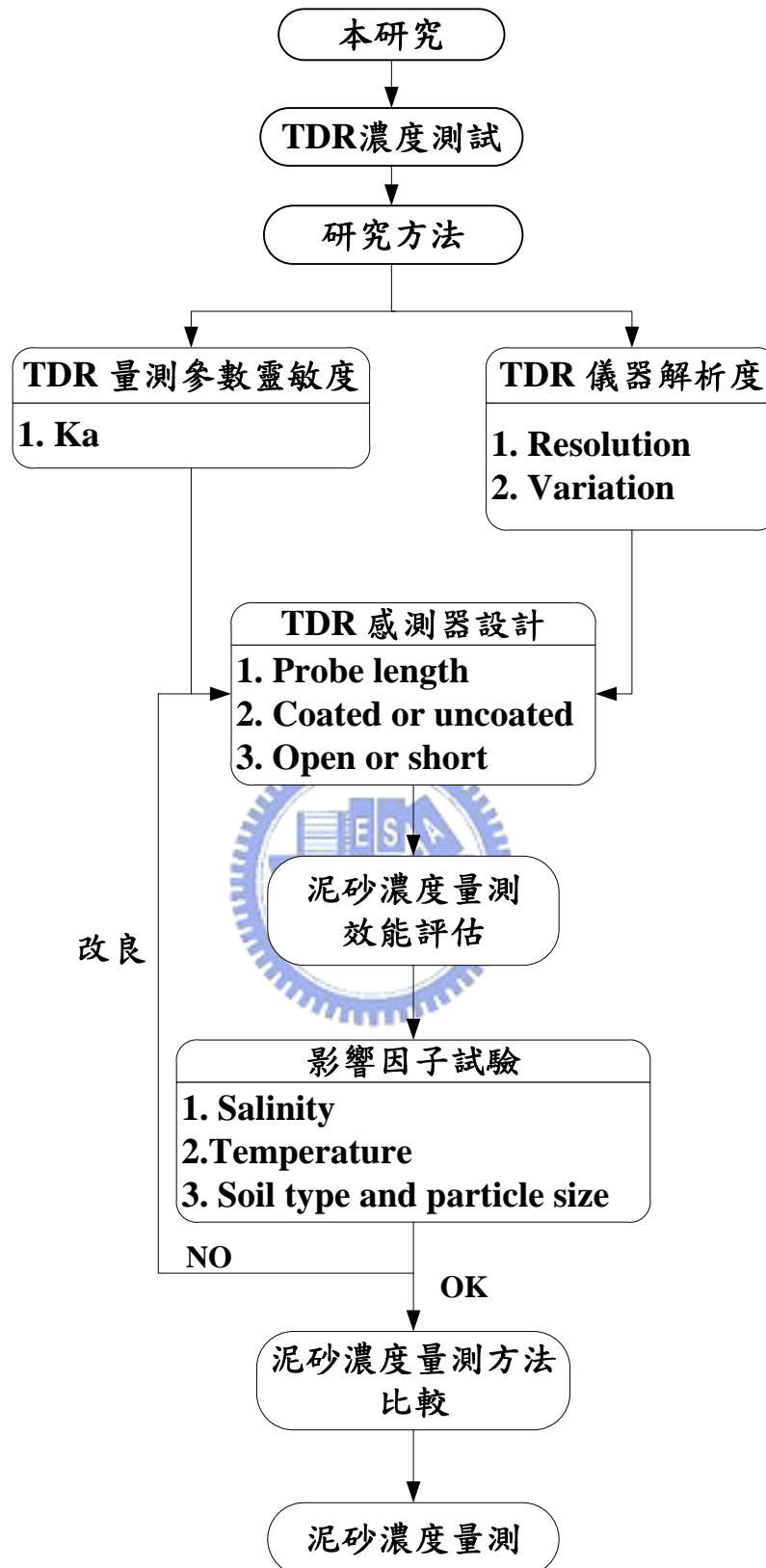


圖 3-1 研究流程圖

3.1 TDR 量測系統參數靈敏度

TDR 量測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)，本節將針對感測器長度(L)探討幾何參數對於電學性質量測之影響，這些探討可作為特定量測需求(包含量測範圍或靈敏度)的感測器設計準則。

因現地渾水中直接量測水相之電學性質仍有實務上困難，本研究主要目標為嘗試提高介電度之量測準確度與量測範圍，以下將就系統參數對介電度量測影響敘述如後：

量測靈敏度(sensitivity)的定義是單位物理量變化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(K_a)之計算來自於電磁波於感測器之走時分析而得，因此，本研究為了瞭解系統參數於視介電常數量測之影響，定義視介電常數之量測靈敏度 S_{K_a} 為電磁波走時對於其視介電常數之微分，如公式(3-1)前半部所示。由於走時 T 可從(2-1)式得到 $T = 2L\sqrt{K_a}/c$ ，將此結果代入上述所定義之視介電常數靈敏度參數中，可得到公式(3-1)。由公式(3-1)可知，理論上視介電常數之量測只受到感測器長度之影響，幾何阻抗不會影響量測的靈敏度。

$$S_{K_a} = \frac{dT}{dK_a} = \frac{L}{c\sqrt{K_a}} \quad (3-1)$$

當探測器長度固定時(即 L 固定)，其量測的靈敏度，隨著待測體濃度之視介電常數變化而改變。因泥砂本身之視介電常數大約為 3~5，而水之

視介電常數為 81；因此，視介電常數隨含砂濃度增加而減小，但由於水與泥砂之介電度差異甚大，除非含砂濃度極高，否則一般於低泥砂濃度量測得的視介電常數將接近水的介電度。而本研究針對在不同泥砂濃度狀況下，提出待測體之視介電常數於量測靈敏度之影響。圖 3-2 上半部為感測器感測器在 0.3m 下之靈敏度結果，其中靈敏度之正規劃化 (Normalized Sensitivity) 定義為其將靈敏度整體向量合轉換為單位向量長度之向量表示法。當待測體之視介電常數範圍從 81 至 3，由圖中之趨勢可瞭解到當視介電常數越低之同時，其量測靈敏度隨之增加。而圖 3-2 下半部為待測體之視介電常數為 80 時，感測器長度對於量測靈敏度之影響。圖中也可以清楚解釋當探測器長度愈長之同時，其量測靈敏度也隨之增加。但限制使用長感測器的因素有兩項，其一是導電度之影響，介質導電度會造成電磁波的衰減，因此當感測器太長時，感測器終點的反射訊號可能過於微弱而無法辨別；第二項是感應的空間解析度，感測器越長，其量測範圍越大，空間解析度越低。綜合考量靈敏度、導電度與空間解析度，目前現地感測器之設計均以 30 cm 為主。

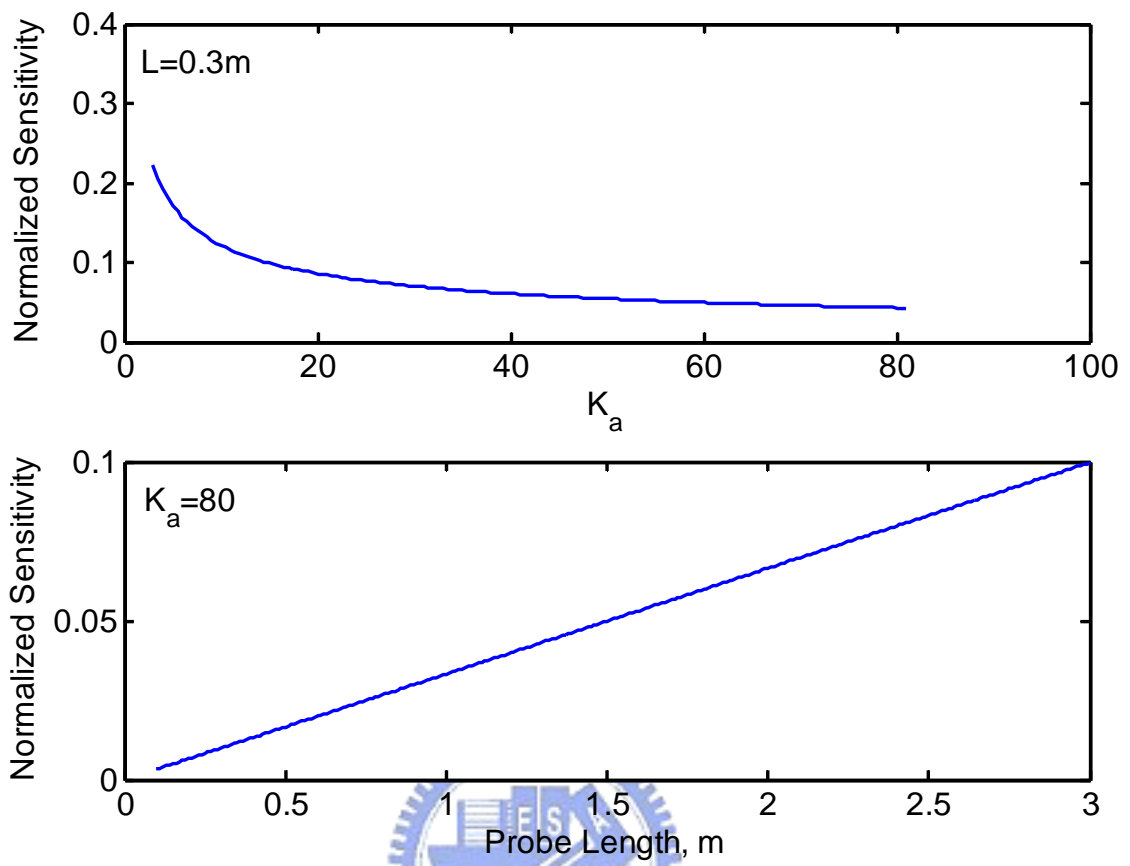


圖 3-2 介電度量測靈敏度

3.2 量測儀器解析度

而本研究主要目的為使泥砂濃度量測於未來能達成現地自動化觀測目標，因此採用由 Campbell 公司所生產之 TDR 100 量測儀器，並配合 Datalogger 使用，具有可程式化、自動化量測(監測)及無線傳輸資料等優點。而本研究首要工作需先就儀器本身解析能力，以及搭配各式感測器量測變異性間之關係進行探討。

Campbell TDR 100 儀器乃利用不同大小之擷取視窗(Time Window (m))，記錄感測器反射之波形，利用公式(3-3)可求得所使用擷取視窗之時間解析能力

$$\text{Resolution(ns)} = \frac{W(m)*2}{c * N} \quad (3-3)$$

上式中，W 為所擷取視窗之長度、c 為光速($3 \times 10^8 \text{m/s}$)，N 為所取樣點數。最後本研究將配合不同感測器形式，以探討泥沙濃度量測之誤差範圍，評估各感測器之量測效能。

3.3 TDR Probe 感測器最佳化設計與效能評析

本節主要探討 TDR 於泥砂量濃度測，現階段量測及當配合現場量測時所遭遇之問題，進行一系列的感測器評估設計及效能的評估。由前期泥砂濃度量測測試所遭遇問題整理如下：

- 1、以 K_a 量測範圍為 3 萬 ppm~ ∞ 。
- 2、以混水水質扣除水體本身水質($\sigma - \sigma_w$)量測之有效範圍為 2000

ppm~10 萬 ppm。

3、現地水質 σ_w 量測不易。

因此，針對上述三項問題，擬以提高 K_a 於低濃度量測靈敏度之方法，或是量測時能將水質導電度影響因素去除，以期能達到解決低濃度量測靈敏度不足之問題。

3.3.1 感測器最佳化設計

本研究根據前期之研究成果，瞭解目前 TDR 視介電常數量測精度於低泥砂濃度時較差，而於現地渾水中直接量測水相之電學性質仍有實務上困難。因此，本研究擬透過 TDR 感測器之改良設計，主要基於較不受水質及土壤種類(粒徑)影響之介電度法，以求突破現有量測限制，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，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 3-3 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 probe 長度增長時，對 K_a 量測靈敏度將逐漸提昇，因此將嘗試以最佳效能之感測器增加感測器之長度，以了解是否對 K_a 量測靈敏度有顯著提升的效果。

(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。Nichol et al. (2002) 以及 Fujiyasu, et al. (2004)等學者嘗試利用感測器絕緣(coating)方式評估導電度對量測影響，因此本研究將嘗試感測器導體絕緣，以了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)：

一般開放式感測器之反射訊號大小受到受測體導電度之影響，因此走時分析也會受到影響。本研究另嘗試以短路處理的感測器作為量測，測試其波形是否有不受導電度影響之不變量，可據以提高走時分析之準確度。Cereti, et al. (2003)之研究亦發現，以 shorted-end 之感測器作為作為量測，能有效改善量測結果之可靠度，另外 [Lin and Tang \(2005\)](#) 也利用 TDR 短路方式進行伸張計感測器研發。基於上述研究經驗參考，以及前期研究成果，本研究也計畫以 shorted 處理的感測器，測試其是否能達到實際解決導電度影響，以增進量測之效能。

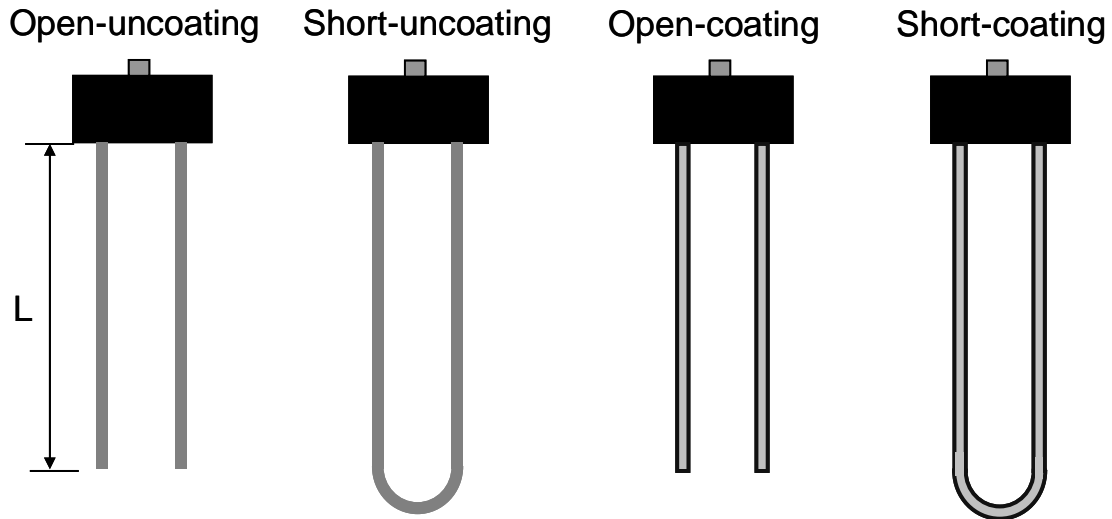


圖 3-3 TDR 感測器設計示意圖

3.3.2 濃度試驗評估

為實際了解感測器之效能，因此本研究將利用 Campbell TDR100，搭配設計之各種型式 TDR 感測器，作為量測設備。試驗流程則採用固定重量之純水為溶劑，加入各種不同濃度(ppm)之砂土，其單位公式如同前公式(2-9)，分別量測不同濃度狀態之 TDR 波形及所對應之電學性質，以探討各種感測器量測效能，求得最佳感測器設計的形式，而後探討各種影響因子。

3.3.3 水質鹽度

前文提到 TDR 量測訊號除了受物質本身介電度影響外，亦會因水質導電度造成量測波形走時偏差，導致影響走時分析結果。且因現地水質常受所含泥砂種類或其他有機物質而造成改變，故於感測器評估中，加入水質導電度影響參數。以石門水庫為例，其庫區水質導電度約為 200

($\mu\text{S}/\text{cm}$)，因此本研究之試驗流程則採用水質導電度約 $100 (\mu\text{S}/\text{cm})$ 、等同現地水質 $200(\mu\text{S}/\text{cm})$ 及略高於現地水質導電度約為 $300 (\mu\text{S}/\text{cm})$ ，分別作為感測器效能評估。

3.3.4 試驗分析方法

由於材料之介電性質影響電磁波之走時，因此可由感測器波形之來回走時分析，以瞭解泥砂變化。而走時分析方法主要可分為切線法(tangent line method)與參考線法(reference line method，[Lin and Tang, 2005](#))兩種，如圖 3-4 與圖 3-5 所示。切線法主要是計算由 TDR 感測器波形之起始點至感測器末端反射之走時，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，所發明之新式走時分析方法配合末端短路處理之感測器，可以得到相當準確之走時分析，其分析方法之原理主要採用感測器探頭反射訊號處及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點與終點，適用於在量測範圍內有共同穩定反射訊號的情形。因此，本研究於感測器效能評估上，試驗資料將採上述兩種分析方法，最後決定最佳感測器之效能及使用之分析方法。

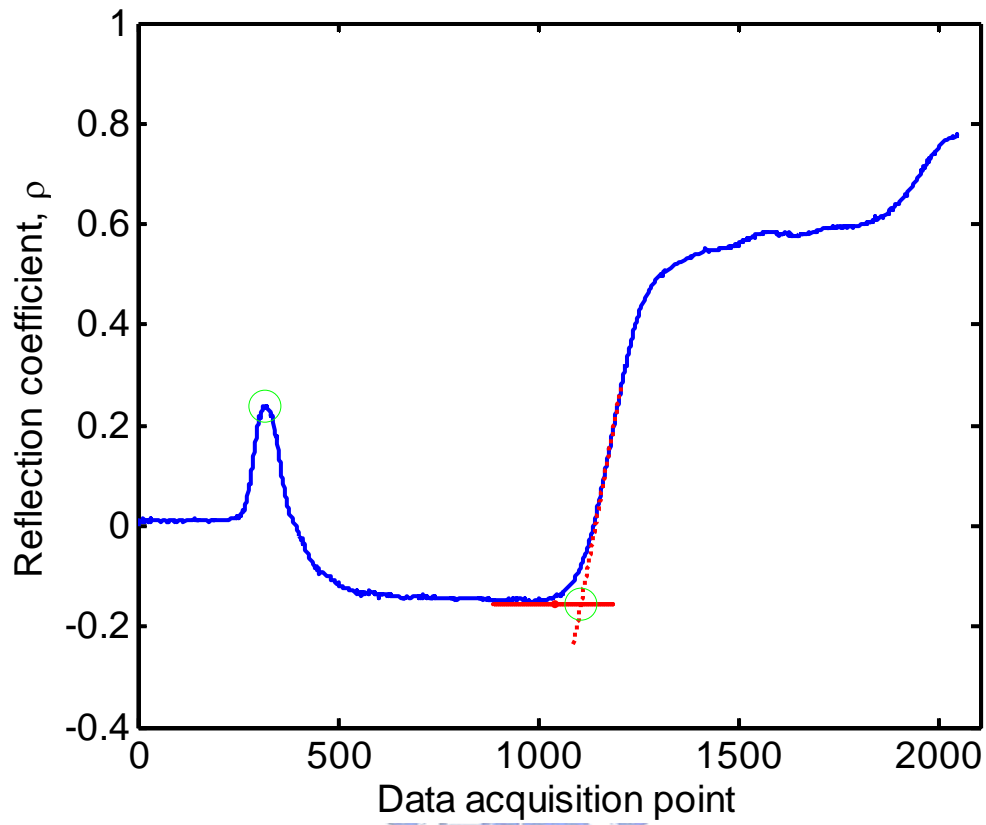


圖 3-4 切線法示意圖

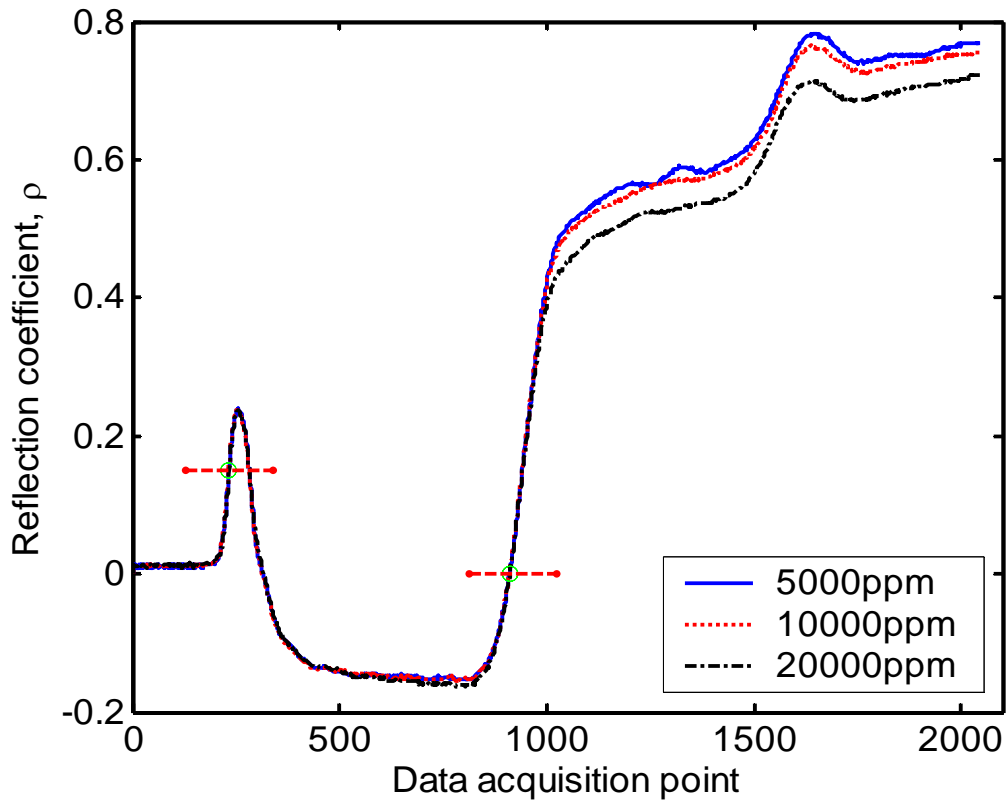


圖 3-5 參考線法示意圖

3.4 溫度影響

由文獻回顧中可知以電學方法量測，所得之介電常數與導電度受溫度影響。因此，本研究將就前述所評估之最佳感測器，施作溫度影響試驗，以了解實際量測於不同溫度下受影響程度。試驗規劃主要基本水質為採用純水(pure water)為對象，將水溫固定於 3~4 種溫度下(包含低溫與高溫)，分別測試各溫度下純水、加 1g 及加 2g 鹽(salt)等三種狀態，TDR 量測系統所受之影響。並嘗試推導出受溫度影響關係之修正式，再搭配感測器泥砂濃度率定關係，以作為未來現地量測之回饋補償，增加量測之準確度。



3.5 土壤種類與粒徑影響

泥砂-水混合物中之電學性質，受到土壤顆粒本身電學性質、土壤與水分子交互作用及泥砂的含量等三個主要因素影響。一般而言，水庫之沈泥種類和粒徑分佈較為一致，但河川之泥砂種類以及粒徑分佈可能隨著洪颱事件而有所變化，因此本研究將利用不同種類之土壤，以及相同土壤性質，但不同粒徑分佈之試體，以了解 TDR 量測結果與土壤種類和粒徑分佈之影響關係，並作為未來於現場率定時考慮之因素。

本研究主要分別以石門水庫沉澱池之沈泥(Shihmen sediment)、交通大學校園內紅土(NCTU red soil)及矽砂土(Silica silt)作為土壤種類影響探討。粒徑影響則以交通大學校園內紅土作為探討對象，並將其粒徑區分

為小於 $75\mu\text{m}$ (#200)、 $75\sim 150\mu\text{m}$ (#200~#100)及 $150\sim 250\mu\text{m}$ (#100~#60)等三種粒徑，試驗方法採用與感測器效能評估相同之方法，以了解粒徑對電學施作影響程度。



第四章 試驗結果與討論

4.1 儀器解析度與量測變異性

本研究採用之 TDR 感測器分為兩種：第一種為 Campbell CS605 感測器，係由三根直徑為 0.48 cm 之不鏽鋼棒所組成之開放式感測器，以絕緣 (coating) 與未絕緣 (uncoating) 處理作為測試，並分別以擷取視窗長度 (Time window) 為 5m 及 25m，儀器解析能力則分別為 0.0163 ns 及 0.0816 ns 等兩組實驗作為測試；且為測試含砂濃度量測時之穩定狀態，故於試驗時加入不同濃度之泥砂濃度，由 0 ppm 至 10 萬 ppm，以了解儀器之解析度與量測變異性關係。

擷取之原始波形如圖 4-3 所示，而由先前測試感測器絕緣試驗資料，分別以兩種走時分析方法結果整理如表 4-1 所示，從表中可明顯觀察出使用參考線法於量測變異性之分析，走時重複量測誤差有較切線法小的趨勢。因此，此處分析結果將以參考線法作為呈現，以每次量測 10 筆資料作為誤差分析，分別求得走時之標準偏差平均值，將其整理如表 4-2 所示。由表中可觀察出，絕緣感測器確實會降低量測造成的誤差；但量測誤差之變異性沒有隨著擷取時間解析度增加而趨於較好的狀態。

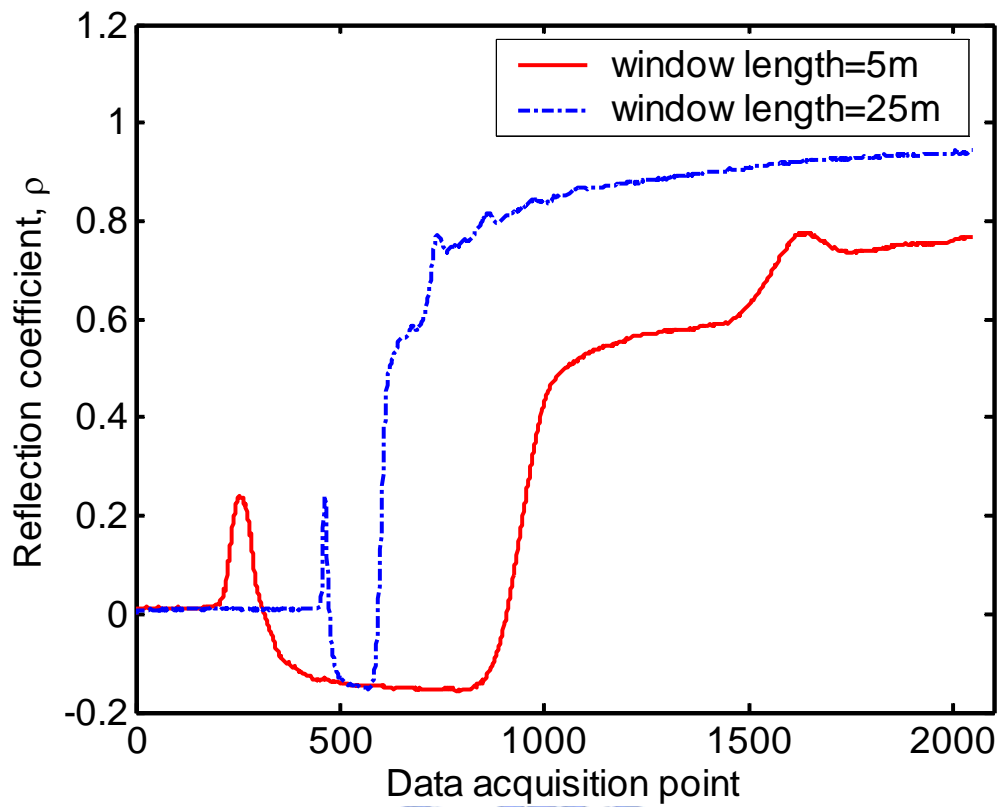


圖 4-1 原始波形比較

表 4-1 分析方法比較

Probe type Analysis method	標準偏差(單筆資料)		
	Open-uncoating	Open-coating with one rod	Open-coating with two rod
Tangent line method	0.3759	0.3097	0.2816
Reference line method	0.1044	0.0976	0.0702

表 4-2 解析度比較表

Resolution Probe type	標準偏差平均值(以六筆資料)	
	Time window:5m	Time window:25m
Open-uncoating	0.0102	0.0108
Open-coating	0.0067	0.0061

4.2 感測器最佳化設計與效能評估

基於前述研究方法，本節將針對各種感測器評估成果作一探討，最後並擇一最佳感測器可供未來現地使用之。

4.2.1 濃度試驗評估

濃度試驗評估係以石門水庫沉澱池之沈泥(Shihmen sediment)且通過 #200(0.074mm)號篩之土樣為主，濃度由 0~15 萬 ppm 作為測試。將所設計之感測器，於各濃度狀態下分別量測 10 次所得之 TDR 訊號，分別以切線法(tangent line method)與參考線法(reference line method)作分析，評估其量測變異性、量測誤差及濃度變化範圍內之波形走時差。各種形式之感測器分析結果說明如後，最後並作統一比較各式感測器之優劣。

1. Open-uncoating

由量測原始波形如圖 4-2 可知，此類型感測器所量得之訊號，末端反射會隨泥砂濃度增加而下降的趨勢，因此無法利用參考線法分析，僅能採用切線法分析，結果如圖 4-3 所示。從圖中每一濃度所對應之實線為所進行量測 10 次之標準偏差範圍(以 error bar 表示)，而虛線則為整體濃度之回歸。由圖中計算可得感測器之整體走時差為 0.8532 ns，所對應的靈敏度是 0.0569 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.0869ns，相當於 15272ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 13461ppm、標準偏差 3739ppm、最大誤差 42439ppm。

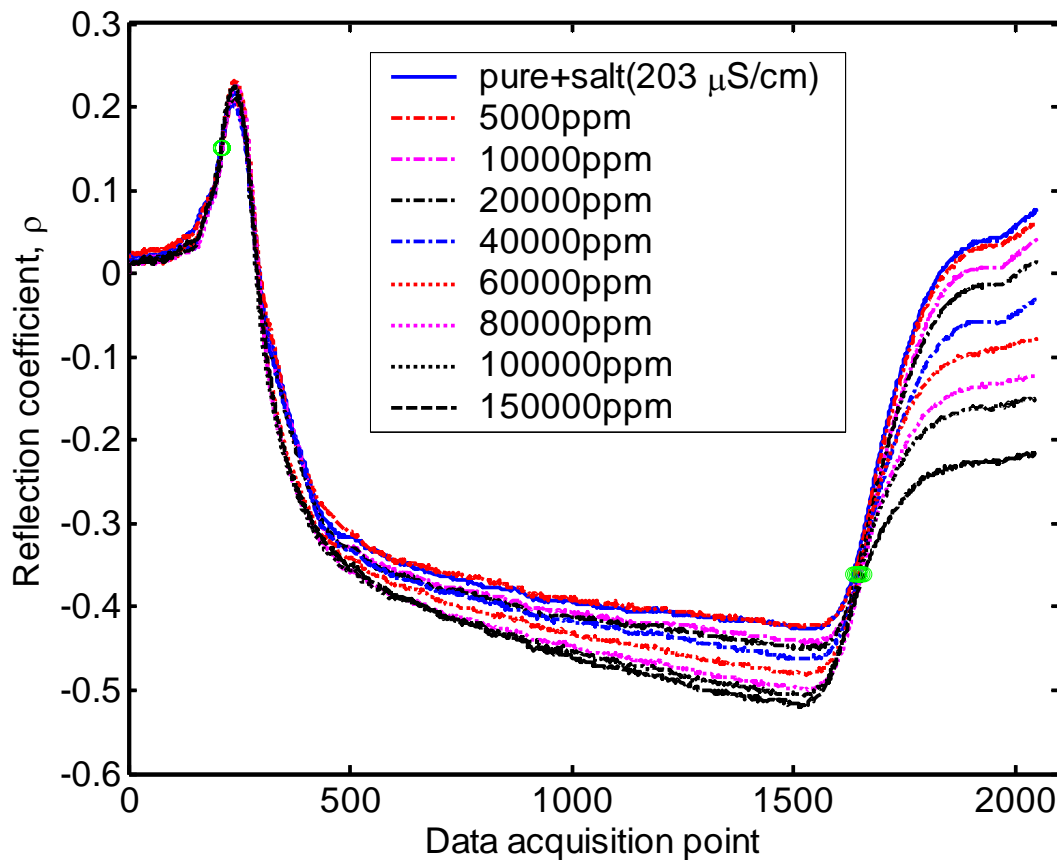


圖 4-2 Open-uncoating 原始波形

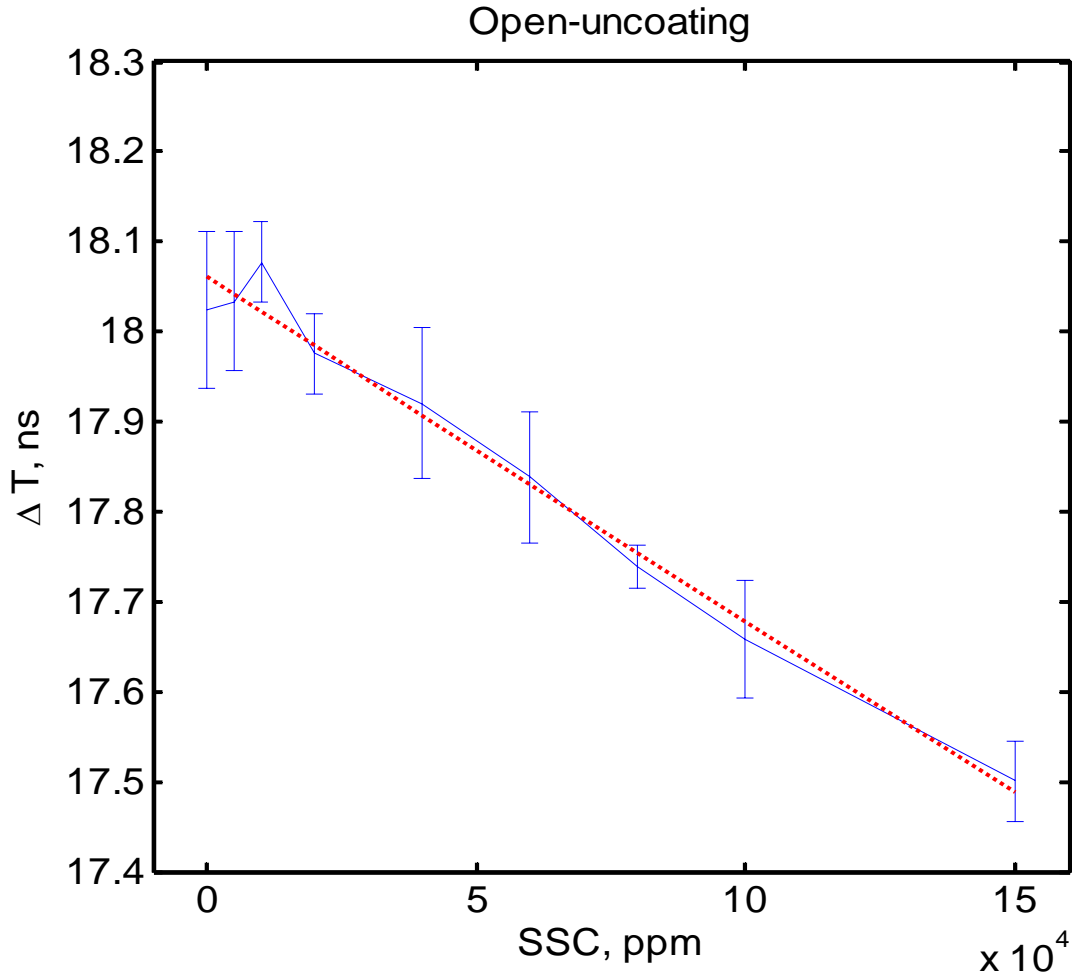


圖 4-3 Open-uncoating 切線法分析結果

2. Short-uncoating

由此型態感測器所量得之訊號，利用參考線法分析之結果如圖 4-4 所示，量測 10 次之標準偏差範圍(以 error bar 表示)，而虛線則為整體濃度之回歸。由圖中計算可得感測器之整體走時差為 0.6483ns，所對應的靈敏度是 0.0432 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.0158ns，相當於 3655ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 4296ppm、標準偏差 955ppm、最大誤差 14825ppm。

使用切線法分析之結果如圖 4-5 所示，由圖中計算可得感測器之整體

走時差為 0.863ns，所對應的靈敏度是 0.0575ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.0886ns，相當於 15408ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 10007ppm、標準偏差 1704ppm、最大誤差 30542ppm。

比較參考線與切線法結果圖中，顯示相同感測器量測結果使用不同方法分析所得之結果可能差異甚巨，而此形式之感測器以參考線法分析之結果較好，將可作為未來分析方法用。

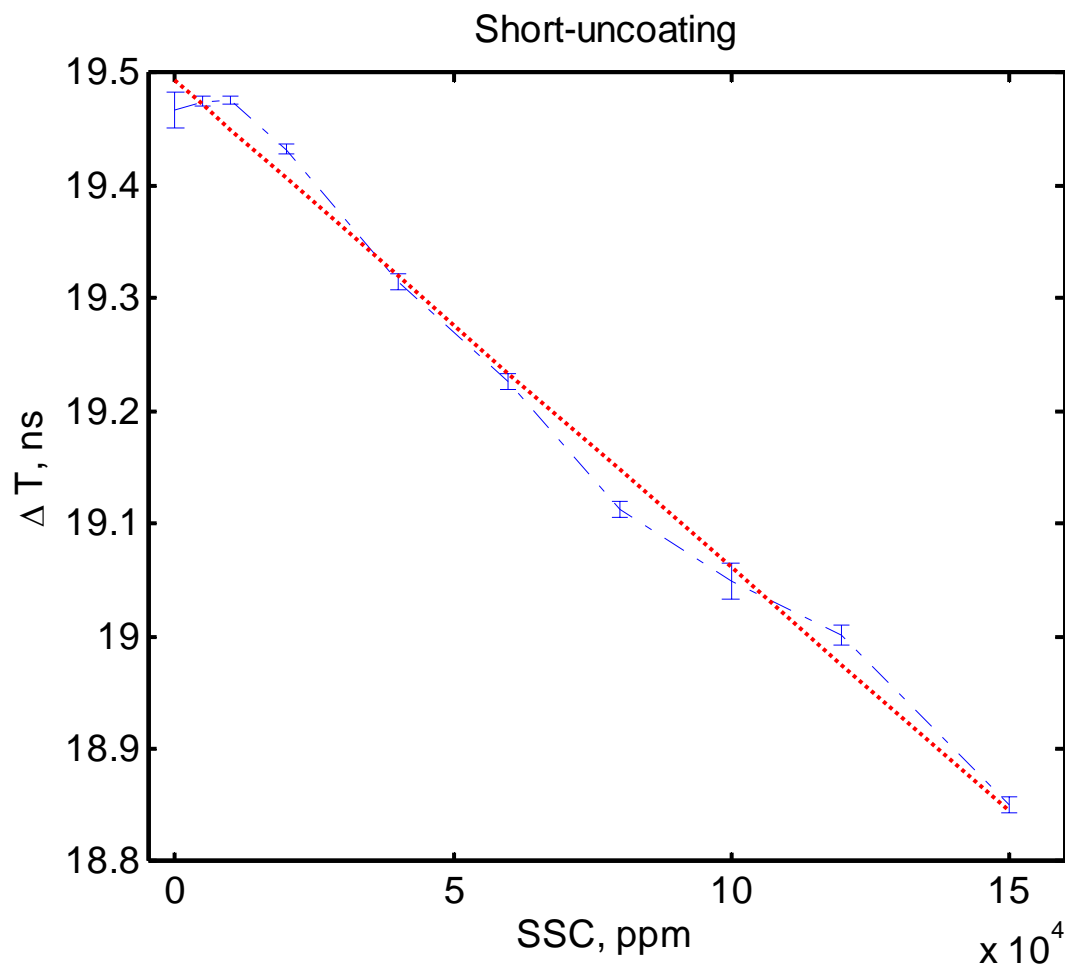


圖 4-4 Short-uncoating 參考線法分析結果

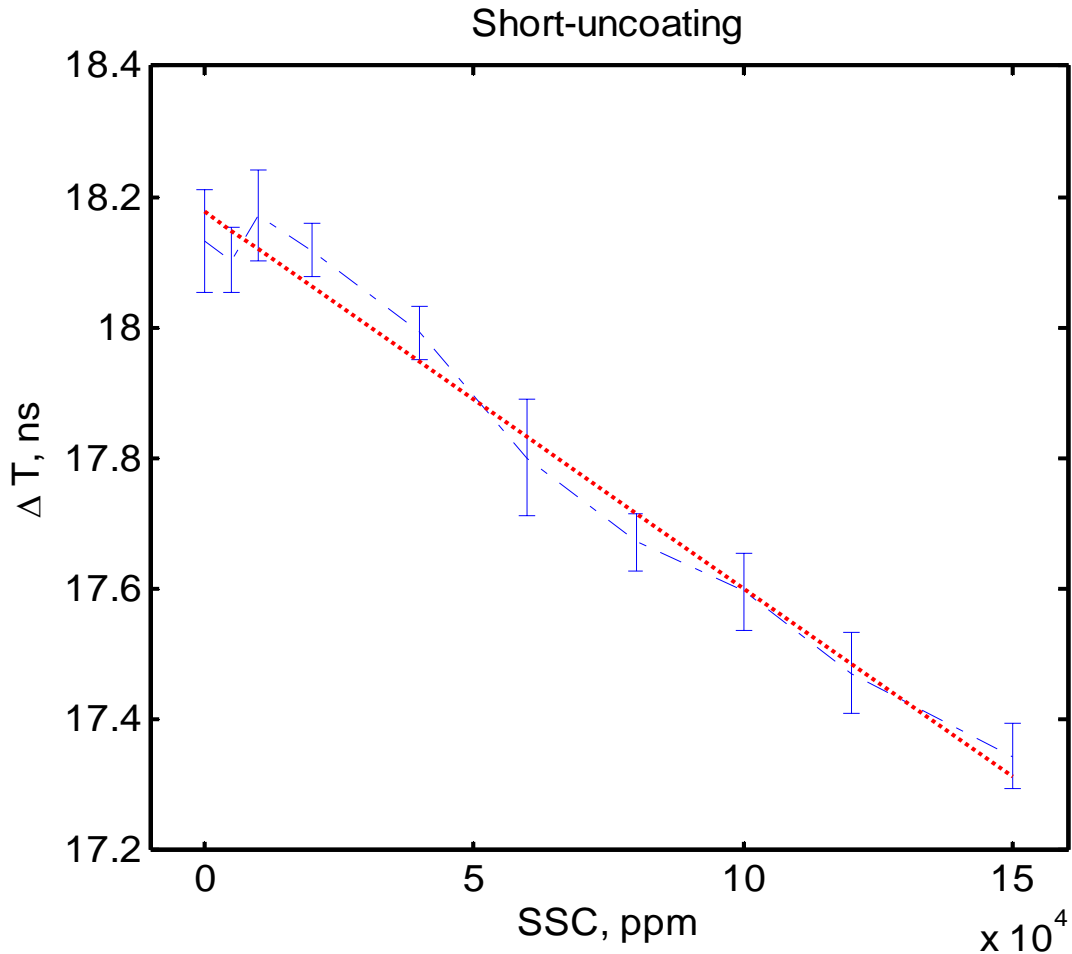


圖 4-5 Short-uncoating 切線線法分析結果

3. Open-coating

由參考線法分析結果，如圖 4-6 所示。量測 10 次之標準偏差範圍(以 error bar 表示)，而虛線則為整體濃度之回歸。由圖中計算可得感測器之整體走時差為 0.0344ns，所對應的靈敏度是 0.0023 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.0118ns，相當於 51304ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 25652ppm、標準偏差 14356ppm、最大誤差 183010ppm。

使用切線法分析之結果如圖 4-7 所示，由圖中計算可得感測器之整體

走時差為 0.0652ns，所對應的靈敏度是 0.0043 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.0766ns，相當於 178140 ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 95026ppm、標準偏差 25243ppm、最大量測誤差為 457470ppm，明顯已經超越率定試驗採用之 15 萬 ppm。歸納造成此感測器量測變異性之因素，可能因為絕緣(coating)使量測感測器對於外在介電度改變靈敏度降低，導致量測變異性提升。

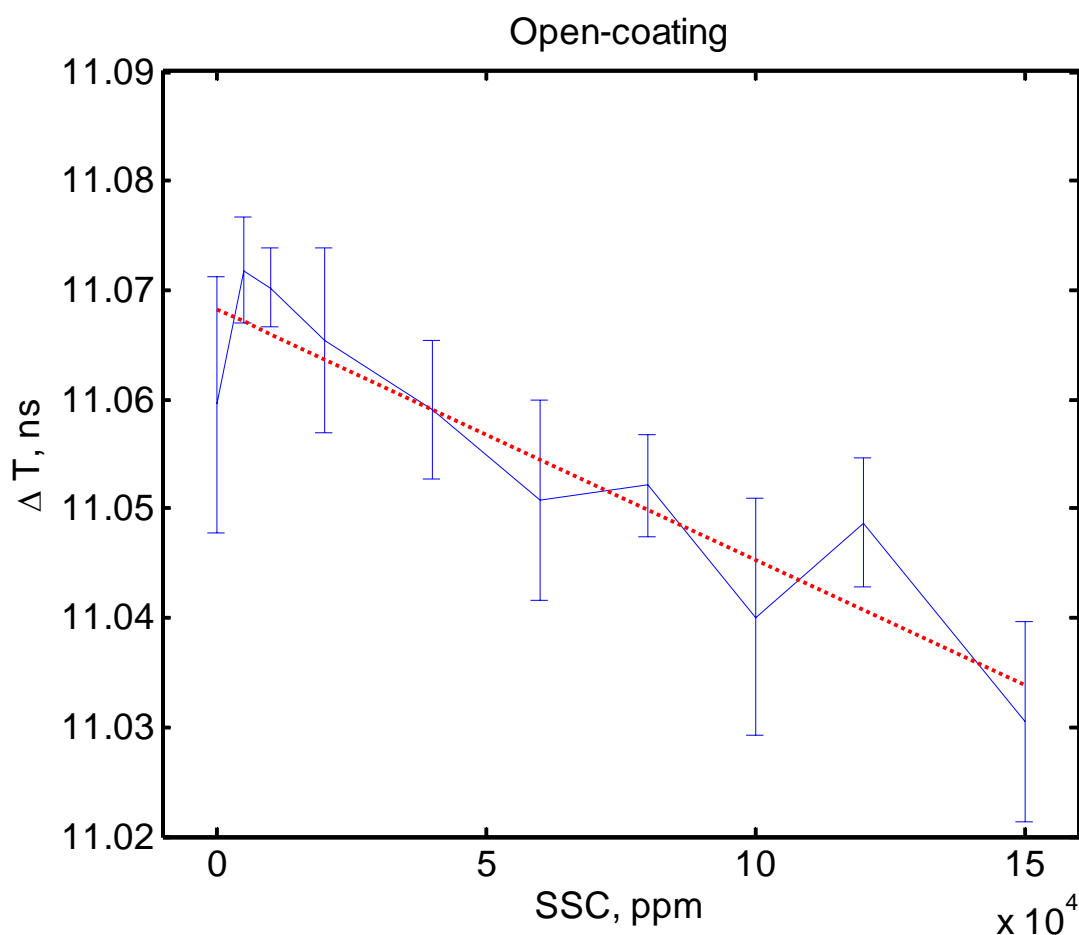


圖 4-6 Open-coating 參考線法分析結果

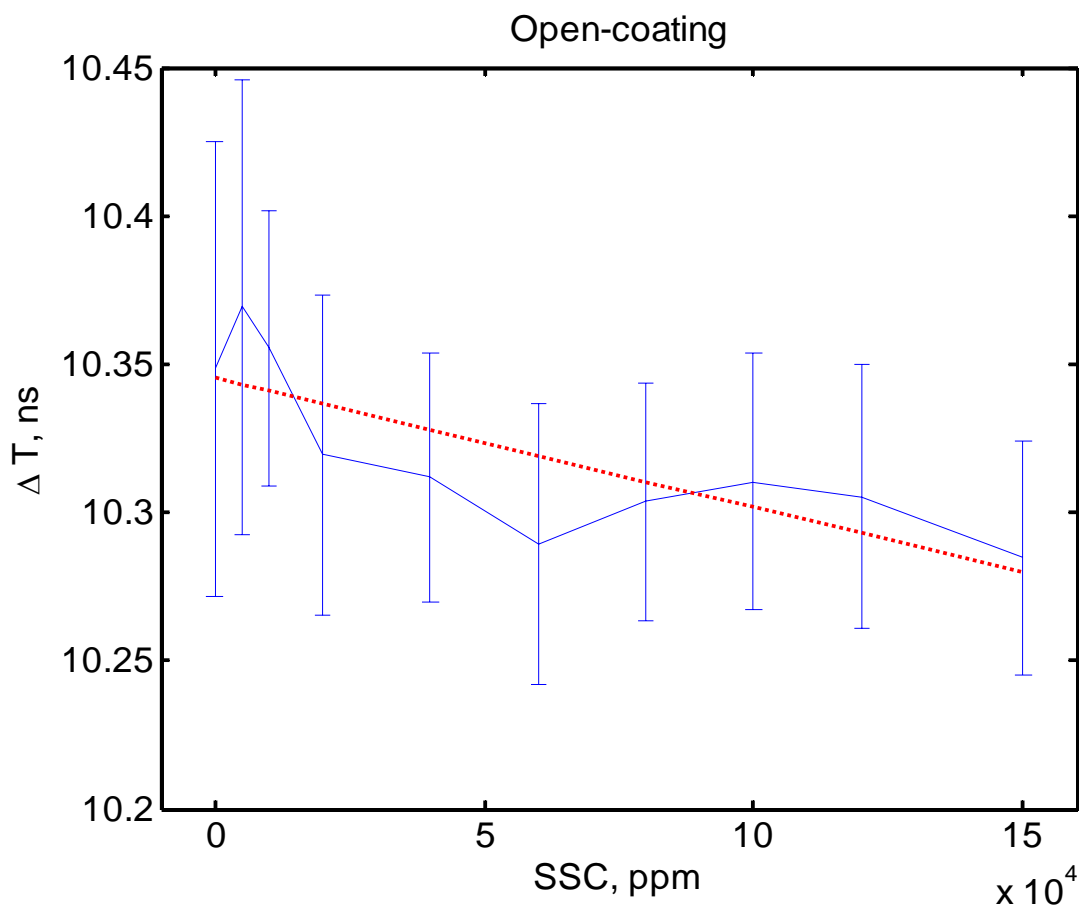


圖 4-7 Open-coating 切線法分析結果

4. Short-coating

本型式感測器之參考線法分析結果如圖 4-8 所示，量測 10 次之標準偏差範圍(以 error bar 表示)，而虛線則為整體濃度之回歸。由圖中計算可得感測器之整體走時差為 0.3511ns，所對應的靈敏度是 0.0234 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.036ns，相當於 15385ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 102690ppm、標準偏差 3835ppm、最大誤差 183010ppm。

使用切線法分析之結果如圖 4-7 所示，感測器之整體走時差為 0.2751ns，所對應的靈敏度是 0.0183 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.164ns，相當於 89617ppm。若以秤重法的結果作為實際正確

值，則量測誤差的平均值 59499ppm、標準偏差 10854ppm、最大量測誤差為 204100 ppm，亦遠超出所率定之量測範圍。經由上述兩種分析方法結果，絕緣後卻使得量測誤差大幅提高，故研判絕緣造成量測靈敏度降低，使得雜訊比上升，因此不適合於泥砂濃度量測使用之感測器。

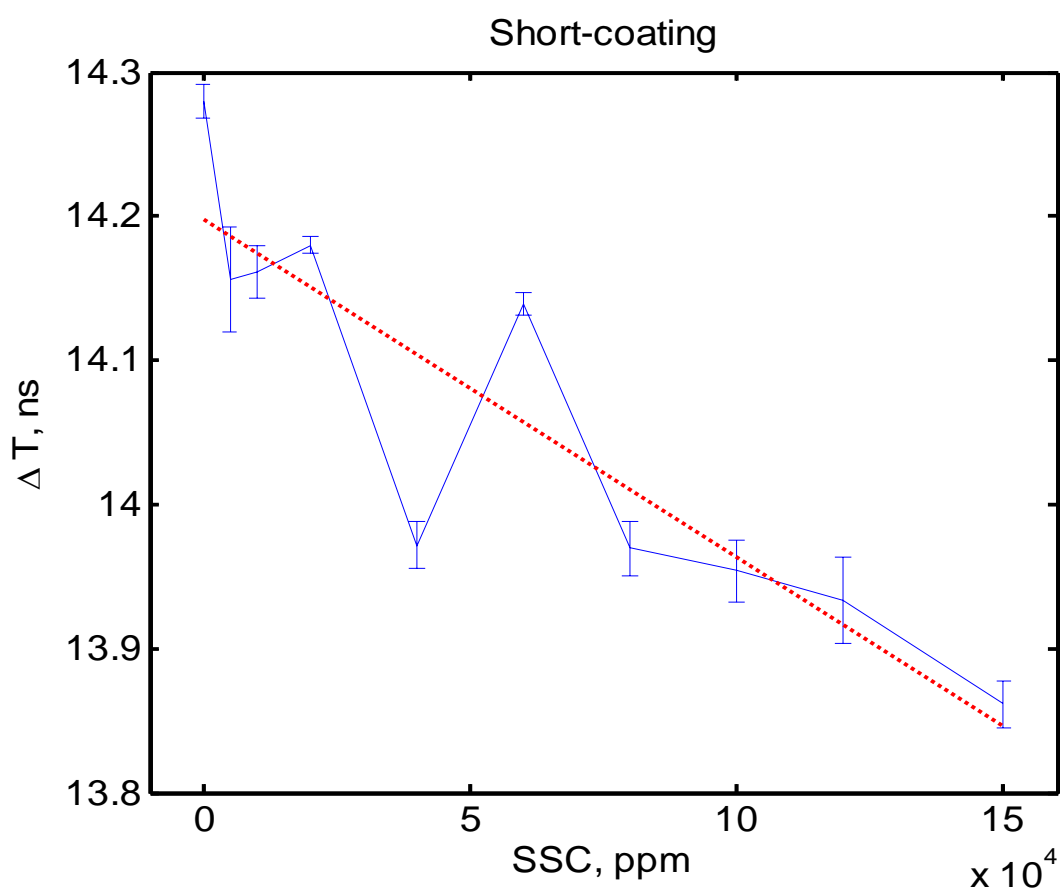


圖 4-8 Open-coating 參考線法分析結果

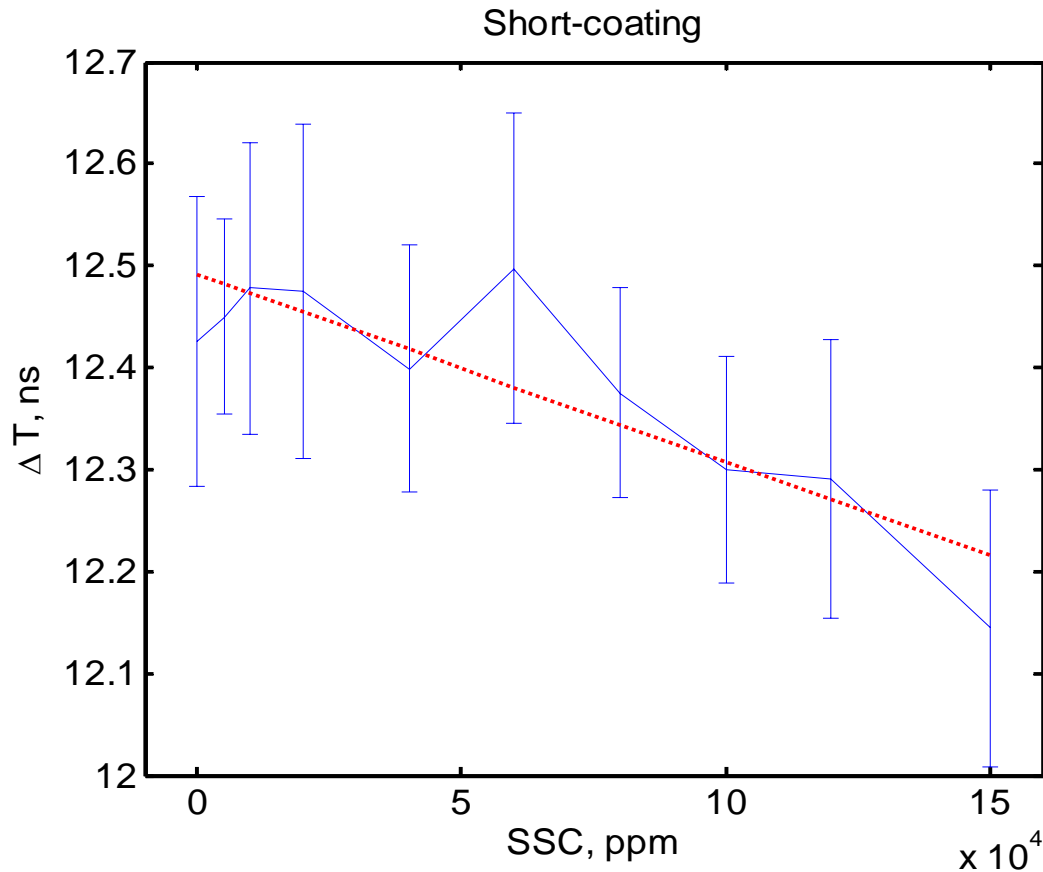


圖 4-9 Open-coating 切線法分析結果

綜合上述感測器於泥砂濃度效能評估之結果，將所有感測器之最大量測誤差與儀器量測重複性誤差之結果，整理如表 4-2 所示，其中量測誤差分別以最大量測誤差(Max. of error)、量測誤差平均值(Mean of error)及量測誤差之標準偏差(Sd of error)等三項表示；量測重複性誤差則分別以最大重複性誤差(Max. of repeatability error，亦即最大值減最小值)、平均值(Mean of repeatability error)與最大標準偏差(Max. sd of repeatability error)，並將比較結果整理成圖 4-10 所示。圖 4-10 為各種感測器，利用參考線法與切線法分析結果，圖中可明顯觀察出，以 Short-uncoating 之感測器採用參考線法分析結果最佳，其最大量測誤差為 14825ppm、量測

誤平均值為 4296ppm、量測誤差的標準偏差為 955ppm；最大重複性量測誤差為 13273ppm、量測重複性誤差平均值為 1890ppm。

為更進一步探討量測誤差來源，因此將量測重複性誤差隨濃度以 error bar 表示(如圖 4-11)。由圖中可觀察出下列幾點：

1. 量測誤差之平均值並未隨濃度增加呈現漸增之趨勢，而是一隨機分佈狀態。
2. 量測重複性誤差之標準偏差值，無隨濃度漸增而升大的趨勢，亦為一隨機分佈狀態。
3. 量測重複性之平均值與標準偏差無一正相關關係，亦即無因平均值小而使標準偏差變小。

前述三點之觀察，搭配圖 4-11 可發現，主要誤差來源為量測誤差所造成，並非重複性量測誤差所貢獻，推估可能原因為實驗系統所造成之誤差來源因素較較大(如攪拌不均勻或其他影響因素)。

感測器評估結果，為與一般常用之感測器效能比較，故將 Open-uncoating 與 Short-uncoating 兩種感測器作一探討，其量測準確度分別約為 20000ppm 與 5000ppm，而由效能比較表中可推論其主要造成差異原因如：1.Open-uncoating 因無法使用切線法分析(僅可使用切線法)，導致其量測重複性誤差均比 Short-uncoating 來的大。2.Open-uncoating 利用切線法分析之量測誤差亦比 Short-uncoating 分析大。3.Open-uncoating

切線法分析結果顯示，其量測重複性誤差(最大重複性誤差、平均值與標準偏差)已遠超出量測誤差(最大誤差、誤差平均值及標準偏差)，可明顯觀察出其誤差來源主要為量測重複性誤差所造成，導致量測準確度較差。

最後，為了解感測器量測之實際效能，故將感測器走時差與理論走時差比較，作為感測器效能探討。理論走時差由 mixing model 推導出 0~15 萬 ppm 走時差為 0.772 ns，而 Short-uncoating 感測器以參考線法分析之走時差為 0.6483ns，僅達理論走時之 84%，可能因理論公式並無考慮結合水的影響(bound water effect)。經由上述討論結果，可歸納出最佳效能感測器為搭配分析方法採用參考線法之 Short-uncoating 感測器，後續將依此結果作為研究感測器增長、水質鹽度、溫度及土壤種類影響等因子探討。



表 4-3 感測器效能比較表

類型 & 分析方法		ppm	量測誤差			量測重複性誤差		
			Max.	Mean	SD	Max.	Mean	SD
Open-uncoating	參考線法	-	-	-	-	-	-	
	切線法	42439	13461	3739	41172	15866	15272	
Short-uncoating	參考線法	14825	4296	955	13273	1890	3655	
	切線法	30542	10007	1704	30541	10103	15408	
Open-coating	參考線法	183010	25652	14356	174290	32569	51304	
	切線法	457470	95026	25243	455170	117290	178140	
Short-coating	參考線法	167180	102690	3835	47843	7854	15385	
	切線法	204100	59499	10854	196100	12135	89617	

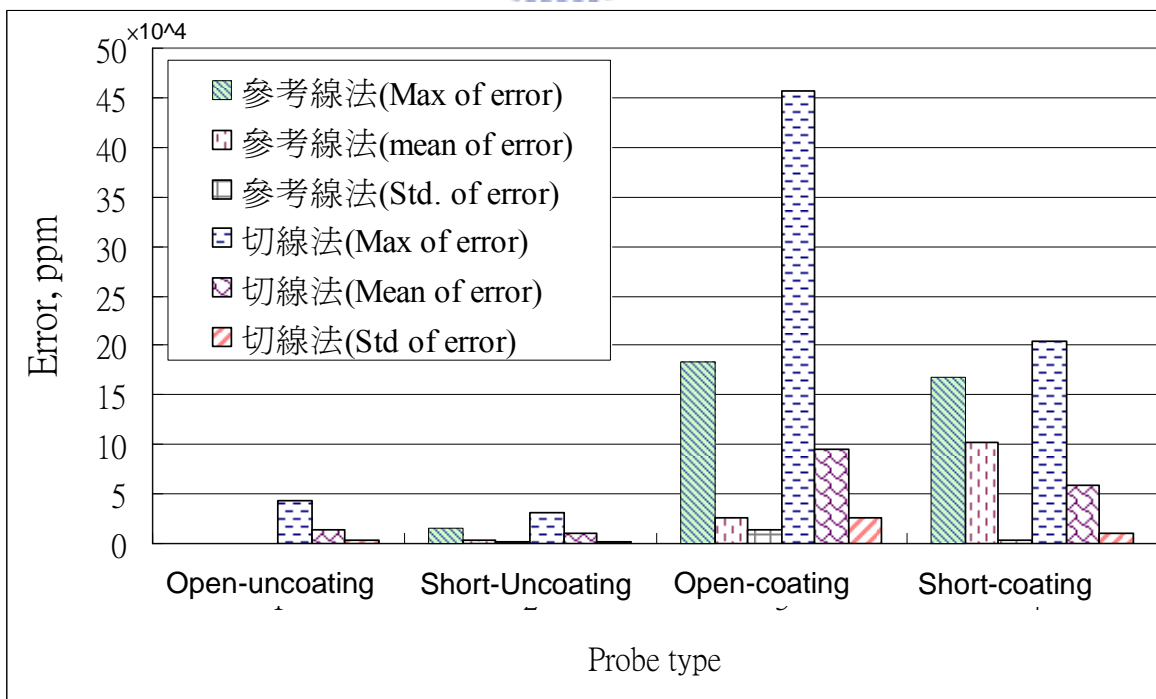


圖 4-10 感測器效能比較圖

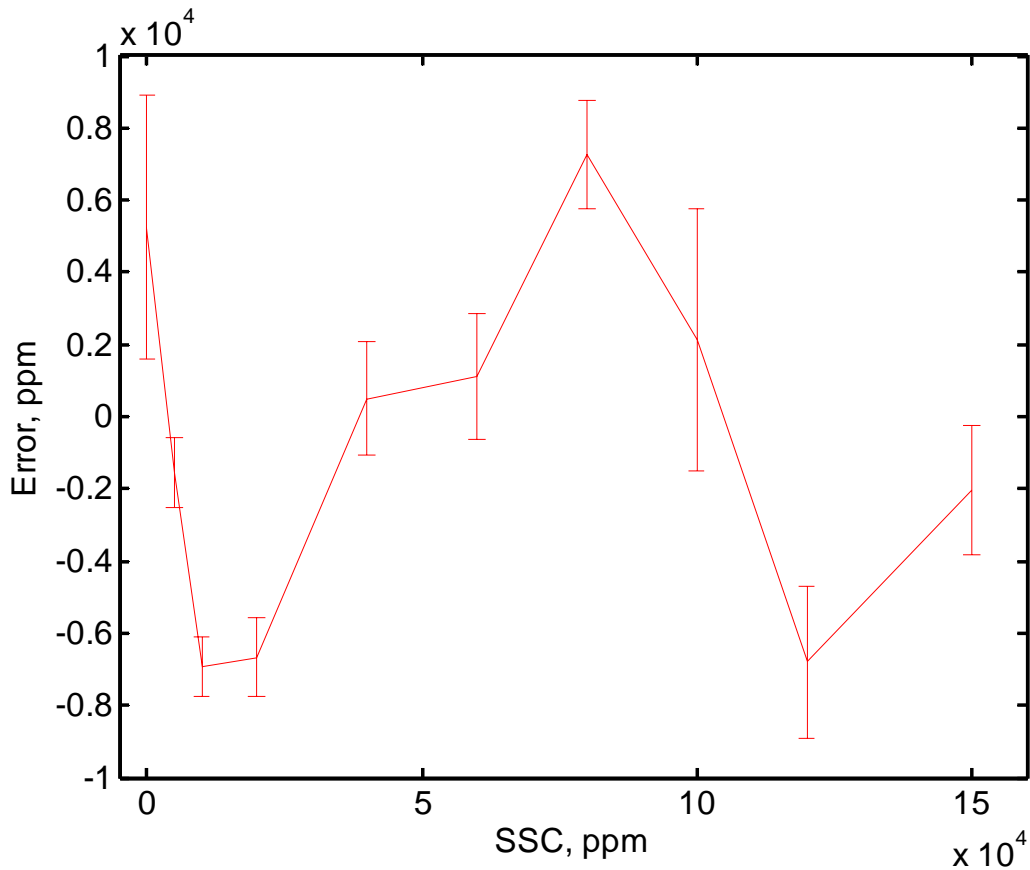


圖 4-11 重複性量測誤差比較圖

4.2.2 感測器長度

基於理論靈敏度對視介電常數之結果，可知當感測器長度越長將會使量測靈敏度增加，但當量測靈敏度提高的同時，於高導電度量測時，將使量測 TDR 訊號能量大量衰減，造成反射波形不明顯，而影響波形計算與分析。

本研究於前述各類型感測器於泥砂濃度測試後，採以量測效能最佳之 Short-uncoating 感測器作為感測器增長是否能提高量測靈敏度效能之研究；因此，設計一 0.6m 長短路感測器，示意圖如圖 4-11 所示，並以此感測器，施作濃砂濃度效能評估，試驗與分析方法如同前述感測器之施

作。

以參考線法分析結果如圖 4-12 所示，量測 10 次之標準偏差範圍(以 error bar 表示)，而虛線則為整體濃度之回歸。由圖中計算可得感測器之整體走時差為 1.139ns，所對應的靈敏度是 0.0759 ns/萬 ppm，量測重複性標準偏差的最大值為 0.0405ns，相當於 5336ppm；量測重複性誤差平均值為 3213 ppm。若以秤重法的結果作為實際正確值，則量測誤差的平均值 5352ppm、標準偏差 987ppm、最大誤差 14420ppm。為了解感測實際量測效能，將感測器走時差與理論走時差比較，作為感測器效能探討。理論走時差由 mixing model 推導出 0.6m 感測器 0~15 萬 ppm 走時差為 1.544ns，而 Short-uncoating 感測器以參考線法分析之走時差為 1.139ns，量測效能僅達理論走時之 73%，造成此結果亦可能因理論公式因無考慮受結合水的影響(bound water effect)。

本試驗結果與 0.3 m Short-uncoating 感測器參考線法分析結果，將量測重複性誤差隨濃度以 error bar 表示(如圖 4-14)比較，由圖中可觀察出，量測誤差平均值與誤差之標準偏差並未隨著感測器長度增長而減小的趨勢；此感測器之最大誤差僅較 0.3m 約小 400ppm，且不論量測重複性標準偏差的最大值、量測誤差的平均、量測重複性誤差標準偏差及量測重複性誤差平均值結果，均較 0.3 m 短路感測器稍差，由誤差平均值與量測重複性誤差平均值比較，可發現無明顯提升感測器效能之主要誤差來源

為量測重複性誤差所造成，造成無明顯提升量測靈敏度之能力，因此未來若要進一步提升量測靈敏度，應朝改善及降低量測重複性誤差著手。

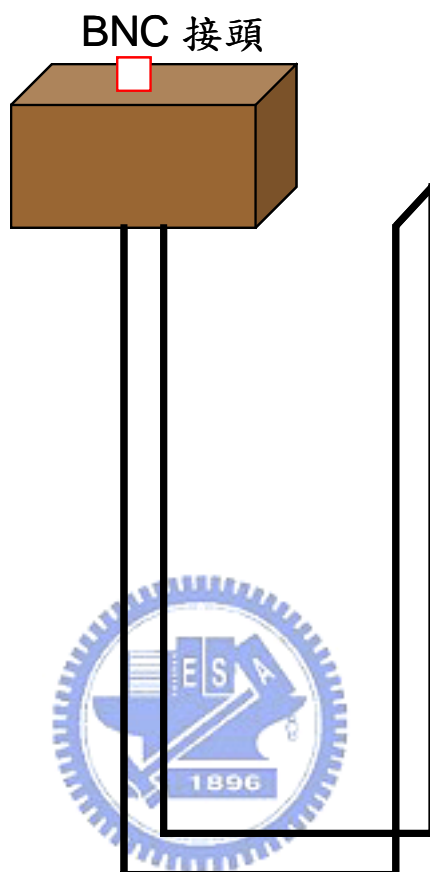


圖 4-12 Short-uncoating 感測器增長示意圖

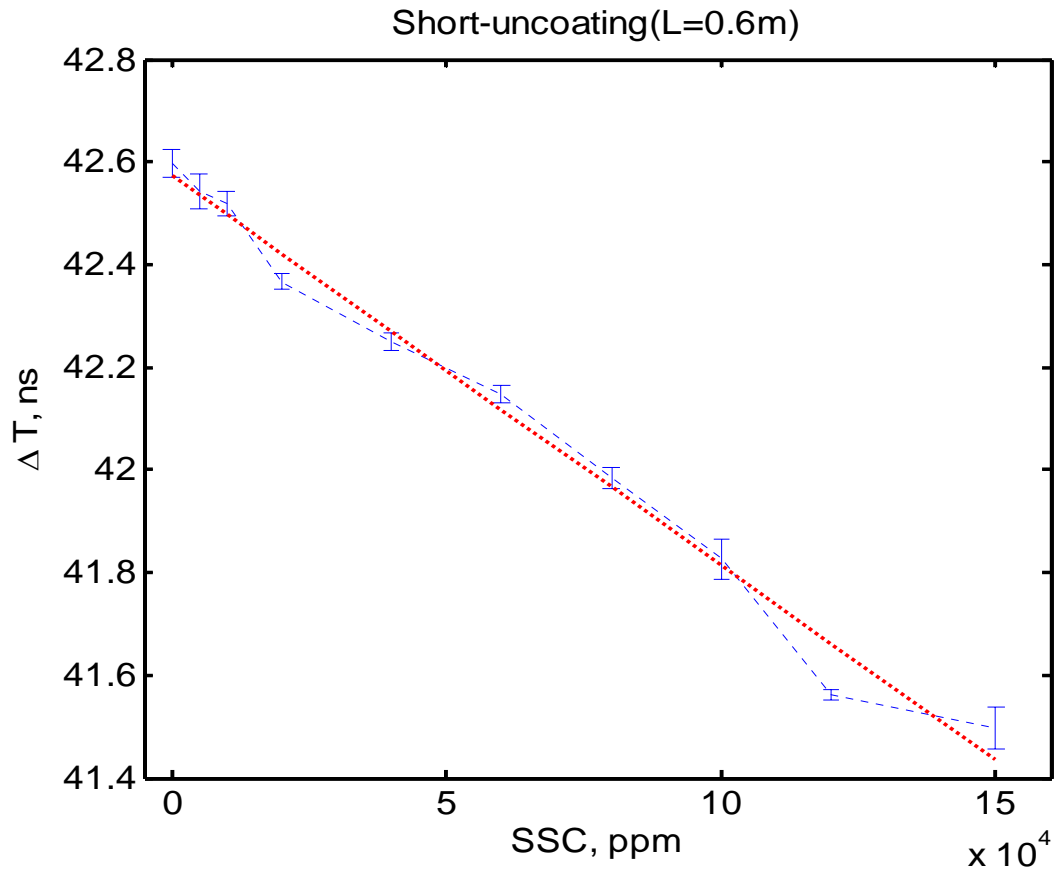


圖 4-13 Short-uncoating 感測器增長分析結果

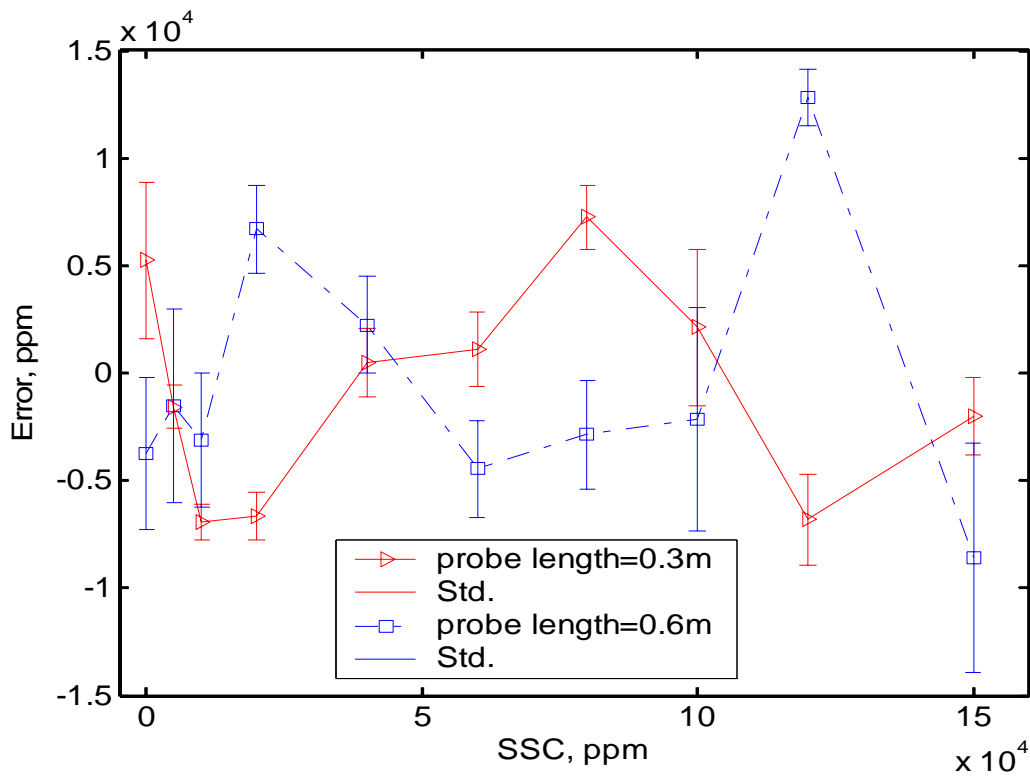


圖 4-14 Short-uncoating 量測誤差比較圖

4.2.3 水質鹽度

傳統使用切線法計算視介電常數，除了受量測試體之本身介電度影響外，亦會遭受導電度的影響，使得波形因能量衰減圓滑化，視介電常數之計算誤差擴大。而泥砂濃度量測可能受到水質本身之導電度變化，而影響其量測準確度；為了瞭解導電度於泥砂濃度量測影響程度，本研究將利用各種形式感測器，以石門水庫沈泥通過#200 號篩(75 μm)為土樣，於固定 80000ppm 之泥砂濃度下，分別量測水質導電度為 100、300 及 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 等不同狀況，測試結果說明如下：

1. Open-uncoating

由原始量測波形，如圖 4-15 中可觀察出，在不同水質條件下，波形受導電度影響顯著，如同前期研究顯示，走時分析於低濃度量測精度不彰，因此初步排除 Open-uncoating 之可行性。

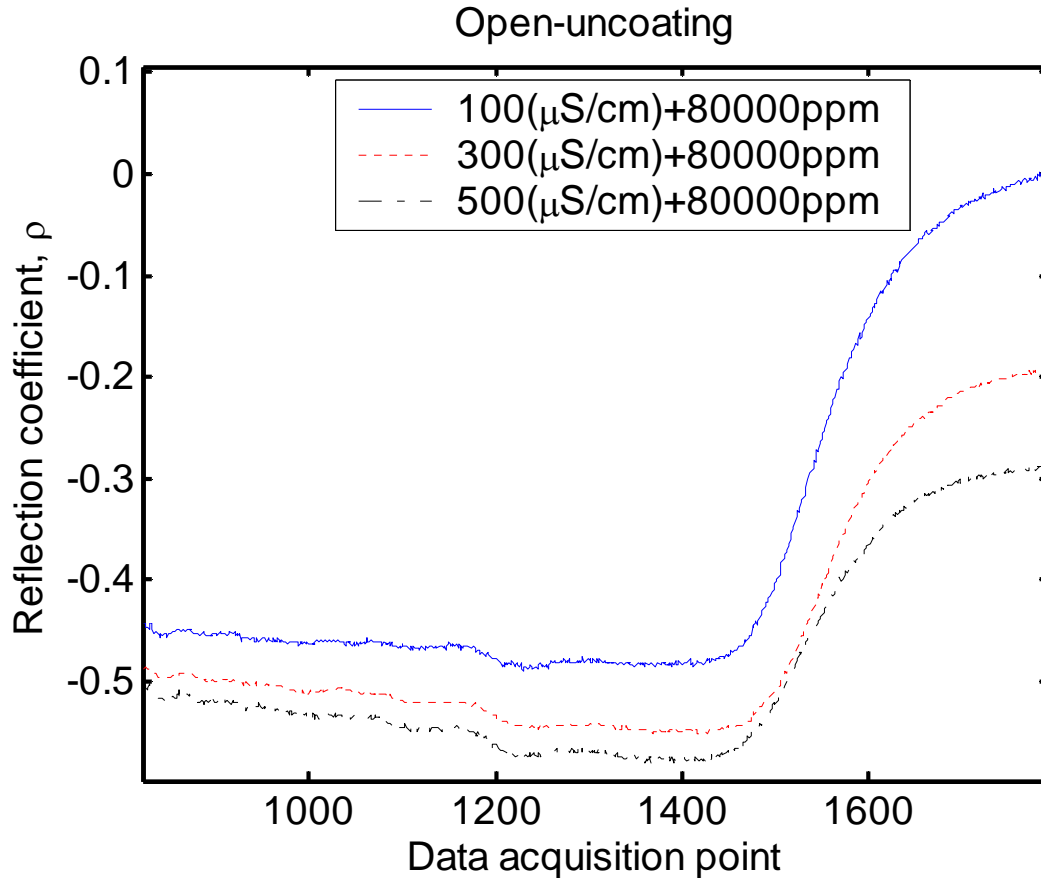


圖 4-15 Open-uncoating 水質鹽度影響

2. Short-uncoating

量測結果之原始波形，如圖 4-16 所示。圖中可明顯發現，三種不同水質之量測波形將會約略於波形下降處之中點交叉；故若採用此量測方法，在計算感測器之走時差時，以交叉點作為參考線法參考位置，初步可將水質影響量測波形之走時，誤差量減至最低，甚至可完全忽略水質之影響。因此，本研究將利用 short-uncoating 感測器為基礎，於各種水質狀態下，測試其量測各種濃度之效能。

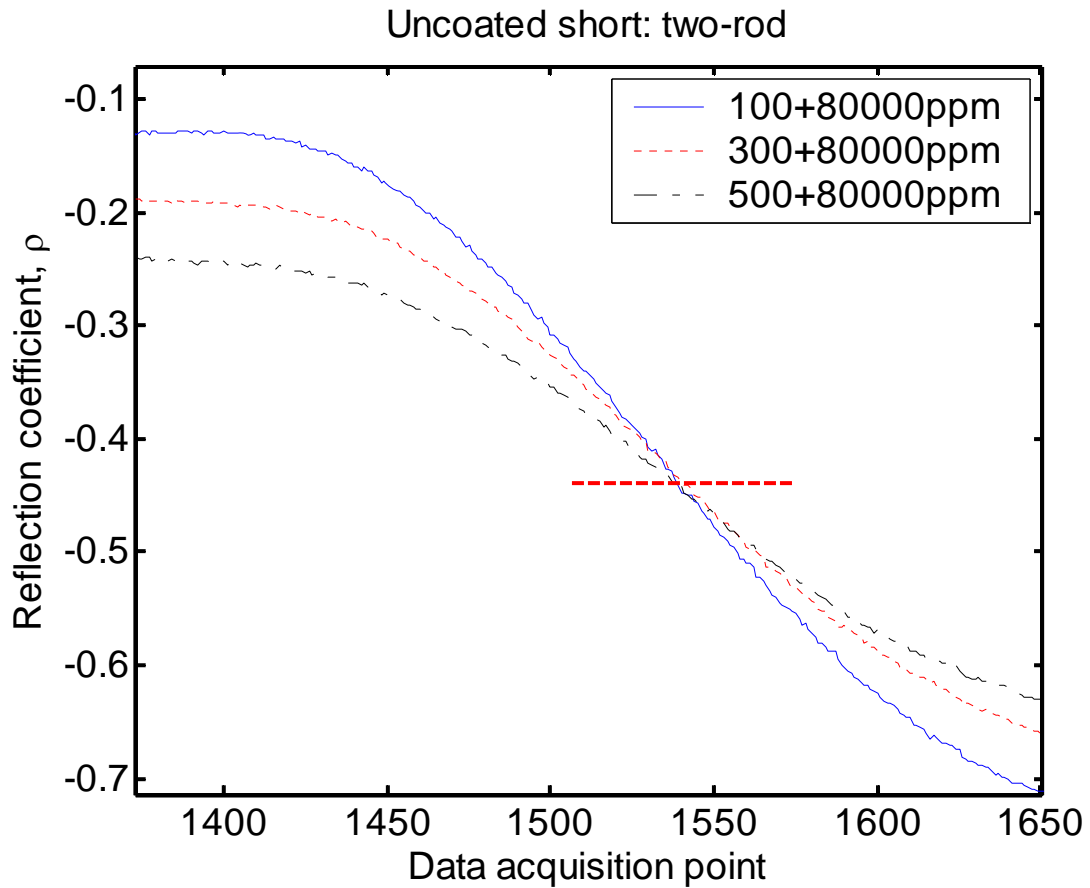


圖 4-16 Short-uncoating 水質鹽度影響

3. Open-coating

Open-coating 感測器，測試結果如圖 4-17 所示。量測之感測器波形反射係數因絕緣而減少導電度影響，但其感測器終端反射點，隨著水質導電度上升而呈現向右偏移的現象，因此無法對水質所造成的影響作修正，此型態之感測器，亦不適合用於泥砂濃度觀測使用。

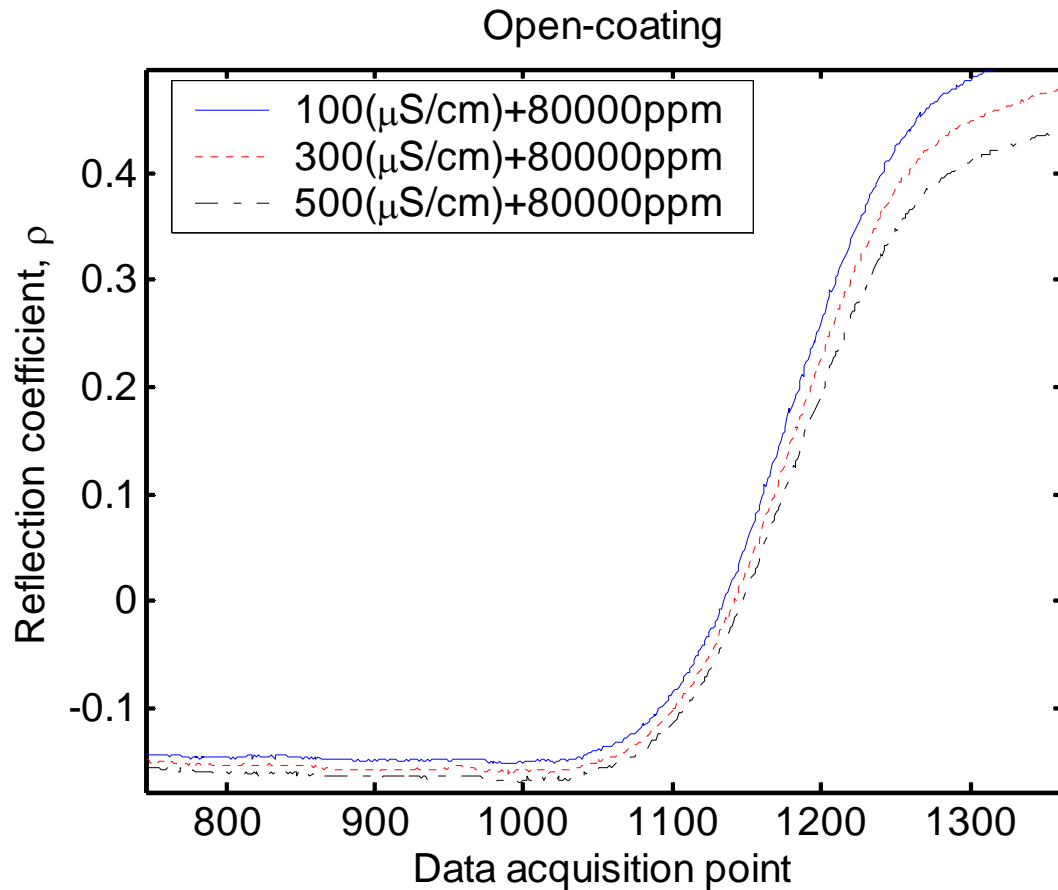


圖 4-17 Open-coating 水質鹽度影響

4. Short-coating

測試結果之原始波形如圖 4-18 所示，圖中觀察出，當水質影響時，雖然波形亦有交叉，但相交處位於波形下降之初始段，然而前述研究結果顯示 short-coating 之量測靈敏度降低，量測誤差過大。因此，此型式感測器，雖有可能將水質影響量測因素去除，但量測效能不佳，不適合於觀測泥砂濃度使用。

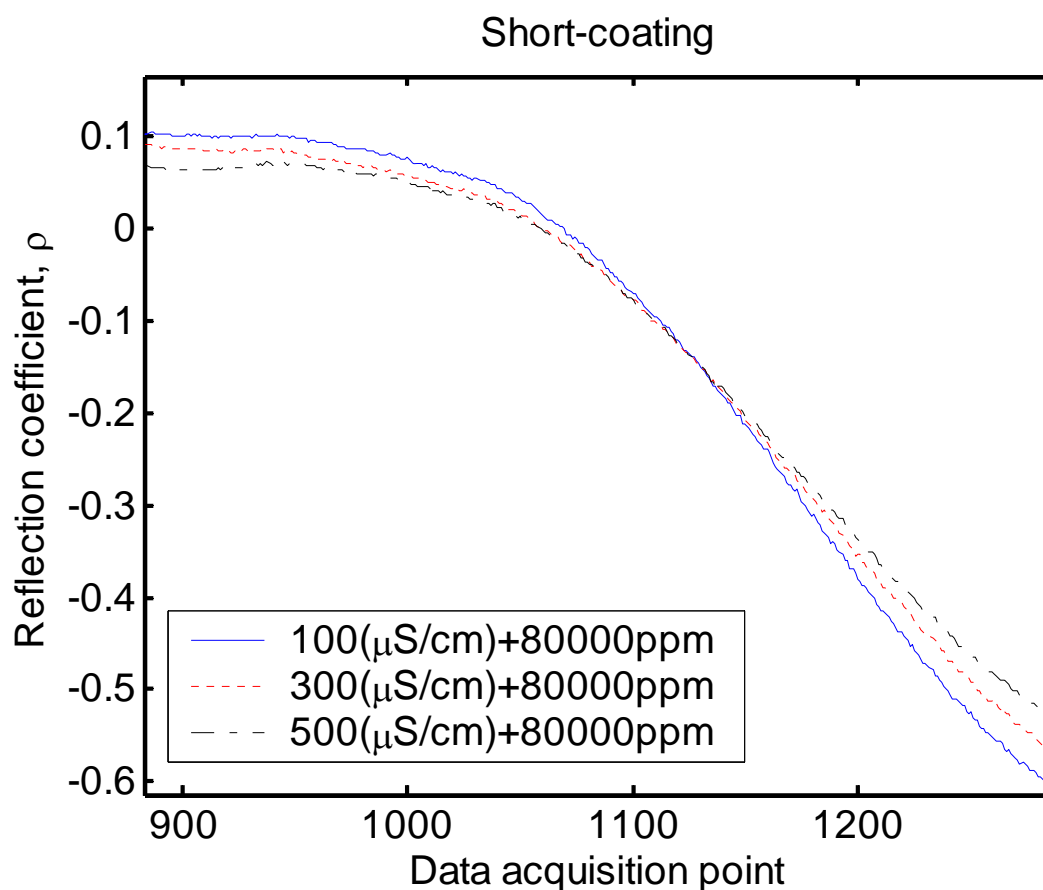


圖 4-18 Short-coating 水質鹽度影響

綜合上述試驗結果之討論，可歸納出最佳感測器的型態為 Short-uncoatin。但若當泥砂濃度改變時，以固定水質交叉點高度作為參考線法分析用，所造成之誤差仍否還在容許範圍內，便是需要探討問題之一。因此接續此試驗，利用 Short-uncaoting 感測器，施作額外兩組試驗，其濃度分別為 4 萬 ppm 與 12 萬 ppm，將水質分別控制為 100、300 及 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。施作原始波形如圖 4-19 所示，由圖中可觀察出，雖然各種水質於不同泥砂濃度狀態下所交錯的高度不一，但其交點約略在同一水平面上。

據上述之試驗結果，為了更深入了解此感測器之量測解析效能，嘗

試建立 100、200 及 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 三種水質於泥砂濃度之走時率定關係，量測濃度由 0 ppm 至 15 萬 ppm。此感測器測試整體分析結果效能如圖 4-20 所示，由圖中可觀察出，於不同水質施作濃度量測，其最後走時差回歸線結果約成平行關係。因此，若分別以 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之回歸式為基準，計算各水質下之最大量測誤差為 24559 ppm，誤差之平均值為 4300 ppm，誤差之標準偏差為 1011 ppm。

由上述分析之結果，初步估計若於水質在 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之下，忽略水質影響，整體量測誤差尚在容許之範圍內，故初步估計可適用於一般現場濃度量測之用。



Short-uncoating

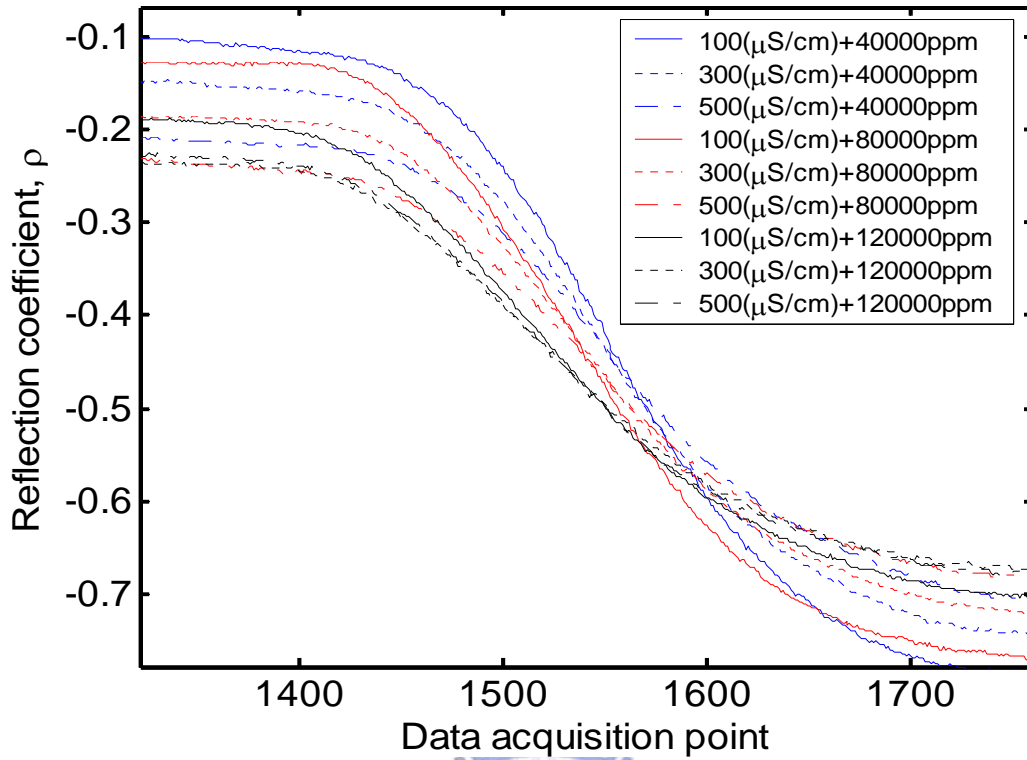


圖 4-19 Short-uncoating 水質鹽度影響

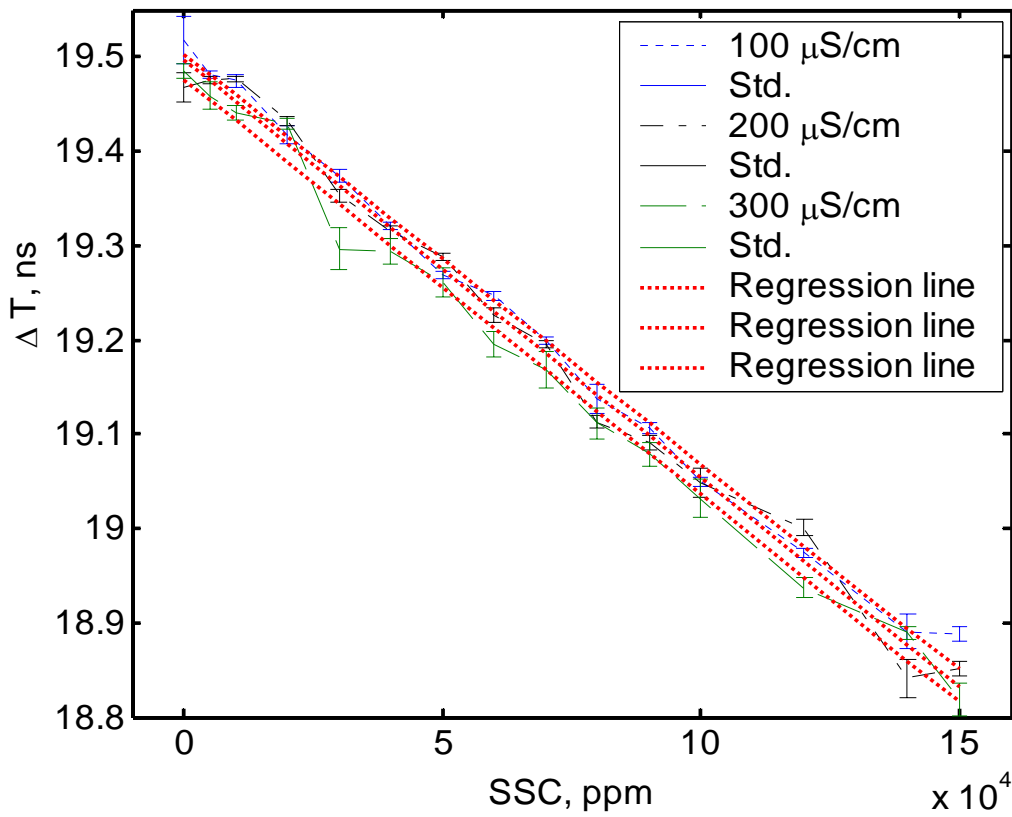


圖 4-20 Short-uncoating 整體效能

4.2.4 溫度影響

前節對各型式感測器評估結果，顯示量測效能及受水質影響最小為 Short-uncaoting 感測器；因此，溫度影響試驗之測試對象將以此型式感測器為主。

此次試驗分別於 4°C、12°C、23°C 及 31°C 等溫度下施作，試驗結果如圖 4-21 所示，由圖中可明顯看出受溫度影響將改變水質之介電常數與導電度，與之前感測器效能評估中受水質導電度上升，將會於一固定反射係數(Reflection coefficient, ρ)處產生一交點，且各溫度下之水質之交點為平移現象，對應之反射係數約與先前施作水質鹽度結果相同。

試驗結果以各溫度下之水質交點，分析其感測器之走時差，並回歸其結果如圖 4-22 所示，由圖中可發現溫度對感測器之走時差影響為線性關係，回歸式如下所示：

$$\Delta T_t(\text{ns}) = -0.03658 \times ^\circ\text{C} + 20.73 \quad (4-1)$$

式中 ΔT_t 為水溫度影響，造成之走時差(ns)。由式(4-1)之結果，將可用來作為量測時溫度補償之關係。因濃度量測時，所量得參數為水與泥砂渾和貢獻所造成之整體走時差，而先前感測器於泥砂濃度率定關係為水質 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 及溫度為 22°C 施作結果，如下式所示：

$$\Delta T_{\text{ssc}}(\text{ns}) = -0.126 \times \text{SC} \quad (4-2)$$

上式中 ΔT_{ssc} 為濃度率定所造成感測器之走時差，SC 為待訂之泥砂體積百

分比。由於溫度率定結果為 100%水質，因此在含有泥砂濃度狀況下，假設泥砂顆粒不受溫度影響，透過體積比例概念，針對溫度修正率定結果，得求解實際泥砂濃度如下：

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{temp} &= [a \cdot (T_{measured} \text{ } ^\circ\text{C} - T_{LAB} \text{ } ^\circ\text{C})](1 - SC) \\
 SC(\%) &= b(t_{measured} - \Delta t_{temp}) + c \\
 \therefore SC(\%) &= b\{t_{measured} - [a \cdot (T_{measured} \text{ } ^\circ\text{C} - T_{LAB} \text{ } ^\circ\text{C})](1 - SC)\} + c \quad (4-3) \\
 SC(\%) &= \frac{b[t_{measured} - a(T_{measured} \text{ } ^\circ\text{C} - T_{LAB} \text{ } ^\circ\text{C})] + c}{1 - b[a(T_{measured} \text{ } ^\circ\text{C} - T_{LAB} \text{ } ^\circ\text{C})]} \\
 ppm &= \frac{SC \cdot G_s}{1 - SC} \cdot 10^6
 \end{aligned}$$

上式中 SC 為待訂之泥砂體積百分比， Δt_{temp} 為溫度效應改變走時， $T_{measured}$ 為實際量測之溫度， T_{LAB} 為於室內標定之溫度(此處為 22°C)， t 為實際量測之走時差， a 為溫度率定係數分別為-0.03658， b 與 c 為泥砂濃度率定係數分別為-7.93 及-154.64， G_s 為土壤之比重，透過上式之修正，便可將現場量測資料施作溫度補償，以降低量測誤差。

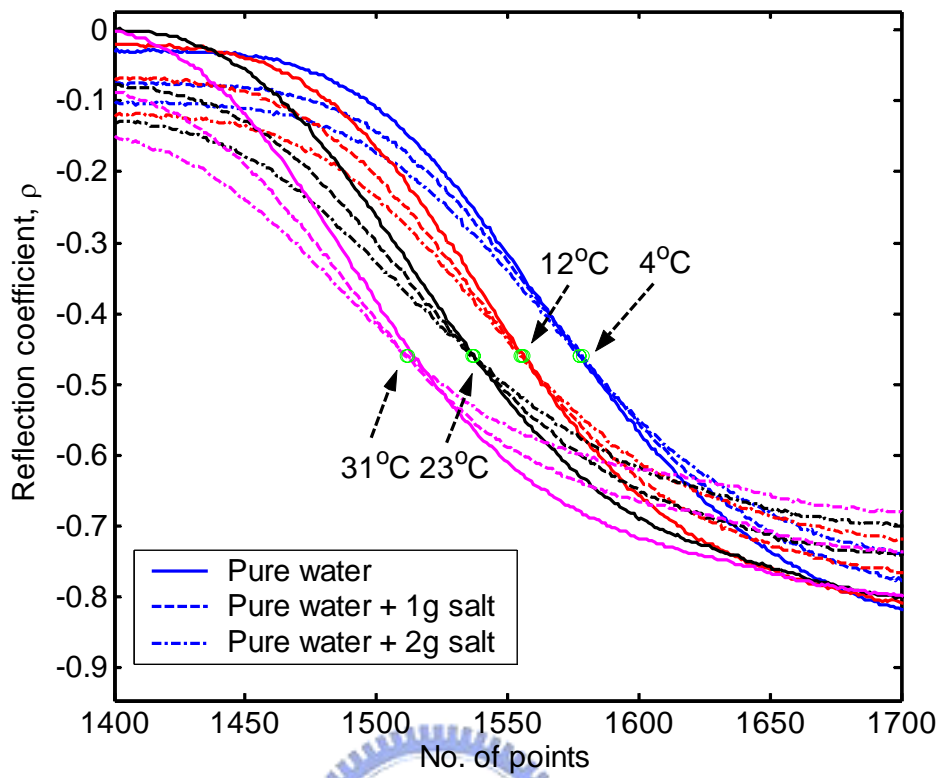


圖 4-21 溫度影響試驗原始波形

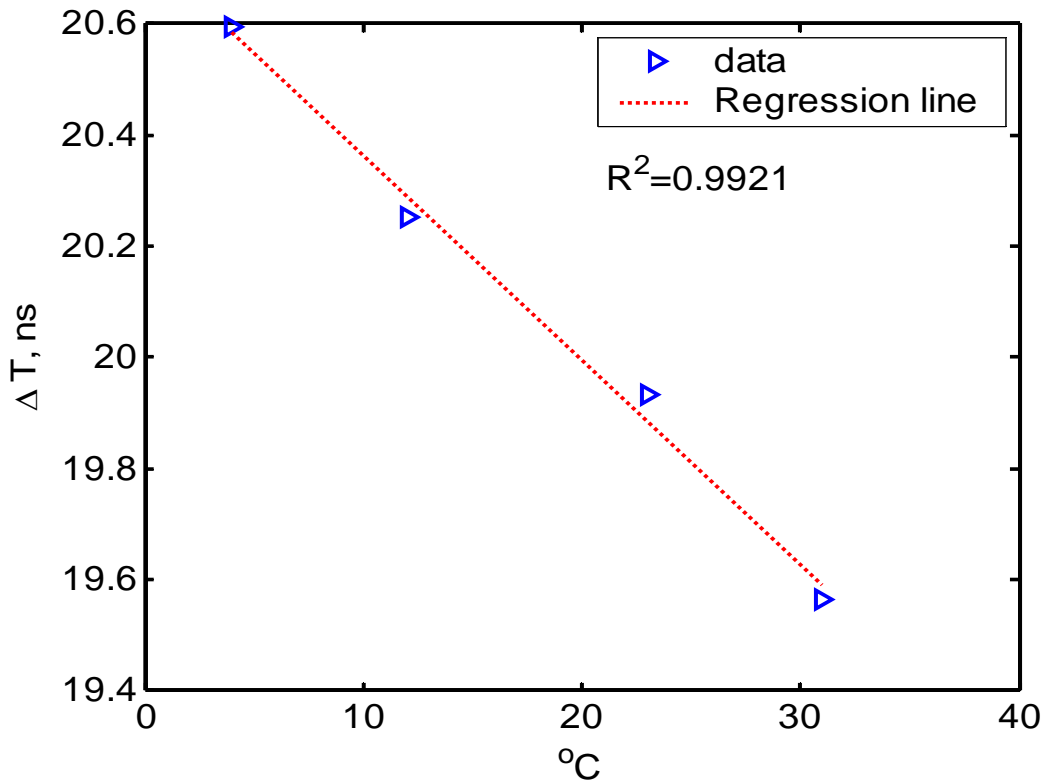


圖 4-22 溫度影響走時差分析回歸結果

4.2.5 土壤種類與粒徑影響

因土壤種類不同，主要差異在於其所組成之礦物及其粒徑大小，若水砂混合物係由不同土壤種類組成時，電學量測方法將勢必受到影響，因此本研究以石門水庫沉澱池之細料粉土(Shihmen sediment)、交通大學校園內紅土(NCTU red soil)及矽砂(Silica silt)作為土壤種類影響因子評估，以了解對量測結果之影響程度。

以先前研究結果最佳效能 Short-uncaoting 之感測器作為測試，分別取三種土樣通過 200 號篩(75 μm)之部分，試驗所採用之水質為 200 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)，施作感測器率定實驗，施作率定結果如圖 4-23 所示。結果顯示，當土壤種類不同時，主要為影響 TDR 量測結果之走時差，而造成率定關係之斜率改變，以此三種土樣結果比較，雖均取其通過 200 號篩(75 μm)之部分，其粒徑分佈圖如圖 4-24(為將過 200 號篩正規化之結果)，發現三種土樣過 200 號篩之粒徑分佈無相似性，且其細顆粒粒徑分佈範圍廣，而三種土壤率定結果顯示矽砂之率定結果較為穩定且其斜率較陡，而其他兩種土樣結果一致性稍差且斜率較緩。

以此三種土壤率定結果，推估電學方法受土壤種類將造成斜率量測誤差(以斜率最大與最小相比)約為 1.39 倍，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。因此，未來若以 TDR 施作量測時，對待測體泥砂之土樣施作適當的率定關係，便可將影響因素減至最

低。

一般天然河川常於洪水期間觀測其泥砂濃度之變化，以了解輸砂或產砂量。但此時河川之懸浮質粒徑分佈，可能因為流量或季節而有所變化，故若將量測系統應於河川上，則需探討在泥砂其顆粒粒徑大小是否將會造成 TDR 泥砂濃度量測上之影響。本研究於粒徑影響評估，係以交通大學校園內紅土作為探討對象，將其粒徑區分為小於 $75\mu\text{m}$ (#200)、 $75\sim 150\mu\text{m}$ (#200~#100)及 $150\sim 250\mu\text{m}$ (#100~#60)等三種，並分別於水質為 $200\ (\mu\text{S}/\text{cm})$ 施作濃度率定關係，試驗分析結果如圖 4-25 所示。由圖中可發現，濃度在 10 萬 ppm 之前，率定關係相當良好，以其回歸式之關係，可知其斜率誤差約為 1.04 倍；而濃度 10 萬過後所造成之量測誤差，可能因濃度較高，量測時致使濃度樣本失去其均勻性或因本實驗以乾篩方式取得不同之粒徑試體，可能尚含有一定比例的黏土含量，而成為影響量測誤差之主控因子。

由本研究結果顯示，以交通大學內紅土粒徑介於 $75\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$ ，評估之 TDR 量測系統受泥砂粒徑影響甚小，故此感測器應用於河川，將可提供一良好之觀測系統。

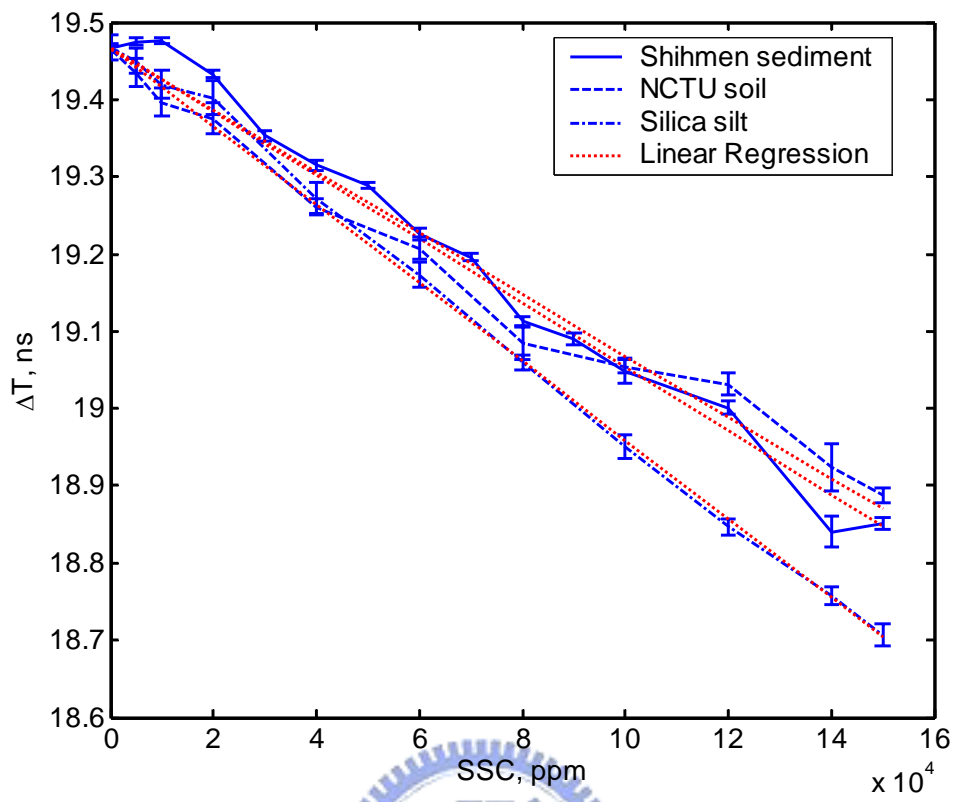


圖 4-23 土壤種類影響



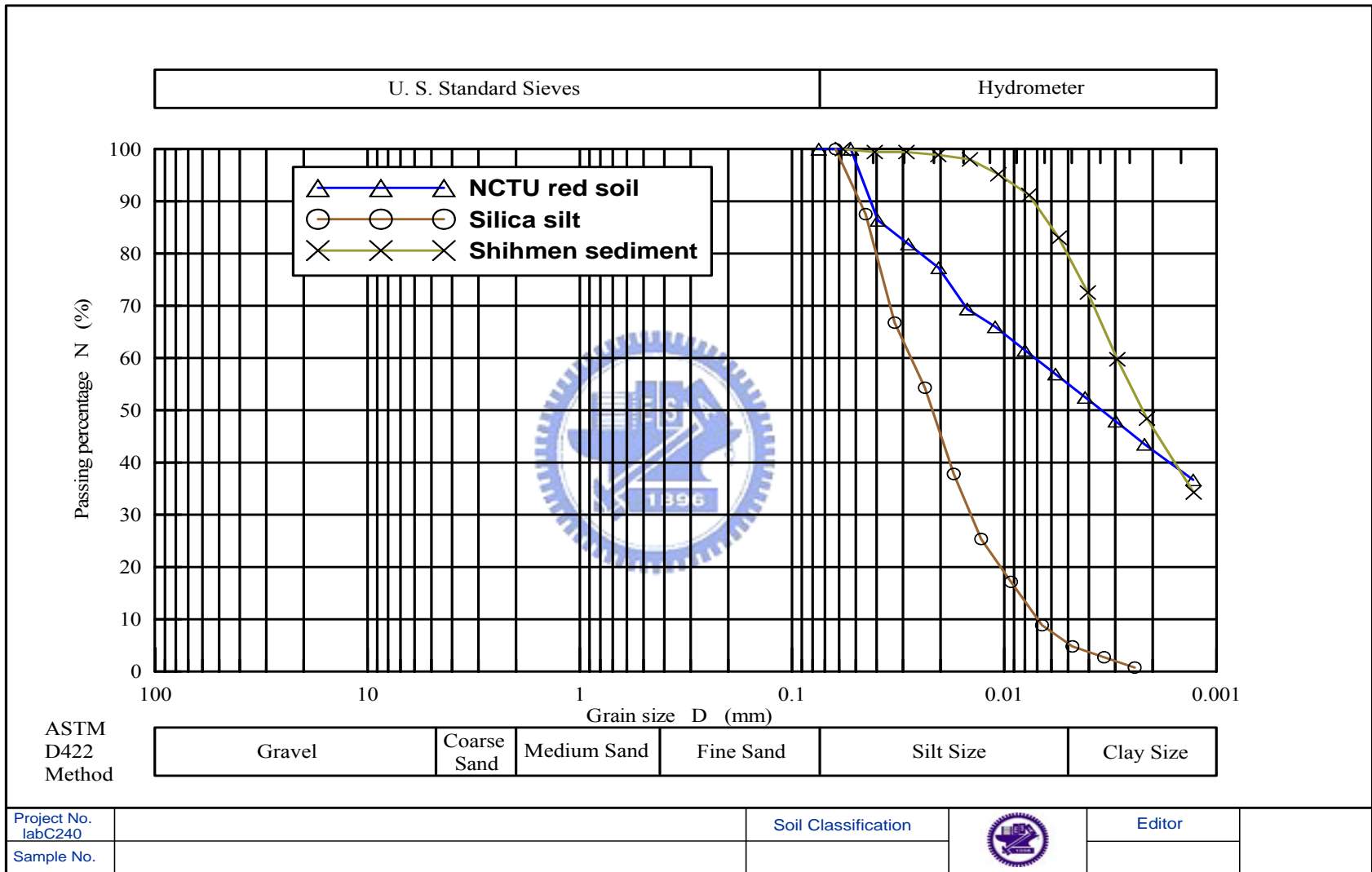


圖 4-24 土壤種類粒徑分佈圖

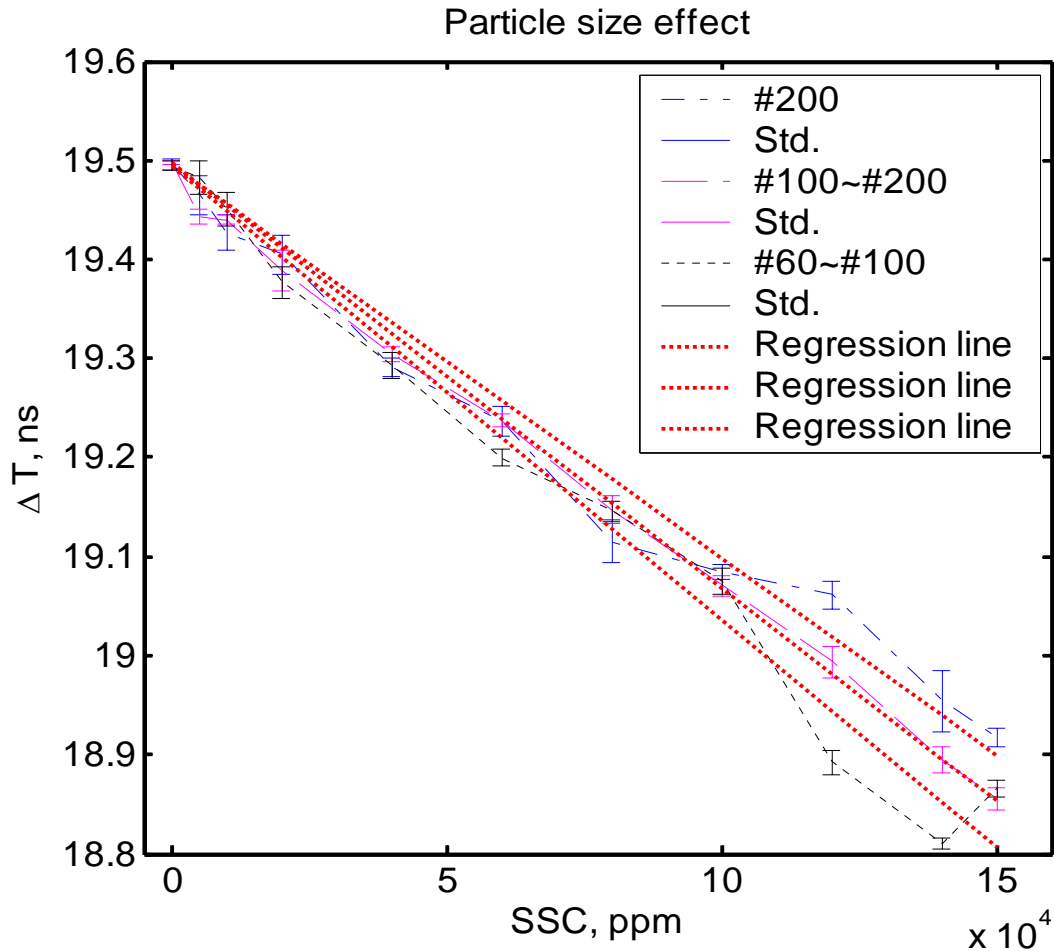


圖 4-25 土壤粒徑影響

4.2.6 水流流速影響

於泥砂濃度量測技術回顧中，Li et al. (2005)提出以電容方式量測泥砂濃度，其原理在於利用電磁波於電容結構中，當泥砂濃度增加時，輸出之電流容量與濃度之關係進行泥砂濃度量測。而泥砂濃度影響因子探討試驗結果中，認為在水流流速 0~2 m/s 下，感測器量測結果並未受影響，研判電磁波頻率高，其量測過程應不受水流速度影響。而本研究採用 TDR 同屬於電磁波量測技術，因此基於既有文獻結果，可研判 TDR 量測結果將不受水流速度影響。

4.3 光學及超音波泥砂觀測技術評估

本研究所提之 TDR 泥砂觀測技術評估，為與現今較常使用之間接泥砂濃度觀測方法比較，因此擬以光學與超音波量測技術作為其效能評估及限制之討論，詳細評估方式如各小節所述。

4.3.1 光學式泥砂觀測技術評估

為評估光學式於泥砂濃度量測之方法以及限制，採用市面使用較為廣泛之 YSI 600 OMS 濁度量測儀以及 D&A OBS-3+濁度量測儀進行測試。而使用之土樣則分別為矽藻土(diatomaceous earth)、交大紅土(NCTU red soil)、矽砂(Silica silt)以及石門水庫沈泥(shihmen sediement)，此四種土樣過標準篩兩百號之粒徑分佈如圖 4-26 所示。其中以石門沈泥之粒徑最小，交大紅土之粒徑分佈最廣。

本實驗之測試結果如圖 4-27 所示，上方為 YSI 600 OMS 之試驗結果，由圖中可得到 YSI 600 OMS 對於石門水庫沈泥以及矽藻土之濁度 (NTU)量測變異性大，資料判釋不易。交大紅土(NCTU red soil)、矽砂 (Silica silt)其粒徑又較為前兩者大，實驗一般經驗則認為交大紅土以及矽砂因粒徑大，有更容易沈澱之趨勢，將造成資料穩定性差，因此 YSI 600 OMS 實驗僅針對石門水庫沈泥以及細藻土進行測試，並初步研判 YSI 600 OMS 之量測變異性來源，可能在於其光學感測器量測之空間範圍小，對於河川變化較為快速之狀況下，YSI 600 OMS 適用性較差。

D & A OBS-3+ 之量測結果如圖 4-27 下方所示，相較於 YSI 600 OMS，試驗資料顯示 OBS-3+之濁度(FTU)量測結果穩定性較佳，但是如同 YSI 600 OMS，OBS-3+量測之結果對於土壤種類(或稱為粒徑大小)之率定結果差異性大，以石門水庫沈泥和矽砂為例，其兩者差異相距 2~3 倍，顯示光學量測技術除了泥砂濃度量測範圍低之外，也易受泥砂種類影響。

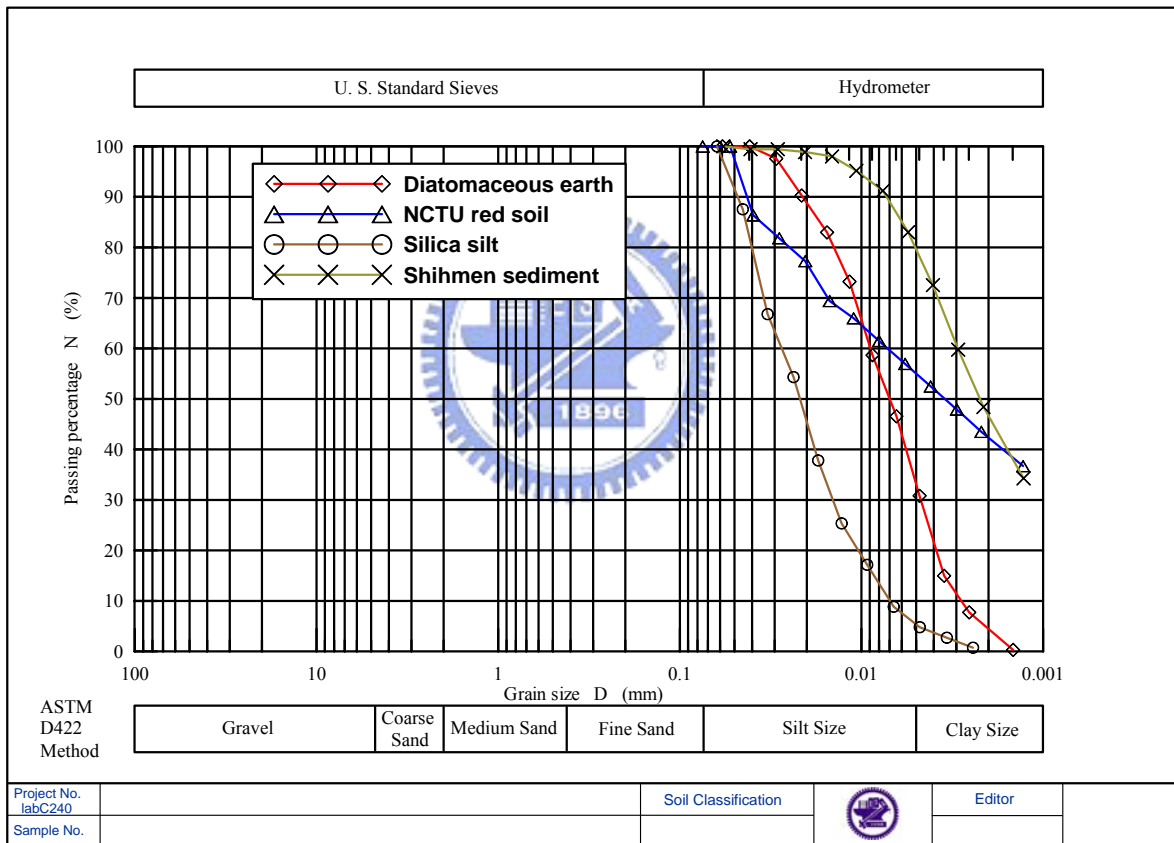


圖 4-26 試驗土樣粒徑分佈

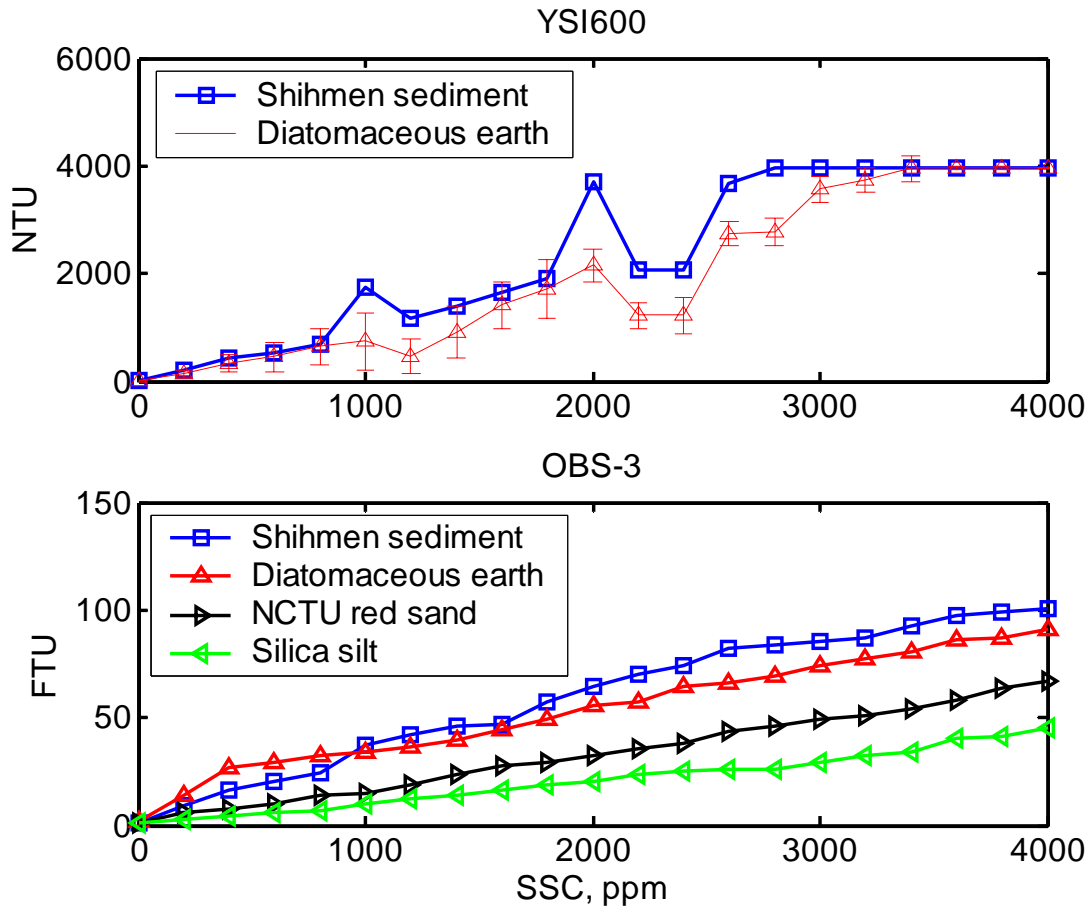


圖 4-27 光學式 YSI 以及 OBS 率定結果

4.3.2 超音波泥砂觀測技術評估

超音波傳輸衰減量測技術原本應用於污水處理廠之污泥濃度量測，其主要量測原理係利用一對超音波探頭，一端發射另一端接收超音波能量，藉以計算超音波於待測物體傳輸過程之衰減量，透過事先標定之衰減量與污泥含量關係，計算污泥濃度。目前工業用之超音波量測設備其最大泥砂濃度量測範圍可達到 10 萬 ppm，符合泥砂運移分析之需求，加上工業用之超音波量測設備採用模組化之金屬外殼，預估耐久性優於其他量測設備，因此列為進一步可行性評估的選項之一。

本研究利用此類超音波儀器進行測試，而測試之試體為通過 200 號篩之矽藻土(diatomaceous earth)、交大紅土(NCTU red soil)、矽砂(Silica silt)以及石門水庫沈泥(shihmen sediement)，其測試結果如圖 4-28 所示。其結果顯示，四種土樣率定結果均呈現線性分佈：然而土壤種類之影響程度大，以石門水庫沈泥及矽砂為例，其量測差異相距 10 倍以上，因此此類超音波儀器是否適用於台灣的河川條件，需要配合現地量測結果，以及現地率定曲線之建立，以做進一步的評估。

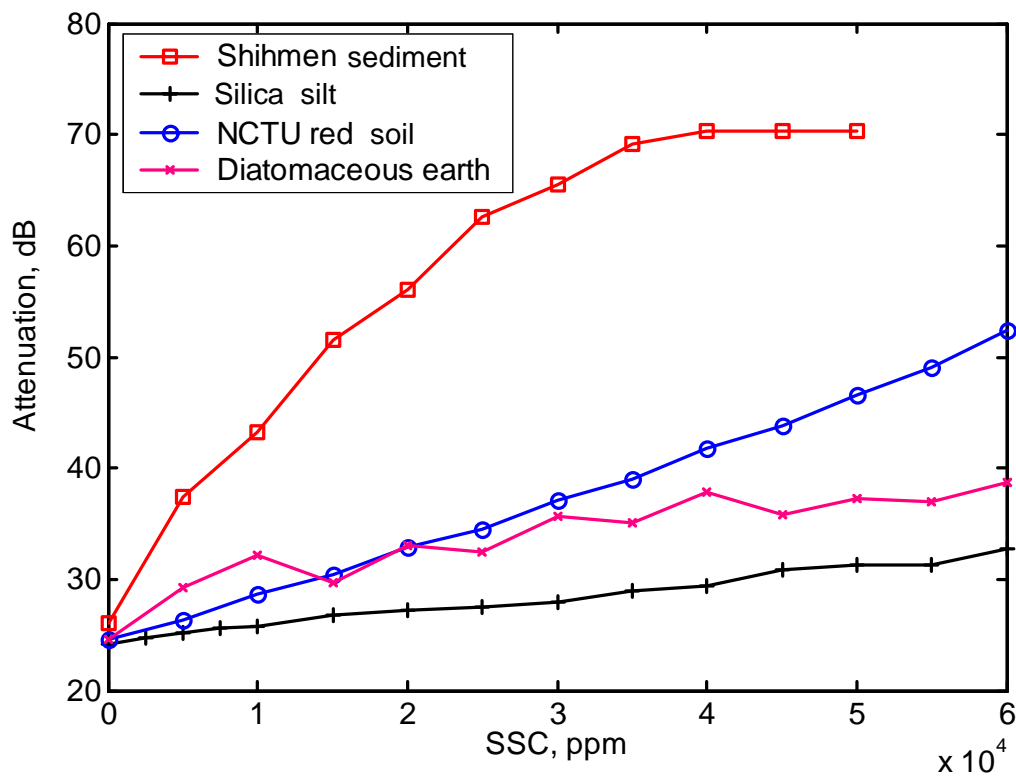


圖 4-28 超音波試驗率定結果

第五章 結論與建議

現有之現地泥砂濃度量測技術，均有其量測範圍限制及儀器本身耐久性問題，現今尚無一套有效之泥砂濃度自動觀測系統。而本研究利用時域反射法研發觀測泥砂濃度之技術，已有初步成果，以下將就本研究評估之結果做進一步之結論與建議。

5.1 結論

本研究所提之高泥砂濃度自動觀測系統，針對可適用於現地量測之最佳感測器影響因子評估結果，可歸納為以下幾點：

1. 儀器本身之解析能力與量測誤差間之變異性並無隨著擷取時間解析度增加而趨於較佳之狀態。因此，為於資料處理方便，建議選擇適合之分析之視窗大小作為量測之用。
2. 參考線法於量測變異性評估結果，顯示分析之量測誤差有較切線法小的優勢，故可作為 TDR 感測器走時差之分析方法。
3. 感測器最佳效能評估與分析結果顯示，最佳之感測器為 Short-uncaoting 型式，以石門水庫沉澱池之沈泥 (Shihmen sediment) 且通過 #200 (0.074mm) 號篩之土樣率定，所得之量測誤差的平均值 4296ppm、標準偏差 955ppm、最大誤差 14825ppm，重複性量測最大誤差量則僅為為 3655ppm。

4. 感測器長度增長之測試結果，顯示所量得之量測誤差的平均值 5352ppm、標準偏差 987ppm、最大誤差 14420ppm，重複性量測最大誤差量為 16866ppm，與 0.3m 比較後並無實際提升量測靈密度之效能。因此，應用於泥砂濃度觀測之感測器長度，建議以 0.3m 為主。
5. 泥砂濃度觀測受水質鹽度影響評估結果，若以末端短路處理之感測器量測，於不同水質量測時，其底部負反射方波之中間點之走時幾乎不受水質影響，並搭配採用參考線分析法，便可有效去除水質鹽度對走時分析的影響。本研究測試結果，於水質在 100~300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 下，若忽略水質影響，最大量測誤差為 24559 ppm，而量測重複性最大誤差則為 5787 ppm，誤差之平均值為 4300 ppm，誤差之標準偏差為 1011 ppm，量測誤差尚在容許之範圍內。因此，將可適用於一般現場濃度觀測用。
6. 溫度影響效應試驗結果顯示，發現溫度對 Short-uncaoting 感測器之走時差影響為線性關係。因此，若於現地量測時，可據此量測水的溫度，以補償方式進行溫度影響修正，將可減少量測誤差之發生。
7. 土壤種類率定影響評估結果，顯示相較於現有量測儀器(如光學及超音波)量測受土壤種類影響很小。因此，未來若以 TDR 施作

量測時，僅需對待測體泥砂之土樣施作適當的率定關係，便可將量測誤差因素減至最低。

8. 本研究評估 TDR 泥砂濃度觀測系統受粒徑影響，結果顯示以交通大學內紅土粒徑介於 $75\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$ 間之粒徑，影響量測誤差甚小。由於河川之懸浮質之粒徑分佈可能因為流量或季節而有所變化，故以此系統若應用於河川觀測，將有其優勢。

5.2 建議

1. 本研究之試驗設備係採用水位能浸滿感測器之容器，於外部利用攪拌器將水砂混合物攪拌均勻後，進行率定試驗。而當施作土壤種類或泥砂粒徑較大(大於 $75\mu\text{m}$) 時，會因樣本不易均勻且易發生沈降現象，造成量測之誤差，未來若可進行試驗設備改良，設計以循環水系統，便可將實驗量測誤差減至最低。
2. 可進一步地利用 TDR 頻譜分析方法，透過進階之訊號分析原理，藉由 TDR 頻譜上之訊號差異，也許能給予更多資訊以作為影響因子之校正方法。

參考文獻

1. 林志平，鐘志忠，張育嘉，楊錦釗，葉克家，洪銘堅，曾君敏(2006)，「高泥砂濃度觀測：時域反射技術」，第十五屆水利工程研討會，A-194~201.
2. Campbell, C.G., Laycak, D.T., Hoppes, W., Tran, N.T., and Shi, F. G. (2004), "High concentration suspended sediment measurements using a continuous fiber optic in-stream transmissometer, Lawrence Berkeley National Laboratory. Paper LBNL-55272. <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-55272>.
3. 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, Aug 4, p 1050-1052.
4. 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.
5. D&A Instrument Company, <http://www.d-a-instruments.com/>.
6. Fujiyasu, Y., Pierce, C. E., Fan, L., and Wong, C. P. (2004), High dielectric insulation coating for time domain reflectometry soil moisture sensor. *Water Resour. Res.*, Vol. 40, W04602.
7. Jon M., Wraith, and Dani Or. (1999), Temperature effects on soil bulk permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resources Research*, Vol. 35, pp. 361-369.
8. Klein, L. A., and Swift C. T. (1997), An Improved Model for Dielectric Constant of Sea Water at Microwave Frequencies. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 25, pp. 104-111.
9. Li, X., Lei, T., Wang, W., Xu, Q., and Zhao, J. (2005), Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentration. *Catena* 60: 227-237.
10. Lin, C.-P. and Tang, S.-H. (2005), Development and calibration of a TDR extensometer for geotechnical monitoring, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 5, Paper ID: GTJ12188.
11. Nichol, C., Beckie, R., and Smith, L. (2002), Evaluation of uncoated and

- coated TDR probes for high electrical conductivity systems. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1454–1465.
12. Pepin, S., N.J. Livingston, W.R. Hook., (1995), Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Science Society of America Journal*, v 59, n 1, p 38-43
 13. Persson, M. (1997), Non-destructive measurements of solute transport in unsaturated zone using time domain reflectometry, Rep. 3212, Dep. of Water Resour. Eng., Lund Univ., Lund, Sweden.
 14. Starr, G. C. (2005), Basal sediment concentration measurement using a time domain reflectometry method. *Transactions of the ASAE*. v 48(1). P205-209.
 15. Stogryn, A. (1971), Equations for calculating the Dielectric Constant of Salinity Water, *Microwave Theory and Techniques*, Vol. 19, pp. 733-736.
 16. Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980), Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16, 574–582.
 17. Topp, G.C., Yanuka, M., Zebchuk, W.D., Zegelin, S. (1988), Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.* 24, 945–952.
 18. Topp, G. C., Zegelin, S., and White, I. (2000), Impacts of the Real and Imaginary Components of Relative Permittivity of Time Domain Reflectometry Measurement in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 64, pp. 1244-1252.
 19. Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A. K. Fung. (1986), *Microwave Remote Sensing : Active and Passive*, Vol.III, Form Theory Theory to Applications, Artech House, Norwood, Mass.
 20. Wren, D.G., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R. A., and Derrow, R. W. (2000), *Field Techniques for Suspended-Sediment Measurement*, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 126, No. 2, pp. 97-104.
 21. Wren, D. G. and Kuhnle, R. A. (2002), “Surrogate techniques for suspended-sediment measurement,” *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, Reno, NV.