

國立交通大學土木工程學系碩士班

碩士論文

適用於橋樑沖刷監測之 TDR 感測器研發

**Developments of Time Domain Reflectometry Sensors Suitable for  
Bridge Scour Monitoring**



指導教授：林志平 博士

研究生：翁玉紋

中華民國 99 年 7 月

# 適用於橋樑沖刷監測之 TDR 感測器研發

## Developments of Time Domain Reflectometry Sensors Suitable for Bridge Scour Monitoring

研究生：翁玉紋

Student: Yu-Wen Weng

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 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

## 摘要

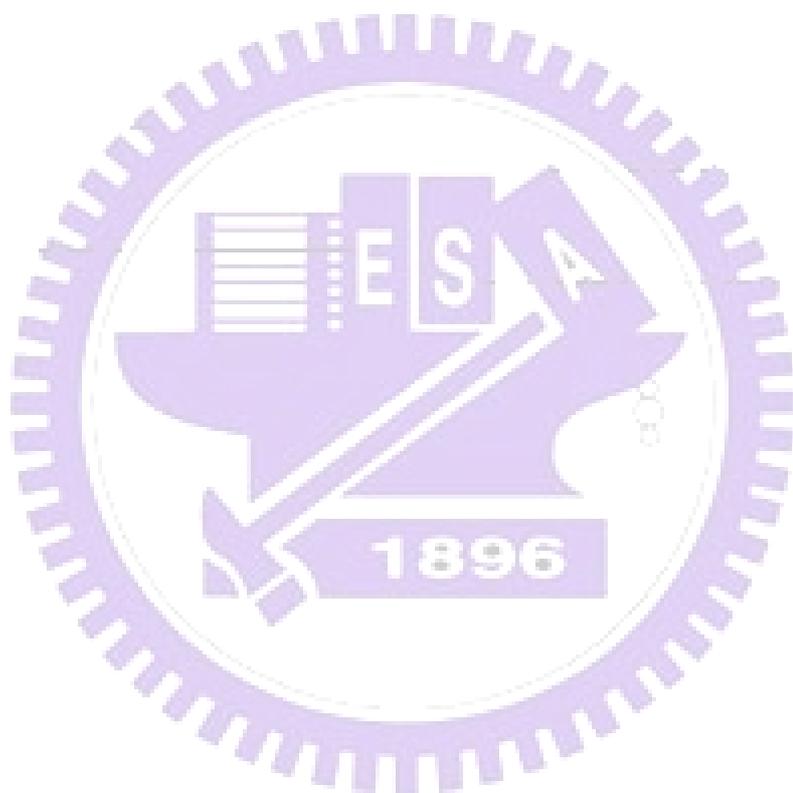
近年來，因氣候變遷關係，台灣地區洪水災害發生頻率上升，加上台灣地形陡峭，河川又多屬狹窄急短的型態，使得河川沖刷機制非常旺盛。嚴重的沖刷常導致橋樑基座淘刷以致橋樑倒塌，不僅日後維護整治經費高，更危及了民眾生命安危。而沖刷監測除可輔助橋梁安全監測使用外，更能提供相關沖刷模式率定使用，然而現階段運用在監測橋樑沖刷雖有許多各式各樣的儀器，除了需具備有即時監測功能外，仍有洪水沖刷下之耐久性實務問題需要著手克服。

本研究將利用時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 傳輸線式之優勢，研發適用於土壤與岩石河床之感測器，進而量測沖刷資訊。第一階段實驗以模擬鑽桿型式之感測器研發為主，係利用金屬鑽桿配合槽溝施作，以埋設另一導體形成導電路徑。其實驗結果定性發現隨槽溝開放的角度及內外導體的間距加大，量測結果的靈敏度也跟著提升。第二階段進行鋼索式之感測器研發為主，其實驗結果發現，導體的材質影響能量的傳遞、導體的大小配置決定感應的範圍、回填料的粒徑大小決定感測器周圍回填材之土壤固體之體積含量比例，皆是影響量測結果靈敏度之因素。綜合多項實驗結果及現地安裝之考量，本研究將採用鋼索式的感測器以進行現地試驗的探討。

為配合定量分析沖刷行為，本研究基於相關文獻初步提出全走時分析法，然而受限於絕緣感測器量測效能與參數率定方式，本研究另外提出土水段走時分析方法，並建議配合絕緣感測器於不同材質下電磁波走速率定模式，建置絕緣感測器現地率定方法與標準沖刷分析程序。因此本研究基於上述研究成果，初步於東勢大橋進行現地試驗，並設置即時監測系統，以能有效期望紀錄洪水所造成之刷深與回淤深度，初步成效良好，但仍須進一步

修正現場波形穩定性，期以提供自動化資訊予橋樑管理者。

關鍵字：時域反射法(TDR)、橋樑沖刷、介電常數



## ABSTRACT

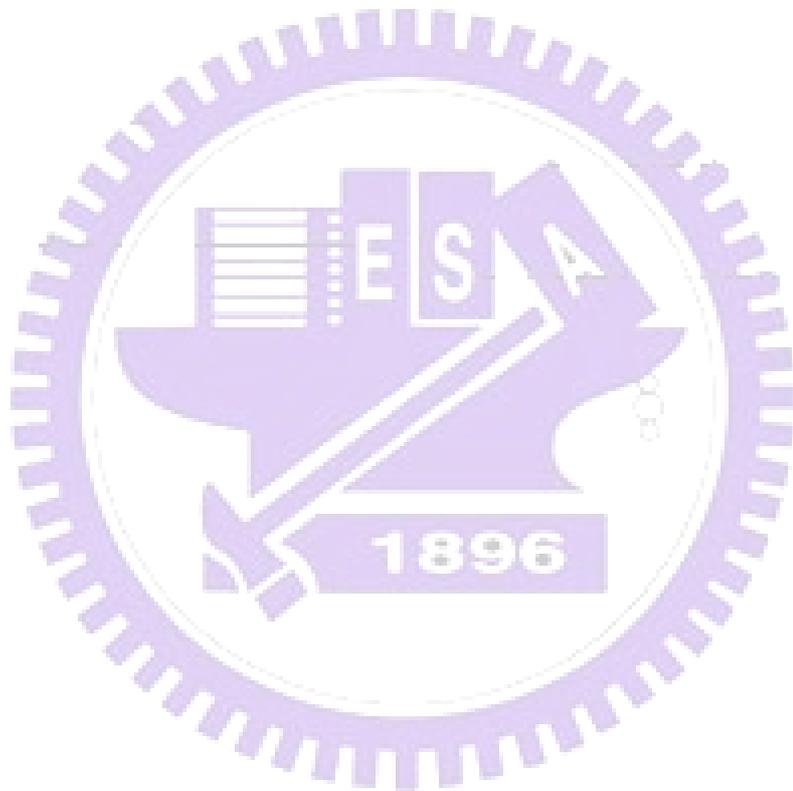
Rivers in Taiwan have features of narrow shape, deep slope, and high flow velocity, aggravating bridge scour. Severe scouring would decrease the pier bearing capacity such that the bridge may collapse, and this failure will not only increase remediation cost, but also endanger the safety of people's lives. To minimize the aforementioned influences, the bridge scour monitoring provides a way of bridge safety assurance, it also supports the in-situ verifications of scouring mechanism model calibration. Many kinds of instruments or techniques are proposed for the bridge scouring monitoring; however, a real-time monitoring method with high durability still needs to be developed.

This study used Time Domain Reflectometry (TDR) technique to develop sensor applicable to both soil and rock scour. The first phase of the sensor development was aimed to work with drill rods. The TDR drill rod sensor is composed of metal drill pipe with a ditch that buried another conductor for the formation of sensing waveguide. Experimental results indicated that with more open angle of ditch and larger spacing between two conductors, the sensitivity of the measurement increases. The second phase of the sensor development was the wire type. Results revealed that the conductor material affects energy transfer, and the conductor size of the configuration decides sensing range. Furthermore, the particle size of the backfill material in borehole also determines measurement sensitivity.

Quantitative analysis of TDR scouring was also proposed in this study. The scouring estimation with acceptable accuracy was accomplished by interpreting the travel time of the soil-water section, and with calibrated electromagnetic wave velocities of the sensor in materials. Finally, this study used a TDR wire type sensors and corresponding analysis method for in-situ testing in the Tung-Shih Bridge. The recorded scouring data of bridge piers is preliminarily

verified. However, modified construction procedure is suggested to stabilize the measured waveforms for data reduction.

**Keywords:** Time Domain Reflectometry (TDR), bridge scouring, dielectric permittivity



## 誌謝

本論文得以順利完成，承蒙指導教授林志平博士於研究所兩年的求學期間悉心指導，給予學生在論文研究以及專業知識上的諸多指導，使學生得以突破研究瓶頸並獲得學識上的精進，此外，於求學態度與待人處世方面亦給予學生許多啟發，使我在研究所的求學期間更加的成長、茁壯，在此致上最誠摯的謝意。

求學期間，承蒙廖志中教授、潘以文教授、黃安斌教授、方永壽教授與單信瑜教授於學識上的指導，在此致上萬分謝意。

口試期間，潘以文教授、廖志中教授與鐘志忠博士給予本論文許多寶貴的意見與建議，使本文得以更加完善，在此表示由衷的感謝。

研究期間，幸蒙志忠、俊宏、柏林、文欽、偉晉、浚生、謝玉、哲毅、永政與智棟等學長的協助，尤其是志忠與俊宏學長的諸多幫助，實在感激不盡。同門同學子奕與儒錚於研究上的協助，以及其他研究所期間同甘共苦的大地組同學們，真的很高興能認識你們這群朋友。還要感謝裕祥、學弟士輝、王凱、逸倫與新進學弟在實驗上的幫助，使每個實驗得以如期順利完成，以此謝文獻上致意。

最要感謝的是培育我長大的父母與姐弟，這二十幾年來如果沒有家人的支持就沒有今天的我。謹以此文獻給我最愛的大家，謝謝你們。

# 目錄

摘要 .....	i
ABSTRACT .....	iii
誌謝 .....	v
圖目錄 .....	viii
表目錄 .....	xii
第一章 前言 .....	1
1.1. 研究動機 .....	1
1.2. 研究目的 .....	3
1.3. 研究流程 .....	4
第二章 文獻回顧 .....	5
2.1. 橋墩沖刷機制 .....	5
2.2. 現有的橋樑沖刷監測技術回顧 .....	7
2.2.1 人工測讀法 .....	8
2.2.2 自動化埋入式感測 .....	10
2.2.3 非接觸式量測方法 .....	16
2.3. 時域反射技術應用於沖刷量測之回顧 .....	18
2.3.1 時域反射技術基本原理 .....	18
2.3.2 TDR 埋入式感測器於沖刷量測之研發 .....	19
2.3.3 TDR 橋墩沖刷訊號分析方法 .....	21
2.3.4 TDR 沖刷量測問題評析 .....	25
2.4. 沖刷量測方法綜合評析 .....	25
第三章 研究方法 .....	28
3.1. TDR 沖刷感測器之改良與評估 .....	28
3.1.1 感測器改良設計 .....	28

3.1.2	室內泥砂沖刷/淤積模擬試驗配置說明 .....	29
3.2.	TDR 全走時訊號分析方法改良 .....	34
3.3.	現場測試規劃 .....	37
第四章	試驗結果與討論 .....	41
4.1.	TDR 沖刷量測效能評估與影響因子探討 .....	41
4.1.1	桿式感測器配置探討 .....	41
4.1.2	導體間的角度影響 .....	45
4.1.3	纜式感測器配置探討 .....	48
4.1.4	纜式感測器各種因子評估 .....	50
4.1.5	室內試驗綜合評析 .....	53
4.2.	TDR 沖刷分析方法驗證 .....	53
4.2.1	無絕緣感測器之 TDR 全走時分析 .....	53
4.2.2	絕緣感測器之 TDR 全走時分析 .....	55
4.2.3	感測器土水段走時分析方法驗證 .....	59
4.2.4	感測器於不同介質之電磁波傳速度率定方法建議 .....	63
4.3.	TDR 橋墩沖刷之現場初步安設說明 .....	68
4.3.1	裝設流程說明 .....	68
4.3.2	現地施工狀況 .....	70
4.3.3	現地沖刷量測檢討 .....	77
第五章	結論與建議 .....	83
5.1.	結論 .....	83
5.2.	建議 .....	84
參考文獻	.....	86
附錄一	各元件樣式 .....	88

## 圖目錄

圖 1.1-1 高屏大橋 2000 年 8 月斷橋情形 .....	2
圖 1.1-2 后豐大橋 2008 年 9 月斷橋情形 .....	2
圖 1.1-3 雙園大橋 2009 年 8 月 09 日斷橋情形 .....	2
圖 1.3-1 研究流程圖 .....	4
圖 2.1-1 局部沖刷、束縮沖刷與一般沖刷示意圖(中興工程顧問公司, 2009).....	6
圖 2.1-2 橋墩(基)或河道窄縮引致之束縮沖刷示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2003) .....	6
圖 2.1-3 局部沖刷示意圖(中華顧問工程司, 2009).....	7
圖 2.1-4 局部沖刷與回淤現象(Dowding and Pierce, 1994) .....	7
圖 2.2-1 重力鋼棒沖刷測深計之示意圖(a)正面圖示意圖(b)側面示意圖(經濟部水利規劃試驗所 2004) .....	9
圖 2.2-2 人工測讀磁性滑動環示意圖(Lagasse et al. 1997) .....	10
圖 2.2-3 自動化測讀磁性滑動環示意圖(Lagasse et al. 1997) .....	12
圖 2.2-4 埋入式無線電波漂浮裝置示意圖(Suzuki and Shimaura 2000) .....	13
圖 2.2-5 壓電薄膜示意圖(Lagasse et al. 1997) .....	13
圖 2.2-6 兩種 FBG 沖刷感測形式示意圖(a)懸臂樑式(b)埋入式光纖光柵感測元件(Lin et al. 2005; Lin et al. 2006) .....	14
圖 2.2-7 電極法示意圖(Suzuki and Shimaura 2000) .....	14
圖 2.2-8 數位感測式示意圖(林宜清, 中興大學土木系 2009) ....	15
圖 2.2-9 振動感應式示意圖(林宜清, 中興大學土木系 2009) ....	15

圖 2.2-10 人工測讀聲納示意圖 (經濟部水利規劃試驗所 2004)	17
圖 2.2-11 自動化聲納示意圖 (Lagasse et al. 1997)	18
圖 2.2-12 GPR 探測與收錄反射訊號歷時資料示意圖(Millard, et al, 1998)	18
圖 2.3-1 TDR 量測系統	19
圖 2.3-2 TDR 感測桿示意圖 (Yankielun and Zabilansky 1999)	20
圖 2.3-3 TDR 感測纜線示意圖 (Dowding and Pierce 1994)	20
圖 2.3-4 TDR 沖刷感測器反向裝置(楊培熙,2003)	22
圖 2.3-5 TDR 沖刷感測器正向裝置(楊培熙,2003)	22
圖 2.3-6 水砂界面沉降量測模擬示意圖(Yu and Yu 2007)	24
圖 2.3-7 TDR 輸出訊號示意圖	24
圖 2.3-8 TDR 訊號隨不同沉降量之變化(Yu and Yu 2007)	25
圖 3.1-1 不同型式之 TDR 橋墩沖刷量測感測器示意圖(a)桿式感測器(b)纜式感測器	29
圖 3.1-2 室內泥砂沖刷/淤積模擬試驗實驗配置示意	32
圖 3.1-3 PCTDR 操作介面(Campbell Scientific TDR100 使用手冊)	32
圖 3.1-4 TDR100 反射儀(Campbell Scientific TDR100 使用手冊)	33
圖 3.2-1 全波型走時示意圖	37
圖 3.3-1 東勢大橋結構圖	38
圖 3.3-2 TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖	39
圖 3.3-3 (a)東勢大橋 P3 段安裝示意圖(b)東勢大橋 P7 段安裝示意圖	40
圖 4.1-1 型式一感測器配置圖	42

圖 4.1-2 型式一不同水位之測試結果 .....	42
圖 4.1-3 型式一不同土層厚度實驗結果 .....	43
圖 4.1-4 型式二(a)感測器配置(b)不同土層厚度實驗結果 .....	43
圖 4.1-5 型式二末端波型觀測 .....	44
圖 4.1-6 型式三感測器配置 .....	44
圖 4.1-7 型式三不同土層厚度實驗結果 .....	45
圖 4.1-8 (a)型式二感測器配置圖(b)置入硬塑鋼之 90 度感測器配置 圖(c)不同水位實驗(d)不同土層厚度實驗 .....	46
圖 4.1-9 槽溝角度 120 度及 135 度之配置示意圖 .....	47
圖 4.1-10 槽溝角度 160 度及 180 度之配置示意圖 .....	47
圖 4.1-11 電纜配置示意圖 .....	48
圖 4.1-12 型式一不同土層厚度實驗結果 .....	49
圖 4.1-13 型式二鋼索加包膜銅線 .....	49
圖 4.1-14 改變導體材質結果比較(a)包膜銅線(b)包膜鋼索 .....	51
圖 4.1-15 改變無絕緣鋼索大小(a)直徑 5.8mm(b)直徑 9.3mm (c)直 徑 16mm .....	51
圖 4.1-16 改變包膜鋼索之大小(a)直徑 3.3mm(b)直徑 2.5mm ....	51
圖 4.1-17 回填料粒徑約 0.5cm~2cm 之碎石之實驗結果 .....	52
圖 4.1-18 (a)能量損失探討(b)感測器實體 .....	52
圖 4.1-19 現地所採用之感測器型式 .....	53
圖 4.2-1 無絕緣感測器水位量測結果 .....	54
圖 4.2-2 無絕緣感測器土層厚度量測結果 .....	55
圖 4.2-3 利用空氣段走時差異以計算量測水位結果 .....	57
圖 4.2-4 利用純水段計算量測水位結果 .....	57
圖 4.2-5 假設當 $SS=0.5$ ，改變不同 $n$ 值所得之土層厚度分析結果	

.....	58
圖 4.2-6 假設 $n=1$ ， $SS=0.1$ 改變參考波型所得之土層厚度分析結果.....	58
圖 4.2-7 $SS=0.1$ 固定土層厚度變化水位，改變不同參考波型之演算.....	59
圖 4.2-8 假設 $n=1$ ，不同 $SS$ 估算之量測值與實際值之差異比較.....	61
圖 4.2-10 假設 $n=1/2$ ，不同 $SS$ 估算之量測值與實際值之差異比較.....	62
圖 4.2-12 假設 $n=-1$ ，不同 $SS$ 估算之量測值與實際值之差異比較.....	63
圖 4.2-13 走時演算示意圖.....	66
圖 4.2-14 感測器之空氣速度.....	66
圖 4.2-15 感測器之純水速度.....	67
圖 4.2-16 感測器之土水混合速度.....	67
圖 4.3-1 現地安裝流程圖.....	70
圖 4.3-2 TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖(P7 上游側).....	74
圖 4.3-3 P7 下游側(TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖).....	75
圖 4.3-4 P3 下游側(TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖).....	76
圖 4.3-5 現地 P7 波型示意圖.....	79
圖 4.3-6 現地 P3 波型示意圖.....	80
圖 4.3-7 東勢 P7 現地資料.....	81
圖 4.3-8 東勢 P3 現地資料.....	82

## 表目錄

表 2.4-1 各項量測系統之優缺點比較.....	27
表 3.1-1 試驗砂基本物理性質.....	33
表 3.1-2 TDR 反射儀規格特性表(Campbell Scientific TDR100 使用 手冊).....	34
表 4.1-1 改變槽溝角度之靈敏度判釋結果.....	46
表 4.1-2 電纜與鋼索試驗結果.....	49
表 4.1-3 纜式因子實驗結果.....	50
表 4.2-1 參考波型.....	54
表 4.2-2 各參數標定結果.....	56
表 4.2-3 Direct Lab Calibration of Velocity.....	65
表 4.2-4 Calibration by Velocity Formulation.....	65
表 4.3-1 P7 上游側現地施工狀況.....	71
表 4.3-2 P7 下游側現地施工狀況.....	72
表 4.3-3 P3 下游側現地施工狀況.....	73
表 4.3-4 現地標定結果.....	79

# 第一章 前言

## 1.1. 研究動機

2000 年 8 月碧利斯颱風過境，外表看似堅固的高屏大橋轉瞬間應聲倒塌，如圖 1.1-1，致使數十人受傷就醫。經過專家的調查後發現其肇因乃橋墩基礎沖刷掏空基礎所致。2008 年 7 月卡玫基颱風及鳳凰颱風相繼過境台灣，9 月 14 日，強烈颱風辛樂克在中台灣降下超大豪雨，水位接近警戒線位置，被公路總局列為危橋的后豐大橋，往后里方向的路段未及封閉，橋墩突然傾斜，約有 40 公尺長，13.5 公尺寬的路面坍塌，如圖 1.1-2，造成兩死四失蹤的悲劇（范文綱，2009）（行政院農委會水土保持局）。

隨著現今氣候變遷，暴雨次數也日益漸增，近年在 8 月 8 日發生的那場 88 水災中，全台受損橋梁高達 120 座，遠超過過去天災的紀錄，也因此橋樑的即時沖刷監測越來越重要，而目前所應用於橋樑沖刷監測之監測系統種類繁多，但面對洪水無情的摧殘下，眾多感測系統所裝置的感測元件無一不受到漂流木及大石頭撞擊之嚴峻的考驗。因此本研究認為若能夠打造耐用性佳之感測器並獲取即時沖刷監測資訊，對於用路人的安危，便可大大的提升保障。



圖 1.1-1 高屏大橋 2000 年 8 月斷橋情形



圖 1.1-2 后豐大橋 2008 年 9 月斷橋情形



圖 1.1-3 雙園大橋 2009 年 8 月 09 日斷橋情形

## 1.2. 研究目的

綜合多位學者之研究，當外力作用大於橋墩基礎的承載力時，橋墩可能會下陷、傾斜以及側移，更嚴重的可能會倒塌。橋樑橋墩受到洪水的沖刷、淘空，導致基樁裸露和覆土高程降低，基樁與土壤之間的摩擦與反力阻抗減少，大大降低了基樁的側向承載力，因而產生過大的側向位移以致橋樑的毀壞(黎杰倫，2006)。

台灣地形陡峭且具有多颱風特性，加上河川多屬狹窄急短的型態，因此沖刷機制非常旺盛。嚴重的沖刷造成河道流路變遷及淘刷橋樑基座，以致橋樑倒塌，不僅日後維護整治經費高，更危及了民眾生命安危。而現在既有沖刷監測包含目視檢查、人工移動、固定點自動化監測等，其共通缺點皆是感測器上之感測元件在洪水沖刷下耐用性受到考驗，且部份監測方法無法獲得回淤資訊，造成工程上的誤判。時域反測法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 近年來在沖刷監測上也有部份成果，但其所監測用之感測器也同樣有耐用性及實務安裝上的問題以需進一步克服，因此，本論文將利用 TDR 傳輸線式之優勢，研發無元件且適用於河床之感測器以增加其耐用性，以量測橋樑沖刷及回淤情況，並透過網路的便利，即時提供最新資訊，俾利管理者進一步判斷橋樑整體之安危，避免釀成更大的傷害。

### 1.3. 研究流程

本論文的研究流程進行如下圖 1.3-1，首先進行文獻回顧中，以瞭解目前橋墩沖刷量測方法，以及其可能問題與需進行改善之處，接著本研究企圖基於時域反射法（Time Domain Reflectometry, TDR）技術，研發不同型式的感測器，並找出影響量測結果之因子，最後決定感測器最佳型式，並將本論文所獲得之結果與實務結合，進行現地安裝監測。

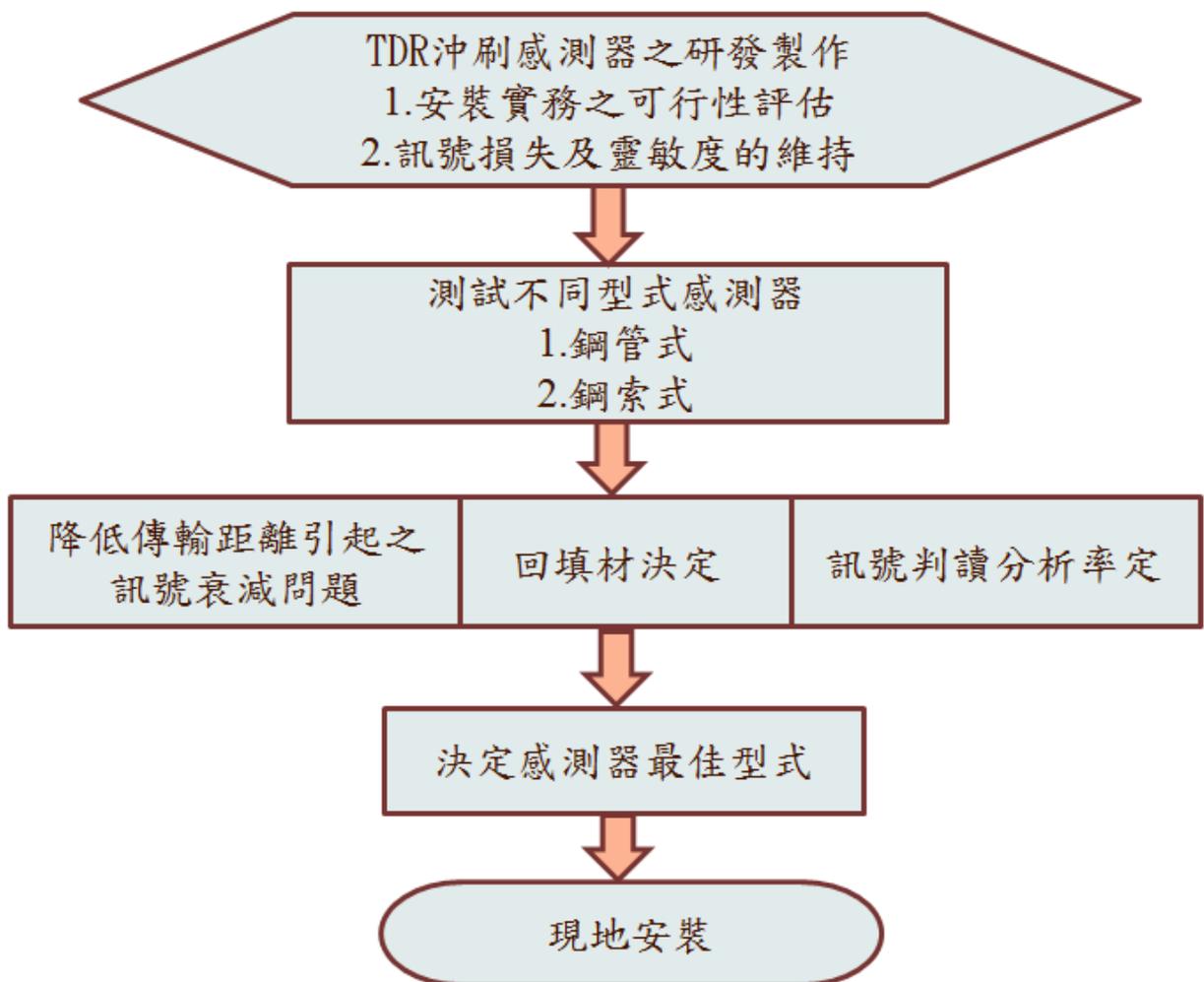


圖 1.3-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1. 橋墩沖刷機制

一般而言，河床總刷深量主要有三項作用組合而成（Richardson and Davis 2001），即一般沖刷、橋墩(台)或河道窄縮之束縮沖刷及橋墩(基)局部沖刷，由圖 2.1-1 所示。

1. 一般沖刷：相當長之時間尺度(通常歷經數年以上)之水流沖刷下，沖刷所造成之較長河段高程下降的情形，此種現象稱為一般沖刷 (general scour)。
2. 束縮沖刷：因跨河構造物或河道窄縮使得河道通水寬度縮減，迫使橋孔(或束縮段河道)間的單寬流量與流速加大，造成橋墩基礎(或束縮段河道)間產生束縮沖刷(contraction scour)效應，圖 2.1-2 所示。
3. 局部沖刷：橋墩(基)的存在對水流產生局部阻礙或干涉作用，造成橋墩(基)周遭河床形成局部刷深之沖刷坑的情形，此種現象稱為橋墩(基)之局部沖刷(local scour)，圖 2.1-3 所示。

橋墩主要的沖刷機制為局部沖刷，由於水中結構物的存在對水流產生局部阻礙或干擾的現象，因此附近之沖刷特別嚴重。最大局部刷深發生於洪峰期間，但退水時泥砂可能疏鬆地回淤在沖刷坑內，造成洪水過後之觀測無法有效掌握橋墩之最大刷深，如圖 2.1-4 所示。(林志平，2009)。

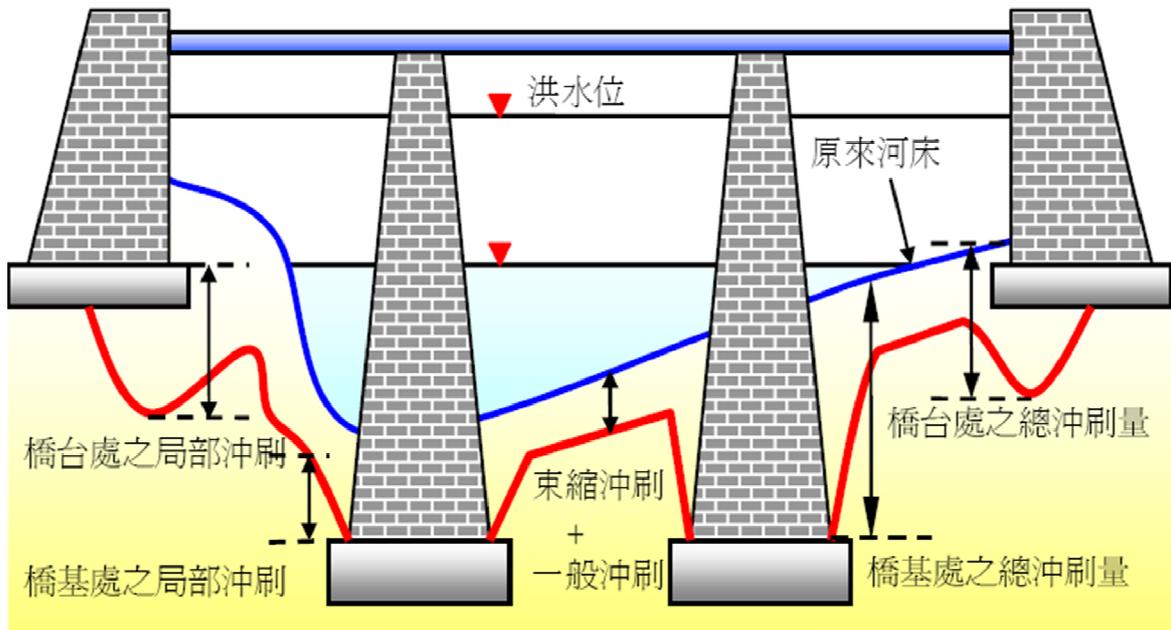


圖 2.1-1 局部沖刷、束縮沖刷與一般沖刷示意圖(中興工程顧問公司，2009)

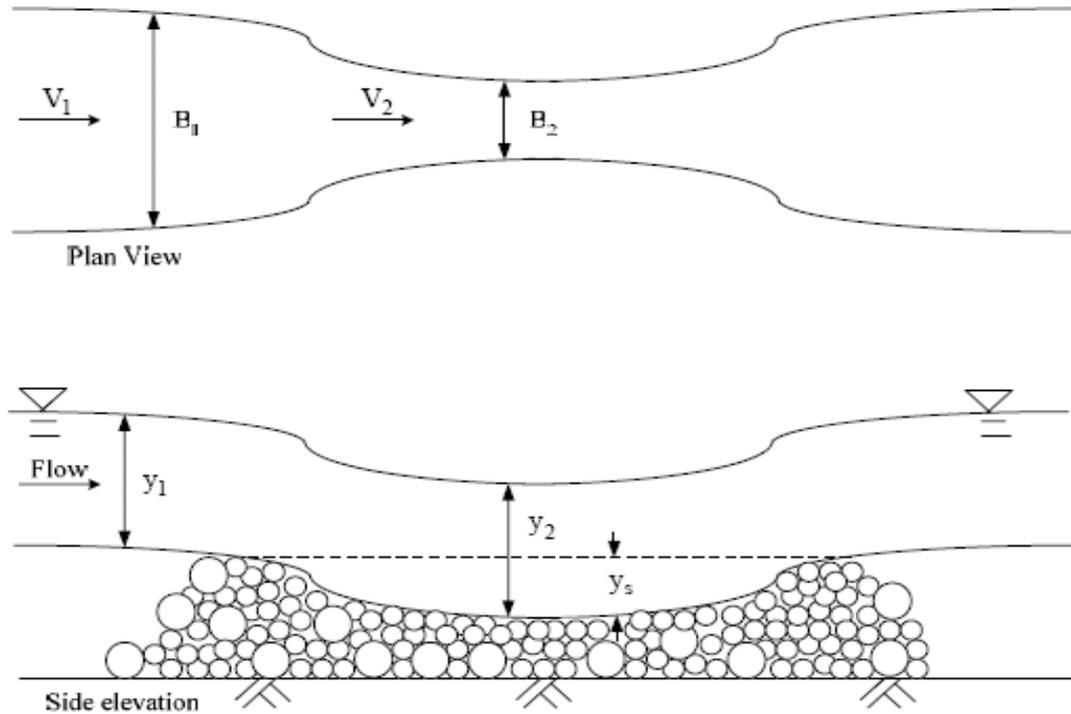


圖 2.1-2 橋墩(基)或河道窄縮引致之束縮沖刷示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2003)

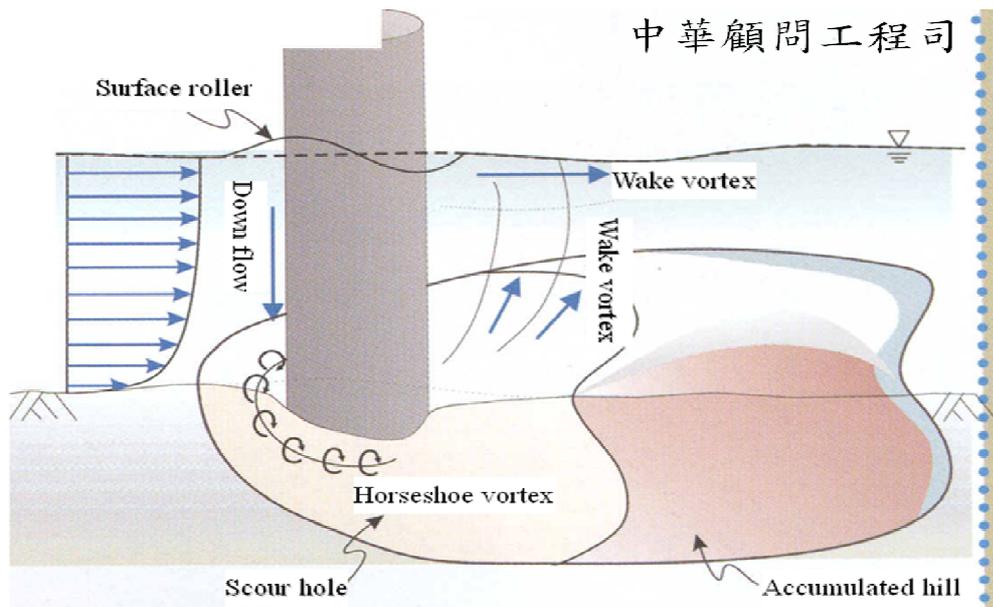


圖 2.1-3 局部沖刷示意圖(中華顧問工程司，2009)

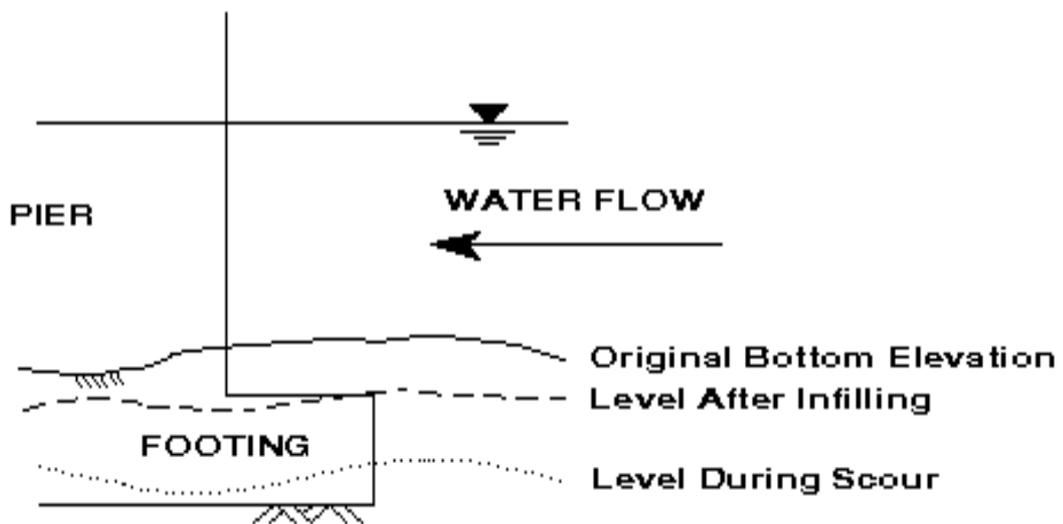


圖 2.1-4 局部沖刷與回淤現象(Dowding and Pierce, 1994)

## 2.2. 現有的橋樑沖刷監測技術回顧

沖刷監測的目的與重要性主要有兩個層次：(1) 可提供跨河構造物之安全預警，(2) 由觀測資料了解沖刷機制並比較現場觀測資料與沖刷公式。由於岩質河床的沖蝕行為複雜且缺乏工程尺度的沖刷分析模式，因此沖刷監測對於岩質河床機制探討、模式發展及模式驗證中扮演重要的角色。現

地洪水期間的沖刷監測極具挑戰性，Jones et al. (1991)即指出研發新的沖刷監測技術為沖刷研究最重要的研究需求之一。美國於 90 年代在 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)的經費支持下，展開發展、測試及評估既有與新的橋墩最大刷深監測技術。其研究分為三個階段，第一階段在於搜尋及評估既有儀器設備；第二階段為改良與現地測試；第三階段進一步發展遠端自動化監測。美國 NCHRP 的研究成果在 Lagasse et al. (1997)中有詳細的介紹，其中主要的涵蓋的監測技術包括重錘式 (Dropping weight)、重力鋼棒 (Mechanical sounding rod)、磁性滑動環 (magnetic sliding collar, SMC)、埋入式無線電波漂浮裝置 (Float out device)、壓電薄膜 (Piezoelectric film) 及聲納 (sonar)等(林志平，2009)。

除了 Lagasse et al. (1997)所回顧與發展的監測技術，過去十幾年亦有許多新型的技術研發，例如時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 最大刷深量測法 (Dowding and Pierce 1994) 與沖刷過程量測法 (Yankielun and Zabilansky 1999)、電極法 (Suzuki and Shimaura 2000) 及光纖光柵法 (fiber Bragg grating, FBG) (Lin et al. 2005; Lin et al. 2006)。

目前橋墩沖刷監測的方法可分為固定點自動化量測、人工移動式量測及目視檢查等三種方式，目視檢查方法最為直接與準確，但僅能進行洪水過後之量測，無法得知洪水期間造成的最大刷深；人工移動式量測具有機動性，但颱風期間之觀測工作困難且具危險性；固定點自動化量測具有良好的時間解析度及可提供沖刷過程觀測。以下章節將進一步介紹目前各項監測系統之原理及優缺。

### 2.2.1 人工測讀法

#### 1 重錘式與重力鋼棒

基本原理是利用重錘自由落下時牽引一捲揚器，此捲揚機內有一數位編碼器，當此重錘或重力鋼棒由馬達上下捲取時，編碼器便有一數位

訊號輸出，經由微電腦控制器讀取此資料，並經過計算得出重錘或重力鋼棒上升、下降之距離，如圖 2.2-1 所示。此種沖刷深度量測技術很直接，但重錘或重力鋼棒接觸底床的判定需要經驗，此外，颱風期間觀測較為困難，颱風後之觀測無法有效反應最大沖刷深度。

## 2 人工測讀磁性滑動環 (Lagasse et al. 1997)

磁性滑動環沖刷測深計之儀器包括了一固定於橋樑基礎上並深入河床之空心不鏽鋼管、可在鋼棒上自由滑動的磁性套環以及探測器，如圖 2.2-2 所示。磁性套環僅可隨河床刷深而向下滑動，當沿著鋼管內部垂下之感測器接觸到磁性套環所產生的磁場時，感測器將會發出警示聲，此時量測感測器沿鋼管內部垂下的距離，即可得知河床與橋面版之間的距離。此種沖刷深度量測方式具有價格低廉、判讀便利等優點，在美國許多小型的橋樑採用，亦是國內目前測試過的主要方法之一。磁性滑動環可以有效顯示最大沖刷深度，但無法量測回淤深度，此外設置的直立鋼管容易受到洪水中的雜物破壞。

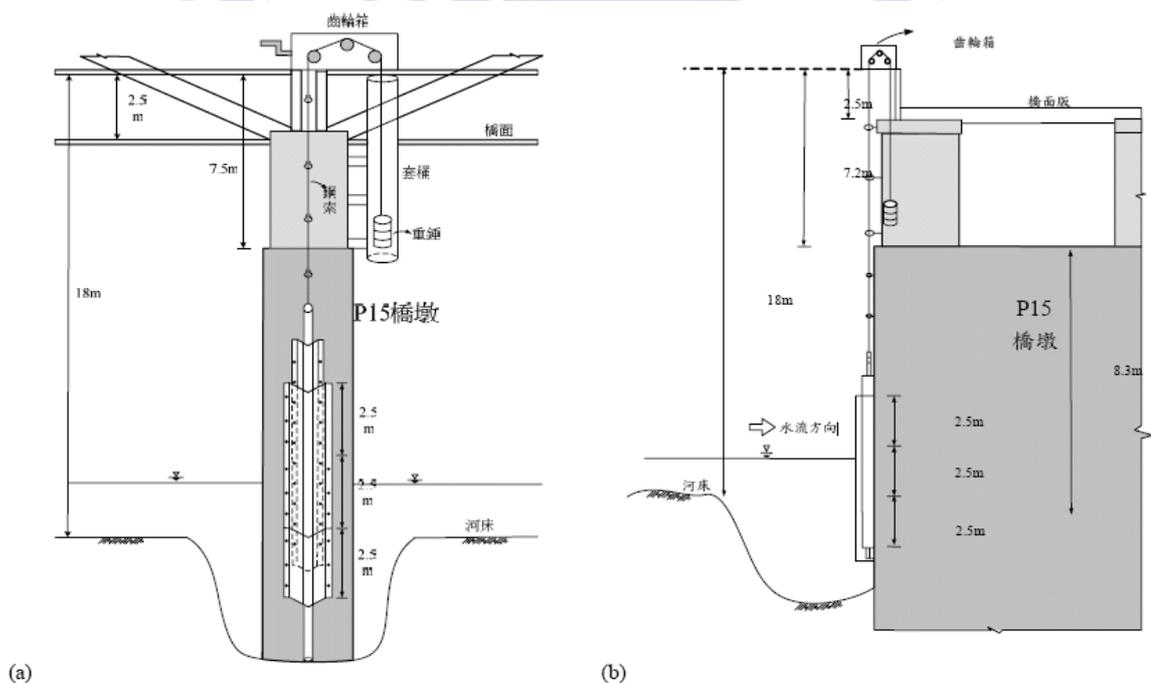


圖 2.2-1 重力鋼棒沖刷測深計之示意圖(a)正面圖示意圖(b)側面示意圖

(經濟部水利規劃試驗所 2004)

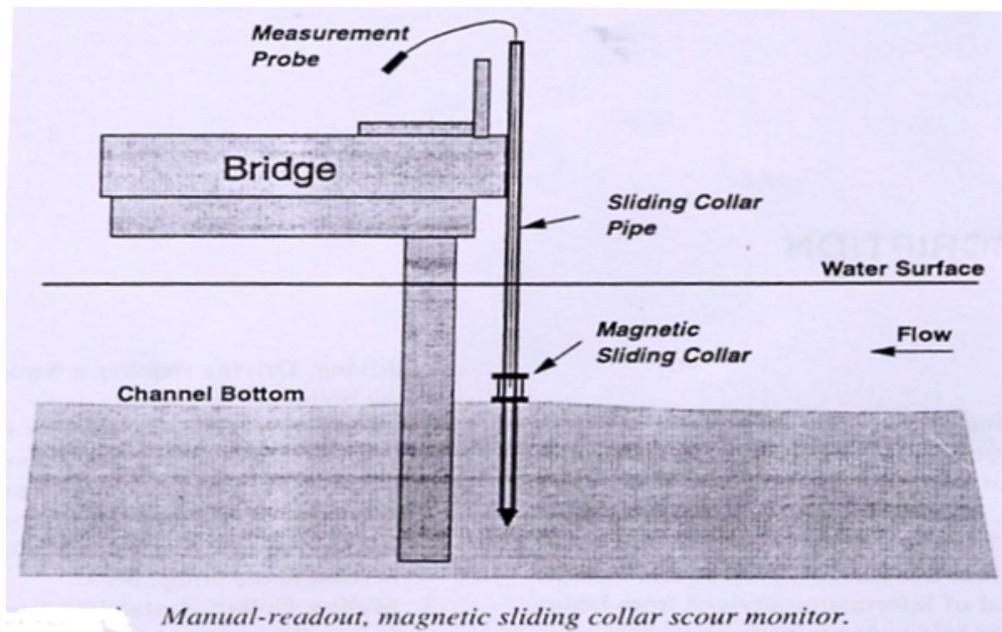


圖 2.2-2 人工測讀磁性滑動環示意圖 (Lagasse et al. 1997)

## 2.2.2 自動化埋入式感測

### 1 自動化測讀磁性滑動環 (Lagasse et al. 1997)

基本原理與人工測讀磁性滑動環相同，但經過改良 (Lagasse et al. 1997) 利用串連的磁簧開關 (Magnetic reed switches) 於鋼管內感測磁性滑動環的位置，如圖 2.2-3 所示。自動化測讀磁性滑動環可避免使用延伸至橋台的直立鋼管，且可以進行遠端自動化量測，但同樣無法量測回淤深度。

### 2 埋入式無線電波漂浮裝置 (Suzuki and Shimaura 2000)

屬於埋入式感測元件的方法，主要原理是利用具無線電發射功能之小型訊號器，將之事先埋於河道中。在埋置靜止時不會發出信號，表示該位置尚未受洪水沖刷，但某些浮體經河水沖刷浮出後，內建機械裝置觸動體內發報系統，送出無線電密碼，由接受器接收後予以解碼、傳輸，進而辨識出河床之沖刷深度，如圖 2.2-4 所示。此種方法的缺點是空間解析度粗略，且電池電源一段時間後必須更換。

### 3 壓電薄膜 (Lagasse et al. 1997)

亦屬於埋入式感測元件的方法，但感測元件為壓電薄膜，如圖 2.2-5 所示。此方法的優點是無須電源供應，但仍處於研發階段，但其元件與安裝方式較為精巧，可能較易受高含砂水流與流木損壞。

### 4 光纖光柵法 (Lin et al. 2005; Lin et al. 2006)

光纖光柵 (fiber Bragg grating) 為一種光纖式的應變感應技術，具有不受電磁波干擾與單一光纖可利用波長多工化佈設多個量測點的優點。利用光纖光柵感應沖刷深度有兩種形式，第一種係利用懸臂樑的機制，將一懸臂樑埋設於河道，利用 FBG 感應器量測懸臂樑上之應變分佈，據以決定沖刷深度；第二種形式亦屬於埋入式感測元件的方法，但感測元件為採用懸臂樑機制的 FBG 感應盒。兩種型式示意圖如圖 2.2-6 所示，第一種形式之現地可行性較低，第二種形式則是埋入式光纖光柵感測元件具有光纖感應的優勢，但儀器較為昂貴，與無線電波漂浮裝置及壓電薄膜類似，其安裝繁瑣且因突出的元件較容易受到高含砂水流與流木損壞。

### 5 電極法 (Suzuki and Shimaura 2000)

屬於埋入式感測桿，其原理是利用三組電極分別量測於河水中的電阻、河床質的電阻及橫跨水與河床質的電阻，其中橫跨水與河床質的電極組所量測到之電阻質與水深成比例關係，根據比例原則可計算水深（或沖刷深度），如圖 2.2-7 所示。電極法之安裝較埋入式感測元件簡易，但量測準確度受含砂濃度與電阻率非均勻分佈之影響。

### 6 數位感測式(林宜清，2009)

其量測示意如圖 2.2-8 所示，(a)為感測機構示意圖，當水流經過感測裝置時，活動鋼板因水流帶動而開始作動，進而帶動繫在其上之鋼絲/電線，該電線將連動 (b)之開/關發生作用，使數位訊號產生明顯改變，

以作為判別是否有水流經過之依據。

#### 7 振動感應式(林宜清，2009)

感應元件內部裝設壓電材料，如圖 2.2-9(a)所示，經由力學振動產生電壓訊號，於橋面板上之訊號線收集盒連接上訊號擷取及傳輸單元，即可在橋梁外進行各感應元件之沖刷訊號監測，如圖 2.2-9(b)。可以監測洪流來時橋墩瞬間遭受最大沖刷深度及洪流消退後之回淤高度。由於裝設儀器時因鑽孔機取出套管時需先封管，因此訊號線須先行截斷後，於套管取出後再行續接，此訊號線接點即成為水流來臨時之弱點。

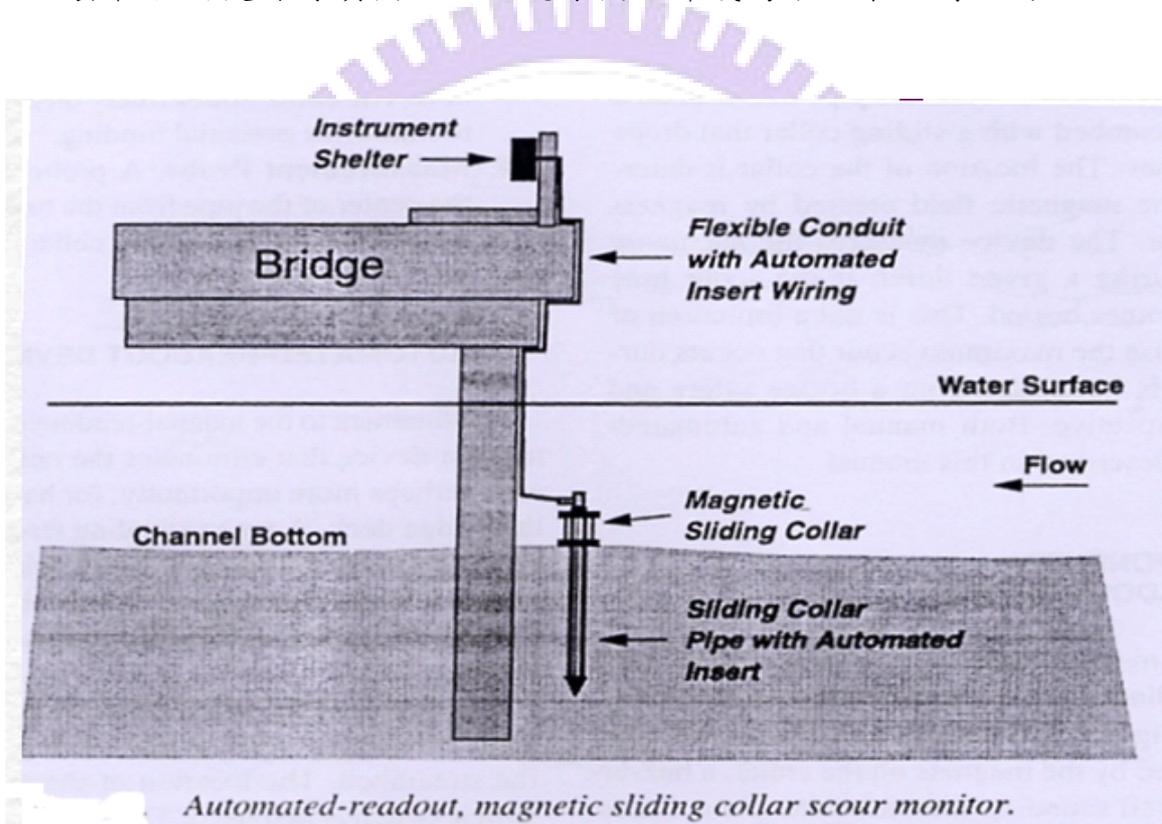


圖 2.2-3 自動化測讀磁性滑動環示意圖 (Lagasse et al. 1997)

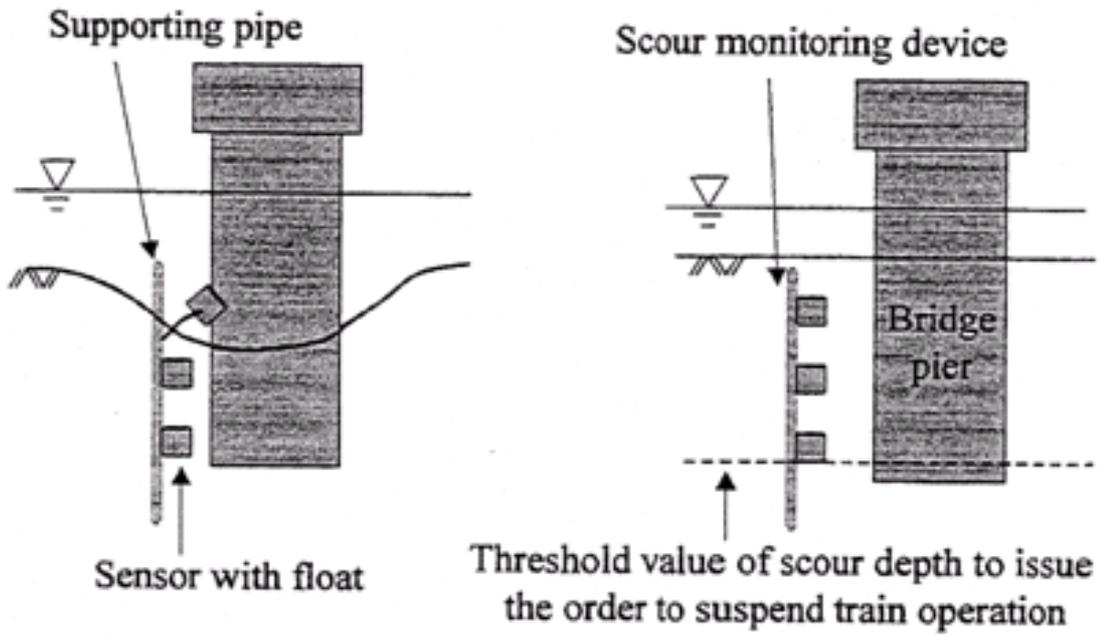


圖 2.2-4 埋入式無線電波漂浮裝置示意圖 (Suzuki and Shimaura 2000)

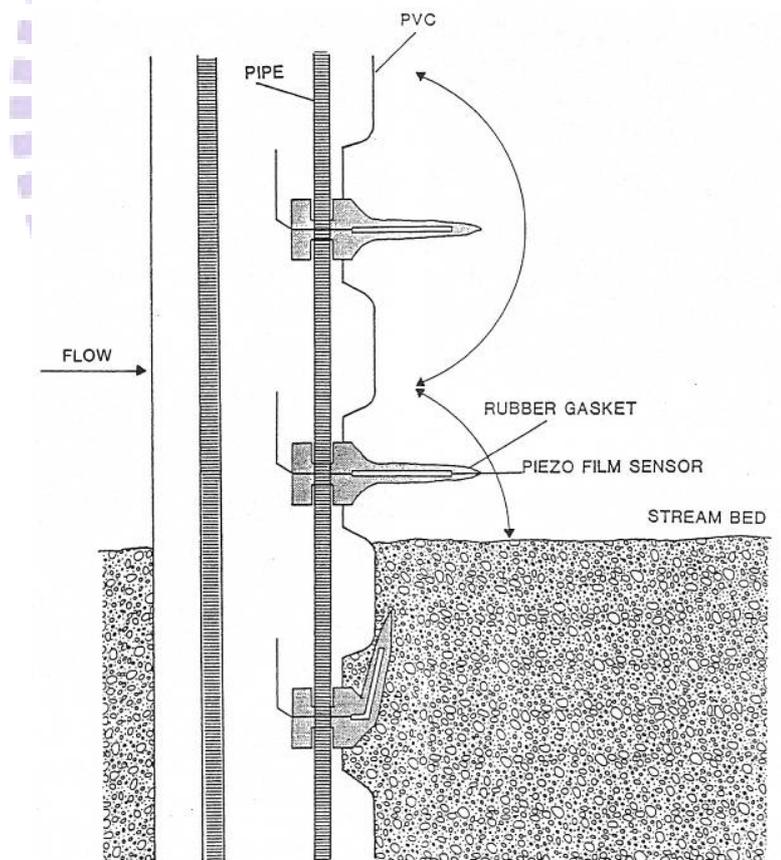


圖 2.2-5 壓電薄膜示意圖 (Lagasse et al. 1997)

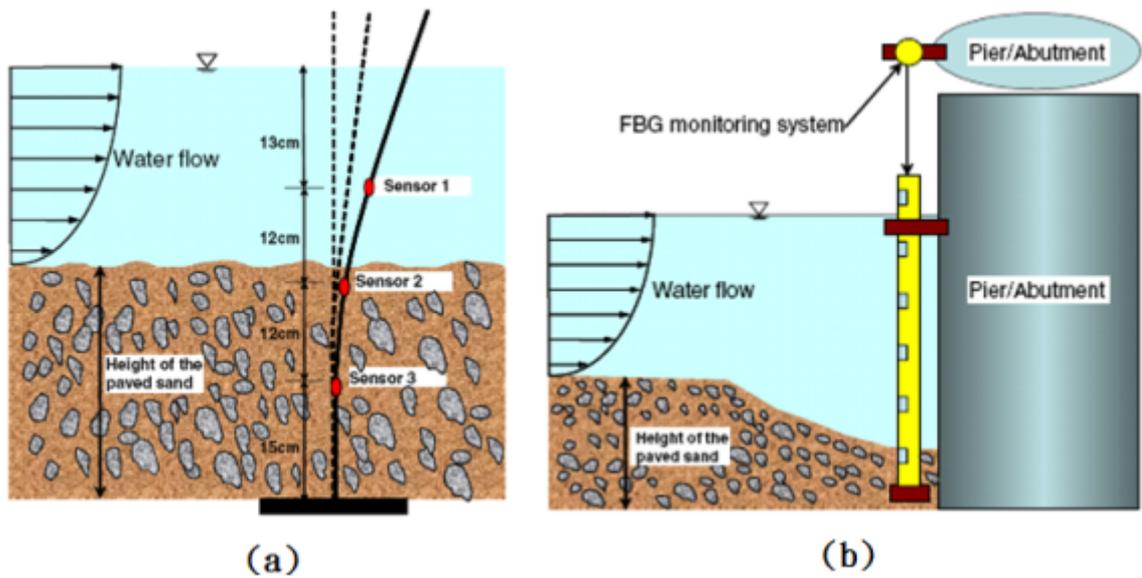


圖 2.2-6 兩種 FBG 沖刷感測形式示意圖(a)懸臂樑式(b)埋入式光纖光柵感測元件 (Lin et al. 2005; Lin et al. 2006)

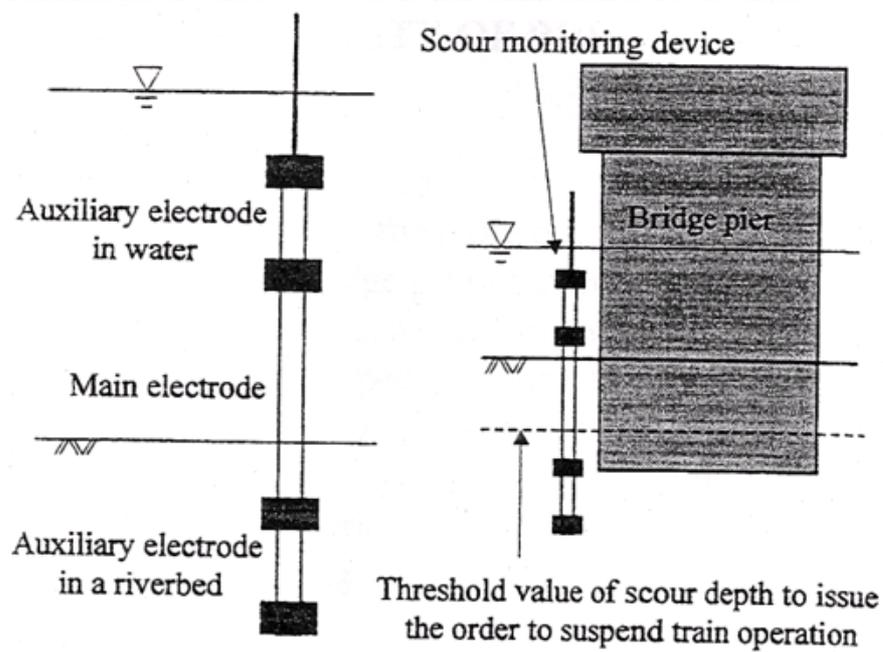


圖 2.2-7 電極法示意圖 (Suzuki and Shimaura 2000)

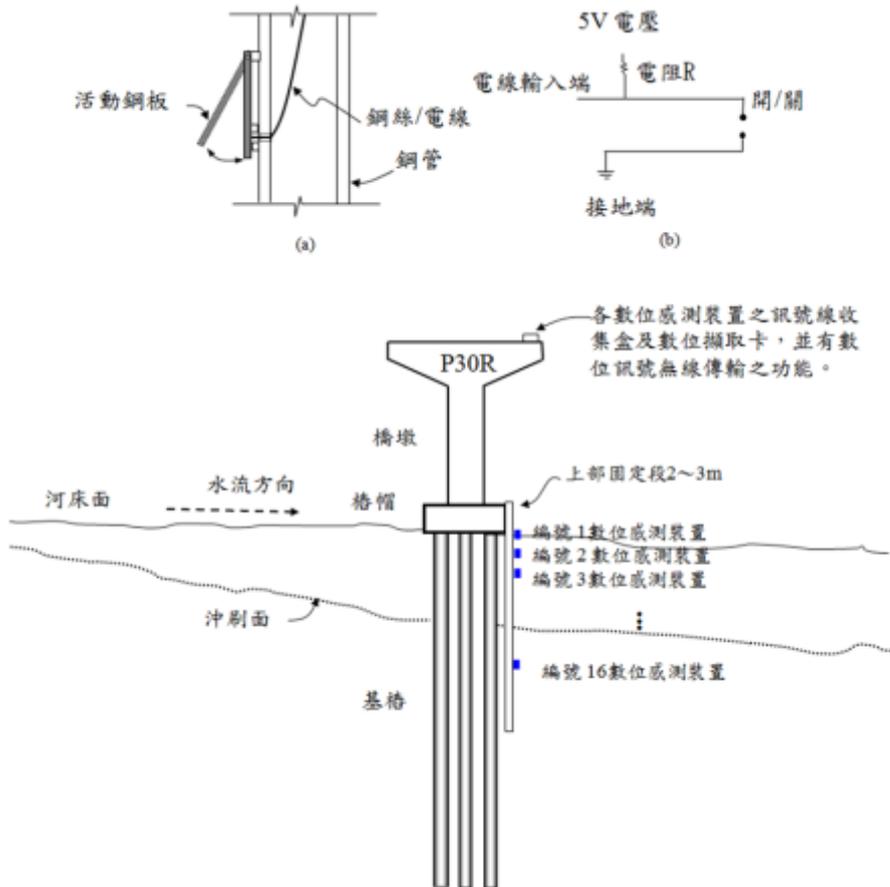


圖 2.2-8 數位感測式示意圖(林宜清，中興大學土木系 2009)

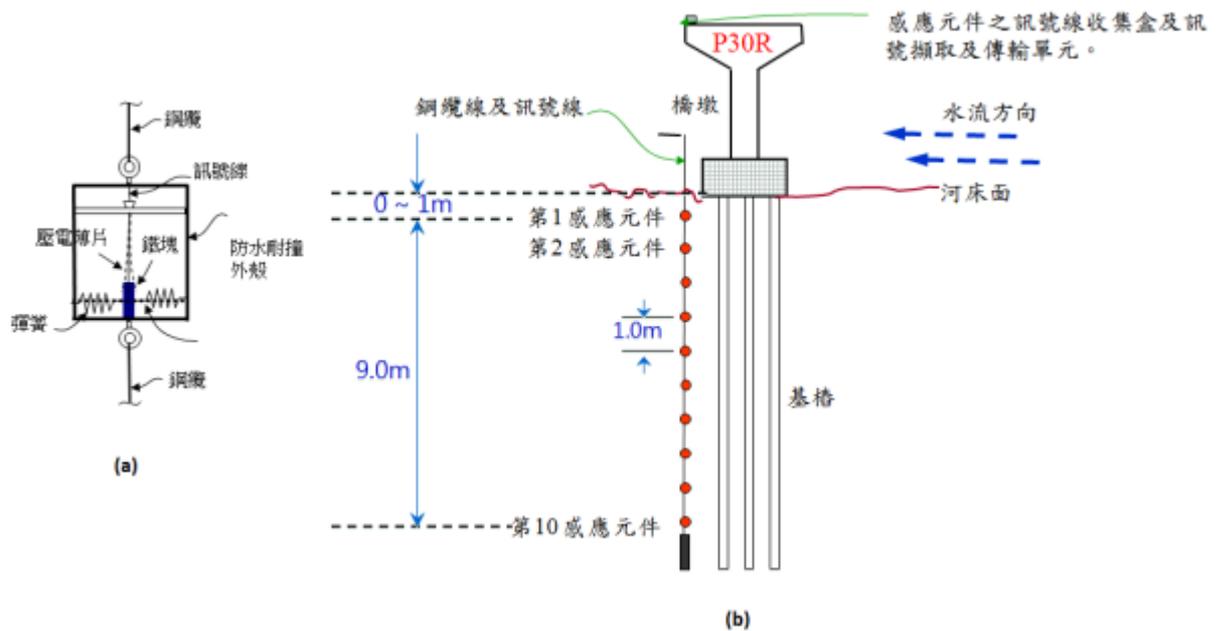


圖 2.2-9 振動感應式示意圖(林宜清，中興大學土木系 2009)

### 2.2.3 非接觸式量測方法

#### 1 聲納 (Lagasse et al. 1997)

聲納沖刷量測與量測水位的超音波水位計原理一致，皆是利用聲波在不同介質間傳遞時所造成部分的反射來推算介質深度。人工量測沖刷量時，將聲納測深儀安裝於鉛魚 (USGS 製) 下腹部，搭配三節吊桿，由橋面往橋下施測，如圖 2.2-10 所示。Lagasse et al. (1997) 建議定點式自動化監測的聲納安裝方式，如圖 2.2-11 所示。聲納法對於河床有非侵入式，可監測沖淤過程，但量測準確度受到泥砂及紊流的影響，且儀器耐久性堪虞。人工量測方式在洪水期間需搭配甚重的鉛魚及吊車，觀測之動員成本較高。

#### 2 雷達 (Millard, et al, 1998, Raeni et al. 2000)

雷達的原理與聲納雷同，以天線發射電磁波並接收因介質改變時所回傳的反射訊號，據以決定沖刷深度，如圖 2.2-12 所示。儀器的設備較聲納昂貴，目前尚未有將雷達定點安裝於水面下的案例，此外，雷達之探測深度受到水體導電度造成訊號衰減之限制。目前大部分的雷達量測採用接觸式的方式，量測效果不錯，但有鑑於洪水期間採用非接觸式的必要性，美國地質測量局 (U.S. Geological Survey, USGS) 於 1980 年代晚期首次將非接觸式透地雷達 (Ground Penetration Radar, GPR) 斷面量測應用於橋墩沖刷測量。該實驗進行時，GPR 天線皆由橋樑或船隻懸吊於河水上方進行量測。此種配置方式導致實驗所收錄之原始資料中包括因橋樑結構而產生之回音雜訊過大而無法準確推估沖刷斷面。但由於 GPR 天線設計與訊號分析方法的進步，USGS 於 1990 年代中期利用橋樑及纜道懸吊方式再次進行數個非接觸式 GPR 河川斷面量測實驗。結果發現由非接觸式 GPR 量測所得之河川斷面與傳統 Sounding-weight 法所得之斷面僅有 10~20% 的差異 (Costa et al. 2000)，因此非接觸式的 GPR

方法對於改良河川斷面量測技術具有很大的潛力，國內經濟部水利署(2005)亦曾初步測試驗證其可行性。

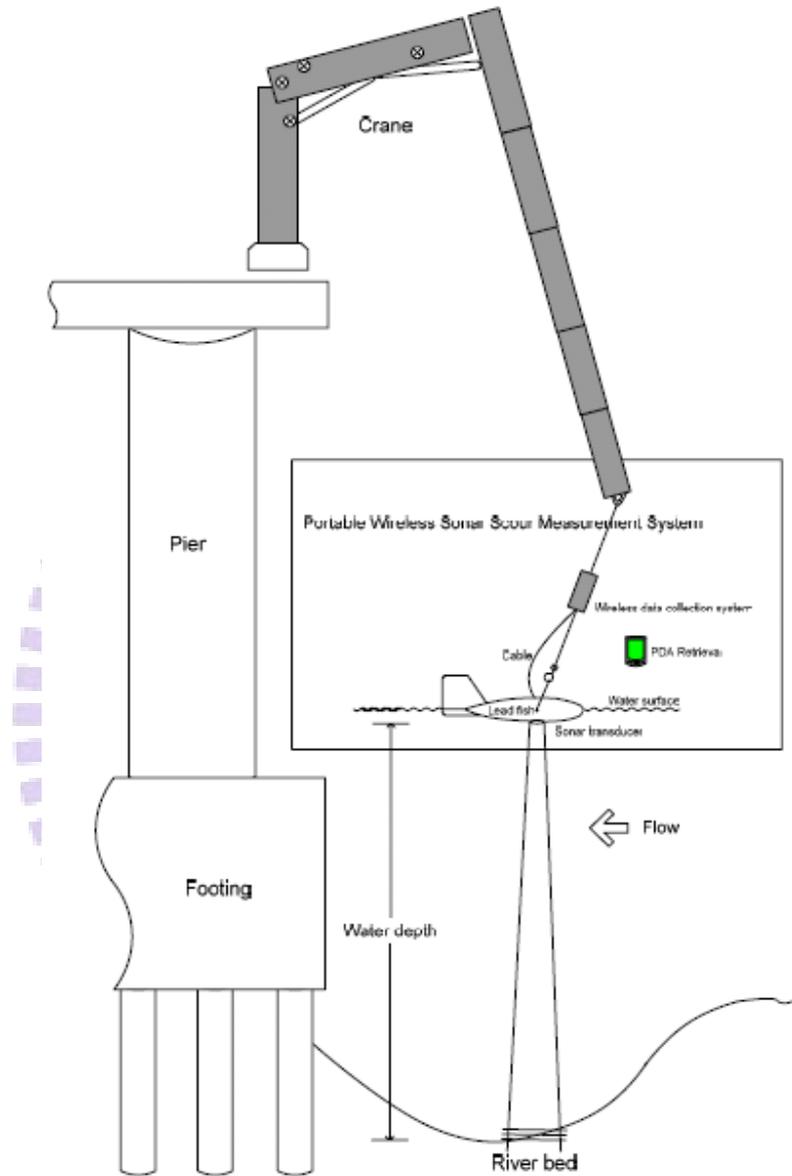


圖 2.2-10 人工測讀聲納示意圖（經濟部水利規劃試驗所 2004）

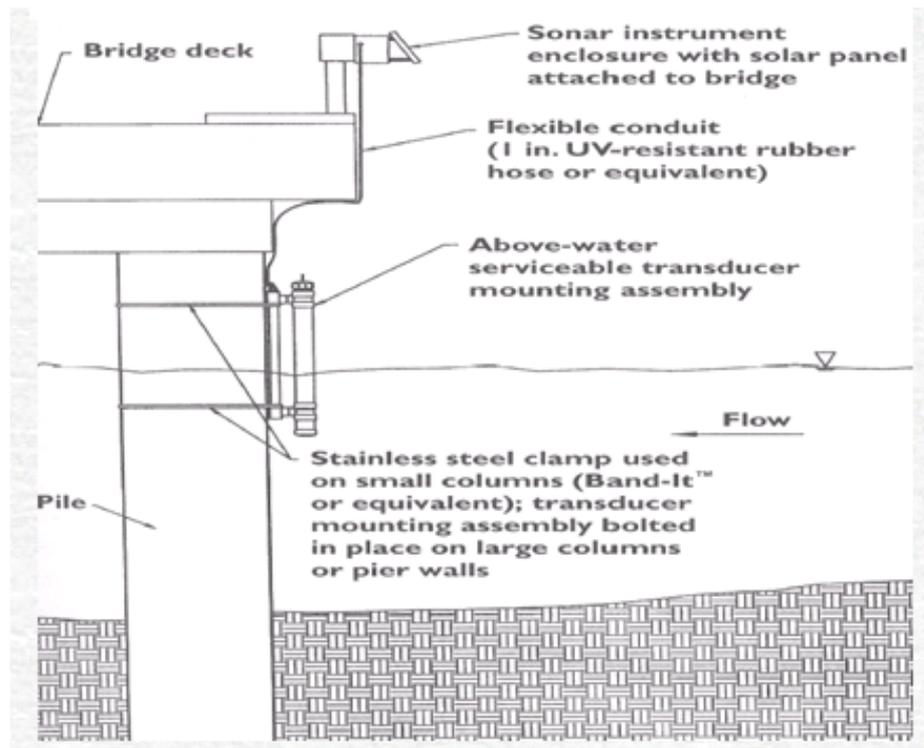


圖 2.2-11 自動化聲納示意圖 (Lagasse et al. 1997)

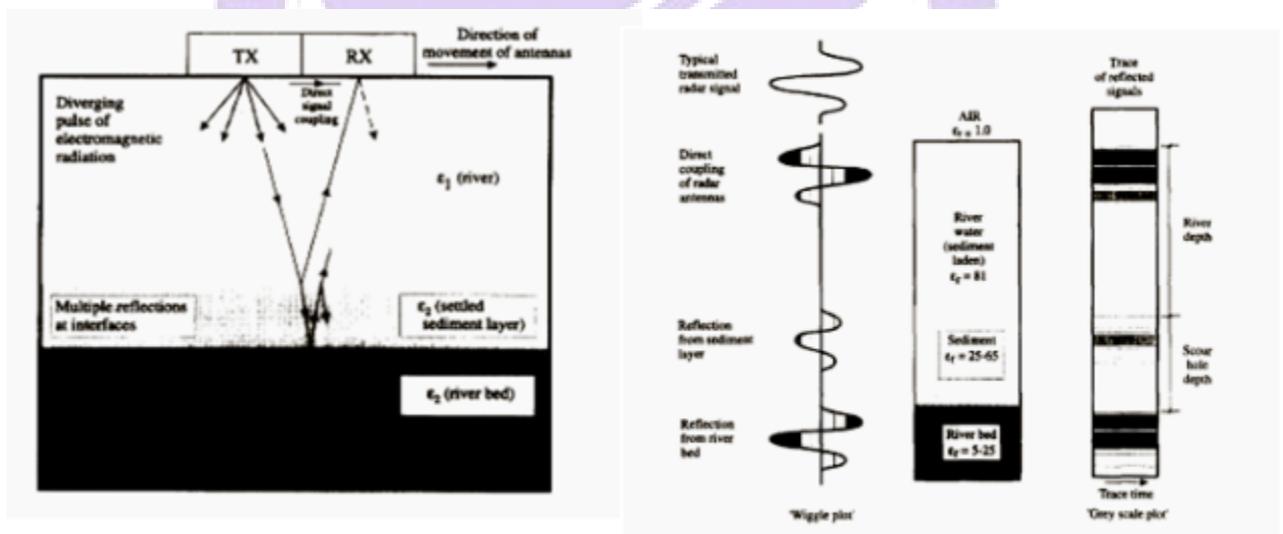


圖 2.2-12 GPR 探測與收錄反射訊號歷時資料示意圖 (Millard, et al, 1998)

### 2.3. 時域反射技術應用於沖刷量測之回顧

#### 2.3.1 時域反射技術基本原理

時域反射儀 (Time Domain Reflectometer. TDR) 主要由階躍脈衝電壓

產生器 (step generator) 、訊號採樣器(sampler) 與示波器 ( oscilloscope)組成。TDR 之基本原理與雷達相同，由製波器 (step generator) 發射一電磁脈衝進入同軸電纜 (coaxial cable) 及感測導波器 ( measurement waveguide) ，並由示波器記錄由於感測導波器內阻抗(impedance)不連續所造成之反射，如圖 2.3-1 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線(同軸纜線)與感測導波器，導波器為同軸纜線之延伸，同時作為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可藉由反射訊號得知環境變化參數。

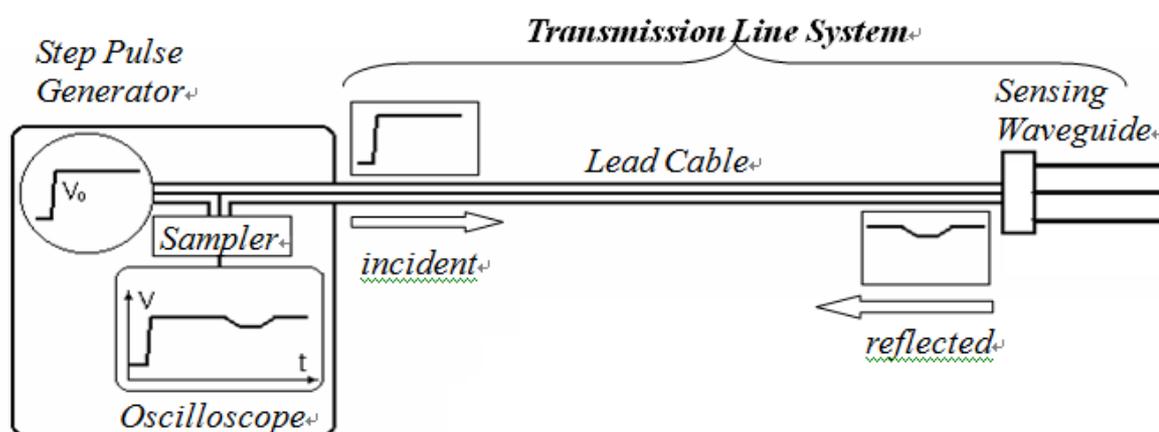


圖 2.3-1 TDR 量測系統

### 2.3.2 TDR 埋入式感測器於沖刷量測之研發

#### 1 TDR 感測桿 (Yankielun and Zabilansky 1999)

本方法屬於埋入式感測桿研發，其原理是以兩根鋼棒組成之導波器貫入河床質，利用電磁波時域反射法感應河水與底床界面之反射訊號，據以決定沖刷深度，如圖 2.3-2 所示。此方法改良了以同軸纜線監測的缺點，具備堅固耐用的特性，但許多問題仍待克服，例如楊培熙 (2003) 實驗結果顯示，當感測器達一定長度後便造成反射訊號衰減，因此需進一步改善傳輸距離引起訊號衰減問題、考慮安裝實務的感測器設計及決定沖刷深度的訊號分析演算法等。

## 2 TDR 感測纜線 (Dowding and Pierce 1994)

與埋入式感測元件的方法類似，在同軸纜線一定的間距加上一突緣裝置埋入底床內，當突緣裝置經河水沖刷露出水面後，河水的拖曳力量將造成同軸纜線的變形，利用電磁波時域反射法的探測，可以決定沖刷深度，如圖 2.3-3 所示。此方法可自動化監測，但缺點是感測元件屬於犧牲式，因此僅能觀測最大刷深，且若纜線被石塊或雜物衝斷，纜線末端可能因為浸水而影響後續監測的解讀。

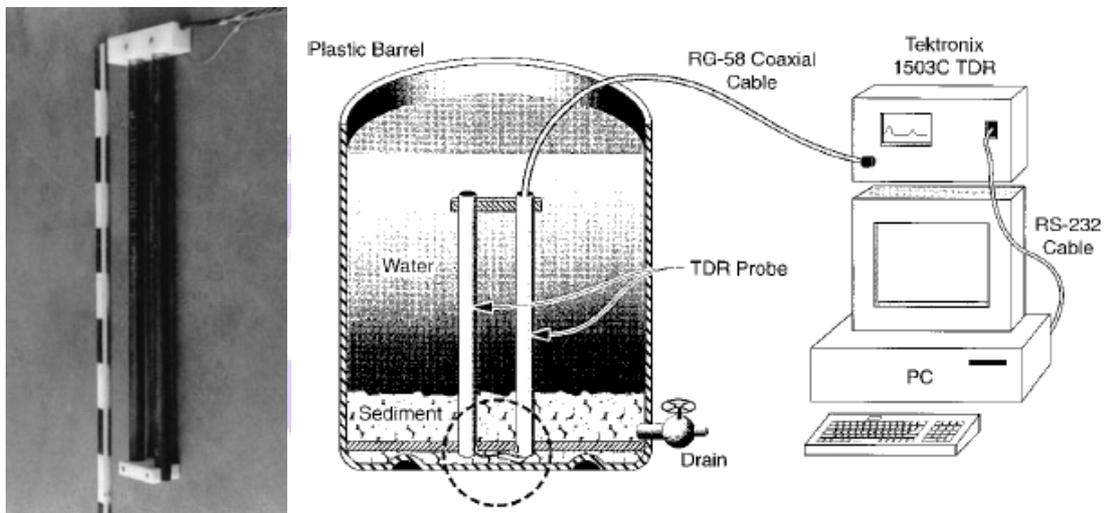


圖 2.3-2 TDR 感測桿示意圖 (Yankielun and Zabilansky 1999)

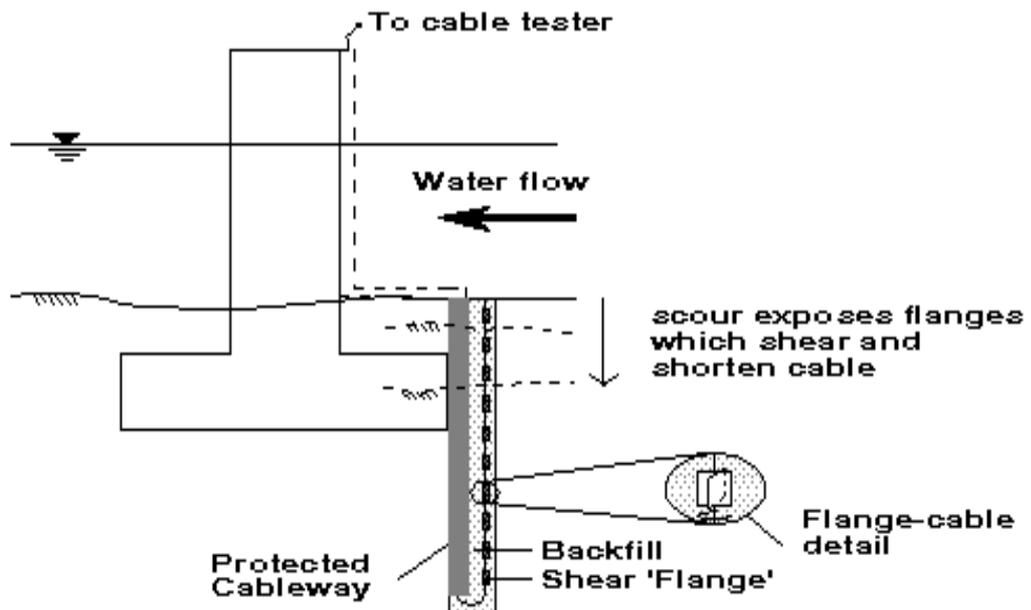


圖 2.3-3 TDR 感測纜線示意圖 (Dowding and Pierce 1994)

### 2.3.3 TDR 橋墩沖刷訊號分析方法

#### 1. 土水界面法

不同的物質其介電常數皆不同，其中空氣=1、水=81、土壤則介於(2~7)，隨著待測物質的組構不同，介電常數改變，量測波型產生不同的反射係數(界面位置)，透過不同界面位置可判釋出土壤與水之走時，如圖 2.3-4 及圖 2.3-7 所示，便可計算出  $K_a$ 。如式(2-1)，其中  $L_a$  為感測器所量測之走時長， $L_p$  為實際高度。

$$K_a = \left(\frac{L_a}{L_p}\right)^2 \dots\dots\dots(2-1)$$

楊培熙(2003)所提出之土水界面分析法，係利用 TDR 之反射訊號量測不同介質之界面位置，例如水位之監測(空氣與水界面)或土壤沖蝕監測(河流與河床土壤之界面)(Dowding, et al. 1996; Yankielun and Zabilansky 1999)。

然而 TDR 量測由於接頭、水-土界面及感測器末端產生的反射訊號，當水位低於 TDR 導波器頂部時，尚有空氣-水界面的反射訊號，在如此複雜的反射訊號要決定沖刷深度並非簡易或容易自動化的工作。若電磁波由下往上傳遞，可以確保在水-土界面反射之前沒有空氣-水界面的反射訊號，水-土界面反射訊號較容易分辨，如圖 2.3-4 所示，但如此的配置將使得感測器的安裝困難度增加。若電磁波由上往下且當水位低於感測器頂部時，在水-土界面反射發生之前即產生接頭、空氣-水界面反射及之間的多重反射，造成水-土界面反射訊號較難以分辨，如圖 2.3-5。由於接頭反射及導電度的影響，水-土界面反射點本身之決定就難以自動化；此外，水-土界面反射點尚須配合邊界反射點(探頭或底部，視感測器擺設方向而定)及介質速度方能計算出沖刷深度，由於河床質的速度未知，主要透過水的部分決定水深，當如上述產生空氣-水界面時，

若無法準確判斷空氣-水界面反射點，則無法計算沖刷深度。

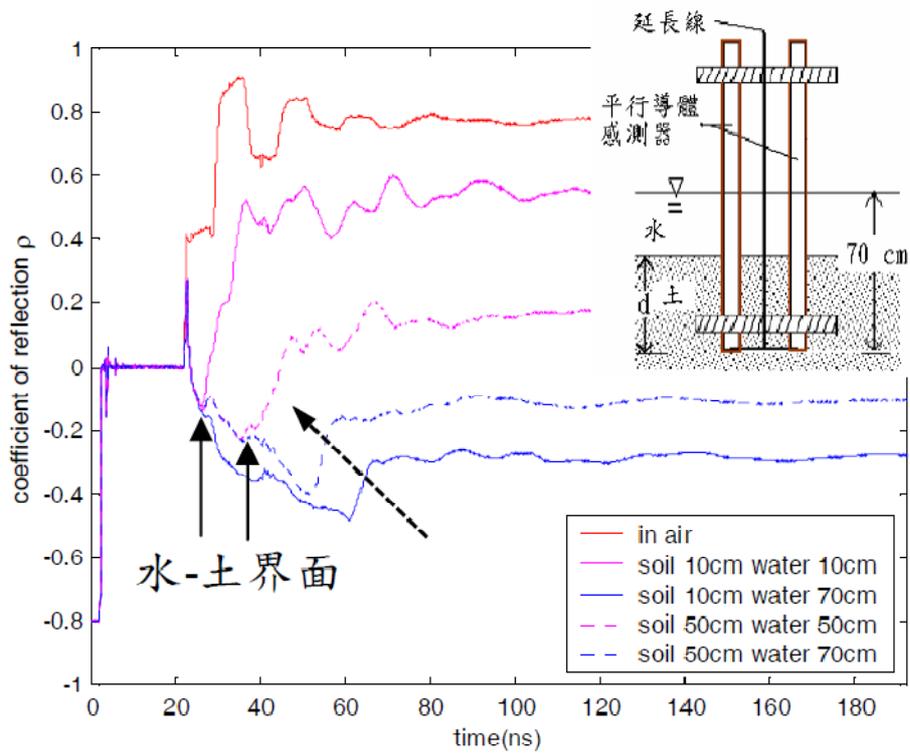


圖 2.3-4 TDR 沖刷感測器反向裝置(楊培熙,2003)

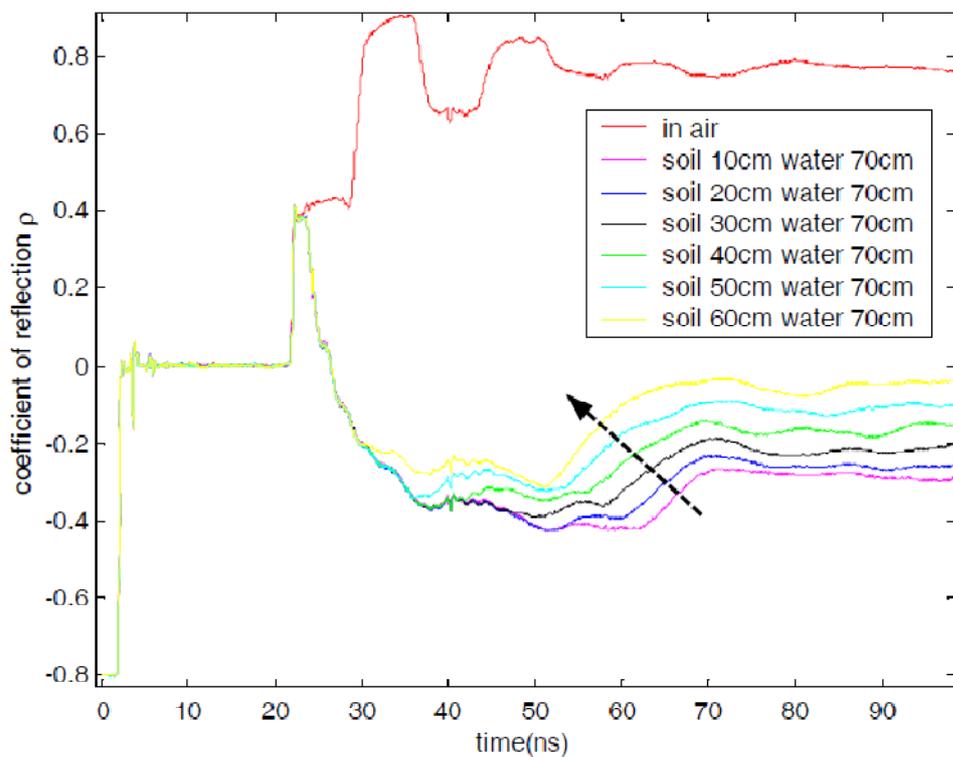


圖 2.3-5 TDR 沖刷感測器正向裝置(楊培熙,2003)

## 2. 全走時分析法

Birchak et al.(1974)提出混合介電常數之模數，如(2-2)式表示，其中  $v_i$  及  $K_i$  分別是部份片段體積及部份介電常數， $\alpha$  為經驗值，於均質或等向材料時  $\alpha$  建議為 0.5。

$$(K_{a,m})^\alpha = \sum_{i=1}^n v_i (K_i^\alpha) \dots \dots \dots (2-2)$$

Yu and Yu (2007)所提出之全走時分析法則是透過(2-2)之概念，認同總混合介電常數  $K_{a,m}$  是由多片段體積下之各個介電常數總合而成，基於此概念提出(2-3)式，其中  $L_1$  與  $L_2$  從圖 2.3-6 示意，分別代表水的厚度及土水厚度， $K_{a,w}$  及  $K_{a,bs}$  分別為水及土水混合(水位高等同於砂土高)之介電常數，參考圖 2.3-7 透過純水及土水混合便標定得之。接著將公式整理如式(2-4)，

$$L_1 \sqrt{k_{a,w}} + L_2 \sqrt{k_{a,bs}} = L \sqrt{k_{a,m}} \dots \dots \dots (2-3)$$

$$\frac{\sqrt{k_{a,m}}}{\sqrt{k_{a,w}}} = \frac{L_2}{L} \left( \frac{\sqrt{k_{a,bs}}}{\sqrt{k_{a,w}}} - 1 \right) + 1 \dots \dots \dots (2-4)$$

因此當已知感測器長度為  $L$ ，且各參數可經由標定取得後，改變不同的沉降量，TDR 之總走時也隨之改變，如圖 2.3-8，再透過全走時分析法，可以量測到不同的總介電常數  $k_{a,m}$ ，所測得的波行進一步分析量化，把已知的各參數代入(2-4)式，便可估算剩餘的土層厚度  $L_2$ 。不過隨著感測器長度增加，在能量損失之情況下，波型變化的觀測仍為一個需要克服的課題。

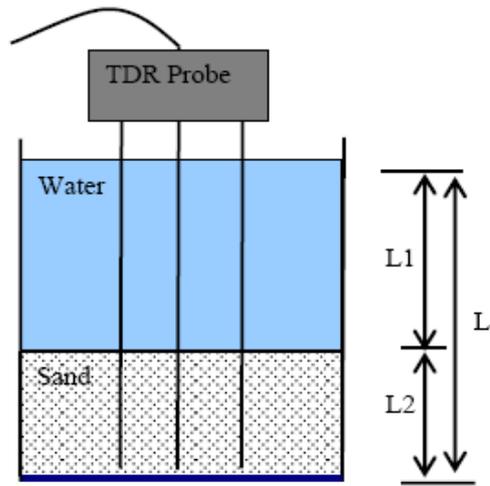


圖 2.3-6 水砂界面沉降量測模擬示意圖(Yu and Yu 2007)

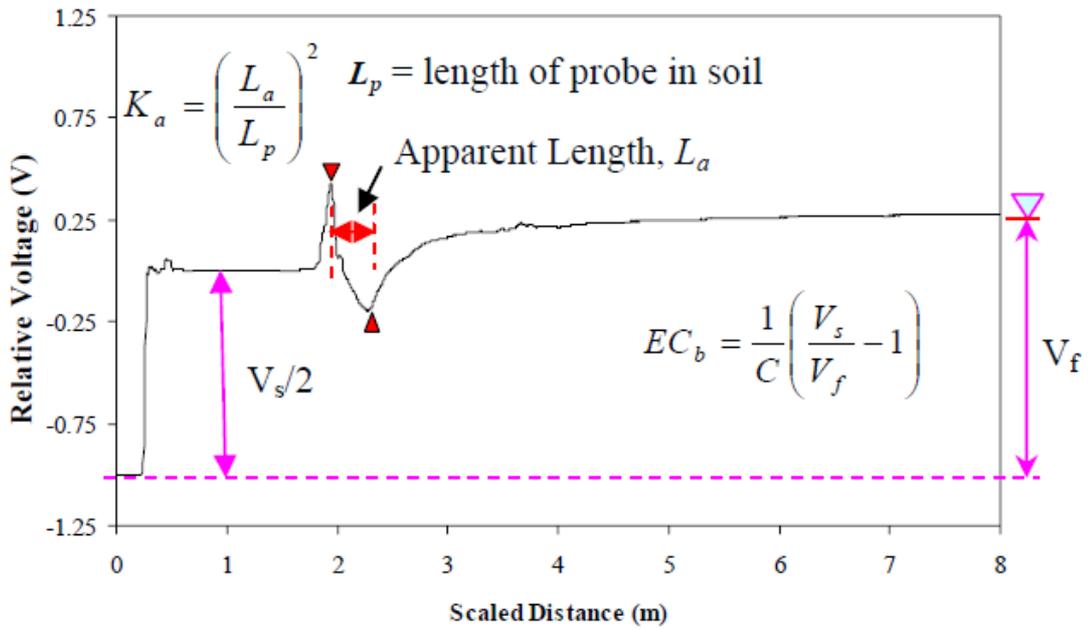


圖 2.3-7 TDR 輸出訊號示意圖

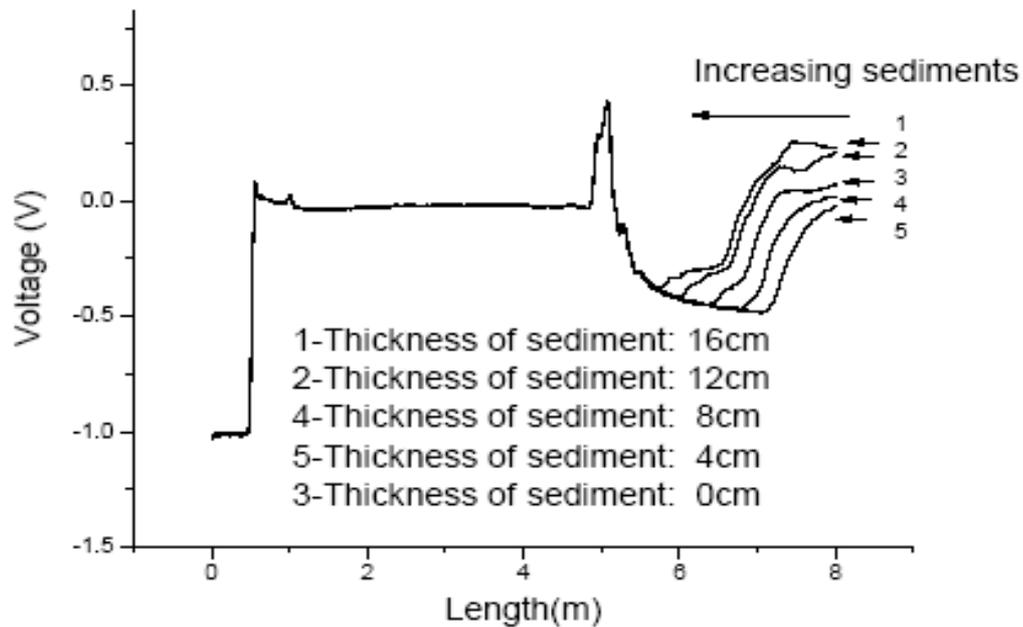


圖 2.3-8 TDR 訊號隨不同沉降量之變化(Yu and Yu 2007)

#### 2.3.4 TDR 沖刷量測問題評析

電磁波時域反射量測技術，為新興的傳輸線監測技術，利用時域反射監測不同介質界面位置的技術亦可應用在沖刷感測。時域反射沖刷感測技術的概念雖已被提出，但仍停留在概念階段，許多問題仍待克服，例如訊號衰減引起之傳輸距離問題、考慮安裝實務的感測器設計及決定沖刷深度的訊號分析演算法等，這些問題若能克服，有助於提昇沖刷觀測效能。本研究之主要目的即在於以時域反射法為基礎，發展更有效、更適合台灣環境的沖刷感測器，以能後續配合 TDR 自動化沖刷觀測技術，落實橋墩沖刷量測實務。

#### 2.4. 沖刷量測方法綜合評析

綜合上述橋墩沖刷自動化觀測方式可分為埋入式感測元件（埋入式無線電波漂浮裝置、壓電薄膜、TDR 感測纜線、光纖光柵、數位感測式及振動感測式）、感測桿（磁性滑動環、電阻法、TDR 感測桿）及非侵入式（聲

納、透地雷達)三大類，並於表 2.4-1 統整既有所有監測方式之優缺，而其中磁性滑動環技術較為成熟，但無法觀測沖刷回淤情形；電阻法之相關資料相當有限，且準確度不佳；埋入式感測元件之安裝較為繁瑣且因突出的元件較容易受到高含砂水流與流木損壞；非侵入式之監測技術需將感測主機置於水中，在台灣高流速、高含砂水流中之耐久性與維護性堪虞。

本研究建議朝向感測桿或鋼索之方式發展，採柔性結構以避免洪水夾帶石頭之撞毀之觀念著手改善感測器之型式，TDR 感測桿及鋼索雖然仍處於研發階段，但極具潛力，值得進一步發展。

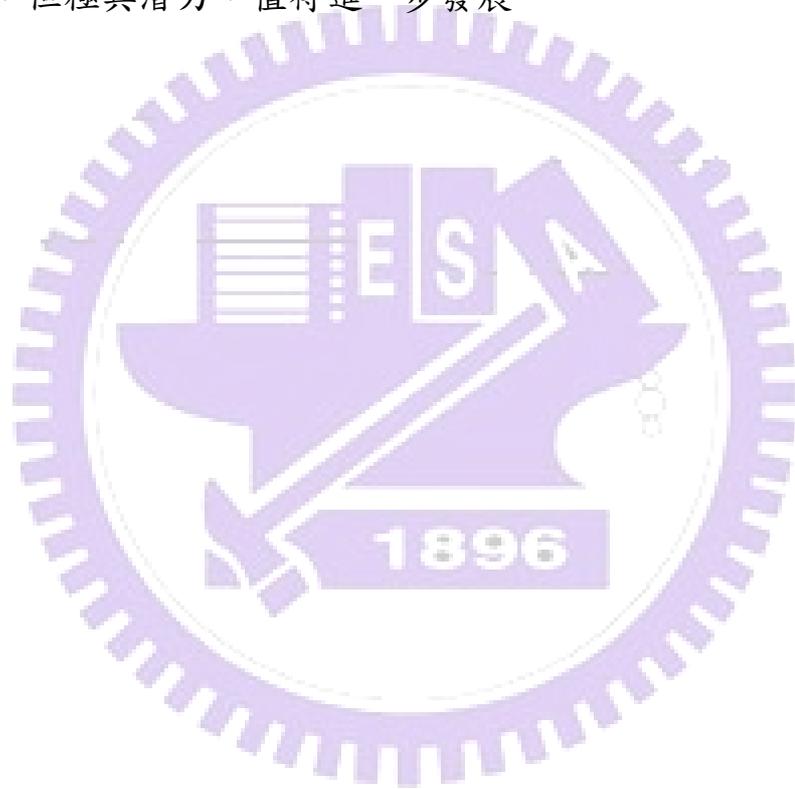


表 2.4-1 各項量測系統之優缺點比較

性能 名稱	即時性	回淤 監測	惡劣河域環 境工作性	數據 分析	電力 供應	備註
重力鋼棒	無	不能	差	簡單	不需	判讀沖刷深度依賴個人經驗。
磁性滑動環	可	不能	差	簡單	不需	設置的直立鋼管容易受到洪水中的雜物破壞。
無線電波漂 浮裝置	無	可	好	簡單	需要	空間解析度差。 電池電源需定時更換。
壓電薄膜	可	可	好	簡單	不需	屬離散點感應，因此空間解析度 取決感測點間距。 製作繁瑣，訊號線於現地安裝要 特別注意。
光纖光柵	可	可	好	簡單	需要	價格昂貴。 元件易受高含砂水流與流木損 壞。
電極法	可	可	差	困難	需要	量測準確度受含砂濃度與電阻 率非均勻分佈之影響。
數位感測式	可	可	好	簡單	需要	價廉但製作繁瑣，訊號線於現地 安裝要特別注意。 耐久性仍需 評估。
振動感應式	可	可	好	簡單	不需	訊號線接點為水流來臨時之弱 點。 耐久性仍需進一步評估。
(人工/自動) 測讀聲納	可	不能	差	困難	需要	受泥砂及紊流影響。 耐久性不佳。
GPR 探測	無	不能	差	困難	需要	設備昂貴。 雜訊處理尚進步空間。
(TDR)埋入 式纜線	可	可	好	簡單	需要	感測元件屬於犧牲式，纜線可能 受到撞擊毀壞。
(TDR)埋入 式感測桿	可	可	好	簡單	需要	訊號衰減引起之傳輸距離問題。 安裝實務的感測器設計。

## 第三章 研究方法

本研究初步實驗規劃將依安裝實務的可行性、訊號損失的改善及靈敏度的維持進行初步沖刷感測器的製作，接著細分鋼管式及鋼索式進行影響因子的探討，並決定現地回填材及訊號判讀分析法，最後確認最佳化感測器型式後進行現地安裝。

### 3.1. TDR 沖刷感測器之改良與評估

現今應用於橋樑沖刷之監測方式多為侵入式監測系統，如何讓感測器在洪峰時期仍可以安穩的在河道中不被摧毀，成為了目前最大的考量。類似土壤含水量感測器的形式（如圖 2.3-2）並不適合現地沖刷監測的安裝，在沖積河床尚可以在感測器底部加裝一鋼管帶動貫入，但並不適合岩質河床之應用。此外，當沖刷感測範圍超過 3m 以上時，能量便會有開始損失的問題要克服；且感測器過長的情況下，必須分段在現場連接，這些安裝實務問題都需在 TDR 沖刷感測技術的初步構想中面對與克服。

#### 3.1.1 感測器改良設計

一般河水與河床質均有一定的導電度，導電度將造成電磁波傳遞隨距離而衰減，因此一般土壤含水量的感測器很少超過 1 m，若直接採用類似土壤含水量的感測器，沖刷感測範圍勢必相當有限，不適合台灣許多河段劇烈沖刷的觀測。圖 2.3-5 為以 Yankielun and Zabilansky (1999) 形式的感測器進行的初步測試，可以明顯看出訊號衰減隨水深增加而增加的現象。因此在不影響訊號判讀的情況下，對感測器表面進行適當地絕緣處理，期望可以改善訊號衰減之問題。

本研究為了克服安裝實務與訊號損失的感測器，先於室內進行初步試驗，並結合實務評估其實際之量測靈敏度。初步規劃感測器於安裝實務上

之採用型式分別有 1.桿式 2.纜式，如圖 3.1-1 所示，桿式感測器是透過鋼管於管壁洗一槽溝並置入搭配之絕緣導體，並利用鋼管的堅硬強度保護絕緣導體不受損傷。纜式感測器則是透過鋼索利用網綁的方式搭配絕緣導體，以柔性結構物的概念，避免與漂流木及大石頭正面迎擊，增加其耐用性。而訊號損失上則透過適當的絕緣處理進行改善，並於後續規劃試驗進行上述兩種型式之靈敏度的評估，進而製作出適合河床沖刷之感測器。

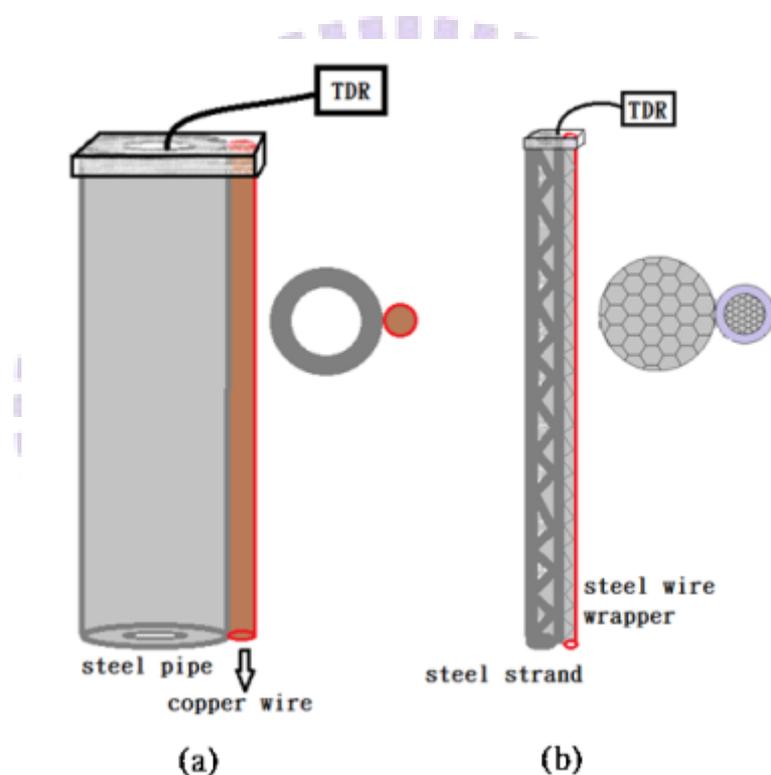


圖 3.1-1 不同型式之 TDR 橋墩沖刷量測感測器示意圖(a)桿式感測器(b)纜式感測器

### 3.1.2 室內泥砂沖刷/淤積模擬試驗配置說明

為配合沖刷感測器之評估，先行於室內初步模擬沖淤情況，透過改變不同水位及不同土層的厚度，擷取波型初步比較各種沖刷感測器之靈敏度，並評估各種型式感測器於現地施作之可行性，其初步整體配置如圖 3.1-2，

並說明實驗步驟。

## 1. 沖淤模擬配置

透明壓克力筒：利於進行實驗的觀察，選擇長 25cm、寬 25cm、高 50cm 之透明壓克力筒進行試驗。細砂：以物性穩定且過 20-40 號篩的渥汰華砂及苗栗南湖溪畔開採之細砂(南湖溪砂)做為室內試驗回填材，其基本物性參表 3.1-1。

(1)長尺：利用精度為 1mm 之長尺檢核回填量的高度。

(2)感測器：桿式與纜式兩種型態。

## 2. 資料擷取設備

(1)電腦：以筆記型電腦利用軟體 PCTDR 紀錄 TDR 反射儀所接收的波型如圖 3.1-3，並以 matlab 撰寫程式進行分析。

(2)TDR 反射儀：電磁波之主要收發之儀器，本研究所使用之 TDR 反射儀為 HL1500TDR 圖 3.1-4，其歸格如表 3.1-2。

(3)傳輸線：一般常見同軸纜線(Coaxial Cable)為傳輸線，其構造由內至外分別為內導體、絕緣介質、外導體與最外層絕緣保護層，同軸線為良好導波器(waveguide)，可將電磁波束制其中並防止電磁波外漏。

室內試驗模擬步驟如下：

(1)感測器施作：如前述的，先行規劃並製作模擬用之感測器。

(2)擷取器與電腦架設：將 TDR 主機與電腦連結，並透過傳輸線與感測器對接。

(3)波型量測：使用軟體 PCTDR，固定解析度下進行波型的擷取。

(4)水位模擬：為了確定感測器是否可順利運作，將感測器置入壓克力筒中，先行於筒內加入不同的水位，確保隨著水位的改變判釋波型。

(5) 沖淤模擬：確定水位模擬可順利運作後，即可固定水位改變不同的沖淤量之模擬，每增加 5 公分或 10 公分(依實驗需求之精細度調整)並紀錄量測波型。

(6) 波型判釋比較：於實驗完成後，將 PCTDR 所擷取到的波型初步用 Matlab 疊加進行比對，透過介電常數的改變，比較定量下的土層厚度其走時的變化，並利用走時變化的差異，進行感測器間的靈敏度判釋。

為了要可以克服現地的惡劣環境，期望利用鑽管堅硬的特性取代原本脆弱的感測器。以一般鋼管模擬鑽管(內導體)、包膜銅線(外導體)，互相搭配製成不同型式沖刷感測器，如圖 3.1-1。初步施作構想是先行於鋼管管壁由外向內洗一槽溝，接著將外導體內嵌，完成初步構想中的沖刷感測器型式；由於外導體是內嵌於鋼管中，預計可能會面臨到電場不易釋放，進而無法感應周圍物質的變化之問題產生。

另一方面，當洪水來臨時，通常都會夾雜著大量的石頭，大多數運用於河床的感測器都有耐撞性的問題面臨考量，而 2.2.2 節中林宜清(2009)所採用之振動感應式感測器則是想以柔克剛的方式吸收掉部份衝擊力，顛覆一般傳統以硬碰硬的模式。因此本研究另外提出鋼索型式之感測器，並利用實驗以評估感測器之量測靈敏度，並探討可能影響量測靈敏度的因子，進而改善感測器的型式至最佳化。

TDR 本身有線傳輸之優勢可以打造無元件之感測器，因此本研究將進行針對鋼管及鋼索之不同型式模擬，期許找出最適用於現地量測之感測器。

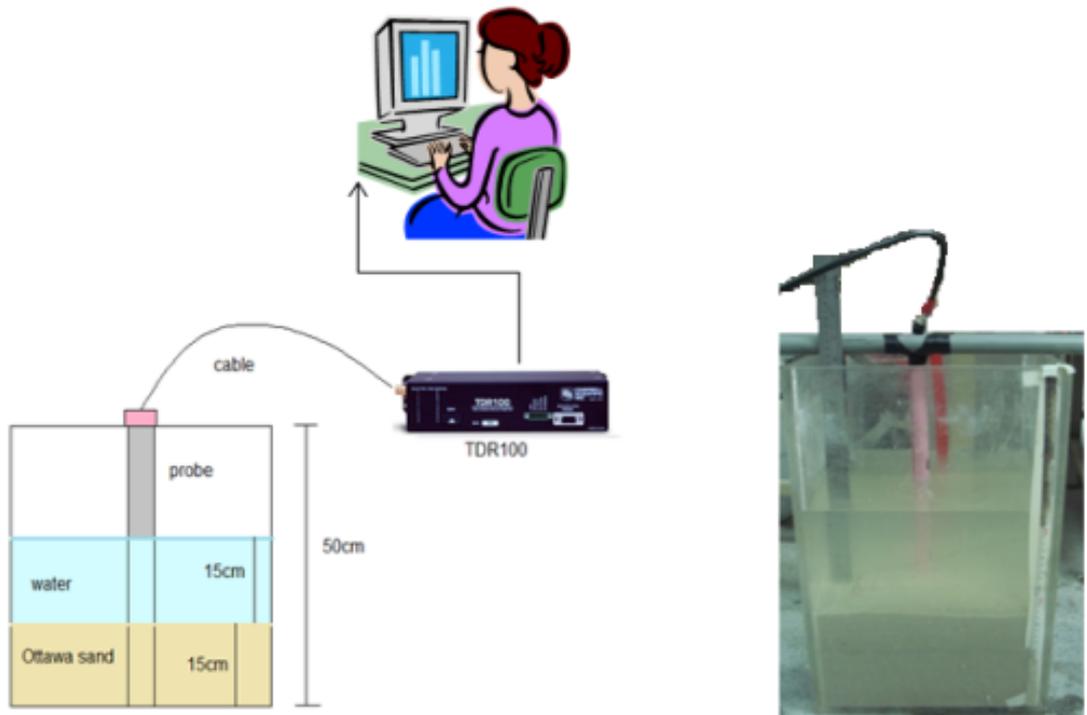


圖 3.1-2 室內泥砂沖刷/淤積模擬試驗實驗配置示意

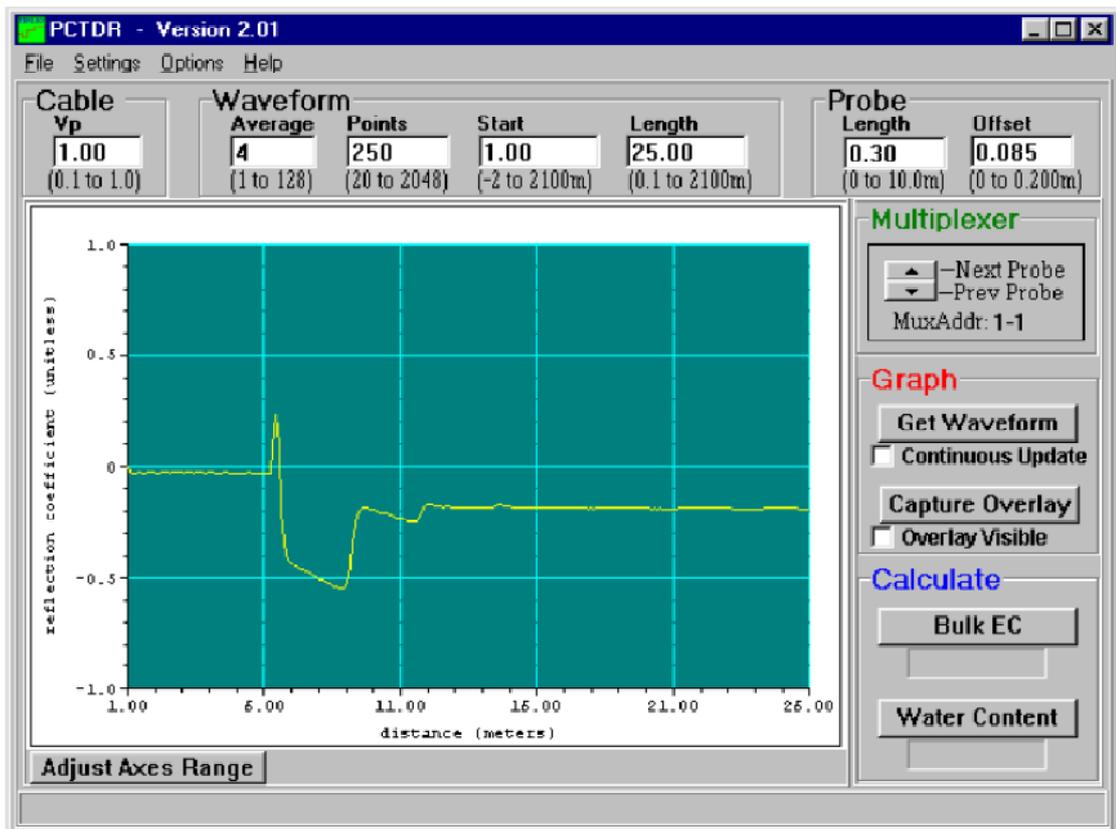


圖 3.1-3 PCTDR 操作介面(Campbell Scientific TDR100 使用手冊)

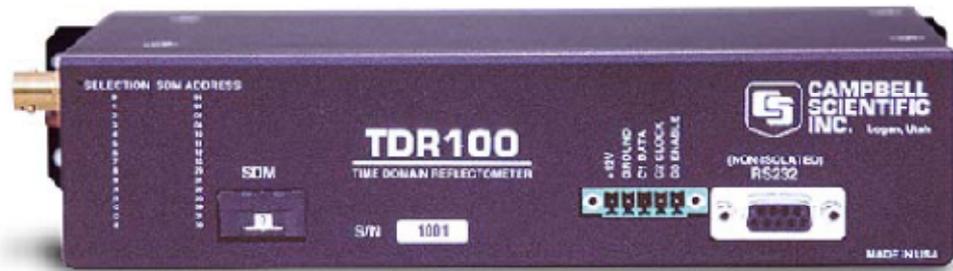


圖 3.1-4 TDR100 反射儀(Campbell Scientific TDR100 使用手冊)

表 3.1-1 試驗砂基本物理性質

試樣種類	渥太華砂(廖元憶, 2005)	南湖溪砂
最大乾密度 $\gamma_{d \max}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.87	1.60
最小乾密度 $\gamma_{d \min}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.50	1.36
比重 $G_s$	2.65	2.646
$D_{60}$	0.45	0.82
$D_{50}$	0.395	0.65
$D_{30}$	0.305	0.42
$D_{10}$	0.22	0.29
均勻係數 $C_u$	2.05	2.828
曲率係數 $C_d$	0.94	0.742
孔隙比 $e$	0.56	0.788
統一土壤分類	SP	SP

表 3.1-2 TDR 反射儀規格特性表(Campbell Scientific TDR100 使用手冊)

規格說明	特性
pulse generator output	250 mV into 50 ohms
output impedance	50 ohms $\pm$ 1%
time response of combined pulse generator and sampling circuit	$\leq$ 300 picoseconds
pulse generator aberrations	$\pm$ 5% within first 10 nanoseconds $\pm$ 0.5% after 10 nanoseconds
pulse length	14 microseconds
timing resolution	12.2 picoseconds
waveform sampling	20 to 2048 waveform values over chosen length <u>distance</u> ( $V_p = 1$ ) <u>time</u> (1 way travel)
range	-2 to 2100 meters 0 to 7 microseconds
resolution	1.8 millimeter 6.1 picoseconds
waveform averaging	1 to 128
electrostatic discharge protection	internal clamping
power supply	unregulated 12 volt (9.6 V to 16 V), 300 milliamps maximum
temperature range	-40°C to 55°C
dimensions	210mm x 110mm x 55 mm
weight	700 g

### 3.2. TDR 全走時訊號分析方法改良

水砂界面之反射訊號在有阻抗不連續面之多重反射作用下不易辨識，因此本研究參考 Yu and Yu (2007) 所提分析方法，研擬適用於沖刷感測器的訊號分析方法，演算過程如下：

1. 由於本研究預期研發之感測器欲克服訊號衰減問題，因此感測器表面將

可能進行絕緣處理，其量測訊號需將絕緣處理之影響分離。本研究藉由率定感測器於空氣與水中之速度（介電度）後，由 TDR 經水面之反射時間與末端反射時間，透過不同水位其走時差的改變，進行適用於沖刷感測器的推導，計算出絕緣材質的影響值。由(3-1)與(3-2)式中之材料介電參數代入走時分析，其中  $\epsilon_{am}$  為綜合空氣介電度， $\epsilon_{wm}$  為綜合水介電度， $\epsilon_w$  為水之介電度（約為 80）， $n$  為率定參數。透過至少三組不同材質（已知其介電度），可得到感測器量測之係數  $\alpha$ 、絕緣材質介電度  $\epsilon_c$ ，以及率定參數  $n$ 。

$$\text{綜合空氣介電度 } (\epsilon_{am})^n = \alpha \cdot 1 + (1 - \alpha)(\epsilon_c)^n \dots\dots\dots(3-1)$$

$$\text{綜合水介電度 } (\epsilon_{wm})^n = \alpha(\epsilon_w)^n + (1 - \alpha)(\epsilon_c)^n \dots\dots\dots(3-2)$$

2. 首先先定義綜合土水混合介電度  $\epsilon_{sm}$  可由下式決定

$$(\epsilon_{sm})^n = \alpha(\epsilon_s)^n + (1 - \alpha)(\epsilon_c)^n \dots\dots\dots(3-3)$$

$$\sqrt{\epsilon_s} = (1 - SS)\sqrt{\epsilon_w} + SS\sqrt{\epsilon_{soil}} \dots\dots\dots(3-4)$$

由於絕緣材質的影響，因此量測所得之空氣、水、土水之介電度都需乘上影響係數，其中 SS 是現地感測器周圍淤積土其固體之體積含量比例，SS 範圍為 0~1， $\epsilon_{soil}$  為感測器周圍淤積土壤固體之介電常數，大約為 3~7，土壤與水混合之介電常數  $\epsilon_s$  受 SS 之影響，因此先基於(3-4)式計算出淤積土壤土水比例關係後，再基於(3-3)式進行綜合土水混合介電度之計算(包含絕緣材)。現地分析時，由於室內已先行求得其它參數，透過現地已知回填砂土厚及水位高度，透過(3-3)與(3-4)式便可於現地進行反算 SS。

3. 擷取初始參考波形，並分析其走時 Reference travel time， $t_r$

$$t_r = t_0 + \frac{2}{c}(L - L_{w,r})\sqrt{\varepsilon_{am}} + \frac{2}{c}(L_{w,r} - L_{s,r})\sqrt{\varepsilon_{wm}} + \frac{2}{c}(L_{s,r})\sqrt{\varepsilon_{sm}} \dots(3-5)$$

參考圖 3.2-1，其中  $t_0$  為人為定義波形起始點至實際感測器起始點之間的電磁波走時，走時末端為感測器終點反射，其他參數為感測器總長  $L$ 、現地水位高  $L_{w,r}$ 、回填砂土厚  $L_{s,r}$  以及光速  $c$ 。若於擷取初始參考波形階段，已知上述各參數資料，透過檢核水與淤積之走時段  $t_{r,w_s}$ （由空氣與水位介面，至感測器底部位置訊號走時），則  $\varepsilon_{sm}$  可現地標定。

4. 實際量測步驟(1) – 水位量測：實際擷取即時量測波形，並分析波形定義起點至空氣與水介面之走時  $t_{m,air}$  可表示為

$$t_{m,air} = t_0 + \frac{2}{c}(L - L_{w,m})\sqrt{\varepsilon_{am}} \dots\dots\dots(3-6)$$

另外由(3-5)參考波形，擷取其空氣段  $t_{r,air}$

$$t_{r,air} = t_0 + \frac{2}{c}(L - L_{w,r})\sqrt{\varepsilon_{am}} \dots\dots\dots(3-7)$$

則實際擷取即時量測波形走時  $t_{m,air}$  與參考波形空氣段，其兩者相扣求得即時水位  $L_{w,m}$

$$L_{w,m} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{am}}}(t_{r,air} - t_{m,air}) + L_{w,r} \dots\dots\dots(3-8)$$

5. 實際量測步驟(2) – 沖刷量測：實際擷取即時量測波形，並分析波形定義起點至感測器終點之走時  $t_m$

$$t_m = t_0 + \frac{2}{c}(L - L_{w,m})\sqrt{\varepsilon_{am}} + \frac{2}{c}(L_{w,m} - L_{s,m})\sqrt{\varepsilon_{wm}} + \frac{2}{c}(L_{s,m})\sqrt{\varepsilon_{sm}} \dots\dots(3-9)$$

由第 4 步驟，在已知即時水位  $L_{w,m}$ ，則可提出對應之純水理論走時：

$$t_h: t_0 + \frac{2}{c}(L - L_{w,m})\sqrt{\varepsilon_{am}} + \frac{2}{c}(L_{w,m})\sqrt{\varepsilon_{wm}} \dots\dots\dots(3-10)$$

將(3-5)參考走時與(3-10)純水理論走時差推得下式

$$\Delta t = t_h - t_r = \frac{2}{c}(L_{w,r} - L_{w,m})\sqrt{\epsilon_{am}} + \frac{2}{c}(L_{w,m} - L_{w,r} + L_{s,r})\sqrt{\epsilon_{wm}} - \frac{2}{c}(L_{s,r})\sqrt{\epsilon_{sm}} \dots\dots(3-11)$$

後續將(3-5) 式參考波型走時與及(3-9) 式實際擷取即時量測波形  $t$ ，計算出走時差之值  $\Delta t$ ，接著透過(3-12) 式，可求得即時泥砂厚度  $L_{s2}$

$$L_{s2} = [\Delta t - (t_m - t_r)] \frac{c}{2(\sqrt{\epsilon_{wm}} - \sqrt{\epsilon_{sm}})} \dots\dots(3-12)$$

測得即時泥砂厚度後與最初之回填土層厚度相比較，便可得知即時的沖淤量。

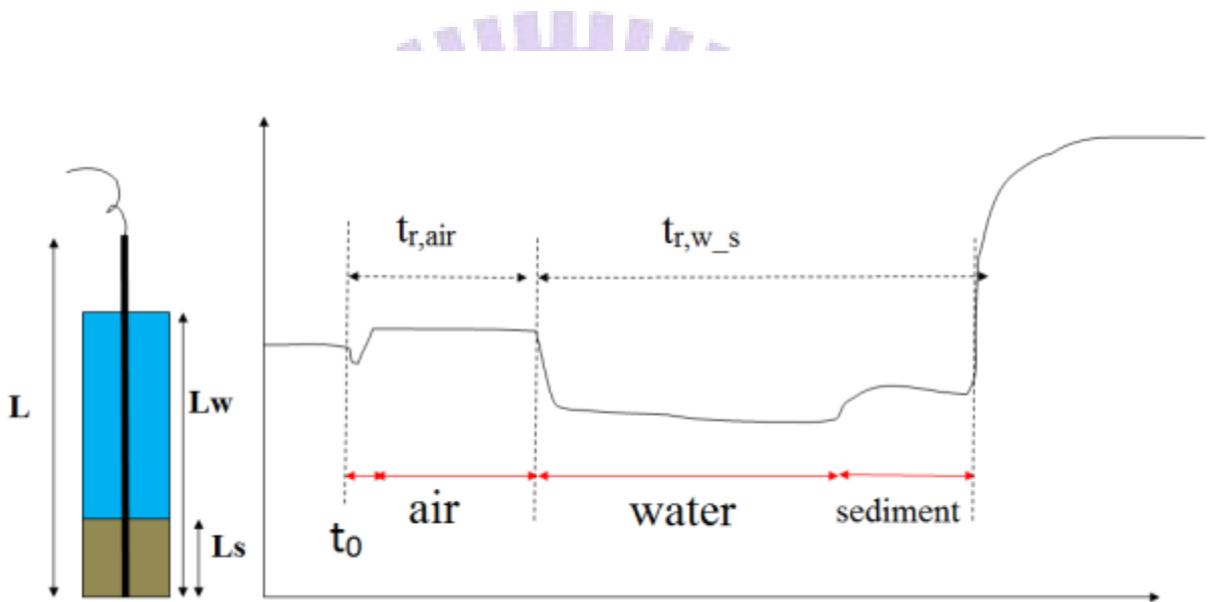


圖 3.2-1 全波型走時示意圖

### 3.3. 現場測試規劃

本研究將進一步施作現場試驗，測試感測器於現地使用之可行性。現場測試場址計劃位於台 3 線 158K+985 東勢大橋(大甲溪流域)，原名為「東豐大橋」是進入東勢鎮必過之橋，然而在經歷過 921 地震之後，東豐大橋變成了一座危橋，經過了一年的的改建，在民國 91 年的 2 月 4 號正式完成這個東勢鎮在災後重建的最大工程，耗資四億兩千五百萬元，重建後的東豐大橋正式改名為東勢大橋。東勢大橋在 921 地震後的結構上大大的改變

了，橋的結構從鋼筋混凝土改為鋼樑結構，參照圖 3.3-1，而防震係數也提升到了 0.33，可耐七級地震，總長為 1129 公尺。

橋墩周圍的地質條件為泥岩所構成，於汛期其間可能產生沖刷行為。現地測試將同步搭配沖刷磚，等待汛期結束後，依沖刷磚剩餘數量便可推得曾經最大刷深，進而評估 TDR 現地最大沖刷量測之準確性。現地安裝整體初步規劃如圖 3.3-2 所示，計劃於 P3 以及 P7 橋墩上游側進行安裝與實測，監測系統將建構於 P7 段，如圖 3.3-3。

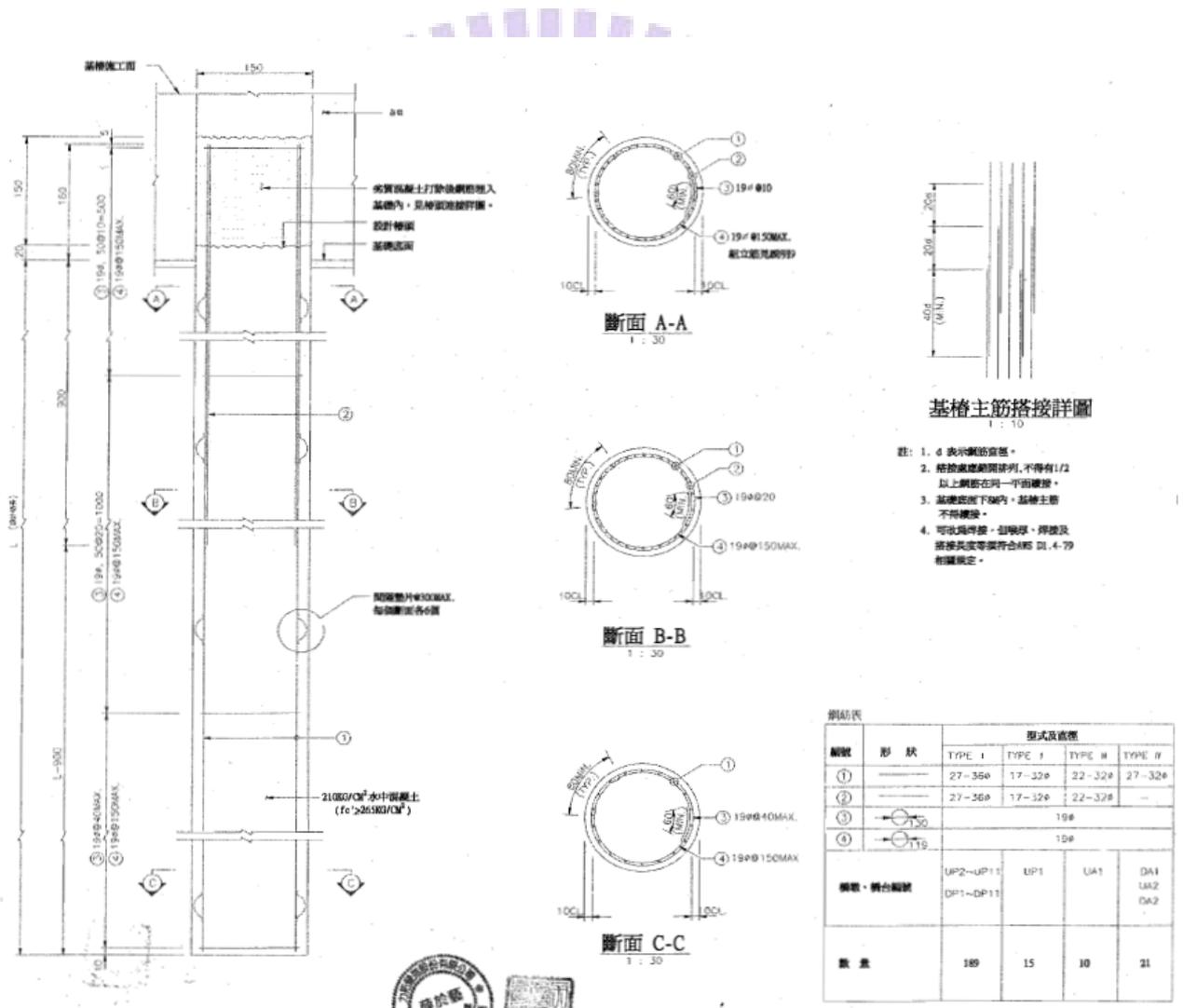


圖 3.3-1 東勢大橋結構圖

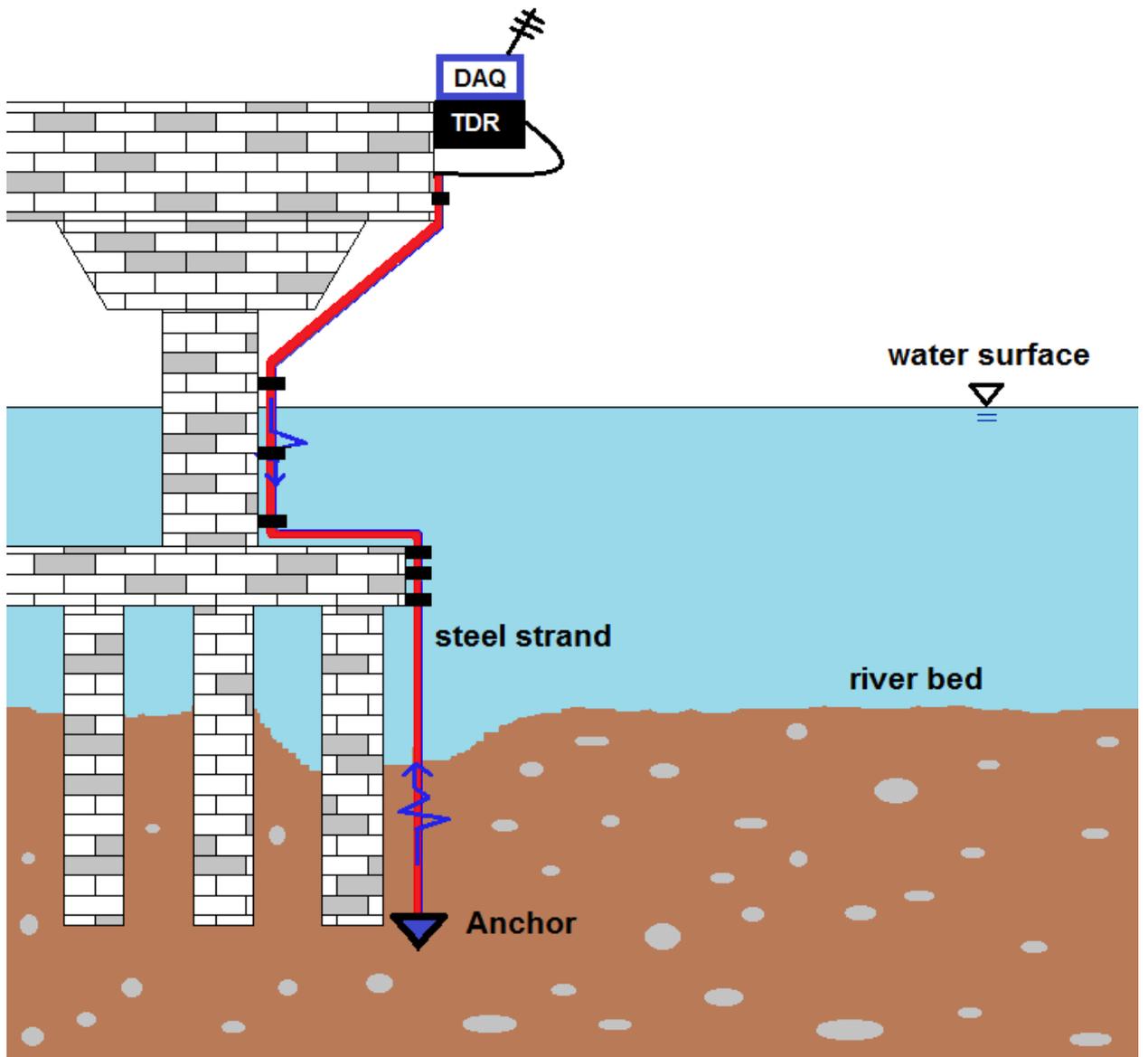


圖 3.3-2 TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖

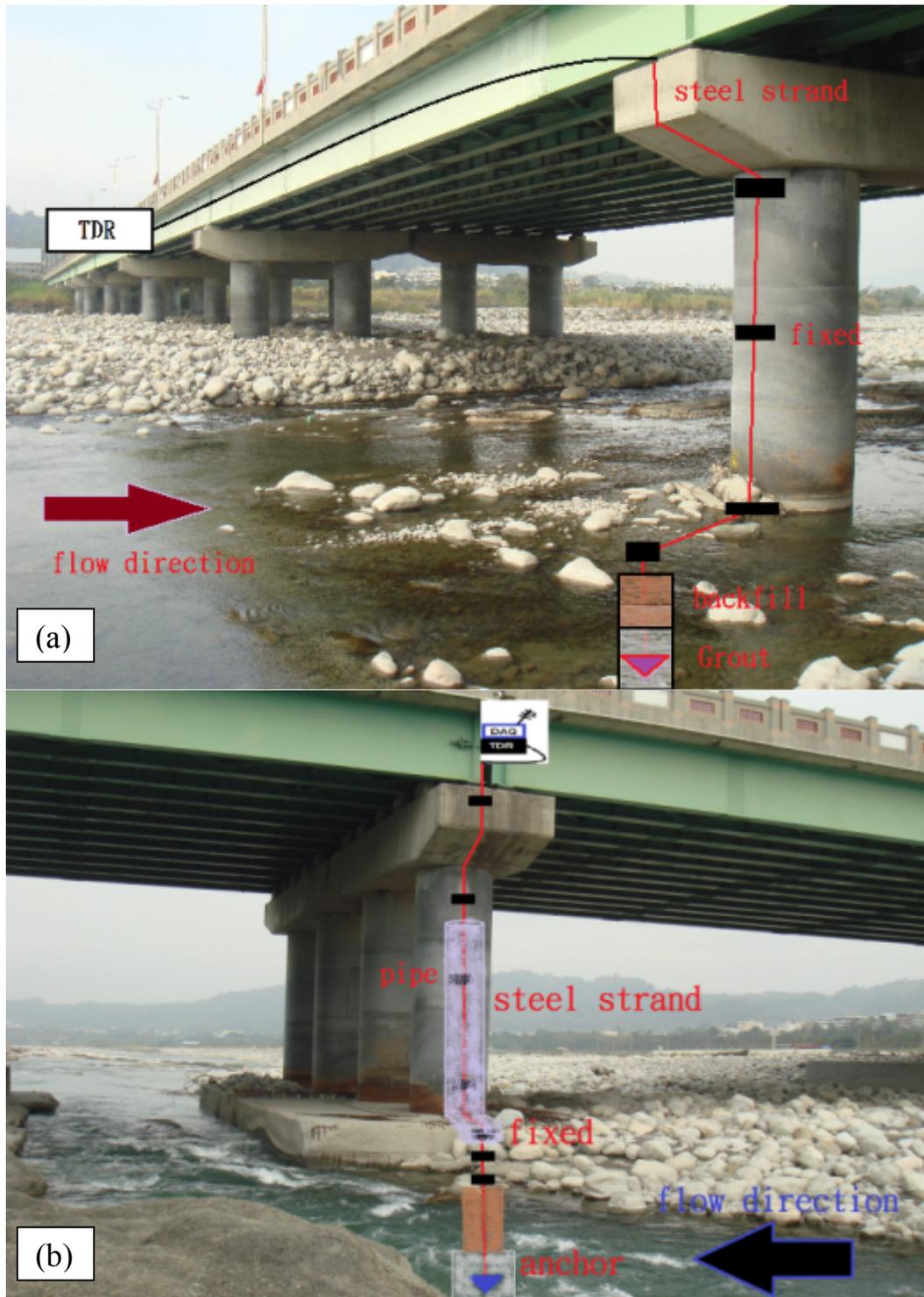


圖 3.3-3 (a)東勢大橋 P3 段安裝示意圖(b)東勢大橋 P7 段安裝示意圖

## 第四章 試驗結果與討論

### 4.1. TDR 沖刷量測效能評估與影響因子探討

本論文為 TDR 沖刷感測器之研發，目的在於提出較具安裝實務可行性之桿式與纜式兩種型態之感測器。感測器之設計主要考量為透過部分導體絕緣克服訊號衰減問題，但須維持良好的量測靈敏度，靈敏度之實驗評估採用砂箱模型，於水中利用砂子沉降量來模擬沖刷及回淤所造成不同土層厚度，量測不同沖淤高度相對應之 TDR 波形，由波形走時受沖淤高度之影響程度，判釋感測器之量測靈敏度。

#### 4.1.1 桿式感測器配置探討

為了讓外導體與鑽管在一起進入岩層時不受破壞，試圖將模擬用之鋼管洗槽溝，並把絕緣外導體(銅線)置入槽溝中，型式一配置說明如圖 4.1-1。先進行不同水位測試，測試結果由圖 4.1-2 看出波型隨不同水位，可以明顯判斷走時的不同。接著進行不同土層厚度之量測，結果如圖 4.1-3，推測型式一於土層厚度改變結果，近乎無靈敏度之原因應是槽溝管壁屏蔽效應所導致，造成電場無法感應外圍砂層，因此此種感測器型式仍需進一步改善。

由於型式一可能受到屏蔽效應的關係造成感應效果不彰，因此進行型式二的嘗試，將絕緣銅線的外部表層橡皮膜去除如圖 4.1-4(a)，檢討是否因為絕緣材導致靈敏度下降，結果由圖 4.1-4(b)，從圖中我們可以清楚的辨識出當土層厚度改變，波型也跟著明顯的變化，但是由圖 4.1-5，其能量損失極為迅速。接著再進一步嘗試將空心鋼管一端切平，並利用 POM 將內外導體隔開進行測試，型式三配置如圖 4.1-6。實驗結果如圖 4.1-7，可以清楚的辨識出隨不同土層厚度，靈敏度獲得顯著的改善。

綜合三種不同型式的感測器進行討論，從型式二的實驗結果，能量的

損耗可以透過導體做適當的絕緣處理來進行改善。型式一與型式三相互對照下，型式一近乎無靈敏度之結果，確實是屏蔽效應所導致；但型式三並不利於現地之安裝，因此將於下一小節繼續探討改良槽溝內嵌方案，嘗試改變內外導體間距離及槽溝角度檢討屏蔽效應之影響。

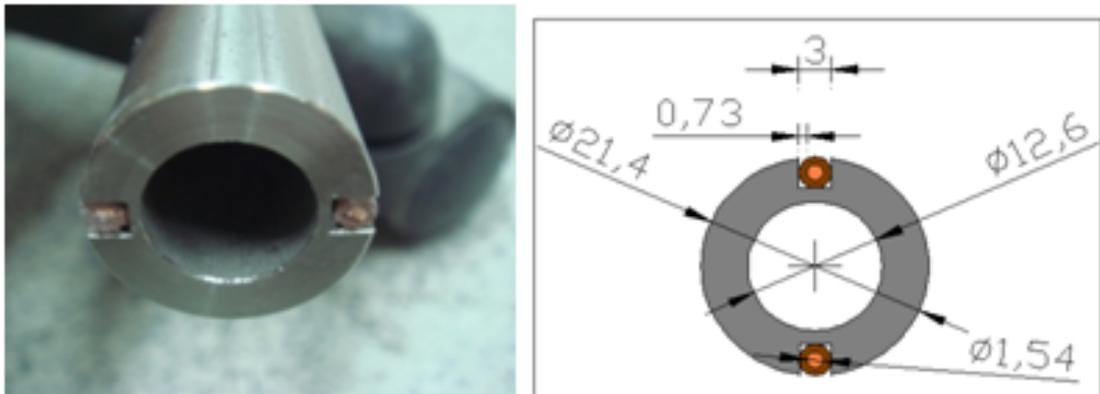


圖 4.1-1 型式一感測器配置圖

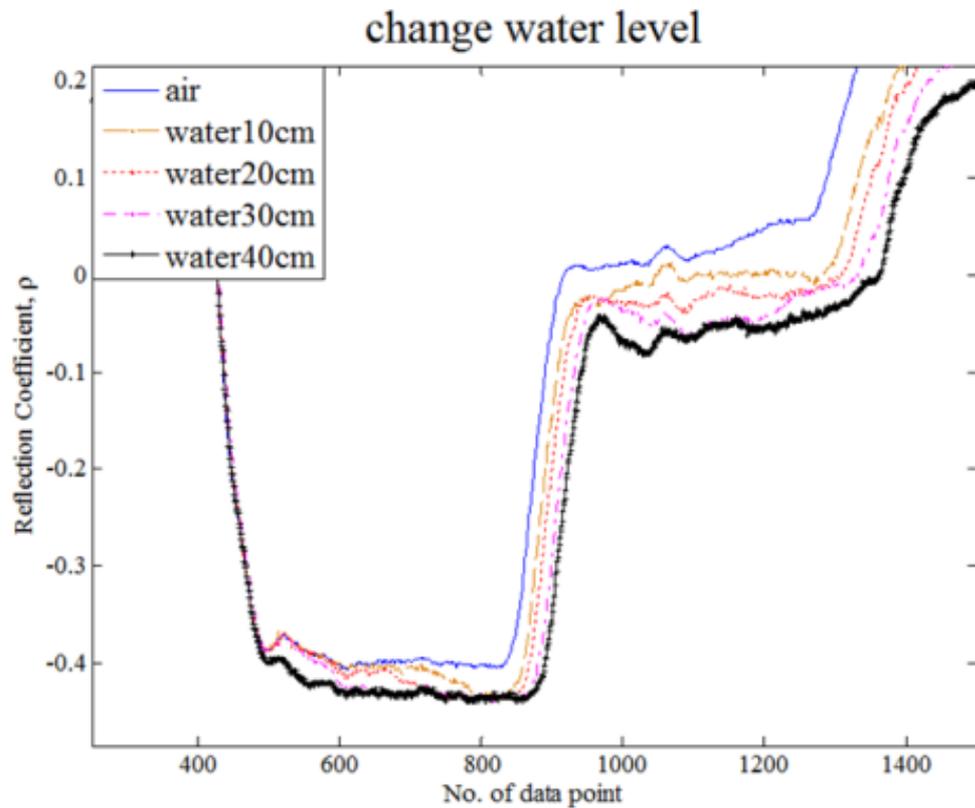


圖 4.1-2 型式一不同水位之測試結果

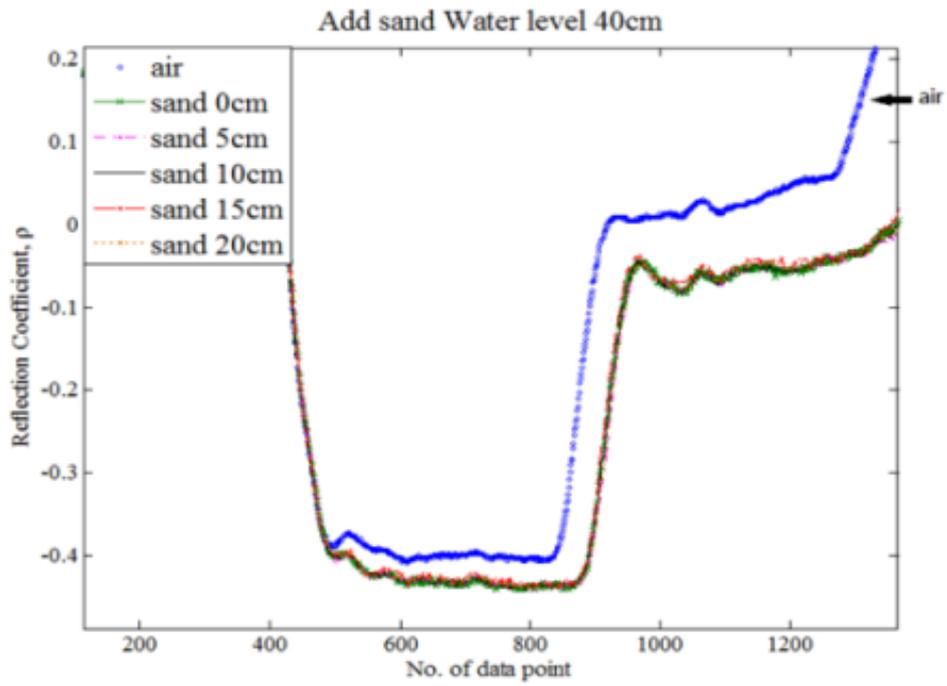
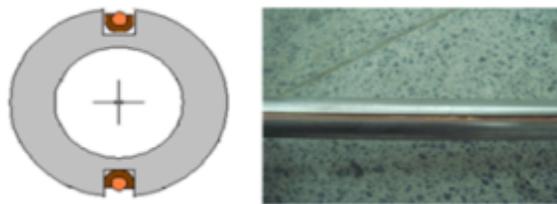


圖 4.1-3 型式一不同土層厚度實驗結果



(a)

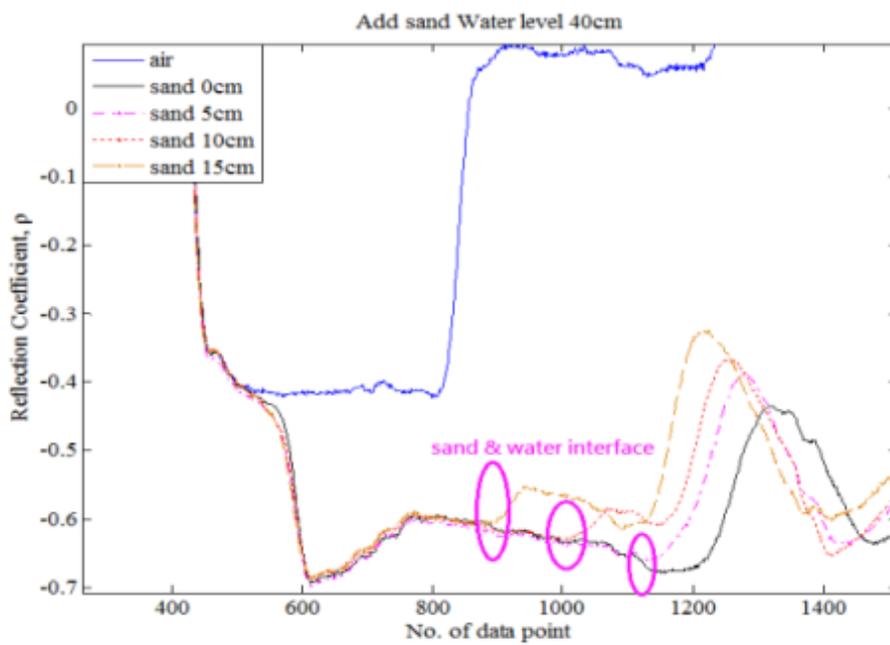


圖 4.1-4 型式二(a)感測器配置(b)不同土層厚度實驗結果

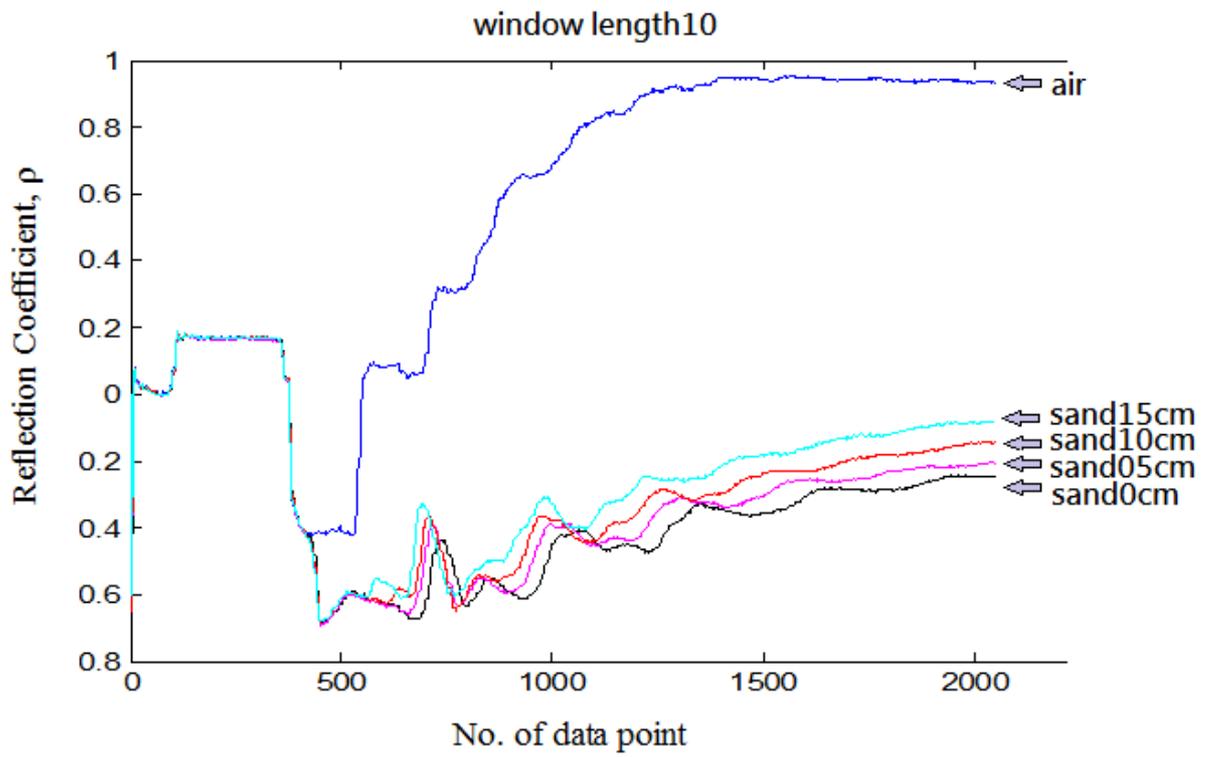


圖 4.1-5 型式二末端波型觀測

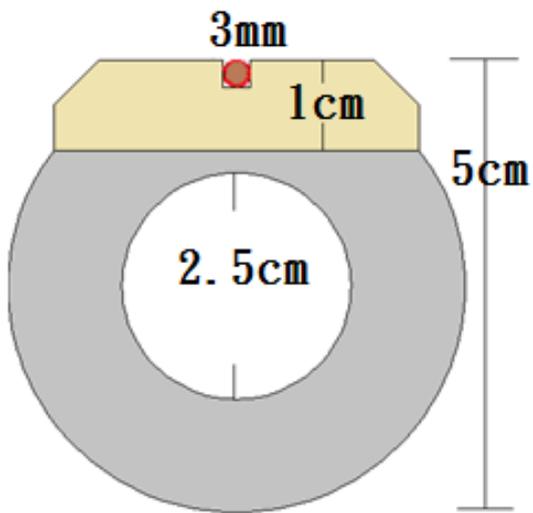


圖 4.1-6 型式三感測器配置

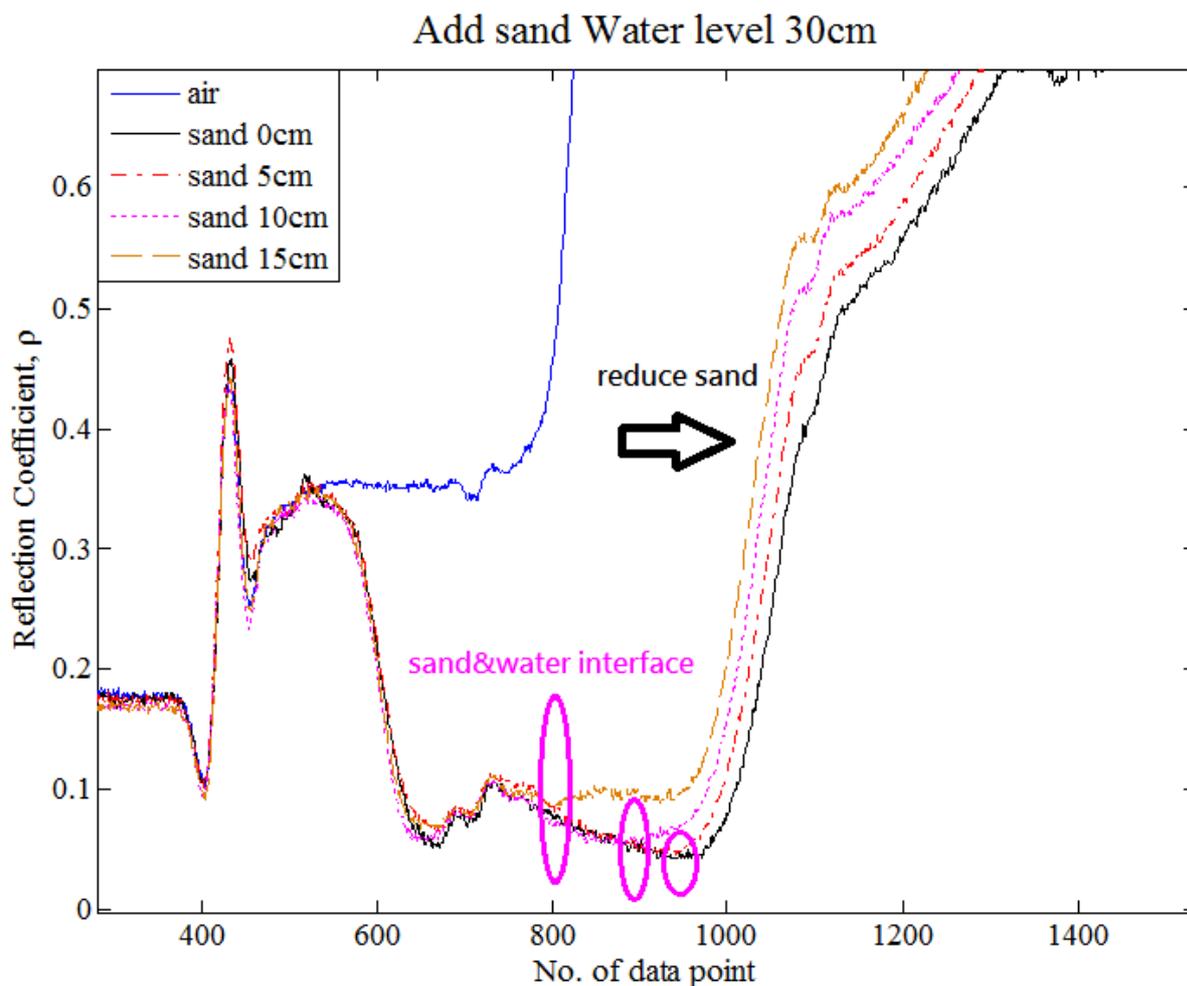


圖 4.1-7 型式三不同土層厚度實驗結果

#### 4.1.2 導體間的角度影響

前一子節實驗結果得知，為了要克服屏蔽效應的影響，將進行改變槽溝角度的比較，將空心鐵管洗出一個槽溝，有別與型式一，槽溝中先行置入一個硬塑鋼，再將另一導體嵌入硬塑鋼中，達到內外導體有些微隔開的效果。配置比較如圖 4.1-8 (a)(b)，其量測的結果如圖 4.1-8 (c)，改變水位時，其波型變化較型式一靈敏；接著進行改變土層厚度，結果由圖 4.1-8 (d) 顯現，其靈敏度仍舊沒有太大的改善。接著逐漸改變其角度，如圖 4.1-9 及圖 4.1-10。由 120 度至 180 度的變化明顯的看出，固定水位面在 30cm 高，加砂至 15cm 厚，隨角度增加屏蔽效應越來越小，在固定的試驗模式下其走時差逐漸增加，如表 4.1-1；因此透過槽溝角度的改變，確實可以改善屏蔽

效應的問題，但若要結合實務，180 度之可行性不高，可能在進行鑽掘時便導致外部的硬塑鋼造成磨損，進而破壞外部導體，因此桿式感測器為了配合實務上的應用，建議採用 135 度或是 160 度之型式。

表 4.1-1 改變槽溝角度之靈敏度判釋結果

角度	120 度	135 度	160 度	180 度
走時差	1.2114e-010	1.3265e-010	1.8952e-010	2.6777e-010

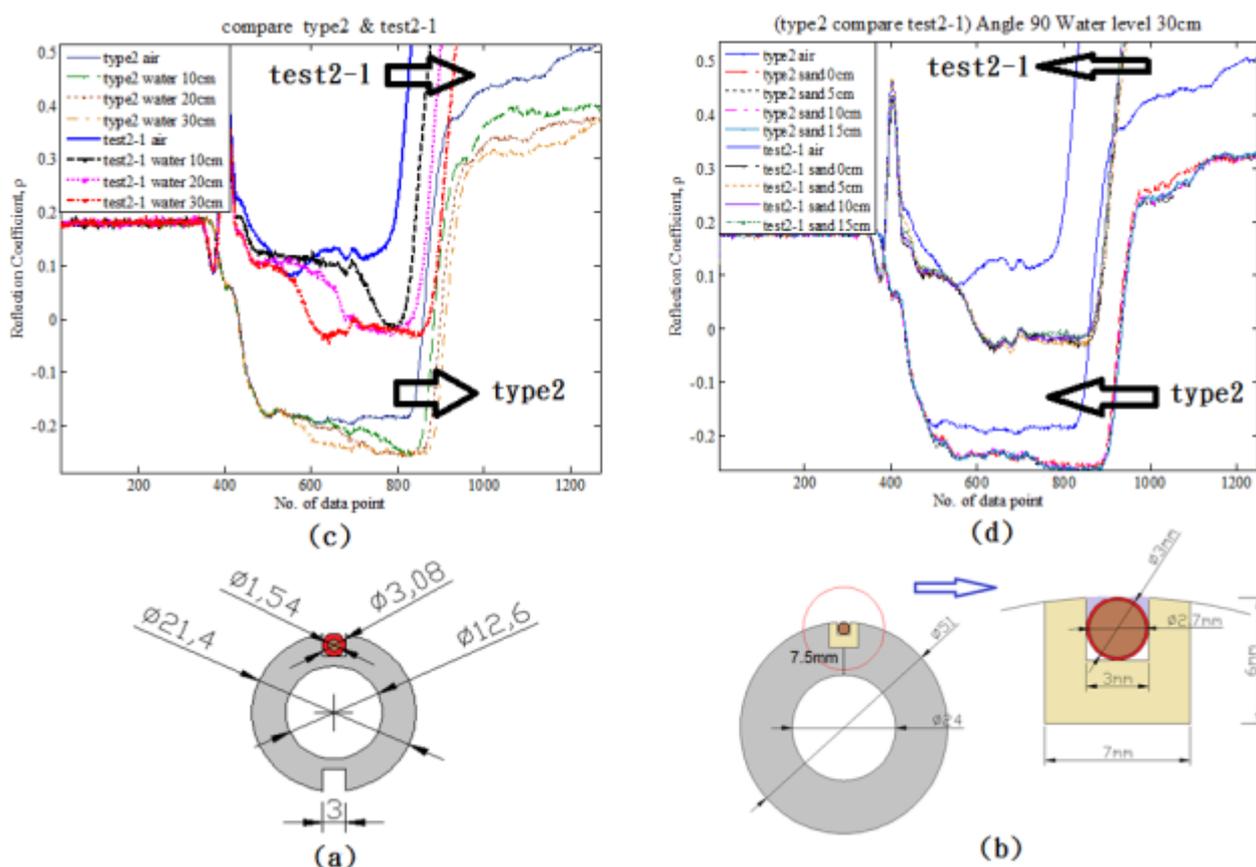


圖 4.1-8 (a)型式二感測器配置圖(b)置入硬塑鋼之 90 度感測器配置圖(c)不同水位實驗(d)不同土層厚度實驗

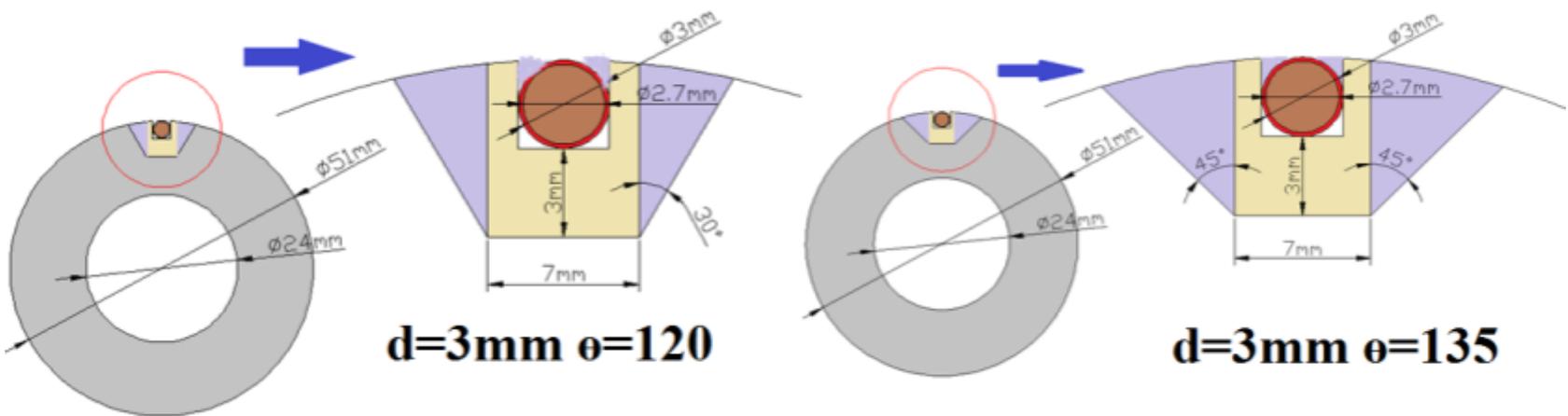


圖 4.1-9 槽溝角度 120 度及 135 度之配置示意圖

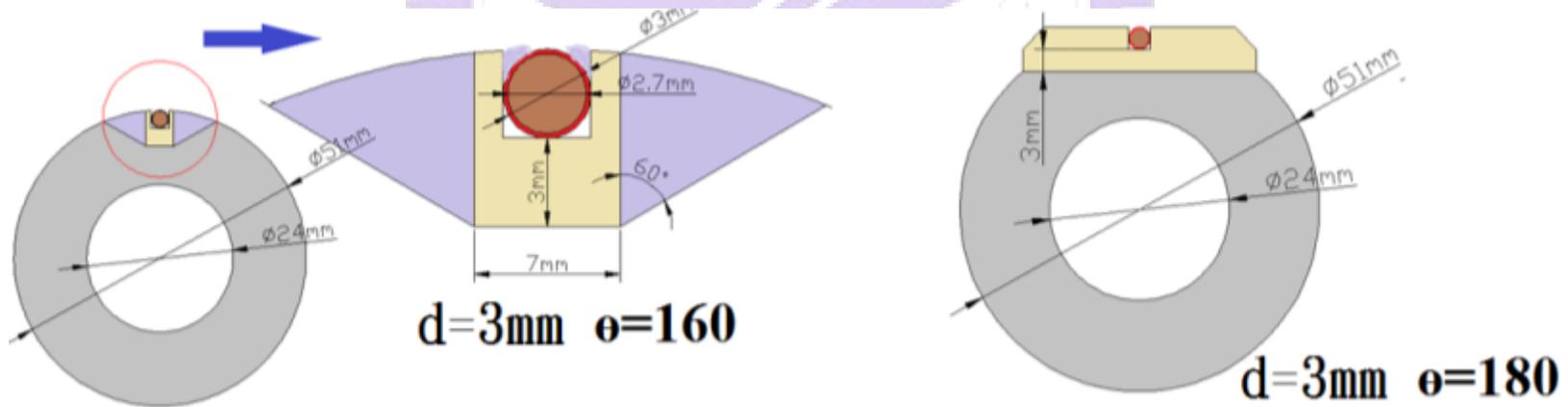


圖 4.1-10 槽溝角度 160 度及 180 度之配置示意圖

### 4.1.3 纜式感測器配置探討

桿式之感測器雖可結合鑽探施做，但為內外導體不易對接，且桿式之感測器屬於剛性結構，在與大石頭及漂流木相互撞擊下，耐用性仍有待評估，因此本研究另外提出類似地錨工法採用鋼索型式之柔性感測器，並透過斷面積縮減達到降低衝擊力的效果。

先行利用一般的電纜線模擬成鋼索配置型式，如圖 4.1-11。雙導體皆做防水處理，結果由圖 4.1-12，明顯可以辨識出隨土層厚度不同，波型逐漸提前之趨勢。接著將電纜線改成鋼索及絕緣銅線，如圖 4.1-13。實驗結果與電纜線的走時差相近，如表 4.1-2，因此鋼索式應是可行的，下一子節將以不鏽鋼鋼索進行各種可能之影響因子評估。

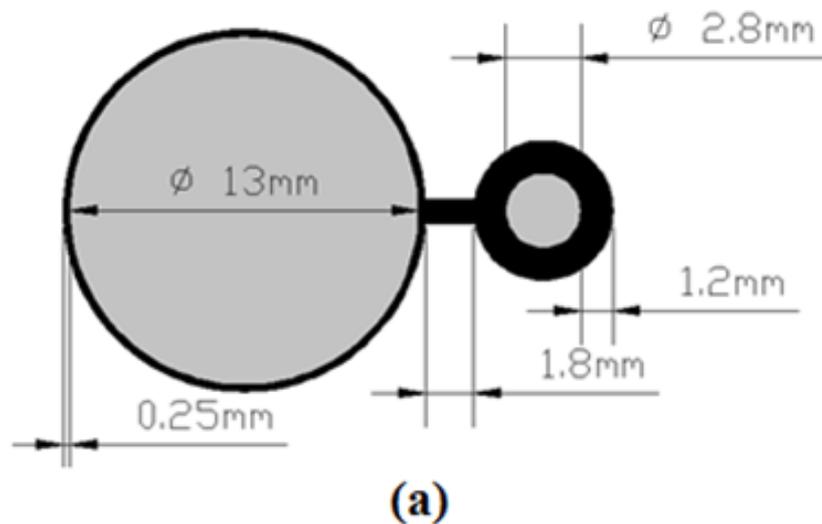


圖 4.1-11 電纜配置示意圖

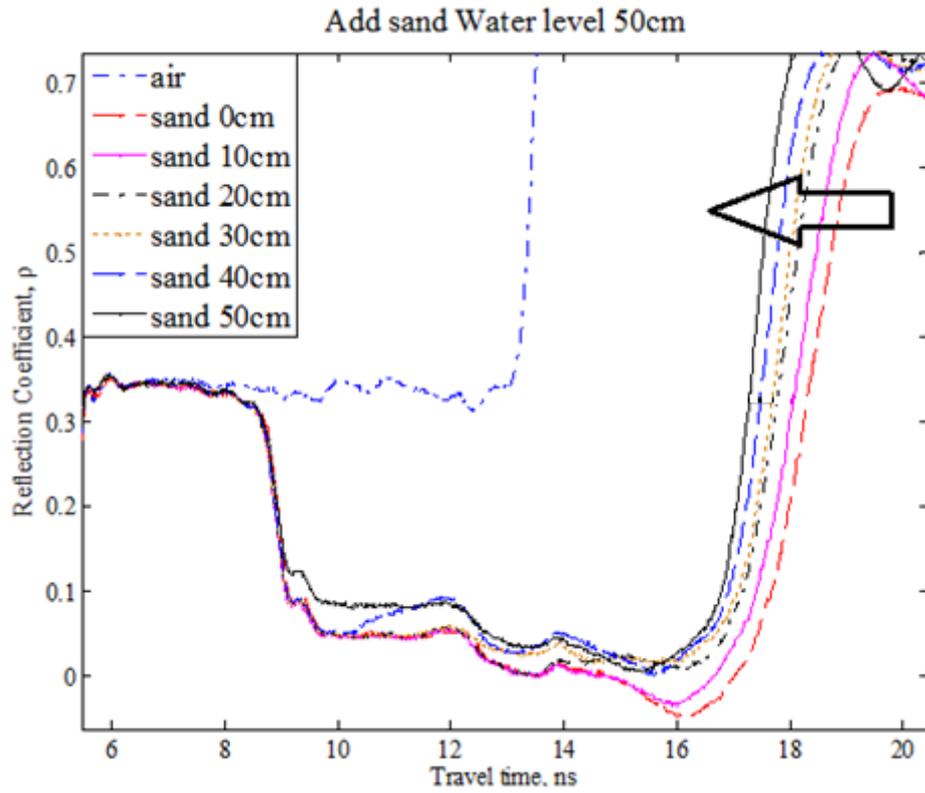


圖 4.1-12 型式一不同土層厚度實驗結果

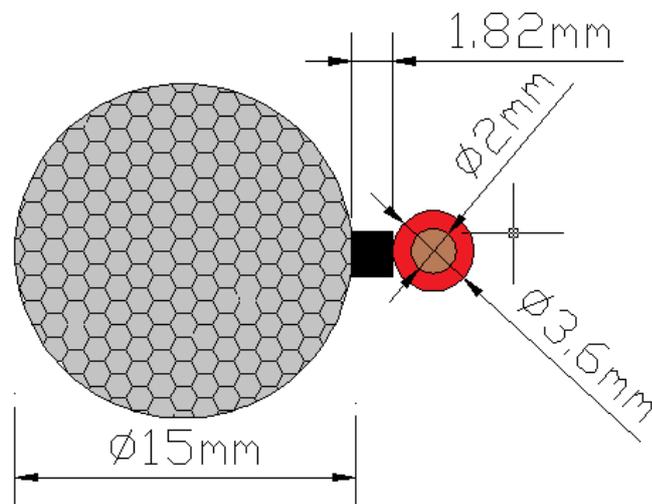


圖 4.1-13 型式二鋼索加包膜銅線

表 4.1-2 電纜與鋼索試驗結果

型式	電纜	鋼索
走時差	8.4951e-010	6.3978e-010

#### 4.1.4 纜式感測器各種因子評估

為了可以提高感測器於現地之耐用性，同步進行了不鏽鋼鋼索搭配包膜細鋼索之試驗，由圖 4.1-14 顯示感測器之斷面配置圖，無論絕緣線採用銅線或細鋼索，均有不錯的量測靈敏度，再配置雷同的情形下，銅線之效果似乎有較靈敏的趨勢。接著進行導體尺寸之探討，固定絕緣銅線之尺寸，由圖 4.1-15 所示，隨著鋼索越大，所測得之靈敏度越大，但一定尺寸以上，如比較 9.3mm 及 16mm 兩種尺寸，隨配置比例的關係靈敏度反而下降。接著進行固定不鏽鋼鋼索之大小，改變包膜鋼索大小，由圖 4.1-16 所示。亦顯示靈敏度隨細鋼索尺寸之加大而增加。

現地安裝時，鋼索置於鑽孔內需回填，回填材質可能影響感測之靈敏度，分別進行渥汰華砂、礫石(如圖 4.1-17)及苗栗南湖細砂，三種回填料的探討，結果顯示當粒徑越大時，靈敏度較差。主要原因為 TDR 鋼索之感測主要在鋼索鄰近周圍，顆粒越大鋼索表面之孔隙面增加，進而影響感測靈敏度，因此決定鋼索尺寸後，需選擇適當的回填方式。為進一步驗證所研發感測器克服訊號衰減之成效，將 10 公尺長的感測器置入水中，結果如圖 4.1-18 所示，雖然波形因長度增加（電阻增加）而有平滑化現象，但末端反射點還是可以清楚辨識。

表 4.1-3 纜式因子實驗結果

試驗種類	材質改變		導體尺寸(mm)		導體尺寸(2)(mm)		回填料粒徑	
	走時差	銅線	7.4585e-010	5.8	6.5914e-010	2.5	4.1093e-010	碎石子
鋼索		4.1093e-010	9.3	7.4585e-010	3.3	5.4241e-010	渥汰華	7.4585e-010
			16	5.3505e-010			南湖砂	4.9863e-010
配置	圖 4.1-14		圖 4.1-15		圖 4.1-16		圖 4.1-17	

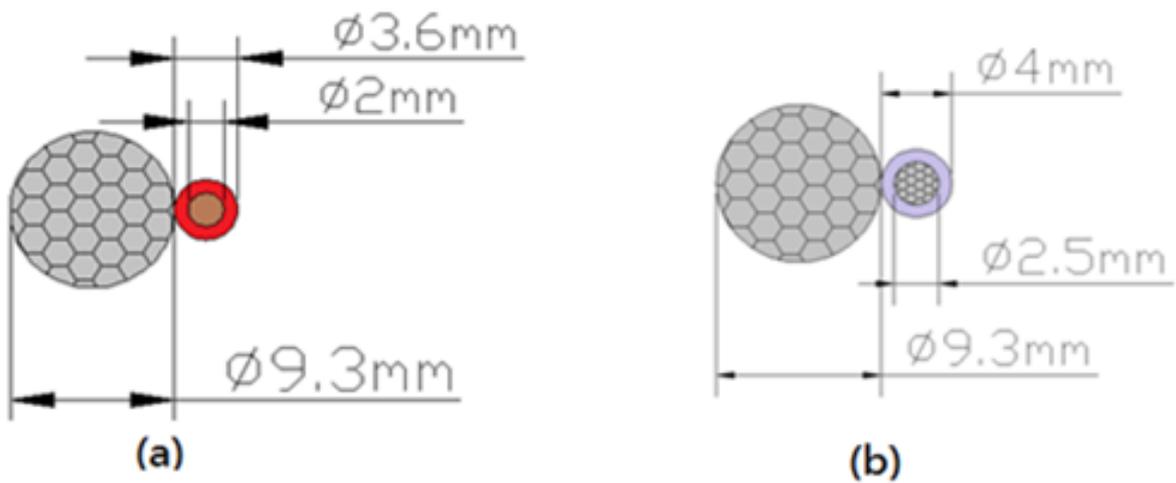


圖 4.1-14 改變導體材質結果比較(a)包膜銅線(b)包膜鋼索

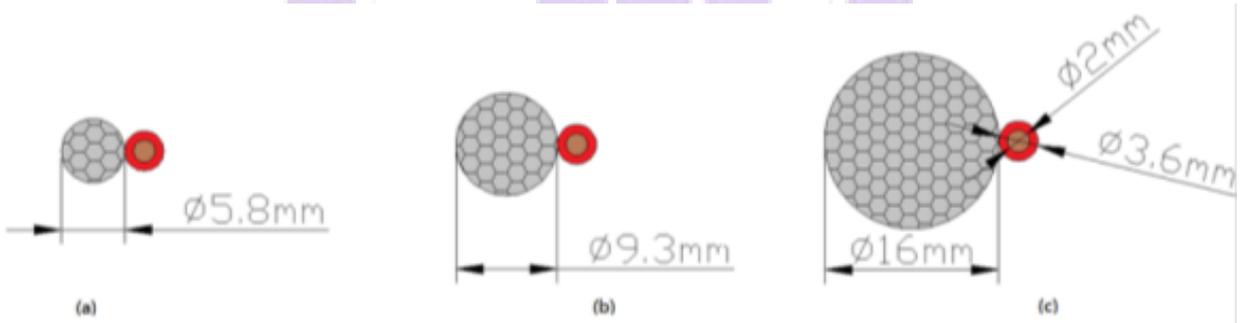


圖 4.1-15 改變無絕緣鋼索大小(a)直徑 5.8mm(b)直徑 9.3mm (c)直徑 16mm

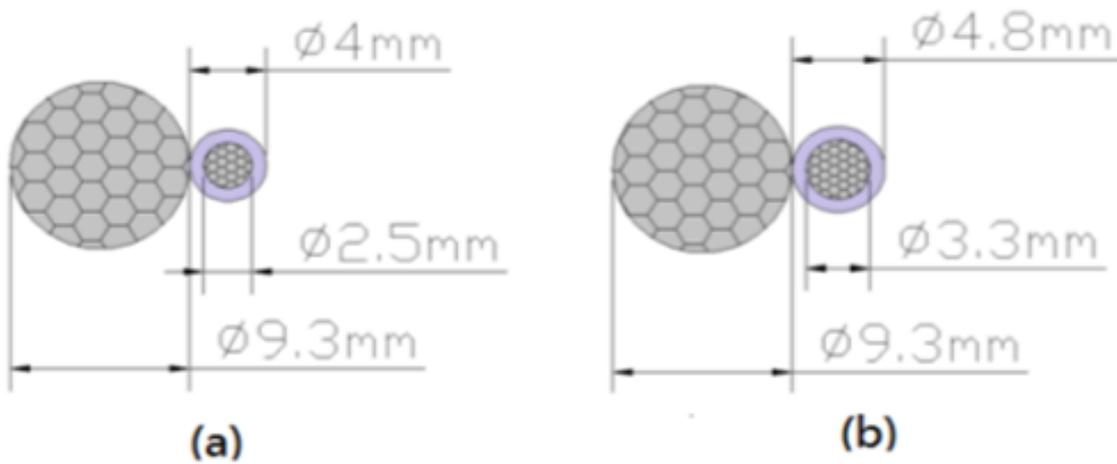


圖 4.1-16 改變包膜鋼索之大小(a)直徑 3.3mm(b)直徑 2.5mm

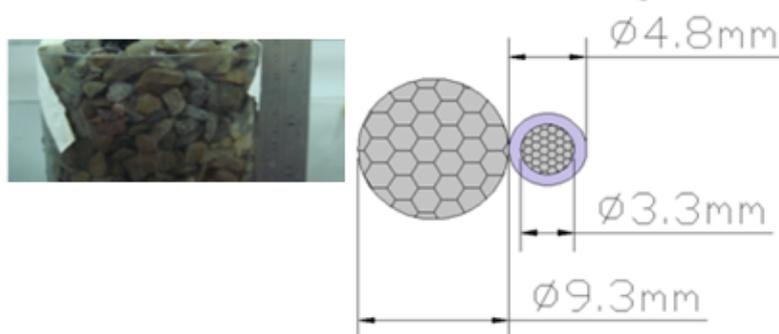
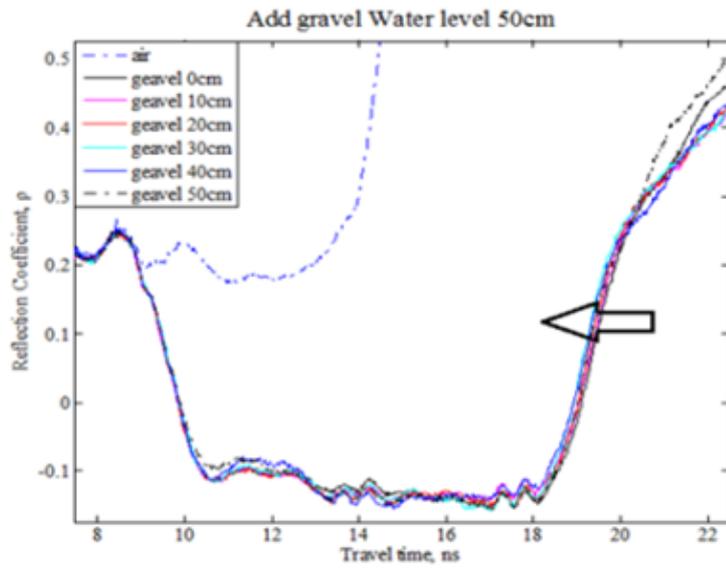
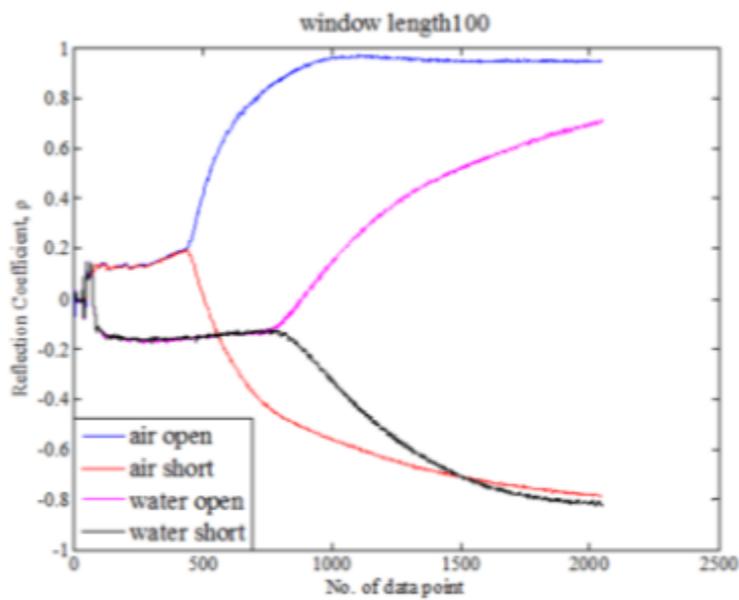


圖 4.1-17 回填料粒徑約 0.5cm~2cm 之碎石之實驗結果



(a)

(b)

圖 4.1-18 (a)能量損失探討(b)感測器實體

#### 4.1.5 室內試驗綜合評析

綜合前述實驗探討，列出以下幾點初步結果，並決定了現地測試之感測器型式，如圖 4.1-19。

1. 鋼管雖然耐撞，但現地安裝時需分段施工，因此內外導體需透過對接的方式串聯，而對接頭施作上不易且工本昂貴，加上鋼索有鋼管所沒有的柔性且感測器施作不需經過複雜的加工。因此將採用鋼索式感測器進行現地試驗。
2. 改變包膜鋼索的大小可以克服材料傳導的問題，因此由包膜鋼索取代包膜銅線。
3. 鋼索試驗經改變尺寸比例結果，選擇靈敏度最佳之組合進行現地感測器施作。
4. 回填料選擇採用粒徑小之南湖細砂，以增加感測靈敏度。



圖 4.1-19 現地所採用之感測器型式

## 4.2. TDR 沖刷分析方法驗證

### 4.2.1 無絕緣感測器之 TDR 全走時分析

為了確認本研究建立之全走時分析法可行性，本研究初步利用無絕緣之鋼棒製成感測器進行量測，分別進行不同水位量測及不同淤積土層厚度量測。淤積土採用南湖砂，基於其基本物性試驗結果，得到南湖砂之土壤

固體體積比 SS 落在 0.5~0.6 區間，因此分析土層厚度將以 SS=0.5(自然允降) 帶入(3-4)式進行演算，並比較三種不同參考波型如表 4.2-1 之實驗結果。

上述實驗結果如圖 4.2-1、圖 4.2-2 所示，水位量測部份，以 tr1 (50 公分水位) 當參考波型，透過與參考波形之空氣段走時差異，以進行水位分析，除水位在 10 公分時誤差達 5%，其餘水位之誤差控制在 1% 內。爾後進行不同淤積土層厚度分析，結果顯示，當固定水位高而改變土層厚度，配合上述三組不同參考波型進行判釋，其結果最大誤差發生在參考波型為 tr1 (50 公分水位)，誤差最大為 5 公分，其它參考波型約略落在 2 公分之誤差值內。

表 4.2-1 參考波型

編號	tr1	tr2	tr3
實驗內容	純水水位 50 公分	水位 50 公分+ 土厚 20 公分	水位 50 公分+ 土厚 50 公分

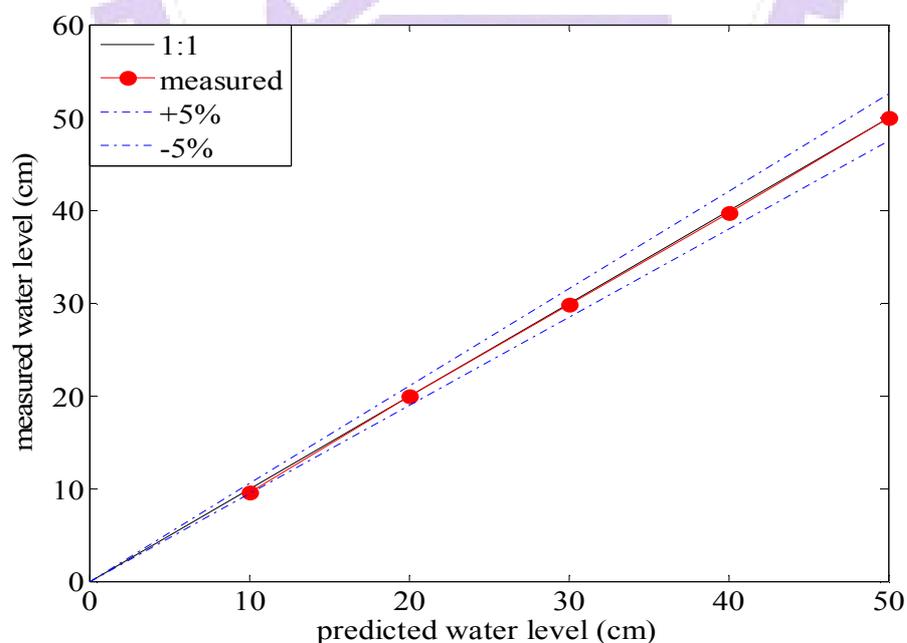


圖 4.2-1 無絕緣感測器水位量測結果

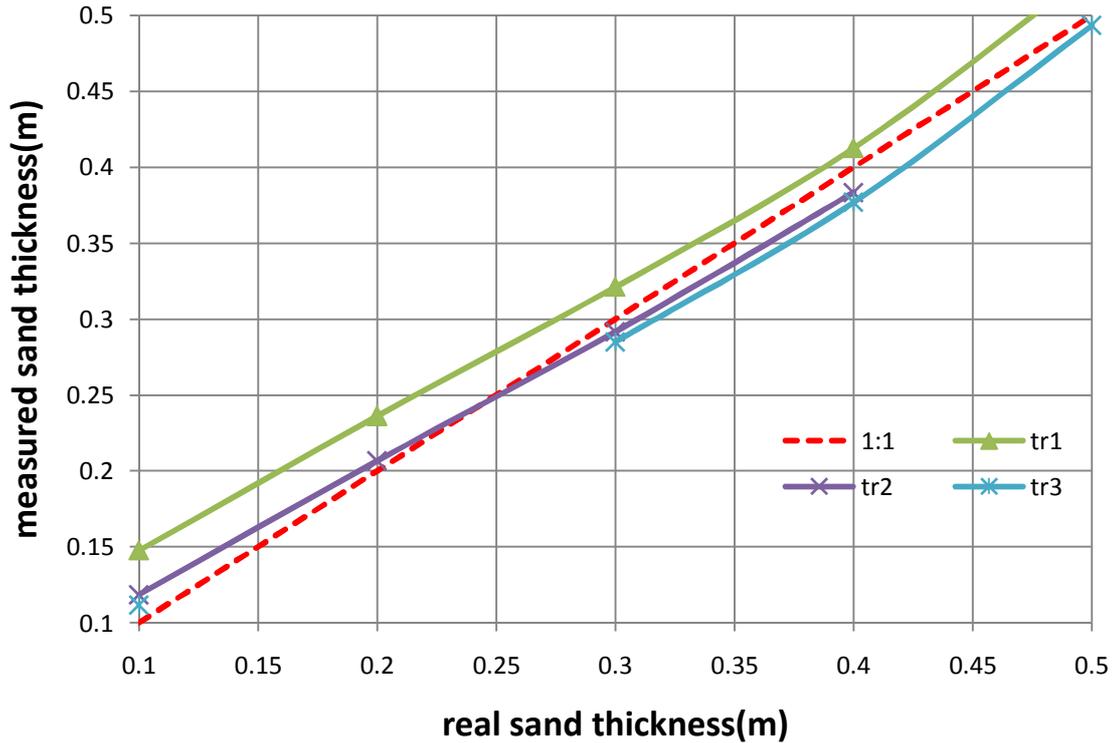


圖 4.2-2 無絕緣感測器土層厚度量測結果

#### 4.2.2 絕緣感測器之 TDR 全走時分析

依據 3.2 節全走時訊號分析方法改良，首先先透過公式(3-1)及(3-2)先進行影響因子之標定，假設當  $n=1$ 、 $n=1/2$  及  $n=-1$ ，其標定結果如表 4.2-2 所示，分別透過空氣段走時差異  $t_{m,air} = \frac{2}{c}(L_{w,m})\sqrt{\epsilon_{am}}$ ，以及純水位段走時  $t_{m,w} = \frac{2}{c}(L_{w,m})\sqrt{\epsilon_{wm}}$ ，進行兩種水位量測分析比較（參考圖 3.2-1），其結果如

圖 4.2-3 及圖 4.2-4 所示，利用空氣段走時差異，所得水位結果誤差在 2% 以內，利用純水段走時分析水深，僅 1% 之誤差值，且利用空氣段進行水位量測需設定一參考波型，利用純水段則直接利用自身走時即可換算得水位。

後續淤積土層厚度計算過程，則採用表 4.2-2 之參數並假設當  $SS=0.5$ ，搭配不同參考波型(tr1=純水水位 50 公分、tr2=± 40 公分+水位 50 公分)，

其結果如圖 4.2-5 所示，其中以  $n=1$  時，代入理論公式，所分析得之土層厚度與實際值較為接近，但其變化量仍不太合理。

接著固定水位，改變各土層厚度及透過不同參考波型( $tr1$ =純水水位 50 公分、 $tr2$ =± 40 公分+水位 50 公分)，假設當  $n=1$  及  $SS=0.1$  所得之量測資訊如圖 4.2-6，其不同土層厚度變化量之趨勢較為合理，然而但當參考波型改變時，卻有一偏移量隨著產生。為了證實是否量測資訊會隨參考波型選擇而影響，本研究改由固定土層厚度，變化不同水位之實驗，其中參考波形分別設定為  $tr1$ =純水水位 50 公分、 $tr2$ =± 40 公分+水位 50 公分及  $tr3$ =± 20 公分+水位 50 公分，其結果如圖 4.2-7，當參考波型改變時，其預測土厚結果也隨之產生一偏移量。

整理 4.2.1 節之實驗，全走時分析法在感測器無絕緣下分析之誤差僅 5 公分，但當感測器改由絕緣鋼索時，發現其量測之走時靈敏度下降，感測器於土水中雖可由全波型觀測出其走時差，但對於全走時而言靈敏度仍不佳，因此將淤積土壤固體體積比  $SS$  由 0.5 調整至 0.1，配合不同土層厚度改變試驗時，其分析後量測值變化之趨勢較為合理化。接著經觀察改變不同參考波型之結果，發現隨參考波型之不同，分析之淤積土厚與實際值產生一等距之偏移量。推測其走時變化量套用於 3.2 節公式(3-9)中相較於參考波型之  $L_s$ ，所估的比重低於已知值  $L_s$ ；相對的，整體的實驗結果會由參考波型已知的  $L_s$  控制結果，並產生一個偏移量。

表 4.2-2 各參數標定結果

	$n=1$	$n=1/2$	$n=-1$
感測器量測之係數 $\alpha$	0.065	0.156	0.356
絕緣材質介電度 $\epsilon_c$	2.19	1.53	0.211
綜合空氣介電度 $\epsilon_{am}$	2.12	2.09	2.03
綜合水介電度 $\epsilon_{wm}$	7.17	7.15	7.11

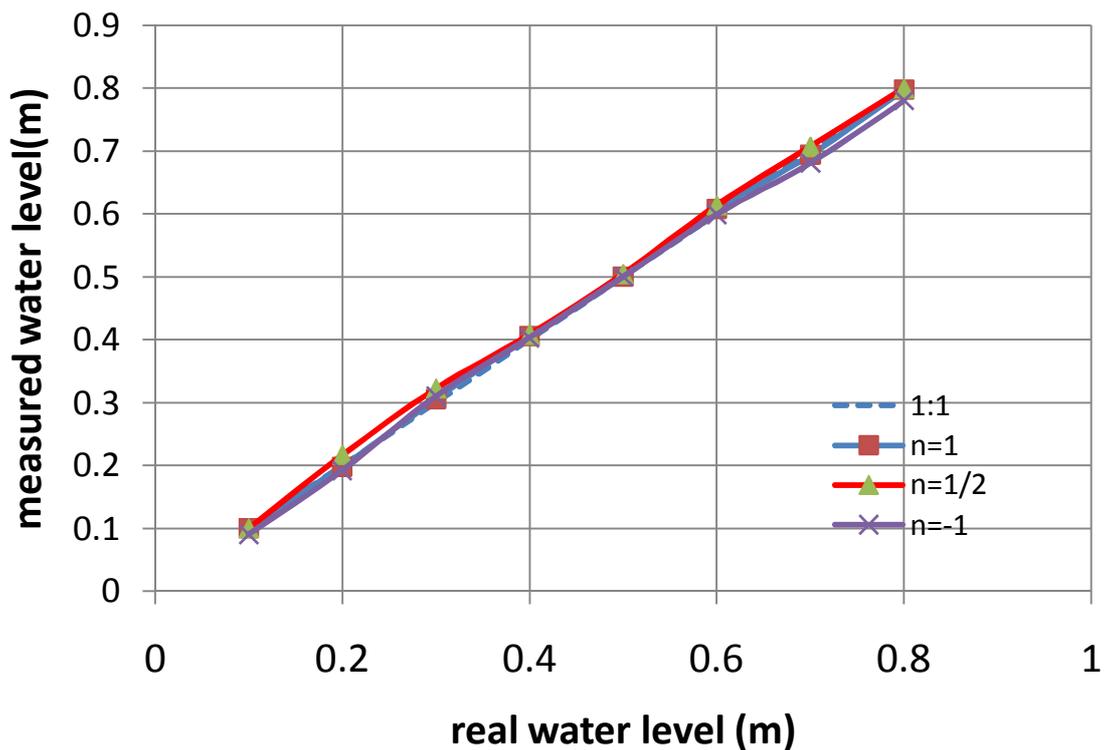


圖 4.2-3 利用空氣段走時差異以計算量測水位結果

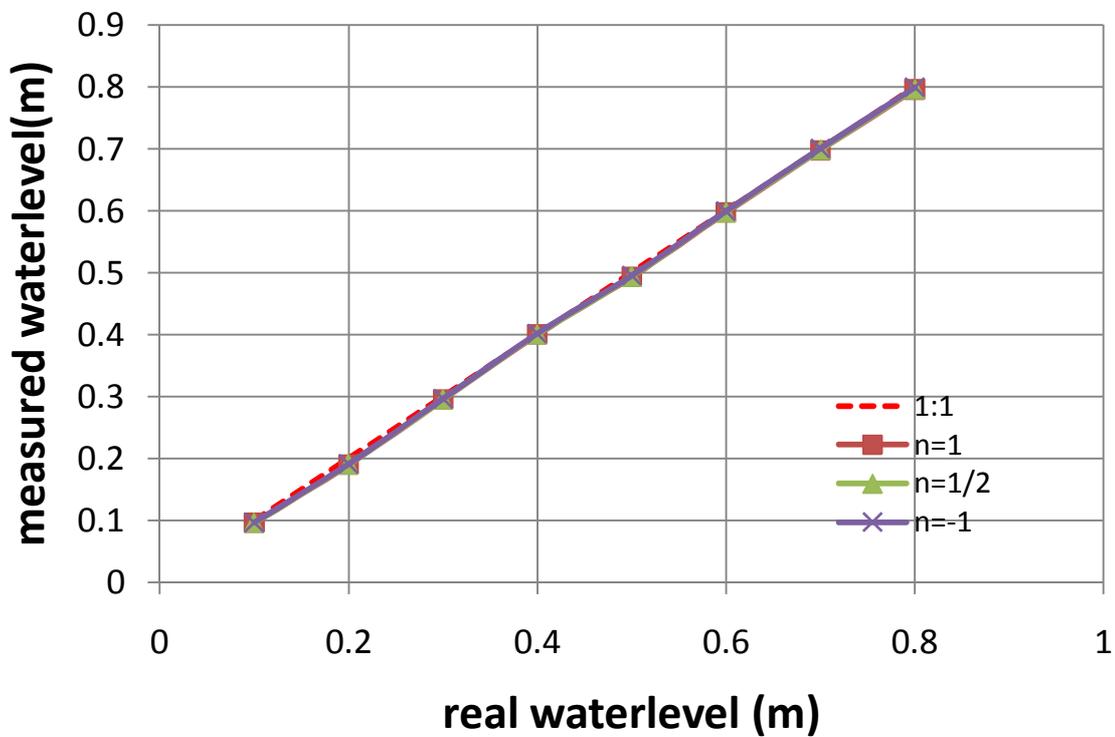


圖 4.2-4 利用純水段計算量測水位結果

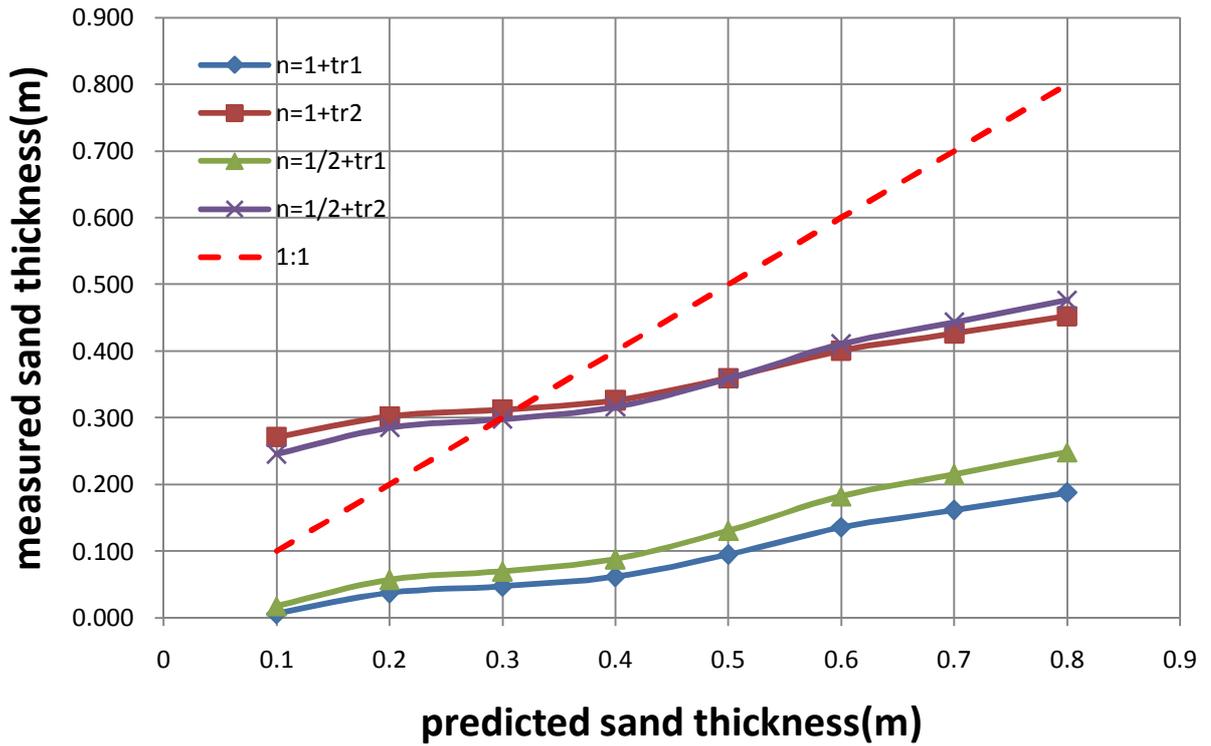


圖 4.2-5 假設當 SS=0.5，改變不同 n 值所得之土層厚度分析結果

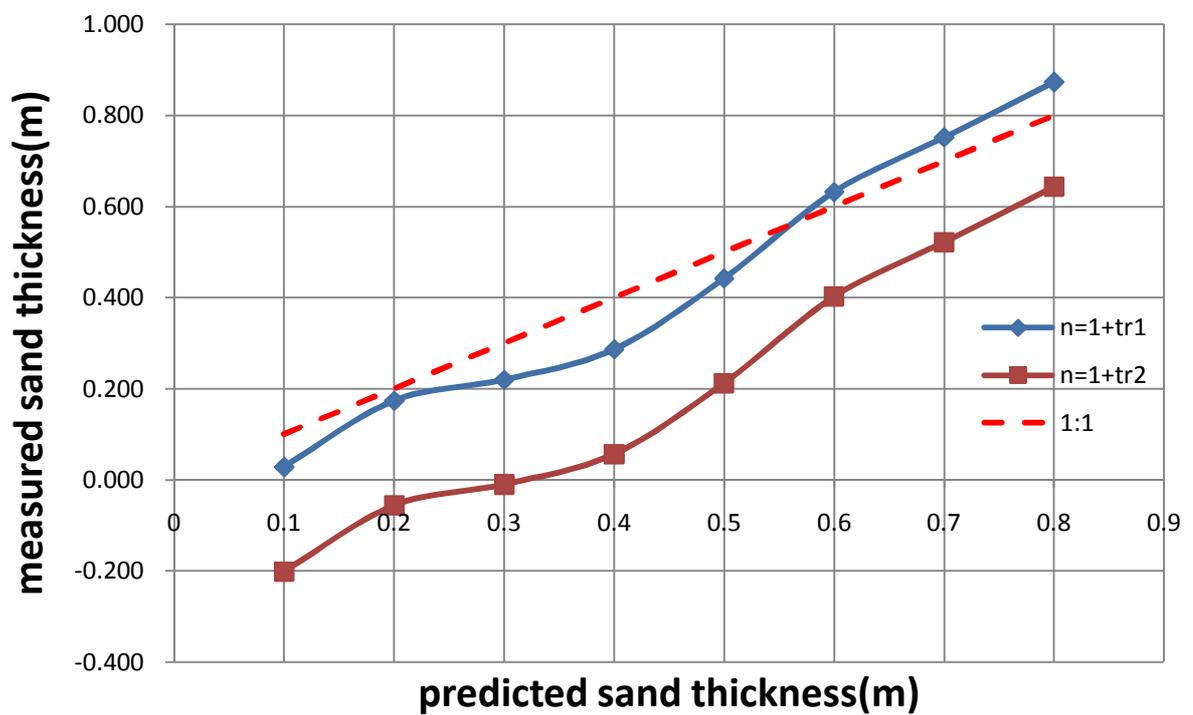


圖 4.2-6 假設 n=1，SS=0.1 改變參考波型所得之土層厚度分析結果

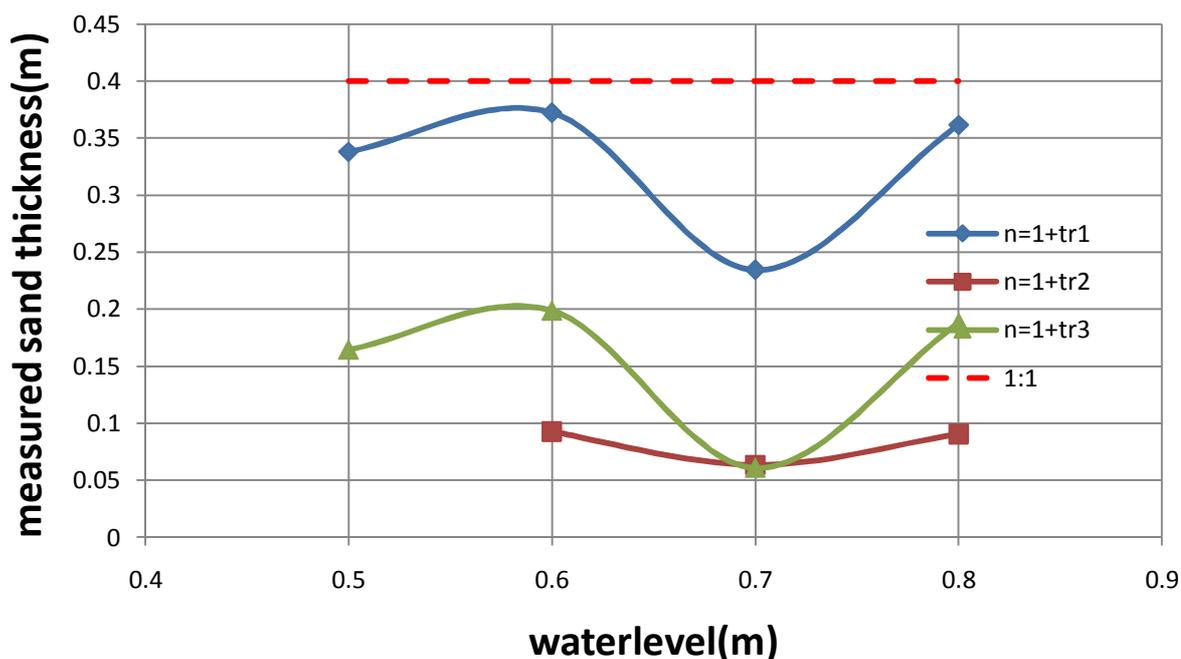


圖 4.2-7 SS=0.1 固定土層厚度變化水位，改變不同參考波型之演算

### 4.2.3 感測器土水段走時分析方法驗證

基於前述試驗分析結果，因全走時分析法於絕緣感測器應用，其淤泥厚度分析結果受參考波形選擇而影響，另外由圖 4.2-4 確認純水段走時分析於水位量測之結果的合理性後，本研究則初步建議採用感測器於土水段之走時分析，進一步瞭解其適用性。

本研究利用室內淤積模擬試驗，每增加 10 公分之厚度便擷取波型並紀錄，共紀錄至土層厚度 80 公分為止，接著將所得之土水混合的波型進行土水段走時分析。初步先進行 SS 的率定，其率定方式如下：

1. 假設  $n=1$ ， $-1$  以及  $1/2$  時，透過不同實驗下得到之空氣段及純水位段走時，並轉換為其對應之介電度，基於公式(3-1)與(3-2)進行最小平方差之標定後可得  $\alpha$ 、 $\epsilon_c$ 。
2. 利用土水段走時公式  $t_{m,w-s} = \frac{2}{c}(L_{w,r} - L_{s,r})\sqrt{\epsilon_{wm}} + \frac{2}{c}(L_{s,r})\sqrt{\epsilon_{sm}}$ ，在室內試

驗已知各土層厚度及水位高度的情況下，可計算出  $\varepsilon_{sm}$ 。

3. 將  $\alpha$ 、 $\varepsilon_c$  代入  $\varepsilon_{sm} = \alpha\varepsilon_s + (1-\alpha)\varepsilon_c$  便可計算出  $\varepsilon_s$ 。
4. 當已知  $\varepsilon_s$  代入  $\sqrt{\varepsilon_s} = (1-SS)\sqrt{\varepsilon_w} + SS\sqrt{\varepsilon_{soil}}$  及可求得 SS，其中  $\varepsilon_{soil} = 3$ 、 $\varepsilon_w = 79$  視水溫調整。

將上述標定方式所得之標定結果反求得各介電常數後，代入公式推求 Ls，(土水段公式： $t_{m,w_s} = \frac{2}{c}(L_w - L_s)\sqrt{\varepsilon_{wm}} + \frac{2}{c}(L_s)\sqrt{\varepsilon_{sm}}$ )，計算之結果如圖 4.2-8 至圖 4.2-10，當  $n=1$ 、 $1/2$  時，兩種標定方式皆顯示當 SS 約等於 0.1， $n=-1$  時，所得之 SS 約等於 0.7，其整體理論走時與實際量測得之走時最為接近。推測改變不同標定方式時，SS 會出現一組相對應的值，使其結果較為合理化。

綜合 4.2.1 及 4.2.2 結果，全走時分析在感測器未絕緣下(靈敏度佳)，當土層厚度改變，量測得到的誤差值最大僅 5 公分；接著將公式套用於絕緣之感測器，當 SS 調整至 0.1，其結果相較於土層厚度實際值才會有一樣的趨勢呈現，但其結果會因參考波型之選擇而變化，隨之產生一個等間距的偏移量。因此為了提昇計算的精度，本研究建議改由透過土水段進行土層厚度分析。

應用土水段分析時，可不需代入參考波型即可求得其土層厚度之值，且土水段分析可不考慮空氣段之結果，減少分析上之誤差。經分析結果當改變  $n$  時會出現一組相互對應之 SS，至此發現，在進行感測器各參數之標定變因現有三組，實驗過程僅透過空氣及水進行  $\alpha$ 、 $\varepsilon_c$  及  $n$  值的計算，在僅兩個方程式下(兩個已知介電常數之材料)，尚有一個未知數，無論假設  $n$  值為何，都能夠率定出符合量測走時的  $\alpha$ 、 $\varepsilon_c$  及 SS，亦即在空氣中、水中與土中的速度都大致吻合實際情況，為簡化計算，本研究建議直接採用

各材質之電磁波速度公式，改為直接率定空氣段速度  $V_a$ 、純水段速度  $V_w$  以及土水段速度  $V_s$ 。

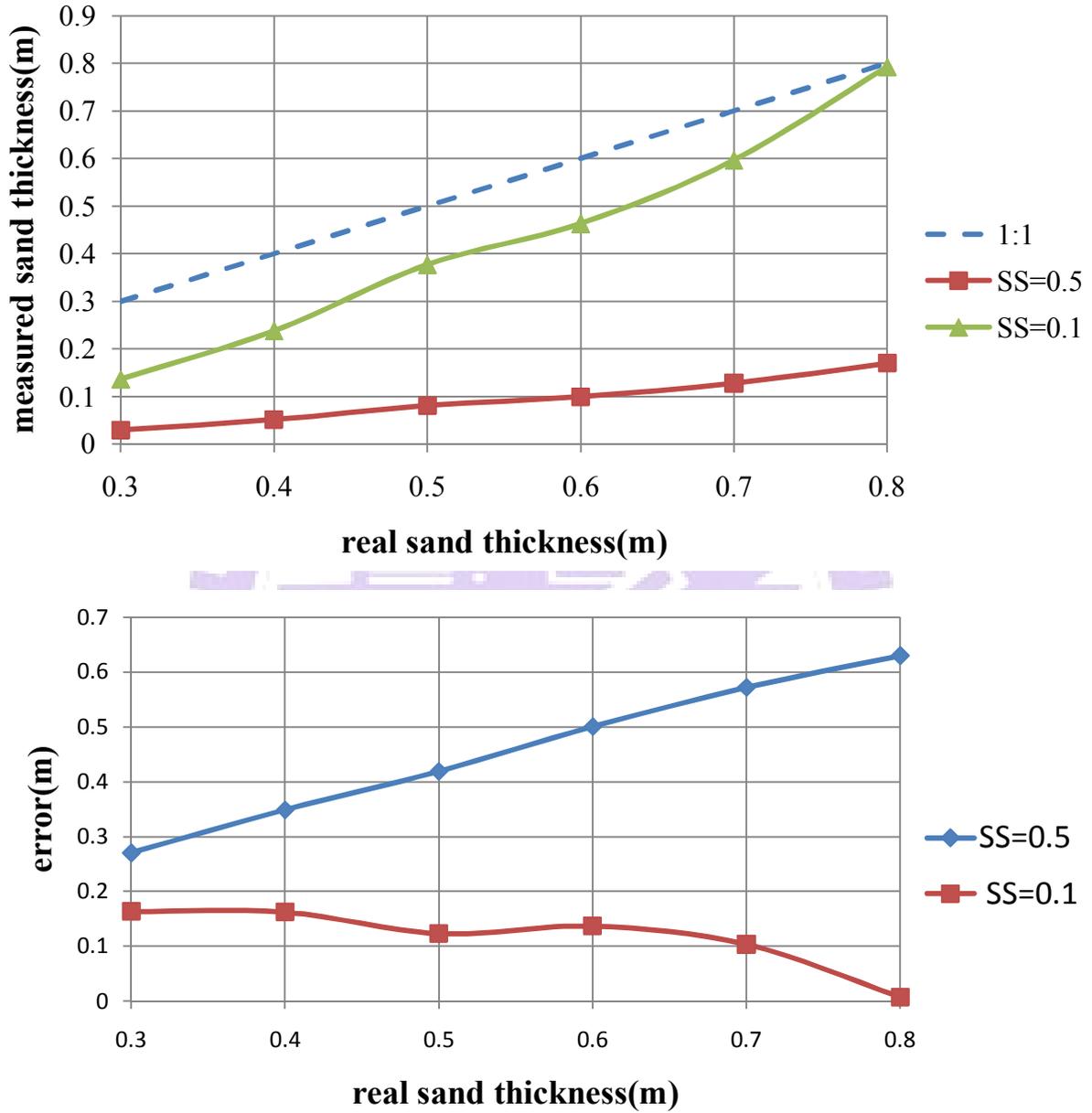


圖 4.2-8 假設  $n=1$ ，不同 SS 估算之量測值與實際值之差異比較

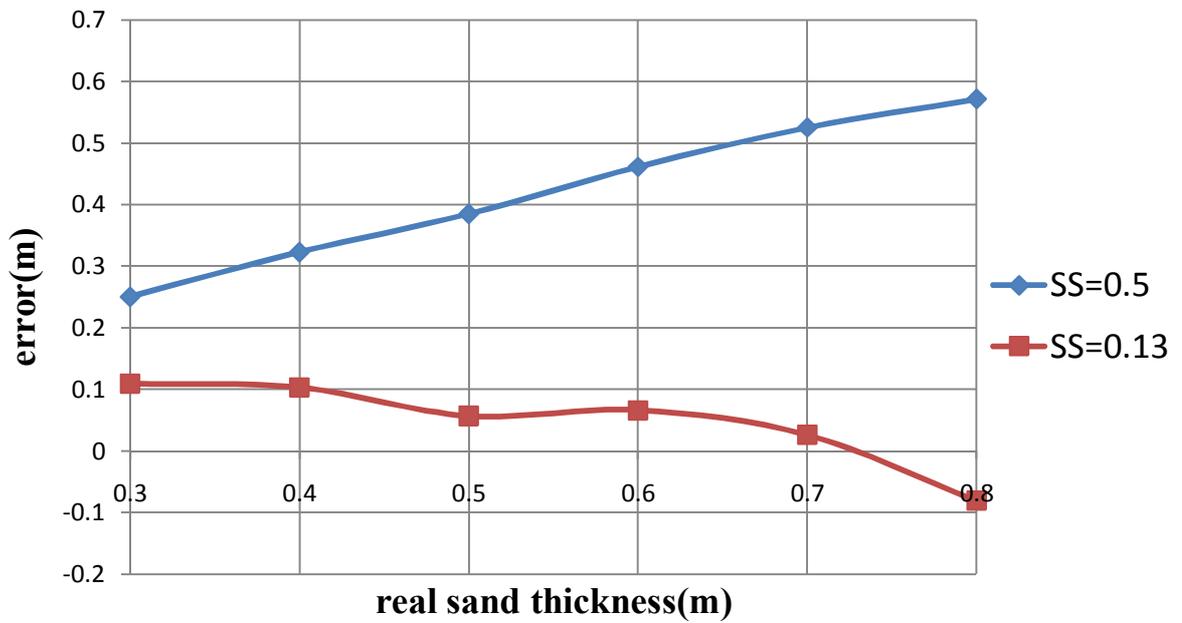
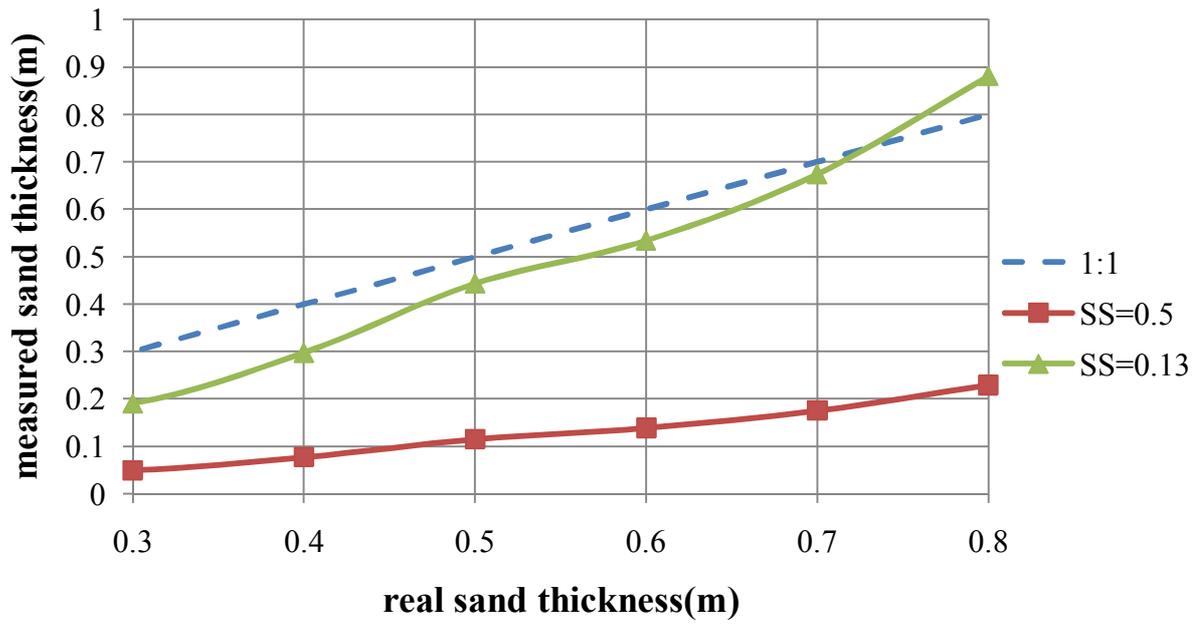


圖 4.2-9 假設  $n=1/2$ ，不同 SS 估算之量測值與實際值之差異比較

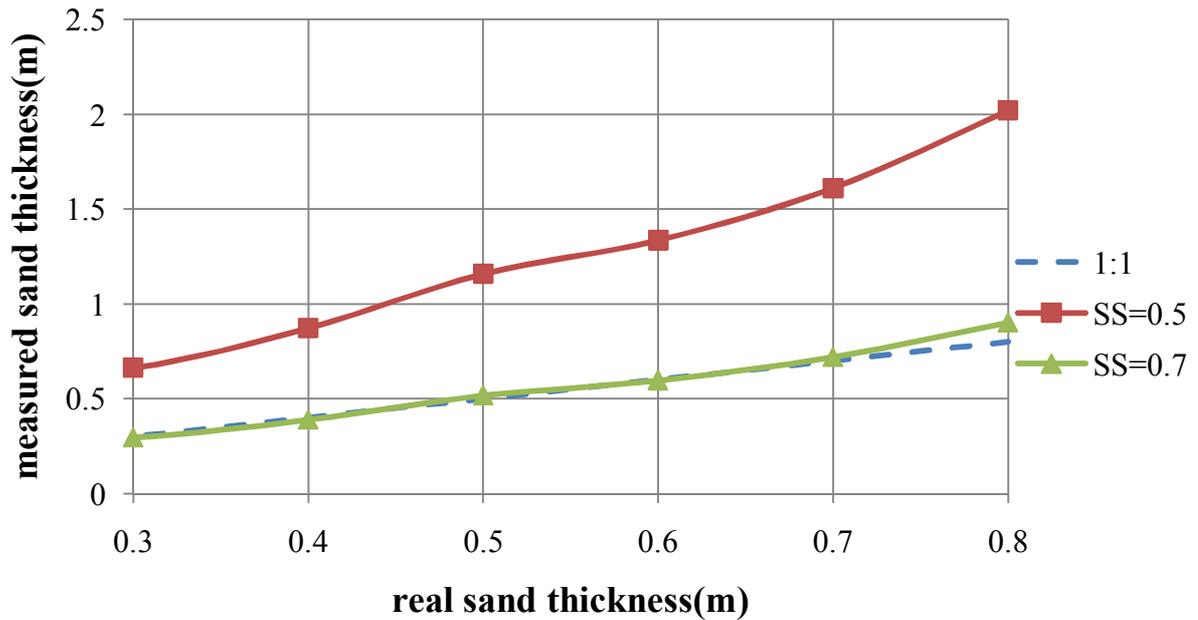


圖 4.2-10 假設  $n=-1$ ，不同 SS 估算之量測值與實際值之差異比較

#### 4.2.4 感測器於不同介質之電磁波傳速度率定方法建議

由於 3.2 節所提之混合公式所需求得之未知數過多，且隨現地之土層情況不同，其 SS 亦是一個需探討的變因，因此本子節建議可考慮採用標定感測器於不同介質中之速度，直接透過走時差與速度反推其厚度，參考如圖 4.2-11。感測器製作完工後，可先於實驗室進行空氣段及純水段的走時量測，室內標定結果如圖 4.2-12、圖 4.2-13 及圖 4.2-14。建議可多組數據進行迴歸得最佳化之參數。標定流程如下：

- (1) 已知感測器總長與各介質之實際長度  $L$ ，並量測其來回走時後，

透過公式  $t = \frac{2L}{V}$  便可計算空氣段速度  $V_{air}$  及純水位段之速度  $V_{water}$

(僅一組數據即可，但多組數據回歸之值應較為精準)。

- (2) 接著在已知現地土層厚度情況下，利用以求得之  $V_{water}$  計算不同水

位時之水的走時  $T_{water}$ ， $T_{w\_s} - T_{water} = T_{bs}$  得知土水段速度  $V_{bs}$ 。

當感測器已安裝完畢後，欲進行現場直接標定，步驟(1)與(2)也可改由直

接透過現場量測已知的兩組不同水位、土厚進行標定，標定流程如下，參照圖 4.2-13：

- (1) 選擇兩組已知水位面高程之波形，其空氣段之走時相扣所得之空氣段走時差

$$t_{a/w,r2} - t_{a/w,r1} = \frac{L_{a/w2,r} - L_{a/w1,r}}{V_a} \dots\dots\dots(4-1)$$

代入已知  $L_{a/w1,r}$ 、 $L_{a/w2,r}$  即可求出  $V_a$ 。

- (2) 兩組已知水位、土厚之波形土水段走時

$$t_{e,ri} - t_{a/w,ri} = \frac{2L_{w,ri}}{V_w} + \frac{2L_{s,ri}}{V_s} \dots\dots\dots(4-2)$$

代入已知  $L_{w,ri}$ 、 $L_{s,ri}$  則可求得  $V_w$ 、 $V_s$ 。

標定各介質下之速度後，即可透過以下步驟(3)、(4)反推水位及土層厚度。

- (3) 利用現地即時波型與參考波型相扣，便可計算出在不同水位時空

氣段走時差  $t_{a/w} - t_{a/w,r1}$ ，代入  $t_{a/w} - t_{a/w,r1} = \frac{2\Delta L_a}{V_{a,r}}$  求得  $\Delta L_a$ ，透過參

考波型已知水位面高程  $L_{a/w,r1}$ ，即時水位高層則為：

$$L_{a/w,m} = \Delta L_a + L_{a/w,r1} \dots\dots\dots(4-3)$$

- (4) 在已知  $V_{w,r}$ 、 $V_{s,r}$  代入即時量測之  $t_e - t_{a/w,m}$  及  $L_{a/w,m}$  便可進行沖刷深度  $L_{s,m}$  的計算。

$$t_e - t_{a/w,m} = \frac{2(L_{a/w,m} - L_{s,m})}{V_w} + \frac{2L_{s,m}}{V_s} \dots\dots\dots(4-4)$$

本研究採用室內試驗資料，分別以室內標準標定流程(多組純水、改變不同土層厚度，其結果迴歸)及現地標定流程(兩組已知不同水位及不同土層厚度)進行處理，分析之結果整理成**錯誤! 找不到參照來源。**、**錯誤! 找不到參照來源。**，從結果研判，兩種標定流程所得速度標定之結果相近，至此可將整體流程視為無誤，將於下一子節套用此演算式於現地所得之資訊，並進行結果之判讀。

表 4.2-3 電磁波於各項介質傳遞波速之率定結果 (室內率定法)

	多組數據迴歸	$\epsilon$
$V_a$ (m/s)	2.10E+08	2.03
$V_w$ (m/s)	1.14E+08	6.95
$V_s$ (m/s)	1.18E+08	6.43

表 4.2-4 電磁波於各項介質傳遞波速之率定結果 (現地率定法)

(1m probe)	$V_a$ (m/s)	$\epsilon$	水位固定 80 公分	$V_w$ (m/s)	$\epsilon$	$V_s$ (m/s)	$\epsilon$
水位(公分) 40to50	2.17E+08	1.92	sand(cm) 40to50	1.09E+08	7.54	1.20E+08	6.27
水位(公分) 30to70	2.27E+08	1.75	sand(cm) 30to70	1.10E+08	7.39	1.19E+08	6.38
水位(公分) 30to80	2.24E+08	1.8	sand(cm) 40to70	1.10E+08	7.42	1.19E+08	6.38

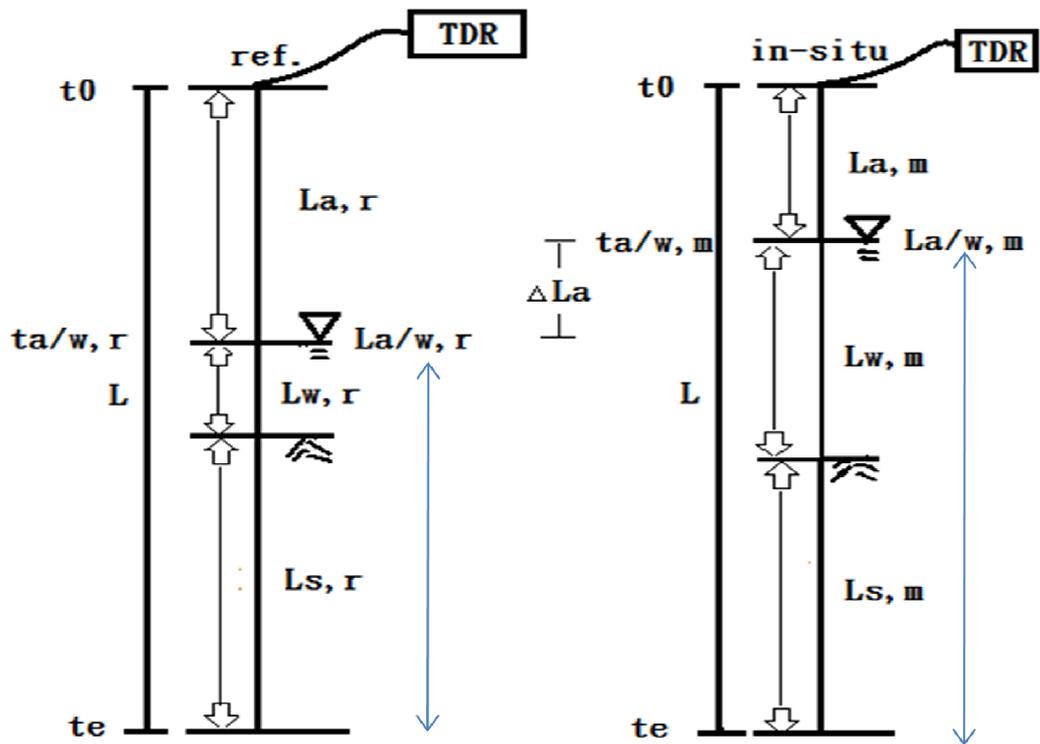


圖 4.2-11 走時演算示意圖

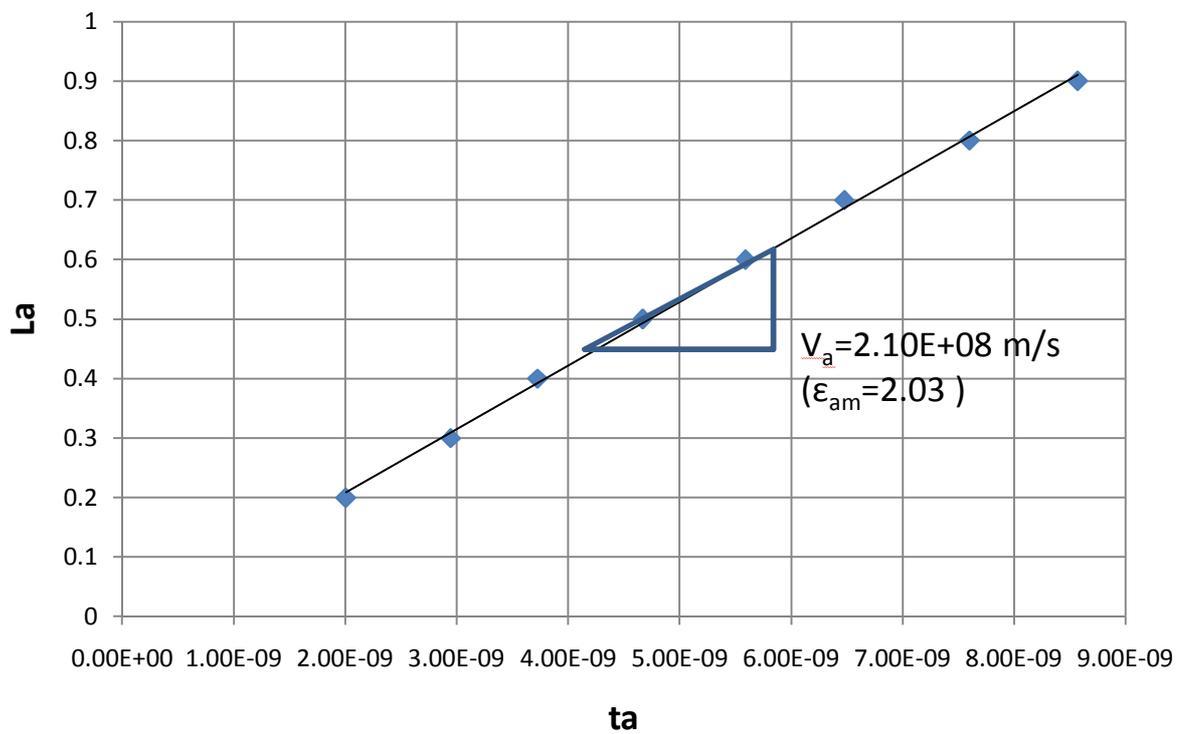


圖 4.2-12 感測器之空氣速度

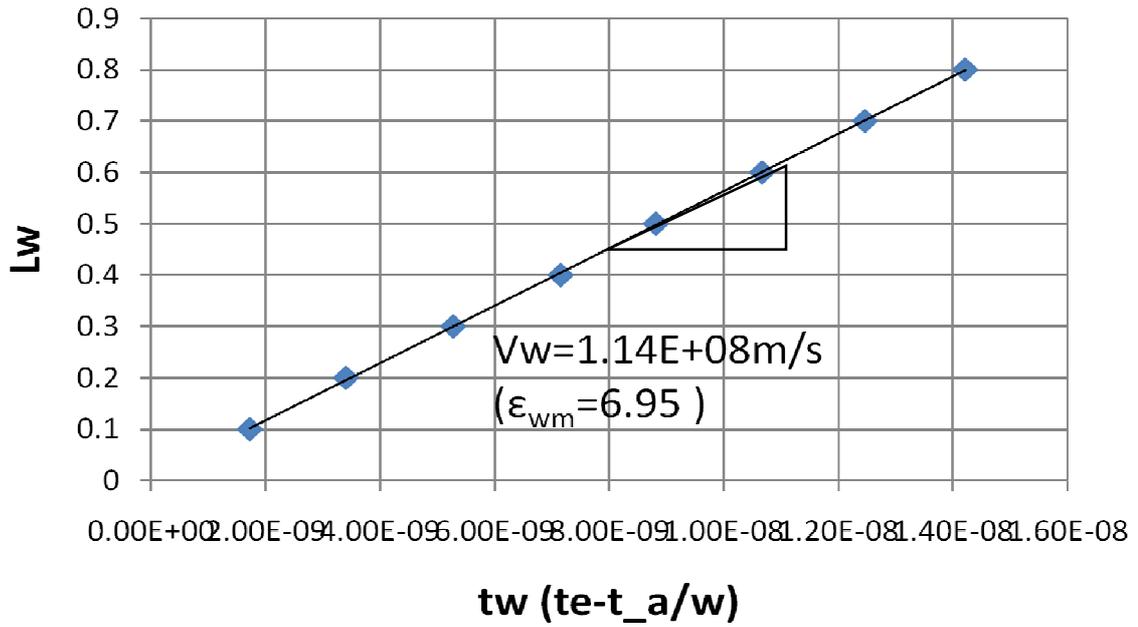


圖 4.2-13 感測器之純水速度

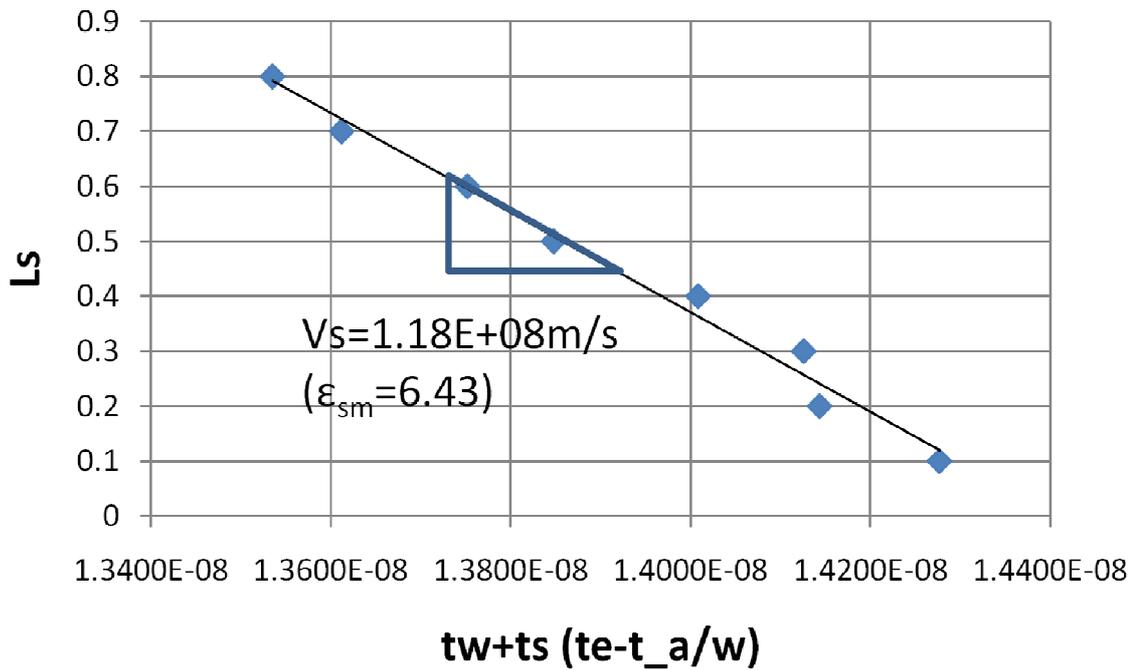


圖 4.2-14 感測器之土水混合速度

### 4.3. TDR 橋墩沖刷之現場初步安設說明

本研究將針對台 3 線 158K+985 東勢大橋(大甲溪流域)進行沖刷感測器之現地試驗，並裝設監測系統，即時監測河川水位、橋址處河床沖刷深度，並自動傳送相關訊息於橋梁管理人員。

#### 4.3.1 裝設流程說明

東勢大橋現地安裝流程規劃由圖 4.3-1 所示。茲將各流程步驟說明如下：

##### 1. 鑽孔：

預先以鑽寶在觀測點鑽孔，鑽孔深度依東勢大橋沖刷觀測深度 10m 加上預留之錨碇段 3m，共 13m 長。（註：依中國土木工程學會所編著之地錨設計與施工準則，錨碇段建議控制在 3~10m）

無加壓式地錨極限錨碇力

$$T_{ug} = g \text{ 壓式地} L_a * \tau_{ult}$$

其中

$\tau_{ult}$ : 極限握裹應力或摩擦應力(kg/cm<sup>2</sup>)

$L_a$ : 錨碇段長度

D: 錨碇段體直徑

##### 2. 錨碇段施作：

先行於廠內加工，材料分別有直徑 3cm 之鋼筋、空心圓管及中心固定器，如圖 4.3-2 元件 1。總錨碇段經公式反算及規範建議，共長 3m。為了增加錨碇段鋼筋與混凝土之握裹力，採每一米處網綁 30cm 之鋼筋，將鋼索先行穿入中心固定器及空心圓管中，空心圓管壓實後，將鋼筋焊在圓管上頭，確保牢固。

##### 3. 錨碇段灌漿：

將 TDR 沖刷監測鋼纜置入孔內，利用灌漿管灌入現場預拌之混凝土，固定錨碇段。施作時，需確保自由端（自由端即為 TDR 沖刷感測器之感測段）成垂直置中狀態，並利用塑膠或鐵製之中心固定器確立其預定位置。最後將鋼腱拉緊固定於橋臺上，如圖 4.3-2。先行計算 3m 之灌漿量，灌漿時由孔洞之最低點以等速且不中斷地完成灌漿，孔內之水及空氣確實排出。

#### 4. 感測段回填：

於感測段透過自然允降的方式，回填適合該場址之砂石，長度為 10 公尺，如圖 4.3-2(4)。為了避免回填砂進入灌漿段，於兩分界點間置入一海棉做為阻隔器，如圖 4.3-2 元件 2。頂部置入一個中心固定器，如圖 4.3-2 元件 4(中心固定器是採螺絲栓於鋼索上)，確保在拉緊鋼索時，鋼索是置中於孔內。

#### 5. 固定：

將鋼纜於橋臺適當地點，拉直後固定栓在橋臺上，固定裝置必須能夠承受鋼纜預期能夠承受之握裹力。

#### 6. 感測段延伸固定：

如步驟 2 之說明，沖刷監測段，透過錨碇方式於橋樑基座旁固定，如圖 4.3-2 所示，並延著橋身向路面拉伸。利用鋼管保護橋身段之感測纜線，鋼管內部利用中心固定器將感測纜線置中；同時，鋼管採非密閉式，可同時監測水位高程。

#### 7. 資料擷取系統建置：

將 TDR 系統置放於便於維護之處，感測纜線與延長線對接，延伸至橋面之 TDR 系統，透過嵌入式系統進行波型判釋及量化，搭配本計畫建置之網絡系統，便可即時監測沖刷狀況。



圖 4.3-1 現地安裝流程圖

#### 4.3.2 現地施工狀況

東勢大橋現地施工狀況表 4.3-1、表 4.3-2 及

表 4.3-3 所示，由於現地靠近橋台附近之地底狀況不一，因此施工過程經過些許變更如圖 4.3-3 及圖 4.3-4，僅 P7 上游側依原始規劃進行安裝。

表 4.3-1 P7 上游側現地施工狀況

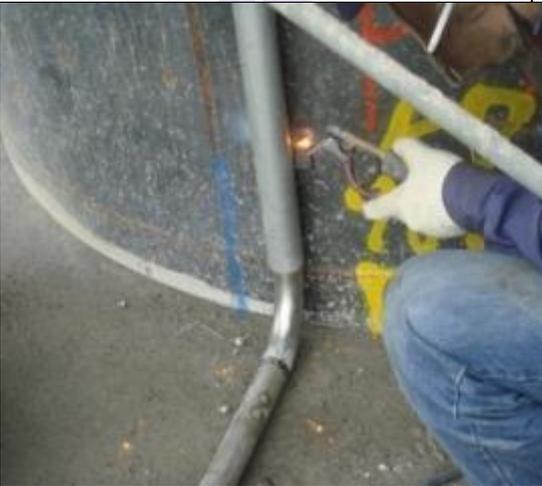
	
<p>置入感測器</p>	<p>鋼鎖固定於橋台側邊</p>
	
<p>外加鐵管施工過程</p>	<p>訊號線與感測器對接</p>
	
<p>感測器施工完成</p>	

表 4.3-2 P7 下游側現地施工狀況

	
<p>置入感測器</p>	<p>回填砂</p>
	
<p>套管完全拔除，回填剩餘的部份</p>	<p>外加鐵管</p>
	
<p>橋臺固定</p>	<p>感測器施工完成</p>

表 4.3-3 P3 下游側現地施工狀況

	
<p>整地完成貌</p>	<p>鑽孔</p>
	
<p>感測器埋設</p>	<p>加砂</p>
	
<p>橋台固定</p>	<p>感測器施工完成</p>

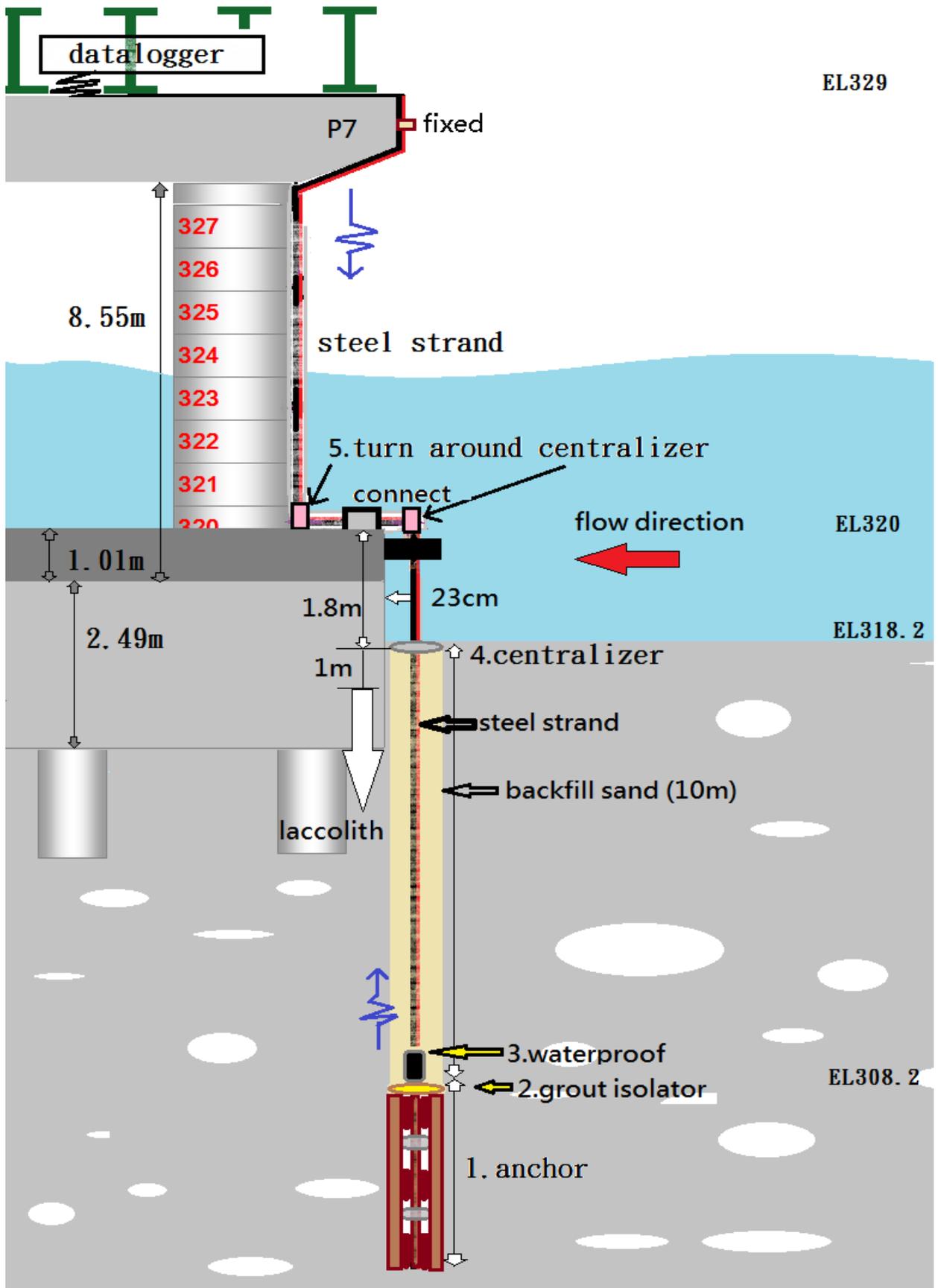


圖 4.3-2 TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖(P7 上游側)

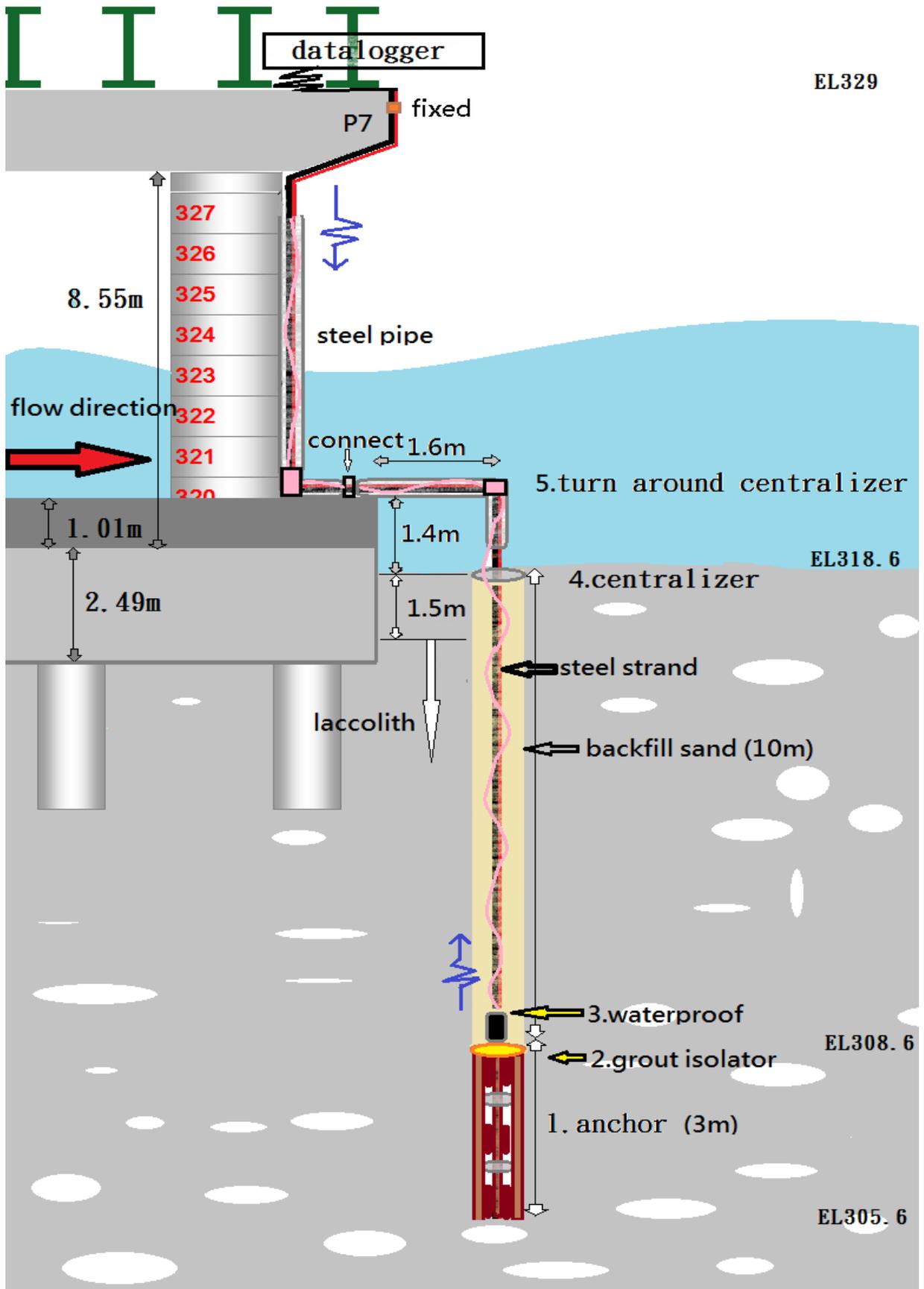


圖 4.3-3 P7 下游側(TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖)

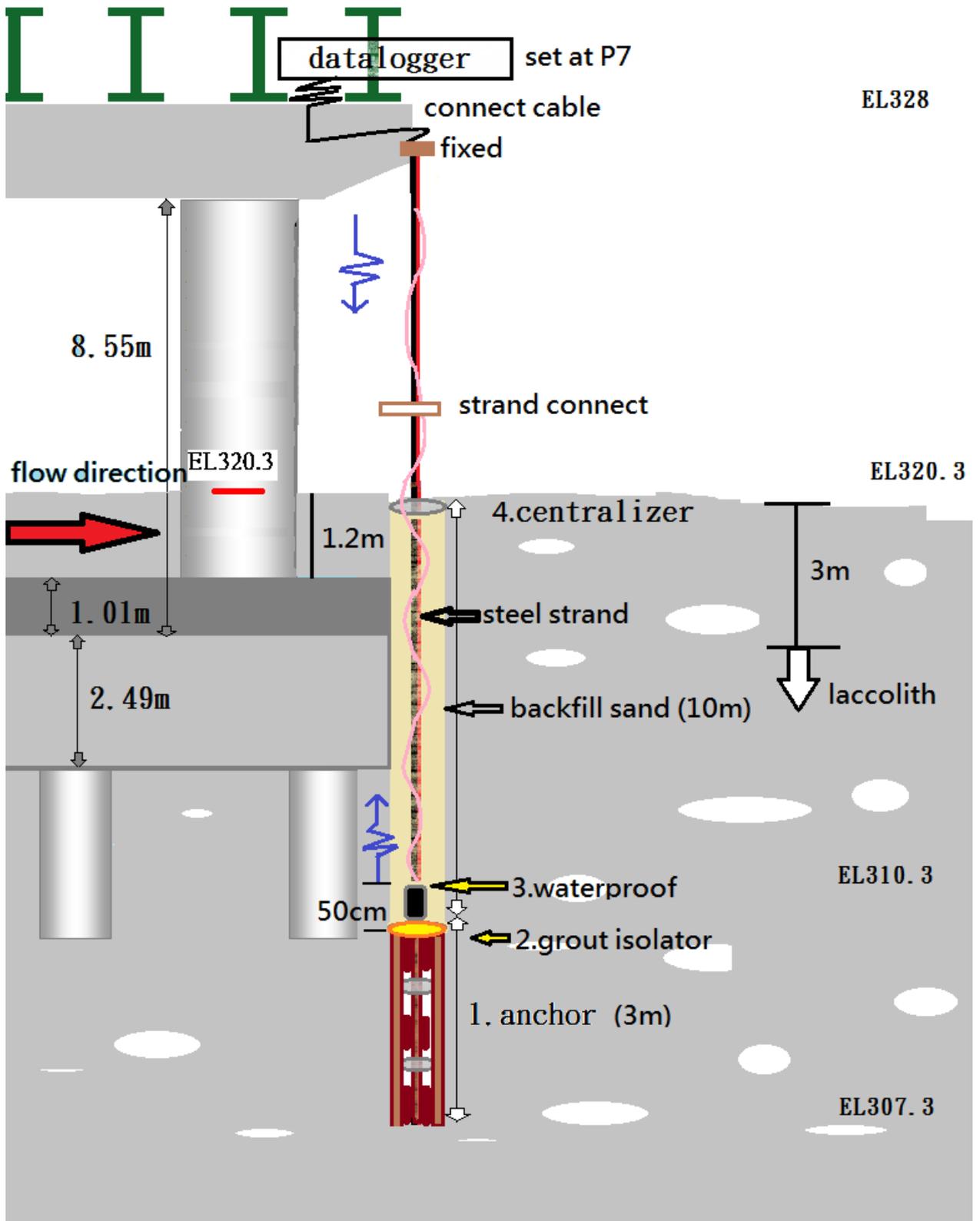


圖 4.3-4 P3 下游側(TDR 橋墩沖刷監測系統示意圖)

### 4.3.3 現地沖刷量測檢討

#### 1. 安裝過程檢討如下：

- (1) 由於實際鑽探位置與設計時之理想狀況落差，因此僅 P7 上游側設計符合既有構想書執行。此次現地裝設額外加裝了 P7 下游側，但由於 P7 下游側近橋台處下方有不知名的異物，並非當地之岩盤，推測可能為舊混凝土基礎，所以 P7 下游側只能延伸距橋台 1.6m 處位置進行鑽孔。而 P3 原本預訂也要安裝在上游側，但由於橋台上方淤埋了大量土方，礙於土方量過大，因此只好變更設計，並為了減少感測器的損壞，決定將 P3 段改安裝於下游側，其 TDR 感測器纜線由橋的樁帽處垂直延伸至地面，並於樁帽做固定。由於現地的情況不一致，三個埋設位置最終以不同的型式呈現，待汛期結束可憑估三種型式的優缺。
- (2) 感測器型態採取開放式感測，因此為了避免量測到之資訊是現地孔壁所回傳，因此建議鑽孔的直徑需大於感測器三倍以上，避開量測範圍。
- (3) 對接的部份需隔外注意，且避免包膜鋼索的表皮損壞以免內外導體相互接觸而造成短路。於轉接處需做好鋼索外膜之保護，避免因水流拉扯之力量造成損壞。
- (4) 感測器目前是採用魚線及束帶進行網綁，至 2010 年 11 月份為止，歷經兩次颱風事件，感測器於現地仍牢固於 2010 年 4 月最初安裝位置，但有部份裸露出土層之魚線已被切斷，因此未來可於兩導體如何固定著手改良。
- (5) 現場安裝時可能會遇到與原先構想不一樣的狀況，建議可多模擬不同情況的安裝方式，避免因安裝不確實而導致訊號不良之問題。

2. 現地演算結果及檢討如下：

- (1) 將現地所獲得之資訊標定整理如表 4.3-4，比較 4.2.3 節於室內標定之結果，兩者間存在了一個倍數的關係，由於感測器在製程上並未統一，因此室內實驗的感測器與現地安裝之感測器可視為不同之感測器，標定之速度產生一規律性的倍數差異可由此說明之。現地演算結果，所代入之速度仍以現地所標定之參數為主。
- (2) 透過室內所得之資訊進行現地試驗的判讀，分析東勢大橋現地資料，波型判釋如圖 4.3-5 及圖 4.3-6，並將各月份結果整理如圖 4.3-7 所示與圖 4.3-8。因雨天之緣故造成部份外露的感應纜線淋濕，產生如圖 4.3-5 之水平段波型結果，因此建議在整體施工過程需避免感應纜線外露以致被雨水淋濕的情形。
- (3) P7 下游側於 8/20 感測器受水流拉扯壓迫，造成短路問題。隔日短路問題已排除。透過目前量測所得之最大沖刷量約為 2m，此數據是感測器周圍所回填之砂層，回填之砂層較為鬆散水流較易帶走，現地實際情況若扣除回填之厚度，沖刷深度應在 1m 以內。對應現場淤積面之水壓計結果。(推得最大刷深之位置)。
- (4) P3 所屬位置高程較高，因此沖刷並不明顯。而對應之水壓計位置位於 EL322 處，因此在水位面尚未到達 EL322 時，無相對應之資料可供比較。
- (5) P7 上游側因水流湍急，產生一個拉扯的力量，使得粗鋼纜壓迫細鋼索，造成感測器短路，因此已無法得到該點之沖刷資訊。建議未來在轉彎處的置中器設計需要注意，避免應力過度集中及正負極壓迫。

表 4.3-4 現地標定結果

p3 situ		(m/s)	$\epsilon$	p7 situ		(m/s)	$\epsilon$
(6/11)	$V_a$	1.71E+08	3.09	(6/9)	$V_a$	1.71E+08	3.09
10.2m 水 10m 砂				10.6m 水 10m 砂			
(7/11)	$V_w$	8.04E+07	13.89	(7/6)	$V_w$	8.54E+07	12.31
10.1m 水 9.6m 砂				10m 水 9.1m 砂			
	$V_s$	9.94E+07	9.09		$V_s$	1.00E+08	8.91

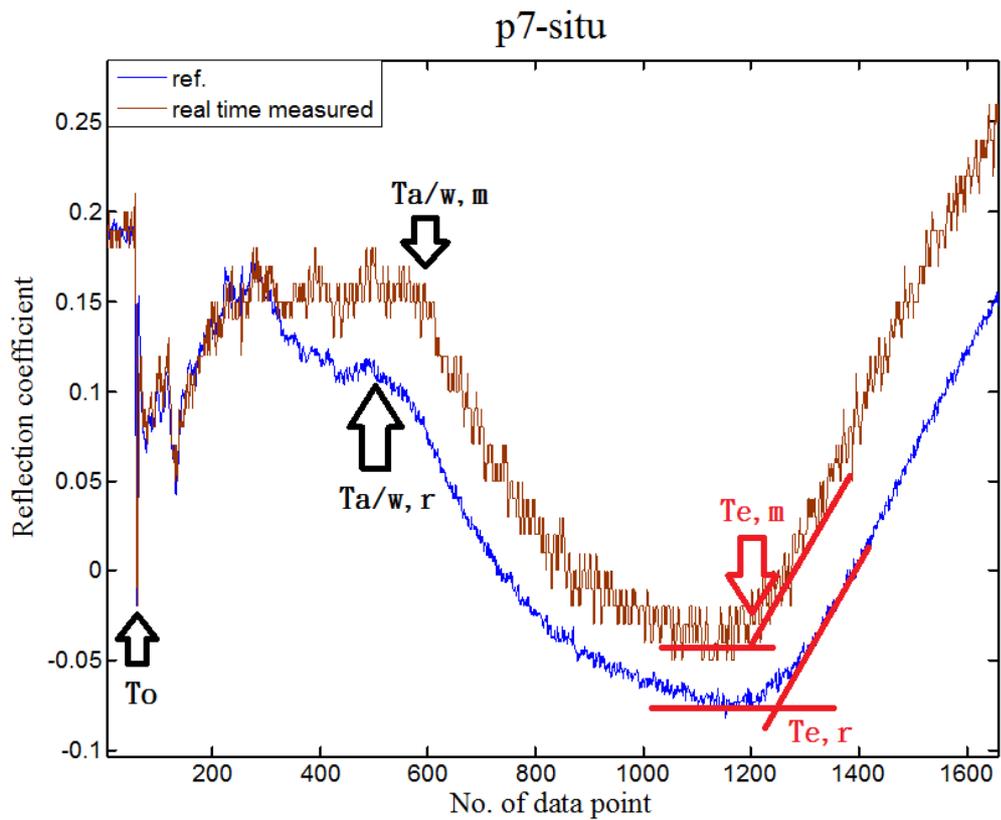


圖 4.3-5 現地 P7 波型示意圖

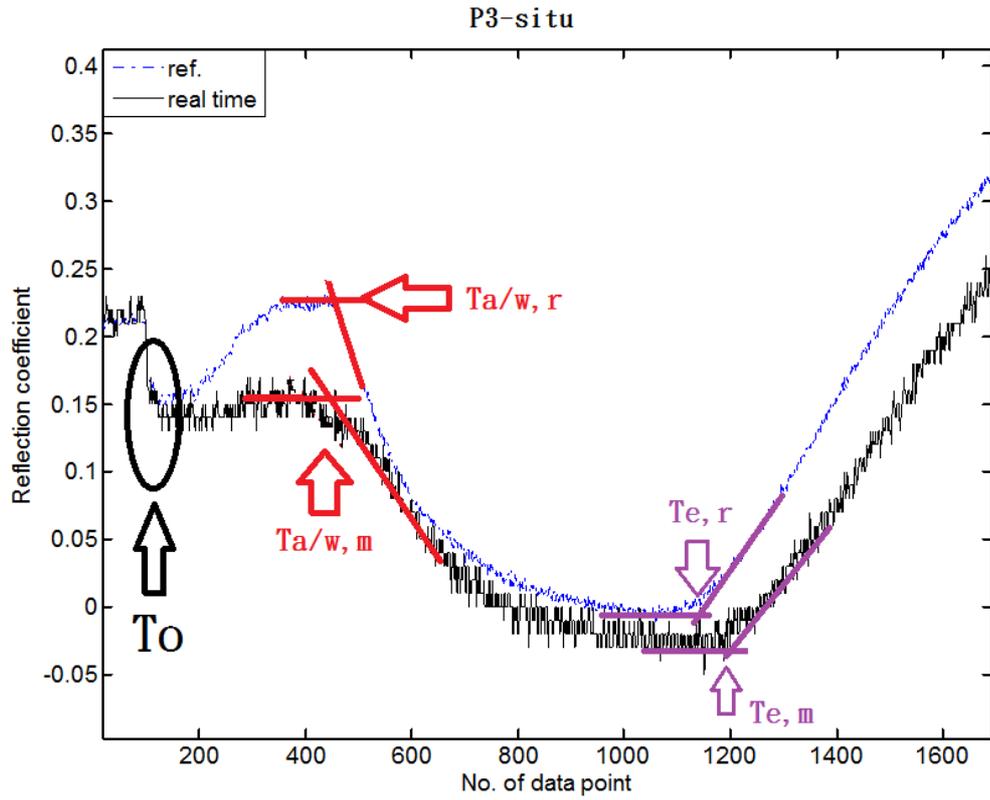
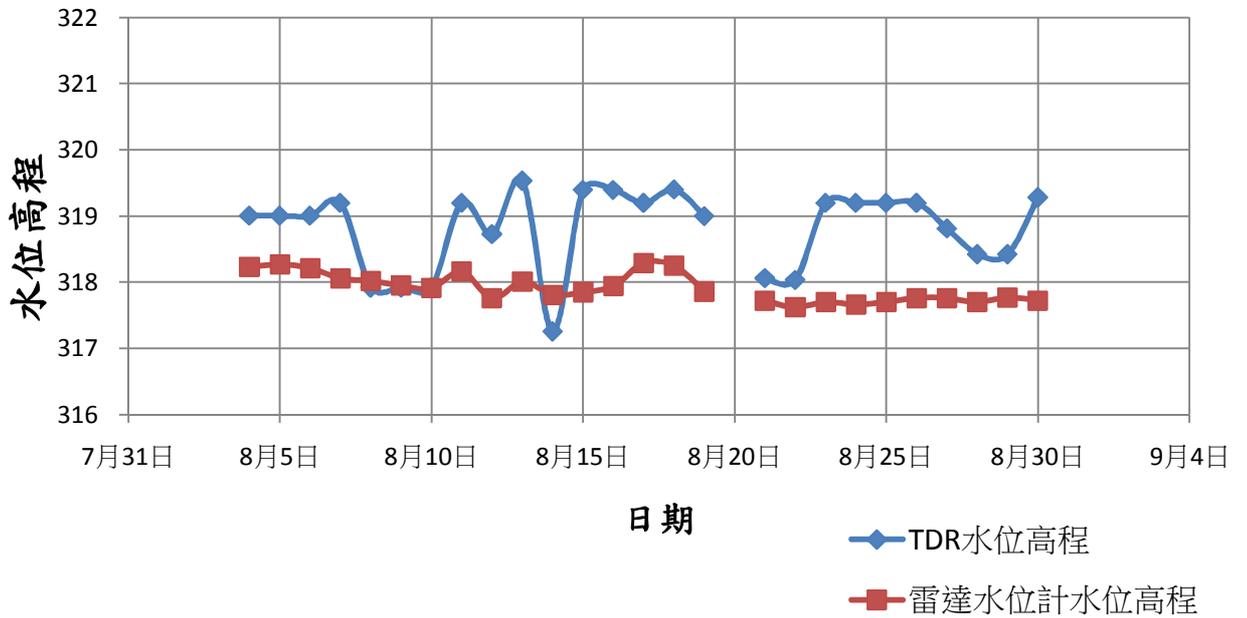


圖 4.3-6 現地 P3 波型示意圖



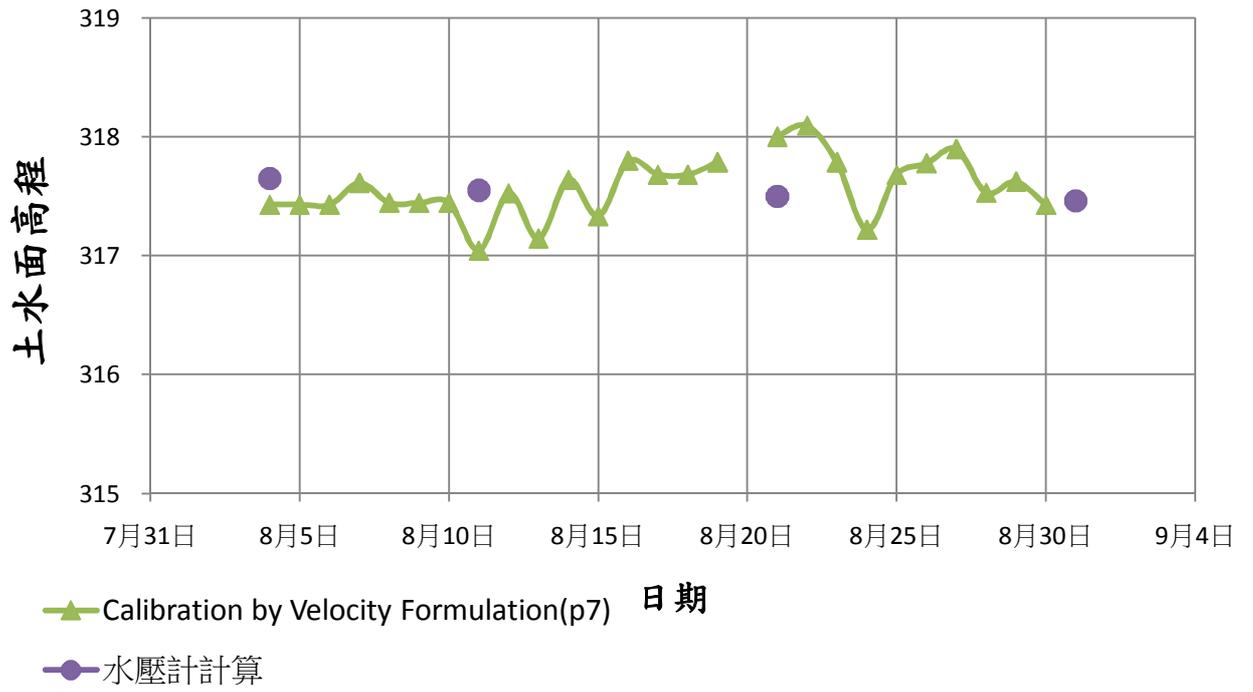


圖 4.3-7 東勢 P7 現地資料



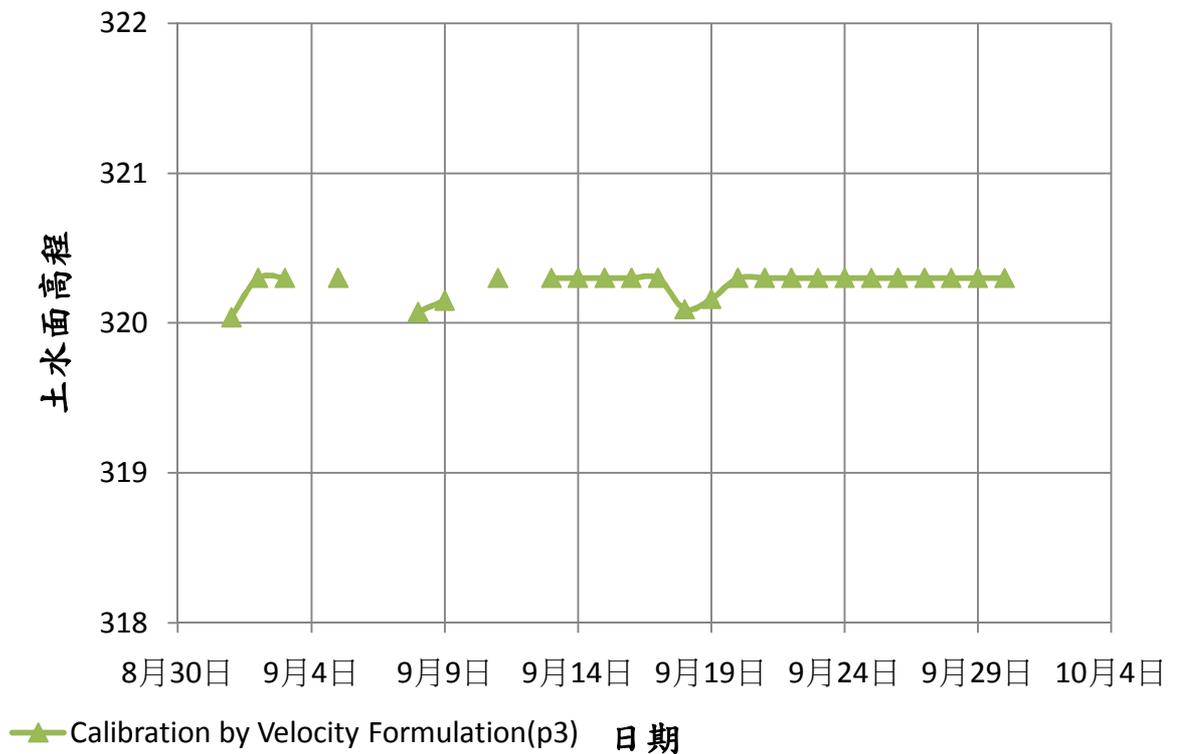
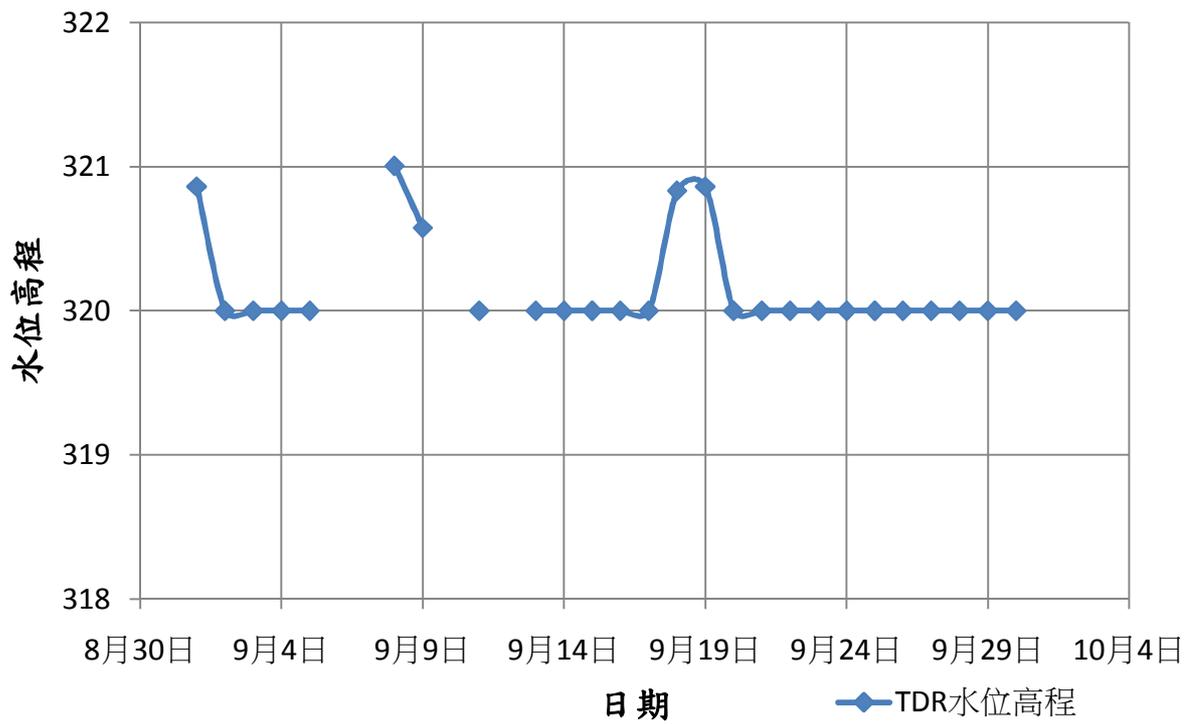


圖 4.3-8 東勢 P3 現地資料

## 第五章 結論與建議

隨著現今氣候變遷，暴雨次數也日益漸增，橋墩的即時沖刷監測越來越重要，目前運用於橋樑監測的監測儀器都有感測元件耐久性的問題需要考量，而 TDR 沖刷監測其最大的優勢除了一機多功用，更可利用線傳輸之優勢打造無元件之感測器。因此本研究透過模擬泥砂沖淤之室內試驗，探討影響感測器靈敏度之因子，進而研發適合於河床使用之感測器。並由試驗結果與現場安裝經驗提出 TDR 橋樑沖刷監測安裝標準程序與量化分析之初步建議。最後針對目前研究成果不足或需改善之處，提出未來研究方向之建議。

### 5.1. 結論

本研究主要分為三部份，一為感測器之研發，其次為數據之量化分析，最後是現地安裝之成果，對應其結論整理如下：

#### 1. 感測器之研發：

- (1) 鑽桿式：因屏蔽效應及實務應用可考量採用 135 度或 160 度之槽溝進行感測器施作。
- (2) 鋼索式：量測之靈敏度隨著導體尺寸配比及導體材質的改變而受到影響，透過實驗結果採用直徑 9.3mm 之鋼索搭配直徑 4.8mm 之絕緣鋼索做為現地感測器之組合。
- (3) 由於現地安裝如採用鑽桿式需多段對接，接頭部份及槽溝之細工複雜且對接不易，經考量製作上的難易，本研究將採用鋼索式進行現地安裝。

#### 2. 沖刷量測之量化分析：

- (1) 本研究提出之全波形走時配合混合模型 (mixing model)，可快速建置各種配置，並可考量水溫影響，但本研究之實驗過程僅透過空氣及水

進行混合模型參數的率定 (包含  $n$  為率定參數、感測器量測之係數  $\alpha$  及絕緣材質介電度  $\epsilon_c$ )，雖然改變水位高度，實際上僅有兩個獨立方程式(兩個已知介電常數之材料)，無法獲得三個未知數的唯一解，需事先假設  $n$  值方能標定對應的  $\alpha$  及  $\epsilon_c$ ，然不同  $n$  值所對應的  $\alpha$  及  $\epsilon_c$  不同， $\epsilon_s$ (土壤與水混合之介電常數)或 SS(現地感測器周圍淤積土其固體之體積含量比例)參數之率定值亦不同。但實際物理現象的  $n$  值為何，必須另外採用額外已知介電度的材料，方能有足夠獨立的方程式進行各參數( $n$ 、 $\alpha$  及  $\epsilon_c$ )之標定。

(2) 無論假設  $n$  值為何，都能夠率定出符合量測走時的  $\alpha$ 、 $\epsilon_c$  及 SS，亦即在空氣中、水中與土中的速度都大致吻合實際情況，為簡化計算，本研究建議直接採用介質電磁波速度率定，改為直接率定感測器之空氣速度  $V_a$ 、水中速度  $V_w$ 、及土水混和速度  $V_s$ 。進行標定過程，建議採多組數據相互驗證

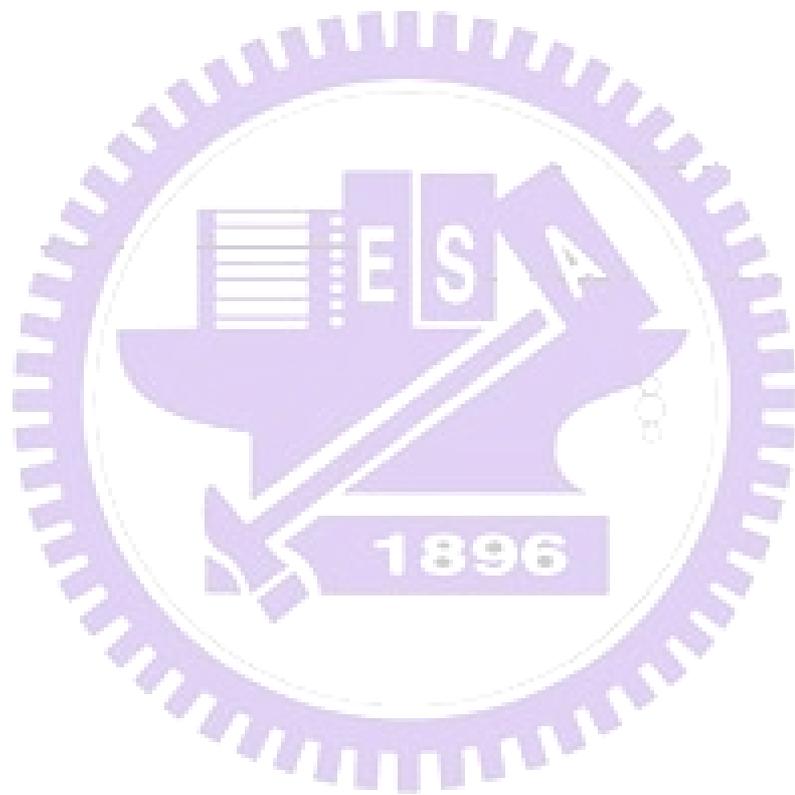
### 3. 現地安裝之成果：

- (1) P7 段之對接處皆是在橋台固定端之後，因此受外力拉扯而損壞之影響不大；P3 是採垂直拉至樁帽固定，因此需隔外注意對接處的損壞。
- (2) P7 由於裝設過程有一水平段，造成高水位時，波型在空氣與水的界面判釋不易，進而影響自動化的選點判釋。建議安裝過程，需仔細考量水平段的處理。

## 5.2. 建議

1. 本研究於土層厚度與 SS 之關係僅作了初步的探討；而土水之介電常數 SS 的變化也跟著變化，因此建議未來可於兩者之間的關係進行探討，以增加數據之準確性。
2. 建議現地安裝完成後可採用介質速度公式，進行各參數的標定。

3. 感測器建議可朝修正靈敏度進行著手，例如透過烤漆之方式取代絕緣皮的方式。
4. 感測器的安設之耐用性尚有進步之空間，因此安設前詳細的規劃仍是一個重要的環節。例如現地預裝設點的實際地底下狀況、感測器外之保護罩的設計、感測器整體的防雨水淋濕之設計.....等。



## 參考文獻

- [1] 楊培熙，(2003)，「TDR 水位量測技術在大地與水利工程之應用」，國立交通大學土木工程學系碩士班碩士論文。
- [2] 廖元憶，(2005)，「台灣西南沿海高細粒料含砂量砂土的探討」，國立成工大學土木工程研究所碩士論文。
- [3] 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2003~2005)，河道深槽沖淤量測及預測模擬變化潛勢評估，執行單位中興大學土木系。
- [4] 黎杰倫，(2006)，「沖刷樁基承受側向載重之變位分析」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
- [5] 林志平，鐘志鐘，(2009)，「傳輸線式自動化沖蝕監測技術研發」，行政院國家科學委員會專題研究計畫。
- [6] 行政院農委會水土保持局，(2008)，97 年重大土石災情報告。
- [7] 范文綱，(2009)，「橋樑基礎局部沖刷監測與安全預警系統」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
- [8] 林宜清，2009「橋梁沖刷監測技術之開發」，簡報檔。
- [9] Dowding, C.H. and Pierce, C.E. (1994), "Use of Time Domain Reflectometry to Detect Bridge Scour and Monitor Pier Movement." Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston, Illinois, Sept 7-9, U.S. Bureau of Mines, Special Publication SP 19-94, NTIS PB95-105789, pp. 579-587.
- [10] Yankielun, N.E., and Zabilansky, L. (1999), "Laboratory Investigation of Time-Domain Reflectometry System for Monitoring Bridge Scour," J. Hydraul. Eng., Vol. 125, pp. 1279-1283.
- [11] Yu, X.B. and Yu, X. (2007). Algorithm for Time Domain Reflectometry

Bridge Scour Measurement System, Field Measurements for Geomechanics, FMGM 2007, Boston, MA.

- [12] Lagasse, P.F., Richardson, E.V., Schall, J.D., and Price, G.R. (1997), "Instrumentation for Measuring Scour at Bridge Piers and Abutments." NCHRP Report 396, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
- [13] Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Schall, J.D., and Clopper, P.E. (2001), "Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures – Experience, Selection and Design Guidance." Second Edition, Hydraulic Engineering Circular 23. Federal Highway Administration Publication No. FHWA NHI 01-003, Washington, D.C.
- [14] Suzuki, O. and Shimamura, M. (2000), "Development of New Scour Monitoring Devices for Railway Bridges," International Symposium on Scour of Foundations, November 19, 2000 in Melbourne, Australia at the occasion of GeoEng 2000, pp. 329-336.
- [15] Millard, S. G., J. H. Bungery, C. Thomas, M. N. Soutsos, M. R. Shaw, A. Patterson (1998), "Assessing bridge pier scour by radar", NDT&E International Vol. 31, No. 4, pp. 251-258.
- [16] Jones, J.S., Trent, R.E., and Potter, D.L. (1991), "Bridge Scour Research Needs," Proceedings of the 1991 National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, pp. 323-328.
- [17] Richardson, E.V. and Davis, S.R. (2001), Evaluation of Scour at Bridges, Hydraulic Engineering Circular No. 18, Fourth ed., Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-NHI 01-001, Washington, D.C.
- [18] Yu, X. and Zabilansky, L.J., 2006, "TDR Automatic Bridge Scouring Monitoring System", ASCE Geo-Shanghai, ASCE Geotechnical Special Publication.
- [19] Campbell Scientific, Inc.,(2000),TDR100 Instruction Manual.

## 附錄一 各元件樣式

	
<p>元件 1. 錨錠段使用鋼筋</p>	<p>元件 2. 砂與混凝土阻隔泡棉</p>
	
<p>元件 3. 感測器置中器</p>	<p>內外導體底部灌膠防水</p>
	
<p>內外導體網綁</p>	<p>鋼索於橋墩側身固定器</p>
	
<p>感測器整體樣式</p>	