

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

剪力帶對於 TDR 錯動變形監測影響之探討

The Effect of Shear Bandwidth on Deformation Monitoring with Time Domain
Reflectometry

研究生：楊浚昇

指導教授：林志平 博士

中華民國九十七年七月

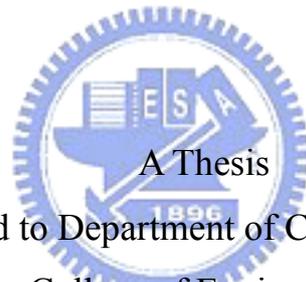
剪力帶對於 TDR 錯動變形監測影響之探討

The Effect of Shear Bandwidth on Deformation Monitoring with Time Domain
Reflectometry

研究生：楊浚昇
指導教授：林志平 博士

Student : Jiun-Sheng Yang
Advisor : Chih-Ping Lin, Ph.D

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 of Science
in
Civil Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

剪力帶對於 TDR 錯動變形監測影響之探討

研究生：楊浚昇

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

時域反射法(time domain reflectometry, TDR)技術應用於大地工程監測已行之有年，其透過電磁波傳送於預埋地層內之同軸纜線，當地層滑動造成纜線之幾何形狀改變所傳回之反射訊號以分析滑動位置，且可透過網路進行遠端自動化、一機多功、低成本等優勢更符合工程上實際需求。然而，現地存在纜線電阻、纜線-灌漿材料-外填土壤三者材料互制與剪力弱帶寬度等影響因子而使得 TDR 錯動變形量化分析仍具有難度，其中纜線電阻之影響已能利用傳輸線理論合理考慮，而材料互制行為已由林文欽 (2007) 得到許多寶貴的結果，但對於剪力帶可能造成的影響仍然缺乏合理的試驗方法。

本研究將先從大型直剪儀試驗重複性不佳的缺點加以改善，在試驗具有重複性的前提下，著重於剪力弱帶之探討，於實驗室以剪力帶環片建立一套模擬現地剪動條件相似之物理模型：剪力帶環片，據以了解剪力弱帶對於 TDR 反射訊號與剪力位移量關係之影響，據以了解如何提昇感測靈敏度及量化分析之可行性。利用林文欽大型直剪儀及本研究的成果，修改林文欽所建議的 TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析，提供實務應用的參考；最後，參考文獻中嘗試以纜線加入節點束制物提升 TDR 反應靈敏度的概念，以試驗探討其可行性。

本研究為了盡量能模擬實際滑動狀況，剪力盒外圍部份視為不動體，因此，束制水泥試體與纜線，使其整體剪動模式更貼近現地，試驗結果雖然有較為可靠的數據（重複性佳），但使其在軟弱土層中之初始門檻值(δ_D)及靈敏度(S)皆下降。剪力帶的模擬試驗結果顯示，剪力帶寬度在試驗 5 公分範圍內對於 TDR 受剪反應之影響不大。重要的是在整理林文欽 (2007) 的試驗，以及更新其重複性試驗的數據後，發現不同勁度外填材料下靈敏度差異頗大，增加了現地量化變形量的難度，但可以考慮模擬試驗不同材料與現地材料的比較，推估可能的變形範圍。另外，TDR 反射訊號經纜線加入束制節點後，能改善其靈敏度，但對於提早偵測變形幫助有限，如何利用束制節點獲得最佳的成效，仍需後續進一步研究。

關鍵字：時域反射法 (TDR)、地層位移、大型直剪儀、剪力帶寬度

The Effect of Shear Bandwidth on Deformation Monitoring with Time Domain Reflectometry

Student : Jiun-Sheng Yang

Advisor : Chih-Ping Lin Ph.D

Abstract

Time domain reflectometry (TDR) is a relatively new technique based on transmitting an electromagnetic pulse into a coaxial cable grouted in rock or soil mass and watching for reflections of this transmission due to cable deformity induced by the ground deformation. It is advantageous in its automation, multiplex capability, distributed sensing, and low cost. However, quantitative interpretation of TDR monitoring remains difficult because the TDR response due to localized shear deformation is affected by cable resistance, soil-grout-cable interaction, and shear bandwidth. While the effect of cable resistance can be taken into account by the electromagnetic theory and the effect of soil-grout-cable interaction have well examined by Lin (2007), the influence of shear bandwidth has not been reasonably investigated. This study improved the repeatability of the large direct shear device developed by Lin (2007) and added the function of controlling the shear bandwidth. This device more realistically simulates the field condition with shear band. The effect of shear band on the TDR response is experimentally investigated with emphasis on how to enhance the sensitivity to shear displacement and quantify the shear displacement from the TDR response. Utilizing the results from Lin (2007) and this study, the standardized procedure of TDR installation and interpretation was revised for better practical use. In addition, the feasibility of improving the sensitivity and early detectability by adding amplifying blocks on the cable was investigated.

To better simulate the field condition, the cable extending outside the shear box was fixed to avoid movement of cable relative to the grout. This revision significantly improves the repeatability of the TDR experiments. But it was found that the early detectability and sensitivity of TDR response to shear displacement in soft ground were overestimated in the previous study. The physical model reveals that the TDR response is not significantly influenced by the shear bandwidth within the testing range of 5cm. It should be noted that, after the improvement of the TDR shear device, the sensitivity of TDR response was found apparently dependent on the stiffness of ground materials, making quantitative interpretation of TDR measurement difficult. However, the range of deformation may be reasonably estimated by comparing the ground materials with several materials tested in the physical model. Furthermore, the amplifying blocks attached on the cable were found useful to improve the sensitivity to shear displacement but has a limited effect on enhancing the early detectability. Optimization of the amplifiers requires further study.

Key words : Time domain reflectometry (TDR), shear displacement, large direct shear device, shear bandwidth

誌謝

本論文得以順利完成，首先要感謝恩師 林志平教授平日對我的教導與提攜，亦師亦友，無論學業方面或為人處世等均給予我莫大之幫助，浩蕩師恩，永誌難忘，在此獻上萬分謝意。

在學期間，承蒙 方永壽博士、潘以文博士、廖志中博士、黃安斌博士及 單信瑜博士，於課業、研究與生涯規劃上之指導與建議，使得學生受益良多，在此致上萬分謝意。

論文口試期間，承蒙中興大學土木工程學系 蘇苗彬教授與工研院能環所 柳志錫博士、劉智超博士，以及宜蘭縣聖母醫護管理專科學校資訊管理科 湯士弘博士，對於本論文提供諸多非常寶貴之意見，使得本論文更臻完善，在此表達由衷感謝。

研究期間，幸蒙宗盛、士弘、志忠、瑛鈞、俊宏、育嘉、仁弘、文欽與奕全等學長對於論文試驗與專業知識提供寶貴意見與協助，在此致上謝意；同時感謝研究室成員瑋晉、岳勳、智棟、永政、哲毅，於生活上與研究上之照料及幫忙；此外，感謝大地組的同學們與曾經幫助過我的人，在此致上由衷感謝。

最後，感謝我的父母對我的栽培，弟弟平時對我的支持，僅將此論文獻給我最敬愛的家人。

楊浚昇 謹誌 2008 年 7 月

目錄

中文摘要.....	i
Abstract	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
照片目錄.....	ix
符號說明表.....	xi
第一章 前言.....	1
1.1. 研究動機.....	1
1.2. 研究目的.....	2
1.3. 研究方法.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1. 地層位移量測方法.....	4
2.1.1. 測傾管.....	4
2.1.2. 管式應變計(Pipe Strain Gauge).....	7
2.1.3. FBG 節理式偏斜儀(Fiber Bragg Grating In-Place-Inclinometer, FBG-IPI).....	7
2.1.4. ShapeAccelArray 感測器.....	9
2.1.5. TDR 錯動變形量測系統.....	10
2.2. TDR 基本原理.....	10

2.2.1.	TDR 於地工監測之應用	13
2.2.2.	TDR 錯動變形量測原理	15
2.3.	TDR 錯動變形量化分析探討	17
2.3.1.	纜線電阻(Cable Resistance)	18
2.3.2.	材料互制行為(Soil-Grout-Cable interaction).....	20
2.3.3.	試驗重複性	24
2.3.4.	剪力帶寬度	24
2.3.5.	改善 TDR 錯動變形訊號之靈敏度	28
第三章	研究方法與試驗規劃.....	31
3.1.	TDR 錯動變形物理模型：大型直剪儀	31
3.1.1.	剪力盒	32
3.1.2.	剪力及圍壓應力設備	35
3.2.	大型直剪儀改良	42
3.2.1.	大型直剪儀試驗重複性改善	42
3.2.2.	模擬剪力帶寬度之物理模型：剪力帶環片	43
3.2.3.	試體準備	46
3.2.4.	試驗流程	48
3.2.5.	試驗規劃	49
3.3.	改善初始啟動門檻值(δ_D)及靈敏度(S)的處理方法	50
第四章	研究結果與討論.....	51
4.1.	錯動變形試驗影響因子探討	52
4.1.1.	大型直剪儀改善：試驗重複性	54
4.1.2.	剪力帶寬度對於 TDR 反應之探討	61
4.1.3.	提高 TDR 訊號靈敏度之成效	71
4.2.	TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析改善	78

第五章 結論與建議.....	84
5.1. 結論	85
5.2. 建議	87



圖目錄

圖 1.1 研研究流程圖究流程圖.....	3
圖 2.1 測傾管及量測設備照片(Green and Mikkelsen, 1988).....	5
圖 2.2 測傾管安裝及原理示意圖(Dunncliff, 1988).....	5
圖 2.3 斜儀構造與現地配置圖(Wilson and Mikkelsen, 1978).....	6
圖 2.4 管式應變計構造與現地配製圖(陳水龍, 1993).....	7
圖 2.5 FBG 偏斜儀現地安裝示意圖(陳至揚, 2001).....	8
圖 2.6 ShapeAccelArray 地層錯動感測器(from Measurand Inc., 2007).....	9
圖 2.7 時域反射法之設備(盧吉勇, 2004).....	11
圖 2.8 不同之阻抗不連續所產生之反射波形 (Addrews, 1994).....	12
圖 2.9 TDR 於大地工程監測之應用(Lin and Tang, 2006).....	14
圖 2.10 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006).....	16
圖 2.11 TDR 變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇, 2003).....	17
圖 2.12 完整 TDR 波傳模型(a) 10m 長延長線 (b) 30m 長延長線.....	19
圖 2.13 衰減比率法與傳統方法比較 (Lin and Tang, 2006).....	19
圖 2.14 原始 $\delta-\rho_{\text{peak}}(L)$ 關係與修正後之結果 (Lin and Tang, 2006).....	20
圖 2.15 不同纜線與灌漿材於渥太華砂之靈敏度(林文欽, 2007).....	21
圖 2.16 灌漿材料順應性試驗之變形模式(林文欽, 2007).....	22
圖 2.17 纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度(林文欽, 2007).....	23
圖 2.18 相同纜線、材料配置條件下反射係數-水平位移曲線.....	24
圖 2.19 反射訊號受剪力帶寬度影響(O'Connor, 1991).....	25
圖 2.20 剪力環設備(盧吉勇, 2003).....	25
圖 2.21 固定材質, 不同剪力帶寬度之 $\delta-\rho_{\text{peak}}$ 關係(盧吉勇, 2003).....	26
圖 2.22 預留寬度(W=3cm)剪動情形(楊清良, 2004).....	27

圖 2.23 預留寬度為 3cm 受剪時呈雙峰狀之波形圖(楊清良，2004).....	27
圖 2.24 纜線中加入 amplifier 示意圖.....	28
圖 2.25 (a) 纜線沒有加 amplifier (b) 纜線加入 amplifier.....	29
圖 3.1 大型直剪儀設計架構圖.....	31
圖 3.2 大型直剪儀各元件示意圖.....	32
圖 3.3 考慮纜線受剪長度之影響.....	33
圖 3.4 剪力盒所考慮影響範圍示意圖.....	34
圖 3.5 剪力盒尺寸設計詳圖.....	34
圖 3.6 Tektronix 1502C (a)實體照片(b)操作介面說明.....	36
圖 3.7 P3 系列同軸纜線剖面示意圖(摘自 CommScope User Manual).....	39
圖 3.8 土壤種類粒徑分佈曲線.....	47
圖 3.9 試驗流程圖.....	49
圖 4.1 P3-500 纜線於不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線.....	53
圖 4.2 RG-8 纜線於不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線.....	53
圖 4.3 固定纜線，相同配置下之剪應力-水平位移曲線.....	55
圖 4.4 相同纜線受剪之反射波形.....	57
圖 4.5 軟、硬性纜線重複性試驗之 $p_{peak}-\delta$ 關係曲線.....	59
圖 4.6 纜線加入不同剪力帶寬度之剪應力-水平位移曲線.....	62
圖 4.7 軟性纜線於不同剪力帶寬度之反射波形.....	64
圖 4.8 硬性纜線(P3-500)於不同剪力帶寬度之反射波形.....	67
圖 4.9 RG-8 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度.....	68
圖 4.10 P3-500 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度.....	69
圖 4.11 提高 TDR 訊號靈敏度試驗之剪應力-水平位移曲線.....	71
圖 4.12 提高 TDR 訊號靈敏度試驗之反射波形.....	73
圖 4.13 RG-8 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線.....	75

圖 4. 14 P3-500 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線.....	76
圖 4. 15 TDR 錯動變形監測之標準程序.....	80
圖 4. 16 RG-8 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度.....	82
圖 4. 17 P3-500 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度.....	83
圖 4. 18 TDR 錯動變形監測資料分析流程圖.....	84

表目錄

表 3. 1 二段式油壓千斤頂基本資料.....	35
表 3. 2 Load cell 規格表.....	37
表 3. 3 位移計規格表.....	37
表 3. 4 顯示器規格特性表.....	38
表 3. 5 外填材料基本物理性質.....	47
表 3. 6 試驗規劃.....	50
表 4. 1 固定纜線，相同配置下之反應特性比較.....	60
表 4. 2 試驗相同配置條件下，加入剪力帶寬度之反應特性比較.....	70
表 4. 3 相同配置條件下，纜線置入節點之反應特性比較.....	77

照片目錄

照片 3. 1 (a) 傳力設備-油壓千斤頂 (b) Load cell (c) 位移計(LVDT) (d) Load cell 與位移計輸出顯示器(正、背面)(林文欽, 2007).....	40
照片 3. 2 大型直剪儀元件說明(林文欽, 2007).....	41
照片 3. 3 (a) 圍壓傳遞板 (b) 圍壓傳遞板及擋板 (c) 擋板及螺絲 (d) 裝有水平導輪之剪力盒及束制纜線用螺絲.....	43
照片 3. 4 (a) 剪力帶環片側視圖 (b) 剪力帶環片上視圖.....	44

照片 3.5 大型直剪儀改良後加入剪力帶環片示意圖.....	45
照片 3.6 (a) 水泥-纜線複合材料製作過程 (b) 水泥養護過程.....	46
照片 3.7 RG-8 纜線加入 (a) 球形節點 (b) 圓柱形節點.....	51
照片 4.1 同種纜線相同配置灌漿材料之變形模式.....	58
照片 4.2 軟性纜線(RG-8)於不同剪力帶寬度之變形模式.....	65
照片 4.3 硬性纜線(P3-500)於不同剪力帶寬度之變形模式.....	67
照片 4.4 提高 TDR 訊號靈敏度試驗之變形模式.....	74



符號說明表

ϵ_r	: 介電度
ϵ_r^*	: 等值介電度
σ_{dc}	: 導電度
ϵ_0	: 真空時的介電常數
μ_0	: 真空之磁導率
Z	: 傳輸纜線阻抗
Z_p	: 介質於真空時($\epsilon_r = 1$)之參考特徵阻抗
ρ	: 反射係數
V_i	: 入射方波
V_r	: 反射方波
c	: 光速
γ	: 傳輸纜線傳遞常數
j	: $\sqrt{-1}$
f	: 頻率
α	: 傳遞常數實部
β	: 傳遞常數虛部
x	: 剪動位置
V_p	: 電磁波於纜線中之傳遞速度



T_R	: 接收到反射尖峰所需走時
δ	: 剪力盒位移量
ρ_{peak}	: 反射係數峰值
S	: 纜線本身的靈敏度
δ_0	: 迴歸門檻值
δ_D	: 反射訊號產生改變的初始位移值
α_R	: 電阻損失因子
W	: 剪力弱帶寬度
$\Delta\rho$: 反射係數變化量
K_s	: 地盤反力係數
K_{gs}	: 複合材料之剪力勁度
L_0	: 土釘受剪影響長度
E	: 灌漿材料勁度
I_0	: 灌漿材料與纜線斷面之慣性矩
D	: 鑽孔直徑

第一章 前言

台灣地區由於地質條件複雜且颱風與地震頻繁，加上近年來氣候異常頻率增高，使得因豪雨而造成山崩、地滑等情形越來越嚴重。山坡地之安全有賴於定期與不定期之監測資料，但傳統地滑監測儀器相當不穩定及需人工量測，常使得監測系統未能發揮應有的角色；另一方面，傳統監測儀器又無法得到即時且連續的資料，因此，有必要進一步研發提升監測技術，以強化山坡地之安全評估。

1.1. 研究動機

近年來於大地工程監測中所發展時域反射(time domain reflectometr, TDR)錯動變形量測系統屬上孔式(up-hole)被動式監測系統，感測器本身不具昂貴的電子元件，因此不易受環境而影響監測品質；TDR 錯動變形量測系統包含階躍脈衝電壓產生器(step generator)、訊號取樣器(sampler)與示波器(oscilloscope)與傳輸纜線所組成，感測器為傳輸纜線之一部份，與傳統儀器相較之下，TDR 具有價格低廉、耐久性與穩定性佳且維修方便之優點，透過網路傳輸可達遠端自動化監測，即時掌握邊坡滑動訊息。利用資料擷取器與多工器，可同時監測地下水位、雨量等物理量，達到一機多功與多點監測，充分降低裝置成本，為一經濟有效的監測方案。

目前 TDR 錯動變形量測系統於監測邊坡滑動已有相當成果，林文欽(2007)已經完成了一套現地安裝標準程序與量化分析之初步建議。然而試驗缺乏重複性的探討，導致其數據難以客觀的分析，以及應用於軟弱土層中，將使得埋設於土坡中纜線不靈敏於外在滑動，致使 TDR 變形量化上存在困難。

1.2. 研究目的

林文欽於室內模擬錯動變形試驗，雖然解決了邊界效應並獲得材料互制行為的結果，但是於軟弱土層中，纜線無法靈敏的量測外在滑動，而且其大型直剪試驗可能因試體、纜線因剪動而移動，造成試驗沒有重複性，致使 TDR 變形量化上還是有困難。此外，剪力弱帶方面，文獻中以空氣段 (Air gap) 來模擬，是否具有代表性，仍有待商榷。就目前而言，林文欽(2007) 試驗為文獻中最為貼近現地狀態之研究設計，因此本研究將逐步探討其試驗之不合理處加以改善，並設計更符合現地剪動之物理模型，最後於纜線加入節點(anchor)，探討對於靈敏度的影響，主要探討的問題如下：

1. 林文欽(2007)試驗重複性不佳。
2. 模擬更符合實際的剪動模式，應變非高度集中之剪力帶寬度。
3. 改善靈敏度(ρ/mm)及 δ_0 不佳的問題。
4. TDR 錯動變形於現地安裝 SOP 的改善及建議。

1.3. 研究方法

本研究流程如圖 1.1，主要架構概述如下：

1. 文獻回顧剪力帶寬度的模擬，以及林文欽(2007)大型直剪物理模型試驗的不足之處。
2. 探討林文欽(2007)試驗不重複的原因，並設計具有重複性之試驗方法。
3. 在具有重複性的前提下，於大型直剪模型加入剪力帶環片以期能充分模擬非應力集中的現象。
4. 解決於軟弱土層及加入剪力帶寬度後，可能造成纜線不靈敏於外在滑動的現象，並進一步定義可量化變形量之公式。
5. 綜合本研究成果及改善林文欽(2007)所建議之現地安裝標準程序，使之

更為系統化，更符合實務應用之需求。

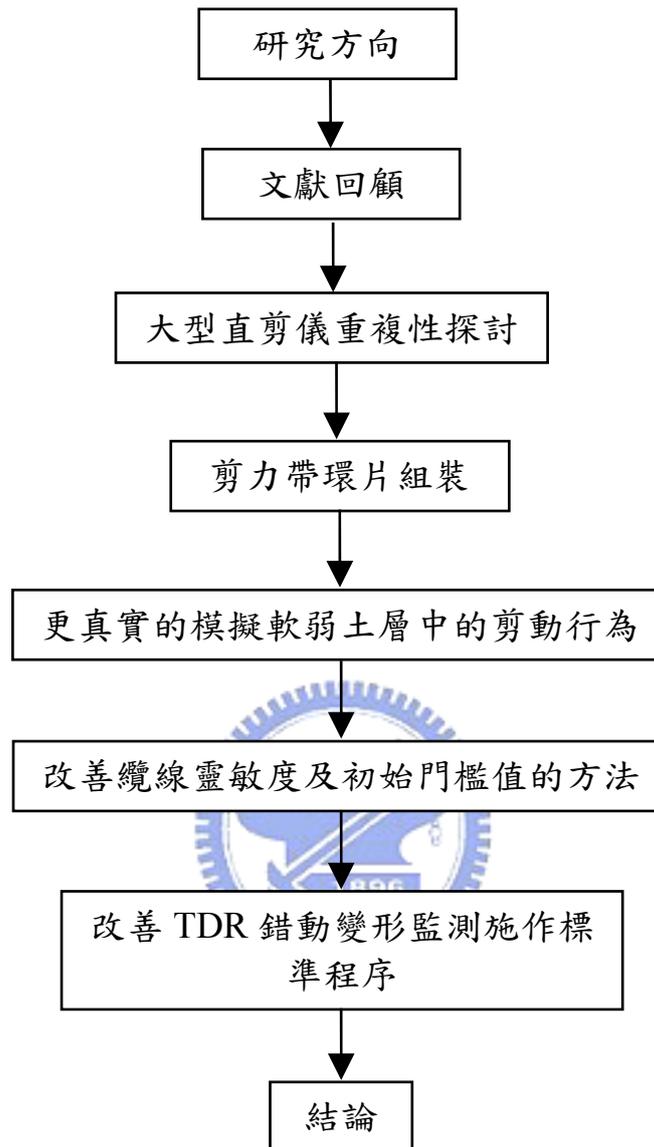


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1. 地層位移量測方法

地層移動監測方法甚多，除了傳統測傾儀(Inclinometer Probe, IP)、孔內測傾儀(In-Place-Inclinometer, IPI)與管式應變計(Pipe Strain Gauge)之外，近

幾年新興不少新式地層錯動監測方法，如 TDR 錯動量測系統、光纖光柵孔內扭曲儀(Fiber Bragg Grating In-Place-Inclinometer, FBG-IPI)與 ShapeAccelArray 3D 陣列系統等，茲將各個監測原理及應用說明如下。

2.1.1. 測傾管

- (1) 測傾探管：測傾管材質通常為 ABS，為具有四個溝槽，國內常用之外徑約為 2.75 英吋，事先埋入現地鑽孔中與地層成為一體，再藉由測傾儀量測。測傾儀主要由感測器與傳輸纜線構成，感測器通常為長 50 公分金屬管，具有兩組導輪方便上下移動，測傾管及測傾儀等元件如圖 2.1 所示。量測時將測傾儀感測器導輪順著槽溝放入測傾管中，每次量測移動距離為 50 公分，導輪傾斜的角度將轉換成量測訊號，由傳輸纜線傳回資料擷取系統，分析時則利用所測得傾斜角轉換成水平位移量，現場配置及位移計算原理如圖 2.2 所示，一般測傾儀量測解析度約為 0.04 mm/m。

利用測傾管可獲得地層水平位移剖面，但需仰賴人工量測且當地層存在剪力帶寬度(shear bandwidth, W)時反應較不靈敏。而地層位移過大時，測傾管可能過度彎曲甚至斷裂，導致感測器無法通過。



圖 2.1 測傾管及量測設備照片 (Green and Mikkelsen, 1988)

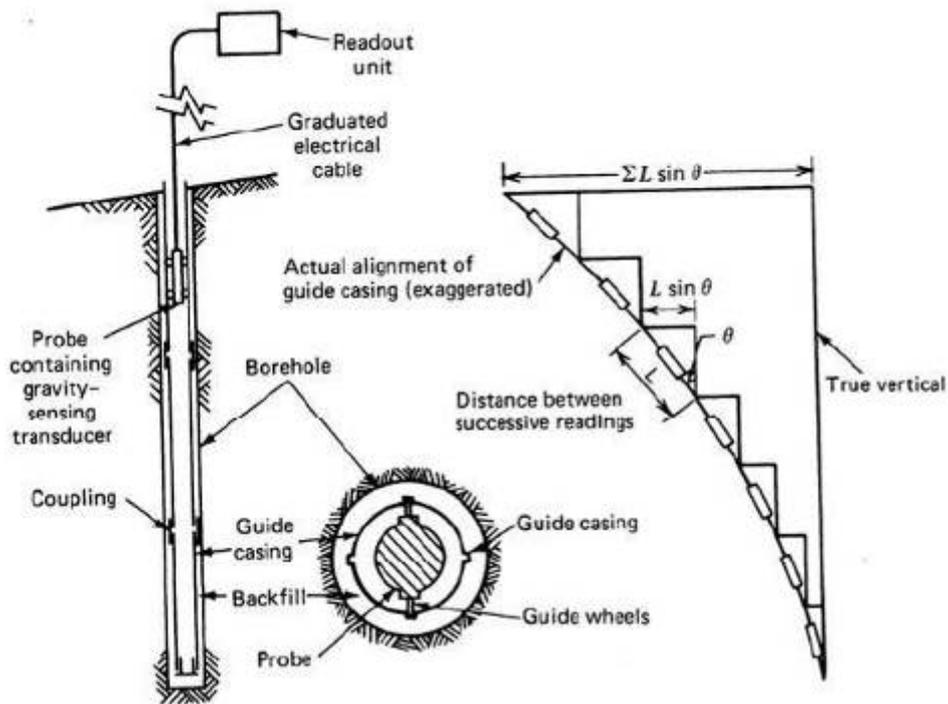


圖 2.2 測傾管安裝及原理示意圖 (Dunnicliff, 1988)

(2)內定置型測傾儀：孔內傾斜儀感測原件常為伺服加速度計感

測器，提供一維或二維位移量測，其構造及現地配置如圖 2.3 孔內傾斜儀兩兩之間以一金屬桿連接組成感測器，順著 ABS 管溝槽往下放至固定位置。孔內測傾儀量測原理基本上與前述測傾管相同，但量測精度可達 1/25000。

孔內測傾儀的優點為可遠端自動化，然而儀器相對昂貴且因為固定於孔內而無法像傾斜儀可量測正反方向作平差，且受到傳輸纜線佔據孔內空間影響，單一孔位可裝設儀器數量有限，造成空間解析不佳。

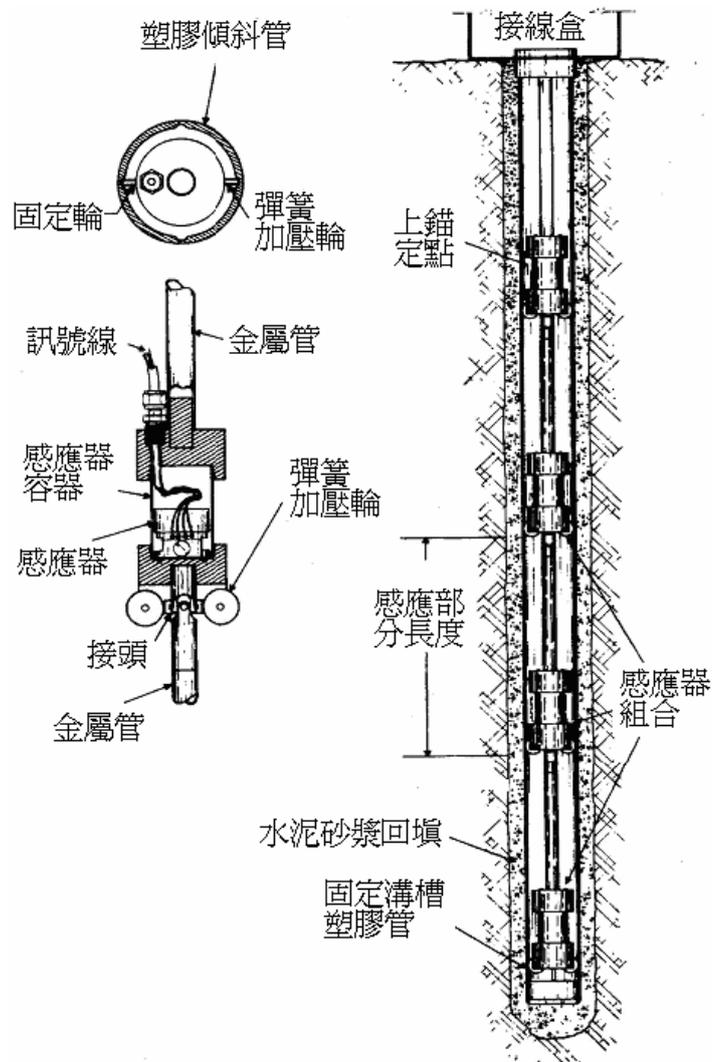


圖 2.3 斜儀構造與現地配置圖 (Wilson and Mikkelsen, 1978)

2.1.2. 管式應變計(Pipe Strain Gauge)

管式應變計用於判斷滑動面位置，其構造及現地安裝示意圖如圖 2.4。其原理為將黏貼有應變計的PVC管放入鑽孔中，當地層滑動產生位移，影響PVC管壁應變變化而判斷滑動面位置。

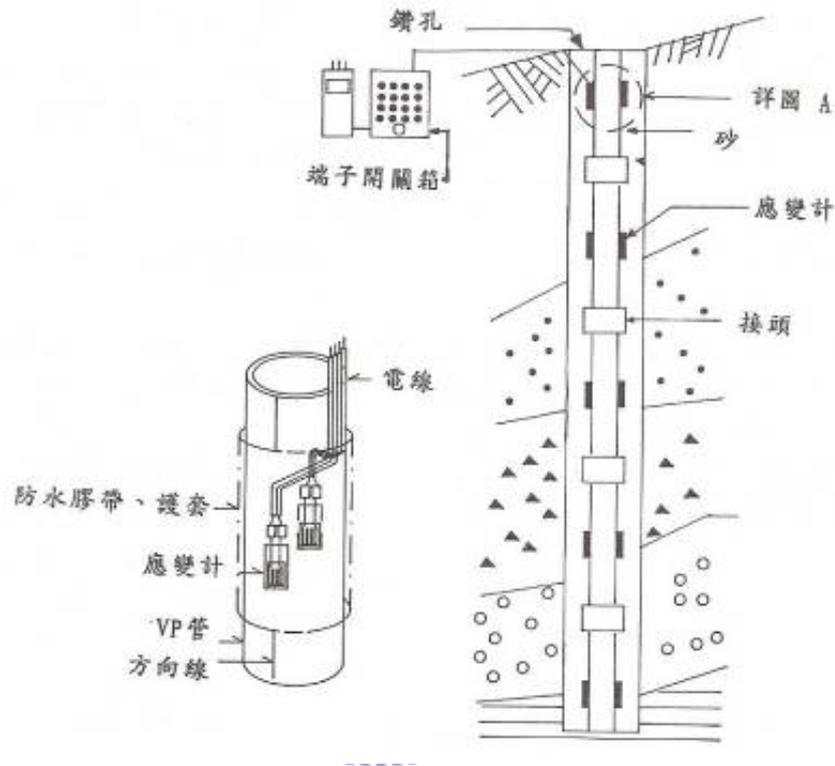


圖 2.4 管式應變計構造與現地配製圖(陳水龍，1993)

管式應變計雖可用於判斷滑動面位置，但由於 PVC 管具有韌性，無法反應薄地層剪動行為，此外，管式應變計分析方法所需假設通常過於理想化(例如：忽略剪力所造成的變形，只考慮彎矩造成的變形)，且判斷滑動面位置的依據並不十分精確。

2.1.3. FBG 節理式偏斜儀(Fiber Bragg Grating In-Place-Inclinometer, FBG-IPI)

FBG節理式偏斜儀感測原理是以光纖光柵黏貼於相對柔性的聚碳酸酯(Polycarbonate)連接兩個具備滑輪的鋁製桿件成為感測器單元，現地安裝時

順著ABS管槽溝依序接續各感測器並予以固定於孔內(如圖 2.5)，當地層滑動，ABS管中的各桿件相對旋轉，聚碳酸酯上的光纖光柵因此分別受到拉力與壓力。透過室內事先標定旋轉量(角度)與光纖光柵波長改變量關係，即可從光纖光柵波長改變量，獲得各感測器單元相對旋轉量，將角度正弦值乘上桿件長度即求得相對水平位移。

FBG 節理式偏斜儀解析之儀器系統相對昂貴且需仰賴 ABS 需地層結為一體，造成無法量測薄層滑動，又因桿件長度限制，使得垂直解析度相對降低；另外偏斜儀量測相對傾角與孔內傾斜儀之絕對傾角不同，位移量測誤差會由孔底往地表累加。

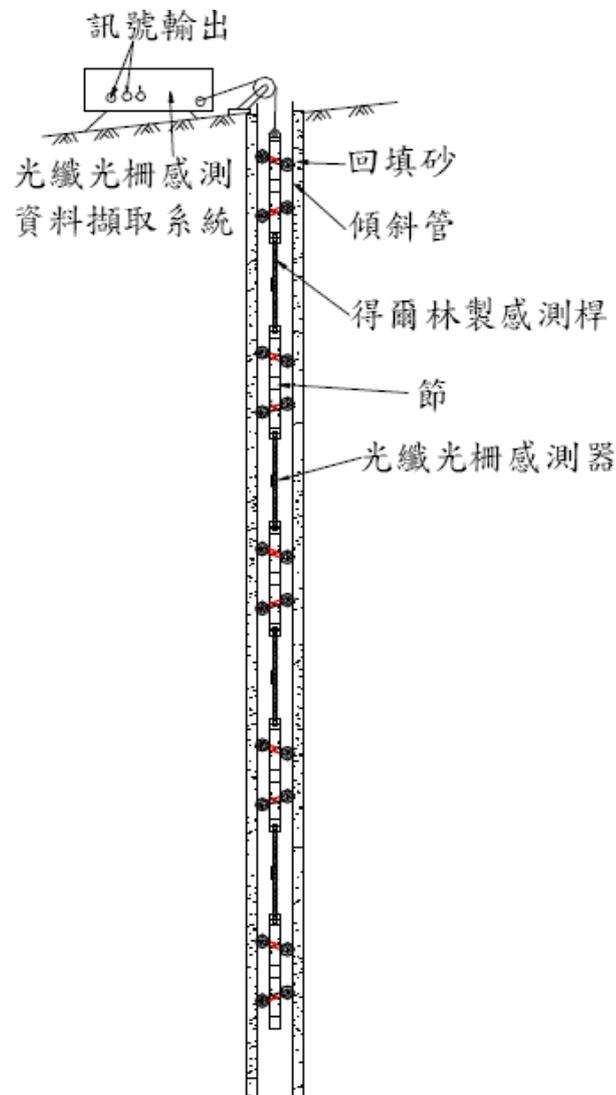


圖 2.5 FBG 偏斜儀現地安裝示意圖(陳至揚，2001)

2.1.4. ShapeAccelArray 感測器

ShapeAccelArray 是由 Canada Measurand 公司以微機電技術 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 所研發製造之感測元件，每元件由八節所組成，每節長為 305mm，直徑為 16mm，並設有一感測器 (Sensor) 與微機處理器 (microprocessor)，可同時量測變形與振動量，為一多點 3D 陣列系統 (如圖 2.6)。於現地安裝時，將感測元件置入鑽孔中，外圍以塑膠套管保護並以砂子填入感測器與套管中以達固定功用。

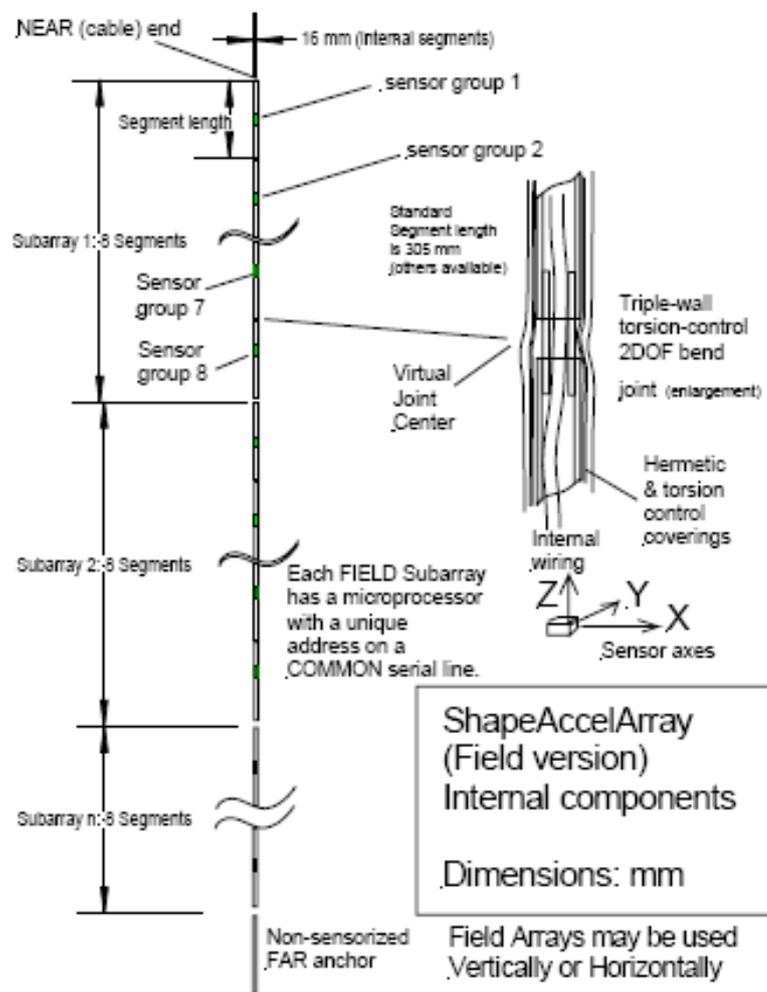


圖 2.6 ShapeAccelArray 地層錯動感測器 (from Measurand Inc., 2007)

ShapeAccelArray 主要應用於土壤變位、構造物之變形與振動之量測。經由量測之土壤變形與振動量，可提供完整之 3D 變形剖面。其主要特色為

輕巧、儀器解析度高、防水及遠端自動化，垂直解析度受限於每節長 305mm 且價格昂貴(38,000 NT/m)，Shape AccelArray 為最新發展的產品，其現地的表現仍有待進一步驗證。

2.1.5. TDR 錯動變形量測系統

時域反射(Time Domain Reflectometry, TDR)錯動變形監測系統具連續性監測、空間解析度佳且可遠端自動化監測。TDR 階躍脈衝產生器與資料擷取器(Datalogger)及多工器(Multiplexer)結合，進行多點且不同功能之監測，並可透過天線或電話線等下載量測訊號。其解決傳統儀器需人工量測、設置成本高、維護性與耐久性低等問題。以常見之傾斜儀而言，可能因過大之變位而無法進行量測，且受限於傾斜儀長度影響，空間解析度較差。當邊坡發生滑動，地層間相對位移對於灌注於現地坡體的同軸纜線造成剪切或拉張等改變纜線幾何形狀的情形時，TDR 於波形上會在該處產生一個反射尖峰，經由走時分析可以明確定位出發生錯動的位置，而透過自動化監測，更可以協助應變中心專業人員判斷邊坡是否發生滑動以及發生滑動的深度，對於邊坡滑動監測方面極具發展潛力。

2.2. TDR 基本原理

時域反射(Time Domain Reflectometry, TDR)是一種以電磁波進行監測及探查的方法，基本原理與雷達(Radar)相似，但 TDR 是在特殊的傳輸線系統中之一維發送與接收電磁波。

圖 2. 7 為時域反射法設備簡圖，包含階躍脈衝電壓產生器(Step Generator)、訊號取樣器(Sampler)與示波器(Oscilloscope)。當製波器產生電壓脈衝進入同軸纜線，再由取樣器(Sampler)紀錄因同軸電纜阻抗(Impedance)不連續所造成電磁波反射訊號並顯示在示波器(Oscilloscope)，透過計算電磁波速與反射來回走時(Round-trip travel time)

可定位阻抗不連續位置。同軸纜線係由一組內、外導線及內、外導線中間之絕緣介質所組成，外導線以封閉的方式包圍內導線，選用同軸電纜線作為傳輸係因訊號傳輸時不為外界訊號所干擾，感測器(Measurement Probe)為同軸纜線之延伸，使得電磁波可傳送至欲量測環境中。

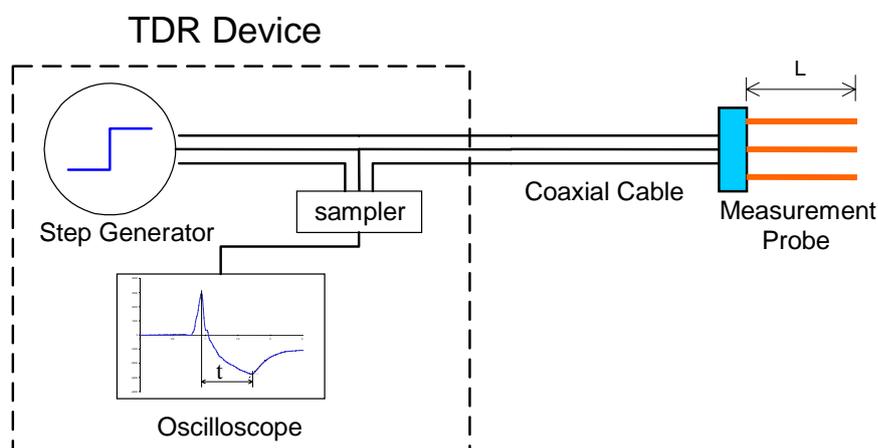


圖 2.7 時域反射法之設備(盧吉勇，2004)

電纜阻抗由電纜斷面幾何與電纜正負極間絕緣介質所決定，控制 TDR 反射訊號大小，TDR 即是在時間域(Time Domain)探討傳輸線中阻抗不連續所造成電磁波反射(Reflection)行為的一項技術。特徵阻抗為纜線本質特性之一，為傳輸線系統重要的控制參數。以下就 TDR 傳輸線系統特性說明：

TDR 傳輸線系統包括同軸纜線與感測器，電磁波在傳輸纜線中傳遞由 Maxwell 方程式控制，因為傳輸電纜特殊電磁場結構，電磁波在傳輸纜線中傳遞可以用導線電流與正、負導線電壓描述，因此 Maxwell 方程式可以簡化成電壓與電流波動方程式。波動方程式解答為傳輸線系統兩個重要的控制參數，分別為特徵阻抗(Characteristic Impedance)與傳遞常數(Propagation constant)。特徵阻抗定義為纜線電壓與電流比值，且為纜線幾何形狀與纜線介質電磁性質函數，當纜線中因特徵阻抗相異而產生阻抗不連續面，電磁波會在阻抗不連續面產生反射波與折射波。傳遞常數為纜線

介質電磁性質函數，控制電磁波在纜線中傳遞速度與衰減。

在不考慮土壤中含有磁性成分的前提下，一般可假設土壤之電磁性質由電學性質所控制，而材料之基本電學性質包括介電度(Dielectric Permittivity, ϵ_r)與導電度(Conductivity, σ_{dc})。介電度為頻率之函數，可以表示為複數，實部(ϵ_r')表示材料儲存外部電場能量的能力，虛部(ϵ_r'')表示材料阻尼效應能量消散特性。導電度代表材料衰減能量的能力。傳輸纜線阻抗(Z)由纜線斷面幾何與介電度決定，以同軸纜線為例，可表示為：

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r^*}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r^*}} \dots\dots\dots(2-1)$$

其中 a 為內導線外徑， b 為外導線內徑， ϵ_r^* 為等值介電度(complex dielectric permittivity)， ϵ_0 相當於真空時的介電常數， μ_0 為真空之磁導率(Magnetic permeability)， Z_p 為介質於真空時($\epsilon_r = 1$)之參考特徵阻抗(Halliday and Resnick, 1962)。

TDR典型反射訊號如圖 2. 8，當入射方波 V_i 於電纜中遇到阻抗不連續面(Z_0 與 Z_t 交界)將產生反射與透射，反射波與入射波的關係可表示為

$$V_r = \rho V_i \dots\dots\dots(2-2)$$

其中 ρ 為反射係數，定義如下，用以描述反射行為

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \dots\dots\dots(2-3)$$

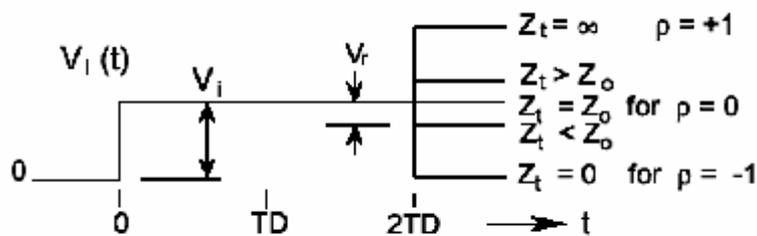


圖 2. 8 不同之阻抗不連續所產生之反射波形(Addrews, 1994)

圖 2.8 顯示電磁波經過阻抗 Z_0 遇到不同阻抗 Z_t 時產生不同之反射，若 $Z_t = Z_0$ (即 $\rho = 0$ ，沒有阻抗不連續面)，則不會產生反射訊號，當 $Z_t > Z_0$ 時， $\rho > 0$ ，可觀察到正反射方波，當 $Z_t < Z_0$ 時， $\rho < 0$ ，可觀察到負反射方波，TD 即為反射訊號所需來回走時 (Addrews, 1994; Dworak et al., 1977)。

傳輸纜線傳遞常數 (propagation constant, γ) 經由推導可表示為

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} = \alpha + j\beta \dots\dots\dots (2-4)$$

其中 c 為光速， ϵ_r^* 為等值介電度 (complex dielectric permittivity)， j 為 $\sqrt{-1}$ ， f 為頻率，而 α 與 β 分別為傳遞常數實部與虛部，其中實部 α 反應電磁波能量衰減，而虛部 β 為空間頻率，時間頻率 ($2\pi f$) 除以空間頻率 (β) 可得波傳相位速度。



2.2.1. TDR 於地工監測之應用

TDR 於地工監測之應用逐漸廣泛，例如 TDR 水位量測計、TDR 地表伸縮儀、TDR 雨量計與 TDR 錯動變形監測等，透過單一主機以及多工器即可將上述各種量測元件連接並透過網路傳輸進行自動化，以達一機多功之功能 (如圖 2.9)。

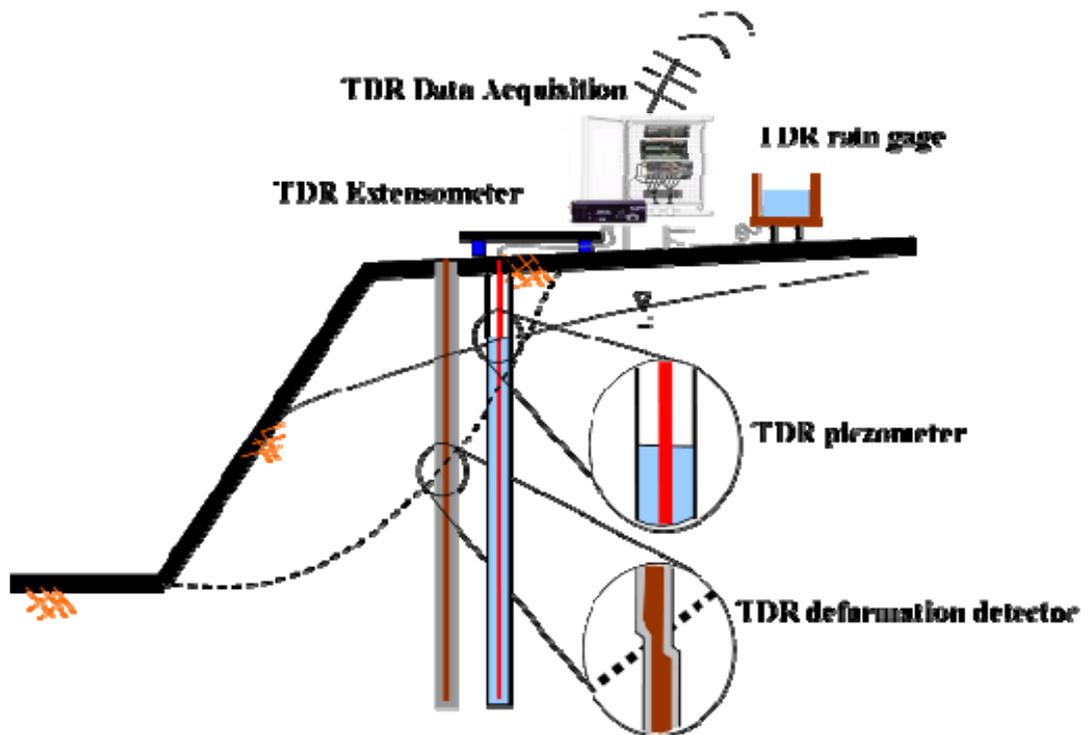


圖 2.9 TDR 於大地工程監測之應用 (Lin and Tang, 2006)

TDR 按照量測原理主要可分為下列幾種應用型式：

1. 變形型 (Crimp Type)：以絕緣介質固定的同軸纜線為傳感器，當外在環境變形，如土體錯動，造成預埋其內的同軸纜線斷面幾何改變而產生反射訊號，分析該反射訊號可以定性甚至定量描述電纜如何變形 (Su, 1987)。在固定量測環境條件下，反射訊號大小與外在環境變形存在良好關係，因此可應用在監測土體內變形。
2. 界面型 (Interface Type)：當斷面幾何固定的傳感器內存在相異絕緣介質，如空氣與地下水，兩者界面即為特徵阻抗不連續處，電磁波行經該界面將產生反射訊號，藉由計算電磁波速與反射來回走時可定位該界面 (Dowding et al., 1996)。應用上可將 TDR 傳感器置入水壓 (水位) 監測井去量測水壓 (水位)，或置入量水堰中量測收集得的水位高度。
3. 能量衰減型 (Attenuation Type)：如果斷面幾何固定的傳感器內存在

導電度，將衰減反射訊號能量，使得反射訊號穩態值(V_{∞})大小改變，據此可反求材料導電度(Giese and Tiemann, 1975)。已知水中導電度與水質相關，可利用反射訊號穩態值(V_{∞})求取量水堰收集得的乾淨水水質或水庫渾水濁度。

4. 速度型(Velocity Type)：將欲研究材料置入斷面幾何固定的傳感器中，作為內部絕緣介質，分析反射訊號走時獲得材料介電度，利用經驗關係式可以量測土水混合物的比例特性(Topp et al., 1980)。

本研究將聚焦於變形型應用於錯動變形的探討。

2.2.2. TDR 錯動變形量測原理

由TDR製波器發出之脈衝訊號在遇到斷面材質不同(即纜線阻抗不連續)或幾何形狀不同時會產生反射訊號，因此可利用此原理來監測岩體變形。首先必須在所要量測變形的岩石上鑽孔，放入同軸纜線，然後用水泥漿填塞，使纜線、灌漿材料與岩塊形成一體。隨著岩體變形將應力傳至灌漿材料再傳給同軸纜線，使之發生破壞，TDR反射之波形亦會隨變形之增加而增加，而目前許多研究指出，變形的大小不僅可量化，且在某些例子中，我們亦能分辨其為剪力或張力變形，甚至可經由室內標定方法，找出量化剪動量的經驗公式，如圖 2.10、式 2.5 及式 2.6 所示(Su, 1987; Dowding et al., 1988 & 1989)。

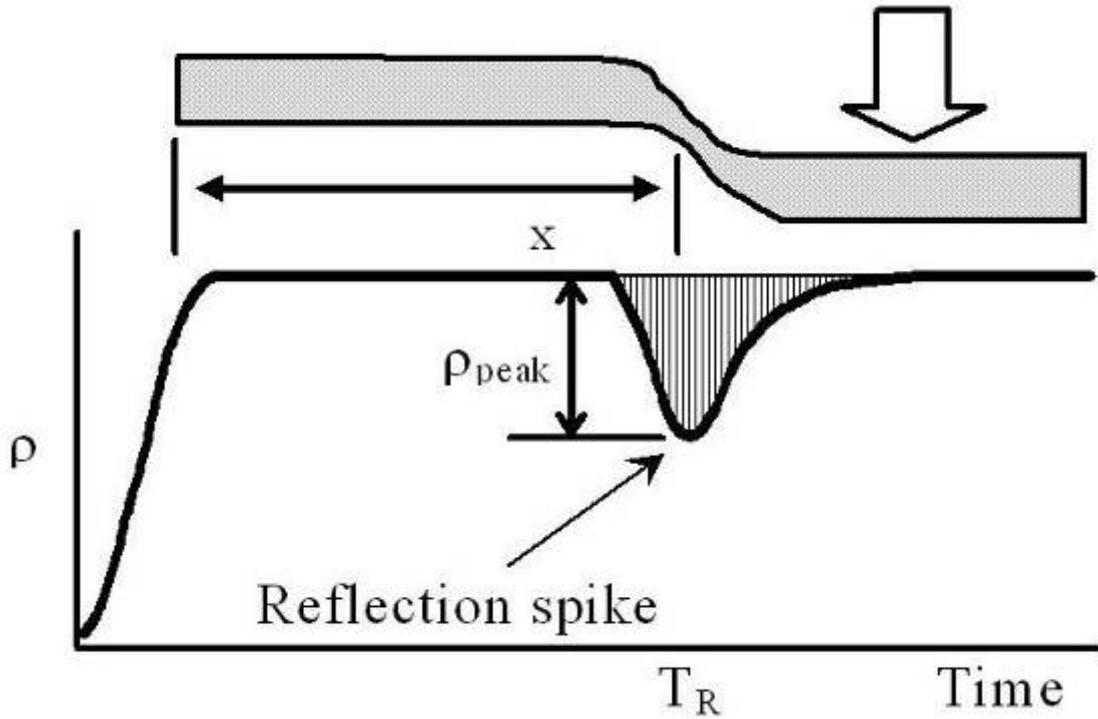


圖 2.10 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006)

$$x = V_p \frac{T_R}{2} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\delta = (\rho_{\text{peak}}/S) + \delta_0 \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

其中 x 為剪動位置， V_p 為電磁波於纜線中之傳遞速度， T_R 為接收到反射尖峰所需走時； δ 為外部位移量， ρ_{peak} 為反射係數峰值， S 為纜線本身的靈敏度； δ_0 為使 TDR 波形產生初始反應所需之啟動位移量，經由一次線性迴歸求得，定義為迴歸門檻值(Regression Threshold Value)。

將同軸纜線安裝於鑽孔後，利用 TDR 發射一電壓脈衝送至纜線下方，至纜線底部反射回來，而其間所遭遇受剪、受張等情況使同軸線產生缺陷(幾何形狀之改變)，便輸出於示波器上。如圖 2.11 所示，由 TDR 產生電磁波經同軸纜線至變形感測纜線時，即於接頭位置產生一起點反射，而於 TDR 之波形上顯現一凸起之反射波形；電磁波繼續前進當遇到凹痕時，又產生一反射訊號，而於 TDR 之波形上顯現一向下凹之反射波形；當電磁波至纜

線之末端時，即產生一終點反射，於TDR之波形上顯示上揚之反射波形。

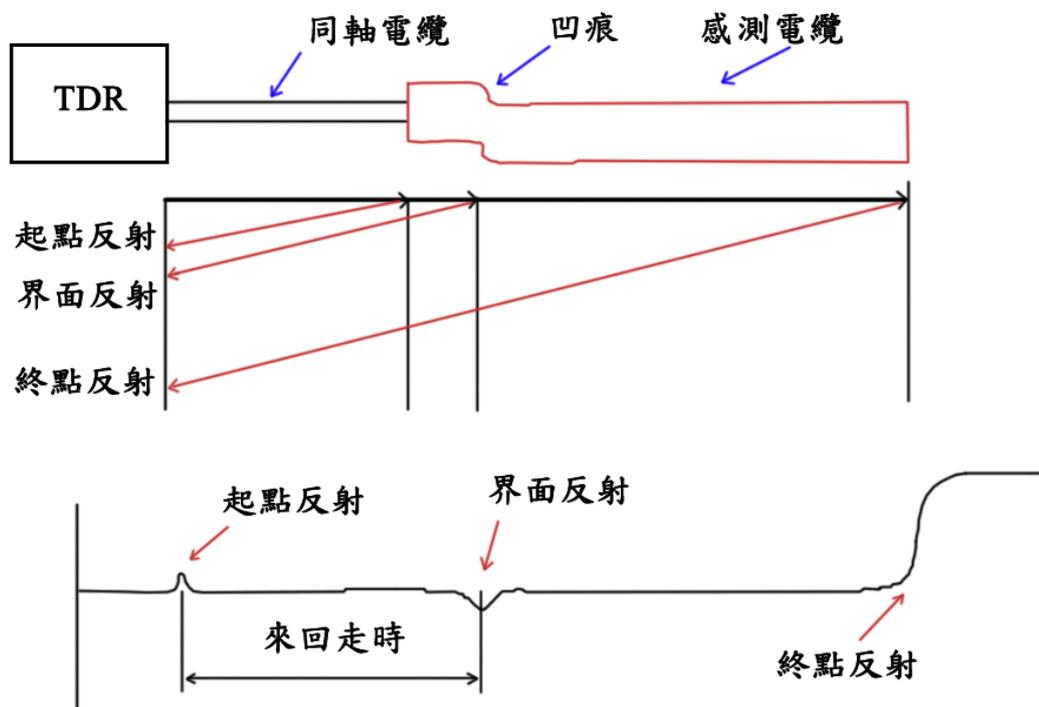


圖 2.11 TDR 變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇，2003)

局部應變或薄剪動常發生於支撐開挖邊緣、土堤下與不穩定邊坡內，在這些大應力梯度的環境，土壤應變變得相當大且集中在薄的剪動帶，而導致土壤之漸進式破壞。若能安裝一組同軸纜線/薄水泥漿系統，使其可隨著土壤受剪變形而變形，如同前面之電纜線隨岩石節理面剪動，則此系統便可直接反應土壤之局部剪動行為，並且透過自動監測的程式來求得廣泛風化岩石、軟岩及土壤之薄剪動帶所引致的邊坡不穩定情況。

2.3. TDR 錯動變形量化分析探討

TDR 使用於岩坡滑動監測及某些土壤邊坡滑動之監測已有相當成效 (Dowding et al., 1988 & 1989)，而其可量測得連續性的變位資料、遠端自動化及一主機多功的優點使其更具發展性。目前 TDR 變形監測量化上，仍存在室內試驗重複性不佳、剪力帶寬度、靈敏度等問題，茲將可能影響 TDR

變形監測量化因子說明如下。

2.3.1. 纜線電阻(Cable Resistance)

利用TDR來量測土壤、岩石之相對變形或地下水位時，感測器可以選用較不受外界訊號干擾之同軸電纜，然而介質材料之選定直接影響了脈衝產生後傳遞時的衰減，故一般採用衰減率低之材料作為介質材料。然而，當纜線太長時又會造成訊號衰減，對此，Lin and Tang (2006) 推導出代表電阻影響的衰減因子(Attenuation factor, A)參數為電阻損失因子(Resistance loss factor, α_R)與頻率之函數，電阻損失因子可視為代表電阻影響本質特性，為纜線導體表面電阻與纜線幾何影響的綜合因子，並依據建立完整之TDR波傳模型，可適當模擬纜線電阻對於反射尖峰大小衰減與波型平滑化的影響，如圖 2. 12所示。Lin and Tang利用完整TDR波傳模型反算而標定出P3-500型纜線所對應的電阻損失因子，提出衰減比率(Attenuation ratio)的概念，將模型所模擬的反射係數峰值 $\rho_{peak}(L)$ 與特定長度的 ρ_{peak} 相除得衰減比率Ratio(L)，如圖 2. 13所示。文中建議以衰減比率曲線即可修正任何纜線變形下，受纜線電阻影響而衰減的 ρ 。圖 2. 14即以衰減比率概念修正纜線電阻影響後的結果。

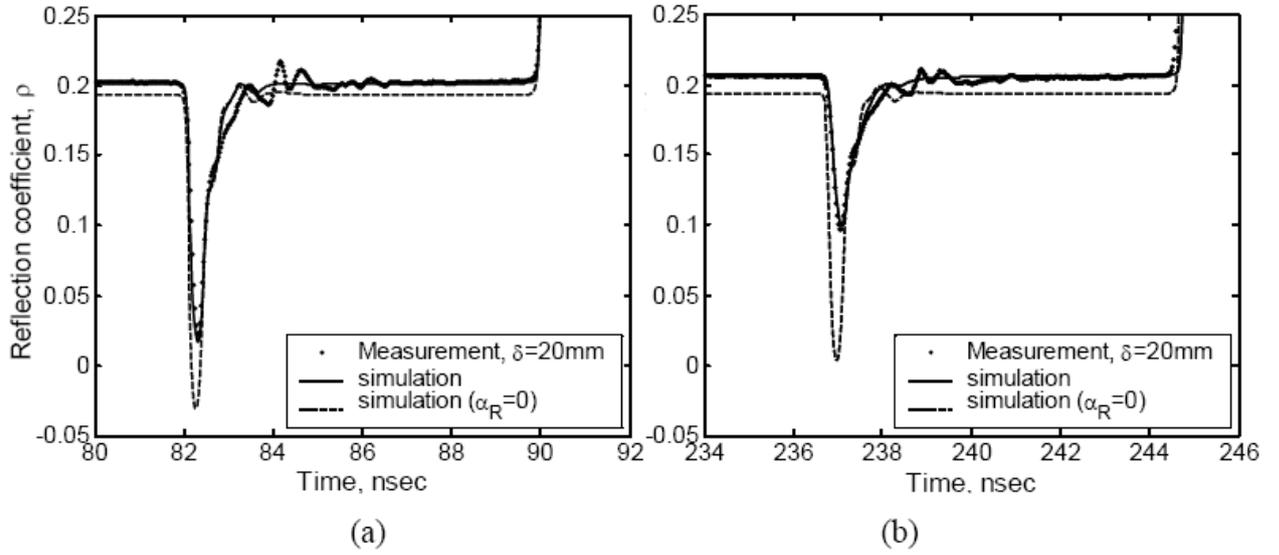


圖 2.12 完整 TDR 波傳模型(a) 10m 長延長線 (b) 30m 長延長線

(Lin and Tang, 2006)

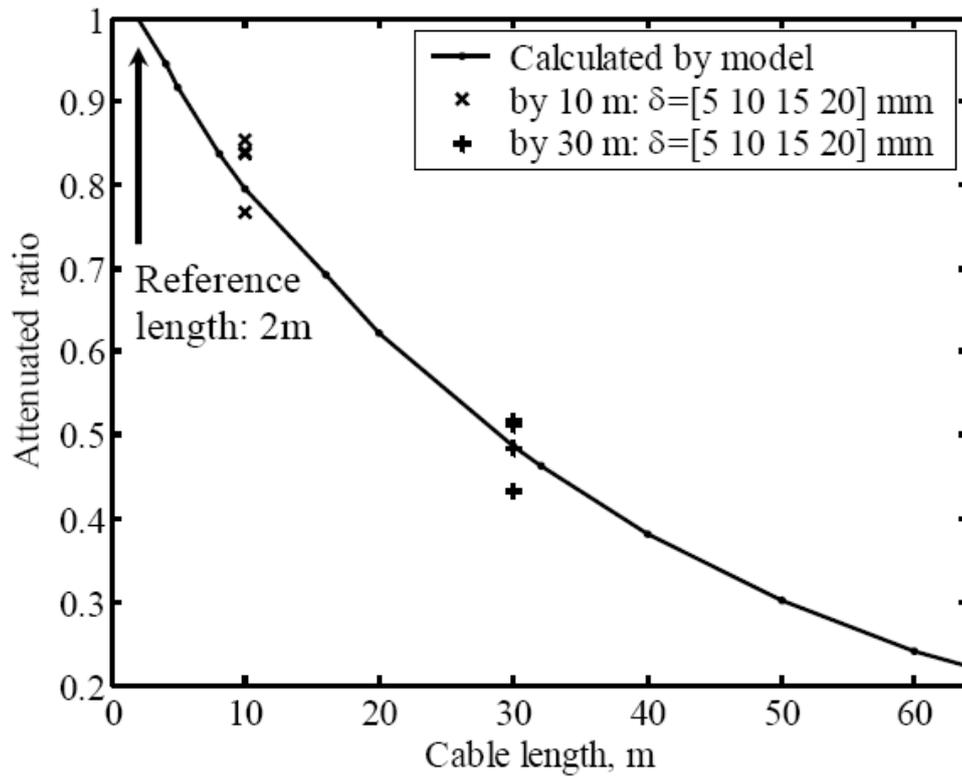


圖 2.13 衰減比率法與傳統方法比較(Lin and Tang, 2006)

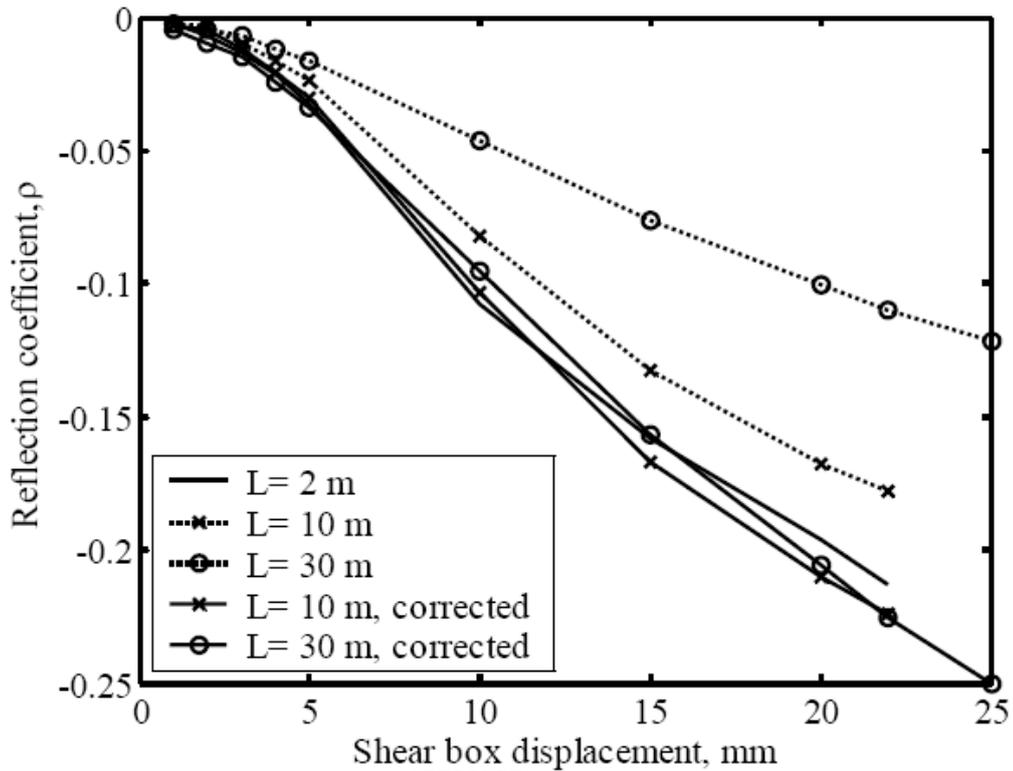


圖 2.14 原始 $\delta - \rho_{\text{peak}}(L)$ 關係與修正後之結果 (Lin and Tang, 2006)

2.3.2. 材料互制行為 (Soil-Grout-Cable interaction)

林文欽(2007)針對現地纜線-灌漿材料-土壤三者互制行為，規劃模擬一系列錯動變形試驗，主要目的為找出適用於軟弱及堅硬地層監測之同軸纜線，並藉由試驗結果探討不同試驗配置條件下，外部位移量(δ)與 TDR 反射係數(ρ)之關係，以利後續量化分析。材料互制(material interaction)行為，主要分：(1) 傳輸纜線受剪特性；(2) 灌漿材料之順應性；(3) 不同勁度外填材料之影響等三項因子，實驗結果概述如下：

(1) 傳輸纜線受剪特性

由圖 2.15 可以得知，去除原有外部塑膠皮披覆後的硬性纜線(P3-500、QR-320)能較早偵測到錯動位移，因此於現地建議採用無塑膠皮披覆的纜線，避免因為塑膠皮與外導體間之滑動降低感測靈敏度，但必須注意無披覆保護所伴隨的腐蝕問題。另外，圖中 QR-320 纜線最多到達 70mm 左右就

斷了，因此，相對於QR-320 型纜線，RG-8 及P3-500 型纜線所能量測到的錯動位移範圍較大。

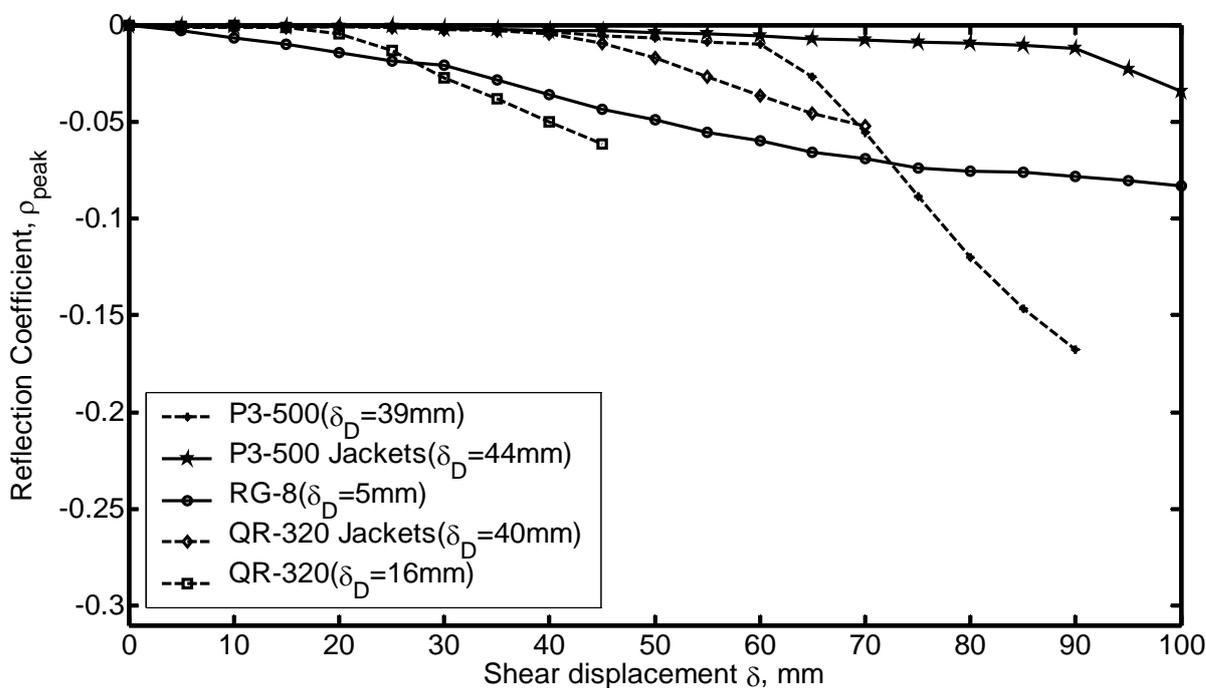


圖 2.15 不同纜線與灌漿材於渥太華砂之靈敏度(林文欽，2007)

2、灌漿材料之順應性

從前一段可知，硬性纜線(P3-500)剝皮後有助於 TDR 的反應，考慮現地實用性與為了最早察得滑動量，捨棄 P3-500 有包覆橡膠的纜線來進行試驗。

由圖 2.16 得知剝皮硬性纜線(P3-500)在有灌漿材料之順應性下，波形沿單一尖峰狀發展，有助於波形判釋；而軟性纜線(RG-8)因為本身纜線的勁度小，外力在沒有灌漿材料包覆反而能更有效的傳遞到纜線上，但值得注意的是：RG-8 纜線仍需依賴灌漿材料之束制才能使之於不同勁度外填材料下有一致之靈敏度。

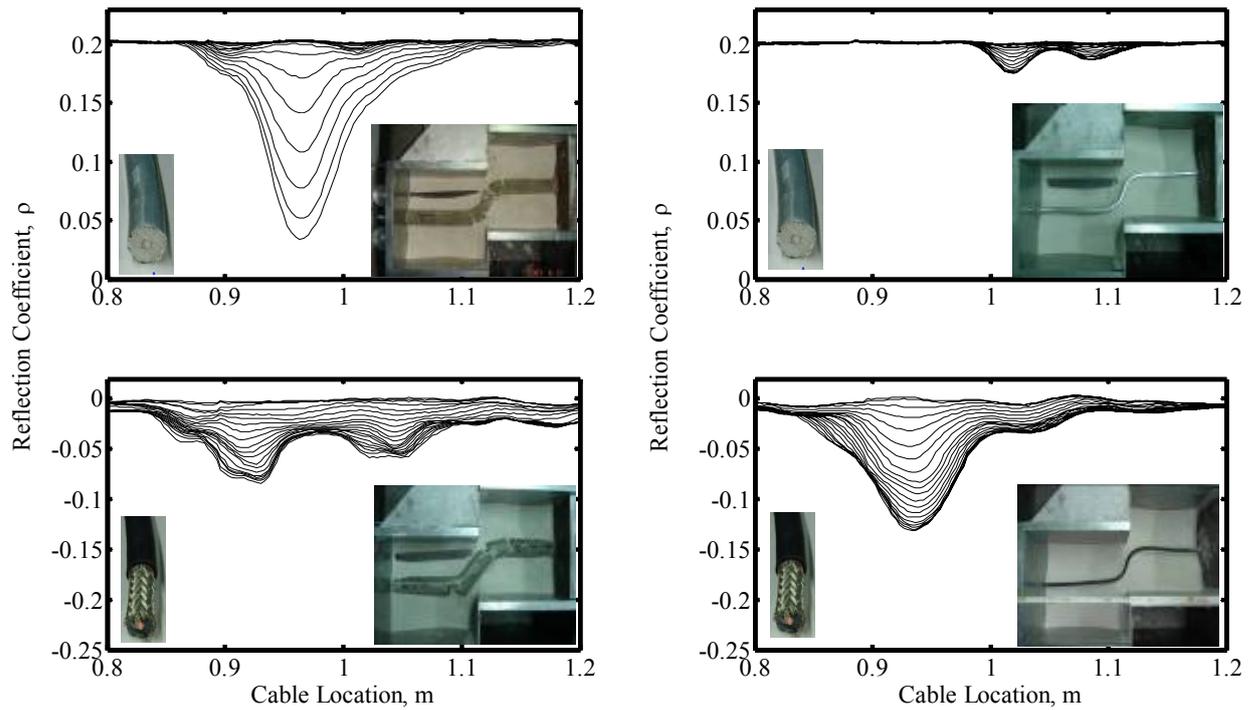


圖 2.16 灌漿材料順應性試驗之變形模式(林文欽，2007)

3、不同勁度外填材料之影響

主要探討纜線於不同勁度外填材料之靈敏度是否一致，圖 2.17 中，P3-500 於細礫石 (M_2) 其 δ_D 比在渥太華砂 (M_1) 中小，且靈敏度也較佳；而 RG-8 於渥太華砂 (M_1) 其 δ_D 比在細礫石 (M_2) 小，因此可以知道 硬性纜線 (P3-500) 較適合堅硬地層，有較好的靈敏度，但不適合於軟弱土壤 (無法提早監測到滑動)；而軟性纜線 (RG-8) 較適合軟弱地層，可較早偵測到滑動，但是靈敏度低。

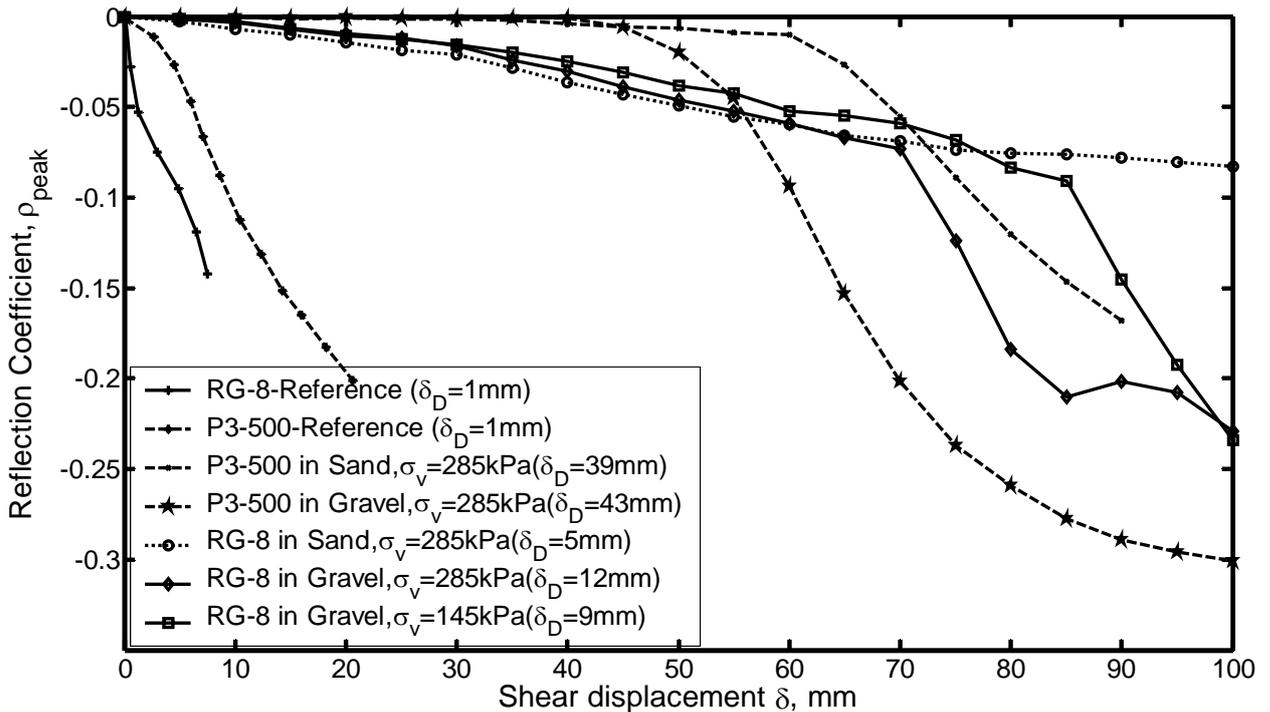


圖 2.17 纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度(林文欽, 2007)

林文欽(2007)綜合以上試驗結果, 得到以下結論:

(1) 纜線選擇方面:

- (a) 硬性纜線適合堅硬地層, 有較佳的靈敏度, 但較不適合軟弱地層(δ_D 太大)。
- (b) 軟性纜線較適合軟弱地層, 可較早偵測到位移(δ_D 小), 但靈敏度較低。

(2) 灌漿方面:

灌漿最重要的是要具有大於纜線的 shear stiffness。灌漿材料與地層的順應性並不重要 (雖然對於採用軟性纜線時有所幫助)。

(3) 資料判釋方面:

- (a) 堅硬但不具張力強度的灌漿有助於固定纜線的受剪模式, 一旦灌漿材料破壞後, 纜線受剪時之 $\Delta\rho - \Delta\delta$ 雷同。
- (b) 利用濾波有助於提早偵測剪力變形及監測的自動化。

2.3.3. 試驗重複性

雖然林文欽(2007)從試驗結果獲得極有價值的相關結論，但相同配置的試驗間，重複性並不佳，如圖 2.18，相同試驗配置但是得到的 ρ_{peak} 與 δ 關係曲線差異過大。根據林文欽(2007)及本研究的試驗紀錄觀察，可能因試驗時，剪動造成試體、纜線移動沒有一致性，導致試驗重複性不佳，如果沒有妥善解決，對於後續 TDR 錯動變形監測量化分析上會更加困難，因此本研究將先著眼於解決重複性的問題，再探討後續的研究。

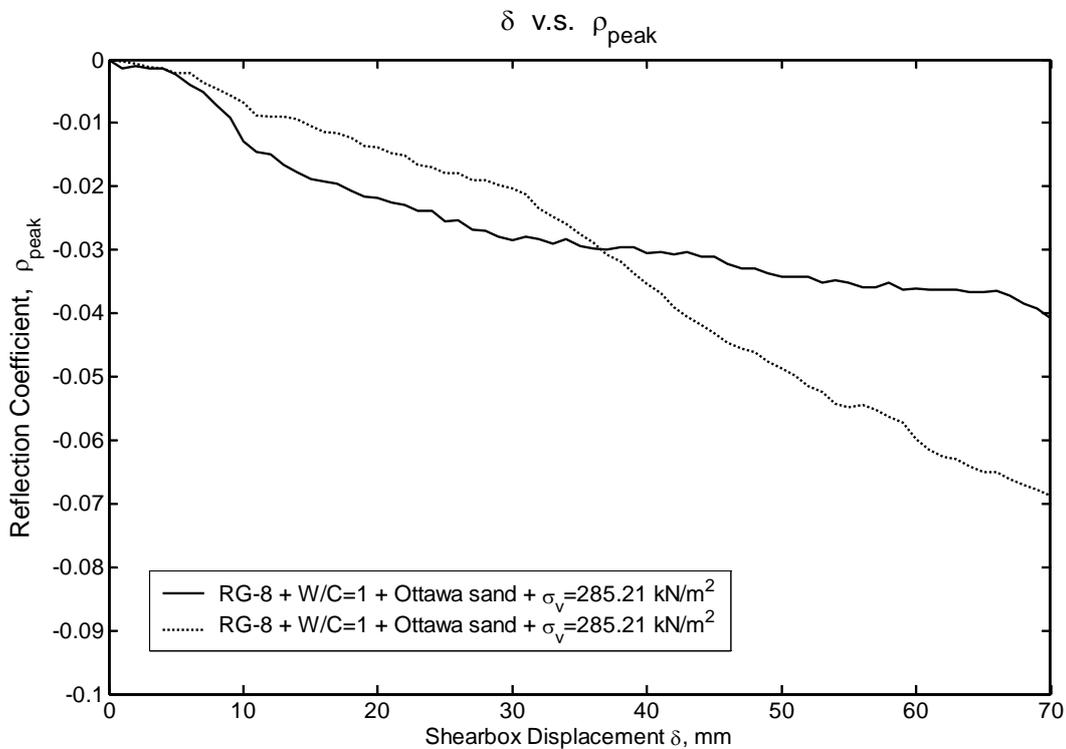


圖 2.18 相同纜線、材料配置條件下反射係數-水平位移曲線

2.3.4. 剪力帶寬度

O'Connor(1991)以某區段纜線外部沒有任何束制，形成一空氣間距(Air gap)模擬剪力弱帶，其結果指出：相同外部剪動量下，剪力帶寬度(W)越寬靈敏度越小(如圖 2.19)。

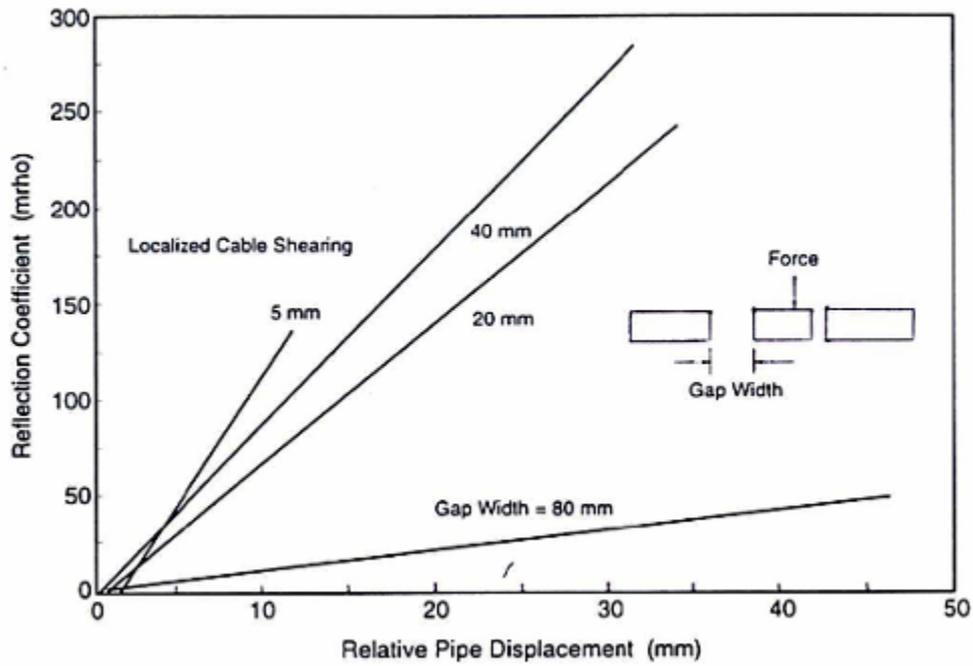


圖 2.19 反射訊號受剪力帶寬度影響(O' Connor, 1991)

盧吉勇(2003)使用剪力環設備(如圖 2.20所示)，內填石膏保護纜線模擬現地剪力弱帶，實驗指出隨著剪力帶寬度(W)增加，初始啟動值(δ_D)亦增加，靈敏度約略成常數(如圖 2.21所示)。

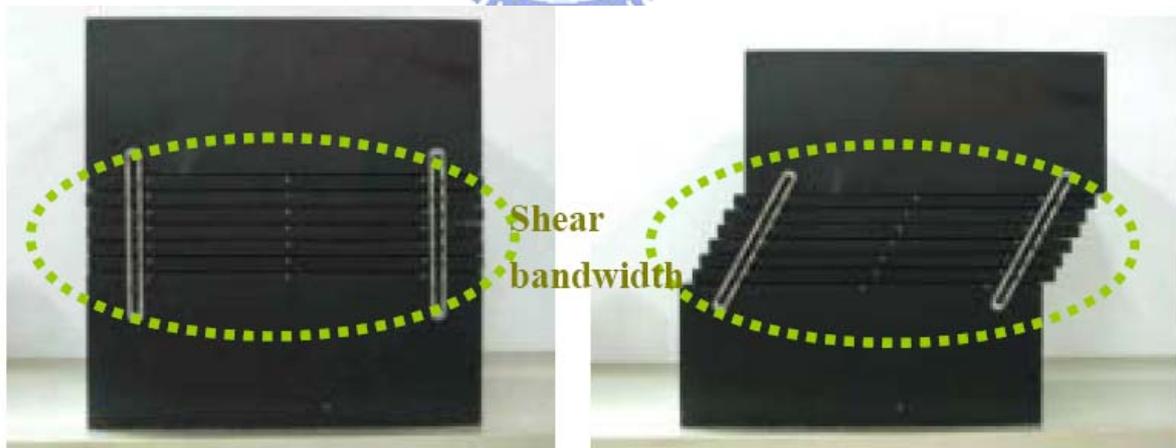


圖 2.20 剪力環設備(盧吉勇，2003)

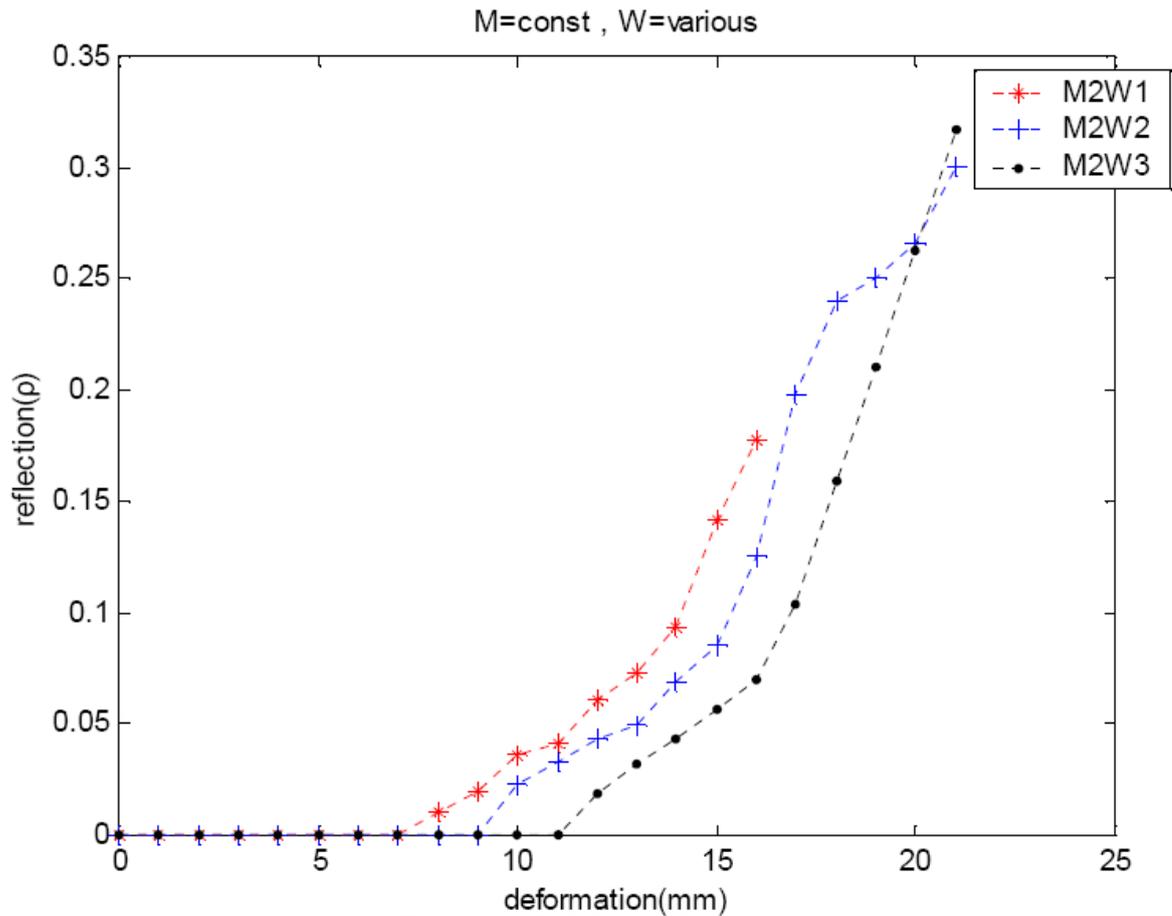


圖 2.21 固定材質，不同剪力帶寬度之 $\delta - \rho_{\text{peak}}$ 關係(盧吉勇，2003)

崔志龍(2004)以 2 m 之 CommScope 延長線，纜線以石膏包覆，並留 20 mm 寬之空氣間距(Air gap)模擬剪力帶寬度(W)，其試驗結果因應力集中於空隙兩側而造成雙剪。

楊清良(2004)以AB膠包覆纜線並預留寬度以模擬不同寬度之剪力帶，如圖 2.22所示，實驗結果亦形成雙剪現象，如圖 2.23所示。

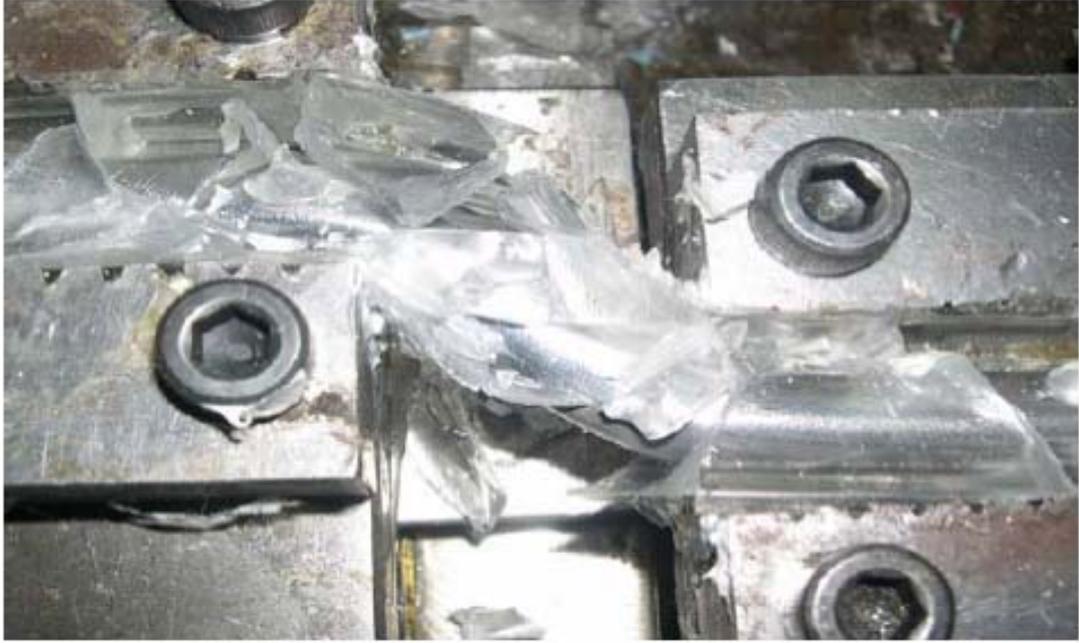


圖 2.22 預留寬度(W=3cm)剪動情形(楊清良，2004)

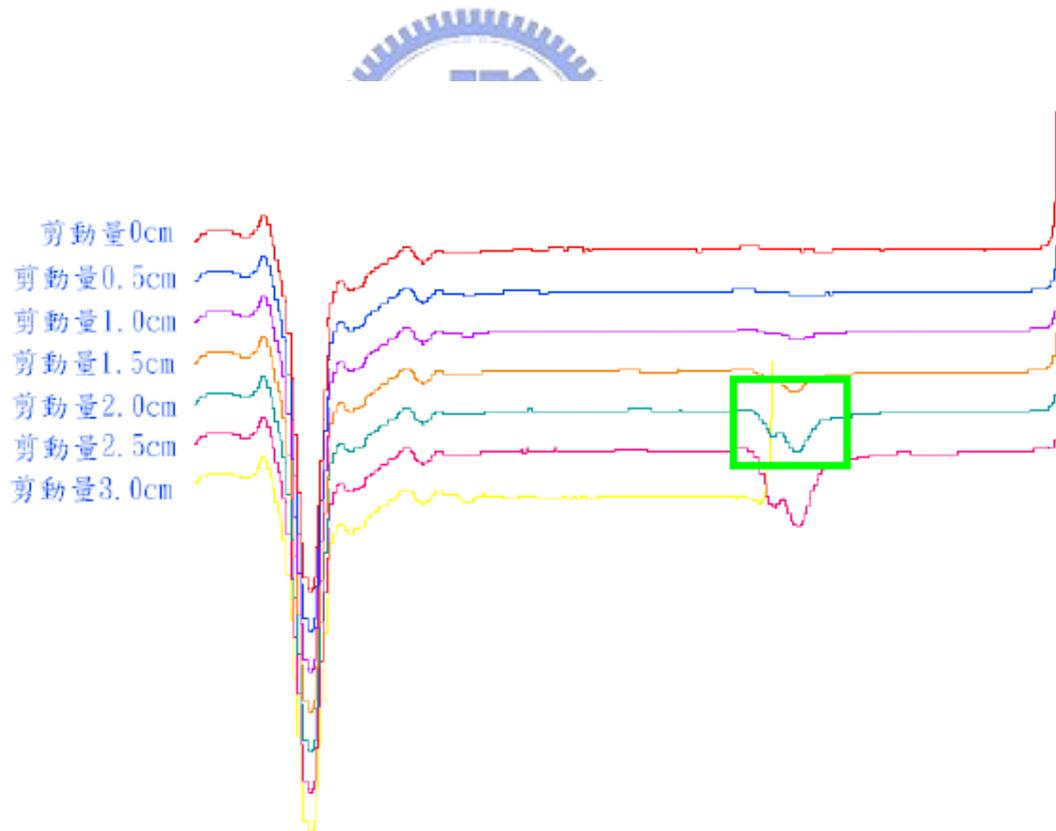


圖 2.23 預留寬度為 3cm 受剪時呈雙峰狀之波形圖(楊清良，2004)

上述文獻模擬剪力弱帶利用空氣間距(Air gap)是不符合現地真正的狀

況，而盧吉勇(2003)雖有使用剪力環模擬現地情況，但其填充材料為石膏，與現地狀況不符。

2.3.5. 改善 TDR 錯動變形訊號之靈敏度

目前透過室內標定程序即可獲得地層位移量與反射係數的關係，惟當纜線於軟弱土壤或有剪力弱帶時，其初始啟動門檻值(δ_D)及靈敏度可能隨弱帶的寬度(W)增加，以邊坡監測而言尚屬不夠靈敏，因此參考ZOSTRICH GEOTECHNICAL該公司的專利(美國專利號碼 6,696,974)，於纜線中加入 Amplifiers(類似節點的束制物)，如圖 2.24，圖 2.25是說明在施加相同力量下，圖 2.25(a)應力集中較為分散，纜線曲率較大；圖 2.25(b)則應力集中在兩amplifier之間，纜線曲率小，希望能藉此改善錯動變形監測的靈敏度及初始啟動門檻值(δ_D)。

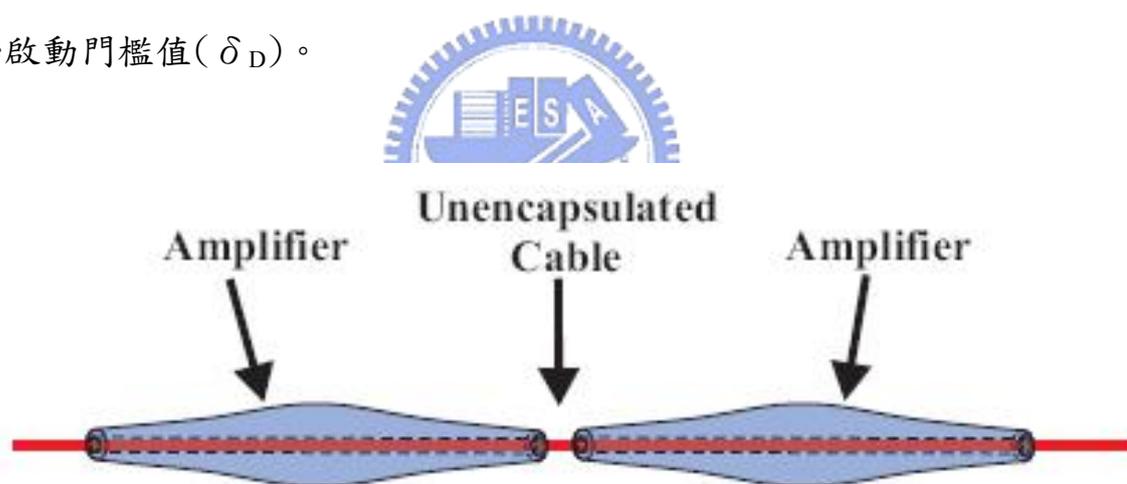


圖 2.24 纜線中加入 amplifier 示意圖

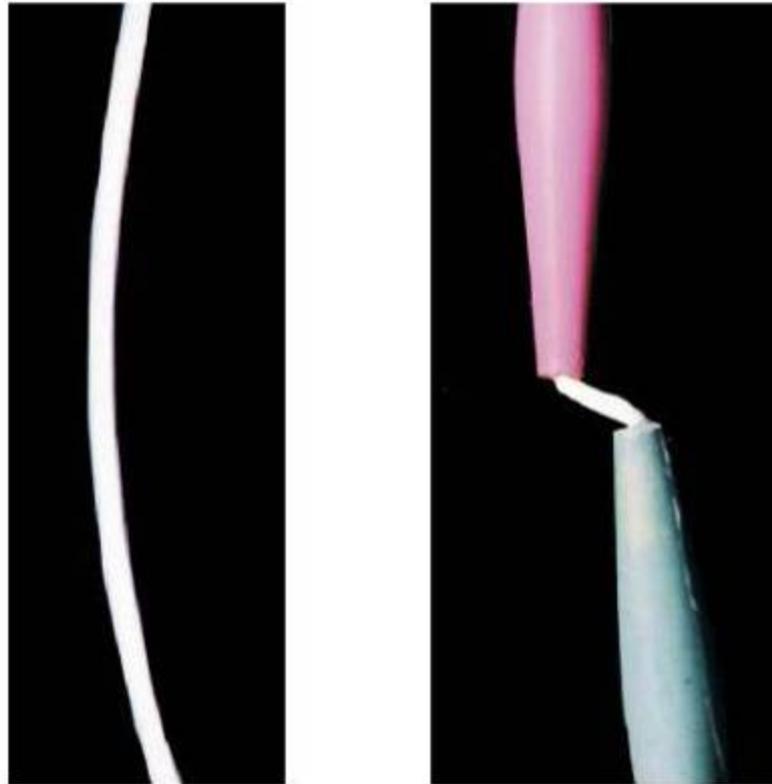


圖 2.25 (a) 纜線沒有加 amplifier (b) 纜線加入 amplifier

由上述文獻回顧可以知道 TDR 錯動變形監測應用於現地時，影響量化變形量的因子主要分為：(1) 纜線電阻(cable resistance)；(2) 材料互制(material interaction)；(3) 實驗重複性；(4) 剪力弱帶；(5) TDR 錯動變形訊號之靈敏度等五項，為了提出有效的 TDR 監測資料判釋方法，必須探討上述影響因子。

其中 Lin and Tang (2006)上述電磁波傳模型衍生的簡易纜線電阻修正法，提供更快速便利的纜線電阻修正，應用於工程實務，已獲得良好的改善。

材料互制方面，林文欽(2007)設計一套可適當模擬現地纜線-灌漿材料-現地材料(Cable-grout-soil)複合材料之物理模型:大型直剪儀，並考慮應力影響邊界與不同土壤勁度等，並初步獲得纜線-灌漿材料-土壤三者之間的互制關係，但是其實驗數據缺乏重複性，無法證明實驗的可靠度。

事實上於現地，變形模式不單純只是直剪的行為，亦存在應變為非高度集中之剪力帶寬度，而文獻中關於剪力帶寬度的模擬，往往使用空氣間距 (Air gap)，其代表性仍有待商榷。

因此本研究將針對林文欽(2007)物理模型改善重複性問題，測試於纜線中加入 Amplifiers 成效，並建立模擬剪力帶寬度之剪力環設計，促使物理模型更加完善，更能模擬現地滑動行為與 TDR 反應。



第三章 研究方法與試驗規劃

為了解現地複雜的剪動機制，林文欽(2007)設計一套可適當模擬現地纜線-灌漿材料-外填材料(cable-grout-soil)複合材料受剪行為之物理模型:大型直剪儀，能有效考慮應力影響邊界與不同土壤勁度等因子，使得能夠在實驗室模擬與探討現地邊坡滑動時 TDR 反射訊號如何變化，提供實務應用時 TDR 錯動變形監測資料判釋依據，因此本研究將採用其模型進行相關改善與研究。

3.1. TDR 錯動變形物理模型：大型直剪儀

模型之主要設計概念如圖 3.1 所示，林文欽(2007)於剪力盒上盒裝設導輪，使剪力盒只有一個方向的自由度，並裝設擋版防止實驗材料因剪動過程中外流，大型直剪儀設計架構與各元件示意圖如圖 3.1 與圖 3.2 所示，各試驗設備之設計概念、考量與詳細規格如下所述：

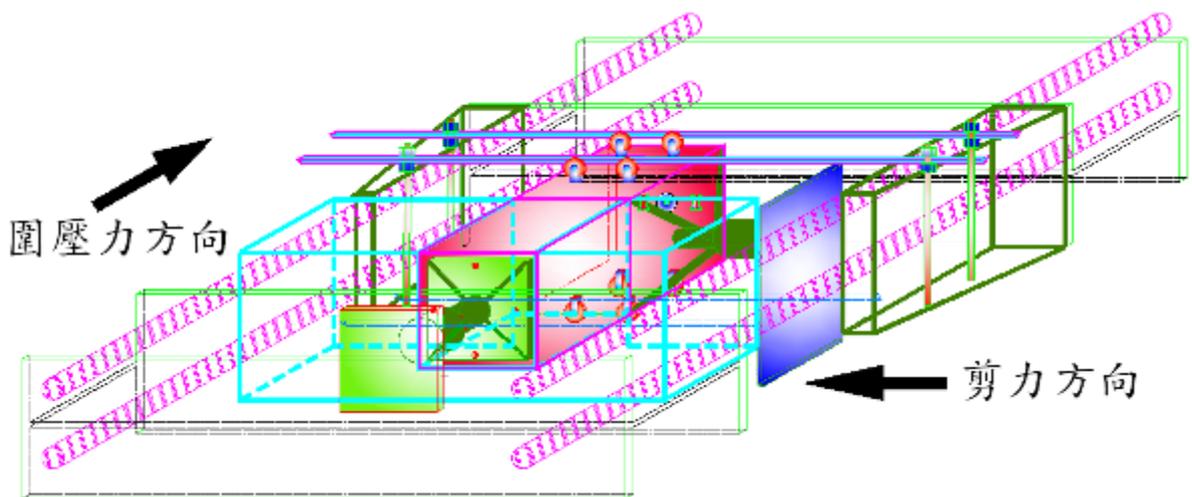


圖 3.1 大型直剪儀設計架構圖

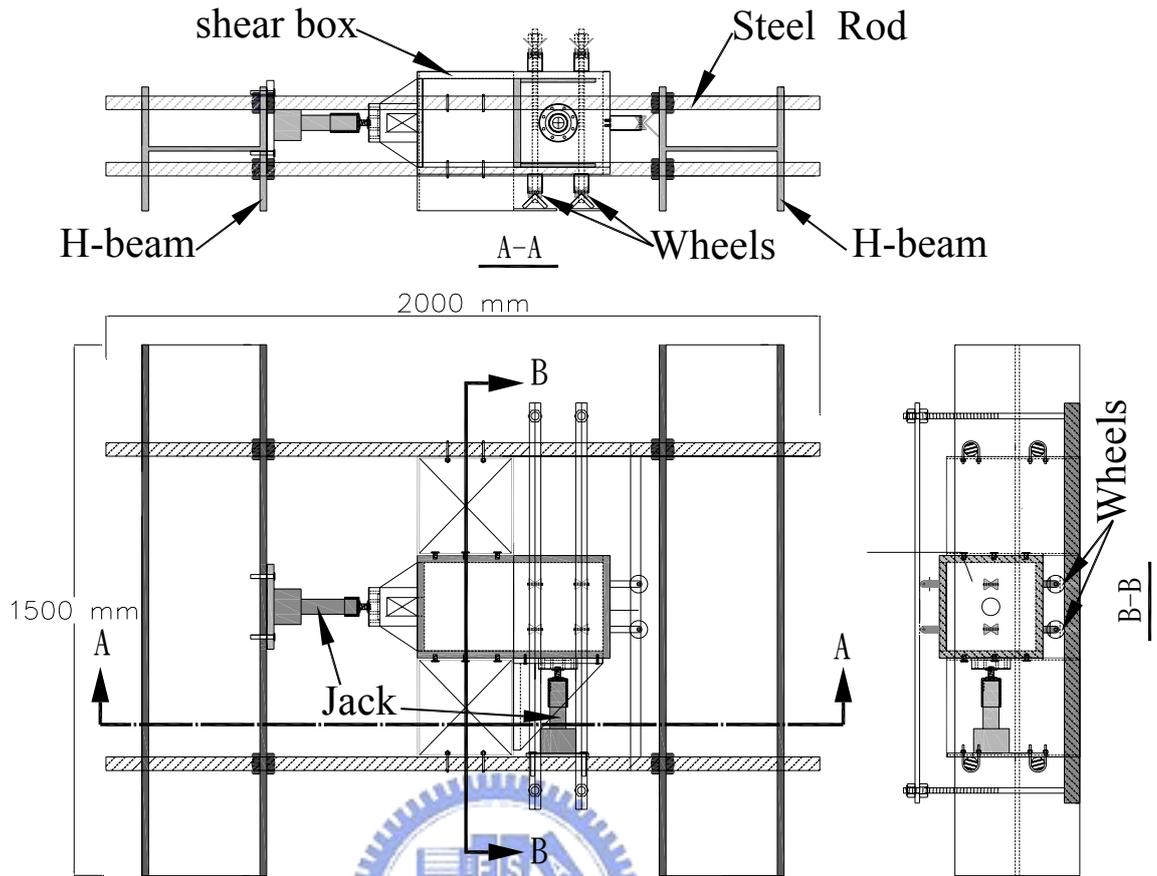


圖 3.2 大型直剪儀各元件示意圖

3.1.1. 剪力盒

為充分模擬現地纜線受剪情況，避免實驗的邊界效應(Boundary effect)，需考量纜線受剪時影響長度與受剪力影響區域。剪力盒尺寸大小依據如下：

(a) 纜線受剪時影響長度：

Juran(1986)提出土釘(Soil nail)埋設於邊坡時，土釘受剪時影響長度如圖 3.3 之 L_0 ，其計算式如下所示。

$$L_0 = \left[\frac{(4EI_0)}{(k_s D)} \right]^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (3-1)$$

其中，E 為灌漿材料勁度， N/m^2 ； I_0 為灌漿材與纜線斷面慣性矩， m^4 ；

K_s 為土壤地盤反力係數， N/m^3 ； D 為鑽孔直徑， m 。

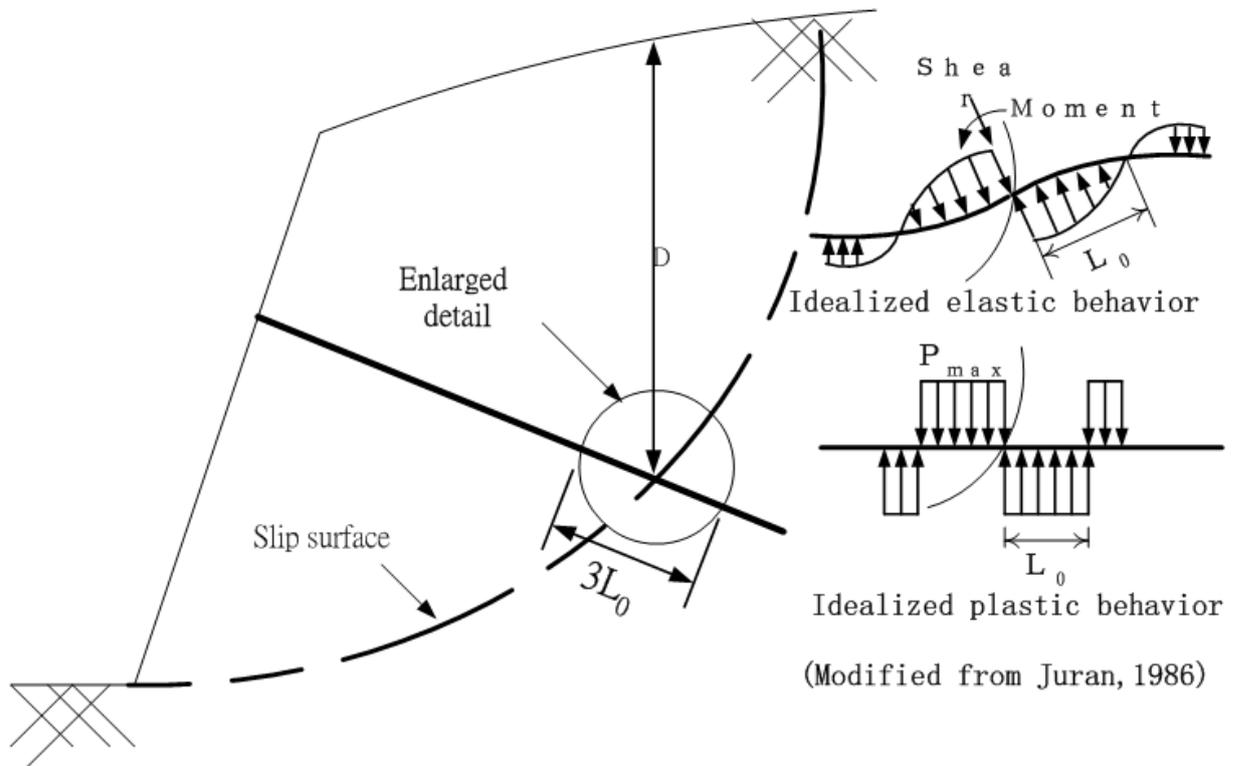


圖 3.3 考慮纜線受剪長度之影響

剪力盒尺寸之設計考慮將以式(3-1)為基礎，灌漿材料彈性模數 $E=75000 \text{ kPa}$ (Blackburn et.al., 2004)，砂土地盤反力係數 $k_s = 24430 \text{ kN/m}^3$ (Reese, 1983)，計算式如下：

$$L_0 = \left[\frac{(4EI_0)}{(k_s D)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= \left[\frac{(4 \times 75000 \times 10^3 \times \frac{\pi(0.05)^4}{64})}{(24430 \times 10^3 \times 0.05)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= 0.09m = 9cm$$

由圖 3.3 顯示考慮纜線受剪影響範圍為 3 倍 L_0 ，27 cm，為求保守起見，本研究所設計剪力盒總尺寸為 50 cm。

(b) 受剪力影響區域

以 Boussinesq (1885) 所提出圓形應力增量概念，視應力主要影響範圍為

兩倍基礎寬度。因此，本研究所使用剪力盒尺寸大小將以此概念進行設計，其考慮灌漿材料受剪之影響寬度如圖 3.4 所示，於剪力面上灌漿體受剪之單位寬度為 B (即水泥漿-纜線複合材之直徑)，其應力影響範圍以兩倍寬度 ($2B$) 計算，剪力盒詳細尺寸如圖 3.5 所示。

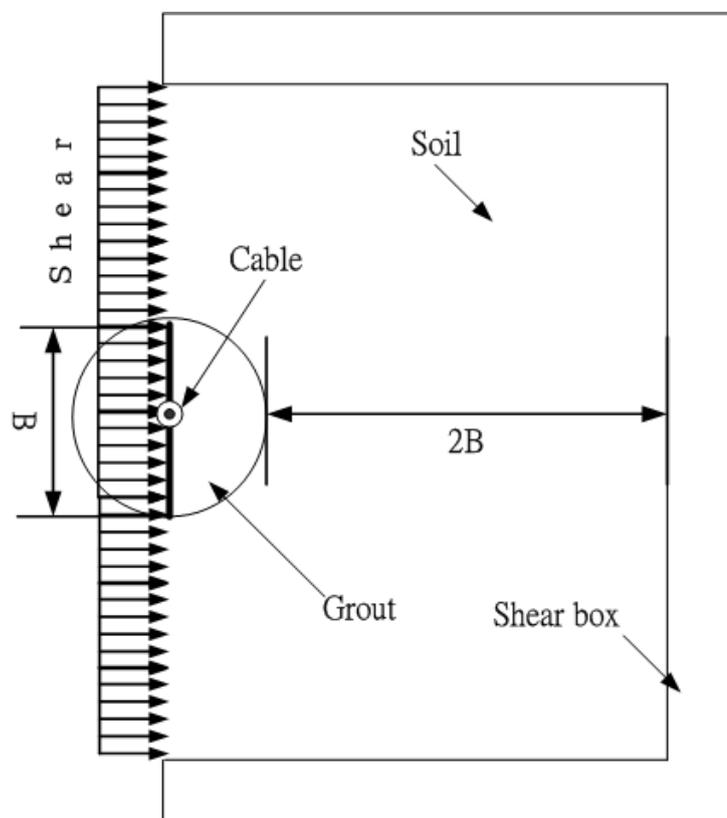


圖 3.4 剪力盒所考慮影響範圍示意圖

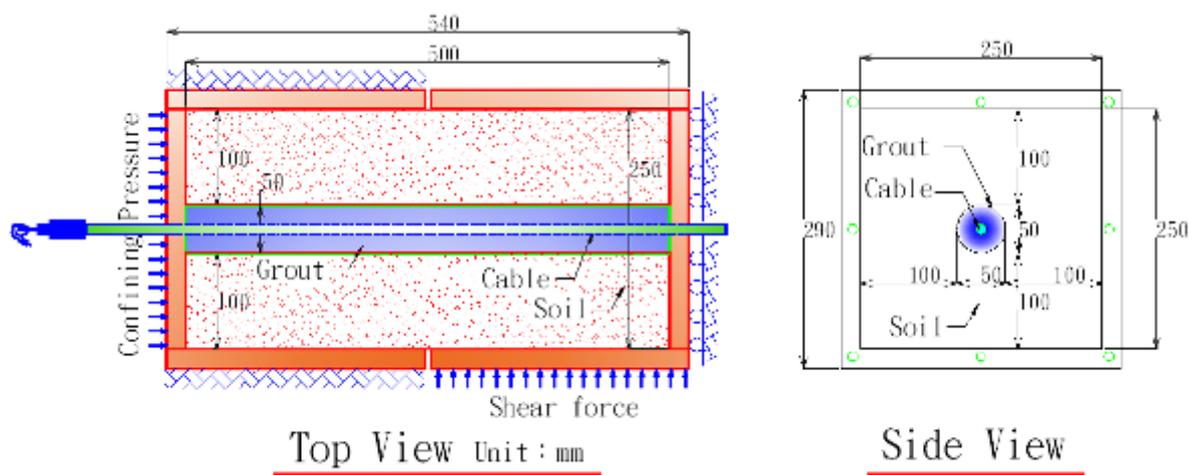


圖 3.5 剪力盒尺寸設計詳圖

3.1.2. 剪力及圍壓應力設備

本研究所使用傳力設備(剪力及圍壓)係日本MASADA JACK二段式油壓千斤頂,如照片 3.1(a)所示。最大揚程為 180 mm,最大剪動力可達 10 ton,但由於本實驗配置將油壓千斤頂採水平向裝置,預估其最大剪動力將折減為 5 ton,千斤頂詳細規格如表 3.1所示。

表 3.1 二段式油壓千斤頂基本資料

型號	能力 (ton)	最低高度(mm)	揚程 (mm)	可延伸長度 (mm)	最高高度(mm)	總重量 (kg)	使用油量(c.c)
HFD-10-2	10	170	180	70	420	8.8	390

3. 資料擷取設備

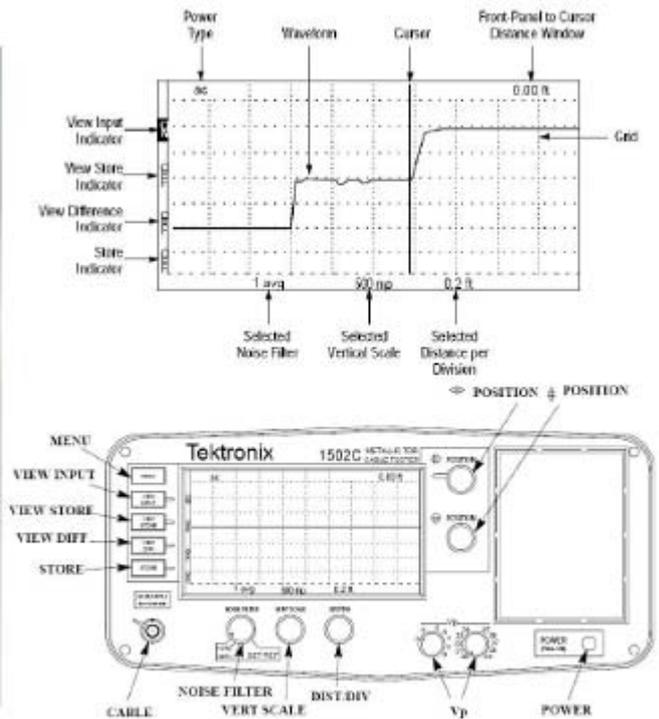
大型直剪儀試驗資料擷取系統主要由 TDR 1502C 製波器以 RS-232 連接埠連接筆記型電腦並配合本研究團隊研發撰寫的波形擷取程式紀錄 TDR 反射波形。另外亦以傳統 load cell 及位移計(LVDT)紀錄試驗時加載水平剪力、圍壓應力與剪力盒位移量,各元件功能與規格詳述如下:

(a) TDR 反射儀

本研究所使用TDR反射儀為Tektronix TDR 1502C,重量約 8.96 kg,攜帶方便且具防水功能,可量測最大距離約 612 公尺(2000 英尺),輸出阻抗為 50 歐姆(Ω),最大解析度(Resolution)為 0.00122 公尺(0.004 英尺),可使用的溫度範圍從-10°C至 55°C。實體照片與操作介面說明如圖 3.6所示。



(a)



(b)

圖 3. 6 Tektronix 1502C (a)實體照片(b)操作介面說明

(摘自 Tektronix 1502C Service Manual)

(b) 筆記型電腦

利用筆記型電腦透過本研究團隊自行研發撰寫的程式控制 TDR 1502C 紀錄 TDR 反射訊號，試驗時設定適當參數使量測空間解析度為 0.4 cm。

(c) 應力計(load cell)

load cell 為美國 FUTEK 公司 MODEL LCF450 型，實體如照片 3. 1(b)，重約 1.6 kg，屬輕巧型，其可感測最大能力(capacity)為 4534 kg (10000 lb),可使用溫度範圍從-50°C 至 93°C，load cell詳細規格整理於表 3. 2。

表 3.2 Load cell 規格表

型號	輸出 功率 (R.O.) mV/V	最大 輸出 VDC	電橋 電阻 (Ω)	非線 性 (%)	遲滯 性 (%)	工作 溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	重量 (kg)	潛變 (%)
FUTEK LCF450	2	10	700	R.O. 之 ± 0.1	R.O. 之 ± 0.2	-50~93	1.6	載重 之 ± 0.02

(d) 位移計(LVDT)

一般表頭式位移尺與常見LVDT位移行程約 150 mm以內，為配合本研究開發大型直剪儀需求，選擇最大位移行程為 200 mm，義大利製 GEFRAN-LT-M-0200-S位移計，如照片 3.1(c)所示，詳細規格如表 3.3所示。

表 3.3 位移計規格表

型號	位移 行程 (mm)	線性 精度 (%)	重複性 (mm)	解析度	位移速率 (m/s)	工作溫度 ($^{\circ}\text{C}$)
GEFRAN LT-M-0200-S	0~200	0.05	0.01	無限	5	-30~100

(e) 顯示器

顯示器紀錄實驗過程所施加水平剪力、剪力盒位移與側向圍壓應力，選擇高精度的AM5H-A顯示器，精確度可達 $\pm 0.1\%$ 滿刻度(full scale)，可量測交、直流電壓/電流等多種信號，數值顯示範圍達 5 位數，具自動歸零與警報功能且穩定性高。顯示器實體如照片 3.1(d)所示，詳細規格特性可參見表 3.4。

表 3.4 顯示器規格特性表

規格特性	說明
精確度	±0.1%滿刻度±1 位數(直流/電位計/ 電阻/PT-100/荷重元) ±0.2%滿刻度±1 位數(交流)
取樣時間	16 cycles/sec
顯示範圍	-19999~99999
零值調整範圍	-19999~99999
過載顯示	doFL/ _{io} FL 或 -doFL/ _{io} FL
類比輸出解析度	15 bit
類比輸出反應速度	<250ms(0~90%)
類比輸出推動能力	電壓輸出：<20Ma 電流輸出：<10V
通訊方式及協議	RS-485 Modbus RTU mode
使用環境溫、濕度	0~60℃；20~90%RH(非結露)
存放環境溫、濕度	-10~70℃；20~90%RH(非結露)
工作電源	AC/DC100~240V；DC12/24/30~90V
資料記憶方式	EEPROM 記憶體

4. 傳輸纜線

市面上纜線種類繁多，導體材質、直徑大小與衰減特性皆有所不同。本研究使用一般常見同軸纜線(Coaxial Cable)為傳輸纜線，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，同軸纜線為良好導波器(waveguide)，可將電磁波束制其中並防止電磁波外漏。以常使用於TDR監測應用的CommScope公司生產的P3系列為例，同軸纜線剖面示意圖如圖 3.7所示。

Sample P3[®] Product Constructions

Prefix

P3[®] = Parameter III[®]
 PF = PowerFeeder[®]

P3 625 JCAM188

P3[®]

Messenger Diameter
 Messenger
 Copper Aluminum
 PE Jacket

Size
 (diameter over shield)

412	750
500	840
565	875
625	1000
700	

Suffix

J = Jacketed
 CA = Copper Aluminum
 SS = Migra-Heal[®] Flooding Compound
 SP = Aerial Floodant
 T = Tracer
 M = Messenger
 CG = CableGuard[®]
 EHS = Extra High Strength
 (This is a sample list, other options are available)

P3 Aerial Construction Configurations

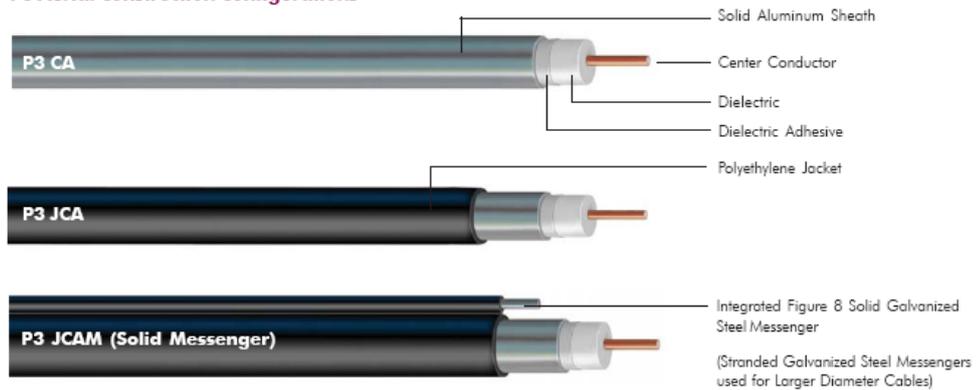


圖 3.7 P3 系列同軸纜線剖面示意圖(摘自 CommScope User Manual)

利用上述各個元件可組裝成一大型直剪儀，各個元件與配置之實際照片說明如照片 3.2。最後，將大型直剪儀固定於一台車，提供施作試驗時儀器搬運便利性與機動性。



(a)



(c)

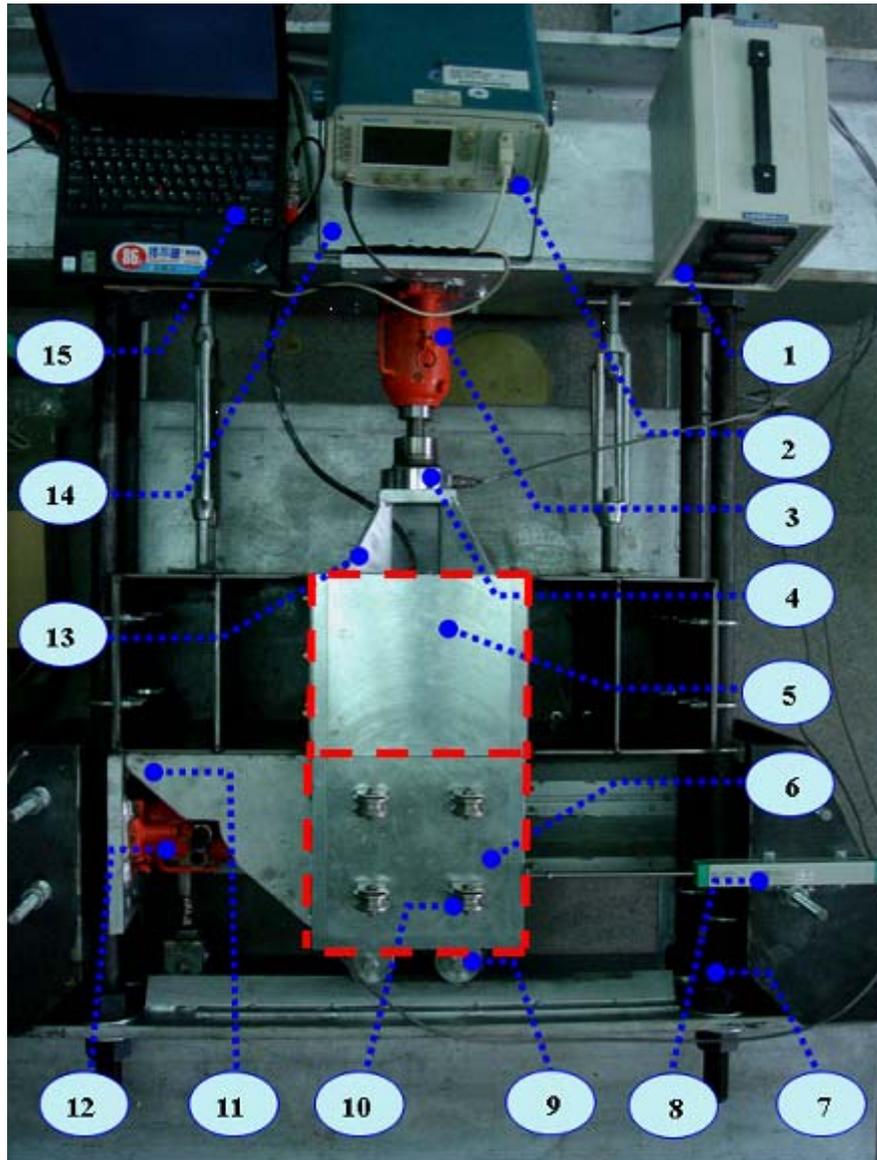


(b)



(d)

照片 3.1 (a) 傳力設備-油壓千斤頂 (b) Load cell (c) 位移計(LVDT) (d) Load cell 與位移計輸出顯示器(正、背面) (林文欽, 2007)



- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| ① Display | ⑨ Horizontal wheels |
| ② TDR step generator | ⑩ Vertical wheels |
| ③ Confining pressure device | ⑪ leaking Prevent plate |
| ④ Load cell | ⑫ Shear force device |
| ⑤ Upper shear box | ⑬ Confining plate |
| ⑥ Lower shear box | ⑭ Reaction frames |
| ⑦ Reaction frames | ⑮ Computer |
| ⑧ LVDT | |

照片 3.2 大型直剪儀元件說明(林文欽, 2007)

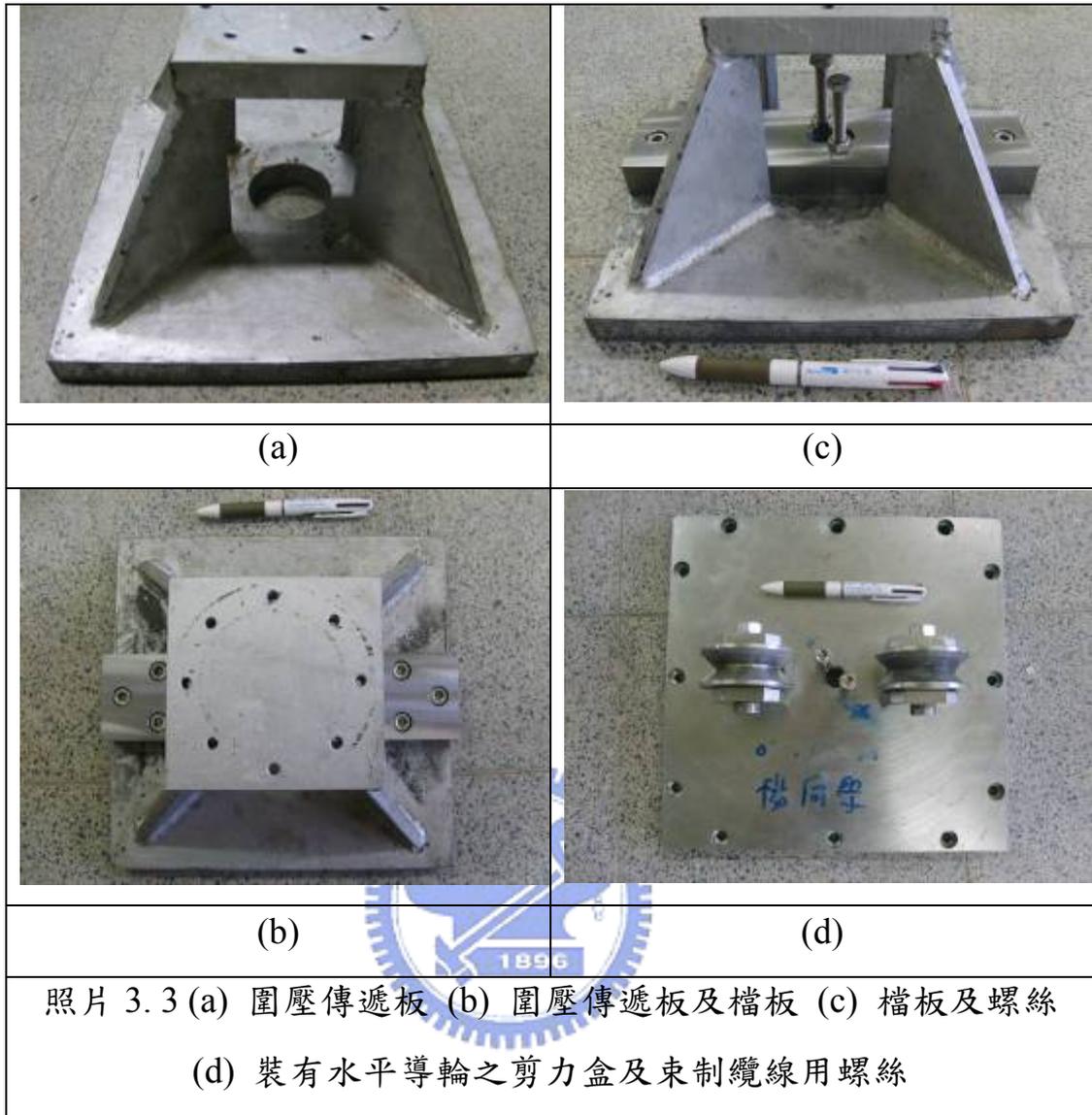
3.2. 大型直剪儀改良

過去文獻 TDR 室內標定試驗，往往只針對纜線進行直剪試驗，所得結果只是纜線本身的靈敏度(sensitivity)，並非纜線與複合材料受剪動之情形。事實上，現地剪動機制複雜，纜線除了受剪外，還可能受拉及彎矩，若現地存在有剪力弱帶時，更可能隨著軟弱土壤產生柔性(flexible)變形，即剪力弱帶內為非均佈應變。本研究將先行改良前述大型直剪儀，確保試驗具有重複性。在試驗具重複性的條件下，聚焦於剪力帶寬度，設計更符合現地條件之 TDR 錯動變形物理模型。參考林文欽(2007)材料互制的結果，進一步探討硬、軟性纜線於剪力帶寬度下受剪時 TDR 反射訊號之變化。最後，在纜線上加入 amplifier，研究其對於提早偵測地層滑動及 TDR 錯動變形靈敏度有無助益。

3.2.1. 大型直剪儀試驗重複性改善

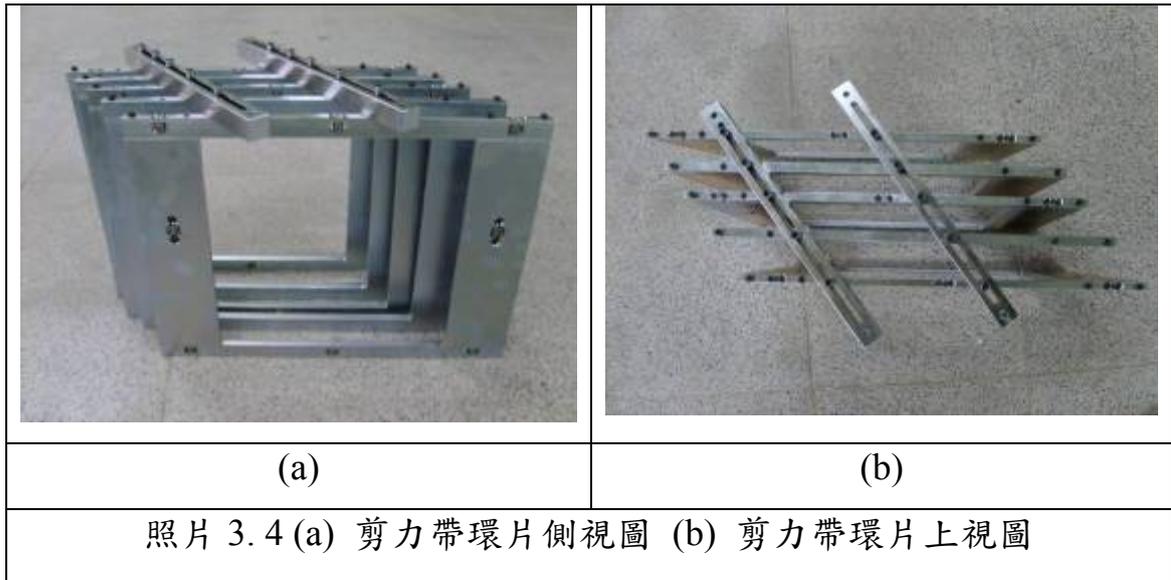
林文欽所設計大型直剪儀，已經成功的改善邊界效應以及上、下剪力盒扭曲或翹曲的問題，同時也考慮了邊界效應的影響，但是可能因每次試驗剪動過程中，可能因水泥試體及纜線還是會產生拉扯的現象，造成試驗不具有重複性，致使無法量化變形量，因此本研究將逐一排除影響試驗重複性的因子。

首先，於圍壓傳遞板照片 3.3(a)加入一檔板，如照片 3.3(b)，防止水泥試體因剪動而移動，並於檔板及裝有水平向導輪之剪力盒上設計一可以束制纜線之螺絲，如照片 3.3(c)及照片 3.3(d)。試驗前將纜線固定於螺絲上，在儘量減少壓痕的條件下，進行試驗，以確保水泥試體及纜線不會因剪動而產生位移。



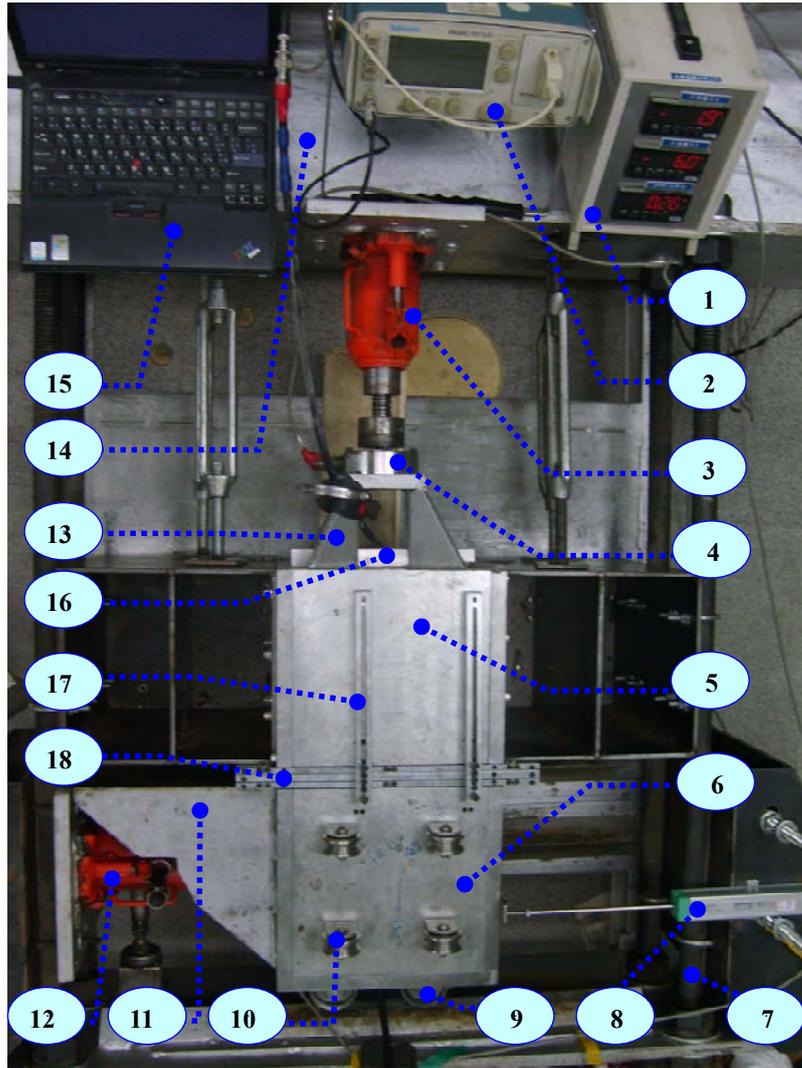
3.2.2. 模擬剪力帶寬度之物理模型：剪力帶環片

過去文獻中關於剪力弱帶的模擬，往往採用空氣間距(Air gap)，不符合現地實際情況。而實際邊坡滑動的剪動模式並不一定會像林文欽(2007)試驗中所假設，為單純的直剪行為，可能更類似一非應力集中的模式。本研究將考慮現地實際情況於上、下剪力盒中夾剪力帶環片模擬剪力帶寬度，如照片 3.4(a)、(b)。



綜合前述 3 個小節，照片 3.5 為大型直剪儀加入剪力帶環片及改良後的示意圖。





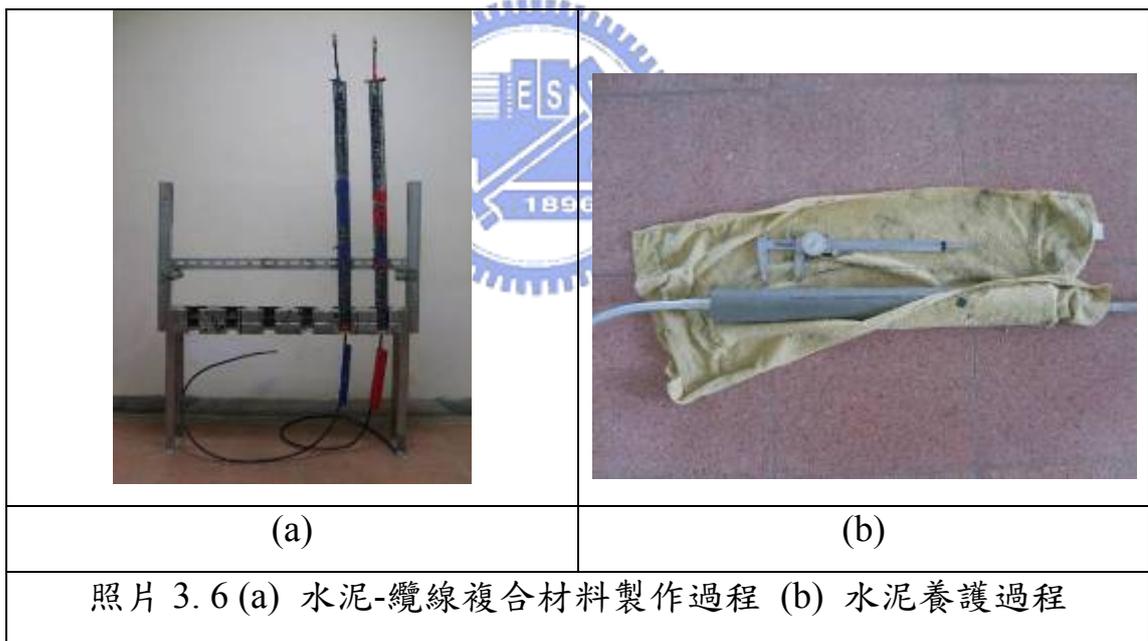
- | | | |
|--------------|---------|---------|
| ① 顯示器 | ⑨ 水平向導輪 | ⑰ 剪力環導軌 |
| ② TDR 1502 C | ⑩ 垂直向導輪 | ⑱ 剪力環片 |
| ③ 圍壓千斤頂 | ⑪ 防漏砂擋板 | |
| ④ Load cell | ⑫ 剪力推進器 | |
| ⑤ 上盒 | ⑬ 圍壓傳遞板 | |
| ⑥ 下盒 | ⑭ 反力架 | |
| ⑦ 反力架 | ⑮ 筆記型電腦 | |
| ⑧ 位移計 | ⑯ 試體檔版 | |

照片 3.5 大型直剪儀改良後加入剪力帶環片示意圖

3.2.3. 試體準備

試體製作分為兩部分：一為製作水泥灌漿圓柱體包覆同軸纜線；二為水泥灌漿圓柱體外側外填材料之準備與裝填，製作過程如下所述：

(a)試體係以內徑 5 cm PVC管為外模，將試驗用同軸纜線外部以工業酒精擦拭後，固定於PVC管正中央，攪拌均勻水灰比 1:1 (water /cement ratio, W/C)灌入PVC模內(照片 3. 6(a))，待水泥乾凝後進行拆模，並依不同之剪力帶寬度修剪為長度約 49 cm、52cm、54cm的試體，爾後以濕毛巾裹住水泥試體進行養護(照片 3. 6(b))，從灌模至養護期共三天，灌漿材料使用市面上常見波特蘭水泥(Portland cement)第一型，考慮現地灌漿工作性，本試驗使用水灰比為 1:1。



(b)外填材料分別為細礫石(Fine Gravel)、渥太華砂(Ottawa sand)，其基本物理性質與粒徑分析如表 3. 5與圖 3. 8所示，其中粗砂有 77.6 %累積停留於 4 號篩，依AASHTO對粒徑大小分類屬細礫石(Fine Gravel)。試驗時將養護完成水泥灌漿圓柱(含同軸纜線)置於剪力盒及剪力帶環片中間，控制每次外填材料密度約略一致。外填材料約分三層夯實，夯實完畢後再以上蓋

鎖緊，再利用側向千斤頂施加所規劃圍壓應力。

表 3.5 外填材料基本物理性質

土壤種類	渥太華砂 (Ottawa sand)	細礫(Fine Gravel)
內摩擦角 (degree)	30.7	42.68
乾單位重 (kN/m^3)	15.5	16.26
比重 G_s	2.65	2.64
D_{60} , mm	0.39	6.63
D_{50} , mm	0.36	6.03
D_{10} , mm	0.26	2.45
C_u	1.5	2.70

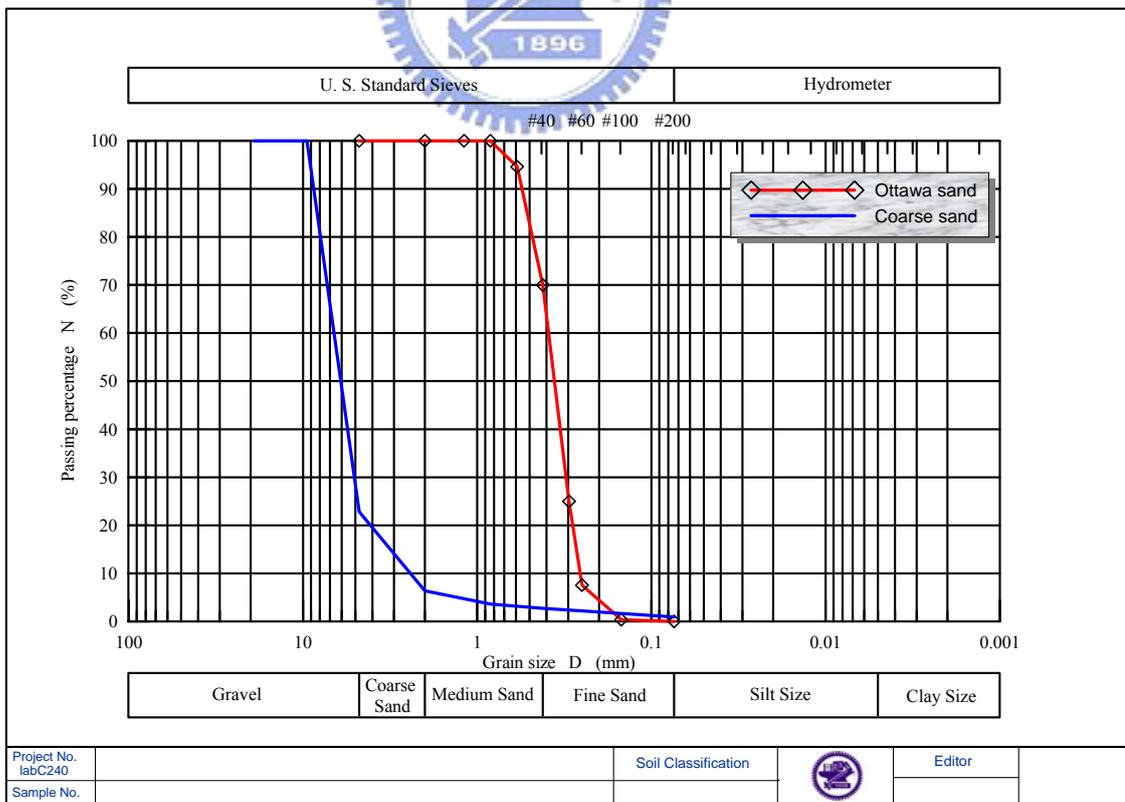


圖 3.8 土壤種類粒徑分佈曲線

3.2.4. 試驗流程

如前所述，本研究自行研發一可適當模擬現地因滑動而造成纜線斷面幾何改變之大型直剪儀及剪力帶環片，其中大型直剪儀方面，材料互制行為所引致 TDR 反射訊號(ρ)與剪力盒相對位移(δ)之間的關係已於林文欽(2007)論文中獲得相當成果，而本研究著重於大型直剪儀中加入剪力帶環片，解決 TDR 錯動變形監測於軟弱土層中，以利進一步量化分析的依據。

茲將大型直剪儀加入剪力帶環片試驗流程表示如下圖 3.9，並敘述如下：

1. 剪力盒及剪力帶環片裝填：如前所述，將養護好的水泥-纜線圓柱置入剪力盒與剪力帶環片中央，於不同剪力帶寬度時，以相同土壤密度將外填材料分次夯實；另外將上、下盒與剪力帶環片接觸處塗抹黃油，以減少擋版、剪力盒、剪力帶環片相互之間的摩擦力。
2. 擷取器與顯示器架設：將已經固定在適當位置的位移計與量測剪力、圍壓應力之 Load cell 連接顯示器，並將量測值歸零。
3. 圍壓應力：待剪力盒裝填試體重模完成，以側向千斤頂施以一固定應力並予以記錄。
4. TDR 初始波形量測：連接纜線與 TDR 1502C，利用本研究團隊自行研發之擷取程式記錄 TDR 初始反射訊號。
5. 施加剪力：利用千斤頂以每次約 1 mm 位移量剪動，每剪動一次即記錄位移量、剪動力與 TDR 反射訊號。從目前累積的試驗經驗，當剪動位移至 70mm 左右，剪力盒及剪力帶環片皆已相當靠近試體，可能有邊界效應的產生，因此重複至剪力盒相對位移達 70 mm，即停止試驗。
6. 拆模：完成一剪動試驗後，拆解剪力盒以了解盒內水泥圓柱與纜線受剪時變形模式。

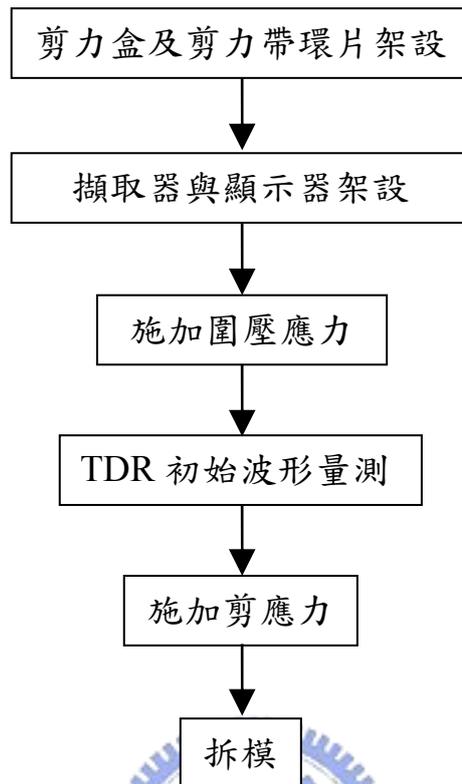


圖 3.9 試驗流程圖

3.2.5. 試驗規劃

於林文欽(2007)的大型直剪試驗，存在有在相同配置下，每次試驗的結果不同之問題，本研究主要將先針對此做一更符合現地的改變，以達到在符合現地的前提下，試驗重複性能一致。另外於軟弱帶中，過去文獻採用空氣間距(Air gap)來模擬，與現地狀況明顯差異過大，為此設計能充分模擬現地剪力弱帶的剪力帶環片，期能了解剪力弱帶對 TDR 錯動變形之影響。

茲將試驗規劃整理如表 3.6，並詳細說明如下。

表 3.6 試驗規劃

	纜線	剪力帶寬度(cm)	剪力環內填	剪力盒內填	圍壓(KN/m ²)	灌漿配比
重複性試驗	RG-8	N/A	N/A	Ottawa sand	285.21	W/C=1
	RG-8			Fine Gravel		
	P3-500(unshield)					
	P3-500(unshield)					
模擬剪應變梯度	RG-8	3	Ottawa sand	Ottawa sand	285.21	W/C=1
	RG-8	5				
	P3-500(unshield)	0				
	P3-500(unshield)	3				
	P3-500(unshield)	5				

(a) 大型直剪儀-試驗重複性

林文欽(2007)的研究中，建議於軟弱土層時，採用軟性(RG-8 型)纜線；於堅硬土層時，採用剝皮硬性(P3-500 型)纜線，故針對軟、硬性纜線，剪力盒內分別填入渥太華砂及細礫石，在固定相同圍壓、灌漿配進行試驗。

(b) 模擬於軟弱土層中真實的剪動行為-模擬剪應變梯度

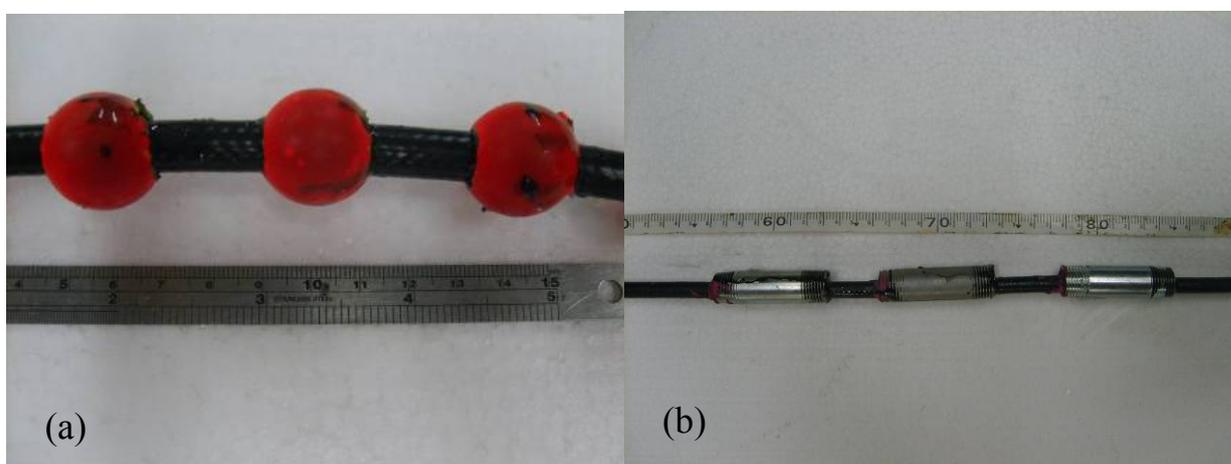
大型直剪儀中於軟弱土層中，所進行的試驗，比較類似單剪的行為，但於真實情況，其剪動應較接近一非應力集中的行為，因此在原本的上、下剪力盒間，加入能模擬剪力帶寬度之剪力帶環片。試驗時，固定填渥太華砂於剪力盒及剪力帶環片中，並固定相同圍壓及水泥配比，僅改變不同的剪力帶寬度，分別為 0、3、5 公分，希望藉此探討於軟弱土壤中，不同剪力帶寬度對 TDR 錯動變形監測有何影響。

3.3. 改善初始啟動門檻值(δ_D)及靈敏度(S)的處理方法

歸納相關探討剪力帶寬度之文獻，可以發現加入剪力帶寬度後，對於 TDR 錯動變形反應之靈敏度影響甚鉅，對此將參考美國專利編號 6,696,974，於纜線加入不同形狀的節點，並探討節點與節點間的間距，從中獲得最佳的方式，希

望能藉此改善錯動變形監測的靈敏度及初始啟動門檻值(δ_D)。

有鑒於林文欽推薦於軟弱地層安裝TDR錯動變形監測系統選擇RG-8 纜線，其試驗獲得的纜線靈敏度(S)及初始門檻值(δ_D)與本研究試驗所得結果差異過大，將於下章詳細說明，因此，本研究將於RG-8 纜線上置入球形節點，並在球內灌入AB膠，球的直徑為 2 公分，球與球間距也為 2 公分，詳細纜線配置如照片 3.7(a)；以及於RG-8、P3-500 纜線置入圓柱狀節點，內部也是灌入AB膠，圓柱長 7 公分，，間距約 4 公分，配置如照片 3.7(b) (以RG-8 為例)，測試結果是否如預期能改善靈敏度及啟動門檻值，並互相比較，結果將於下一章探討。



照片 3.7 RG-8 纜線加入 (a) 球形節點 (b) 圓柱形節點

第四章 研究結果與討論

本研究主要分為三個部份來說明，第一、大型直剪儀試驗重複性改良：有鑑於重複性會影響試驗的品質及後續的量化處理，先行探討林文欽(2007)試驗的可靠性，再進行後續的試驗；第二、模擬於軟弱土壤中，剪動方式為一非應力集中的行為；第三、在纜線上加入節點，評估是否有助於增強TDR反射訊號。最後綜合以上結果，改善林文欽(2007)於現場所建議的安裝標準程序，使其更完整。

4.1. 錯動變形試驗影響因子探討

為了充分模擬更加符合現地軟弱土層的剪動行為，以及量化變形量，規劃了一系列錯動變形試驗，試驗配置與規劃已於3.2.5節詳述，主要目的為能於各種地層中量化變形量，並藉由試驗結果探討不同試驗配置條件下，外部位移量(δ)與TDR反射係數(ρ)之關係，以利後續量化分析工作。隨試驗過程記錄TDR反射訊號、剪力盒相對位移量、圍壓應力及剪應力，不同試驗條件下的剪應力 / 正向應力-位移曲線分兩種纜線整理如圖4.1及圖4.2，從目前試驗累積的經驗觀察發現，當剪力盒剪動到約70mm左右，剪力盒剪動面會越來越靠近水泥試體，導致水泥試體被剪力盒直接壓迫，因此，剪動70mm以後的試驗數據不足以採信，後續試驗曲線皆只繪至70mm。

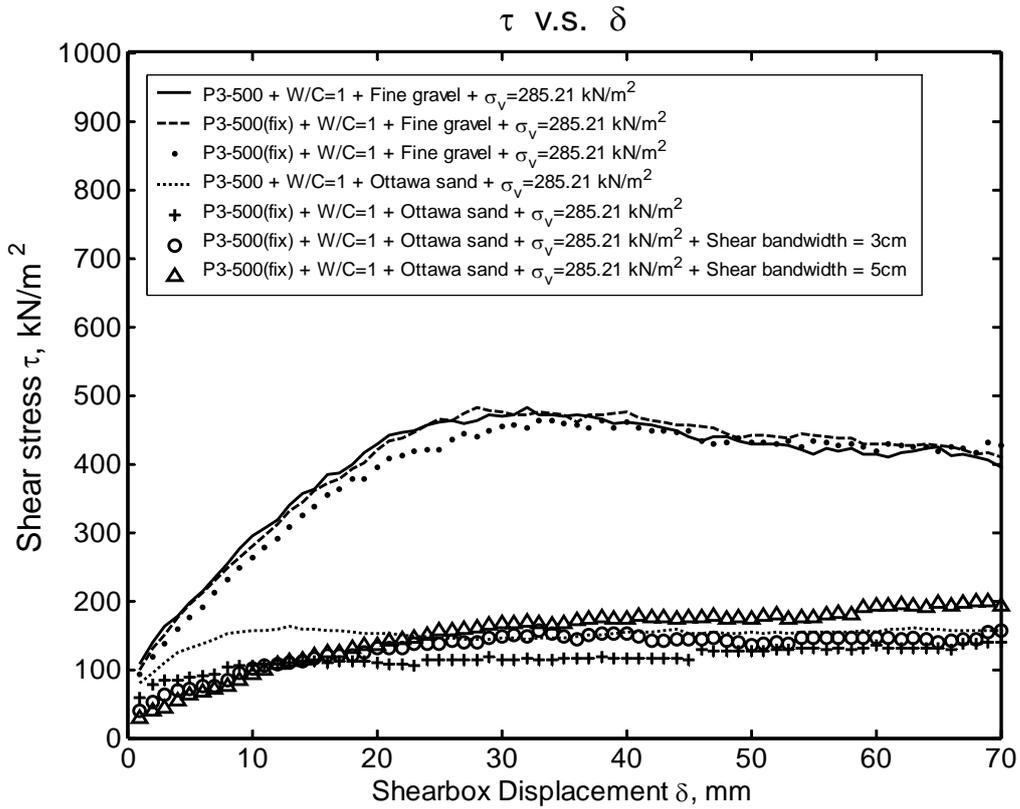


圖 4.1 P3-500 纜線於不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線

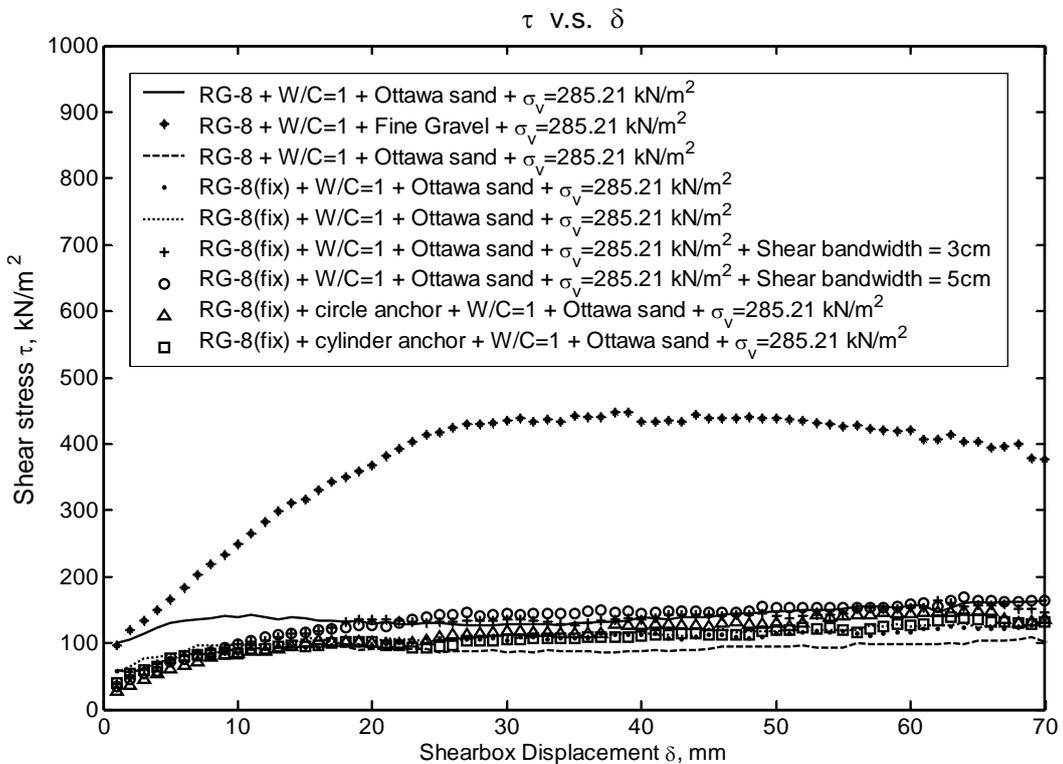


圖 4.2 RG-8 纜線於不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線

茲將室內錯動變形試驗結果分為試驗重複性、剪力帶寬度對於 TDR 反應之探討與提高 TDR 訊號靈敏度之成效等三個影響因子，依序在後續小結討論。

4.1.1. 大型直剪儀改善：試驗重複性

試驗若沒有重複性，則將很難有可靠的數據進行量化變形量，因此首先針對林文欽(2007)室內大型物理模型進行改良，逐步釐清造成試驗重複性不佳的原因。

參考先前林文欽研究建議，軟性(RG-8 型)纜線適用於較軟弱地層，試驗外填材料採用渥太華砂；而剝皮硬性(P3-500 型)纜線適用於較堅硬地層，試驗外填材料則使用細礫石，控制灌漿配比($W/C = 1 : 1$)，並於每次試驗施以固定之圍壓應力(285.21 kN/m^2)以確保每次邊界條件為相近，探討纜線於固定配置靈敏度(sensitivity, S)及初始啟動門檻值(trigger threshold value, δ_D)之結果。試驗結果將分為外填材料-灌漿-纜線複合勁度、TDR 反射波形與各纜線之靈敏度(S)與初始啟動門檻值(δ_D)、回歸啟動門檻值(δ_0)四個部份。

(1) 外填材料-灌漿-纜線複合勁度：

固定條件下，不同纜線之剪應力-位移曲線如圖 4.3，對應整體複合材料剪力勁度(shear stiffness, k_{gs})整理於表 4.1，其中纜線種類後面有括號fix 的是表示有束制水泥試體及纜線，沒有括號的為林文欽(2007)先前試驗所得，各纜線所對應的線性段斜率差異不大(RG-8 型=37~51、P3-500 型=94~117)，可證明每次試驗條件配置近乎相同。

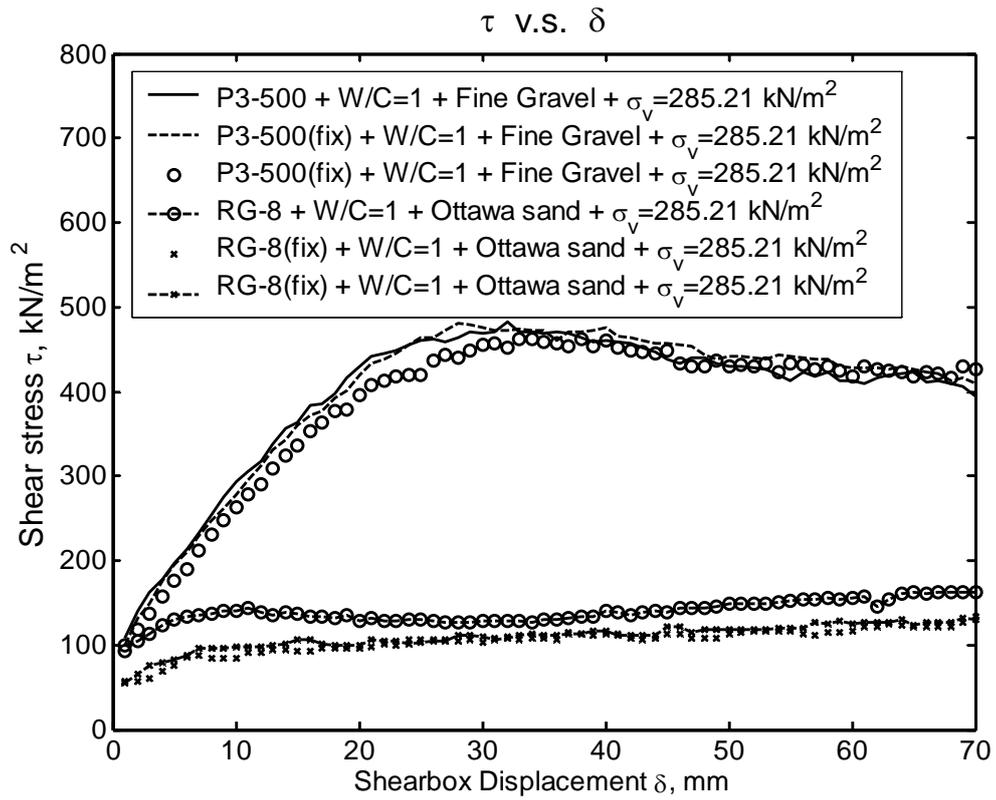


圖 4.3 固定纜線，相同配置下之剪應力-水平位移曲線



(2) TDR 反射波形：

圖 4.4 為各纜線反射係數，相同條件下，模擬現地狀況加入束制的機制(束制水泥試體及纜線)，強迫纜線被拉緊，軟性RG-8 纜線因原本勁度較小，束制後反而造成勁度變大，需要較大的外力才能將纜線外覆之灌漿材料擠碎(如照片 4.1)，促使纜線產生反應，導致不易產生波形反應；而相對來說，硬性P3-500 纜線本身勁度較大，束制前後變化不大，因此波形變化沒有軟性纜線來的明顯。與林文欽(2007)的試驗結果相比，雖然束制後軟性纜線反射波形不明顯，但是其發展的趨勢較具一致性(如圖 4.4)。



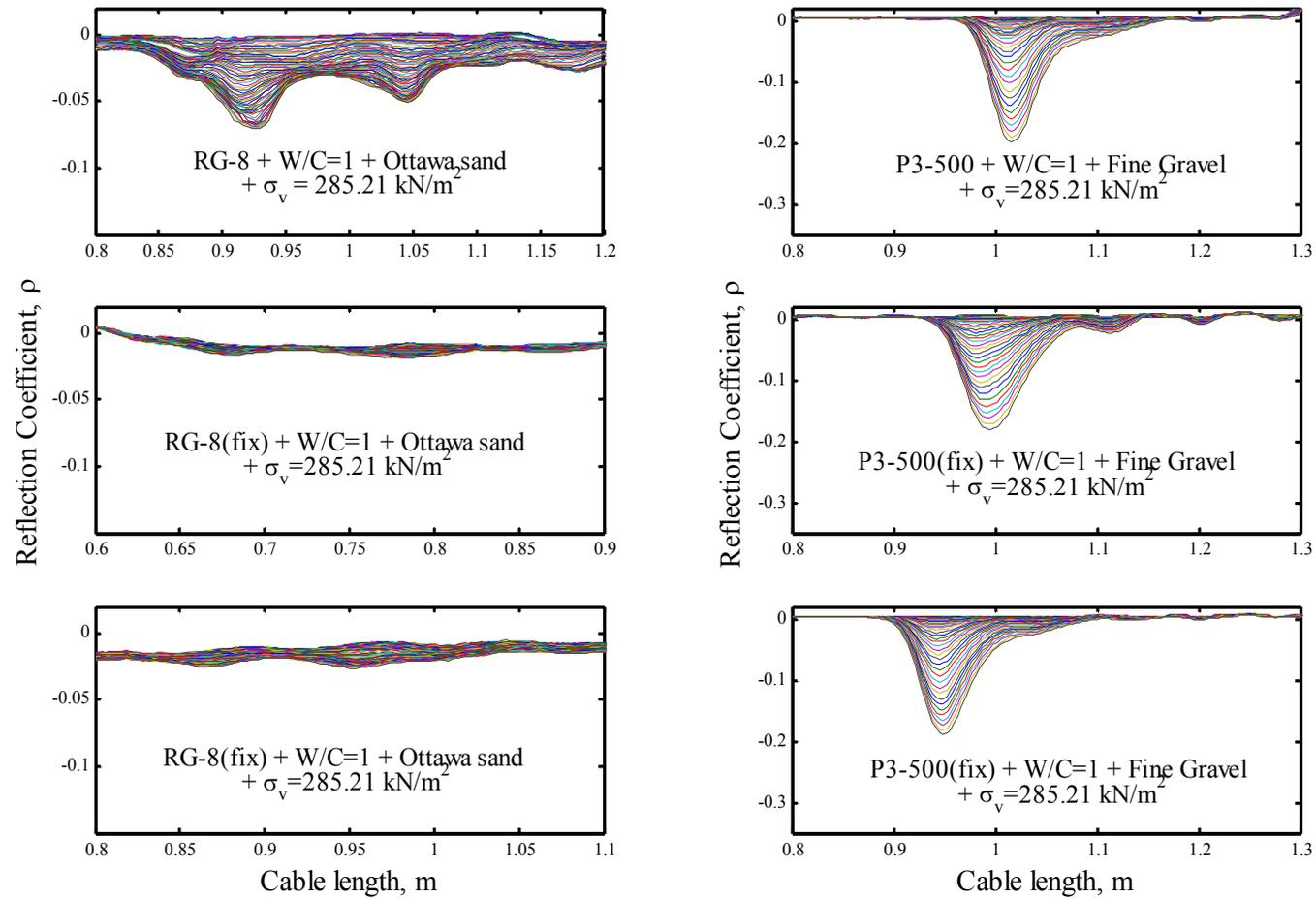
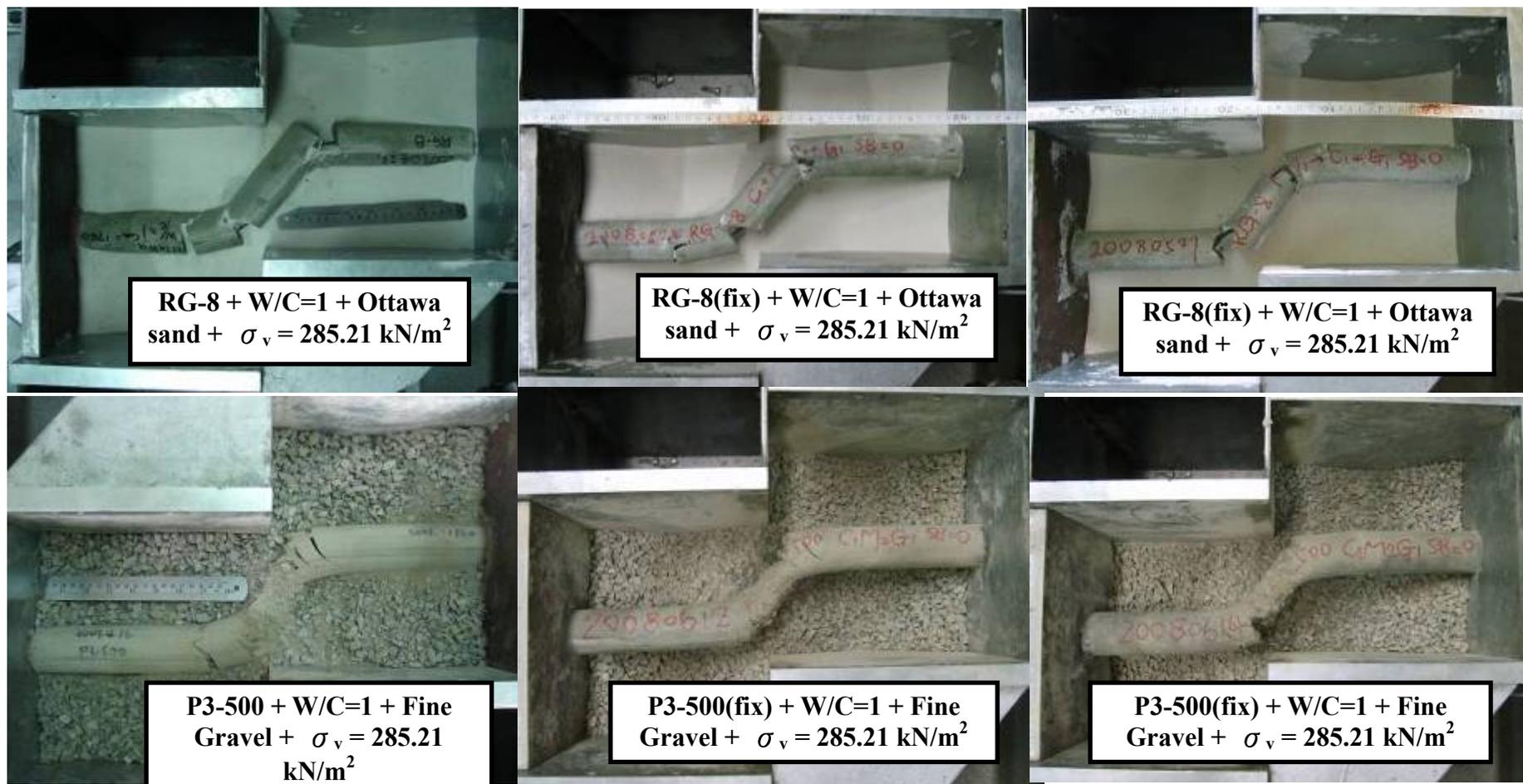


圖 4.4 相同纜線受剪之反射波形



照片 4.1 同種纜線相同配置灌漿材料之變形模式

(3) 不同纜線靈敏度與啟動門檻值：

圖 4.5 為不同纜線靈敏度(S , ρ /mm)，將其取線性段作一次線性迴歸所得結果整理於表 4.1。其中，啟動門檻值之定義分為初始啟動門檻值(δ_D)與迴歸門檻值(δ_0)，前者為經由目視可辨識之反射波形改變所對應初始值，後者則為迴歸 $\rho - \delta_{peak}$ 所得量化方程式與橫軸(δ)之截距。

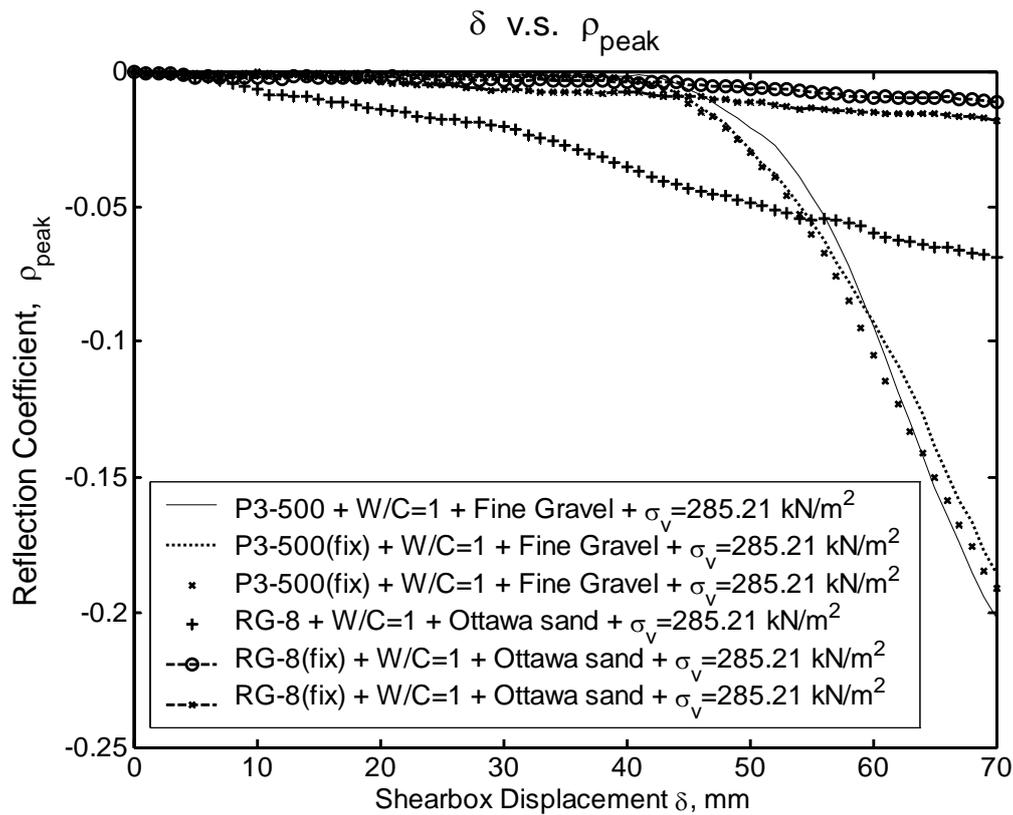


圖 4.5 軟、硬性纜線重複性試驗之 $\rho_{peak} - \delta$ 關係曲線

表 4.1 固定纜線，相同配置下之反應特性比較

Cable Type	Diameter(m m)	Proportion of Water/Cement(W/C)	Backfil l Soil type	Backfill Soil Stiffness(slope of τ - δ)	Linear Regression				Confining Stress(kN/ m ²)	Curing(da y)
					Trigger Threshold Value, δ_D (m m)	Regression Threshold Value, δ_0 (m m)	Sensitivity,S(ρ / mm)	Rsquare, R ²		
RG-8	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	51	5 ^(A)	5.863 ^(B)	0.001071 ^(F)	0.9905	285.21	3
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	37	22 ^(C)	11.846 ^(C)	0.000225 ^(E)	0.8913	285.21	3
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	39	21 ^(B)	5.284 ^(A)	0.000275 ^(D)	0.9882	285.21	3
P3-500	12.4	W/C=1:1	Coarse sand	117	43 ^(F)	43.266 ^(E)	0.006290 ^(C)	0.9393	285.21	3
P3-500(fix)	12.4	W/C=1:1	Coarse sand	94	42 ^(E)	44.890 ^(F)	0.006861 ^(A)	0.9853	285.21	3
P3-500(fix)	12.4	W/C=1:1	Coarse sand	97	39 ^(D)	42.670 ^(D)	0.006317 ^(B)	0.9791	285.21	3

Performance : (A) > (B) > (C) > (D) > (E) > (F)

從表 4.1 可看出軟性(RG-8 型)纜線初始門檻值(δ_D)由先前的 5mm 降為 20mm 左右，靈敏度($S, \rho/\text{mm}$)從 0.001071 降為 0.000225、0.000275；而剝皮硬性(P3-500 型)纜線其初始門檻值(δ_D)、迴歸門檻值(δ_0)及靈敏度($S, \rho/\text{mm}$)皆為一致($\delta_D=43、42、39\text{mm}$ ， $\delta_D=43.266、44.890、42.670$ ， $S=0.006290、0.006861、0.006317$)。對照林文欽前期的研究，顯示加入束制(束制水泥試體及纜線)的動作會造成適用於軟弱地層中的 RG-8 型纜線反應變慢，但是適用於堅硬地層中的 P3-500 型纜線則無改變；而由水泥試體的破壞情形來看，束制後的試驗，雖然水泥試體破裂面皆較為破碎，但是 P3-500 纜線反應並無明顯變化，因此破裂面破碎應該單純為試驗中加圍壓時水泥試體檔板所造成，影響纜線初始門檻值及靈敏度有限。推測造成初始門檻值及靈敏度不佳的原因，應該為前一小節所述，故推測只要是採用細礫石的試驗，結果應該和林文欽(2007)試驗結果一致，而用渥太華砂則使得纜線反應下降。

本研究為模擬於現地取一塊體出來做試驗，其塊體外(即剪力盒外)之水泥試體及纜線可視為被束制住，因此本試驗所採用的機制是較符合現地的，而且試驗結果重複性良好，因此，後續試驗都將束制水泥試體及纜線，以確保試驗的可靠度，進一步量化變形量。

4.1.2. 剪力帶寬度對於 TDR 反應之探討

本試驗主要目的為探討於軟弱土層中，其剪動模式並不單純是一個應力集中的單剪行為，而應該是非應力集中的剪應變梯度行為，因此希望藉剪力帶寬度對於 TDR 反應之探討了解軟弱土層對於 TDR 錯動變形監測之影響。由於剝皮後的硬性(P3-500 型)纜線有助於提早偵測到錯動，因此本試驗還是採用剝皮後的硬性纜線，而軟性纜線則用 RG-8 型來進行試驗。試驗結果分為外填土壤勁度、TDR 反射波形、以及各纜線靈敏度與啟動門檻

值三個部份，詳述如下：

(1) 外填土壤勁度：

本節試驗控制每次試驗圍壓應力為 285.21 kN/m^2 ，灌漿之水灰比 1:1，外填材料(包含剪力帶環片內)為渥太華砂，每次試驗僅改變模擬剪力帶寬度的剪力帶環片數量。將試驗之 $\tau - \delta$ 關係整理成圖 4.6，圖中顯示無論剪力帶環片的有無，外填材料為渥太華砂的纜線剪應力皆座落在相近的區域，圖中林文欽(2007) P3-500 及 RG-8 的試驗，其與本研究之試驗結果於 20mm 之前的試驗數據有約 50 kN/m^2 的落差，推測為重新架設大型直剪儀時，相關配置有些微誤差的變更所累積造成，但其曲線變化的趨勢仍為相近的，依然可說明每次試驗相關配置是接近相同的。

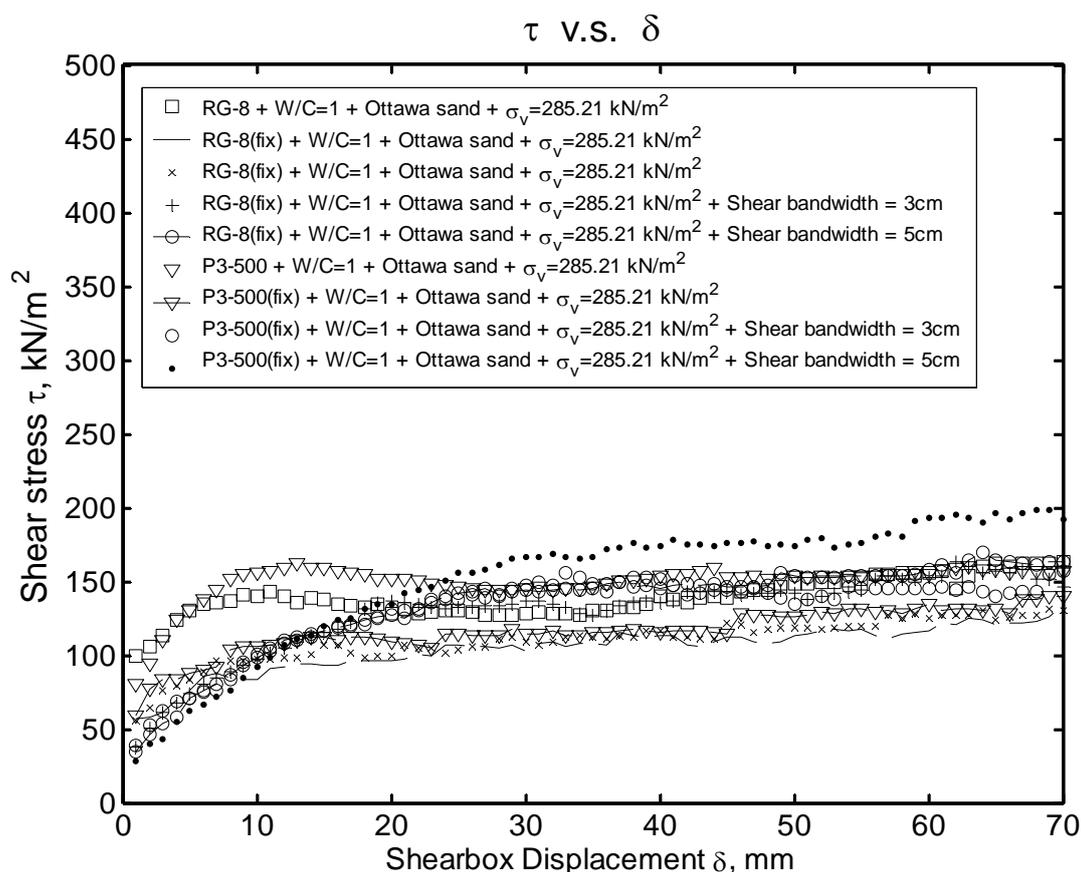


圖 4.6 纜線加入不同剪力帶寬度之剪應力-水平位移曲線

(2) TDR 反射波形：

茲將軟、硬纜線，分開探討加入剪力帶寬度後，對於 TDR 反應有何影響，詳述如下：

(a) 軟性(RG-8 型)纜線

圖 4.7 為改變剪力帶寬度為 0、3、5 公分，探討於軟弱地層中，模擬剪應變梯度之反射波形，可觀察得：軟性纜線(RG-8)，在加入剪力帶寬度後，除了剪力帶寬度 3 公分的試驗，其約於剪動 84mm 左右波形從原先的雙峰逐漸成為單峰，其於試驗 TDR 反射波形發展一致，再比較其水泥試體破裂情形，剪力帶寬度 3 公分的破裂情形較多裂痕，對照圖 4.7 左下波形，就是因為應力逐漸集中導致其破裂處裂縫增加，如照片 4.2 所示；其餘試驗則破裂情況雷同，此結果可呼應本節開始所述，剪動超過 70mm，其試驗數據會因剪力盒剪動面過於接近水泥試驗，而強制其破壞，造成試驗判讀上的困難。本小節試驗可歸納出，RG-8 型纜線於軟弱土層中，剪力帶寬度對於 TDR 的反射波形影響有限。



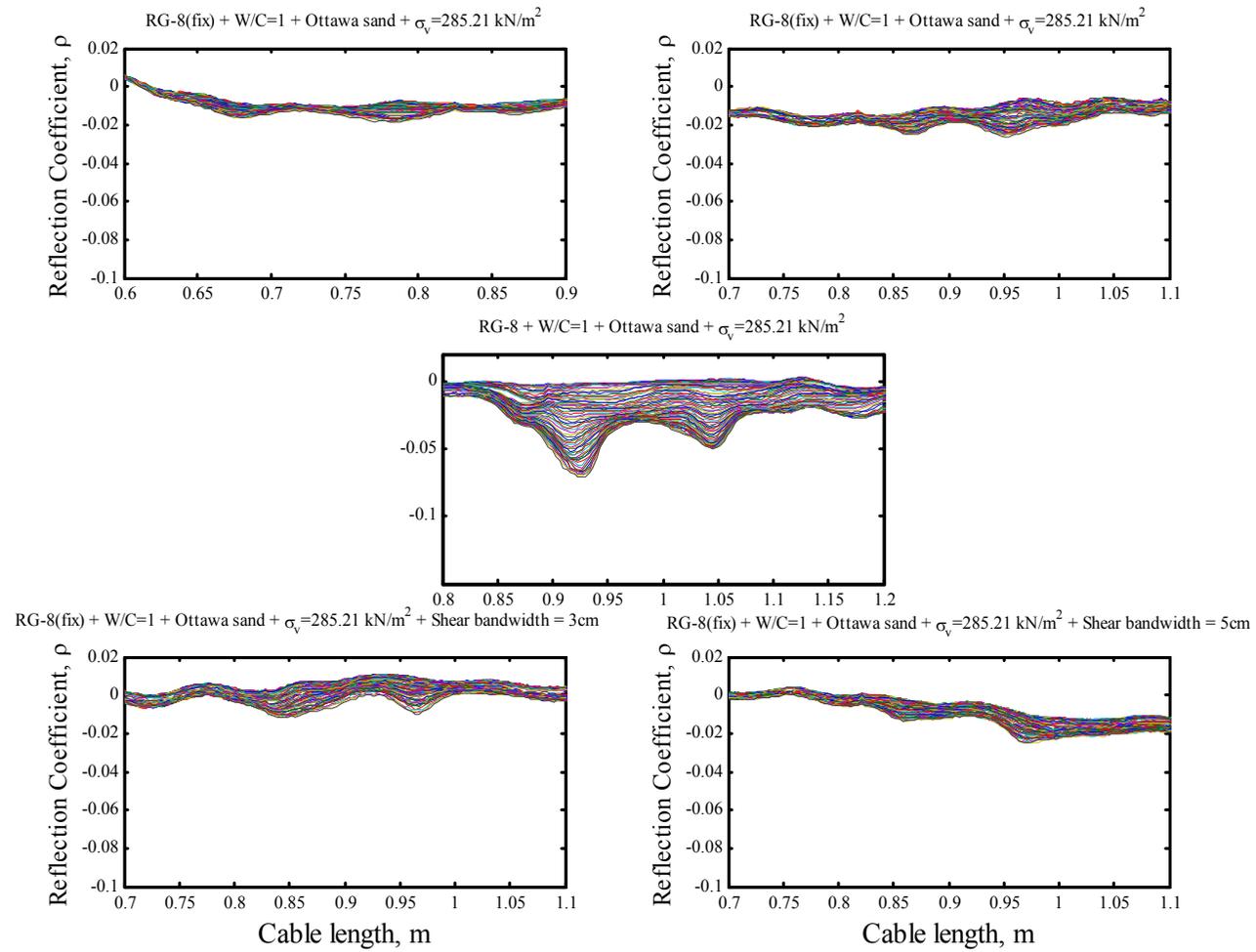
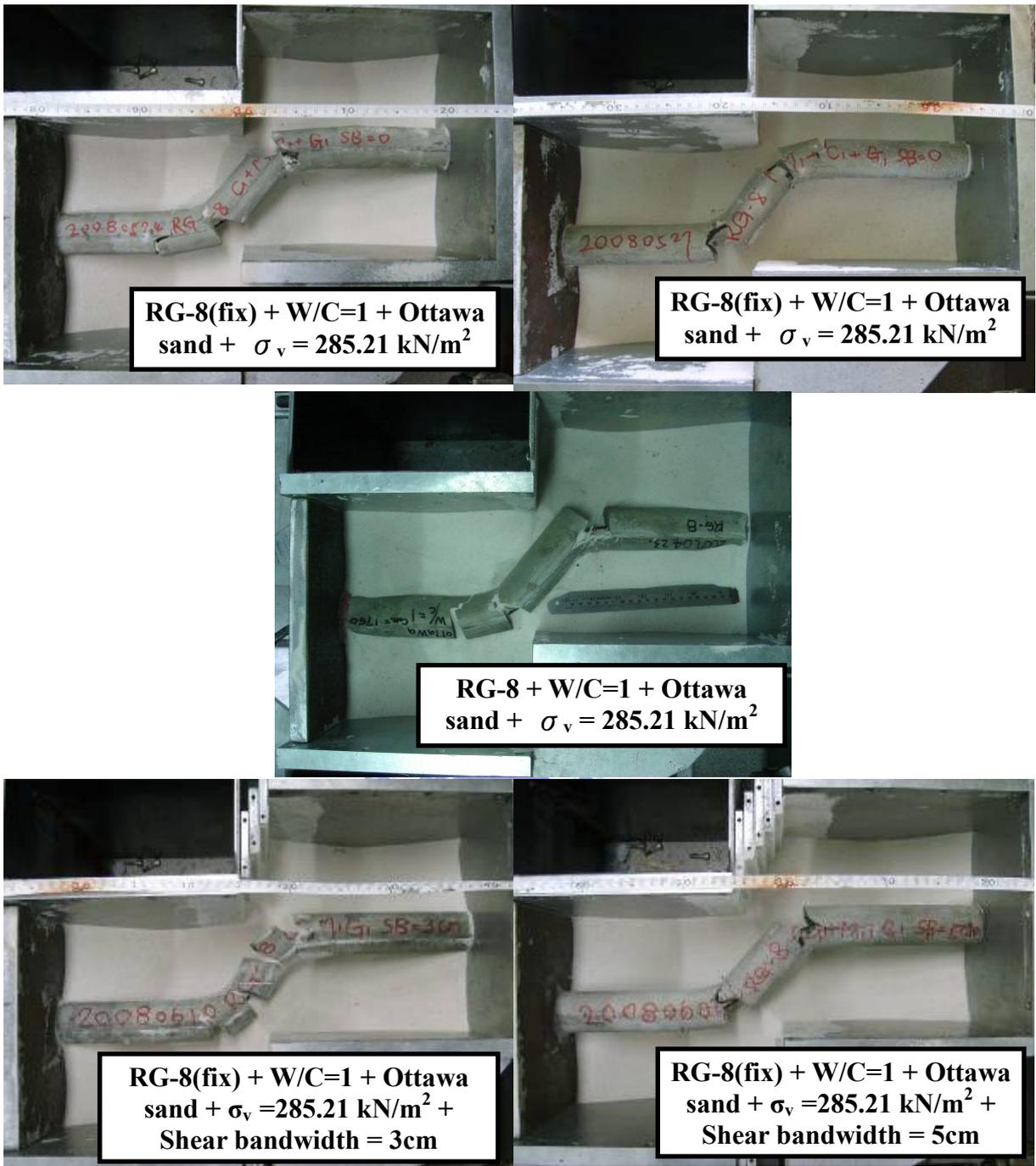


圖 4.7 軟性纜線於不同剪力帶寬度之反射波形



照片 4.2 軟性纜線(RG-8)於不同剪力帶寬度之變形模式

(b) 硬性(P3-500 型)纜線

圖 4.8 為探討硬性纜線(P3-500 型)於軟弱土層中，模擬剪應變梯度的行為，在試驗具有重複性的條件下，加入剪力帶寬度後，對TDR反射波形有何影響。圖 4.8 左上側中可明顯看出，林文欽(2007)試驗所得到的反射訊號大過纜線及水泥試體經過束制後的反射訊號，但是其缺乏重複性的驗證來證明其可靠度。

從圖 4.8 中，可發現不同於林文欽(2007)在剪力帶寬度 0 公分所得到的單一尖峰，剪力帶寬度 0、3、5 公分的試驗皆呈現波形發展一致的雙峰波形，造成的原因推測為，束制水泥試體及纜線使得纜線靈敏度由單峰變成雙峰波形。照片 4.3 可看出，試體的破裂情形以林文欽(2007)的試驗破碎較為集中(水泥試體呈碎裂狀)，而束制水泥試體及纜線後不論加多少寬度的剪力帶，水泥試體破裂則分散為兩個明顯的裂痕，因此束制後會使得應力分散不集中，但是在束制的條件下，剪力帶寬度的增加影響水泥試體破裂的情況不大，也就是和軟性纜線(RG-8 型)的結論相同，剪力帶寬度對於硬性纜線(P3-500 型)反射波形影響有限。

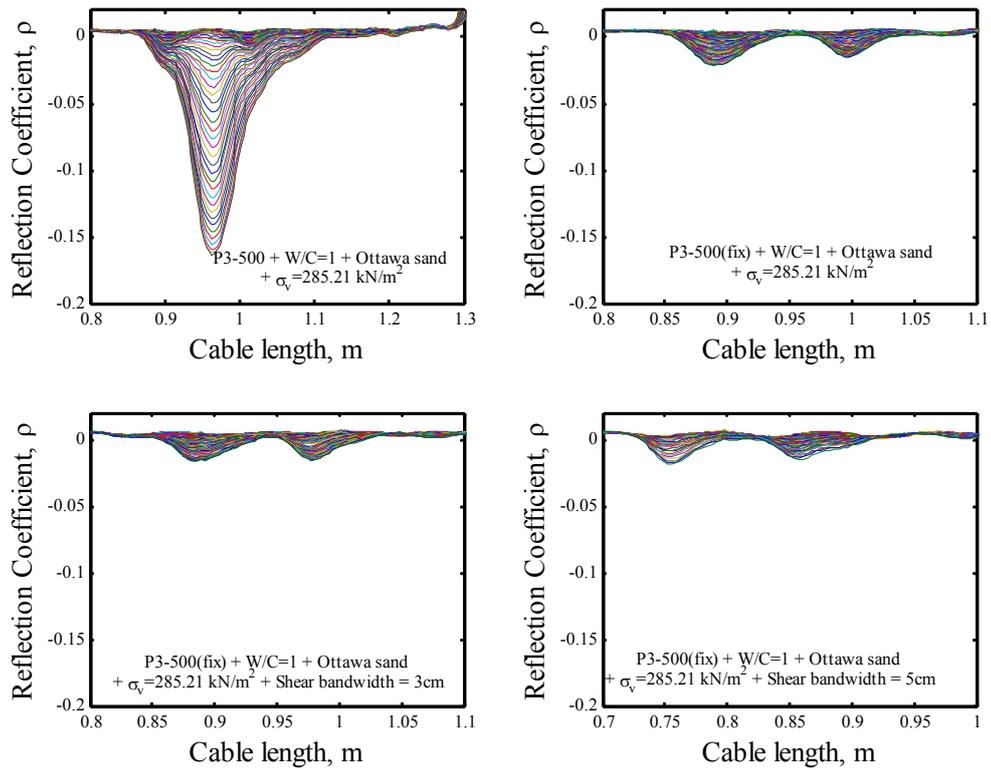
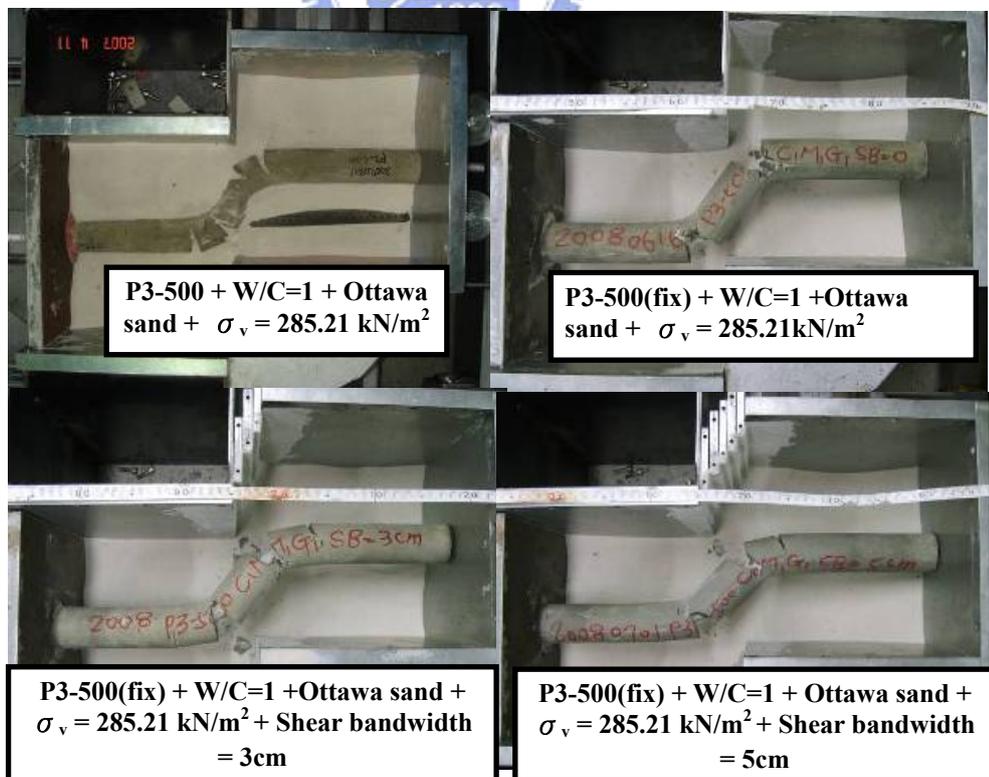


圖 4.8 硬性纜線(P3-500)於不同剪力帶寬度之反射波形



照片 4.3 硬性纜線(P3-500)於不同剪力帶寬度之變形模式

(3) 靈敏度與啟動門檻值

圖 4.9 為 RG-8 纜線 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 關係曲線，取 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 線性段作一次線性迴歸，結果整理於表 4.2。比較圖 4.9 與表 4.2，顯示 RG-8 有無加入剪力帶寬度，其靈敏度及初始門檻值差異不大(靈敏度為 0.000225、0.000275、0.000356、0.000235 ρ/mm ，初始門檻值為 22、21、16、18mm)；另外，由表 4.2 及 P3-500 纜線 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 關係曲線(圖 4.10)可知，加入剪力帶寬度後將使得初始門檻值(δ_D)變大，亦即較晚反應變形發生(由原本 41mm 變成 55mm)，但其靈敏度則接近(0.000412、0.000381、0.000504)。值得一提的是，林文欽(2007) P3-500 於渥太華砂的試驗(無束制水泥試體及纜線，表 4.2 中 P3-500 無 fix 括號)，與束制後的結果相比，雖然初始門檻值差不多($\delta_D=39、41\text{mm}$)，但是靈敏度大幅的下降(由原先的 0.005665 變為 0.000412)，證明了於前一節的結論，束制水泥試體及纜線，使大型直剪試驗更為貼近現地狀況，試驗也具有重複性，但於渥太華砂中軟、硬性纜線靈敏度皆會下降。

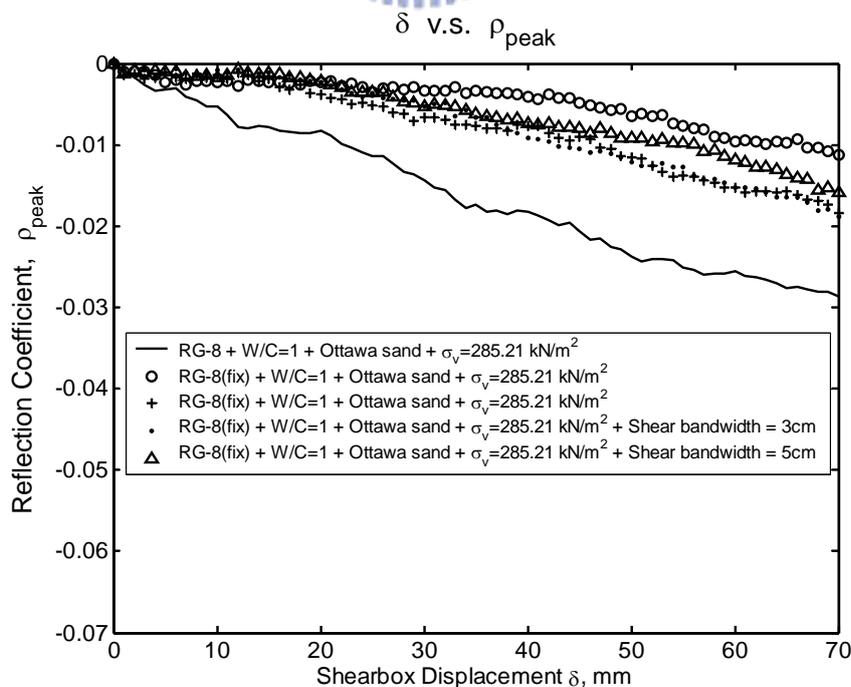


圖 4.9 RG-8 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度

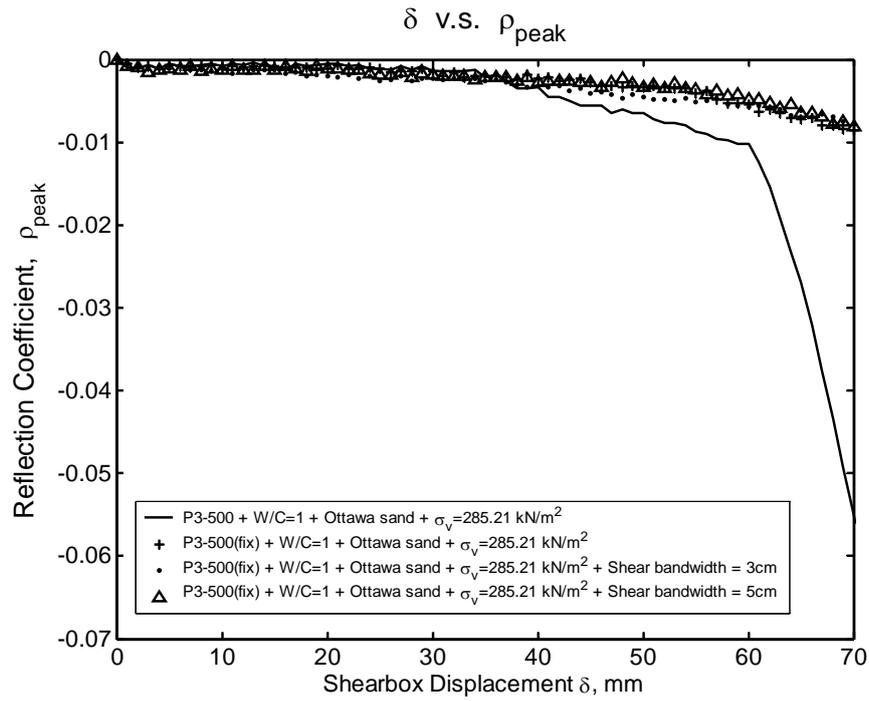


圖 4. 10 P3-500 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度



表 4.2 試驗相同配置條件下，加入剪力帶寬度之反應特性比較

Cable Type	Diameter (mm)	Proportion of Water/Cement (W/C)	Backfill Soil type	shear bandwidth (cm)	Shear band backfill soil type	Backfill Soil Stiffness(slope of τ - δ)	Linear Regression				Confining Stress(kN/m ²)	Curing(day)
							Trigger Threshold Value, δ_D (mm)	Regression Threshold Value, δ_0 (mm)	Sensitivity, S(ρ /mm)	Rsquare, R ²		
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	N/A	N/A	37	22 ^(D)	11.846 ^(C)	0.000225 ^(H)	0.8913	285.21	3
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	N/A	N/A	39	21 ^(C)	5.284 ^(A)	0.000275 ^(F)	0.9882	285.21	3
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	3	Ottawa sand	30	16 ^(A)	12.243 ^(D)	0.000356 ^(E)	0.9121	285.21	3
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	5	Ottawa sand	41	18 ^(B)	7.2664 ^(B)	0.000235 ^(G)	0.9759	285.21	3
P3-500	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	N/A	N/A	83	39 ^(E)	60.000 ^(H)	0.005665 ^(A)	0.9949	285.21	3
P3-500 (fix)	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	N/A	N/A	31	41 ^(F)	43.587 ^(E)	0.000412 ^(C)	0.9553	285.21	3
P3-500 (fix)	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	3	Ottawa sand	28	55 ^(G)	47.338 ^(F)	0.000381 ^(D)	0.9661	285.21	3
P3-500 (fix)	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	5	Ottawa sand	30	55 ^(G)	51.358 ^(G)	0.000504 ^(B)	0.9404	285.21	3

Performance : (A) > (B) > (C) > (D) > (E) > (F) > (G) > (H)

4.1.3. 提高 TDR 訊號靈敏度之成效

本試驗主要目的為針對前述 4.1.1 與 4.1.2 小節的試驗，由於束制纜線及水泥試體而造成靈敏度不佳，將使得後續量化分析上不夠精確。因此，本研究參考 2.3.5 小節所提到的專利，試著提升 TDR 訊號的靈敏度。茲將試驗結果分為外填材料勁度、TDR 反射波形、及纜線靈敏度與啟動門檻值三個部份探討如下：

(1) 外填材料勁度：

本試驗改變的地方僅纜線有無加入節點，試驗固定圍壓為 285.21 kN/m^2 ，控制灌漿水灰比 $W/C=1:1$ ，由先前 4.1.2 小節可知，剪力帶寬度影響纜線靈敏度及啟動門檻值有限，因此採用無剪力帶寬度的配置來進行試驗，並且在試驗具重複性的前提下進行。外填材料皆採用渥太華砂，其試驗勁度如圖 4.11，相關試驗之剪應力-水平位移曲線皆座落於相鄰之範圍內。

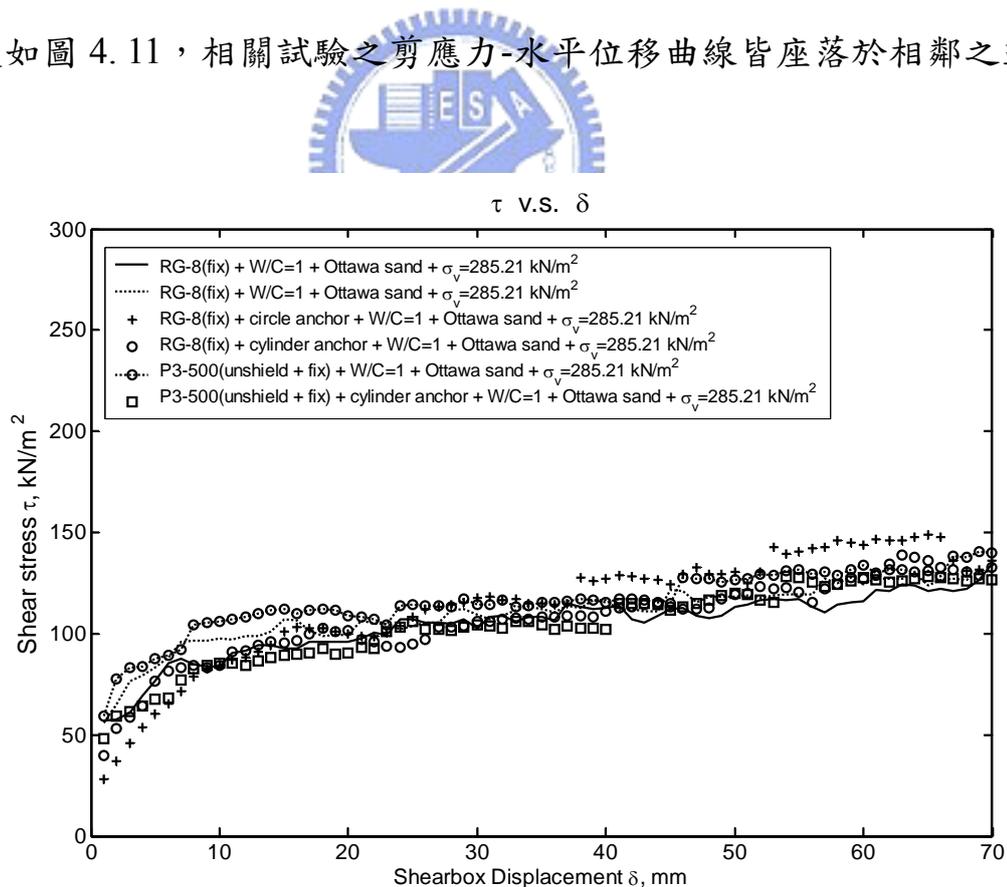


圖 4.11 提高 TDR 訊號靈敏度試驗之剪應力-水平位移曲線

(2) TDR 反射波形

圖 4.12 顯示於同一外填材料(渥太華砂)下，RG-8 及 P3-500 纜線加入節點後(圖 4.12 (c)、(d)、(e)、(f))與沒有加入節點 TDR 反射波形相比(圖 4.12 (a)、(b))，兩種纜線加入節點後的反射波形呈現較為擴大的雙尖峰狀，經過節點的束制，外力還是如預期有集中的情形，波形反射係數的最大值也隨之增加。照片 4.4(c) 顯示出於 RG-8 纜線加入結點的試體，其破裂處有增加，可能是因為球與球太過密集而造成，力直接作用在節點身上，而並非作用在節點與節點之間，而照片 4.4(d) 因為結點為圓柱狀(長度 7 公分，間距 4 公分)，應力集中在圓柱與圓柱之間，因此破裂情況與未加入節點差異不大。P3-500 纜線在置入圓柱狀節點〔長度 7 公分，間距 4 公分〕〔照片 4.4(f)〕後，雖然產生裂縫的位置與未置入節點〔照片 4.4(e)〕的插不多，但力量也未能集中於節點與節點之間，因此試體稍有破裂的情形發生。



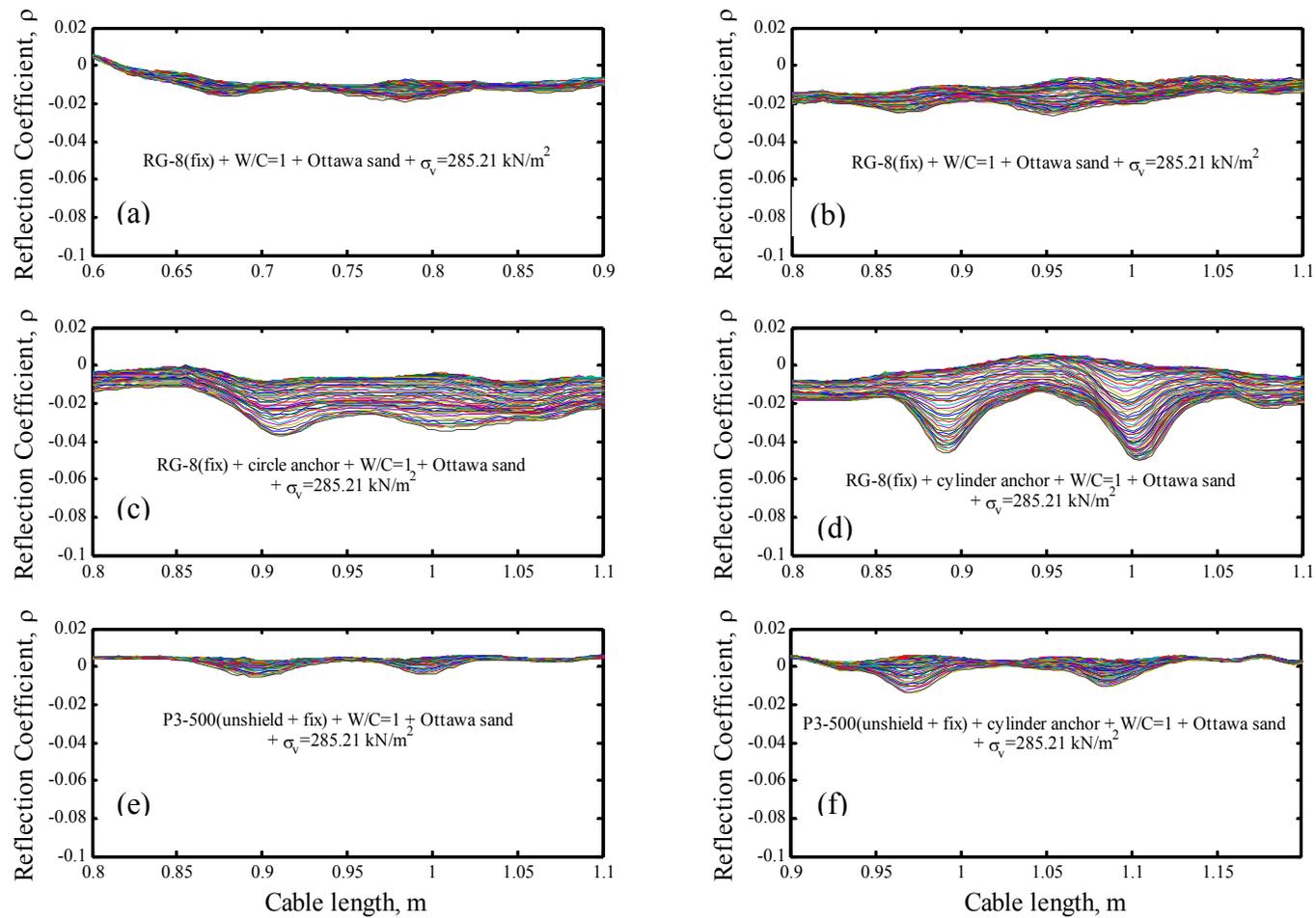
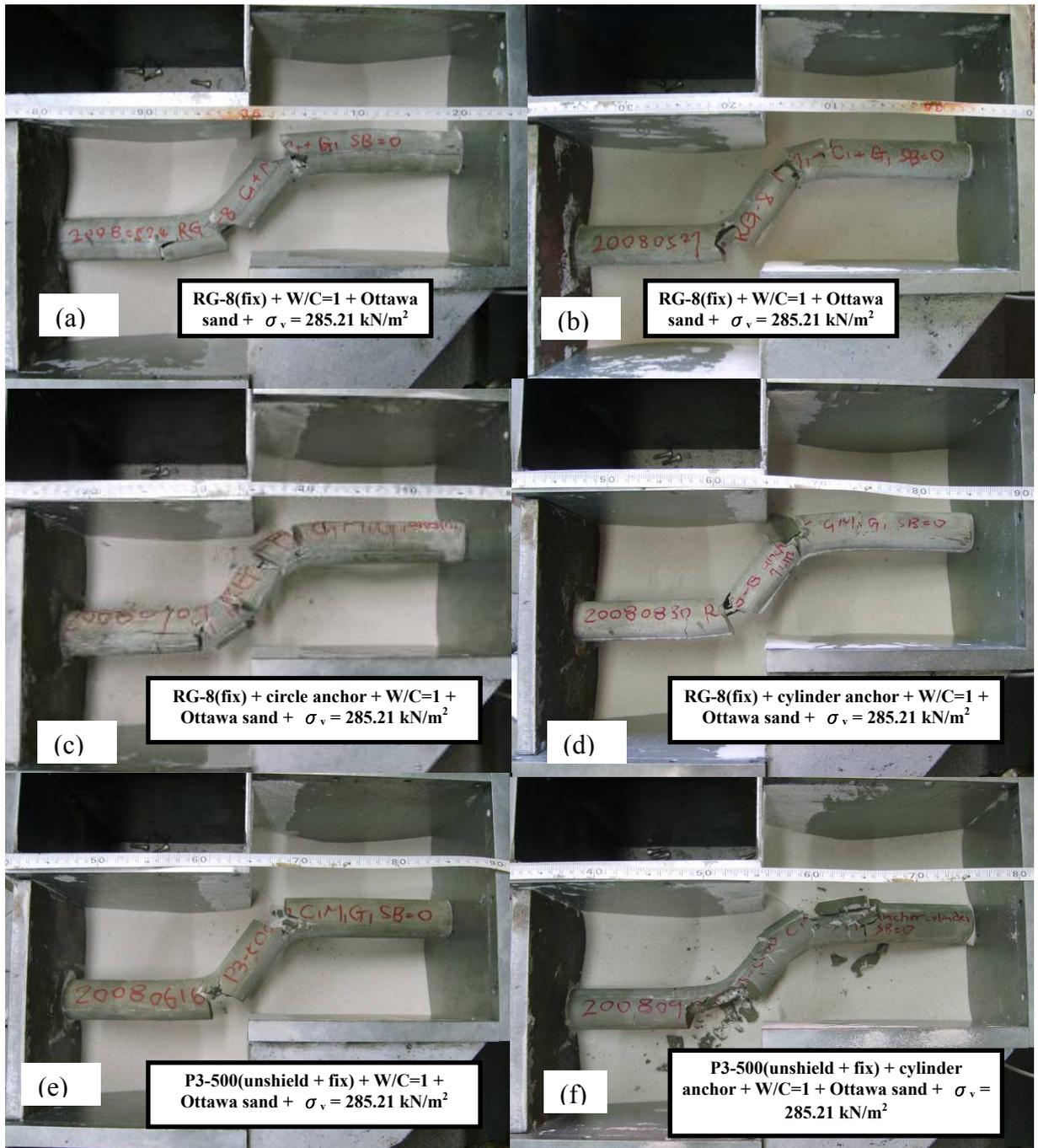


圖 4.12 提高 TDR 訊號靈敏度試驗之反射波形



照片 4.4 提高 TDR 訊號靈敏度試驗之變形模式

(3) 靈敏度與啟動門檻值

圖 4.13 說明 RG-8 纜線放入圓形節點，其靈敏度有增加，但效果不是十分明顯，但如果採用圓柱狀的節點，則效果明顯增大許多；而圖 4.14 則顯示

P3-500 纜線採用圓柱狀的節點，效果不佳，茲將結果整理於表 4.3。

表 4.3 可得知，RG-8 纜線加入節點可以改善靈敏度(S)的問題，且對於初始門檻值(δ_D)有幫助，靈敏度從 0.000225、0.000275 增加為 0.000578、0.000926 ρ/mm ，而初始門檻值則些微增加(22、21、20、15mm)；而 P3-500 纜線置入節點後，靈敏度改善不大(由 0.000412 變為 0.000415 ρ/mm)，但初始門檻值則有顯著的改善(由 41 變為 32mm)。RG-8 纜線置入圓柱狀的靈敏度之所以比圓形好很多，推測應該是因為球狀的設計太小(直徑為 2 公分)，無法使得應力完全集中(纜線曲率半徑還是很大)，而反觀圓柱形長為 7 公分，使得間距內的曲率半徑變小，因此能明顯的改善靈敏度；P3-500 纜線同樣也採用圓柱狀節點來進行測試，但僅初始門檻值改善較為顯著，推測可能因為節點剛好位於力量集中的地方所造成，照片 4.4(f)也顯示破裂處皆為粉碎性破壞，而非如照片 4.4(d)較為平整的破壞。

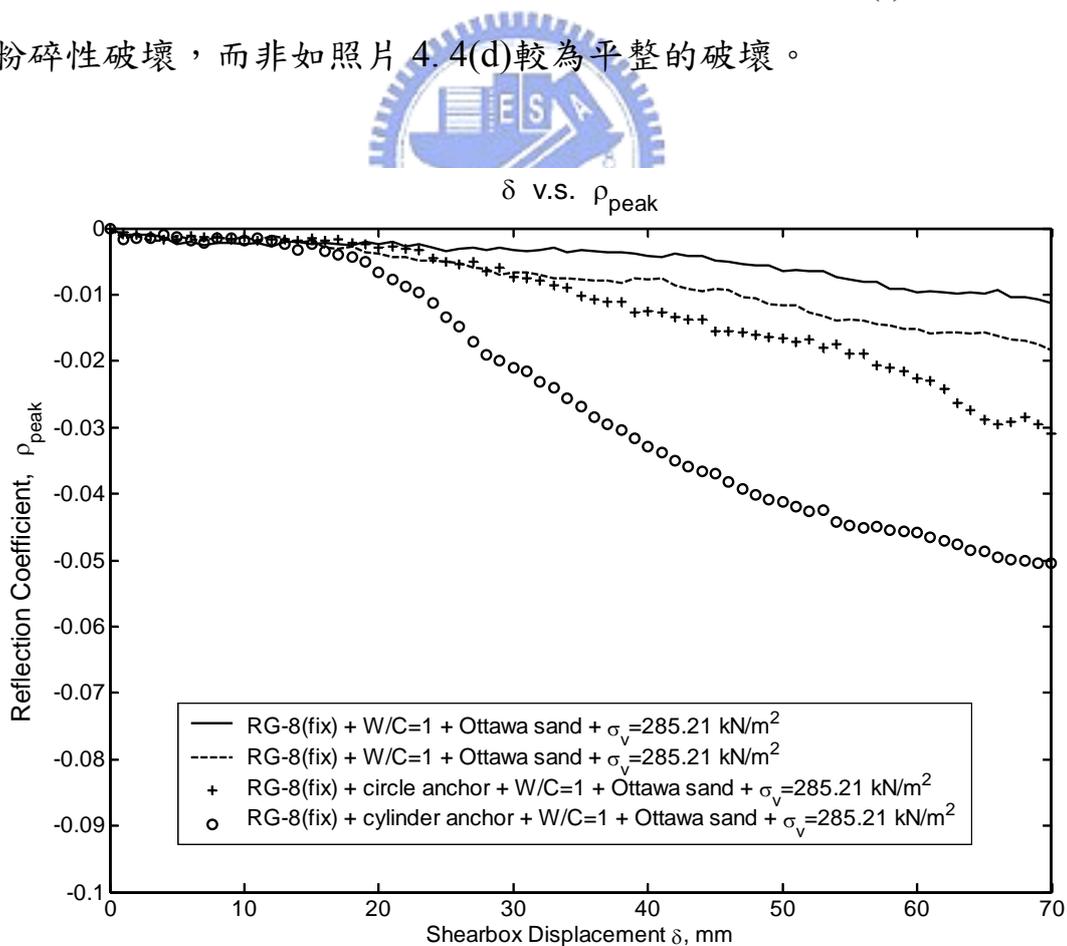


圖 4.13 RG-8 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線

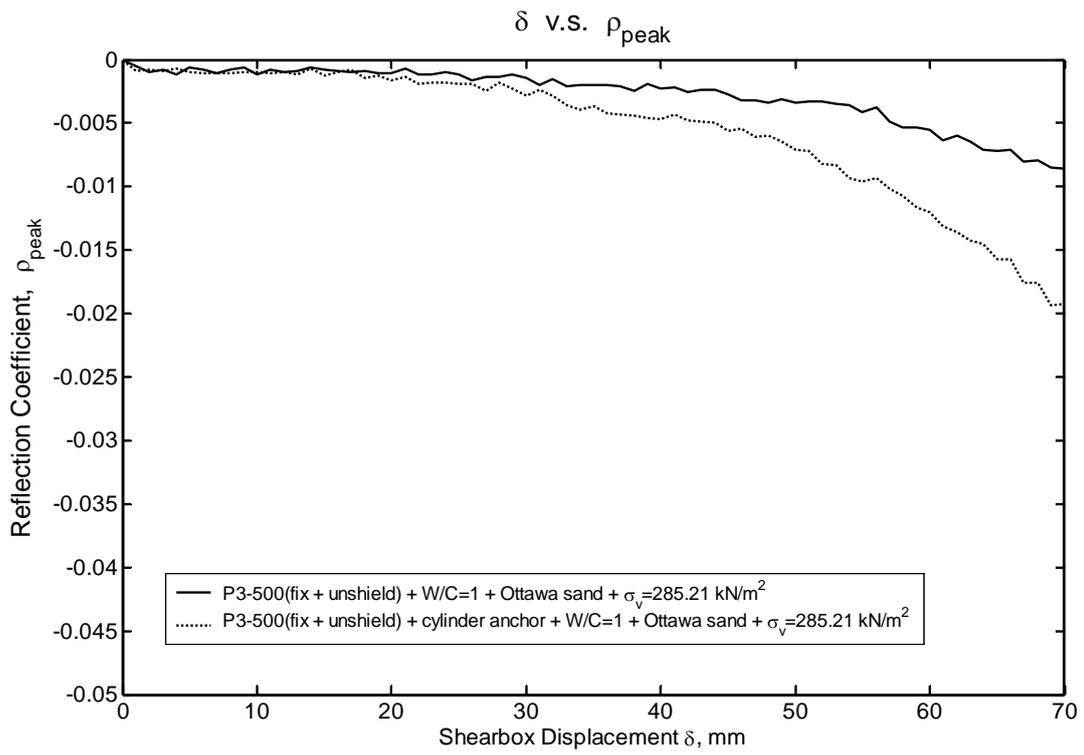


圖 4.14 P3-500 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線



表 4.3 相同配置條件下，纜線置入節點之反應特性比較

Cable Type	Diameter(mm)	Proportion of Water/Cement(W/C)	Backfill Soil type	Backfill Soil Stiffness(slope of τ - δ)	Linear Regression				Confining Stress(kN/m ²)	Curing(day)
					Trigger Threshold Value, δ_D (mm)	Regression Threshold Value, δ_0 (mm)	Sensitivity, S(ρ /mm)	Rsquare, R ²		
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	37	22 ^(D)	11.846 ^(C)	0.000225 ^(F)	0.8913	285.21	3
RG-8(fix)	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	39	21 ^(C)	5.284 ^(A)	0.000275 ^(E)	0.9882	285.21	3
RG-8(fix) circle anchor	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	30	20 ^(B)	18.647 ^(D)	0.000587 ^(B)	0.9918	285.21	3
RG-8(fix) cylinder anchor	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	41	15 ^(A)	8.684 ^(B)	0.000926 ^(A)	0.9582	285.21	3
P3-500(unsheilded)fix	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	31	41 ^(F)	43.587 ^(F)	0.000412 ^(D)	0.9553	285.21	3
P3-500(unsheilded)fix cylinder anchor	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	26	32 ^(E)	29.445 ^(E)	0.000415 ^(C)	0.9243	285.21	3

Performance : (A) > (B) > (C) > (D) > (E) > (F)

4.2. TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析改善

邊坡滑動監測應用 TDR 技術已行之多年，但實務應用時往往只考慮纜線本身衰減特性，並無考慮纜線種類於不同土壤之反應，使得纜線種類之選擇並無統一標準與依據。因此林文欽(2007)建議 TDR 錯動變形監測安裝的標準程序，並建議於軟弱、堅硬地層分別適用的纜線種類，但是其試驗缺乏重複性及剪力帶對於 TDR 訊號反應影響的探討，本研究將彌補這些缺失，使安裝標準程序及量化分析更加完善。茲將 TDR 錯動變形監測安裝標準程序與量化分析之初步建議分述如下：

(1) 透過本研究之試驗與分析結果，以及相關研究計畫所累積現場安裝經驗，針對灌漿與纜線安裝提出一套參考標準程序(如圖 4.15)。主要提供：纜線選擇依據、現場安裝不同階段所需合理的考量與準備(如灌漿配比)，使得 TDR 錯動變形監測應用更具實務性與便利性，茲將各流程應注意事項說明如下：

a. 纜線選擇：

束制水泥試體及纜線後，雖然使得 RG-8 型纜線反應下降，但其於軟弱地層初始靈敏度還是優於 P3-500 型纜線，因此，軟弱地層還是沿用林文欽(2007)的建議使用 RG-8 型纜線；而於堅硬地層，P3-500 型纜線束制水泥試體及纜線後，TDR 訊號反應影響不大，所以於堅硬地層同樣沿用林文欽(2007)所提出的建議採用 P3-500 型纜線。

b. 前置作業：

了解現場鑽孔直徑與深度，以及當地地質概況與水位，於試驗室需先確定纜線訊號是否有異常，並保護纜線直到安裝。

c. 現場安裝：

為了避免纜線置入鑽孔時，因水的關係而上浮，纜線末端綁重

物(25 米深約需 2 公斤重物)，以直徑約 3 公分 PVC 管置入孔中，供灌漿與固定軟性纜線之用，接著調配水灰比(重量比)約為 1：1 之水泥漿，分次從 PVC 管灌入水泥漿，直到孔口流出水泥漿為止，拔除 PVC 管後，再拔除鑽孔內套管(此時視地層狀況決定拔除外套管，通常地層狀況佳，可等灌漿完成後再拔除外套管)，捕水泥漿至孔口，纜線製作接頭並檢查訊號。

d. 二次灌漿：

對縮漿段進行灌漿，水泥將配比依舊為水灰比(重量比)1：1，量測 TDR 訊號，建立初始值。

e. 儀器保護：

製作保護蓋保護預留的纜線及接頭，量測完畢後，保護蓋上鎖。

f. 完工：

保護蓋應盡量與地面平整。



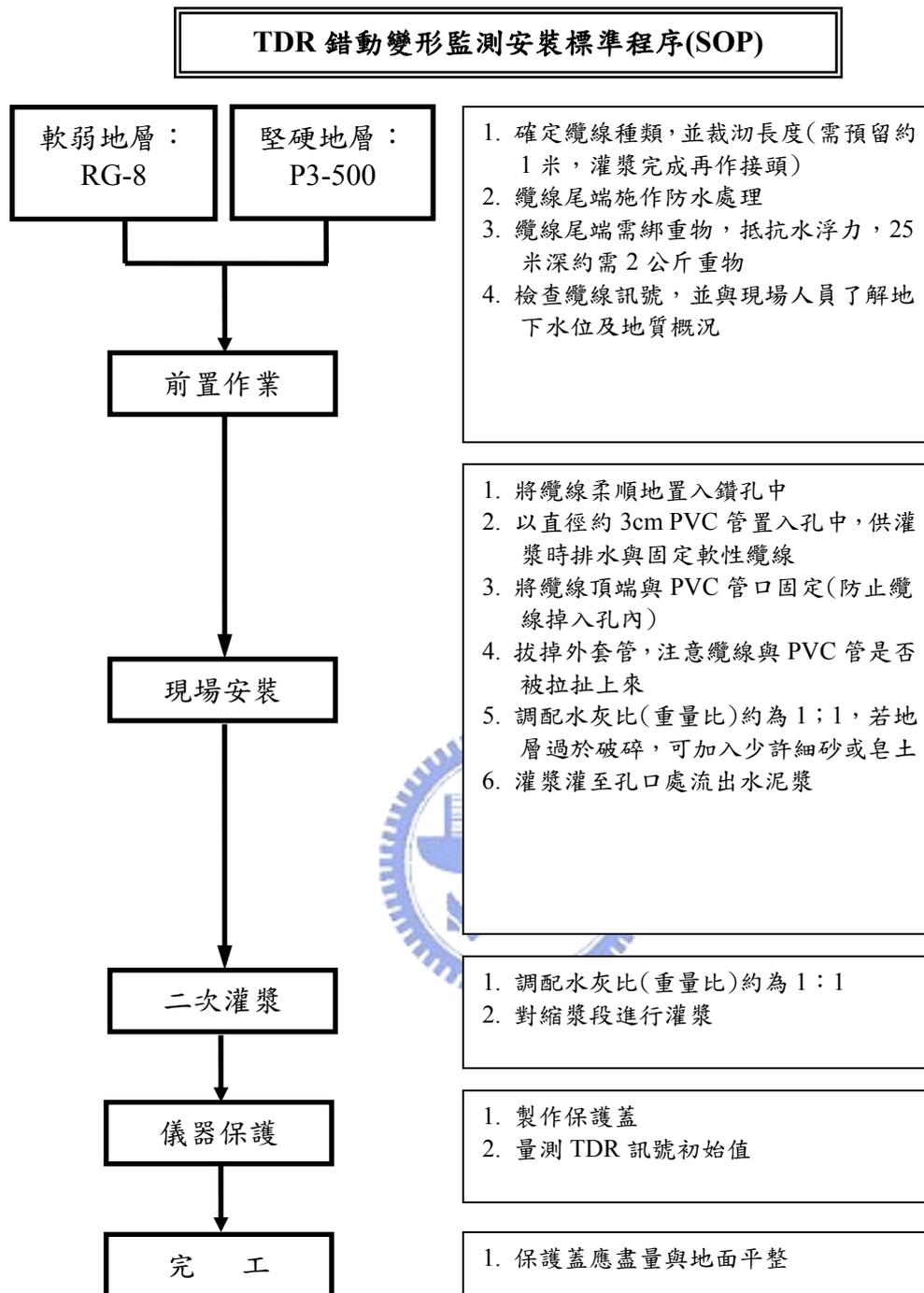


圖 4.15 TDR 錯動變形監測之標準程序

(2) 由 4.1.1、4.1.2 小節及林文欽(2007)的試驗結果，另外再將Lin et. al. (2007)以RG-8 與P3-500 型纜線外覆石膏之直剪試驗結果(典型直剪破壞模式)進行比較，典型直剪破壞模式可以視為於岩層中的剪動行為，綜合上述試驗結果，若固定水灰比及圍壓，只改變不同勁度的外填材料，可得 $\rho_{peak}-\delta$ 的關係曲線，茲將軟、硬性纜線分別表示為圖 4.16和圖 4.17，並說明如下：

a. 軟性纜線(RG-8 型)

圖 4.16可說明，地質材料會影響RG-8 纜線的靈敏度及啟動門檻值(表 4.2可知RG-8 於渥太華砂靈敏度為 0.000225、0.000275 ρ/mm ， δ_D 為 22、21mm；於細礫石中靈敏度為 0.004254 ρ/mm ， δ_D 為 7mm)，所以應用於所有類型土層上量化仍有困難，但可以考慮模擬試驗不同材料與現地材料的比較，推估可能的變形範圍，圖中的Reference line即代表典型直剪破壞模式。現地若屬岩層，RG-8 纜線以式(4-1)進行量化分析；若現地地質材料較接近細礫石，則採用式(4-2)進行量化分析；若現地地質材料較接近渥太華砂則用式(4-3)來進行量化分析，該式是在試驗具有重複性的前提下，加入不同剪力帶寬度(0、3、5 公分)的 $\rho_{peak}-\delta$ 關係曲線，利用非線性三次式迴歸得到。

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.016203} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.001277} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4-2)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.000253} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4-3)$$

式(4-1)、(4-2)、(4-3)中 δ 為地層滑動量， ρ_{peak} 為反射係數(與初始量測值之差值)， δ_0 為迴歸門檻值。參考林文欽先前研究及本研究的結果，其中 δ_0 受地質材料勁度影響頗大，若地層為堅硬岩層時，則

$\delta_0 \approx 0mm$ ；若地質材料接近細礫石時， $\delta_0 \approx 12mm$ ；若地層為軟弱土壤或存在剪力帶寬度時，以本研究所使用之軟弱外填材料而言

$\delta_0 \approx 5mm \sim 12mm$ (表 4.2 RG-8 型纜線試驗結果)。

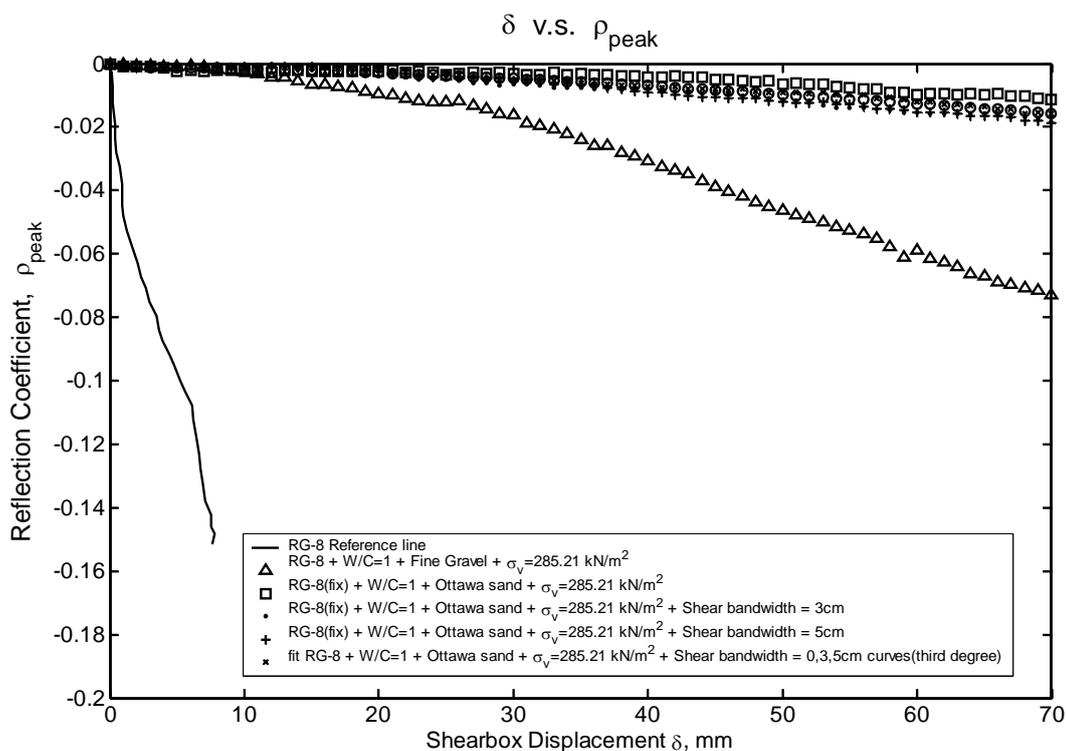


圖 4.16 RG-8 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度

b. 硬性纜線(P3-500 型)

圖 4.17 為 P3-500 於不同外填材料勁度之 $\rho_{peak} - \delta$ 關係曲線，圖中顯示該種纜線也是受地質材料影響很大(靈敏度分別為 0.010783、0.006861、0.006317、0.000412、0.000381、0.000504)，量化變形量也和 RG-8 型纜線相同，僅能與試驗用的材料與現地地質材料比較，推估可能的變形範圍，現地若屬岩層，纜線以式(4-4)進行量化分析；若現地地質材料較接近細礫石，則採用式(4-5)進行量化分析，該式為非線性三次式迴歸 P3-500 於細礫石中的重複性試驗而得；若現地地質材料較接近渥太華砂

則用式(4-6)來進行量化分析，採用非線性三次式迴歸P3-500 加入剪力帶寬度(0、3、5 公分)的試驗。

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.010783} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4-4)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.0072833} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4-5)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.0002115} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4-6)$$

若地層為堅硬岩層時，則 $\delta_0 \approx 0mm$ ；若地質材料接近細礫石， $\delta_0 \approx 42mm \sim 44mm$ (表 4.1 P3-500 型纜線重複性試驗結果)；若地質材料接近渥太華砂，以本研究所使用之軟弱外填材料而言， $\delta_0 \approx 43mm \sim 51mm$ (表 4.2 P3-500 型纜線試驗結果)。

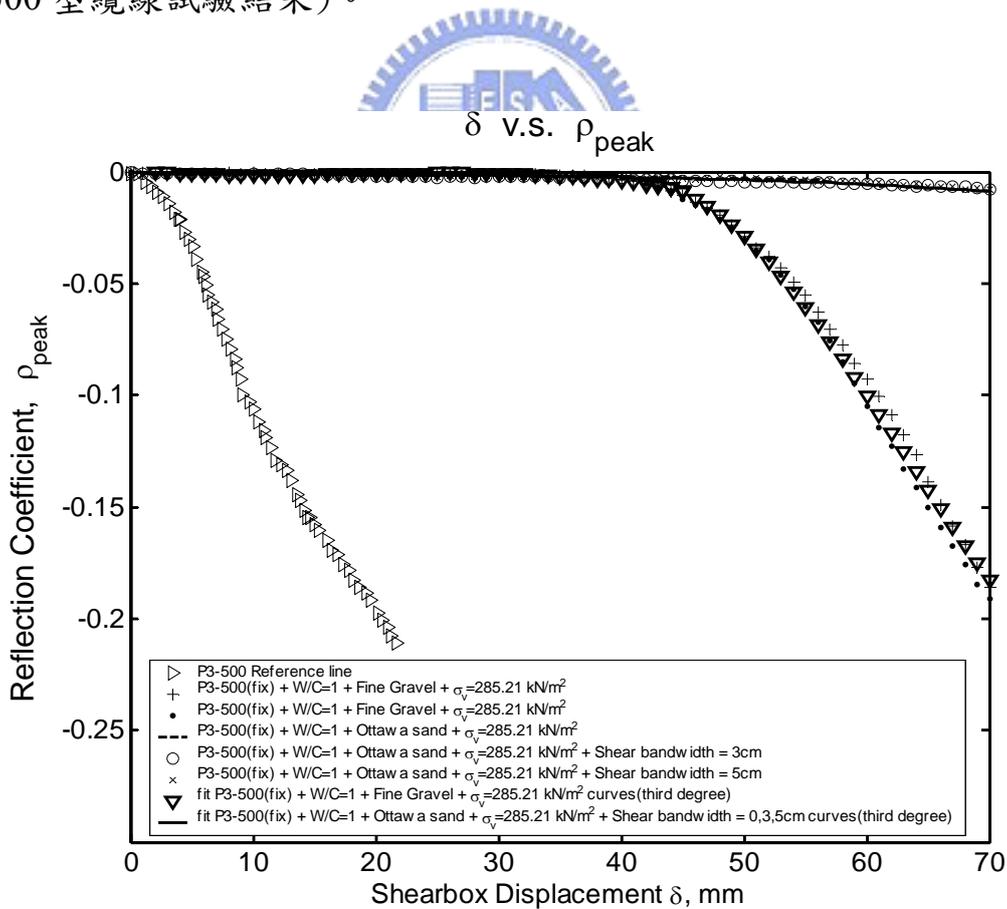


圖 4.17 P3-500 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度

(3) 綜合上述結論，茲將TDR錯動變形監測資料分析整理如圖 4.18。

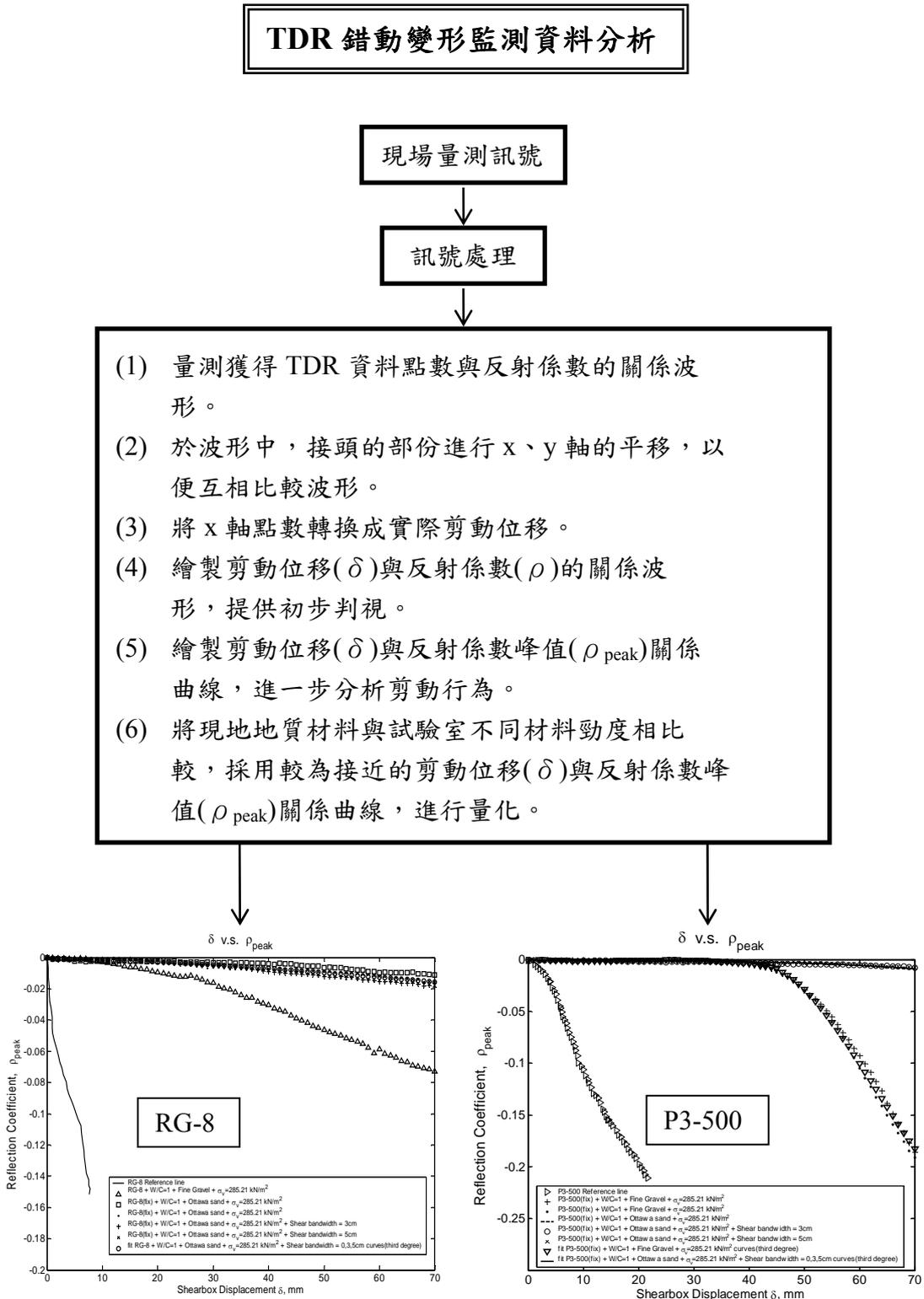


圖 4.18 TDR 錯動變形監測資料分析流程圖

第五章 結論與建議

雖然林文欽(2007)於纜線的選擇及現地安裝的程序都有初步的結果及建議，然而，大型直剪儀試驗重複性不佳及剪力帶可能造成的影響仍然缺乏合理的試驗方法；再者，現地複雜之材料互制行為導致目前應用上只能定性描述滑動位置，完全量化錯動變形量化分析則存在相當難度。因此，本研究除了改良物理模型-大型直剪儀，並且為了充分了解軟弱地層對 TDR 錯動變形監測有何影響，製作能模擬現地剪力帶寬度的物理模型：剪力帶環片，探討不同剪力帶寬度對於量化分析的影響。並整合先前的試驗結果與現場安裝經驗提出 TDR 錯動變形監測安裝標準程序與量化分析之改善。另一方經由纜線上加入節點的設計，探討是否對於後續量化上有所幫助。最後針對目前研究成果不足或需改善之處，提出未來研究方向的建議。

5.1. 結論

本研究主要分為三部份，一為 TDR 錯動變形量化分析結果，其次為現地安裝標準程序之建議，最後探討提高 TDR 訊號靈敏度之可行性，對應研究結論整理如下：

一、TDR 錯動變形量化分析結果：

(1) 纜線選擇方面：

- (a) 在固定及束制纜線及水泥試體後，整體配置符合現地剪動的狀況且具有重複性，不論軟、硬性纜線，每次試驗的結果及水泥破壞模式都幾乎一致，軟弱地層束制後會對軟、硬性纜線造成靈敏度及初始啟動值降低，但是在堅硬地層則不會產生影響。
- (b) 綜合上述結論及 4.2 節的研究，軟弱土層依然與林文欽(2007)所建議的一樣，採用 RG-8；堅硬地層則用 P3-500。

(2) 剪力帶寬度對於 TDR 反應影響之探討：

RG-8、P3-500 型纜線，於軟弱土層中，加入有限的剪力帶寬度後(3、5 公分)，對 TDR 反應沒有太大的影響。

(3) 不同勁度外填材料之影響：

(a) 於不同勁度之外填材料下，各種纜線之靈敏度皆相差甚遠(如圖 4.15、4.16)。

(b) 量化變形量方面，需比較試驗所模擬的材料與現地材料，再推估可能的變形範圍。

綜合本研究第一部分 TDR 錯動變形量化分析結論：

(i) 綜合本研究試驗結果，建議現地若屬堅硬土層時，以

P3-500(unshielded)型纜線較適用，其克服初始反應門檻值(δ_D)後即有較佳之靈敏度；若現地屬軟岩或土壤時，安裝 RG-8 型纜線，其能最早偵得滑動(約 20mm)。

(ii) 灌漿仍然對於 TDR 錯動變形量化分析上有幫助，因為有灌漿，所以圍壓及剪力帶寬度對於 TDR 反應並無影響。量化變形量方面，僅能針對試驗室所模擬過的地質材料進行量化，要適用於所有地質狀況仍需繼續研究。

二、現地安裝標準程序之建議：

因地制宜，選擇上述適用之纜線，若纜線外導體無橡膠保護者應作防蝕處理；感測器末端需作防水處理；至現地時，以純水泥漿(水灰比為 1)進行灌漿使纜線與周圍土壤順應；若遭遇過大之破碎帶時，可加入少許細砂以防漏漿；最後，保護纜線接頭，需低於地面且有保護蓋並注意防潮。

三、提高 TDR 訊號靈敏度之可行性：

利用纜線段置入節點，以 RG-8 及 P3-500 型纜線之試驗結果進行分析，

結果顯示靈敏度有所提升，其中以圓柱狀的節點改善較為明顯，推測節點形狀會影響 TDR 訊號靈敏度之效果，應用於現地仍需後續研究。

5.2. 建議

- 1、目前於軟弱地層的剪動，已經盡量模擬現地的情況，於大型直剪儀加入剪力帶寬度，模擬剪動為一非應力集中的模式，力求能夠貼近現地的情況，但是剪力帶寬度本研究僅增加到 5cm，可能無法完全模擬軟弱地層的剪動行為，因此，後續建議可以製作更多的剪力帶環片，以了解更大的剪力帶寬度對於 TDR 反應有何影響。
- 2、RG-8 纜線中加入節點後，其靈敏度雖有改善，但因為節點為球形且直徑只有 2cm，使得纜線曲率半徑未如預期的小，應力未能有效集中，節點為圓柱形則效果明顯比圓形好，可得知形狀影響頗大；進一步於 P3-500 纜線測試，節點雖為圓柱狀，但力量沒有集中在節點與節點之間，因此效果有限，後續仍可進一步測試各種形狀，以及節點配置的方式，進而運用到現地的測試。

參考文獻

- [1] 交通部，「道路邊坡高效能監測系統研發與崩塌預警基制訂」，期末報告，(2002)。
- [2] 陳水龍，廖志中，黃鎮臺，「管式應變計於邊坡滑動監測之分析」，第五屆大地工程學術研討會論文集，第 351-358 頁，(1993)。
- [3] 陳至揚，「光纖光柵感測偏斜儀之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，(2001)。
- [4] 崔志龍，「TDR 與 OTDR 錯動變形監測之研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，(2004)。
- [5] 楊清良，「運用時域反射技術與傾斜觀測管在量測地層變形之適用性研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，台中，(2004)。
- [6] 盧吉勇，「TDR 錯動變形量測之研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，(2003)。
- [7] 林志平，湯士弘，鍾志忠，林文欽，「時域反射技術於大地工程監測之創新發展」，台灣公共工程學刊，第二卷，第一期，49~55 頁，(2006)。
- [8] 林文欽，「TDR 錯動變形物理模形與資料分析改良」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，(2007)。
- [9] Andrews, J.R. (1994), "Time Domain Reflectometry, 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.4-13.
- [10] Boussinesq, J. (1885) Application des Potentiels à L'Étude de L'Équilibre et due Mouvement des Solides Élastiques, Gauthier-Villars, Paris, 1885.

- [11] Brani Vidakovic, "Statistical modeling by wavelets," Wiley (1999), pp.73-80.
- [12] Cole, R. G. (1999), "Compliant TDR Sensor Cable Grout Composites to Measure Localized Soil deformation" M.S. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, USA, December.
- [13] Chen, Y. M et al. (2004), "Testing Study on Applications of Time Domain Reflectometry to Slope Monitoring," 23(16), pp.2748-2755.
- [14] CommScope, Inc. (2003), CommScope Broadband Product Catalog.
- [15] Dowding, C.H., Su, M.B., and O'Connor (1988), "Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, pp.287-297.
- [16] Dowding, C.H., Su, M.B., and O'Connor (1989), "Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 22, pp.1-23.
- [17] Dowding C.H., Huang, F.C (1994), "Early Detection of Rock Movement with Time Domain Reflectometry," Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 8, 1994a, pp. 1413-1427.
- [18] Dowding, C. H. and Pierce, C. E., (1994), "Measurement of Localized Failure Planes in Soil with Time domain Reflectometry" 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. 569-578.
- [19] Dowding, C. H., Huang, F-H., and McComb, P. S., (1996), "Water Pressure Measurement with Time Domain Reflectometry," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 19, pp. 58-64.
- [20] Dowding, C.H., Cole, R.G., Pierce, C.E., (2001), "Detection of

- Shearing in Soft Soils with Compliantly Grouted TDR Cable,”
Proc. TDR 2001, Infrastructure Technology Institute, Northwestern
University, Evanston, IL USA
- [21] Dowding, C. H., Summers, J. A., Taflove, A., and Kath, W. L., (2002),
“Electromagnetic Wave Propagation Model for Differentiation of
Geotechnical Disturbances Along Buried Cables,” *Geotechnical Testing
Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 449-458
- [22] Dworak, R.A., Jordan, A.G., and Thorne, J.S., (1977), “Time Domain
Reflectometer Microcomputer, ” (contract H0346138), BuMines OFR
106-77 ,pp.113
- [23] Dunnicliff, J., (1988), “Geotechnical Instrumentation for Monitoring
Field Performance,” New York: John Wiley & Sons, pp.252-258
- [24] D.L. Donoho and I.M. Johnstone, (1994), “Ideal spatial adaptation via
wavelet shrinkage,” *Biometrika*, vol.81, pp.425-455
- [25] D.L. Donoho, (1995), “De-Noising by Soft Thresholding,” *IEEE
Transactions on Information Theory* ,vol.41,no.3,pp.613-627
- [26] Giese, K. and Tiemann, R., (1975), “Determination of the Complex
Permittivity from Thin-Sample Time Domain Reflectometry: Improved
Analysis of the Step Response Waveform,” *Adv. Mol. Relax. Processes*,
Vol. 7, pp. 45-49.
- [27] Halliday, D. and Resnick, R., (1962), *Physics, Part II*, 2nd ed., John
Wiley & Sons, New York.
- [28] Juran, I., “Soil Nailing in Excavations, (1986), ” Notes prepared for the
Cooperative Program, Project 24-2, C.B. Villet and J.K.
Mitchell, Eds., Appnd.3.A, Vol. VI.
- [29] Kim, M.H., (1989), *Quantification of Rock Mass Movement with
Grouted Coaxial Cables*, M.S. Thesis, Northwestern University,
Evanston, IL, 65pp.
- [30] Lin, C.P., Tang, S.H., Chung, C.C. and Lin, W.C. (2006), “Quantification of

Localized Shear Deformation with Time Domain Reflectometry, ” TDR 2006: 3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications, September 2006, Purdue University , West Lafayette , IN.

- [31] O’Connor, K.M., (1991), “Development of a System for Highwall Monitoring Using Time Domain Reflectometry,” Edmonton: US Bureau of Mines Sum Rep.
- [32] O’Connor, K.M., and Dowding, C.H., (1999), “GeoMeasurement by Pulsing TDR and Probes,CRC.
- [33] Pierce, C.E., Bilaine, C., Huang, F.-C., and Dowding, C. H. (1994), “Effects of Multiple Crimps and Cable Length on Reflection Signatures from Long Cables,” Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining applications, Northwestern University Evanston, Illinons, Step 7-9, 1994, pp.540-554.
- [34] Pierce, C. E. (1998), “Time Domain Reflectometry Measurements of Localized Soil Deformation,” Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, USA.
- [35] Reese, L.C.,Handbook on Design of Piles and Drilled Shafts Under Lateral Load, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.(1983).
- [36] ShapeAccelArray sensor, (2007) : <http://www.measurand.com/>
- [37] Su, M.B. (1987), “Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry,”Ph.D. Dissertation, Northwestern Univ., Evanston,IL,112pp.
- [38] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P., (1980), “Electromagnetic Determination of Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry,” Water Resources

Research, Vol. 16, pp. 574-582.

- [39] Tektronix, Inc., (1997), 1502C Metallic Time-Domain Reflectometer Service Manual.
- [40] Tang, S.-H., Lin, C.-P., Lin, W.-C., and Chung, C.-C., (2007)
“Quantification of Cable Deformation with TDR: Implications to Localized shear deformation Monitoring,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (submitted)
- [41] Wilson, S.D. and Mikkelsen, P.E. (1978), Field Instrumentation. In Landslides: Analysis and Control -. Special Report 176. National Research Council: Washington, D.C., pp.112-138.
- [42] United States Patent : 6,696,974, (2000). “Cable device for detecting and monitoring rock and soil displacement”

