

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

TDR 錯動變形物理模型與資料分析改良

Improved Physical Model and Data Analysis for TDR Monitoring of Shear
Displacement

研究生：林文欽

指導教授：林志平 博士

中華民國九十六年七月

TDR 錯動變形物理模型與資料分析改良
Improved Physical Model and Data Analysis for TDR Monitoring of Shear
Displacement

研究生：林文欽

Student : Wen-Chin Lin

指導教授：林志平 博士

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 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

TDR 錯動變形物理模型與資料分析改良

研究生：林文欽

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

錯動變形監測可提供與邊坡安全性有關的重要訊息，尤其對於山勢陡峭，降雨湍急的台灣，更需發展有效的邊坡監測系統。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、一機多功與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，但材料互制之影響尚需進一步探討。

本研究將著重於材料互制之探討，於實驗室建立一套與現地邊界條件極相近之物理模型：大型直剪儀，據以了解纜線-灌漿材料-外填土壤複合材料受剪後 TDR 反射訊號與剪力盒位移量之關係，據以了解如何提昇感測靈敏度及量化分析之可行性。利用大型直剪儀研究結果提出 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，透過訊號處理方法提昇 TDR 波形辨識度，提早偵測滑動，並以監測實務常用警戒值概念建立一門檻值，當 TDR 波形超過警戒門檻值，可據以調整監測頻率，進行後續較密集的觀測。

本研究充分探討不同纜線、灌漿配比與不同勁度外填材料組合下 TDR 纜線受剪反應，結果顯示較適用於軟弱土壤監測之纜線種類為外導體為網狀(braided cable)的 RG-8 纜線型，其外層橡膠包覆能防止纜線受蝕破壞，相對較軟的外導體可較早察得滑動，重要的是在不同勁度外填材料下仍有極相似的靈敏度，即纜線初始剪動後相對變形可被量化，將有助於簡化現地應用難度。另外，TDR 反射訊號經訊號處理去雜訊後，可至少提早約 2mm 察得滑動，利用不同纜線試驗結果，初步訂出可供實務應用參考的警戒門檻值。

關鍵字：時域反射法(TDR)、大型直剪儀、地層位移、小波分析

Improvement on Slip Displacement Physical Model and Data Analysis Using TDR

Student : Wen-Chin Lin

Advisor : Chih-Ping Lin Ph.D

Abstract

Time domain reflectometry (TDR) technology has become a valuable tool for detecting displacements and locating shear planes in rock or soil slopes. It is 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. Early detection of localized shear deformation in soft soils and quantifying the shear displacement using TDR remains a challenging work. 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 electromagnetic theory, the effects of soil-grout-cable interaction and shear bandwidth needs further studies. The objective of this study is to develop a physical model that mimics the field condition such that the effect of soil-grout-cable interaction can be experimentally investigated. The physical model mainly consists of a large direct shear device to avoid boundary effects in radial and axial directions and a loading system that applies overburden and shear force. Different combinations of soil, grout, and cable form soil-grout-cable composites inside the shear box. The effect of soil-grout-interaction on the TDR response is experimentally investigated with emphasis on how to enhance the sensitivity to shear displacement and quantify the shear displacement from TDR response. In addition, a post signal processing technique is proposed to expedite and automate detection of shear displacement. The results show that, while the solid-outer-conductor cable (e.g. P3-500) is suitable for monitoring in rocks, a braided cable (e.g. RG-8) is desired in soils for early detection of localized shear displacement. Furthermore, the relationship between the reflection magnitude and shear displacement in a RG-8 cable is relatively independent of the soil stiffness, suggesting the possibility of quantifying shear displacement after it is detected. The experimental results show that the grout, although stiffer than the surrounding soil, does not “protect” the cable from deformity. A stiff brittle grout can be used for all soil conditions. The proposed signal processing technique allows detection of shear displacement at least 2 mm earlier than visual inspection. A shearband device is suggested to be added to the shear box in future study.

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

誌謝

本論文得以順利完成，首先感謝恩師 林志平教授平日對我的教導與提攜，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，承蒙成功大學土木工程學系 李德河教授、吳建宏教授、中興大學土木工程學系 蘇苗彬教授與台北科技大學土木工程學系 陳水龍教授，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(老大)、士弘(阿湯哥)、志忠、瑛鈞、俊宏、和翰、育嘉與仁弘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，奕全、浚昇、瑋晉、岳勳，於生活上與研究上之照料及幫忙；此外，感謝大地組的同伴們與曾經幫助過我的人，因為有你們，使得我人生旅途中，增添許多色彩，在此致上最真誠的謝意。

最後，感謝我的父母及奶奶對我的養育之恩，姐姐與哥哥平時對我的照顧及女友婉怡這六年來一直陪伴著我、鼓勵我，僅將此論文獻給我最敬愛的家人與女友。

林文欽 謹誌 2007年7月

目錄

中文摘要.....	i
Abstract	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	ix
照片目錄.....	xi
符號說明表.....	xii
第一章 前言.....	1
1.1. 研究動機.....	1
1.2. 研究目的.....	2
1.3. 研究架構.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
2.1. 地層位移量測方法.....	5
2.1.1. 測傾管.....	5
2.1.2. 管式應變計(Pipe Strain Gauge).....	8
2.1.3. FBG 節理式偏斜儀.....	8
2.1.4. ShapeAccelArray 感測器.....	10
2.2. TDR 錯動變形量測系統.....	11
2.2.1. TDR 基本原理.....	11
2.2.2. TDR 於地工監測之應用.....	14
2.2.3. TDR 錯動變形量測原理.....	15
2.2.4. TDR 錯動變形量化分析現存問題.....	18

2.2.5. 提早偵測 TDR 錯動變形之訊號處理	37
2.3. 既有地層位移量測與 TDR 之綜合比較	39
第三章 研究方法與試驗規劃	41
3.1. TDR 錯動變形物理模型與因子探討	41
3.1.1. 物理模型:大型直剪儀	42
3.1.2. 試體製作	54
3.1.3. 試驗方法	56
3.1.4. 試驗控制因子	56
3.2. 提早偵測 TDR 錯動變形訊號處理方法	62
第四章 試驗結果與討論	64
4.1. 錯動變形試驗影響因子探討	64
4.1.1. 傳輸纜線受剪特性	66
4.1.2. 灌漿材料之順應性	71
4.1.3. 不同勁度外填材料之影響	76
4.2. 訊號處理用於提早偵測變形之成效	81
4.3. TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析初步建議	87
第五章 結論與建議	90
5.1. 結論	90
5.2. 建議	92
參考文獻	94

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	4
圖 2.1 測傾管及量測設備照片(Green and Mikkelsen, 1988)	6
圖 2.2 測傾管安裝及原理示意圖(Dunnicliff, 1988)	6
圖 2.3 孔內傾斜儀構造與現地配置圖(Wilson and Mikkelsen, 1978)	7
圖 2.4 管式應變計構造與現地配置圖(陳水龍, 1993).....	8
圖 2.5 FBG 偏斜儀現地安裝示意圖(陳至揚, 2001).....	9
圖 2.6 ShapeAccelArray 地層錯動感測器(from Measurand Inc., 2007)	10
圖 2.7 時域反射法之設備(盧吉勇, 2004).....	12
圖 2.8 不同之阻抗不連續所產生之反射波形(Adrews, 1994)	13
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 反射係數隨長度增加而減小(Kim, 1989).....	19
圖 2.13 對應四種變形量, 反射係數隨長度增加而減小	20
(Pierce et al., 1994)	20
圖 2.14 現地量測與波傳模擬結果比較圖.....	21
(Dowding et al., 2002)	21
圖 2.15 延長線長度 2m 與 47m 之原始波形比較	22
(盧吉勇, 2003)	22
圖 2.16 不同 RG58AU 延長線長度之剪位移與反射係數之關係	23
(崔志龍, 2004)	23
圖 2.17 不同長度 CommScope 電纜之剪位移與反射係數之關係	

.....	23
(崔志龍, 2004).....	23
圖 2. 18 完整 TDR 波傳模型(a)10m 長延長線(b) 30m 長延長線.....	24
(Lin and Tang, 2006).....	24
圖 2. 19 衰減比率法與傳統方法比較 (Lin and Tang, 2006).....	25
圖 2. 20 原始 $\delta - \rho_{\text{peak}}(L)$ 關係與修正後之結果.....	25
(Lin and Tang, 2006).....	25
圖 2. 21 單向度剪力試驗配置圖(Dowding et al., 1989).....	26
圖 2. 22 剪力位移與反射係數關係圖(Dowding et al., 1989).....	27
圖 2. 23 不同纜線直徑之剪力位移與反射係數關係圖.....	28
(Dowding et al., 1989).....	28
圖 2. 24 雙環剪設備(Blackburn and Dowding, 2004).....	29
圖 2. 25 纜線-灌漿材-土壤複合材料之有限元素模型.....	30
(Blackburn and Dowding, 2004).....	30
圖 2. 26 有限元素分析雙環剪試驗結果(Blackburn and Dowding, 2004).....	30
圖 2. 27 單向度雙剪設備(Chen et al., 2004).....	31
圖 2. 28 相對位移與反射係數關係圖(Chen et al., 2004).....	31
圖 2. 29 剪力設備示意圖(Lin and Tang, 2006).....	32
圖 2. 30 不同外填材料之側向位移與反射係數關係圖.....	33
(Lin and Tang, 2006).....	33
圖 2. 31 不同剪力帶寬度之側向位移與反射係數關係圖.....	33
(Lin and Tang, 2006).....	34
圖 2. 32 反射訊號受剪力帶寬度影響(O'Connor, 1991).....	34
圖 2. 33 剪力環設備(盧吉勇, 2003).....	35
圖 2. 34 固定材質, 不同剪力帶寬度之 $\delta - \rho_{\text{peak}}$ 關係(盧吉勇, 2003)	

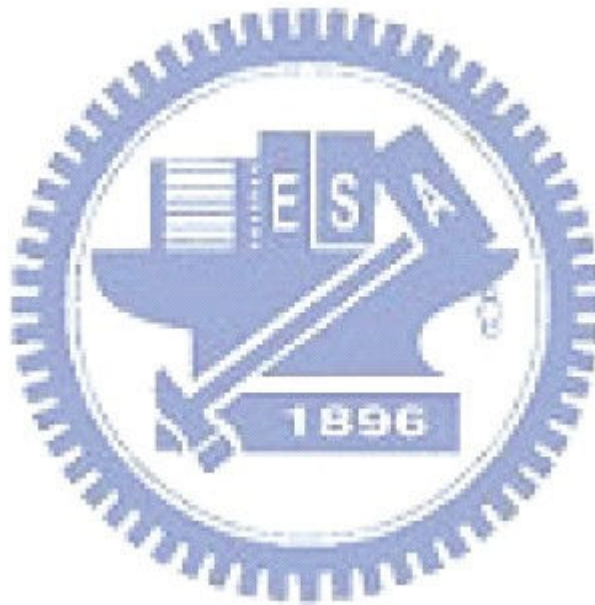
.....	35
圖 2. 35 預留寬度(W=3cm)剪動情形(楊清良, 2004).....	36
圖 2. 36 預留寬度為 3cm 受剪時呈雙峰狀之波形圖(楊清良, 2004)	36
圖 2. 37 經訊號處理後之深度與反射係數關係圖	38
(Farrington, S. P. et al., 2006)	38
圖 2. 38 門檻值概念圖(Farrington, S. P. et al., 2006).....	38
圖 3. 1 模擬現地邊界條件概念示意圖(Modify from Lin and Tang, 2006).....	42
圖 3. 2 大型直剪儀設計架構圖.....	43
圖 3. 3 大型直剪儀各元件示意圖.....	43
圖 3. 4 考慮纜線受剪長度之影響.....	44
圖 3. 6 剪力盒所考慮影響範圍示意圖.....	46
圖 3. 7 剪力盒尺寸設計詳圖.....	46
圖 3. 8 Tektronix 1502C (a)實體照片(b)操作介面說明	48
(摘自 Tektronix 1502C Service Manual).....	48
圖 3. 9 P3 系列同軸纜線剖面示意圖(摘自 CommScope User Manual)	51
圖 3. 10 土壤種類粒徑分佈曲線.....	55
圖 3. 11 試驗規劃.....	58
圖 4. 1 不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線.....	65
圖 4. 2 不同試驗條件下之反射係數-水平位移曲線.....	65
圖 4. 3 不同纜線試驗之剪應力-水平位移曲線.....	66
圖 4. 4 不同纜線受剪之反射波形.....	68
圖 4. 5 不同纜線與灌漿材於渥太華砂之靈敏度	70
圖 4. 6 灌漿材料順應性試驗之剪應力-水平位移曲線.....	72

圖 4.7 灌漿材料順應性試驗之反射波形.....	73
圖 4.8 灌漿材料順應性試驗之靈敏度.....	74
圖 4.9 QR-320 型纜線之內導體受拉而產生頸縮.....	76
圖 4.10 不同外填材料試驗之剪應力-水平位移曲線.....	77
圖 4.11 同一纜線於不同勁度外填材料下之反射波形.....	79
圖 4.12 纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度.....	81
圖 4.13 原始波形與去雜訊效果比較.....	82
圖 4.14 Threshold 之選擇.....	82
圖 4.15 Mode 與 level 之選擇.....	83
圖 4.17 RG-8 纜線， $\delta_D=9\text{mm}$	84
圖 4.18 RG-8 纜線， $\delta_D=12\text{mm}$	85
圖 4.19 P3-500 Unshielded 纜線， $\delta_D=39\text{mm}$	86
圖 4.20 P3-500 Unshielded 纜線， $\delta_D=43\text{mm}$	86
圖 4.21 TDR 錯動變形監測之標準程序.....	88

表目錄

表 2.1 不同配比之水泥砂漿中與直剪試驗中纜線剪切試驗特性 (Chen, et al., 2004).....	32
表 2.2 傳統與新興之錯動監測儀器比較.....	40
表 3.1 二段式油壓千斤頂基本資料.....	47
表 3.2 Load cell 規格表.....	49
表 3.3 位移計規格表.....	49
表 3.4 顯示器規格特性表.....	50
表 3.5 外填材料基本物理性質.....	55
表 3.6 不同纜線之種類特性.....	59

表 4.1 不同纜線於相同外填材料與水泥配比下之反應特性比較 67
表 4.2 不同灌漿材料順應性下，相同纜線之反應特性比較 75
表 4.3 不同外填材料勁度下，相同纜線之反應特性比較 78



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).....	52
照片 3. 2 大型直剪儀元件說明.....	53
照片 3. 3 (a)水泥-纜線複合材料製作過程(b)水泥養護過程.....	54
照片 3. 4 (a) 常使用於邊坡監測之纜線(Dowding, 2004) (b)本研究 使用之類同軸纜線.....	60
照片 4. 1 不同纜線-灌漿材之變形模式.....	69
照片 4. 2 灌漿材料順應性試驗之變形模式.....	73
照片 4. 3 同一纜線於不同勁度外填材料下之變形模式.....	80



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
G_1	: 灌漿材料配比为 1:1
G_n	: 無灌漿材料
M_1	: 外填材料為渥太華砂
M_2	: 外填材料為細礫石
C_1	: 圍壓應力 = 285.21 kN/m ²
C_2	: 圍壓應力 = 142.6 kN/m ²
m_0	: Daubechies Wavelets
ϕ	: 小波函數

- N : 小波函數中之零慣量數目
- σ : 訊號標準差
- λ : 門檻值
- m : 小波係數絕對偏差之中位數
- n : 訊號長度
- 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

台灣位處地震頻繁地區且多颱風、降雨強度大，山脈佔總面積 70%，地形陡峭、地質條件錯綜複雜，然而具有經濟價值的山坡地常過度開墾，甚至濫墾濫伐，使得近年來，常發生豪雨而造成山崩、地滑等災害。例如民國八十六年期間，汐止林肯大郡山地區山坡地滑動，造成樓房衝毀、倒塌的重大災變。如何有效防止地滑發生並即時監測滑動，將災害損傷減到最低是值得研究的方向。

1.1. 研究動機

現有地層移動監測方法甚多，例如傳統的測傾儀(Inclinometer Probe,IP)、孔內傾斜儀(In-Place-Inclinometer,IPI)等，然而所採用感測器常以昂貴電子元件組成，往往因現地環境潮濕、溫度變化而影響儀器精度與耐久性。傳統測傾儀垂直解析度受限於儀測長度(gauge length)，垂直解析度較差而無法量測薄層剪動。再者，傳統儀器常需仰賴人工量測，無法進行自動化監測與提供即時監測資料，延緩減災所需黃金時間。

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，因此較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。

TDR 錯動變形量測系統於監測岩石邊坡滑動已有相當成效，可準確偵測得錯動位置[16][17]。然而應用於軟弱土壤時，存在地層土壤-纜線-灌漿三者之材料互制行為，使得埋設於軟弱土坡纜線不靈敏於外在滑動[32]。此外，當地層中存在有剪力弱帶時，亦不易有效地將外在滑動傳遞於 TDR 纜線，致使 TDR 變形量化上存在困難。本研究將設計更符合現地滑動條件之物理模型：室內大型直剪儀，探討 TDR 反射訊號與錯動變形量間之關係。

1.2. 研究目的

台灣存在諸多軟弱土壤地質邊坡，文獻中關於室內模擬錯動變形試驗往往與現地條件存在差距。例如直接剪動纜線[7][30]，只能得到纜線本身靈敏度，與埋置於邊坡上的纜線變形機制有所不同。以纜線外填石膏(或水泥)包覆試體去模擬纜線-灌漿互制行為[8]，是否與軟弱土壤-灌漿-纜線受剪時之機制相同，仍有待商榷。此外，儀器邊界所引致的邊界效應亦可能影響過去文獻的試驗代表性[31]。過去文獻中，也未有何種纜線或灌漿材料較適用於軟弱土壤邊坡的具體建議。

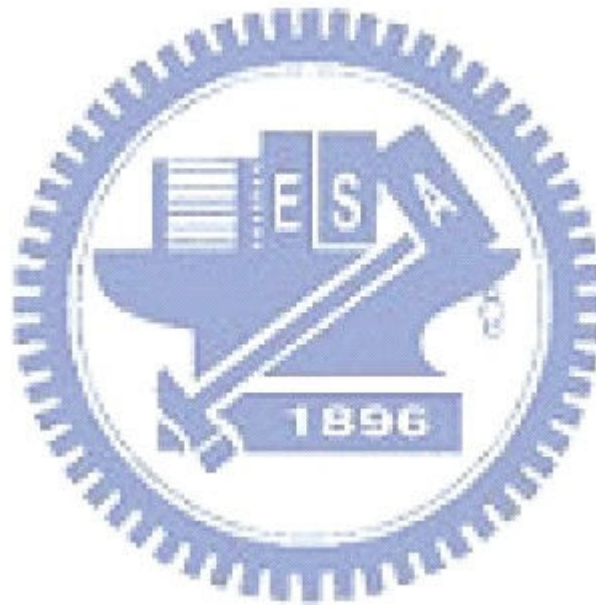
有鑑於此，本研究將設計尺寸足夠大，更符合現地剪動條件之物理模型：室內大型直剪儀，避免直剪盒邊界所造成影響，藉以釐清上述問題，其主要探討內容如下：

1. 試驗現地常用纜線，探討不同纜線於軟弱土壤的靈敏度，提供現地安裝選擇的依據。
2. 探討灌漿材料是否可更有效將外力傳遞至纜線。
3. 探討纜線種類與灌漿配比固定下，利用圍壓設備模擬不同勁度外填材料下靈敏度。
4. 並藉由訊號處理，增益 TDR 反射訊號辨識度，提早察覺變形。

1.3. 研究架構

本研究流程如圖 1.1 所示，研究架構內容如下：

1. 文獻回顧既有監測地層錯動變形儀器優劣與限制。
2. 問題定義目前 TDR 錯動變形監測於實務應用不足點，及影響因子。
3. 建立尺寸足夠大，更符合現地剪動條件之物理模型：室內大型直剪儀，避免直剪盒邊界所造成影響，探討 TDR 反射訊號與錯動量關係。
4. 藉由大型直剪儀試驗成果，提出適用於現地之纜線種類與灌漿配比，並建立適用於現地安裝之標準程序。
5. 利用訊號處理方法提高反射波形之辨識變形發生能力，並以門檻值概念提供實務應用警戒值訂定的參考。



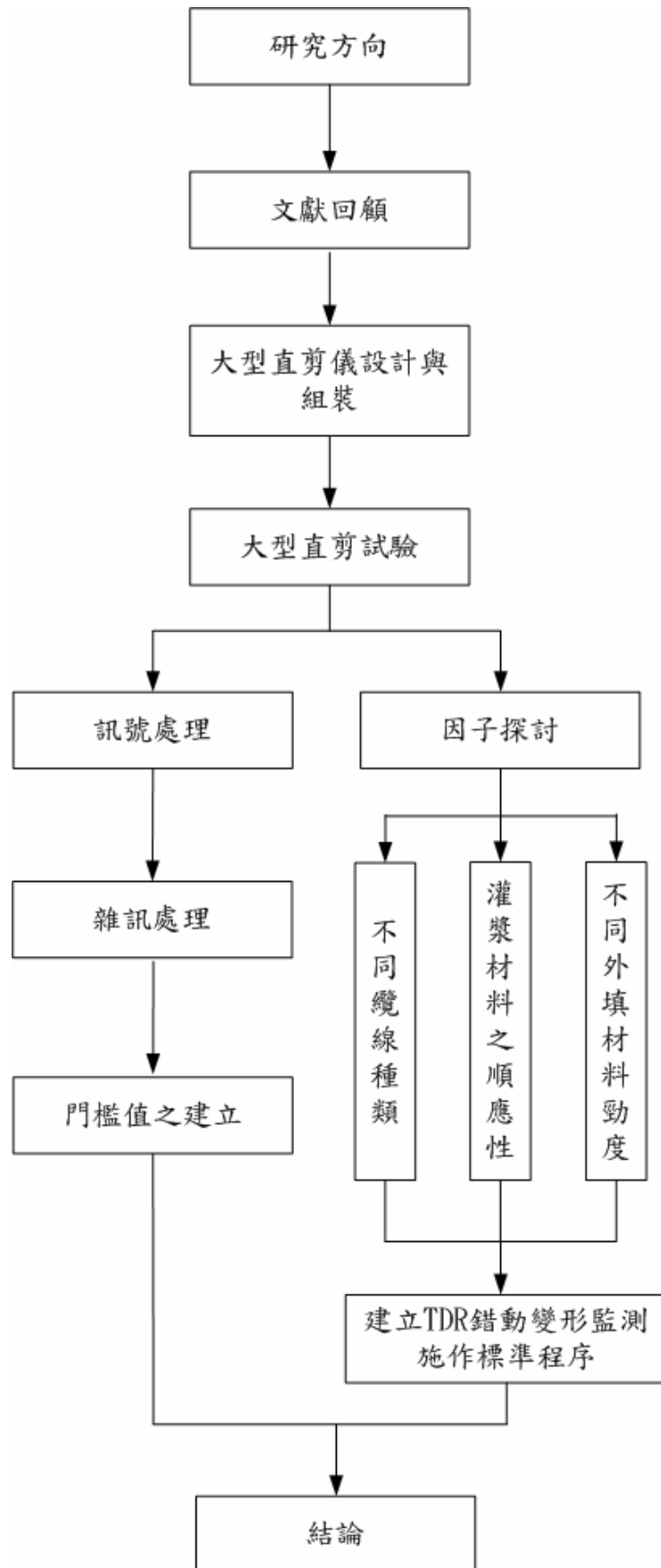


圖 1.1 研究流程圖

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[1]。

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。

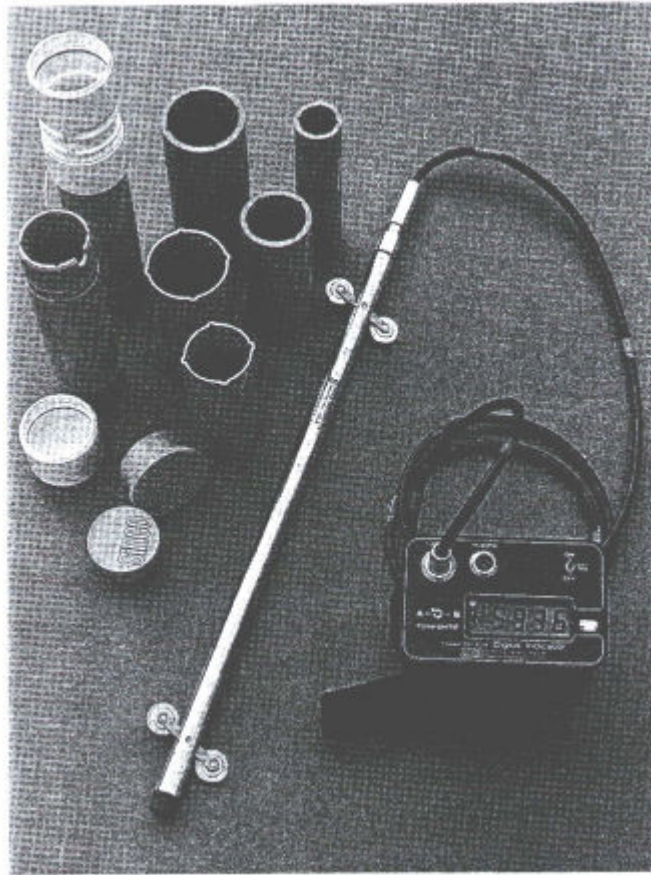


圖 2.1 測傾管及量測設備照片(Green and Mikkelsen, 1988)

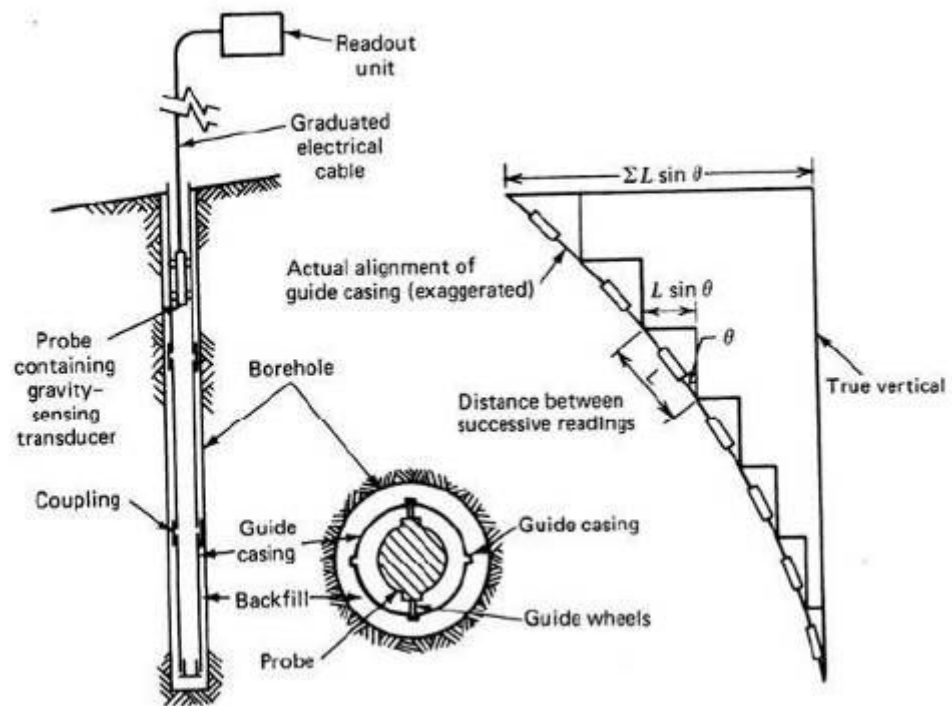


圖 2.2 測傾管安裝及原理示意圖(Dunnicliff, 1988)

(2)孔內定置型測傾儀：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 所示，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[1]。

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。

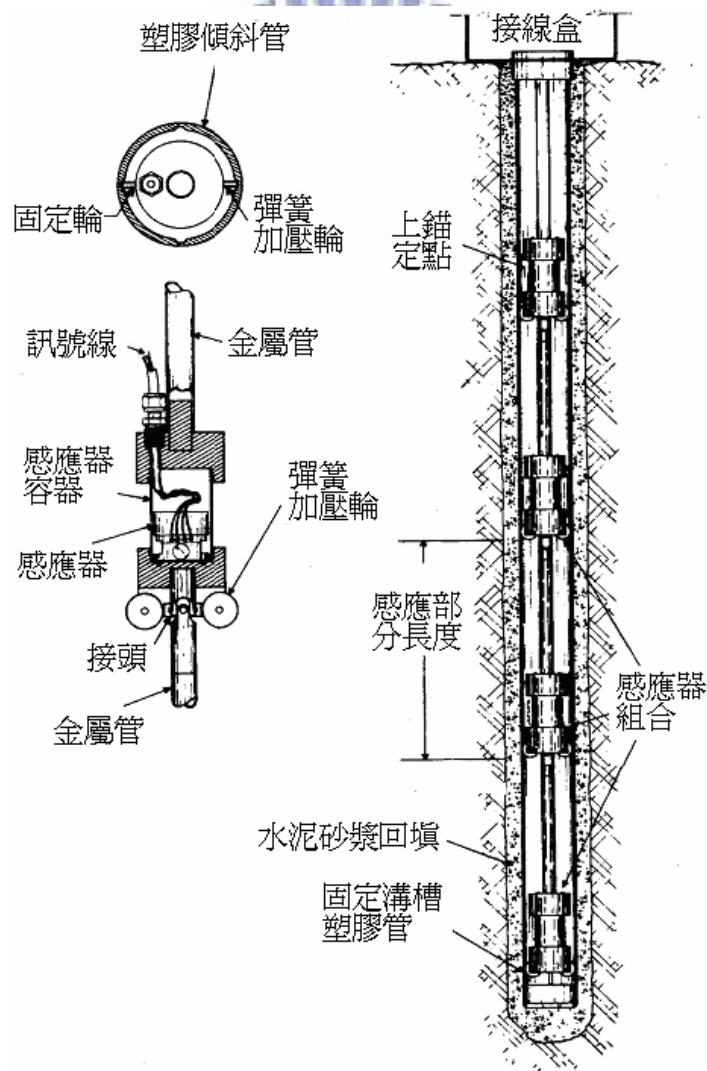


圖 2.3 孔內傾斜儀構造與現地配置圖(Wilson and Mikkelsen, 1978)

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[2]。

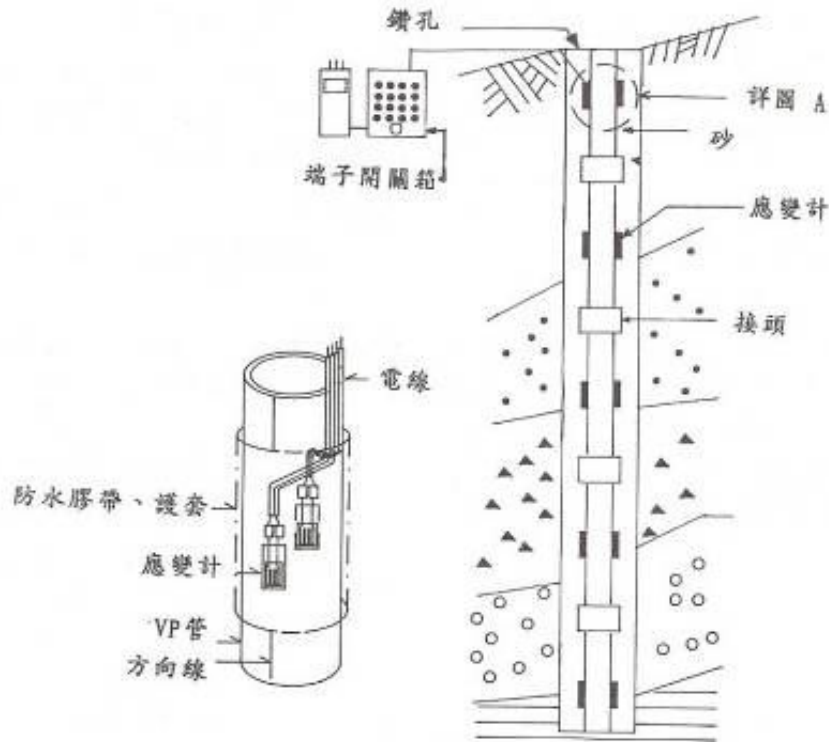


圖 2.4 管式應變計構造與現地配置圖(陳水龍，1993)

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[2])，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

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[3]。

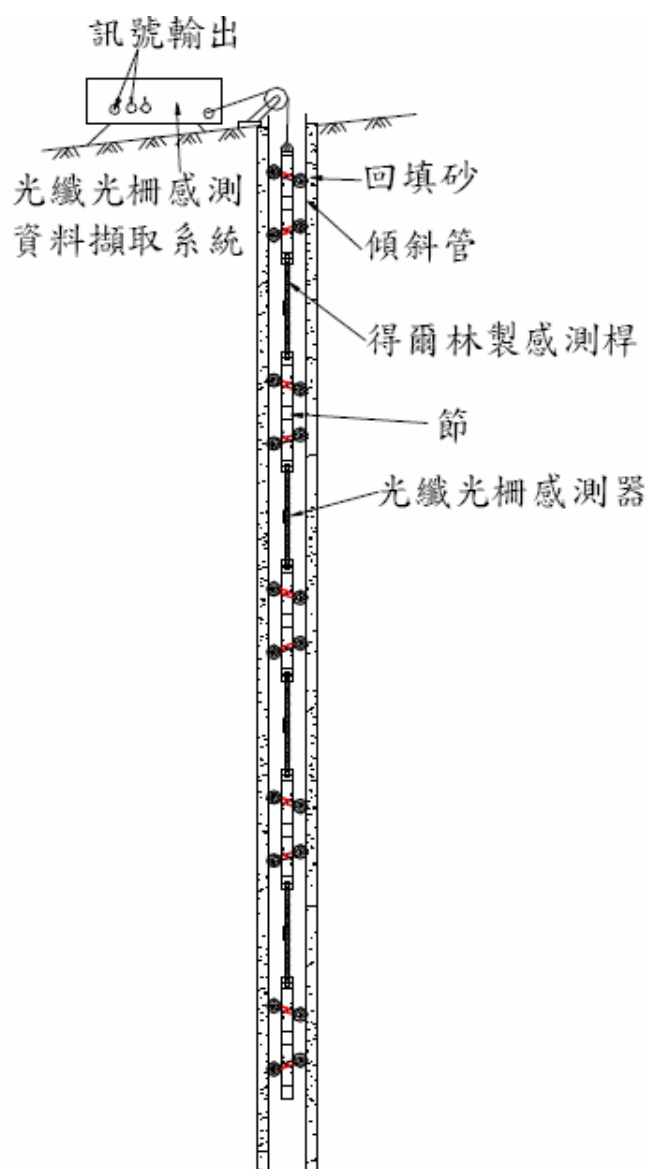


圖 2.5 FBG 偏斜儀現地安裝示意圖(陳至揚，2001)

2.1.4. ShapeAccelArray 感測器

ShapeAccelArray 是由 Canada Measurand 公司以微機電技術(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。

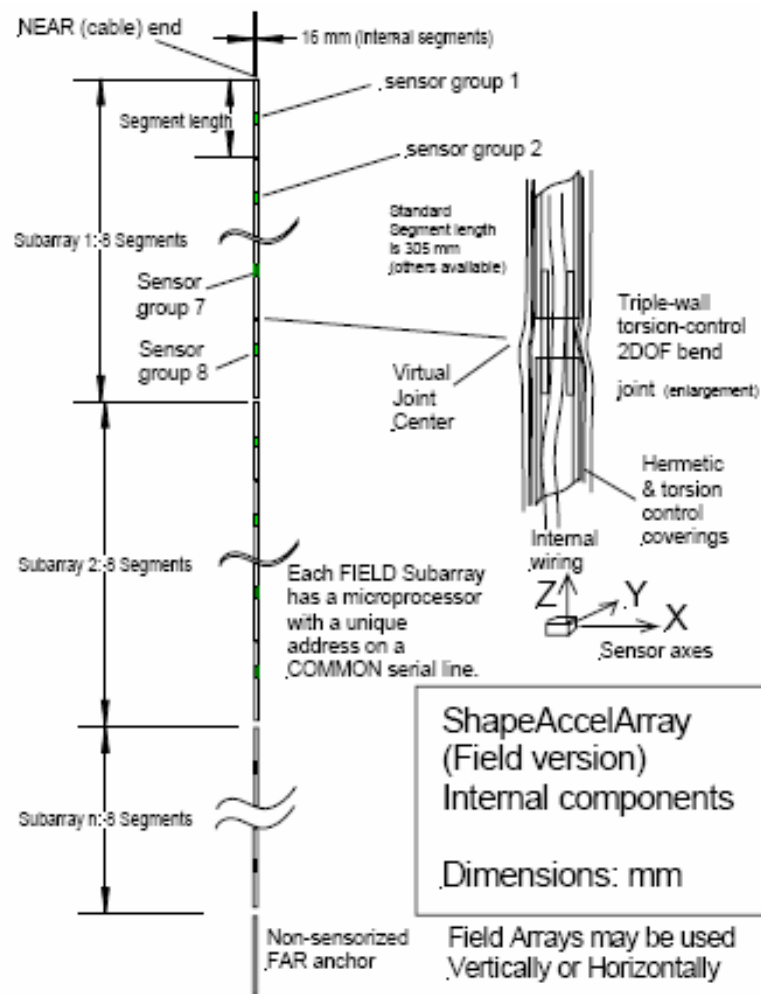


圖 2. 6 ShapeAccelArray 地層錯動感測器(from Measurand Inc., 2007)

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，Shape AccelArray 為最新發展的產品[38]，其現地的表現仍有待進一步驗證。

2.2. TDR 錯動變形量測系統

時域反射 (Time Domain Reflectometry, TDR) 錯動變形量測系統具備位連續性監測、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，空間解析度較差且當地層發生薄層滑動時。TDR 錯動變形感測器經過灌漿與周圍土壤結為一體，當地層滑動時，TDR 感測器因幾何改變(即阻抗不連續)進而由反射波形求得地層錯動變形位置與位移量。對於邊坡滑動監測方面極具發展潛力。

2.2.1. 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[8]。

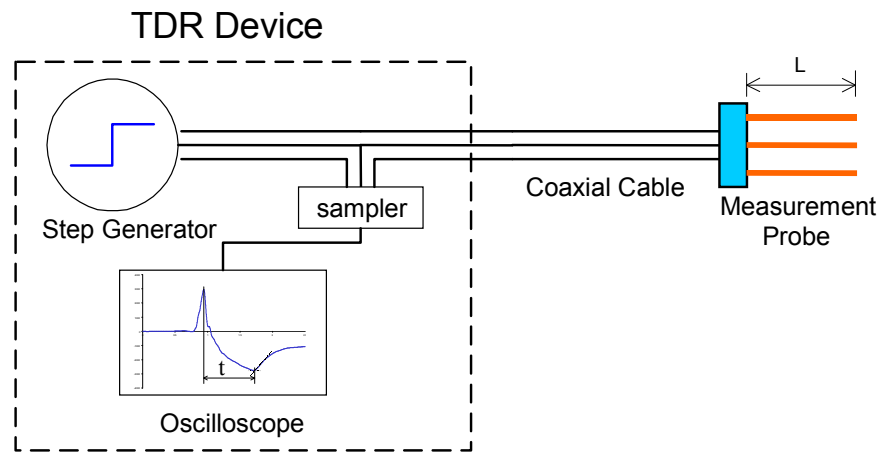


圖 2.7 時域反射法之設備(盧吉勇，2004)

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[8]。

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) [28]。

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

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

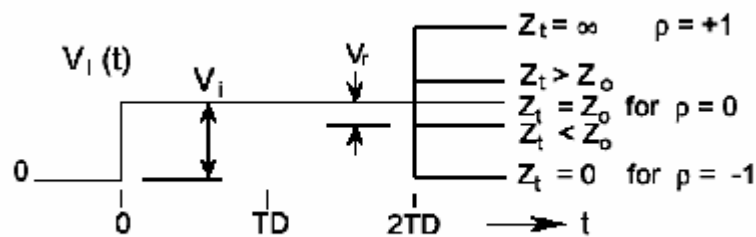


圖 2. 8 不同之阻抗不連續所產生之反射波形(Addrews, 1994)

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 $Z_i < Z_0$ 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)[9][23]。

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。

2.2.2. TDR 於土工監測之應用

TDR 於土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)。

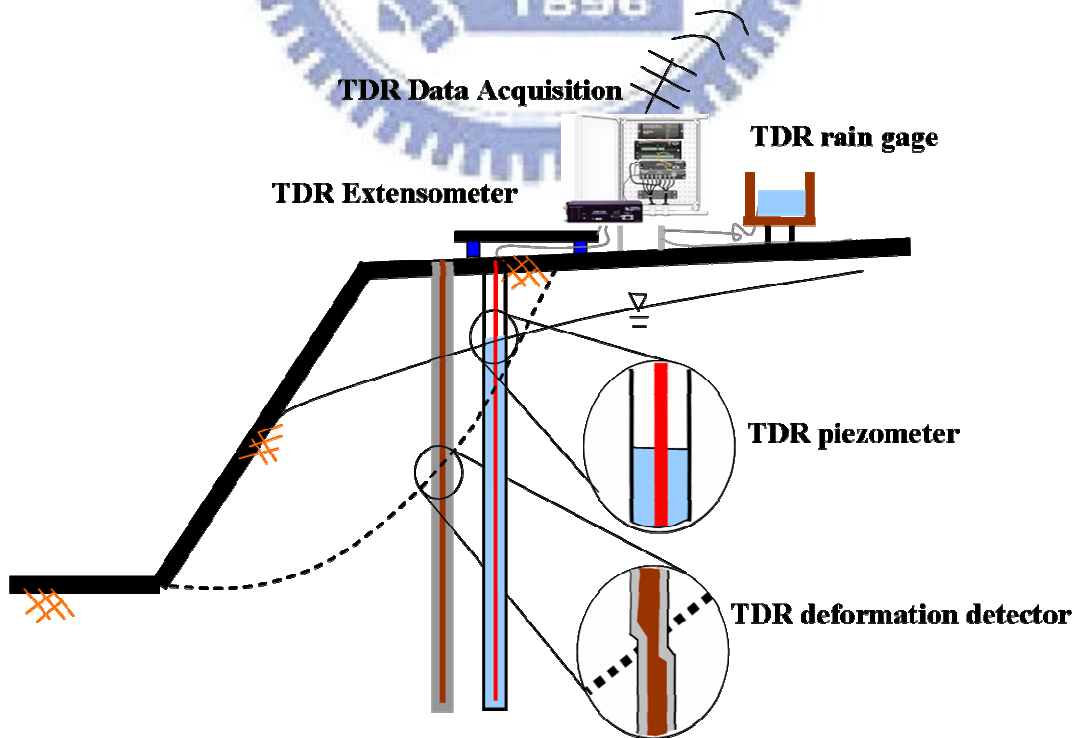


圖 2.9 TDR 於大地工程監測之應用(Lin and Tang, 2006)

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)[39]。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)[20]。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)[27]。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)[40]。

本研究將聚焦於變形型應用於錯動變形的探討。

2.2.3. TDR 錯動變形量測原理

上述 TDR 量測系統與傳輸纜線的原理中得知，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)[39][16][17]。

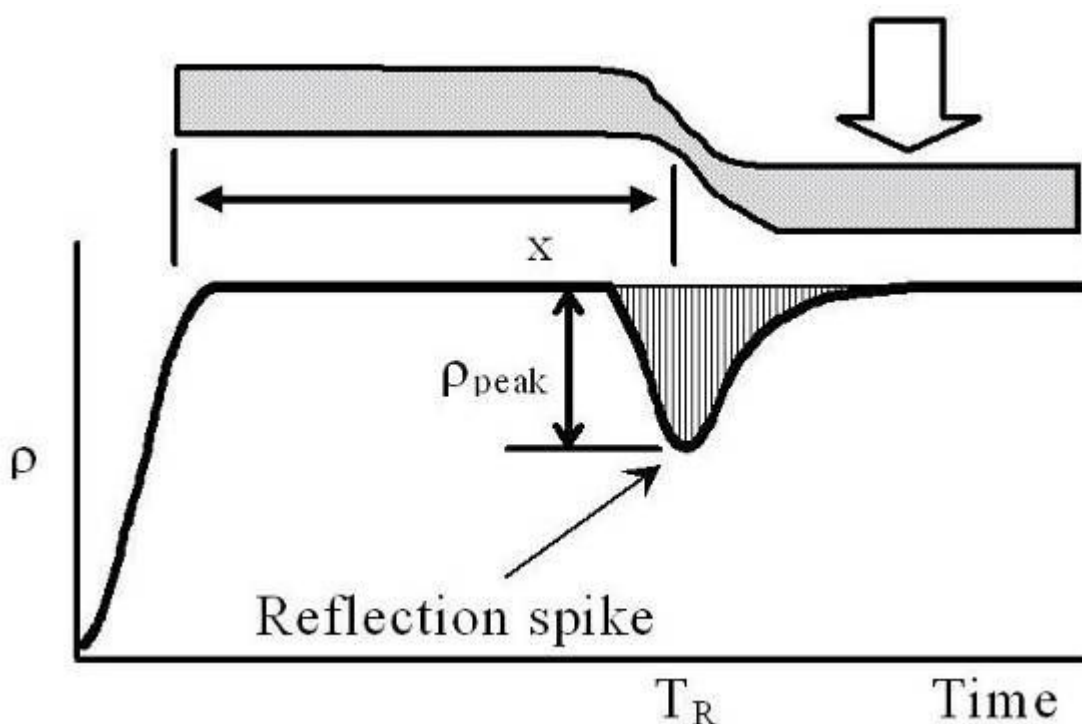


圖 2. 10 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006)

$$x = V_p \frac{T_R}{2} \dots\dots\dots(2-5)$$

$$\delta = (\rho_{\text{peak}}/S) + \delta_0 \dots\dots\dots(2-6)$$

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、受張等情況使同軸纜線產生缺陷(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。

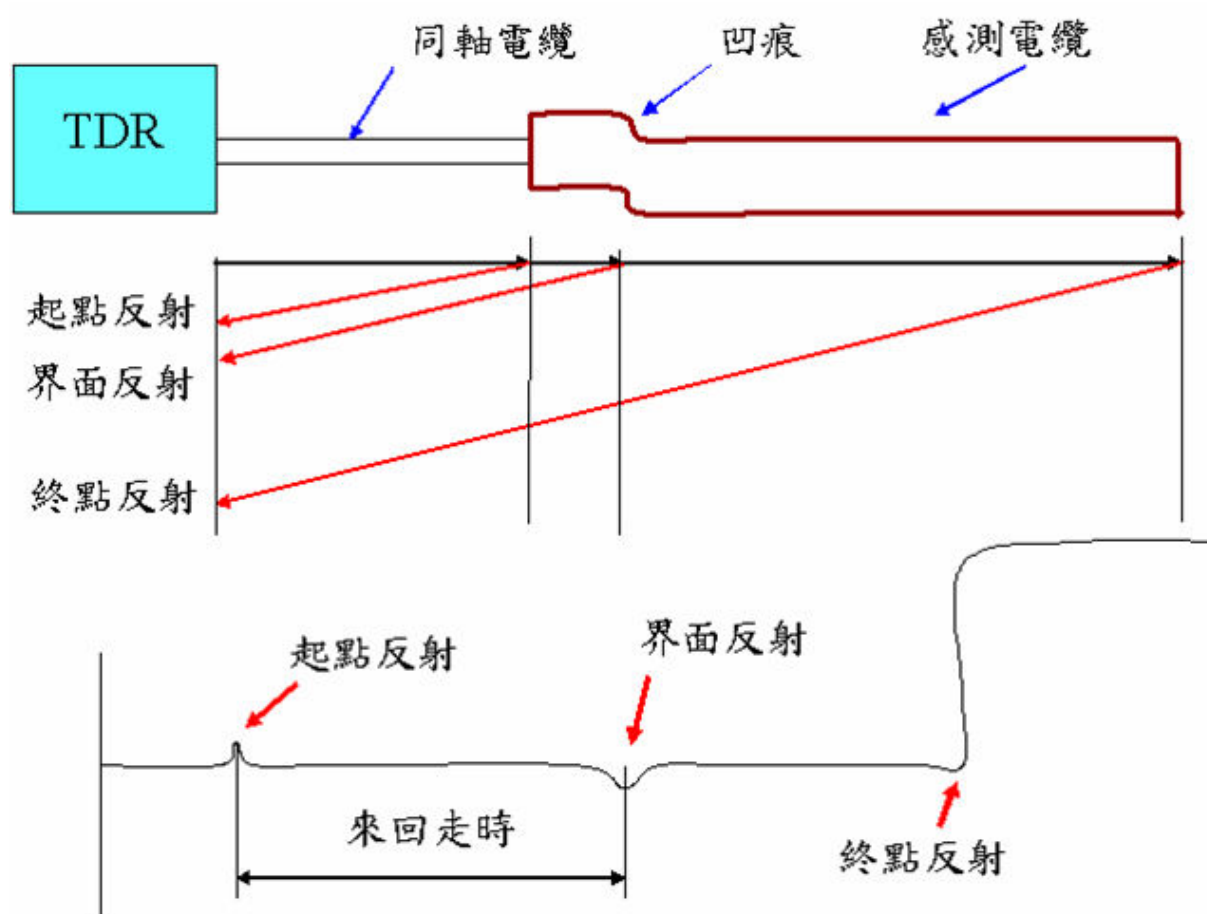


圖 2.11 TDR 變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇，2003)

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[8]。

在 TDR 量測軟弱土壤變位時，需重視周遭澆置薄水泥漿之特質與順應性。纜線之設計旨在量測土壤之變形，而薄水泥漿所扮演的角色係固定纜線並將土壤之變形傳遞至纜線上，因此在選用纜線周遭的澆置材料時，澆置材料的強度與勁度應儘量與土壤相當(Pierce, 1998；Cole, 1999；Dowding et al., 2001)[35][13][21]。若材料之強度與勁度小於土壤之強度與勁度，則此材料將吸收一小部分之變形；反之，若材料強度、勁度大於土壤，則所測得的變形，不全然反應真實的土壤應變。尤其於軟弱土壤中，纜線-灌漿材料-現地材料之間的互制行為相當複雜，應進一步研究，以利對於現地量測資料的判讀。

2.2.4. TDR 錯動變形量化分析現存問題

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)[16][17]，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。然而，目前應用於現地變形監測仍存在許多問題，如纜線長度影響反射訊號之衰減(纜線電阻)與變形量之量化(即材料互制及剪力弱帶)等。將以往學者對於有關 TDR 量化之研究整理如下：

(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，因此許多學者致力於此方面的研究，其分述如下：

Kim (1989)以相同直徑不同長度之纜線進行剪力試驗，試驗結果如圖

2. 12 所示，於相同剪力位移量下，隨著纜線長度增加，反射係數漸減的現象[30]。

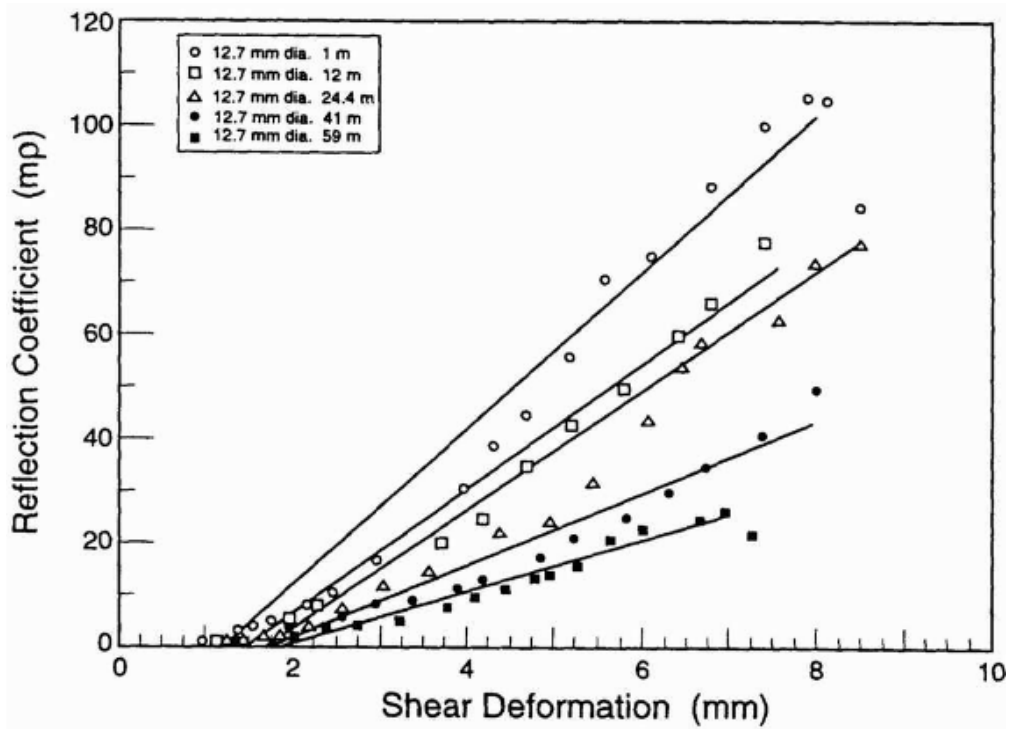


圖 2. 12 反射係數隨長度增加而減小(Kim, 1989)

Pierce et al. (1994) 以單剪設備進行纜線的剪切試驗，試圖探討反射訊號與纜線長度之關係。實驗以直徑 22.2 mm，外導體為鋁製的同軸纜線(P-3 75-875CA 型)，並以不同長度(3 至 530 m)之纜線對應不同剪切位移量(5.1 mm、7.6 mm、10.2 mm 及 12.7 mm)建立纜線長度與反射係數之關係。如圖 2. 13 所示，於相同剪力位移量下，反射係數隨纜線長度增加而衰減[35]。

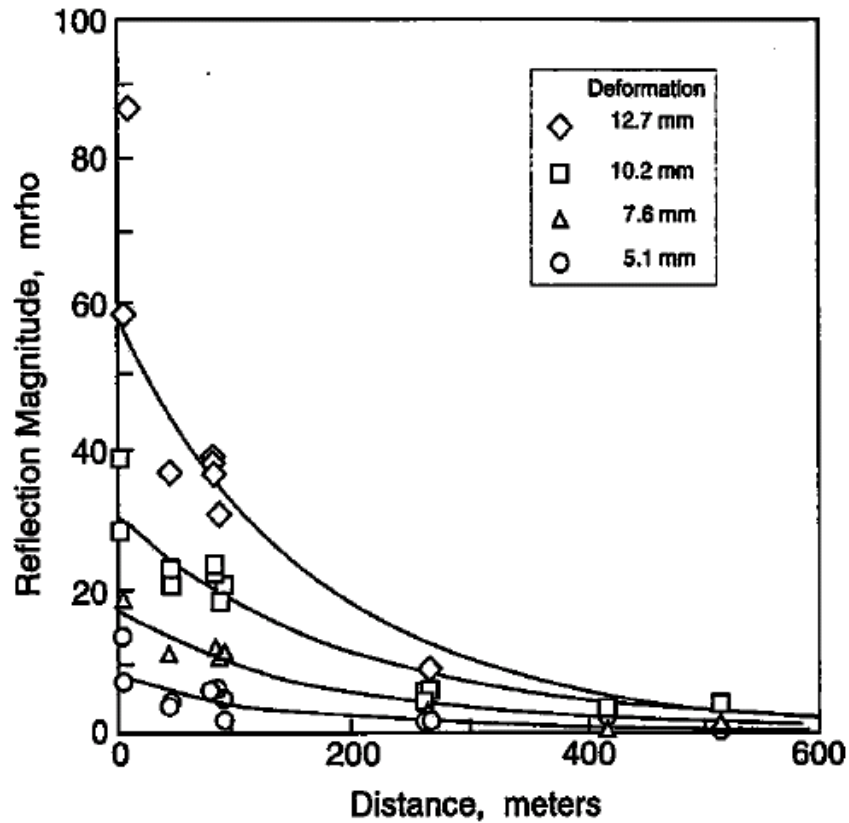


圖 2.13 對應四種變形量，反射係數隨長度增加而減小
(Pierce et al., 1994)

Dowding et al. (2002) 提出考慮纜線電阻影響的波傳模型，此模型於時間域以有限差分法計算波傳行為，此模型計算費時且該模型僅考慮電阻對於訊號衰減的影響，並未考慮電阻造成之相位干擾，其模擬反射訊號尖峰大小與量測值相較之下，仍存在相當誤差 (如圖 2.14 所示) [22]。

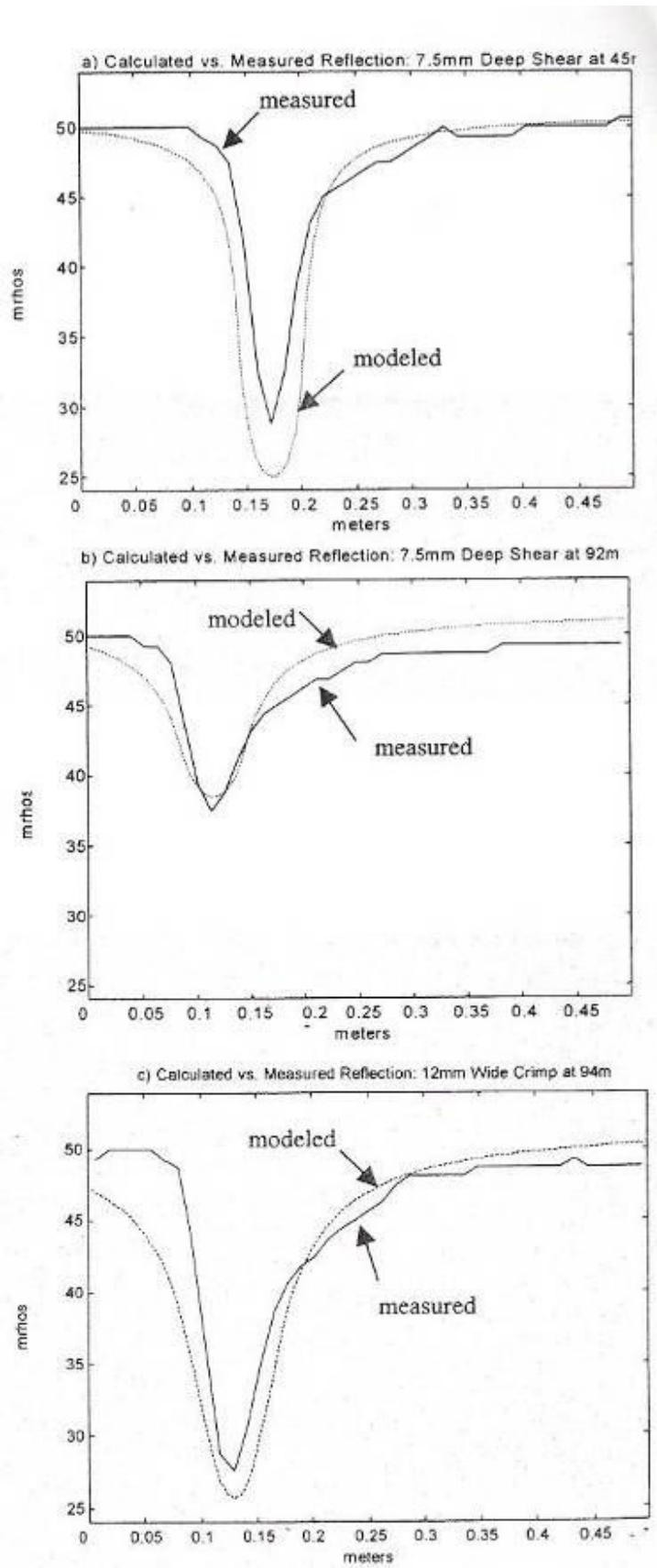


圖 2.14 現地量測與波傳模擬結果比較圖
(Dowding et al., 2002)

盧吉勇(2003) 以延長線長度 2 m 與 47 m 進行剪力試驗，試驗結果如圖 2.15 所示，於相同剪力位移量(20 mm)下，2 m 延長線的反射係數尖值(ρ_{peak}) 約為 47 m 延長線的 10 倍[8]。

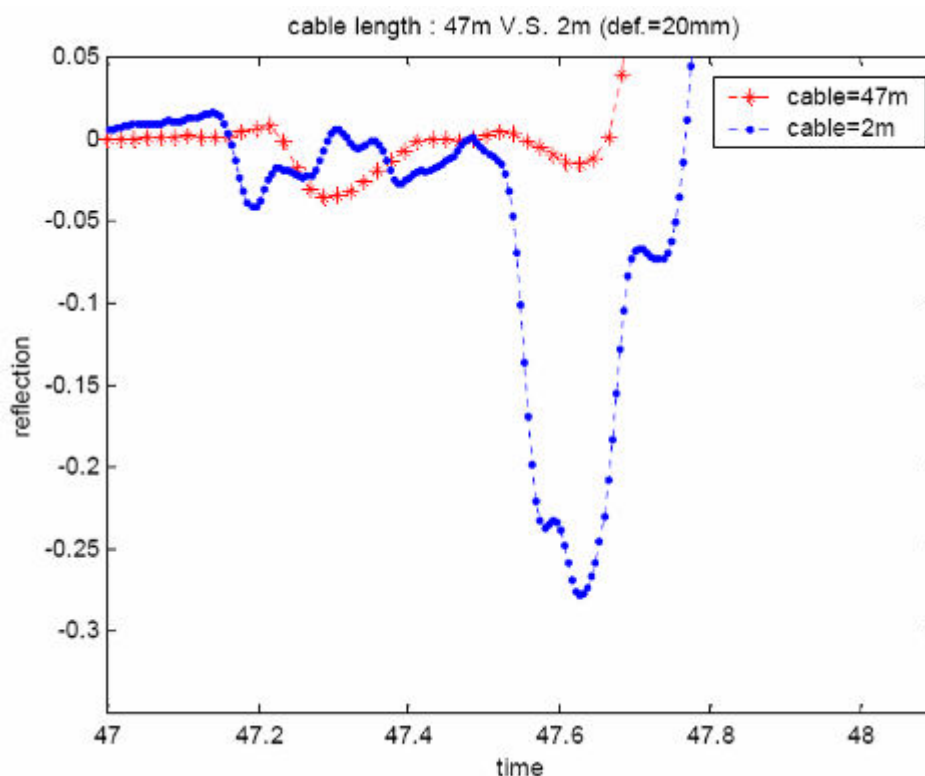


圖 2.15 延長線長度 2m 與 47m 之原始波形比較
(盧吉勇，2003)

崔志龍(2004) 分別以 RG58AU 及 CommScope 型之不等長延長線進行直剪試驗，結果(如圖 2.16 及圖 2.17)指出：於相同變化下，兩種纜線之反射係數均隨著長度增加而減小[5]。

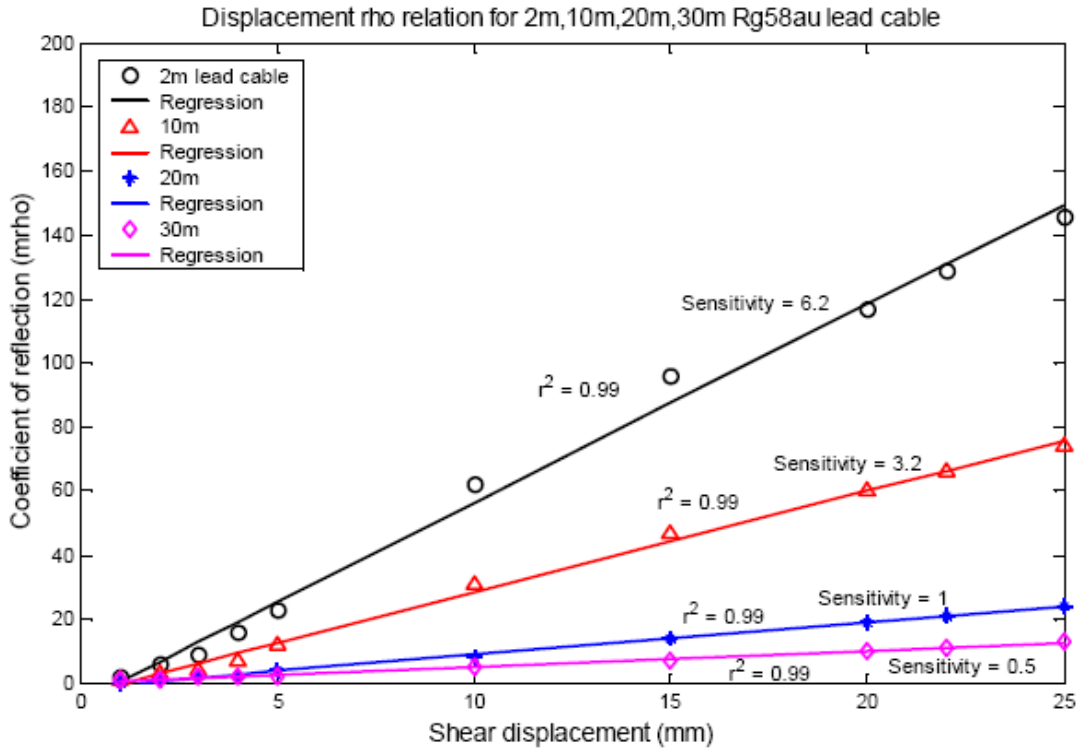


圖 2.16 不同 RG58AU 延長線長度之剪位移與反射係數之關係
(崔志龍, 2004)

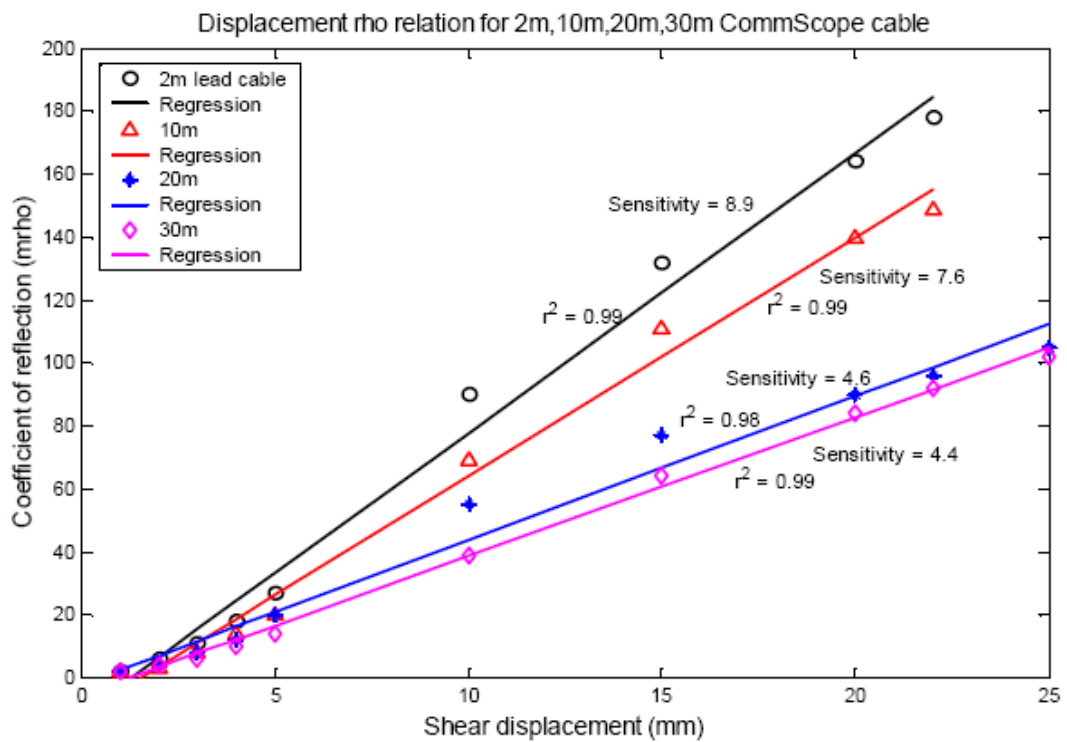


圖 2.17 不同長度 CommScope 電纜之剪位移與反射係數之關係
(崔志龍, 2004)

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. 18 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. 19 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. 20 即以衰減比率概念修正纜線電阻影響後的結果[31]。

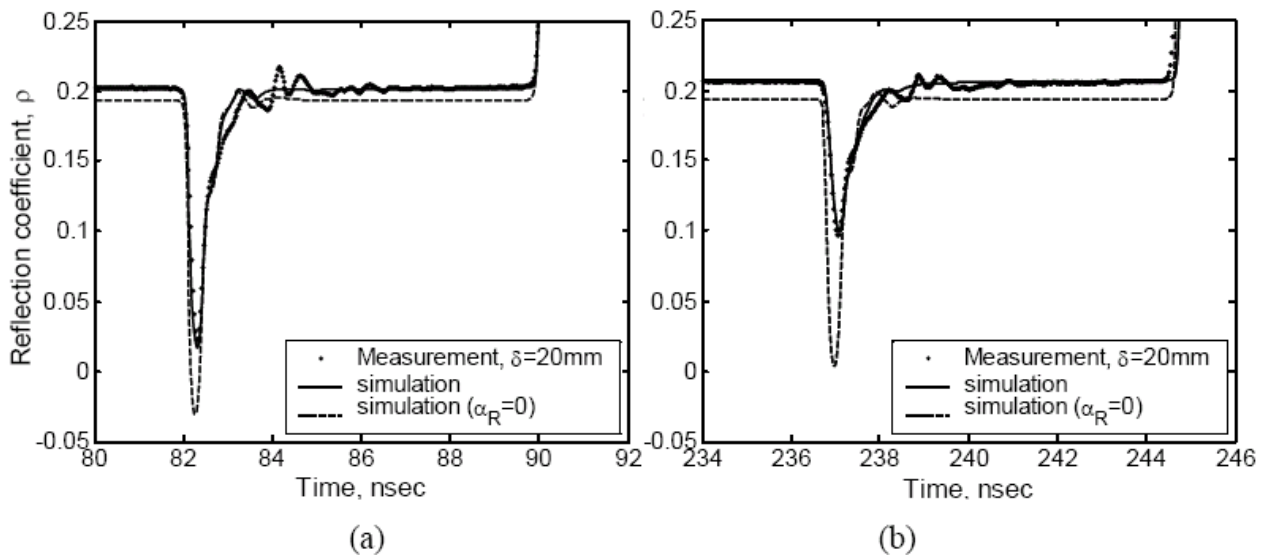


圖 2. 18 完整 TDR 波傳模型(a)10m 長延長線(b) 30m 長延長線
(Lin and Tang, 2006)

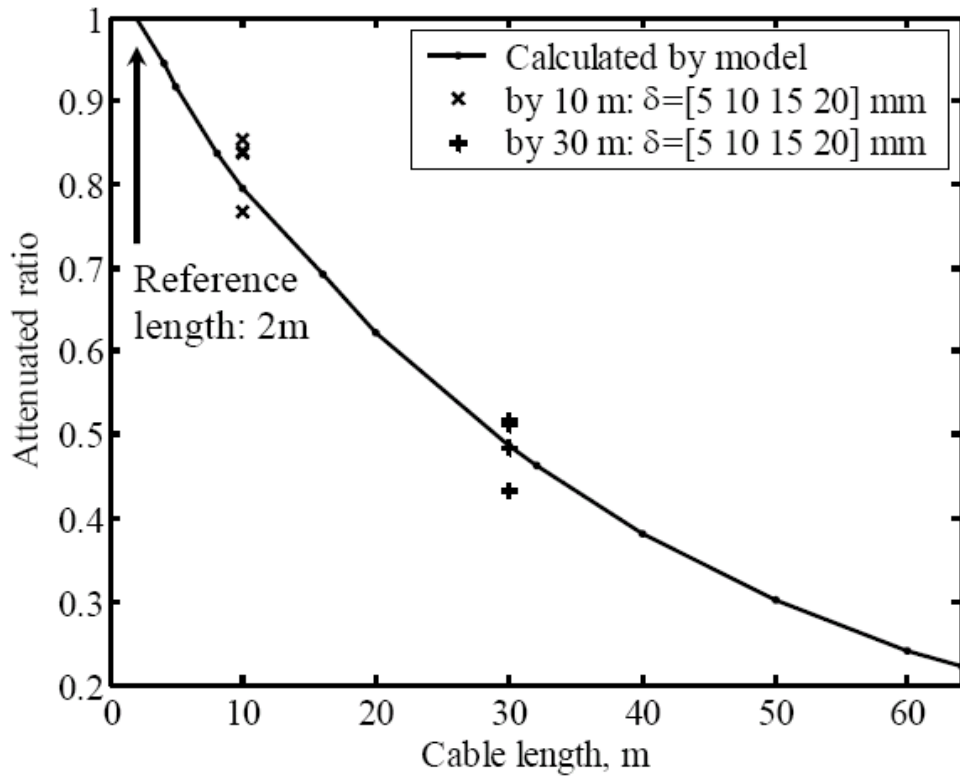


圖 2.19 衰減比率法與傳統方法比較 (Lin and Tang, 2006)

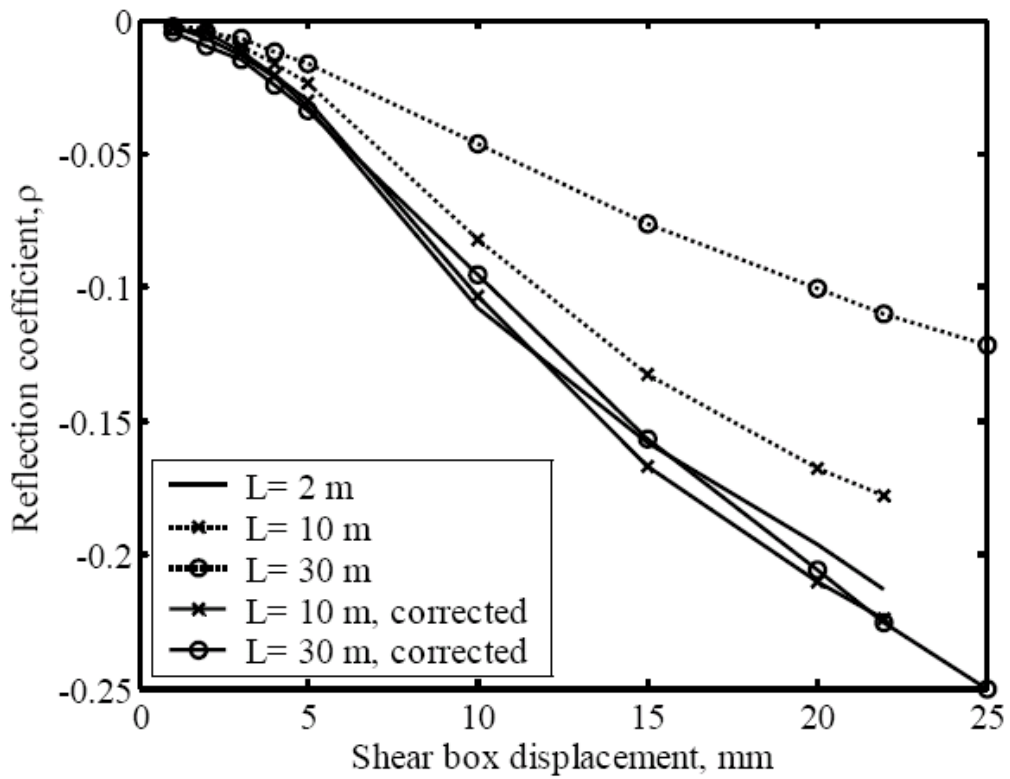


圖 2.20 原始 $\delta - \rho_{\text{peak}}(L)$ 關係與修正後之結果 (Lin and Tang, 2006)

(2) 材料互制行為(Soil-Grout-Cable)：

Dowding et al. (1989) 於實驗室內進行單向度剪力試驗，模擬岩塊之受剪行為。實驗配置如圖 2.21 所示。實驗中以三種不同直徑的同軸纜線且周圍以水泥漿束制纜線，水泥漿養護 14 天後施作剪力與張力試驗。實驗前先将水泥塊體分成左、中與右三個部分，左右兩個塊體固定不動，力量只加載於中間之水泥塊體。實驗過程中以 TDR Tektronix 1502 型號紀錄反射訊號。實驗結果指出：受剪動之塊體變位與反射訊號尖峰(ρ_{peak})有著良好的線性關係，如圖 2.22 所示；但此一線性關係隨纜線直徑不同有所差異，如圖 2.23 所示，纜線直徑較小者較早偵察得訊號變異，即使反射訊號產生改變的初始位移值(δ_0)較小[17]。

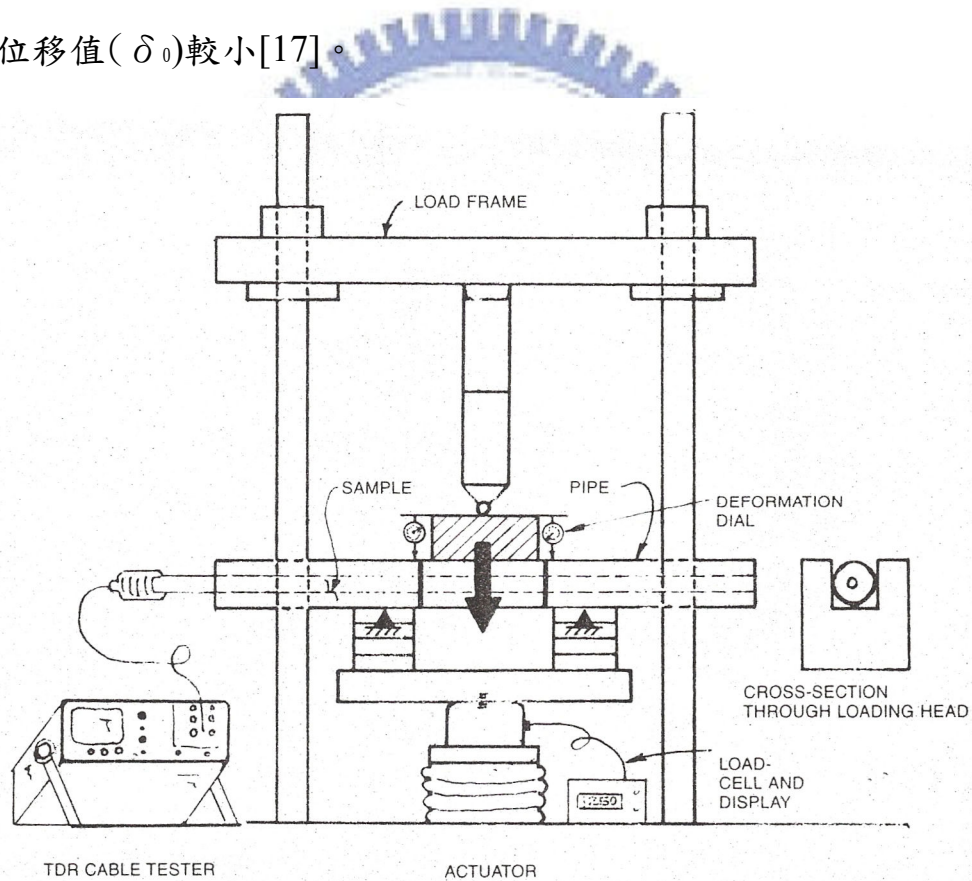


圖 2.21 單向度剪力試驗配置圖(Dowding et al., 1989)

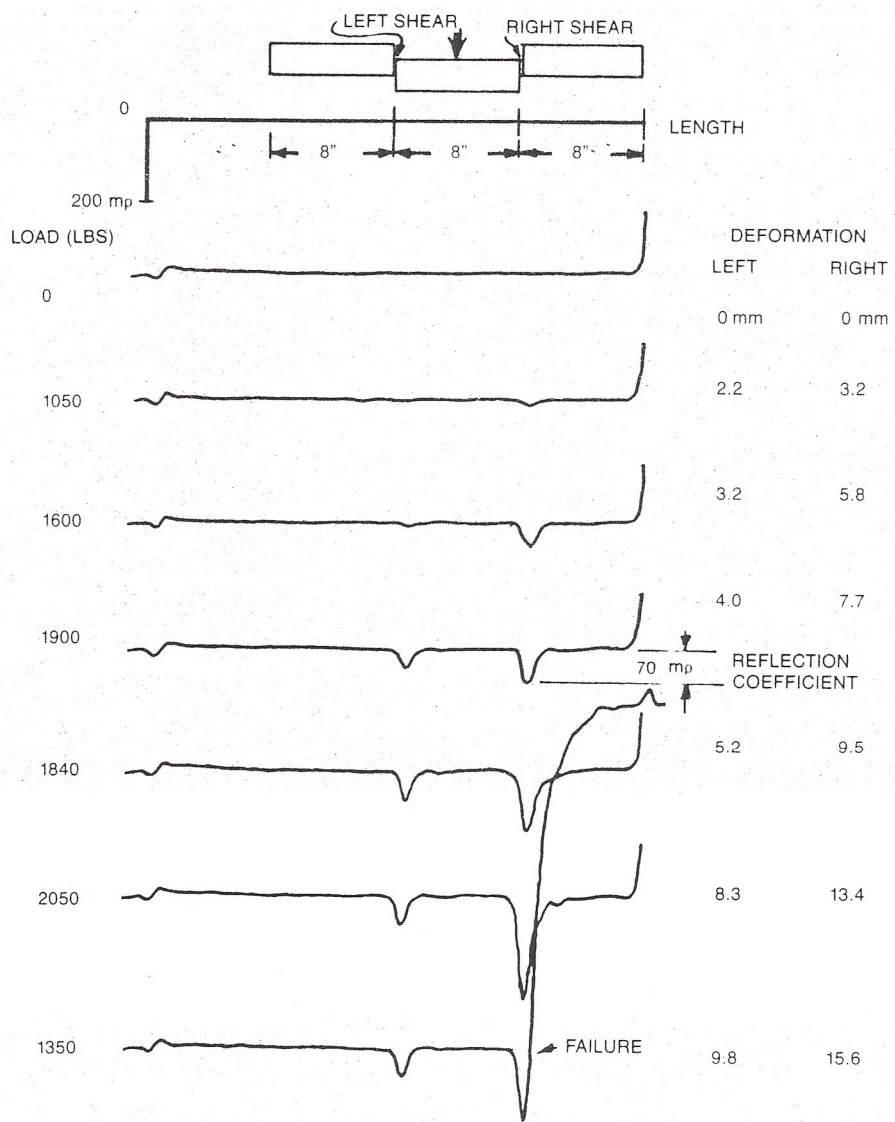


圖 2.22 剪力位移與反射係數關係圖(Dowding et al., 1989)

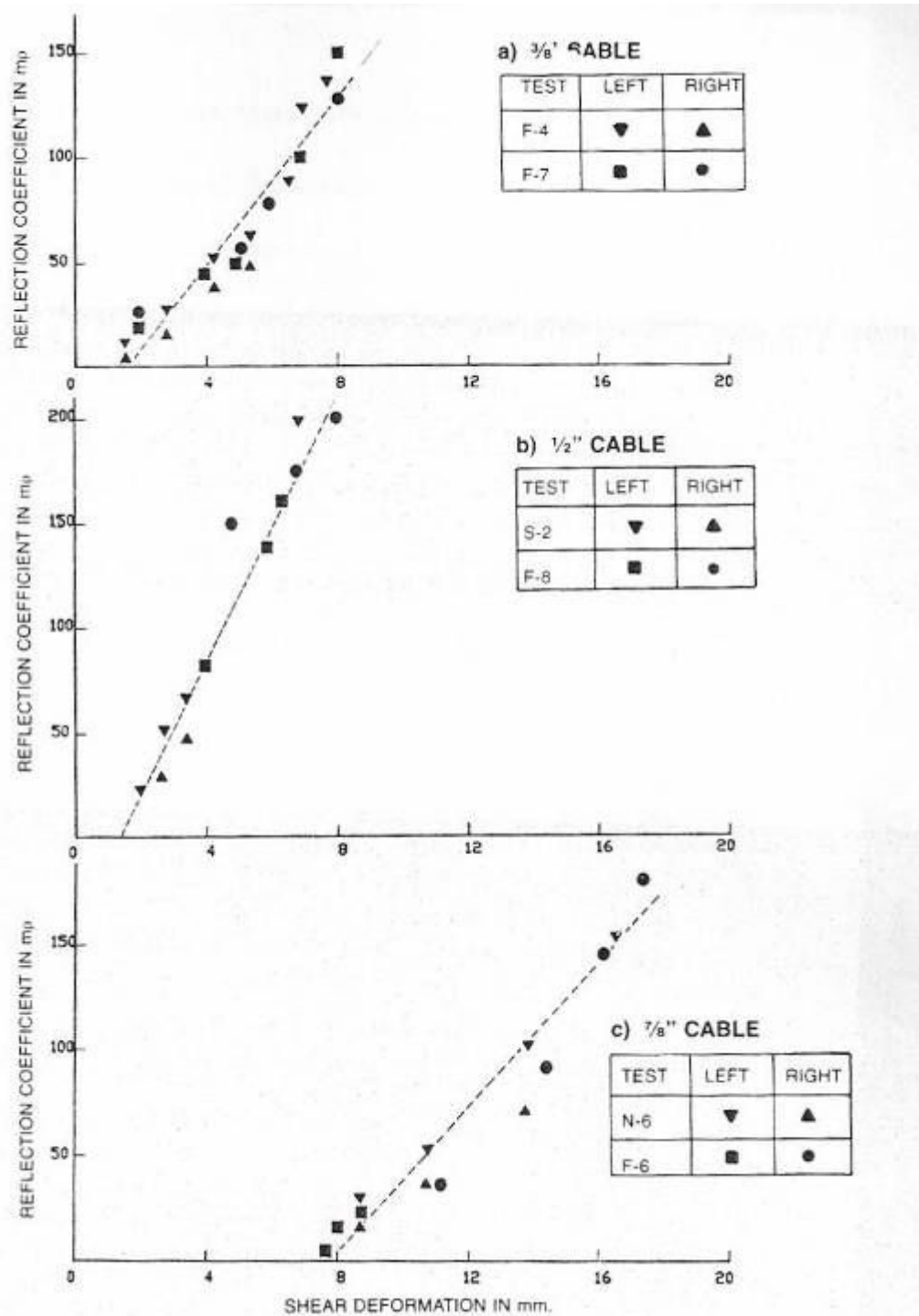


圖 2.23 不同纜線直徑之剪力位移與反射係數關係圖
(Dowding et al., 1989)

Blackburn and Dowding (2004) 以有限元素軟體 Plaxis 建立纜線、灌漿材料與外填土壤(cable-grout-soil)之互制關係。首先以實驗室之雙環剪設備(如圖 2.24 所示)分別對於纜線及纜線-灌漿材料之複合材進行雙環剪試驗

(如圖 2. 25 所示)；再由試驗得到纜線及複合材之強度參數以提供有限元素模型分析使用。模擬結果如圖 2. 26 所示，分別於軟、中及硬三種土壤中，探討纜線於何種灌漿強度下有最佳反應(指現地材料的外部位移量有效傳遞至纜線)，並由模擬結果建議灌漿強度約為周圍土壤之 1~5 倍[12]。

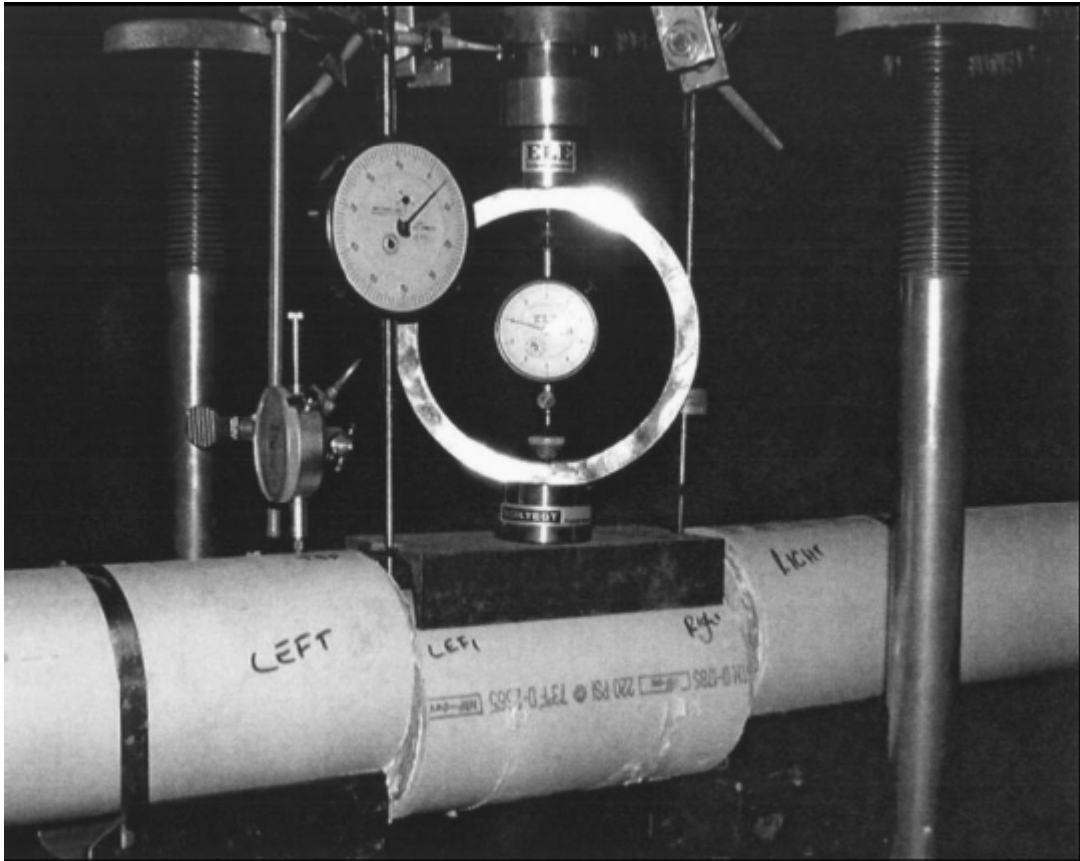


圖 2. 24 雙環剪設備(Blackburn and Dowding, 2004)

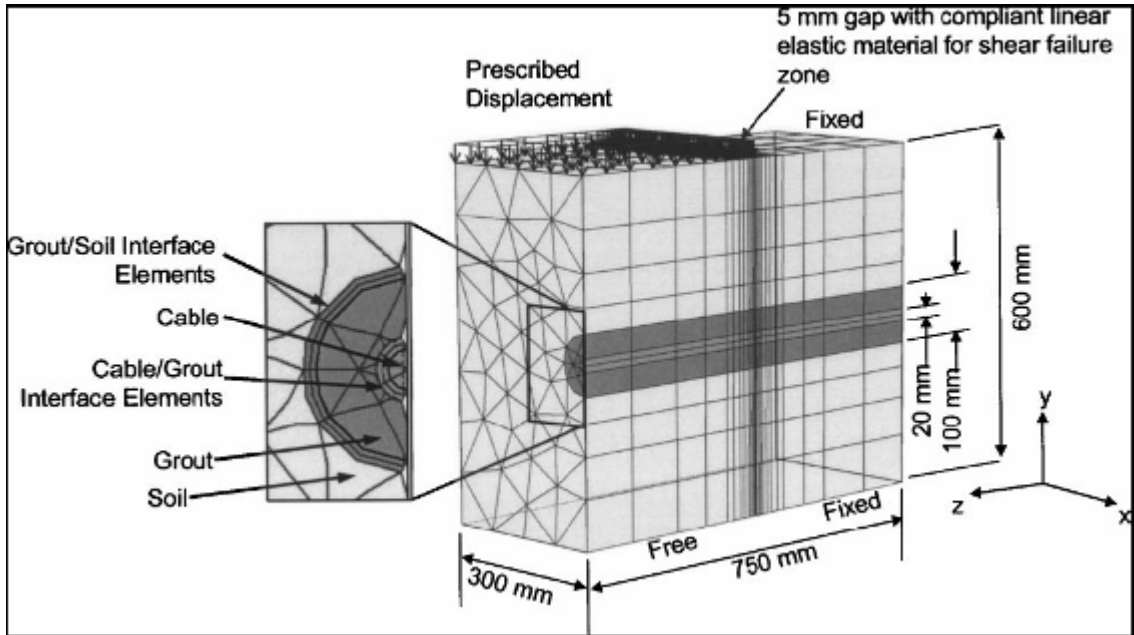


圖 2.25 纜線-灌漿材-土壤複合材料之有限元素模型
(Blackburn and Dowding, 2004)

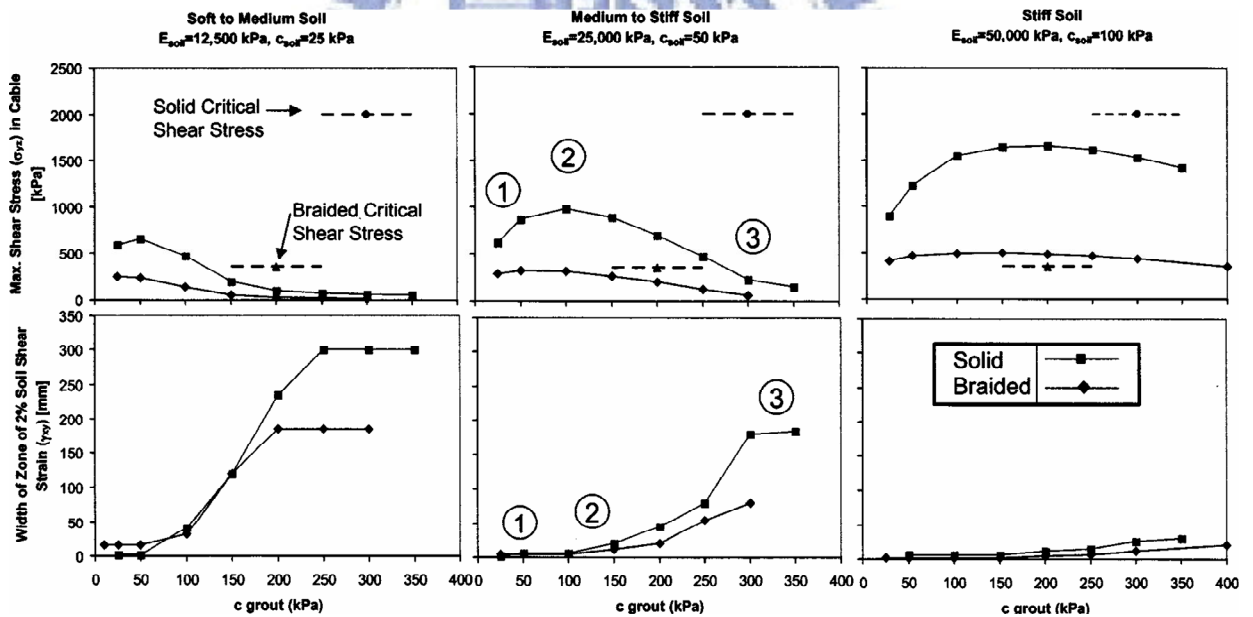


圖 2.26 有限元素分析雙環剪試驗結果(Blackburn and Dowding, 2004)

Chen et al. (2004) 於實驗室進行雙環剪試驗，設備配直如圖 2.27 所示。試體尺寸為長 500 mm、斷面積為 80 mm×80 mm，纜線為水泥:砂等於 1:2 及 1:1.5 之灌漿材料所包覆，養護齡期為七天，試驗前預先鋸一深 1~2 mm 之缺陷以掌控剪力面位置，實驗結果如圖 2.28 及表 2.1 所示，試驗結果中，

水泥:砂為 1:2 者較 1:1.5 之靈敏度高，初始啟動門檻值(δ_D)則相近[14]。

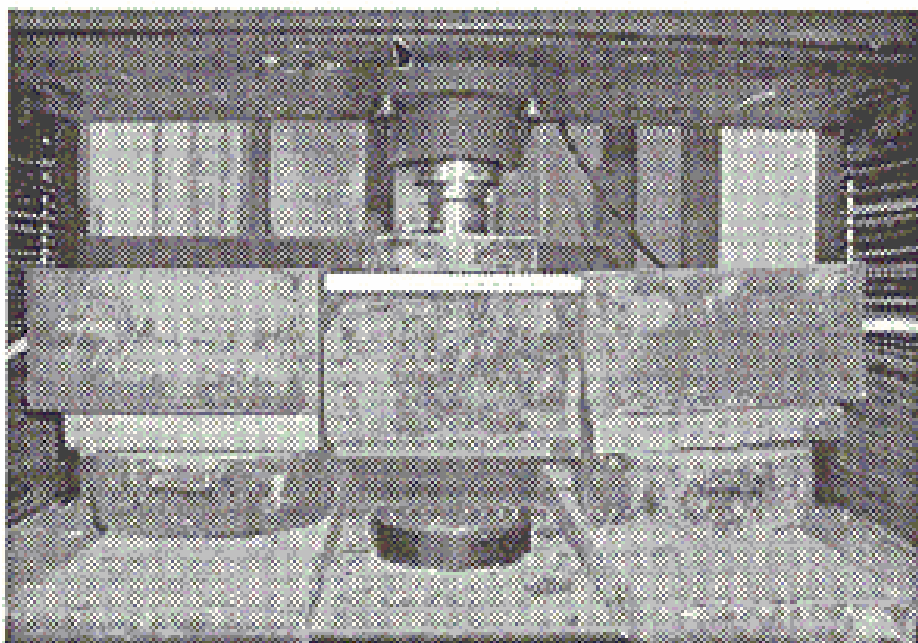


圖 2.27 單向度雙剪設備(Chen et al., 2004)

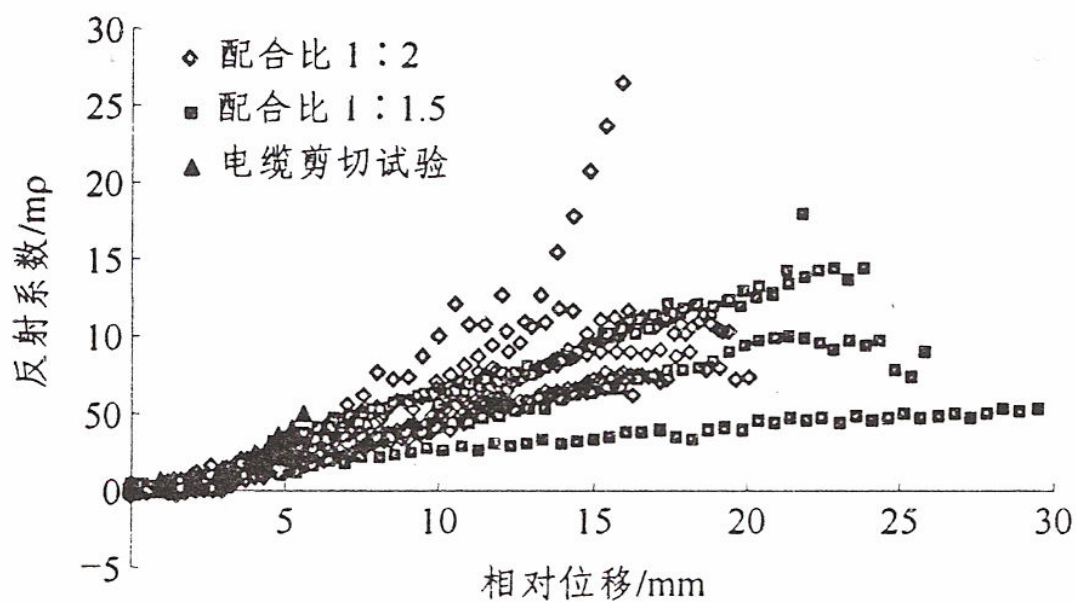


圖 2.28 相對位移與反射係數關係圖(Chen et al., 2004)

表 2.1 不同配比之水泥砂漿中與直剪試驗中纜線剪切試驗特性(Chen, et al., 2004)

水泥砂漿 配合比	平均剪切 靈敏度 $m, \rho/mm$	平均最大 相對位 移值/ mm	平均臨 界 位 移 值/ mm	平均剪 切 面 剪 力 峰 值/ kN	平均試 體 抗 壓 強 度 值/ MPa
1:2	6.35	17.92	1.20	3.58	3.32
1:1.5	4.48	25.23	1.14	6.08	4.64
直剪試驗	7.66	6.40	1.24	0.34	-

Lin and Tang (2006)於實驗室進行模擬纜線-灌漿材料-現地材料間互制行為，設計一剪力盒進行試驗，剪力盒尺寸為長 400 mm，斷面積為 70 mm × 70 mm，如圖 2. 29 所示。實驗配置以固定 P3-500 纜線長為 1 m，纜線外以直徑 40 mm 的水泥試體(水:水泥為 1:1)保護，外填材料為粗顆粒砂、渥太華砂及玩具黏土模擬硬、軟與極軟弱之現地土壤。實驗結果如圖 2. 30 所示，固定纜線及灌漿配比條件下，外填不同材料所影響的只是初始啟動行檻值 (δ_0)不同，其靈敏度約略成常數；固定纜線及外填材料之條件下，初始啟動值(δ_0)與靈敏度相差不遠；圖 2. 31 說明固定纜線、灌漿配比與外填材料，只改變剪力弱帶寬度(W)之條件下，隨著剪力弱帶寬度(W)增加，初始啟動門檻值(δ_0)亦增加，但其靈敏度仍約略成常數[31]。

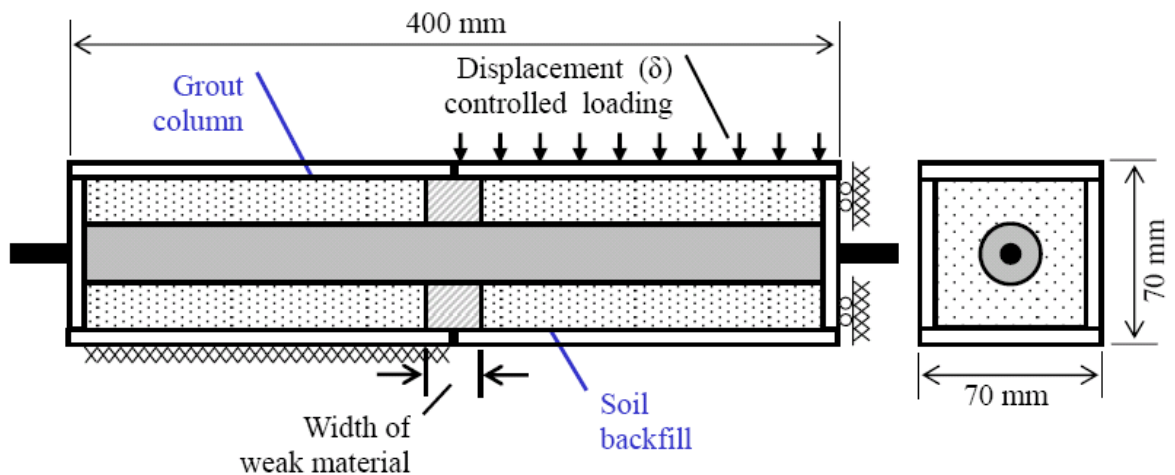


圖 2. 29 剪力設備示意圖(Lin and Tang, 2006)

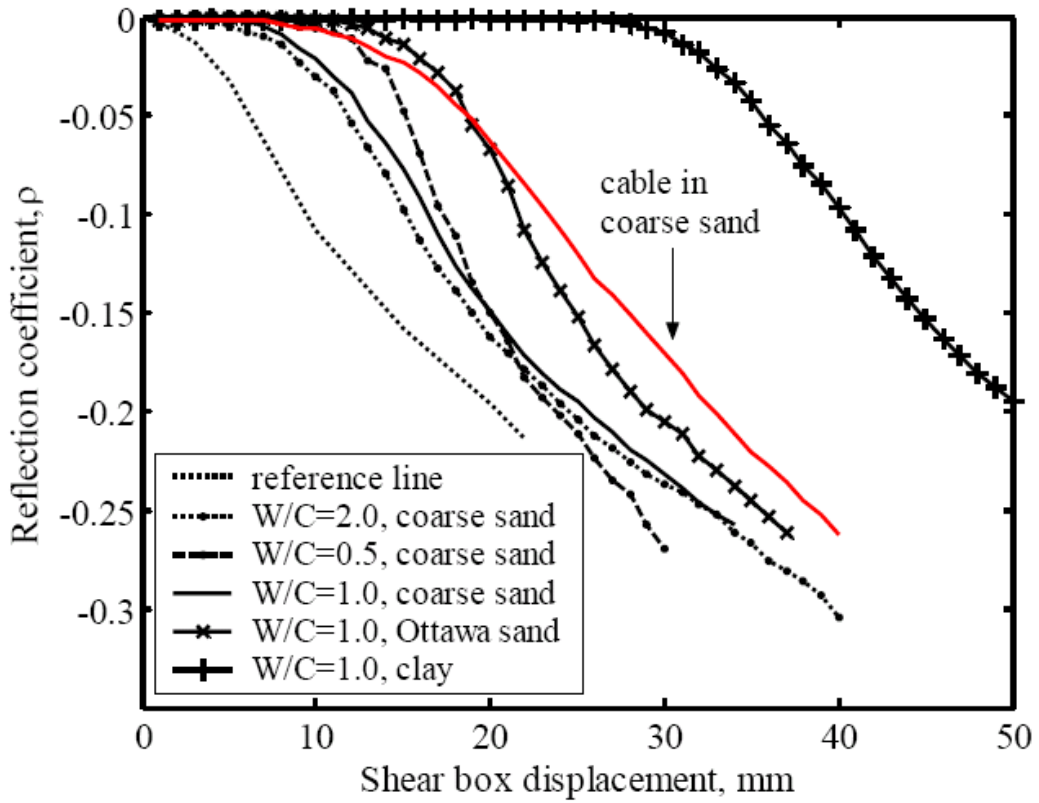


圖 2.30 不同外填材料之側向位移與反射係數關係圖
(Lin and Tang, 2006)

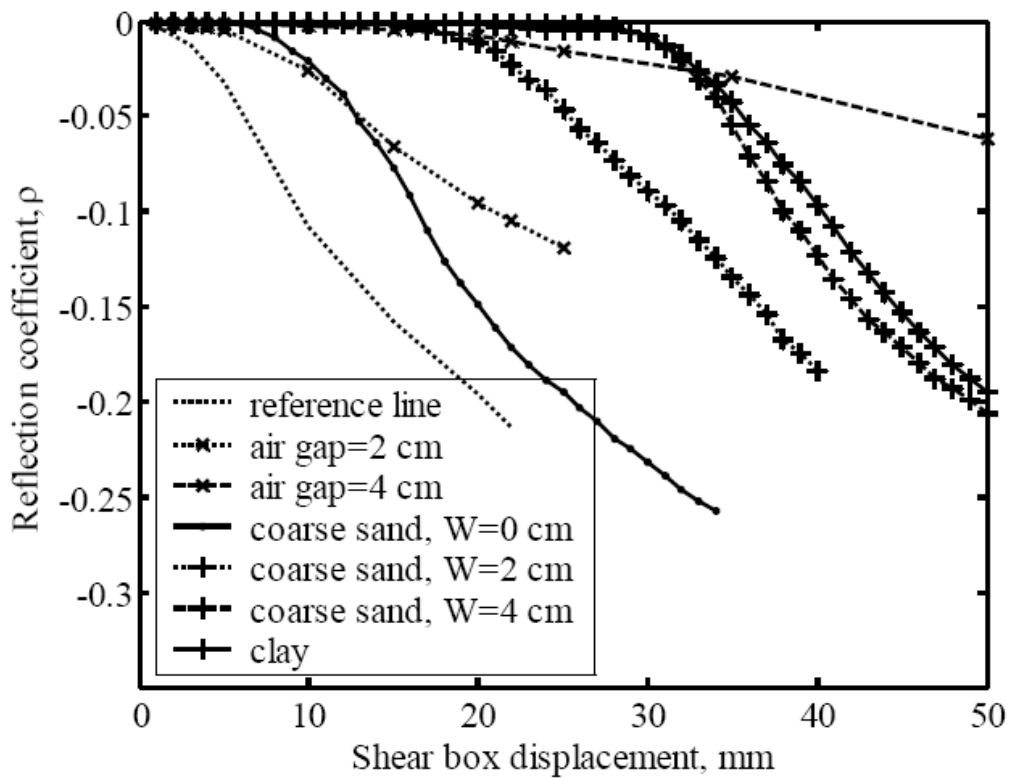


圖 2.31 不同剪力帶寬度之側向位移與反射係數關係圖

(Lin and Tang, 2006)

(3) 剪力弱帶(Shear Bandwidth)：

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 2.32 所示)[32]。

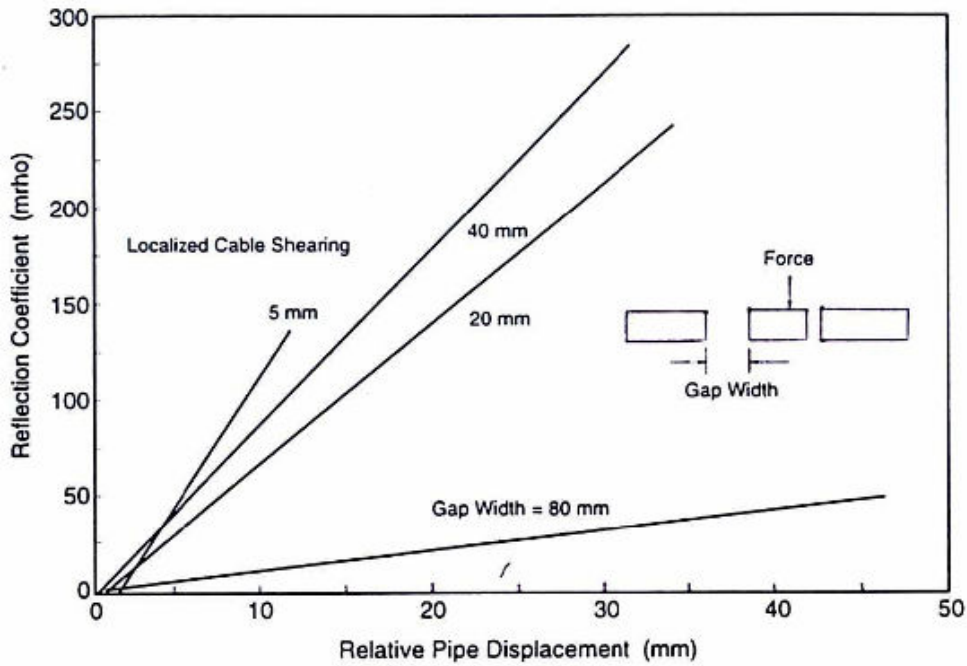


圖 2.32 反射訊號受剪力帶寬度影響(O'Connor, 1991)

盧吉勇(2003) 使用剪力環設備(如圖 2.33 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_0)亦增加，靈敏度約略成常數(如圖 2.34 所示)[8]。

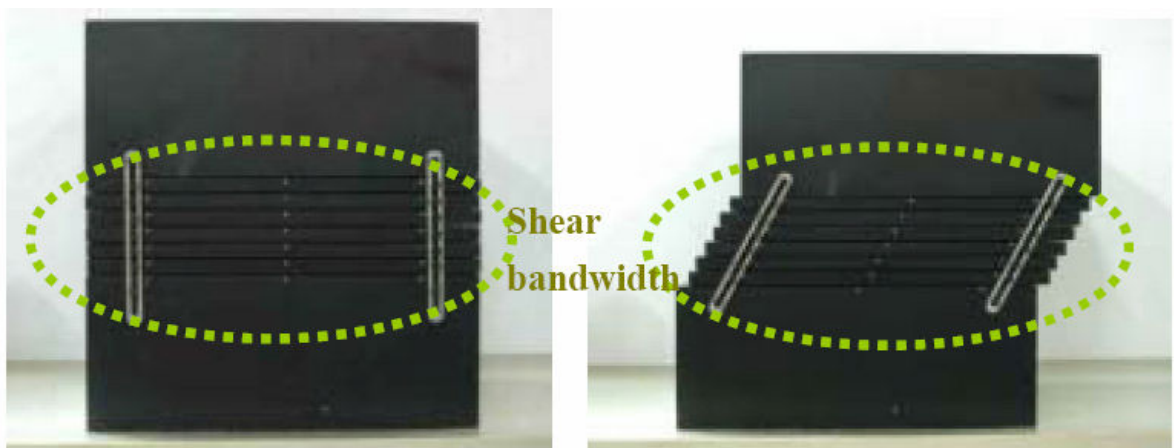


圖 2.33 剪力環設備(盧吉勇，2003)

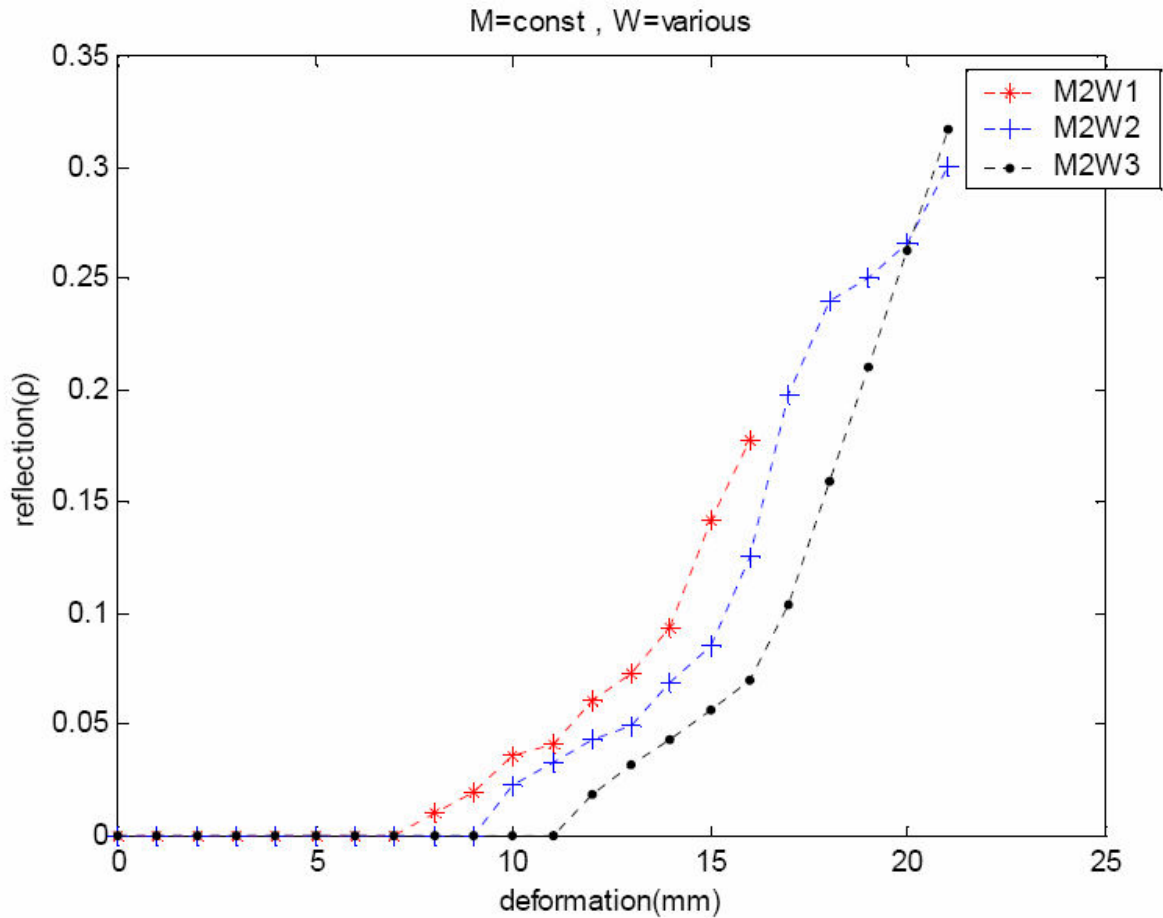


圖 2.34 固定材質，不同剪力帶寬度之 $\delta - \rho_{peak}$ 關係(盧吉勇，2003)

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[5]。

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 2.35 所示，實驗結果亦形成雙剪現象，如圖 2.36 所示[7]。

此外，Lin and Tang (2006)亦對剪力弱帶進行室內模擬[31]，已於前小節說明。



圖 2.35 預留寬度(W=3cm)剪動情形(楊清良，2004)

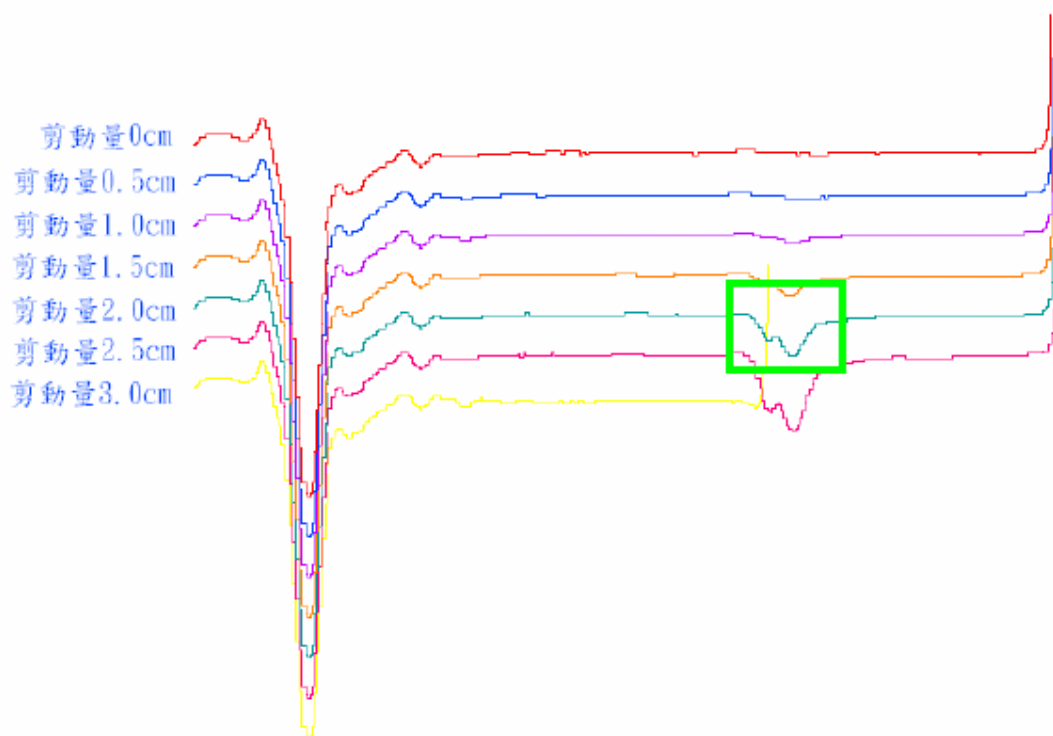


圖 2.36 預留寬度為 3cm 受剪時呈雙峰狀之波形圖(楊清良，2004)

由上述文獻回顧中可得知目前有關 TDR 錯動變形量化之影響因子主要分為：(1)纜線電阻;(2)材料互制;(3)剪力弱帶等三項因子。

纜線電阻影響方面由 Lin and Tang (2006)利用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。

材料互制方面雖然有不少學者於實驗室進行相關試驗，但所使用的儀器是否足以模擬現地剪動時材料間的互制行為，有待商榷；此外，實驗室所使用的直剪設備常出現剪力盒扭曲、轉動及存在邊界效應(Boundary effect)等問題；經有 FEM 所模擬纜線-灌漿材料-土壤受剪時之變形行為進而找出最佳灌漿材料之配比區間，但 FEM 只考慮應力傳遞，並未考慮灌漿材料之破壞行為，與實際情形不符；另外，最適灌漿強度仍需考慮實務上施工性與否且材料互制行為與 TDR 反射訊號間存在密不可分的關係，因此有必要了解因材料互制行為所引致之 TDR 波形反應。

剪力弱帶方面雖有室內相關模擬試驗，但以空氣間距(Air gap)模擬現地剪力弱帶是否具代表性，仍有待進一步了解。

2.2.5. 提早偵測 TDR 錯動變形之訊號處理

由上述學者的研究發現，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時，其初始啟動門檻值(δ_D)隨弱帶的寬度(W)增加，以邊坡監測而言尚屬不夠靈敏。為達實務上的需求，Farrington, S. P. et al. (2006) 提出訊號處理概念，對監測資料作進一步分析，利用去除雜訊(de-noise)與對時間、空間作微分，其效果較目視反射訊號改變量及測傾管監測資料能更早發現地層位移位置(如圖 2. 37 所示)。此外，亦提出啟動門檻值(Trigger Metric)概念(如圖 2. 38 所示)，當反射訊號達此門檻值時即需密切注意其反射係數變化情形[37]。

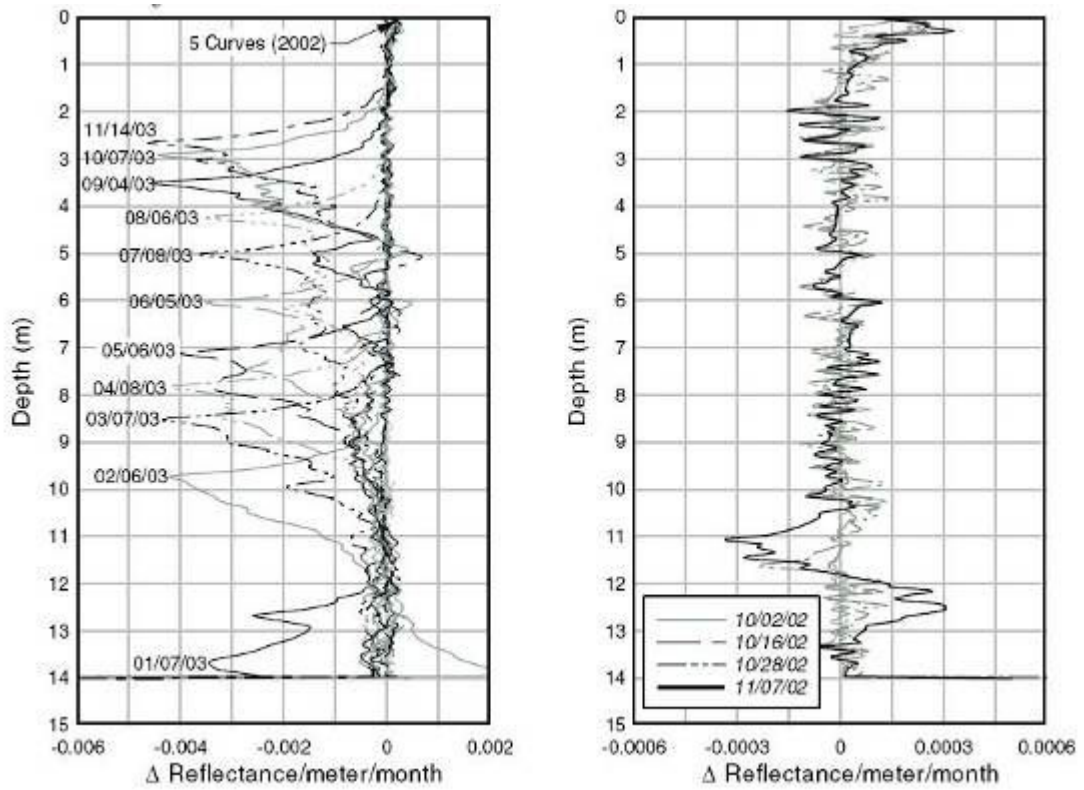


圖 2.37 經訊號處理後之深度與反射係數關係圖
(Farrington, S. P. et al., 2006)

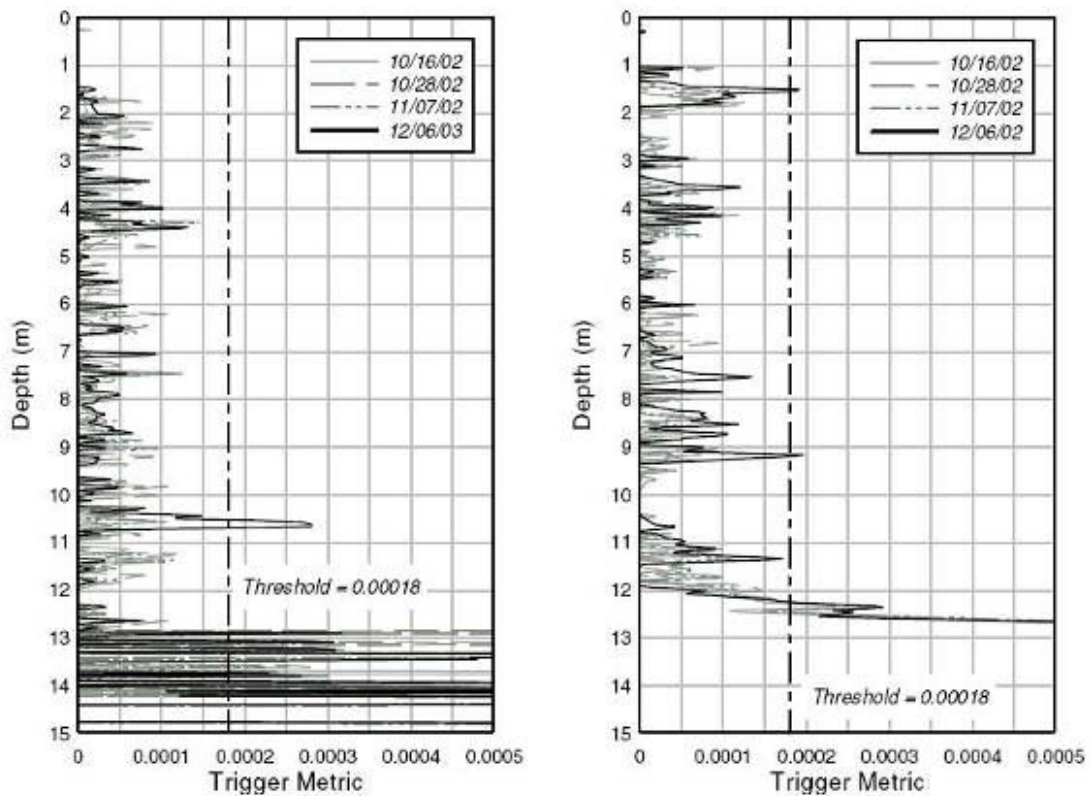


圖 2.38 門檻值概念圖(Farrington, S. P. et al., 2006)

然而，現地監測資料經由訊號處理之成效為何?目前並無參考依據；此外，依據現地監測資料而訂定門檻值有其困難度，又超過門檻值之反射訊號是否足以表示現地已開始產生滑動?有待商榷。

2.3. 既有地層位移量測與 TDR 之綜合比較

傳統與新式監測儀器存在不同優缺點、功能性及使用限制條件等特性，表 2. 2 為上述地層位移量測方法中，依量測原理、量測規格、經濟性及使用限制條件等之整理。由表 2. 2 可發現：傳統監測儀器常為下孔式電子感測器，易受潮而影響量測精度及耐久性、不易自動化與無法即時監測等缺點。且傳統監測變形技術通常只具備點之量測功能，不具變位量測上之連續性，無法得到錯動區之完整變形剖面，且常需依賴人工定時量測及單一孔位之空間解析度差。此外，測傾管所採用之 ABS 管與地層之互制可能降低對於薄剪動的反應，例如常見之測傾儀技術(Inclinometer Probe,IP)或孔內測傾儀技術(In-Place Inclinometer,IPI)等，皆有上述之缺點。此外，最新發展之 ShapeAccelArray 錯動變形感測器雖然可得到土體 3D 變形量且又可進行遠端自動化等優點，但受限於感測元件長(每節 305mm)而降低其空間解析度，加上 PVC 管之韌性致使無法量測薄層滑動；此外，感測元件造價昂貴為其缺點之一。

近年來所發展之 TDR 錯動變形監測，具耐久性高、垂直解析度佳、可遠端自動化等優點，並可連接 TDR 所發展之雨量器、水位監測、地表伸縮儀等，達一機多功，降低監測成本；惟其於軟弱土層之錯動監測，變位量化上仍有困難且量測不具方向性。

以邊坡監測而言，若能即時掌握地層錯動之訊息便可提早啟動防災工作，減少災害之發生，因此，需發展一套較完整的監測系統，解決傳統儀器所不及之缺點。

表 2.2 傳統與新興之錯動監測儀器比較

傳統滑動監測儀器		新興滑動監測儀器		
儀器種類	管式應變計 (Pipe Strain Gauge)	傾斜探管 (Inclinometer Probe, IP)	孔內傾斜儀 (In-Place Inclinometer)	FBG 偏斜儀
量測原理	量測應變片所產生應變以判斷滑動面位置	量測側傾角轉換成水平位移量	量測側傾角轉換成水平位移量	利用應變管原理測扭曲度
量測規格	應變量測範圍： $\pm 10000 \mu$ 精度： $\pm 0.5\%$	傾斜量測範圍： $\pm 50^\circ$ 傾斜解析度： $0.04\text{mm}/\text{m}$ 空間解析度： 0.5m	傾斜量測範圍： $\pm 30^\circ$ 傾斜解析度： $0.0017\text{mm}/\text{m}$ 空間解析度： $> 2\text{m}$	利用纜線因地層錯動所造成之阻抗改變轉換成位移量
價格	低	中	高	低
特性與限制條件	1. 耐久性低 2. 管理維護性低 3. 無法量測薄層滑動 2. 位移量測約 2~3 公分	1. 耐久性中 2. 管理維護性低 3. 需仰賴人工量測 4. 無法量測薄層滑動	1. 耐久性中 2. 管理維護性低 3. 垂直解析度低 4. 無法量測薄層滑動	1. 連續性變位資料 2. 可自動化 3. 可量測薄層滑動 4. 管理維護性高 5. 耐久性高 6. 無方向性 7. 於軟弱土壤中，靈敏度低
				ShapeAccelArray
				利用加速度計量測之傾角轉換成位移量
				傾斜量測準確度： $3.4\text{mm}/\text{m}$ 傾斜解析度： $0.017\text{mm}/\text{m}$ 空間解析度： 0.3m
				高
				1. 3D 剖面 2. 可自動化 3. 可同時量測震動與變位 4. 可作溫度校正 5. 無法量測薄層滑動

第三章 研究方法與試驗規劃

由第二章文獻回顧可得知目前有關 TDR 錯動變形量化分析影響因子主要為：(1)纜線電阻、(2)材料互制、(3)剪力弱帶三項因子。本研究將聚焦於材料互制，設計更符合現地邊界條之 TDR 錯動變形物理模型，並採用與現地相近之試體(纜線-灌漿材料-土壤之複合材料)，探討複合材料受剪時 TDR 反射訊號之變化。此外，更加入圍壓設備模擬實際土體於不同深度圍壓狀態，並研究可提早偵測地層滑動面發生的訊號分析與資料判讀改良方法。

3.1. TDR 錯動變形物理模型與因子探討

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。此外，室內直剪試驗常遭遇剪動時，上、下剪力盒扭曲或翹曲現象。

為了解現地複雜的剪動機制，對於上述缺失改良 TDR 室內標定盒設計與試驗方法是迫切且需要研究的課題。有鑑於此，本研究將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。模型之主要設計概念如圖 3.1 所示，相關細節於下一節說明。

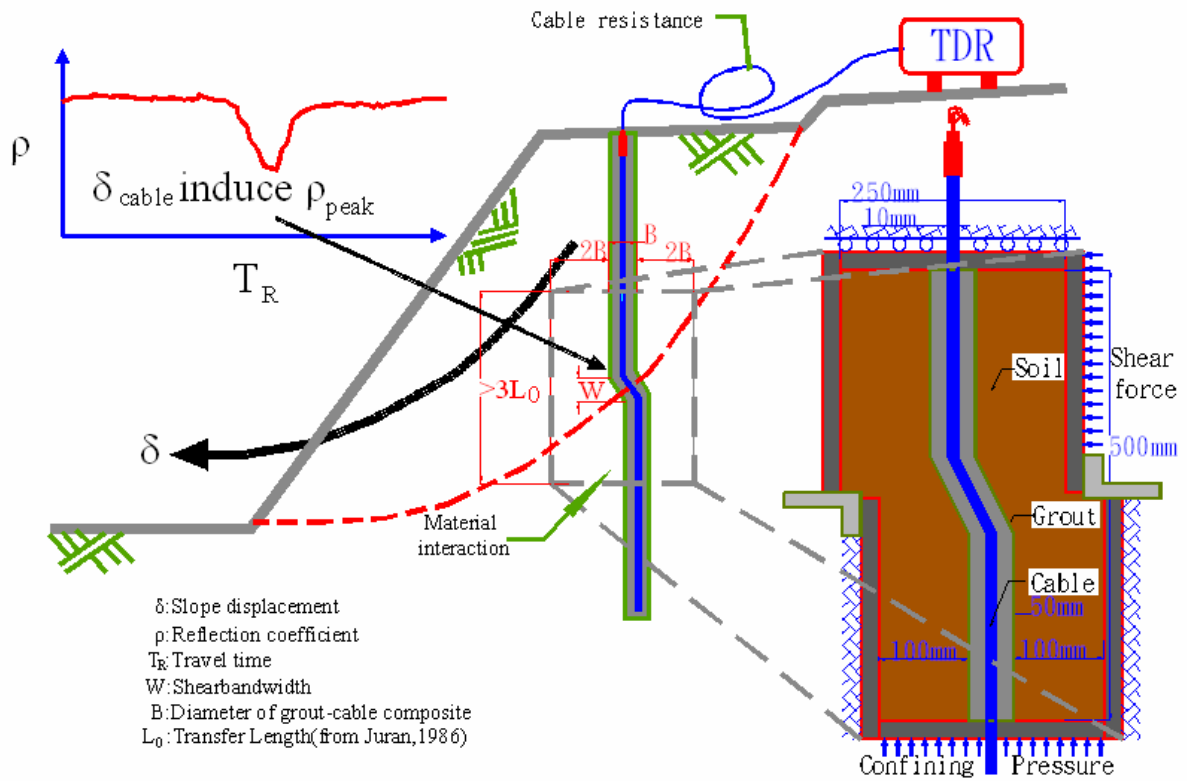


圖 3.1 模擬現地邊界條件概念示意圖 (Modify from Lin and Tang, 2006)

3.1.1. 物理模型: 大型直剪儀

過去文獻所採用的單向度剪力設備常存在上、下剪力盒於剪動過程中彎曲，剪力盒內材料常在剪動面外流並產生空隙，造成試驗與理論存在誤差。為解決上述問題，本試驗儀器將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 3.2 與圖 3.3 所示，各試驗設備之詳細規格如下所述：

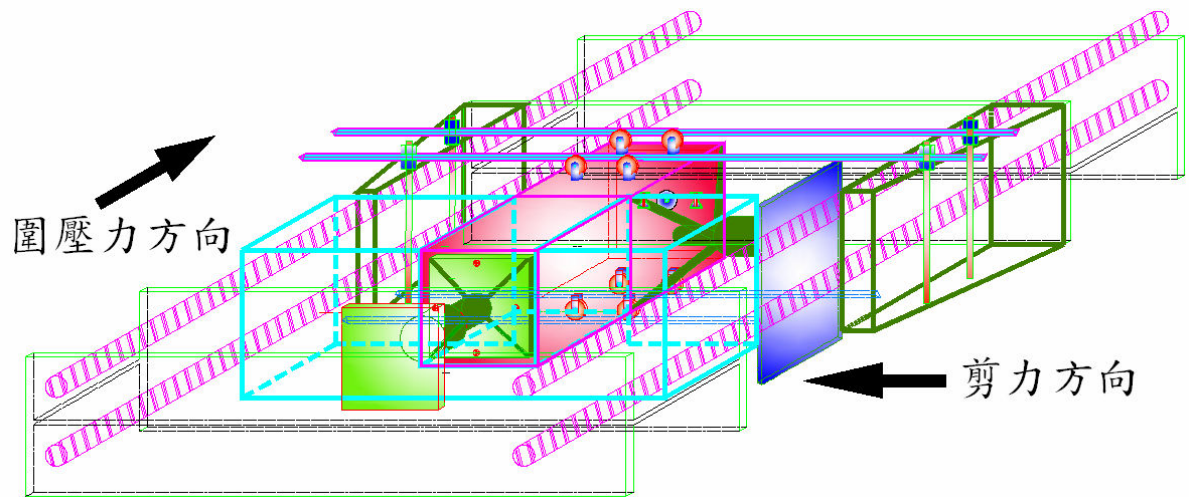


圖 3.2 大型直剪儀設計架構圖

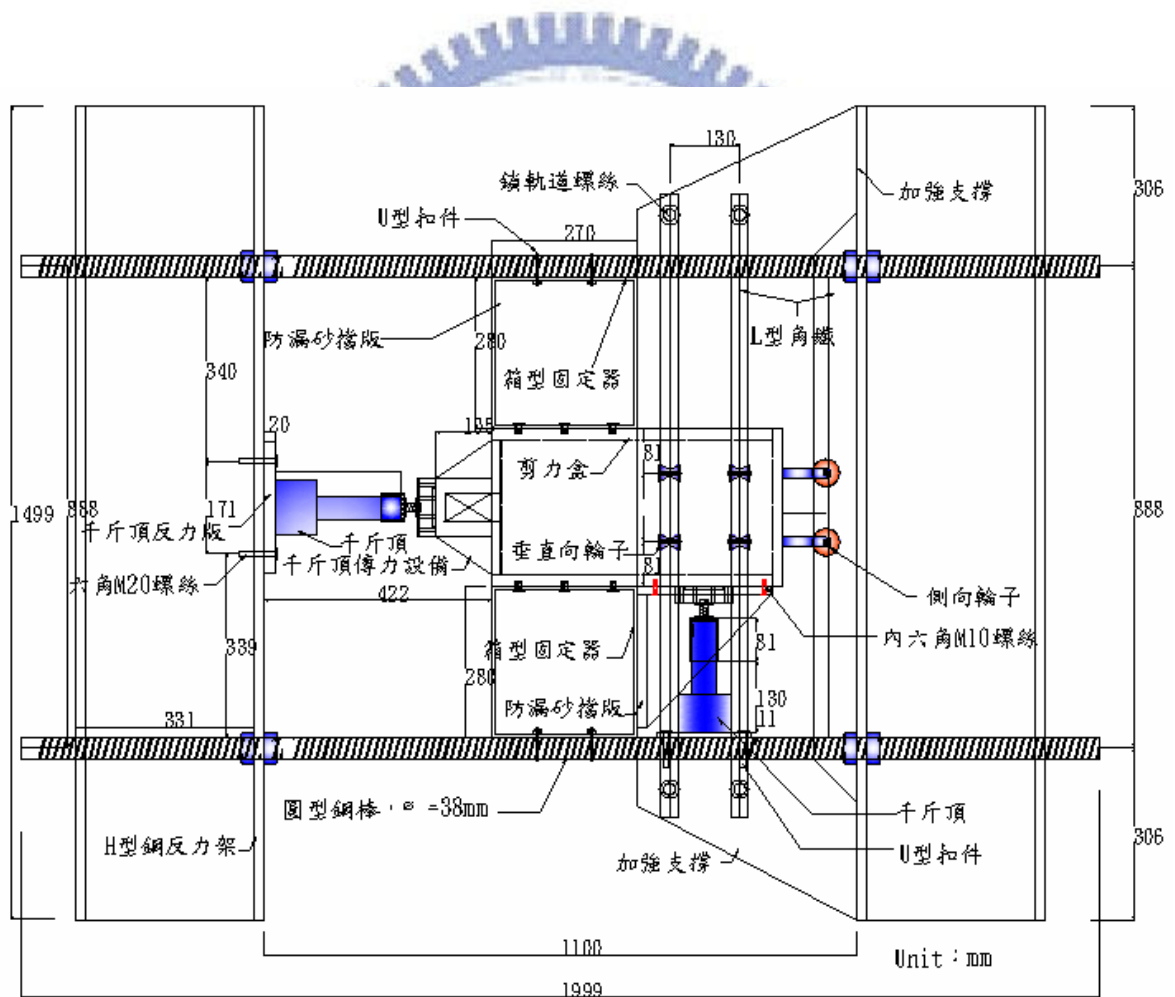


圖 3.3 大型直剪儀各元件示意圖

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 3.4 之 L_0 ，其計算式如下所示[29]。

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

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 。

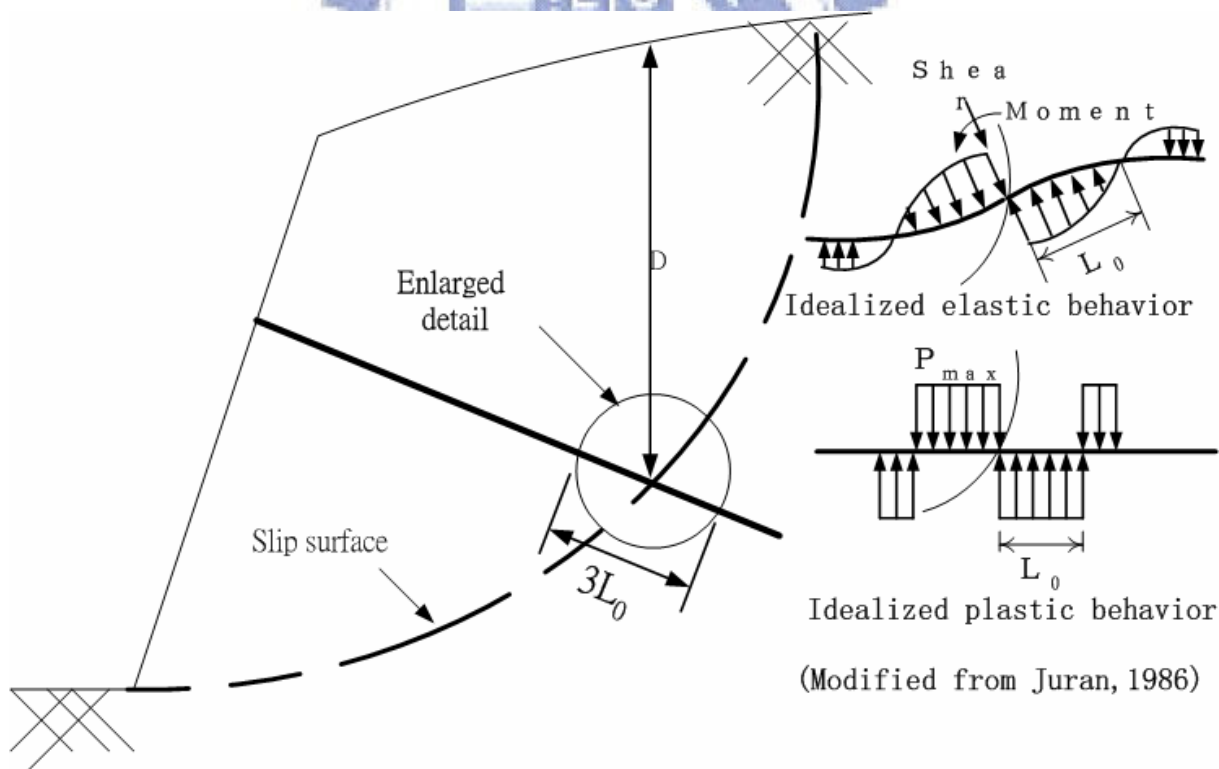


圖 3.4 考慮纜線受剪長度之影響

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 $E=75000$

kPa(Blackburn et.al., 2004)[12]，砂土地盤反力係數 $k_s = 24430 \text{ kN/m}^3$ (Reese, 1983)[36]，計算式如下：

$$\begin{aligned} L_0 &= \left[\frac{(4EI_0)}{(k_s D)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= \left[\frac{(4 \times 75000 \times 10^3 \times \frac{\pi(0.05)^4}{64})}{(24430 \times 10^3 \times 0.05)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= 0.09\text{m} = 9\text{cm} \end{aligned}$$

由圖 3.4 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[10]。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 3.5 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 3.6 所示。

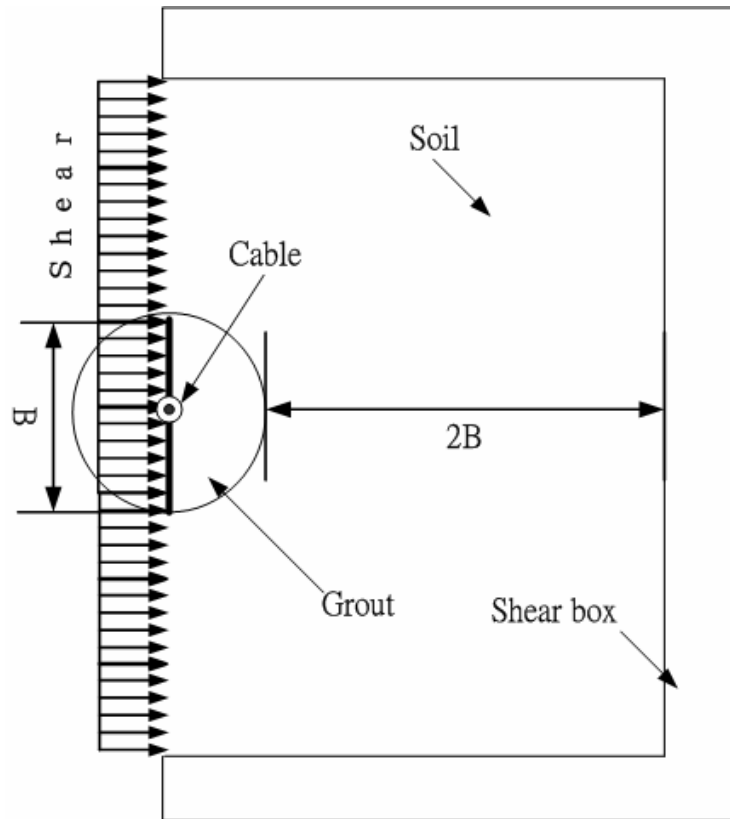


圖 3.5 剪力盒所考慮影響範圍示意圖

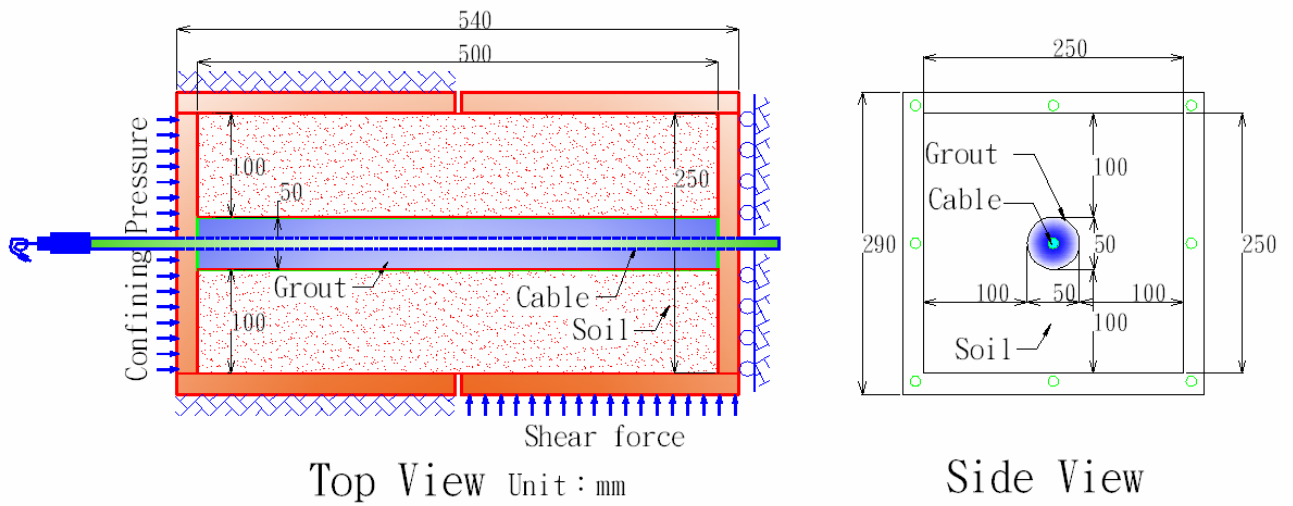


圖 3.6 剪力盒尺寸設計詳圖

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 英呎)，輸出阻抗為 50 歐姆(Ω)，最大解析度(Resolution)為 0.00122 公尺(0.004 英呎)，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 3.7 所示 [41]。

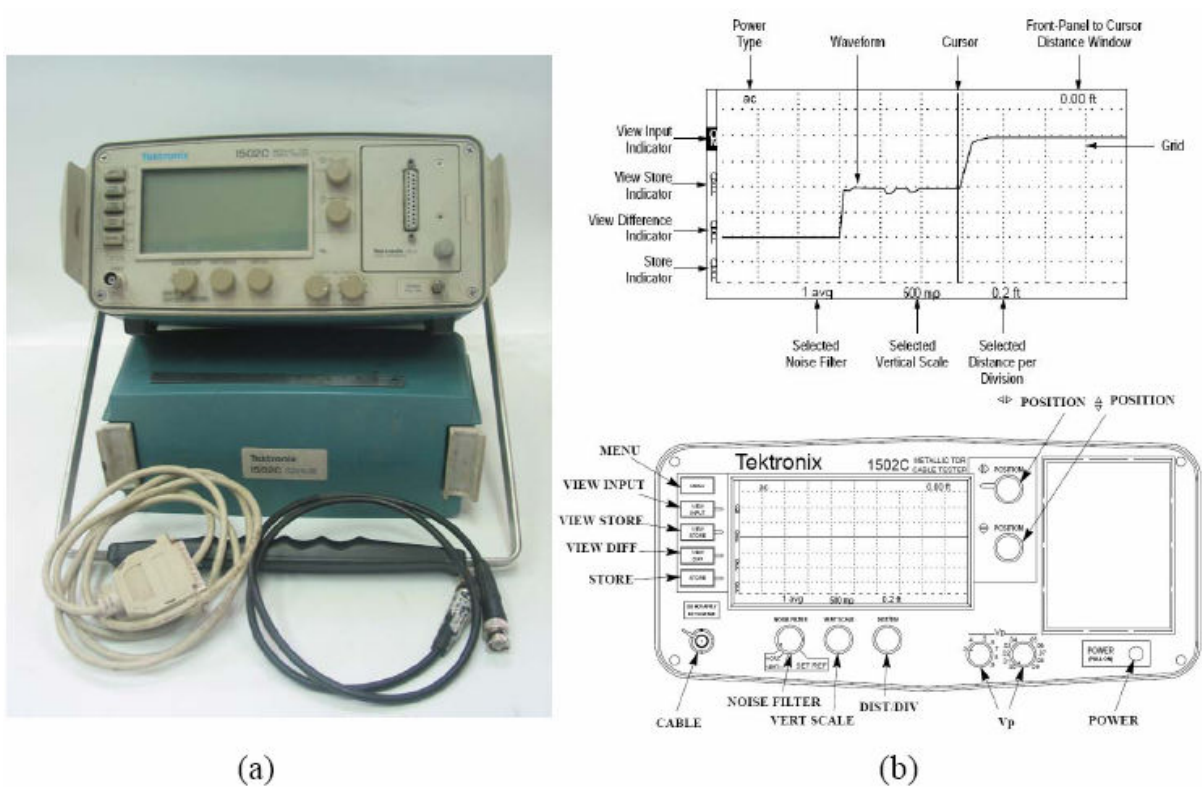


圖 3. 7 Tektronix 1502C (a)實體照片(b)操作介面說明

(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，為配合本研究所研發大型直剪儀需求，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	$\pm 0.1\%$ 滿刻度 ± 1 位數(直流/電位計/ 電阻/PT-100/荷重元) $\pm 0.2\%$ 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	$_{do}FL/_{io}FL$ 或 $_{-do}FL/_{-io}FL$
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°C；20~90%RH(非結露)
存放環境溫、濕度	-10~70°C；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 [15]，同軸纜線剖面示意圖如圖 3.8 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-Heat[®] 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

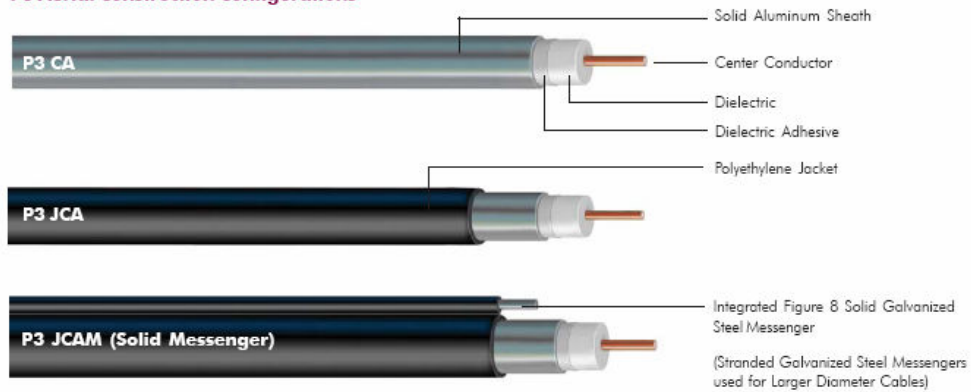


圖 3.8 P3 系列同軸纜線剖面示意圖(摘自 CommScope User Manual)

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)

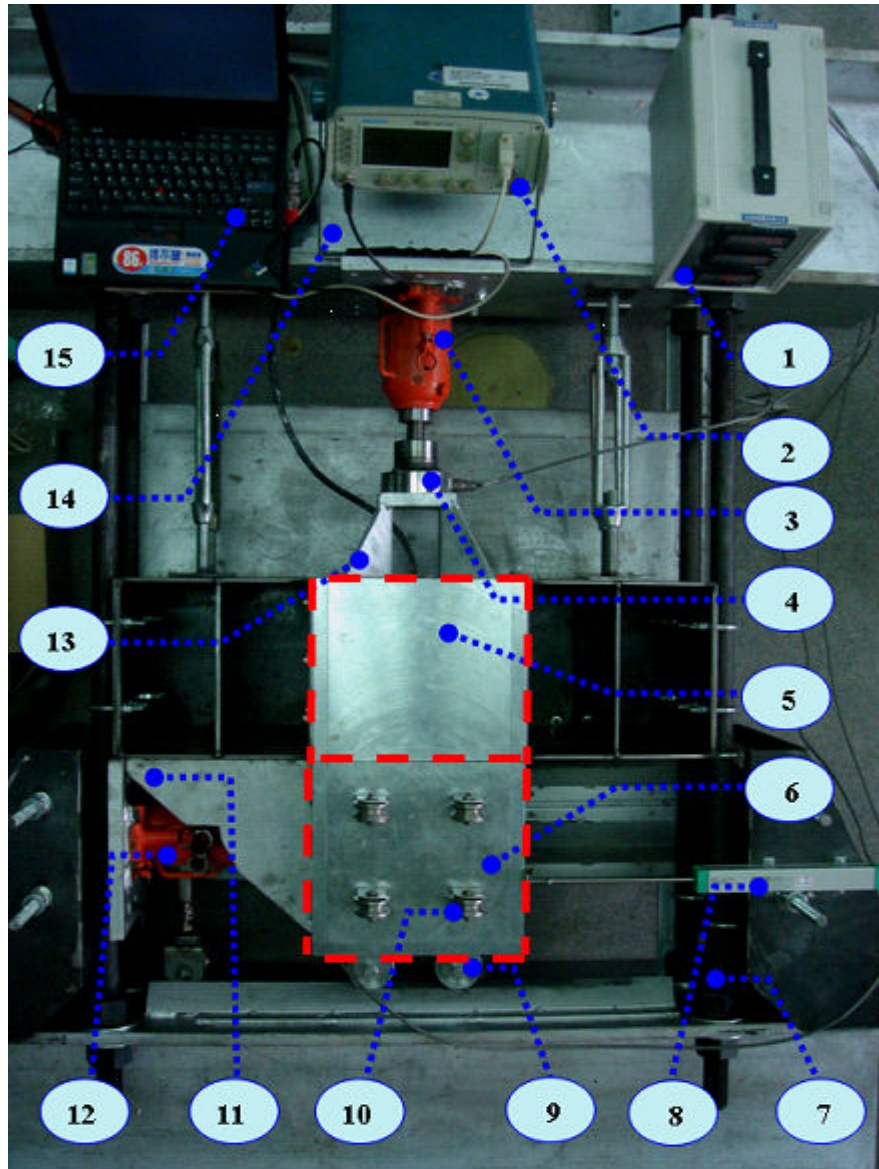


(b)



(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)



- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 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

3.1.2. 試體製作

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，攪拌均勻不同水灰比 (water /cement ratio, W/C) 灌入 PVC 模內(照片 3. 3(a))，待水泥乾凝後進行拆模，並修剪為長度約 50 cm 試體，爾後以濕毛巾裹住水泥試體進行養護(照片 3. 3(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。



(a)



(b)

照片 3. 3 (a)水泥-纜線複合材料製作過程(b)水泥養護過程

- (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. 9 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)置於剪力盒中間，控制每次外填材料重量約略一致。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

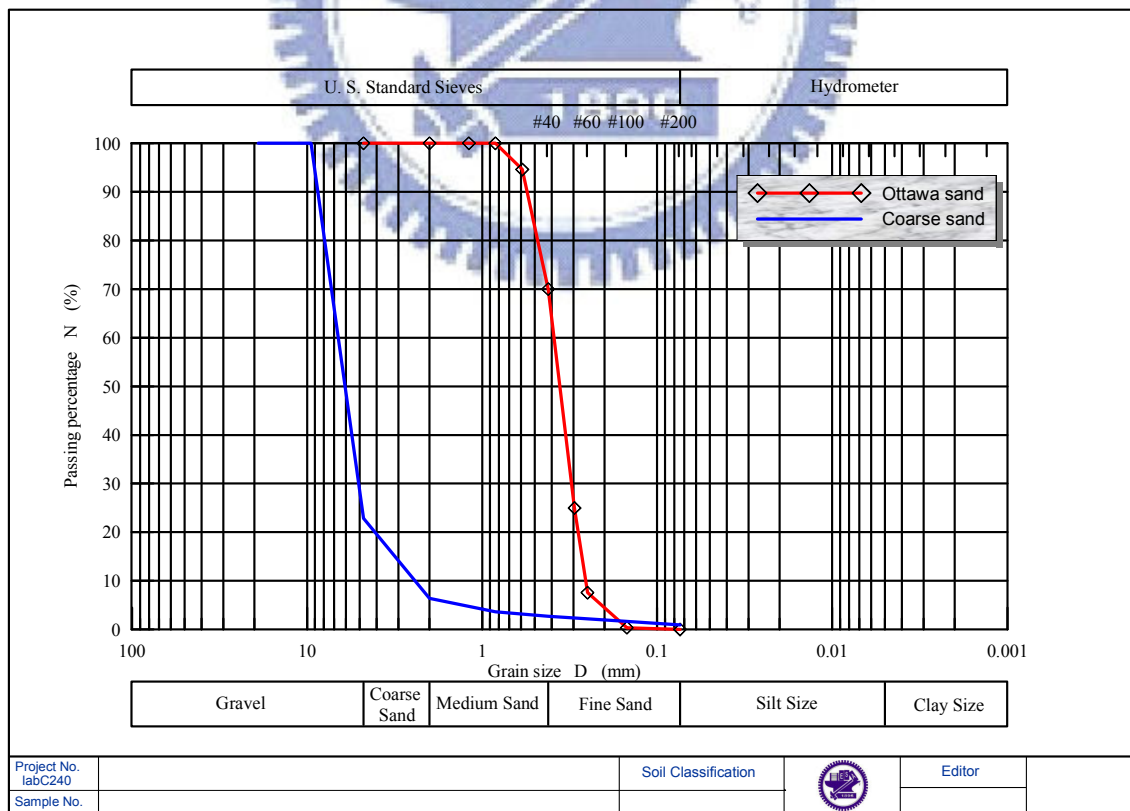


圖 3.9 土壤種類粒徑分佈曲線

3.1.3. 試驗方法

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，觀察因纜線-灌漿材料-土壤此三者受剪時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，以利進一步量化分析的依據。

茲將大型直剪試驗流程敘述如下：

1. 剪力盒裝填：如前所述，將養護好的水泥-纜線圓柱置入剪力盒中央，以固定土壤重量方式將外填材料分次夯實；另外將上、下盒與擋板接觸處塗抹黃油，以減少擋版與剪力盒摩擦力。
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，重複至剪力盒相對位移達 100 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。

3.1.4. 試驗控制因子

本研究主要將透過室內物理模型探討與了解土壤-纜線-灌漿材料三者受剪時互制行為，並據以找出一適用於軟弱地層監測之纜線，提昇地

層滑動感應的靈敏度。另一方面，探討灌漿所扮演角色，是否能有效地傳遞地滑變形至纜線而引致 TDR 波形，根據試驗結果提出現地安裝適當的灌漿材料與配比。並以不同勁度土壤，探討相同纜線其靈敏度變化，作為進一步量化分析之參考。此外，透過訊號處理，增進對 TDR 訊號之判釋，幫助提早察覺滑動發生，建立一門檻值作為實務應用時參考警戒值。

茲將試驗規劃控制因子整理如圖 3.10，並詳細說明如下：

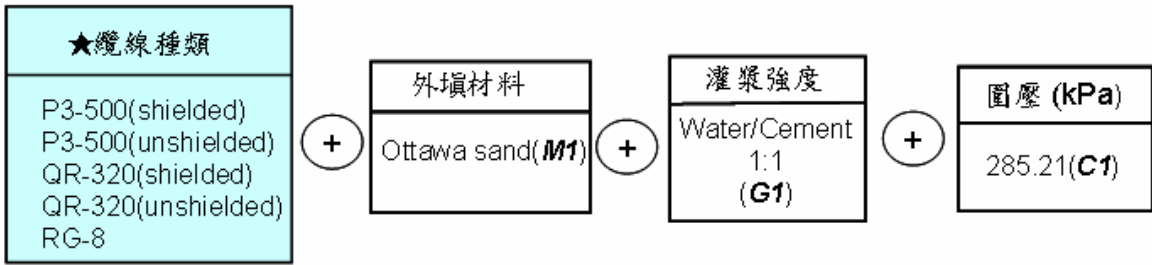
(a) 傳輸纜線種類(cable type)

試驗主要目的為了解不同纜線於相同邊界條件下因受剪而產生的反射訊號特性，提供最適用軟弱土層之纜線之選擇參考。

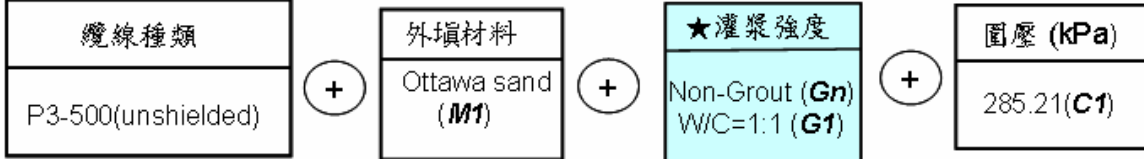
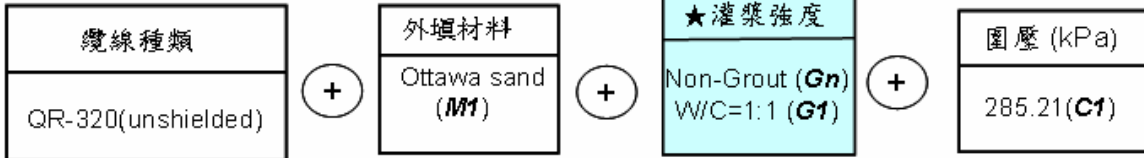
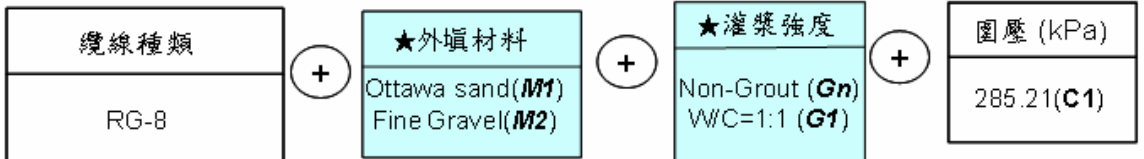
邊坡滑動監測所使用同軸纜線大多如照片 3.4(a)所示，直徑從 7.2 mm 至 22 mm 不等[12]，阻抗則以 50 歐姆或 75 歐姆(Ω)為主，根據外導體種類，纜線主要可分為軟性(braided)與硬性(solid)外導體兩類。Chen et al. (2004)提出小直徑纜線適用於變形量較小之滑動地層[14]；反之，直徑較大纜線適於變形量較大之滑動地層。此外，Dowding, et al., (2004)利用由纜線剪力試驗與有限元素分析結果，說明以照片 3.4(a)中所示兩種纜線為最佳選擇[12]。

本研究所使用纜線種類為 CommScope P3-500(硬性纜線)、QR-320(硬性纜線)與 RG-8(軟性纜線)三種纜線型式，涵蓋上述兩位學者所提出纜線種類。纜線如照片 3.4(b)所示，纜線種類特性如表 3.6 所示，三種纜線除了直徑互異，外導體亦有軟性(Braided)與硬性(Solid)之分，硬性纜線又分為外導體外側有、無橡膠包覆兩種。

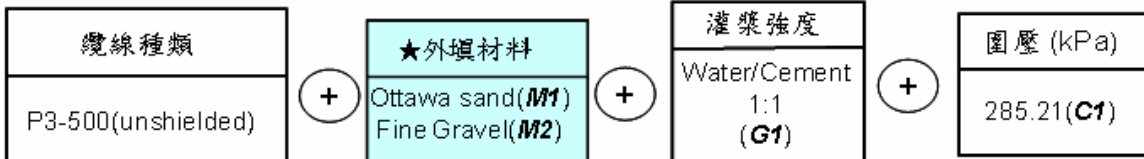
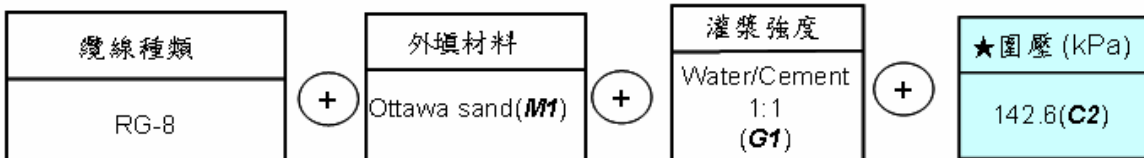
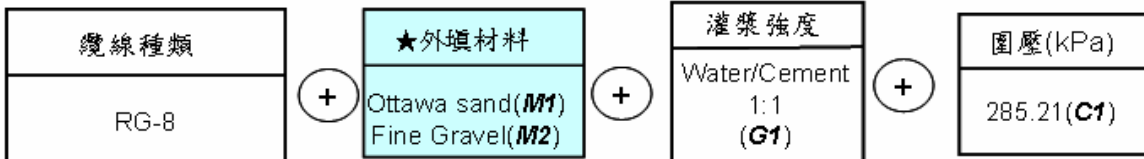
不同纜線種類之探討



灌漿材料順應性之探討



不同土壤勁度之探討

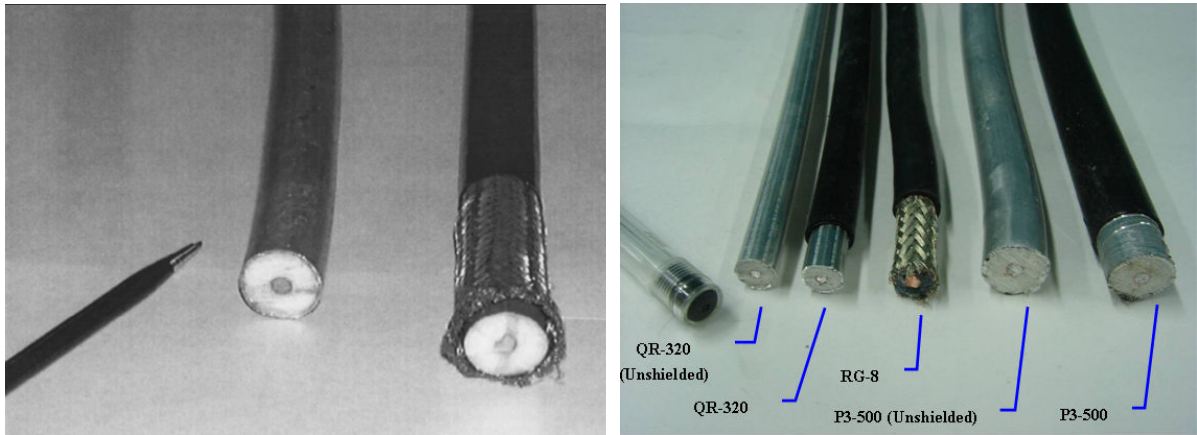


註：★為試驗控制變因。

圖 3.10 試驗規劃

表 3.6 不同纜線之種類特性

纜線種類	QR-320 JCAR		P3-500 CA		P3-500 JCA		RG-8	
	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)
纜線重量(kg/km)		83		107		141		N/A
最大曲率半徑 (mm)		50.8		16.5		8.9		N/A
最大拉力極限 (kgf)		54.5		136		136		N/A
最小破裂力(kgf)		N/A		816		816		N/A
電流容量(nf/km)		50±3		50±3		50±3		96.8
阻抗(ohms)		75±3		75±2		75±2		50
波傳速度(%)		87		87		87		84
直徑(mm)		10.03		12.4		14.3		10.3
衰減特性(20°C)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)	頻率 (MHz)	Max.(dB/100m)
	50	2.62	50	1.71	50	1.71	50	2.94
	108	4	108	2.46	108	2.46	100	4.58
	300	6.69	300	4.3	300	4.3	200	5.89
	500	8.92	500	5.67	500	5.67	700	11.77
	1000	12.76	1000	8.27	1000	8.27	1000	15.04



(a)

(b)

照片 3.4 (a) 常使用於邊坡監測之纜線(Dowding, 2004) (b)本研究使用之類同軸纜線

(b) 灌漿材料(grouting)之順應性

此試驗主要探討探討是否需要考慮灌漿材料與周圍地層的順應性。因此固定其它因子，以 QR-320、P3-500(硬)與 RG-8(軟)纜線外圍是否存在水泥灌漿包覆，進行試驗。考慮現地灌漿工作性，本試驗使用水灰比為 1:1(簡稱為 G1)。

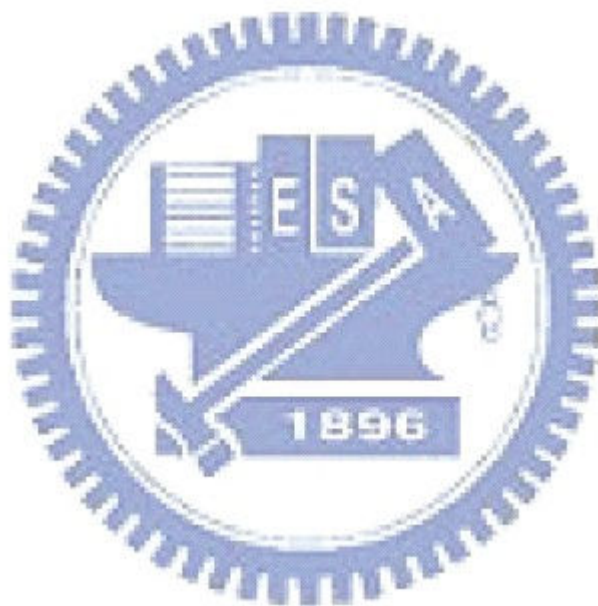
(c) 不同勁度外填材料(soil stiffness)

本試驗主要探討纜線於不同勁度土壤中之靈敏度等與量化相關的參數。外填材料為渥太華砂(Ottawa sand, 簡稱為 M1)、細礫石(fine gravel, 簡稱為 M2)兩種材料，並且以不同圍壓應力代表軟、中與硬三種材料。

(d) 圍壓應力(confine pressur)

為充分模擬現地邊界條件，本試驗模型具有可施加圍壓應力之設備，模擬現地某深度下的覆土應力(Overburden Pressure)狀態，亦利用不同圍壓應力代表不同勁度土壤。試驗所施加圍壓應力分別為 285.21 kN/m² (千斤頂施力=1760 kg, 簡稱為 C1)與 142.6 kN/m² (千斤頂施力=880 kg, 簡稱為 C2)，以渥太華砂而言，大約模擬現地深度約為 8 m 與

17.4 m 左右之覆土應力。



3.2. 提早偵測 TDR 錯動變形訊號處理方法

為了更清楚辨識 TDR 反射訊號而不受雜訊影響，將利用訊號分析方法針對 TDR 反射波形進行處理。本研究所使用訊號分析方法為常見小波方法中的 Daubechies 小波，並引用 Donoho and Johnstone (1994)[26] 所提出之「小波係數臨界法」將雜訊經由小波轉換後，利用設立臨界值 (threshold) 概念去除雜訊。以下就 Daubechies 小波及小波係數臨界法作一簡單介紹：

(a) Daubechies Wavelets :

首先介紹 Daubechies wavelets 之轉移函數如下：

$$m_0(\omega) = \left(\frac{1 + e^{-i\omega}}{2} \right)^N L(\omega) \dots\dots\dots (3-2)$$

$N (\geq 2)$ 表示小波函數 (wave function, $\Psi(x)$) 中之零慣量 (vanishing moments) 的數目，亦即

$$\int x^n \psi(x) dx = 0, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \dots\dots\dots (3-3)$$

$L(\omega)$ 為一三角多項式， $|L(\omega)|^2$ 是由 $\cos \omega$ 所構成的多項式。

$$|L(\omega)|^2 = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N-1} a_k \cos^k \omega \dots\dots\dots (3-4)$$

將 $\sin^2 \frac{\omega}{2} = \frac{1 - \cos \omega}{2}$ 代入式(3-4)，並令輔助多項式 $P(\omega)$ 為 $\sin^2 \frac{\omega}{2}$ 所構成的多項式，且 $|L(\omega)|^2 = |P_A(e^{-i\omega})|$ 。假設 $z = e^{-i\omega}$ ，則 $\cos \omega = \frac{z + z^{-1}}{2}$ ，則 $P(\omega)$ 可改寫成下式：

$$P_A(z) = \frac{1}{2} \sum_{k=1-N}^{N-1} a_{|k|} z^{N-1+k} \dots\dots\dots (3-5)$$

由式(3-5)求出 $P_A(z)$ 進而求出 $L(\omega)$ 後再求得 m_0 ， $\sqrt{2}m_0(\omega)$ 之係數即為小波函數係數 ($h_0, h_1, \dots, h_{2N-1}$)。本研究所使用的小波為為 Daubechies 3，簡性為 DB3，是以零慣量為 3 所求得之型式(張信常，2004)[4]。

(b)小波係數臨界法：

Donoho and Johnstone (1994) 提出利用小波增強訊號的方法將夾帶雜訊經小波分解，再利用設定臨界值(Threshold)的概念將小於臨界值之雜訊過濾。其中門檻值又分為硬式(Hard)與彈性式(Soft)兩種，本研究所使用之軟式臨界值如下式：

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log n} \dots\dots\dots (3-6)$$

式(3-6)中 λ (Time Constant Threshold Value) 為門檻值， n 為訊號長度， σ 為訊號標準差 ($\sigma = m / 0.6745$)，其中， m 為小波係數絕對偏差之中位數[25]。

利用上述方法將反射訊號作一後處理，茲將分析過程如下：

- (1)雜訊處理(de-noising): 透過 Matlab 工具作處理，選用 Daubechies 3 並配合軟式臨界值過濾雜訊。
- (2)反射係數變化量($\Delta \rho$): 將每一筆資料與原始資料之差值去找出微小變化，將微小變化量定義稱為 $\Delta \rho$ 。其概念如下式。

$$\Delta \rho_i = \rho_i - \rho_r \dots\dots\dots (3-7)$$

式(3-7)中， i 為量測筆數，通常為量測日期， ρ_r 為初始量測值。

第四章 試驗結果與討論

本研究主要分為三部份，第一、室內錯動變形試驗，探討材料互制相關影響因子；第二、由錯動變形結果與現場安裝經驗針對現地安裝之標準程序與量化分析提出建議；第三為訊號分析方法研究，探討是否能提早偵測 TDR 錯動。本章將先整理與討論室內錯動變形試驗結果與量化分析，再嘗試以訊號分析方法處理試驗資料，評估訊號處理用於提早偵測變形之成效，茲將結果分述如下。

4.1. 錯動變形試驗影響因子探討

為充分模擬現地纜線-灌漿材料-土壤三者互制行為，規劃一系列錯動變形，試驗配置與規劃已於 3.1.4 節詳述，主要目的為找出一適用於軟弱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-位移曲線整理如圖 4.1，對應剪力盒位移量與反射係數關係則如圖 4.2 所示。本試驗以渥汰華砂或細礫石加上 285.21 kN/m² 圍壓應力，整體勁度皆比寶山砂岩之強度小(如圖 4.1)[6]。亦即試驗所規劃外填材料勁度小於軟弱砂岩，以渥汰華砂而言，更遠小於寶二砂岩。

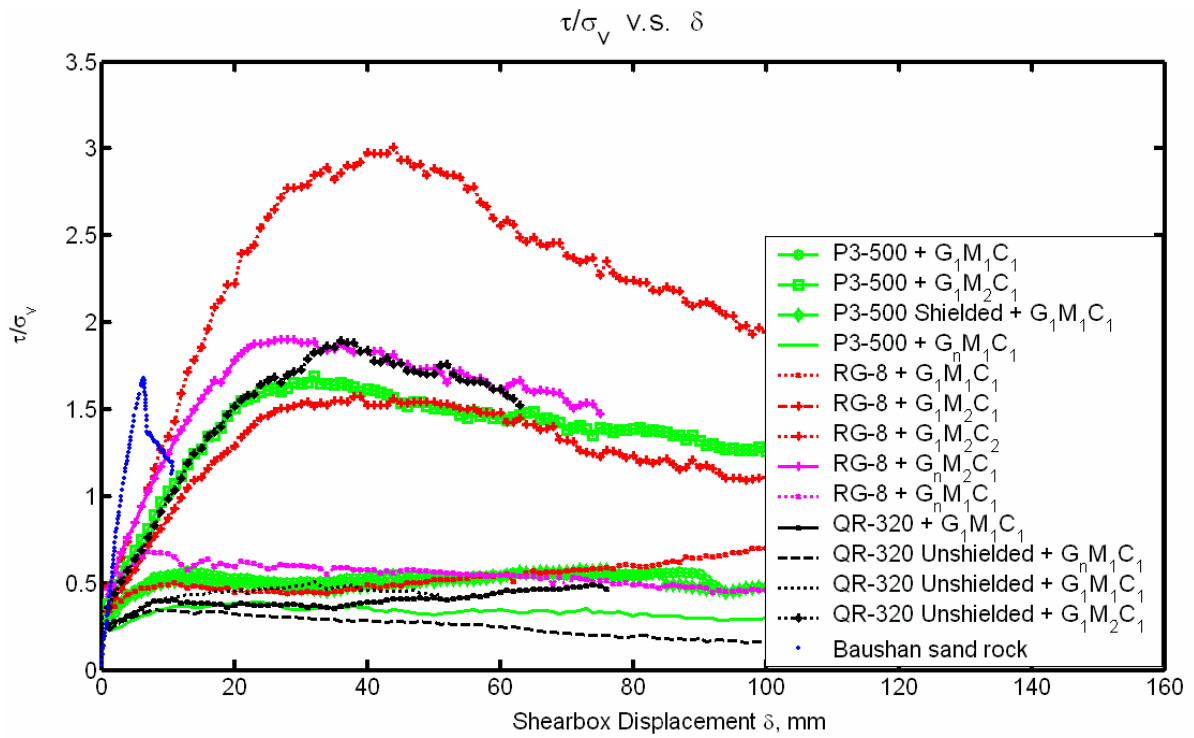


圖 4.1 不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線

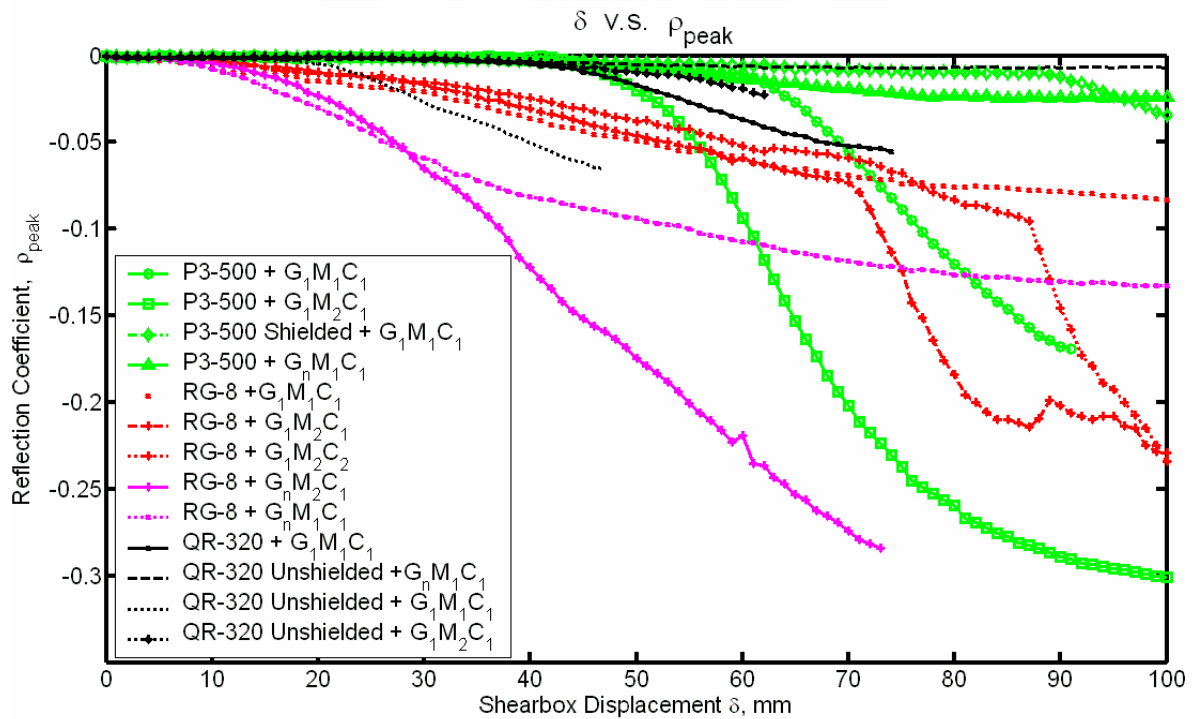


圖 4.2 不同試驗條件下之反射係數-水平位移曲線

茲將室內錯動變形試驗結果分為傳輸纜線受剪特性、灌漿材料之順應性與不同勁度外填材料之影響三個因子，將依序在後續小節探討。

4.1.1. 傳輸纜線受剪特性

傳輸纜線種類繁多且特性不一，何種纜線較適用於軟弱土壤中監測位移是值得研究的課題。此一小節即是本研究針對不同種類纜線(硬性與軟性、有無橡膠包覆)，控制灌漿配比($W/C=1:1, G1$)與外填材料為渥太華砂，並於每次試驗前施以固定之圍壓應力(285.21 kN/m^2)以確保每次之邊界條件為相近，探討纜線於固定外填材料與灌漿配比之靈敏度(sensitivity, S)與初始啟動門檻值(trigger threshold value, δ_D)之結果，並據以決定適用於軟弱地層的纜線。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)、迴歸啟動門檻值(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 所示，對應整體複合材料剪力勁度(shear stiffness, k_{gs})整理於表 4.1，其中除了 P3-500 unshielded 斜率較陡之外(線性段斜率=83)，其餘資料可視為同一區域內(線性段斜率=37~52)，研判此差異是因為 P3-500 纜線為硬性(solid)外導體，勁度較其它纜線來得大所致。

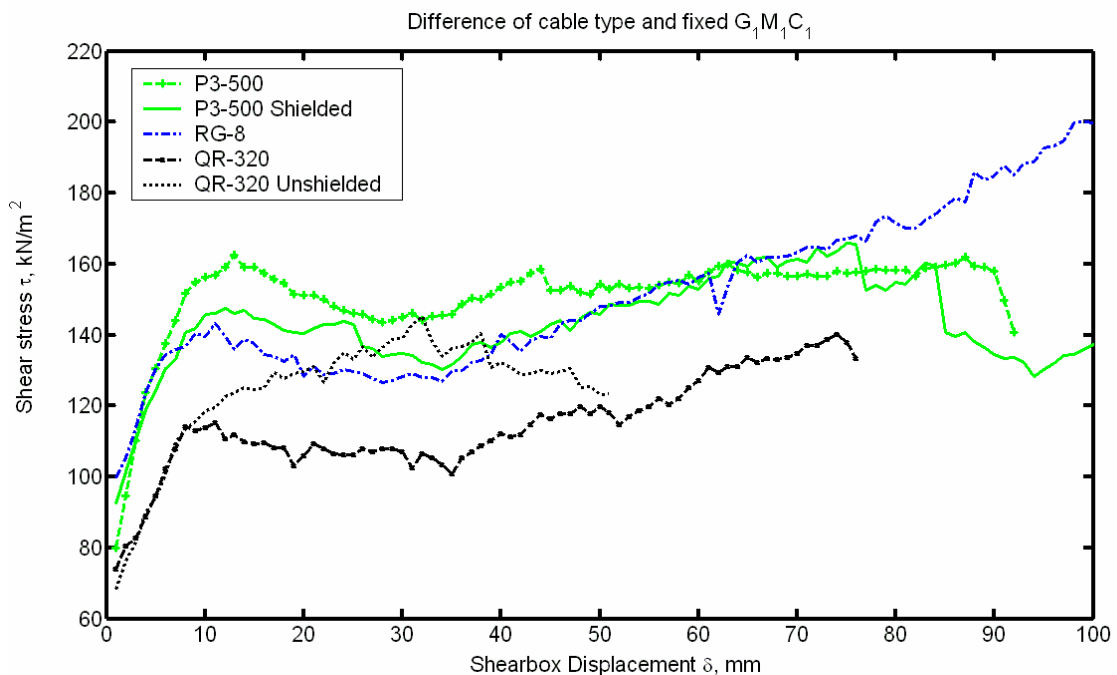


圖 4.3 不同纜線試驗之剪應力-水平位移曲線

表 4.1 不同纜線於相同外填材料與水泥配比下之反應特性比較

Cable Type	Diameter (mm)	Proportion of Water/Cement (W/C)	Backfill Soil type	Shear Stiffness, k_{gs} (slope of τ - δ)	Linear Regression				Confining Stress (kN/m^2)	Curing (day)
					Trigger Threshold Value, δ_p (mm)	Regression Threshold Value, δ_0 (mm)	Sensitivity, $S(p/mm)$	Rsquare, R^2		
P3-500 (unshielded)	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	83	39 ^(C)	59.5411 ^(D)	0.0056710 ^(A)	0.9949	285.21	3
P3-500 (shielded)	14.3	W/C=1:1	Ottawa sand	52	44 ^(E)	83.9489 ^(E)	0.0021006 ^(C)	0.9891	285.21	3
RG-8	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	51	5 ^(A)	5.8632 ^(A)	0.0010713 ^(E)	0.9905	285.21	3
QR-320 (shielded)	10.03	W/C=1:1	Ottawa sand	37	40 ^(D)	38.8558 ^(C)	0.0016730 ^(D)	0.9893	285.21	3
QR-320 Unshielded	8	W/C=1:1	Ottawa sand	41	16 ^(B)	17.8079 ^(B)	0.0022450 ^(B)	0.9909	285.21	3

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

(2) TDR 反射波形：

圖 4.4 為各纜線反射係數，相同條件下，以軟性 RG-8 纜線之初始反應較靈敏，只要剪力影響區域內的水泥灌漿圓柱產生破壞，即可有效傳遞外在變形至纜線而產生反射波形。但因本身勁度小，外力不易集中於單一處而造成反射波形出現雙剪(Double Peak);相對地，硬性纜線 P3-500 與 QR-320 因其纜線本身勁度大，需要較大的外力方能促使纜線產生反應，使得變形初期較不易產生波形反應，外力需將纜線外覆之灌漿材料擠碎後(如照片 4.1)才因應力集中而產生反射訊號且發展趨勢則較具一致性(如圖 4.4)。

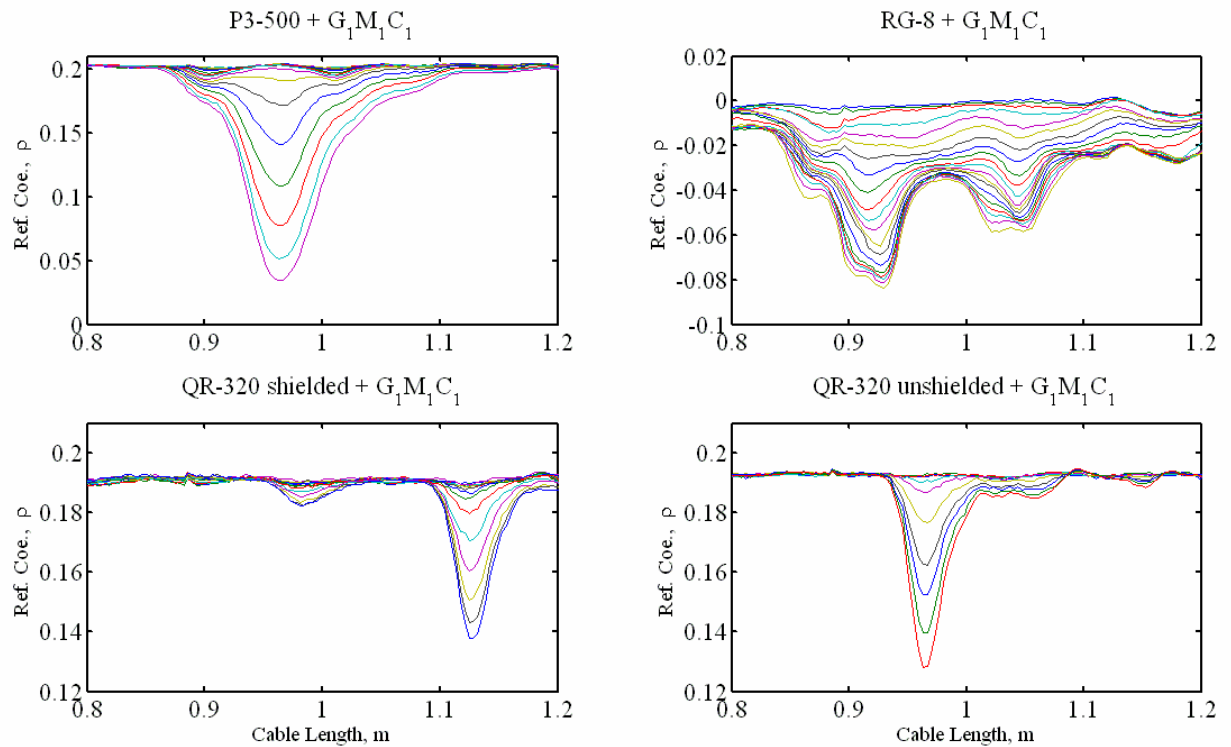
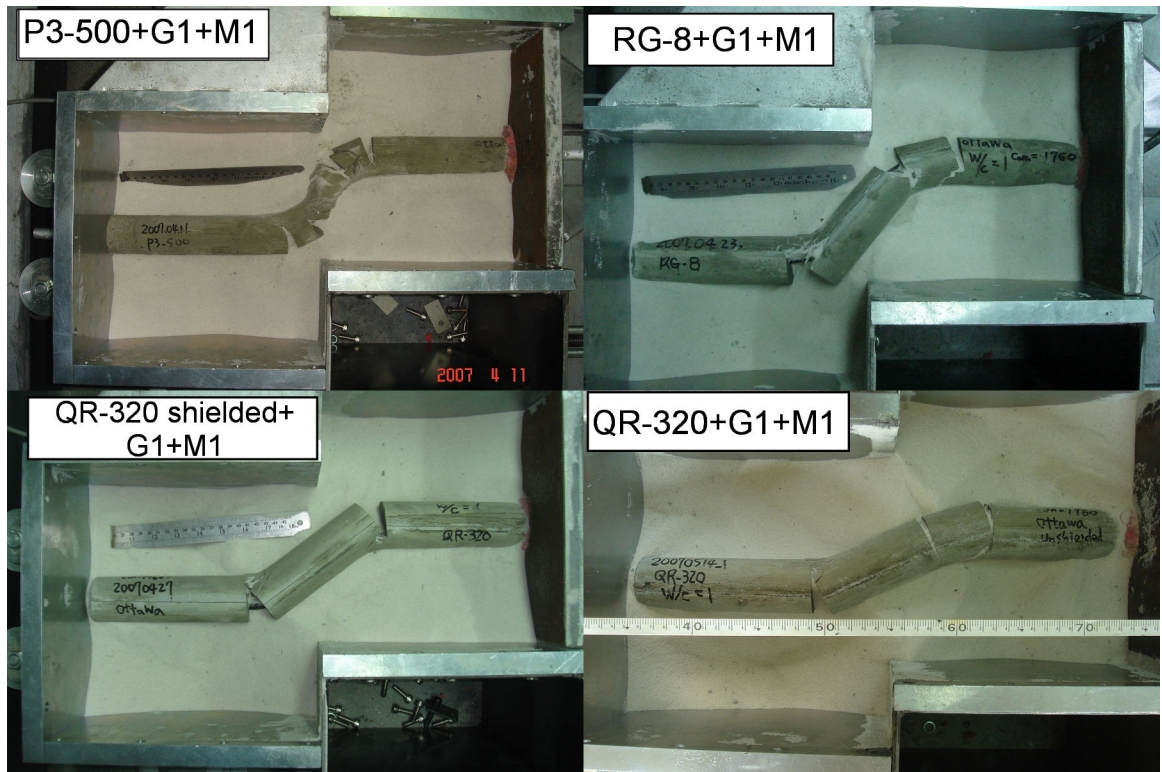


圖 4.4 不同纜線受剪之反射波形



照片 4.1 不同纜線-灌漿材之變形模式

(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($S, \rho/\text{mm}$)，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 $\rho - \delta_{\text{peak}}$ 所得量化方程式與橫軸(δ)之截距。

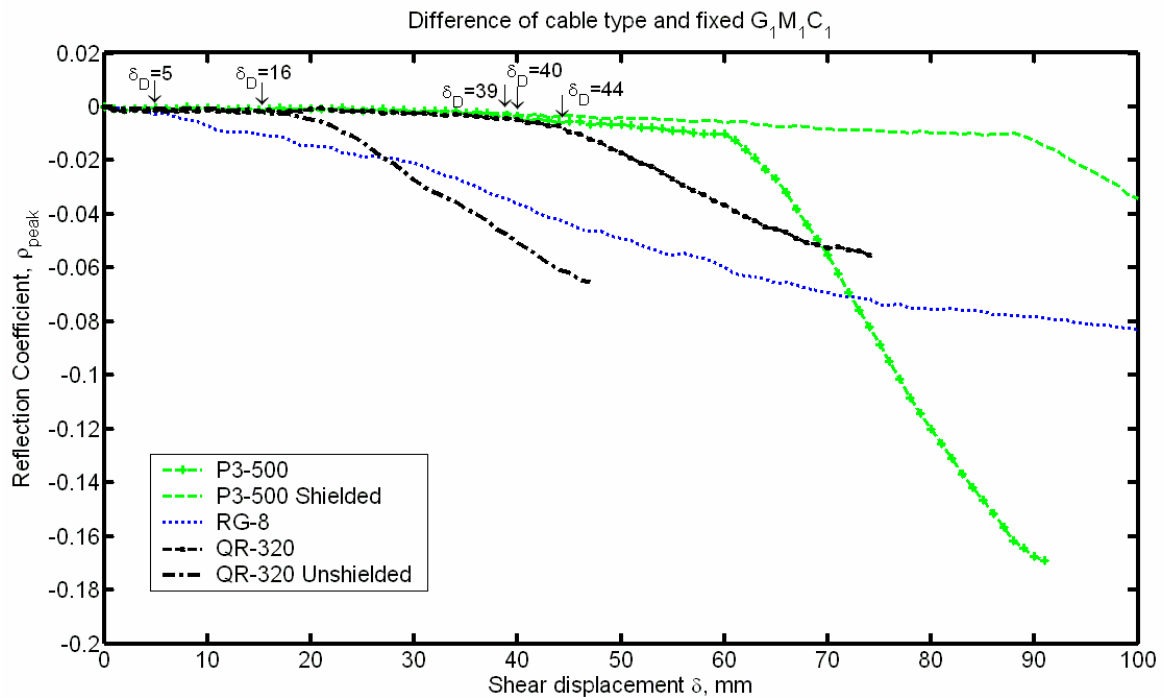


圖 4.5 不同纜線與灌漿材於渥太華砂之靈敏度

比較表 4.1 五種纜線初始啟動門檻值(δ_D)與迴歸門檻值(δ_0)，顯示以 RG-8 的 δ_D 與 δ_0 最小(5 mm, 5.8632 mm)，亦即有最佳之初始反應(最早偵測到滑動)，P3-500 (外導體有橡膠保護) 則最晚產生初始反應，如前所述，造成此現象乃因為 P3-500 纜線勁度較大，所需初始啟動門檻值(δ_D)較大。由照片 4.1 也可發現 P3-500 纜線-灌漿材破壞模式較 RG-8 與 QR-320 碎裂，研判是雖然灌漿材料已產生張力裂縫，但由於纜線本身勁度較大，使得破裂面不易集中而擴大破碎帶。

當變形量超過啟動門檻值，由灌漿材料傳遞與束制作用將使得反射係數與剪力盒位移量呈線性關係發展，回歸此線性段得到斜率亦即靈敏度(S , ρ/mm)，如表 4.1，靈敏度以 P3-500 型(外導體無橡膠保護)型靈敏度最高，而外導體有橡膠保護的 RG-8 型最低。

綜觀上述結果，不同的纜線型態對於錯動位移的 TDR 反應不同，若地層滑動屬於岩層的層面或節理面之滑動，目前一般會採用硬殼式(如 P3-500 型)的纜線，但建議採用無塑膠皮披覆的纜線，避免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的防腐蝕；若地層屬於軟岩或土壤，則軟式的 RG-8 型纜線似乎比一般習用的硬式纜線更容易提供滑動的預警；此外，由圖 4.5 可得知 P3-500 型與 RG-8 纜線有較大的位移量測範圍(以 P3-500 Unshielded 型而言，至少為 92mm 才斷裂)，可提供較大變位之量測。

4.1.2. 灌漿材料之順應性

本試驗主要目的為探討纜線外灌漿材料之順應性(即灌漿材料與周圍土壤之順應)，並進一步探討是否有助於量化分析。利用 4.1.1 小節所使用五種纜線進行初步測試，發現 P3-500 型纜線(外導體有橡膠保護)外表披覆塑膠皮會隨剪動過程與內導體產生相對滑動，與現場使用經驗相符，降低靈敏度。QR-320 型纜線(外導體有橡膠保護)初始啟動門檻值為 QR-320 型(外導體無橡膠保護)的三倍，考慮現地實用性與為了最早察得滑動量，捨棄前述 P3-500 型(外導體有橡膠保護)與 QR-320 型纜線(外導體有橡膠保護)，選出另外三種纜線進行灌漿材料順應性之試驗。試驗結果分為外填土壤勁度、TDR 反射波形、以及與各纜線靈敏度(S)三個因子探討如下：

(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 ，外填材料為渥太華砂，只改變灌漿材料有無，此外，為了解不同外填材料之影響，另外施作一組細礫石作為對照組。將試驗之 $\tau - \delta$ 關係整理成圖 4.6，圖中顯示無論灌漿材料有無，外填材料為渥太華砂的纜線剪應力座落於相近區域，同理，細礫石的資料則座落於較高的相近區域。

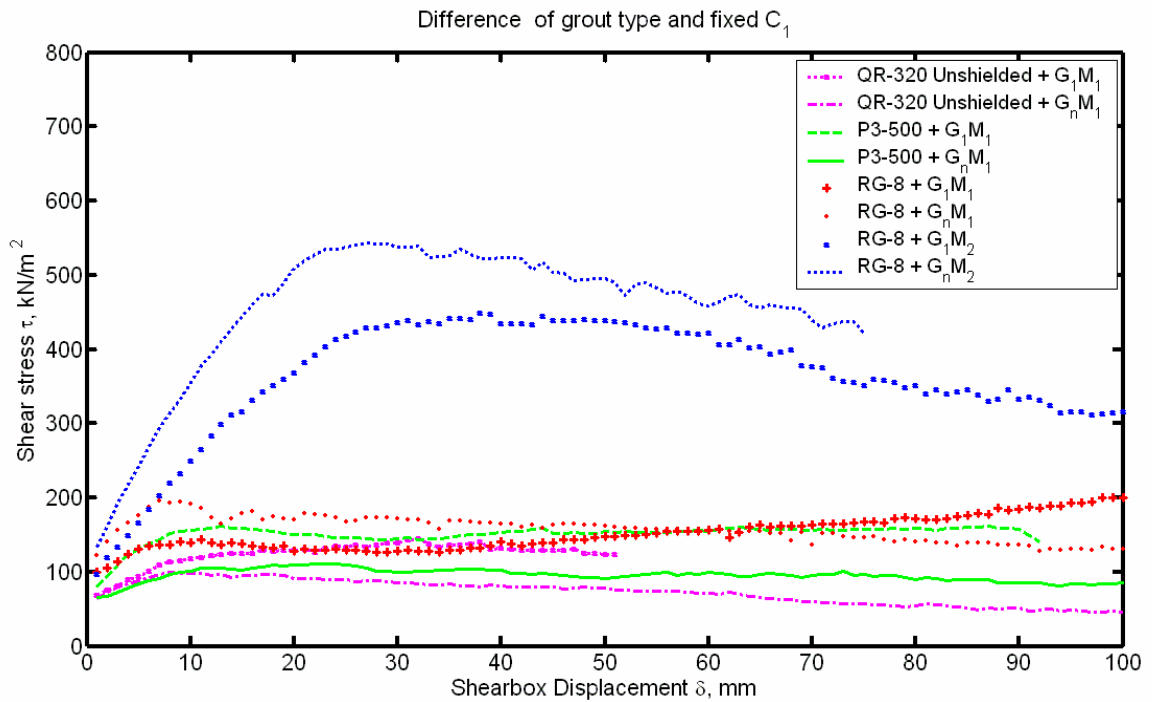


圖 4.6 灌漿材料順應性試驗之剪應力-水平位移曲線

(2) TDR 反射波形：

圖 4.7 為不同纜線探討灌漿材料順應性之反射波形，可以觀察得：硬性纜線(P3-500 型與 QR-320 型)，在無灌漿材料(圖 4.7 右側)之順應下，TDR 反射波形發展不一、不易辨識。反之，有灌漿材料之反射波形(圖 4.7 左側)因為灌漿材料之順應性而有效地將外力傳遞給纜線，使得波形沿單一尖峰狀發展(如照片 4.2)，此現象對於波形判釋與量化分析上有很大的幫助；而軟性纜線(RG-8 型)因本身勁度小，外力易直接轉稼給纜線，因此在沒有灌漿材料包覆下之效果比有灌漿的纜線易產生反射訊號(圖 4.7 右下側)。

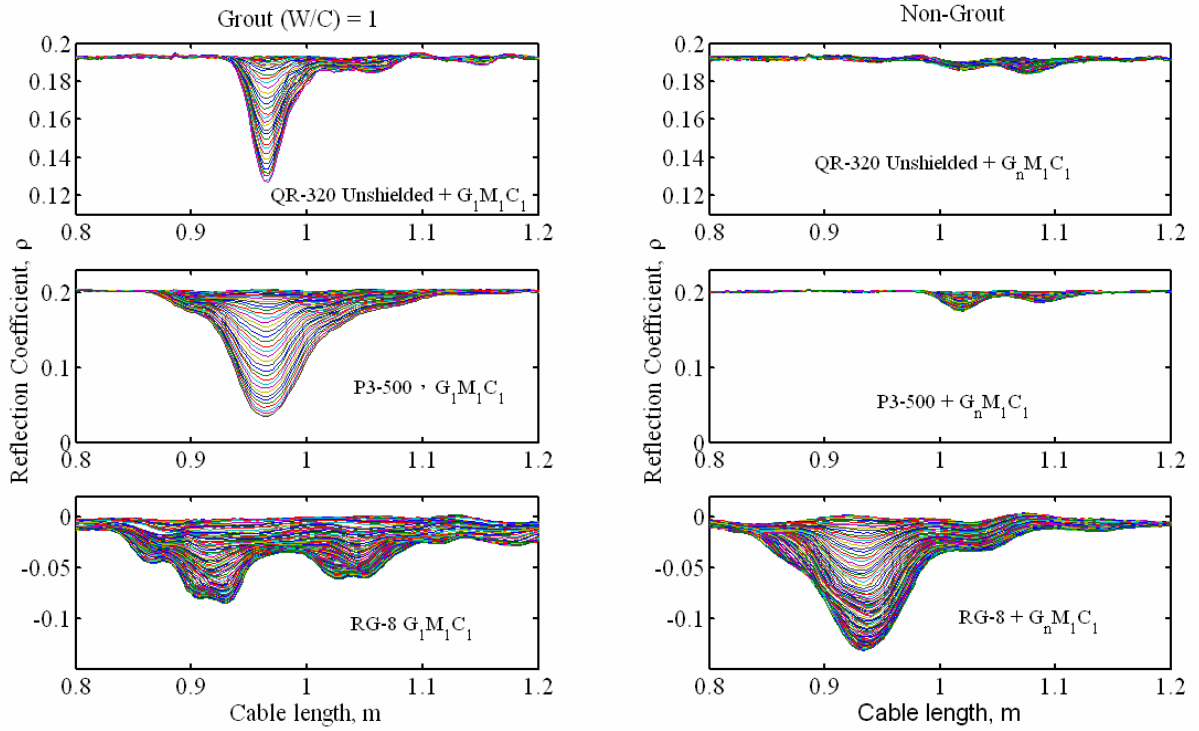
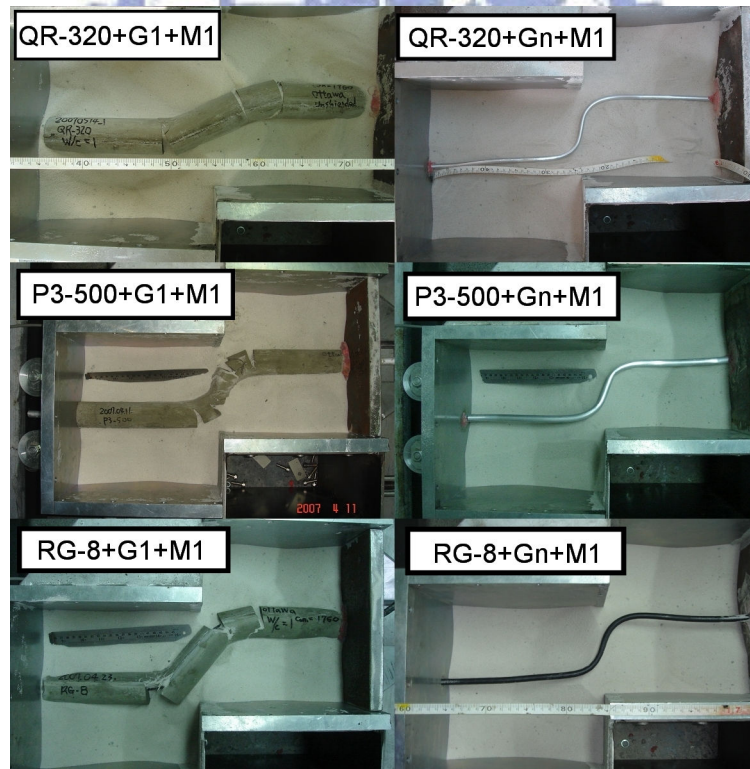


圖 4.7 灌漿材料順應性試驗之反射波形



照片 4.2 灌漿材料順應性試驗之變形模式

(3) 靈敏度：

圖 4. 8 為纜線 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 關係，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. 8 與表 4. 2，顯示 QR-320 型纜線有無灌漿材料束制，其靈敏度相差甚大 (0.0022450 v.s. 0.0000719)，P3-500 型纜線亦有類似情形。此外，RG-8 型纜線因其外導體為軟性編織網狀，受力時較易產生反射訊號，因此即使 RG-8 纜線不加灌漿材料而直接置於外填材料，如渥太華砂或細礫石，剪力仍可直接由外填材料輕易轉稼給纜線；反之，當 RG-8 受灌漿材保護，剪力反而需要破壞灌漿材料後才能有效傳給纜線，造成 RG-8 與 QR-320(或 P3-500)纜線試驗結果的差異性。

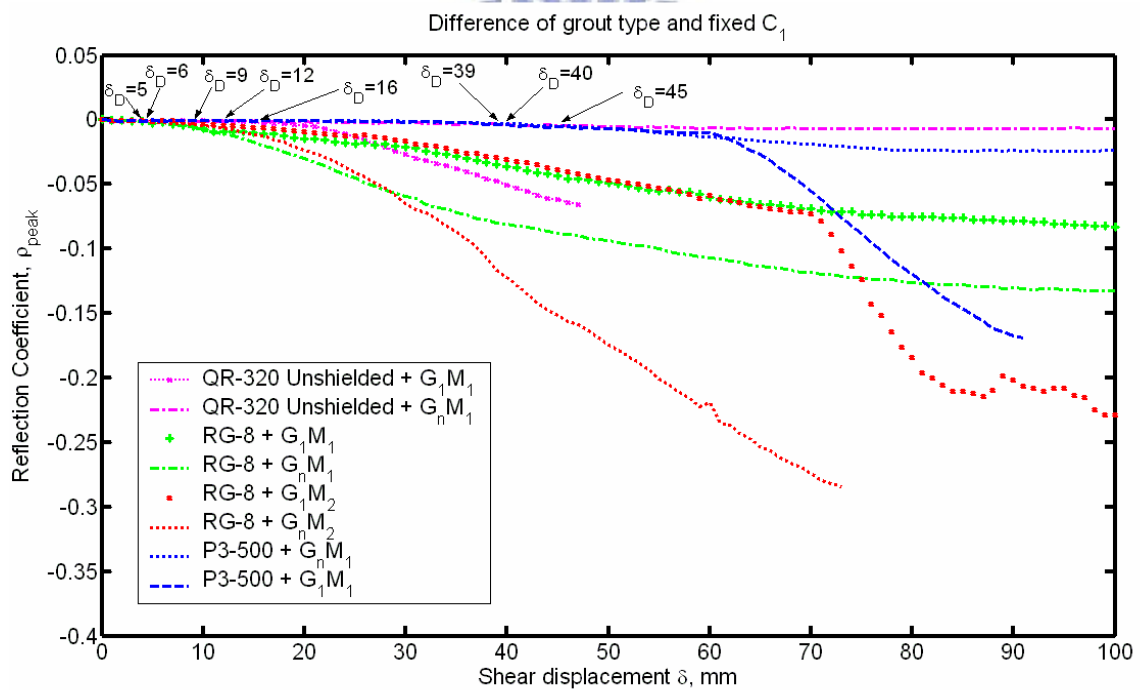


圖 4. 8 灌漿材料順應性試驗之靈敏度

上述試驗結果可觀察出：若纜線勁度大於土壤(如本試驗之 P3-500 型與 QR-320 型)，則灌漿材料有助於傳遞剪力變位；反之，若纜線勁度小於土壤(如本試驗之 RG-8 型)，則灌漿材料並無助於剪力之傳遞。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(如圖 4. 12 及 4.1.3 節之討論)。

表 4.2 不同灌漿材料順應性下，相同纜線之反應特性比較

Cable Type	Diameter (mm)	Proportion of Water/Cement (W/C)	Backfill Soil type	Shear Stiffness, k_{gs} (slope of $\tau-\delta$)	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	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	51	5 ^(A)	5.8632 ^(A)	0.0010713 ^(F)	0.9905	285.21	3
RG-8	10.3	W/C=1:1	Fine Gravel	103	12 ^(D)	13.9663 ^(D)	0.0012770 ^(E)	0.9863	285.21	3
RG-8	10.3	N/A	Fine Gravel	41	9 ^(C)	14.358 ^(E)	0.0048700 ^(B)	0.9892	285.21	3
RG-8	10.3	N/A	Ottawa sand	75	6 ^(B)	7.4867 ^(B)	0.0014389 ^(D)	0.9275	285.21	3
QR-320(unshielded)	8	N/A	Ottawa sand	31	45~57 ^(H)	12.7856 ^(C)	0.0000719 ^(H)	0.8345	285.21	3
QR-320(unshielded)	8	W/C=1:1	Ottawa sand	41	16 ^(E)	17.8073 ^(F)	0.0022450 ^(C)	0.9909	285.21	3
P3-500(unshielded)	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	83	39 ^(F)	59.5411 ^(H)	0.0056710 ^(A)	0.9949	285.21	3
P3-500(unshielded)	12.4	N/A	Ottawa sand	26	40 ^(G)	27.8549 ^(G)	0.0003989 ^(G)	0.9043	285.21	3

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

4.1.3. 不同勁度外填材料之影響

本小節試驗主要目的為探討纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度是否一致，若不一致，將造成量化分析上的困難(因個別條件不同，例如：土壤勁度)。因此，本研究擬以室內所建立物理模型(大型直剪儀)，探討此一影響因子。

在施作 4.1.1 與 4.1.2 小節試驗時，時常發現 QR-320 纜線重複性不佳且內導體易受拉扯而頸縮斷裂(圖 4.9)，顯示 QR-320 不適合應用於現地監測，故捨棄 QR-320 型纜線進行本節相關試驗。

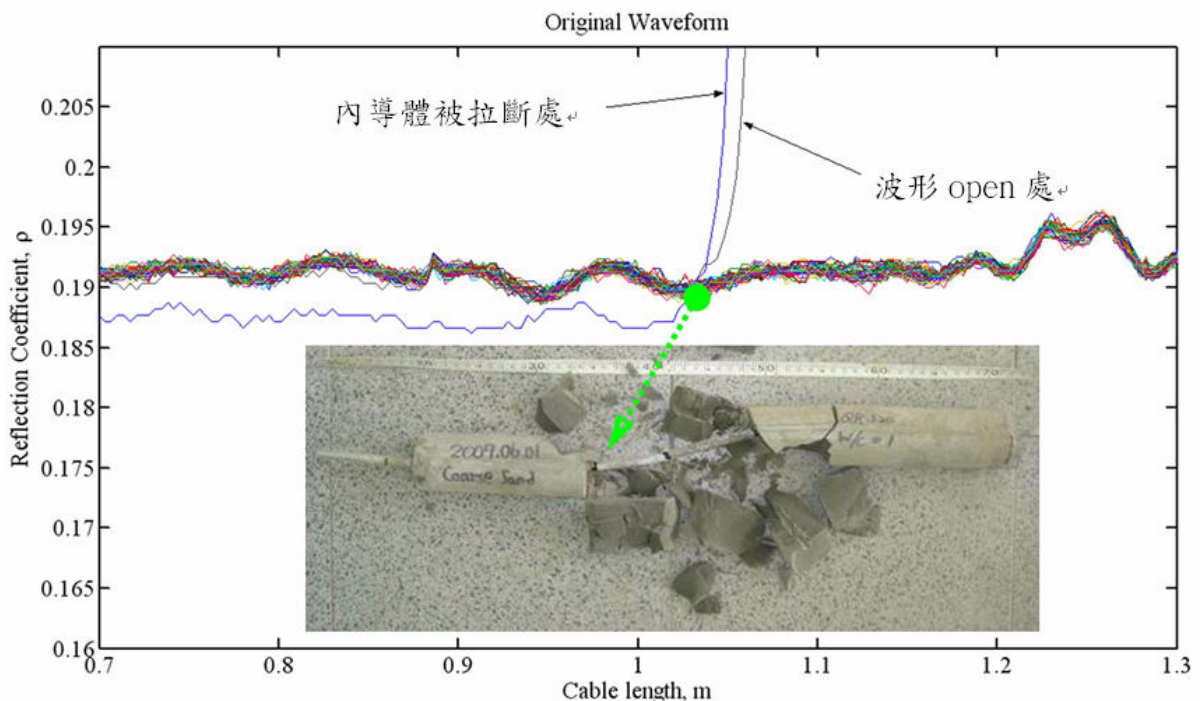


圖 4.9 QR-320 型纜線之內導體受拉而產生頸縮

在 4.1.1 節不同纜線試驗，以 RG-8 型有最小 δ_D 與靈敏度較佳之 P3-500(無橡膠包覆)進行此系列試驗。為深入了解與確定外填材料勁度對於 δ_D 的影響，首先將針對外填材料勁度與 δ_D 之關係進行探討，其次依序探討 TDR 反射波形與各纜線靈敏度(S)：

(1) 外填土壤勁度與初始啟動門檻值(δ_D)之關係：

固定纜線種類與灌漿配比为 1:1，外填土壤為渥太華砂與細礫石，並於

施加不同圍壓應力(285.21 kN/m² 與 142.6 kN/m²)藉以得到兩種不同勁度之外填材料。不同圍壓與不同外填材料之剪應力-位移曲線與整體外填材料之剪力勁度如圖 4.10 與表 4.3 所示。圖 4.10 內剪應力-位移曲線顯示渥太華砂與細礫石尖峰強度之差異甚大，表 4.3 亦顯示兩種外填材料剪力勁度具有差異性，能代表兩種不同勁度之土壤。

而不同勁度外填材料下之初始啟動門檻值(δ_D)，以 RG-8 型分別為：5 mm、12 mm 與 9 mm；P3-500 型為 39 mm 與 43 mm。初始啟動門檻值(δ_D)是以目視法去判定反射訊號是否有明顯改變；另外，每次試驗雖儘量控制試驗條件一致，但因外填材料為土壤，可能造成少許誤差等原因而造成初始啟動門檻值(δ_D)之不同。因此，不同勁度外填材料下之初始啟動門檻值(δ_D)仍可視為相近。

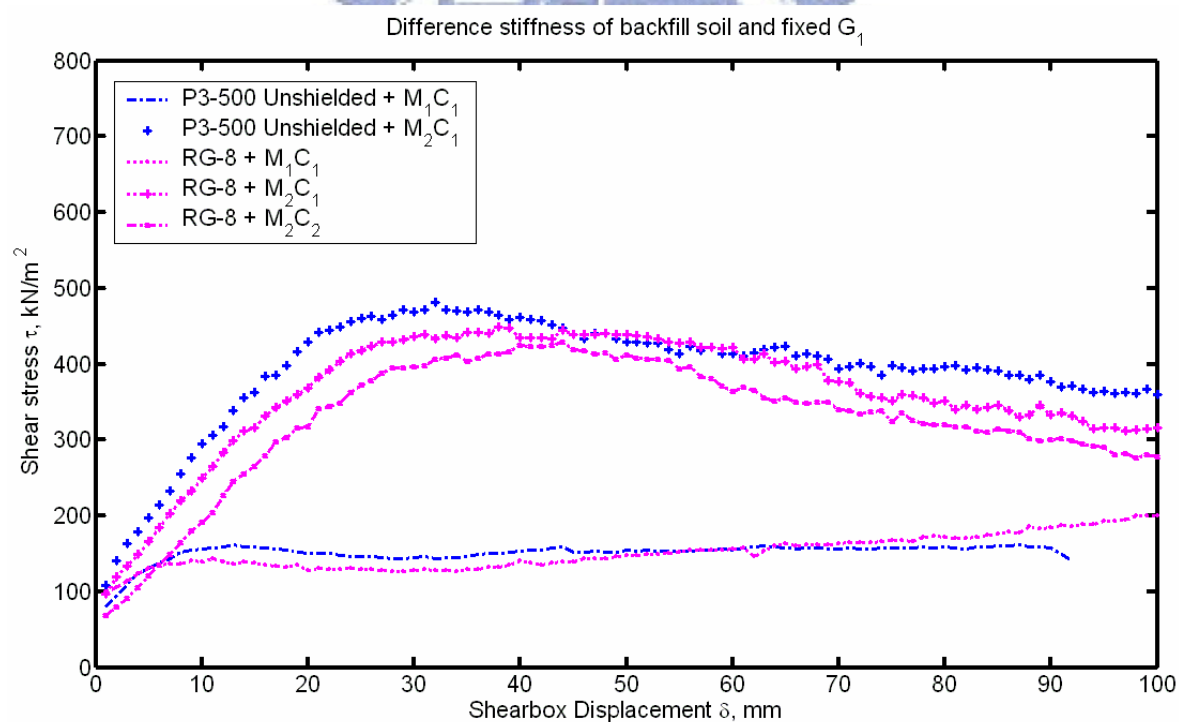


圖 4.10 不同外填材料試驗之剪應力-水平位移曲線

表 4.3 不同外填材料勁度下，相同纜線之反應特性比較

Cable Type	Diameter (mm)	Proportion of Water/Cement (W/C)	Backfill Soil type	Shear Stiffness, k_{gs} (slope of τ - δ)	Linear Regression				Confining Stress (kN/m^2)	Curing (day)
					Trigger Threshold Value, δ_p (mm)	Regression Threshold Value, δ_0 (mm)	Sensitivity, $S(p/\text{mm})$	Rsquare, R^2		
P3-500 (unshielded)	12.4	W/C=1:1	Ottawa sand	83	39 ^(D)	59.5411 ^(E)	0.0056710 ^(B)	0.9949	285.21	3
P3-500 (unshielded)	14.3	W/C=1:1	Fine Gravel	117	43 ^(E)	43.2656 ^(D)	0.0062864 ^(A)	0.9393	285.21	3
RG-8	10.3	W/C=1:1	Ottawa sand	51	5 ^(A)	5.8632 ^(A)	0.0010713 ^(D)	0.9905	285.21	3
RG-8	10.03	W/C=1:1	Fine Gravel	103	12 ^(C)	13.9663 ^(C)	0.0012770 ^(C)	0.9863	285.21	3
RG-8	8	W/C=1:1	Fine Gravel	91	9 ^(B)	10.968 ^(B)	0.0009791 ^(E)	0.9740	142.6	3

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

(2) TDR 反射波形：

圖 4. 11 顯示 RG-8 纜線於不同勁度外填材料下之反射波形，分別代表同一複合材料(RG-8 + G1)於不同勁度下之反射波形，可看出於勁度較小之外填材料其對應 TDR 反射波形帶寬為 12.22 cm，勁度較大者則為 7.38 cm，說明纜線於軟弱土壤與堅硬土壤之 TDR 反射波形差異性，即是纜線於堅硬地層中(如岩層的層面或節理面之滑動)受剪所造成的反射波形易發展成局部剪力模式(亦即單一尖峰狀)；而纜線於較軟弱地層(如軟岩或土壤)受剪所造成的反射波形易發展成剪力帶模式(亦即兩尖峰狀)。此外，當外填材料較軟弱時，纜線-灌漿材之破裂模式較不集中也較不碎裂(照片 4. 3 左側)，符合前述外填材料較軟弱時反射波形較不易集中成單一尖峰狀之現象。

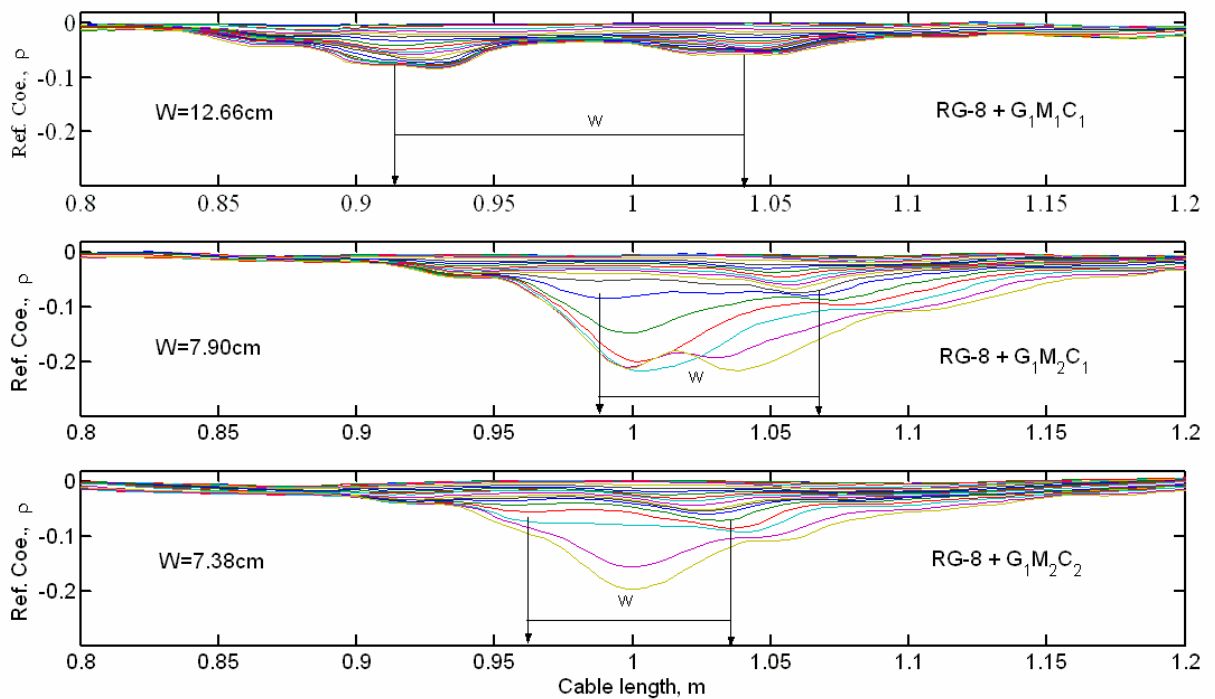
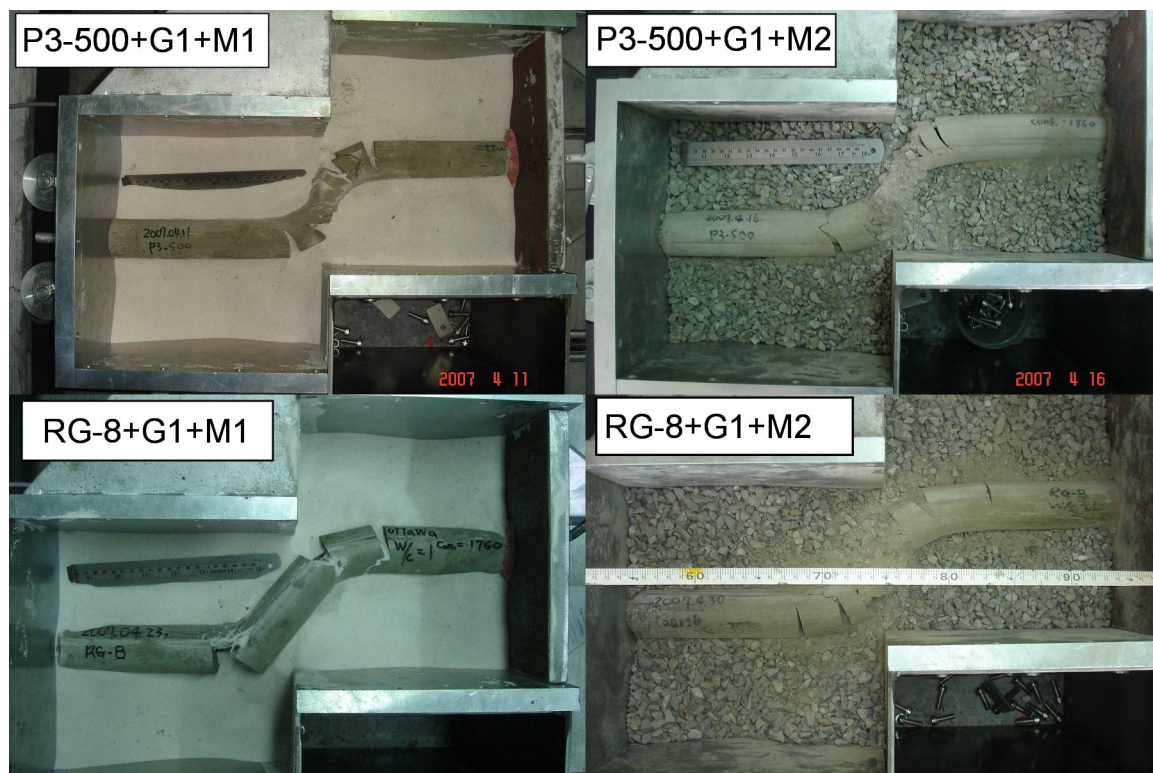


圖 4. 11 同一纜線於不同勁度外填材料下之反射波形



照片 4.3 同一纜線於不同勁度外填材料下之變形模式

(3) 靈敏度：

圖 4.12 為各纜線 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 關係。其中軟性纜線 RG-8 於 70 mm 及 87 mm 處出現斜率轉折，經比對後發現是因為波形由雙剪發展成單剪之交界。這意味此試驗配置之外填材料仍屬軟弱土壤，以致於剪動破壞模式非典型之直剪；另外將 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，發現 RG-8 轉折後之斜率與典型直剪 (Lin et. al., 2007) 之斜率約略相同(如圖 4.12)，因此判定 RG-8 試驗所出現雙線性曲線是因雙剪模式轉變成直剪模式所造成。因此，RG-8 纜線之迴歸資料只取到 70 mm 及 87 mm (即出現斜率轉折處)，將迴歸所得靈敏度(ρ /mm)、啟動門檻值整理成表 4.3，結果顯示 RG-8 纜線在不同勁度之外填材料下，靈敏度仍會極為相近($S=0.0009791$ 、 0.0010713 、 0.0012770)，而 P3-500 型($S=0.0056710$ 、 0.0062864)靈敏度僅約略相近。

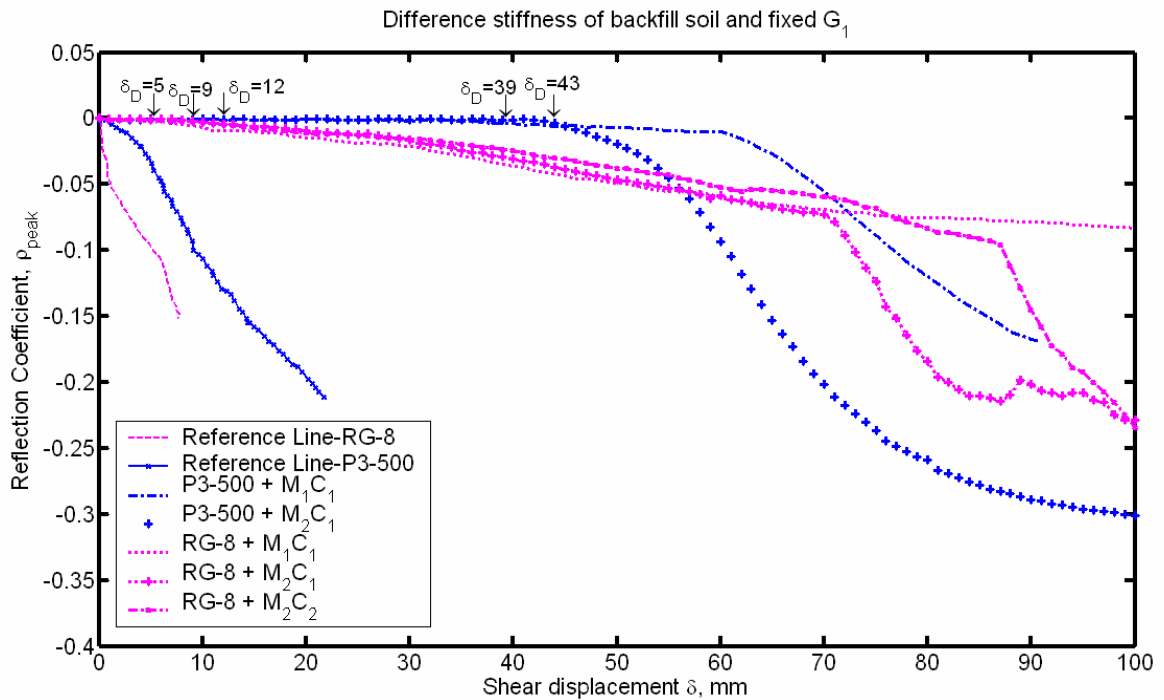


圖 4.12 纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度

4.2. 訊號處理用於提早偵測變形之成效

經由 4.1 節室內試驗結果，選出適用於軟弱材料之纜線種類-RG-8 型，同時也加入 P3-500 型纜線之試驗結果進行訊號處理，探討訊號處理是否適用於不同種類纜線之可行性。

訊號處理主要步驟為 (1) 將原始 TDR 反射訊號去雜訊，(2) 將去雜訊後的變形與未變形波形相減，獲得反射係數變化量($\Delta \rho$)，期望可藉由這些步驟更清楚辨識滑動面，並透過門檻值的概念，建立並提供日後現地監測警戒值，作為滑動發生後監測頻率調整之參考依據。以下就訊號處理各分析步驟之進行探討：

(1) 去雜訊效果比較：

圖 4.13 顯示位移 6 mm 之原始訊號與分別使用 db 3 小波方法與 smooth 去雜訊後的波形，結果顯示使用小波方法比 smooth 法較易去除雜訊，因此後續將以小波方法進行雜訊處理。圖 4.14 與圖 4.15 為採用不同門檻參數

與不同母小波的小波方法去雜訊後訊號與原始訊號比較，其中較適合的門檻參數與母小波為「sqtwolog + soft + sln + Level 3」。

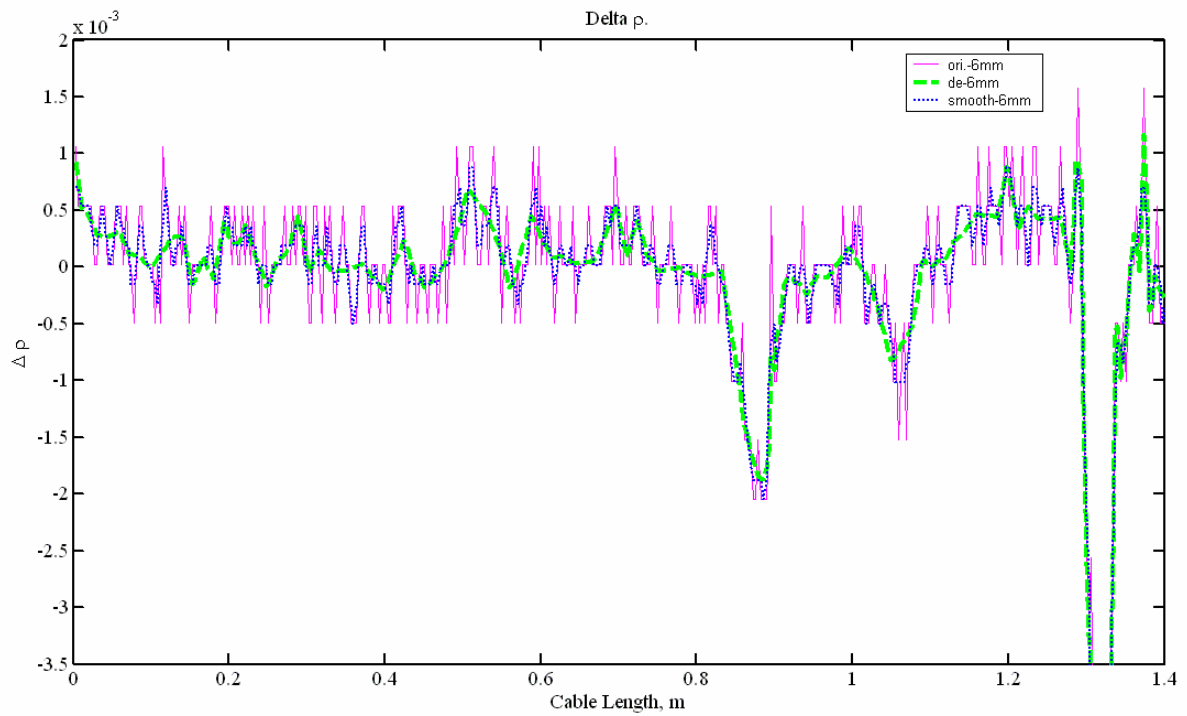


圖 4.13 原始波形與去雜訊效果比較

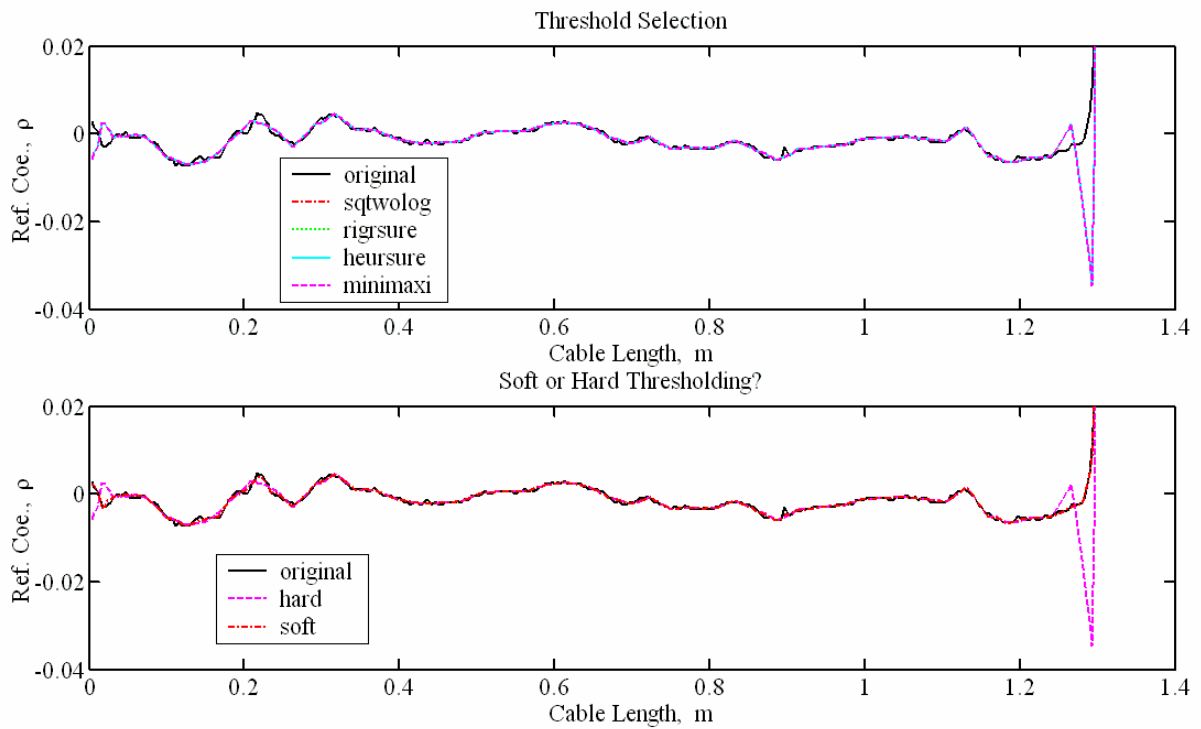


圖 4.14 Threshold 之選擇

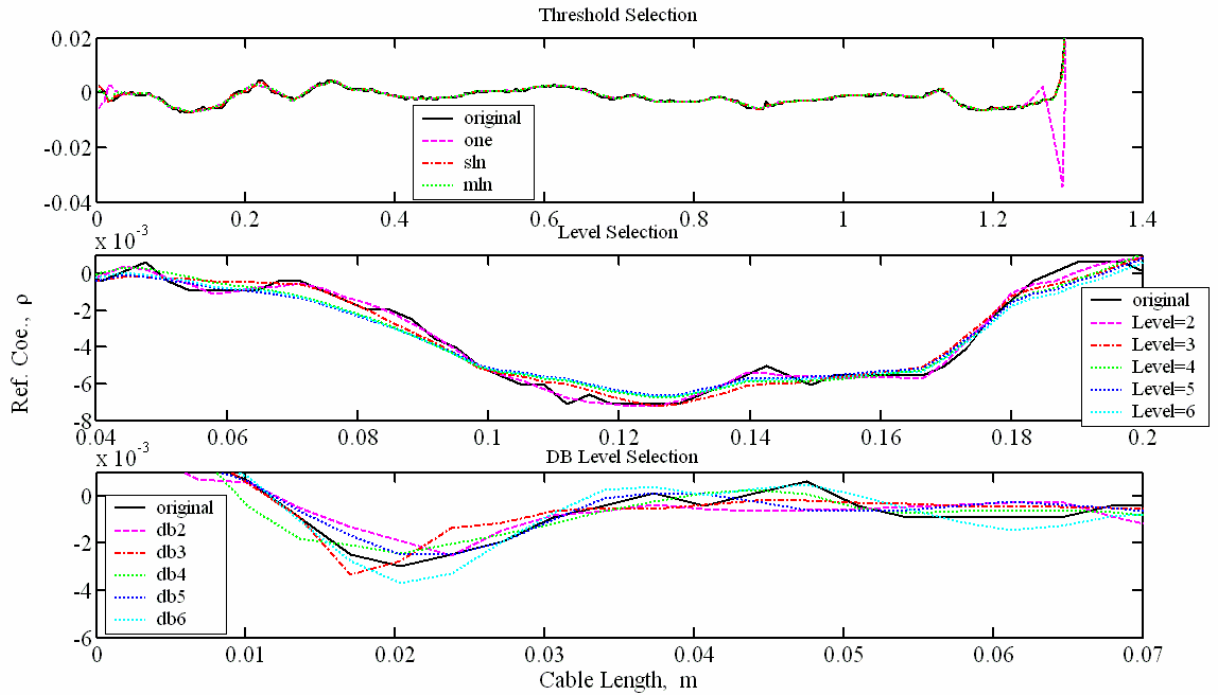


圖 4.15 Mode 與 level 之選擇

決定適當的參數後，針對 RG-8 型與 P3-500 型進行訊號處理，結果如下：

- (2) RG-8 型：圖 4.16、圖 4.17 與圖 4.18 所對應原始波形原本的初始啟動門檻值分別為 5 mm、9 mm 與 12 mm，經訊號處理後，至少可提早約 2mm 即察得滑動面，圖 4.18 甚至顯示可提早約 3 mm。

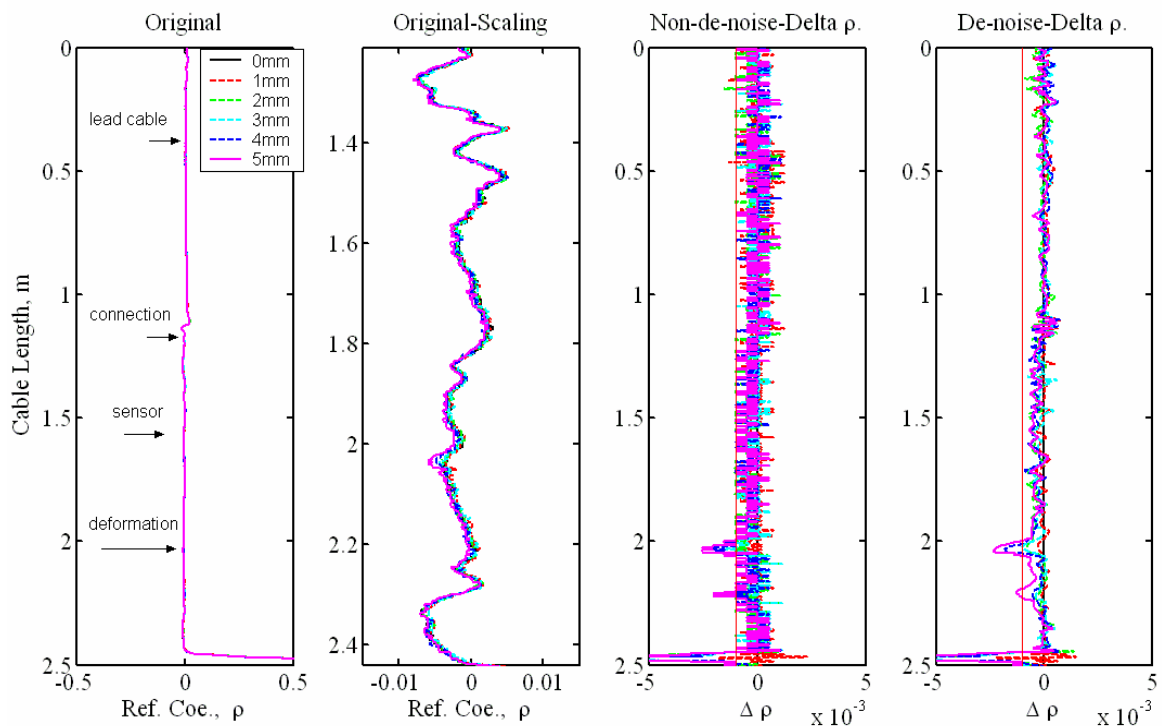


圖 4. 16 RG-8 纜線， $\delta_D=5\text{mm}$

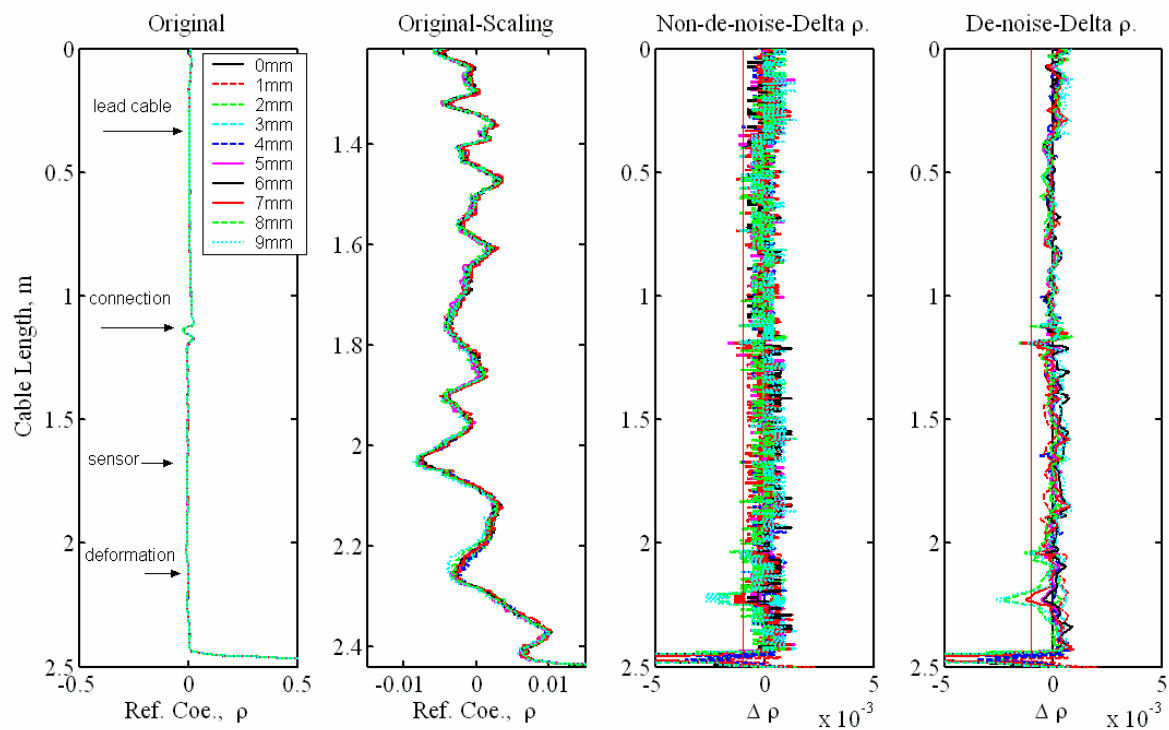


圖 4. 17 RG-8 纜線， $\delta_D=9\text{mm}$

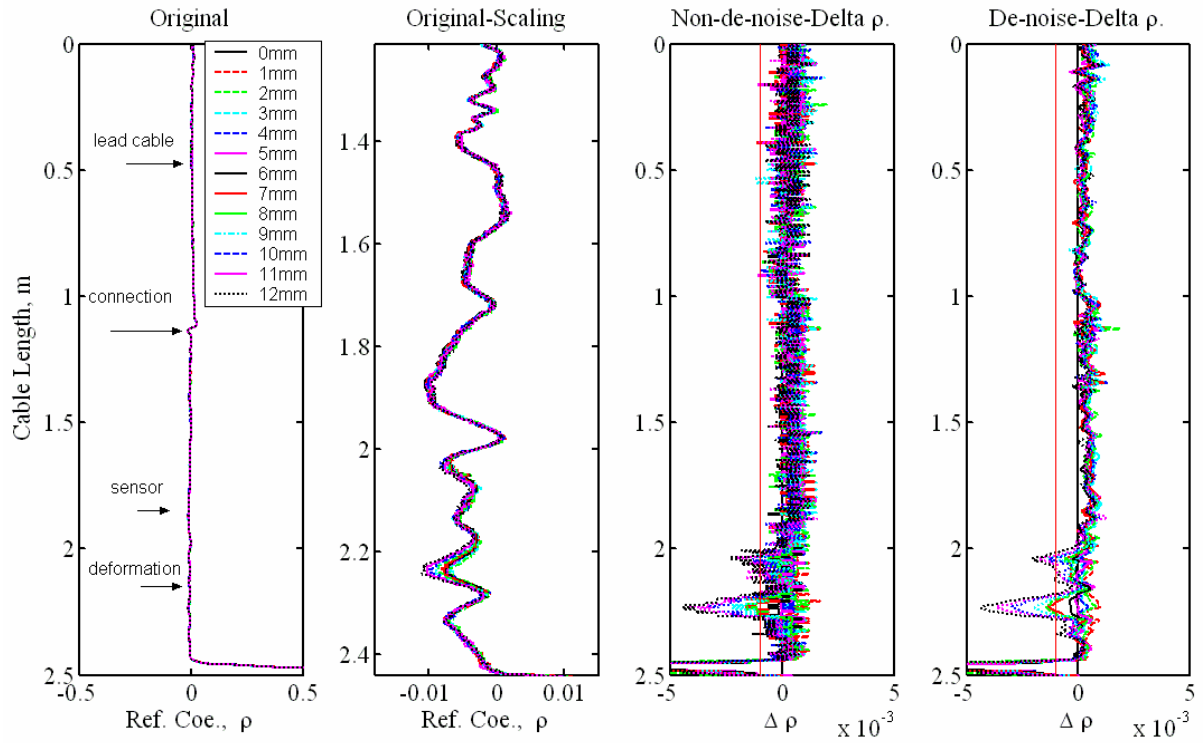


圖 4. 18 RG-8 纜線， $\delta_D=12\text{mm}$

(3) P3-500 型：圖 4. 19 與圖 4. 20 所對應原始波形原本的初始啟動門檻值分別為 39 mm 與 43 mm，經訊號處理後，可提早約 5 mm 察得滑動面。

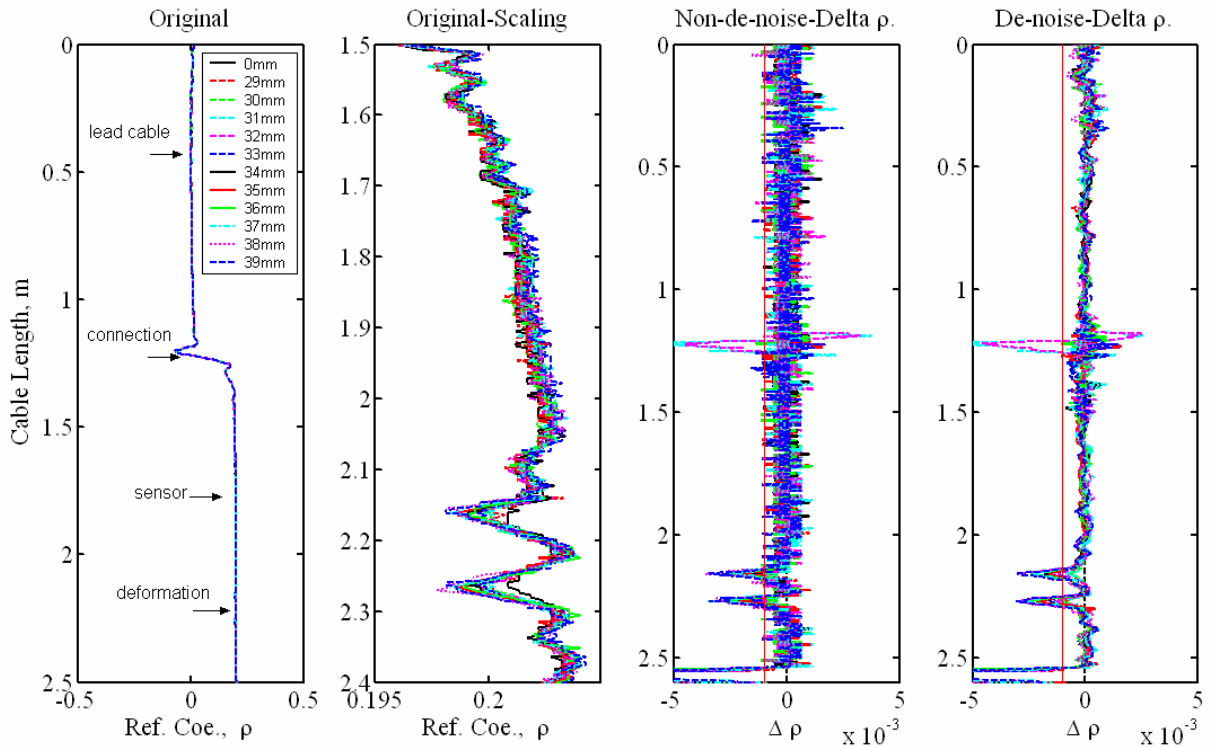


圖 4.19 P3-500 Unshielded 纜線， $\delta_D=39\text{mm}$

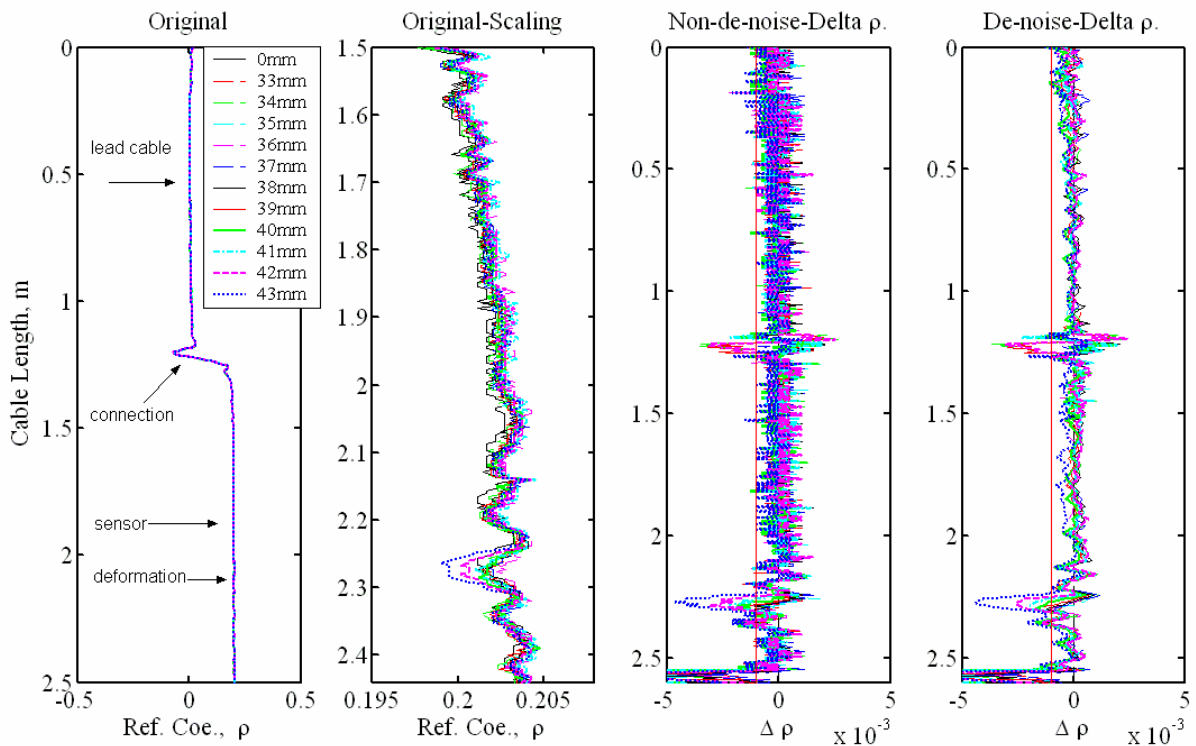


圖 4.20 P3-500 Unshielded 纜線， $\delta_D=43\text{mm}$

上述結果顯示經過本節訊號處理後，4.1 節的結果至少可提早約 2 mm

察得滑動。根據已知滑動量，利用門檻值概念，可由上述分析結果訂出門檻值為 0.001ρ (圖 4.16~圖 4.19 最右側圖片內鉛直紅線)，比對兩種纜線原始試驗結果 (如 4.1 節之結果)，顯示門檻值與可目視滑動量相符合，亦即當反射訊號超過門檻值即為土壤已錯動變形纜線。

4.3. TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析初步建議

應用 TDR 技術於邊坡滑動監測已行之多年，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。此外，Dowding et al. (2004)以數值模型探討纜線外填材料影響，提出灌漿強度為周圍土壤之 1~5 倍左右為最佳灌漿配比 [12]，但礙於現地灌漿強度控制不易且水灰比過大亦會造成嚴重縮漿，因此何謂適當的現地灌漿選擇仍是有待探討的問題。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：

- (a) 透過本研究之實驗與分析結果，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. 21)。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。

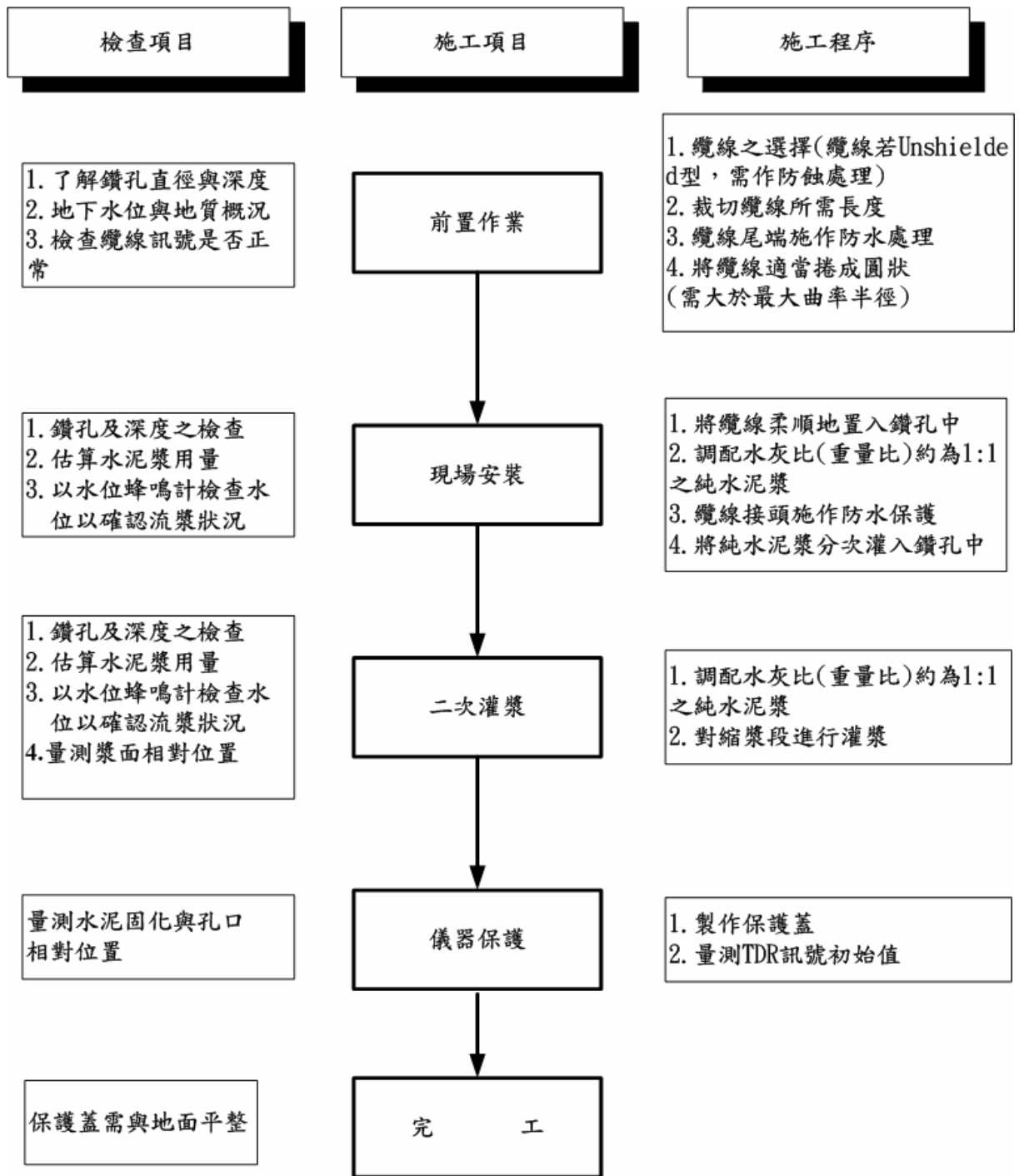


圖 4. 21 TDR 錯動變形監測之標準程序

(b) 由 4.1 節之試驗結果顯示：RG-8 纜線在不同勁度之外填材料下，靈敏度仍極為相近($S=0.0009791$ 、 0.0010713 、 0.0012770)，同樣，P3-500 型($S=0.0056710$ 、 0.0062864)靈敏度僅約略相近。因此，現地若屬堅

硬土層時，建議安裝 P3-500(unshielded)型纜線且以式(4-1)進行量化分析；若現地屬軟岩或土壤時，建議安裝 RG-8 型纜線，並以式(4-2)進行量化分析。

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.0062864} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots(4-1)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.0010713} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots(4-2)$$

式(4-1)與式(4-2)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。其中 δ_0 受地層勁度與剪力帶寬度所影響，若地層為堅硬土層時，則 $\delta_0 \approx 0$ ；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， $\delta_0 \approx 5mm \sim 12mm$ 。因此，有關 δ_0 受地層勁度與剪力帶寬度所影響問題，仍需進一步研究。



第五章 結論與建議

TDR 錯動變形監測應用於大地工程已行之多年，其最大的優勢為可遠端自動化並可與其它量測物理量的 TDR 感測器結合，一機多功用，進而節省監測成本。然而，纜線的選擇及現地安裝的程序缺乏參考依據；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，錯動變形量化分析則存在相當難度。另外，除了以目視辨識反射波形變異之外，已有學者提出訊號處理概念，但成效如何仍有待商榷。因此，本研究透過建立更能符合現地狀況的物理模型-大型直剪儀與一系列試驗，探討不同纜線-灌漿材料-土壤互制因子對於量化分析的影響。並由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初步建議。另一方面經由室內剪動試驗的資料進行訊號處理，探討訊號處理之成效。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，最後探討監測資料分析方法之改善，即提早偵測變形之訊號處理，對應結論整理如下。

一、 TDR 錯動變形量化分析結果：

1. 傳輸纜線受剪之反應特性：

(a) 各種纜線初始反應門檻值(δ_D)與迴歸初始反應門檻值(δ_0)皆以 P3-500 shielded 型為最大，RG-8 型為最小(即最早偵得滑動)；同一種纜線中，外導體有橡膠披覆(shielded)者較無披覆(unshielded)者靈敏。

(b) 固定灌漿配比、圍壓與外填材料下，以 P3-500 (unshielded) 型之靈敏度最佳，RG-8 型纜線靈敏度最差。

2. 灌漿材料順應性之探討：

- (a) 硬性纜線(solid cable)QR-320 型與 P3-500 型纜線在沒有灌漿材料之束制下，TDR 反射波形發展不易判釋，亦即沒有灌漿材包覆之纜線，反射波形成長量與剪力位移量不具唯一性；反之，有灌漿材所包覆之纜線，反射波形與剪力位移成線性關係成長。
- (b) 軟性纜線(braided cable)因外導體較軟而較易反應，藉由灌漿材料所提高的趨動纜線效果較不顯著。
- (c) QR-320 纜線經多次試驗結果發現重複性不佳，且即使變形很小，內導體即容易受拉扯而斷裂，較不適用於現地作為錯動變形感測器。

3. 不同勁度外填材料之影響：

- (a) 於不同勁度之外填材料下，RG-8 靈敏度極為相近；P3-500 (unshielded)型之靈敏度約略相近。
- (b) RG-8 纜線於較軟弱土壤中，反射波形易發展成剪力帶模式(亦即兩尖峰狀)，待應力集中後才發展成直剪變形模式(波形單一尖峰狀)。

綜合本研究第一部份 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，以安裝 RG-8 型纜線，其能最早偵得滑動且不同勁度外填材料下，靈敏度仍極為相近。
- (ii) 硬性纜線(P3-500 型與 QR-320 型)，在無灌漿材料之順應下，TDR 反射波形不易辨識。反之，有灌漿材料之反射波形因灌漿材料之順應性而有效地將外力傳遞給纜線，有助於量化分析；而軟性纜線(RG-8 型)因本身勁度小，

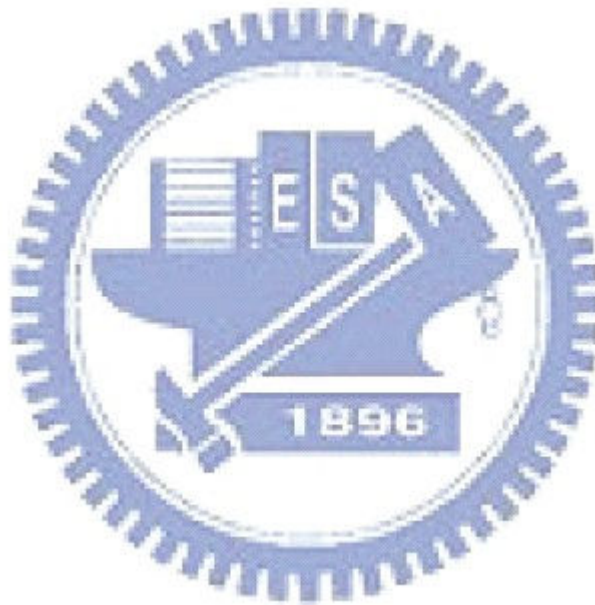
外力易直接轉稼給纜線，因此在沒有灌漿材料包覆下之效果比有灌漿的纜線易產生反射訊號。因此，只要灌漿勁度大於纜線勁度，則灌漿有助於傳遞剪力位移。

- 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、 訊號處理用於提早偵測變形之成效：利用小波方法作雜訊處理，以 P3-500 與 RG-8 兩種纜線之試驗結果進行分析，結果顯示至少可提早約 2 mm 察得滑動。透過實驗室已知滑動量訂出門檻值為 0.001ρ ，並顯示門檻值與可目視滑動量相符合，亦即當反射訊號超過門檻值即為土壤已錯動變形纜線。

5.2. 建議

1. 本研究雖以近似現地邊界條件下之物理模型進行相關模擬試驗，並初步獲得纜線-灌漿材-土壤三者之間受剪之互制關係。然而現地邊界變形模式不只是單純直剪行為，可能亦存在應力為非均變變化之剪力帶寬度，因此，建議後續相關研究可考慮在大型直剪儀加入剪力帶設計並進行模擬，促使物理模型更佳完整。
2. 訊號分析方法繁多，現階段以小波方法配合適當參數以可獲得良好結果，但未來仍可嘗試以其他不同方法，如在頻率域找出雜訊主要頻率並將其過濾，以獲得更清楚辨識之效果。
3. 現地弱面或剪力面與纜線之夾角可能不是目前大型直剪盒所限

制的 90 度直角，未來可考慮剪力面與纜線之夾角非 90 度的剪力盒設計，探討不同夾角剪力面對於 TDR 反射訊號之影響。



參考文獻

- [1] 交通部(2002),「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。
- [2] 陳水龍, 廖志中, 黃鎮臺(1993),「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。
- [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] 張信常,「適用性時變臨界值法小波理論於數位助聽器之應用探討」, 碩士論文, 國立成功大學電機工程研究所, 台南, (2004)。
- [5] 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)。
- [6] 曾孝欽,「軟岩用多功能剪力試驗系統之建立—直剪與單剪系統」, 碩士論文, 國立交通大學土木工程研究所, 新竹, (2003)。
- [7] 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)。
- [8] 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)。
- [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 du Mouvement des Solides Élastiques, Gauthier-Villars, Paris.
- [11] Brani Vidakovic, “Statistical modeling by wavelets,” Wiley, 1999. pp.73-80.

- [12] Blackburn, J. T., and Dowding, C. H., (2004), “Finite-element Analysis of Time Domain Reflectometry Cable-grout-soil Interaction,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 231-239.
- [13] 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.
- [14] Chen, Y. M et al., (2004), “Testing Study on Applications of Time Domain Reflectometry to Slope Monitoring,” *23(16)*, pp.2748-2755.
- [15] CommScope, Inc. (2003), *CommScope Broadband Product Catalog*,
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] 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
- [22] 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
- [23] Dworak, R.A., Jordan, A.G., and Thorne, J.S., (1977), "Time Domain Reflectometer Microcomputer," (contract H0346138), BuMines OFR 106-77 ,pp.113
- [24] Dunnicliff, J., (1988), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance," New York: John Wiley & Sons, pp.252-258
- [25] D.L. Donoho and I.M. Johnstone, (1994), "Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage," *Biometrika*, vol.81, pp.425-455
- [26] D.L. Donoho, (1995), "De-Noising by Soft Thresholding," *IEEE Transactions on Information Theory* ,vol.41,no.3,pp.613-627
- [27] 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.
- [28] Halliday, D. and Resnick, R., (1962), *Physics, Part II*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- [29] 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.

- [30]Kim, M.H. (1989), Quantification of Rock Mass Movement with Grouted Coaxial Cables, M.S. Thesis, Northwestern University, Evanston, IL, 65pp.
- [31]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.
- [32]O’ Connor, K.M., (1991), “Development of a System for Highwall Monitoring Using Time Domain Reflectometry,” Edmonton: US Bureau of Mines Sum Rep.
- [33]O’Connor, K.M., and Dowding, C.H., (1999), “GeoMeasurement by Pulsing TDR and Probes,CRC.
- [34]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, Illinois, Sep 7-9, 1994, pp.540-554.
- [35]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.
- [36]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).
- [37]Farrington, S. P. and Sargand, S. M., (2006), ” Advanced Processing of Time Domain Reflectometry for Improved Slope Stability Monitoring, ” Geotechnical Engineering in the Information Technology Age , Atlanta, Georgia, USA
- [38]ShapeAccelArray sensor, (2007) : <http://www.measurand.com/>

- [39]Su, M.B. (1987), “Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry,” Ph.D. Dissertation, Northwestern Univ., Evanston,IL,112pp.
- [40]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.
- [41]Tektronix, Inc., (1997) ,1502C Metallic Time-Domain Reflectometer Service Manual.
- [42]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)
- [43]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.