

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

TDR 與 OTDR 錯動變形監測之研究
On the Slip Displacement Monitoring Using TDR and



研究生：崔志龍

指導教授：林志平 博士

中華民國九十三年七月

TDR 與 OTDR 錯動變形監測之研究

On the Slip Displacement Monitoring Using TDR and OTDR

研 究 生：崔志龍

Student : Chih-Lung Tsui

指導教授：林志平 博士

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

July 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年七月

TDR 與 OTDR 錯動變形監測之研究

研究生：崔志龍

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

一直以來，錯動變形監測在大地工程扮演著相當重要的地位。隨著通信及電子技術之演進，傳統之錯動變形量測設備已跟不上時代之脈動。時域反射法(TDR, Time Domain Reflectometry) 具有遠端即時監測之特性，其先進的被動式監測技術應用在錯動變形監測上，更是錯動變形監測的一項創新。TDR 在錯動變形監測上，能定出地層發生錯動之位置，隨著錯動量之增加，亦可明顯由反射訊號得知其增量之趨勢。但美中不足的是，在錯動變形量化上，受到纜線電阻及現地破壞模式之影響，至今仍無量化錯動量之通用方式。

本研究主要考慮薄剪破壞模式，以考慮纜線電阻之傳輸線波傳理論模擬不同電纜長度受剪之 TDR 反射訊號，並以阻抗及錯動量之唯一性關係量化錯動量。光時域反射儀(OTDR, Optical Time Domain Reflectometer)光纖傳輸具有低衰減與可偵測缺陷點位置與損失之特性，故引進 OTDR 結合 TDR 錯動變形試驗，找出錯動事件點之位置，並試圖探討錯動量與光損失之關係。

由本研究結果顯示：在不考慮剪力帶寬度下，以同一個感測電纜下，連接不同延長線長度(2m、10m、20m 及 30m)均可模擬出近似之 TDR 反射波形，並得出阻抗-變位之唯一性關係；OTDR 光纖對錯動變形量測初始反應較 TDR 感測電纜佳，其低衰減之特性，可做遠超過 TDR 感測電纜長度之長距離量測，唯其在錯動變形量之量測範圍較 TDR 感測電纜小。TDR 感測電纜與 OTDR 光纖在錯動變形之量測上，可形成互補的效果。

On the Slip Displacement Monitoring Using TDR and OTDR

Student : Chih-Lung Tsui

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

Abstract

Monitoring of slip displacement has been employed in the Geotechnical engineering for many years. With the evolution of the communication and electronic technology, the traditional slip-displacement monitoring device has fallen behind. The application of TDR passive monitoring technique on the slip displacement monitoring is an innovation. TDR can be used to determine the position of slip displacement and find the trend of increment of the displacement from the reflective signal in slip displacement monitoring. Unfortunately, the quantification of slip displacement is affected by the cable resistance and complex failure modes in field strata, and there has not been generalized method for quantifying the slip displacement magnitude.

This study focuses on the thin shearing mode. Transmission line theory considering cable resistance is utilized to simulate the TDR waveforms of a sensor cable subjected to shearing with different lead cable length. The relation between the impedance and slip displacement magnitude is used to quantify the displacement magnitude. Taking advantages of the low attenuation characteristics of optical time domain reflectometry (OTDR), this study also explores the OTDR system for slip displacement monitoring and discusses the relation between displacement magnitude and light loss.

The result shows that the TDR waveforms of different slip displacement and lead cable length are successfully simulated by the developed algorithm and the relation between the cable impedance and slip displacement magnitude can be uniquely obtained. The sensitivity of the OTDR system is superior to that of TDR system. The OTDR system can detect much longer sensor distance than TDR due to its low attenuation but the measuring range of slip displacement for the OTDR system is smaller than that for the TDR system. On the slip displacement monitoring, the TDR and the OTDR system can be complementary.

誌謝

本文得順利完成，首要感謝指導教授 林志平博士平日悉心教誨與指正。無論在學業上或生活方面均有良好的溝通餘裕，不至成為另種額外之負擔，始能全心投入研究之工作，浸潤兩載獲益匪淺。

於學期間，承蒙潘以文教授、廖志中教授、黃安斌教授、方永壽教授、單信瑜教授，供授意見與指引，在此致上萬分謝意。

口試期間，良受蘇苗彬教授、林炳森教授、蔡光榮教授、陳錦清經理，對本文指正與建議，始能趨於完備，於此表示由衷感謝。

幸蒙士弘學長等、同學等及學弟等協助，與家人的栽培，僅以此謝文獻上致謝意。



目錄

第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 地層移動之監測方法.....	4
2.1.1 傾斜探管.....	4
2.1.2 孔內傾斜儀.....	5
2.1.3 伸縮計.....	7
2.2 TDR錯動變形量測系統.....	7
2.2.1 TDR基本原理.....	8
2.2.2 TDR量測系統.....	9
2.2.3 傳輸線參數.....	10
2.2.4 錯動變形量測原理.....	12
2.3 TDR錯動變形量化分析.....	14
2.4 反射波形影響因子.....	16
第三章 TDR錯動變形量化之研究.....	31
3.1 TDR波形模擬(考慮R之TL model).....	31
3.1.1 流程.....	31
3.1.2 傳輸線理論.....	31
3.1.3 R之TL model波形模擬.....	33
3.2 試驗方法.....	35
3.3 試驗設備.....	36
3.4 TDR錯動變形量化分析結果.....	37
第四章 OTDR結合TDR量測錯動變形.....	53
4.1 OTDR簡介.....	53
4.2 OTDR量測系統及原理.....	54
4.2.1 OTDR量測系統.....	54
4.2.2 OTDR量測原理.....	54
4.2.3 OTDR光纖量測注意事項.....	56
4.3 OTDR結合TDR量測錯動變形試驗.....	58
4.3.1 原理.....	58
4.3.2 錯動變形試驗.....	59
4.3.3 試驗結果.....	59
第五章 結論與建議.....	69
5.1 結論.....	69

5.1.1 TDR.....	69
5.1.2 OTDR.....	70
5.2 建議.....	70
參考文獻.....	72



圖表目錄

圖 2.1 傾斜探管照片.....	20
圖 2.2 傾斜探管之現地配置與變形剖面.....	20
圖 2.3 孔內傾斜儀構造和配置圖.....	21
圖 2.4 Slope Extensometer現場配置.....	21
圖 2.5 時域反射儀之元件.....	22
圖 2.6 TDR邊坡監測系統.....	22
圖 2.7 不同之阻抗不連續所產生之反射波形.....	23
圖 2.8 TDR變形監測之反射訊號與原理.....	23
圖 2.9 岩體變形監測.....	24
圖 2.10 單向度剪力試驗裝置.....	24
圖 2.11 剪力變形與反射係數之關係圖.....	25
圖 2.12 不同外徑同軸纜線的反射係數與剪力變形之關係.....	25
圖 2.13 張力、剪力試驗裝置.....	26
圖 2.14 反射訊號電壓降的面積對時間關係的積分.....	26
圖 2.15 剪動量與面積之關係.....	27
圖 2.16 空間解析度受纜線長度影響.....	27
圖 2.17 反射係數隨纜線長度增加而遞減.....	28
圖 2.18 對應 4 種不同變形，反射係數隨長度增加而減小.....	28
圖 2.19 TDR反射訊號因剪力帶寬度之影響.....	29
圖 2.20 電纜受張力作用之頸縮現象.....	29
圖 2.21 不同剪力帶寬度之TDR反射波形.....	30
圖 2.22 模擬現地錯動變形之剪力盒.....	30
圖 3.1 波形模擬反算流程.....	41
圖 3.2 TDR傳輸線系統之等效電路與輸入阻抗.....	41
圖 3.3 非均勻傳輸線之分割串聯.....	41
圖 3.4 受剪之錯動變形感測電纜.....	42
圖 3.5 (a)纜線受剪後之變形；(b)(c)模擬分段示意.....	42
圖 3.6 不同延長線模擬分段示意.....	43
圖 3.7 TDR室內錯動變形試驗設備.....	43
圖 3.8 剪動變形器.....	43
圖 3.9 RG58AU延長線為 2、10、20、30m之TDR反射波形.....	44
圖 3.10 不同RG58AU延長線長度之剪位移與反射係數之關係.....	44
圖 3.11 剪動位移量與積分面積關係.....	45
圖 3.12 RG58AU 2m延長線模擬之結果.....	45
圖 3.13 反算分析之阻抗-錯動量關係.....	46

圖 3.14	RG58AU 10m延長線模擬之結果	46
圖 3.15	RG58AU 20m延長線模擬之結果	47
圖 3.16	RG58AU 30m延長線模擬之結果	47
圖 3.17	2、10、20、30m CommScope電纜之TDR反射波形	48
圖 3.18	不同長度CommScope電纜之剪位移與反射係數之關係	48
圖 3.19	剪動位移量與積分面積關係	49
圖 3.20	CommScope電纜為 2m之波形模擬結果	49
圖 3.21	反算分析之阻抗-錯動量關係	50
圖 3.22	CommScope電纜為 10m之波形模擬結果	50
圖 3.23	CommScope電纜為 20m之波形模擬結果	51
圖 3.24	CommScope電纜為 30m之波形模擬結果	51
圖 4.1	OTDR系統與光纖	61
圖 4.2	單模光纖構造	61
圖 4.3	OTDR量測示意圖	62
圖 4.4	OTDR事件型態	62
圖 4.5	典型OTDR軌跡	63
圖 4.6	OTDR之動態範圍	63
圖 4.7	局部彎曲所造成之光損失	64
圖 4.8	光纖直徑改變所造成之損失	64
圖 4.9	光纖整體彎曲所造成之損失	65
圖 4.10	光纖與TDR感測電纜之錯動變形試驗	65
圖 4.11	剪動量為 0mm與 1mm之光纖(b)訊號	66
圖 4.12	剪動為 0mm與 2mm時光纖(a)錯動事件	66
圖 4.13	剪動為 0mm及 10mm光纖(a)錯動事件	67
圖 4.14	剪動為 0mm及 15mm光纖(a)訊號	67
圖 4.15	光纖(a)剪動量與光損失之關係	68
表 3-1	不同長度RG58AU延長線，反射係數與變位量之關係	52
表 3-2	不同長度CommScope電纜，反射係數與變位量關係	52
表 4-1	光纖(a)錯動量與光損失關係	68

第一章 緒論

1.1 研究動機

地層滑動為邊坡穩定極重要之一環，過去以來，在地層滑動的量測上，多使用傳統機械式之量測方法，這些量測方法的主要貢獻就是用來描述與分析地層滑動。近 20 年間，傾斜度量測儀器直起發展，並廣泛的使用於地滑監測，也有在壩體、堤岸或其他建築物中當作監測儀器使用。一般而言，常使用的傾斜度量測儀器主要有兩種形式，一種為傾斜探管(IP, Inclinator Probe)，另一種為孔內傾斜儀(IPI, In-Place-Inclinometer)。此外，伸張計可量測錨定在地表或鑽孔中已知點間金屬線的長度變化情形。傳統的量測方法，常需人工定時施測並擷取資料，缺乏效率與不經濟；使用傾斜探管時，若地層中有薄層剪動產生，因導管於此處曲率突然變大，將導致儀器無法下放。

其次，傳統之錯動變形量測傳感器(Transducer)，乃是將量測物理量轉換成電壓，由擷取系統記錄並傳輸之。電子感應器對於水、濕氣、雷擊等不具抵抗性且有溫度效應，常在監測一段時日後，出現不合理的讀數，造成管理者困擾，使寄望由電子感應器達自動化目的大打折扣。

基於上述理由，先進地層錯動監測技術有逐漸使用上孔(up-hole)設備探測被動式(passive)傳感器之趨勢，探測媒介包括電磁波與光，

分別使用同軸電纜與光纖做為傳輸線，其傳感器常為傳輸線之一部分，此類監測系統兼具機械式之穩定性與電子式之便利性，藉由各系統整合，可達自動化目的。

TDR 錯動變形量測系統，已能正確地找出地層滑動位置，在地層錯動變形量量化的課題上，受制於地層滑動破壞模式的複雜性，存在著待解決的問題。因此本研究著重在簡化錯動變形影響因子下，以試驗室錯動變形試驗結果，配合 TDR 纜線電阻之傳輸線波傳理論模擬 TDR 反射訊號，並求出錯動變形量與阻抗之關係。此外亦引進 OTDR 系統施做錯動變形試驗，探討錯動變形量與光損失(loss)關係。

1.2 研究目的

地層錯動變形之量測為大地工程監測實務重要之項目，以往將 TDR 技術應用於變形量測研究存在著某些問題，如變形之量化(錯動量、剪動帶寬度)、纜線長度影響訊號衰減等。此外，TDR 纜線現場安裝及灌漿，也影響纜線破壞行為及資料品質，本研究主要針對薄剪模式進行探討，目的如下：

- 1.在無剪力帶寬度下，使用不同延長線長度接相同感測電纜，以 TDR 室內錯動變形試驗結果，經由纜線電阻之傳輸線波傳理論模擬與反算，找出錯動變形量(δ)與阻抗(Z)之關係，進而求出纜線錯動變形之量化方法。

2.以 OTDR 結合 TDR 室內錯動變形試驗，綜合比較兩者對剪動靈敏性之差異，並探討 OTDR 光纖感測錯動變形與光損失關係，評估此種方式之成效。



第二章 文獻回顧

變形量測在大地工程中扮演極其重要角色，因變形所導致的側向變位、沈陷...等，與土工構造物、邊坡的穩定性有著密不可分的關係。一般在大地工程領域的變形量測可分為：地表或地層中之垂直及水平變形、軸向變形、扭曲變形等，本研究則著重在地層錯動變形上。

邊坡滑動必然有移動發生，移動之總量、速率及分佈通常是所需要量測之物理量中最重要。只靠坡面觀察來決定邊坡穩定是不足的，必須要與邊坡內部行為之監測相互配合，最能夠顯示邊坡即將發生滑動之重要指標通常來自於土壤或岩層內部微量之移動。以下就地層移動之監測方法做文獻回顧。

2.1 地層移動之監測方法

過去 20 年間，傾斜度量測儀器開始發展，其最大的貢獻就是用來描述和分析地滑。傾斜度量測儀器廣泛的使用於監測地滑，也有在壩體、堤岸或其他建築物中當作監測儀器使用。這些傳統的監測儀器存在著某些缺點(1.1 節所述)，以下對過去地層移動之監測方法做簡要之回顧。

2.1.1 傾斜探管

普遍使用的傾斜探管是由 Wilson(1952)開始於哈佛大學所研發。傾斜探管(圖 2.1)通常包括感測器(由金屬外殼保護)、輪子、電纜(連接

感測器)。現場配置如圖 2.2，使用時將傾斜探管放入傾斜管 (inclinometer casing) 中，並利用電纜將儀器上下移動，當量測完一個方向後將傾斜探管取出，把傾斜探管放入和先前方向相差 90 度的方向，以減少儀器本身之誤差，然後由量測到的訊號換算成角度繼而求出變位。

將傾斜探管從孔內的底部拉到頂部時，通常以等間距往上拉，根據 Gould and Dunncliff (1971) 所提出的報告，讀數間距必須小於 1.5 公尺，否則很難反應地表下隨著深度而改變之位移，即間距太大時解析度不夠。當傾斜探管內裝的感測器型式不一樣的時候，精度也不一樣，通常精度可達 1：10000。

此種方法以分段線性化方式近似出地層錯動變形剖面，最佳的量測方式為上拉的長度相同於感測器之長度，即是各量測間距等於零。其缺點為：需人工定時至現場量測且耗時；當遇有薄剪且錯動量大時，將導致量測儀器無法下放。

2.1.2 孔內傾斜儀

孔內傾斜儀的感測器通常為伺服加速度計或電解式感測器，可以量測一或二維(即 X 與 Y 方向之變位)的位移，任兩個孔內傾斜儀之間由一根金屬桿連接起來，將所有孔內傾斜儀連接後，再將孔內傾斜儀一一置入現地之傾斜觀測管內，並於孔頂將孔內傾斜儀固定住，然後

量測土體變形，而其整體埋入之裝置如圖 2.3 所示。感測器是藉由支架固定於傾斜觀測管中，若每個感測器之間的距離愈靠近時，所量測到的變位精度也愈高。故感測器的位置即可隨精度之要求而隨時加以調整，但感測器數目因受到纜線所需空間之影響而受限。

使用孔內傾斜儀時需量測角度的變化及感測器的間距，以求出每一個感測器間的相對位移，由這些相對位移可求出地層錯動變形剖面。一般而言，感測器可以量測到之角度變化值約為正負 30 度。理論上，在 1 公尺的深度內變位的精度可以達到正負 0.01 公釐。但實際上，在 1 公尺的深度內變位的精度為正負 0.04 公釐，精度為 1：25000，為傾斜探管的 2.5 倍。每一個孔中可以裝設孔內傾斜儀的數目有限，而且儀器較傾斜探管為複雜昂貴，孔內傾斜儀可自動化並以遠距離的擷取訊號。

傾斜探管可以利用量測正反兩面的讀數來減少儀器本身造成的誤差，而孔內傾斜儀卻無法這麼做，所以需要更精確、靈敏的感測器。有時亦同時使用孔內傾斜儀和傾斜探管，其目的是用來互相檢核。因為孔內傾斜儀的精度高，所以可以用來量測較小的變形，並且可以連續的量測和記錄，進而得到現地變形曲線。

使用孔內傾斜儀時因礙於各儀器間必須以纜線連接，故有間距之存在，其錯動變形剖面為分段不連續線性內差之近似結果，若剪力帶

通過兩孔內傾斜儀間之連接電纜，將影響錯動變形量測之靈敏度；其儀器設備昂貴與複雜亦是缺點。

2.1.3 伸縮計

伸縮計(Extensometer)可量測錨定在已知點間連接線長度變化情況，可分為地表型與孔內型。地表型伸縮計主要為量測因地層滑動所引致之地表位移變化或張力裂縫之擴張；相較於地表型伸縮計，孔內型伸縮計則可直接量測地層錯動量。圖 2.4 為 Slope Extensometer 之現場配置，屬孔內型伸縮計之一種。

Slope Extensometer 之錯動變形量測方式為將金屬線錨定至鑽孔中，並預先施加張力於金屬線，當現地地層錯動發生時將拉伸金屬線使之變長，藉由地表量測設備(readout device)量測出金屬線改變長度進而求出地層錯動量。

此地層錯動量測方式存在部分缺點：因金屬線之側向移動造成地層錯動初始變位無法量測；必須事先知道地層錯動發生之可能位置，以便設置鑽孔孔壁之錨定點；只適合量測地層薄剪帶之錯動量，若剪力帶寬度增加將導致誤差增加(Kirschke, 1977)。

2.2 TDR 錯動變形量測系統

傳統之地層中移動量測儀器的穩定性、耐久性及精度足以影響邊坡監測之判讀及品質，且如 2.1 節所述各量測儀器均存在某些缺點。

拜電子設備及遠端通訊演進之賜，監測自動化及遠端傳輸功能已蔚為趨勢，相對於偏遠及不易到達之現地長期監測，自動化遠端傳輸更顯其所具有的優勢。TDR 錯動變形量測系統具自動化及遠端傳輸特性，且埋設於地層中之錯動變形傳輸纜線不易受周遭環境影響，並且可整合其他邊坡監測感測器，如 TDR 雨量計、TDR 水壓計、TDR 伸縮計，或其它傳統感測器，達到方便、經濟等目的。

2.2.1 TDR 基本原理

時域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)是以電磁波為基礎之探測法，其基本原理與雷達相同，但電磁波之傳遞僅侷限於傳輸纜線(transmission line)。因此，雷達量測為三維的波傳問題，而時域反射儀量測為一維的波傳問題。

時域反射法之基本原理，由脈衝電壓產生器發射一電磁脈衝進入同軸電纜及感測器，並由示波器記錄由於電纜阻抗不連續所造成之反射。電纜阻抗由電纜或感測器斷面幾何及其內部介質之介電度決定，因此當感測器斷面因受力而變形時，或絕緣介質不同時，在斷面幾何改變處或介質改變處將產生阻抗不連續。當電磁波遇到阻抗不連續所產生之回彈訊號為接收器所接收，再透過電磁波速與時差之計算，便可知道阻抗不連續處之位置。

在大地工程監測方面，依應用原理可歸類為三：第一，利用 TDR

反射訊號監測當電纜受到外在環境之影響造成電纜幾何形狀之改變，例如岩石或土壤之相對變位造成埋置其中之電纜幾何形狀改變 (Dowding et al., 1988)；第二、利用 TDR 之反射訊號量測感測器內不同介質之界面位置，例如地下水位之監測(空氣與地下水界面)(Dowding et al., 1999)；第三、將所欲研究之材料做為感測器之介質，利用反射訊號研究材料之介電常數與導電係數，以進一步推估土壤之含水量與土壤之鹽度。

本研究即針對上述第一項應用，量測當變形傳輸纜線受到外力作用時，因其斷面幾何發生改變而造成阻抗之不連續進行相關探討。

2.2.2 TDR 量測系統



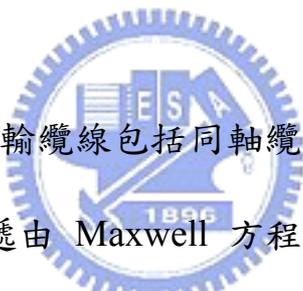
圖 2.5 為 TDR 設備之簡圖，它包含階躍脈衝電壓產生器 (step generator)、訊號採樣器 (sampler) 與示波器 (oscilloscope)，脈衝產生器產生電壓脈衝傳入同軸纜線，訊號採樣器擷取並透過示波器顯示由同軸纜線傳回之反射訊號；同軸電纜係因其外導體有屏蔽作用，訊號傳輸時不會被外界訊號所干擾，故選之做為傳輸或感測媒介。同軸纜線由一組內、外導線所組成，外導線以封閉的方式包圍內導線；感測器 (measurement probe) 為同軸纜線之延伸使得電磁波傳進所要量測之材料或環境中。

當利用 TDR 來量測土壤、岩石之相對變形或地下水位時，因為

纜線介質材料之選定直接影響了脈衝產生後傳遞時的衰減，因此一般採用衰減率低之介質材料。於錯動變形的量測中，在同軸電纜介質材料固定的情形下，纜線阻抗之變化僅受到纜線幾何形狀改變所影響。

TDR 之資料擷取可利用半自動方式使用 RS232 串列埠，將 TDR 與電腦連結直接下載訊號，但 TDR 最大的優點是自動化遠端監測，可將 TDR 與可程式化之資料擷取器 (datalogger) 結合，由資料擷取器控制 TDR 儀器與多工器 (multiplexer) 進行多點不同功能之感測器監測，並透過電話線或無線電下載 TDR 訊號，如圖 2.6。

2.2.3 傳輸線參數



TDR 量測系統之傳輸纜線包括同軸纜線與其延伸之感測器，電磁波在傳輸纜線中之傳遞由 Maxwell 方程式控制，因為同軸電纜之特殊電磁場結構，電磁波在傳輸纜線中之傳遞可以用導線之電流與正、負導線之電壓來描述，因此 Maxwell 方程式可以簡化成電壓與電流之波動方程式，波動方程式之解答中兩個最重要的元素分別為特徵阻抗(characteristic impedance)與傳遞常數 (propagation constant)。特徵阻抗是纜線之電壓與電流之比值，它是纜線之本質特性，為纜線幾何形狀與纜線介質之電磁性質之函數，當纜線中因特徵阻抗不同而產生阻抗不連續時，電磁波會在阻抗不連續面產生反射波與折射波，並控制反射訊號之大小；傳遞常數是傳輸纜線另一項本質特性，為纜線

介質之電磁性質的函數，它控制了電磁波在纜線中傳遞之速度與衰減。

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})。在頻率域，一般而言介電度為頻率之函數，但變形監測所使用之傳輸纜線內部介質之介電度在TDR系統的量測頻寬下為常數、導電度為零。

若不考慮纜線導體之電阻，傳輸纜線之阻抗為纜線之斷面幾何與介電度決定，以同軸纜線為例可表示為：

$$Z = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} \frac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{Z_p}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

其中 a 為內導線之外徑、 b 為外導線之內徑、 ϵ_0 為空氣之介電常數、 μ_0 為真空之磁導率(Magnetic permeability)、 Z_p 為介質為空氣時 ($\epsilon_r = 1$)之阻抗。當入射之方波 V_i 於電纜中遇到阻抗不連續(Z_0 與 Z_t 之交界)時將產生反射與透射，反射波可表示為：

$$V_r = \rho V_i \quad (2.2)$$

其中反射係數為電纜阻抗之函數：

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad (2.3)$$

圖 2.7 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， $\rho > 0$ ，可觀察到一正的反射方波，當 $Z_t < Z_0$ 時， $\rho < 0$ ，可觀察到一負的反射方波。

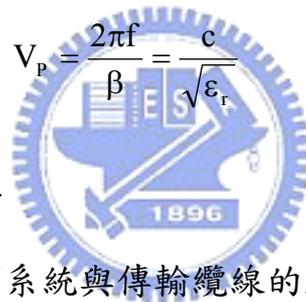
傳輸纜線之傳遞常數經由推導可得複數 γ ：

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r} = \alpha + j\beta \quad (2.4)$$

其中 f 為頻率、 c 為光速、 ϵ_r 為材料介電度與空氣介電度 ϵ_0 之比值、 α 與 β 分別為傳遞常數之實部與虛部、 $j = (-1)^{1/2}$ ，其中實部 α 反應電磁波之能量衰減，而虛部 β 為空間頻率，時間頻率 $2\pi f$ 除以空間頻率 β 可得波傳之相位速度 V_p ：

$$V_p = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.5)$$

2.2.4 錯動變形量測原理



經上述之 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或幾何形狀不同處(阻抗不連續)，將產生反射訊號。於 TDR 錯動變形量測上，在同軸電纜介質不變下，錯動變形發生處因感測電纜受剪作用，其受剪處斷面幾何會發生變化，產生反射訊號。應用此項原理之目的有二：其一為當埋設錯動變形傳輸纜線於有滑動之虞的地層中，經由走時計算，可量測出錯動發生的位置；其二為當滑動量逐漸增大時，TDR 反射波形亦隨之增加，因此可藉由一些方法估計出錯動位移量。

如圖 2.8 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；當電磁波至電纜之末端時，即產生一終點反射，於 TDR 之波形上顯現上揚之反射波形。

我們可以應用此項原理用來監測岩體變形，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，以期其與岩塊形成一體。然後，隨著岩體變形，在同軸纜線發生破壞處，TDR 反射之波形會隨變形之增加而增加。目前許多研究指出，變形的大小可量化，且在某些例子中，我們亦能分辨其為剪力或張力變形 (Dowding et al., 1988 & 1989, Su and Chen, 2000)。

當同軸纜線安裝填漿於鑽孔後，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)，會個別對輸入之脈衝產生影響，而疊加的效果，便輸出於示波器上。如圖 2.9 所示，大壩底下所埋設的兩支同軸纜線，其有因不均勻沈陷而使電纜線受張，亦有因節理旁岩層相對位移而使電纜線受剪者，若能對其個別於波形產生之影響有所瞭解，則可對輸出之波形，及疊加之效果有所判別。

局部之應變及(或)薄剪動常發生於支撐開挖邊緣、土堤下、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(區)，以致會導致土壤之漸進式破壞。假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。

在 TDR 量測土壤變位時，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需與土壤相當，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。

目前對於土壤邊坡滑動之變位量測，多限制在使用一些費人力的手工量測，如傾斜探管，它是經由事先於地上鑽孔，然後搭接、埋置傾斜管，再定期派人員至現地垂放傾斜儀，然後換算成土層剖面位移。而 TDR 設備在埋置後，透過資料自動之擷取，可達遠端監測、即時及自動之資料蒐集，且它亦有能力量測出非常薄的剪動帶。

2.3 TDR 錯動變形量化分析

將 TDR 運用在錯動變形量測上是相當具有發展性的創新技術，

不僅量測簡便、連續性擷取資料、可遠端自動化操控，亦可結合其它 TDR 邊坡監測系統，達到經濟與效率之目的。但是受到現地地層錯動變形之複雜性、電纜衰減之特性，在錯動變形量化分析上，確實存在著部分問題，以下就以往學者過去所做之研究做進一步描述。

Dowding et al.(1989)採用圖 2.10 之剪力試驗裝置，使用不同直徑之電纜線施作剪力試驗。實驗中左右兩塊體是固定不動，並加載在中央之水泥砂漿塊體上，加壓力將裹纜線之塊體斷成三截以模擬岩體受剪之狀況。

由進行模擬岩塊於受剪時產生剪力變形之試驗獲得圖 2.11 所示之結果。剪動過程之變位與受剪處反射係數之關係如圖 2.12 所示，對應不同直徑之電纜，線性迴歸出互異的靈敏度 (sensitivity) 與初始反應 (initial response)，以靈敏度與初始反應做為錯動變形量量化依據。

$$u = (V_{pk}/S) + u_0 \quad (2.6)$$

u 為待求之變位量、 V_{pk} 為反射係數峰值、 S 為靈敏度、 u_0 為 x 軸截距也就是指初始反應。此種量化方式可適用於當纜線受局部剪應變 (localized shear) 時，若有剪力帶寬度之影響下，則不適用。當纜線長度變長時，能量之衰減亦會造成靈敏度之減小。

Su and Chen (1998) 採用圖 2.13 所示之實驗設備進行模擬實驗，

此一實驗裝置可進行剪力與張力之模擬試驗。考慮同軸纜線上具有多區段變形時，則 TDR 反射訊號之分析上將產生多處不連續介面與不同阻抗，容易造成反射訊號間之相互干擾，所以其建議以反射訊號電壓降之面積對時間之積分(圖 2.14)，來取代原有之以變形處之最大電壓降的量化方式，做為量化錯動變形量之方法；丁建仁(1999)，以面積法計算變位量，指出不論是拉伸變形或是剪動變形，在相同的變形量下所得到的計算結果誤差最小，以面積法做為量化的方式確實與變位量間有一良好關係；鍾宏達(2000)以同樣方法，以多項式迴歸出剪動量與面積間之關係式，如圖 2.15 所示。上述以面積法量化錯動變形量之方式依然無法考慮纜線長度與剪力帶寬度之影響，故其通用性仍存著疑慮。



2.4 反射波形影響因子

(A) 纜線電阻

假設在傳輸纜線長度短、低衰減前提下，纜線電阻對反射訊號的影響不大。但是現地監測點通常與時域反射儀有一段距離，因此需埋設一段長距離之電纜，故纜線電阻不可忽視。纜線電阻會造成上升時間(rise time)與訊號衰減的增加，致使反射波形平滑化、空間解析度降低、反射係數減小。

Su (1987)的研究指出，隨著電纜長度增加，上升時間隨之增

長、反射波形平緩化，電磁波於不連續處走時增大，引致空間解析度之降低，如圖 2.16。

Kim (1989)以相同直徑不同長度之電纜得到當纜線長度增長時，對應相同的剪位移下，反射係數變小(圖 2.17)。Pierce et al. (1994)量測 4 種不同變位量，其結果亦說明了反射係數隨長度增加而減小(圖 2.18)。

(B)纜線變形模式

現地地層中的滑動破壞之行為甚為複雜，電纜埋設於地底下時，可能遭受剪力、張力或此兩種複和式力量之作用；彎矩作用的行為亦同樣存在。為析離出當纜線受各種不同力量機制作用時，所發生的行為與反射訊號的關係，將以往學者的研究成果說明如下。

Dowding et al. (1989) 進行模擬纜線於岩塊受剪時之情形，得到當剪位移逐漸增大時，反射釘狀波形亦更加顯著，直到纜線剪斷破壞而產生正向反射，如圖 2.11。

O'Connor (1991)的研究說明了當對應相同剪位移，剪力帶寬度(air gap)越寬，靈敏度越小，如圖 2.19。

Dowding et al. (1989) 進行模擬纜線於岩塊中受拉之行為，隨張力變形之增加，反射訊號之頸縮現象隨之加寬，當纜線破壞，

成開放性之迴路 (open circuit)，如圖 2.20。

通常對應相同的剪力與張力位移下，電纜受剪之反射係數比張力來的大。

O'Connor et al., (1995) 指出，電纜於土層中受錯動變形，當發生局部化錯動變形，可以纜線受剪力作用行為解釋錯動量與反射訊號之關係 (圖 2.21a)。當剪力帶超過某寬度時(圖 2.21 b-c)，纜線並受有彎矩作用，反射波形呈現兩處明顯凹痕，以凹痕間距近似剪力帶寬度是可行的方式。

Lu (2003)研發出模擬現地錯動變形之剪力盒(圖 2.22)，考慮剪力帶寬度、延長線長度與多重反射等影響。剪力帶寬度之增加導致初始反應值增加及反射係數之減少；延長線長度增加使反射訊號變小；多重反射影響下，初始反應值增加且反射波形之振幅寬度與深度將變小。

(C)其它

過去學者的研究指出，電纜多區段變形、現場灌漿、噪音等，均會影響反射波形。本研究的 R 之 TL model 可解決多區段變形的影響，現場灌漿與電纜破壞模式有著密不可分的關係，而噪音對反射訊號的影響並不大。

以往在錯動變形量化上，沒考慮因纜線電阻 R 所影響之訊號衰減

與上升時間之增加。本研究以傳輸線波傳理論，加入纜線電阻 R 的影響，建立一數值模擬與反算的方法。在簡化錯動變形影響因子下，不考慮剪力帶寬度影響，以不同長度電纜做室內錯動變形試驗，探討阻抗與錯動量之關係。此外，將結合 OTDR 與 TDR 施做錯動變形試驗，探討 OTDR 光纖量測與錯動變形之關係，因目前 OTDR 量測系統尚未應用在有關地層錯動之研究，故文獻回顧不含此部分，關於 OTDR 光纖量測原理將於第四章介紹。



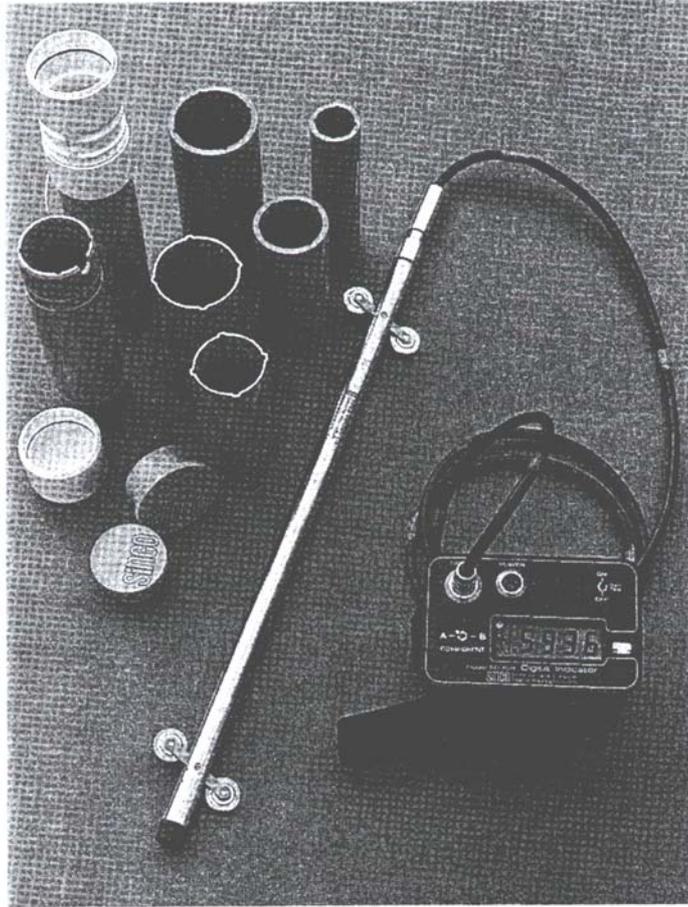


圖 2.1 傾斜探管照片
(Green and Mikkelsen, 1988)

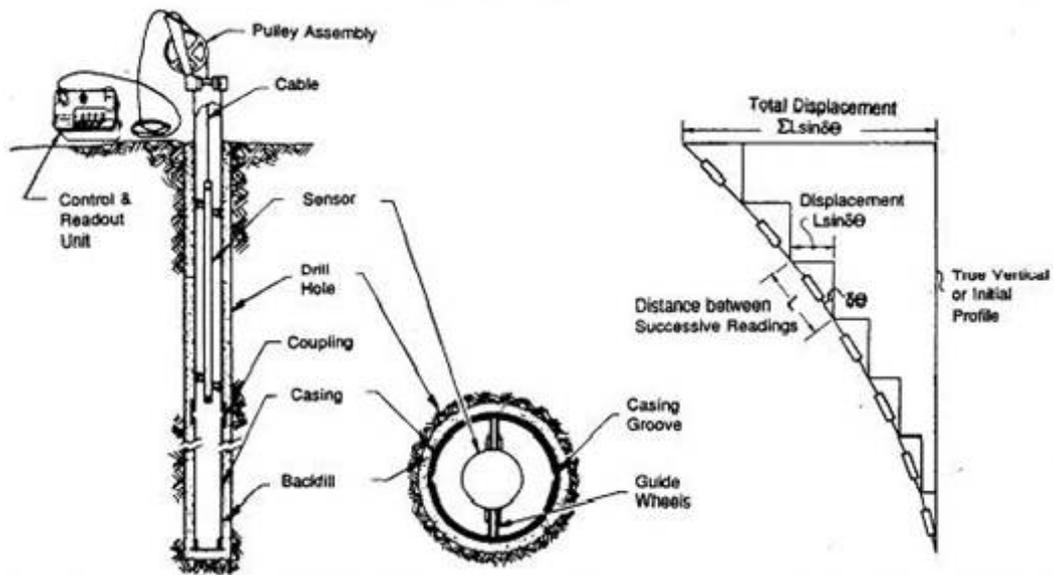


圖 2.2 傾斜探管之現地配置與變形剖面
(Wilson and Mikkelsen, 1978 ; Green and Mikkelsen, 1988)

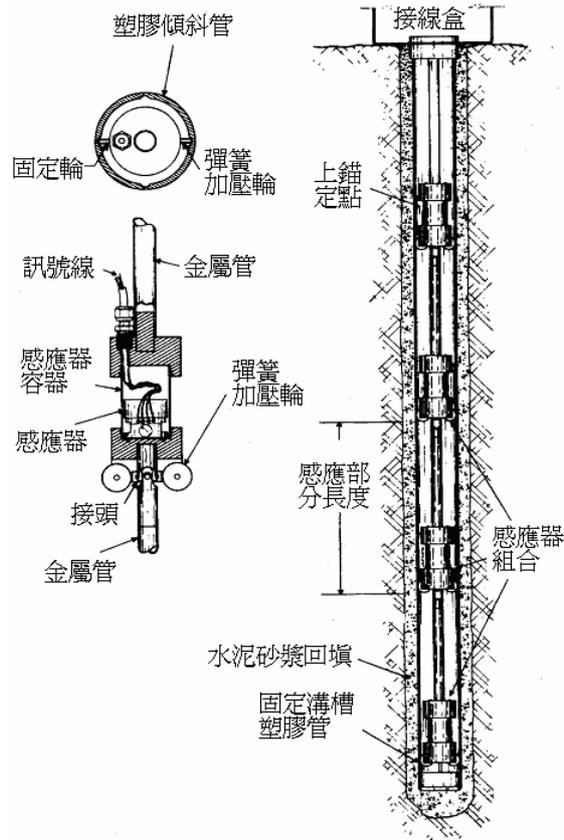


圖 2.3 孔內傾斜儀構造和配置圖
(Wilson and Mikkelsen, 1978)

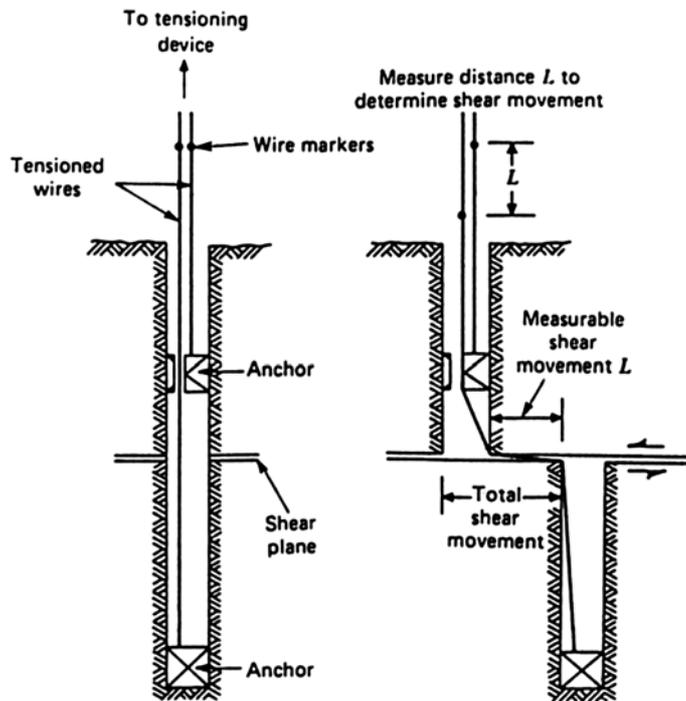


圖 2.4 Slope Extensometer 現場配置
(after Kirschke, 1977)

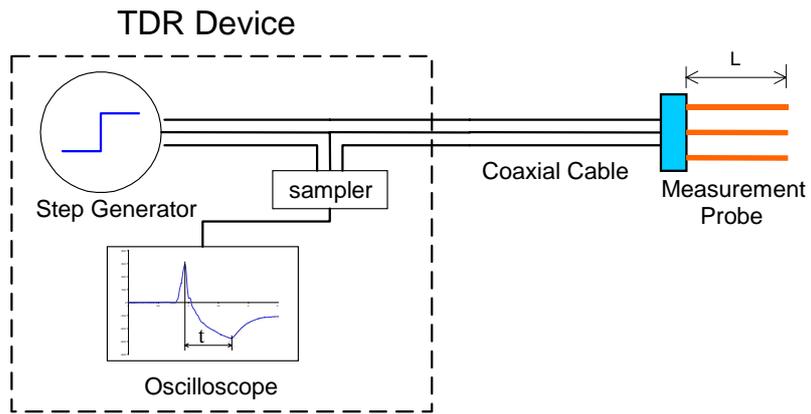


圖 2.5 時域反射儀之元件

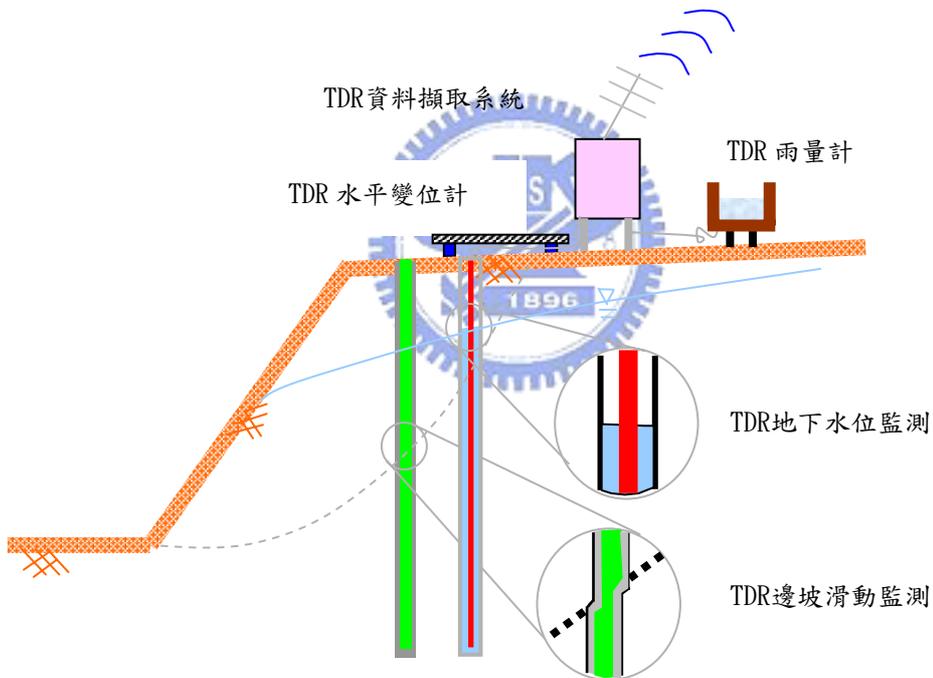


圖 2.6 TDR 邊坡監測系統

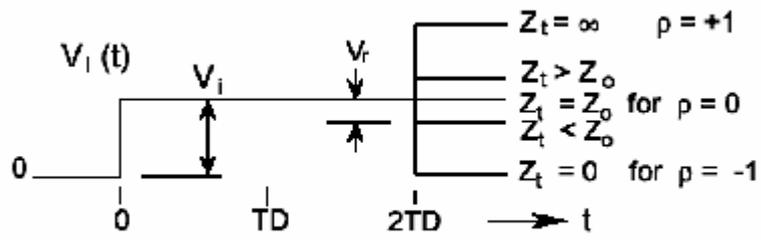


圖 2.7 不同之阻抗不連續所產生之反射波形
 (TD 為入射電磁波碰到不連續面回彈為接收器所接收之時差)

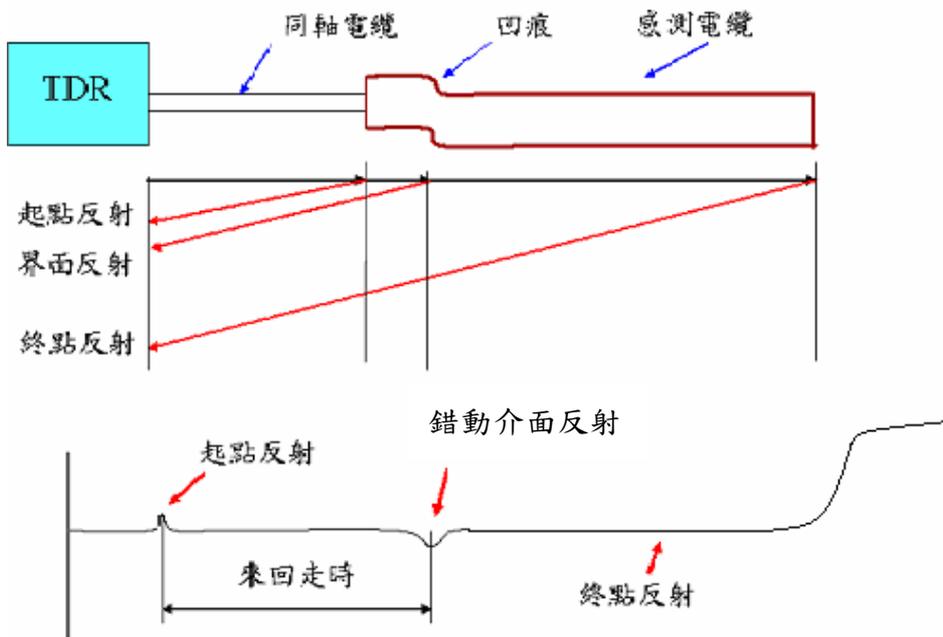


圖 2.8 TDR 變形監測之反射訊號與原理

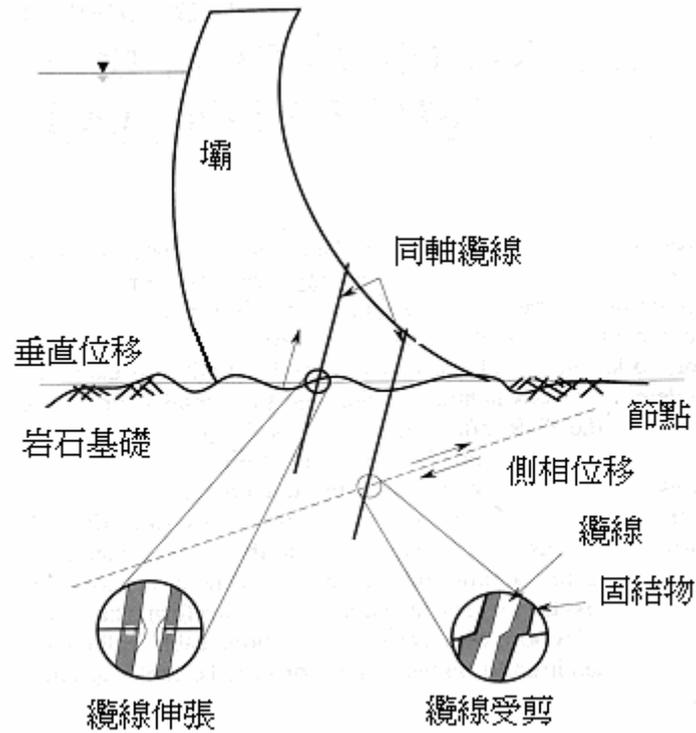


圖 2.9 岩體變形監測
(O'Connor and Dowding, 1999)

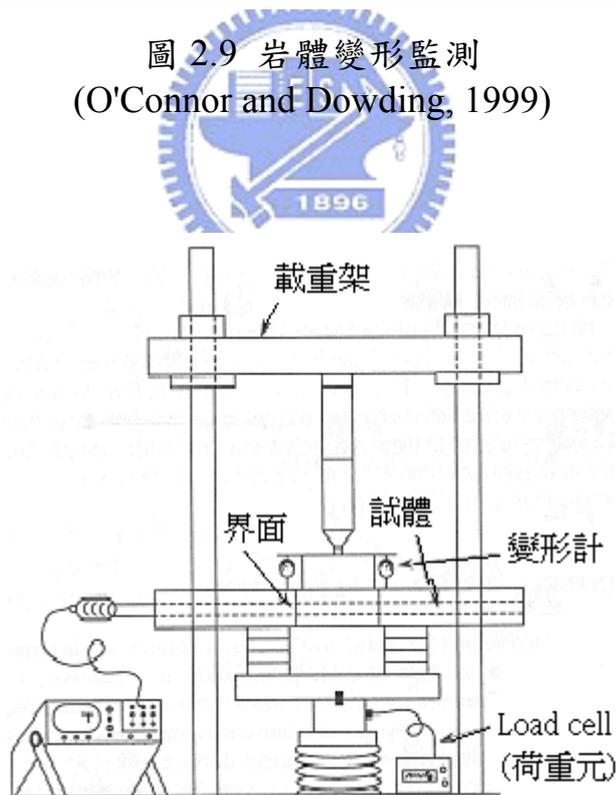


圖 2.10 單向度剪力試驗裝置
(Dowding et al. 1989)

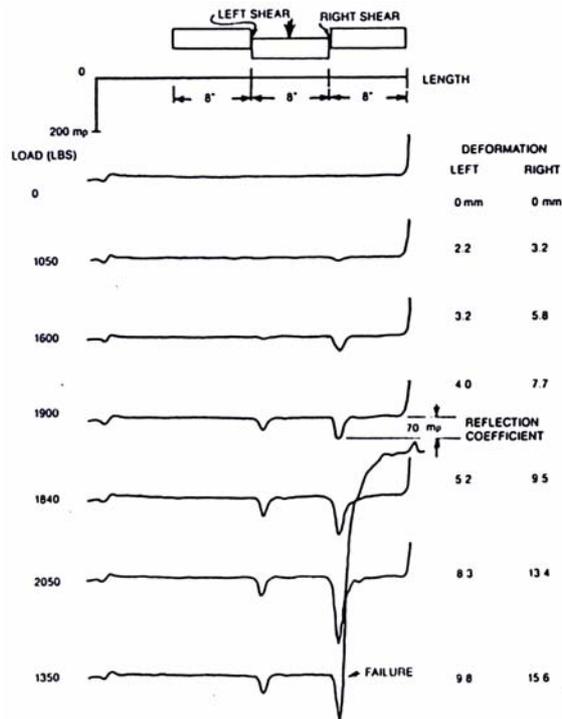


圖 2.11 剪力變形與反射係數之關係圖
(Dowding et al., 1989)

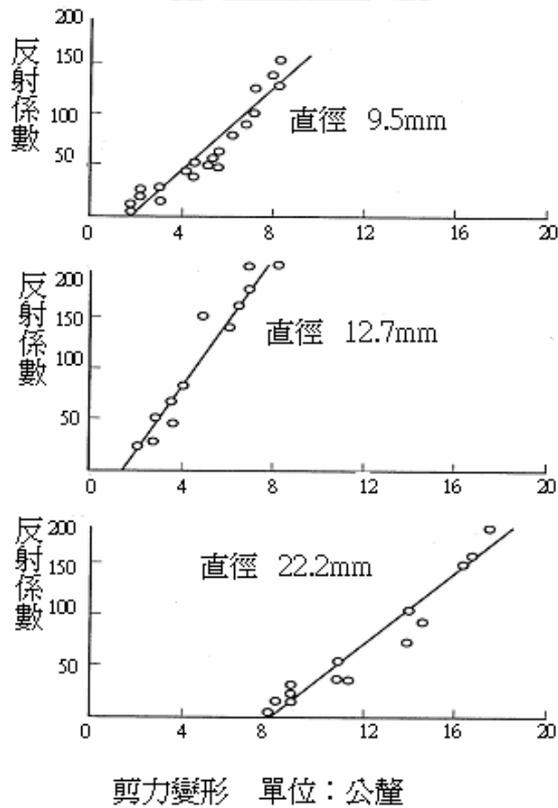


圖 2.12 不同外徑同軸纜線的反射係數與剪力變形之關係
(Dowding et al., 1989)

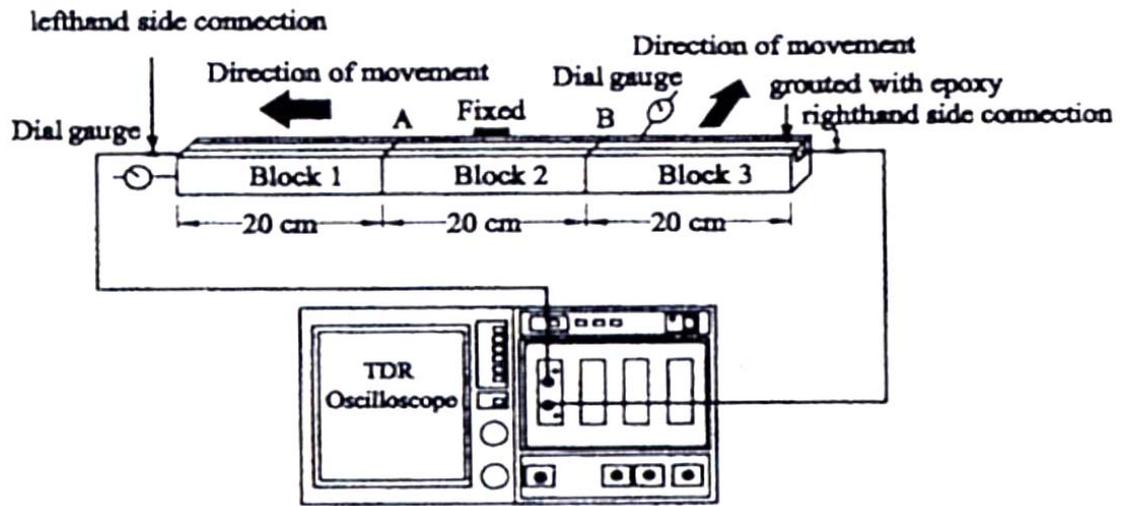


圖 2.13 張力、剪力試驗裝置
(Su,1998)

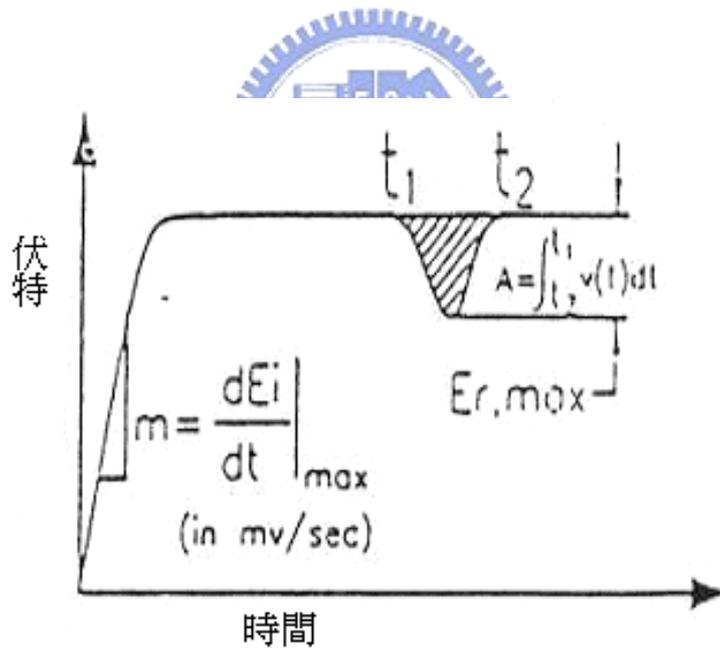


圖 2.14 反射訊號電壓降的面積對時間關係的積分
(Su and Chen, 1998)

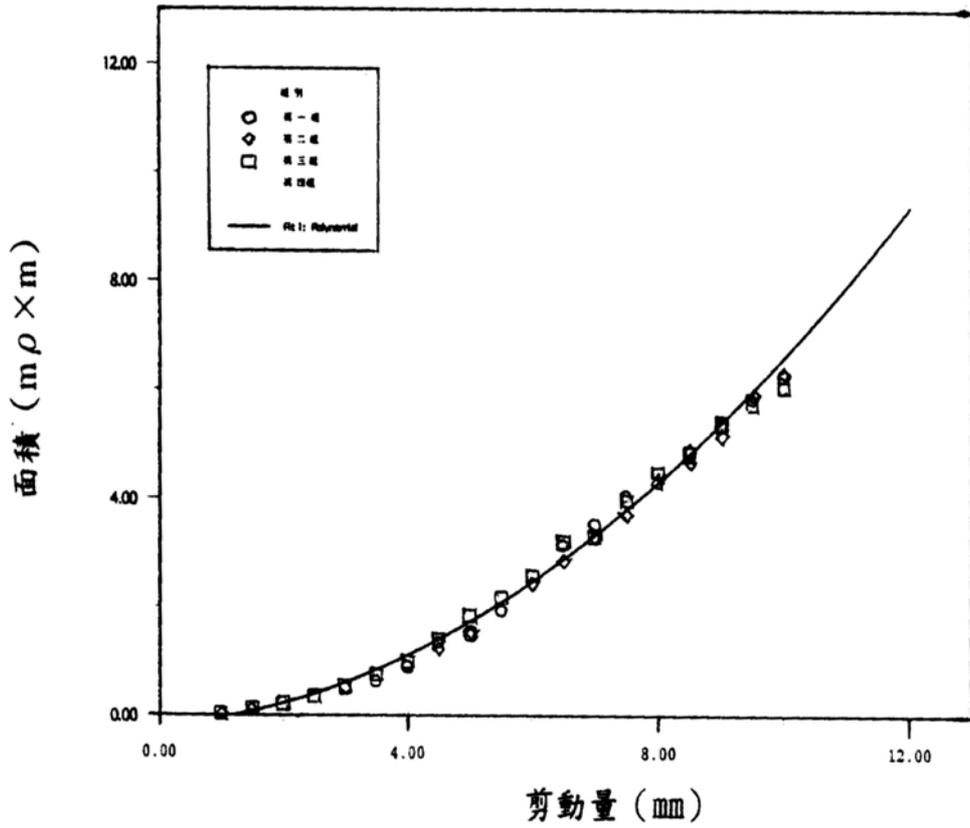


圖 2.15 剪動量與面積之關係
(鍾宏達, 2000)

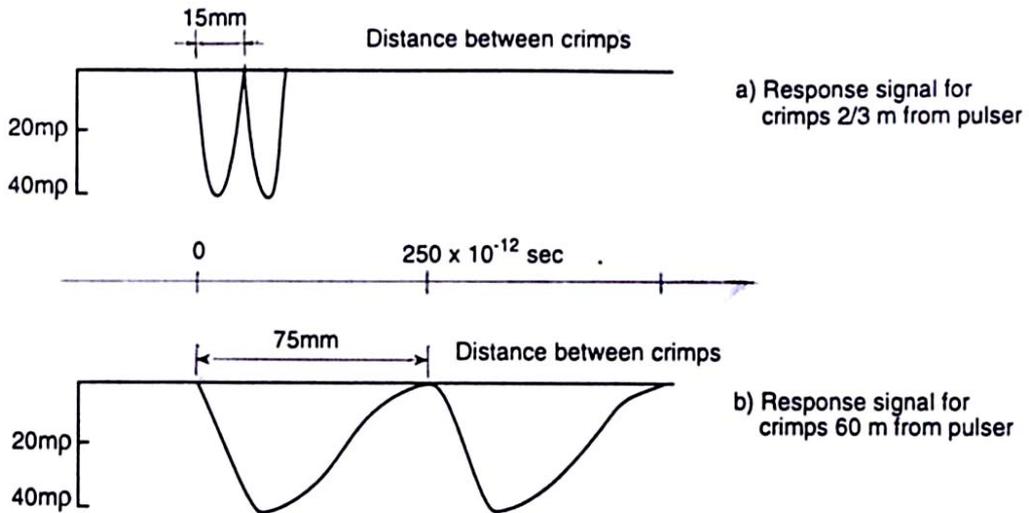


圖 2.16 空間解析度受纜線長度影響
(Su, 1987)

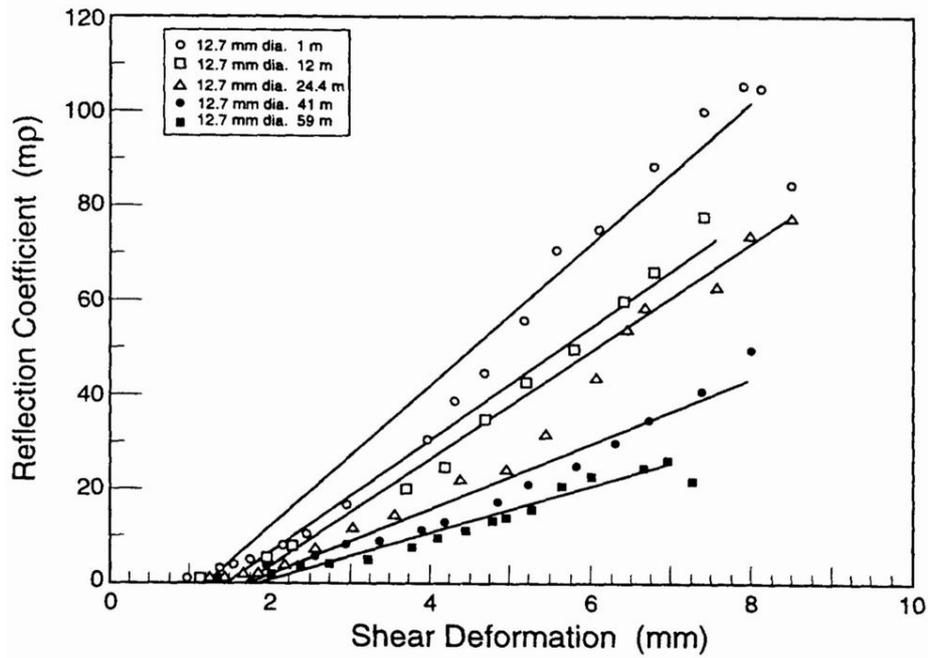


圖 2.17 反射係數隨纜線長度增加而遞減
(Kim, 1989)

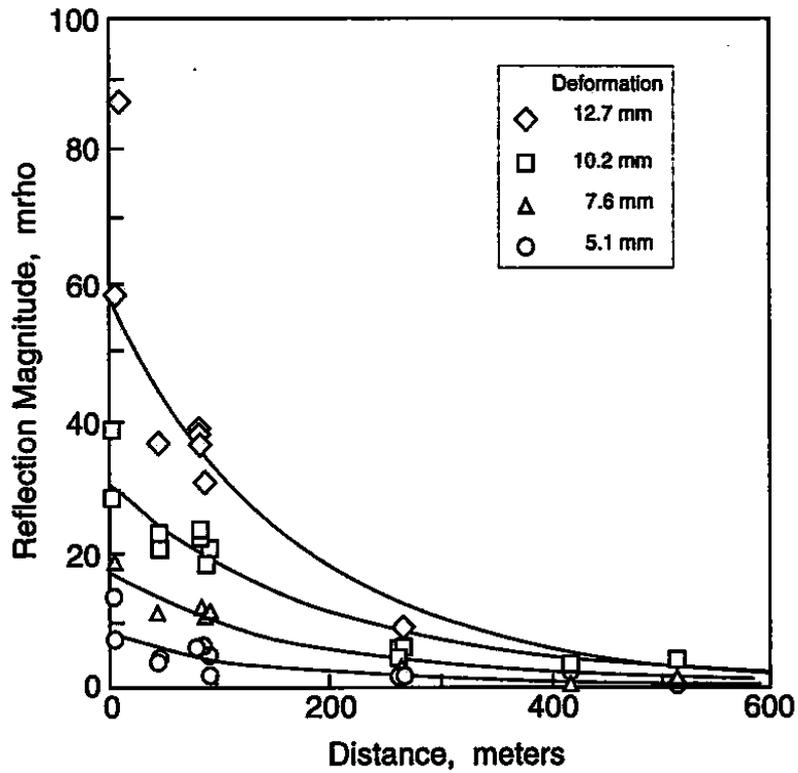


圖 2.18 對應 4 種不同變形，反射係數隨長度增加而減小
(Pierce et al., 1994)

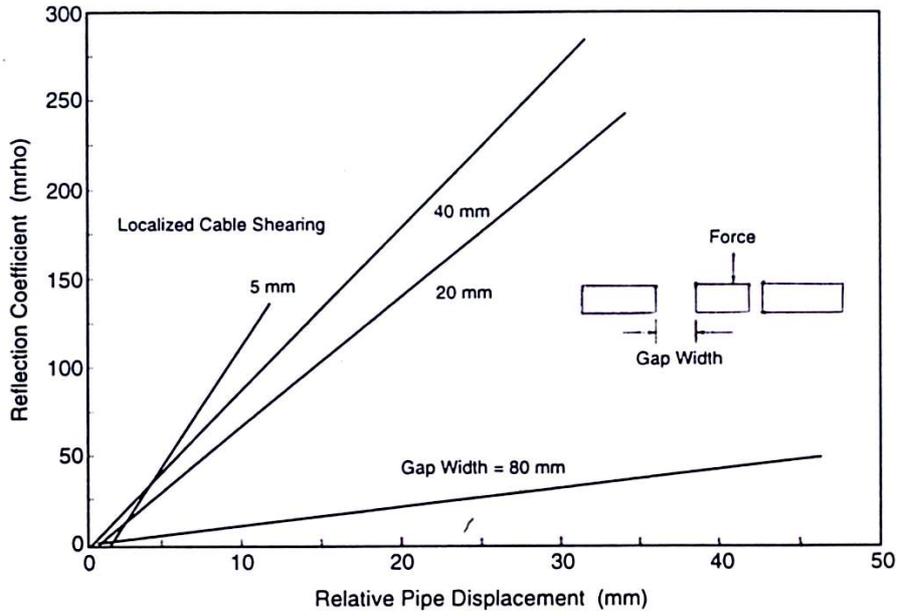


圖 2.19 TDR 反射訊號因剪力帶寬度之影響 (O'Connor 1991)

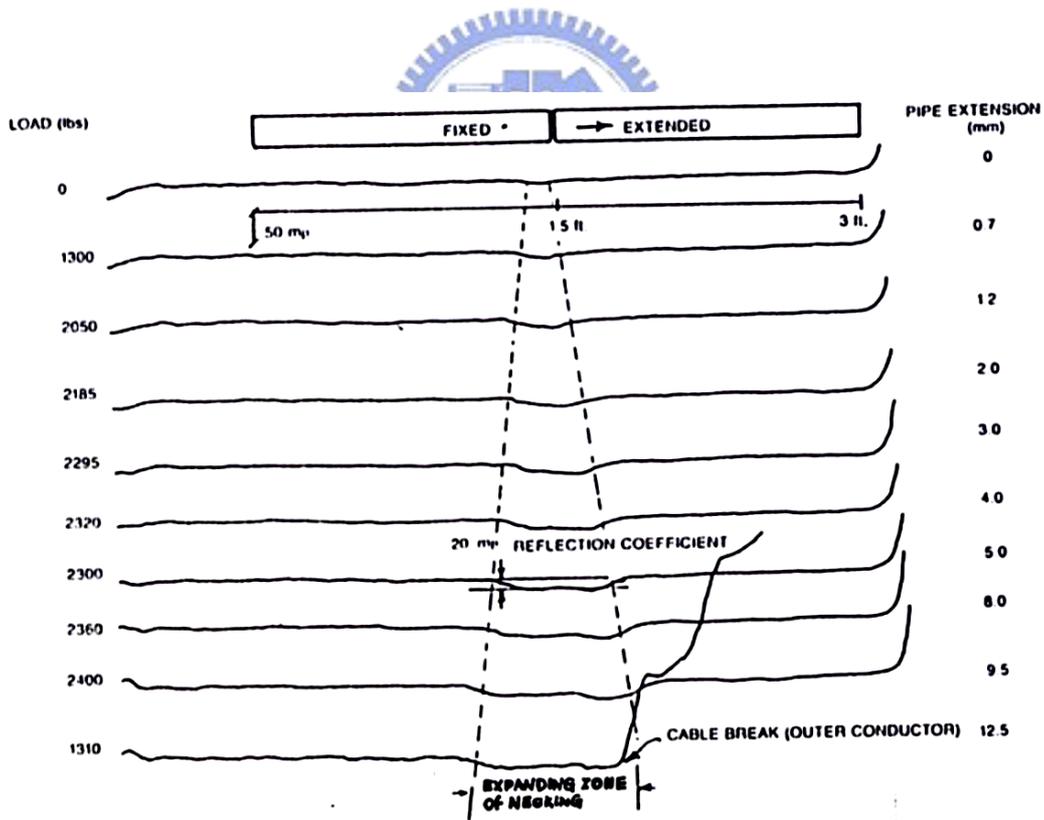


圖 2.20 電纜受張力作用之頸縮現象 (Dowding et al., 1989)

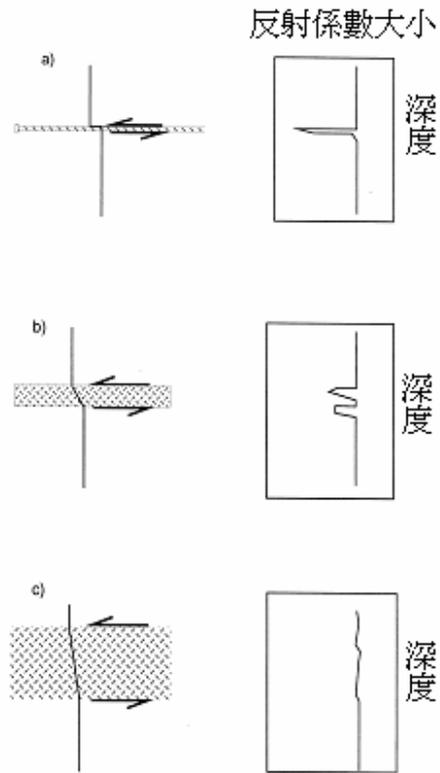


圖 2.21 不同剪力帶寬度之 TDR 反射波形：(a)局部剪動；(b)小錯動帶寬與纜線受彎曲；(c)大錯動帶寬(O'Connor, 1995)

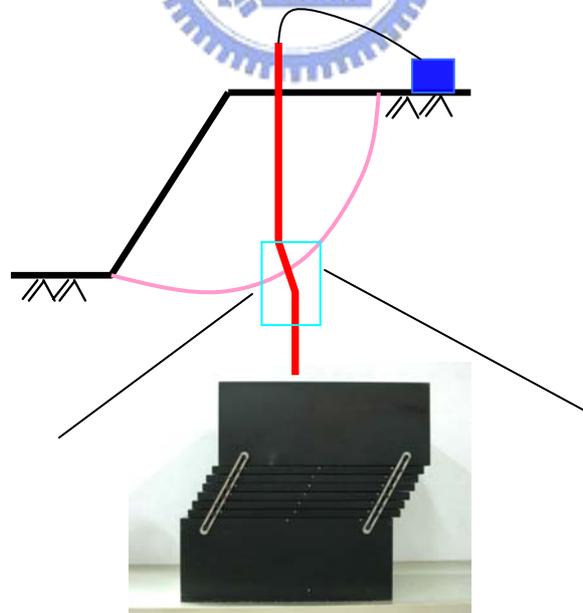


圖 2.22 模擬現地錯動變形之剪力盒

第三章 TDR 錯動變形量化之研究

如 2.4 節末所提，TDR 纜線電阻 R 會造成訊號之衰減與上升時間之增加，導致反射係數減小、空間解析度降低等。為解決此問題，本研究以傳輸線理論加入纜線電阻 R 之影響，建立一套考慮 R 之傳輸線理論模型(R-Transmission Line model)，模擬不同長度電纜受剪時之 TDR 反射波形，並藉由反算分析，找出錯動量與電纜阻抗之關係。

3.1 TDR 波形模擬(考慮 R 之 TL model)

3.1.1 流程

由圖 3.1 可瞭解波形模擬之流程，首先由時間域之原始訊號 $X(t)$ 經由傅立葉轉換成頻率域之頻譜 X_K ，再將此一頻譜乘上模擬纜線系統之系統函數 H_K (可由 R 之 TL model 推導)，形成另一新的函數 Y_K ，將此一函數經由傅立葉反轉換反算出最終之波形函數。以下 3.1.2 節與 3.1.3 節之關係式均為在頻率域下所得之式子。

3.1.2 傳輸線理論

因同軸電纜之特殊電磁場結構，電磁波在傳輸線傳遞可由導體之電流與導體間之電壓描述。對一均勻之傳輸線而言，可求得一通解：

$$V(z) = V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{\gamma z} \quad (3.1a)$$

$$I(z) = \frac{V^+}{Z_c} e^{-\gamma z} - \frac{V^-}{Z_c} e^{\gamma z} \quad (3.1b)$$

其中 z 為沿傳輸線之位置、 V^+ 與 V^- 為未定常數、 γ 為傳遞常數、

Z_c 為特徵阻抗(為斷面幾何與介電度之函數)。 γ 與 Z_c 可表示為：

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon} \quad (3.2a)$$

$$Z_c = Z_p / \sqrt{\epsilon} \quad (3.2b)$$

其中 $j = (-1)^{1/2}$ 、 c 為光速、 ϵ 為介電度、 Z_p 為傳輸線介質為空氣時之阻抗(斷面幾何之函數)。

圖 3.2 為一均勻傳輸線(uniform transmission line)之等效電路，可代表 TDR 傳輸線系統。此系統之邊界條件如下：

$$V(0) = V_s - Z_s I(0) \quad (3.3a)$$

$$V(l) = Z_L I(l) \quad (3.3b)$$

其中 V_s 為電壓源並對應 3.1.1 節之 X_k 、 Z_s 為來源阻抗(source impedance)、 Z_L 為在某位置 l 時之負載阻抗(load impedance)，當遭遇斷路時 $Z_L = \infty$ ；遭遇短路時 $Z_L = 0$ 。以上兩邊界條件可解得 V^+ 與 V^- 未定常數。將 V^+ 與 V^- 帶入式(3.1)，在 $z = 0$ 處可得一特解，也就是 TDR 示波器上之取樣電壓 $V(0)$ 。

輸入阻抗法(input impedance approach)為上述延伸之較好方式。輸入阻抗 $Z_{in}(z)$ 為在等效電路 z 位置之等效阻抗(圖 3.2)，位置 $z = 0$ 之阻抗可為在 $z = l$ 之函數：

$$Z_{in}(0) = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh(\gamma l)}{Z_c + Z_{in}(l) \tanh(\gamma l)} \quad (3.4)$$

於節點位置 $z = 0$ 、 $I(0) = V(0)/Z_{in}(0)$ ，可得取樣電壓 $V(0)$ 並對應

3.1.1 節之 Y_k :

$$V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_s} V_s \quad (3.5)$$

上式可改寫為：

$$V(0) = H_k \cdot V_s \quad (3.6)$$

H_k 為系統函數。

以上所述為在傳輸線為單一均勻區段下之情形，若傳輸線為多數非均勻區段，如圖 3.3 所示，可藉輸入阻抗之方式，由邊界條件 Z_L 往前推得 Z_{n-1} ，再以 Z_{n-1} 為邊界條件以同樣之方式求得 Z_{n-i} ，如下式：

$$\begin{aligned} Z_{in}(Z_n) &= Z_L \\ Z_{in}(Z_{n-1}) &= Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} \tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L \tanh(\gamma_n l_n)} \\ Z_{in}(Z_{n-2}) &= Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(Z_{n-1}) + Z_{c,n-1} \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(Z_{n-1}) \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\ &\vdots \\ Z_{in}(0) &= Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} \tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1) \tanh(\gamma_1 l_1)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

以上列之方式，最後可得到如式(3.5)之關係式。

3.1.3 R 之 TL model 波形模擬

通常 TDR 錯動變形量測系統所使用之感測電纜為傳輸電纜之延伸(相同電纜)，且導體內部材料均為一致，故錯動變形反射訊號之改變僅受制於纜線斷面幾何之變化，斷面幾何之改變將造成電纜阻抗之變化，並影響反射訊號之大小。過去在 TDR 錯動變形量測上並沒有考慮電阻 R 所造成之影響。本研究依據上節所述之 TL 理論加入纜線

電阻 R 之影響，建立一 R 之 TL model 模擬 TDR 反射波形並反算分析阻抗與錯動量之關係。式(3.2)可改寫為：

$$\gamma' = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon} \cdot A(R) \quad (3.8a)$$

$$Zc' = Zp / \sqrt{\epsilon} \cdot A(R) \quad (3.8b)$$

其中 A(R)可定義為衰減因子。

藉由式 3.3~式 3.8 可知 V(0)為纜線阻抗、傳遞常數與區段長度之函數：

$$V(0) = f(Zc_i, \gamma_i, L_i) = H_k' \cdot Vs \quad (3.9)$$

其中下標i為分割之電纜區段、 H_k' 為考慮R之系統函數。

如圖 3.4 為電纜受剪作用之情形。由圖 3.5(a)可知，當電纜受剪作用下，其纜線變形呈對稱式漸縮模式。對於CommScope電纜，相同之感測電纜與延長線下，可將纜線分割成三個區段，如圖 3.5 (b)(c)，剪動處前段為 $Z_{c1} - \gamma_1 - L_1$ ；剪動發生處為 $Z_{c2} - \gamma_2 - L_2$ ；末段為 $Z_{c3} - \gamma_3 - L_3$ 。對於RG58AU延長線接CommScope(此處或以下均指 3.3 節(c)之同軸電纜)感測電纜，將纜線分割成 4 個區段，延長線為 $Z_{c1} - \gamma_1 - L_1$ ；感測電纜前段為 $Z_{c2} - \gamma_2 - L_2$ ；剪動處為 $Z_{c3} - \gamma_3 - L_3$ ；末段為 $Z_{c4} - \gamma_4 - L_4$ ，如圖 3.6。R值的取得是利用擷取已知長度RG58AU與CommScope電纜的TDR波形，由 R_i 模擬出近似波形後而求得。

3.2 試驗方法

為了析離出纜線電阻對 TDR 錯動變形量測之影響，本研究著重在簡化 TDR 錯動變形量測影響因子，考慮當沒有剪力帶寬度下，取不同長度延長線接感測電纜，試驗感測電纜受剪作用後，其反射波形與錯動變形之關係，以 R 之 TL model 模擬並反算錯動變形量與阻抗之關係後，歸納出量化錯動量之方法。

以上方式不考慮現地地層錯動變形模式之複雜性：灌漿強度與現地地層材料、纜線握裹之間互制行為；電纜剪力、張力及彎矩等複合力之作用機制。

本研究在 TDR 錯動變形量化上，不考慮剪力帶寬度之影響，以不同長度之電纜進行試驗。另外 OTDR 與 TDR 結合錯動變形試驗將於下個章節說明。

1. RG58AU 延長線

在此所指的延長線為感測器與 TDR 間所連接之同軸電纜。

本試驗先取 1m CommScope 變形感測器，予以剝皮處理後，取石膏與水配比 1.5：1 (重量比) 澆置於剪力盒內並靜置 2 天待其凝固。試驗時，分別以 2m、10m、20m、30m RG58AU 之同軸電纜連接 1m CommScope 變形感測器，量測剪動位移量漸次增加之反射波形，由電腦擷取並記錄分析之，直至纜線破壞為止。

2. Commscope 同軸電纜

本試驗使用同一條同軸電纜，做為傳輸與變形感測之用。

剪動處與 TDR 之距離為分別為 2m、10m、20m 與 30m，試驗方法與上述相同。本試驗與上述試驗主要區別在於不同電阻 R 的影響下，反射訊號衰減程度的差異。

3.3 試驗設備

TDR 室內錯動變形試驗設備如圖 3.7 所示，主要包括 TDR 資料擷取系統、剪動變形器，變形傳輸纜線。

(A) TDR 資料擷取系統：

在此實驗中之 TDR 資料擷取系統共包括 TDR 1502C、筆記型電腦、資料傳輸線等，透過 TDR 1502C 將資料利用筆記型電腦與擷取程式擷取並記錄每一筆 TDR 反射訊號。



(B) 剪動變形器：

由兩台鑽床萬力、金屬底板、兩剪力盒所組成，如圖 3.8 所示。鑽床萬力固定於金屬底板上，藉由轉動旋轉桿推動剪力力盒使產生錯動變形，每轉動 1/4 圈產生 1mm 錯動變形量。於做試驗前，感測電纜置入剪力盒中，並將石膏澆灌於盒內靜置 2 天。

(C) 變形傳輸纜線：

變形感測器採用 CommScope P3 500 同軸電纜，直徑 12.7mm

(不含外皮)。TDR 量測系統與剪動處間之連接纜線除了上述之外，亦使用 RG58 AU 2m、10m、20m 及 30m 之同軸電纜做為延長線。此部分包含纜線接頭。

3.4 TDR 錯動變形量化分析結果

1. RG58AU 延長線

於相同之石膏試體，感測導波器 1m，剪動過程分別接 2m、10m、20m 及 30m 長度之延長線，所得到之 TDR 波形如圖 3.9 所示。由圖中可知，隨著延長線長度之增加，反射處波形逐漸變緩、加寬，訊號呈不明顯情形。由式(2.3)計算得各長度之反射係數後，如表 3-1 所示，線性迴歸後得出對應不同延長線長度，反射係數與剪位移之關係，如圖 3.10，與 2.4 節所提及之關係符合。靈敏度(sensitivity)為直線之斜率，初始反應(initial response)為直線交於 X 軸離原點之距離。

使用面積積分法可得到圖 3.11，隨延長線長度之改變，變位量與積分面積並無一致性關係，斜率分佈範圍 0.12~0.05，相斜率最大與最小之比值為 2.4，相較於最大電壓降法斜率範圍 6.2~0.5，斜率最大與最小之比值為 12.4，面積積分法所得結果比最大電壓降法集中，但仍無一致性關係。此外在判定積分邊界會隨不同使用者而改變，多重反射亦會干擾積分邊界之判定，

若錯動處離感測器尾端太近，訊號於錯動處走時尚未完全反應出錯動斷面阻抗之變化，則積分右邊界將消失。

當延長線為 2m，接 1m CommScope 同軸電纜感測器時，所得之波形經由 R 之 TL model 模擬之結果，可得如圖 3.12，藉由反算分析可獲得阻抗與錯動量之關係，如圖 3.13。

由於 2m、10m、20m 及 30m 延長線均連接相同之感測電纜，無論接任何長度之延長線，其受剪處阻抗與錯動量之關係應為一致。所以將延長線為 2m 反算分析所得之阻抗，在對應不同長度電阻 R 影響不同之下，套用至延長線為 10m、20m 及 30m 之情形，如圖 3.14~圖 3.16 所示。當延長線為 10m 時，模擬之波形近乎一致；當延長線為 20m 及 30m 時，所模擬之波形有微向右漂移之傾向。

錯動的量化上，考慮無剪力帶寬度影響下，可參考圖 3.13。先由 TDR 擷取錯動反射波形後，模擬反算得錯動處之阻抗，阻抗所對應剪動量即是所求。

2. CommScope 同軸電纜

相較於 RG58AU 同軸電纜，本試驗所採用之 CommScope 屬低衰減之同軸電纜，此部分與前試驗差別在於傳輸纜線亦為感測器之一部分，試驗控制錯動發生處分別距離 TDR 1502C

2m、10m、20m 及 30m。TDR 擷取之波形如圖 3.17。相較於 RG58AU 同軸電纜，此試驗結果受延長線長度之影響不大，反射訊號在 30m 電纜長度下依然明顯可辨，由式(2.3)可計算出反射係數與剪位移之關係，如表 3-2，線性迴歸後可得如圖 3.18。與 RG58AU 同軸電纜比較，可知 RG58AU 纜線衰減嚴重影響反射量之大小。

使用面積積分法可得到圖 3.19，隨延長線長度之改變，變位量與積分面積同樣無一致性關係，斜率分佈範圍 0.16~0.1，斜率最大與最小之比值為 1.6，相較於最大電壓降法斜率範圍 8.9~4.4，斜率最大與最小之比值為 2，同樣地，面積積分法所得結果比最大電壓降法集中，而缺點如前述。

圖 3.20 為 2m CommScope 模擬之波形，經由反算分析可得圖 3.21 之阻抗與錯動量之關係。以 3.4 節第 3 段所提同樣方式可模擬出 CommScope 電纜為 10m、20m、30m 之波形，如圖 3.22~圖 3.24 所示。當感測電纜為 10m 模擬波形近乎一致；為 20m 時於錯動量 15-22mm 略為高估；為 30m 時於錯動量 20-22mm 也略為高估。

在試驗 CommScope 感測電纜時，由於 2m、10m、20m、30m 之感測電纜與延長線相同，從最長之電纜做起，每做完一組即

截短電纜，所以有 4 組試體施做錯動變形試驗，4 組試體不可能完全相同，故造成上述之誤差。而 RG58AU 錯動變形試驗則分別使用 4 種不同長度之延長線接相同之感測電纜，所以不會有上述之問題。



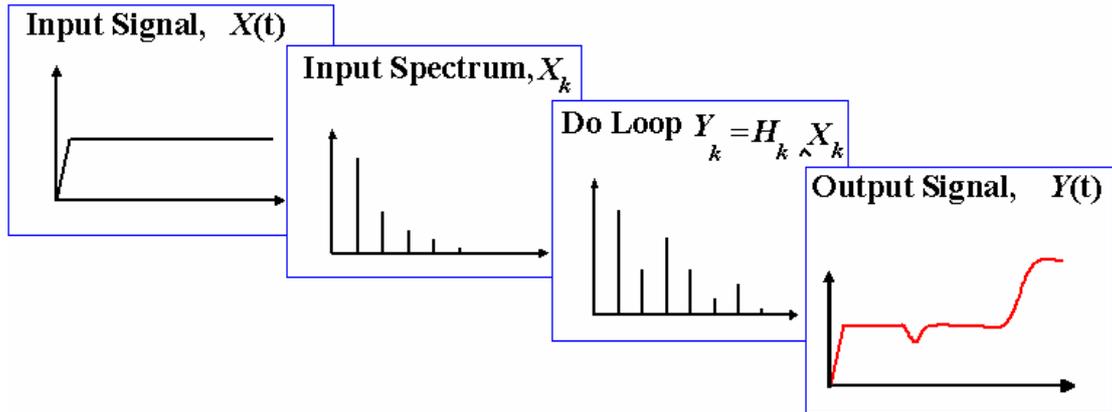


圖 3.1 波形模擬反算流程(Lu, 2003)

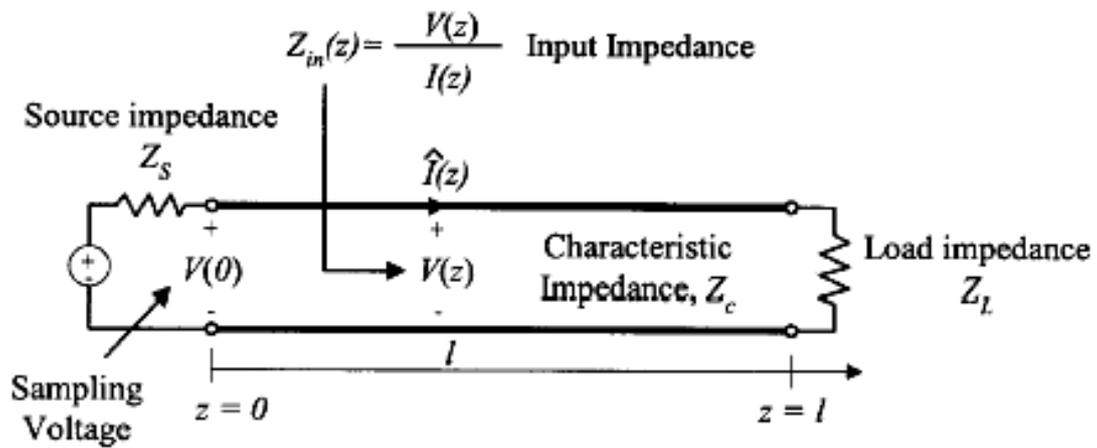


圖 3.2 TDR 傳輸線系統之等效電路與輸入阻抗

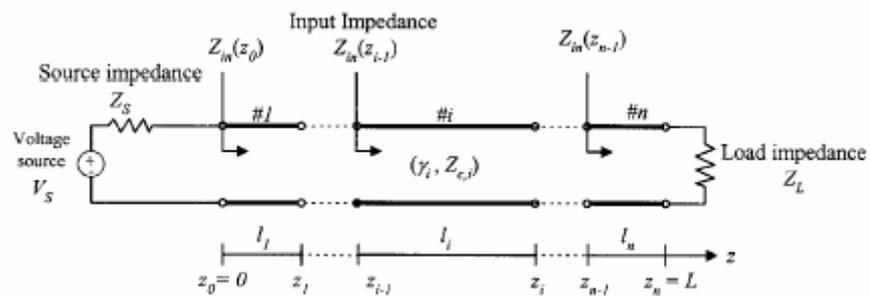


圖 3.3 非均勻傳輸線之分割串聯

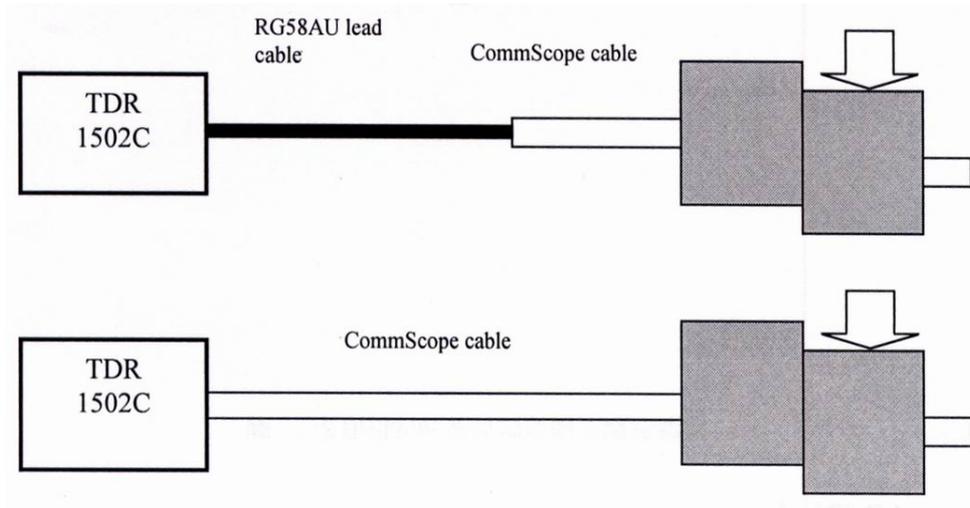


圖 3.4 受剪之錯動變形感測電纜

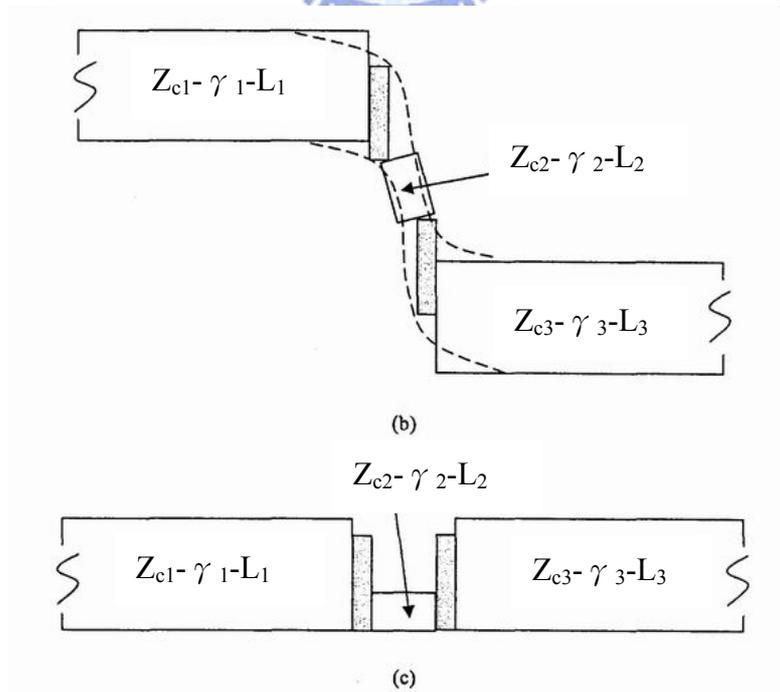
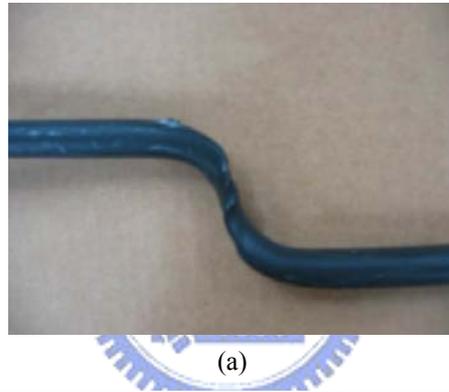


圖 3.5 (a) 纜線受剪後之變形；(b)(c) 模擬分段示意

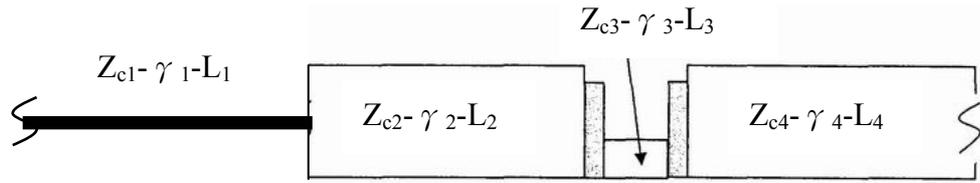


圖 3.6 不同延長線模擬分段示意



圖 3.7 TDR 室內錯動變形試驗設備

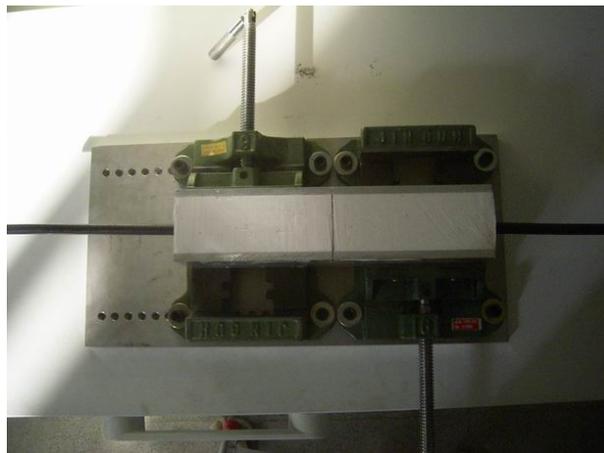


圖 3.8 剪動變形器

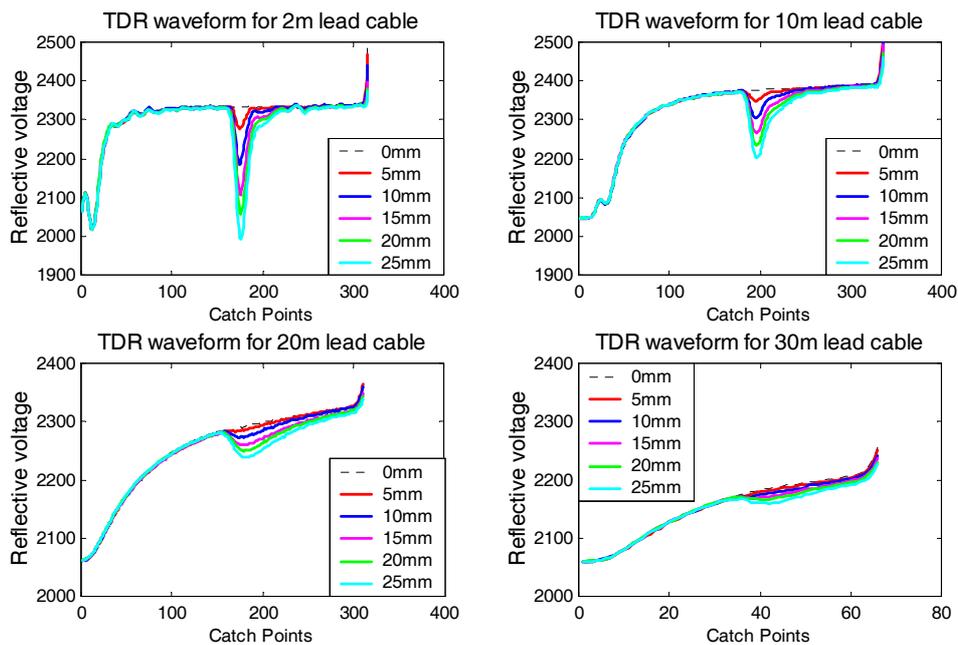


圖 3.9 RG58AU 延長線為 2、10、20、30m 之 TDR 反射波形

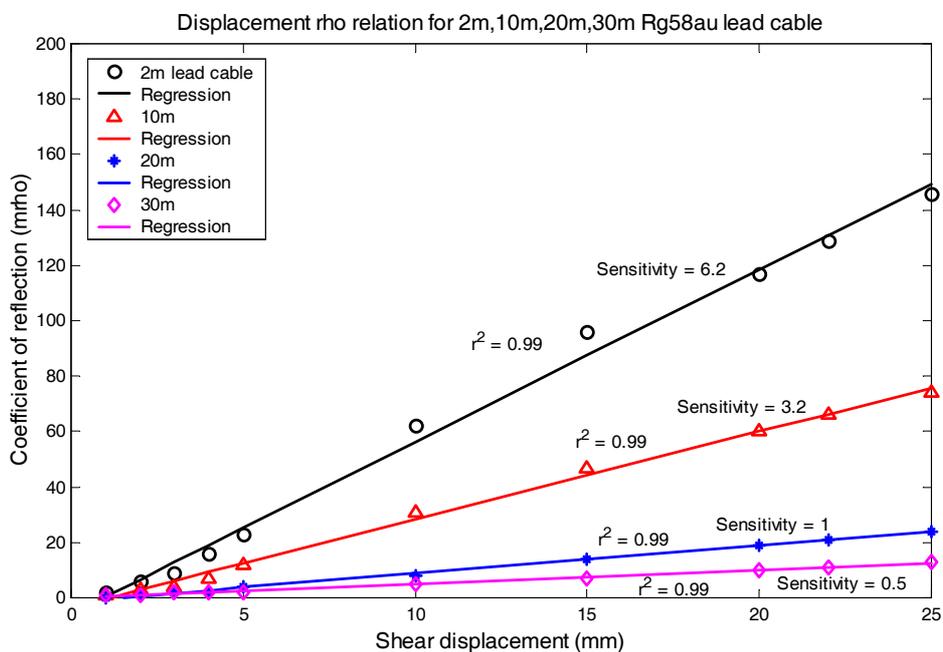


圖 3.10 不同 RG58AU 延長線長度之剪位移與反射係數之關係

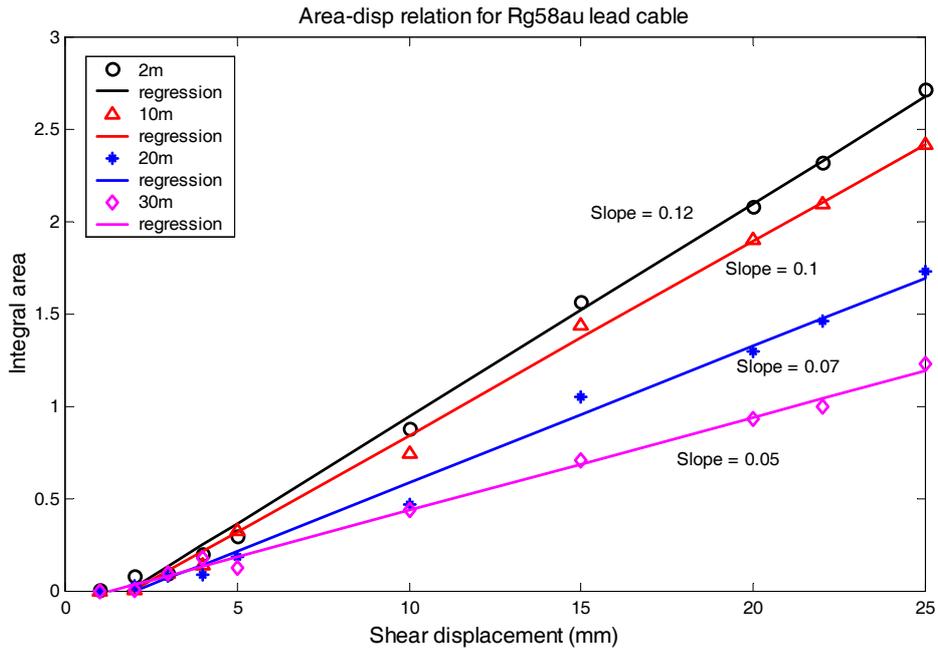


圖 3.11 剪動位移量與積分面積關係

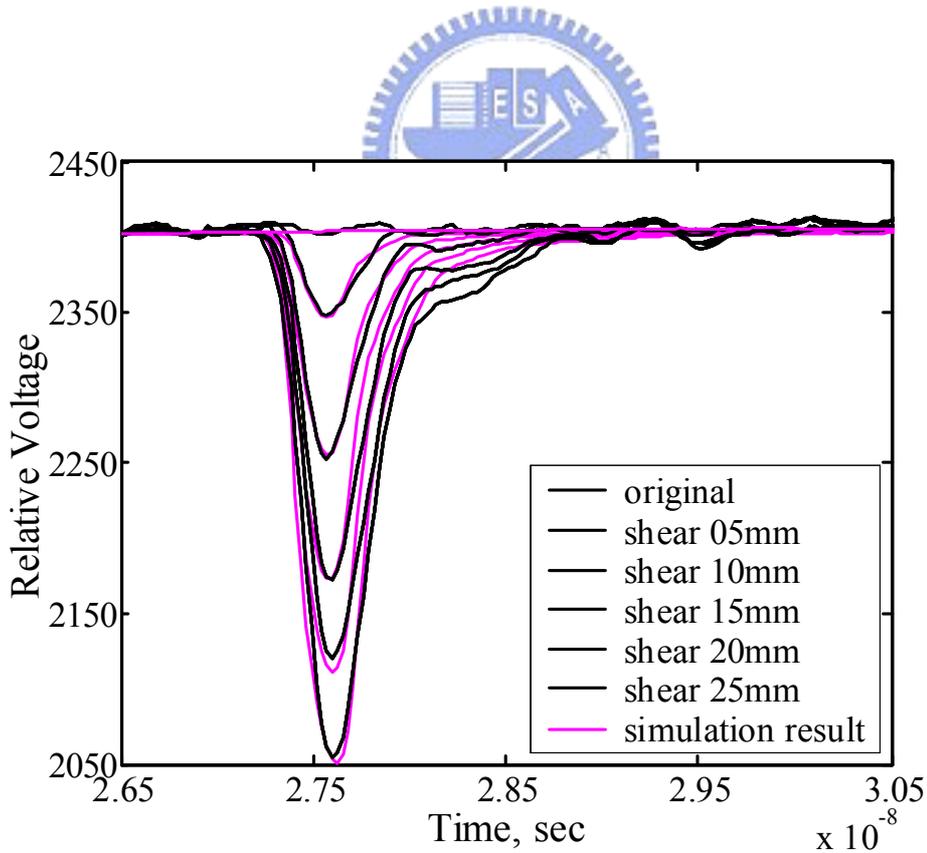


圖 3.12 RG58AU 2m 延長線模擬之結果

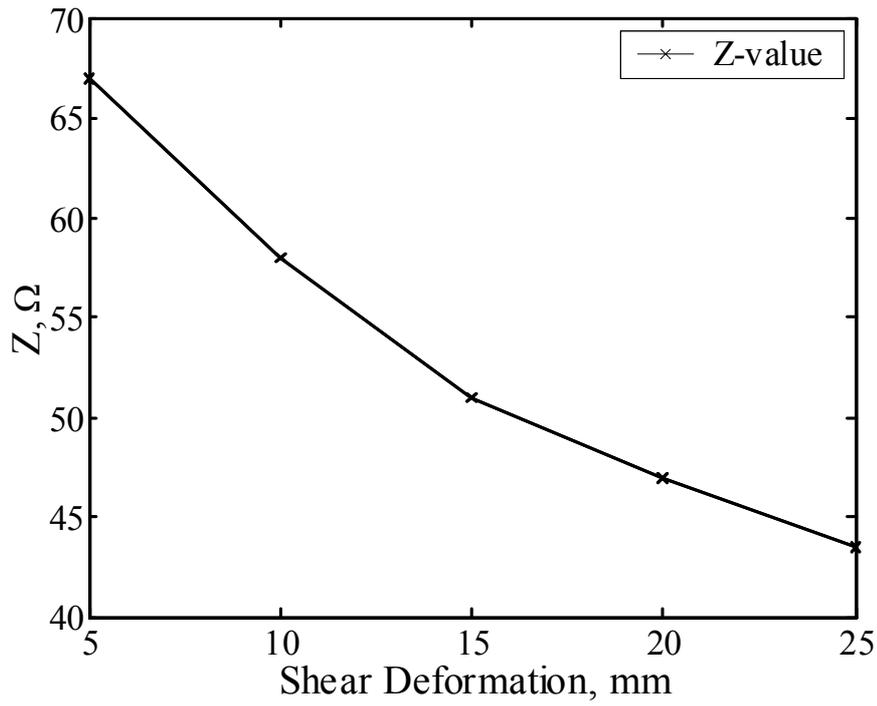


圖 3.13 反算分析之阻抗-錯動量關係

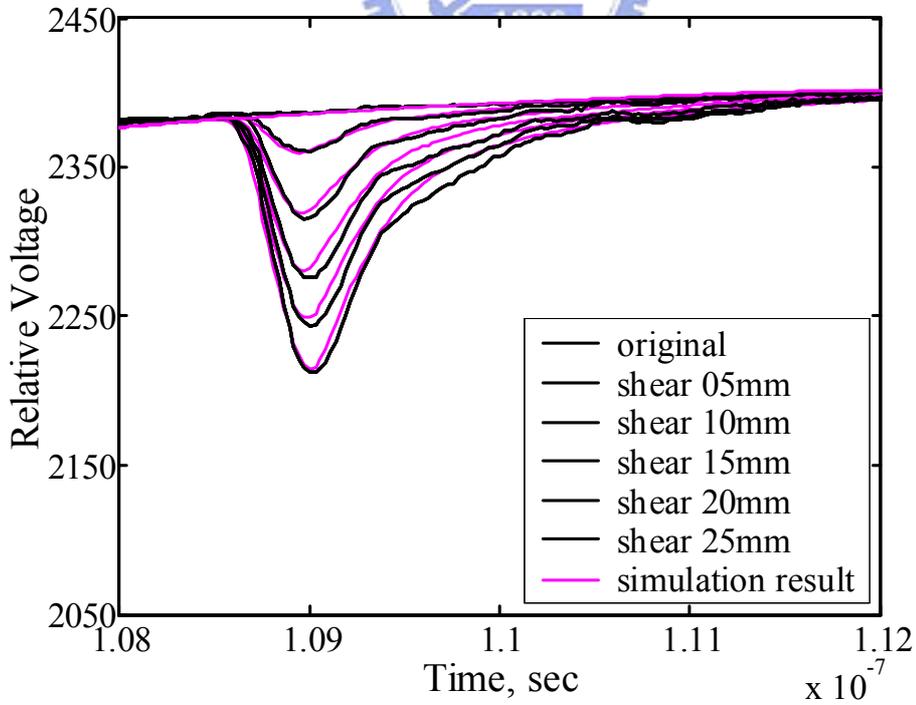


圖 3.14 RG58AU 10m 延長線模擬之結果

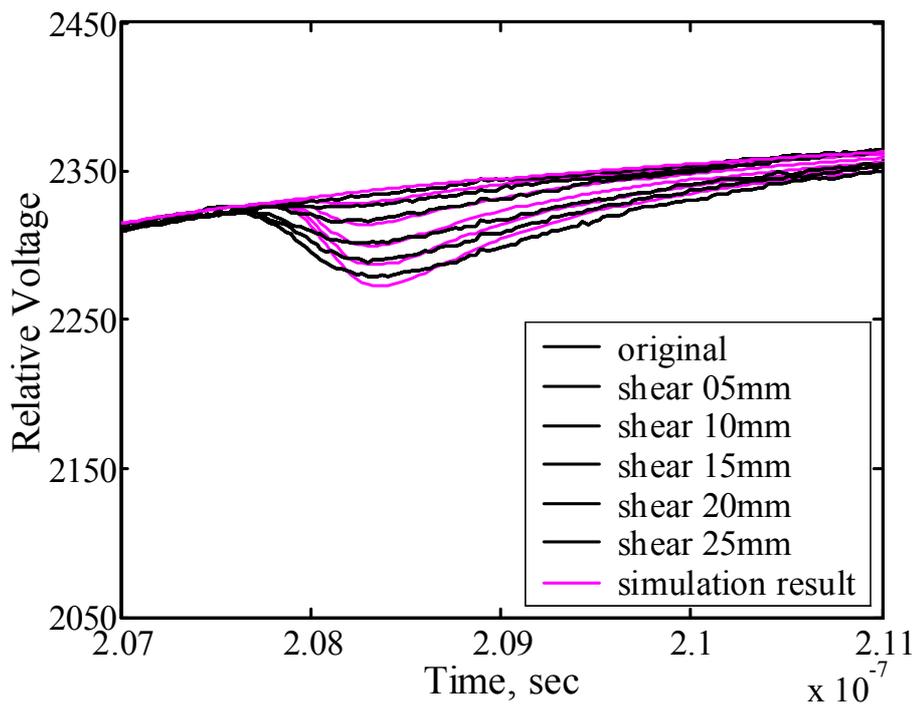


圖 3.15 RG58AU 20m 延長線模擬之結果

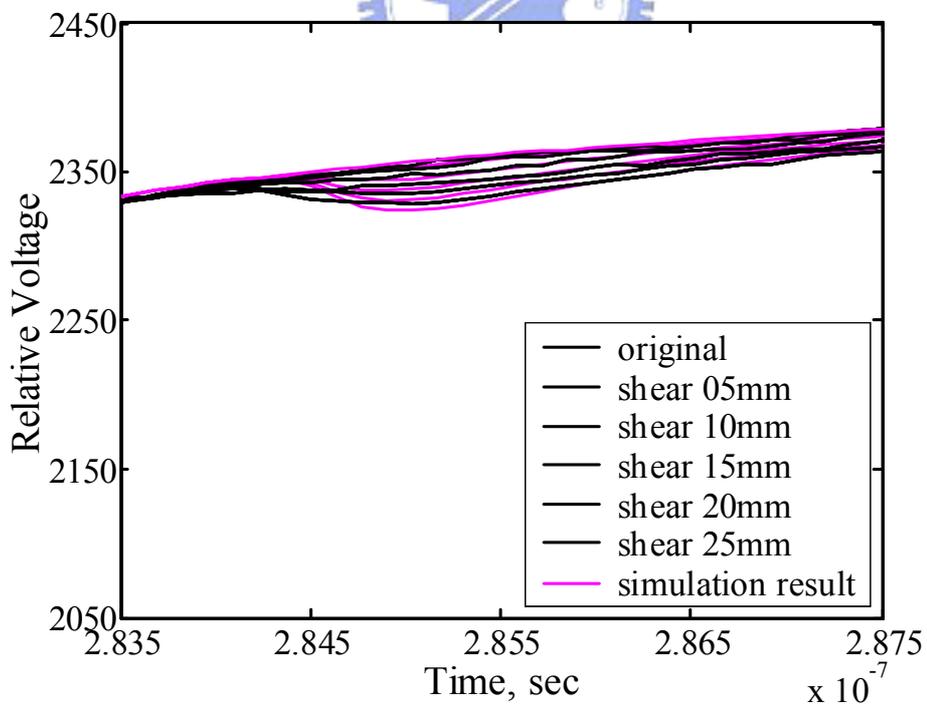


圖 3.16 RG58AU 30m 延長線模擬之結果

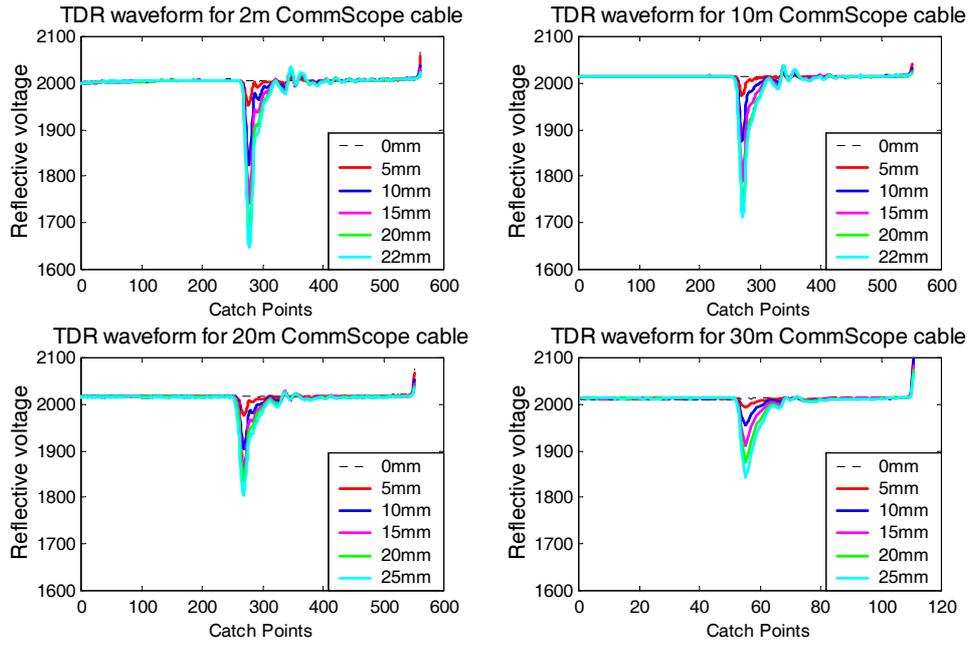


圖 3.17 2、10、20、30m CommScope 電纜之 TDR 反射波形

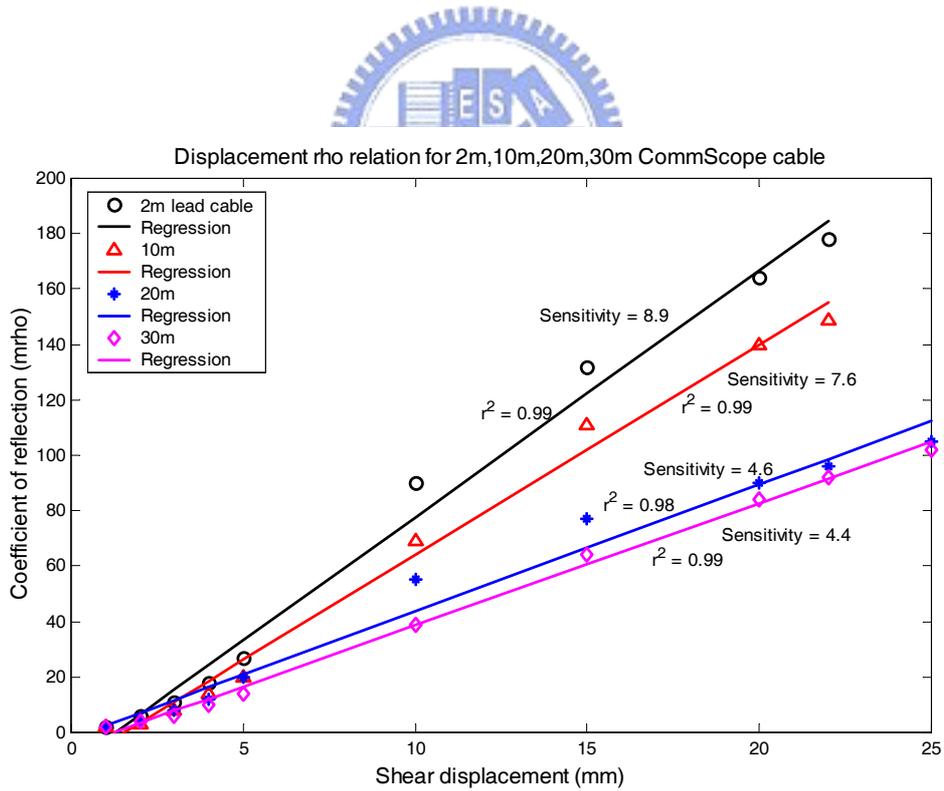


圖 3.18 不同長度 CommScope 電纜之剪位移與反射係數之關係

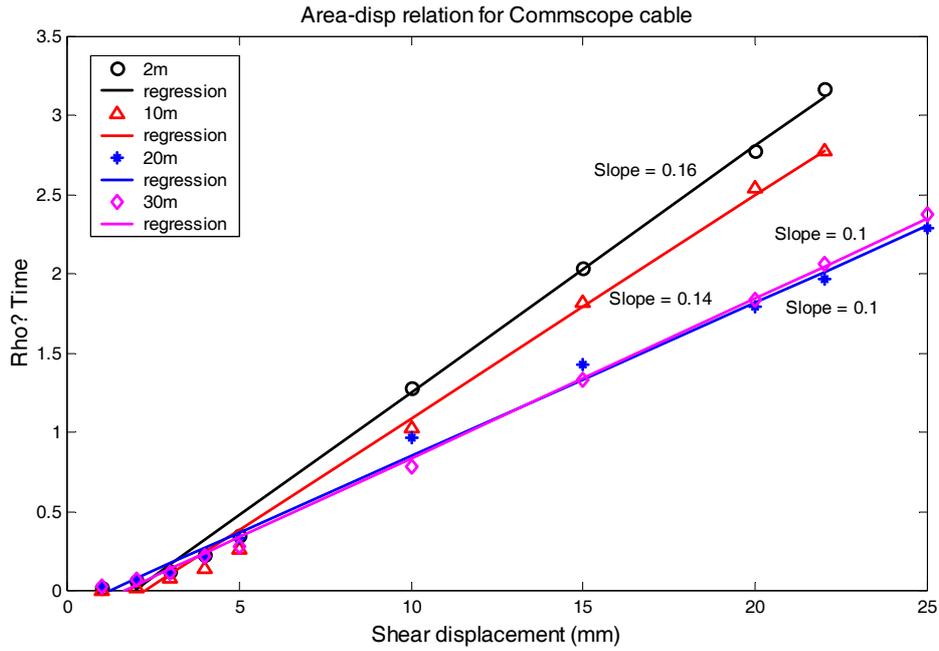


圖 3.19 剪動位移量與積分面積關係

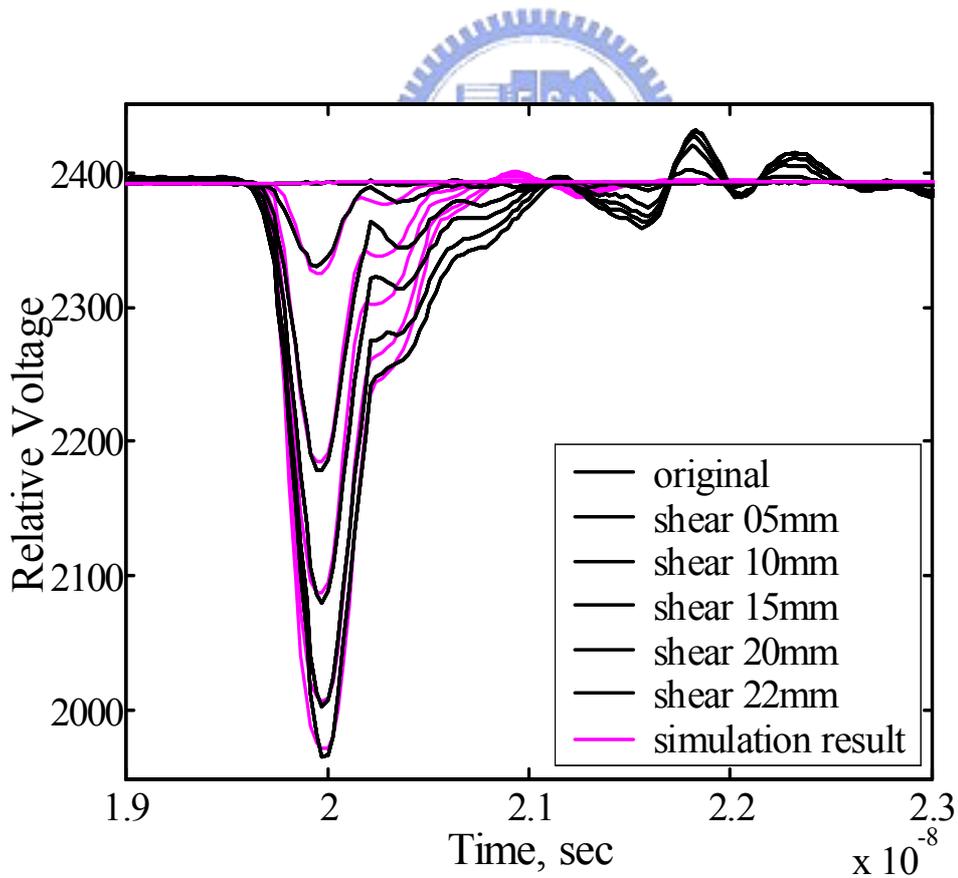


圖 3.20 CommScope 電纜為 2m 之波形模擬結果

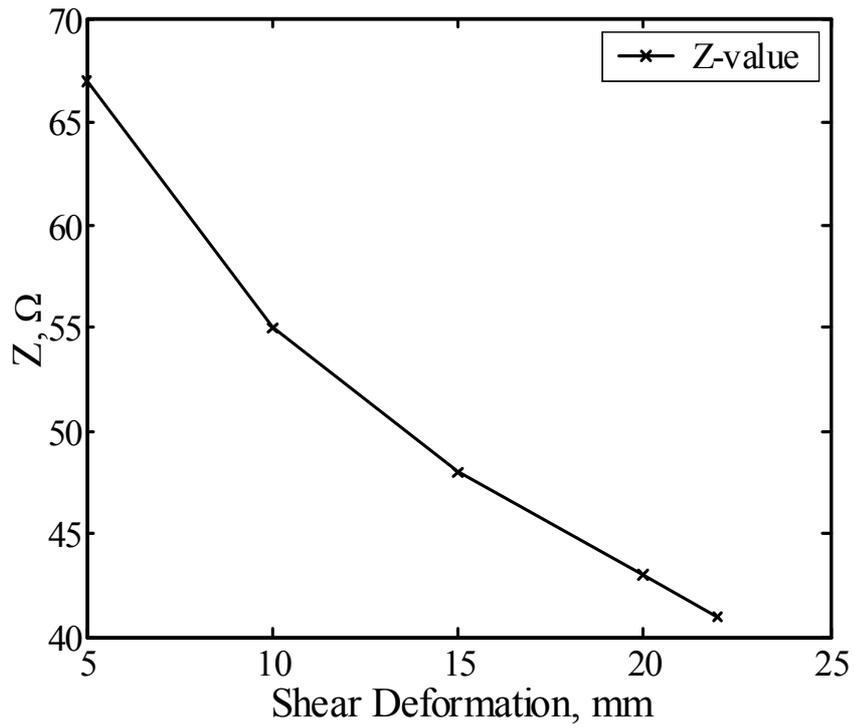


圖 3.21 反算分析之阻抗-錯動量關係

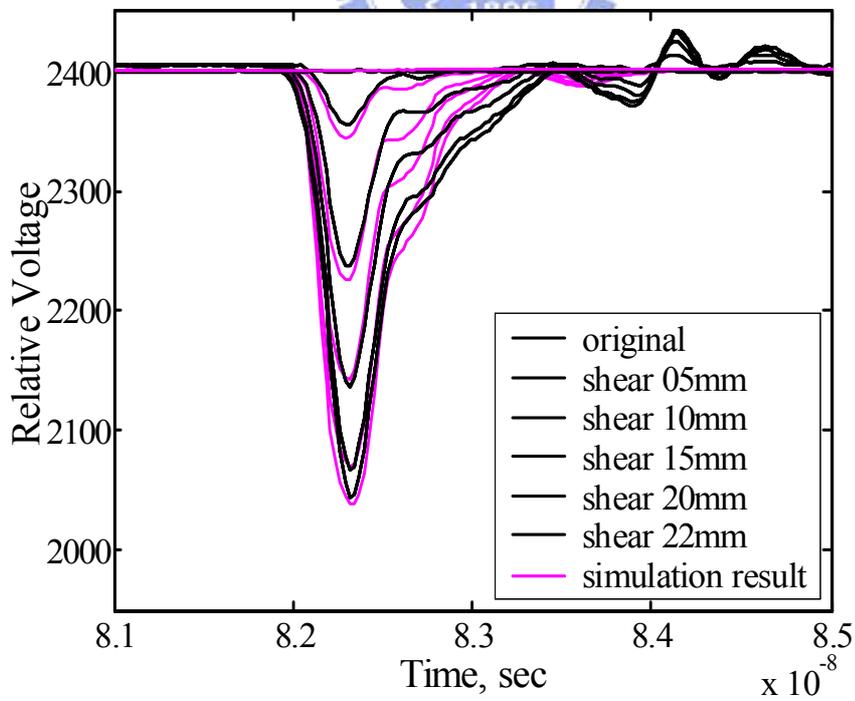


圖 3.22 CommScope 電纜為 10m 之波形模擬結果

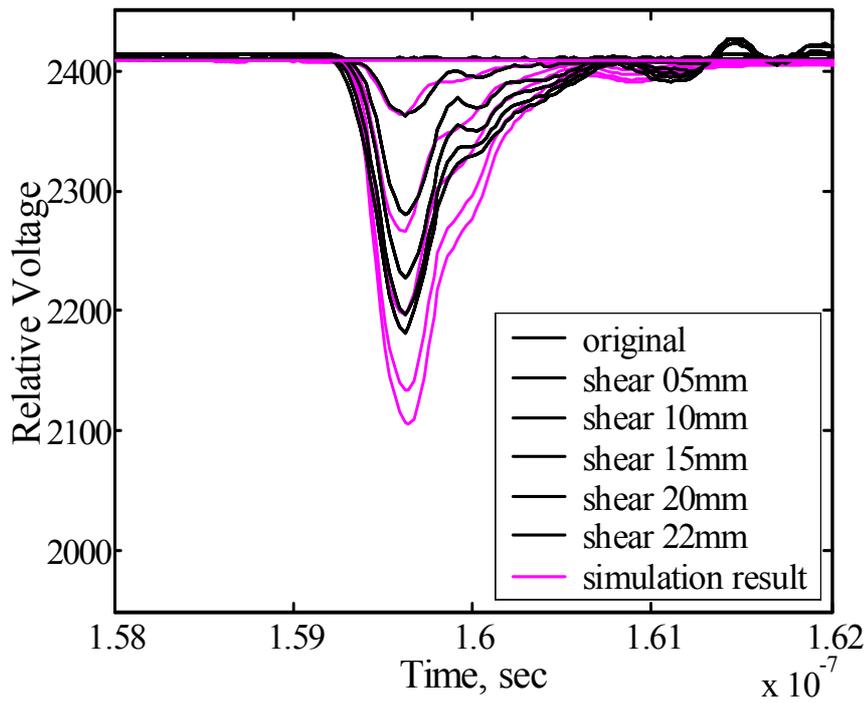


圖 3.23 CommScope 電纜為 20m 之波形模擬結果

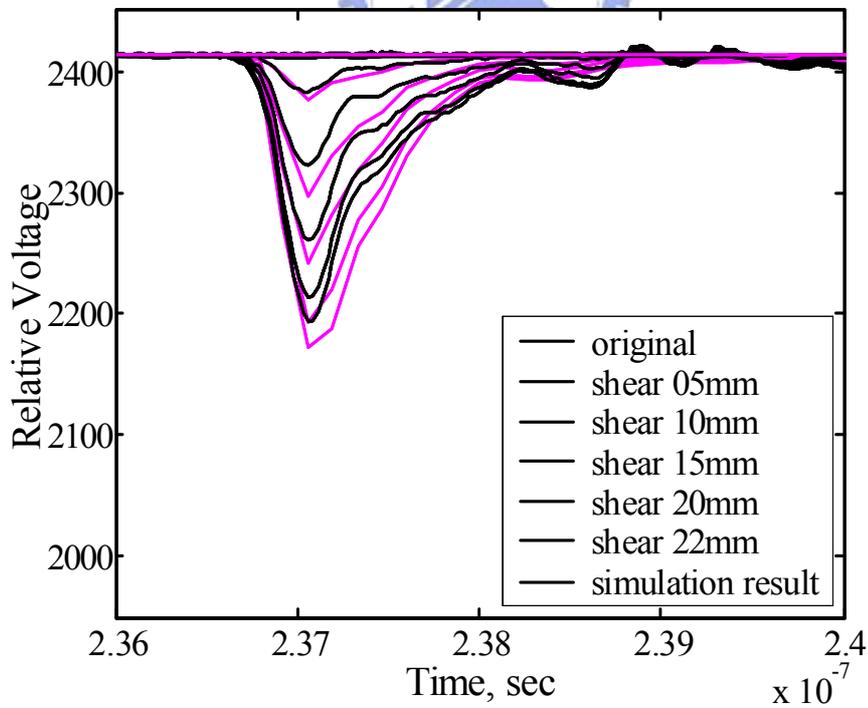


圖 3.24 CommScope 電纜為 30m 之波形模擬結果

表 3-1 不同長度 RG58AU 延長線，反射係數與變位量之關係

不同長度 RG58AU 延長線接 1m CommScope 感測電纜											靈敏度(mp/mm)	初始反應(mm)
變位(mm)	1	2	3	4	5	10	15	20	22	25		
2m 之反射係數(mp)	2	6	9	16	23	62	96	117	129	146	6.2	0.9
10m 之反射係數(mp)	1	3	4	7	12	31	47	60	66	74	3.2	1.1
20m 之反射係數(mp)	0	1	2	2	4	8	14	19	21	24	1	1.3
30m 之反射係數(mp)	1	1	2	2	2	5	7	10	11	13	0.5	-0.1

表 3-2 不同長度 CommScope 電纜，反射係數與變位量關係

不同長度 CommScope 感測電纜										靈敏度(mp/mm)	初始反應(mm)
變位(mm)	1	2	3	4	5	10	15	20	22		
2m 之反射係數(mp)	2	6	11	18	27	90	132	164	178	8.9	1.3
10m 之反射係數(mp)	2	3	8	14	20	69	111	140	149	7.6	1.6
20m 之反射係數(mp)	2	4	8	12	20	55	77	90	96	4.6	0.5
30m 之反射係數(mp)	2	4	6	10	14	39	64	84	92	4.4	1.2

第四章 OTDR 結合 TDR 量測錯動變形

TDR 錯動變形量測系統具備如 2.2 節所描述的優勢外，在現地感測電纜之設置，因電纜衰減之特性將造成埋設纜線長度上之限制，此外，現地埋設之長距離感測電纜對錯動發生之靈敏度較差。為彌補上述之成因，引進 OTDR(光時域反射儀)光纖量測系統。OTDR 光纖傳輸本身具有低衰減與對受外力變形作用高靈敏反應之特性，藉由 OTDR 可量測因光纖受彎曲所造成之事件損失。因此，在衰減與靈敏度上正好與 TDR 錯動變形感測電纜形成互補效果。基於此，故引進 OTDR 量測系統，藉由與 TDR 結合錯動變形試驗，評估其錯動變形量測之成效。



4.1 OTDR 簡介

光纖通信是 21 世紀 70 年代發展起來的，由於其具有傳輸頻帶寬、損耗低、通訊量大及不受電磁干擾等特性，因此發展迅速。目前，電信光纖網已成為承載著大量訊息的網路，故保證其安全、暢通是非常重要的，建立在此條件下，必須有一種能夠測量光纖傳輸特性的儀器，以便瞭解光纖的傳輸情形，偵測光纖缺陷、衰減及損失特徵。OTDR 正是一種這樣的光學儀器，它是憑藉光的背向散射與反射原理，利用光在光纖中傳播時產生的背向散射光來獲取衰減的信息，可用於測量光纖衰減、接頭損耗、光纖故障點定位以及瞭解光纖沿長度

的損耗分佈情況等，是光纜施工、維護及監測中必不可少的工具。

4.2 OTDR 量測系統及原理

4.2.1 OTDR 量測系統

如圖 4.1 所示，OTDR 量測系統主要有兩個部分：其一為訊號產生及接收部分，即 OTDR 儀器本身。本試驗採用由 EXFO 所製造之 FTP400 Universal Test System 及 FTP7300B OTDR 模組；其二為光纖部分，做為傳輸光訊號及感測之用。本試驗採用單模光纖，由內而外可分為五個部分(圖 4.2)：纖蕊(core)、纖殼(cladding)、披覆(coating)、凱弗拉絲及外層披覆(jacket)。纖蕊由玻璃(SiO_2)或塑膠抽絲而成，主要做為傳輸光訊息；纖殼包覆在纖蕊外層，其折射率較纖蕊為低，以產生全反射，使光能順利在纖蕊中傳輸；披覆層可防止內部受外力損害。

4.2.2 OTDR 量測原理

如示意圖 4.3，脈衝產生器(pulse generator)激發一衝光，藉由信號處理單元(signal processing unit)來調整雷射的強度，脈衝的寬度是根據解析度(spatial resolution)和靈敏度(sensitivity)的需求來決定。光由方向耦合器(direction coupler)進入光纖後，利用雷力散射(Rayleigh backscatter)和弗雷司涅爾反射(Fresnel reflections)原理，由檢光器(photo-detector)接收經過分析後，透過類比數位轉換器(ADC)來顯示

在 OTDR 的顯示螢幕。檢光器旁有一計時器來計算收到信號的時間進而計算位置。

藉由 OTDR 量測所佈設之光纖，可得到事件的位置及型態(圖 4.4)，也就是在光纖某距離點發生了何種事件；事件的損失及反射，指出此事件所造成光能量之損耗為何。

圖 4.5 為一典型 OTDR 軌跡圖，垂直軸為反射信號功率(dB)，水平軸為 OTDR 與光纖內某點之間的距離；直線是由於物理現象 Rayleigh backscattering 的分佈；直線的斜率代表光纖的每公里的損耗 (dB/km)；正釘(positive spike)是由於物理現象 Fresnel reflection 的分佈，機械的接點、連接器和斷裂處會有很小的反射，而造成在軌跡圖上產生正釘的現象，在光纖的末端根據光纖的物理特性，會造成很大的反射現象，而產生正釘或負釘的現象；front connector 為 OTDR 與待測光纖的連結，是由於不良的連結器所造成，不良的連結器會因插入損失(insertion loss)使得光功率的衰耗，也會造多重反射現象；熔接(fusion splice)會造成軌跡圖中的 backscatter level 突然的掉下來；彎矩(bend)是由於外界的應力，使得光纖有彎曲的現象，而造成部分光從纖殼射出，也將同熔接點般會造成軌跡圖中的 backscatter level 突然的掉下來。

在 OTDR 錯動變形量測方面，本研究有兩主要方向：埋設光纖

受剪力作用後，以 OTDR 找出錯動事件發生位置；光纖受剪作用後，其初始反應來的比 TDR 感測電纜靈敏，故可與 TDR 做比較，此外，因光纖受剪將造成局部彎曲現象，致使部分光從纖衣射出，造成光損失，基於此，可探討錯動變形量與光損失之關係。

4.2.3 OTDR 光纖量測注意事項

(A) 盲區

光時域反射儀所採用之檢光器為低功率檢測用，當傳輸介質的折射率突然改變時所產生的 Fresnel 反射，其能量較強並會造成檢光器飽和的現象，導致檢光器暫時的盲目，無法辨識近處兩連續事件之事件狀態。盲區可分為事件盲區及衰減盲區兩種，由反射事件引起之反射峰，從反射峰之起始點到檢光器飽和峰值之間的長度距離稱為事件盲區；從反射峰的起始點到可辨識其它事件點之間的距離稱做衰減盲區。依據 EXFO 提供之 OTDR Series FTB-7000B/FTB-7000C 使用及操作手冊，本試驗所使用之 OTDR 量測系統，其事件盲區為 3m。

(B) 動態範圍與距離

圖 4.6 顯示 OTDR 量測系統之動態範圍(dynamic range)，由動態範圍可知道 OTDR 量測系統所能量測之距離。假設某 OTDR 量測系統在固定之脈衝長度(pulse length)下，動態範圍為 40 dB，其

量測所使用之光纖衰減為 0.2 dB/km，我們可以得到此系統所能量測到之最長長度範圍為 $40/0.2 = 200$ km (maximum)。使用 OTDR 量測系統必定是為了偵測某事件之型態及位置等，所以事件之產生將伴隨能量之損耗。假設量測光纖路徑上有五個均為 1 dB loss 之事件，OTDR 光纖量測長度將減少 $5/0.2 = 25$ km，量測總路徑長度即為 175 km。由上得知，量測總路徑長受動態範圍、光纖衰減及事件損失所控制。

此外，動態範圍隨不同之脈衝長度而改變。通常較短之脈衝長度具有較小的動態範圍與較佳的解析度；較長的脈衝長度具有較大的動態範圍與較差的解析度。依據上述由 EXFO 所提供之產品使用手冊，本試驗所用之 OTDR 量測系統，在高解析度下具有 37.5 dB/35.5 dB 之動態範圍。以往在錯動變形量測之研究上，埋設之 TDR 纜線長度可達數百公尺，若以 OTDR 量測系統動輒數十或數百公里之佈設而言，數百公尺之埋設長度將不成問題。

對於 OTDR 光纖量測，存在一距離位置之誤差，參考下式：

$$E = \pm 1 \pm 2.5 \times 10^{-5} \times L \pm L/SP \quad (4.1)$$

其中 E 為距離誤差量、L 為量測距離、SP 為取樣點數，以上單位為公尺。

假設發生事件位置離 OTDR 之距離為 1km，本試驗所採用之

OTDR 系統取樣點數為 52000 點，經由上式可計算出距離之誤差為 $\pm 1 \pm 0.000025 \times 1000 \pm 1000 \div 52000 = 1.04$ (m)。此量測距離之誤差並非固定不變，將隨著長度之增加而變大。

4.3 OTDR 結合 TDR 量測錯動變形試驗

4.3.1 原理

光在光纖中傳輸，能量多少會有損失，而光纖損失主要有三種：其一為材料損失(material loss)，為光能量被材料吸收所致；其二為光散射(light scattering)所造成之損失，光在光纖中行進被材料分子構造上之缺陷所散射；其三為波導及彎曲損失(waveguide and bending loss)，為光纖結構上之變形所造成，包括直徑之改變、局部之彎曲或整體之彎曲，如圖 4.7 至圖 4.9 所示(以上截錄於郭原宏碩士論文，2002)。

如 4.2 節所述，光時域反射儀具有量測光纖事件點所造成損失之特性，當光纖遭受局部剪動作用後，將造成局部彎曲或整體彎曲之行為，部分光會從纖殼射出造成光能量之損失，以光時域反射儀連接光纖可偵測出此事件點之能量損失，隨著剪動量之增大，光能量損失與剪動量之關係我們無法預測，因光纖剪變形機制受制於光纖佈設之方式(以纖殼或披覆或外層披覆方式埋設)、澆灌材料之性質(強度、對光纖之握裹)。唯一可知的是，因光纖直徑較小，若光纖佈設與澆灌得

當，我們可預測其對局部剪位移初始反應來的比 TDR 電纜靈敏。基於上述，故施做 OTDR 錯動變形量測試驗，量測錯動事件位置、初始反應及錯動量與事件損失之關係。

4.3.2 錯動變形試驗

如圖 4.10 所示，取兩條長度分別為 1416m(a)及 1424m(b)之 SM/125/250 單模光纖，對 1550nm 光波長之衰減量為 0.19 dB/km。將光纖(a)在剪動帶約 1m 之長度黏貼於全長 1.7m CommScope 電纜，以順應因剪動產生部分變形由同軸電纜所吸收；光纖(b)則設置於旁與光纖(a)做比對，預期其較早於光纖(a)斷裂。為避免 4.2.3 節所提盲區之影響，將光纖尾端預留 100m。

以上配置完成後，在無剪力帶寬度之下，以 3.2 節所述之相同方式將石膏與水配比 1.5：1 澆灌於模內後靜置兩天。試驗時，OTDR 以光波長 1550nm 量測，試體分階段逐漸剪動，以 TDR 及 OTDR 分別擷取同軸電纜及光纖之資料並記錄。

4.3.3 試驗結果

如圖 4.11 所示為光纖(b)光路徑之情形，縱軸為光能量(dB)，橫軸為距離(m)。當剪動為 1mm 時光纖(b)在 1323m 處產生反射故障事件，其後剪動 2mm、3mm 結果均一致，顯示光纖(b)在剪動量為 1mm 已經斷裂，圖中 2 代表剪動量為 1mm 之 OTDR 訊號，另一則為原始

訊號，經計算顯示剪動處與尾端相距 101m。

光纖(a)在剪動量達 2mm 時於 1318m 處產生非反射故障事件如圖 4.12，且隨著剪動量之增加光損失量於該處亦明顯增加，如表 4-1 所示。剪動量在 10mm 時損失為最大(圖 4.13)，在 15mm 時光纖(a)已經斷裂(圖 4.14)，經計算剪動事件離光纖末端距離為 98m。

本次 TDR 電纜錯動變形試驗所求之初始反應約為 1.2mm，且依過去資料整理多分佈在 1~2mm 之間，光纖(b)結果如預期，早先於電纜產生反應；光纖(a)亦如所期，能承受較光纖(b)範圍大之錯動，且在剪動過程達 10mm，損失與錯動量呈現正相關(圖 4.15)。在位置距離量測方面，光纖(a)誤差 2m；光纖(b)誤差 1m。





圖 4.1 OTDR 系統與光纖

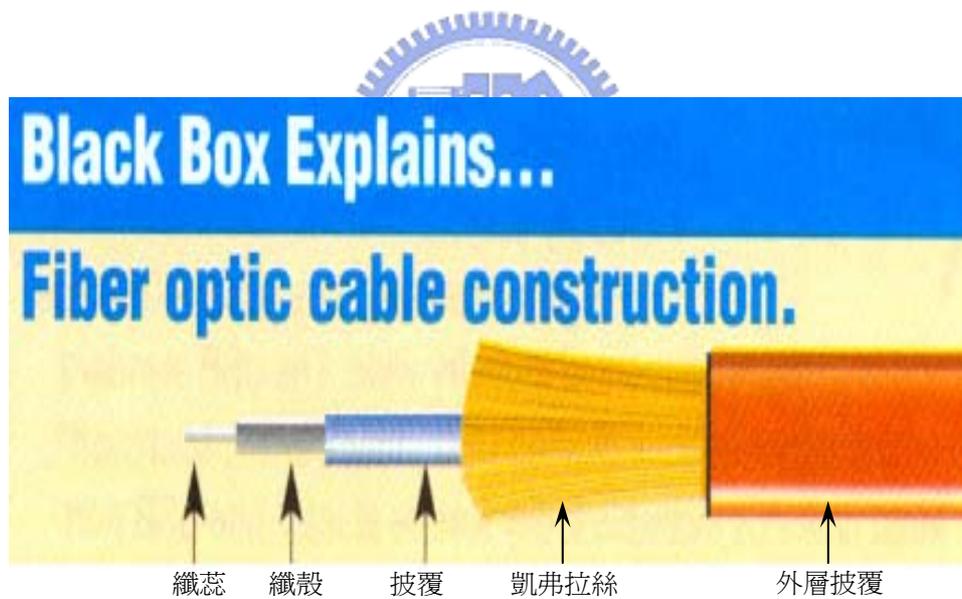


圖 4.2 單模光纖構造

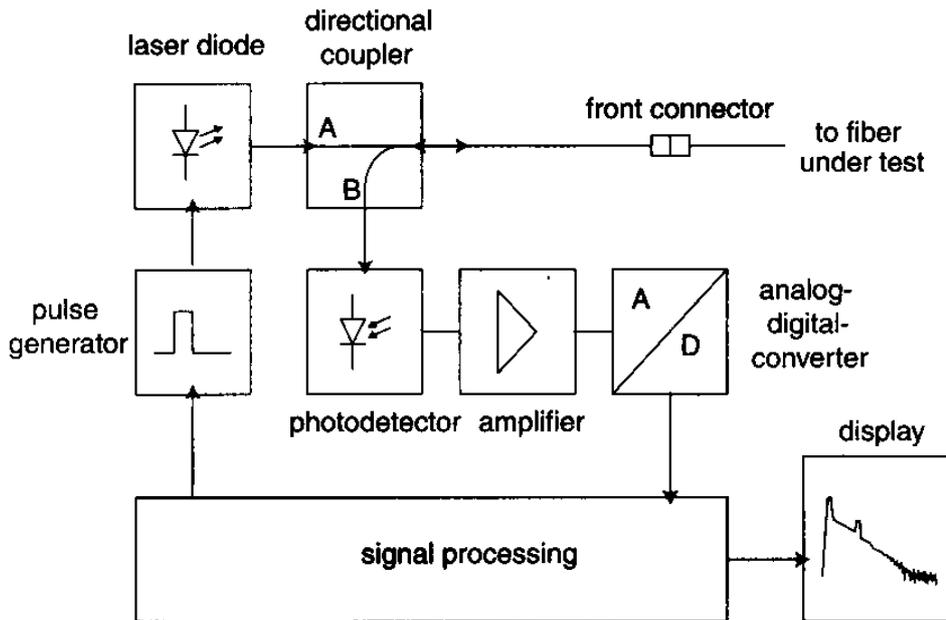


圖 4.3 OTDR 量測示意圖

說明 事件資訊

↔	跨距起點	↔	跨距終端
---	連續光纖	↯	被合併的反射故障
→	結束軌跡線分析	↯	被合併的正向故障
└	非反射終端	↯	被合併的反射終端
└	非反射故障	↯	被合併的非反射終端
└	反射終端	Σ	總損耗
└	反射故障	_r	光回波
└	正向故障	↯	反射終端 (可能是光回波)
→	發射位準	↯	反射故障 (可能是光回波)
→	光纖區域	↯	被合併的反射故障
└	被合併的非反射故障	↯	被合併的反射終端

圖 4.4 OTDR 事件型態

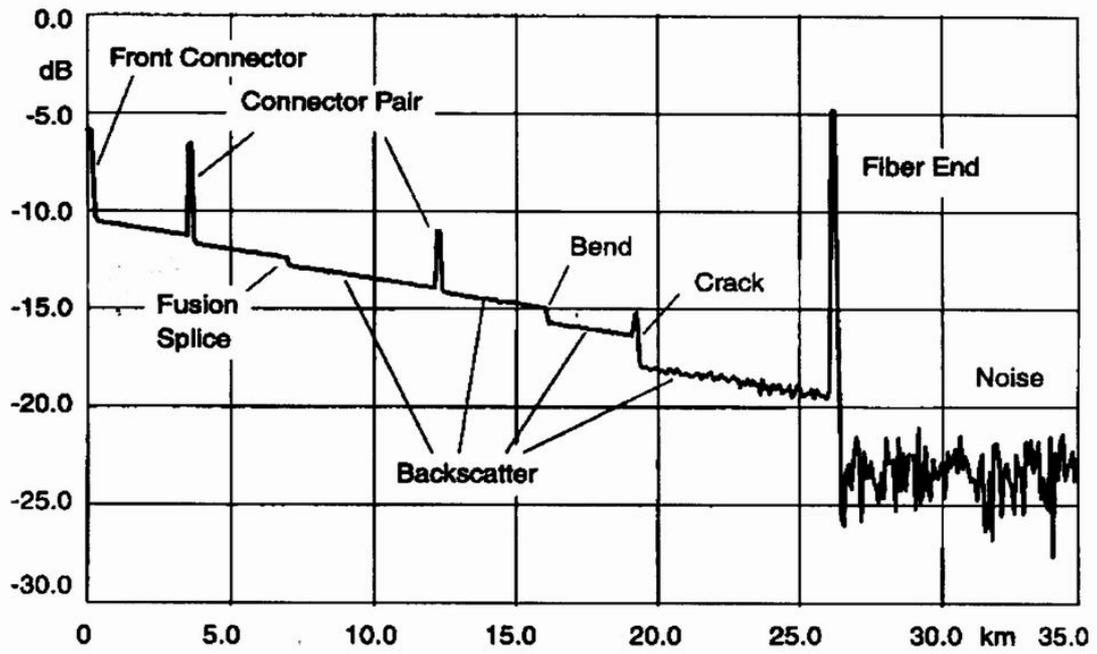


圖 4.5 典型 OTDR 軌跡

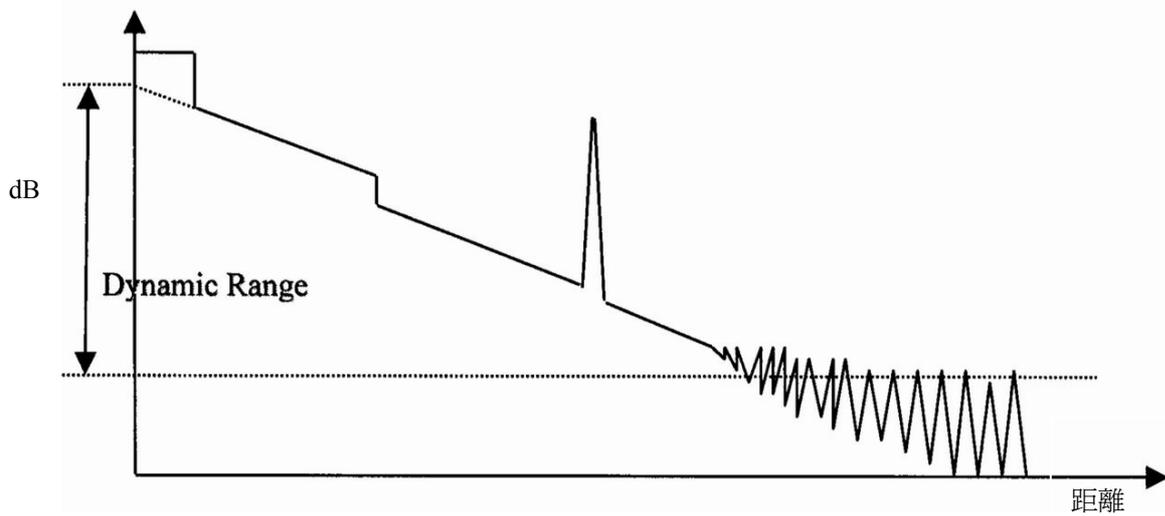


圖 4.6 OTDR 之動態範圍

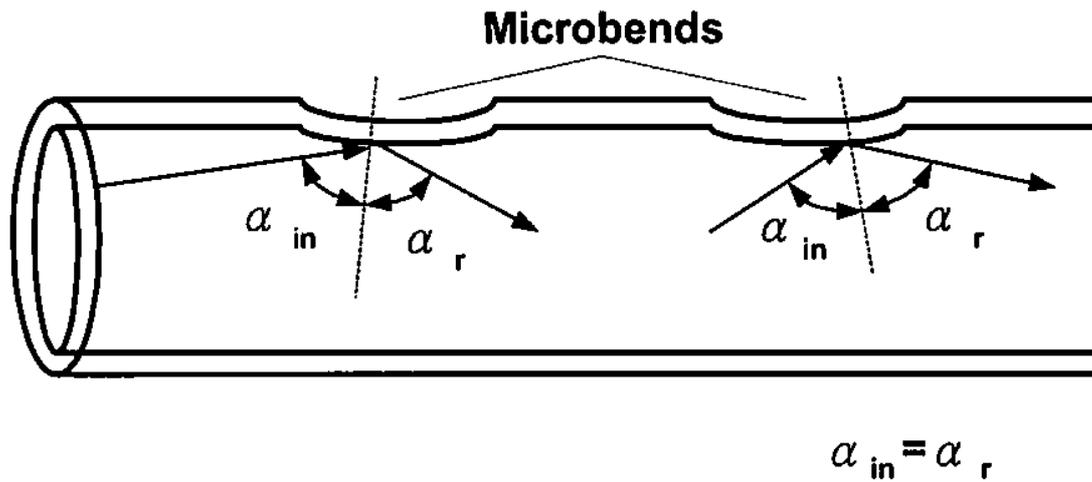


圖 4.7 局部彎曲所造成之光損失
(郭宏源，2002)

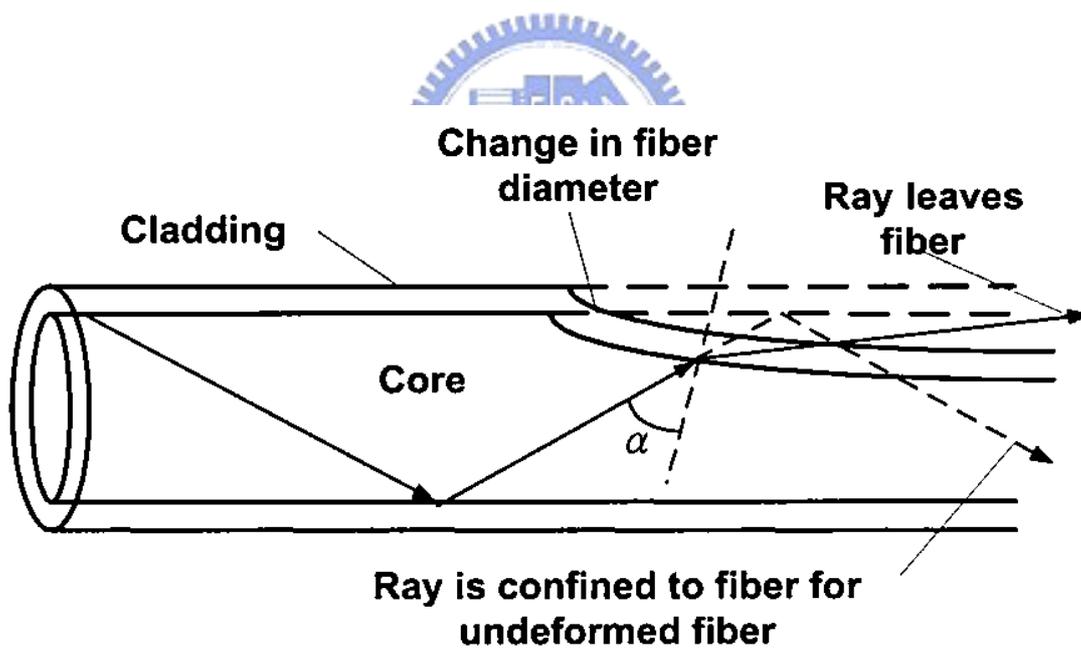


圖 4.8 光纖直徑改變所造成之損失
(郭宏源，2002)

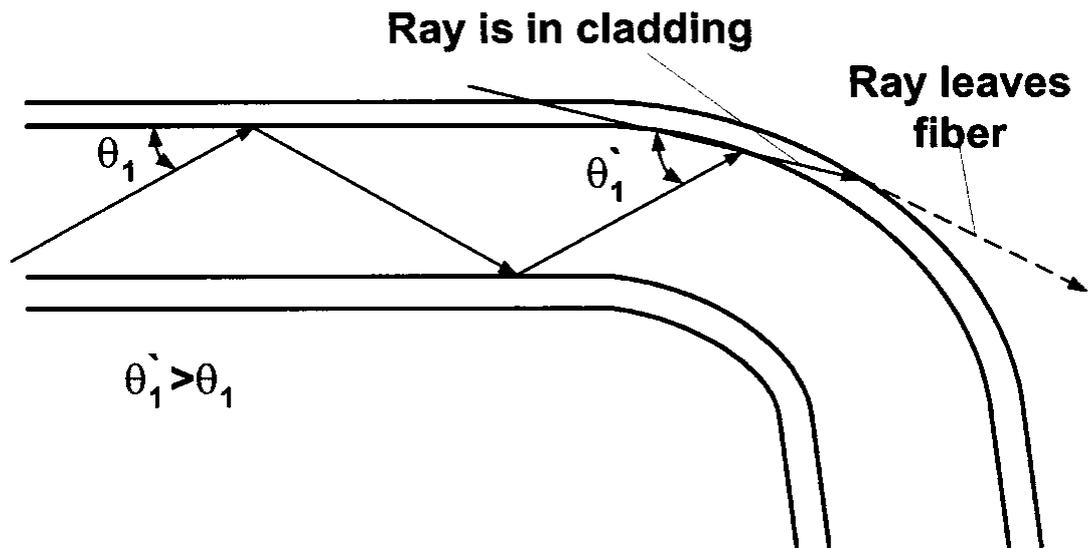


圖 4.9 光纖整體彎曲所造成之損失
(郭宏源，2002)

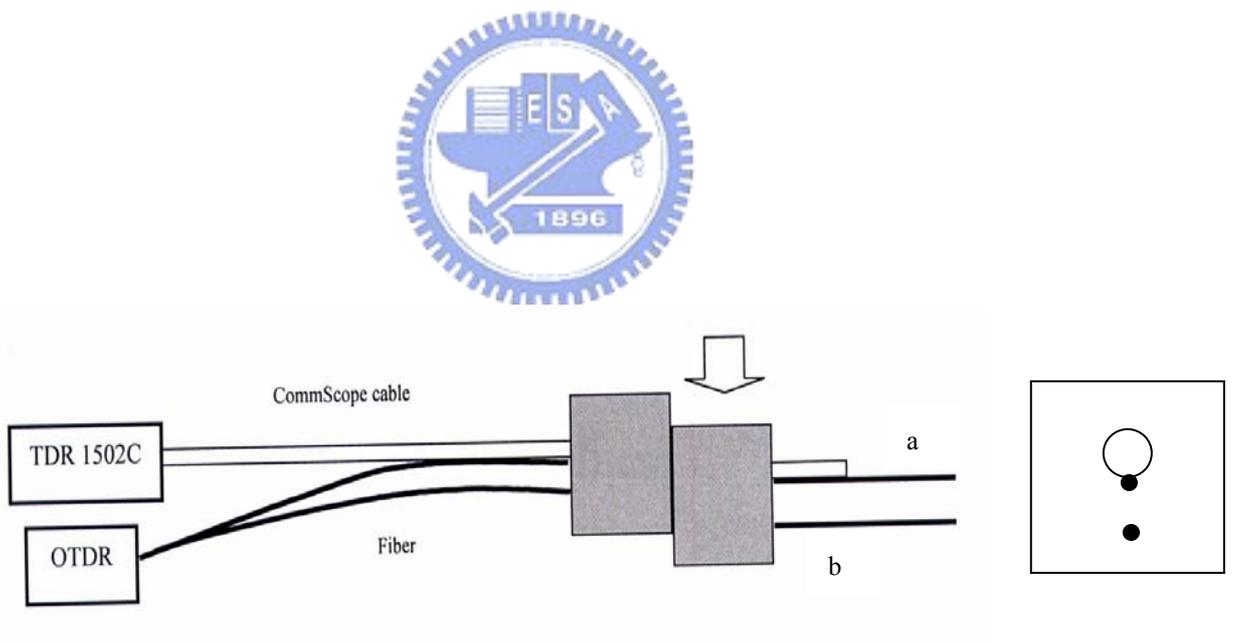


圖 4.10 光纖與 TDR 感測電纜之錯動變形試驗

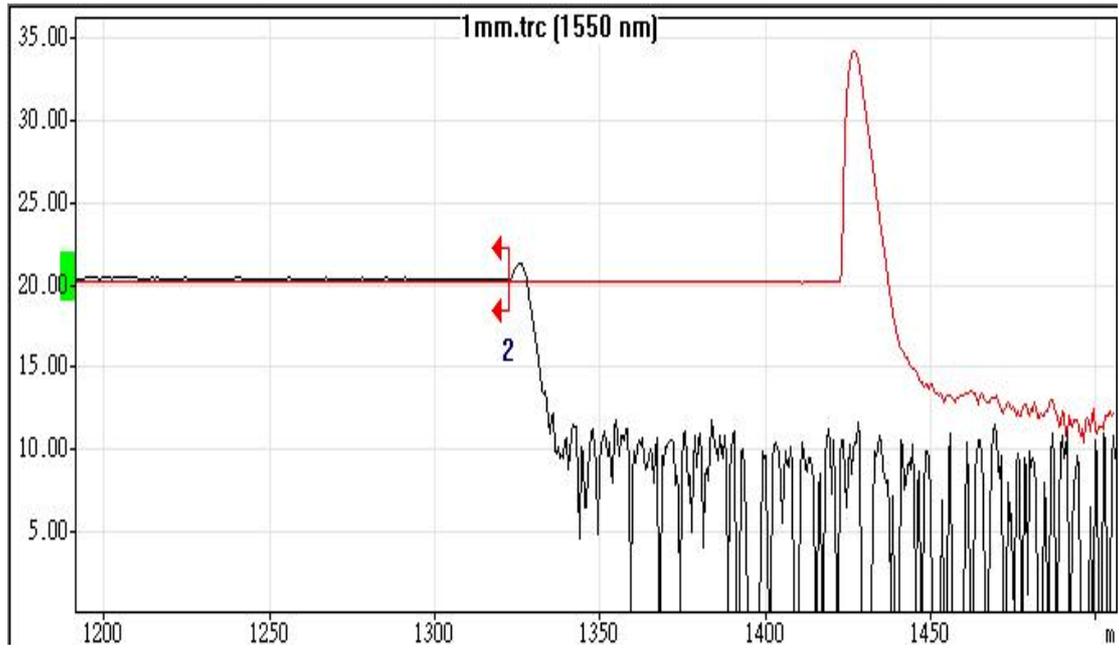


圖 4.11 剪動量為 0mm 與 1mm 之光纖(b)訊號(圖中 2 為斷裂處)

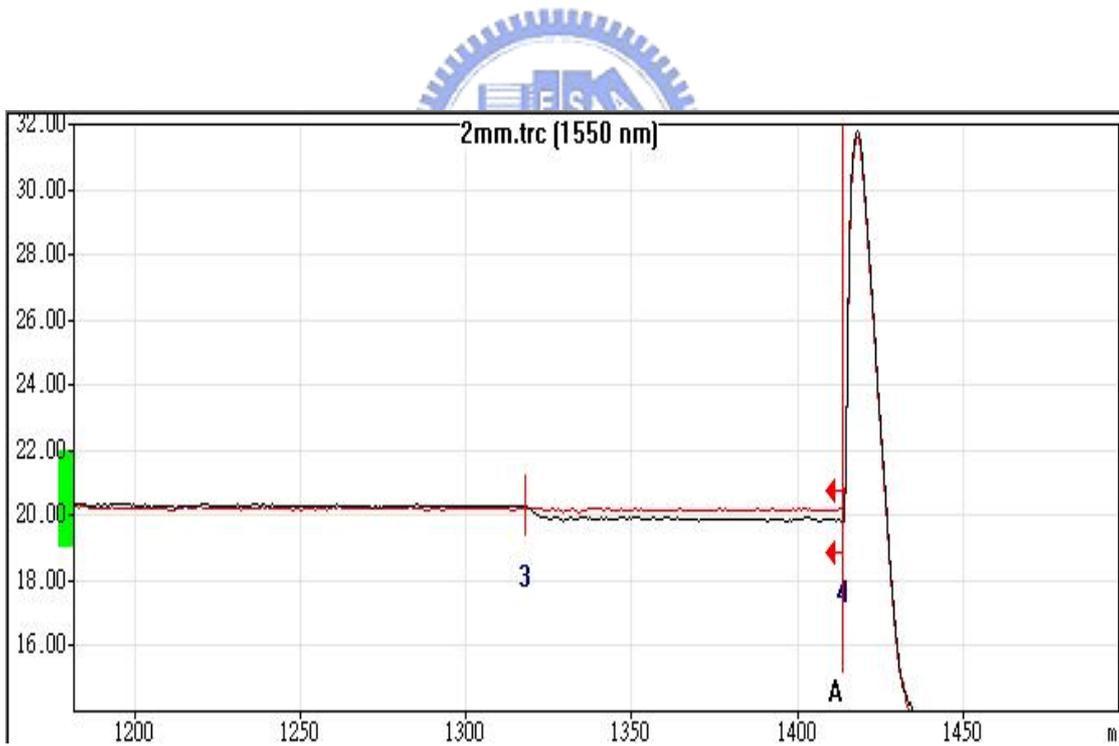


圖 4.12 剪動為 0mm 與 2mm 時光纖(a)錯動事件(圖中 3 為錯動事件點，4 為光纖末端)

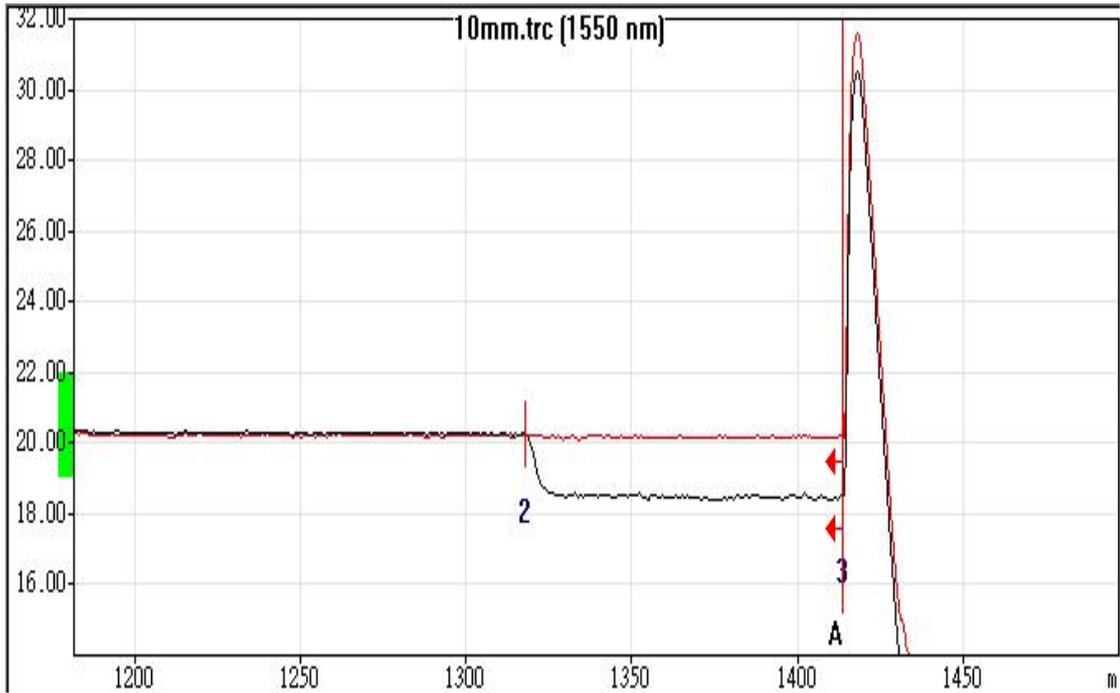


圖 4.13 剪動為 0mm 及 10mm 光纖(a)錯動事件(圖中 2 為錯動事件點，3 為光纖末端)

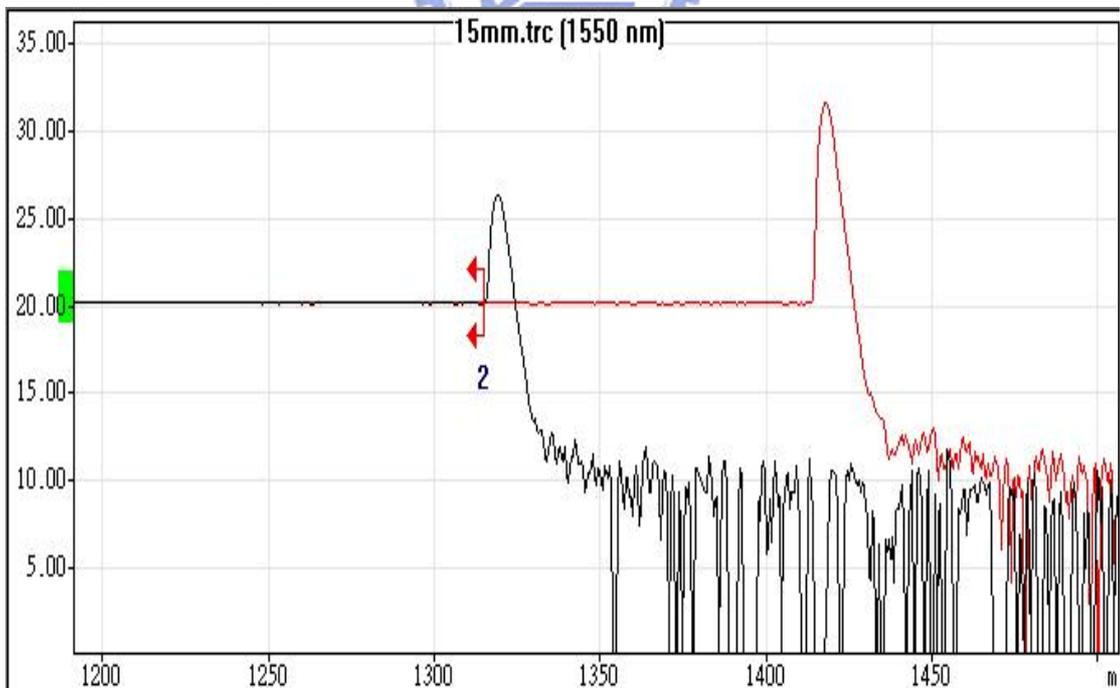


圖 4.14 剪動為 0mm 及 15mm 光纖(a)訊號(圖中 2 為斷裂處)

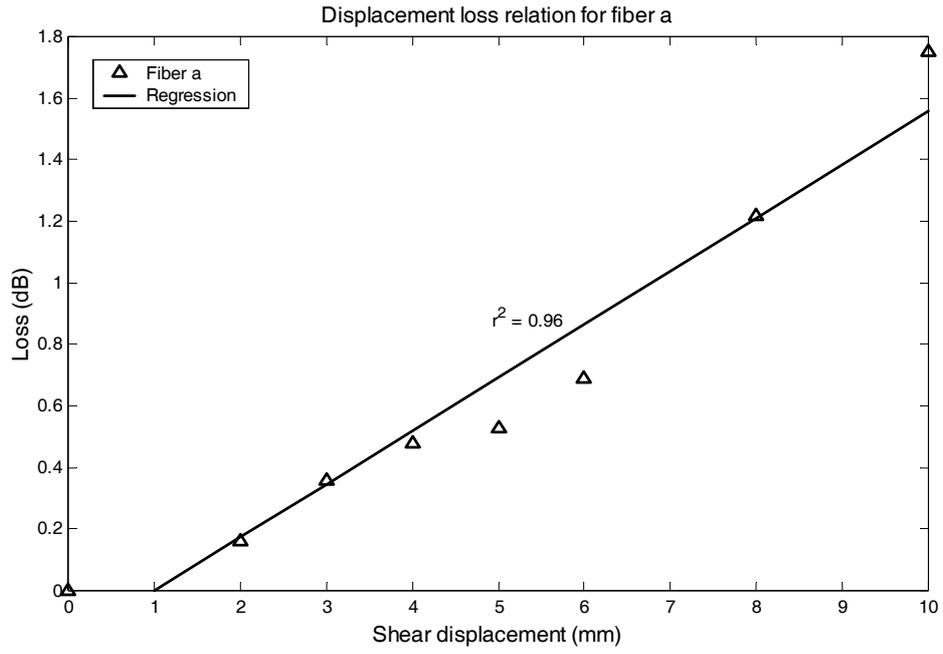


圖 4.15 光纖(a)剪動量與光損失之關係



表 4-1 光纖(a)錯動量與光損失關係

剪動量(mm)	2	3	4	5	6	8	10
損失(dB)	0.16	0.36	0.48	0.53	0.69	1.22	1.75

第五章 結論與建議

錯動變形監測在大地工程實務上扮演著相當重要之角色，無論是在壩體底部錯動之監測、支撐開挖側向土體滑動之監測或堤岸及其它建物之監測，均佔有重要之地位，尤其在邊坡穩定上，其重要性更不可忽視。

隨著通信與電子科技之進步，錯動監測方法更不可停滯不前，必須引進科技之進展，創新現有之方法。TDR 錯動變形量測系統便享有科技之成果，與傳統儀器比較，不僅可連續性量測錯動變形剖面，更可達成遠端即時監測之便利。但是在錯動變形量化上，至今仍無通用之方式，以下就本研究試驗結果做進一步結論與建議。

5.1 結論

5.1.1 TDR

- 1.隨纜線長度之增加，線性迴歸出反射訊號初始值(initial response)有增大之趨勢，為衰減與上升時間增加所造成，但是超過一定之長度後又突然變小，為線性迴歸之斜率變緩而影響橫軸截距。
- 2.無論是使用 RG58AU 或 CommScope 同軸電纜當作延長線，在對應相同之錯動位移量下，反射係數均隨著延長線之增長而變小。
- 3.相較於 CommScope 延長電纜，隨著 RG58AU 延長線增加，反射訊號變的極不明顯，電阻 R 會嚴重影響反射訊號之判識。

- 4.在錯動變形量化上，利用 R 之 TL model 模擬反算分析，可求得錯動變形量與電纜阻抗有一致性之關係。
- 5.現地埋設錯動變形感測電纜，需選用低衰減性同軸電纜，延長線與感測器為同一條，埋設前必須在試驗室做標定試驗找出阻抗與錯動量之關係。

5.1.2 OTDR

- 1.以 OTDR 光纖量測錯動變形，能較早於 TDR 錯動變形量測系統辨別出錯動發生之位置。
- 2.就光纖(a)之設置而言，錯動變形量與光損失呈現正相關。
- 3.與 TDR 錯動量測比較之下，OTDR 錯動量測靈敏度高於 TDR、低衰減(相對於量測距離)、量測錯動變形範圍小，正好與 TDR 錯動量測形成互補效果。

5.2 建議

- 1.本試驗不考慮剪力帶寬度之影響，未來可進一步加入空氣區間或灌漿材料剪力帶寬度、電纜－灌漿材料互制行為之相關研究。
- 2.OTDR 之光纖初始反應比 TDR 感測電纜佳，埋設現地時可先獲知錯動發生位置，必須要注意的是光纖直徑小柔性高，現地埋設較 TDR 感測電纜來的困難。
- 3.由光纖(a)與(b)比對可知，若光纖附著於一緩衝材料上，部分變形由緩衝材吸收，將可延伸其錯動變形量測範圍，緩衝材的選擇

必須軟硬適中，除可使光纖產生變形，亦可吸收部分變形，未來可進一步做使用緩衝材之研究。



參考文獻

1. 丁建仁，「時域反射原理設置之變位量量化研究」，碩士論文，中興大學，民 88 年。
2. 交通部，道路邊坡高效能監測系統研發與崩塌預警基準制訂，民 91 年期末報告。
3. 郭原宏，「光纖光柵感測器於結構監測之應用」，碩士論文，台灣大學，民 91 年。
4. 盧吉勇，「TDR 錯動變形量測之研究」，碩士論文，交通大學，民 92 年。
5. 鍾宏達，「時域反射系統應用於監測地層滑動之可行性研究」，碩士論文，中興大學，民 89 年。
6. 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.
7. 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.
8. Dowding, C.H. and O'Connor (2000), "Comparison of TDR and Inclometers for Slope Monitoring," Proc. GeoDenver 2000, GeoInstitute of the ASCE, Denver.
9. Dunicliff, J. and Green, G.E. (1988), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.
10. Dussud, M.L. (2002), TDR Monitoring of Soil Deformation: Case Histories and Field Techniques, Master Thesis, Northwestern Univ.
11. EXFO (2002), Optical Time Domain Reflectometer Series, User Guide.

12. Gould, J.P. and Dunnicliff, C.J. (1971), "Accuracy of Field Deformation Measurements," In Proc., Fourth Pan-American Engineering, San Juan, American Society of Civil Engineers, New York, Vol.1, pp.313-366.
13. Green, G.E. and Mikkelsen, P.E. (1988), Deformation Measurements with Inclinometers. In Transportation Research Record 1169, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-15.
14. Kim, M.H. (1989), Quantification of Rock Mass Movement with Grounded Coaxial Cables, M.S. Thesis, Northwestern University, Evanston, IL, 65pp.
15. Kirschke, D. (1977), "Superficial and Underground Investigation at Sliding Rock Slopes in Greece," in Proceedings of the International Symposium on Field Measurement in Rock Mechanics, Vol. 2, pp. 775-778.
16. O'Connor, K.M. and Dowding, C.H. (1999), GeoMeasurement by Pulsing TDR and Probes, CRC.
17. O'Connor, K.M. (1991), Development of a System for Highwall Monitoring Using Time Domain Reflectometry. U.S. Bureau of Mine Sum. Rep., prepared for Syncrude Research Ltd., Edmonton, Aug., 75 pp.
18. O'Connor, K.M., Peterson, D.E., and Lord, E.R. (1995), "Development of a Highwall Monitoring System using Time Domain Reflectometry", Proc., 35th U.S. Sym. Rock Mech., Reno, Nevada, June, pp.79-84.
19. Pirce, 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, Step 7-9, 1994, pp.540-554.
20. SU, M.B. (1987), Quantification of Cable Deformation with Time

Domain Reflectometry, Ph.D. Dissertation, Northwestern Univ., Evanston, IL, 112 pp.

21. Su, M.B., and Chen, Y.J. (2000), “TDR Monitoring for Integrity of Structural Systems”, Journal of Infrastructure Systems, Vol.6, No.2, pp.67-72.
22. 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.

