

## TDR 岩層滑動監測的新方法建立

吳輝龍<sup>(1)</sup> 陳德天<sup>(2)</sup> 蘇苗彬<sup>(3)</sup>

### 摘要

時域反射技術 (TDR) 主要是利用電磁波的折射與反射現象來找出傳輸路徑中不連續的位置以及特性阻抗; 而埋設電纜線本身即為一具連續性、可多點量測的感應器。室內實驗部分, 目前已確立電纜線典型變形相對應之波形變化特徵, 同時變形量與反射訊號間的量化關係也歸納出一定的相關程度, 在現地地滑調查的應用上已可取代傳統系統。本研究結合相關理論的闡述及各種室內模擬試驗的成果, 針對各種現地資料的特殊現象提出適當的解釋, 以作為日後資料判讀的參考依據。同時根據現地擷取波形的合成情況, 輔以記號間長度變化來判定滑動面存在深度, 並對照現地岩心及監測資料加以驗證, 確立其可行性。

(**關鍵字**: 時域反射技術 (Time Domain Reflectometry)、滑動面、監測)

## Landslide Monitoring System Using Time Domain Reflectometry

*H. L. Wu*

Director-General, Soil and Water Conservation Bureau,  
Council of Agriculture, Nantou, Taiwan.

*The-tin Chen*

Senior Specialist and Executive Secretary, # 2. Engineering Office,  
Soil and Water Conservation Bureau, Feng Yuan, Taichung, Taiwan 402

*M. B. Su*

Professor, Department of Civil Engineering,  
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402

### ABSTRACT

TDR (Time Domain Reflectometry) is a technique used by power engineers to locate

- 
- (1) 行政院農委會水土保持局局長  
(2) 行政院農委會水土保持局第二工程所祕書  
(3) 國立中興大學土木工程學系教授

discontinuous points in a transmission system. This technique is applied to landslide monitoring in unstable slopes. TDR cables grouted in boreholes can locate failure plane and amount of movement. The coaxial cable installed works as a continuous sensor that can measure deformation occurred at multiple locations. Shear and extension that caused grouted cable to deform will change the TDR signatures. The relationship between deformation and waveform change were quantified in previous researches. Li-shan lanslide area were chosen to install TDR cables. Results from three years monitoring are presented here to show the applicability of using TDR to monitor landslides. Profile of the monitored slope are presented to show its geological stratum so as the potential sliding plane. Waveform change summarized from monitoring data are verified. Deformation within the slope are judged. The result showed TDR monitoring system for sliding plane is unstable slope is acceptable. (KeyWords : TDR(Time Domain Reflectometry), Sliding Surface, Monitoring)

## 一、TDR 背景介紹

時域反射技術(Time Domain Reflectometry; TDR)最早在電信工程上的發展，原本是電機及通訊工程師使用在輸配電路及通訊網路中，尋找短路或發生障礙位置的一種技術。近年來，此一方法開始運用到其他的方向；包括做某些材料特性的量測與變形的監測系統上，並有利用光的傳輸發展的OTDR的量測系統，採用光纖做導線，而非原本的同軸電纜線。TDR的應用甚至延伸至環境工程與核子工程的領域，如量測地下化學物質的傳輸情形、核爆的區域...等。

TDR 監測系統在土木工程方面已有非常廣泛之應用。路面工程方面，可作為鋪面溼度的監測系統；在結構工程方面，舉凡監測混凝土結構中的裂縫位置、監測橋墩的沖刷情形和移動位置、橋樑監測上的應用...等等，應用情況亦日趨成熟。另外，不僅在岩石工程方面，可進一步監測岩盤變位；而大地工程方面，目前則已能使用於監測土層邊坡之滑動情況[1]。

當設置 TDR 監測系統用於土層邊坡滑動之量測時，主要是以同軸電纜線作為量測變位的連續性感應器，並藉由電磁波形的變

化，了解地層的滑動情形[2]。由此可知，推求反射訊號波形和同軸電纜線變形間的關係是必要的。至於前人於室內試驗的相關研究，目前成果包括同軸電纜線長度對反射訊號波形的影響、受不同變形型式而造成波形的不同變化，以及反射訊號波形之量化方式；此外，現地監測之實際應用部分也已經有初步的進展。

## 二、TDR 基本原理

時域反射技術可用於量測傳輸線的特性阻抗(characteristic impedance)[3]，其原理主要是利用波行進間所遭遇介質改變而產生折射與反射的現象來作量測，找出傳輸路徑中不連續的位置以及特性阻抗；其行為遵循波動理論。一個基本的 TDR 系統如圖 1 所示，包含下列幾個部份：

- (1) 波形產生器 ( pulser )
- (2) 用以量測待測裝置 ( Device Under Test ; DUT ) 上各種訊號的擷取器 ( signal sampler )
- (3) 連結波形產生器，訊號擷取器及待測裝置的傳輸線 ( transmission line )

(4)顯示或記錄擷取器上訊號的裝置  
(displayer or recorder)

所謂的時域反射系統，係由波形產生器 (pulser) 送出一源源不絕且上昇時間 (rise time) 極短的時變性電壓脈衝進入待測裝置 (test device), 而電壓脈衝的型式通常為一種躍階脈衝 (step function pulse), 此一訊號通過訊號擷取器後沿著傳輸線傳至待測裝置。若於傳送途中遇到不連續點時, 亦即傳輸線因外力造成電纜局部特性的改變, 將造成部分能量的反射, 然後反射波將與入射波重疊, 結果造成所謂的「反射係數」(reflection coefficient), 即反射電壓與入射電壓的比值, 並隨著時間的變化, 而顯示在測試儀的示波器上。理論上, 在輸入的波和反射回來的波之間時間的延遲, 可以決定出障礙發生的地點。而綜合的考慮延遲的時間、反射波的波形及波長與大小, 可以決定出每一個障礙發生的位置、形式與嚴重的程度。

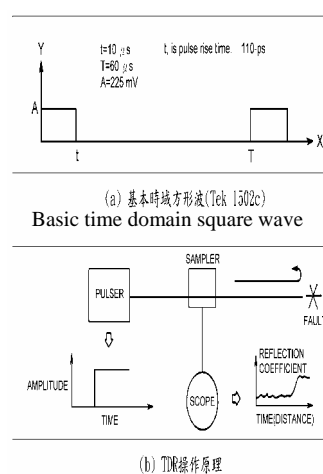
### 三、同軸電纜線

在TDR設置中, 訊號傳遞之路徑, 即為可量測變化之範圍。而在本研究中作為量測變位之感測計, 為一傳輸線。傳輸線可引導能量從某一點 (輸入) 到達另一點 (輸出)。一般使用的傳輸線可分為同軸式與平行導線式兩種。平行導線式傳輸線在高頻使用時易受外來干擾且其能量的輻射 (radiation) 損失相當大的。用於TDR測量的傳輸線屬於同軸式導線, 即以同軸電纜線 (coaxial cable) 為訊號傳遞的路徑。同軸電纜線可以提供電磁波一個一維度的波傳路徑, 其能量在電纜線中則是以橫向電磁 (TEM) 波的方式傳遞; 而波動進行的控制方程式可以用線路原理或麥氏(Maxwell's)理論來引導取得[4]。

### 四、地滑面調查方法

地層滑動面調查乃是使用鑽探孔, 於地滑地內設置計測儀器, 以量測地層滑動量及土壓力。常用的調查方法大致如下:

1. 滑動面測管法
2. 應變管測定計法
3. 地層伸縮量測定法
4. 地滑地中土壓法
5. 地層孔內傾斜測定法
6. TDR 地層變位觀測系統



Basic principle for TDR  
圖 1. 基本 TDR 系統 (摘自 Dowding et al., 1989[2])  
Figure 1. Basic TDR system. (Adopted from Dowding et al., 1989[2])

#### 4.1 TDR作為地層變位的觀測系統之功能

TDR 作為地層變位的觀測系統, 其功能大致有如下三項:

1. 可以同時處理多個不連續點之反射情況

(1) 定出多個不連續點之特性阻抗

傳輸線的拉長、縮短、折疊、扭絞、斷裂均會造成傳輸質的改變, 而成為電路上的一個不連續點, 此時特性阻抗的改變將使得入射能量無法全部的被吸收, 而有

部份的能量反射。由反射電壓位準的不同，則可知道該處的特性阻抗。

(2) 定出多個不連續點的位置

傳輸線如遇電纜之電學特性突然改變處，便會造成部份的入射訊號反射訊號回源端，根據反射波與入射波有時間上之不同，便可輕易地利用下面關係式求出電纜線上不連續點之位置。

$$d = \frac{v_p \times t}{2} \quad (1)$$

其中

$d$ ：量測端到不連續點的距離

$v_p$ ：波在電纜線上的傳遞速度

$t$ ：電磁波行經傳輸線起點到不連續點，再返回起點所需時間

2. 了解電纜線變形型式電纜線變形型式

基本可分為兩種，一種為電纜線受到純剪的作用，另一種為受純拉作用。根據前人研究此兩種變形型式都有其容易辨別之波形，若電纜線同時遭受複合的受力情況時，則必須以室內試驗模擬才可了解其變形型式。

3. 了解地滑的嚴重性

根據 M.B.Su (1990)[3]及丁建仁(1999)[5]研究結果顯示，對同軸電纜線所受到的剪動量和拉伸量可量化其變形量，且以面積法為最佳方式，並不受多重反射的影響。因此了解現場的波形變化是受到何種變形型式後所產生的，求取現場波形所圍成面積，利用室內試驗剪動量量化結果，以了解現場地層變形的嚴重性。

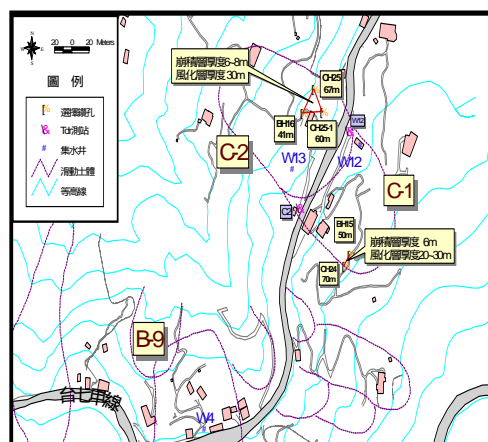


圖 2. 梨山地滑區 TDR 測站平面配置圖  
Figure 2. Plan view for TDR station within Lisan landslide area.

## 五、現地設置

根據既往地質調查結果，推測梨山地區在過去曾發生過大規模之地層滑動，造成一馬蹄形崩崖，於崩崖下之凹地內，形成一向北延伸之平緩小山脊，即為古滑動體。本區之地質材料為受地質構造擾動之板岩，又因地層滑動，使板岩材料更加破碎，容易受地下水之滲透而風化成黏土，而表土為堆積深厚之崩積層，另分化出數十個小滑動體，致形成目前之地滑地形。為測試 TDR 地層變化觀測的能力，及增加對地層滑動面的掌握，在梨山地滑地區內安裝了多組的 TDR 觀測系統，以下用裝置在 C 區的兩處觀測 C1 與 C2 來作說明。

## 六、C 區滑動土體的概況

C-1 滑動土體位於台七甲線 72K+500~72K+700 路段，以往曾因連續降雨及豪雨，數度誘發本滑動體向西北滑動，致使其趾部的蛇籠擋土牆變形毀損，路邊排水溝亦屢遭擠壓破壞[6]。

C-2 滑動土體位於台七甲公路 72K+500 下邊坡，呈東北~西南走向，在平面上呈方形，其上有一鑽孔 BH-16。以往曾因豪雨數度誘發本滑動土體向西北滑動，致使其頭部的台七甲公路路基隨之下陷，雖然在民國 80 年 6 月曾以方形石籠予已修復，但在翌年 3 月路面再度因為降雨而龜裂或下陷，截至 81 年 9 月為止，下陷已達 25cm 以上，至目前下陷量可能達 3 公尺以上。

本路段邊坡仍處於不穩定狀態，每逢梅雨季節或颱風來襲，累積雨量飽和後即發生邊坡坍塌，造成路面下陷，經多次修補，路面已呈波浪狀。目前處理方式係於上、下邊坡設置蛇籠，以及佈設 7 孔橫向排水管。

滑動區內鑽孔計有 BH-15、BH-16、CH-24、CH-25、CH25-1 等 5 孔。由鑽孔資料繪得之地質等厚度線，可大略推估其崩積層厚度約介於 6~8m，風化層厚度則介於 20~30m；由此可知本區之 TDR 埋設鑽孔深度不應少於 40m。

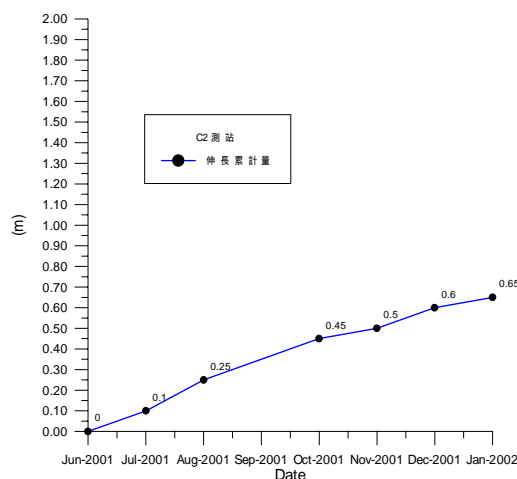
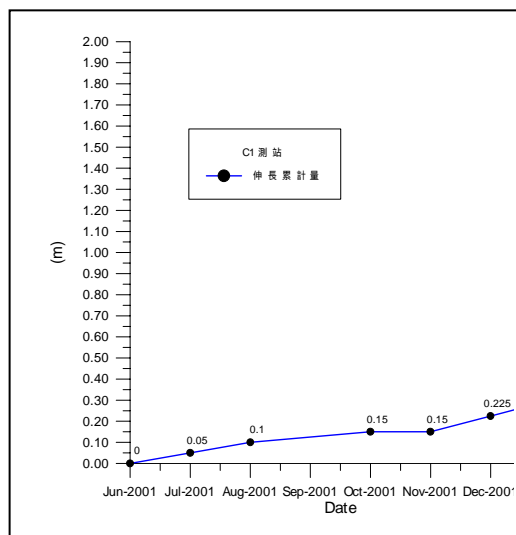
於 C-1、C-2 滑動體之趾部附近，除偶見壓力裂隙外，於地表並未明顯出現上拱或隆起之現象，故推測其滑動面並非弧形破壞，而為趨近平面破壞，且因位移量大於下陷量，於頭部位置容易出現陷落型張力裂隙。

## 七、觀測結果

### 7.1 伸長量比較

由波形尾端訊號開路位置，可以觀察出整體 TDR 電纜線的長度變化情形，紀錄並整理不同日期所得之觀測結果後可以進行比較。圖 3 為從觀測期間 2001 年 6 月至 2002 年 1 月間埋設的電纜線長度變化，C2 測站累計伸長量大致為 0.65m。而 C1 測站則相對上伸長速度較為緩慢，累計伸長量只有 0.3m。

(a) C1 station



(b) C2 station

圖 3. 波形累計伸長圖

Figure 3. Accumulation of total extension for TDR monitored data.

### 7.2 波形變化

#### 1. 測站 C-1(C-1 滑動土體)

本測站設置於 89 年 1 月，於本研究內觀測日期從 90 年 6 月至 91 年 1 月，共讀取 7 次現地觀測資料，將其處理數化後圖形如

圖 4 所示。

## 2.測站 C-2(C-2 滑動土體)

C2 測站為 90 年 4 月所設置，主要為觀測 C-2 滑動土體之地層滑動情形，自設置後至 91 年 1 月共有 6 筆現地觀測資料，中間 90 年 10 月因電纜線接頭鬆脫故障，故當月無法讀取資料。其資料整理後圖形如圖 5 所示。

## 八、滑動面判識

本節由數化後波形上起伏變化，配合前人所作之 TDR 波形分析，對地層滑動情況與形式作出結果判定。並將 TDR 判釋結果套用至蘇英智[8] - 於論文中所作之地層剖面圖，對判釋結果做進一步驗證。以下就各滑動土體分別說明之：

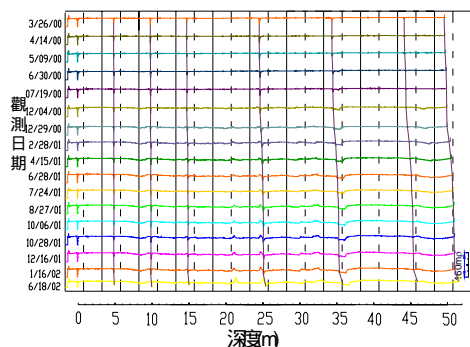


圖 4. C1 測站波形資料圖

Figure 4. TDR Waveform for C1 station.

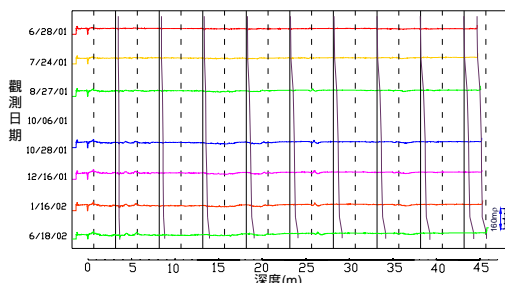


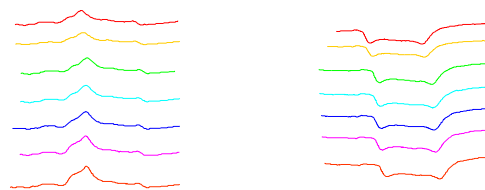
圖 5. C2 測站波形資料圖

Figure 5. TDR Waveform for C2 station.

## 8.1 C-1 滑動土體

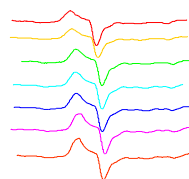
由 C1 測站所得之數化波形，如圖 4 所示，研判地層下存在三處滑動較明顯之地滑，其波形變化處放大如圖 6 所示：(1)地表下 21m 處，由波形上尖峰凸起，並隨時間幅度緩慢增加，研判此處存在一緩慢移動之滑動面。(2)地表下 24.5 處，在靠近預作記號上方處，為一緩慢移動之滑動面存在此深度。

而將所判釋之滑動面位置，利用 C1 測站地表高程，將其套用於地層剖面圖上，如圖 7 所示，由自動監測站所得資料發現滑動面大部分存在於強風化板岩與其他岩層之交界面。而由 TDR 所判釋之滑動面存在於深度 21m、24.5m、35m，除深度 21m 之滑動面外，其餘兩處滑動面正好位於強至中風化板岩與其上下強風化板岩層交界處。而由波形變化程度上，深度 35m 處滑動程度較 21m、24.5m 處為明顯。



波形變化處.1

波形變化處.3



波形變化處.2

圖 6. C1 波形變化處放大圖

Figure 6. Expanded waveform change for C1 TDR record.

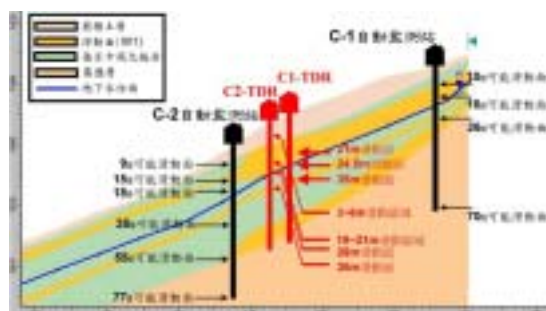


圖 7. C1 地層剖面圖(摘自蘇英智, 2001)  
Figure 7. Profile for slopes including C1 station.  
(Adopted from Su, I. C. 2001)

### 8.2 C-2 滑動土體

由 C2 測站波形分析上研判, 如圖 5 所示, 此處地表下存在四處滑動情況較明顯之滑動面, 其波形變化處放大如圖 8 所示: (1) 地表下 3~6m 處, 此區域之波形呈現不規則起伏變化, 故此處應存在一淺層滑動面。(2) 地表下 19~21m 處, 此深度之電纜線波形呈現小規模凹谷後兩側伴隨一小凸峰, 為一典型之受拉伸波形。(3) 地表下 26m 處, 於電纜線設置完成後即出現一持續發展之凸峰, 研判此處有一滑動面存在。(4) 地表下 36m 處, 波形上顯示兩相距約 1m 處之剪動變形發生。

將 C2 測站判釋之滑動面利用同樣方法套用至圖 7 剖面, 更可看出其滑動面間形成與連續發展的關係。由剖面圖上深度 3~6m 處之滑動面屬於崩積土層所造成, 無明顯之單一剪動面, 故在波形上呈現連續且不規則起伏之波形。而深度 19~21m 處則可能為 C1 測站深度 21m 處滑動面之延伸。深度 26m~36m 處位於強至中風化層其上下強風化板岩層交界, 形成原因應與 C1 測站之深度 24.5m~35m 處相同, 並可能為其延伸。

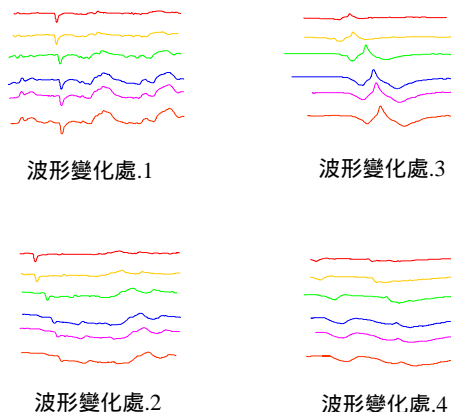


圖 8. C2 波形變化處放大圖  
Figure 8. Expanded waveform change for C2 TDR record.

## 九、結論

本研究結果證實 TDR 監測系統於判釋地滑深度部份, 與各滑動區之自動監測站、各鑽孔土層分佈所分析結果表現的一致性, 足見時域反射技術於現地應用的可行性。且同軸電纜線是一連續的感應器, 並不像孔內傾斜計是由個別感應器組成, 因此更能準確地定出地層滑動位置, 進一步取代傳統監測的優勢得以窺見。

另外, 對於現地測站的特殊波形部份, 在嘗試於室內進行模擬後也有相當不錯的成果, 使得現地波形判釋基準更形充實而完備。其中測站 W12 深度 34~34.5m 處, 記號右端 V 字型尖峰訊號漸與該記號融合為一的現象, 極可能是由於固結效果的不同, 造成交界處產生局部擠壓的變形機制; 而測站 W9 深度 13m 處的特殊凸峰, 則可能為電纜線經某種複合變形作用後, 即將造成斷路的預先徵兆。

## 參考文獻

1. 丁建仁 (1999)「時域反射原理設置之變位量量化研究」, 碩士論文, 國立中興大學土木工程研究所, 臺中。
2. 財團法人工業技術研究院能源與資源研究所 (1999)「八十五年度坡地災害整治計畫-梨山地區地層滑動基本設計與補充調查委託技術服務-期末報告(附錄)」, 台灣省政府農林廳水土保持局第二工程所委託研究報告。
3. 廖建鑫 (2002)「梨山地區地層滑動面之觀測與判定使用時域反射技術(TDR)」, 碩士論文, 國立中興大學土木工程研究所, 臺中。
4. 蘇英智 (2001)「梨山地滑穩定性即時分析系統之建立」, 碩士論文, 國立中興大學土木工程研究所, 臺中。
5. Dowding, C. H., M. B. Su and K. M. O'Connor (1988) "Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation," Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 25, No. 5, pp. 287-297.
6. Dowding, C. H., M. B. Su and K. M. O'Connor (1989) "Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables," Int. J. Rock Mech. and Rock. Eng., Vol. 22, pp. 1-23.
7. M. B. Su (1990) "Fracture Monitoring within Concrete Structure by Time Domain Reflectometry," Engineering Fracture Mechanics., Vol. 35, No. 1/2/3, pp. 313-320
8. Dowding, C.H and K.M. O'Connor (1999) "GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes", pp116-117, U.S.A.

---

92年6月30日收稿  
92年8月15日修改  
92年8月23日接受