

MTDR 在大地工程上之應用

蘇苗彬、陳育志

國立中興大學土木工程所

摘要

MTDR 是一種以同軸電纜作為媒介之電磁波脈衝量測儀，TDR 量測技術可使用於許多大地工程方面之量測與監測，如地下水位、體積含水量之量測、混凝土結構物之裂縫監測等。本文除概述 TDR 之原理及其應用外並提出一種分析 MTDR 訊號之方法，以反射訊號電壓降的面積對時間關係的積分來計算當量電容，以取代原有以最大電壓降的方法，並經由驗證試驗證實其適用性。此法除可方便計算外並可合理解決多重反射下分析訊號所遭遇之困難。

一、前言

同軸電纜 TDR 基本上是一種閉迴路雷達，最初是給電子工程師檢測同軸電纜傳輸線之用[1]，此項技術後來又延伸用於量測材料特性，如含水量[2]及材料之誘電行為[3]等。在岩石工程方面，此項技術則可用於監測岩體變位[4、5]及岩爆之發生[6]。此外亦可用於監測混凝土結構物內的裂縫[7]，當同軸電纜埋置於混凝土結構物內時，其作用相當於一連續性之感測計，可檢測沿電纜線上任何位置之裂縫及相對位移。當將電磁脈衝波從電纜一端載入，並擷取到電纜變位點之反射訊號後，即可確定變形位置。當裂縫位置無法預知之下，用 TDR 來作裂縫監測實為一可行之方法。這點是 TDR 監測技術相較於

傳統監測方法最大的優點。本文提出一種分析 MTDR 訊號之方法，以反射訊號電壓降的面積對時間關係的積分來計算變形量，以取代原有以最大電壓降的方法，並經由驗證試驗結果證實其適用性。

二、TDR 系統簡介

圖1為 TDR 系統之簡圖，包含訊號產生器、同軸電纜及示波器。系統中之脈衝產生器產生電磁脈衝波載入電纜，一般採用低電壓重覆脈衝產生器，以便能採用等時間間隔訊號擷取系統，來量測電壓上升時間小於 50ps 之訊號。因電阻不連續而產生反射之訊號則由擷取系統擷取並於示波器上顯示。同軸電纜提供電磁波一個一維度的波傳路徑，其波動方程式可由電路理論或馬克斯威爾(Maxwell)方程式推導而得，推導過程見傳輸線理論教科書(如 Dworsky[8])。

三、反射訊號之型態

同軸電纜變形後，其電路不連續特性可分為兩種型態：(I)對特性阻抗 z_0 充電，(II)對總體電路元件充電[9]，此兩種型態均會造成反射電壓脈衝。藉由量測電磁波由入射到反射的時間，即可換算成距離，定出不連續點之位置；而反射電磁波之斜率與振幅則與電纜之特性相關。由於不同的不連續面係分佈在不同之空間，因此也分佈在不同時間域，

因而可以加以分析。此種位置與波傳時間之關係為 TDR 量測之基礎。

1. 電纜受拉

受拉伸之電纜由於頸效應而使電纜直徑變小，因而造成一與原始阻抗 Z_0 不同的特性阻抗 Z_1 。在界面處，其反射係數 (ρ) 可由特性阻抗求得(如圖 2g)[10]。

$$\rho = (Z_1 - Z_0) / (Z_1 + Z_0) \cdots \cdots \cdots (1)$$

2. 電纜受剪

電纜受剪時之變形拘限在局部，其對整體電路造成之效應，可以並聯一當量電容到原電路中加以模擬。如此反射係數 (ρ) 則無法單純的以阻抗來表示，而必須以理想化之局部電容變量來表示，則反射係數 (ρ) 可由下式求得[10]。圖 2f 為並聯電容電路之“電壓-時間”圖。

$$\rho = \Delta C \cdot Z_0 / 2 \cdot t_r \cdots \cdots \cdots (2)$$

式中

ΔC : 當量電容值

Z_0 : 電纜之特性阻抗

t_r : 電壓上升時間

四、多重反射

由於入射電磁波之電壓上升時間有極限，因此實際上 TDR 之量測在應用上有頻寬之限制。典型阻抗不連續電路的“時間常數”遠快於上升時間，因此使反射脈衝訊號不那麼理想，而是如圖 3 所示之脈衝波形。其當量電容可由下式求得[1]。

$$C = \left| \frac{Z}{m \cdot Z_0} \right| \times [E_{r, \max}] \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中 m 為反射脈衝波形中斜率之最大值(受控於入射電磁波電壓之上升時間)

$$m = \left. \frac{dE_i}{dt} \right|_{\max} \text{ in mv/sec} \cdots \cdots \cdots (4)$$

基本上當量電容值相當於式(2)中之反射係數，是以在當量電容相同之情形下，若電壓上升時間不同(即 m 不同)，便會造成不同之電壓降 $E_{r, \max}$ 。

因微小變形而產生之反射電磁波，其最大振幅隨入射電磁波電壓上升時間之增加而減少，當一傳輸線上有許多點不連續介面或傳輸線由多種不同阻抗之導線組成時，這些點之反射訊號便會相互干涉，增加訊號分析上的問題。實際上許多量測均屬小變形，因此反射電磁波之最大振幅很快的便趨近於零，而且無法避免互相干擾之情形。

為克服入射電磁波電壓上升時間受限而造成之問題，本文提出一種分析 MTDR 訊號之方法，以反射訊號電壓降的面積對時間關係的積分(如圖 3)來計算當量電容，以取代原有以最大電壓降的方法。

$$\text{Area} = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中

t_1 : 因並聯電容而使反射電磁波產生電壓降之起始點

t_2 : 反射電磁波回到參考電磁電壓之時間點

五、驗證試驗

本文設計一以半硬外殼之同軸電纜作試驗，以評估本分析方法之適用性。試驗時在同軸電纜不同位置處給予變位，並於電纜之兩端分別以 TDR 量測。如圖 4 所示，電纜分別連接到 TDR(標示為 L, R)，首先先在 A 處給予一變形，然後於電纜兩端分別量測反射電磁波；接著於 B 處再給予一變形，再次於電纜兩端分別量測反射電磁波。設計此試驗之目的為(1)證明電纜變位可以當量電容之方式分析，(2)測試多重反射之效應。

為瞭解變形對反射電磁波壓降之影響，試驗包括小變形及大變形之情形。量測所得之反射電磁波波形如圖 5、6 所示。圖 5 為電纜只有一處小變形之波形，而圖 6 為只有一處大變形之波形；圖 7 為圖 5 局部放大之圖形而圖 8 則為圖 6 局部放大後之圖形。

圖9、10為電纜有兩處變形時反射電磁波之波形；圖9為A處波形，圖10為B處之波形。

表1為所有驗證試驗之數據。由表1中可看出，當電纜僅有一處變形時，不論其變形之大小，或是量測端之位置，以面積法及最大電壓降($E_{r,max}$)法均可得到相當好之結果。但當電纜上有兩處變形時，以最大電壓降($E_{r,max}$)法分析之結果，其誤差最大達17.39%，而面積法之誤差均在1%以內，由此可知面積法在多重反射下之適用性。

六、結論

本文提出以反射訊號電壓降對時間關係的積分來分析MTDR訊號之方法，因為反射電磁波之面積不受入射電磁波電壓上升時間之影響，相較於原有以最大電壓降的方法，可得到較低之誤差。此法除可方便計算外並可合理解決多重反射下分析訊號所遭遇之困難。如此MTDR的方法可推展作為多點即時量測的多功能監測系統。

參考文獻

- [1] Moffit L.R. (1964), "Time domain reflectometry—theory and applications", *Engineering Design News*, pp. 38-44.
- [2] Topp G.C., Davis J.C. and Annan A.P. (1980), "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial Transmission lines", *Water Resources Research*, Vol. 16(3), pp. 574-582.
- [3] Cole R.H. (1975), "Evaluation of dielectric behavior by time domain spectroscopy: 1, dielectric response by real time analysis; 2, complex permeability; 3, precision difference methods", *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 79(4), pp. 1459-1474.
- [4] O'Connor K.M., and Dowding C.H. (1984), "Application of time domain reflectometry to mining", *Proc. 25th Symp. on Rock Mechanics*, Northwestern University, Evanston, Ill, pp. 737-746.
- [5] Dowding C.H., Su M.B., and O'Connor K.M. (1989), "Measurement of rock mass deformation with grouted coaxial antenna cables", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 22, pp. 1-23.
- [6] Schmitt G.G. and Dick R.D. (1985), "Use of CORTEX to measure explosive performance and stem behavior in oil shale fragmentation test", *1st Mini-Symp. on Explosives and Blasting Research*, Soc. of Explosive Engineers, Montville, Ohio.
- [7] Su M.B. (1990), "Fracture monitoring within concrete structure by time domain reflectometry", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, pp. 313-320.
- [8] Dworsky L.N. (1979), *Modern transmission lines Theory and application*, Wiley, New York, 236pp.
- [9] Dowding C.H., Su M.B., and O'Connor K.M. (1988), "Principles of time domain reflectometry applied to measurement of rock mass deformation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 25(5), pp. 287-297.
- [10] Mooijweer H. (1971), *Microwave Techniques*, Macmillan, London, 293pp.
- [11] Hewlett Packard (1990), "application Notes 62-3", *Advanced TDR techniques*, 22pp.

Multiple Reflection of Metallic Time Domain Reflectometry

Department of Civil Engineering National Chung-Hsing University

Abstract

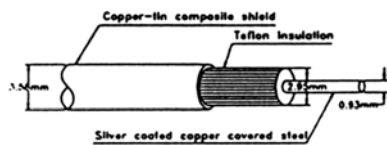
Metallic Time Domain Reflectometry (MTDR) is an electromagnetic pulse testing technique which allows metallic coaxial cable to be used as a conducting and sensing device. This technique can be applied to monitor

fracturing within concrete structures. When the coaxial cable is embedded in a concrete structure, it works like a continuous sensor that can detect fracturing and relative movement at any location along its length. Based on the reflection waveform characteristics, the type and magnitude of cable deformation can be identified.

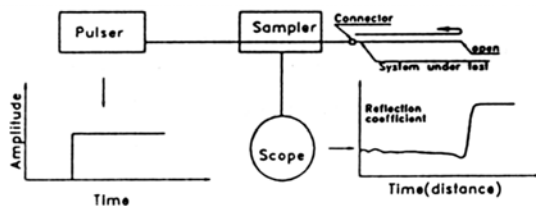
An integration method is proposed to analyze the reflected waveform which can more accurately measure the multiple reflections than the current derivative method. Verification was done by testing a semi-rigid coaxial cable with crimps on it. The technique of multiple reflection analysis presented in this paper proved to be able to analyze multiple reflections along one cable.

表 1. 驗證試驗之數據

變形點	小變形		大變形					
	一處變形(A)		一處變形(A)		兩處變形			
量測點	A		A		A		B	
量測項目	$E_r, \max$ (mV)	Area (mV-cm)	$E_r, \max$ (mV)	Area (mV-cm)	$E_r, \max$ (mV)	Area (mV-cm)	$E_r, \max$ (mV)	Area (mV-cm)
連續性點	28.90	1499	118.71	6743	129.03	6754	110.97	6568
連續性點	28.65	1507	116.13	6702	108.39	6718	122.32	6610
誤差 (%)	0.87	0.53	2.20	0.61	17.39	0.53	9.73	0.64



(a) 半硬外殼同軸電纜之組成圖



(b) 系統操作原理

圖1. TDR 系統之配置簡圖

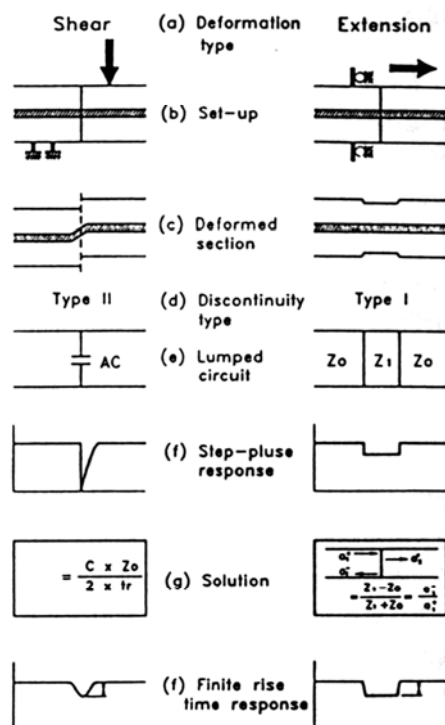


圖2. 電纜變形型式與反射波波形及理想化分析之關係(Dowding et. Al. 1989)

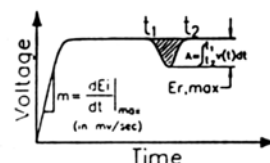


圖3. 電容計算之方法

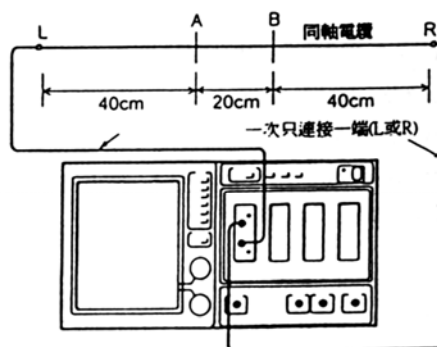


圖4. 驗證試驗之儀器設置圖

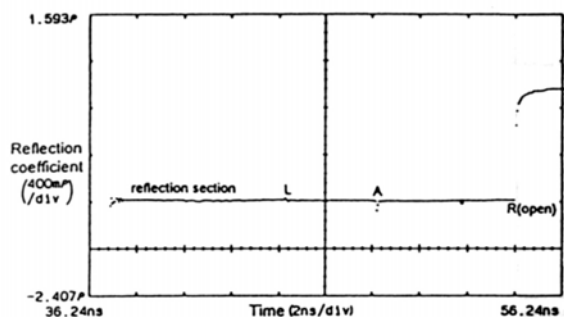


圖5(L). A點產生變形時之反射波形(連結於L端)

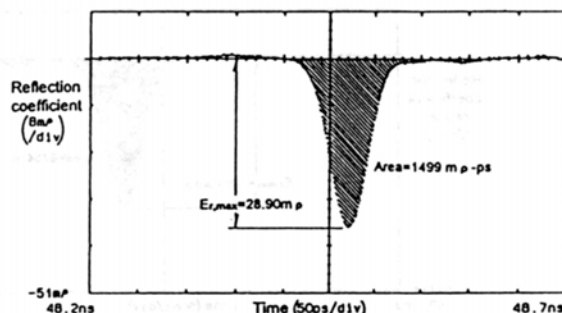


圖7(L). A點產生(小)變形時A點反射波形之放大圖(連結於L端)

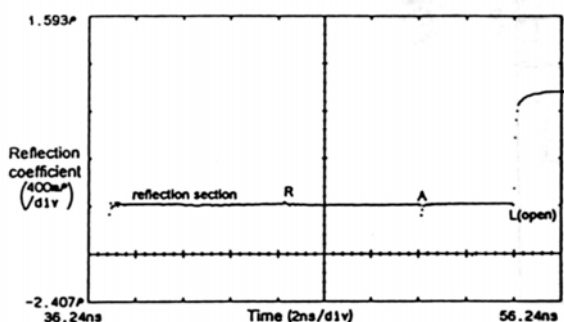


圖5(R). A點產生變形時之反射波形(連結於R端)

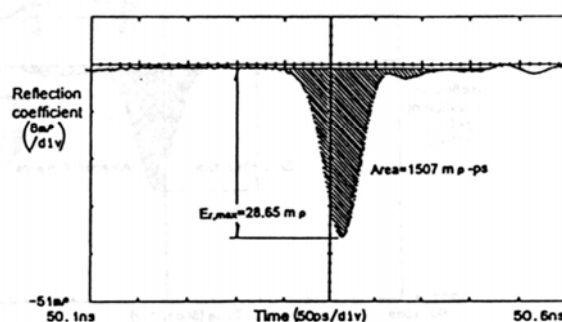


圖7(R). A點產生(小)變形時A點反射波形之放大圖(連結於R端)

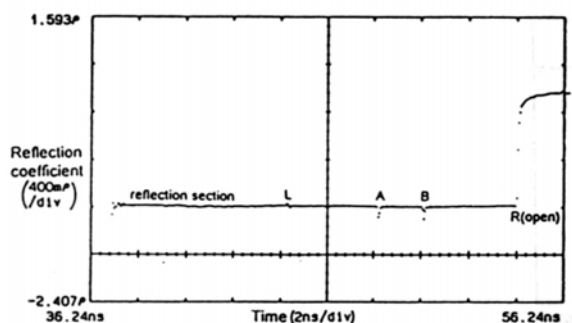


圖6(L). A、B點產生變形時之反射波形(連結於L端)

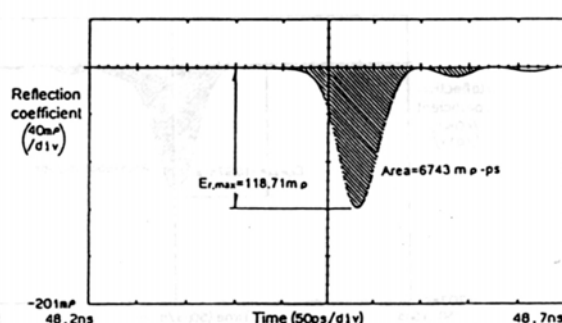


圖8(L). A點產生(大)變形時A點反射波形之放大圖(連結於L端)

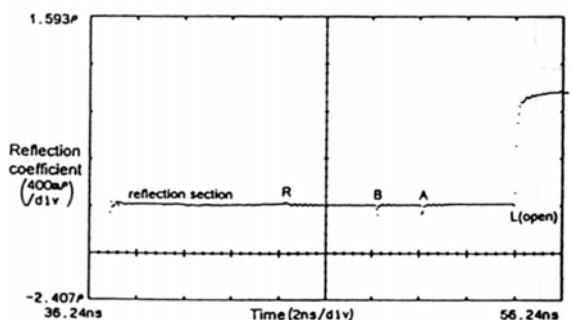


圖6(R). A、B點產生變形時之反射波形(連結於R端)

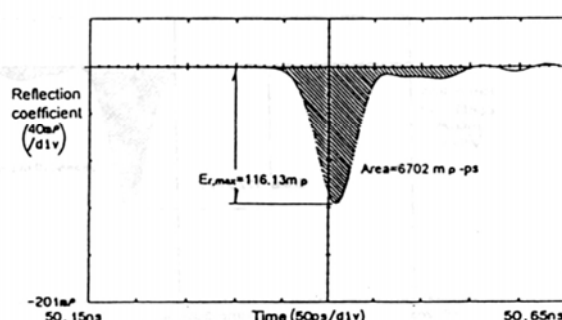


圖8(R). A點產生(大)變形時A點反射波形之放大圖(連結於R端)

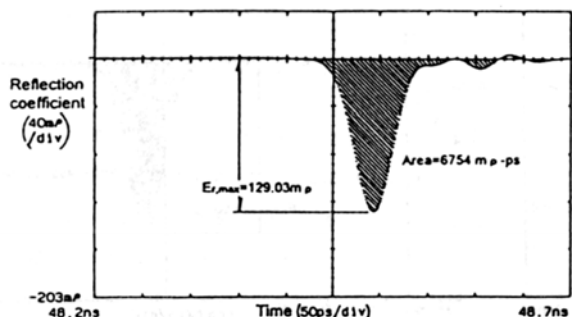


圖9(L). A、B點產生變形時A點反射波形之放大圖(連結於L端)

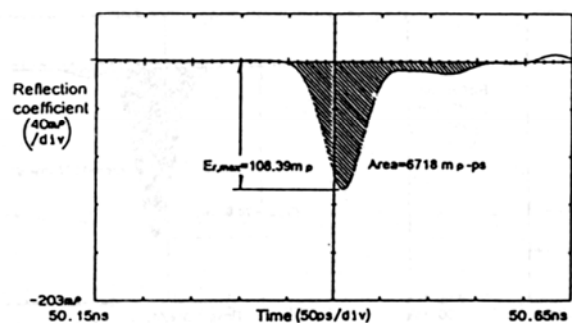


圖9(R). A、B點產生變形時A點反射波形之放大圖(連結於R端)

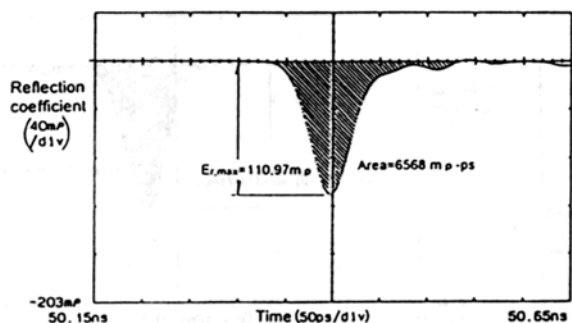


圖10(L). A、B點產生變形時B點反射波形之放大圖(連結於L端)

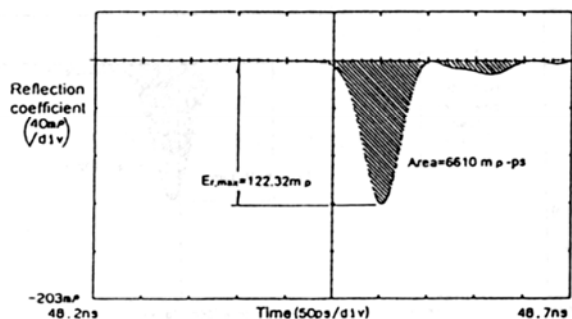


圖10(R). A、B點產生變形時B點反射波形之放大圖(連結於R端)