



2006 TAIWAN ROCK ENGINEERING SYMPOSIUM

岩盤工程研討會論文集



台灣 台南 成功大學

2006年2月26日至27日

使用 TDR 量測梨山地層滑動面之成果分析

蘇苗彬 廖建鑫

國立中興大學 土木工程學系

摘要

地層的錯動變形在地滑地監測項目中扮演著重要的地位。傳統的觀測方法雖有價錢昂貴與欠缺自動化的缺點，但仍有其穩定性與一定的參考價值。隨著科技的進步，量測的方法也逐漸創新。近年來使用時域反射技術（TDR）應用在地層滑動深度之監測上，並於梨山地滑地獲致良好成果。在滑動深度判釋上，TDR 可明確而清楚的判定滑動所發生的位置，由每月波形變化，亦可了解其滑動面發展過程。於現地滑動量之量化，在室內實驗中採面積積分法，從波形上剪動處波形之面積變化可求得相對之剪動量；但現地上目前仍有待進一步研究，其中主要原因是現地埋設的電纜線受破壞機制相當複雜，且變形模式受限於地質材料和剪力帶寬度(Shear band)的影響。

關鍵字：TDR、時域反射、地層滑動監測。

一、研究背景

為了儘量減少地層滑動所引致的可能損失，地滑災害的相關調查、預防、整治、監測及指示工作將相形重要；其中尤以地滑災害之監測為最。正確而完善的監測系統能夠確切地提
地層滑動的即時狀態，以作為整治計畫中整治工法設計、安全管理，以及施工進度控制之
者，並藉以確認地滑整治之效果及危險性之評估。同時經由觀測資料之分析歸納，可進一
建立預警系統，對地滑可能發生時間做出較正確的預報。

在地滑監測的工程領域裡，地層的變位量與滑動面深度是屬於比較重要的項目。以目前
測定地層變形仍大多延用傳統的應變管測定計法、伸縮儀以及人工或自動管內傾斜儀。
項監測儀器不但有價錢昂貴的顧慮，且在實用上，應變計和伸縮儀有量測間距範圍的

限制，而人工或自動傾斜儀則有設置和重力方向的限制，受現地條件影響頗大。

時域反射技術(Time Domain Reflectometry, TDR)為地層滑動面調查上另一新技術，由於時域反射技術(TDR)埋設之電纜線本身即為一具連續性且可多點量測的感應器，加上不受設置方向的限制、不易受地下物質侵害、不因濕度、溫度、或地下水狀態的改變而有所影響，以及儀器設置簡便快速且兼具經濟實惠等優點，近年來在現地地滑狀態調查的應用上已頗有取代傳統系統的架勢。室內實驗部份，目前已確立電纜線各種變形相對應之波形變化特徵，變形量與反射訊號之間的量化關係也歸納出一定的相關程度，使得時域反射技術(TDR)在現地應用上的日趨成熟。

二、相關文獻回顧

在土木工程監測方面依其應用可歸類為三類：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變形的改變，例如岩石、土壤、結構物之相對變位造成埋置其中之電纜幾何形狀之改變(Dowding et al., 1988; Aimone-Martin et al., 1994)。第二、利用TDR之反射訊號量測不同介質之介面位置，例如地下水位置之監測或橋墩土壤沖蝕監測(Dowding et al., 1996; 李岳儒, 1996)。第三、將所研究之材料當作一部份電纜（或由電纜延伸之探測頭）之絕緣介質，利用反射訊號研究之介電常數與導電係數，在進一步推估土壤之含水量與土壤之鹽度(Topp et al., 1980)。

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(Kachanoski et al., 1994)、核爆的區域(Mckown et al., 1994)...等。

歸納相關研究如下：

(1)長度對反射訊號波形的影響

Dowding等人(1988)認為在直徑為12mm，長度為152 m的同軸電纜線上，訊號於傳輸中將損失3.4%，而上昇時間(Rise Time)將增加20%。而在1528m長的同軸電纜線中，訊號衰減將達29%，而上昇時間將增加33%。

Pierce等人(1994)認為隨著同軸電纜線長度的增加，訊號衰減的情形與反射訊號波形的寬度均會隨之增加，而其對於波形的解析度呈非線性的下降，當量測範圍為268~530m時，訊號衰減情形嚴重，僅可測得變位的情形，而無法對於振幅作定量的工作。

上述研究結果顯示，訊號在經過長距離的傳輸時，將對於訊號振幅、上昇時間、波形寬度與解析度等造成影響。

(2)同軸電纜受不同變形型式之研究

Dowding C.H.等人(1989)，曾於室內試驗對三種不同直徑大小(9.5mm、12.7mm、22.2mm)的同軸電纜線，進行軸力與剪力幾何變形試驗，歸納出以下結論：當同軸電纜線受剪力變形時，反射訊號波形於受剪處產生一反射係數為負的尖峰效應，且反射係數的大小與變形量有一明顯的關係。當受軸向拉伸而產生變形時，於受拉處產生一反射係數為負的凹谷波形，隨著拉伸變形量的增加，反射係數的寬度大小也隨之變大。蘇苗彬(1990)也得到反射係數和剪動變形量、拉伸變形量有一定程度關係的結論。

1988年Dowding C.H.等人(1988)利用有限元素法模擬同軸電纜幾何形狀變形的情況，得到等值電容改變量和剪動量呈線性關係，並根據先前所做的反射係數和剪動量呈一線性的關係，做出了初步結論就是，當同軸電纜發生剪力變形時，將發生幾何形狀的改變，此改變可理想化的以一個局部等效電容的改變加以模擬。

綜合上述研究結果，均是以反射係數為剪動變形的量化方式，而其變位量與反射係數間關係則有線性與雙線式或指數形式等不同形式。

(3)變形量化方式

蘇苗彬等人(1998)試驗的結果顯示，當電纜線僅有一處剪動變形時，不論其變形之大小或是量測端位置，以面積法與最大電壓降法分析均可得到相當好之結果。但當電纜線上有兩處變形時，以最大電壓降法分析的結果，其誤差將遠大於面積法。因而提出以反射訊號電壓降對時間關係積分的方法來分析TDR訊號，認為反射電磁波之面積不受入射電磁波電壓上昇時間之影響。

丁建仁(1999)利用室內實驗設置，確定藉由所得波形進而分辨同軸電纜線變形型式的可行性；並發現不論是拉伸變形或是剪動變形，若以面積法計算其變位量，在相同變形量下所得到計算結果誤差均為最小；由此可知，使用面積法做為量化方式確實與變位量間存在一良好關係。

三、基本理論

3.1 使用同軸電纜線

在同軸電纜線中，訊號傳遞之路徑，為可量測變化之範圍，作為量測變位之感測計，即為一傳輸線。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。

當電流在傳輸線中流動時，將在兩導體間造成一個電壓差。而電壓脈衝沿著同軸電纜線的傳播行為，則是由傳輸線的四個基本參數決定，這些主要常數均勻分佈於整條線上：

(1)電阻(Resistance, R)：每單位長度之能量損失或電壓降；單位為歐姆/米(ohms/m)。

(2)電感(Inductance, L)：導線本身所吸引的能量；單位長度、時間內在導體中的電流流動所產生的磁場強度。單位為亨利/米(henry/meter)。

(3)電容(Capacitance, C)：由兩導線間的電壓差所產生；控制單位長度之內外導體間的電壓差。單位為法拉第/米(farads/meter)。

(4)介質損耗；電導(Dielectric Loss, G)：單位長度中，兩導線間之介質於電壓通過時產生的能量損失。單位為姆歐/米(mhos/meter)。

以上所述的這四個參數，由同軸電纜線中導線、介質材料、其間的幾何形狀與尺寸等共同的決定。

至於同軸電纜線中的電路性質，亦可以利用這些基本參數模擬成一個等效電路；而這些基本參數同時可以用來決定其特性阻抗(characteristic impedance) Z_0 。

理想傳輸線 ($R = G = 0$) 之特性阻抗 (單位為歐姆)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

而實際傳輸線 ($R \neq G \neq 0$) 之特性阻抗

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + \omega jL}{G + \omega jC}}$$

其中， $j : \sqrt{-1}$

ω ：角頻率（單位：rad/sec）

3.2 同軸電纜線之變形型式

同軸電纜線變形後，將對其造成電路不連續特性；通常線路的障礙可用電纜的阻抗係數的改變來描述。其可能發生的原因包括：因為電纜內部導線直徑的改變，導線之間幾何形狀的變化，外導線的受損，內導線的偏心，或者因介質的性質或材料有所改變等等。

如圖3.1所示，一般同軸電纜線基本之變形型式可分成下列兩種：

1. 電纜線軸向受拉變形

軸向受拉之電纜由於頸縮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 。在界面處之反射係數，根據傳輸線理論可由特性阻抗求得

$$\rho = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad \begin{array}{l} \text{其中，} \rho : \text{反射係數} \\ Z_0 : \text{電纜線之特性阻抗，單位為歐姆} \\ Z_1 : \text{電纜線性質改變後之特性阻抗，單位為歐姆} \end{array}$$

2. 電纜線受剪動變形

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。會造成阻抗的改變，如此反射係數無法單純的以阻抗來表示，而必須以理想化之局部電容改變量來表示，則反射係數可由下式求得：

$$\rho = \frac{\Delta C \times Z_0}{2 \times t_r} \quad \text{其中，} \Delta C : \text{當量電容值}$$

t_r ：電壓上昇時間，即電壓由0至電壓值的90% 所需的時間

而其當量電容值可由下式求得。

$$C = \left| \frac{2}{m \times Z_0} \right| \times [E_{r, \max}] \quad \text{其中，} E_{r, \max} : \text{反射電磁波最大電壓降}$$

m ：反射脈衝波形中斜率之最大值（單位為mV/sec），

如圖3.9所示， m 受控於入射電磁波電壓之上昇時間。

$$m = \left. \frac{dE_i}{dt} \right|_{\max} \quad \text{其中, } E_i : \text{入射電磁波電壓}$$

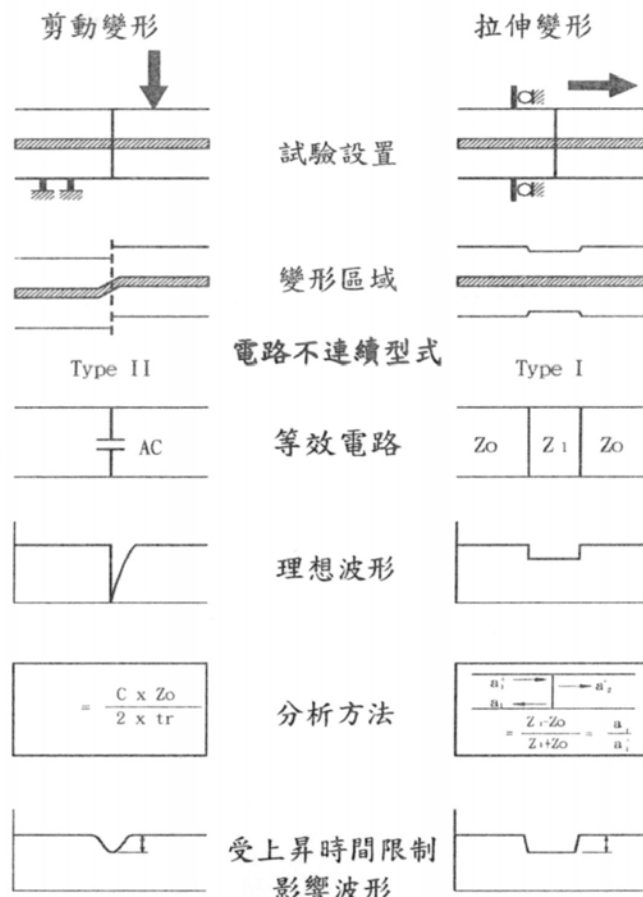


圖 3.1 同軸電纜線變形型式與其波形型式
(摘自 Dowding et al., 1988)

四、TDR 現地量測結果

4.1 TDR 監測資料與滑動面判釋

自梨山地滑區 TDR 監測系統分佈如圖 4-1 所示，裝設完成後，每個月進行一次資料讀取與紀錄，但因梨山地區於雨季或颱風過後，對外交通偶有中斷，若發生此情況則資料將延至下月讀取。由波形資料顯示，9 處監測站中以 A1、B9 監測站出現較大的波形變化，分別就波形判釋結果詳述如下：

1.A1 監測站

量測時間自 93 年 11 月開始，至 94 年 11 月為止，波形圖如圖 4.2 所示，波形以 11 米深度以上出現多處變化，及 17 米深度有一持續發展變化，顯示在較淺層之地層較不穩定，但並無滑動較明顯之滑動面，研判為局部地層錯動。於 94 年 8 月，波形圖上顯示深度 1.875 米處，波形出現大幅度向上的情況，表示此處電纜線變形超出電纜線所能延展之程度，使其發生斷裂破壞情況，亦顯示此深度之淺層滑動情況較明顯。因此處電纜線未完全扯斷，故目前深度 1.875 米下波形仍可量測。

2.B9 監測站

量測時間自 93 年 12 月開始，波形圖如圖 4.3 所示，深度 8.3 米以上出現多處變化，顯示在較淺層之地層亦呈現不穩定情況，研判為局部地層錯動。深度 15 米~16.5 米則有一發展中波形變化，研判存在一滑動面於此範圍深度。

五、結論

以 TDR 取代管內傾斜儀做為量測地層變位的方式，在梨山地區獲得良好的成效，除了改善傳統傾斜管變形過大儀器即無法量測之缺點外，在價格上 TDR 亦較傾斜儀具優勢，TDR 並具有可自動化與遠端監測的功能，提供了現代化地層滑動監測之另一項選擇。

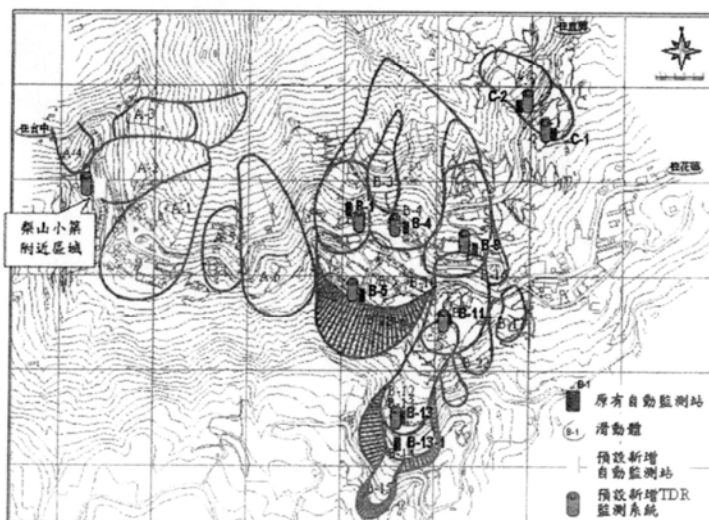


圖 4.2 TDR 新監測站分佈圖

參考文獻

- [1]. Dowding, C. H., Su, M. B. 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.1, pp.287-297.
- [2]. Dowding, C. H., Su, M. B. 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 .
- [3]. Dowding, C. H. and C. E. Pierce (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, pp. 569-578 .
- [4]. Dowding C.H and K.M. O'Connor (2000) , "Comparison of TDR and Inclinometers for Slope Monitoring".
- [5]. 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學系。
- [6]. 鍾宏達, 2000, 「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, 國立中興大學土木工程學系。

TDR地層變位監測系統
A1監測站

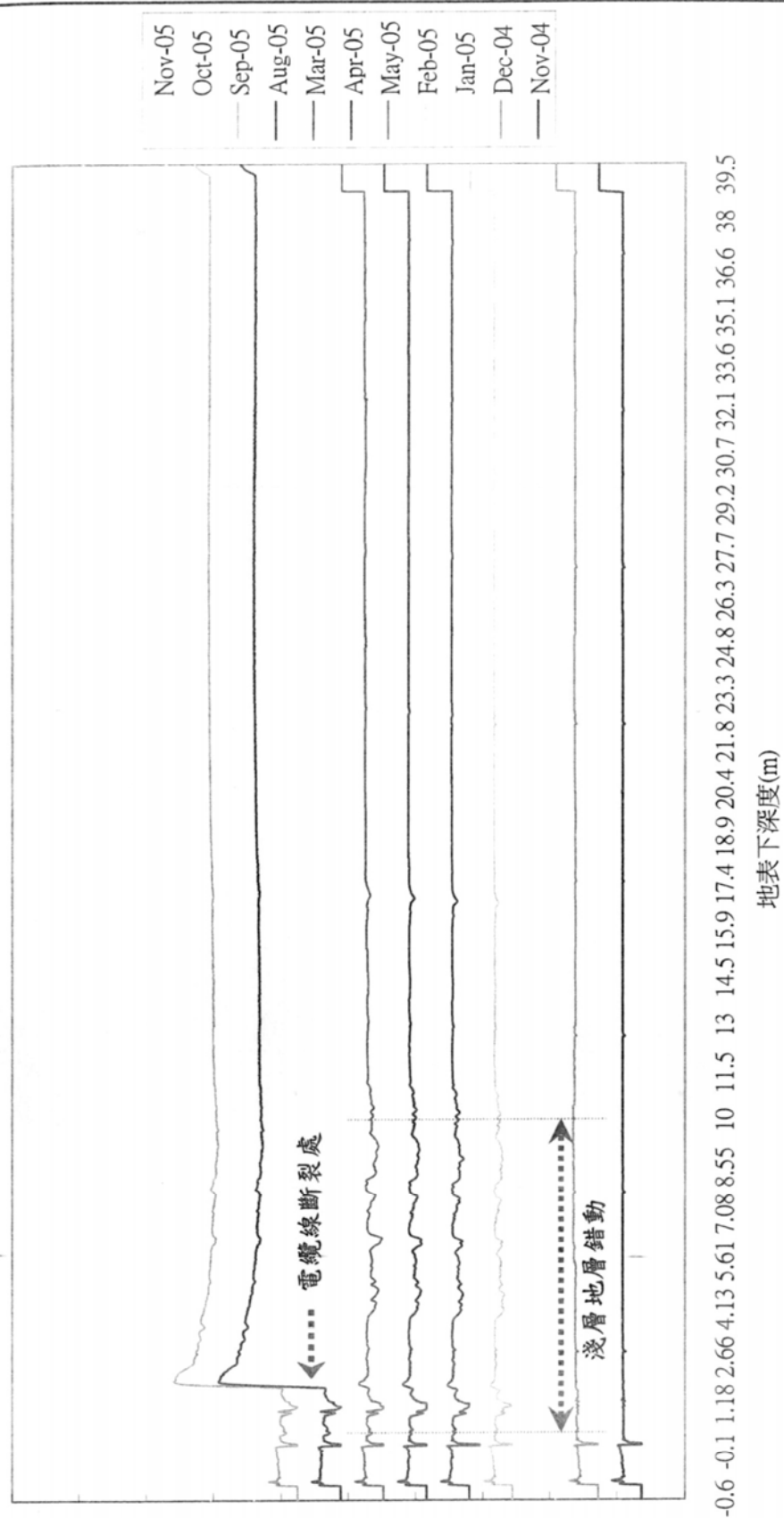


圖 4.2 A1 監測站波形圖

TDR地層變位監測系統
B9監測站

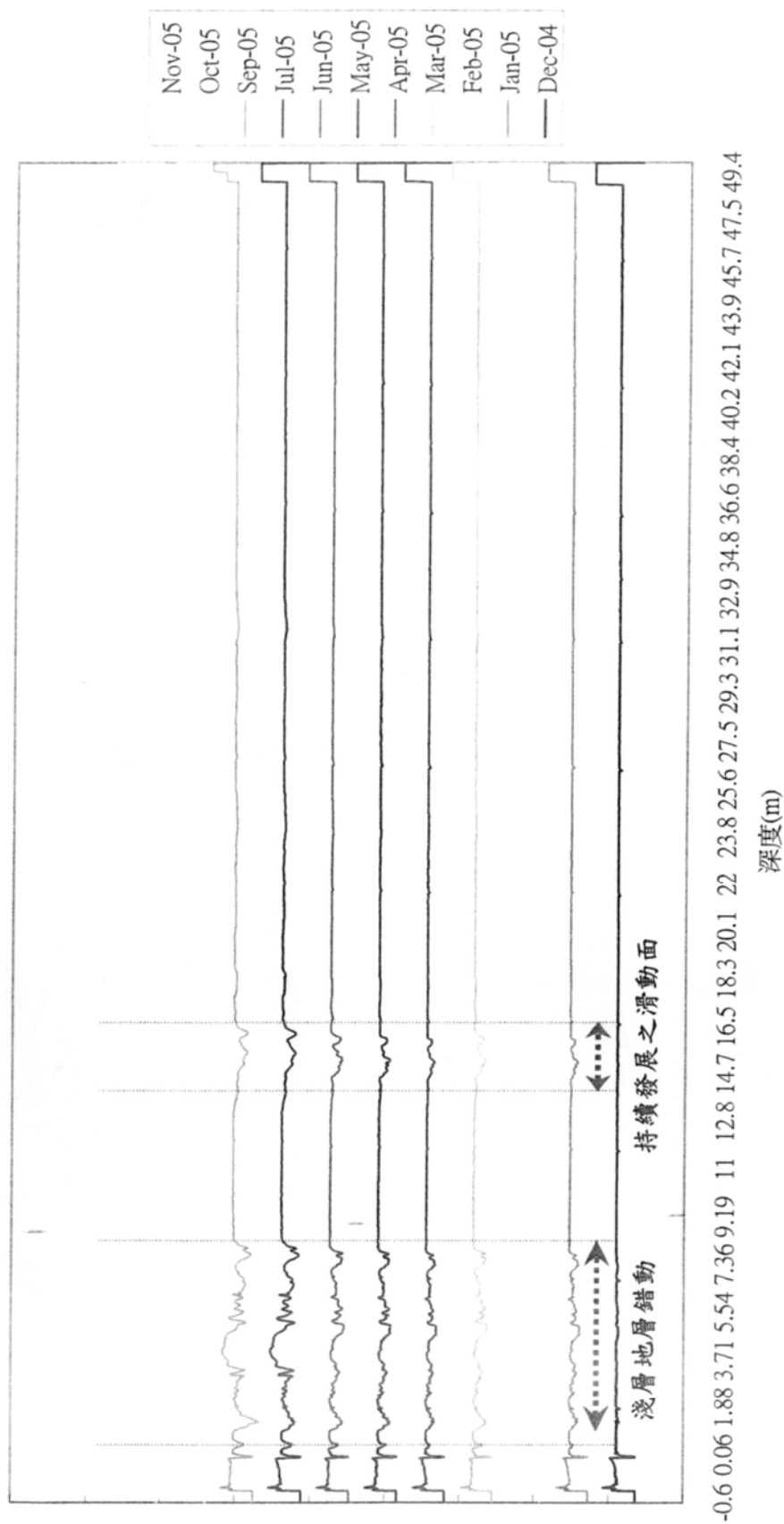


圖 4.3 B9 監測站波形圖