

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

軟弱岩石之探勘與監測

Characterization and Field Monitoring in Soft Rock

計畫編號：NSC 90-2611-E-009-009

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：林志平 國立交通大學土木工程系

計畫參與人員：湯士弘 國立交通大學土木工程系

計畫參與人員：張正宙 國立交通大學土木工程系

一、中文摘要

年輕軟弱岩盤膠結不良強度低，且遇水容易軟化，構築於此類地層之地工結構物常因軟岩之弱化而產生滑動破壞。為了更深入了解軟岩之物理與力學性質及其弱化機制，並對構築於此類地層之地工結構物進行監測，本計畫擬研究使用時域反射法與表面波譜法來調查軟岩之層次、物理與工程性質、及地層位移之監測。本計畫為整合型多年期研究計畫『軟弱岩石之大地工程行為』其中之一子計畫。上年度已完成(1)軟岩電學性質量測系統之建立、(2)軟岩相對變形量測系統之建立、與(3)表面波震測系統之建立。本年度預計完成之工作項目包括(1)軟岩電學性質及其量測方法之研究、(2)軟岩變形監測之量化分析與感測器之改良、與(3)表面波震測資料之分析。本報告簡述本計畫之執行成果。

關鍵詞：軟弱岩盤、時域反射法、表面波譜法

Abstract

Unlike brittle rock, soft rock is often weakly bonded and has low shear strength. The shear strength of soft rock decreases further upon leaching. Geotechnical failure often occurs in soft rock due to the low strength of the material. The main objectives of this project are to use Time Domain Reflectometry (TDR) and Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) to characterize the physical and engineering

properties of soft rock and to monitor the performance of geotechnical structures in soft rock. This project is a sub-project of a multi-year collaborated research on "Engineering Performance of Geotechnical Systems in Very Weak Rock". The work accomplished last year includes (1) development of a TDR system to measure electrical properties of soft rock specimens; (2) development of a TDR system for monitoring relative displacement in soft rock; and (3) development of a SASW system to measure shear modulus profile in soft rock. The work planned for this year includes (1) study of dielectric properties and spectroscopy of soft rocks; (2) quantitative analysis of TDR deformation monitoring; (3) analysis of surface wave seismic survey. This report briefly describes the study result of this year.

Keywords: Soft Rock, Time Domain Reflectometry, Spectral Analysis of Surface Wave

二、計畫緣由與目的

台灣中北部(桃園至台中)麓山帶地區出露之地層，在地質年代上均屬於甚為年輕之地層，屬於『極軟弱至軟弱』之岩石。其組成之砂岩固結差、膠結不良、且遇水容易軟化。構築於此類地層之地工結構物常因軟岩之弱化而產生滑動破壞[1,2]。

由於此等介乎土壤及岩石間大地工程材料之性質與工程行為仍非十分確，86至

88 年間由潘以文教授擔任總計畫主持人，結合不同專長之研究人員，共同完成了『極軟弱年輕砂、頁岩層之力學行為』整合型研究計畫。其探討之問題包括：如何取得完整不擾動的試體？如何獲得足具代表性之岩石性質（包含自然及岩石之岩相組成，單軸、三軸強度，剪力強度，應力-應變行為，透水性，波速，依時行為，砂頁岩界面的力學特性）？其弱化機制如何？力學行為如何？如何估計岩石經重模後材料之力學特性及最佳之夯實方法？工程分析所需之力學參數如何研訂？參與之人員研發出改良式之軟弱岩石取樣與保存技術、適合軟弱岩石使用之高壓傍壓儀試驗（pressuremeter）儀器、多功能軟弱岩石孔內試驗裝置、改良式之現地透水試驗方法、適合軟弱岩石使用之高壓三軸試驗儀器、以及 suspension P-S Logging 現地波速量測技術之引進。參與人員已使用這些新開發或引進的試驗技術，進行了一系列之現地取樣、試驗與室內之試驗，提出了決定極軟弱岩石材料力學參數之程序與數值模擬之方法。

軟岩的基本力學性質及其量化之實驗工具已於前期研究得到相當大之進展，但土工結構物構築於此類地層之分析與設計，在國內外相關文獻報導都有限，仍需進一步研究。在未來的數年中本研究小組希望延續前期研究之努力，將現有之研究成果與工程設計施工結合。本計畫為整合性計畫『極軟弱岩石之大地工程行為』中的一個子計畫。其他四個子計畫將針對土工結構物中之深基礎、淺基礎、邊坡、及隧道進行破壞機制之研究並提出分析與設計之方法。本計畫之目的在於延續前期計畫，利用電磁波與表面波決定軟岩之物理性質與工程性質。合併前期研究之成果提供其他子計畫分析所需之參數。提供其他子計畫於模型試驗與現場試驗中研究破壞機制所需之監測工具，並架構遠端控制之監測系統，用以監測土工結構物構築於軟岩地層之表現。本計畫在本年度擬完成之主要研究項目包括：

1. 軟岩電學性質及其量測方法之研究
2. 軟岩變形監測之量化分析與感測器之改良

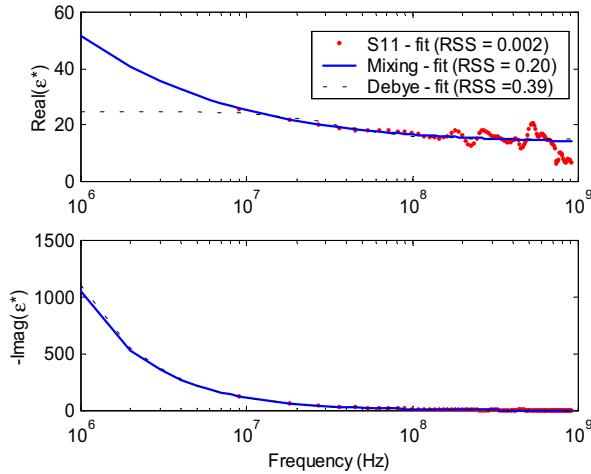
3. 表面波震測資料之分析。

三、結果與討論

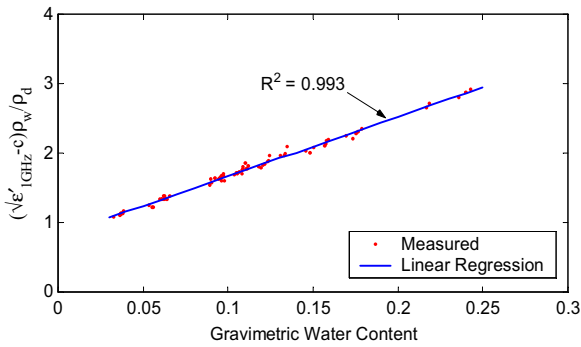
軟岩電學性質及其量測方法之研究

上年度所建立之時域反射量測系統包括一時域反射儀及同軸感測器，由此量測系統所量測到之 TDR 波形可經由頻譜分析計算感測器內部材料之導電度（conductivity）及介電頻譜（dielectric spectrum，介電度隨頻率之變化）[3,4]。本研究嘗試利用三種不同之方式推求地質材料之介電頻譜，如圖一所示，S11-fit 為直接求解各頻率之系統函數，Mixing-fit 為利用體積混合率[3]模擬介電度之頻散曲線，再由 TDR 波形反算體積混合率之參數，Debye-fit 則使用 Debye 模式模擬介電頻散。結果顯示 S11-fit 方法所能量測之範圍介於 9 MHz ~ 1.5 GHz，但由於高頻資料之誤差及系統函數於高頻之複雜度，較可靠之量測結果在 200 MHz 之內，Mixing-fit 及 Debye-fit 方法可得到較為平滑之介電頻散曲線，但其介電模式必須能夠具有足夠之自由度以含蓋材料實際介電度於量測頻率範圍內之變化，以地質材料而言，Mixing-fit 之方法優於 Debye-fit。結果亦顯示，儀器之頻寬可介於 20 kHz ~ 1.5GHz，若改良感測器之設計及標定之方法，可望提高高頻量測之準確度，若增長取樣時間或利用非均勻取樣理論，可量測到更低頻之介電度。

在地質材料之介電性質方面，由軟岩之重模試體所得到之結果顯示，介電頻譜受到土壤種類、含水量、及土壤密度等之影響。而土壤種類對於高頻介電度之影響較小，因此可利用高頻介電度獨立量測地質材料之含水量，如圖二所示，在 1 GHz 之介電度經由土壤乾密度之正規化後與土壤含水量成線性關係[4]。結果亦顯示，導電度與低頻之介電度包含土壤種類、孔隙水、及微觀結構之訊息，但其量化分析仍須進一步之研究，若能配合更低頻之量測，對於軟岩物理性質、微觀結構、及孔隙水特性將有很大的助益。



圖一 介電頻譜之量測

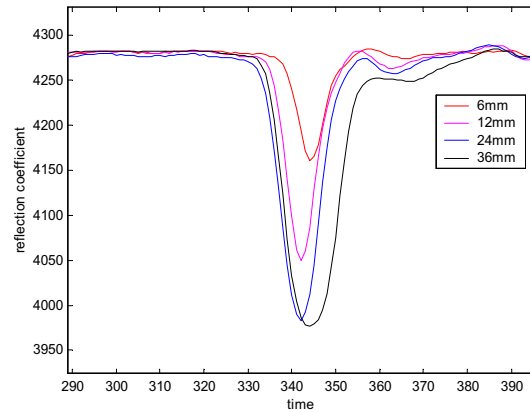


圖二 高頻介電度與含水量之關係

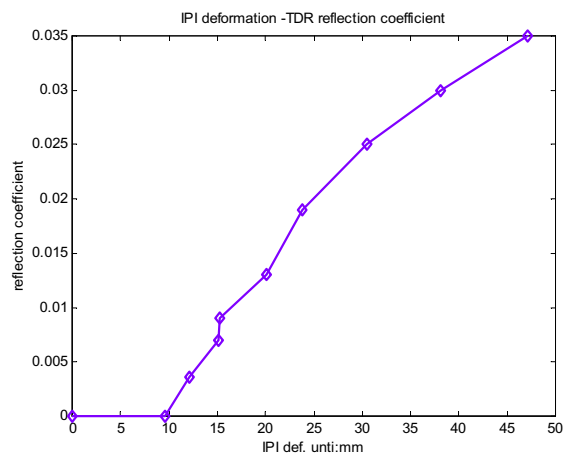
軟岩變形監測之量化分析與感測器之改良

傳統 TDR 變形監測之量化分析係透過實驗室之直剪實驗，配合 TDR 反射訊號之量測，建立相對變形與 TDR 反射訊號幅度間之經驗關係。但這些經驗公式因不同的量測系統、電纜長度、剪力帶大小而有差異，且此方法不適用於有多重反射下之訊號。圖三顯示同樣變形為 6 mm 但具有不同變形寬度之反射訊號，雖然變形量相同，但反射係數因變形寬度不同而有很大的差異，TDR 訊號之反射主要取決於電纜之電學阻抗，因此將變形剖面與阻抗剖面相關聯應為較合理之方法，本研究已完成波形分析之數值模式，可由波形分析反算電學阻抗。電學阻抗與變形量之關連性具有唯一性，但埋設於土體內部之 TDR 電纜，其實際變形之機制及形狀較為複雜，本研究目前所完成之數值模式為離散式之模式，對於連續變形之模擬需要將電纜區分為許多微小元素，因此反算分析之速度與

可靠度不佳，進一步之研究將改良分析與反算方法。過去之量化分析主要由室內試驗得到，其試驗之邊界條件與現地狀況並不相符，本研究利用無線通訊及自動化資料擷取系統建立遠端控制之變形監測系統，並於現地進行足尺寸之邊坡滑動試驗，邊坡之實際變形量由定置型傾斜儀測得，TDR 反射係數與變形量如圖四所示，本試驗之結果顯示，雖然 TDR 之量化分析尚未完成，但反射係數之變化速率可有效反應邊坡之穩定性。除上述之理論分析外，目前正進行變形標定盒之設計，使室內試驗之邊界條件與現地試驗相符。此外，本研究亦得到改良感測電纜之方法以增加其靈敏度，並利用時域反射法之原理製作伸縮計以配合感測電纜進行變形監測[5]。



圖三 TDR 反射訊號

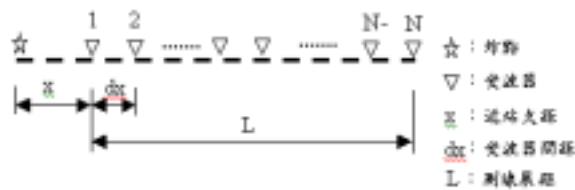


圖四 TDR 反射係數與變形之關係

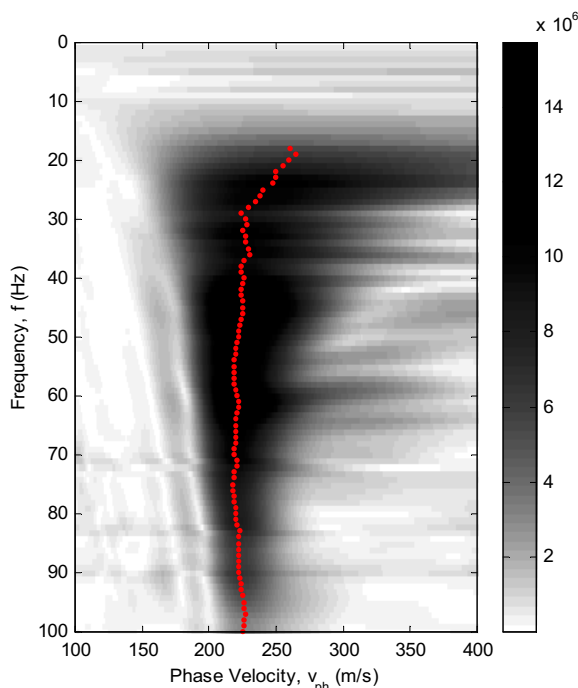
表面波震測資料之分析

本研究探討以先進之多頻道式表面波震測法量測地層之剪力波速，使用一般多

頻道折射震測儀，將一串受波器與震源排成一列，紀錄震測資料，如圖五所示。利用先進之二維訊號識別計算頻散曲線，再由頻散曲線透過反算方法求得剪力波速。相較於傳統表面波譜法，多頻道表面波震測可以改進傳統表面波譜法之問題，以波場轉換分析多頻道震測資料更可避開相位調整之問題，且可以在 $f-v$ 域「看到」頻散曲線，得知可由試驗得到頻散曲線之有效範圍，如圖六所示，可提昇頻散曲線計算之準確度及可靠度。本文亦探討施測因子對波譜轉換之影響（如圖五所示之 dX 、 $X1$ 、 L ），其中受波器間距造成之空間映頻混擾可由其與頻散曲線之不同特性分辨之，而不同測線展距在多重振態地層中所得之「有效頻散曲線」，則必須在反算分析時考慮理論頻散曲線之相容性。利用多頻道波譜轉換法可有效地整合表面波震測與折射震測[6]，亦可利用如反射震測之 Roll-along 施測方式，快速地探測地層變化。



圖五 表面波震測施測因子



圖六 由多頻道波場轉換求得頻散曲線

四、計畫成果自評

本研究主要包含三個部分，各部分大致上已達成預期目標，部分研究成果已超越原計畫內容，而部分研究亦發掘新的問題，這些問題對於後續之研究亦極具意義。本研究之成果對於地質調查與監測具有高度的應用價值，在電學性質及其量測方法之研究方面已完成兩篇學術論文被國際期刊接受[3,4]，在變形監測方面之成果也正進行專利申請[5]及學術論文之發表，表面波震測之部分研究成果將於2002岩盤工程研討會中發表[6]，其他成果[7]也將陸續投稿至國際學術期刊。

五、參考文獻

- [1] 蘇英豪(1994)，”北二高關西至新竹段沿線邊坡坍塌整治方案彙集報告”，國道建設技術研討會論文集，pp.69-87，民國83年。
- [2] 董家鈞、廖志中、潘以文(1999)，”臺中大坑地區軟岩邊坡崩滑型態與機制之探討”，第八屆大地工程學術研究討論會論文集，民國88年8月，屏東，1616-1627。
- [3] Lin, C-P (2002a), “Analysis of a Non-uniform and Dispersive TDR Measurement System with Application to Dielectric Spectroscopy of Soils,” Water Resources Research, in press.
- [4] Lin, C-P (2002b), "Frequency Domain versus Traveltime analyses of TDR Waveforms for Soil Moisture Measurements," Soil Sci. Soc. Am. J. in press.
- [5] 林志平、湯士弘（民國91年），”時域反射伸縮計，專利申請。
- [6] 林志平、張正宙、鄭孟雄（民國91年），”以多頻道表面波量測地層之剪力波速”，2002岩盤工程研討會。
- [7] 張正宙（民國91年），”多頻道表面波震測之研究”，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

