

軟弱岩石之探勘與監測

Characterization and Field Monitoring in Soft Rock

計畫編號：89-2218-E-009-104

執行期限：89年08月至90年07月

主持人：林志平 國立交通大學土木工程系 助理教授

一、中文摘要（關鍵詞：軟弱岩盤、時域反射法、表面波譜法、貝氏機率理論）

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。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定，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做監測，本計畫擬研發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、以及地層相對位移之監測。本研究為『極軟弱岩石之大地工程行為』整合型研究計畫之子計畫（五），主要目的是延續前三年所執行『極軟弱年輕砂、頁岩層之力學行為』整合型研究計畫之成果，本子計畫分三年執行，專注於利用電磁波與表面波決定軟岩之物理性質與工程性質，並利用時域反射法建立遠端控制之監測系統，用以監測地工結構物構築於軟岩地層之表現。本年度預計完成之工作項目包括（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）表面波譜法試驗與分析系統之建立。本報告簡述本計畫之執行成果。

英文摘要（keywords：Soft Rock, Time Domain Reflectometry, Spectral Analysis of Surface Wave, Bayesian Theory）

The outcrops in northern and central foothill regions of Western Taiwan are young or very young according to their geological age. They can be classified as “very weak to weak” rocks. The sandstone that constitutes part of these soft rocks is often poorly consolidated, weakly cemented, and prone to soften when exposed to

water. Geotechnical failure often occurs in soft rock due to the soft 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 the sub-project (5) of a collaborated research on “Engineering Performance of Geotechnical Systems in Very Weak Rock”. It extends an earlier collaborated research project on “Mechanical Behavior of Very Weak Sandstones and Shales”, conducted in the past three years. The aim of this three-year research is to use electromagnetic wave and seismic surface wave to characterize the physical and engineering properties of soft rock. It will also develop a monitoring system based on time domain reflectometry to monitor the performance of geotechnical structures in soft rock. The main objectives set for this 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. This report briefly describes the status of the research.

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，常含極軟弱至軟弱之岩石。由於其組成之砂岩孔隙大、透水性高，普遍具有固結差，膠結不良、遇水極易軟化之特性，本地區之邊坡於豪雨或開挖後，於砂岩體內常產生局部之侵蝕破壞或沿頁岩面上產生各種形態之大規模岩層滑

動，例如北二高關西至新竹段施工時曾產生二十多個邊坡滑動皆屬此類型態之邊坡滑動[蘇英豪，民國 83 年]。此外，大規模之山坡地工程中常於大填方或挖方整平之基地上構築結構物，或由於填方區夯實不良，或由於岩層受風化作用產生軟化現象，常使基礎承载力及沉陷量不易估計，而產生基礎沉陷以致造成房屋龜裂之現象（例如新竹青草湖附近某高級社區）。此類地層常發生大地工程災害，探究其原因乃是對於此類地層之力學行為與材料組成律等未完全掌握，而未採用適合之分析方法及施工方法所致。

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明確，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。這些成果已在國內外相關之學術會議中發表，『多功能軟弱岩石孔內試驗裝置』並已獲得專利（黃安斌等，2001）。

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，但地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地工

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(一)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。(二)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。(三)架構遠端控制之監測系統，用以監測地工結構物構築於軟岩地層之表現。本計畫在第一年內擬從事之主要研究項目包括：

1. 軟岩電學性質量測系統之建立。
2. 岩石相對變形量測系統之建立。
3. 表面波譜法試驗與分析系統之建立。

三、計畫執行狀況

軟岩電學性質量測系統之建立

時域反射儀 (Time Domain Reflectometer, 亦簡稱為 TDR) 由電磁脈衝製波器、通訊電纜、及視波器組合而成，由製波器發射一電磁脈衝經由同軸電纜進入感測器，並由視波器紀錄由於電纜阻抗不連續所造成之反射。藉此反射訊號，可量測材料之電學性質。目前已購置時域反射儀之主機及設計製作量測軟岩試體之感測器，試驗之組立如圖一所示。感測器為一同軸量測系統，同軸為直徑 4 mm 之不鏽鋼導體，外側導體則由內徑 5 cm 之鋼環所組成，此感測器之長度為 10 cm，同軸感測器之上方為一轉接頭，連結同軸電纜與同軸感測器。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) (Lin, 2001)，TDR 波形之擷取已透過電腦自動化 (如圖二)，可適當控制取樣頻率 (sampling frequency) 及取樣視窗 (sampling window)，以利頻譜分析之運算。材料之電導度可利用 Giese and Tiemann (1975) 之電磁波理論由波形之穩態反應直接求得，介電頻譜可經由量測訊號之系統分析求得，將反射訊號之富立葉轉換除以脈衝產生器之入射訊號可得 TDR 量測系統之系統函數 (System function, S) 之量測值，此量測值必須等於量測系統之理論系統函數，理論系統函數為纜線阻抗、纜線傳遞常數、纜線長度、與邊界條件之函數。經由解在不同頻率下之系統非線性函數可以得到不同頻率之介電度，如此可以得到介質之介電頻譜。

岩石相對變形量測系統之建立

利用 TDR 監測相對變形所使用之儀器與前項所使用之儀器相同，唯一的差異在於與土體或岩體接觸的部分。變形的量測不需要特別設計之探測頭，可直接選取適當的同軸電纜(Dowding et al., 1989)。傳統的方法透過實驗室之拉力與剪力實驗，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 (Su, 1987)，以量化相對變形之大小。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。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，圖三顯示電纜相對變形與組抗剖面標定試驗之組立，利用不同寬度之墊片於同軸電纜上加壓形成不同形狀之變形，現正進行電學阻抗剖面之反算與變形幾何之比較。此外，為能夠有效監測地工結構物構築於軟岩地層之表現，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，系統元件如圖四所示。

表面波譜法試驗與分析系統之建立

由於頻譜儀(Spectral Analyzer)的成本昂貴且頻道數少，傳統之表面波頻譜法 (SASW) 採用兩個受波器的方式依不同之探測深度改變受波器之間距；因為僅使用兩個受波器，試驗過程繁瑣，且不易分辨基態表面波與高次模組之表面波或雜訊。本計畫採用 Park et al. (1999)所建議之多頻道式表面波探測法，將一串受波器與震源排成一列(如圖五所示)，透過多頻道信號之比較，可容易判斷出有效之雷利波及無效之雜波，依據判斷得之雷利波與雜波特性，選擇適當之濾波方式率除雜訊增加 S/N 比，可增強低頻訊號及探測深度，因此可使用較高自然頻率之受波器。本計畫結合交通大學大地工程試驗室現有之折射/反射震測儀，增購 24 個 4.5Hz 之受波器及電纜，成為一套多頻道式表面波探測系統，現正進行測線參數之研究，決定適當之受波器間距、近支距、遠之距(如圖五所示之 dX 、 X_1 、 X_{max})，並研究如何將折射震測或反射震測與多頻道表面波探測結合。

四、參考文獻

蘇英豪『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。

黃安斌、房正國、廖志中、潘以文、2001，"高壓多功能孔內試驗裝置"，中華民國專利，發明第 130458 號，專利權人行政院國家科學委員會，專利期間 90 年 4 月 21 日至 109 年 1 月 3 日。

Lin, C-P (2001), "Measurement of Dielectric Spectrum with a Non-uniform TDR System," Submitted to Water Resources Research (SCI, EI).

Giese, K. and Tiemann, R. (1975), "Determination of the Complex Permittivity from Thin-Sample Time Domain Reflectometry: Improved Analysis of the Step Response Wave form," Adv. Mol. Relax. Processes, Vol. 7, pp. 45-59.

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.

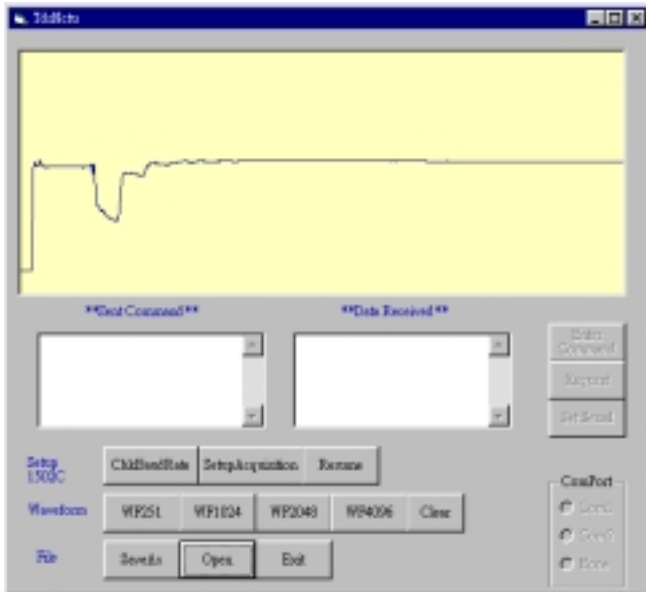
Su, M.-B. (1987), "Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry," Ph.D. Dissertation, Northwestern University, 112 pp.

Park, C. B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999), "Multichannel Analysis of Surface Waves," Geophysics, Vol. 64, No.3, pp. 800-808.

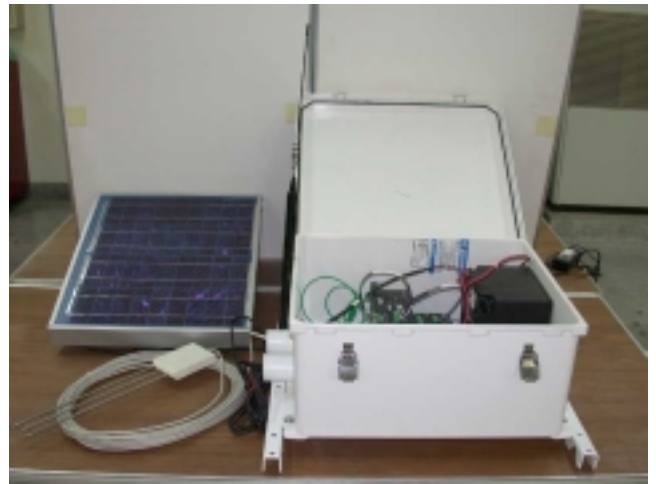
五、圖表



圖一 TDR 電學性質量測系統。



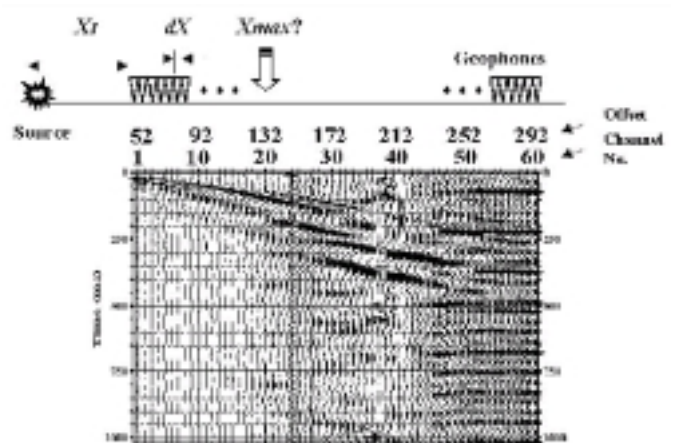
圖二 TDR 資料擷取自動化程式。



圖四 TDR 遠端監測系統。



圖三 TDR 變形量測標定試驗。



圖五 多頻道式表面波探測法。