

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

極軟弱岩石之大地工程行為 (II) 總子計畫

Engineering Performance of Geotechnical Systems in Very Weak Rocks

計畫編號：NSC 90-2611-E-009-006

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：廖志中 執行機構：交通大學 職稱：教授

共同主持人：潘以文 執行機構：交通大學 職稱：教授

共同主持人：黃安斌 執行機構：交通大學 職稱：教授

共同主持人：壽克堅 執行機構：中興大學 職稱：教授

共同主持人：林志平 執行機構：交通大學 職稱：助理教授

一、中文摘要

桃園至台中麓山帶地區出露之地層，係以上新世之卓蘭層及上新-更新世之頭嵙山層為主。卓蘭層及頭嵙山層香山相等地層甚年輕，砂岩孔隙大、透水性高，材料性質介乎土壤及岩石間。由於取樣不易，早期對其力學性質及行為甚難加以掌握，本研究群以往在國科會整合性計畫支持下，對於此等地層岩石之力學行為與性質已能初步掌握。然而，此類地層內之大地工程行為，例如邊坡穩定，基礎承載，及坑室行為一直未被有效掌握。本研究團隊擬針對此類地層的大地工程行為加以探討。共分為五個子計畫：

- (一) 深基礎在軟弱岩石中之行為
- (二) 淺基礎在軟弱岩石中之行為
- (三) 軟弱岩石邊坡中之軟岩行為
- (四) 孔穴周圍軟弱岩石之力學行為
- (五) 軟弱岩石之探勘與監測

本計畫將以三年時間進行研究工作，本報告針對各主計畫之第二年度之研究成果加以彙整。

關鍵詞：卓蘭層，頭嵙山層，軟弱岩石、基礎工程、邊坡穩定、現地試驗、數值模擬

Abstract

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 or shale that constitute most of these soft rocks are characterized as being poorly consolidated, weakly cemented, and prone to soften when exposed to water unconfined. Under the field conditions these sandstone or shale may behave as a consolidated rock. The same material however could be crushed by fingers or turn into a pile of sand when soaked in water. Because of the young age, the sandstone has relatively large voids and high permeability. Local deterioration or failure within the rock mass or massive sliding along layers of shale in rock slopes often occur as a result of heavy rainfall or excavation. The behavior of these soil/rock like geomaterials

is not well understood. Subjects such as the characteristics of the rock mass, foundation bearing capacities, mechanical behavior, stress in rock mass, suitable support systems for tunnels in these types of weak rock, relevant to foundation and tunnel designs, demand further research.

In three years, this research group intends to continue an earlier collaborated research project on “Mechanical Behavior of Very Weak Sandstones and Shales”, and extend what was accomplished in that endeavor into aspects that are applicable to geotechnical engineering designs. The proposed research includes the following five sub-projects:

- (1) Performance of deep foundations in soft rock
- (2) Shallow foundations in soft rock
- (3) Rock behavior related to slope failure in very soft rock
- (4) Behavior of soft rock around a cavity
- (5) Field characterization and monitoring in soft rock

This report presents the summarized results of each sub-project in the second year. The results include the preparation and the mechanical properties of the artificial weak rock, and the modified material model of poorly cemented sandstone, site investigation of the experimental station, TDR application, etc.

Keywords: Cholan, Toukoshan Formation, foundation engineering, slope stability, in situ test, numerical modeling

二、緣由與目的

麓山帶卓蘭層以砂頁岩互層及砂岩

夾薄頁岩層組成。頭嵛山層又可分為二種岩相，即由礫岩組成之火炎山相及由厚層砂岩、粉砂岩與頁岩組成之香山相（或通霄砂岩）[1]。此等地層甚年輕，砂岩孔隙大、透水性高，材料性質介乎土壤及岩石間。由於取樣不易，早期對其力學性質及行為甚難加以掌握，本研究群在果科會整合性計畫支持下，歷經近三年之努力，對於此等地層岩石之力學行為與性質已能初步掌握[2]。由於此地層之邊坡常於豪雨或開挖後，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[3]，及台中大坑地區常有軟岩邊坡破壞[4]。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）。此外，此等地層內地下坑室開挖後之行為及岩壓之估計、合適之支撐等問題，尚不是完全明瞭。因此，本研究群針對上述軟岩之大地工程行為加以研究

本整合型研究計畫擬達成之目的包括：

1. 深淺基礎在軟弱岩石中承載值理論之推導。
2. 建立使用傍壓儀、多功能軟弱岩石孔內試驗、與傳統室內試驗以及勁度控制直剪試驗(stiffness controlled direct shear test) 結果來估算軟弱岩石內深基礎承載值，以及基礎受壓、拉與橫向力時其與位移間關係之方法。
3. 確認軟弱岩石坡之漸進破壞與潛變之特性。軟弱岩石殘餘強度之特性。
4. 孔穴周圍之岩體在受重力或孔穴擴張之情望下，其應力/應變分佈之理論與數值分析。
5. 時域反射（time domain reflectometry, TDR）與地表波頻譜分析（spectral analysis of surface wave, SASW）之現地試驗技術來決定軟弱岩石之

層次、力學特性、以及地層位移監測技術之研發。

本文針對第二年之成果提出報告。

三、結果與討論

總計畫及各子計畫的主要成果摘錄如下：

(一) 寶山實驗站工址調查：本年度針對寶山第二水庫的實驗站進行調查。本計畫實驗站場址位於寶山第二水庫管理中心預定地附近。調查項目包括地表地質調查、鑽探、荷重試驗、孔內波速(p-slogging)，並配合其他計畫進行現地直接剪力試驗、試坑邊坡滑動試驗等。研究成果豐碩，對於工址的特性已約略可掌握。圖一為完成的地質圖。荷重試驗結果，利用simplex分析，得到加解壓階段之剪力模數 G 於65.0 MPa~119.7 MPa之間、凝聚力 c 介於0 MPa~3.216 MPa之間、摩擦角 ϕ 介於 $21.^\circ$ ~ $40.^\circ$ 、現地水平應力 P_0 隨深度而加大，介於0.145 MPa~0.333 MPa之間及極限降服應力 P_y 介於1.1 MPa~2.7 MPa之間。圖二為荷重儀試驗典型曲線。本研究進行三孔的p-slogging，結果顯示P波波速 V_p 介於1300 m/sec~2000 m/sec之間，S波波速 V_s 介於190 m/sec~650 m/sec之間，而且波速與地層岩性之比對發現，波速有隨深度變大之趨勢，而灰色泥岩之波速較黃棕色砂岩稍快。

(二) 淺基礎模型試驗及極限承載力探討：本研究進行模擬平面應變之基礎承載試驗(二個試體)；由承載曲線示意圖大致可將人造膠結不良砂岩的承載行為分為三大階段，分別

為初始階段、降伏階段及破壞階段。另外，透過繪製網格，試驗施作後依其變形經觀察結果顯示，試體破壞可分成四區，即主動受壓區、被動受壓區、主要剪裂面、及完整區。研究將承載試驗所得之極限承載力與各個理論分析所預測之極限承載力的比較，顯示出幾乎所有的承載理論分析方式所預測之極限承載力與本試驗之結果的偏差量均大；初步探討的原因為各理論分析針對的材料對象大多為凝聚性的砂土或是以硬岩為主，少有針對軟弱岩石的承載理論，加上各承載力公式中，主要的控制因子為凝聚力，而本研究製作之人造膠結不良砂岩的凝聚力偏低，故以理論預測之承載力遠低於實驗所得，不適用於預估膠結不良砂岩之極限承載力。此有待進一步將人造膠結不良砂岩之製作流程標準化，包含壓密應力與時間等因素，再以其材料參數作為比較依據，可得更佳的结果。詳細結果可參考子計劃二的成果報告

(三) 載重試驗模型基樁之製作：完成人造軟岩製作與模型基樁載重試驗所使用之試驗槽設計與機械加工。模型基樁之核心使用鋼板加工製作，此核心底部寬30mm使用30mm厚之鋼板製作。模型基樁之深度250mm，樁體之核心使用10mm厚之鋼板製作。樁體鋼板中心裝有光纖光柵用以量測樁體內部載重之傳遞(load transfer)。樁體之表面使用水泥漿製作，為防止水泥漿與樁體核心鋼板間之滑動，在樁體鋼板表面裝有許多鋼釘。在人造軟岩製試體製

作完成後將試驗槽橫向300mm x 600mm之檔版換成安裝有鑽孔之模版。鑽孔位置與FBG地層扭曲感應系統安裝位置相匹配，使用鑽機從鑽孔位置向試體內部將安裝FBG地層扭曲感應系統所需佔用空間內之軟岩鑽除，將FBG地層扭曲感應系統外層圖上樹脂然後塞入鑽孔。模型基樁與監測系統安裝完成之後即可將原試驗槽之鋼製橫向檔版復原，然後進行載重試驗。室內試驗現正進行之中，在完成一系列試驗之後將從事現有承載值分析理論之評估。詳細結果可參考子計劃一的成果報告。

(四) 邊坡漸進式破壞模擬：本研究嘗試定性模擬軟岩邊坡產生漸進式破壞之過程，令坡頂所受加載逐漸提高，以探討軟岩邊坡之破壞機制及其過程，本研究利用FLAC程式來作為定性模擬之工具，程式分析時所採用的力學模式是莫爾-庫倫塑性模式(Mohr-Coulomb plasticity model)，假設材料之峰後應力應變行為呈應變軟化(Strain-softening)特性。令岩體之強度參數從尖峰強度漸減至殘餘強度，以模擬岩體產生應變軟化的現象。模擬結果外觀現象與現地尚稱吻合，且可進一步了解岩體內的應力變化。詳細結果可參考子計劃三的成果報告。

(五) 軟弱岩石非線性依時行為(黏塑性)之二維數值模：針對軟弱岩石孔穴力學進一步發展建立可模擬軟弱岩石非線性依時行為(黏塑性)之二維數值模式，配合先前發展之棋盤式

潛在裂紋前處理器可微觀模擬裂紋成長。本研究已透過會議及討論，取得若干其他子計畫之發現(包括照片及特徵曲線)，經進一步驗證後即可以裂紋成長模擬探討軟岩相關之微觀行為。詳細結果可參考子計劃四的成果報告。

(六) 軟岩變形監測之量化分析與感測器之改良：本研究已完成TDR反射訊號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，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。詳細結果可參考子計劃五的成果報告。

(七) 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。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，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，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，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。詳細結果可參考子計劃五的成果報告。

四、計畫成果自評

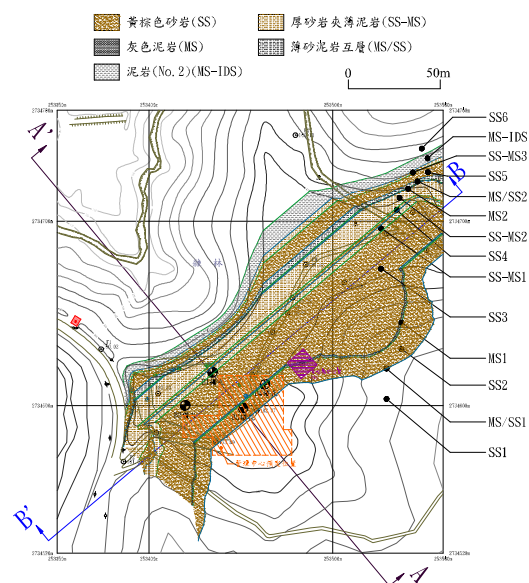
本報告為第二年之研究成果，針對台灣地區軟弱砂岩之大地工程行為加以探究，以提供土木工程分析、設計之參考。綜觀各子計畫的成果，皆能依預定進度執行，研究工作配合及成果的整合亦甚佳，未來繼續執行，應會有甚佳的整合性成果。階段性成果亦可參考個子持人指導之碩士論文[5,6,7,8,9]。

五、參考文獻

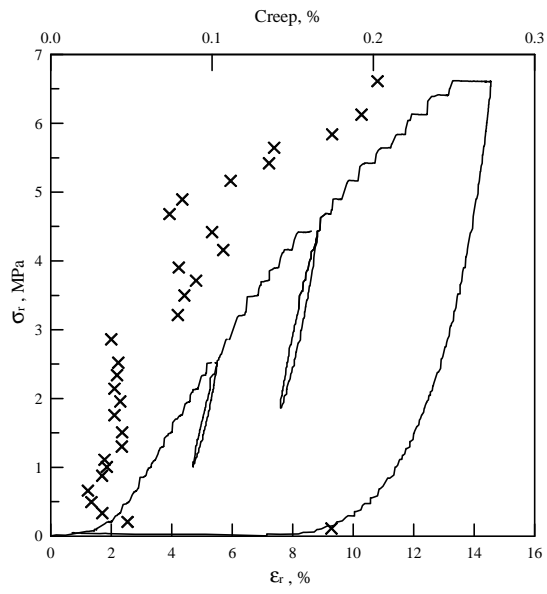
- [1] 何春蓀，台灣西部麓山帶地質，土工技術，第二十期，第 80-98 頁，民國 76 年。
- [2] Huang, A.B., Liao, J.J., Pan, Y.-W., Cheng, M.H., Hsieh, S.Y., and Peng, J.K.(2000), "Characterization of Soft Rocks in Taiwan," Proceedings of the 4th North American Rock Mechanics Symposium, July 31-August 3,

Seattle, U.S.A., pp. 83-90.

- [3] 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。
- [4] 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.
- [5] 劉英助，人造膠結不良砂岩之模型承載試驗設備建立及淺基礎承載試驗，國立交通大學土木工程研究所，民國九十一年。
- [6] 簡宜嫻（民國九十一年），『膠結不良軟岩之彈塑性模式與基礎承載模擬應用』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十一年六月。
- [7] 陳俊中（民國九十一年），『軟岩強度尺寸效應與現地邊坡誘發破壞試驗』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十一年六月。
- [8] 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。
- [9] 洪任賢，軟弱岩石之應力應變行為，國立交通大學土木工程研究所，民國九十一年。



圖一 實驗站地質圖



圖二、典型荷壓儀試驗結果