

# 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) - 子計畫三：

### 軟弱岩石邊坡中之軟岩行為

### Rock Behavior Related to Slope Failure of Soft Rock

計畫編號：NSC89-2218-E009-103

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：潘以文 國立交通大學土木工程學系

計畫參與人員：王慧蓉、曾孝欽、李程遠 國立交通大學土木工程學系

#### 一、中文摘要

年輕軟弱岩盤膠結不良強度低，其邊坡常於豪雨或開挖後常產生各種形態之大小規模岩層滑動破壞。本計畫擬針對影響軟弱岩石邊坡破壞之材料力學因素加以深入探討。年輕極軟弱岩石中，岩盤內之節理經常較不發達，不少邊坡破壞之肇因乃根源於軟弱岩石之材料力學因素。除了偏向於構造不穩定所產生之邊坡破壞（如楔形破壞與翻落破壞），軟弱岩石邊坡破壞常牽涉到（1）材料弱化、（2）因應變軟化材料強度降低至殘餘強度、（3）潛變效應、（4）局部應力過度衍生漸進破壞等材料力學機制。本計畫擬針對這些因素及其對軟岩邊坡穩定之影響等問題加以探討。

本計畫研製了可決定軟岩應變軟化特性與殘餘強度之環剪試驗儀器，此一環剪試驗儀可用以進行大剪應變之剪力試驗，並可用以進行藉應變控制之固定剪應變速率潛變試驗。未來將可利用環剪試驗儀進行一系列環剪試驗。研究中建立了一個彈塑性模式，可合理考慮軟岩的力學行為受應力歷時與應力路徑的影響。藉由彈塑性模式中適當之硬化律設計，此一模式容許考量應變軟化，且可以考慮軟岩材料的剪漲效應。將應變軟化力學模式結合數值分析工具建立軟岩邊坡分析模式，進而用以模擬軟岩邊坡經應變軟化材料強度降低至殘餘強度之應力分析與穩定平衡問題，可以用來模擬漸進式邊坡破壞發生之機制與過程。

**關鍵詞：**軟弱岩盤、邊坡破壞、弱化、潛變、殘餘強度、模式

#### Abstract

Slope failure often occurs in soft rock due to the low strength of the material. This project aims to study the material mechanics of the soft rock relevant to common slope failure in soft rock. Unlike brittle rock, soft rock often contains few joints. Many times, slope failure in soft rock can be related to characteristics of the material. Unless for slope

failure resulted from structural instability, relevant material characteristics of soft rock related to slope failure might include (1) degradation, (2) strain softening, (3) creep, and (4) local stress failure. This project will investigate these aspects and their effects on slope stability in soft rock.

This project has designed and built a ring shear apparatus appropriate for testing the mechanical behavior and properties of soft rock concerning slope stability problems. Using the ring shear test, both the peak and residual strengths can be obtained. This ring shear apparatus was designed to perform large shearing and creep tests for soft-rock specimen. A series of experiments will be carried to investigate the degradation and softening behavior of soft rock. The project also established a constitutive model with the consideration of strain softening behavior. Combined the strain-softening constitutive model with FEM analysis, it will be possible to model the progressive failure of slope.

**Keywords:** Soft Rock; Slope Failure; Degradation; Creep; Residual Strength; Model

#### 二、緣由與目的

台灣西部地區的土木工程建設有不少是在丘陵山麓地帶，而中北部地區的山地地層大部份都是以年輕的軟弱砂岩分佈。由於此等地層甚年輕，砂岩孔隙大、透水性高，本地區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泥岩或頁岩面上產生各種形態之大規模岩層滑動，過去在前期之研究工作已對軟弱砂岩之弱化問題由微觀之角度加以探討。在本階段之研究工作中擬針對影響軟弱岩石邊坡破壞之材料力學因素加以深入探討。在年輕極軟弱岩石中，岩盤內之節理經常較不發達，不少邊坡破壞之肇因乃根源於軟弱岩石之材料力學因素。除了偏向於構造不穩定所產生之邊坡破壞（如楔形破壞與翻落破壞），軟弱岩石邊坡破壞常牽涉到（1）材料弱化、（2）因應變軟化材料強度降低至殘餘強度、（3）潛變效應、（4）局

部應力過度衍生漸進破壞等材料力學機制。本計畫擬針對這些因素及其對軟岩邊坡穩定之影響等問題加以探討。第一年工作擬發展適合決定軟岩應變軟化特性與殘餘強度之環剪試驗 (ring shear test) 儀器, 本年度已初步完成儀器之設計與製作。研發此一環剪試驗儀將用以進行極大剪應變之剪力試驗, 並可用以進行藉應變控制之固定剪應變速率潛變試驗。在第一年之工作項目中, 並收集國內外相關之軟岩邊坡破壞案例, 作為後續工作之參考。

### 三、結果與討論

#### 軟岩邊坡破壞案例

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)]。有些時候邊坡破壞是因為岩體內存在幾組不連續面造成構造之不穩定, 形成諸如平面滑動破壞(plane failure)楔形滑動破壞(wedge failure)與翻落破壞(toppling)。有不少軟岩邊坡破壞發生在軟弱砂泥岩互層之地質條件中, 有時候破壞成因是在軟弱泥質岩層因泡水弱化[顏東利等(民國88年)]或在累積相當大應變之後, 經應變軟化材料強度已降低至殘餘強度, 失去穩定平衡而造成邊坡滑動之加速形成在應變軟化與殘餘強度的問題上, 顏東利等(民國89年)指出泥岩質邊坡設計強度宜考慮採用殘餘強度作為設計強度。在軟弱岩石中亦可不時產生潛變型之邊坡蠕動(creep)[Ohta, et al, 1993], 或因局部坡面傾蝕或應力集中造成局部破壞或造成連鎖破壞之漸進邊坡破壞(progressive slope failure)型態, 或因地震動態作用而發生邊坡滑動[Ishijima and Fujii, 1997; Small & Morgemstern, 1991; Leonards, et al., 1993]。

#### 軟弱岩石邊坡破壞原因討論

肇因於構成軟弱岩盤的材料之力學性質與行為特性, 軟弱岩石邊坡可能發生(1)在軟弱砂泥岩互層中軟弱泥質岩層因泡水弱化強度降低邊坡失去穩定、(2)累積相當應變後應變軟化材料強度降低至殘餘強度, 邊坡失去穩定平衡而造成滑動加速、(3)潛變型之邊坡蠕動(creep)、(4)局部坡面傾蝕或應力集中造成局部破壞或造成連鎖破壞之漸進邊坡破壞、(5)地震力作用而發生邊坡滑動。

在材料力學因素上, 軟弱岩石邊坡破壞常牽涉到(1)因應變軟化材料強度降低至殘餘強度、(2)潛變效應、(3)局部應力過度衍生漸進破壞等材料力學機制。

#### 環剪試驗儀器優點

在軟弱砂泥岩互層中軟弱泥質岩層因泡水弱化強度降低方面, 事實上考慮軟岩邊坡應變之特性, 在滑動加速之前, 材料可能已產生相當大之剪應變, 且強度因為應變軟化而降低至殘餘強度, 因此採用應變軟化及殘餘強度的觀念作為邊坡破壞分析之基礎應屬合理。Harris (1997)發現由邊坡破壞逆算分析所得之強度參數會十分接近由環剪實驗(ring shear test)所得之殘餘強度。環剪實驗本身具有十分有力之優點: 首先, 環剪實驗之試體可以承受幾乎沒有限制之剪應變大小; 其次, 在受剪過程中, 試體之剖面積始終維持固定; 第三, 試體厚度較薄, 若要進行排水試驗, 所需控制之應變速率可較為大, 因此試驗時間可以相對縮短。這些優點均不是三軸試驗、直剪試驗、甚至先進的直接單剪試驗(direct simple shear test)所能滿足的。若加以適當設計, 環剪實驗還可能可配合伺服馬達進行應變控制之潛變試驗。本計畫第一年工作已嘗試發展適合決定軟岩應變軟化特性與殘餘強度之環剪試驗儀器, 研發此一環剪試驗儀將用以進行極大剪應變之剪力試驗, 並可用以進行藉應變控制之固定剪應變速率潛變試驗。

不少學者曾發展環剪試驗之儀器, 進行大剪應變之實驗, 用以研究應變軟化與殘餘強度的問題[如Bromhead (1979)]。實驗結果證明固定體積條件下土壤內摩擦角為固定值且為不排水穩態(steady state)狀況之最小內摩擦角[Negussey et al. (1988)], 因此對於發生穩態滑動之邊坡問題最為適切, 最明顯之例子就是地震力作用之下邊坡之穩定與變形考量。由固定體積環剪試驗所得之殘餘強度特別適合邊坡之耐震分析[Stark & Contreras (1996)]。Saasa et al. (1996)也探討地震所引致之邊坡滑動問題, 他們以地震引致之邊坡滑動實際例子, 引用不排水環剪試驗結果來說明地震引致之邊坡滑動之成因。

#### 環剪試驗儀器製作

本計畫中配合其他計畫經費業已購入一套多自由度材料力學試驗系統, 此一系統容許加載包括軸向載重、橫向載重、荷載架座下方並裝置扭力制動器(torsional actuator)(圖1), 扭剪荷重儀(torsional load cell)、與扭角電子規(angular sensor)、等相關量測設備, 配合本計畫今年度中業已設計與製作完成之扭剪試體盒(圖2)與荷載系統連接(圖3), 便可構成一套高性能之環剪實驗儀。

配合該力學試驗系統之軸向載重, 將可施加垂直應力於試體。配合該力學試驗系統之伺服控制, 此一環剪實驗儀將可進行應變控制環剪。由於材料力學試驗系統本有完全伺服控制之能力, 藉由控制試體之垂直變位, 若不准垂直變位發生, 隨時伺服控制增或減垂直應力來滿足垂直變位為零, 便可作為一套固定體積式的環剪試驗儀。同理, 若採用伺服迴路控制方式, 隨時檢核垂直應力(正向應

力)與垂直變位(正向變位)之比例,隨時調整正向應力之大小,使正向應力與正向變位之比值保持定值,則可以進行固定勁度之環剪試驗。總而言之,如此之系統將可以進行包括固定正向力,固定體積,與固定勁度三種方式之環剪試驗。

此一環剪實驗儀並能夠從事應變速率控制之潛變試驗。應變速率控制之壓縮試驗及潛變試驗固然可以利用具有迴路控制功能(feedback loop-control)之力學試驗系統來進行試驗。然因潛變試驗耗時較長,此種用迴路控制之潛變力學試驗系統未必適合。為進行不同應變速率控制之潛變試驗,因此可以配合現已具有的一部可達極低慢速範圍之步進馬達,一旦銜接上環剪儀之制動系統,可用來控制環剪實驗極低速之剪應變速率,即可利用來環剪實驗儀進行潛變實驗。潛變試驗將以應變速率控制的方法來操作控制。

為求實驗用試體之一致性,未來實驗所採用之軟岩樣本將來自本整合型計畫所建立之實驗站。本計畫配合本整合型研究計畫已於交通大學校區與新竹縣寶山第二號水庫壩址分別建立實驗站,從事取樣以用於各種相關之實驗項目。

#### 應變軟化模式

在前階段的研究計畫(NSC89-2211-E-009-037)中,曾經建立了一個力學模式。三面模式是通用漸近降伏模式的特例,可用來描述材料受應力歷時之影響。藉由漸近降伏模式,應力歷時與應力路徑的影響能被合理考慮,因此可以用來模擬軟岩的力學行為,該模式曾結合FEM數值分析,用以詮釋現地試驗結果。藉由彈塑性模式適當之硬化律設計(王慧蓉,2001),此一模式容許應變軟化之考量(如圖4),且可以考慮軟岩材料的剪漲效應所造成之排水受剪下體積之膨脹變化(如圖5)與不排水受剪下孔隙水壓變化(如圖6)。將應變軟化力學模式結合數值分析工具可以用來模擬漸進式邊坡破壞發生之機制與過程。

#### 四、計畫成果自評

本計畫本年度之目標在於發展適合決定軟岩應變軟化特性與殘餘強度之環剪試驗(ring shear test)儀器,並收集國內外相關之軟岩邊坡破壞案例。

已完成之工作包括為設計組裝完成上述之環剪實驗儀器,可加無限剪應變量與可做潛變試驗之環剪試驗儀器,研究計畫中所建立的三面模式,可合理考慮軟岩的力學行為受應力歷時與應力路徑的影響。藉由彈塑性模式適當之硬化律設計,此一模式容許應變軟化之考量,且可以考慮軟岩材料的剪漲效應。將應變軟化力學模式結合數值分析工具可以用來模擬漸進式邊坡破壞發生之機制與過程。本計畫並收集國內外相關之軟岩邊坡破壞案例,作

為後續軟岩邊坡破壞分析模式研究工作之參考。

整體自評,實際執行之計劃成果接近原計畫目標。

#### 五、參考文獻

- 王慧蓉(民國九十年),『軟弱岩石之漸進屈伏模式及其應用』,國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十年六月。
- 蘇英豪(民國83年)『北二高關西至新竹段沿線邊坡坍塌滑整治方案彙集報告』,國道建設技術研討會論文集,pp.69-87。
- 顏東利、陳俊樺、秦中天、張文城(民國88年)『軟弱泥砂岩互層岩盤之公路邊坡整治案例探討』,地工技術,第七十二期,pp.13-22。
- Bromhead, E. N. (1979) "SIMPLE RING SHEAR APPARATUS.", *Ground Engineering*, 12:5, pp.40-44.
- Harris, A.J. and Watson, P.D.J. (1997) "Optimal procedure for the ring shear test", *Ground Engineering*, 30:6, pp. 26-28.
- Ishijima, Y. and Fujii, Y. (1997) "Study of the mechanism of slope failure at Toyohama tunnel, 10 February 1996", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Proc. of the 1997 36th US Rock Mechanics ISRM Int. Symp.* 1997, 34: 3, pp.519.
- Leonards, G.A.; Sotiropoulos, E.S.; Marinos, P.G.; Mourtzas, N.D.; Kountouris, P.J. (1993) "TWO CASE STUDIES OF SLOPE INSTABILITY IN SOFT ROCK" *Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks, Proc. of the Int. Symp., Athens, Greece, A.A. Balkema*, pp.1125.
- Negussey, D., Wijewickreme, W. K. D., and Vaid, Y. P. (1988) "CONSTANT-VOLUME FRICTION ANGLE OF GRANULAR MATERIALS." *Canadian Geotechnical Journal*, 25:1, pp.50-55.
- Ohta, H., Ohmori, K., Sakaguchi, K. and Nakamichi, I. (1993) "Long-term behaviour of excavated soft-rock slope" *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*, pp.15-24.
- Sassa, K, Fukuoka, H. and Evans, S. (1996) "Earthquake-induced-landslides: distribution, motion and mechanisms" *Soils and Foundations*, pp. 53-64 .
- Small, C.A. and Morgenstern, N.R. (1991) "Observations of a highwall cut in soft rock, Highvale Mine", *Canadian Geotechnical Conference, Proceedings of the 44th Canadian Geotechnical Conference, Calgary, Alberta, Can*, pp. 93/1.
- Stark, T.D. and Contreras, I.A. (1996) "Constant volume ring shear apparatus", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 19, pp. 3-11.

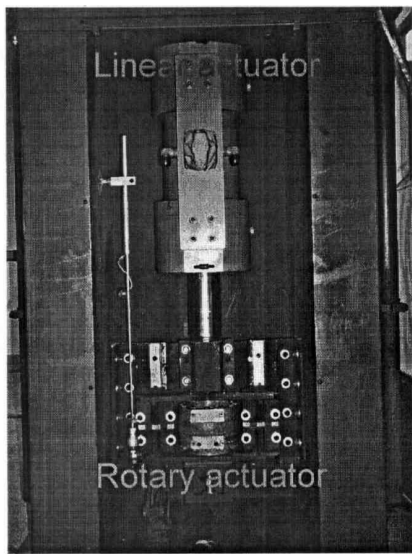


圖1 多自由度力學試驗系統制動器

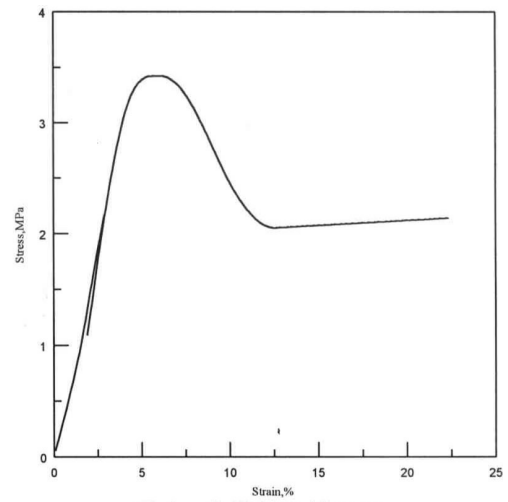


圖4 應變軟化模擬例

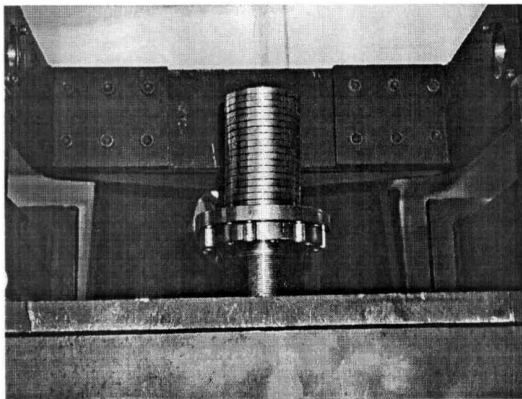


圖2 扭剪試體盒

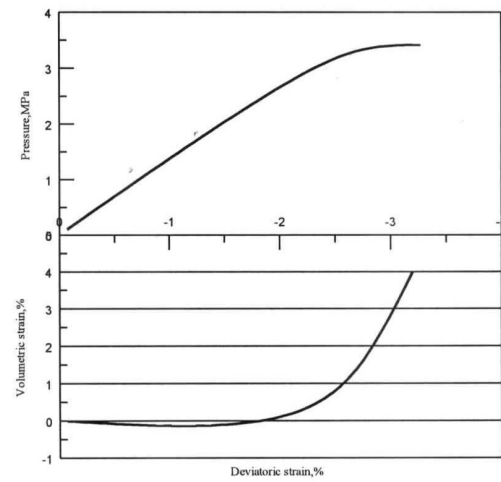


圖5 排水受剪下體積之膨脹變化模擬

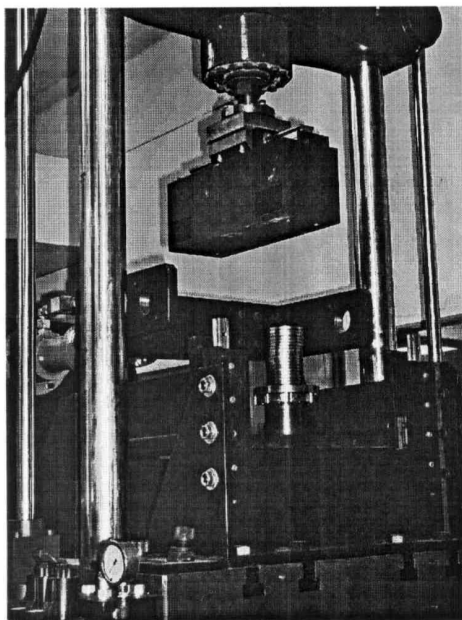


圖3 扭剪試驗示意

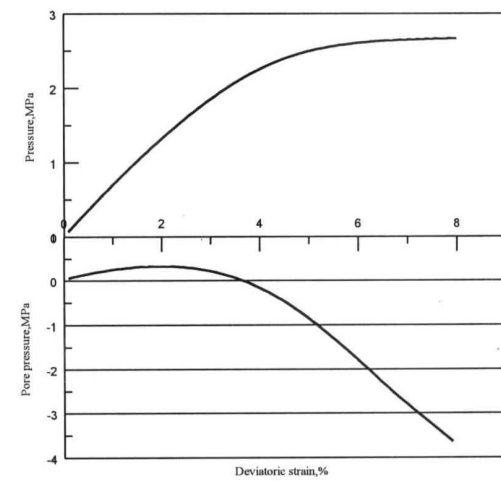


圖6 不排水受剪下孔隙水壓變化模擬