

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：NSC90-2611-E009-008

執行期限：90年8月1日至91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：陳俊中、李程遠 國立交通大學土木工程學系

一、中文摘要

膠結不良沈積岩層普遍強度低，該類岩層邊坡常發生規模不等之滑動與崩塌破壞，欲瞭解其破壞機制，需針對影響膠結不良岩石邊坡破壞之材料力學因素加以深入探討。膠結不良之軟岩其節理經常較不發達，不少邊坡破壞之肇因乃根源於軟弱岩石之材料力學因素，本計畫旨在針對這些因素及其對軟岩邊坡穩定之影響問題加以探討。

本計畫完成一套能探討軟岩應變軟化特性與殘餘強度之環剪試驗儀器，此一環剪試驗儀將可用以進行大剪應變之環剪試驗，並可控制包括固定正應力、固定勁度、與固定體積等加載條件。除儀器研製外，本計畫也發展了一套描述軟岩材料應變軟化行為之材料力學模式，此外並嘗試建立軟岩邊坡漸進破壞之分析模式，用來模擬軟岩之漸進破壞行為，以便於瞭解軟岩邊坡之漸進破壞機制與其成因與發展過程。

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 poorly cemented soft rock due to its low strength. This project studies the material mechanics of the poorly cemented soft rock relevant to common slope failure in soft rock. Unlike brittle rock, soft rock often contains few joints. A lot of times, slope failure in poorly cemented soft rock can be related to material characteristics. This project attempts to investigate the relevant aspects and their effects on slope stability in soft rock.

This project has developed a ring shear apparatus capable of applying large shear strain under various loading conditions. Besides, a constitutive model for describing the mechanical behavior of soft rock was established. Numerical simulation of the process of the progressive slope failure in soft rock was also attempted.

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

二、緣由與目的

台灣中北部麓山帶地區出露之地層，除未固結之紅土礫石層、台地堆積層、河床沖積層等以外，岩層多膠結不良，屬於『極軟弱至軟弱』之年輕岩層。本地區邊坡常於豪雨或開挖後，於砂岩體內易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 [蘇英豪，民國 83 年；顏東利等，民國 89 年；Ohta, et al, 1993；Ishijima and Fujji, 1997；Small & Morgemstern, 1991；Leonards, et al., 1993]。在膠結不良軟弱沈積岩層中，邊坡破壞除了因為構造性因素所發生者外，節理不發達之岩坡也常會發生漸進式破壞。造成漸進式破壞可能之因素包括：荷載之不均勻性、應力分佈不均局部降伏使應力重新分佈、沿滑動面強度的隨機變異性、坡腳傾蝕、坡頂擾動或張裂灌水、應變軟化造成強度與勁度下降、孔隙水壓局部變化、...等。模擬邊坡漸進式破壞也大約都不脫離能描述這些現象或因素的方式。

三、結果與討論

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必然為較合理方式(顏東利等，國 88 年；Wong 等，1996)，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。

環剪儀在求試體的殘餘強度有著極佳的優勢。然而，在過去眾多學者所使用、研發的儀器與試驗過程，卻也不免被發現存在有若干瑕疵與困難，例如：(1) 如同過去直剪一般，限制住試體的破壞面；(2) 控制系統的能力不足，導致試驗過程各方向應力、應變穩定性差，試驗方式亦受

限；(3)系統能量不足；(4)試體尺寸無法符合理論要求(應力分佈)與消弭不應存在之外在影響(固端效應)；(5)僅能使用重模試體等等。這些問題，有些隨著科技的進步，已能加以掌握或解決(如控制系統)；有些則由於難以同時兼顧或基於經濟考量，在設計、研發本系統(圖一、二)時，幾經思考、計算其影響誤差在可接受範圍後，加以捨之。

扭剪試驗目的乃為求得試體之殘餘強度。針對此需求，其目前發展與試驗規劃主要有下幾個重點：

1. 該儀器目前使用實心試體：使用實心試體，可使用現地鑽心取回之試體從事試驗。經過計算，材料在經過一定扭轉角後(60°)，假設全斷面降服與實際應力分佈狀況之誤差將小於千分之二，實可忽略。

2. 試體之上端點擁有 X、Y、Z 三個方向的自由度：一般環剪儀之試驗皆以一端固定、一端施加扭力與軸力來施加剪力，此軸力之偏心一般忽略之。本系統刻意在上部扭轉固定端加入三向滑槽，讓試體上端不能旋轉，卻能傳遞軸力至垂直 load cell 又能在水平 X、Y 方向上自由移動，以充分符合純扭的假設。

3. 使用大約 20 個厚度為 6 mm 的金屬環，層層相疊，限制試體之剖面積。每個金屬環底部鑲有數十個小鋼珠，使金屬環層層相疊時，彼此之間摩擦力減至最低試體得自由發展其破壞面。

4. 以圖控程式語言(Labview)為操作介面，整合 MTS 油壓系統與採用 WGA-710A 的資料擷取系統，使成為一部能力強大、多工，但操作介面簡單的材料力學試驗系統。

配合軸向能夠施加 250kN、175 mm 衝程、水平面 270kN-cm 扭力與可 90° 旋轉油壓缸與穩定之 MTS 油壓系統，使得材料試驗系統有能力同時做出兩個方向以上的伺服控制與資料擷取，而能夠從事固定體積、固定應力與固定勁度的試驗，充分模擬各種現地條件。

在力學模式與數值模式建立方面，本計畫採用彈塑性模式的觀念，基本上考慮材料存在一彈性範圍，在彈性範圍內，材料之組合律符合彈性之應力-應變關係，因此需要定義材料之應力屈伏面函數(yield surface or yield function)。超出彈性範圍後，則有不可回復之塑性應變，應此需要定義材料之塑性流法則(plastic flow rule)，為定義進入塑性範圍後屈伏面函數之發展，應此需要定義材料之硬化發展法則(hardening rule or evolution rule)。本計畫前階段研究成果基於類似觀念，提出了一個三面模式(three-surface model)，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; 簡宜嫻,

2002)，此一模式應該容許應變軟化之考量，且可以考慮軟岩材料的剪漲效應與不排水受剪下孔隙水壓變化。將應變軟化力學模式結合數值分析工具(如有限元素法、有限差分法、...等)則可以用來模擬大應變下應變軟化所造成之漸進式邊坡破壞發生之機制與過程。

在模擬邊坡漸進式破壞方面，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。

由定性模擬邊坡漸進式破壞例，邊坡破壞常是由於邊坡內部破壞，隨著其破壞區域之逐漸擴展，而最後破壞區域貫通形成滑動面，因此隨著邊坡內強度參數的改變，或是裂縫造成幾何面的變化等因素，邊坡內岩體的應力不可能均勻分佈，導致會有部分區域有應力應變集中的現象，若其應力超過岩體材料的強度時，該區域自然會產生局部的破壞，例如張力裂縫的產生或是坡趾的掏蝕，而當邊坡內產生局部破壞時，原本該區域岩體所承受之應力必會產生釋放或轉移的動作，使附近區域岩體必須進行應力重新調整的動作，由分析結果可知，產生局部破壞附近的區域最易受到應力轉移的影響，使得局部破壞的區域漸漸擴大，並互相延伸相連加速邊坡之破壞，邊坡漸進式破壞即在如此重複不斷地進行應力調整的動作中產生，造成破壞面逐漸地延伸擴大，由模擬邊坡漸進式破壞的結果，在破壞初期，坡頂加載區域以及軟弱薄層和坡趾交界處有局部之破壞，隨著強度參數之降低，局部破壞之區域逐漸擴大，且坡頂亦開始有張力裂縫破壞區域的產生，邊坡內的塑性降伏區域亦逐漸擴大，並往坡頂之張力裂縫方向延伸，而最後在坡趾處產生了局部的破壞面，坡頂處則產生了張力裂縫，破壞面貫穿整個邊坡，邊坡內部中間大部分產生塑性降伏的區域，綜而言之，軟岩邊坡漸進式破壞的機制即衍生於連續發展之應力調整所伴生之位移與降伏區域之發展，由定性模擬例結果即可解釋邊坡漸進式破壞的機制與過程(圖三)。

四、計畫成果自評

本計畫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。研發的儀器可以克服傳統環剪試驗儀器的缺點。

計畫中並建立的三面模式，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。

本計畫收集國內外相關之軟岩邊坡破壞案例，作為軟岩邊坡破壞分析模式研究工作之參考。本研究並藉由定性數值模擬軟岩邊坡產生漸進式破壞之過程，以示範說明軟岩邊坡漸進式破壞的機制乃衍生於連續發展之應力調整所伴生之位移與降伏區域之發展，由定性模擬例結果即可解釋邊坡漸進式破壞的機制與過程

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。

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。

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。

蘇英豪（民國83年）『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。

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。

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。

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.

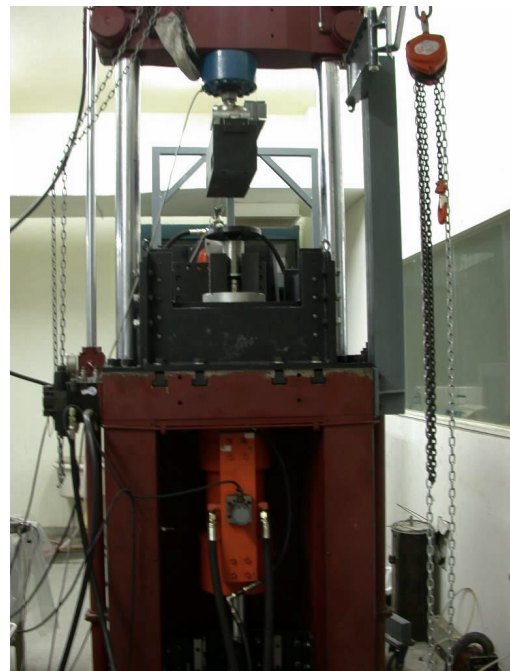
Leonards, G.A.; Sotiropoulos, E.S.; Marinou, P.G.; Mourtzas, N.D.; Kountouris, P.J. (1993) "Two case studies of slope instability in soft rock." *Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks*, Proc. of the Int. Symp., Athens, Greece, A.A. Balkema, pp.1125.

Ohta, H., Ohmori, K., Sakaguchi, K. and Nakamichi, I. (1993) "Long-term behaviour of excavated soft-rock

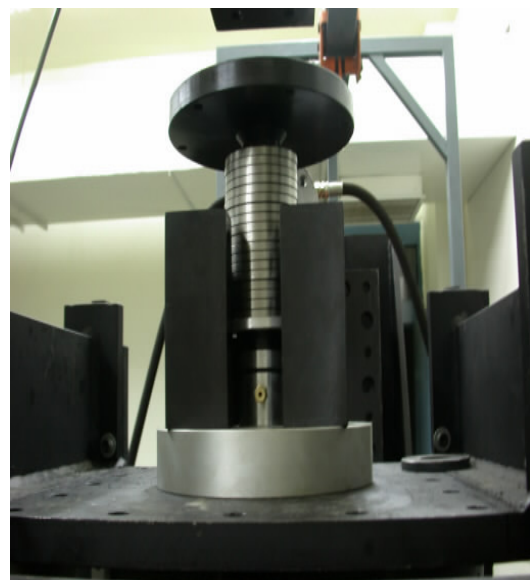
slope" *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*, pp.15-24.

Ramsamooj, D.V. and Lin, G.S. (1990) "Prediction of progressive failure in heavily overconsolidated slope", *J. of Geotechnical Engineering* v 116 n 9, p 1368-1380.

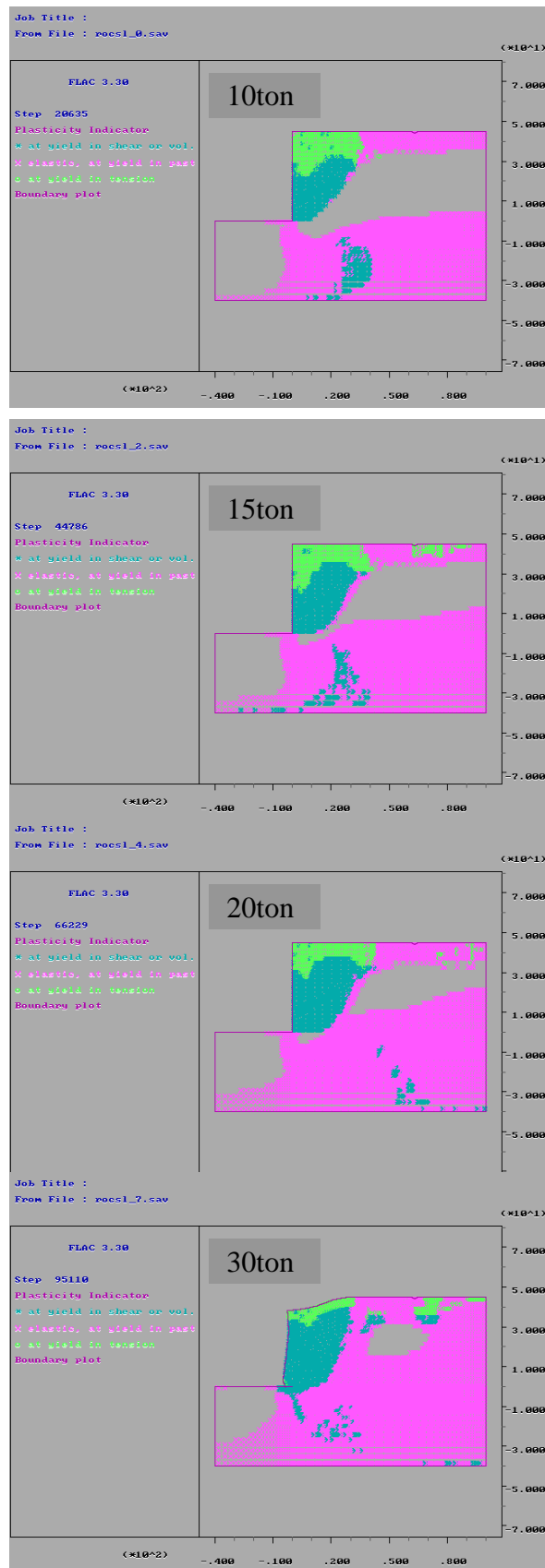
Wong, L.W., Yen, T.L., Wang, J.Y. and Chang, W.C. (1996) "Residual Strength of Mudstones of the Cholan Formation" *Proc. 3rd Sino-British Geological Conf.*, Taipei, pp.77-86.



圖一、材料試驗系統整體架構圖



圖二、試體假組立概況



圖三 漸進破壞過程中塑性降伏區域分佈發展圖