

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計劃三：膠結不良沈積岩層之邊坡行為(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-009-002-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：潘以文

計畫參與人員：李程遠、劉晉材、藍洋峻、吳東嶽

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告

膠結不良沈積岩層之大地工程行為一子計畫三：

膠結不良沈積岩層之邊坡行為

Slope Behavior in Poorly Cemented Sedimentary Rock

計畫編號：NSC93-2211-E009-002

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

全程期限：91年8月1日至94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：李程遠、劉晉材、藍洋峻、吳東嶽

國立交通大學土木工程學系

一、摘要

台灣中北部麓山帶地質常見膠結不良軟弱砂岩，此等岩性之邊坡往往易發生漸進破壞，常於邊坡滑動面產生非常大之變形前，破壞面某些局部區域就因材料應變軟化之力學性質，剪應力達尖峰強度後隨之逐漸衰減至殘餘強度。本計畫之研究宗旨在於探討膠結不良軟弱岩石之殘餘強度以及探討該種類軟岩之邊坡破壞行為。

環剪試驗為決定大地材料正確殘餘強度的最佳方法，本研究因此特別針對膠結不良軟弱岩石研發（中空）環剪儀器與試驗程序，並提出合理與簡化之力學模式以解析試驗結果，用來探討軟弱岩石之殘餘強度與材料大幅受剪後之力學行為。本研究利用此環剪儀完成包括固定正向力環剪、固定體積環剪、與反覆環剪等種類之環剪試驗，用於深入探討大剪應變下裂面形成之過程與殘餘強度之發展。

一般岩石邊坡穩定分析方法多僅考慮整體之極限破壞，然針對屬於極軟弱岩石之砂岩或泥岩邊坡而言，潛在滑動面上各點之應力與應變在全面破壞之前其分佈並不均勻，由於材料之應變軟化行為，整體滑動面大多由各局部破壞區逐漸發育而成，或謂漸進式破壞。本研究探討軟岩邊坡中漸進破壞行為，首先收集案例，分析相關之誘發機制，再研擬一系列能夠模擬不同誘發因素的數值分析模式：考慮誘發因素包含材料強度之隨機變異性、應變軟

化力學模式、地下水位變動、淺層漸進式風化與坡趾側蝕等所誘發之邊坡漸進式破壞。藉由實際案例之模擬比較，顯示本研究研擬之數值分析程序能合理地模擬漸進式破壞行為的過程與結果。

關鍵詞：軟弱岩盤、邊坡破壞、殘餘強度、環剪試驗、漸進破壞

Abstract

Progressive failure often occurs in poorly cemented soft-rock slope. Very frequently, stress concentration may result in local failure in the slope prior to the development of a full sliding surface, followed by the final large sliding deformation along the sliding surface. This project aimed to study the residual strength of poorly cemented rock and the slope failure in regions of this type of geology.

To investigate the residual strength of poorly cemented rock, a hollow-cylinder ring-shear device specially designed for testing the residual strength of soft rock was developed. An approach for data interpretation with a simplified model was also proposed. Various types of ring shear tests, including constant-normal-force test, constant-volume test, and repeated shear test, were conducted to study the evolution of the failure surface and the strain-softening behavior of poorly cemented rock under large

shear strain.

Most slope stability analyses only consider ultimate failure of a slope. For poorly cemented soft-rock slope, however, the shear strengths at various locations on the sliding surface are not fully mobilized at the same time. With strain-softening behavior, progressive failure often occurs. In this research, those possible causes or mechanisms (e.g., random strength distribution, strain-softening behavior, GWT change, weathering, and erosion, etc.) could trigger progressive failure of soft-rock slope were studied. Approaches for the numerical simulation of the possible mechanisms for progressive failure were suggested. With a series of simulation of real slope-failure cases, it appeared the analyses using the suggested approaches could reasonably simulate the progressive failure of soft-rock slopes.

Keywords: Soft Rock; Slope Failure;
Residual Strength; Ring shear test;
Progressive failure

二、緣由與目的

台灣中北部麓山帶地質多為膠結不良軟弱砂岩，普遍固結差膠結不良、遇水易軟化。考慮軟岩邊坡岩石此等材料力學行為，發生破壞之邊坡於破壞或滑動加速之前，內部之局部材料可能已產生相當大之剪應變，導致強度可能因為應變軟化而降低至殘餘強度。因此邊坡破壞分析之力學行為模型宜考慮材料會因應變軟化，尖峰強度後剪力強度隨應變漸衰減至大應變下殘餘強度，較為合理。不少軟岩邊坡破壞發生在軟弱砂泥岩互層之地質條件中，有時候破壞成因常因軟弱泥質岩層泡水弱化或累積相當大應變之後，經應變軟化材料強度降低至殘餘強度，失去穩定平衡終於而造成邊坡滑動之加速形成。Wong 等 (1996) 曾以回饋分析檢討國內卓蘭層砂泥岩互層邊坡之案例，驗證滑動面強度極為吻合殘餘強度。一般邊坡穩定分析多考慮極限破壞，假設邊坡因受豪雨或其他環境因素作用時，滑動面上各點同時發生破壞瞬間產生滑動。然針對極軟弱岩石邊坡

而言，潛在滑動面各點應變分佈不均，由於應變軟化行為，邊坡極可能呈現漸進式破壞，整體滑動面乃是由各局部破壞區逐漸發育而成。

傳統極限平衡法分析漸進式破壞之脆性土坡，係假設可能滑動面上安全細數均相同亦即滑動破壞面上各點同時破壞，但是由於滑動面上各點之應力及應變不均勻，同時坡體內可能存在裂縫或節理，因此滑動面上各點並未同時達到破壞，而是漸進式破壞，整體滑動面乃為局部破壞區逐漸拓展而成。對脆性土壤而言，土壤破壞後強度將有顯著的降低，因此在局部破壞區存在的可能滑動面上並非各點之強度均為尖峰強度，若依極限平衡以各點強度為尖峰強度分析將過於高估安全係數。

剪力試驗最常用的不外乎三軸壓縮、三軸伸張及直剪、單剪試驗，但這些試驗常不足以使材料達到顆粒重組排列的條件而得到殘餘強度。反覆直剪試驗曾被廣泛的用來求得黏土的排水殘餘強度，但是該試驗方法仍有儀器上限制，剪力盒任何一向的最大剪位移量有限，導致試體未能作用於同一個方向的連續剪變形，通常使得殘餘強度的結果較環剪試驗結果大。環剪儀最大的特色為，土壤可在任何程度的剪位移上於同一個方向連續的剪動。如此功能使得土壤顆粒於平行剪動方向可完全地進行排列，達到殘餘強度發展的條件。另外環剪試驗儀於受剪過程可保持剪力平面的斷面積。

基於此，本計畫之研究宗旨即在於探討膠結不良軟弱岩石之殘餘強度以及該類軟岩之邊坡破壞行為。對殘餘強度之探討，本研究研發一套適合膠結不良軟弱岩石之中空環剪儀器與試驗程序，並配合提出合理、簡化之力學模式以解析試驗結果，用以探討軟弱岩石完整應力應變曲線，峰後強度、與大應變下之殘餘強度性質、剪裂面上行為、以及破壞面發展如何影響殘餘強度等問題。就軟岩之邊坡破壞行為，本研究首先經由收集之邊坡破壞案例探討可能誘發漸進式邊坡破壞之因素與機制，繼而研擬一系列可模擬各種誘發漸進式邊坡

破壞之機制的數值模式，藉以闡述漸進式邊坡破壞中行為的過程。

三、結果與討論

1. 軟岩殘餘強度探討

中空環剪儀設計製作

本計畫研製一套中空環剪儀，此儀器容納之試體為內徑 4cm，外徑 7.2cm 的中空試體（如圖 1）。系統架構（如圖 2），裝置於前階段發展完成之多功能力學試驗系統上，可兼作為扭剪試驗、單剪試驗、與直剪試驗所需之加載系統。本報告僅限說明扭剪試驗部分，茲簡要說明中空環剪儀設計如下：

1. 試驗機台（如圖 3）：其中包括軸向力油壓缸與扭力油壓缸（如圖 4）。油壓缸由強詠機械製造，其動力方向供應垂直移動及水平旋轉。垂直油壓缸最大衝程為 150mm，設計安全出力為 20 噸；旋轉油壓缸最大旋轉角度為 100 度，由伺服閥以 $\pm 5V$ 電壓控制。油壓供應幫浦 (Hydraulic Power Supply, HPS) 為美國 MTS 公司製造提供試驗系統所需的動力來源並以水塔水冷式循環熱交換處理達到冷卻效果。

2. 『無平面束制』基座

頂座由六片鋼板組合成空心立方箱，反力桿穿過鋼箱下方鋼板可使之垂直移動，並置放荷重元於箱中反力桿上方。箱上方裝置兩組不同水平方向線性滑軌，提供試體水平旋轉的束制且能補償試體因偏心偏斜所造成額外的彎矩。傳統環剪儀均假設儀器上下對心，並未考量上下基座偏心的問題。由於本試驗機器體積龐大，此偏心可能造成試體斷面受不均勻應力與額外之 bending，影響結果甚鉅。由於扭剪試體在試驗過程中不斷旋轉，無法確定之應力將造成解析上的困難，所以本試驗儀選擇將水平面的束制解除。雙向自由運動之上基座如圖 5 與 6 所示。本試驗儀中之線性運動均採用 ABBA 生產之自潤式線性軌道，以減少各部摩擦。各運動部位依衝程、受力狀態不同，選用適當規格之產品，線性軌道如圖 7 所示。底座包含扭力傳遞夾具（兩塊內部供牙夾具及一根矩形鋼棒如）、上及

下扭力計接頭主要為了傳導正向力及扭力於扭剪室試體。

3. 扭力傳遞機制

驅動摩擦力所需位移，遠小於靠材料應變而產生足夠應力抵抗所需之變形。本試驗儀之扭力傳導，採用摩擦傳導機制，以求應變損耗之減少，扭力傳遞機制如圖 8 所示。

4. 扭剪室

扭剪室為一個類似三軸室設備，除方便乾燥試體做扭剪試驗外亦可供後續不排水扭剪試驗研究使用。頂座反力桿可進入扭剪室上方圓柱孔與試體接觸，但是開孔室中周圍應該要有類似滾珠裝置與反力桿身碰觸效果更佳。所設計之試體盒乃採橫向束制金屬環來維持 K_0 狀態並允許純扭轉條件，試體置於內、外環圈組之間，內、外環圈組皆是由一組極低磨擦力之滑環所組成，扭剪室如圖 9 所示。為維持 K_0 狀態，試體與環間的空隙填充石蠟，並確保蠟是否能將試體與環間填滿。本研究將石蠟以隔水加熱的方式融化，並以玻璃針筒採“壓力”注射方式填蠟，效果頗為良好。

5. 試體之固定與扭力傳遞

試體與試體盒上、下端座之接合方式，影響扭力傳遞。本計畫過去曾採用試體端部嵌入刀片方式，但可能造成試體兩端局部有明顯張力裂縫，可能影響殘餘強度，最後改採用樹脂膠結方式固定試體，效果大為改良，扭力藉由樹脂膠結剪應力傳遞底座與試體間之扭力。所選用樹脂膠適合軟岩強度，能有效傳遞足夠扭力。垂直荷重元型號 SM-1000 Interface 製造，最大安全荷重 1000 lb 量測精度 1 lb，反應頻率 3350 Hz，最大變形量為 0.127 mm。垂直位移計 Temposonic 為量測油壓缸垂直向相對位置感測計，角度計量測旋轉油壓缸相對的旋轉量單位為度數，兩者均採電磁感應且連續量測確保其線性與準確減少感測器損壞的機會。

6. 控制系統

控制系統包含控制軟體、微處理機控制機(MTS 458.20)及擷取系統。搭配本研究所用 Labview 控制程式可以將輸入的命令及輸出的資料以圖形化方式呈現並即時掌控試驗品質。MTS 458.20 有六個擴充卡槽分別有垂直向、水平向及扭轉之 DC 及 AC control 控制三種方向的位移量及力量。由於類比訊號處理上比數位訊號處理快，所以由 MTS 458.20 直接控制 P、I、D 三個控制迴路參數減少電腦資料處理的負荷。擷取系統為美商 NI(National Instruments)公司製造負責訊號的擷取經 Labview 程式轉換成為各種不同頻道的物理量。控制系統使用類比控制器 MTS458.20，控制與擷取利用同一部 PC 上執行。並以 LABVIEW 寫成操作介面，配合 MTS 油壓系統與資料擷取系統，可以同時執行雙向控制、資料擷取；而得以從事應力、應變與勁度控制試驗。圖 10 為試驗儀組立實況。

中空環狀試體製作

本研究採用的試體取自寶山第二水庫右側壩墩附近，於風化層下方約 2~3m 的新鮮岩盤開鑿岩塊，運回實驗室後，將現地岩塊敲碎製作人造砂岩試體。中空環狀試體之鑽取方法(劉晉材,2004)的步驟以下列簡要說明: 1. 製作鑽筒:筒身與筒頭的組合為鑽筒，由於鑽取方式採乾鑽，鑽取試體時筒身鑽端會大量磨損，所以採筒身與筒頭分離的方式，可以輕易更換視為耗材的筒身。鑽取中空試體必須有兩種不同直徑的鑽管，其筒身分外徑為 76mm 與 39mm，厚度均為 1.5mm，長度為 40cm 的兩種鋼管，並採用現有分別適合筒身的筒頭。

2. 鑽取試體: 以固定式鑽機鑽取岩樣時需用轉速越高、下鑽速度越慢的原則。將外徑 39mm(相當於鑽取試體內徑)的鑽筒鎖在鑽機上並將鑽筒向下接觸試體，接觸試體時需不時(約 5sec 間格)以高壓空氣灌入高速轉動的鑽筒並排除筒內岩屑，俟下鑽

試體 3cm 後提起鑽筒，以高壓空氣清除試體孔內岩渣。再開始下鑽接觸至已鑽深度，如此反覆動作直至所需試體高度為止。重複外徑 76mm 鑽筒的鑽取動作至所需試體高度即得到一中空試體。以本研究鑽取試體的經驗上應須注意以下兩點情況: (1)試體強度若較高或所鑽取面積較大(更換較大筒身直徑時)，可能須改變為不到 3cm 就要提起鑽筒排出岩屑。(2)若提起的鑽筒筒身預先以砂輪機刻畫的 45 度鋸齒有磨耗而萎縮的情形，需再以砂輪機刻畫鋸齒提高鑽取效率。

中空試體與扭剪室的上下加載版(圓型面積)扭力的傳遞由環氧化樹脂(Slink ECP-1230)負責接合試體端面與加載版，因此加載版與試體間的界面抗剪力需足夠，所以於加載版沿徑向方向刻鑿出數條深淺溝槽，試體則刻劃上下兩端各八個溝槽，以環氧化樹脂(分 A、B 兩膠)於其中膠黏，再靜置約 12~18 小時，即可發揮強度。

完整的試體製作流程詳細步驟說明如下:

1. 組立金屬套環:

將試體製作台平整擺放並以水準氣泡尺修整水平，置放一內環(軸承)於製作台直立桿，後將中空圓形紙片(內外徑為 37.5mm 及 75mm)放進內環，再將外環對齊紙片擺入，紙片和環間空隙塗黃油隔絕石蠟由此溢出。內環環向縫隙及外金屬環內溝槽異物清出並擦拭乾淨，光滑面塗潤滑油，組立至約高出試體高度，外環間內部縫隙上黃油增加潤滑效果及阻絕石蠟填入。組立後，將鋼製夾具定住外金屬環，以尼龍繩網綁夾具固定，使外金屬環保持同一鉛直線。

2. 試體修飾置放:

中空試體鑽取後，修整至所需高度(約 100mm)，以研磨機切削試體兩端使試體高度為 95mm，並以砂輪機刻劃深約 4mm 各

八個溝槽，以高壓空氣將脫離碎粒及粉塵清除，置入夾具束縛的金屬環中，並使試體置中。

3. 石蠟灌注與修整:

石蠟以隔水加熱方式成為液體，將玻璃針筒真空吸入石蠟液體，注射入套環與試體空隙至試體高度為止，但須注意勿將針筒內空氣也注入造成填充材有空隙。待石蠟硬化後，將試體溝槽及環向溢入或溢出石蠟部份以小刀刮除或修平。

4. 膠黏試體

A、B 兩膠劑量各約 1.0g 以電子秤秤重量，比例為 1:1 方式均勻攪拌。先於上下端試體八個溝槽處塗膠，再將下端最下層金屬環取出旋入特製平面軸承滾珠金屬環。上加載版塗膠約各 2.0g 劑量後，穿過特製金屬環與試體表面接觸並稍微按壓加載版調整水平高度。扭剪室下加載版塗膠，試體另一端普通金屬環取出，另一特製大金屬環放於下加載版下，將試體上加載版上端母接頭進反力桿卡榫，微微調整油壓缸至下加載版與試體接觸，大金屬環旋上試體，完整試體即完成。

環剪試驗結果解析

軟弱砂岩屬脆性材料，受剪初期，材料尚處於理想的線彈性行為，當達到尖峰剪力強度(Peak shear strength)後，隨應變量增加剪力強度漸漸遞減，最後至一定剪應變後，剪力強度趨於穩定，達到殘餘剪力強度(Residual shear strength)。本研究係假設一簡化應變軟化模式，由扭力-扭轉角關係反算尖峰強度及殘餘強度等參數，用以處理環剪試驗結果解析。

試驗結果與討論

本計畫中利用此中空環剪儀完成包括固定正向力環剪、固定體積環剪、與反覆環剪等試驗，用以探討大剪應變下裂面形

成之過程與殘餘強度之發展。限於篇幅，本報告僅呈現典型固定正向力環剪、固定體積環剪、與反覆環剪等試驗之結果，詳細內容請參考藍洋峻等論文。圖 11 為固定正向力為 1500N 下環剪之扭力-扭角與膨脹量-扭角圖。由扭力-扭角曲線可看出初始段成線性、之後達尖峰段，過尖峰後扭力逐漸下降至殘餘段之殘餘扭力。由膨脹量-扭角曲線可看出除了一開始的一小段體積壓縮，尖峰前試體大體穩定膨脹，峰後體積則不再明顯繼續膨脹，至殘餘段體積大致維持穩定。由初始線性段可計算彈性剪力模數，由最終殘餘段扭力可計算殘餘剪力強度。利用簡化應變軟化模型(剪應力-剪應變曲線可藉由某一個三折線描述，可由彈性剪力模數、尖峰強度、殘餘強度、與對應殘餘強度之剪應變定出)，再配合數值分析最佳化反可算(令模擬計算出扭力-扭角曲線最接近實際試驗所得之扭力-扭角曲線)，即可推估得尖峰強度與對應殘餘強度之剪應變大小。計算原理請參考藍洋峻論文(民九十四年)。由數個不同正向力之環剪試驗可獲得試體在不同正向力下分別之尖峰剪力強度與殘餘剪力強度，便可推得尖峰強度參數與殘餘強度參數。

當岩層深度較大，若受週遭岩層束制，不允許剪動面體積變化，則受剪行為將近似固定體積之條件。圖 12 為初始正向力 380N 下固定體積環剪試驗之扭力-扭角與正向力-扭角圖。等向性線彈性行為在理想純剪狀態不應有任何體積膨脹，受剪初期初始正向力增量理應為零。受剪初期產生正向力起伏，可歸諸系統儀器穩定性問題。由彈性段後扭力值隨剪動量增加而增加，材料在不允許體積應變之發生，材料發展的正向力只能隨扭剪角增加而升高。

當環剪試驗應力應變曲線發展至穩定之殘餘狀態時，伴隨近乎水平裂面產生，此時裂面上的相互阻抗即為殘餘強度。此時，該裂面上之行為其實應類似岩石的節理行為，而節理面上的不規則面受剪行為

對殘餘強度發展十分重要。

圖 13 為正向力 1000N 下反覆環剪試驗之扭力-扭角與膨脹量-扭角圖。反覆循環剪動之扭力-扭轉角曲線之阻滯圈覆合性非常高，曲線除第一階逆向剪動扭力值(絕對值)稍大外，其餘循環曲線皆相似。若比較各循環之 0 度與 30 度位置殘餘扭力值，經過第一階剪動後之雙向殘餘強度變化率大，其餘幾次循環皆微幅起伏。由剪脹曲線觀察，隨初始塑性變形的膨脹產生，經過循環後之膨脹量曲線皆開始剪縮，由兩向剪動磨損使曲線類似鐘擺行為而裂面漸漸壓縮。受第一階循環後之剪縮潛能漸穩定，變化量幾乎維持固定。研判環剪試驗待試體水平裂面產生後，再經反覆循環剪動，裂面顯著有磨耗現象，但隨循環次數增加磨損率越低漸趨穩定。

2. 軟岩之邊坡破壞行為探討

軟岩邊坡漸進式破壞

針對邊坡失去穩定之力學破壞的原因大約可以歸納為兩大類，(1)剪應力增加：如土壤因降雨而使其含水量增加，進而使其岩體單位重量提高；亦獲坡頂增加荷載；或因地震或爆炸等外力皆能觸發其剪應力增加；或因坡腳受沖刷、侵蝕等幾何條件改變，致使邊坡內材料應力重新調整。(2)剪力強度降低：如材料因受風化影響導致剪力強度下降、水位上升使有效應力下降進而剪力強度降低、...等。

岩石邊坡破壞模式因現地地質條件及地質構造之變化可能十分複雜，不同的學者有不同的分類方法，提出岩石邊坡之四種破壞模式，分為(1)圓弧破壞(2)平面破壞(3)楔形破壞(4)傾倒破壞等四種。其中圓弧破壞大都發生在及破碎的岩盤或性質近似土壤之岩盤；平面破壞大都發生在順向坡且沿著層面發生的機率最大；楔形破壞則係兩個不連續面之交線出露在坡面上方會產生；傾倒破壞則大都發生在岩層不連續之傾角接近直角，或是岩塊重心向外傾斜以超出岩塊之投影面時較易產生。依滑動速率不同或破壞的力學機制不同，就分析及設計的觀點而言，主要可分為：(1)

滑動模式(Sliding)，又可細分為均質土壤或軟岩邊坡之弧形破壞及構造岩坡之平面(單向弱面傾向坡外)與楔形破壞(兩組弱面交線傾向坡外)；(2)傾倒模式(Toppling，葉理或其他單組規則弱面傾向坡內)；(3)落石模式(Rock-falling，單粒或成群)；(4)流動(Flow，土流、泥流、土石流、岩屑流、雪崩及火山灰流等)；(5)側向展滑(Lateral-spreading，上硬下軟地層)；(6)複合模式(Composite，上述任兩種以上之組合)。本文內將破壞型態依破壞之發展不同分為兩大類。第一類將其定義為瞬間型破壞，亦即邊坡產生有破壞的行為時是瞬間發生地，破壞非持續緩慢逐漸發展而來，先前學者所提出之破壞模式，若發生破壞行為係非常突然者，則視為瞬間型破壞。而第二類為漸進式破壞，由於應力-應變之不均勻分布，有些邊坡之破壞就像撕破紙張一般地漸進發展而成。這種破壞面漸進式的發展與延伸，最後也終究可能形成整體邊坡的破壞，即為本論文探討之『邊坡漸進式破壞』。

至於常與漸進式破壞模式混淆的“後退式破壞”，其力學機制為主要是由於坡趾被移除(如人為開挖或河岸沖刷等)，使邊坡下部因變形而產生滑動，進而促使其斜坡的上部失去支撐，引起斜坡上部相繼向下滑動。一般而言，後退式滑動的速度比較緩慢，但破壞範圍會逐漸向上坡方向延伸，且其影響規模亦會逐漸擴大。

此處將邊坡破壞型態分類成若干破壞模式的主要目的，乃是便於瞭解邊坡破壞時之力學機制及破壞原因，將各個邊坡破壞型態適當的分類後，方能根據不同的破壞模式，建立不同的分析模式及分析方法。

土壤邊坡之破壞模式大多受到材料因素與幾何條件所控制。土壤邊坡穩定分析方法可概分為極限平衡分析法與連體力學應力分析法。

至於岩石邊坡由於破壞模式大都為受到既有構造(各種不連續面)控制之破壞模式。但對於非常破碎或極端軟弱之岩石材料也不能仍不無可能產生類似土壤邊坡之破壞模式。一般需先藉由立體投影圖進

行運動學分析(kinematic analysis)判斷是否某種破壞模式之運動性條件，若有，則進一步進行力學平衡分析，以決定安全係數。

數值應力分析方法在邊坡穩定分析上之應用，仍常以分析較複雜情況為主，在大地工程實務上，一般性之穩定分析仍多採極限平衡法作，不過數值應力分析方法卻能作為佐證的好工具，兩相比較進而作出最準確地判斷。

不論為何種邊坡穩定分析方法均有其優缺點，如針對極限平衡法而言，其法之長處在於能簡易地提供於分析者一個明確的安全係數，來加以判斷其穩定性，然而，對於所獲得之可能破壞面乃以假設而來，並不能準確地表示可能破壞面的真實位置，同時與其所對應的安全係數之定義是否為考量破壞面上與破壞面以外之材料性質所反映的真實力學行為，仍有可議之處。反之，數值應力分析方法雖能結合材料特性的組合律來加以研擬應力與應變狀況，似較極限平衡法嚴謹，但卻並不易直接輸出所分析邊坡之安全係數，給予分析者直觀上對穩定性的研判。所以，結合各方法之長處，避免其短處以便更符合實際現地邊坡的分析方法已是目前所要求之趨勢。大地工程問題(如：邊坡穩定與基礎承載等)皆多以傳統的極限平衡分析法來判定安全係數，然而若需考量材料變形性時，則是需以有限差分法或有限元素法來模擬分析較為合理，但針對變形分析法其安全係數的制定則需多加以定義。『剪力強度折減』可說是運用數值應力分析以決定邊坡穩定分析安全係數的另一類概念。安全係數的定義是土壤實際剪力強度與折減至破壞時之剪力強度兩者的比值。自從安全係數之定義如同剪力強度折減因子時，藉由有限元素程式將土壤剪力強度折減至坍塌發生時，進而可獲得對應之安全係數。

漸進式破壞，係指邊坡破壞並非一瞬間突然發生的，而可能是為局部破壞逐漸累積、發展而成的。軟岩邊坡更易由於坡內岩體裂縫伸展、或材料性質軟化、或環境

漸進風化、亦或應力集中等因素，致使邊坡內部分岩塊應力或應變過大，因而促使潛在滑動破壞面某部分逐步發生局部破壞，而這局部破壞之岩石剪力強度將由原來尖峰強度驟降為殘餘強度，並將原來承受額外剪應力，部分轉嫁至鄰近未受破壞岩塊，而未破壞岩石的剪應力因而增加，倘若未破壞岩石所承受剪應力超過其尖峰剪力強度，亦或有過大變形產生，擴展局部破壞區範圍，破壞行為可能因骨牌效應持續性地發展，最後導致整體破壞，不過亦有可能局部破壞區僅中止於滑動破壞面的某部分。

所謂漸進式破壞，係指邊坡破壞並非一瞬間突然發生的，而可能是為局部破壞逐漸累積、發展而成的。

相同地，軟弱岩石邊坡更易可能由於坡內岩體裂縫伸展、或材料性質軟化、或環境漸進風化、亦或應力集中等因素，致使邊坡內部分岩塊應力或應變過大，因而促使潛在滑動破壞面某部分逐步發生局部破壞，而這局部破壞之岩石剪力強度將由原來尖峰強度驟降為殘餘強度，並將原來承受額外剪應力，部分轉嫁至鄰近未受破壞岩塊，而未破壞岩石的剪應力因而增加，倘若未破壞岩石所承受剪應力超過其尖峰剪力強度，亦或有過大變形產生，於是又擴展局部破壞區之範圍，就如骨牌效應般，破壞行為會持續性地發展，最後可能導致整體破壞，不過，亦有可能局部破壞區僅中止於滑動破壞面的某部分階段而已。

邊坡漸進式破壞之定義也是以此觀念為出發點，在某些情況，地質材料產生破壞面時，沿著破壞面上各點的材料，因位移量不同，材料的剪應變大小也不一樣，所激發的剪力強度也有差異，並非一次同時達到尖峰強度。以邊坡而言，坡趾處的滑動面，其相對剪應變常最大，滑動時其位移已使材料超過尖峰強度而達殘餘強度，往上邊坡其剪位移及剪應變漸小，部分材料尚未發揮到尖峰強度。因此當下邊坡已達殘餘強度發生局部破壞而滑動時，破壞面逐漸擴大並往上邊坡延伸，最後才

使整個邊坡滑動，此即漸進式破壞的例子。

對於軟弱岩石而言，可能滑動面局部破壞區的強度遠低於尖峰強度，而未破壞區之強度則為尖峰強度；因此，平均強度介於尖峰強度與殘餘強度之間，是故極限平衡法取岩石強度均為尖峰強度進行分析，將高估軟弱岩石邊坡之穩定性。

邊坡漸進式破壞機制模擬

此部分研究首先收集國內、外軟岩邊坡漸進式破壞案例，藉以探討可能之邊坡漸進式破壞機制。將軟弱岩石邊坡漸進式破壞機制區分為兩大類。第一類為岩體本身之材料因素，包含了力學模式中應變軟化的趨勢，與其材料強度中有隨機變異性的影響。而第二類為影響岩體外在之環境因素，包含了因季節性降雨或其他因素而造成地下水位的變動，因時間而產生持續性岩體淺層的風化，與因人為或外在因素使岩體造成邊界幾何形狀的改變，如：坡趾沖刷側蝕等。模擬方法與考量漸進式破壞機制大意如圖 14 所示。

地質材料之膠結特性、粒度、組織特性等等，都對軟弱岩石邊坡的穩定性有很大的影響。軟岩邊坡之漸進式破壞，皆由局部邊坡破壞開始。甚至局部邊坡破壞也能造成災害。而這些局部邊坡破壞，不少是由於岩石材料強度存在隨機變異性的影響，因材料強度非均質，使邊坡內岩體的應力不能均勻的分布，導致會有部分區域有應力集中的現象，若其剪應力超過岩體材料之剪力強度時，該區域自然會產生局部邊坡之破壞，繼而發生岩石邊坡崩潰。而在地質構造影響部分，因斷層或斷層帶、褶皺軸及其附近，岩盤必然破碎、脆弱、並易於崩坍，各種地質弱面，常易於滑動。故如何研擬其隨機變異性成為本章節最重要的工作。因應軟岩邊坡地質材料中難免具有天然缺陷（如：節理，與不規則之裂隙等）存在，此研究所研擬之隨機變異性模式，可合理地模擬漸進式破壞行為過程，其局部剪裂區域初兆及發展，與隨機性天然缺陷所在的一致性。（如圖 15a

示意）

軟弱岩石邊坡發生漸進式破壞的機制中，以水的因素最為複雜也最為重要，簡單地說，水一方面在岩層裂隙中形成水壓力，一方面則潤滑岩石節理或使夾在節理內的填充物質軟化、膨脹，間接降低弱面強度。這就是為什麼邊坡滑動總在下雨時發生的原因。地下水壓 P_w 則可以在極短的時間（例如一天，甚至數小時）內，因自然力（例如豪雨）或人力，造成變化，此外，水對凝聚力 c 、摩擦角 φ 、及單位重 ρ ，也有不利影響，因此，地下水常成為邊坡破壞的決定性因素，為邊坡穩定的一大殺手。地下水位對邊坡之影響大略如下：1. 地下水位上升，使靜態水壓力增加，有效應力降低，亦伴隨著剪力強度遞減。2. 地下水滲入潛在的滑動面或弱面內，地下水的上頂力及滲流力使有效應力及剪力強度均降低。3. 在垂直裂縫（如：開口節理或張力裂縫）的水壓力，因水的側向壓力增加將土坡或岩坡推向坡趾。4. 地下水亦會增加土體或岩體的自重，增加其下滑力。5. 水能溶解膠結物質，尤其是泥質砂岩，遇水軟化。6. 地下水流產生滲流的水壓力，降低有效應力及剪力強度。

地下水的因素嚴重地影響到邊坡的穩定性，而本研究則著重於地下水位高程的變化與因水位反覆性地升降而於岩體內可能形成之強度弱化區，此兩大部分進而對軟岩邊坡發生漸進式破壞之影響，並作定性與定量的描述。針對地下水位面因反覆升降，促使地下水位附近岩體衍生局部之弱化加以探討，本研究認為此區域之強度特性可能會隨時間因弱化而衰減，也可能是漸進式破壞行為之肇因之一。因應外在環境因素改變，如降雨時地下水位線高程的變動，本研究模擬岩體之強度伴隨地下水位變動產生變化，以數值模擬證實邊坡漸進式破壞過程中擴展的傾向，與水位線高程具有相當高度的關聯性。（如圖 15b 示意）

因風化作用，令岩石在結構上和成分上發生變化，逐漸由堅硬變為疏鬆，由大塊變為小塊，礦物的結構也愈來愈不緊密。

使得在原地形成的風化物會變得愈來愈厚，進而形成風化層(regolith)；而鬆散的風化產物，其本身強度性質遠低於未風化時之強度，容易受到各種外在因素影響而產生應力分布不均、應力集中等現象，進而發生局部破壞，使得岩體緩慢地累積變形，亦可能成為漸進式破壞誘發機制之一。此亦為本研究考慮的方向，故本節將對因風化作用而使軟岩邊坡強度分布不均進行模擬。

由於風化作用對軟岩邊坡強度性質的效應，主要特點在於時間效應與垂直深度的影響，因風化作用與時間具有明顯的關係，時間經歷越久，坡內岩體受風化程度越顯著，故其岩體剪力強度會隨時間發展而衰減是一特色，再者；因岩層表面裸露於地表外，易與大氣、水文交互作用影響，故坡頂淺層岩體受風化程度遠比坡內嚴重，而從坡頂計算垂直深度越深之岩體，受風化效應越不明顯，甚至到某一臨界深度，則毫不需考慮風化對坡內岩體強度的影響，此為另一特色。但須注意的是，不論坡面岩體如何受風化效應影響，其強度性質也不至於衰減至零，故本研究以殘餘土之剪力強度(residual shear strength)作為岩體在極致風化下，其剪力強度之下限值，相反的是，一但到達臨界深度時，則以完整剪力強度(intact shear strength)最為其上限值。

軟弱岩層的風化區，常是發生漸進式破壞的開端。本研究針對風化區內強度性質參數(凝聚力與摩擦角)的衰減，以及衰減程度的範圍與趨勢，首先將岩體邊坡的形成分為兩大階段，第一階段為邊坡開挖前岩體的原始狀態。在此階段岩體完全未受任何人為的破壞，只單純地承受自然風化影響，首當其衝，必是岩盤接近表面淺層強度性質因岩石風化的衰退，其風化程度的趨勢應隨深度緩慢遞減，至某深處岩石性質不再受風化的影響。故針對原始岩盤而言，其地表強度性質為殘餘土壤或某風化程度之岩石強度，而強度隨岩體深度而成非線性遞增，遇至新鮮岩盤時，強度性質達到飽和(新鮮岩盤強度)。

為探討軟岩邊坡受接近地表岩層受風化作用或侵蝕作用之影響。本研究考慮受風化影響，近地表岩體強度呈現漸進式的衰減，但非無止盡地弱化，其強度狀態的設定與衰退函數的描述符合特定法則。藉由此模擬得知軟岩邊坡受淺層風化作用影響，坡面易發生小規模性的坍塌。而坡頂處可能產生張力裂縫的發生，此局部破壞區的生成皆是誘發漸進式破壞之一大因素(如圖 15c 與 d 示意)。

河流側向沖刷、侵蝕經常使崩崖後退，甚至引起許多小規模式坍塌，而沿河岸開鑿的公路，其下邊坡也常受到河水沖刷而懸空，終於路基下陷或發生較小規模的滑動，針對軟弱岩石邊坡，若此局部破壞區下滑的趨勢將對坡趾處產生擠壓作用，而使坡趾應力集中，受應力極大，若坡趾處被河川側蝕，則使邊坡失去側向支撐力，造成穩定性急速降低，極易造成邊坡坍塌，進而觸發漸進式破壞。除此之外，側向侵蝕亦會隨時間發展而對坡趾支撐造成更嚴重的影響。為探討軟岩邊坡遭受坡趾處的側蝕對邊坡漸進式破壞過程之影響，本研究假設坡趾處側蝕幾何形狀的改變近似圓弧型，配合時間發展定性描述侵蝕發展的趨勢，驗證坡趾處在失去橫向支撐力下應力集中，於坡體內部產生相應之行為破壞，一開始先導致初始之局部破壞區生成，進而觸發邊坡產生漸進式破壞。(如圖 15e 示意)

為模擬漸進式邊坡破壞乃隨時間而發展的過程，本研究提出虛擬時間軸的觀念(見圖 16 示意)，藉由國內現地實際案例長時間且持續性地觀察，同時並配合相關文獻上記載之描述，發現漸進式破壞行為之趨勢與傾向於相對時間上皆具有其相似性。

四、計畫成果自評

本計畫之研究目標在於探討膠結不良軟弱岩石之殘餘強度以及探討該種類軟岩之邊坡破壞行為。

本計畫研製完成一套多功能力學試驗

系統。就儀器設計而言，本期已達到設計目標，本計畫中利用此中空環剪儀完成包括固定正向力環剪、固定體積環剪、與反覆環剪等試驗，用以探討大剪應變下裂面形成之過程與殘餘強度之發展。此外，本計畫並就軟岩之邊坡破壞行為，此部分研究由所收集國內、外軟岩邊坡漸進式破壞案例分析，探討可能誘發軟岩邊坡漸進式破壞之因素與機制，繼而研擬一系列模擬不同誘發因素所建立的數值模型，以闡述軟岩邊坡破壞行為之行為與過程。整體自評，包括儀器研發、製作、試驗進行工作、問題探討、數值模擬分析等原規畫工作目標，皆順利進行，實際執行之計劃成果接近原計畫進度。先後共有五名碩士研究生參與本研究完成論文。

五、參考文獻

- 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功路邊坡整治案例探討』，地工技術，第七十二期，pp. 13-22。
- 李程遠（民國九十二年），『多功能剪力試驗系統之研發-扭剪部分』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十二年六月。
- 曾孝欽（民國九十二年），『軟岩用多功能剪力試驗系統之建立-直剪與單剪系統』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十二年六月。
- 劉晉材（民國九十三年），『軟岩中空環剪試驗之系統研發』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十三年六月。
- 藍洋峻（民國九十四年），『膠結不良軟弱岩石之殘餘強度試驗與解析』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十四年六月。
- 吳東嶽（民國九十四年），『軟岩邊坡漸進式破壞之機制探討與數值模擬』，國立交通大學土木工程系碩士論文。民國九十四年六月。
- 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 典型中空試體

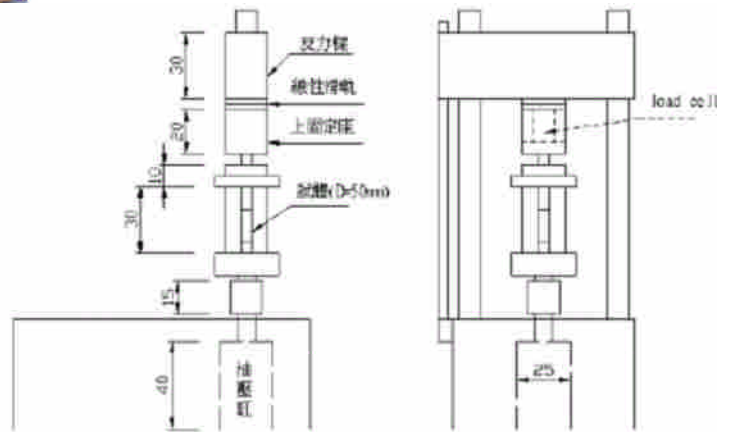


圖2 系統架構示意圖



圖3 試驗機台

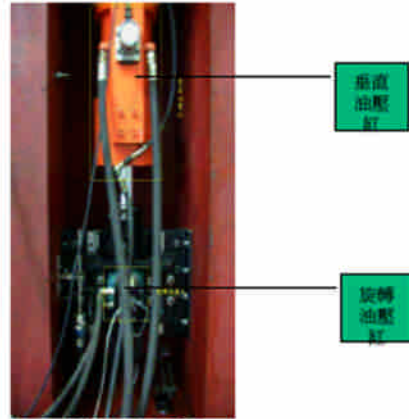


圖4 油壓缸



圖5 雙向自由運動基座



圖6 無平面束制基座



圖7 線性軌道



圖8 扭力傳遞機制



圖9 扭剪室(含試體)



圖10 試驗儀組立(未含試體)

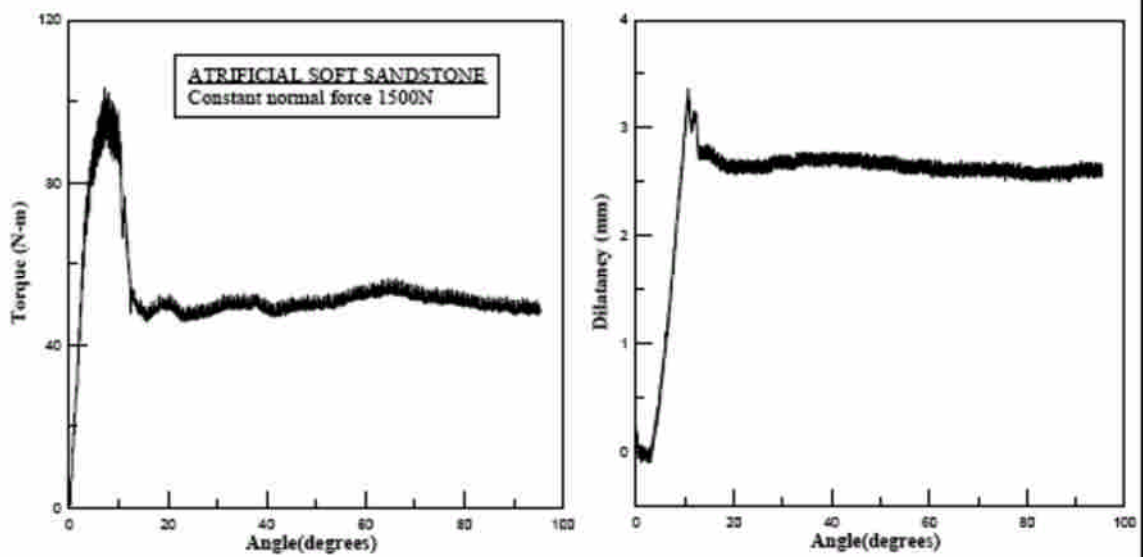


圖11 固定正向力下環剪之(a) 扭力-扭角曲線
與 (b) 剪漲-扭角曲線

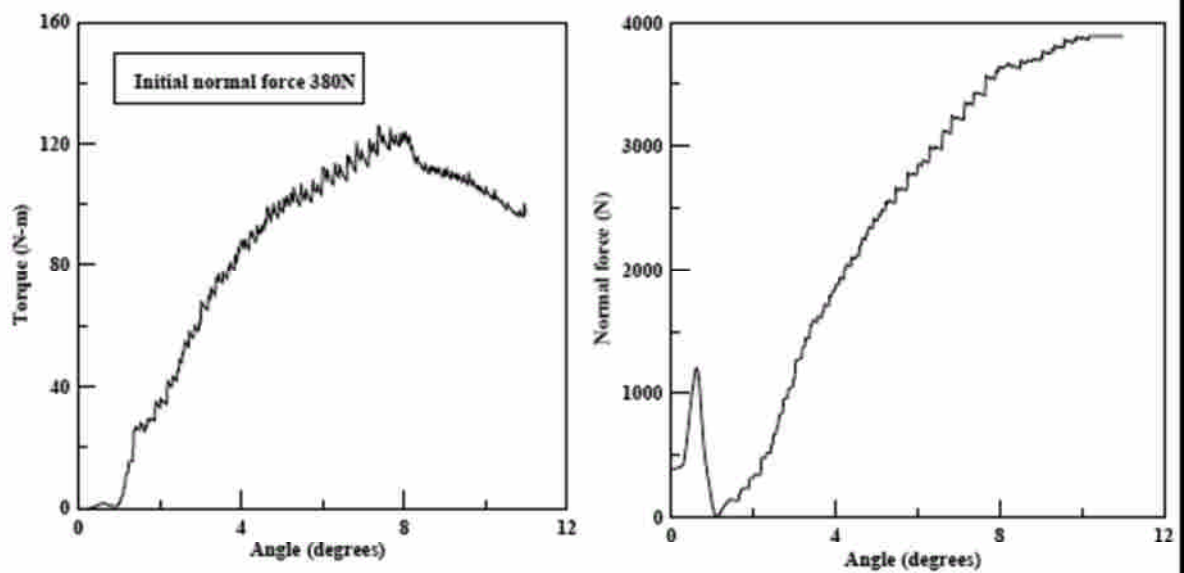


圖12 固定體積下環剪之(a) 扭力-扭角曲線
與 (b) 正向力-扭角曲線

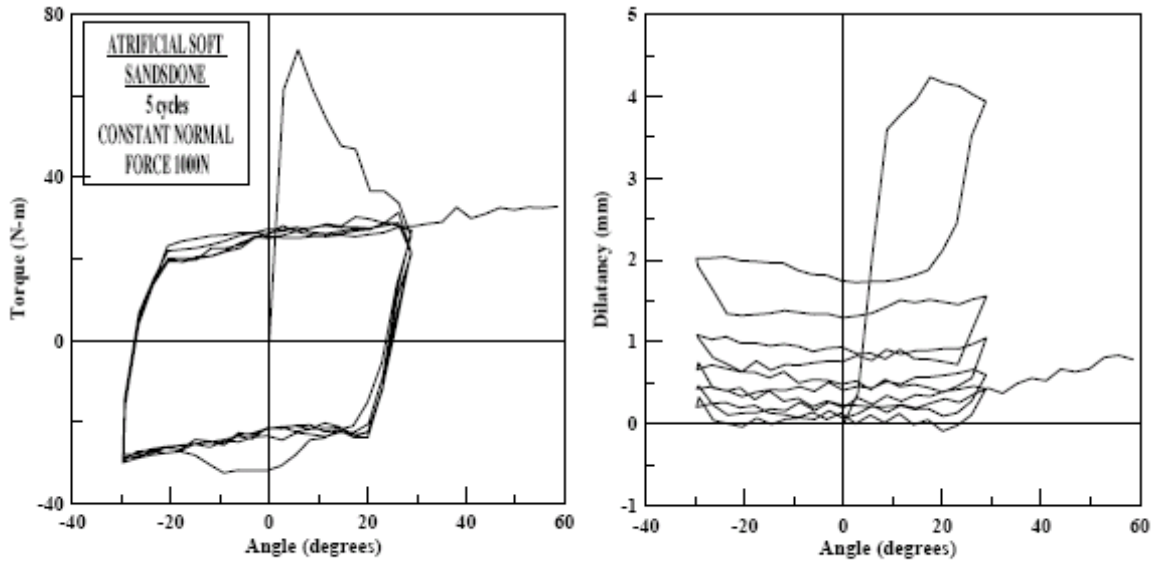


圖13 固定正向力下反覆環剪之扭力-扭角曲線

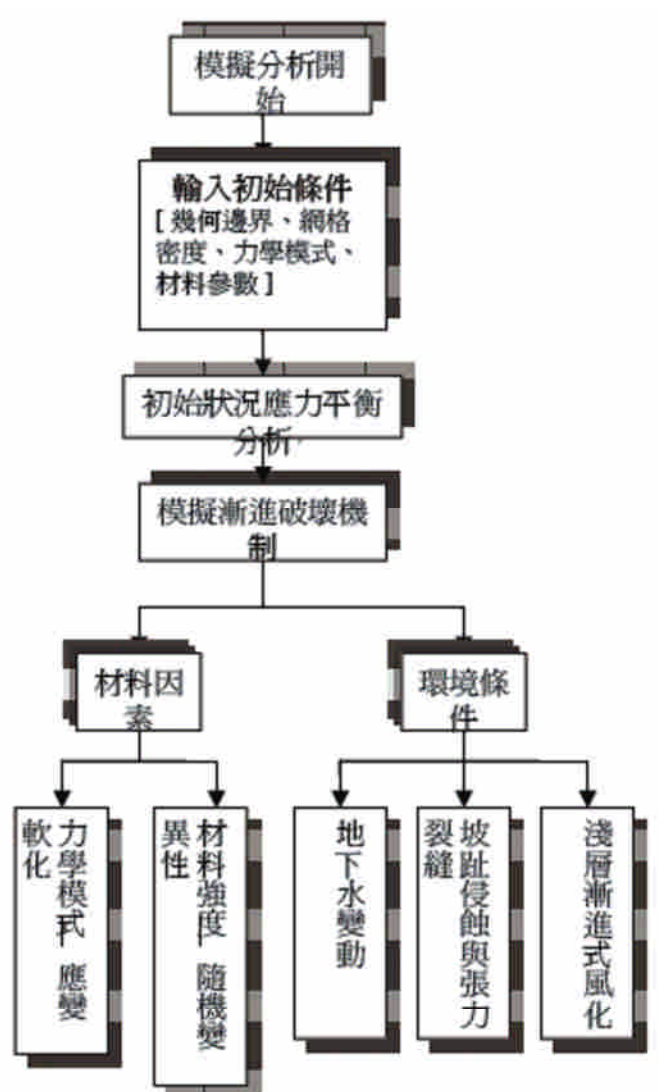


圖14 軟岩邊坡漸進破壞之模擬機制

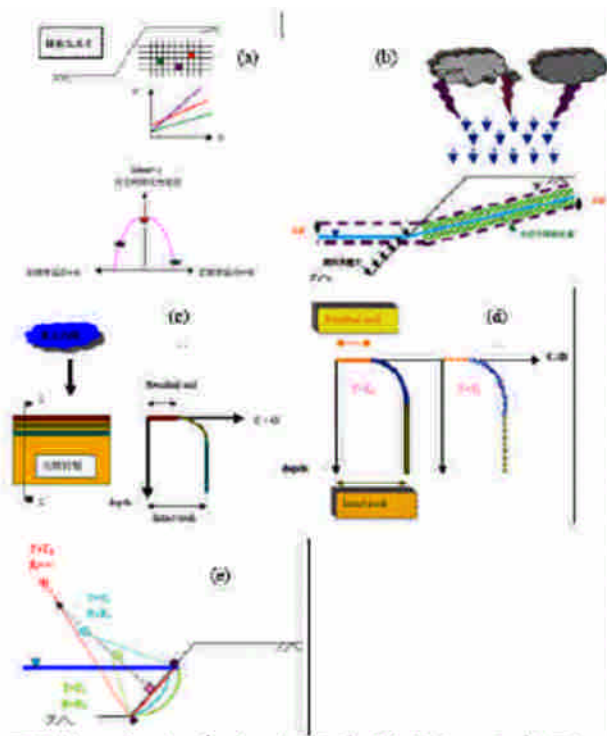


圖15 漸進邊坡破壞機制模擬示意圖

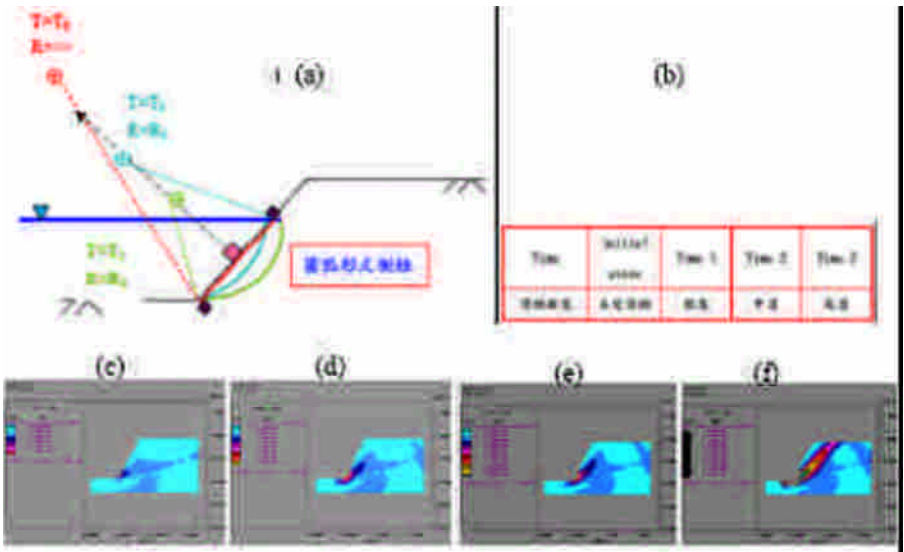


圖16 虛擬時間概念與坡趾掏刷數值模擬例