

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫：崩積地層力學模式及地工問題模擬(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-009-020-

執行期間：94年08月01日至95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：賴忠良、黃玉霖、劉盛華

報告類型：精簡報告

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 95 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

崩積地層工址特性評估與大地工程問題－ 子計畫 4：崩積地層力學模式及地工問題模擬

Constitutive Modeling and Numerical Simulations of Geotechnical Problems for Colluvial Deposit

計畫編號：NSC94-2211-E009-020

執行期限：94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

主持人：潘以文

計畫參與人員：賴忠良、黃玉霖、劉盛華

國立交通大學土木工程學系

一、摘要

崩積地層一般組成多不規則，組成顆粒大小懸殊，不均質性高，崩積層的內容與堆積體原來的地質材料以及其發生位移（滑動、崩塌、墜落）所形成之原因有莫大的關係。崩積層屬不穩定地質，常有可能再促發復發性之滑動或潛變性之滑動，於崩積層之隧道開挖與基礎工程也常出現問題。基於以上之理由，本計畫為整合性計畫『崩積地層工址特性評估與大地工程問題』的其中子計畫之一，擬以三年為期，探討如何由微觀出發建構可代表崩積層材料之力學模式，並探討崩積地層邊坡破壞機制及模式與模擬分析之方法。擬探討內容包含崩積層地質材料的型態、滑動型崩積層組成材料特性、滑動型崩積層材料之力學行為與模式、崩積層破壞機制與模式、崩積層邊坡之復發性及漸進性破壞的數值模擬分析、合理考量材料性質高度不確定性的途徑以進而推估材料參數的合宜手段、以及探討崩積層相關大地工程問題之模擬分析等。第一年探討內容包含崩積層地質材料的型態、滑動型崩積層組成材料特性、滑動型崩積層材料之力學行為與模式、以梨山為例作為滑動型崩積層之探討對象。本期中報告提出第一年進行至今（95.5）工作成果。

關鍵詞：崩積層、力學模式、邊坡復發破壞、邊坡漸進性破壞

Abstract

The composition of colluvium usually is more or less heterogeneous which may result in higher uncertainty in the determination of its engineering properties. Depending on the slope-failure mode and the original geo-material, the resulted type of colluvial deposit may be different. Colluvium is usually unstable in nature. Slope failure often reactivates in colluvium. Tunneling and foundations in colluvial deposit also may encounter various types of difficulties. This three-year project “Constitutive Modeling and Numerical Simulations of

Geotechnical Problems for Colluvium”, as one of the six projects in the integrated project “Site Characterization and Engineering Problems in Colluvial Deposit” has the following goals: (1) to study the classification of colluvial deposits, (2) to study the failure mechanism of colluvial deposit, (3) to develop numerical simulation tool for reactivated failure and progressive failure of colluvial slope, (4) to study the uncertainty of engineering properties for colluvium, and (5) to study various geotechnical engineering problems in colluvial deposit by numerical simulation.

Keywords: Colluvium; Constitutive Modeling; Reactivated Slope Failure; Progressive Slope Failure

二、緣由與目的

台灣許多區域都有崩積層出現，各種人為的開發與工程布置很容易遭遇到崩積層，固然最好能避開，然而一旦無法避免，則必須瞭解工址崩積層的特性並掌握其工程性質。崩積地層一般組成較不規則，組成顆粒大小懸殊，不均質性高，其組成材料可能從近似原來大規模滑動前岩體的材料、到大塊石、到細粒土壤都有可能，有些情況下可以視為鬆動的破碎岩體、有時可視為複合性顆粒材料、有時形同不均勻的土壤，崩積層的內容實與崩積層堆積體原來的地質材料以及其發生位移（滑動、崩塌、墜落）所形成之原因有莫大的關係。崩積地層的型態依據岩石及土壤物質的材料型態與其下移破壞型態的不同分為三類：岩塊堆積崩積層、土石混合堆積崩積層、以及岩層滑動崩積層（董家鈞與楊賢德（2001））。岩塊堆積崩積層多由岩石或墜落或傾覆造成；土石混合堆積崩積層多由土石崩移或滑動較容易造成；而岩層滑動崩積層則多由岩層崩移或滑動所造成。

岩層滑動崩積層乃因為部分岩層之崩移或滑動所生，常不容易經由鑽探柱狀圖發現，其呈現之岩層層次常與邊坡的坡面平行，若崩積層與原地層

介面上水壓升高或介面上材料強度因風化而逐漸弱化，長久之後常逐漸在崩積層與原地層之交界面附近形成一層類似粉土質或泥質之軟弱夾層，或因為經長期雨水入滲作用，將崩積內風化的細料往下移至不整合面上，而形成厚度不一的粉土或黏土質之軟弱夾層(中興大學，水保局計畫，民 89)，一旦有不利條件(如遇大雨水壓上升、地震、坡腳沖刷、人為開挖)發生，則有可能再促發復發性之滑動或潛變性之滑動。軟弱夾層之存在與特性常是崩積層邊坡復發性之滑動或潛變性之滑動之關鍵因素，因此軟弱夾層的形成過程、力學特性與行為也宜加以掌握。

基於以上之理由，本計畫為整合性計畫『崩積地層工址特性評估與大地工程問題』的其中子計畫之一，擬以三年為期，探討如何由微觀出發建構可代表崩積層材料之力學模式，並探討崩積層邊坡破壞機制及模式與模擬分析之方法。第一年探討內容包含崩積層地質材料的型態、滑動型崩積層組成材料特性、滑動型崩積層材料之力學行為與模式、以梨山為例作為滑動型崩積層之探討對象。於實地完成 wire-line 鑽探與取樣，所取得之岩心樣品皆努力減低擾動，並於鑽孔內完成孔內 televue 探查掌握真實岩體內之弱面條件，至目前(95.5)工作展開約三分之二以上，提出期中報告。

三、滑動型崩積層之探討 – 以梨山為例 梨山地滑區簡介

梨山地滑區位於中橫公路(台八線)與中橫公路宜蘭支線(台七甲線)交會處，行政區劃隸屬於台中縣和平鄉梨山村(圖 2.1 所示)。中橫公路西起台中縣東勢鎮，沿大甲溪河岸經和平、谷關以及德基水庫行至梨山，長 82 公里；中橫公路繼續東行翻越大禹嶺後可抵達花蓮，長 137 公里；中橫公路宜蘭支線由梨山向東北經由思源啞口可抵達宜蘭，長 112 公里。921 大地震以後，台八線谷關至德基路段坍方，迄今尚未修復，目前僅能由東勢沿台八線至和平鄉轉接台二十一線，至埔里後接台十四線往霧社，再由台十四甲線經合歡山及大禹嶺至梨山。梨山地滑區面積約為 230 公頃。北部以大甲溪為界，大甲溪為台灣中部之主要河川，發源於思源啞口附近標高 2,560m 之山峰，向西南流經思源、勝光、志良，在環山部落與松茂之間與合歡溪匯合，沿岸常見曲流、沖積扇與河階的地形景觀。大甲溪河谷兩岸偶有岩盤裸露，其坡度約 30°-50°，河谷上部接近山脊處，偶顯露老年期地形特徵，留有侵蝕或沉積的遺跡，山腰上則分布著起伏的大小丘陵地，為標準的地滑地形。梨山地滑區則位於台七甲線與台八線交匯處向北傾斜之坡面，地勢標高在海拔 1800m~2100m 之間，由南向北遞降；南側稜線為福壽山農場(2,232m)，向北下降至大甲溪河床(1,400m)，形成一集水區。

工研院能資所(1993)將梨山地滑區大致以集水區內之主要河谷為界，由西而東劃分為西區、東

南區及東北區三個地滑區，各地滑區再細分為 A-1~A-9, B-1~B-14 及 C-1~C-10 等滑動體。其後中華顧問工程司(1999)的調查報告延用工研院能資所所做之地滑分類，但在西區增加了 A-10~A-13 四個滑動土體，東南區增加了 B-15~B-31 十七個滑動土體，東北區則未增加。富國技術公司在 2001 年於分類上採用了以上的分類，但於分析上則僅將梨山地滑區分為四區，除引用原有之西及東北二區外，再將原東南區細分為東南(一)區及東南(二)區，東南(一)區代表於梨山賓館上下所存在之滑動體，東南(二)區則為國民旅舍上下方所存在之滑動體。

此次研究以 B-9 滑動體，為主要的研究對象。原因如下：1、它位於梨山整個滑動區之中間位置，本身具有很多大大小小的滑動體。2、滑動體本身需具有很多的滑動面存在，可供研究、判釋及模擬。3、鑽孔位置除了選擇具有指標性的位置外，還需考慮鑽孔機具是否到得了。4、鑽孔用地的取得，是否能夠取得，也佔有很大的因素之一……等等原因

B-9 地下水位變化隨降雨發生反應甚快，地下水上升至尖峰與降雨量之關係相當顯著，且長期地下水位與季節性降雨量呈現明顯之相關性，顯示本區域地下水位受到地表入滲補注之影響大於滲流補注之影響。據瞭解早期台八線施工時曾將開挖之土石材料運填至本區域，B-09 滑動體範圍之地表崩積層最大厚度可達 32 公尺以上，研判此為本滑動體地下水位受降水入滲流入影響甚大之可能因素。

B-9 滑動體該處感應器於相關排水廊道工程施做完成後已有變緩的趨勢。由廊道開挖所獲得之地質資料，推估梨山村一帶較深層之基盤中由於大地應力作用造成相當廣泛之剪裂帶，此剪裂帶造成地質弱帶，當大甲溪河谷下切造成河谷側向解壓後，於是此地質弱帶中造成滑動變位或潛變變形，而每當有下方產生滑動或有較大變形或有向源侵蝕時便會引致上方地層側向不平衡力量加大而更不穩定。

梨山地滑區在地質分區上，係位於中央山脈之脊梁山脈地質區之西側邊緣，出露之地曾屬中新世之廬山層，在標準地點的廬山層主要由黑色至深灰色板岩(slate)、千枚岩(phyllite)、硬頁岩(argillite)及深灰色硬砂岩互層所組成，偶有零星散佈之泥灰岩團塊，劈理構造發達(何春蓀，1986)。梨山地滑區之廬山層，以大規模不同程度的風化板岩為主，岩性較為單調，偶夾 2~8cm 之砂岩以及石英脈。

根據工研院能資所(1993)調查結果，梨山地滑區之地層走向約呈 N15°-45°E，向東南傾斜 15°-35°。在河谷處之層面及劈理的傾斜角度近乎垂直，但在稜線或山坡上轉為平緩，此一現象可能是因岩性軟弱及河谷解壓，造成邊坡頂部岩層潛移翻倒所致。富國技術工程(2001)調查結果，地滑區內地層之主要節理位態有三組：(1)N32°W/86°SW；

(2)N29°E/83°SE；(3)N32°W/86°SW，三組皆為高角度節理，劈理則為 N36°E/32°SE。

四、崩積層材料模型分類

第一種：灰色黏土夾灰色板岩顆粒



第一種材質屬於極軟弱的地質材料，由灰色黏土夾雜板岩顆粒所組成。偶夾一些石英顆粒。在力學上面而言，幾乎沒有很大的抗剪強度，因此此種地質材料若位於邊坡地層中時，當地下水位超過此層面時，會加速減弱材料強度，所以此層面通常屬於較常造成邊坡滑動的層面。

此種材質屬於軟弱夾心層，其所形成的原因目前還不是很明確。推測的結果，有可能具有下列幾點：1. 地表逕流或降雨將細粒料往下帶，當無法帶往其他地方時，則慢慢的堆積，形成所謂的軟弱帶。2. 地下水位長期重複性上升下降時，則會將細粒料一直往下帶，造成細粒料堆積。3. 此地區，有梨山斷層經過，因此這些軟弱帶，有可能屬於斷層泥的一部份。

第一孔(N-1)：屬於灰色黏土夾灰色板岩顆粒的長度約 4.1M(15.7m~18.9m；26.2m~27.1m)，目前先採用人工判釋量測的粗步估算，板岩顆粒面積佔此長度的百分比 13.62%。第二孔(N-2)：屬於灰色黏土夾灰色板岩顆粒的長度約 7.65M(26.15m~29.80m；52.8~56.8m)，以人工判釋量測的粗步估算，板岩顆粒面積佔此長度的百分比 23.61%。由此可知控制此段的力學材料，屬於細粒料。因為它佔的百分比，超過 50%以上。

另外，第一孔(N-1)(高程為 1886m)，它的第一層弱面位於地表下 15.7m~18.9m，厚度約有 3.2m，屬於具有較長的軟弱帶。而第二孔(N-2)(高程為 1949m)，它的第一層弱面位於地表下 26.15m~29.80m，厚度約有 3.65m，而第二層弱面位於地表下 52.8~56.8m，厚度約有 4.0m。因此推測第一孔的第一層屬於較長軟弱帶約有 3.2m，可能會與第二孔第一層或第二層的軟弱帶形成邊坡的破壞滑動面。

材質軟弱具有彈塑性的特性可視為土壤，可採用摩爾-庫倫彈-塑性模式。因此第一種材質，建議以摩爾-庫倫彈塑性材料模式模擬。

第二種：灰色板岩內含有多組弱面



第二種材質屬於中等的地質材料，由灰色板岩

及灰色黏土約各占一半所組成的，偶夾一些石英顆粒及石英脈出現，偶而會有一些銹染出現。其板岩之所以如此破碎，可能受大地應力相互作用碰撞後，所形成的。另外板岩最大的特性為受到風化後，劈理面會開裂，岩體略成破碎狀。

這種的地質材料，大都屬於強~中風化性的板岩，因此形成灰色板岩夾灰色黏土，但板岩顆粒排列不規則。此外有一些板岩塊，因為之前岩石受到輕至中度變質作用，造成礦物重新定向性的排列，容易劈成一片一片的平薄石板，所以形成劈理狀的界面，當受到大地應力作用後，而形成整齊破碎的狀態。因此有一些灰色板岩夾灰色黏土，但是板岩顆粒排列整齊的存在。

第三種：灰色板岩內含有兩組以內節理(節理厚度不可忽略)



第四種：灰色板岩內含有兩組以內節理(節理厚度可忽略)



第三種及第四種，屬於具有較完整的板岩塊。內部只具有幾組的節理存在，而節理面，大部分夾有灰色黏土，少部份夾有石英脈(例如第二孔，深度約 21.90m 處，夾有 2mm 厚的石英脈及黃灰色黏土)，或者節理厚度可忽略。另外在第一孔的 29.70m 處，及第二孔的 70.10m 處，各發現具有兩組節理面的存在。

第一孔(N-1)判釋後，節理大小及數量統計如下：
20.10m→40°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。
20.20m→70°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。
21.00m→52°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。
25.00m→70°(節理厚度約 0mm)。
29.00m→70°(節理厚度約 0mm)。
29.70m→共兩組節理(一組為 75°，另一組為 65°，厚度各約為 1mm，內夾灰色黏土)。
31.20m→50°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。
33.5.0m→70°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。
38.80m→80°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。
39.30m→85°(節理厚度約 0mm)。

第二孔(N-2)判釋後，節理大小及數量統計如下：
21.90m→80°(節理厚度約 2mm，內夾石英脈及黃灰色黏土)。
23.50m→80°(節理厚度約 1mm，內夾黃灰色黏土)。
39.70m→70°(節理厚度約 1mm，內夾灰色黏土)。

59.90m→55°(節理厚度約 0mm)。
 61.60m→70°(節理厚度約 2mm, 內夾灰色黏土)。
 64.90m→60°(節理厚度約 0mm)。
 65.70m→60°(節理厚度約 0mm)。
 65.80m→70°(節理厚度約 0mm)。
 66.50m→80°(節理厚度約 0mm)。
 68.30m→70°(節理厚度約 0mm)。
 70.10m→共兩組節理(一組為 80°, 另一組為 80°, 厚度各約為 0mm)。
 77.50m→70°(節理厚度約 0mm)。

由上面統計節理的角度上面可得知,大部分的節理角度均約大於 70 度以上,因此我們可以大約判斷出,其大約均屬於張力節理。

第四種材質,其由近彈性體之完整岩體再加上幾組的節理弱面(節理弱面可忽略)所組成,屬於新鮮岩盤,因此預計採用等值岩體力學模擬之(林建宏, 1992)。

崩積地層材料之力學行為與力學模式

崩積地層既非原生、原地、與原狀的地質材料,其不規則性往往較其他地層大地材料之不確定性高的多。本計畫擬由岩層滑動型崩積層切入,中橫公路梨山大規模之不穩定邊坡即屬岩層滑動型崩積層。此類崩積層內的材料其力學行為主要受原來岩體內不連續面分佈及不連續面間接觸機制控制,影響微觀力學機制乃以“面之接觸”較主。離散大地材料(如破碎岩體、礫石土等)之力學研究可由現象學方法及構造學方法兩種途徑進行,現象學之力學分析方法概念為由材料巨觀(均質化)受擾動之反應(如受外力後之材料變形),評估材料力學行為,而構造學之力學分析方法概念則為由材料微觀變形機制(構造單元互制行為)探究材料力學行為。若構造單元變形機制對材料所受之狀態(State)敏感、材料變異性高或材料行為主要由材料構造性因素控制時,粒狀材料之構造學分析法將較為合適。

如上節所述,當大地材料受較高之非連體化作用時(如呈分離塊狀之岩體材料),材料特性將受不連續面分佈及接觸特性影響較巨,衡諸此一事實,大地材料非連續特性之構造學探討有其優點。既然大地材料之力學特性多受其微觀特性影響,故只要能掌握大地材料之微觀變形機制,即可望能掌握巨觀之受力變形反應。本計畫擬對破碎岩體聚合體由微觀變形機制推導其巨觀(均質化)之力學等值特性並進而推導必要之力學模式。

若假設岩層滑動型崩積層之材料行為可視為具有數組規則弱面之塊狀聚集岩體,每組弱面之位態、間距、勁度、強度若皆知,則基本上有,可能藉由均質化程序推估岩體等值連體之力學性質及破壞準則[Carter and Alehossein, 1990; 林建宏, 1992; Sasaki, et al., 1994; Zienkiewicz and Pande, 1977]。藉由組合每一組節理以及(intact

rock)岩石材料內發生之彈性應變與黏性應變以建構完整應力-應變關係, Zienkiewicz and Pande (1977)提出所謂 Multilaminate model 模擬含規則節理岩體之黏彈性模式行為。Sasaki 等(1994)則提出所謂 Multi-yield model, 他們首先組合每一組節理以及(intact rock)岩石材料內發生之彈性應變以獲得含規則節理岩體之彈性關係,接著考量每一組節理之受剪屈伏準則,若在某一組節理上剪應力超越屈伏準則,則該組節理上發生塑性應變。累加各組節理經座標轉換後之應變和,可推導應力增量與應變增量間關係。

林建宏(1992)推導含 n 組規則節理岩體之彈性關係,假設各組弱面間距一定,正向勁度與剪力勁度已知,弱面厚度可忽略。考量應變分割連續(strain decomposition 或 strain partition), 彈性應變源自岩石材料彈性應變與各組弱面上之彈性應變的總和。運用應變分割連續觀念,

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}^r + \sum_{i=1}^n \{\varepsilon\}_i^w$$

其中 $\{\varepsilon\}$ 為岩體之總應變(以向量代表張量), $\{\varepsilon\}^r$ 為完整岩石應變張量, $\{\varepsilon\}_i^w$ 為沿第 i 組弱面上應變張量。

若完整岩石與各組弱面上應變增量 $\{\varepsilon\}$ 與應力增量 $\{\sigma\}$ 間存在局部線彈性(piecewise linear)關係,則

$$\{\varepsilon\}^r = [C]^r \{\sigma\}$$

$$\{\varepsilon\}_i^w = [C]_i^w \{\sigma\}$$

其中 $[C]^r$ 與 $[C]_i^w$ 分別為完整岩石與第 i 組弱面上之柔度矩陣(即勁度矩陣之反矩陣)。疊加後可獲得岩體之柔度矩陣如下

$$[C]^e = [C]^r + \sum_{i=1}^n [C]_i^w$$

但各組弱面之位態各不相同,在局部座標系統下(對每一組弱面上,皆以兩個切線方向座標軸 s, t 及一個法線方向座標軸 n 以定義該組弱面之局部座標系統),只要正向彈性勁度 K_n 與剪力彈性勁度 K_s 已知(但可令 K_n 與 K_s 為有效應力函數),並且該組弱面平均間距 S 亦已知,即可輕易得到第 i 組弱面局部座標系統下之之柔度矩陣 $[C]_{sm}^w$ 。並可由局部座標系統下經由第 i 組弱面的座標轉換矩陣 $[T]_i$ 轉換到全域座標系統下之柔度矩陣 $[C]_{xyz}^w$, 其關係如下:

$$[C]_{xyz}^w = [T]_i [C]_{sm}^w [T]_i^T$$

因此,岩體之柔度彈性矩陣可得如下

$$[C]^e = [C]^r + \sum_{i=1}^n [T]_i [C]_{sm}^w [T]_i^T$$

除了考慮以上之彈性應變，本計畫擬假設塑性應變（不可回復應變）只發生弱面上而不發生於完整岩塊中。沿任一組弱面上的應力狀態 (σ_n, τ) 條件皆不得超越該組弱面上的屈服準則 $F_i(\sigma_n, \tau) = 0$ ，當任一組 i 組弱面上的應力狀態 (σ_n, τ) 條件達到 $F_i(\sigma_n, \tau) = 0$ 時，該組節理上將發生塑性應變，且其在局部座標系統下塑性應變之增量 $\{\varepsilon_i\}_{sm}^p$ 遵循塑性流法則（flow rule），

$$\{\varepsilon_i\}_{nst}^p = \Lambda \frac{\partial F_i}{\partial \{\sigma\}}$$

其中之塑性流比例 Λ 可藉由必須滿足 $F_i(\sigma_n, \tau) = 0$ 條件（consistency condition）計算得到。而由第 i 組弱面的局部座標系統之塑性應變增量 $\{\varepsilon_i\}_{nst}^p$ 得轉換至全域座標系統下之第 i 組弱面的塑性應變增量 $\{\varepsilon_i\}^p$

$$\{\varepsilon_i\}^p = [T]_i \Lambda \frac{\partial F_i}{\partial \{\sigma\}}$$

加總各組弱面發生的塑性應變增量即可得總塑性應變增量 $\{\varepsilon\}^p$

$$\{\varepsilon\}^p = \sum_{i=1}^n [T]_i \Lambda \frac{\partial F_i}{\partial \{\sigma\}}$$

由彈性應變增量與塑性應變增量之總和可得總應變增量

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}^e + \{\varepsilon\}^p = [C]\{\sigma\} + \sum_{i=1}^n [T]_i \Lambda \frac{\partial F_i}{\partial \{\sigma\}}$$

一旦建構得代表規則塊狀聚集岩體均質化之力學（簡稱『塊狀岩體均質化模式』），並經完成細節推導與研擬標定其相關參數方法之程序，本計畫擬將其納入數值應力分析程式內，以供後續邊坡穩定模擬分析應用。

五、進度與檢討

本計畫至今已完成之工作係以梨山為例作為滑動型崩積層之探討對象。現業已於實地完成 wire-line 鑽探與取樣，所取得之岩心樣品皆努力減低擾動，並於鑽孔內完成孔內 televue 探查掌握真實岩體內之弱面條件，由這些資料，將崩積層材料分成四種模型，加以定性分類、進而用以研擬適當之力學模型。

參考文獻：

- 1、蘇苗彬、徐登文、壽克堅，”梨山地區地層滑動整治計畫圖表與解說彙編”，行政院農業委員會水土保持局，2003。
- 2、董家鈞、楊賢德，『崩基層之分類與工程特性研究』水土保持研究，第八卷第1期，2001。
- 3、富國技術工程股份公司，”八十八年度坡地災害整治計畫「監測系統分析及運用」委託技術服務，行政院農業委員會水土保持局第二工程所，2001。
- 4、林建宏，”含規則節理岩體內圓形隧道之收斂-圍束分析”，國立交通大學研究所碩士論文，1991。
- 5、Stewart, T.W.G . and Ripley B.D., ” Deformation analysis of the Wahleach rock slope, southwest British Columbia”, FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics : proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, Minnesota, USA, pp55-61 (1999).
- 6、Zienkiewicz, O.C. and Pande, G.N. (1977) “Time Dependent Multilaminate Model of Rocks – A Numerical Study of Deformation and Failure of Rock Mass,” Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., v 1, p219-247.
- 7、Carter, J.P. and Alehossein, H. (1990) “Analysis of Tunnel Distorsion due to an Open Excavation in Jointed Rock”, Computers and Geotechnics, v 9, pp.209-231.
- 8、Sasaki, T., Yoshinaka, R., and Nagai, F. (1994) “A study of the Multiple Yield Models on Jointed Rock Mass by Finite Element Methods”, Proc. Of JSCE, No.505/III-29, p.59-68.