

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

機率式斷層位移危害度分析之應用—以山腳斷層為例(2/2) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型

計畫編號：NSC 95-2221-E-002-258-

執行期間：95年08月01日至96年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：林銘郎

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：陳師賢、張家偉

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 96 年 08 月 14 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

機率式斷層位移危害度分析之應用—以山腳斷層為例(I&II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：**NSC 95-2221-E-002 -258**

執行期間：94年 08月 01日至 96年 07月 31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：林銘郎

計畫參與人員：鍾春富、朱聖心、陳師賢、羅佳明、蔣佳興、魏勇帆

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 96年8月13日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ■ 成果報告
□ 期中進度報告

(計畫名稱)

機率式斷層位移危害度分析之應用—以山腳斷層為例(I&II)

計畫類別：■ 個別型計畫 □ 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2221-E-002 -258

執行期間：94 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日

計畫主持人：林銘郎

共同主持人：

計畫參與人員：鍾春富、朱聖心、陳師賢、羅佳明、蔣佳興、魏勇帆

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：□ 精簡報告 ■ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☑ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

□ 涉及專利或其他智慧財產權，□ 一年 □ 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學土木工程學系

中 華 民 國 96 年 08 月 13 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

機率式斷層位移危害度分析之應用—以山腳斷層為例

計畫編號：NSC 95-2221-E-002 -258

執行期限：94 年 8 月 1 日~96 年 7 月 31 日

主持人：林銘郎

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

摘要

由災害性地震事件中顯示斷層錯動導致上覆土層變形，進而造成斷層破裂帶之結構物或維生管線破壞之案例為數甚多。如何評估結構物在使用年限內遭受斷層錯動之風險，係為重要之課題。綜觀當前台北都會區相關斷層研究咸認為台北盆地西緣的山腳斷層屬於高活動度之正斷層，山腳斷層之錯動將造成覆蓋於台北盆地的第四紀沉積物變形，因此若能了解地表的變形情況以及影響範圍，便能對於山腳斷層錯動引致地表之變形有初步之了解。

機率式斷層位移危害度分析 (PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)，為量化斷層錯動引致地表位移量之方法學。由於所蒐集資料以正斷層為主，適用於正斷層及斷層線位移量之評估。本研究利用此一方法推論山腳斷層在最大可能地震週期之基盤錯移量，再以數值方法模擬基盤錯動下，不同覆土層厚度剪切帶發展範圍之影響及地表差異變形之影響。

由於數值模擬在厚達 700m 之覆土層，其在斷層基盤錯動 2.5 公尺時塑性應變帶之發展並未發展至地表，且僅發展至基盤破裂尖端附近。而由鑽孔及定年資料推斷山腳斷層有生長斷層 (growth fault) 現象，此種斷層錯動所造成上覆蓋沉積層之變形行為與數值模擬單一覆土層錯動影響之異同亦為本文探討重點。

本研究應用機率式斷層位移危害度分

析進行山腳斷層斷盤滑移量分析，並以數值方法模擬基盤錯動下，不同覆土層厚度剪切帶發展範圍之影響及地表差異變形之影響。再以小尺寸砂箱模型，針對覆土層厚度、生長斷層分次錯動的影響進行試驗，並進行成果討論。

其初步試驗與數值模擬驗證結果茲列點說明如下：

1. 全尺寸數值分析，考慮不同覆土層厚度剪切帶的發展，發現較深之覆土層塑性應變帶並未發展至地表，此與古地震之地陷證據未能相符。

2. 生長次層發展至地表之第一條剪切帶，所需要之基盤錯移率為單一覆土層第一條剪切帶的 1/3 倍。由此一現象顯示，生長斷層在基盤錯動時，剪切帶會比單一覆土層更為快速發展至地表，且為沿著原覆土層之剪切帶弱面繼續向上發展，而非從基盤再次發展新的一條剪切帶。

關鍵字：機率式斷層位移危害度分析、山腳斷層、生長斷層、砂箱試驗、數值分析。

Abstract

Observing from the earthquake disasters over the decades in Taiwan, the deformations of near surface soil, which are the major factors, leads to the damages of underground structures or pipe lines. Geologists and civil engineers are of the opinion that Shanchaio fault is a highly active normal fault that may

trigger earthquakes in Taipei basin area. To study the process of fault propagation as well as the associated soil deformation during a fault offset event, we set up sandbox experiments of simulating normal fault offset and use the non-cohesive sands was adopted simulating near surface soil. We use finite element numerical method to obtain the simulation results and compare them with that from the experiments.

This Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis PFDHA is still in development, the information adopted in this method is mainly normal faults. Therefore, the article chooses Shanchiao fault in Taipei basin as investigation topics. The research evaluated by PFDHA indicates the fault displacement exceeding the annual rate 2% in 50 years is about 2.5 meters by the Displacement Approach; moreover, we use this finite element program to model the simulation of the full scale normal faulting. The results obtained from numerical analyses based on the faulting process that was discussed with the depth of a single overburden soil 700 meters. The shear zones were little occurred in the overburden soil, and propagation was close to fault tip.

However, researches of prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault indicate deformations of near surface soil. Therefore, our research sets up sandbox experiments of simulating normal fault offset with growth fault and use the non-cohesive sands was adopted simulating near surface soil. We show the difference results obtained from sandbox experiments between simulations of a single overburden soil and the growth strata.

Key Words: PFDHA, Shanchiao fault, growth fault, sandbox experiments, numerical analysis.

壹、前言

近年來，由斷層錯動所引致上覆土層變形，進而造成斷層帶兩側之建築物或地下維生管線嚴重損壞之案例甚多，如 1992 年美國加州 Landers 地震($M_w=7.2$)，1999 年台灣集集地震($M_w=7.6$)及同年在土耳其發生的 Kocaeli 地震($M_w=7.4$)及 Duzce 地震($M_w=7.1$)。沿此地表破裂跡沿線，大多數結構物均遭受到嚴重損毀。

由集集地震中槽溝開挖調查亦清楚顯示，斷層錯動具有重覆性，且隨斷層前緣發展造成沖積土層變形，而引致結構物破壞。因此對於斷層帶附近之結構物具有較大之危害。但消極把建築物避免跨越活動斷層為作為防治對策。在斷層密佈的活動構造環境中，對於維生管線或大型工程，確實很難避免跨越活動斷層，因此如何量化評估在斷層錯動所造成危害分析，是當前重要之課題。

機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)主要評估結構物在使用年限內，遭受某程度斷層錯動位移量的機率。現已用於美國核廢料儲存場評估。由於 PFDHA 目前仍處於發展階段，僅適用於正斷層及斷層線之分析。

台北盆地西緣的山腳斷層，是大台北地區最有地震潛能之可能活動斷層。雖然其活動性與地震之關聯仍有許多未知數，但如果山腳斷層發生地震活動，對台北都會區影響甚巨。由台北盆地構造的演化，造成了盆地不對稱沉積，由東向西逐漸加厚。此現象也引發台北盆地西緣山腳斷層正斷層的研究及探討。目前研究指出山腳斷層為一明顯之生長斷層，隨著正斷層活動伴隨沉積作用，為同一沉積構造，隨著正斷層兩側地層同時沉積不同，可觀察斷層之活動性。

由現地調查結果顯示，斷層錯動時將引致上覆土層變形，造成地表結構物損壞，形成一窄區範圍之斷層帶之破壞。為模擬斷層錯動引致地表變形之行為，進而將斷層線之

位移危害度評估擴展至斷層帶之分析，因此必須結合目前對於斷層錯動時引致上覆土層之研究結果。但由於相關文獻有限，且影響參數，包含斷層傾角、抬昇量、覆土層材料性質等，較為複雜。

由於更新世以後，受到沖繩海槽的順時針轉向及向西延伸的影響，東西向水平伸張的應力逐漸取代擠壓應力而成為影響臺灣北部地殼的主要大地應力，輔以臺北盆地及鄰近地區歷經 5 年的 GPS 測量結果顯示，此區域地殼呈西北西—東南東伸張。造山運動期間由擠壓應力所形成的各逆斷層構造已經失去活動的機制，因此近期無再活動的可能性。但山腳斷層為一正斷層，為拉張應力的作用下所產生的斷層構造，目前臺北盆地附近仍處於此種大地應力狀態下，因此山腳斷層活動的機制仍舊存在(林朝宗，2001)[1]。

山腳斷層位於北部臺灣的臺北盆地西側，是一條約東北走向，傾角向東的正斷層。雖然有地震記錄以來，它並未有明顯活動，但盆地西側顯著的地形崖和盆地內第三系沉積岩基盤的深度皆說明了山腳斷層的活動在臺北盆地的演化中扮演著重要的角色，且在北臺灣東西向伸張變形的應力條件，仍有可能再次活動。

根據李錫堤(2001)的綜合分析[2]，大臺北地區的地震威脅來自三種不同震源，其中之一即為來自盆地地下或週緣山地的淺源地震。此類地震和斷層活動有關，除了強大的震動之外，亦會造成地表變形直接衝擊建築物，山腳斷層活動便是屬於此類。目前的資料顯示，山腳斷層即是影響大臺北地區之最有可能之高活動性斷層，有關山腳斷層之活動歷史，由鑽探資料推斷山腳斷層在距今一萬年以前應屬於高活動度的斷層，但在最近一萬年或稍短時間內斷層活動幾已停止。近年來岩心的古地震研究中顯示了 1.5 萬年以來山腳斷層最少有四次的地震活動紀錄(Huang, et al., 2007) [3]，且關渡平原一帶的淺層震測結果也說明山腳斷層為一

活動的正斷層(石瑞銓等，2004) [4]，至於康熙 33 年(西元 1694 年)的大地震是否與山腳斷層有關，目前仍無定論。由以上的結果來看，對於山腳斷層最後一次的活動時間看法相當分歧，可能在一萬年前就已停止活動，也可能在數千年內尚有活動，也有可能三百多年前是最近一次活動(盧詩丁等，2004) [5]。

因此本研究考慮此使用砂箱實驗與數值分析比對，探討正斷層錯動引致上覆土層變形之影響，並以山腳斷層之現地剖面，作為分析探討。以期將 PFDHA 之方法，應用於臺北盆地之山腳斷層分析探討，作為未來耐震設計之參考。

貳、研究方法

位於山腳斷層沿線上有許多重要建設(圖 1)，若山腳斷層發生錯動，單層或多次沉積之上覆土層所發展之剪切帶，將造成地表變形，使結構物發生破壞。因此為了解斷層錯動時，覆土層對斷層剪切帶發展之影響，主要分為山腳斷層之錯移量設計、山腳斷層全尺寸數值模擬以及生長斷層(growth fault)砂箱模型試驗。先以機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)推論山腳斷層在最大可能地震週期之基盤錯移量，再以數值方法模擬基盤錯動下，不同覆土層厚度剪切帶發展範圍之影響及地表差異變形之影響。最後利用砂箱試驗了解山腳斷層生長次層(growth strata)之沉積現象，模擬覆土層之變形情況以及影響範圍。

2.1 機率式斷層位移危害度分析

由於山腳斷層之位置等仍待釐清，因此採用機率式斷層位移危害度分析(Probability Fault Displacement Hazard Analysis, PFDHA)，將不確定之因素以機率分析方式加以改善，並考慮區域地質之不同，應用於山腳斷層上，建立一套分析方式。此方法學分為兩種方式進行分析(Youngs, 2003)[6]：

(1) 地震法 (Earthquake approach)

PFDDHA 的分析主要對時間、空間兩個部份進行討論。時間的部份，在地震法主要考慮斷層滑移速率、 b 值、最小地震規模 (m_0) 及最大地震規模 (m_u)，來計算特徵地震地震模式下，地震的累積發生率；空間的部分主要考慮地震規模、斷層的滑移量、場址與斷層線的距離，來計算平均一年中，超越特定位移量之累積發生機率。

將兩者所計算出來的機率結果相乘，即可知道在平均一年中，超越特定位移量之發生機率。

(2) 位移法 (Displacement approach)

在時間的部份，由斷層滑移速率控制，由歷史資料中斷層滑移量及所經過之時間，經過公式計算可得超越特定位移量之發生機率。

2.2 山腳斷層之基本假設及錯移量推估

(1) 斷層之位態

山腳斷層受到第四紀沉積物的覆蓋，傳統的野外地質調查方法並無法得知斷層的位置，斷層位置的確認主要依靠地質鑽探、地球物理以及地球化學等方法；斷層之位態無法得知，目前僅能得知一般正斷層為高斷層傾角之錯動行為，由中央地調所山腳斷層鑽孔調查結果，由斷層南段之樹林剖面 (圖 2) 做位態推論，假設山腳斷層之傾角為 60 度。

(2) 地層參數

在基盤深度的選取方面，利用臺北盆地基盤等深線決定剖面之基盤深度；覆土層力學性質方面，蔣佳興 (2006) [7] 從中興顧問股份有限公司之鑽孔資料 (2005) [8] 得到土壤單位重 γ 、由參數敏感度分析得到彈性模數 E 、土壤泊松比 ν 、靜止土壓力係數 K_0 ，進行分析，選取參數如表 1 所示。

(3) 山腳斷層錯移量推估

由機率式斷層位移危害度分析之方法學中的位移法 (鍾春富等, 2004; 2006) [9, 10]，可以得到基盤位移量超越指定值 d 與平均一年發生斷層錯動超越 d 的次數 (年發

生機率) 之危害度曲線圖。依據中央地調所臺北都會區地下地質與工程環境調查研究計畫地質深井鑽探結果得知，臺北盆地第三紀基盤深達 680 公尺，且由臺北盆地第四紀沉積物質之研究，推估沉積年代約為 40 萬年，由此估算山腳斷層之平均滑移速率約為 0.0017 公尺/年 (劉桓吉等, 2000) [11]；而利用鑽探岩心與定年資料，所計算出斷層中段過去 1 萬年內的垂直滑移速率約為 0.0018 公尺/年 (Huang, 2003) [12]。根據耐震設計基本目標，考量最大地震 (迴歸期 2475 年) 時，土壤內基礎產生塑性變形可達規定之上限值；因此，年發生機約為 0.0004，對應危害度曲線之滑移速率 0.002 公尺/年，可得到設計之斷層錯移量約 2.5 公尺 (圖 3)。

2.3 山腳斷層全尺寸數值模擬

依據臺北盆地第三紀基盤等深度線圖 (圖 4, 王乾盈、孫志財, 1999) [13] 所示，山腳斷層沿線基盤深度在五股地區基盤深度較深，在樹林地區較淺，因此本研究針對基盤深度在不同地區之差異，分別切剖面得到 700m、500m、300m、100m 四個基盤深度在設計之錯移量下，對上覆土層剪切帶之發展、地表垂直位移之變化進行探討。

2.4 山腳斷層之砂箱物理模型試驗

由前節之全尺寸數值分析，考慮不同覆土層厚度剪切帶的發展，發現較深之覆土層塑性應變帶並未發展至地表，與古地震之地陷證據未能相符，考量山腳斷層可能有多次沉積，造成剪切帶並非一次從基盤向上發展。在前人現地調查研究，發現正斷層的錯動若伴隨著沖積物的沉積，上盤之沉積層會有較下盤沉積層增厚的現象，一般稱為生長斷層 (growth fault) (謝昭輝, 2000) [14]。在沉積之後，若再次發生錯動，對於斷層錯動究竟會產生什麼影響，本研究欲嘗試了解。故利用砂箱試驗，先觀察沒有沉積的情況下，斷層分次錯動試驗所造成之影響；接者模擬有沉積的情況，即生長斷層試驗，將現地既有地質剖面縮尺寸，進行室內物理試

驗模擬山腳斷層上覆土層變形行為。

參、砂箱試驗及配置

3.1 砂箱配置

實驗砂箱主體尺寸為長度 100cm、寬度 20cm、高度 60cm，砂箱底板分為上盤及下盤兩部份，下盤固定於底座，上盤則由馬達所控制，可作雙向移動，模擬正斷層或逆斷層之斷盤錯動，基盤驅動系統角度調整器可調整 15 至 90 度，變化刻度為 5 度，以模擬斷層不同傾角，砂箱配置如圖 5 所示。試驗砂箱長度 100cm，寬度 20cm。本文所採用實驗砂為越南石英砂，礦物組成 99% 以上為石英，其粒徑分佈主要為 40 至 140 號篩之間，為均勻級配，由基本物性實驗，可得平均砂土比重 G_s 為 2.65，土壤單位重為 15.7 (kN/m^3)。實驗過程為斷盤之上盤沿傾角 60° 之斷層面向下滑移，以模擬正斷層斷盤錯動，實驗過程中利用固定距離下之相機進行連續拍攝，以觀察其剪切帶發展順序及行為。實驗所採用之砂土層總厚度為 20cm，控制其相對密度為 55%，孔隙比為 0.68。為能清楚觀察剪切帶的發展，石英砂在鋪設過程中，採用染色砂分層鋪設之方式將土壤分層，每鋪設 2cm 砂土層，加鋪設一薄層色砂，色砂材料為石英砂染色後烘乾。此外，在試驗過程中，係以連續照片中觀察色砂層之變化為主，在基盤抬昇過程時，當色砂層產生扭曲或剪動行為時，即代表剪切帶已發展至該色砂層高度。

3.2 分階錯動試驗

分階方式考慮無生長次層之情況下，在斷層傾角為 60° 度下，基盤分兩次錯動進行試驗，觀察分階錯動前後覆土層的變形行為，釐清對剪切帶的發展是否有影響。

3.3 生長斷層試驗

預先給予覆土層一錯動量，考慮在因沉積造成之生長次層，同樣給予斷層傾角為 60° 度的條件，觀察在含有生長次層之覆土

層，剪切帶之發展是否有所不同。

3.4 砂箱試驗規劃

規劃五組試驗如下，並將其整理(表 2)。

(1) 斷層傾角 60° 度，無生長層，單次錯動，錯動 6cm；為蔣佳興 (2006) 之重複性試驗 (圖 6)。

(2) 斷層傾角 60° 度，無生長層，分兩階錯動；每階錯動 3cm，共錯動 6cm (圖 7)。

(3) 斷層傾角 60° 度，有生長層，分兩階錯動，即生長斷層 (growth fault)；第一次錯動 5.5cm，第二次錯動 1cm (圖 8)。

(4) 第 (3) 組之重複性試驗。

(5) 第 (3) 組之重複性試驗。

肆、數值模擬結果

4.1 數值模擬

經進行邊界收斂分析、數值模型尺寸之邊界效應及網格切割數測試，並由山腳斷層之現地簡化剖面，考慮高斷層傾角 (60°) 對不同覆土層厚度的影響，利用第三紀基盤等深度線圖，取剖面中最深之基盤位置，決定山腳斷層沿線之基盤剖面深度 (圖 9)，得到 100m、300m、500m、700m 四個基盤深度 (圖 10)，將其分析結果之塑性應變帶以及垂直位移量作觀察比較。

4.2 塑性應變帶之發展

(1) 剖面 1 (基盤深度為 700m)

檢核初始應力狀態，如圖 11 (a) 所示，大地應力於平衡後土體垂直方向位移隨深度遞增，並確認其底部應力無誤。由圖 11 (b) 可知在錯移前其土體應於彈性狀態，無塑性應變之產生。

圖 12 為基盤錯移量分別為 1m 及 2.5m 之情況下，土體之塑性應變帶之發展情況，由圖中可知，在厚達 700m 覆土層其塑性應變帶之發展並未發展至地表，且僅發展至基盤破裂尖端附近。

(2) 剖面 2 (基盤深度為 500m)

確認檢核初始應力狀態，並由圖 13 可知，在基盤錯移量為 1m 時之塑性應變帶發

展，較 700m 厚之覆土層發展迅速；當錯移量達 2.5m，其塑性應變帶可發展至地表。

(3) 剖面 3 (基盤深度為 300m)

檢核初始應力狀態。由圖 14 可知，在基盤錯移量為 1m 時，塑性應變帶已發展至地表，且塑性應變量持續的在增加，至基盤錯移量為 2.5m 時，基盤破裂尖端處之塑性應變帶之增量最為明顯。

(4) 剖面 4 (基盤深度為 100m)

檢核初始應力狀態。從圖 15 可知，在基盤錯移量為 0.5m 時，塑性應變帶已發展至地表，之後塑性應變量持續增加，錯動至 2.5m 止。

伍、含生長斷層之砂箱試驗結果

利用間隔 2cm 左右之水平染色砂在斷層錯移時的扭曲，來觀察剪切帶的發展；在不同之錯移率（基盤錯移量/下盤覆土層厚度， $\Delta H/H$ ）的情況下，觀察剪切帶發展順序以及剪切帶的發展範圍（ W/H ），其中 W 代表斷層上盤尖端投影至地表之處，與地表剪切線之水平距離， H 代表覆土層厚度（圖 16）。

5.1 分階錯動試驗

試驗結果顯示在分階前後之剪切帶發展範圍均為 0.4，且分階後繼續錯移，並無新的剪切帶從基盤向上發展，砂土仍然沿著第一條剪切帶弱面向下滑移。此一現象說明在停止錯移給予其自重平衡，再錯動之情況，對於剪切帶之發展並不會造成影響（圖 17）。

5.2 生長斷層與單一覆土層試驗比較

在物理模型之生長斷層試驗中（圖 18），原單一覆土層第一條剪切帶在錯移率達 0.06 時，剪切帶發展至地表；而生長次層試驗顯示第一條剪切帶沿著原覆土層之剪切帶弱面繼續向上發展，且在錯移率達 0.02 時，含生長次層之上覆土層之第一條剪切帶即可發展至地表（表 3）；亦即含生長次層之上覆土層發展至地表之第一條剪切

帶，所需要之基盤錯移率僅為單一覆土層第一條剪切帶的 1/3。由此一現象顯示可推論，含有生長斷層之上覆土層在山腳斷層基盤錯動時，剪切帶會比單一覆土層更為快速發展至地表，且為沿著原覆土層之剪切帶弱面繼續向上發展，而非從基盤再次發展另一條新的剪切帶。

如以斷層擴展距離與上盤滑移量比值（ P/S ）進行比較，即以斷層擴展之初始值及目前斷層擴展尖端相連之直線 P ，與上盤初始位置與上盤目前所在位置相連之直線 S ，兩者相除進行剪切帶擴展過程之觀察發現，剪切帶從開始發展至地表，生長次層剪切帶之 P/S ratio 約可達為原覆土層 3 倍左右（表 4），由此顯示生長次層之剪切帶發展較為快速。

陸、結論與建議

由數值分析結果顯示，剪切帶之發展受覆土層厚度之影響，覆土層厚度越厚則在相同之基盤錯移量下，塑性應變帶越不容易發展，對於地表之結構物影響越小。而砂箱試驗結果則顯示分階錯動前後，原覆土層砂土層應力重新排列，對於剪切帶之發展無顯著之影響。而正斷層如含有生長層（生長斷層），當基盤錯動時，剪切帶會沿原覆土層之剪切帶弱面向上發展。且此剪切帶會比單一覆土層，更為快速發展至地表，錯移率僅需單一覆土層之 1/3 至 1/2。

故針對山腳斷層之週邊之重大工程設計分析，應需考慮生長斷層之影響，進行鑽孔調查是否有生長斷層之證據，生長斷層之剪切帶發展代表最近一次斷層錯動對上覆土層之影響，因此發展出之剪切帶為最危險之活動斷層線（active line），須特別加以注意。

參考文獻

- [1]林朝宗，「臺北都會區地質環境」，臺北都會區地質災害研討會論文集，第 1-1-1-19 頁（2001）。

- [2]李錫堤，「臺北都會區活斷層與地震災害潛勢」，臺北都會區地質災害研討會論文集，第4-1-4-19頁（2001）。
- [3]Huang, S.Y., C.M. Rubin, Y.G. Chen and H.C. Liu, “Prehistoric Earthquakes along the Shanchiao Fault, Taipei Basin, Northern Taiwan,” *J. Asian Earth S.*,doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.025 (2007)
- [4]石瑞銓，詹益湘，劉桓吉，「山腳斷層於關渡平原之淺層震測調查」，經濟部中央地質調查所特刊，第15號，第1-11頁（2004）
- [5]盧詩丁，劉彥求，衣德成，鍾令和，「山腳斷層調查與研究」，經濟部中央地質調查所九十三年度業務成果發表會手冊，九十三年度，第7-8頁（2004）。
- [6]Youngs R. R., “A methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA),” *Earthquake Spectra*, Vol.19, pp.191-219 (2003)。
- [7]蔣佳興，「正斷層錯移對上覆砂土層變形行為探討」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所（2006）。
- [8]中興工程顧問股份有限公司，「補充地質調查與試驗」，中正國際機場聯外捷運系統建設計畫報告（2005）。
- [9]鍾春富，林銘郎，「機率式斷層位移危害度分析初探」，岩盤工程研討會論文集。p216-p223（2004）。
- [10]鍾春富、蔣佳興、林銘郎、鄭富書，「機率式斷層位移危害度分析-以山腳斷層為例」，岩盤工程研討會論文集，p631-p640。（2006）。
- [11]劉桓吉，蘇泰維，李錦發，紀宗吉，林朝宗，「山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響」，經濟部89年度研究發展專題（2000）。

[12] Huang, Shao-Yi, “Prehistoric earthquakes along Shanchiao Fault, Taipei Basin, Northern Taiwan.” Master thesis, Central Washington University (2003)。

[13]王乾盈、孫志財，「台北盆地震測地層解釋」，經濟部中央地質調查所特刊，第十一號，p273-p292 (1999)。

[14]謝昭輝，「臺北都會區工程地質-泰山、關渡地區山腳斷層初期震源調查研究」，八十九年度都會區地下地質與工程環境調查研究計畫，臺北縣，經濟部中央地質調查所（2000）

表 1：全尺寸數值模形相關參數表[7]

參數		數值
土壤彈性參數	彈性模數 E	800 MPa
	柏松比 ν	0.3
土壤塑性參數	凝聚力 c	5KPa
	摩擦角 ψ	35°
靜止土壓力係數 k_0		0.43
土壤單位重 γ		20KN/m ³
土壤與基盤間摩擦係數 $\mu=\tan(2/3\psi)$		0.43

表 2：砂箱試驗規劃表

試驗	分階錯動	生長層	附註
1	×	×	
2	○	×	
3	○	○	
4	○	○	3之重複性試驗
5	○	○	3之重複性試驗

表 3：含生長斷層之砂箱試驗結果表

錯移率	剪切帶發展
0	覆土層鋪至 19cm 高
0.05	第一條剪切帶開始發展
0.07	第一條剪切帶發展至地表
0.11	第二條剪切帶開始發展
0.13	第二條剪切帶發展至基盤
0.18	第三條剪切帶開始發展
0.21	第三條剪切帶發展至地表
0.28	基盤錯移量 5.3cm
0	生長層鋪至 20cm 高
0.02	生長層第一條剪切帶發展至地表
0.04	生長層第二條剪切帶開始發展
0.11	生長層第二條剪切帶發展至生長層底部

表 4：含生長斷層之砂箱試驗 P/S ratio 比較表

發展情況	S (cm)	P (cm)	P/S
單一上覆土層			
剪切帶開始發展	1	12.3	12.09
剪切帶向上擴展	1.3	14.6	10.97
剪切帶發展至地表	1.4	19.8	13.83
含生長斷層之上覆土層			
剪切帶發展至地表	0.5	21.2	42.4

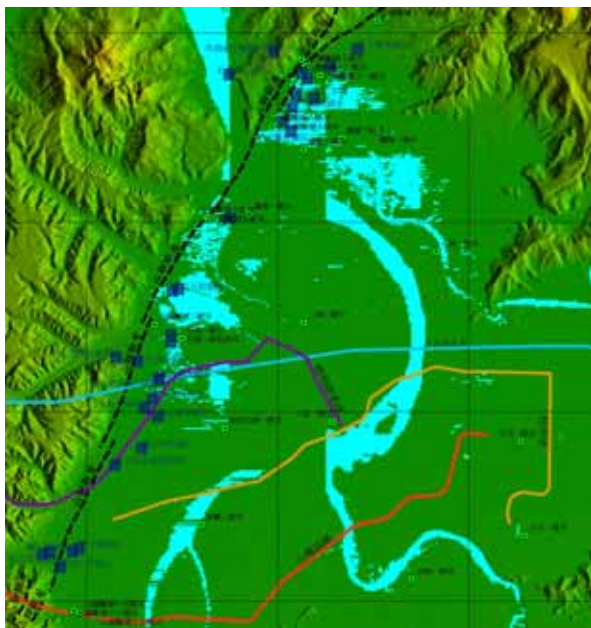


圖 1：山腳斷層沿線及周邊重要建設相關位置圖

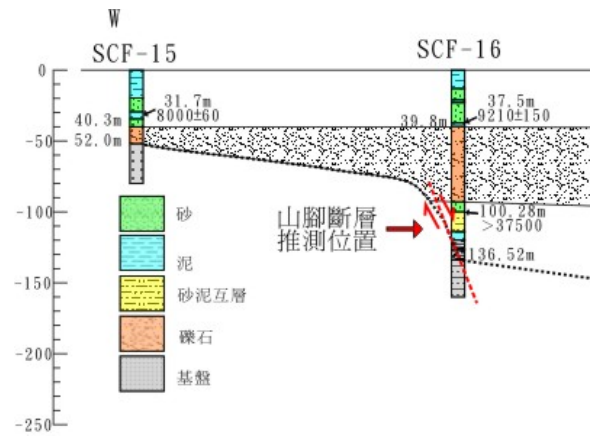


圖 2：山腳斷層斷層南段之樹林剖面柵狀圖

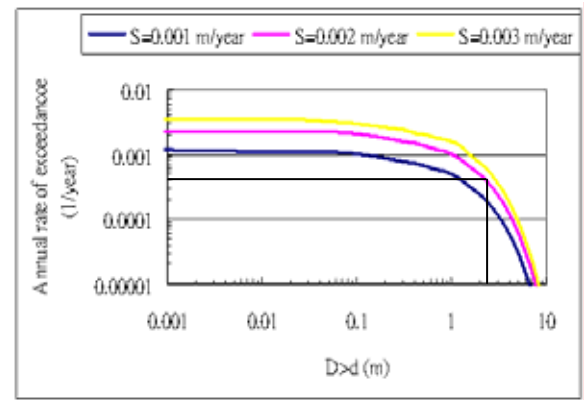


圖 3：利用機率式斷層位移危害度分析推估山腳斷層基盤錯移量圖

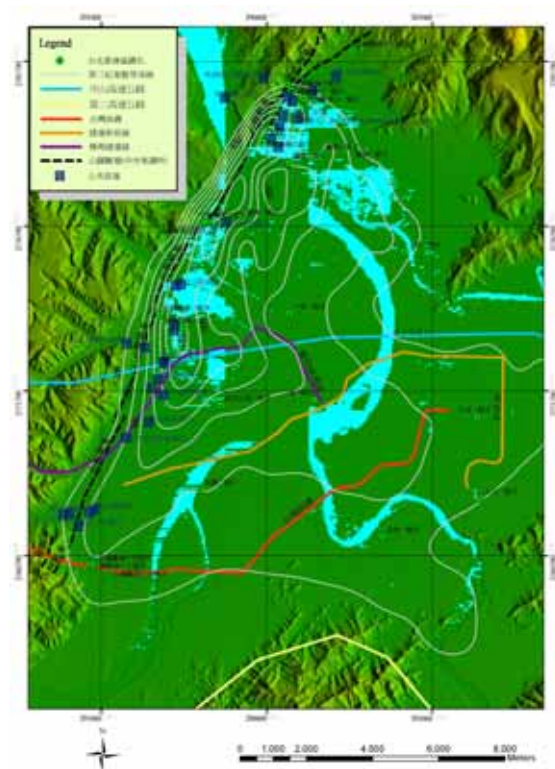


圖 4：臺北盆地第三紀基盤等深度線圖（重繪自王乾盈、孫志財，1999）

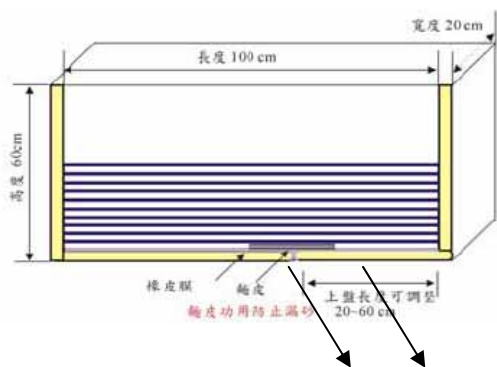


圖 5：砂箱試驗配置圖

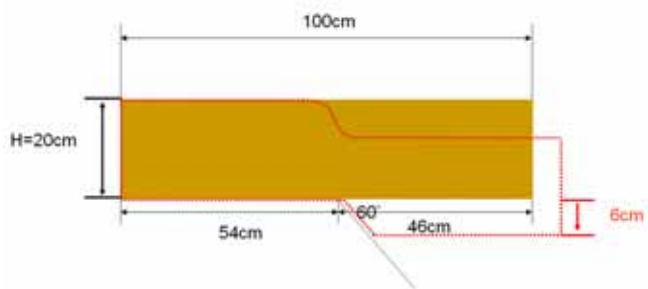


圖 6：斷層傾角 60 度無生長層砂箱試驗示意圖

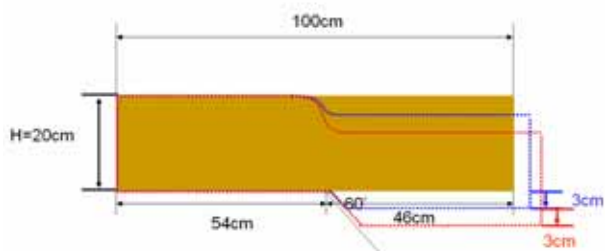


圖 7：斷層傾角 60 度無生長層分階錯動砂箱試驗示意圖

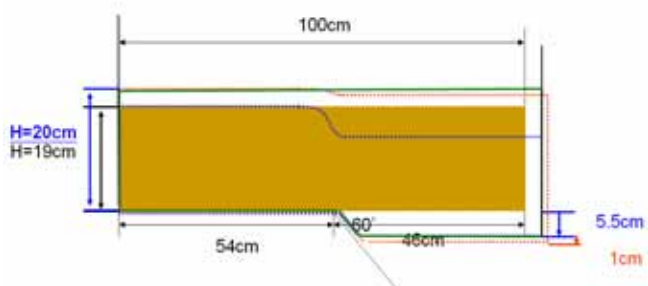


圖 8：斷層傾角 60 度有生長層分階錯動砂箱試驗示意圖



圖 9：本文於山腳斷層沿線之基盤剖面位置圖

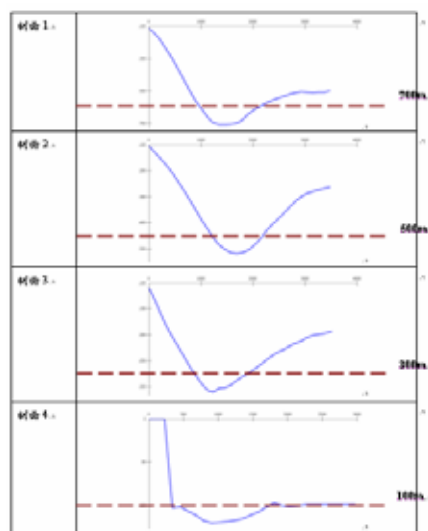


圖 10：前述各剖面之基盤深度圖

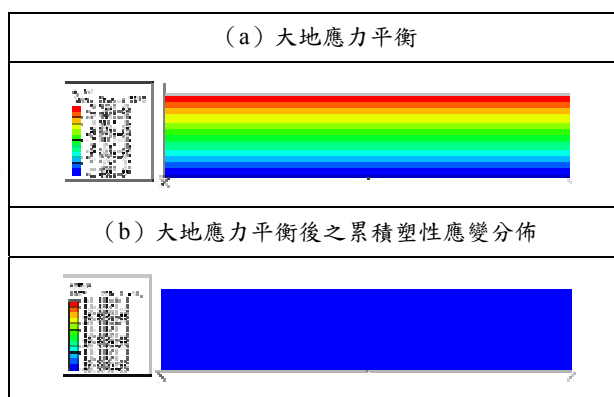


圖 11：數值模擬初始應力應變圖

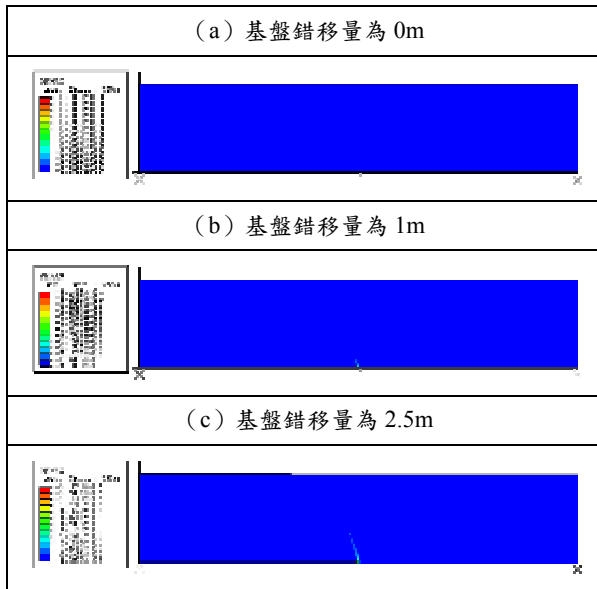


圖 12：數值模擬覆土層厚度 700m 塑性應變帶發展圖

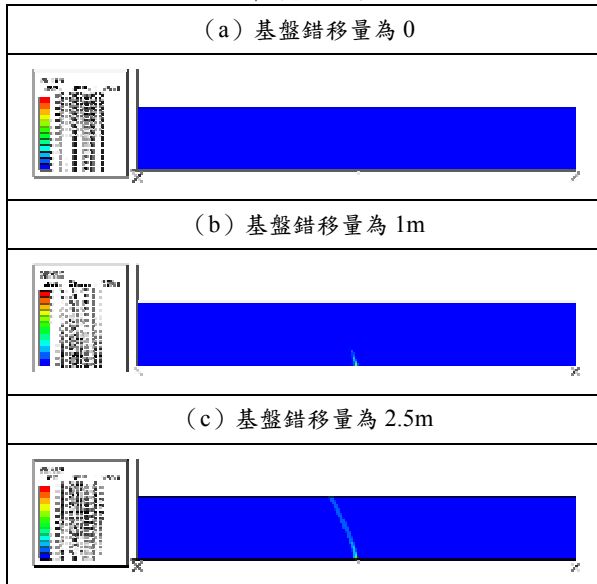


圖 13：數值模擬覆土層厚度 500m 塑性應變帶發展圖

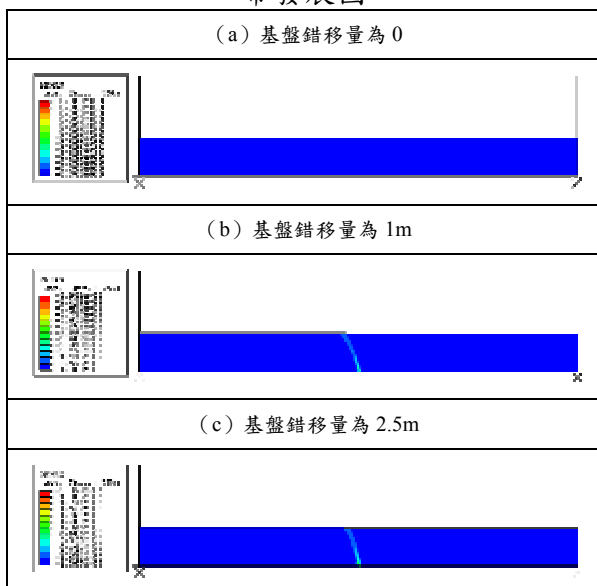


圖 14：數值模擬覆土層厚度 300m 塑性應變帶發展圖

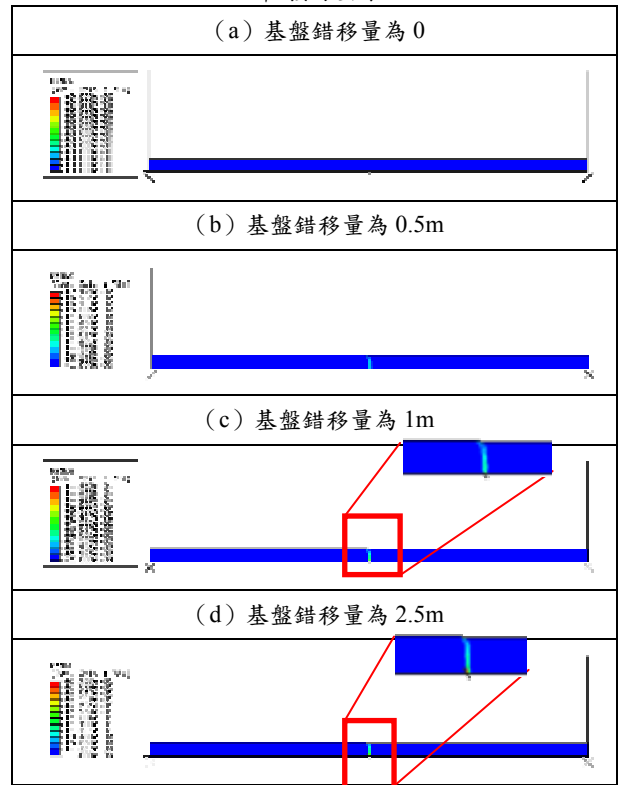


圖 15：數值模擬覆土層厚度 100m 塑性應變帶發展圖

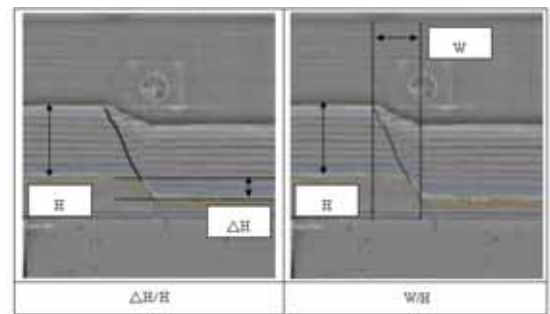


圖 16：砂箱試驗錯移率定義圖



圖 17：砂箱試驗分階錯動圖

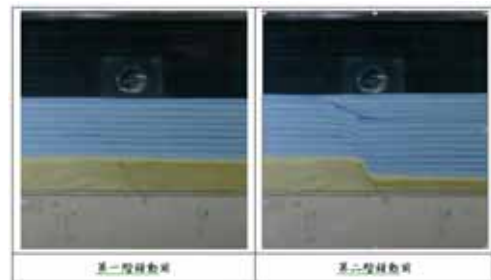


圖 18：含生長斷層砂箱試驗圖

行政院國家科學委員會補助國內專家學者

出席國際學術會議心得報告

96 年 08 月 13 日

計畫編號	NSC 95-2221-E-002 -258
計畫名稱	機率式斷層位移危害度分析之應用—以山腳斷層為例(2/2)
出國人員姓名	林銘郎
服務機關及職稱	國立台灣大學土木工程研究所副教授
會議時間地點	時間：2007/07/09~2007/07/12 地點：葡萄牙/里斯本
會議名稱	(中文) 第十一屆國際岩石力學會議 (英文) 11th ISRM Congress- The second half century of rock mechanics
發表論文題目	A Constitutive Model for Elastic Visco-plastic Behavior of Weak Sandstones

一、參加會議經過

本屆國際岩石力學會議我國(臺灣)計有 6 位研究人員參與，其服務單位、姓名與職稱整理如表 1。除中興大學壽克堅教授外，其餘 5 位結隊同行，與會過程整理如表 2。

本次大會提供每位與會人員會議論文集 2 冊，特殊場次研討會光碟資料 1 片。前述資料分由各與會人員妥善保存。

表 1 第十一屆國際岩石力學會議台灣與會人員

編號	姓名	服務單位	職稱
1	黃燦輝	國立台灣大學土木工程學系	教授
2	鄭富書	國立台灣大學土木工程學系	教授
3	林銘郎	國立台灣大學土木工程學系	副教授
4	壽克堅	國立中興大學土木工程學系	教授
5	翁孟嘉	國立高雄大學土木與環境工程系	助理教授
6	王泰典	國立台北科技大學材料與資源工程系	助理教授

表 2 第十一屆國際岩石力學會議與會過程摘錄

日期與時間	過程摘錄	備註
7/4 16:00	自台灣大學出發至桃園國際機場，搭乘 19:30 班機飛往西班牙馬德里	
7/8 16:00	抵達葡萄牙里斯本會議中心附近，入住飯店	
7/9~7/12 12:00	參與國際岩石力學會議	詳照片 1 至照片 14 說明
7/12 12:00	離開里斯本，前往馬德里	
7/17 10:40	自西班牙馬德里機場返台	
7/18 12:05	抵達桃園國際機場	



照片 1 第十一屆國際岩石力學會議地點
—葡萄牙里斯本會議中心



照片 2 第十一屆國際岩石力學會議報到
地點—左起王泰典、翁孟嘉、林銘郎、黃
燦輝、鄭富書



照片 3 第十一屆國際岩石力學會議主會場(1/4)－左起林銘郎、黃燦輝、翁孟嘉、鄭富書



照片 4 第十一屆國際岩石力學會議主會場(2/4)－左起林銘郎、翁孟嘉



照片 5 第十一屆國際岩石力學會議主會場(3/4)－左起黃燦輝、王泰典



照片 6 第十一屆國際岩石力學會議主會場(4/4)－左起林銘郎、黃燦輝、王泰典



照片 7 第十一屆國際岩石力學會議里斯本會議中心廣場留影—左起王泰典、黃燦輝、翁孟嘉



照片 8 第十一屆國際岩石力學會議開幕式



照片 9 第十一屆國際岩石力學會議大會演講 Ted Brown



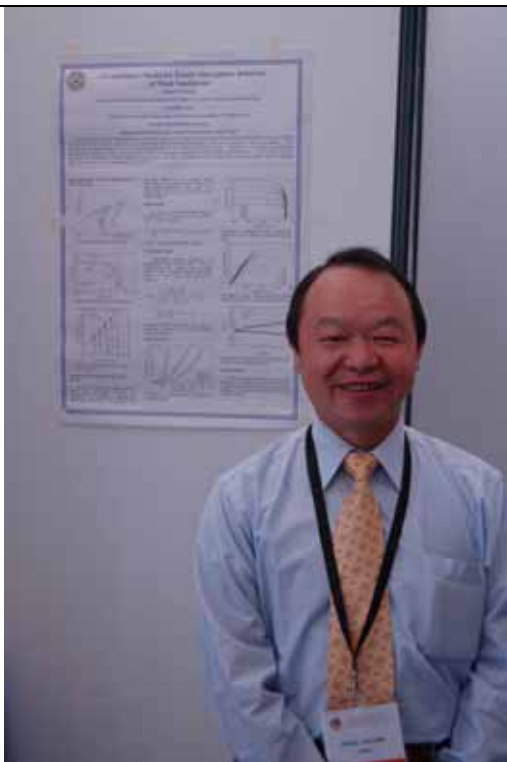
照片 10 第十一屆國際岩石力學會議岩石力學青年學者獎—洛佳獎頒獎(左起洛佳教授遺孀、第十一任國際岩石力學學會主席 Nielen van der Merwe 教授、得獎者 Hideaki Yasuhara 博士)



照片 11 第十一屆國際岩石力學會議海報發表會場



照片 12 第十一屆國際岩石力學會議台北科大材資系王泰典助理教授海報發表



照片 13 第十一屆國際岩石力學會議台大土木系黃燦輝教授海報發表



照片 14 第十一屆國際岩石力學會議台大土木系林銘郎副教授(右)與高雄大學土環系翁孟嘉助理教授(左)海報發表

二、與會心得

國際岩石力學會議(Congress of the International Society for Rock Mechanics)為國際上岩石力學界4年一度的全球盛會，自1966年於葡萄牙里斯本(Lisbon, PORTUGAL)首度舉辦以來，迄今已第十一屆。為慶祝岩石力學於二十世紀後半的蓬勃發展，本屆大會於2007年7月9日至13日重回里斯本，由葡萄牙大地工程學會(Portuguese Geotechnical Society, PGS)主辦，西班牙岩石力學學會(Spanish Society for Rock Mechanics, SEMR)共同主辦，並特別以「岩石力學的第二個半世紀(The second half century of rock mechanics)」為主題，結合會議前7月6日於西班牙馬德里(Madrid, SPAIN)舉辦的「特殊情況的地下工程(Underground Works under Special Conditions)」專題討論會(workshop W1)，會議後7月14日至15日於波大·德葛大一亞索里斯(Ponta Delgada – Azores)舉辦的「火山岩(Volcanic Rocks)」專題討論會(W2)，以及7月14日至15日於馬德里以及蛇姑飛亞(Segovia)舉辦的「自然岩石的保存與岩石風化(Preservation of Natural Stone and Rock Weathering)」專題討論會(W3)，回顧過往，兼備廣度與深度全面地探討岩石力學未來的展望。

本屆國際岩石力學會議擴大舉辦，收錄論文數量達286篇，創下以往的記錄，其中有關岩石力學特性與模擬(T2 主題)、隧道與地下工程(T4 主題)的論文，投稿論文數量分別為90與75篇，佔投稿論文總數比例31.5與26.2%，如同以往仍為國際岩石力學界最關心的課題。

國際岩石力學會議所發表的論文，循例按國家會員(National Group, NG)分配篇數。因國際情勢，目前台灣仍非國際岩石力學學會之國家會員，但仍突破重重限制，本屆共計發表論文5篇，由國科會自然處補助研究經費，其中4篇由國科會工程處補助研究經費，台灣發表之論文題目與作者整理如表3所示。

表3 第十一屆國際岩石力學會議台灣發表論文

編號	論文題目	主題 編號	論文集 頁數	作者	發表 型式
1	A constitutive model for elastic visco-plastic behavior of weak sandstone	T2	127-130	翁孟嘉、蔡立盛、 鄭富書、林銘郎	海報 發表
2	The use of a bonded-particle model for studying the mechanical behavior of weak rock	T2	491-494	鄭富書、李宏輝、 黃燦輝、謝佑明	口頭 發表
3	Elucidating the anisotropic squeezing behavior of New Guanyin Tunnel	T4	857-860	黃燦輝、陳正勳、 王泰典	海報 發表
4	Numerical analysis of soft rock tunneling in western Taiwan area	T4	959-962	壽克堅、Y. C. Chuang	海報 發表
5	Study on tunnel excavation disturbed zone in weak rock with time-dependent behavior	T4	1057- 1060	王泰典、羅偉、 丁原智、劉世桐	口頭 發表

綜觀本屆國際岩石力學會議的論文主題，有幾點值得思考與借鏡之處。首先是以 PFC 程式做為研究工具的論文數量不少，此一基於非連續體理論發展而來、利用顆粒膠結一流動觀念建立控制方程式的新興軟體於 2002 年左右發表，不過數年的光景，已於本屆會議發表了許多案例的模擬與機制的探討等，相較於 1990 年代許多依據非連續體理論建立的分析軟體發表初期的應用情況，如 DDA、UDEC 與 3DEC 等程式，研究期程明顯大幅縮短，國際間岩石力學研究在數值方法應用上的腳步大幅快速邁開，至為明顯。本人於近兩年國科會補助之研究計畫與未來三年補助之計畫，同樣也是運用到 PFC 程式作為分析工具，作為與砂箱物理模型比對校核之用，頗有英雄所見略同之感覺。

在投稿篇數較少的幾個主題方面，如 T5：地震工程與岩石動力學、T6：石油工程與碳氫化合物貯存、以及 T7：安全評估與風險管理等亦值得注意。地震工程與動力學的研究因 1960 年代數個大地震造成土層液化、結構物破壞的重大損害而受重視，在大地工程土壤領域已有較成熟的理論與分析方法，在岩石力學領域則應用較晚，本屆此一主題發表的論文，仍多以案例分析為主，如地下結構物的地震反應以及邊坡的受震分析等部份則以試驗或量測結果闡釋機制問題，如開炸引致岩體損傷、音射量測成果的解釋與應用等，尚無突破性的方法論。國內地質營力旺盛，岩體工程或多或少必然受地震等動力作用影響，近來地下工程受震反應亦受關注，岩石動力學的研究亦值重視與發展。

石油工程與碳氫化合物貯存主題收錄論文不多，論文多數依據實際案例背景進行試驗、監測與分析，部份論文報導岩體滲透性與水文地質概念與主題 2 相近，其涉及長期行為的預測部份則與主題 1 有關，未來亦可能為岩石力學與環境影響的另一個議題。

安全評估與風險管理僅收錄 9 篇論文，為本屆國際岩石力學會議 7 大主題論文數量最少者，論文內容多數是將安全評估的方法應用在實例案例進行討論、減少不確定性的方法、或是工程實例的風險管理，相對而言比較偏重創意與嘗試性的研究，成熟度略遜於其他主題的論文。惟安全評估與風險管理自 2000 年以來在大地工程領域快速發展，其與可靠度分析、性能設計法等的最新的分析與設計觀念，在安全性與風險性的定義上較為接近，評估結果較接近世界貿易組織有關降低貿易技術障礙的論點，相信在短期的未來，安全評估與風險管理在岩石力學領域亦將有另一番研究的高潮。

另外，本屆國際岩石力學會議新增的特殊場次研討會亦值得重視(表 4)，包括落石-機制與潛能評估(S01)、岩石力學資料(S02)、地下空間建築之革新(S03)、地球物理在岩石工程之應用(S04)、地下結構的維護與修補(S05)、採礦場之關閉(S06)、採礦(S07)、岩石爆破引致之震動(S08)、3D 雷射掃描在地工問題的應用(S09)、廢棄物之地下處置(S10)等新興的課程與技術，亦提供岩石力學未來研究方向的參考。

其中落石-機制與潛能評估(S01)之主題，為本人國科會計畫未來三年研究主要課題，藉此機會了解了國外發展趨勢與自己研究努力方向是否有獨到創新之處，收獲良多。

表 4 第十一屆國際岩石力學會議特殊場次研討會

編號	特殊場次主題	論文數量
S01	Rockfall – Mechanism and Hazard Assessment 落石－機制與風險評估	10
S02	Rock Mechanics Data: Representation and Standardisation 岩石力學資料：代表性與標準化	7
S03	Innovations in Underground Construction 地下工程的新技術	8
S04	Application of Geophysics to Rock Engineering 地球物理方法在岩石工程的應用	7
S05	Maintenance and Repair of Underground Structures 地下結構維護與修補	9
S06	Mine Closure 礦場關閉	7
S07	Mining 採礦	4
S08	Rock Blasting Induced Vibrations 岩石爆破引致之震動	8
S09	3D Laser Scanning Application to Geotechnical Problems 3D 雷射掃描在地工問題的應用	6
S10	Underground Waste Disposal: Progress and Challenges 廢棄物地下處置：進步與挑戰	10