

A study of the deformation of surface ruptures from fault activity

林銘郎<sup>1</sup>、李崇正<sup>2</sup>、黃文昭<sup>2</sup>、黃文正<sup>3</sup>、粘為東<sup>1</sup>、詹佩臻<sup>1</sup>、張有毅<sup>2</sup>、劉桓吉<sup>4</sup>、盧詩丁<sup>4</sup>、陳盈璇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>台灣大學土木工程學系、<sup>2</sup>中央大學土木工程系、<sup>3</sup>中央大學應用地質所、<sup>4</sup>中央地質調查所

摘要

根據近年來世界上幾個著名災害性地震之調查結果，顯示鄰近斷層帶之結構物受到地震破壞之原因。除了強地動外，另一主要因素為活動斷層之斷錯錯動所導致之近地表岩層變形。以1999年集集地震為例，在斷層作用時之斷層帶附近，大多數結構物均遭到嚴重損毀。然而少數結構物即便位於斷層帶，結構物本身卻僅有剛體位移或轉動而未受損。因此斷層作用時，近地表岩層變形行為與此一變形對人工結構物之影響，實有進一步研究之需要。目前對於活動斷層近地表變形特性的研究在研究方法大致上可以分為現地調查、物理模型試驗以及數值分析等三大類，本計畫之研究為突破單一方法學提出結果之侷限性，因此併用現地調查、物理實驗及數值模擬，分別進行基本行為觀察及定量分析。

本年度(第三年度)的研究規劃橫移斷層為主要研究對象，為了解斷層兩側岩層變形行為(包含剪切帶發育、遷移及影響參數等)、斷層錯移在近地表可能影響範圍；現地調查方面，本研究選定米崙斷層與美國舊金山灣地之黑沃斷層(Hayward Fault)為模擬對象，以鑽探資料或槽溝剖面建立簡化地層剖面，並提出簡化之土層參數。物理實驗方面，本研究今年已進行16組離心機砂箱實驗，探討正斷層錯動時，上覆土層變形行為及對結構物之影響；另外，以砂箱實驗配置與實驗所得之材料參數進行數值分析，以測定邊界條件及輸入參數之合理性。而在數值模擬方面，又分成連續體分析法及非連續體分析法，以砂箱尺度及全尺度數值分析探討正斷層作用、生長斷層作用時上覆土層變形行為，及其對人工結構物之影響，並提出較合理的安全性探討指標，作為判斷建築物安全性的參考。

透過不同分析方法了解斷層尖端擴展受上覆岩層對斷層跡修飾的效應，探討隨斷層尖端擴展主要變形區內土體內應力、應變的空間分布，未來可用於探討斷層作用時，其對結構物之影響，對學理上斷層帶縮短距離的決定相當重要。另外加強對斷層錯動-土壤-結構互制的了解，針對直接承受斷層錯動衝擊的結構物，如何強化結構設計，盡量減少衝擊的程度也是地震減災可行的方法。

前言

根據地調所2010年出版之臺灣活動斷層分布圖及地震地質與地變動潛勢分析計畫的研究成果，目前共有33條活動斷層，其中有20條是第一類活動斷層，本研究今年度之研究標的為橫移斷層。

Sylvester(1988)將橫移斷層分成處於相鄰板塊邊界上的轉形斷層及板塊內的橫移斷層兩大類。其中板塊邊界轉形斷層包括大洋脊轉形斷層、板塊邊界轉形斷層及海溝相關轉形斷層等三種；板塊內橫移斷層包括：板塊嵌入相關轉形斷層、撕裂斷層、轉渡斷層及大陸地殼內的轉形斷層等四種。其在大地構造上與板塊的相互關係見圖1所示。世界上知名的橫移斷層為數不少，其地表跡明顯且相當長外(幾乎皆超過一千公里)，且由歷史地震記錄可知，斷層的最大錯移量及最大地震矩規模皆以橫移斷層為冠。因此，橫移斷層的破壞力及對此類斷層研究的重要性。

本計劃為四年期之計劃，本研究報告為四年期計劃中第三年之計劃結果，主要研究標的為橫移斷層，然而，為將前兩年之計劃結果加以精進並因應計劃總成果，仍繼續對逆正斷層進行物理實驗及數值模擬，以下介紹米崙斷層簡化剖面、橫移斷層物理試驗、山腳斷層數值模擬及斷層影響範圍之結果。

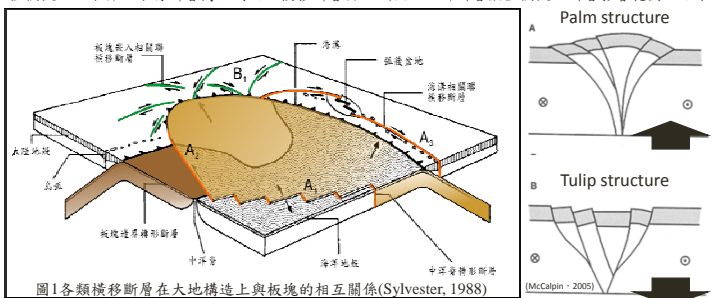


圖1各類橫移斷層在大地構造上與板塊的相互關係(Sylvester, 1988)

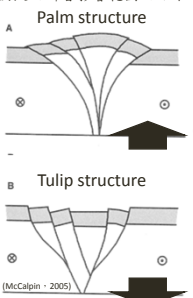


圖2 棕櫚樹構造

米崙斷層

本年度的研究標的為米崙斷層，1951年10月22日花蓮發生兩起強震，規模分別為Ms7.4及Ms7.2，造震斷層即為米崙斷層，是一左移兼具逆衝分量約呈南北向的橫移斷層，由花蓮縣七潭海岸向南延伸至花蓮市美崙山西南側，長約8公里。斷層走向為北偏東35度，為一高角度東傾左移逆衝斷層，斷層面傾角介在60-70度間。而米崙斷層與東部橫頂斷層、瑞穗斷層及池上斷層其深部可能為連貫的斷層帶，亦即分隔菲律賓海板塊和歐亞板塊的縫合構造，若根據Sylvester(1988)的分類，屬於板塊邊界轉形斷層，而地表的這些斷層跡，應為轉形斷層在簡單剪力作用搭配聚合的效應下，所形成的類似棕櫚樹的構造(圖2)。圖3為斷層位置圖及本研究所用資料之鑽井位置圖，由鑽井資料，本研究建議之土層簡化分層如表1所示。

表1 米崙斷層建議簡化土層分層

Table with 5 columns: Depth (m), SPT-N, Soil description, Friction angle (degrees), and Young's Modulus/Poisson Ratio. It lists three soil layers with their respective properties.



橫移斷層砂箱試驗

根據前人砂箱試驗結果，在俯視圖中最顯著的橫移斷層特徵為雁型排列(圖4)，而在垂直斷層線的剖面圖中最顯著的則是花狀構造(圖2)。本研究總共進行3組覆土層厚度6公分之橫移斷層試驗，三組試驗為別比較先抬升後橫移及先橫移後抬升的影響，橫移量皆為2公分，而抬升量皆為1.5公分。試驗中滑移及抬升各階段進行拍照及地表掃描。試驗結果如圖5(俯視圖)及圖6(剖面圖)，顯示地表有明顯破裂跡產生，且破裂方向與雷氏剪裂相同，而抬升時抬升側會產生圓弧狀破裂跡，砂顆粒由抬升側滑落在未抬升盆。如果以剖面圖來看，則可以看到花狀構造，且花狀構造會因為抬升的作用而更加明顯。

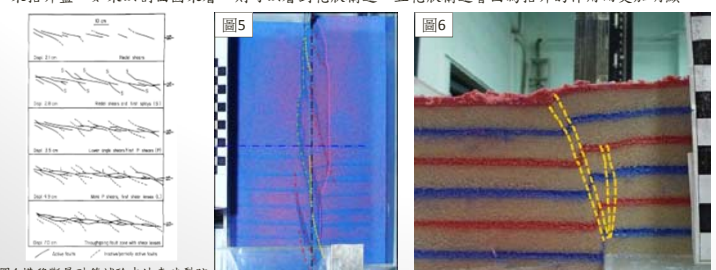


圖4 橫移斷層砂箱試驗中地表破裂跡的演化(Naylor et al., 1986)

山腳斷層數值模擬

由鑽探資料可以發現山腳斷層附近之基盤深度可從數十公尺至七百公尺不等(Lin CZ, 2005)，在覆土層較厚之處，沉積物必定是在斷層錯動前後進行多次沉積，緩慢增加沉積物之厚度。因此，既然非一次沉積，探討多次沉積實屬必要。本研究之山腳斷層現地數值模擬係參照台北盆地內之鑽孔剖面中五段剖面的結果(圖7(a))。SCF-2與WK-1E之水平距離約為650公尺，SCF-2之基盤深度為157.64m，而WK-1E的基盤深度達到675m。根據劉桓吉(2000)的研究指出，在SCF-2岩心中可以看到137m至156.3m的互層構造呈現層面傾斜及正斷層的小構造，其層面的傾角由淺而深，逐漸變陡，推測此一構造可能是山腳斷層上盤的未固結沉積物，受到山腳斷層下滑時的拖曳作用造成。林朝宗(2001)則指出，由SCF-2岩心可知在斷層面上20公尺範圍內的台北盆地第四紀沉積物仍受到斷層活動的影響。

本研究進行山腳斷層數值模擬基於以下幾點假設：(1)基盤每次錯動2.5m，亦即此處的上盤基盤共經歷了169次錯動陷落。(2)此處的上盤經歷了同樣次數的沉積而形成169層生長地層。(3)為上盤(WK-1E)基盤675m的厚度，上盤每次生長4m。(4)下盤層每次生長1.5m。而數值模擬所選用之顆粒密度為2600(kg/m³)，摩擦係數為0.364，K<sub>n</sub> = K<sub>no</sub>(σ<sub>v</sub>'/σ<sub>vo</sub>')<sup>0.4</sup>；K<sub>no</sub> = 4.08 × 10<sup>6</sup> (N/m)，注意K<sub>n</sub>皆根據其深度修正，而K<sub>s</sub>為K<sub>n</sub>之1/3。

模擬結果如圖7(b)，由模擬結果可以看到每一層生長層的頂部在沉積物都是水平的，但隨著上盤持續陷落，原本的水平面會開始受到擾動。而出現錯移、傾斜，甚至，有些上層已經變形成垂直的走向，且原本在下的地層還有可能出現在上的現象。以上現象明顯的呼應了劉桓吉(2000)及林朝宗(2001)所看到在SCF-2鑽孔裡所看到的擾動現象。

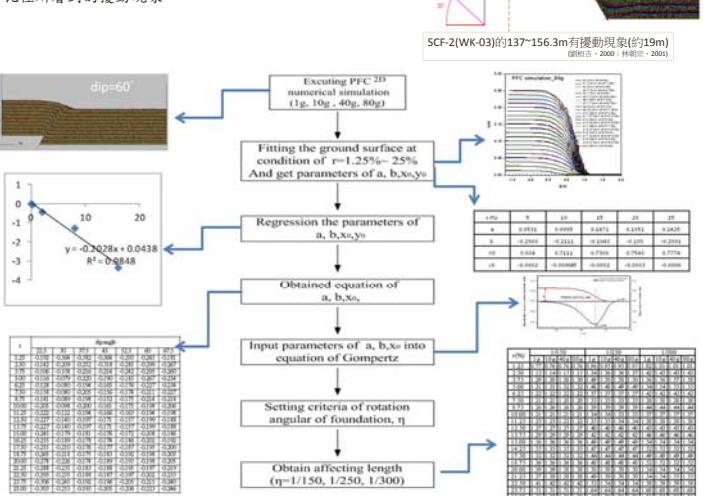


圖8 求取地表影響範圍流程圖

斷層影響範圍

由80g的試驗條件下進行離心模型逆斷層錯動試驗，顯示地表變形剖面是一sigmoid函數，本研究選用Gompertz函數來模擬地表變形剖面：

Equation (Eq.1) and (Eq.2) defining the Gompertz function f(x) and its derivative f'(x) with parameters x0, x1, x2, and y0.

斷層錯動所造成地表變位剖面的形狀、範圍及高程變化，可以用來評估合理的建物後退距離。構造物之容許沉陷量視地層、基礎型式、載重大小、構造物種類、使用條件及環境因素而異，一般以差異沉陷所產生的容許角變量來設計。本研究所定義之地表變形影響範圍(affecting length)係採用建築技術之規定，當建築物角變量達1/150時建築物開始產生損害。若我們將角變量達1/150代入(Eq.1)，則可求得x<sub>1</sub>與x<sub>2</sub>值，x<sub>1</sub>與x<sub>2</sub>間之距離定義為斷層錯動後地表變形的影響範圍。

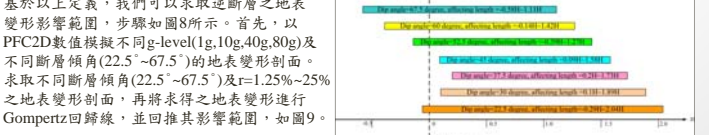


圖9 不同斷層傾角之斷層於錯動比=25%時之地表影響範圍

結論

本研究利用校正過的微觀參數，進行不同逆、正斷層傾角的數值模擬，可以建立不同斷層錯動量下的地表變形剖面。本文提出(Eq.1)、(Eq.2)及圖15來進行初步評估及預測，圖16即為初步預成果。但由於目前尚未有詳細PF2D離心機上的巨觀參數轉為微觀參數的研究或公式，因此，為了能在第四年之研究成果中提出適合臺灣活動斷層之變形模式與範圍之經驗式或圖表，展示出不同性質之土層中影響範圍的成果，本研究未來之工作重點即找出砂土及黏土材料在物理實驗及數值模擬之間的關連，才能利用符合現地之土層參數之數值模擬參數進行數值模擬，並求取影響範圍。另外，由山腳斷層之數值模擬結果可以看到剪切帶內的土層因受到多次錯動的作用而傾斜甚至變得極陡，此一現象與SCF-2鑽井內所看到的現象相同，由此數值模擬及鑽井資料比較的結果可以確定這一件事。