

# 山腳斷層再活動對大台北地區地變、淹水災害 及鄰近斷層觸動之探討

蔡家民<sup>1</sup> 黃文正<sup>1,2</sup> 詹佩臻<sup>3</sup> 盧詩丁<sup>4</sup>

## 摘要

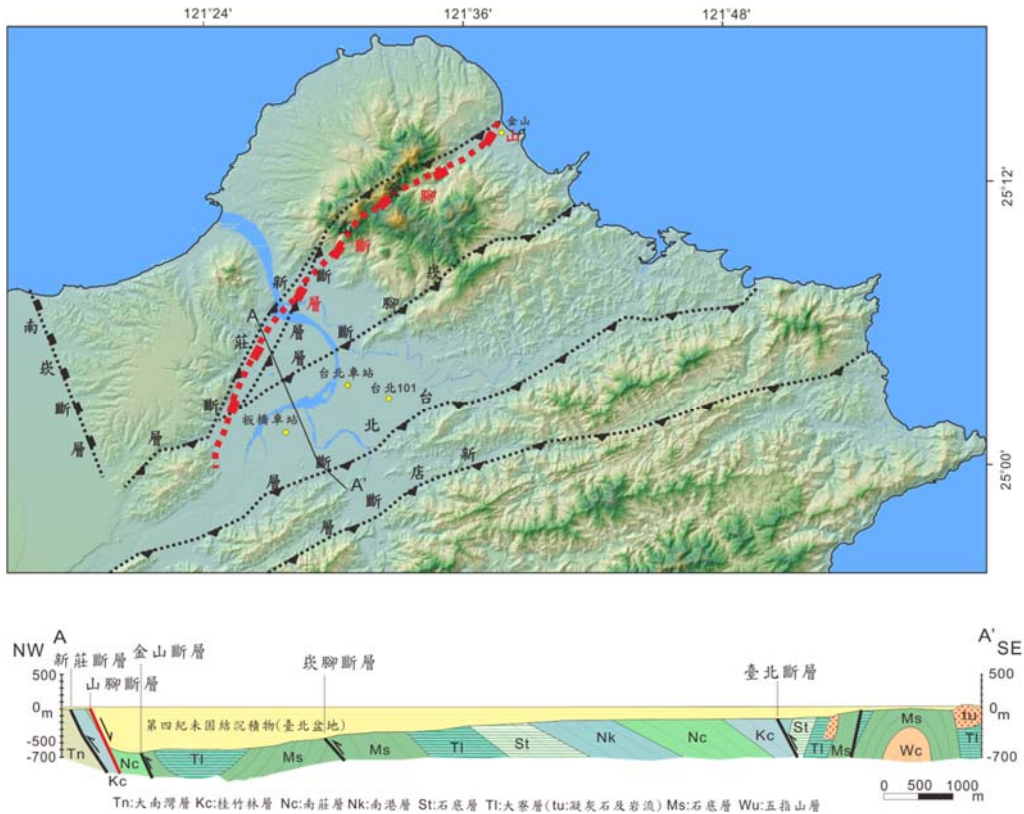
山腳斷層位於台北盆地西緣，為北北東-南南西走向向東傾的正移斷層，地表為第四紀未固結的沉積物所覆蓋，推估陸地上的斷層長度約 34 公里，若含外海延長部份則可達 83 公里以上；根據鑽探資料，在關渡地區斷層兩側第三紀岩盤的落差可達七百公尺，顯示台北盆地的陷落形成和山腳斷層的活動密切相關，加上目前台灣北部處於西北西-東南東伸張環境，山腳斷層再次活動的可能性極高。本研究藉由地質、地物資料建立山腳斷層面的幾何分布，利用錯動理論模擬山腳斷層活動時可能造成的地表下陷及淹水危害，再以庫倫應力觀念探討大台北地區數條不同斷層受觸動的可能性。根據經驗公式，山腳斷層可能造成的最大地震接近規模 7.5 ( $M_w = 7.39 \pm 0.34$ )，以此規模進行模擬，產生的最大沉陷量約 3.25 公尺，地變下陷區範圍約呈扁長的橢圓形，平行且西界緊鄰山腳斷層，可能的淹水區大致上相當於臺北盆地內下陷區的西半部，約 60 平方公里；金山沿海地區海水入侵約 0.8 公里，可能的淹水總面積約 2 平方公里。各鄰近斷層不似有觸發大面積錯動的可能性；然而，淺部 0-4 公里，為庫倫破壞應力增加區，將可能有較頻繁的觸發小地震發生。

**關鍵詞：**山腳斷層、活動斷層、地震災害、庫倫破壞應力

- 
1. 國立中央大學地球科學系 (Department of Earth Sciences, National Central University)
  2. 國立中央大學應用地質研究所 (Institute of Applied Geology, National Central University)
  3. 臺灣大學土木工程學系 (Department of Civil Engineering, National Taiwan University)
  4. 經濟部中央地質調查所 (Central Geological Survey, MOEA)

## 前言

大台北地區為台灣政經中心，同時也是台灣人口分布最為密集的區域，整體人口達七百萬，為世界前五大都會區之一。然而，台灣島位處歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界，由於造山作用伴隨的一系列構造運動，使得島上有著為數不少的斷層構造，並且地震活動頻繁，在人口密集的大台北地區就存在著數條長度超過20公里的斷層（圖一），若這些斷層產生相當規模的地震活動，便可能對大台北地區造成不可小覷的災害。根據近幾十年來的地質調查以及鑽井資料的分析結果（林朝宗與李錦發，1997；劉桓吉等，2000、2002；陳致同，2012），山腳斷層被認定為是台北都會區中最具致災潛能的活動構造，它的活動歷史無疑地與台北盆地之形成密不可分（Teng and Lee, 1996；Teng *et al.*, 2001；陳文山等，2008），它的威脅性也因為1694年發生的康熙台北湖（林朝榮，1957；謝英宗，2000；趙丰，2011）以及1867年之基隆海嘯（徐泓，1983；林明聖，2006）兩起事件的古文獻研究報導，挑起了一波波的爭論。於2007年邱俊穎（2007）、邱俊穎等（2007）及2010年Lai *et al.*（2010）即針對山腳斷層的再活動，以地震矩規模7的斷層錯動，模擬台北盆地內的地形變化及可能的淹水情況。然而，2011年日本福島的311核能事故之後，國內對核四廠的續廢建和核一、核二及核三安全性議題，再興爭議高潮，除再次嚴格地檢視各核能廠設備及既有的地質地物資料外，也挹注大筆的經費對各廠址週遭進行各種地質地物調查，因此對山腳斷層也有較新穎的資料及認知，特別是其海外延伸的情形，這使得山腳斷層的長度，被認為大有可能比原本認知的還要更長（中央社等，2011；陳冠宇，2014）。換言之，可能造成的最大地震矩規模也將隨之變大。本研究仿照邱俊穎（2007）及邱俊穎等（2007）所採用的斷層錯動模型，對山腳斷層再活動可能造成的影響再作探討，根據近年來對山腳斷層長度瞭解的更新資料，將地震矩規模調高為7.5，模擬山腳斷層錯動後，對台北盆地及金山地區可能造成的地表下陷及淹水危害情形，並以庫倫應力觀念探討大台北地區數條不同斷層（圖一）受觸動的可能性。



圖一 大台北地區主要斷層分布圖。金山斷層、新莊斷層、山腳斷層、南崁斷層地表跡，參考林啟文等（2007）；崁腳斷層、台北斷層、新店斷層參考自張徽正等（1998）。紅色虛線為山腳斷層地表投影跡，黑色虛線為鄰近斷層地表投影跡。垂直剖面圖修改自許劭禎（2013）。

Fig. 1 Major fault map in the Greater Taipei area. The red dotted line denotes the projected fault trace of the Shanchiao fault, and the black dotted lines the projected fault traces of major neighboring faults.

## 山腳斷層的相關研究

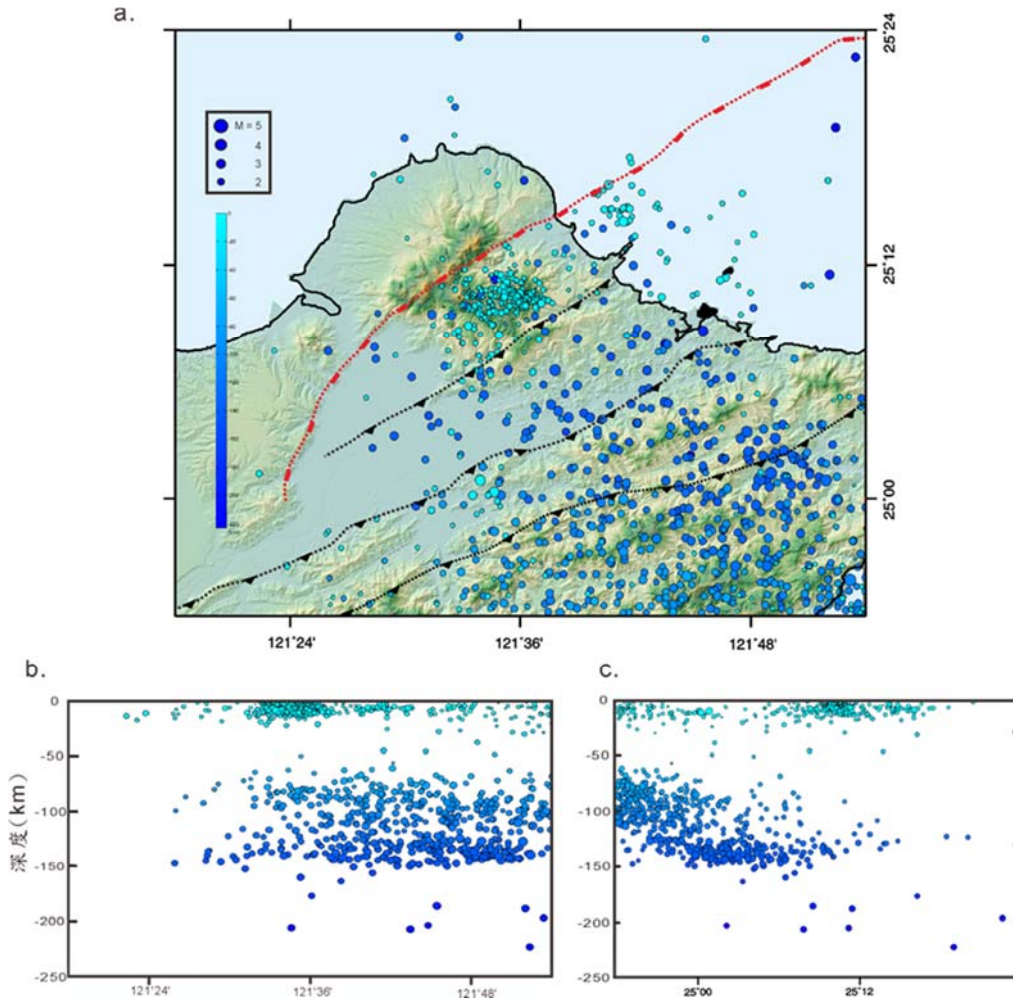
在斷層長度的報導，根據中央地調所的活動斷層研究（林啟文等，2007），山腳斷層為正移斷層，呈北北東走向，在台灣本島上全長約34公里，分南北兩段（圖一）：南段以新北市樹林向北延伸至台北市北投區，長約13公里，為第四紀沖積層所覆蓋；北段則由北投向北延伸至台北金山，長約21公里，為大屯山的火山岩覆蓋。而海外延伸的區域，蕭力元（1996）及黃雯苓（2007）皆指出在金山外海有一正移斷層，此正移斷層可能與山腳斷層有連接的關係，向外

海延伸約20公里長。2011年9月16日中央社等（2011）報導台電公司公告的最新報告指出山腳斷層外海延伸至少達40公里，最長延伸至棉花峽谷，海陸域總長約120公里。陳冠宇（2014）根據鑽孔岩心資料及外海的反射震測資料，指出山腳斷層陸上加外海的延伸，最長可達83公里，以接力斷層（*relay faults*）的樣態出現。

在斷層深部構造的研究方面，蘇泰維等（2003a、2003b）報導在SCF-15以及SCF-16號井的基盤面有較明顯的落差，並且在SCF-16號井深120.3-123.2公尺之岩心夾有斷層泥，斷層面約70-80度。石瑞銓等（2004）於關渡平原震測結果顯示斷層呈現高角度向東南傾斜；戴榮興（2000）在泰山、五股、蘆洲、關渡分別進行震測，結果顯示斷層傾角呈75度以上之高角度（剖面深度約300公尺）；而簡志宇（2008）針對關渡以及五股蘆洲地區同樣進行震測研究，結果顯示斷層之傾角約呈50度向東南傾斜（剖面深度約1公里）。陳致同（2012）報導山腳斷層是由一高角度的主斷層以及西側一較低角度的分支斷層所組成，具有左移的分量而呈現負花狀構造（*half-negative flower structure*）。

在斷層活動性的研究方面，謝英宗（2000）認為清康熙三十三（西元1694）年之『康熙台北湖』可能為山腳斷層活動所造成台北盆地的洪泛災害。林朝宗（2001）及陳文山等（2008）由鑽井資料判定第三紀沉積岩基盤在山腳斷層附近可深達700公尺以上，認為山腳斷層的活動使盆地內第三紀沉積岩基盤持續下陷。而基盤陷落的深度盆地西北區最深向東南變淺（劉桓吉等，2000、2002；林朝宗，2001、2005），這顯示斷層在盆地西北緣的活動性較高（邱俊穎等，2007）或有較大的累加地震垂直變位量。Huang *et al.*（2007）根據鑽井資料，認為一萬一千年以來，山腳斷層至少發生過三次的地震事件，而其垂直滑移量介於2.3公尺至4.5公尺之間。侯進雄（2007）、饒瑞鈞等（2010）及Chang *et al.*（2010）利用不同的大地測量方式，皆報導山腳斷層兩側在地表變形行為上有所差異。然而，氣象局2000-2010年全台地震紀錄，在山腳斷層並沒有明顯的地震活動紀錄出現（圖二）。陳致同（2012）由生長斷層的同構造沉積物堆疊架構，認為山腳斷層自末次冰期以來持續活動，且兩萬三千年來主斷層的平均垂直向構造滑移速率約為2 mm/yr 而分支斷層約為1 mm/yr，而九千至八千四百年前的六百年區間紀錄到特別高量的構造沉陷（主斷層7.4公尺，分支斷層3.3公尺），與前人提出該時段內曾發生古地震的觀察相吻合。陳冠宇（2014）指出1867年的基隆海嘯，可能為地震規模6.8~7.22的正滑斷層活動所引發，與山腳斷層外海延伸長度可能引致的地震規模大致相符，值得注意。

此外，有關目前台灣北部的應力狀態研究，余水倍等（1999）報導於1991至1996年間之GPS測量結果顯示，整個台北GPS網大致呈西北西—東南東向的伸張。而邱紀瑜（2010）計算2006至2010年之台北地區應變速率場也顯示其最大主應變呈西北西—東南東方向，為伸張應變，皆說明台灣北部目前處於一西北西—東南東向伸張型的大地構造環境。

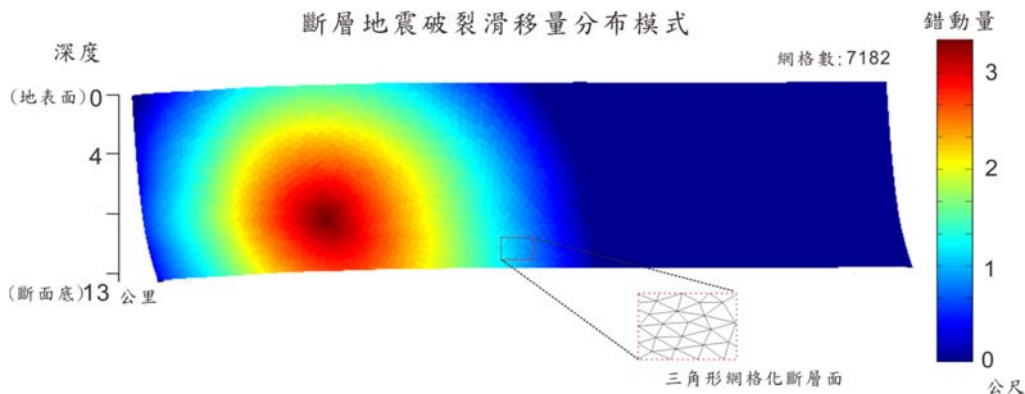


圖二 2000 年至 2010 年台灣北部地震紀錄分布。a. 為地震分布鳥瞰圖；b. 為東西向地震深度分布；c. 為南北向地震深度分布。紅色點線段為山腳斷層，黑色點線段由北至南分別為崁腳斷層、台北斷層、新店斷層。（資料來源為中央氣象局提供）

Fig. 2 Distribution of earthquakes occurring between 2000 and 2010. (data source: Taiwan Central Weather Bureau) a. map overview, b. west-to-east profile, and c. north-to-south profile.

## 研究方法

研究方法本研究利用靜態的（static）斷層錯移模型，模擬地震後，因山腳斷層兩側岩體的相對錯移，對大台北地區的地殼所引致之變形及應力變化。此模型將地殼岩體視為一具有水平自由面(亦即地表面)，且往兩側及往下無限延伸的彈性體，斷層面則視為彈性體中的不連續面；斷層面的生成，是以商業套裝軟體cubit，依據實際的斷層幾何形貌，產生一組三角形所構成。斷層兩側岩體的相對錯移情形，即斷層面上的錯動量分佈，則採用Kim 和Sanderson（2005）的地震破裂滑移模式，並簡化地以震源為圓心且為錯移量最大處，幅射狀地往外遞減直到錯移量為零。此外，組成斷層面的各個小三角形錯動面（如圖三所示），則以角錯動理論（angular dislocation theory）模擬，此理論提供彈性體在斷層錯動後在各處所造成的位移量及應變與應力張量之解，累加所有小三角形錯動面的效應，即可求得山腳斷層錯動所引致的地殼變形及應力改變，我們的數值模型即利用Meade（2007）所提供的角錯動理論之Matlab程式為基本架構所建立。底下我們進一步說明斷層幾何形態的建立依據、地震矩規模與滑移量之推算及庫倫破壞應力。



圖三 地震破裂滑移量分布模式。此三維網格化斷面為參考山腳斷層的幾何參數值所建立的。

Fig. 3 Slip distribution model of earthquake rupture on meshed Shanchiao fault.

### 斷層幾何形態之建立

為了對山腳斷層錯動進行地表變形的模擬，首先必須將山腳斷層，予以三維空間的網格及數位化。在斷層地表線跡的分布情形，於台灣本島的部分參考林啟文等（2007）；而在外海之部分，採納黃雯苓（2007）所繪製之台灣東北

外海斷層分佈圖，將金山正移斷層外海延伸之部分視為山腳斷層向外海的延伸。斷層全長約為54公里，若採用的斷層長度超過此值，延伸的部份則參考陳冠宇（2014）所彙整的台灣東北外海斷層分佈圖。斷層傾角之變化，我們參考在淺部震測所得出之山腳斷層傾角（簡志宇，2008），將其向下延伸，並在深部給予一傾角變緩之變化。這段傾角變化的假設則是考慮正移斷層的傾角常會隨深度變緩，呈現鐘狀（listric）（Davis *et al.*, 2011），因此在深部漸變其傾角由60度轉變為30度。圖三即為利用Cubit軟體所建立的山腳斷層網格化圖，共由7182個三角形網格所組成，詳細的斷層幾何參數彙整於表一。我們利用同樣的方法建立鄰近的幾條主要斷層以利於庫倫破裂應力之求得，參考的幾何形態資料如圖一及表二。

表一 山腳斷層幾何形態及力學參數

Table 1. Values of geometric and mechanical parameters for Shanchiao fault.

山腳斷層	斷層參數	參數值		參考文獻
	斷層長度	南段（樹林向北伸至北投）	13km	林啟文等（2007）
北段（北投向北延伸至金山）		21km	林啟文等（2007）	
海外延伸		約 20km	蕭力元（1996）； 黃雯苓（2007）	
寬度	深度 / sin 傾角	18.4km		
深度	深度參考莫荷面深度(岩石圈深度)	13km		
面積	長度x寬度	1012km <sup>2</sup>		
走向	北北東-南南西		林啟文等（2007）	
傾角 <sup>[1]</sup>	淺部（0-9 公里）	60°	戴榮興（2000）； Shyu <i>et al.</i> , (2005)； 簡志宇（2008）； 石瑞銓等（2004）	
	深部	30°	邱俊穎等（2007）	
<b>其他參數</b>				
剪力模數	1.5 Gpa			
泊松比	0.25			
視摩擦係數	0.4			

註：[1]斷層面於深度9公里處，有傾角上的變化，乃參考蕭力元（1996）的震測剖面解釋。

表二 大台北地區主要斷層資料彙整

Table 2. Values of parameters for main faults in the Greater Taipei area

斷層	方位	斷面傾角	斷層長度
金山斷層	東北 <sup>[1]</sup>	30° E~45° E <sup>[2]</sup>	34km <sup>[1]</sup>
新莊斷層	東北 <sup>[1]</sup>	30° E~45° E <sup>[2]</sup>	20km <sup>[1]</sup>
炭腳斷層	N60° E <sup>[3]</sup>	東北段 40° E~60° E 炭腳以南 22° E <sup>[3][4]</sup>	20km <sup>[3]</sup>
台北斷層	N60~70° E <sup>[5]</sup>	60° E 深部為低角度 <sup>[6]</sup>	60km <sup>[7]</sup>
新店斷層	東北東 <sup>[8]</sup>	65~70° E <sup>[7]</sup>	>70km <sup>[7][8]</sup>

註：[1]市川雄一(1930)、[2] 邱華燈(1968)、[3]黃鑑水等(1991)、[4]Ho (1974)、[5] Ho *et al.*, (1963)、[6] 黃鑑水(1998a、1998b)、[7] 何春蓀(1983)、[8]黃鑑水等(1994a、1994b)。

### 地震矩規模與滑移量之推算

在不同地震矩規模下，滑移量的大小及分布情形當然會有所不同。我們利用Wells 和Coppersmith (1994) 提出的地震矩規模 $M_w$ 與正滑斷層地表破裂長度SRL之經驗公式，取決可能的最大地震矩規模：

$$M_w = 4.86 + 1.32 \times \log(SRL) \quad \text{式 1}$$

如果採納的山腳斷層地表破裂長度為34公里（林啟文等，2007），可能的最大地震矩規模為 $6.88 \pm 0.34$ ；若是地表破裂長度為54公里（林啟文等，2007；蕭力元，1996；黃雯苓，2007），可能的最大地震矩規模為 $7.15 \pm 0.34$ ；若長度為地表破裂83公里（陳冠宇，2014），可能的最大地震矩規模為 $7.39 \pm 0.34$ 。基於可能的地表破裂長度，底下我們同時考慮地震矩規模6.5、7.0及7.5，地震矩規模超過7.5暫不考慮，因為正滑斷層地震有如此大規模的，幾乎不曾被報導（Wells and Coppersmith, 1994）。

透過地震矩規模 $M_w$ 與地震矩量 $M_0$ 的關係式（Hanks and Kanamori, 1979）：

$$M_w = 2/3 \times \log(M_0) - 10.7 \quad \text{式 2}$$

及地震矩量的計算式：

$$M_0 = \mu \times A \times \bar{D} \quad \text{式 3}$$



其中， $\mu$  為剪力模數 (shear modulus) 在岩石圈可假定為  $3 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup> (Hanks and Kanamori, 1979)。如果地震破裂面積  $A$  為已知，我們即可透過地震矩量  $M_0$ ，來求得平均地震滑移量  $\bar{D}$ 。因此，再藉由 Wells 和 Coppersmith (1994) 提出的地震矩規模與正滑斷層破裂面積  $A$  之經驗公式：

$$M_w = 3.93 + 1.02 \times \log(A) \quad \text{式 4}$$

我們即可求得地震矩規模 6.5、7.0 及 7.5 的平均地震滑移量  $\bar{D}$ ，分別為 62.8、135.8 及 293.7 公分。再者，我們所採用的簡化地震破裂滑移模式 (Kim and Sanderson, 2005) 有底下兩關係式：

$$A = \pi \times (L/2) \times (L/2) \quad \text{式 5}$$

$$D_{max} = 3 \times \bar{D} \quad \text{式 6}$$

其中， $L/2$  為圓形地震破裂面半徑， $D_{max}$  為最大地震滑移量，即假定發生在震源。地震破裂面上的滑移量，即由震源往外幅射狀線性遞減，在離震源距離等於或大於  $L/2$  的位置，滑移量皆為零。此外，結合前人的研究 (石瑞銓等, 2004)，認為山腳斷層是一左向正滑斷層及由 GPS 觀測結果，台灣北部地區目前的大地構造應力主要方向為西北西—東南東向的伸張型態，方位角約為 103 度 (余水倍等, 1999；邱紀瑜, 2010)，因此假設在斷層面上的滑移方向其水平投影即為此方向。更詳細的數值模型上之運作方式，請參考蔡家民的碩士論文 (2014)。

## 庫倫破壞應力

近數十年來，庫倫破壞應力 (Static Coulomb failure stress) 相當廣泛地被利用在探討斷層受地震觸發而錯動的可能性上 (e.g. Stein, 1999)。一般認為，淺層地震的發生，是由於斷層兩側的岩體瞬間相對滑動所產生的動態 (dynamic) 現象；然而，地震後，斷層的永久錯移，也將造成鄰近岩體中應力狀態的改變，透過岩體中應力的改變，我們可以估計在地震後，其鄰近地區的斷層是否會產生觸發效應，而有較高的機率發生地震。庫倫破壞應力  $\Delta CFS$  即為此目的設計，計算地震後特定面上應力的改變量，計算公式如下：

$$\Delta CFS = \Delta \tau_{slip} + \mu(\Delta \sigma_n + \Delta P) \quad \text{式 7}$$

其中  $\Delta \tau_{slip}$  為受到地震後產生的剪應力改變量； $\Delta \sigma_n$  為受到地震後產生的正應力改變量； $\mu$  為摩擦係數； $\Delta P$  為孔隙液壓改變量。再將式 7 轉變如下式：

$$\Delta CFS = \Delta \tau_{slip} + \mu' \Delta \sigma_n \quad \text{式 8}$$

其中  $\mu'$  為視摩擦係數 (apparent coefficient of friction)。計算後，如果  $\Delta CFS > 0$ ，則說明該區域發生後續地震的可能性增加，而當  $\Delta CFS < 0$ ，則該區域發生後續地震的可能性則會降低。本研究即透過庫倫破壞應力來了解當山腳斷層活動後，對於鄰近的幾條主要斷層可能造成的影響。

## 模擬結果

先前已說明本研究的模型如何建立及所採用的斷層滑動量分佈模式，但模擬結果可預期地仍將受控於幾個因子，這包括地震的規模、地震的震央位置及震源深度等，底下我們先以地表的同震垂直變位，來比較各因子對模擬結果的影響情況。

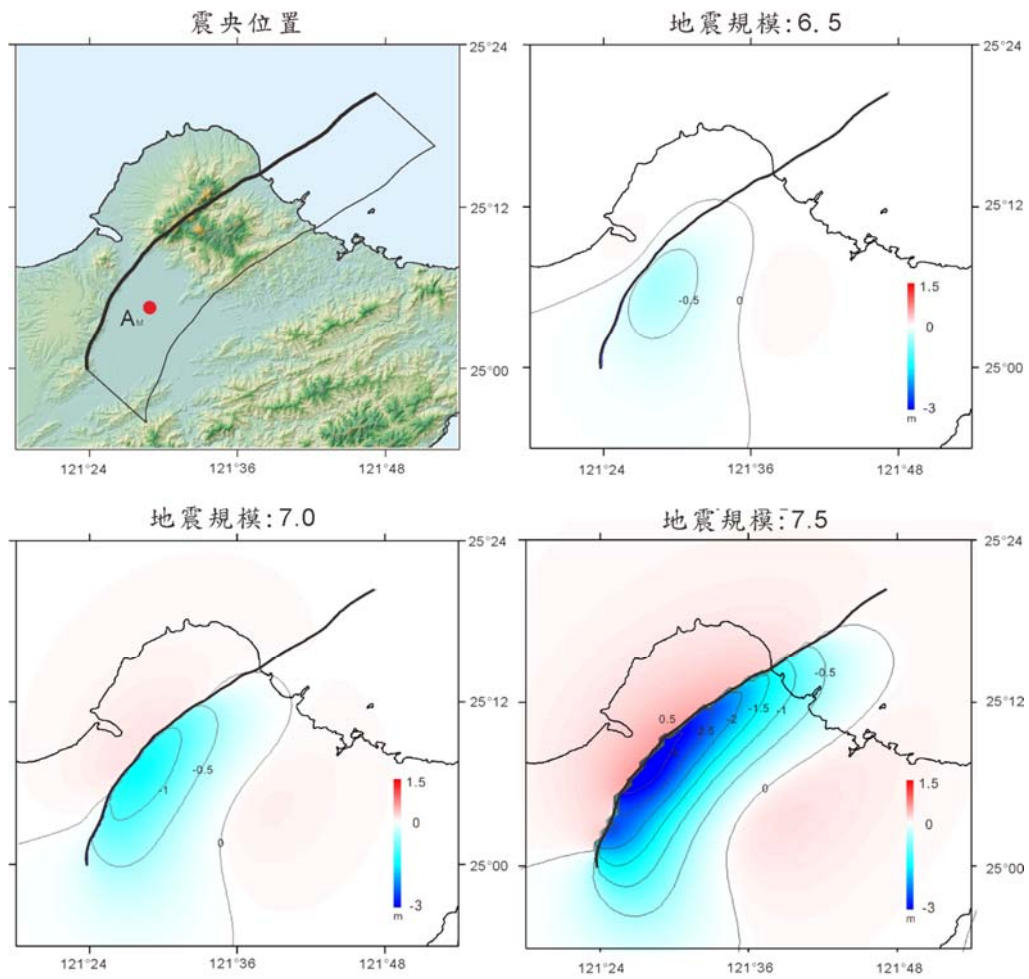
### 地表同震變形

圖四為不同地震矩規模  $M_w = 6.5$ 、 $7.0$  及  $7.5$  的地表同震垂直變位。震央在山腳斷層南段五股一帶，即圖上紅點標示為  $A_M$  的位置，約為台北盆地中第四紀沉積物厚度最深的位置，同時被認為有持續活動之可能性；震源深度設為 9 公里，乃是參考 2004 年台北四獸山的地震震源深度。變形的情況隨地震矩規模變大相對更劇烈，特別是在上盤，最大沉陷量由  $M_w = 6.5$  的  $\sim 0.75$  公尺、 $M_w = 7.0$  的  $\sim 1.25$  公尺，增大到  $M_w = 7.5$  的  $\sim 3.25$  公尺，且位置也越來越貼近斷層，整體的沉陷變化，若以似橢圓形圈合的 0.5 公尺等沉陷線而言，西北-東南向的短軸變化不大，皆約 7-8 公里，但東北-西南向的長軸變化，則相當明顯，由  $M_w = 6.5$  的  $\sim 10$  公里、 $M_w = 7.0$  的  $\sim 25$  公里，增大到  $M_w = 7.5$  的  $\sim 50$  公里。

圖五a為不同震央  $A_M$ 、 $B_M$  及  $C_M$  的地表同震垂直變位，震源深度為 9 公里，地震矩規模  $M_w = 7.5$ 。震央  $C_M$  位置的設定，為採納 1867 年之金山海嘯為東北外海大地震可能性之考量；震央  $B_M$  位置的設定，乃考慮本研究的錯動量分布為一圓形向外遞減的模式，若震央在斷層的中段，則能較充分的表現此錯動量分布模式。整體的變形形式 (pattern)，差異不大，但相對應的位置隨震央改變隨之變化，斷層上盤 (東側) 為沉陷側，斷層下盤 (西側) 為升側，最大沉陷量及最大抬升量，分別為  $\sim 3.25$  公尺及  $\sim 0.5$  公尺，位置皆貼近斷層。

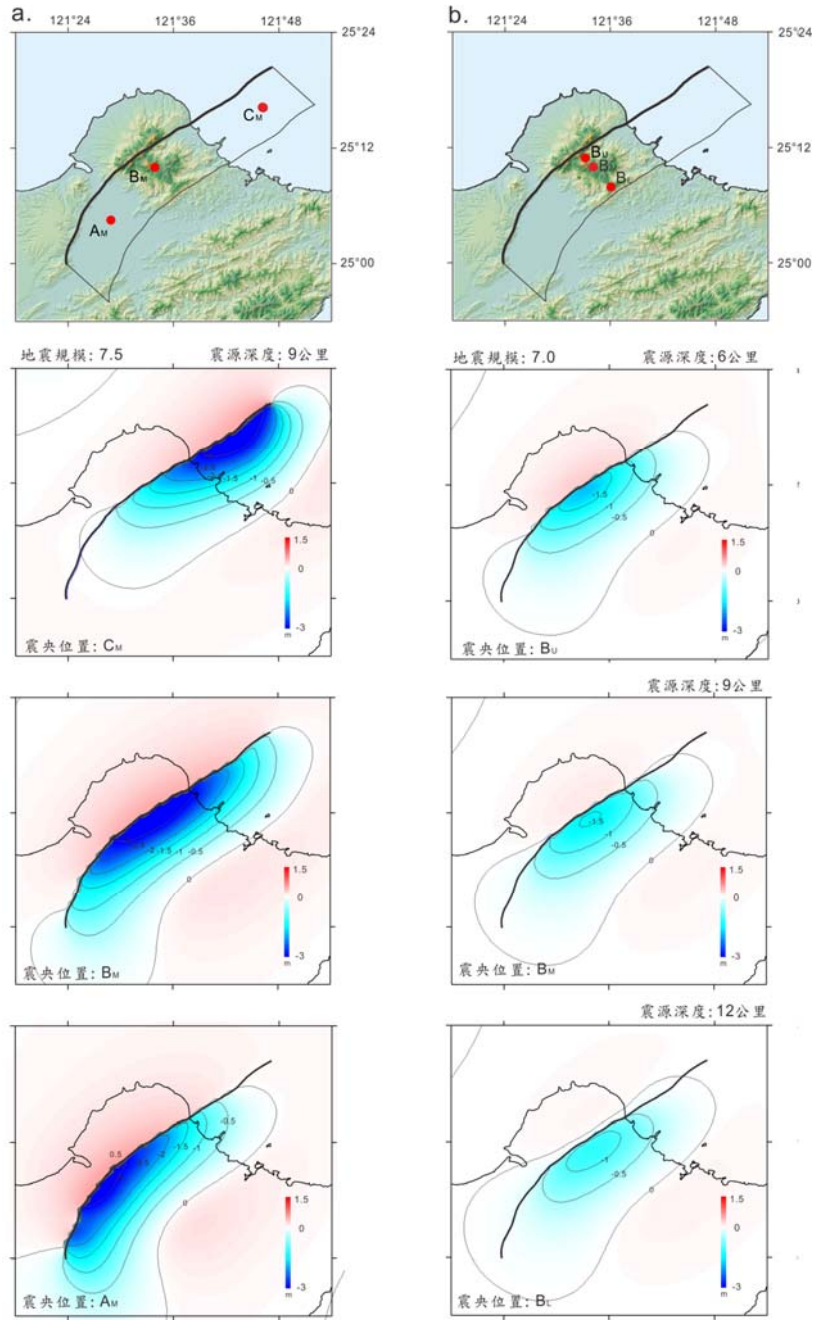
圖五b為不同震源  $B_U$ 、 $B_M$  及  $C_L$  的地表同震垂直變位，震源深度分別為 6、9 及 12 公里，地震矩規模  $M_w = 7.0$ 。整體的沉陷影響範圍類似，但最大的下陷量不

同，隨震源深度變淺，量值由~1.25公尺、~1.6公尺變大到~1.85公尺，位置也隨之越貼近斷層。



圖四 不同地震矩規模下的山腳斷層引致之地表同震垂直位移。地震矩規模  $M_w=6.5$ 、7.0 及 7.5 所產生之地表變形行為，斷層底部深度 13 公里。左上圖中紅色點表示震央位置，震源深度 9 公里，冷色系為沉陷區域，暖色系為抬升區域。

Fig. 4 Coseismic vertical displacement induced by Shanchiao faulting with earthquake moment magnitude of 6.5, 7.0 and 7.5, respectively. The red dot in the upper left diagram marks the epicenter. Cool color indicates the area subsided, and warm color the area uplifted.



圖五 山腳斷層地表同震垂直位移。斷層底部深度 13 公里。a. 不同的震央 b. 不同的震源深度。紅色點表示震央位置，冷色系為沉陷區域，暖色系為抬升區域。

Fig. 5 Coseismic vertical displacement induced by Shanchiao faulting with the bottom edge of the fault at depth of 13 km. a. different epicenters and b. different depths of hypocenters. The red dots mark the epicenters. Cool color indicates the area subsided, and warm color the area uplifted.

## 可能淹水區域

接續山腳斷層地震錯動所造成的地表永久變形，偌大的區域將可能變位降至海平面以下，若地震同時造成海堤或河堤的崩潰，海水的倒灌或河水的潰堤，將使低於海平面以下的區域，成為淹水的高危險區。本研究將模擬所得的沉陷資料與地形高程資料進行對比，評估在山腳斷層地震錯動後，於台北盆地內以及金山地區可能受淹水危害之高危險區域。

### (1) 臺北盆地可能之淹水區域

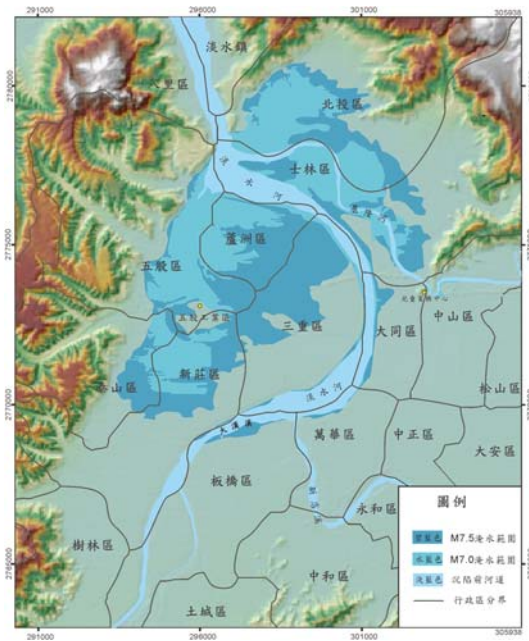
臺北盆地內主要為大漢溪、新店溪及兩者匯流的淡水河所貫穿，淡水河由盆地的西北緣切出後，朝西北方流，於淡水出海。盆地型的地勢，若山腳斷層地震錯動，造成斷層西側抬升東側下陷，河水西流受阻淤積，加上河水潰堤、或盆地內的暴雨，抑或海水倒灌等，都將可能造成盆地內淹大水。圖六中的碧藍色區域，即為地震矩規模 $M_w=7.5$ （震源在 $A_M$ 山腳斷層南段，深度9公里）的地變後地表高程在海平面以下的區域，約略呈似橢圓形，橢圓的長軸平行山腳斷層地表跡，長約15公里，短軸長約為5公里，整體面積約為60平方公里，包括的行政區有整個蘆洲區、五股區與士林區在台北盆地中的大部份及部份的三重區、新莊區與泰山區，其中，五股工業區一帶因原地勢較高，地變後仍高於海平面。此可能淹水區域的東界，相較於圖四右下的地表垂直變位圖，約相當於平行山腳斷層地表跡的 1.0公尺等沉陷量線的位置，顯示地變沉陷的範圍，遠大於可能的淹水地區。

### (2) 金山地區可能之淹水區域

金山地區為山腳斷層所橫跨，大半地形平緩且緊鄰大海，當山腳斷層發生地震錯動，地變所造成的沉陷，將可能造成海水的入侵淹沒。圖七中剛青色區域，即為地震矩規模 $M_w=7.5$ （震源在山腳斷層北段 $C_M$ ，深度9公里）所造成地表高程在海平面以下的區域，亦即為地震後可能的淹水區，顯示海水往陸地方向入侵可達0.8公里，總計淹水面積約2平方公里。

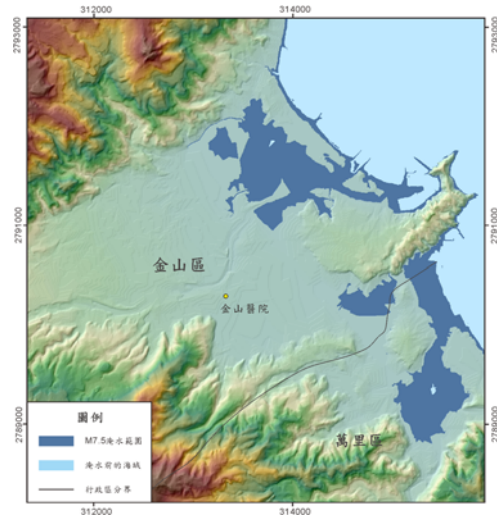
## 鄰近斷層的庫倫破壞應力

大台北地區其他的五條主要斷層，由西往東分別為新莊斷層、金山斷層、崁腳斷層、台北斷層及新店斷層，各斷層的位置及分布情形，見圖一。我們以較保守的地震矩規模 $M_w=7.0$ ，及震源 $A_M$ 、 $B_M$ 、 $C_M$ （深度皆為9公里），並考慮目前台北區域處於西北西—東南東向的伸張大地構造環境，假定這五條斷層會以



圖六 山腳斷層地震錯動後台北盆地可能淹水區域。碧藍色的區域為地震矩規模  $M_w=7.5$  的可能淹水範圍，震源在山腳斷層南段 AM（見圖五 a），深度 9 公里，斷層底部深度 13 公里；水藍色的區域為地震矩規模  $M_w=7.0$  的可能淹水範圍，根據邱俊穎等（2007）的淹水圖繪製，此範圍與本研究的結果（地震矩規模  $M_w=7.0$ ，斷層深度 13 公里）幾乎相同。

Fig. 6 Potential inundation area in the Taipei basin after Shanchiao faulting.



圖七 山腳斷層地震錯動後金山地區可能淹水區域。震源在山腳斷層南段 AM（見圖五 a），深度 9 公里，斷層底部深度 13 公里。

Fig. 7 Potential seawater encroachment region in the Jinshan area.

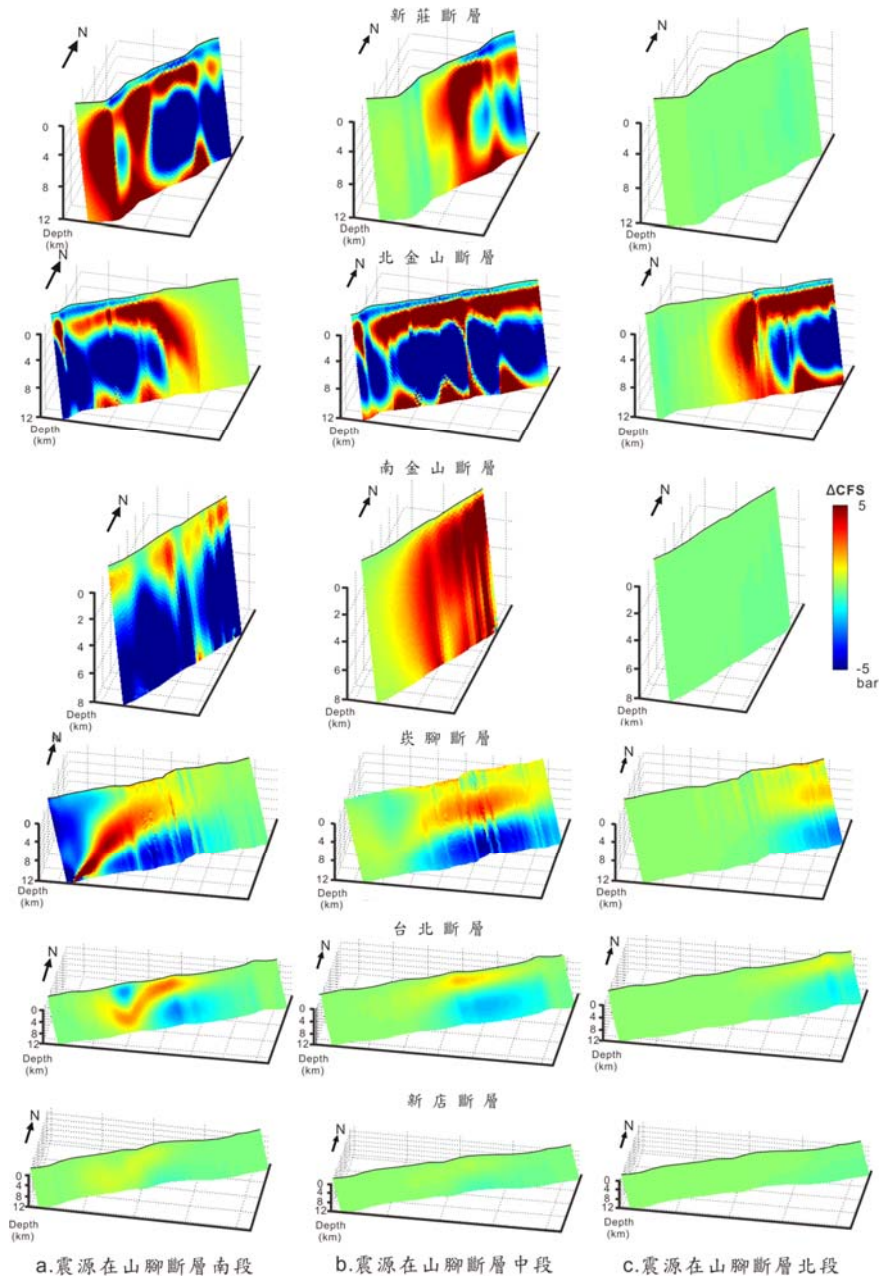
正滑錯移方式活動，來計算各斷層面上庫倫破壞應力的變化量。其中金山斷層橫跨山腳斷層的上下盤，故將其以山腳斷層為界，分南金山斷層與北金山斷層兩段進行模擬。

圖八為模擬之結果，暖色系為庫倫破壞應力增加區，冷色系為庫倫破壞應力減少區，量值的變化範圍約在 $\pm 5$ bar間，此值約相當於地表下18公尺深的靜岩壓。再者，新莊斷層、金山斷層及崁腳斷層斷面上的庫倫破壞應力值之變化樣式（pattern），明顯地受控於震源位置，震源越接近的斷層面，其應力值較大且變化波動也較明顯；相較下，台北斷層及新店斷層則不顯著。粗略而言，各斷層面的淺部（0-4公里深）為應力增加區，且新莊斷層的南半段、北金山斷層的中段及南金山斷層有較大面積的應力增加區。

## 討論

### 山腳斷層長度與深度變化對模擬結果之影響

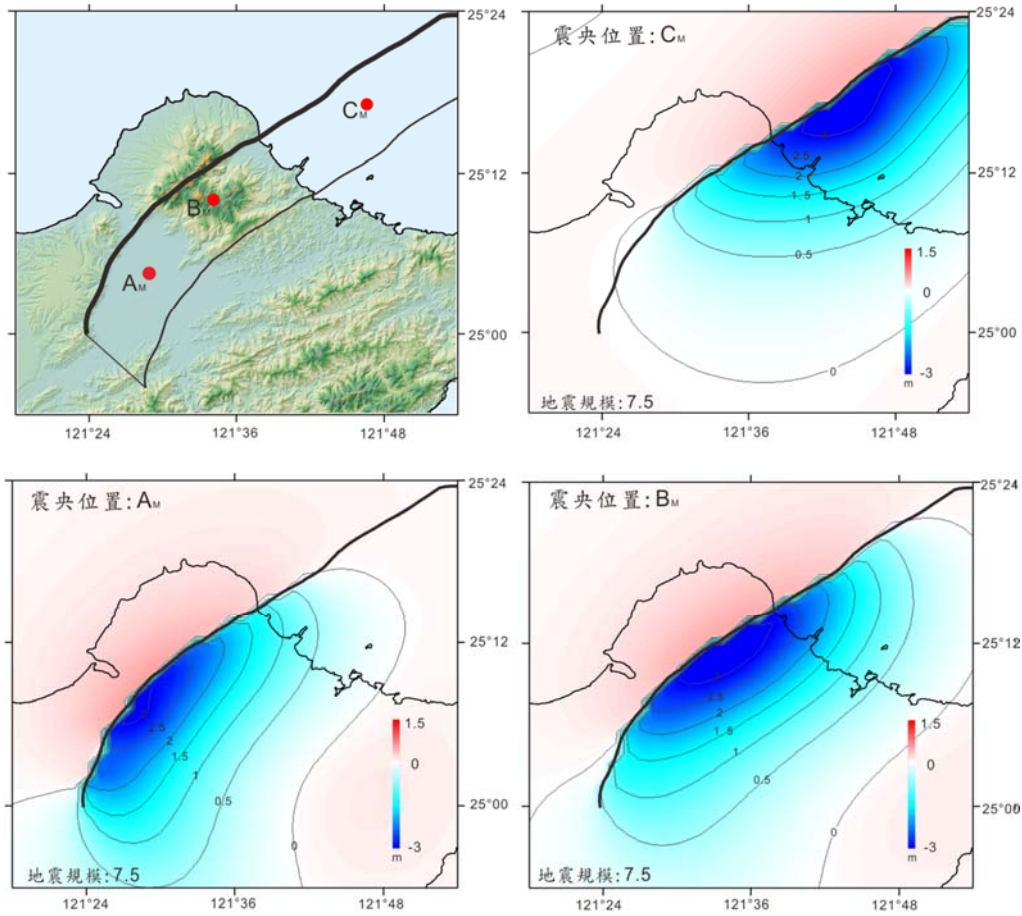
本研究根據不同的研究學者所報導的山腳斷層地表投影跡長度，透過經驗公式決定，並採納可能的最大地震矩規模6.5、7.0及7.5，再分別以這些地震矩規模，搭配地震破裂滑移量分布模式（圖三）模擬山腳斷層錯動。然而，除地震矩規模外，我們也須強調震源位置的不同，將對模擬結果有侷大的影響（圖五），如同樣為地震矩規模7.5，但震源位於 $C_M$ 時，台北盆地內就不會發生如前一章節中陳述的那般嚴重情形。再者，山腳斷層模型建立的兩個幾何因子，斷層長度及斷層底部的深度（簡稱為斷層深度），也將對模擬結果有影響，特別是當地震矩規模7.5時。我們先前模型建立時，所採用加上部份海外延伸的山腳斷層分布，合計長度54公里（林啟文等，2007；蕭力元，1996；黃雯苓，2007）及深度13公里，將造成地震破裂滑移面積的局限，如圖三所示，當地震破裂超出斷層面時，不予考慮。換言之，模擬結果的實際地震矩規模是極可能小於原本假定的規模。因此，我們根據陳冠宇（2014）報導的斷層長度83公里，及採納氣象局2000年至2010年台灣北部的地震紀錄顯示之淺層地震分布底界約深度25公里（圖二）為斷層深度，再對山腳斷層建立新模型。圖九為以此模型模擬所得的垂直地變結果，相較前一模型的結果，兩結果的最大沉陷量並沒有差異；下陷嚴重的區域（ $> -1$ 公尺）的寬度約增加原來的四分之一，但整體的下陷區的寬度幾乎為原來的兩倍。這將連帶影響可能的淹水區，不過由於原地形的效應，淹水區寬度的增幅不至於有四分之一。



圖八 山腳斷層錯動後鄰近斷層庫倫破壞應力改變量。a. 震源於斷層南段 AM b. 震源於斷層中段 BM c. 震源於斷層北段 CM。震源位置如圖四所示，地震矩規模為 7.0。圖中暖色系區域為應力上升區，冷色系區域為應力下降區。

Fig. 8 Change in Coulomb failure stress on neighboring faults after Shanchiao faulting. a. hypocenter located on the southern segment, AM; b. hypocenter located on the middle segment, BM; and c. hypocenter located on the northern segment, CM. The locations of hypocenters as shown in Fig.4. Cool color indicates decreasing  $\Delta CFS$  decreasing, and warm color increasing  $\Delta CFS$  increasing.





圖九 山腳斷層地表同震垂直位移，斷層底部深度為 25 公里。紅色點表示震央位置，冷色系為沉陷區域，暖色系為抬升區域。

Fig. 9 Coseismic vertical displacement induced by Shanchiao faulting with the lower boundary of the fault at depth of 25 km. The red dot marks the epicenter. Cool color indicates the area subsided, and warm color the area uplifted.

### 鄰近斷層觸發活動可能性評估

根據鄧屬予等 (Teng *et al.*, 2000 ; 2001) 臺灣東北部隱沒板塊方向約在 80 萬年前反轉，台灣北部的應力環境也由壓縮轉為伸張，麓山帶開始毀山，同時地殼開始下陷。近期的大地測量研究成果 (余水倍等, 1999 ; 邱紀瑜, 2010) ，也顯示台灣北部目前處於一西北西—東南東向伸張型的大地構造環境。台北盆地內的幾條逆移斷層 (圖一) ，為臺灣北部地殼中既存的構造弱面，因應此伸張型的大地構造環境，在其行為上有所轉變，是具有潛在可能性的。

我們利用了庫倫破壞應力理論，假定山腳斷層的重新活動發生，對鄰近斷層面上各處的應力變化量作計算。然而在利用庫倫破壞應力進行斷層是否受觸發的可能性評估前，必須先決定該斷層的可能活動方式，方能進行庫倫破壞應力改變量的計算。然後，視應力增加區為可能受觸發產生地震處，及若面積相較為廣，則可能的觸發地震矩規模相對也可能較大，亦即引致較大面積的錯動；應力減少區，則代表越趨穩定。在對各斷層庫倫破壞應力樣式作解釋前，我們認為有必要進一步說明其中的假設及討論其成立性，這些包括不言而喻的假設，如這些鄰近的斷層為地殼中相對的強度弱面。此外，模型中組成各斷層的小三角形斷面之可能滑動方向，採納目前台灣北部的西北西—東南東向伸張型態，將方位角103度投影到小三角形斷面以決定滑動方向。其實也假定鄰近幾條斷層的可能活動方式，受控於現今的大地構造應力狀態；同時也假定各斷層面上的應力狀態，處於臨界點。如此一來，庫倫破壞應力的計算才相對有意義，我們模擬的結果，顯示各斷層面的淺部（0-4公里的）為應力增加區，然而此區的寬度窄且於地殼淺部，研判認為為觸發小地震可能出現的區域；至於新莊斷層的南半段、北金山斷層的中段及南金山斷層有較大面積的應力增加區，這現象可與Wang *et al.* (2011) 對金山及山腳斷層的靜態應力轉移分析雷同，解讀為可能發生較大地震錯動的斷面位置，然而，這些斷層面與山腳斷層幾乎毗鄰，甚至相交錯，若山腳斷層因應力降產生地震的情況下，這些斷層面的應力狀態整體也將有顯著的牽動效應，因此認為這兩條斷層仍處於臨界點的可能性極低，所以儘管為庫倫破壞應力的增加區，研判認為將不似會有較大規模的地震錯動發生的可能性。

## 結論

本研究利用彈性錯位理論及地震破裂滑移量分布模式，進行山腳斷層地震錯動引致的地表變形模擬。所得的地表下陷量分布圖，比對原地表高程的資料，進一步繪製可能淹水的區域圖。此外，再利用庫倫破壞應力之理論，探討對鄰近斷層可能造成的影響。本研究的結果可以簡要歸納如下：

1. 同震地表垂直變位模擬結果顯示：山腳斷層上盤（東側）為沉陷側，斷層下盤（西側）為升側，根據目前推論之山腳斷層長度83、54及34公里，可能產生之最大地震矩規模約分別為規模 $M_w=7.5$ 、7.0及6.5，產生的最大沉陷量分別

約3.25、1.25及0.75公尺，地變下陷區約呈扁長的橢圓形，平行且緊鄰山腳斷層地表跡，中心位置約與震央相符。

2. 地震矩規模 $M_w=7.5$ （震源在 $A_m$ 山腳斷層南段，深度9公里）將造成臺北盆地內，於緊鄰山腳斷層處，約60平方公里扁長類橢圓形的淹水區，含括的行政區有蘆洲、五股、士林區、三重區、新莊區與泰山區，其中，五股工業區一帶因原地勢較高，地變後將不受淹水危害。此外，地變沉陷的範圍遠大於可能的淹水地區，至少兩倍以上。

3. 地震矩規模 $M_w=7.5$ （震源在 $C_m$ 山腳斷層北段，深度9公里）將造成金山沿海地區因地變下陷導致海水入侵約0.8公里，淹水總面積約2平方公里。

4. 鄰近斷層上的庫倫破壞應力分析，假定山腳斷層發生地震矩規模 $M_w=7.0$ 的錯動，庫倫破壞應力量值的變化範圍約在 $\pm 5\text{bar}$ 間。大體上各斷層面的淺部（0-4公里的）為應力增加區，為觸發小地震可能發生的區域，各鄰近斷層不似有大面積觸發錯動的可能性。

## 誌謝

感謝陳浩維老師提供並教授cubit網格生成軟體的使用，及Brendan J. Meade慷慨地分享三角形錯位理論的Matlab程式碼。並感謝兩位審稿委員，給與的指正及精闢建議。

## 參考文獻

- 中央社、蘋果日報、自由時報、聯合報、中國時報（2011）山腳斷層延伸到東北角外海9月16日報導。
- 市川雄一（1930）桃園圖幅說明書。台灣總督府殖產局，第581號，共38頁。
- 石瑞銓、詹益湘、劉桓吉（2004）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，第十五號，1-11。
- 何春蓀（1983）台灣基隆沿海區至桃園大溪間煤田地質及構造。經濟部中央地質調查所彙刊，第22號，17-70頁。
- 余水倍、陳宏宇、郭隆晨、侯進雄、李錦發（1999）台北盆地斷層活動之觀測研究。經濟部中央地質調查所特刊，第十一號，227-251。
- 林明聖（2006）歷史海嘯的研究方法。地質，第25卷，第2期，71-81。
- 林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧（2007）台灣北部的活動斷層。經濟部

- 中央地質調查所特刊，19號，共129頁。
- 林朝宗（2001）台北都會地質環境。台北都會區地質災害研討會論文集，第1.1-1.19 頁。
- 林朝宗（2005）山腳斷層與台北盆地西緣的地質構造。大台北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集，191-197。
- 林朝宗、李錦發（1997）從鑽井資料看台北斷層在台北盆地的位置及活動性。地工技術，第六十四期，79-92。
- 林朝榮（1957）台灣地形。台灣省通志稿，卷一，土地志，地理篇，第一冊，台灣省文獻委員會，303-314。
- 邱俊穎（2007）山腳斷層再活動對於台北盆地內地形變化之探討。國立臺灣大學地球科學系，碩士論文，共56頁。
- 邱俊穎、胡植慶、陳致言、劉桓吉（2007）山腳斷層再活動對於台北盆地內地形變化之探討。經濟部中央地質調查所特刊，第二十號，97-110。
- 邱紀瑜（2010）利用GPS觀測資料探討台北地區之地殼形變。國立中央大學地球物理研究所，碩士論文，共139頁。
- 邱華燈（1968）台灣北部桃園附近之新莊斷層。中國地質學會會刊，第11卷，60-73頁。
- 侯進雄（2007）台灣活動斷層構造相關地殼變形監測研究。國立台灣大學，地質科學研究所，博士論文，共225頁。
- 徐泓（1983）清代台灣天然災害史料彙編。行政院國家防災科技研究報告。
- 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）台灣活動斷層概論。五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第十號，共103頁。
- 許劭禎（2013）利用鑽井資料建構臺北盆地第三紀之地層與構造。國立中央大學地球科學系，碩士論文，共147頁。
- 陳文山、林朝宗、楊志成、費立沅、謝凱旋、鞏慧敏、林佩儀、楊小青（2008）晚期更新世以來台北盆地沉積層序架構與構造的時空演變。經濟部中央地質調查所彙刊，第二十一號，61-106。
- 陳冠宇（2014）台灣北部由造山帶至弧後張裂之陸域及海域構造研究。國立中央大學地球科學系，博士論文，共183頁。
- 陳致同（2012）台北都會區山腳活斷層之地震地質研究。國立臺灣大學地質科學研究所，博士論文，共195頁。
- 黃雯苓（2007）台灣東北部海域斷層系統之研究。國立臺灣海洋大學應用地球研究所，碩士論文，共90頁。
- 黃鑑水（1998a）五萬分之一臺灣地質圖說明書—台北圖幅第二版。經濟部中央地質調查所出版。

- 黃鑑水 (1998b) 台北地質圖說明書。五萬分之一台灣地質圖說明書，圖幅第4號，經濟部中央地質調查所，共46頁。
- 黃鑑水、李錦發、劉桓吉 (1991) 台灣北部崁腳斷層之地質調查與探勘研究。國科會防災科技研究報告80-17號，共24頁。
- 黃鑑水、張憲卿、李元希 (1994a) 臺灣北部新店斷層之地質調查與探勘研究。國科會防災科技研究報告83-11號，共24頁。
- 黃鑑水、張憲卿、李元希、林真在 (1994b) 臺北近郊新店斷層及相關問題。地質，第14卷，第1期，1-18頁。
- 趙丰 (2011) 康熙、台北、湖。科學人，11期，34-35。
- 劉桓吉、蘇泰為、李錦發、紀宗吉、林朝宗 (2000) 山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響。經濟部89年度研究發展報告，共30頁。
- 劉桓吉、蘇泰為、邱禎龍、曾俊傑、紀宗吉、林文哲、李錦發、費立沅、賴典章、林朝宗、黃健政 (2002) 臺北盆地地下地質與工程地質研究。90年度中央地質調查所年報，59-64頁。
- 蔡家民 (2014) 山腳斷層再活動對大台北地區地形變化及相鄰斷層庫倫應力之探討。國立中央大學地球科學系，碩士論文，共97頁。
- 蕭力元 (1996) 臺灣東北外海的新生代地質構造。國立臺灣大學地質科學研究所，碩士論文，共62頁。
- 戴榮興 (2000) 臺北盆地西緣之山腳斷層震測調查研究。國立中央大學地球物理研究所，碩士論文，共84頁。
- 謝英宗 (2000) 康熙台北湖古地理環境之探討。台灣大學地理學系地理學報，27，85-95。
- 簡志宇 (2008) 臺北盆地西北深部構造之研究。國立中央大學地球物理研究所，碩士論文，共60頁。
- 蘇泰維、黃健政、劉桓吉、劉憲德 (2003a) 臺北盆地西緣山腳斷層調查研究初步成果。經濟部中央地質調查所年報，九十一年度，118-121。
- 蘇泰維、劉桓吉、劉憲德、黃健政 (2003b) 臺北盆地西緣山腳斷層調查研究初步成果。91年度中央地質調查年報，118-121頁。
- 饒瑞鈞、李元希、胡植慶 (2010) 地震地質與地變動潛勢分析-地變動監測分析 (4/4) 期末報告。中央地質調查所報告第99-10號，共400頁。
- Chang, C.P., Yen, J.Y., Hooper, A., Chou, F.M., Chen, Y.A., Hou, C.S., Hung, W.C., and Lin, M.S. (2010) Monitoring of surface deformation in northern Taiwan using DInSAR and PSInSAR techniques. *Terr. Atmos. Ocean.*, Vol. 21, No. 3, 447-461. doi: 10.3319/TAO.2009.11.20.01(TH)
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, C.F. (2011) *Structure geology of rock and regions*. John

- Wiley & Sons, 839 p.
- Hanks, T.C. and Kanamori, H. (1979) A moment-magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 84, 2348-2350.
- Ho, C.S., Hsu, M.Y. and Jen, L.S. (1963) Fault structures in the Keelung coastal area, Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 6, 18-33.
- Ho, C.S. (1974) The Taipei fault and related structural feature in northern Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 17, 95-109.
- Huang, S.Y., Rubin, C.M., Chen, Y.G., and Liu, H.C. (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei basin, northern Taiwan. *Journal of Asian Earth Science*, 31, 265-276.
- Kim, Y.S. and Sanderson, D.J. (2005) The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth Sci. Rev.*, 68, 317-334.
- Lai, J.S., Chiu, C.Y., Chang, H.K., Hu, J.C., and Tan, Y.C. (2010) Potential inundation hazards in the Taipei basin induced by reactivation of the Shanchiao fault in northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 21, No. 3, 529-542.
- Meade, B.J. (2007) Algorithms for the calculation of exact displacements, strains, and stresses for triangular dislocation elements in a uniform elastic half space. *Computers and geosciences*, 33, 1064-1075.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., Chen, Y.G., and Liu, C.S. (2005) Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 10, B08402.
- Stein, R.S. (1999) The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, Vol. 402, 605-609.
- Teng, L.S. and Lee, C.T. (1996) Geomechanical appraisal of seismogenic faults in northeast Taiwan. *Jour. Geol. Soc. China*, 39, 125-142.
- Teng, L.S., Yuan, P.B., Yu, N.T. and Peng, C.H. (2000) Sequence stratigraphy of the Taipei Basin deposits: a preliminary study. *Journal of the Geological Society of China*, 43, 497-520.
- Teng, L.S., Lee, C.T., Peng, C.H., Chen, W.F., and Chu, C.J. (2001) Origin and geological evolution of the Taipei basin, northern Taiwan. *Western Pacific Earth Sciences*, Vol. 1, No. 2, 115-142.
- Wang, J.C., Wang, J.H., Shieh, C.F. and Yeh, Y.H. (2010) Static stress transfer between the Chinshan and Shanchiao faults in the Taipei metro-politan area. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 21, 515-527.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacements. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.

# Topographic change and potential inundation hazard in the Greater Taipei area and Coulomb stress on neighboring faults induced by the reactivation of the Shanchiao fault in northern Taiwan

Chia-Min Tsai<sup>1</sup>, Wen-Jeng Huang<sup>1,2</sup>, Pei-Chen Chan<sup>3</sup> and Shih-Ting Lu<sup>4</sup>

## ABSTRACT

The Shanchiao fault, located along the western margin of the Taipei basin, is a NNE-SSW trending, east-dipping, normal-separation fault overlaid with Quaternary unconsolidated sediments. Its length is estimated to be approximately 35 km on land but likely to reach over 83 km if the part extending into the sea is included. According to the Taipei basin drilling data, there is an elevation difference of at least 700 m on the top of the tertiary basement across the fault, not only linking the movement of Shanchiao fault to the formation of the Taipei basin and but also indicating the possibility that, under the present WNW-ESE extensional regime of northern Taiwan, the Shanchiao fault may be reactivated in the future.

In this study, a seismic reactivation of the Shanchiao fault was simulated, the surface settlements of the Taipei basin and the Jinshan area calculated using the triangular dislocation elements, and the areas at risk of inundation predicted. The Coulomb failure stresses on neighboring faults were also measured to help assess possible triggered activities. Based on a pertinent empirical formula, the Shanchiao fault is associated with a potential recurrence of an earthquake with a maximum moment magnitude as high as  $M_w=7.5$ . Under the assumption of the occurrence of such an earthquake, the main results of the study are summarized as follows: The settlement reaches ~ 3.25 m deep with a prolate ellipse-like coverage parallelly abutting the

- 
1. Department of Earth Sciences, National Central University
  2. Institute of Applied Geology, National Central University
  3. Department of Civil Engineering, National Taiwan University
  4. Central Geological Survey, MOEA

Shanchiao fault from its western side. The potential inundation area is estimated to be approximately 60 km<sup>2</sup>, consistent to the western half of the earthquake-induced settlement in the Taipei basin, while the possible sea water encroachment area approaches 2 km<sup>2</sup> at Jinshan due to the coastline retreat of 0.8 km inland. Furthermore, the earthquake-induced faulting is unlikely to trigger large-scale rupture on the main neighboring faults. However, the increase in Coulomb failure stress on the shallow parts of all neighboring faults at the depth of 0 to 4 km indicates an enhanced frequency of induced micro-earthquakes.

**Key words:** Shanchiao fault, active fault, earthquake hazard, Coulomb failure stress.