

地下三維構造 模型建置與地震減災之研究

林義凱／國家災害防救科技中心地震與人為災害組佐理研究員

柯明淳／國家災害防救科技中心地震與人為災害組助理研究員

柯孝勳／國家災害防救科技中心地震與人為災害組副研究員

楊耿明／國立成功大學地球科學系副教授

陳文山、吳逸民／國立台灣大學地質系教授

台灣地區對於地質構造的地下三維模型建置多為局部地區，且其建置深度也較淺，對於地震防災上之協助仍然有限。本研究主要目的為利用歷史地震資料及地表地質調查資料與地球物理資料等，建置活動斷層的地下三維構造資料與模型，可提供地震災害風險評估或於重大地震事件發生後立即分析震源與斷層之三維空間關係與餘震分布趨勢。本研究以新竹地區為示範區，擬以初步研究方式，針對各類型地質資料進行整合與模型建置，另外將根據三維模型建置成果，並利用三角剪切帶分析模式推估可能地震規模與地表變形範圍，同時藉由小區域的地下三維構造建置成果與經驗，做為未來建置台灣全區活動斷層地下三維構造模型之參考。分析結果顯示，若新竹斷層發生錯動，可能引發規模 6.76 地震，地表可能變形範圍寬度達 286 公尺。

前言

活動斷層是指過去曾經活動，且可能再次發生錯動的斷層。在 1999 年 921 集集地震後，活動斷層對於地表結構物的影響逐漸受到人們注意，而地表變形主要受地下三維構造幾何形貌與地下覆土厚度等因素所控制。根據地調所對於 921 集集地震車籠埔斷層沿線的槽溝探察結果顯示，地震造成地表破裂的位置，往往與基盤上之覆土層厚度有關，當覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，則斷層可能出露地表的可能性愈高。由地震引發地地表破裂，於斷層錯動形成的震波在傳播過程中，會對地表建物造成結構毀損（動態影響）及永久塑性變形行為（靜態影響）。而於都會區發

生地震可能導致的災害，主要為地表變形所導致，包括維生管線、交通設施等因地表變形造成剛性的管線（瓦斯或電纜）或鐵道設施（鋼軌）損壞，然而對於線狀設施及結構，避免通過活動斷層應為首要目標，但往往於建設之經濟性或目的性，相關設施並非完全能夠避開活動斷層。且依活動斷層相關研究定年成果顯示，斷層活動多具有重複性，故於斷層帶附近之建物安全性應須特別注意。各種地震造成的災害，對民眾安全及社會經濟造成相當大的影響。因此，對於斷層再活動造成地表變形行為與變形影響範圍、包括寬度、變形程度及再現周期評估，以目前地震防災的角度而言，似有進一步研究的空間。

地質構造特性與地表變形分析的關聯性

在台灣西部麓山帶地區常見到的地質構造多為斷層擴展褶皺 (fault-propagation fold), Suppe^[1] 將其定義為發生在擴展中的斷層前方的變形作用, 並造成斷層上覆岩層發生變形而產生褶皺 (圖 1)。由既有的研究成果得知, 影響斷層錯動造成地表變形的因素包括: 斷層種類、覆土層厚度與土壤性質 (Bray *et al.*,^[2]、Lin *et al.*,^[3])。當斷層再活動時, 會對其上方的岩層 (包括近地表之岩層與近代沖積物) 與結構物將造成何種影響之資訊, 室內以實驗室砂箱模型 (魏^[4]; 鍾^[5]) (圖 2) 與數值模擬的方法進行研究 (Oettle *et al.*,^[6]; 林等人^[7]), 而野外經由槽溝開挖的方式進行地表變形行為的研究 (陳等人^[8]) (圖 3)。然而以防災需求的角度而言, 事先了解地震可能造成的地表破裂或地表變形位置實屬相當必要, 因此需優先了解斷層擴展褶皺與地表變形的構造演化, 三角剪切模式 (Trishear model) 的研究則可合理解釋其斷層與褶皺構造的相關性 (Erslev^[9]; Chen *et al.*,^[10]; 陳^[11])。

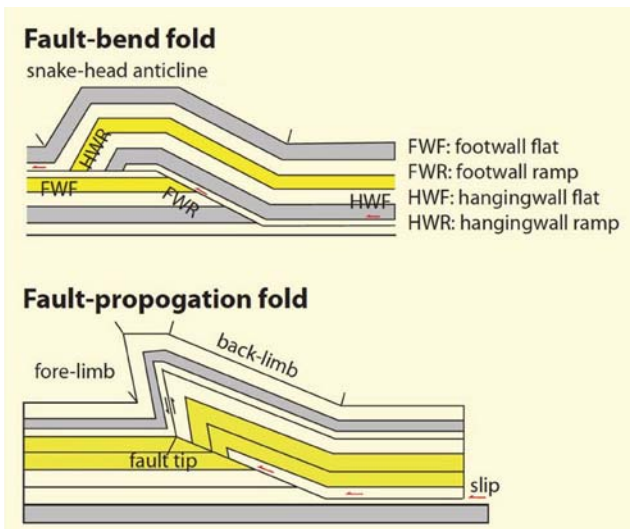


圖 1 斷層彎曲褶皺與斷層擴展褶皺示意圖 (修改自 Suppe^[1])

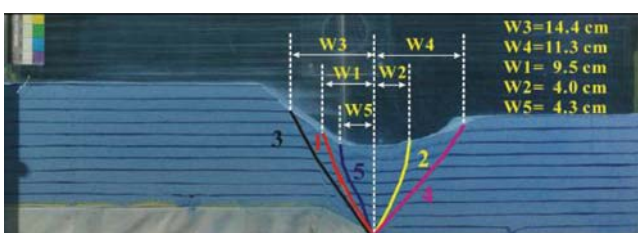


圖 2 砂箱模型分析圖 (鍾^[5])

三角剪切模式最早由 Erslev^[9] 提出, 主要是用於解釋褶皺形貌的問題, 此模式之變形作用主要發生在斷層前緣前方的三角型區域內, 故稱為三角剪切模式 (圖 4)。由於三角剪切模式相當於單剪作用於一平面上, 但在此三角形的變形區域中保持面積守恆, 所以此變形區域之質點位移方向與斷層滑移方向斜交。Allmendinger 於 1998 年^[12] 開始進一步應用三角剪切帶變形模式的概念發展相關數值模擬軟體 (FaultFold 4.5.4), 此數值模擬的主要輸入參數包括: 斷層傾角 (θ)、三角剪切帶張角 (2ϕ)、斷層破裂距離 (P)、斷層滑移量 (S)、斷層破裂滑移比 (P/S)、斷層尖端位置 (t)。而其中斷層傾角、斷層尖端位置與斷層滑移量可於現地調查或震測剖面得知, 而 P/S 值與三角剪切帶張角無法確切得知, 僅以假設為 P/S 值為定值並針對不同之三角剪切帶張角進行分析。FaultFold 軟體可以分析因斷層活動造成的地層應力方向與應變分布狀態, 但多屬運動學分析, 對於地質材料性質、特性與應力、應變狀態等力學機制未能有效定義, 而主要控制褶皺形貌的 P/S 值之力學意義也未完全明確, 故針對力學性質加以探討有其必要性 (Cardozo^[13])。

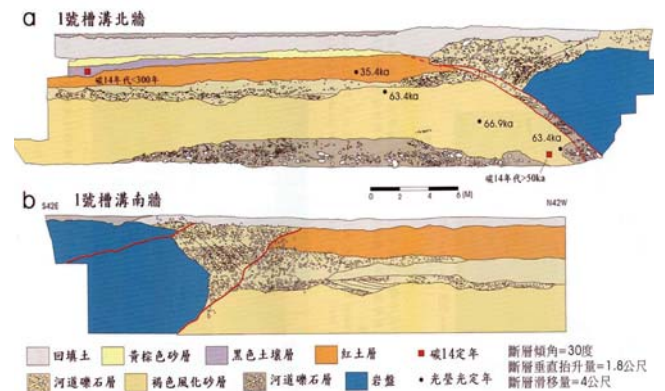


圖 3 新竹篤行 1 號槽溝南北剖面圖 (陳等人^[8])

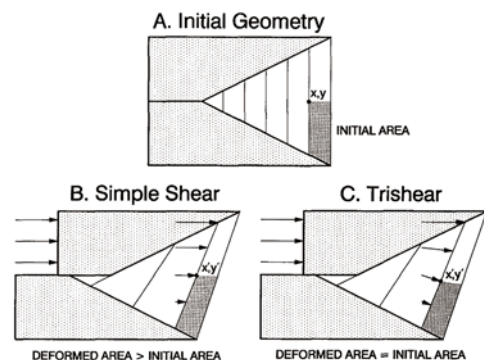


圖 4 Trishear 分析理論示意圖 (Erslev^[9])

Wells and Coppersmith^[14] 統計已發生的斷層破裂與寬度，並與該地震規模對比，經迴歸分析可得斷層錯動量與地震規模、斷層長度、斷層面面積等相對應之關係式。該研究分別迴歸分析正斷層、逆斷層及橫移斷層造成地表破裂之歷史紀錄得到相對應斷層種類的經驗公式，將欲評估之斷層依其斷層特性採適用之迴歸公式可得到預估斷層造成地表破裂的寬度及範圍（圖 5）。

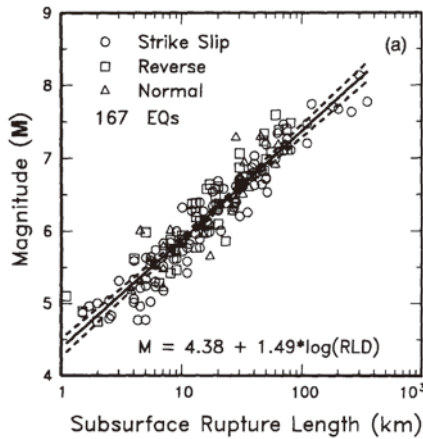
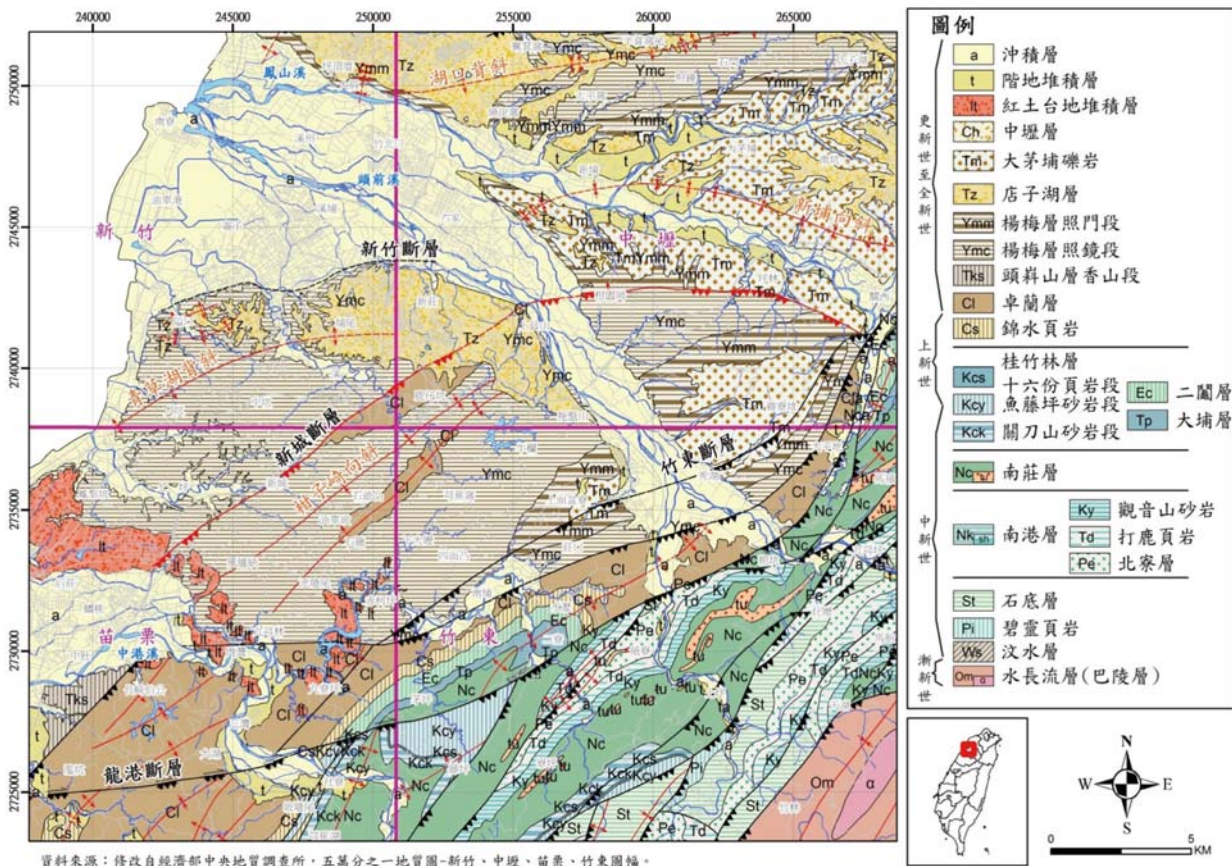


圖 5 斷層規模與破裂長度迴歸分析圖 (Wells and Coppersmith^[14])

新竹地區之地層分布狀況，根據經濟部中央地質調查所出版之五萬分之一台灣地質圖說明書—新竹圖幅^[15]、中壢圖幅^[16]、苗栗圖幅^[17]與竹東圖幅^[18]及易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置圖冊^[19]，得知本研究區域主要出露地層由老至新分述如下，包括漸新世的地層為水長流層，其岩性以板岩、硬頁岩為主；中新世的地層依序為：汶水層、碧靈頁岩、石底層、北寮層、打鹿頁岩、觀音山砂岩、南港層、南莊層、大埔層、桂竹林層關刀山砂岩段及部分魚藤坪砂岩段，其岩性以砂岩、粉砂岩、頁岩及泥岩為主；上新世的地層依序為：桂竹林層部分魚藤坪砂岩段與十六分頁岩段、二鬮層、錦水頁岩，其岩性以砂岩、粉砂岩及頁岩互層為主；更新世的地層依序為：卓蘭層、頭嵙山層香山段、楊梅層照鏡段、楊梅層照門段、店子湖層、大茅埔礫岩、中壢層，其岩性以砂岩、粉砂岩、頁岩及礫岩為主；全新世的河階礫石層與沖積層則多由礫石、砂、泥等未膠結沉積物所組成（圖 6）。另依地調所公告資料，本區域主要有 2 條



資料來源：修改自經濟部中央地質調查所，五萬分之一地質圖—新竹、中壢、苗栗、竹東圖幅。

圖 6 研究區域地質圖

活動斷層，分別為新竹斷層與新城斷層（圖 7）。其中新城斷層通過新竹科學園區南緣，又屬第一類活動斷層，極具活動潛勢。由近期的精密水準測量得知（2002 年至 2006 年），橫跨新竹斷層、新城斷層與大平地斷層的新竹—五峰水準測線，共有 4 次施測結果，整條水準測線的高程差變化量均在 8 公厘以內，於觀測期間內新竹斷層及新城斷層均未有明顯活動跡象（圖 8）。饒瑞鈞等^[20]另由 GPS 觀測資料得知新城斷層上盤以每年約 1 公分的速度往西北方向位移，下盤以每年約 0.2 公分的速度向西北西方向位移的趨勢（圖 9），然斷層兩側仍為壓縮作用而維持逆移形式。綜合上述之前人研究顯示，本研究區域因位在菲律賓海板塊與歐亞大陸的碰撞帶，板塊擠壓速率快速（每年約 8 公分），導致碰撞帶快速累積能量，因而地震風險也較高。故考量臺灣產業因應大規模災害衝擊、落實永續發展、降低災害風險以及減少災害損失是目前政府極為重要的執行課題之一。

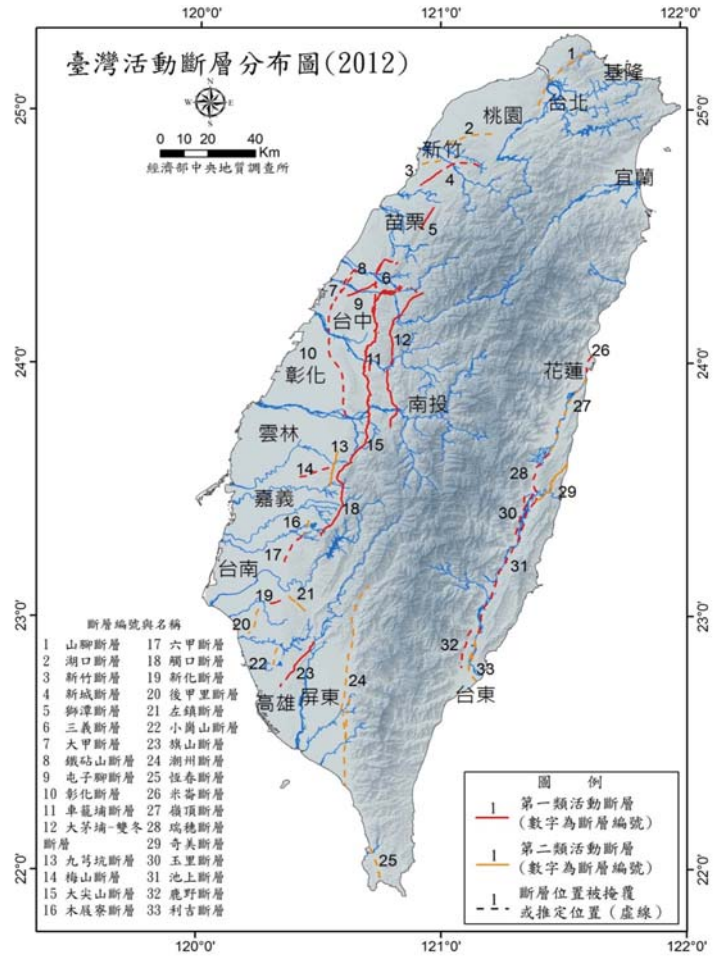


圖 7 全臺活動斷層分布圖 (摘自經濟部中央地質調查所^[21])

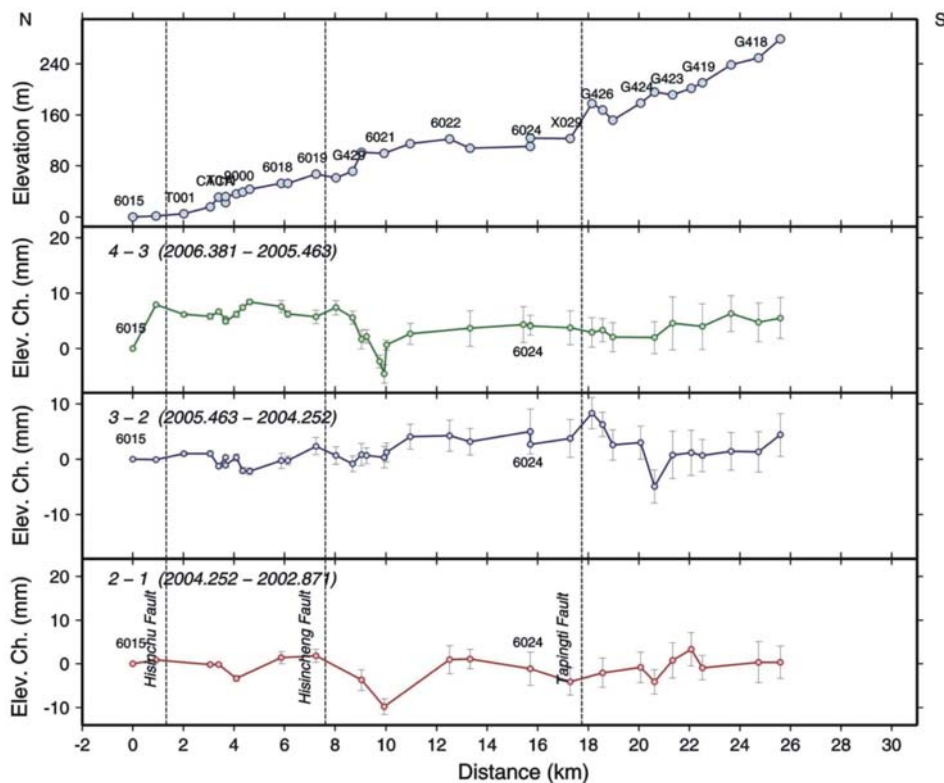


圖 8 新竹地區的精密水準測量結果。新竹至五峰測線 2002 年 10 月至 2006 年 4 月間每兩次之高程差變化圖 (饒等人^[20])

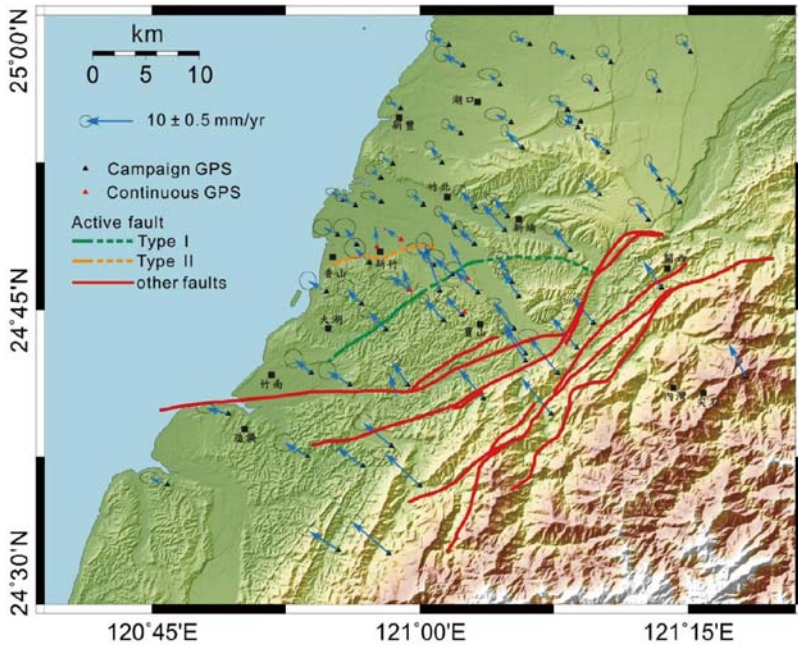


圖 9 新竹地區 2002~2010 年 GPS 速度場 (黃^[22])

模型建置流程及推估斷層可能引發的地震規模

本研究將以新竹地區為初步研究區域，並根據中油公司地鑽井、地球物理震測資料以及地表露頭等地質調查成果，彙整建置平衡剖面資料，配合中央地質調查所的地質圖及斷層位置資料，建立活動斷層地下三維構造。以地調所比例尺 1/25,000 的活動斷層條帶地質圖，找出活動斷層位置，加上縱向的平衡剖面圖，建立初步斷層地下形貌，最後連結數條剖面的斷層，便能得到斷層的三維構造模型。為了準確地建立活動斷層地下三維構造，本研究將每種資料的座標系統，都轉換成相同的座標系統。在整合資料的座標系統過程中，也將各平衡剖面的位置予以重新校正，確認剖面上主要斷層與地質圖上出露位置相符之後遂進行 SKUA-GOCAD 數化建模之工作。於三維構造模型建置完成後，將以 Wells and Coppersmith^[14] 之迴歸公式依斷層面積參數推估可能引發之地震規模與斷層滑動距離 (S) 等。

$$\text{Area} = 10 (-3.99 + 0.98 \times M_w)$$

$$\log(\text{MD}) = -0.44 + 0.42 \times \log L$$

M_w ：地震規模；Area：斷層面積（平方公里）；
MD 為最大斷層錯動量（公尺）；L 為斷層破裂長度（公里）

接下來將各構造平衡剖面，利用三角剪切變形帶之模擬軟體（FaultFold 4.5.4）數化分析，由於構造平衡剖面資料可直接量測斷層傾角 (θ)、斷層尖端位置 (t)，故將假設斷層破裂距離 (P) 配合上述斷層參數推估之斷層滑動距離 (S)，並依據砂箱模擬經驗劃定分析三角剪切帶張角範圍在 50° 至 80° 間，即可進行分析求得地表可能變形位置與範圍。

最後彙整上述研究成果，可建立完整的活動斷層地下三維模型與資料庫；於應用層面，針對地震發生的即時地震評析、相關地質資料之展示、以及後續餘震評估與相關因應措施之

擬定，均具有相當有效之助益。然經由各類型地質資料整合及相互校驗、輔助分析，對於建立更精確之地下構造形貌。經由模型分析與滑動傾向評估，搭配各調查成果與資料，可建立斷層活動性評估及地表可能造成之影響範圍。

三維斷層構造模型的特性描述與立體展現

根據中油公司鑽井、震測資料以及地表地質所建構的平衡剖面資料，配合中央地質調查所出版的五萬分之一地表地質圖幅及全台活動斷層分布資料，建立活動斷層地下三維構造模型。模型建置流程如下：首先根據地調所的活段斷層條帶地質圖、活動斷層分布圖，找出活動斷層位置，加上縱向的平衡剖面圖及震測剖面，確認斷層地下形貌，最後連結數條剖面的斷層，以三維模型建置軟體建置斷層的三維構造模型。根據本研究蒐集位於竹苗地區的構造平衡剖面及震測剖面。將所有剖面數化並於三維空間系統中重新定位，其數化與定位成果見圖 10。此外將特別針對新竹和新城兩條活動斷層之地下形貌與該兩條活動斷層在地表出露位置作比對而加以校正，並依序建立其三維形貌（圖 11、12），茲將模型建置之活動斷層地下三維構造詳述如下：

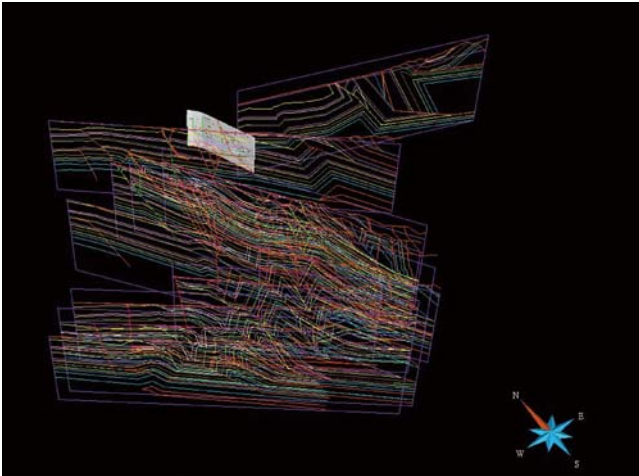


圖 10 數化竹苗地區構造平衡剖面 and 震測剖面

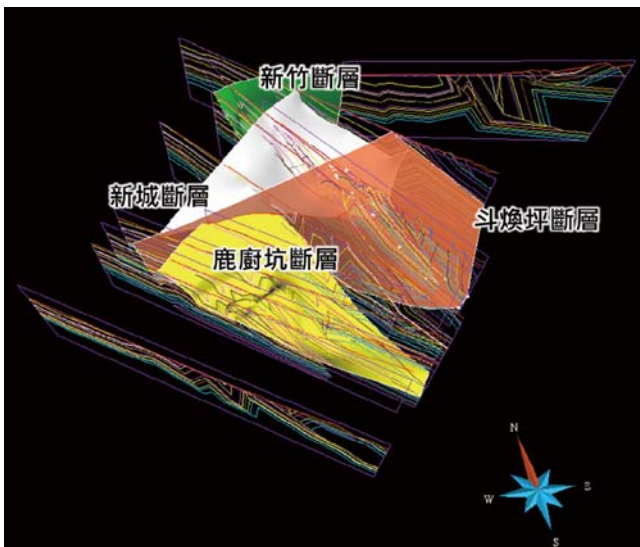


圖 11 三維模型成果 (新竹、新城、鹿廚坑、斗煥坪斷層)

新竹斷層

新竹斷層位於外麓山帶，走向東—西向，斷層面向南傾斜，斷層自新竹市區東南方的光復中學附近，延伸至新竹市區西南方的美山村。根據井下資料和震測解釋，新竹斷層的地下構造形貌有三條分支斷層，其中一條高傾角近乎垂直，其餘兩條淺部亦為高傾角，但是在北寮層內合併轉成低傾角斷層。高傾角的新竹斷層分別向東和向西伸展較長的距離，但由於構造剖面的限制，僅繪出部份長度。根據地表資料，新竹斷層東段（即該斷層和新城斷層交會處以東）應保持高傾角東西走向延伸至為內麓山帶軟橋斷層所截之處。新竹斷層西段，無論是高低傾角斷層皆形成向北凸出的曲面。

新城斷層

新城斷層位於外麓山帶，走向北北東—南南西，為一向東傾之低傾角逆斷層，在構造平衡剖面上地下有兩條分支斷層，新竹斷層北段由關西南方至頭前溪呈東北東走向，長約 12 公里；新竹斷層南段由頭前溪延伸至頭份東北方的頂埔里，呈東北走向，長約 16 公里。新城斷層的地下三維構造形貌有從北到南的變化，其特徵有三：(1) 斷層面從北段簡單的上凹或圓錐狀曲面向南轉變成向上凹凸的較複雜的曲面；(2) 斷層面最深處之深度向南加深；(3) 斷層面北段向北抬昇和 新竹斷層會合，但南段則為東西走向的斗煥坪斷層所截。

斗煥坪斷層

斗煥坪斷層位於外麓山帶新城斷層南側，主要位於竹東丘陵南緣一帶，從斗煥坪至社寮坑，並截切新城斷層。斗煥坪斷層為一東西走向高低傾角近乎垂直的斷層，向東延伸止於內麓山帶竹東—北埔斷層的南端。

湖口斷層

湖口斷層位於外麓山帶，由新竹縣湖口向東延伸至桃園縣平鎮，野外調查未發現斷層露頭出露，且鑽井資料僅看到褶皺現象，所以將可能為斷層的位置標註為褶皺軸。地調所在該區域進行許多地質調查，包含光螢光定年、野外地質、鑽探、震測、重力、地電阻、水準測量、GPS，推測湖口斷層位於向斜軸的急折面 (hinge surface) 與地表的交線。

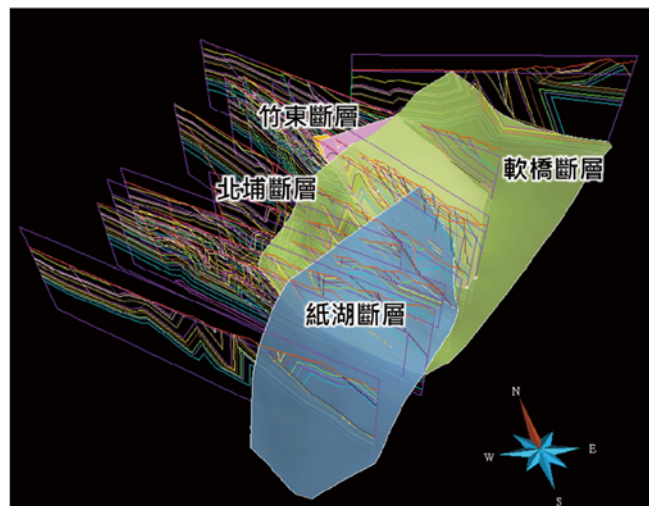


圖 12 三維模型成果 (竹東、北埔、軟橋、紙湖斷層)

如何利用三維模型精進地震防災分析技術

於防災應用層面，可將建置完成之三維構造模型提供至既有之應變簡報使用，因目前應變簡報僅利用二維地質剖面相關資訊研判地震相關資訊，若新增三維模型資料，可更明確掌握震央位置與地下斷層之關聯性及後續餘震研判（圖 13）。然而於災害發生前之整備階段，亦可針對潛在危險性高的區域持續關注，並對於該區域之可能發生災害研擬對策。本研究採用模擬震源的地動分布圖層，進行建物震災損失評估，並建立網格化建物震災損失分布圖，另外利用 Arc Gis 套疊分析成果於三維模型，可推估斷層影響可能造成之建物毀損數量（圖 14）。再利用三角剪切帶模式分析

地表可能變形範圍，本研究暫以新竹斷層為例，進行地表變形範圍分析，依分析結果顯示，倘若三角剪切帶張角自 $60^\circ \sim 90^\circ$ ，其變形範圍自 68 ~ 286 公尺（圖 15），與地調所公告之地質敏感區範圍寬度相近。

根據本研究建置之三維斷層模型，可評估新竹地區潛在活動性高的斷層活動可能引發的地震規模，分別為新竹斷層、新城斷層、斗煥坪斷層、湖口斷層，茲將可能發生地震之規模及分析成果將詳述如下（地震斷層參數彙整詳表 1）：

- (1) 新竹斷層，由本研究建置之三維模型研判，新竹斷層長度可能長約 28 公里，可能引發之地震規模 $M_w = 6.76$ ；斷層面面積約 135 平方公里，可能引發地震規模 $M_w = 6.16$ 。

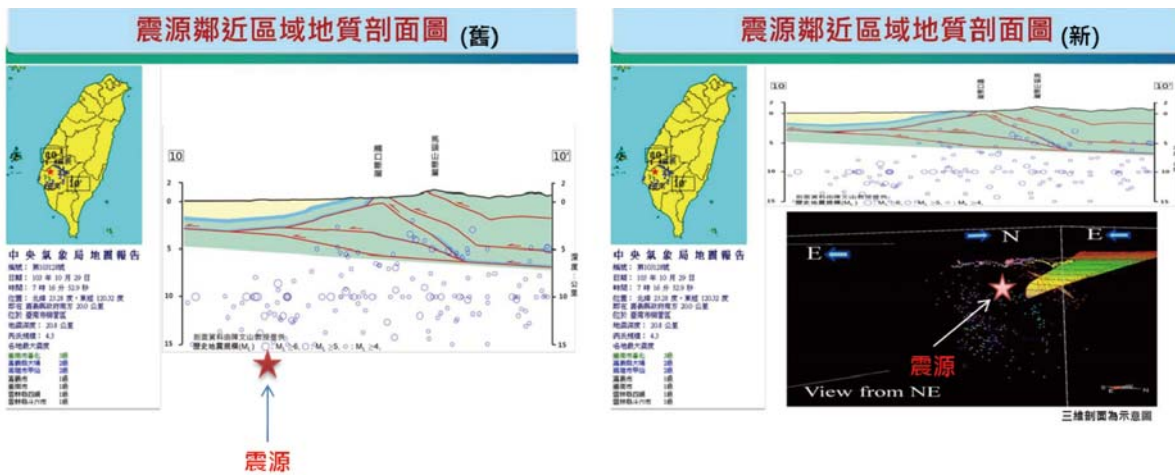


圖 13 應變簡報版型修改示意圖

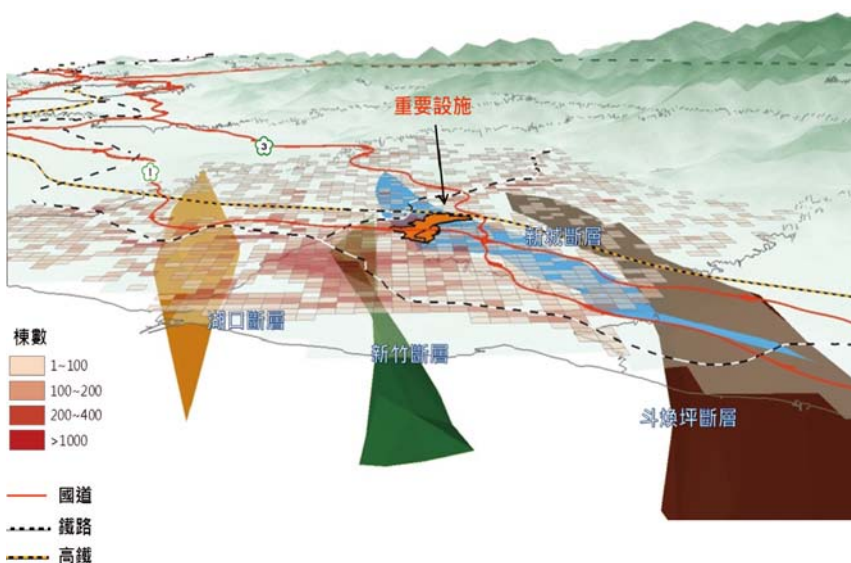


圖 14 鄰近斷層之損害評估

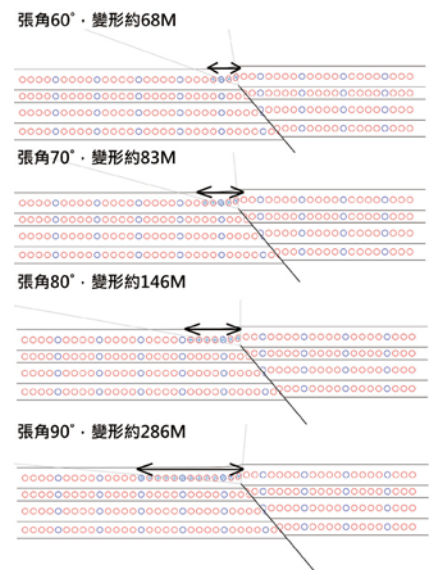


圖 15 三角剪切帶分析地表變形範圍圖

- (2) 新城斷層，斷層長度約 28 公里。然由三維模型研判，新城斷層錯動面積約 225 平方公里，可能引發之地震規模 $M_w = 6.39$ ；若依地表地質特性與斷層面幾何形貌，可將斷層概分為 2 段，其斷層北段長度為 11 公里，斷層南段則為 17 公里，依照單一性帶狀的面積推算，其斷層北段面積約為 88 平方公里，可能引致之地震規模為 $M_w = 5.9$ ；斷層南段面積為 137 平方公里，可能引致之地震規模為 $M_w = 6.17$ 。
- (3) 斗煥坪斷層，經由三維模型研判斷層長度可能約 28 公里，可能引發之地震規模 $M_w = 6.76$ ；斷層面積約 364 平方公里，可能引發最大地震規模 $M_w = 6.6$ 。
- (4) 湖口斷層，經由三維模型研判斷層長度可能長達 21 公里，可能引發之地震規模 $M_w = 6.43$ ，斷層面積約 171 平方公里，可能引發地震規模 $M_w = 6.26$ 。

表 1 各斷層參數表

斷層名稱	斷層長度 (km)	依斷層長度推估地震規模 (M_w)	斷層面積 (km^2)	依斷層面積推估地震規模 (M_w)
新竹	9	6.16	81	5.93
	28*	6.76*	135*	6.16*
新城	22	6.63	364	6.6
	28*	6.72*	225*	6.39*
斗煥坪	10	6.22	130	6.14
	28*	6.76*	364*	6.6*
湖口	15	6.61	189	6.31
	21*	6.43*	171*	6.26*

*：由本計畫建置之三維模型所得斷層參數

結論與建議

經由建置完成之活動斷層地下三維模型，將於地震發生可提供即時提供地震評析、展示相關地質資料及對於後續餘震評估等提供相當助益。且由本模型成果對於地震發生後之應變作業提供一完整的研判資料，以利於研判後續餘震位置並可立即推估可能錯動之斷層及地表可能錯動範圍，以利災後救援。經由分析結果顯示，新竹斷層若發生錯動，可能引發規模 6.76 之地震，且可能造成地表變形區域之寬度約 286 公尺，此變形帶寬度恰與中央地調所公告之地質敏感區相近。未來應加入有限元素法或離散元素法進行分析，可更精確評估斷層靠近地表周圍之變形程度。

參考文獻

1. Suppe, J. (1985) Principles of Structural Geology, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
2. Bray, J.D., Seed R.B. and Seed H.B. (1994) Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *J. Geotech. Engrg.*, 562-580, doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:3(562).
3. Lin, M.L., Chung, C.F., Jeng, F.S., (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Eng. Geol.*, 88(1-2), 70-89., doi:10.1016/j.enggeo.2006.08.004.
4. 魏勇帆 (2006) 覆土材料性質對於逆斷層錯動引致上覆土層變形之探討，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，共 172 頁。
5. 鍾春富 (2007) 逆斷層錯動引致上覆土層變形行為及對結構物影響之研究，國立臺灣大學土木工程學研究所博士論文，共 271 頁。
6. Oettle N.K., J.D. Bray, D.S. Dreger (2015) Dynamic effects of surface fault rupture interaction with structures, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 72, 37-47., doi:10.1016/j.soildyn.2015.01.019.
7. 林銘郎、李崇正、黃文正、黃文昭 (2011) 活動斷層進地表變形特性研究 (1/4)，經濟部中央地質調查所報告，共 220 頁。
8. 陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能梯、張徽正、石瑞銓、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁 (2003) 新城斷層的古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，第 11 ~ 23 頁。
9. Erslev, E.A. (1991) Trishear fault-propagation folding. *Geol.*, 19(6), 617-620, doi:10.1130/0091-7613(1991)019 <0617:TFPF> 2.3.CO;2.
10. Chen, W.S., K.J. Lee, L.S. Lee, D.J. Ponti, C. Prentice, Y.G. Chen, H.C. Chang, and Y.H. Lee (2004) Paleoseismology of the Chelungpu Fault during the past 1900 years. *Quat. Int.*, 115-116, 167-176, doi:10.1016/S1040-6182(03)00105-8.
11. 陳伯軍 (2006) 斷層擴展褶皺之斷層破裂距離與斷層滑移量比值 (P/S) 力學特性之研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 52 頁。
12. Allmendinger, R.W. (1998) Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17(4), 640-656, doi:10.1029/98TC01907.
13. Cardozo, N., Allmendinger, R.W. and Morgan, J.K. (2005) Influence of mechanical stratigraphy and initial stress state on the formation of two fault propagation folds. *J. Struct. Geol.*, 27, 1954-1972. doi:10.1016/j.jsg.2005.06.003.
14. Wells D.L., Coppersmith K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. seism. Soc. Am.*, 84(4), 974-1002. <http://www.bssaonline.org/content/84/4/974.short>
15. 江婉綺、劉桓吉 (2011) 臺灣地質圖幅及說明書，新竹圖幅 (1/50,000)，經濟部中央地質調查所。
16. 塗明寬、陳文政 (1990) 臺灣地質圖幅及說明書，中壢圖幅 (1/50,000)，經濟部中央地質調查所。
17. 何信昌 (1994) 臺灣地質圖幅及說明書，苗栗圖幅 (1/50,000)，經濟部中央地質調查所。
18. 塗明寬、陳文政 (1991) 臺灣地質圖幅及說明書，竹東圖幅 (1/50,000)，經濟部中央地質調查所。
19. 經濟部中央地質調查所 (2013) 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置圖冊，共 53 頁。
20. 饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文 (2006) 地震地質調查與活動斷層資料庫建置計畫，活動斷層監測系統計畫 (5/5)，經濟部中央地質調查所報告，共 256 頁。
21. 經濟部中央地質調查所 (2012) 臺灣活動斷層分布圖。
22. 黃宣維 (2012) 以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部新竹地區之新期構造活動，國立臺灣大學理學院地質科學系碩士論文，共 158 頁。

