

2022 年 0918 池上地震玉里斷層與新斷層的斷裂機制研究

林啓文¹、周稟珊¹、黃文正²

摘要

臺灣花東縱谷位處歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界，位於縫合帶西界的玉里斷層在 2022 年 9 月 18 日池上地震 ($M_w=6.9$ ；簡稱 0918 池上地震) 再次活動，相距上一次 1951 年地震活動造成地表破裂歷經 71 年，而位於縫合線東界的池上斷層也有地表破裂。除了上述兩條斷層再次活動，0918 池上地震增加 3 條新斷層，包括春日斷層、大禹斷層與東寧斷層，這些新斷層與主斷層-玉里斷層的運動模式相同，均為左移運動兼向東逆衝，但與主斷層沒有連接，而是相隔一段距離。由地表破裂的分析，作者推測這些新斷層屬於第一級分散斷層 (first order splay fault)。

由分散斷層在縫合帶內的分布範圍，作者推測這些新斷層與主斷層處於相同的遠場應力，但受到局部應力的影響而改變斷層走向，因此屬於相同的運動形式、而不同的斷層走向。這些新斷層不僅分布在縫合帶中央位置，也分布在縫合帶東界的池上斷層上盤，指示花東縱谷下方可能發育數條傾向相反的分支斷層或分散斷層，花東縱谷未來的斷層活動，除了主斷層也可能發生在這些新斷層上。

關鍵詞：花東縱谷、0918 池上地震、玉里斷層、春日斷層、大禹斷層、東寧斷層、分支斷層、分散斷層

前言

1951 年 11 月 25 日臺灣花東縱谷中部發生規模 $M_L7.3$ 地震，中央山脈東側出現地表破裂，位於花蓮縣玉里鎮三民向南延伸，但是缺乏明顯的錯移現象，Hsu (1956; 1962) 提出玉里斷層，但是無法判斷斷層位態，例如斷層面是向東或向西傾斜？也不清楚斷層的運動形式 (sense of movement)；唯一發現在瑞穗

¹ 經濟部地質調查及礦業管理中心

² 國立中央大學應用地質研究所

南方舞鶴台地北端有一侵蝕溝，溝西側出露向東緩傾斜的礫石層，溝東側的礫石層則向西傾斜，指示玉里斷層北端的可能露頭。玉里斷層在地表與地下的證據不足，包括施測淺層反射震測結果解析不足，以致一直無法確認斷層的地表斷層跡。

2022年9月17日與9月18日，臺灣花東縱谷內接連發生規模 M_w 6.5 地震（0917 關山地震），與規模 M_w 6.9 地震（0918 池上地震）等兩次地震（圖 1），因此對玉里斷層有更多的瞭解。

這兩次地震，除了玉里斷層與池上斷層產生地表破裂之外，也形成 3 條新斷層（經濟部中央地質調查所，2022a；林啓文與周稟珊，2022），這些斷層都屬於左移兼背衝斷層（back thrust），主斷層為玉里斷層。地震過後有許多研究，包括地震觀測（Lee *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024）、大地測量（經濟部中央地質調查所，2022b；Widiatmoko *et al.*, 2023）、地表破裂觀察（林啓文，2022；林啓文與周稟珊，2022；經濟部中央地質調查所，2022a；Wang *et al.*, 2024）等，但很少討論地表破裂幾何的運動學發展與破裂機制，以及與板塊邊界、縫合帶（suture zone）特性與岩石紀錄的關係，因此本研究針對玉里斷層與新斷層探討它們的形成機制。

地體構造架構

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交接帶（Chai, 1972）。陸地上，位於西側的中央山脈由古生代至古近紀的變質岩所組成，代表中新世以前的歐亞大陸邊緣；位於東側的海岸山脈，由新近紀火山岩與沉積岩所組成，代表火山島弧的沉積體系（例如陳文山，2016）。兩者之間的縫合帶，由變形的新近紀海底沉積物所構成，稱為利吉層（Hsu, 1956），屬於混同層（Biq, 1971）。地表上，縫合帶寬約 3-5 公里，由未膠結的河流相沖積層所覆蓋，地形上這個區域稱為花東縱谷。

歐亞板塊與菲律賓海板塊碰撞，是由於中新世早期南中國海床擴張，歐亞板塊向東隱沒至菲律賓海板塊之下（Ludwig *et al.*, 1967; Ludwig, 1970），後者也向北移動，並隱沒至歐亞板塊之下（Hsu, 1971），而交接帶形成壓縮環境。約上新世開始，臺灣島開始浮出海面（Chi *et al.*, 1981），由於地處板塊的縫合帶，花東縱谷地震頻仍，有歷史紀錄的一百多年來，例如 1951 年、2006 年、2018 年等地震，地震機制與地表破裂跡大多顯示花東縱谷的斷層運動以左移斷層與逆



圖 1 2022 年 0917 關山地震與 0918 池上地震地表破裂位置。黃色星號為兩次地震的震央。紅色點為調查的地表破裂，紫色點為噴砂位置，黃色區域已經劃設為活動斷層地質敏感區的範圍。

衝運動為主 (Hsu, 1962; Wu *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2007; 經濟部中央地質調查所, 2018), 顯示菲律賓海板塊向西壓縮與向北隱沒的特性。

根據中央地質調查所的彙整, 花東縱谷共有 8 條活動斷層(林啓文等, 2009; 2021), 其中兩斷層位於縫合帶西側與中央山脈交界, 分別是位於縱谷中部的玉里斷層(1951 年地震)與位於縱谷南部的鹿野斷層(2006 年地震)(圖 1)。有 6 條斷層位於縫合帶東側與海岸山脈交界, 包括米崙斷層(1951 年地震、2018 年地震)、嶺頂斷層(2018 年地震)、瑞穗斷層(1951 年地震)、奇美斷層, 池上斷層(1951 年地震、2003 年地震)與利吉斷層。但是, 有一些斷層可能被縱谷內厚層沖積層覆蓋, 沒有露出地表, 例如縱谷北側的縫合帶西緣。相反地, 縱谷內主要河流流向縫合帶東側與海岸山脈交界, 較低地勢的丘陵與易受侵蝕的沉積岩, 使得活動斷層出露地表而容易觀察。

0917 關山地震與 0918 池上地震

2022 年 9 月 17 日, 花東縱谷南方發生規模 $M_L 6.4$ ($M_w 6.5$) 關山地震(圖 2 左), 震源深度 17km, 震央 23.0777N、121.1630E (中央氣象局, 2022a); 斷層面解顯示為位態 $N13^\circ E/80^\circ W$ 的左移斷層; 餘震集中於關山與池上之間, 震源深度在 15 公里以內, 集中於 10 公里(圖 2 左)。

2022 年 9 月 18 日在花東縱谷西側發生規模 $M_L 6.8$ ($M_w 6.9$) 池上地震(圖 2 右), 震源深度 25km, 震央 23.1375N、121.2040E (中央氣象局, 2022b); 斷層面解顯示為位態 $N9^\circ E/82^\circ W$ 的左移斷層; 餘震由池上向北逐漸擴展, 震源深度在 15 公里以內, 集中於 10 公里(圖 2 右)。

由於 0917 關山地震與 0918 池上地震的震央接近, 而且斷層面解算出的斷層相近, 一些地震學家認為後者為主震 (main shock), 前者為前震 (foreshock); 兩次地震的餘震分布區域相近。0918 池上地震的主震與餘震, 緊鄰玉里斷層西側的中央山脈下方約 2-3 公里, 推測玉里斷層若向下連接板塊縫合帶西界, 斷層傾角約向西傾斜 74-79 度。

地表破裂與斷層力學

野外調查 0918 池上地震造成的地表破裂, 主要是左移斷層兼具逆移分量,

而由地震斷層面解（圖 2）推估，玉里斷層的傾角約 80 度。因此，作者簡化以橫移斷層形式來分析這些地表破裂，並推估壓縮作用力的方向，之後再和大地測量的結果作比對。

依據岩石力學三軸試驗結果，破壞面（failure plane）（或斷層）與最大主應力軸夾特定的角度（ θ ），這個角度決定於岩石的內摩擦角（ φ ），因此

$$\theta=45-\varphi/2$$

φ 與岩石的性質有關，一般約 30 度（例如 Fossen, 2016）。張力裂隙（tension gash）通常平行最大主應力軸（ σ_1 ），由實驗室得知的另一項資訊，破壞面通常由早期的張力裂隙連結而成。

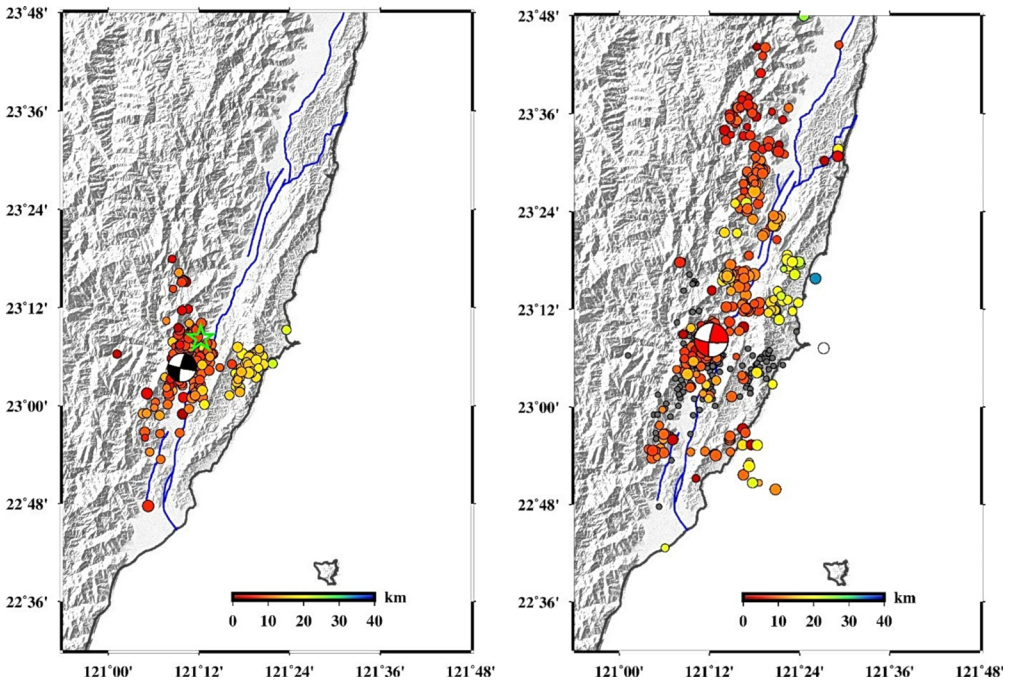


圖 2 左圖：0917 關山地震 M_L 6.4 (M_w 6.5) 的餘震 (0918 池上地震之前)。右圖：0918 池上地震 M_L 6.8 (M_w 6.9) 的餘震。海灘球指示斷層面解，圓圈代表餘震，藍色線為活動斷層斷層跡。摘自臺灣地區地球物理資料管理系統中央氣象局 (2022c)。

以走向滑移斷層系統分析，中間主應力軸（ σ_2 ）假設與地表面垂直（Anderson, 1951），最大主應力軸（ σ_1 ）與斷層面夾角為（ θ ）。因此，橫移斷層斷層面與最大主應力軸夾角約 30 度。橫移斷層在純剪變形（pure shear；圖 3A）與單剪變形時（simple shear；圖 3B），可能伴生許多分支斷層（branch fault；Sylvester,

1988)，主要破裂面與最大壓應力軸的夾角關係如圖 3。

利用上述關係，野外量測張力裂隙與破壞面（斷層面）的走向與夾角關係，可以推測最大主應力軸。此外，由於地震斷層面解的斷層面並非垂直地面，野外發現地表破裂也有逆移分量，因此這樣的推估方式只能比較不同斷層的最大主應力軸變化，以探討各斷層的形成機制，實際上確切的最大主應力方向是無法獲得的。

2022 年 0918 池上地震的震央，位在池上附近靠近中央山脈側，附近已知的活動斷層包括玉里斷層與池上斷層均有地表破裂（圖 1），另外在花東縱谷內形成 3 條新斷層。以下作簡要敘述。

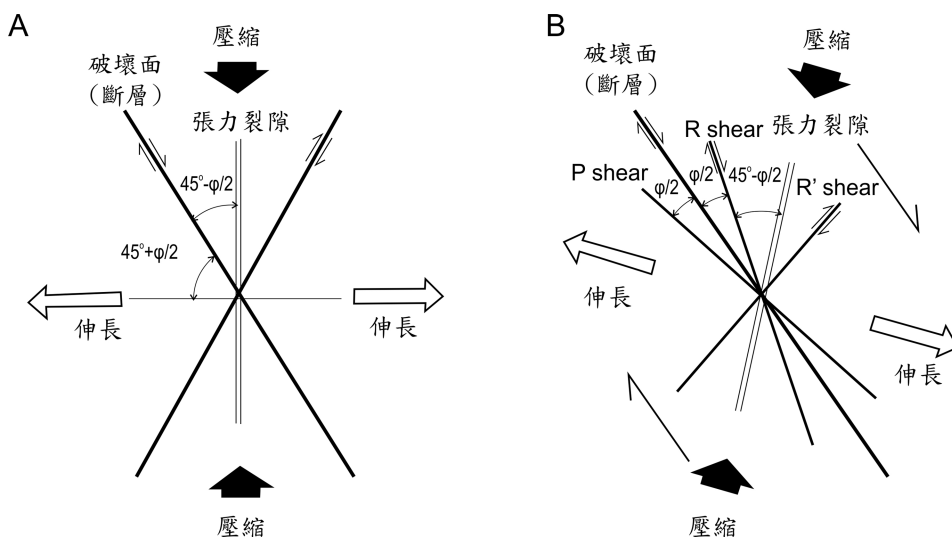


圖 3 橫移斷層造成構造的幾何關係平面圖。P 為 P 剪裂 (P shears)，R 與 R' 為雷式剪裂 (Riedel shears)， ϕ 為內摩擦角。黑色箭頭為壓縮方向，白色箭頭為伸長方向。摘自 Sylvester (1988)。

玉里斷層

玉里斷層的斷層跡沿線有明顯且連續的地表破裂，延伸約 14 公里，其中最南端 3 公里為 0918 池上地震新形成、且出露地表之斷層。原來定義的玉里斷層的北段 12 公里，在該次地震沒有產生地表破裂。地表破裂概述如下：

玉里醫院北側防堤道路 (Y11；圖 4)，一組 N10°E 的裂隙，道路另一組裂隙走向 N24°W，西側上升；後者連結河堤上 1 組走向 N20°W 裂隙，西側上升、指示左移分量。

卓溪北方泥土路 (Y12；圖 4)，一組走向 N25°W 的雁行排列張力裂隙，裂

隙具有開口，位在形狀為壓力脊（pressure ridge）的土丘上，壓力脊走向 N10°E 為剪力方向，而張力裂隙尖端指示最大主應力方向。

玉里高中棒球場（Y13；圖 4、圖 5A）：，紅土球場與草地上一組雁行排列、走向 N24°W 的裂隙，裂隙區隆起形成脆性剪切帶（brittle shear zone），西側抬升；裂隙的邊界指示著剪力方向為 N12°E，而裂隙尖端指示最大主應力方向。

玉里高中科學館（Y14；圖 4、圖 5B），草地上雁行排列裂隙走向 N22°W，隆起形成壓力脊，西側抬升。裂隙邊界指示剪力方向 N10°E，而裂隙指示最大主應力方向。

客城至源城溪的水稻田，地表破裂散佈約 1 公里寬，有一組雁行排列裂隙，另一組為走向 N10°E 剪力破裂（shear fracture），西高東低，破裂集中於玉里斷層跡附近。

樂樂溪北岸道路（Y15；圖 4），一組 Z 型（Zigzag）裂隙走向 N5°W，呈現左移形式，剪力破裂與斷層崖走向為 N10°E。

玉長大橋南岸道路（Y16；圖 4），一組剪力破裂為 N15°E 走向，西側上升，另一組雁行排列裂隙，走向 N25°W。

長良北村農路（Y17；圖 4），左移斷層，西高東低，斷層崖走向 N18°W，另一組裂隙走向 N24°W，剪力破裂走向為 N10°E。

長良北村農田（Y18；圖 4）。水稻田產生撓曲崖（flexure scarp），西高東低，崖走向 N15°E，高差約 50 公分，另有一組走向 N18°W-N24°W 的雁行破裂。

長良北村西瓜田（圖 5C、5D）：左移斷層，左移 100 公分，上盤（西側）抬升約 70 公分。

玉里斷層最南端，秀姑巒溪堤防道路（Y19；圖 4），一組雁行排列裂隙，走向 N20°W，剪力破裂走向 N18°E，西側抬升。

前述露頭指示，玉里斷層的斷層崖（fault scarp）與撓曲崖相當明顯，左移分量最大約 100 公分，抬升量最高約 70 公分；指示它是一條左移兼具向東逆移的斷層，走向為北偏東 10-15 度；由於斷層具有向東逆衝的分量，研判斷層面向西呈高角度傾斜，這與餘震觀測結果吻合（圖 2）。

本研究統計 0918 池上地震地表破裂的最北側—純柑地區至最南端長良地區，張力裂隙平均方向為 N22°W，剪切帶或斷層的平均走向為 N13°E。岩石破裂時的張力裂隙大致平行最大主應力軸，由此推測沿線地表破裂時最大主應力軸約呈 N22°W 走向，而脆性剪切帶指示主斷層方向，約呈 N10°-18°E 走向。玉里斷層的走向為 N13°E，指示板塊交界的縫合線走向約為上述的平均值；平直的斷

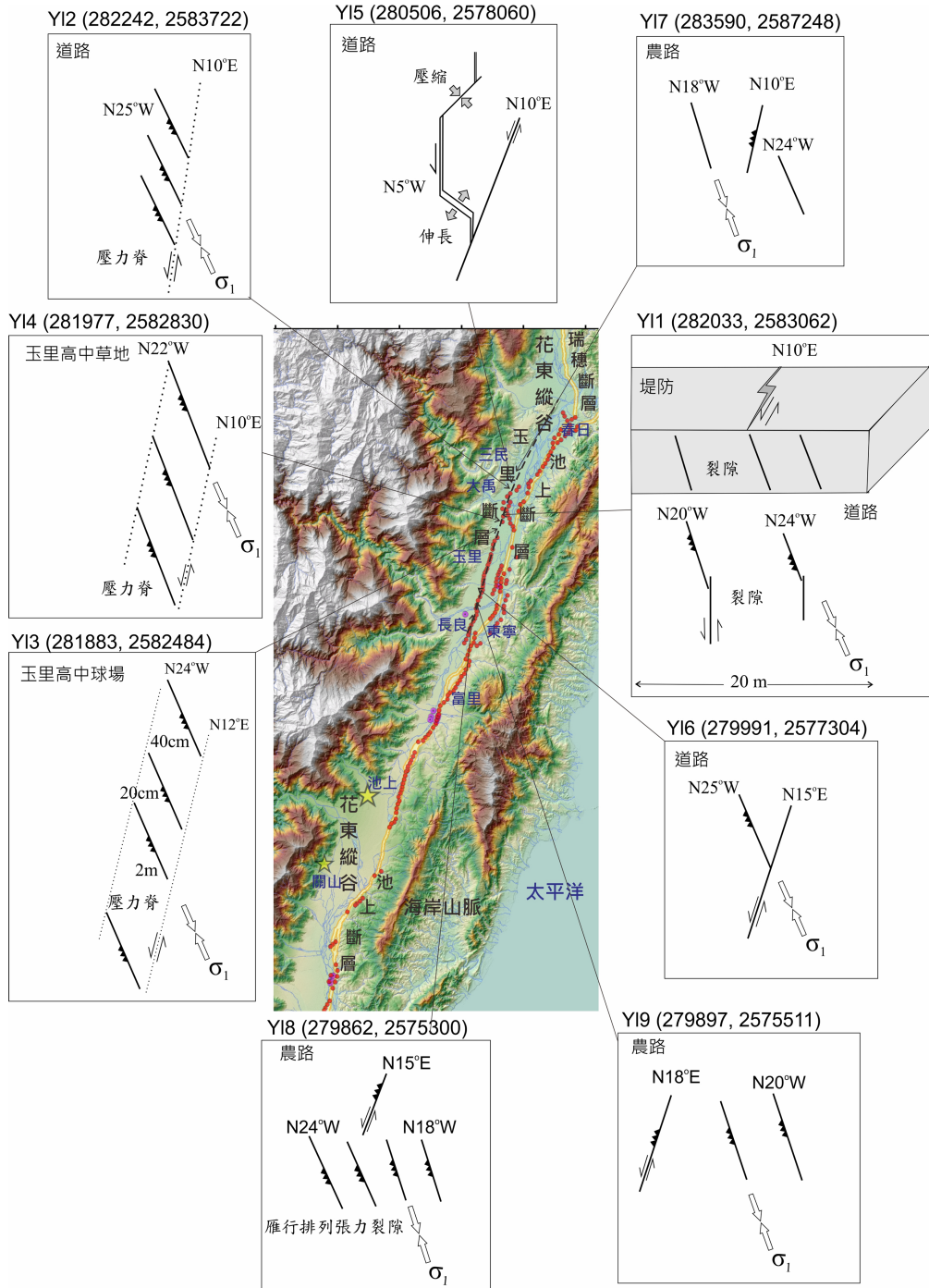


圖 4 池上地震發生時沿著玉里斷層的地表破裂。露頭代號包括 TW67 二度分帶坐標，內框顯示推測的最大主應力方向。點線為剪切帶的邊界，張力裂隙的一側鋸齒代表上升側，單箭頭表示相對剪動方向，空箭頭代表主應力方向。



圖 5 0918 池上地震玉里斷層地表破裂露頭。A：玉里高中棒球場，紅土球場一組雁行排列裂隙，裂隙區隆起形成脆性剪切帶，向北拍攝。B：玉里高中科學館，草地上雁行排列裂隙，隆起成壓力脊，向南拍攝。C、D：長良北村西瓜田，左移 100 公分，上盤抬升約 70 公分，C 圖向東拍攝，D 圖向西拍攝。

層跡，地表面上大略平行花東縱谷走向，也指示斷層傾角可能很陡。不同地點地表破裂走向的差異，也有可能受到上覆未膠結沉積物影響而有變化。

最北端至最南端，地表破裂與裂隙的走向相當一致，說明上述最大主應力方向 $N22^{\circ}W-S22^{\circ}E$ ，是該次地震時的遠場應力（far field stress 或 remote stress）方向，代表區域性應力場（regional stress field）。

池上斷層

關山地震與池上地震發生時，池上斷層也有再活動，地表破裂大多沿著池上

斷層跡分布（經濟部中央地質調查所，2022a）。位於海岸山脈西緣的池上斷層，地表破裂顯示斷層向西北逆移，與原先池上斷層的特性一致；主要地表破裂概述如下。

船仔山北方（Cs1；圖 6），一組呈現類似階梯式逆斷層，斷層走向 $N22^{\circ}E-N45^{\circ}E$ ，東南側抬升的逆移形式，與以往針對池上斷層的特性的資料類似，而主要裂隙走向為 $N10^{\circ}-18^{\circ}W$ 。

崙天大橋東方（Cs2；圖 6），斷層崖走向 $N35^{\circ}E$ ，一組裂隙 $N10^{\circ}W$ 。

富池橋北側農田（Cs3；圖 6、圖 7A），斷層崖（看似撓曲崖）走向 $N28^{\circ}E$ ，上盤（東南側）抬升 40 公分，依據農田主人描述上盤底為泥岩（利吉層），下盤底為河相沖積層，是池上斷層的斷層跡位置。

富池橋農田（Cs4；圖 6、圖 7B），斷層崖（看似撓曲崖）走向 $N35^{\circ}E$ ，上盤（東南側）抬升 30-40 公分。

0918 池上地震除了地表破裂之外，稍後的同震變形大地測量結果，池上斷層上盤有明顯向西北滑移現象（圖 15 左），指示逆移斷層形式。逆移斷層無法

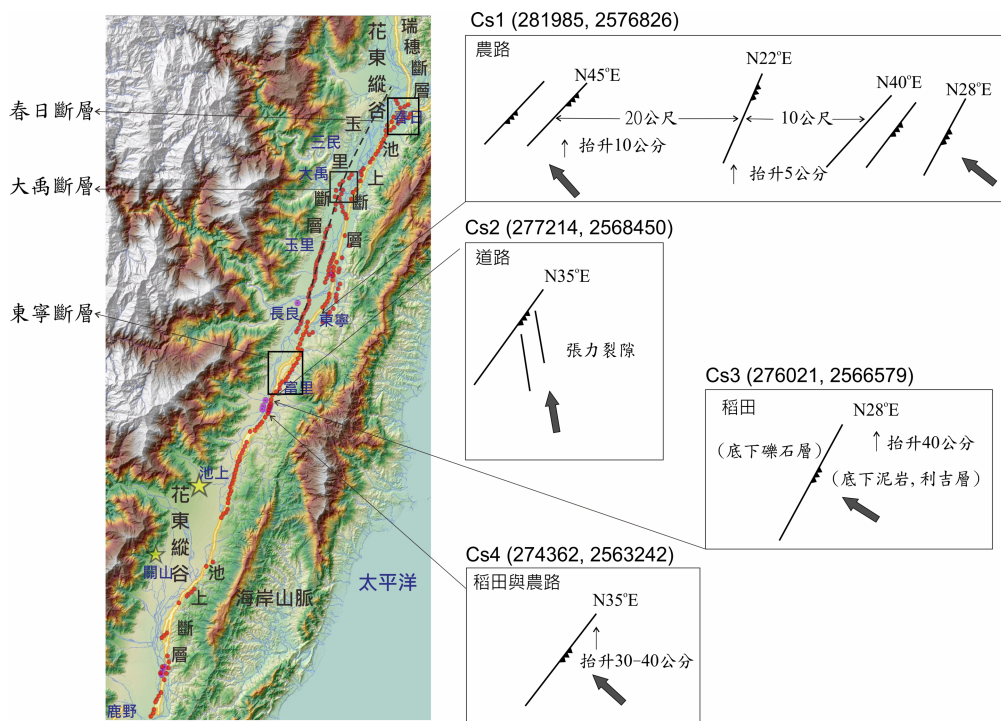


圖 6 0918 池上地震時池上斷層沿線的地表破裂。左圖內框指示新斷層的位置（細部資料見圖 8、圖 10 與圖 12）。

從斷層去推測最大主應力軸向，但是由同震變形的測量結果可以指示最大壓縮量的方向，是朝向西北走向。玉里斷層再次活動，可能是誘發池上斷層一部分區段（segment）再度活動的原因。

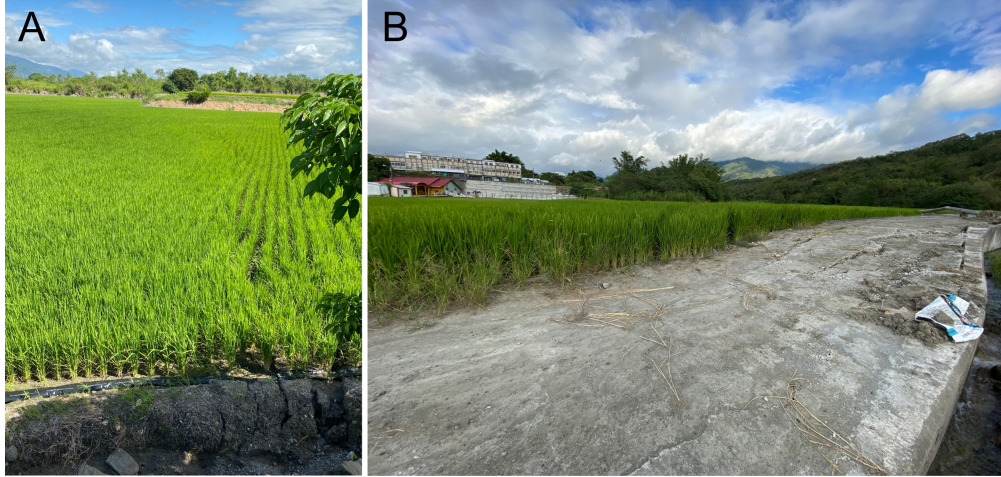


圖 7 0918 池上地震池上斷層地表破裂露頭。A：富池橋北側農田，東南側（右側）抬升，是池上斷層的斷層跡位置。B：富池橋農田，斷層崖（看似撓曲崖）走向 $N35^{\circ}E$ ，東南側（右側）抬升。

春日斷層

斷層造成的地表變形，由玉里鎮春日向西南延伸至松浦，呈 $N30^{\circ}E$ 走向，長約 3.5 公里（圖 8）。觀察到的地表變形如下：

地表變形的南段，斷層通過水稻田（Cz1；圖 8、圖 9A），撓曲崖走向 $N62^{\circ}E$ （圖 9 左），上盤（西北側）抬升 60-80 公分。

向北延伸，斷層的走向轉至 $N38^{\circ}E-45^{\circ}E$ （Cz2；圖 8），一組 $N8^{\circ}E$ 的破裂跨過溝堤連接兩側稻田。

更向北方，斷層走向轉為 $N28^{\circ}E$ （Cz3；圖 8），上盤（西北側）抬升約 50 公分。

最北段的斷層露頭（Cz4；圖 8），除了撓曲崖轉為走向 $N24^{\circ}E$ 以外，另外形成走向 $N8^{\circ}W$ 與 $N55^{\circ}W$ 等兩組裂隙（圖 9B），延伸寬度約 50 公尺。

春日斷層造成的地表破裂走向為 $N45^{\circ}E-N62^{\circ}E$ （圖 8），局部為 $N24^{\circ}E-N28^{\circ}E$ ，屬於左移斷層兼具逆衝分量。如果前述玉里斷層的伸長裂隙代表主應力方向（ $N22^{\circ}W$ ），依據最大主應力軸與斷層面夾角關係， $\theta=45-\varphi/2$ （圖 3），不會產生類似春日斷層走向的地表破裂。若以地表破裂走向方位回推，最大主應力

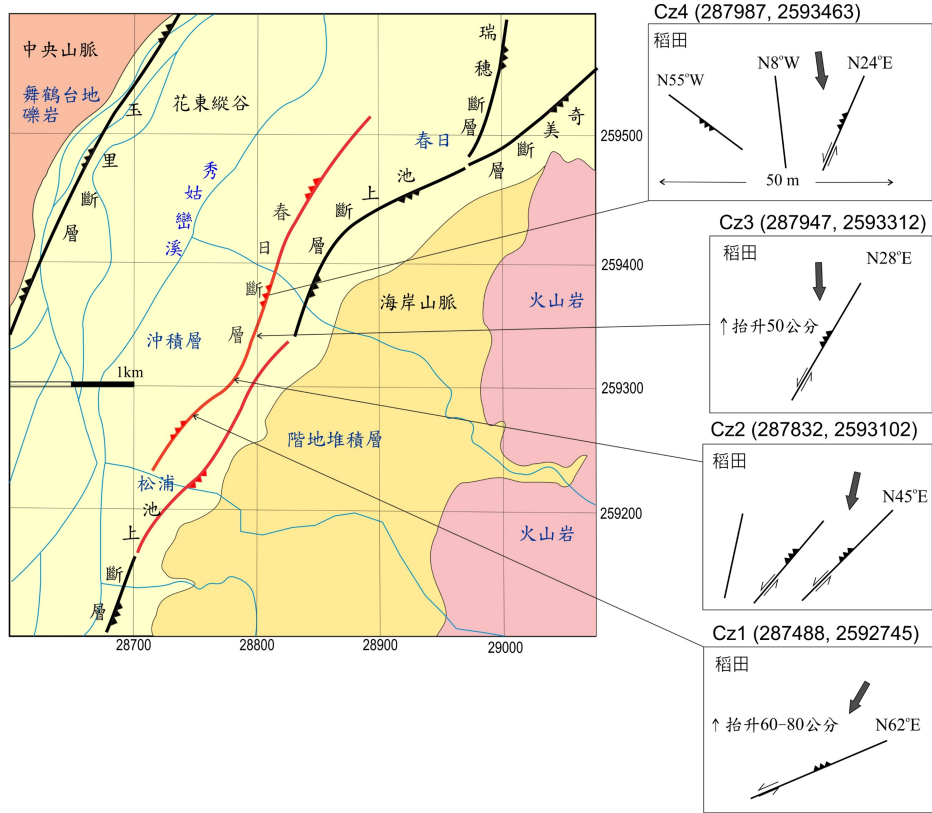


圖 8 春日斷層的斷層跡。比例尺 1/25,000，TW67 座標。黑色線段為已知活動斷層，紅色線段為 0918 池上地震時沿著池上斷層產生的地表破裂以及形成的新斷層。



圖 9 春日斷層地表破裂露頭。A：斷層通過水稻田，撓曲崖走向 N62°E，西北側抬升。B：撓曲崖轉為走向 N24°E，照片後方田埂抬升處，另外一組裂隙位於照片前方，而與前者呈小角度斜交。

軸可能介於 $N15^{\circ}E$ - $N30^{\circ}E$ 之間 (圖 8)，推論春日斷層與玉里斷層的當地應力場 (local stress or *in situ* stress) 不同。除了斷層走向不同，春日斷層與玉里斷層地表上沒有互相連結的證據，作者認為春日斷層為 0918 池上地震形成的新斷層，屬於分散斷層 (splay fault; Scholtz *et al.*, 2010)，將在文後進行討論。

大禹斷層

斷層位於大禹開發區 (高寮大橋南方)，長約 1 公里 (圖 10)，野外發現此斷層與玉里斷層並未連接，而是更偏向東方。觀察到的地表變形如下：

斷層最南側的水稻田 (Ty1; 圖 10)，斷層走向 $N42^{\circ}E$ (圖 11A)。北側水稻田 (Ty2; 圖 10)，斷層走向轉為 $N22^{\circ}E$ 。更向北側農路 (Ty3; 圖 10)，地表破裂走向轉為 $N12^{\circ}E$ 。

大禹斷層的東側，有一組走向 $N40^{\circ}E$ 地表破裂 (Ty4; 圖 10)，左移 60 公分、東南側抬升 40 公分的逆斷層，且上盤形成凸起 (bulge; 圖 11B)；逆斷層與大禹斷層相距約 40 公尺，兩者之間的區域相對下陷。逆斷層延伸約 120 公尺，斷層運動形式與玉里斷層、大禹斷層皆不同，指示是向西北壓縮作用所造成。

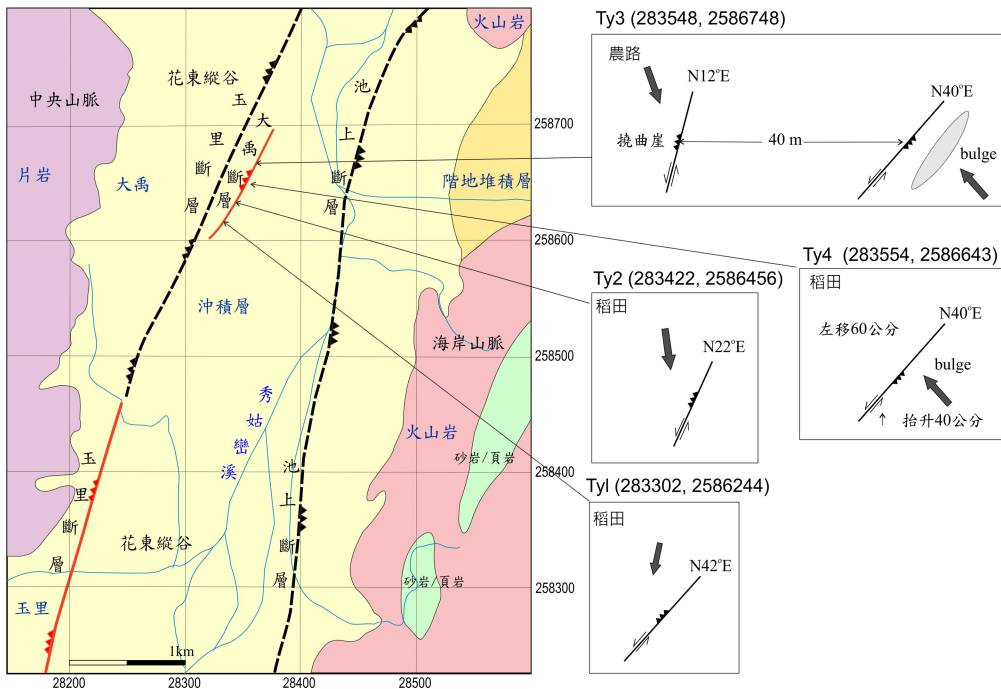


圖 10 大禹斷層的斷層跡。比例尺 1/25,000，TW67 座標。黑色線段為已知活動斷層，紅色線段為 0918 池上地震新形成的斷層，虛線為沖積層掩覆。

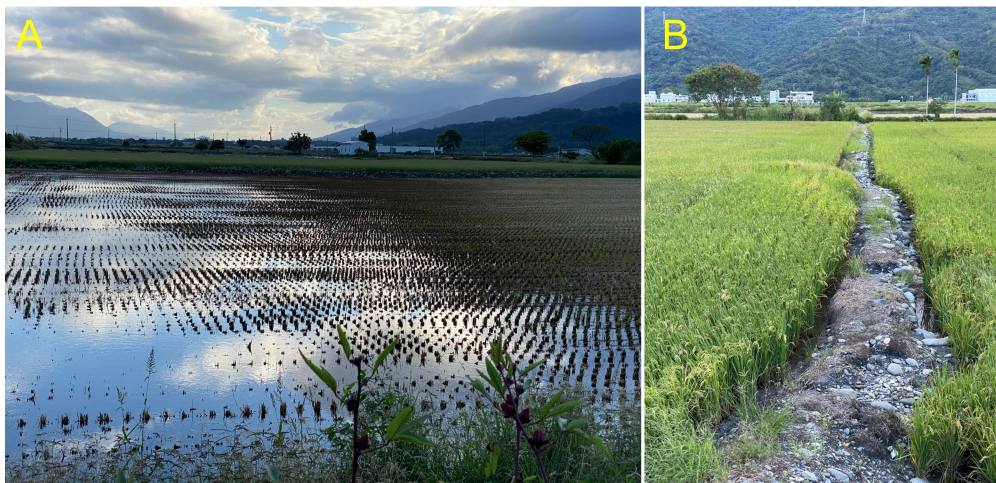


圖 11 大禹斷層地表破裂露頭。A：斷層最南側，採收後的水稻田乾濕分界為斷層崖。B：大禹斷層東側，有一組地表破裂東南側抬升，其東側另有一組破裂，兩者壓縮而形成凸起。

大禹斷層，最南側稻田斷層跡走向 $N42^{\circ}E$ ，向北斷層跡走向轉為 $N22^{\circ}E$ ，更向北側，斷層跡走向轉為 $N12^{\circ}E$ ；換言之，愈靠近玉里斷層與其夾角愈大。除了斷層走向不同，大禹斷層與玉里斷層地表上沒有連結，作者認為大禹斷層為本次地震形成的新斷層，也屬於分散斷層。

東寧斷層

斷層由富里鄉萬寧向西南延伸至竹田，長約 3.5 公里，呈 $N30^{\circ}E$ 走向。東寧斷層位於池上斷層上盤（圖 12）。觀察到的地表變形如下：

富北國中操場（Dn1；圖 12），分布雁行排列小型斷層（圖 13A），呈 $N42^{\circ}E$ - $N48^{\circ}E$ 走向，西北側皆為上盤，抬升量少於 15 公分。

斷層向東北延伸（Dn2；圖 12），在東寧附近的水稻田有西側抬升的斷層跡（圖 13 B），斷層再向北延伸至萬寧附近。

上述小型左移的背衝斷層，以 $\theta=45-\varphi/2$ 來推測其最大主應力軸為 $N15^{\circ}E$ - $N15^{\circ}W$ ，也與池上斷層向西北逆衝的運動形式不相同。西側池上斷層與東側東寧斷層所夾區域-學校園（圖 12），以往地質學者認為是花東縱谷內典型的壓力脊（pressure ridge），但都缺乏力學機制的證據，這次地震造成的現象解釋此種構造的形成機制-兩側壓縮的證據。壓力脊的形成需要一段長久的韌性變形過程，指示東寧斷層可能向下延伸一段深度，甚至向西延伸至玉里斷層的地下延伸處。同樣地，上述所提到的新斷層，包括春日斷層與大禹斷層，也可能向下延

伸一定深度，可能還有許多如上述的斷層面向西傾斜的逆斷層（背衝斷層）存在於花東縱谷之下的縫合帶。

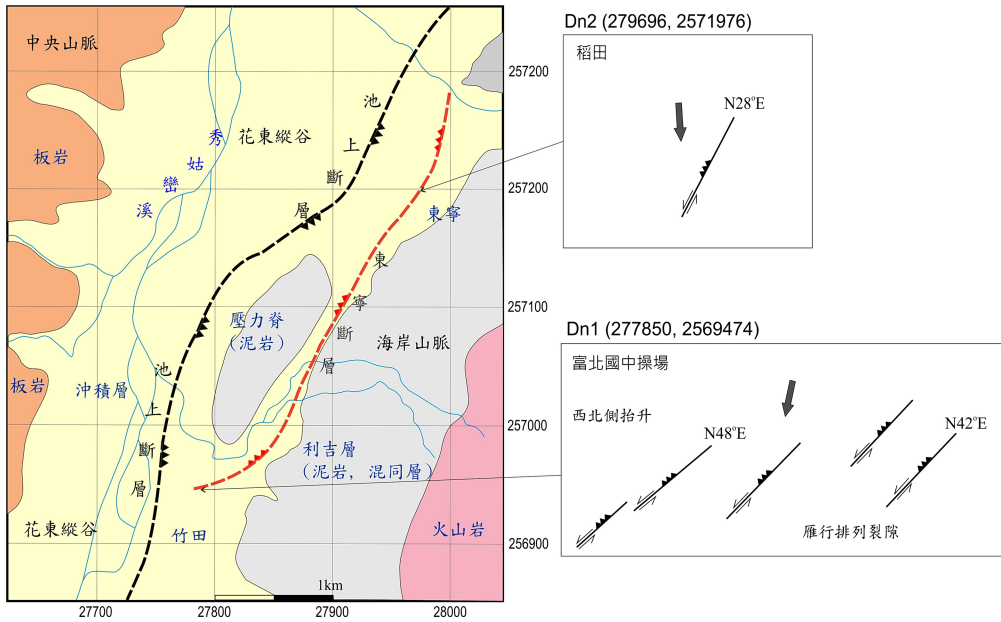


圖 12 東寧斷層的斷層跡。比例尺 1/25,000，TW67 座標，黑色線段為已知活動斷層，紅色線斷為 0918 池上地震新形成的斷層，虛線為沖積層掩覆。

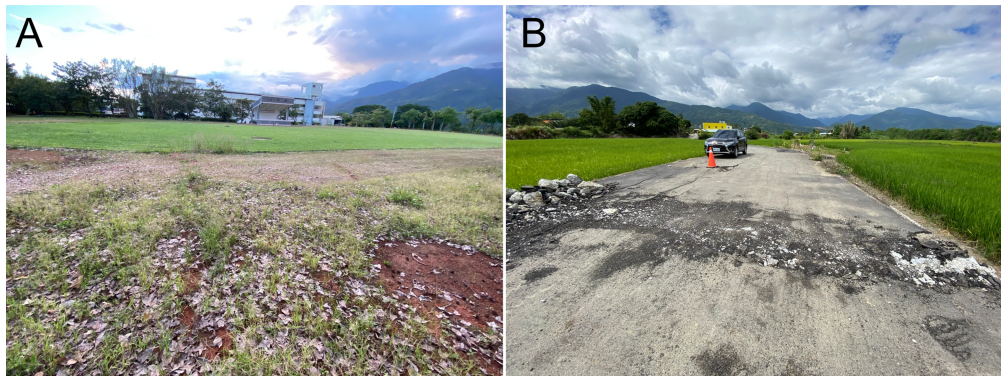


圖 13 東寧斷層地表破裂露頭。A：富北國中操場，分布雁行排列小型斷層，西北側為上盤。B：東寧附近水稻田有西側抬升的斷層跡。

地表位移大地測量

2022 年 0918 池上地震過後，地表位移與變形是以 Global Navigation Satellite

System(GNSS)共 44 站、Campaign model-GNSS 共 88 站、精密水準測量(Precise Levelling)和合成孔徑雷達差分干涉法(D-InSAR)，來進行同震變形大地測量(經濟部中央地質調查所，2022b)。

0917 關山地震的同震水平位移顯示，最大位移點緊鄰震央關山的中央山脈側，向南南西方向位移(方位角 182-207 度)，位移 10-17 公分(圖 14 左)，大量在 ERPN 站，向西北位移，指示縫合帶西側的板塊向南南西方移動；海岸山脈側的池上斷層上盤向西北方向位移，與震間的位移型態相似。0917 關山地震在關山附近有地表抬升約 10 公分(圖 14 右)。

0918 池上地震的同震水平位移，中央山脈側玉里斷層上盤集中於玉里至池上之間，向南南西方位移(方位角 193-218 度)，最大位移量約 100 公分(圖 15 左)，顯現玉里斷層的左移運動形式(比較圖 14)；遠離玉里斷層的中央山脈內，則向西南方位移(方位角 224-244 度)，指示遠離縫合帶時位移減少、方向改變的現象。更西北側的中央山脈內，則是向東南方位移(方位角 140 度)，與震間期間的位移背景值類似。該次地震在海岸山脈側也有明顯的位移現象(圖 15 左)，池上斷層上盤最大位移量約 100 公分，向東逐漸減至 30 公分，向西北方位移(方位角 322-344 度)，此種現象說明該次地震池上斷層仍有地表破裂(比較圖 6)，

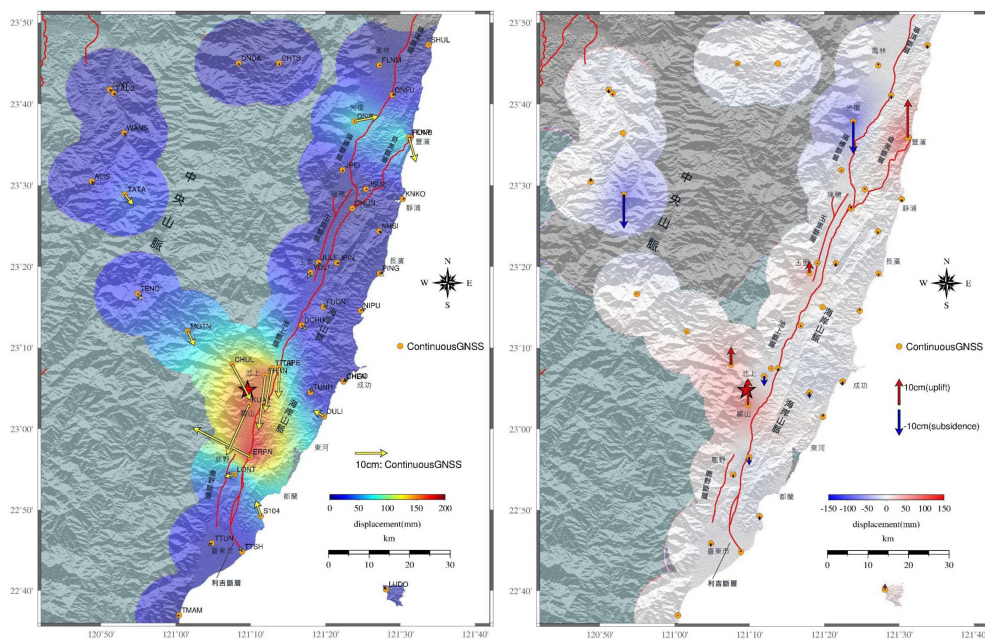


圖 14 0917 關山地震地表位移。左圖為水平位移，右圖為垂直位移。摘自經濟部中央地質調查所(2022b)。

以及大禹斷層上盤的凸起現象 (Ty4, 圖 10)。

0918 池上地震地表抬升現象位於中央山脈側玉里附近，向南抬升量逐漸減少，最大抬升量約 100 公分 (圖 15 右)；相對地，海岸山脈呈現下降趨勢。值得注意的是池上斷層上盤也有顯著抬升，指示前述池上斷層也有地表破裂現象 (圖 6、圖 7)。

同震變形的測量結果，除了反應地表變形之外，水平位移的方向與位移量，可以提供斷層滑移方向的指示。若是應力與應變共軸 (純剪模式；pure shear)，在同震時期的最大位移方向，可以假設是壓縮量 (應變) 最大的方向。對於野外沒有張力裂隙可以判斷最大主應力軸的情形下，是可以考慮的估計值。但是，隨著時間變長或是在單剪模式下，最大壓縮方向與最大主應力軸則有夾角 (圖 3)，則不適用。例如，水稻田、草地等會有塑性變形的效應，因此在震後持續變形，玉里圓環是一個例子，地震過後雖然馬上填補裂隙或重新鋪水泥，兩週以後仍持續變形產生新裂隙，因此中央地質調查所才必須在地震後進行大地測量。脆

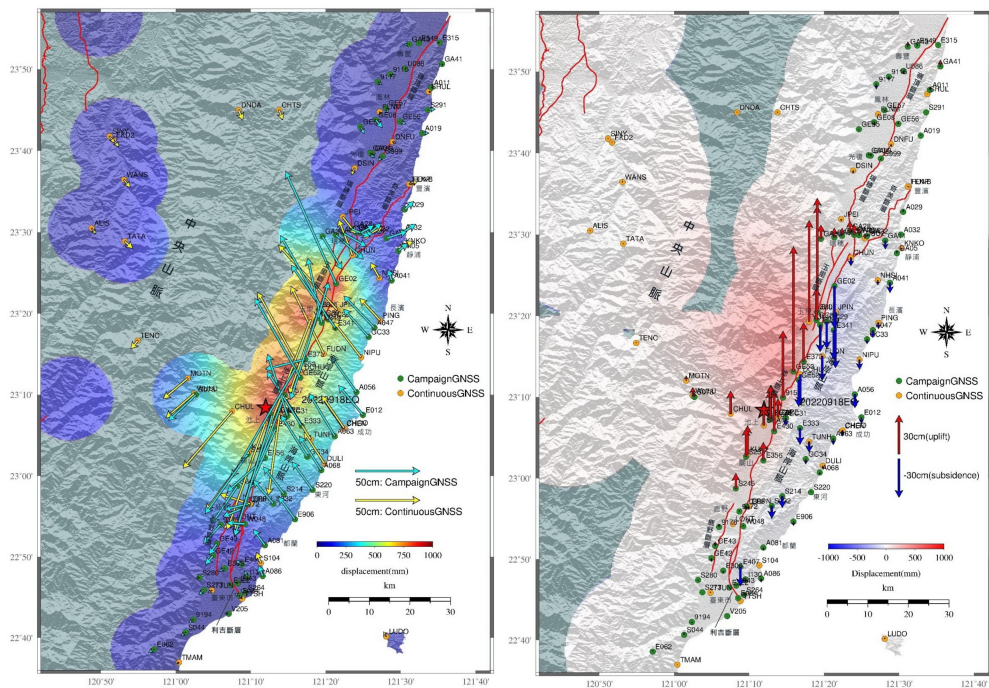


圖 15 0918 池上地震的地表位移情形。左圖為水平位移，右圖為垂直位移。黃色箭頭指示位移資料由連續 GNSS 連續站取得，藍色箭頭指示位移資料由 GNSS 移動站取得，後者為了補充前者的密度進行量測。摘自經濟部中央地質調查所 (2022b)。

性剪切帶 (brittle shear zone) 內的雁行排列張力裂隙的持續增加裂縫寬度，指示震後持續的單剪變形，局部應力的主應力軸方向也在改變。

討論

(一)、橫移斷層的形成機制

類似臺灣所處的板塊邊界，針對橫移斷層系統的破裂方式有許多的討論 (Sylvester, 1988)，例如加州 San Andreas Fault 以及紐西蘭 Alpine Fault System (Chinney, 1966)。Anderson (1951) 最早提出次生斷層 (secondary fault) 的概念，主斷層 (master fault) 形成後，常會伴隨次生斷層的形成，這些次生斷層和主斷層有連結，通稱為分支斷層 (branch fault)，但沒有運動學含意。運動形式不同，斷層的連結方式也有許多種：例如一條斷層分叉成為兩條斷層，一條分支斷層從主斷層分出，如斷層轉彎 (fault bend)；或是一條分支斷層形成後，再連接另一條斷層 (Du and Aydin, 1995)。次生斷層，可以是分散斷層 (splay fault)，或是二級斷層 (second-order fault)，運動學上有不同的意義 (圖 16；Price and Cosgrove, 1990)；分散斷層由主斷層分出，二級斷層則併入主斷層。

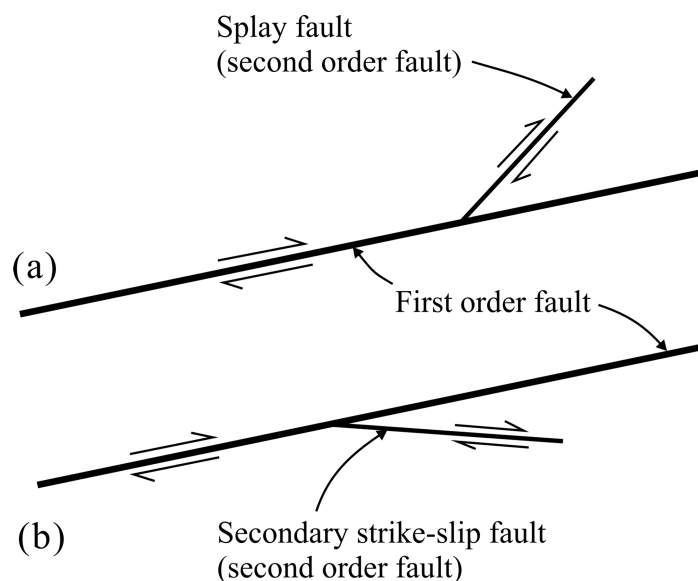


圖 16 一級斷層，及其與分散斷層 (a)、次生橫移斷層 (b) 的關係，注意二級橫移斷層運動方向與一級斷層運動方向的區別。摘自 Price and Cosgrove (1990)。

主斷層與分支斷層的連結，可能因為地栓（barrier）或凹凸點（asperity）的存在而轉彎，這些分叉點通常位在斷層強度改變與斷層幾何改變之處（King and Nabelek, 1985），例如雷式剪裂或是 P 剪裂（圖 3）。另一種斷層連接的方式，是形成作用帶（process zone），用來吸收橫移斷層端點的應力，例如紐西蘭 Alpine Fault System 的 horsetail（Chinney, 1966）。分支斷層的形成，可以是與主斷層受到相同的構造應力，稱為輔助斷層，也可能是應力重組的結果。分散斷層與主斷層的夾度，經過統計各種不同的夾角都有可能（de Jossineau *et al.*, 2007），但集中值約 17 度（Ando *et al.*, 2009）。野外調查時，常常看到一條斷層在接近主斷層時消失（Du and Aydin, 1995），原因可能是當次生斷層靠近主斷層時，擴展的能量變小而無法連接，除非是有更多的能量持續，能夠讓次生斷層繼續向前滑動，進而連結主斷層。因此，次生斷層是否會連結主斷層，取決於最大主應力方向、岩石內摩擦係數，以及斷層幾何形貌。

野外調查春日斷層、大禹斷層與東寧斷層，均為左移向東逆衝的背衝斷層，運動形式也與主斷層相同，但是都沒有與主斷層連結。Scholtz *et al.*（2010）提出一種橫移斷層的新形式-第一級分散斷層（first order splay fault），並定義它是一種次生斷層，它與主斷層夾某一銳角，且剪動方向相同。雖然許多次生斷層都發生在主斷層端點的某些地栓或凹凸處，那些位置是應力集中處，會形成次生斷層如雷氏剪裂、共軛斷層（conjugate fault）或反向正斷層（antithetic fault）等類型，但這些都不屬於第一級分散斷層。

分析分支斷層在遠場應力下的形成方式以及如何轉彎的模式，Du and Aydin（1995）認為主應力軸可能改變方向，他們只考慮由端點形成分支斷層，因此屬於次生斷層；以地震傳導來研究斷層的案例中（Poliakov *et al.*, 2002），也是分析主斷層分出的次生斷層；之後學者研究地栓及幾何規則處對地震傳導的影響，有許多成果，但很少討論與主斷層有一段距離的第一級分散斷層。Scholtz *et al.*（2010）認為主斷層與次生斷層的形成有先後順序；當主斷層的方位與應力場不吻合時，會在適合的方位產生新斷層，稱為分散，它可以是斷層的旋轉，也可能是主應力軸改變方位。

本研究中的三條新斷層與玉里斷層夾有不同的角度，但沒有與主斷層連結，符合的第一級分散斷層的定義，形成方式是受到與主斷層相同的遠場應力，所以滑動特性相似，但是新斷層的方位有所變化，可能是局部應力的變化，或是受到斷層幾何的影響。

(二)、斷層區段 (fault segment) 與地震斷層 (earthquake faults)

玉里斷層以往未完全出露到地表，由地形與地質特徵推測長度有 23 公里，位於花東縱谷與中央山脈的交界處。2022 年池上地震時，南段 11 公里發生地表破裂，且在南端增加 3 公里的地表破裂。位於北段的 12 公里，在 0918 池上地震時並未發現地表破裂。因此，0918 池上地震時並不是斷層全段都有活動，而是僅有部分區段產生破裂，而北段不屬於地震區段 (earthquake segment)。

玉里斷層北段，位於秀姑巒溪主河道或被台地礫石層所覆蓋，只有位於北端的台地礫石層有斷層錯移的特徵。由於在 1951 年和 2022 年的地震中未曾發生破裂現象，因此這個斷層區段的活動週期可能更長，或是斷層已經向更軟的泥岩擴展，例如向東北側的秀姑巒溪泥岩河床。

0917 關山地震與 0918 池上地震的震央，分別距離地表破裂南端為 22 公里與 15 公里，且由地震序列顯示地震是向北傳遞，破裂與變形逐漸向北傳遞 (Sun *et al.*, 2024)，位移量也向北逐漸減少，愈向北方地表變形愈不明顯。這些現象指示震央的地下深處，可能有活動斷層被沉積物掩蓋，破裂因此沒有延伸至地表。未來的斷層活動有可能使這些縱谷平原下方縫合帶的界限斷層，逐漸露出地表，進一步擴展向北連接玉里斷層，或向南連接鹿野斷層 (圖 1)。

除了玉里斷層向南擴展產生新的地表破裂以外，前述說明了其他原來沒有活動斷層的區域，形成新的地震斷層，包括春日斷層、大禹斷層與東寧斷層。這些斷層的分布相距數公里至十數公里，東西相距 2 公里，甚至位於池上斷層的上盤。以縫合帶作為板塊聚合的毀壞帶 (damage zone) 的觀點，0917 關山地震與 0918 池上地震的毀壞帶相當寬廣，也指示毀壞帶逐漸向淺部發展。未來對於地震潛勢的評估，可能要考慮這些新地震斷層的再次活動與側向擴展，就如同加州聖安得里斯斷層一般，個別的斷層分支 (fault branch) 或分散斷層，在板塊的擠壓過程中不僅要評估主斷層如玉里斷層的擴展，也需要針對每一新斷層獨立分析其特性，在地震災害評估時則要綜合考量。

(三)、大禹斷層東側的新斷層

大禹斷層東側有形成長約 120 公尺的逆斷層 (圖 10、圖 11 右)，且斷層上盤 (東南側) 形成凸起。此逆斷層與大禹斷層相距 40 公尺，兩者間的區域相對下陷。如果形成西側大禹斷層的壓縮方向為南南東-北北西方向，而東側斷層因

為左移分量（60 公分）大於逆移分量（40 公分），因此只能判斷其壓縮方向約呈西北-東南方向，因此這個農路上的變形現象可能代表兩次壓縮作用，也就是地震事件的破裂過程中，最大主應力軸改變了方向。

以往斷裂力學（fracture mechanics）分析的例子，這種形成新斷層的最大主應力軸與造成主斷層滑動的最大主應力軸不同者，都屬於分散斷層，就是包括大禹斷層與其東側的逆斷層。這一條逆斷層與春日斷層的走向相近，看似可以連結，但兩者屬於不同的性質，因為春日斷層是西北側抬升（背衝）的左移斷層。上述的例子可以看出，地震造成地表破裂的過程中，除了主斷層受到遠場應力而有破裂之外，局部應力的變化會產生不同特性的新斷層或凸起，後者的最大主應力軸與遠場應力有一些角度的偏差，影響因素可能是地形凹凸處（topographic asperity）或構造凹突處（structural asperity）等（King and Nabelek, 1985）。

（四）、縫合帶下的構造與新期構造意義

東寧斷層位在池上斷層上盤，同樣是左移背衝形式，指示兩種意義：首先，分散斷層有可能在遠離主斷層的位置；其次，分散斷層可以在縫合帶東界池上斷層上盤形成。以往認為池上斷層是縫合帶的東界，東寧斷層的出露顯示以往認為是壓力脊的學校園，為兩條以上斷層壓縮的結果到證實。0918 池上地震的 3D 破裂模式示意圖中（圖 17），遠場應力或區域應力（ σ_1 ），全區大致維持一定方向，但當地應力（ σ_1' 與 σ_1'' ），因不同地點而主應力軸方向有變化，產生不同走向的新斷層，新斷層沒有連接主斷層，包括玉里斷層與池上斷層。這也指示縫合帶內不僅有向東逆衝的玉里斷層，與向西逆衝的池上斷層，地下有許多不同傾向的斷層。

春日斷層運動形式與玉里斷層相同，但是兩者有相當的距離，遠端的斷層會新形成，然後向主斷層的方向接近（擴展），以紐西蘭 Marborogh fault 的例子是愈接近主斷層，滑移量逐漸減少（Little and John, 1998），其端點有可能是複雜的分支斷層或褶皺構造，顯示兩斷層靠近處附近的複雜應力狀態。換言之，這些遠場應力造成的分散斷層，可以廣泛分布於縫合帶範圍內。依據中央地質查調查所的彙整資料，位於花東縱谷中部的春日地區有 4 條活動斷層的聚合（林啓文等，2021），加上本次地震增加的春日斷層，可以說明花東縱谷中部斷層分布廣而範圍特別寬的原因。

春日斷層在地震中出現地表破裂，意謂著除了主斷層會誘發地震之外，次級

斷層或次生斷層也會產生災害，以加州 San Andres Fault 的例子，所有橫移斷層可能都是分支斷層，在地表下也可能是連結的狀態 (King and Nabelek, 1985)。新斷層在不同的地方出現，其斷層幾何形貌可能來自持續的構造作用，而在地形上顯現轉彎的特徵，而地表斷層是深處斷層作用在地表的直接反應，這些斷層都可能是下一次大地震發生的地點。

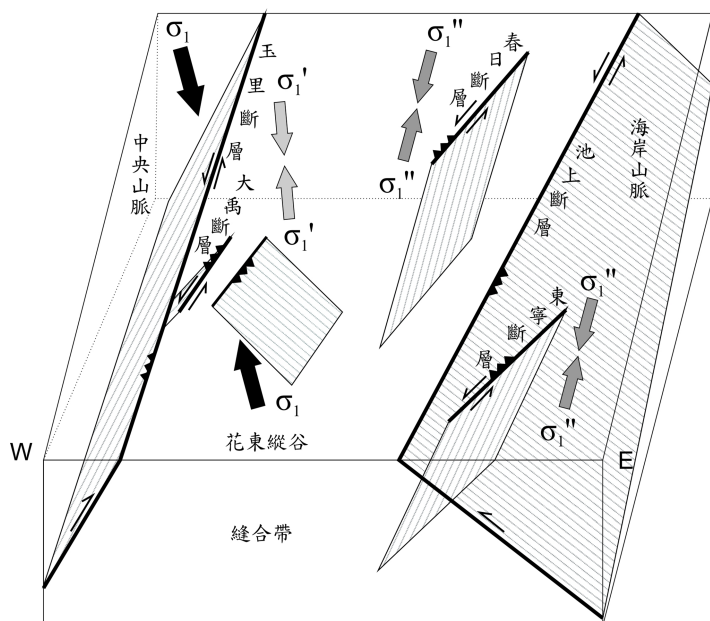


圖 17 0918 池上地震的 3D 破裂模式。 σ_1 為遠場應力，全區維持一定方向， σ_1' 與 σ_1'' 為當地應力，因不同地點而主應力軸方向有變化，產生不同走向的新斷層。

結論

2022 年 9 月 17 日臺灣東部關山地震規模 M_w 6.5，池上斷層局部地區包括臺東縣鹿野鄉瑞良地區與花蓮春日里松浦地區有局部破裂，這個壓縮造成的現象也發生在秀姑巒溪西岸的大禹地區，因此形成稻田的凸起。

2022 年 9 月 18 日池上地震規模 M_w 6.9，玉里斷層繼 1951 年後再次活動，但是大禹以北的斷層區段並沒有產生新的地表破裂，而是斷層向南擴展約 3 公里長至樂樂溪以南的長良地區。此外，該次地震也產生新的斷層，包括春日斷層長度約 3 公里，大禹斷層長度約 1 公里，以及東寧斷層長度約 3.5 公里；這些新斷層均為北北東至東北走向的背衝斷層，斷層上盤在西北側，且兼具左移分量。

春日斷層、大禹斷層與東寧斷層等新形成的斷層，雖然運動方向與玉里層斷層類似，但與後者並沒有連接。依據斷裂力學的分析，本研究認為這些斷層是第一級分散斷層，而非與主斷層連接的次生斷層或分支斷層。這些新斷層的走向相對於主斷層呈偏東 15-30 度，顯示這些新斷層的形成是主斷層向東偏折，也指示板塊擠壓的遠場應力與不同地區造成的當地應力並不一定相同。

誌謝

林揚閔與李忠勳先生協助野外地質調查，國立中正大學李元希教授以及國立東華大學顏君毅教授審稿並提出許多建議，作者敬致謝忱。

參考文獻

- 中央氣象局 (2022a) <https://scweb.cwb.gov.tw/Zh-tw/earthquake/cmt/2022091721411964086>
- 中央氣象局 (2022b) <https://scweb.cwb.gov.tw/Zh-tw/earthquake/cmt/2022091721411964086>
- 中央氣象局 (2022c) 臺灣地區地球物理資料管理系統。 <https://doi.org/10.7914/SN/T5>.
- 林啓文 (2022) 0917 關山地震與 0918 池上地震的地質調查概述。地質, 第 41 卷 3-4 期, 第 6-8 頁。
- 林啓文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009) 臺灣東部與南部的活動斷層，二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊, 第 23 號, 共 178 頁。
- 林啓文、劉彥求、周稟珊、林燕慧 (2021) 臺灣活動斷層調查的近期發展。經濟部中央地質調查所彙刊, 第 34 號, 第 1-40 頁。
- 林啓文、周稟珊 (2022) 玉里斷層再次活動追蹤與啟示。地質, 第 41 卷 3-4 期, 第 26-31 頁。
- 陳文山 (2016) 臺灣地質概論。中華民國地質學會出版, 共 204 頁。
- 經濟部中央地質調查所 (2018) 2018 年 0206 花蓮地震地質調查報告。第一部分：地質調查。
- 經濟部中央地質調查所 (2022a) 2022 年 0917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告。第一部分：地質調查, 共 78 頁。
- 經濟部中央地質調查所 (2022b) 2022 年 0917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告。第二部分：大地測量地表變形結果, 共 48 頁。
- Anderson, E.M. (1951) *The Dynamics of Fault*. 2nd Edition, Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Ando, R., Shaw, B.E. and Scholz, C.H. (2009) Quantifying natural fault geometry: statistics of splay fault angles. *Bull. Seism. Soc. Amer.* 99, 389-395.
- Biq, C. (1971) Comparison of mélangé tectonics in Taiwan and in some other mountain belts. *Petrol. Geol. Taiwan* 9, p.79-106.

- Chai, B.H.T. (1972) Structural and tectonic evolution of Taiwan. *Am. J. Sci.* 272, 389-422.
- Chi, W.R., Namson, J. and Suppe, J. (1981) Stratigraphic record of plate interactions in the Coastal Range of eastern Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China* 4, 155-194.
- Chinnery, M.A. (1966) Secondary fault. *Can. J. Earth Sci.* 3(2), 163-190.
- de Jossineau, G., Mutlu, O., Aydin, A., Pollard, D.D. (2007) Characterization of strike-slip fault - splay relationships in sandstone. *J. Struct. Geol.* 29, 1831-1842
- Du, Y. and Aydin, A. (1995) Shear fracture patterns and connectivity at geometric complexities along strike-slip faults. *J. Geophys. Res.* 100, B9, 18093-18102.
- Fossen, H. (2016) *Structural Geology*. 2nd Edition. Cambridge University Press, 510pp.
- Hsu, M.T. (1971) Seismicity of Taiwan and some related problems. *Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* 8, p.41-160.
- Hsu, T.L. (1956) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. *Bull. Geol. Surv. Taiwan* 8, 39-64.
- Hsu, T.L. (1962) Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China* 1, 95-102.
- Hu, J.C., Cheng, L.W. Chen, H.Y., Wu, Y.M., Lee, J.C., Chen, Y.G., Lin, K.C., Rau, R.J., Kuo-chen, H., Chen, H.H., Yu, S.B. and Angelier J. (2007) Coseismic deformation revealed by inversion of strong motion and GPS data: the 2003 Chengkung earthquake in eastern Taiwan. *Geophys. J. Inter.* 169, 667-674.
- King, G. and Nabelek, J. (1985) Role of faults in the initiation and termination of earthquake rupture. *Science* 228, 984-987.
- Lee, S.J, Liu, T.Y. and Lin, T.C. (2023) The role of the west-dipping collision boundary fault in the Taiwan 2022 Chihshang earthquake sequence. *Scientific reports*. <http://doi.org/10.1038/s41598-023-30361-0>
- Little, T.A. and Jones, A (1998) Seven million years of strike-slip and related off-fault deformation, northeastern Marlborough fault system, South Island, New Zealand. *Tectonics* 17, 285-302.
- Ludwig, W.J. (1970) The Manila Trench and West Luzon Trough- III. Seismic refraction measurements. *Deep-sea Res.* 14, 553-571.
- Ludwig, W.J., Hayes, D.E., and Ewing, J.I. (1967) The Manila Trench and West Luzon Trough- I. Bathymetry and sediment distribution. *Deep-sea Res.* 17, 533-544.
- Poliakov, A.N.B., Dmowska, R. and Rice, J.R. (2002) Dynamic shear rupture interactions with fault bends at off-axis secondary faulting. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 107, ESE6.1-ESE6.18.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W. (1990) *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, 502pp.
- Scholtz, C.H., Ando, R and Shaw, B.E. (2010) The mechanics of first order splay faulting: The strike-slip case. *J. Struct. Geol.*, 32, 118-126.
- Sun, W.F., Pan, S.Y., Huang, C.M., Gau, Z.K., Yen, I.C., Ho, C.W., Chi, T.C., Ku, C.S., Huang, B.S., Fu, C.C. and Kuo-chen, H. (2024) Deep learning-based earthquake catalog reveals the seismogenic structures of the 2022 M_w 6.9 Chihshang earthquake sequence. *Terr. Atmos.*

- Ocean Sci., <https://doi.org/10.1007/s44195-024-00063-9>.
- Sylvester, A.G. (1988) Strike-slip fault. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1666-1703.
- Wang, Y., Wu, S.H., Chou, H.L.B., Li, Y.Y., Cheng, W.S., Ho, A., Chen, J.M., Liu, S.Z., Hsieh, C.Y., Duan, S., Min, S.M., Myo, M.N., Tsai, Y.L., Liang, N.W., Liao, J.H., Lam, T.Y.A., Chang, E.W. and Shyu, J.B.H. (2024) Surface ruptures of the 2022 Guanshan-Chihshang earthquakes in central Longitudinal Valley area, eastern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s44195-024-00077-3>.
- Widiatmoko, F.R., Yen, J.Y., Yen, I.C., Huang, S.Y. and Shih, N.W. (2023) Assessing the Yuli surface deformation from the 20220918 Chishang earthquake: an integrated RTK GNSS network approach. *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s44195-023-00058-y>.
- Wu, Y.M., Chen, Y.G., Chang, C.H., Chung, L.H., Teng, T.L., Wu, F.T. and Wu, C.F. (2006) Seismogenic structure in a tectonic suture zone: with new constraints from 2006 M_w 6.1 Taitung earthquake. *Geophys. Res. Lett* 33, L22305.

A Study on the Fracture Mechanism of the Yuli Fault and the New Faults of September 18 Chihshang Earthquake, 2022, Eastern Taiwan

Chii-Wen Lin¹, Ping-Shan Chou¹ and Owens Wen-Jeng Huang²

Abstract

The Huadong Longitudinal Valley in Taiwan is located at the boundary between the Eurasian Plate and the Philippine Sea Plate. The Yuli Fault, located at the western boundary of the suture zone, reactivated during the 0918 Chihshang Earthquake ($M_w=6.9$) on September 18, 2022. This reactivation occurred 71 years after the last surface rupture caused by the 1951 earthquake. The Chihshang Fault, located at the eastern boundary of the suture line, also experienced surface rupture. In addition to the reactivation of the aforementioned two faults, the 0918 Chihshang Earthquake led to the emergence of three new faults, including the Chunjih Fault, Tayu Fault, and Tungning Fault. These new faults share the same movement pattern as the main fault - the Yuli Fault, which is characterized by left-lateral strike-slip with a thrust component towards the east. However, these new faults are not connected to the main fault but are separated by a certain distance. Based on the analysis of surface rupture, the authors speculate that these new faults belong to the first order splay faults.

Based on the distribution of the splay faults within the suture zone, the authors infer that these new faults and the main fault are under the same far-field stress. However, they are affected by local stress respectively, which alters the fault strike. Therefore, they exhibit the same movement pattern but different fault strikes. These new faults are not only distributed in the central part of the suture zone but also on the hanging wall of the Chihshang Fault at the eastern boundary of the suture zone, indicating that there may be several branch faults or splay faults with opposite dip directions beneath the Huadong Longitudinal Valley. In the future, fault activity in the Huadong Longitudinal Valley may occur on these new faults in addition to the main fault.

Key Words: Huadong Longitudinal Valley, 0918 Chihshang Earthquake, Yuli Fault, Chunjih Fault, Tayu Fault, Tungning Fault, Branch fault, Splay fault.

¹ Geological Survey and Mining Management Agency, MOEA.

² Institute of Applied Geology, National Central University.