

斷層活動性觀測研究第四階段(3/4)

經濟部中央地質調查所

一、 目標與效益

(一)目標:

配合「行政院災害防救科技創新服務方案」課題四「精進防災科技技術」，為落實「防災資訊創新應用」、「防災科技產業推廣」及「防災科技社會服務」，發揮「深耕研發、創新應用、實質整合」之防災科研應用成效，提升「災害預警技術」並擴大「環境監測技術與應用」，對活動斷層進行調查及觀測，提供明確資訊，以達預警及防災的目標，並加速進行位於人口密集區附近之活動斷層調查及斷層參數的分析，進而評估斷層活動潛勢，計畫成果可供中央及地方政府進一步加值作為災害潛勢的評估分析與災損分析，作為地震防、減災之基礎資訊。

活動斷層相關資料是國土利用規劃的基礎資料，也是地震危害度評估的重要依據。所以，活動斷層調查部分針對未知或資料仍不足的活動斷層應持續利用地表地質調查、空拍、地形判釋、地球物理地電阻法探勘、地球物理震測、地表變形觀測及地質鑽探等方法進行斷層位置精查；若有合適地點則透過槽溝開挖、階地掘坑及定年等方法，以獲得斷層長期變動速率。

活動斷層觀測部分，藉由長期連續的地表變形觀測，包括地表變形觀測與分析、斷層活動性觀測整合分析、斷層潛勢分析研究等方式，評估斷層的活動潛勢，製作斷層活動機率圖。

(二)效益

本計畫之成果可提供活動斷層相關具體資料，以評估公共建設的規劃與設計，減少盲目提高防範級數擴大工程建設經費，對產業發展後續發展後續投入防、減災工作之各項投資將有明顯助益，對地震防、減災及重大工程建設均有重大經濟效益，納入活動斷層相關資訊與參數後，使防、減災工作可以提升效能，由此亦可窺見本計畫在經濟效益上的重要性。

臺灣百餘年來已發十數起重大的災害性地震，其中最嚴重的 3 次，便造成約 7,000 人死亡，另外僅 921 集集地震就造成 2,400 人以上的死亡及 100 億美元以上有形財物的損失，而這些估算還不包括重建的經費。基本上，本計畫成果是進行國土規劃不可或缺的資料，其投入之經費遠低於災損及重建。計畫調查與觀測成果，對重大工程建設(如核電廠、水庫、高速鐵路、科學園區等)短、中、長期使用安全評估，都是非常關鍵的資料，可提供重大工程設計施工及國土利用規劃之參考，以避離高敏感或高風險的區域。

二、計畫重點

為能有效執行 108 年度地質科技研究發展計畫，將建立高科技水準的地質調查團隊，提供國土開發、保育及防災地質資訊與專業服務。本年度計畫重點分述如下：

本計畫重點為進行活動斷層調查與觀測，工作重點概述如下

- (一) 活動斷層特性精細調查:以野外地質調查，搭配淺層鑽探、地球物理探勘、空拍等調查方法，以瞭解初鄉斷層與車瓜林斷層在近地表區域的變形分布範圍與精確的斷層位置。
- (二) 補充地質調查及斷層位置精查:進行梅山斷層、初鄉斷層、車瓜林斷層與恆春斷層補充調查工作，以增補劃設地質敏感區所需之現地調查資訊，並且藉由統整地質鑽探、岩心記錄分析，建立鑽井位置之地下剖面、區域地質、地形特徵與梅山斷層的地質特性，繪製（修訂）梅山斷層之斷層跡（帶）位置圖，及撰寫梅山斷層地質敏感區劃設草案。
- (三) 斷層活動性觀測整合分析：持續觀測 GPS、水準測量及 PSInSAR 衛星干涉資料進行整合分析，觀測斷層活動相關的地殼變動情形。
- (四) 斷層潛勢分析評估研究：綜合運用地變動觀測資料，建構斷層地下孕震構造，進行斷層活動潛勢評估與境況模擬，製作臺灣地區斷層活動潛勢圖，提供國家地震防、減災規劃之應用。

(五)活動斷層資料彙整與加值應用：觀測資料標準化格式轉換、資料處理、顯示之公用程式，並將相關計畫研究成果公開上網，方便民眾查詢活動斷層相關資訊。在調查方面，本項持續進行活動斷層之調查，累積活動斷層基本資料，適時更新活動斷層分布圖及活動斷層參數表。

三、計畫成果

(一) 活動斷層特性精細調查

此工作的進行可分為斷層位置精細調查、斷層特性及斷層帶分析、與斷層長期滑移速率評估 3 個部分，其中斷層位置精細調查部分，本年度完成了斷層沿線空拍 89 平方公里：分別為初鄉斷層沿線空拍 38.5 平方公里，及車瓜林斷層沿線空拍 50.6 平方公里，地球物理探勘(地電阻)測線 812 公尺，地質剖面開挖(清理剖面)共 68 平方公尺。斷層特性及斷層帶分析部分，共計完成 200 公頃的高精度影像空拍。斷層長期滑移速率評估的部分，完成 4 處的階地沉積物探坑挖掘採樣，取得 9 組 C-14 定年結果，初鄉斷層沿線之工作施作範圍如圖 1 所示，車瓜林斷層沿線之工作施作範圍如圖 7 所示。藉由以上調查結果，並配合前人文獻資料及野外調查，繪製初鄉斷層與車瓜林斷層比例尺 1/5000 斷層跡(帶)測繪圖；以及利用高精度影像空拍影像，完成初鄉斷層至車籠埔斷層之濁水溪剖面比例尺 1/1000 地質構造分布測繪圖。

1.初鄉斷層位置

藉由前人研究資料及本計畫調查，濁水溪以北 3 公里範圍內，斷層位置可由受斷層擾動露頭的位置推定，濁水溪河床初鄉斷層明顯出露，濁水溪以南至初鄉底，斷層沿著明顯的地形線形崖處延伸，初鄉底以南至東埔蚋溪北岸，根據地電阻測勘結果(圖 2)判釋，東北-西南走向的凹谷似初鄉斷層帶的西界位置，東埔蚋溪河床初鄉斷層的位置可清楚界定，東埔蚋溪南岸河階地出現似受斷層傾動的地形崖，東埔蚋溪南岸階地以南至初鄉斷層南端與車籠埔斷層相接處，則依據野外露頭觀察結果推測斷層位置，並依作圖法連接。

2.初鄉斷層帶構造特性：

初鄉斷層帶於濁水溪河床沿線之露頭剖面最為完整(圖 3、圖 4、圖 5)，下盤僅約 3 公尺寬，上盤約有 150 公尺。斷層上下盤不僅斷層帶的寬度差異甚大，變形程度也相當不對稱。然而此斷層帶具相當錯動量的斷層面、劇烈變形的核心帶及受剪裂的破壞帶，應可算是發育成熟的斷層帶。

3.初鄉斷層滑移速率評估

本案根據東埔蚋溪階地表面之上下盤高差及 Simoes et al. (2007)推估之階地底岩高差，並以 Simoes et al. (2007)所提供之 56° 當作斷層角度，推測初鄉斷層滑移量約為 34-102 公尺(圖 6)。藉由 Chen et al. (2003)之定年資料，並配合本案評估之斷層滑移量，可推估初鄉斷層的長期滑移速率約為 2.5-7.5 mm/yr

4.車瓜林斷層位置

藉由前人研究資料及本計畫調查(圖 7)，車瓜林斷層於內門地區至半天寮，都被植被覆蓋，半天寮至崑山西側，車瓜林斷層的位置應位於林啟文(2013)劃設的位置更西側，崑山西側至千秋寮，車瓜林斷層之斷層帶可連續追蹤，延伸距離約 4.5 公里；千秋寮至崎溜地區，未發現明顯的車瓜林斷層帶，然而在調查區內仍偶見寬度較窄的剪裂帶(shear zone)，或高傾角的岩層，本案推斷車瓜林斷層應位於調查點更西側的位置，崎溜至燕巢市區外緣，車瓜林斷層則根據崎溜山西側邊界地形崖劃設。

5.車瓜林斷層帶構造特性

車瓜林斷層帶以崑山一帶東側至千秋寮的出露最為明顯，野外的露頭調查加上高 40 公路南側剖面清理之調查結果(圖 8、圖 9、

圖 10)，認為斷層帶的實際厚度約為 5-10 公尺寬，由間距以數公分至十數公分密集分布的剪切帶所構成，單條剪切帶(individual shear bands)寬度通常為數公厘，亦有公分級的，延續性頗佳。

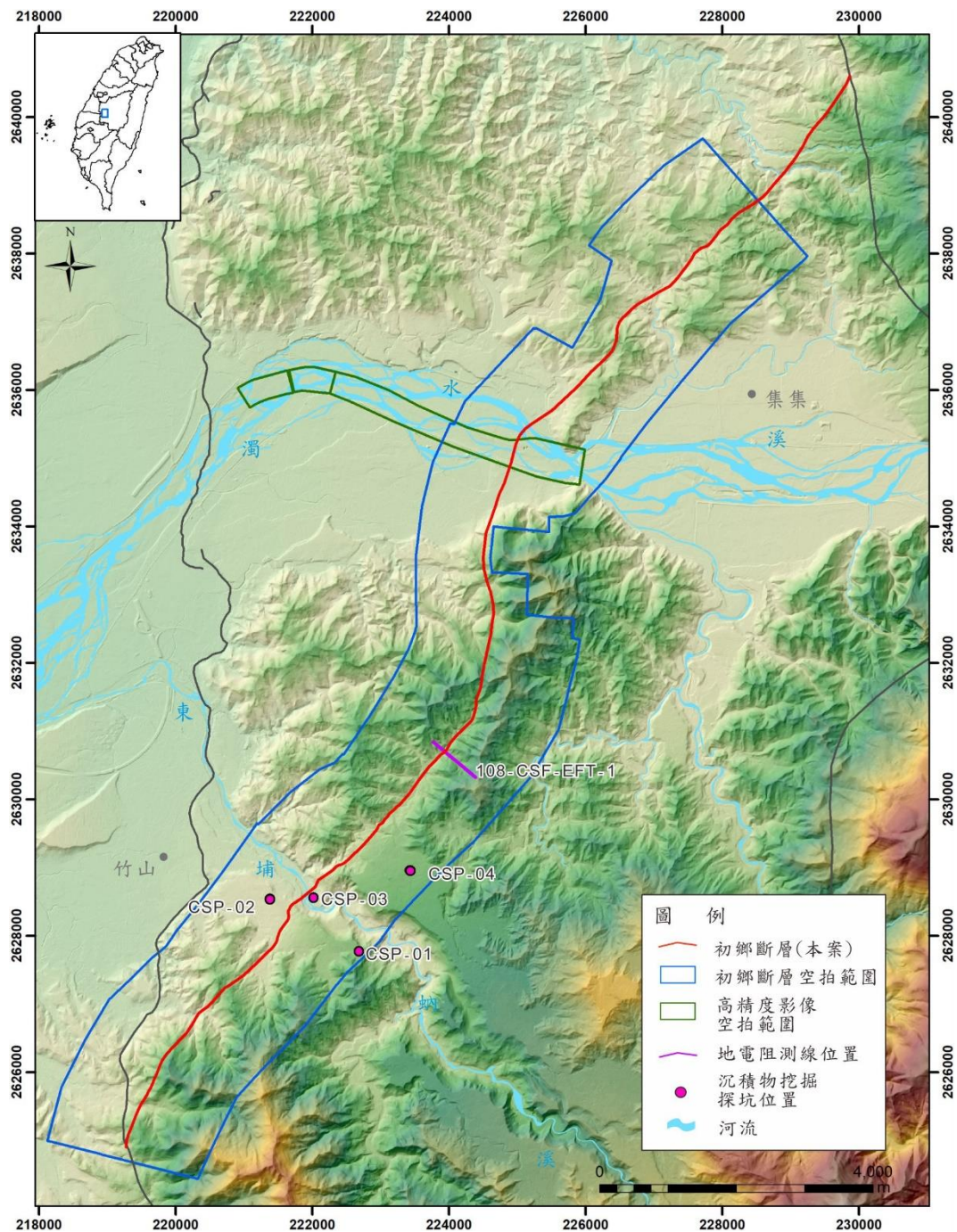


圖 1、初鄉斷層沿線工作內容。

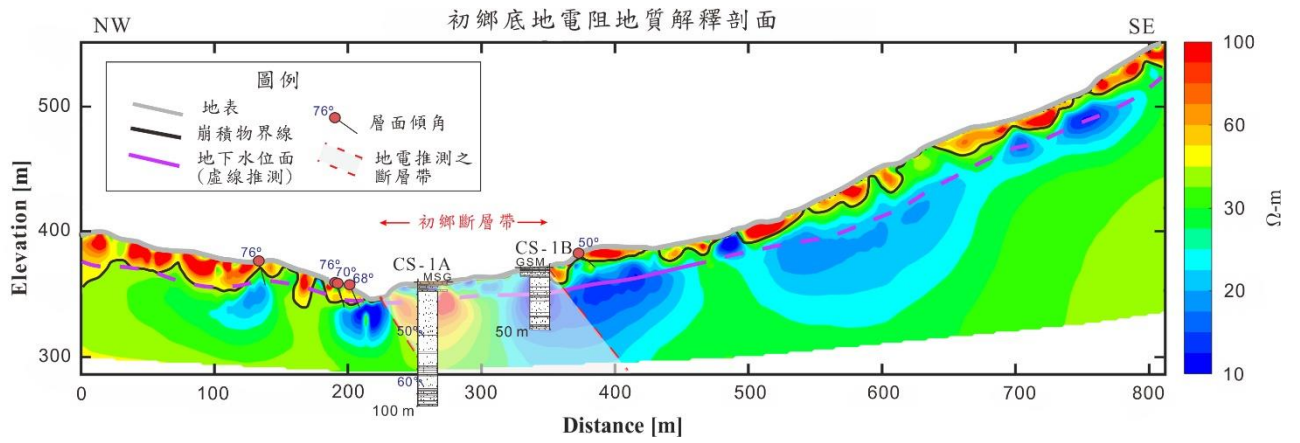


圖 2、初鄉斷層地電阻地質剖面解釋圖。

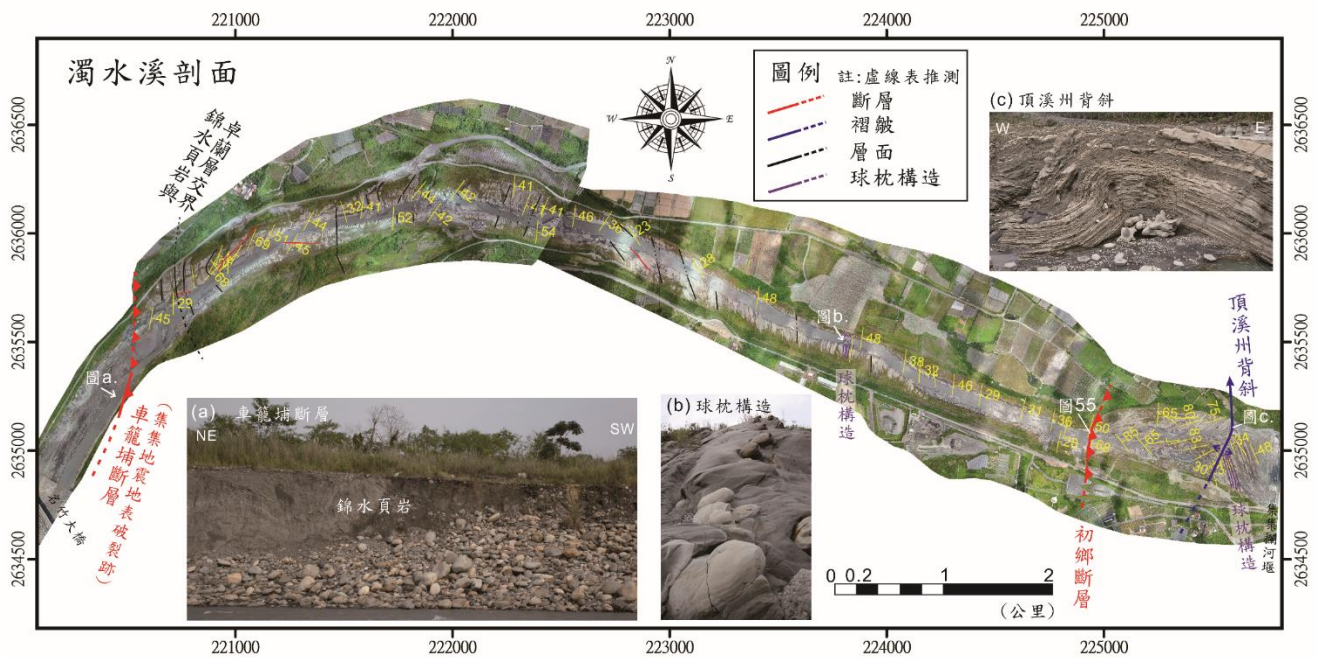


圖 3、初鄉斷層至車籠埔斷層於濁水溪的剖面。

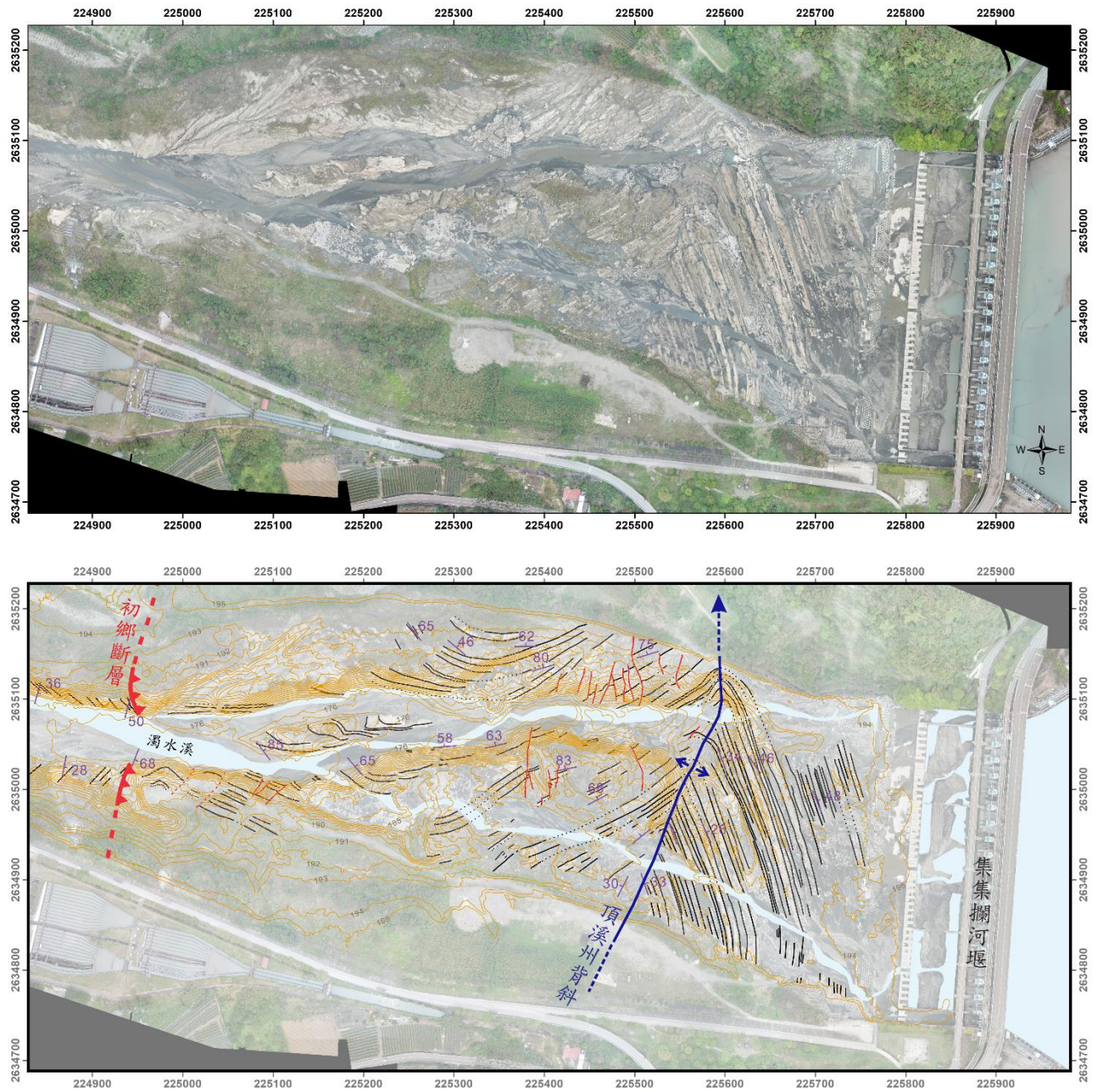


圖 4、濁水溪集集攔河堰下游處初鄉斷層兩側的高精度空拍影像(上圖)及構造判釋圖(下圖)。下圖中的黃色線條為一公尺間距的等高線。



圖 5、濁水溪集集攔河堰下游處的初鄉斷層露頭。斷層西側出露厚層至極厚層青灰色或深灰色之混濁砂岩、厚層泥岩及中至薄層的砂頁岩互層，層態為東北西南走向，向東傾約 25~30 度；斷層東側為厚層泥岩及中至薄層的砂頁岩互層，岩層位態變化急遽。

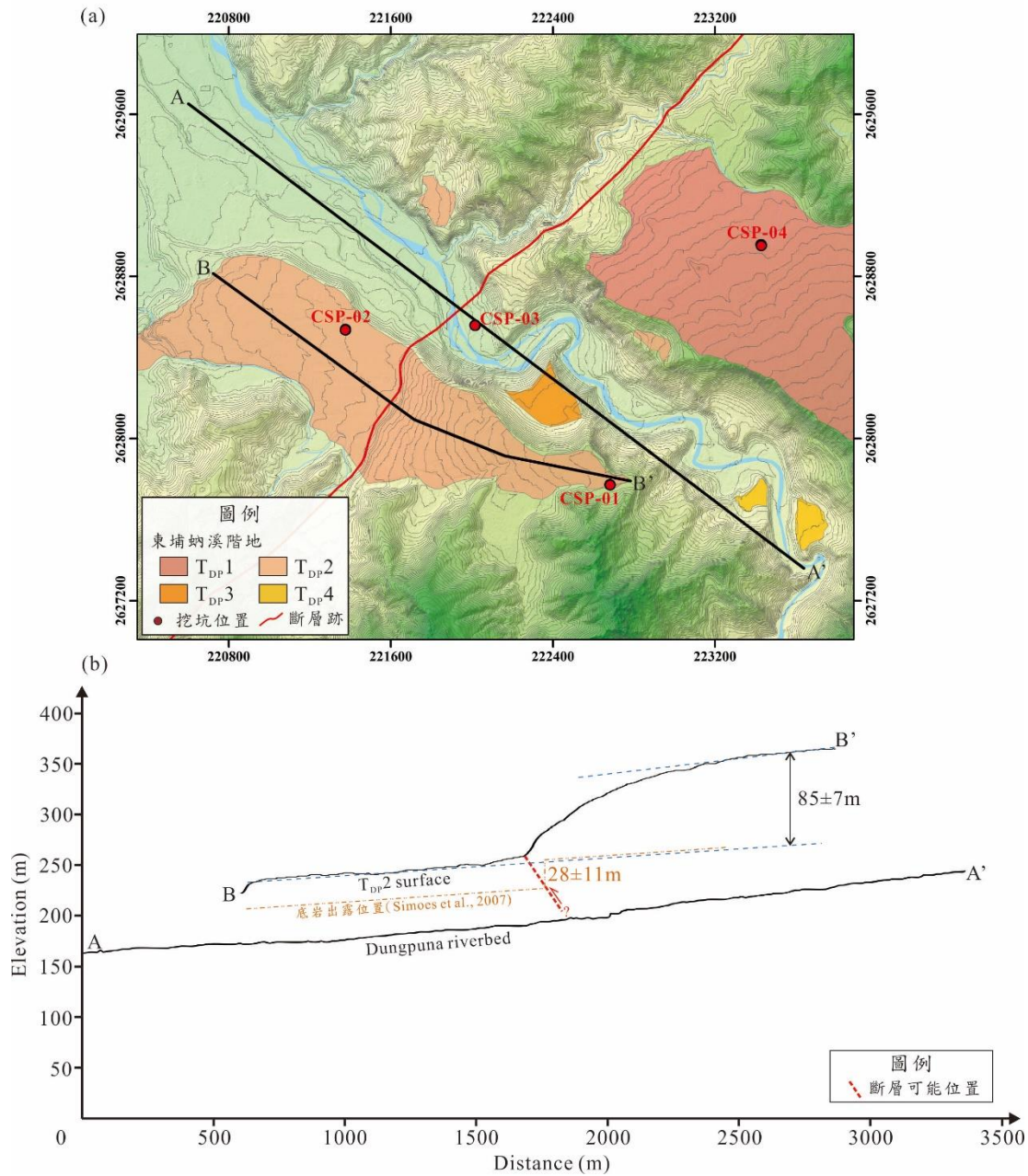


圖 6、東埔蚋溪現今河道及初鄉斷層通過之 T_{DP2} 的剖面。(a)A-A'為現今河道剖面投影方向，B-B'為 T_{DP2} 階地表面剖面方向(b)B-B'投影至 A-A' 的剖面上，並以斷層上下盤階面高差推算垂直抬升量為 85 米。

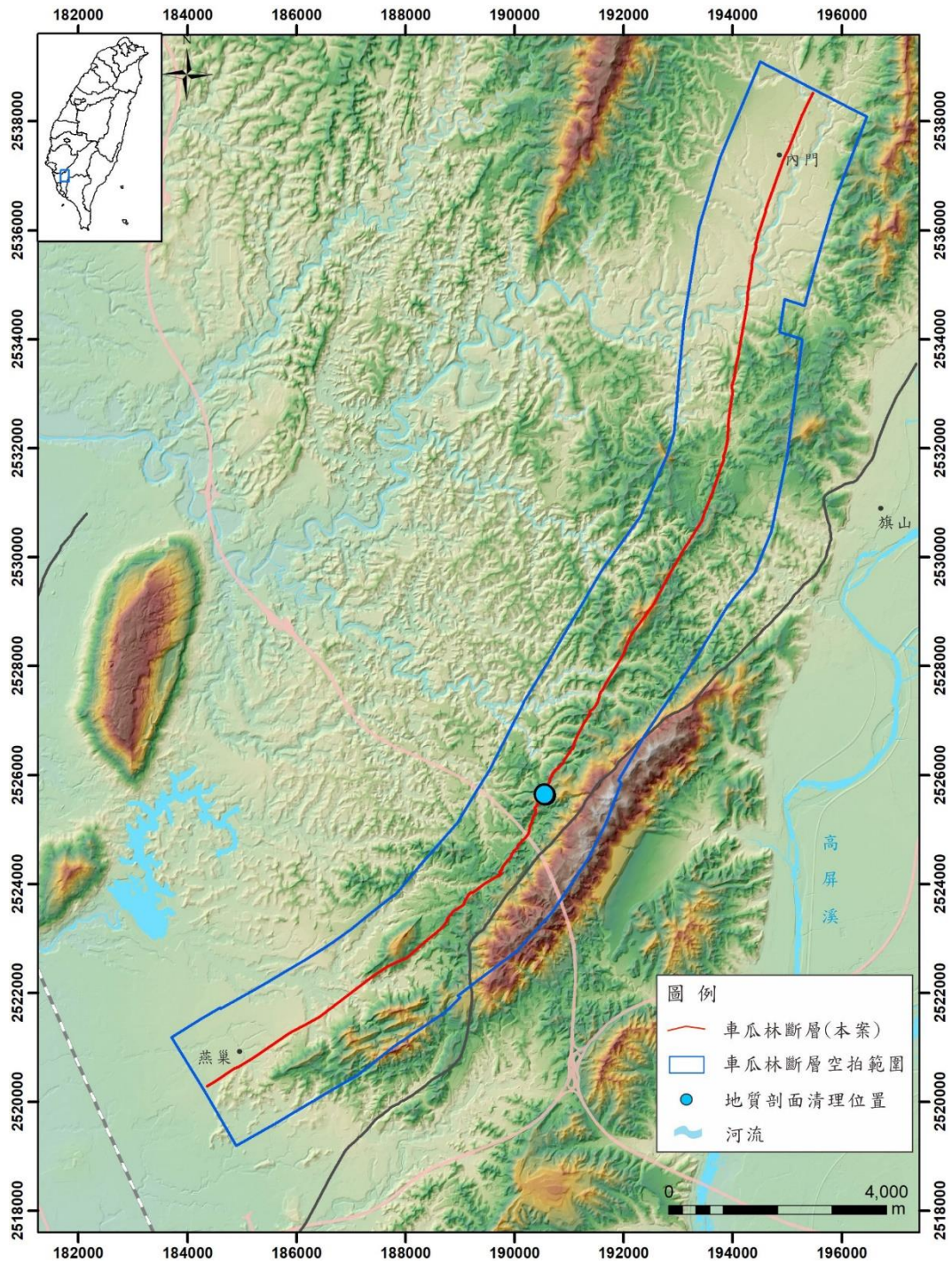


圖 7、車瓜林斷層沿線工作內容。



圖 8、國道 3 號往北側眺望空照。高 40 公路南側至國道 3 號北側露頭之間，可連續追蹤車瓜林斷層帶(紅色箭頭)。



圖 9、剖面清理成果空照圖。圖中淺藍框內即為清理範圍。

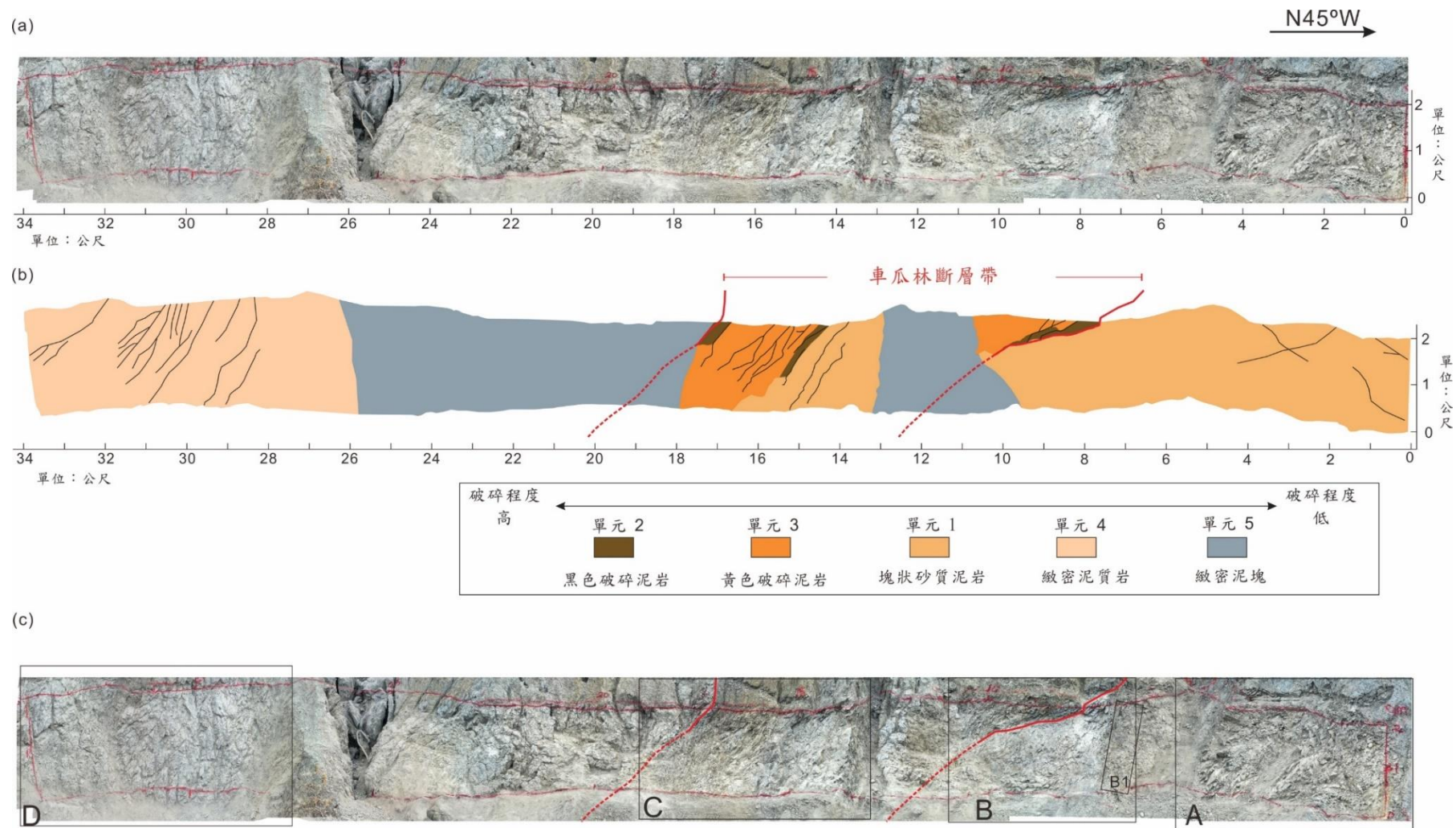


圖 10、車瓜林斷層剖面影像圖及立面測繪結果。(a)剖面接合照片；(b)剖面素描圖；(c)構造分區素描索引圖。

(二) 補充地質調查及斷層位置精查

本年進行梅山斷層、初鄉斷層、車瓜林斷層與恆春斷層補充調查工作，以增補劃設地質敏感區所需之現地調查資訊，並且藉由統整地質鑽探、岩心記錄分析，建立鑽井位置之地下剖面、區域地質、地形特徵與觸口斷層的地質特性，繪製（修訂）梅山斷層之斷層跡（帶）位置圖，及撰寫梅山斷層地質敏感區劃設草案。共計完成梅山斷層 5 處共 10 孔之鑽探工作、初鄉斷層 1 處共 2 孔、車瓜林斷層 1 處共 4 孔與恆春斷層 1 處 2 孔地質鑽探工作，地質鑽探進尺數合計 1300 公尺(表 1)，並完成 20 組破十四定年及繪製此 8 處 8 條之地質構造剖面。

1. 梅山斷層：

於梅山斷層沿線補充地質調查範圍內，共建立梅山 P1(圖 11)、梅山 P2、梅山 P3(圖 12)、梅山 P4(圖 14)與梅山 P5 等五個剖面，結合野外工作與前人研究成果，劃出共 9 個斷層跡控制點。

參考大森房吉(1907)所記錄的 1096 年梅山地震所造成的地表破裂斷層位置，及葛岳淵(2010)博士論文中梅山斷層沿線地電阻調查成果，並結合地形分析及鑽探成果，於三疊溪以北依地形及調查資料成果修正梅山斷層斷層跡位置，三疊溪以南則沿用大森房吉(1907)所記錄的 1096 年梅山地震所造成的地表破裂斷層位置，繪製梅山斷層斷層跡位置。

2. 初鄉斷層：

於初鄉斷層沿線補充地質調查範圍內，建立初鄉 P1 剖面(圖 14)，由鑽探成果顯示，初鄉斷層應位於本案初鄉 P1 剖面更西側之位置。

3. 車瓜林斷層：

於車瓜林斷層沿線補充地質調查範圍內，建立車瓜林 P1 剖面(圖 15)，由鑽探成果推測車瓜林斷層可能位於車瓜林-1B 井與車瓜林-2B 井之間的地形崖。另由剖面的晚期更新世沖積層具有剪切紋理，而全新世沖積層則未見剪切帶，故推測車瓜林斷層於 11,400~26,500 年間應有斷層活動。

4. 恆春斷層：

恆春斷層沿線補充地質調查範圍內，建立恆春 P5 剖面(圖 16)，由於恆春-5A 井與恆春-5B 井岩心皆未見剪切紋理。故推測恆春斷層及其分支斷層未切過此剖面；而結合先前恆春 P2 剖面之成果，推測恆春斷層的分支斷層可能位於恆春-2A 井與恆春-2B 井之間而未向西延伸至恆春-5A 井與恆春-5B 井。

表 1、108 年度活動斷層補充地質調查案鑽井位置表

井名	X 座標 (TW67)	Y 座標 (TW67)	井位高程 (公尺)	預計井深 (公尺)	實際井深 (公尺)
梅山-1A	202459	2609564	114	100	100.00
梅山-1B	202422	2609588	113	50	51.00
梅山-1C	202442	2609581	113	50	51.00
梅山-2A	201516	2609302	124	100	100.00
梅山-3A	197816	2608143	51	50	51.00
梅山-3B	197775	2608168	51	50	50.00
梅山-4A	203016	2609739	128	50	50.00
梅山-4B	203029	2609737	128	50	50.00
梅山-4C	203105	2609691	130	50	50.00
梅山-5A	193333	2606048	31	150	150.55
車瓜林-1A	185101	2521463	63	100	100.00
車瓜林-1B	184990	2521522	62	50	50.25[陳柏村1]

車瓜林-2A	184999	2521509	62	100	100.00
車瓜林-2B	185012	2521478	62	50	50.00
恆春-5A	223052	2433381	19	100	100.00
恆春-5B	222890	2433512	19	50	50.00
初鄉-1A	223033	2630868	334	100	100.00
初鄉-1B	223223	2630822	365	50	50.70

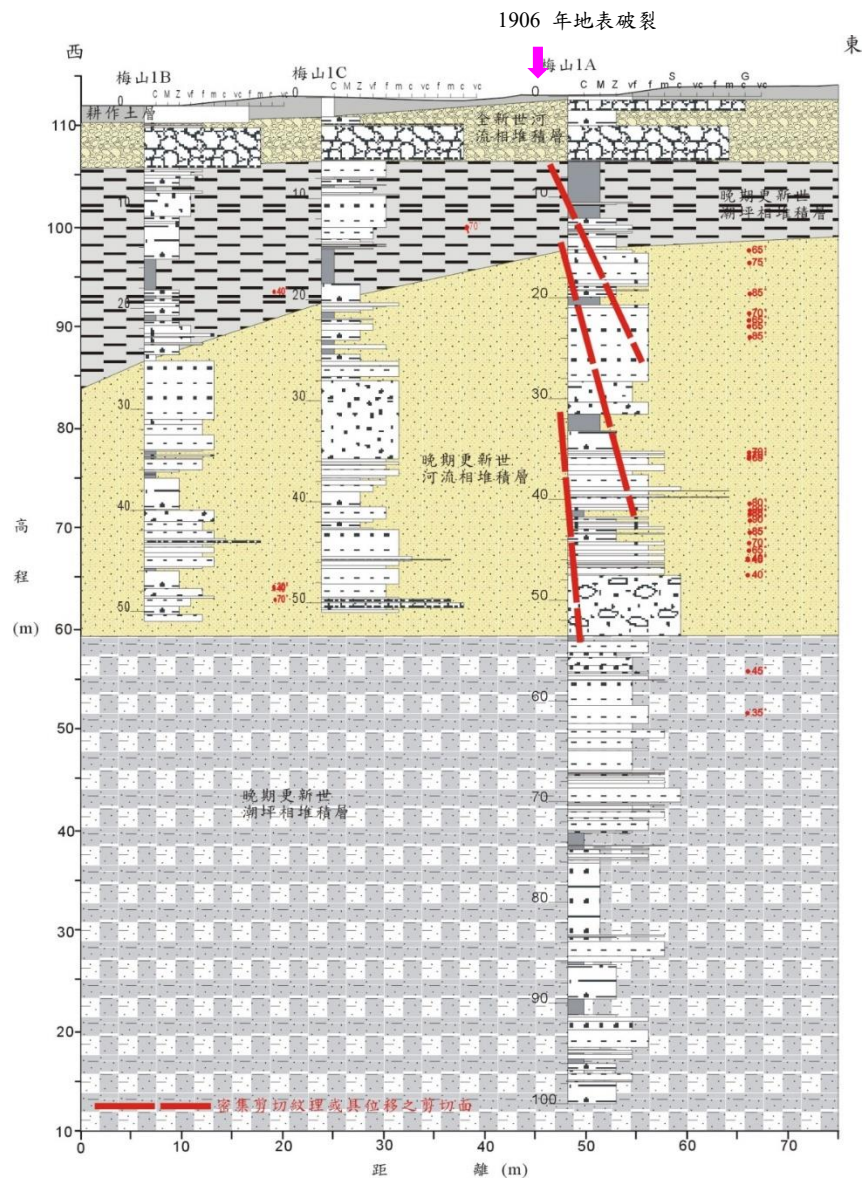


圖 11、補充地質調查鑽探梅山P1剖面。

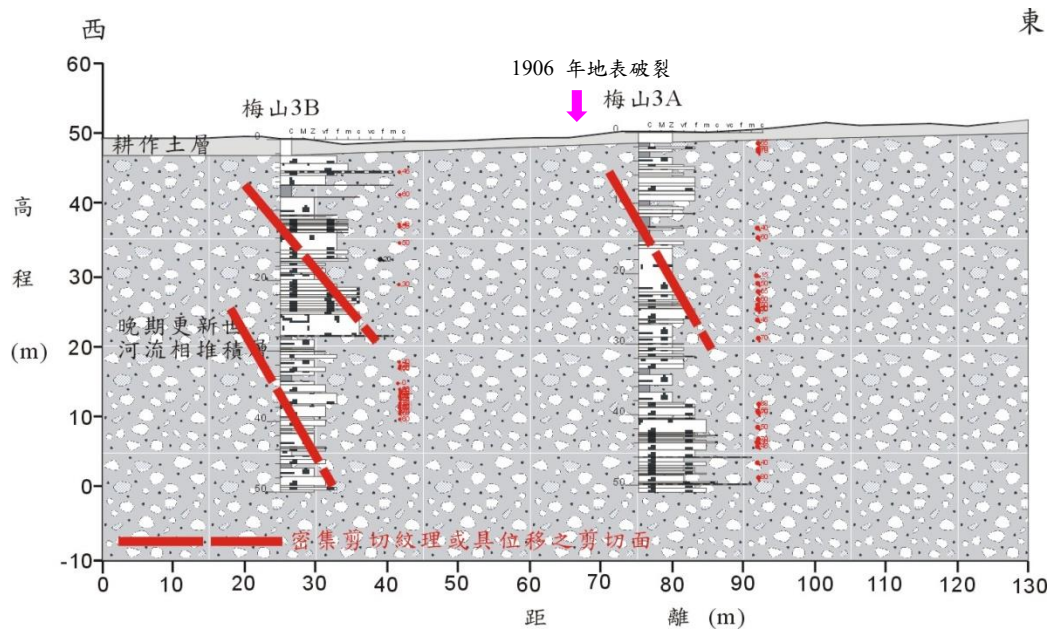


圖 12、補充地質調查鑽探梅山P3剖面。

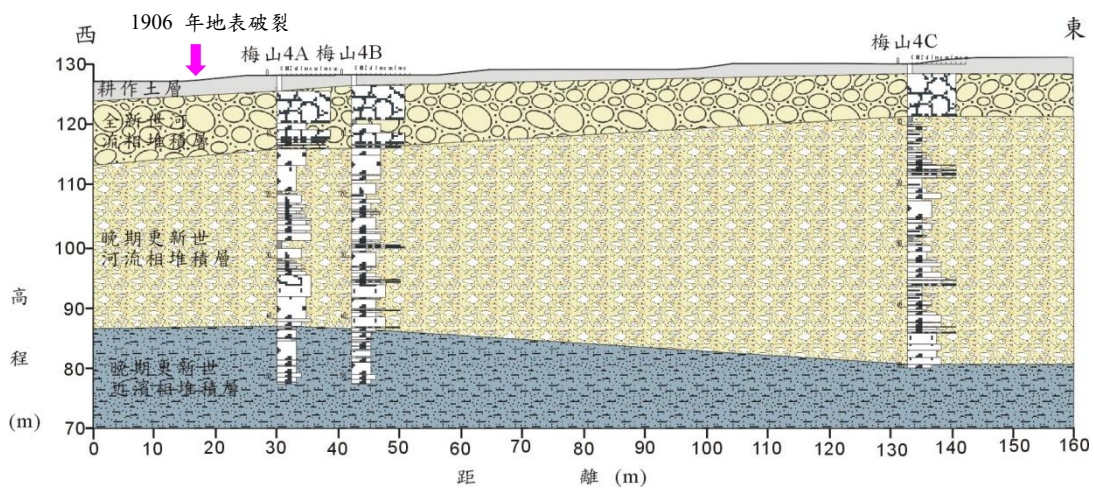


圖 13、補充地質調查鑽探梅山P4剖面。

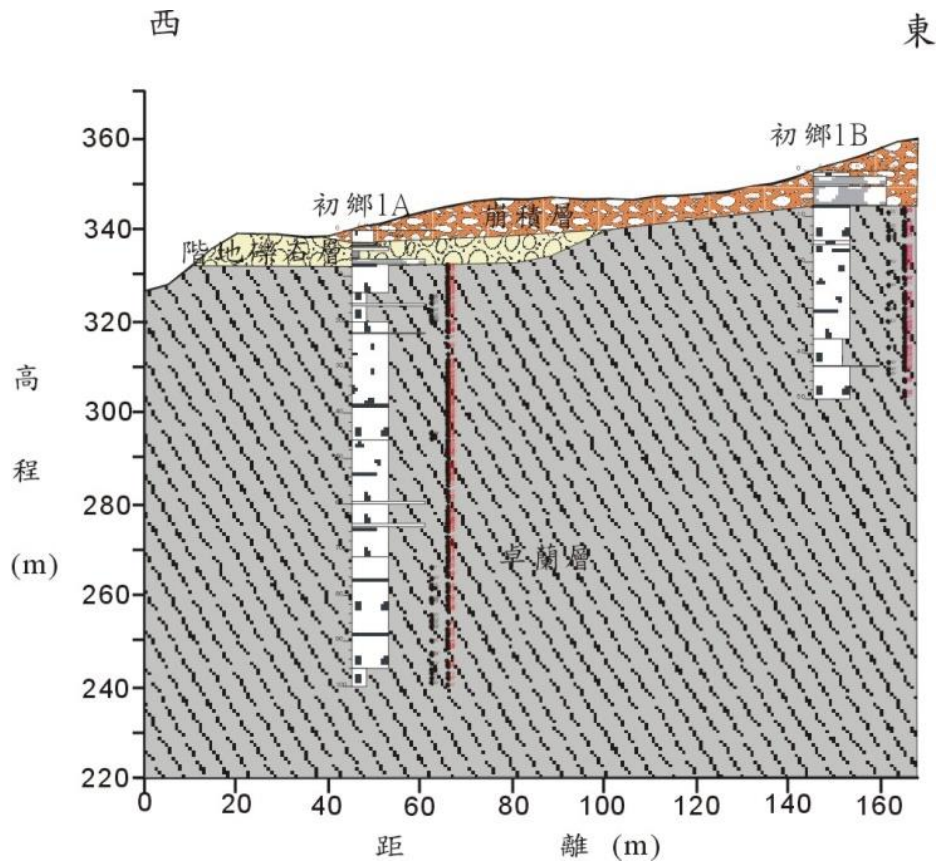


圖 14、補充地質調查鑽探初鄉P1剖面。

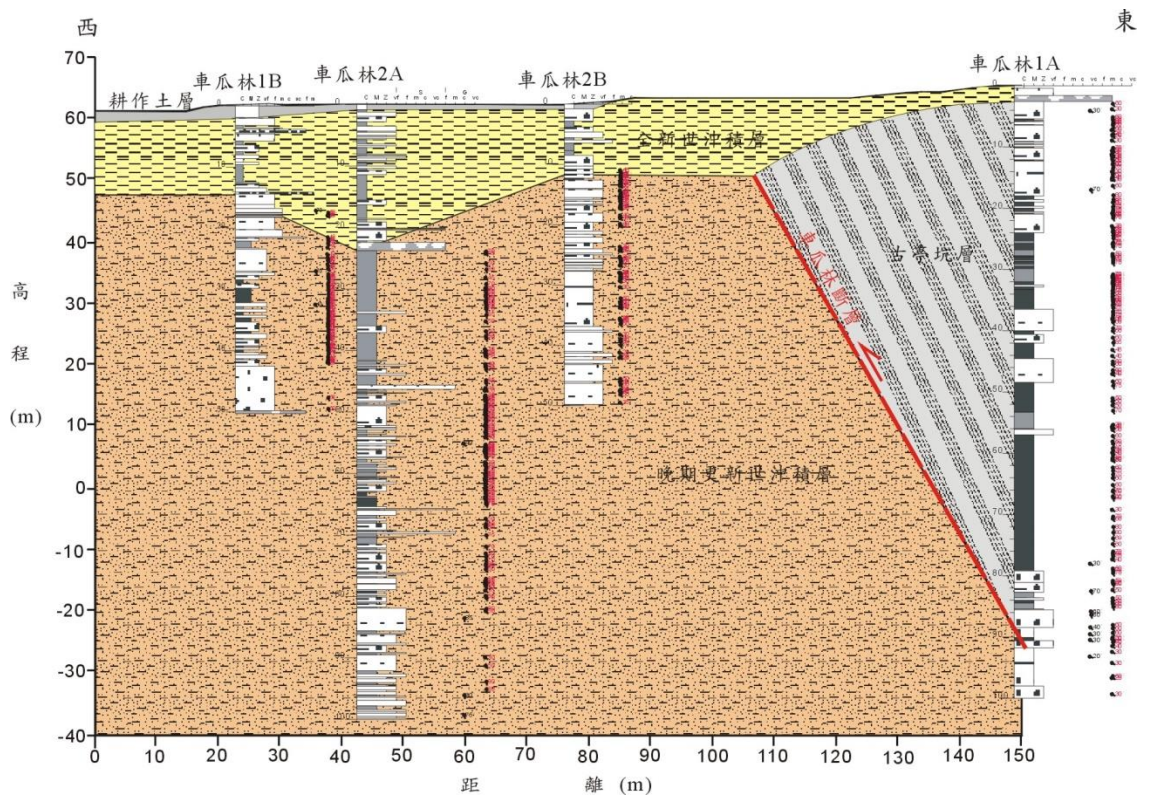


圖 15、補充地質調查鑽探車瓜林P1剖面。

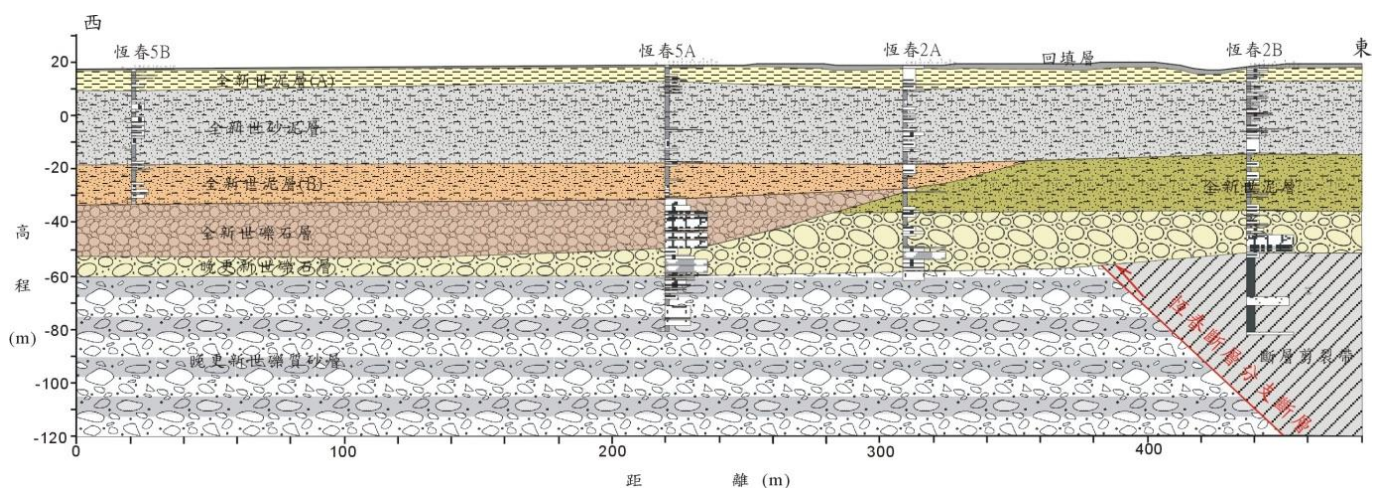


圖 16、補充地質調查鑽探恆春P5剖面。

(三) 斷層活動性觀測整合分析

本年目標為整合運用 GPS 移動站、精密水準測量、GPS 連續觀測站及 PS-InSAR 衛星影像等觀測資料，透過資料處理，獲取全臺水平速度場、垂直速度場及應變速率場等觀測成果。本計畫並配合數值斷層模擬，針對活動斷層與潛在的活動構造進行分析研究，利用不同的斷層模型推估斷層短期滑移速率、滑移虧損率及斷層幾何參數等資訊。上述成果將供斷層潛勢分析計畫使用，評估活動斷層之發生機率。最後會嘗試利用單點定位技術(PPP)發展連續 GPS 近即時解算，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一周內完成連續 GPS 同震位移場之解算工作。本計畫工作期程共計 4 年(106-109 年)，將配合斷層潛勢分析計畫工作進度，分中部地區、北部地區、南部地區與東部地區(圖 17)，逐年完成全臺主要活動構造之斷層幾何參數推求。

1.連續 GPS 資料分析

由於 GPS 之水平誤差為 10 或數毫米 (mm)，故可利用 GPS 測網進行水平變形之觀測；另一方面連續 GPS 觀測已累積長時間之時間序列，過去對於連續 GPS 在垂直方向變化較少討論，但未來已可將長時間的連續 GPS

測站垂直變化加以分析討論並與精密水準測量相輔佐分析臺灣垂直升降變化與斷層活動之關聯性。此外，GPS 連續站的加密以及精密水準測線的延伸亦可以解析臺灣斷層兩側的滑移速率，推斷高發震潛能構造之活動行為，並瞭解地殼變形與地震發生間之關係。

臺灣自 1990 年起陸續建置連續 GPS 觀測站，1999 年 921 集集地震後更投入大量的研究經費與人力建置更密集的觀測站。經由長時間的資料累積，與處理觀測資料經驗，目前連續 GPS 的觀測結果可提供的效應與應用如下：

a. 利用 skyplot 透空圖，分析臺灣連續 GPS 觀測站各測站資料接收狀況，以確認時間序列之正確性，並探討影響其接收狀況之可能性，以確保後續分析的正確性。

b. 解析時間序列中之週期性訊號。臺灣連續 GPS 觀測站結果在不同地區所出現的週期性訊號是否由構造活動所產生？目前 Dong et al. (2002) 提供了全球資料的分析，說明季節性的效應所存在的影響因子，本計畫將由臺灣的連續 GPS 站為主，分析各觀測站的季節性效應，以釐清時間序列異常變化的因子，可提供未來判斷斷層活動的異常變化的背景資訊。

c. 目前連續 GPS 觀測結果多以每日解為主，本計畫將利用個觀測站之不同取樣率 (30 sec 或 1 sec) 將特殊地震事件前後 5 日結果以高取樣率分析方式提供時間序列，此成果可以進一步了解斷層活動前的變化，並掌握更精準的同震變形量。

d. 利用高精度的同震變形，可提供斷層滑移的模擬，掌握斷層的幾何特性，與可能發生的地震規模，並了解可能的盲斷層位置。

e. 利用地表變形與 PS-InSAR 結合，提升面狀資訊的正確度。

圖 18 及圖 19 為彙整歷史資料至 2019 年 09 月相對澎湖白沙站(S01R)之年速度場結果。由解算結果顯示，水平速度場在跨越縱谷斷層系統、西部麓山帶和變形前緣的速度梯度變化較大，與主要活動構造的分布吻合。臺南以南地區，新化斷層南北兩盤的水平速度場變化較大；在新化斷層以南地區，測站速率約 3-5 cm/yr，向西或西南運動，速度場呈現逆時針旋轉，前人研

究指出 (Ching et al., 2007; Hu et al., 2007) 此速度場逆時針旋轉，可能與構造側向擠出有關。另外北部地區則呈順時針旋轉，速度場由西北向逐漸轉向北和東北向，在宜蘭地區則由東北向漸轉至向東和東南向，且速度場由北往南漸增，其變形模式以橫移伸張 (transtensional) 變形為主，前人研究此變形模式主要受控於板塊碰撞和隱沒作用板塊後撤的綜合影響 (Hu et al., 2001, 2002; Rau et al., 2008; Hou et al., 2009)，或是構造側向擠出有關 (Angelier et al., 2009)。垂直速度場方向上則以西部彰雲地區、宜蘭平原、屏東平原、中央山脈東翼以及海岸山脈北段為主要下陷區域。西部彰雲地區的地表沉降主要受超抽地下水影響 (e.g., Tung and Hu, 2012)；屏東平原和宜蘭平原則可能同時受構造作用和地下水位升降所影響 (e.g., Hu et al., 2006; Hsieh et al., 2011; Su et al., 2017)；海岸山脈北段下陷則可能與菲律賓海板塊向北隱沒作用往下沉有關 (Wu et al., 2009)。主要的構造抬升區，以西部麓山帶和中央山脈為主，此結果與過去只使用線性迴歸結果約略相同。

2. 移動式 GPS 觀測、精密水準測量及單頻 GPS 資料分析

雖然 GPS 連續站之設置可以大幅提升地表變形之時間解析力與坐標解算精度，然而在有限的經費與臺灣複雜的地表變形環境下，移動式 GPS 觀測的時間解析力雖然不足，但是卻可以更有效地提高三維地表變形的空間解析力。此外，雖然單頻 GPS 本身單獨使用下的坐標解算精度並不高，但在短距離內 (臺灣地區之經驗距離為 10 公里) 搭配雙頻 GPS 一起使用 (圖 6)，可以獲得接近雙頻 GPS 的坐標解算精度 (圖 20)，又隨著單頻 GPS 儀器價格的逐年降低，單頻 GPS 具有相當高的潛力可以取代 GPS 移動站來進行連續式的觀測，既提高地表變形之空間解析力，也提高其時間解析力。

由於臺灣位於板塊擠壓邊界的環境下，逆衝斷層為臺灣造山帶主要發育之構造，故對於垂直變形場之監測是不可或缺的。精密水準測量在高程坐標測量的精度是無可取代的，因此精密水準測量可以提供高精度之垂直變形場 (圖 21)。在與 GPS 連續觀測成果進行比較校正後，精密水準垂直變形場更可以由區域內相對垂直變形差異關係轉換成實際之垂直運動，提供後續地表變形直觀分析之便利性。此外，雖然 GPS 移動站之高程坐標精度並

不佳，但是在經過十數年的資料蒐集後，透過與 GPS 連續站之坐標時間序列比較，多數之 GPS 移動站垂直速度場也可以透過適當之檢核來進行使用，直接提高臺灣地區垂直速度場之空間解析能力。

在構造活動的區域利用這些方法可以發現在中大型地震發生時有明顯的地表變形。除此之外，臺灣在間震期相對於澎湖白沙 S01R 的地表速度場最高達 82–91 mm/yr，因此無論間震、同震及震後，利用這些大地觀測技術監測地表變動，將足以了解臺灣活動斷層的變動情形，並建立不同時期地表速度場之移動與方向。

另一方面，地表速度場於空間中分布的形貌特性，會因為坐標框架的選擇不同而有所變化。因此，應變率的結果可反映各測站間的速度梯度變化，此特性得以使應變率於空間中分布的型態變化獨立不因不同坐標框架的選擇而有改變。

3.連續 GPS 近即時資料解算

2019 年 4 月 18 日臺灣東部花蓮發生了 M_L 6.1 的地震，震央位於中央山脈一側 ($24.0543^\circ N, 121.5592^\circ E$)，震源深度約 20 km。中央地質調查所於該地震發生後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GPS 連續站資料來進行地表同震位移場之解算。

由 GPS 連續站獲得之地表同震位移場指出(圖 22)，最大同震位移位於震央南邊的銅門測站，同震抬升為 3.1 mm，水平分量向西為 3.8 mm；向南為 17.1 mm。而位於震央東南邊的北埔測站，其同震抬升為 16.1 mm，同震位移水平分量向西為 7.6 mm，同震位移水平分量向南為 12.9 mm。除此之外，周圍測站所記錄到的同震位移均不超過 10 mm，並且於地震後並無明顯的永久變形行為，連續 GPS 的同震位移場大致沿震央呈扇形分布。

在衛星影像處理方面，本團隊主要採用 (European Space Agency; ESA) 所屬衛星 Sentinel-1A/B 的雷達影像，使用差分合成孔徑雷達干涉技術 (D-InSAR)，得到視衛星方向同震地表視衛變形圖。然而，此同震變形量可能並非為真實地表變形，部分來自於大氣效應或其他誤差。根據合成孔徑雷達

干涉技術結果顯示(圖 23)，其變形量與連續 GPS 測站一致，最大均只有數公分，表示此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

由震源機制解與主餘震的空間分布指出，本次地震主要的孕震構造極有可能是北北東-南南西走向且向西傾之斷層面，因此本團隊根據 2018 年花蓮近海地震之震源模型，擷取北北東-南南西走向且向西傾之斷層面，繼續往 25 公里處延伸來建立本次地震的斷層幾何。本計畫僅反演 GPS 水平同震位移場來估算斷層滑移分布。其最佳模型指出，斷層之滑移量主要分布在 50 mm~80 mm，集中在深度約 10-25 km 的位置。此地震之測地矩(M_0)為 1.06×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 5.98。然而，雖然本次地震的規模和 2018 年花蓮近海地震的規模相當，但是由本次地震深度達 20 公里，因此此模型之可信度仍需要更進一步驗證。

4.PS-InSAR 應用

PS-InSAR 衛星影像分析技術可針對大範圍的地表地形變化進行觀測，快速的獲得大區域面狀的地殼變形資訊。故經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到包含東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部等數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域。

本年度分析處理 Sentinel-1 衛星影從 2015 年 4 月至 2019 年 9 月之干涉影像對，由升軌及降軌結果顯示，除中央山脈多為高山植被所覆蓋，大致上都能產生大範圍的干涉條紋。利用結合升軌與降軌影像以獲得東西方向與垂直方向上的地表變形的結果(圖 24)可以得到，嘉義的東石鄉、雲林的內陸以及屏東的林邊與佳冬為主要的下陷區域，下陷量可達到近 30 mm/yr。主要抬升則位於台南台地，速率約為 15 mm/yr，而龍崎地區則擁有最大的抬升速率，約 25 mm/yr。其結果與 GPS 相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。發現此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層、旗山斷層、小崗山斷層以及六甲斷層與木屐寮斷層兩側都可以看到明顯的速度不連續性。時間序列分析方面，SENTINEL-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性。大部分斷層上下盤與這段期間均無明顯速度差異，唯跨過後甲里斷

層其測站之間的相對速度似乎在美濃地震後有了很大的改變，GPS 及 InSAR 結果都顯示台南台地於美濃地震震後抬升速度變快。

6.活動斷層模型之建置

本計畫利用 BLOCKS、DEFNODE 與 Baseline Inversion Model 反演水平速度場和垂直速度場，推求臺灣南部地區活動斷層之斷層滑移虧損率。今年南部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果(2002 年至 2016 年速度場)於工作會議時討論出各模型結果之權重，並依據討論所得之權重計算出加權平均滑移虧損速率(圖 25)，結果顯示木屐寮-六甲斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr，新化斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.9 mm/yr，後甲里斷層之加權平均滑移虧損速率為 2.4 mm/yr，左鎮斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.1 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.3 mm/yr，旗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.0 mm/yr，潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.9 mm/yr。然而在檢視各模型的滑移虧損速率可信區間，同時和過去利用測地資料所推求之斷層滑移速率進行比對後，發現臺灣南部的斷層滑移虧損速率的估算值有很大的不確定性。這樣的結果可能和臺灣南部具有非彈性變形的構造活動有關，這些構造運動在斷層模型建立中並不會被考慮進來。此外，在與過去利用測地資料所推求之斷層滑移速率進行比對中，指出採用不同斷層模型的結果來進行交互比對是必要的，因為測地滑移速率的計算結果和斷層模型的假設高度相關。最後，本計畫嘗試加入的垂直速度場資料，但垂直速度場可能紀錄到非構造活動的垂直向地表運動，使得垂直向速度場擬合不如水平向。未來工作將持續探討非構造活動造成的垂直向速度場對塊體模型模擬結果的影響。雖然在定性討論上，滑移虧損率高低可顯示該斷層在未來破裂及發生地震的潛勢；但如何將此虧損率與地質資料顯示的長期滑移速率結合，來定量地計算斷層破裂機率，並放入機率地震災害評估的邏輯樹中，將是本計畫未來的研究重點。

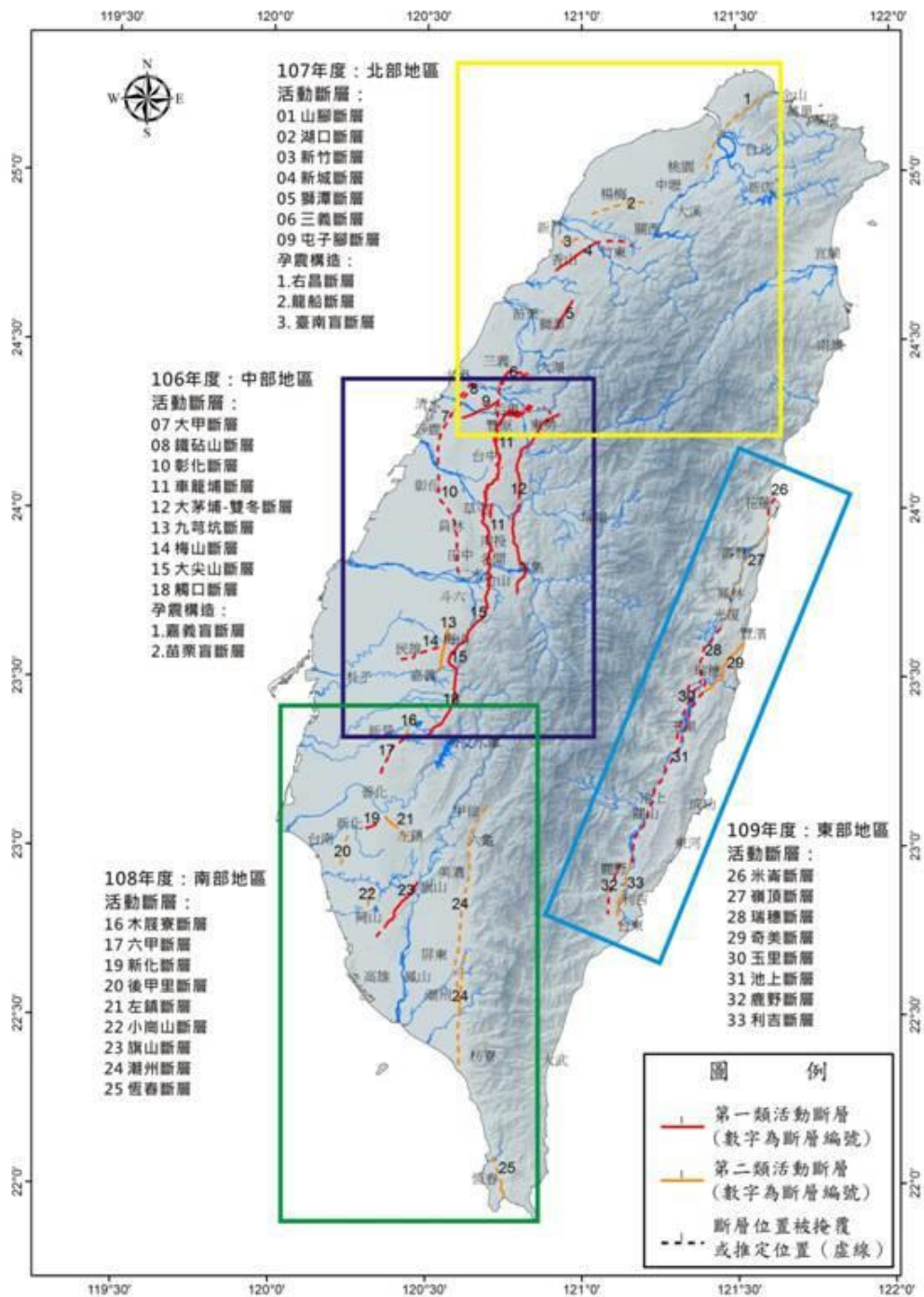


圖 17、本計畫各工作期程分區圖。本計畫將於 106 - 109 年間配合斷層潛勢分析計畫工作進度，分中部地區、北部地區、南部地區與東部地區完成全臺地表變形觀測資料處理分析與斷層模型建置。

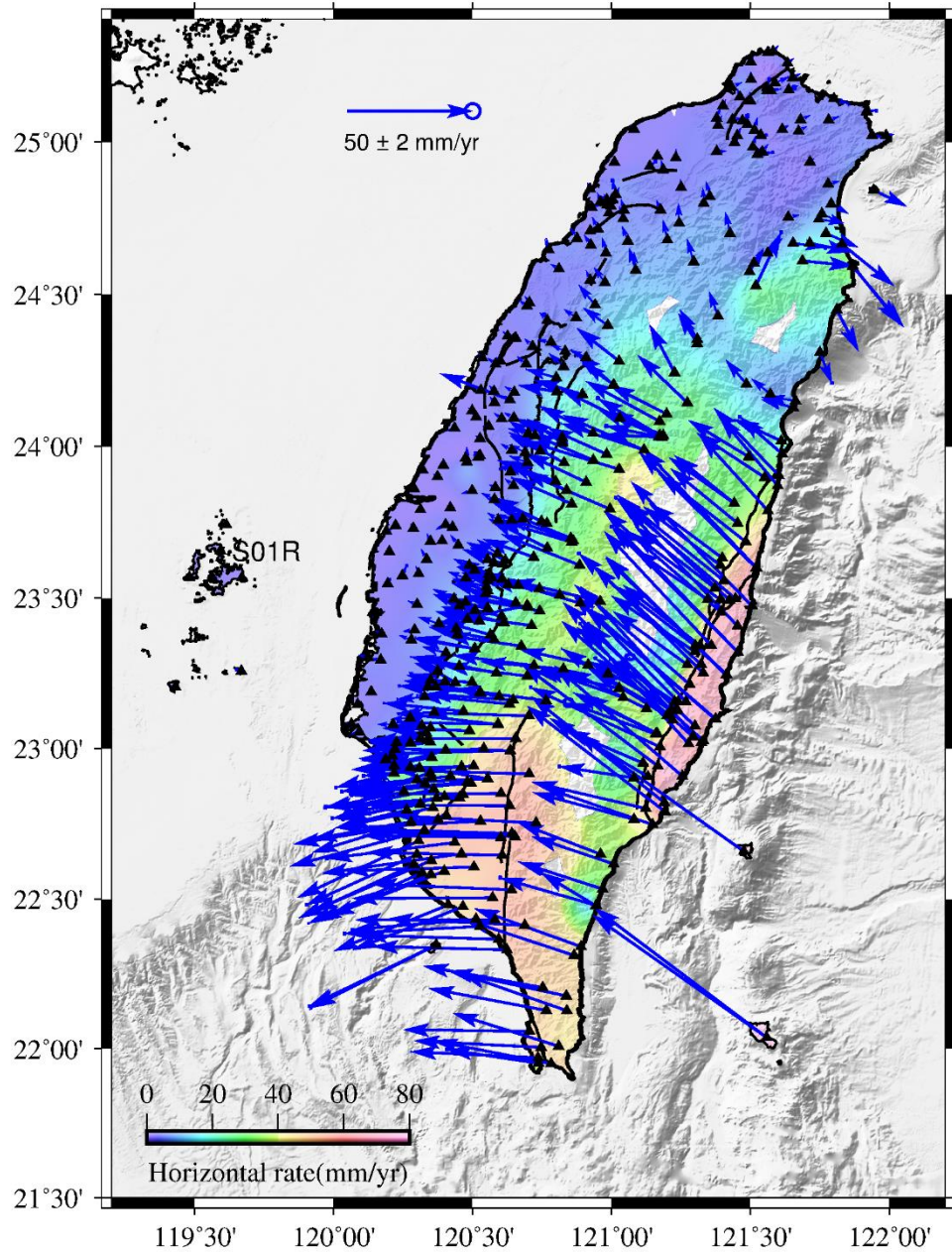


圖 18、整合歷史資料至 2019 年 09 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。

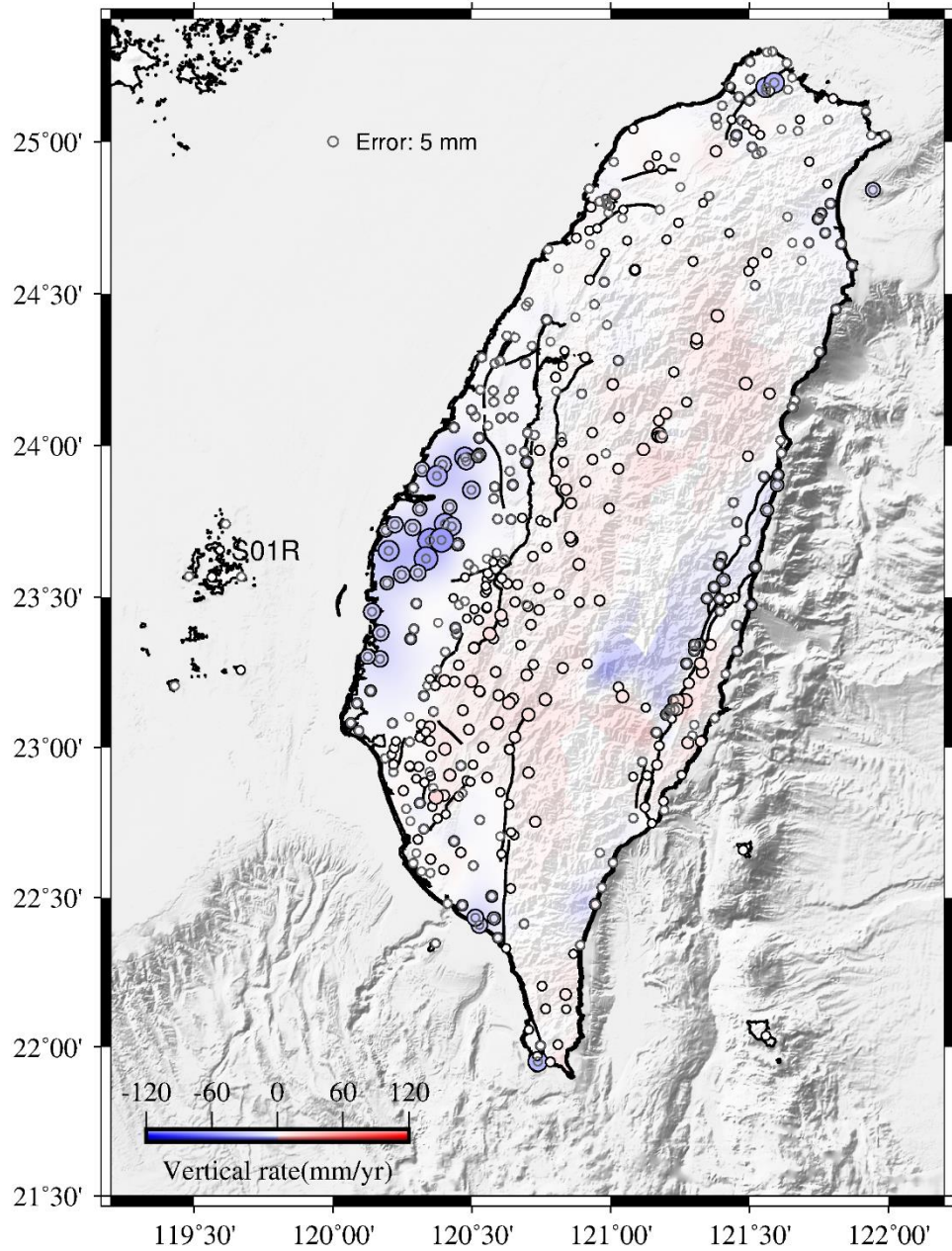


圖 19、整合歷史資料至 2019 年 09 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）（垂直方向速度場）。圓圈代表速度場誤差值的大小。

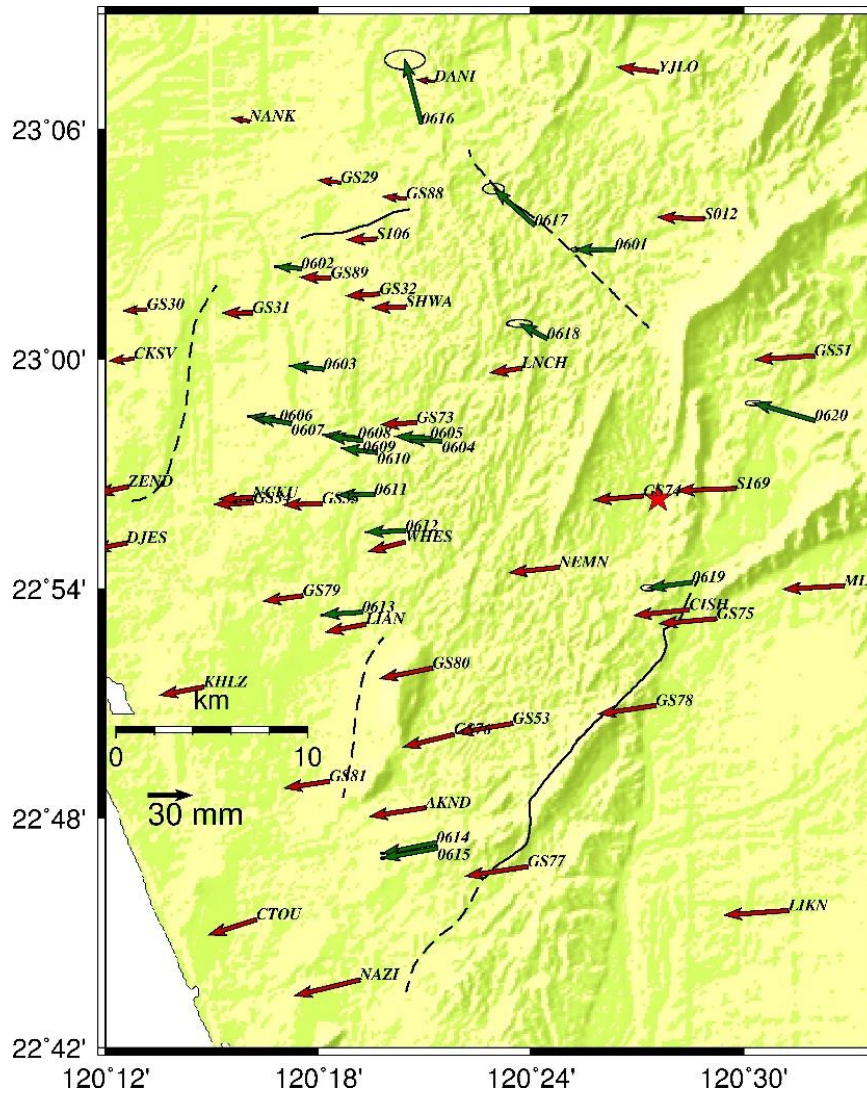


圖 20、2018 至 2019 年水平速度場，綠色箭頭為單頻測站之速度向量，紅色箭頭為連續站之速度向量，各站速度相對澎湖白沙站 S01R。

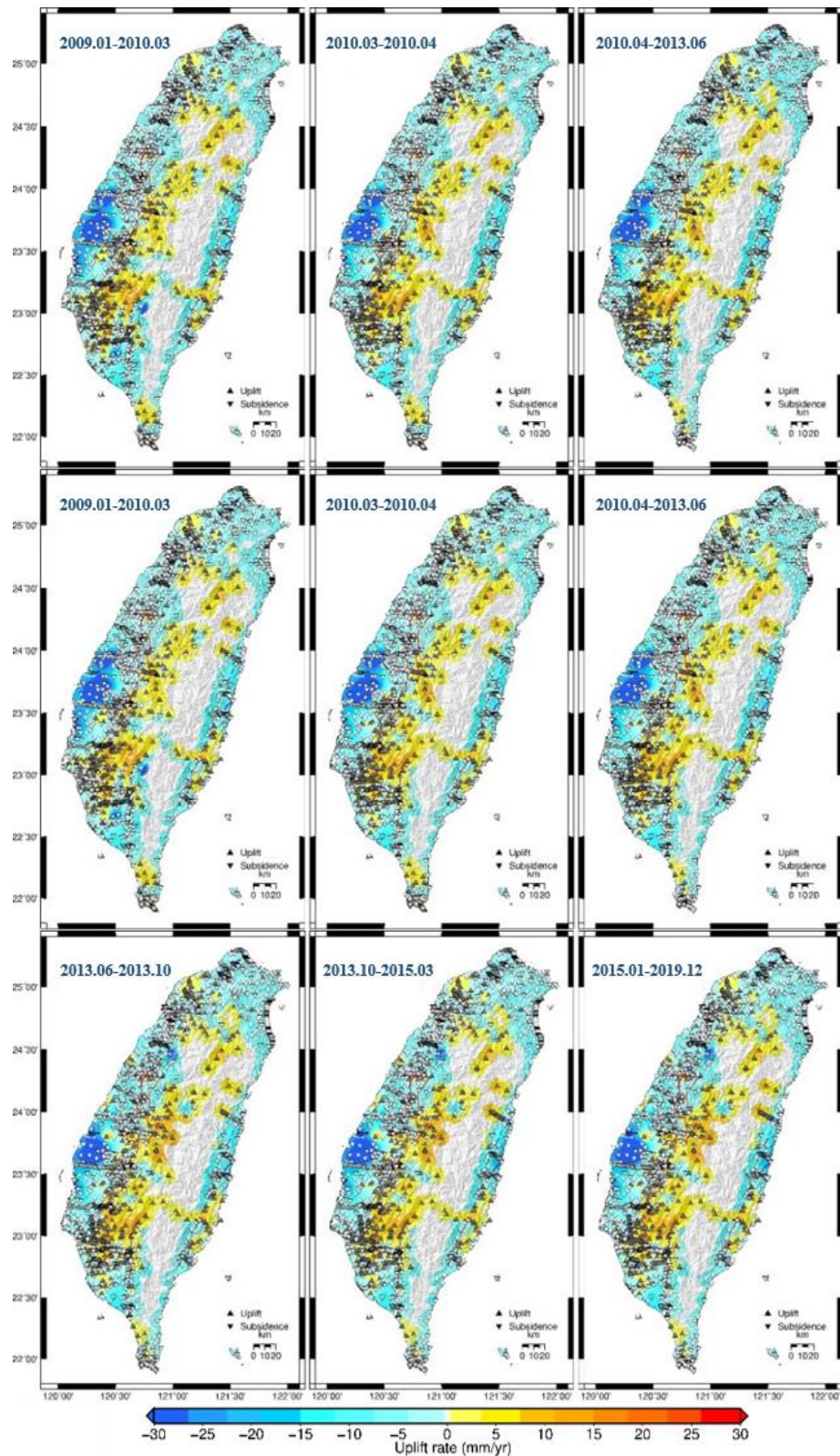


圖 21、2002 年至 2019 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

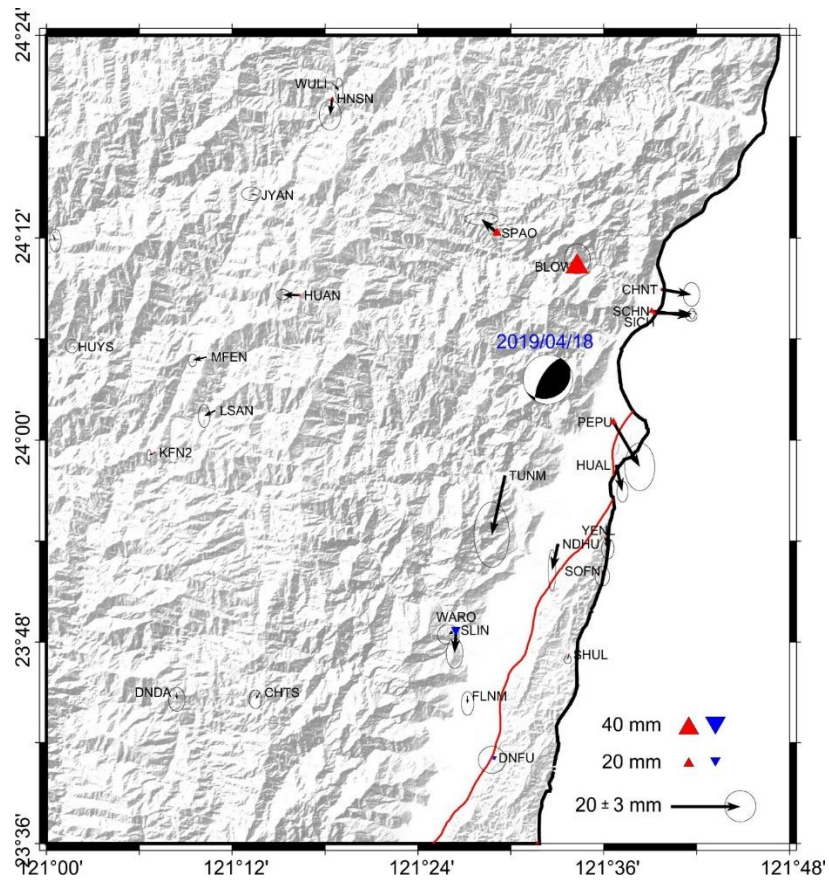


圖 22、花蓮秀林鄉地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色三角形代表抬升，藍色三角形代表下陷。

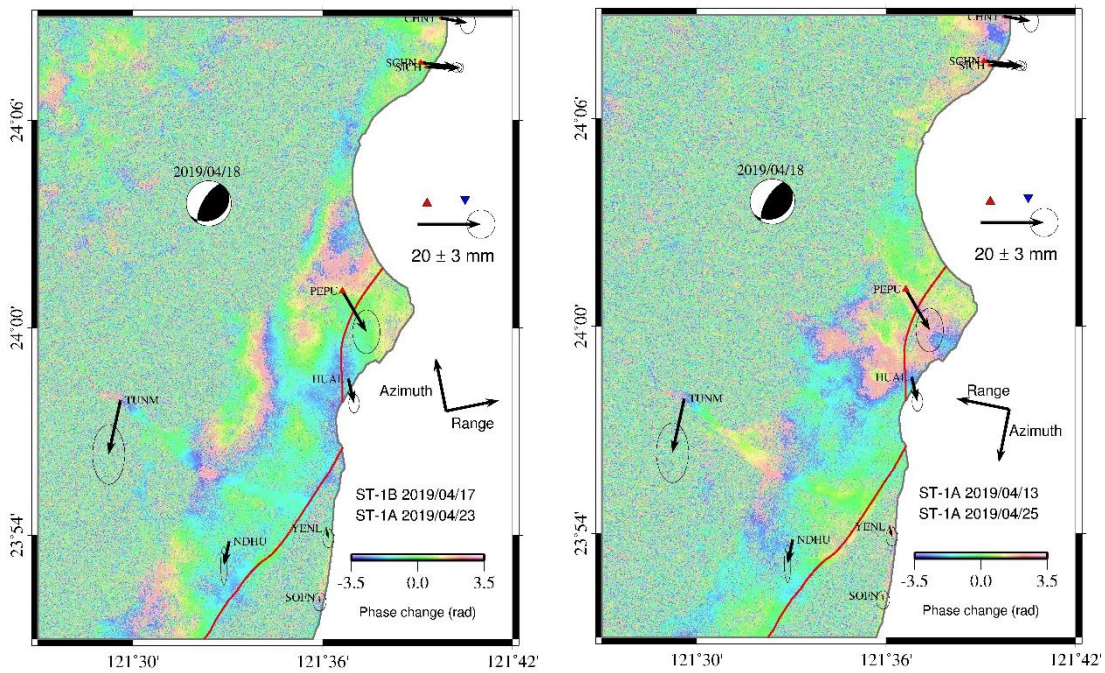


圖 23、花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。

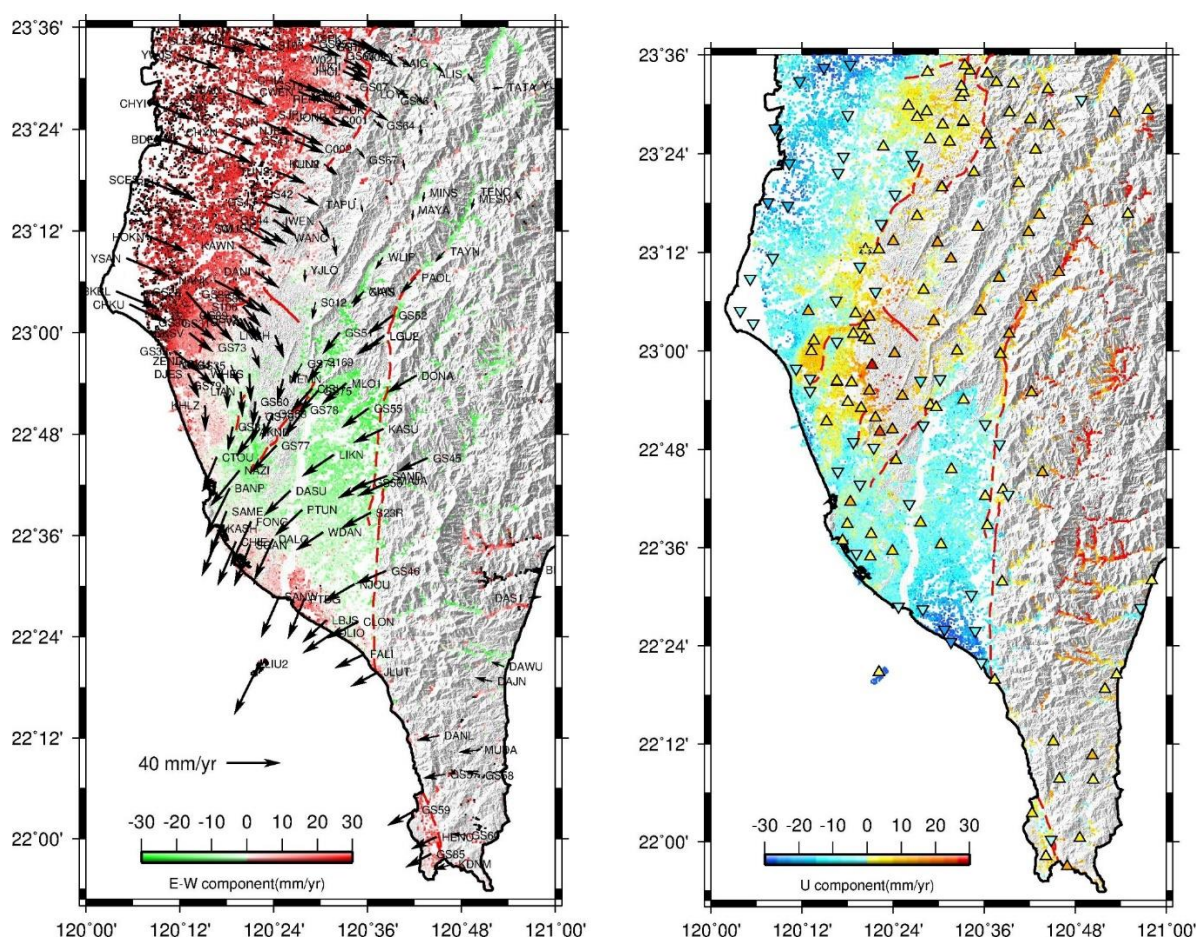


圖 24、左圖為 SENTINEL-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東；冷色系代表地表變形向西。箭頭為連續 GPS 測站水平方向移動速率。右圖為 SENTINEL-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系三角形代表地表變形抬升；冷色系倒三角形代表地表變形下降。三角形為連續 GPS 測站垂直方向移動速率。

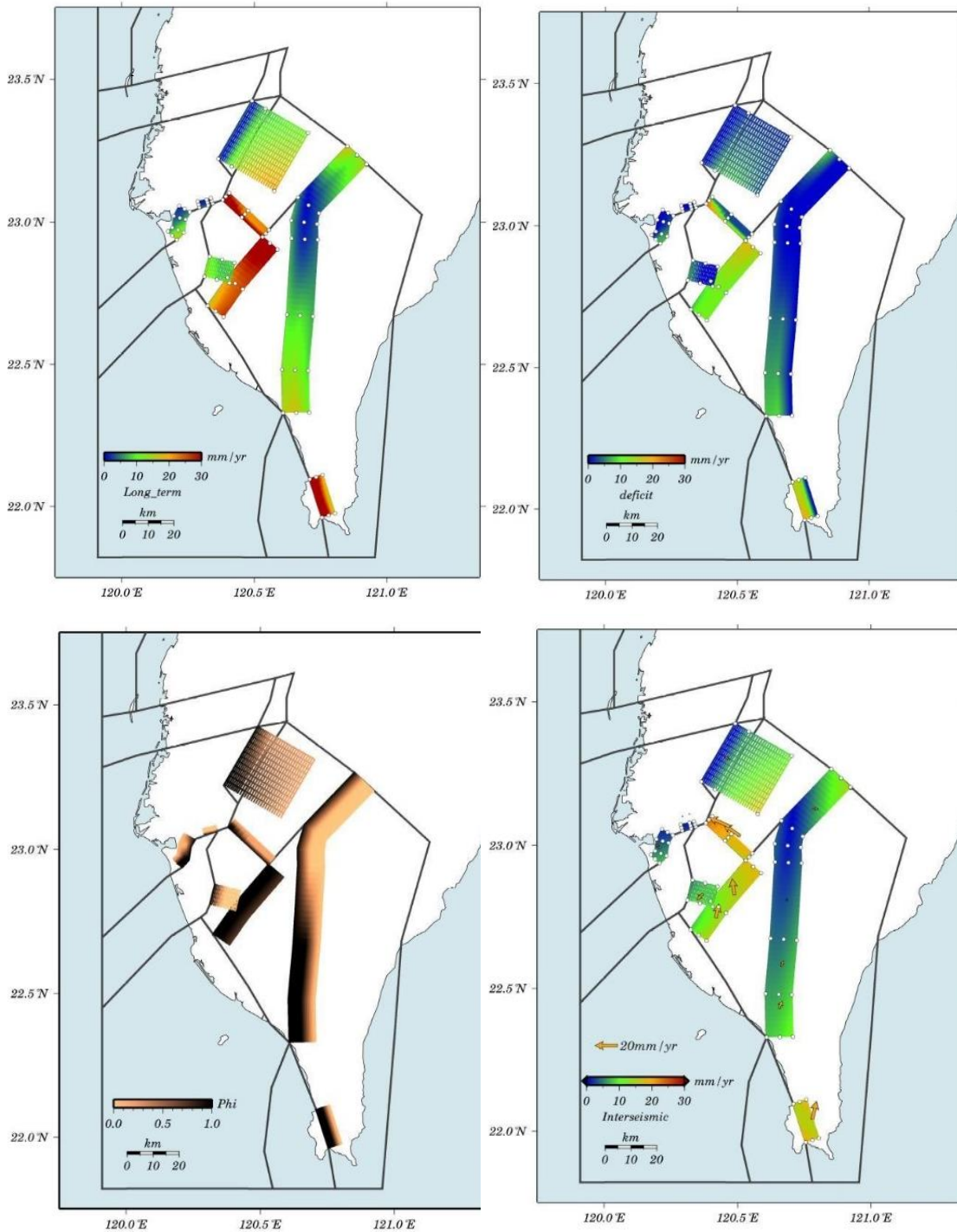


圖 25、(a) 推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置，橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向，暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b) 各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient) 分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。

(四) 斷層潛勢分析評估研究

依據歷史相關文獻記載，大多數致災地震與臺灣島內活動斷層有關。2012年版的台灣活動斷層分布圖，含括33條活動斷層，而該版本的調查資料精進主要以1999年集集地震之後所啟動一系列的活動斷層調查研究計畫所匯集。本計畫參酌美國、日本對於斷層引發地震潛勢評估方法，從文獻資料致力收集相關斷層參數。首先，嘗試依據文獻資訊轉化為重要的斷層參數，包含斷層幾何(斷層長、斷層寬、斷層傾角)、斷層分段及長期滑移速率。使用彙整的斷層參數計算斷層面積之後，進一步估算特徵地震規模，於此每個斷層對應的回歸週期即可被予以估算。最後，選擇適當的機率模型估算活動斷層在未來30年、50年和100年之發震潛勢，彙整的斷層參數不僅對於衍生的地震危害度分析工作有相當的幫助。

本年度針對南部地區九條活動斷層(16木屐寮斷層、17六甲斷層、19新化斷層、20後甲里斷層、21左鎮斷層、22小崗山斷層、23旗山斷層、24潮州斷層、25恆春斷層)進行新資料蒐集，並諮詢相關專家後，進行參數更新及邏輯樹重新劃設，完成(a)建立活動斷層之特徵地震模式、(b)評估活動斷層未來發生機率、(c)製作活動斷層發生機率潛勢圖。各斷層參數更新之狀況詳

表 2、表 3 所示，活動斷層發生機率潛勢圖如圖 26 所示。此外，建立北宜蘭構造及初鄉斷層之參數表及邏輯樹節點之劃設，以及北宜蘭構造及初鄉斷層之震源參數彙整。

此外，本計畫蒐集 Wu et al. (2017)之 D90 孕震深度空間分布資料，針對南部地區活動斷層進行孕震深度分析，結果顯示斷層區域之 D90 孕震深度均高於地質平衡剖面之深度，推測區域中應有其他深部構造之影響。

表 2、活動斷層參數修改情形(O 表示有修改)

斷層名稱	斷層參數	分段破裂模式	斷層幾何	特徵地震規模	滑移速率 (mm/yr)
木屐寮-六甲		O(權重)	O	O	O
新化		O(權重)			O
後甲里		O	O	O	
左鎮			O	O	O
小崗山斷層			O	O	O
旗山斷層		O	O	O	O
潮州斷層			O(傾角)	O	O
恆春斷層		O(北段長度)	O	O	O

表 3、南部地區活動斷層未來 30、50、100 年發生機率

斷層名稱	最近一次發生時間	統計模式	規模 6.5 以上發生機率		
			未來 30 年	未來 50 年	未來 100 年
木屐寮-六甲	西元 1941 年	BPT	29.2%	43.6%	66.7%
	未知	Poisson	20.6%	31.4%	51.3%
新化	西元 1946 年	BPT	9.6%	14.0%	20.7%
後甲里	西元 1862 年	BPT	2.4%	3.8%	6.6%
	未知	Poisson	1.7%	2.8%	4.9%
左鎮	未知	Poisson	2.3%	3.7%	6.7%
小崗山斷層	未知	Poisson	4.9%	7.8%	14.2%
旗山斷層	未知	Poisson	11.4%	17.9%	31.6%
潮州斷層	未知	Poisson	2.5%	4.2%	8.1%
恆春斷層	未知	Poisson	13.2%	20.5%	34.9%

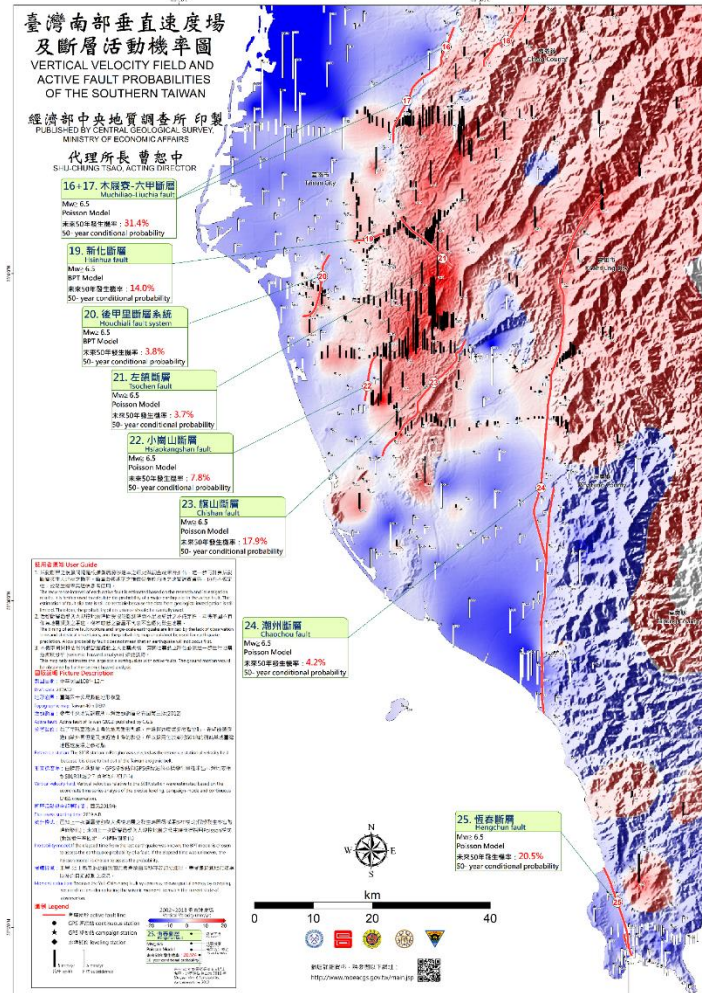
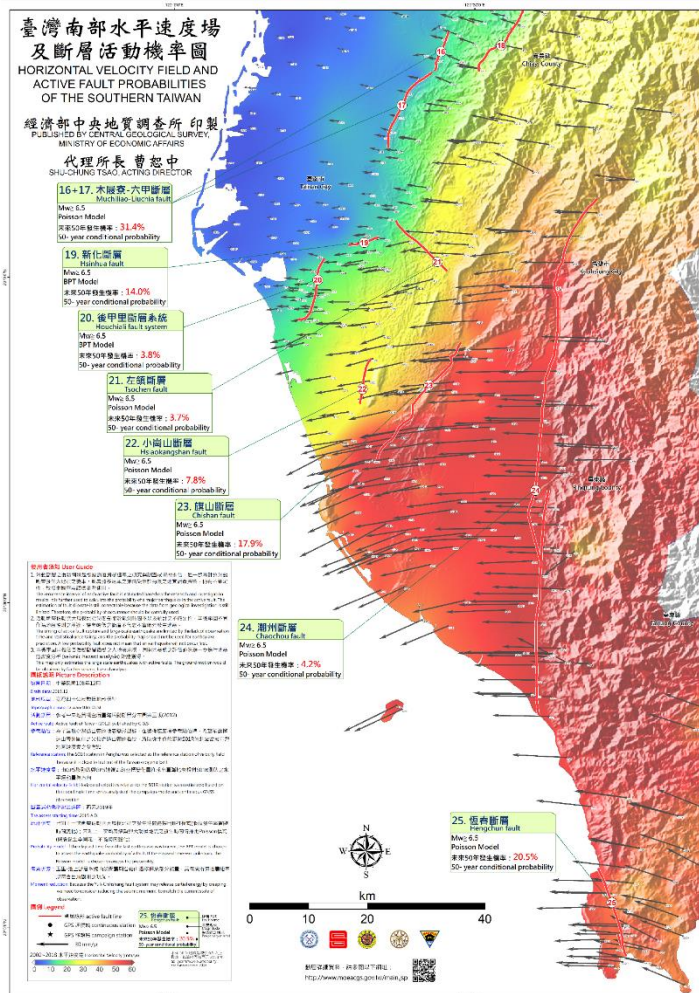


圖 26、(左)台灣南部水平速度場及斷層活動機率圖。(右)台灣南部垂直速度場及斷層活動機率圖。

(五) 活動斷層資料彙整與加值應用

活動斷層調查資料，整合野外地質調查、淺層鑽探、地電阻探勘、空拍等調查方法，建立地質構造剖面相關資料，完成活動斷層地質敏感區劃定計畫書草案。活動斷層觀測資料透過標準化格式轉換、資料處理、分析，對活動斷層短期滑移速率與潛在的活動構造進行分析研究。

此外，本所活動斷層查詢網頁以 Google 地圖與 Google 衛星影像為底圖，結合 ESRI ArcGIS JavaScript API 與全國門牌地址定位 API，提供活動斷層空間位置展現，行政區暨門牌地址定位與活動斷層定位及環域分析(圖 27)。活動斷層查詢網站之功能架構主要可以分為基本圖台、定位功能、圖層套疊功能、活動斷層資訊查詢與活動斷層資訊匯出等五項功能模組。既有活動斷層查詢網頁之斷層資訊以條帶地質圖及說明文字形式呈現(圖 28)。

本網頁除了既有活動斷層查詢功能，亦加入擴充之斷層資訊，包含斷層資訊、活動參數、分析潛勢與評估成果，透過圖形化互動介面，公開相關研究成果，公開活動斷層資訊，提供民眾查詢活動斷層資訊，及提供活動斷層知識供民眾了解，滿足民眾知的權利。

上述活動斷層相關資料，可應用於是否位於地質敏感區區位之查詢，並協助內政部辦理申請人查詢土地與活動斷層空間之關係，供其申辦非都市土地變更或開發使用，同時並協助國內重大開發案件提供地質專業意見。

活動斷層參數資料，可供國家地震工程研究中心、國家災害防救科技中心及行政院災害防救辦公室，供做地震風險評估使用。提供國家重要公共建設地質諮詢服務，參與許多國內重大開發案之意見諮詢，包括烏山頭水庫、中山大學仁武校區、2018 台中花博、國道 7 號、豐原-東勢生活圈快速道路、龍崎掩埋場、淡北快速道路、馬頭山掩埋場等案，本所均透過公、私管道提供專業地質意見，對於社會影響甚為深遠。



圖 27、中央地質調查所活動斷層查詢系統。



圖 28、活動斷層查詢網站示意圖。