

斷層活動性觀測研究-斷層監測與潛勢分析

Observation of Fault Activity: Integrated Monitoring of Active Faults and Earthquake Probabilities Analysis

主管單位：經濟部中央地質調查所

胡植慶¹

Hu, Jyr-Ching

李元希³

Lee, Yuan-His

陳卉瑄⁶

Chen, Kate Huihsua

¹ 國立臺灣大學地質科學研究所

³ 國立中正大學地球與環境科學系

⁵ 國立大學地球科學系

⁷ 國立成功大學測量及空間資訊學系

劉啟清

Liu, Chi-Ching

鄭錦桐⁴

Cheng, Chin-Tung

景國恩⁷

Ching, Kuo-En

² 國立成功大學地球科學系

⁴ 中興工程顧問社防災科技研究中心

⁶ 國立師範大學地球科學系

饒瑞鈞²

Rau, Ruey-Juin

張午龍⁵

Chang, Wu-Lung

唐昭榮¹

Tang, Chao-Lung

摘要

本計畫旨在應用 GPS 測量與井下應變儀觀測，結合地質構造、地震活動觀測、數值模擬和斷層活動度研究，提供近斷層活動性及其潛勢、發震構造、斷層力學和可能地震前兆的重要資訊。

GPS 及精密水準測量之工作內容主要包含(1)已測 GPS 及精密水準資料計算結果及(2)南部地區地表變形分析。至 10 月 31 日止我們已進行台灣地區 GPS 及 29 條水準測線的資料解算分析。恆春地區 GPS 的速度場分布與 2002-2011 年一致。嘉南地區 GPS 觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層之斷層每年累積之能量及最大地震規模分別為 $1.44 \pm 0.46 \times 10^{23}$ dyne-cm ($M_w 6.66 \pm 0.28$)、 $0.41 \pm 0.17 \times 10^{23}$ dyne-cm ($M_w 6.76 \pm 0.19$)與 $2.10 \pm 0.22 \times 10^{24}$ dyne-cm ($M_w 6.71 \pm 0.28$)。

井下應變儀部份，本計畫除分析台北網、新竹網及嘉義網共十三個測站，並持續維護資料庫並提升其安全性，以利未來時間序列分析之用。另外本計畫也建立並修正氣壓對井下應變儀觀測的影響模式，以移除環境影響因素，作為尋找與地震相關的應變異常。從 2009 年至 2012 年 11 月，台北網發現的應變異常事件有 3 次，新竹網 13 次，嘉義網 15 次，其中 5 次異常事件同時出現在新竹網及嘉義網。

斷層活動潛勢分析部分，在參數不確定性以及邏輯樹建立規劃上，101 年共召開了三次專家諮詢會議。建立池上斷層及小崗山斷層之參數表：池上斷層以 BPT 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 $M_w 6.7\sim 7.4$ 地震之機率為 36.3%，46.3%，61.5%；小崗山斷層發生規模 $M_w 6.7\sim 6.8$ 地震之機率則為 6.0%，9.8%，18.5%。

整合分析部分，包括(1)地下水位異常、(2)地化異常、(3)井下應變儀異常、(4)地震訊號異常之整合。整合期間含括 2009 年整年到 2012 年 11 月間規模大於 5 的 112 個地震事件。其中在 2009 年 12 月 19 日 $M 6.9$ 的花蓮地震和 2011 年 3 月 20 日 $M 5.8$ 的台東

外海地震中，顯現地下水位、井下應變儀、地化氣體的同步異常。同天並伴隨著長微震事件，顯示異常觀測和長微震可能具有相同機制。這兩個地震皆在嘉義網和新竹網觀察到異常，但震央非鄰近觀測網。對於規模小於6的地震亦對應到異常，顯示異常反應的空間分布（廣度）和地震規模、震央距離可能不相關，抑或是目前統計資料仍不足。

關鍵詞：全球衛星定位系統、連續觀測站、井下應變儀、觀測井、斷層活動潛勢分析

Abstract

This research focuses on gathering new information about fault behavior in Taiwan using GPS and strainmeter stations. Combined with multidisciplinary studies of plate-boundary tectonics, earthquake activity, numerical simulations, and active fault systems, we integrate these information into a comprehensive understanding of fault activity and earthquake probability, seismogenic structures, fault mechanics, and possible earthquake precursory.

In GPS analysis, we focus on (1) examinations of results of campaign-mode GPS and 29 precise leveling lines; and (2) analysis of surface deformation in Southern Taiwan. The GPS velocity field in Hengchun area is consistent with the GPS velocities from 2002 to 2011. In terms of GPS and leveling results and fault model, the accumulative moments and maximum moment magnitude of Liuchia, Chukou, and Chutouchi faults are $1.44 \pm 0.46 \times 10^{23}$ dyne-cm ($M_w 6.66 \pm 0.28$), $0.41 \pm 0.17 \times 10^{23}$ dyne-cm ($M_w 6.76 \pm 0.19$), and $2.10 \pm 0.22 \times 10^{24}$ dyne-cm ($M_w 6.71 \pm 0.28$), respectively.

We process the data, strengthen the security of the database, and maintain 13 borehole strainmeter stations in Chiayi, Hsinchu, and Taipei networks. All the raw data are processed to strain of each channel, and combined into areal and shear strains of each station. We also estimate the effect of atmospheric pressure change. The residual strain after removing groundwater, atmospheric, and tidal effects could be used to search for pre-seismic strain anomaly. From 2009 to Nov. 2012, we find 3 strain anomalies in Taipei, 13 in Hinchu, and 15 in Chiayi networks, respectively. Five of them are observed by Hsinchu and Chiayi networks.

To establish database of fault parameters and the potential of fault activity, three expert consult meetings were held in 2012. We collect fault parameters of the Chihshang and Xiaogangshan faults. Based on BPT model, the probabilities for a $M_w 6.7\sim 7.4$ earthquake occurred along the Chihshang in 30, 50 and 100 years are 36.3%, 46.3% and 61.5%, respectively, and the probabilities for a $M_w 6.7\sim 6.8$ earthquake occurred along the Chihshang fault are 6.0%, 9.8% and 18.5%, respectively.

We search for possible precursory anomalies of earthquakes by using geochemical and hydrological observations, borehole strainmeter, and seismic records. Between Jan. 2009 and Oct. 2012, there are 112 $M_w > 5$ earthquakes occurred in Taiwan. Two of them have synchronized anomalies from hydrological, geochemical, and borehole strain signals, while ambient tremors are also observed. These two earthquakes are not close to stations, thus we argue that the anomalies are a function of earthquake magnitude and epicentral distance.

Keywords : GPS, CGPS, Borehole Strainmeter, monitoring well, Potential Activity of Faults

一、前言

經濟部中央地質調查所於 91~95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，已逐年在台灣陸上活動斷層帶設置監測點位，包括全球定位系統(Global Positioning System，簡稱 GPS)與井下應變儀(borehole strainmeter)。累積至 100 年為止，已完成連續 GPS 站共 72 站和 13 口井下應變儀及 8 個地球化學觀測站(圖 1)。藉由解算連續 GPS 之每日座標解、水準測量之計算與分析，以及井下應變儀資料分析，可提供地殼活動觀測資料，有助於我們瞭解該地區之斷層、地震活動與觀測結果之關聯性。

本計畫目標旨在應用 GPS 測量與井下應變儀觀測，結合地質構造、地震活動觀測、數值模擬和斷層活動度的研究，期能提供近斷層活動性及其潛勢、發震構造、斷層力學和可能地震前兆的重要資訊。主要執行重點為：(1)分析地調所架設的 72 個連續 GPS 測站及 13 站(扣除瑞峰國小測站及甲仙十八灣測站)井下應變儀之時間序列；(2)藉由移動式 GPS 測站、精密水準測線和連續 GPS 觀測網的觀測，分析主軸應變率、剪應變率和旋轉率，以了解地殼變形之型態並利用數值模式，反演斷層面上的鎖定率、滑移虧損和滑移率；(3)比較井下應變儀和連續 GPS 觀測站的長期應變率，分析應變速率改變的因素；(4)由地球化學觀測的異常事件資料，配合連續 GPS 和井下應變儀觀測，評估地震發生前的應變異常現象；(5)斷層活動潛勢分析方面，評估地震機率模型應用在臺灣的可行性。並藉由美國和日本發展地震機率模型經驗，分析池上斷層和小崗山斷層的活動潛勢；(6)維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性。

二、GPS 及精密水準測量

至 2012 年 10 月 31 日止，我們已進行台灣地區 GPS 及 29 條精密水準測線的資料解算分析。GPS 的速度場分布均與 2002-2011 年一致(圖 2)；水準測段每公里觀測精度小於 2.0 mm 以下者有 90.0%，且所有的測段閉合差均符合規範，顯示資料品質相當穩定可靠。

本研究將臺灣地區 2002-2012 年所測量之 GPS 移動站與連續站觀測資料作時序分析，藉由各站的座標時間序列，可知各點之位移變化情形並求得各地區速度場分布。以臺北地區、宜蘭地區、桃苗竹苗地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區、恆春地區及花東地區 8 個測網，解算 909 座移動站、中央地質調查所 72 個 GPS 連續站，以及與其他單位交換約 128 個 GPS 連續觀測站之水平方向速度場(圖 3a)；並由移動站及連續站平面速度場計算平面應變速率場(圖 3b)。

臺灣現今的垂直速度場在臺灣中間區帶以及海岸山脈南段有較高的抬升速率，其大致呈現一圓頂狀的圖案(圖 4)。沉陷則發生在平原和盆地地區，以及臺灣島周圍沿海地帶。臺灣的地表抬升(圖 4 中的暖色系)速率在雪山山脈、中央山脈與西部麓山帶南段為 0.2-18.5 mm/yr，其中該範圍內最大速率 22.9 mm/yr 發生於中央山脈中北段。從最大抬升速率的位置向北和向南其值迅速下降。大於 5.0 mm/yr 抬升速率的 70%發生在雪山山脈與中央山脈的範圍內。此外，海岸山脈南段有 1.3-25.4 mm/yr 的抬升速率且具有臺灣最大的抬升速率 25.8 mm/yr。而臺灣地區的地表沉陷(圖 4 中的冷色系)可區分為四個主要的區域。第一區為臺灣西南部的海岸平原區，其沉陷速率通常大於 15.0 mm/yr，且臺灣最大的沉陷速率 113.0 mm/yr 也位於該地區內。第二區為屏東平原的最南端角落。在該區域內，沉陷速率最大為 33.2 mm/yr。海岸山脈北段是第三個主要的沉陷地區，其沉陷速率為 5.0-20.0 mm/yr，該區最大值为 -23.5 mm/yr。第四個主要的沉陷區域在臺灣東北部的宜蘭平原。通常在平原南部側面的沉陷速率以及從海岸線向西往宜蘭平原的沉

陷速率之減少比在北部的側面稍大；一般而言，該區的沉陷速率在 2.0-18.0 mm/yr 之間，而宜蘭平原的最大沉陷速率為 23.9 mm/yr。在臺灣北部及恆春半島的垂直速度分別是 -3.5 ± 3.9 mm/yr 及 -1.7 ± 3.6 mm/yr。

本研究將臺灣地區 2002-2012 年所測量之 GPS（包含移動站與連續站）與 29 條精密水準觀測資料整合。針對各地區跨斷層速度剖面的結果，分析各斷層之水平及垂直速度變化情形。其中嘉南地區六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層之斷層透過 GPS 觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出，滑移速率分別為 8.6 ± 1.3 mm/yr、 6.9 ± 1.6 mm/yr 及 29.6 ± 2.7 mm/yr；其鎖定深度則分別是 1.2 ± 0.4 km、 0.4 ± 0.3 km 與 5.6 ± 0.4 km。假設六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層之斷層長度分別為 23 km、27 km 與 25 km，則各斷層每年累積之能量及最大地震規模分別為 $1.44 \pm 0.46 \times 10^{23}$ dyne-cm (M 6.66 \pm 0.28)、 $0.41 \pm 0.17 \times 10^{23}$ dyne-cm (M 6.76 \pm 0.19) 與 $2.10 \pm 0.22 \times 10^{24}$ dyne-cm (M 6.71 \pm 0.28)。由上述之結果顯示，竹頭崎斷層具有較高的斷層滑移速率及較深的鎖定深度，此結果可解釋成滑脫面上其實是有能量在累積。西南部泥岩區之主要變形帶位於小崗山斷層與旗山斷層之間，此區域具有顯著之抬升速率，最大約為 18 mm/yr，出現在小崗山和旗山斷層之間，但水平速度場中相對應之位置卻無梯度變化。而在小崗山斷層與旗山斷層之間，可觀察到右移與擠壓之變形分量向東逐漸增加，速度差異量分別可達 8 mm/yr 與 10 mm/yr。隨著兩斷層間水平速度分量之增加，垂直速度場之量值也跟著增加。跨越旗山斷層北段，則有約 12 mm/yr 之縮短量。

三、井下應變儀資料檢核與分析

本研究除處理台北網、新竹網及嘉義網共 13 個測站外，並持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性，以利未來時間序列分析之用。唯其中瑞峰國小測站(LMMT)及甲仙十八灣測站(ECT)不再觀測及維護，曾文水庫南測站(RST) CH1 永久損壞；新樂國小測站(CINT) CH0 於 2012 年 7 月之後有資料中斷與數值不正常跳階的情況，尚待進一步的維護與保養。此外所有測站資料均轉成應變分量。本計畫也分析多次較大氣壓變化時的記錄，建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，得到移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與地震相關的應變異常。

井下應變儀的地震前兆訊號之搜尋原則如下：

- (1) 因為尚未修正潮汐與降雨的效應，本計畫僅搜尋台灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於變化小於潮汐變化(約 0.2 μ strain)的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。因為台灣地區規模大於 5.0 的地震，過去 4 年來總共 112 個，考慮太長的期間會涉及到其他地震，往往無法區分期間的相關性。
- (2) 異常的發生除了地殼的應力累積以及受地體構造力的穩定作用，也受到其他環境因素的影響，如潮汐、降雨、氣壓。在除去各種環境影響因素後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上是固定斜率的平滑線。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為異常。
- (3) 判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件：其一是在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳（陡升或突降），也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，則表示該測站並不在該地震的應力影響範圍內，任何半個月前或一個月前的地殼應變應該與地震不相關。其二是在附近幾個井下應變儀觀測站中至少有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現異常。若只有單一測站的明顯異常則存疑。其三是對於所看到的異常，需要再檢視該時間的環境因素是否也有特殊的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴

謹，資料的突跳或缺失難免，因此適當的資料補遺與篩選是必要的程序，異常資料的再確認也是必須的。

根據上述的判斷原則，我們主要測試兩個井下應變儀網，即嘉義網，包括達邦(DARB)、太興國小(TAIS)與中興國小(TSUN)三站；以及新竹網，包括大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)與梅花國小(PFMT)三站，並在 2012 年度加入台北網，包括樹林站(SLIN)、明德中學站(SANS)與錦和國小站(JING)。首先將所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都重新取樣為相同的取樣率。建立環境因子模式並做修正，再估算資料中的地潮訊號並扣除。最後依上述原則判斷是否有同震以及震前的異常應變。

井下應變資料在移除地下水與氣壓的影響之後，在無太大的異常資料干擾（如同震應變或颱風應變）時，已可有效移除潮汐。然而由於多種環境因素影響地下岩層的應變遠大於每日潮汐，特別是與斷層滑移相關的活動，這些會嚴重影響所估計潮汐的正確性。如何在有異常訊號時仍能正確的估計潮汐，尚待進一步的測試，如考慮切除較大的異常訊號後再估計潮汐。目前本研究所建立的程式已可以容許 30%左右的資料遺缺，所以切除較大異常訊號尚不會造成困擾，但需要對所求得的潮汐做正確性的分析。此外，相同地區中井下應變儀對於地潮反應的振幅不一致，與相位不對齊的現象，建議未來須進一步探討井下應變儀資料的絕對值。

2009 年 1 月至 2012 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 19 個事件（圖 5），嘉義測網記錄到 10 個應變異常、新竹測網記錄到 9 個應變異常，而台北測網記錄目前並沒有可判斷為地震相關的應變異常。其中共同應變異常事件共有 5 個。

本研究挑選科羅莎颱風、甲仙地震兩個事件，並選取可能記錄到該次事件的測站，針對面應變的時間序列進行時頻分析。結果顯示各站有其特徵頻率及特殊事件。後續仍須分析更長時間之記錄，觀察特殊頻率是否僅在颱風或地震事件前後出現，並定義出各站之特徵頻率。

- (1) 科羅莎颱風：兩個站記錄到科羅莎颱風的訊號，分別為 DARB、TSUN，面應變的時間序列如圖 6。進行時頻分析後如圖 7，有 0.08 Hz 的特徵頻率。10/6 前後，TSUN 站在 0.1~0.5 Hz 間之頻率有明顯的強度變化，但在 DARB 站之特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同。
- (2) 甲仙地震：三個站記錄到甲仙地震的訊號，分別為 DARB、TSUN、TAIS。面應變的時間序列如圖 8，進行時頻分析後如圖 9，有 0.04、0.06 Hz 的特徵頻率。3/8 前後，DARB 站在 0.1~0.5 Hz 間之頻率有明顯的強度變化。但其他測站之特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同。

四、斷層潛能分析模式之評估

關於斷層活動潛勢分析部分，在參數不確定性以及邏輯樹建立規劃上，本計畫在 2012 年共召開了三次專家諮詢會議，以車籠埔斷層為例，討論邏輯樹建立之過程及方式。本研究在活動斷層發生機率評估上，首先蒐集文獻並建立池上斷層及小崗山斷層之參數表。

本計畫活動斷層潛勢評估之詳細流程如圖 11 所示，首先針對活動斷層進行參數之蒐集，包含斷層之幾何特性、分段特性及斷層活動度。斷層之幾何特性可藉由經驗公式獲得斷層之特徵地震規模，斷層分段則用來劃分斷層破裂事件，斷層活動度之研究則可以得到斷層之長期滑移速率及古地震事件之年代及次數。由於活動斷層調查之參數均有其不確定性，考慮這些不確定性的影響，本計畫採用邏輯樹之概念，將各參數之不確定

性分別給予權重，分為斷層模型、斷層變形模型、地震發生率模型及機率模型之不確定性，依此邏輯樹劃分可以產生 480 種不同權重之事件，將這 480 個事件之權重加總後即為 1。

池上斷層根據歷史地震破裂情形可分為南段與北段，南段 33 公里，北段 32 公里，而由於池上斷層有一完整之歷史地震循環，因此可以利用 2003 年成功地震斷層面上之平均滑移量，計算近期地震累積之長期滑移速率。池上斷層以 BPT 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生地震之機率，規模 M_w 6.7~7.4 之間，機率為 36.3%，46.3%，61.5%。

池上斷層的邏輯樹可產生 12 條分支（圖 11），各分支的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 12 為特徵地震模式分布情形。整段事件得到的地震矩規模 7.1~7.4，再現週期及權重分別為 211(0.03)、122(0.03)、75(0.02)、43(0.02)；北段事件得到的再現週期及權重分別為 152(0.09)、88(0.09)、38(0.06)、22(0.06)；南段事件得到的再現週期及權重分別為 147(0.18)、86(0.18)、37(0.12)、21(0.12)。

小崗山斷層根據陳文山等人（2010）之分布圖，將小崗山斷層往北延伸，總長 31 公里，以 Poisson 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生地震之機率，規模 M_w 6.7~6.8，機率為 6.0%，9.8%，18.5%。

小崗山斷層的邏輯樹可產生 6 條分支，各分支的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 13 為小崗山斷層特徵地震模式分布情形。地震矩規模 6.7~6.8，再現週期及權重分別為 750(0.12)、566(0.36)、454(0.12)、531(0.08)、401(0.24)、322(0.08)。

五、整合觀測資料分析

整合分析部分，包括 (1) 地下水位異常；(2) 地球化學異常；(3) 井下應變儀異常；(4) 地震訊號異常之整合。整合期間含跨 2009 年整年到 2012 年 11 月間 112 個規模大於 5 的地震事件（圖 14）。分析針對井下應變儀應變及地下水及地化異常，利用時間分布列表以尋找共同事件，並同時在這些地震事件當天尋找是否伴隨長微震事件。在 112 起地震事件中，共有 13 筆規模大於 6 的地震，其中 10 起發生在東部外海，而其他則分布於南投民間(2009/11/5 $M_{6.2}$)、高雄甲仙(2010/3/4 $M_{6.4}$)、屏東霧台(2012/2/26)。規模最大的是 2009/12/19 $M_{6.9}$ 地震，發生在花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里。

在規模 6 的地震中，僅有 1 個地震同時觀測到在嘉義網和新竹網地下水位、井下應變儀、地化氣體的異常記錄（圖 15），為 2009/12/19 $M_{6.9}$ 的花蓮地震（發生在花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里）。另一起同步異常的地震 2011/3/20 發生在台東外海，規模不到 6、距離觀測網亦不近，但卻對應到異常觀測。此兩次同步異常觀測顯示地震規模、震央距離可能與異常記錄的空間廣度沒有絕對關係，或者是我們沒有足夠的同步異常統計資料來說明異常觀測和地震參數的關係。然而值得一提的是，當嘉義網在地下水位、井下應變儀、地化氣體出現同步異常的當天，亦有長微震的出現，這暗示控制了長微震訊號的機制，和控制地下水位、井下應變儀、地化氣體的異常可能相似。反應在長微震的，是在地殼深部對應力應變非常敏感的脆性塑性轉換帶之變形行為（慢速滑移），可能與淺部地殼的變形有觸發關係，然而這個觸發機制的合理與否需要深入的分析方能釐清。

在未來研究中，建議累積統計上有意義的同步異常並配合長微震目錄，以釐清可能的物理機制。要理解地震前兆異常的機制，我們必須要有足夠的統計數字。目前同步異常觀測僅反應在兩次地震上，無法提供足夠的資訊討論異常成因。然而長微震的存在，可提供未來物理模型所需，將孕震帶下方的變形視作其中一個物理機制。

此外，目前累積的異常觀測資料難以說明是同震變化還是前兆型變化。要能辨別，

必須依賴連續資料的補足，並有多方的資訊整合。目前 GPS 的連續資料解析度無法到分鐘的時間尺度，但井下應變儀、地震訊號可以做到秒的解析度，期能在未來進行更完整的比對。

參考文獻

1. 胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞、張午龍、陳卉瑄、鄭錦桐，2010，斷層活動性觀測研究第二階段—斷層監測與潛勢分析研究(2/4)。經濟部中央地質調查所研究報告 99-07 號，共 248 頁。
2. Gladwin, M.T. (1974) Ultrasonic stress monitoring in active sites: observation of the time dependence of stress relief mechanisms in mining pillars, Eos Trans. AGU, 55, 1192.
3. Gladwin M.T. (1977) Simultaneous monitoring of stress and strain in massive rock, Pageoph, 115, 267-274.
4. Gladwin, M.T. (1982) Ultrasonic stress monitoring in underground mining, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 221-228.

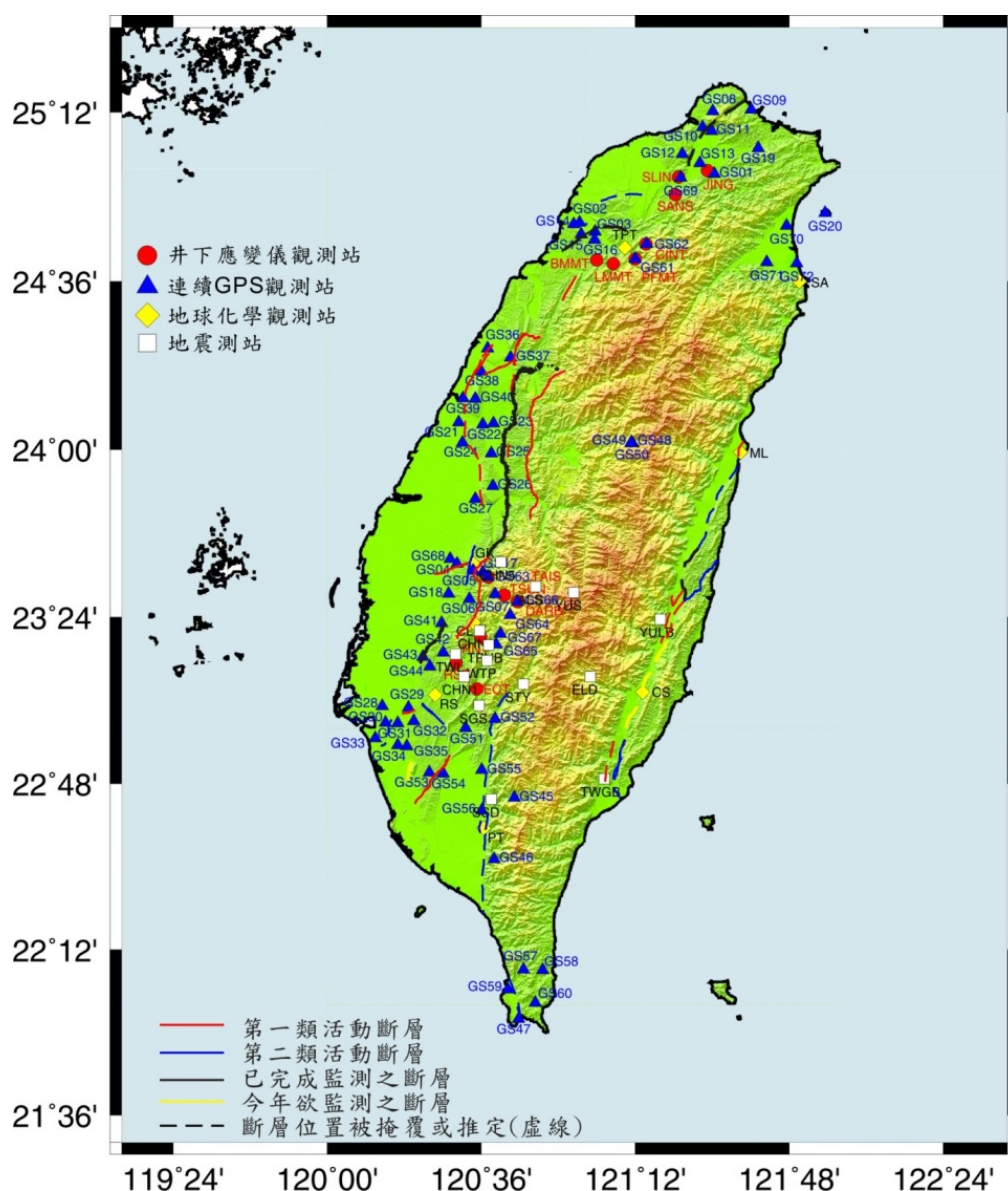


圖 1 中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀、地震測站及地球化學觀測站分

布圖。

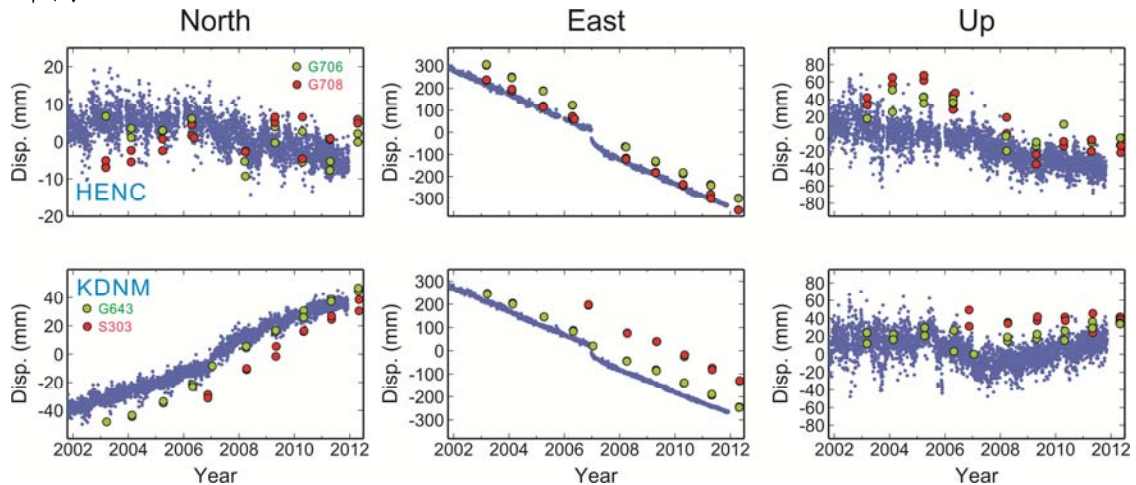


圖 2 2002-2012 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表 HENC 及 KDNM 兩連續站，黃色點位分別為移動站 G706 及 G643，紅色點位則為 G708 及 S303 之位移-時間序列分布情形。

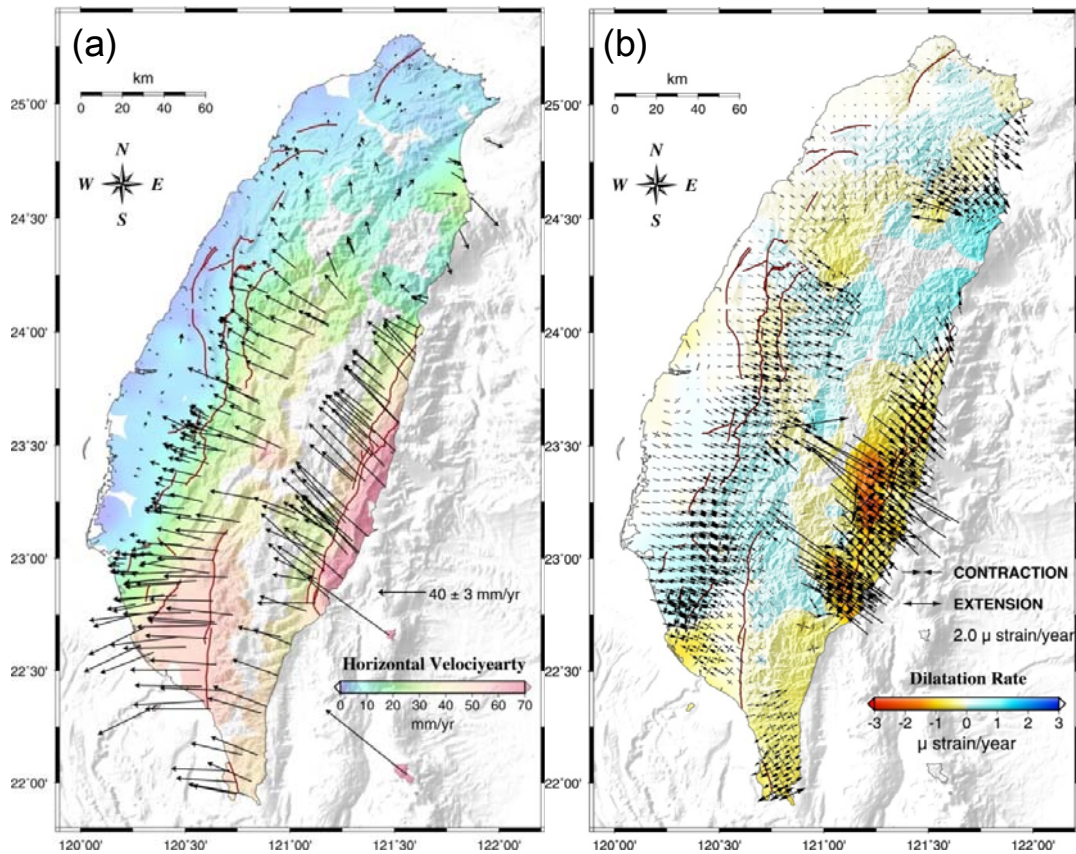


圖 3 2002-2012 年全臺灣相對於澎湖白沙站(S01R)之 GPS 連續站水平方向速度場與應變率場分布圖。(a) 水平方向速度場。(b) 應變率場分布圖。色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

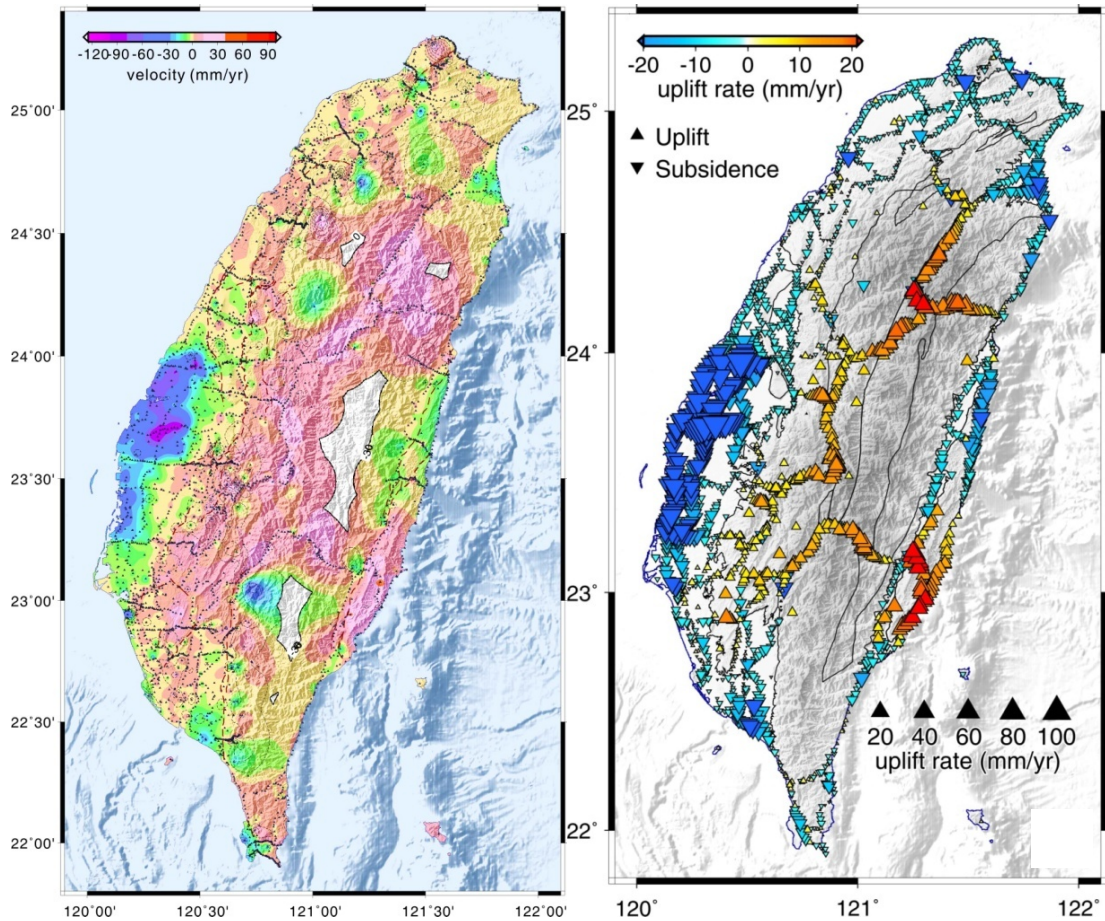
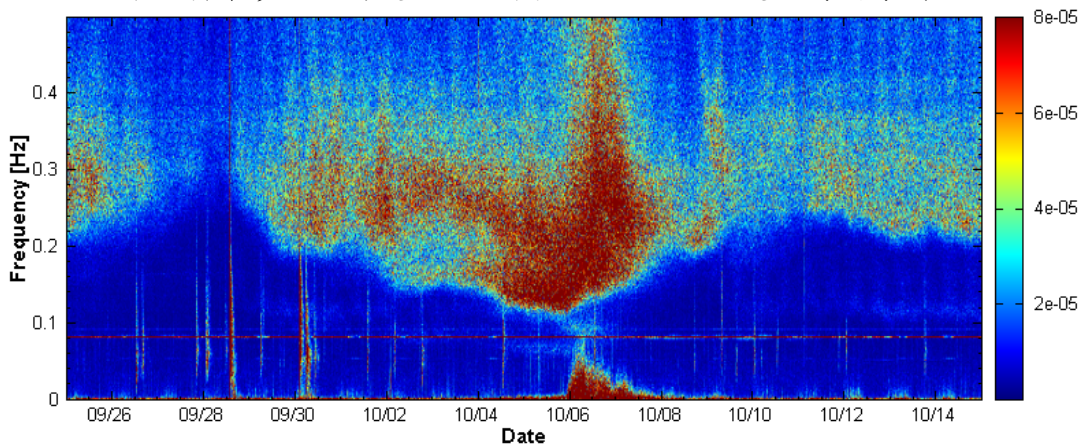
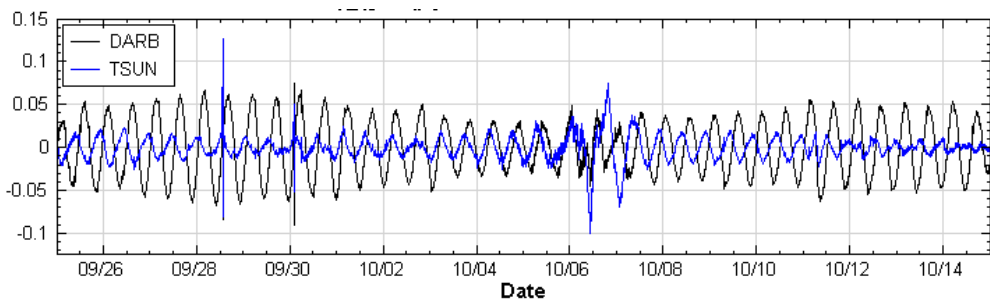
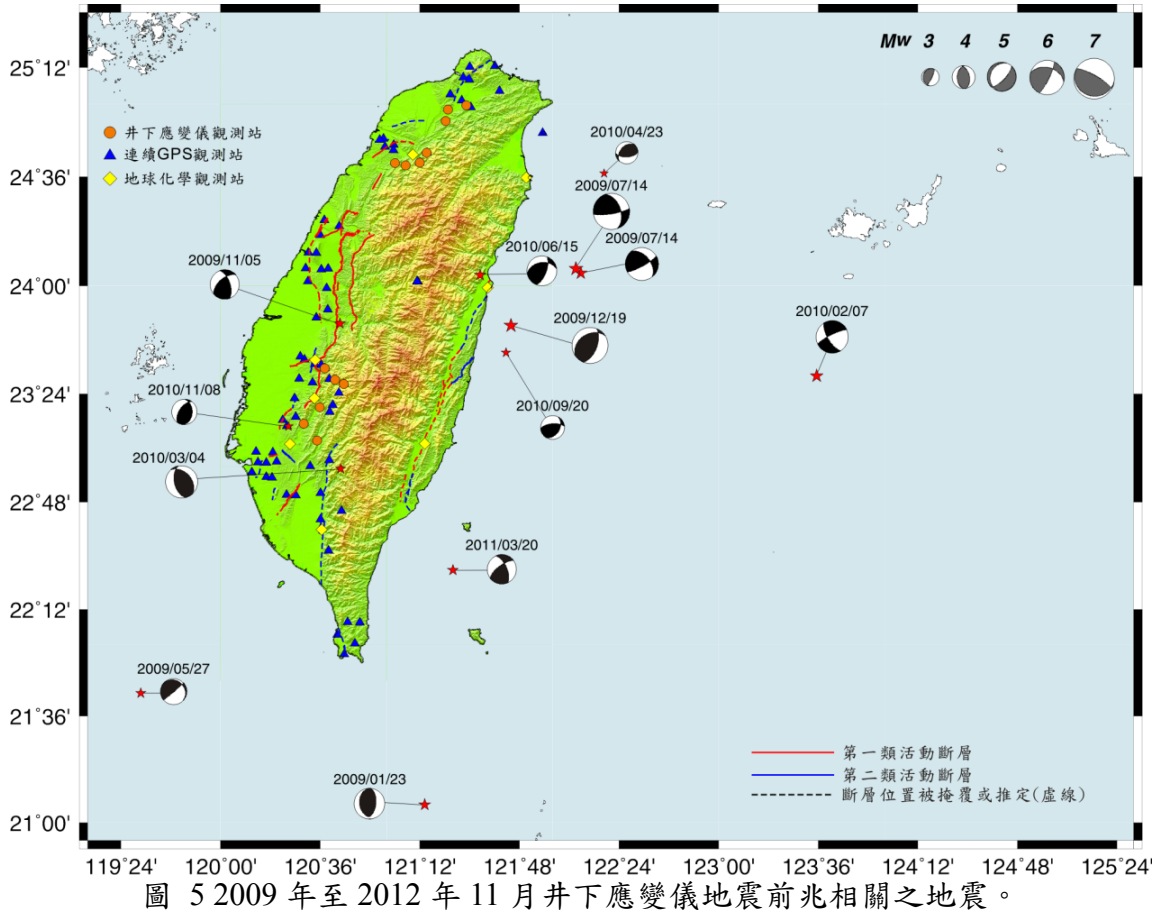


圖 4 由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。經擬合後之資料均以大陸邊緣穩定站(S01R)為參考點。左圖之色階變化顯示速度量值的大小，其結果是採用最小曲率法之內插所求得。黑色點為點位位置，黑色虛線表示各點之誤差值分布情形，其誤差值介於 10-40 mm/yr 之間。右圖的色彩變化及三角形大小反映速度量值，三角形為計算點位位置；正三角表示地表抬升，倒三角表示地表沉陷。



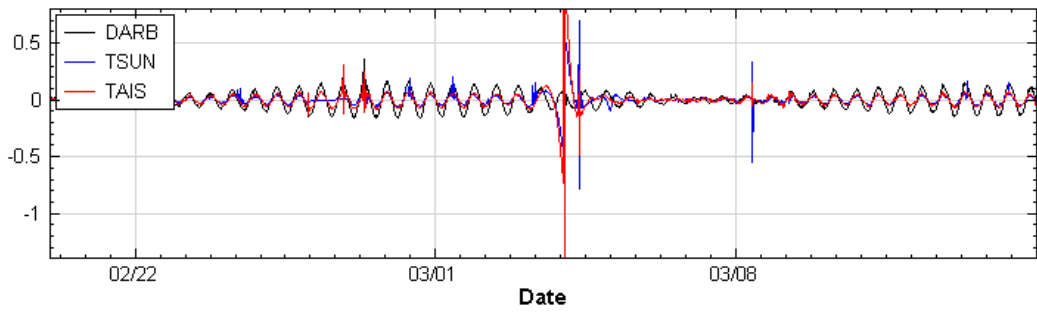


圖 8 甲仙地震前後 DARB、TSUN 與 TAIS 站面應變的時間序列。

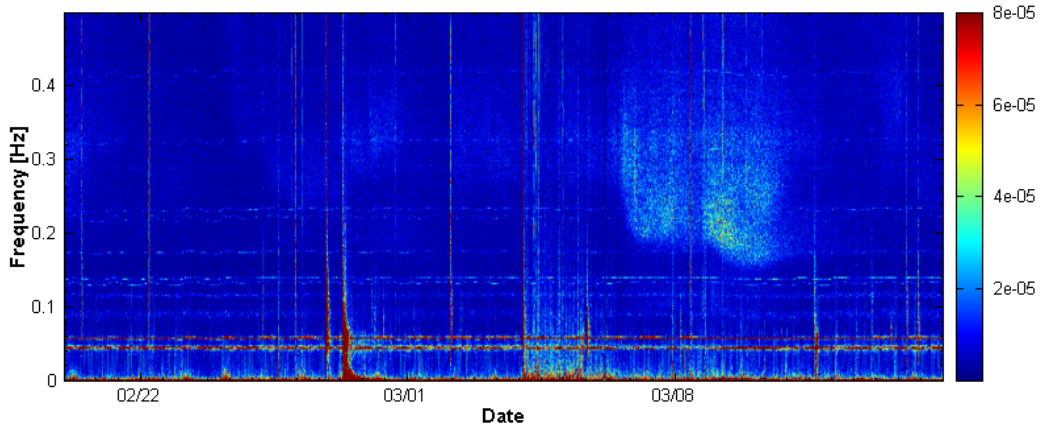


圖 9 甲仙地震前後 DARB 站面應變時頻圖。

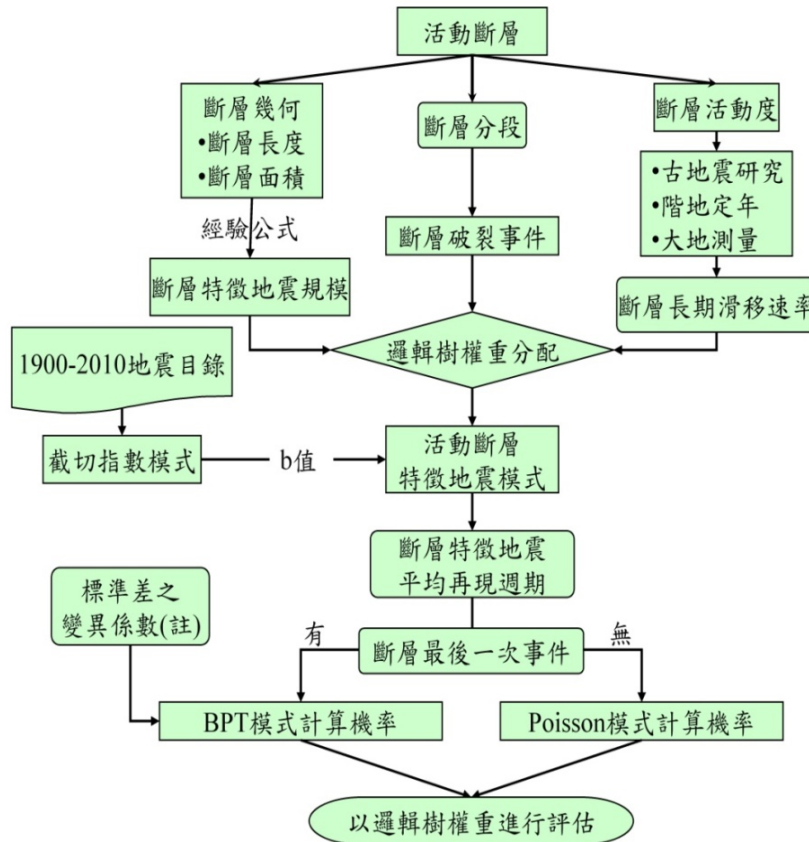


圖 10 活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。

池上斷層邏輯樹

斷層名稱	斷層破裂事件	斷層面積 (km ²)	特徵地震規模(M _W)	斷層滑移速率 (mm/yr)	統計模式
------	--------	-------------------------	-------------------------	----------------	------

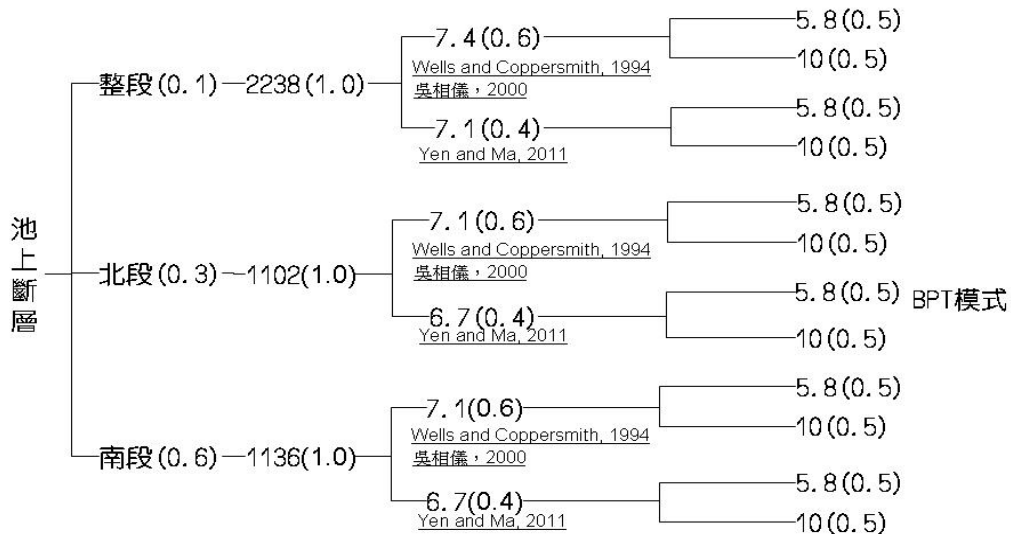


圖 11 本計畫池上斷層邏輯樹。

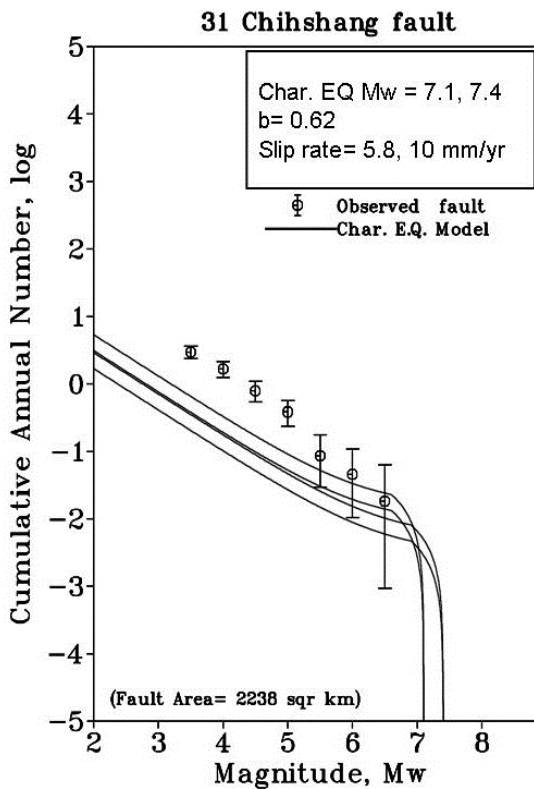


圖 12 池上斷層整段之特徵地震模式。

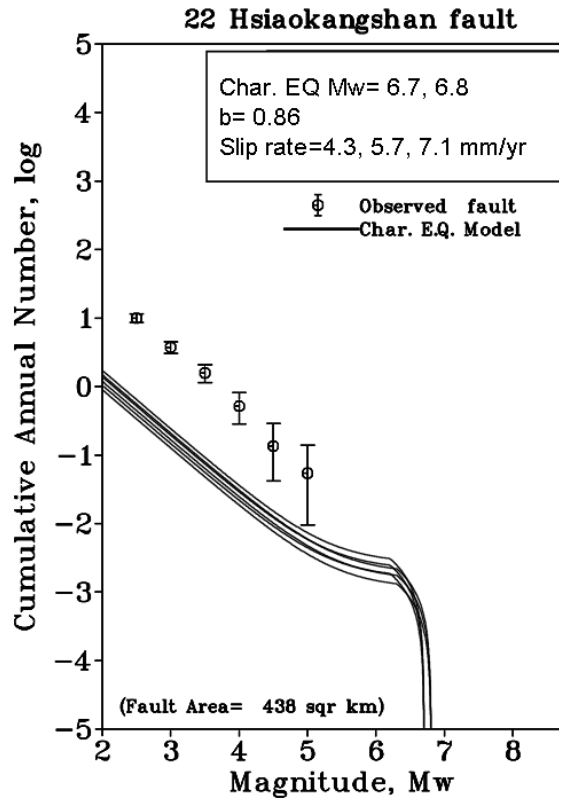


圖 13 小崗山斷層之特徵地震模式。

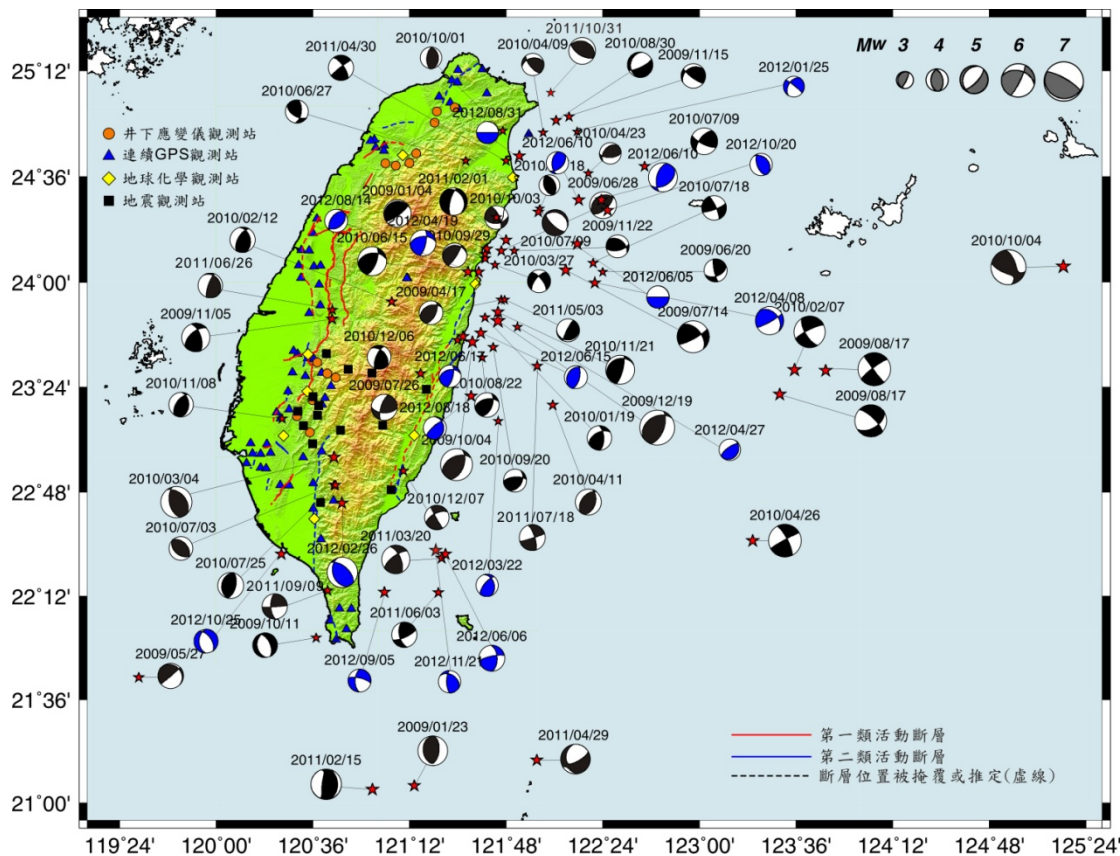


圖 14 2009 年至 2012 年 11 月規模大於 5 地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形、和黑色方形分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、GPS、地化觀測（氣體和水位）及地震觀測站。藍色海灘球為 2011 年 11 月至 2012 年 11 月規模大於 5 之地震事件。

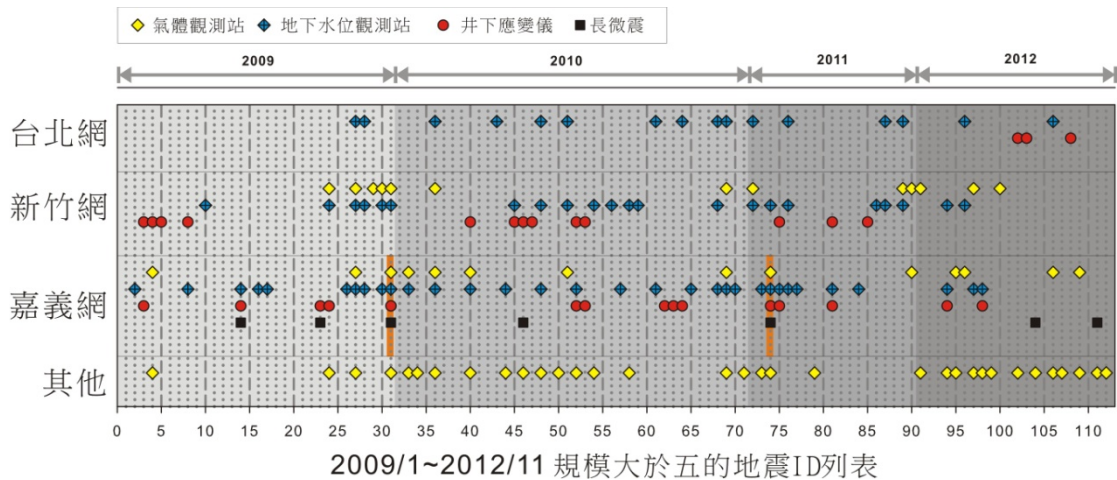


圖 15 2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID，垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。