



計畫編號：101-5226904000-01-01

經濟部中央地質調查所

101年度委託專業服務計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第二階段-
斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」
(第四年度)

全程計畫：自98年5月至101年12月止

本年度計畫：自101年1月至101年12月止



委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立臺灣大學

中華民國 101 年 12 月

計畫編號：101-5226904000-01-01

經濟部中央地質調查所
101年度委託專業服務計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第二階段-
斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」
(第四年度)

全 程 計 畫：自98年5月至101年12月止

本 年 度 計 畫：自101年1月至101年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 101 年 12 月

斷層活動性觀測研究第二階段
斷層監測與潛勢分析研究(4/4)

(第四年度)

計畫主持人：胡植慶

協同主持人：劉啟清

饒瑞鈞

研 究 員：李元希

鄭錦桐

張午龍

陳卉瑄

景國恩

唐昭榮

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 101 年 12 月

目錄

| | |
|--------------------------------------|-------|
| 表目錄 | IV |
| 圖目錄 | VI |
| 摘要 | XXI |
| ABSTRACT | XXIII |
| 第一章、緒論 | 1 |
| 1-1 計畫整體概述 | 1 |
| 1-2 100 年度工作成果 | 12 |
| 1-3 本年度工作內容概述 | 18 |
| 1-4 本年度預期成果 | 21 |
| 第二章、GPS 及精密水準測量 | 23 |
| 2-1 工作項目 | 23 |
| 2-1-1 工作進度 | 25 |
| 2-1-2 2012 年測量資料檢核 | 28 |
| 2-2 臺灣地區 GPS 連續站資料分析 | 83 |
| 2-2-1 週期性分析 | 83 |
| 2-2-2 雜訊分析 | 89 |
| 2-2-3 空間濾波技術 | 91 |
| 2-2-4 地下水位相關性分析 | 94 |
| 2-3 臺灣地區觀測及解算成果分析 | 103 |
| 2-3-1 臺灣地區 2002-2012 年 GPS 速度場 | 103 |
| 2-3-2 臺灣地區 2002-2012 年應變率場 | 104 |
| 2-3-3 臺灣地區垂直速度場 | 108 |
| 2-4 台灣地區地表變形分析 | 117 |
| 2-4-1 北部地區變形特性 | 117 |
| 2-4-2 西北部地區變形特性 | 122 |
| 2-4-3 中部地區變形特性 | 129 |
| 2-4-4 嘉南地區變形特性 | 137 |
| 2-4-5 高屏地區變形特性 | 150 |
| 2-4-6 恆春半島地區變形特性 | 163 |
| 2-4-7 東部地區變形特性 | 166 |
| 2-4-8 宜蘭地區變形特性 | 174 |
| 第三章、井下應變儀之研究方法與成果 | 181 |

| | | |
|--------------------|-------------------------------|-----|
| 3-1 | 井下應變儀資料處理 | 181 |
| 3-1-1 | LEVEL-0 | 184 |
| 3-1-2 | LEVEL-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正 | 186 |
| 3-1-3 | LEVEL-2：包含正確原始面積應變、剪應變 | 193 |
| 3-1-4 | 井孔回復效應與水泥膨脹效應的估算與濾除 | 200 |
| 3-1-5 | 資料完整性測試 | 212 |
| 3-2 | 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷 | 218 |
| 3-2-1 | 影響應變儀資料變化的因素 | 218 |
| 3-2-2 | 檢視井下應變儀資料中異常事件 | 227 |
| 3-3 | 井下應變儀資料管理系統網站 | 237 |
| 3-3-1 | 資料庫更新 | 237 |
| 3-3-2 | 時頻圖繪製 | 244 |
| 3-3-3 | 時頻圖分析案例 | 246 |
| 3-4 | 井下應變儀相關建議事項 | 249 |
| 第四章、斷層活動潛勢分析 | | 257 |
| 4-1 | 前言 | 257 |
| 4-2 | 分析流程 | 257 |
| 4-2-1 | 活動斷層調查與參數蒐集 | 257 |
| 4-2-2 | 活動斷層潛勢評估流程 | 263 |
| 4-2-3 | 活動斷層邏輯樹建立之規劃及方向 | 268 |
| 4-3 | 池上斷層發生機率潛勢評估 | 284 |
| 4-3-1 | 池上斷層參數蒐集 | 284 |
| 4-3-2 | 池上斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 | 291 |
| 4-3-3 | 池上斷層特徵地震模式 | 294 |
| 4-3-4 | 池上斷層發生機率評估 | 296 |
| 4-4 | 小崗山斷層發生機率潛勢評估 | 298 |
| 4-4-1 | 小崗山斷層參數蒐集 | 298 |
| 4-4-2 | 小崗山斷層破裂模式及邏輯數權重分配 | 305 |
| 4-4-3 | 小崗山斷層特徵地震模式 | 305 |
| 4-4-4 | 小崗山斷層發生機率評估 | 307 |
| 第五章、整合觀測資料分析 | | 309 |
| 5-1 | 異常記錄與大地震活動之關係 | 309 |
| 5-2 | 長微震事件資料庫建置 | 314 |
| 5-2-1 | 與規模五地震之比對 | 314 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 5-2-2 2011 年長微震目錄 | 314 |
| 第六章、結論與建議 | 317 |
| 參考文獻 | 321 |
| 2012/04/10 專家諮詢會議(一) | 341 |
| 2012/08/15 專家諮詢會議(二) | 347 |
| 2012/10/22 專家諮詢會議(三) | 355 |
| 委員審查意見 | 361 |
| | |
| 附錄 A GPS 資料檢核成果 | |
| 附錄 B 精密水準測量資料檢算成果 | |
| 附錄 C 應變率計算方法 | |
| 附錄 D 井下應變儀儀器原理 | |
| 附錄 E 井下應變儀觀測站觀測系統校正與檢修完工報告書 | |
| 附錄 F 時間序列資料分析 | |
| 附錄 G 斷層滑移速率 | |
| 附錄 H 活動斷層幾何特性和地震矩規模 | |
| 附錄 I 活動斷層特徵地震模式 | |
| 附錄 J 機率密度函數 | |
| 附錄 K 去除前餘震說明 | |
| 附錄 L 斷層活動潛勢分析專家諮詢會議 | |
| 2012/04/10 專家諮詢會議(一) | |
| 2012/08/15 專家諮詢會議(二) | |
| 2012/10/22 專家諮詢會議(三) | |
| 附錄 M 委員審查意見 | |

表目錄

| | |
|--|-------|
| 表 A：本年度預期進度甘梯圖(GANTT CHART)。 | XV |
| 表 B：預期進度查核點(CHECK POINT)。 | XVI |
| 表 C：全程計畫預期進度甘梯圖。 | XVIII |
| 表 D：期末須交付之各項工作項目。 | XIX |
| 表 1.1：中央地質調查所建置的 72 個連續 GPS 追蹤站資料接收起始時間表。 | 7 |
| 表 1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。 | 9 |
| 表 1.3：地球化學觀測站資料接收起始時間表。 | 10 |
| 表 2.1：GPS 測量進度表。 | 23 |
| 表 2.2：水準測線測量進度表。 | 24 |
| 表 2.2：水準測線測量進度表(續)。 | 25 |
| 表 2.3：2012 年度新增精密水準點位。 | 27 |
| 表 2.4：空間濾波前後之 WRMS 值列表。 | 93 |
| 表 2.5：空間濾波前後之頻譜指數變化表。 | 93 |
| 表 2.6：利用 GPS 高程與地下水位計算 ELASTIC STORAGE COEFFICIENTS 之成果。 | 99 |
| 表 2.7：GPS 觀測站與地下水位站共點一覽表。 | 101 |
| 表 2.7：GPS 觀測站與地下水位站共點一覽表(續)。 | 102 |
| 表 3.1：井下應變儀測站的經緯度與資料日期。 | 182 |
| 表 3.2：井下應變儀測站的安裝日期、儀器與各分量的方位角。 | 183 |
| 表 3.3：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。 | 225 |
| 表 4.1：活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式。 | 260 |
| 表 4.2：斷層分段型式、特徵及可能性。[McCALPIN, 1996]。 | 272 |
| 表 4.3：美國 WG07 斷層參數表。[摘錄自 WG07, 2008]。 | 273 |
| 表 4.4：車籠埔斷層垂直滑移速率。[摘錄自 CHEN ET AL., 2003]。 | 280 |
| 表 4.5：車籠埔斷層長期滑移速率彙整。 | 282 |
| 表 4.6：本計畫參考 CHENG ET AL., 2009 設定池上斷層之深度與傾角。 | 287 |
| 表 4.7：池上斷層參數表。 | 289 |
| 表 4.8：池上斷層整段以 BPT 模式評估之發生機率。 | 296 |
| 表 4.9：池上斷層北段以 BPT 模式評估之發生機率。 | 296 |
| 表 4.10：池上斷層南段以 BPT 模式評估之發生機率。 | 297 |
| 表 4.11：池上斷層發生機率評估。 | 297 |
| 表 4.12：小崗山斷層參數表。 | 303 |
| 表 4.13：小崗山斷層以 POISSON 模式評估之發生機率。 | 307 |

| | |
|--|-----|
| 表 5.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件列表。 | 309 |
|--|-----|

圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 1.1：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。..... | 6 |
| 圖 1.2：A.全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。B. 全臺灣應變率場分布圖。 12 | |
| 圖 1.3：五股至臺北測線水準垂直速度圖。 | 12 |
| 圖 1.4：1995-2010 年間相對於 S01R 之速度場。 | 13 |
| 圖 1.5：2009 年至 2011 年 10 月井下應變儀地震前兆相關之地震。 | 15 |
| 圖 1.6：嘉義測網的井下應變儀於 2010 年 3 月 4 日甲仙地震期間的面應變時間序列。 | 15 |
| 圖 1.7：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 | 17 |
| 圖 1.8：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。 | 17 |
| 圖 1.9：地質調查所設置的 72 個連續觀測站與其它單位交換 128 個連續觀測站分布圖。 | 19 |
| 圖 1.10：2002 年 3 月至 2012 年 11 月 GPS 移動站及水準測線分布與施測次數圖。 | 20 |
| 圖 2.1：2012 年度新增點位分布圖。 | 26 |
| 圖 2.2：2002-2011 年及 2012 年 GPS 點位坐標殘差分布圖。 | 29 |
| 圖 2.3：2002-2011 年及 2012 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 | 29 |
| 圖 2.4：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 | 30 |
| 圖 2.5：2002-2012 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。 | 30 |
| 圖 2.6：精密水準測量結果分析圖。 | 31 |
| 圖 2.7：台 2_石門至萬里測線水準垂直速度圖。 | 33 |
| 圖 2.8：士林至三芝測線水準垂直速度圖。 | 34 |
| 圖 2.9：淡水至士林測線水準垂直速度圖。 | 35 |
| 圖 2.10：五股至臺北測線水準垂直速度圖。 | 37 |
| 圖 2.11：縣 115_新屋至童話世界測線水準垂直速度圖。 | 38 |
| 圖 2.12：縣 122_新竹至五峰測線水準垂直速度圖。 | 39 |
| 圖 2.13：縣 117_新竹至峨眉測線水準垂直速度圖。 | 40 |
| 圖 2.14：苗栗至南庄測線水準垂直速度圖。 | 42 |
| 圖 2.15：縣 132_大安至東勢測線水準垂直速度圖。 | 43 |
| 圖 2.16：縣 136_龍井至太平測線水準垂直速度圖。 | 44 |
| 圖 2.17：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準垂直速度圖。 | 46 |
| 圖 2.18：縣 150-台 16_北斗至水里測線水準垂直速度圖。 | 47 |
| 圖 2.19：縣 164_金湖至瑞峰測線水準垂直速度圖。 | 48 |
| 圖 2.20：縣 174_北門至楠西測線水準垂直速度圖。 | 50 |
| 圖 2.21：台 19 甲_善化至關廟測線水準垂直速度圖。 | 51 |

| | |
|--|----|
| 圖 2.22：縣 182_安平至龍崎測線水準垂直速度圖。 | 52 |
| 圖 2.23：台 28_路竹至茂林主副線水準垂直速度圖。 | 54 |
| 圖 2.24：台 22_岡山至安坡測線水準垂直速度圖。 | 55 |
| 圖 2.25：佳冬至七佳測線水準垂直速度圖。 | 57 |
| 圖 2.26：恆春西台地至佳樂水測線水準垂直速度圖。 | 58 |
| 圖 2.27：台 26_恆春至鵝鑾鼻主副線水準垂直速度圖。 | 59 |
| 圖 2.28：嶺頂至瀧澗測線水準垂直速度圖。 | 61 |
| 圖 2.29：豐濱至光復測線水準垂直速度圖。 | 62 |
| 圖 2.30：靜浦至紅葉測線水準垂直速度圖。 | 63 |
| 圖 2.31：富岡至東成測線水準垂直速度圖。 | 64 |
| 圖 2.32：台 2_梗枋至東澳測線水準垂直速度圖。 | 65 |
| 圖 2.33：臺北盆地信義短測線分布圖。 | 66 |
| 圖 2.34：臺北盆地信義短測線水準垂直變化圖。 | 67 |
| 圖 2.35：中部跨車籠埔斷層短測線分布圖。 | 68 |
| 圖 2.36：五光至黃竹短測線水準垂直變化圖。 | 69 |
| 圖 2.37：曾厝至霧峰短測線水準垂直變化圖。 | 70 |
| 圖 2.38：北勢至峰谷短測線水準垂直變化圖。 | 71 |
| 圖 2.39：烏溪南岸短測線水準垂直變化圖。 | 72 |
| 圖 2.40：中興新村短測線水準垂直變化圖。 | 73 |
| 圖 2.41：跨梅山斷層短測線分布圖。 | 74 |
| 圖 2.42：B003-B092 短測線水準垂直變化圖。 | 75 |
| 圖 2.43：B036-B086 短測線水準垂直變化圖。 | 76 |
| 圖 2.44：B087-B080 短測線水準垂直變化圖。 | 77 |
| 圖 2.45：B002-B059 短測線水準垂直變化圖。 | 78 |
| 圖 2.46：B110-B101 短測線水準垂直變化圖。 | 79 |
| 圖 2.47：B037-B095 短測線水準垂直變化圖。 | 80 |
| 圖 2.48：G088-G330 短測線水準垂直變化圖。 | 81 |
| 圖 2.49：每日坐標解之時間序列經處理成殘差 (RESIDUAL) 之示意圖。 | 83 |
| 圖 2.50：GS01-GS44 年週期性之三方向振幅與相位統計圖。 | 84 |
| 圖 2.51：GS01-GS44 半年週期性之三方向振幅與相位統計圖。 | 85 |
| 圖 2.52：GS01-GS44 年週期性之南北方向振幅與相位分布圖。 | 86 |
| 圖 2.53：GS01-GS44 年週期性之東西方向振幅與相位分布圖。 | 87 |
| 圖 2.54：GS01-GS44 年週期性之高程方向振幅與相位分布圖。 | 88 |
| 圖 2.55：GS01-GS44 之整數頻譜指數之雜訊分析結果。 | 90 |

| | |
|---|-----|
| 圖 2.56：GS01-GS44 之實數頻譜指數之雜訊分析結果。 | 90 |
| 圖 2.57：站距與三方向時間序列殘差相關性統計圖。 | 92 |
| 圖 2.58：空間濾波前後之時間序列成果圖。 | 92 |
| 圖 2.59：臺灣西部及北部平原 GPS 連續站之年週期訊號分布圖。 | 95 |
| 圖 2.60：屏東平原之連續站、雨量站及地下水位站之分布圖。 | 96 |
| 圖 2.61：NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。 | 96 |
| 圖 2.62：屏東平原高程向 GPS 時間序列。 | 97 |
| 圖 2.63：屏東平原南北向 GPS 時間序列。 | 97 |
| 圖 2.64：屏東平原東西向 GPS 時間序列。 | 98 |
| 圖 2.65：GPS 站與地下水位站分布圖。 | 100 |
| 圖 2.66：GPS 高程向時間序列與地下水位時間序列之關係圖。 | 102 |
| 圖 2.67：全臺灣相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 移動站水平方向速度場。 | 105 |
| 圖 2.68：全臺灣相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 連續站水平方向速度場。 | 106 |
| 圖 2.69：全臺灣應變率場分布圖。 | 107 |
| 圖 2.70：(A) 內政部水準相對基隆 (K999) 之垂直速度場 (2002-2008)。(B) 本計畫水準相對各測線最西側點位之垂直方向速度場 (2002-2012)。 | 110 |
| 圖 2.71：本計畫水準利用各測線中與內政部一、二級水準聯測點位間之速度差，以平差方式平移後得到相對基隆 (K999) 之垂直方向速度場 (2002-2012)。 | 111 |
| 圖 2.72：臺灣地區相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 垂直方向速度場 (2002-2012)。 | 112 |
| 圖 2.73：GPS 站之坐標時間序列及修正。 | 113 |
| 圖 2.74：TWVD2001 的一、二級水準測線及 GPS 連續站的空間分布。 | 114 |
| 圖 2.75：由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。 | 115 |
| 圖 2.76：利用數值塊體模型，模擬斷層的活動與地殼塊體的旋轉造成地表一系列的變形，從模擬結果顯示在臺灣北部地區有區域性順時針旋轉 (右移運動) 的現象，而在西北部地區有區域性逆時針旋轉 (左移運動) 的現象[CHING ET AL., 2011]。 | 118 |
| 圖 2.77：臺北地區 A 剖面速度分布圖。 | 120 |
| 圖 2.78：臺北地區 B 剖面速度分布圖。 | 121 |
| 圖 2.79：利用古應力軸分布及大地構造幾何型態，分析臺灣北部及西北部地區的斷層活動型態，從分析結果顯示在臺灣西北部地區古近紀的正斷層已經反轉再活動為帶右移滑移分量的逆斷層的現象 [LACOMBE ET AL., 2003]。 | 123 |
| 圖 2.80：桃竹苗地區 C 剖面速度分布圖。 | 126 |
| 圖 2.81：桃竹苗地區 D 剖面速度分布圖。 | 127 |
| 圖 2.82：桃竹苗地區 E 剖面速度分布圖。 | 128 |
| 圖 2.83：中部地區 F 剖面速度分布圖。 | 133 |

| | |
|---|-----|
| 圖 2.84：中部地區 G 剖面速度分布圖。 | 134 |
| 圖 2.85：中部地區 H 剖面速度分布圖。 | 135 |
| 圖 2.86：中部地區 GPS 水平速度場與縣 148_王功至草屯、縣 150_北斗至水里水準測線分布圖。 | 136 |
| 圖 2.87：縣道 150_北斗至水里斷層模擬結果。 | 136 |
| 圖 2.88：嘉南地區 I 剖面速度分布圖。 | 144 |
| 圖 2.89：嘉南地區 J 剖面速度分布圖。 | 145 |
| 圖 2.90：嘉南地區 K 剖面速度分布圖。 | 146 |
| 圖 2.91：嘉南地區 GPS 水平速度場與縣 174_北門至楠西水準測線分布圖。 | 147 |
| 圖 2.92：縣 174_北門至楠西測線水準與 GPS 垂直速度比較圖。 | 148 |
| 圖 2.93：二維彈性斷層模型示意圖。 | 149 |
| 圖 2.94：斷層模擬結果。 | 149 |
| 圖 2.95：西南地區 L 剖面速度分布圖。 | 156 |
| 圖 2.96：西南地區 M1 剖面速度分布圖。 | 157 |
| 圖 2.97：西南地區 M2 剖面速度分布圖。 | 158 |
| 圖 2.98：西南地區 N 剖面速度分布圖。 | 159 |
| 圖 2.99：本研究使用之測站分布圖。 | 160 |
| 圖 2.100：相對於澎湖白沙測站 S01R 之 GPS 水平速度場。 | 160 |
| 圖 2.101：相對於澎湖白沙測站 S01R 之垂直速度場。 | 161 |
| 圖 2.102：AA'速度剖面圖。 | 161 |
| 圖 2.103：沿 BB'速度剖面圖。 | 162 |
| 圖 2.104：恆春半島地區 O 剖面速度分布圖。 | 165 |
| 圖 2.105：東部地區 P 剖面速度分布圖。 | 170 |
| 圖 2.106：東部地區 Q 剖面速度分布圖。 | 171 |
| 圖 2.107：東部地區 R 剖面速度分布圖。 | 172 |
| 圖 2.108：東部地區 S 剖面速度分布圖。 | 173 |
| 圖 2.109：宜蘭區域地質圖。 | 175 |
| 圖 2.110：宜蘭平原南北向之地下構造圖。 | 176 |
| 圖 2.111：宜蘭平原上斷層之分布。 | 176 |
| 圖 2.112：宜蘭地區 T 剖面速度分布圖。 | 178 |
| 圖 3.1：瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料之異常狀況。 | 185 |
| 圖 3.2：新樂國小(CINT)的 CH0 資料異常情況。 | 185 |
| 圖 3.3：曾文水庫南測站應變分量。 | 187 |
| 圖 3.4：曾文水庫北測站應變分量。 | 187 |
| 圖 3.5：甲仙十八灣測站應變分量。 | 188 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 圖 3.6：梅花國小測站應變分量。 | 188 |
| 圖 3.7：大坪國小測站應變分量。 | 189 |
| 圖 3.8：中興國小測站應變分量。 | 189 |
| 圖 3.9：太興國小測站應變分量。 | 190 |
| 圖 3.10：新樂國小測站應變分量。 | 190 |
| 圖 3.11：達邦測站應變分量。 | 191 |
| 圖 3.12：錦和國小測站應變分量。 | 191 |
| 圖 3.13：明德中學測站應變分量。 | 192 |
| 圖 3.14：樹林觀測站應變分量。 | 192 |
| 圖 3.15：曾文水庫南測站應變方向。 | 194 |
| 圖 3.16：曾文水庫北測站應變方向。 | 194 |
| 圖 3.17：甲仙十八灣測站應變方向。 | 195 |
| 圖 3.18：梅花國小測站應變方向。 | 195 |
| 圖 3.19：大坪國小測站應變方向。 | 196 |
| 圖 3.20：中興國小測站應變方向。 | 196 |
| 圖 3.21：太興國小測站應變方向。 | 197 |
| 圖 3.22：新樂國小測站應變方向。 | 197 |
| 圖 3.23：達邦國小測站應變方向。 | 198 |
| 圖 3.24：錦和國小測站應變方向。 | 198 |
| 圖 3.25：明德中學測站應變方向。 | 199 |
| 圖 3.26：樹林測站應變方向。 | 199 |
| 圖 3.27：曾文水庫南測站原始面應變與模式修正。 | 200 |
| 圖 3.28：曾文水庫北測站原始面應變與模式修正。 | 201 |
| 圖 3.29：甲仙十八灣測站原始面應變與模式修正。 | 202 |
| 圖 3.30：梅花國小測站原始面應變與模式修正。 | 203 |
| 圖 3.31：大坪國小測站原始面應變與模式修正。 | 204 |
| 圖 3.32：中興國小測站原始面應變與模式修正。 | 205 |
| 圖 3.33：太興國小測站原始面應變與模式修正。 | 206 |
| 圖 3.34：新樂國小測站原始面應變與模式修正。 | 207 |
| 圖 3.35：達邦測站原始面應變與模式修正。 | 208 |
| 圖 3.36：錦和國小測站原始面應變與模式修正。 | 209 |
| 圖 3.37：明德國中測站原始面應變與模式修正。 | 210 |
| 圖 3.38：樹林測站原始面應變與模式修正。 | 211 |
| 圖 3.39：曾文水庫南測站的比較檢核。 | 212 |





























































































| | |
|---|-----|
| 圖 3.40：曾文水庫北測站的比較檢核。 | 213 |
| 圖 3.41：梅花國小測站的比較檢核。 | 213 |
| 圖 3.42：大坪國小測站的比較檢核。 | 214 |
| 圖 3.43：中興國小測站的比較檢核。 | 214 |
| 圖 3.44：太興國小測站的比較檢核。 | 215 |
| 圖 3.45：新樂國小測站的比較檢核。 | 215 |
| 圖 3.46：達邦測站的比較檢核。 | 216 |
| 圖 3.47：錦和國小測站的比較檢核。 | 216 |
| 圖 3.48：明德中學測站的比較檢核。 | 217 |
| 圖 3.49：樹林測站的比較檢核。 | 217 |
| 圖 3.50：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。 | 219 |
| 圖 3.51：井下應變儀中地潮分量的評估。 | 219 |
| 圖 3.52：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。 | 220 |
| 圖 3.53：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小地下水位持續下降。 | 220 |
| 圖 3.54：台北地區地下水各測站水位資料。 | 220 |
| 圖 3.55：台北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。 | 221 |
| 圖 3.56：嘉義網達邦站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 | 223 |
| 圖 3.57：嘉義網中興站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 | 223 |
| 圖 3.58：嘉義網太興站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 | 223 |
| 圖 3.59：台北網錦和站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 | 224 |
| 圖 3.60：台北網明德站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 | 224 |
| 圖 3.61：台北網樹林站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 | 224 |
| 圖 3.62：2009 年至 2012 年 11 月井下應變儀地震前兆相關之地震。 | 227 |
| 圖 3.63：2012 年 2 月 26 日規模 6.4，屏東霧台地震。 | 228 |
| 圖 3.64：2012 年 4 月 27 日規模 5.0，台灣東部海域地震。 | 229 |
| 圖 3.65：2012 年 6 月 10 日規模 6.5，宜蘭東部海域地震。 | 229 |
| 圖 3.66：2012 年 6 月中旬新竹尖石鄉地震群位置圖。 | 232 |
| 圖 3.67：梅花國小測站(PFMT)2012 年至六月間的降雨與應變資料(已去除氣壓與地潮)。 | 233 |
| 圖 3.68：新樂國小測站(CINT)2011 年 10 月至 2012 年 6 月間的降雨與應變資料(已去除氣壓與地潮)。 | 234 |
| 圖 3.69：2012 年 6 月 15 日規模 6.5 與 6 月 17 日規模 5.0，花蓮豐濱鄉地震於地震前的應變資料。 | 235 |
| 圖 3.70：2012 年 8 月 31 日規模 5.0，苗栗縣竹南鎮地震前台北網的應變資料。 | 236 |
| 圖 3.71：科羅莎颱風前後應變的時間序列。 | 246 |
| 圖 3.72：TSUN 科羅莎颱風前後應變時頻圖。 | 246 |

| | |
|--|-----|
| 圖 3.73：DARB 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。 | 247 |
| 圖 3.74：甲仙地震前後面應變的時間序列。 | 247 |
| 圖 3.75：甲仙地震前後 DARB 面應變時頻圖。 | 248 |
| 圖 3.76：甲仙地震前後 TSUN 面應變時頻圖。 | 248 |
| 圖 3.77：甲仙地震前後 TAIS 面應變時頻圖。 | 248 |
| 圖 3.78：2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間降雨資料比對。 | 251 |
| 圖 3.79：井下應變儀中的原始氣壓記錄。 | 252 |
| 圖 3.80：氣象局屬自計站氣壓記錄。 | 253 |
| 圖 3.81：各相同地區內井下應變儀訊號中地潮振幅之比較。 | 254 |
| 圖 4.1：斷層幾何參數示意圖。 | 261 |
| 圖 4.2：斷層分段分布圖。 | 261 |
| 圖 4.3：由斷層分區建立斷層破裂模式。 | 262 |
| 圖 4.4：間震期之變形模式即為剛體運動剪去彈性錯位變形， $\text{SLIP DEFICIT} = \text{剛體運動 (BLOCK MOTION)} - \text{間震變形 (ASEISMIC DISPLACEMENT)}$ 。 | 262 |
| 圖 4.5：活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖。 | 265 |
| 圖 4.6：活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。 | 266 |
| 圖 4.7：加州地區地震潛勢評估邏輯樹。 | 266 |
| 圖 4.8：WG02 模式評估示意圖。 | 267 |
| 圖 4.9：斷層破裂面積示意圖。 | 267 |
| 圖 4.10：機率密度函數分布圖。 | 268 |
| 圖 4.11：計算震度 6 級以上之區域機率理論。 | 268 |
| 圖 4.12：鄭錦桐劃設之 PSHA 處理參數與模式不確定性的邏輯樹架構。 | 271 |
| 圖 4.13：WASATCH FAULT 之邏輯樹架構。 | 271 |
| 圖 4.14：日本斷層參數之斷層分段準則。 | 272 |
| 圖 4.15：車籠埔斷層地貌及槽溝分布圖。 | 274 |
| 圖 4.16：車籠埔斷層之古地震槽溝之比較。 | 274 |
| 圖 4.17：台灣造山帶剖面以及 921 集集地震之震源機制解。 | 275 |
| 圖 4.18：車籠埔斷層霧峰仙宮廟槽溝上下盤的淺層鑽探結果。 | 276 |
| 圖 4.19：中台灣區域地質圖以及平衡剖面位置圖。 | 276 |
| 圖 4.20：車籠埔斷層沿線之平衡剖面。評估車籠埔斷層之傾角約 27~39 度。 | 277 |
| 圖 4.21：將 YANG ET AL. [2007] 之車籠埔斷層等深線數化建立之斷層面。 | 277 |
| 圖 4.22：左圖為深部反射震測剖面之平面分布圖。 | 277 |
| 圖 4.23：濁水溪震測剖面之重新解釋以及同震變位之 GPS 向量投影。 | 278 |
| 圖 4.24：2001 年度記錄 $M_L > 1$ 之地震深度-頻率分布。 | 278 |

| | |
|--|-----|
| 圖 4.25：車籠埔斷層階地採樣點之地形剖面。..... | 279 |
| 圖 4.26：(A) 霧峰鳳梨園槽溝之描繪 (B) 槽溝之解釋及採樣點。..... | 280 |
| 圖 4.27：車籠埔斷層同震累積變形量 (Y) 與地震時距 (X) 的回歸線性方程式。..... | 280 |
| 圖 4.28：車籠埔斷層之破裂模式及權重分配。..... | 281 |
| 圖 4.29：車籠埔斷層邏輯樹。..... | 283 |
| 圖 4.30：池上斷層位置分布圖。..... | 285 |
| 圖 4.31：富里富池橋東方驚溪露頭照片。..... | 286 |
| 圖 4.32：2003 年成功地震地震系列分布圖。..... | 286 |
| 圖 4.33：根據成功地震建立之池上斷層三維幾何面模型。..... | 287 |
| 圖 4.34：本計畫建置池上斷層三維幾何面。..... | 287 |
| 圖 4.35：將圖 4.14 之 GPS 位移速度場投影到 PROFILE A 方向之速度變化。GPS 位移速度場是相對於澎湖白沙站 (S01R)。..... | 288 |
| 圖 4.36：池上鄉錦園村的萬安一號槽溝北牆。..... | 288 |
| 圖 4.37：錦園三號槽溝，2003 年成功地震造成地表垂直錯移量約 10 公分。..... | 288 |
| 圖 4.38：(A)1951 年玉里池上地震地表破裂及主要地質構造圖。(B)1951 年花蓮-台東系列地震主震之時空分布。..... | 292 |
| 圖 4.39：本計畫池上斷層分段破裂模式。..... | 292 |
| 圖 4.40：模擬 2003 年成功地震同震時斷層面之滑移量分布。..... | 293 |
| 圖 4.41：模擬 2003 年成功地震同震時斷層面之滑移量分布。..... | 293 |
| 圖 4.42：本計畫池上斷層邏輯樹。..... | 294 |
| 圖 4.43：整段之特徵地震模式。..... | 295 |
| 圖 4.44：北段之特徵地震模式。..... | 295 |
| 圖 4.45：南段之特徵地震模式。..... | 295 |
| 圖 4.46：小崗山斷層條帶地質圖。..... | 299 |
| 圖 4.47：台南-高雄平原活動構造圖。..... | 300 |
| 圖 4.48：鑽井柵狀剖面，地層對比與沉積環境。..... | 301 |
| 圖 4.49：左圖為 08P-HKS-AL-1 淺層反射震測剖面，右圖為陳文山等[2010]之解釋。..... | 301 |
| 圖 4.50：小崗山線形附近精密水準測量結果。..... | 302 |
| 圖 4.51：紅色線為 12000-11500 YR BP 以來各井的平均抬升速率，橘色線為 8000-7700 YR BP 以來各井的平均抬升速率。..... | 302 |
| 圖 4.52：本計畫小崗山斷層邏輯樹。..... | 305 |
| 圖 4.53：小崗山斷層特徵地震模式。..... | 306 |
| 圖 5.1：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。..... | 313 |
| 圖 5.2：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。..... | 313 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 圖 5.3：自動化偵測系統流程簡圖。..... | 315 |
| 圖 5.4：2010 年 1 月 3 日長微震示意圖。..... | 316 |

表 A：本年度預期進度甘梯圖(Gantt Chart)。

| 計畫名稱：斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究 (4/4) | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|----|
| 月次 | 第 1 月 | 第 2 月 | 第 3 月 | 第 4 月 | 第 5 月 | 第 6 月 | 第 7 月 | 第 8 月 | 第 9 月 | 第 10 月 | 第 11 月 | 第 12 月 | 備註 |
| 工作項目 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | |
| 第一季查核點 | | |  | | | | | | | | | | |
| GPS 連續站資料檢核及分析解算 (由成大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| GPS 及水準測量規劃、督導 (由成大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| 井下應變資料校正及計算分析 (由臺大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| 第二季查核點 | | | | | |  | | | | | | | |
| 地質及地震資料整理 (由臺大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  | | | | | | | |
| 期中報告 | | | | | | |  | | | | | | |
| 維護資料庫 (由臺大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| 第三季查核點 | | | | | | | | |  | | | | |
| 計算結果檢驗及分析 (由臺大與成大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| 斷層活動度與地震潛能分析 (由臺大工作團隊負責) | | | | | |  |  |  |  |  |  |  | |
| 整合並綜合分析觀測資料 (由臺大工作團隊負責) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| 期末報告 | | | | | | | | | | |  |  | |
| 第四季查核點 | | | | | | | | | | | |  | |
| 預定進度 (累積數) | 5 % | 10 % | 20 % | 30 % | 40 % | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % | 95 % | 100 % | |

說明：(1)工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期，期末報告必須明列於本表中。
(2)預定進度百分比一欄係為配合追蹤考核作業所需，累計百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。

表 B：預期進度查核點(Check Point)。

| 序號 | 查核點 交付項目 | 預定達成日期 | 完成狀態 |
|----|--|--------|---|
| 1 | <p>(第一季查核點)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 第一期請款收據 3. 工作進度報告表 <ol style="list-style-type: none"> a. 應變儀資料校正及 GPS 計算分析 100年11月至101年2月 b. GPS 及水準資料查核 1-2 月 c. 池上斷層之斷層面幾何參數 | 三月三十日 | <p>第一季進度報告</p> <p>第一期款請款</p> |
| 2 | <p>(第二季查核點)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作進度報告表 <ol style="list-style-type: none"> a. 應變儀資料校正及計算分析 3-5 月 b. GPS 及水準資料查核 3-5 月 c. 小崗山斷層之斷層面幾何參數 d. 整合觀測資料至最新 | 六月三十日 | <p>第二季進度報告</p> |
| 3 | <p>(期中報告)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 經費收支報告表 5. 第二期款請款收據 | 七月三十一日 | <p>期中報告書面與簡報資料</p> <p>會議紀錄與委員意見辦理狀況</p> <p>第二期款請款</p> |
| 4 | <p>(第三季查核點)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作進度報表 <ol style="list-style-type: none"> a. GPS 及水準資料查核 6-8 月 b. 應變儀資料校正及計算分析 6-8 月 c. 池上與小崗山斷層之 BPT 模式估算 | 九月三十日 | <p>第三季工作進度報告及繳交文件</p> |
| 5 | <p>(期末報告)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作進度報表 <ol style="list-style-type: none"> a. GPS 及水準資料 9-10 月查核及分析 b. 應變儀資料校正及計算分析 9-10 月 c. 綜合分析觀測資料 d. 估算斷層之再現週期 e. 完成資料庫系統維護 2. 期末報告書初稿 | 十一月三十日 | <p>期末報告書面資料初稿</p> <p>會議紀錄與委員意見辦理狀況</p> |

| | | | |
|---|---|---------|-------------------------------------|
| 6 | <p>(第四季查核點，驗收)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 正式成果報告書 30 份 2. 正式成果報告資料光碟 10 份 3. 經費收支報告表 4. 尾款請款收據 | 十二月三十一日 | <p>成果報告 30 份</p> <p>成果報告光碟 10 片</p> |
|---|---|---------|-------------------------------------|

表 C：全程計畫預期進度甘梯圖。

| 計畫名稱：斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究 | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 年次 工作項目 | 第1年 期中 報告 | 第1年 期末 報告 | 第2年 期中 報告 | 第2年 期末 報告 | 第3年 期中 報告 | 第3年 期末 報告 | 第4年 期中 報告 | 第4年 期末 報告 |
| GPS 連續站資料 檢核與計算 | | | | | | | | |
| 井下應變儀資料 檢核與分析 | | | | | | | | |
| GPS 速度場計算應變 率變化 | | | | | | | | |
| 整合 GPS 交換站、地 質及地震、地化資料進 行相關性比對 | | | | | | | | |
| 資料庫安全性 提升與維護 | | | | | | | | |
| 井下應變儀維護記錄 格式，供巡察維護 | | | | | | | | |
| 瑞穗及車籠埔斷層 潛能分析評估 | | | | | | | | |
| 山腳及新城斷層 潛能分析評估 | | | | | | | | |
| 六甲及木屐寮斷層潛 能分析評估 | | | | | | | | |
| 池上及小崗山斷層潛 能分析評估 | | | | | | | | |
| 臺北盆地與新竹地區 斷層模型參數設定 | | | | | | | | |
| 中部及嘉義地區斷層 模型參數設定 | | | | | | | | |
| 臺南及高屏地區斷層 模型參數設定 | | | | | | | | |
| GPS 測量及水準外業 | | | | | | | | |
| 預定進度(累積數) | 12% | 25% | 37% | 50% | 62% | 75% | 87% | 100% |

表 D：期末須交付之各項工作項目。

| | 工作項目 | 章節 |
|------------------|--|---|
| GPS 及 精密水準測量 | 1. 測量外業督導 (GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點，共計 40 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 41 測段。以上數據以 2012 年度測量公司承辦之業務範圍為準)、GPS 分區測量數量之 10% (小數點以下四捨五入) 抽樣檢核測量、GPS 測量成果與抽測結果基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。 | 2-1 節 (p.23) 2-1-2 小節 (p.28) 附錄光碟-附錄 A 附錄光碟-附錄 B |
| | 2. 藉由 GPS 移動站 (依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位) 與連續站 (以經濟部中央地質調查所設置為主，其站位數量及資料以地調所所能提供者為限) 及精密水準測量資料，計算地表位向量，以推求地表水平與垂直方向的速度場，並提供區域之主應變率及跨斷層的滑移速率分析。 | 2-3 節 (p.103-116) |
| | 3. GPS 與水準測量歷年成果分析 (項目至少包含 GPS 與水準測量之誤差及成果分析、斷層位置及其地表變形特徵、斷層短期滑移速率及隨時間速率變化情形等)。 | 2-1-2-2-1 小節 (p.32-81) 2-2 節 (p83-p102) |
| | 4. 利用所得之地表速度場及應變率，對台南及高屏地區進行斷層模型參數 (以地調所 2010 年公告之活動斷層為主) 反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據。 | 2-4-4 小節 (p.137-149) 2-4-5 小節 (p.150-162) |
| 井下應變儀資料 檢核與分析 | 1. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係。 | 3-1 節 (p.181-217) 附錄光碟-附錄 D-3 |
| | 2. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。並經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。 | 3-2 節 (p.218-236) 附錄光碟-附錄 D-2 |

| | | |
|--------------|--|---|
| | 3. 完成資料庫整合，持續建立資料庫（收集並處理資料）。 | 3-3-1 小節 (p.237-243) |
| | 4. 完成井下應變儀資料庫建置，完成應變分析成果展示軟體開發。 | 3-3-3 小節 (p.246-248) |
| 斷層活動 潛勢分析 | 1. 蒐集並確定池上斷層與小崗山斷層(註：若所分析之斷層參數不足時，屆時會依其重要性或已確定之活動斷層，將另行選定其他斷層進行分析研究)之斷層參數：包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複週期、最大地震規模等。 | 表 4.7 (p.289) 表 4.12 (p.303) |
| | 2. 進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估，說明各項參數計算與求取之考量；同時詳細標註資料來源及參考文獻。 | 4-3 節 (p.284-297) 4-4 節 (p.298-307) |
| | 3. 召開兩次專家諮詢會議，針對所分析斷層潛勢的邏輯樹和權重分配進行討論，取得共識。 | 4-2-3 節 (p.268-283) 會議記錄 (p.341-p.360) |
| 整合觀測 資料分析 | 1. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站之資料加以比較，找出其相關性。 | 5-1 節 (p.309-313) |
| | 2. 將利用地球化學監測站資料與井下應變資料比對出的共同異常事件，再進行與 GPS 連續站資料及地震資料(以規模大於 5 地震時間點及背景地震活動為主)統合，綜合以上觀測資料分析其相關性，進一步探討異常事件發生機制。 | 5-1 節 (p.309-313) |
| | 3. 以井下應變儀時間點為主，分析連續地震資料，理解是否有無慢地震徵兆、以進一步解釋應變異常。 | 5-2 節 (p.314-316) |

摘要

本計畫本年度的主要執行重點為：(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 觀測和井下應變儀，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則是評估地震機率模型應用在臺灣的可行性，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。因此本計畫的執行，旨在結合 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。

本年度期末報告在 GPS 及精密水準測量部份，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 的速度場分布均與 2002-2011 年一致；29 條水準測段的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。透過嘉南地區 GPS 觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出，嘉南地區六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層滑移速率分別為 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 ($M_w 6.66 \pm 0.28$)、 $0.41 \pm 0.17 \times 10^{23}$ dyne-cm ($M_w 6.76 \pm 0.19$) 與 $2.10 \pm 0.22 \times 10^{24}$ dyne-cm ($M_w 6.71 \pm 0.28$)。

井下應變儀部份本期執行進度除處理台北網、新竹網及嘉義網共十三個測站外，並持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性之外，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；除此之外，所有測站資料均轉成應變分量。另外本計畫也利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立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"。從 2009 年至 2012 年 11 月，我們在台北網發現 3 個應

變異常事件，新竹網發現 13 個應變異常事件，嘉義網則有 15 個應變異常事件，其中 5 次異常事件同時在新竹網及嘉義網兩測網中被觀測到。

井下應變資料在移除地下水與氣壓的影響之後，每日的潮汐訊號就更為明顯，因此開始撰寫程式來估計各站的潮汐，在無太大的異常資料干擾（如同震應變或颱風應變）時，已可有效得移除潮汐，然而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。另外發現相同地區中井下應變儀對於地潮反應的震幅不一致，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。

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，本年度共召開了三次專家諮詢會議，報告則以車籠埔斷層為例說明邏輯樹建立之過程及方式。本年度活動斷層發生機率評估，首先蒐集文獻建立了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 年發生地震之機率，規模 M_w 6.7~7.4 之間，機率為 36.3%，46.3%，61.5%；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%。

整合分析部分，共包括(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，整合期間含跨 2009 年整年到 2012 年 11 月間 112 個地震事件。分析針對井下應變儀應變異常、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。在被檢驗的 112 個規模大於五的事件中，2009/12/19 $M6.9$ 的花蓮地震和 2011/3/20 $M5.8$ 的台東外海地震顯現了地下水位、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。這兩個地震的異常記錄在嘉義網和新竹網被觀察到，而地震皆為東部外海、非鄰近嘉義網及新竹網，並且規模小於六的地震亦對應到異常，說明異常記錄的空間分布(廣度)和地震規模、離地震的距離可能不相關，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。

關鍵詞：地表變形觀測、時間序列、井下應變儀、斷層活動潛勢分析

Abstract

The main goals of this project are to: (1) explore the anomalous crustal deformation phenomena by analyzing the time series from 72 continuous GPS and 13 borehole strainmeter stations; (2) determine the accumulation of current crustal strain pattern revealed from principal strain rate, shear strain rate and rotation rate by GPS velocity field and calculate the coupling coefficient, slip deficit and slip rate along the fault plane by inversion of geodetic measurements; (3) compare the strain rate from continuous GPS and strainmeter measurements and assess the parameters for the change of strain rate; (4) study the anomalous observation from geochemical monitoring stations with the comparison of continuous GPS and strainmeter measurement; (5) assess the potential of fault activity of the Chishang fault and Hsiaokangshan fault based on the earthquake probability model developed in USA and Japan ; (6) build and maintain the database for access borehole strainmeter records and set up database security. The goal of this proposal is to gather new information about fault behavior in Taiwan using the new-installed GPS and strainmeter stations. Along with multidisciplinary studies of plate-boundary tectonics, observation of earthquake activity, numerical simulations, and active fault systems, we aim at integrating these informations into a comprehensive understanding of fault activity and earthquake probability, seismogenic structures, fault mechanics and information of possible earthquake precursory.

For the 2012 final report, we focus on the topics of (1) examinations of results of GPS and precise leveling data that has been measured up-to-date; and (2) analysis of surface deformation in Southern Taiwan. We first process the measurements from campaign-mode GPS in Taiwan area and 29 precise leveling lines. The GPS velocity field in Hengchun area is consistent with the GPS velocities from 2002 to 2011. Precisions of 90.0% leveling sections of 29 precise leveling lines are less than 2.0 mm per kilometer, and all sections are within the closure. In terms of analysis of GPS and leveling measurements and results of fault model, the fault slip rates of the Liuchia fault, Chukou fault, and Chutouchi fault are 8.6 ± 1.3 mm/yr, 6.9 ± 1.6 mm/yr, and 29.6 ± 2.7 mm/yr, respectively. The locking depths of these three faults are 1.2 ± 0.4 km, 0.4 ± 0.3 km, and 5.6 ± 0.4 km, respectively. Assuming the fault lengths of the Liuchia fault, Chukou fault, and Chutouchi fault are 23 km, 27 km, and 25 km, respectively. The accumulative moments and maximum moment magnitude of these three faults are $1.44 \pm 0.46 \times 10^{23}$ dyne-cm (M_w 6.66 ± 0.28), $0.41 \pm 0.17 \times 10^{23}$ dyne-cm (M_w 6.76 ± 0.19), and $2.10 \pm 0.22 \times 10^{24}$ dyne-cm (M_w 6.71 ± 0.28), respectively.

The persisted data processing on almost all the borehole strainmeter stations in Chiayi Hsinchu and Taipei networks are carried out to maintain the security of database for facilitating the analysis of time series of strainmeter data. No monitoring data are available in LMMT and ECT stations due to the unfunctionable status. The CH1 in RST is out of work. Since July 2012, the interrupt and abnormal spike are observed in CH0 of CINT station, further maintenance is expected. Consequently, all the raw data are processed to the components of strain of each channel, and

combined them into areal and shear strains for each station. We also establish the correction model for the influence of air pressure recorded in borehole-strainmeter data by using the observations during several large air-pressure variations. After removing the groundwater and air pressure effects, the residual strain data show clear tidal effect, thus the tidal effect could be further modeled and removed. The residual strain after removing all the above-mentioned environmental effect could be used for searching pre-seismic strain anomaly. From 2009 to November 2012, We find 3 strain anomalies in Taipei Network, 13 strain anomalies in Hinchu Network, 15 strain anomalies in Chiayi network respectively. In addition, 5 strain anomalies are found both in the Hsinchu and Chiayi networks.

For assessment of fault parameters and logic trees of probability analysis for active faults, three expert consult meetings were held by using the Chelungpu fault as a case example to demonstrate how to establish the logic trees for probability analysis. First of all, we collect the fault parameters of the Chihshang and Xiaogangshan faults. Based on BPT model, the probabilities for a Mw 6.7~7.4 earthquake occurred along the Chihshang in 30, 50 and 100 years are 36.3%, 46.3% and 61.5% respectively. The Xiaogangshan fault could extend northward with a fault length of 31 Km. On the base of Poisson model, the probabilities for a Mw 6.7~6.8 earthquake occurred along the Chihshang in 30, 50 and 100 years are 6.0%, 9.8% and 18.5% respectively.

We have searched for possible precursory anomalies for magnitude greater than 5 earthquakes ($M > 5$), using geochemical, hydrological observation, borehole strainmeter, and seismological observations. During the study period of Jan.2009 to Oct. 2012, there are 112 $M > 5$ events occurred in Taiwan. Two earthquakes appear to reveal the synchronized anomalies from hydrological, geochemical, and borehole strain signals, whereas ambient tremors are also observed. These two earthquakes are not local to stations nor both bigger than 6, therefore we argue that the observed anomalies are a function of earthquake magnitude and source-to-station distance.

KEYWORDS: observation of surface deformation, Time series, Borehole Strainmeter, Analysis in Potential Activity of Faults

第一章、緒 論

1-1 計畫整體概述

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(圖 1.1 和表 1.1)和 13 口井下應變儀(圖 1.1 和表 1.2)及 8 個地球化學觀測站(圖 1.1 和表 1.3)。藉由解算連續 GPS 之每日座標解，以及水準測量之計算與分析，提供地殼活動觀測資料，將有助於吾人瞭解該地區之斷層、地震活動與觀測結果之關聯性。另外分析位於梅花國小(PFMT)、瑞峰國小(LMMT)、大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)、中興國小(TSUN)、太興國小(TAIS)、樹林(SLIN)、曾文水庫北(RNT)、達邦(DARB)、曾文水庫南(RST)、甲仙十八灣(ECT)、錦和(JING)及明德中學(SANS)等 13 個井下應變儀資料，討論該區域之觀測數據的可靠性，資料分析包含：估計因自然環境對應變資料的影響量、估計井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，以及大氣壓力、水文、地潮及海潮效應的影響量等修正和移除不正常的突出資料。

本計畫除了每年持續搜集、計算累積至最新的 GPS 追蹤站及應變儀觀測資料，同時還會將地震資料、GPS 監測點、連續追蹤站及井下應變儀資料整合分析探討，本團隊也會利用中央地質調查所 98 至 100 年度之委辦計畫(斷層活動性觀測研究第二階段-斷層活動性之地球化學觀測與研究)之地球化學觀測站資料加以比對，期望能找出良好的地球物理與地球化學資料相關性。斷層活動性觀測研究第二階段-斷層活動性之地球化學觀測與研究委辦計畫中，主要著重於台灣各活動斷層區設置氣體與水位遠端傳輸觀測站及地下水氣與溶解氣體之調查工作，以瞭解不同構造區觀測結果之異同，探討台灣南部與北部不同構造區對於觀測結果之影響，並評估觀測站氣體成份與水位觀測結果，及作為斷層與地震活動之可能前兆訊息。該研究團隊發現，以歷年大平地觀測站的觀測結果為例，地震若發生距觀測站不遠的地方，通常在數天至數小時前，氬氣濃度皆呈現異常升高的變化情形，在排除氣象因子及人為因素影響後，這些的異常值出現很明顯的就是該次地震發生前的地震前兆訊息。就整體的來說，大平地觀測站的變化可以反映出台灣北部地區地殼的活動情形，特別是發生在觀測站周遭數十公里內及宜蘭平原內的地震事件。另外，經過長期觀測結果顯示，測站中崙濁水潭氣體之 CO_2/CH_4 比值有最明顯的變化，其變化與地震活動也最有關連。利用分析儀器，就地分析當地土壤氣體成份，於 2002 年 11 月 1 日開始發現其氣體成份有非常明顯的成份變化，且於一星期後本地區發生了規模 4.1，深約 11.2 公里的地震(震央便在觀測站附近)，而於地震發生約兩天後，氣體成份又逐漸回復到原先背景值。如果此氣體成份異常現象，果真主要是受此

地震活動所控制影響，這將是非常有效而直接的「地震前兆」現象，非常有助於我們對該地區斷層與地震活動的瞭解。由以上研究結果顯示，無論地球物理或地球化學的研究都非常重要，若能將地球化學的數據與地球物理的資料加以整合，相信可以推估更加完整且具有絕對參考價值的斷層活動性與地震潛能評估。故本團隊除持續搜集、計算累積至最新的 GPS 追蹤站及應變儀觀測資料，並致力於整合分析地震資料、GPS 監測點、連續追蹤站、井下應變儀及地球化學資料，做進一步的探討。

最後，也會比較美國及日本先進國家之斷層活動度與地震潛能評估模式，剖析其優缺點，提供作為建立台灣分析模式後，實際進行斷層活動度與地震潛能模式之分析。

全程計畫預期進度甘梯圖請見表 C，全程計畫工作內容說明如下：

98 年：

(1) 連續 GPS 追蹤站

- a. 完成地調所設置 GPS 連續觀測站資料檢核及計算。針對每年的觀測結果進行校驗、誤差分析與測站觀測品質查核。
- b. 完成地調所設置 GPS 連續觀測站時間序列解算。將 GPS 時間序列擬合，並去除大誤差量之觀測天數，分析年週期與半年週期效應，求得各測站之地表水平與垂直方向的位移量，並分析鄰近斷層的滑移速率與區域之應變率之改變。
- c. 整合地調所與其他單位交換之 GPS 連續觀測站解算之結果加入分析，完成全台各區域之應變率之計算。

(2) 井下應變儀觀測

- a. 多分量井下應變儀的檢校，完成包含曾文（南）、曾文（北）、十八灣、中興、太興、達邦等 6 站井下應變儀軸向校正與氣壓、潮汐及井孔溫度變化之響應校正，並持續分析應變累積與地震之關係。
- b. 完成各觀測站之資料收集及編修，並進行面應變、剪應變分析。
- c. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析應變儀觀測站及水位觀測井之資料與相關斷層之活動關聯性並建立異常資料事件檔，期能歸納出可靠之斷層活動潛勢因子與經驗法則。
- d. 建立井下應變儀維護記錄表標準格式，供本案巡察及維護之參考。
- e. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。

(3) 整合觀測資料進行分析

- a. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站資料加以比較，利用時間序列比對，分析各觀測資料異常之時間的相關性。

(4) 斷層潛能分析模式之評估

- a. 分析比較美國及日本之斷層活動度與地震潛能分析模式，並剖析其優缺點。
- b. 挑選瑞穗斷層與車籠埔斷層，蒐集並確定斷層參數（包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複周期、最大地震規模），進行斷層活動度與潛能分析模式之評估。

99 年：

(1) GPS 連續追蹤站

- a. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及解算地表水平與垂直方向的位移量及速度場，並提供區域之主應變率、剪應變率、及跨斷層的滑移速率分析。
- b. 進行 GPS 時間序列分析，去除大量誤差之觀測及分析年週期與半年週期效應，並探討各測站的雜訊特性。所得之時間序列將與地震資料進行比對，期望解析出慢地震效應與台灣各不同地區之變形特性。
- c. 利用所得之地表速度場及應變率，對台北盆地地區及新竹地區進行斷層模型參數反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據。

(2) 井下應變儀觀測

- a. 多分量井下應變儀的檢校，完成包含大坪、瑞峰、梅花、新樂、明德及錦和等 6 站井下應變儀軸向校正與氣壓、潮汐及井孔溫度變化之響應校正，並持續分析應變累積與地震之關係。
- b. 完成各觀測站之資料收集及編修，並進行面應變、剪應變分析。
- c. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析應變儀觀測站及水位觀測井之資料與當地斷層、地震活動之關聯性並建立異常資料事件檔，期能歸納出可靠之斷層活動潛勢因子與經驗法則。
- d. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。
- e. 實際應用 98 年已建立之井下應變儀維護紀錄表標準格式，檢討本案巡察及維護使用後之效益。

(3) 整合觀測資料進行分析

- a. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用所得之地球化學觀測站資料加以比較，找出其相關性。

(4) 斷層潛能分析模式之評估

- a. 蒐集並確定山腳斷層及新城斷層之斷層參數：包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複週期、最大地震規模等，進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估，說明各項參數計算與求取之考量；同時詳細標註資料來源及參考文獻。

100—101 年：

(1) GPS 連續追蹤站

- a. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及解算地表水平與垂直方向的位移量及速度場，並提供區域之主應變率、剪應變率、及跨斷層的滑移速率分析。
- b. 進行 GPS 時間序列分析，去除大量誤差之觀測及分析年週期與半年週期效應，並探討各測站的雜訊特性。所得之時間序列將與地震資料進行比對，期望解析出慢地震效應與台灣各不同地區之變形特性。
- c. 利用所得之地表速度場及應變率，對中部地區、嘉義地區（100 年），台南地區及高屏地區（101 年）進行斷層模型參數反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據。
- d. 針對斷層模型中誤差較大的參數部分，再收集所需資料補強資料不足的觀測結果。

(2) 井下應變儀觀測

- a. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係。
- b. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。
- c. 經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。
- d. 完成資料庫整合，導入即時接收分析，同時建立使用者層級區分使用權限。
- e. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。
- f. 於 101 年完成井下應變儀資料庫建置，完成應變分析成果展示軟體開發。

(3) GPS 測量及水準測量外業檢核與資料分析

- a. 當年度新設監測樁位之規劃與施工督導。
- b. 當年度外業施測作業督導、抽測與成果檢核。

c. GPS 與水準測量歷年成果分析（項目至少包含 GPS 與水準測量之誤差及成果分析、集集地震之震後變形、斷層位置及其變形特徵、斷層短期滑移速率及應變轉移情形等）。

(4) 整合觀測資料進行分析

a. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站之資料加以比較，找出其相關性。

(5) 斷層潛能分析模式之評估

a. 蒐集並確定六甲斷層與木屐寮斷層（100 年），池上斷層與小崗山斷層（101 年）之斷層參數：包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複週期、最大地震規模等，進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估，說明各項參數計算與求取之考量；同時詳細標註資料來源及參考文獻。

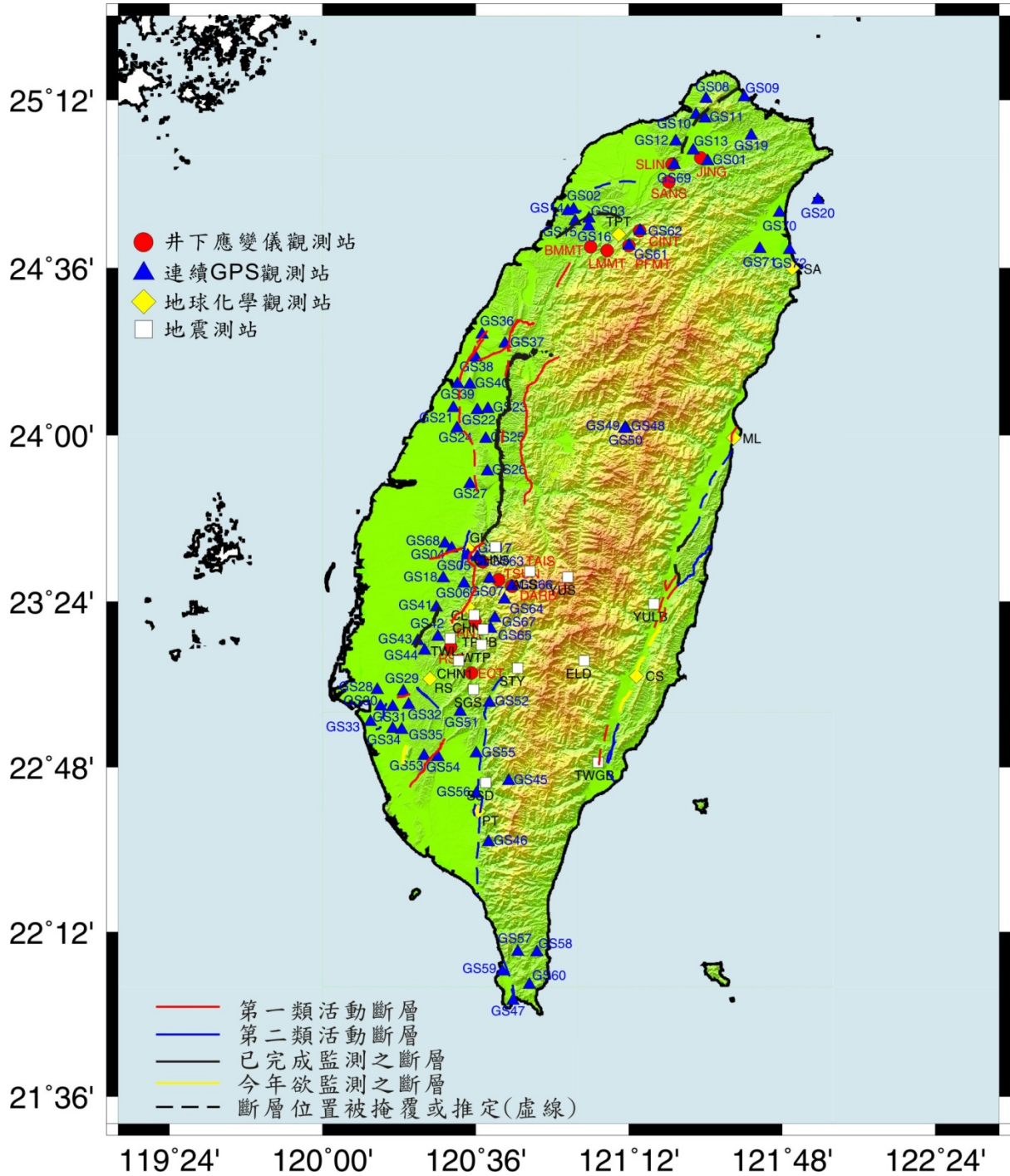


圖 1.1：中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀、地震測站及地球化學觀測站分布圖。

表 1.1：中央地質調查所建置的 72 個連續 GPS 追蹤站資料接收起始時間表。

| 測站代碼 | 測站名稱 | 接收起始時間 | 測站代碼 | 測站名稱 | 接收起始時間 |
|------|---------|------------|------|----------|------------|
| GS01 | 地調所 | 2002.06.17 | GS37 | 泰安休息站 | 2006.10.25 |
| GS02 | 新竹高工 | 2004.10.21 | GS38 | 清水服務區 | 2006.10.21 |
| GS03 | 工研院 | 2004.10.19 | GS39 | 龍井國小 | 2006.10.21 |
| GS04 | 大埔美農場 | 2004.10.16 | GS40 | 龍峰國小 | 2006.10.21 |
| GS05 | 半天寮淨水廠 | 2004.10.21 | GS41 | 竹門國小 | 2007.11.23 |
| GS06 | 民和國中 | 2004.10.21 | GS42 | 東原國中 | 2007.11.23 |
| GS07 | 培英國小 | 2004.10.21 | GS43 | 果毅國小 | 2007.11.27 |
| GS08 | 興華國小 | 2005.08.15 | GS44 | 六甲國小湖東分校 | 2007.11.30 |
| GS09 | 大鵬國小 | 2005.08.16 | GS45 | 霧臺鄉公所 | 2009.01.08 |
| GS10 | 竹圍國中 | 2005.09.06 | GS46 | 來義國小 | 2009.01.08 |
| GS11 | 北投國小 | 2005.08.15 | GS47 | 台電南展館 | 2009.01.08 |
| GS12 | 樂善國小 | 2005.09.06 | GS48 | 廬山警光山莊 | 2009.04.14 |
| GS13 | 國光國小 | 2005.08.16 | GS49 | 廬山蔡宅 | 2009.04.14 |
| GS14 | 西門國小 | 2005.09.13 | GS50 | 馬赫坡森林民宿 | 2009.03.25 |
| GS15 | 雙溪國小 | 2005.09.13 | GS51 | 杉林國小 | 2009.12.18 |
| GS16 | 寶山水庫 | 2005.09.13 | GS52 | 新發國小 | 2009.12.18 |
| GS17 | 太平國小 | 2005.09.14 | GS53 | 星星兒的家 | 2009.12.18 |
| GS18 | 嘉義農試所 | 2005.09.14 | GS54 | 大洲國中 | 2009.12.15 |
| GS19 | 保長國小 | 2006.07.12 | GS55 | 舊寮國小 | 2009.12.11 |
| GS20 | 龜山島 | 2006.08.04 | GS56 | 瑪家國中 | 2009.12.14 |
| GS21 | 大嘉國小 | 2006.06.10 | GS57 | 石門國小 | 2009.12.15 |
| GS22 | 快官交流道 | 2006.06.10 | GS58 | 高士國小 | 2009.12.14 |
| GS23 | 五光國小 | 2006.05.30 | GS59 | 車城國小射寮分校 | 2009.12.17 |
| GS24 | 文祥國小 | 2006.05.30 | GS60 | 永港國小 | 2009.12.18 |
| GS25 | 寶山國小 | 2006.05.31 | GS61 | 梅花國小 | 2010.10.05 |
| GS26 | 名崗國小 | 2006.05.31 | GS62 | 新樂國小 | 2010.10.05 |
| GS27 | 彰化農場 | 2006.05.31 | GS63 | 太興國小 | 2010.10.05 |
| GS28 | 中崙加壓站 | 2006.06.17 | GS64 | 里佳國小 | 2010.10.05 |
| GS29 | 潭頂自來水廠 | 2006.06.16 | GS65 | 茶山國小 | 2010.10.05 |
| GS30 | 大橋國小 | 2006.06.25 | GS66 | 達邦 | 2010.10.05 |
| GS31 | 西勢國小 | 2006.06.17 | GS67 | 新美國小 | 2010.10.05 |
| GS32 | 虎頭埤 | 2006.06.23 | GS68 | 三和國小 | 2010.12.17 |
| GS33 | 永華國小 | 2006.06.22 | GS69 | 樹林焚化爐 | 2011.09.09 |
| GS34 | 成大航太實驗場 | 2006.06.24 | GS70 | 玉田國小 | 2011.09.09 |
| GS35 | 南沙崙農場 | 2006.06.24 | GS71 | 大隱國小 | 2011.09.09 |

| | | | | | |
|------|------|------------|------|------|------------|
| GS36 | 德化國小 | 2006.10.21 | GS72 | 利澤國中 | 2011.09.09 |
|------|------|------------|------|------|------------|

表 1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。

| 編號 | 測站代碼 | 站名 | 安裝日期 | 資料起迄時間 | | Coordinate(WGS84) | | | 儀器狀況及建議 |
|----|------|-------|------------|------------|---------|-------------------|-------------|-------|--|
| | | | | 起始 | 結束 | 經度 | 緯度 | 高程(m) | |
| 1 | RST | 曾文水庫南 | 2003/10/23 | 2004/07/18 | 2012/11 | 120°30'4.65 | 23°14'10.97 | 110 | CH1 感應器於 2005 年 4 月受地震影響之後一直都沒有接收到資料，判定為永久損壞。 |
| 2 | RNT | 曾文水庫北 | 2003/10/28 | 2004/04/15 | 2012/11 | 120°35'53.58 | 23°19'39.92 | 252 | 良好(2009 年 9 月之後為現地下載) |
| 3 | ECT | 甲仙十八灣 | 2003/10/26 | 2004/04/16 | 2007/07 | 120°34'57.69 | 23°08'29.21 | 448 | 因雷擊而故障，於 2004 年 12 月之後資料品質不佳，且 2007 年後無資料。2011 年 12 月正式廢除，不再繼續觀測維護。該站觀測系統可充作曾文南站、曾文北站完整備品系統。 |
| 4 | PFMT | 梅花國小 | 2005/06/04 | 2005/06/04 | 2012/11 | 121°12'1.73 | 24°40'43.69 | 496 | 良好 |
| 5 | LMMT | 瑞峰國小 | 2005/06/04 | 2005/06/07 | 2012/10 | 121°6'49.85 | 24°39'47.49 | 247 | 安裝初期由於雷擊事件造成 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理。不再繼續觀測維護。 |
| 6 | BMMT | 大坪國小 | 2005/05/18 | 2005/06/09 | 2012/11 | 121°3'1.92 | 24°40'34.52 | 195 | 良好 |
| 7 | TSUN | 中興國小 | 2006/03/01 | 2006/03/01 | 2012/11 | 120°41'21.04 | 23°28'42.48 | 1370 | 良好 |
| 8 | TAIS | 太興國小 | 2006/03/04 | 2006/03/04 | 2012/11 | 120°37'36.95 | 23°32'34.1 | 790 | 良好 |
| 9 | CINT | 新樂國小 | 2006/11/15 | 2006/11/15 | 2012/11 | 121°14'32.12 | 24°43'57.8 | 505.2 | CH0 於 2012 年 7 月之後有資料中斷與數值不正常跳階的情況發生。 |
| 10 | DARB | 達邦 | 2006/11/19 | 2006/11/19 | 2012/11 | 120°44'29.39 | 23°27'22.27 | 952.8 | 良好 |
| 11 | JING | 錦和國小 | 2007/11/07 | 2007/11/20 | 2012/11 | 121°28'49.31 | 24°59'35.89 | 19 | 良好 |
| 12 | SANS | 明德中學 | 2007/11/02 | 2007/11/12 | 2012/11 | 121°21'21.01 | 24°54'28.51 | 80 | 良好 |
| 13 | SLIN | 樹林焚化廠 | 2009/09/11 | 2009/09/11 | 2012/11 | 121°22'10.36 | 24°58'10.81 | 77 | 良好 |

表 1.3：地球化學觀測站資料接收起始時間表。

| 類別 | 編號 | 測站代碼 | 站名 | 安裝日期 | 資料起迄時間 | | Coordinate(WGS84) | | | 儀器狀況及建議 |
|-----------|----|-------|------|-----------|------------|------------|-------------------|--------------|-------|--|
| | | | | | 起始 | 結束 | 經度 | 緯度 | 高程(m) | |
| 土壤氣體 | 1 | TPT | 大平地 | 2005/12 | | 2012/12/03 | 121°9'6.552 | 24°43'19.092 | 217 | 儀器皆正常，唯網路常因下雨斷線。 |
| | 2 | MS | 梅山 | 2006/08 | 2006/08/22 | 2009/12/28 | 120°33'58.48 | 23°35'18.29 | | 颱風影響，地基掏空，遷往舊古坑站。 |
| | | GK | 舊古坑 | 2010/01 | 2010/01/27 | 2011/12/27 | 120°34'12.42 | 23°36'34.76 | | 降雨影響，地層下陷，遷往新古坑站。 |
| | | GK | 新古坑 | 2011/12 | 2011/12/22 | 2012/12/06 | 120°34'13.35 | 23°36'34.88 | 188 | 仍舊受到降雨影響，阻塞逸氣來源。 |
| | 3 | CL | 中崙 | 2004/04 | 2004/04/07 | 2012/12/10 | 120°33'6.552 | 24°43'19.092 | 720 | 儀器皆正常，但是會受到降雨影響，會有劇烈起伏。 |
| | 4 | RS | 二溪 | 2006/11 | 2006/11/15 | 2010/12/31 | 121°9'6.4284 | 23°22'54.984 | | 此外測站後面的土地持續流失，測站恐會崩塌。 |
| | 5 | PT | 屏科大 | 2008/10 | 2008/10/17 | 2012/12/10 | 120°24'42.876 | 23°7'18.948 | 30 | 良好 |
| | 6 | SA | 蘇澳 | 2009/12 | 2009/12/11 | 2010/12/31 | 121°49'54.624 | 24°36'7.236 | | 颱風影響，地基掏空，於 2010/12/31 結束觀測。 |
| | 7 | ML | 美崙 | 2010/09 | 2010/09/30 | 2012/09/16 | 121°36'6.732 | 23°59'31.164 | | 測站受到降雨影響，逸氣來源受阻，於 2012/10/25 遷至壽豐東華大學校區。 |
| | | DH | 東華 | 2012/10 | 2012/10/25 | 2012/12/10 | 121°33'3.23 | 23°53'50.21 | 37 | 良好 |
| | 8 | CS | 池上 | 2008/11 | 2008/11/13 | 2012/12/10 | 121°13'18.912 | 23°7'55.092 | 270 | 良好 |
| 地下水氣及溶解氣體 | | AT500 | 安通 | 2011/09 | 2011/9/16 | 2012/11/1 | 121°20'34.2 | 23°16'50.1 | | 良好(因安通自流井溫度達 60℃，需冷凝系統保護儀器，2012/11/1 後冷凝系統故障，正在維修中。) |
| | | KT | 墾丁社頂 | 2011/12 | 2012/8/18 | 2012/12/10 | 120°48'40.2 | 21°57'24.2 | | 良好(2011/12~2012/8/17 之數據受碳酸鈣結垢影響) |
| 地下水 | 1 | JH | 錦和 | 2007/11/7 | 2009/5/27 | 2012/12/1 | 121°28'49.31 | 24°59'35.89 | 19 | 有時會出現水位計斷訊數周的情況，除此之外仍算良好。 |
| | 2 | MD | 明德 | 2007/11/2 | 2008/12/1 | 2012/12/1 | 121°21'21.01 | 24°54'28.51 | 80 | 有時會出現水位計斷訊數周的情況，除此之外仍算良好。 |
| | 3 | SN | 樹林 | 2009/9/11 | 2009/11/1 | 2012/12/1 | 121°22'10.36 | 24°58'10.81 | 77 | 有時會出現水位計斷訊數周的情況，除此之外仍算良好。 |

| | | | | | | | | | | |
|---|----|----|----|------------|-----------|------------|--------------|-------------|-------|--------------------------------|
| 位 | 4 | SL | 新樂 | 2006/11/15 | 2008/12/1 | 2012/10/16 | 121°14'32.12 | 24°43'57.08 | 505.2 | 運作良好，但 2012 年 10 月後已無資料。 |
| | 5 | RF | 瑞峰 | 2005/6/4 | 2009/9/30 | 2012/4/2 | 121°6'49.85 | 24°39'47.49 | 247 | 前兆表現不佳，建議不再繼續觀測與維護。 |
| | 6 | SS | 雙溪 | 2005/11/1 | 2008/12/1 | 2012/9/1 | 120°59'24.33 | 24°45'57.76 | 105 | 因用地問題已無法設站，於 2012 年 9 月後斷訊。 |
| | 7 | MH | 梅花 | 2005/6/1 | 2008/12/1 | 2011/9/3 | 121°12'1.73 | 24°40'43.69 | 496 | 前兆表現不佳，建議不再繼續觀測與維護。 |
| | 8 | CS | 中興 | 2006/3/1 | 2008/12/1 | 2010/7/22 | 120°41'21.04 | 23°28'42.48 | 1370 | 有前兆反應，但因儀器問題已於 2010 年 7 月後無資料。 |
| | 9 | TS | 太興 | 2006/3/4 | 2008/12/1 | 2011/6/9 | 120°37'36.95 | 23°32'34.1 | 790 | 有前兆反應，但因儀器問題已於 2011 年 6 月後無資料。 |
| | 10 | DB | 達邦 | 2006/11/19 | 2008/12/1 | 2012/5/3 | 120°44'29.39 | 23°27'22.27 | 952.8 | 有前兆反應，但因儀器問題已於 2012 年 5 月後無資料。 |
| | 11 | YS | 汙水 | 2006/11/1 | 2009/5/8 | 2012/12/1 | 120°31'49.78 | 23°22'53.46 | 510 | 良好 |

1-2 100 年度工作成果

本計畫在 100 年度的工作成果主要為連續 GPS 速度場和應變場解算，精密水準測量之觀測以及時間序列的分析，13 個井下應變儀觀測資料的分析，六甲斷層及木屐寮斷層的斷層潛勢分析模式之評估，地球化學、連續 GPS、長微震與井下應變儀之觀測資料進行整合分析，概述如下：

在 GPS 連續觀測部分，以臺北地區、宜蘭地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區及花東地區 6 個測網，解算 68 個中央地質調查所 GPS 連續站與其他單位交換約 129 個 GPS 連續觀測站之速度場（圖 1.2a）和應變場（圖 1.2b）。

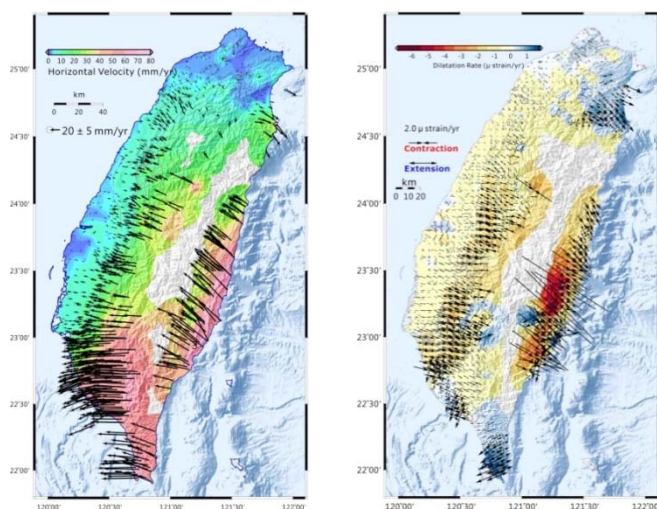


圖 1.2: a. 全臺灣相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 水平方向速度場，彩色色階反映 2002-2011 年測量資料所求得之速度場量值大小，黑色箭頭表示 2002-2011 年速度場方向及大小之分布情形。b. 全臺灣應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

在精密水準測量部分，則顯示山腳斷層南段（新北市三重區、蘆洲區、新莊區以及臺北市中山區）為一地表沉陷區域，最大年平均下陷速率約為 26 mm/yr。

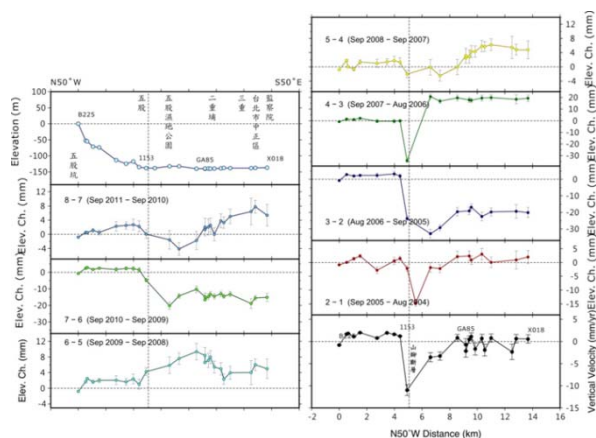


圖 1.3：五股至臺北測線水準垂直速度圖。

時間序列資料分析部分，圖 1.4 展示台灣 19 個 GPS 連續站在 1995-2010 年間相對於澎湖白沙站 S01R 之速度場。為了探討震間期之速度變化，本計畫將 16 年間的度場濾除同震及震後效應切割成集集地震前（1995-1999 年）、集集地震後 1-6 年內（2001-2005 年）以及集集地震後 6-11 年內（2006-2010 年）此三時段來表示。由圖 1.4 可以得知臺灣中部、東部，以及南部之測站，在集集地震後 1-6 年內（圖 1.4 紅色箭頭）相較於集集震前速度場（圖 1.4 綠色箭頭）有速度增快之趨勢，其中以測站 SUNM、SUAO、HUAL、FLNM、CHEN 最為顯著，速度差異量多達 5-15 mm/yr。將集集地震後 6-11 年內之速度場（圖 1.4 藍色箭頭）與震前速度場（圖 1.4 綠色箭頭）比較，測站 SUNM、SUAO、HUAL、FLNM 仍有差異量約 3-5 mm/yr。另外也利用速度場資料，利用二維彈性斷層模型反演中部地區以及嘉南地區斷層的幾何型態以及滑移速率，對於評估斷層之發震潛能有良好的依據。

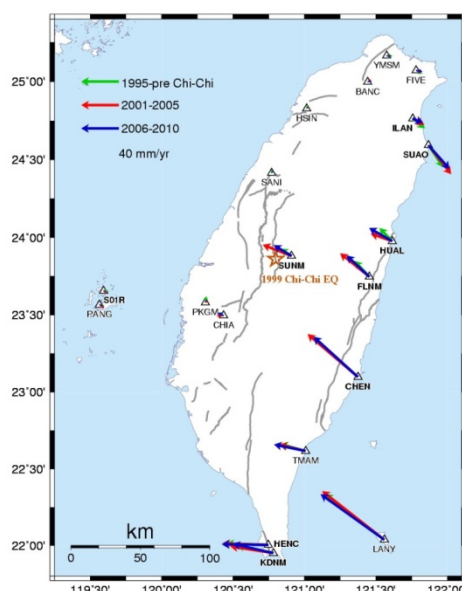


圖 1.4：1995-2010 年間相對於 S01R 之速度場。綠色箭頭為集集地震震前時段（1995-1999 年）、紅色箭頭為集集地震後 1-6 年內時段（2001-2005 年）、藍色箭頭為集集地震後 6-11 年內時段（2006-2010 年）。紅色星號標記集集地震震央位置。

目前井下應變儀的資料已經可以移除不正常的突出資料、估計井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢與估計因自然環境對應變資料的影響量，其中包含地下水影響與氣壓影響分量的初步估計與移除，與利用多變數迴歸法來分析井下應變儀觀測中的潮汐分量。並以建立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"。

100 年的計畫中，我們嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

- a. 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 μstrain)的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。這是因為台灣地區規模大於 5.0 的地震，在過去兩年多來共有 87 個，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。

- b. 對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線(意指忽略每日潮汐的變化後)。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。
- c. "異常"前兆的判斷：要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(徒升或突降)，也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這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"，若只有一站的明顯"異常"僅能存疑。其三是對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，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。

根據此一原則，我們針對 2009 年至 2011 年 10 月期間，規模 5 以上的地震，在井下應變儀資料中，新竹網發現 13 個應變異常事件；嘉義網則發現 14 個應變異常事件，其中 5 次異常事件同時在兩個測網中被觀測到，如圖 1.5 所示。其中 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震在嘉義測網有較明顯的面應變應變率的變動，大約發生在地震前 8 至 12 天左右(圖 1.6)。

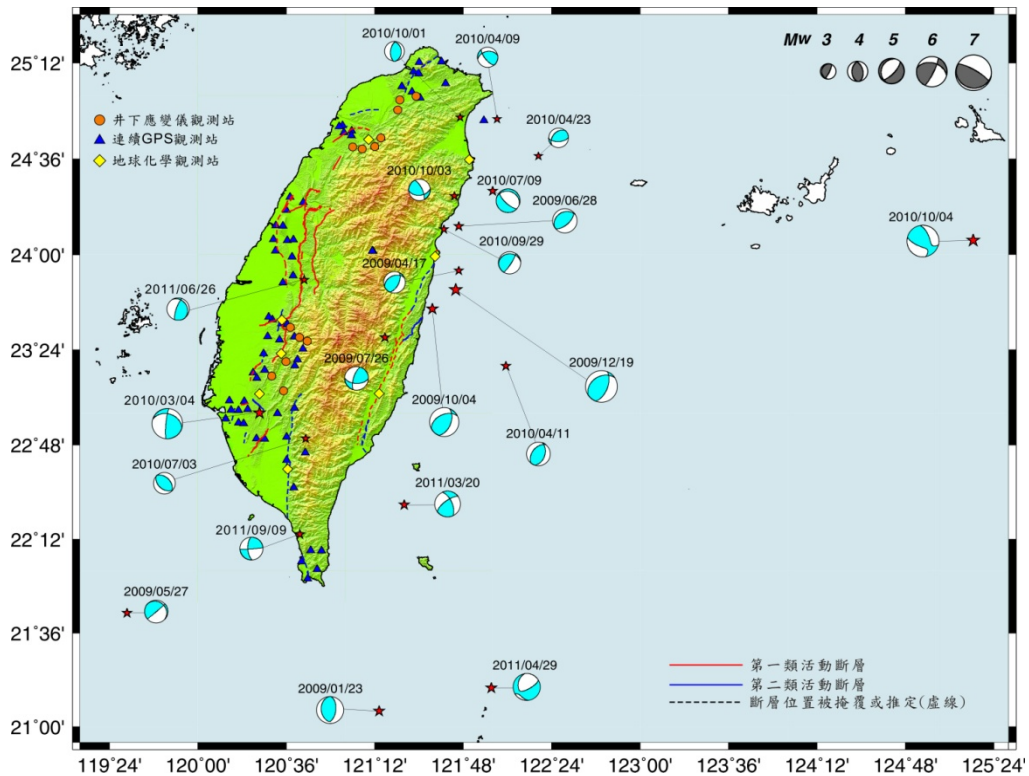


圖 1.5：2009 年至 2011 年 10 月井下應變儀地震前兆相關之地震。

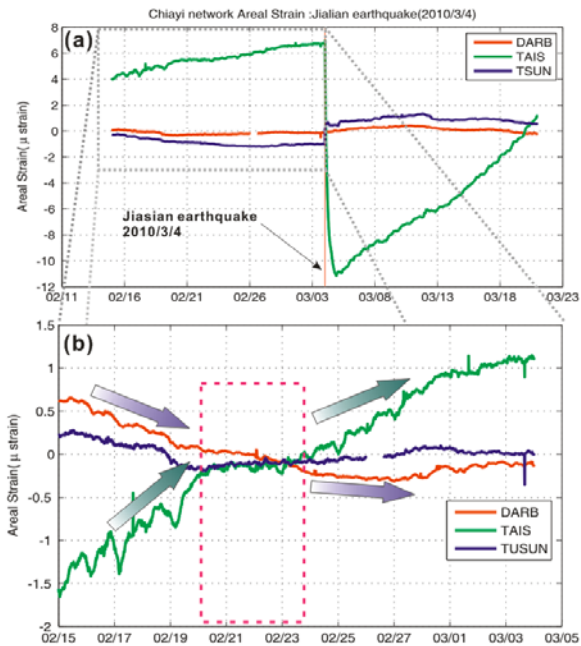


圖 1.6：嘉義測網的井下應變儀於 2010 年 3 月 4 日甲仙地震期間的面應變時間序列。(a)圖為甲仙地震期間嘉義網三個測站的面應變時間序列，資料已做過校正(包含井孔與水泥雙指數回復效應、地下水位修正與氣壓修正)，明顯各站都有同震的變化。(b)圖為地震前至 2 月 15 日期間嘉義網三個測站的面應變時間序列，並且各測站皆扣除平均應變量。應變率的改變在三個測站都有發生，時間大約在地震前 8-12 天。

斷層活動度與地震潛能分析模式評估部分，本計畫參考美、日之研究方法及結果，建立臺灣地區評估活動斷層潛勢之方法，共分為三種情形之分析流程。第一種已知古地震發生次數有 2 次以上之斷層(如車籠埔斷層)；第二種僅知道古地震最後一次發生的時間(如：新城斷層)；第三種(為無任何古地震最後一次事件未知資料的)斷層進行評估(如：大茅埔--雙冬斷層)。另外本研究參考美國南加州地區建立各活動斷層的三維幾何構造模型經驗，本計畫充分運用六甲斷層與木屐寮斷層地質和地球物理資料，建立活動斷層之三維構造何模型，除了在視覺展示上具效果外，在斷層潛勢分析或是斷層面滑移量模擬都有所幫助。本計畫在進行六甲斷層與木屐寮斷層潛勢評估時，是考慮兩條斷層同時破裂之情形，並參考 Hung et al.[1999]之構造剖面建立斷層面之三維幾何模型，面積為 654 平方公里。在進行活動斷層發震機率評估時，考慮兩種情況：狀況一為未知活動斷層最近一次活動時間，以 Poisson 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 ≥ 6.7 之機率為 11.46%，18.35%，33.26%； $M_w \geq 7.0$ 之機率為 4.40%，7.23%，13.91%；狀況二為假設 1941 年中埔地震為最近一次發生時間，以 BPT 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 ≥ 6.7 之機率為 5.17%，11.13%，30.46%； $M_w \geq 7.0$ 之機率為 0.01%，0.05%，0.62%。

在整合資料觀測分析部分，本研究針對規模五以上的地震，尋找可能的異常記錄，結至 2011 年 10 月止，總共有 87 的地震規模大於 5 的事件，其中，其中規模最大為 M6.9，發生在花蓮市地震站東南約 20 公里外海。其空間分布及對應的震源機制如圖 1.7 所示。在 87 個規模五以上事件中，約 78% 的地震皆發生於台灣東部及外海。共有 11 個規模大於六的地震，亦大多為東部外海的地震，僅有兩個地震分別發生在高雄甲仙(M6.4, 2010/3/4)和南投名間(M6.2, 2009/11/05)。這些規模六的地震僅有一個事件同時觀測到(1) 地下水位(2)地化氣體(3)井下應變儀記錄三樣異常，此事件為規模最大的 M6.9 地震。

異常記錄統計圖如圖 1.8 事件 27 和 72，發生於 2009/12/19(規模 6.9，花蓮外海)和 2011/3/20(規模 5.8，台東外海)。而由於規模 5.8 的地震事件又同時有對應到慢滑事件(slow slip event)的長微震(tremor)之記錄，我們初步排除規模 5.8 地震事件的同步異常觀測為前兆型異常。

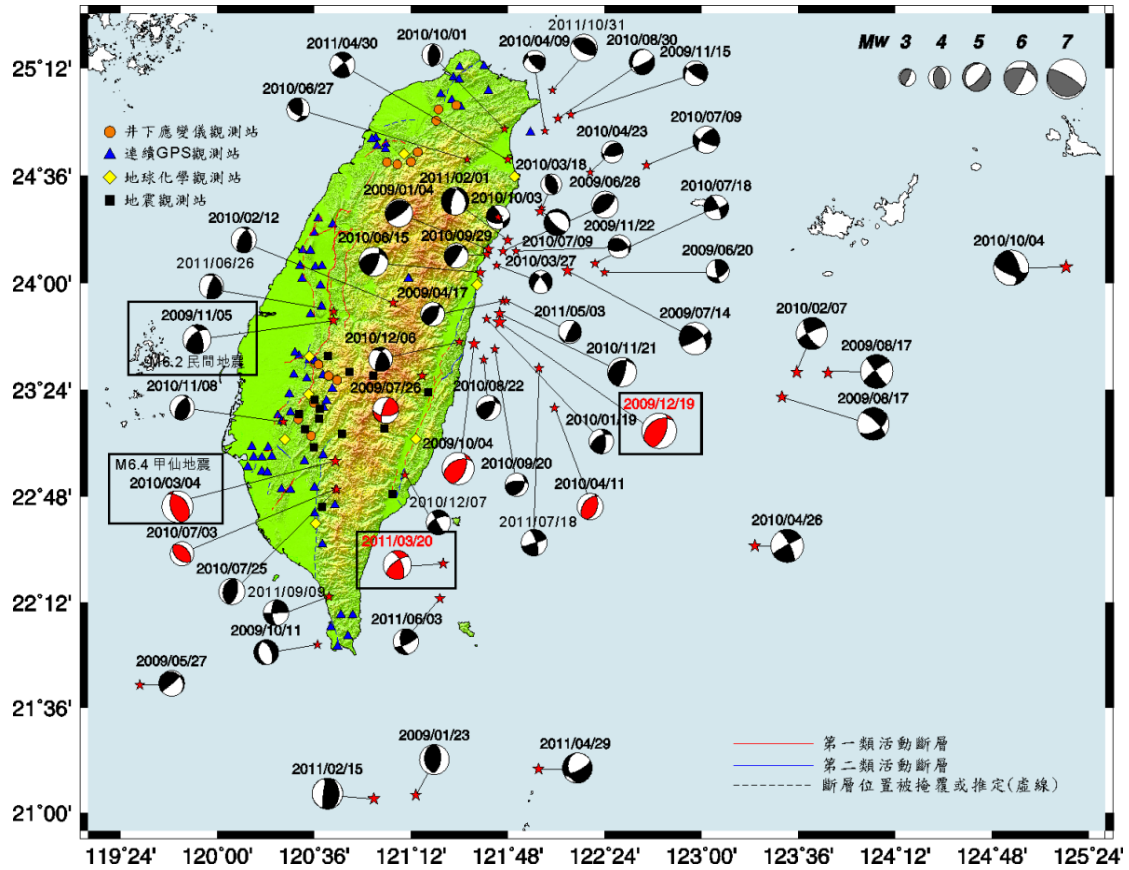
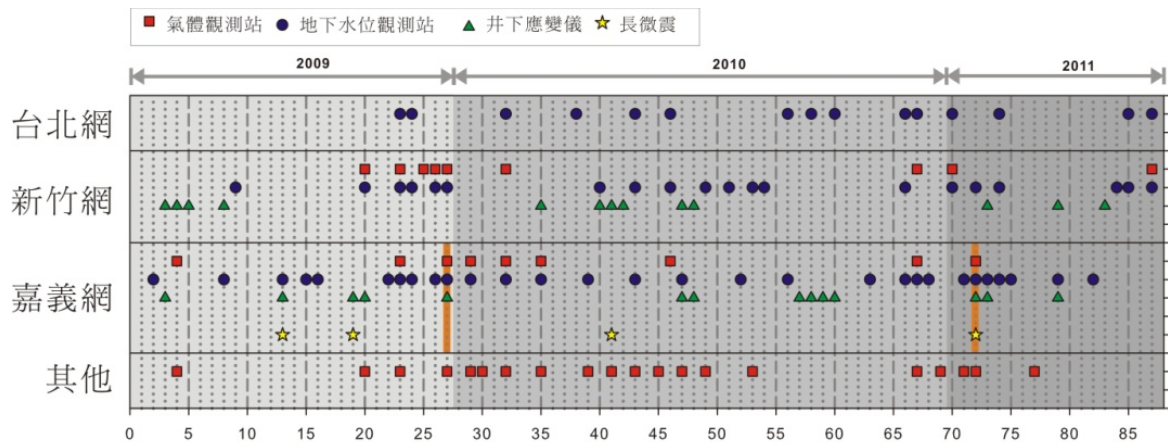


圖 1.7：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。紅色海灘球為所有觀測網中觀測到至少三種或以上之異常訊號。



2009/1~2011/10 規模大於五的地震ID列表

圖 1.8：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。

1-3 本年度工作內容概述

本計畫目標在藉由地調所設置的 72 個 GPS 連續追蹤站和其它單位交換的 128 個連續觀測站（表 1.1，圖 1.9）、GPS 移動站（圖 1.10）、精密水準測線（圖 1.10）、井下應變儀（表 1.2）及地球化學觀測站（表 1.3）的監測資料（圖 1.1），同時配合地質構造、數值模擬與斷層活動度研究，分析測站鄰近斷層滑移速率的變化及地殼變形特性，評估斷層活動度與地震潛能，以瞭解各區域斷層的活動特性及可能的孕震、發震構造（如活動斷層、盲斷層及地震活動密集區）並進行持續性的監測。除了可精確瞭解斷層活動的狀況，定出斷層的滑移速率外，再配合重點區域進行的微震觀測，希望可釐清斷層的地下形貌、應力累積、釋放過程及分布概況，將有助於國土建設、規劃及地震災害防救工作之規劃。本計畫今年度工作內容概述如下：（各 GPS 及應變儀觀測站之觀測資料分析將視地調所所能提供之資料為限）

- (1) 測量外業督導（GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點，共計 40 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 41 測段。以上數據以 2012 年度測量公司承辦之業務範圍為準）、GPS 分區測量數量之 10%（小數點以下四捨五入）抽樣檢核測量、GPS 測量成果與抽測結果基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。
- (2) 藉由 GPS 移動站（依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位）與連續站（以經濟部中央地質調查所設置為主，其站位數量及資料以地調所所能提供者為限）及精密水準測量資料，計算地表位移向量，以推求地表水平與垂直方向的速度場，並提供區域之主應變率及跨斷層的滑移速率分析。
- (3) GPS 與水準測量歷年成果分析（項目至少包含 GPS 與水準測量之誤差及成果分析、斷層位置及其地表變形特徵、斷層短期滑移速率及隨時間速率變化情形等）。
- (4) 利用所得之地表速度場及應變率，對台南及高屏地區進行斷層模型參數（以地調所 2010 年出版之活動斷層為主）反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據。
- (5) 井下應變儀應變率異常評估：綜合地化異常討論是否為前兆，以及綜合地震觀測資料討論是否與慢地震有關。
- (6) 針對規模大於 5 的地震評估：利用井下應變儀、地化測站及地震活動（地震安靜期）探討是否有前兆？
- (7) 蒐集並確定池上與小崗山斷層之斷層參數：包括斷層長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複週期、最大地震規模等；進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估，說明各項參數

計算與求取之考量。

- (8) 完成井下應變儀資料庫資料庫整合，持續建立資料庫（收集並處理資料）。
- (9) 完成井下應變儀資料庫建置，完成應變分析成果展示軟體開發。

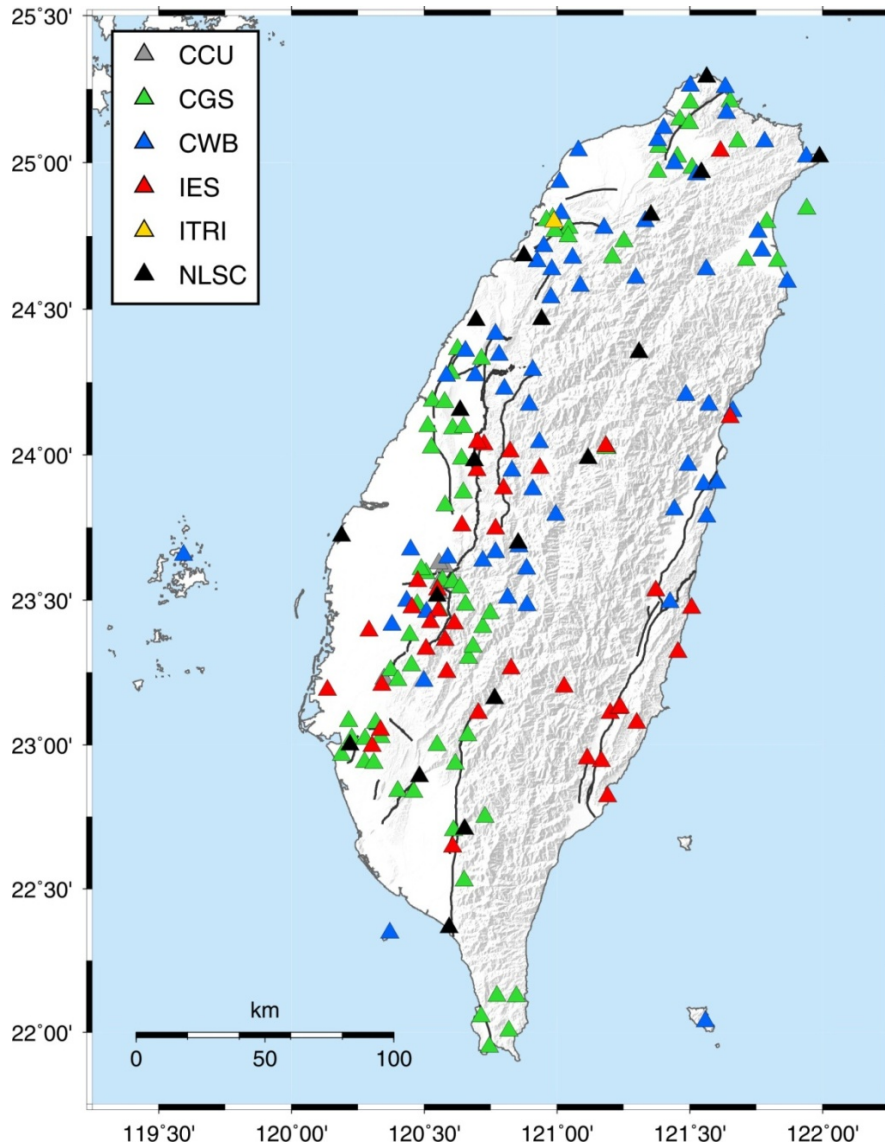


圖 1.9：地質調查所設置的 72 個連續觀測站與其它單位交換 128 個連續觀測站分布圖。架設單位代號：CCU 為國立中正大學、CGS 為經濟部中央地質調查所、CWB 為交通部中央氣象局、IES 為中央研究院、ITRI 為經濟部工業技術研究院、NLSC 為內政部國土測繪中心。

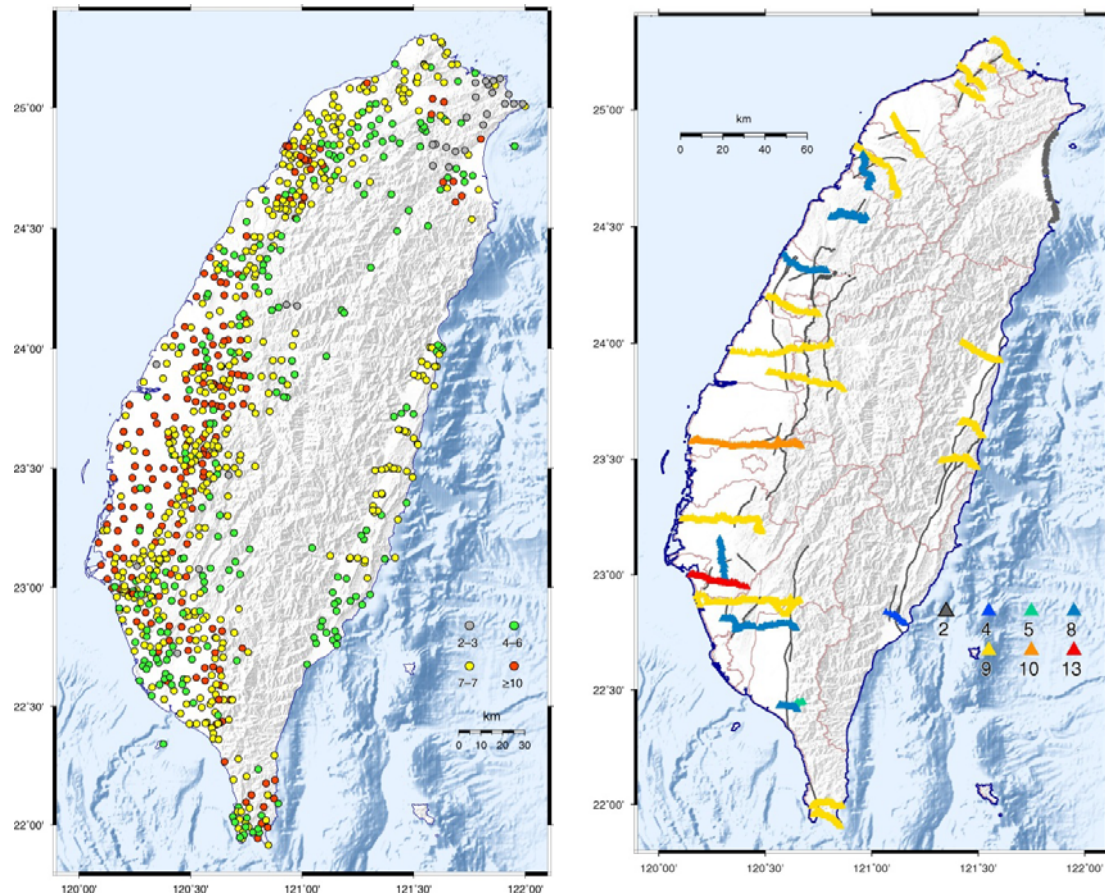


圖 1.10：2002 年 3 月至 2012 年 11 月 GPS 移動站及水準測線分布與施測次數圖。左圖中圓點表各 GPS 移動站點位的位置，點位的顏色代表其施測次數（以年為單位）。右圖中三角點表各精密水準點位的位置，點位的顏色代表其施測次數（以年為單位）。

1-4 本年度預期成果

◎ GPS 連續追蹤站、移動站和精密水準測線

- (1) 完成測量外業規劃、監工及資料檢算，並進行 2012 年測量資料之精度分析。
- (2) 完成全臺灣 GPS 與水準資料之解算分析，推求全臺灣速度場及應變速率之空間分布情形。
- (3) 完成台南及高屏地區之斷層模型建置與斷層參數推求。
- (4) 綜合歷年計畫之成果，討論台南及高屏地區斷層系統的斷層參數、活動行為及地震潛能之合理性。

◎ 井下應變儀觀測

- (1) 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓、潮汐影響及井孔溫度校正，估計自然環境對應變資料的影響量，以及地調所既有 11 測站(ECT 與 LMMT 已故障)之井孔回復與水泥膨脹效應的影響。計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積異常與地震之關係。
- (2) 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。
- (3) 經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。
- (4) 持續建立資料庫(收集並處理資料)。
- (5) 完成井下應變儀資料庫建置，完成應變分析成果展示軟體開發。

◎ 斷層活動度與地震潛能分析模式之評估

- (1) 挑選池上斷層與小崗山斷層(註：若所分析之斷層參數不足時，屆時會依其重要性或已確定之活動斷層，將另行選定其他斷層進行分析研究)，蒐集並確定斷層參數：包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率 (slip rates)、滑移赤字 (slip deficit) 及地震重複週期 (recurrence interval)、最大地震規模 (maximum possible earthquake magnitude) 等，說明各項參數計算與求取之考量；同時詳細標註資料來源及參考文獻。
- (2) 進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估。

◎ 整合觀測資料分析

- (1) 分別建立 GPS、井下應變儀、和地震儀(長微震訊號)記錄異常資料庫。
- (2) 針對(1)地球化學監測站 (2)地下水位 (3) GPS 連續站資料(4)井下應變儀(5)井下地震儀(配合氣象局短周期和中研院寬頻測站)之資料進行時間空間序列比較。
- (3) 綜合以上觀測資料分析其相關性，進一步探討異常事件發生是否與區域地震、遠距地震、慢滑事件有關，進一步釐清地震前兆的可能性。

第二章、GPS 及精密水準測量

2-1 工作項目

在 2012 年計畫之 GPS 及精密水準測量工作項目中，依據透空度及其與斷層距離遠近之差異，預先規劃施測約 900 個 GPS 移動站點位及 41 條橫跨活動斷層總長度為約 1,000 公里的精密水準測線來進行 GPS 與精密水準測線之觀測。與此同時，本計畫也收集 200 個 GPS 連續站之觀測資料來進行資料分析。

GPS 及精密水準施測進度及其測量次數如表 2.1 至表 2.2 及圖 1.10 所示。該部分之期末工作項目分別如下所示：

- (1) 利用軟體解算 GPS 連續站資料，其中包含 68 個中央地質調查所 GPS 連續站，以及與其他單位交換約 129 個 GPS 連續觀測站之資料，進而計算其速度場和應變場並探討 GPS 時間序列之週期性效應。
- (2) 針對 2002-2010 年所設置之 GPS 與精密水準測量監測網進行重複觀測，並規劃針對歷年 GPS 及精密水準遺失或毀損之點位進行補設作業。
- (3) 藉由全臺 GPS 站點及精密水準之測量資料，計算地表位移向量來推求應變速率之空間分布情形，以瞭解地殼變形狀況。並透過資料的時序分析，闡明地殼變形與地震發生間之關係。
- (4) 利用斷層模型之建立評估斷層滑移型態、斷層滑移速率及各個斷層參數（包含斷層幾何，閉鎖深度，斷層面積等）。並結合大地測量、地質及地震資料，解析各主要斷層之地震潛能之問題。

表 2.1：GPS 測量進度表。

| 項次 | 地區 | 預計測量時間 | 實際測量時間 | 外業監工時間 | 檢測時間 |
|----|--------|--------|-------------|-------------|----------------------------|
| 1 | 臺北地區 | 10 月 | 10/03-10/20 | 10/19-10/20 | 10/31-11/01 |
| 2 | 桃竹苗地區 | 5 月 | 05/04-05/26 | 05/16-05/18 | 05/16-05/18 05/28-05/29 |
| 3 | 中部地區 | 8 月 | 08/06-08/30 | 08/14-08/15 | 08/14-08/16 |
| 4 | 嘉南地區 | 6 月 | 06/04-06/29 | 07/03-07/04 | 07/03-07/05 |
| 5 | 高屏地區 | 7 月 | 07/07-07/25 | 07/18-07/19 | 07/18-07/19 |
| 6 | 恆春半島地區 | 4 月 | 04/16-04/21 | 04/21 | 04/21-04/22 |
| 7 | 宜蘭地區 | 10 月 | 10/21-10/27 | 10/21 | 11/02 |
| 8 | 花東地區 | 9 月 | 09/12-09/24 | 09/13-09/14 | 08/21-08/24 |

表 2.2：水準測線測量進度表。

| 項次 | 測線名稱 | 預計測量時間 | 實際測量時間 | 外業監工時間 |
|----|--------------------|--------|-------------|-------------|
| 1 | 台 2_石門至萬里測線 | 9 月 | 09/01-09/02 | 09/02 |
| 2 | 士林至三芝測線 | 9 月 | 09/07-09/08 | 09/07 |
| 3 | 淡水至士林測線 | 9 月 | 09/03-09/04 | 09/04 |
| 4 | 五股至臺北測線 | 9 月 | 09/05-09/06 | 09/05 |
| 5 | 信義測線 | 9 月 | 09/05 | 09/05 |
| 6 | 縣 115_新屋至童話世界測線 | 7 月 | 07/23-07/28 | 07/25 |
| 7 | 縣 122_新竹至五峰測線 | 6 月 | 06/01-06/09 | 06/07 |
| 8 | 縣 117_新竹至峨眉測線 | 6 月 | 06/10-06/21 | 06/18 |
| 9 | 苗栗至南庄測線 | 8 月 | 08/06-08/29 | 08/29 |
| 10 | 縣 132_大安至東勢測線 | 3 月 | 03/23-03/29 | 03/23 |
| 11 | 縣 136_龍井至太平測線 | 7 月 | 07/09-07/14 | 07/10 |
| 12 | 五光至黃竹測線 | 8 月 | 08/03-08/10 | 08/04 |
| 13 | 曾厝至霧峰測線 | 8 月 | 08/04 | 08/04 |
| 14 | 北勢至峰谷測線 | 8 月 | 08/03-08/05 | 08/05 |
| 15 | 烏溪南岸測線 | 8 月 | 08/01 | 08/01 |
| 16 | 王功至草屯測線草屯至埔里段 | 3 月 | 03/5-03/21 | 03/09-03/10 |
| 17 | 縣 148-台 14_王功至草屯測線 | | | |
| 18 | 中興新村測線 | 8 月 | 08/01 | 08/01 |
| 19 | 縣 150-台 16_北斗至水里測線 | 3 月 | 03/14-03/22 | 03/22 |
| 20 | 縣 164_金湖至瑞峰測線 | 9 月 | 09/11-09/29 | 09/25 |
| 21 | B003 至 B092 測線 | 10 月 | 10/05 | 10/05 |
| 22 | B036 至 B086 測線 | 10 月 | 10/04 | 10/04 |
| 23 | B087 至 B080 測線 | 10 月 | 10/06 | 10/06 |
| 24 | B002 至 B059 測線 | 10 月 | 10/07 | 10/07 |
| 25 | B110 至 B101 測線 | 10 月 | 10/02 | 10/02 |
| 26 | B037 至 B095 測線 | 10 月 | 10/01 | 10/01 |
| 27 | G088 至 G330 測線 | 10 月 | 10/03 | 10/03 |

表 2.2：水準測線測量進度表（續）。

| 項次 | 測線名稱 | 預計測量時間 | 實際測量時間 | 外業監工時間 |
|----|----------------|--------|-------------|-------------|
| 28 | 縣 174_北門至楠西測線 | 4 月 | 04/02-04/11 | 04/07 |
| 29 | 台 19 甲_善化至關廟測線 | 10 月 | 10/11-10/15 | 10/10 |
| 30 | 縣 182_安平至龍崎測線 | 5 月 | 05/22-05/28 | 05/30 |
| 31 | 台 28_路竹至茂林主線 | 2 月 | 02/22-02/29 | 02/27-02/28 |
| 32 | 台 27_路竹至茂林副線 | | | |
| 33 | 台 22_岡山至安坡測線 | 5 月 | 05/01-05/21 | 05/22 |
| 34 | 佳冬至七佳測線 | 9 月 | 09/17-09/19 | 09/19 |
| 35 | 恆春西台地至佳樂水 | 4 月 | 04/23-04/29 | 04/25 |
| 36 | 台 26_恆春至鵝鑾鼻主線 | 4 月 | 04/26-04/29 | 04/26 |
| 37 | 恆春至鵝鑾鼻副線 | 4 月 | 04/27 | 04/27 |
| 38 | 嶺頂至瀧澗測線 | 11 月 | 11/01-11/04 | 11/03 |
| 39 | 豐濱至光復測線 | 11 月 | 規劃中 | |
| 40 | 靜浦至紅葉測線 | 11 月 | 11/05-迄今 | |
| 41 | 富岡至東成測線 | 11 月 | 規劃中 | |
| 42 | 台 2_梗枋至東澳測線 | 10 月 | 10/17-10/26 | 10/25 |

2-1-1 工作進度

由於本分項計畫之工作為分析大地測量資料，以及進行 GPS 及精密水準測量之監工，因此於此節中，我們將今年度（2012 年）計畫之工作進度區分為「外業工作」及「計畫研究工作」等二個部份之工作項目。

外業工作

詳見表 2.1 及表 2.2。

計畫研究工作

- (1) 2012/01/12-12/05 歷年資料時序分析及斷層活動機制探討工作。
- (2) 2012/02/16-12/05 地質、地震資料整理，斷層地震潛能解析及斷層模型建置工作。
- (3) 2012/03/23-12/12 臺灣地區 GPS 連續站資料計算及時間序列分析。

2-1-1-1 2012 年新點規劃

本年度至五月底為止共計新增埋設 17 個精密水準監測點位 (圖 2.1)，其編號為 GG94-GG99 及 GH01-GH11 (表 2.3)，主要向東延伸原有的縣 182_安平至龍崎測線，以強化本區龍船斷層活動性之解析能力。

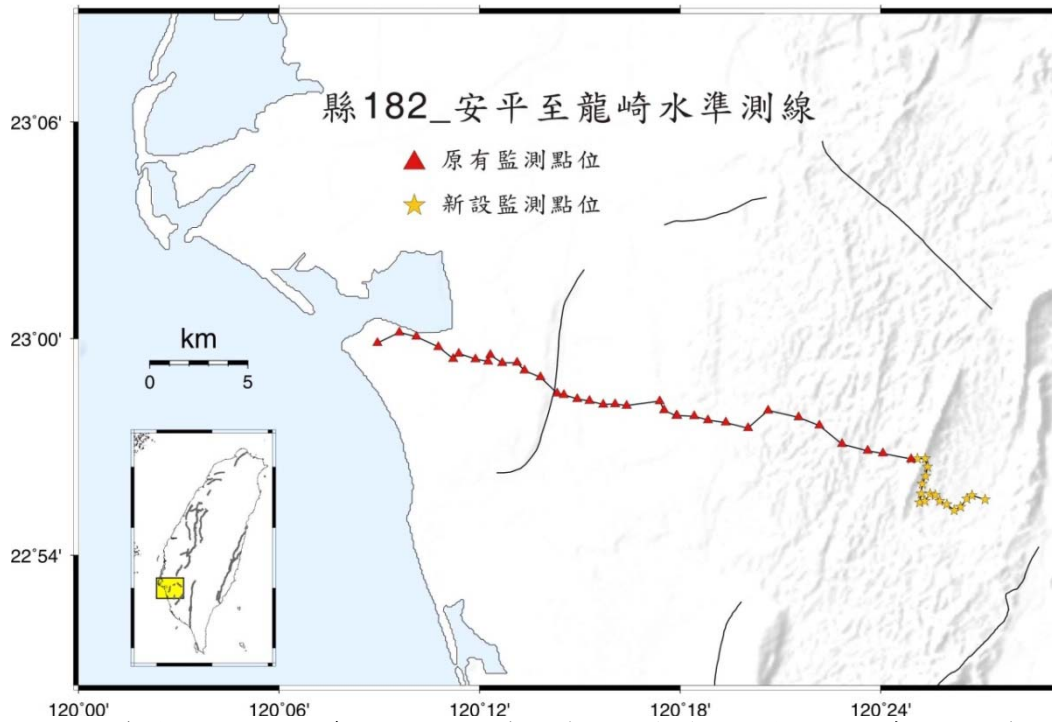


圖 2.1：2012 年度新增點位分布圖，紅色三角形表示原有精密水準點位，黃色星形為新增精密水準點位。

表 2.3：2012 年度新增精密水準點位。

| 點名 | 點號 | 緯度 | 經度 |
|------------|------|-----------|------------|
| 龍湖宮 | GG94 | 22.944685 | 120.418362 |
| 五間檳榔 | GG95 | 22.944726 | 120.422155 |
| 烏山頭清泉寺 | GG96 | 22.940820 | 120.423244 |
| 天母宮 | GG97 | 22.936554 | 120.422385 |
| 龍崎高幹 318 | GG98 | 22.932918 | 120.420684 |
| 龍崎高幹 328 | GG99 | 22.928564 | 120.420274 |
| 靈隱寺 | GH01 | 22.924361 | 120.419395 |
| 山南宮 | GH02 | 22.925066 | 120.421946 |
| 龍崎 89 之 14 | GH03 | 22.928327 | 120.424701 |
| 內龍幹 125 | GH04 | 22.927902 | 120.427140 |
| 內龍幹 108 | GH05 | 22.925165 | 120.429404 |
| 內龍幹 88 | GH06 | 22.923516 | 120.432950 |
| 九龍宮 | GH07 | 22.920865 | 120.436577 |
| 內龍幹 60 | GH08 | 22.922439 | 120.439876 |
| 內龍幹 42 | GH09 | 22.926197 | 120.442892 |
| 龍崎幹 22 | GH10 | 22.927643 | 120.445568 |
| 紫雲宮 | GH11 | 22.925723 | 120.452029 |
| 龍湖宮 | GG94 | 22.944685 | 120.418362 |

2-1-2 2012 年測量資料檢核

在 GPS 資料處理方面，本計畫主要以移動站之觀測資料為主，再配合部分連續站的觀測資料，進行臺灣地區斷層活動之監測。本研究 GPS 觀測資料之解算與網形平差，是採用 Bernese 5.0 [Dach et al., 2007] 解算軟體進行。

精密水準測線之測量乃針對 2002-2011 年所設置之精密水準測量監測網進行重複觀測。總計本年度須施測之精密水準測線共 41 條，總長度大於 1000 公里（表 2.2）。

2-1-2-1 GPS 座標計算穩定度分析

在資料計算方面，由於存在許多因素而導致計算結果不穩定，並在座標時間序列上呈現離散的現象，因此我們藉由統計的方式來查核資料計算的穩定性。在本計畫中，我們採用座標殘差及均方根誤差分析兩種方式來檢視資料計算的穩定性。座標殘差分析是將各站每次測量所獲得之座標觀測值與擬合曲線上之座標計算值相減，將所獲得之座標殘差值（residual）進行統計。在理想狀況下，如果資料之計算成果是穩定的，此殘差值會等於零；另一方面，均方根誤差分析為針對各測站每次解算時所產生的均方根誤差量（RMS error）進行統計。

2-1-2-1-1 座標殘差分析

由圖 2.2 可知 2002-2011 年及 2012 年 GPS 觀測資料之座標殘差分布情形。2002-2011 年資料中，N 方向之殘差值 95% 信賴區間為 -0.14 ± 8.59 mm（2 倍標準差）、E 方向為 0.27 ± 12.42 mm 及 H 方向為 0.18 ± 31.93 mm。在 2012 年的資料中，N 方向之殘差值 95% 信賴區間為 -0.08 ± 4.11 mm、E 方向為 0.12 ± 5.74 mm 及 H 方向為 0.63 ± 14.86 mm。

2-1-2-1-2 均方根誤差分析

均方根誤差分析為針對測站每次解算時，所產生的均方根誤差量（RMS error）做其統計。本計畫採用水平及垂直兩分量來分析。由統計結果（圖 2.3）可看出 2002-2011 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.79 mm，垂直方向為 22.38 mm，及 2012 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.07 mm，垂直方向為 20.65 mm。

2-1-2-1-3 檢查位移-時間序列

一般而言，連續站之解算成果可代表該地區長期位移趨勢，在沒有地震發生、更換天線盤等其他外力因素下，位移值應該是呈現穩定的線性分布。移動站完成資料解算，進行速度場分析前，應先比較移動站與該地區連續站解算結果之位移-時間序列圖，應符合該地區之連續站趨勢。以恆春地區為例（圖 2.4），KDNM 站（墾丁國家公園管理處）位處恆春斷層東側上盤及 HENC 站（恆春氣象站）則位於西側下盤，兩站之長期地表位移有所差異。由資料解算結果可知移動站解算結果符合連續站位移趨勢（圖

2.5)。

此外，解算成果可能會受到透空度、測量次數等因素影響，進行測量工作時若發現透空度不佳或無法施測的情形，則須檢視其長期位移速度是否符合該區型態，以決定是否保留該點位，至 2012 年為止，各 GPS 站之時間序列與點位狀況表如附錄 A。

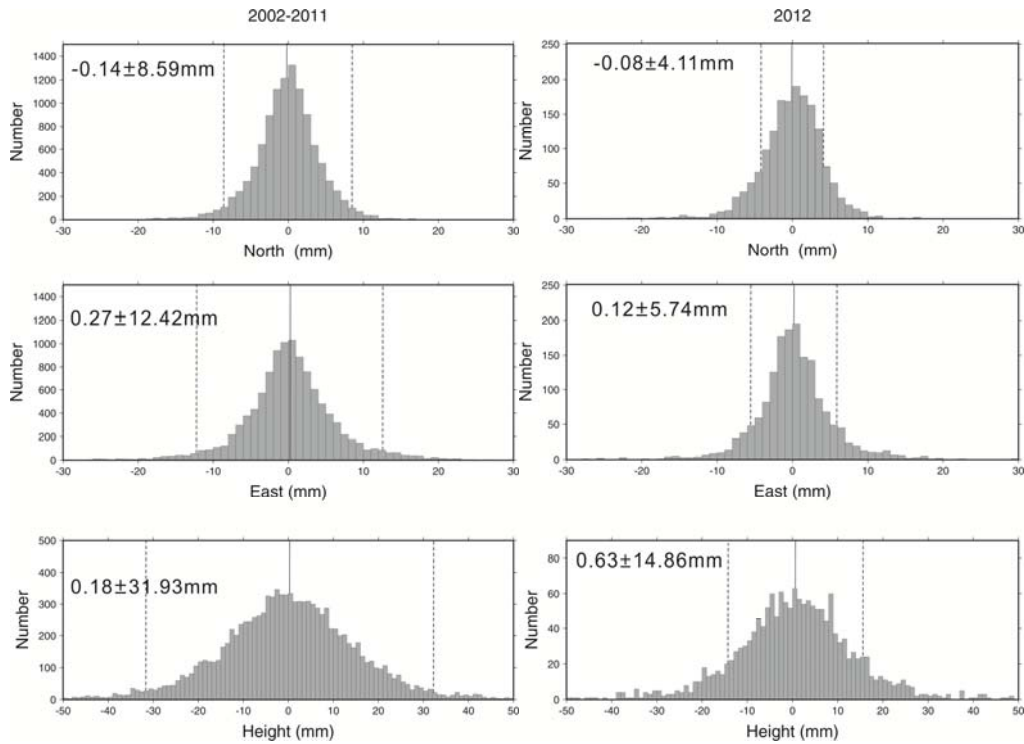


圖 2.2：2002-2011 年及 2012 年 GPS 點位坐標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

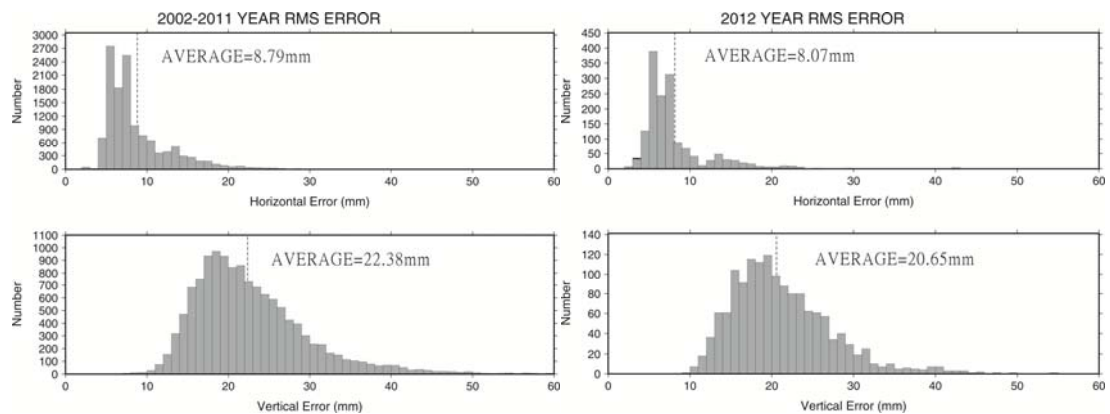


圖 2.3：2002-2011 年及 2012 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

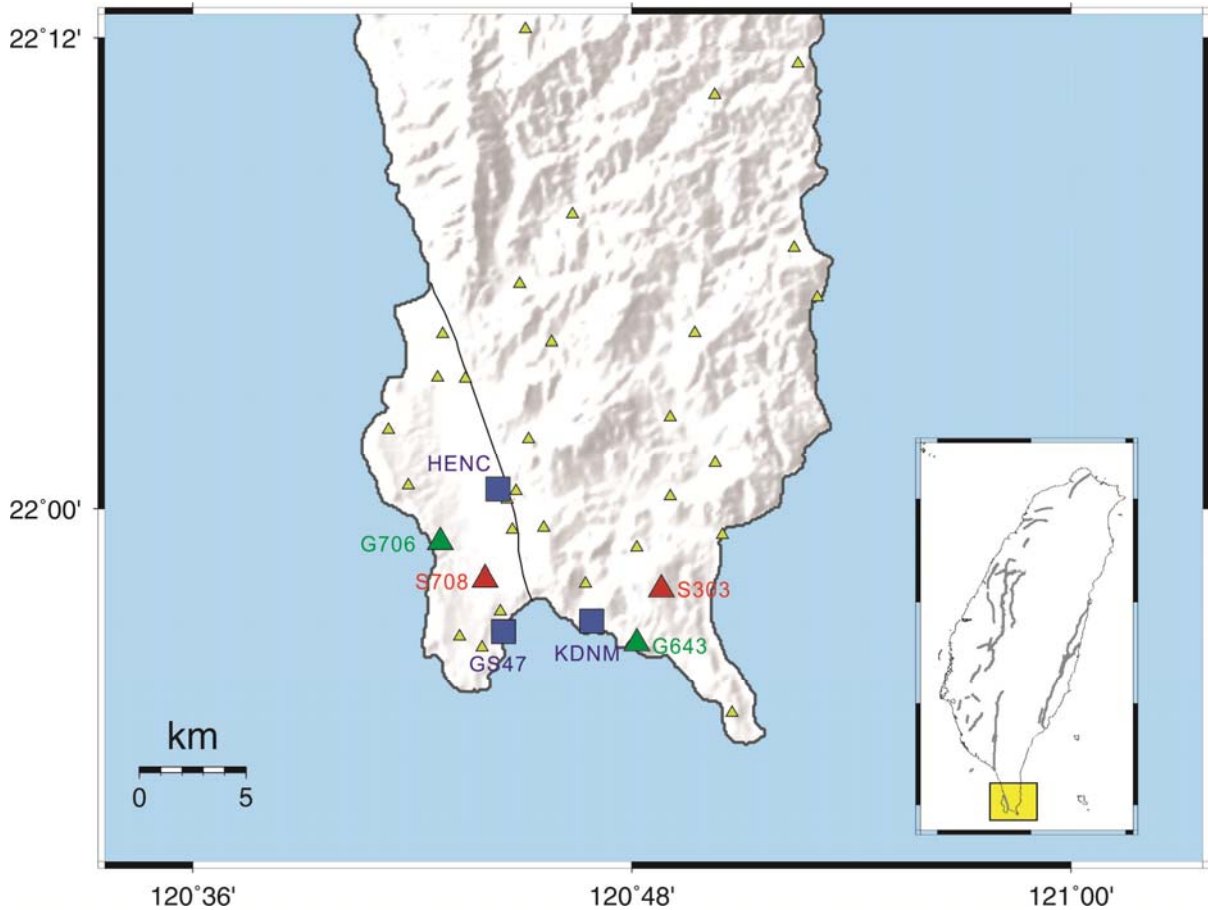


圖 2.4：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形，正方形為連續站，三角形則為移動站。

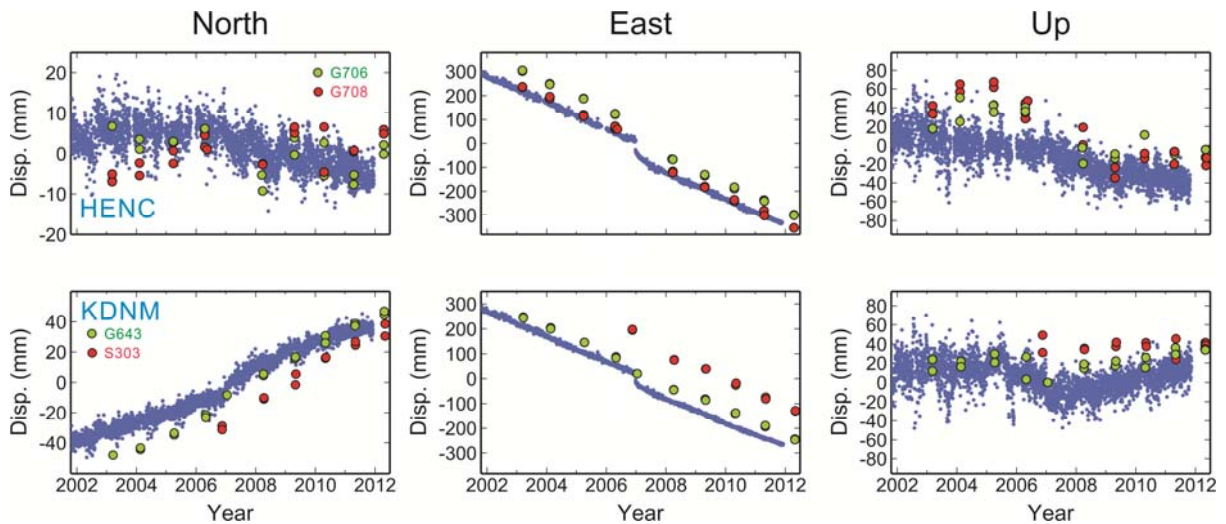


圖 2.5：2002-2012 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站 (S01R) 之位移-時間序列圖，藍色點位代表 HENC 及 KDNM 兩連續站，黃色點位分別為移動站 G706 及 G643，紅色點位則為 G708 及 S303 之位移-時間序列分布情形。

2-1-2-2 精密水準測量精度分析

2012 年所獲得之 42 條精密水準測量資料共計 1221 個測段，其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 1092 個測段（圖 2.6a），佔所有測段比例之 89.4 %。重新計算各測段之施測精度，測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 72.5 %（885 個測段）；測段往返閉合差精度小於 $2.0\sqrt{k}$ 者，則佔所有測段比例為 94.7 %（1156 個測段）。考慮與測段距離的關係後[Bomford, 1985]，每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 1070 個測段達測段達 87.6 %（圖 2.6b），顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

精密水準測量中，除縣 182_安平至龍崎測線、縣 164_金湖至瑞峰測線、富岡至東成測線與台 2_梗枋至東澳測線分別有 13 次、10 次、4 次與 2 次測量記錄外，其餘測線皆有 8 次之測量資料。各測線之精密水準點位時間序列狀況詳見附錄 B-2 節，點位狀況及資料涵蓋時間詳見附錄 B-3 節。

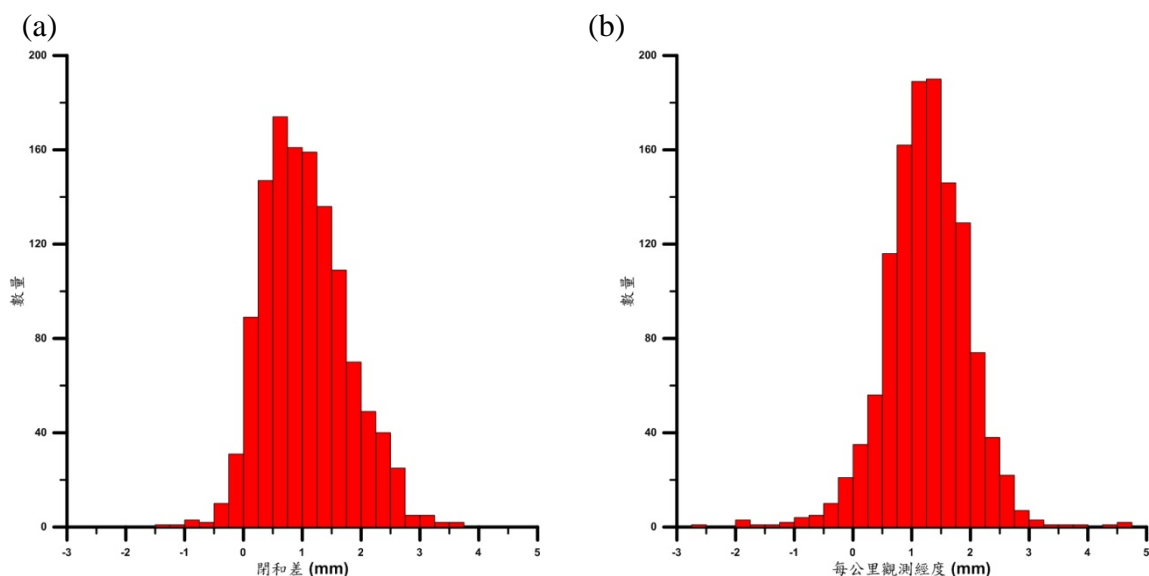


圖 2.6：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a)為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.50 mm 上。(b)為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 1.50 mm 上。

2-1-2-2-1 各測線高程變化分析

台 2_石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 30 公里，本水準測線於此測線於 2004 至 2012 年間共施測 9 次，分別於 2004-2005 及 2007-2012 年間的 9 月份、2006 年 8 月間進行。由垂直速度變化顯示，本測線跨斷層並未有大於 ± 3 mm/yr 的明顯高程差變化量(圖 2.7)，此結果顯示 2004-2012 年間，山腳斷層在該區域並未有明顯之活動性，然該測線點位在由西 7-10 km 處有下陷 ~ 4 mm/yr、17-18 km 處有下陷 ~ 2 mm/yr 的變化，與地調所公佈之山腳斷層地表位置相關，可能屬於山腳斷層及其分支斷層的活動現象。此外，該測線之點位時間序列斜率亦沒有明顯之變化。

士林至三芝測線

本測線亦跨越山腳斷層，測線長約 9 公里。該測線 2004 至 2012 年間之 9 次測量分別於 2004-2005 及 2007-2012 年的 9 月、2006 年 8 月間進行。此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側(GB11 及 GB12)，由垂直速度之結果顯示，本區域跨斷層之水準垂直速度變化並未有大於 5 mm/yr 的明顯高程差變化量(圖 2.8)，然而與台 2_石門至萬里測線相較之下，由西約 0.2 km 處垂直速度大於 5 mm/yr，向東至 4 km 處逐漸遞減至約 2 mm/yr，而後又向東繼續抬升至約 10 mm/yr，測線的垂直速度有較大之變化，據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能較為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要長時間的監測以及與其他資料的佐證。同時，該測線之點位時間序列斜率亦沒有明顯之變化，此點可供垂直速度變化之佐證。

淡水至士林測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 21 公里，在 2004 年 9 月進行第一次施測之後，又分別於 2005 年 10 月、2006 年 8 月、2007-2012 年的 9 月間進行第 2 至第 9 次的施測。由圖 2.9 中得知，山腳斷層東側 3.5 公里內的垂直速度皆顯示顯著的沉陷(0959 至 B229，臺北市大度路知行路口至大度路中央北路二段 257 巷路口)，其最大沉陷量為 -25.9 mm/yr；而點位時間序列亦在此區段間呈現下陷的趨勢。觀察 2004-2006 及 2007-2012 之高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由 -30 mm 至 -10 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。由於該區位於基隆河與淡水河的匯流處，屬於河流下游沙洲的一部分，此明顯的變化應與該區域因地表未固結岩體之壓密與固結岩層之排水結合高密度人為活動，以及部分斷層活動而產生的地表沉陷有關。

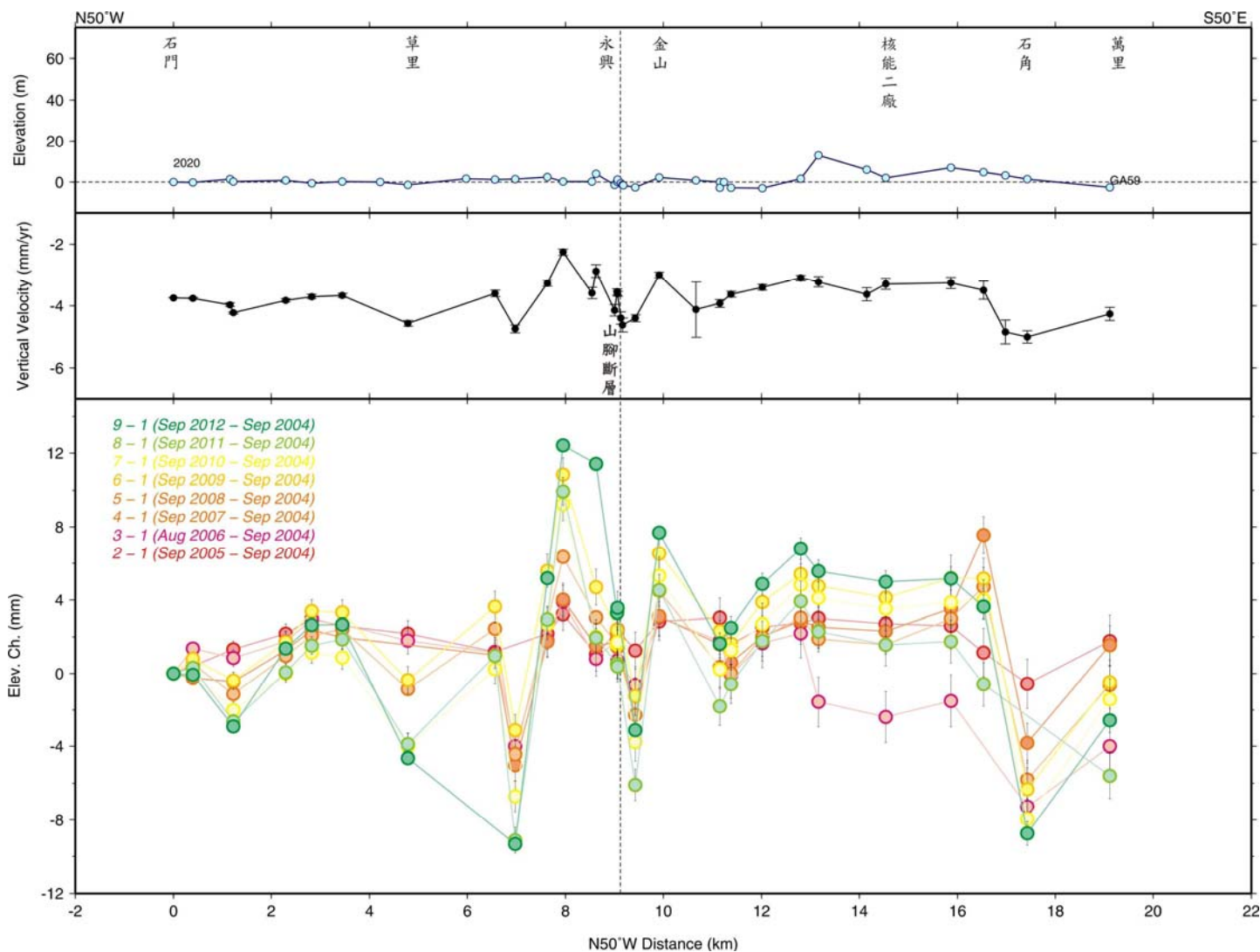


圖 2.7：台 2_石門至萬里測線水準垂直速度圖。最上一欄為固定最西側點位高程為 0 m 之地形變化，第二欄為相對 S01R 之精密水準垂直速度。第三欄為相對第一次測量相減的高程變化曲線。垂直虛線為地調所 2010 年公布之活動斷層與地調所各區域地質圖中繪製之褶皺軸的地表出露位置，水平虛線為垂直速度與高程為零之位置。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

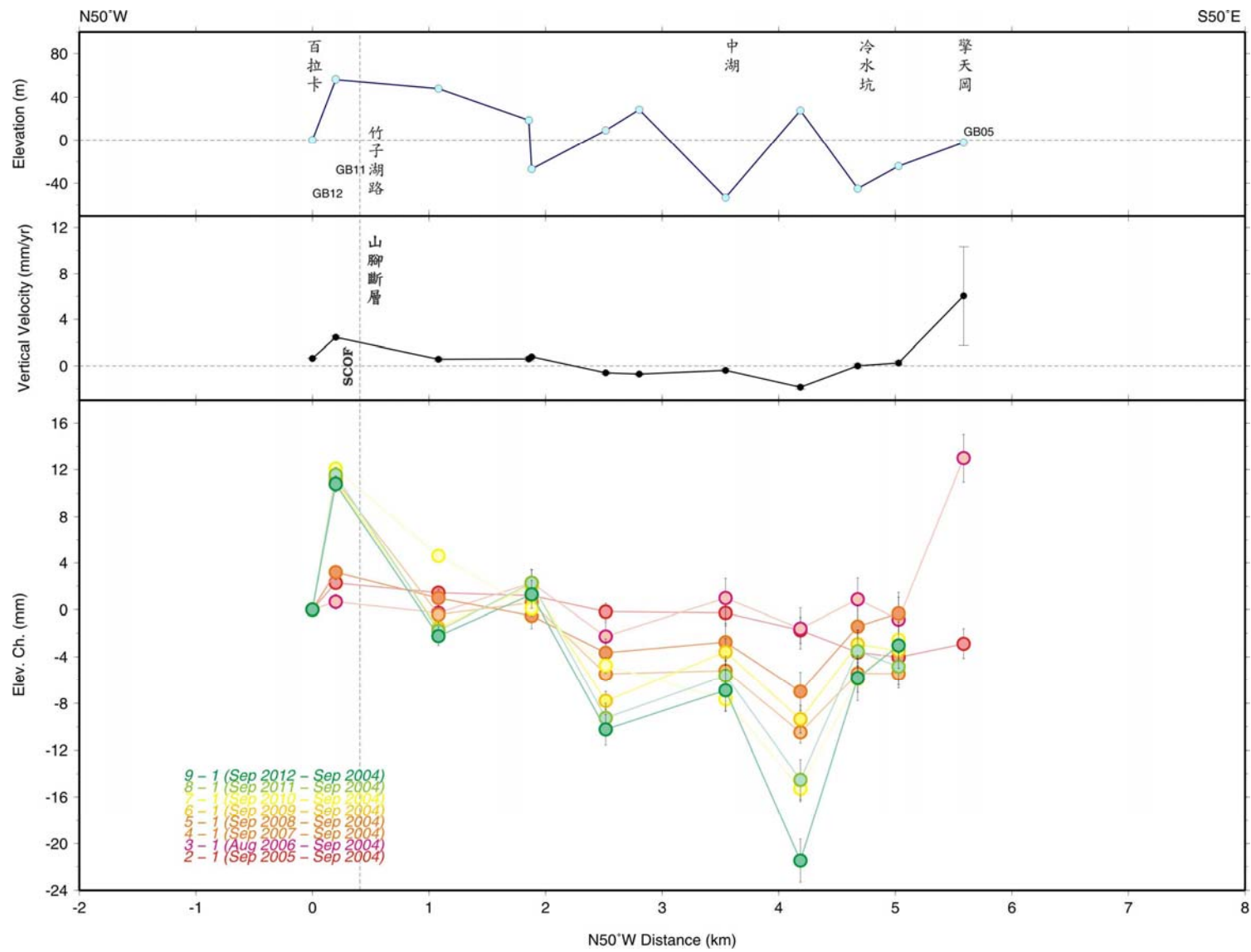


圖 2.8：士林至三芝測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

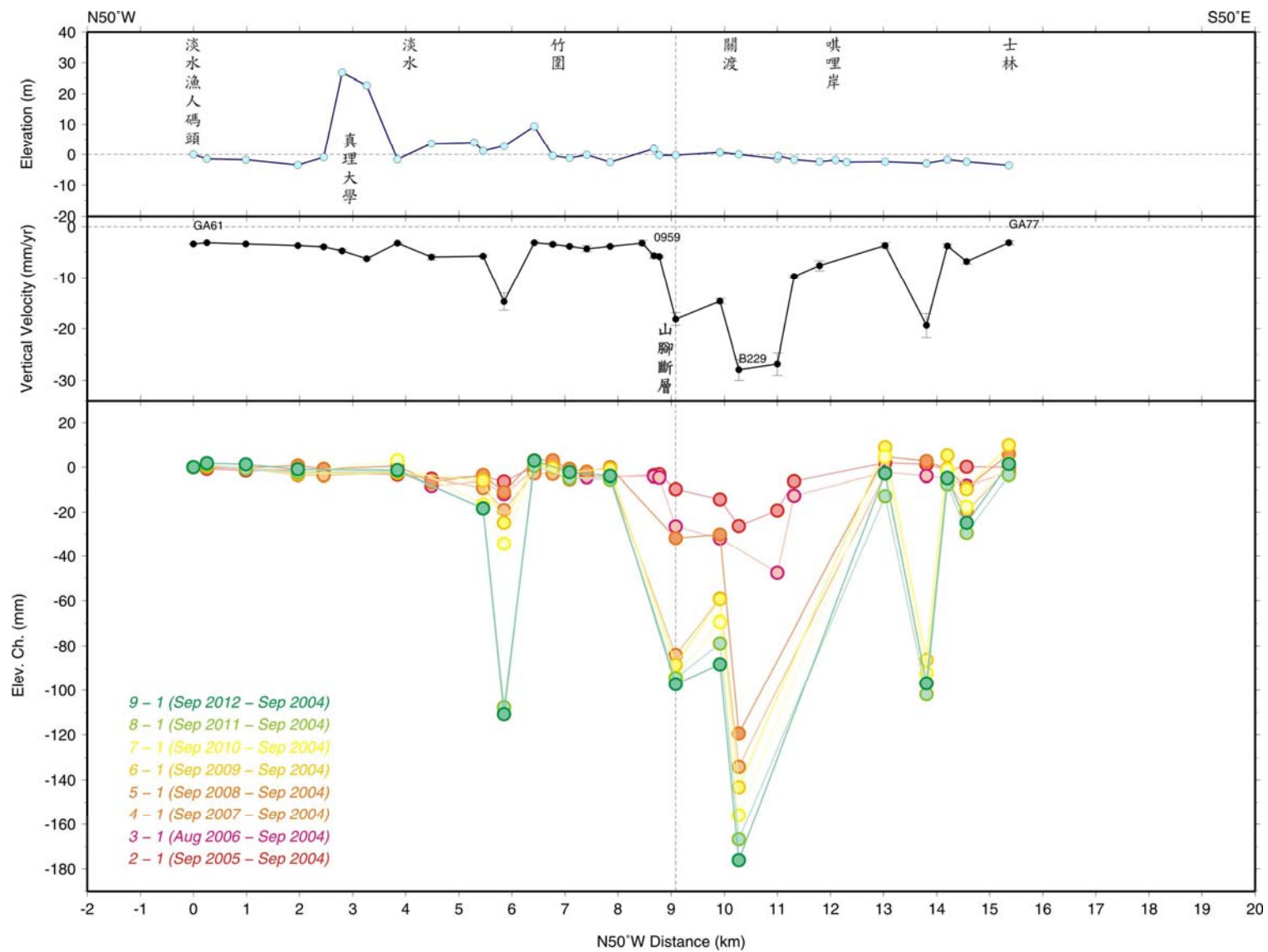


圖 2.9：淡水至士林測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

五股至臺北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 19 公里。此水準測線於 2004 及 2006 年的 8 月、2005 及 2007-2012 年的 9 月間進行 9 次的施測。由水準垂直速度的變化說明，點位五股至五股濕地公園間（1153 至 GA85）有最大垂直速度變化約 -11 mm/yr（圖 2.10），此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。斷層東側之地表活動可分為沉陷與抬升兩類。依據經濟部水利署於 2007 年 9 月 17 日所發佈之新聞稿，臺北局部地區（臺北縣三重市、蘆洲鄉、新莊市、臺北市中山區）於 2004-2006 年間出現較明顯地層下陷徵兆，最大年平均下陷速率約 26 mm/yr，與我方之垂直速度相較，說明 2007 年至 2009 年間地表下陷情形雖有略微緩減，但該地區仍為地表沉陷。

縣 115_新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層與大平地斷層，測線長 34 公里，水準測線於 2004 年 6 月、2005-2012 年的 7 月間進行 9 次的施測作業。整條水準測線之垂直速度均落在 0-5 mm/yr 之內（圖 2.11），而時間序列亦呈現此一結果。由垂直速度的變化顯示近 6 年來雙連坡斷層的活動性並不顯著（跨斷層變化 < 1 mm/yr）；而大平地斷層則有較大之垂直速度變化（~4 mm/yr）。

縣 122_新竹至五峰測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及大平地斷層，測線長 46 公里之縣 122_新竹至五峰水準測線，於 2002 年 10 月、2004 年 3 月、2005 年 6 月、2006 年 4 月、2008-2012 年的 6 月間進行共 9 次的施測。由 9 次的結果顯示整條水準測線之垂直方向速度幾乎均落在 0-6 mm/yr 之內（圖 2.12），最大速度變化為跨越新城斷層的 6 mm/yr。藉由時間序列的趨勢線斜率均大致相同，顯示於 2002-2012 年間，該區域斷層活動並不明顯。

縣 117_新竹至峨眉測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層，測線長 31 公里，此測線於 2004-2005 及 2008-2012 年的 6 月、2006 年 7 月間進行共 7 次的施測。整條測線的垂直速度（圖 2.13）及時間序列並未有明顯的變化，由垂直速度指出新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層並無產生顯著垂直變形之趨勢。另 2005-2006 年間之高程變化與其他時段（2004-2005、2006-2010）不同，疑與 2006 年 7 月凱米颱風（KAEMI）之降雨有關（警報期間：7/23-7/26；水準測量期間：7/10-8/01）。

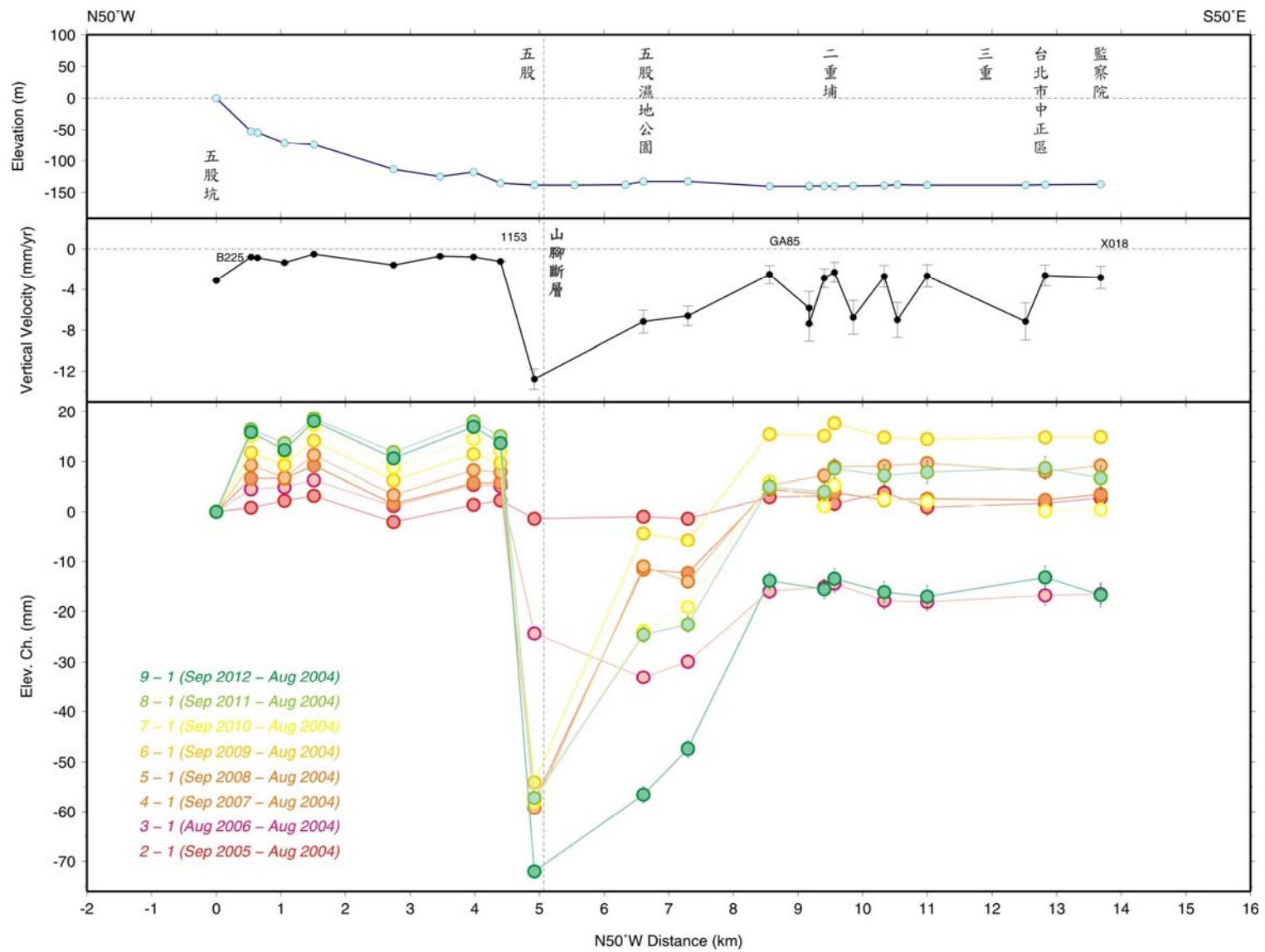


圖 2.10：五股至臺北測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

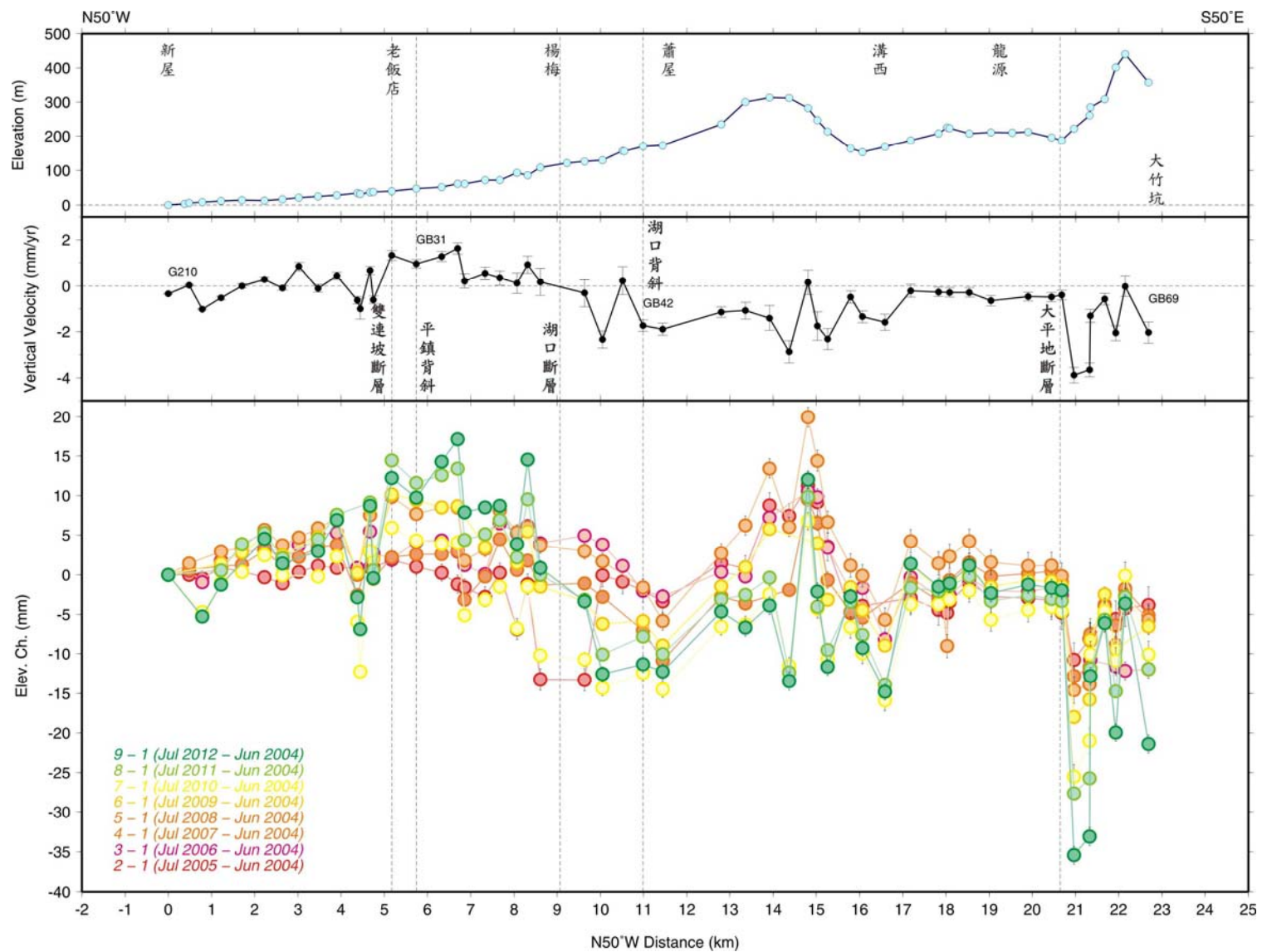


圖 2.11：縣 115_新屋至童話世界測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

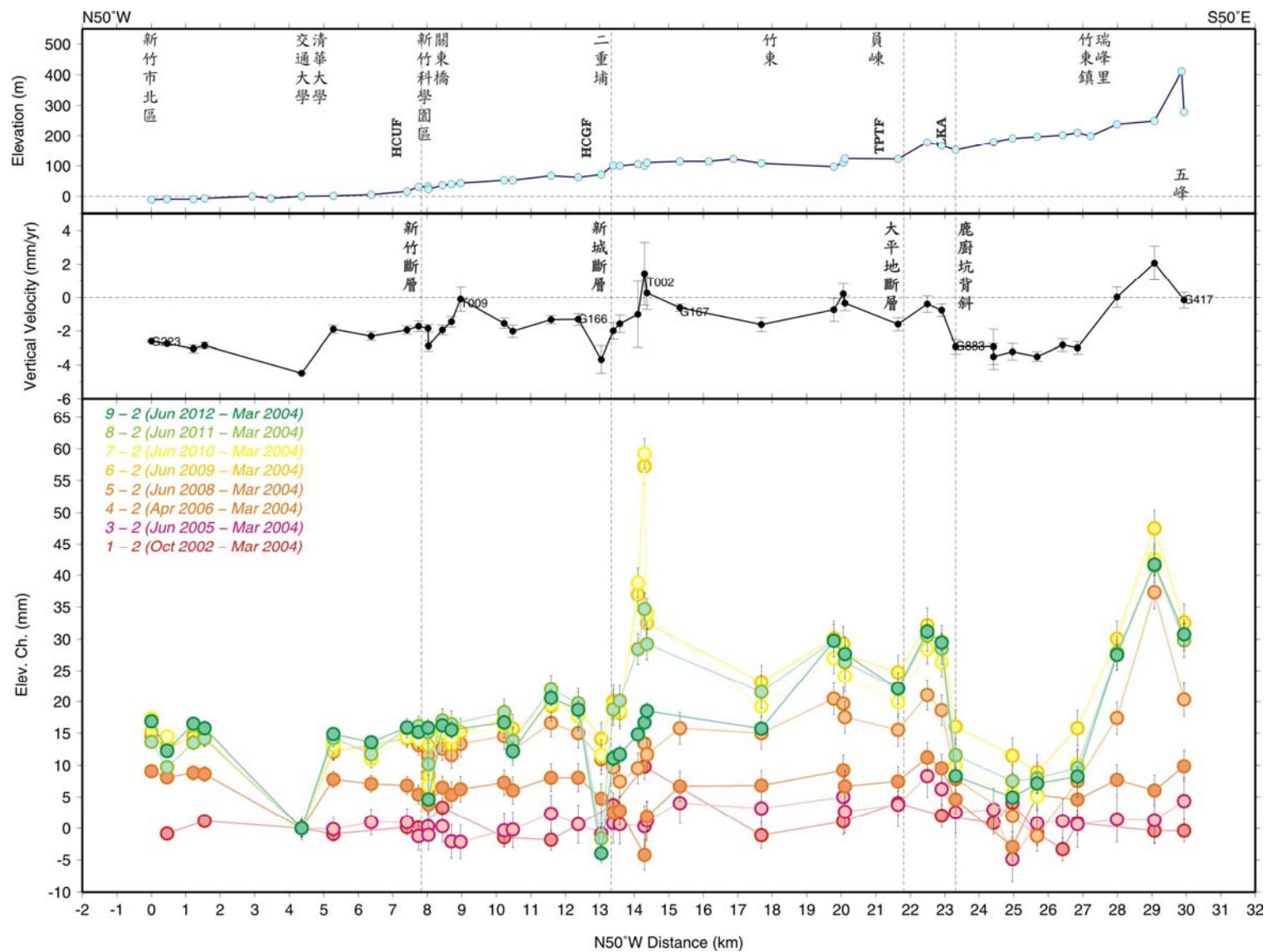


圖 2.12：縣 122_新竹至五峰測線水準垂直速度圖。最下欄為相對第二次測量相減的高程變化曲線。其餘圖例如圖 2.7 所示。

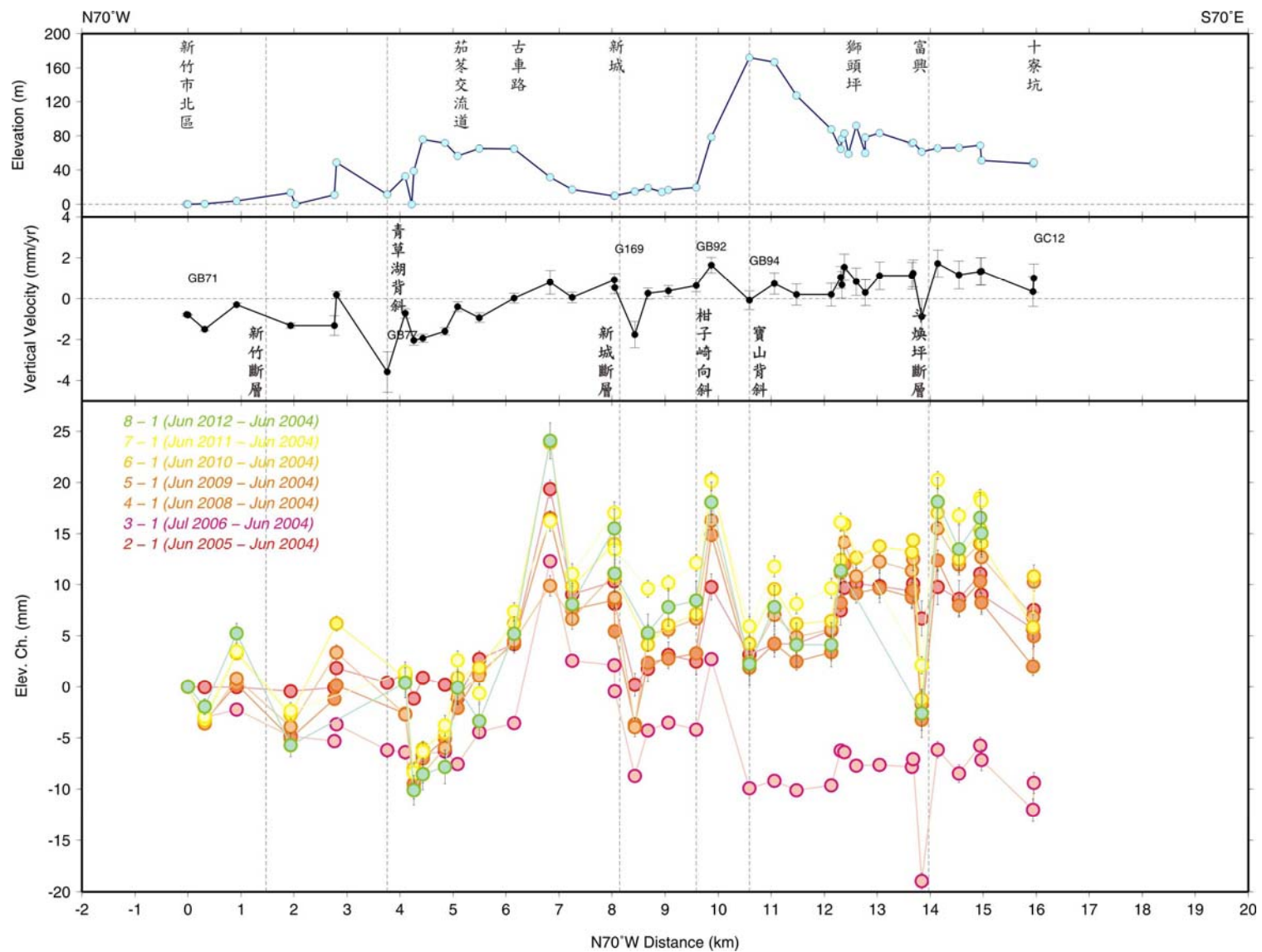


圖 2.13：縣 117_新竹至峨眉測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長 43 公里，此測線於 2005 年及 2007-2012 年的 8 月、2006 年的 9 月間共進行 8 次的施測。整條測線的水準垂直速度在 ± 4 mm/yr 之間（圖 2.14），除 2009-2010 年間之高程變化接近地形變化外，2005-2009 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。此結果可能暗示此地區之斷層滑移量主要是集中在滑脫面上。而由時間序列發現自石觀音（GD33）起，點位略微呈現逐年抬升的趨勢。

縣 132_大安至東勢測線

本測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 31 公里。本測線除 2005 年於 7 月、2006 年於 5 月進行測量外，2004 年、2008-2012 年皆在 3-4 月間施測，共計有 7 次的觀測資料。就水準垂直速度之變化而言，各處之垂直速度多在 0-4 mm/yr 之間（圖 2.15），且自外埔（G905）至后里（G912）間的垂直速度呈現下滑的趨勢，通過三義斷層後又上揚至測線末端顯示屯子腳斷層北側有略微下陷的現象，而三義斷層的上盤正持續抬升。另海墘（G091）至大甲東（G901）之間的高程變化於 2004-2012 年呈現規律之起伏（圖 2.15），說明該段區域有以年為週期的變化。

縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨彰化斷層，測線長約 35 公里，於 2004 年 6 月、2005 年及 2007-2012 年的 7 月、2006 年 11 月間進行共 9 次的施測。整條水準測線之垂直速度除 25 km 附近有顯著抬升外，其餘大多在 -4 -0 mm/yr 之內（圖 2.16）。橫跨清水斷層區域（G924 至 G926）的水準抬升速率有 ~ 3 mm/yr 的變化（圖 2.16）；而在跨越車籠埔斷層區域（G948 至 AF25）的水準抬升速率亦有 6.1 mm/yr 的最大變化量（圖 2.16），兩者均可說明此兩斷層有持續性的活動現象。依時間序列圖中，南寮至一江橋（G926 至 G951）的地表有逐年緩慢下陷的趨勢。此外由歷次水準觀測變化可以發現，G948 至 G950（太平市山腳至一江橋東岸）間由 2004 至 2005 年間之沉陷持續變化至 2006 至 2012 年間之抬升，此區域之垂直變形反映車籠埔斷層的震後地表活動模式。

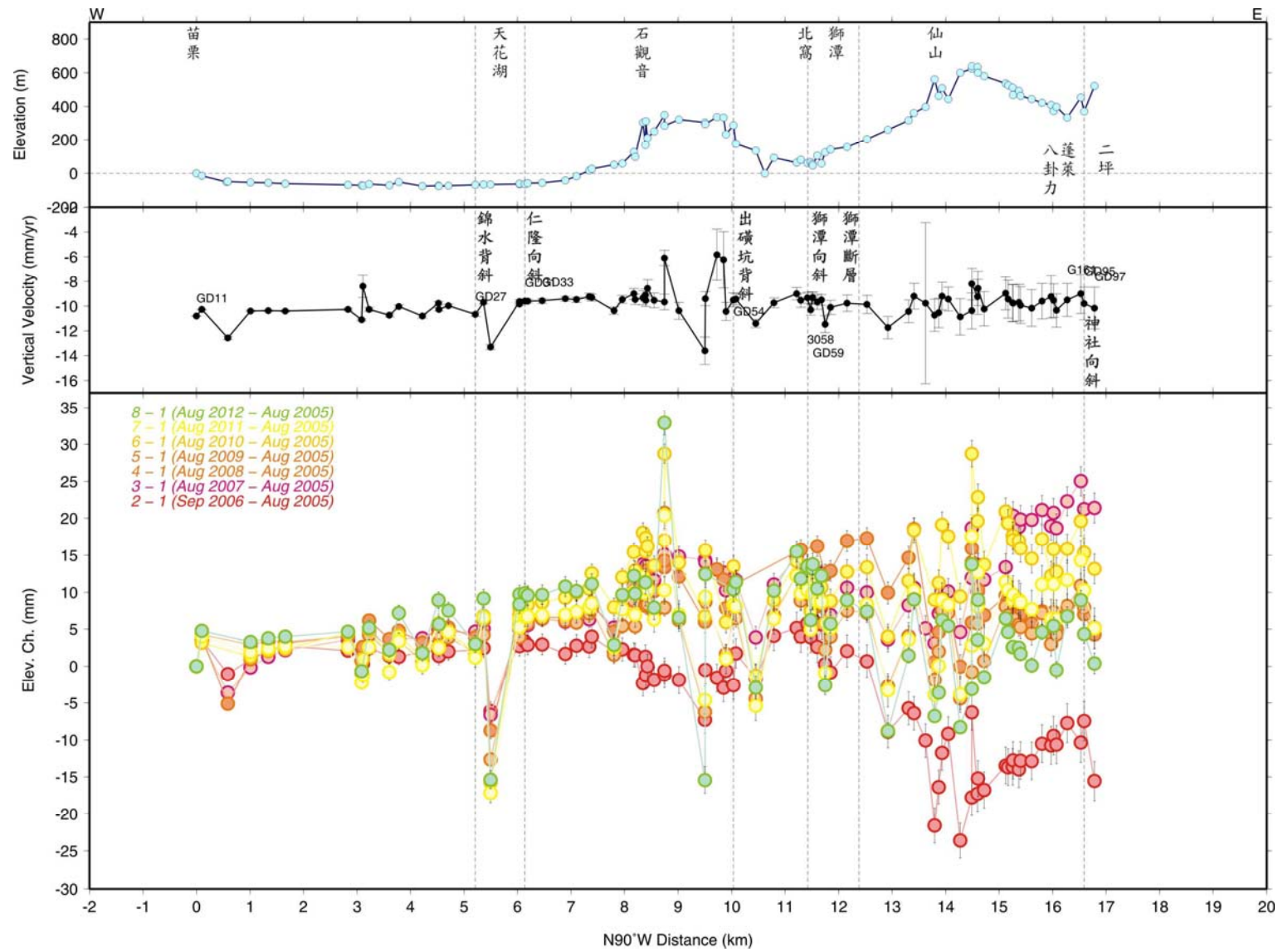


圖 2.14：苗栗至南庄測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

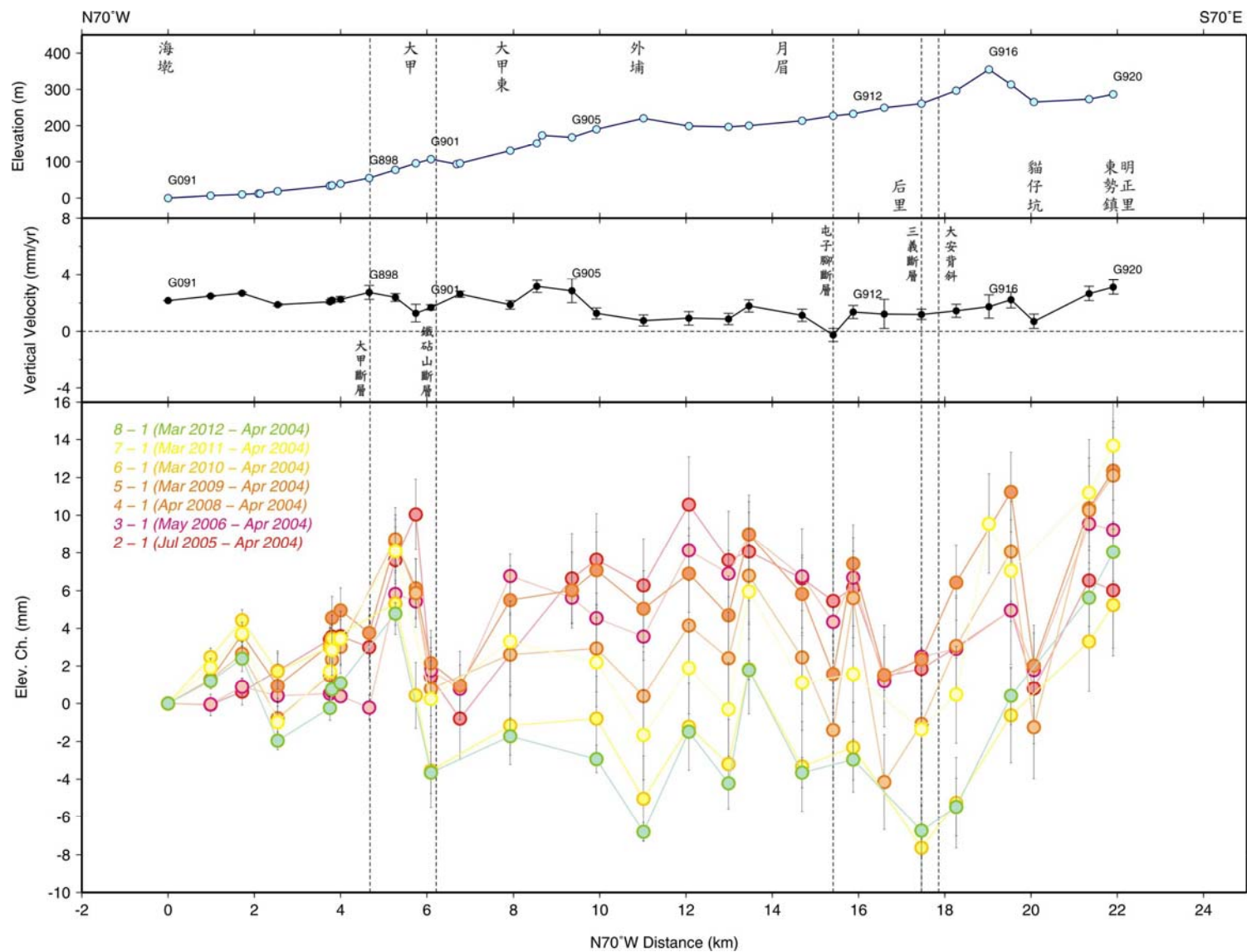


圖 2.15：縣 132_大安至東勢測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

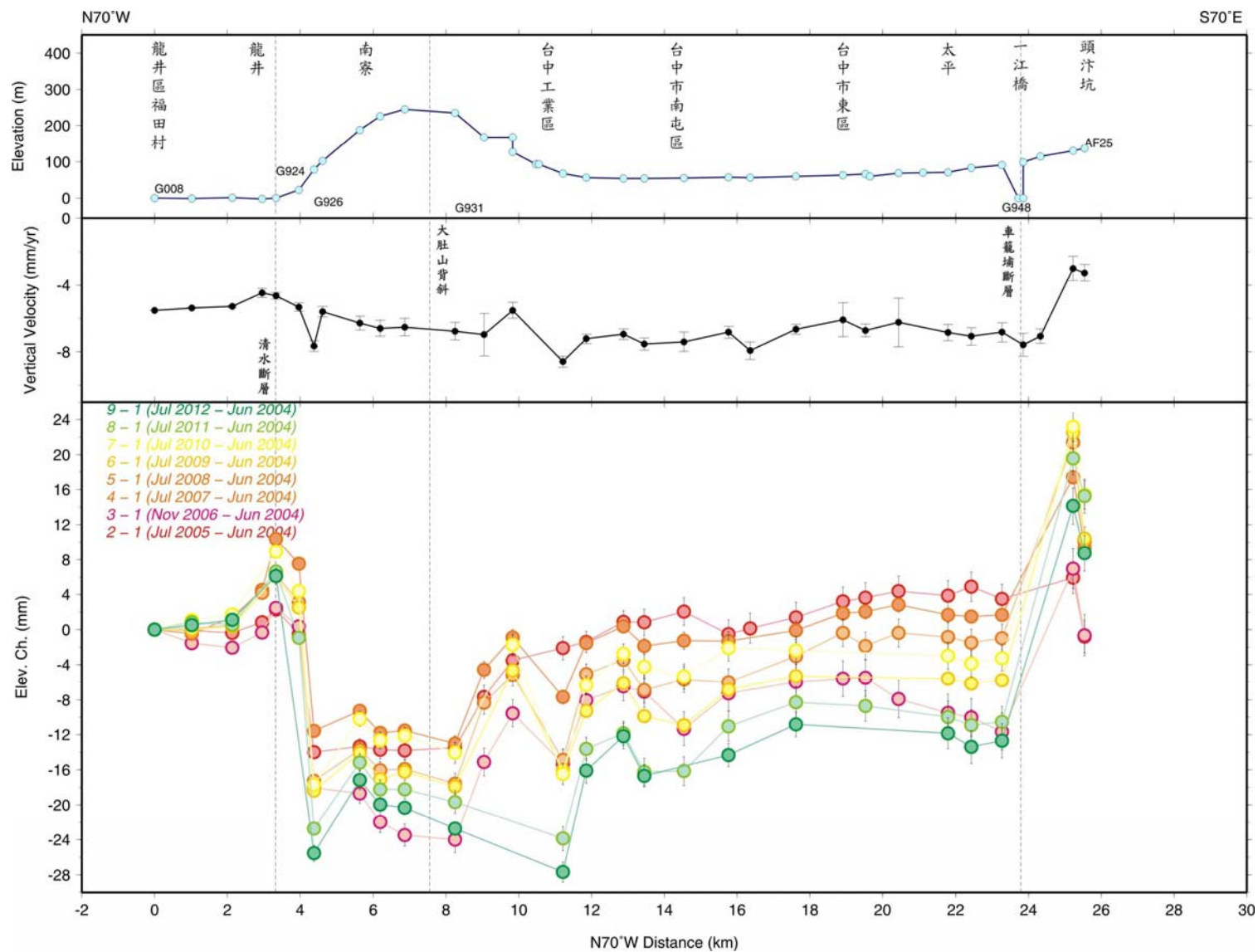


圖 2.16：縣 136_龍井至太平測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

縣 148-台 14_王功至草屯測線

橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層長約 63 公里之縣 148-台 14_王功至草屯水準測線於 2002 年 7 月、2004 年 2 月、2005 及 2008 年 4 月、2006 年 6 月、並 2009-2012 年 3 月進行共 9 次施測。員林 (X112) 以西一帶可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速度最大可達~90 mm/yr (圖 2.17)。自彰化斷層以東區域之垂直速度均在 -10-0 mm/yr 之間，然通過車籠埔斷層區域 (X115 至 T057, 草屯至富功國小) 有 0 至 -10 mm/yr 之垂直速度變化，相對於大茅埔-雙冬斷層地區 (C014 至 C015, 雙冬國小至粗坑橋) 之變化在 -8 至 -10 mm/yr 之間，橫跨車籠埔斷層之改變較為顯著。此結果顯示大茅埔-雙冬斷層在此地區的活動性較不明顯。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，點位 X112 以東之地表垂直變化相對而言較不顯著。

縣 150-台 16_北斗至水里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 45 公里，於 2002 年 8 月、2004 年 1 月、2005 及 2008 年 4 月、2006 年 11 月、與 2009-2012 年 3 月進行共 9 次之施測。本測線彰化斷層以西 (點位 1107, 北斗) 之垂直速度不似縣 148-台 14 測線可見明顯的地層下陷現象 (圖 2.18)。而自彰化斷層以東地表有顯著的抬升趨勢，通過車籠埔斷層後至大茅埔-雙冬斷層以西的 12 km 區段，該地表抬升的狀況更為明顯 (由 0 mm/yr 至~16 mm/yr)，然而於通過大茅埔-雙冬斷層地區 (G279 至 X118, 水里隧道至頂崁) 轉為下陷之趨勢 (由~16 mm/yr 至~8 mm/yr)，此結果可能顯示斷層滑移量於集集地震過後約 10 年仍然集中於車籠埔斷層以東之滑脫面。比較於本測線北方之縣 148-台 14 測線，不論是西側的地層下陷情形，與通過車籠埔斷層以東地區的地表抬升趨勢，兩者有明顯的差異存在，此結果是否說明南投市南北兩段的變形前緣或車籠埔斷層的運動模式有所不同，需要進一步的地質資料與模型加以分析與解釋。

縣 164_金湖至瑞峰測線

橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及大尖山斷層長 61 km 之縣 164_金湖至瑞峰水準測線有 10 次水準測量結果，分別於 2003 年 8 月、2004 年 7 月、2005-2012 年的 9 月間完成。在重複測量之結果中，G256 以東之垂直速度變化並不明顯 (圖 2.19)，2003-2004、2007-2012 年間之高程變化在土厝以東有相似之變化。0-4 km 間有明顯之垂直速度變化，且內政部 2002-2007 年之台 17 線該測段水準測量資料亦符合此結果，參考中油公司地質圖幅顯示，金湖至口湖地區有 B 構造貫穿其間。通過大尖山斷層至 G799，垂直速度則略微增加 (最大 12.6 mm/yr)，顯示大尖山斷層或九芎坑斷層處於活動狀態。

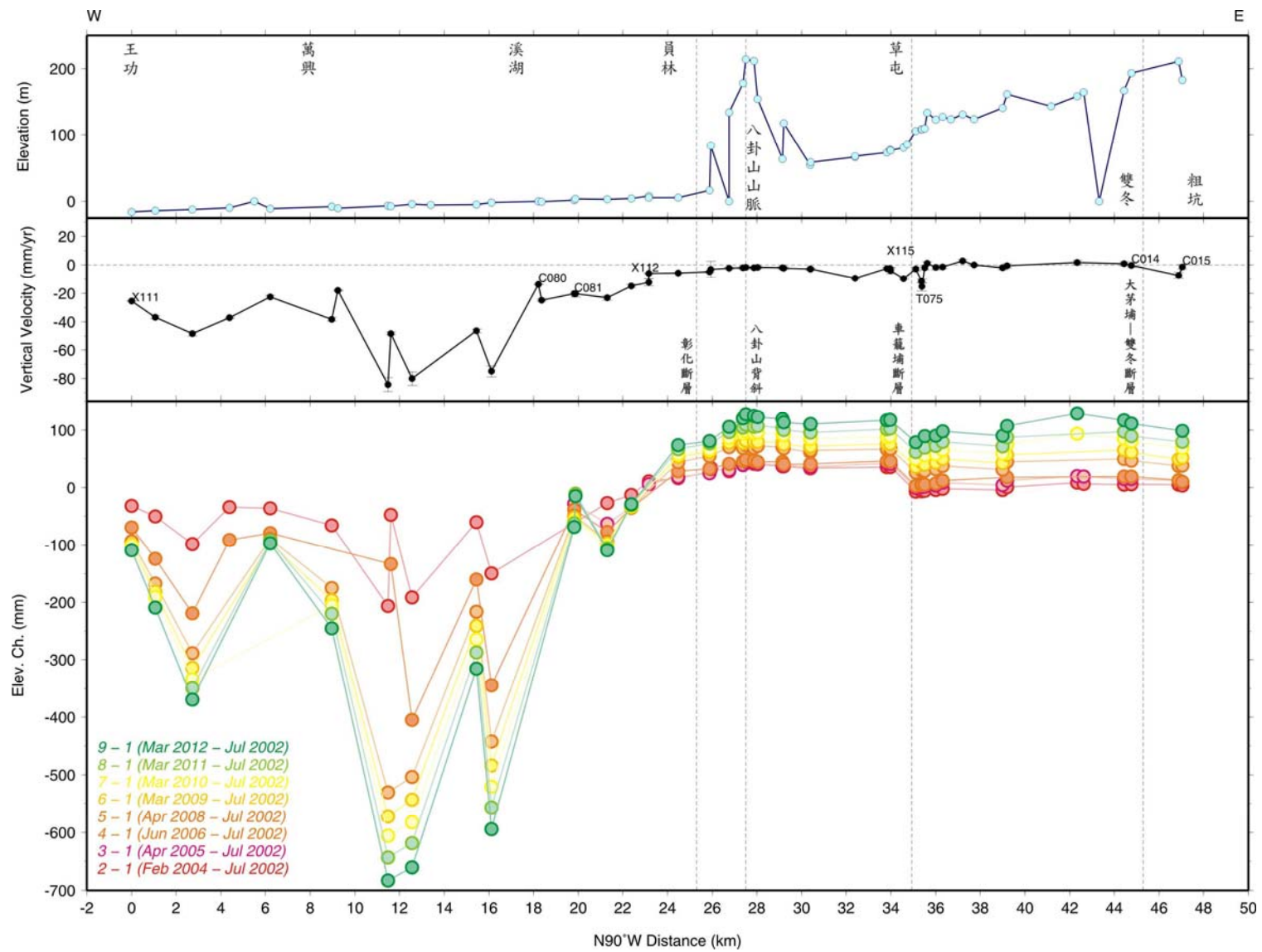


圖 2.17：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

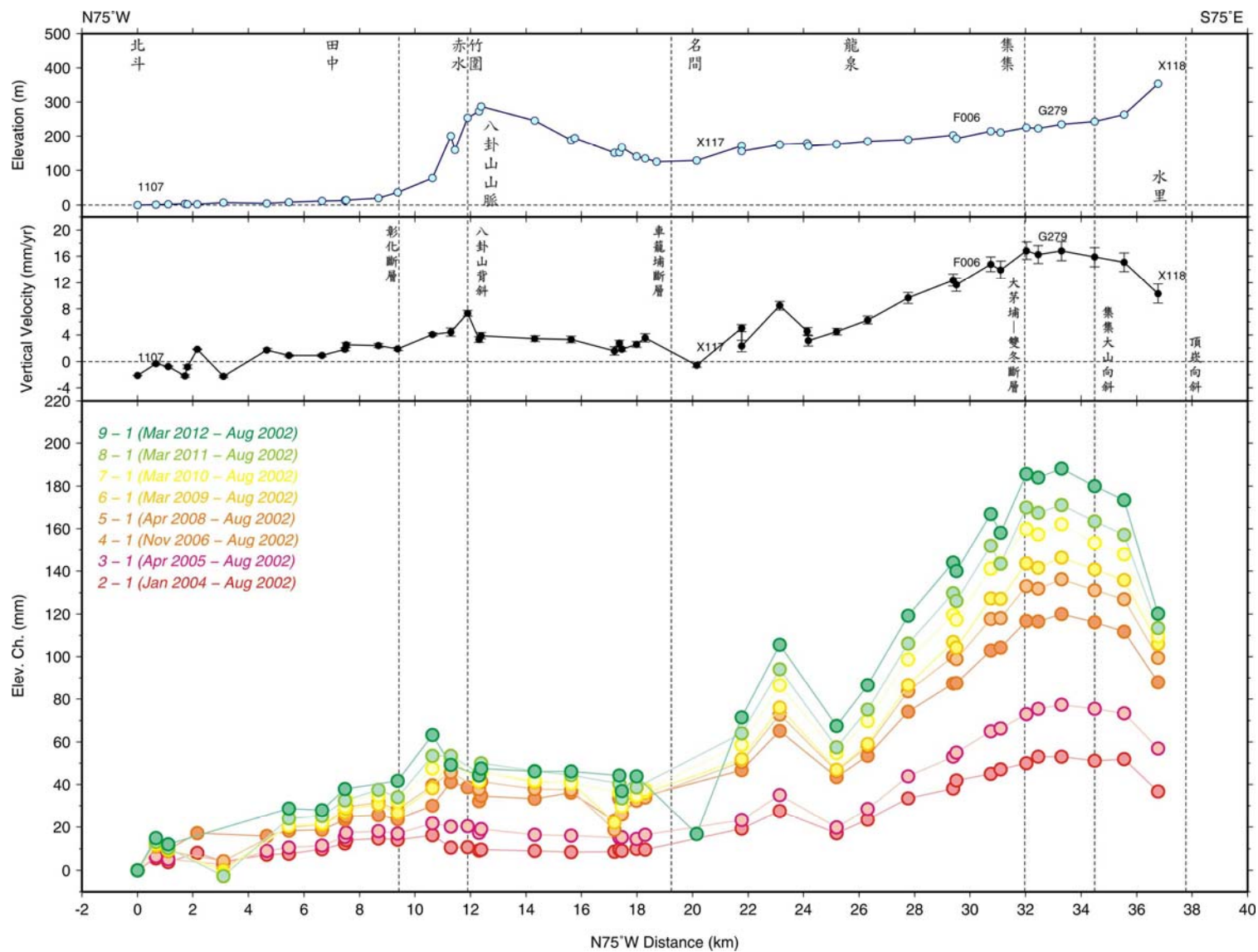


圖 2.18：縣 150-台 16_北斗至水里測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

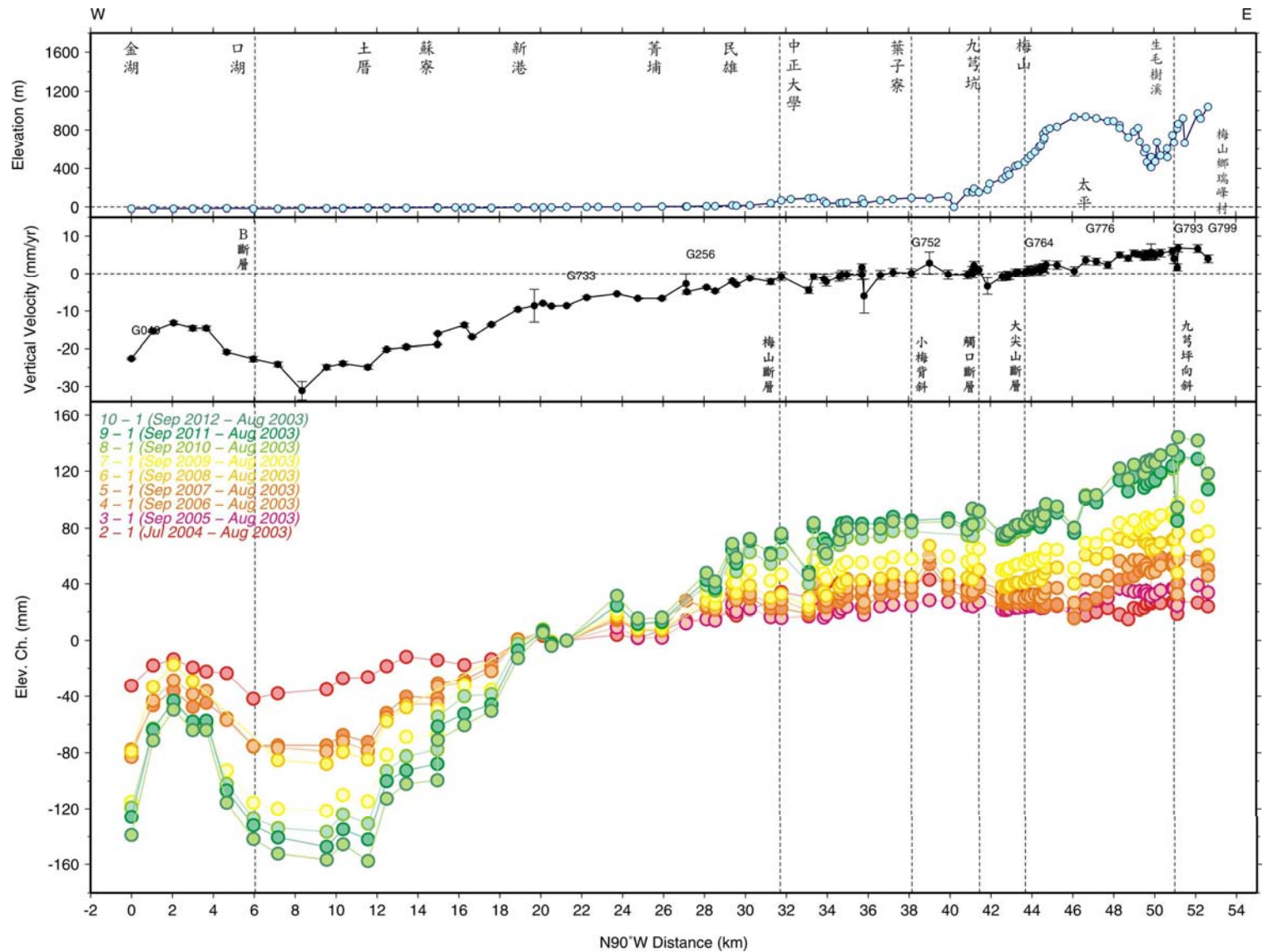


圖 2.19：縣 164_金湖至瑞峰測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層及觸口斷層，測線長約 66 公里之縣 174_北門至楠西水準測線與內政部一等二級水準路線重複，故有 31 個點位（46%）和內政部一等二級水準點位重複。內政部一等二級水準之測量時間為 2002 年 10 月，而地調所的施測則於 2003 年 8 月、2004 年 10 月、2005 及 2008 年 3 月、2006 年 9 月、2009-2012 年 4 月共進行 9 次施測。在通過六甲斷層之地區（I086）至觸口斷層以西之間的 5 公里內有達~10 mm/yr 的垂直抬升速度（圖 2.20），此結果若非反應六甲斷層在此 8 年內均保持著活動性，即表示六甲斷層與觸口斷層間存在的北勢坑斷層[張憲卿，2008]為一活動構造。本測線自 G816（水庫管理局）起，點位的高程時間變化趨勢線變得較陡，顯示自進入山區地段（即六甲斷層以東），地表高程活動性增加。

台 19 甲_善化至關廟測線

橫跨新化斷層的台 19 甲_善化至關廟水準測線，測線長度約為 29 公里。此測線共有 9 次水準測量，分別於 2002 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 11 月、2007-2012 年的 10 月進行。在跨新化斷層（G372 至 G370，新市鄉遠東技術學院至新化）有較顯著的水準抬升速率及 GPS 垂直速度場變化（各約 10 mm/yr），表示新化斷層帶有傾向滑移之趨勢（圖 2.21）。

縣 182_安平至龍崎測線

本縣道 182 測線橫跨台南台地與後甲里斷層，從台南安平至龍崎，今年自龍崎向東延伸約 4 公里，全長約 42 公里。此測線共有 13 次水準測量，分別於 2001 年 6 月、10 月、2002 年 5 月、10 月、2003 年 6 月、11 月、2005 年 3 月、2006 年 7 月、2008-2012 年間的 5 月完成。不論由地形剖面、高程相鄰兩次變化及垂直抬升速率圖上均可明顯見到台南台地之存在（台南市中西區至仁德一帶），且台地之東緣隨時間而有往東延伸之趨勢；在台南台地的西緣（台南市中西區）開始，至台地的東緣（虎尾寮、仁德）止，由 GPS 垂直速度場及水準高程變化可發現該區域有穩定的 3-5 mm/yr 之地表抬升速率趨勢（圖 2.22），但整體的地表垂直變化量並不明顯；另外在虎尾寮地區跨過後甲里斷層的兩個點之抬升速率每年均有抬升的趨勢，平均抬升速率變化約為 6 mm/yr，且通過斷層後（仁德）立即有下陷的變化，最大差異量達 7 mm/yr（圖 2.22），此現象或可說明後甲里斷層為一活躍之活動構造，然因垂直速度變化量均在 1 cm/yr 以下，故在最近 10 年內該斷層之垂直方向的活動性並不顯著。

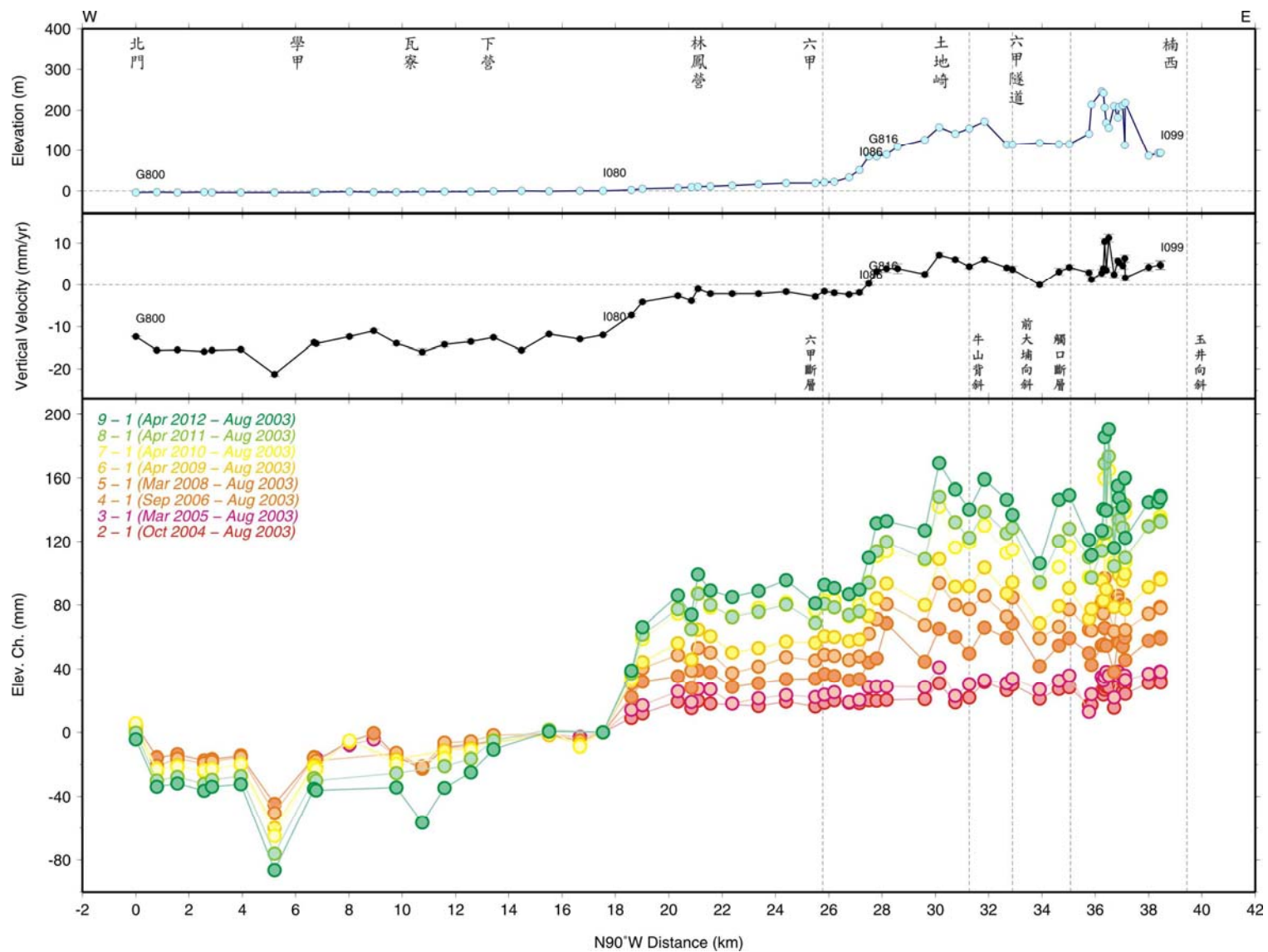


圖 2.20：縣 174_北門至楠西測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

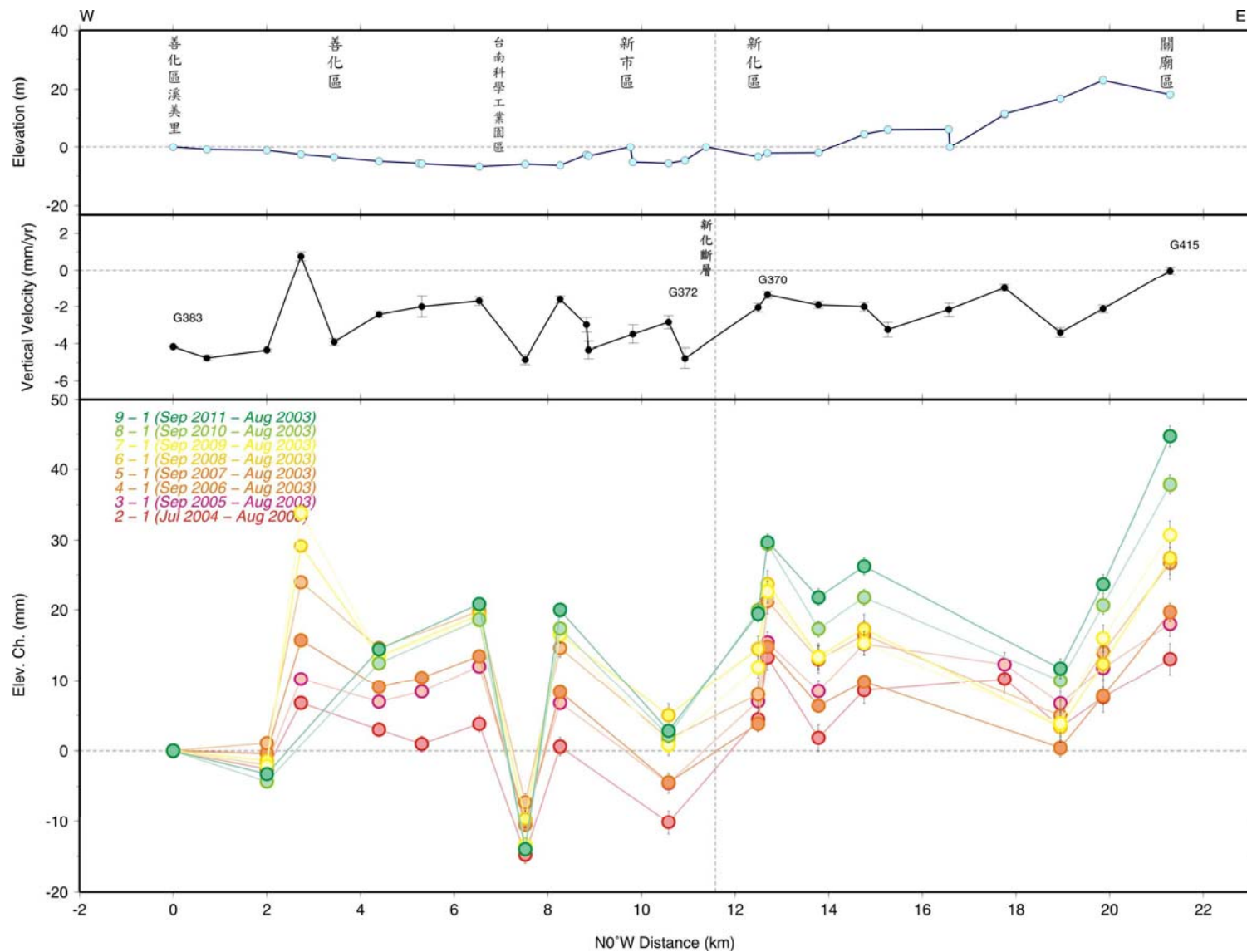


圖 2.21：台 19 甲_善化至關廟測線水準垂直速度圖。其餘圖例如圖 2.7 所示。

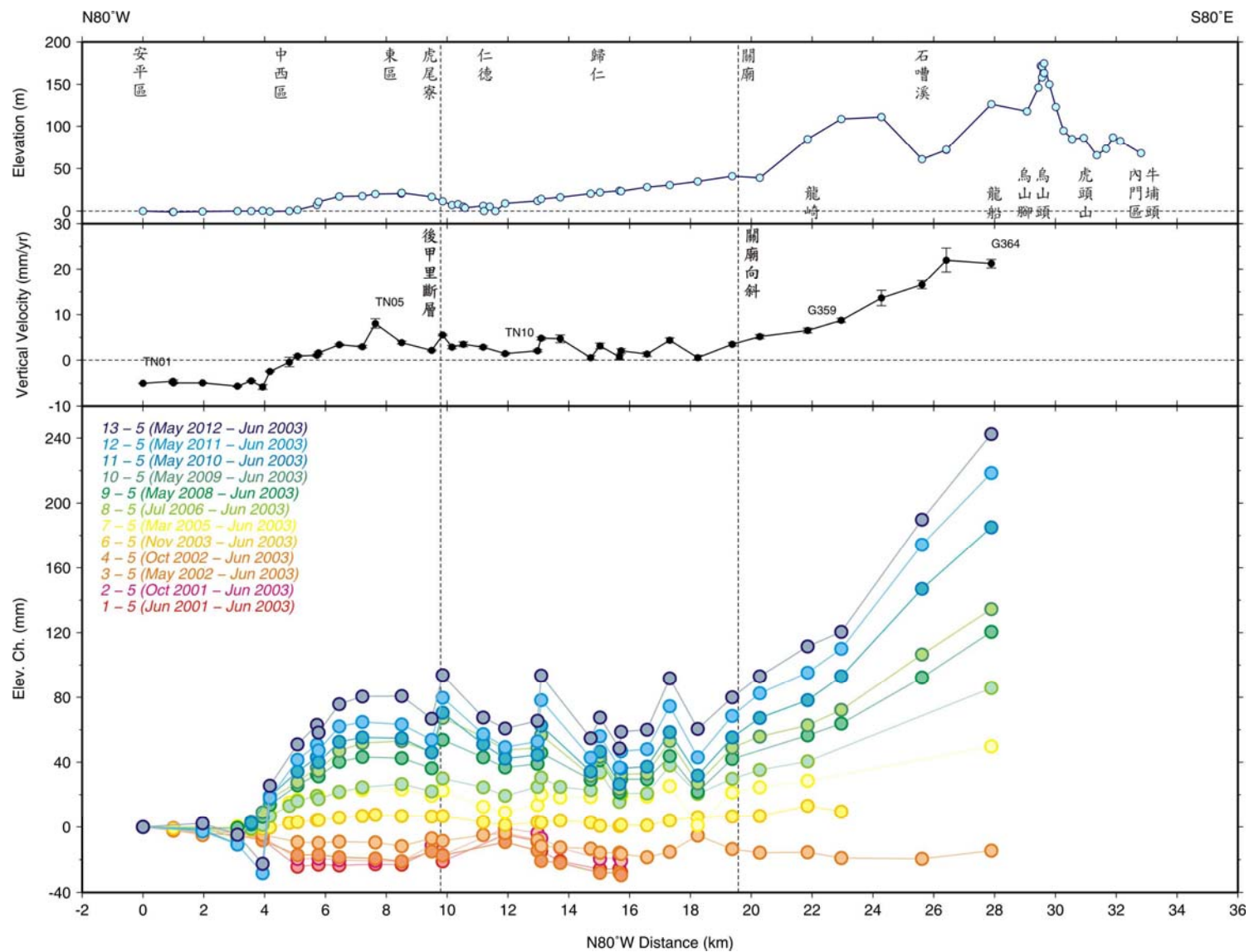


圖 2.22：縣 182_安平至龍崎測線水準垂直速度圖。最下欄為相對第五次測量相減的高程變化曲線。其餘圖例如圖 2.7 所示。

台 28_路竹至茂林測線及其副線

橫跨小崗山、旗山斷層及潮州斷層長 90 公里之台 28_路竹至茂林水準測線於 2002、2004 及 2008-2012 年 2 月、2005 年 4 月、2006 年 5 月間進行共 9 次之施測。台 28_路竹至茂林測線於中壇 (B232) 分成北 (台 28_路竹至茂林主線) 與南 (台 27_路竹至茂林副線) 兩條水準測線。由圖 2.23 顯示, 台 28_路竹至茂林主線於 G471 至 G474 (阿蓮至田寮鄉崇德國小) 垂直速度場及水準高程變化均持續增加 (垂直速度最大達 ~25 mm/yr), 與地形剖面比較, 垂直抬升速率增加之處與地形高區並不吻合, 又該位置與古亭坑斷層位置接近, 顯示此地表抬升現象可能與古亭坑斷層或小崗山斷層的活動有關。台 27_路竹至茂林副線顯示跨越潮州斷層區域 (R013 以東, 高樹鄉大津至茂林國小一帶) 略有地表沉陷速率變化 (由約 4 mm/yr 降至 ~2 mm/yr) (圖 2.23), 此變化與地形起伏並不相符, 可能與該測段位於濁口溪曲流攻擊坡上, 可能造成邊坡滑動有關, 故目前水準之測量資料未能明確表示此區有地下構造之活動, 另一方面參考測線鄰近區域 (南北各 5 公里內) 未有足夠之 GPS 垂直速度場資料以供判明 (共 5 個點位, 潮州斷層東側僅有 1 個點位), 因而以現階段之資料量較難以斷定潮州斷層在此區域中之活動性如何。另由水準高程時間序列分析, 自旗山至竹子門地區, 歷年來均呈現沉陷的趨勢, 而稍南邊的副線卻未有相同的表現, 此現象是否反映旗山斷層下盤區域的地表沉陷情形, 需配合地體構造等其他證據加以分析、討論。

台 22_岡山至安坡測線

本測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層, 測線長約 50 公里, 於 2004 年 3 月、2005 至 2006 年 5 月、2008 至 2012 年間的 5 月進行施測 (圖 2.24)。在橫跨旗山斷層及潮州斷層區域 (G533 至 G536, 燕巢鄉橫山國小至深水國小; G560 至 G568, 高樹鄉泰山國小至三地門鄉口社國小), 水準高程變化並未有明顯之變化量 (分別為 1.1 mm/yr 及 0.5 mm/yr), 或可說明旗山斷層及潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生。另由各相鄰兩次之高程差變化圖及 GPS 與水準垂直抬升速率比較圖中均可看出, 在嶺口至泰山之間有與地形剖面不同之地表下陷趨勢, 並在載興至新南勢之間有最大的下陷量 (-9.3 mm/yr); 該地為跨越紅橋溪之高樹大橋, 由測量資料可發現高樹大橋有逐年下陷的現象 (圖 2.24)。由高程時間序列上, 義守大學醫學院至橫山國小 (G530 至 G533) 及里嶺大橋 (G544) 以東均為地表高程逐年下陷之趨勢, 然在跨過潮州斷層以東 (泰山國小, R020), 其下陷趨勢減緩; 此現象與 GPS 垂直速度場有相同的表現。

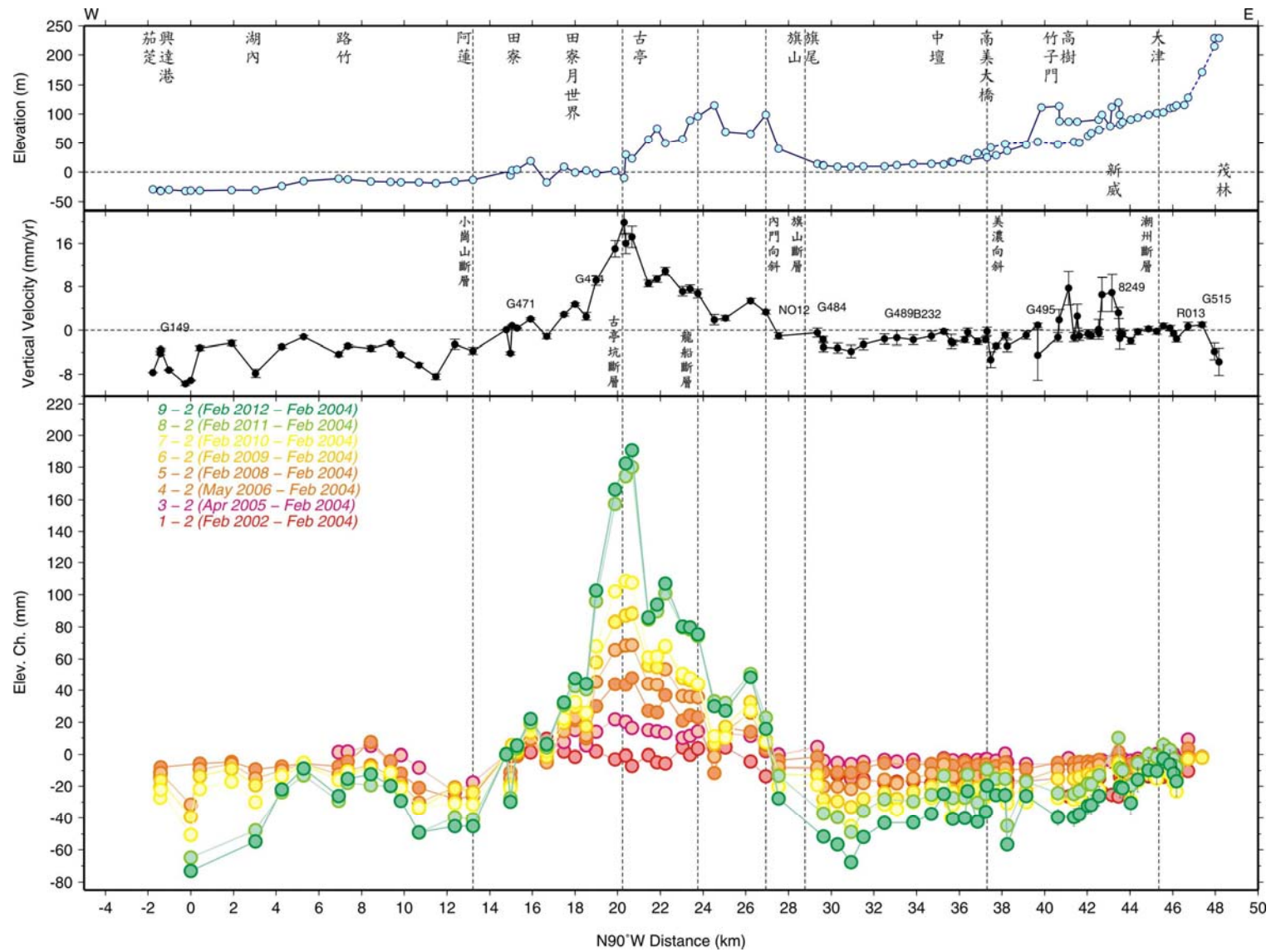


圖 2.23：台 28_路竹至茂林主副線水準垂直速度圖。最下欄為相對第二次測量相減的高程變化曲線。其餘圖例如圖 2.7 所示。

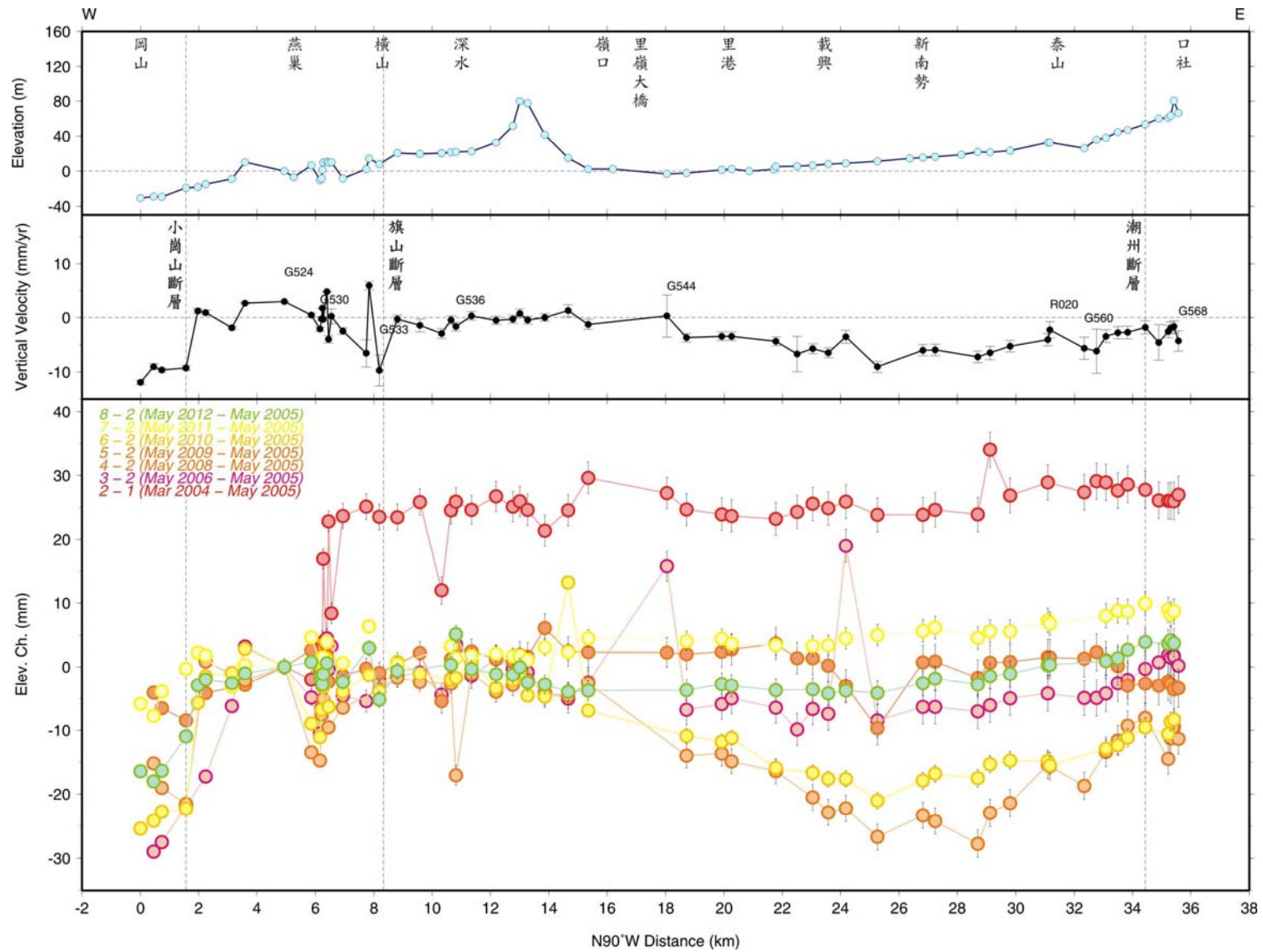


圖 2.24：台 22_岡山至安坡測線水準垂直速度圖。最下欄為相對第二次測量相減的高程變化曲線。其餘圖例如圖 2.7 所示。

佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮州斷層，長約 21 公里，於 2005-2011 年的 9 月間共進行了 8 次的施測，本測線主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。該測線於 2007-2008 年間之高程變化與其他時段（2005-2007、2008-2010）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風(NURI)之降雨有關(警報期間：8/19-8/21；水準測量期間：9/04-9/09；圖 2.25)。在通過大響營農場處至 GC81，仍存在 7.6 mm/yr 的垂直速度變化，整體的時間序列趨勢仍是處於抬升的狀態，透露潮州斷層西側有新期的活動產生。

恆春半島地區測線

恆春斷層為恆春半島地區地調所公布之唯一一條活動斷層，地調所於恆春半島佈設三條水準測線，分別為恆春西台地至佳樂水(長約 19 公里)、台 26_恆春至鵝鑾鼻主線(長約 19 公里)及恆春至鵝鑾鼻副線(長約 5 公里)。本地區之水準測線於 2002 年 1 月、2004 及 2008 年 3 月、2005 年 6 月、2006 年 8 月、2009-2012 年 4 月共計進行 9 次的施測。由圖 2.26 至圖 2.27，2006 年以前在橫跨恆春斷層時水準高程變化並無明顯之改變(0.5-0.6 mm/yr)，顯示 2006 年以前恆春斷層並無顯著之活動性。但在 2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之 M_w 7.0 的災害性地震(中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號)，造成恆春斷層西側於近兩年間(2006 年 8 月至 2008 年 3 月)在德和至恆春一帶有最大約 80 mm 的沉陷現象，而在南灣以西地區也有約 60 mm 的沉陷；並相對於斷層東側較無明顯的高程變化，在西側有相對的下陷發生(南樹林至馬鞍山一帶)，說明在 2006 年的地震中，恆春斷層並未有顯著的活動，而恆春地區主要的震後變形為恆春斷層西側的沉陷。

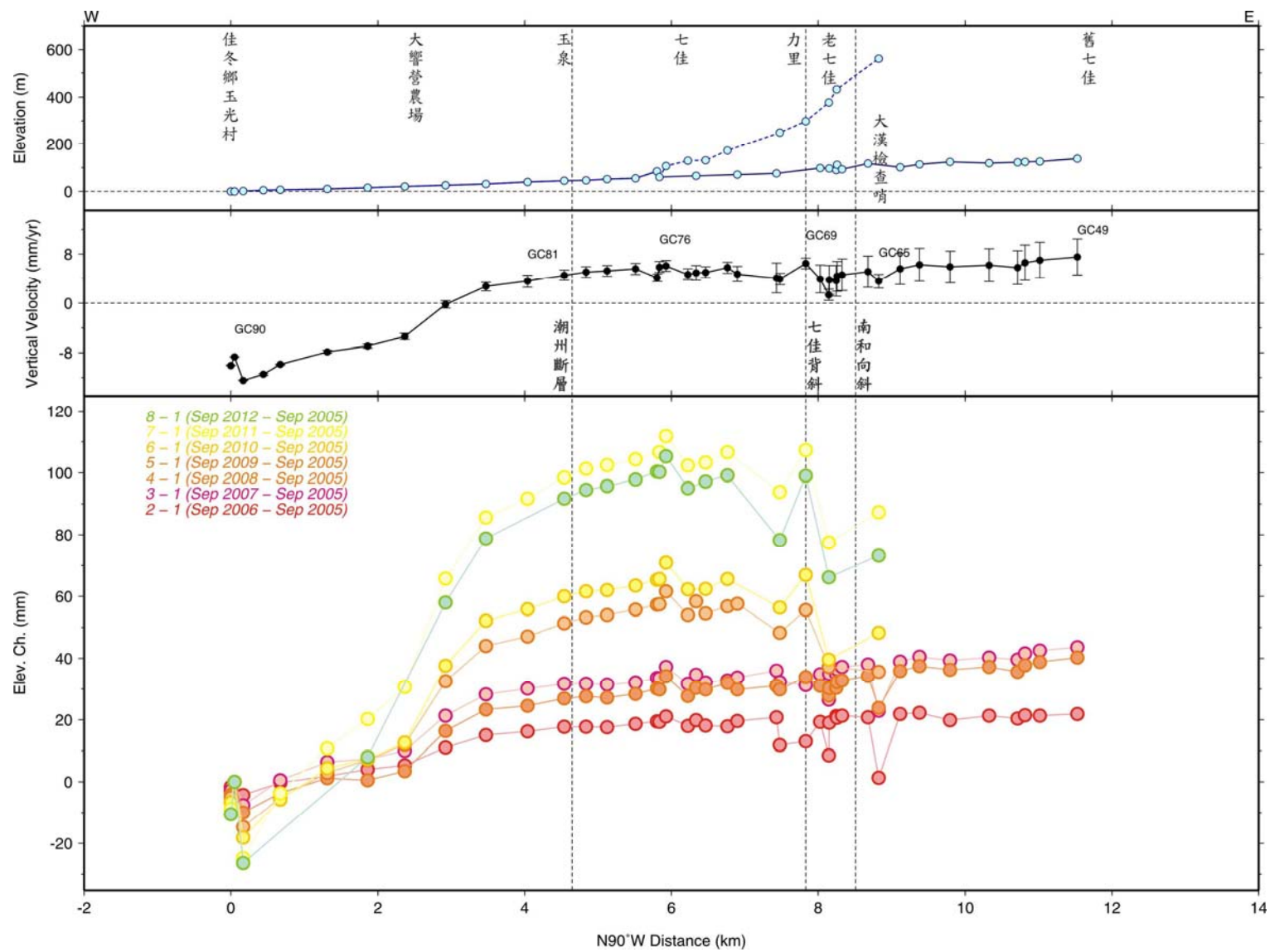


圖 2.25：佳冬至七佳測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

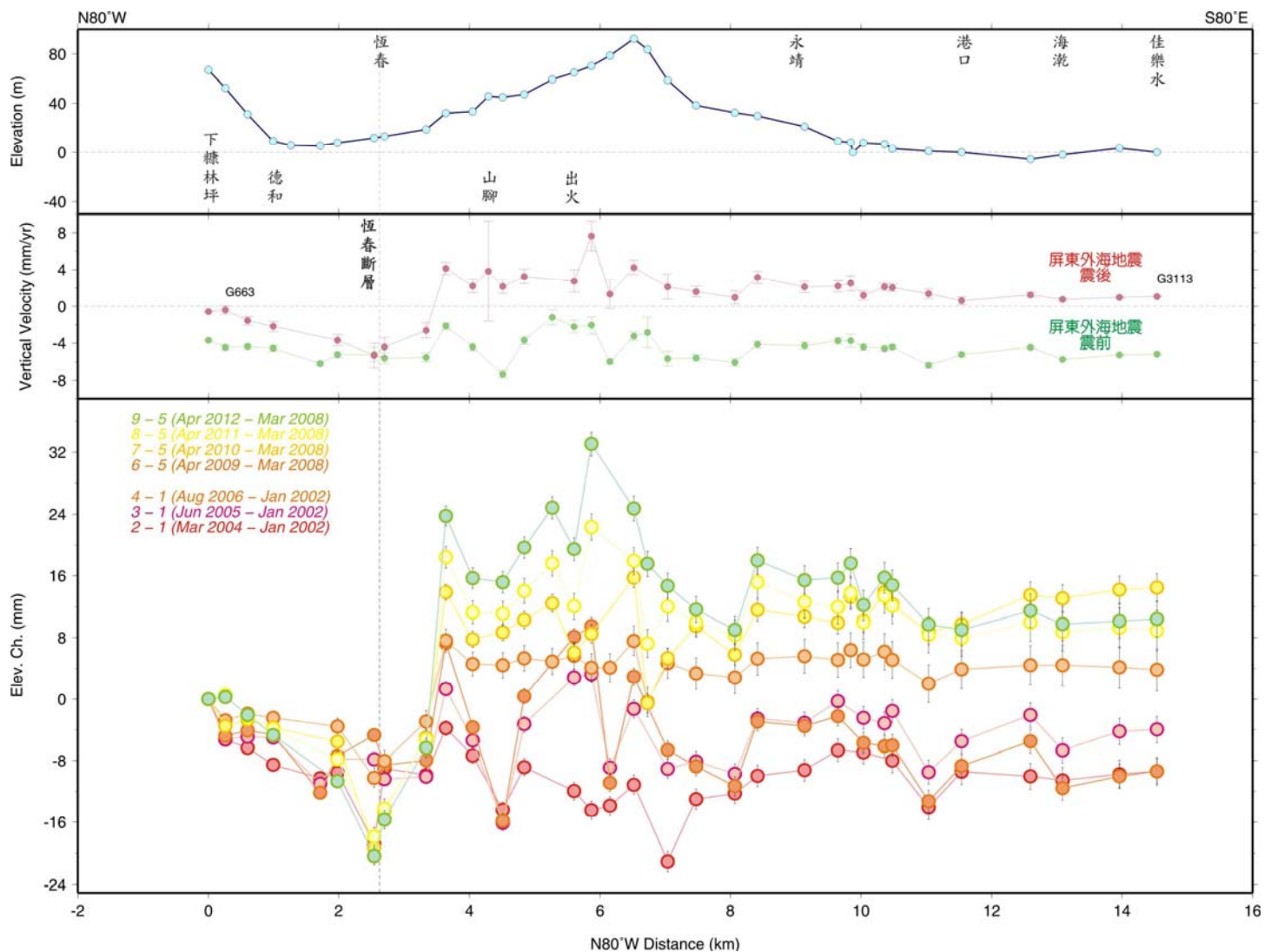


圖 2.26: 恆春西台地至佳樂水測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。第二欄中之綠色為 2002-2006 年恆春地震震前垂直速度，紅色為 2006-2012 年恆春地震震後垂直速度。

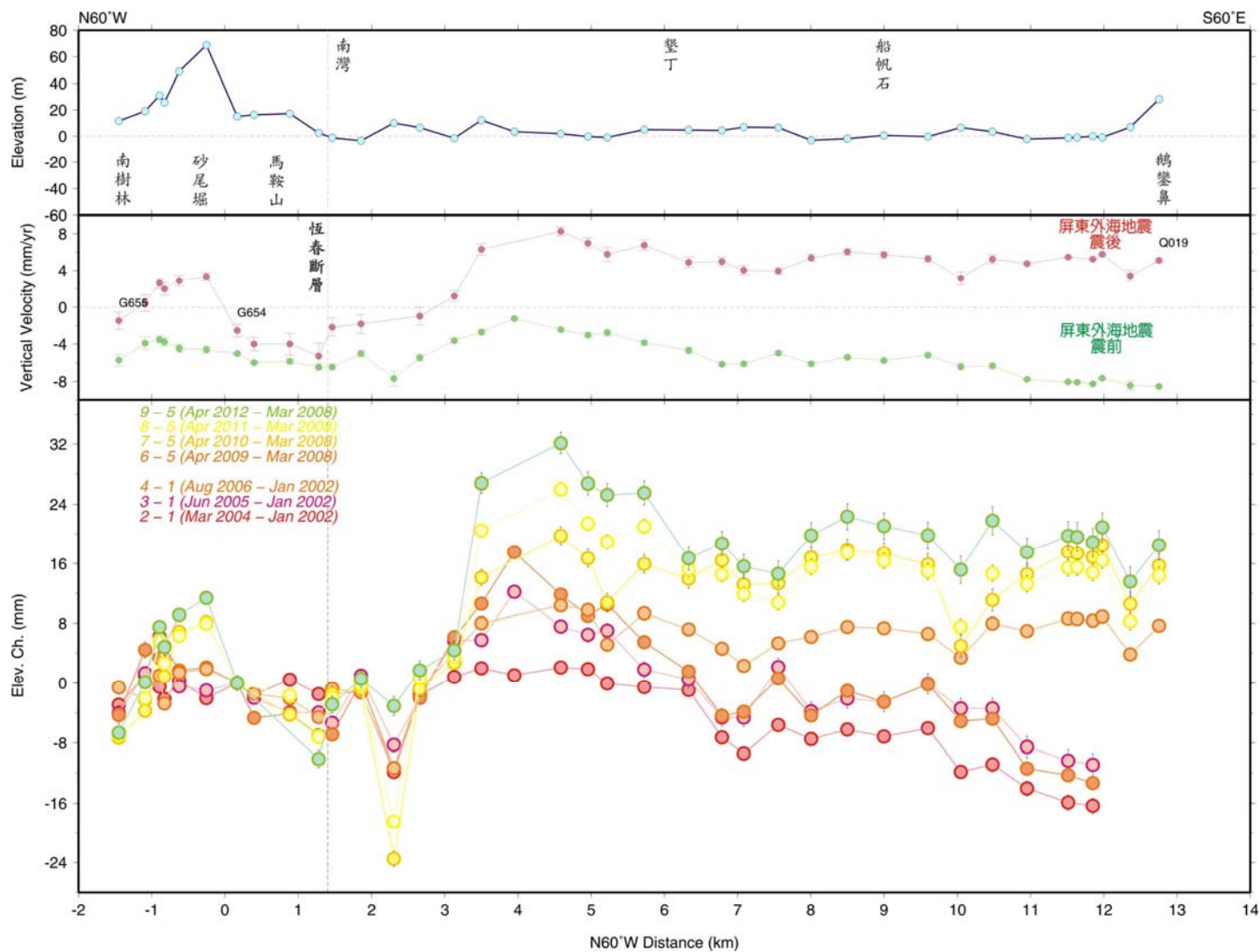


圖 2.27：台 26_恆春至鵝鑾鼻主副線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。第二欄中之綠色為 2002-2006 年恆春地震震前垂直速度，紅色為 2006-2012 年恆春地震震後垂直速度。

嶺頂至瀧澗測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 25 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 10 月、2007-2012 年的 11 月進行共 9 次的施測。該測段之每 2 年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2.28），然在嶺頂斷層東側之垂直速度與地形並不一致，呈現下陷的趨勢。

豐濱至光復測線

本測線位於奇美斷層的西側，測線長約 22 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 10 月、2007-2012 年的 11 月進行共 9 次的施測。於圖 2.29 顯示，在 G995 至 A103（泰來至豐富）有 -28.7 mm/yr 的水準抬升速率變化，同時此段之 GPS 垂直速度場亦呈現一致之趨勢。此結果說明奇美斷層以西之海岸山脈內有活動構造之發育，或說明海岸山脈確實持續在抬昇中。

靜浦至紅葉測線

本測線橫跨奇美斷層、瑞穗斷層及玉里斷層，測線長 33 公里，分別於 2004 年 10 月、2005-2012 年的 11 月進行共 9 次的施測。在 GA34 至 GA22（瑞穗牧場至瑞穗鄉猴仔山）之間，水準抬升速率的變化（ 7.7 mm/yr）可說明瑞穗斷層與玉里斷層之活動（圖 2.30）。同時，跨越奇美斷層之區域（GA14 至 GA08，阿魯鷺至亂石）由水準抬升速率變化有明顯之下陷區（ -12.8 mm/yr），然而 GPS 垂直速度場並未有相稱的趨勢（ -2.4 mm/yr）。

富岡至東成測線

本測線橫跨利吉斷層及鹿野斷層，測線長 25 公里，分別於 2009-2012 年的 11 月進行共 4 次的施測。該測線之每 2 年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2.31），然在岩灣至臺東大橋段之垂直速度變化較地形高度改變大，呈現較明顯之沉陷（速度變化約 -12 mm/yr），且鹿野斷層以西之垂直速度呈現下降的趨勢，亦與地形變化不一致。

台 2_梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水—梨山斷層及小帽山斷層，測線長 61 公里，於 2011-2012 年的 10 月進行共 2 次的施測。該測線之地形受沖繩海槽弧後塌陷的影響，呈現較明顯之沉陷（圖 2.32）。

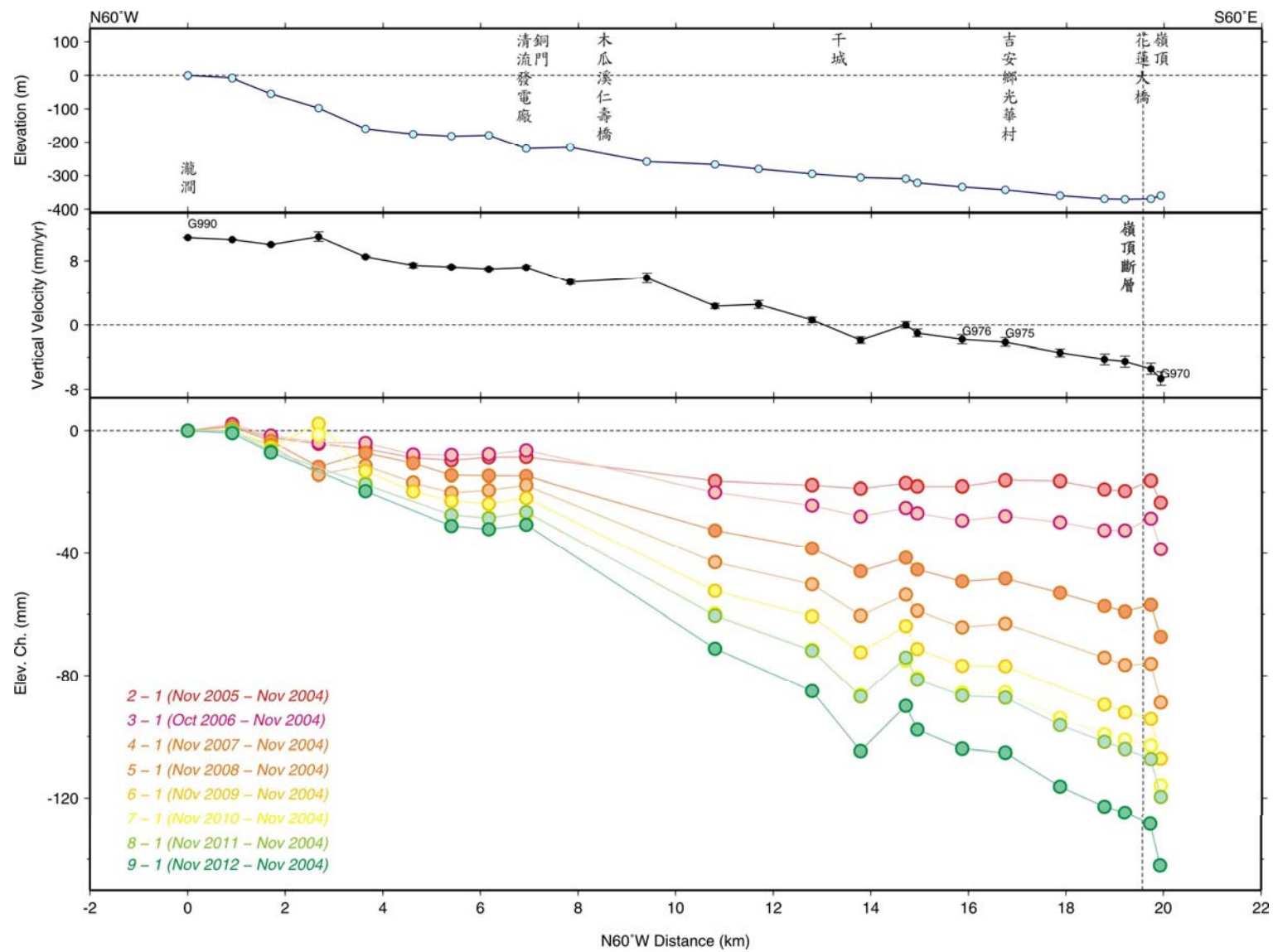


圖 2.28：嶺頂至瀧澗測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

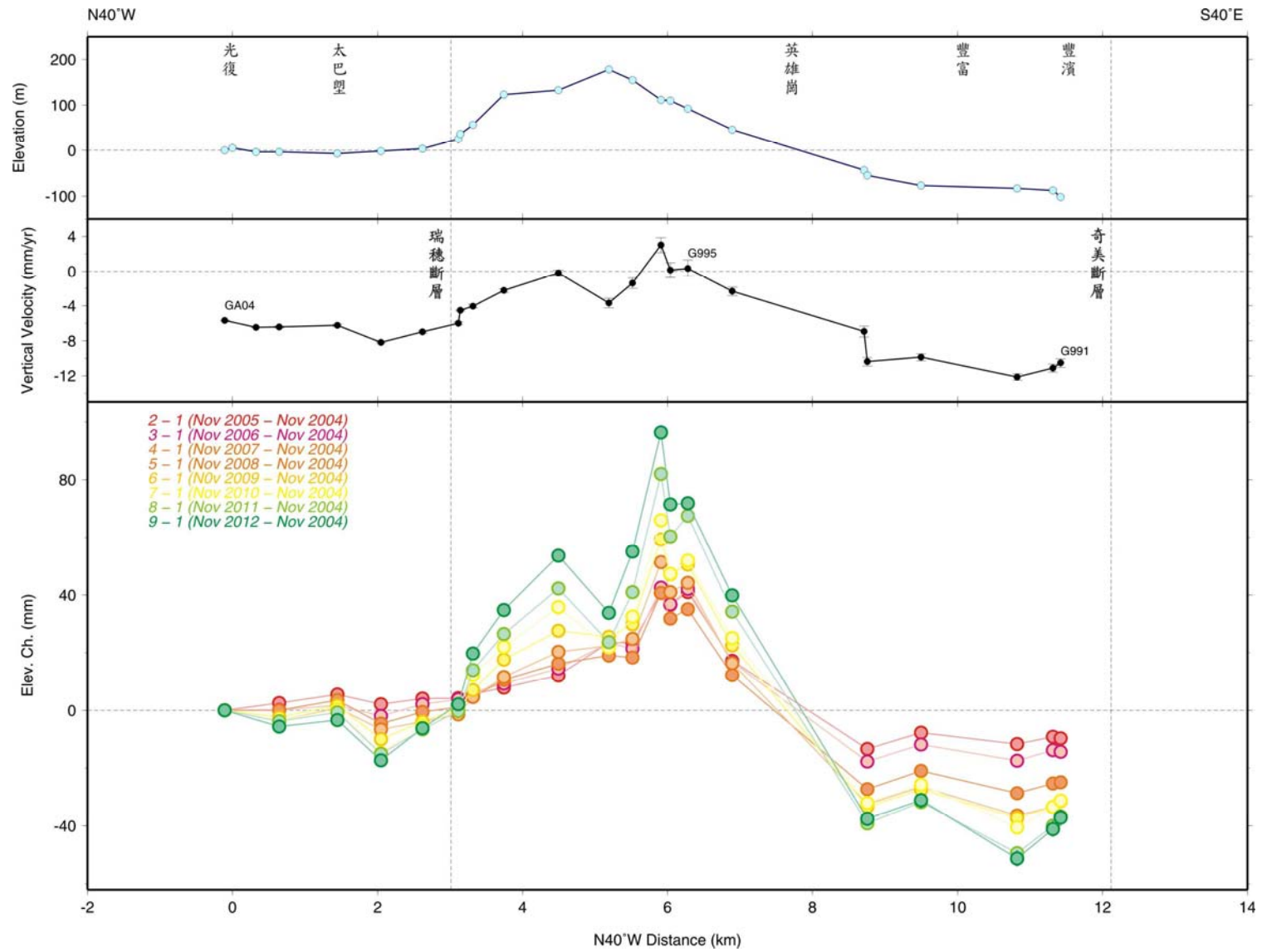


圖 2.29：豐濱至光復測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

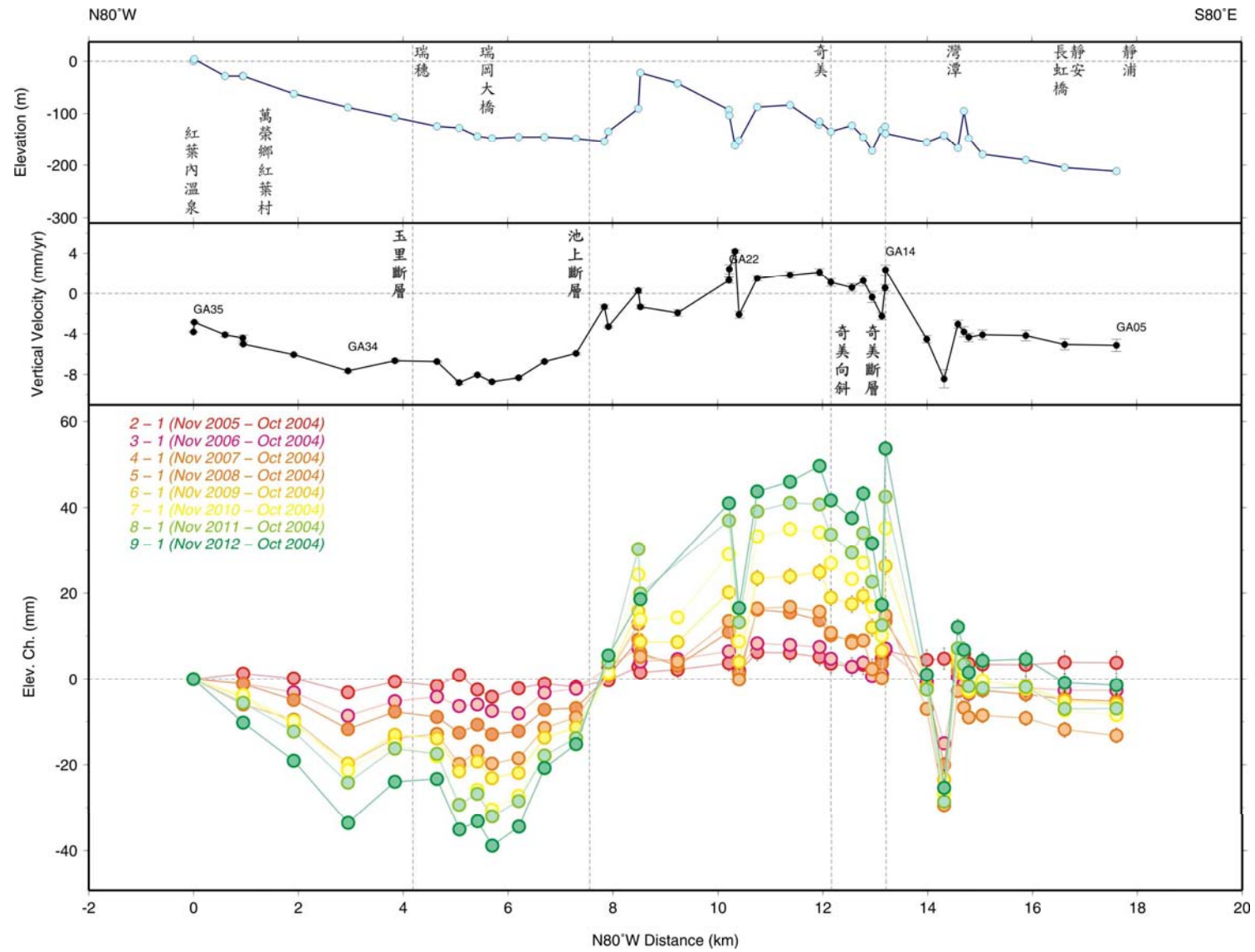


圖 2.30：靜浦至紅葉測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

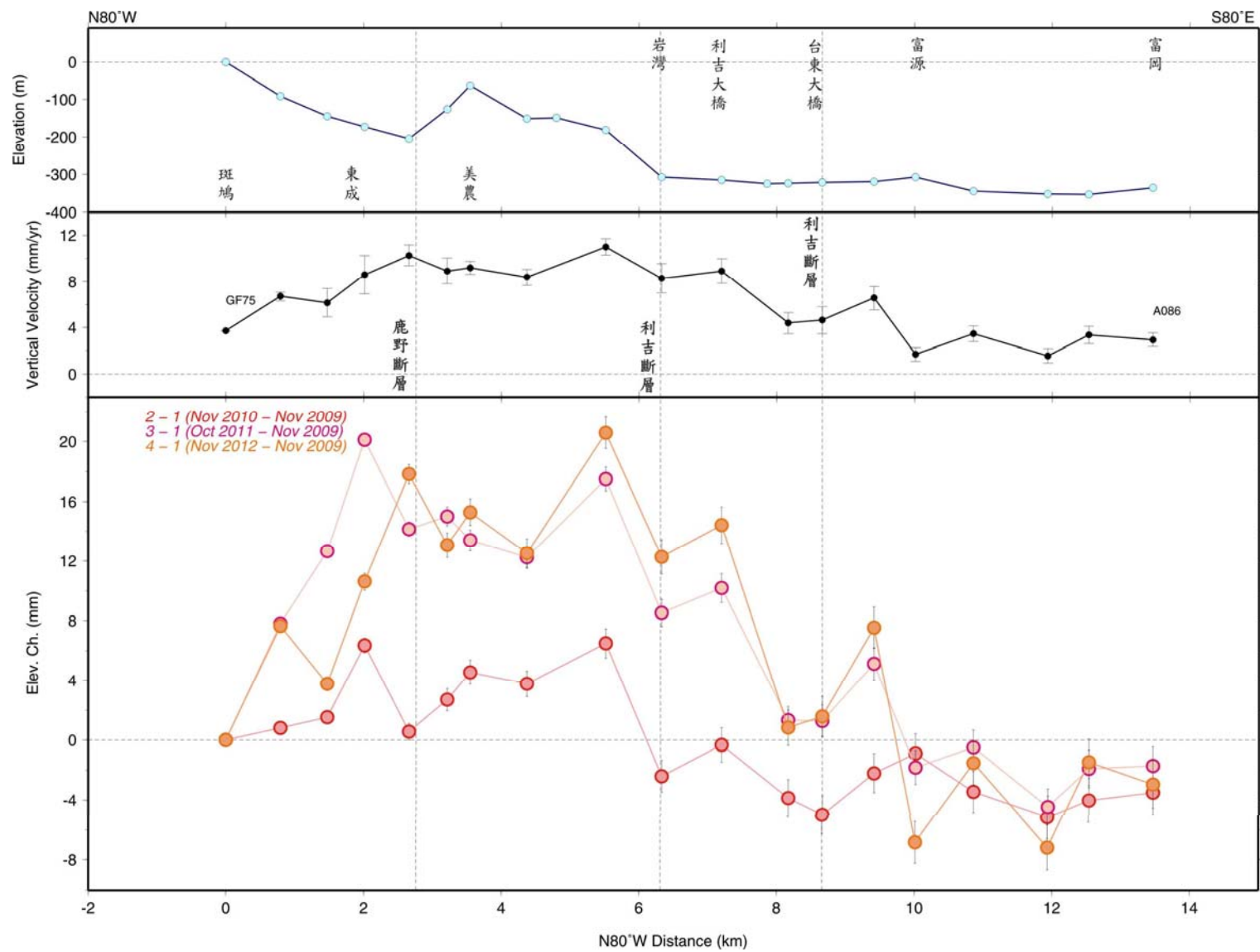


圖 2.31：富岡至東成測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

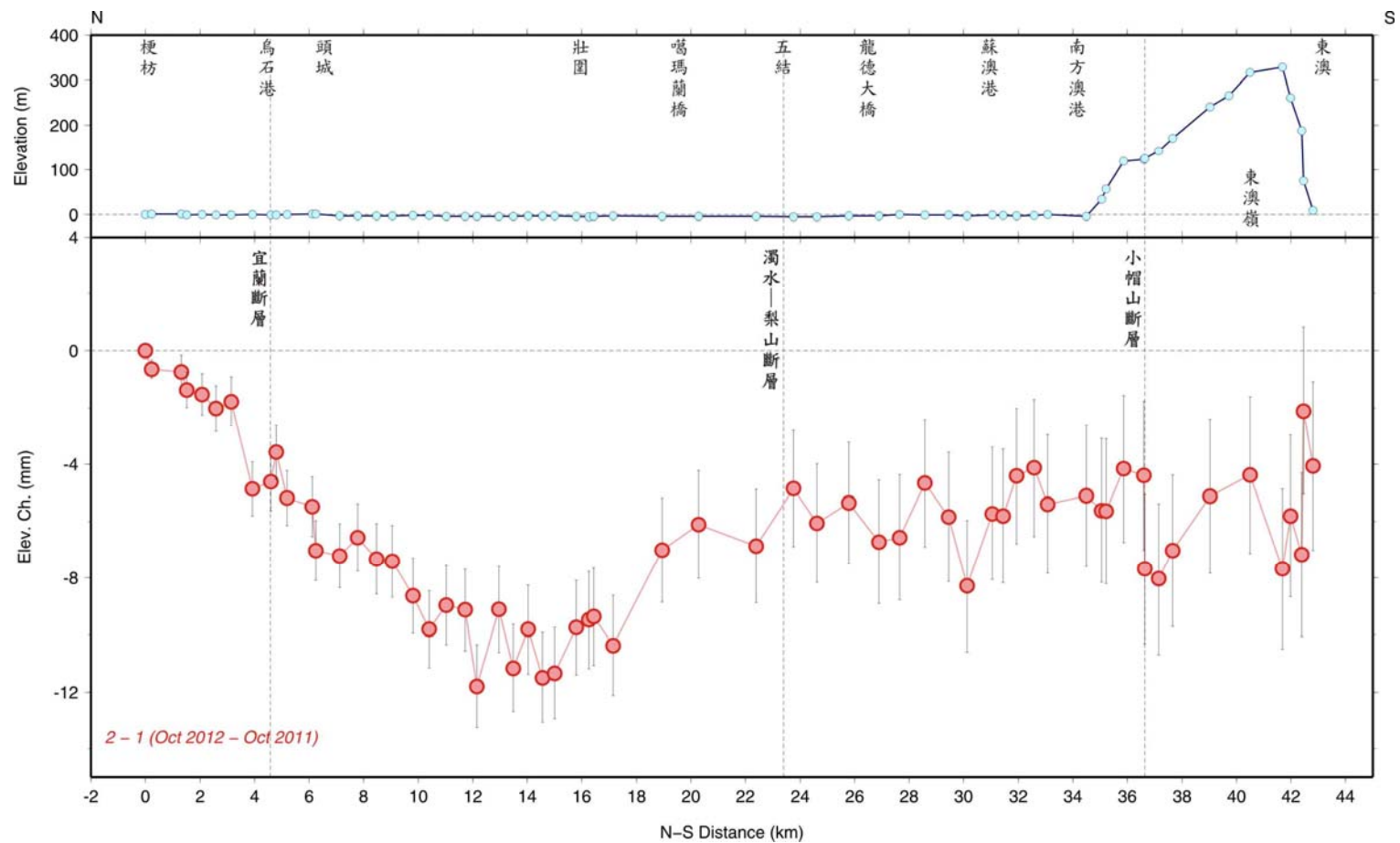


圖 2.32：台 2_梗枋至東澳測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.7 所示。

臺北盆地信義短測線

本測線為地調所為監測臺北盆地下陷情形，而於臺北市信義區松仁路設置之測線（圖 2.33），自 2007 至 2012 年止，其間共計施測 6 次，水準測量施測後得到相對於 1188 的高程差變化投影至東西剖面如圖 2.38。

跨車籠埔斷層測線

該 5 條測線為地調所在車籠埔斷層沿線，所設置的橫跨斷層之水準測線（圖 2.35）。自 2007 至 2012 年止，其間共計施測 6 次，水準測量施測後的高程差變化投影至東西剖面如圖 2.36 至圖 2.40。

跨梅山斷層測線

該 7 條測線為地調所在梅山斷層沿線，所設置的橫跨斷層之水準測線（圖 2.41）。自 2007 至 2012 年止，其間共計施測 6 次，水準測量施測後的高程差變化投影至東西剖面如圖 2.42 至圖 2.48。

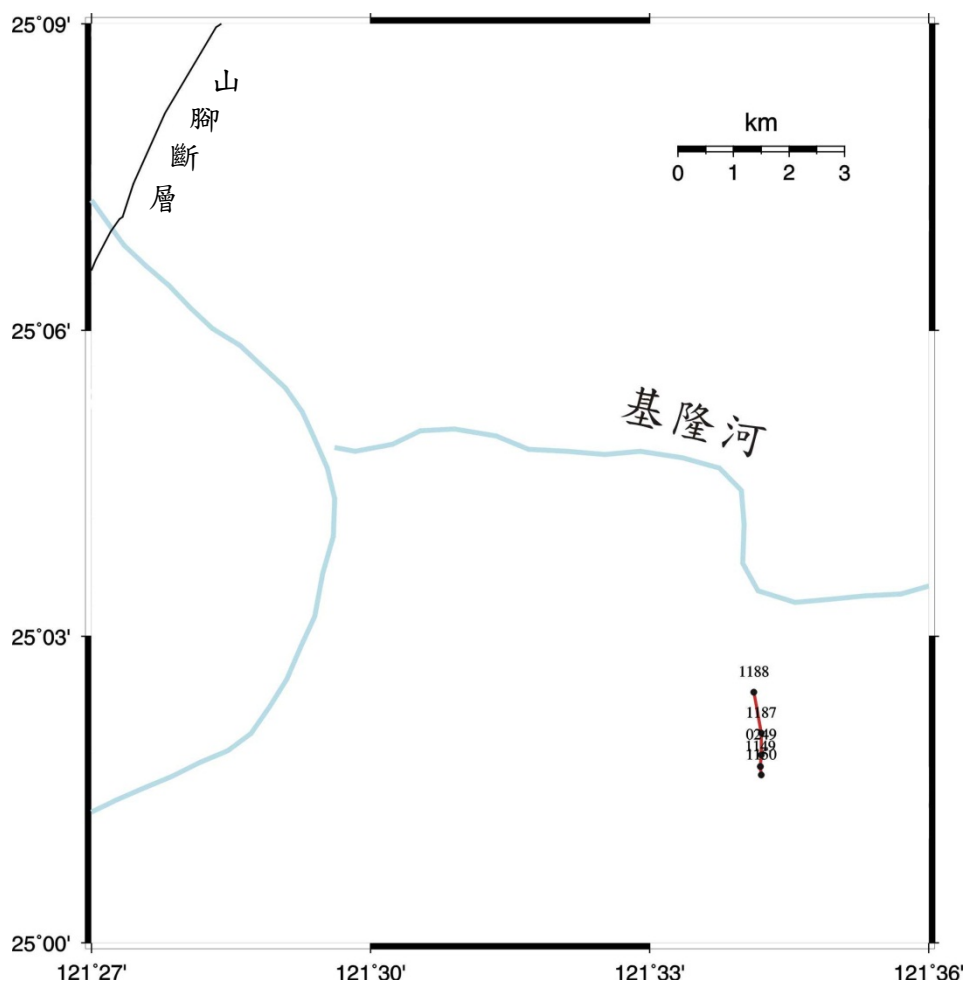


圖 2.33：臺北盆地信義短測線分布圖。

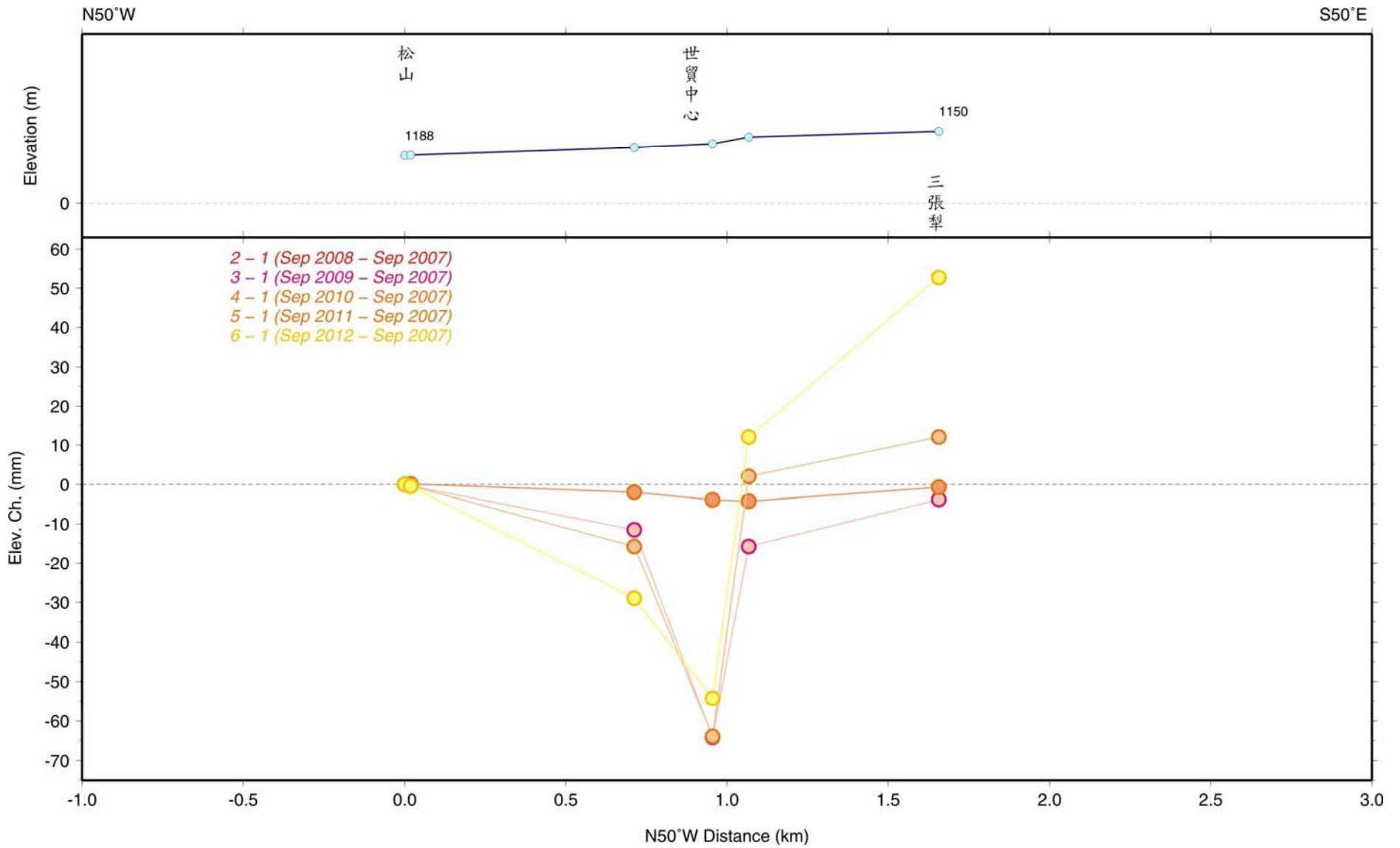


圖 2.34：臺北盆地信義短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

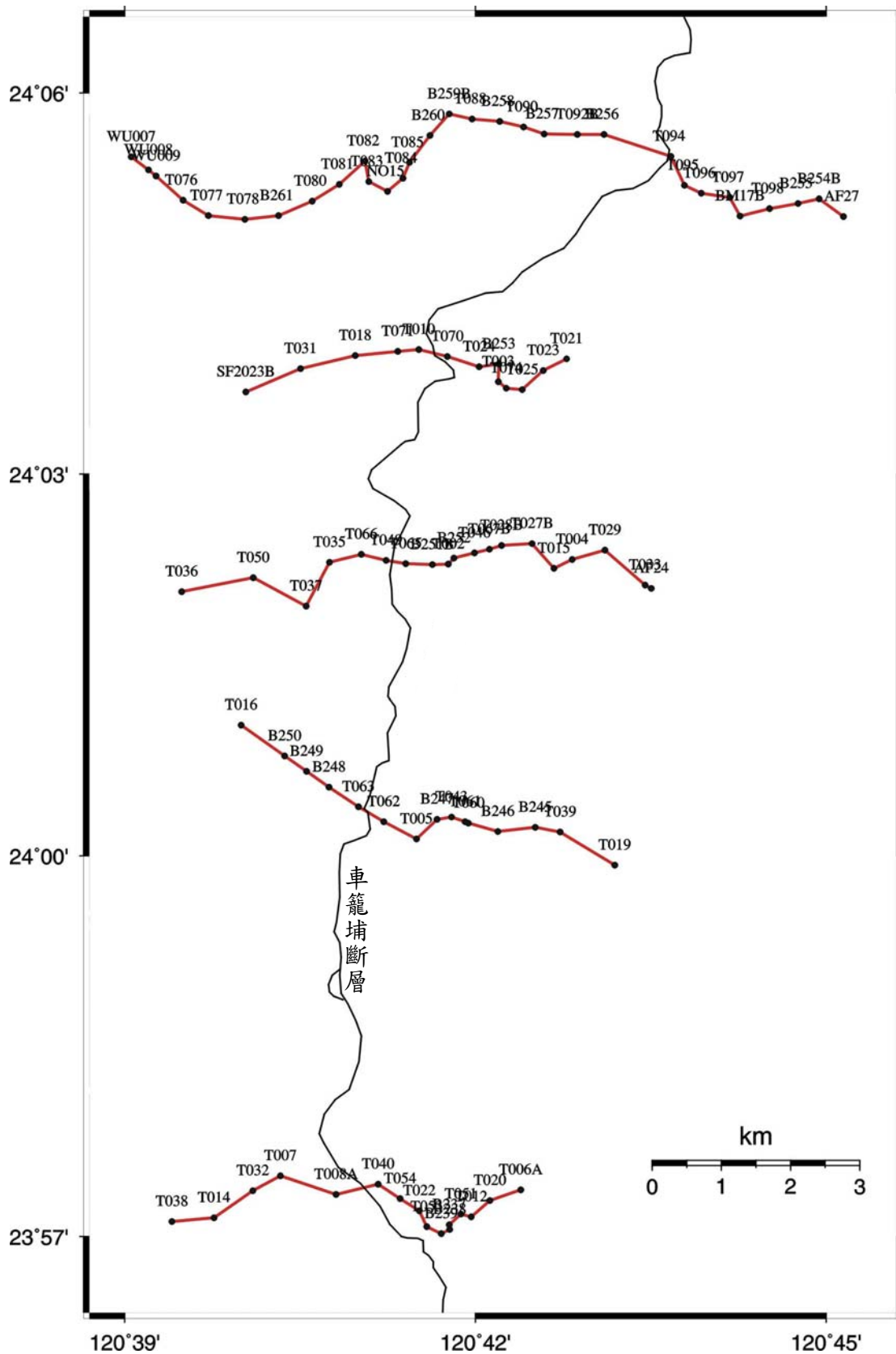


圖 2.35：中部跨車籠埔斷層短測線分布圖。

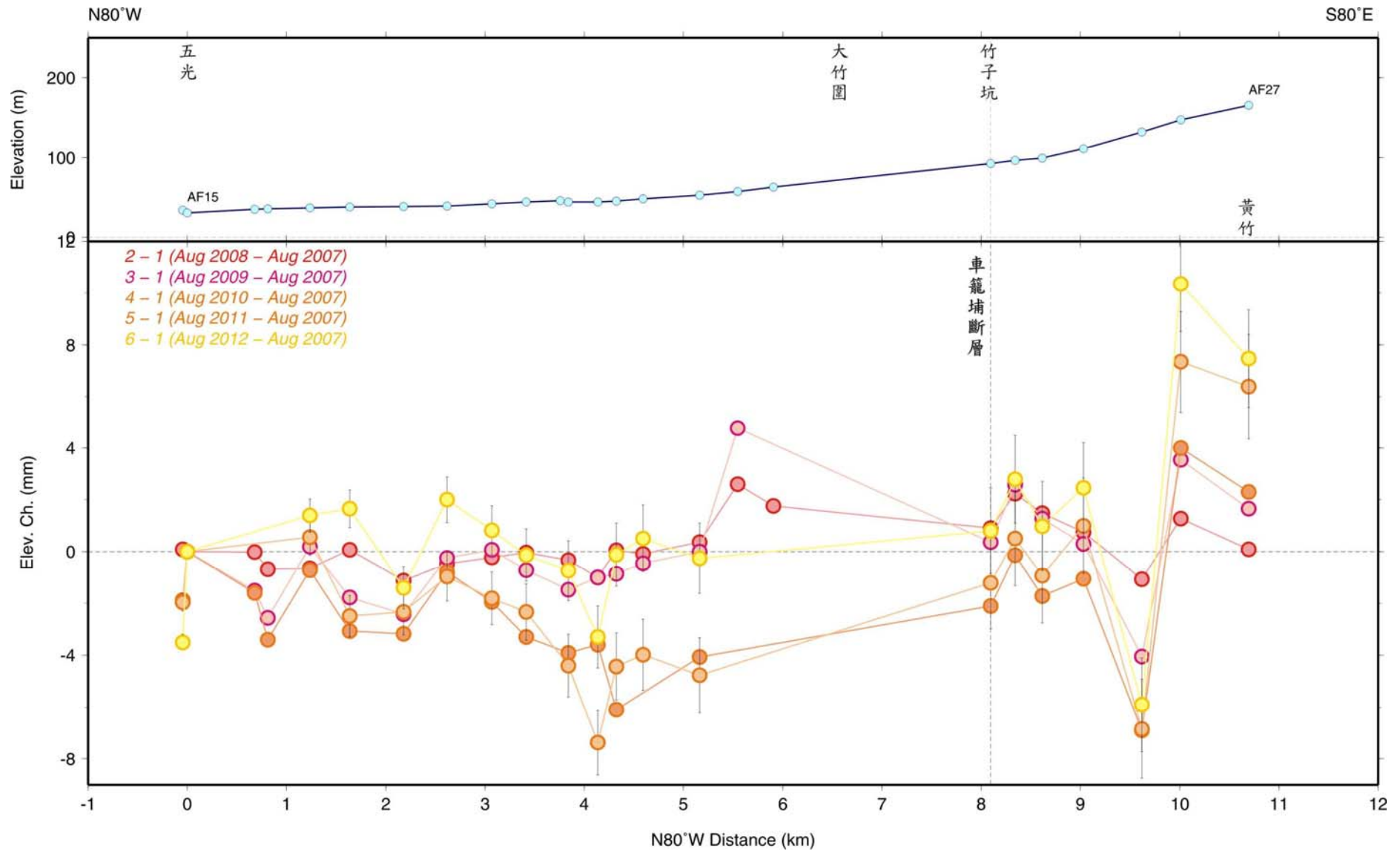


圖 2.36：五光至黃竹短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

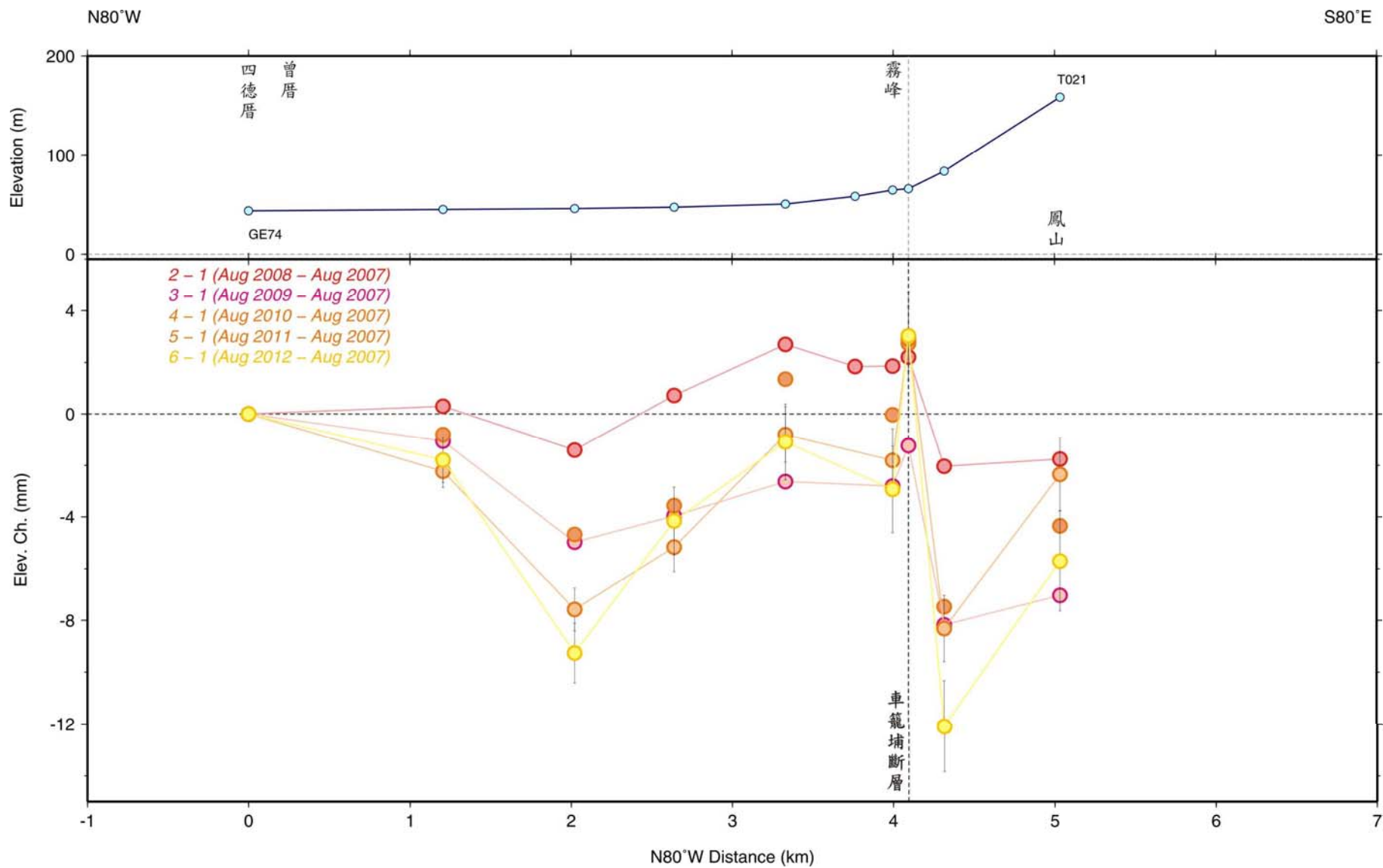


圖 2.37：曾厝至霧峰短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

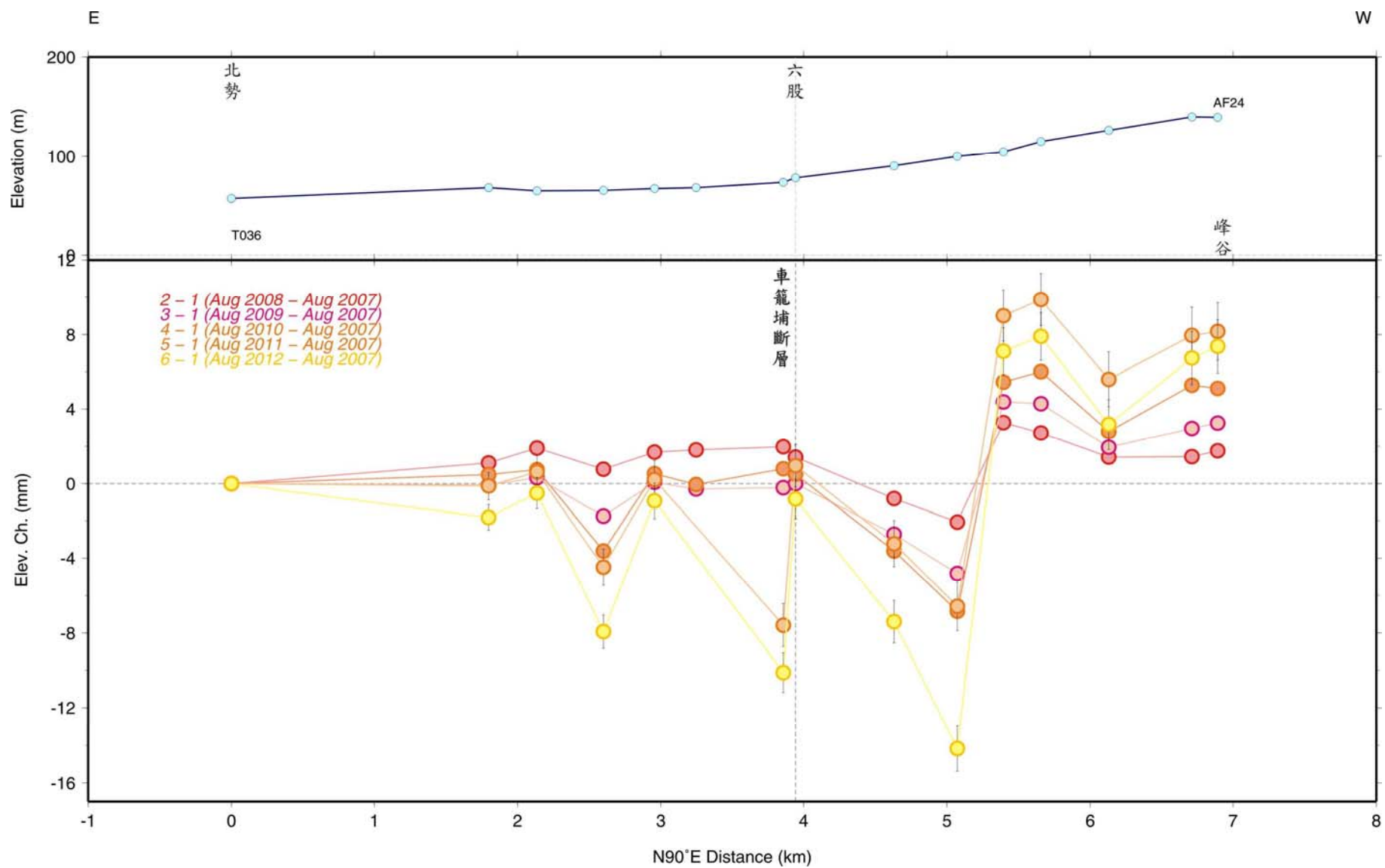


圖 2.38：北勢至峰谷短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

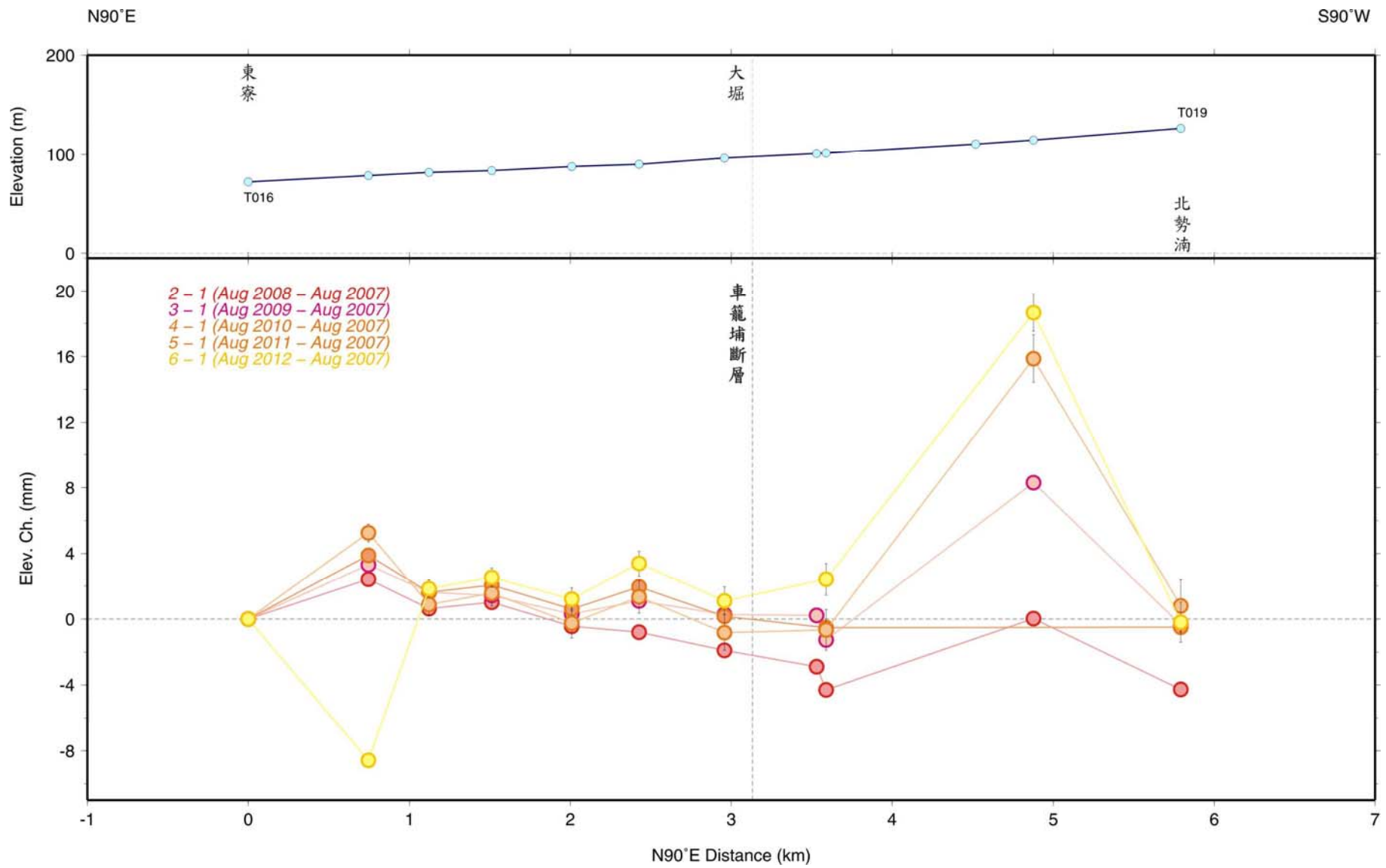


圖 2.39：烏溪南岸短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

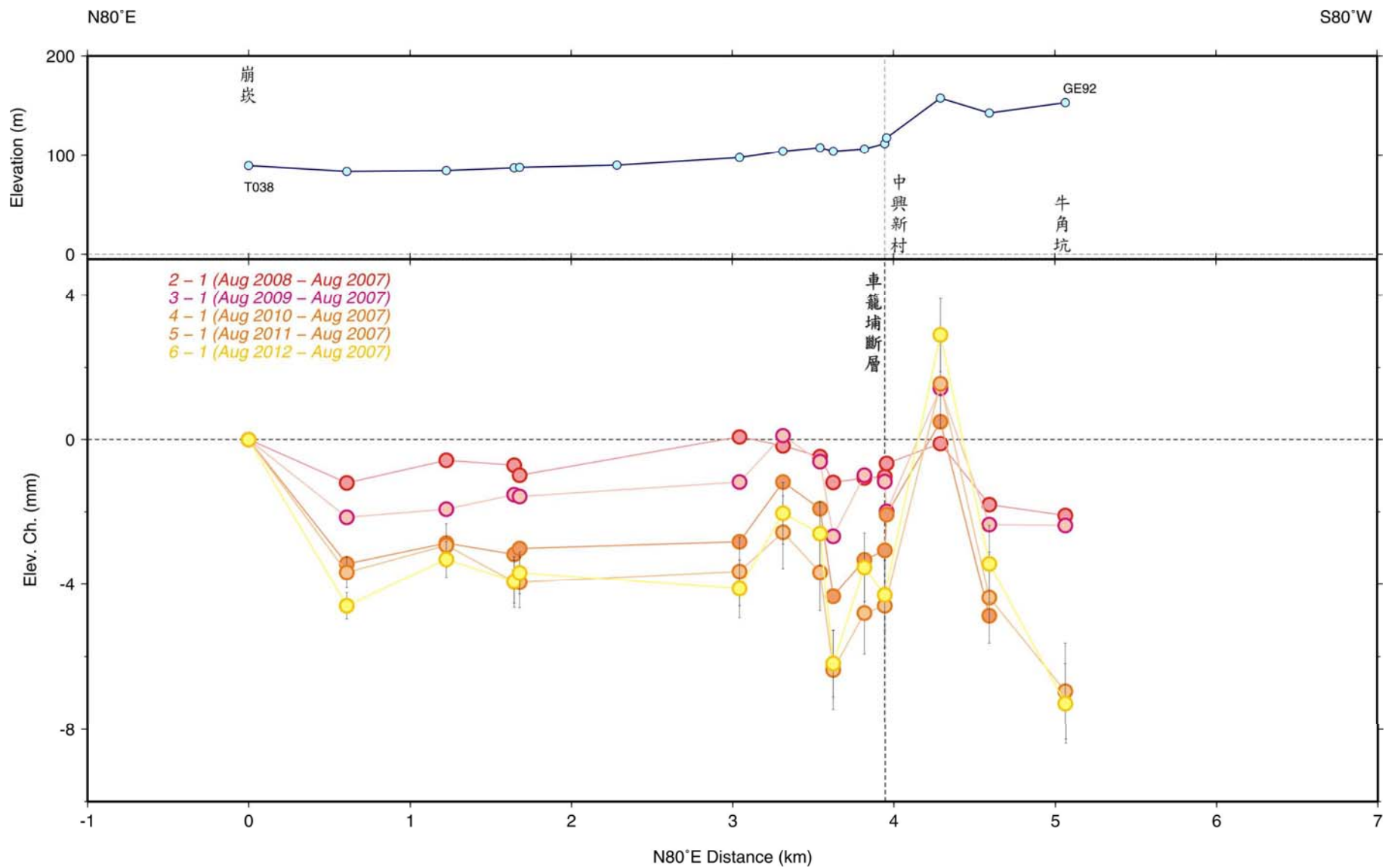


圖 2.40：中興新村短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

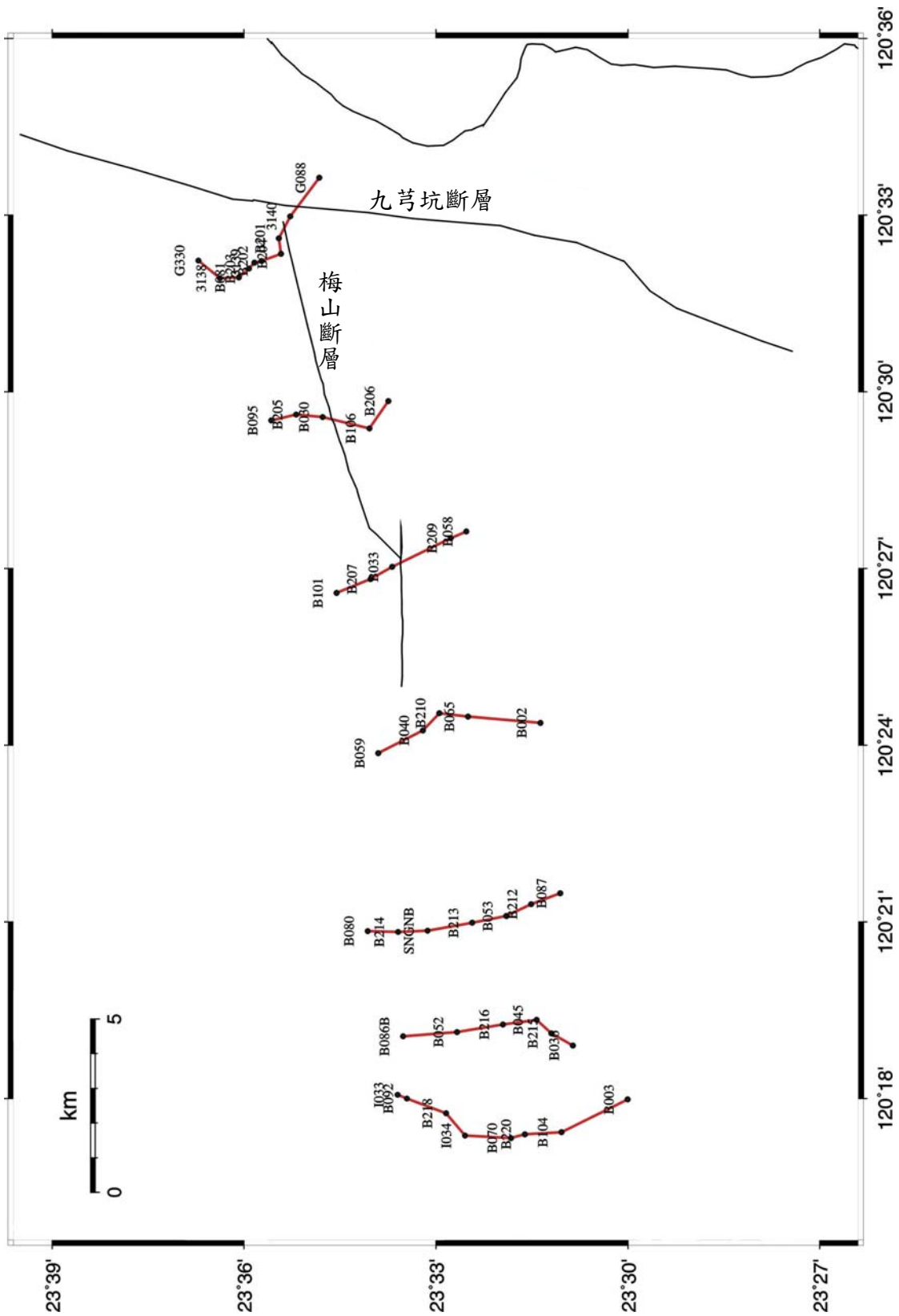


圖 2.41：跨梅山斷層短測線分布圖。

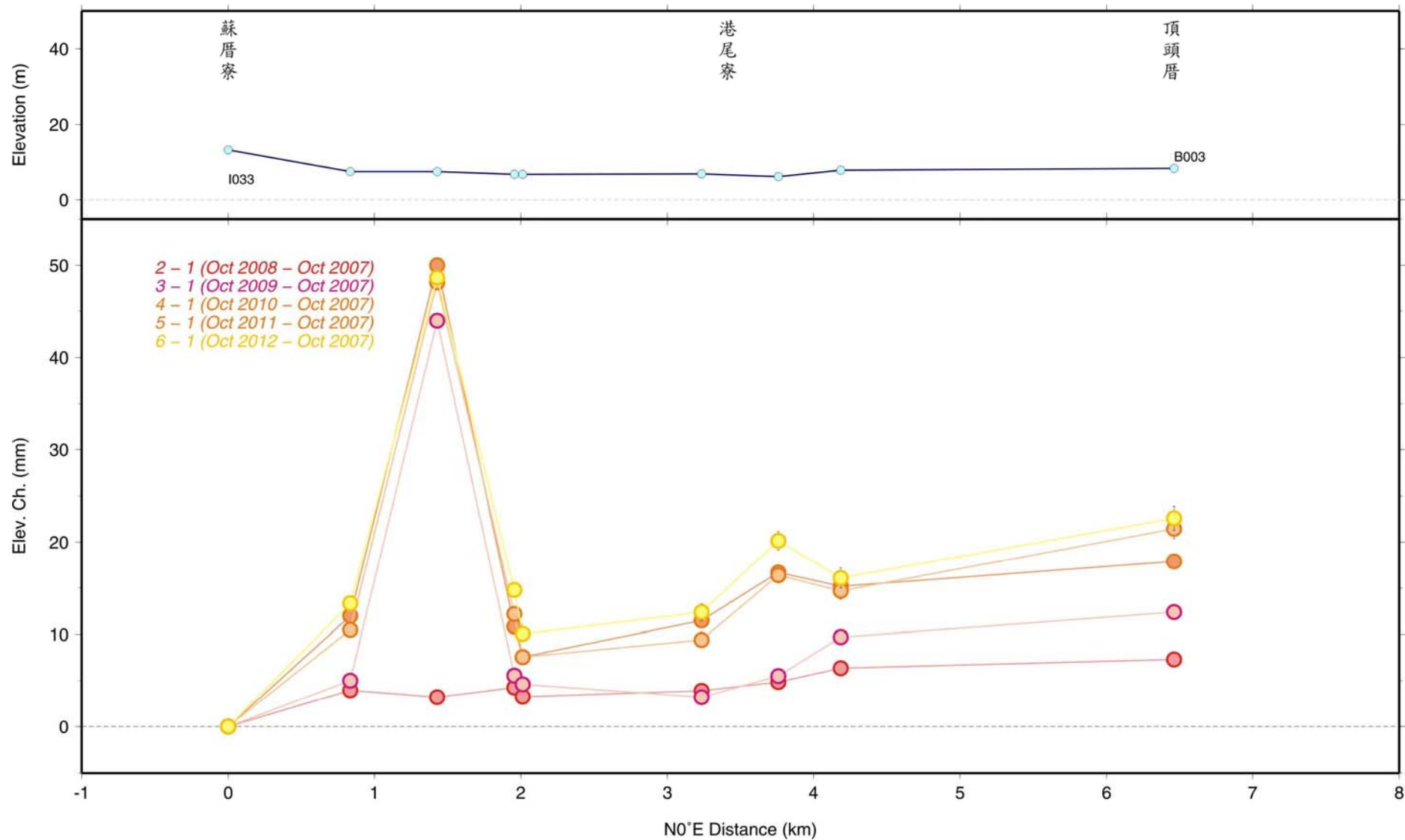


圖 2.42 : B003-B092 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

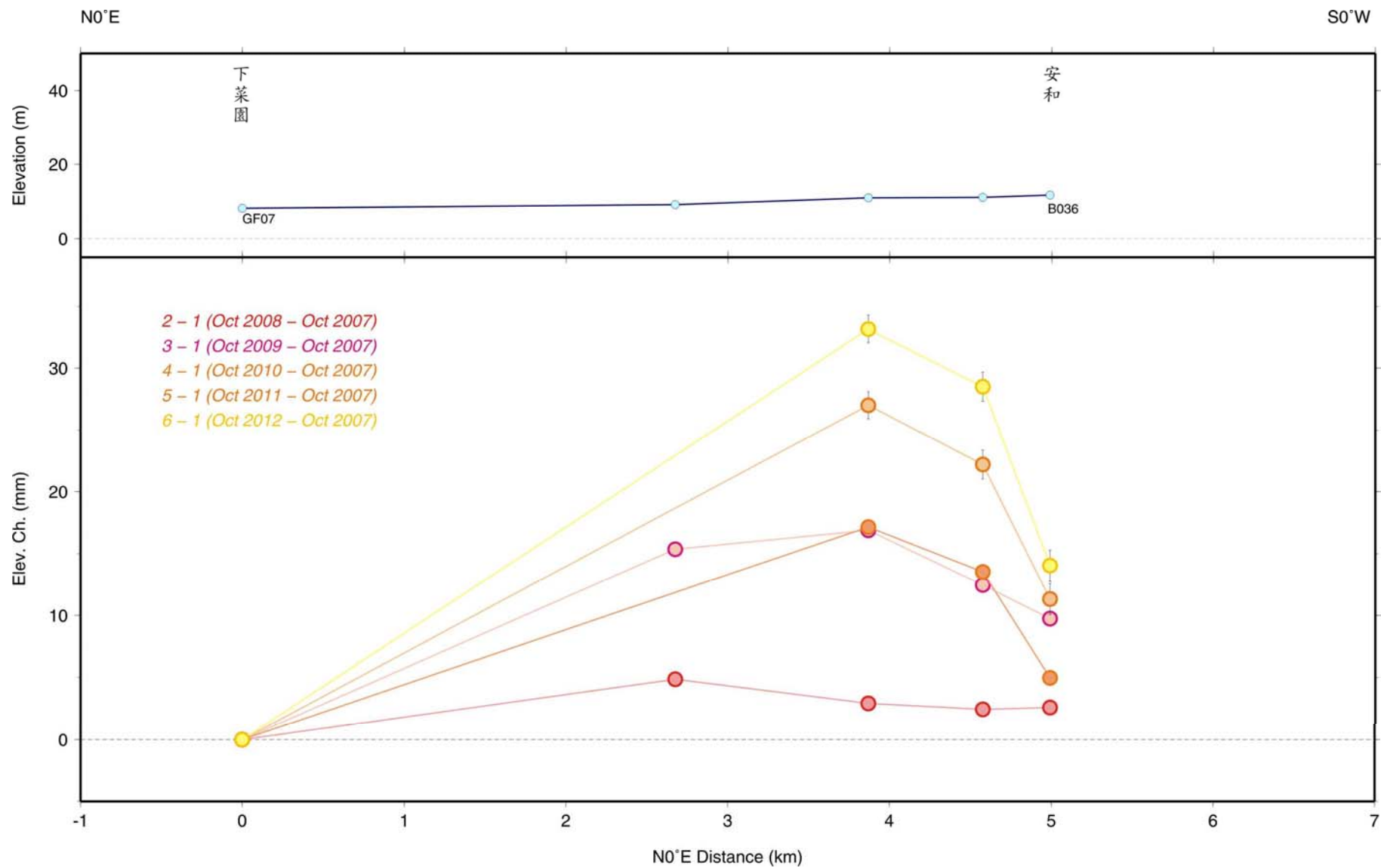


圖 2.43 : B036-B086 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

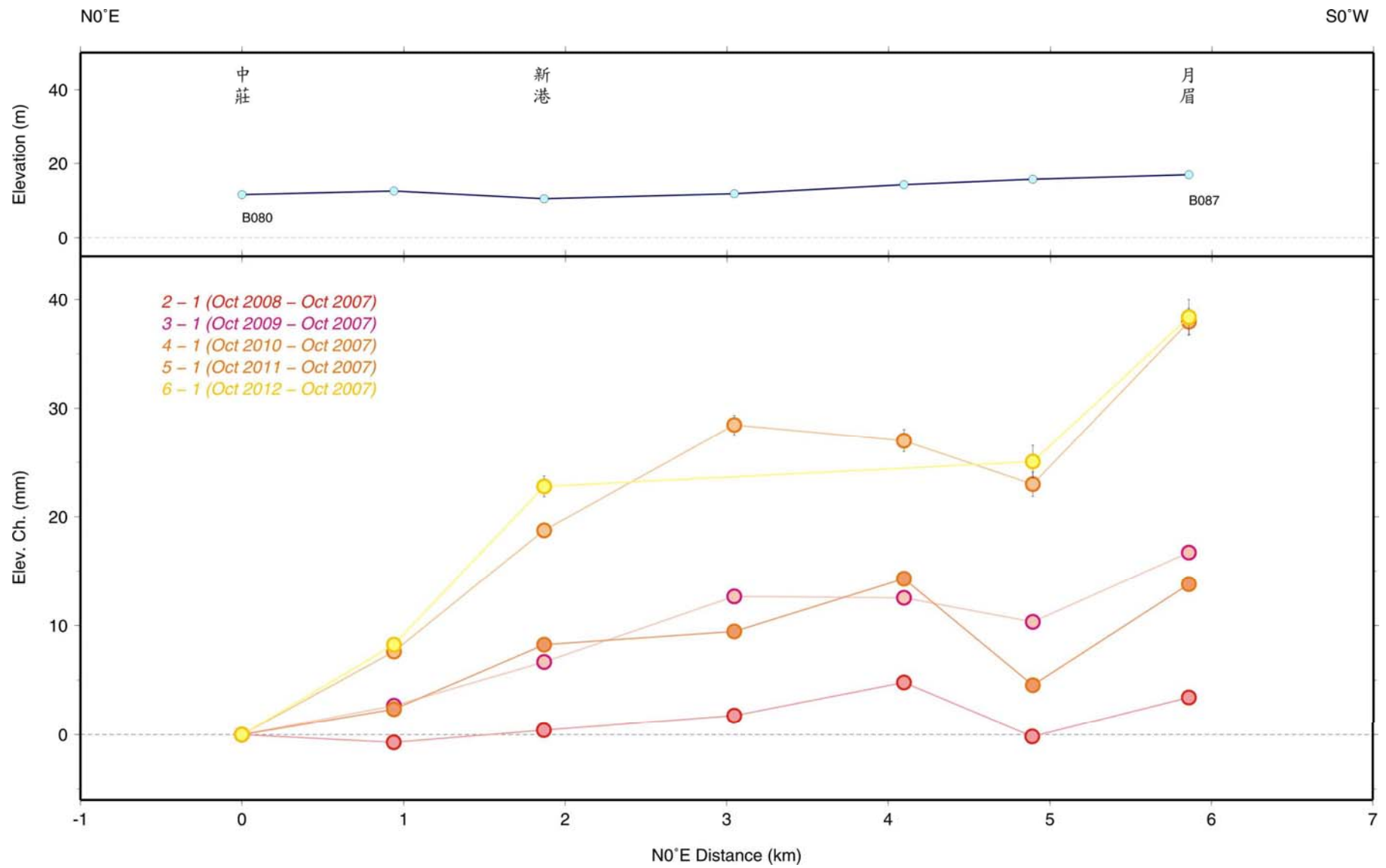


圖 2.44 : B087-B080 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

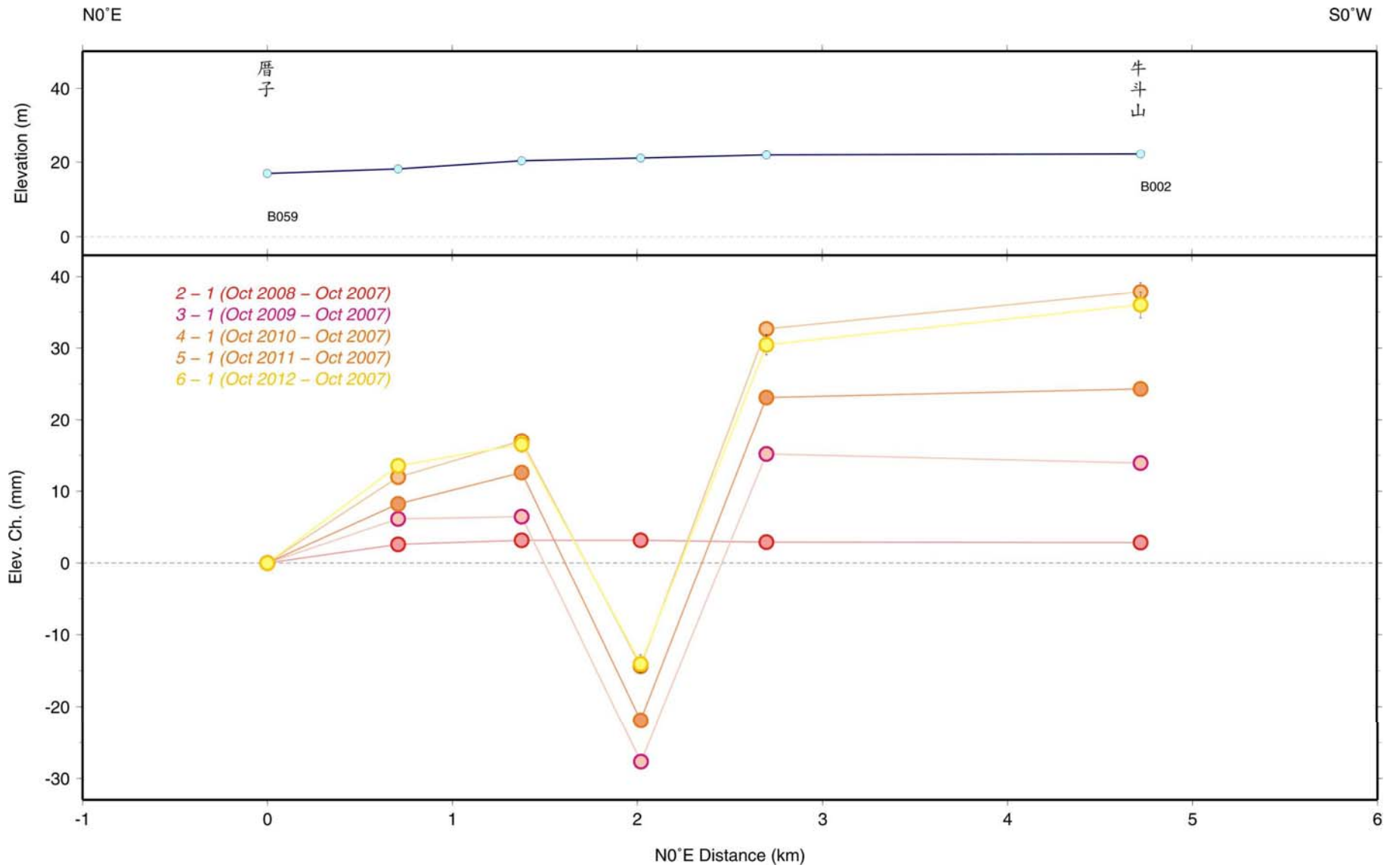


圖 2.45：B002-B059 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

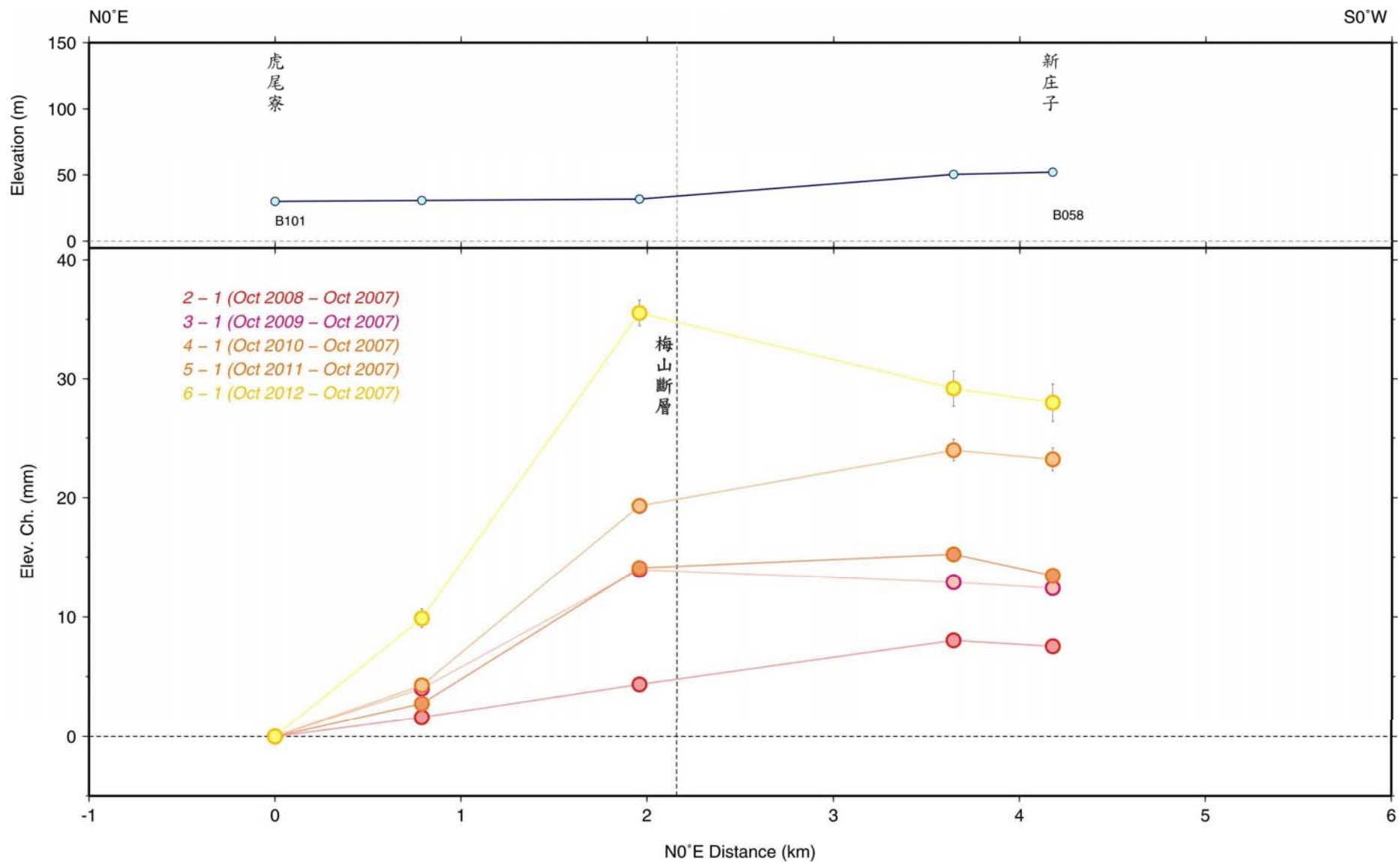


圖 2.46 : B110-B101 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

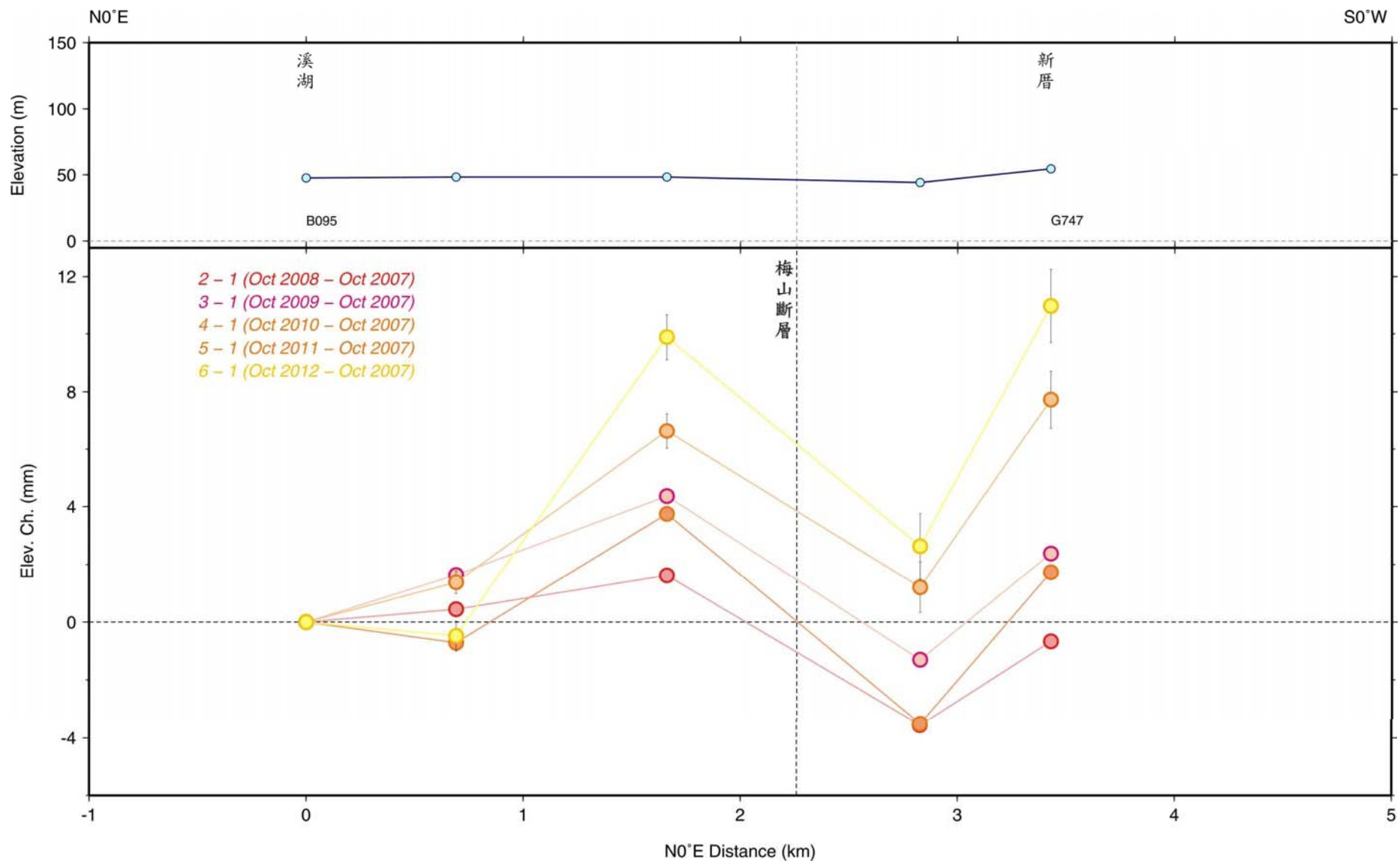


圖 2.47：B037-B095 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

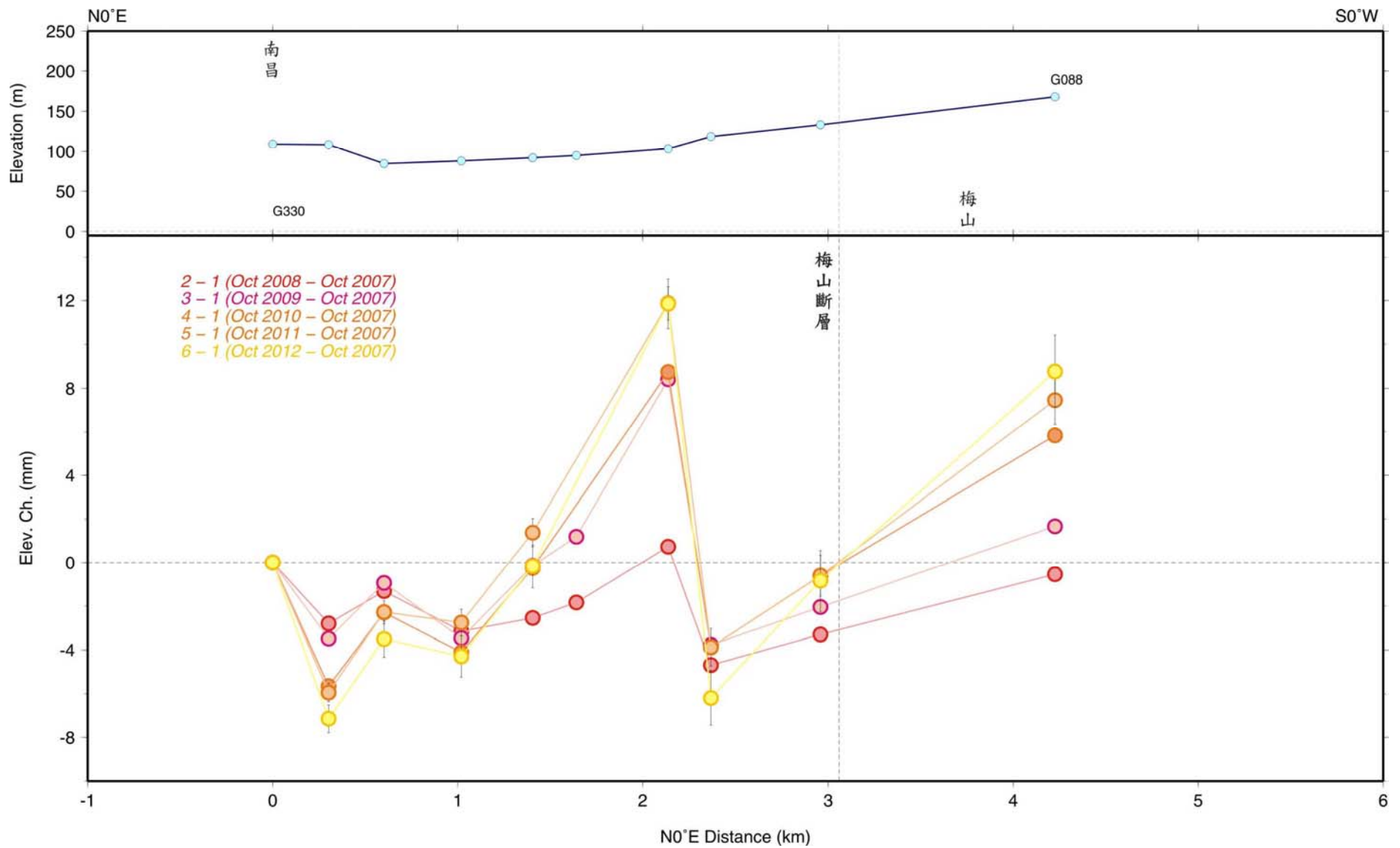


圖 2.48 : G088-G330 短測線水準垂直變化圖。圖例如圖 2.7 所示。

2-1-2-2-2 小結

由歷年精密水準測量成果及計算求得之垂直速度場，對照斷層於地表的分布位置，根據跨斷層垂直速度場的變化量，可以指出臺灣地區的斷層活動性為何。臺北地區的山腳斷層在大屯山區以北的位置，垂直速度變化 ~ 2 mm/yr，在臺北盆地則有 $12\sim 28$ mm/yr的活動。桃竹苗地區的新城、大平地和獅潭斷層則有 $4\sim 8$ mm/yr的垂直速度變化量存在；雖然其量值較小，卻為臺灣西北部地區最大的變化。中部地區的三義—車籠埔斷層持續著1999年集集地震以來的震後變形(>16 mm/yr)，其值大於彰化斷層的變化(~ 8 mm/yr)。嘉南地區的六甲、觸口和後甲里斷層均有約 10 mm/yr的變化量，是該區值得注意的活動斷層。高屏地區的小崗山、旗山和潮州斷層均有 >10 mm/yr的垂直變化量。花東地區因位於板塊碰撞前線，斷層活動性較高，跨斷層垂直速度變化均有 >10 mm/yr的量值，需持續進行監測。跨斷層之垂直速度變化於**2-4**節有結合GPS移動站、連續站與精密水準資料之統整描述。

2-2 臺灣地區 GPS 連續站資料分析

在 GPS 連續站 (CGPS) 時間序列處理方面，利用 Nikolaidis [2002] 之加權最小二乘法估計 (式 2.1 之參數，其中 \mathbf{b} 為速度場， \mathbf{c} 、 \mathbf{d} 為年週期參數， \mathbf{e} 、 \mathbf{f} 為半年週期參數， \mathbf{g} 為同震位移量， \mathbf{h} 為震後所改變之速度場， \mathbf{k} 為非線性震後變形之參數， \mathbf{v} 則為殘差，如圖 2.49。

$$\begin{aligned}
 y(t_i) = & a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) \\
 & + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{hj}) t_i \\
 & + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \exp(-(t_i - T_{kj}) / \tau_j) H(t_i - T_{kj}) + v_i
 \end{aligned}
 \tag{式 2.1}$$

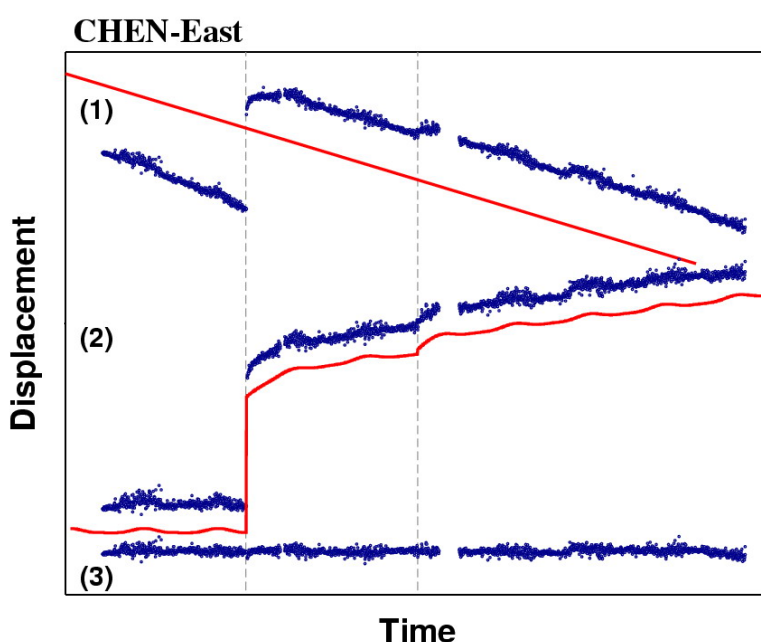


圖 2.49：每日坐標解之時間序列經處理成殘差 (residual) 之示意圖。

2-2-1 週期性分析

GPS 時間序列的週期性效應，最為常見的為年週期與半年週期。此效應一般被認為有三種原因所造成[Dong et al., 2002]，第一：由日、月潮引力作造成之影響，通常極潮 (pole tide)、固體潮 (solid tide) 及海潮 (ocean tide)。第二：以太陽為熱源所造成之一系列之週期性變化，例如大氣壓力、非潮汐所引致之海平面變化、地下水效應及熱膨脹效應。第三：由於模式改正的誤差所引致之週期性之變化，如衛星軌道模式、大氣壓模式、水汽分布模式、多路徑效應、天線盤相位中心改正等。根據 Dong et al. [2002] 分析世界上 429 個 GPS 連續站週期性效應顯示水平向之年週期振幅範圍在 1-3 mm，高程向則在 4-10 mm。為了探討 GPS 時間序列之週期性效應，我們提取各站之

在時間序列分析後之週期性參數進行分析，也就是（式 2.1 中之 **c**、**d**、**e**、**f** 參數，圖 2.50 及圖 2.51 即由以上參數繪成，分別代表年週期及半年週期之分布。如圖 2.50 所示，水平向之年週期振幅範圍均在 3 mm 以下，除 GS36 與 GS39 在東西向呈現 3.5 mm 與 2.9 mm 的高振幅。高程向則在 5 mm 以下，除 GS17、GS13 與 GS41 分別呈現 6.2 mm、5.9 mm 與 5.11 mm 的高振幅。在半年週期方面，其振幅量小於年週期，水平向均在 0.5 mm 以下，高程向均在 2 mm 以下。圖 2.52、圖 2.53 及圖 2.54 則分別為週期性效應於南北向、東西向以及高程向之分布圖。

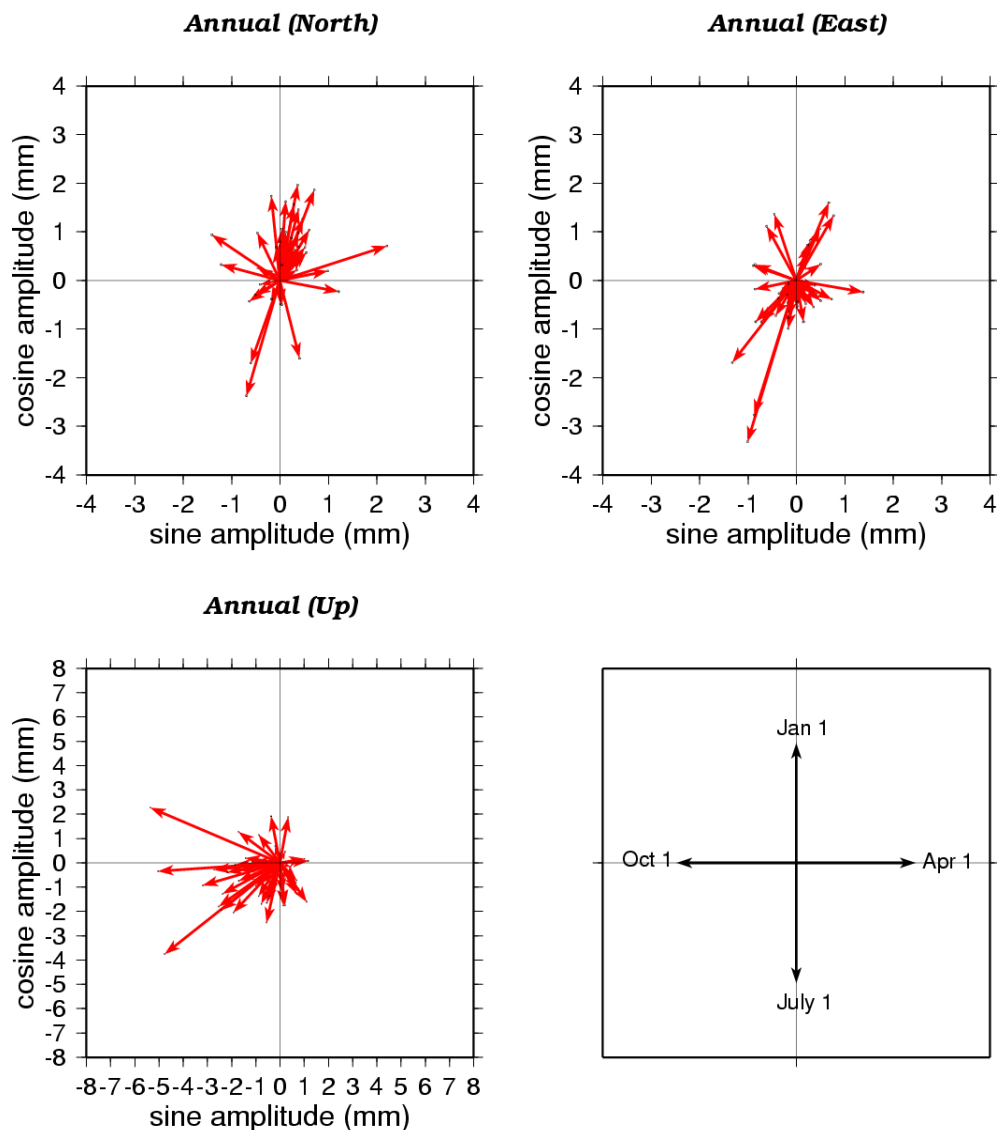


圖 2.50：GS01-GS44 年週期性之三方向振幅與相位統計圖。每一箭號即代表一個 GPS 站之年週期特性，箭號長度代表其週期振幅、箭號方向則代表其週期性相位偏移。週期性訊號的波峰與時間的關係如本圖圖幅右下角所示，若箭號指向垂直向下，則該站的波峰則出現在 6 月 1 號。

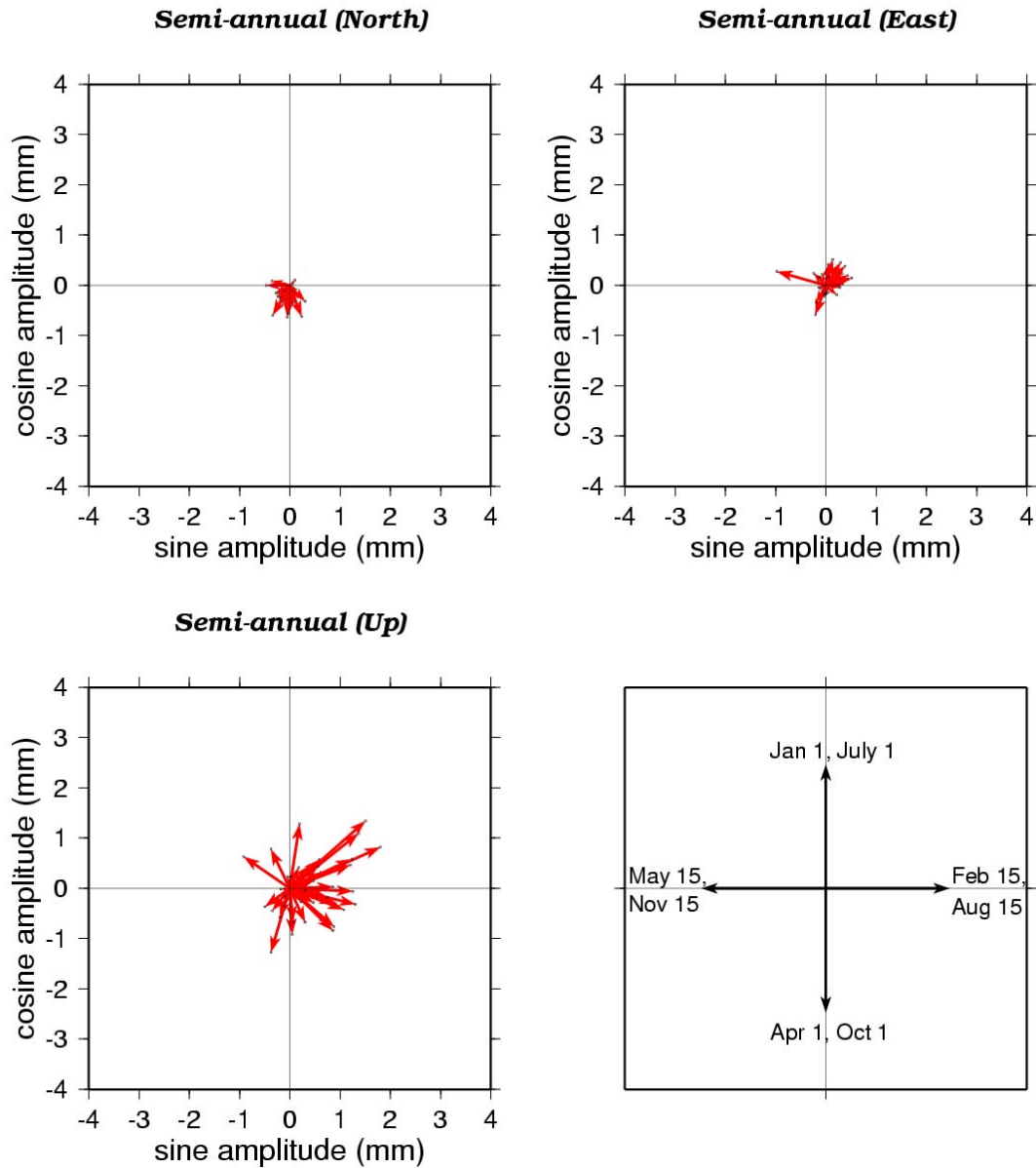


圖 2.51：GS01-GS44 半年週期性之三方向振幅與相位統計圖。每一箭號即代表一個 GPS 站之半年週期特性，箭號長度代表其週期振幅、箭號方向則代表其週期性相位偏移。週期性訊號的波峰與時間的關係如本圖圖幅右下角所示，若箭號指向垂直向下，則該站的波峰則出現在 4 月 1 號以及 10 月 1 號。

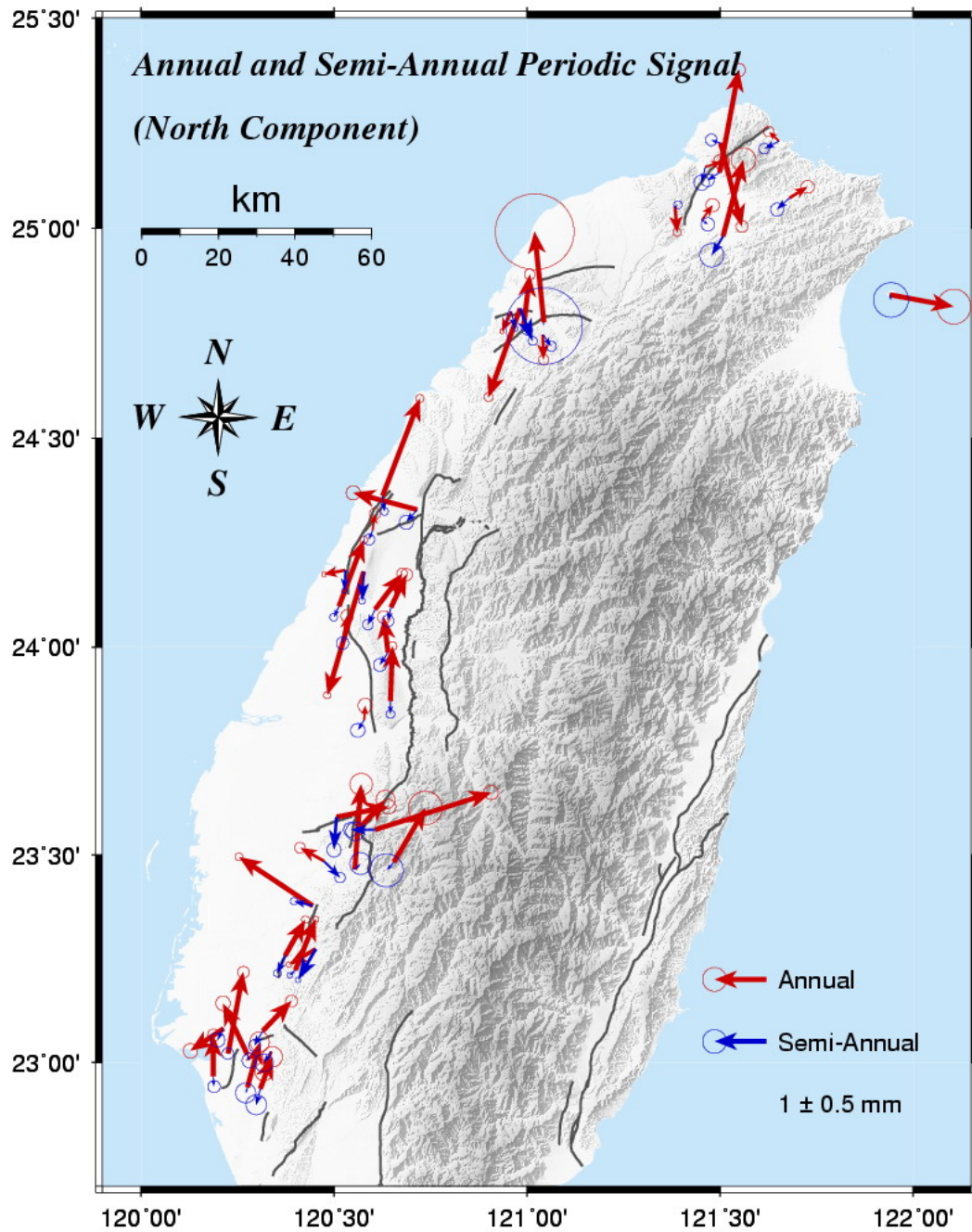


圖 2.52 : GS01-GS44 年週期性之南北方向振幅與相位分布圖。

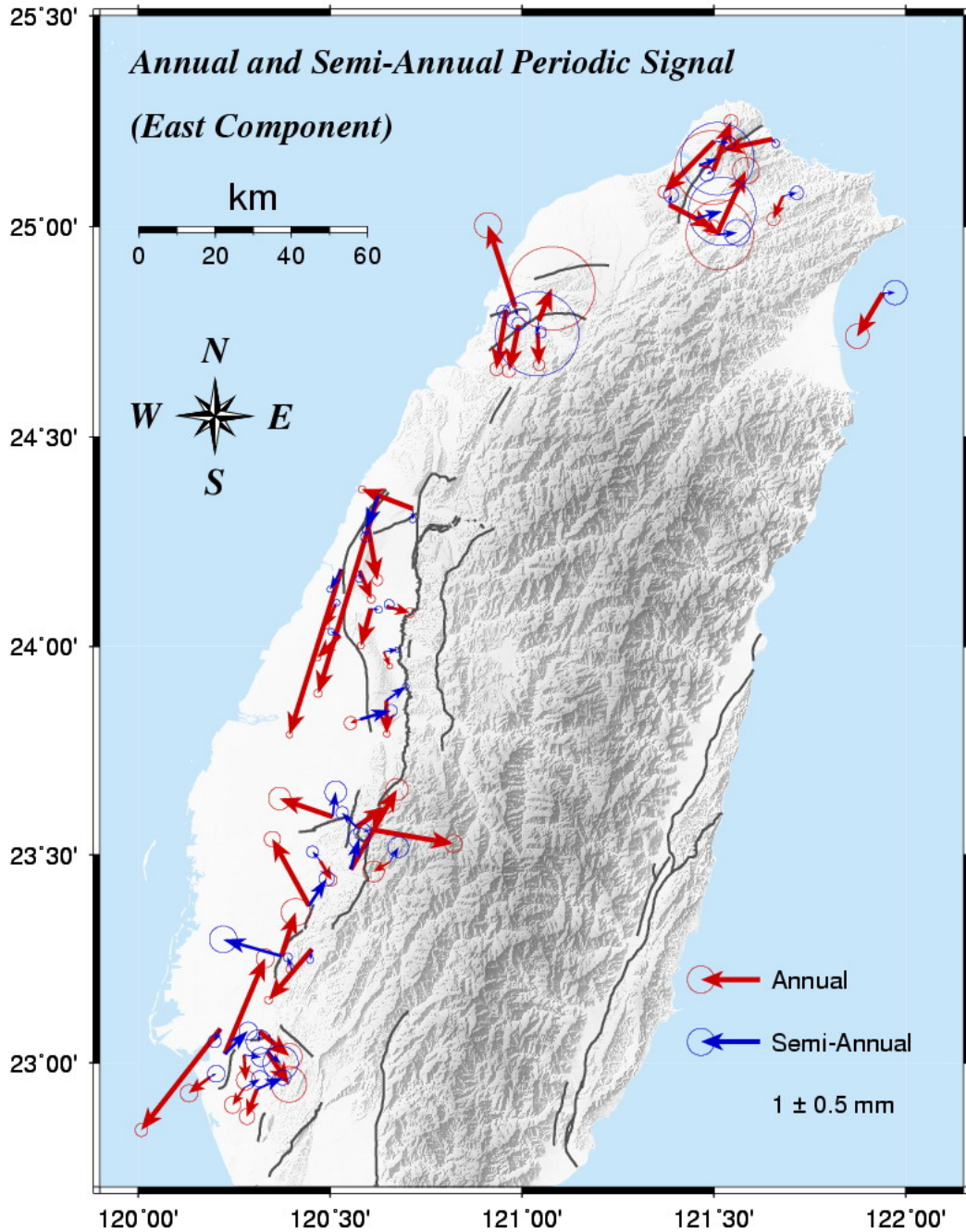


圖 2.53 : GS01-GS44 年週期性之東西方向振幅與相位分布圖。

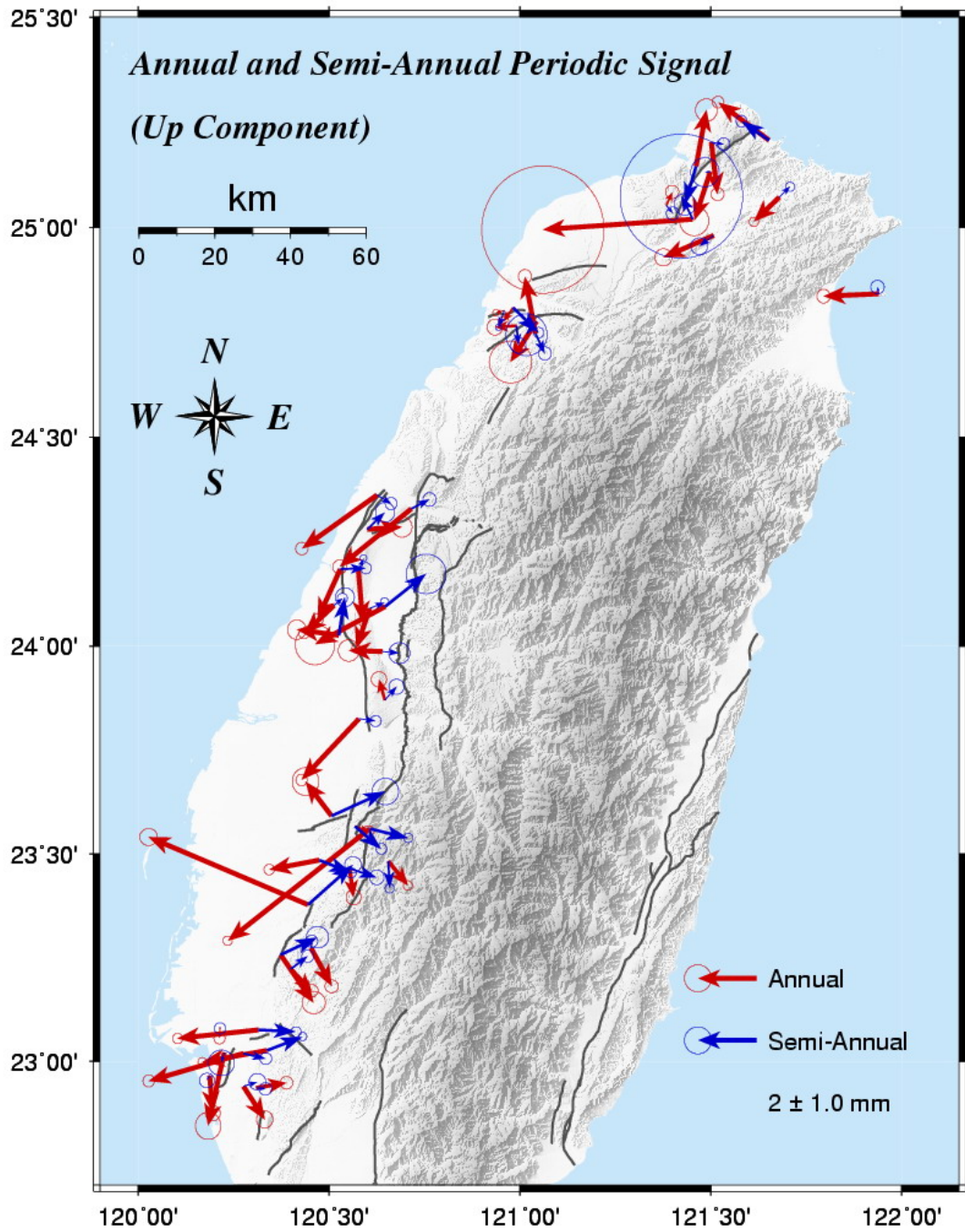


圖 2.54 : GS01-GS44 年週期性之高程方向振幅與相位分布圖。

2-2-2 雜訊分析

對 GPS 時間序列進行雜訊 (noise) 分析主要有二個目的，第一為估計合理的 GPS 誤差。由於 GPS 時間序列內含了與時間相關之雜訊，因此用一般以高斯分布為基礎的最小二乘法所估計的速度場誤差將會被低估，Mao et al. [1999] 的研究就提出了可能會低估了 5-11 倍之速度場誤差；第二為了解樁位型式對時間序列之影響。不同樁位型式之 GPS 站所耗費的經費差距非常大，例如深錨式之 GPS 站所需的經費就遠大於屋頂式。因此，一些研究即在探討深錨式 GPS 站是否較其它便宜的樁位有更穩定之時間序列表現 [William et al., 2004; Beavan, 2005; Langbein, 2008]。對於 GPS 時間序列雜訊而言，可以利用功率譜過程來描述 [Agnew, 1992]。其公式如下：

$$P_x(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^\kappa \quad (\text{式 2.2})$$

其中 f 為時間頻率 (temporal frequency)， P_0 和 f_0 為正規化常數， κ 則為頻譜指數 (spectral index)。頻譜指數通常在 -3 到 1 之間，當 $-3 < \kappa < -1$ 稱為 classical Brownian motion，當 $-1 < \kappa < 1$ 稱為 fractional white noise， $\kappa = 0$ 稱為 white noise， $\kappa = -1$ 稱為 flicker noise， $\kappa = -2$ 稱為 random walk noise。過去文獻均提出 GPS 時間序列之雜訊較接近 white noise 加上 flicker noise。為了探討臺灣連續站的雜訊特性，我們分別分析由 GAMIT 與 Bernese 解算之時間序列，利用英國 National Oceanography Centre 的 Simon D.P. Williams 博士所研發的 CATS 軟體 [William et al., 2004]，利用 Maximum Likelihood Estimation 方法來估計時間序列之雜訊特性。首先，我們將雜訊區分為三種型態，分別為 white noise，white noise + flicker noise 以及 white noise + random walk noise，再將所有時間序列計算其匹配參數 (MLE 值)，MLE 值最大的雜訊型態則為該時間序列最適合之雜訊型態。圖 2.55 展示各 GPS 站在三方向的 MLE 差值，圖中可見無論是 GAMIT 或是 Bernese 的結果，其 MLE 值幾乎是 white noise + flicker noise 為最大，該結果與前人之研究結果相符。接著我們再利用 CATS 對每個時間序列估計其最佳之頻譜指數，其結果如圖 2.56 所示，GAMIT 及 Bernese 的結果均落在 fractional white noise 的範圍，由 GAMIT 結果之頻譜指數 (κ 值) 三方向分別為 -0.55，-0.48 及 -0.36，Bernese 結果之頻譜指數 (κ 值) 三方向分別為 -0.44，-0.45 及 -0.42。比較 SOPAC 計算南加州觀測網 (SCIGN) 之成果，其頻譜指數 (κ 值) 三方向分別為 -1.1，-1.1 及 -0.9。綜合以上結果可以得知，臺灣與南加州之連續站時間序列均較適合以 white noise + flicker noise 來描述，但南加州特性較偏向 flicker noise，而臺灣結果較偏向 white noise。

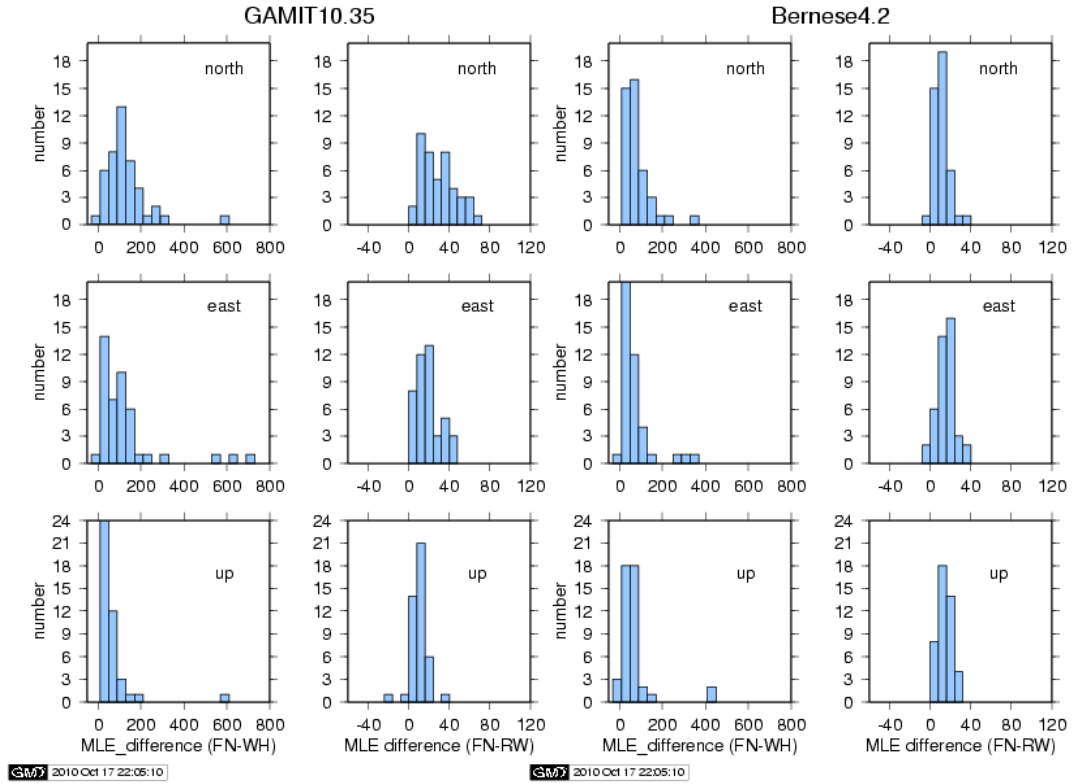


圖 2.55 : GS01-GS44 之整數頻譜指數之雜訊分析結果。

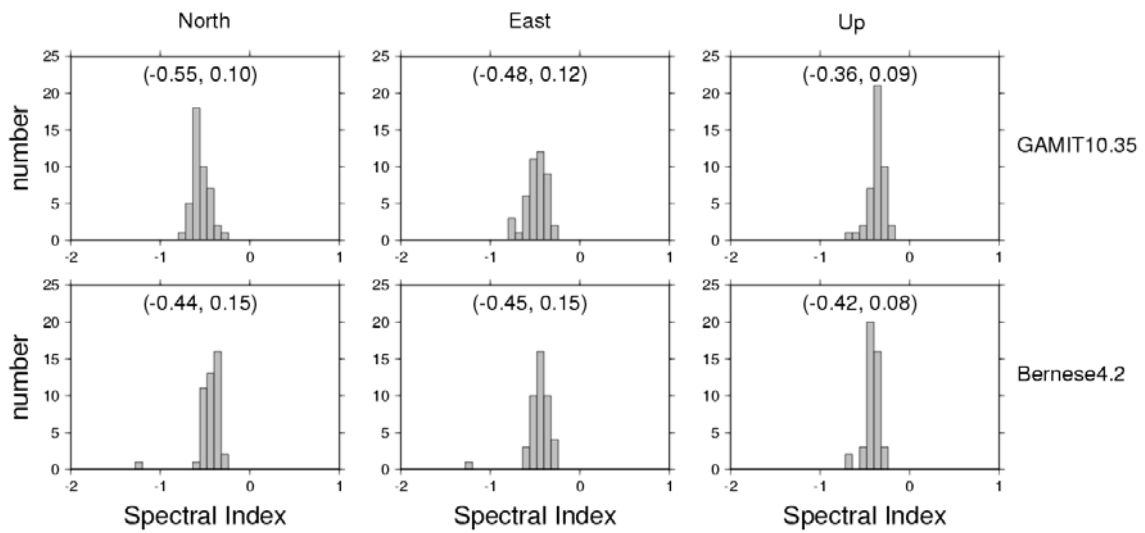


圖 2.56 : GS01-GS44 之實數頻譜指數之雜訊分析結果。

2-2-3 空間濾波技術

GPS 時間序列中仍隱含著與時間相關的雜訊，如 flicker noise。前人文獻曾提出提取一空間相關之雜訊，並進一步濾除來消除時間相關之雜訊及改善時間序列之離散程度，此空間相關之雜訊稱作 common mode noise (CME)。在 CME 估計方面，最早是由 Wdowinski et al. [1997]所提出，其公式如式 2.3：

$$\varepsilon(d) = \frac{\sum_{S=1}^S \varepsilon_S(d)}{S} \quad (\text{式 2.3})$$

其中 S 為濾波基準站數目， $\varepsilon_S(d)$ 為單時刻之殘差量。由式 2.3 可知每個基準站於 CME 之貢獻量為等權。Nikolaidis [2002]進一步將對每個殘差量用每日均方根值進行加權，如式 2.4：

$$\varepsilon(d) = \frac{\sum_{S=1}^S \varepsilon_S(d) / \sigma_S^2}{\sum_{S=1}^S 1 / \sigma_S^2} \quad (\text{式 2.4})$$

對於某觀測網應用 CME 濾除空間相關性雜訊之潛能，可以利用任意兩站之距離與其時間序列殘差之相關性來探討（圖 2.57）。我們將 GS01 至 GS44 共 44 站兩兩配對，如 GS01 與 GS02，再將兩站之三方向之時間序列殘差分別求得其相關係數，再求得站距而繪成圖 2.57。由圖 2.57 可知，短基線的殘差相關係數高，以 GAMIT 為例，在站距 50 公里內其相關係數大都高於 0.5，此也提供使用 common mode noise 範圍的指標。因此我們以中臺灣為例，選取 GS21 等 12 站（表 2.4）進行 common mode noise 之提取與濾除，其成果列於表 2.4、表 2.5 與圖 2.58。經由 common mode noise 的濾除，中臺灣 GPS 站時間序列之三方向 wrms 平均由原先之 1.5mm、1.4mm、4.3mm 改善至 0.9mm、1.0mm、3.3mm。由圖 2.58 也可看到時間序列在濾波後得到有效的改善。最後將所有濾波後的站進行雜訊分析並與濾波前作比較，發現三方向頻譜指數（ κ 值）中位數由濾波前之 -0.55、-0.36、-0.33 至濾波後之 -0.44、-0.34、-0.24，表示濾波後之時間序列雜訊更趨近於 white noise。

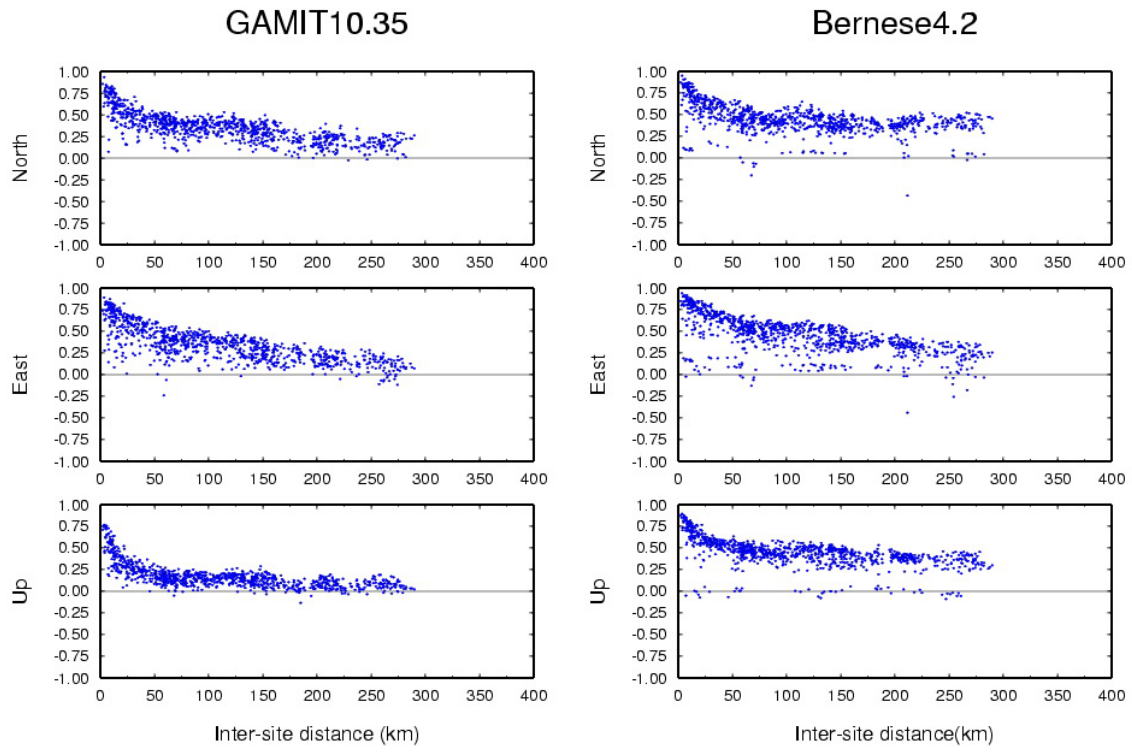


圖 2.57：站距與三方向時間序列殘差相關性統計圖。

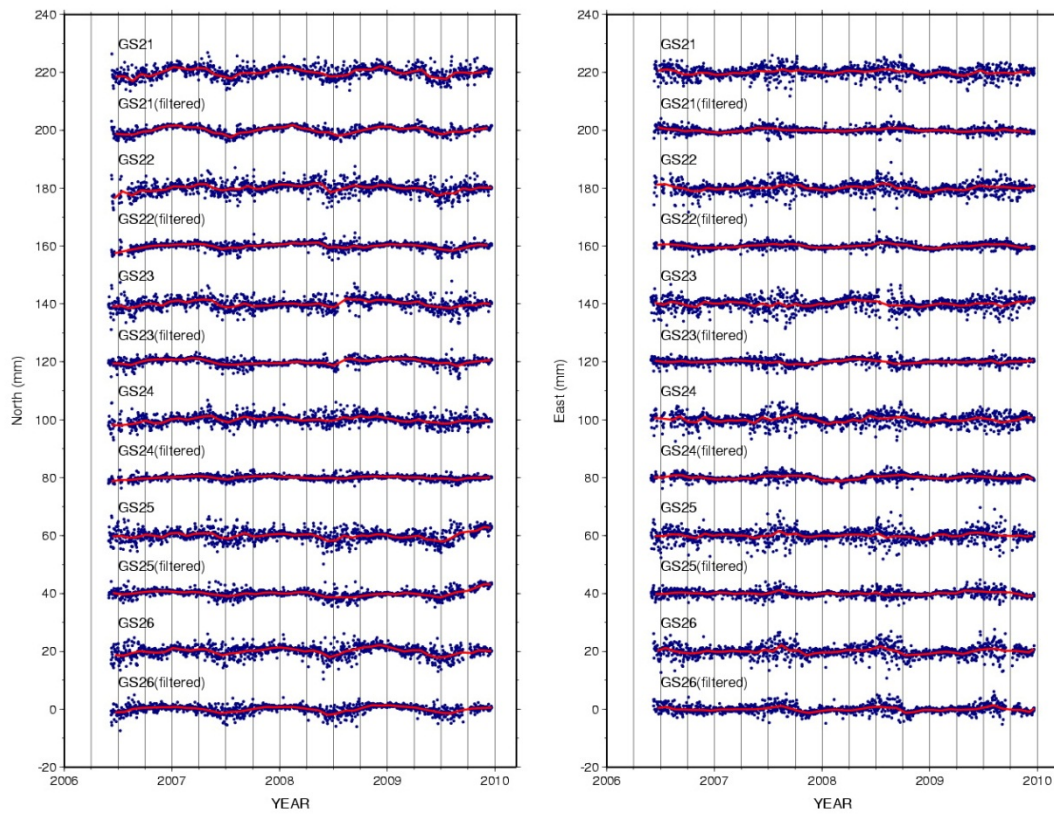


圖 2.58：空間濾波前後之時間序列成果圖。

表 2.4：空間濾波前後之 wrms 值列表。

| 站名 | 濾波前 wrms (mm) | | | 濾波後 wrms (mm) | | |
|------|---------------|------|-----|---------------|------|-----|
| | North | East | Up | North | East | Up |
| GS21 | 1.5 | 1.5 | 3.9 | 0.8 | 0.8 | 2.5 |
| GS22 | 1.6 | 1.5 | 4.2 | 0.8 | 0.6 | 2.8 |
| GS23 | 1.6 | 1.7 | 5.3 | 0.9 | 0.8 | 4.0 |
| GS24 | 1.5 | 1.6 | 4.8 | 0.6 | 0.8 | 3.7 |
| GS25 | 1.7 | 1.7 | 4.9 | 1.1 | 0.9 | 3.9 |
| GS26 | 1.5 | 1.6 | 4.9 | 1.0 | 1.0 | 4.0 |
| GS27 | 1.5 | 1.6 | 4.4 | 1.0 | 1.0 | 3.5 |
| GS36 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 1.1 | 1.7 | 3.3 |
| GS37 | 1.6 | 1.5 | 4.4 | 1.0 | 1.0 | 3.6 |
| GS38 | 1.4 | 1.5 | 4.1 | 0.9 | 0.9 | 2.9 |
| GS39 | 1.3 | 1.7 | 3.9 | 0.7 | 1.2 | 2.9 |
| GS40 | 1.6 | 1.3 | 3.6 | 1.2 | 0.7 | 2.5 |
| 平均 | 1.5 | 1.6 | 4.4 | 0.9 | 1.0 | 3.3 |
| 中位數 | 1.5 | 1.6 | 4.3 | 1.0 | 0.9 | 3.4 |

表 2.5：空間濾波前後之頻譜指數變化表。

| | 濾波前 頻譜指數 | | | 濾波後 頻譜指數 | | |
|-----|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | North | East | Up | North | East | Up |
| 平均值 | -0.56 | -0.41 | -0.35 | -0.47 | -0.40 | -0.31 |
| 中位數 | -0.55 | -0.36 | -0.33 | -0.44 | -0.34 | -0.24 |

2-2-4 地下水水位相關性分析

為了探討 GPS 地表變形與地下水位變化之關係，我們選取 2002 年至 2009 年臺灣北部與西部平原之連續站為對象進行研究，其中連續站所屬單位除了經濟部中央地調所，尚包括中央氣象局以及內政部地政司。水文資料為經濟部水利署所架設之地下水位觀測井之每日水位資料（部份為每月水位）。圖 2.59 為 GPS 連續站在高程方向之年週期性訊號分布。圖 2.59 中顯示，高程向年週性訊號之振幅大小（箭號長度），其平原區大於山區，其中振幅最大之區域主要在屏東平原（5.5 mm - 14.2 mm）與濁水溪沖積扇（2.4 mm - 14.7 mm），臺北盆地與蘭陽平原也有零星之連續站顯示明顯之週期性訊號，但強度較小，分布區域也較小。

以下本研究針對屏東平原來探討該區因地下水位變化所造成之地表變形。圖 2.60 為屏東平原之 GPS 連續站點位分布，以及在圖 2.61 所使用之地下水位站與雨量站點位分布圖。圖 2.61 為 NJOU 站之高程向 GPS 位移與其鄰近之地下水位站、雨量站之時間序列。由圖 2.61 顯示該站以每年約 1 cm 之速率下陷，但約有 1.4 cm 年之週期振幅震盪。與雨量與地下水位資料比較，發現抬升之時間段為高雨量時段，通常在每年之五月至十月，且地下水位開始抬升之時間也與 GPS 高程位移一致。非雨季時段則為下陷，地下水位也呈現下降之趨勢。此外，在 2009 年 8 月 8 日，單日降雨量高達近 800mm，其 GPS 高程位移及地下水位均有明顯突升現象（高程抬升約 3 cm，地下水位抬升約 30 m）。

圖 2.62 至圖 2.64 分別為屏東平原連續站在高程向、南北向及東西向之時間序列。縱觀三圖，高程向之年週期振幅較水平向大，尤其在屏東平原南段（連續站 NJOU、CLON 及 FALI）。在水平向方面，在時間序列上有受到 2006 年 4 月 1 日卑南地震與 2006 年 12 月 26 日恆春地震影響，因此在該時段有明顯之同震與震後效應。在水平向時間序列上（圖 2.62 與圖 2.63），可發現 LIKN、FALI 兩站呈現年週期相反之訊號，在雨季時，LIKN 時間序列呈西北向，FALI 則為東南向；反之，在乾季時，LIKN 時間序列呈東南向，FALI 則為西北向。其它站也有類似之效應，如 PTUN、WDAN 與 CLON 站等。此種效應在 Bawden et al. [2001]研究美國洛杉磯之地層下陷區時提出，在地下水集水區邊緣地帶，由於乾濕季所造成之地下水集水區之收縮與膨脹，進而造成在水平方向呈輻射狀之水平位移。

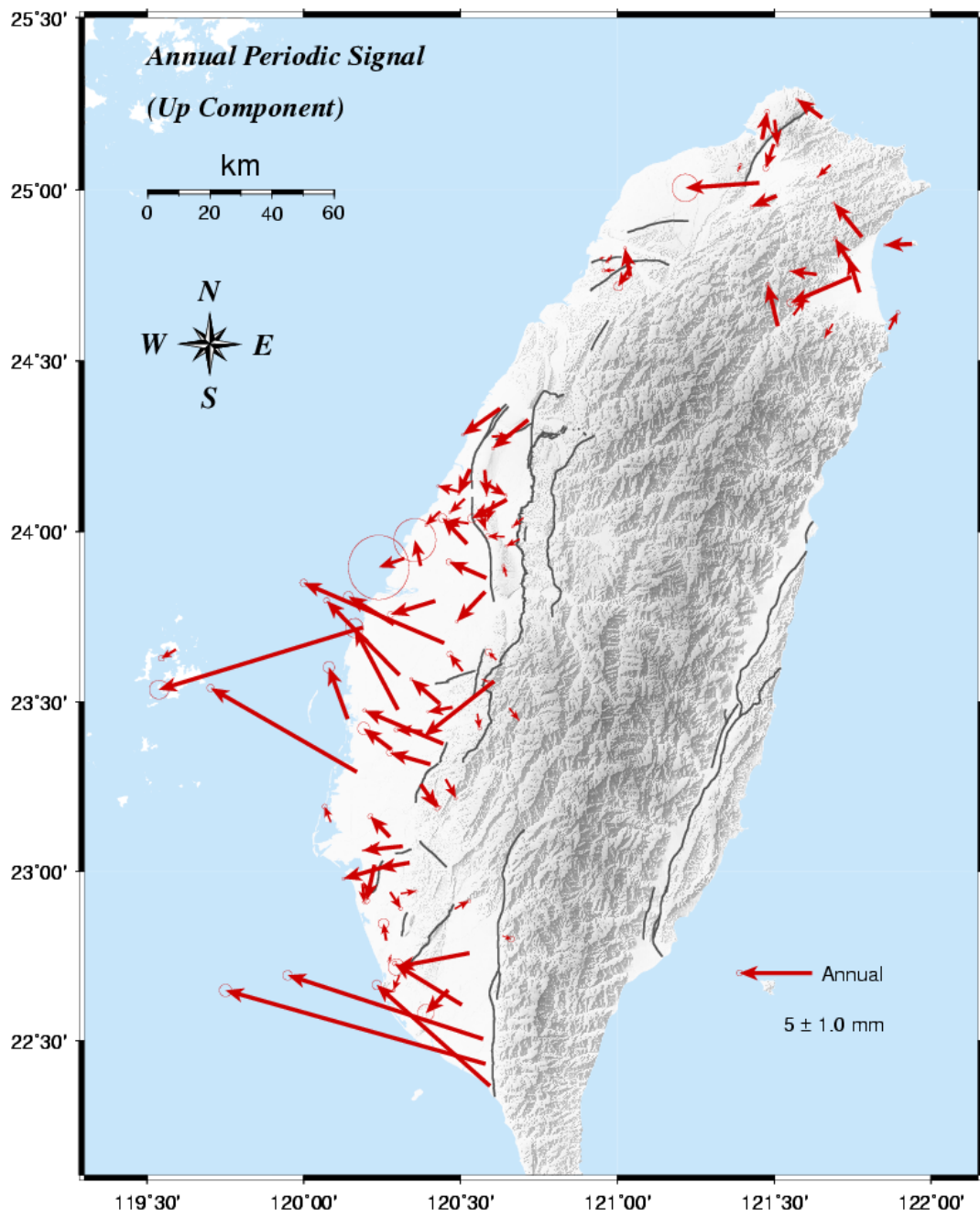


圖 2.59：臺灣西部及北部平原 GPS 連續站之年週期訊號分布圖。

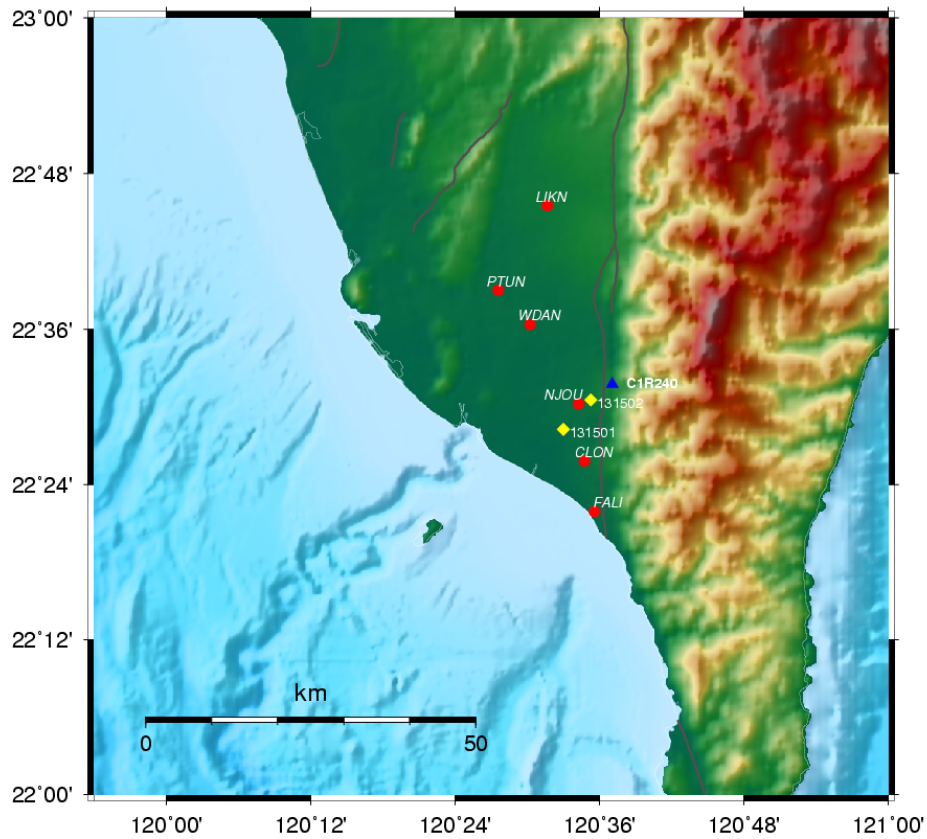


圖 2.60：屏東平原之連續站、雨量站及地下水位站之分布圖。紅色圓圈為 GPS 連續站、黃色方格為地下水位站、藍色三角型為雨量站。

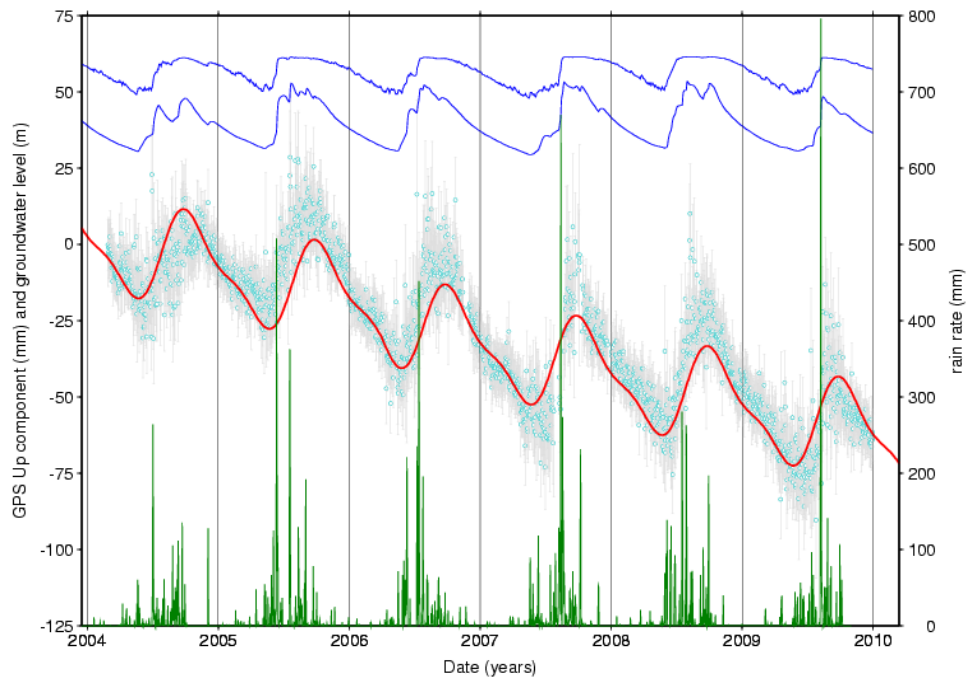


圖 2.61：NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。圖中時間序列、地下水位以及日雨量分別以紅線、藍線及綠線表示。

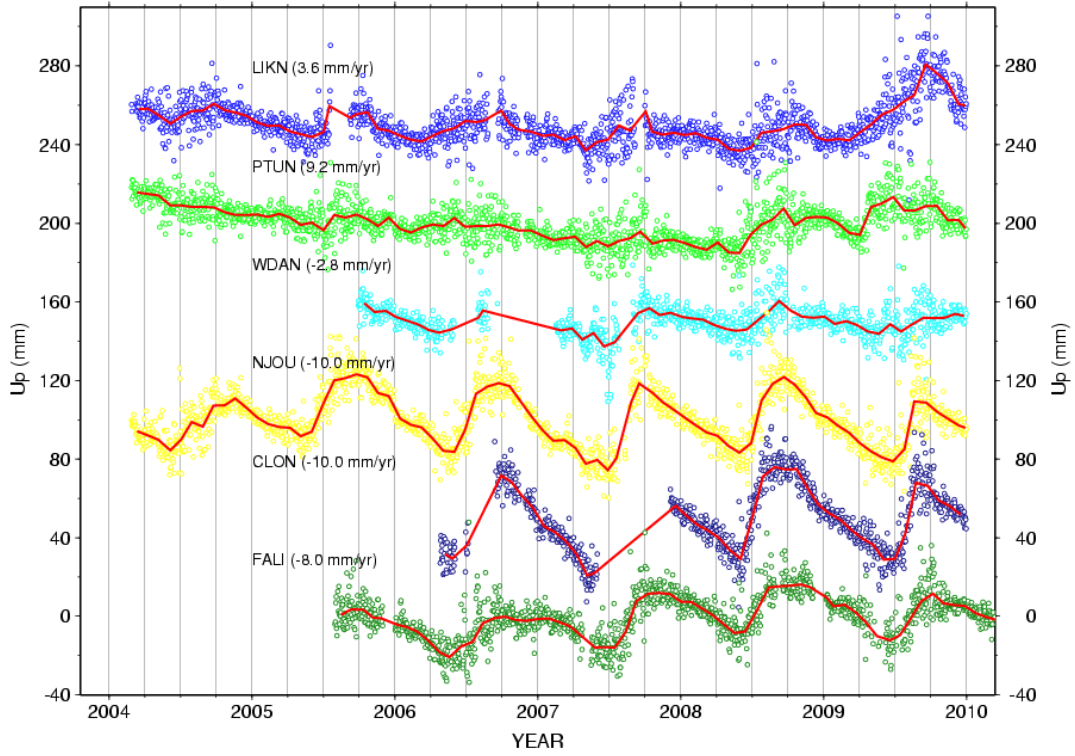


圖 2.62：屏東平原高程向 GPS 時間序列。紅線為 28 天平均線，括號中之量值為長期平均速度場。

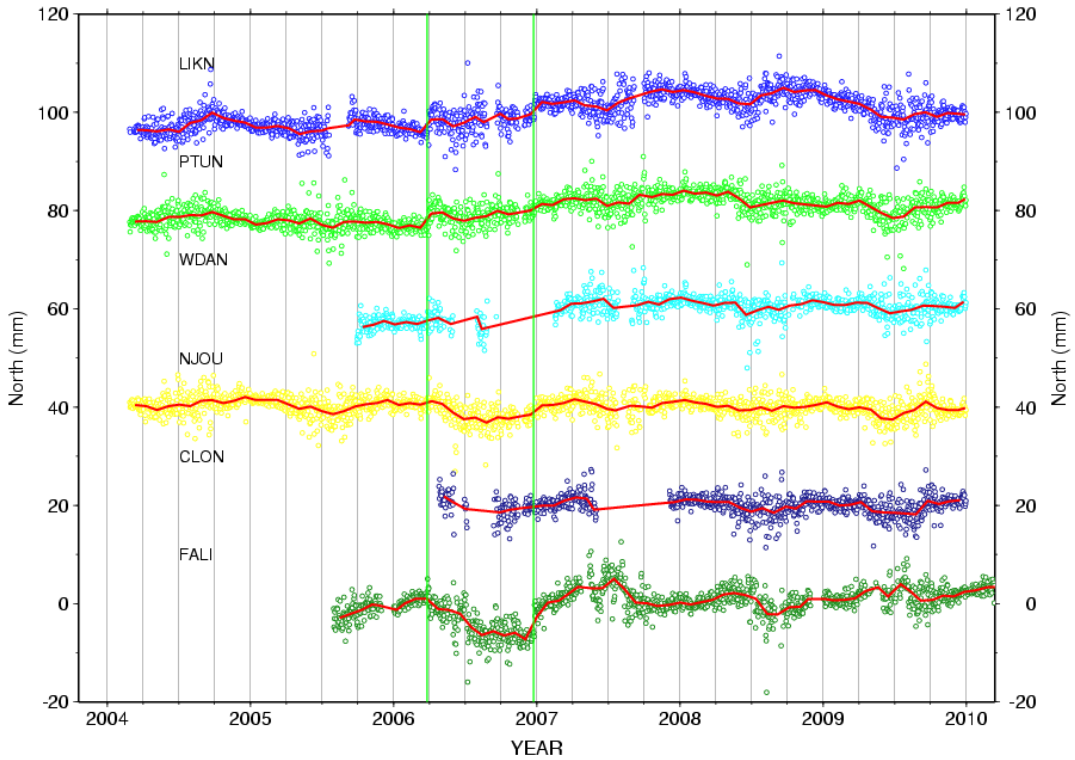


圖 2.63：屏東平原南北向 GPS 時間序列。紅線為 28 天平均線，綠色直線為 2006 年 4 月 1 號卑南地震與 2006 年 12 月 26 號恆春地震發生時間。

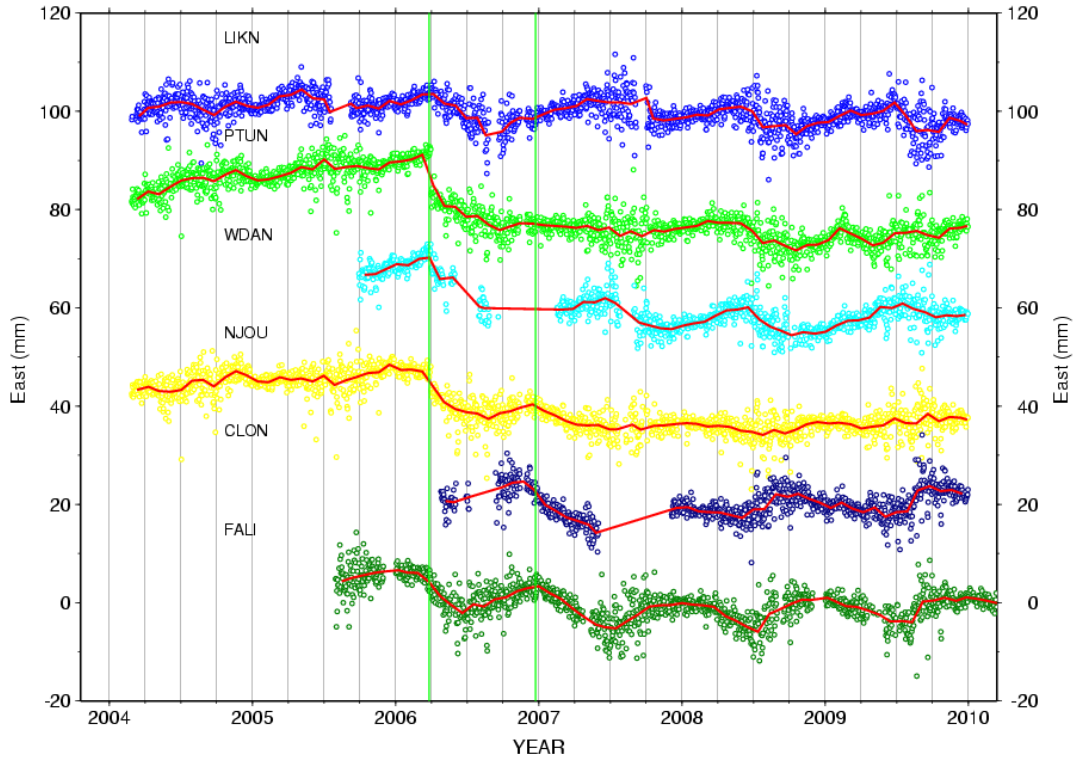


圖 2.64：屏東平原東西向 GPS 時間序列。紅線為 28 天平均線，綠色直線為 2006 年 4 月 1 號卑南地震與 2006 年 12 月 26 號恆春地震發生時間。

在屏東平原高程向所發現的與地下水位呈現高相關之行為，可以利用 Terzaghi [1925]提出的有效應力理論式 2.5 來說明：

$$\sigma_e = \sigma_T - p \quad (\text{式 2.5})$$

其中 σ_e 為有效應力， σ_T 為總應力， p 則為孔隙水壓。在總應力不變下，當孔隙水壓增加時，其有效應力降低，地表隨之抬升。反之亦然。在屏東平原地區，雨季時降雨量大，地下水位上升，孔隙水壓增大造成有效應力之降低，於是造成地表之抬升。

地表高程位移與地下水位高程變化之比值稱為 Elastic storage coefficients。該項係數即代表某土層因含水層之變化所反應之地殼變形。該水文參數在地下水之非穩態水流模擬與地下水資源評估居重要之角色[Hoffmann et al., 2001]。Todd [1980]提出 Elastic storage coefficients 之經驗式：

$$S = 3 \times 10^{-6} b \quad (\text{式 2.6})$$

S 為 Elastic storage coefficients， b 為飽和含水層厚度。表 2.6 即為利用 GPS 高程與地下水高程變化所估計 Elastic storage coefficients 之結果。Todd 經驗式(式 2.6)所需之飽和含水層厚度則參考中央地調所出版之臺灣地區地下水觀測網第一期計畫屏東平原水文地質調查研究總報告獲得。如表 2.6 所示，屏東平原南段所估計之 S 值範圍在 0.0014-0.0024 之間，而 Hoffmann 等人在內華達州拉斯維加斯河谷利用 InSAR 估

計之 S 值範圍在 0.0004 - 0.0034 之間，顯示屏東平原 S 值之變異較拉斯維加斯河谷為小。由於 S 值隨 b 值而變化，所以各地之 S 值有不同之量，但範圍約在 0.005 - 0.00005 之間[Freeze and Cherry, 1979]。此外，利用 GPS 高程所得之結果較 Todd 之經驗式(式 2.6) 為大，此與 Hoffmann et al.利用 InSAR 評估與 Zhang et al. [2009]利用 PS-InSAR 估計 Elastic storage coefficients 之結果一致。

表 2.6：利用 GPS 高程與地下水位計算 Elastic storage coefficients 之成果。

| GPS 測站 | 地下水井站 | Elastic storage coefficients (GPS 估計) | Elastic storage coefficients (經驗式) |
|--------|-------|---------------------------------------|------------------------------------|
| NJOU | 萬隆 | 0.0019 | 0.00051 |
| CLON | 枋寮 | 0.0024 | 0.00075 |
| FALI | 德興 | 0.0014 | 0.00030 |

接著本研究針對地調所連續站進行地表位移與地下水位變化之關係進行探討，以站距為基準，將 GPS 連續站與地下水井站進行配對，找到 25 組相近之組合，其配對分布圖及詳細資訊列於圖 2.65 與表 2.7。將此 25 組配對針對 GPS 三方向時間序列位移與地下水位不同井深之水位變化分別進行相關係數求取，其結果列於表 2.7。其中 GS13、GS36 與 GS41 的高程向 GPS 時間序列與地下水位呈現高相關性（表 2.7 中之相關係數 > 0.4 ，以粗體表示）。圖 2.66 展示上述三測站之高程向 GPS 時間序列以及與之配對的地下水位共點站之變化，觀察可知地下水位變化與季節性之高振幅變化與呈現高度一致性。

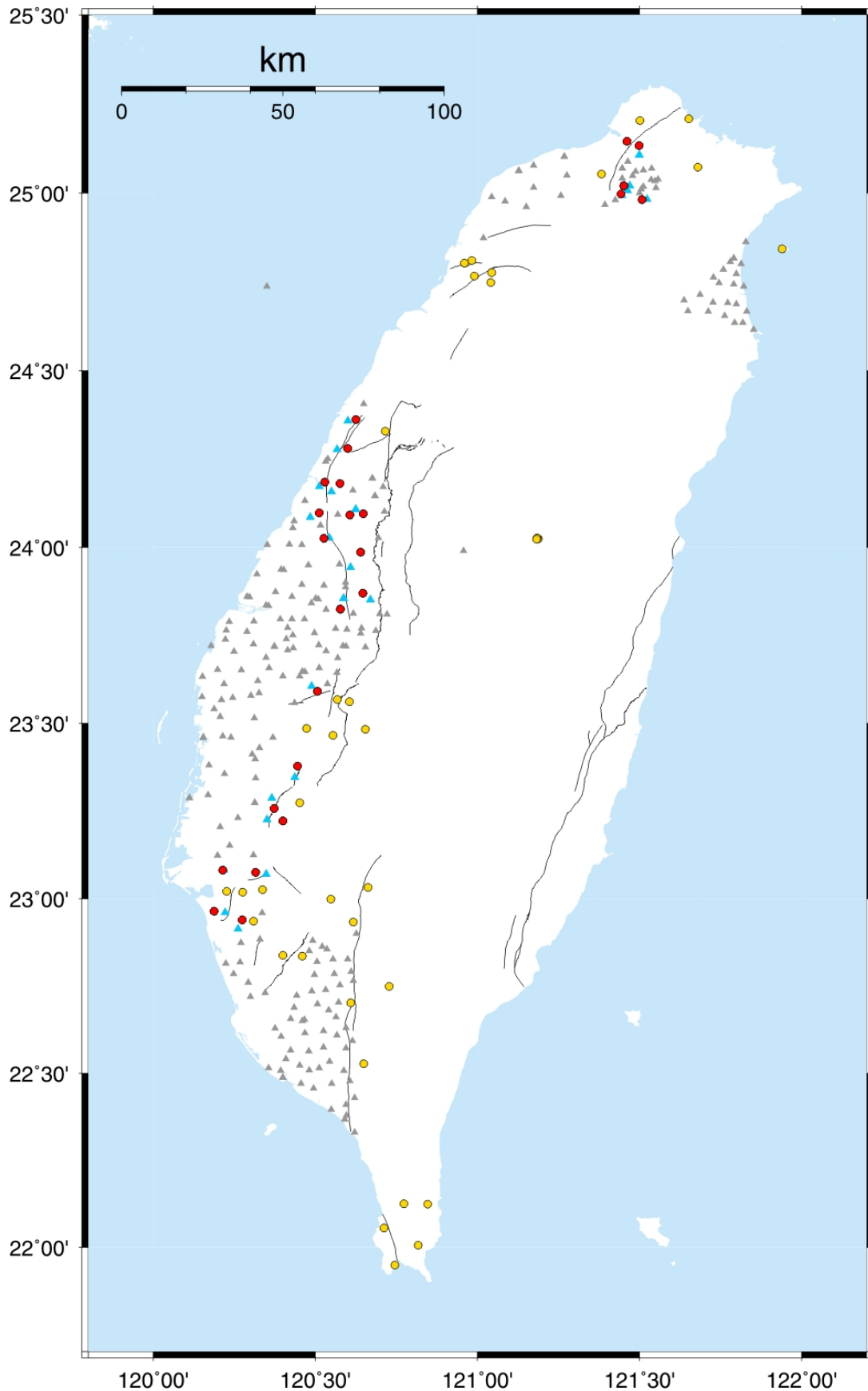


圖 2.65：GPS 站與地下水位站分布圖。圓形為 GPS 測站，三角形為地下水位站，紅色圓形與藍色三角形為配對成功之測站。

表 2.7：GPS 觀測站與地下水位站共點一覽表。

| GPS 測站 站名 | 兩站間距 (km) | 地下水位站 | | 相關係數 | | |
|--------------|--------------|-------------------|--------|--------|---------------|--------------|
| | | 站名 (孔數) | 井深 (m) | North | East | Up |
| GS10 | 6.082 | 631201 (2) | 22.0 | 0.006 | -0.027 | -0.082 |
| | | | 59.0 | 0.126 | -0.191 | 0.110 |
| GS11 | 2.944 | 631201 (2) | 22.0 | -0.204 | -0.230 | 0.068 |
| | | | 59.0 | 0.089 | -0.056 | 0.184 |
| GS01 | 1.618 | 010601 (1) | 50.0 | -0.015 | -0.123 | 0.091 |
| GS13 | 2.013 | 010103 (2) | 21.0 | -0.069 | 0.063 | 0.047 |
| | | | 79.0 | -0.174 | -0.552 | 0.559 |
| GS13 | 1.829 | 010111 (1) | 118.5 | -0.117 | -0.478 | 0.498 |
| BANC | 0.636 | 010102 (2) | 21.2 | 0.047 | 0.018 | -0.027 |
| | | | 64.7 | -0.118 | 0.020 | 0.086 |
| GS04 | 2.591 | 100401 (2) | 46.5 | -0.277 | 0.288 | 0.140 |
| | | | 166.2 | -0.332 | 0.397 | 0.264 |
| GS26 | 3.433 | 080601 (2) | 125.5 | 0.322 | -0.248 | 0.072 |
| | | | 248.6 | 0.333 | -0.267 | 0.096 |
| GS27 | 3.464 | 071201 (2) | 140.0 | 0.051 | -0.034 | 0.052 |
| | | | 269.0 | 0.071 | -0.009 | 0.070 |
| GS27 | 3.464 | 071211 (1) | 50.8 | 0.067 | -0.026 | 0.067 |
| GS36 | 2.811 | 061401 (2) | 102.0 | -0.392 | 0.468 | 0.415 |
| | | | 151.0 | -0.278 | 0.316 | 0.366 |
| GS38 | 3.720 | 060401 (2) | 35.0 | 0.045 | 0.173 | -0.193 |
| | | | 145.0 | 0.133 | -0.169 | -0.140 |
| GS39 | 2.357 | 070501 (4) | 20.0 | 0.190 | 0.294 | 0.141 |
| | | | 122.0 | -0.009 | 0.066 | 0.144 |
| | | | 193.0 | 0.056 | -0.072 | 0.056 |
| | | | 258.0 | 0.004 | -0.196 | 0.004 |
| GS40 | 3.947 | 061601 (2) | 46.0 | -0.009 | -0.084 | -0.162 |
| | | | 101.0 | -0.165 | -0.060 | -0.213 |
| GS21 | 3.415 | 070213 (1) | 48.0 | -0.069 | 0.143 | 0.088 |
| GS22 | 2.684 | 061501 (1) | 43.0 | -0.205 | 0.218 | 0.041 |
| GS23 | 2.944 | 061501 (1) | 43.0 | -0.137 | 0.021 | 0.114 |
| GS24 | 1.933 | 070801 (4) | 22.7 | -0.014 | 0.217 | 0.162 |
| | | | 72.0 | 0.119 | 0.028 | 0.321 |
| | | | 138.7 | 0.208 | 0.083 | 0.368 |
| | | | 302.0 | 0.029 | -0.065 | 0.162 |

表 2.7：GPS 觀測站與地下水位站共點一覽表（續）

| GPS 測站 站名 | 兩站間距 (km) | 地下水位站 | | 相關係數 | | |
|--------------|--------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| | | 站名 (孔數) | 井深 (m) | North | East | Up |
| GS25 | 5.974 | 071002 (2) | 83.0 176.0 | 0.149 -0.132 | -0.135 0.012 | -0.016 -0.203 |
| GS41 | 3.649 | 110302 (1) | 210.0 | 0.484 | 0.269 | 0.502 |
| GS43 | 3.388 | 110402 (4) | 54.0 120.1 178.0 242.1 | 0.099 0.016 0.239 0.182 | 0.108 -0.029 0.170 0.052 | -0.139 -0.073 -0.142 -0.085 |
| GS44 | 5.558 | 110901 (3) | 69.0 177.7 225.9 | -0.067 -0.035 -0.084 | 0.013 0.040 0.055 | 0.032 0.052 0.041 |
| GS28 | 0.403 | 112101 (4) | 36.0 74.0 173.0 230.4 | 0.333 0.240 0.076 0.116 | 0.310 0.204 -0.013 -0.113 | -0.014 -0.023 0.033 0.059 |
| GS29 | 3.692 | 111902 (3) | 48.0 104.0 153.0 | 0.031 0.025 0.065 | 0.003 -0.019 -0.035 | -0.036 -0.009 -0.013 |
| GS33 | 3.818 | 112702 (1) | 36.0 | -0.201 | -0.008 | -0.094 |
| GS34 | 3.243 | 112703 (1) | 40.0 | -0.029 | 0.117 | -0.100 |

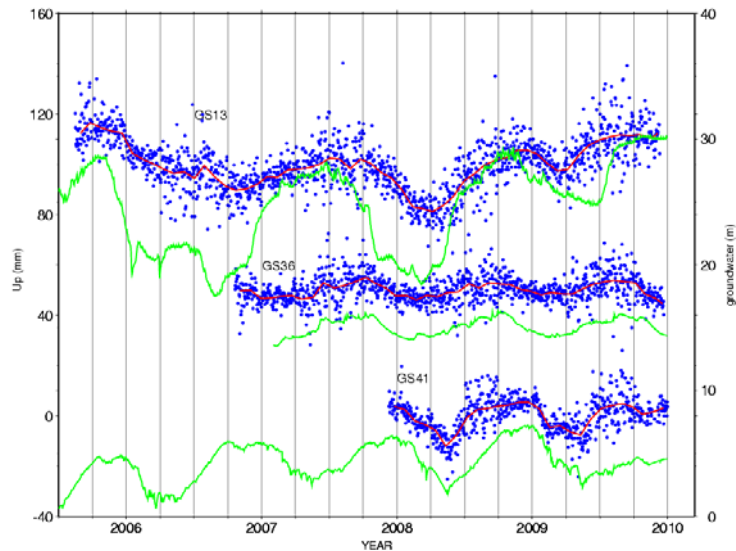


圖 2.66：GPS 高程向時間序列與地下水位時間序列之關係圖。藍點為 GPS 連續站每日觀測量，紅線為其平均線，綠線為地下水位站之變化。

2-3 臺灣地區觀測及解算成果分析

2-3-1 臺灣地區 2002-2012 年 GPS 速度場

本計畫將臺灣地區 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。臺北地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2011 年，測量次數介於 3 至 8 次。由圖 2.67 及圖 2.68 可知，本區域速度場主要東北方向，值約在 0-3.5 mm/yr。

宜蘭地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2011 年，測量次數介於 3 至 10 次，考慮 2005 年 3 月 6 日規模分別為 5.9 及 6.0 之第 34 號及 34A 號地震所造成的影響，本區採 2006 至 2011 年觀測資料解算本區速度場。由圖 2.67 及圖 2.68 可知，本區域在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化亦是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 3-40 mm/yr。

桃竹苗地區 GPS 資料觀測時間自 2003 至 2012 年，測量次數介於 2 至 10 次。由圖 2.67 及圖 2.68 可知，在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0-10 mm/yr。

中部地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2012 年，測量次數介於 3 至 11 次。由圖 2.67 及圖 2.68 可知在大茅埔斷層以東速度場約 30-45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16-20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6-15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12-16 mm/yr。

嘉南地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2012 年，測量次數介於 3 至 11 次。由圖 2.67 及圖 2.68 可知，嘉義南部至臺南北部地區在觸口斷層和九芎坑斷層—木屐寮斷層—六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑—木屐寮—六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12-15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15-20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增。

高屏地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2012 年，測量次數介於 3 至 11 次。由圖 2.67 及圖 2.68 可知，本區域主要之活動構造為東北—西南走向之旗山斷層與南北

走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，跨過潮州斷層及恆春斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr。

恆春地區由於 2006 年 12 月 26 日發生屏東外海地震對恆春地區之 GPS 速度場造成影響，採震後觀測時間為 2007 至 2012 年的資料解算速度場，如圖 2.67 及圖 2.68 速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41-62 mm。

花東地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2012 年，測量次數介於 3 至 9 次。由圖 2.67 及圖 2.68 顯示，在南北向速度場，自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20-40 mm/yr 增加至 50-70 mm/yr 再減少為 20-60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

2-3-2 臺灣地區 2002-2012 年應變率場

2002-2012 年平面應變速率場乃是由 GPS 移動站及連續站平面速度場（圖 2.67 及圖 2.68）計算而得，其結果如圖 2.69 所示，最大之壓縮應變率集中於縱谷地區，該區域之量值約 -1 至 -6 $\mu\text{strain/yr}$ ，壓縮軸之軸向與板塊聚合方向相符，皆為 NW-SE 方向。而台灣西部之主要應變行為亦是壓縮應變（約 -0.5 至 -1.5 $\mu\text{strain/yr}$ ），壓縮軸軸向大致為 E-W 方向；其中，車籠埔斷層南段之壓縮應變率是僅次於縱谷地區的量值大小，約 -1.2 至 -1.5 $\mu\text{strain/yr}$ ，該數值在集集震後有增強之趨勢；觸口斷層往南延伸一帶具有壓縮應變，約 -1 至 -1.5 $\mu\text{strain/yr}$ ，壓縮軸方向大致為 E-W；其餘各處如桃竹苗地區及高屏地區其應變速率介於 -0.5 至 0.5 $\mu\text{strain/yr}$ ，變形型態介於壓縮與伸張之間，壓縮軸方向亦大致為 E-W。蘭陽平原次有伸張應變約 1 $\mu\text{strain/yr}$ ，伸張軸方向為 NW-SE，應變量值較集集震前為弱。恆春半島南端之伸張應變漸大，較集集震前為強，約 0.5 至 2 $\mu\text{strain/yr}$ ，伸張軸方向為 NE-SW。

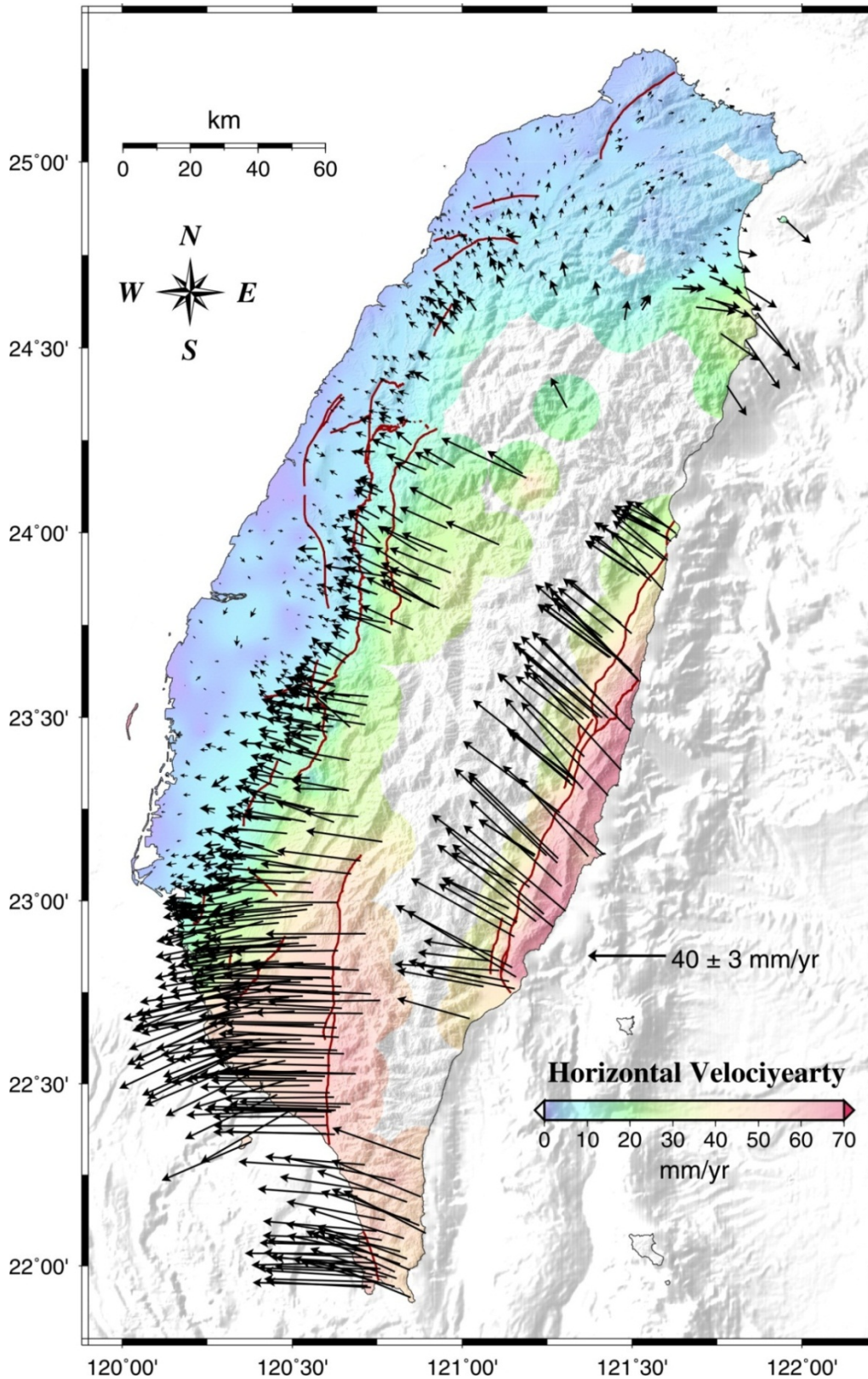


圖 2.67：全臺灣相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 移動站水平方向速度場，彩色色階反映 2002-2011 年測量資料所求得之速度場量值大小，黑色箭頭表示 2002-2011 年速度場方向及大小之分布情形。

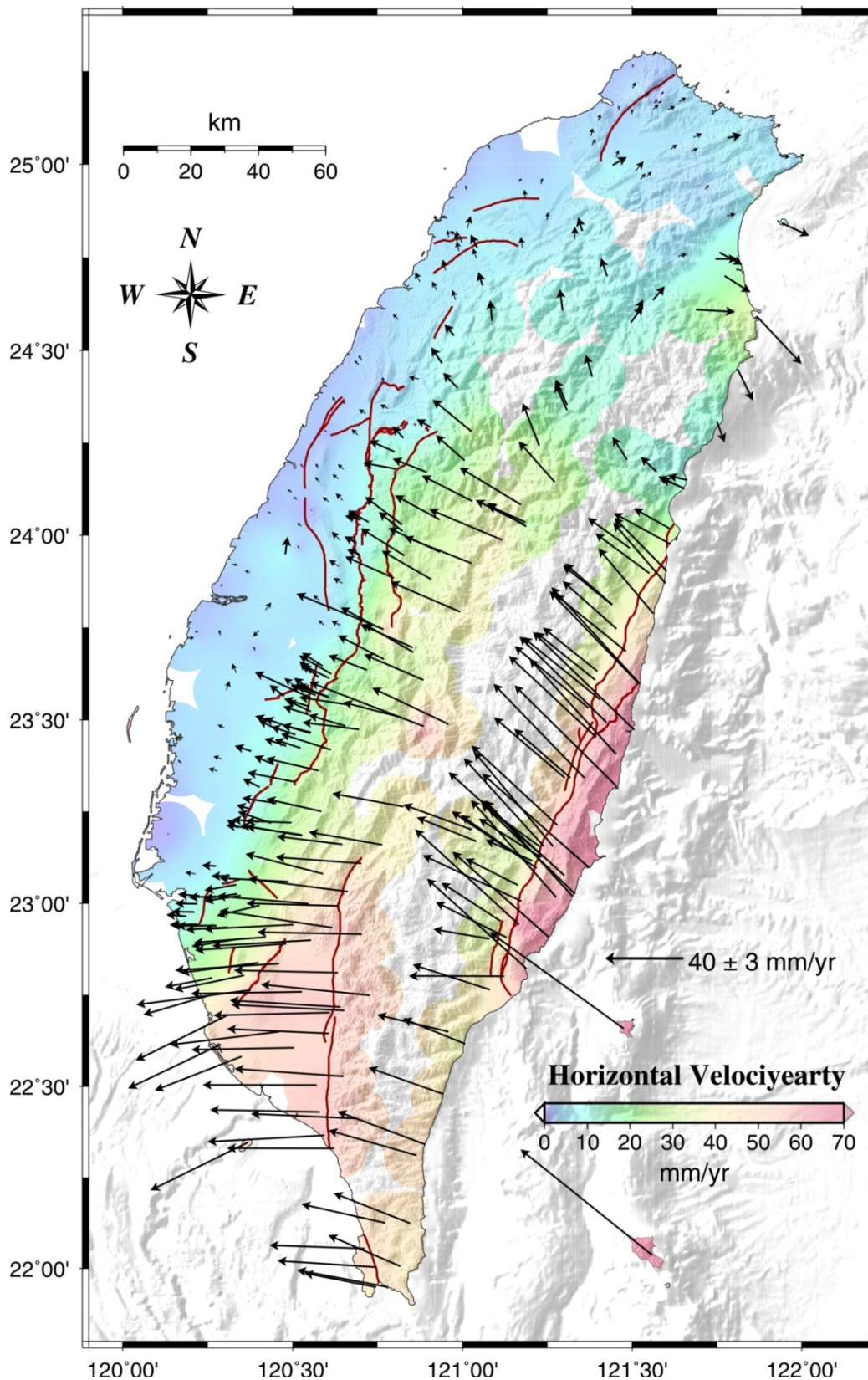


圖 2.68：全臺灣相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 連續站水平方向速度場，彩色色階反映 2002-2011 年測量資料所求得之速度場量值大小，黑色箭頭表示 2002-2011 年速度場方向及大小之分布情形。

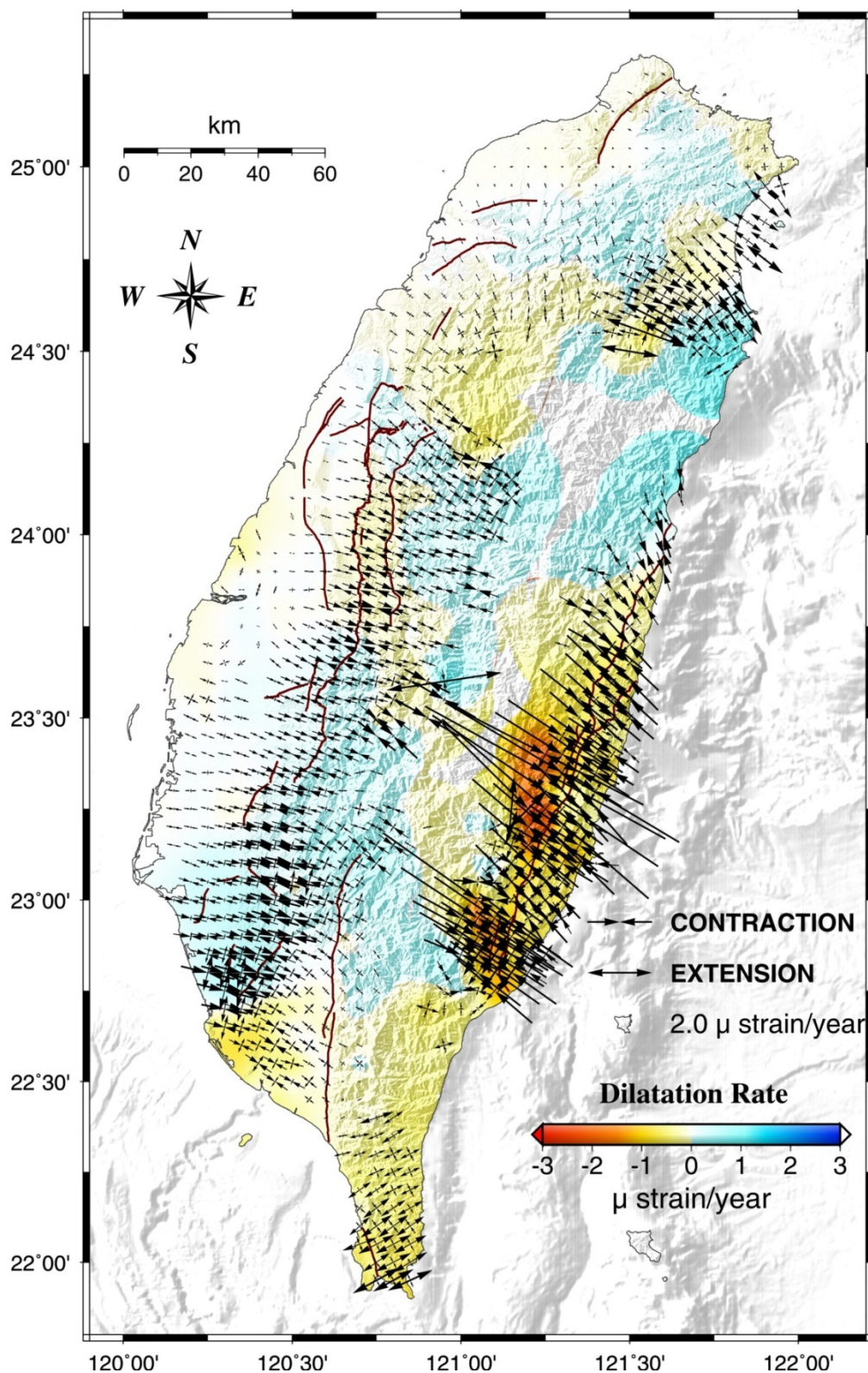


圖 2.69：全臺灣應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

2-3-3 臺灣地區垂直速度場

臺灣造山帶主要是由逆衝斷層所形成，且現今之平原地區亦因大量的人工抽水而導致大面積之地層下陷，為闡明上述各因子所造成之地表變形，除水平速度場之量測外，我們仍需藉由精密水準高程變化與 GPS 垂直速度場之量測分析來了解地表垂直變形之空間分布特性。由於中央地質調查所（地調所）之水準路線皆為獨立之單一測線，多數測線間並無與其他水準路線相連接，故其測量成果（高程變化量 elevation change 與垂直速度 vertical velocity）之參考站多半是選擇最邊緣（最東邊或是最西邊）的測站。相對的，由內政部所設置之水準測線則是連結至基隆水準原點（K999）所量測得之高程變化與抬升速率，有固定之參考原點，本節將分別探討內政部與地調所之水準垂直速度場之呈現差異並能探討其在垂直地表變形上之意義。

2-3-3-1 垂直速度場資料之擬合

如前所述，在本研究中有兩種獨立的垂直速度測量資料。一為精密水準測量，其施測時段由 2000-2012 年，點位間距平均為 2 km [Chen et al., 2011]。當中又包含了內政部一、二級精密水準點位於 2000 至 2008 年共 4 次測量所得之垂直速度資料，其測量基準點是臺灣地區水準原點（基隆 K999），其高程依據 TWVD2001 (Taiwan Vertical Datum 2001) [Yang et al., 2003] 為 5.6156 m，施測時段為 2000-2008 年（圖 2.70a）；以及地調所為監測地表變形於 2002-2012 年設置並平均每年 1 次測量之精密水準測量測線所得之垂直速度資料（圖 2.70b），其測量基準點為各獨立測線之邊緣點位，故其雖依據內政部水準測量之規範[內政部，2001]，卻無一致之高程基準。將地調所水準資料利用各測線中與一、二級聯測之點位垂直速度之差異值平均，並依據該平均值平移地調所的水準垂直速度，使其與內政部之速度一致，以此方式將地調所水準之基準點延伸至 K999，使水準測量資料成為具相同參考點位之框架（圖 2.71）。

另一垂直速度資料為 2000-2012 年以澎湖白沙（S01R）為參考點的 200 個 GPS 連續站觀測資料（資料來源 <http://gps.earth.sinica.edu.tw>）及 874 個地調所 GPS 移動站測量資料（圖 2.72）。由於連續站的誤差精度與水準測量之結果接近，故以連續站資料為主，移動站資料為輔。其中連續站的資料 43% 大於 8 年的連續記錄時間，46% 為 5-8 年，11% 為小於 5 年的時間段。GPS 連續資料的每日解之產生是透過 Bernese software v.4.2 [Hugentobler et al., 2001] 解算而得，利用由 IGS (International GNSS Service) 提供之衛星精密軌道參數，在 ITRF2000 (International Terrestrial Reference Frame 2000, ITRF00; Altamimi et al., 2002) 坐標框架下以澎湖白沙連續站（S01R）為約制點計算各點位每天坐標的情形。並且由於 2000-2008 年間有 4 個地震規模大於 6.0 的強震，故 GPS 連續站的垂直速度是坐標每日計算而得的時間序列結合同震跳動（offset）的補償，採用最小二乘法（least-square regression method）決定一線性迴歸函數，並以該函數為此站的速度值。另其他的時間序列跳動因素，如天線盤更換或小

規模的地震等，為了能更準確地評估垂直速度而一併補償抵銷。同時本工作中亦應用空間濾波技術（spatial filter technique；Tabei and Amin, 2002; Wdowinski et al., 1997）以移除時間序列的共同誤差（common-mode errors）造成之非正常數據（outlier）。此非正常數據乃是時間序列跳動點的殘差量大於三倍一般時間序列殘差的均方根值。垂直速度場的標準差則以未知數 σ_{ls} 用最小二乘法評估速度值 $k = 5 \times mis$ 的量；其中 k 為時間序列中每日坐標變化的影響， mis 是時間序列測量值與計算值間的殘差。而速度之誤差便以 $\sigma = (\sigma_{ls}^2 \times k)^{1/2}$ 式重新計算而得（圖 2.73）。

由於 GPS 與水準垂直速度的參考點與坐標框架不同，欲得到完整的臺灣地區垂直速度場，本研究將水準結果利用以下的方式修正為相對 S01R，以利後續討論臺灣地區的垂直變形。若一 GPS 站與水準點位為同樣位置上且無測量誤差之發生，則兩者的垂直速度差勢必肇因於其參考框架的不同。然而由於本研究中採用 GPS 連續站為主，造成水準點位與 GPS 站不可能共點，因此我們合理地假設如果 GPS 站和水準測量點位越接近，則兩者的垂直速度越一致。故此我們首先搜索水準測量點位半徑 1 公里範圍內的 GPS 連續站，結果在 90 個 GPS-水準共點當中共有 67 個站（圖 2.74）被利用來下一步驟的計算；而點位的速度誤差之傳播則由水準與 GPS 觀測誤差而得。第二，我們計算垂直速度差異的平均值以校正水準測量的結果。為了顧及個別的資料所提供之變數貢獻度，分別給予兩種權重，其包含了速度差異的誤差（ W_s ，為速度差的倒數），以及 GPS 站與水準點之間的距離。資料的權重矩陣（ W ）為 W_s 及 W_d 的關係式； W_d 則以式 2.7 表示：

$$W_d = e^{\left(\frac{-d^2}{D^2}\right)} \quad (\text{式 2.7})$$

其中 d 是 GPS 站與水準點間的距離， D 為一個距離衰減常數，其值一般為 0.5 km。此權重意味著距離某點 0.4 km 外的值其貢獻度在計算速度值時只剩一半的大小，若是與點位的距離在 1 km 遠，則其貢獻度則減少到約 2%。最後在消除垂直速度的差異上得到水準垂直速度的校正值為 -3.64 ± 0.19 mm/yr，與 GPS 移動站的差異較大，最大達 51.67 ± 25.55 mm/yr；與 GPS 連續站的差異較小，最大為 18.30 ± 1.30 mm/yr。接著將該校正值套用至水準垂直速度場，使得 GPS 觀測和水準測量的參考站均為 S01R（圖 2.75）。

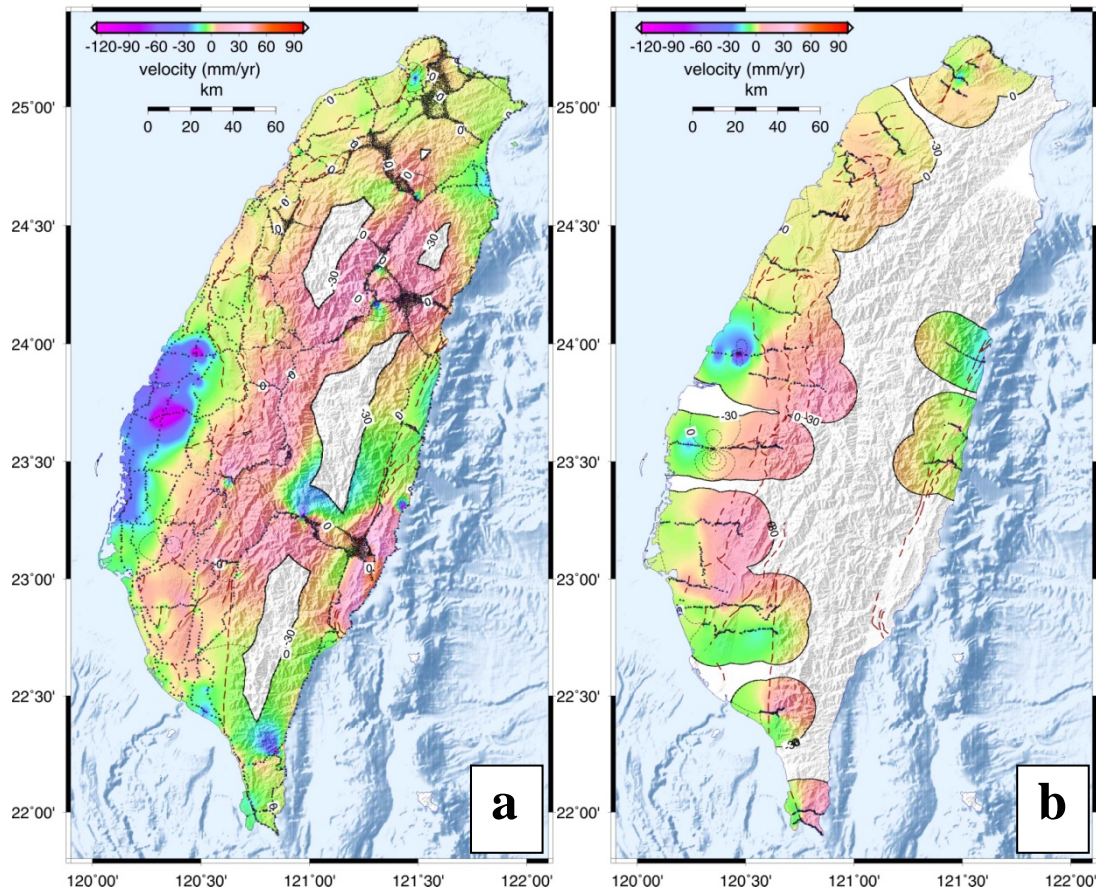


圖 2.70：(a) 內政部水準相對基隆 (K999) 之垂直速度場 (2002-2008)。色階變化顯示速度量值的大小，其結果是採用最小二乘法之內插程式所求得。紅色虛線為地調所 2000 年公布之活動斷層，黑色虛線與實線表示各點之誤差值分布情形，黑點為計算之點位。(b) 本計畫水準相對各測線最西側點位之垂直方向速度場 (2002-2012)。色階變化顯示採用最小曲率法之內插程式所求得之速度量值的大小。與(a)相較之下資料顯得較為片段，且無一致性之參考點，故底圖之色階變化僅具參考性，並非真實表示不同測線間的垂直速度值。

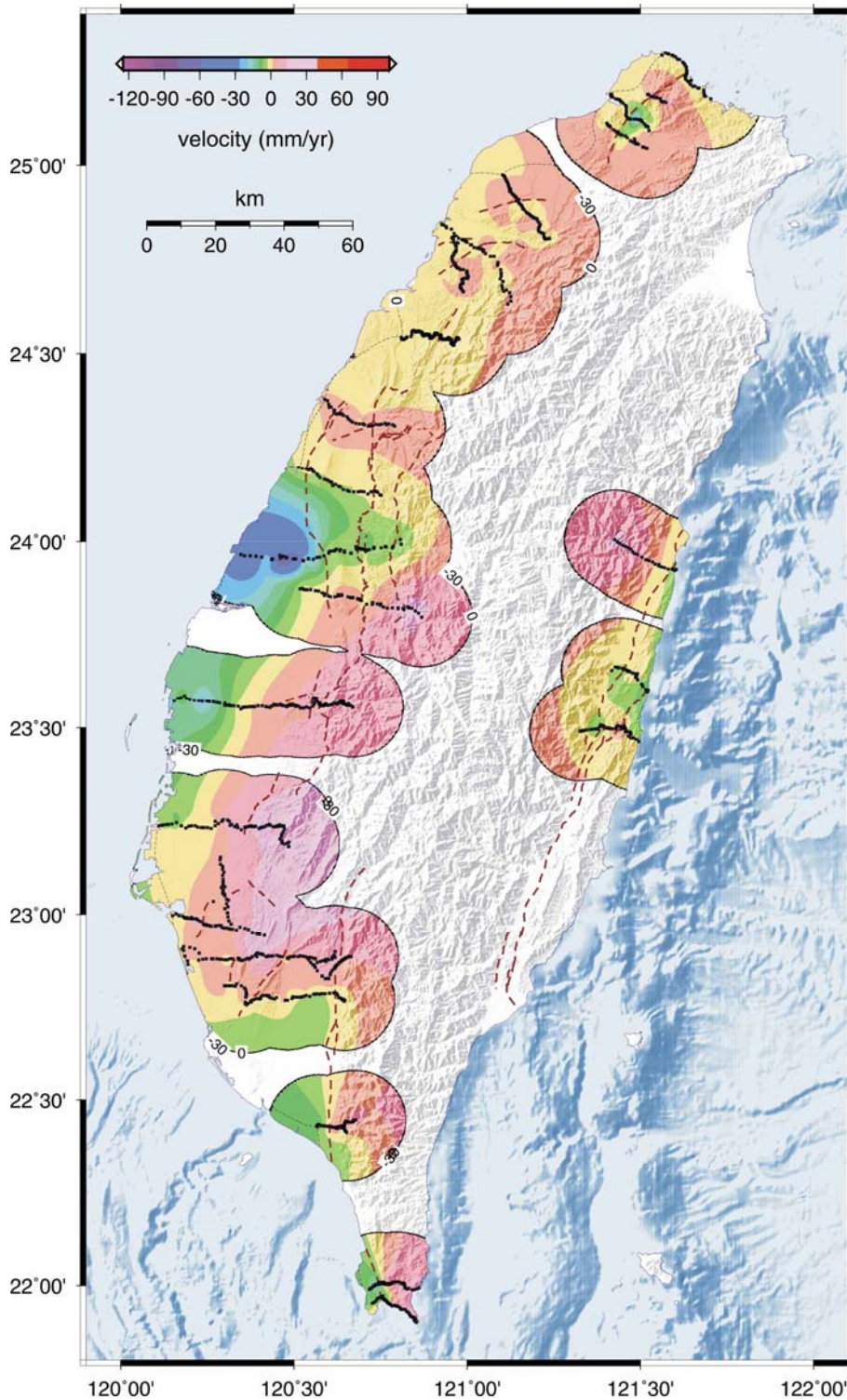


圖 2.71：本計畫水準利用各測線中與內政部一等一、二級水準聯測點位間之速度差，以平差方式平移後得到相對基隆（K999）之垂直方向速度場（2002-2012）。色階變化顯示採用最小二乘法之內插程式所求得之速度量值的大小。紅色虛線為地調所 2010 年公布之活動斷層，黑色虛線與實線表示各點之誤差值分布情形，黑點為計算之點位。與圖 2.70b 相較，各測線因有一致的參考點，故底圖之色階乃真實反映各測線間的垂直速度分布。

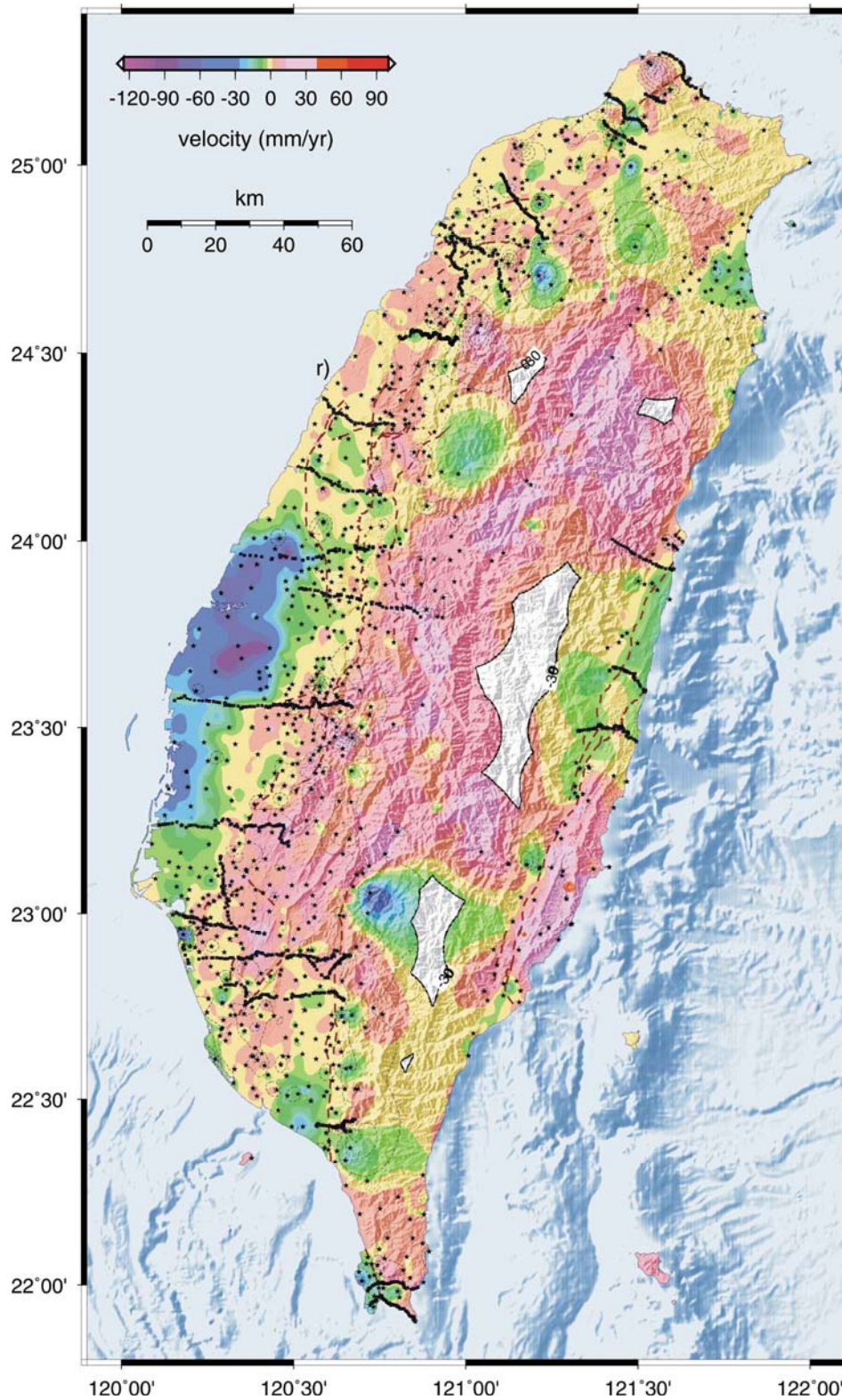


圖 2.72：臺灣地區相對於澎湖白沙站 (S01R) 之 GPS 垂直方向速度場 (2002-2012)，包含 200 個 GPS 連續站及 874 個移動站的資料 (圖中黑色點)。色階變化顯示速度量值的大小，其結果是採用最小二乘法之內插程式所求得。黑色虛線表示各點之誤差值分布情形，其誤差值介於 10-40 mm/yr 之間。

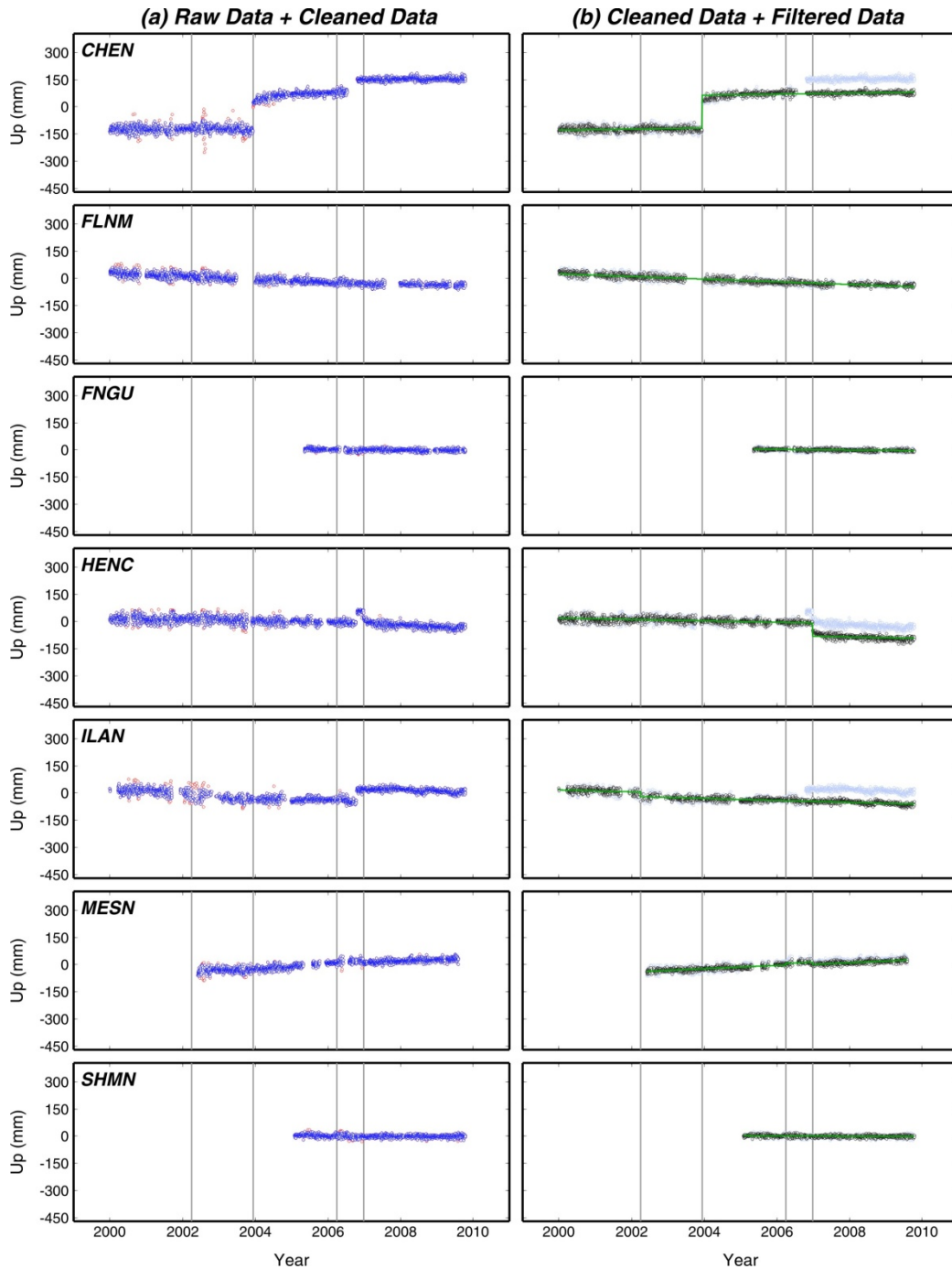


圖 2.73：GPS 站之坐標時間序列及修正。圖中灰色虛線由左而右分別代表 2002 年 $M_w7.1$ 花蓮地震、2003 年 $M_w6.8$ 成功地震、2006 年 $M_w6.0$ 臺東地震，以及 2006 年 $M_w7.0$ 屏東外海地震等事件發生的時間點。(a)為坐標時間序列的原始資料及清理後之資料。紅色圓圈為原始的觀測值，藍色圓圈則是移除離散度過高的資料後之時間序列（清理後之資料）。(b)為坐標時間序列清理後之資料及濾波後之結果。淡藍色圓圈是已移除離散度過高的資料後之時間序列，黑色圓圈是濾除共同噪訊（common-mode noise）後之時間序列。綠色線則是利用最小二乘法得到之坐標時間序列最佳趨勢線。

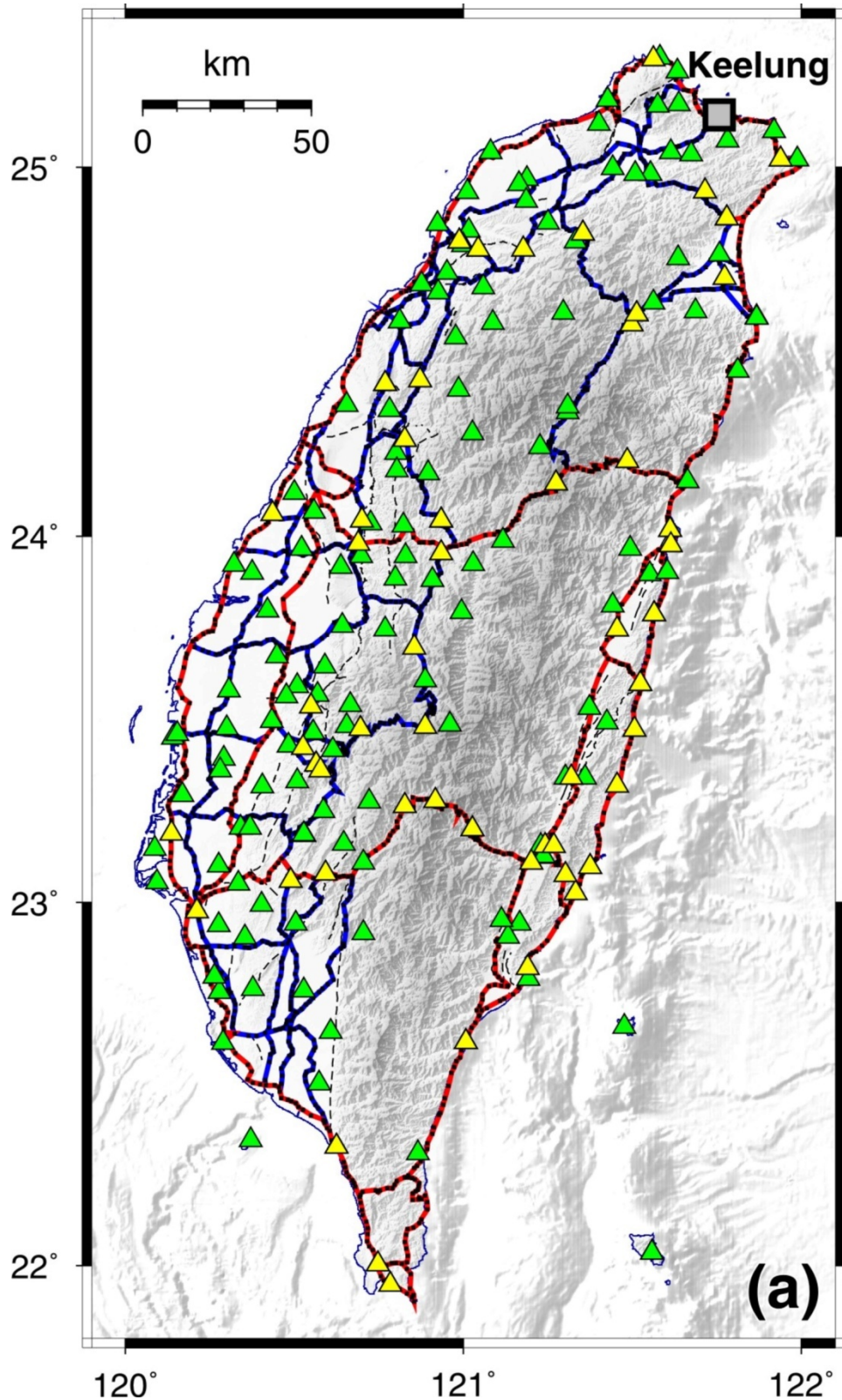


圖 2.74：TWVD2001 的一等一、二級水準測線及 GPS 連續站的空間分布。紅線為一等一級水準測線、藍線為一等二級水準測線。灰色方形為水準測線的基準點位置 (K999)。三角形為本研究中所採用之 GPS 連續站的位置；黃色三角形表示選擇用來計算水準測量與 GPS 觀測的垂直速度差異之 67 個連續站。

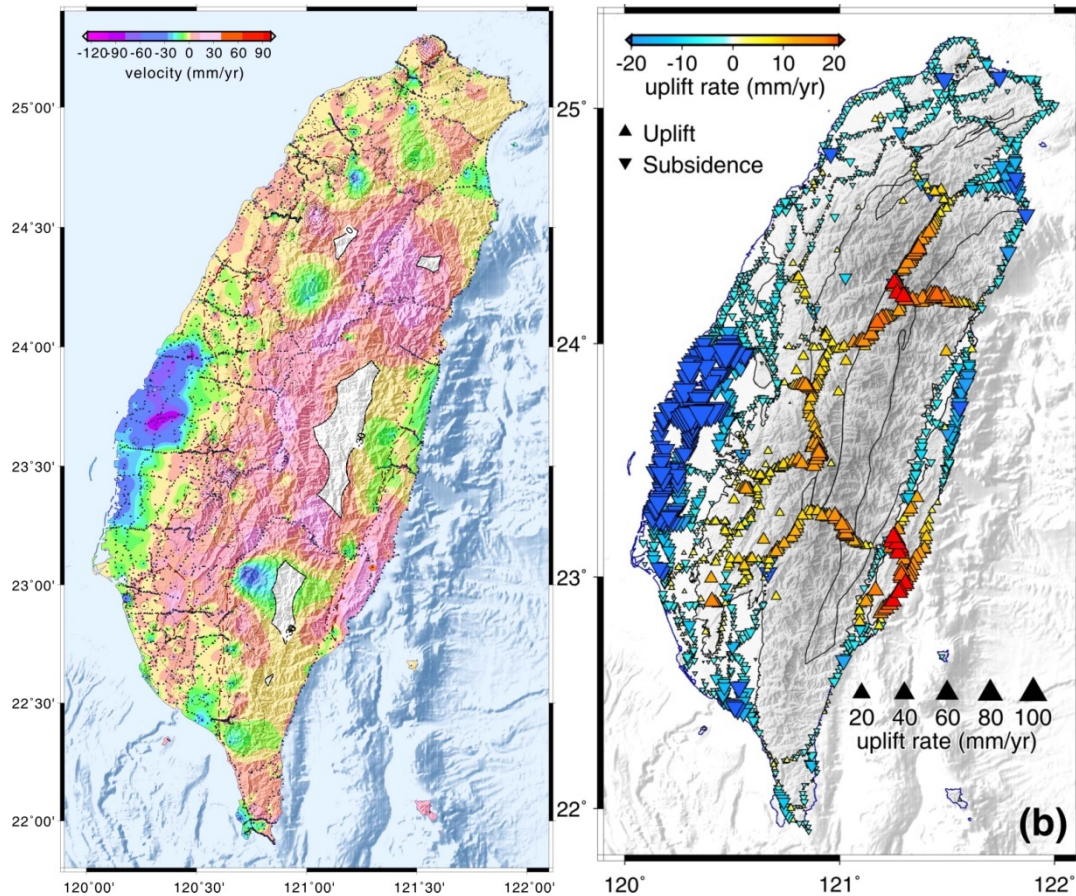


圖 2.75：由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。經擬合後之資料均以大陸邊緣穩定站 (S01R) 為參考點。左圖之色階變化顯示速度量值的大小，其結果是採用最小曲率法之內插所求得。黑色點為點位位置，黑色虛線表示各點之誤差值分布情形，其誤差值介於 10-40 mm/yr 之間。右圖的色彩變化及三角形大小反映速度量值，三角形為計算點位位置；正三角表示地表抬升，倒三角表示地表沉陷。

2-3-3-2 臺灣現今垂直速度場

一般而言，整個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 2.75)。而沉陷速率則發生在平原和盆地區，以及臺灣島周圍沿海地帶(圖 2.75)。

臺灣的地表抬升(圖 2.75 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 2.75 中的冷色系)可區分為四個主要的區域。第一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。第二個位於屏東平原的最南端角落，在該區域內，沉陷速率有較大的 10.0 mm/yr 以及 -33.2 mm/yr 的最大值。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，該區最大值為 -23.5 mm/yr。最後一個主要的沉陷區域在臺灣東北部的宜蘭平原。通常在平原南部的側面的沉陷速率和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。最後，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 (圖 2.75)。

2-4 台灣地區地表變形分析

本章節將臺灣地區 2002-2012 年所測量之 GPS（包含移動站與連續站）與精密水準觀測資料整合，針對各地區的跨斷層速度剖面結果，分析各斷層之水平及垂直速度變化情形，並藉由此結果進行中部地區、嘉南地區及西南部地區的 2 維斷層模型建置，討論這些地區的斷層活動行為。各斷層之跨斷層水平與垂直速度變化詳見表 2.9 所示。

2-4-1 北部地區變形特性

2-4-1-1 地質背景

Angelier et al. [1990]針對台灣北部地區的大地演化過程提出塊體旋轉的現象；李德貴等[Lee et al., 1991]及呂懿德[Lue, 1989]也利用古地磁資料指出台灣北部地區在構造上平均有 20° 的旋轉。Lu and Malavieille [1994]和Lu et al. [1995]利用三維砂盒模型，運用一不對稱的嵌入體與大陸邊緣的岩石產生斜碰撞造成一系列的變形，顯示在嵌入點的北部有區域性順時針旋轉（右移運動）的現象，而在嵌入點南部有區域性逆時針旋轉（左移運動）的現象，在台灣北部更呈現擠縮變形、橫斷變形、旋轉變形、伸張及書疊式走滑斷層等在單一的變形機制架構下結合在一起且互相影響，這些變形機制的分布、性質、與相對的重要性與嵌入體的形狀及板塊斜聚合的方向成函數關係，提供了直觀的大地構造演化模式與過程之解釋（圖2.76）。同樣地，Hu and Angelier [1996]以彈塑性二維有限元素法，模擬台灣碰撞帶的動力過程與應力分佈，分別考慮菲律賓海板塊的聚合方向與沖繩海槽的張裂系統的分佈，與比對古主應力軸的方向，根據結果顯示台灣的應力軌跡受到聚合方向、沖繩海槽的擴張以及板塊邊界的幾何型態之影響。

臺北盆地之山腳斷層自關渡附近呈南南西走向延伸至新莊，長約 11 km。王執明等 [1978]研究指出斷層東側相對下降約 500 m 以上，形成臺北盆地之盆地地形；而山腳斷層發生於距今一萬年前左右發生活動[林啟文等，2007b]。李錫堤 [1993b]亦指出在關渡大橋處基岩深度最深不到 50 m，而進入臺北盆地後岩盤深度隨即加深到 300 m 以上。近年來由地質鑽探及地球物理探勘的證據[和協工程技術顧問公司，1999；中鼎工程顧問社，1999；謝昭輝等，2000]，顯示主要斷層面由一組呈分階陷落的斷層帶所構成，並錯移松山層與地表淺處沖積層，在關渡地區斷層帶寬度約 170 m，在泰山地區斷層寬度約 80 m；且在關渡地區山腳斷層的落差仍然相當可觀，且山腳斷層一直延伸至金山地區並延伸入海[Huang, 2003; 林啟文等，2007b]。

山腳斷層北段早先被命名為金山斷層[林啟文等，2000]，經由地質調查結果方被認定為與山腳斷層為同一條斷層，並改稱為山腳斷層。其東北延伸進入海域，西南延伸至大屯火山群、台北盆地至臺北盆地南端的樹林地區，陸地上長約34公里[丹桂之助，1939；林朝榮，1957；王執明等，1978；林朝宗，2005]。中央地質調查所將山腳斷層分類為

活動斷層之一，在大屯火山區呈東北走向[市川雄一，1931]。本斷層於金山地區，斷線東南側為上盤，屬中新世五指山層；西北側為下盤，屬中新世南莊層與大埔層，因受斷層之擠壓而致層面傾角變陡，層位落差約在2600 m[李錫堤，1994]。Chu et al. [1998]，在構造地質分析上顯示山腳斷層原本是一條逆斷層，形成於蓬萊造山運動的晚期。當時斷層東南方的是一片上升的山地，向西北仰衝。到了更新世中期以後，造山運動停止，地殼伸張作用取代了壓縮作用，山腳斷層轉化為一正斷層，斷層的上盤逐步滑落成一地塹盆地。

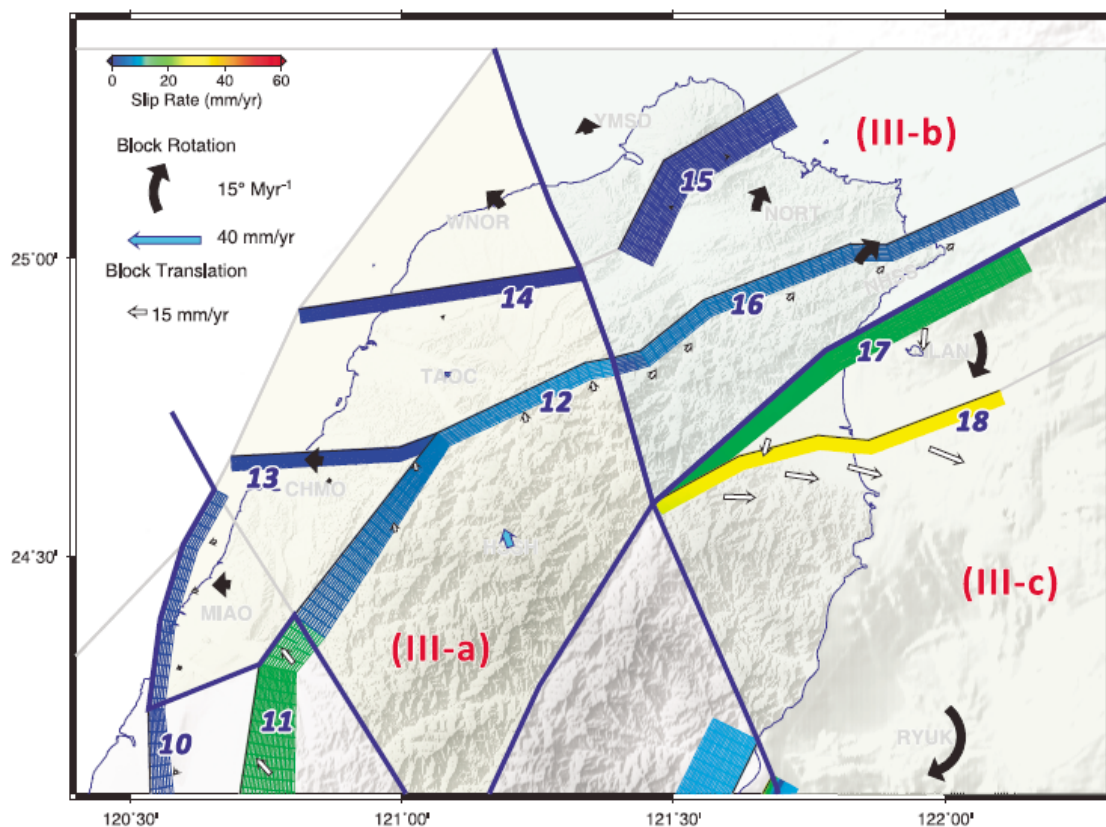


圖 2.76：利用數值塊體模型，模擬斷層的活動與地殼塊體的旋轉造成地表一系列的變形，從模擬結果顯示在臺灣北部地區有區域性順時針旋轉（右移運動）的現象，而在西北部地區有區域性逆時針旋轉（左移運動）的現象[Ching et al., 2011]。

楊潔豪等人 [1989, 1990]利用暫態電磁法探測山腳斷層，發現有兩條不連續面，磺溪北側者與山腳斷層有關，地質調查所推測山腳斷層可能錯移第四紀地層，但是本斷層僅能推測錯移更新世地層。黃鑑水等 [1991]調查指出在金山—北投地區斷層上盤為五指山層，斷層下盤在金山、關渡地區則出露桂竹林層及南莊層，層位落差在2600 m 以上；並認為山腳斷層之初次活動應在大屯火山群噴發之前。

山腳斷層往南至台北盆地之西緣則呈北北東走向，自關渡附近向南南西方向延伸至新莊，為一條正移斷層，因盆地面與西側之林口台地呈現相當明顯之地形落差，因此許多學者提出台北盆地的陷落形成和山腳斷層的活動有關[林啟文等，2000]。於新莊下坡

角T-1井下42 m(海平面以下32 m)深處泥砂層之下遇第三紀基底岩層面，及於泰山(舊名山腳)東南方T-3井下70 m深處砂泥層之下遇礫石層，而推斷沿林口台地之東，即台北盆地西緣有山腳斷層經過，且認為林口台地與台北盆地間之斷崖為斷層崖面[盧詩丁等，2004]。

在臺北盆地內，山腳斷層被第四紀沖積層所掩覆，雖然以往由地形特徵認為斷層位於林口台地與臺北盆地的交接帶，但由鑽探結果顯示，斷層跡的位置距台地東緣數百 m 以上；而在盆地內斷層兩側的基盤落差約 60-220 m。山腳斷層的北段，在大屯火山區，斷層約沿著大屯山與七星山交界的鞍部；在金山地區，斷層約沿著山地與平原的交界；鑽探顯示斷層北段兩側的基盤落差超過 600 m。這些基盤的落差可能是山腳斷層的正移斷層作用所造成的，而斷距似乎有由南向北增加的趨勢。由大地測量結果顯示，山腳斷層兩側並未有明顯的水平位移速度變化，但斷層的上盤有明顯的下陷趨勢；在大屯火山地區，由地形特徵與鑽井結果顯示，下陷區呈現東北走向的槽狀，寬度約數百公尺至 2 km，因此山腳斷層的上盤可能有另一斷層存在。

2-4-1-2 速度剖面

臺北地區之 GPS 及精密水準點位分布及跨斷層速度剖面如圖 2.77 至圖 2.78 所示。其中平面速度場包含 GPS 移動站及連續站資料、垂直速度場包含 GPS 連續站、地調所及內政部之精密水準測線資料。剖面 A 包含地調所台 2_石門至萬里、士林至三芝等 2 測線；剖面 B 包含淡水至士林、五股至臺北 2 測線。

在臺北地區之活動斷層有山腳斷層一條。由跨越斷層之速度剖面 A (圖 2.77) 可觀察到顯著的壓縮，與山腳斷層正交之分量：斷層東南側 5 km 內為 0 至 0.5 mm/yr，斷層西北側 5 km 內為 0 至 2 mm/yr；在相同的距離範圍內之地表垂直速度變化在斷層東南側最大有 4 mm/yr 的抬升。

速度剖面 B (圖 2.78) 觀察到伸張的情形，其與山腳斷層正交之分量：斷層東南側 5 km 內為 0.5 至 -0.5 mm/yr，斷層西北側 5 km 內為 0.5 至 2 mm/yr；在相同的距離範圍內之地表垂直速度變化在山腳斷層上下盤各 1 km 內有最大 -24 mm/yr 的沉陷。

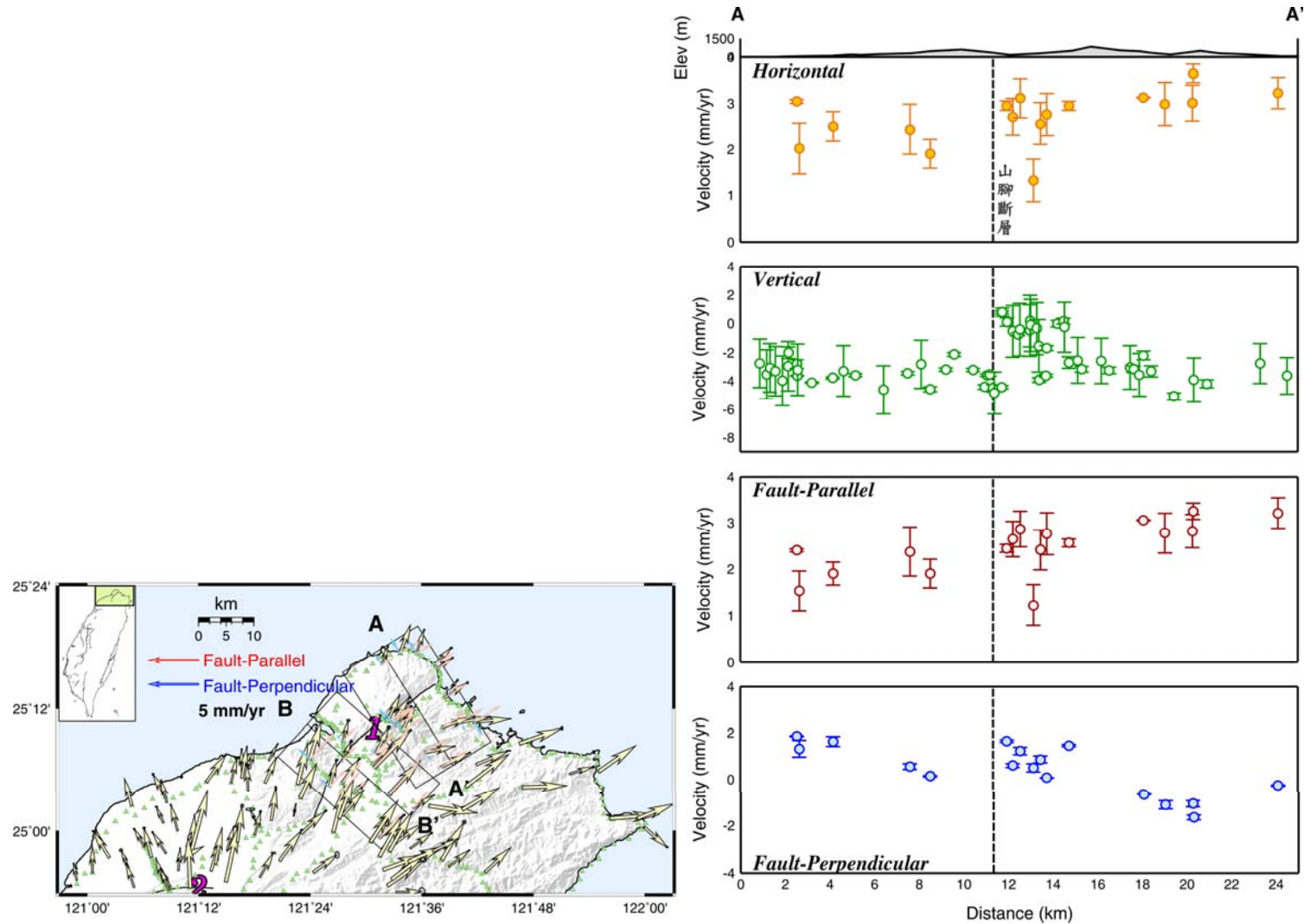


圖 2.77：臺北地區 A 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層：1 為山腳斷層，2 為湖口斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小，其分布自湖口斷層以北至三貂角以西呈現順時針旋轉的型態。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

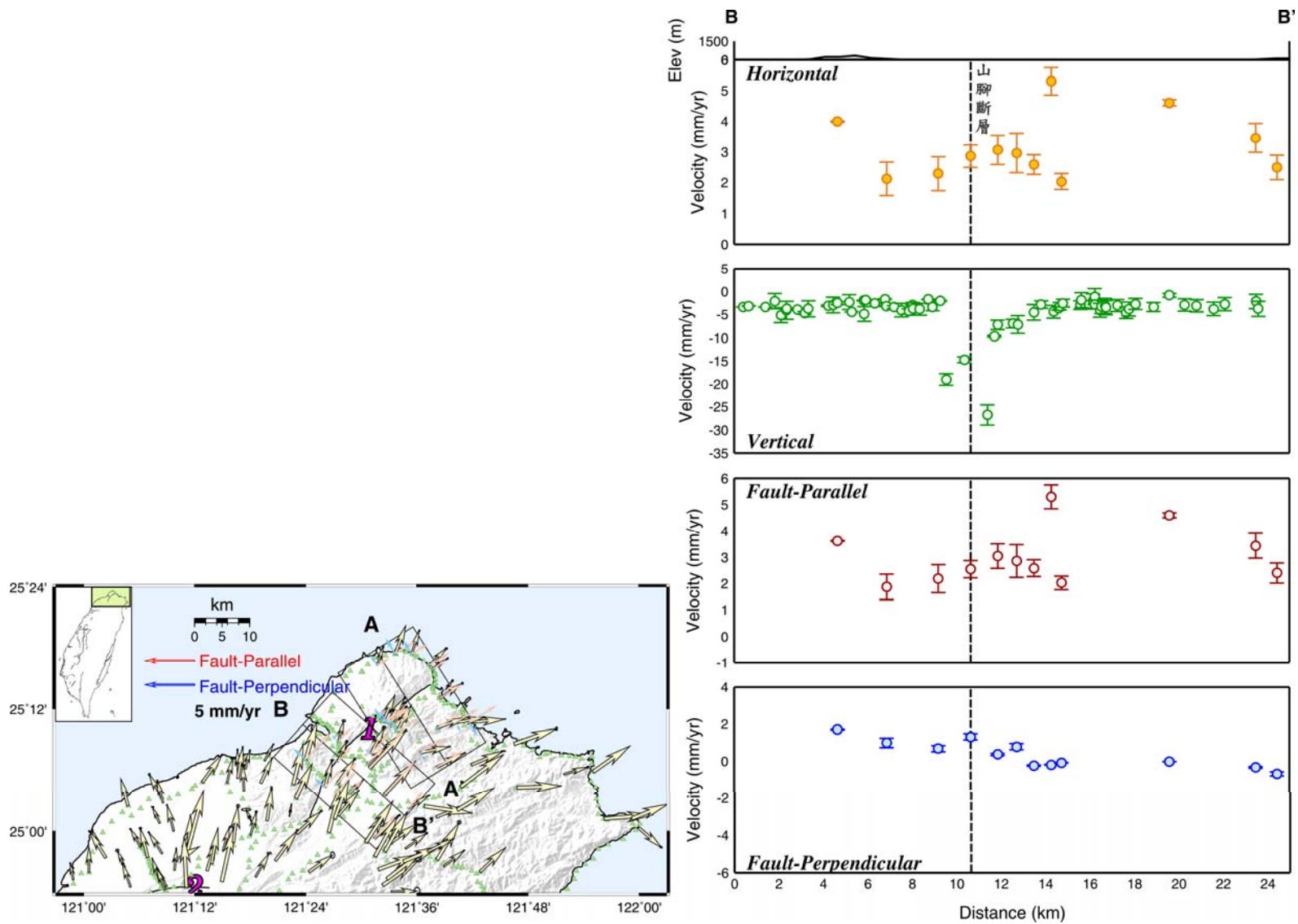


圖 2.78：臺北地區 B 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.77 所示。

2-4-2 西北部地區變形特性

2-4-2-1 地質背景

相較於臺灣其他地區較為單純的褶皺衝斷帶 (fold-and-thrust belt) 地質構造走向，西北部地區的走向呈現一外凸弓形 (arcuate-shape salient) 的型態，其原因乃是受控於臺灣西部被動式大陸邊緣 (passive continent margin) 上兩個前陸 (foreland) 基盤高區 (basement) — 北為觀音高區，南稱北港高區 — 的分布位置及其幾何形貌有關 [Lacombe et al., 2003; Mouthereau et al., 2002; Namson, 1981, 1983, 1984; Suppe, 1980] (圖 2.79)，其由臺灣地區古應力場及現今應力壓縮軸的方位之改變 [Angelier et al., 1986; Hu et al., 1996]，並砂盒物理模型的研究 [Lu et al., 1998; 江婉綺, 2005] 可得驗證。

同時，歐亞板塊與菲律賓海板塊於臺灣造山帶之碰撞作用，在臺灣西北部地區造成兩組共生的地質構造 [楊耿明等, 2005; Chiu, 1970; Yang et al., 2006]。結合臺灣區域地質圖 [陳肇夏等, 2000] 以及中油公司西部外海探測資料 [Huang et al., 1993]，一組為原東西走向或東北東—西南西向的正斷層再活動成高角度之橫移斷層，如：湖口斷層、大平地斷層、斧頭坑斷層等；另外一組為東北—西南走向或北北東—南南西向，如：獅潭斷層、曲尺斷層、紙湖斷層等，其於臺灣褶皺衝斷帶整體的地質環境而言，此組走向代表主要的山脈及構造走向，接近於垂直水平最大擠壓方向。Yang et al. [1996] 利用震測剖面及構造分析，以及 Hung and Wiltschko [1993] 由構造動力學的研究結果指出，本區東西走向之構造多半原為造山作用以前的東西向正斷層，後來在造山擠壓過程中重新以逆斷層或平移斷層的型式再活動，並與造山帶之東北—西南主要構造走向之斷層等構造相連接。本地區主要的斷層有湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、大平地—斗煥坪斷層系統及斧頭坑斷層，前四條依經濟部中央地質調查所的定義為第一、二類活動斷層 [林啟文等, 2007b]，第五條在同樣的定義下為存疑性活動斷層 [林啟文等, 2007b]，斧頭坑斷層為中油公司的探測結果 [Huang et al., 1993]。

石再添等 [1983] 調查指出湖口斷層全長 21.6 km，而石再添等 [1983] 與楊貴三 [1986] 之地形分析更證實此斷層的活動持續到晚更新世。在近年的研究之中，已有學者 [Huang et al., 1993] 圖示湖口斷層系統與外海的正斷層系統或可相連，並認為該斷層在外海為一主要的走向斷層構造。根據王昱 [2003] 桃園—新竹台地地區構造活動與地形特徵之研究中指出，地形崖成因主要為摺皺崖或次生軸面破壞斷層作用，而非主要構造斷層的斷層崖。Tang [1963] 根據震測剖面的變化及其明顯的地形崖，推論斷層的存在，認為斷層落差 200 m，斷層面向南傾斜 60°。林啟文等 [2007b] 依據野外調查及地質鑽探的結果指出，湖口斷層可能是向斜軸部所形成的逆移斷層，但未發現出露地表的證據，故列為第二類活動斷層。

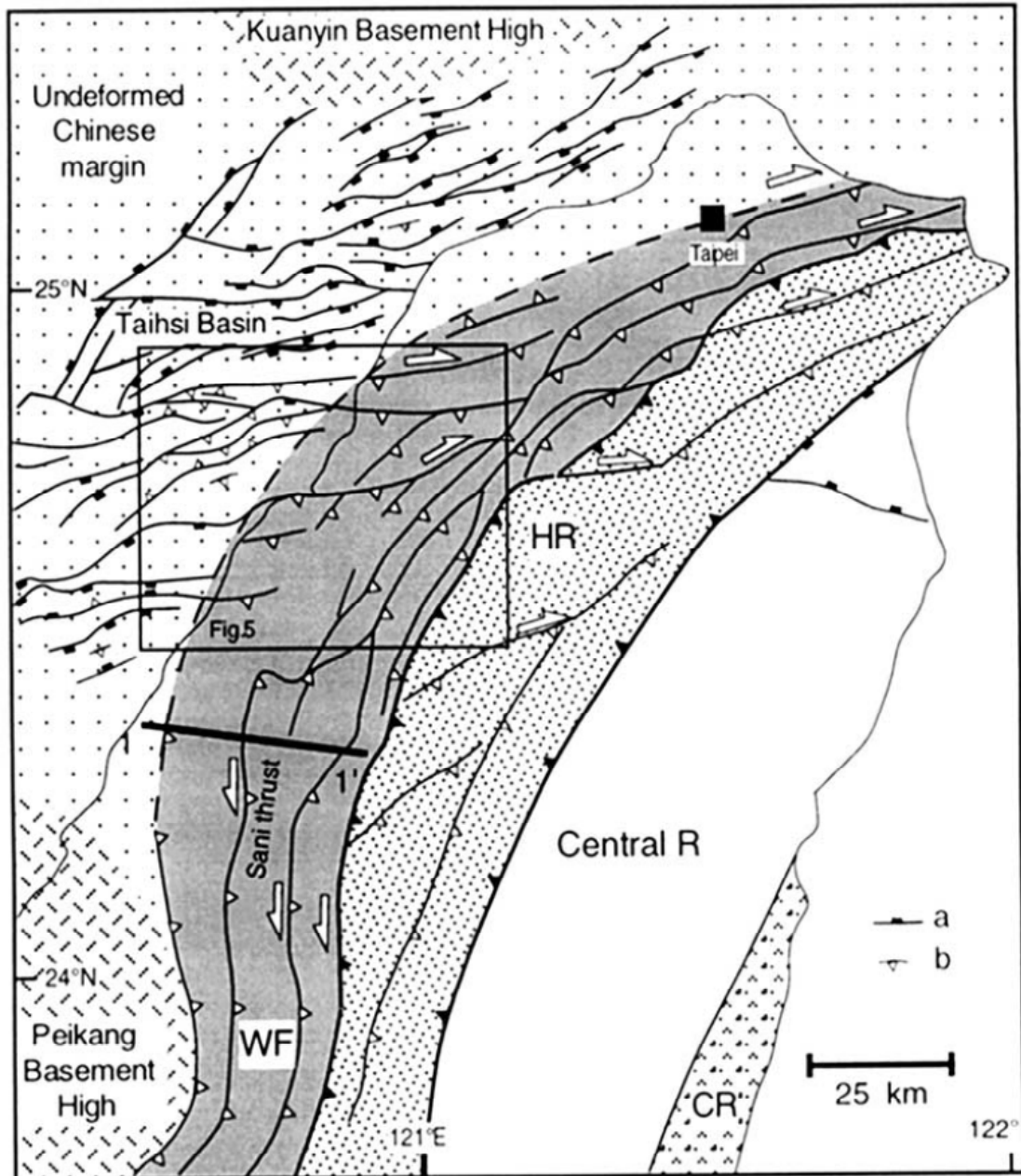


圖 2.79: 利用古應力軸分布及大地構造幾何型態, 分析臺灣北部及西北部地區的斷層活動型態, 從分析結果顯示在臺灣西北部地區古近紀的正斷層已經反轉再活動為帶右移滑移分量的逆斷層的現象[Lacomebe et al., 2003]。

新竹斷層以東西走向通過本區, 在北側於頭前溪與新城斷層相接, 在南側漸轉為東北-西南走向。新竹斷層在地表未有地質露頭的發現, 因此被中央地質調查所列為第二類活動斷層[林啟文等, 2007b]。綜合地表地質、地下鑽井及震測剖面, Namson [1984] 及 Suppe [1984] 認為新竹斷層可能連接至地下之盲逆斷層。最近的震測剖面及地下鑽井顯示新竹斷層有明顯地層錯移[Yang et al., 1996; 林啟文等, 2007b]。

新城斷層以東北西南走向通過新竹科學園區東南外側, 斷層向東南傾斜約 40° - 60° [劉桓吉, 1988], 同時覆蓋在岩盤上方之更新世紅土台地礫石層也有明顯的錯

移現象，指示新城斷層在紅土礫石沉積後仍有持續的活動[Huang, 1984]。利用高解析度之數位高程資料[詹瑜璋等，2003；Chan et al., 2007]以及河道發育[劉力豪，2004]所做之構造地形分析，Shyu et al. [2001]認為頭前溪南岸河階反映出新城斷層的活動作用。中央地質調查所於野外調查該斷層，認為新城斷層截切全新世的階地礫石層，是為第一類活動斷層[林啟文等，2007b]。

Bonilla [1975]認為獅潭斷層在地形上所顯示的高差，可能是由 1935 年之前的斷層活動所造成。董倫道等[2005]利用地電阻測線的探測資料，配合地質調查的結果，推測在上福基砂岩中的電阻率不連續現象為獅潭斷層分布的位置。由 2005 至 2006 年之地殼變形監測資料結果顯示，跨獅潭斷層的速度場變化呈現逆移兼具右移的形式[饒瑞鈞等，2006]，然累計至 2010 年止共 6 年之資料顯示，跨獅潭斷層的速度場變化為逆移兼具左移[饒瑞鈞等，2010]。獅潭斷層之構造運動學特性至少有兩種可能性：一、獅潭斷層是一個重要的區域構造，向下完整切斷其臨近的出磺坑背斜與獅頭山背斜兩個大構造，二、獅潭斷層只是一地表淺部、沿層面滑動的滑移斷層，而本區主要的斷層構造並非傾角朝西的獅潭斷層，而是在更深部傾角朝東的盲斷層。林啟文等[2008]結合地質調查、地球物理探勘及大地測量之結果，認為獅潭斷層為第一類活動斷層。

大平地—斗煥坪斷層系統在前人研究中均將本斷層列為活動斷層[Bonilla, 1975, 1977; Hsu and Chang, 1979; 徐鐵良，1984；楊貴三，1986]，但野外未能找到階地變位的證據。根據石瑞銓等[1999]及林正洪等[2006]分別進行桃園、新竹地區之微震研究，僅有少數地震分布於大平地斷層下方 5、6 km 處，在斷層線東南側有明顯集中的微震分布，故判斷本斷層的地震活動並不明顯。Tang [1964]圖示此斷層介於頭嵙山層與卓蘭層、錦水頁岩等地層之間，為逆斷層，東側上升，其東北段經過階地堆積層。大平地斷層於石門附近走向轉為近乎東西向，並與新店斷層相接。該斷層斷面傾向東南，地面傾角約為 60°至 70°之間。林啟文等[2007b]利用中央地質調查所的 GPS 調查成果，認為跨大平地—斗煥坪斷層系統並無明顯的位移速率變化量，結合野外地質、地球物理探勘等結果，判斷大平地—斗煥坪斷層系統尚未發現更新世晚期的活動證據[黃宣維，2012]，因此屬於存疑性斷層。

斧頭坑斷層因於斧頭坑一帶出露而得名，在 Ku [1963]的研究中又名東勢窩斷層，斷層由東西走向往東轉為北北東—南南西走向，經過斧頭坑、東湖等地，長度約 15 km。所出露之斷層面角度平緩，截切過更新世頭嵙山層，然其餘部份均為紅土台地堆積層及沖積層所掩覆[張憲卿，1990]。

2-4-2-2 速度剖面

桃竹苗地區之 GPS 及精密水準點位分布及跨斷層速度剖面如圖 2.80 至圖 2.82 所示。其中平面速度場包含 GPS 移動站及連續站資料、垂直速度場包含 GPS 連續站、

地調所及內政部之精密水準測線資料。剖面 C 包含地調所縣 115_新屋至童話世界；剖面 D 包含縣 122_新竹至五峰、縣 117_新竹至峨眉等 2 測線；剖面 E 包含苗栗至南庄測線。

在桃竹苗地區之活動斷層有湖口斷層、新竹斷層、新城斷層及獅潭斷層等 4 條。由跨越斷層之速度剖面 C (圖 2.80) 可觀察到和緩的壓縮兼右移型態，與湖口斷層正交之分量：斷層東南側 5 km 內為 4 至 6 mm/yr，斷層西北側 5 km 內為 2 mm/yr，其間有至少 2 mm/yr 的速度變化量存在；在相同的距離範圍內之地表垂直速度變化在斷層東南側最大有 4 mm/yr 的沉陷。與新城斷層正交之分量：斷層東南側 5 km 內為 5 mm/yr，斷層西北側 5 km 內為 4 mm/yr；在相同的距離範圍內之地表垂直速度變化在斷層南北兩側呈現一上凸之穹丘狀外型。

速度剖面 D (圖 2.81) 觀察到伸張的情形，其與新竹斷層正交之分量：斷層東南側 5 km 內為 4 至 5 mm/yr，斷層西北側 5 km 內為 4 mm/yr；在相同的距離範圍內平行斷層走向分量之速度變化在斷層西北側則有 2 mm/yr 至斷層位置之 -1 mm/yr，隨後至斷層東南側再恢復至 2 mm/yr。

速度剖面 E (圖 2.82) 觀察到伸張的情形，其與獅潭斷層正交之分量：由斷層東南側 5 km 之 8 mm/yr，降至跨越斷層位置 1 km 處的 5 mm/yr，之後回升至斷層東南側 5 km 處之 8 mm/yr。在剖面位置 12-22 km 的距離範圍內，水平速度、垂直速度、平行斷層走向與垂直斷層走向之速度型態均呈現一上凸之穹丘狀外觀。

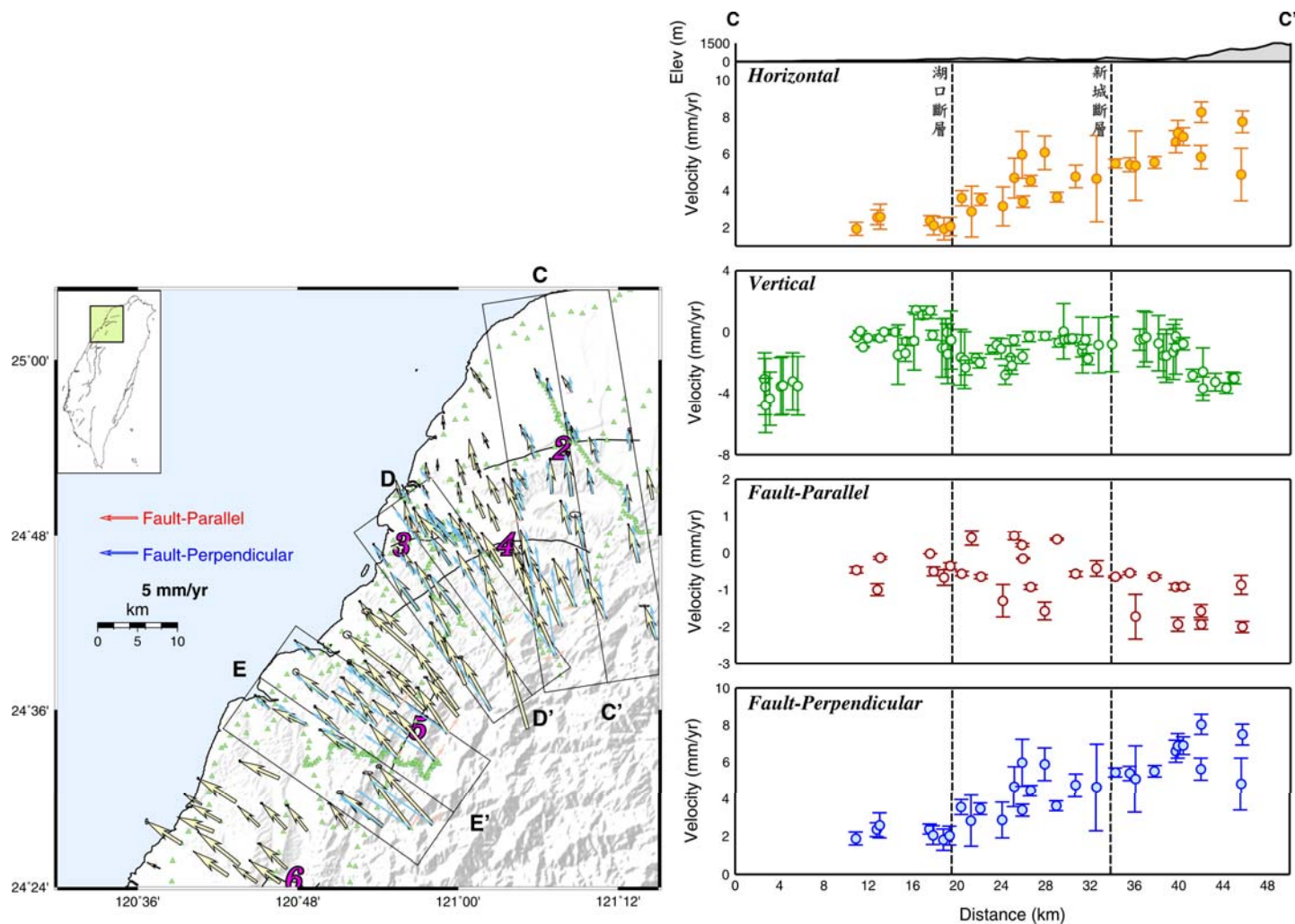


圖 2.80：桃竹苗地區 C 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層：2 為湖口斷層，3 為新竹斷層，4 為新城斷層，5 為獅潭斷層，6 為三義斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小，其分布自湖口斷層以北至三義斷層呈現逆時針旋轉的型態。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

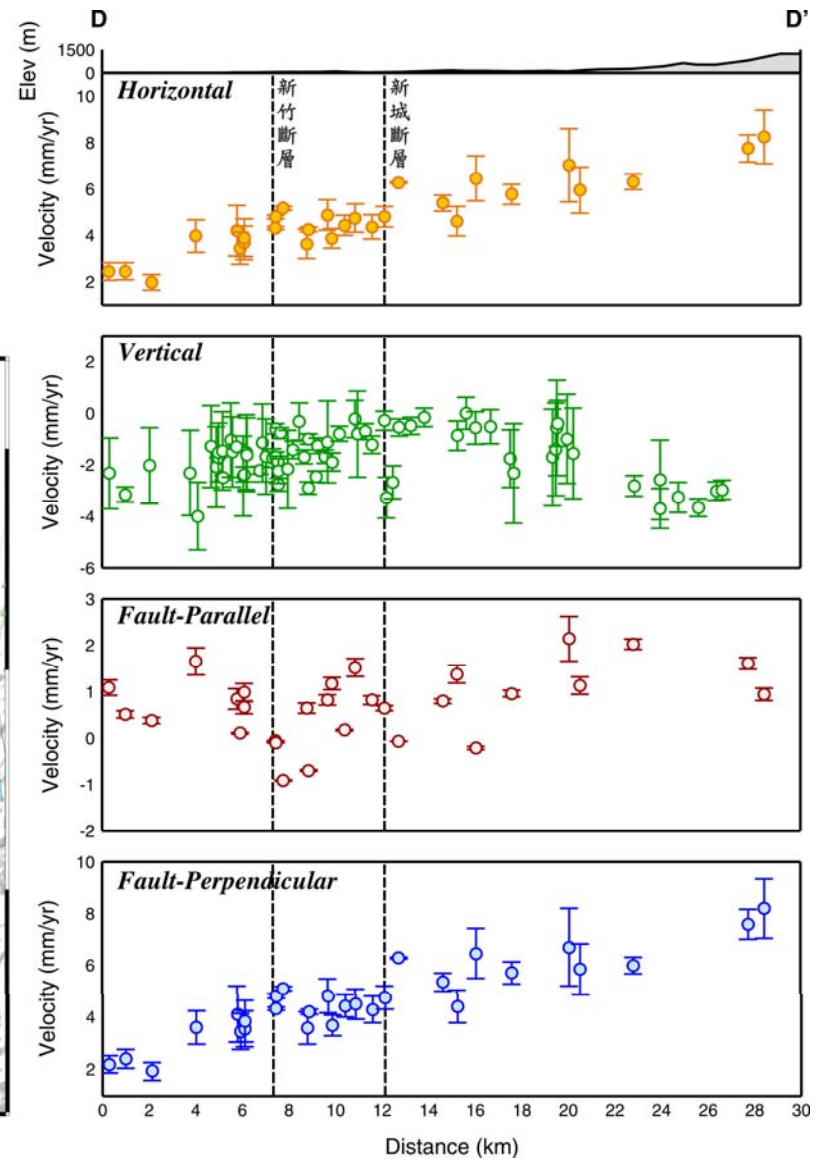
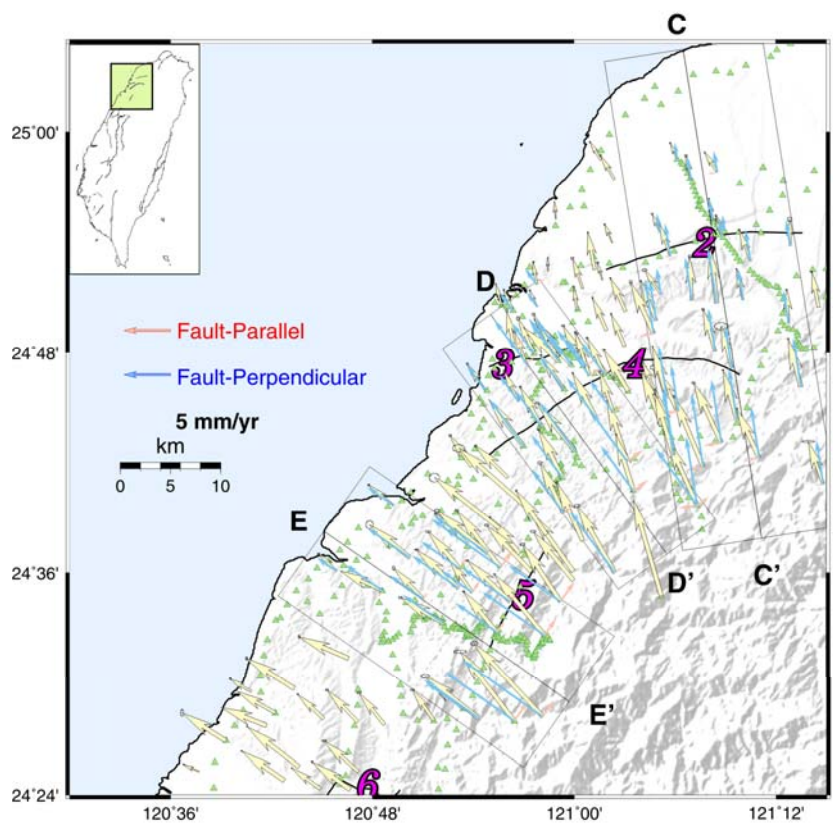


圖 2.81：桃竹苗地區 D 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.80 所示。

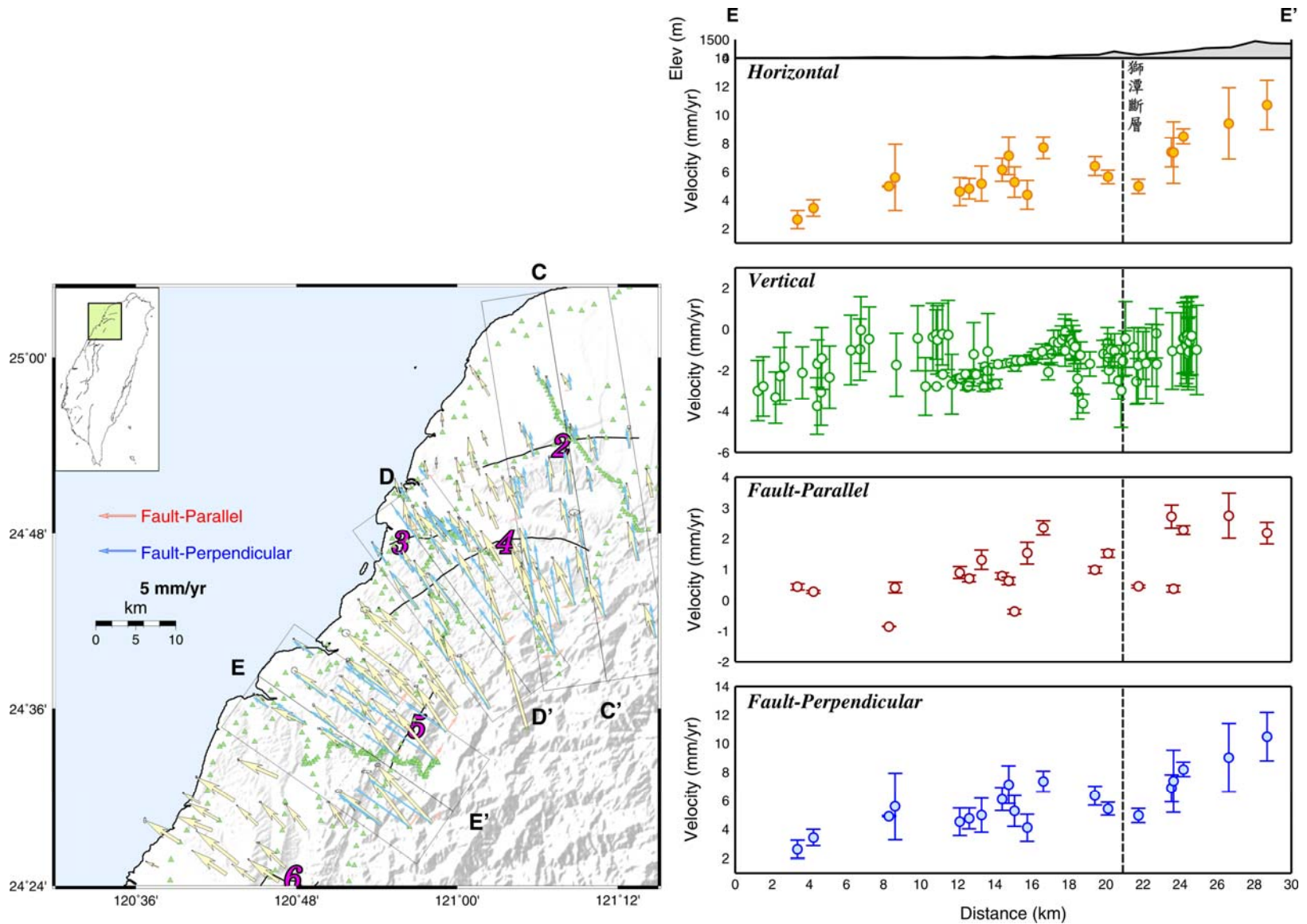


圖 2.82：桃竹苗地區 E 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.80 所示。

2-4-3 中部地區變形特性

2-4-3-1 地質背景

1999 年規模 7.6 之集集地震為台灣中部地區因車籠埔斷層錯動所引發之災害性地震，該地震造成兩千餘人喪生、十萬戶房舍毀損，為台灣地區百年難得一見的大地震。

台灣中部區域，位處於西部麓山帶中段，整個西部麓山帶的地質構造呈現一典型的覆瓦狀 (imbricate structure) 排列的褶皺逆衝斷層帶，地層雖然已經因褶皺作用而變形，但尚未受到變質作用影響，因板塊相互隱沒開始造山，菲律賓海板塊向西北方向運動導致西部褶皺逆衝斷層帶走向的分布近乎為北北東—南南西，因附近北港基盤高區的存在，所以當菲律賓海板塊往西北邊推進時，成為一阻礙，使整個麓山帶及斷層分布成 S 型彎曲，在中部地區剛好在凹進 (recess) 的曲線上，在此區域之斷層走向分布也受此大地構造影響。

該區主要有三個主要斷層經過，由東向西為大茅埔—雙冬斷層、車籠埔斷層、彰化斷層，三條斷層均屬於向西運動、朝東傾斜的褶皺逆衝斷層帶，此三條斷層為依次 (in sequence faulting) 發育的覆瓦狀逆衝斷層構造，因擠壓力向西遞移，依序發育的斷層為由東向西的大茅埔—雙冬斷層、車籠埔斷層、彰化斷層，相較於其他兩個斷層，彰化斷層之發育較為年輕，可能為其尚未出露之原因；以車籠埔斷層為界，兩側皆呈現豬背型向斜構造，東側的向斜，為車籠埔斷層向西逆衝滑移作用所形成，西側則為彰化斷層向西逆衝滑移作用所造成的[楊耿明，2002]。

彰化斷層為存疑性活動斷層[林啟文等，2007a]，為中部麓山帶地區的變形前緣，主要分布在彰化縣，為北北東轉南北走向，因並未在地表觀測到其斷層形貌，可能被沖積層或山麓堆積物所覆蓋，斷層並未出露，因缺乏斷層露頭之證據，斷層性質也不明確，推測可能為盲斷層。彰化斷層為此地區一條重要之活動斷層，在地調所的斷層分類中劃分為存疑性活動斷層[林啟文等，2000b]，因該斷層在地表並無明顯之斷層露頭證據，因此在推測其地表位置的問題上，仍具相當之不確定性，但由於彰化斷層在地表地形上有明顯的特徵，故一向被視為台灣地區之主要斷層。彰化斷層位於八卦丘陵西緣[三浦唯宣，1933；林朝榮，1957]，斷層的走向和丘陵之走向一致，由大肚溪南方經彰化市、員林、出水、田中至濁水溪北岸。斷層走向在八卦丘陵北端之彰化附近呈北偏西 20°，在丘陵南端員林以南則約呈南北走向，長約 32 公里。依地形特徵之差異，由北而南可將彰化斷層分為彰化-花壇段，花壇-員林段，員林-二水段等三個區段。北段可能出露逆衝至地表淺部，但中南段應仍為盲斷層。彰化斷層是台灣麓山帶最西緣的一條斷層，依照台灣地體演化，彰化斷層是中部地區西部麓山帶系列斷層中最為年輕的斷層，很可能未出露地表，或僅於地表產生小錯動。位於八卦丘陵西緣之彰化斷層，其存在的證據主要來自八卦丘陵的地表地形特徵[林朝榮，1957；石再添、楊貴三，1985；Delcaillau et

al., 1998]。在震測剖面[Chen, 1978; 許文立等, 2000]及地質資料上均無法判釋彰化斷層的確實位置。雖然無法在震測剖面[許文立等, 2000]上辨識出因斷層活動於八卦山背斜和平原接壤處產生的錯動, 但可明顯觀察到被視為八卦山背斜西翼之西傾地層與向東傾斜 18° - 45° 之斷層面[Chen, 1978]。

車籠埔斷層屬第一類活動斷層[林啟文等, 2007a], 北連三義斷層, 南接觸口斷層, 分布在台中縣市、南投縣, 以烏溪為界分為兩段, 北段呈南北走向, 南段呈南北走向; 車籠埔斷層的上盤為麓山帶地層, 由老到新, 依序出露為桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層、頭嵙山層、第四紀紅土層, 逆衝到現代堆積層之上, 桂竹林層主要出露在大甲溪以北, 錦水頁岩層則因斷層活動之干擾出現的並不一致, 而卓蘭層以上之地層則為麓山帶主要之地層[陳旭銘等, 2000], 下盤為頭嵙山層以上之出露, 斷層前緣兩側均為沖積層及階地等第四紀未膠結之沉積物所覆蓋, 集集地震後, 地表變形特徵有斷層崖等由北向南相當連續的出現, 所處的位置皆出露錦水頁岩及卓蘭層, 表示車籠埔斷層的主斷層並未有變形特徵[林啟文等, 2000b]。位在西部麓山帶邊緣之車籠埔斷層, 為一近南北走向且向東傾斜之低角度逆衝斷層。該斷層北起內灣, 沿西南西方向至石岡後, 從豐原再向南延伸至南投桶頭。車籠埔斷層北接三義斷層, 南接觸口斷層; 其東、西兩側分別為雙冬斷層和彰化斷層, 此二斷層同為南北走向的第四紀斷層, 是弧陸碰撞過程中在褶皺帶發育之典型的逆衝斷層。此外, 於 1999 年集集地震時, 車籠埔斷層造成近 90 公里的地表破裂, 水平同震最大位移量約 8.5 公尺, 垂直最大位移量約 3.2 公尺。斷層上盤之地表露頭分布第三紀錦水頁岩層, Wang et al. [2000]集集地震乃因車籠埔斷層沿錦水頁岩之弱面滑動所造成。

大茅埔一雙冬斷層為第一類活動斷層[林啟文等, 2007b], 分布在台中縣、南投縣, 為內麓山帶與外麓山帶的分界線, 以大甲溪為界分為兩段, 大甲溪以南為雙冬斷層, 主要為南北走向, 往北越過大甲溪斷層走向稍轉為北東向, 此段為大茅埔斷層; 雙冬斷層下盤出露更新世的頭嵙山層, 上盤由漸新世到中新世的地層組成, 斷層貫穿第四紀中晚期的頭嵙山層上部礫岩層, 因此可以推斷雙冬斷層之活動應該晚於頭嵙山層上部礫岩層之沉積[黃鑑水等, 2000]。

2-4-3-2 速度剖面

台灣地區速度場剖面分析目的在於求得跨斷層速度場變化, 剖面分析方式如圖 2.83 所示, 此區分別做了 F、G、H 三個 GPS 速度場剖面。依照各斷層走向, 分別以水平分量及垂直分量剖面表示。水平分量速度場可分解為垂直斷層走向及平行斷層走向分量; 對此三區之 GPS 速度場剖面分析描述。

F 剖面 (圖 2.83), 此剖面由西向東橫跨彰化斷層、車籠埔斷層、雙冬一大茅埔斷層三斷層之北段, 剖面走向為 $N64^{\circ}W$; 其水平速度場, 剖面 0 km 處速度量為 1.48 mm/yr

向東到剖面 40 km 速度量增加到 22.08 mm/yr；垂直速度場，在剖面位置 0 km 處，速度量平均為-4 mm/yr，向東到剖面位置 40 km 其速度量增加至平均 0.74 mm/yr；平行斷層走向之速度量，其剖面速度量平均為 0.65 mm/yr；垂直斷層走向之速度量則由剖面 0 km 處之 1.42 mm/yr 向東到剖面 40 km 增加到 21.99 mm/yr。

G 剖面（圖 2.84），此剖面由西向東橫跨彰化斷層、車籠埔斷層，雙冬一大茅埔斷層三斷層之中段，剖面走向為 N80°E；其水平速度場，速度量由剖面位置 0 km 之 3.61 mm/yr 向東至剖面位置 50 km 增加到 17.62 mm/yr；垂直速度場，在剖面位置 0 km 至彰化斷層（剖面位置 24 km 處）之速度量，其速度量分布較不一致，彰化斷層以東至剖面位置 50 km 其平均速度量為-4.96 mm/yr；平行斷層走向之速度量由剖面位置 0 km 處之 3.04 mm/yr 至剖面位置 50 km 處速度量下降到-8.48 mm/yr；垂直斷層走向之速度量則由剖面位置 0 km 的 1.96 mm/yr 往東到剖面位置 50 km 處速度量下降到-10.14 mm/yr。

H 剖面（圖 2.85），此剖面由西向東橫跨彰化斷層、車籠埔斷層、雙冬一大茅埔斷層三斷層之南段，剖面為 E-W 方向；其水平速度場，剖面位置 0 km 處之速度量 1.69 mm/yr 向東至剖面位置 65 km 處增加到 29.26 mm/yr；垂直速度場，在剖面位置 0 km 處到彰化斷層（剖面位置 32 km）其速度量較無一定之分布，彰化斷層以東到車籠埔斷層（剖面位置 43 km）其速度平均為-1.23 mm/yr，由剖面位置 43 km 處到剖面位置 65 km 處其速度量增加至平均速度量為 11.24 mm/yr；平行斷層走向之速度量，由剖面位置 0 km 之平均速度量 0.87 mm/yr 向東至剖面位置 65 km 增加到 14.87 mm/yr；垂直斷層走向之速度量則由剖面位置 0 km 之平均速度量-0.48 mm/yr 向東至剖面位置 65 km 增加到 25.32 mm/yr。

2-4-3-3 二維彈性斷層模型

我們利用最小二乘法，藉由反演地表位移量來求解斷層滑移量及斷層幾何參數。為了求得合理之斷層幾何（斷層傾角、斷層位置、斷層深度、鎖定深度），我們依據 2004 年中央地質調查所報告「台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）—台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析」之構造平衡剖面作為起始模型及約制條件（圖 2.86），利用蒙地卡羅演算法推算最佳之斷層幾何參數。

就資料使用部分，我們將 GPS 水平速度場分解為為垂直斷層與平行斷層走向分量，因為我們是採用 2 維斷層模型，故水平速度場剖面是採用垂直斷層走向之速度分量（圖 2.87）。由於垂直速度場在彰化斷層以西之平原地區直到海岸線間的區域以沉陷為主，反映此地區因人工抽水而造成顯著之地層下陷（圖 2.87），因此為了避免斷層滑移速率估算錯誤，就縣道 150_北斗至水里水準路線剖面之速度資料，我們主要是採用沉陷速率小於 10 mm/yr 以東之地區（距剖面西側約 5 公里處）的垂直速度值。另外，本區域

由西向東分別涵蓋了彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔—雙冬斷層（圖 2.87，根據速度剖面的變化指出（圖 2.87），彰化斷層及車籠埔斷層皆有對應到速度差異，因此本計畫主要針對這二條斷層對地表變形之貢獻進行模擬。

就縣道 150_北斗至水里水準路線剖面，速度資料反演所獲得之最小 L2 norm 值為 36.7 mm/yr，其斷層幾何參數為，彰化斷層向東傾斜 $18.5^{\circ} \pm 2.4^{\circ}$ ，斷層底部與滑脫面相交深度為 6.0 ± 1.3 km；車籠埔斷層向東傾斜 $25.6^{\circ} \pm 0.9^{\circ}$ ，斷層底部與滑脫面相接深度為 9.4 ± 1.0 km（圖 2.87）。彰化及車籠埔斷層之斷層滑移速率分別為 18.3 ± 13.9 mm/yr 及 25.5 ± 8.7 mm/yr；其鎖定深度則分別是 2.9 ± 1.2 km 與 6.8 ± 1.2 km（圖 2.87）。

2-4-3-4 討論

就斷層錯位模型而言，我們可以注意到縣道 150_北斗至水里水準路線剖面的擬合結果，可以得到相對較合理的斷層滑移速率。然而，我們同時也注意到，此結果在水平速度分量上的擬合並不佳，仍有相當大的改進空間。與 Hsu et al. [2003] 藉由反演 1993 至 1999 年 GPS 速度場來估算車籠埔斷層滑移速率的結果相比，Hsu et al. [2003] 的滑移速率為 20 mm/yr 與本速度剖面估算出來的車籠埔斷層滑移速率 25.5 ± 8.7 mm/yr 相當接近。然而，我們要注意的是中部地區 2002 年後之震後變形主要集中在 1999 年集集震源區。目前中部地區之模型仍為初步之結果，接下來我們將考慮彰化斷層鎖定且斷層滑移量集中在向西滑脫面的可能性。換言之，在將來的工作中，此地區之變形研究勢必要直接考慮利用三維斷層模型來進行解析。

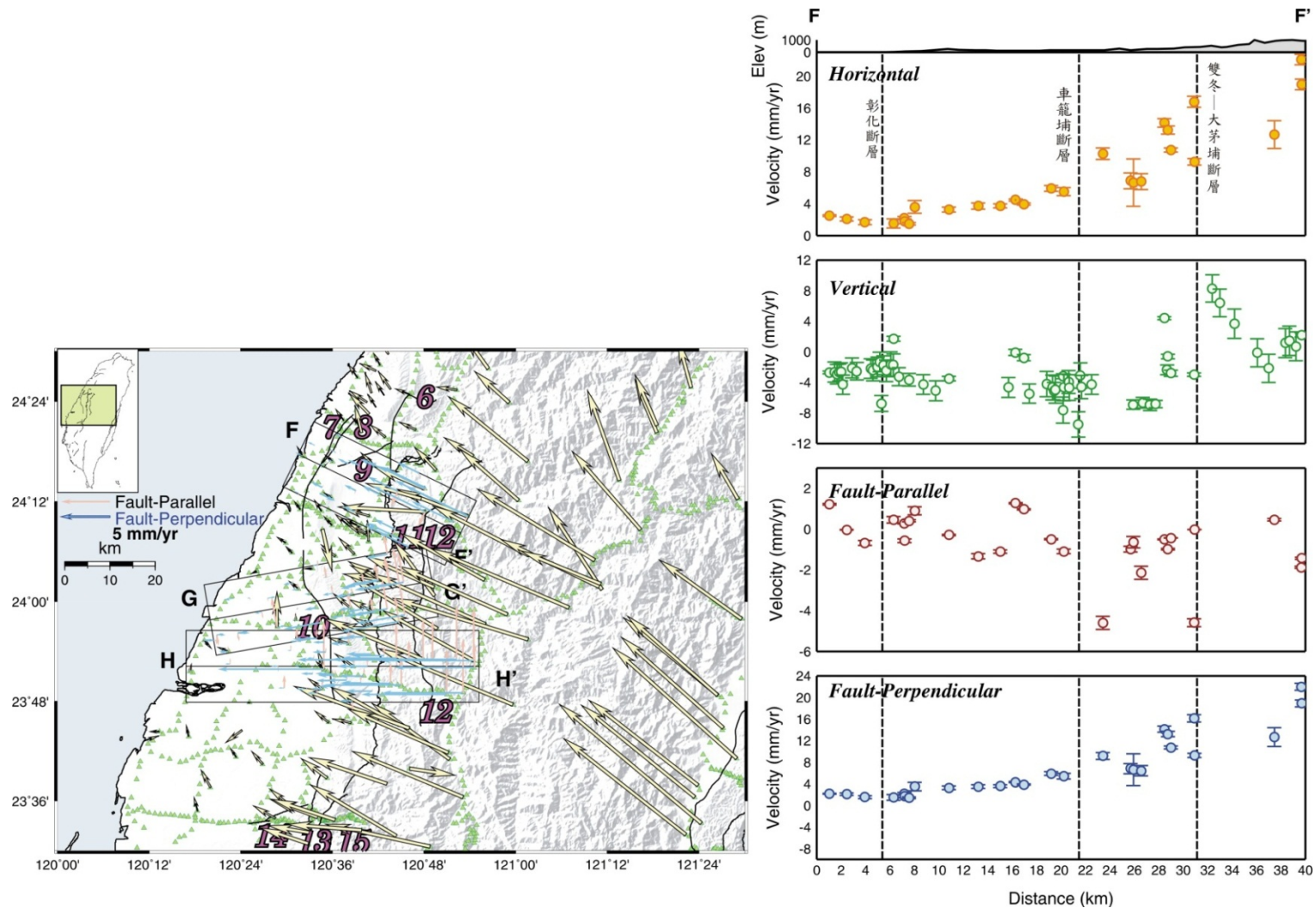


圖 2.83：中部地區 F 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層：6 為三義斷層，7 為大甲斷層，8 為鐵砧山斷層，9 為屯子腳斷層，10 為彰化斷層，11 為車籠埔斷層，12 為大茅埔—雙冬斷層，13 為九芎坑斷層，14 為梅山斷層，15 為大尖山斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

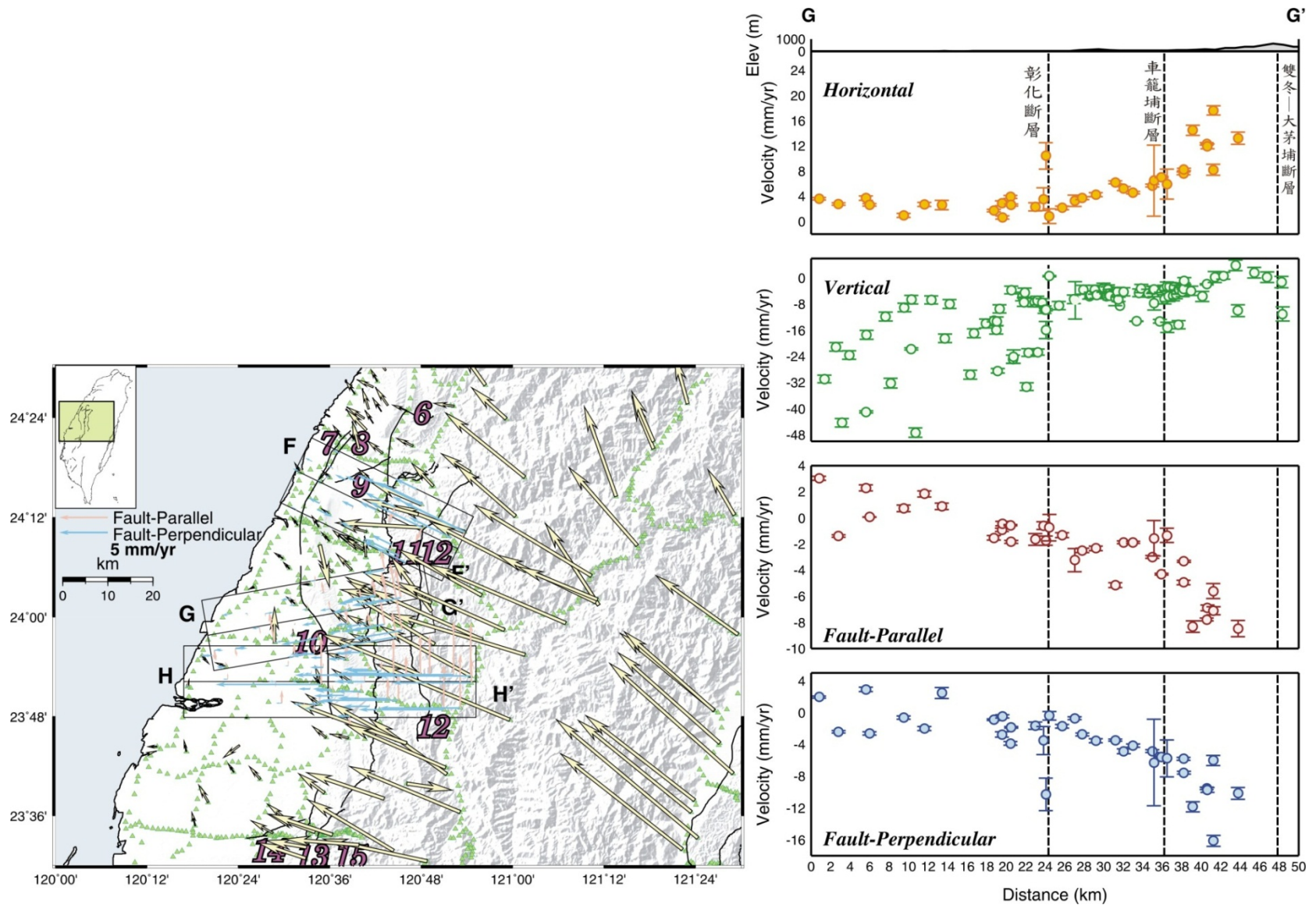


圖 2.84：中部地區 G 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.83 所示。

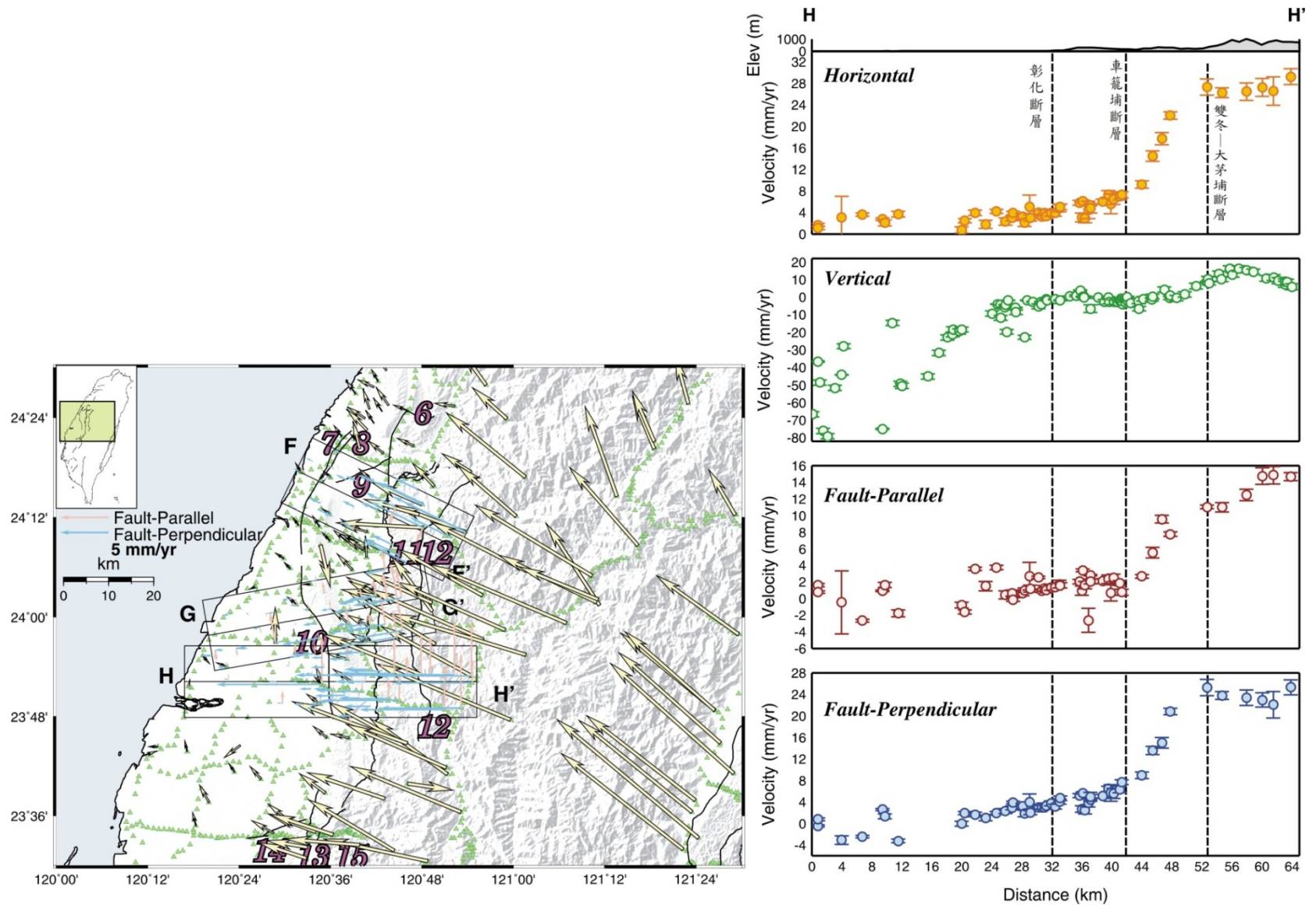


圖 2.85：中部地區 H 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.83 所示。

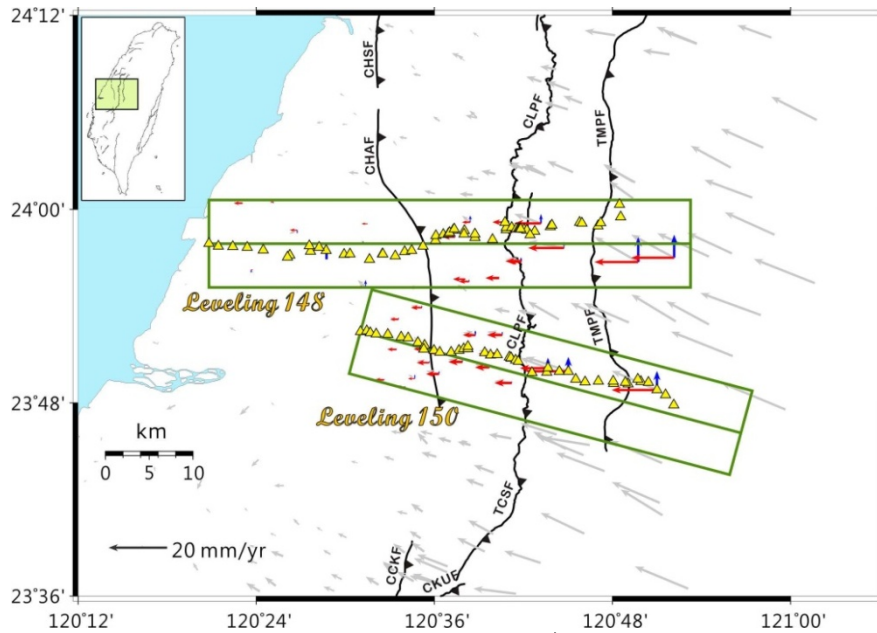


圖 2.86：中部地區 GPS 水平速度場與縣 148_王功至草屯、縣 150_北斗至水里水準測線分布圖。灰色箭頭為 GPS 水平速度向量，紅色箭頭為剖面中水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色箭頭為剖面中水平速度向量平行斷層走向之分量。黃色三角形為水準點位置。CHSF 為清水斷層、CHAF 為彰化斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TCSF 為大尖山斷層、CKUF 觸口斷層、TMPF 為大茅埔—雙冬斷層。

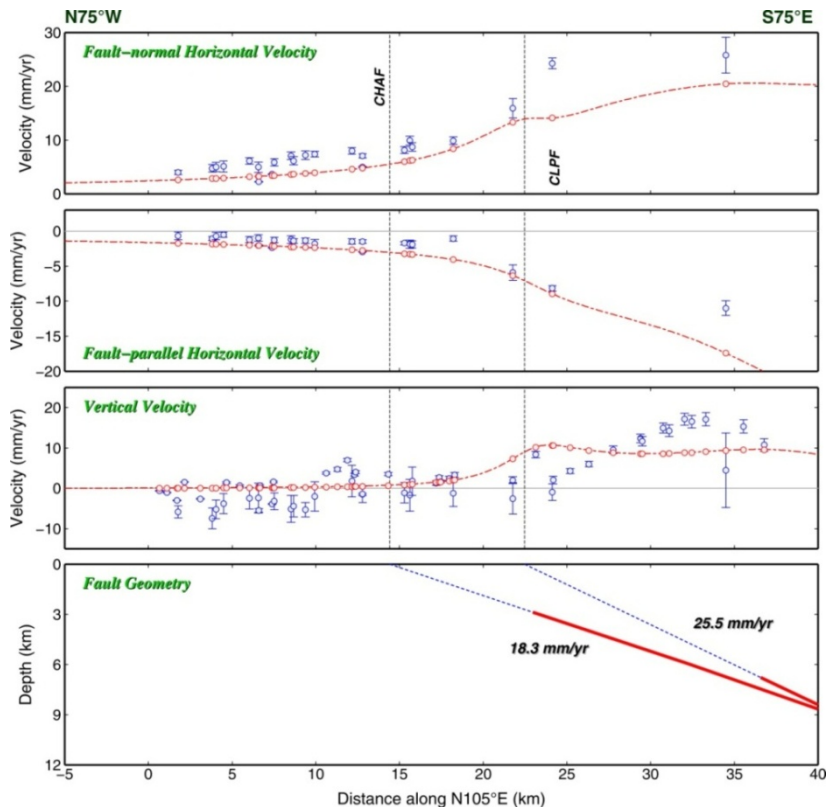


圖 2.87：縣道 150_北斗至水里斷層模擬結果。由上而下分別是水平速度分量、垂直速度分量及斷層幾何分布。藍色圓圈為觀測值；紅色虛線為計算值。藍色虛線為斷層鎖定位置，紅色實線為斷層潛移區段。灰色虛線為斷層投影位置。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

2-4-4 嘉南地區變形特性

2-4-4-1 地質背景

嘉義區域的構造地形分區以九芎坑斷層為分界，東側屬於西部麓山帶地質區，西側為隆起台地與海岸平原區；隆起台地與海岸平原區又以嘉義斷層為界，上盤的紅土台地屬於隆起台地區，下盤屬於沉降的海岸平原區。晚期更新世，嘉義斷層（盲斷層）作用造成上盤紅土台地隆起並向西傾斜（小梅背斜構造）。因此，從外麓山帶以西的逆衝斷層計有觸口斷層、九芎坑斷層與嘉義斷層；此由一系列疊瓦狀逆衝斷層構成的褶皺-逆衝斷層帶可對比八掌溪以南的崙後斷層（觸口斷層）、木屐寮-六甲斷層與新營斷層。

濁水溪以南，南北走向褶皺-逆衝斷層帶又被另一組近東西走向的橫移斷層截切，由北而南計有古坑斷層、梅山斷層與新化斷層。這些橫移斷層都屬於第一級活動斷層，1906 年嘉義地震與 1946 年台南地震各自造成梅山斷層與新化斷層的活動，1999 集集地震斷層以古坑斷層為南界[Omori, 1907a, b; 張徽正等, 1998; 林啟文等, 2000b; Chen et al., 2001]。這些橫移斷層將麓山帶或隆起台地區分割成為數個構造區塊。尤其晚更新世以來，隆起台地區至海岸平原區的地形與構造變動速率有明顯的關係與差異。

這些橫移斷層形成時間各有不同，大致分為兩個階段，一是古坑斷層與左鎮斷層截切至麓山帶，成為麓山帶中部份逆衝斷層的界線斷層，如古坑斷層為九芎坑斷層與桐樹湖斷層界線斷層，以及大尖山斷層與觸口斷層界線斷層；左鎮斷層為觸口斷層（崙後斷層）與木屐寮-六甲斷層的南端界線斷層。另一，梅山斷層與新化斷層未截切至麓山帶，僅發育在隆起台地與海岸平原區，晚更新世-全新世的地形明顯受到變形；如梅山斷層與新化斷層的活動造成斷層兩側隆起台地與海岸平原區的錯移[陳文山等, 2004]。從上述斷層截切的地層來看，古坑斷層與左鎮斷層應較梅山斷層與新化斷層還早形成，但這些斷層至今都還持續活動。

梅山斷層是 1906 年 3 月 17 日規模 7.1 嘉義梅山地震產生的地表斷層，包括主斷層（梅子坑斷層）及支斷層（陳厝寮斷層）兩部份，斷層主要呈東北東走向，為右移斷層[Omori, 1907a, b]。主斷層（梅子坑斷層）以北偏東 75° 方向，由嘉義縣的梅山向西南西延伸至中正大學現址一帶與支斷層（陳厝寮斷層）相接，此段長約 10 公里，接著再向西延伸至民雄附近後消失，此段長約 5 公里，故梅山斷層全長約 15 公里。至於民雄以西至新港一帶約 10 公里長之區段，地表雖然沒有明顯錯動，但有大量噴水、噴沙的現象，因此可推測本斷層於此地區可能以潛伏斷層（sub-ground fault）的形式存在[Omori, 1907a, b]。雖然梅山斷層發生在文獻可考之年代，但因農耕及工程建設遭到破壞掩覆，再加上雨量大、風化速率快，斷層證據相當不易保存，使得梅山斷層分布的位置充滿爭議。可以確定的是，梅山斷層具有大規模的花狀構造[彭秋紋等, 2004; 林泓毅, 2005]，為典型的右移斷層。主斷層的傾角朝南，地表斷層帶寬度可達 450 公尺。梅山斷層之位置於三美莊與開元后一帶有最顯著之證據[Omori, 1907a, b; 董德輝,

1987；石同生等，2003；彭秋紋等，2004；林泓毅，2005；楊貴三、馮鈺棋，2005]。從梅山斷層的位置來看，此斷層之走向與此地區第三紀發育一系列正斷層的走向非常一致，故認為梅山斷層是沿著地下正斷層構造再活動的走向滑移斷層。葉永田、鄭世楠 [1998]指出 1906 年梅山地震的震央位置位於 23.583°N，120.533°E，震源深度 15 公里，地震規模 $M_L = 7.1$ 。此地震之震源機制顯示斷層走向為 N75°E，傾角 90°，滑移角 -141°。由於此斷層為歷史地震斷層，因此在地調所的斷層分類中劃分為第一類活動斷層 [林啟文等，2000b]。

台灣西南部一直被認為是高地震潛能的區域，而壓縮應變率最高的地區是在觸口斷層一帶 [Yu and Chen, 1994; Yu et al., 1997]，唯地質調查階地與槽溝開挖之研究未能明確指示斷層在近代的活動週期 [齊士崢、宋國城，2000；黃鑑水等，1994]。此地區主要之活動斷層有六甲斷層、木屐寮斷層及觸口斷層。

六甲斷層位於台南縣東山至六甲附近的山麓，呈北北東走向，長度約 10 公里 [石再添等，1986]。由於六甲線形的位置恰位於丘陵區與平原地區相接之處，在地形上落差相當大，因此呈現出相當清楚的地形特徵，在地形圖及航照上線形亦相當明顯，然而此斷層除地形上的特徵外，地表的斷層證據相對薄弱。木屐寮斷層為台南縣白河東方一明顯線形，呈北北東走向，北起頭前溪橋南側之山豬炭，南至六重溪北岸，延伸約 7 公里，具有斷層小崖、三角切面等地形上之特徵 [Sun, 1970, 1971]。楊貴三 [1986]調查斷層經過的白水溪河床，發現更新世之二重溪層相當錯亂，且白水溪左岸河階上的斷層小崖和河流流向直交，而推測斷層存在的可能。根據中油地質圖觸口斷層出露上盤最老的中新世岩層（南港層）逆衝至下盤年輕的台地堆積層與頭嵙山層之上，這些岩層曾受過多次強烈擠壓變形，且河流下切作用旺盛、階地數量多，顯示此地區構造活動仍持續進行 [李明書等，2003]。

根據 GPS 觀測資料分析結果指出 [郭素妙等，2008]，觸口斷層沿線自 1996 年以來，有將近 20 mm/yr 的水平縮短量，但觸口斷層在中段及南段之變形行為不盡相同，中段有較高之垂直抬升速率（20 mm/yr）；南段則有較大之壓縮應變（-2 μ strain/yr）及右剪切應變（2.5 μ strain/yr）為主要變化。中南兩段之差異或許與斷層幾何形貌及區域地質條件有關，有待更進一步分析探討，而南段的觸口斷層持續累積應變是無庸置疑的，未來再活動的可能性高。同屬覆瓦狀構造的六甲-木屐寮斷層連線與觸口斷層之間，同樣具有年平均 15 mm 的水平縮短量，顯示兩構造線間亦在持續累積應變。

新化斷層為 1946 年 12 月 5 日規模 6.3 之災害性地震所造成的地震斷層，斷層走向呈北偏東 70°，由台南縣新化東北方約 5.5 公里之那拔林向西南延伸至新化畜產試驗所，斷層破裂長度約 6 公里，屬右移斷層。Bonilla [1975]認為自中央橋一帶向西南延伸約 6 公里，仍有屬於此地震地表變形之雁形破裂及撓曲，並有些微垂直位移，因此斷層實際破裂長度可能超過 12 公里。鄭世楠 [1999]將 1946 年新化地震的地震資料進行重

新定位，結果顯示新化地震震央位於 23.070°N ， 120.330°E ，震源深度 14 公里，地震規模 $M_L = 6.3$ 。此地震之震源機制顯示斷層走向為 $\text{N}75^{\circ}\text{E}$ ，傾角 90° ，滑移角 -151° ，最大壓應力 (P) 軸呈西北-東南向。由於此斷層為歷史地震斷層，因此在地調所的斷層分類中劃分為第一類活動斷層[林啟文等，2000b]。在槽溝開挖部分，新化斷層之斷裂面均呈高角度傾斜，判斷屬於走向滑移斷層之花狀構造 (Flower structure)，且有至少四次古地震事件[李錫堤等，2000；陳文山等，2004]。此花狀構造異可由震測剖面顯示[Wang et al., 1994；邱朝聰，1997；楊耿明等，2000]。

2-4-4-2 速度剖面

嘉南地區之 GPS 及精密水準點位分布及跨斷層速度剖面如圖 2.88 至圖 2.90 所示。其中平面速度場包含 GPS 移動站及連續站資料、垂直速度場包含 GPS 連續站、地調所及內政部之精密水準測線資料。

I 剖面 (圖 2.88)，此剖面由西向東橫跨梅山斷層、九芎坑斷層、觸口斷層三斷層，剖面走向為 $\text{N}73^{\circ}\text{W}$ ；其水平速度場，剖面 7 km 處速度量為 3.46 mm/yr 向東到剖面 50 km 速度量增加到 16.57 mm/yr ；垂直速度場，在剖面位置 1.3 km 處，速度量平均為 -43.5 mm/yr ，向東到剖面位置 50 km 其速度量增加至 6.86 mm/yr ；平行斷層走向之速度量，在剖面位置 7 km 處，其剖面速度量為 3.29 mm/yr ，向東到剖面位置 50 km 其速度量減少至約 -1.05 mm/yr ；垂直斷層走向之速度量則由剖面 7 km 處之 -1.07 mm/yr 向東到剖面 50 km 增加到 16.51 mm/yr 。

J 剖面 (圖 2.89)，此剖面由西向東橫跨六甲斷層、觸口斷層三斷層，剖面走向為 $\text{N}65^{\circ}\text{W}$ ；其水平速度場，剖面 1.5 km 處速度量為 0.27 mm/yr 向東到剖面 45 km 速度量增加到 35.68 mm/yr ；垂直速度場，在剖面位置 1.5 km 處，速度量平均為 -28.11 mm/yr ，向東到剖面位置 48 km 其速度量增加至 9.42 mm/yr ；平行斷層走向之速度量，在剖面位置 1.5 km 處，其剖面速度量為 -0.16 mm/yr ，向東到剖面位置 48.7 km 其速度量減少至 -12.33 mm/yr ；垂直斷層走向之速度量則由剖面 1.5 km 處之 0.21 mm/yr 向東到剖面 45 km 增加到 33.11 mm/yr 。

K 剖面 (圖 2.90)，此剖面橫跨新化斷層，剖面走向為 $\text{N}15^{\circ}\text{W}$ ；其水平速度場，剖面 0 km 處速度量為 8.75 mm/yr 向東到剖面 19.7 km 速度量增加到 29.77 mm/yr ；垂直速度場，在剖面位置 0 km 處，速度量平均為 -4.21 mm/yr ，向東到剖面位置 19.7 km 其速度量增加趨勢不明顯差不多還是 -3.65 mm/yr ；平行斷層走向之速度量，在剖面位置 0 km 處，其剖面速度量為 -8.63 mm/yr ，向東到剖面位置 19.7 km 其速度量減少至約 -29.76 mm/yr ；垂直斷層走向之速度量則由剖面 0 km 處之 1.42 mm/yr 向東到剖面位置 19.7 km 其速度量增加趨勢不明顯，約為 0.85 mm/yr 。

2-4-4-3 嘉南地區二維彈性斷層模型

依據 1996-2006 年間相對於澎湖白沙(S01R)之 GPS 水平速度場分析結果指出[郭素妙等, 2008], 觸口斷層沿線自 1996 年以來, 有將近 20 mm/yr 的水平縮短量, 但觸口斷層在中段及南段之變形行為不盡相同, 中段有較高之垂直抬升速率 (20 mm/yr); 南段則有較大之壓縮應變 ($-2 \mu\text{strain/yr}$) 及右剪切應變 ($2.5 \mu\text{strain/yr}$) 為主要變化。中南兩段之差異或許與斷層幾何形貌及區域地質條件有關, 有待更進一步分析探討, 而南段的觸口斷層持續累積應變是無庸置疑的, 未來再活動的可能性高。同屬覆瓦狀構造的六甲-木屐寮斷層連線與觸口斷層之間, 同樣具有年平均 15 mm 的水平縮短量, 顯示兩構造線間亦在持續累積應變, 也暗示著平原 (plain) 與台地 (tableland) 間之盲斷層 (blind thrust) 現今仍為一條活躍之活動構造。此地區自東南到西北, 速度向量由 54 mm/yr、方位角 272° 顯著遞減至 1 mm/yr、方位角 252° [郭素妙等, 2008]。其中, 同屬覆瓦狀構造的六甲-木屐寮斷層系統與觸口斷層之間, 具有 15 mm/yr 的顯著水平縮短量, 顯示兩構造線間正在持續累積應變[郭素妙等, 2008]。

2-4-4-3-1 縣 174_北門至楠西精密水準測線成果分析

長約 66 公里之縣 174_北門至楠西水準測線於嘉南地區橫跨六甲斷層及觸口斷層 (圖 2.91), 地調所沿此測線重複施測 8 次, 分別於 2003 年 8 月、2004 年 10 月、2005 年 3 月、2006 年 9 月、2008 年 3 月、2009 年 4 月、2010 年 4 月及 2011 年 4 月進行。由於此測線幾乎與內政部一等二級水準路線重疊, 為了解析精密水準測量所提供之地表變形資訊, 於計算精密水準垂直運動量時, 本計畫可以約制 X204 等 30 個點位之抬升速率 (表 2.8), 該速率為相對於澎湖白沙 GPS 連續站 S01R 之垂直運動速率, 推求自 2000-2008 年內政部一等水準測量與 GPS 連續站觀測資料[Ching et al., 2011]。

相鄰兩次測量之高程變化量沿東西方向之剖面分布形態顯示 (圖 2.92), 六甲-木屐寮斷層系統 (測站 G816) 以東地區之垂直運動型態大致上以抬升為主; 相反地, 測站 I080 以西區域之垂直運動型態則以沉降為主; 介於測站 I080 與測站 I086 間之區域, 在 2003-2005 年與 2009-2011 年期間主要為抬升。

本計畫接著藉由最小二乘法來推求各水準點於 2003-2011 年間之平均垂直運動速率 (圖 2.92)。其結果顯示, 於測站 I080 以西之區域, 具有約為 15 mm/yr 之沉降速率; 在測站 I086 以東之區域, 其垂直抬升速率大致在 5 mm/yr 左右, 且最大抬升速率約為 7.5 mm/yr。

2-4-4-3-2 二維彈性斷層模型結果

為了擷取測量資料中所隱含之構造意義, 本計畫採用二維彈性斷層模型來反演 GPS 與精密水準的資料, 推求斷層面上之滑移速率並搜尋各主要斷層幾何之最佳解。我們首先假設此一斷層系統是由一個滑脫面 (décollement) 和數個分支斷層 (branched fault) 所組成, 這些分支斷層即是我們所熟知的活動斷層。再假設滑脫面上完全是潛移

的狀態，即不會發生地震；而任一支斷層上盤滑脫面之滑移量（ S_1 ），要等於該分支斷層下盤滑脫面之滑移量（ S_2 ）與此分支斷層上之滑移量（ S_3 ）的總和（圖 2.93）。此外，在考慮斷層面上之滑移角（rake angle），我們可以將滑移速率分解成走向滑移（strike slip）和傾向滑移（dip slip）兩個滑移分量。由於斷層淺部可能因摩擦力作用而發生鎖定並持續累積能量，本模型簡單地假設鎖定深度以上之斷層滑移速率為零；換言之，斷層鎖定深度必須小於或等於該斷層之實際深度。在給定斷層幾何型貌與斷層滑移量後，透過 Okada [1985] 所提供之方程式，即可求得地表之位移速率，即每條斷層上之滑移速率為 s ；地表位移量以 d 來描述。地表位移量及斷層滑移速率參數間之關係式以 $Gs = d$ 來表示。

表 2.8：縣 174_北門至楠西精密水準測線約制站抬升速率表。

| 點號 | 抬升速率(mm/yr) | 點號 | 抬升速率(mm/yr) | 點號 | 抬升速率(mm/yr) |
|------|--------------|------|--------------|------|-------------|
| X204 | -1.92 ± 1.10 | I082 | -0.08 ± 1.20 | I091 | 0.71 ± 1.46 |
| I073 | -2.84 ± 1.28 | 1147 | -0.29 ± 1.13 | I092 | 0.55 ± 1.48 |
| I074 | -1.96 ± 1.20 | X205 | 0.09 ± 1.03 | I093 | 0.83 ± 1.48 |
| X218 | -1.60 ± 1.00 | I084 | 0.11 ± 1.45 | I094 | 0.82 ± 1.47 |
| I075 | -1.91 ± 1.22 | I085 | 0.14 ± 1.40 | I095 | 0.39 ± 1.45 |
| I076 | -1.70 ± 1.28 | I086 | 0.14 ± 1.40 | I096 | 0.86 ± 1.43 |
| I077 | -1.58 ± 1.33 | I087 | 0.67 ± 1.42 | I097 | 1.09 ± 1.40 |
| I078 | -1.49 ± 1.35 | I088 | 0.51 ± 1.41 | I098 | 0.84 ± 1.36 |
| I079 | -1.55 ± 1.36 | I089 | 0.85 ± 1.40 | I099 | 0.78 ± 1.32 |
| I081 | -0.39 ± 1.28 | I090 | 1.03 ± 1.42 | X219 | 0.75 ± 1.22 |

為了使計算結果符合實際觀測，我們在建立斷層模型的過程中給予 1 個約制條件：在震間時期（interseismic period），斷層滑移速率必須為正值。此外，為了求得合理之斷層幾何（斷層傾角、斷層位置、斷層深度、鎖定深度），我們依據 2004 年中央地質調查所報告「台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）—台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析」之構造平衡剖面作為起始模型及約制條件，利用蒙地卡羅演算法推算最佳之斷層幾何與斷層滑移速率參數。我們以速度誤差之倒數為權重，藉由計算下式之最小值來求得各參數之最佳解。

$$F(\mathbf{s}, \beta) = \left\| \sum^{-1/2} (Gs - d) \right\|^2 \quad (\text{式 3.1})$$

就資料使用部分，我們將 GPS 水平速度場分解為為垂直斷層與平行斷層走向分量。其中，垂直斷層走向分量主要是對應斷層面上傾向滑移速率之變化，而平行斷層走向分

量主要是對應斷層面上走向滑移分量之變化。由於 GPS 與精密水準垂直速度場在六甲-木屐寮斷層以西約 6 公里處向西直到海岸線間的區域以沉陷為主，反映此地區因人工抽水而造成顯著之地層下陷（圖 2.92），因此為了避免斷層滑移速率估算錯誤，我們主要是採用六甲-木屐寮斷層西側約 6 公里處以東之垂直速度值。另外，本區域由西向東分別涵蓋了六甲-木屐寮斷層、觸口斷層、竹頭崎斷層及平溪斷層（圖 2.91），根據速度剖面的變化指出（圖 2.62），六甲-木屐寮斷層、觸口斷層及竹頭崎斷層皆有對應到顯著之速度差異，因此本計畫主要針對這三條斷層對地表變形之貢獻進行模擬。反演所獲得之最小 L2 norm 值為 152.5 mm/yr，其斷層幾何參數為，六甲-木屐寮斷層向東傾斜 $29.8^\circ \pm 3.1^\circ$ ，斷層底部與滑脫面相交深度為 4.8 ± 0.2 km；觸口斷層向東傾斜 $31.6^\circ \pm 2.3^\circ$ ，斷層底部與滑脫面相接深度為 4.8 ± 0.2 km；竹頭崎斷層向東傾斜 $36.3^\circ \pm 4.4^\circ$ ，斷層底部深度為 5.6 ± 0.4 km（圖 2.94）。六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層之斷層滑移速率分別為 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（圖 2.94）。根據 Wells and Coppersmith [1994]的經驗式 $M_w = (5.00 \pm 0.22) + (1.22 \pm 0.16) \times \log_{10}(\text{SRL})$ ，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 及 25 km，我們可以獲得此三條斷層可能誘發之最大地震規模分別是 6.66 ± 0.28 、 6.76 ± 0.19 及 6.71 ± 0.28 。由模型獲得之斷層鎖定寬度與滑移速率，我們同樣可以推估六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層累積能量之速率分別為 $1.44 \pm 0.46 \times 10^{23}$ dyne-cm、 $0.41 \pm 0.17 \times 10^{23}$ dyne-cm 與 $2.10 \pm 0.22 \times 10^{24}$ dyne-cm。故此三條斷層可能之地震重複周期將分別為 1345.5 ± 11557.9 年、 5518.0 ± 14781.3 年及 102.2 ± 110.7 年。若考慮過去此地區之最大地震規模 6.3，則此三條斷層可能之地震重複周期將分別為 247.0 ± 94.3 年、 957.2 ± 536.3 年及 15.2 ± 1.6 年。

2-4-4-4 討論

嘉南地區已知的活動構造較清楚也較單純，由西向東，分別為盲斷層、六甲-木屐寮斷層系統及觸口斷層。透過 GPS 觀測與精密水準測量之結果指出，盲斷層、六甲-木屐寮斷層系統及觸口斷層皆可與地表變形做一比對，其中，測站 I080 的位置可能大致位於盲斷層的頂點。根據相鄰兩次測量之高程變化量型態顯示，該盲斷層之活動極可能具有週期性的變化，就 2003-2011 年間之觀測指出，在 2003-2005 年與 2009-2011 年期間為斷層潛移的型態；而其餘時間中則為斷層鎖定之型態。

就斷層錯位模型而言，竹頭崎斷層具有相當高的斷層滑移速率，在這個區域內也具有相對較深之鎖定深度（圖 2.94），顯示竹頭崎斷層是值得我們高度關切之斷層。然而我們可以注意到竹頭崎斷層的斷層鎖定深度相當深，換言之，此結果亦可能解釋成滑脫面上其實是有能量在累積。亦即，此模擬結果反映的是滑脫面之滑移速率變化而非竹頭

崎斷層之效應。

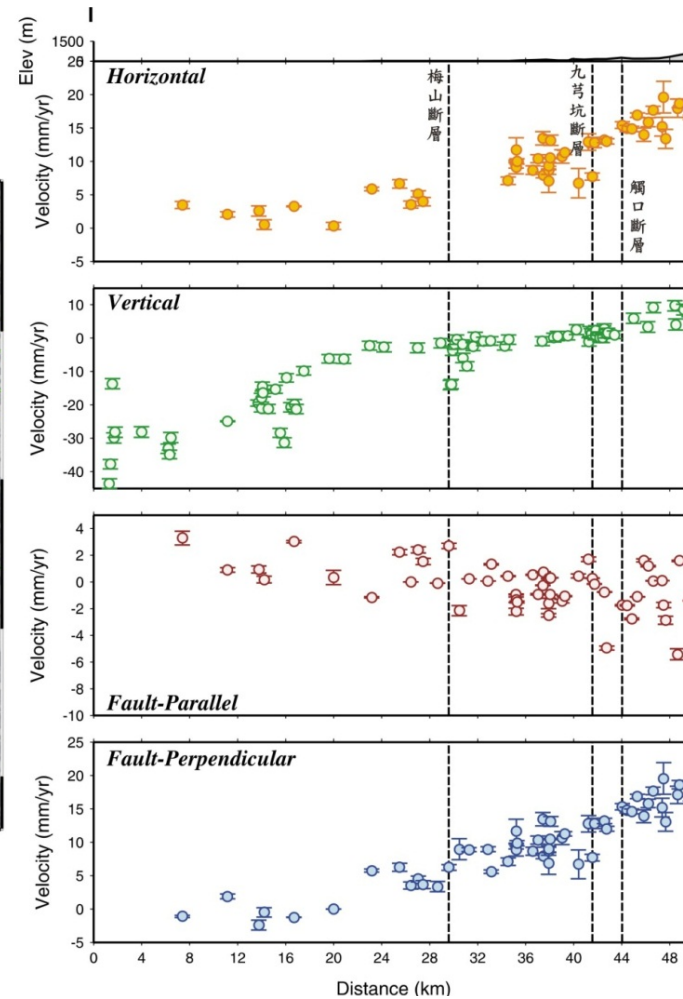
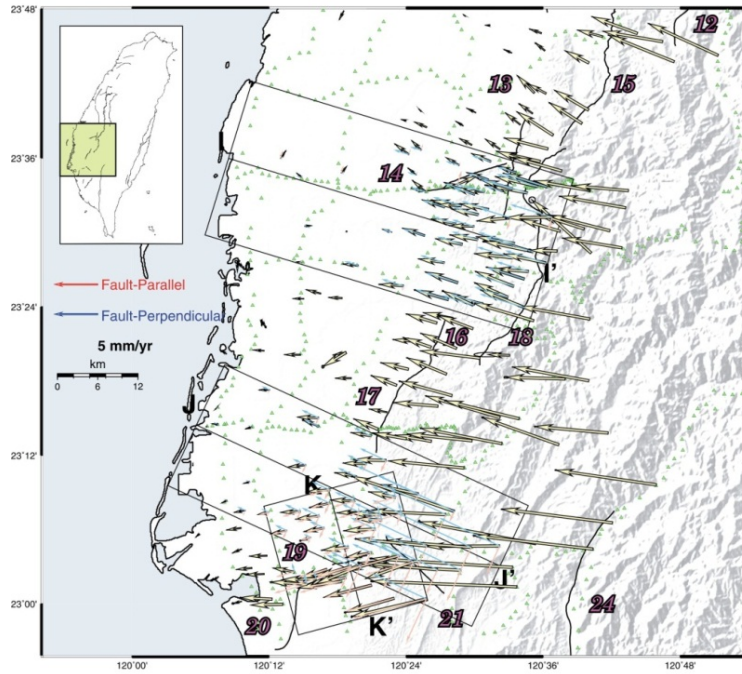


圖 2.88：嘉南地區 I 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層：12 為大茅埔-雙冬斷層，13 為九芎坑斷層，14 為梅山斷層，15 為大尖山斷層，16 為木屐寮斷層，17 為六甲斷層，18 為觸口斷層，19 為新化斷層，20 為後甲里，21 為左鎮斷層，24 為潮州斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小，其分布自大茅埔-雙冬斷層以南至觸口斷層以南呈現順時針旋轉的型態，自木屐寮斷層以北至後甲里斷層以南呈現逆時針旋轉的型態。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。

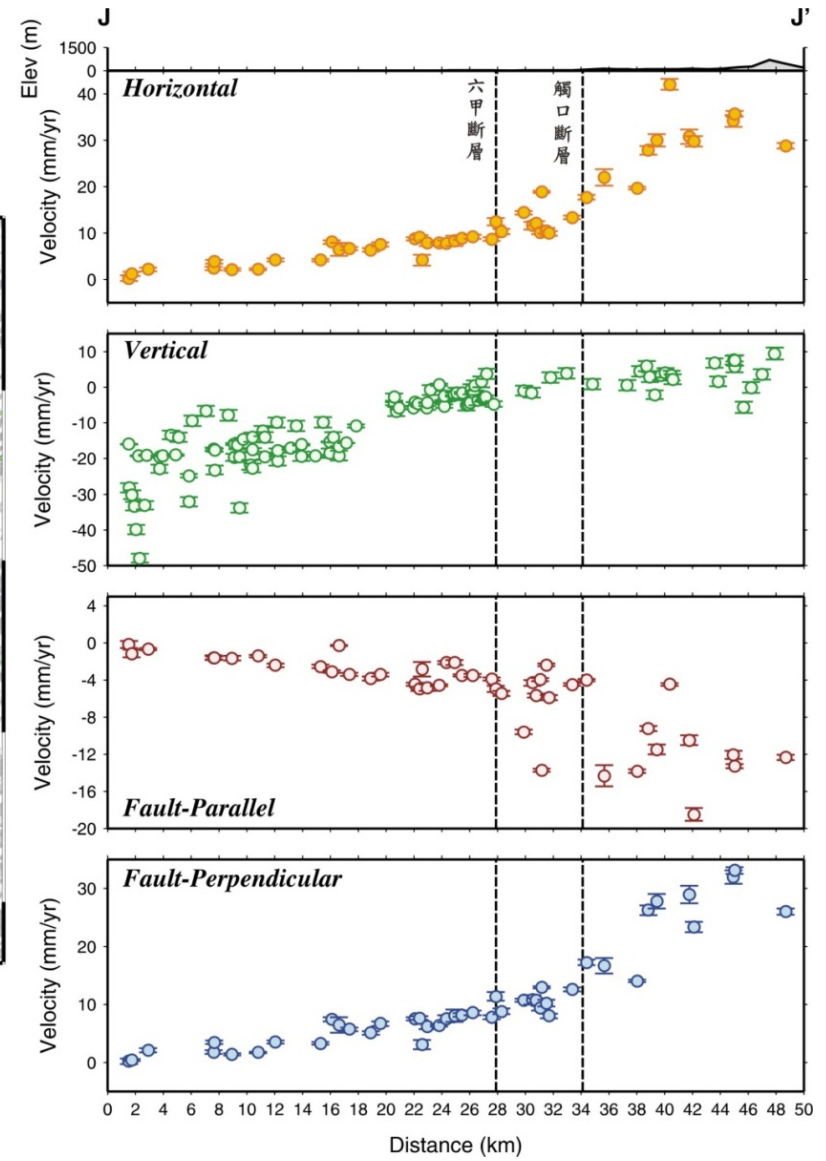
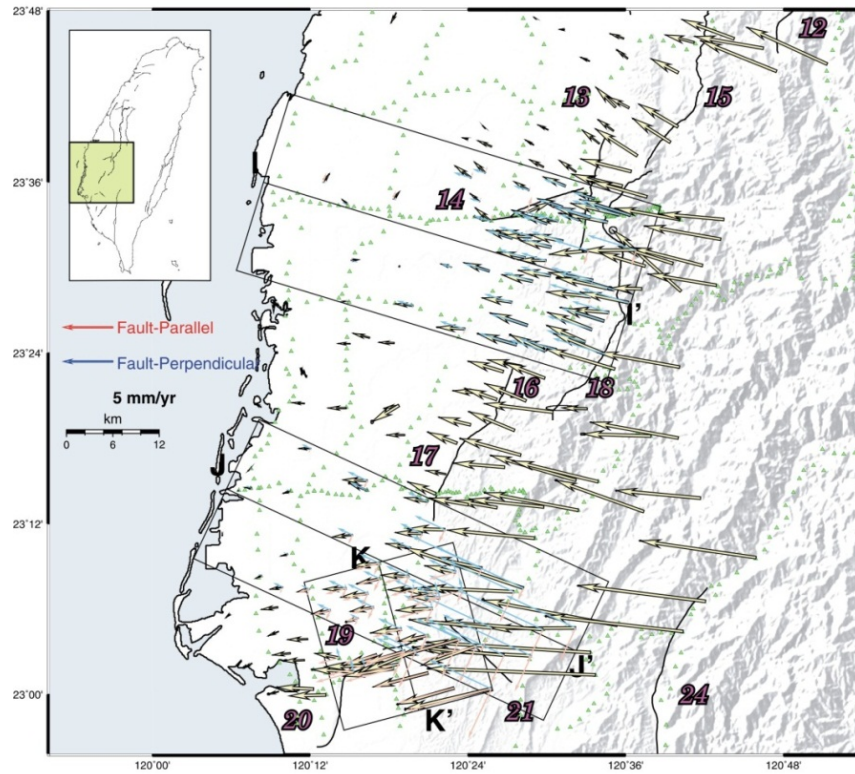


圖 2.89：嘉南地區 J 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.88 所示。

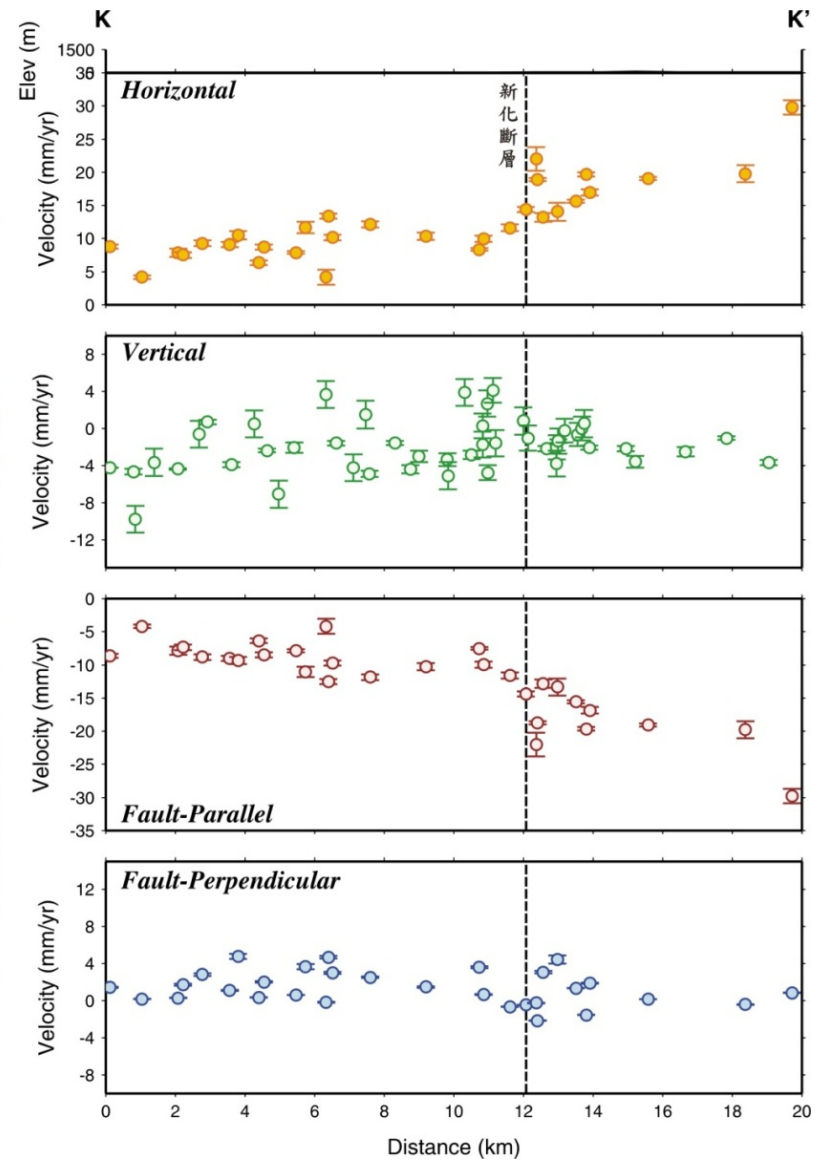
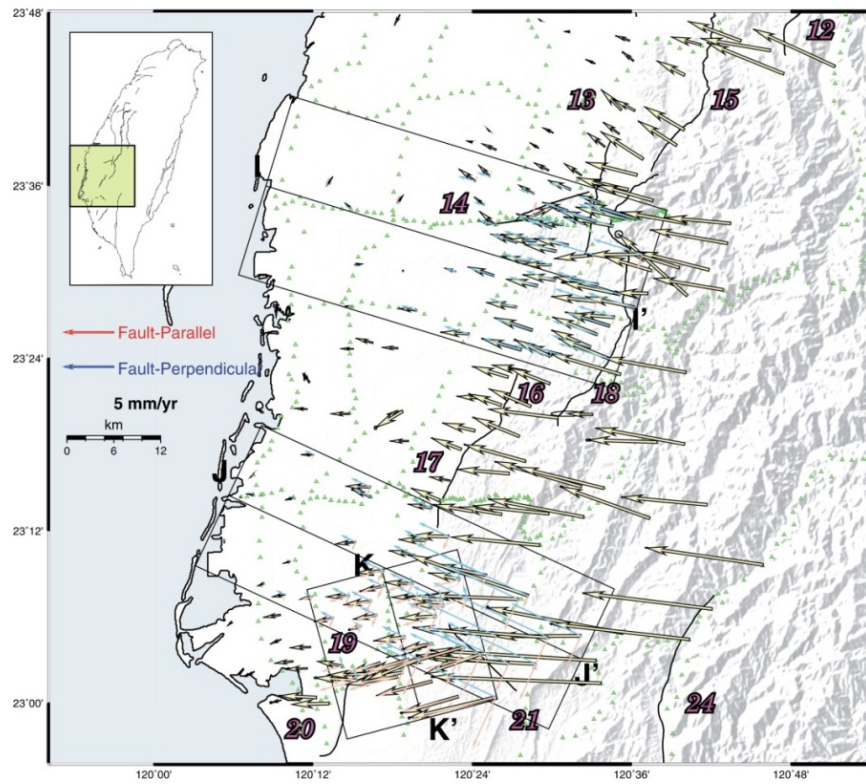


圖 2.90：嘉南地區 K 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.88 所示。

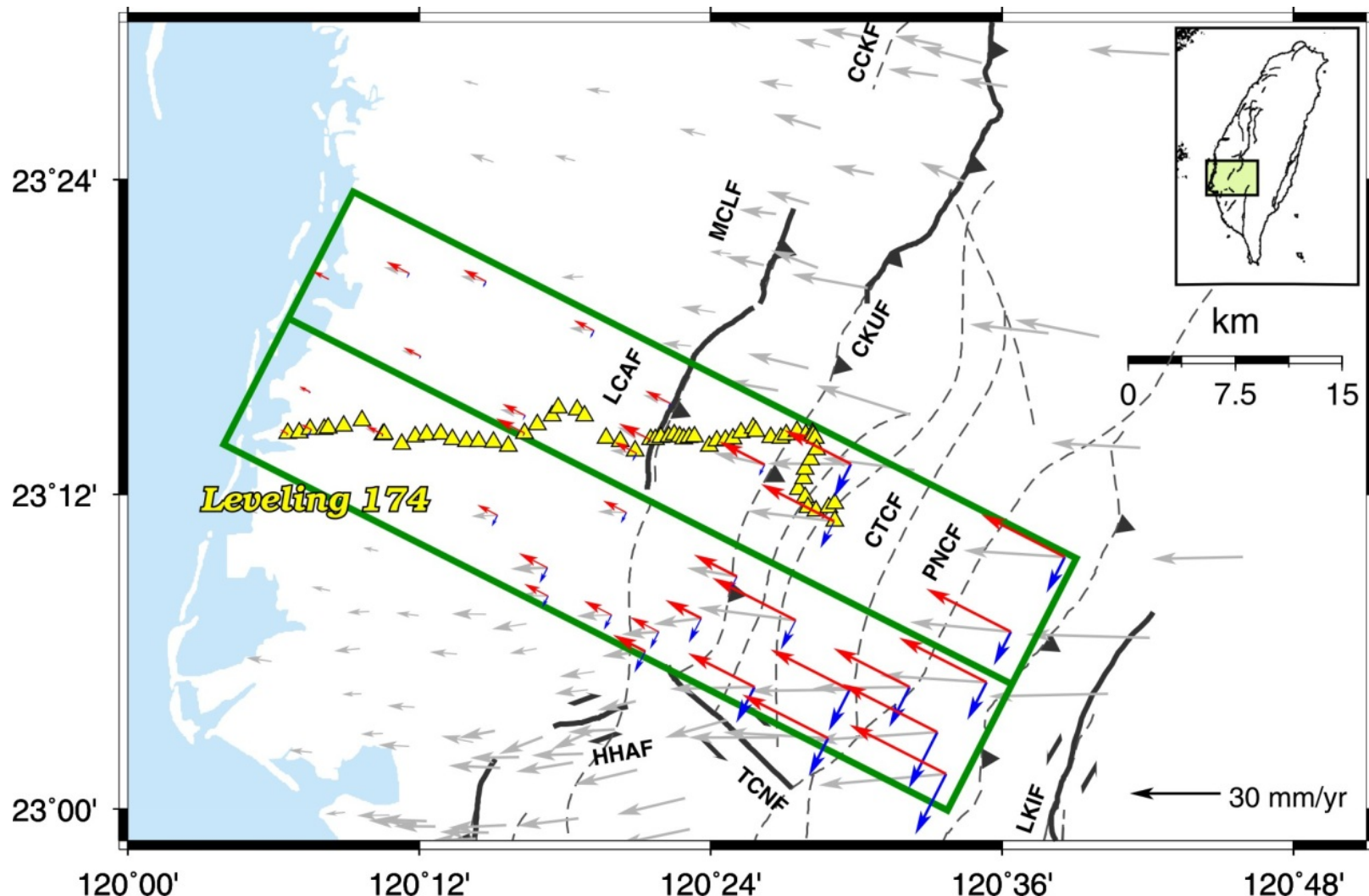


圖 2.91：嘉南地區 GPS 水平速度場與縣 174_北門至楠西水準測線分布圖。灰色箭頭為 GPS 水平速度向量，紅色箭頭為剖面中水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色箭頭為剖面中水平速度向量平行斷層走向之分量。黃色三角形為水準點位置。LCAF 為六甲斷層、MCLF 為木屐寮斷層、CKUF 為觸口斷層、CTCF 為竹頭崎斷層、PNCF 為平溪斷層。

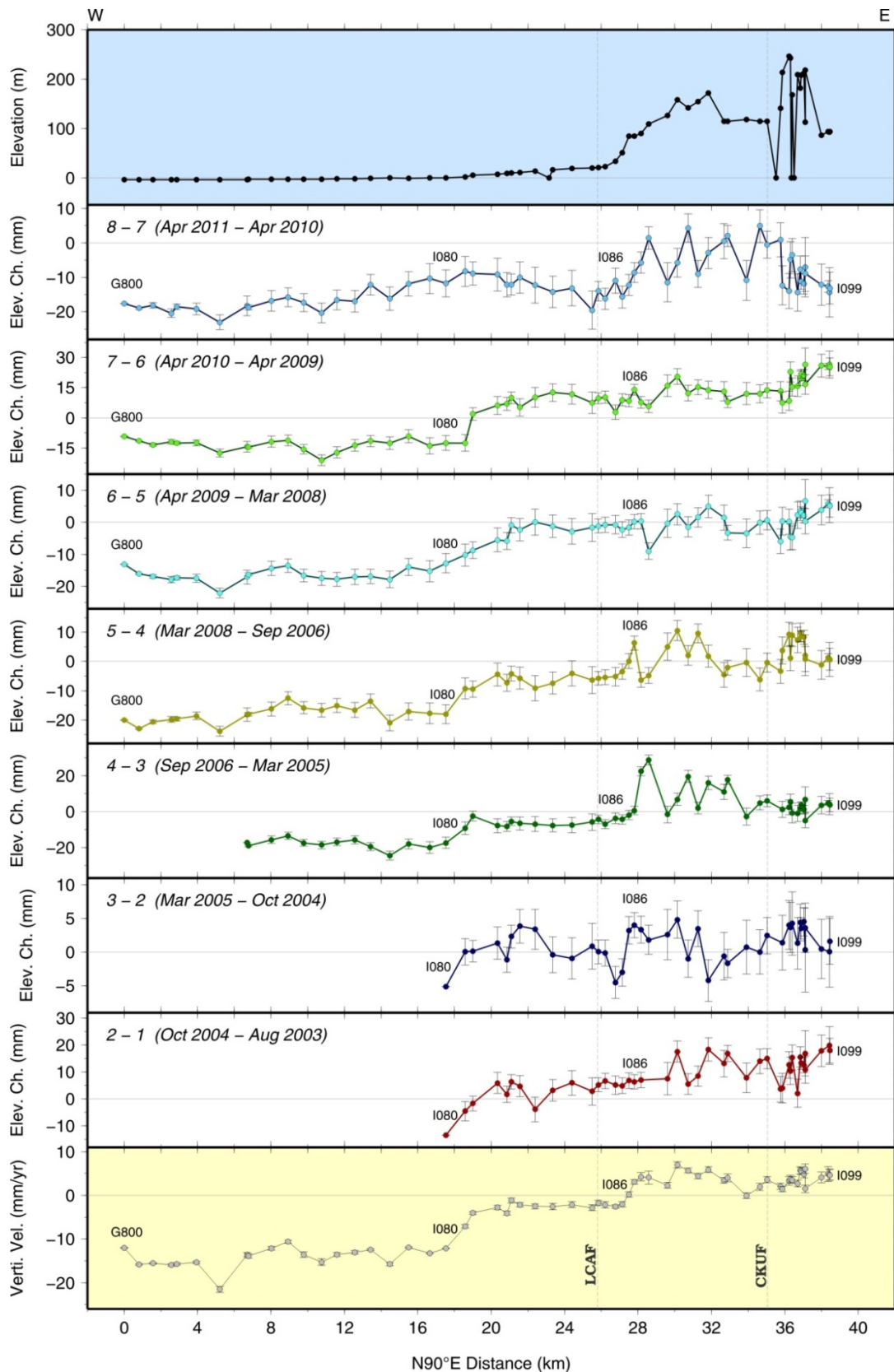


圖 2.92: 縣 174_北門至楠西測線水準與 GPS 垂直速度比較圖。圖例說明如圖 2.91 所示。LCAF 為六甲斷層、CKUF 為觸口斷層。

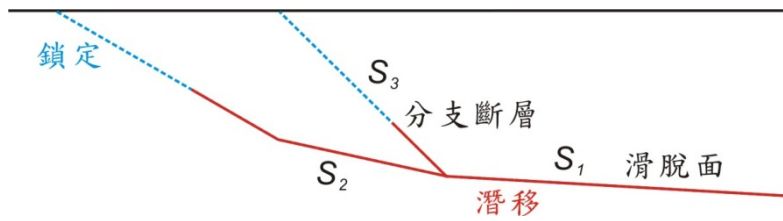


圖 2.93：二維彈性斷層模型示意圖。

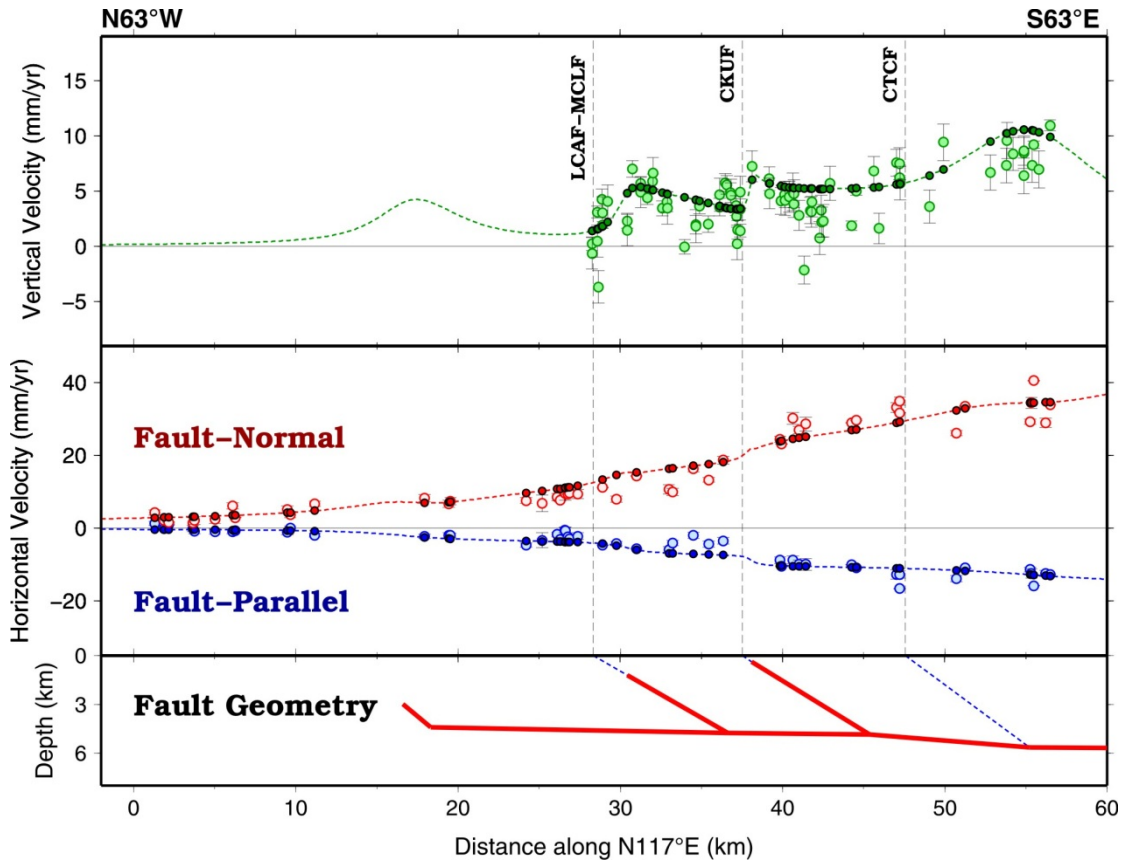


圖 2.94：斷層模擬結果。由上而下分別是 GPS 水平速度分量、GPS 垂直分量、精密水準抬升速率及斷層幾何分布。藍色圓圈為觀測值；紅色虛線為計算值。藍色虛線為斷層鎖定位置，紅色實線為斷層潛移區段。灰色虛線為斷層投影位置。LCAF-MCLF 為六甲-木屐寮斷層、CKUF 為觸口斷層、CTCF 為竹頭崎斷層。

2-4-5 高屏地區變形特性

2-4-5-1 地質背景

世界上主要山脈的構造研究[例如：Tapponnier et al., 1983; Ratschbacher et al., 1991]顯示，板塊間之碰撞擠壓導致山脈發育的同時，也會導致各個地質構造單元沿著一條或數條主要的斷層構造朝著非封閉邊界（free boundary）方向擠出，此即為所謂的構造脫逸（tectonic escape）。在台灣造山帶的研究中，對台灣西南部構造活動之解釋亦採用構造脫逸的概念[Lu and Malavieille, 1994]。於台灣西南部，因持續受到菲律賓板塊與歐亞板塊間西北西方向之碰撞擠壓，及位於被動大陸邊緣之北港高地幾何型貌兩者間的交互作用，導致台灣西南部之物質向西南西方向擠出[Lu and Malavieille, 1994; Hu et al., 1997, 2001; Lu et al., 1998]。Lacombe et al. [2001]與 Hu et al. [2007]進一步指出，位於台灣西南部之脫逸構造可以分解成四個朝南南西或朝南方向移動且近乎剛性的塊體運動。區分這些塊體之主要構造由西向東分別為北北東-南南西走向之變形前緣與旗山斷層，及接近南北走向之高屏斷層與潮州斷層。而依據 1995-2005 年 GPS 速度場之資料分析認為，台灣西南部地區 N140°E 走向之左移鳳山轉換斷層帶與東北-西南走向且具右移分量之龍船-旗山逆衝斷層系統之運動行為，反映此地區近乎東-西方向擠壓與南-北方向伸張之構造脫逸應力環境[Ching et al., 2007; 景國恩等，2008]。

台灣西南部主要是由厚的泥岩古亭坑層所覆蓋，此區域涵蓋了五條主要斷層，由東向西分別為潮州斷層、旗山斷層、龍船斷層、小崗山斷層與後甲里斷層。其中，依據中央地質調查所 2010 年公告之活斷層分類結果指出，旗山斷層為第一類活動斷層，後甲里斷層、小崗山斷層、潮州斷層為第二類活動斷層。以下將分別描述此五條斷層之特性。

後甲里斷層位於台南台地之東側，呈北北東-南南西走向，長度約為 11 公里，林朝榮[1957]首先由台南台地東緣的直線狀崖及該處向東傾斜達 15 度至 30 度的地層，推測此地形並非沙丘風下側常有之陡坡，而是屬於斷層崖。斷層上盤即為台南台地，下盤為大灣低地。Sun [1964]則由航照判識推測後甲里斷層存在於台南台地東緣，為一斷層面向西傾斜之逆衝斷層，斷層全長約 11 公里。此後數十年中，部分學者認為後甲里斷層是一高角度向東傾斜的正斷層[Hsieh, 1972; 陳于高，1993; 郭炫佑，1999; 林啟文等，2000]，因其切過全新世台南層故為一活斷層[吳東錦等，1992; 陳于高，1993; 李元希等，1999]；但亦有對其活

動性存疑者[林啟文等, 2000], 郭炫佑[1999]在台南台地及後甲里斷層進行淺層震測, 認為後甲里斷層為向東高角度傾斜, 且在台南層沉積後應未再活動。經濟部中央地質調查所[張徽正等, 1998]則認為後甲里斷層雖未切過全新世地層, 但可能屬於原生構造成長斷層, 斷層可能再活動的潛勢低, 故將其列為存疑性活斷層。

旗山斷層位於台灣南部, 呈東北走向, 由一個主斷層及多個分支斷層所組成的斷層變形帶, 變形帶寬度約 40-400 公尺之間, 主斷層之變形帶寬度約為 9-30 公尺[陳柏村, 2005]。其斷層長度有 65 km [林啟文等, 2000b]與 30 km [吉田要, 1932; 鳥居敬造, 1933; 耿文溥, 1967 兩種主要的說法。兩者主要的差異在於名為內英斷層之原旗山斷層北段, 與旗山斷層南段之特性是否一致且是否可認定為同一斷層系統。本計畫研究區域所通過之斷層為旗山斷層南段(以下皆簡稱為旗山斷層)。旗山斷層東側為山麓地形, 西側為丘陵地形, 斷層兩側地勢有明顯落差。下盤主要由泥岩組成, 常形成惡地地形; 上盤組成以砂岩、泥岩與礫岩為主, 因此斷層線形主要反映的是岩性之差異。沿著主斷層之斷層跡沿線的地質調查顯示, 旗山斷層主斷面擦痕及斷層帶中破裂面上的擦痕主要為逆衝斷層兼具左移分量, 此調查在緊鄰中寮隧道北出口附近之南勢湖剖面更為顯著[耿文溥, 1967; 陳柏村, 2005]。然而根據 GPS 的分析卻指出, 旗山斷層為具有右移分量之逆衝斷層[Lacombe et al., 2001; Hu et al., 2002; Ching et al., 2007; 景國恩等, 2008]。此外, 旗山斷層西側之古亭坑層中, 分布許多深灰色之泥岩剪裂帶, 且大多與旗山斷層相互平行[陳柏村, 2005]。這些泥岩剪裂帶因側向延伸良好, 距離可超過 2 km, 因此被認為是旗山斷層之分支斷層[陳柏村, 2005]。其中, 位於烏山頂至深水之間, 全長約 3 km 的深水坑斷層[陳柏村, 2005], 其斷層帶主要由數條髮辮狀剪裂帶拼合而組成, 由拖曳褶皺與剪裂帶之擦痕指出, 深水坑斷層為一具逆衝分量之右移斷層。由於此斷層南北兩端皆匯入旗山斷層, 同樣也被認為是旗山斷層向西擴展所形成之分支斷層[陳柏村, 2005]。

龍船斷層為本區域中另外一條重要之構造線, 野外露頭可見斷層泥厚度約 20-30 公尺, 走向呈 N30°-40°E, 推測可能為低角度之逆衝斷層[中華顧問工程司, 1992]。然鄭宏祺[2000]引中油未對外開放報告指出, 斷層面向東傾斜約 70°-80°, 為一東側上升西側下降之高角度逆斷層, 估計其層位落差約為 2500 公尺, 越往北落差越大, 且其斷層傾角也越陡。此外, 本斷層疑似為一沿背斜軸之縱向逆斷層, 故其下盤或潛伏有較上盤為完整之背斜構造[徐慶雲, 1975], 經由震測剖面繪製結果推斷其可能為斷層擴展褶皺作用[鄭宏祺, 2000]。

呈北北東走向且長約 8 公里之小崗山斷層可能為逆衝斷層, 由高雄縣阿蓮鄉南蓮村向南延伸至燕巢鄉瓊林村[Sun, 1964]。小崗山斷層位於大、小崗山台地

的西側，從數值地形圖上可以看到明顯之斷層崖線，但此崖線為長年風化侵蝕後所存留下來的，斷層的確切位置及形態並不明確。前人的研究中，大都從地表地質的證據加以推斷小崗山斷層的位置和形態[Sun, 1964; Hsu and Chang, 1979; 楊貴三, 1986]。另外，Sun [1964]與沈淑敏等[2006]依據航照判釋結果指出，小崗山西側有 5-6 段排列成線形之斷層小崖，東高西低，崖高約 5 公尺，推測為一條向東傾斜的逆斷層。由於大、小崗山台地位於大崗山背斜上[Gong et al., 1996]，而小崗山斷層位於台地的西側，因此斷層的形成和台地的隆起必有其關連性。此一構造關係一般認為和台南台地與後甲里斷層的關係[郭炫佑, 1999]有著異曲同工之妙，推測同為泥貫入作用抬升台地，並伴隨地層的錯動形成斷層。台灣西南部的泥貫入作用是台灣地區獨特的構造作用之一，背斜、泥貫入作用和斷層三者間的連鎖效應，在台灣西南外海的前人研究中有較詳盡的研究。翁群評[2001]根據五條橫過斷層的震測剖面指出，在斷層崖階附近皆出現地層攪動之跡象，推測小崗山斷層為大崗山背斜下之泥貫入體向上抬升，造成不同地層之間的錯動所形成的。由攪動處近地表地層之扭曲情況來看，可推測斷層活動大概以潛移方式發生，且持續至今，留下一崖階。經濟部中央地質調查所[2009]由小崗山斷層附近所鑽取的 4 口岩芯，分析其碳十四年代、古環境與埋藏深度的結果，估算此斷層之長期滑移速率。由東向西之鑽井資料指出，山腳下 1 號井之平均抬升速率為 4.4 ± 0.6 mm/yr；小崗山 1 號井之平均抬升速率為 4.1 ± 0.6 mm/yr；小崗山 2 號井之平均抬升速率為 1.35 ± 0.6 mm/yr；小崗山 3 號井之平均抬升速率為 1.1 ± 0.5 mm/yr。假設主斷層之傾角約 45° ，小崗山斷層之淨滑移速率為 5.7 ± 1.4 mm/yr [經濟部中央地質調查所, 2009]。

潮州斷層為中央山脈至台灣西南部西部麓山帶的分界，從斷層兩側的地層分析結果可以知道於長時間尺度下潮州斷層為一逆斷層，而潮州斷層可分南北段來討論。從地質調查結果可以知道，斷層北段在近地表斷層帶之角度幾近垂直，斷層面之擦痕走向為 $N20^\circ E$ 、傾角為 $76^\circ W$ ，且從擦痕線理來看顯示具有左移之現象[陳文山, 2004]。南段潮州斷層之位置應位於各個扇階最西側崖的前緣，但最東側山與中央山脈連接線的線形崖經常被認為是潮州斷層位置[林朝榮, 1957; Bonilla, 1975; Wang, 1976; 張慧中, 1986]或認為由另一斷層（安坡斷層、賽嘉斷層、三地門斷層）形成之斷層崖[楊貴三, 1986]。另外從重力資料分析，推估斷層向東傾斜，其傾角約為 75° 至 80° [Hsieh, 1970; Chiang, 1971]。從過去 GPS 資料分析也顯示潮州斷層並沒有明顯的走向滑移之特性[沈里俊, 2003]。

2-4-5-2 速度剖面

由 2002 至 2010 年 128 個 GPS 移動站速度場指出，水平速度場於小崗山斷層以東之平均速率約為 66 mm/yr、N270°，往西減至約 15 mm/yr、N259°，呈逆時鐘方向旋轉（圖 2.95）。

為了進一步解析跨斷層速度場之變化形態，我們於研究區域選取南北兩條東西向跨越斷層之速度剖面來進行分析（圖 2.95 至圖 2.98），將水平速度場分解成平行斷層走向與垂直斷層走向分量來進行討論。

從 L 之速度剖面（圖 2.95）可以發現在後甲里斷層以東的水平速度場與並無太大變化，但向東跨過後甲里斷層後，水平速度場之斜率有明顯變大之趨勢。平行斷層速度分量也有相同之趨勢，於斷層兩側約有 7 mm/yr 之擠壓量。整個剖面顯示此地區於後甲里斷層和龍船斷層間有著約 14 mm/yr 之右移分量與約 15 mm/yr 之縮短量。另外，垂直速度場在龍船斷層附近達到最大值約為 25 mm/yr，而在後甲里斷層附近之抬升量約為 3 mm/yr，往西於沿海地區則為沈陷情形。

就 M1 速度剖面而言（圖 2.96），不論是平行或是垂直小崗山斷層走向之速度分量皆顯示，跨越此斷層並沒有顯著之速度差異，然而於小崗山斷層與旗山斷層之間，我們可以觀察到平行斷層走向的右移分量逐漸增加，差異量可達 13 mm/yr；而垂直斷層走向速度分量（擠壓分量）亦逐漸增加，增加量達 13 mm/yr。當小崗山斷層與旗山斷層間之水平速度分量之增加，垂直速度場之量值也隨著增加。此外，我們也注意到當水平速度分量之梯度發生變化時，垂直速度場也開始下降。

在 M2 速度剖面中（圖 2.97），雖然整個剖面顯示此地區具有約 20 mm/yr 之右移分量與約 25 mm/yr 之縮短量，然而，不論是平行或是垂直旗山斷層走向之速度分量皆顯示，跨越旗山斷層並沒有顯著之速度差異。不過我們同時注意到，雖然最大抬升速率主要集中在投影距離約 8-12 km 處，但是在旗山斷層東側投影距離約 12-23 km 間仍有約 5 mm/yr 之抬升速率。

另外從 N 速度剖面中（圖 2.98），我們可以發現此區域不論在垂直或是水平速度分量，於跨越朝洲斷層處幾無速度量之差異。而在垂直速度場中，在朝洲斷層以東有著約 5 mm/yr 之抬升量，但在斷層以西則為沈陷情形，最大之沈陷量約為 20 mm/yr，出現在剖面投影距離約 1 至 4 km 處。

2-4-5-3 高屏地區泥岩區現今地殼變形特性

根據 1995 至 2005 年台灣西南部 72 個 GPS 測站相對於澎湖白沙之水平速

度場分析顯示，此地區由東往西沿著 246°到 265°之方位角由 42 mm/yr 到 13 mm/yr，呈逆時鐘方向旋轉[Ching et al., 2007]。此速度場在空間中的變化型態指出，旗山斷層為一主要之邊界斷層，將台灣西南部區分為西翼之變形區域及東翼近乎剛性之塊體。旗山斷層以西之變形區呈現 $1.07 \pm 0.17 \mu\text{strain/yr}$ ，方位 N103°E 之縮短應變， $1.54 \pm 0.41 \mu\text{strain/yr}$ ，方向 N66°E 之右剪應變，及順時針方向 $19.8^\circ \pm 7.0^\circ /\text{Myr}$ 之旋轉量[Ching et al., 2007]。透過平行東北-西南斷層走向與垂直東北-西南斷層走向之水平速度場分量之分析結果顯示，跨小崗山斷層與旗山斷層有約 10 mm/yr 之右移分量及約 17 mm/yr 的縮短量，此結果說明小崗山斷層與旗山斷層系統為一具右移分量之逆衝斷層系統。

景國恩等[2008]分析 GPS 觀測資料之結果指出，台灣西南部脫逸構造並非單純由北北東-南南西走向和接近南北走向之斷層所控制，相反地，N140°E 走向之鳳山左移轉換斷層帶（FTFZ）在脫逸構造的發育上扮演著重要的角色。即跨斷層約 10 mm/yr 之左移位移量，會由東向西改變台灣西南部地區之速度向量，由朝西逆時針旋轉至朝西南西平行構造脫逸之方向。而 N140°E 走向之左移鳳山轉換斷層帶（FTFZ）與東北-西南走向且具右移分量之龍船-旗山逆衝斷層系統之運動行為，反映此地區近乎東-西方向擠壓與南-北方向伸張之應力環境[Ching et al., 2007]。

2-4-5-3-1 大地測量資料分析

本研究採用之大地測量觀測資料分為 GPS 及精密水準等 2 部分，以下個別分述：

GPS 觀測資料部分：本研究所使用的 GPS 資料為 2002 年至 2010 年地調所 128 個 GPS 重複觀測站資料（圖 2.99）。自 1995 年起，地調所於台灣西南部地區佈設 GPS 重複觀測站及連續觀測站。GPS 重複觀測站之施測約為每年 1 次，每個測段會同時測量 3 至 10 個測站，而每個測段每一測站會接收衛星訊號約 6 至 14 個小時。衛星訊號之接收頻率為 15 秒一筆，衛星接收之仰角大於 15°。本研究使用之資料時間段為 2002 年至 2010 年間的 GPS 觀測資料，利用一般通用之 GPS 解算軟體 Bernese v.5.0 進行計算與網形平差。各測站座標之水平分量誤差為 2 至 5 mm；而垂直分量上之誤差則為 10 至 20 mm。

精密水準觀測資料部分：本研究使用兩種精密水準資料（圖 2.101），分別為 90 個點位間距約為 2 km 之內政部一等一級與一等二級水準資料，資料時間段為 2000 至 2008 年，由 Ching et al. [2011]提供，以及地調所點位間距約為 1 km 之精密水準路線資料。地質調查所之精密水準測量使用 DiNi12 電子水準儀。測

量作業規範及資料處理乃依據現行「一等水準測量作業規範」[內政部，2001]實施。地調所於本研究區域一共設立兩條水準路線，其一為通過大崗山北側長度約 91 公里之路竹至茂林水準路線，此路線在 2004 年至 2010 年共經過 6 次的重複測量，另一條為通過大崗山南側長度約 50 公里之岡山至安坡路線，此測線在 2002 到 2010 年間經歷 7 次的重複測量。

2-4-5-4 討論與結論

在本研究區域介於小崗山斷層與旗山斷層之間，由 2002 年至 2010 年 GPS 水平速度場可見顯著的速度梯度變化（圖 2.100），由東約 63 mm/yr、方位角 N272°，向西減至 26 mm/yr、方位角 N266°（圖 2.100），此逆時鐘方向旋轉之現象與台灣西南部之脫逸構造是相呼應的 [Lacombe et al., 2001; Ching et al., 2007]。

從過去文獻可以知道，逆斷層在活動時，會有水平方向位移伴隨著明顯的抬升情形，依據 2000 年至 2010 年之水準資料分析顯示，此區域同時具有顯著之抬升速率，最大之抬升速率約為 18 mm/yr，出現在小崗山和旗山斷層之間（圖 2.101 至圖 2.103），但在水平速度場中相對應之位置卻無梯度變化之記錄（圖 2.102 至圖 2.103）。進一步之速度剖面分析可見，跨越小崗山斷層並沒有顯著之速度差異（圖 2.102 至圖 2.103）。在小崗山斷層與旗山斷層之間，卻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（圖 2.102 至圖 2.103）。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。而跨越旗山斷層北段，則可觀察到約 12 mm/yr 之縮短量（圖 2.102 至圖 2.103）。由美國加州聖安德列斯斷層與台東池上斷層的研究指出，出露地表之潛移斷層可由水平速度場看到顯著的水平速度變化，但如果斷層淺部是潛移狀態，只在斷層深部有鎖定之現象時，加上尚不確定可能有潛移作用之深度，故難以從地表上觀測到的水平速度變化來判斷是否為潛移斷層，我們需要更多的地質證據和研究來推論此區是否有潛移斷層之存在。

結合速度場與速度剖面分析結果得知，本研究區域之主要變形帶位於小崗山斷層與旗山斷層之間。此變形帶之變形量可能連續分布於此區域，或是集中於數條未被公告之活動斷層上，像是古亭坑斷層、龍船斷層、平溪斷層等，抑或可能受到其他地質構造活動之影響。此外，我們也注意到跨越旗山斷層有顯著之水平縮短量卻無明顯之垂直抬升量，對於此現象目前暫時並無較好的解釋，需要更進一步的研究來了解。

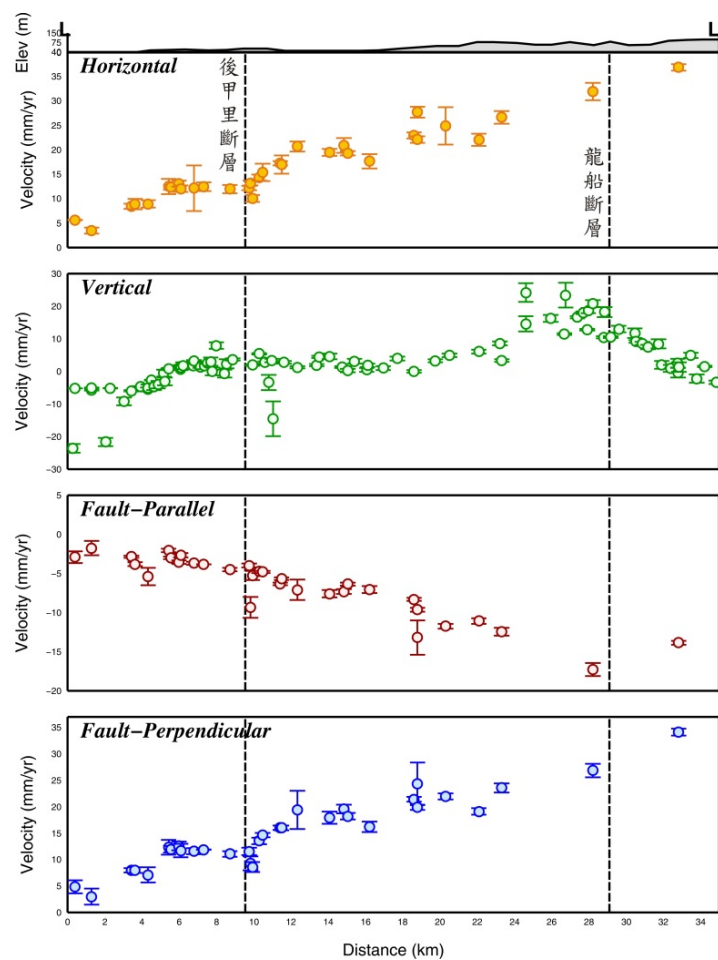
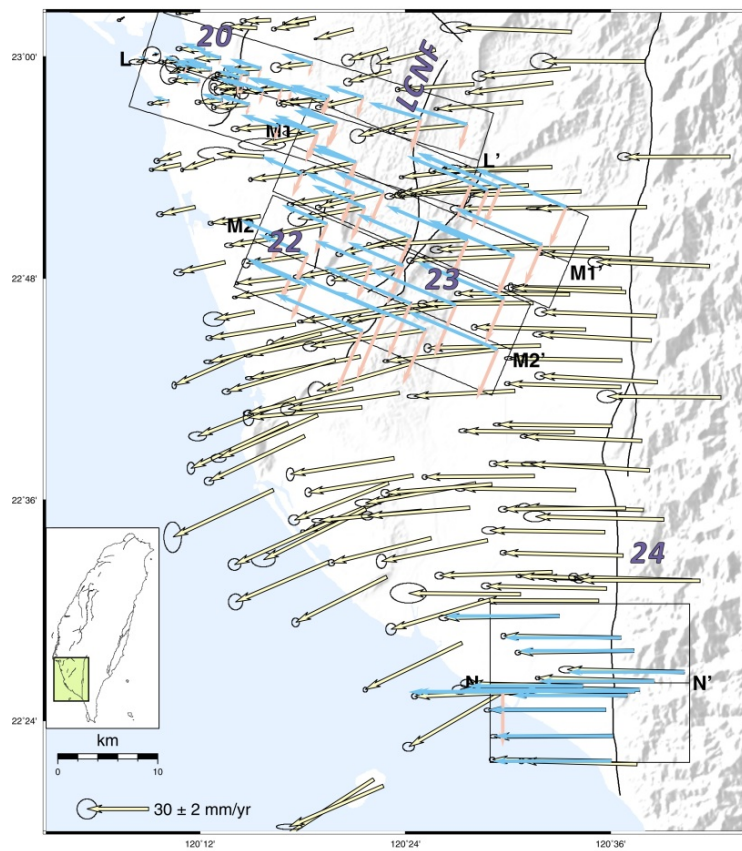


圖 2.95：西南地區 L 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層。20 為後甲里斷層，22 為小崗山斷層，23 為旗山斷層，24 為潮州斷層，LCNF 為龍船斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小，其分布自東向西呈現逆時針旋轉的型態。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。

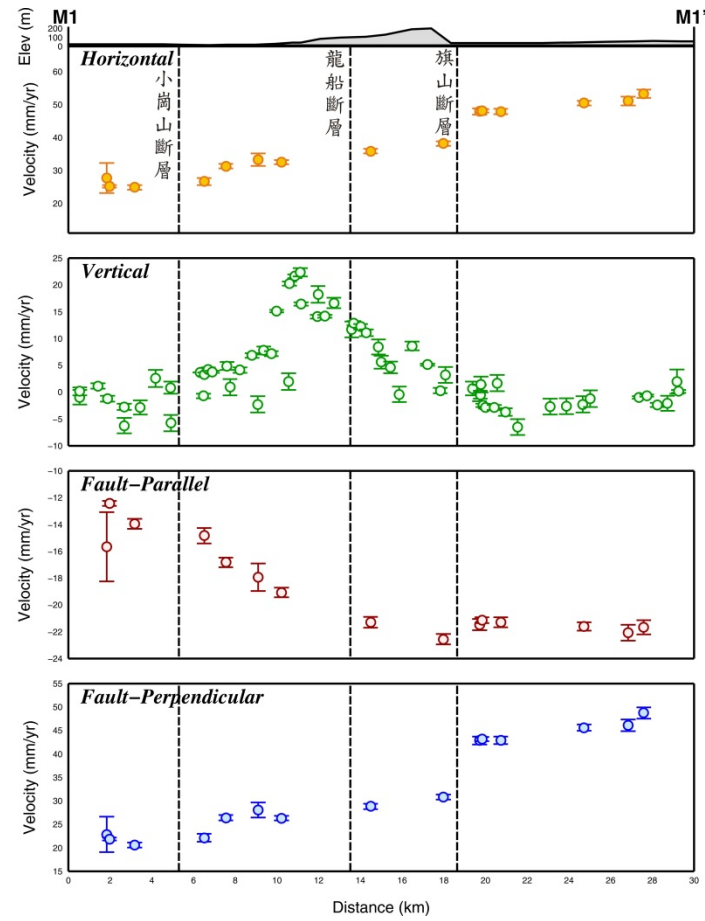
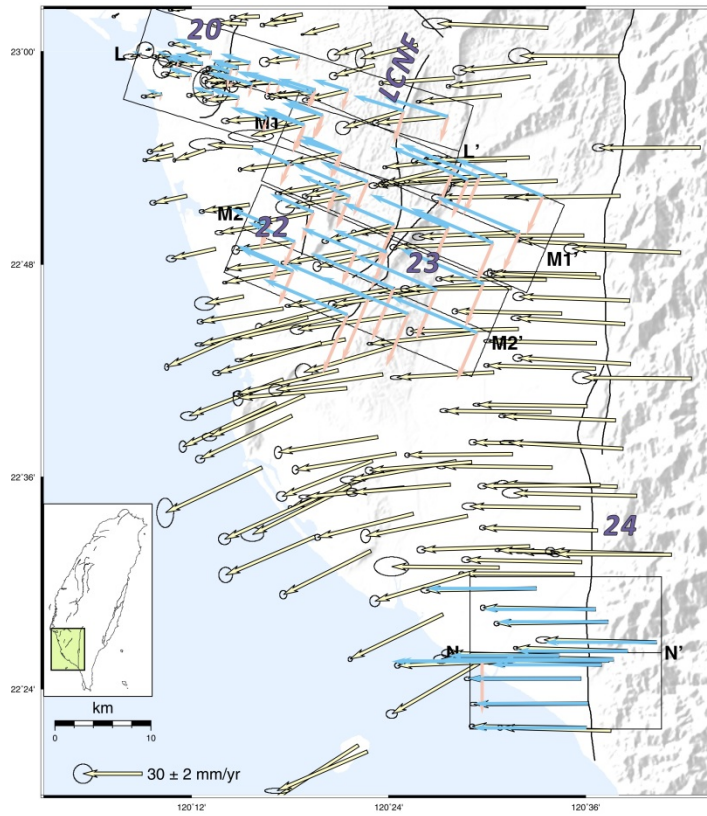


圖 2.96：西南地區 M1 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.95 所示。

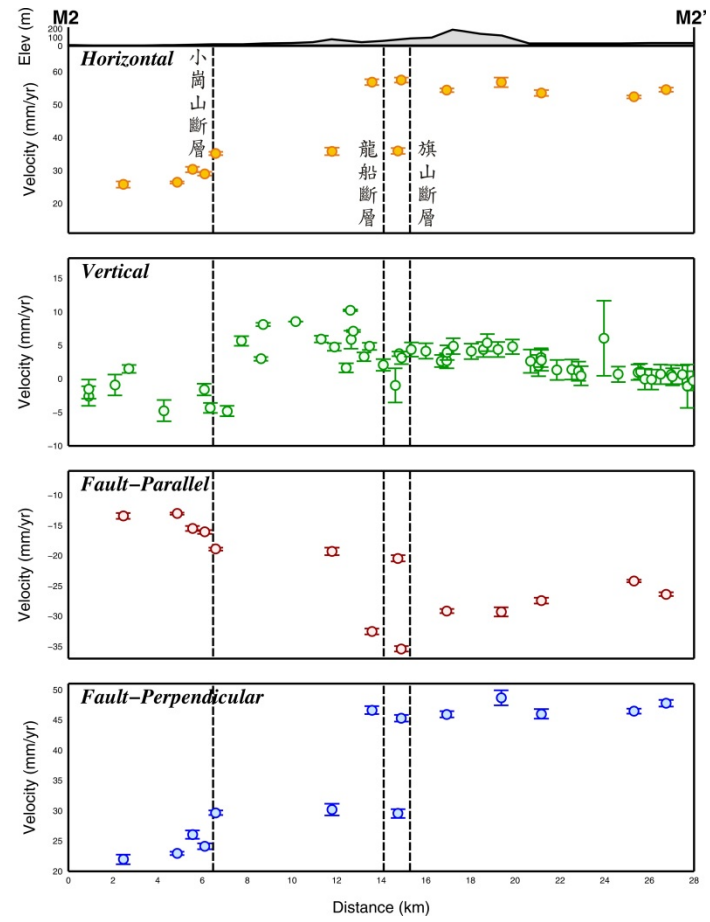
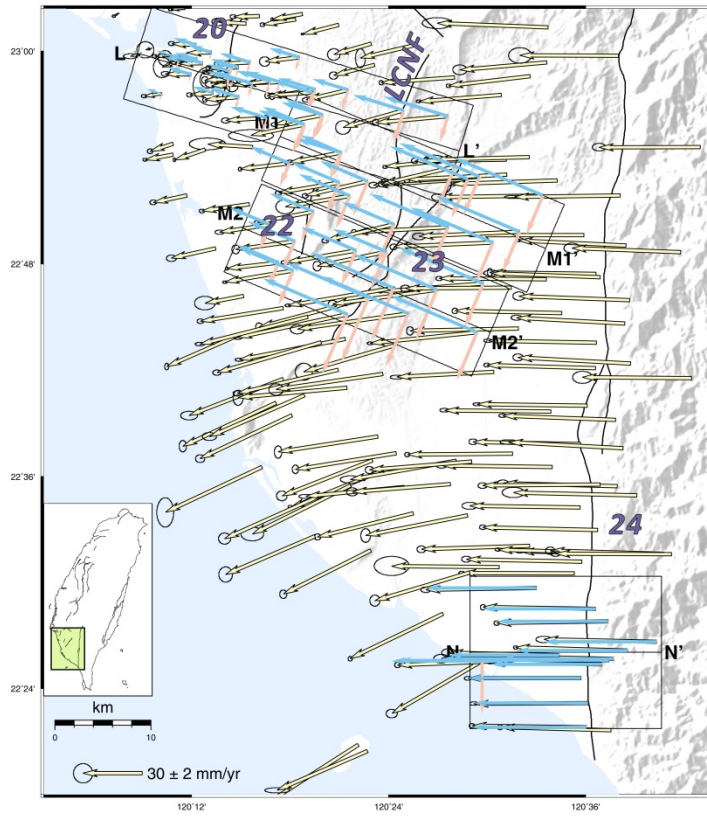


圖 2.97：西南地區 M2 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.95 所示。

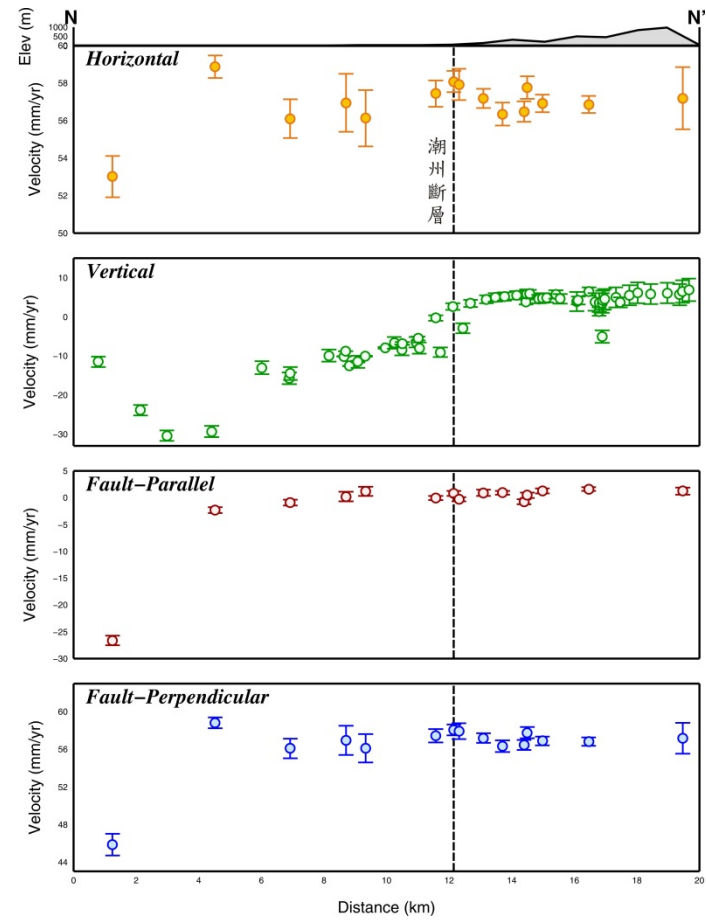
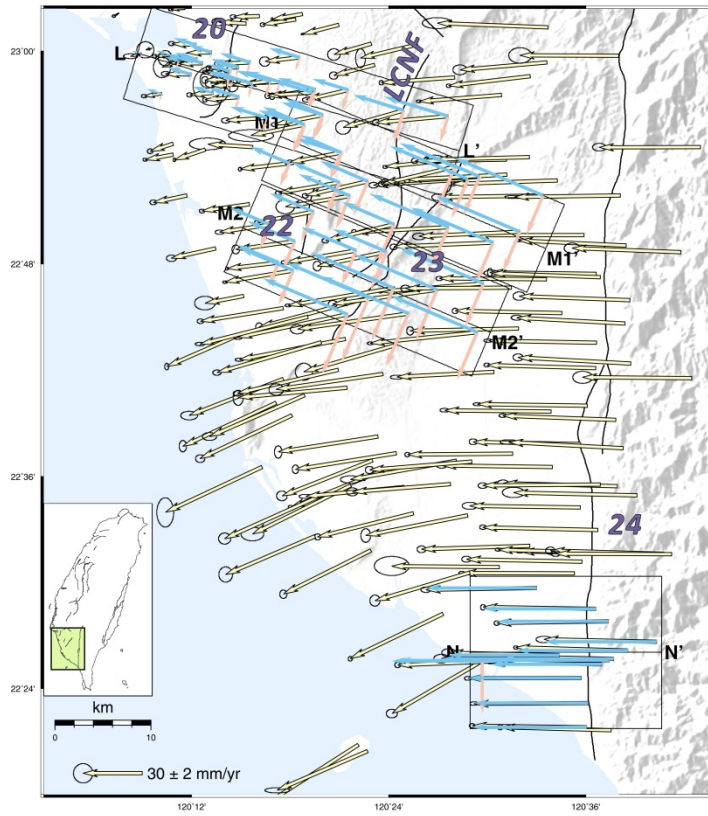


圖 2.98：西南地區 N 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.95 所示。

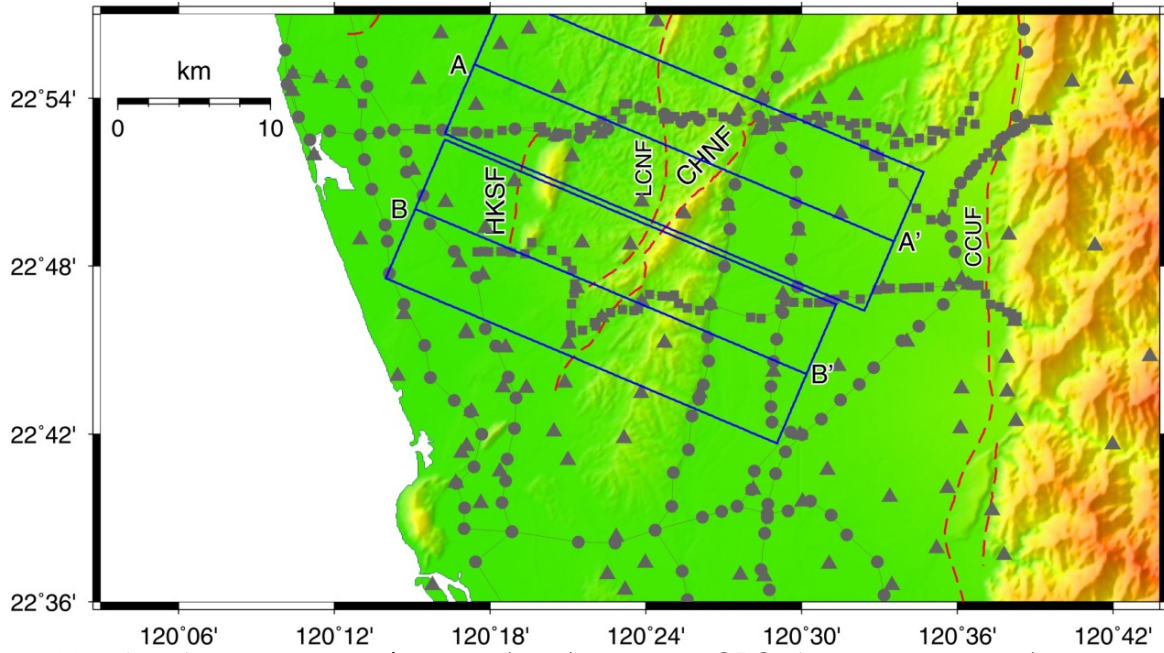


圖 2.99：本研究使用之測站分布圖。三角形為地調所之 GPS 重複觀測站；圓圈為內政部一級、二級水準路線[Ching et al., 2011]；方形為地調所水準路線[饒瑞鈞等, 2010]。紅色虛線為地調所公告之活動斷層位置。CCUF：潮州斷層；CHNF：旗山斷層；HKSF：小崗山斷層。藍色方框標示速度剖面之位置。

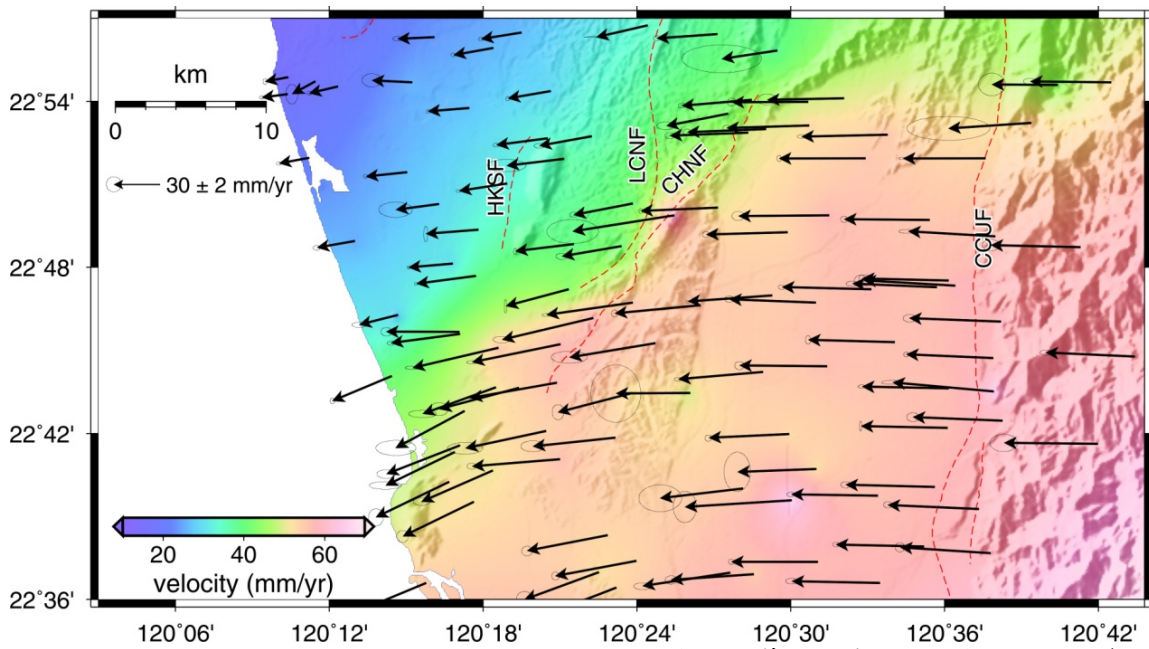


圖 2.100：相對於澎湖白沙測站 S01R 之 GPS 水平速度場。箭頭代表 GPS 重複觀測站資料推求之位移向量，95%可信區間之誤差橢圓位於各位移向量頂端。黑色箭頭為地調所之 GPS 速度場。

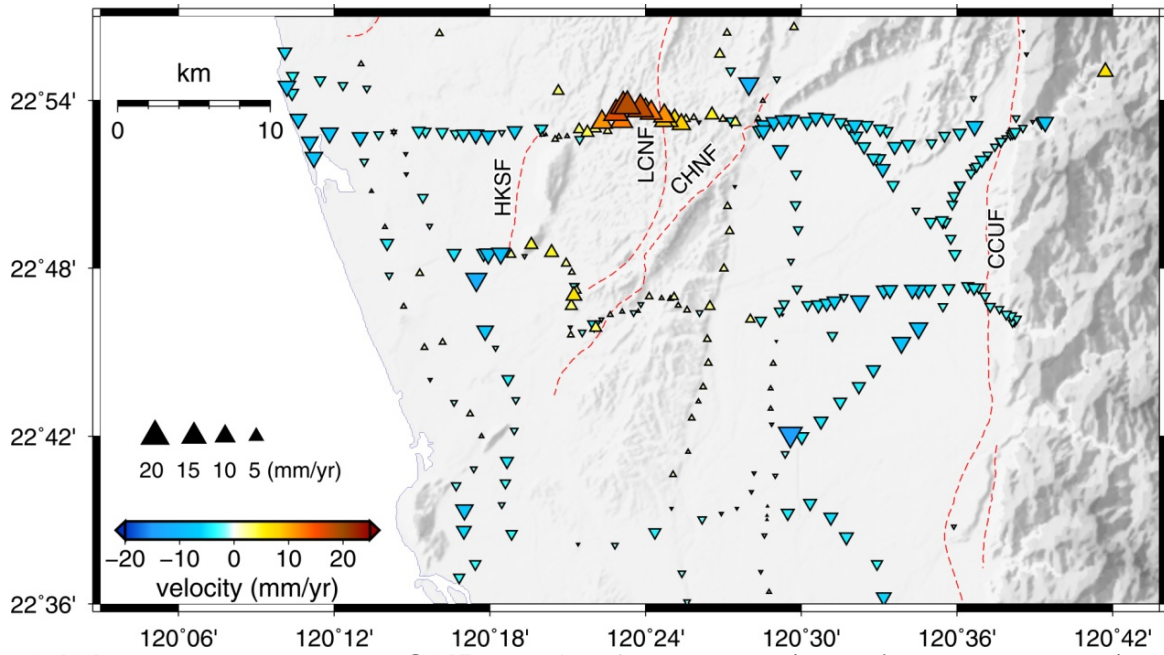


圖 2.101：相對於澎湖白沙測站 S01R 之垂直速度場。暖色三角形代表抬升，冷色反三角形代表下陷。

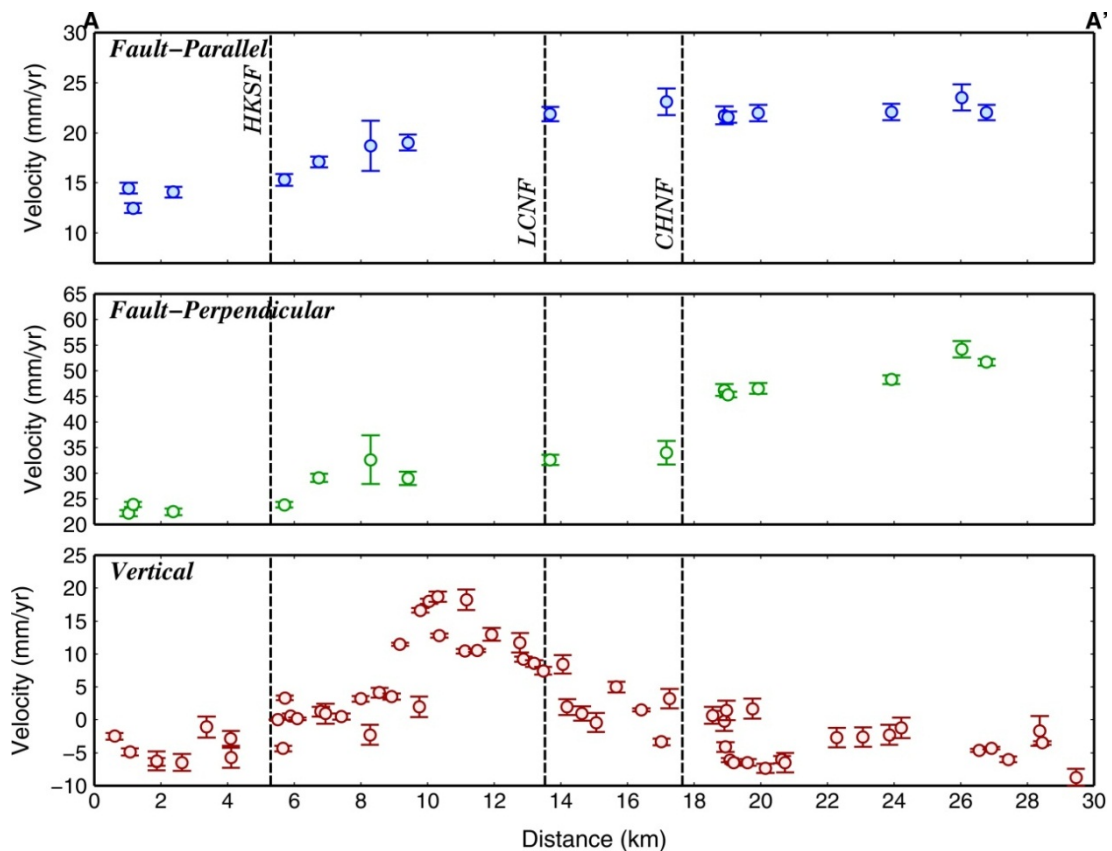


圖 2.102：AA'速度剖面圖。最上方為平行斷層走向之速度分量，向東北為正；中間為垂直斷層走向之速度分量，向西北為正；下方為垂直速度場。黑色虛線標示斷層位置。x 軸為沿 AA'剖面之投影距離，剖面位置標示於圖 2.99。

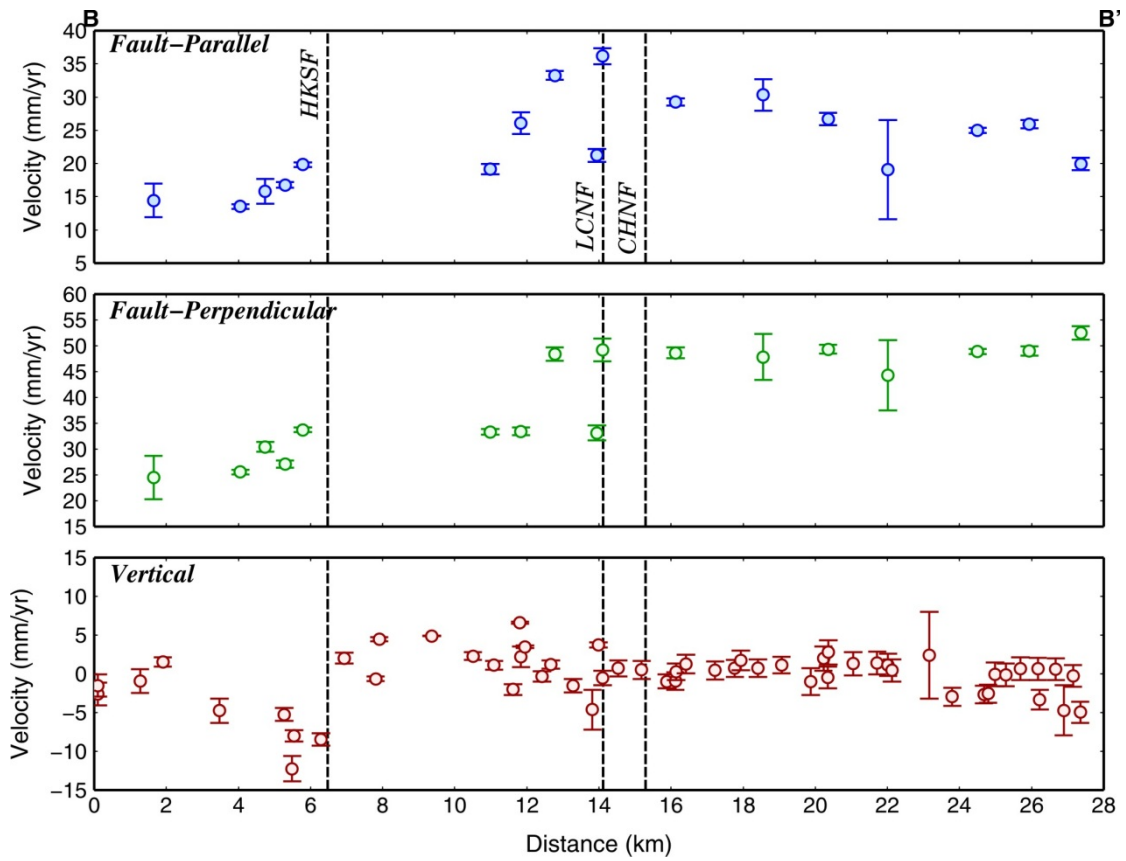


圖 2.103：沿 BB'速度剖面圖。最上方為平行斷層走向之速度分量，向東北為正，中間為垂直斷層走向之速度分量，向西北為正；下方為垂直速度場。黑色虛線標示斷層位置。x 軸為沿 BB'剖面之投影距離，剖面位置標示於圖 2.99。

2-4-6 恆春半島地區變形特性

2-4-6-1 地質背景

自 1900 年有地震觀測紀錄以來，恆春半島的發震頻率總較台灣其他地區來得低。根據 Cheng and Yeh [1989] 及中央研究院台灣寬頻地震觀測網 (<http://bats.earth.sinica.edu.tw/>) 資料，在 1900 年至 2005 年所發生規模大於 6 之地震中，有 1955 年 4 月 M 6.8、1959 年 8 月 M 7.1、M 6.1 與同年 9 月 M 6.5 的地震出現於恆春附近，然其震央位置均在恆春東方 30 至 100 公里的海面上，與恆春斷層並無關連性。此結果反映，恆春斷層系統的地震重複週期可能相當長，或是停止活動。

此地區主要為恆春半島西側之斷層。恆春斷層可能為逆移斷層，呈北北西走向。斷層位於恆春谷地，由海口至馬鞍山，長約 16 公里。該斷層之長期滑移速率平均為~42.1 mm/yr，其滑移向量指示斷層之運動型態為具有左移分量之逆衝斷層。比對此地相當低之地震活動性，可知此結果仍需進一步研究。

林朝榮[1957]從地形上直線形的明顯山麓線認為恆春斷層的北端可連接潮州斷層。在經濟部中央地質調查所的調查結果中[林啟文等，2000b]，因恆春斷層的活動年代不明確，而將其列為存疑性活動斷層。然而楊貴三[1986]經由各種斷層地形特徵，推測恆春斷層是由尖山向南南東方向延伸，經恆春東方折向南穿過馬鞍山入海，其長度約 16 公里，此與詹新甫[1974]所指出斷層南段之位置通過馬鞍山東側，斷層為 N22°W 走向的高角度逆斷層，斷層面向東傾斜約 70°之說法一致。又 Bonilla [1975]根據沿岸珊瑚礁的高度及碳十四定年法，算出斷層跡東側和西側的上升率沒有顯著的差別，認為此斷層在全新世以來並不活躍。然而陳于高[1993]利用珊瑚或灘相沈積之化石、碳十四定年法及海階相對海水面之高度來計算地殼垂直變動速率，顯示在全新世後期恆春斷層兩側都在上升，而認為恆春斷層仍十分活躍。分析 GPS 及精密水準測量資料分析恆春半島的地形變形，認為恆春斷層兩側位移量與以往的資料比較顯示，恆春半島的位移型態在過去十年並未有明顯的改變[陳建良等，2005；楊佳勳等，2008]；由水準測量結果顯示，恆春斷層上盤的抬升速率雖未明顯大於下盤，但恆春西台地北段相對於恆春半島整體的抬升速率大於 10 公厘，顯示恆春西台地的傾斜作用仍持續進行中，研判在恆春半島西側海域中應存在一逆移斷層，造成恆春西台地的傾斜，以及恆春谷地的相對沉陷[陳建良等，2005]。

楊貴山[1986]由直線狀山麓、7 個三角切面、與河流流向直交的數段斷層小崖，龍鑾潭（可能為斷層池），以及馬鞍山中央有東側較高的直線狀谷等斷層地形特徵，推測本斷層是由尖山向南南東延伸，經恆春東方折向南穿過馬鞍山入海。陳于高[1993]利用珊瑚或灘相沈積之化石來計算地殼垂直變動速率，並利用碳十四定年法及海階相對海水面之高度推估上升速率，顯示在全新世後期恆春斷層兩側都在上升，因而認為恆春斷層

仍十分活躍。

2-4-6-2 速度剖面

恆春半島地區之 GPS 及精密水準點位分布及跨斷層速度剖面如圖 2.104 所示。其中平面速度場包含 GPS 移動站及連續站資料、垂直速度場包含 GPS 連續站、地調所及內政部之精密水準測線資料。

O 剖面（圖 2.104），此剖面由西向東橫跨恆春斷層，剖面走向為 $N73^{\circ}E$ ；其水平速度場，剖面 2.4km 處速度量為 58.31 mm/yr 向東到剖面 15.7 km 速度量漸漸減少到 52.93 mm/yr；垂直速度場，在剖面位置 5.85 km 處，速度量平均為 -10.33 mm/yr，向東到剖面位置 14.9 km 其速度量增加至 0.15 mm/yr；平行斷層走向之速度量，在剖面位置 2.4 km 處，其剖面速度量為 -18.30 mm/yr，向東到剖面位置 15.7 km 其速度量減少至 -31.27 mm/yr；垂直斷層走向之速度量則由剖面 2.4 km 處之 -55.37 mm/yr 向東到剖面 15.5 km 增加到 -40.09 mm/yr。

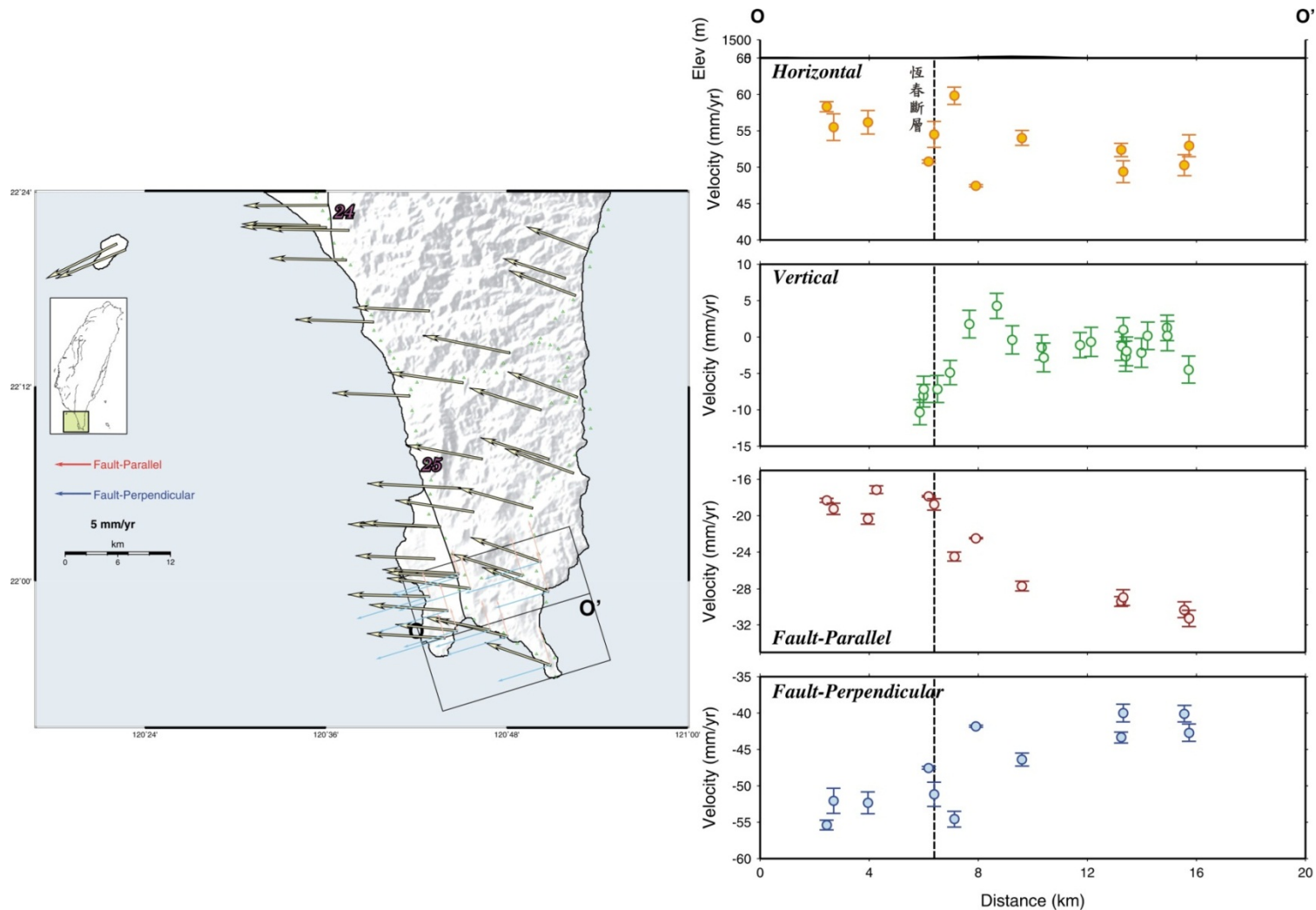


圖 2.104：恆春半島地區 O 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層：24 為潮州斷層，25 為恆春斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小，其分布自潮州斷層以南至恆春斷層以南呈現逆時針旋轉的型態。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

2-4-7 東部地區變形特性

2-4-7-1 地質背景

台灣是歐亞板塊與菲律賓海板塊自過去數百萬年來相互擠壓碰撞而成的產物[Ho, 1988; Teng, 1990]，而台灣東部地區之花東縱谷則是世界上已知相當活躍的板塊縫合帶[Angelier et al., 1997]，以東為屬於菲律賓海板塊的呂宋火山島弧（海岸山脈），以西則為屬於歐亞板塊的中央山脈。在花東縱谷地區最主要的活動構造為延著縱谷東測分佈且向東傾斜之縱谷斷層，縱谷斷層是台灣現今最活躍的斷層，該斷層具有約 20-50 mm/yr 的快速斜向滑移速率[Angelier et al., 2000]，導致斷層東側（上盤）海岸山脈的快速隆升。依據地調所公告之斷層分佈[林啟文等，2000b]，縱谷斷層自北而南大致是由七條斷層所組成，分別是米崙斷層、月眉斷層、玉里斷層、池上斷層、奇美斷層、鹿野斷層及利吉斷層。

米崙斷層[Hsu, 1956]，又稱為花蓮斷層[林朝榮，1962]或美崙斷層[楊貴三，1986]，為 1951 年花蓮外海地震所造成之地表破裂，其分佈可延伸至花蓮北側外海。故米崙斷層位於花東縱谷北端、米崙台地西側邊界，在陸地上的分佈北起七星潭海岸、南至花蓮市美崙山西南側，向南延伸到了花蓮市區內，斷層則逐漸趨於不明顯，陸地上全長大約 8 km。根據海底地形及震測剖面資料，米崙斷層持續以北北東走向延伸入海[何邦碩，1974]。而依據地調所之地球物理資料與地形判釋顯示米崙斷層線延著地形坡度變化最大的邊緣發展，斷層面東傾約 60-70°。綜合 1951 年地震地表破裂與此斷層的長期活動位移型態來看，米崙斷層是以左移滑移為主、逆衝為輔，呈北偏東 30°走向。米崙台地的長期抬升速率約 4.5 mm/yr、向北水平位移速率約 8.5 ± 3.0 mm/yr，這些變動量可能與米崙斷層的活動有關[鍾令和等，2004a]。最後，根據東部地區海水面變化的研究[Hsiesh et al., 2004]推論階地最早的形成時間可能在 5000-6000 年之內。假設南米崙階地群的九群階地代表九次甚至更多的古地震事件，那麼米崙斷層的活動週期可能只有六、七百年而已，甚至更短。

嶺頂斷層總長約 30 km，位於海岸山脈北端的西麓，北由花蓮大橋沿南南西方向延伸，經月眉、朝保、米棧至鳳林東方之山興，呈北北東走向。斷層型態可能為一向西傾斜具左移分量之逆移斷層[游明聖，1997]。嶺頂斷層地區過去並沒有密集的大地測量網來分析區域的地殼變形。陳佳元 [1974]利用海岸山脈北端附近地區四個三角點的測量，計算出海岸山脈北端在 1909-1942 與 1971 年間向北北東方向位移了 3.65 m，此結果間接指出月眉斷層為一活斷層。地調所分析此結果指出，假設海岸山脈北端的地表地殼變形大部份集中於嶺頂斷層的斷層滑移上，則在此 30-60 年間嶺頂斷層左移錯移了 3 至 4 m，平均速率為 5.8-12.2 mm/yr。Yu and Kuo [2001]利用 GPS 所測得海岸山脈北段移動速率相似（5.2-15.5 mm/yr）與上述的平均速率相似，略小於余水倍[1989]利用

三角測量所測得之移動速率 26.8 mm/yr。

瑞穗斷層為逆移斷層兼具左移性質，呈東北走向，由光復鄉東富村向南延伸至玉里鎮春日里[陳文山等，2006；林啟文等，2007a；陳文山等，2008]。本斷層一部分屬於徐鐵良[1962]所稱玉里斷層的北段。由地質特性認為瑞穗斷層的南側端點應置於與奇美斷層的交會處，全段由富田至春日共約 33 km，由於兩者的斷層特性不同，奇美斷層將海岸山脈截切為南北兩段，南側的中新世都鑾山層逆衝在更新世八里灣層之上，此斷層是海岸山脈中最大錯距的斷層。另外，春日以南劃分為池上斷層的另一原因是兩側斷層的震間活動行為有很大差異。本斷層也是 1951 年 11 月 25 日地震的地震斷層，暫列第一類活動斷層。除了 1951 年的地震之外，尚有 3 次古地震事件，古地震的活動週期約 190 ± 20 年。

奇美斷層依前人研究顯示為臺灣東部海岸山脈地區重要的第一類活動斷層[Hsu, 1956; 陳惠芬, 1984; 李瓊武、余水倍, 1987; Chen et al., 1991; 張瑞津等, 1992; 朱傲祖、游明聖, 1995; 賴文基, 1995; 鄭文弘, 1996; 林啟文等, 2000b]，其南端由玉里東方之樂合溪溪口起，向東北延伸，經瑞穗東側之德武、秀姑巒溪中段的奇美村，直抵至豐濱入海，全長超過 30 km，為一逆衝斷層，走向呈北偏東 $40-50^\circ$ ，並將海岸山脈分隔為南北兩段。陳文山、王源[1996]指出因奇美斷層其上下盤地層年代的差異甚大，顯示奇美斷層為一錯距很大且為一活動時間很長的逆斷層，其下盤岩層亦受花東縱谷斷層活動而抬升。在斷層的活動性上，Chen et al. [1991]在豐濱附近，發現斷層切過全新世河階礫石層，其中夾有年代約 4000-5000 年之繩紋紅陶碎片，顯示自有人類歷史以後斷層仍在活動。奇美斷層在奇美村附近秀姑巒溪中的露頭指出，該斷層面的位態約為 $N70-80^\circ E, 70^\circ S$ ，而在斷層帶中可見斷層擦痕線理與水平的夾角 (rake) 分別為 80° 與 16° ，顯示奇美斷層在該地為一左移的逆衝斷層[賴文基, 1995; 鄭文弘, 1996]。

就玉里斷層而言，Cheng et al. [1996]對地震震央經重新定位，顯示 1951 年 11 月 25 日 2 時 50 分的 Ms 7.0 玉里地震震央位於成功東北東方外海，震源深度 36 公里，其震源機制解顯示玉里斷層為帶左移分量的高角度逆斷層。Hsu [1962]指出玉里斷層為 1951 年 11 月 25 日地震斷層。陳惠芬[1984]彙整 1914 至 1979 年間在全台 1543 個三角點在的垂直變化量，指出東部地區海岸山脈中段於此期間的上升速率大於 20 mm/yr，最大抬升量為 3.5 m。另外，許華杞[1985; 1987]比較 1924 年與 1976 年間東部地區一等水準點的垂直變動，指出縱谷中段玉里-壽豐地區抬升量明顯相較於其他地區為大。畢慶昌[Biq, 1984]利用於 1914-1921 年與 1976-1979 年兩次約間隔 60 年的三角點測量，以中央山脈為固定點，計算海岸山脈的水平位移量，發現三角點在海岸山脈的南段及中段大多向西北移動，而北段則朝北北東移動。而李瓊武、余水倍[1987]利用 1917-1921 年及 1976-1978 年兩次的三角點測量，利用不同的基線進行修正，得到海岸山脈北段在兩次測量期間相對於中央山脈其一等點之水平位移量為 3.5-4.4 m 間，方向由南端的

北北西漸轉至北端的北北東。

池上斷層為北北東走向，斷層面於地表約傾斜 60° ，全長約 47 公里。斷層由瑞穗東南方一帶向南西延伸至池上東南方，錦園南方萬安附近[林啟文等，2000b]。游明聖[1997]於富里國小槽溝發現該處池上斷層段層面位態為北偏東 20° 向東傾斜 60° ，上盤出露利吉層，下盤為河階礫石層，其層面向東傾斜 35 至 40° 。除了 1951 年地震造成池上斷層的地表破裂外，另外 1992 年 5 月 29 日（5.4 級地震）與 2003 年 12 月 10（6.8 級地震）也均造成部分地表破裂。在 1951 年地震後，池上斷層主要以潛移的方式活動，並造成路面、水溝、房屋等遭到破壞，以大坡、錦園、萬安一線最明顯，平均每年有 2.7、2.1 與 1.9 公分的錯移量 Angelier et al. 1997]。而 Yu and Kuo [2001] 以 GPS 監測得到池上斷層地區有 30 mm 的年平均水平位移。

鹿野斷層主要呈南北走向，為逆衝斷層。斷層北起上鹿寮，經馬背、龍田、稻葉、初鹿，往南沿著卑南山台地西側延伸，並可能通過台東體育實驗中學東側，全長約 24 公里。鹿野斷層為卑南山礫岩逆衝至中央山脈板岩的高角度逆斷層[Hsu, 1976; York, 1976]。Chen [1976]由震測結果推論卑南山礫岩的兩側，均有高角度向西逆衝的斷層（分別為西側的鹿野斷層與東側的卑南山斷層）存在。王執明、王乾盈[1991]在卑南山台地西側的淺層震測結果顯示，鹿野斷層為低角度向東傾斜的斷層，卑南山礫岩向西逆衝於中央山脈板岩之上。根據台東地區的水平三角網測量結果[Yu and Lee, 1986]，海岸山脈相對卑南山為向北移動，顯示卑南山斷層以左移運動為主；而鹿野地區向東移動，可能指示鹿野斷層以逆衝作用為主。姜彥麟等[2006]由 2005-2006 年的水準與 GPS 測量結果指出，鹿野斷層上盤的相對抬升量為 2.5 cm/yr，水平方向變形的壓縮量為 1.5 cm/yr，左移量約 0.2 cm/yr。此外，地調所由台東地區重力異常圖、大地電磁探測、淺層震測及地電阻調查結果顯示，鹿野斷層呈南北走向，向東傾斜，地下淺部斷層兩側的岩性有相當大的差異，東側為卑南山礫岩，而西側是板岩層。而大地測量資料與台東地區之地震顯示，鹿野斷層為逆衝斷層，可能為相當活躍的斷層。

利吉斷層為南北轉東南走向之逆衝斷層，上盤位於東側。斷層面向東南傾斜 $40 - 60^\circ$ [Bonilla, 1977]。斷層北起台東縣鹿野鄉瑞隆村的坪頂台地西側，沿海岸山脈西緣向南延伸，經台東縣延平鄉、卑南鄉至台東市北方轉東南方向至海濱，長約 25 公里。本斷層亦包含其西側之分支斷層—卑南山斷層[Hsu, 1956]。Hsu [1976]由利吉國小附近的露頭發現利吉斷層由東向西以 $40-65^\circ$ 逆衝而掩覆在水平的河階礫石層上。王執明、王乾盈[1991]在卑南山斷層的淺層震測結果顯示，卑南山斷層為高角度斷層，東側為利吉層，斷層且延伸至卑南。根據台東地區的水平三角網測量結果[Yu and Lee, 1986]，海岸山脈相對卑南山為向北移動，顯示卑南山斷層以左移運動為主。朱傲祖、游明聖[1995]分析卑南山礫岩之擦痕位態，顯示卑南山斷層是以左移作用為主的斷層。

2-4-7-2 速度剖面

P 剖面：本區域主要經過嶺頂斷層，剖面走向為 $N60^{\circ}W$ (圖 2.105)。垂直斷層走向之速度量由 41.3 mm/yr 向西減至 26.6 mm/yr ；平行斷層走向之速度量由 11.2 mm/yr 向西增減至 16.1 mm/yr ；水平速度場合向量大致朝西北方，從 44 mm/yr 向西北減至 27 mm/yr ；高程方向由西向東逐漸抬升，其抬升量為 26.8 mm/yr 。其中，跨過嶺頂斷層左右兩側，從平行斷層走向可以看出斷層有左移的現象，斷層東南側往斷層方向速度方向由北逐漸變慢，經過斷層後速度呈現不變的情況約 2 mm/yr 。

Q 剖面：本區域主要經過瑞穗斷層和奇美斷層，剖面走向為 $N66^{\circ}W$ (圖 2.106)。在平行斷層的分量中，奇美斷層西北側 4km 內為 24 至 26 mm/yr ，瑞穗斷層 3 km 內從東南到西北為 17 mm/yr 至 10 mm/yr ，有左移的情形；垂直速度分量中，奇美斷層西側 3 km 內為 60 mm/yr 至 66 mm/yr ，瑞穗斷層東南側 3 km 內從 57 mm/yr 降到 46 mm/yr ，在剖面 4 km 處從 43 mm/yr 逐漸減少為 32 mm/yr ；水平和向量分量從 70 mm/yr 往西北減至 33 mm/yr ；高程呈現 W 型，跨過斷層速度有下降的趨勢，奇美斷層為 -10 mm/yr ，瑞穗斷層為 -7 mm/yr 。

R 剖面：本區域主要經過瑞穗斷層和奇美斷層，剖面走向為 $N66^{\circ}W$ (圖 2.107)；其水平速度場從 18 km 處的 72 mm/yr 逐漸下降到 10 km 處的 64 mm/yr ， 10 km 到 4 km 處下降速率比較快從 64 mm/yr 下降到 38 mm/yr ；平行斷層分量從 25 mm/yr 向西北減到 9 mm/yr ；垂直斷層的分量從 64 mm/yr 向西北遞減到 36 mm/yr ；在高程向也有像 Q 剖面一樣的現象呈 W 型。

S 剖面：本區域主要經過鹿野斷層及利吉斷層，剖面走向為 $N77^{\circ}W$ (圖 2.108)。平行斷層走向之速度量由 36 mm/yr 向西減至 -2 mm/yr ；垂直斷層走向之速度量由 60 mm/yr 向西在， 14km 處增加為 65 mm/yr 之後下降到 29 mm/yr ；水平速度從 18 km 處的 62 mm/yr 到 13 km 處增加到 72 mm/yr ，在 12km 處快速下降到 49 mm/yr ，之後持續下降到 30 mm/yr 。

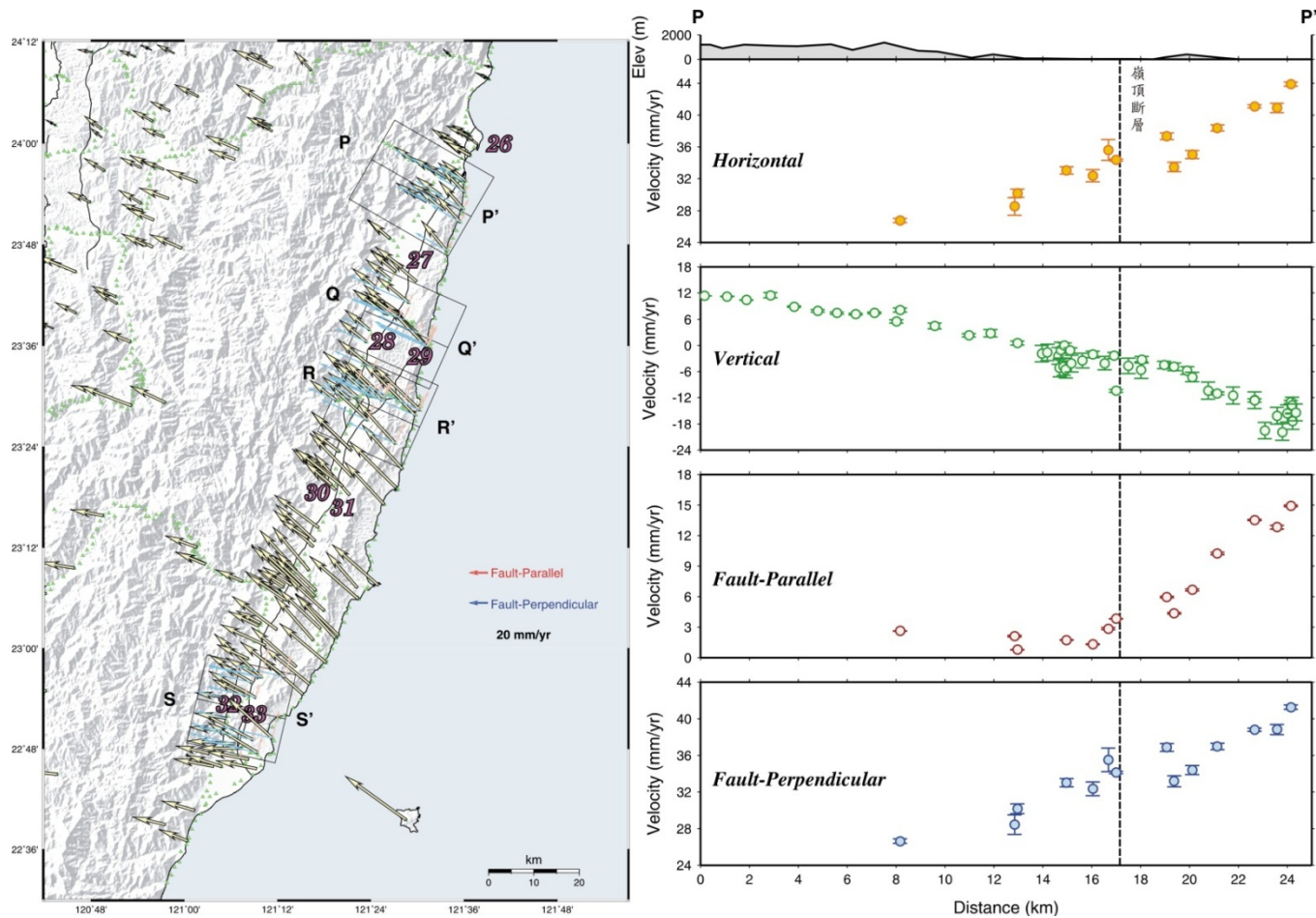


圖 2.105：東部地區 P 剖面速度分布圖。左圖中黑線為地調所公布之活動斷層：26 為米侖斷層，27 為嶺頂斷層，28 為瑞穗斷層，29 為奇美斷層，30 為玉里斷層，31 為池上斷層，32 為鹿野斷層，33 為利吉斷層。黃色箭頭為 GPS 速度場，箭頭長度反應其量值大小，其分布自利吉斷層以北至米侖斷層呈現往西北方向的型態。右圖中黃圈為水平速度量值；綠圈為垂直速度量值；紅圈為平行斷層走向速度分量，藍圈為垂直斷層走向速度分量。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

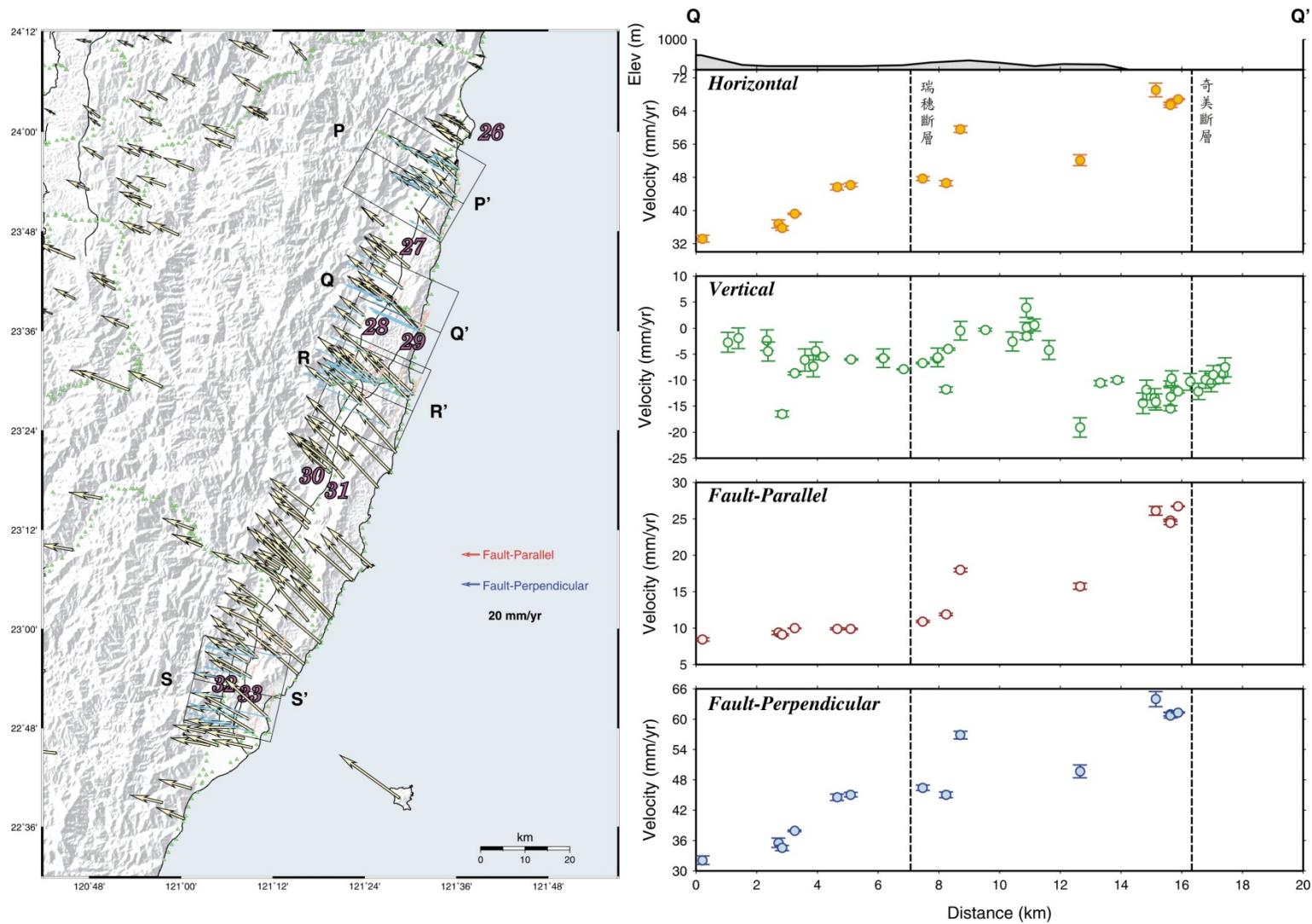


圖 2.106：東部地區 Q 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.105 所示。

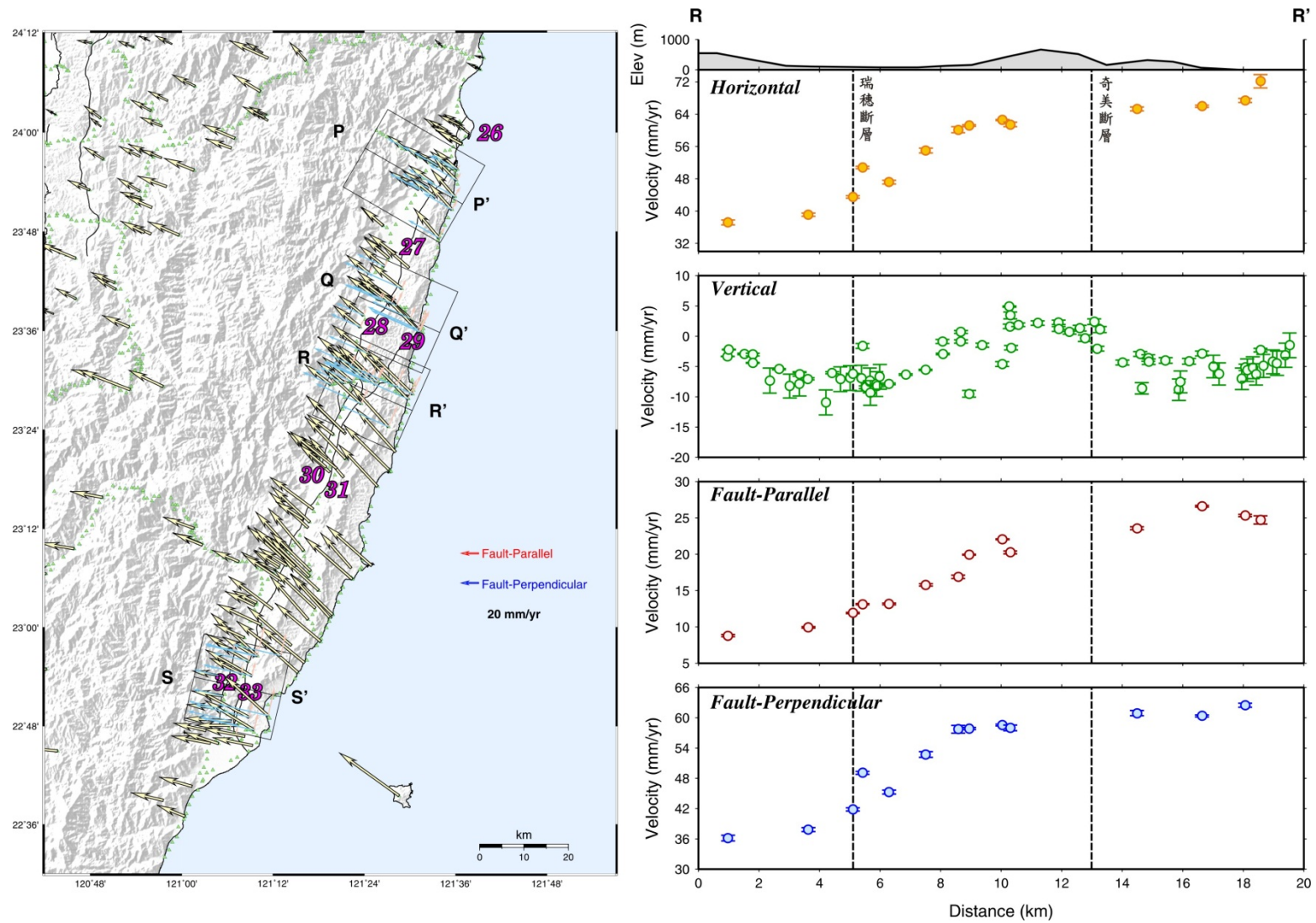


圖 2.107：東部地區 R 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.105 所示。

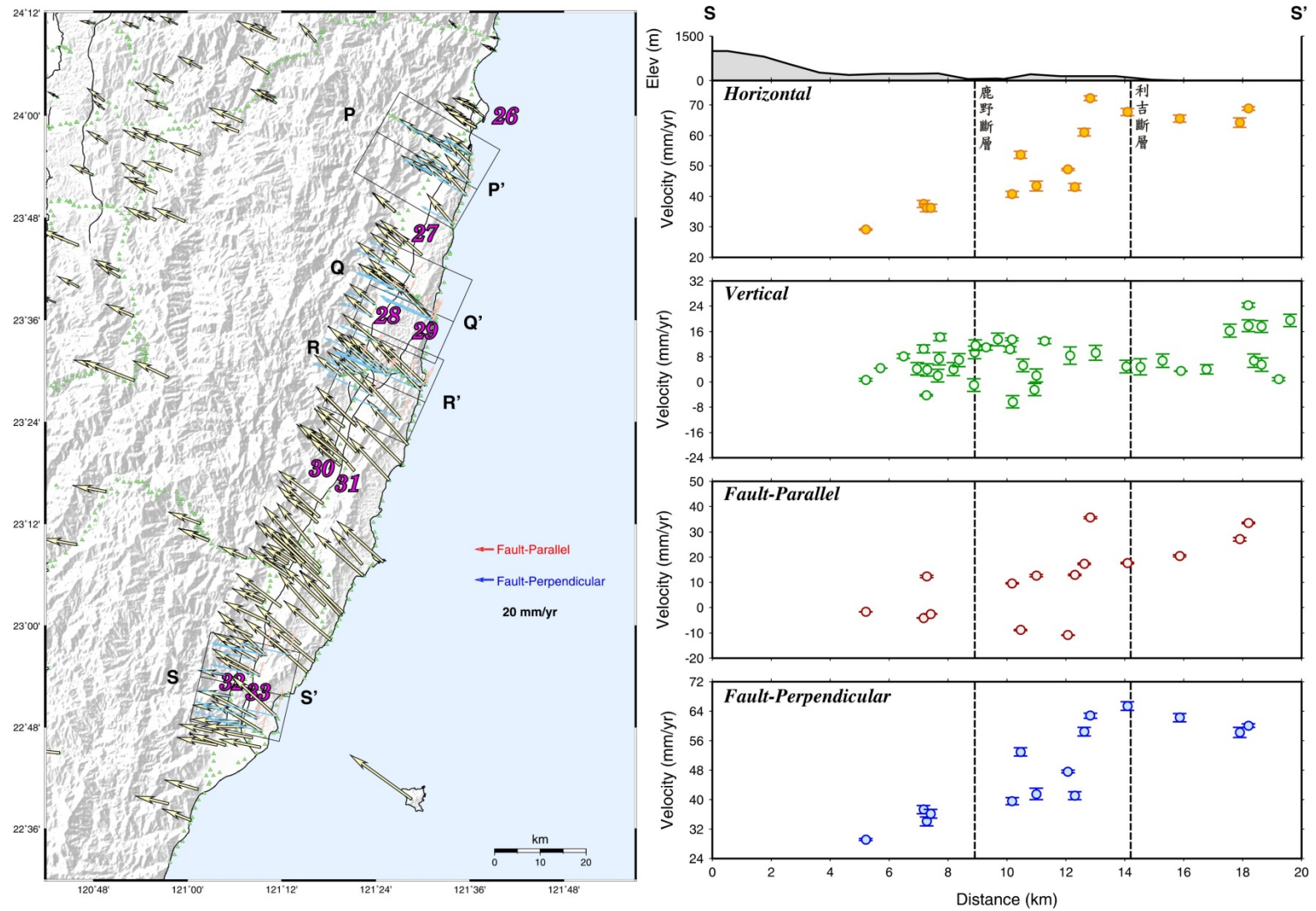


圖 2.108：東部地區 S 剖面速度分布圖。圖例說明如圖 2.105 所示。

2-4-8 宜蘭地區變形特性

2-4-8-1 地質背景

台灣位於菲律賓板塊和歐亞板塊的碰撞活動帶，透過 GPS 的觀測，相對穩定大陸邊緣之澎湖白沙站觀測站，蘭嶼觀測站每年以 8.2 公分的顯著速率往西北方向移動，表示兩板塊以顯著的速度相互靠近，使台灣島上發生劇烈的變形縮短。在台灣東北部之宜蘭地區以及宜蘭東部外海為地震活躍的區域，由於菲律賓海板塊沿著琉球海溝向北隱沒到歐亞板塊之下，形成琉球島弧與沖繩海槽之弧溝系統而導致此地區地震的發育頻繁。沖繩海槽位於琉球弧溝系統後方，是歐亞板塊大陸邊緣之弧後盆地。海槽由台灣東北方一直沿伸到日本九州，大致與琉球海溝平行。沖繩海槽向西南延伸至宜蘭平原，因受到海槽擴張之影響，使得平原處於伸張變形之環境。由於海岸山脈在中新世晚期開始進行弧陸碰撞，造成沖繩海槽以海岸山脈碰撞點為支點，呈楔形張裂而發育出宜蘭平原。宜蘭平原為蘭陽溪沖積而成的扇狀平原，以牛鬥、頭城、蘇澳為頂點，呈一等邊三角形。宜蘭平原大部分的地區為沖積層所覆蓋，主要由泥沙及礫石所組成，多為未固結之沉積物。本區出露的地層主要以始新世及中新世地層為主（圖 2.109）。

探討台灣北部及東北部地區隱沒與聚合之作用，顯示目前北台灣之大地應力受到不對稱板塊聚合之影響，而產生以淡水河口至宜蘭為界線之旋轉軸，在此軸之西側產生逆時針旋轉，而在東側產生順時針旋轉，且東側的旋轉力量大於西側。

Liu [1995]利用重複精密水準測量觀測宜蘭平原之地殼變形，結果顯示在羅東與宜蘭之間每年有 20 mm 的下陷量，而整個平原以每年 0.44 微徑度向東傾斜。結合此觀測量與過去此地區之反射震測成果[江新春，1976]顯示，沖繩海槽之擴張活動正在向西南延伸進入宜蘭平原。徐閔儀[2006]根據 GPS 速度場分析結果，顯示宜蘭平原呈西北-東南伸張。而在另一方面，推測由於山脈擠壓，造成物質平行山脈走向的流動結合琉球海溝向南退後所造成沖繩海槽之伸張，使得沖繩海槽南側移動速度變快，此速度變化由北順時針往東南旋轉，且愈往南速度愈大，由此推論沖繩海槽為不對稱之弧後張裂[Rau et al., 2008]。許雅儒[1998]利用 1992-1998 年之 GPS 觀測資料推測在宜蘭與羅東之間有一走向 N53°E 的構造線通過，垂直此構造線的速度分量由北向南、由西向東遞增，再加上以往大地測量的成果與宜蘭外海的海底地形，可以推斷平原應該只向南單一方向開裂，並形成一系列的正斷層。邱詠恬[2008]分析 GPS 速度場指出測沿蘭陽溪南側有一條近東西向橫跨平原之左移剪切帶通過，可與前人研究[Liang et al., 2005; 江新春，1976; 康竹君等，2007; 康竹君，2007]所得之一條近東西向之左移斷層比對，即濁水斷層，其跨斷層之速度量為 17.4 mm/yr。

根據中央地調所五萬分一地質圖，蘭陽溪南側之斷層多為層間斷層，古魯斷層為上部蘇澳與下部蘇澳層之界面，廬山曾與南蘇澳層間之斷層為小帽山斷層，南蘇澳層與大

南澳片岩間之斷層則為猴其山斷層。除了上述層間斷層外，另有鹿皮溪斷層及南澳斷層。此五條斷層唯古魯斷層為左移斷層，其餘皆為傾角向南，中高角度之逆斷層(圖 2.110、圖 2.111)。

何春蓀[1986]認為以濁水斷層為界，斷層以北為雪山山脈地層，以南則為中央山脈地層，因此，此斷層可能為梨山斷層之延伸。另由大地測量及地震資料顯示，濁水斷層為梨山斷層之延伸的可能性更加提高[Liang et al., 2005; 黃信樺, 2007; 康竹君, 2007]。蔡義本[1976]利用微地震(規模 0.3 至 3.0)推求由牛鬥往宜蘭海岸之地震密集帶，其認為近乎垂直而深度不超過二十公里之活動斷層，推測可能為梨山斷層的延伸。江新春[1976]由震測剖面推測此斷層沿蘭陽溪分布，且傾角向南。

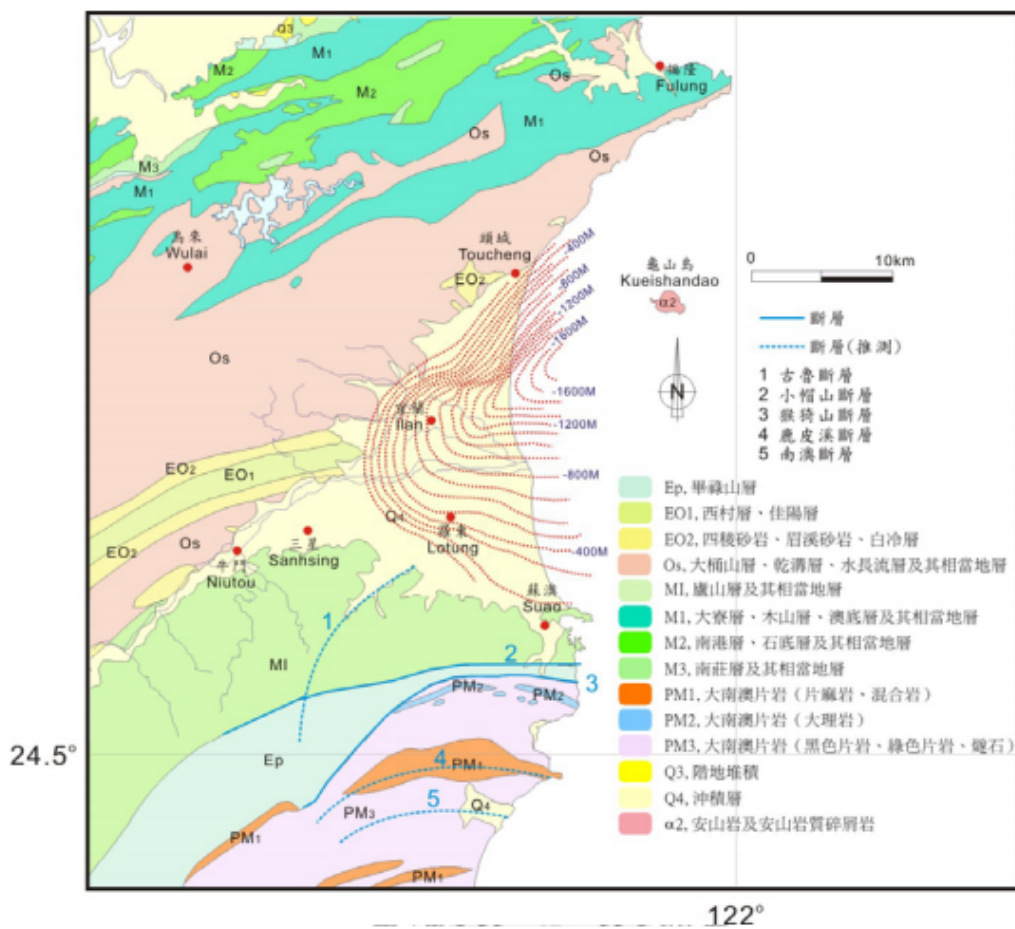


圖 2.109：宜蘭區域地質圖。圖中紅色虛線為基盤位置，藍色實線為斷層位置，藍色虛線為推測之斷層位置(摘自 Chiu [2008])。

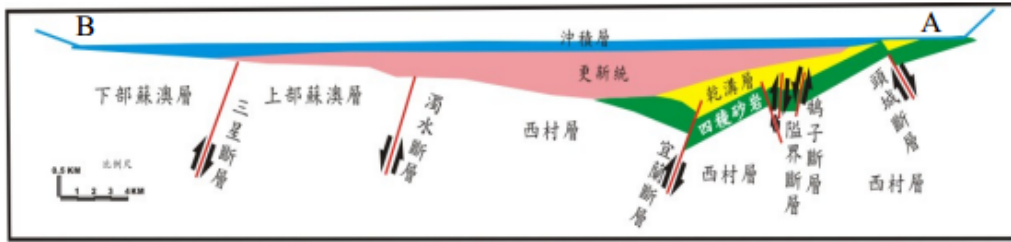


圖 2.110：宜蘭平原南北向之地下構造圖，剖面位置為圖四中紅色線段之剖面（摘自 Chiu [2008]）。

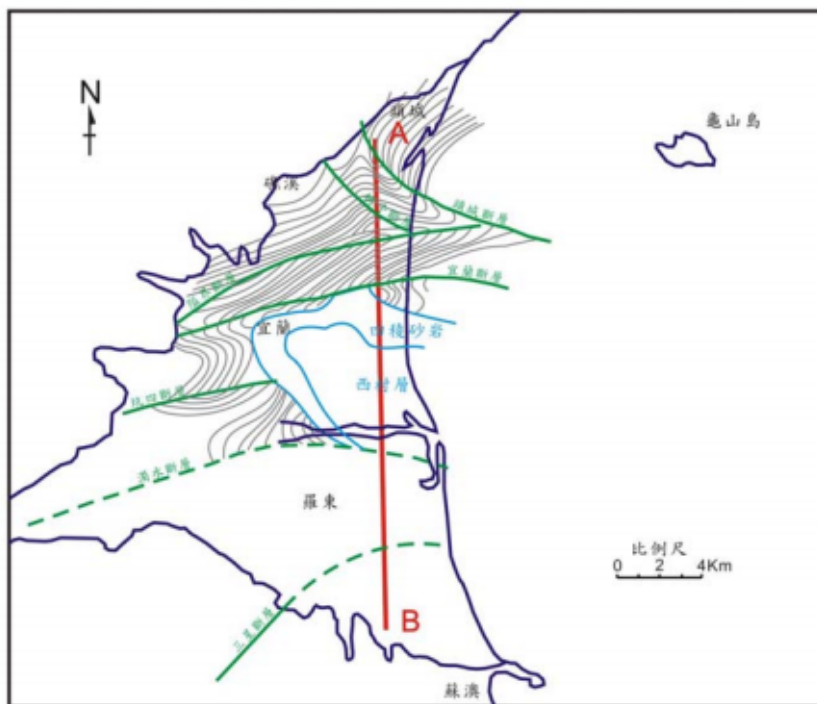


圖 2.111：宜蘭平原上斷層之分布，紅色實線為剖面位置，綠色實線為斷層位置，綠色虛線為推測之斷層位置（摘自 Chiu [2008]）。

2-4-8-2 速度剖面

根據水平速度場分析顯示(圖 2.112)，宜蘭地區速度向量約為 0.6 至 47.0 mm/yr，方向介於 15°- 340°；最大值为 47.0 mm/yr，方向為 148°，宜蘭平原蘭陽溪以北之地區，GPS 速度量值較小，且方向較不一致，為 0.6-5.9 mm/yr，方向為 15°-340°；相反地，蘭陽溪以南之速度場（量值为 3.7-47.0 mm/yr，方向為 38°-147°）則遠大於平原北部。往東愈近海岸其速度值之增加就愈明顯，可達 47.0 mm/yr，方向為 148°。此外，沿著宜蘭平原南緣之速度場，由西往東呈現明顯之順時針旋轉（速度方位角變化由 39° 至 148°）。

由速度剖面 T（圖 2.112）得知，垂直於濁水斷層的速度分量上，跨斷層速度變化

為 14.2 mm/yr；而平行於斷層的速度分量上，跨斷層速度變化為 12.1 mm/yr，由於傾角向南[江新村，1976]，垂直斷層分量於南側較北側快，推測其為正斷層，而平行斷層的速度及方向則推測具有左移分量，故推測此斷層為正斷層帶左移分量。

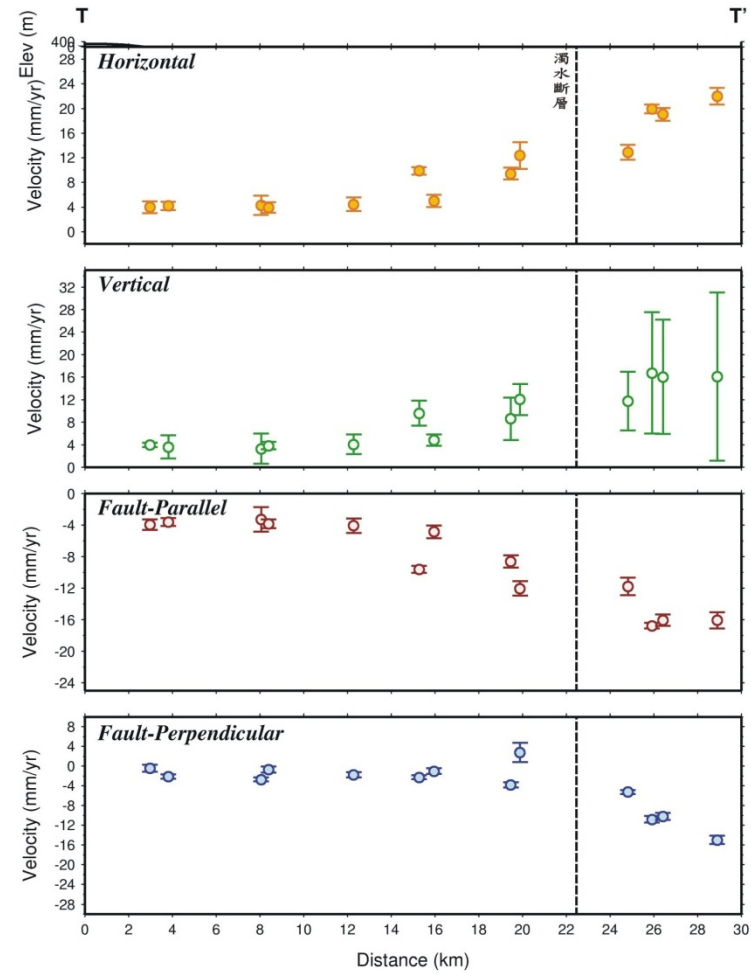
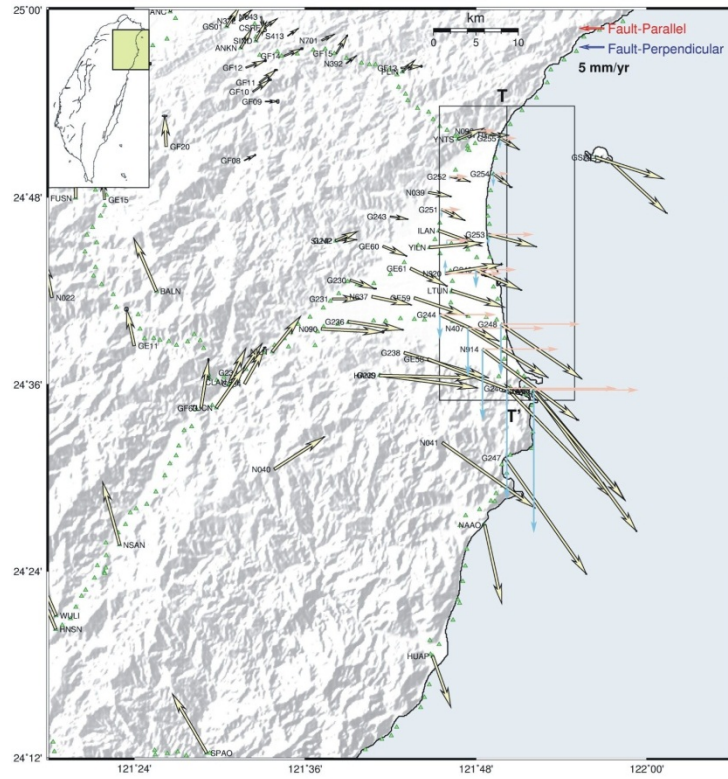


圖 2.112: 宜蘭地區 T 剖面速度分布圖。左圖為宜蘭地區水平速度場及剖面 T 之位置分佈；右圖為剖面 T 的速度剖面圖，右圖中斷層為濁水斷層，藍色為垂直斷層走向速度分量，紅色為平行斷層走向速度分量，綠色為垂直方向速度分量，黃色為水平方向速度分量。

表 2.9：跨斷層速度變化表。

| 活動斷層編號、名稱及英文縮寫 | 垂直斷層走向 速度變化 ^b | 平行斷層走向 速度變化 ^a | 垂直地表速度變 化 ^c |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 山腳斷層[SCOF] | 1.9±0.1 | 1.0±0.3 | -4.0±1.0 |
| 2 湖口斷層[HKOF] | 4.0±0.2 | -0.7±0.2 | -2.3±1.0 |
| 3 新竹斷層[HCUF] | 1.5±0.3 | -2.0±0.2 | ~0 |
| 4 新城斷層[HCGF] | 2.5±0.3 | ~0 | 0.5±1 |
| 5 獅潭斷層[STNF] | 2.0±0.1 | 1.5±0.3 | 0.5±1 |
| 6 三義斷層[SYIF] | 0.7±0.2 | -0.2±0.1 | -0.1±1.0 |
| 7 清水斷層[SCAF] | 0.5±1.1 | -0.9±0.2 | 10.2±1.5 |
| 7 大甲斷層[TCAF] | -3.9 ± 1.1 | -1.2±2.5 | -2.0±1.0 |
| 8 鐵砧山斷層[TCSF] | -3.9 ± 1.1 | -1.2±2.5 | 0.4±1.0 |
| 9 屯子腳斷層[TTCF] | 1.5±0.3 | -3.2±0.5 | 0.1±0.5 |
| 10 彰化斷層[CHA] | ~0 | -0.6±0.1 | 2.0±0.5 |
| 11 車籠埔斷層[CLPF] | 3±0.3 | 1.5±0.1 | ~0 |
| 12 大茅埔－雙冬斷層[TMPF] | 3±0.4 | 0.3±0.1 | 12.0±2.0 |
| 13 九芎坑斷層[CCKF] | 2.0±0.2 | 2±0.1 | ~0 |
| 14 梅山斷層[MSNF] | 5.0±0.3 | -1.5±0.1 | -1.0±0.3 |
| 15 大尖山斷層[TASF] | 0.3 ± 4.2 | 6.0 ± 4.8 | -11.6±2.0 |
| 木屐寮斷層[MCLF] | 2.4 ± 3.2 | -1.8 ± 3.8 | ~0 |
| 17 六甲斷層[LCAF] | 2.2±0.3 | -1.8±0.2 | ~0 |
| 18 觸口斷層[CKUF] | 4.0±0.3 | ~0 | 7.0±0.2 |
| 19 新化斷層[HHAf] | 1.0±0.1 | -8.5±0.5 | ~0 |
| 20 後甲里斷層[HCLF] | 6.2±1.1 | -4.7±0.4 | 3±0.5 |
| 21 左鎮斷層[TCNF] | 1.3 ± 8.4 | 6.9 ± 8.4 | ~0 |
| 22 小崗山斷層[HKSF] | 8.0±1.5 | -3.2±1.1 | 7.0±1.3 |
| 23 旗山斷層[CHNF] | 3.5±1.0 | -4.5 ± 1.1 | 1.8±1.0 |
| 24 潮州斷層[CCUF] | 2.8±1.5 | 1.0±0.3 | 15.6±1.0 |
| 25 恆春斷層[HCNF] | 5.8±2.0 | 7.4±1.2 | 7.0±2.4 |
| 26 米崙斷層[MLNF] | 7.2 ± 2.3 | 8.6 ± 1.7 | -17.9±3.1 |
| 27 嶺頂斷層[LTIF] | 4.1±1.0 | 4.3±0.4 | -6.5±1.2 |
| 28 瑞穗斷層[RSUF] | 10.2±1.1 | 4.5±0.6 | 5.2±1.5 |
| 29 奇美斷層[CMIF] | 3.5±1.0 | 3.1±0.3 | -6.8±1.2 |
| 30 玉里斷層[YLIF] | 5.1 ± 5.8 | 18.0 ± 4.5 | -0.8±1.6 |
| 31 池上斷層[CSGF] | 20.4±3.2 | 18.4±2.1 | 19±7.8 |
| 32 鹿野斷層[[LYHF]] | 6.3±1.4 | 3.2±0.2 | 3.3±0.4 |
| 33 利吉斷層[LCIF] | 8.6±2.1 | 6.0±0.7 | 2.9±1.0 |

- a：平行斷層走向分量，資料採用斷層兩側 5 公里內點位，正值表示左移斷層，負值表示右移斷層，誤差值為斷層兩側標準差。
- b：垂直斷層走向分量，資料採用斷層兩側 5 公里內點位，誤差值為斷層兩側標準差。
- b：垂直地表速度，資料採用斷層兩側 5 公里內點位，誤差值為斷層兩側標準差。

第三章、井下應變儀之研究方法與成果

目前中央地質調查所採用的井下應變儀為 GTSM (Gladwin Tensor strain meter)，最早於 1960 年代後期用於觀測變形，當時用來測量低頻(30 分鐘)之應變資料[Gladwin, 1974, 1977, 1982]；1980 年代初期，GTSM 才開始被美國及澳洲應用於地震的研究，在當時，已經可以提供 100 Hz 之高頻應變資料。GTSM 的設計為模組化，含有三個測量應變之模組，這些模組互相獨立，三個模組以各種不同角度安裝在不銹鋼管內，當鋼管被岩石擠壓時，內部的電容平行板間的距離改變，會提高其間的電壓，若岩石是被延展，則情況相反，電壓降低。在臺灣現有裝置此型的應變儀共有兩種類型，即為 GTSM100(曾文水庫南、曾文水庫北以及甲仙十八灣，共 3 站)以及 GTSM21(其餘各站包括大坪、瑞峰、梅花、新樂、中興、太興、達邦、錦和、明德及樹林，共 10 站)，其內部設計略有不同，詳細儀器原理與分析理論請參考附錄光碟-附錄 D。

目前井下應變儀部份，除了持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性，並繼續處理與計算分析各測站資料，包含：移除不正常的突出資料、估計井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢與估計因自然環境對應變資料的影響量，其中包含地下水影響與氣壓影響分量的初步估計與移除，並以建立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"。

3-1 井下應變儀資料處理

本計畫將所有正常運作中的井下應變儀測站資料一起處理，其中大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)、錦和國小(JING)、瑞峰國小(LMMT)、梅花國小(PFMT)、明德中學(SANS)、樹林(SLIN)、中興國小(TSUN)、太興國小(TAIS)以及達邦(DARB)等 10 站是屬於 GTSM21 井下應變儀，與在臺灣最早裝置的三個站曾文水庫南(RST)、曾文水庫北(RNT)及甲仙十八灣三站(ECT)的 GTSM1000 儀器不同。資料處理以 10 分鐘一筆的資料為處理主軸，其所有測站資料期間如表 3.1 所示。由於甲仙十八灣(ECT)於 2004 年 12 月之後資料品質不佳，且 2007 年後無資料，不再處理 ECT 測站之資料，本報告只呈現該測站至 2004 年的資料。

表 3.1：井下應變儀測站的經緯度與資料日期。

| 編號 | 測站代碼 | 站名 | 資料起迄時間 | | Coordinate(WGS84) | | |
|----|------|-------|------------|---------|-------------------|-------------|-------|
| | | | 起始 | 結束 | 經度 | 緯度 | 高程(m) |
| 1 | RST | 曾文水庫南 | 2004/07/18 | 2012/11 | 120°30'4.65 | 23°14'10.97 | 110 |
| 2 | RNT | 曾文水庫北 | 2004/04/15 | 2012/11 | 120°35'53.58 | 23°19'39.92 | 252 |
| 3 | ECT | 甲仙十八灣 | 2004/04/16 | 2007/07 | 120°34'57.69 | 23°08'29.21 | 448 |
| 4 | PFMT | 梅花國小 | 2005/06/04 | 2012/11 | 121°12'1.73 | 24°40'43.69 | 496 |
| 5 | LMMT | 瑞峰國小 | 2005/06/07 | 2012/10 | 121°6'49.85 | 24°39'47.49 | 247 |
| 6 | BMMT | 大坪國小 | 2005/06/09 | 2012/11 | 121°3'1.92 | 24°40'34.52 | 195 |
| 7 | TSUN | 中興國小 | 2006/03/01 | 2012/11 | 120°41'21.04 | 23°28'42.48 | 1370 |
| 8 | TAIS | 太興國小 | 2006/03/04 | 2012/11 | 120°37'36.95 | 23°32'34.1 | 790 |
| 9 | CINT | 新樂國小 | 2006/11/15 | 2012/11 | 121°14'32.12 | 24°43'57.8 | 505.2 |
| 10 | DARB | 達邦 | 2006/11/19 | 2012/11 | 120°44'29.39 | 23°27'22.27 | 952.8 |
| 11 | JING | 錦和國小 | 2007/11/20 | 2012/11 | 121°28'49.31 | 24°59'35.89 | 19 |
| 12 | SANS | 明德中學 | 2007/11/12 | 2012/11 | 121°21'21.01 | 24°54'28.51 | 80 |
| 13 | SLIN | 樹林焚化廠 | 2009/09/11 | 2012/11 | 121°22'10.36 | 24°58'10.81 | 77 |

在每部儀器中都裝置有四個線性變形感應器，其主要儀器軸的方向分布於不同的方位角，基本上這些角度為了發揮最好的功能，設計為各相差 60-60-60-30 度，如此，若以某一分量為 0 度起算，依次為 CH0 - 0 度，CH1 - 60 度，CH2 - 120 度，CH3 - 150 度，所以其中 CH1 與 CH3 互相垂直。當在裝設儀器時，其上有一電子羅盤，可以定出各分量由北方算起的真正方位角，如表 3.2 中所示。另外為了考慮孔隙與水泥的恢復效應，需要用到儀器型態與裝儀器的時間，也一併列入表 3.2 中。

表 3.2：井下應變儀測站的安裝日期、儀器與各分量的方位角。

| 編號 | 測站代碼 | 站名 | 安裝日期 | 深度(m) | 儀器型態 | 方位角 (由東方逆時針算起) | | | |
|----|------|-------|------------|---------|---------|----------------|--------|--------|--------|
| | | | | | | CH0 | CH1 | CH2 | CH3 |
| 1 | RST | 曾文水庫南 | 2003/10/23 | 224.20 | GTSM100 | -19.42 | 40.58 | 100.58 | 130.58 |
| 2 | RNT | 曾文水庫北 | 2003/10/28 | 198.95 | GTSM100 | 44.51 | 104.51 | 164.51 | 194.51 |
| 3 | ECT | 甲仙十八灣 | 2003/10/26 | 193.82 | GTSM100 | -96.80 | -36.08 | 23.20 | 53.20 |
| 4 | PFMT | 梅花國小 | 2005/06/04 | 165.00 | GTSM21 | 58.10 | 118.10 | 178.10 | 208.10 |
| 5 | LMMT | 瑞峰國小 | 2005/06/04 | 155.00 | GTSM21 | 10.70 | 70.70 | 130.70 | 160.70 |
| 6 | BMMT | 大坪國小 | 2005/05/18 | 200.00 | GTSM21 | 36.20 | 96.20 | 156.20 | 186.20 |
| 7 | TSUN | 中興國小 | 2006/03/01 | 195.6.0 | GTSM21 | -68.50 | -8.50 | 51.50 | 81.50 |
| 8 | TAIS | 太興國小 | 2006/03/04 | 199.7.0 | GTSM21 | 3.50 | 63.50 | 123.50 | 153.50 |
| 9 | CINT | 新樂國小 | 2006/11/15 | 198.10 | GTSM21 | -70.00 | -10.00 | 50.00 | 80.00 |
| 10 | DARB | 達邦 | 2006/11/19 | 198.90 | GTSM21 | 21.70 | 81.70 | 141.70 | 171.70 |
| 11 | JING | 錦和國小 | 2007/11/07 | 191.00 | GTSM21 | 155.90 | 215.90 | 275.90 | 305.90 |
| 12 | SANS | 明德中學 | 2007/11/02 | 200.00 | GTSM21 | 138.78 | 198.78 | 258.78 | 288.78 |
| 13 | SLIN | 樹林焚化廠 | 2009/09/11 | 183.00 | GTSM21 | -19.42 | 40.58 | 100.58 | 130.58 |

在本計畫中的井下應變儀的資料處理，完成包含 Level-0 到 Level-2 的資料處理、井孔恢復與水泥膨脹效應的估算，另外再做資料的完整性測試，說明如下：

3-1-1 LEVEL-0

原始井下應變儀 1Hz 資料，以 Bottle 格式每小時儲存一個檔案，並加以 tgz (compressed tar file) 壓縮，儲存在每個月日數的子目錄中。因此一年的資料會有 31 個子目錄，每個子目錄下可能有最多 12 天的資料，每天有 24 個檔案。由於資料檔可能高達 $24 \times 12 = 288$ 個檔案，結果發現有些檔案太小，甚至為零大小檔案，表示資料有誤，或資料沒傳回來，可是因檔名出現在目錄中，常被誤認為資料正常。

在本次的測站，資料的起始期間自 2003 年 10 月到 2009 年 9 月都有，有三個測站有較明顯問題，目前已對部分測站進行維護與保養的工作，相關內容請參考附錄光碟－附錄 E。

- (1) 瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理，如圖 3.1 所示。
- (2) 甲仙十八灣(ECT)因雷擊而故障，2004 年 12 月之後資料品質不佳，且 2007 年後無資料。
- (3) 曾文水庫南(RST)的 CH1 感應器於 2005 年 4 月之後一直都沒有接收到資料。
- (4) 新樂國小(CINT)的 CH0 大約從 2012 年 7 月之後有資料中斷與數值不正常跳階的情況發生，未來在計算該測店面應變時，可能需要考慮使用其他 3 個頻道來做計算，如圖 3.2 所示。

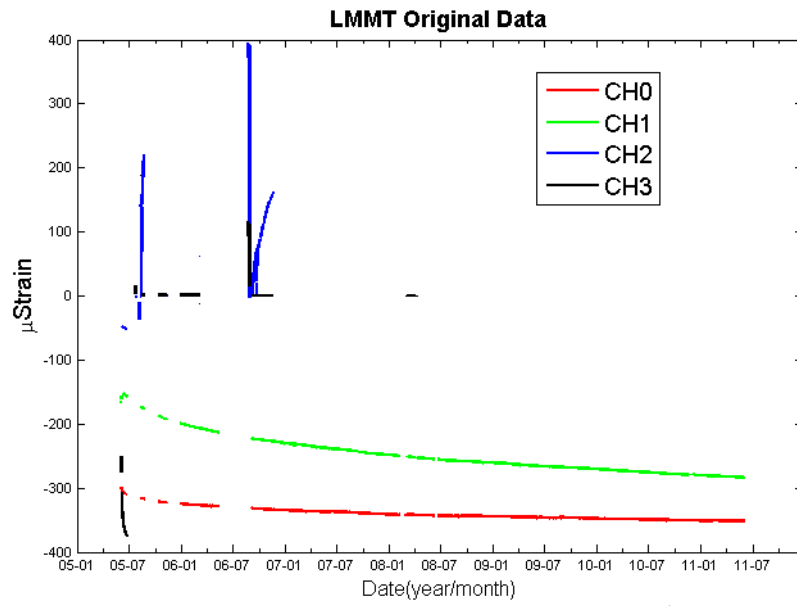


圖 3.1：瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料之異常狀況。

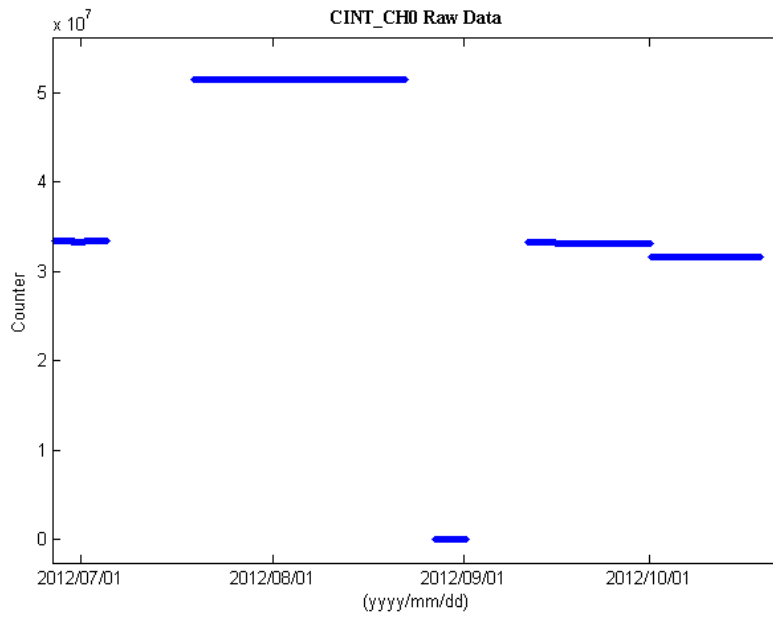


圖 3.2：新樂國小(CINT)的 CH0 資料異常情況。

3-1-2 LEVEL-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正

儀器 GTSM21(圖 D.4)中

$$\frac{R}{1-R} = \frac{d_2}{d_1}$$

其中 R 在一開始時約為 0.5(因 $d_1 = d_2$)，此時的變形量量測精度較 GTSM100 約低一倍，在初始設定 ($R=0.5$) 時，記錄上的每一計數約相當於 0.0919540 nano-strain，但其讀數與真正變形量間的關係就不再是線性了，當儀器已變形至 1.0 ppm 時，則記錄上的每一計數約相當於 0.1411661 nano-strain，所有的資料必須經過線性化修正，才能較接近地殼變動的觀測。

本儀器的 $d_1 = 200\mu\text{m}$ ；應變儀外徑為 $D = 87 \text{ mm}$ ，而記錄的 1 讀數等於 10^{-8} 個電板兩端電壓，所以讀數的變形量大約等於：

$$\varepsilon = \frac{(d_2 - d_{20})}{D} = \frac{d_1}{D} \left[\frac{R}{1-R} - \frac{R_0}{1-R_0} \right] = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{87 \cdot 10^{-3}} \left[\frac{r \cdot 10^{-8}}{1-r \cdot 10^{-8}} - \frac{r_0 \cdot 10^{-8}}{1-r_0 \cdot 10^{-8}} \right]$$

在儀器初始設定時，在實驗室無變形量時，應該是 $d_1 = d_2$ ，此時讀數應為 $1/2 \times 10^8 = 50,000,000$ ，此時 $R_0/(1-R_0) = 1.0$ ，其餘時間所得的變形量可相對於之前 $t = 0$ 時間之相對變形。由此公式所求得各測站的資料轉變成應變後，如圖 3.3 至圖 3.14 所示。

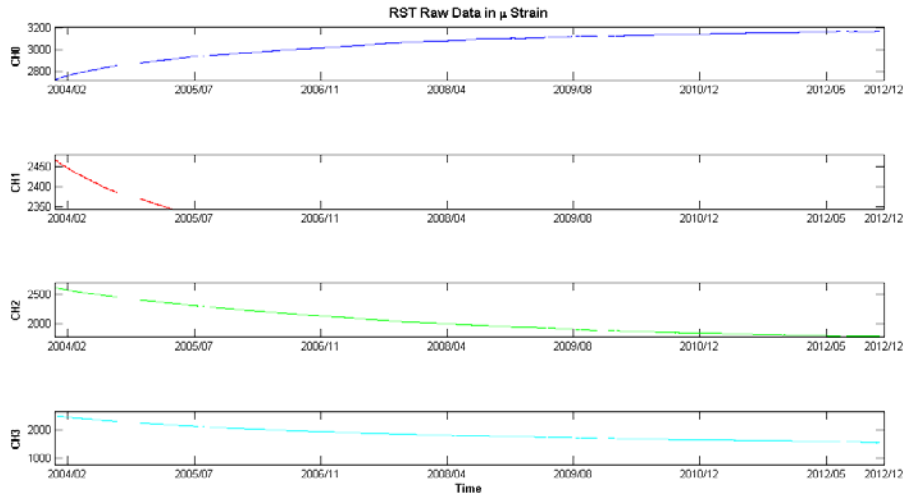


圖 3.3：曾文水庫南測站應變分量。2004-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

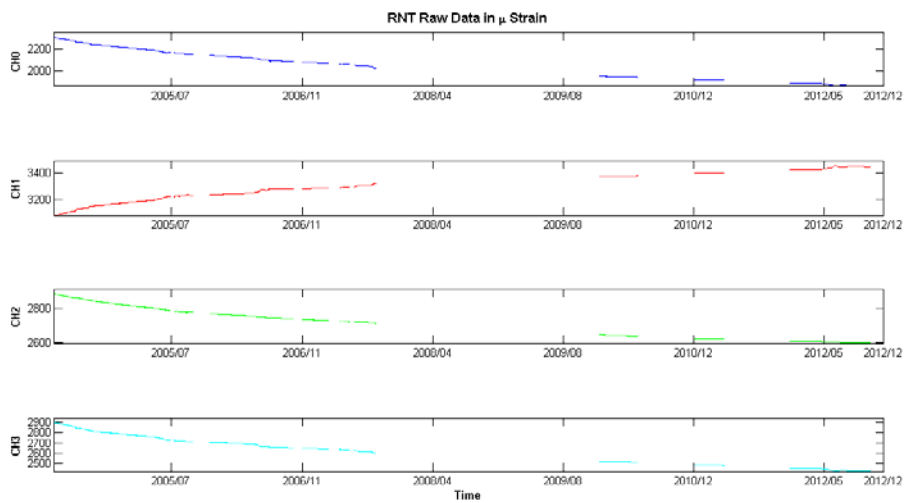


圖 3.4：曾文水庫北測站應變分量。2004-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

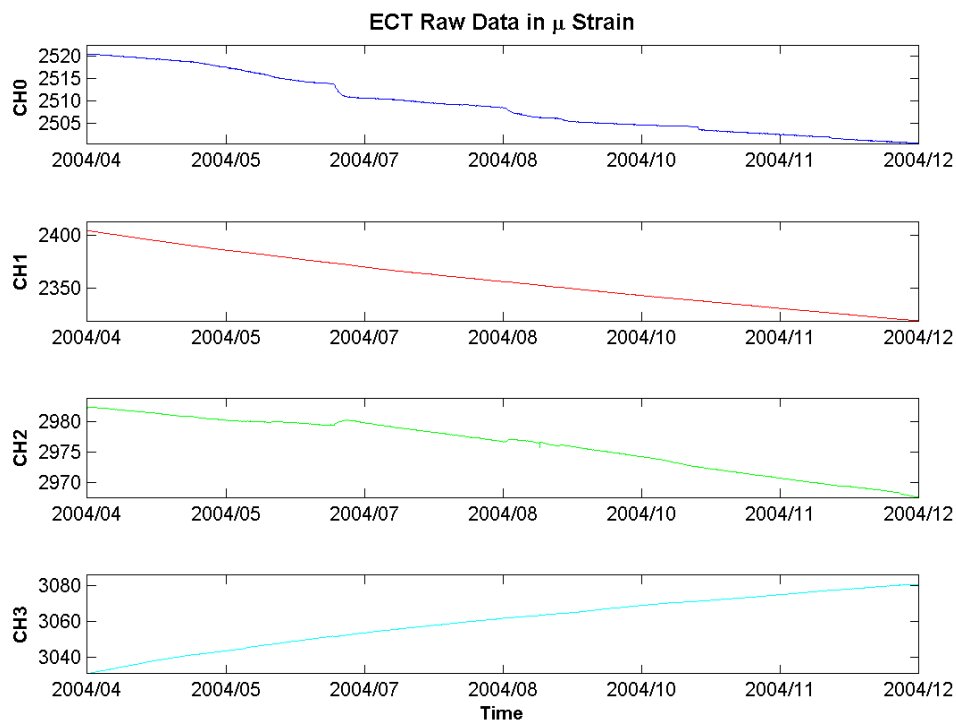


圖 3.5：甲仙十八灣測站應變分量。2004 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。

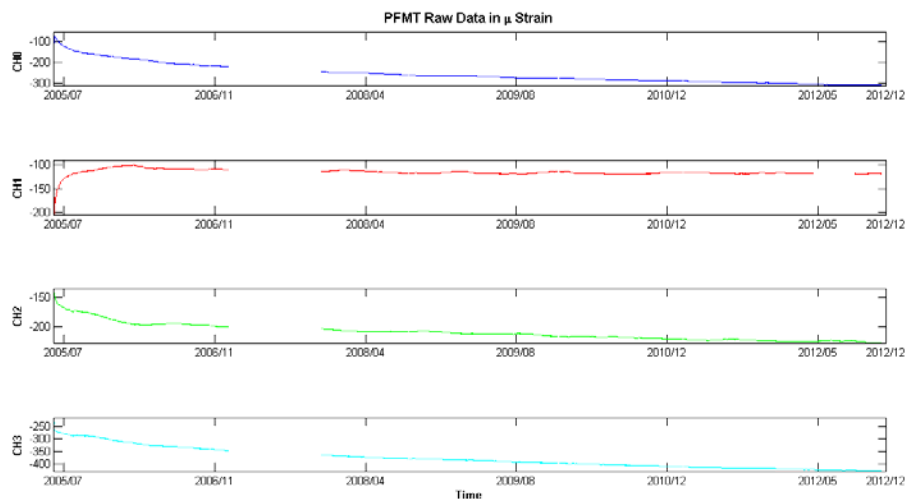


圖 3.6：梅花國小測站應變分量。2005-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

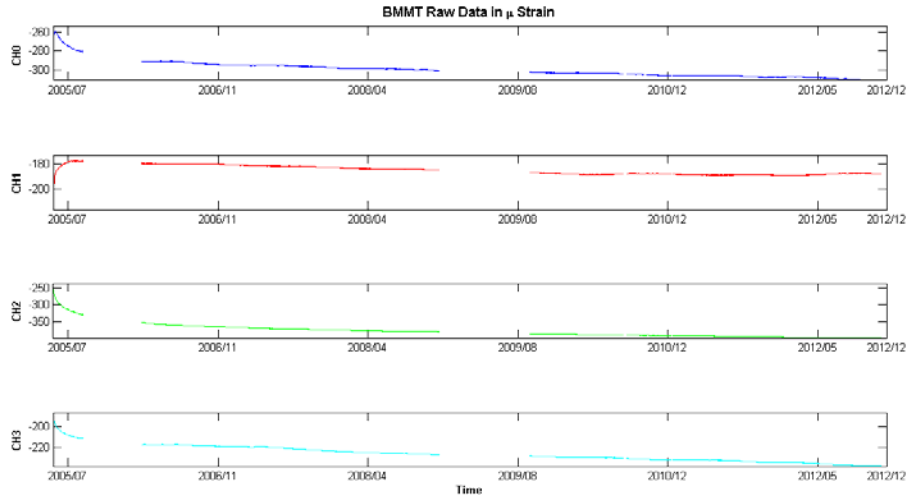


圖 3.7：大坪國小測站應變分量。2005-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

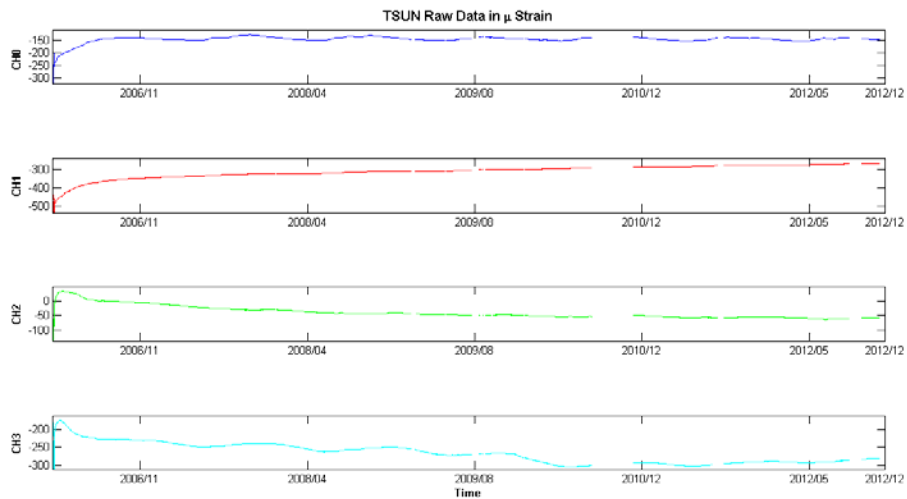


圖 3.8：中興國小測站應變分量。2006-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

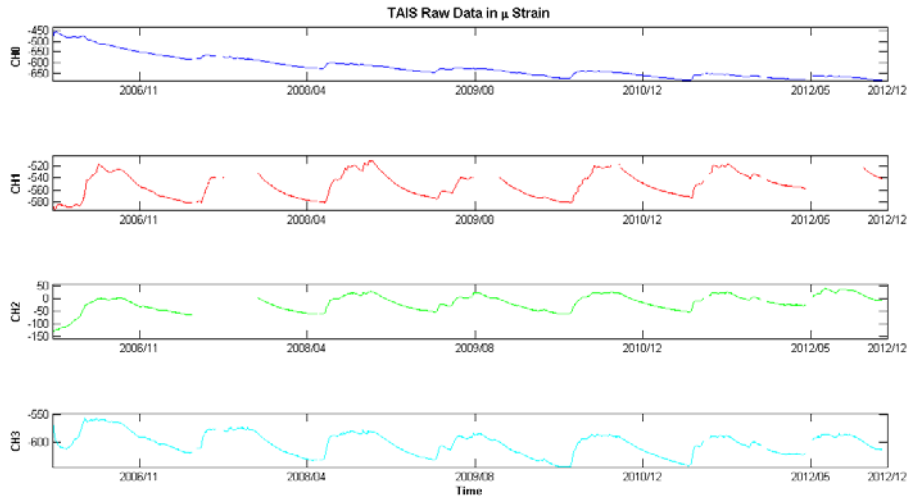


圖 3.9：太興國小測站應變分量。2006-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

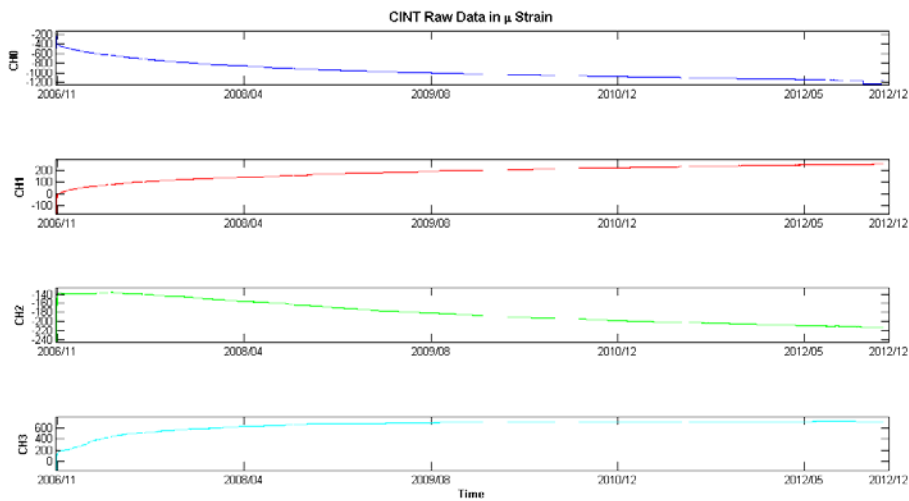


圖 3.10：新樂國小測站應變分量。2006-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

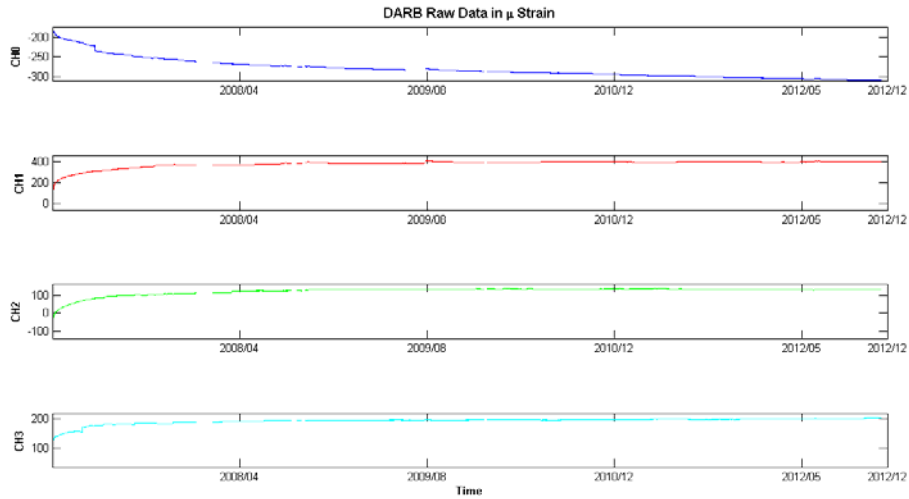


圖 3.11：達邦測站應變分量。2006-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

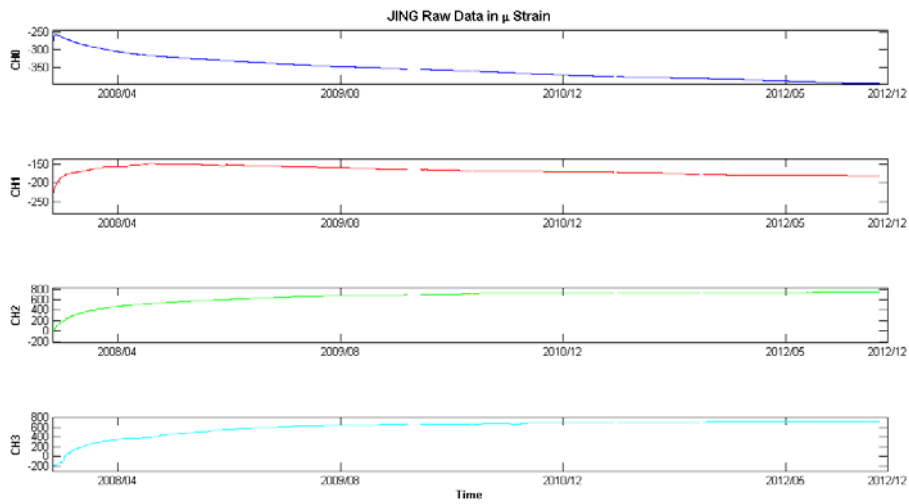


圖 3.12：錦和國小測站應變分量。2007-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

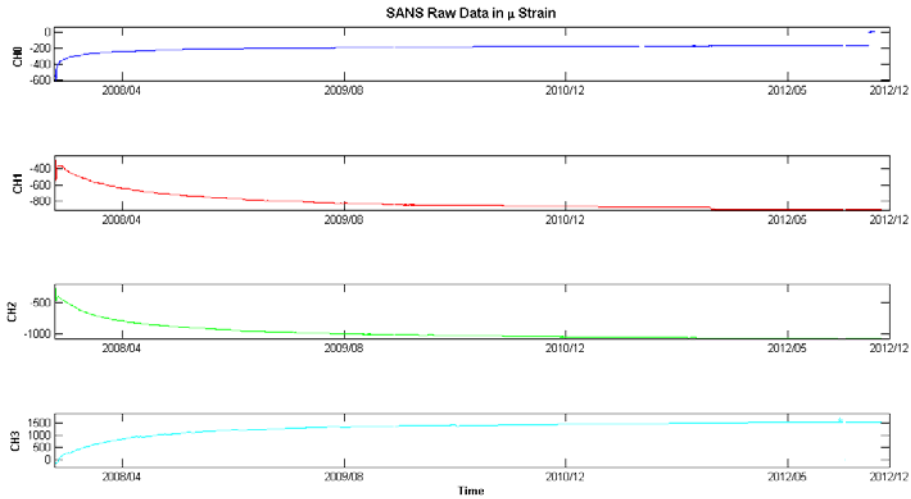


圖 3.13：明德中學測站應變分量。2007-2012 年 11 月資料轉變成應變後，各分量之資料。

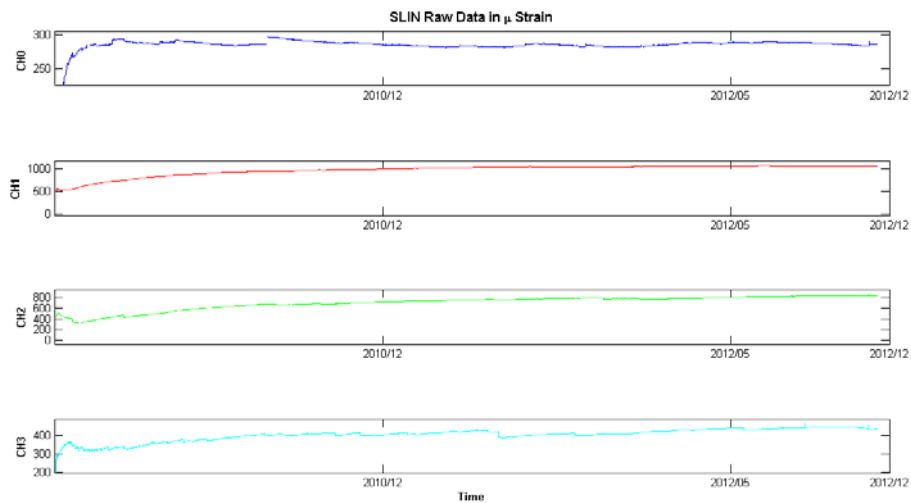


圖 3.14：樹林觀測站應變分量。2009-2012 年 11 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

由以上資料可看出各站資料資料偶因儀器故障中斷外，其餘大致完整。除了瑞峰國小測站有兩個分量資料不正常與嘉義地區測站受地下水變化所影響外，其餘都可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應(Dual- Exponential Relaxation)。中興國小與太興國小測站都有數十微應變(μstrain)的上下起伏變動，井孔回復的鬆弛效應並不明顯，再因其它效應(應該是地下水位變化的效應)引起變化太大，可能會影響到井孔回復的雙指數鬆弛效應的估計。今年蒐集到最早期的資料將會並進一步與附近地下水位觀測站資料連結，將試圖估計這效應的模式。在這階段的報告之後，將引用所有 11 站的資料，一起討論。(ECT 測站未修復與 LMMT 資料異常)

3-1-3 LEVEL-2：包含正確原始面積應變、剪應變

Gladwin 的 GTSM 井下應變儀的設計就是利用至少三個的伸張計(Extensometer) 放在一個平面上的三個方向，為方便計，各成 60 度角的差異(事實上，因空間的關係，無法是真正在同一平面上，而是上下有垂直差距。) ，而又為保險起見，在加另一伸張計與第三支成 30 度角的差距，也就是與第 2 支成 90 度的差異。在這樣的設計下，可以用第 1 到第 3 支的延伸量量測結果來計算所有的變形量，因其分布均勻，量測誤差傳播的結果，也不至於造成大的偏差。此時，就可以用矩陣的方式來表示：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_1 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_2 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_3 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (\text{式 3.1})$$

其中， $\theta_2 = \theta_1 + 60^\circ$ ； $\theta_3 = \theta_1 + 120^\circ$ 。至於第 4 支($\theta_4 = \theta_2 + 90^\circ$)的觀測量，可於前面三分量有問題時，可以取代之，或是第 4 支與第 2 支的觀測結果直接相加，也可以得到面積的變形量，這是因為二者成 90° 的夾角，在公式中，

$\cos 2\theta_2 = \cos 2(\theta_1 + 90^\circ) = -\cos 2\theta_1$ ；而 $\sin 2\theta_2 = \sin 2(\theta_1 + 90^\circ) = -\sin 2\theta_1$ ，因此，若前三個方向有良好的應變記錄，則可簡易求得 ε_a 、 γ_1 、 γ_2 三個工程量，其中 ε_a 是面積應變， γ_1 是跨過西北(Northwest)或東北(Northeast)平面的最大純工程剪斜(Engineering Shear)應變量，而 γ_2 是跨過東西或南北平面的最大純工程剪斜應變量，也就是說， γ_1 在東西或南北平面產生了最大的延伸(Extension)量，而 γ_2 在西北或東北平面產生了最大的延伸量。

為了資料分析及解釋，將各分量之資料轉換成面積應變與剪斜應變則是最基本的資料處理程序。在此同時，可由前三個方向所估計出來的三個工程量 ε_a 、 γ_1 、 γ_2 來估計第四個分量之值，以作為檢核之用。圖 3.15 至圖 3.26 為轉換成 ε_a 、 γ_1 、 γ_2 三個工程量所的結果。

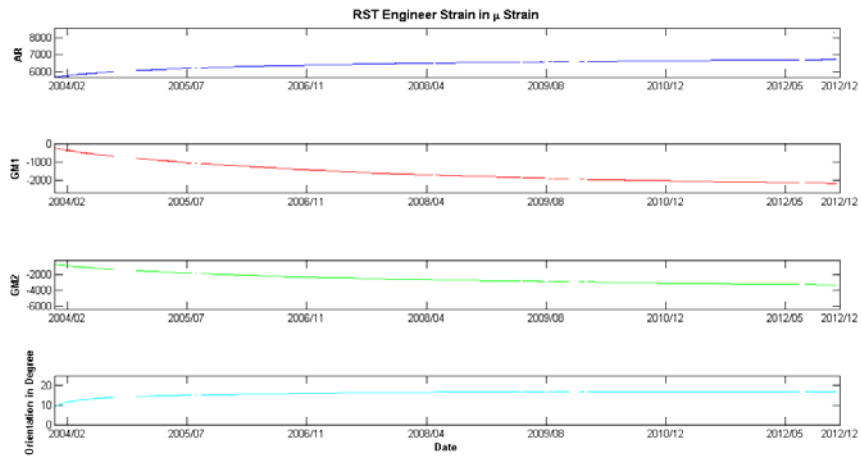


圖 3.15：曾文水庫南測站應變方向。於 2004 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2)及最大應變方向。

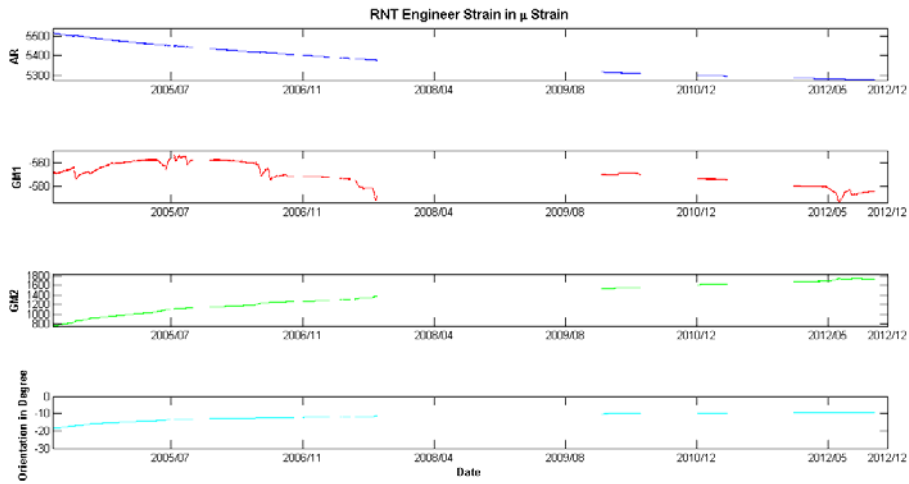


圖 3.16：曾文水庫北測站應變方向。於 2004 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2)及最大應變方向。

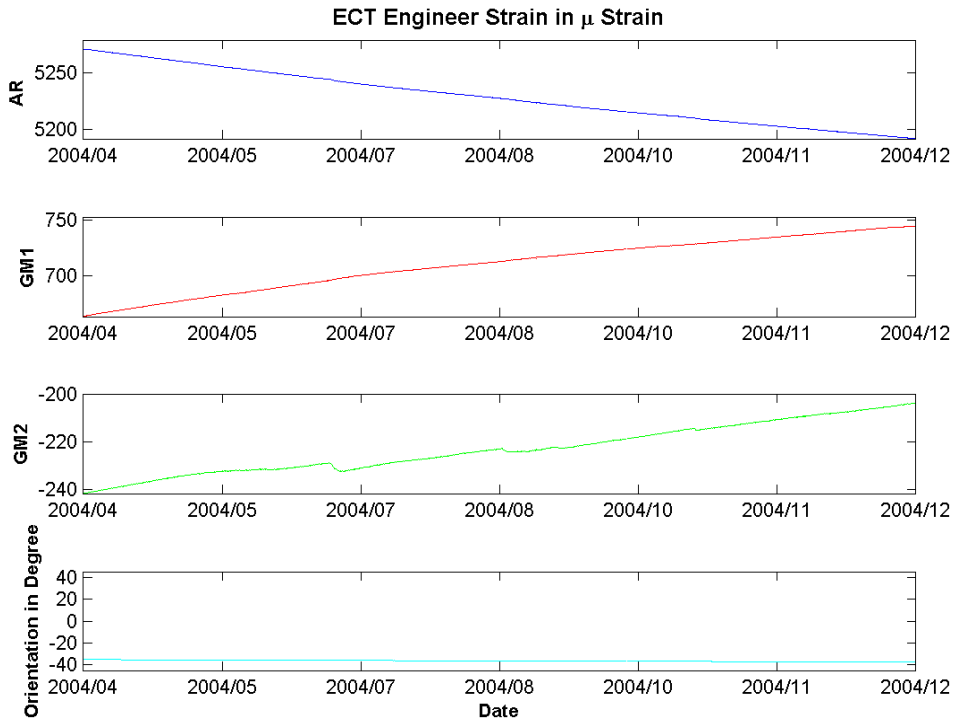


圖 3.17：甲仙十八灣測站應變方向。於 2004 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

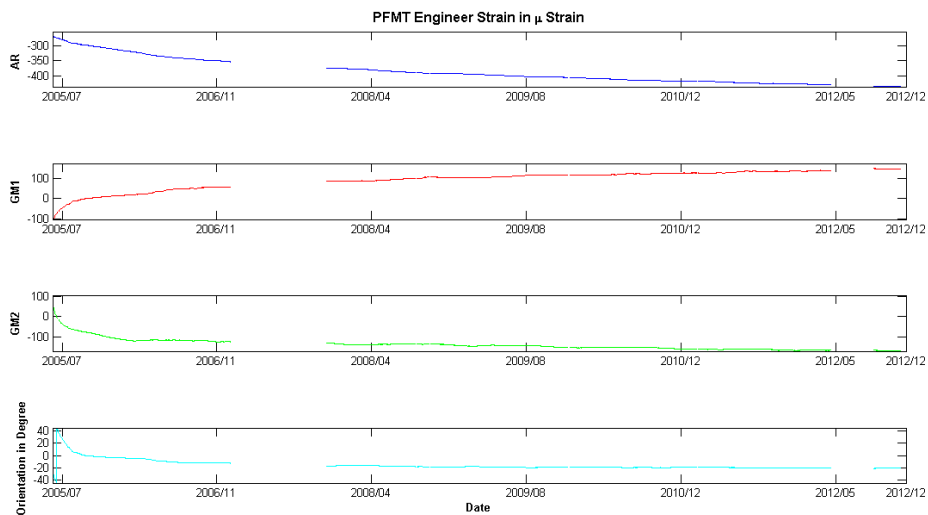


圖 3.18：梅花國小測站應變方向。於 2005 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

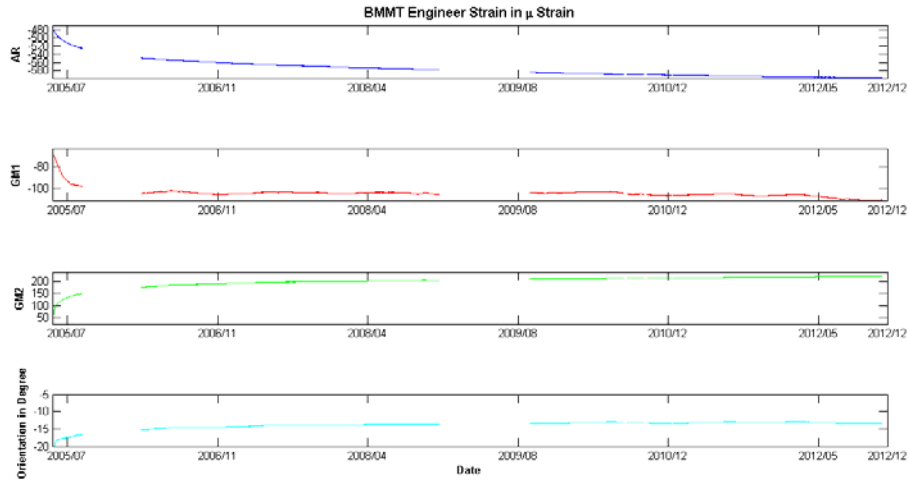


圖 3.19：大坪國小測站應變方向。於 2005 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

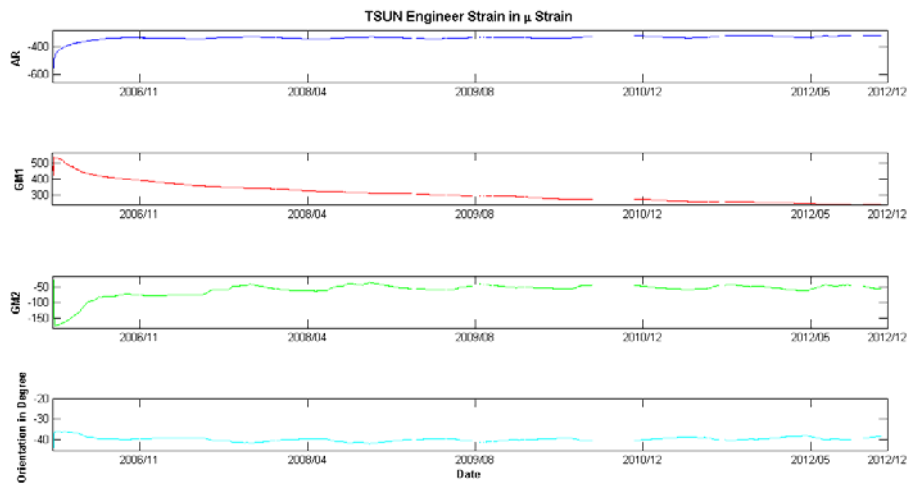


圖 3.20：中興國小測站應變方向。於 2006 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

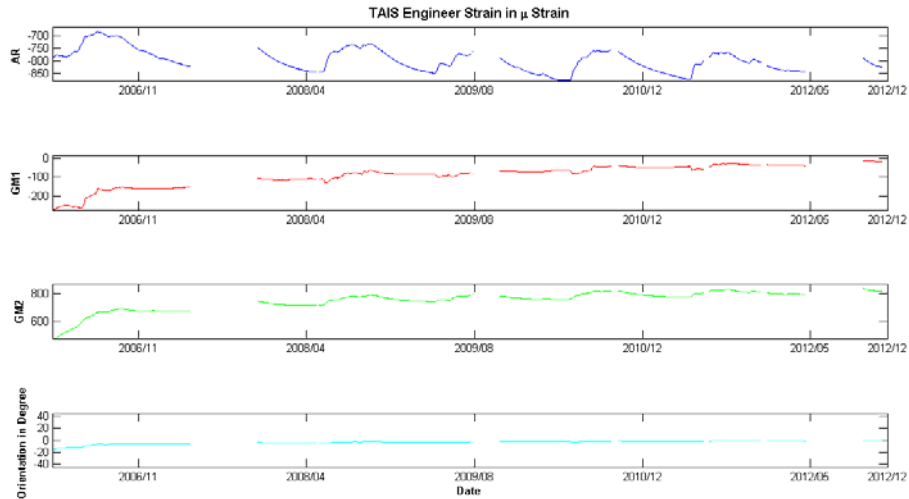


圖 3.21：太興國小測站應變方向。於 2006 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

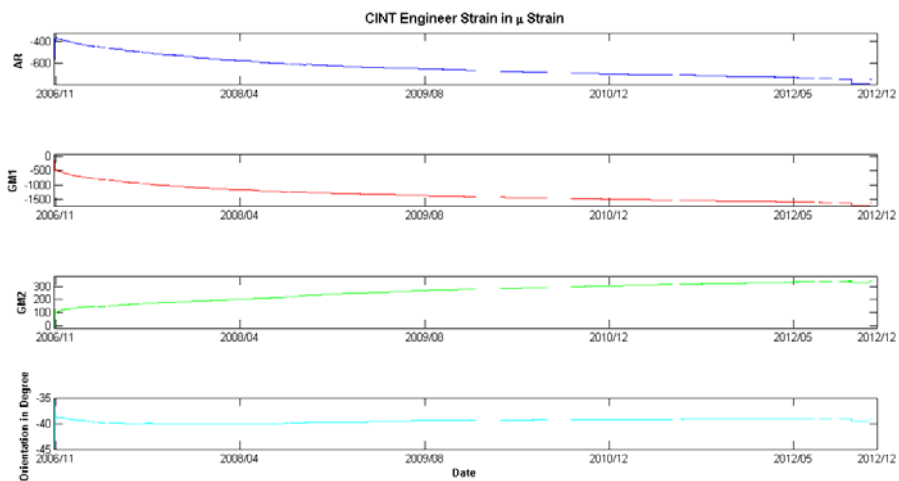


圖 3.22：新樂國小測站應變方向。於 2006 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

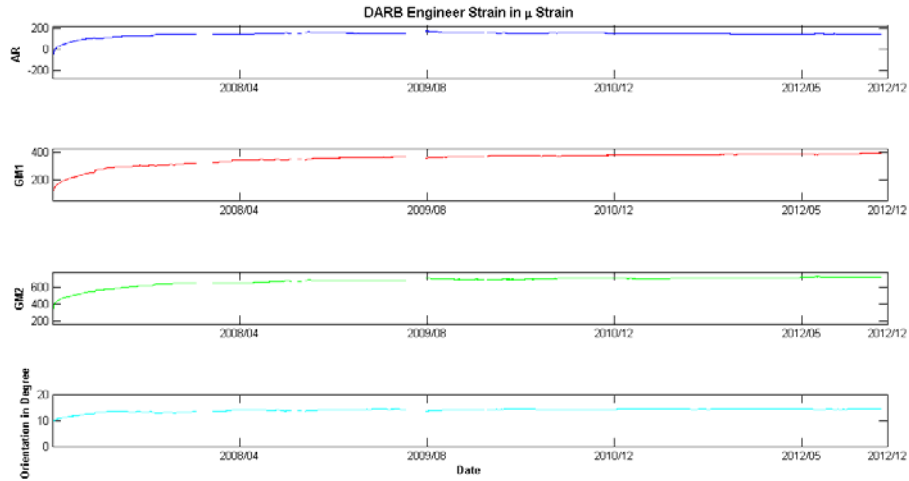


圖 3.23：達邦國小測站應變方向。於 2006 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

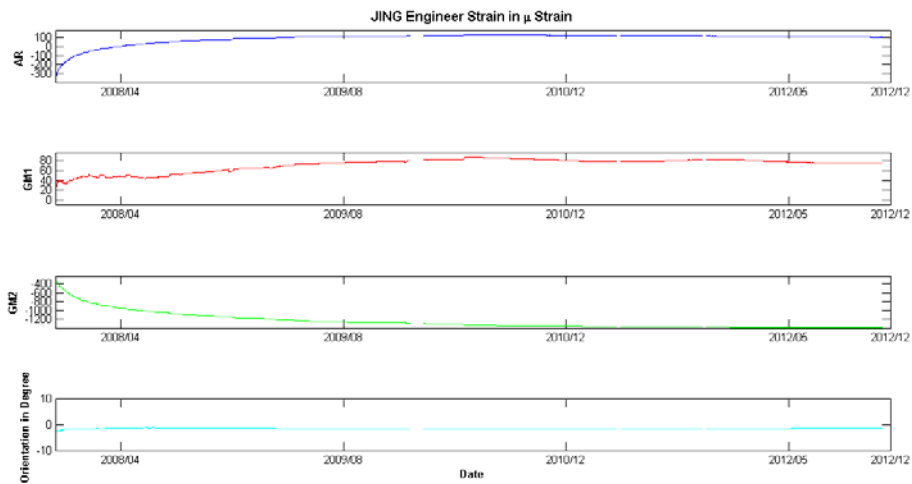


圖 3.24：錦和國小測站應變方向。於 2007 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

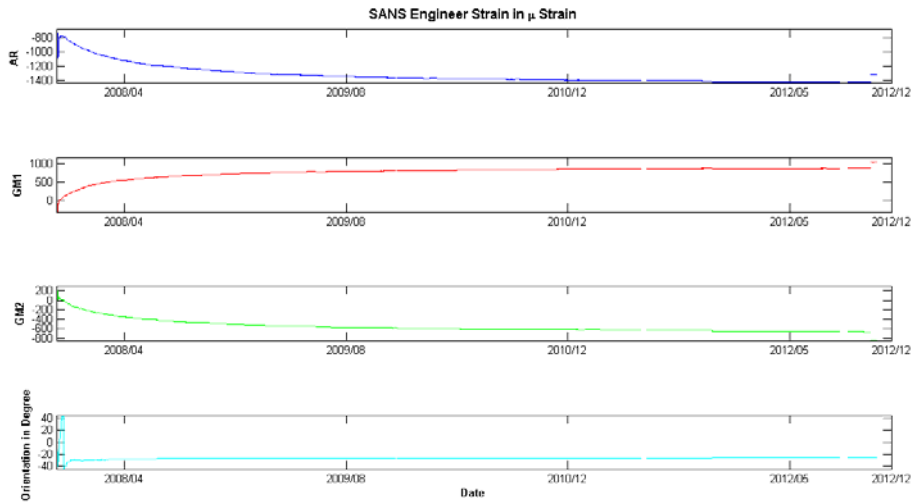


圖 3.25：明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

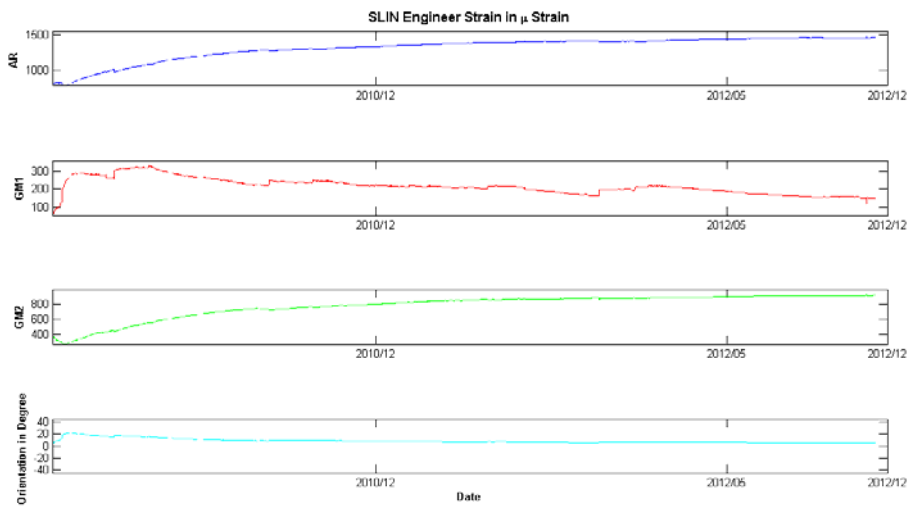


圖 3.26：樹林測站應變方向。於 2009 年到 2012 年 11 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ϵ_a (AR)、 γ_1 (GM1)、 γ_2 (GM2) 及最大應變方向。

3-1-4 井孔回復效應與水泥膨脹效應的估算與濾除

井下應變儀安裝在井洞之內後，用不收縮水泥封井，藉以結合岩石與儀器。當不縮收水泥乾涸時，最先數十小時會釋放出許多熱量，導致溫度急遽上升，其所造成的效應在不同應變儀會有不同的反應，而且相當複雜，通常棄而不用。之後在數年之內，被挖開的井會慢慢恢復，岩石、水泥與儀器會結成一體，不收縮水泥也會些許膨脹，慢慢的達到平衡，這兩種效應都會以自然對數的負指數方式衰減(附錄光碟-附錄 D)，因此可藉由函數回歸模式來做修正，以下為各測站回歸模式的參數與修正後的資料(圖 3.27 至圖 3.38)。

| RST | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a*\exp(-x/b)+c*\exp(-x/d)+e*x+f$ | Goodness of fit: SSE: 4.7361e+006 R-square: 0.9998 Adjusted R-square: 0.9998 RMSE: 3.3965 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | -636.5 (-637, -636) |
| b = | 150.8 (150.5, 151) |
| c = | 304.5 (296.9, 312.2) |
| d = | 10.67 (10.47, 10.86) |
| e = | 0.1386 (0.1382, 0.139) |
| f = | 1307 (1306, 1307) |

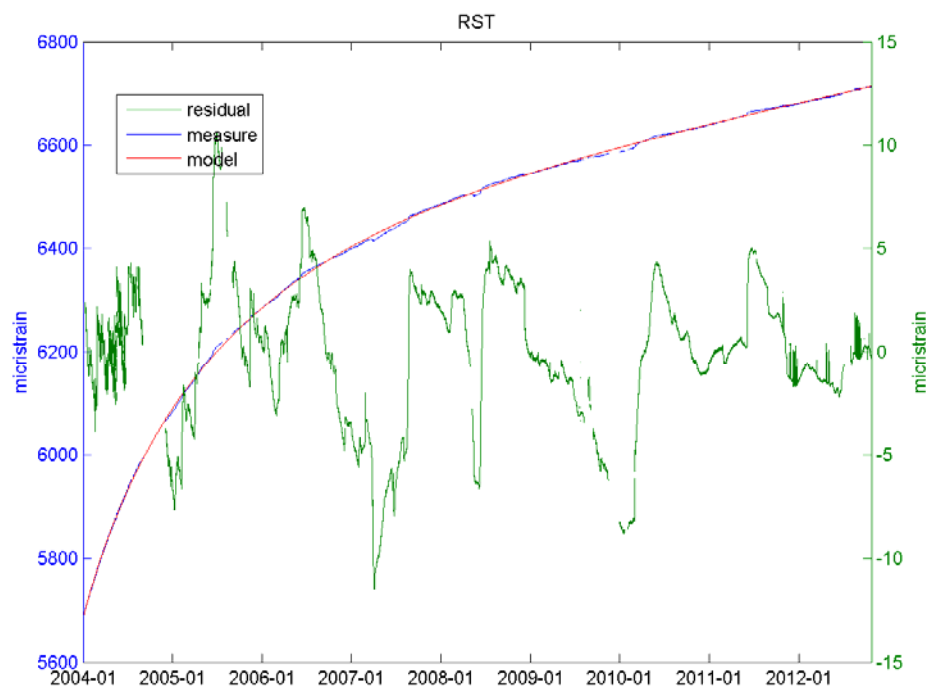


圖 3.27：曾文水庫南測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| RNT | |
|---|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 30.98 (30.87, 31.1) b = 200 (198.1, 202) c = 3.128e+004 (2.434e+004, 3.822e+004) d = 3.136e+004 (2.776e+004, 3.496e+004) e = 0.8731 (0.7662, 0.98) f = -2.576e+004 (-3.27e+004, -1.882e+004) | Goodness of fit: SSE: 1.397e+05 R-square: 0.9999 Adjusted R-square: 0.9999 RMSE: 0.7682 |

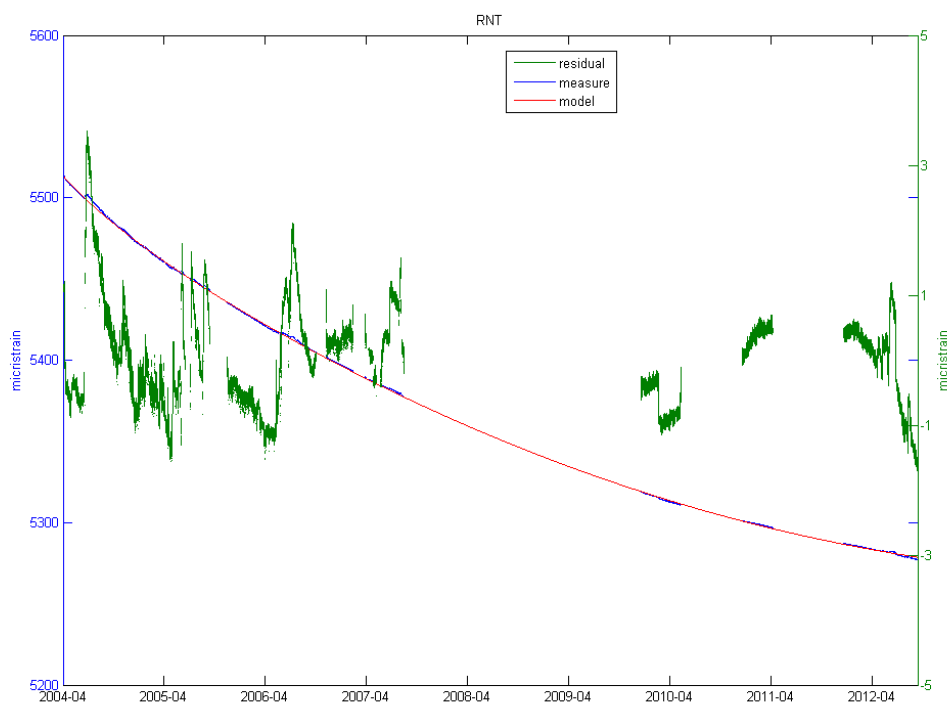


圖 3.28：曾文水庫北測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| ECT | |
|--|--|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ | Goodness of fit: SSE: 1513 R-square: 0.9999 Adjusted R-square: 0.9999 RMSE: 0.2017 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | -3.38 (-3.813, -2.946) |
| b = | 25.36 (23.56, 27.16) |
| c = | 22.61 (22.35, 22.86) |
| d = | 100 (95.5, 104.5) |
| e = | -0.2374 (-0.2391, -0.2357) |
| f = | 5254 (5254, 5255) |

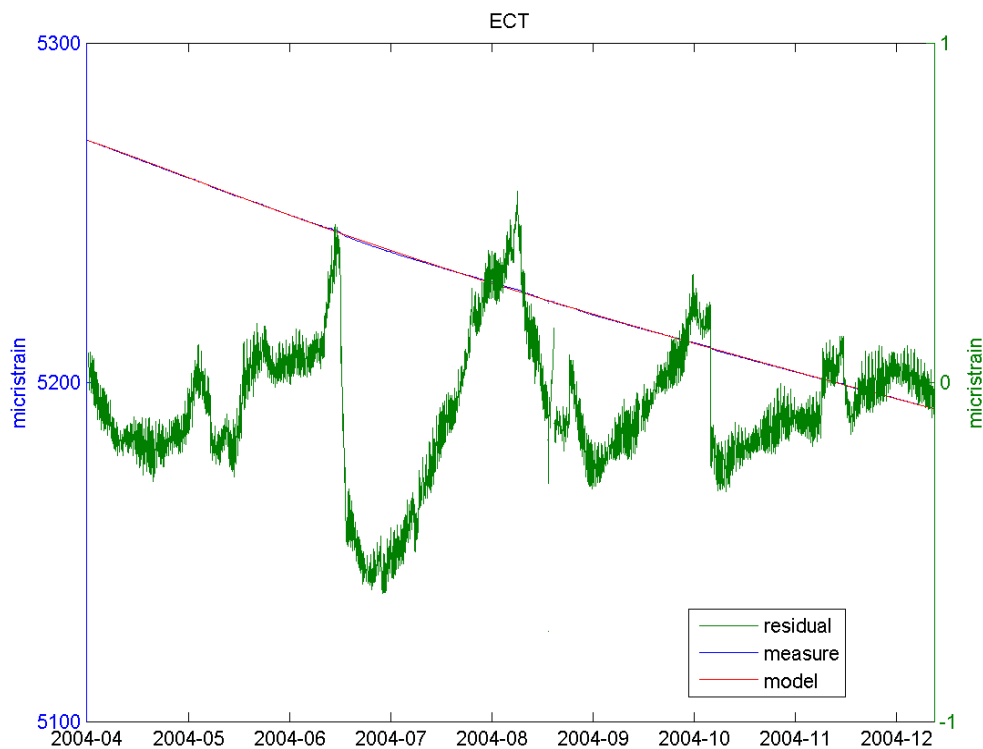


圖 3.29：甲仙十八灣測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| PFMT | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 29.33 (28.87, 29.78) b = 183.4 (181.3, 185.5) c = 79.15 (78.93, 79.37) d = 719.4 (712.7, 726.1) e = -0.02203 (-0.02214, -0.02192) f = -378 (-378.3, -377.7) | Goodness of fit: SSE: 3.6987e+005 R-square: 0.9992 Adjusted R-square: 0.9992 RMSE: 1.1050 |

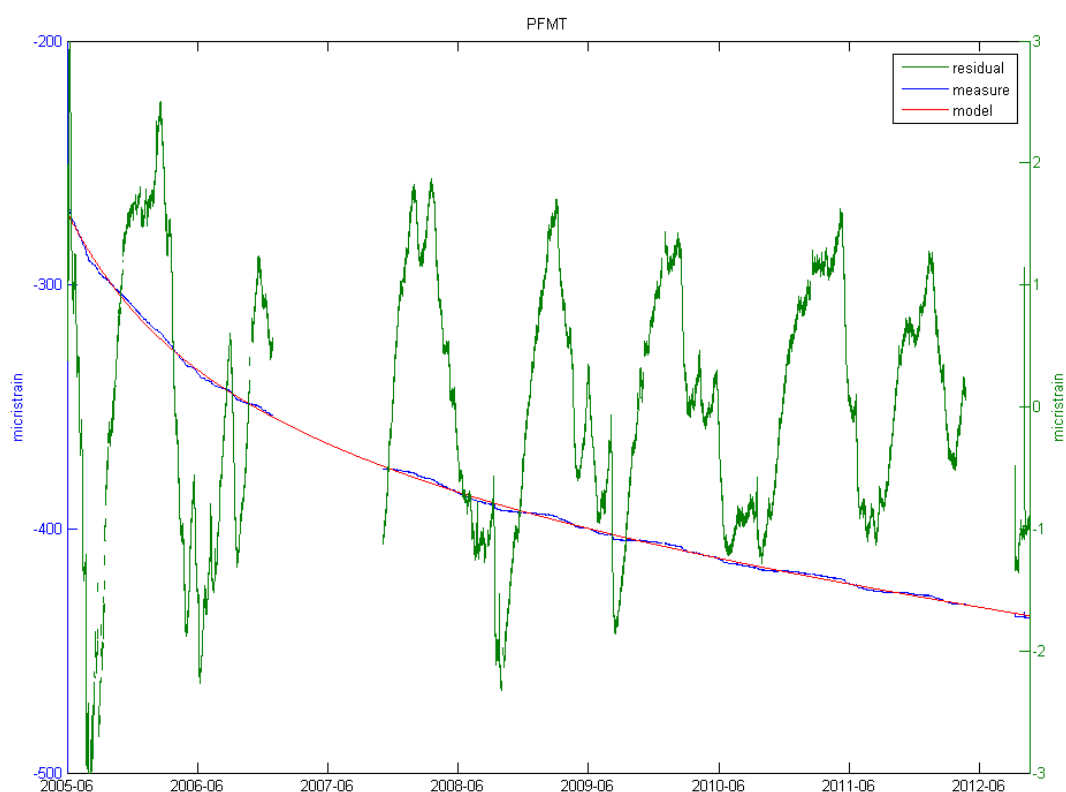


圖 3.30：梅花國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| BMMT | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ | Goodness of fit: SSE: 2.9726e+05 R-square: 0.9997 Adjusted R-square: 0.9997 RMSE: 0.3104 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | 51.89 (51.86, 51.91) |
| b = | 99.16 (99.06, 99.26) |
| c = | 131.1 (129.6, 132.5) |
| d = | 2675 (2655, 2696) |
| e = | 0.009915 (0.009707, 0.01012) |
| f = | -672.2 (-673.6, -670.8) |

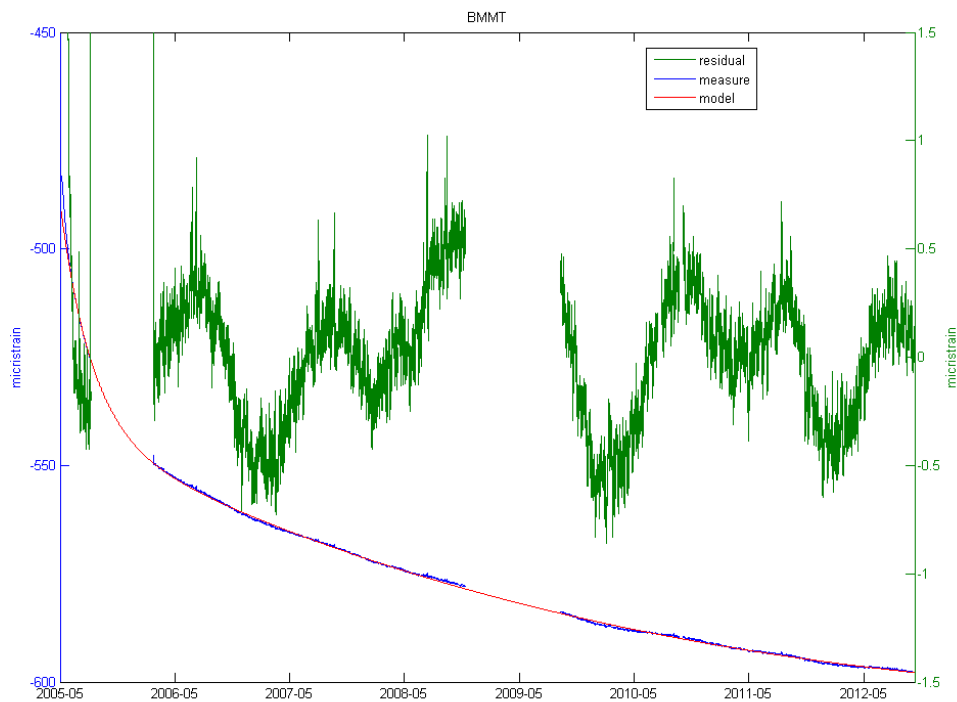


圖 3.31：大坪國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| TSUN | |
|--|--|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ | Goodness of fit: SSE: 7.0020e+006 R-square: 0.8100 Adjusted R-square: 0.8100 RMSE: 4.8073 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | -132.4 (-133, -131.8) |
| b = | 58.79 (58.44, 59.15) |
| c = | 4091 (-3702, 1.188e+004) |
| d = | 1.854e+004 (234.5, 3.684e+004) |
| e = | 0.2121 (0.009145, 0.4151) |
| f = | -4422 (-1.221e+004, 3371) |

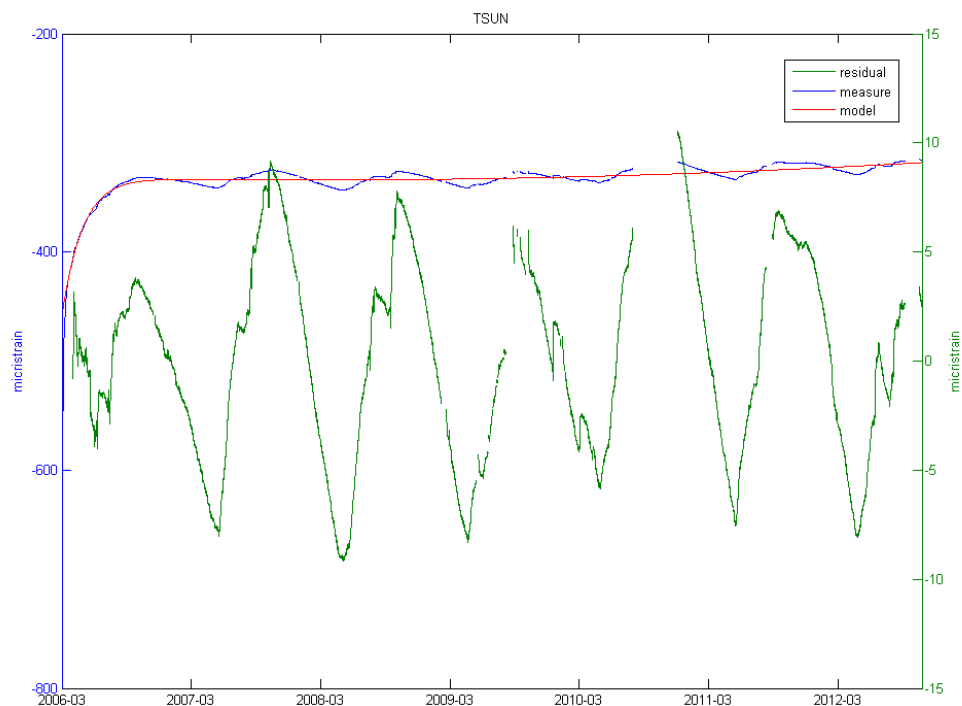


圖 3.32：中興國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| TAIS | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 4.497e+005 (-1.372e+006, 2.272e+006) b = 2.213e+005 (-5.516e+005, 9.943e+005) c = 4.402e+005 (-1.346e+006, 2.226e+006) d = 2.202e+005 (-5.543e+005, 9.947e+005) e = 3.979 (0.6617, 7.297) f = -8.899e+005 (-2.358e+006, 5.781e+005) | Goodness of fit: SSE: 2.1025e+006 R-square: 0.9477 Adjusted R-square: 0.9477 RMSE: 3.5091 |

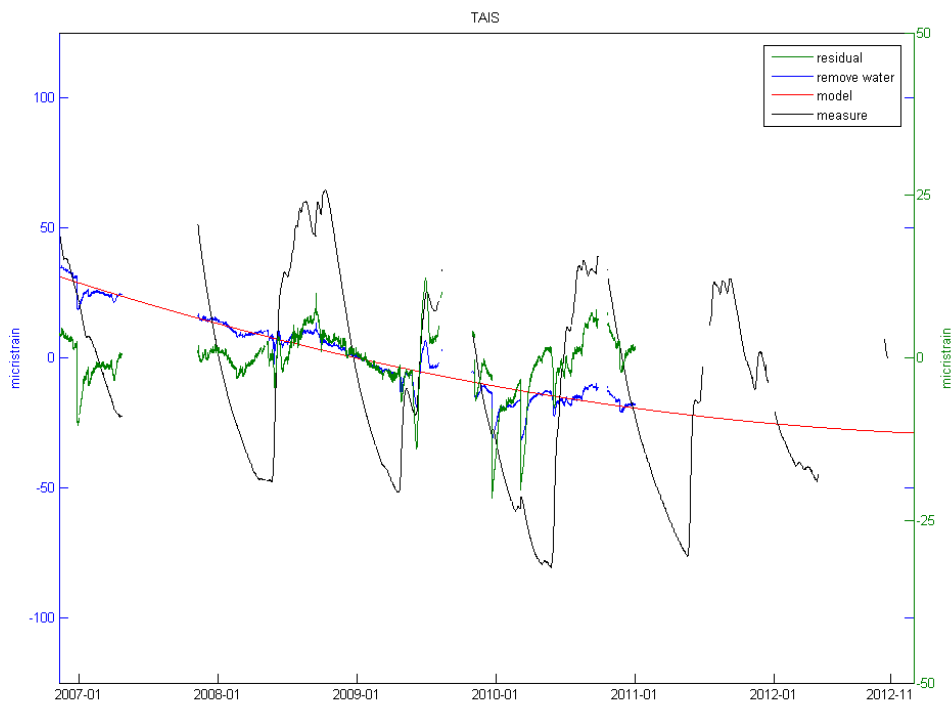


圖 3.33：太興國小測站原始面應變與模式修正。此站受地下水影響特別明顯，必須先校正原始面應變中的地下水影響，才可進行井孔回復與水泥乾枯效應的評估。原始面應變觀測的時間序為黑色，修正過地下水影響的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| CINT | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ Coefficients (with 95% confidence bounds): | Goodness of fit: SSE: 8.9436e+05 R-square: 0.9995 Adjusted R-square: 0.9995 RMSE: 1.8676 |
| a = | 32.7 (32.55, 32.85) |
| b = | 22.11 (21.91, 22.32) |
| c = | 233.1 (233, 233.2) |
| d = | 410.3 (409.9, 410.7) |
| e = | -0.05973 (-0.05979, -0.05967) |
| f = | -616.7 (-616.8, -616.6) |

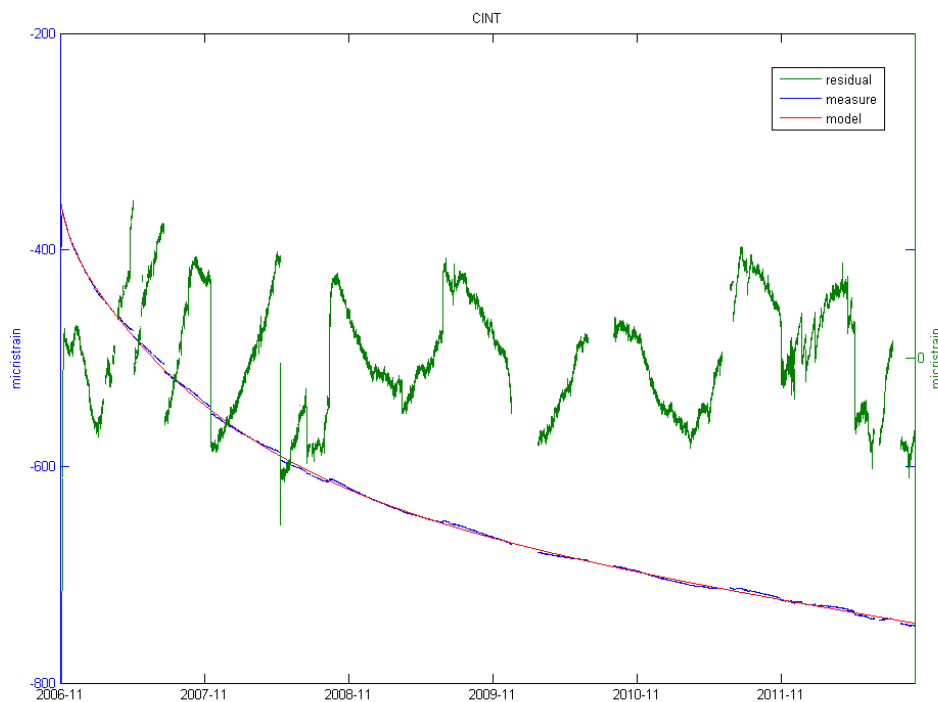


圖 3.34：新樂國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| DARB | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ | Goodness of fit: SSE: 1.7713e+06 R-square: 0.9733 Adjusted R-square: 0.9733 RMSE: 2.5380 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | -95.62 (-96.03, -95.2) |
| b = | 55.41 (55.03, 55.78) |
| c = | -85.64 (-85.79, -85.48) |
| d = | 469.5 (466.7, 472.3) |
| e = | -0.02048 (-0.02059, -0.02036) |
| f = | 190.6 (190.4, 190.9) |

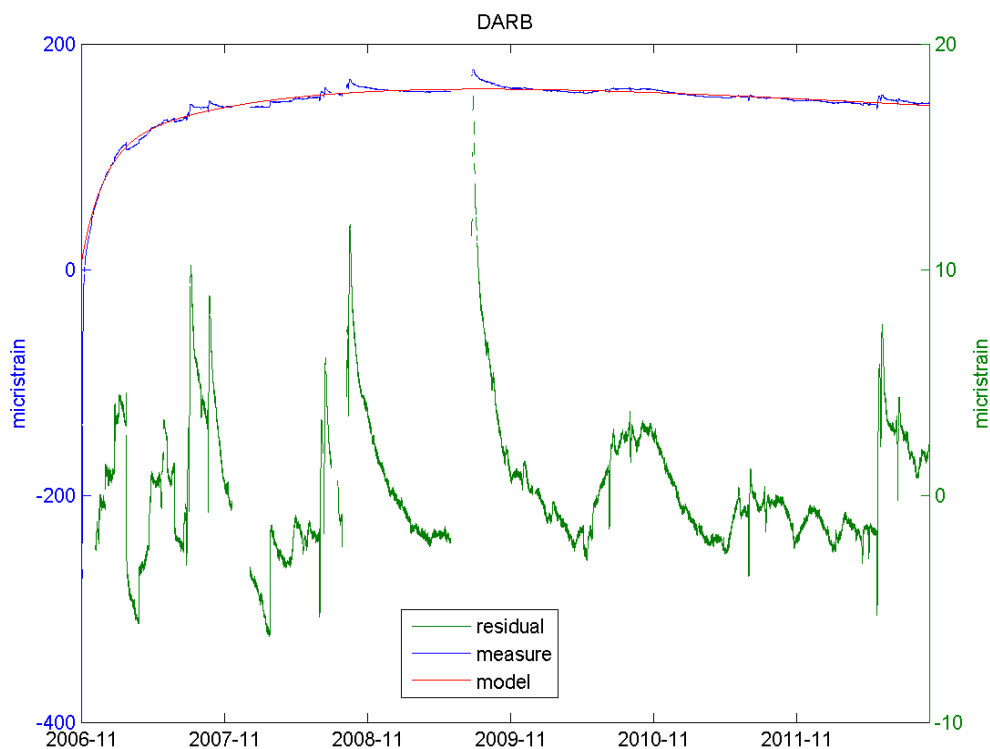


圖 3.35：達邦測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| JING | |
|--|---|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ Coefficients (with 95% confidence bounds): | Goodness of fit: SSE: 1.7379e+06 R-square: 0.9969 Adjusted R-square: 0.9969 RMSE: 2.6599 |
| a = | -177.5 (-177.8, -177.1) |
| b = | 52.14 (51.94, 52.35) |
| c = | -234 (-234.2, -233.8) |
| d = | 366.2 (365.3, 367.1) |
| e = | -0.03856 (-0.0387, -0.03841) |
| f = | 177.5 (177.2, 177.7) |

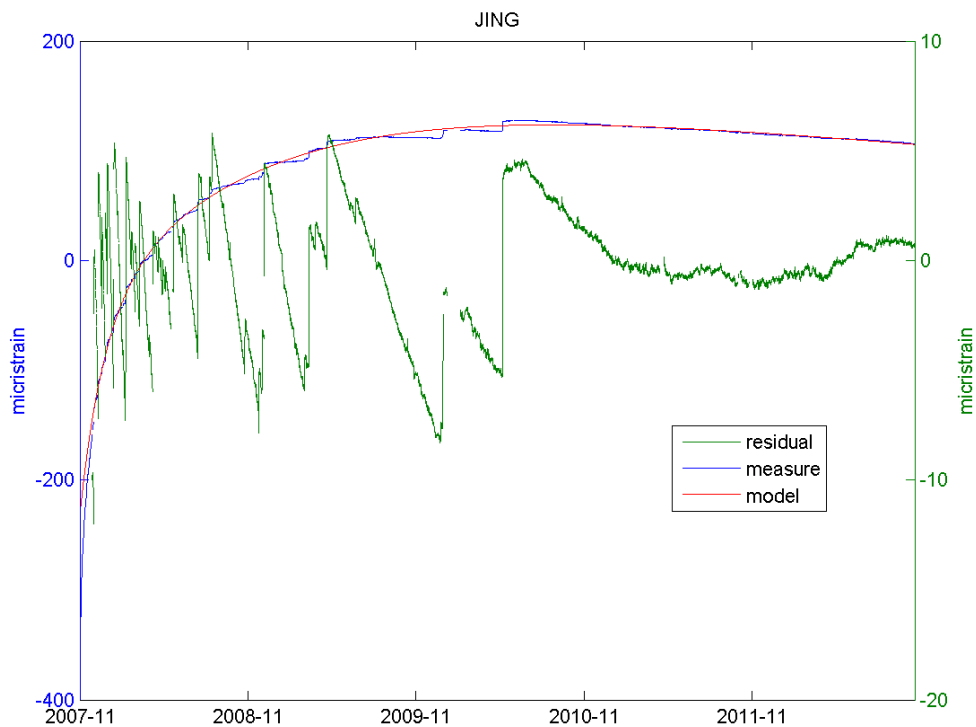


圖 3.36：錦和國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| SANS | |
|--|--|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ | Goodness of fit: SSE: 3.9031e+006 R-square: 0.9990 Adjusted R-square: 0.9990 RMSE: 3.9420 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | 260.7 (260.2, 261.2) |
| b = | 46.12 (45.99, 46.26) |
| c = | 419.6 (419.2, 420) |
| d = | 247.4 (247, 247.8) |
| e = | -0.04739 (-0.0475, -0.04728) |
| f = | -1345 (-1345, -1345) |

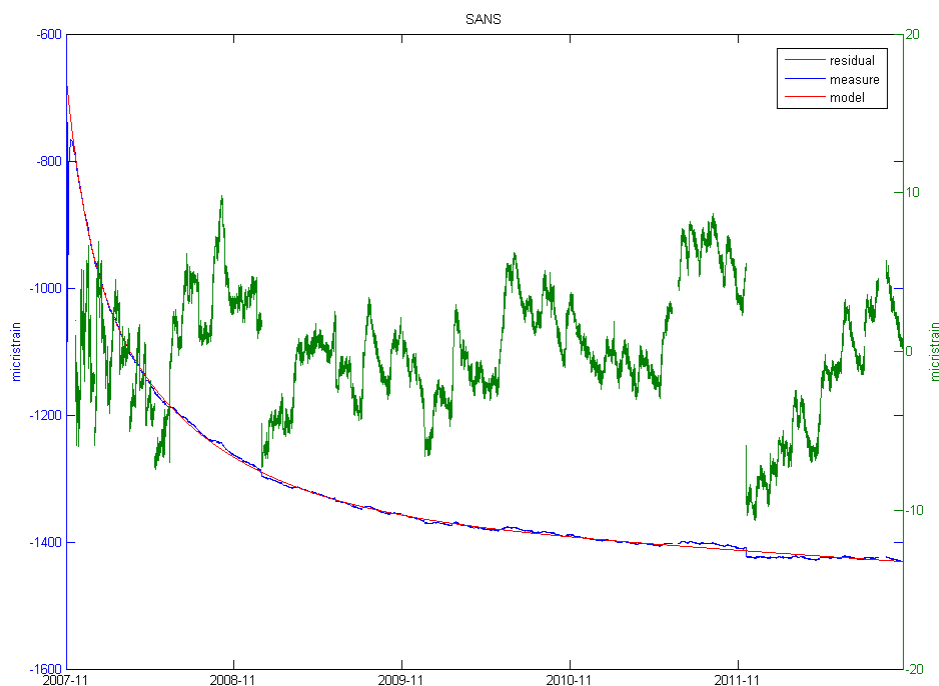


圖 3.37：明德國中測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

| SLIN | |
|--|--|
| General model: $f(x) = a \cdot \exp(-x/b) + c \cdot \exp(-x/d) + e \cdot x + f$ | Goodness of fit: SSE: 1.1245e+007 R-square: 0.9970 Adjusted R-square: 0.9970 RMSE: 8.5414 |
| Coefficients (with 95% confidence bounds): | |
| a = | -636.5 (-637, -636) |
| b = | 150.8 (150.5, 151) |
| c = | 304.5 (296.9, 312.2) |
| d = | 10.67 (10.47, 10.86) |
| e = | 0.1386 (0.1382, 0.139) |
| f = | 1307 (1306, 1307) |

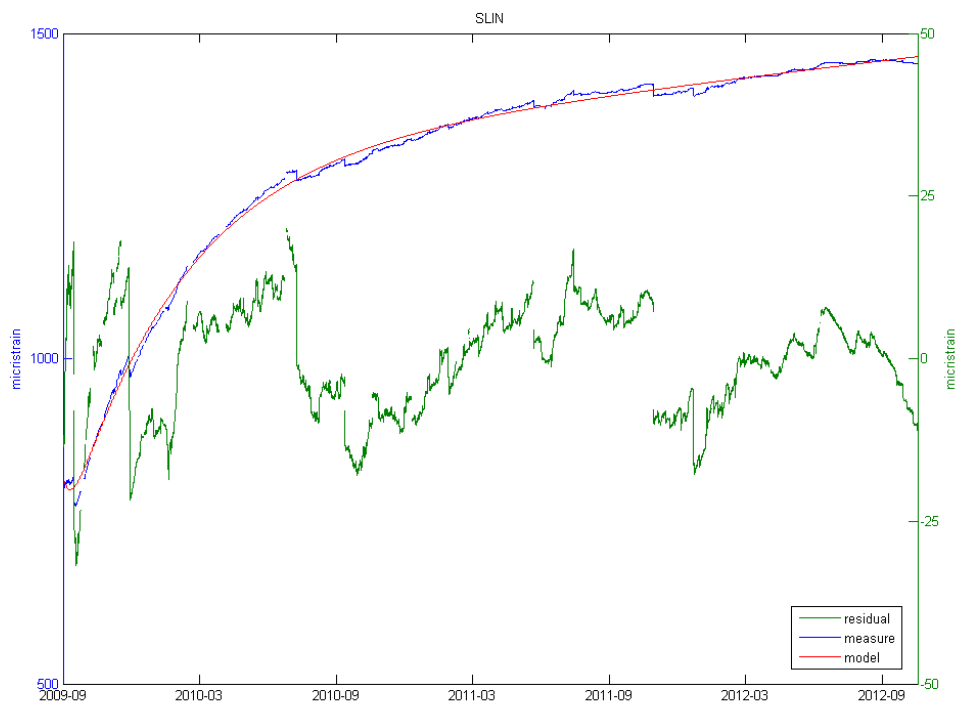


圖 3.38：樹林測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

3-1-5 資料完整性測試

在應變與應變公式的理論推導中，一個平面上若能測到三個方向獨立的線性變形量，只要這三方向角度不都擠在一起(即其相關性不會太高)，則可以由這三個分量的資料預測到這平面上任一方向的線性應變量 $e(\theta)$ 及剪應變量 $\gamma(\theta)$ ，即

$$\begin{aligned} e(\theta) &= \frac{1}{2}e_a + \frac{1}{2}\gamma_1 \cos 2\theta + \frac{1}{2}\gamma_2 \sin 2\theta \\ \gamma(\theta) &= -\gamma_1 \sin 2\theta + \gamma_2 \cos 2\theta \quad (\text{engineering shear}) \end{aligned} \quad (\text{式 3.2})$$

這即是在任一方位角 θ 的延伸量 $e(\theta)$ 以及工程剪斜應變 $\gamma(\theta)$ 。

若我們以此來推測第四個方向的線性應變量，則可以和原記錄比較，依此圖 3.39 至圖 3.49 顯示所比較的結果。這些比較可以顯示各測站各軸方向正確性。為了更進一步的證實，我們也會將前所述的面積應變的兩個檢驗量，即將 GTSM 井下應變儀的三個平面上各成 60 度角的平均值即為其面積應變 $\epsilon_a = (e(0) + e(1) + e(2))/3$ ，應該與成 90 度的第 4 支及第 2 支的平均值 $\epsilon_a = (e(2) + e(4))/2$ 相等。在這樣的設計下，我們可以用兩種與方向性相關的檢驗方法同時比較各分量的真正的方向角與記錄有差異。這樣的差異一直存在許多測站的資料中，在 2009 年曾與儀器製造者 Prof. Gladwin 討論這問題，但他認為不可能儀器裝置錯誤，而未再討論，僅說可能是其它環境或地形因素所造成的。所以所有的資料計算仍然根據原廠商所提供的角度資料來計算，將來有足夠的資料時再做進一步的探討。

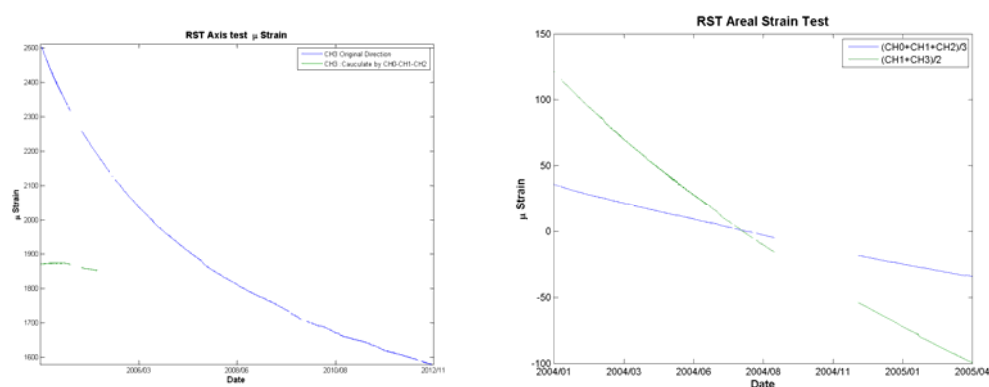


圖 3.39：曾文水庫南測站的比較檢核。利用曾文水庫南測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

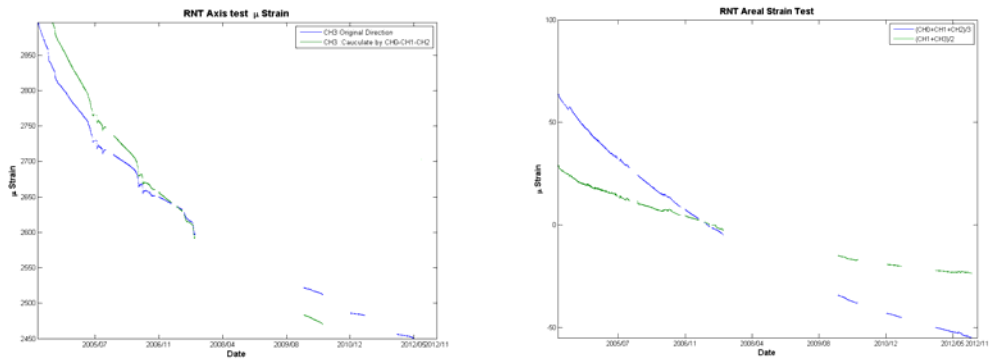


圖 3.40：曾文水庫北測站的比較檢核。利用曾文水庫北測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

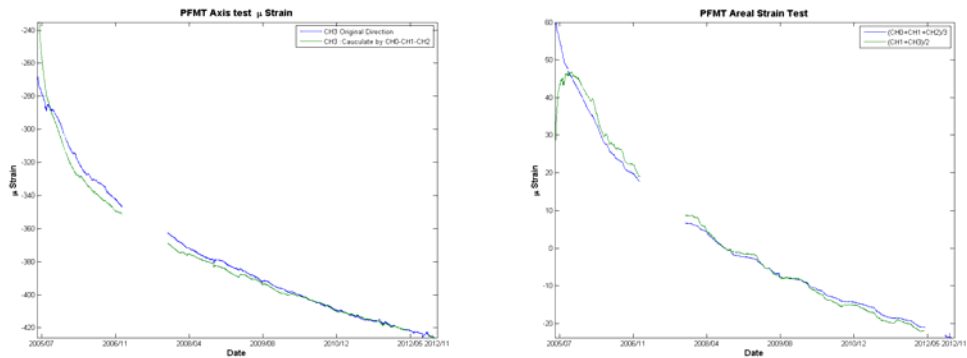


圖 3.41：梅花國小測站的比較檢核。利用梅花國小測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

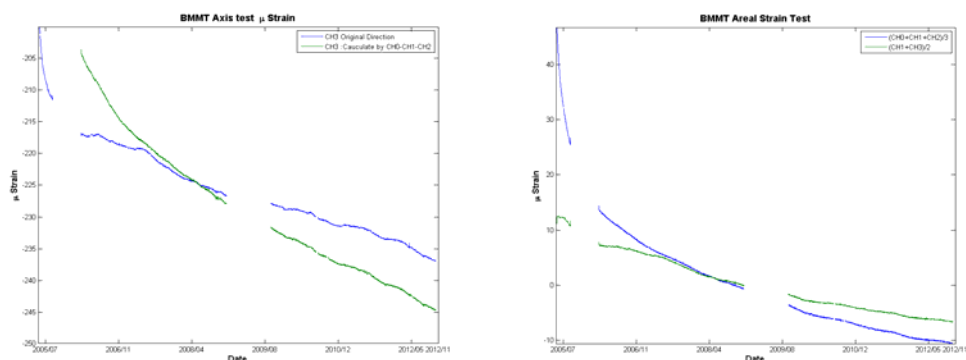


圖 3.42：大坪國小測站的比較檢核。利用大坪國小測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1, γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

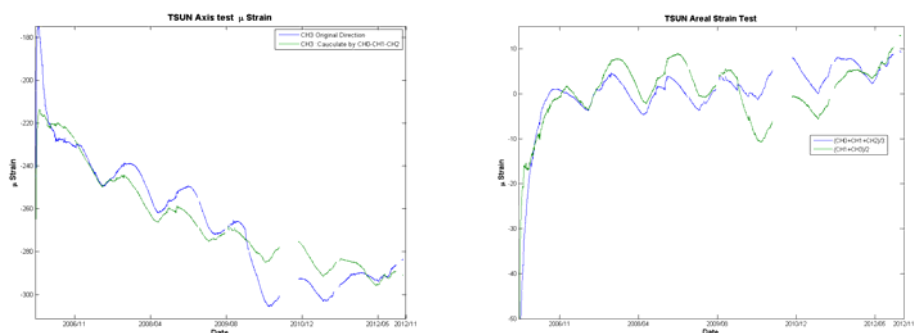


圖 3.43：中興國小測站的比較檢核。利用中興國小測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1, γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

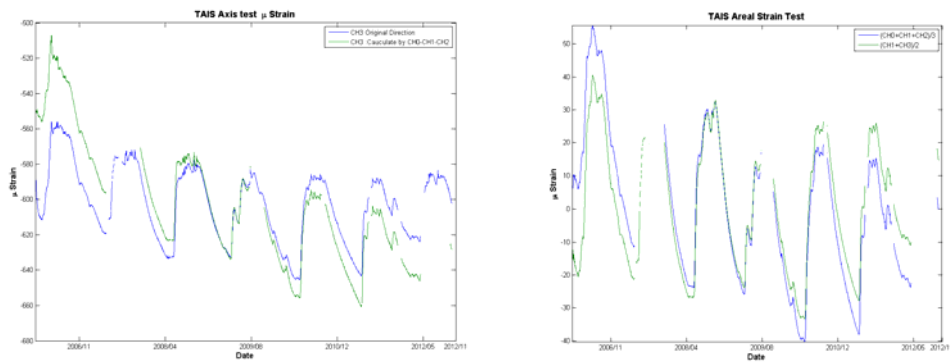


圖 3.44：太興國小測站的比較檢核。利用太興國小測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

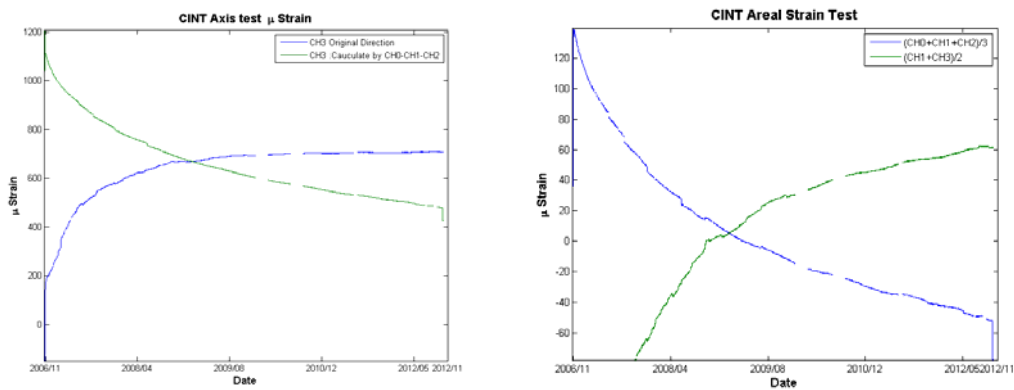


圖 3.45：新樂國小測站的比較檢核。利用新樂國小測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

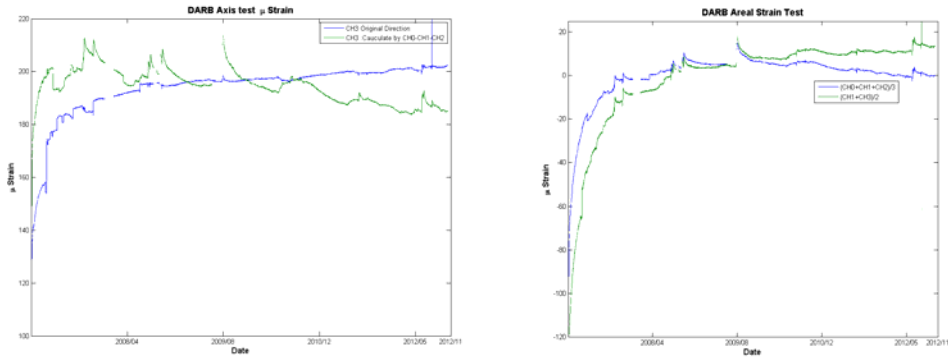


圖 3.46：達邦測站的比較檢核。利用達邦測站的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

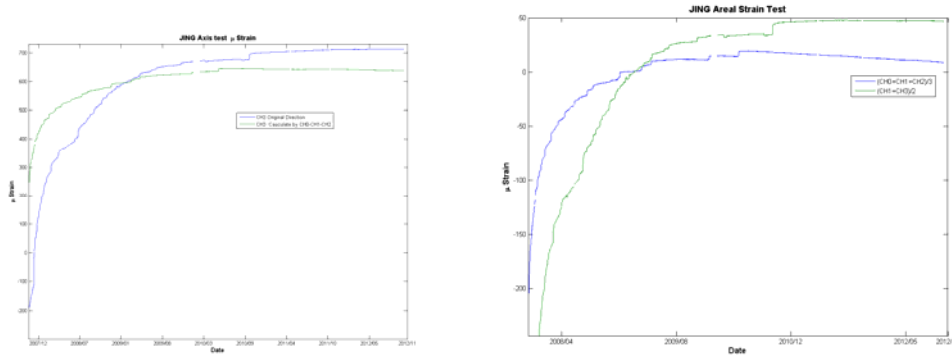


圖 3.47：錦和國小測站的比較檢核。利用錦和國小測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1 、 γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

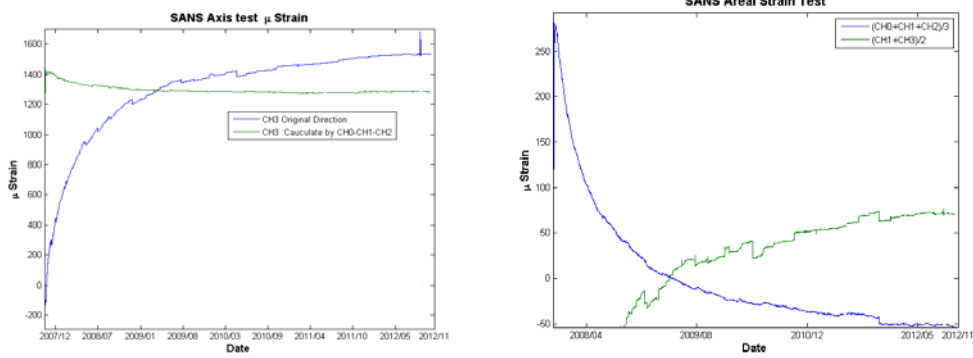


圖 3.48：明德中學測站的比較檢核。利用明德中學測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1, γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

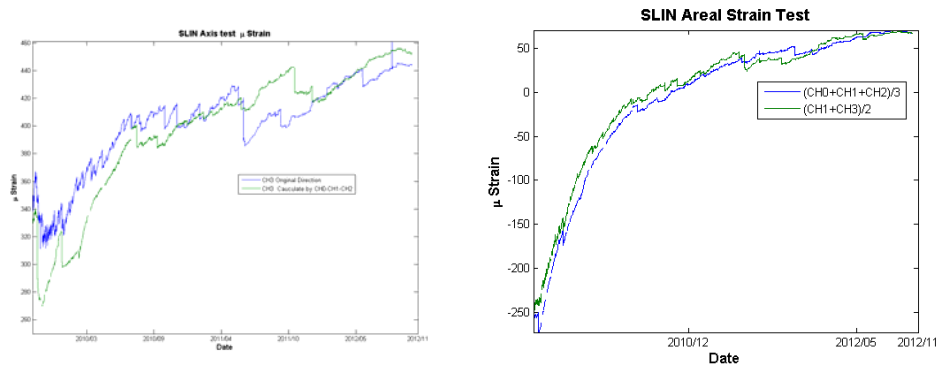


圖 3.49：樹林測站的比較檢核。利用樹林測站的工程應變量的面積應變 ϵ_a 及剪應變 (γ_1, γ_2) 可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 $(CH0+CH1+CH2)/3$ 與第 2 支及第 4 支的平均值 $(CH1+CH3)/2$ 的比較檢核。

3-2 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷

3-2-1 影響應變儀資料變化的因素

井下應變儀是一種相當敏感的地殼變形監測儀器，通常需要埋設於地底下壹至兩百公尺深度以下，以減少溫度變化或其它環境或地表活動所產生的地殼變形。然而，縱使如此細心的設計，仍然無法排除所有的環境變化因素，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、地表空氣壓地變化、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形...等。

但估計各種因素對井下應變儀的影響，不可僅有單一因素來估計，也無法由幾個單一時間多種因素來做回歸分析，畢竟在這階段還無法把所有會影響井下應變儀的所有因素都放在多變數回歸模式中，不完整的回歸模式會因為各種變數間的高相關而產生錯誤的回歸模式，例如颱風來時的低氣壓往往伴隨著很大的降雨量，氣壓、氣溫、潮汐與地下水都有很明顯的年週期，各變數間的高相關性很容易產生偏差的模式，因此，本計畫將依各站各變數一步一步的試圖建立起正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，然後才在剩餘的資料中，試圖找出可能的地震前兆訊號，或是由與地震相關的變化找出斷層在地震前、後或同震的活動狀況。

在過去對資料分析的成果中[胡植慶等，2011]，已能正確的建立各測站的井孔恢復效應(圖 3.27-圖 3.38)、估算大氣壓力影響分量(圖 3.50)與初步計算面應變中地潮的影響分量(圖 3.51)，並且在嘉義各測站資料中看出此區域的地下水變化相當大，可高達 20 公尺(圖 3.52)，而每公尺地下水變化可能相對於岩層中的孔隙水壓的變化，對岩層會產生約 $0.56 \sim 9.05 \mu\text{strain/meter}$ 的應變影響，因此這一地區的資料一定要先移除地下水效應(或孔隙水壓效應)的影響，否則無法估計其它的效應。在新竹地區的地下水資料則較不完全(圖 3.53)，大坪國小(BMMT)測站無地下水的觀測資料，瑞峰國小(LMMT)測站的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全，新樂國小(CINT)測站的地下水資料變化不大，約在 61~64 公尺之間，其對井下應變儀的效應則約為 $4.0 \mu\text{strain/meter}$ ，梅花國小(PFMT)測站的地下水變化約在 115~132 公尺之間，於 2005 年至今持續的下降，水位的年變化不大，看不出週期性，但這一站的井下應變儀資料並看不出持續下降的變化，這也有可能是在移除井孔效應時，這長期的線性變化也一併的被移除了。所以對新竹地區的應變資料無法先移除地下水的影響量。台北地區的地下水資料較新竹測網的地下水資料完整(圖 3.54)，各站水位長期趨勢大致不變，水位變化與井下應變儀資料並沒有像嘉義地區那麼高相關(圖 3.55)，是否可以直接移除地下水的影響量需要進一步的研究。

Atmospheric Pressure

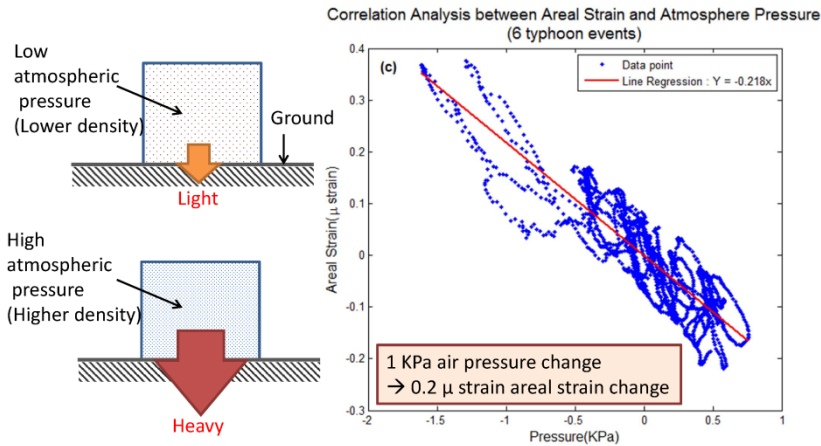


圖 3.50：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。氣壓的上升對應變儀面應變造成重荷而產生壓縮，因此氣壓的變化與面應變的變化是負相關。

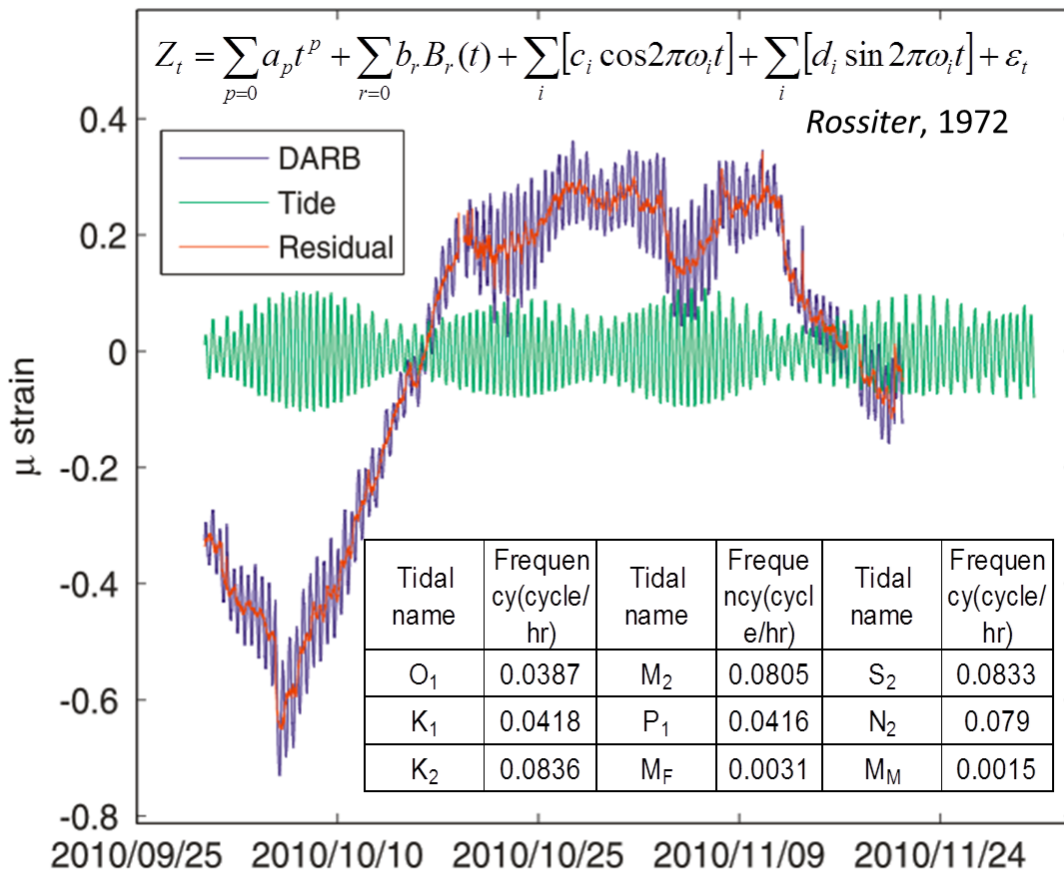


圖 3.51：井下應變儀中地潮分量的評估。利用固定幾個主要得起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，再加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應，詳細理論請參考附錄光碟－附錄 D。藍色線段是原始面應變資料、綠色線段為所評估出來的地潮分量，而紅色線段為原始面應變扣掉地潮分量後的殘差。

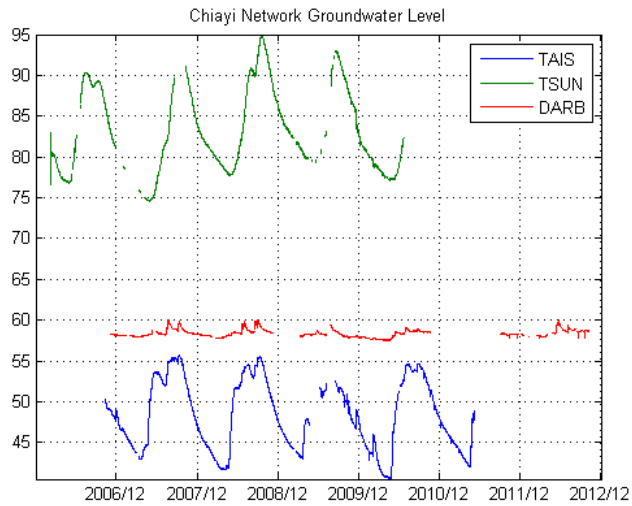


圖 3.52：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。

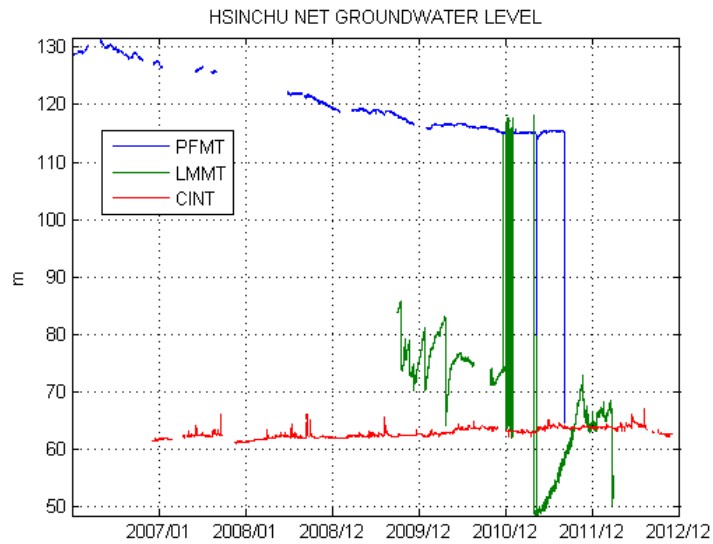


圖 3.53：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小地下水位持續下降。

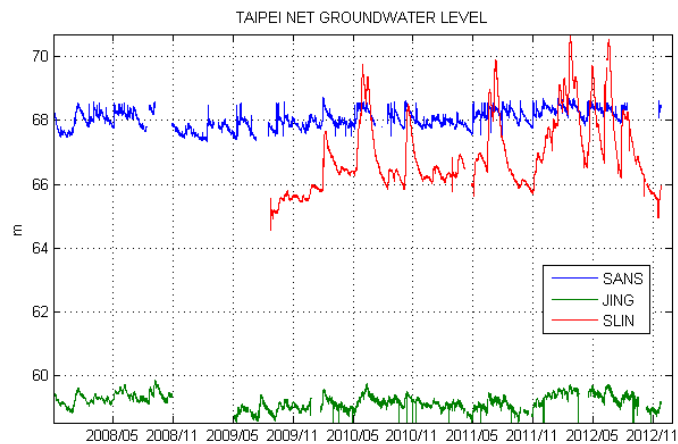


圖 3.54：台北地區地下水各測站水位資料。

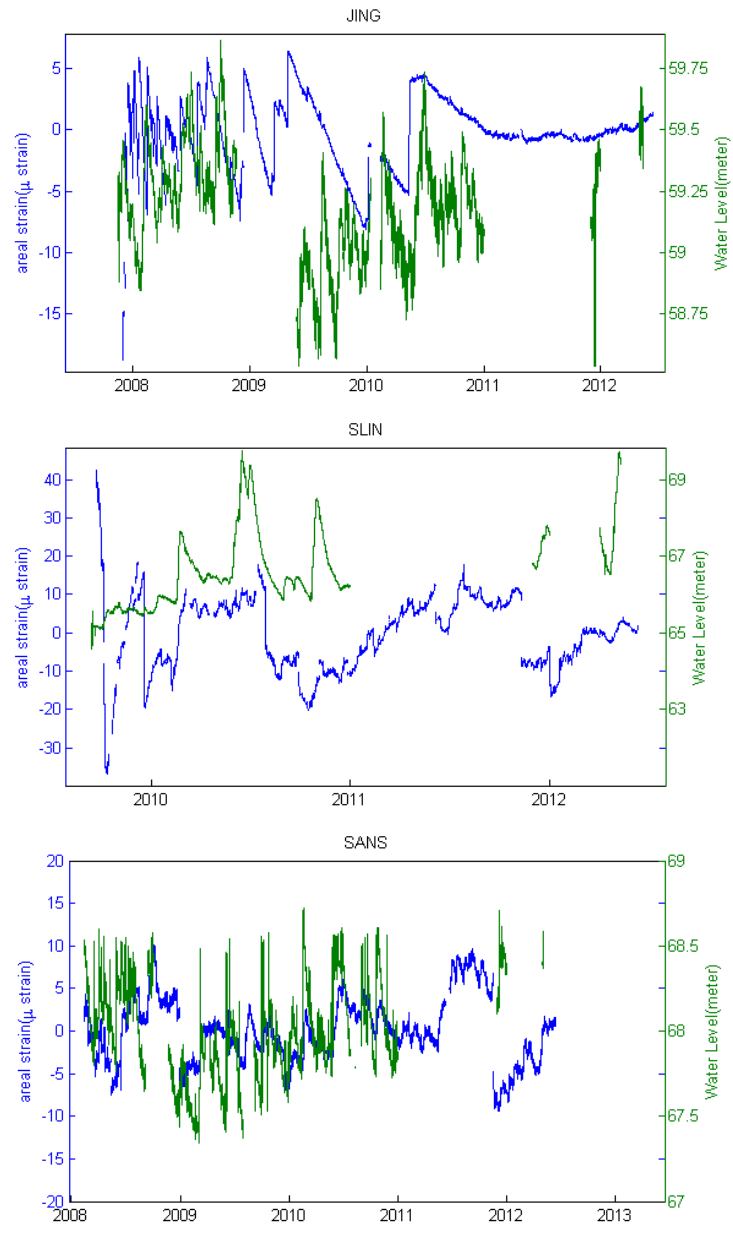


圖 3.55：台北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。

在建立各種修正模式之前，必須先對各效應做物理性的探討，簡單敘述如：

1.地下水效應

由於地下水儀器並非與井下應變儀設置在同一深度，也非同一井孔，所以地下水資料一般是代表儀器周遭岩層的孔隙水壓，以及代表儀器上方地下水的多寡量，前者孔隙水壓增大時，可抵消岩層外來的應力，減少岩層的擠壓應變(或增加其膨脹應變)，但後者所代表的物理效應是增加儀器上方的垂直負載，其效應與氣壓變化相同，與孔隙水壓效應相反。由於地下水壓代表這兩種相反的效應，各測站會因為地下水壓計所設置的含水層的位置、水層分布範圍的大小以及水層與地表水的相通程度而有很大的不同反應，當然儀器附近岩層的孔隙率與透水性也是主要的因素。若地下水壓計是設置在封閉的含水層，則其四周岩層的體積應變也會改變水層中的水壓，因此這水壓變化會與井下應變儀同步，如此去除地下水效應也可能移除了真正的岩層應變資訊。不過，應該沒有完全封閉的地下水層，水層本身的體積應變僅能短期的增加其中的水壓，並不會有長期的效應。所以移除地下水壓變化對井下應變儀資料的效應，該還是可以保留地殼的長期應變。依照現在所分析的幾個測站來看，以嘉義網長期地下水的影響較為明顯，量約在 0.56 ~ 9.05 $\mu\text{strain}/\text{meter}$ 之間。嘉義網 DARB 站、TSUN 站與 TAIS 站的地下水影響係數分別為：6.65、0.93 與 9.05(圖 3.56~3.58)。

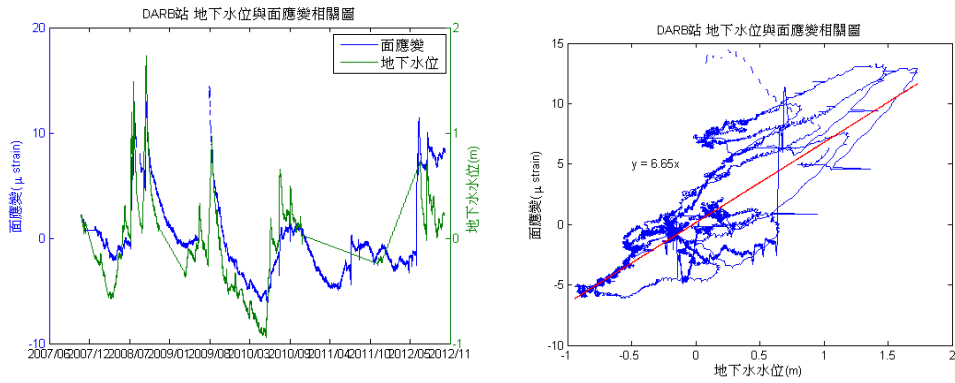


圖 3.56：嘉義網達邦站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

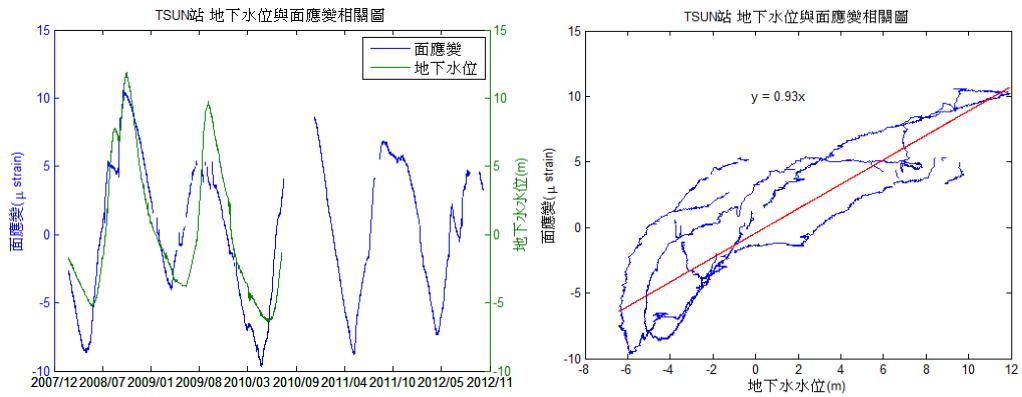


圖 3.57：嘉義網中興站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

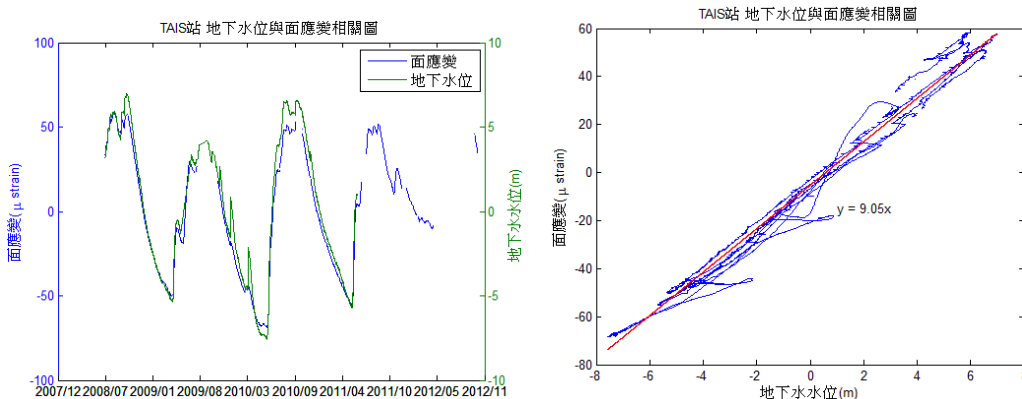


圖 3.58：嘉義網太興站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

之前提到新竹網的地下水資料較不完全，且地下水水位變動與面應變之關係並不明顯，因此暫時無法做地下水的影響效應評估。另外在觀察台北測網的應變儀資料與地下水水位之關係時，長時間的資料與地下水的相關性並沒有很好(圖 3.55)，但當觀察較短時間(大約一年)，井下應變儀的面應變資料與地下水水位的變化有較好的線性相關(圖 3.59~3.61)。但相較於嘉義網，它們之間的線性關係有比較大的誤差，可能來自於其他環境因子影響，因此所求得的參數只是初步的測試，JING 站、SANS 站與 SLIN 站的地下水影響係數分別為：2.38、6.29 與 4.67(圖 3.59~3.61)。

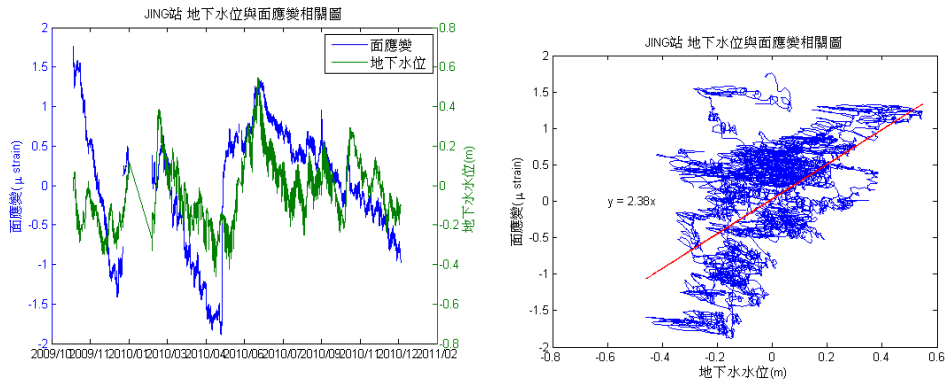


圖 3.59：台北網錦和站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

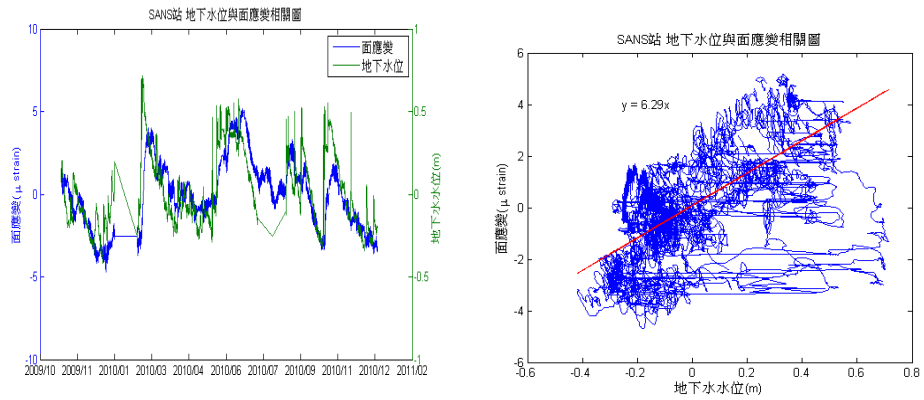


圖 3.60：台北網明德站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

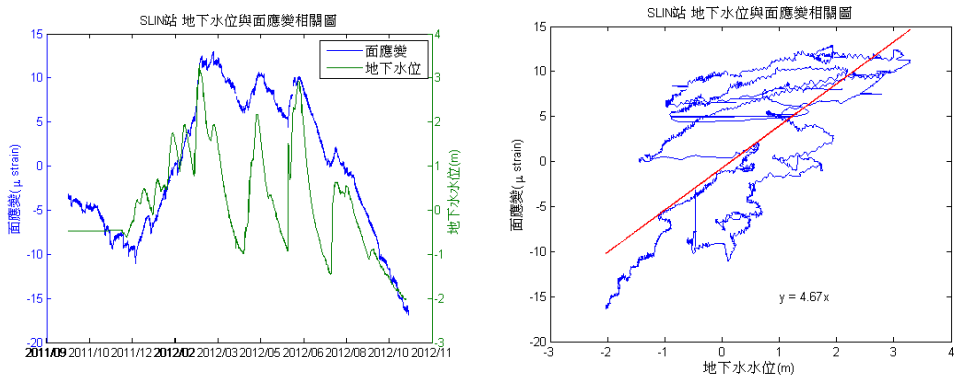


圖 3.61：台北網樹林站地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

2. 氣壓的影響量

大氣壓力的變化，通常是較大區域的，除了在鋒面邊緣，否則氣壓是均勻的平面垂直壓力，其對井下應變儀的影響應該只受岩層彈性係數的變化以及岩層與儀器的偶合係數不同而有所差異，因此，對於同一測站的儀器其單位氣壓變化對井下應變儀記錄的影響應該是長期不變的，而且這影響量在大範圍氣壓變化中應該是一致的，也就是這兩者間的關係是線性的。因此，尋找這關係式的原則事先在資料中搜尋較大氣壓變化的記錄，特別是幾個較大的颱風，或者是高氣壓或低氣壓時的記錄，然後再從其中挑選井下應變儀記錄比較單純的，依此來估計一個關係係數(表 3.3)。然後依此係數做氣壓變化的修正，若是正確的修正模式，會使井下應變儀資料有下面的特性：

- a. 應變的變化與氣壓的變化比較不相關。
- b. 在大多數起的氣壓變化時期，井下應變儀的變化仍然是平坦的。
- c. 在地震前後時期，若有同震的應變變化，應該是應變的跳動與應變累積率(即其斜率)的改變兩種，一般而言，大部份的應變斜率都是直線的，而不當的氣壓修正或未作氣壓修正前，很多都是與氣壓變化一般的成峰或成谷狀的變化。

依照這樣的原則，可以適當的刪去正確的氣壓修正模式。

表 3.3：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。

| 測站 | 氣壓影響係數 | 測站 | 氣壓影響係數 |
|------|--------|------|--------|
| RST | -0.083 | PFMT | -0.196 |
| RNT | -0.080 | CINT | -0.245 |
| DARB | -0.398 | SLIN | -1.642 |
| TAIS | -0.663 | SANS | -0.820 |
| TSUN | -0.430 | JING | -0.245 |
| BMMT | -0.215 | | |

3. 何謂井下應變儀資料的異常

由於現今對地震前後地殼應變是否會有什麼前兆會出現？多久前會出現？其大小會有多大？哪些地震(多大的或多遠的)會在某一測站出現異常前兆？這些都是我們所關切的，但至今仍無確切的答案。因此，在本計劃中初次嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

- a. 因為尚未修正潮汐與降雨的效應，本計劃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 $0.2 \mu\text{strain}$)

的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。這是因為台灣地區規模大於 5.0 的地震，在過去四年來共有 112 個，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。

- b. 對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線(意指忽略每日潮汐的變化後)。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。
- c. "異常"前兆的判斷：要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(徒升或突降)，也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這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"，若只有一站的明顯"異常"僅能存疑。其三是對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，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。

根據以上的思考與原則，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)。為了避免因為環境因子的資料缺失或不同採樣率，而在做環境因子的模式修正時損失了部份的觀測量，所以原來地下水每分鐘一筆的資料下降到每十分鐘一筆，氣壓資料量原為每卅分鐘一筆，而且多有缺失，先將同一地區的氣壓資料互相補遺，也就是假設同一地區氣壓在短時期的變化大致相同，若其中某一站氣壓資料缺失一小段時期，則可以用另外一站的氣壓變化值補遺。如此各網的三個站互相補遺，可以得到完整的資料。然後再用適當的內差法，將每卅分鐘一筆的資料內差成每十分鐘一筆，如此所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都有相同的取樣率，依照上面的原則建立環境因子模式，並做修正，然後再依上述原則判斷所有規模大於五的地震(依氣象局公告)是否有同震以及震前的異常應變。在修正的資料中，由於新竹網的大坪國小地下水觀測記錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。另外台北地區的地下水水位與井下應變儀面應變的關係還不明確，也暫不做台北地區的地下水影響量修正。

3-2-2 檢視井下應變儀資料中異常事件

2011年11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三個事件，分別是2月26日屏東縣霧台鄉的地震，4月27日發生在東部海域的地震與8月31日發生於苗栗縣竹南鎮的地震。前兩次觀察到應變異常的測網都是在嘉義網比較明顯，而第三次地震在台北網有發現應變異常。如圖3.62為2009至2012年11月所有規模大於5之地震事件，以下針對有應變前兆反應的地震事件做說明。

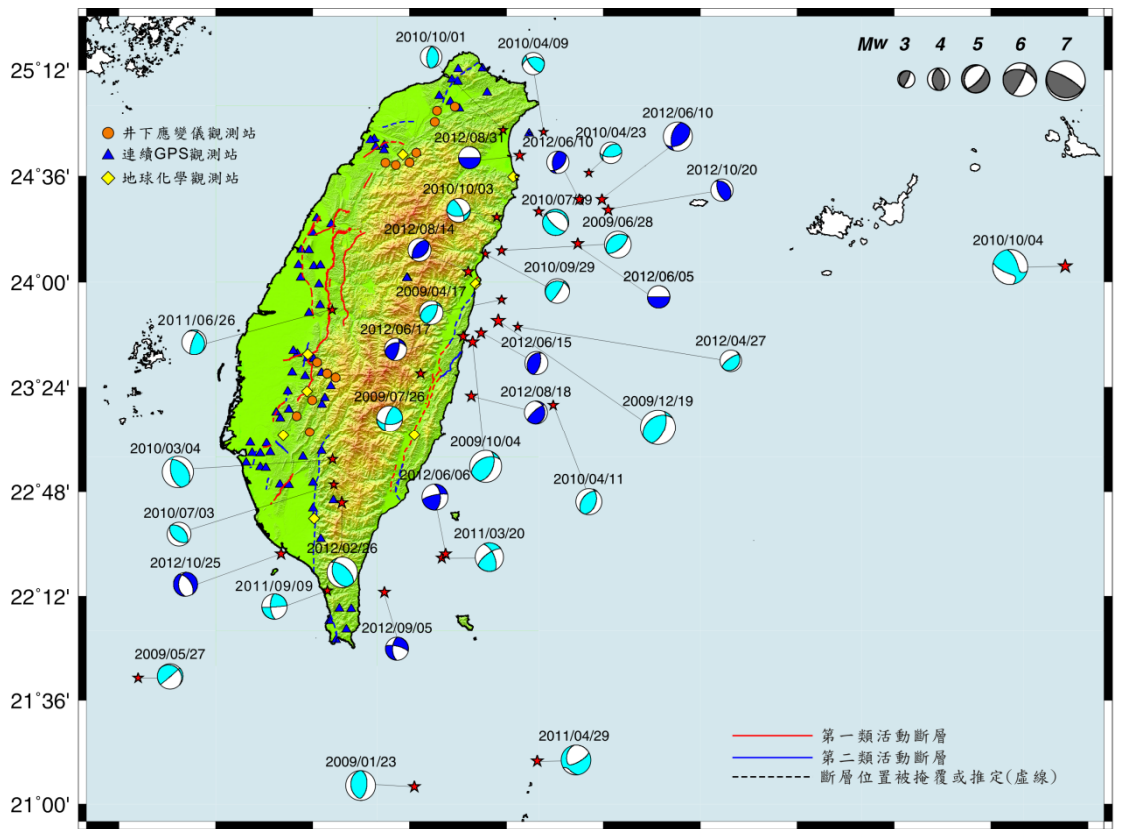


圖 3.62：2009 年至 2012 年 11 月井下應變儀地震前兆相關之地震。藍色海灘球為 2011 年 11 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件。

(1) 2012 年 2 月 26 日規模 6.4 屏東霧台地震

2 月 26 日的地震對於嘉義測網所有測站皆有造成永久的應變改變，觀察地震前的應變資料，TSUN(中興國小)大約在 2 月 13 日就有明顯的應變斜率改變，經對比降雨資料，該時間內沒有明顯降雨，另外 DARB 站在 2/16 之前與 2/16 之後的斜率也有明顯的改變，而 TAIS 站在 2/14 至 2/21 間斜率有些微的持續變化，但其量不太顯著。(見圖 3.63)。

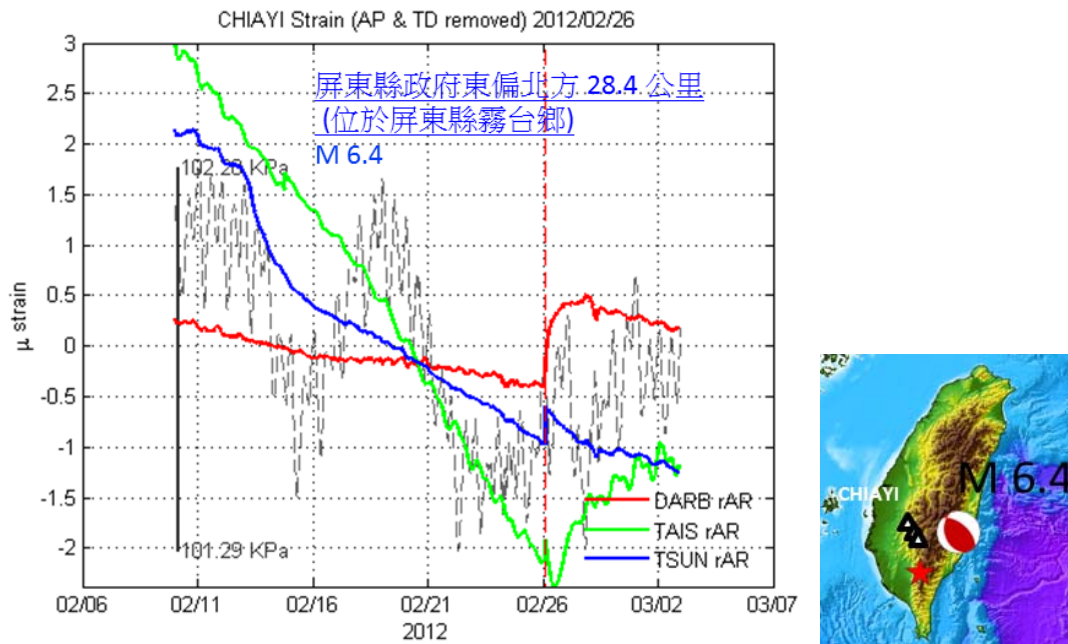


圖 3.63: 2012 年 2 月 26 日規模 6.4，屏東霧台地震。在嘉義網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(2) 2012 年 4 月 27 日規模 5.0 台灣東部海域地震

4 月 27 日的東部海域地震，地震前大約在 4 月 16 日至 4 月 21 日之間，嘉義測網三個測站都有很明顯的應變斜率改變，非常明顯從一直壓縮階段轉換為體積膨脹的應變(圖 3.64)，雖然比對降雨資料後發現在這段期間有明顯降雨，可惜這段期間缺乏地下水資料來比對應變的變化是否由於地下水水位的變化所造成。從達邦站(DARB)的應變資料可以知道嘉義地區明顯的降雨發生在大約 4/18，這場降雨也直接造成短時間內達邦井下應變儀的應變壓縮($\sim 0.3\mu\text{strain}$)，隨後馬上由壓縮的應變轉變為伸張的應變，雖然沒有地下水的資料佐證，我們仍可以判定這是由於降雨後的地下水水位上升所造成，但比較特別的是另外兩個測站(TAIS、TSUN)隔了 3 天，一直到 4/21 之後才開始有應變斜率的變化，轉變為伸張的應變。這兩個測站的應變率變化點與降雨不一致，再加上之後 4/25~26 的降雨期間，達邦測站的面應變反而轉變為持續的壓縮，這些地震前的異常應變變化情況

我們目前將他認為是可能的地震前兆訊號。

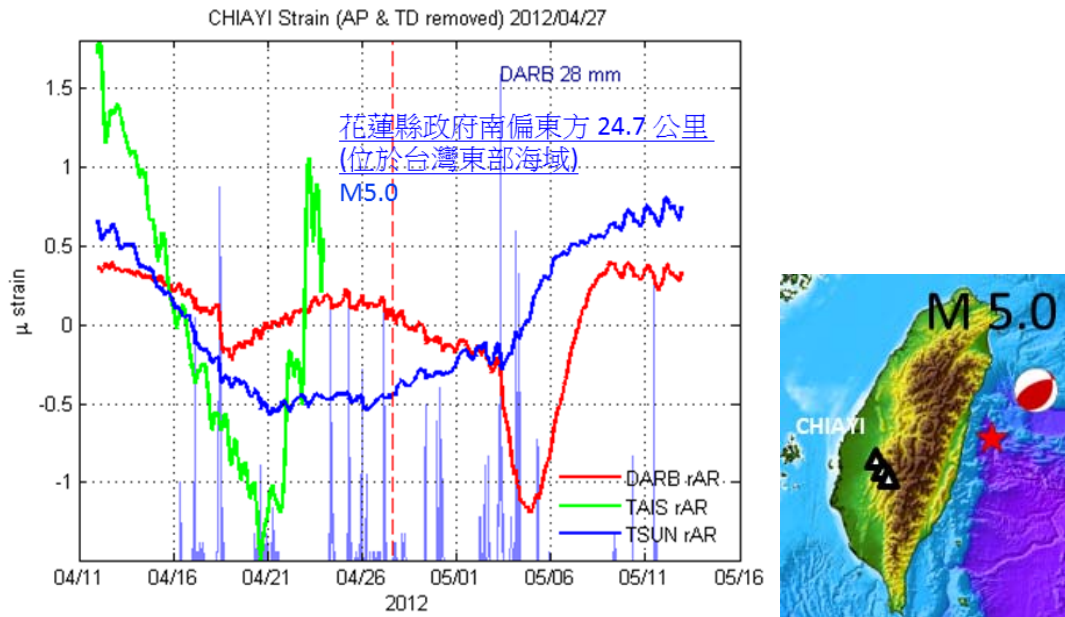


圖 3.64：2012 年 4 月 27 日規模 5.0，台灣東部海域地震。在嘉義網各測站有明顯的應變異常。

(3) 2012 年 6 月 10 日規模 6.6 與規模 5.1 台灣東部海域地震

6 月 10 日的兩起地震，台北測網有地震前的應變斜率改變，但發生的時間不相同，SLIN(樹林焚化廠)的時間點大約發生在 5 月 25 日，而 SANS(明德中學)是發生在 6 月 4 日(圖 3.65)，並於 5/29 至 6/2 也有微小的斜率持續變化。目前已排除降雨的因素與地下水影響，仍將它列為應變異常的事件。

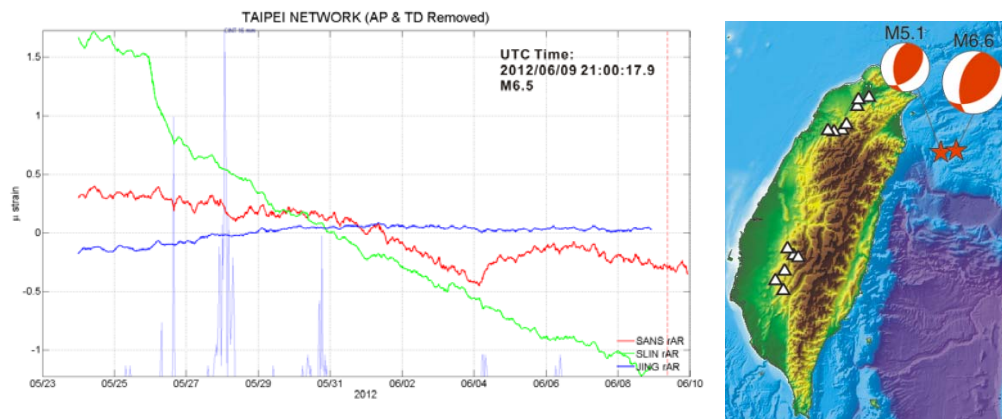


圖 3.65：2012 年 6 月 10 日規模 6.5，宜蘭東部海域地震。在台北網各測站有明顯的應變異常。

(4)2012 年 6 月中旬新竹地震群

新竹縣尖石鄉自從 2012 年 6 月 11 日起至 6 月 15 日接連發生 9 個規模大於 3.3 以上的淺層有感地震，深度大約都在 10 公里以內，根據中央氣象局的震源機制解，這次的地震以右移的走向滑移活動分量為主。這些地震在水平距離上與新竹測網的井下應變儀非常接近，最近的測站為新樂國小站(CINT)，大約 4 公里左右，其次是梅花國小站(PFMT)，大約 12 公里(圖 3.66)，雖然這些地震都是規模小於 5 的地震，不在目前異常訊號搜尋的條件內，但我們對井下應變儀於這些鄰近的小地震是否有反應與是否有地震的前兆訊號仍感到好奇。

分析的初步結果顯示，CINT 與 PFMT 這兩個測站的應變資料中有可能的地震前異常反應，新樂國小站從 2011 年 10 月就開始有異常的徵兆，而梅花國小的應變異常發生在今年 6 月初，而最遠的大坪國小站(BMMT)沒有明顯的地震前異常。

梅花國小在 2012 年半年以來的應變變化在 6 μ strain 以內，在應變斜率的變化上，除了 CH0 與 CH2 可能受降雨後地下水位變動的影響在 2 月 21 日與 4 月 21 日這兩個時間段有明顯應變率的改變(CH0 方向較平時更壓縮，而 CH2 方向較平時更伸張)，大致上趨勢不變(圖 3.67a)。主要的應變異常是發生在 5 月底過後，三個方向的感應器同時由壓縮的趨勢轉變成伸張應變(圖 3.67a 黃色區域)。大致從 6 月 7 日左右開始，三個方向感應器的應變皆從原來的壓縮應變轉換成伸張應變，在比對新竹地震群大約在這個應變異常 4 天後發生。由於我們已經排除氣壓與地潮的影響，剩下造成三個感應器在地震前都同時有伸張應變的可能性是地下水的變動，或者是地震前岩體裂隙增加所造成的應變改變，但也許這情況是複合的，地震前岩體狀態的改變也同時造成地下水水位的變化，最後同時影響了應變儀的訊號。目前新竹地區在這段時間內無地下水水位的資訊可以佐證，但地下水水位的改變可能是由於降雨所造成，我們比對這段時間內的降雨資訊(圖 3.67b)後，認為這段變化的 8 天內都沒有明顯的降雨，因此也排除了降雨後地下水位上升所造成的應變改變。最後我們認為梅花測站在 6 月 11 日新竹地震群發生前的應變率改變應該是明顯的地震前兆訊號。

無獨有偶地，在距離新竹地震群最近的新樂國小站(CINT)，自從 2011 年 10 月之後一直有非常特別的應變振盪與短時間內的應變跳動發生(圖 3.68)。雖然從去年 10 月至今年 6 月的應變資料看來，除了 CH0 有較異常的跳動之外，其他感應器的應變變化都在 10 μ strain 以內(圖 3.68a)。但當我們去除各感應器的線性趨勢與 CH0 較大的應變跳動之後，CH0 仍然有較不穩定的應變變化，會在一段時間的伸張應變後突然轉變為壓縮應變，而其他感應器的應變變化相較之下較為平緩(圖 3.68b)。從圖 3.68b 中我們也發現 CH1 的應變變化大致從 2012 年 3

月 20 日之後明顯不同於之前，每日的應變振盪幅度明顯比之前還要大，從原來不到 $0.1 \mu\text{strain/day}$ 變成 $0.2 \mu\text{strain/day}$ 以上(扣除地潮與氣壓後的資料)。但這樣的振盪似乎在新竹地震群發生之後就不再發生(圖 3.68c)。如果不是那麼巧地，剛好在離地震最近的測站發生儀器異常才造成這些異常的應變訊號，那這些異常的應變訊號很有可能就是代表著地震的前兆訊號！

這次事件的分析，我們直接採用測站各方向感應器的應變資料來做分析，與過去在震前應變儀異常訊號的判斷上採用研究成果比較多的平面應變來做分析有所不同。因為在這端期間 PFMT 缺 CH1 資料，CINT 的 CH0 有異常跳動，如果直接分析各方向的應變訊號就能避免因為缺某個方向感應器的資料就無法得到平面應變的情況，並且可以了解異常變動的來源是來自於哪個方向的感應器。然而當某方向感應器缺資料而採用不同方向感應器來計算平面應變也是一個替代方案，但 3-1-5 小節的方向性檢測中指出，採用不同感應器所計算的平面應變仍然存在差異，這樣的差異一直存在許多測站的資料中，因此如何結合原來的平面應變與採用不同感應器所計算的平面應變，可能是未來必須努力的方向，不然就得嘗試調整應變儀的各感應器方向角。

目前仍然是以分析平面應變來探討應變儀訊號與地震的關係為主，主要是因為過去幾年對於影響應變儀平面應變的環境因子較為了解，其影響的比例也較為清楚。這次新竹地震群事件探討是個嘗試的開始，未來對於各應變儀中不同方向感應器的應變訊號或應變儀的剪切應變必須有更進一步的研究，才能了解影響的物理因子與其影響程度，進而做資料校正後，來分析構造活動與應變儀訊號的關係。

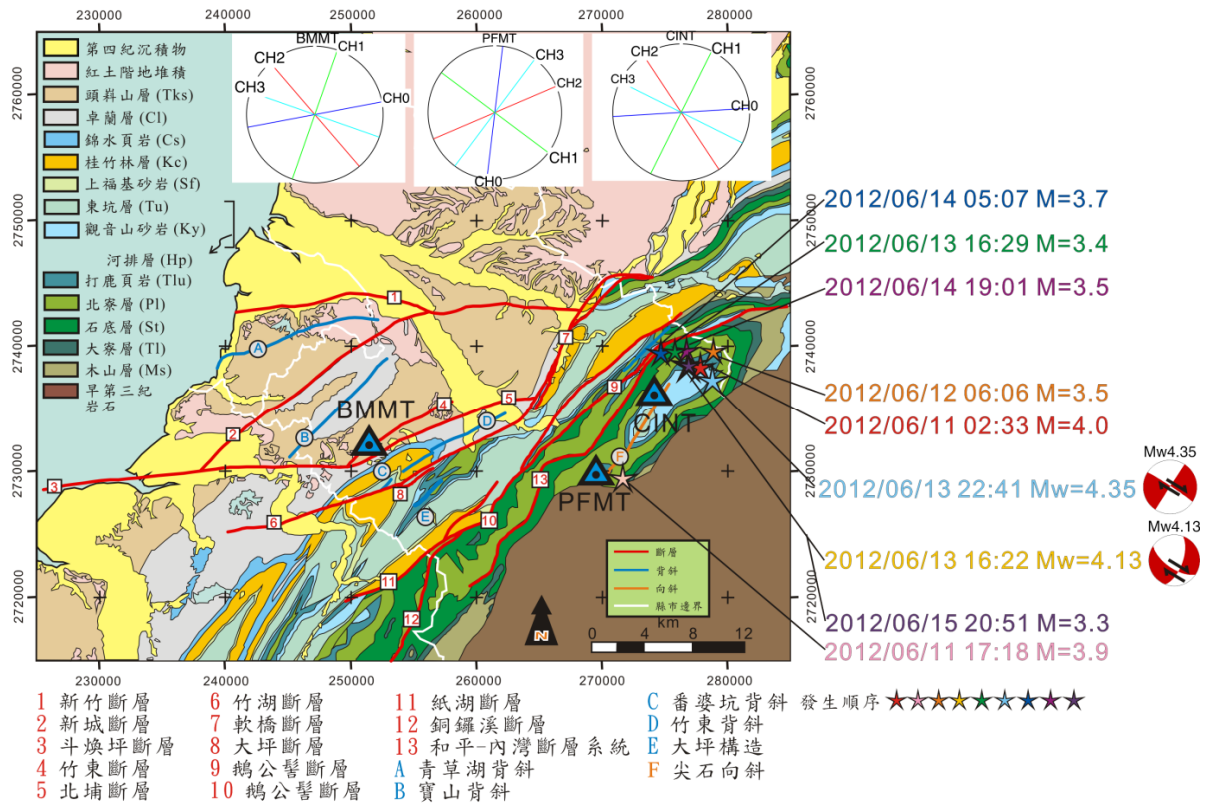


圖 3.66：2012 年 6 月中旬新竹尖石鄉地震群位置圖。星號為中央氣象局所標示之震央位置，藍色三角形為新竹網井下應變儀位置。圖上方白色圓圈標示出各井下應變儀感應器之測量方位。[修改自黃宣維，2012]。

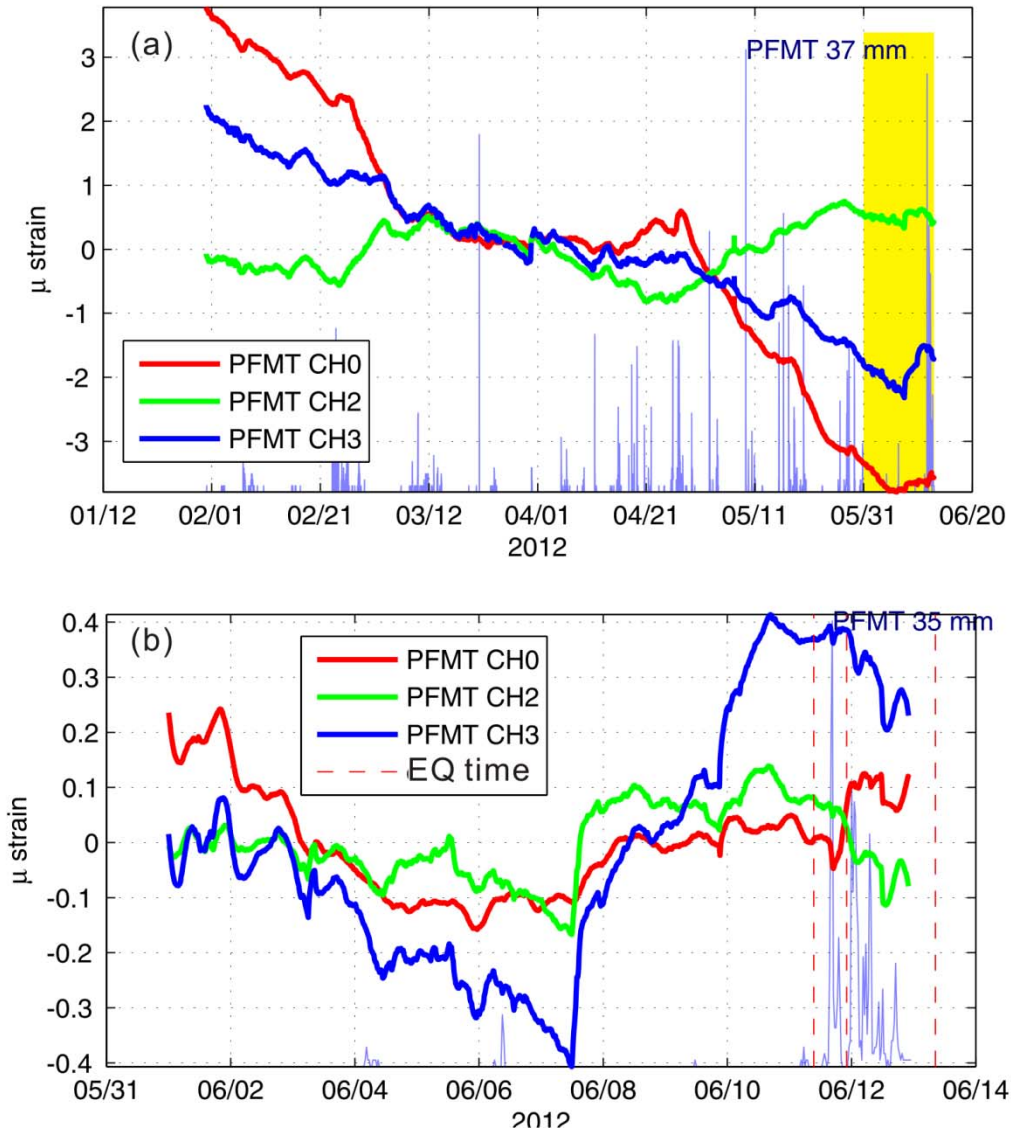


圖 3.67: 梅花國小測站(PFMT)2012 年至六月間的降雨與應變資料(已去除氣壓與地潮), (a)圖展現半年來各感應器的應變趨勢, CH3 的應變率相對穩定, 而 CH0 與 CH2 可能受降雨後地下水位變動的影響在 2/21 與 4/21 這兩個時間段有明顯應變率的改變, CH0 方向較平時更壓縮, 而 CH2 方向較平時更伸張。但 5 月底過後三個方向感應器同時變成伸張應變(黃色區域)。(b)5/31 至 6/13 間各方向應變數值(各扣除其平均值)。大致在 6/7 左右, 三個方向感應器皆從原來的壓縮應變轉換成伸張應變, 新竹地震群大約在這個應變異常 4 天後發生。

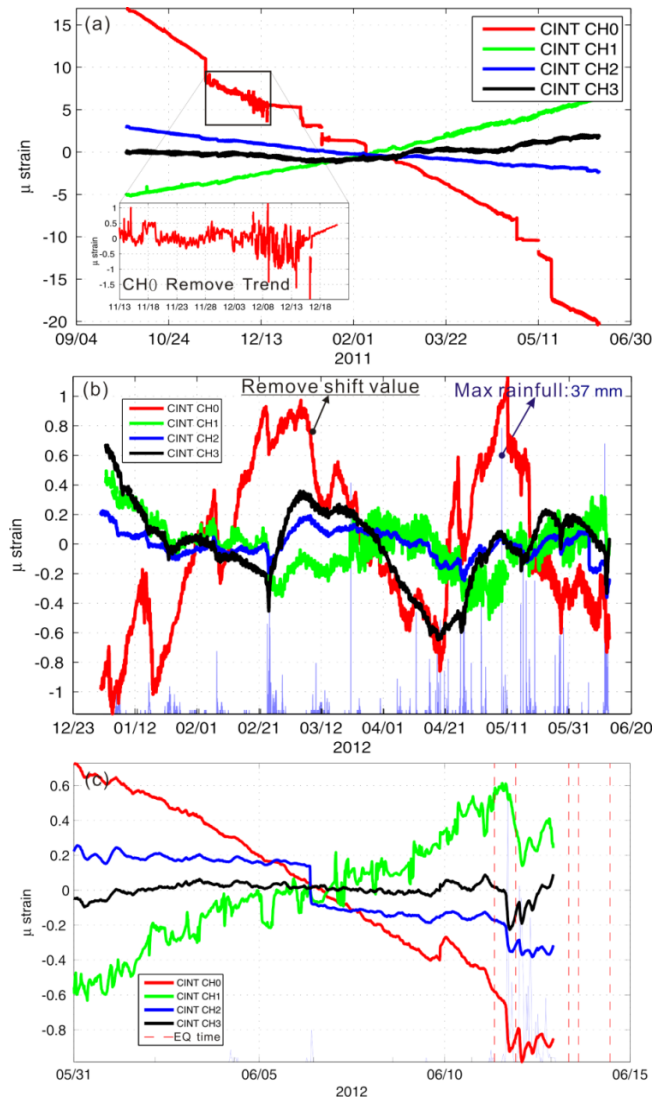


圖 3.68：新樂國小測站(CINT)2011 年 10 月至 2012 年 6 月間的降雨與應變資料(已去除氣壓與地潮)，明顯有持續性的應變異常。(a) 圖展現各感應器的長期應變趨勢，CH0 方位的應變自從 2011 年 11 月 13 日之後開始出現持續約 1 個月的異常應變震盪，並且接著出現數次短時間內的永久應變壓縮變化，大多在 1 個小時內就產生了 $1 \mu\text{strain}$ 以上的應變。(b) CINT 測站從 2012 年至該年 6 月期間的應變資料，所有資料已去除氣壓、地潮與這段時間內的線性趨勢，並且修正 CH0 數個主要的短時永久應變改變。所有方位的應變在半年內的應變變化大約在 $2 \mu\text{strain}$ 以內。CH0 相較於其他方位感應器仍有較大的應變率變化，另外 CH1 方位的應變變化大約在 2012 年 3 月 20 日之後振盪幅度明顯比之前還要大，從原來不到 $0.1 \mu\text{strain/day}$ 變成 $0.2 \mu\text{strain/day}$ 以上(扣除地潮與氣壓後的資料)。(c) 新竹地震群發生前的半個月內整體應變變化在約 $1.7 \mu\text{strain}$ 內，整體應變斜率變化不大，但仍有一些應變異常的訊號存在，如 CH2 在 6 月 6 日有發生一次約 $0.2 \mu\text{strain}$ 的突降(壓縮)與 CH1 持續每日較大幅度的應變振盪現象似乎在地震時間之後就沒那麼明顯。

(5)2012年6月15日規模5.3與6月17日規模5.0花蓮縣豐濱鄉地震

6月15日與6月17日的兩起地震前，台北測網與新竹測網在6月11日至12日間有明顯應變壓縮再伸張的現象，但這段時間的前後應變率沒有明顯改變，經比對降雨與地下水資料，目前認為很可能在這段期間內岩體短時間內受到壓縮變形，所以應變儀都測量到面應變的壓縮，而體積的壓縮造成地下水水位的快速抬升(圖 3.69)，再比對全球地震資料之後，這個現象很可能是受到6月11日土耳其規模6.0的地震所影響，而非這兩起地震(6/15與6/17的花蓮地震)的地震前兆。

過去認為地下水水位的上升會增加岩體的孔隙水壓，進而抵銷有效應力，使得應變儀記錄到體積膨脹的訊號，而這次短時間內的地下水水位上升現象則是與岩體應變壓縮有關，如何結合這兩種現象，更進一步正確的修正應變儀資料中的地下水水位影響，則是未來重要的工作之一。

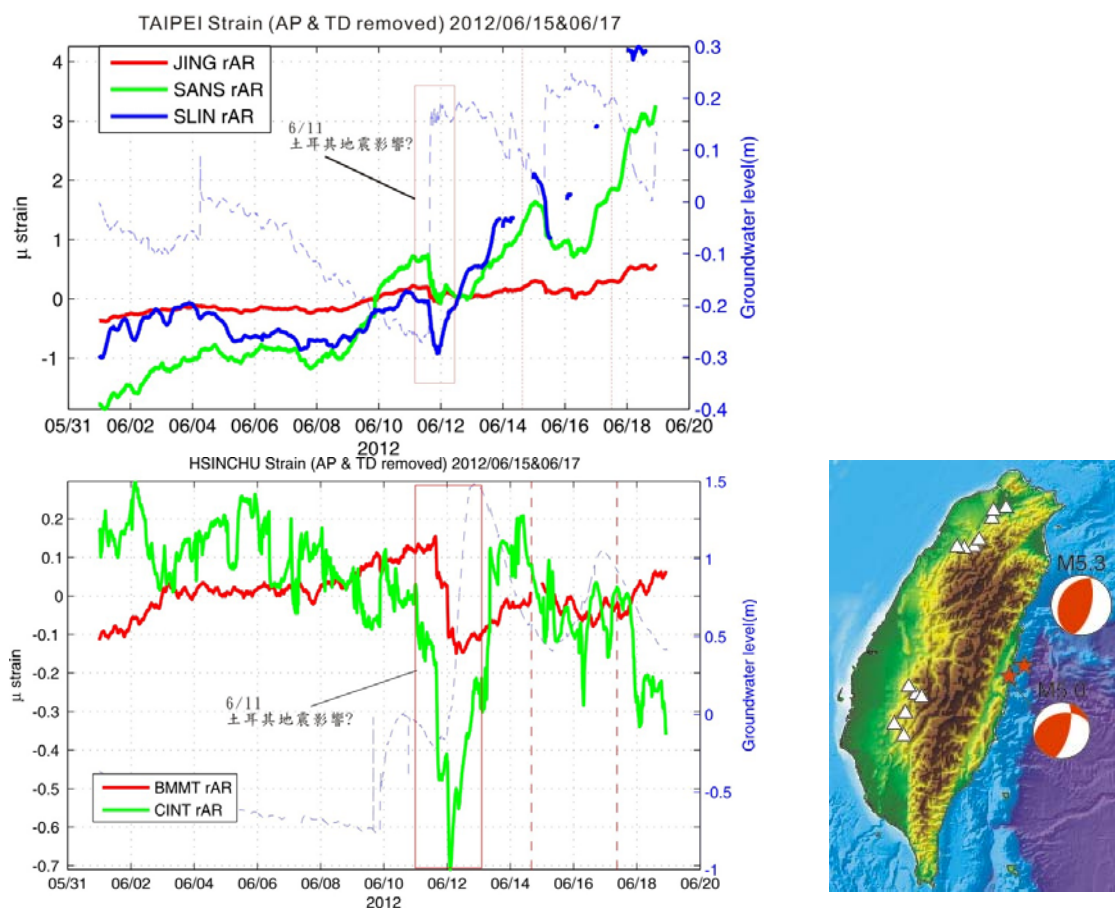


圖 3.69：2012年6月15日規模6.5與6月17日規模5.0，花蓮豐濱鄉地震於地震前的應變資料。在台北網與新竹網地震前6月12日有受到土耳其遠震所造成的應變改變與地下水水位變化。

(6)2012 年 8 月 31 日規模 5.0 苗栗縣竹南鎮地震

8 月 31 日的地震前，台北測網的 SLIN 站與 SANS 站分別在 8 月 24 日與 8 月 27 日有明顯應變率的變化，比對過降雨與地下水的資料後，在這段期間沒有明顯降雨，地下水資料沒有特別的變化，因此初步判定為此次地震的前兆訊號(圖 3.70)。而離地震最近的新竹測網很可惜因為資料在這時間段非常不完整而無法分析。

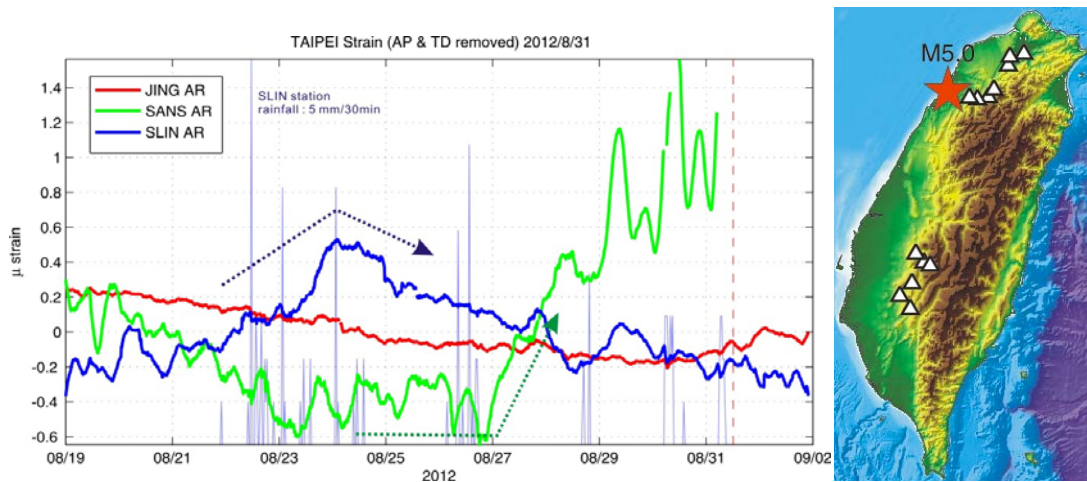


圖 3.70：2012 年 8 月 31 日規模 5.0，苗栗縣竹南鎮地震前台北網的應變資料。在台北網有兩測站於地震前應變率的改變。

3-3 井下應變儀資料管理系統網站

3-3-1 資料庫更新

本計畫工作內容進行井下應變儀資料庫系統及地球化學資料之更新，更新之最新資料日期及 2004 年至 2012 年各站可下載檔案列表如下：

1. 井下應變儀資料庫系統：

井下應變儀資料庫最新資料日期

| 代碼 | 站名 | 設置時間 | 起始時間 | 最新時間 |
|------|-------|------------|------------|---------|
| RST | 曾文水庫南 | 2003/10/23 | 2004/07/18 | 2012/11 |
| RNT | 曾文水庫北 | 2003/10/28 | 2004/04/15 | 2012/11 |
| ECT | 甲仙十八灣 | 2003/10/26 | 2004/04/16 | 2007/07 |
| PFMT | 梅花國小 | 2005/06/04 | 2005/06/04 | 2012/11 |
| LMMT | 瑞峰國小 | 2005/06/04 | 2005/06/07 | 2012/10 |
| BMMT | 大坪國小 | 2005/05/18 | 2005/06/09 | 2012/11 |
| TSUN | 中興國小 | 2006/03/01 | 2006/03/01 | 2012/11 |
| TAIS | 太興國小 | 2006/03/04 | 2006/03/04 | 2012/11 |
| CINT | 新樂國小 | 2006/11/15 | 2006/11/15 | 2012/11 |
| DARB | 達邦 | 2006/11/19 | 2006/11/19 | 2012/11 |
| JING | 錦和國小 | 2007/11/07 | 2007/11/20 | 2012/11 |
| SANS | 明德中學 | 2007/11/02 | 2007/11/12 | 2012/11 |
| SLIM | 樹林焚化廠 | 2009/09/11 | 2009/09/11 | 2012/11 |

井下應變儀資料庫自 2004 年至 2012 年間各測站資料可下載檔案列表

| 代碼 | RST | RNT | ECT | PFMT | LMMT | BMMT | TSUN | TAIS | CINT | DARB | JING | SANS | SLIM |
|------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|----------|----------|---------------|
| 站名 | 曾文 水庫 南 | 曾文 水庫 北 | 甲仙 十八 灣 | 梅花 國小 | 瑞峰 國小 | 大坪 國小 | 中興 國小 | 太興 國小 | 新樂 國小 | 達邦 | 錦和 國小 | 明德 中學 | 樹林 焚化 廠 |
| 2012 | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 2011 | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 2010 | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 2009 | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 2008 | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | |
| 2007 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | |
| 2006 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | |
| 2005 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | |
| 2004 | ● | ● | ● | | | | | | | | | | |

以上資料統計至 2012/11/30

2.地化資料庫系統更新

地化資料庫最新資料日期

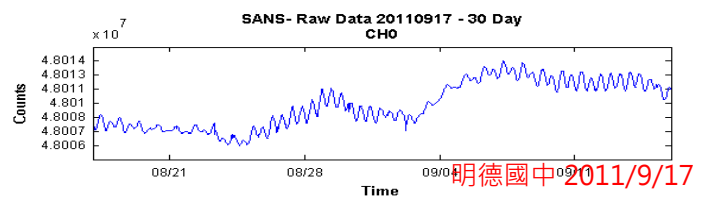
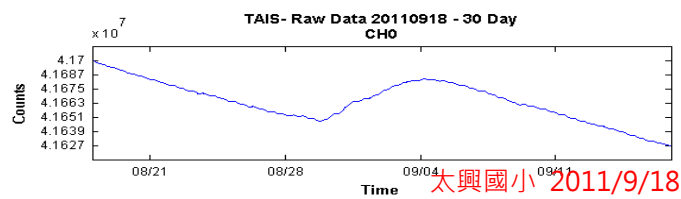
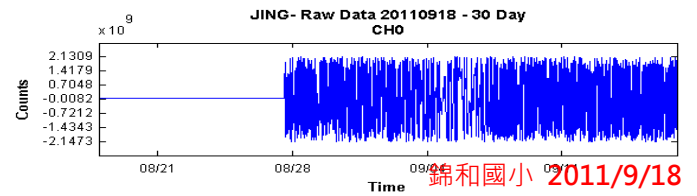
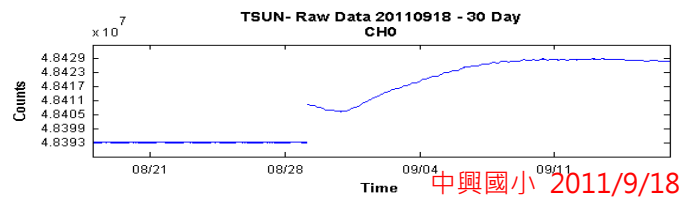
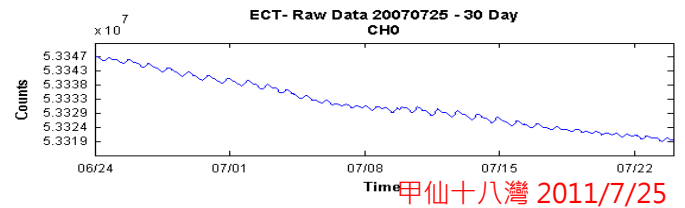
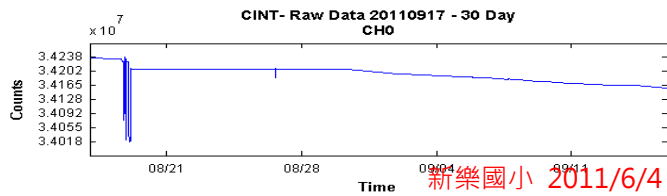
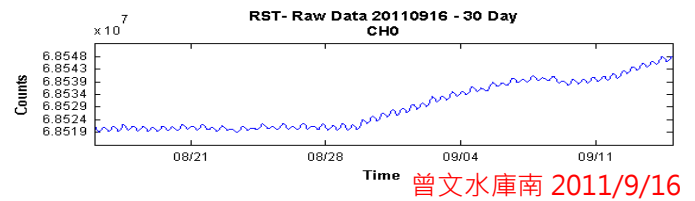
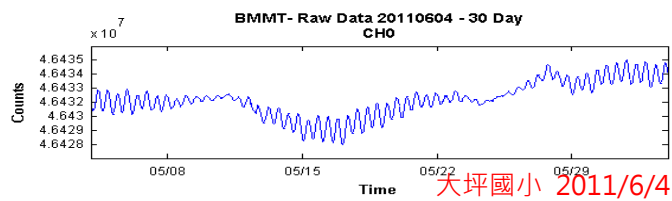
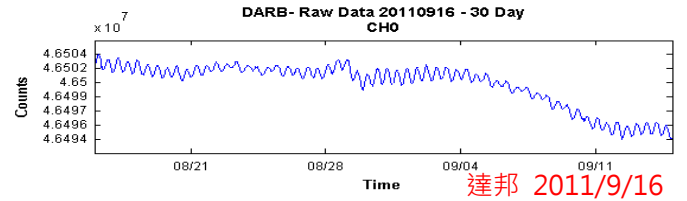
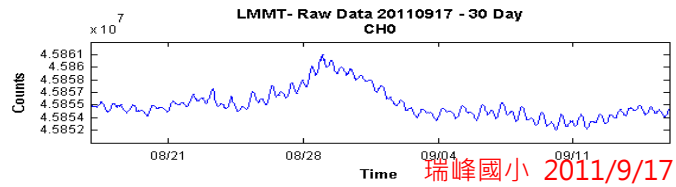
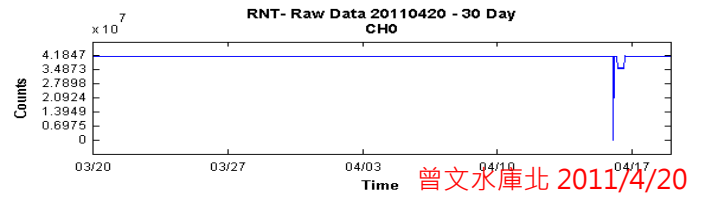
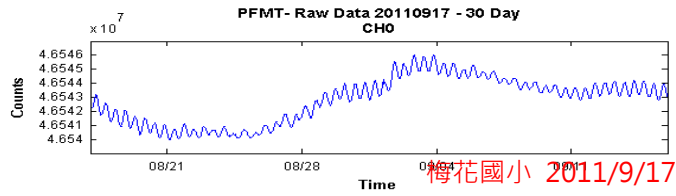
| 代碼 | 站名 | 起始時間 | 最新時間 | 備註 |
|-----|--------|------------|------------|------|
| ES | 二溪觀測站 | 2009/11/01 | 2010/07/20 | 類型 A |
| TPT | 大平地觀測站 | 2009/10/25 | 2011/07/05 | 類型 A |
| CL | 中崙觀測站 | 2009/10/25 | 2011/07/05 | 類型 A |
| GK | 古坑觀測站 | 2009/11/01 | 2011/07/05 | 類型 A |
| CS | 池上觀測站 | 2009/10/18 | 2011/07/05 | 類型 A |
| PT | 屏東觀測站 | 2009/09/01 | 2011/07/05 | 類型 A |
| MS | 梅山測站 | 2009/10/25 | 2009/10/25 | 類型 A |
| HH | 新化觀測站 | | | 類型 A |
| HC | 新城觀測站 | | | 類型 A |
| JS | 礁溪觀測站 | | | 類型 A |
| SA | 蘇澳觀測站 | 2009/12/10 | 2010/07/27 | 類型 A |
| AT | 安通觀測站 | 2010/12/01 | 2011/08/25 | 類型 B |
| ST | | 2010/02/02 | 2011/08/25 | 類型 B |
| MH | 梅花觀測站 | 2010/01/02 | 2010/10/10 | 類型 C |
| SLN | 樹林觀測站 | 2010/01/01 | 2010/10/18 | 類型 C |
| TS | 太興觀測站 | 2010/01/01 | 2010/10/14 | 類型 C |
| YS | 汧水觀測站 | 2010/01/01 | 2010/10/15 | 類型 C |

地化資料庫自 2004 年至 2011 年間各測站資料可下載檔案列表

| 類別 | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | B | B | C | C | C | C |
|------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 代碼 | ES | TPT | CL | GK | CS | PT | MS | HH | HC | JS | SA | AT | ST | MH | SLN | TS | YS |
| 站名 | 二溪 觀測 站 | 大平 地觀 測站 | 中崙 觀測 站 | 古坑 觀測 站 | 池上 觀測 站 | 屏東 觀測 站 | 梅山 測站 | 新化 觀測 站 | 新城 觀測 站 | 礁溪 觀測 站 | 蘇澳 觀測 站 | 安通 觀測 站 | | 梅花 觀測 站 | 樹林 觀測 站 | 太興 觀測 站 | 沅水觀 測站 |
| 2011 | | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | ● | ● | | | | |
| 2010 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | ● | | ● | ● | ● | ● | ● |
| 2009 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | ● | | | | | | |
| 2008 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2007 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2006 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2005 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

以上資料統計至 2011/10/31

3. 資料庫網站井下應變儀展示資料更新。以 30 天為例。



4.地化資料庫檔案下載頁面補正測站中文名稱並新增類別(1)A (2) B (3)C

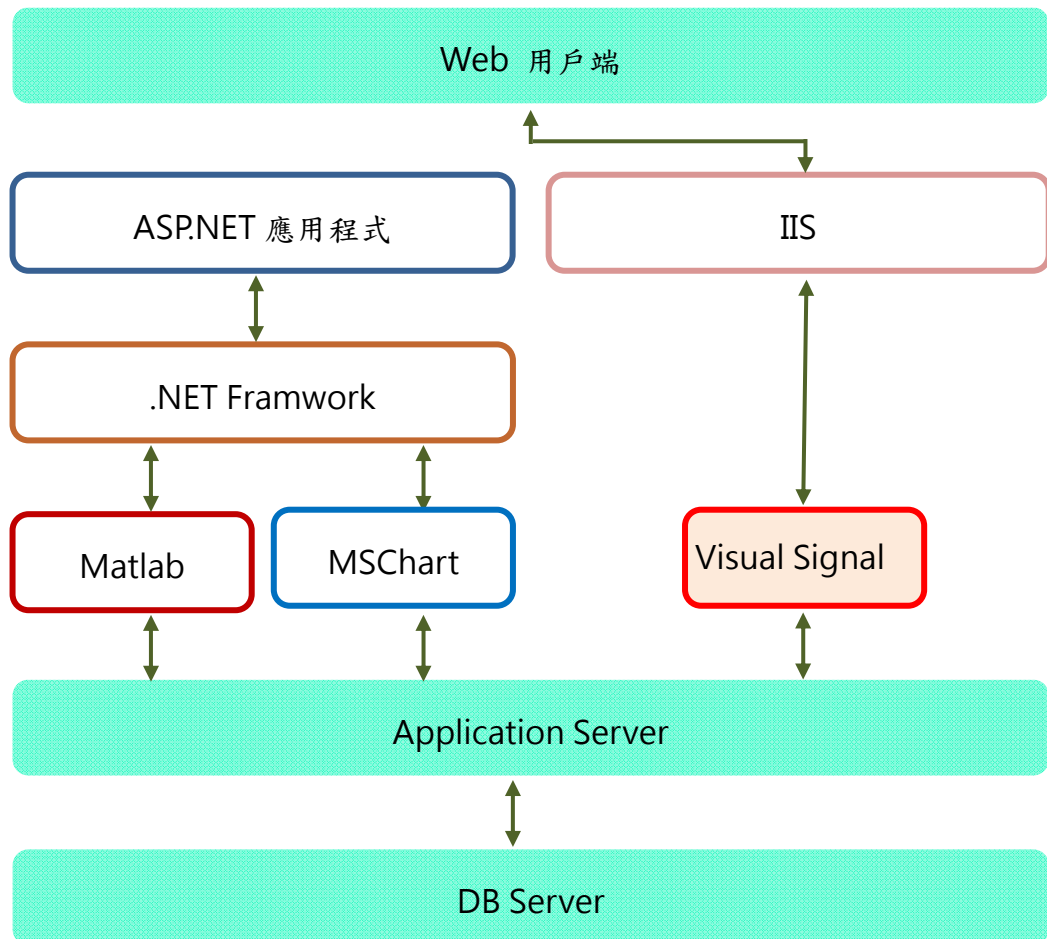
| | | | |
|-----------------------------------|----------------------|--------|--------------|
| * 類型 : | 地化資料 | * 代號 : | (1)A(氣體成份相關) |
| * 站台 : | 安通觀測站 (AT) | | (1)A(氣體成份相關) |
| * 起始日期 : | <input type="text"/> | | (2)B(水氫相關) |
| * 結束日期 : | <input type="text"/> | | (3)C(水壓相關) |
| <input type="button" value="查詢"/> | | | |

| | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| * 類型 : | 地化資料 | * 代號 : | (1)A(氣體成份相關) |
| * 站台 : | 安通觀測站 (AT) | | (1)A(氣體成份相關) |
| * 起始日期 : | 二溪觀測站 (ES) | <input type="text"/> | |
| * 結束日期 : | 大平地觀測站 (TPT) | <input type="text"/> | |
| <input type="button" value="查詢"/> | | | |

- 安通觀測站 (AT)
- 二溪觀測站 (ES)
- 大平地觀測站 (TPT)
- 中崙觀測站 (CL)
- 古坑觀測站 (GK)
- 池上觀測站 (CS)
- 屏東觀測站 (PT)
- 梅山測站 (MS)
- 新化觀測站 (HH)
- 新城觀測站 (HC)
- 礁溪觀測站 (JS)
- 蘇澳觀測站 (SA)
- 樹林觀測站 (SLN)
- (ST)
- 太興觀測站 (TS)
- 梅花觀測站 (MH)
- 沅水觀測站 (YS)

5. 資料庫網站更新架構

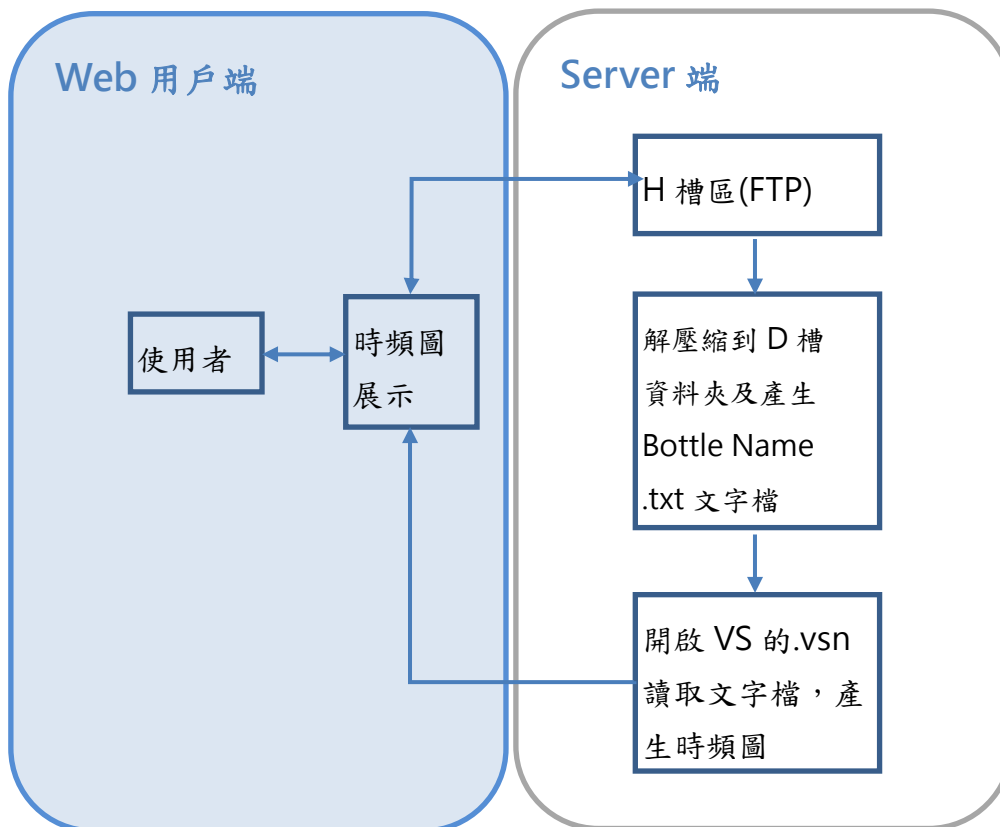
本年度為繪製時頻圖，於原有架構下，透過 IIS 呼叫伺服器端的 Visual Signal 程式，以背景程式的模式下執行，透過 Visual Signal 能對原始的井下應變儀資料或地化資料，進行資料處理，包括移除 Bump、補遺、趨勢移除等，進而在小波轉換、加強式小波轉換、Haar 轉換、希爾伯特-黃轉換法中選擇最適合的分析法繪製時頻圖，以便透過高解析時頻圖了解特殊應變之訊號能量。



3-3-2 時頻圖繪製

(時間序列資料分析方法及流程請參考附錄光碟－附錄 F。)

透過網頁繪製時頻圖，架構及網站操作如下：



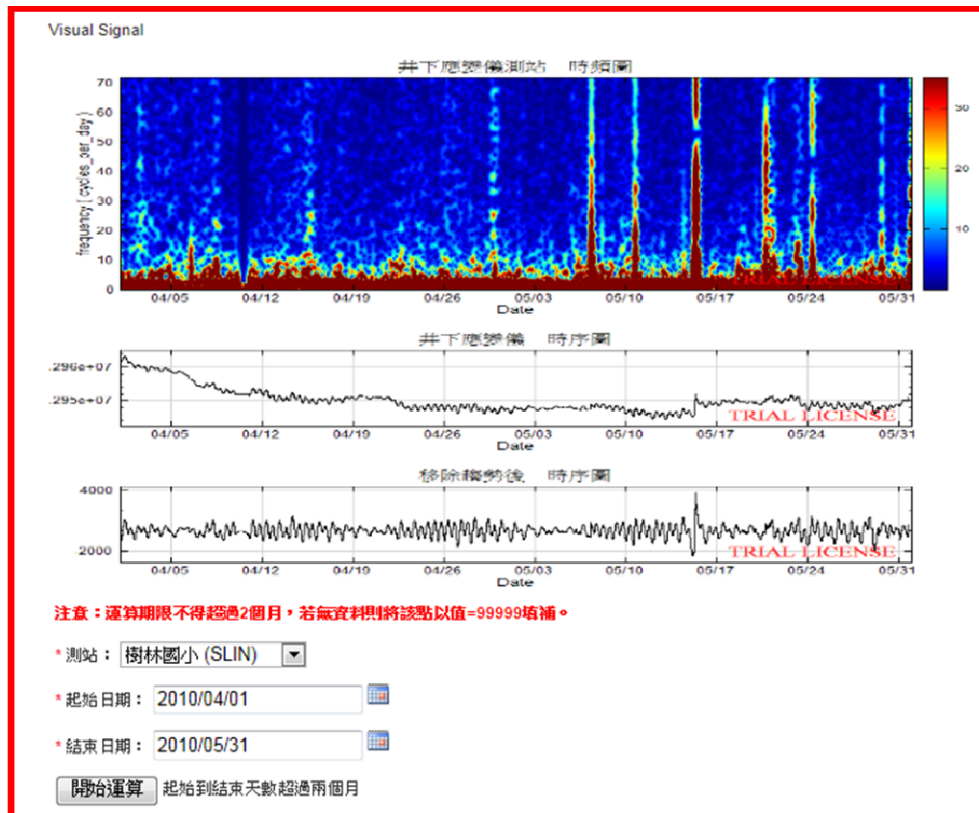
1. 選擇測站、起始時間、結束時間：(最大時間長度為一個月)



2.繪製時頻圖與時序圖

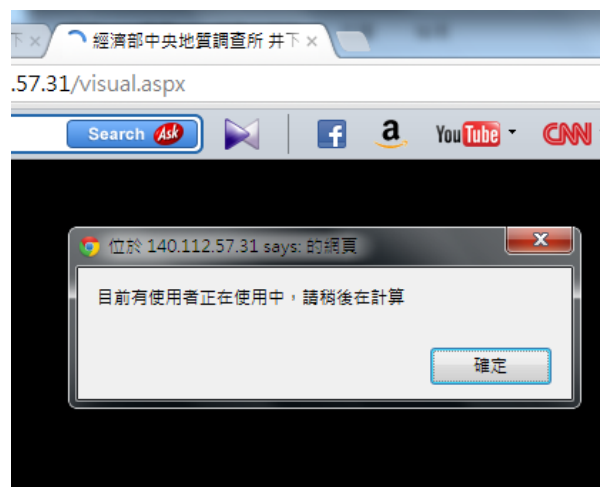
回首頁 · 井下應變儀成果

井下應變儀成果



3.提示資源使用中警示

若有兩位以上使用者，欲透過網頁繪製時頻圖，則會出現「目前有使用者正在使用中，請稍後再計算」提示字樣。



3-3-3 時頻圖分析案例

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，初步成果如下，各站有其特徵頻率及特殊事件(颱風、地震)，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，並可定義出各站之特徵頻率。

1. 科羅莎颱風：有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 3.71，進行時頻分析後如圖 3.72，有 0.08Hz 的特徵頻率，10/6 前後，在 0.1~0.5Hz 間之頻率有明顯的強度變化，圖 3.73 也有類似的時頻圖特徵，但特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同。

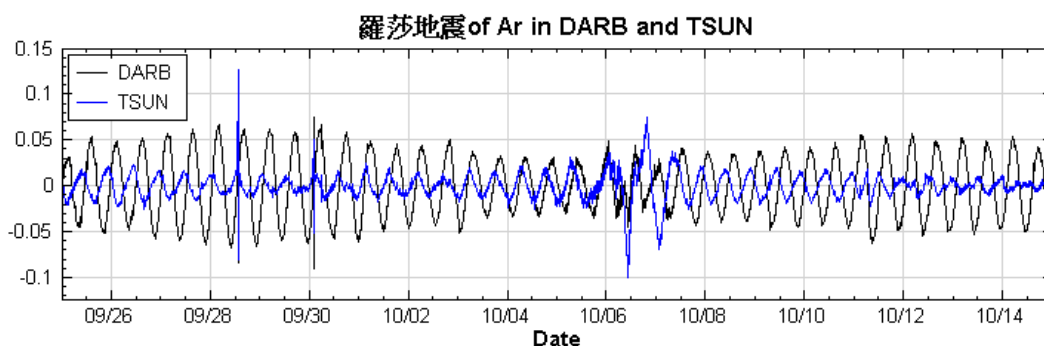


圖 3.71：科羅莎颱風前後面應變的時間序列。

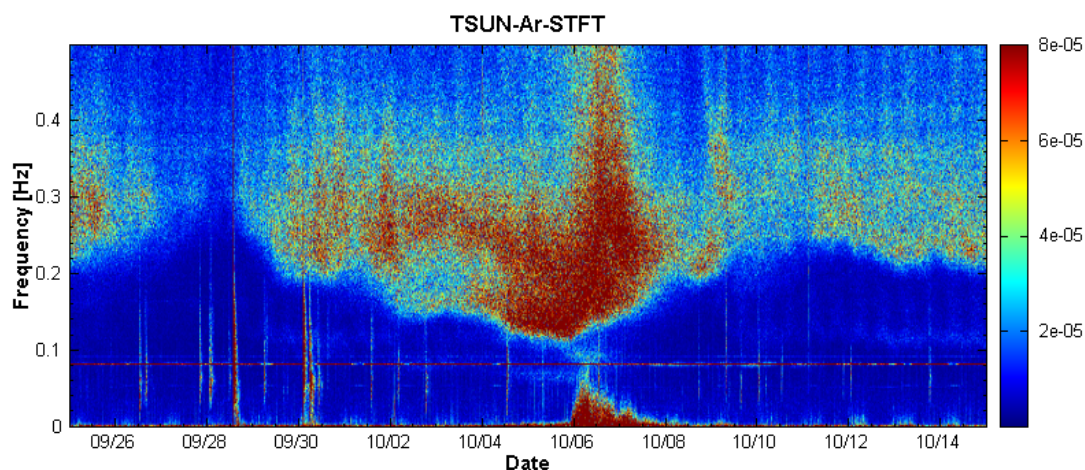


圖 3.72：TSUN 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。

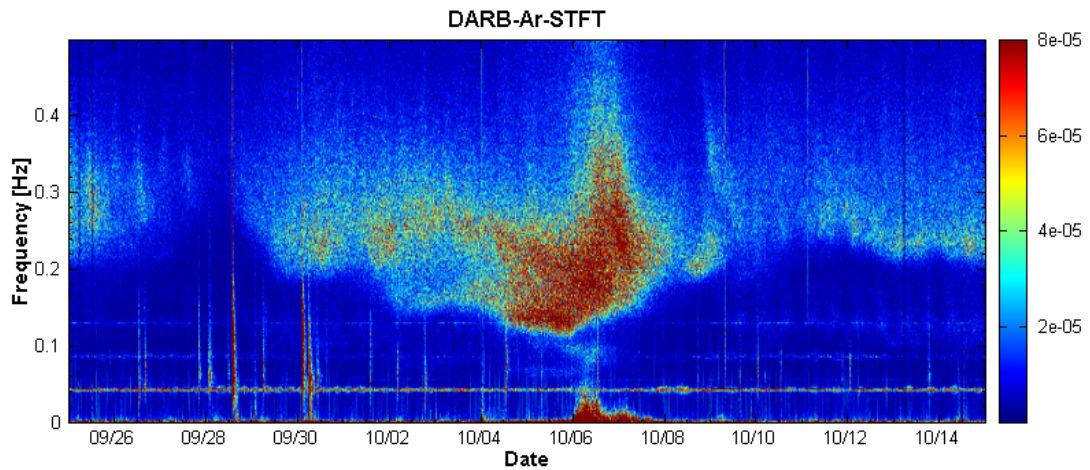


圖 3.73：DARB 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。

2. 甲仙地震：有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 3.74，進行時頻分析後如圖 3.75，有 0.04、0.06Hz 的特徵頻率，3/8 前後，在 0.1~0.5Hz 間之頻率有明顯的強度變化，圖 3.76、圖 3.77 也有類似的時頻圖特徵，但特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同。

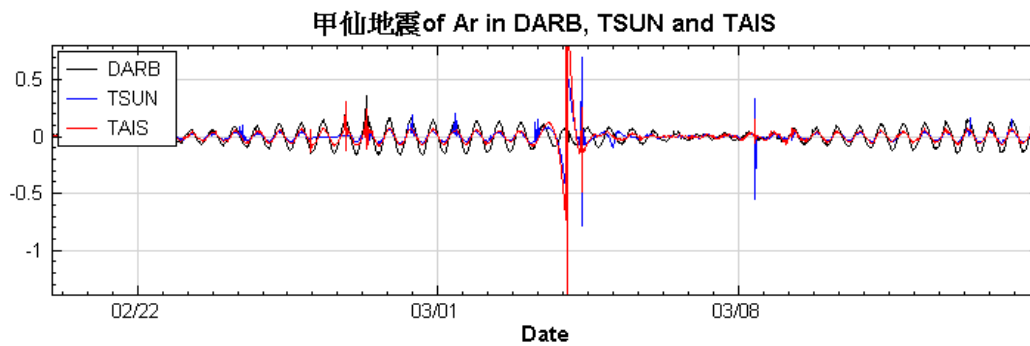


圖 3.74：甲仙地震前後面應變的時間序列。

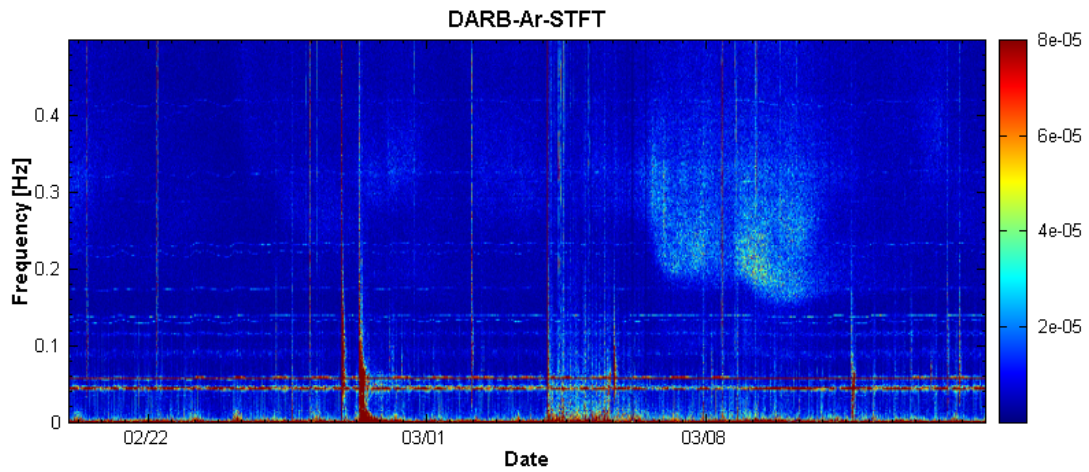


圖 3.75：甲仙地震前後 DARB 面應變時頻圖。

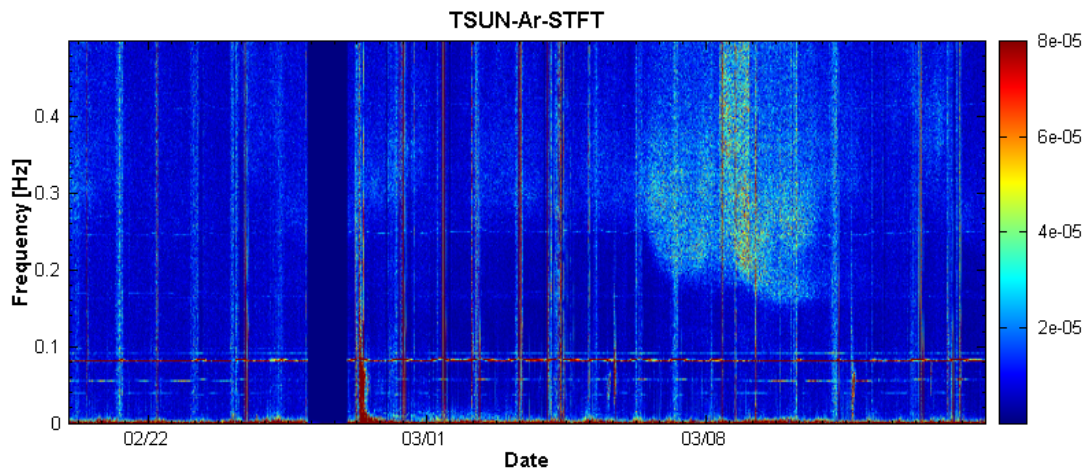


圖 3.76：甲仙地震前後 TSUN 面應變時頻圖。

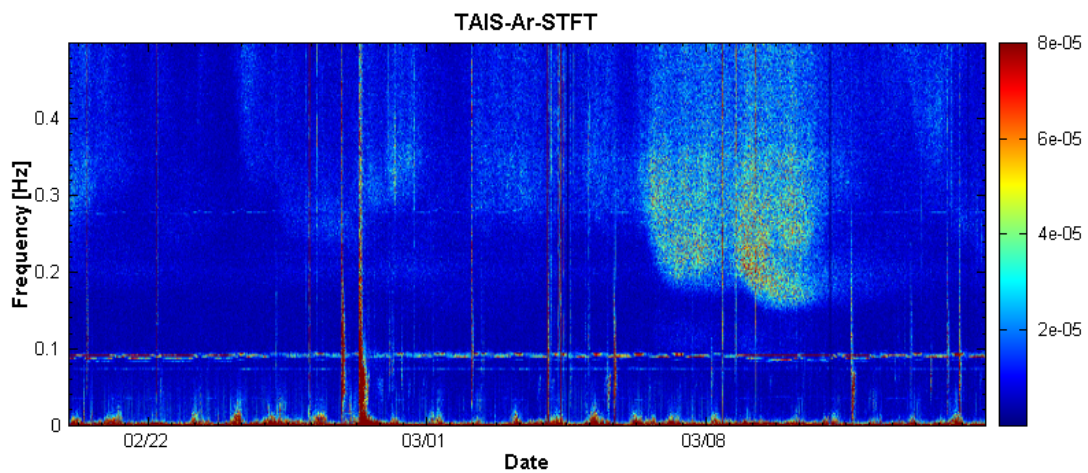


圖 3.77：甲仙地震前後 TAIS 面應變時頻圖。

3-4 井下應變儀相關建議事項

目前井下應變儀的研究目的在找出與構造活動的關聯性與其物理意義，資料處理的方式往往會藉由環境因子（降雨、氣壓、地下水等）的量測資訊來做為訊號修正的參考，然而在資料處理的過程中往往會發現資料的不穩定跳動與缺失，這些情況可能是來自於儀器的不穩定，因此需要藉由後續大量時間的人工編修與藉由其他測站的資料來參考修正後才得以使用。然而未來仍希望我們可以藉由井下應變儀的資料提供可能的地震前徵兆，以做為防災的資訊之一。在這個大方向的目標之下，應變儀中各方向感應器與鄰近環境相關偵測儀器的「穩定性」則會是影響資料是否能即時處理運算與呈現的重要一環。然而截至今年度的工作結果來看，井下應變儀的資料仍然有許多變動是來自於儀器的不穩定與資料缺漏，以下提出幾點問題以供未來改進參考：

1. 四個測站的應變計有較明顯問題，未來可以建議可以首先對這四個測站進行維護與保養的工作：

根據美國地質調查所使用井下應變儀之經驗顯示，井下應變儀壽命可連續十年甚至二十年以上，但必須避免兩個不利的情形發生，一為管線接頭漏蝕，一為雷擊。由於應變儀埋設於地下深部，為能密切反應周圍岩盤的變形，在安裝時即以膨脹型水泥將儀器牢牢地固定在地下，因此若是地下儀器發生問題時，是不可能無損地將儀器從地底下取出更換或維修，而上述的兩種情形都是可能造成地下儀器損毀而無法恢復的情況。

檢視所有的應變儀觀測情形，並回顧儀器設置後觀測的記錄，有三個應變儀觀測站的儀器應是受到外力影響而永久損壞，其分別為：

- (1) 瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理。
- (2) 甲仙十八灣(ECT)因雷擊而故障，於 2004 年 12 月之後資料品質不佳，且 2007 年後無資料，本報告資料只呈現至 2004 年。
- (3) 曾文水庫南(RST)CH1 感應器於 2005 年 4 月之後一直都沒有接收到資料。

檢視各站觀測記錄，目前各站儀器運作情形：

- (1) 瑞峰國小(LMMT)於 2005 完成，然而在初完成後未滿一個月內即發現該站接收資料異常，經詢該站所處位置-瑞峰國小校方表示約於 6 月底該校有發生雷擊事件導致全校停電，研判資料異常應與雷擊事件有關，經後送儀器至澳洲原廠檢修後，證實儀器電路元件有多處高壓燒毀的現象，更換元件後將

全新儀器裝上後即發現該站的 CH2、CH3 兩個訊號呈現異常反應，指出雷擊確實影響到地下儀器的正常運作，後經多次檢測包含 2011 年全省巡迴大檢修都指出這兩個頻道的訊號已無資料上傳，證實已損毀，而於 2012 年該站因資料結果持續不理想，已經將地上儀器拆除，不再繼續觀測維護。回顧該站雷擊事件的原因，由於共站的數據機與地下水壓計也同時損壞，判斷雷擊突波是從電話線經水壓計，因為水壓計與應變儀兩者距離太近(分別深度為地下 150m 與 200m)，導致電流由水壓計竄至應變儀再傳至地上的資料記錄器，造成損壞。由於臺灣山區落雷難以避免，為減少類似狀況持續發生，後續觀測站的設計即縮短水壓計的埋設深度，降低其與應變儀之間的相連性，並於數據機端加裝光電隔離器，儘量切斷與外部線路的連線。

- (2) 甲仙十八灣(ECT)於 2007 年後資料即無法記錄，顯示儀器亦發生嚴重損壞，初步檢視電路元件有燒毀現象，通過聘請澳洲原廠技師巡檢後得出結論-該站原本受雷擊導致地上地下儀器全部受損，地上觀測系統電路板幾乎全毀。本次已將觀測系統全部修復軟體亦全部更新。但井底線路測試結果，發現井下所有接線均毀壞，無法修復。觀測系統裝回現場也無用，該站觀測系統可充作曾文南站、曾文北站完整備品系統，將有助於將來兩站故障時快速置換維修。該站於 2011 年 12 月正式廢除，撤回地下所有儀器設備，不再進行觀測與維護。
- (3) 曾文水庫南站(RST)為地調所設置時間最長的應變觀測站之一，於 2003 年設置完成，原本資料接受品質一切正常，然而在 2005 年 4 月的一場地震後，發現其中 CH1 即無資料接收，經判定可能受到地震影響而損壞，後經巡檢測試仍無法接收孔底資料，判定為永久損壞。幸好其他三個頻道仍能正常運作，對於面積與剪切應變的求取並未有太大的影響。

綜觀上述幾站的觀測記錄，除曾文南站的 CH1 為因地震震動造成損壞外，其他兩站都與雷擊有強烈的關係，因此地調所後續維護工作一直針對如何防止雷擊與減輕雷擊損害進行相關補強，如加裝防雷擊裝置，加強電路隔離系統，但雖然所有觀測站仍能有效正常地運作，雷擊損毀的案例仍常有所聞，在臺灣山區夏季多雷的情形下，可能也是難以避免的事情。

另外，今年度亦發現新樂國小(CINT)的 CH0 大約從今年 2012 年 7 月之後有資料中斷與數值不正常跳階的情況發生，未來在計算該測站面應變時，可能需要考慮使用其他 3 個頻道來做計算。但又由於該測站在方向性檢測的結果非常不理想，使用不同頻道來計算工程應變的會有不一致的趨勢，因此在新舊資料結合與之後的數據分析會有其一定的困擾。

2. 井下應變儀中雨量計資料缺失

當我們將井下應變儀降雨資訊與氣象局的降雨資料做比對後，會發現應變儀的雨量資料有許多缺漏，如梅花國小站(PFMT)在 2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間資料顯示沒有降雨，但從氣象局的資訊的確可以得知在這段期間的總降雨量高達 150 毫米以上(圖 3.78)。目前已知降雨的確會對應變計造成負載壓縮的應變，未來如果要完整且即時地從應變資訊中濾除降雨的影響，勢必須有相對正確且完整的降雨資訊，才得以進行這項工作，建議未來必須對應變儀中的雨量計進行維修以確保雨量資訊的正確性。

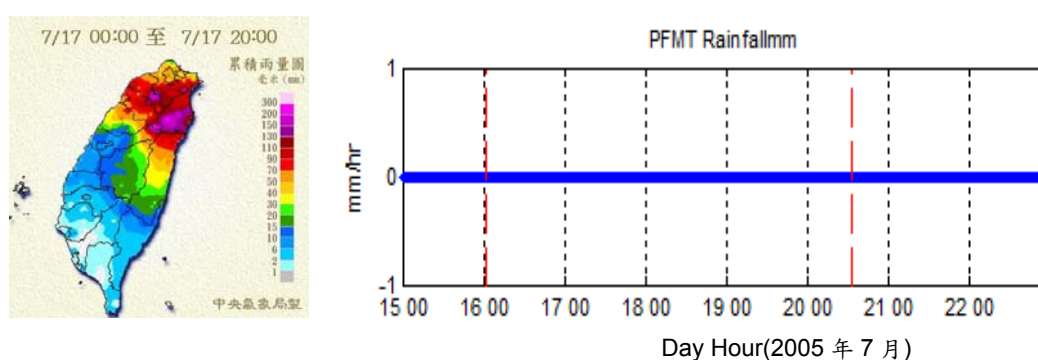


圖 3.78：2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間降雨資料比對。左圖為氣象局 7/17 當日 0 時累計至 22 時的雨量分布圖；右圖為井下應變儀梅花國小站的從 7/15-7/22 的降雨資料。

3. 井下應變儀中氣壓計異常問題

首先是氣壓量值並不正確，以海平面平均氣壓 1013 hPa 與每上升 100 公尺氣壓大約下降 10hPa 的概念來計算各測站在所在海拔高度下的理論氣壓，我們可以得到嘉義網 DARB 站(952 m)、TAIS(790 m)及 TSUN(1370 m) 的平均理論氣壓值分別為 918 hPa、934 hPa 及 876 hPa，而新竹網 BMMT 站(195 m)、PFMT(496 m)及 CINT(505 m) 的平均氣壓理論值分別為 993 hPa、964 hPa 及 963 hPa。但圖 3.79 井下應變儀氣壓計的數值偏離理論值太多，並且出現海拔較高測站的氣壓值比相對低海拔測站還要高的現象(圖 3.79)。

另外藉由鄰近這些測站地區的氣象局屬自計站的氣壓資料作為比對(圖 3.80)，長時間下來的氣壓變化是穩定的，並沒有像應變儀氣壓計訊號有跳階與趨勢上升或下降的現象。

由於井下應變儀的資料處理同時也必許考慮到氣壓的影響，這些非氣壓變動所造成的氣壓數值將會在資料處理的過程帶入，最後會造成判斷構造活動訊號的困難。目前的處理是考慮鄰近測站(包含井下應變儀與氣象局屬自計站)的氣壓數

值來調整異常氣壓。建議未來必須對這些應變儀的氣壓計儀器進行校正與維修，以保持訊號的穩定性，則有利進一步邁向即時資料處理與呈現的目標。

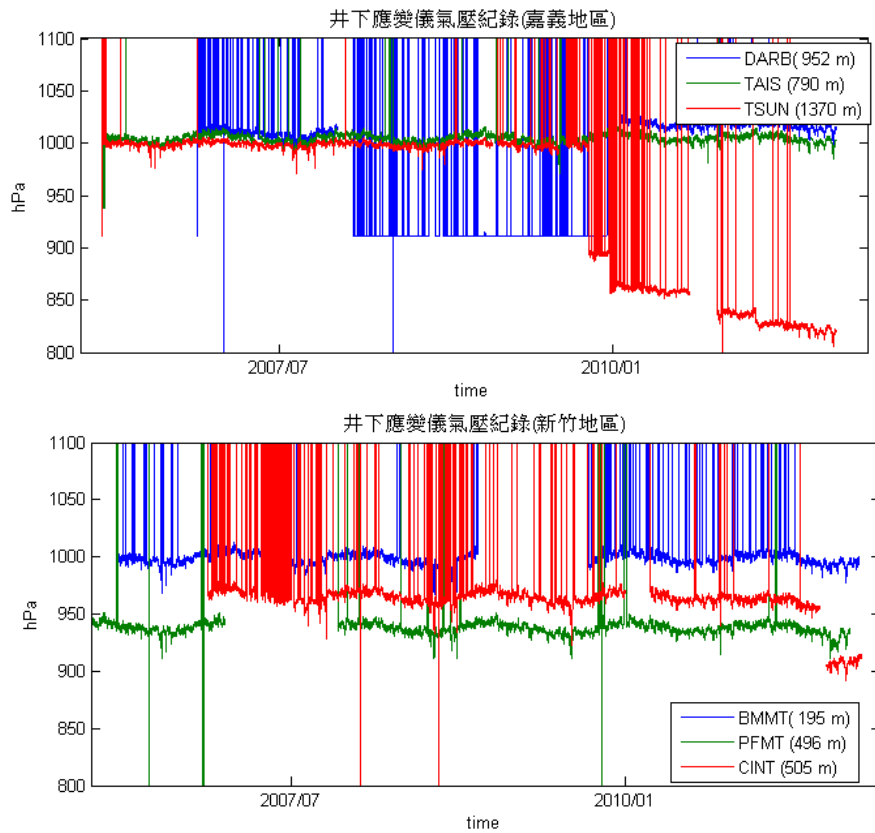


圖 3.79：井下應變儀中的原始氣壓記錄。上圖為嘉義地區測站，下圖為新竹地區測站。

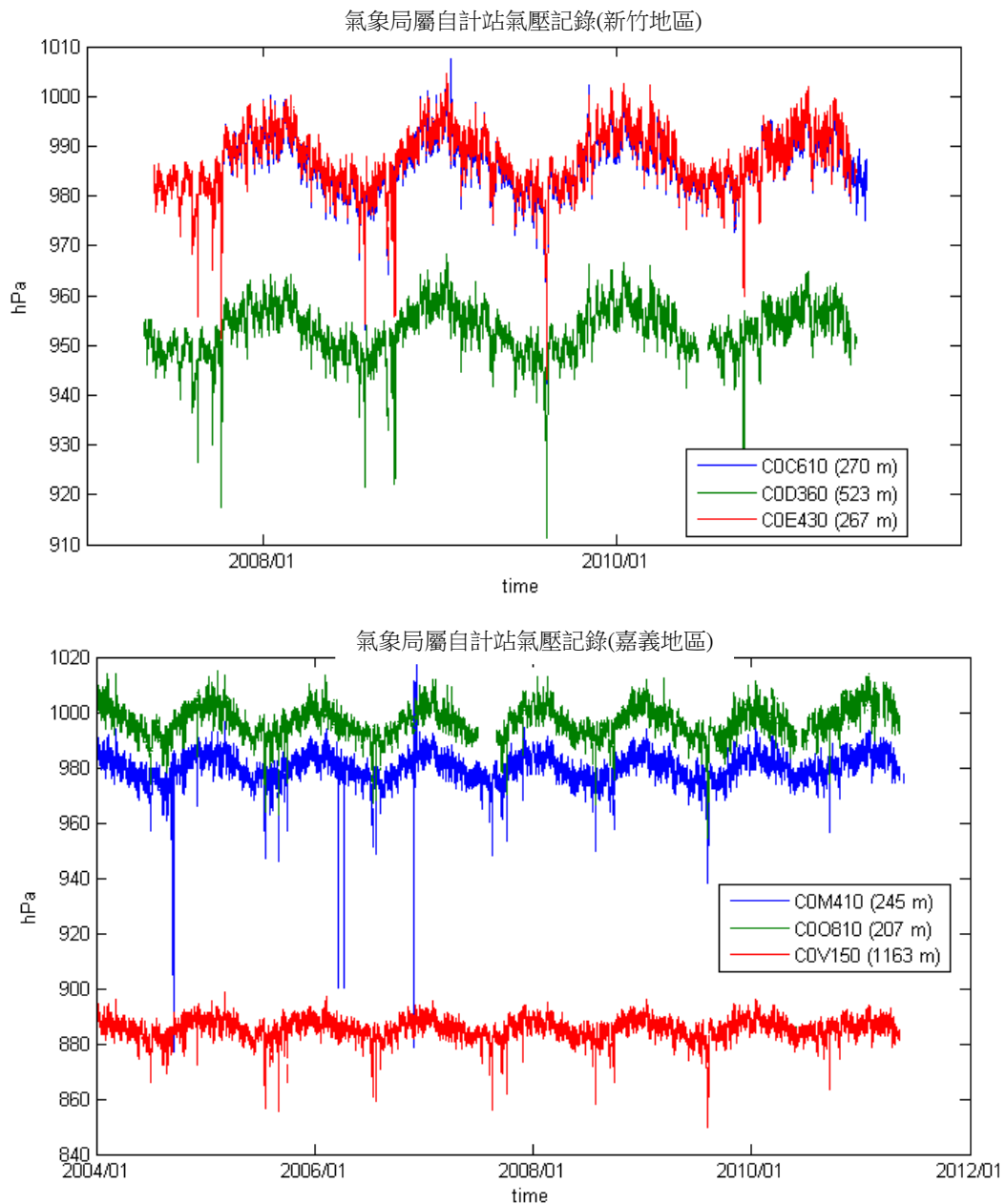


圖 3.80：氣象局屬自計站氣壓記錄。上圖為嘉義地區測站，下圖為新竹地區測站。

4. 共站地下水測站的資料的重要性

由嘉義網井下應變儀與共站地下水水位的比對，可以知道應變計數值的變動有一定比例受到地下水位變動的影響，因此可藉由共站地下水水位站的資料來做為濾除的標準，然而新竹地區則因為地下水水位站的訊號一直很不穩定且時有缺漏，一直無法作用來濾除應變計中地下水的影響，希望未來有機會能對這些地下水水位站進行維護，以維持資料的穩定，也建議未來新增井下應變儀，最好能有地下水水位站共站。

5. 井下應變儀數值絕對量的校正

理論上同地區之相鄰之井下應變儀於相同時間段的應變資料中，對於地潮訊號的振幅與相位應該要一致，但經過檢視各區的面應變資料後，發現就算相同地區，各測站面應變中地潮振幅的大小卻不太相同，而且新竹網與甲仙網的資料顯示明顯的相位不一致(圖 3.81)。

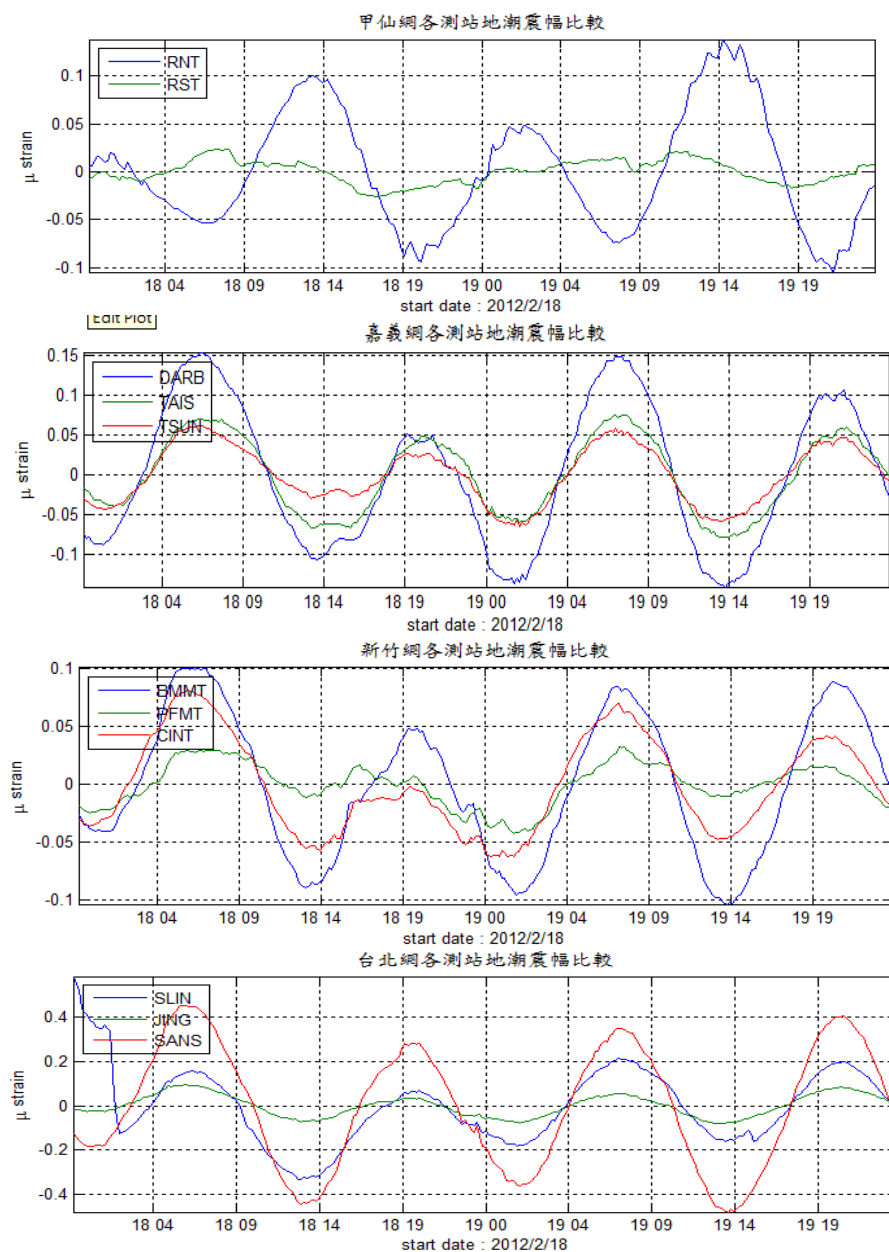


圖 3.81：各相同地區內井下應變儀訊號中地潮振幅之比較。

GTSM 井下應變儀埋設在地底下深處，利用膨脹性水泥將儀器與岩層緊緊耦合以確實反應地下岩層變形的大小，但是由於岩層、水泥與儀器外殼不同彈性係數的關係，儀器記錄的觀測數值要確實反應遠場(far-field)的應變量就必須經過一定的計算與校正，考量這三種不同材質的組合，GTSM 設計者提出了在等向(isotropic)環境下的雙環模型(two-ring model)並計算出實驗室內的關係曲線 [Gladwin and Hart 1985]。可是實際上的儀器安裝到地底下後，我們對於膨脹性水泥的耦合程度與厚度難以量測，因此無法直接以實驗室的公式來計算，[Hart, Gladwin et al. 1996]利用鄰近的兩站井下型與長基線的雷射應變儀觀測站資料比對，校正出井下型應變儀的耦合參數(coupling factor)，並提出修正的方法。利用理論與觀測潮汐振幅與相位間的關係，我們可以推導出井下應變儀與岩層間的耦合參數，使得觀測數值更能反應出實際的物理變化量。一般來說，GTSM 應變儀設計為 3-4 個不同方位角指向的水平線性應變量組合而成的，其分量皆為水平方向而無垂直向，但近年有研究發現應變儀觀測資料中可能也存有垂直變化的分量[Roeloffs 2010]，其可能與對應垂直變化的水平變化量，其量值與各岩層的泊松比(poisson's ratio)，顯示應變儀資料校正工作的複雜與必要性。

由上可知各觀測站因其周圍岩層與水泥耦合程度的不同而有不同的特性，因此可能造成觀測結果上振幅與相位間的差異，未來需要藉由其他觀測結果或理論潮汐的估算來將原始應變儀數值做一校正，來得到正確的物理絕對量。

第四章、斷層活動潛勢分析

4-1 前言

臺灣位於菲律賓海板塊及歐亞板塊之交界處，活躍的板塊運動使台灣的地震頻繁，根據以往地震的歷史記錄，台灣主要的災害性地震發生於陸域之活動斷層，例如 1906 年嘉義梅山地震是由於梅山斷層錯動造成；1935 年新竹、台中烈震造成獅潭斷層及屯子腳斷層錯動；1999 年 921 集集大地震是由於車籠埔斷層錯動造成，以上地震均造成上千之人員傷亡及房建物毀損。有鑒於此，中央地調所針對全台灣活動斷層進行了詳細之調查，目前(2010 年)公佈的全台活動斷層有 33 條，然而目前活動斷層的調查與測量結果，尚無進行系統之彙整，對於斷層潛勢評估及工程設計應用上較為不便，因此，本計畫會先針對活動斷層進行文獻蒐集並建立斷層參數表，可提供作為潛勢評估以及工程設計之應用。

活動斷層潛勢評估的結果可應用於包括土地利用計畫者、建築法規、災害準備及復原、緊急應變、地震保險、工程設計建築之最大震度評估、公共建設及教育大眾減災之推動組織。對於工程設計而言，工程師需針對建築物制定耐震設計之參數；對於地震保險而言，保險業者在制定各區域之地震保險率，需根據地震潛勢評估之結果進行調整。

本計畫斷層潛勢評估的目的是建立台灣活動斷層潛勢評估流程，流程及方法參考美國及日本之經驗，並以台灣現有之活動斷層資料為例進行評估，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年之發生機率。

4-2 分析流程

4-2-1 活動斷層調查與參數蒐集

活動斷層調查主要可分為兩部份，一為斷層位置及幾何特性，二為斷層活動性與變形性，斷層各特性的調查方式如表 4.1 所示，首先蒐集調查區域之相關文獻及地質圖資，確定主要活動斷層之位置，然後進行航照或是遙測影像判釋地表之線形，並配合現地勘查確定斷層於地表之延伸及確切位置，之後藉地球物理探勘方式（震測或地電阻），了解斷層的地下形貌及幾何情形，並搭配跨斷層面之槽溝開挖及鑽探資料，瞭解斷層之古地震及活動情形，完成斷層幾何面及活動性的調查。如果此斷層是一條活動斷層，就必須進行變形特性之量測，包括 GPS 速度場及精密水準測量，獲得斷層的短期變形特性，並從斷層力學及能量的觀點建立斷層活動之數值模型，而後斷層破裂引發大地震發生之規模及週期便可以推求之，此結果即可用來評估活動斷層發生大地震之潛勢。

本計畫將蒐集活動斷層過去之調查報告及測量結果，建立活動斷層之參數表，為了獲得活動斷層之幾何面相關參數，並嘗試建立斷層面幾何模型。斷層分段之依據以及各分支斷層之長度、寬度、深度、面積、走向及傾斜角度之幾何關係可用圖 4.1 來表示，參數表之各斷層參數之意義如下所述：

1. 斷層分段：活動斷層依據特性給予各分段之名稱，破裂面積大之斷層，其活動往往為分段滑移，而非全段的破裂滑動，因此會造成各分段規模、滑移量不一的地震。每一分段中，會重複的發生大致相同規模的最大地震，稱為特徵地震。分段的依據可根據以下幾點[李錫堤，1993]：

- (1) 斷層線彎曲處；
- (2) 雁形跳階處；
- (3) 地形起伏巨變處；
- (4) 橫斷構造交會處；
- (5) 基岩種類或水文環境巨變處；
- (6) 斷層滑移速率改變處；
- (7) 最新活動時間不同者；
- (8) 地震斷層不相連續者。

以美國為例，圖 4.2 為美國舊金山灣中之斷層分段分布圖，San Andreas Fault 分為 SAN、SAP、SAS 三段；San Gregorio Fault 分為 SGN、SGS 兩段。斷層經過分段後，其破裂模式就會有各種排列組合方式，圖 4.3 為針對 Hayward-Rodgers Creek fault 分段，並進行破裂模式排列組合，區分出 4+1 個破裂事件後，由專家評估各事件之可能性，最後分配四個破裂模式之權重並提出斷層之破裂模式。

2. 斷層長度：一般所指的斷層長度為斷層於地表面所延伸之最大長度，也可以說是斷層破裂所能達到的最大長度，但是有些活動斷層是屬於地下盲斷層，則根據圖 4.1 之斷層幾何面求得其斷層長度。

3. 斷層寬度：如圖 4.1 所示，斷層寬度指的是斷層面延伸入地下之寬度，斷層寬度之求法可藉由其他地球物理資料佐證，加上構造平衡剖面建立斷層面三維幾何模型而獲得，或是由文獻已知之斷層孕震深度及斷層傾角，經由三角函數換算求得。

4. 斷層深度：藉由相關資料瞭解區域構造特性，並搭配過去地震之震源深度，瞭解孕震(seismogenic)構造之深度後，進一步推斷斷層破裂後之最深度。

5. 面積：面積可藉由建立斷層面三維幾何模型求得，或是從斷層長度×斷層寬度推求之。

6. 走向：斷層之走向可藉活動斷層分布圖中，斷層線之走向而定之；或是

地形圖上呈現之活動斷層地表之線形推估之。

7. 傾角：傾角為斷層面與水平面所交之銳角，可從地物探勘資料或是鑽井資料獲得斷層之傾角。

8. 斷層機制：斷層機制為斷層活動之力學機制，主要分為正斷層、逆斷層及平移斷層，其獲得方式詳如表 4.1 所示。

9. 短期滑移速率：斷層短期滑移速率，可參考表 4.1 藉由 GPS 或是水準測量量測獲得。

10. 長期滑移速率：所謂斷層長期滑移速率是指涵蓋多次斷層活動記錄之總長時間除以斷層面總滑移(錯動)量，獲得單位時間內斷層滑移(錯動)的距離。由於斷層通常是間歇性錯移而零星連續滑動，所以一般指的是斷層的平均滑移速率。長期滑移速率為評估斷層潛勢的重要參數，可搭配斷層破裂面積(Af)及剪力模數(shear modulus, μ)計算活動斷層釋放之能量與時間之關係，或是搭配活動斷層之一次錯動量計算其再現週期，詳細的說明如附錄光碟-附錄 G 所示。

11. 滑移赤字：利用斷層區塊模型將斷層閉鎖區附近的變形視為剛體運動和彈性變形的線性組合，如圖 4.4 所示；剛體運動一般為板塊以尤拉極為圓心而做的運動，彈性變形可視為閉鎖區的反向運動，稱為滑移赤字或滑移虧損(slip deficit)。

12. 單一事件變位量：單一事件變位量為斷層之同震地表錯移量，大地震後可由地表直接量測其變位量。古地震之變位量可藉由被錯移的古地形面、河系、山脊線、河階崖、被抬升的海階、海蝕洞及均夷面等之量測來獲得其變位量。

13 特徵地震規模及最大可能地震規模：斷層會重複的發生大致相同規模的最大地震，稱為特徵地震，其規模則為特徵地震規模。地震規模之大小與活動斷層之長度、面積及變位量有關，詳細的說明可參考附錄光碟-附錄 H。

14. 地震復發間隔：表示地震會重複發生特徵地震之間隔時間。

15. 最近一次活動時間：為活動斷層最後一次發生特徵地震之時間。

參數表建立之目的是為蒐集該活動斷層之相關文獻資料，利於進行後續研究，並從文獻中萃取斷層各項特性參數以及該參數之研究方法，逐一填於斷層參數表中，並在最後一欄填入該參考文獻。本計畫盡可能列舉蒐集之所有文獻研究結果以資比對，因此同一個斷層參數欄位會有多樣的數值、研究方法及參考文獻。

表 4.1：活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式。

| 斷層參數 | | 調查方法與分析模式 |
|----------|-------------|---|
| 斷層位置與特性 | 斷層位置與長度 | <ul style="list-style-type: none"> ● 遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 ● 地表地質調查與河階地形研究。 ● 地物探勘瞭解地下地層錯動情形。 ● 鑽探瞭解跨斷層之地層差異。 ● 根據地質鑽探建構地質剖面。 |
| | 斷層分段與分支 | <ul style="list-style-type: none"> ● 遙測地形判釋，各分段地形抬升量有所差異。 ● 地表地質調查，以位態改變分辨之。 ● 跨斷層河階地形，各分段河階發育不一致。 ● 主斷層錯動量與地震規模皆大，分支斷層則次之。 ● 主斷層與分支斷層可以透過運動學分析反演之來綜合解釋。 |
| | 斷層位態與3D幾何形貌 | <ul style="list-style-type: none"> ● 淺層與深層鑽探，斷層走向、傾角、震源機制提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 淺部與深部震測，提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 軟體模擬運動學分析與模擬地下三維構造。 |
| | 斷層機制 | <ul style="list-style-type: none"> ● 地表斷層露頭與斷層擦痕。 ● 斷層鄰近地震機制。 ● 以 GPS 速度場推估地殼應變量探討機制。 |
| | 最大可能地震規模 | <ul style="list-style-type: none"> ● 依據斷層破裂之尺度，由經驗公式推估最大可能地震規模。 |
| 斷層活動性與變形 | 活動歷程 | <ul style="list-style-type: none"> ● 歷史文獻資料有關地震記載。 ● 古地震研究（槽溝開挖、跨斷層河階定年）。 |
| | 平均滑移速率 | <ul style="list-style-type: none"> ● 短期斷層滑移速率，以 GPS 速度場與精密水準資料推估。 ● 長期斷層滑移速率由定年成果提供。 |
| | 地震復發間隔 | <ul style="list-style-type: none"> ● 利用長期斷層滑移速率資訊，採用特徵地震模式及適當的統計模式進行推估。 |
| | 地表變形量 | <ul style="list-style-type: none"> ● 根據斷層機制、GPS 與精密水準資料、透過運動學分析推測地表可能之變形量與變形模式。 |

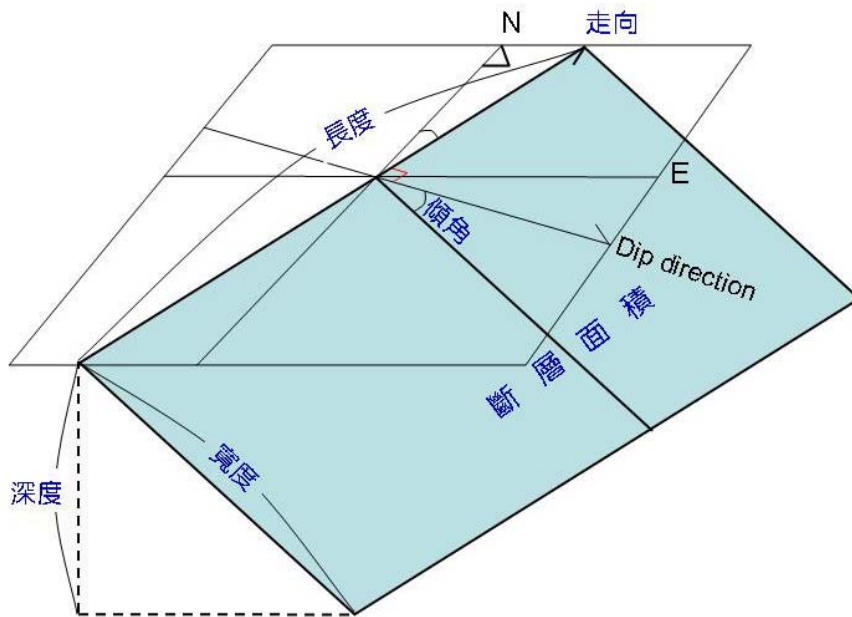


圖 4.1：斷層幾何參數示意圖。

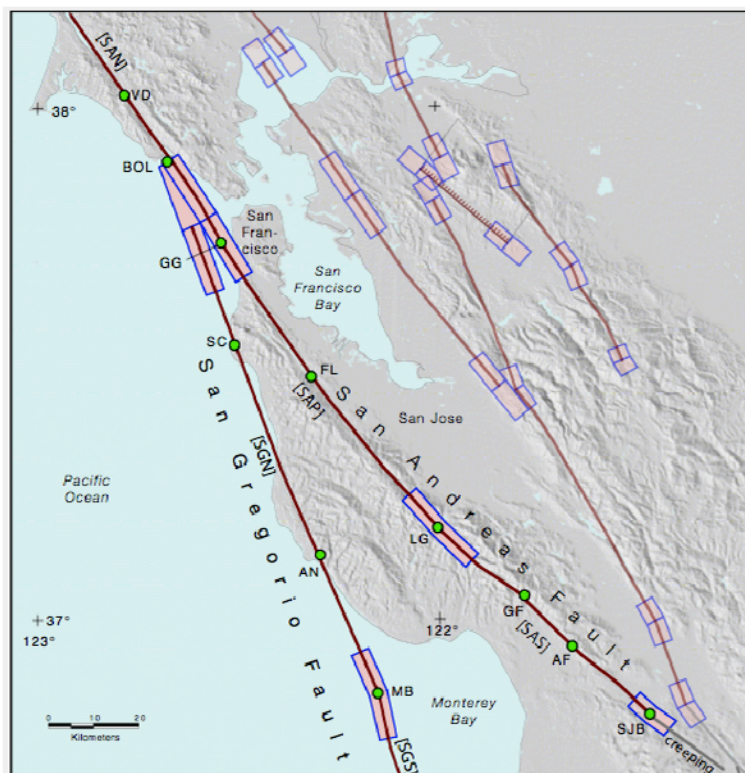


圖 4.2：斷層分段分布圖。San Andreas Fault 之分段：SAN、SAP、SAS；San Gregorio Fault 之分段：SGN、SGS[摘錄自 WG02, 2003]。

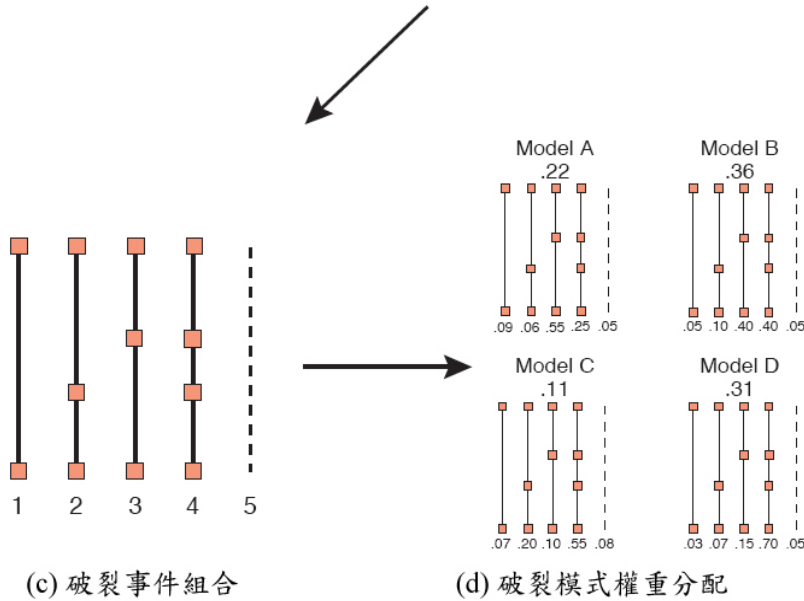
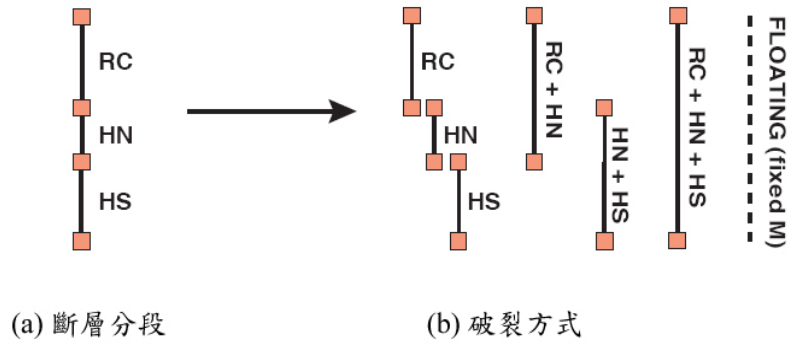


圖 4.3：由斷層分區建立斷層破裂模式。(a) 圖中橘色方框為分區之邊界，以 Hayward-Rodgers Creek fault 為例，先劃分三個斷層分區；(b) 分區中可產生六種破裂組合（加上不明破裂方式 floating earthquake）；(c) 建立破裂事件；(d) 將各破裂模式及事件進行權重分配。[摘錄自 WG02, 2003]

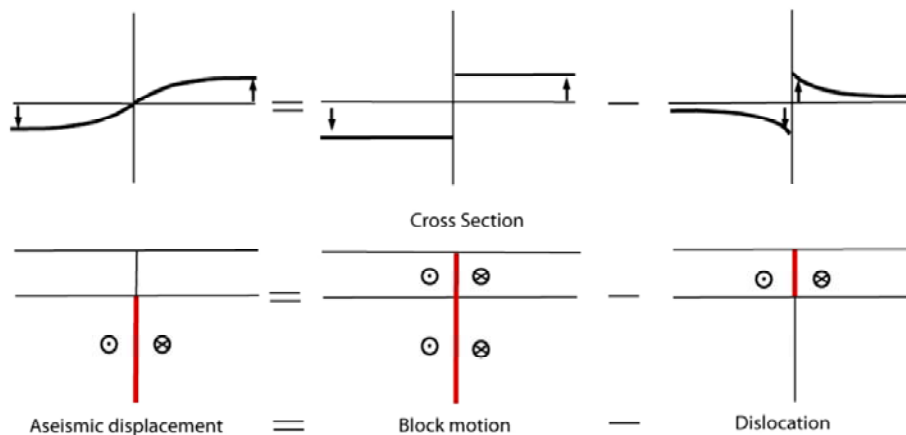


圖 4.4：間震期之變形模式即為剛體運動剪去彈性錯位變形， $\text{Block motion} - \text{Dislocation} = \text{Aseismic displacement}$ 。

4-2-2 活動斷層潛勢評估流程

活動斷層潛勢評估方法之概念如圖 4.5 所示，活動斷層依調查之結果分為三種情形，分述如下：

1. 第一種是已知古地震發生次數有 2 次以上：例如車籠埔斷層藉由槽溝開挖可找到 5 次之古地震事件，將這些古地震事件的發生間隔相加平均後，即可得到其平均活動間隔，並計算標準差及變異係數，並選取合適之機率密度函數，代入週期及變異係數，即可獲得函數分布之圖形，台灣過去有許京穎[2008]評估活動斷層之潛勢，以對數常態分布之統計模式進行評估，本計畫考慮斷層之活動特性符合彈性回彈理論，建議採用 BPT 機率密度函數來進行評估，各機率密度函數之說明詳如附錄光碟-附錄 J。
2. 第二種是僅知道古地震最後一次發生的時間：需藉由斷層古地震之錯動量及定年推算斷層之長期滑移速率。在描述斷層的地震年發生率上，本計畫建議採用特徵地震模式，需要長期滑移速率、斷層面面積及特徵地震規模等參數，特徵地震模式之理論及公式說明詳如附錄光碟-附錄 I 所示，所得特徵地震之年發生率倒數即為再現週期，以 BPT 模式進行評估，變異係數則參考美、日兩國之經驗予以假定，例如美國 BPT 模式的變異係數為 0.7 (0.3)，0.5 (0.5)，0.3 (0.2) [WG02, 2003]；日本則採用 0.24 為變異係數[地震調查研究推進本部，2001]。
3. 第三種為古地震最後一次事件未知的情形：斷層之特徵地震規模及斷層一次事件錯動量 U 是以經驗公式帶入求得，則斷層之活動間隔即為 U/V ，其中 V 為活動斷層之長期滑移速率，由於不清楚最後一次地震發生時間，因此機率密度函數選擇 Poisson 模式進行評估。

本計畫活動斷層潛勢評估之詳細流程如圖 4.6 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，圖 4.7 為美國評估加州地區地震所採用之邏輯樹，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。

特徵地震模式是來描述斷層的地震發生率，在 Youngs and Coppersmith [1985]中提到，推估斷層的特徵地震模式需要使用到的參數計有：斷層破裂面積、

斷層滑移速率、剛性或是剪力模數 (rigidity shear modulus)(一般為 $3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$)、Gutenberg-Richter 關係式中的 b 值、上限地震規模(最大可能地震)與下限地震規模。各參數詳細說明如下：

1. 斷層破裂面積：一般是指斷層幾何面面積，在 WG02 針對 SFBR 區域所做的斷層潛勢評估中，將斷層幾何面積乘上地震滑移尺度因子 R，圖 4.8 所示即為計算 North Hayward Fault 的面積和地震矩率所選用的參數，其中 $A=L$ (長度) $\times W$ (寬度) $\times R$ (地震滑移尺度)。此外，還需要將地表潛移的區域扣除，如圖 4.9 所示，白色區域之斷層面積才適用於地震矩率之計算。
2. 斷層滑移速率：以斷層面上之長期滑移速率為主。
3. Gutenberg-Richter 關係式中的 b 值：許京穎[2008]曾以台灣電力公司核電廠耐震安全評估中使用之震源分區來計算各分區之 b 值，本計畫則建議以 Cheng et. al., [2007]的震源分區選取地震，使用截切指數模式以最大似估計法(maximum likelihood estimate, MLE)來估算。其中的地震目錄是經過去除前餘震的主震目錄，詳如附錄光碟-附錄 K。
4. 最大可能地震規模推估：參考附錄光碟-附錄 H，藉由尺度-規模經驗公式來推估斷層的最大可能地震。

完成上述參數蒐集後即可以特徵地震模式來推估特徵地震的回復週期，並利用各參數的可能分布範圍計算出特徵地震的可能回復週期分布，最後可供統計模式計算未來地震發生機率。

從特徵地震模式，我們可以獲得幾個重要之參數，包括特徵地震矩規模之大小及年發生率，而年發生率之倒數即再現週期，我們可將此再現周期帶入機率密度函數中來計算該斷層震源在未來幾年發生特徵地震之機率。

計算地震未來之發生機率，尚需要該斷層特徵地震最近一次發生之時間，有些統計模式會將不確定性帶入計算，例如再現週期之標準差。機率密度函數的計算方式如圖 4.10 所示，假設曲線為地震發生之機率密度函數 $f(t)$ ，則從地震發生後經過時間 T 到 ΔT 之發震條件機率為斜線之面積/所有藍色區的面積，條件機率的公式為：

$$P(T \leq t \leq T + \Delta T | t > T) = [F(T) - F(T + \Delta T)] / F(T) \quad (\text{式 4.1})$$

其中

$$F(T) = \int_T^{\infty} f(t) dt \quad (\text{式 4.2})$$

在獲得每一條斷層分支之再現時間之機率後，若要計算位於兩條以上斷層區域之破裂機率，或是多個斷層分支集成之條件機率，可以使用下列計算方

式：

$$P_{total} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n) \quad (式 4.3)$$

其中 P_{total} 為將所有斷層之發生率交集後之發生率， P_1 至 P_n 則為各斷層發生率。此方法也可應用在區域震度的發生率評估上，如圖 4.11 所示，圖中兩個圓代表兩條斷層發生地震 A 及地震 B 震度 6 級以上機率，因此受這兩條斷層影響發生震度 6 級以上之區域機率：

$$P = 1 - (1 - P_A)(1 - P_B) \quad (式 4.4)$$

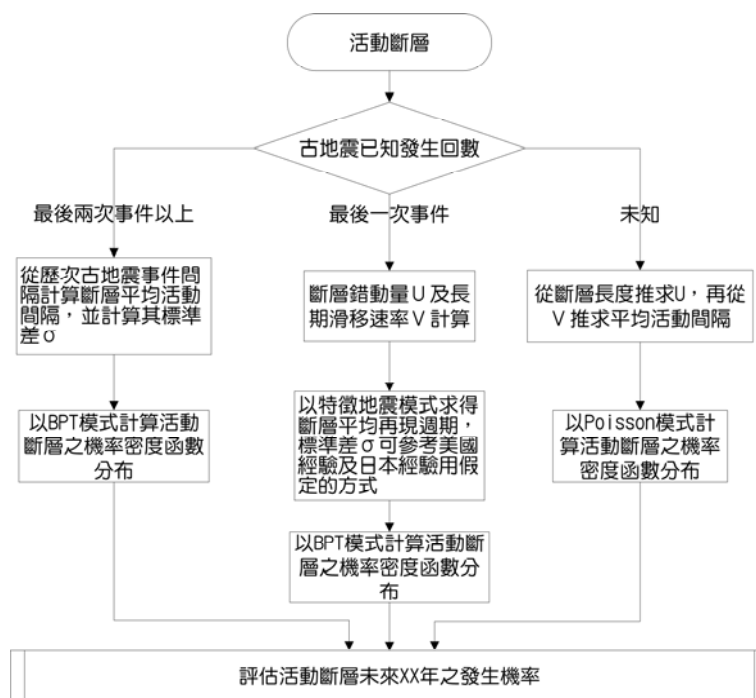


圖 4.5：活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖。

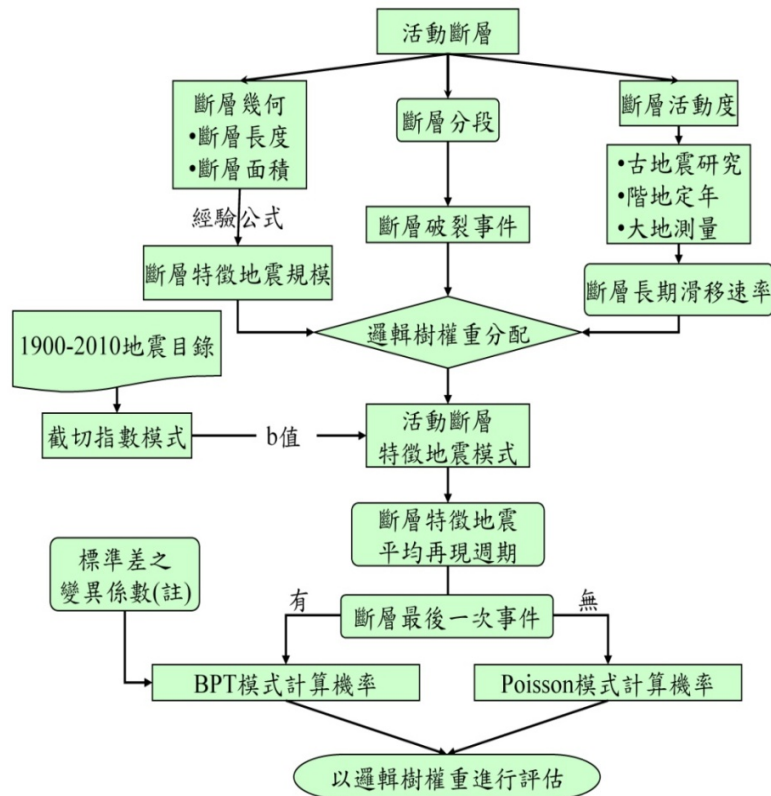


圖 4.6：活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。

註：標準差之變異係數參考美國經驗以 0.7(0.3)、0.5(0.5)、0.3(0.2)帶入評估

Components of the Uniform California Earthquake Rupture Forecast 2 (abbreviated logic tree of 480 branches)

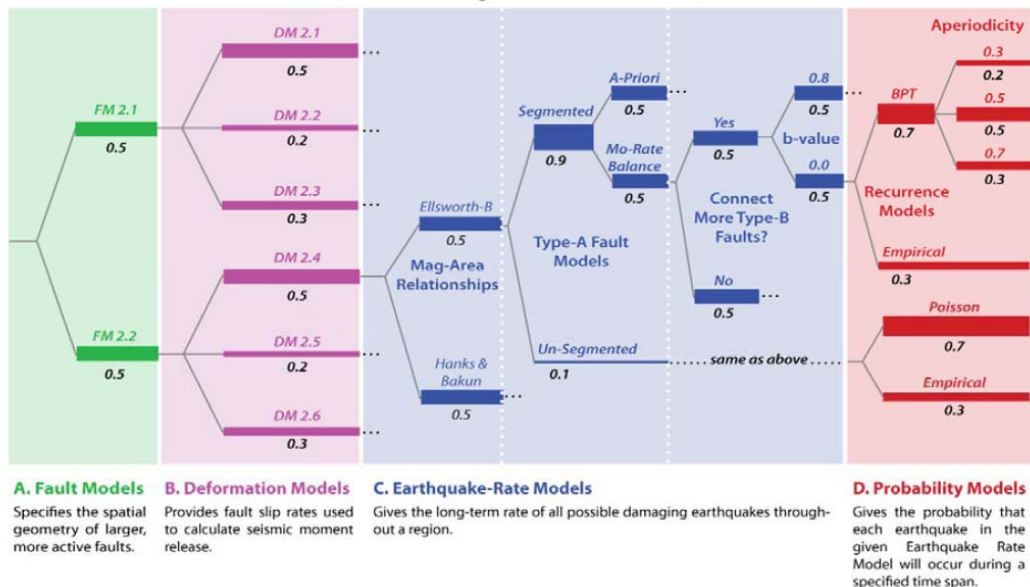


圖 4.7：加州地區地震潛勢評估邏輯樹。[摘錄自 WG07, 2008]。

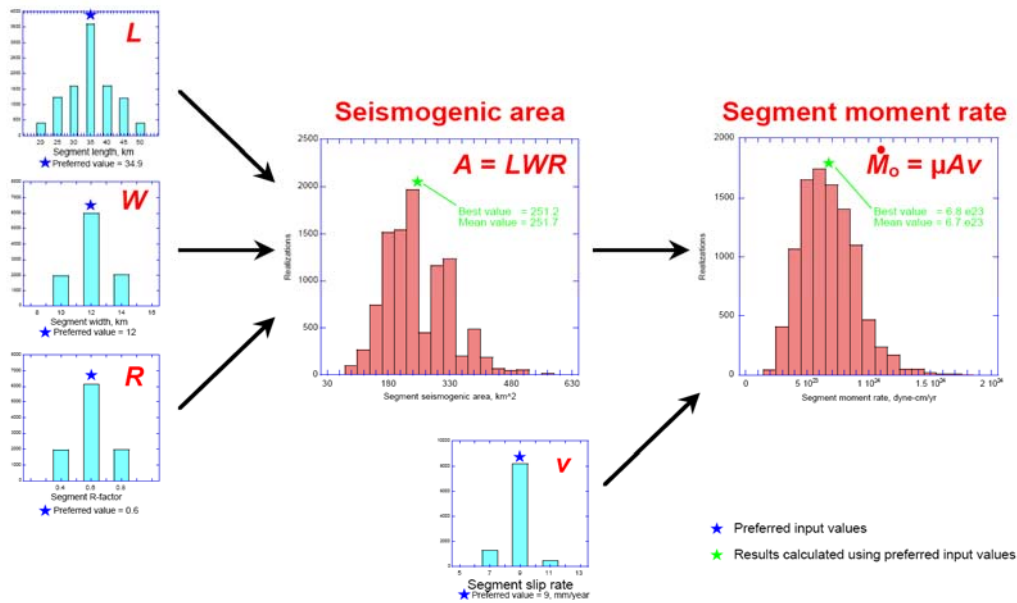


圖 4.8：WG02 模式評估示意圖。藍色長條圖橫軸為長度、寬度、地震滑移尺度及滑移速率之參數值，縱軸為發生頻率（10000 次實況模擬獲得），紅色長條圖為面積及地震矩率之計算。[摘錄自 WG02, 2003]。

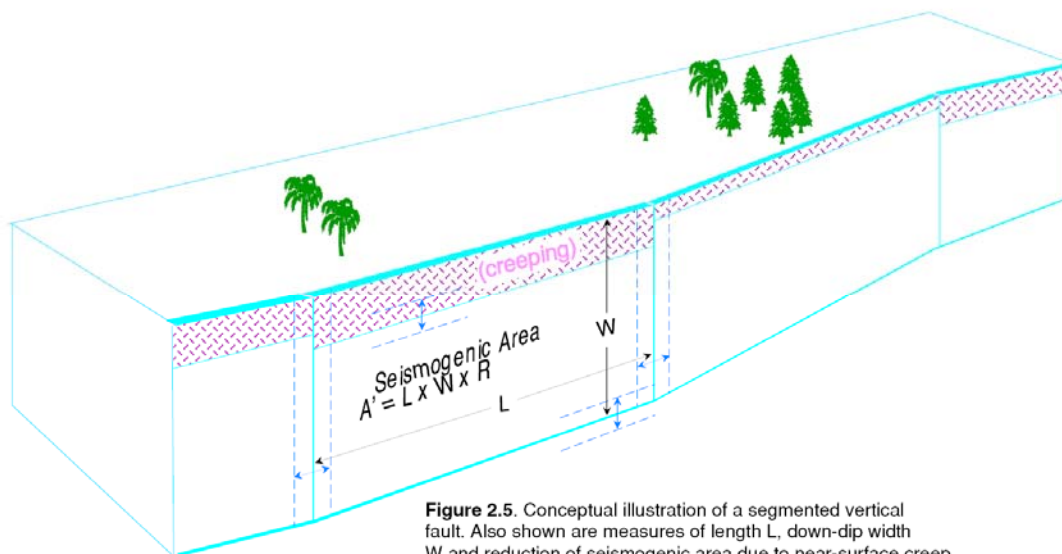


Figure 2.5. Conceptual illustration of a segmented vertical fault. Also shown are measures of length L , down-dip width W and reduction of seismogenic area due to near-surface creep. Dashed lines illustrate uncertainties in segment endpoint position and other quantities.

圖 4.9：斷層破裂面積示意圖。計算斷層破裂面積，需扣除地表潛移之部分，即圖中之紫色網格處，圖中虛線部分為斷層邊界之不確定性，也需一併考慮。[摘錄自 WG02, 2003]。

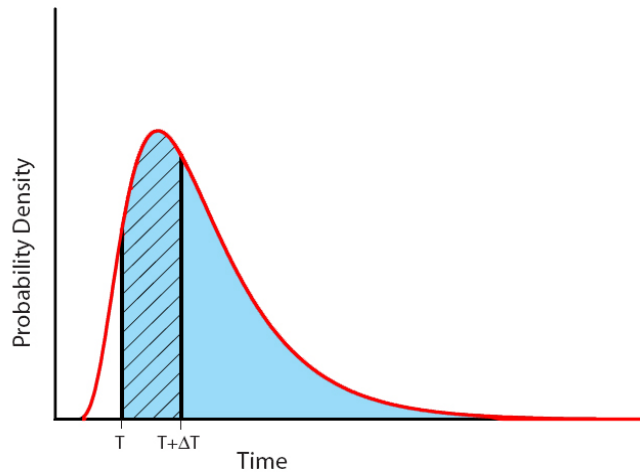


圖 4.10：機率密度函數分布圖。圖中紅色線段表示機率密度函數之線段，Time 為 0 代表最近一次地震發生之時間，Time 為 T 代表發生地震後經過了 T 時間。

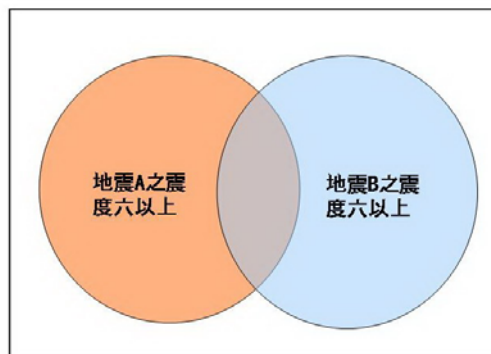


圖 4.11：計算震度 6 級以上之區域機率理論。[摘錄自日本全國地震動預測地圖，2008]。

4-2-3 活動斷層邏輯樹建立之規劃及方向

4-2-3-1 活動斷層邏輯樹建立之規劃與方向

在進行活動斷層震源地震潛勢評估時，斷層震源之參數就成為影響潛勢評估結果之重要因素，因此在建立斷層參數時需盡可能的多方蒐集各專家之地質調查成果及測量結果。然而，活動斷層調查之參數均有其不確定性，此不確定性之原因有二，一為資料本身固有的隨機誤差分布，屬於自然的誤差特性，例如地震規模大小、地震次數分布、斷層破裂面積誤差；二為目前科學研究上之不確定性，將來隨著資料的累積或是研究方法的突破可逐漸降低其誤差，如：震源模式選擇、斷層滑移速率、尺度-規模經驗公式、存疑性活動斷層等，針對同一條斷層，會有許多地質學家提出不同模式或是參數，在進行地震潛勢評估時，我們不能偏頗於特定專家之看法，而是需要盡量整合各專家之建議來進行分析，邏輯樹就因應而生了。

邏輯樹包含一系列的節點(nodes) 與分支(branches)。每一節點代表任一參

數/模式，由節點延伸出的每一分支，代表此參數/模式的變化或可能性，將各種選擇或變化給予適當機率或權重，使各分支匯入上層節點的機率值總和為1，藉由適當的分支來反映參數的不確定性與可能性。鄭錦桐[2002]在進行台灣地區之機率式地震危害度分析時首度劃設了台灣孕震源之邏輯樹，如圖4.12所示。2008年美國國家地震危害度地圖中，針對Wasatch fault劃設之邏輯樹如圖4.13所示，圖中主要考慮之節點有斷層模型、傾角、滑移速率、規模之不確定性，同時還有強地動模式選擇之不確定性。

在邏輯樹中各分支的機率/權重一般有兩種設定方法，第一類是參數有上、下界限或是資料的變異特性適合以常態分布或指數常態分布來描述，例如：斷層滑移速率、破裂深度、b值等，這類的參數特性可以3個或多個分支來表現其不確定性。Keefer and Bodily[1983]證明參數若是屬於此類的特性，則可以3個權重值表示，其中中間值(median) 50%給權重0.63，另外最小5%與最大95%(相當於 ± 1.65 個標準差位置)，則皆設定權重為0.185，不過經驗上通常也可設定為0.6, 0.2, 0.2。當節點過多時，單一節點有3個以上的分支對結果影響並不敏感，因此，為節省運算時間又可分析出合適的結果，此類參數多以3個分支為主。第二類參數多屬具選擇性且可信度有爭議的假設、模式或方法，例如：斷層滑移速率、震源分區原則、斷層位態與機制、尺度-規模經驗公式的選擇。此類參數通常無法有足夠資訊以統計作為依據來設定各分支的權重，因此，專家的意見通常成為重要的權重依據。

本計畫建議台灣地區活動斷層邏輯樹之劃設上，可分為以下五種節點，斷層分段及破裂事件、斷層傾角、斷層破裂深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，敘述如下。

1. 斷層分段及破裂事件：在斷層分段上，應蒐集各專家之研究，了解其分段之原則，同時在邏輯樹中呈現各專家意見之分支，本計畫目的是完成分段準則並建立適合於台灣活動斷層之一套規範，可適用於所有活動斷層上。

日本的活動斷層資料庫建立之後，針對活動分段定立了分段之準則，部份提供了數據作為參考，圖 4.14 為其分段準則之圖示，說明如下：

- (1) 兩斷層線跡中有超過 2 公里之缺口；
- (2) 斷層線跡走向彎曲 20 度以上；
- (3) 跳階處；
- (4) 平行之斷層線跡距離超過 2 公里；

另外還有：

- (5) 斷層滑移速率及滑移方向改變處；
- (6) 分段古地震歷史不一致者；

McCalpin[1996]在其對斷層分段之描述中建立如表 4.2，並同時評估了各分

段特徵之確實度有多少。

2. 斷層傾角：斷層的構造形貌在地下之之情況較為複雜，為了進行後續地震危害度及地震模擬之評估，需簡化斷層傾角以利分析，斷層傾角最多考慮雙傾角，並參考各地質調查研究成果以分支表示。

3. 斷層破裂深度：根據以往對大地震之觀察，破裂深度通常不會小於5公里，然而台灣地質剖面往往只呈現深度10公里內之情形，從地質的角度與基底滑脫面的角度均難以與地震結合，因此在深度推估上，應考慮岩石的脆塑性轉換帶，此處可參考Scholz對於岩石深部脆塑性轉換之研究，同時蒐集台灣地熱流之分布情形，可更精準的推估岩石脆塑性轉換帶之深度，另外在構造活躍區域也可參考該區地震重定位之深度分布，這兩種方式所推估之破裂深度可各當作邏輯樹之一分支。

4. 特徵地震規模：特徵地震規模主要是以斷層震源尺度-規模經驗公式推估而得，建議採用面積-規模公式，在台灣地區採用各專家學者之經驗公式進行計算並給予權重。

5. 斷層長期滑移速率：以地質或槽溝觀察到之長期滑移速率為主，在操作上需注意將抬升率轉換到斷層面之上。另外需考慮短期滑移速率，這是因為活動斷層會以潛移方式釋放能量，例如台灣東部縱谷內之池上斷層即有潛移之現象。根據Wallace[1970]的公式，可了解潛移對於計算活動斷層再現週期之影響。

$$RI=D/(S-C) \quad (\text{式4.5})$$

式中 RI 是平均重複間隔；D 是單一且典型的斷層活動錯移；S 是與大規模歷史地震活動有關的滑移速率；C 是潛移速率(Creep slip rate) (許多斷層常無潛移實際資料，一般假設C 為零)。另外美國WG07在建立斷層參數表時會建立一無震滑移因子，如表4.3所示，以Parkfield斷層為例，其無震滑移因子0.8，表示其量測之滑移速率乘上0.2才是真正由地震造成之長期滑移速率。

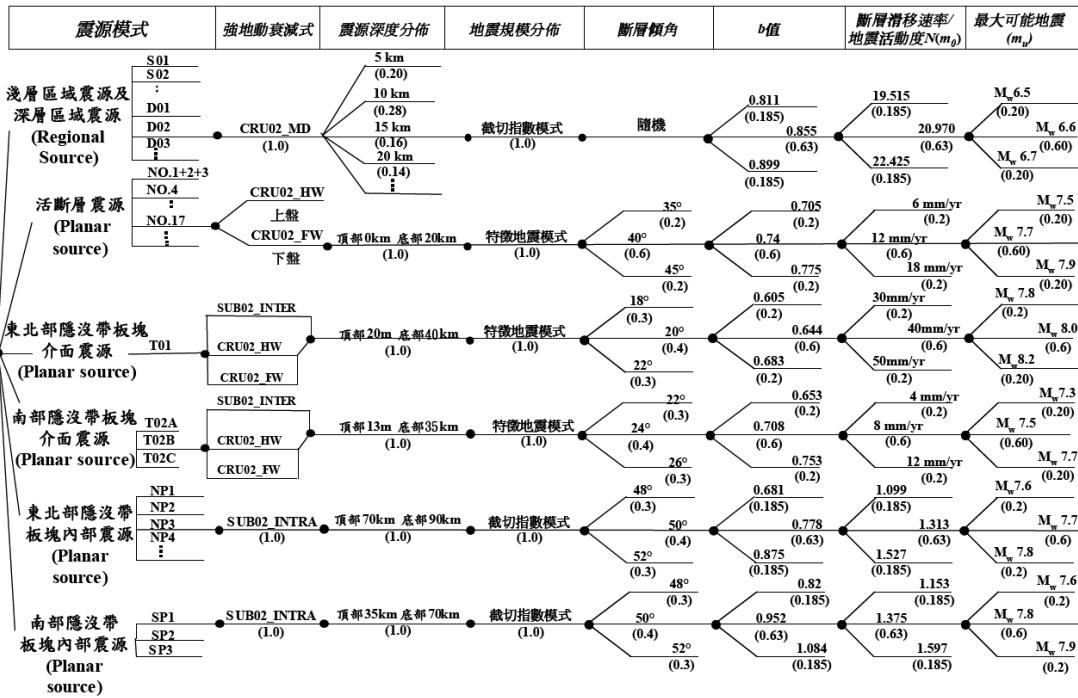


圖 4.12: 鄭錦桐劃設之 PSHA 處理參數與模式不確定性的邏輯樹架構。[摘錄自鄭錦桐, 2002]

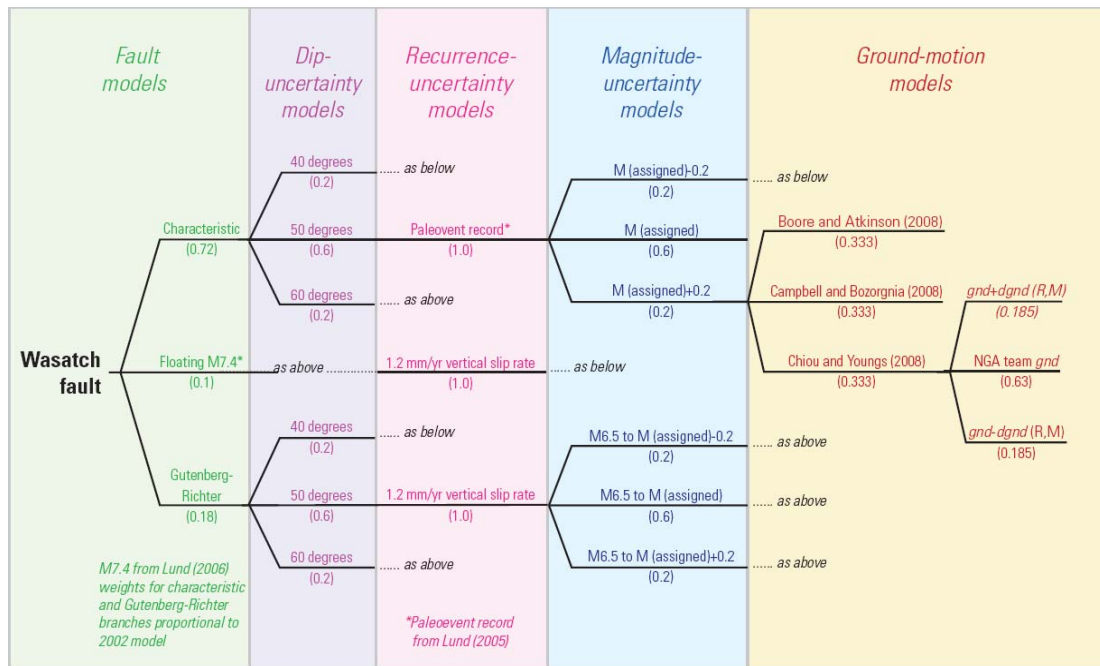
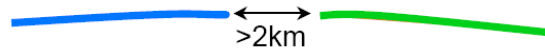
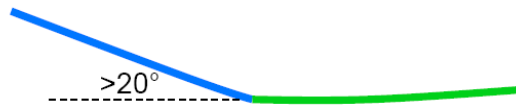


圖 4.13: Wasatch fault 之邏輯樹架構。[摘錄自 Mark D. Petersen et al., 2008]

1. Gap of more than 2 kilometers



2. Bend of more than 20 degrees



3. Stepi-over



4. Parallel faults separated in more than 2 km



圖 4.14：日本斷層參數之斷層分段準則。[摘錄自松田時彥，1990]。

表 4.2：斷層分段型式、特徵及可能性。[McCalpin, 1996]。

| 分段型式 | 定義分段之特徵 | 作為分段之可能性 |
|------|--|-------------|
| 1.地震 | 受限於歷史地震破裂 | 確定 100% |
| 2.行為 | 1. 藉由複合的，資料良好的古地震破裂限制其分段 | 高 |
| | 2. 滑移速率、地震重現期、地震後持續時間、地表位移量、潛移或是鎖定行為、斷層複雜度 | 中(26%) |
| 3.構造 | 分段邊界由斷層分支，或與其他斷層、褶皺交叉，或是交錯之構造 | 中高 (31%) |
| 4.地質 | 1. 以第四紀盆地火火山體為分段邊界 | 可能性變異大(39%) |
| | 2. 受限於單一的基盤或是流變地域 | |
| | 3. 以地球物理測勘異常點為界 | |
| | 4. 地貌指示分段點，例如山前地貌變化，山頂高程變化 | |
| 5.幾何 | 斷層之走向變化，跳階，分離或是斷層中之缺口 | 中低(18%) |

表 4.3：美國 WG07 斷層參數表。[摘錄自 WG07，2008]。

| Fault Name [ID # in Quaternary Fault and Fold Database- * indicates Q-faults compilation not yet completed] | model | Source of fault trace | rake | dip | dip direction | slip rate | slip rate error | Aseismic slip | top depth | bottom depth | Details of slip rate, black from 1996 model, red from 2002 model, blue from 2006 |
|---|-------|-----------------------|------|-----|---------------|-----------|-----------------|---------------|-----------|--------------|---|
| Main strands of the San Andreas fault system | | | | | | | | | | | |
| San Andreas (Offshore) [1a] | | 2002 | 180 | 90 | n/a | 24 | 3 | 0 | 0 | 11 | Slip rate based on Niemi and Hall (1992) and Prentice, et al. (1991). WG99/WG02 source parameters used in 2002. |
| San Andreas (North Coast) [1b] | | 2002 | 180 | 90 | n/a | 24 | 3 | 0 | 0 | 11 | Slip rate based on Niemi and Hall (1992) and Prentice, et al. (1991). WG99/WG02 source parameters used in 2002. |
| San Andreas (Peninsula) [1c] | | 2002 | 180 | 90 | n/a | 17 | 4 | 0 | 0 | 13 | WG99/WG02 source parameters used in 2002. |
| San Andreas (Santa Cruz Mtn) [1d] | | WGCEP 2007 | 180 | 90 | n/a | 17 | 4 | 0.1 | 0 | 15 | WG99/WG02 source parameters used in 2002 for Santa Cruz Mtn section. Frequency of earthquakes revised in 2006 based on more frequent earthquakes at Arano Flat (Fumal et al. 1999, 2003). |
| San Andreas (Creeping Section) [1e] | | 2002 | 180 | 90 | n/a | 34 | 5 | 1 | 0 | 12 | WG99/WG02 source parameters used in 2002. |
| San Andreas (Parkfield) [1f] | | CFM-R | 180 | 90 | n/a | 34 | 5 | 0.8 | 0 | 10.2 | Slip rate reported by WGCEP (1995) |
| San Andreas (Mojave N) [1g, 1h] | | WGCEP 2007 | 180 | 90 | n/a | 27 | 7 | 0 | 0 | 15.1 | Slip rate based on Sieh (1984), Salyards et al. (1992), and WGCEP (1995) Section split from 2002 Mojave section because differences in slip distribution in 1812 earthquake. |
| San Andreas (Mojave S) [1h] | | WGCEP 2007 | 180 | 90 | n/a | 29 | 7 | 0 | 0 | 13.1 | Slip rate based on Sieh (1984), Salyards et al. (1992), and WGCEP (1995) Section split from 2002 Mojave section because differences in slip distribution in 1812 earthquake. |
| San Andreas (San Bernardino N) [1i] | | WGCEP 2007 | 180 | 90 | n/a | 22 | 6 | 0 | 0 | 12.8 | Slip rate reported by Weidon and Sieh (1985) Section split from 2002 San Bernardino section at intersection of north branch (Mill Creek fault). |
| San Andreas (San Bernardino S) [1i] | | WGCEP 2007 | 180 | 90 | n/a | 16 | 6 | 0 | 0 | 12.8 | Slip rate reported by Weidon and Sieh (1985) Section split from 2002 San Bernardino section at intersection of north branch (Mill Creek fault). Slip rate reduced from San Bernardino North section to accommodate slip transfer to San Jacinto fault and San Geronimo knot zone of distributed shear. |
| San Andreas (San Geronimo Pass - Garnet Hill) [1i, 250*] | | WGCEP 2007 | 180 | 58 | N | 10 | 6 | 0 | 0 | 16.4 | Slip rate reported by Weidon and Sieh (1985). Slip reduced from Coachella section by 10 mm/yr total slip in Eastern California Shear Zone. |
| San Andreas (Coachella) [1j] | | 2002 | 180 | 90 | n/a | 20 | 6 | 0.1 | 0 | 11.1 | Slip rate based on Sieh and Williams (1990); Sieh (1986); Keller et al. (1982); Bronkowsk (1981) Section modified from 2002 by moving northern end point to intersection of North Branch (Mill Creek fault) with Banning section. Aseismic slip factor of 0.1 applied due to documented creep and triggered slip. |
| Imperial [132] | | CFM-R | 180 | 82 | NE | 20 | 5 | 0.1 | 0 | 14.6 | Slip rate based on study by Thomas and Rockwell (1996). Aseismic slip factor of 0.1 applied due to documented creep and triggered slip (Sharp and others, 1982) |
| San Jacinto (San Bernardino) [125a] | | WGCEP 2007 | 180 | 90 | n/a | 6 | 4 | 0 | 0 | 16.1 | Slip rate reported by WGCEP (1995). Southern end of section moved to south margin of San Bernardino valley, inferred. |

Fault revised since 2002 model Fault added since 2002 model Alternate slip rates in deformation models

4-2-3-2 活動斷層邏輯樹建立案例-車籠埔斷層

本計畫彙整專家會議之重要討論，以車籠埔斷層為例，說明台灣活動斷層潛勢評估邏輯樹劃設之方法論及準則。

1. 斷層長度與分段：

在車籠埔斷層的分段特性上，中央地質調查所公佈之版本，以烏溪為界分為南北兩段，北段長約38公里，在1999年集集地震時，石岡以東至苗栗縣卓蘭鎮也形成地表破裂與地面隆起，長約16公里；南段長約38公里。

另根據陳文山等人[Chen et al., 2007]之分段，在1999年集集地震時，在石岡段的同震抬升量平均為3.6公尺，車籠埔段則為1.5公尺，大尖山段則為0.8公尺，車籠埔斷層由於同震變位量之差異可分為石岡段(本計畫歸為北段)36公里，車籠埔段48公里及大尖山段14公里(本計畫歸為南段)，分段點位於台中市大里區草湖溪處，總長98公里，斷層之分布如圖4.15所示，圖4.16則顯示車籠埔斷層沿線各槽溝所開挖之古地震事件記錄，其中位於北段之豐原槽溝只發現1,800年左右有一次事件，而位於南段的槽溝中均發現多次古地震事件，可以當作是活動特性之不同而將其分段。

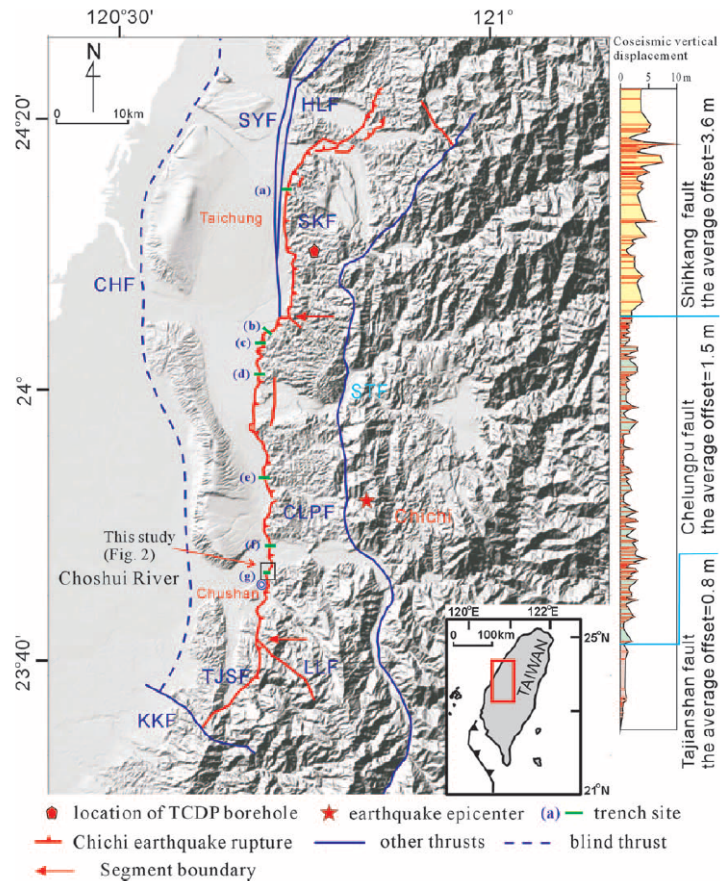


圖 4.15：車籠埔斷層地貌及槽溝分布圖。集集地震是沿著麓山帶前緣破裂，可再分為石岡、車籠埔及大尖山斷層，槽溝位置 (a) 豐原 (b) 鳳梨園 (c) 仙公廟 (d) 萬豐 (e) 釋迦園 (f) 名間 (g) 竹山[摘錄自 Chen et. al., 2007]。

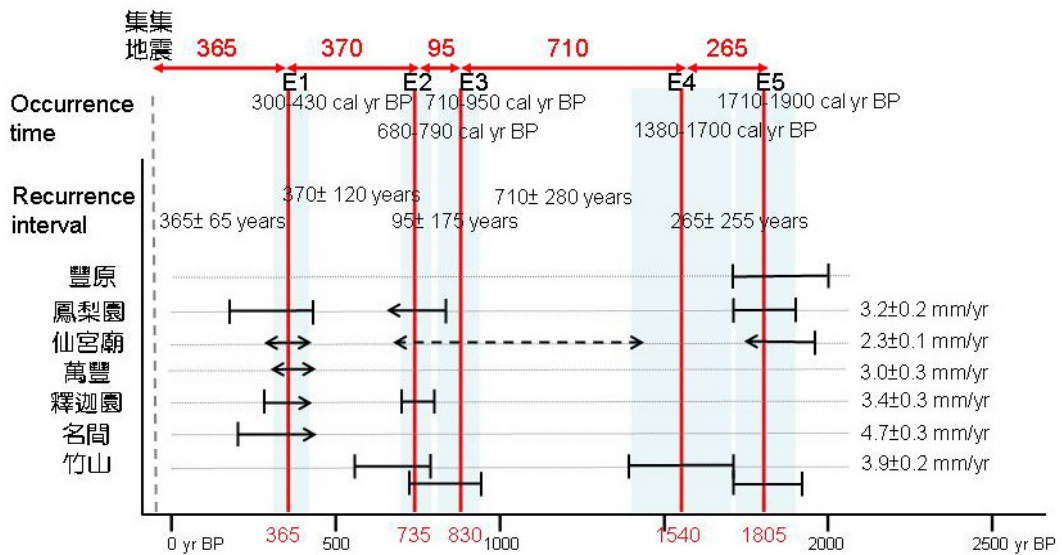


圖 4.16：車籠埔斷層之古地震槽溝之比較。灰色虛線表示 1999 年集集地震，黑色實線表示各事件在各槽溝中之年代分布情形[摘錄自 Chen et. al., 2007]。

2. 斷層傾角：

圖 4.17 為 921 集集地震序列幾個主要的震源機制(Kao and Chen, 2000)，從這些主要事件解出之車籠埔斷層平均傾角為 25 度，地震叢集延伸達 15 公里。

由位於霧峰之仙宮廟槽溝之褶皺及其上下盤之淺孔鑽井，可推估車籠埔斷層淺部之傾角，圖 4.18 所示即為車籠埔斷層上盤井深約 22.8 公尺處鑽至斷層，延伸至槽溝後得到之傾角約為 30 度[Chen et al., 2007]。

由震測、重力、鑽探及地面地質調查資料，描繪台灣中部之平衡剖面[Yang et al., 2007]，圖 4.19 為車籠埔斷層之平衡剖面平面分布圖，圖 4.20 為平衡剖面，得知車籠埔斷層之傾角約為東傾 28~39 度左右，另外 Yang et al., [2007]將這些平衡剖面整合之後建立之車籠埔斷層幾何形貌等深線，經本計畫數化後呈現如圖 4.21 所示，由三維幾何面可看出車籠埔斷層南北段傾角上略有變化，南段傾角稍陡，約 35~45 度，北段傾角較緩，約 25~35 度，觀察圖 4.22 的深部震測剖面[Wang et al., 2002]中，也可觀察到車籠埔斷層幾何形貌上之差異。

3. 斷層破裂深度：

圖 4.22 為 Wang et al [2002]作出之兩條深部反射震測剖面，右圖上為烏溪深部反射震測剖面，右圖下為濁水溪深部反射震測剖面，根據震測剖面解釋之車籠埔斷層深度，烏溪剖面在深度 9 公里左右接到基底滑脫面；濁水溪剖面在深度 10 公里左右接基底滑脫面。圖 4.23 為李元希等人[Lee et al., 2011]根據濁水溪剖面所作之解釋，認為有一分支初鄉斷層沿著中新世地層底部之滑移面出露地表，同時從 GPS 同震垂直變位量，可推測車籠埔斷層之傾角約 40~50 度，及基底滑移面的位置，約在深度 10 公里，距車籠埔斷層 15 公里左右。

從 Mouthereau and Petit, [2003]所做的 2001 年年度地震記錄分布，如圖 4.24 所示，車籠埔斷層所在之台灣中部褶皺逆衝帶餘震主要在深度 10 公里為頻率高區，而地震延伸可達深度 15 公里處。

本計畫參考以上之研究，設定車籠埔斷層深度 15 公里為最大值。

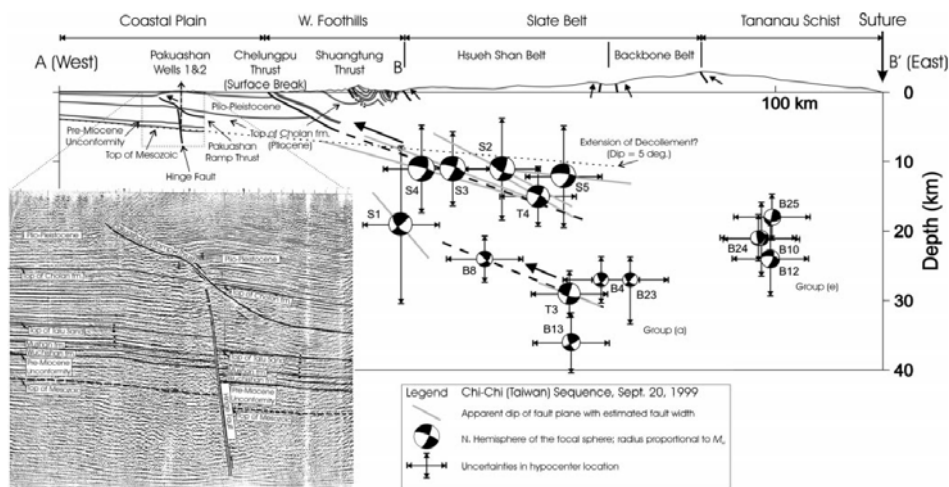


圖 4.17：台灣造山帶剖面以及 921 集集地震之震源機制解。[摘錄自 Kao and Chen, 2000]。

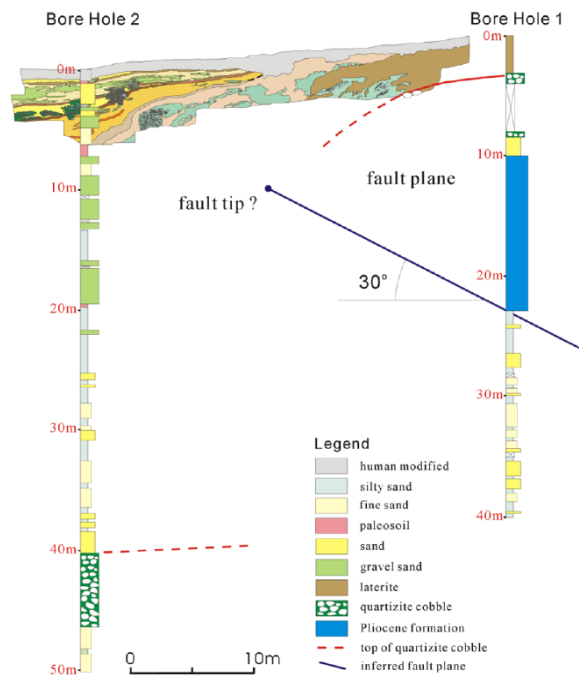


圖 4.18：車籠埔斷層霧峰仙宮廟槽溝上下盤的淺層鑽探結果。上盤井深約 22.8 公尺處鑽至斷層，估計斷層面傾角 30 度。[摘錄自 Chen et al., 2007]。

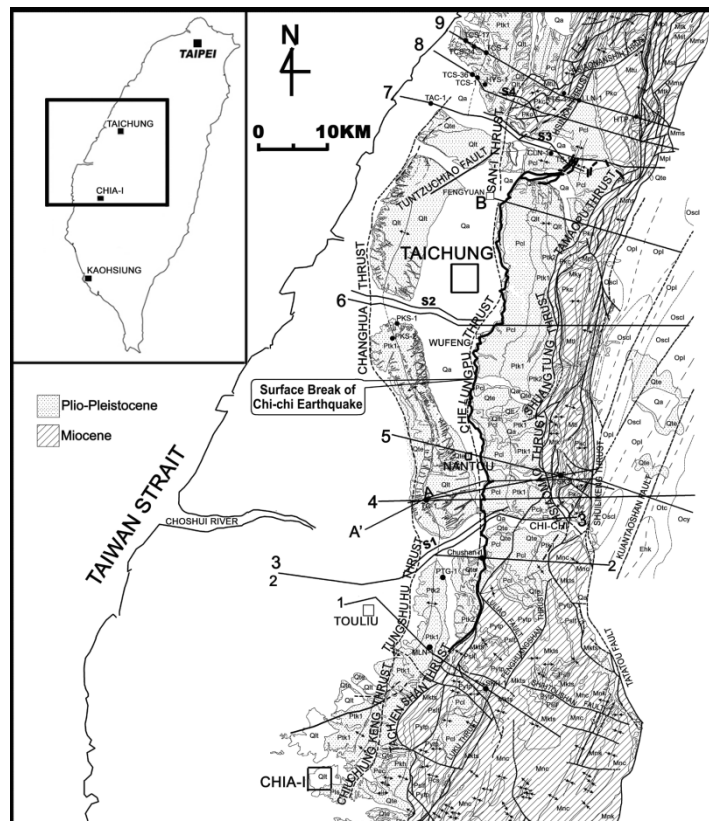


圖 4.19：中台灣區域地質圖以及平衡剖面位置圖。[摘錄自 Yang et al., 2007]。

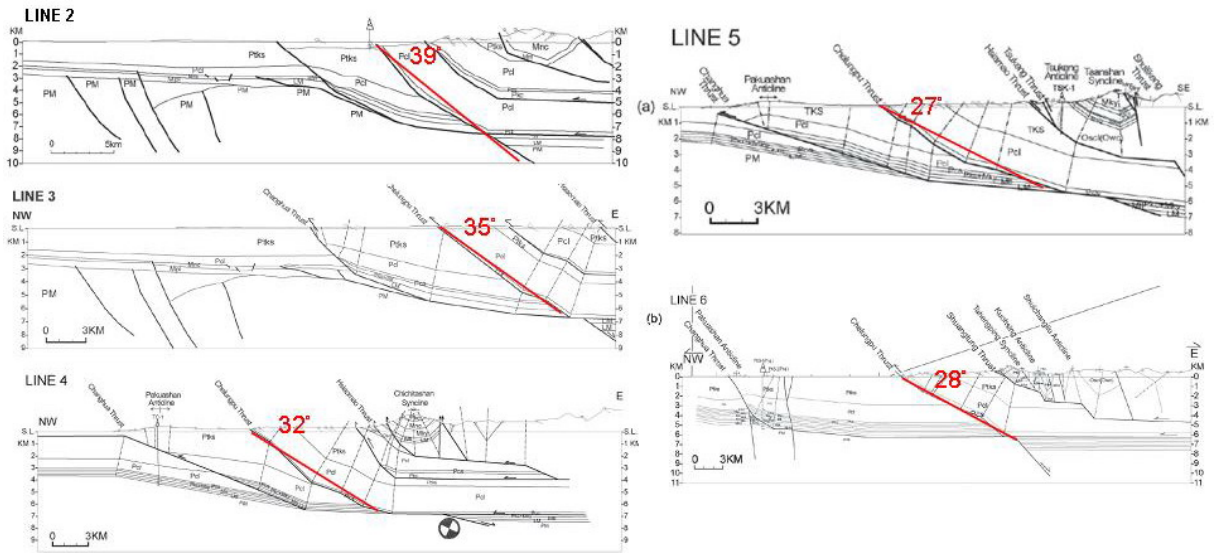


圖 4.20: 車籠埔斷層沿線之平衡剖面。評估車籠埔斷層之傾角約 27~39 度。[摘錄自 Yang et al., 2007]。

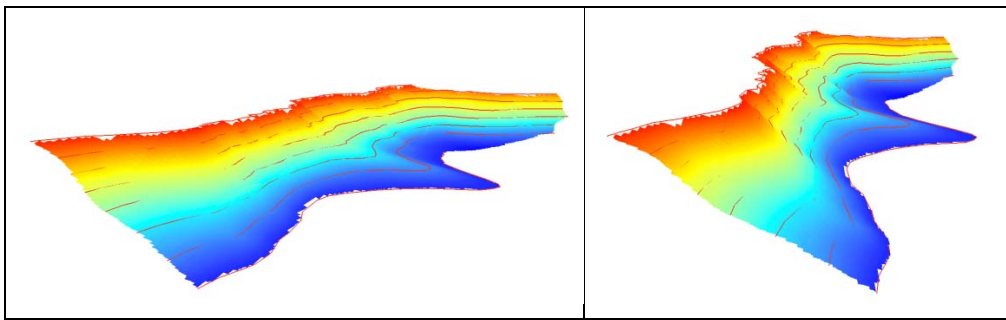


圖 4.21: 將 Yang et al. [2007] 之車籠埔斷層等深線數化建立之斷層面。

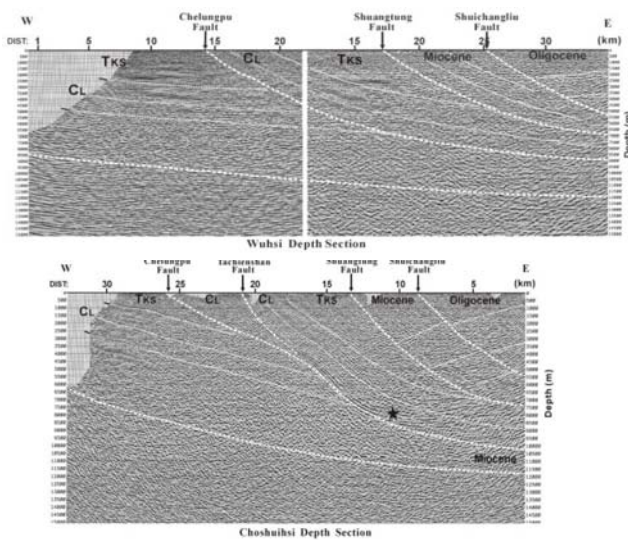
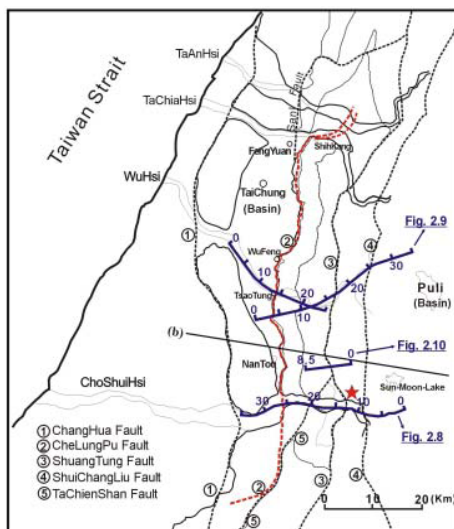


圖 4.22: 左圖為深部反射震測剖面之平面分布圖，右圖上為烏溪深部反射震測剖面，右圖下為濁水溪深部反射震測剖面。[摘錄自 Wang et al., 2002]。

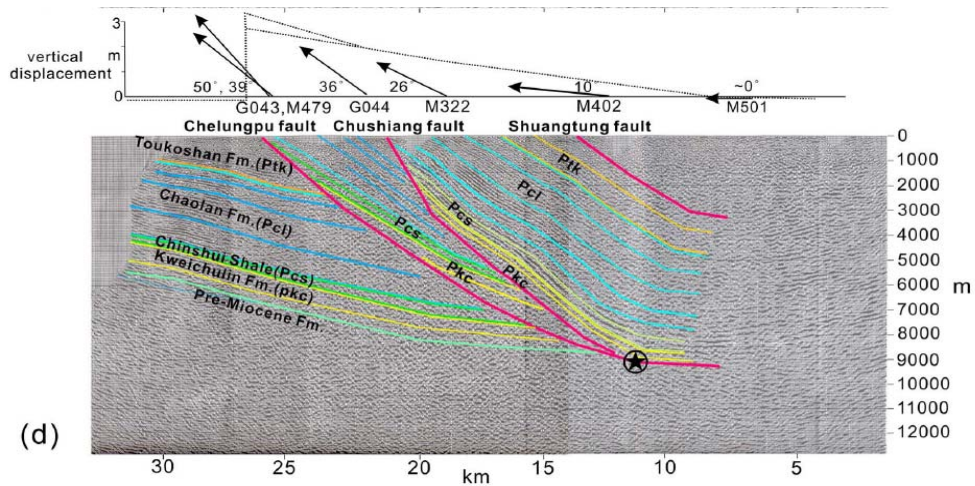


Figure 12

圖 4.23：濁水溪震測剖面之重新解釋以及同震變位之 GPS 向量投影。圖中顯示車籠埔斷層及初鄉斷層的疊瓦狀構造，並切穿中新世地層。[摘錄自 Lee et al., 2011]。

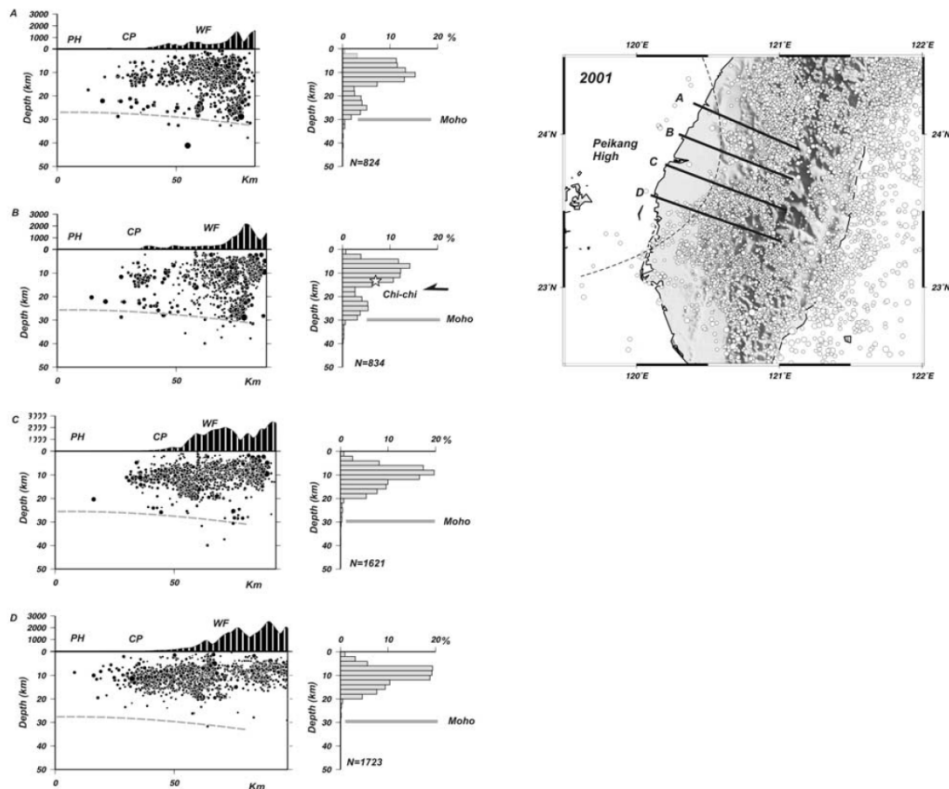


圖 4.24：2001 年度記錄 $M_L > 1$ 之地震深度-頻率分布。地震資料來源於中央氣象局，四條 70 公里長之剖面 (A-D) 調查結果，左邊為空間分布圖，右邊長條圖為地震事件深度-頻率分布。[摘錄自 Mouthereau and Petit, 2003]。

4. 長期滑移速率：

陳于高等人[2003]採集了包括石岡、新社、草屯及竹山之上盤階地樣本，並進行定年，圖 4.25 為採樣階地之地形剖面以及階地高差，而霧峰之樣本則來自於霧峰槽溝之木頭及陶碎片樣本，如圖 4.26 所示。將各地區定年所獲得之垂直抬升速率彙整為表 4.4，得到之滑移速率分別為：

石岡抬升速率 8.6–11.7 m/kyr。

新社抬升速率 5.6–9.9 m/kyr。

霧峰槽溝垂直變位速率 5.5–6.7 and 4.1–5.0 m/kyr。

草屯垂直抬升速率 2.8–5.0 m/kyr。

竹山崖高 55-65 公尺，垂直滑移速率 4.0–4.9 m/kyr。

陳文山等人(2007)在車籠埔斷層沿線進行槽溝開挖，位址如圖 4.15 所示，藉由從槽溝中觀察到的古地震事件抬升量及定年資料，得到車籠埔斷層同震累積變形量 (Y) 與地震時距 (X) 的回歸線，如圖 4.27 所示，其斜率即可當作車籠埔斷層整段之滑移速率。

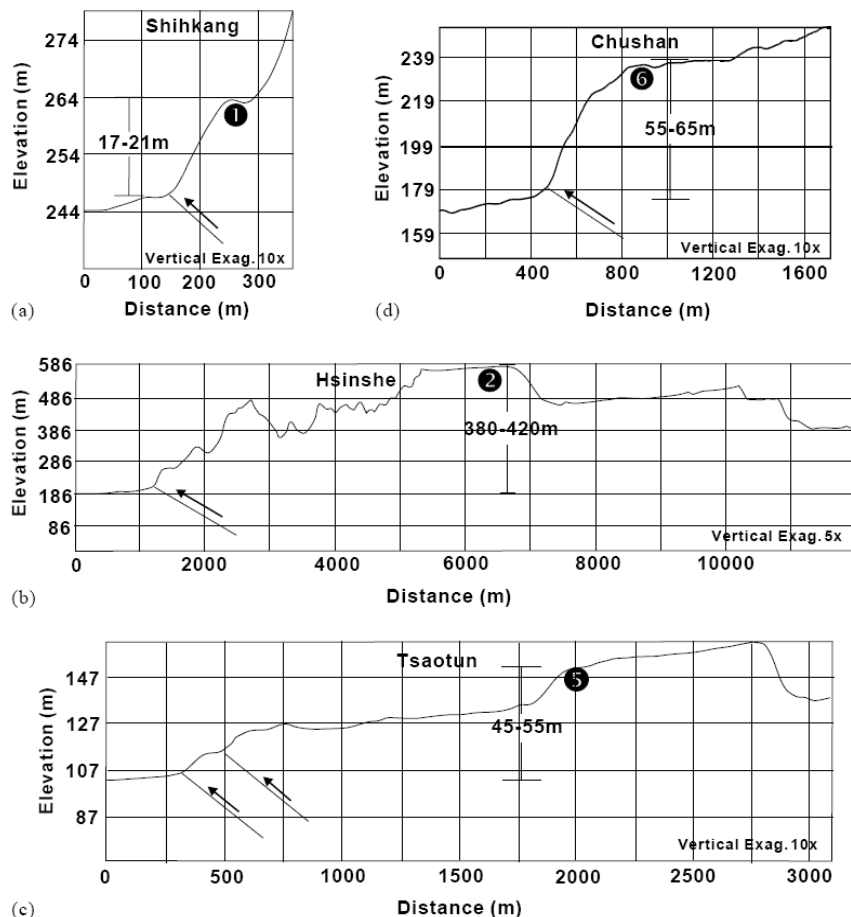


圖 4.25：車籠埔斷層階地採樣點之地形剖面。(a) 石岡 (b) 新社 (c) 草屯 (d) 竹山，同時呈現地表高程差，此高差推測為車籠埔斷層之累積垂直滑移量。[摘錄自 Chen et al., 2003]。

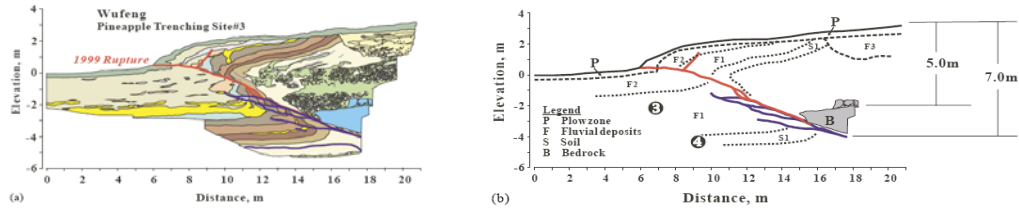


圖 4.26：(a) 霧峰鳳梨園槽溝之描繪 (b) 槽溝之解釋及採樣點。[摘錄自 Chen et al., 2003]。

表 4.4：車籠埔斷層垂直滑移速率。[摘錄自 Chen et al., 2003]。

Vertical slip rates along the Chelungpu fault

| Sample no. | Locality | Cumulative vertical displacement (m) | Age (ka) | Vertical slip rate (m/kyr) | Remarks |
|------------|----------|--------------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|
| #1 | Shihkang | 17-21 | 1.79-1.97 (TL) | 8.6-11.7 | This study |
| #2 | Hsinshu | 380-420 | 42.4-67.6 (OSL) | 5.6-9.9 | This study |
| #3 | Wufeng | 5.0 | 0.75-0.91 (TL) | 5.5-6.7 | This study |
| #4 | Wufeng | > 7.0 | 1.4-1.7 (C-14) | > 4.1-5.0 | W.S. Chen et al. (2001) |
| #5 | Tsaotun | 45-55 | 11.0-6.0 (OSL) | 2.8-5.0 | This study |
| #6 | Chushan | 55-65 | 13.2-13.8 (C-14) | 4.0-4.9 | Y.G. Chen et al. (2002b) |

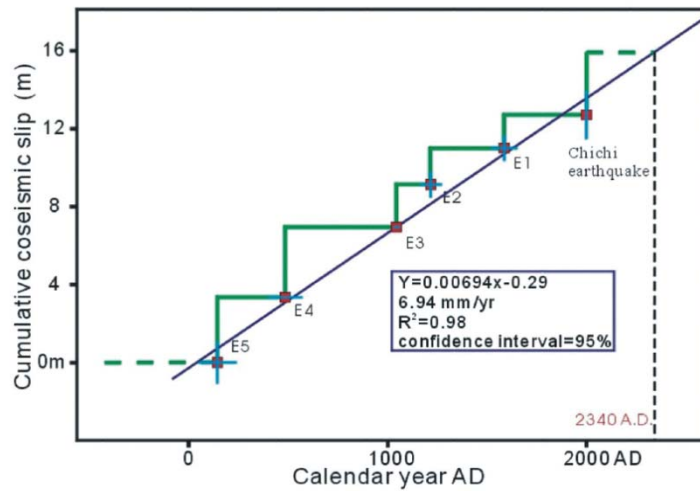


圖 4.27：車籠埔斷層同震累積變形量 (Y) 與地震時距 (X) 的回歸線性方程式。[摘錄自 Chen et al., 2007]。

5. 斷層特徵地震規模：

藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有Wells and Coppersmith[1994]、吳相儀[2000]及Yen and Ma[2011]等列於參數表中以供參考。

本計畫在評估車籠埔斷層之破裂模式，共分為 3 種事件來探討，圖 4.28 為此 3 種破裂模式之示意圖，A 事件為整段破裂之情形、B 事件為北段破裂、C 事件為南段破裂。目前各事件權重分別為 A(0.3)、B(0.1)、C(0.6)，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

車籠埔腳斷層之邏輯樹建立如圖 4.29 所示，其不確定性的部份為斷層滑移速率及最大可能地震規模，滑移速率計算如表 4.5 所示，北段滑移速率為 11.2~23.4 mm/yr[Chen et. al., 2003]，南段滑移速率為 4.4~10.4mm/yr [Chen et. al., 2003]，整段滑移速率為 9.8~16.4 mm/yr [Chen W. S. et al., 2007]，在邏輯樹中為了計算之方便，假設北段滑移速率為 11.2(0.2)，17.3(0.6)，23.4(0.2)；南段滑移速率為 4.4(0.2)，7.4(0.6)，10.4(0.2)；整段滑移速率為 9.8(0.2)，12.5(0.6)，16.4(0.2)，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith [1994]，吳相儀[2000]及 Yen et al. [2010]之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，北段 7.1(0.2)，7.1(0.4)，6.8(0.4)；南段 7.2(0.2)，7.2(0.4)，7.1(0.4)；整段加上集集地震規模當作其中一支 7.6(0.2)，7.4(0.6)，7.4(0.2)，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。權重的分配詳如圖 4.29 所示。

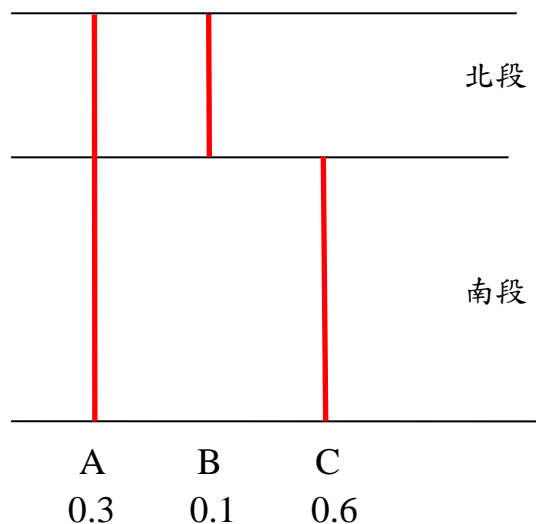


圖 4.28：車籠埔斷層之破裂模式及權重分配。

表 4.5：車籠埔斷層長期滑移速率彙整。

| 分段 | 垂直滑移速率 (mm/yr) | 滑移速率 (傾角 30 度)(mm/yr) | 資料 | 參考文獻 |
|----|-------------------|---|------------------------|----------------------------|
| 北段 | 8.6~11.7 | 17.2~23.4 | 石岡地區河階 | Chen et al., 2003 |
| | 5.6~9.9 | 11.2~19.8 | 新社河階 | Chen et al., 2003 |
| 分段 | 垂直滑移速率 (mm/yr) | 滑移速率 (傾角 40 度)(mm/yr) | 資料 | 參考文獻 |
| 南段 | 5.5~6.7 | 8.6~10.4 | 霧峰槽溝樣本 | Chen et al., 2003 |
| | 4.1~5.0 | 6.4~7.8 | 霧峰槽溝樣本 | Chen et al., 2003 |
| | 2.8~5.0 | 4.4~7.8 | 草屯河階地 | Chen et al., 2003 |
| | 4.0~4.9 | 6.2~7.6 | 竹山階地 | Chen et al., 2003 |
| 分段 | 垂直滑移速率 (mm/yr) | 滑移速率 (傾角 25 度)及(傾 角 45 度) (mm/yr) | 資料 | 參考文獻 |
| 整段 | 6.94 | 9.8 及 16.4 | 採用槽溝之古地震事 件抬升量及定年資料 | Chen W. S. et al., 2007 |

車籠埔斷層邏輯樹

| 斷層名稱 | 斷層破裂事件 | 斷層傾角 (度) | 斷層深度 (km) | 斷層滑移速率 (mm/yr) | 特徵地震規模 (M_w) | 統計模式 |
|------|--------|----------|-----------|----------------|------------------|------|
|------|--------|----------|-----------|----------------|------------------|------|

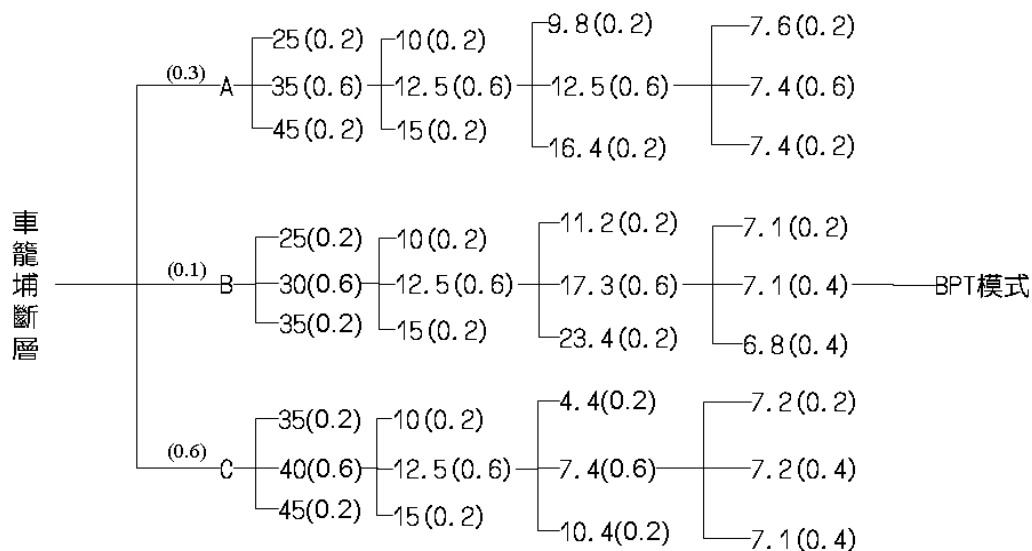


圖 4.29：車籠埔斷層邏輯樹。

4-3 池上斷層發生機率潛勢評估

4-3-1 池上斷層參數蒐集

斷層長度上，池上斷層位於台東縱谷之中南段，長約65公里，北自玉里鎮春日里，經台東縣池上鄉萬安，再向南延伸至鹿野鄉瑞源，為菲律賓海板塊碰撞歐亞大陸板塊形成的構造縫合帶斷層，斷層機制為逆移兼具左移分量，斷層分布如圖4.30所示。由富里富池橋東方之池上斷層露頭可觀察到池上斷層屬於高角度逆衝斷層，上盤之利吉層向西逆衝至階地礫石之上，如圖4.31所示。

斷層幾何面上，圖4.32所示為2003年 $M_w=6.8$ 成功地震之餘震重定位結果[Kuochen et al., 2007]，可作為池上斷層幾何形貌之參考，由縱谷東邊的餘震序列分布可以看出有一明顯的地震帶沿著傾角向東的斷層面分布，深度可達地下25公里處。Cheng et al.[2009]為模擬池上斷層之同震變形，建立池上斷層之幾何形貌，如圖4.33所示，本計畫參考其建立之池上斷層幾何形貌的設定，按照表4.6之設定建立池上斷層幾何形貌，其結果如圖4.34所示，得到之面積為2238平方公里。

短期之滑移速率上，根據GPS在1992-1999年之測量結果[Yu and Kuo, 2001]，池上斷層之滑移速率約31 mm/yr，將圖4.30之GPS站量得之速度場投影到剖面A上，如圖4.35所示，可以看到在跨縱谷斷層-池上段之速度場有顯著的變化，上下盤速度場可達30 mm/yr之差異。安朔葉等[Angelier et al., 1997]的監測結果顯示，池上斷層會以潛移的方式活動，在大坡、錦園、萬安一帶平均每年1.9-2.7公分的位移量，李建成等[Lee et al., 2006]計算池上斷層的潛移速率約20-30 mm/yr。

長期滑移速率之研究上，陳文山等[2010]研究鯨溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖面，除了量測河階比高並進行碳14定年，推論池上斷層之長期抬升速率應與河流的下切速率相當，約為23.5-27.0 mm/yr，若以斷層面65度換算制斷層面淨滑移速率為26-30 mm/yr，可算是相當活躍。

單一事件變位量，可從古地震的槽溝研究獲得。陳文山等[2008]沿池上斷層共挖掘6個槽溝，其中萬安1號槽（位置在圖4.30萬安槽溝）溝中有5次同震錯移，每次同震的垂直變動量從20至66公分（圖4.36），而2003年成功地震在錦園三號槽溝（位置在圖4.30錦園槽溝）中造成地表的垂直錯移量約10公分（圖4.37）。

歷史地震上，1951年11月25日的台灣東部的強震，造成與縱谷平行之地表破裂，徐鐵良[Hsu, 1962]認為池上斷層為1951年11月25日的地震斷層，鄭世楠等[Cheng et al., 1996]對地震重新定位，規模為 $M_s=6.8$ 。2003年12月10日之成功地震規模為 $M_w=6.8$ ，李建成等[Lee et al., 2006]認為該次地震是屬於池上斷層之破裂造成，也造成了部份地表破裂之情形，這兩次歷史地震相隔大約50年左右。陳文山等[2008]在池上斷層進行槽溝之古地震研究，初步結果顯示1000年以來發現至少有8次古地震事件。

本計畫將蒐集之池上斷層參數建立成如表4.7之參數表，在潛勢評估時需謹慎考慮潛移所造成的影響，另外會進一步探討池上斷層是否應分段之問題。

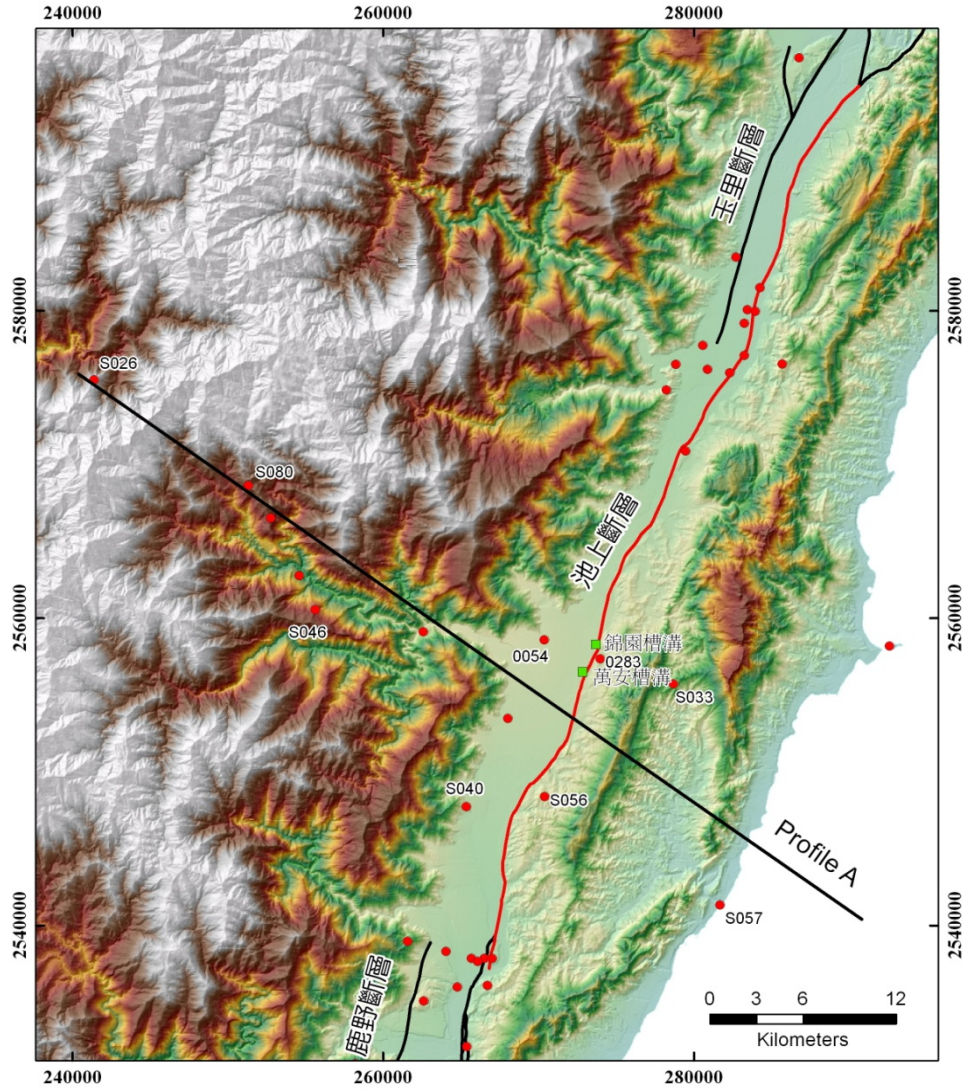


圖 4.30：池上斷層位置分布圖。圖中紅色實心為 GPS 點位，綠色方框為槽溝之位置。



圖 4.31：富里富池橋東方驚溪露頭照片。此露頭為可直接觀察到池上斷層出露的位置。利吉層向西逆衝至第二階地礫石之上，斷面位態為北 20 度東，傾角向東 60 度，與上述數階地形崖的走向接近。

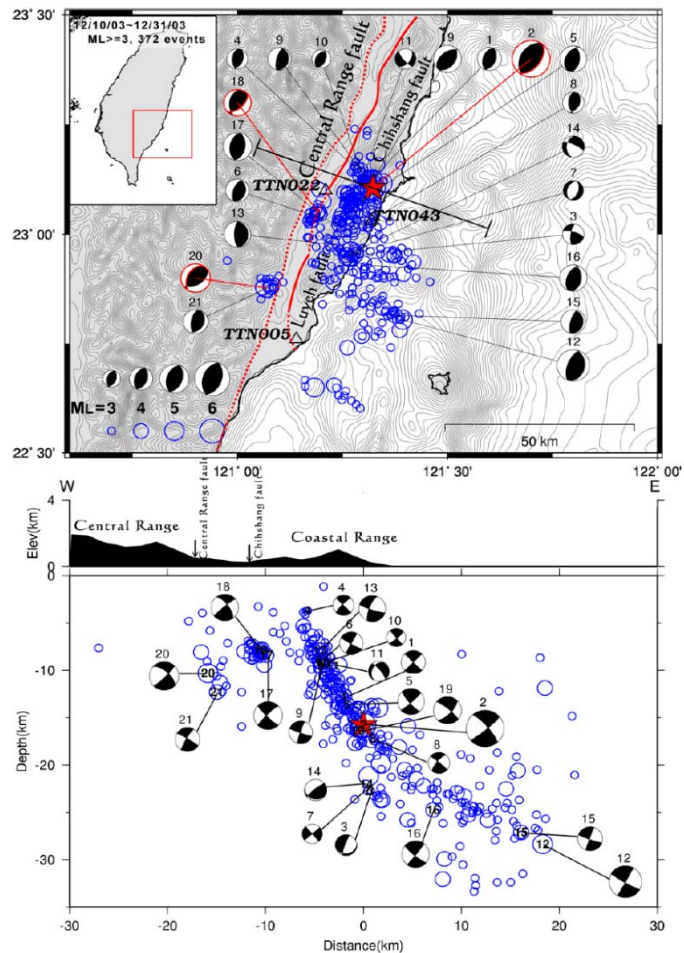


圖 4.32：2003 年成功地震地震系列分布圖。紅框的海灘球代表主要破裂面。下面的剖面圖代表 $M_L \geq 3$ 的震源機制解投影圖，主震（星號）位於深 15 公里的地下。[引自 Kuochen et al., 2007]。

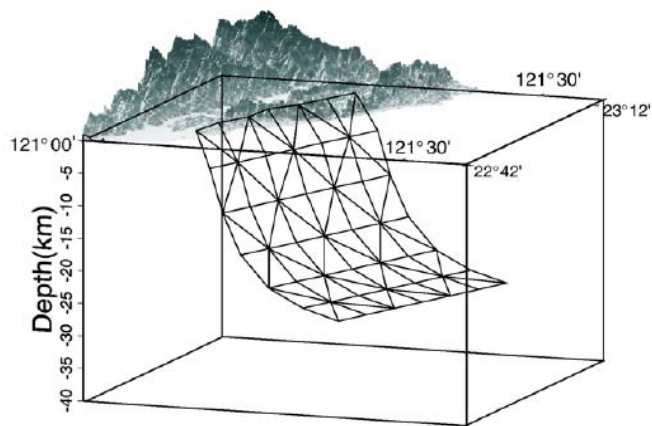


圖 4.33：根據成功地震建立之池上斷層三維幾何面模型。[引自 Cheng et al., 2009]。

表 4.6：本計畫參考 Cheng et al., 2009 設定池上斷層之深度與傾角。

| | | | |
|--------|--------|---------|---------|
| 深度(km) | 0-18.5 | 18.5-23 | 23-25.4 |
| 傾角(度) | 65 | 40 | 20 |

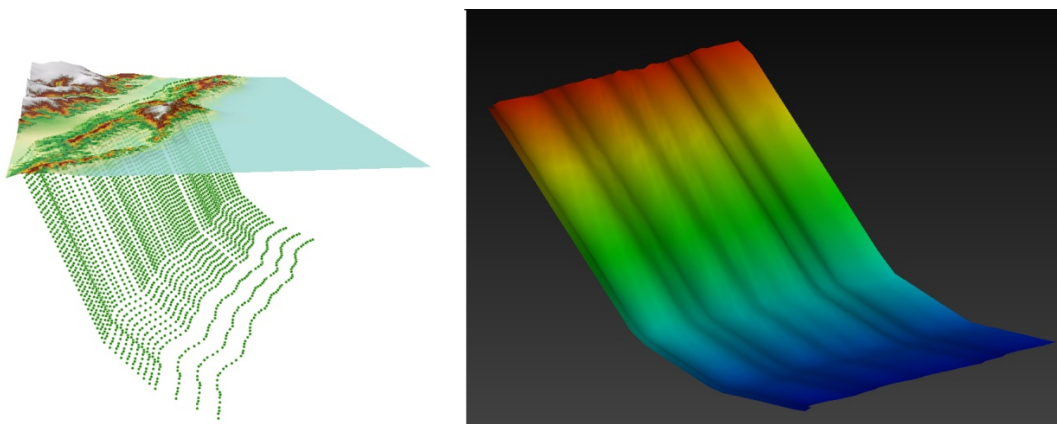


圖 4.34：本計畫建置池上斷層三維幾何面。

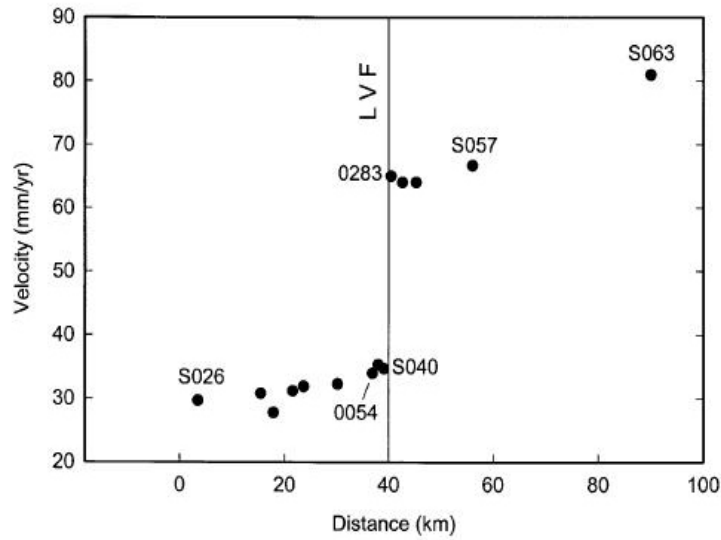


圖 4.35：將圖 4.14 之 GPS 位移速度場投影到 Profile A 方向之速度變化。GPS 位移速度場是相對於澎湖白沙站 (S01R)。[摘錄自 Yu and Kuo, 2001]。

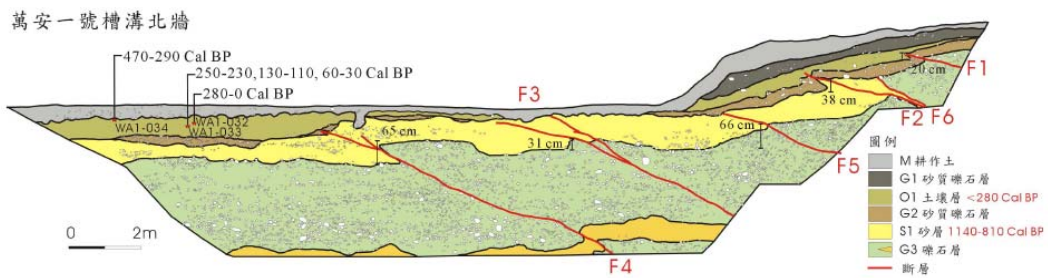


圖 4.36：池上鄉錦園村的萬安一號槽溝北牆。[摘自陳文山等，2008]

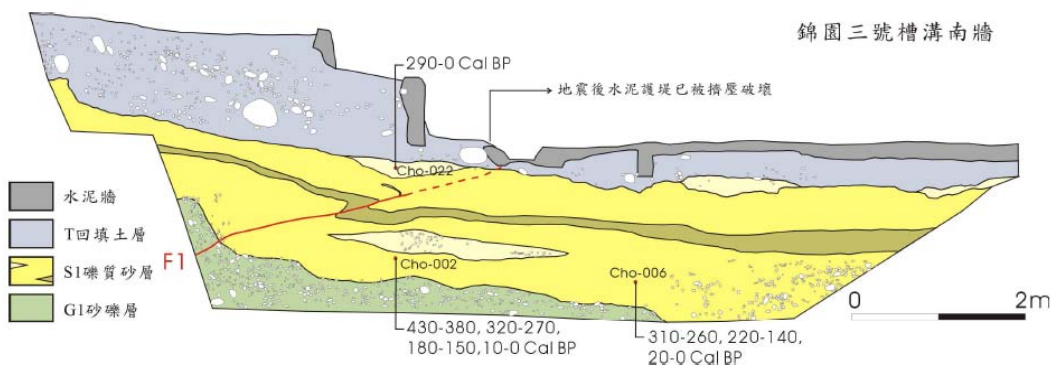


圖 4.37：錦園三號槽溝，2003 年成功地震造成地表垂直錯移量約 10 公分。[摘自陳文山等，2008]。

表 4.7：池上斷層參數表。

| | 斷層參數 | 斷層參數數據 | 研究方法 | 參考文獻 |
|---------------------------|----------------------|--|--|-----------------------|
| 池上斷層 | 斷層分支 | | | |
| | 長度(km) | 65 | 由花蓮縣玉里鎮春日里向南南西方向經台東縣池上鄉萬安，再向南延伸至鹿野鄉瑞隆村 | 林啟文等，2009 |
| | 寬度(km) | 34.4 | 本計畫建置之斷層面模型 | 參考 Cheng et al., 2009 |
| | 深度(km) | 25.4 | 2003 年成功地震地震系列分布圖 | Kuochen et al., 2007 |
| | 面積(km ²) | 2238 | 本計畫建置之斷層面 | 參考 Cheng et al., 2009 |
| | 走向 | 北北東 | 地表地質調查 | 林啟文等，2009 |
| | 傾斜角度(度) | 0~18.5 公里：65 度 18.5~23 公里：40 度 23~25.4 公里：20 度 | 本計畫建置之斷層面 | 參考 Cheng et al., 2009 |
| | 斷層機制 | 略具左移分量逆斷層 | 鑽井、地物探勘及地表地質調查 | 林啟文等，2007 |
| | 短期滑移速率(mm/yr) | 19-27 | 地表破裂變形釘網測量 | Angelier et al., 1997 |
| | | 31 | 1992-1999 GPS 速度場 | Yu and Kuo, 2000 |
| | | 20-30 | 地表破裂變形潛變儀測量 | Lee et al., 2006 |
| | 長期滑移速率(mm/yr) | 26-30 | 量測鯉溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖面河階比高並進行碳 14 定年 | 陳文山等，2010 |
| | 滑移赤字 | | | |
| | 單一事件變位量(m) | 0.1 | 錦園 3 號槽溝，2003 年成功地震錯移 | 陳文山等，2008 |
| | | 0.2、0.38、0.31、0.65、0.66 | 萬安 1 號槽溝，5 次古地震事件錯移 | |
| 最大可能地震規模(M _W) | 7.3 | M _W = 4.33 + 0.90 log A (逆斷層) | Wells and Coppersmith, 1994 | |
| | 7.2 | M _W = 5.00 + 1.22 log L (逆斷層) | | |
| | 7.4 | M _W = (0.82 ± 0.071) log (A) + (4.61 ± 0.141) | 吳相儀，2000 | |

| | | | | |
|-----------|--|--------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | 7.2 | $M_W = (1.32 \pm 0.122) \log(L) + (4.817 \pm 0.132)$ | |
| | | 7.1 | $\log(L_e) = (1/2)\log(M_0) - 8.08$ $M_W = (\log(M_0) - 9.1)/1.5$ | Yen and Ma, 2011 Kanamori, 1977 |
| 地震重複週期(年) | | 50-125 | 歷史地震經驗，槽溝開挖古地震事件推估 | |
| 最近一次活動時間 | | 1951 年 $M_S 6.8$ 2003 年 $M_W 6.8$ | 歷史地震 | |

4-3-2 池上斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

地調所的池上斷層分布圖，主要參照了陳文山等人[Chen et al., 2007]之縱谷斷層分段，已在圖4.30中呈現，然而池上斷層歷經兩次大的地震事件，從這兩次事件中可得到池上斷層有分段破裂之特性，陳卉瑄等人[Chen et al., 2008]針對1951年的花蓮-台東系列地震進行研究，發現1951年11月24日在池上斷層引發兩個主震地震，分別是池上之 $M_L6.0$ ($M_W6.59$)地震及三分鐘後玉里之 $M_L7.3$ ($M_W6.95$)地震，鍾令和[2003]描繪出1951年地表破裂之分布情形，如圖4.38(a)所示，陳卉瑄等人將主震畫上並對照後，認為兩個主震分別為池上段及玉里段之破裂，如圖4.38(b)，本計畫為避免混淆，圖4.38(b)之池上段當作池上斷層南段，玉里段當作池上斷層北段。

2003年之成功地震，參考圖4.32的地震分布後，認為是池上斷層南段之破裂，而且地表破裂可以一直往南延伸到鹿野鄉瑞源，比圖4.38(b)延伸的更南。根據兩次歷史地震的破裂模式，得到池上斷層南段長度33公里，北段長度32公里，本計畫將池上斷層分為南北兩段，分段點約在富里鯉溪之位置，並分別給予權重，如圖4.39所示。

藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有Wells and Coppersmith[1994]、吳相儀[2000]及Yen and Ma[2011]等列於參數表中以供參考。由於對池上斷層幾何面已有所了解，本計畫採用斷層面積帶入經驗公式中評估特徵地震規模，得到整段7.4(0.2)、7.4(0.4)、7.1(0.4)；北段7.1(0.2)、7.1(0.4)、6.7(0.4)，南段7.1(0.2)、7.1(0.4)、6.7(0.4)。邏輯樹如圖4.42所示。

由於2003年成功地震的發生，將池上斷層面上之同震平均滑移量除上週期，可算出由地震貢獻之滑移速率。Cheng et al.[2009]使用彈性半空間模型，計算2003年成功地震同震時斷層面上之平均滑移量約為52公分，如圖4.40所示；許雅儒[Hsu et al., 2009]利用GPS資料回推成功地震同震變形同時考慮了地層速度構造，得到之平均滑移量約為30公分，如圖4.41所示，其餘大部份資料所回推之斷層面同震變形平均滑移量結果多落於此範圍，包括44公分[Ching et al. 2007]以及48公分[Hu et al. 2007]，利用強地動資料逆推之結果有34公分[Hu et al., 2007]及39公分[Wu et al., 2006]。本計畫採用30公分及50公分除以52年(2003-1951)，得到之速率為5.8 mm/yr及10 mm/yr。本計畫給予其等權重並帶入特徵地震模式中。

本計畫初步劃設池上斷層之邏輯樹如圖4.42所示，並將特徵地震規模結果相同的合併，以簡化邏輯樹及後續之計算。

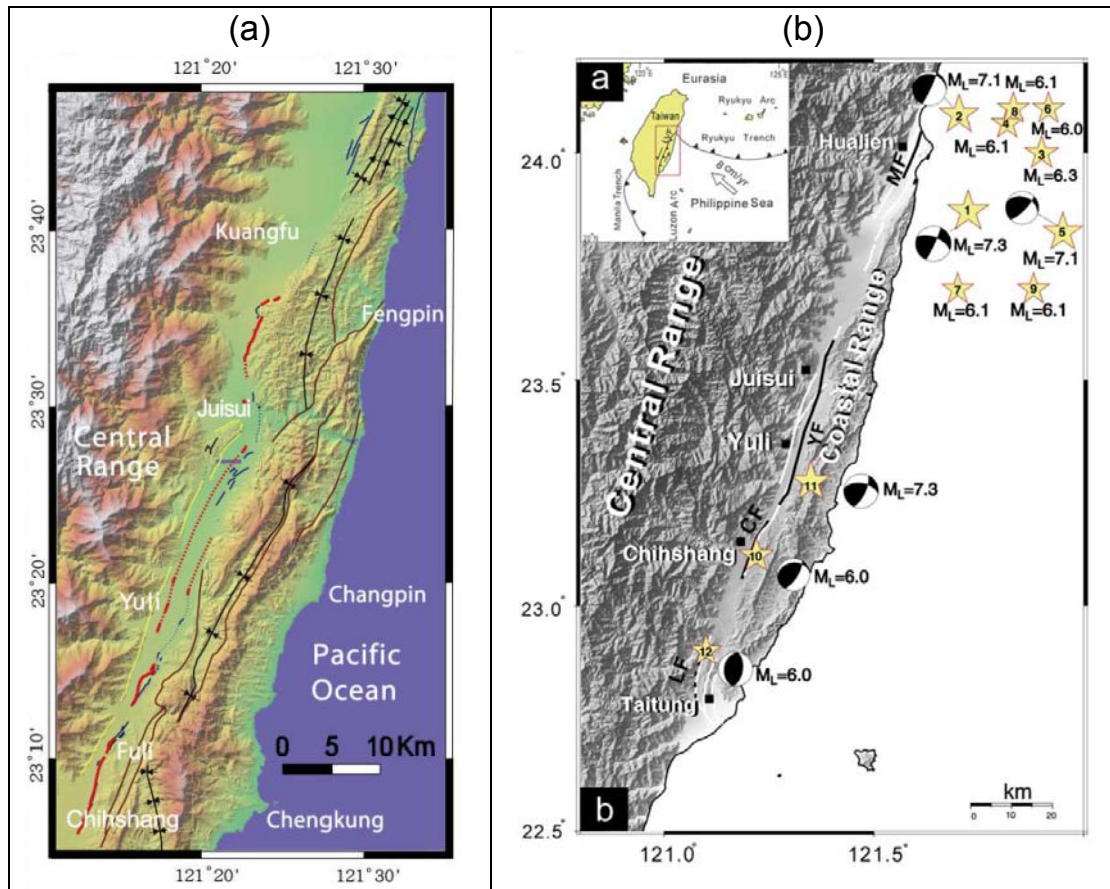


圖 4.38 : (a)1951 年玉里池上地震地表破裂及主要地質構造圖。紅色線代表地表破裂，藍線代表花東縱谷可能之活動斷層地表調查位置，黃線代表中央山脈斷層。[引自鍾令和, 2003]。(b)1951 年花蓮-台東系列地震主震之時空分布 [Chen et al., 2008]，CF 為池上段，YF 為玉里段。

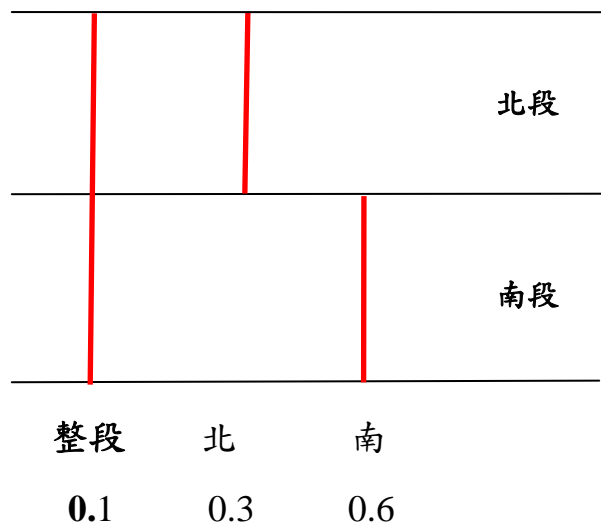


圖 4.39 : 本計畫池上斷層分段破裂模式。

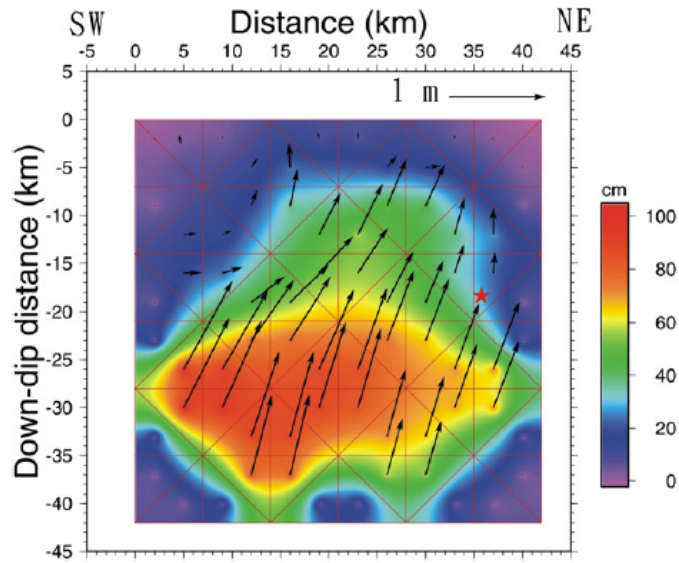
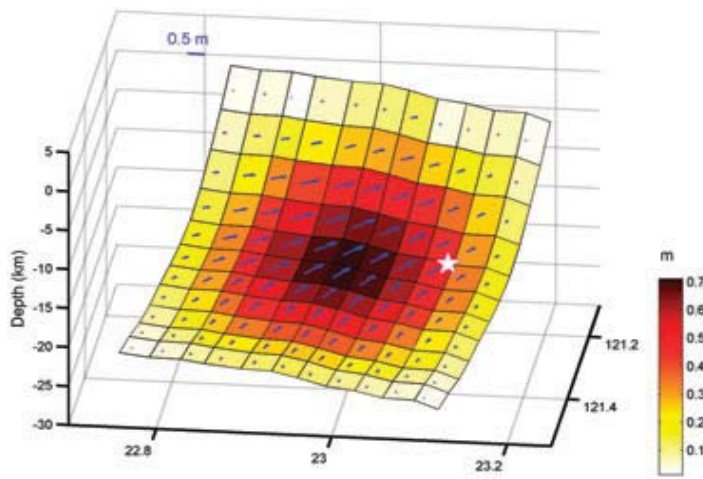


圖 4.40：模擬 2003 年成功地震同震時斷層面之滑移量分布。滑移量主要集中在 20 公里深，平均滑移量為 52 公分。[摘錄自 Cheng et al., 2009]。



(a)

圖 4.41：模擬 2003 年成功地震同震時斷層面之滑移量分布。斷層面幾何設定為淺部 60 度，深部 20 度達 25 公里深，平均滑移量為 30 公分。[摘錄自 Hsu et al., 2009]。

池上斷層邏輯樹

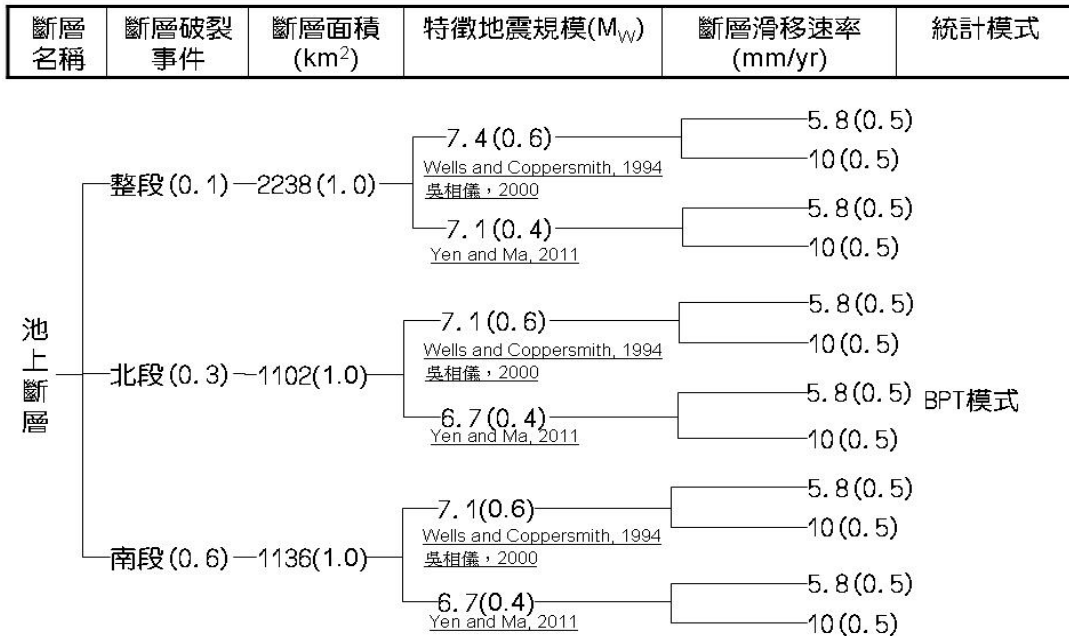


圖 4.42：本計畫池上斷層邏輯樹。

4-3-3 池上斷層特徵地震模式

圖 4.42 的邏輯樹可產生 12 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 4.43~圖 4.45 為 3 個事件之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)。

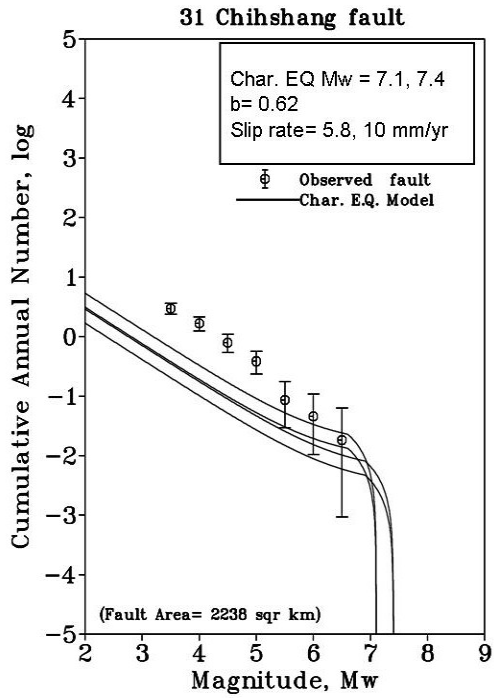


圖 4.43：整段之特徵地震模式。

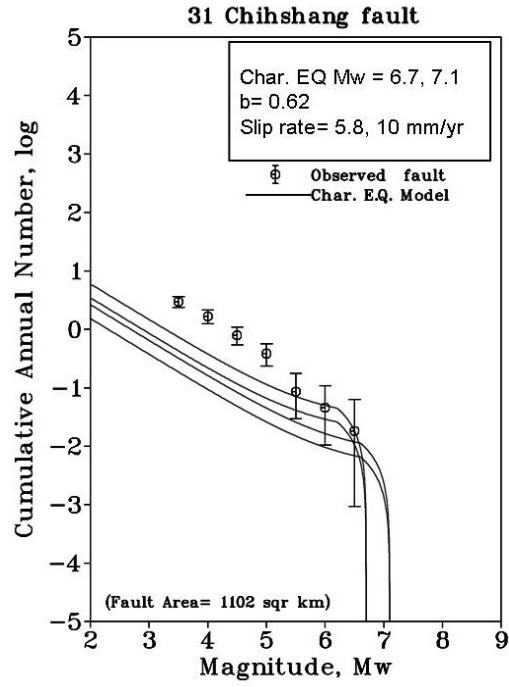


圖 4.44：北段之特徵地震模式。

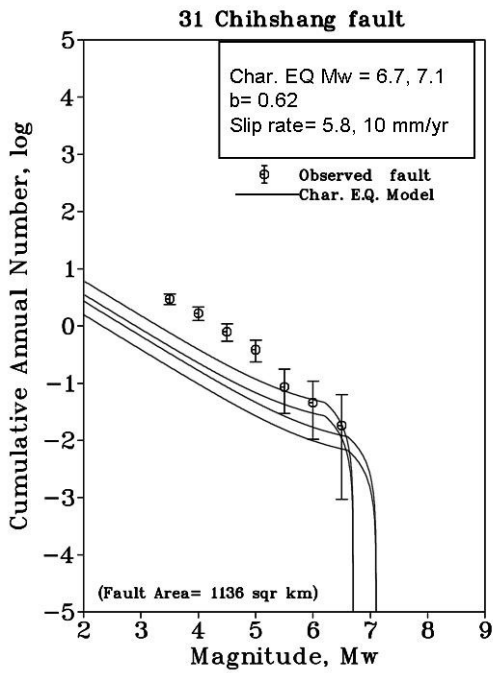


圖 4.45：南段之特徵地震模式。

4-3-4 池上斷層發生機率評估

在獲得各事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算池上斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，池上斷層整段最後一次發生時間為西元 1951 年，北段為西元 1951 年，南段為西元 2003 年。表 4.8~4.10 為使用 BPT 模式評估池上斷層各事件之發生機率。表 4.11 為池上斷層 BPT 模式評估之結果，採用式 4-3 的計算方式，得到池上斷層未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 36.3%、46.3% 及 61.5%。

表 4.8：池上斷層整段以 BPT 模式評估之發生機率。

| 整段 (週期) | 最後一次事件 | 30 年機率 | 50 年機率 | 100 年機 率 | weight |
|---------|--------|--------|--------|-------------|--------|
| 211 | 1951 | 0.06 | 0.14 | 0.38 | 0.03 |
| 122 | 1951 | 0.28 | 0.46 | 0.76 | 0.03 |
| 75 | 1951 | 0.53 | 0.73 | 0.94 | 0.02 |
| 43 | 1951 | 0.77 | 0.92 | 0.99 | 0.02 |
| 權重後加總 | | 3.6% | 5.1% | 7.3% | 0.1 |

表 4.9：池上斷層北段以 BPT 模式評估之發生機率。

| 北段 (週期) | 最後一次事件 | 30 年機率 | 50 年機率 | 100 年機 率 | weight |
|---------|--------|--------|--------|-------------|--------|
| 152 | 1951 | 0.17 | 0.32 | 0.62 | 0.09 |
| 88 | 1951 | 0.45 | 0.65 | 0.89 | 0.09 |
| 38 | 1951 | 0.82 | 0.94 | 1.00 | 0.06 |
| 22 | 1951 | 0.93 | 0.99 | 1.00 | 0.06 |
| 權重後加總 | | 16.1% | 20.3% | 25.6% | 0.3 |

表 4.10：池上斷層南段以 BPT 模式評估之發生機率。

| 南段 (週期) | 最後一次事件 | 30 年機率 | 50 年機率 | 100 年機 率 | weight |
|---------|--------|--------|--------|-------------|--------|
| 147 | 2003 | 0.00 | 0.05 | 0.36 | 0.18 |
| 86 | 2003 | 0.09 | 0.31 | 0.76 | 0.18 |
| 37 | 2003 | 0.64 | 0.88 | 0.99 | 0.12 |
| 21 | 2003 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.12 |
| 權重後加總 | | 21.3% | 29.0% | 44.2% | 0.6 |

表 4.11：池上斷層發生機率評估。

| | M_w | 30 年機率 | 50 年機率 | 100 年機率 |
|--------------------|---------|--------|--------|---------|
| | | BPT | BPT | BPT |
| P _{整段} | 7.1~7.4 | 3.6% | 5.1% | 7.3% |
| P _{北段} | 6.7~7.1 | 16.1% | 20.3% | 25.6% |
| P _{南段} | 6.7~7.1 | 21.3% | 29.0% | 44.2% |
| P _{total} | 6.7~7.4 | 36.3% | 46.3% | 61.5% |

註：P_{total} 見式 4.3

4-4 小崗山斷層發生機率潛勢評估

4-4-1 小崗山斷層參數蒐集

斷層長度，孫習之[Sun, 1964]首先利用航照判讀，認為在二仁溪與阿公店溪之間的大小崗山西側存在一呈南北走向線型崖，認為是一斷層崖，命名為小崗山斷層，之後研究者大致認同孫習之的看法，認為此線型崖為一逆斷層構成之斷層崖。根據地調所條帶地質圖，小崗山斷層長約8公里，由高雄縣阿蓮鄉南蓮村向南延伸至燕巢鄉瓊林村，其分布如圖4.46所示。若是以長度8公里推估小崗山斷層之特徵地震規模，則小崗山斷層不可能發生 $M_w6.5$ 以上之地震。

陳文山等[2010]從地質圖研判，位於小崗山斷層北側之梅嶺斷層，上盤為麓山帶地形，前緣為全新世海階，下盤為海階台地（中洲台地），類似於小崗山斷層兩側之地質，研判可能為小崗山斷層向北延伸之部分，向北延伸之部分終止於新化斷層，圖4.47之黃色方框內為小崗山斷層可能延伸，如此長度即變為31公里左右。

斷層地下構造上，陳文山等[2010]根據跨小崗山斷層之四口鑽井，畫出鑽井之柵狀剖面圖，如圖4.48所示（鑽井位置參考圖4.46），其中小崗山1號井及山腳下1號井均鑽遇古亭坑層，並具有密集且強烈之剪切構造，圖4.48中四口井地層對比之兩條等時面，也顯示位於上盤之鑽井受到了抬升之作用造成層位之落差。圖4.49為08P- HKS- AL- 1淺層反射震測剖面（測線位置參考圖4.46）[石瑞銓等，2008]，震測剖面顯示小崗山3號至山腳下1號井之間的古亭坑層可能具有多處較具規模的錯動面，地表下的構造型態可能是由多組與層面略平行的斷層因為差異滑移而造成地表淺部全新世地層的撓曲，構造型態屬於盲斷層。

短期滑移速率上，中央地質調查所在大崗山北方的縣184道路設有水準測線（路竹—茂林測線）（測線位置參考圖4.46）。此測線在2004年2月設立至2008年間有4次施測紀錄（圖4.50上）；小崗山線形西側（測點J105與G470之間）在2005年以前有明顯的下降趨勢，小崗山線形以東則逐年有抬升的趨勢，而抬升速度約7.5-25 mm/yr 之間。此外，中央地質調查所在小崗山南方另一條水準測線（岡山—安坡測線；測線位置參考圖4.46），2004年至2008年之間共有3次施測（圖4.50下），結果顯示小崗山線形（測點B263）以西，沒有明顯的高程變化，線形以東則有明顯的抬升現象，平均抬升速度約10-12 mm/yr。由2條水準測量的結果，小崗山線形東側均有明顯的高程差變化。

長期滑移速率上，陳文山等[2010]由小崗山斷層附近所鑽取的四口岩芯分析其碳十四年代、古環境與埋藏深度的結果估算，顯示全新世以來垂直變動速率由東向西逐漸遞減，如圖4.51所示，以淺層震測剖面解釋之傾角45度（圖4.49）推算小崗山斷層之淨滑移速率為 5.7 ± 1.4 mm/yr。

本計畫將蒐集之小崗山斷層參數建立成如表4.12之參數表，綜合前述，本計畫假設

斷層長度為31公里，而由於缺少斷層最後一次發生時間，預計會採用Poisson機率密度函數進行評估。

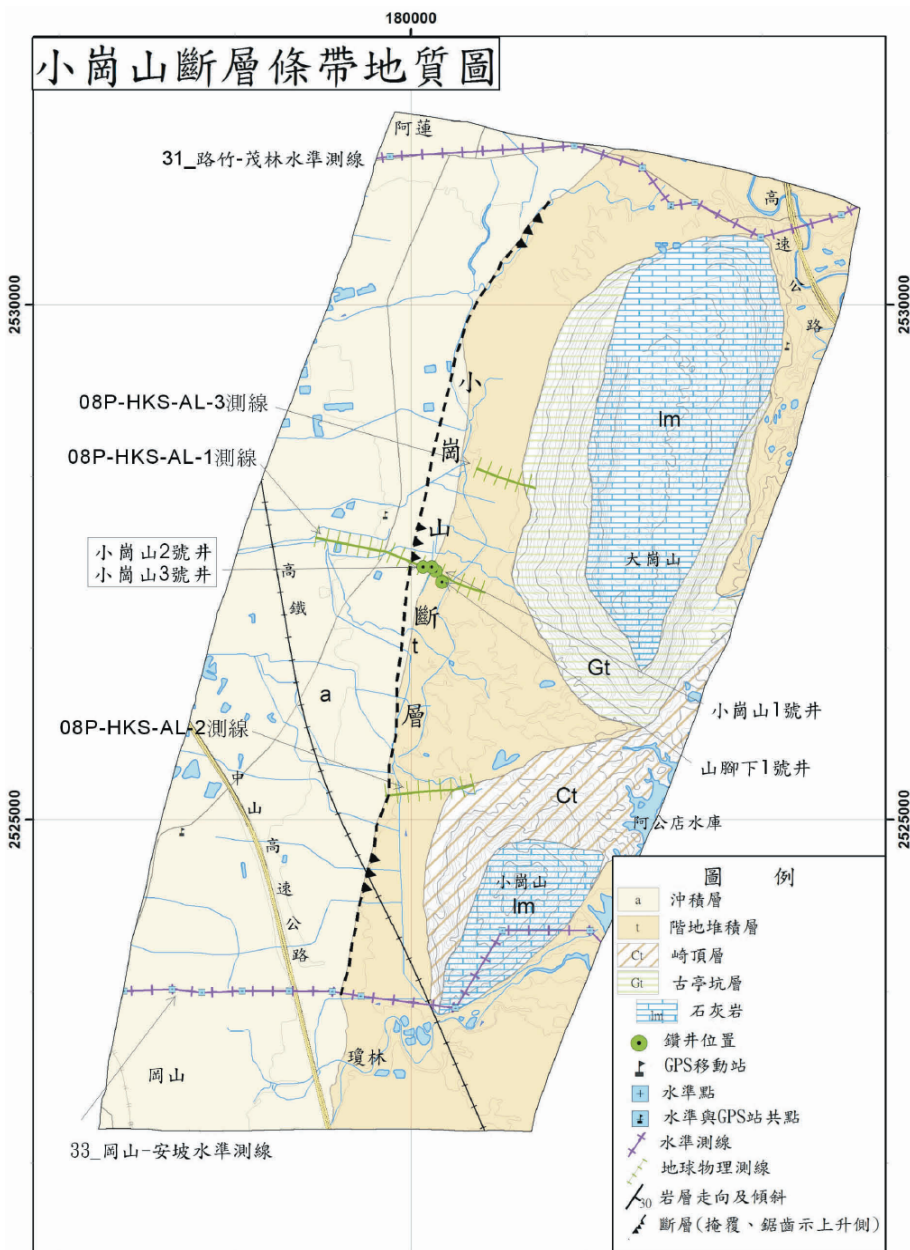
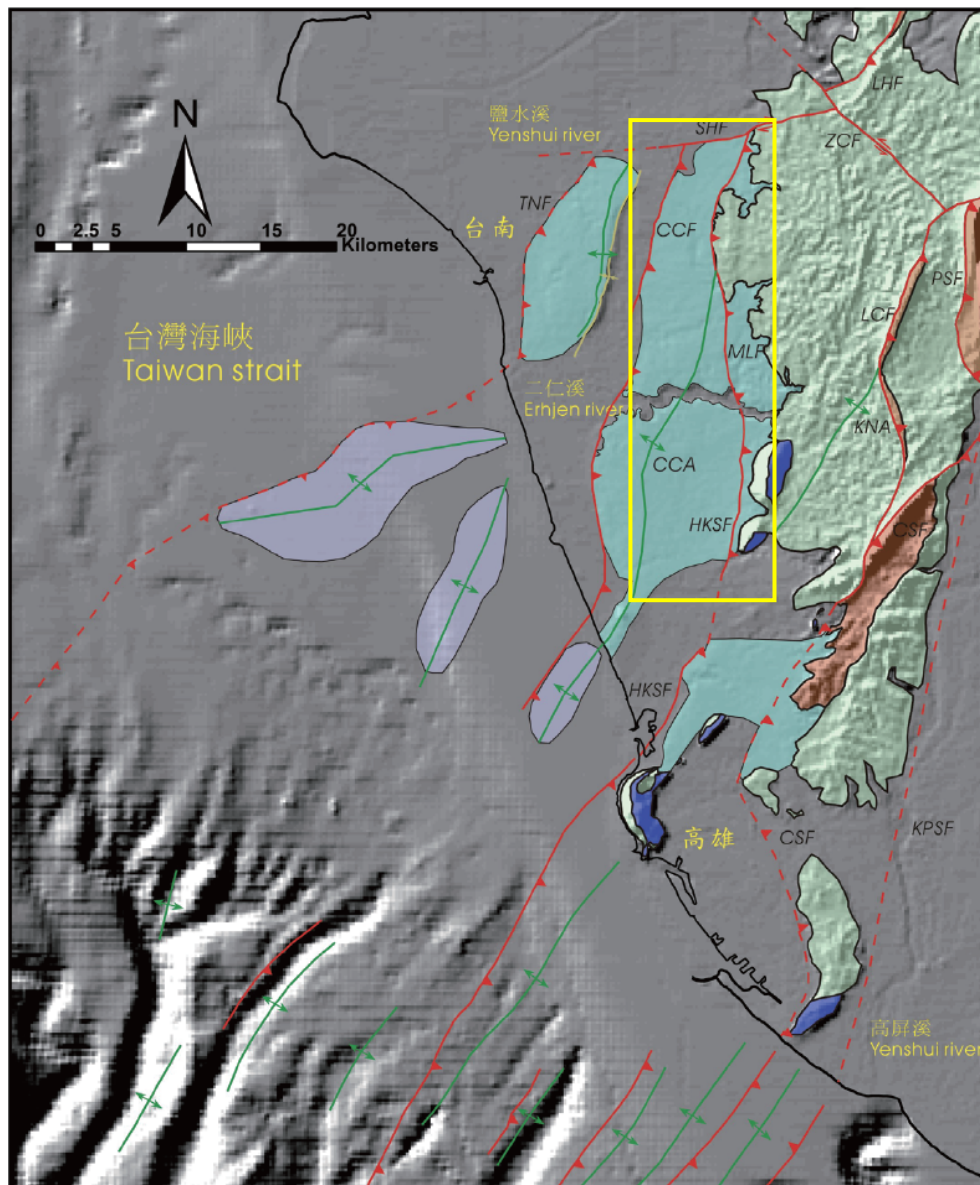


圖 4.46：小崗山斷層條帶地質圖。[林啟文等，2009]。



晚期中新世-早期上新世砂岩
 晚期上新世-更新世泥岩
 更新世石灰岩
 全新世海階
 海底背斜

↗ 逆斷層
 ↘ 推測逆斷層
 ↔ 平移逆斷層
 X 背斜
 X 向斜

圖 4.47：台南-高雄平原活動構造圖。CCF:中洲斷層，CSF:旗山斷層，HKSF:小崗山斷層，LCF:龍船斷層，LHF:崙後斷層，KPSF:高屏溪斷層，MLF:梅嶺斷層，PSF:平溪斷層，SHF:新化斷層，TNF:台南斷層，ZCF:左鎮斷層，CCA:中洲背斜，KNA:坑內背斜。[摘錄自陳文山等，2010]。

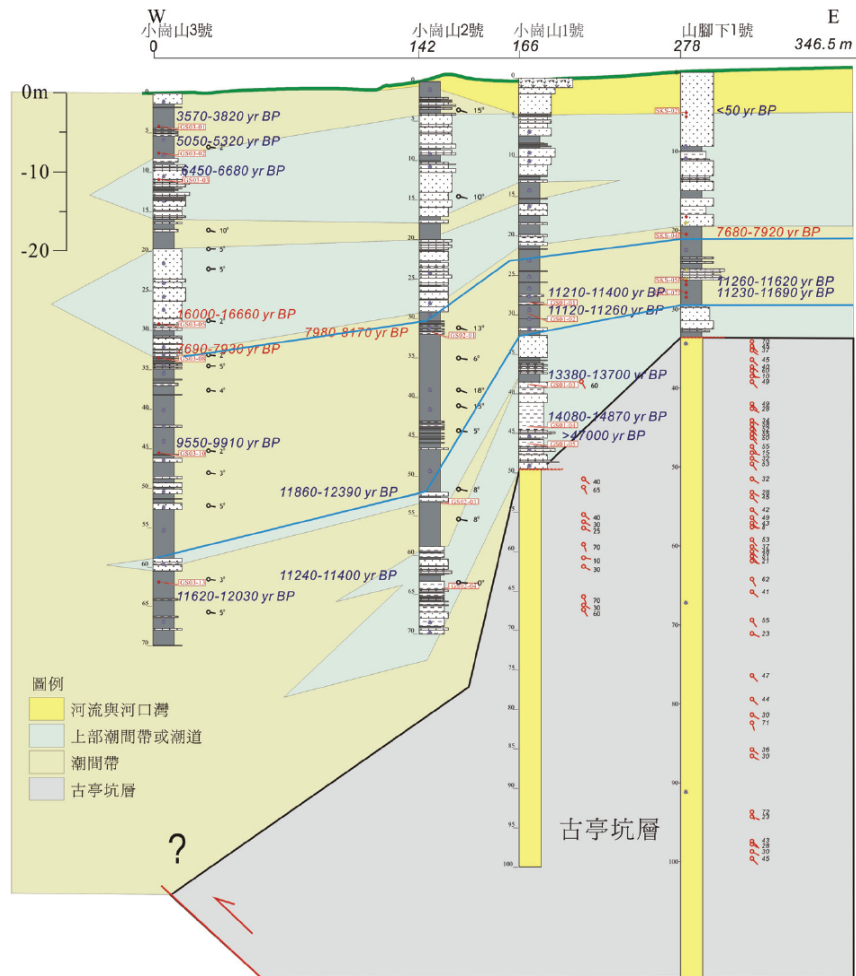


圖 4.48：鑽井柵狀剖面，地層對比與沉積環境。藍色線為 7700- 8000 yr BP 與 11500- 12000 yr BP 等時面。[摘錄自陳文山等，2010]。

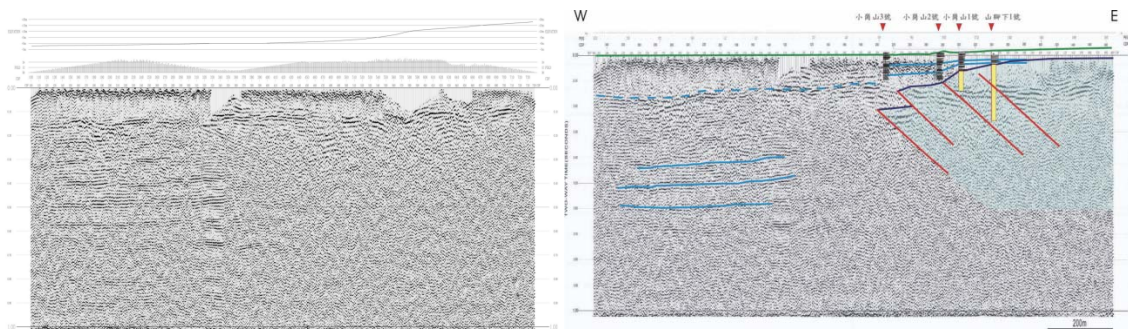


圖 4.49：左圖為 08P-HKS-AL-1 淺層反射震測剖面，右圖為陳文山等[2010]之解釋。

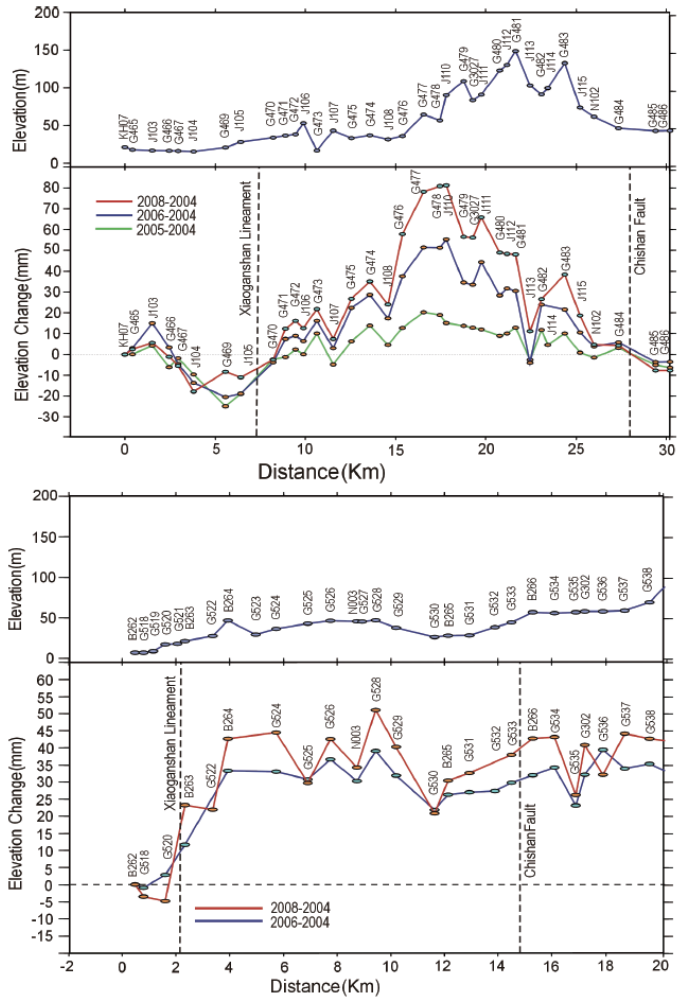


圖 4.50：小崗山線形附近精密水準測量結果。上圖為縣 184 道路竹一茂林測線，下圖為台 22 線岡山—安坡測線。

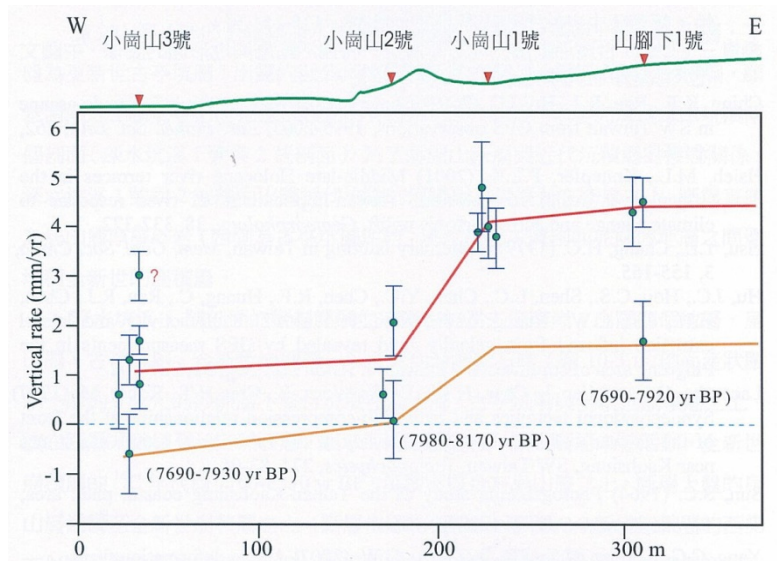


圖 4.51：紅色線為 12000-11500 yr BP 以來各井的平均抬升速率，橘色線為 8000-7700 yr BP 以來各井的平均抬升速率。[陳文山等，2010]。

表 4.12：小崗山斷層參數表。

| | 斷層參數 | 斷層參數數據 | 研究方法 | 參考文獻 |
|-----------|----------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|
| 小崗山 斷層 | 斷層分支 | 無 | | Sun, 1964；林啟文等，2009 |
| | 長度(km) | 8 | 由高雄縣阿蓮鄉南蓮村向南延伸至燕巢鄉瓊林村 | Sun, 1964；林啟文等，2009 |
| | | 31 (本計畫潛勢評估採用) | 由地質圖比對，將梅嶺斷層為小崗山斷層之延伸 | 陳文山等，2010 |
| | 寬度(km) | 14.1 | 深度 × sin(傾角) | |
| | 深度(km) | 10 | 區域地震深度分布 | 鄭錦桐，2002 |
| | 面積(km ²) | 438 | 長度×寬度 | |
| | 走向 | 北北東 | 地形、航照判釋 | Sun, 1964；林啟文等，2009 |
| | 傾斜角度(度) | 45 | 跨斷層震測剖面 | 石瑞銓等，2008 |
| | 斷層機制 | 逆移斷層 | 1.遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 2.地物探勘瞭解地下地層錯動情形。 | 林啟文等，2010；陳文山等，2010 |
| | 短期滑移速率(mm/yr) | 7.5-25 (抬升) | 水準測線，路竹－茂林測線 | 中央地調所 |
| | | 10-12 (抬升) | 水準測線，岡山－安坡測線 | |
| | 長期滑移速率(mm/yr) | 5.7±1.4 | 由小崗山斷層附近所鑽取的四口岩芯分析其碳十四年代、古環境與埋藏深度的結果估算 | 陳文山等，2010 |
| | 單一事件變位量(m) | 0.85 | $\log D = 0.29 M_w - 1.84$ | Wells and Coppersmith, 1994 |
| | 最大可能地震規模(M_w) | 6.7 | $M_w = 4.33 + 0.90 \log A$ (逆斷層) | Wells and Coppersmith, 1994 |
| 6.8 | | $M_w = 5.00 + 1.22 \log L$ (逆斷層) | | |

| | | | | |
|--|-----------|-----|---|------------------|
| | | 6.8 | $M_W = (0.82 \pm 0.071) \log(A) + (4.61 \pm 0.141)$ | 吳相儀, 2000 |
| | | 6.8 | $M_W = (1.32 \pm 0.122) \log(L) + (4.817 \pm 0.132)$ | |
| | | 6.7 | $\log(L_e) = (1/2) \log(M_0) - 8.08$ $M_W = (\log(M_0) - 9.1) / 1.5$ | Yen and Ma, 2011 |
| | 地震重複週期(年) | | | |
| | 最近一次活動時間 | NA | | |

4-4-2 小崗山斷層破裂模式及邏輯數權重分配

本計畫評估小崗山斷層採用整段評估，長度31公里。

特徵地震規模藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有Wells and Coppersmith[1994]、吳相儀[2000]及Yen and Ma[2011]等列於參數表中以供參考。由於目前對於小崗山斷層深部地下構造形貌不清楚，本計畫採用斷層長度帶入經驗公式中評估特徵地震規模，得到整段6.8(0.2)、6.8(0.4)、6.7(0.4)。

長期滑移速率為 5.7 ± 1.4 mm/yr，本計畫之邏輯樹權重分配為4.3(0.2)，5.7(0.6)，7.1(0.2)。

本計畫初步劃設小崗山斷層之邏輯樹如圖4.52所示，並將特徵地震規模結果相同的合併，以簡化邏輯樹及後續之計算。

小崗山斷層邏輯樹

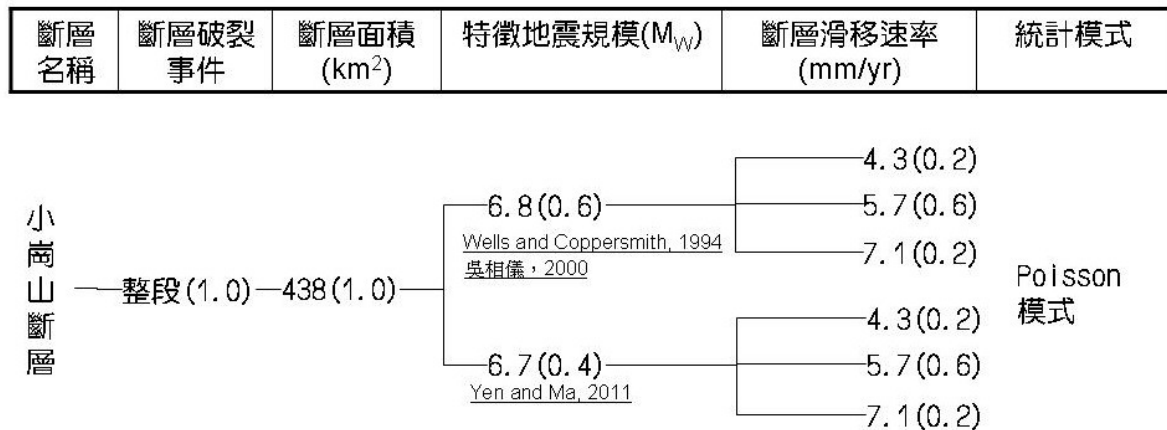


圖 4.52：本計畫小崗山斷層邏輯樹。

4-4-3 小崗山斷層特徵地震模式

圖4.52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4.53為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)。

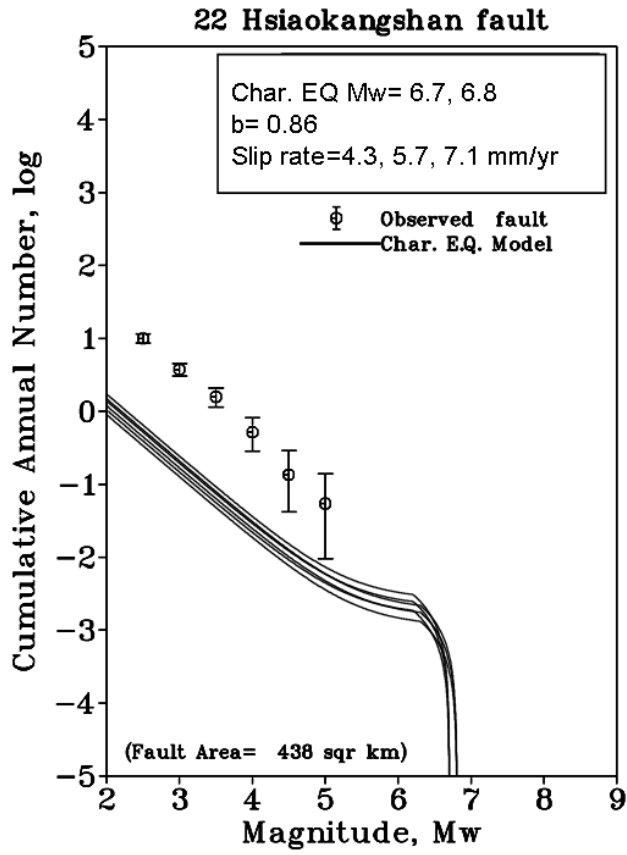


圖 4.53：小崗山斷層特徵地震模式。

4-4-4 小崗山斷層發生機率評估

在獲得各事件之再現週期後，由於無最近一次發生時間，因此以Poisson模式估算小崗山斷層未來30、50及100年的發生機率。表4.13為評估小崗山斷層之發生機率。未來30年、50年及100年之機率為6.0%、9.8%及18.5%。

表 4.13：小崗山斷層以 Poisson 模式評估之發生機率。

| 週期 | 最後一次事件 | 30 年機率 | 50 年機率 | 100 年機率 | weight |
|-------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 750 | NA | 3.9% | 6.4% | 12.5% | 0.12 |
| 566 | NA | 5.2% | 8.5% | 16.2% | 0.36 |
| 454 | NA | 6.4% | 10.4% | 19.8% | 0.12 |
| 531 | NA | 5.5% | 9.0% | 17.2% | 0.08 |
| 401 | NA | 7.2% | 11.7% | 22.1% | 0.24 |
| 322 | NA | 8.9% | 14.4% | 26.7% | 0.08 |
| 權重後加總 | | 6.0% | 9.8% | 18.5% | 1 |

第五章、整合觀測資料分析

5-1 異常記錄與大地震活動之關係

本次期末報告共累計 2009 年 1 月至 2012 年 11 月共 112 個地震事件，如表 5.1 詳列。其中僅有兩個地震同時觀測到(1)地下水位(新竹、嘉義網)(2)井下應變儀(嘉義網) (3)地化氣體記錄三樣異常，分別為 2009/12/19 21:02 規模 6.9 的花蓮地震(發生在花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里，表 5.1 中編號 31)以及 2011/3/20 16:00 規模 5.8 的台東地震(發生在台東縣政府東南方 41.9 公里外海，表 5.1 中編號 74)。異常記錄統計圖如圖 5.2 所示，這兩個地震在嘉義網的觀測具有地下水位、氣體觀測、和井下應變儀三種同步異常訊號，同一天並有長微震(tremor)之記錄，可能對應到發生在孕震帶下方的慢滑事件(slow slip event)。

表 5.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件列表。

| ID | 臺灣時間 | 規模 | 震央位置 |
|----|------------------|-----|----------------------|
| 1 | 2009/01/02 09:39 | 5.1 | 屏東恆春地震站西偏南 94.0 公里 |
| 2 | 2009/01/04 06:04 | 5.1 | 花蓮秀林地震站東偏北方 16.2 公里 |
| 3 | 2009/01/23 20:38 | 5.3 | 台東蘭嶼地震站南偏西方 116.2 公里 |
| 4 | 2009/04/17 20:37 | 5.3 | 花蓮市地震站東南方 9.5 公里 |
| 5 | 2009/05/27 06:27 | 5.7 | 高雄市地震站西南方 120.8 公里 |
| 6 | 2009/06/20 11:44 | 5.4 | 宜蘭南澳地震站東偏南方 82.2 公里 |
| 7 | 2009/06/25 05:09 | 5.0 | 花蓮市地震站東方 68.6 公里 |
| 8 | 2009/06/28 17:34 | 5.3 | 花蓮秀林地震站東北方 18.8 公里 |
| 9 | 2009/07/14 02:05 | 6.0 | 花蓮市地震站東方 61.9 公里 |
| 10 | 2009/07/14 04:28 | 5.2 | 宜蘭南澳地震站東南方 58.5 公里 |
| 11 | 2009/07/16 18:48 | 5.4 | 花蓮市地震站東方 69.1 公里 |
| 12 | 2009/07/17 02:42 | 5.1 | 花蓮市地震站東方 69.0 公里 |
| 13 | 2009/07/26 09:00 | 5.4 | 南投名間地震站東南方 34.3 公里 |
| 14 | 2009/07/26 14:10 | 5.4 | 花蓮玉里地震站北方 8.8 公里 |
| 15 | 2009/07/30 00:53 | 5.8 | 屏東恆春地震站西方 27.8 公里 |
| 16 | 2009/08/17 08:05 | 6.8 | 花蓮市地震站東偏南方 240.4 公里 |
| 17 | 2009/08/17 18:10 | 5.9 | 花蓮市地震站東偏南方 221.6 公里 |
| 18 | 2009/08/17 18:15 | 5.4 | 花蓮市地震站東偏南方 210.4 公里 |
| 19 | 2009/08/18 21:17 | 5.3 | 花蓮市地震站東偏南方 213.9 公里 |

| ID | 臺灣時間 | 規模 | 震央位置 |
|----|------------------|-----|----------------------|
| 20 | 2009/08/19 07:47 | 5.2 | 花蓮市地震站東偏南方 207.7 公里 |
| 21 | 2009/08/20 22:18 | 5.5 | 花蓮市地震站東偏南方 205.2 公里 |
| 22 | 2009/08/22 04:57 | 5.1 | 屏東枋寮地震站西方 16.9 公里 |
| 23 | 2009/09/12 20:05 | 5.1 | 花蓮市地震站東方 89.3 公里 |
| 24 | 2009/10/04 01:36 | 6.1 | 花蓮西林地震站東南方 23.0 公里 |
| 25 | 2009/10/11 14:42 | 5.0 | 屏東恆春地震站西偏南 14.8 公里 |
| 26 | 2009/10/23 07:05 | 5.1 | 台東市地震站東偏南方 35.1 公里 |
| 27 | 2009/11/05 17:32 | 6.2 | 南投名間地震站南偏東方 10.1 公里 |
| 28 | 2009/11/05 19:34 | 5.7 | 南投名間地震站南偏東方 13.6 公里 |
| 29 | 2009/11/15 22:47 | 5.5 | 基隆市地震站東偏南方 46.3 公里 |
| 30 | 2009/11/22 01:27 | 5.0 | 花蓮秀林地震站東北方 22.4 公里 |
| 31 | 2009/12/19 21:02 | 6.9 | 花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里 |
| 32 | 2010/01/05 03:27 | 5.5 | 花蓮秀林地震站東偏北方 25.8 公里 |
| 33 | 2010/01/19 14:09 | 5.6 | 花蓮市地震站南偏東方 18.2 公里 |
| 34 | 2010/02/07 14:10 | 6.6 | 花蓮市地震站東偏南方 230.9 公里 |
| 35 | 2010/02/09 13:02 | 5.4 | 台東蘭嶼地震站南偏西方 127.1 公里 |
| 36 | 2010/02/12 10:42 | 5.2 | 花蓮西林地震站西偏北方 38.3 公里 |
| 37 | 2010/02/22 13:21 | 5.6 | 宜蘭蘇澳地震站東偏南方 128.5 公里 |
| 38 | 2010/02/26 09:07 | 5.8 | 花蓮市地震站東偏南方 131.9 公里 |
| 39 | 2010/02/26 13:38 | 5.0 | 花蓮市地震站東偏南方 128.1 公里 |
| 40 | 2010/03/04 08:18 | 6.4 | 高雄甲仙地震站東南方 17.1 公里 |
| 41 | 2010/03/04 15:07 | 5.1 | 台東成功地震站東偏南方 78.0 公里 |
| 42 | 2010/03/04 16:16 | 5.7 | 高雄甲仙地震站南偏東方 14.3 公里 |
| 43 | 2010/03/10 14:27 | 5.1 | 花蓮市地震站東偏南方 178.3 公里 |
| 44 | 2010/03/27 07:07 | 5.2 | 花蓮秀林地震站東偏北方 8.0 公里 |
| 45 | 2010/04/09 19:49 | 5.1 | 宜蘭市地震站東偏北方 27.6 公里 |
| 46 | 2010/04/11 12:57 | 5.4 | 台東成功地震站東偏北方 76.7 公里 |
| 47 | 2010/04/23 09:49 | 5.0 | 宜蘭蘇澳地震站東方 47.6 公里 |
| 48 | 2010/04/26 10:59 | 6.8 | 台東蘭嶼地震站東方 225.9 公里 |
| 49 | 2010/05/03 21:38 | 5.1 | 花蓮市地震站東偏南方 220.1 公里 |
| 50 | 2010/06/15 08:31 | 5.5 | 花蓮秀林地震站南偏東方 4.5 公里 |
| 51 | 2010/06/27 02:05 | 5.1 | 宜蘭牛鬥地震站西北方 1.9 公里 |
| 52 | 2010/07/03 03:11 | 5.1 | 高雄旗山地震站東方 26.0 公里 |

| ID | 臺灣時間 | 規模 | 震央位置 |
|----|------------------|-----|------------------------------|
| 53 | 2010/07/09 03:43 | 5.3 | 宜蘭南澳地震站東偏南方 30.4 公里 |
| 54 | 2010/07/09 08:41 | 5.8 | 宜蘭蘇澳地震站東方 76.9 公里 |
| 55 | 2010/07/17 17:04 | 5.2 | 花蓮玉里地震站東偏北方 45.6 公里 |
| 56 | 2010/07/18 21:03 | 5.2 | 花蓮市地震站東方 84.5 公里 |
| 57 | 2010/07/25 11:52 | 5.7 | 高雄旗山地震站東方 27.0 公里 |
| 58 | 2010/08/22 00:38 | 5.3 | 花蓮西林地震站南偏東方 29.3 公里 |
| 59 | 2010/08/30 16:45 | 5.2 | 基隆市地震站東偏南方 48.8 公里 |
| 60 | 2010/09/04 03:06 | 5.0 | 宜蘭蘇澳地震站東偏南方 98.1 公里 |
| 61 | 2010/09/20 11:17 | 5.1 | 花蓮西林地震站東南方 23.2 公里 |
| 62 | 2010/09/29 01:33 | 5.0 | 花蓮秀林地震站東偏北方 10.6 公里 |
| 63 | 2010/10/03 03:23 | 5.1 | 宜蘭南澳地震站東南方 9.0 公里 |
| 64 | 2010/10/04 21:28 | 6.6 | 宜蘭蘇澳地震站東方 377.7 公里 |
| 65 | 2010/11/08 21:01 | 5.2 | 台南東山地震站西偏南 11.2 公里 |
| 66 | 2010/11/12 21:08 | 5.3 | 宜蘭南澳地震站東偏南方 82.5 公里 |
| 67 | 2010/11/12 23:39 | 5.3 | 屏東枋寮地震站南方 20.4 公里 |
| 68 | 2010/11/21 20:31 | 6.1 | 花蓮市地震站南偏東方 15.5 公里 |
| 69 | 2010/12/06 10:14 | 5.2 | 花蓮西林地震站南方 15.0 公里 |
| 70 | 2010/12/07 10:46 | 5.1 | 台東成功地震站南方 14.8 公里 |
| 71 | 2010/12/10 04:42 | 5.2 | 台東蘭嶼地震站東南方 98.9 公里 |
| 72 | 2011/02/01 16:16 | 5.5 | 花蓮縣政府東北方 30.6 公里外海 |
| 73 | 2011/02/15 15:18 | 5.5 | 台東縣政府南方 174.1 公里外海 |
| 74 | 2011/03/20 16:00 | 5.8 | 台東縣政府東南方 41.9 公里外海 |
| 75 | 2011/04/29 21:12 | 5.9 | 台東縣政府南偏東方 182.5 公里外海 |
| 76 | 2011/04/30 16:35 | 5.8 | 宜蘭縣政府南偏東方 10.1 公里 |
| 77 | 2011/05/03 23:52 | 5.2 | 花蓮縣政府東偏南方 10.7 公里外海 |
| 78 | 2011/05/22 09:34 | 5.0 | 花蓮縣政府東北方 20.3 公里外海 |
| 79 | 2011/06/03 01:07 | 5.2 | 台東縣政府南偏東方 58.0 公里 (位於台灣東部海域) |
| 80 | 2011/06/10 09:25 | 5.1 | 花蓮縣政府南方 44.6 公里 (位於花蓮縣近海) |
| 81 | 2011/06/26 21:19 | 5.0 | 南投縣政府東方 31.9 公里 (位於南投縣仁愛鄉) |
| 82 | 2011/07/12 19:17 | 5.3 | 花蓮縣政府南偏西方 53.9 公里 (位於花蓮縣近海) |
| 83 | 2011/07/13 15:19 | 5.4 | 宜蘭縣政府東方 206.8 公里 (位於台灣東部海域) |
| 84 | 2011/07/18 22:48 | 5.1 | 花蓮縣政府東偏南方 88.2 公里 (位於台灣東部海域) |
| 85 | 2011/09/09 11:26 | 5.0 | 台東縣政府南偏西方 52.4 公里 (位於台灣東部海域) |

| ID | 臺灣時間 | 規模 | 震央位置 |
|-----|------------------|-----|-------------------------------|
| 86 | 2011/09/12 13:15 | 5.1 | 花蓮縣政府東偏南方 128.2 公里 (位於台灣東部海域) |
| 87 | 2011/09/22 06:18 | 5.1 | 花蓮縣政府北偏東方 11.9 公里 (位於花蓮縣近海) |
| 88 | 2011/10/30 11:23 | 6.3 | 基隆市政府東方 143.6 公里 (位於台灣東北部海域) |
| 89 | 2011/10/31 23:17 | 5.0 | 宜蘭縣政府東偏北方 21.7 公里 (位於台灣東部海域) |
| 90 | 2011/12/23 03:39 | 5.0 | 花蓮縣政府東方 99.5 公里 (位於台灣東部海域) |
| 91 | 2012/01/25 16:36 | 5.0 | 宜蘭縣政府東偏北方 47.4 公里 (位於台灣東部海域) |
| 92 | 2012/01/29 16:07 | 5.6 | 基隆市政府東偏北方 66.4 公里 (位於台灣東北部海域) |
| 93 | 2012/02/04 10:54 | 5.6 | 宜蘭縣政府東方 90.9 公里 (位於台灣東部海域) |
| 94 | 2012/02/26 10:35 | 6.4 | 屏東縣政府東偏北方 28.4 公里 (位於屏東縣霧台鄉) |
| 95 | 2012/03/22 07:44 | 5.0 | 台東縣政府東北方 70.7 公里 (位於台灣東部海域) |
| 96 | 2012/04/09 05:43 | 5.7 | 花蓮縣政府東方 75.3 公里 (位於台灣東部海域) |
| 97 | 2012/04/19 09:58 | 5.5 | 花蓮縣政府北偏東方 16.7 公里 (位於花蓮縣近海) |
| 98 | 2012/04/27 22:48 | 5.0 | 花蓮縣政府南偏東方 24.7 公里 (位於台灣東部海域) |
| 99 | 2012/06/05 04:38 | 5.1 | 花蓮縣政府東偏北方 62.9 公里 (位於台灣東部海域) |
| 100 | 2012/06/05 17:56 | 5.1 | 花蓮縣政府東偏北方 67.4 公里 (位於台灣東部海域) |
| 101 | 2012/06/06 09:08 | 5.9 | 台東縣政府東南方 44.6 公里 (位於台灣東部海域) |
| 102 | 2012/06/10 05:00 | 6.6 | 宜蘭縣政府東偏南方 62.8 公里 (位於台灣東部海域) |
| 103 | 2012/06/10 05:54 | 5.1 | 宜蘭縣政府東偏南方 53.7 公里 (位於台灣東部海域) |
| 104 | 2012/06/15 00:15 | 5.3 | 花蓮縣政府南偏西方 32.0 公里 (位於花蓮縣豐濱鄉) |
| 105 | 2012/06/17 17:01 | 5.0 | 花蓮縣政府南偏西方 35.5 公里 (位於花蓮縣豐濱鄉) |
| 106 | 2012/08/14 18:55 | 5.2 | 花蓮縣政府西偏北方 13.0 公里 (位於花蓮縣秀林鄉) |
| 107 | 2012/08/18 04:20 | 5.2 | 花蓮縣政府南偏西方 69.6 公里 (位於台東縣近海) |
| 108 | 2012/08/31 20:11 | 5.0 | 新竹市政府西南方 13.0 公里 (位於苗栗縣竹南鎮) |
| 109 | 2012/09/05 04:00 | 5.2 | 台東縣政府南偏西方 58.6 公里 (位於台灣東部海域) |
| 110 | 2012/10/20 16:49 | 5.1 | 宜蘭縣政府東偏南方 95.5 公里 (位於台灣東部海域) |
| 111 | 2012/10/25 18:31 | 5.5 | 高雄市政府南偏東方 22.1 公里 (位於屏東縣近海) |
| 112 | 2012/11/21 01:09 | 5.5 | 台東縣政府東南方 42.5 公里 (位於台灣東部海域) |

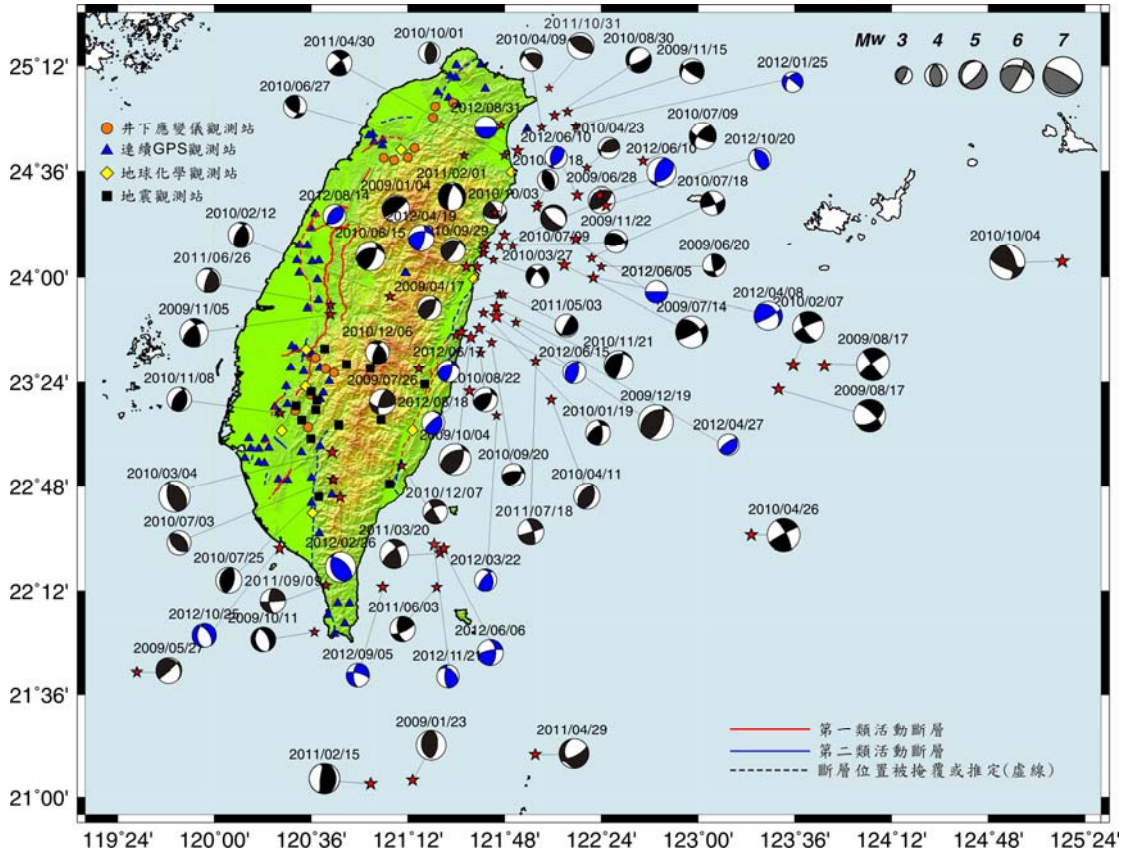
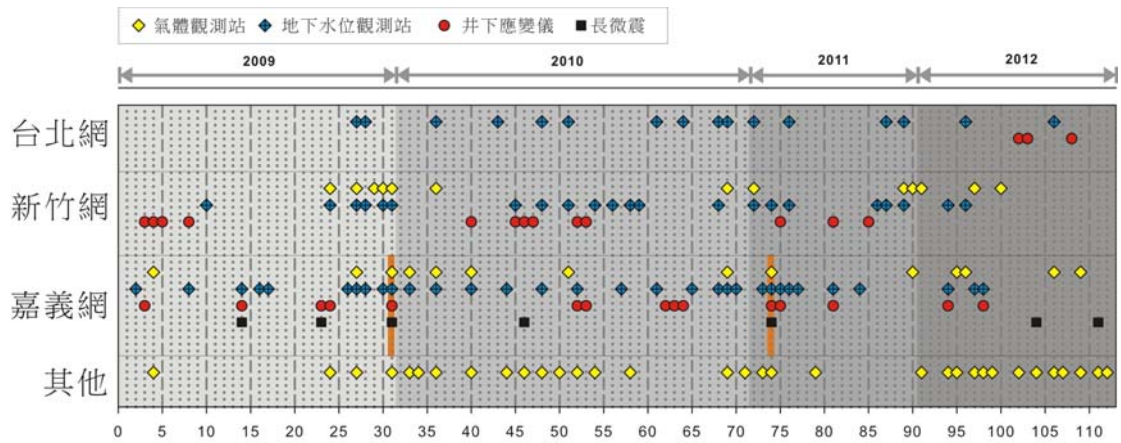


圖 5.1：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形、和黑色方形分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、GPS、地化觀測(氣體和水位)及地震觀測站。藍色海灘球為 2011 年 11 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件。



2009/1~2012/11 規模大於五的地震ID列表

圖 5.2：2009 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(表 5.1)，黃色菱形、藍色菱形、紅色圈圖、和黑色方塊分別代表氣體觀測、地下水位、井下應變儀和地震訊號異常，而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。

5-2 長微震事件資料庫建置

在去年度報告書中，整合觀測加入了長微震目錄的建置。在孕震區更深部的下部地殼這些長微震事件的發現，將我們對斷層活動方式的理解推入了新紀元。這種活動介於一般地震數十秒的快速破裂和數年的緩慢蠕變(creeping)之間，稱為慢地震(slow earthquake)。其錯動位移有限、破裂時間長，以至於僅有非常弱的地震波輻射，難以從地震波分辨，直到 2002 年日本 NIED 的研究員 Obara 首度發現並量化慢地震特徵：(1)為貌似雜訊 (2)主頻率 2-8 Hz (3)無明顯 P 波、S 波到時 (4)能量持續時間長、數分鐘到數月不等 (5)能在相距數公里至數十公里不等的測站具近乎一致之到時。這樣的特徵和在火山地區觀測到的火山長微震(volcanic tremor)相似，因此又被稱作非火山長微震(non-volcanic tremor)。

在許多隱沒帶，長微震訊號通常伴隨 GPS 偵測到的慢速滑移事件，由地表變形數據逆推得知，慢地震釋放的地震矩能量可對等於規模六的地震事件，並被發現是誘發 2011 年 M9 日本東北地震之主因，因此被視作是應力累積狀態評估中不可忽略的重點研究。然而，台灣的慢地震由於規模較小，GPS 資料無法解析，而地震資料則受背景雜訊影響，在目視辨認上較為困難且主觀。由師大地球科學陳卉瑄老師研究室的研究生莊育菱已成功發展自動偵測系統，透過搜尋數年的連續資料，建立完整之慢地震目錄，並進一步分析其時空分布特徵。

由於長微震被發現對小的應力變化非常敏感，被認為是未來能指示孕震帶以下變形的一項新興觀測。由於本計畫有共站的井下地震儀資料，我們欲與井下應變儀、地化觀測站的資料各自獨立成立資料庫，為未來整合分析的重要標準。

5-2-1 與規模五地震之比對

與 2009 年 1 月至 2012 年 11 月共 112 個地震事件互相比對，我們只發現 7 個長微震的觀測(圖 5.2 黑方形所示)，而之中僅有 2 個對應到井下應變儀、地化氣體觀測和地下水位的異常。

5-2-2 2011 年長微震目錄

利用連續記錄地震訊號的振幅與雜訊相除所得之比值當門檻，初步發展之自動化偵測系統描述如下(圖 5.3)。

1. **第一階段 — 波形相似度檢驗：**在同一時間中，研究區域裡是否有一半以上(至少 7 個)的測站均收到相似的訊號，且訊號之相關係數最大值超過門檻值 0.95。

2. **第二階段 — 平均訊噪比檢驗**：在通過第一階段門檻值之時間段中，相似測站之平均訊噪比是否通過門檻值 1.15。
3. **第三階段 — 事件持續時間檢驗**：同時通過第一、二階段的續時間是否超過門檻值 600 秒。

利用此方法，已成功建置了 2009 至 2011 年長微震目錄(莊, 2012)，長微震的波形例子如圖 5.4 所示。

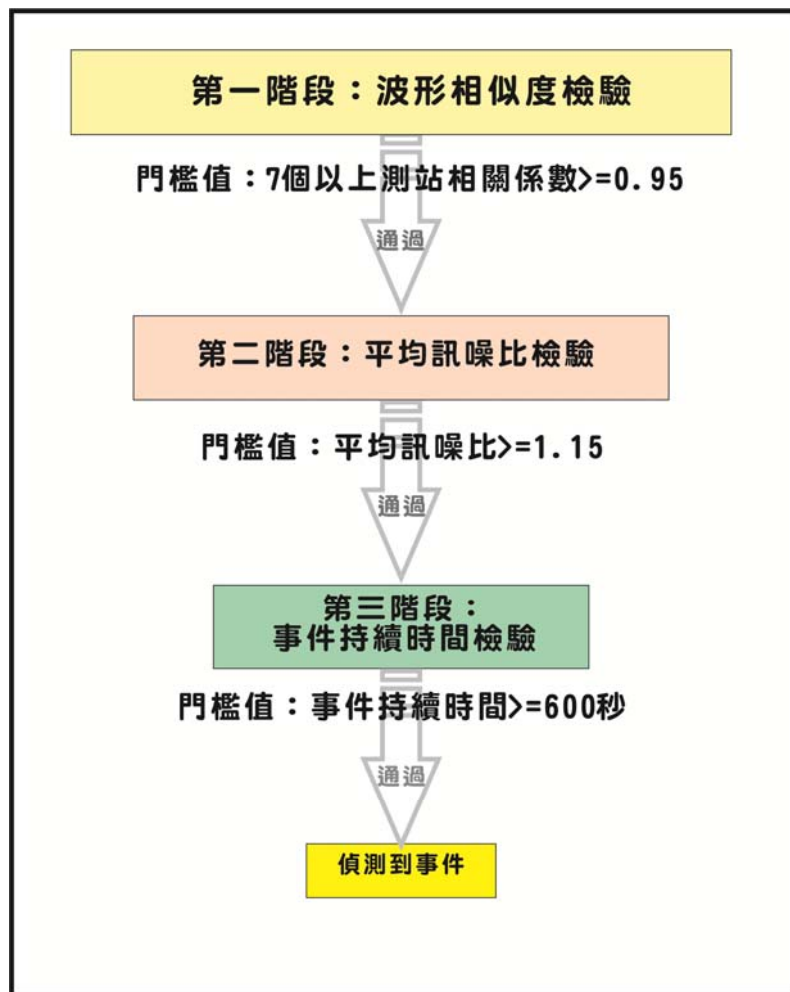


圖 5.3：自動化偵測系統流程簡圖。流程分為三個階段依序進行，通過三階段篩選的訊號即定義為自動化偵測所得的事件。

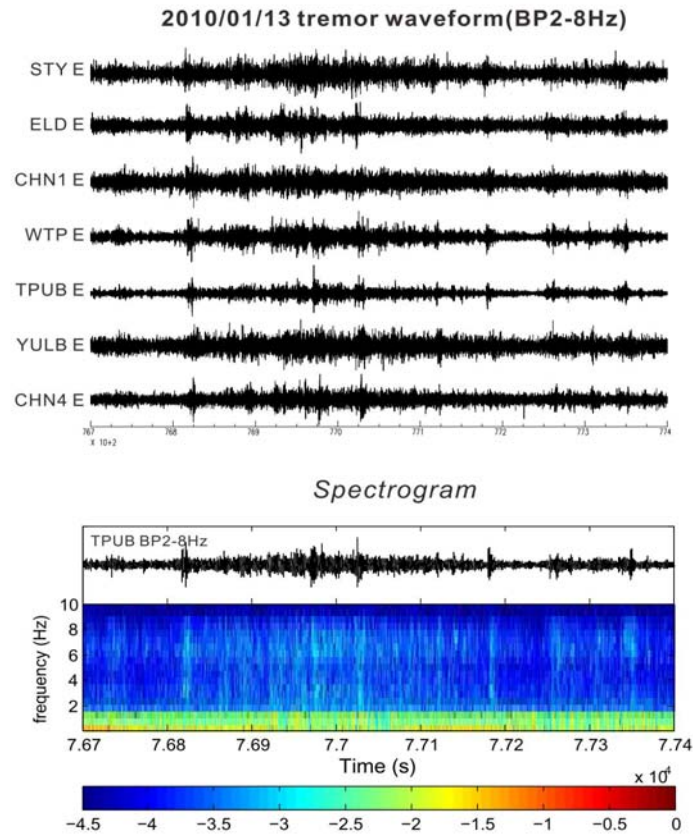


圖 5.4：2010 年 1 月 3 日長微震示意圖。上圖標示不同測站的波形，而下圖為時頻圖。

第六章、結論與建議

(一) GPS 及精密水準測量：

1. 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；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。顯示外業觀測之資料品質相當穩定可靠。
2. 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。
3. 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之記錄。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。

(二) 井下應變儀資料檢核與分析：

1. 已完成持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性的作業，以利未來時間序列分析之用。
2. 目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立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"。在台北網發現3個應變異常事件，新竹網發現13個應變異常事件，嘉義網則有15個應變異常事件，其中5次異常事件同時在新竹網及嘉義網兩測網中被觀測到。
3. 在資料經過地下水與氣壓修正後，開始編輯程式做潮汐的估計與移除，

已可有效估計以三個月資料為期的潮汐並移除之，但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，將考慮以切除較大的異常訊號後再估計潮汐，現有程式已可以容許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。

4. 建議針對幾個目前有異常運作的井下應變儀進行維護以及修正，包含以下項目：
 - (1) 瑞峰國小(LMMT)的CH2 與 CH3。
 - (2) 曾文水庫南(RST)的CH1。
 - (3) 新樂國小(CINT)的CH0。
 - (4) 梅花國小站(PFMT)的雨量計。
 - (5) 各井下應變儀中氣壓計。
5. 發現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。

(三) 斷層潛能分析模式之評估：

1. 本計畫在進行池上斷層與小崗山斷層潛勢評估時，蒐集了活動斷層幾何面及活動性之相關文獻，建立池上斷層與小崗山斷層之參數表。
2. 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%；小崗山斷層則是根據陳文山等人(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%。

(四) 整合觀測資料分析：

1. 本次期末報告共累計2009年1月至2012年11月共112個地震事件對應的(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比較。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 M6.4)、屏東霧台(2012/2/26)。規模最大的是2009/12/19 M6.9地震，發生在花蓮市地震站南偏東方21.4公里。

2. 在規模六的地震中，僅有一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，其為2009/12/19 M6.9的花蓮地震(發生在花蓮市地震站南偏東方21.4公里，表5.1中編號31)。另一起同步異常的地震是發生在台東外海2011/3/20 M5.8的地震(編號74)，規模不到六、距離觀測網亦不近，但卻對應到異常觀測。此兩筆同步異常觀測此顯示地震規模、離地震距離可能與異常記錄的空間廣度沒有絕對關係。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雷同。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。
3. 在下一階段的計畫中，建議以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物理機制：我們利用長微震的資訊點出，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個地震上，不能提供討論異常成因足夠資訊，然而長微震的存在，可提供未來物理模型所需，將在孕震帶下方的變形視作其中一個物理機制。
4. 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

- 三浦唯宣 (1933) 臺灣地誌的研究。《地學研究》，Nos.1-2，Nos 5，10 頁。(日文)
- 丹桂之助 (1939)，「臺北盆地之地質」，矢部教授還曆紀念論文集，第 1 卷，371-380 頁。
- 日本地震調查研究推進本部地震調查委員會 (2001) 長期的な地震発生確率の評価手法について。
- 日本地震調查研究推進本部地震調查委員會 (2008) 全國地震動預測地圖 2008 年版。
- 中華顧問工程司 (1992) 第二高速公路後續計畫，田寮-燕巢段初步設計階段，地質調查工作報告，中華民國交通部國道新建工程局，共 147 頁。
- 中鼎工程顧問社 (1999) 臺北都會區大眾捷運系統新莊線路廊範圍斷層調查報告，82-97 頁。
- 王執明、鄭穎敏、王源 (1978) 臺北盆地之地質及沉積物之研究。《臺灣礦業》，第 30 卷，第 4 期，78-108 頁。
- 王執明、王乾盈 (1991) 卑南文化公園基地附近地質調查。國立臺灣史前文化博物館報告，共 74 頁。
- 王昱 (2003) 桃園—新竹臺地區構造活動與地形特徵。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 104 頁。
- 內政部 (2001) 一等水準測量作業規範，內政部，台北。
- 市井雄一 (1931)，臺北圖幅說明書，臺灣總督府殖產局，第 583 號，共 29 頁。
- 石同生、盧詩丁、李元希、林偉雄、林啟文 (2003) 梅山斷層。中央地質調查所網路版活動斷層精查報告。
- 石再添、張瑞津、黃朝恩、石慶得、楊貴三、孫林耀明 (1983) 臺灣北部與東部活動斷層的地形學研究。《臺灣師範大學地理研究所地理研究報告》，第 9 期，20-72 頁。
- 石再添、楊貴三 (1985) 八卦台地的活斷層與地形面。《國立台灣師範大學地理研究所地理研究報告》，第十一期，173-186 頁。
- 石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三 (1986) 台灣活斷層的地形學研究。《國立台灣師範大學地理研究報告》，12 期，1-44。
- 石瑞銓、王乾盈、林正洪、顏宏元 (1999) 北部地區活動斷層地球物理探勘。經濟部中央地質調查所 88 年度研究報告，共 80 頁。
- 石瑞銓、王維豪、李元希 (2008) 地震地質與地變動潛勢分析-斷層帶地下構造調查研究 (2/4)。經濟部中央地質調查所報告第 97-11 號，共 127 頁。

- 吉田要 (1932) 高雄州旗山南西部油田調查報告及旗山南西部油田地質圖 (三萬分之一), 台灣總督府殖產局, 第 610 號, 1-37 頁 (日文)。
- 朱傲祖、游明聖 (1995) 花東縱谷活動斷層調查研究。行政院國家科學委員會專題研究計畫報告, NSC83-0202-M-047-001, 共 186 頁。
- 江新春 (1976) 宜蘭平原之震測。礦業技術, 第 14 卷, 第 6 期, 215-221 頁。
- 江婉綺 (2005) 竹苗地區地質構造之砂盒物理模型研究, 國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 共 104 頁。
- 吳東錦、陳于高、劉聰桂 (1992) 台南台地台南層之沈積史與新期構造研究。地質, 第 12 卷, 第 2 期, 第 167-184 頁。
- 吳相儀 (2000) 台灣地區中大型地震震源參數分析。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 何邦碩 (1974) 花蓮近海海域地球物理初步測勘。海洋彙刊, 第 12 期, 39-47 頁。
- 余水倍 (1989) 臺東縱谷地區之地殼變形研究。國立中央大學地球物理研究所博士論文, 共 117 頁。
- 李元希、謝凱旋、黃敦友、何信昌、陳華玫、張徽正 (1999), 台灣西南部前陸盆地的演化。中國地質學會八十八年年會, 第 246-248 頁。
- 李明書、劉彥求、林偉雄、林啟文 (2003) 經濟部中央地質調查所施政計畫報告—活動斷層調查報告 (觸口斷層)。經濟部中央地質調查所。
- 李錫堤 (1993a) 活斷層工程評估的新發展。地工技術, 44 期, 5-18。
- 李錫堤 (1993b) 金山—新莊斷層的活動性評估。工程地質技術應用研討會, 工業技術研究院能源與資源研究所。
- 李錫堤、謝昭輝、鄧屬予 (1994) 台灣西部活斷層之綜合研究, 行政院國家科學委員會防災科技研究報告 81-66 號。
- 李錫堤、鄭錦桐、紀立民、廖啟雯、廖卿妃 (2000) 槽溝開挖探查成果簡介。第三屆台灣活斷層調查研討會資料。
- 李瓊武、余水倍 (1987) 台灣東部地殼水平變動之研究。第六屆測量學術及運用研討會論文集, 127-134 頁
- 沈里俊 (2003) 利用 GPS 衛星測量在屏東-高雄地區地殼觀測之研究。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 114 頁。
- 沈淑敏、張瑞津、楊貴三 (2006) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置—活動構造地形判釋及資料建置分析 (2/2), 經濟部中央地質調查所報告第 93-13 號, 共 174 頁。
- 和協工程顧問公司 (1999) 山腳斷層調查工作報告, 共 44 頁。

- 林正洪、詹瑜璋、陳光榮、張道明 (2006) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫—活動斷層帶之微震研究計畫 (3/3)。經濟部中央地質調查所報告 95-8 號，共 80 頁。
- 林泓毅 (2005) 以淺層反射震測法探究梅山斷層之地下構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生、張徽正 (2000a) 台灣中部濁水溪以南地區的集集地震斷層與構造分析。*經濟部中央地質調查所特刊*, 12 號, 第 89-111 頁。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000b) 台灣活動斷層概論第二版，五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明。*經濟部中央地質調查所特刊*, 13 號。
- 林啟文、陳文山、饒瑞鈞 (2007a) 台灣活動斷層調查的近期發展。*經濟部中央地質調查所特刊*, 18 號, 第 85-110 頁。
- 林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧 (2007b) 臺灣北部的活動斷層 (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*, 第十九號, 共 118 頁。
- 林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村 (2008) 臺灣中部的活動斷層—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 21 號, 共 148 頁。
- 林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009) 台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*, 23 號, 共 178 頁。
- 林朝榮 (1957) 臺灣地形。臺灣省通志稿卷一，土地志、地理篇(第一冊)。
- 林朝榮 (1962) 花蓮地方的第四系—臺灣之第四紀研究 (三)。國家長期發展科學委員會研究報告，共 42 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，第 191-197 頁。
- 松田時彦 (1990) 最大地震規模による日本列島の地震分帯図。*地震研彙報*, 第 65 期, 第 289-319 頁。
- 康竹君、張翠玉、李建成、陳柔妃 (2008) 南沖繩海槽之最西端及梨山斷層最北端：*Western Pacific Earth Sciences*, vol. 8 蘭陽平原的構造活動特性，共 34 頁。
- 康竹君 (2007) 蘭陽平原之新期構造分析研究。國立台灣海洋大學應用地球科學研究所碩士論文。

- 康竹君、張翠玉、李建成、陳柔妃、李昭興 (2007) 梨山斷層延伸至蘭陽平原，蘭陽平原之新構造特性研究。TGA Meeting 會議摘要，龍潭。
- 姜彥麟、李建成、李通藝 (2006) 台東縱谷南段近斷層地表變形分析。中國地質學會 95 年年會暨學術研討會論文摘要，263 頁
- 胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞 (2011) 斷層活動性觀測研究第二階段：斷層監測與潛勢分析研究(3/4)。經濟部中央地質調查所報告 100-07 號，共 265 頁。
- 邱詠恬 (2008) 利用 GPS 觀測資料探討宜蘭平原之現今地殼變形，國立台灣大學理學院地質科學研究所碩士論文，至共 124 頁。
- 邱詠恬、景國恩、侯進雄、胡植慶、饒瑞鈞 (2008) 由 2002-2006 年之 GPS 觀測資料探討宜蘭平原之地殼變形，*經濟部中央地質調查所特刊*，20 號，第 111-124 頁。
- 邱朝聰 (1997) 台灣西南地區之震測研究—西南海域之大陸棚及新化斷層為例。國立臺灣海洋大學應用地球物理研究所碩士學位論文，共 47 頁。
- 徐閔儀 (2006) 台灣北部震間地殼變形：1995-2005 年 GPS 觀測。國立成功大學地球科學系碩士論文，共 114 頁。
- 徐慶雲 (1975) 台南縣坑內、龍船及高雄縣小滾水構造地質核查報告，中油內部報告。
- 徐鐵良 (1962) 臺灣海岸地形之研究。*中國地質學會會刊*，第 5 號，第 29-45 頁。
- 徐鐵良 (1984) 地質與工程。中國工程師學會，共 494 頁。
- 翁群評 (2001) 小岡山斷層及其附近構造，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 耿文溥 (1967) 台灣南部甲仙及旗山間之地質，*台灣省地質調查所彙刊*，第 19 號，1-13 頁。
- 張瑞津、石再添、沈淑敏、張政亮，1992，花東縱谷北段河階的地形學研究。*師大地理研究報告*，第十八期，第 241-292 頁。
- 張慧中 (1986) 台灣南部潮州斷層北段之新期構造研究，國立台灣大學地質學研究所碩士論文，共 67 頁。
- 張憲卿 (1990) 五萬分之一臺灣區域地質圖—白沙屯圖幅。經濟部中央地質調查所。
- 張憲卿 (2008) 五萬分之一臺灣區域地質圖，嘉義圖幅。經濟部中央地質調查所編印。

- 張徽正、林啟文、陳勉銘 (1998) 台灣活動斷層概論第一版—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*, 第十三號, 第 1-122 頁。
- 許文立、翁群屏、王乾盈 (2000) 彰化斷層是活動斷層? 第八屆台灣地區地球物理研討會論文集, 279-285 頁。
- 許京穎 (2008) 台灣潛勢地震之發生機率評估。國立中央大學地球物理研究所碩士論文, 共 133 頁。
- 許雅儒 (1998), 由 GPS 觀測資料探討宜蘭平原的伸張變形。國立中央大學地球物理研究所碩士論文, 共 110 頁。
- 許華杞 (1985) 利用三角測量成果分析台灣東部的地殼變動及地殼構造。測量工程, 第 27 卷, 第 1 期, 1-10 頁。
- 許華杞 (1987) 沖繩海槽南端與台灣宜蘭地區之地殼變動。測量工程, 第 29 卷, 第 3 期, 1-6 頁。
- 黃信樺 (2007) 台灣東北地區的地震構造: 由碰撞末期轉變為隱沒拉張之構造特性。國立台灣大學理學院地質科學研究所碩士論文, 共 110 頁。
- 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。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 132 頁。
- 黃鑑水、李錦發、劉桓吉 (1991) 臺灣北部金山斷層之地質調查與探勘研究, 國科會防災科技研究報告 79-44 號, 共 14 頁。
- 黃鑑水、劉桓吉、張憲卿 (1994) 台灣南部觸口斷層之地質調查與探勘。*經濟部中央地質調查所彙刊*, 第 9 號, 51-76 頁。
- 黃鑑水、陳勉銘 (2000) 台灣中部地區之雙冬斷層。*經濟部中央地質調查所特刊*, 12 號, 第 171-182 頁。
- 郭炫佑 (1999) 後甲里斷層及其附近構造, 國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 郭素妙、景國恩、饒瑞鈞、侯進雄 (2008) 由 1996-2006 年之 GPS 資料探討臺南地區地殼變形。*經濟部中央地質調查所特刊*, 20 號, 1-16。
- 陳于高 (1993) 晚更新世以來南台灣地區海水面變化與新構造運動研究。國立台灣大學地質學研究所博士論文, 共 158 頁。
- 陳文山、王源 (1996) 台灣東部海岸山脈地質。*經濟部中央地質調查所—台灣地質之七*, 共 101 頁。
- 陳文山、楊志成、吳樂群、楊小青、陳勇全、顏一勤、劉立豪、黃能偉、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄 (2004) 沈降環境的山麓河谷地形特性—探討台

- 北盆地、蘭陽平原與屏東平原鄰近山麓地形與構造的關係。*經濟部中央地質調查所彙刊*，第 17 期，79-106 頁。
- 陳文山、陳于高、楊小青（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置—槽溝開挖與古地震研究計畫（5/5）與總報告。經濟部中央地質調查所研究報告 95-08 號，共 133 頁。
- 陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宵、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生、盧詩丁（2008）從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義。*經濟部中央地質調查所特刊*，20 號，165-191 頁。
- 陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2008）地震地質與地變動潛勢分析計畫：斷層長期滑移速率與再現週期研究(2/4)。經濟部中央地質調查所研究報告 97-9 號，共 75 頁。
- 陳文山、游能悌、楊小青（2010）地震地質與地變動潛勢分析計畫—斷層長期滑移速率與再現週期研究（總報告）。經濟部中央地質調查所研究報告 99-9 號，共 141 頁。
- 陳文山、松多信尚、石瑞銓、楊志成、游能悌、朱曜國、陳志壕、林啟文、劉桓吉、盧詩丁、劉彥求、林燕慧、陳柏村（2010）台灣西部平原區隱伏在全新世沉積層下的新期構造—以小崗山斷層為例。*經濟部中央地質調查所特刊*，24 號，75-92 頁。
- 陳佳元（1974）由三角點檢測證實東臺灣海岸山脈向北北東移動。*臺灣省地質調查所彙刊*，24 號，119-123 頁。
- 陳柏村（2005）旗山斷層南段變形特性之研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 125 頁。
- 陳勉銘、何信昌（2000）九二一集集地震斷層與車籠埔斷層之關聯。*經濟部中央地質調查所特刊*，12 號，第 113-138 頁。
- 陳建良、林啟文、陳文山，2005，臺灣南部恆春半島地殼變形初步研究。*經濟部中央地質調查所特刊*，16 號，55-73 頁。
- 陳惠芬（1984）從三角點檢測成果見到的台灣的地盤上升。*經濟部中央地質調查所特刊*，3 號，129-140 頁。
- 陳肇夏、何信昌、謝凱旋、羅偉、林偉雄、張徽正、黃鑑水、林啟文、陳政恆、楊昭男、李元希（2000）五十萬分之一臺灣區域地質圖第二版—臺灣圖幅。經濟部中央地質調查所。
- 烏居敬造（1933），高雄州旗山油田調查報告及旗山油田地質圖（三萬分之一），台灣總督府殖產局，第 633 號，共 36 頁。

- 游明聖 (1997) 台東縱谷活動斷層研究。國立臺灣大學地質學研究所博士論文，共 141 頁。
- 彭秋紋、石瑞銓、張徽正、林啟文、陳文山、石同生、盧詩丁 (2004) 梅山斷層與其淺部剪切帶構造特徵。*經濟部中央地質調查所特刊*, 15 號, 85-98。
- 景國恩、饒瑞鈞、李建成、胡植慶、侯進雄 (2008), 由 1995-2005 年之 GPS 觀測資料探討台灣西南部之地殼變形,*經濟部中央地質調查所特刊*, 20 號, 17-31。
- 楊佳勳、景國恩、饒瑞鈞、陳江鑫、侯進雄, 2008, 由 1995 至 2006 年之 GPS 觀測資料探討潮州斷層與恆春斷層之活動行為,*經濟部中央地質調查所特刊*, 20 號, 81-96 頁。
- 楊耿明、洪日豪、吳榮章、黃旭燦、丁信修、徐祥宏 (2000) 台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(1/5)—西南地區(觸口斷層)。經濟部中央地質調查所, 共 93 頁。
- 楊耿明 (2002) 台灣西部平原區和麓山帶的構造地質。中油探採研究所。
- 楊耿明、徐祥宏、黃旭燦、林國安、吳明賢、丁信修、吳榮章、梅文威 (2005) 臺灣西北部麓山帶的橫移構造特性。中國地質學會 94 年年會暨學術研討會論文集, 第 188 頁。
- 楊貴三 (1986) 臺灣活斷層的地形學研究-特論活斷層與地形面的關係。私立中國文化大學地學研究所博士論文。
- 楊貴三、馮鈺棋 (2005) 嘉義地區活斷層之地形學研究。*國立臺灣師範大學地理研究*, 42 卷, 1-21。
- 楊潔豪、陳平護、陳洲生 (1989) 併合暫態法與電阻法探查金山斷層之研究, 國科會防災科技研究報告 77-64 號, 共 71 頁。
- 楊潔豪、陳洲生、陳平護 (1990) 併合電探法研究金山斷層, 國科會防災科技研究報告 78-67 號, 共 173 頁。
- 經濟部中央地質調查所 (2009) 十、小崗山斷層, *經濟部中央地質調查所特刊*, 第 23 號, 編號 100-10。
- 葉永田、鄭世楠 (1998) 活動斷層地球物理探勘計畫 87 年度報告—由歷史地震資料探討 1906 年梅山地震斷層的分布。經濟部中央地質調查所。
- 董倫道、李亦亨、陳文山 (2005) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫—地球物理探勘計畫 (4/5)。經濟部中央地質調查所報告 94-9 號, 共 187 頁。
- 董德輝 (1987) 台灣西南部梅山活動斷層的活動週期及機制。國立台灣大學地質學研究所碩士論文。

- 齊士崢、宋國城 (2000) 臺灣界線斷層帶上沖積扇階地地形發育的複雜性。 **環境與世界**, 4 期, 77-92。
- 詹瑜璋、陳于高、史天元 (2003) 利用空載雷射掃瞄資料分析新城斷層系統：清晰之地形與其代表之構造作用。中國地質學會 92 年年會暨學術研討會論文集, 第 133 頁。
- 詹新甫 (1974) 恆春半島之地層與構造並申論中新世傾瀉層。 **臺灣省地質調查所彙刊**, 24 號, 99-108 頁。
- 鄭文弘 (1996) 台灣東部海岸山脈北段地質構造特性之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 共 186 頁。
- 鄭世楠 (1999) 1946 年 12 月 5 日新化地震與新化地震斷層的研究。1999 年中國地球物理學會成果發表會論文集。
- 鄭宏祺 (2000) 台灣西南部台南至屏東地區地質構造之研究, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 共 92 頁。
- 鄭錦桐 (2002) 台灣地區地震危害度的不確定性分析與參數拆解。國立中央大學地球物理研究所博士論文, 227 頁。
- 劉力豪 (2004) 竹東丘陵活動斷層之古地震及相關活動性研究。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 90 頁。
- 劉桓吉 (1988) 五萬分之一臺灣區域地質圖—新竹圖幅。經濟部中央地質調查所。
- 蔡義本 (1976) 宜蘭地區之地震研究。 **礦業技術**, 第 14 卷, 5 期, 154-161 頁。
- 賴文基 (1995) 台灣東部海岸山脈中段地質構造特性之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 共 122 頁。
- 盧詩丁、劉彥求、衣德成、鍾令和、劉桓吉 (2004) 活動斷層調查報告—山腳斷層, 經濟部中央地質調查所施政計畫報告。
- 鍾令和 (2003) 1951 年池上-玉里地震地表破裂與其所指示之新構造意義, 國立台灣大學地質科學研究所碩士論文, 138 頁。
- 鍾令和、石同生、劉彥求、許文靈、謝中敏、吳文綜 (2004a) 米崙斷層調查報告。經濟部中央地質調查所, 未出版報告。
- 謝昭輝、謝盛雄、戴榮興 (2000) 山腳斷層震測調查研究。中國地質學會 89 年年會論文集, 147-150 頁。
- 饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文 (2006) 地震地質調查及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 95-10 號, 共 241 頁。

- 饒瑞鈞、李元希、胡植慶 (2010) 地震地質與地變動潛勢分析計畫—地變動監測分析總報告。經濟部中央地質調查所報告，99-10 總號。
- Agnew, D. (1992) The time domain behavior of power law noises, **Geophys. Res. Lett.**, 19, 333-336.
- Altamimi, Z., P. Sillard and C. Boucher (2002) ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications, **J. Geophys. Res.**, 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561.
- Angelier, J. (1986) Preface-Geodynamic of the Eurasia-Philippine Sea plate boundary, **Tectonophysics**, vol. 125, IX-X.
- Angelier, J., F. Bergerat, H. T. Chu and T. Q. Lee (1990) Tectonic analysis and the evolution of a curved collision belt: The Hsuehshan Range, northern Taiwan, **Tectonophysics**, vol. 183, 77-96.
- Angelier, J., Chu, H.-T., Lee, J.-C. (1997) Shear concentration in a collision zone: kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan. **Tectonophysics**, 274, 117-144.
- Angelier, J., H. T. Chu, J. C. Lee, and J. C. Hu (2000) Active faulting and earthquake hazard: the case study of the Chihshang Fault, Taiwan, **J. Geodynamics**, 29, 151-185.
- Bawden, G. W., W. Thatcher, R. S. Stein, K. W. Hudnut, and G. Peltzer (2001) Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects, **Nature**, 412, 812-815.
- Biq, C. C. (1984) Present-day manner of movement of the Coastal Range, eastern Taiwan, as reflected by triangulation changes, **Mem. Geol. Soc. China**, 6, 35-40.
- Bomford, G. (1985) *Geodesy*, 4th Ed., Oxford University Press.
- Bonilla, M. G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan. **U.S. Geological Survey Open-File Report**, no. 75-41, 58pp.
- Bonilla, M. G. (1977) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan, **Mem. Geol. Soc. China**, vol. 2, 43-55.
- Chan, Y. C., Y. G. Chen, T. Y. Shih, and C. Huang (2007) Characterizing the Hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: Detailed geomorphic features and their structural implications, **J. Asian**

Earth Sci., vol. 31, no. 3, 303-316.

- Chen, J. S. (1976) The analysis and design of refraction and reflection seismic survey of the Taitung area, **Petrol. Geol. Taiwan**, no.13, 225-246.
- Chen, J. S. (1978) A comparative study of the refraction and reflection seismic data obtained on the Changhua Plain to the Peikang Shelf, Taiwan. **Petrol. Geol. Taiwan**, no.15, 199-217.
- Chen, W. S., M. T. Huang, and T. K. Liu (1991) Neotectonic significance of the Chimei fault in the coastal range, eastern Taiwan, **Proc. Geol. Soc. China**, 34, 43-56.
- Chen, W.S., Yen, I.C., Keegan P. Fengler, Charles M. Rubin, Yang, C.C., Yang, H.C., Chang, H.C., Lin, C.W., Lin, W.H., Liu, Y.C., and Lin, Y.H. (2007) Late Holocene Paleoseismicity of the Southern Part of the Chelungpu Fault in Central Taiwan: Evidence from the Chushan Excavation Site. **Bull. Seis. Soc. Am.**, 97(1B), 1-13.
- Chen, W.S., Yen, I.C., Fengler, K.P., Rubin, C.M., Yang, C.C., Yang, H.C., Chang, H.C., Lin, C.W., Lin, W.H., Liu, Y.C., Lin, Y.H. (2007) Late Holocene paleoearthquake activity in the middle part of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan, **Earth Planet. Lett.**, 264(3/4), 420-437.
- Chen, K.-H., M. Yang, Y.-T. Huang, K.-E. Ching, and R.-J. Rau (2011) Vertical displacement rate field of Taiwan from geodetic levelling data 2000-2008, **Survey Review**, 43, 321,296-302, doi:10.1179/003962611X13055561708380.
- Chen, K. H., Toda, S., and Rau, R. J. (2008), A leaping, triggered sequence along a segmented fault: the 1951 Hualien – Taitung earthquake sequence in eastern Taiwan, **J. Geophys. Res.**, 113, B02304, doi:10.1029/2007JB005048.
- Chen, Y. K., Chen, W. S., Lee, J. C., Lee, Y. H., Lee, C. T., Chang, H. C. and Lo, C. H. (2001) Surface rupture of 1999 Chi-Chi earthquake yields insights on active tectonics of Central Taiwan, **Bull. Seis. Soc. Am.**,91, 977-985.
- Chen, Y.G., Chen, Y.W., Chen, W.S., Zhang, J.F., Zhao, H., Zhou, L.P., Li, S.H. (2003) Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating, **Quat. Sci. Rev.** 22(10-13), 1213-1221.

- Cheng, S. N. and Y. T. Yeh (1989) Catalog of the earthquakes in Taiwan from 1604 to 1988. Inst. Earth Sci., Academia Sinica, IES-R-661, 255pp.
- Cheng, S.N., Y.T. Yeh, and M.S. Yu (1996) The 1951 Taitung earthquake in Taiwan. **Jour. Geol. Soc. China**, 39(3), 267-285.
- Cheng, C. T., Chiou, S. J., Lee, C. T., Tsai, Y.B. (2007) Study on probabilistic seismic hazard maps of Taiwan after Chi-Chi earthquake, **J. GeoEngineering**, 2(1), 19-28.
- Cheng, L.W., J.C. Lee, J.C. Hu, and H.Y. Chen (2009) Coseismic and postseismic slip distribution of the 2003 Mw=6.5 Chengkung Earthquake in eastern Taiwan: elastic modeling from inversion of GPS data. **Tectonophysics**, 466, 335-343.
- Chiang, S. C. (1971) Seismic study of Chaochou structure, Pingtung, Taiwan, **Petrol. Geol. Taiwan**, 8, 281-294.
- Ching, K.-E., R.-J. Rau, J.-C. Lee, and J.-C. Hu (2007) Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-2005, **Earth and Planetary Science Letters**, 262, 601-619.
- Ching, K. E., R. J. Rau, K. M. Johnson, J. C. Lee and J. C. Hu (2011) Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995–2005, **J. Geophys. Res.**, vol. 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.
- Ching, K.-E., M.-L. Hsieh, K. M. Johnson, K.-H. Chen, R.-J. Rau, and M. Yang (2011) Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, **Journal of Geophysical Research**, 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242.
- Chiu, H. T. (1970) Structural features of the area between Hsinchu and Taoyuan, northern Taiwan, **Proc. Geol. Soc. China**, vol. 13, 63-75.
- Chu, C. J., C. T. Lee and L. S. Teng (1998) Structural features and Quaternary tectonics of the Chinshan Fault, northern Taiwan, **J. Geo. Soc. China**, vol. 41, 25-42.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl (Eds.) (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Berne, 612 pp.

- Deffontaines, B., O. Lacombe, J. Angelier, H.-T. Chu, F. Mouthereau, C.-T. Lee, J. Deramond, J.-F. Lee, M.-S. Yu, and P.-M. Liew, 1997, Quaternary transfer faulting in Taiwan foothills: evidence from a multi-source approach. *Tectonophysics*, 274, 1-3, 61-82.
- Delcaillau, B., Deffontaines, B., Floissac, L., Angelier, J., Deramond, J., Souquet, P., Chu, H. T., Lee, J. F. (1998) Morphotectonic evidence from lateral propagation of an active frontal fold; Pakuashan anticline, foothills of Taiwan. *Geomorphology*, 24, 263-290.
- Dong, D., P. Fang, Y. Bock, M. K. Cheng, and S. Miyazaki (2002) Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 2075.
- Freeze, R., and J. Cherry (1979) Groundwater, Prentice-Hall, Old Tappan, N. J.
- Gladwin M.T. (1977) Simultaneous monitoring of stress and strain in massive rock, *Pageoph*, 115, 267-274.
- Gladwin, M.T. (1982) Ultrasonic stress monitoring in underground mining, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 19, 221-228.
- Gladwin, M.T. (1984) High precision multi component borehole deformation monitoring, *Rev. Sci. Instrum.*, 55, 2011-2016.
- Gladwin, M. T. and R. Hart (1985). "Design Parameters for Borehole Strain Instrumentation." *Pure and Applied Geophysics* 123(1): 59-80.
- Gong, S. Y., T. Y. Lee, J. C. Wu, S. W. Wang, and K. M. Yang (1996) Possible links between the development of Plio-Pleistocene coral reef limestones and thrust migration in southwestern Taiwan, *Journal of Geological Society of China*, 39, 151-160.
- Hart, R. H. G., M. T. Gladwin, et al. (1996). "Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity." *J. Geophys. Res.*, 101(B11): 25553-25571.
- Ho, C. S. (1988) An Introduction to the Geology of Taiwan, Explanatory Text of the Geological Map of Taiwan, 2nd ed., Cent. Geol. Surv., Min. of Econ. Taipei, Taiwan, 192 pp.
- Hoffmann, J., H. A. Zebker, D. L. Galloway, and F. Amelung (2001) Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by

- synthetic aperture radar interferometry, *Water Resour. Res.*, 37, 1551–1566.
- Hsieh, M. L., P. M. Liew, and M. Y. Hsu (2004) Holocene tectonic uplift on the Hua-tung coast, eastern Taiwan, *Quart. Inter.*, 115, 47-70.
- Hsieh, S. H. (1970) Geology and gravity anomalies of the Pingtung Plain, Taiwan, *Proc. Geol. Soc. China*, 13, 76-89
- Hsieh, S. H. (1972) Subsurface geology and gravity anomalies of the Tainan and Chungchou structure of the coastal plain of southwestern Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*, 10, 323-338.
- Hsu, T. L. (1956) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan, *Bull. Geol. Surv., Taiwan*, 39-64.
- Hsu, T. L. (1962) Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan, *Mem. Geol. Soc. China*, 95-102.
- Hsu, T. L. (1976) Neotectonics of the longitudinal valley, eastern Taiwan, *Bull. Geol. Surv. Taiwan*, no.25, 53-62.
- Hsu, T. L., and H. C. Chang (1979) Quaternary faulting in Taiwan, *Mem. Geol. Soc. China*, 3, 155-165.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, and H. Y. Chen (2009) Coseismic and postseismic deformation associated with the 2003 Chengkung, Taiwan earthquake. *Geophys. J. Int.* 176, 420-430.
- Hu, J. C., and J. Angelier (1996) Modeling of Stress-deformation Relationships in a Collision Belt: Taiwan, *TAO*, vol. 7, no.4, 447-465.
- Hu, J. C., J. Angelier, J. C. Lee, H. T. Chu, and D. Byrne (1996) Kinematics of convergence, deformation and stress distribution in the Taiwan collision area: 2-D finite-element numerical modeling, *Tectonophysics*, vol. 255, 243-268.
- Hu, J.C., Angelier, J., Lee, C.T., Chu, H.T. and Byrne, B. (1997) Kinematics of convergence, deformation and stress distribution in the Taiwan collision area: A 2-D finite element numerical modeling. *Tectonophysics*, 255: 243-268.
- Hu, J. C., J. Angelier, and S. B. Yu (1997) An interpretation of the active deformation of southern Taiwan based on numerical simulation and GPS studies, *Tectonophysics*, 274, 145-170.

- Hu, J. C., S. B. Yu, J. Angelier, and H. T. Chu (2001) Active deformation of Taiwan from GPS measurements and numerical simulations, **J. Geophys. Res.**, 106, 2265-2280.
- Hu, J.-C., S.-B. Yu, H.-T. Chu, and J. Angelier (2002) Transition tectonics of northern Taiwan induced by convergence and trench retreat, in Byrne, T. B., and Liu, C.-S., eds., *Geology and Geophysics of an Arc-Continent collision, Taiwan*, **Geol. Soc. Am. Special Papers**, 358, 149-162.
- Hu, J.-C., C.-S. Hou, L.-C. Shen, Y.-C. Chan, R.-F. Chen, C. Huang, R.-J. Rau, K. H.-H. Chen, C.-W. Lin, M.-H. Huang, and P.-F. Nien (2007) Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pintung area of southwestern Taiwan. **Journal of Asian Earth Sciences**, 31, 287-302, doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.020.
- Huang, C. S. (1984) Quarternary fault in the coastal area between Hsinchu and Chunan, northern Taiwan, **Special Publication of the Central Geological Survey**, vol. 3, 103-126.
- Huang, C. Y., P. B. Yuan, and S. J. Tsao (2006) Temporal and spatial records of active arc-continent collision in Taiwan: A synthesis, **GSA Bulletin**, vol. 118, 274-288.
- Huang, S. T., R. C. Chen, and W. R. Chi (1993) Inversion tectonics and evolution of the northern Taihsi basin, Taiwan, **Petrol. Geol. Taiwan**, vol. 28, 15-46.
- Hugentobler (2001) U., S. Schaer, and P. Fridez, (Eds.), *Bernese GPS Software Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Berne, 515 pp.
- Hung, J. H. and D. V. Wiltschko (1993) Structure and kinematic of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan, **Petrol. Geol. Taiwan**, vol. 28, 59-96.
- Kanamori, H. (1977) The energy release in great earthquakes, **J. Geophys. Res.**, 82, 2981-2987.
- Kao, H., and Chen, W.P., (2000) The Chi-Chi Earthquake sequence: Active, Out-of-Sequence Thrust Faulting in Taiwan, **Sciences**, 288, 2, 346-2,349.
- Ku, C. C. (1963) Photogeologic study of terraces in northwestern Taiwan, **Proc. Geol. Soc. China**, vol. 6, 51-60.

- Kuo Chen Hao, Wu Yih-Min, Chen Yue-Gau, Chen Rong-Yuh (2007) 2003 Mw6.8 Chengkung earthquake and its related seismogenic structures. **J. Asian Earth Sci.** no. 31 pp. 332–339.
- Keefer, D. L., and Bodily, S. E. (1983) Three-point approximations for continuous random variables: **Management Science**, 29, 595-609.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, J. Angelier, and B. Deffontaines (2001) Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan. **Tectonophysics**, 333, 323-345.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, J. Angelier, H. T. Chu, and J. C. Lee (2003) Frontal belt curvature and oblique ramp development at an obliquely collided irregular margin: Geometry and kinematics of the NW Taiwan fold-thrust belt, **Tectonics**, vol. 22, no.3, 9-1-9-16.
- Langbein, J. (2008) Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada, **J. Geophys. Res.**, 113(B5), B05405.
- Lee, T. Q., J. Angelier, H. T. Chu, and F. Bergerat (1991) Rotations in the northeastern collision belt of Taiwan: preliminary results from paleomagnetism, **Tectonophysics**, 199, 109-120.
- Lee, Y.H., Chen, G.T., Rau, R.J., and Ching, K.E. (2008) Coseismic displacement and tectonic implication of 1951 Longitudinal Valley earthquake sequence, eastern Taiwan, **J. Geophysical Res.-Solid Earth**, 113, 13.
- Lee, Y.-H. and Y.-X. Shih (2011) Coseismic Displacement, Bilateral Rupture, and Structural Characteristics at the Southern End of the 1999 Chi-Chi Earthquake rupture, Central Taiwan. **J. Geophys. Res.**, 116, B07402.
- Lee, J.-C., Chu, H.-T., Angelier, J., Hu, J.-C., Chen, H.-Y. and Yu, S.-B. (2006) Quantitative analysis of surface coseismic faulting and postseismic creep accompanying the 2003, $M_W=6.5$, Chengkung earthquake in eastern Taiwan. **J. Geophys. Res.**, 111, B02405, doi:10.1029/2005JB003612.
- Liu, C. C, 1995, The Ilan plain and the southwestward extending Okinawa-trough, **J. Geol. Soc. China**, vol. 38, 229-242.
- Lu, C. Y., and J. Malavieille (1994) Oblique convergence, indentation and rotation tectonics in the Taiwan Mountain Belt: Insights from experimental modeling. **Earth Planet. Sci. Lett.**, 121, 477-494.
- Lu, C. Y., J. Angelier, H. T. Chu, and J. C. Lee (1995) Contraction, transcurrent,

- rotation and extensional tectonics: Examples from Northern Taiwan, *Tectonophysics*, 125, p.129-146.
- Lu, C. Y., K. J. Chang, F. S. Jeng, and W. T. Jian (1998) Impact of basement high on the structure and kinematics of the western Taiwan thrust wedge: insights from sandbox models. *TAO*, 9, 533-550.
- Lue, Y. T (1989) The paleomagnetic study in the fold-thrust belt, Northern Taiwan and its tectonic implication, Doctor Dissertation, National Taiwan University.
- Mao, A., C. G. A. Harrison, and T. H. Dixon (1999) Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.*, 104, 2797-2816.
- Mark D. Petersen, Arthur D. Frankel, Stephen C. Harmsen, Charles S. Mueller, Kathleen M. Haller, Russell L. Wheeler, Robert L. Wesson, Yuehua Zeng, Oliver S. Boyd, David M. Perkins, Nicolas Luco, Edward H. Field, Chris J. Wills, and Kenneth S. Rukstales (2008) Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. *USGS Open-File Report* 2008–1128.
- McCalpin, J. P. (1996) Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research. McCalpin ed. "Paleoseismology", Academic Press, p.439-493.
- Mouthereau, F., B. Deffontaines, O. Lacombe, and J. Angelier (2002) Variations along the strike of the Taiwan thrust belt: Basement control on structural style, wedge geometry, and kinematics, *Geology and Geophysics of an Arc-Continent collision, Taiwan, Republic of China: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 358*, p. 35–58.
- Mouthereau, F., and Petit, C., (2003) Rheology and strength of the Eurasian continental lithosphere in the foreland of the Taiwan collision belt : constraints from seismicity, flexure and structural styles: *J. of Geophys. Res.*, v. 108, p. 2512.
- Namson, J. (1981) Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan: (I) southern part, *Petrol. Geol. Taiwan*, vol. 18, 31-51.
- Namson, J. (1983) Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan: (II) central part, *Petrol. Geol. Taiwan*, vol. 19, 51-76.
- Namson, J. (1984) Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area,

- Taiwan: (III) northern part, *Petrol. Geol. Taiwan*, vol. 20, 35-52.
- Nikolaidis, R. (2002) Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, Ph.D. thesis, Univ. of Calif., San Diego.
- Okada, Yoshimitsu (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- Omori, F. (1907a) Earthquake of the Chiayi area, Taiwan, 1906, *Introduction of Earthquake*, 103-147. (in Japanese)
- Omori, F. (1907b) Preliminary note of the Formosa earthquake of March 17, 1906, *Bull. Imp. Earthquake Investigation Committee*, 1, (2), 53-69.
- Ratschbacher, L., W. Frisch, H. G. Linzer, and O. Merle (1991) Lateral extrusion in the Eastern Alps, 2. Structural analysis, *Tectonics*, 10, 257-271.
- Rau, R.J., K.-E. Ching, J.-C. Hu, and J.-C. Lee (2008) Crustal deformation and block kinematics in transition from collision to subduction: GPS measurements in northern Taiwan, 1995-2005, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2007JB005414.
- Roeloffs, E. (2010). "Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters: Roles of vertical and shear coupling." *J. Geophys. Res.*, 115: 25.
- Sun, S. C. (1964) Photogeologic study of the Tainan-Kaohsiung coastal plain area, Taiwan., *Petroleum Geology of Taiwan*, 3, 39-51.
- Sun, S. C. (1970) Photogeologic study of the Tainan-Hsinying Coastal plain, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, 7, 133-144.
- Sun, S. C. (1971) Photogeologic study of the Hsinying-Chiayi coastal plain. *Petroleum Geology of Taiwan*, 8, 65-76.
- Suppe, J. (1980) A retrodeformable cross section of northern Taiwan, *Proc. Geol. Soc. China*, vol. 23, 46-55.
- Suppe, J. (1984) Seismic interpretation of the compressively reactivated normal fault near Hsinchu, western Taiwan, *Petr. Geol. Taiwan*, vol. 20, 85-96.
- Tabei, T. and W. L. Amin (2002) Common-mode errors in the GPS coordinates time series: Application of spatial filtering technique, *J. Geod. Soc. Japan*, 48, 229-241.

- Tang, C. H. (1963) Contemporaneous deformation in the Pleitoncene Yangmei Formation of the Hukou area, Hsinchu, **Proc. Geol. Soc. China**, vol. 6, 75-79.
- Tang, C. H. (1964) Sunsurface geology and oil possibilities of Taoyuan ditrict, **Petrol. Geol. Taiwan**, vol. 3, 53-73.
- Tapponnier, P., G. Peltzer, A. Y. Le Dain, R. Armijo, and P. Cobbold (1983) Propagating extrusion tectonics in Asia; new insights from simple experiments with plasticine, **Geology**, 10, 611-616.
- Teng, L. (1990) Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, **Tectonophysics**, 183, 57-76.
- Terzaghi, K. (1925) Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Deuticke, Vienna.
- Todd, D. K. (1980) Groundwater Hydrology, 2nd ed., 535 pp., John Wiley, New York.
- Wang, C.Y., G. P. Chen and D. T. Jong (1994) The detection of active faults on Taiwan using shallow reflection seismic, **TAO**, 5, (2), 277-293.
- Wang, S. (1976) ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwesten Taiwan, **Petrol. Geol. Taiwan**, 13, 37-57.
- Wang, C.Y., C.H. Chang, and H.Y. Yen (2000) An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the thin-skinned thrust model. **TAO**, 11, 609-630
- Wang, C.Y., C. L. Li, F. C. Su, M. T. Leu, M. S. Wu, S.H. Lai, and C. C. Chern (2002), Structural mapping of the 1999 Chi-Chi earthquake fault, Taiwan, by seismic reflection methods, **Terr. Atmos. Ocean. Sci.**, 13, 211–226.
- Wallace, R.E. (1970) Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault, **Geol. Soc. Am. Bull.**, 81, 2875-2889.
- Wdowinski, S., Y. Bock, J. Zhang, P. Fang, and J. Genrich (1997) Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, **J. Geophys. Res.**, 102(B8), 18057-18070.
- Wells, D. L. and K .J. Coppersmith (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 84,

974-1002.

- Williams, S. D. P., Y. Bock, P. Fang, P. Jamason, R. M. Nikolaidis, L. Prawirodirdjo, M. Miller, and D. J. Johnson (2004) Error analysis of continuous GPS position time series, *J. Geophys. Res.*, 109(B3), B03412.
- Working Group On California Earthquake Probabilities (2003) Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002-2031. USGS Open-File Report 03-214.
- Working Group On California Earthquake Probabilities 2007 (2008) The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2. USGS Open-File Report 07-1437.
- Wu, Y. M. et al., 2006. Coseismic versus interseismic ground deformations, fault rupture inversion and segmentation revealed by 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake in eastern Taiwan, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2005GL024711.
- Yang, K. M., J. C. Wu, J. S. Wickham, H. H. Ting, J. B. Wang. and W. R. Chi (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural evolution and evolution in Foothills Belt, Northwestern Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*, vol. 30, 111-150.
- Yang, M., K.-H. Chen, and S.-W. Shiao (2003) A new height reference network in Taiwan, *Survey Review*, 37, 260-268.
- Yang, K. M., S. T. Huang, J. C. Wu, H. H. Ting, and W. W. Mei (2006) Review and new insights on foreland tectonics in western Taiwan, *Int. Geol. Rev.*, vol. 48, no. 10, 910-941.
- Yang, K.M., Huang S.T., Wu J.C., Ting H.H., Mei W.W., Lee M., Hsu H.H., Lee C.J. (2007) 3D Geometry of the Chelungpu Thrust System in Central Taiwan : Its Implications for Active Tectonics. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18, (2), 143-181.
- Yen, Y. T. and Ma, K. F. (2011) Source-Scaling Relationship for M 4.6–8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(2), 464–481.
- York, J.E. (1976) Quaternary faulting in eastern Taiwan. *Bull. Geol. Surv. Taiwan*, no.25, 63-72.

- Youngs, R.R., and Coppersmith, K.J. (1985) Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, ***Bull. Seism. Soc. Am.***, 75, 939-964.
- Yu, S. B., and C. Lee (1986) Geodetic measurement of horizontal crustal deformation in eastern Taiwan, ***Tectonophysics***, 125, 73-85.
- Yu, S. B. and H. Y. Chen (1994) Global positioning system measurement of crustal deformation in the Taiwan arc-continent collision zone. ***Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences***, 5, 477-498.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. ***Tectonophysics***, 274, 41-59.
- Yu, S. B., and L. C. Kuo (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, ***Tectonophysics***, 333, 199-217.
- Zhang, Y. Q., H. L. Chen, B. B. Chen, N. Jiang, and K. C. Lei (2009) Seasonal displacements in upper-middle alluvial fan of Chaobai River, Beijing, China, observed by the permanent scatterers technique, Urban Remote Sensing Event, 2009 Joint, 20-22 May 2009.

2012/04/10 專家諮詢會議(一)

檔 號：
保存年限：

國立臺灣大學地質科學系 開會通知單

受文者：本系胡教授植慶

發文日期：中華民國 101 年 3 月 27 日

發文字號：101 質字第 006 號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：普通

附件：

開會事由：召開中央地質調查所委託(本系胡植慶教授及國立成功大學辦理建教合作)研究計畫「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」之斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(一)

開會時間：101 年 4 月 10 日(星期二)上午 10 時

開會地點：經濟部中央地質調查所 2 樓第 2 會議室

主持人：胡教授植慶

聯絡人及電話：李秀芳 (02)3366-2943#202

出席者：本系陳教授文山、本系徐助理教授濤德、國立中央大學應用地質研究所李教授錫堤、國立中央大學地球科學系暨地球物理研究所溫教授國樑、國家災害防救科技中心柯組長孝勳、嘉南藥理科技大學應用空間資訊系葉教授永田

列席者：國立中正大學地球與環境科學系李副教授元希、劉博士啟清、中興工程顧問社大地工程研究中心鄭博士錦桐、經濟部中央地質調查所構造與地震地質組

副本：本系胡教授植慶

備註：請出席委員攜帶附件資料與會

系主任

陳于高

101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」之斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(一)

議 程

開會時間：101 年 4 月 10 日(星期二)上午 10 時

開會地點：經濟部中央地質調查所 2 樓第 2 會議室

| 時 間 | 議 程 |
|-------------|--------------------|
| 10:00-10:05 | 一、主席致詞 |
| 10:05-10:35 | 二、主辦單位簡報(時間 30 分鐘) |
| 10:35-11:35 | 三、綜合討論(時間由主席視狀況裁定) |
| 11:35-11:45 | 四、會議結論 |
| 11:45 | 五、散會 |

會議名稱：101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(一)

會議出席人員簽名單
主辦單位：國立臺灣大學 地質科學系

| | | | |
|--------------|-------------------------|-----|---------|
| 時 間 | 101 年 4 月 10 日 10 時 0 分 | 地點 | 中央地質調查所 |
| 主持人 | 胡植慶 教授 | 記錄 | 李秀芳 |
| 出席者(依姓名筆畫排序) | 簽 名 | | |
| 李錫堤委員 | | | |
| 柯孝勳委員 | 柯孝勳 | | |
| 徐浩德委員 | 徐浩德 | | |
| 陳文山委員 | 陳文山 | | |
| 溫國樑委員 | | | |
| 葉永田委員 | 葉永田 | | |
| 列席者簽名 | | | |
| 張干利 | 胡植慶 | 謝豐旋 | |
| 鄭錦桐 | 饒瑞鈞 | 朱傲祖 | |
| 李錫勳 | 劉洛清 | 賴志華 | |
| 李錫勳 | 陳建良 | 陳致言 | |
| 林燕慧 | 盧詩丁 | 李元希 | |
| 李秀芳 | | | |

檔 號：
保存年限：

國立臺灣大學地質科學系 函

地址：10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號
聯 絡 人：李秀芳
聯絡電話：3366-4956#202
電子郵件：hflee@ntu.edu.tw
傳 真：02-23644625

受文者：本系胡教授植慶

發文日期：中華民國 101 年 4 月 17 日
發文字號：101 質字第 008 號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

主旨：檢送召開中央地質調查所委託研究計畫「斷層活動性觀測
研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動
潛勢分析專家諮詢會議(一)之會議記錄 1 份，請 查照。

正本：本系陳教授文山、本系徐助理教授濤德、國立中央大學應用地質研究所李教授
錫堤、國立中央大學地球科學學系暨地球物理研究所溫教授國樑、國家災害防
救科技中心柯組長孝勳、國立成功大學大地資源研究中心葉教授永田
副本：本系胡教授植慶、國立中正大學地球與環境科學系李副教授元希、劉博士啟
清、國立成功大學地球科學系饒副教授瑞鈞、中興工程顧問社大地工程研究中心
鄭博士錦桐、國立中央大學地球科學系張助理教授午龍、經濟部中央地質調查
所構造與地震地質組

系主任

陈于高

經濟部中央地質調查所 101 年度「斷層活動性觀測研究第 2 階段—斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(一)會議紀錄

開會時間：民國 101 年 4 月 10 日上午 10 時 00 分

開會地點：中央地質調查所第 2 會議室。

主持人：胡植慶教授

記錄：李秀芳

出席人員：李錫堤委員（請假）、柯孝勳委員、徐濬德委員、陳文山委員、溫國樑委員（請假）、葉永田委員、鄭錦桐博士、饒瑞鈞副教授、劉啟清博士、李元希副教授、張午龍助理教授、李易叡、彭葦、地質調查所謝凱旋、盧詩丁、賴慈華、朱倣祖、陳建良、高銘健、陳致言、林燕慧。

一、主席致詞：(略)

二、簡報及討論：(略)

三、委員意見及建議事項：

(一) 邏輯樹：

1. 採用邏輯樹進行活動斷層之不確定分析，其精神必須廣納各學術研究之見解，非獨採地調所版本。
2. 車籠埔斷層的研究已非常成熟，邏輯樹相對於山腳斷層應可以更為收斂。
3. 山腳斷層在面積的節點上應再細分。
4. 權重的決定應該詳細說明原因。

(二) 斷層分段：

1. 車籠埔斷層的分段由於許多文獻版本不一樣，應作權重的分配。
2. 斷層的分段，除了地質的資料之外，也應該考慮地震的資料。
3. 由槽溝的資料可以得知，車籠埔斷層的石岡段破裂權重應該降低。
4. 山腳斷層之分段界線可由大屯火山之火山岩體做為一個界線。

(三) 傾角與破裂深度：

1. 臺灣地區的脆性—塑性轉換帶深度非定值，可以利用區域背景地震之深度作為破裂深度之底部。

2. 可加入區域熱流資料換算破裂深度。
3. 傾角與破裂深度將決定活動斷層之面積，並據此可利用於後續推估地震規模參考。

(四) 最可能地震規模：

1. 建議利用已知之長度與面積回推地震規模，再與 wells and coppersmith 之經驗公式做為比對。
2. 用最大可能地震規模易產生文字上面的誤解，應改為最可能地震規模。
3. 目前採用兩種方法換算地震規模，應該增加其權重之討論。

(五) 滑移速率：

1. 車籠埔斷層的石岡分段滑移速率為垂直滑移速率，非水平滑移速率。
2. 短期滑移速率應該改為近期滑移速率，應該增加近期與長期滑移速率之討論。
3. 斷層之潛移除了大地測量的資料之外，應該增加地質的資料。
4. 短期滑移速率應該要增加誤差值。
5. 山腳斷層北段之長期滑移速率之引用文獻需要再討論。
6. 陳致同的滑移速率評估方法應再重新考慮其正確性。
7. GPS 如何引用入滑移速率推估，進而回饋至活動斷層潛勢評估。

四、總結：

本次會議結束，增加下次討論細部項目：

1. 邏輯樹之細項；
2. 山腳斷層之分段；
3. 引用文獻之方法；
4. 邏輯樹權重分配的依據。

五、散會： 11 時 55 分。

2012/08/15 專家諮詢會議(二)

檔 號：
保存年限：

國立臺灣大學地質科學系 開會通知單

受文者：本系胡教授植慶

發文日期：中華民國 101 年 8 月 7 日
發文字號：101 質字第 013 號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

開會事由：召開中央地質調查所委託(本系胡植慶教授及國立成功大學辦理建教合作)研究計畫「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」之斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(二)

開會時間：101 年 8 月 15 日(星期三)下午 2 時

開會地點：經濟部中央地質調查所 2 樓第 2 會議室

主持人：胡教授植慶

聯絡人及電話：李秀芳 (02)3366-2943#202

出席者：本系陳教授文山、本系徐助理教授濤德、國立中央大學應用地質研究所李教授錫堤、國立中央大學地球科學系暨地球物理研究所溫教授國樞、國家災害防救科技中心柯組長孝勳、國立成功大學大地資源研究中心葉教授永田
列席者：國立中正大學地球與環境科學系李副教授元希、劉博士啟清、國立成功大學地球科學系饒副教授瑞鈞、中興工程顧問社大地工程研究中心鄭博士錦桐、國立中央大學地球科學系張助理教授午龍、經濟部中央地質調查所構造與地震地質組

副本：本系胡教授植慶

備註：請出席委員攜帶附件資料與會

系主任

陈于高

101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」之斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(二)

議 程

開會時間：101 年 8 月 15 日(星期三)下午 2 時

開會地點：經濟部中央地質調查所 2 樓第 2 會議室

| 時 間 | 議 程 |
|-------------|--------------------|
| 14:00-14:05 | 一、主席致詞 |
| 14:05-14:35 | 二、主辦單位簡報(時間 30 分鐘) |
| 14:35-15:50 | 三、綜合討論(時間由主席視狀況裁定) |
| 15:50-16:00 | 四、會議結論 |
| 16:00 | 五、散會 |

會議名稱：101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(二)

會議出席人員簽名單
主辦單位：國立臺灣大學 地質科學系

| | | | |
|------------------|-------------------------|-----|---------|
| 時 間 | 101 年 8 月 15 日 14 時 0 分 | 地點 | 中央地質調查所 |
| 主持人 | 胡植慶 教授 | 記錄 | 李秀芳 |
| 出席者(依姓名 筆畫排序) | 簽 名 | | |
| 李錫堤委員 | 李錫堤 | | |
| 柯孝勳委員 | | | |
| 徐濤德委員 | 陳文山 | | |
| 陳文山委員 | | | |
| 溫國樑委員 | 溫國樑 | | |
| 葉永田委員 | 葉永田 | | |
| 列席者簽名 | | | |
| 劉啟清 | 賴志華 | 詹詩丁 | |
| 陳建良 | 鄭智仁 | 李秀芳 | |
| 李昌敏 | 梁勝雄 | 陳柏村 | |
| 王偉 | 李作允 | 謝崇旋 | |
| 林燕群 | 李介文 | 朱徽祖 | |

會議名稱：101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(二)

會議出席人員簽名單(續頁)
主辦單位：國立臺灣大學 地質科學系

| 列席者簽名 | | |
|-------|--|--|
| 李元弔 | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

檔 號：
保存年限：

國立臺灣大學地質科學系 函

地址：10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號
聯絡人：李秀芳
聯絡電話：02-3366-4956#202
電子郵件：hflee@ntu.edu.tw
傳 真：02-23644625

受文者：本系胡教授植慶

發文日期：中華民國 101 年 8 月 28 日
發文字號：101 質字第 015 號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

主旨：檢送召開中央地質調查所委託研究計畫「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(二)之會議記錄 1 份，請 查照。

正本：本系陳教授文山、本系徐助理教授濤德、國立中央大學應用地質研究所李教授錫堤、國立中央大學地球科學學系暨地球物理研究所溫教授國樑、國家災害防救科技中心柯組長孝勳、國立成功大學大地資源研究中心葉教授永田
副本：本系胡教授植慶、國立中正大學地球與環境科學系李副教授元希、劉博士啟清、國立成功大學地球科學系饒副教授瑞鈞、中興工程顧問社大地工程研究中心鄭博士錦桐、國立中央大學地球科學系張助理教授午龍、經濟部中央地質調查所構造與地震地質組

系主任

鄧茂華

經濟部中央地質調查所 101 年度「斷層活動性觀測研究第 2 階段—斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(二)會議紀錄

開會時間：民國 101 年 8 月 15 日下午 14 時 00 分

開會地點：中央地質調查所第 2 會議室。

主持人：胡植慶教授

記錄：李秀芳

出席人員：李錫堤委員、柯孝勳委員、徐澔德委員（請假）、陳文山委員、溫國樑委員、葉永田委員、鄭錦桐博士、劉啟清博士、李元希副教授、李易叡、彭肇、地質調查所謝凱旋、盧詩丁、賴慈華、朱傲祖、陳建良、陳致言、林燕慧、鄭智仁、陳柏村、李作允、李介文、梁勝雄。

一、主席致詞：(略)

二、簡報及討論：(略)

三、委員意見及建議事項：

(一) 邏輯樹：

1. 引用文獻須一併呈現原始資料，有助於委員討論權重之合理性。
2. 每個節點分支的數量應由專案的目的性而控制。
3. 加入斷層機制與機率模式的節點選擇
4. 對於參數明確之斷層如車籠埔斷層，可考慮將參數權重集中，且分支參數之變異度減小。

(二) 斷層分段：

1. 山腳斷層向北延伸至外海的資料不足，是否要把外海分段需要再討論。
2. 分段數量多寡會影響最後評估之潛勢，故不宜將較易發生之分支參數的權重分散於不可能發生之分段。
3. 標示每個分段點的位置。

(三) 傾角與破裂深度：

1. 加入震測剖面的資料，若目標斷層有震測剖面與平衡剖面的資料時，震測剖面之權重應大於平衡剖面。
2. 對於車籠埔斷層來說，其相關文獻資料已經非常充分，應與其他資料相對較少之活動斷層的傾角誤差區間有分別。

(四) 最可能地震規模：

1. 除了用面積計算規模之外，建議亦可利用已知斷層破裂長度回推地震規模，做為其中一個分支來考慮。
2. 面積由於受到斷層破裂深度的不確定性影響也會有其不確定性，所以應多參考破裂深度之相關文獻。

(五) 滑移速率：

1. 若由不同的分支算出來的結果差異不大的時候，其權重可以設為 1。
2. 若其引用的文獻經由討論之後發現有嚴重錯誤，應不宜考慮於邏輯樹中。

四、總結：

本次會議結束，下次討論項目重點：

1. 呈現文獻之原始資料；
2. 搜尋未發表的資料；
3. 簡單的呈現出邏輯樹的機率模式。

五、散會： 16 時 50 分。

2012/10/22 專家諮詢會議(三)

檔 號：
保存年限：

國立臺灣大學地質科學系 開會通知單

受文者：本系胡教授植慶

發文日期：中華民國 101 年 10 月 12 日
發文字號：101 質字第 017 號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

開會事由：召開中央地質調查所委託(本系胡植慶教授及國立成功大學辦理建教合作)研究計畫「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」之斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(三)

開會時間：101 年 10 月 22 日(星期一)下午 2 時

開會地點：經濟部中央地質調查所 2 樓第 2 會議室

主持人：胡教授植慶

聯絡人及電話：李秀芳 (02)3366-2943#202

出席者：本系陳教授文山、本系徐副教授濤德、國立中央大學應用地質研究所李教授錫堤、國立中央大學地球科學系暨地球物理研究所溫教授國樑、國家災害防救科技中心柯組長孝勳、國立成功大學大地資源研究中心葉教授永田

列席者：國立中正大學地球與環境科學系李副教授元希、劉博士啟清、國立成功大學地球科學系饒副教授瑞鈞、中興工程顧問社大地工程研究中心鄭博士錦桐、國立中央大學地球科學系張助理教授午龍、國立成功大學測量及空間資訊學系景助理教授國恩、經濟部中央地質調查所構造與地震地質組

副本：本系胡教授植慶

備註：請出席委員攜帶附件資料與會

系主任

鄧茂華

會議名稱：101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(三)

會議出席人員簽名單
主辦單位：國立臺灣大學 地質科學系

| | | | |
|--------------|--------------------------|-----|---------|
| 時 間 | 101 年 10 月 22 日 14 時 0 分 | 地點 | 中央地質調查所 |
| 主持人 | 胡植慶 教授 | 記錄 | 李秀芳 |
| 出席者(依姓名筆畫排序) | 簽 名 | | |
| 李錫堤委員 | 李錫堤 | | |
| 柯孝勳委員 | 柯孝勳 | | |
| 徐濤德委員 | | | |
| 陳文山委員 | | | |
| 溫國樑委員 | 溫國樑 | | |
| 葉永田委員 | 葉永田 | | |
| 列席者簽名 | | | |
| 鄭錦桐 | 盧詩丁 | | |
| 李昌叡 | 賴慈華 | 陳致亨 | |
| 朱傲翹 | | | |
| 張國華 | 呂春美 | 劉嘉平 | |
| 連運良 | 鄭智仁 | 林依蓉 | |

101 年度「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」之斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(三)

議 程

開會時間：101 年 10 月 22 日(星期一) 下午 2 時

開會地點：經濟部中央地質調查所 2 樓第 2 會議室

| 時 間 | 議 程 |
|-------------|--------------------|
| 14:00-14:05 | 一、主席致詞 |
| 14:05-14:35 | 二、主辦單位簡報(時間 30 分鐘) |
| 14:35-15:50 | 三、綜合討論(時間由主席視狀況裁定) |
| 15:50-16:00 | 四、會議結論 |
| 16:00 | 五、散會 |

檔 號：
保存年限：

國立臺灣大學地質科學系 函

地址：10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號
聯絡人：李秀芳
聯絡電話：02-3366-4956#202
電子郵件：hflee@ntu.edu.tw
傳 真：02-23644625

受文者：本系胡教授植慶

發文日期：中華民國 101 年 10 月 31 日
發文字號：101 質字第 019 號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

主旨：檢送召開中央地質調查所委託研究計畫「斷層活動性觀測
研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動
潛勢分析專家諮詢會議(三)之會議記錄 1 份，請 查照。

正本：本系陳教授文山、本系徐副教授濤德、國立中央大學應用地質研究所李教授錫
堤、國立中央大學地球科學學系暨地球物理研究所溫教授國樑、國家災害防救
科技中心柯組長孝勳、國立成功大學大地資源研究中心葉教授永田
副本：本系胡教授植慶、國立中正大學地球與環境科學系李教授元希、劉博士啟清、
國立成功大學地球科學系饒副教授瑞鈞、中興工程顧問社大地工程研究中心鄭博
士錦桐、國立中央大學地球科學系張助理教授午龍、國立成功大學測量及空間
資訊學系景助理教授國恩、經濟部中央地質調查所構造與地震地質組

系主任

鄧茂華

經濟部中央地質調查所 101 年度「斷層活動性觀測研究第 2 階段—斷層監測與潛勢分析研究(4/4)」斷層活動潛勢分析專家諮詢會議(三)會議紀錄

開會時間：民國 101 年 10 月 22 日下午 14 時 00 分

開會地點：中央地質調查所第 2 會議室。

主持人：胡植慶教授

記錄：李秀芳

出席人員：李錫堤委員、柯孝勳委員、徐澔德委員（請假）、陳文山委員（請假）、溫國樑委員、葉永田委員、鄭錦桐博士、李易叡、彭肇、地質調查所、盧詩丁、賴慈華、朱傲祖、陳建良、陳致言、林依蓉、鄭智仁、呂睿晟、張國峯。

一、主席致詞：(略)

二、簡報及討論：(略)

三、委員意見及建議事項：

(一) 斷層分段：

1. 山腳斷層南北分段點目前看來最適合的位置是大屯山。
2. 山腳斷層之北段延伸，由於外海之斷層滑移速率無法測量，但由於牽涉到國家安全，建議利用震測資料找尋可能海外分段點的依據。
3. 山腳斷層盆地與山之滑移速率相差一個 order，需要合理的解釋。
4. 建議蒐集李錫堤教授之北台灣構造文獻、張中白教授之山腳斷層差分干涉影像文獻、景國恩教授之精密水準測量。
5. 車籠埔斷層點的依據與說明需要更詳細。建議搜尋陳文山教授與李錫堤教授之文獻。

(二) 傾角與破裂深度：

1. 車籠埔斷層主要應考慮孕震帶之傾角而非斷層延伸至地表上的傾角，建議搜尋 John Suppe 或余立凡對於車籠埔斷層的相關文獻。

(三) 滑移速率：

1. 車籠埔斷層分段之滑移速率與再現周期不相同，但是所設之分段權重一樣，是否合理。
2. 最可能地震規模、滑移速率、再現周期這三者需要交換比對。

(四) 斷層參數表：

1. 所引用之饒瑞鈞教授短期滑移速率資料僅至 2006 年，請更新。

四、總結：

本次會議結束。建議未來計畫將每年專家會議所討論之特定斷層製作一本活動斷層邏輯樹小冊子。

五、散會： 16 時 50 分。

委員審查意見

| 期中審查意見 | 處理情形 |
|---|--|
| 1. P.13 圖 1.5 的台灣形狀有誤。 | 遵照委員意見辦理，詳見圖 1.5。 |
| 2. P.54 圖 2.21 之"台灣西北部"有誤! | 遵照委員意見辦理。 |
| 3. P.55 倒數第三行"2009-2011 為抬升"，由 P.59 之圖 2010-2011 為下降?請修正。 | 遵照委員意見辦理，已將抬升改為下降。 |
| 4. P.57 倒數第三行，竹頭崎斷層之地表重複周期 15.2 年，與近百年之地震觀測是否一致?請解釋。 | 由斷層模型，我們可以注意到竹頭崎斷層的斷層鎖定深度相當深，換言之，此結果亦可能解釋成滑脫面上其實是有能量在累積。亦即，此模擬結果反映的是滑脫面之滑移速率變化而非竹頭崎斷層之效應。依此觀點，則推求出來的竹頭崎斷層地震重複週期並不可信。 |
| 5. P.60 章節 2-4-1-2 二維彈性模型，圖 2.24、2.25 應更清楚以圖表補充說明使用於 Mw 之 S1、S2、S3 的位置、深度、傾角、長度、斷層面積等。又地盤之彈性變形模數如何決定?邊界條件為何?slip distribution?如何查核推測之好壞?CTCF 目前沒有 dislocation(creep)?但速度場看來又受其影響。請說明。 | 各斷層之斷層參數與查核好壞之方式已在 2-4-3-1-2 章節中被提及，另外，我們也將於完稿中針對各斷層參數進行製表之工作。而模型中，竹頭崎斷層鎖定之地表效應，同樣可以用滑脫面之滑移速率變化進行解釋。 |
| 6. P.70 ECT 站於 2004 年 12 月之後無資料，與 P.67、P.122 不一致，請更正。 | 遵照委員意見辦理，詳見 3-1-1 節。 |
| 7. P.104, 第七行(B)之標題有誤。 | 已將 Remove Fill Gap 修正為 Remove Gap，詳見附錄 F。 |
| 8. P.105、P.106 公式說明不清 (如高斯平均及 fs)，請更正。 | 已加強說明短時傅立葉分析及疊代式高斯濾波法，詳見附錄 F。 |
| 9. P.116-117，異常之判斷建議可顯示長期之 trend 加強說明異常之發生點，如圖 3.56 TAIS 站文字說明沒有明顯變化，但圖中 2 月 20 日左右有斜率改變!圖 3.58 SANS 站報告指 6 月 4 日發生 | TAIS 在 2/14~2/21 間其斜率有些微的持續變化，但其量不太顯著，詳見圖 3.63。 SANS 在 6/4 之變化相當明顯，但在 |

| 期中審查意見 | 處理情形 |
|---|--|
| 斜率改變，但途中於 6 月 2 日前已有改變。 | 5/29~6/2 也有微小的持續斜率變化，詳見圖 3.65。 |
| 10. P.147 圖 4.14 及 P.150 圖 4.21 有關池上的斷層的樣貌不同，請說明。 | 圖 4.14 為地調所 (2010) 年版本之池上斷層線形，圖 4.21 為鍾令和 (2003) 描繪之 1951 年池上斷層之地表破裂線形跡。 |
| 11. 井下應變儀的成果，是否可以與章節 2-4-1-2 的成果建立關聯，請說明；另外新竹地震群的成果與意義，期末時請作更清楚的詳述，凸顯本研究的價值，並規劃後續精進研究的方向。 | 2-4-1-2 之成果是建立在大地測量及二維斷層模型的推估上，井下應變儀的成果或可和其建立關聯，然其關係仍須進一步的研究。新竹地震群部分已於 3-2-2 章節展現。 |
| 12. 井下應變儀設置水位計已有幾站故障，請團隊對水位計需求與規格提供建議供參。 | 遵照委員意見辦理。中興與太興兩觀測站之地下水壓觀測井設置，已於 10 月下旬發包進行。 |
| 13. 高屏地區之地質背景與活動構造部分，由於旗山斷層、龍船斷層引發南二高相關工程問題，建議請就此一部分作一補充說明，以凸顯本研究的價值。 | 根據所裡目前蒐集之測量資料顯示，高屏地區主要之活動構造為小崗山斷層及滑脫面。此結果和南二高相關地區所反映之地表變形型態並不一致。又因南二高相關地區之監測資料僅有 1 年，資料穩定性仍待提升，故兩者之差異需要持續之觀察及研究。 |
| 14. 池上斷層，在 1951 年及 2003 年的地震活動與斷層潛勢的關聯是否可以更明確說明；2003 成功地震釋放的能量是否可以用章節 2-4-1-2 的模型做一分析校核。 | 1951 年於池上斷層發生兩次主震破裂，分別為池上斷層南段與北段之破裂；2003 年成功地震則為池上斷層南段之破裂，更詳細內容將於期末報告說明。 此外，2-4-1-2 模式主要是用來解析震間時期之斷層活動行為，與同震模型有基本假設之差異。若要探討 1951 年與 2003 年地震之關聯性，需另外建立同震模型。 |
| 15. 斷層活動潛勢的斷層分段、傾角、破裂深度、最可能的地震規模及滑移速度等 | 本計畫於期末報告時將以車籠埔斷層為例，說明斷層參數之不確定性及邏 |

| 期中審查意見 | 處理情形 |
|--|--|
| 建議就美國或日本舉一案例作好好 review 並附於報告。 | 輯樹劃分之準則，詳見 4-2-3-2 節。 |
| 16. 斷層活動潛勢分析請注意斷層形式(逆斷層、橫移斷層)、不同的應用性？ | 謝謝委員意見。 |
| 17. 斷層地震潛勢建議列出完整參數表，顯示各斷層已有參數，參數多者應優先進行評估。 | 謝謝委員意見。 |
| 18. 恆春外海地震對恆春斷層的影響是否總體上只對其上盤有影響?請說明。 | 恆春外海地震對恆春斷層的影響仍在研究中，就測量成果，顯示恆春斷層上盤為抬升、下盤為沉陷。 |
| 19. 小崗山斷層文中引用林啟文等 2010 文章，若變形屬分散性，則潛勢評估應不同。 | 以林啟文等(2010)之理論，小崗山斷層不會發生大規模之地震，因此本計畫參考陳文山等(2010)之理論及斷層線型進行小崗山斷層之潛勢評估。 |
| 20. 地表變形的結果，建議參考地質圖中地層的岩性，有利於結果的解釋。 | 地表變形之結果以參考地質圖中之岩性分布。 |
| 21. GPS 連續站的位移表示方法，是否可改善"向北"、"向西"及"向上"之展示，方便閱讀。 | 座標系統之所以會定義“向東”、“向北”及“向上”為正，主要是依據右手定則。 |
| 22. 高屏地區精密水準的測量結果，指示抬升量最大的位置是在古亭坑斷層附近(龍船斷層的西南方延伸)。 | 是的，與地質圖的比較顯示，抬升量最大的位置是在古亭坑斷層附近。但是此比較結果卻不能直接推論到是因古亭坑斷層活動所造成之結果。 |
| 23. GPS 連續站或移動站的測量結果是否只能表示同震及震後的變形?請說明。 | GPS 移動站的測量成果除了可以展現同震、震後及間震期之變形，其主要之功能為增加觀測資料之空間解析力。而 GPS 連續站除了具備 GPS 移動站之特性，還增加了時間軸上之解析能力。相較於日本及美國，台灣的 GPS 時間序列具有多變的特性，例如，某些測站於間震期的變形並非呈現線型、震後數年之速率常常沒有回到地震前之數值。此外，這些資料除了可能蘊含有慢地震之資訊，也有極 |

| 期中審查意見 | 處理情形 |
|---|----------------------------------|
| | 高之可能解析出其他的訊號，只是此部分仍需要持續之研究。 |
| 24. 水準與 GPS 部份短測線撤消及加長之檢討，請全盤討論，並於期末提出建議供下階段佈設參考。 | 針對水準與 GPS 部份短測線撤消及加長之檢討已於期末提出建議。 |
| 25. 今年為四年期計畫最後一年，請團隊掌握進度提早進行。 | 遵照委員意見辦理。 |
| 26. 以期中報告而言，內容充實完整。 | 謝謝委員意見。 |

101 年度期末委員審查意見

| 期末審查意見 | 處理情形 |
|---|--|
| 1. 請加強 4 年成果的綜整及具體呈現，尤其是與斷層活動性觀測的成果說明。如果能針對斷層或斷層群作綜合評述（類似本所特刊的活動斷層說明則更佳）。 | 感謝委員建議，已針對各地區之地質背景、斷層構造研究與現今地表變形監測狀況進行綜合性描述，詳見 2-4 節所述。 |
| 2. 請列表(或增補表 1.1、1.2 及 1.3)整理計畫於 2 個階段 8 年來各種觀測儀器設置的年代、儀器目前狀況、有效資料範圍及後續維護管理建議。 | 感謝委員建議，已增加移動站、連續站及精密水準觀測點位狀況表於附錄 A 及附錄 B。並請參照表 1.2 及 1.3。 |
| 3. 斷層活動潛勢圖如美國加州的成果是否已完成初稿？並建議使用圖示呈現。 | 將於四年階段性總報告中彙整本計畫四年評估之成果，並呈現其活動潛勢圖。 |
| 4. 請說明觀測結果如何區別超抽地下水與構造作用二者之間的影响？若僅以跨斷層高程變化為證據是否恰當。 | 對於觀測結果的垂直地表方向變化，欲分辨是地層下陷或斷層活動，將建議地調所可執行的二種方法為：(1) 做季節性的測量；(2) 另設置一條垂直（南北向）的測線，則可分辨。 |
| 5. 建議斷層傾角設定應有合理性，如 p.215 剖面深度尚未及震源深度。 | 為了後續地震模擬之便利，傾角設定原則為簡化為單一傾角，有基底滑脫面之斷層則可考慮雙傾角，有好的斷層幾何面則可直接建立斷層面幾何模型。p.215 之剖面是提供了斷層淺部傾角之資訊，本計畫在傾角之設定除了考慮 p.215 之剖面外，同時考慮了深部震測剖面以及地震主震之震源機制解。 |
| 6. 請加強說明池上斷層傾角變動的解釋。 | 西元 2003 年成功地震後之餘震序列，可以清楚呈現池上斷層之幾何形貌，因此在建立池上斷層幾何時，其變動性及爭議性較少。 |
| 7. 參考文獻的引用宜更新，如 McCalpin, J. P. (1996) 該專書已有較新版本。 | 感謝委員意見，本團隊會持續蒐集並更新參考文獻。 |
| 8. 建議潛勢分析於建立邏輯樹時應考慮深度因素。 | 在進行活動斷層潛勢評估時，斷層幾何面仍建議採用整體斷層面進行評估，可了解活動斷層可能引發之最大特徵地震 |

| 期末審查意見 | 處理情形 |
|--|---|
| | 規模之大小，而深度因素則是在後續應用中考慮，例如地震波形模擬或是境況模擬等。 |
| 9. 旗山斷層下盤目前持續抬升，建議利用本計畫觀測資料及搜集區域地質資料加強說明。 | 高屏地區旗山斷層的地表變形綜合討論已於本文中進行討論，詳見 2-4-5 節。 |
| 10. 請加強說明北部地區的觀測結果，建議以較大尺度表示本區域速度場及應變場之分布情形。 | 北部地區的觀測結果及其討論，並該區域速度場的呈現，已於本文中描述，詳見 2-4-1 節。 |
| 11. 請加強說明萬里地區水準測量結果變動之分析。 | 針對萬里地區高程變動之異常結果，其可能屬於山腳斷層或其分支斷層的活動現象，已於 2-1-2-2-1 節中述及。 |
| 12. 請加強斷層參數表之彙整。 | 在下階段計畫中，預計召開各斷層參數表及邏輯樹討論會議，藉由專家討論提供之資訊及建議，加強斷層參數表彙整。 |
| 13. 請加強異常或測量變動量的解釋。 | 感謝委員建議，GPS 解算結果受到約制站影響甚大，已擬定新增國內約制站及更新約制條件，以減少資料異常情形。 |
| 14. 請加強未來本計畫應採取或執行的工作方向建議。 | 感謝委員建議，將於總報告書內加強補充說明。 |
| 15. 各測線高程與 GPS 速度場的變化分析小結(p.57、p.79)，建議以斷層為主體列表(以數值加說明)的方式，說明各斷層的觀測結果。 | 各斷層的觀測結果，及其跨斷層水平與垂直速度場變化情形之描述和列表，詳見 2-4 節及表 2.9 所述。 |
| 16. 2012 年 4 月 27 日的東部地震，嘉義測站有體積應變，其變化值如何表示？請以定量的方式描述。 | 感謝委員建議，已於該事件討論處加以說明。 |