計畫編號：99-5226904000-05-01

經濟部中央地質調查所

99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(2/4)」

(第二年度)

全 程 計 畫：自98年5月至101年12月止
本年度計畫：自99年1月至99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 99 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(2/4)

(第二年度)

計畫主持人：胡植慶

協同主持人：劉啟清

研　究　員：饒瑞鈞

張午龍

陳卉瑄

鄭錦桐

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　99　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 III
圖目錄 V
摘要 XV
Abstract XVI
一、緒論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 本年度工作內容概述 8
1-3 本年度計畫期中之成果 9
二、連續 GPS 觀測站之成果 11
2-1 速度場、主軸應變與旋轉率 11
2-1-1 北部地區 19
2-1-2 新竹地區 23
2-1-3 中部地區 25
2-1-4 嘉義地區 29
2-1-5 西南地區 33
2-1-6 小結 37
2-2 活動斷層地區應變率場 38
2-2-1 山腳斷層地區 38
2-2-2 新竹地區 40
2-3 活動斷層模型參數反演 42
2-3-1 新城斷層 42
2-3-2 山腳斷層 43
三、井下應變儀之研究方法與成果 48
3-1 儀器原理 48
3-2 分析理論 52
3-3 資料校正 54
3-4 時間序列資料分析 56
3-5 井下應變儀資料管理系統網站 57
3-5-1 資料庫管理系統網頁簡介 57
3-5-2 井下應變儀資料庫系統更新 59
3-5-3 資料庫網站更新架構 66
3-6 大坪國小、新樂國小、錦和國小、瑞峰國小、梅花國小、明德中學及樹林等七

站的資料處理.....67
3-6-1 井下應變儀資料處理.....67
3-6-2 井下應變儀資料與地下水變化.....84
3-6-3 地下水影響量之移除.....88
3-7 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷.....92
3-7-1 影響應變儀資料變化的因素.....92
3-7-2 檢視井下應變儀資料中異常事件的方法.....93
四、斷層活動潛勢分析.....100
4-1 前言.....100
4-2 分析流程.....100
4-2-1 活動斷層調查與參數蒐集.....100
4-2-2 活動斷層潛勢評估流程.....106
4-3 活動斷層發生機率潛勢評估.....111
4-3-1 車籠埔斷層.....112
4-3-2 山腳斷層.....116
4-3-3 新城斷層.....128
4-4 美國與日本之研究進程.....137
4-5 小結.....140
五、整合觀測資料分析.....142
5-1 2006-2010 井下應變儀異常與大地震活動、地化異常之關係.....142
5-2 2006-2010 井下應變儀與地震訊號觀測異常.....142
5-3 臺灣規模六大地震前兆異常整合分析.....146
5-3-1 區域地震活動異常分析.....146
5-3-2 前兆異常綜合分析.....152
六、結論與建議.....154
七、參考文獻.....158
附錄 A 中央地質調查所 GPS 連續站時間序列.....附 1
附錄 B Poly3D 理論基礎簡介.....附 17
附錄 C 井下應變儀維護紀錄表對巡察及維護之效益.....附 23
附錄 D 斷層滑移速率.....附 37
附錄 E 活動斷層幾何特性和地震矩規模.....附 41
附錄 F 活動斷層特徵地震模式.....附 45
附錄 G 機率密度函數.....附 49
附錄 H 審查委員意見.....附 53

表目錄

表 A 本年度預期進度甘梯圖 (Gantt Chart) XI
表 B 預期進度查核點（Check Point） XII
表 C 全程計畫預期進度甘梯圖 XIII
表 D 期末預期完成工作項目 XIV
表 1.1 GPS 追蹤站資料接收起始時間表 3
表 1.2 應變觀測站資料接收起始時間表 4
表 1.3 地球化學觀測站資料接收起始時間表 4
表 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場（資料解算至 2010 年 10 月） 12
表 2.2 新城斷層的震間滑移模型參數 42
表 2.3 山腳斷層模型滑移速率逆推所使用之 GPS 連續觀測站 45
表 2.4 山腳斷層滑移向量模擬結果之分布統計表 46
表 3.1 所有未處理的七個站的經緯度與資料日期 67
表 3.2 七個站的安裝日期、儀器與各分量的方位角 68
表 4.1 活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式 103
表 4.2 車籠埔斷層參數表 113
表 4.3 山腳斷層參數表 120
表 4.4 山腳斷層破裂事件 A 以 BPT 模式評估之發生機率 125
表 4.5 山腳斷層破裂事件 B 以 BPT 模式評估之發生機率 125
表 4.6 山腳斷層破裂事件 C 以 BPT 模式評估之發生機率 126
表 4.7 山腳斷層破裂事件 A 以 Poisson 模式評估之發生機率 126
表 4.8 山腳斷層破裂事件 B 以 Poisson 模式評估之發生機率 127
表 4.9 山腳斷層破裂事件 C 以 Poisson 模式評估之發生機率 127
表 4.10 山腳斷層發生機率評估 128
表 4.11 石同生等推估新城斷層滑移速率（石同生等，2003） 131
表 4.12 新城斷層參數表 132
表 4.13 新城斷層破裂事件 A 以 BPT 模式評估之發生機率 136
表 4.14 新城斷層破裂事件 B 以 BPT 模式評估之發生機率 136
表 4.15 新城斷層發生機率評估 137
表 C.1 大坪站應變儀維護記錄表 ..... 附 25
表 C.2 瑞峰站應變儀維護記錄表 ..... 附 27
表 C.3 新樂站應變儀維護記錄表 ..... 附 29
表 C.4 梅花站應變儀維護記錄表 ..... 附 31
表 C.5 新竹地區應變儀觀測站巡查結果 ..... 附 32

表 E.1 Wells and Coppersmith（1994）彙整之斷層參數及地震矩規模關係式 ..... 附 43

圖目錄

圖 1.1 中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀及地球化學觀測站分布圖。 2
圖 1.2 連續 GPS 觀測資料 98 年成果。 4
圖 1.3 連續 GPS 之 GS04、GS05、GS017 與 GS41 測站之時間序列。 5
圖 1.4 塊體模型模擬地表變形之結果。 6
圖 1.5 柯羅莎颱風期間(2007 年 10 月)應變儀記錄顯示異常的改變。 6
圖 1.6 地化異常在中大規模地震前後的表現與地震距離之關係圖。 7
圖 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站相對於澎湖 S01R 站之平均速度場。方框 A-E 為本計畫探討之區域。 14
圖 2.2 中央地質調查所 GPS 連續觀測站以 ITRF2005 為框架之平均速度場。 15
圖 2.3 中央地質調查所 68 個 GPS 連續觀測站以及其他單位 124 個 GPS 連續觀測站之測站分布圖。 16
圖 2.4 （a）中央地質調查所及其他單位之 GPS 連續觀測站相對於澎湖 S01R 站之平均速度場。（b）震間速度場比較。 17
圖 2.5 GPS 連續觀測站之主軸應變率和面膨脹率。 18
圖 2.6 GPS 連續觀測站之旋轉率。 19
圖 2.7 北部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 20
圖 2.8 北部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 21
圖 2.9 北部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 21
圖 2.10 測站 GS01、GS08、GS10 及 GS13 之時間序列。 22
圖 2.11 新竹地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 23
圖 2.12 新竹地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 24
圖 2.13 新竹地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 24
圖 2.14 測站 GS03 及 GS15 之時間序列。 25
圖 2.15 中部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 26
圖 2.16 中部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 27
圖 2.17 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 28
圖 2.18 測站 GS23、GS36、GS39 與 GS40 時間序列圖。 29
圖 2.19 嘉義地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 30
圖 2.20 嘉義地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 31
圖 2.21 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 31
圖 2.22 測站 GS04、GS05、GS017 與 GS41 測站之時間序列。 32
圖 2.24 西南地區 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 35
圖 2.25 西南地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 36
圖 2.26 測站 GS29 與 GS31 測站之時間序列。 37

圖 2.27 2005 年 6 月至 2009 年間臺北山腳斷層地區的平均應變率。 38
圖 2.28 2005 年 6 月至 2009 年間臺北山腳斷層地區的平均應變率。 39
圖 2.29 臺北山腳斷層地區的應變率場。 40
圖 2.30 2005 年 6 月至 2010 年 8 月間新竹新城斷層地區的平均應變率。 41
圖 2.31 新竹新城斷層地區的應變率場。 41
圖 2.32 新城斷層震間滑移模型。 43
圖 2.33 GPS 水平速度場。 46
圖 2.34 山腳斷層滑移向量模擬結果。 47
圖 3.1 GTSM 模組化示意圖。 49
圖 3.2 GTSM100 的感應器設計圖。 50
圖 3.3 井下型應變儀三個感測元件以互相旋轉 60˚疊置。 50
圖 3.4 GTSM21 的感應器設計。 51
圖 3.5 應變儀所觀測到的潮汐週期訊號。 55
圖 3.7 利用最小平方法求得最適模式曲線以除去井孔回復效應，獲得殘餘應變。 56
圖 3.8 井下應變儀資料庫管理系統網站首頁。 58
圖 3.9 新增井下應變儀資料表。 60
圖 3.10 新增地球化學資料表。 60
圖 3.11 使用者設定指定資料來源、FTP、備分根目錄、檔案輸出等路徑。 61
圖 3.12 手動選擇匯入資料、更新資料。 61
圖 3.13 手動匯出地球化學資料。 61
圖 3.14 新增地球化學資料選項。 62
圖 3.15 獨立地球化學資料頁面。 62
圖 3.16 測站、時間、資料類型等項目選擇並繪圖。 63
圖 3.17 權限管理頁面。 64
圖 3.18 測站 Download 頁面。 65
圖 3.19 系統之架構圖。 66
圖 3.20 瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料異常狀況。 69
圖 3.21 大坪國小測站應變分量。2006-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。 70
圖 3.22 新樂國小測站應變分量。2006-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。 70
圖 3.23 錦和國小測站應變分量。2005-2010 年資料轉變成應變後，各分量之資料。 71
圖 3.24 梅花國小測站應變分量。2007-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。 71
圖 3.25 明德中學測站應變分量。2007-2010 年資料轉變成應變後，各分量之資料。 72
圖 3.26 樹林觀測站應變分量。2009-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。 72
圖 3.27 大坪國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 74

圖 3.28 新樂國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 75
圖 3.29 達邦國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 75
圖 3.30 錦和國小測站應變方向。於 2007 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 76
圖 3.31 梅花國小測站應變方向。於 2005 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 76
圖 3.32 明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 77
圖 3.33 中興國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 77
圖 3.34 太興國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 78
圖 3.35 梅花國小測站應變方向。於 2005 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 78
圖 3.36 明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 79
圖 3.37 樹林測站應變方向。於 2009 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。 79
圖 3.38 大坪國小測站的比較檢核。 80
圖 3.39 新樂國小測站的比較檢核。 81
圖 3.40 達邦測站的比較檢核。 81
圖 3.41 錦和國小測站的比較檢核。 82
圖 3.42 梅花國小測站的比較檢核。 82
圖 3.43 明德中學測站的比較檢核。 83
圖 3.44 樹林測站的比較檢核。 83
圖 3.45 太興國小測站的比較檢核。 84
圖 3.46 中興國小測站的比較檢核。 84
圖 3.47 太興國小測站面積應變與地下水壓變化。 85
圖 3.48 太興國小測站 CH0 分量應變與地下水壓變化。 86
圖 3.49 太興國小測站 CH1 分量應變與地下水壓變化。 87
圖 3.50 太興國小測站 CH2 分量應變與地下水壓變化。 87
圖 3.51 太興國小測站 CH3 分量應變與地下水壓變化。 88
圖 3.52 達邦地下水對井下應變儀資料的線性影響模式修正。 89
圖 3.53 興國小地下水對井下應變儀資料的線性影響模式修正。 89
圖 3.54 中興國小地下水對井下應變儀資料的線性影響模式修正。 90
圖 3.55 達邦站的井孔鬆弛分析。 90
圖 3.56 太興國小站的井孔鬆弛分析。 91
圖 3.57 中興國小站的井孔鬆弛分析。 91
圖 3.58 嘉義地區井下應變儀因 2010 年 3 月甲仙地震所產生的同震變化。 94
圖 3.59 新竹地區的井下應變儀在 2007 年 10 月 06 日所觀測到的異常。 95
圖 3.60 臺南曾文南井下應變儀觀測站（RST）與嘉義地區的井下應變儀觀測站在 2007 年 10 月 06 日所觀測到的異常。 95

圖 3.61 嘉義地區的三個井下應變儀觀測站在 2010 年 05 月 23 日所觀測到的異常。 96
圖 3.62 嘉義的井下應變儀記錄與石桌附近的 GPS 觀測網 GS05-GS07-GS17 所算出的地表應變一起做觀測。 97
圖 3.63 嘉義的井下應變儀記錄在 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震有明顯的變動。 97
圖 3.64 嘉義的井下應變儀記錄在 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震有明顯的變動。 98
圖 4.1 斷層幾何參數示意圖。 104
圖 4.2 斷層分段分布圖。 104
圖 4.3 由斷層分區建立斷層破裂模式。 105
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。 105
圖 4.5 活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖。 108
圖 4.6 活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。 109
圖 4.7 加州地區地震潛勢評估邏輯樹。 109
圖 4.8 WG02 模式評估示意圖。 110
圖 4.9 斷層破裂面積示意圖。 110
圖 4.10 機率密度函數分布圖。 111
圖 4.11 計算震度 6 級以上之區域機率理論。 111
圖 4.12 車籠埔斷層之歷史地震槽溝之比較。 115
圖 4.13 車籠埔斷層之 BPT 機率密度函數。 115
圖 4.14 關渡平原的淺層震測結果。 117
圖 4.15 臺灣東北部海域震測分布及震測剖面斷層延伸位置對比圖。 118
圖 4.16 震測資料對比之臺灣東北外海斷層分布圖。 118
圖 4.17 台北盆地的地下剖面，成子寮剖面。 119
圖 4.18 本計畫之山腳斷層三維斷層幾何模型平面分布圖。 119
圖 4.19 山腳斷層之破裂模式及權重分配。 122
圖 4.20 山腳斷層邏輯樹。 123
圖 4.21 事件 A 之特徵地震模式。 124
圖 4.22 事件 B 之特徵地震模式。 124
圖 4.23 事件 C 之特徵地震模式。 124
圖 4.24 新城斷層條帶地質圖。 129
圖 4.25 新竹地區地質圖及剖面位置圖。 130
圖 4.26 新城斷層三維幾何模型。 130
圖 4.27 新城斷層之破裂模式及權重分配。 134
圖 4.28 新城斷層邏輯樹。 135
圖 4.29 事件 A 之特徵地震模式。 135

圖 4.30 事件 B 之特徵地震模式。 135
圖 4.31 日本主要活動斷層潛勢評估成果。 138
圖 4.32 美國舊金山灣地區活動斷層在未來 30 年內發生規模≧6.7 之機率。 139
圖 4.33 美國南加州之三維斷層模型。 139
圖 4.34 美國南加州之活動斷層三維模型及區域地震目錄投影。 139
圖 4.35 美國南加州之活動斷層三維模型及用此模型建立之 block region。 140
圖 5. 1 2006 年至今規模六、規模五地震與井下應變儀異常、氡氣異常的時間相關性。 142
圖 5.2 2006/7/20 當天發現持續時間最久的地震波異常記錄(100s)。 144
圖 5.3 2008/3/12 當天發現持續時間最久的地震波異常記錄(500s)。 144
圖 5.4 井下應變儀異常、深低頻振動觀測站之空間分布，以及異常前後兩天內鄰近 M<4 地震之分布圖。 145
圖 5. 5 同時有井下應變儀和地震觀測記錄異常之測站分布。 146
圖 5. 6 2009/1-2010/9 規模六地震與地化觀測站、井下應變儀測站分布示意圖。 147
圖 5. 7 2009/7/14 M6 震前一個月背景地震活動分布圖。 148
圖 5. 8 2009/8/17 M6.8 震前一個月背景地震活動分布圖。 148
圖 5. 9 2009/10/4 M6.1 震前一個月背景地震活動分布圖。 149
圖 5. 10 2009/11/5 M6.2 震前一個月背景地震活動分布圖。 149
圖 5. 11 2009/12/19 M6.9 震前一個月背景地震活動分布圖。 150
圖 5. 12 2010/2/7 M6.6 震前一個月背景地震活動分布圖。 150
圖 5. 13 2010/3/4 M6.4 震前一個月背景地震活動分布圖。 151
圖 5. 14 2010/4/26 M6.8 震前一個月背景地震活動分布圖。 151
圖 5. 15 (a)~(h)為 8 個不同的規模六事件在新竹地區（紅線）與嘉義地區（藍線）大震前背景地震活動速率。 152
圖 5. 16 八個不同的規模六事件在井下應變儀偵測到之前兆異常、氡氣異常、與震前地震活動異常的時間相關圖。 153
圖 B. 1 Poly3D 中物件與元素示意圖。 附 19
圖 B. 2 晶格受力產生螺旋錯位（Screw dislocation：晶格錯位中的一種）。 附 19
圖 B. 3 Angular Dislocation 示意圖(修改自 Thomas, 1993)。 附 20
圖 B. 4 Poly3D 中多邊形元素柏格向量 b 示意圖。 附 21
圖 C.1 瑞峰站雨量計因落葉而有阻塞現象，若未清理將會影響雨量觀測結果。 附 33
圖 C.2 瑞峰站太陽能板。 附 33
圖 C.3 大坪站應變儀資料記錄器。 附 34
圖 C.4 梅花應變儀觀測站外觀。 附 34
圖 C.5 新樂站透過 USB 下載觀測資料，但未能成功。 附 35

圖 D.1 活動斷層錯移之露頭可用來評估斷層之滑移速率。 ..... 附 39
圖 E.1 臺灣地區的地震規模與斷層長度關係。 ..... 附 42
圖 E.2 地震矩規模與斷層長度之關係。 ..... 附 43
圖 E.3 地震矩規模與斷層面積之關係。 ..... 附 43
圖 E.4 地震矩規模與斷層平均錯動量之關係。 ..... 附 43
圖 F.1 San Andreas 斷層中南段之特徵地震模式。 ..... 附 46
圖 F.2 假定相同滑移速率情形下比較指數地震分布模式與特徵地震模式的差異。 ..... 附 47
圖 G.1 不同 α 值（紅線 0.3、紫線 0.5、藍線 0.9）對 BPT 模式之影響。 ..... 附 52
圖 G.2 日本 BPT 模式評估示意圖。 ..... 附 52
圖 G.3 各統計模型之條件機率比較，X 軸為地震後經過時間，Y 軸為發生率。 ..... 附 52

表 A 本年度預期進度甘梯圖 (Gantt Chart)

計畫名稱：斷層活動觀測資料處理分析													
工作項目 \ 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
第一季查核點	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(11)	(9)	(10)	(11)	(12)	
GPS 連續站資料檢核													
井下應變儀資料檢核													
第二季查核點													
地質及地震資料整理													
資料計算及分析													
期中報告													
維護資料庫													
第三季查核點													
計算結果檢驗及分析													
斷層活動度與地震潛能分析													
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	(第一季查核點) 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 a. 應變儀資料查核 1-2 月 b. GPS 資料查核 1-2 月 c. 山腳斷層之斷層面幾何參數	三月三十日	第一季進度報告 第一期款請款
2	(第二季查核點) 1. 工作進度報告表 a. 應變儀資料查核 3-5 月 b. GPS 資料查核 3-5 月 c. 新城斷層之斷層面幾何參數	六月三十日	第二季進度報告
3	(期中報告) 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	期中報告書面與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況 第二期款請款
4	(第三季查核點) 1. 工作進度報表 a. GPS 資料 4-8 月 b. 應變儀資料 4-8 月 c. 斷層之 BPT 模式估算	九月三十日	第三季工作進度報告及繳交文件
5	(期末報告) 1. 工作進度報表 a. GPS 資料 9-10 月分析 b. 應變儀資料 9-10 月分析 c. 完成資料庫系統維護 d. 估算斷層之再現週期 2. 期末報告書初稿	十一月三十日	期末報告書面資料初稿 會議記錄與委員意見辦理狀況
6	(第四季查核點，驗收) 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	成果報告 30 份 成果報告光碟 10 片

表 C 全程計畫預期進度甘梯圖

計畫名稱：斷層活動觀測資料處理分析								
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、木屐寮、新城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、嘉義、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 期末預期完成工作項目

	工作項目	已完成
GPS 連續站資料檢核與計算（詳見第二章） 張午龍老師	1. 完成地調所設置之 GPS 連續觀測站 2009.10 月～2010.10 月資料檢核及計算。	ˇ
	2. 校驗、誤差分析與測站觀測品質的查核並解算 GPS 連續觀測站時間序列(詳見附錄 A)。	ˇ
	3. 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，以求得各測站之地表水平與垂直方向位移量，分析鄰近斷層的滑移速率與區域之應變率之改變。	ˇ
	4. 利用地調所與其他單位交換之 GPS 連續觀測站資料（共 181 站），整合、計算全台各區域之應變率。	ˇ
井下應變儀資料檢核與分析（詳見第三章） 劉啟清老師	1. 多分量井下應變儀的檢校，完成包大坪國小(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)以及樹林(SLIN)等七站資料，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。	ˇ
	2. 完成各觀測站之資料收集及編修，進行面應變、剪應變分析。	ˇ
	3. 持續建立資料庫及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（詳見附錄 C）。	ˇ
	4. 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。	ˇ
斷層潛能分析評估（詳見第四章） 鄭錦桐老師	1. 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，提供作為建立臺灣地區分析模式之借鏡。	ˇ
	2. 挑選新城斷層與山腳斷層，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週期、最大地震規模），進行斷層活動度與潛能分析模式之評估。	ˇ
整合觀測資料分析（詳見第五章） 陳卉瑄老師	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，以嘉義地區鄰近測站之資料加以比較，找出其相關性。	ˇ

摘要

本計畫本年度的主要執行重點為：(1)分析連續連續 GPS 測站及井下應變儀之時間序列；(2)藉由長期觀測推估研究地區 GPS 速度場變化並進一步瞭解應變率變化情形；(3)井下應變儀和連續 GPS 觀測記錄比較；(4)配合地球化學觀測資料，利用連續 GPS 觀測和井下應變儀，評估地震發生前的異常現象；(5) 藉助美國和日本發展地震機率模型經驗，評估山腳斷層和新城斷層的活動潛勢分析；(6) 維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性。

本年度期末報告在 GPS 觀測站部分，加入其他單位 GPS 測站進行主軸應變率、旋轉率評估、及活動斷層地區應變場估計。全島 GPS 解算結果與期中報告無甚差異。在計算山腳斷層及新城斷層應變率部分，結果顯示山腳斷層北部、南部、東部與西部區域之平均應變率大小分別為-0.002、-0.209、0.275、0.399 μstrain/yr，沿山腳斷層分布之最大主應力方向為東北東-西南西走向，局部區域的最大主應力變化則大致與斷層走向相互垂直; 新城斷層兩側平均應變率為-0.05 μstrain/yr，以壓縮應力為主，最大主應力方向為東南東-西北西走向。反演新城斷層附近速度場的結果則顯示其平均震間滑移速率為 17 mm/yr；而山腳斷層斷層面的平均滑移速率為 5.33 mm/yr，8 公里深以上的滑移量平均 2.91 mm/yr，8 公里深以下的滑移量平均 5.86 mm/yr。北段斷層面的滑移速率較南段不平均，主要是集中 8 公里深以下，而滑移速率不連續的斷層區塊，往往會是應力集中的地方，很可能指示著未來地震發生的區域。

井下應變儀部份本期執行進度除了持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性之外，亦處理大坪國小(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)以及樹林(SLIN)等七站資料，以利未來時間序列分析之用。此七站資料，除了瑞峰國小測站因兩個分量資料不正常外，其餘都可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應、未受地下水變化的影響。另外，本計畫也嘗試對兩地震相關或其它觀測也有相同異常的例子作為探討對象，在逐漸累積經驗後再加以量化，而根據井下應變異常事件的判斷原則，找出較有意思的異常事件有：2010 年 3 月甲仙地震、2007/10/06 之地震以及 2010/05/23 之地震。

關於斷層活動潛勢分析部分，除了完成北部山腳斷層及新竹地區新城斷層之三維模型建立及參數蒐集外，利用各目標斷層參數之資料建置、搜集、三維模型建立，評估山腳斷層潛勢未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.7 以上之機率為 3.0%、4.8%及 9.0%；而新城斷層潛勢未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 0.0%、0.0%及 0.2%。

井下應變儀及地化異常部份本期針對 2009 年之後規模六地震，在新竹地區和嘉義地區觀測網進行震前異常的分析。我們發現八個規模六的地震事件中有四個同時有氡氣及井下應變儀異常，而僅有兩個同時具氡氣、井下應變儀、及地震活動異常。此兩個事件為發生在 2009/10/4 M6.1 及 2009/11/5M6.2，是最靠近新竹地區的兩個強震事件。下一年度計畫擬進一步量化背景地震活動之異常，以與其他異常觀測作更客觀的比較。

關鍵詞：全球衛星定位系統、連續觀測站、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 continuous GPS and borehole strainmeter stations; (2) determine the accumulation of current crustal strain from GPS velocity filed; (3) compare the GPS and strainmeter measurements; (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 Shanchiao fault and Hsinchen fault based on the earthquake probability model developed in US 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 this information into a comprehensive understanding of fault activity and earthquake probability, seismogenic structures, fault mechanics and information of possible earthquake precursory.

GPS derived velocities near the Shanchiao fault show that average strain rate of -0.059μstrain/yr. The principal stress are generally oriented in ENE-WSW direction, where the maximum variation is perpendicular to the strike of the fault. Near the Hsinchen fault, the average strain rate is -0.05μstrain/yr. The principal stress are also oriented in ENE-WSW direction. The inverted interseismic slip for the Hsinchen fault is later determined to be 17 mm/yr. The average slip rate along the Shanchiao fault is 5.33 mm/yr. The average slip rate is 2.91 mm/yr above the depth of 8 km and the average slip rate increase to 5.86 mm/yr below this depth. In addition, the slip behavior on the north and south segments are different, the north segment demonstrates a larger difference of slip rate between shallow portion and deep portion. The large slip patches concentrate below the depth of 8 km, thus it implies that these fault patches might be the seismogenic zone of the big earthquake.Other than maintaining borehole strainmeter database, we have also processed strainmeter data at seven more stations: BMMT, CINT, JING, LMMT, PFMT, SANS, and SLIN. We found the strain change pattern results from dual-exponential relaxation effect with insignificant influence from ground water variation. These calibrated strainmeter data is useful for further comparison with GPS time series and geochemical anomalies.

In analysis of potential activity of faults, we have collected the fault parameters of the Shanchiao and Hsinchen fault to construct a 3D fault model. Using the fault parameters collected in the pervious mid-term report, the earthquake probability on the Shanchiao and Hsinchen faults is calculated to be 9.0 % and 0.2% in 100 years.

The strainmeter, Radon, and seismicity anomalies preceding to the M>6 earthquakes in Taiwan since 2009 have been analyzed. Six of eight M6 earthquakes have been found to show both strainmeter and Radon anomalies. The significant change in seismicity preceding the major events is only confined to two M6 events. The better quantification of seismicity precursory will be conducted in the following study, to compare with strainmeter and Radon anomalies..

KEYWORDS: GPS, CGPS, Time series, Borehole Strainmeter, Analysis in Potential Activity of Faults

一、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，已逐年在臺灣陸上活動斷層帶設置監測點位，包括全球衛星定位系統(Global Positioning System，簡稱 GPS)與井下應變儀(Borehole strainmeter)。累積至 99 年為止，已完成連續 GPS 站共 68 站(圖 1.1 和表 1.1)和 13 口井下應變儀(圖 1.1 和表 1.2)及 7 個地球化學觀測站(圖 1.1 和表 1.3)。本計畫在 98 年度的工作成果主要有連續 GPS 速度場和應變場解算及時間序列的分析，嘉義地區的 6 個井下應變儀觀測資料的分析，車籠埔斷層和瑞穗斷層的斷層潛勢分析模式之評估，地球化學、連續 GPS 與井下應變儀之觀測資料進行整合分析，概述如下：

過去在 GPS 連續觀測資料分析部分，以北部地區、新竹地區、中部地區、嘉義地區及西南地區 5 個測網，解算 50 個中央地質調查所連續 GPS 觀測站與其他單位交換 111 個 GPS 連續觀測站之速度場(圖 1.2a)和應變場(圖 1.2b)。在時間序列分析方面，時間序列常有週期性變化的情形，如嘉義地區之 GS04、GS05 與 GS17 測站在南北方向有明顯走勢的變化，該趨勢線在每年 5 月皆有位移方向的改變，意味此重複現象可能是一種年週期變化(圖 1.3)。目前時間序列中所觀察到的週期性變化之原因尚未明瞭。有的測站的週期為一年，有的更長。部分測站卻無法得知其週期為何，仍須透過資料累積來判斷是否有重複出現的週期現象，或地表變形之異常變化，以釐清變化之原因。另外也利用速度場資料，將臺灣劃分為 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬，反演臺灣各活動斷層的滑移速率、虧損速率及鎖定率(圖 1.4)。由於塊體模型假設塊體為一剛性塊體，並沒有考量塊體之內部變形，因此由塊體模型所求得之長期滑移速率有高估之可能性。但由塊體模型所估算之斷層面上滑移速率虧損和鎖定率，對於斷層活動潛勢之評估，仍有其參考價值。

在井下應變儀觀測分析部分，分析曾文水庫南、曾文水庫北、甲仙十八灣、中興國小、太興國小、達邦等 6 站的資料，分析發現某些測站受到地下水位變化影響極大。例如達邦測站，在除去了井孔回復效應以後，與地下水位的變化幾乎完全同步，1 公尺的水位變化可以造成約 7 μstrain 的變化。2007 年 10 月的柯羅莎(Krosa)颱風期間，應變儀記錄顯示異常的改變，達邦站在颱風後有明顯的約 4 μstrain 的壓縮(圖 1.5)，而後再回升，而中興站則相反，先有約 1 μstrain 的膨脹，而後壓縮再回升。這個變化看起來不像是受氣壓變化的影響，因為氣壓的降低比應變的變化約提早了一天(以最低點計)，也不像是颱風過後水位提升的影響。因為方向與其他測站不一致，所以很可能是有構造上意義的變化，故今年度將加強此部分分析。在 2008 年 5 月的汶川地震表面波到達時，達邦與中興國小都在應變儀記錄上顯示應變量突然的改變，而且都是約 0.1 μstrain 的膨脹，這是否顯示表面波的經過會引發地區性斷層的小地震，還是只是儀器的特性所致？本年度將進一步的探討。

在斷層活動度與地震潛能分析模式評估部分，特徵地震模式的計算是以斷層參數表當中推估的參數進行，配合推估參數的可能範圍搭配出計算再現週期的參數組合表。特徵地震所推算出的車籠埔斷層特徵地震再現週期，全段為 183 年至 997 年，北段為 211 年至 494 年，南段為 144 年至 313 年。而瑞穗斷層特徵地震再現週期為 52 年至 255 年。瑞穗斷層參數組合所推估的特徵地震發生率有些超過實際地震的發生率，可能是因為東部地區的斷層潛移量較大，因此參數表中的滑移速率可能有高估的情形。此部分與假設斷層滑移速率均由特徵地震釋放有所不同，需要加入 GPS 觀測資料來輔助釐清。

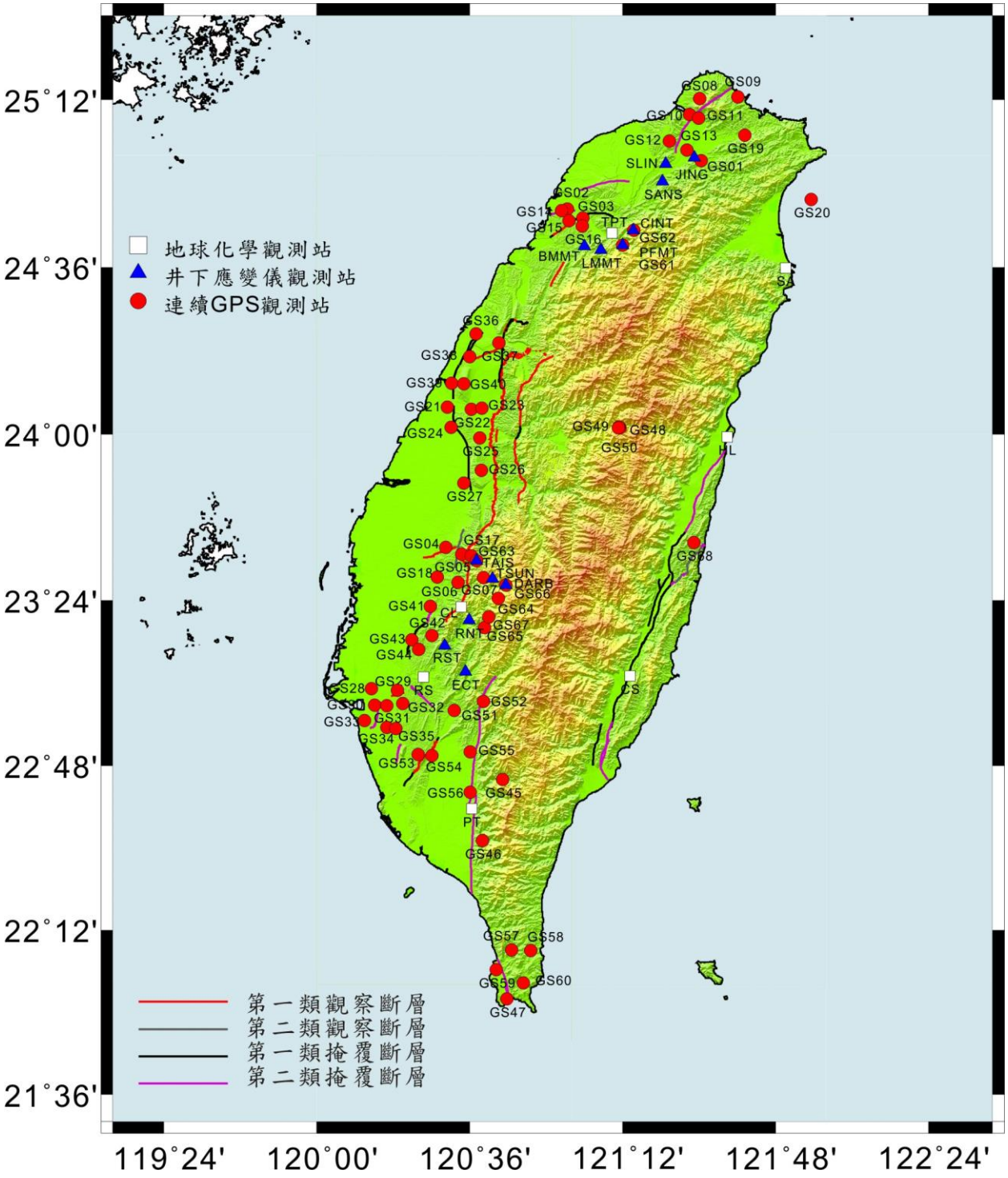


圖 1.1 中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀及地球化學觀測站分布圖。

表 1.1 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	GS35	南沙崙農場	2006.06.24
GS02	新竹高工	2004.10.21	GS36	德化國小	2006.10.21
GS03	工研院	2004.10.19	GS37	泰安休息站	2006.10.25
GS04	大埔美農場	2004.10.16	GS38	清水服務區	2006.10.21
GS05	半天寮淨水廠	2004.10.21	GS39	龍井國小	2006.10.21
GS06	民和國中	2004.10.21	GS40	龍峰國小	2006.10.21
GS07	培英國小	2004.10.21	GS41	竹門國小	2007.11.23
GS08	興華國小	2005.08.15	GS42	東原國中	2007.11.23
GS09	大鵬國小	2005.08.16	GS43	果毅國小	2007.11.27
GS10	竹圍國中	2005.09.06	GS44	六甲國小湖東分校	2007.11.30
GS11	北投國小	2005.08.15	GS45	霧臺鄉公所	2009.01.08
GS12	樂善國小	2005.09.06	GS46	來義國小	2009.01.08
GS13	國光國小	2005.08.16	GS47	台電南展館	2009.01.08
GS14	西門國小	2005.09.13	GS48	廬山警光山莊	2009.04.14
GS15	雙溪國小	2005.09.13	GS49	廬山蔡宅	2009.04.14
GS16	寶山水庫	2005.09.13	GS50	馬赫坡森林民宿	2009.03.25
GS17	太平國小	2005.09.14	GS51	杉林國小	2009.12.18
GS18	嘉義農試所	2005.09.14	GS52	新發國小	2009.12.18
GS19	保長國小	2006.07.12	GS53	星星兒的家	2009.12.18
GS20	龜山島	2006.08.4	GS54	大洲國中	2009.12.15
GS21	大嘉國小	2006.06.10	GS55	舊寮國小	2009.12.11
GS22	快官交流道	2006.06.10	GS56	瑪家國中	2009.12.14
GS23	五光國小	2006.05.30	GS57	石門國小	2009.12.15
GS24	文祥國小	2006.05.30	GS58	高士國小	2009.12.14
GS25	寶山國小	2006.05.31	GS59	車城國小射寮分校	2009.12.17
GS26	名崗國小	2006.05.31	GS60	永港國小	2009.12.18
GS27	彰化農場	2006.05.31	GS61	梅花國小	2010.10.
GS28	中崙加壓站	2006.06.17	GS62	新樂國小	2010.10.
GS29	潭頂自來水廠	2006.06.16	GS63	太興國小	2010.10.
GS30	大橋國小	2006.06.25	GS64	里佳國小	2010.10.
GS31	西勢國小	2006.06.17	GS65	茶山國小	2010.10.
GS32	虎頭埤	2006.06.23	GS66	達邦	2010.10.
GS33	永華國小	2006.06.22	GS67	新美國小	2010.10.
GS34	成大航太實驗場	2006.06.24	GS68	三和國小	2010.11.

表 1.2 應變觀測站資料接收起始時間表

測站代碼	站名	資料開始接收時間	測站代碼	站名	資料開始接收時間
RNT	曾文水庫北	2004.04.15	TAIS	太興國小	2006.03.04
ECT	甲仙十八灣	2004.04.16	CINT	新樂國小	2006.11.15
RST	曾文水庫南	2004.07.18	DARB	達邦	2006.11.19
PFMT	梅花國小	2005.06.04	SANS	明德	2007.11.12
LMMT	瑞峰國小	2005.06.07	JING	錦和	2007.11.20
BMMT	大坪國小	2005.06.09	SLIN	樹林	2009.09.11
TSUN	中興國小	2006.03.03			

表 1.3 地球化學觀測站資料接收起始時間表

測站代碼	站名	座標_TWD67(N,E)	資料接收起始時間
CL3	中崙濁水潭站	(2586520, 204643)	2004.01.14
TPD	大平地站	(2736929, 265637)	2005.12.16
MS	梅山站	(2609740, 206325)	2006.11.09
RS	二溪站	(2558154, 189642)	2006.11.09
CC	潮州站	(2500689, 209087)	2008.09.03
CS	池上站	(2558221, 273485)	2008.09.23
SA	蘇澳站	(2721458, 335062)	2009.12.11

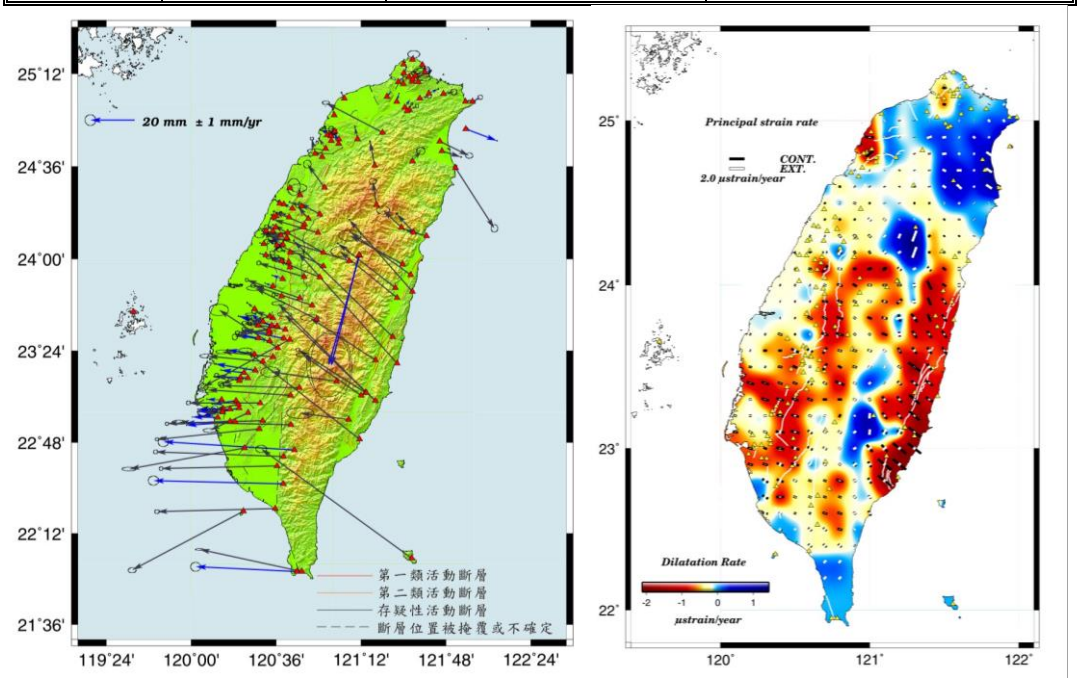


圖 1.2 連續 GPS 觀測資料 98 年成果(胡植慶等，2009)。(a)中央地質調查所及其他單位之 GPS 連續觀測站平均速度場。(b)臺灣地區主軸應變率和面膨脹率。

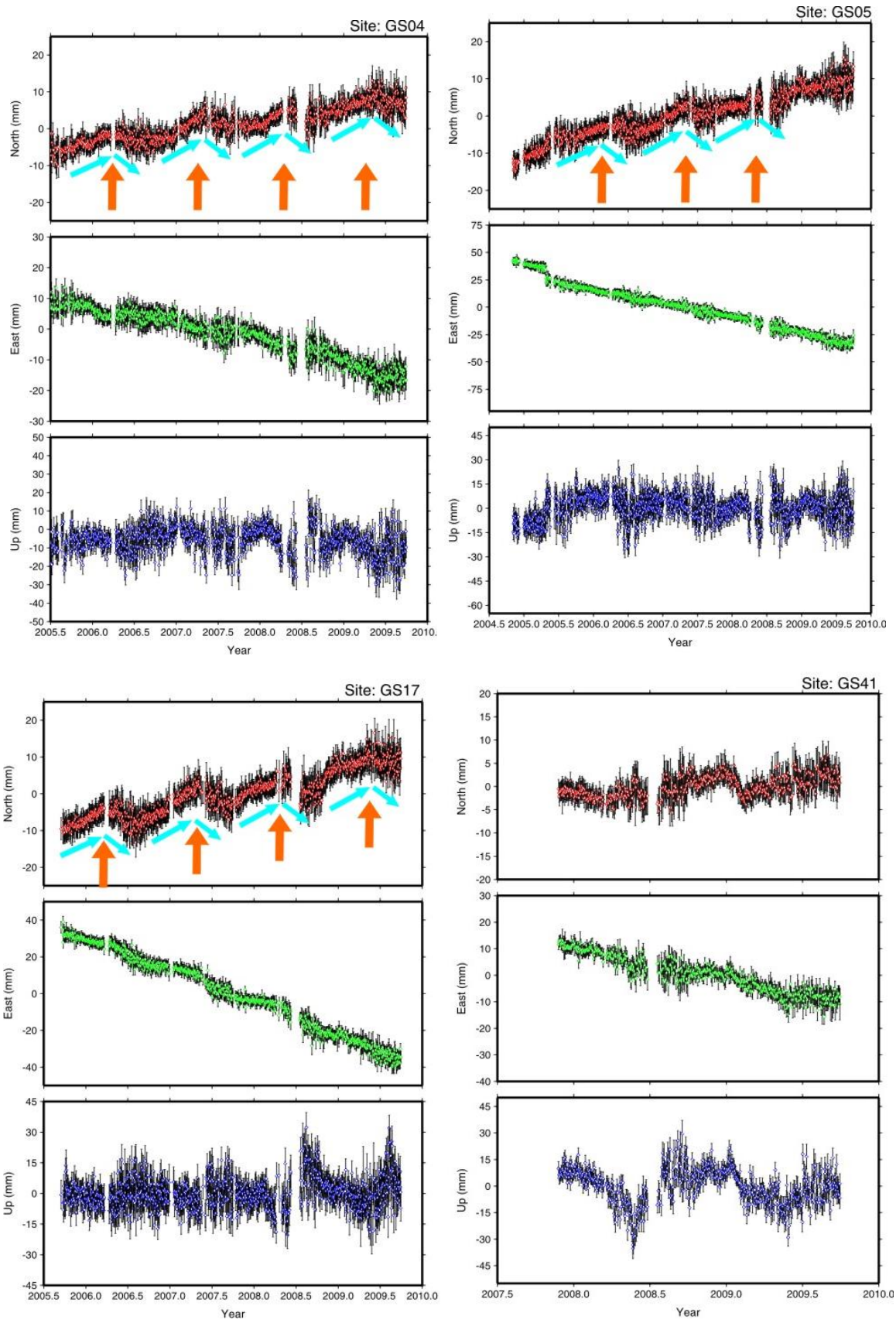


圖 1.3 連續 GPS 之 GS04、GS05、GS017 與 GS41 測站之時間序列(胡植慶等，2009)。

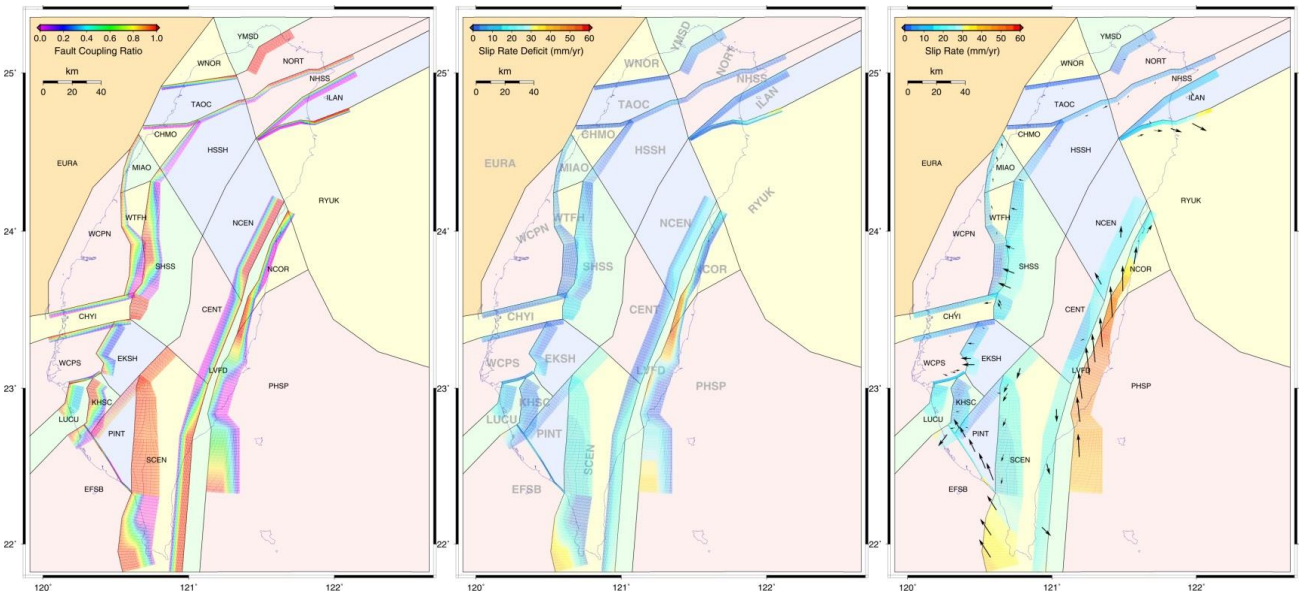


圖 1.4 塊體模型模擬地表變形之結果(胡植慶等，2009)。(a) 斷層面鎖定率分布圖；(b) 斷層面上滑移速率虧損值分布圖；(c) 斷層長期滑移速率分布圖。

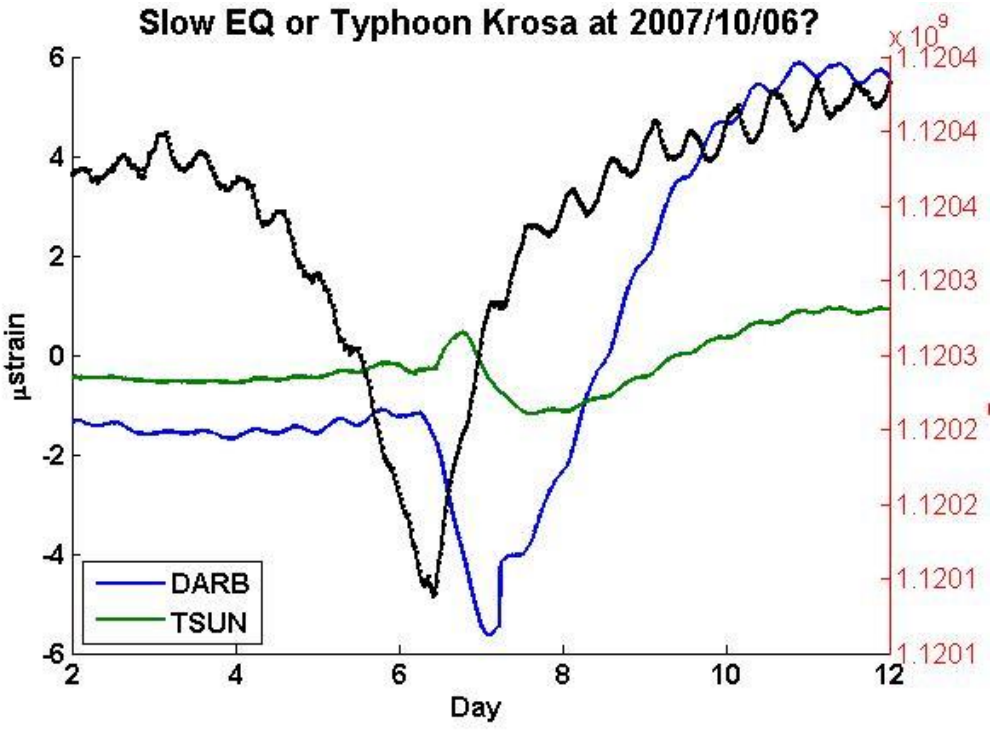


圖 1.5 柯羅莎颱風期間(2007 年 10 月)應變儀記錄顯示異常的改變(胡植慶等，2009)。達邦站(藍線)在颱風後有明顯的壓縮再回升，而中興站(綠線)則相反；黑線表示氣壓變化。

在整合觀測資料進行分析部分，GPS 觀測結果於地震發生前無明顯異常變化，而地球化學觀測結果則是在震前有異常變化，但目前仍無法分析出地震與地化異常的直接關連。因此，是否在地震前有前兆現象仍需要更多的資料做為佐證。初步分析得知持續時間夠久的氡氣異常記錄，皆與地震活動有關，其發生時間在地震前 10 天至 1 個月不等(圖 1.6)。未來加入更多地化測站異常資料，並整合井下應變與地下水位資料將能客觀的量化地震與地化異常的「觸發關係」。

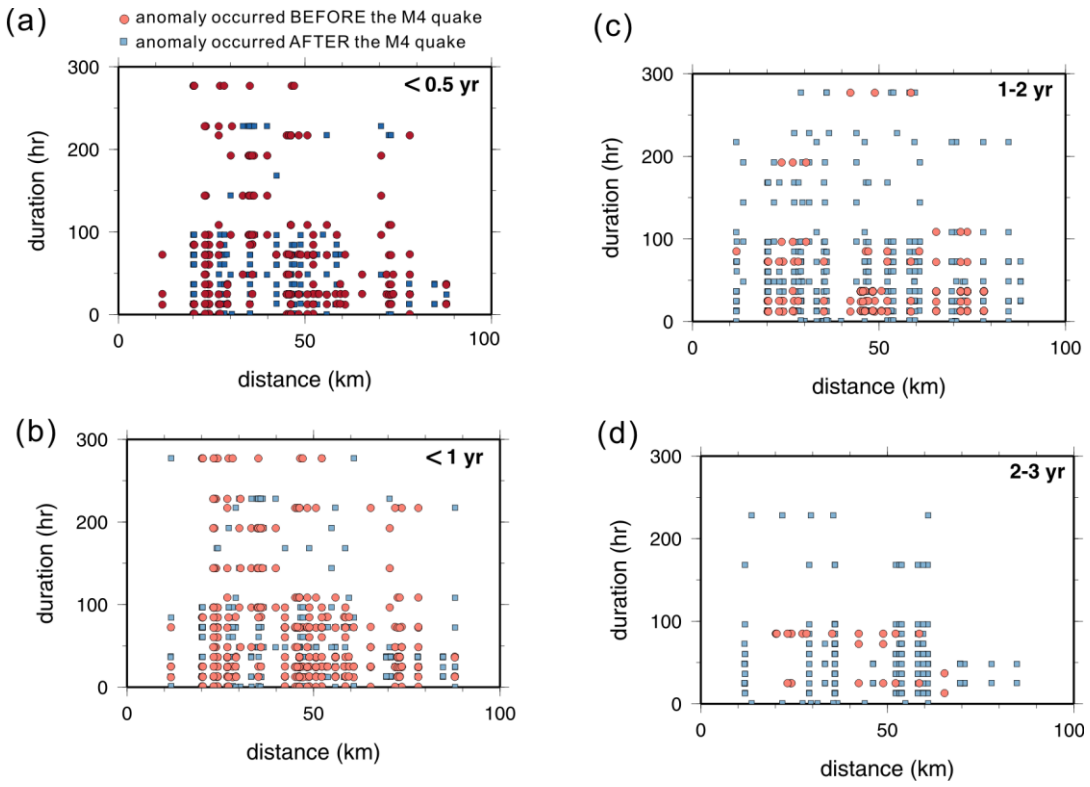


圖 1.6 地化異常在中大規模地震(規模 4 以上)前後的表現與地震距離之關係圖(胡植慶等，2009)。紅圓心為地化異常發生於中大規模地震前；藍方塊為地化異常發生於中大規模地震後。(a) 地化異常在中大規模地震相隔時間小於半年 (b) 相隔時間小於一年 (c) 相隔時間為一至兩年 (d) 相隔時間為兩至三年。

1-2 本年度工作內容概述

全程計畫目標在藉由地調所已設置 60 個 GPS 連續觀測站（未包括 99 年底新增 GS61-GS68 八站）、12 個井下應變儀及 6 個地球化學觀測站（圖 1.1）的監測資料，同時配合地質構造、數值模擬與斷層活動度研究，分析斷層活動潛能，並利用觀測資料之時間序列比對連續觀測站之異常關聯性。本年度工作項目如下：

1. GPS 連續觀測站

整合並處理地調所已設置與其它單位，如中央氣象局、中央研究院及內政部等共 184 個觀測站，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。

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臺灣各不同地區之變形特性。

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

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。

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。

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。

持續建立資料庫（收集並處理資料）。

實際應用 98 年已建立之井下應變儀維護記錄表標準格式，檢討本案巡察及維護使用後之效益。

3. 斷層潛勢分析

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。

4. 整合觀測資料分析

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。

1-3 本年度計畫期中之成果

1. GPS 連續觀測站

臺灣北部、東北部至宜蘭地區，中央山脈延伸至屏東恆春半島地區皆呈現伸張之主軸應變，最大伸張面膨脹率達 1.32 μstrain/yr。西部海岸平原壓縮量較小。西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈之主軸應變為壓縮應變，最大壓縮面膨脹率達 1.97 μstrain/yr。由花蓮北部沿中央山脈雪山山脈一帶，旋轉率呈現向東北方向順時鐘變化並增加旋轉角度。臺南、高雄北部地區也為順時針旋轉。苗栗至台中地區亦呈現順時鐘方向旋轉。海岸山脈至中央山脈東側及屏東恆春半島地區則呈現明顯的逆時針旋轉。

以 GPS 速度場解算出的平均應變率結果顯示，沿山腳斷層分布之最大主應力方向為東北東-西南西走向，局部區域的最大主應力變化則大致與斷層走向相互垂直，與物質側向伸張及弧後伸張之作用力影響方向一致；在新城斷層解算結果，沿新城斷層分布之最大主應力方向為東南東-西北西走向。應變率場顯示沿新城斷層之應力皆為壓縮應力，顯示此斷層為逆斷層。

2.井下應變儀觀測

井下應變儀部分，在七站(大坪國小、新樂國小、錦和國小、瑞峰國小、梅花國小、明德中學及樹林)資料中，除了瑞峰國小測站因兩個分量資料不正常外，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)，不會像嘉義地區的測站受地下水變化的影響。另外，太興國小測站的總和面積應變量變化曲線，與地下水位的變化幾乎完全同步，根據迴歸分析得結果，可看出 1 公尺的水位變化可以造成約 5.0275 μstrain 的變化。

在地下水影響量之移除之部份，根據分析，達邦、太興國小與中興國小三個測站的地下水位變化大，且井下應變儀資料受其影響也深，然而這影響量之估計並不太容易，因為各測站在較大地下水影響時，無法先有效的移除井孔鬆弛效應，因此也很難單獨的移除地下水的影響效應。

本計畫也嘗試對兩地震相關或其它觀測也有相同異常的例子作為探討對象，在逐漸累積經驗後再加以量化，而根據井下應變異常事件的判斷原則，找出較有意思的異常事件有：2010 年 3 月甲仙地震、2007/10/06 之地震以及 2010/05/23 之地震。在 2009 年 08 月到 2010 年 07 月的嘉義井下應變儀三站(DARB、TAIS、TSUN)的應變與同時間嘉義石桌附近的 GPS 觀測網 GS05-GS07-GS17 所算出的面積應變一起觀測，可看出其一致性與不一致性。在這段期間有幾個有趣的變化，其中較顯著的是在 2009 年十月三日與十二月十九的兩個花蓮磯崎附近的地震，規模分別為 M=6.1 與 M = 6.9，前者有太興站與 GPS 都是由之前的壓縮變回鬆弛，後者所有的觀測都在地震前明顯的鬆弛。又在 2009 年 11 月 5 日的南投名間地震(M = 6.2) 雖太興站有明顯的同震現象，但並無前震，其它站變化也不顯著。至於 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震(M=6.6)與 3 月 8 日的兩個臺南地震 (M=4.9) 則各站變化迥異，須與其他資料再詳細參照。

3. 斷層潛能分析模式之評估

活動斷層潛勢經評估成果，山腳斷層潛勢未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 3.0%、4.8%及 9.0%；而新城斷層潛勢未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 0.0%、0.0%及 0.2%。

4. 整合觀測資料進行分析

綜合背景地震活動速率異常、井下應變儀異常、與氡氣異常事件，分析結果發現在八個異常事件中有四個同時有氡氣及井下應變儀異常，而僅有兩個同時具氡氣、井下應變儀、及地震活動異常。

二、連續 GPS 觀測站之成果

2-1 速度場、主軸應變與旋轉率

中央地質調查所於 2002 年至 2010 年共設置 68 個 GPS 連續觀測站(圖 2.1)，本年度報告計畫為計算 2009 年 10 月至 2010 年 10 月之觀測資料，並加入 2002 年以來的計算資料，提供速度場分析與時間序列變化觀測。藉由 Nikolaidis（2002）時間序列表示法，將全臺灣時間序列擷取分析。其中，由於參考約制站 S01R 於 2009 年 10 月 29 日更換天線盤，在更新 IGS 校正參數後仍有些許偏差，研究團隊將尋求較佳的解決方式，再將此誤差消除。此外各測站再經由已知因素校正：新竹高工 GS02 測站之時間序列變化，2005 年 4 月至 2006 年 6 月受到大樓施工的影響，將所造成之偏移扣除後再加以評估計算。GS49 與 GS50 於 2009 年 8 月在南北方向產生一階變化，變化原因是由山崩造成，計算速度場、主軸應變率與旋轉率時已將此因素校正。GS51-GS60 因觀測時間較短，僅將時間序列呈現，而不將速度場納入應變率計算，以減少誤差。GS61-GS68 自 2010 年 10、11 月新建立，觀測資料累積之後加入計算與討論。因此，全臺灣相對於澎湖 S01R 站之平均速度場如圖 2.2 和表 2.1 所示。於 ITRF2005 框架下之相對於地球質心運動之速度場如圖 2.3 所示。由於地體構造與速度場變化之關連性，本計畫將討論區域分為 A-E（北部地區、新竹地區、中部地區、嘉義地區及西南地區），並將時間序列結果呈現於附錄 A，其中時間序列非線性變化與異常變化皆未刪除。

由本計畫的連續 GPS 觀測結果所獲得相對於澎湖 S01R 速度場與余水倍 1997 年所發表屬於震間速度場相比較，其方法為利用 Lin et al.（2010）所發表利用平均速度場與集集地震前之速度場比較。本計畫結果(如圖 2.4b)，由兩不同時段所計算出之速度場比較可以發現集集地震後速度場變化大致上可以分為五個區域（a-e），a 區速度場變化不大介於 0-10 mm 的變化，但變化方向很明顯的是順時鐘方向；b 區主要受倒車籠埔斷層上盤影響，速度場向西增加顯著介於 10-22 mm；c 區北段主要為車籠埔斷層下盤，南段主要為嘉南平原與中央山脈中斷的西側，該區域變化不大大致在 0-5 mm 間變化；d 區主要為臺灣東部其中在台東段有 27 mm 的變化，該值受到集集地震後主要較大的陸地上地震如成功地震及卑南地震影響，因此產生區域速度場差異；e 區域變化最大，最大值達 29 mm，其向西大致以潮州斷層為界，向西屬於 c 區，速度場差異較小。

為評估主軸應變率與旋轉率，本年度期末報告另加入上年度所分析之地調所與其他單位（中央氣象局、中央研究院、內政部、中正大學、國土測繪中心等）的 GPS 站之速度場。總計與其他單位交換之連續觀測站共 124 站，與地調所測站加以彙整，共 192 個觀測站（圖 2.1），其速度場（不包括 GS51-GS68）如圖 2.4 所示。接著除去資料不足或特異之資料後進行主軸應變率與旋轉率之評估(圖 2.5 與圖 2.6)。

表 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場（資料解算至 2010 年 10 月）

Station	Lon (°)	Lat (°)	V_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	V_H (mm/yr)	S_E (mm/yr)	S_N (mm/yr)	S_H (mm/yr)	V (mm/yr)	Azi (°)
GS01	121.5082	24.9820	3.56	4.55	-0.16	0.03	0.03	0.10	1.0	38.0
GS02	120.9823	24.8097	-3.35	2.22	-3.24	0.05	0.05	0.30	4.0	303.5
GS03	121.0441	24.7766	-3.68	7.37	-0.65	0.04	0.03	0.19	4.0	333.5
GS04	120.5068	23.5915	-5.58	3.42	-2.19	0.92	0.21	0.90	4.0	301.5
GS05	120.5684	23.5671	-14.01	4.77	1.21	0.04	0.03	0.15	4.0	288.8
GS06	120.5542	23.4656	-15.40	3.44	2.02	0.04	0.03	0.15	4.0	282.6
GS07	120.6548	23.4829	-18.93	4.74	6.68	0.04	0.04	0.17	4.0	284.1
GS08	121.5015	25.2037	2.48	6.18	-0.38	0.04	0.04	0.22	1.0	21.9
GS09	121.6519	25.2086	4.19	4.41	0.81	0.05	0.04	0.23	1.0	43.5
GS10	121.4615	25.1462	1.08	5.22	-4.63	0.04	0.04	0.21	1.0	11.7
GS11	121.4988	25.1336	1.40	5.17	-2.59	0.04	0.04	0.20	1.0	15.2
GS12	121.3828	25.0530	2.56	3.85	-0.26	0.04	0.04	0.21	1.0	33.6
GS13	121.4522	25.0200	1.94	4.85	2.39	0.05	0.04	0.27	1.0	21.8
GS14	120.9595	24.8032	-0.31	4.02	-1.57	0.04	0.03	0.18	4.0	355.6
GS15	120.9905	24.7666	-1.48	4.50	0.62	0.03	0.03	0.17	4.0	341.8
GS16	121.0416	24.7479	-1.58	5.24	-0.57	0.04	0.03	0.19	4.0	343.2
GS17	120.6058	23.5612	-17.31	5.62	3.18	0.04	0.05	0.21	4.0	288.0
GS18	120.4738	23.4850	-9.80	2.79	0.16	0.03	0.04	0.18	4.0	285.9
GS19	121.6798	25.0723	5.67	3.71	-0.23	0.05	0.04	0.26	1.0	56.8
GS20	121.9400	24.8425	14.01	-6.70	-18.03	0.06	0.06	0.40	2.0	115.6
GS21	120.5124	24.0973	-1.86	0.99	-1.30	0.04	0.04	0.22	4.0	298.0
GS22	120.6063	24.0909	-3.70	2.16	-0.98	0.04	0.04	0.23	4.0	300.3
GS23	120.6477	24.0946	-5.15	4.00	16.59	0.05	0.04	0.63	4.0	307.8
GS24	120.5261	24.0252	-2.64	1.17	-5.89	0.04	0.04	0.27	4.0	293.9
GS25	120.6402	23.9865	-4.69	3.55	0.26	0.05	0.05	0.29	4.0	307.1
GS26	120.6460	23.8698	-4.79	2.10	1.11	0.04	0.04	0.24	4.0	293.7
GS27	120.5779	23.8248	-3.59	2.03	-1.51	0.04	0.04	0.21	4.0	299.5
GS28	120.2144	23.0810	-6.03	0.48	-1.23	0.05	0.04	0.22	4.0	274.6
GS29	120.3158	23.0751	-10.16	-0.85	6.44	0.04	0.04	0.22	3.0	265.2
GS30	120.2263	23.0205	-11.36	0.53	2.05	0.05	0.04	0.20	3.0	272.7

表 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場（續）

Station	Lon (°)	Lat (°)	V_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	V_H (mm/yr)	S_E (mm/yr)	S_N (mm/yr)	S_H (mm/yr)	V (mm/yr)	Azi (°)
GS31	120.2758	23.0189	-14.60	-0.80	-0.67	0.04	0.03	0.22	3.0	266.9
GS32	120.3371	23.0258	-23.03	-10.29	0.90	0.19	0.23	0.25	3.0	245.9
GS33	120.1878	22.9644	-10.96	0.47	0.50	0.04	0.04	0.21	4.0	272.5
GS34	120.2751	22.9392	-20.68	-0.69	2.66	0.04	0.04	0.21	4.0	268.1
GS35	120.3094	22.9355	-22.02	-1.60	2.62	0.05	0.04	0.24	3.0	265.8
GS36	120.6253	24.3620	-1.86	2.00	0.84	0.07	0.05	0.23	4.0	317.1
GS37	120.7154	24.3286	-4.45	2.17	-0.03	0.05	0.04	0.25	4.0	296.0
GS38	120.6006	24.2798	-1.77	0.68	-0.69	0.04	0.04	0.23	4.0	291.0
GS39	120.5296	24.1844	-1.43	1.45	-0.46	0.06	0.04	0.23	4.0	315.4
GS40	120.5763	24.1812	-1.88	2.42	-1.09	0.04	0.06	0.22	4.0	322.2
GS41	120.4449	23.3776	-11.31	4.39	-1.32	0.09	0.09	0.55	4.0	291.2
GS42	120.4520	23.2732	-19.75	5.96	10.19	0.10	0.11	0.43	4.0	286.8
GS43	120.3736	23.2572	-8.88	3.80	5.55	0.10	0.09	0.42	4.0	293.2
GS44	120.4004	23.2222	-15.90	3.53	13.46	0.09	0.10	0.43	3.0	282.5
GS45	120.7282	22.7491	-56.60	6.73	16.82	0.44	0.32	2.21	4.0	276.8
GS46	120.6495	22.5275	-57.24	5.03	9.64	0.24	0.22	1.67	4.0	275.0
GS47	120.7453	21.9487	-40.36	7.08	-13.53	0.42	0.32	1.83	4.0	279.9
GS48	121.1886	24.0236	-20.78	12.47	12.06	0.37	0.34	2.39	3.0	301.0
GS49	121.1845	24.0260	-19.14	-16.95	-35.01	0.56	0.67	3.91	3.0	228.5
GS50	121.1833	24.0231	-22.38	-3.69	-23.02	0.74	1.01	6.52	3.0	260.6

註：V_E, V_N, V_H 分別代表東西、南北與高程之速度場；S_E, S_N, S_H 分別代表東西、南北與高程之速度場誤差；V 代表水平速度場；Azi 為水平速度場之方位角。

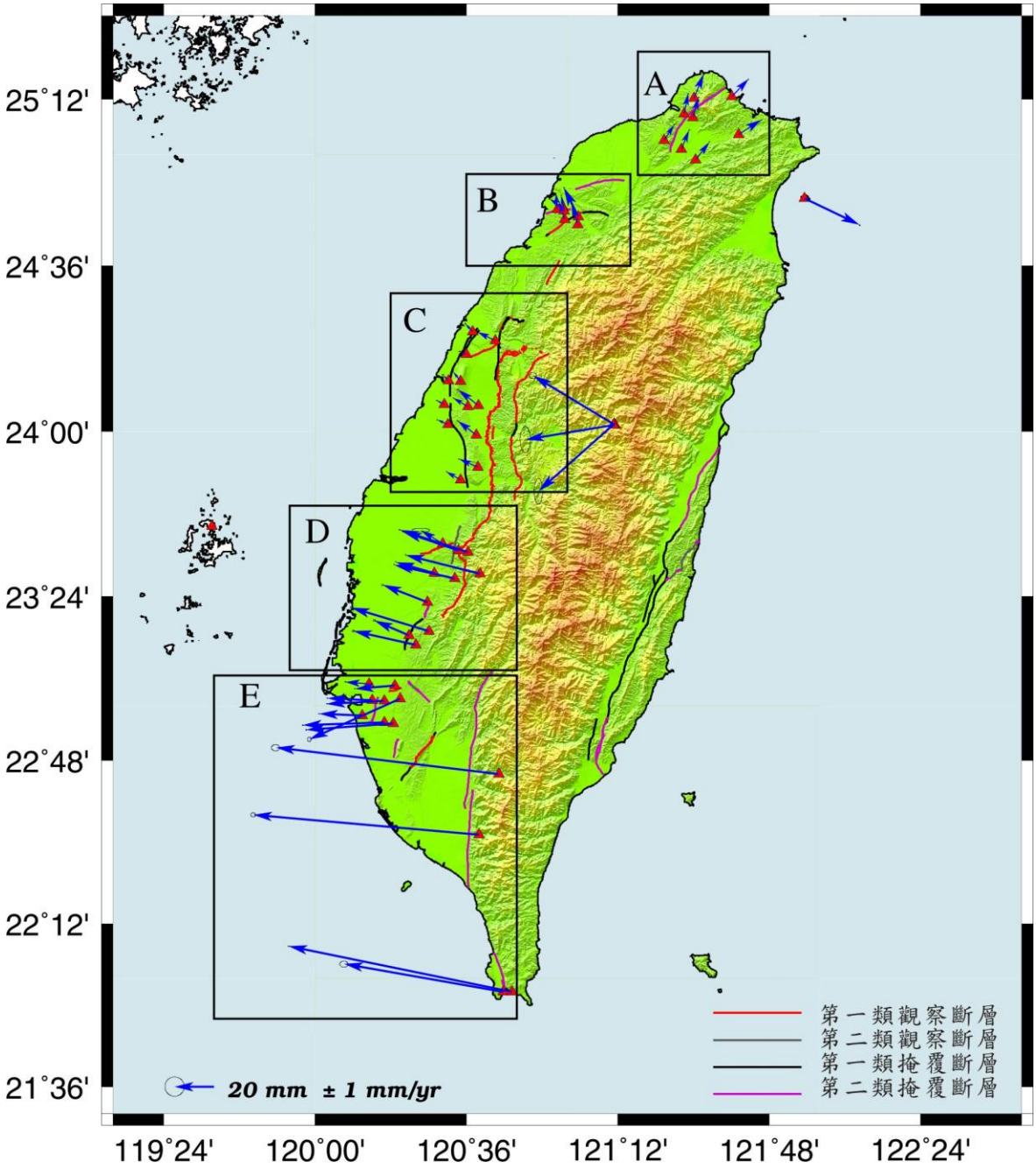


圖 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站相對於澎湖 S01R 站之平均速度場。方框 A-E 為本計畫探討之區域。(觀測資料時間段：2003-2010)

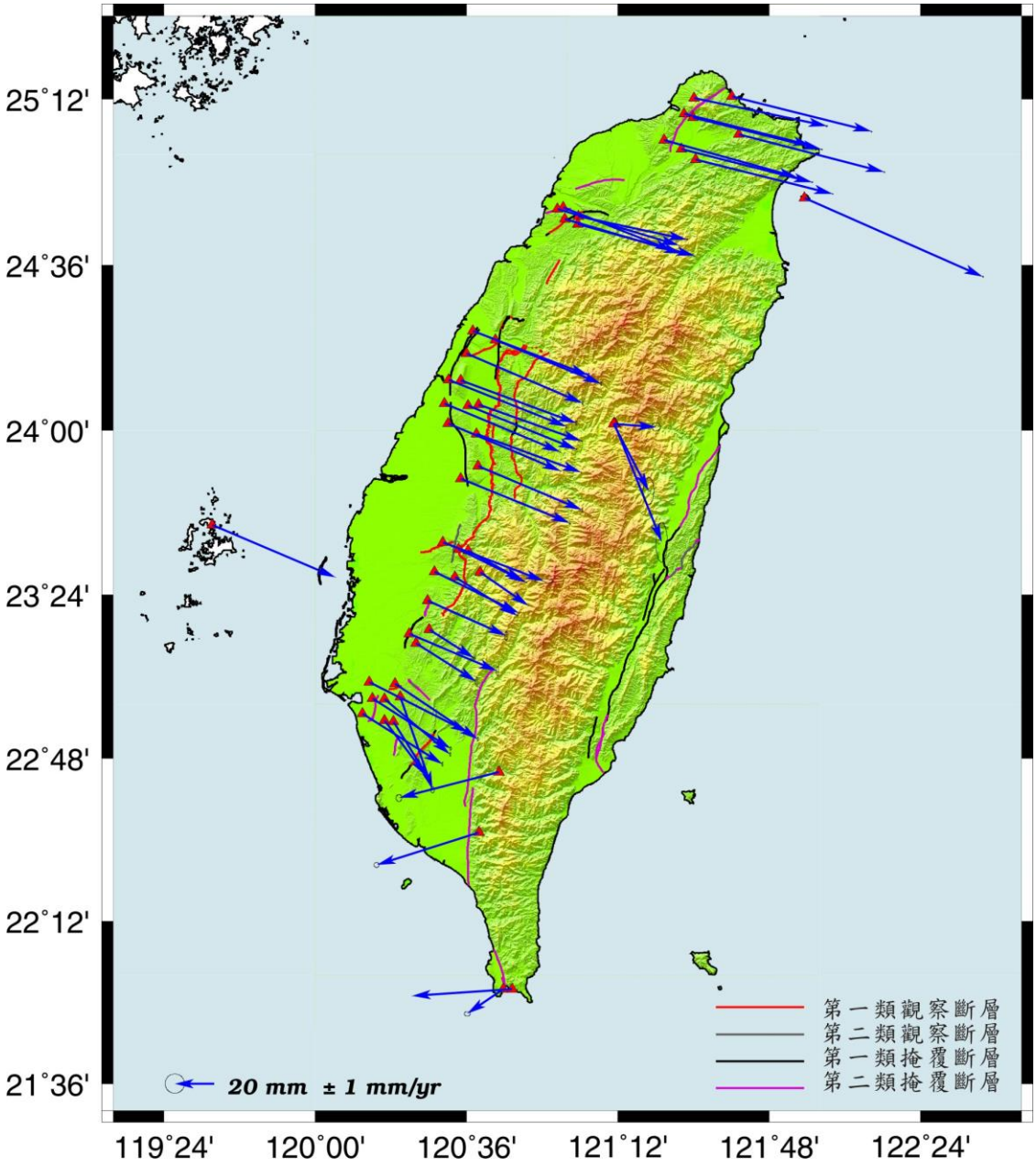


圖 2.2 中央地質調查所 GPS 連續觀測站以 ITRF2005 為框架之平均速度場。(觀測資料時間段：2003-2010)

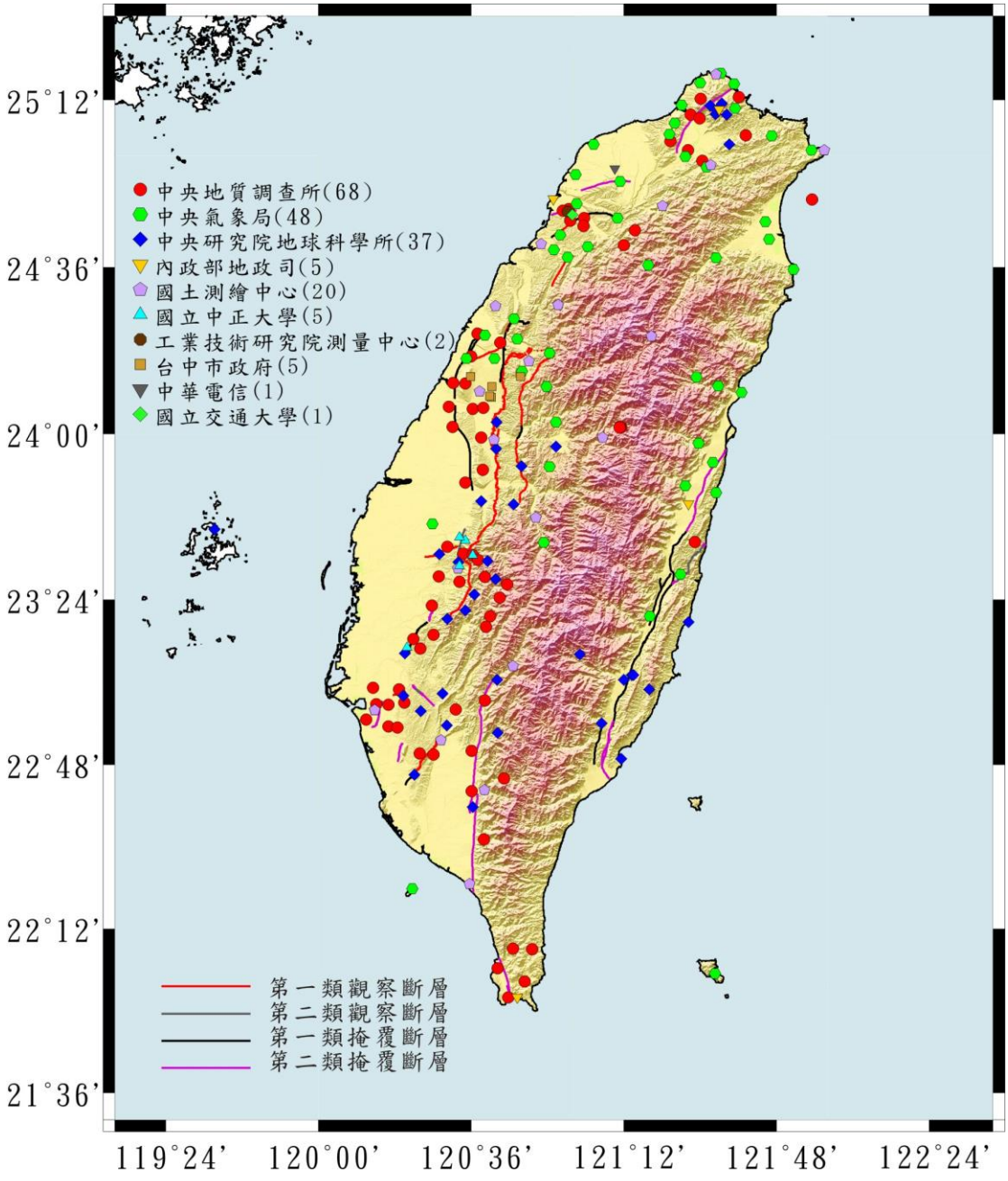


圖 2.3 中央地質調查所 68 個 GPS 連續觀測站以及其他單位 124 個 GPS 連續觀測站之測站分布圖。

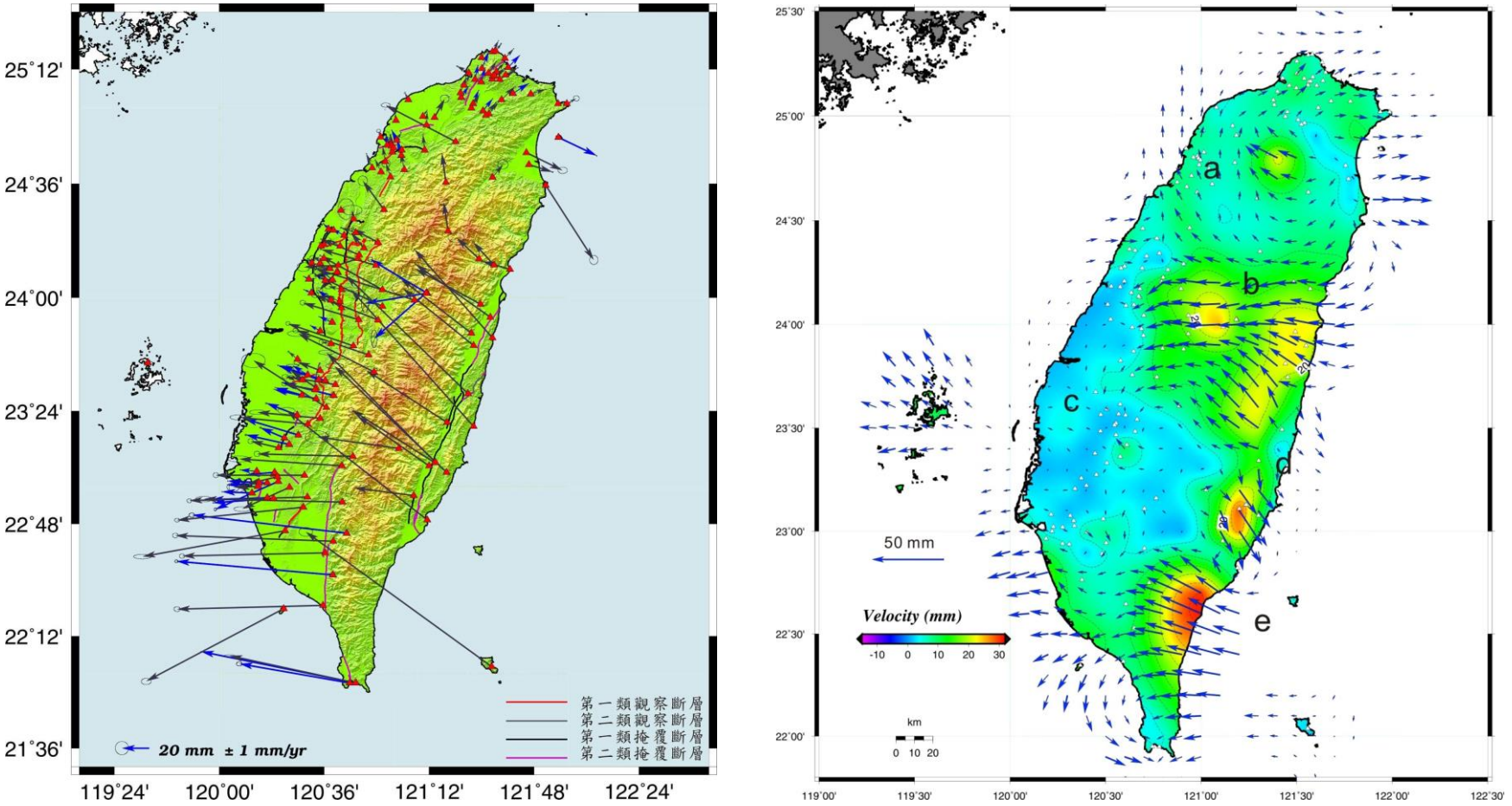


圖 2.4 （a）中央地質調查所及其他單位之 GPS 連續觀測站相對於澎湖 S01R 站之平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站(GS01-GS50)之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。（b）利用 Lin et al.（2010）所發表之方法將本計畫的連續 GPS 觀測結果所獲得相對於澎湖 S01R 速度場與余水倍 1997 年所發表震間速度場比較。(觀測資料時間段：2003-2010)

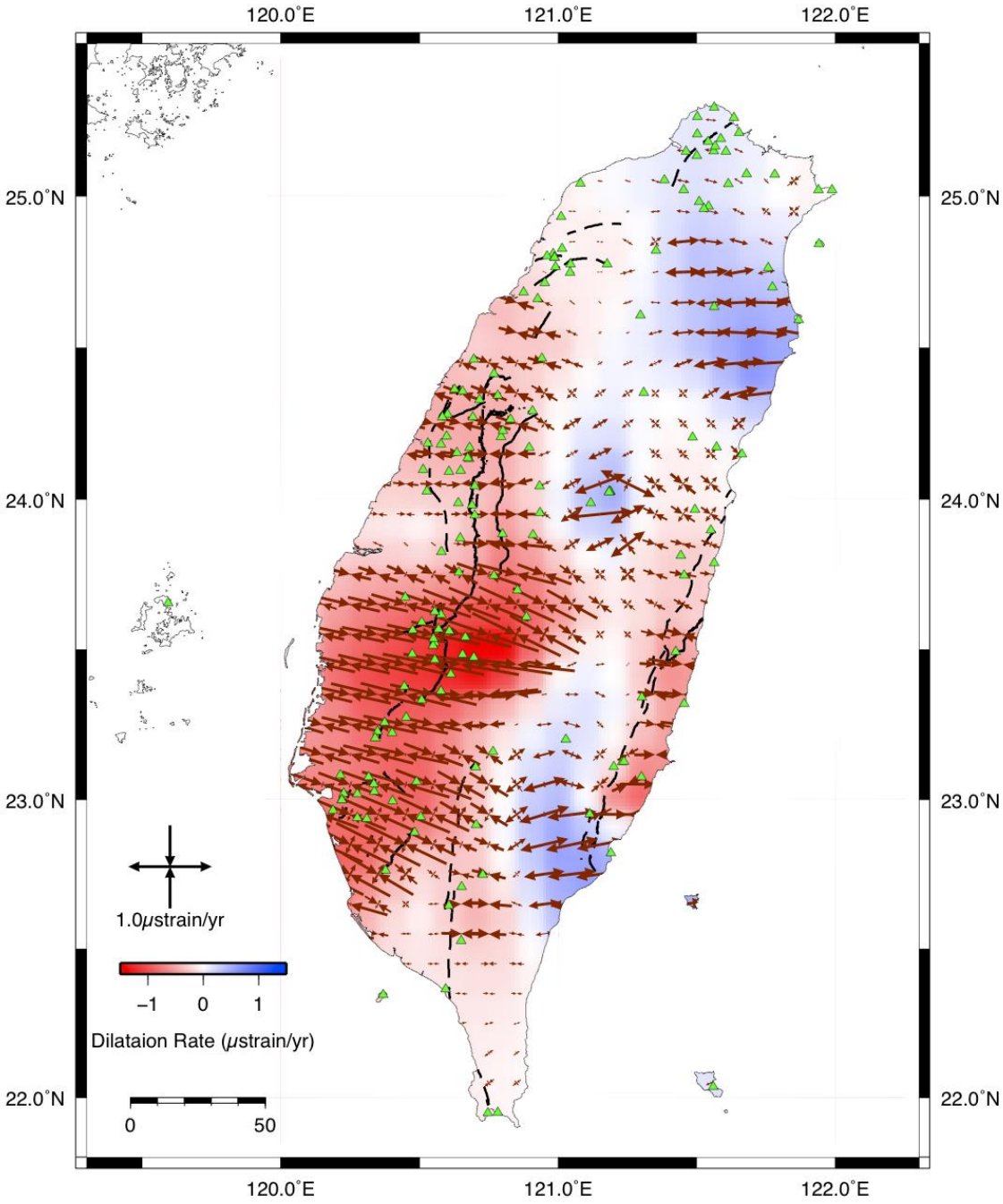


圖 2.5 GPS 連續觀測站之主軸應變率和面膨脹率。雙箭頭向內代表壓縮主軸應變軸，雙箭頭向外代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。底圖之顏色表示面膨脹率；紅色表示壓縮，藍色表示伸張。(觀測資料時間段：2003-2010)

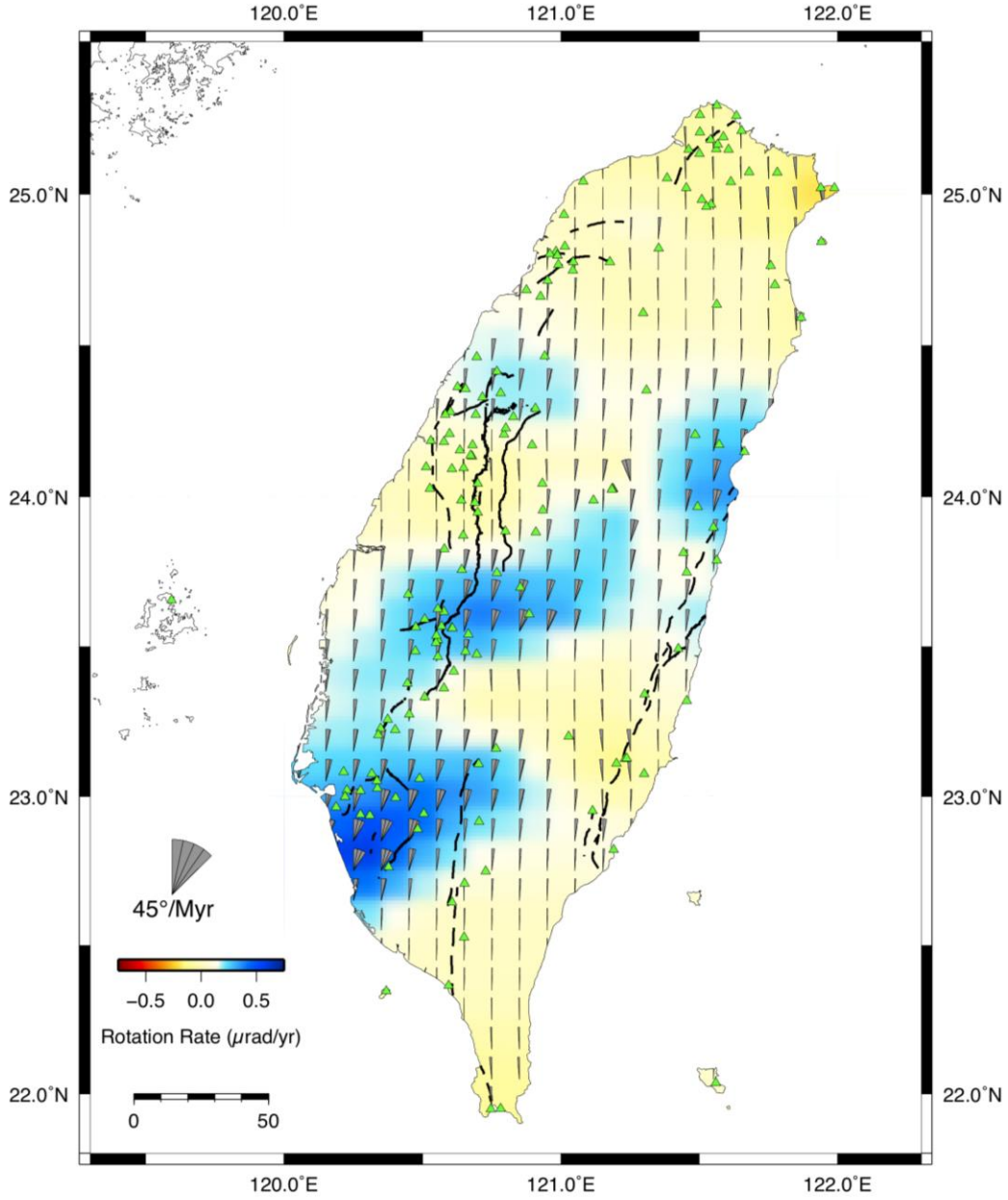


圖 2.6 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。(觀測資料時間段：2003-2010)

2-1-1 北部地區

本區域測站較多為沿著山腳斷層兩側分布，結果顯示台北地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 2.0 至 5.7 mm/yr，其方位角介於-1.5°至 69°之間，平均速度場為約 3.4 mm/yr，平均方位角為 28°（圖 2.7）。本區域中大部分的主軸應變為伸張，僅在局部地區呈現壓縮應變，但量級皆不大。其中伸張應變較大的區域為宜蘭地區，伸張面膨脹達 0.95 μstrain/yr（圖 2.8）。雪山山脈及北部山區呈現順時針旋轉，其他地區則無明顯旋轉趨勢，如圖 2.9 所示。

時間序列中，GS01 測站觀測時間最久（2002 年 06 月 17 日開始記錄），資料累積較豐富。因此，在時間序列可以明顯觀察到移動方向相反的年週期變化，變化時間點約為每年的 2 月初及 8 月初，且三個方向皆有此年週期變化現象。除了 GS01 測站之外，GS08 測站之南北方向的時間序列亦可看出此年週期變化，變化時間點約為每年的 6 月及 11 月，如圖 2.10 所示。另一方面，GPS 資料接收與解算後結果可明顯觀察出時間序列的離散程度有顯著的差異，而且具有時間段出現之現象。未來需再加入氣象資料並配合其他測站資料，進一步佐證是否與季節變化有關。GS10 及 GS13 測站的高程分量，下降後回升再下降，呈現一階階的趨勢。GS10 測站從每年 10 月開始下降至隔年 7 月開始上升，之後 10 月再下降，接近年週期變化；而 GS13 測站從資料接收（2005 年 8 月）到次年同一時期高程明顯下降約 41.7 mm，之後有先回升再下降的趨勢，此變化週期較長，約 22 個月（圖 2.10）。

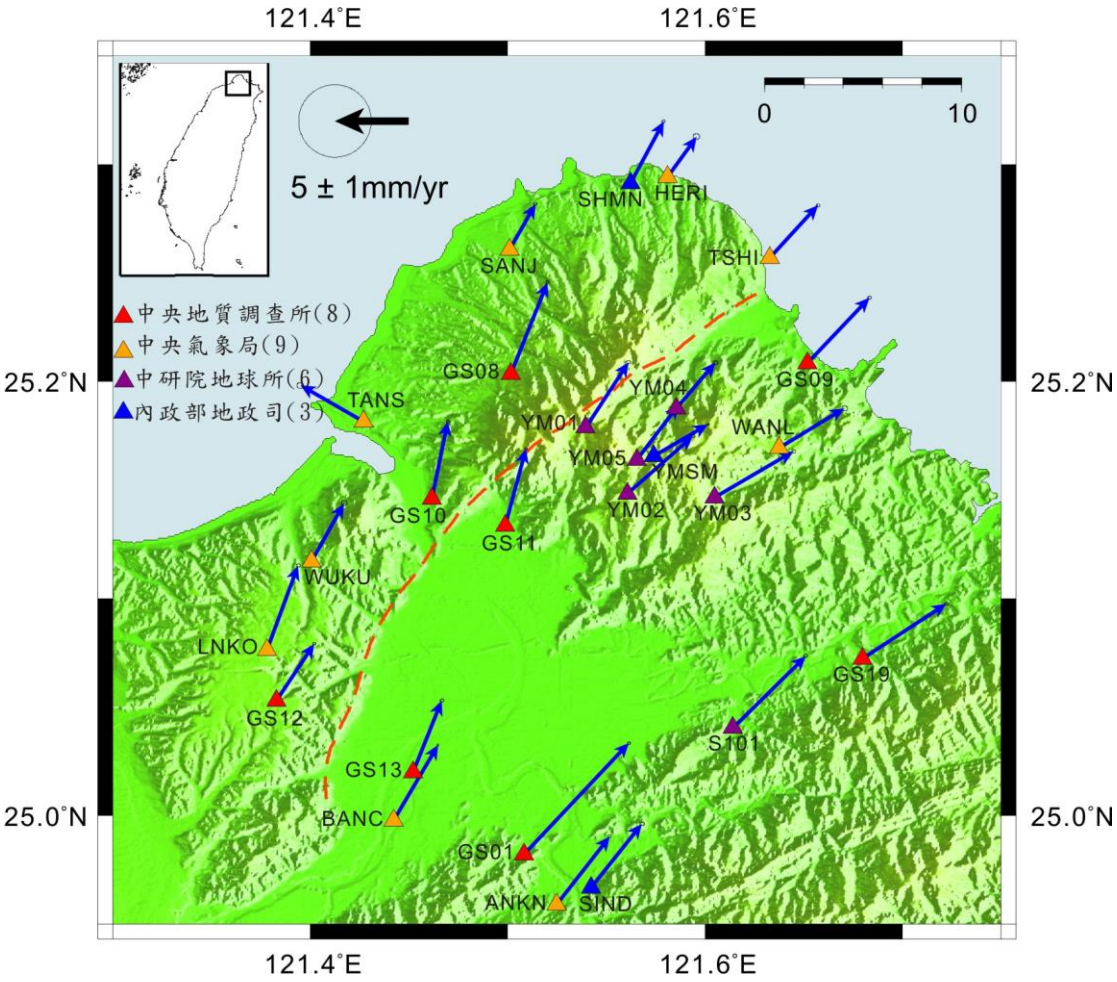


圖 2.7 北部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。(觀測資料時間段：2003-2010)

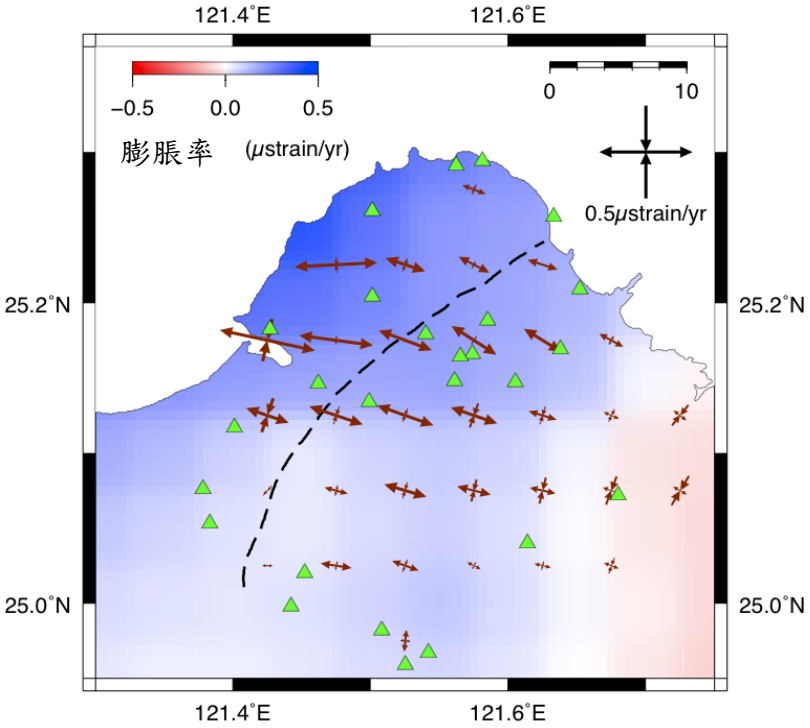


圖 2.8 北部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。雙箭頭向內代表壓縮主軸應變軸，雙箭頭向外代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。底圖之顏色表示面膨脹率；紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

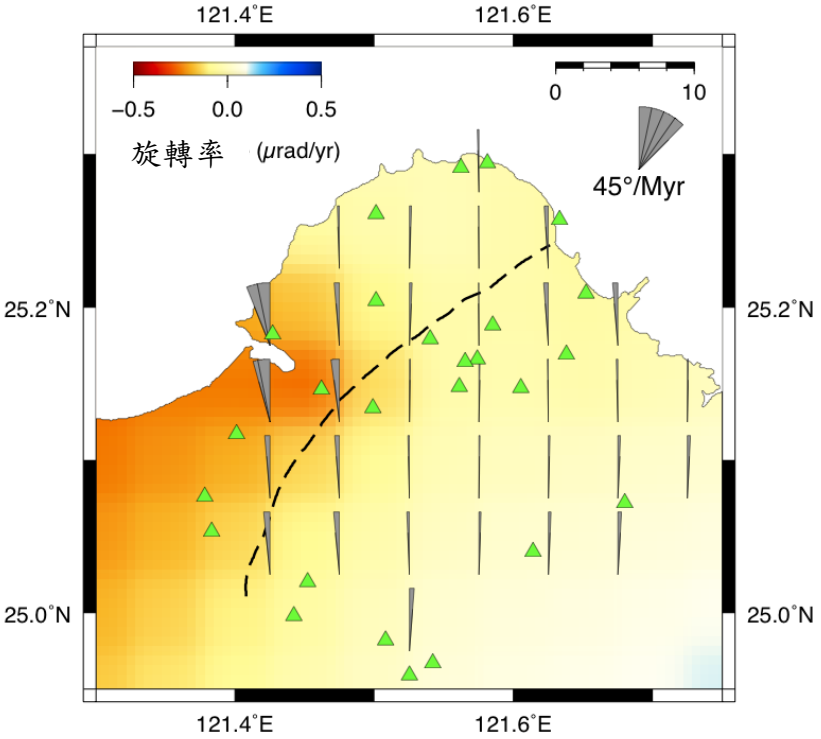


圖 2.9 北部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

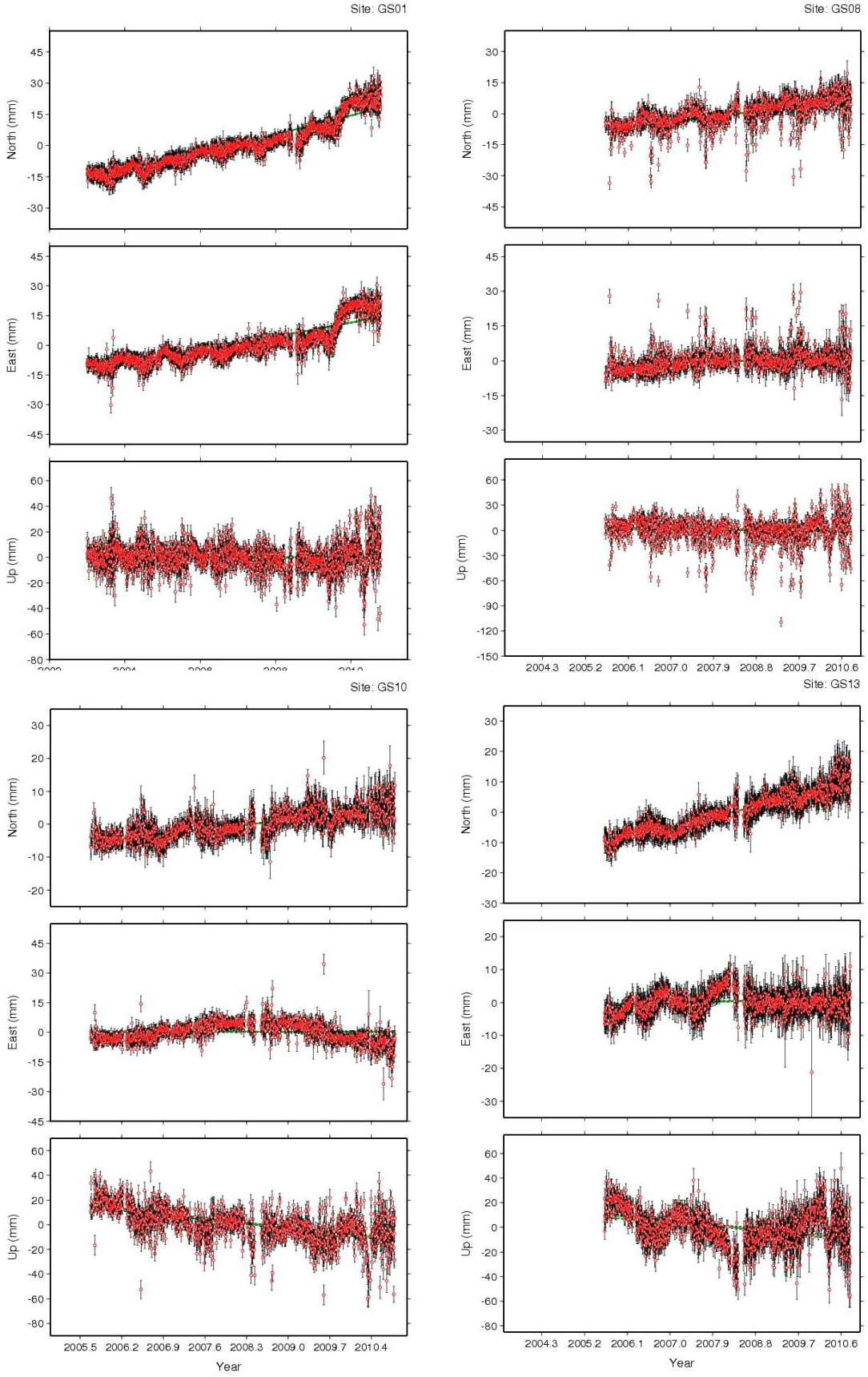


圖 2.10 測站 GS01、GS08、GS10 及 GS13 之時間序列。

2-1-2 新竹地區

新竹地區測站多分布於新城斷層兩側，相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 3.6 至 6.4 mm/yr，方位角介於 295˚至 336˚之間。平均速度場為約 4.9 mm/yr，平均方位角為 330˚（圖 2.11）。新竹市區與竹北地區呈現明顯的壓縮之主軸應變，最大壓縮面膨脹率為 1.42 μstrain/yr，其他地區都相當的小，如圖 2.12。在旋轉率方面，除了北部沿海地區有明顯的順時針旋轉外，其他地區皆無明顯旋轉趨勢，如圖 2.13 所示。

在時間序列方面，GS03 測站於 2005 年 4 月底，往南偏移了 8.2 mm，而高程方向抬升約 7.9 mm。GS03 測站及 GS15 測站從 2008 年 8 月起至 2009 年初，由南北方向之時間序列發現往北偏移約 10.8 mm 及 5.6 mm，之後有再下降的趨勢（圖 2.14），與前一台北地區之 GS11 測站具有相同趨勢。由長時間的時間序列觀測瞭解其變化為週期性的波動，唯 GS03 與 GS11 在該時間段變化速率加快且明顯，目前週期性影響仍無法確定主要影響因子，需在往後的研究中探討該一科學問題，以獲得解答。

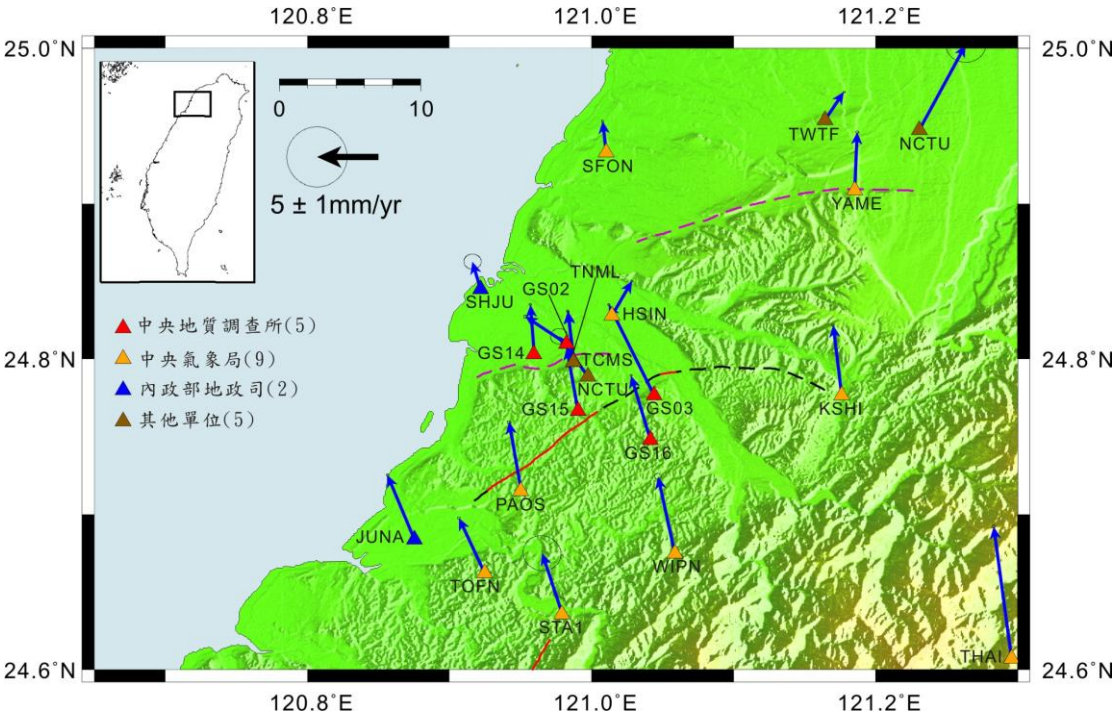


圖 2.11 新竹地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。(觀測資料時間段：2003-2010)

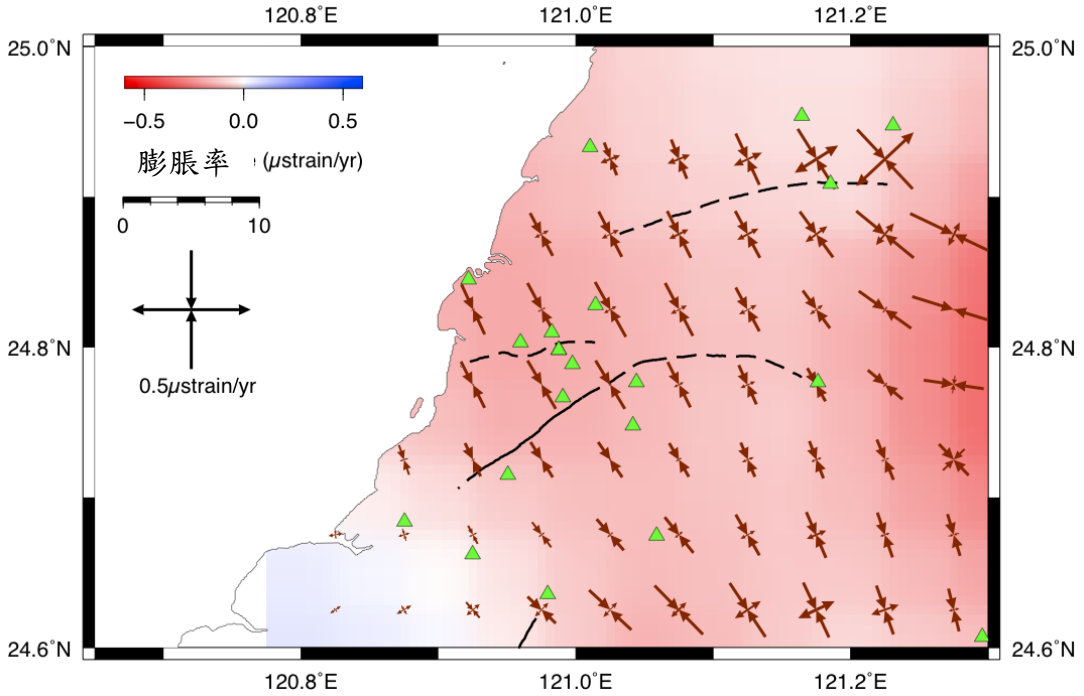


圖 2.12 新竹地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。雙箭頭向內代表壓縮主軸應變軸，雙箭頭向外代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。底圖之顏色表示面膨脹率；紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

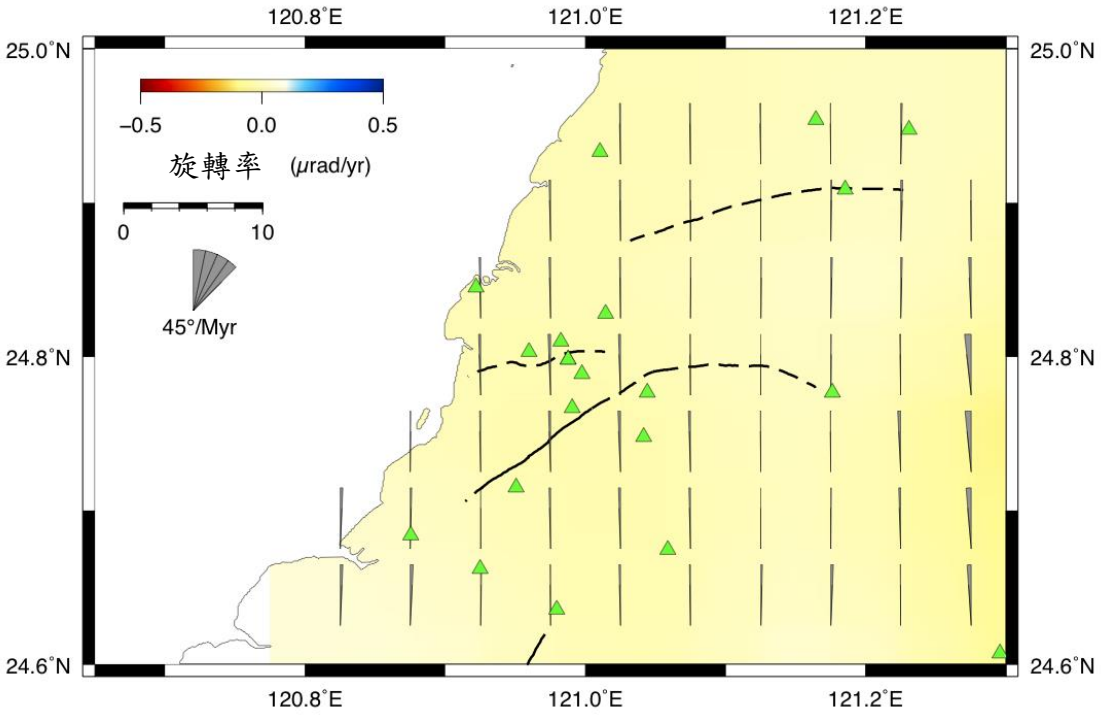


圖 2.13 新竹地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左為逆時針旋轉。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

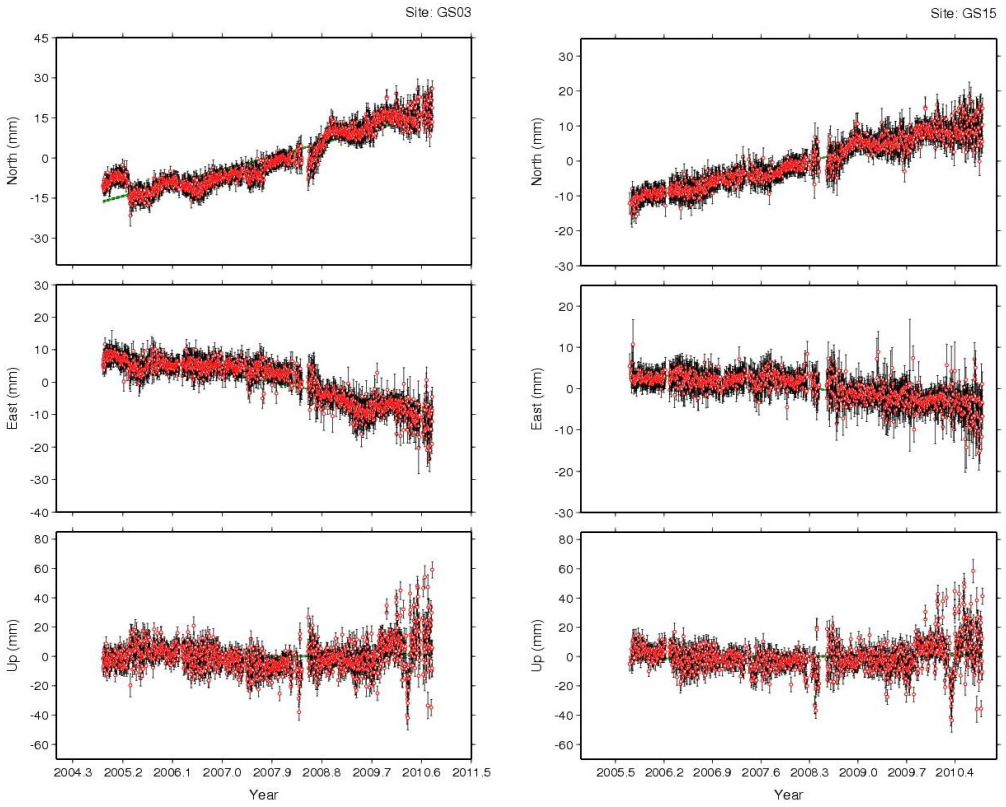


圖 2.14 測站 GS03 及 GS15 之時間序列。

2-1-3 中部地區

中部地區測站多分布於屯子腳斷層與彰化斷層兩側。921 集集地震主要破裂帶為車籠埔斷層，測站皆位於車籠埔斷層西側，亦可以提供震後該區域變形量之分析。然而主要還是以彰化斷層兩側測站基線變化為未來研究的方向。中部地區相對於澎湖白砂 S01R 之速度場介於 1.9 至 6.5 mm/yr，其方位角介於 291°至 322°之間。平均速度場約為 3.8 mm/yr，平均方位角為 303°（圖 2.15）。本區域主要為壓縮應變為主，尤其橫跨車籠埔斷層出現較大量的壓縮應變。而車籠埔斷層上盤亦觀測到壓縮應變，如圖 2.16，顯示 921 震後速度場的變化在此斷層兩側呈現不均勻的分布。本區域之旋轉率變化，除了車籠埔斷層北段，有少許之順時針旋轉趨勢外，其他地區都無明顯之旋轉趨勢（圖 2.17）。

時間序列中，本區域測站大致穩定，其中 GS23 測站從 2008 年 6 月至同年 9 月，垂直方向共抬升 103.3 mm。而其中 GS36 及 GS39 測站於東西方向之時間序列，以及 GS40 測站於南北方向之時間序列有明顯波動之變化。圖 2.18 中之藍色箭頭指出斜率出現轉折變化之處，此四段時間分別為 2007 年 2 月 4 日、2008 年 3 月 2 日、2009 年 1 月 3 日及 2009 年 12 月 18 日。

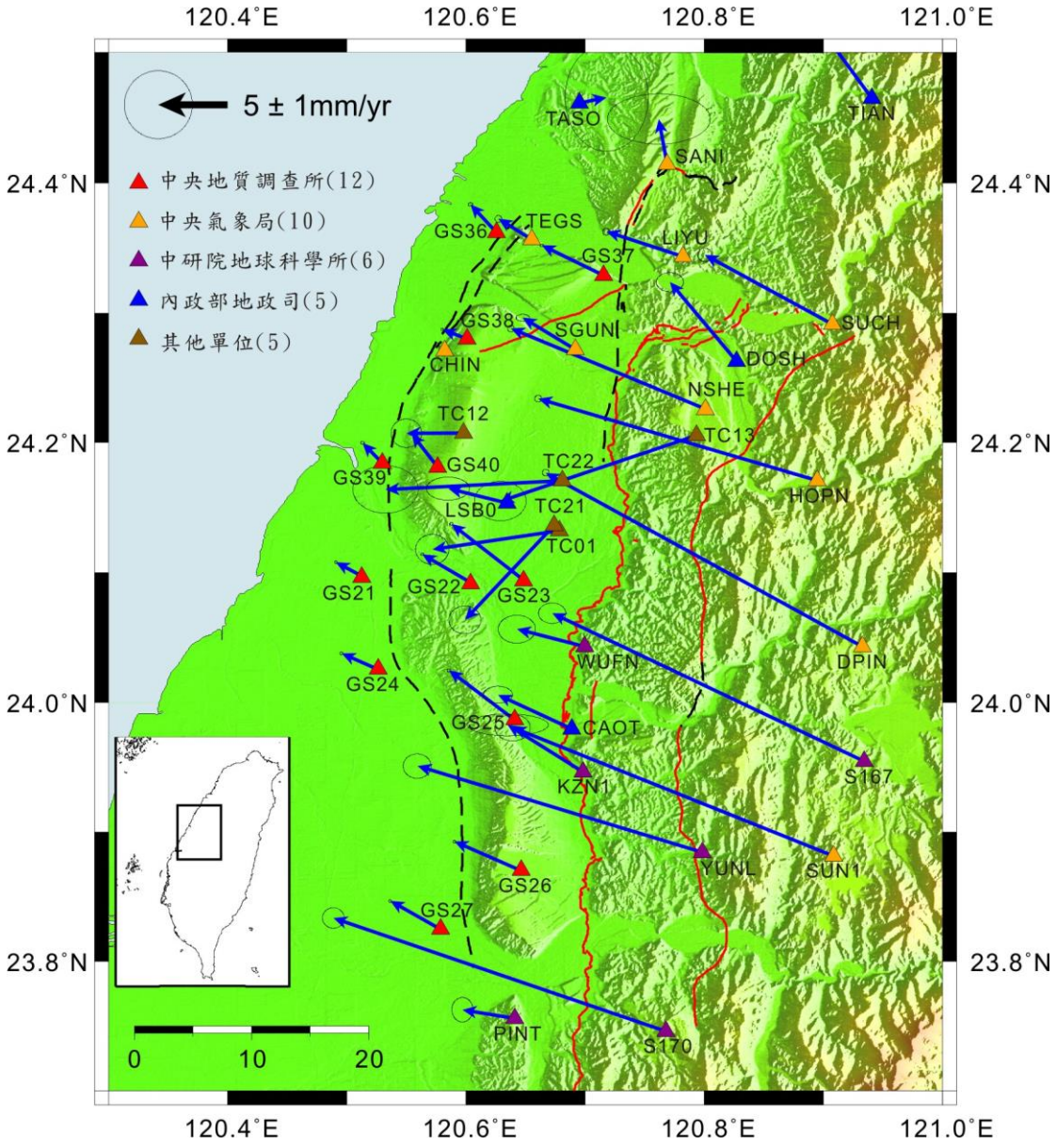


圖 2.15 中部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。(觀測資料時間段：2003-2010)

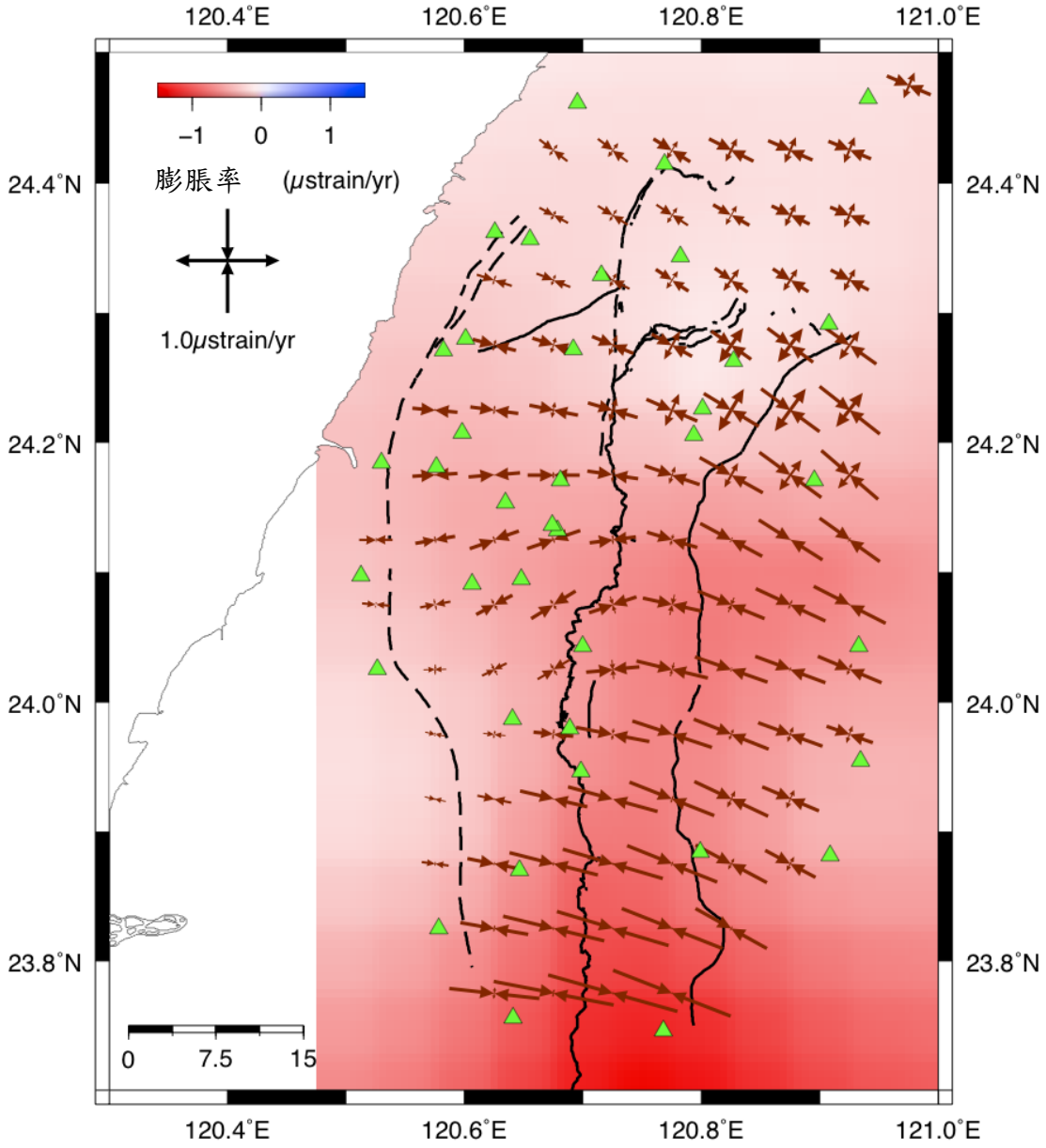


圖 2.16 中部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。雙箭頭向內代表壓縮主軸應變軸，雙箭頭向外代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。底圖之顏色表示面膨脹率；紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

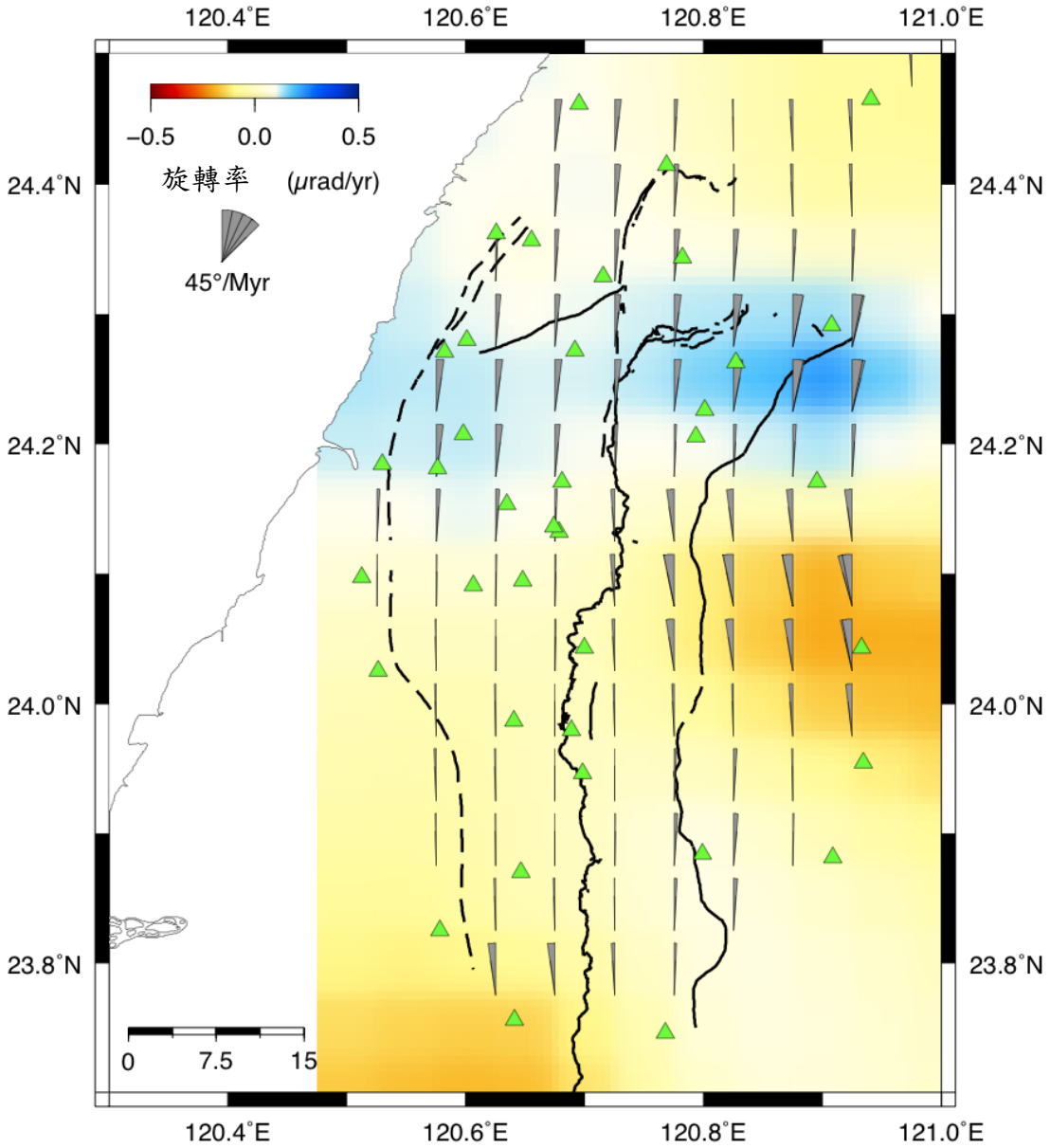
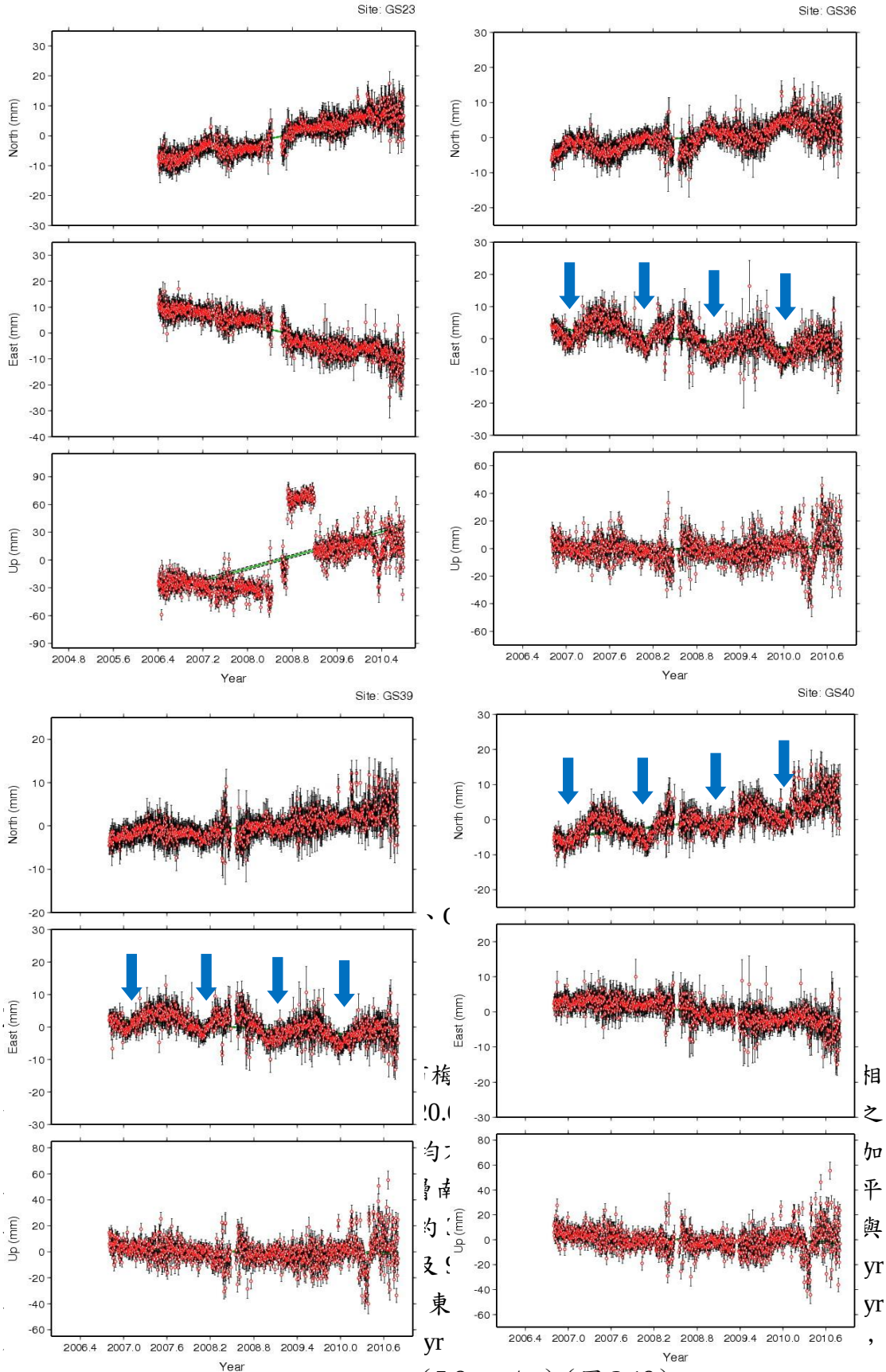


圖 2.17 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。



發現九弓坑斷層兩側區域差異量最大（5.8 mm/yr）（圖 2.19）。

應變率方面，本區域大多呈現壓縮應變，僅有小區域的伸張變化；主要壓縮

量集中於斷層兩側，顯示有不等量的移動變化。最大壓縮面膨脹率達 1.04 μstrain/yr，如圖 2.20。本區域之旋轉率呈現順時針旋轉之趨勢，於中部山區有較大的順時針旋轉率（圖 2.21）。時間序列中，GS04、GS05 與 GS17 測站在南北方向有明顯走勢的變化（藍色箭頭所表示之趨勢）。該趨勢線在每一段中所呈現的走勢方向恰好相反，而且有重複出現的現象。圖 2.22 中藍色箭頭所指之處的時間分別為 2006 年 5 月、2007 年 5 月、2008 年 5 月以及 2009 年 5 月，固定發生於每年之 5 月，意味著此重複現象是一種年週期變化。GS41 測站則是在高程方向有沉陷之現象，自設立該測站後至 2008 年 5 月，該站緩慢沉陷，之後漸漸抬升，如圖 2.22 所示。

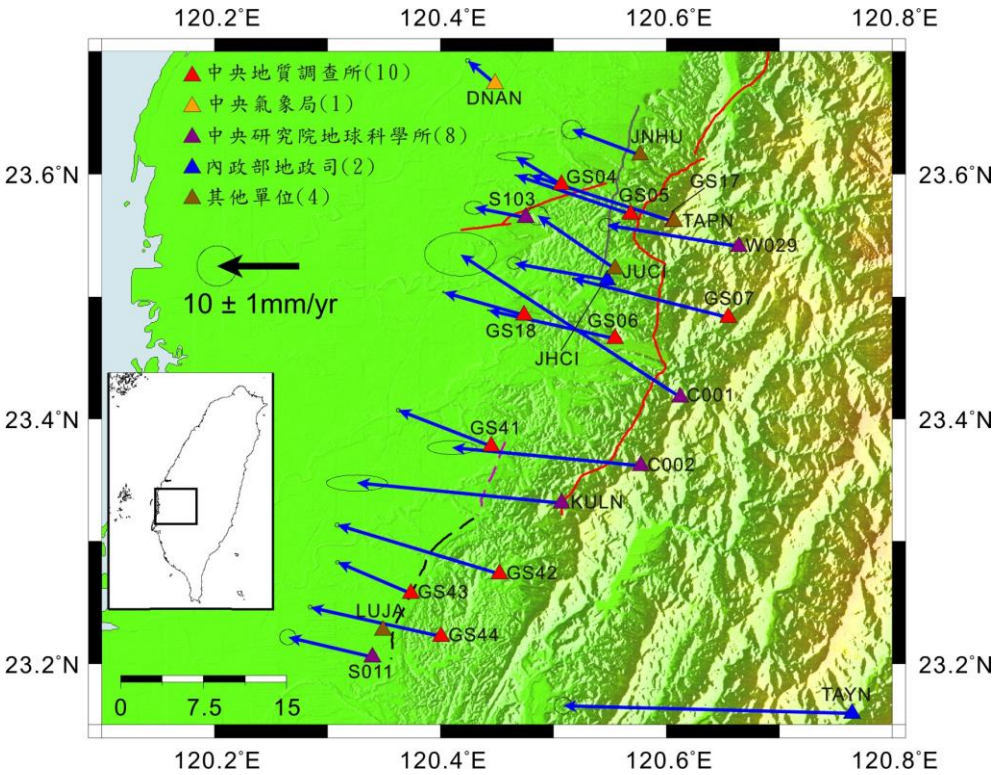


圖 2.19 嘉義地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。(觀測資料時間段：2003-2010)

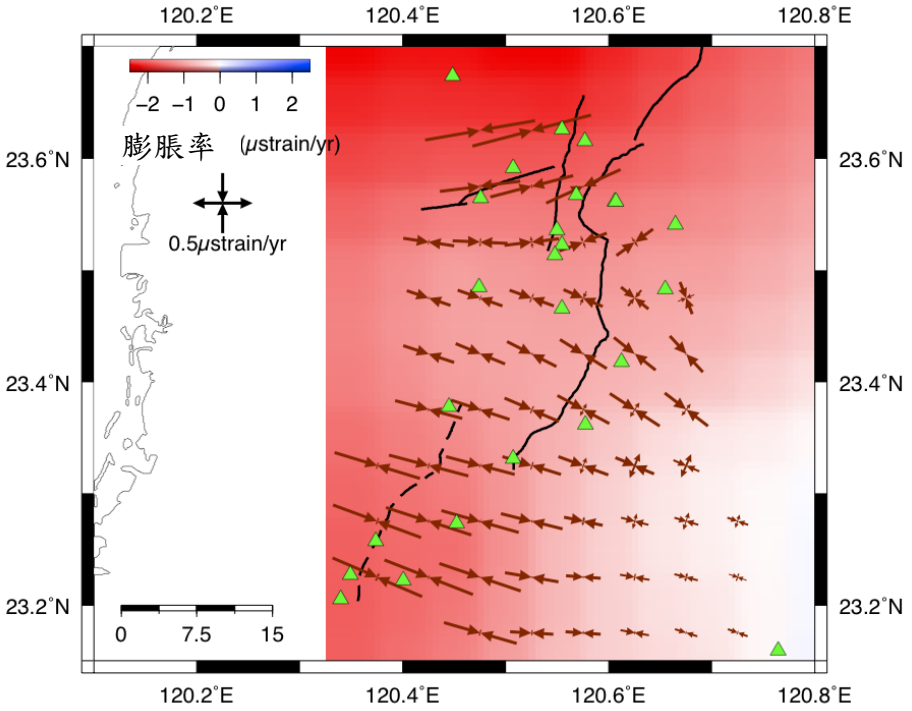


圖 2.20 嘉義地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。雙箭頭向內代表壓縮主軸應變軸，雙箭頭向外代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。底圖之顏色表示面膨脹率；紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

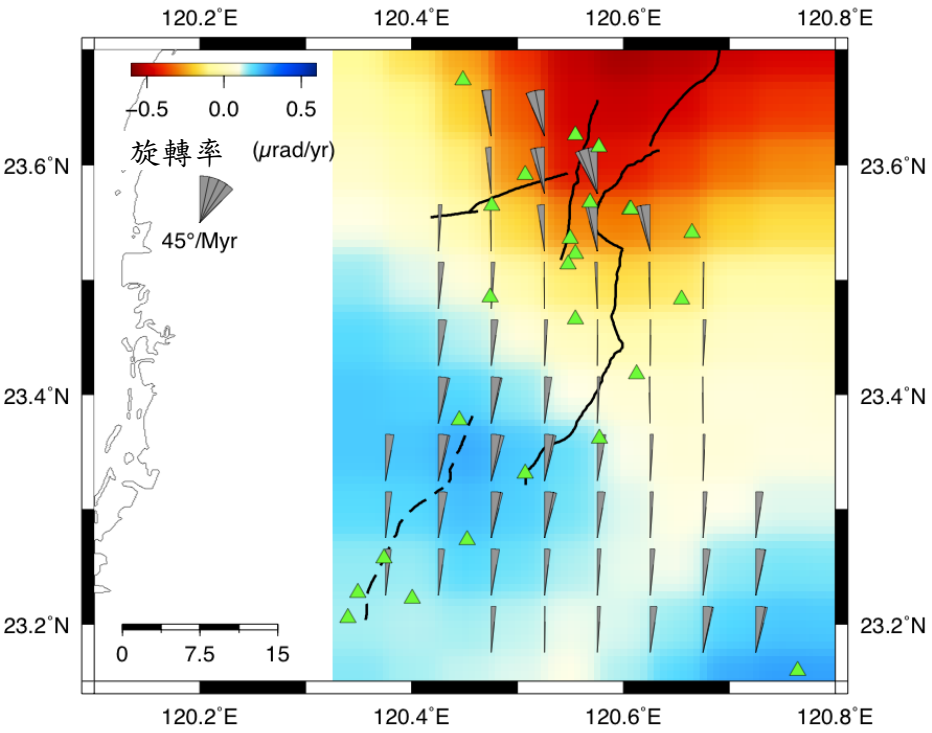


圖 2.21 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左為逆時針旋轉。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

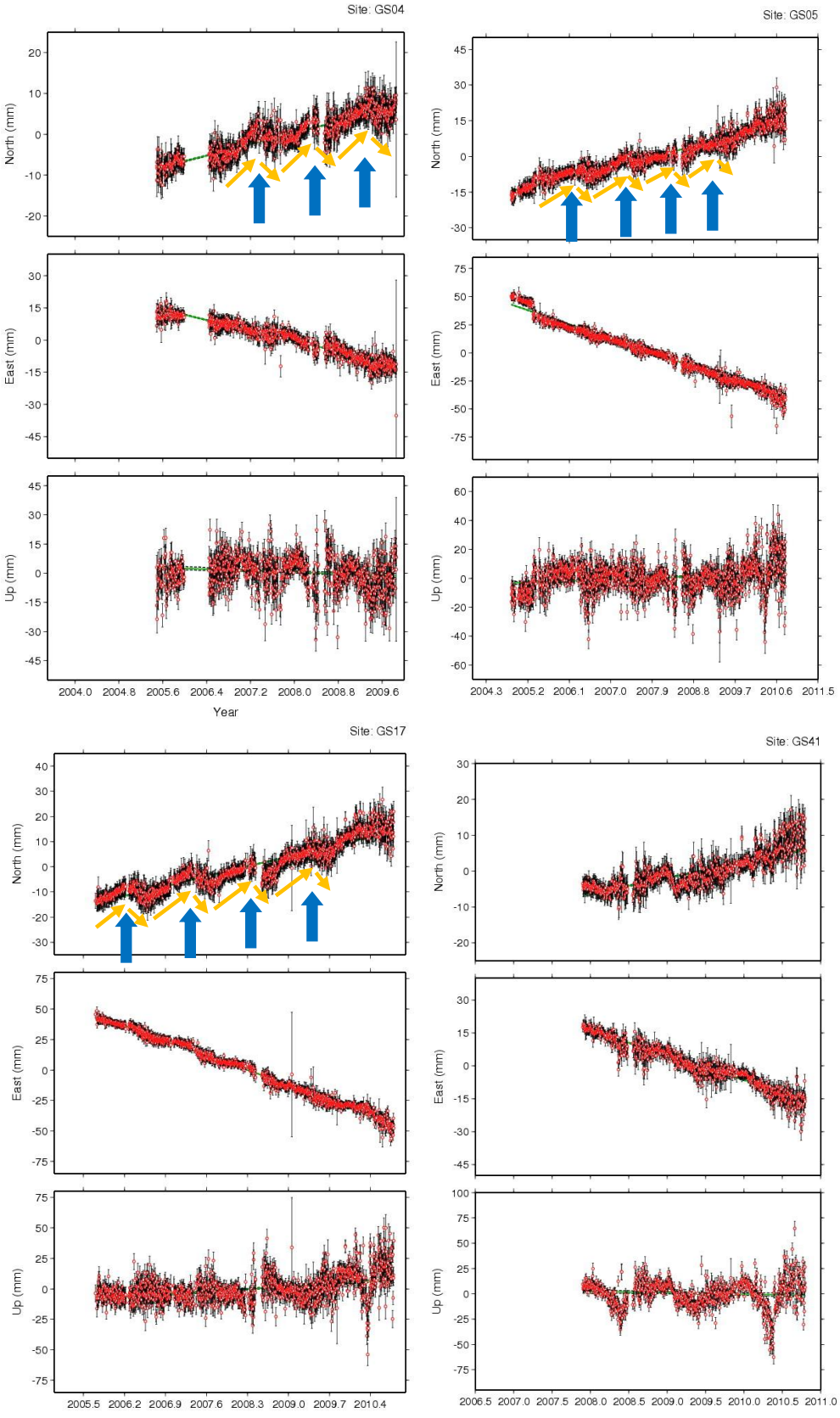


圖 2.22 測站 GS04、GS05、GS017 與 GS41 測站之時間序列。

2-1-5 西南地區

臺南地區與高屏地區速度場不同，呈現量級的不一致性；在臺南地區較小，往南跨過岡山一帶至屏東平原速度場較大。因此，以下將分兩小區詳述。

臺南地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 6.0 至 25.2 mm/yr，其方位角介於 246°至 274°之間。平均速度場為約 15.2mm/yr，平均方位角為 266°。高屏地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 40.9 至 57.5 mm/yr，其方位角介於 276°至 280°之間。平均速度場為約 51.8 mm/yr，平均方位角為 277°。整個西南地區速度場由西往東及由北往南有增加之趨勢。臺南地區在後甲里斷層以西，平均水平位移速率約為 11.2 mm/yr；後甲里斷層以東約為 19.1 mm/yr，顯示斷層兩側差異約有 7.9 mm/yr 之縮短量。此外，新化斷層兩側之水平速度場由北往南增加約 6.5 mm/yr，此速度場結果顯示新化斷層之活動特性以右移分量為主（圖 2.23）。

臺南高雄地區主軸應變為壓縮應變，較大壓縮應變分為兩個區域：一為高雄山區域，最大壓縮面膨脹率為 0.90 μstrain/yr；另一部份則為後甲里斷層西側，最大壓縮面膨脹率為 1.00 μstrain/yr。而屏東地區主軸應變則為伸張應變，約為 0.09 μstrain/yr，如圖 2.24 所示。本區域旋轉率方面，臺南地區為順時針旋轉，由東往西旋轉率愈大。臺南往南逐漸變成逆時針旋轉，愈往南旋轉率愈大（圖 2.25）。

西南地區時間序列大致上呈線性走勢。GS29 測站於南北方向在 2007 年 5 月時開始呈現向南移動的趨勢（圖 2.26 中藍色箭頭處），該變化約持續一個月的時間，之後又趨於穩定不變。GS29 及 GS31 測站則是在高程方向具有沉陷與抬升重覆出現之波動現象，如圖 2.26 所示。

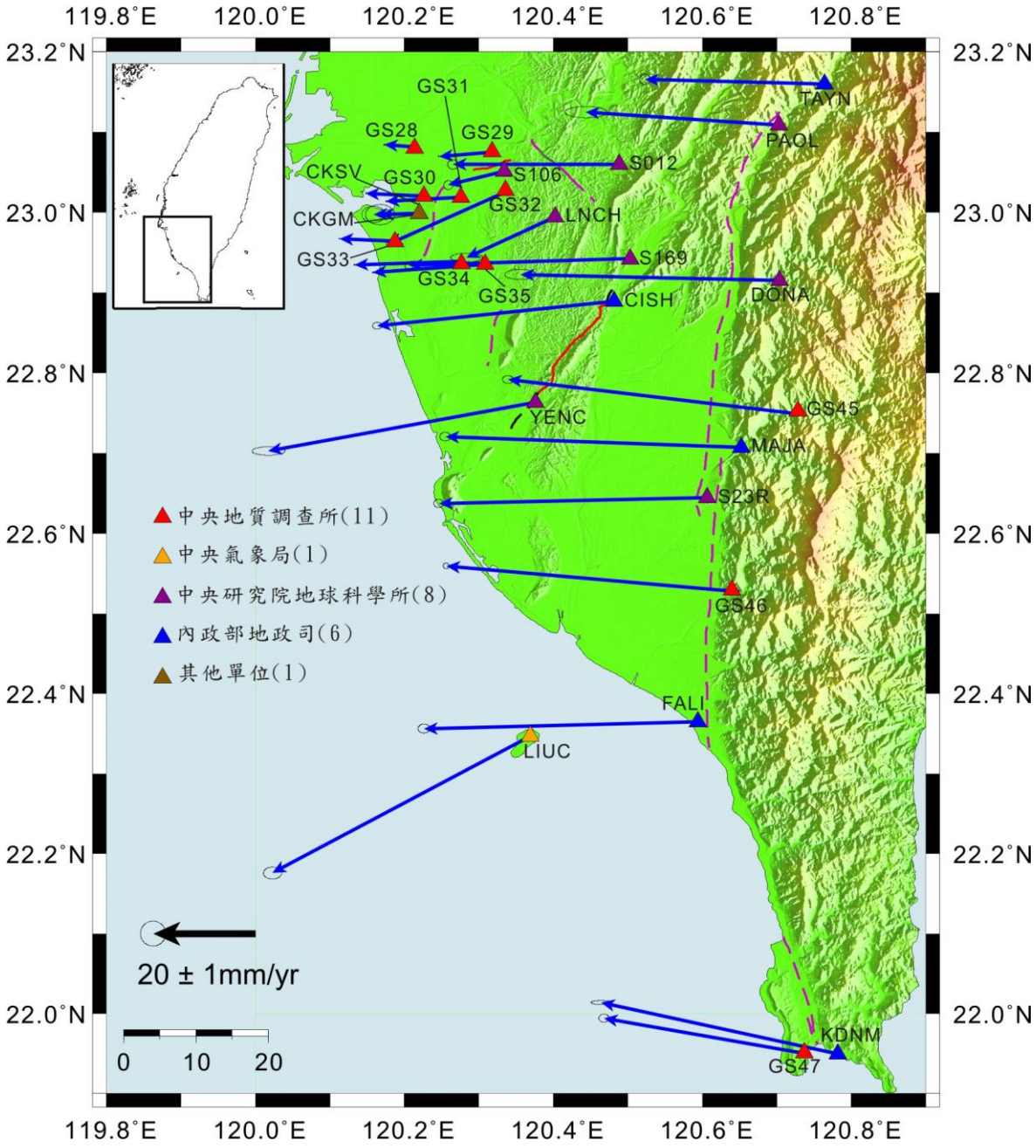


圖 2.23 西南地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。(觀測資料時間段：2003-2010)

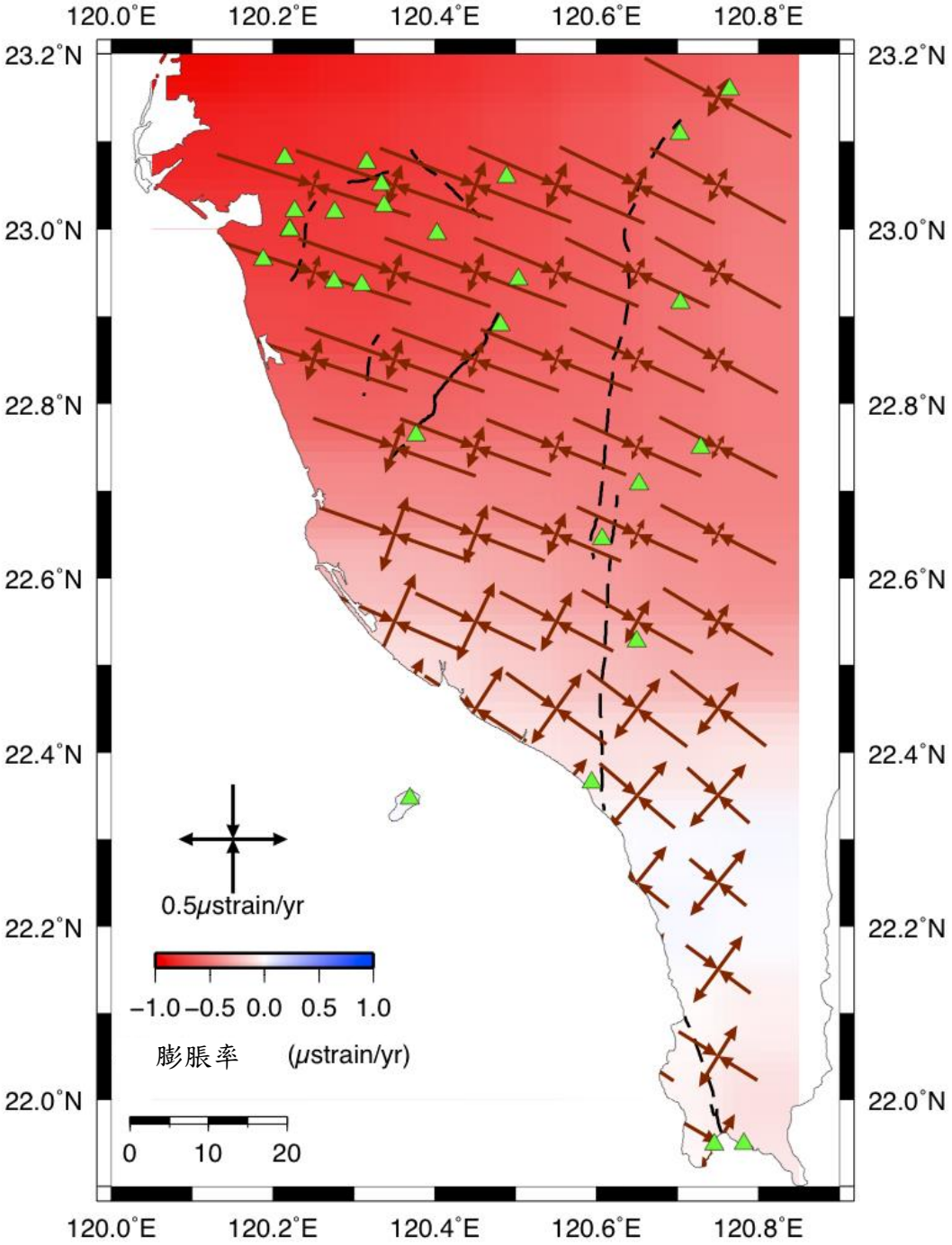


圖 2.24 西南地區 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。雙箭頭向內代表壓縮主軸應變軸，雙箭頭向外代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。底圖之顏色表示面膨脹率；紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

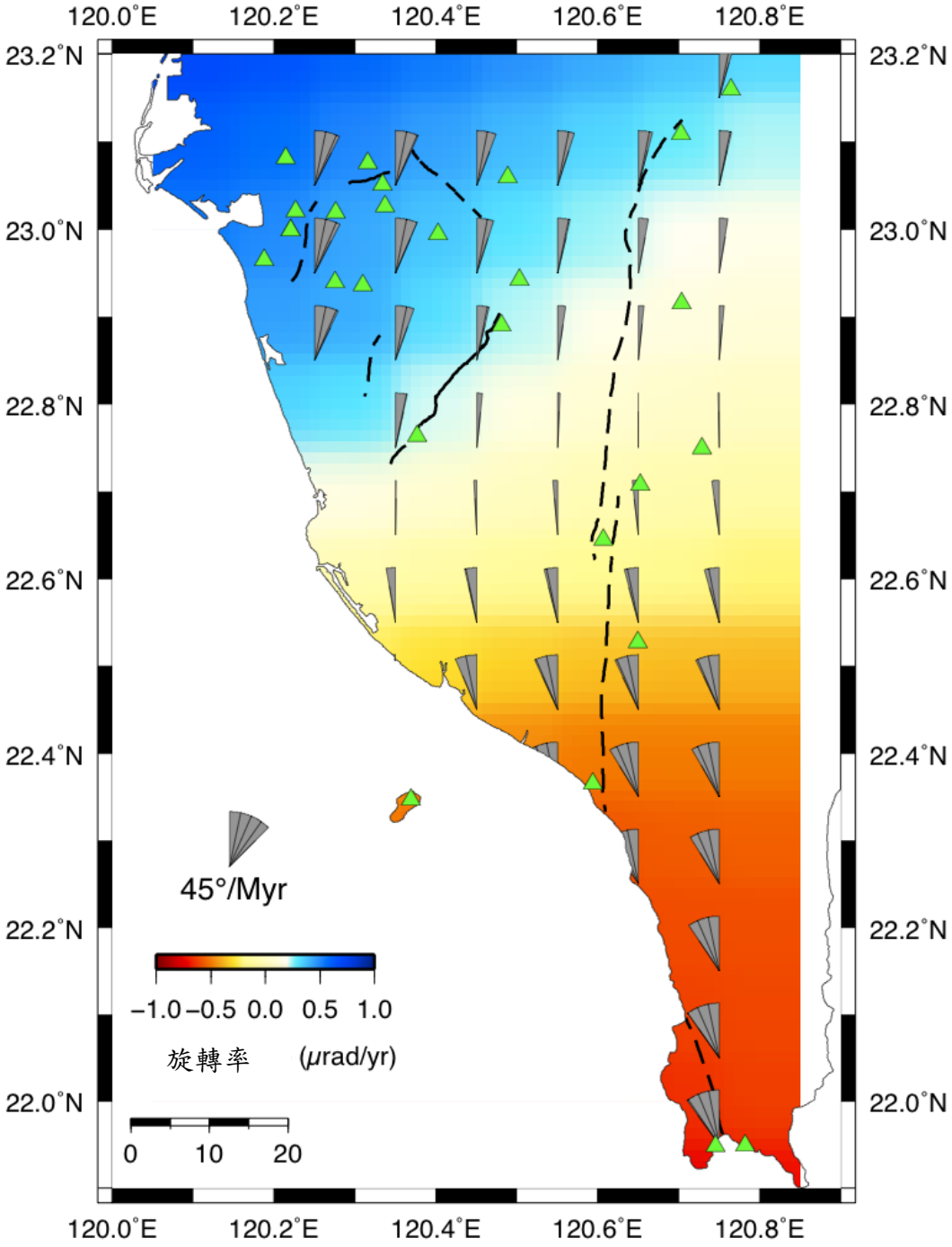


圖 2.25 西南地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

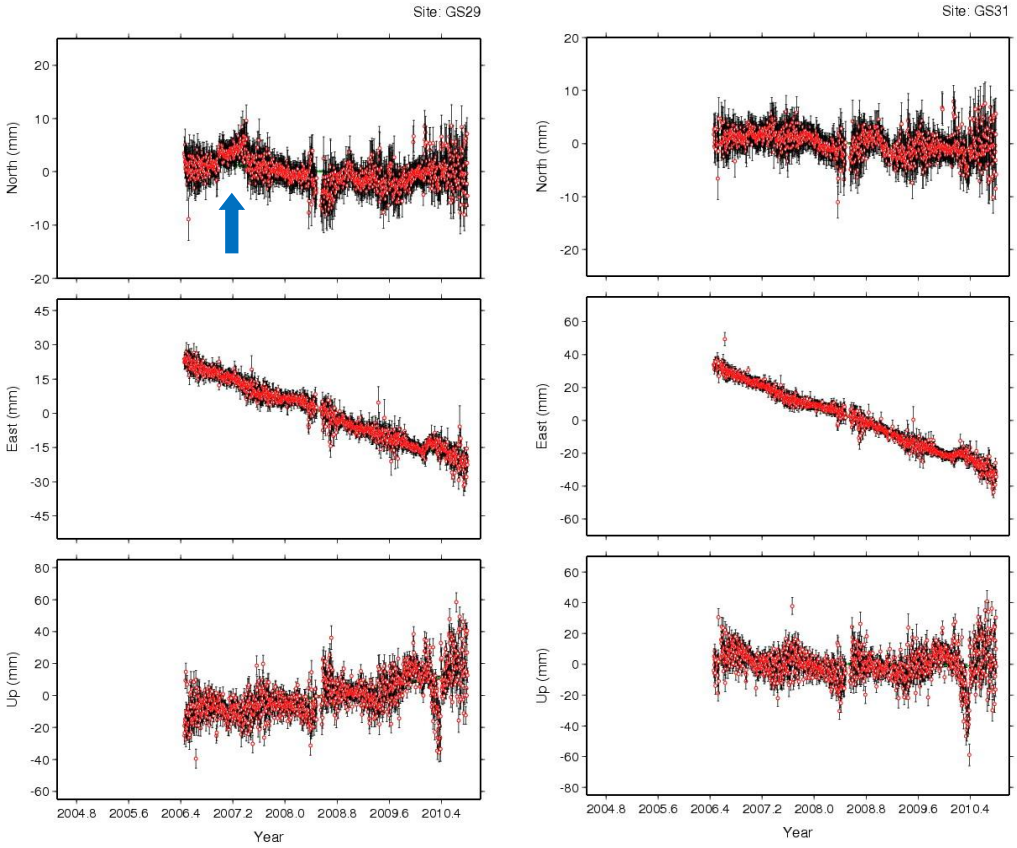


圖 2.26　測站 GS29 與 GS31 測站之時間序列。

2-1-6 小結

由圖 2.1 與圖 2.4，地調所設置之 GPS 站與附近各單位 GPS 站觀測結果顯示：臺灣地區速度場相對於澎湖 S01R 站，在北部地區移動量小，且方向由西北轉北方向，至宜蘭地區呈現東南方向移動。在新竹地區多呈現西北方向，與台北地區速度場呈現連續性的順時鐘方向旋轉。中部地區由於測站多位於車籠埔斷層下盤，速度場移動量相較於其他上盤測站較小。往南至嘉義地區，速度場移動量則明顯增加，方向為向西北方移動。至臺南地區，速度場量級變化不大，但方向漸偏西。至屏東平原則速度場增大，速度場則偏向西南方向移動，呈現一逆時鐘旋轉之現象。

由圖 2.5，臺灣北部、東北部至宜蘭地區，中央山脈延伸至屏東恆春半島地區皆呈現伸張之主軸應變，最大伸張面膨脹率達 1.32 μstrain/yr。西部海岸平原壓縮量較小。西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈之主軸應變為壓縮應變，最大壓縮面膨脹率達 1.97 μstrain/yr。

由花蓮北部沿中央山脈雪山山脈一帶，旋轉率呈現向東北方向順時鐘變化，並增加旋轉角度。臺南、高雄北部地區也為順時針旋轉。此外，苗栗至台中地區

亦呈現順時鐘方向旋轉。海岸山脈至中央山脈東側及屏東恆春半島地區則呈現明顯的逆時針旋轉（圖 2.6）。

2-2 活動斷層地區應變率場

2-2-1 山腳斷層地區

山腳斷層兩側共 12 個 GPS 測站計算出平均應變率為-0.059μstrain/yr(圖 2.27)，山腳斷層北部、南部、東部與西部區域之平均應變率大小分別為-0.002 μstrain/yr、-0.209 μstrain/yr、0.275 μstrain/yr、0.399 μstrain/yr(圖 2.28)。以 GPS 速度場解算出的平均應變率結果顯示，沿山腳斷層分布之最大主應力方向為東北東-西南西走向，局部區域的最大主應力變化則大致與斷層走向相互垂直，與物質側向伸張及弧後伸張之作用力影響方向一致。山腳斷層因位處大臺北地區，其活動性監測仍不能忽視，必須以長時間資料累積以提供更精準的研究結果。本區域中大部分為伸張的主軸應變率，僅在局部地區呈現壓縮變化(圖 2.29)。

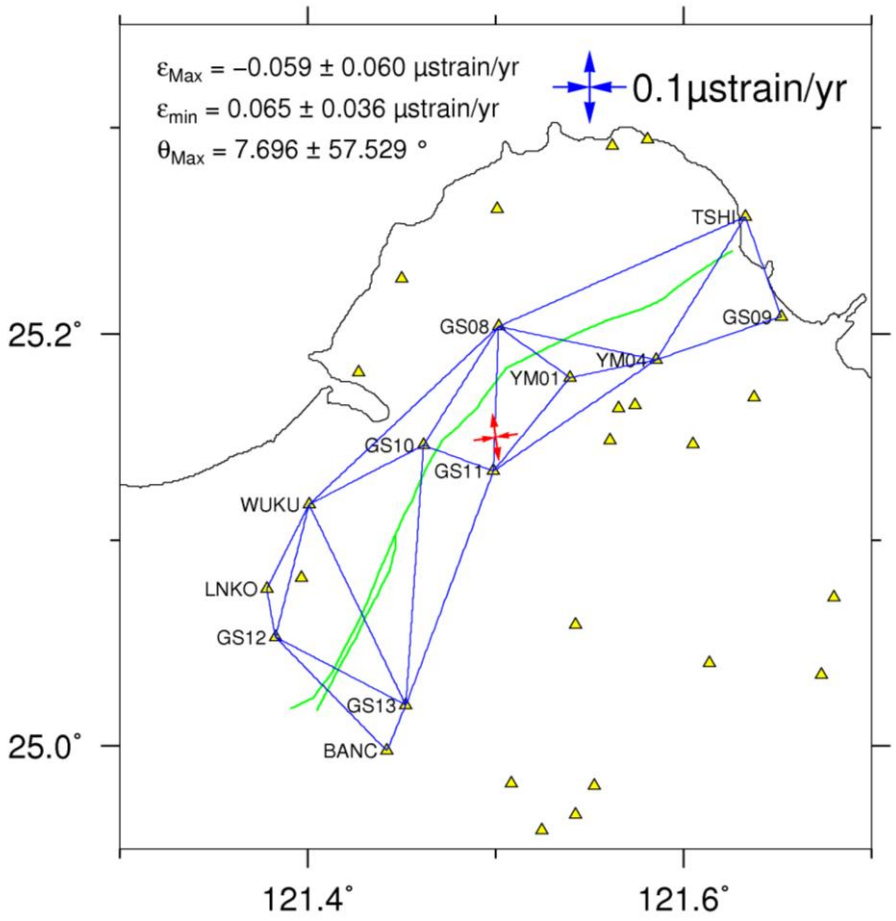


圖 2.27 2005 年 6 月至 2009 年間臺北山腳斷層地區的平均應變率。黃色三角形為此區域內之 GPS 測站分布(含地調所站及其它機構的站)，藍色網格為納入計算的基線。紅色箭頭表示最大(伸張)及最小(壓縮)主應變之大小及方向。

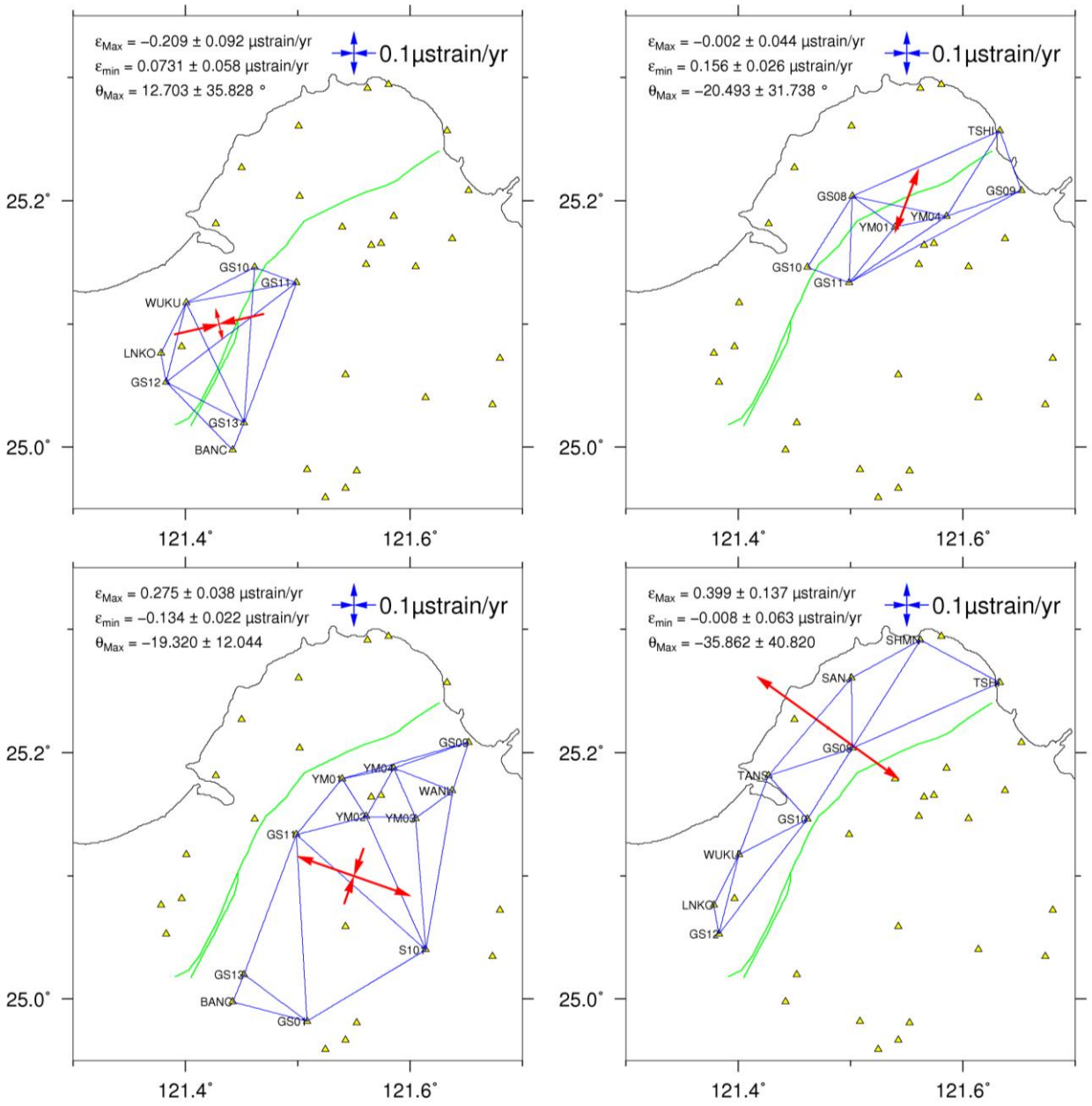


圖 2.28 2005 年 6 月至 2009 年間臺北山腳斷層地區的平均應變率。黃色三角形為此區域內之 GPS 測站分布(含地調所站及其它機構的站)，藍色網格為納入計算的基線。 紅色箭頭表示最大(伸張)及最小(壓縮)主應變之大小及方向。右上、左上、左下與右下分別為山腳斷層北段、南段、東半部與西半部的平均應變率。

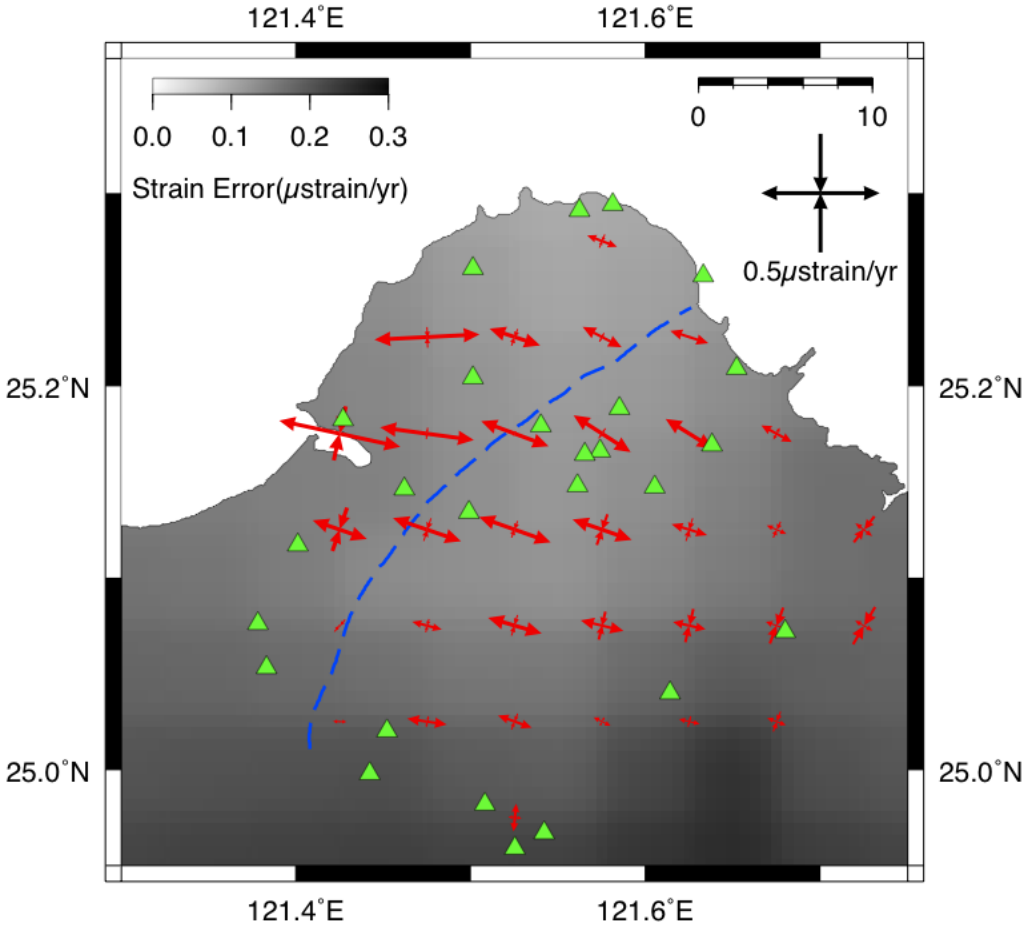


圖 2.29 臺北山腳斷層地區的應變率場。綠色三角形是使用到的 GPS 連續站，藍色虛線為斷層位置。紅色箭頭表示最大(伸張)及最小(壓縮)主應變之大小及方向。搜尋半徑為 10 公里。

2-2-2 新竹地區

新城斷層兩側共七個 GPS 測站計算出平均應變率為-0.05μstrain/yr(圖 2.30)。以 GPS 速度場解算出的平均應變率結果顯示，沿新城斷層分布之最大主應力方向為東南東-西北西走向。應變率場顯示沿新城斷層之應力皆為壓縮應力(圖 2.31)，顯示此斷層為逆斷層。因其位處新竹地區，其活動性監測仍不能忽視，必須以長時間資料累積以提供更精準的研究結果。

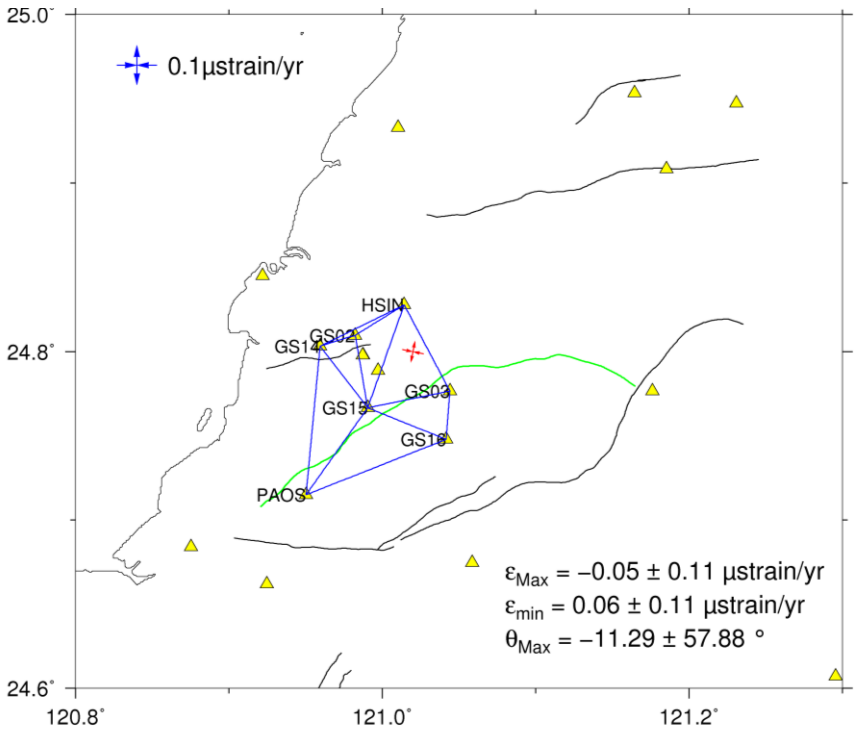


圖 2.30 2005 年 6 月至 2010 年 8 月間新竹新城斷層地區的平均應變率。黃色三角形為此區域內之 GPS 測站分布(含地調所站及其它機構的站)，藍色網格為納入計算的基線。 紅色箭頭表示最大(伸張)及最小(壓縮)主應變之大小及方向。

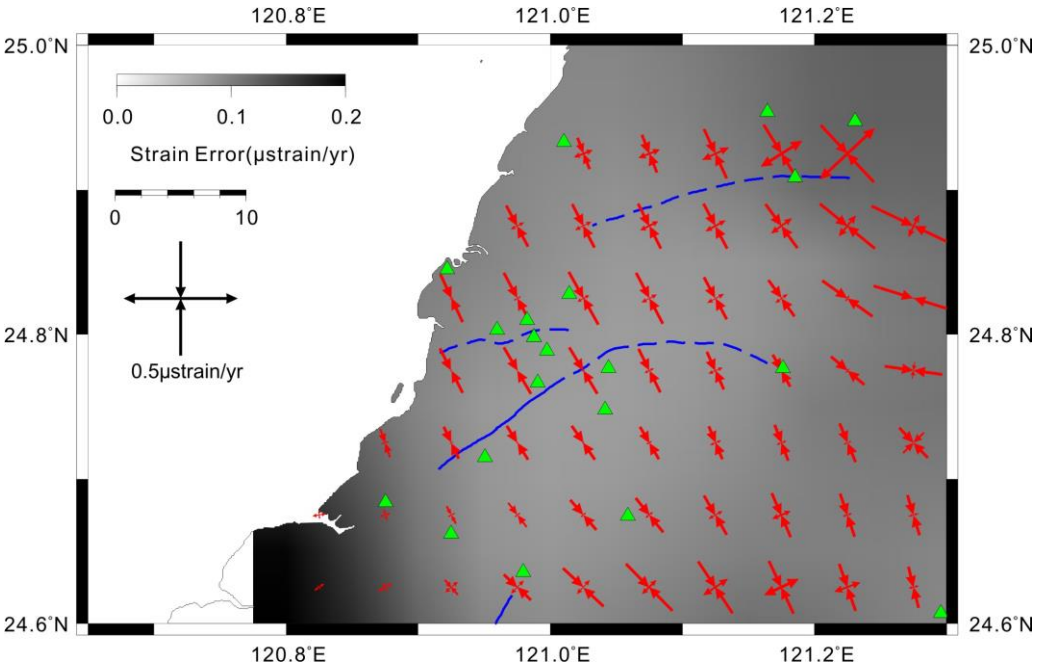


圖 2.31 新竹新城斷層地區的應變率場。綠色三角形是使用到的 GPS 連續站，藍色虛線為斷層位置。紅色箭頭表示最大(伸張)及最小(壓縮)主應變之大小及方向。搜尋半徑為 15 公里。

2-3 活動斷層模型參數反演

2-3-1 新城斷層

我們使用新城斷層附近共 19 個 GPS 測站所觀測到的水平及垂直速度對新城斷層的震間（interseismic）活動模型進行反演計算。除了地表形變資料外，我們使用 Chen et al. (2003) 提出的新城斷層位態資料來約制斷層的地下幾何形貌。圖 2.32 中紅色箭頭代表 GPS 所觀測相對於 SFON 的水平速度場。

斷層模型反演是利用非線性最佳化中的模擬退火法（simulated annealing, Cervelli et al., 2001) 對不同的模型參數組合（如傾角、滑移速度等）計算預估和觀測地表運動值的偏差（以 RMS, root mean square, 表示）。接著尋找出 RMS 值最低的參數組合即代表最佳的斷層模型。

Chen et al. (2003) 所提出的新城斷層面長度及寬度約為 34 及 12 公里（假設斷層面往西北延伸），傾角為 29º-34ºS，走向為 N50º-60ºE。我們利用這些參數當作模型反演的約制，並假設震間滑移是平均分布於斷層面上，來估算其它的斷層參數，包括深度及震間滑移量。表 2.2 列出我們所得到的新城斷層最佳模型參數，而圖 2.32 中的綠色箭頭則表示由此模型估算的地表運動速度。注意在圖中我們將斷層長度加長來降低因有限斷層所引起的模型邊界效應（boundary effect）。結果顯示新城斷層主要的震間滑動發生在深度大於 3 公里處，滑移速率具有每年約 17 mm 的逆衝分量。注意的是此模型雖然沒有加入可能存在的深部（>5km）滑脫面（detachment）所造成的影響，所預估的地表形變已接近觀測值，顯示新城斷層的震間行為並不明顯地受到滑脫面的影響。未來應加入遠場（東南方）的 GPS 速度觀測來進一步測試這個推論。

表 2.2 新城斷層的震間滑移模型參數

長度 (km)	寬度 (km)	頂部深度 (km)	傾角 (degree)	走向 (degree)	滑移速率 (cm/yr)
55	12	3.3	30	N55ºE	1.7

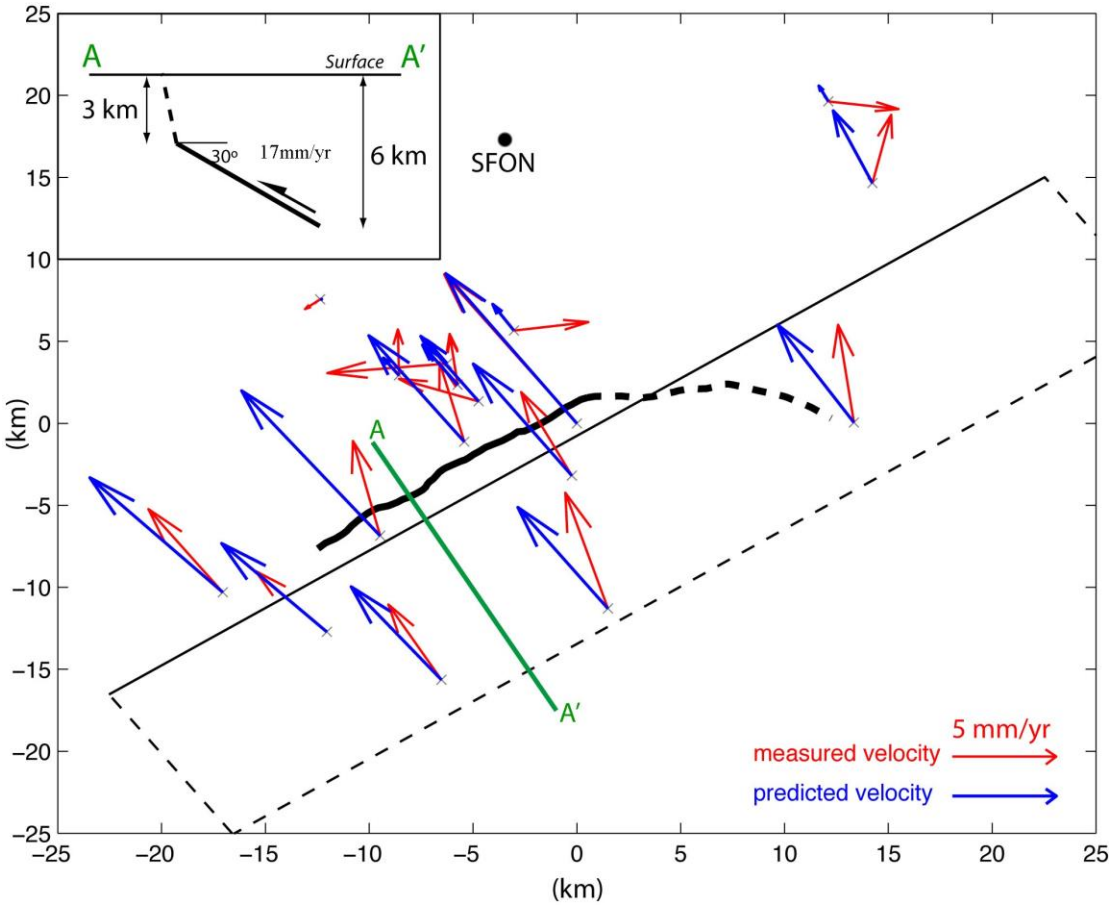


圖 2.32 新城斷層震間滑移模型。黑粗線為斷層地表位置（虛線表示斷層位置被掩蓋或推定），細黑線表示斷層模型的頂端，細黑虛線顯示斷層模型投影到地表的範圍。A-A'剖面表示於左上緣的插圖。紅色箭頭代表 GPS 觀測的地表水平速度，藍色箭頭則為預估值。

2-3-2 山腳斷層

影響 GPS 地表速度場之因子，包含短週期之彈性變化(如地震發生)及長週期之板塊擠壓變形過程。為了闡明和分辨短週期與長週期之變形行為，並進一步進行評估斷層活動潛勢，因此利用斷層模型之建立來推求斷層之滑移速率。

斷層模型建構參數

根據前章節所蒐集之斷層參數資訊，本研究中考慮將山腳斷層的傾角變化主要分為三段：

地表至 3 公里深之斷層面：以東北海域之震測剖面與陸上鑽井資料所提供之證據，在建構斷層幾何模型時，此深度內之斷層面傾角設定約為 80 度。

8 公里深以下之斷層面：由於山腳斷層在深部很可能是與過去金山-新莊斷層共用同一個斷層面(林朝宗，2005)，我們假設斷層在此深度以下是沿著約 30-25

度的傾角的斷層面活動。

在 3 公里至 8 公里深度間之斷層面：根據東北海域之震測剖面與一般正斷層傾角的變化，我們假這在此區段的斷層面傾角有一個約 80-30 度的匙形(listric)上凹變化(Smithand and Bruhn, 1984)。

另外，地表斷層跡則是根據地調所公布之山腳斷層位置，並結合東北海域震測所顯示之正斷層位置。但由於建構斷層滑移反演模式所要需參考的地表速度場資料限制(數量與幾何分布位置)，斷層模型過度向海域延伸與斷層面網格經度過細都並不恰當，因此在進行模擬時，斷層模型有兩項簡化：第一是最北端只向海域延伸約 11 公里，第二是斷層面的三角面元素只有 78 個。

（一）地表速度場

地表速度場的部分，此地區內共有中央氣象局、中央研究院地球所、中央地質調查所、國土繪測中心等 27 站連續觀測站(表 2.3)之 GPS 速度場，速度場解算起始時間大部分為 2006 年。其中 WANL、HERI、TANS、WUKU、LNKO 等五站之解算起始時間為 2008 年，因為解算的時間長度不夠，與 GS13 站相對於鄰近 BANC 與 GS01 有不同趨勢的速度場，暫時不列如模式運算，最後列入斷層滑移反演模式之測站共 21 站，其速度場與測站分布如圖 2.33。在將速度場導入斷層滑移反演模式之前，我們將山腳斷層下盤林口台地之平均速度場為參考，將各測站之速度場扣除此參考數值，並只利用水平分量來了解山腳斷層上盤在斷層面上的滑移速率。

（二）斷層滑移速率反演

斷層錯動的影響只會發生於地表面以下的岩體中，如果我們將斷層兩側的岩石視為完整的岩體，此時岩石受斷層錯動導致的變形會近似線性的彈性關係，這整個變形場的空間我們即可稱之為彈性半無限空間(elastic half-space)。當斷層錯動時可視為彈性半無限空間中某個面發生了位移量，此面是空間中位移不連續的邊界，並且可由許多邊界元素組成這個面，而探討錯動面與其錯動向量這兩者跟彈性半無限空間中位移場之關係的模擬，稱之為錯動模型(dislocation model)。本計畫所利用的 Poly3D 正是 Thomas (1993)以角度錯動為理論基礎所建構的一套錯位模型之模擬程式，它允許使用者以三角多邊形為基本元素去建構彈性半空間中的位移不連續邊界(如：斷層面)，這使得我們在錯位模擬時的斷層面可以更接近真實斷層面的複雜形貌。詳細理論可參考附錄 B。

模擬的結果顯示主要滑移發生在斷層較深、傾角較平緩的基底滑脫面區域，滑移向量大致向北北東(圖 2.34)。斷層面的平均滑移速率為 5.33 mm/yr，8 公里深以上的滑移量平均 2.91 mm/yr，8 公里深以下的滑移量平均 5.86 mm/yr(表 2.4)。

另外，結果中也顯示北段斷層面的滑移速率較南段不平均，主要是集中 8

公里深以下，而滑移速率不連續的地方往往會是應力集中的地方，很可能指示著未來地震發生的區域，這個區域大約在大屯山系下方 8 公里深的地方。山腳斷層南段斷層面上的滑移速度場分布是比較連續、均勻的，南段的斷層面上可能會累積的應力就相對較小，未來可能發震的機會也會比斷層北段較小。

模擬的結果中也顯示了一些較不合理的地方「斷層面淺部有些部份的滑移方向是向上」。我們認為這很可能是 GPS 速度場仍然有一些分量不是來自於斷層活動，而是模式為了演算出這些分量所造成的結果。

表 2.3 山腳斷層模型滑移速率逆推所使用之 GPS 連續觀測站

ANKN(CWB)	GS10(CGS)
BANC(CWB)	GS11(CGS)
FIVE(CWB)	GS12(CGS)
HERI(CWB)	GS13(CGS)
LNKO(CWB)	GS19(CGS)
SANJ(CWB)	YM01(IES)
TANS(CWB)	YM02(IES)
TSHI(CWB)	YM03(IES)
WANL(CWB)	YM04(IES)
WUKU(CWB)	YM05(IES)
GS01(CGS)	YMSM(MOI)
GS08(CGS)	S101(IES)
GS09(CGS)	SIND(NLS)
	SHMN(NLS)
CWB:中央氣象局(10 站)、IES:中央研究院地球所(5 站)、CGS:中央地質調查所(8 站)、NLS:國土繪測中心(2 站)	

表 2.4 山腳斷層滑移向量模擬結果之分布統計表

區段	平均值	標準差	最大值
上半部	2.91	2.324	7.57
下半部	5.86	5.663	18.03
北段	6.56	6.008	18.03
南段	3.73	3.833	14.29
北段_上	2.76	2.638	7.57
北段_下	7.28	6.214	18.03
南段_上	3.05	2.165	6.21
南段_下	3.91	4.172	14.29
			單位:mm/yr

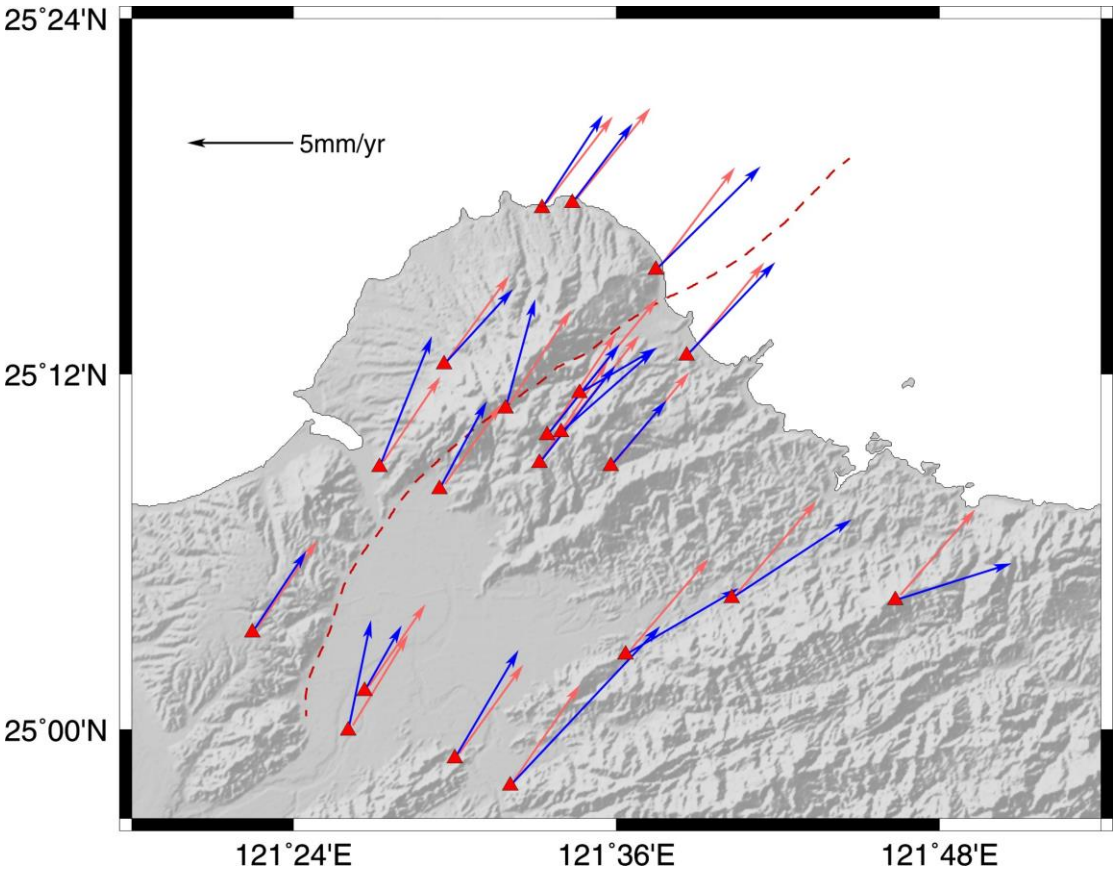


圖 2.33 GPS 水平速度場。藍色實線為實際 GPS 速度場，紅色實線為斷層模型模擬之地表速度場。紅色虛線為山腳斷層模型在地表之投影。

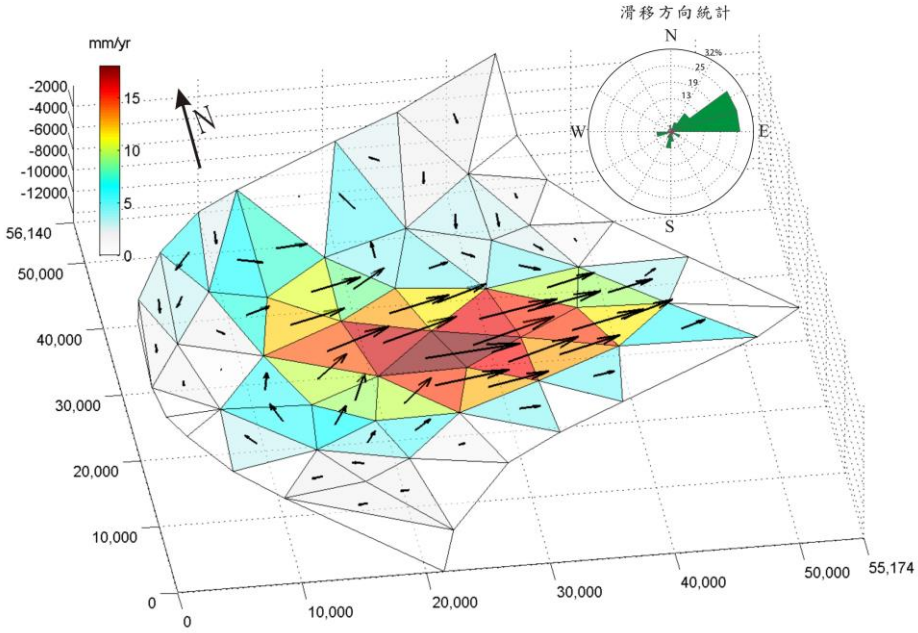


圖 2.34 山腳斷層滑移向量模擬結果。深部斷層面的滑移量大於淺部，滑移方向大部分向北北東方向。平均滑移量為 5.33mm/yr，在 8 公里深以上平均 2.91 mm/yr，8 公里以下平均 5.86 mm/yr。

三、井下應變儀之研究方法與成果

3-1 儀器原理

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(圖 3.1)，含有三個測量應變之模組，另有一個模組用來測方位，一個用作參考不變形模組參考單元(Non-deforming reference cell)。這些模組互相獨立，直徑 100 mm，高度 170 mm，分別疊置於圓柱形框架內。應變量測模組內含一個三元件電容器(Three element capacitance)，其中 d_1 之間距固定不動(圖 3.2)做為參考位置，另一方之側板則可隨應變而移動，可精確量測達 3×10^{-9} cm。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，如圖 3.3 所示，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、明德等 9 站)，其內部設計略有不同，GTSM100 將三塊平行電板的最外兩塊的距離固定，並固定在一端的外殼上，而中間的電板則跟著外殼的另一端一起移動(圖 3.4)，如此，當外殼被擠壓 d 距離的量時，電板間的距離也會改變 ±d ，若我們將電板兩端輸入固定的電壓，則間距的改變將會影響到中間電板的電壓，距離越近的一端電壓越大。

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

$d_1 \cdot R = d_2 \cdot (1-R)$

$d_2 = (d_1 + d_2) \cdot R$

取其微小量的變化 δd_2：

$$\delta d_2 = (d_1 + d_2) \cdot \delta R + R \cdot \delta(d_1 + d_2)$$

因為 $(d_1 + d_2) = \text{constant} = d$

$$\delta d_2 = (d_1 + d_2) \cdot \delta R = d \cdot \delta R$$

所以這個分量的線性變形量為

$$\varepsilon = \frac{\delta d_2}{D} = \frac{\delta R}{D} \quad (d_1 + d_2)$$

本儀器的 $d = (d_1 + d_2) = 400$ μm；應變儀外徑為 D = 87 mm，而記錄的 1 讀數等於 10^{-8} 個電板兩端電壓， 所以 1 讀數的變形量大約等於：

$$\varepsilon = \frac{\delta d_2}{D} = \frac{\delta R}{D} \bullet \left(d_1 + d_2\right) = \frac{10^{-8}}{87 \times 10^{-3}} \times 400 \times 10^{-6} = 4.598 \times 10^{-11}$$

因此記錄上的每一計數相當於 0.046 nano-strain。如圖 3.1 所示，GTSM 經由垂直疊置的三個應變感測元件，感測軸 R1、R2 及 R3 分別旋轉相隔 60 度。由於整支 GTSM 上下均由膨脹水泥所包覆，我們可以假設三個應變模組所在的約 0.6 m 範圍內，應變橢圓(Strain ellipse)是不變的。應變量測模組的強度通常採用「適當硬度」，有效模數應不小於圍岩的 0.6 至 0.8 倍，由此來決定外殼之厚度，大多數的有效模數均落在 1 至 3 GPa，應變儀量測的變形量主要決定於應變儀外殼之有效模數及外覆膨脹水泥之厚度與強度，但若上述二者的參數如和圍岩的強度參數無法匹配，則便會在水泥包覆體上產生應力集中的現象。

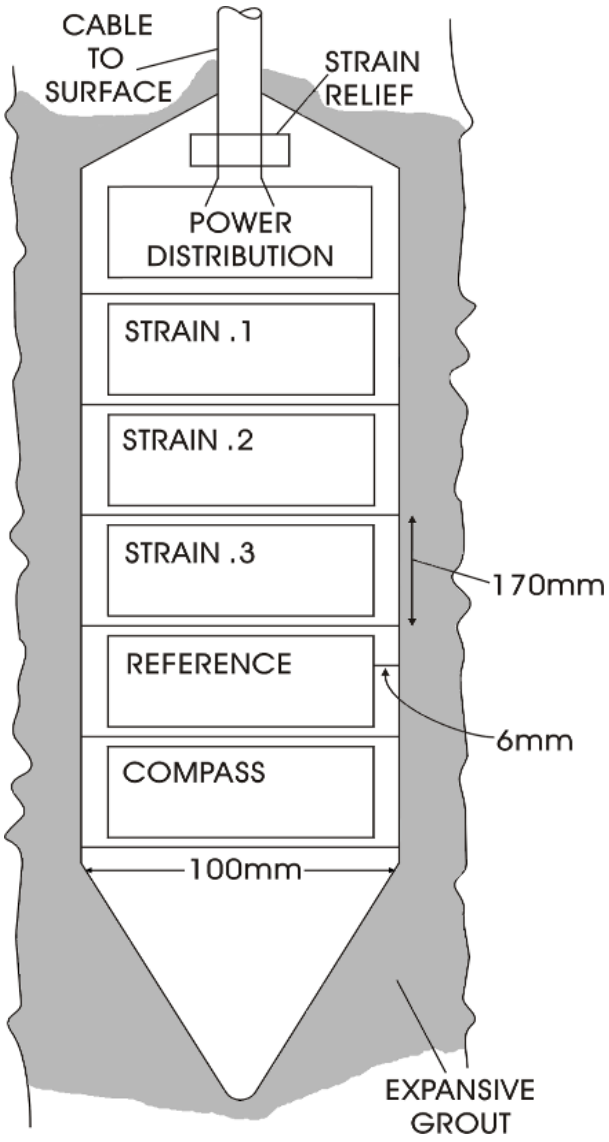


圖 3.1 GTSM 模組化示意圖 (Gladwin, 1982)。

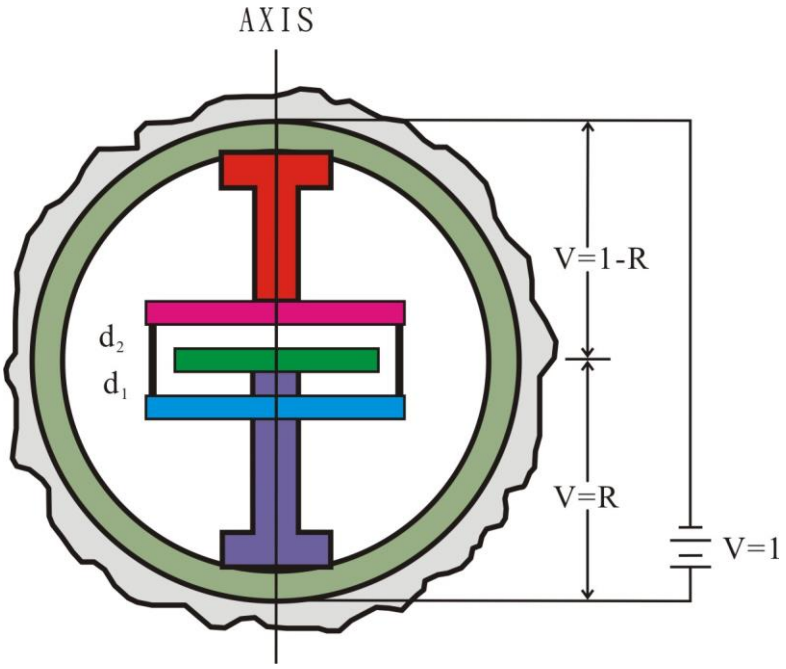


圖 3.2 GTSM100 的感應器設計圖。三塊平行電板的最外兩塊的距離固定，並固定在一端的外殼上，而中間的電板則跟著外殼的另一端一起移動。

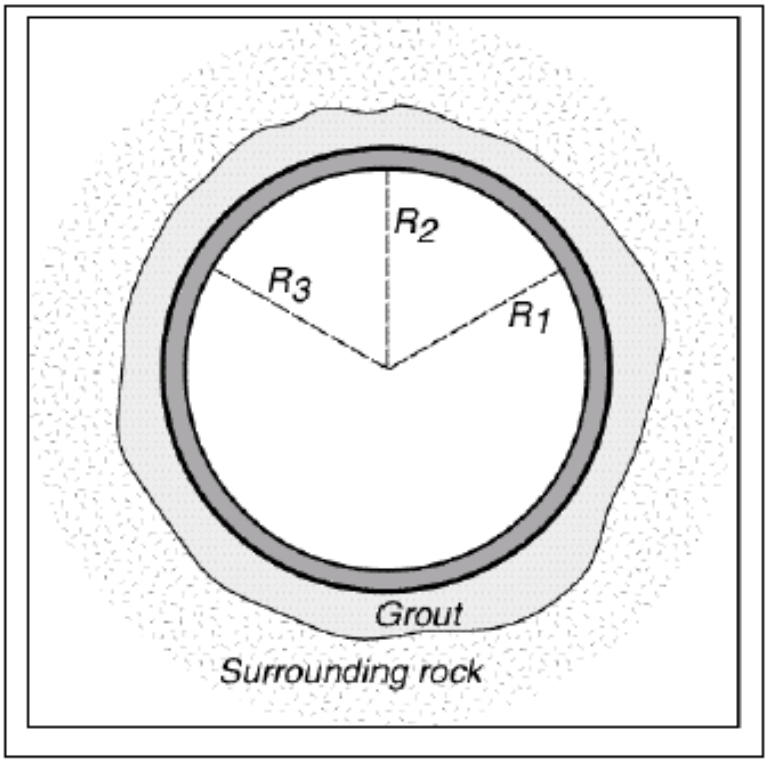


圖 3.3 井下型應變儀三個感測元件以互相旋轉 60˚疊置 (Gladwin, 1982)。

對於 GTSM21 型的儀器而言，其設計是將 d_1 的兩塊電板間的距離固定不變(圖 3.4)，其移動的距離 δd_2 仍然相當於外殼的總變形量，亦即 $\delta(d_1+d_2)=\delta d_2$，而微小量的變化：

$$\delta d_2 = (d_1+d_2)\cdot\delta R + R\cdot\delta(d_1+d_2) = (d_1+d_2)\cdot\delta R + R\cdot\delta d_2$$

所以可導出：

$$\delta d_2\cdot(1-R) = (d_1+d_2)\cdot\delta R$$

$$\delta d_2 = \frac{\delta R}{1-R}\cdot(d_1+d_2) = \frac{\delta R}{(1-R)^2}d_1$$

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 約低了一倍，其讀數與真正變形量間的關係就不再是線性了，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。

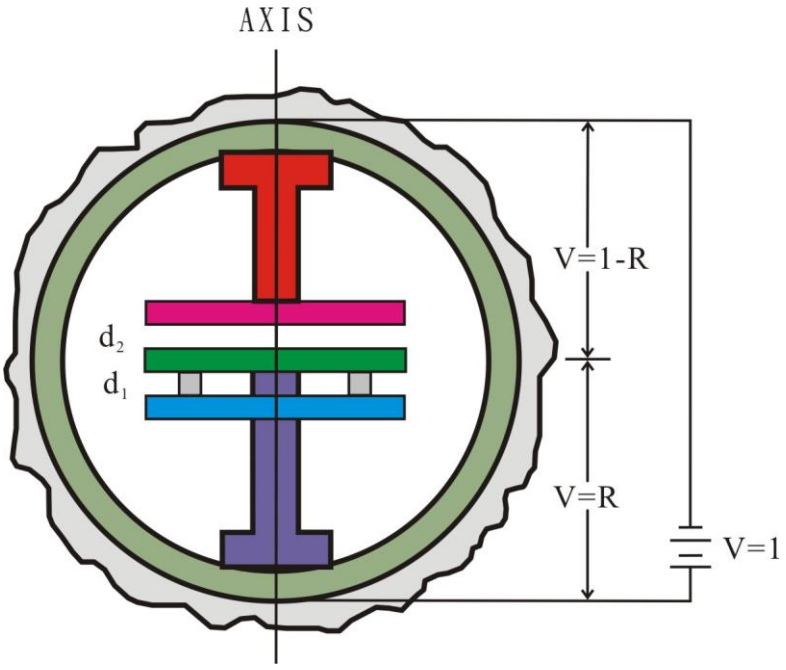


圖 3.4 GTSM21 的感應器設計。其設計是將 d_1 的兩塊電板間的距離固定不變，其移動的距離 d_2 仍然相當於外殼的總變形量。

3-2 分析理論

在接近地表的地方，垂直應力可視為 0，因此在平面上發生的 strain 可以用 plane stress 來描述。在直角座標系中，令 u 為 x 方向上之位移，v 為 y 方向上之位移，則應變張量由 6 個元素減少為 3 個，即

$$\varepsilon_{xx}=\frac{\partial u}{\partial x};\ \varepsilon_{yy}=\frac{\partial v}{\partial y};\ \varepsilon_{xy}=\varepsilon_{yx}=\tfrac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right) \tag{3-1}$$

依慣例，應變收縮(Contraction)為負號，伸張(Extension)為正號。在一固體內以 x 方向反時針旋轉 θ 角度上之伸長量(Elongation)，e：$e(\theta)=\varepsilon_{xx}\cos^2\theta+\varepsilon_{yy}\sin^2\theta+2\varepsilon_{xy}\cos\theta\sin\theta$，或

$$e(\theta)=\tfrac{1}{2}\left(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}\right)+\tfrac{1}{2}\left(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy}\right)\cos 2\theta+\varepsilon_{xy}\sin 2\theta \tag{3-2}$$

因此可以用 ε_{xx}，ε_{yy} 及 ε_{xy} 線性組合成任意 θ 角度之伸張量。此即 GTSM 可利用平面上 θ 量得之任意三個互相獨立的伸張量，即可決定該點之應變張量。若應變張量已知，則與 x 軸交角為 θ(反時針)之任意垂直面上之剪應變為：

$$\gamma(\theta)=\left(\varepsilon_{yy}-\varepsilon_{xx}\right)\sin 2\theta+2\varepsilon_{xy}\cos 2\theta \tag{3-3}$$

工程分析上習慣定義下列三量：

$$\varepsilon_a=\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}$$

$$\gamma_1=\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy}$$

$$\gamma_2=2\varepsilon_{xy}$$

式(3-1)可改寫成：

$$e(\theta)=\frac{1}{2}\varepsilon_a+\frac{1}{2}\gamma_1\cos 2\theta+\frac{1}{2}\gamma_2\sin 2\theta \tag{3-4}$$

或以矩陣方式表示為：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ½ & ½\cos 2\theta_1 & ½\sin 2\theta_1 \\ ½ & ½\cos 2\theta_2 & ½\sin 2\theta_2 \\ ½ & ½\cos 2\theta_3 & ½\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}5)$$

上式說明了應變儀內某一個特定方向之變形量可由 ε_a，γ_1 及 γ_2 線性組合而成。反之，吾人只要將上式逆推，即可由應變儀三個互成 60° 之感測軸應變量求得 ε_a，γ_1 及 γ_2。

若要 u_1，u_2 及 u_3 分別為應變儀三個感測器量得的位移量，則下式為完整的關係式，其中包括各項必須之修正量：

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/g_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/g_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ½ & ½\cos 2\theta_1 & ½\sin 2\theta_1 \\ ½ & ½\cos 2\theta_2 & ½\sin 2\theta_2 \\ ½ & ½\cos 2\theta_3 & ½\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}6)$$

或表示為　U = M × G × H × T × S

其中，U 為應變儀變形向量，

M 為三個感應器之機械差異性矩陣，

G 為三個感應器安置之方向性矩陣，

H 為面應變與剪應變藕合因子矩陣，

T 為地形與地質影響矩陣，

S 為觀測井所在位置之應變狀態，正是觀測之主要目標。

由於井下應變儀觀測會受地潮、氣壓及雨量等影響。若觀測站非深處內陸則又必須考慮海潮之影響。BAYTAP-G 是進行觀測資料分析的一種常用軟體，它可將觀測資料分解成地潮分量、氣壓分量、趨勢項及不規則雜訊。雨量因為屬非線性影響，必須單獨分析。GOTIC2 則是另一項分析軟體，它可處理海潮之影響，但必須搭配有觀測站地區之海底地形與陸上地形資料。

3-3 資料校正

（一）潮汐修正

利用地潮中相對明顯的因子，校正出鄰近岩層變形與儀器觀測變形的關係(圖 3.5)。應變儀各向度元件直接量測地下岩層的變形，儀器透過應變計內部之電磁閥感測不同方向的變形大小，產生相對之電位差以求得之量測值，並不等同於實際變形量，須經過機器因子之校正，始能獲得各方向實際之變化值。一般影響機器因子的大小有幾個要素，主要包含圍岩的彈性係數、充填灌漿的性質、儀器製成的材質、井孔與儀器封裝後的口徑大小、儀器管壁厚度的大小等(Gladwin, 1984)。有關儀器製成之材質，井孔與儀器口徑與儀器管壁大小於實驗室裝配時已經決定，然而設置深度圍岩之彈性係數與充填灌漿的性質則必須透過現地實驗方能求得。現地實驗耗時花費大，且可能造成井孔之損壞，對於實際操作上並不實用。目前對於變形量之校正理論，國際上多採取比對觀測地潮與理論地潮的方式進行，利用地潮分量中最主要的兩個分量 O1 與 M2 來進行振幅與相位差的校正，可導出各向度應變之實際變化量(陳致言，2007)。

（二）氣壓和雨量的影響

在短期至中期地殼變形與地潮研究中，氣壓與地下水文的變化常會在觀測訊號上造成不正常或是不預期的雜訊(圖 3.6)，而由於各觀測站地質與地形環境的不同，在氣壓地下水文的變化也會有所不同，因此針對各站進行氣壓與水文的修正時必須非常地謹慎(Zadro et al., 1988)。而在進行上述兩種效應修正前，將會有幾個問題必須先行解決，首先是氣壓變化與降雨的關係；其次是降雨與地下水位面的關係，這個問題較為複雜，因為降雨與地下水位的升降並非一線性的關係，其間牽涉到該地區的水文特性與水力係數，這些因素都讓這個問題更顯複雜；第三、氣候的變化在地潮的全日、半日或更長的週期變化的影響，都是可能會影響到應變儀觀測資料的品質(Chapman and Lindzen, 1970)。一些研究表示因氣壓變化所造成的應變響應可透過最小平方法濾除(Johnston et al., 1986)，或者透過 BayTap-G 的統計方式抽離出應變資料中相對應的氣壓成分(Takemoto et al., 2003)。

安裝井下應變儀時需灌注混凝土至孔內，且填滿儀器與孔壁之空隙，以減少井孔回復所產生的長期應變變化與避免地下含水層流動時造成影響(Johnston et al., 1994)。儘管如此，在觀測中仍可見到井孔回復效應在應變資料上所造成的影響(圖 3.7)。此外，混凝土的回復(Curing)性質也是必須濾除的雜訊。除去井孔效應與灌漿回復所產生的變應量，可得到較為乾淨的應變值，較能反應出儀器徑向的應變量(Gladwin et al., 1991)。在應變儀資料中，井孔與灌漿的回復效應是一影響重大的趨勢，由於該效應在不同方位的感應單元中會有不同的響應，因此要修正這些效應須針對各個單元量測結果進行。根據美國 PBO 教育訓練資料(Roeloffs, 2005)，會影響此趨勢的因子有：膨脹性水泥凝固時所施的壓縮力、熱的消散作

用與井孔回復作用，綜合趨勢效應可以下列通式表示：

$$y = F + A_1 e^{T_1 t} + A_2 e^{T_2 t} + mt$$

其中 F 是一常數截距，m 為一隨時間變化之線性趨勢，T1 與 T2 為時間常數，透過上式可以發現井孔效應的相近模型之解釋，當有了適當解釋模型後，運用最小平方法擬合是最佳的方式(陳致言，2007)。

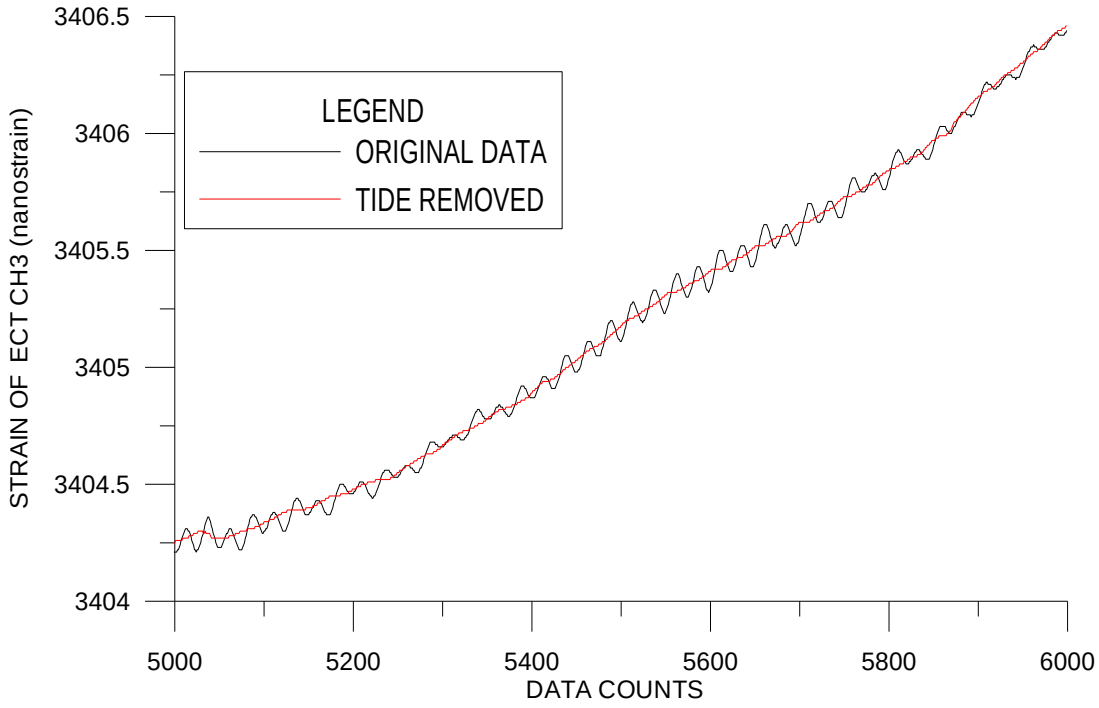


圖 3.5 應變儀所觀測到的潮汐週期訊號（陳致言，2007）。

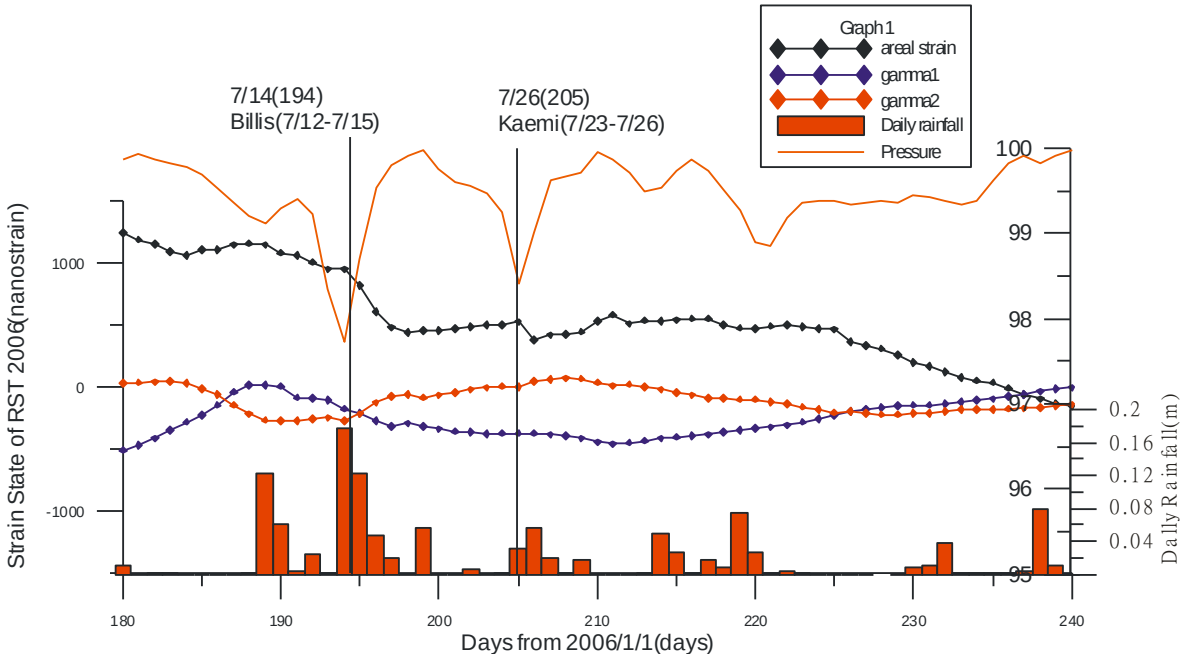


圖 3.6 應變儀所觀測到氣壓和雨量的因素（陳致言，2007）。

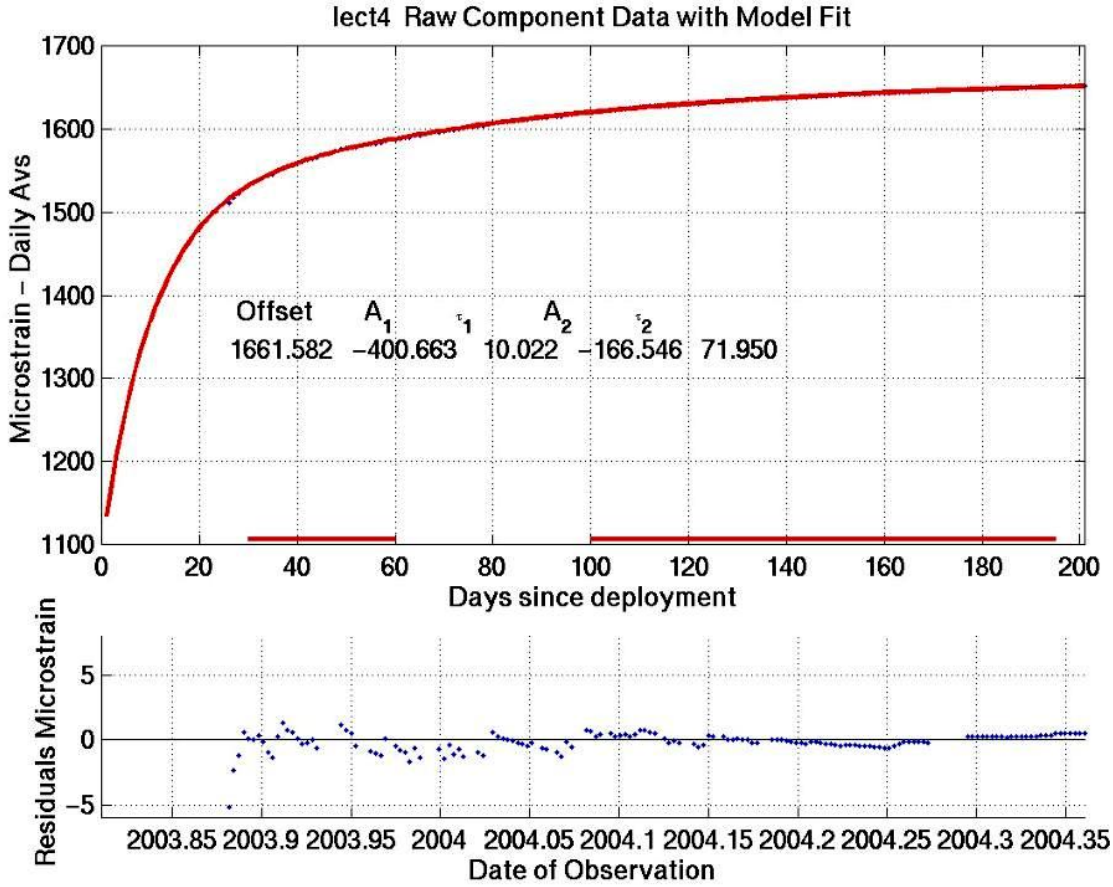


圖 3.7 利用最小平方法求得最適模式曲線以除去井孔回復效應，獲得殘餘應變（陳致言，2007）。

3-4 時間序列資料分析

應變儀之連續資料可視為時間序列資料，對於此種資料可以使用離散時間數位訊號處理技術，我們所採用的 Visual Signal 時頻分析工具，除了能作傳統的傅立葉轉換外，我們還使用時頻分析之希爾伯特黃轉換(Hilbert Huang Transform)來處理時間序列的資料。時頻分析相較傳統的頻譜分析多了頻率對時間的解析。時頻分析的研究始於 40 年代，主要的研究對象為非穩態訊號或時變訊號，主要的任務是描述訊號的頻含量如何隨時間變化。在 80 年代後，隨著電腦運算的突飛猛進，時頻分析開始有突破性的發展，從短時間的傅立葉轉換(STFT)到小波轉換(Wavelet transform)，進一步到目前開始被廣泛討論的希爾伯特黃轉換，提供了從時域到時頻域的轉換，且透過二維或三維的時頻分布圖形，表現各種分量及能量的變化趨勢。

3-5 井下應變儀資料管理系統網站

3-5-1 資料庫管理系統網頁簡介

本資料庫資料管理系統網站(圖 3.8)，係委託廠商(承泰技研股份有限公司)以 ASP.NET 之網站架構設計，其網頁外觀是依經濟部中央地質調查所之網頁架構為藍本，並以陳列清楚、操作方便的原則，讓使用者進入網頁後能夠快速讀取各項資訊，並利用 FTP 的方式下載各項資料成果，冀資料庫管理系統的功能能夠完整發揮。

井下應變儀資料庫管理系統網頁的內容完善，包含井下應變儀的量測原理、臺灣井下應變儀測站的建置與基本資料、應變資料的蒐集與成果展示、相關的問題解答與網站連結，以及美國「板塊邊界觀測計畫(Plate Boundary Observation, PBO)」的出版刊物與所屬研究團隊的陳列。網頁的主要建構模式為七大項目，每一項目皆依其項目名稱作詳細之介紹。七大項目如下：

1. 臺灣的井下應變儀(Borehole Strainmeter in Taiwan)：
   為了讓使用者能夠快速瞭解臺灣各個井下應變儀測站的基本資料與各測站之位置，本網站以 Google Map 的技術架構將各測站之經緯度座標(TWD 67)標示於地圖上，俾使有興趣之使用者可以將各測站的位置對照地質與地理資訊，以對各測站之應變資料有更透徹的分析與瞭解。
2. 井下應變儀(Borehole Strainmeter, BSM)：
   本資料庫系統管理網站也詳細說明了井下應變儀的基本設計構造、分析原理、安裝步驟及過程，讓使用者能夠瞭解井下應變儀的運作的環境及分析模式。
3. 井下應變儀資料成果(Products of BSM)：
   井下應變儀所量測到應變資料是以 Bottle 的檔案格式，及其他地物資料成果是存放在專屬的資料庫系統中，使用者若欲下載各測站之各項數據資料，只需點選網站上的「Bottle」連結，即可以 FTP 的模式進入資料庫系統中，下載所需的各年份的數據資料至使用者本機工作站中分析。
4. 相關連結(Related Links)：
   提供美國地質調查所(USGS)之井下應變儀、迷你 PBO(Mini-PBO)計畫、Pinon Flat、Durmid Hill 與 Glendale-Verdugo 長基線雷射應變儀等相關資訊與連結，使用者便於快速參考。
5. 問與答(F&Q)：
   為了解決使用者可能有的關於應變儀的各項疑惑或問題，本資料庫系統管理網站也提供常見的問題與解答，幫助使用者可以快速且方便地解決進行資料分析時所遇到的問題。
6. 出版刊物(Publications)：
   有關應變儀的使用與安裝手冊、研究文獻與其他各單位的研究計畫，以及其他相關的地質與地物的研究文獻，使用者在本項目中皆可以自由下

載參考，使得使用者能夠更進一步地瞭解井下應變儀的背景、原理和應用。

7. 研究團隊(Research Groups)：
   在最後一項目中，本網站也提供了臺灣與美國的研究團隊的各所屬單位，臺灣部分有中央地質調查所、國立臺灣大學地質科學系、中央研究院地球科學研究所、國立成功大學地球科學系，以及國立師範大學地球科學系；美國方面則有板塊邊界觀測計畫(PBO)、美國地質調查所(USGS)等研究單位。使用者可以自行向各研究團隊聯絡尋求諮詢或數據討論等。

除了建構中文之井下應變儀資料庫管理系統網頁之外，也將會逐步建構完整的英文版網頁，以供有興趣的外國人或是慣用英文的使用者也能夠讀取與下載井下應變儀及其他相關的各項數據資料。

另外，提供第一期資料庫內容的線上更新機制，以便調查人員隨時修正資料內容，亦規劃後續功能擴充。並維護井下應變儀資料庫，進行資料庫登錄之身份檢核，以提供不同層級使用者觀測資料的查詢與資料展示權限。



圖 3.8 井下應變儀資料庫管理系統網站首頁。首頁先就井下應變儀的靈敏度等優點做簡介。

3-5-2 井下應變儀資料庫系統更新

本計畫工作內容進行井下應變儀資料庫系統之更新，完善資料匯出入功能，並且在現有系統新增地球化學資料之內容，本報告更新內容如下：

1. Microsoft SQL 2008 資料庫架設及新增：

   在 Microsoft SQL 2008 中新增井下應變儀與地球化學資料表,利用即時轉入資料程式加入排程，並且定時將原始資料轉入資料庫，可以提供資料給於前端網頁展示及研究人員下載分析。最後可以根據往後的需求彈性擴充及增加資料表。

2. 可即時轉換、匯入及備份監測資料：

   管理者選擇指定資料來源、FTP 根目錄、備分根目錄、檔案輸出及 SQL 與 SMTP 伺服器等設定。再選擇即將匯入的原始資料、更新資料(數據與繪圖)，完成後會自動寄出 log 資料。

   井下應變儀資料及地球化學資料會依據頻率及測站名稱另存成檔案提供下載，井下應變儀資料將每日資料匯出成.sac 格式檔案並壓縮成.tar 檔案，壓縮檔案名稱分為：

SSSSYYDay.tar	每 10 分鐘一筆的應變數據。
SSSSYYDDD_01.tar	每秒 1 筆的應變數據。
SSSSYYDDD_02.tar	每秒 20 筆的應變數據。
SSSSYYDDD_100.tar	每秒 100 筆的應變數據。

   地球化學資料將以年份為單位匯出成.csv 格式檔案並壓縮成.tar 檔案，壓縮檔案名稱為：

A-SSSSYY.tar	該站該年的地化數據

   其中 SSSS 表四字元的觀測代號，YY 表西元紀年末二位數，DDD 則表示該年度的第幾天。

3. 透過網站查詢、展示及下載監測資料：

   網站內容新增地球化學資料內容選項，使用者可透過網站直接選擇測站、時間之項目。並且根據使用者需求選擇資料類型，以歷線圖展示於網頁上。網站提供原始資料下載處，使用者透過權限建立，輸入帳號/密碼方可進入下載頁面，再針對所選項目範圍篩選出資料進行下載。

   更新進度如下：

   - 新增井下應變儀資料表(圖 3.9)
   - 新增地化資料表(圖 3.10)
   - 使用者設定指定資料來源、FTP 根目錄、備分根目錄、檔案輸出等路匯入匯出井下應變儀資料(圖 3.11)
   - 手動選擇井下應變儀匯入資料、更新資料(圖 3.12)
   - 手動匯出地球化學資料資料(圖 3.1.3)

- 新增地球化學資料選項 (圖 3.14)
- 獨立地球化學資料頁面 (圖 3.15)
- 測站、時間、資料類型等項目選擇並繪圖(圖 3.16)
- 權限管理頁面(圖 3.17)
- 測站 Download 頁面(圖 3.18)

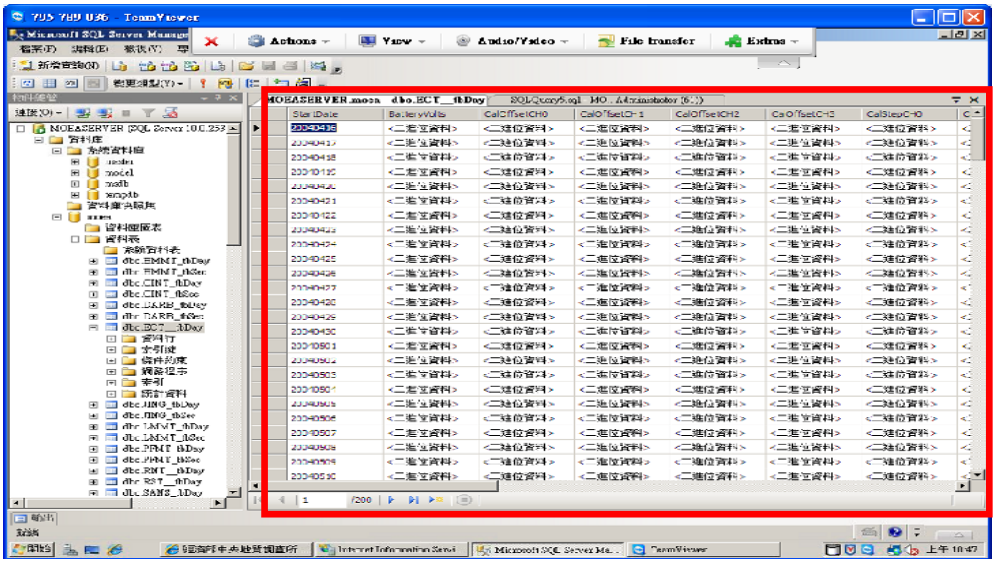


圖 3.9 新增井下應變儀資料表。

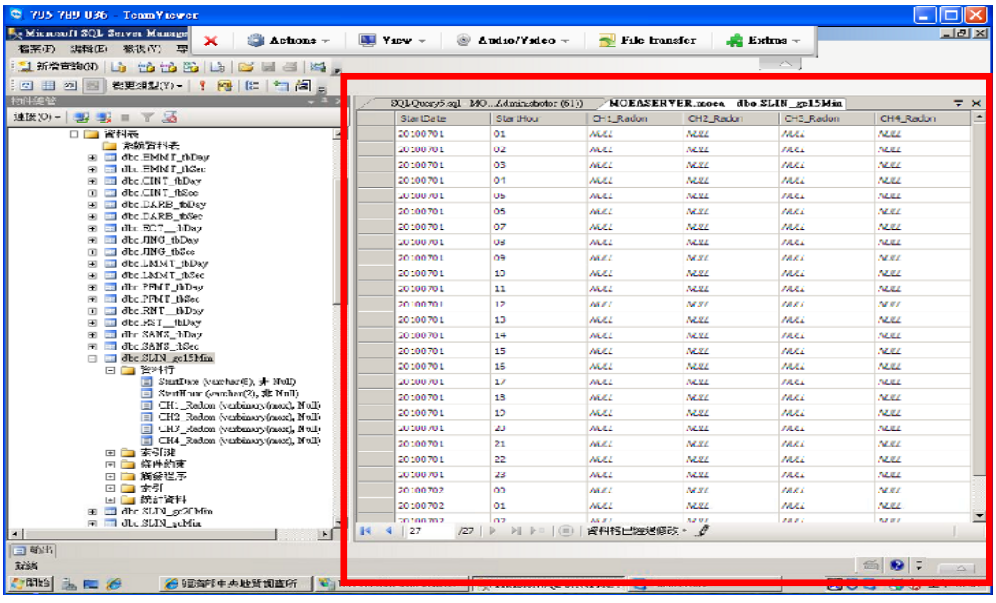


圖 3.10 新增地球化學資料表。

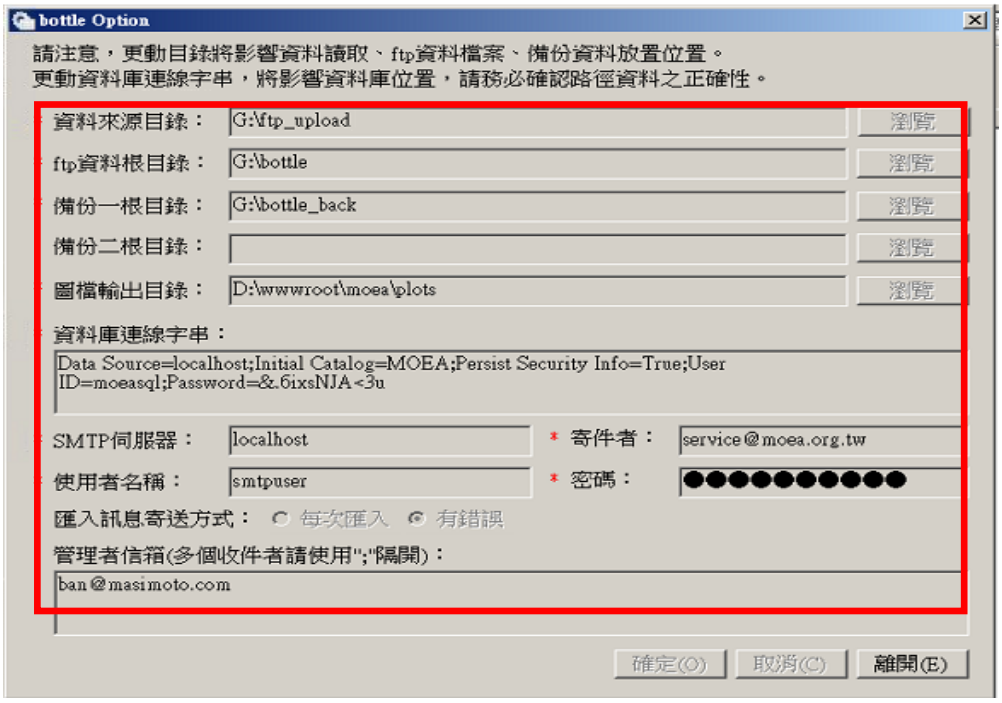


圖 3.11 使用者設定指定資料來源、FTP、備分根目錄、檔案輸出等路徑。

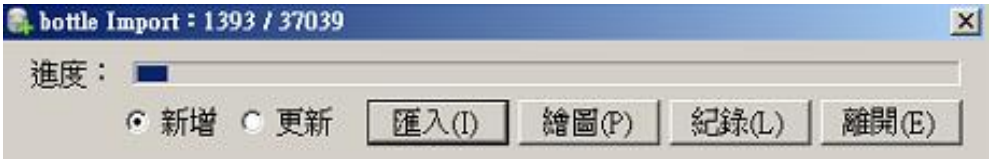


圖 3.12 手動選擇匯入資料、更新資料。

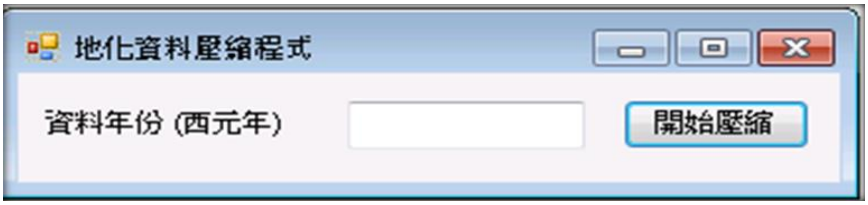


圖 3.13 手動匯出地球化學資料。

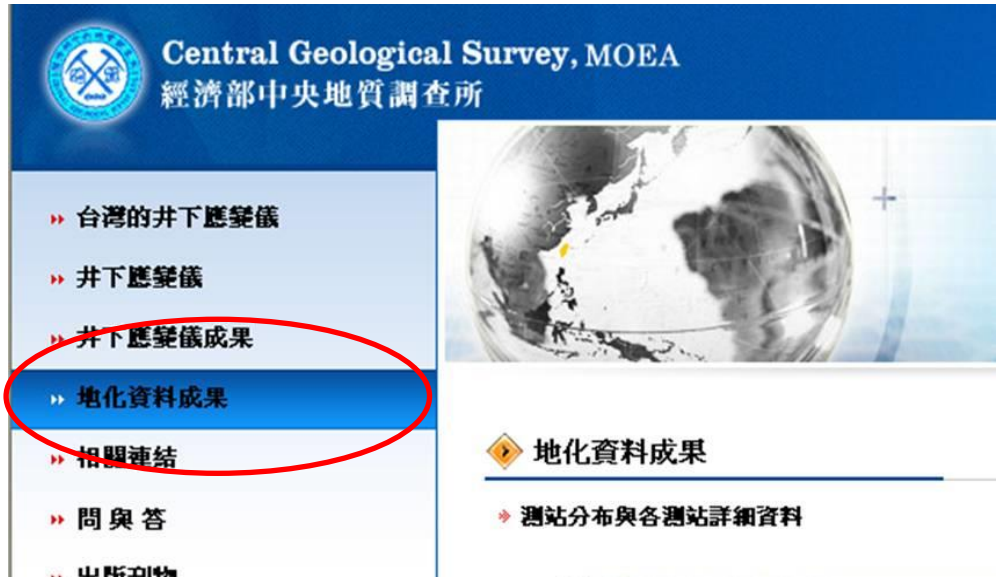


圖 3.14 新增地球化學資料選項。



圖 3.15 獨立地球化學資料頁面。

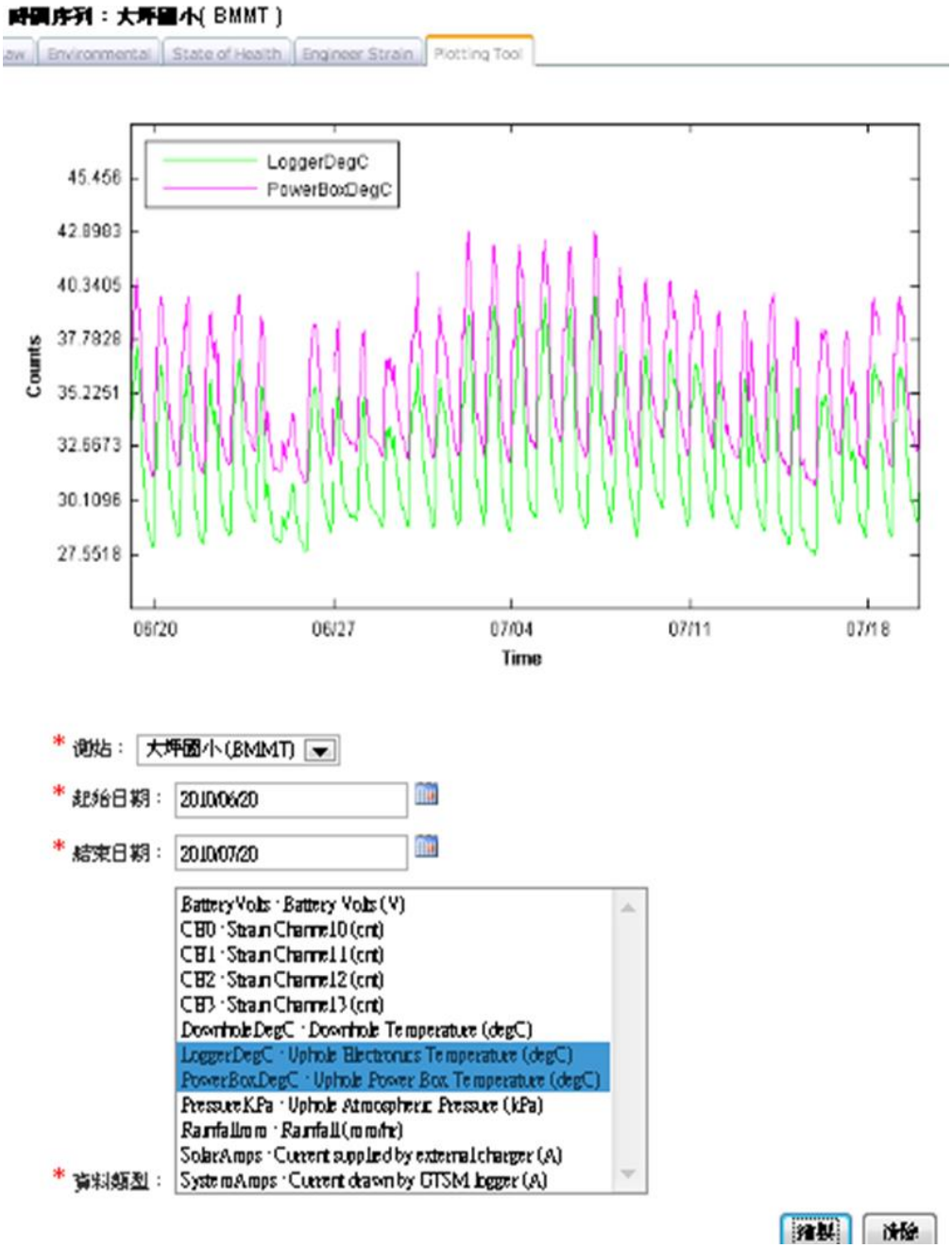


圖 3.16 測站、時間、資料類型等項目選擇並繪圖 (a)井下應變儀資料。

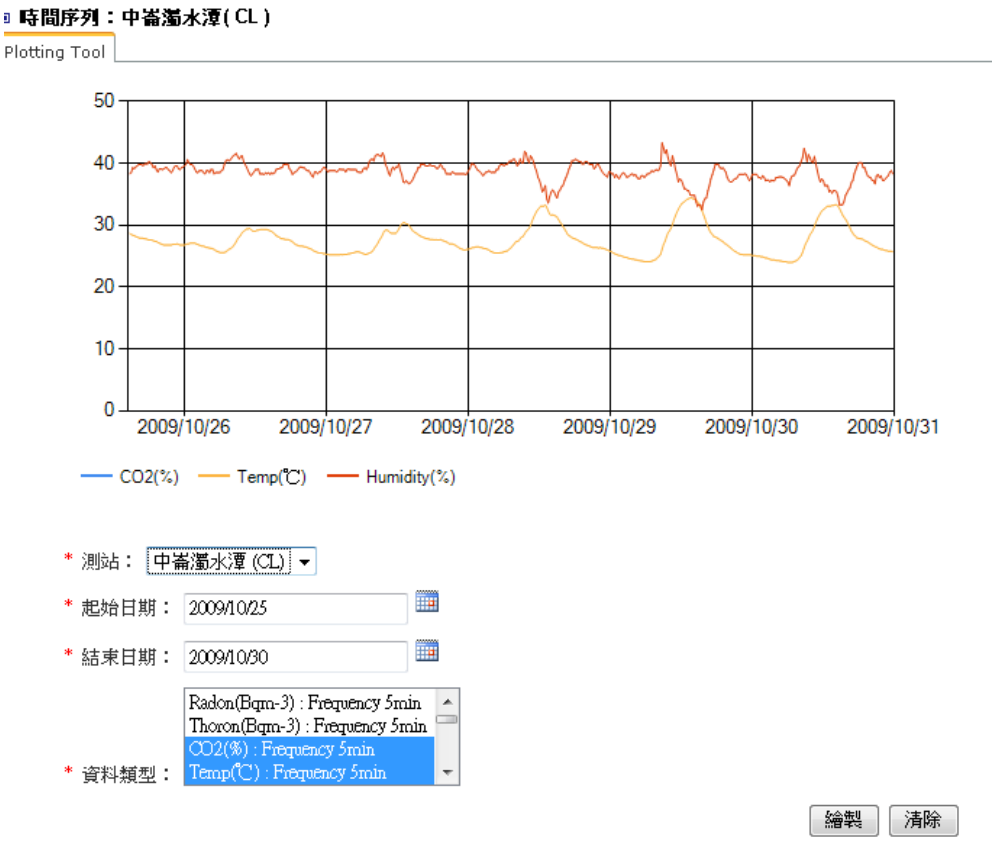


圖 3.16 測站、時間、資料類型等項目選擇並繪圖 (b)地球科學資料 (續) 。



圖 3.17 權限管理頁面。

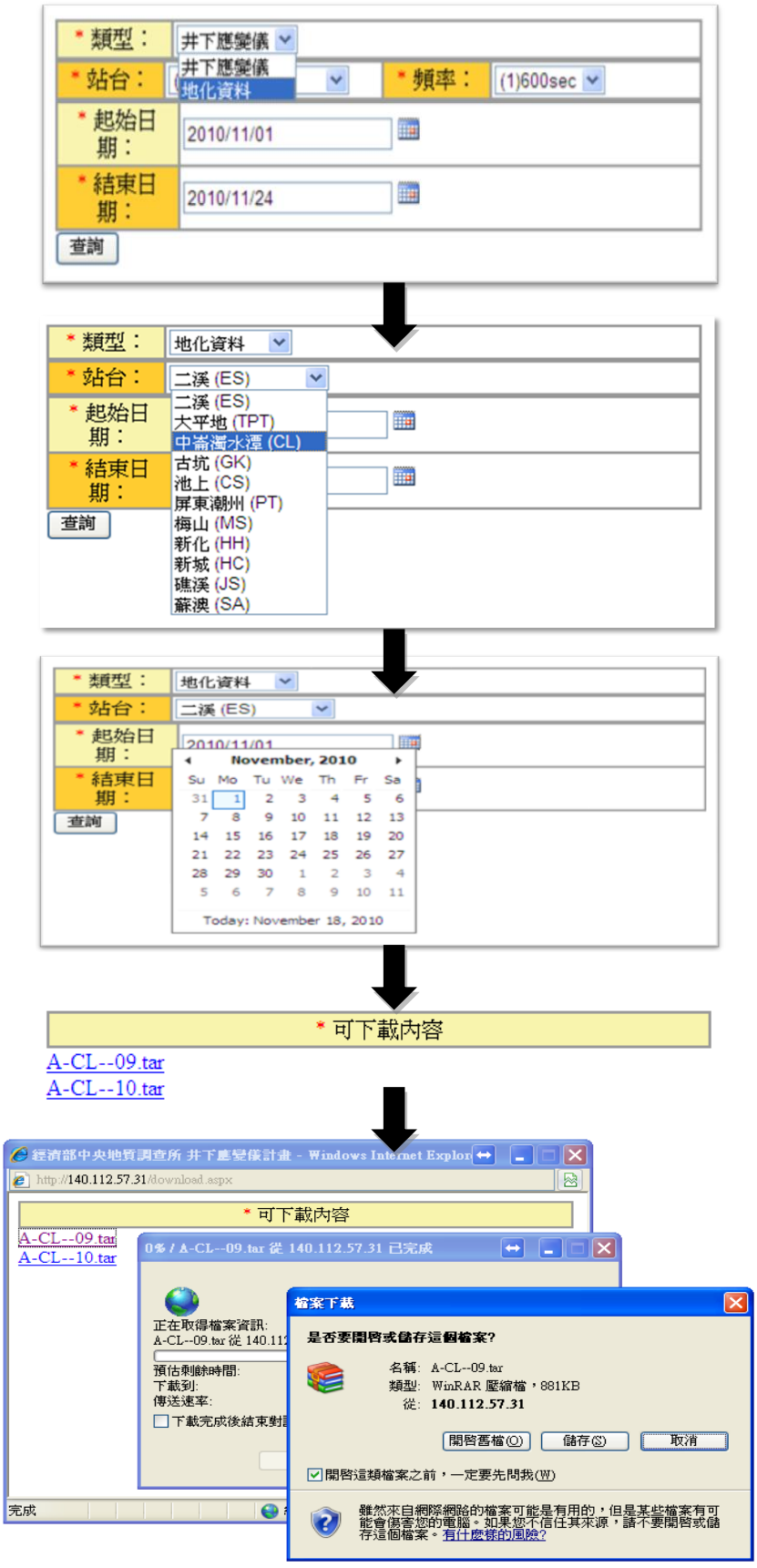


圖 3.18 測站 Download 頁面。

3-5-3 資料庫網站更新架構

根據承接的原網站架構進行新增，使用 Microsoft Chart 進行地化資料繪圖，其更新後系統架構為(圖 3.19)。

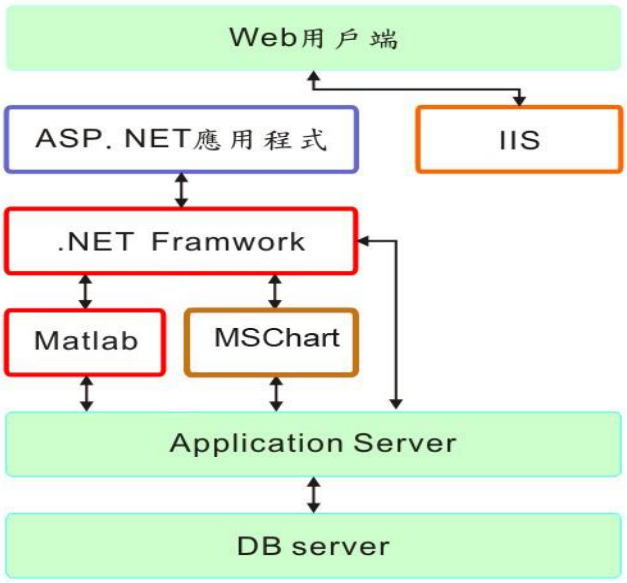


圖 3.19 系統之架構圖。

3-6 大坪國小、新樂國小、錦和國小、瑞峰國小、梅花國小、明德中學及樹林等七站的資料處理

3-6-1 井下應變儀資料處理

今年將所有尚未處理的井下應變儀測站資料一起處理，共計有大坪國小(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)以及樹林(SLIN)等七站，所用的儀器都是與中興國小、太興國小、達邦等三站一樣的 GTSM21 井下應變儀，而與在臺灣最早裝置的三個站 曾文水庫南、曾文水庫北、甲仙十八灣三站 GTSM1000 儀器不同。資料處理以 10 分鐘一筆的資料為處理主軸，其資料期間如表 3.1 所示。

表 3.1 所有未處理的七個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		
			起始	結束	經度	緯度	高程(m)
1	BMMT	大坪國小	2005/05/18	2010/10	121°3’1.92	24°40’34.52	195
2	CINT	新樂國小	2006/11/15	2010/10	121°14’32.12	24°43’57.08	505.2
3	JING	錦和國小	2007/11/07	2010/10	121°28’49.31	24°59’35.89	19
4	LMMT	瑞峰國小	2005/06/04	2010/10	121°6’49.85	24°39’47.49	247
5	PFMT	梅花國小	2005/06/04	2010/10	121°12’1.73	24°40’43.69	496
6	SANS	明德中學	2007/11/02	2010/10	121°21’21.01	24°54’28.51	80
7	SLIN	樹林	2009/09/11	2010/10	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。另外為了將來考慮孔隙與水泥的恢復效應，須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 七個站的安裝日期、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	BMMT	大坪國小	2005/05/18	200	GTSM21	10.7	70.7	130.7	160.7
2	CINT	新樂國小	2006/11/15	198.1	GTSM21	3.5	63.5	123.5	153.5
3	JING	錦和國小	2007/11/07	191	GTSM21	21.7	81.7	141.7	171.7
4	LMMT	瑞峰國小	2005/06/04	155	GTSM21	58.0	118.0	178.0	208.0
5	PFMT	梅花國小	2005/06/04	165	GTSM21	-96.8	-36.8	23.2	53.2
6	SANS	明德中學	2007/11/02	200	GTSM21	155.9	215.9	275.9	305.9
7	SLIN	樹林	2009/09/11	183	GTSM21	138.8	198.8	258.8	288.8

在本計畫中的井下應變儀的資料處理，將先做基本的資料整理與測試。包含 Level-0 到 Level-2，另外再做資料的完整性測試，說明如下：

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 × 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。

在本次的三個測站，資料起始期間自 2005 年 6 月到 2009 年 9 月都有，其中瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理，如圖 3.20 所示。這樣的缺失，將再進一步確定資料來源的問題。

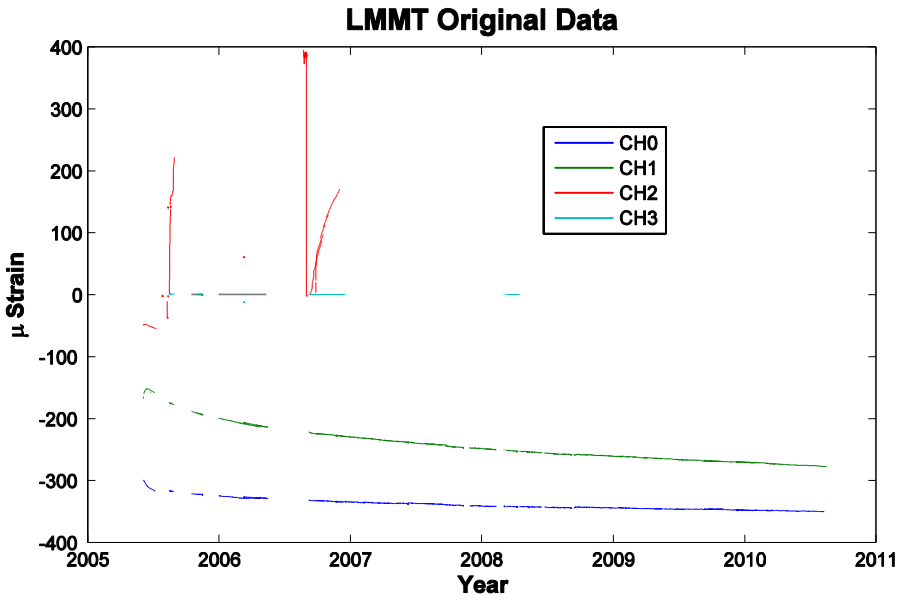


圖 3.20 瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料異常狀況。一直都不正常。

2. Level-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正。

本次三站的儀器都是 GTSM 21

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

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 $d_1 = 200\mu m$；應變儀外徑為 D = 87 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：

$$\varepsilon=\frac{(d_2-d_{20})}{D}=\frac{d_1}{D}\cdot\left[\frac{R}{1-R}-\frac{R_0}{1-R_0}\right]=\frac{200\cdot10^{-6}}{87\cdot10^{-3}}\cdot\left[\frac{r\cdot10^{-8}}{1-r\cdot10^{-8}}-\frac{r_0\cdot10^{-8}}{1-r_0\cdot10^{-8}}\right]$$

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 $1/2 \times 1.08 = 50{,}000{,}000$，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 3.21 到圖 3.26 所示。

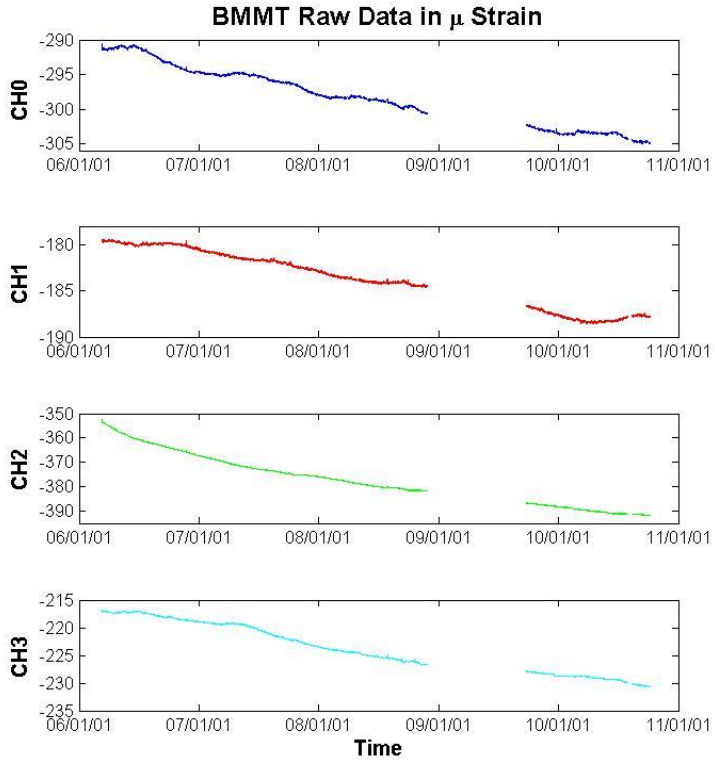


圖 3.21 大坪國小測站應變分量。2006-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。

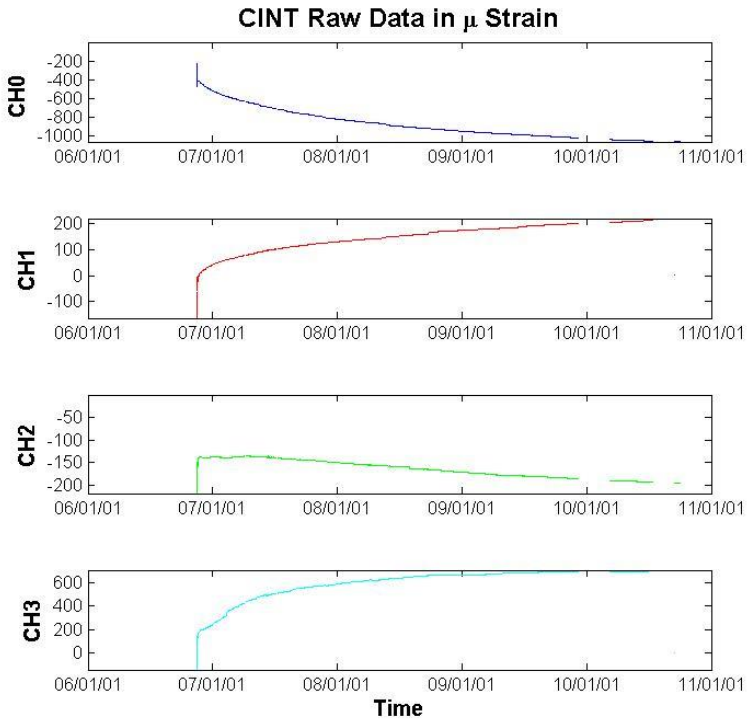


圖 3.22 新樂國小測站應變分量。2006-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。

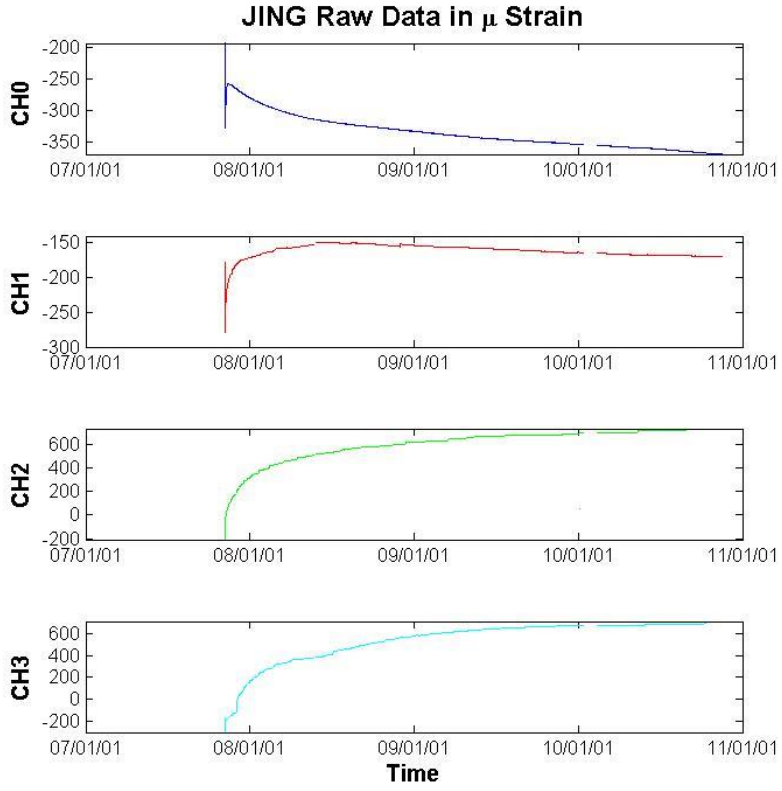


圖 3.23 錦和國小測站應變分量。2005-2010 年資料轉變成應變後，各分量之資料。

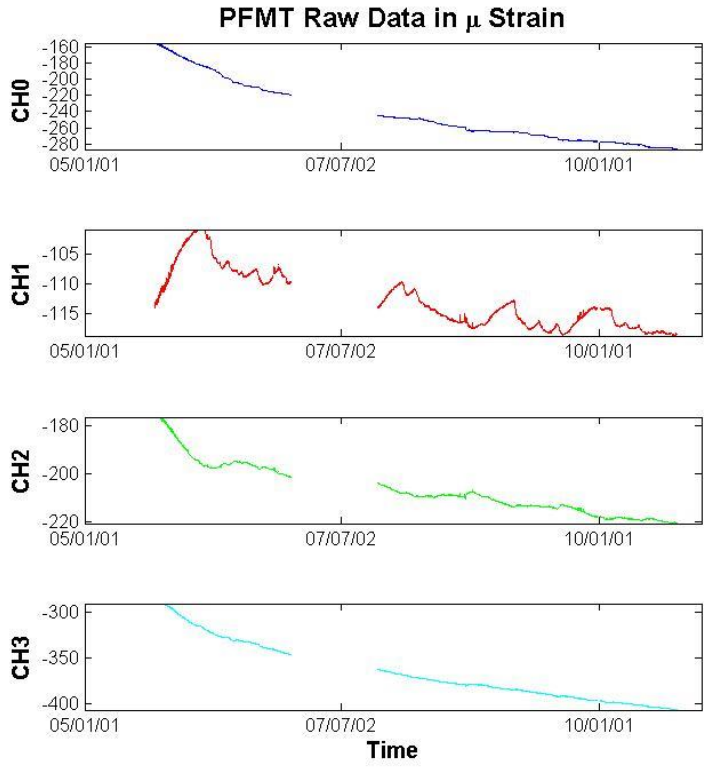


圖 3.24 梅花國小測站應變分量。2007-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。

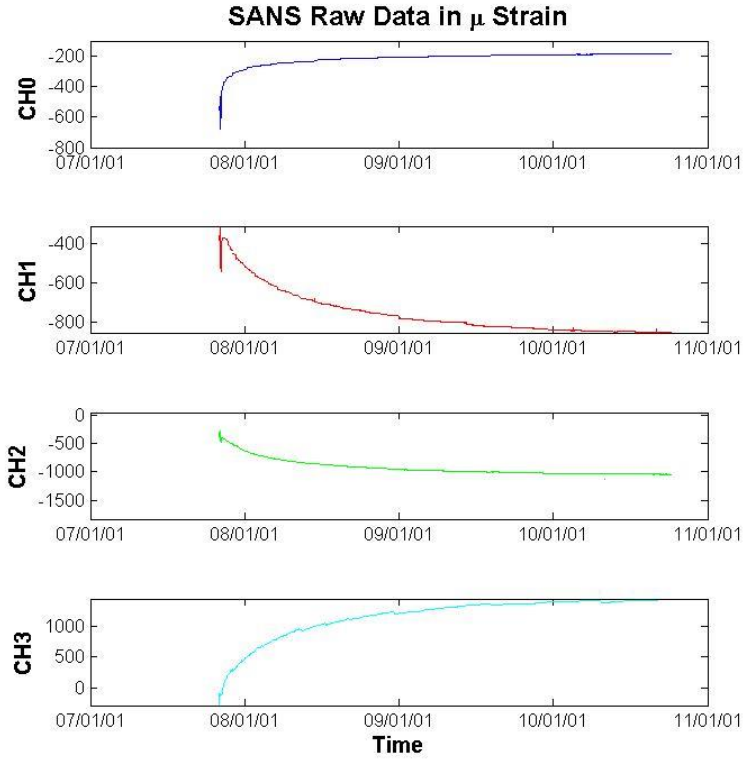


圖 3.25 明德中學測站應變分量。2007-2010 年資料轉變成應變後，各分量之資料。

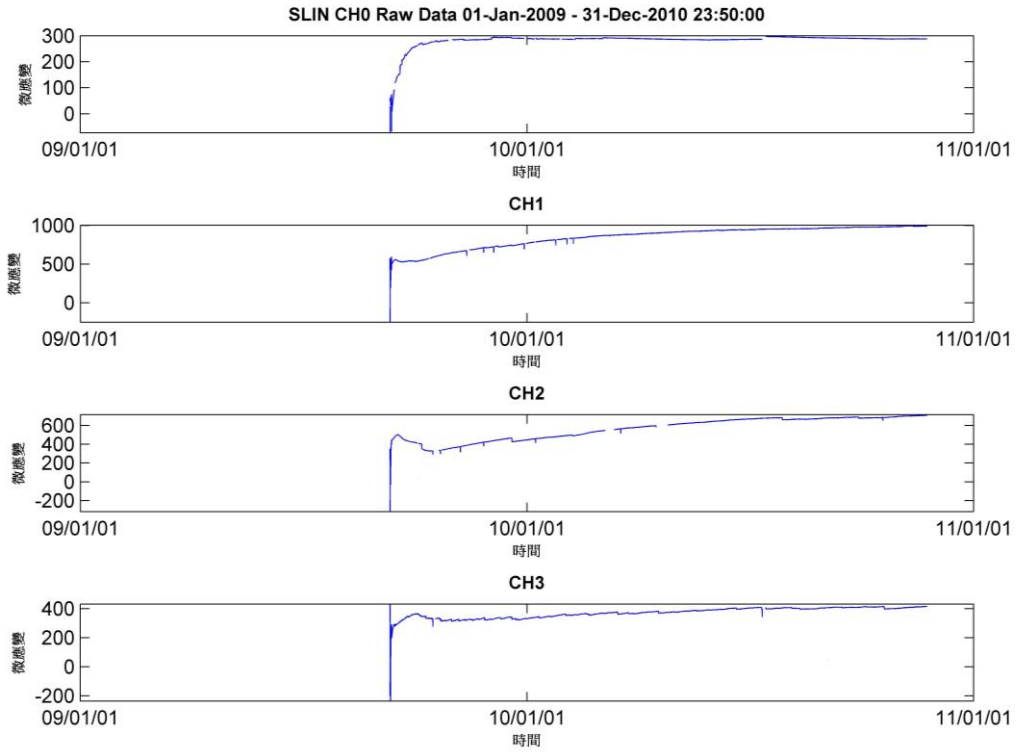


圖 3.26 樹林觀測站應變分量。2009-2010 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。

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。這七站資料，除了瑞峰國小測站因兩個分量資料不正常外，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)，不會像嘉義地區的測站受地下水變化的影響，如去年中興與太興國小測站都有數 10 微應變(μstrain)的上下起伏變動，而且看不出井孔回復的鬆弛效應，這可能是因為兩口井都是在 2006 年 3 月就安裝，但因為未拿到早期的資料，看不到變化最大的井孔回復的鬆弛效應部分，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。因此我們今年蒐集到最早期的資料，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 測站仍未修復)

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：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ½ & ½\cos 2\theta_1 & ½\sin 2\theta_1 \\ ½ & ½\cos 2\theta_2 & ½\sin 2\theta_2 \\ ½ & ½\cos 2\theta_3 & ½\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$$

其中， $\theta_2=\theta_1+60°$；$\theta_3=\theta_1+120°$。至於第 4 支($\theta_4=\theta_2+90°$)的觀測量，可於前面三分量有壞掉之時，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。

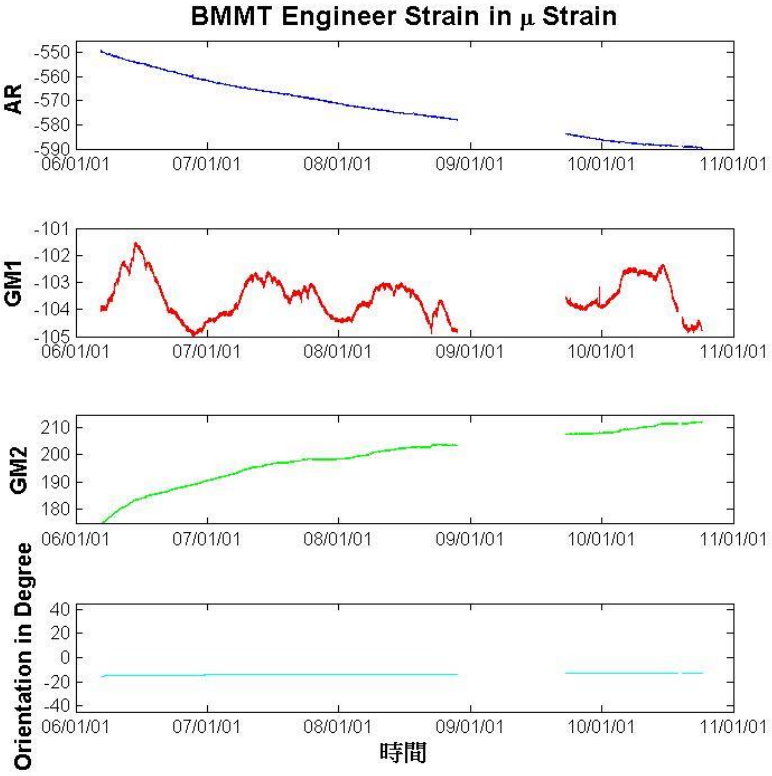


圖 3.27 大坪國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

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 3.27 至圖 3.37 為轉換成 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量所的的結果。

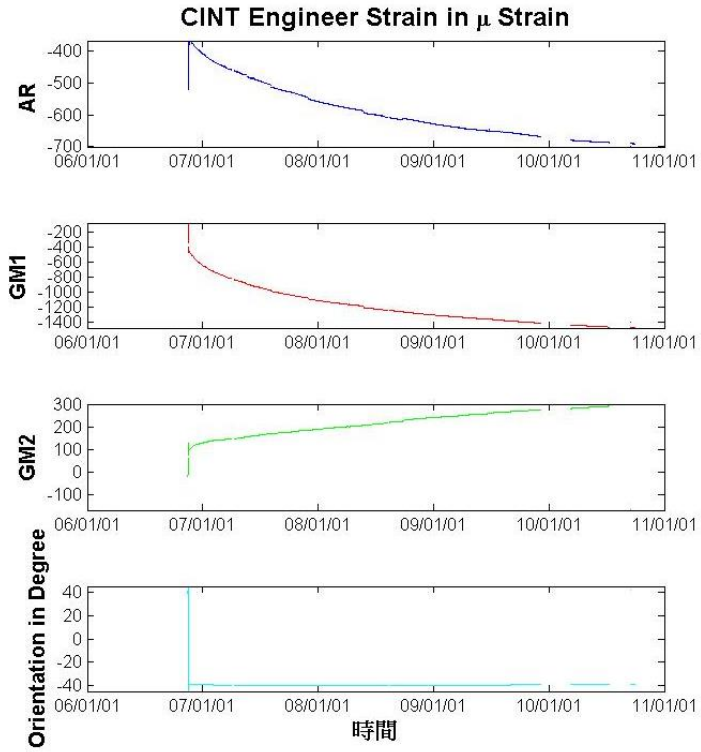


圖 3.28 新樂國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

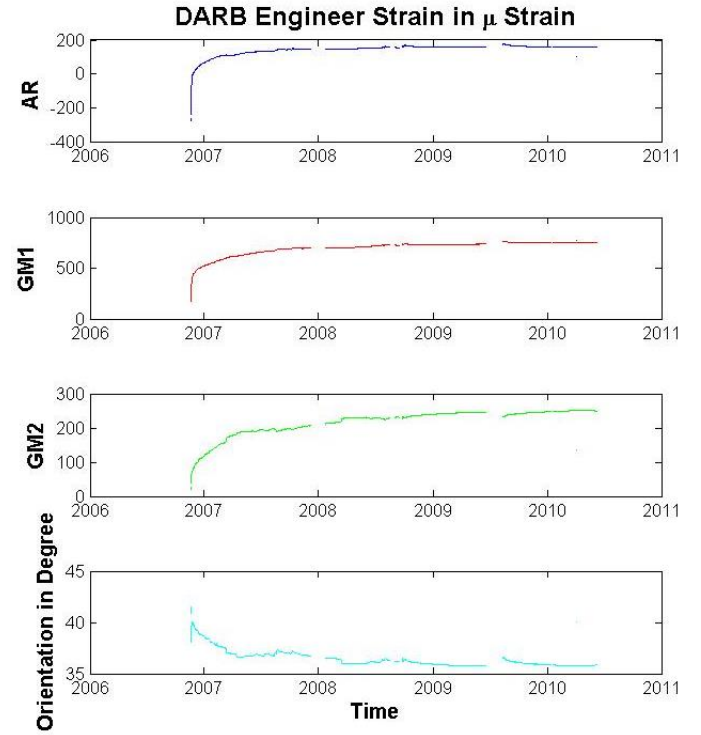


圖 3.29 達邦國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

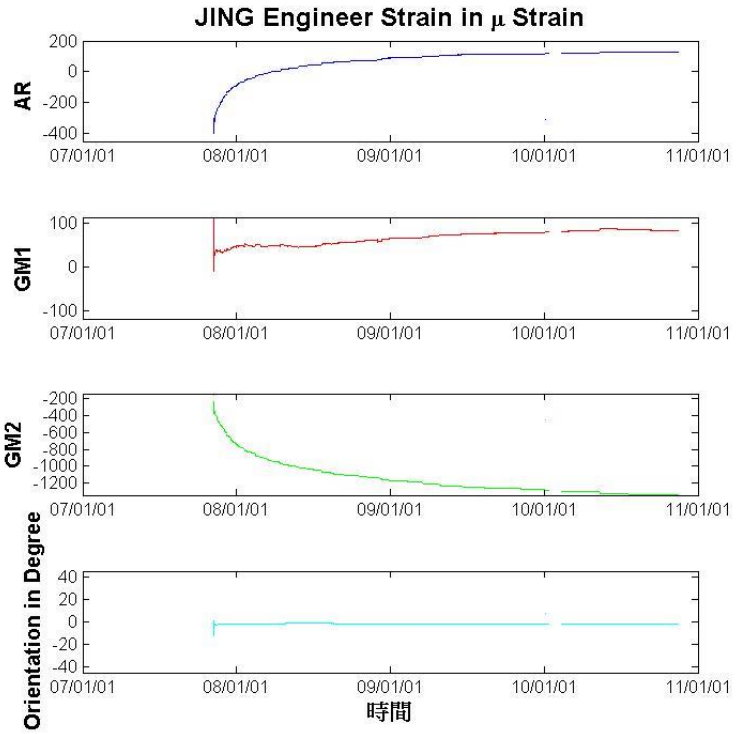


圖 3.30 錦和國小測站應變方向。於 2007 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

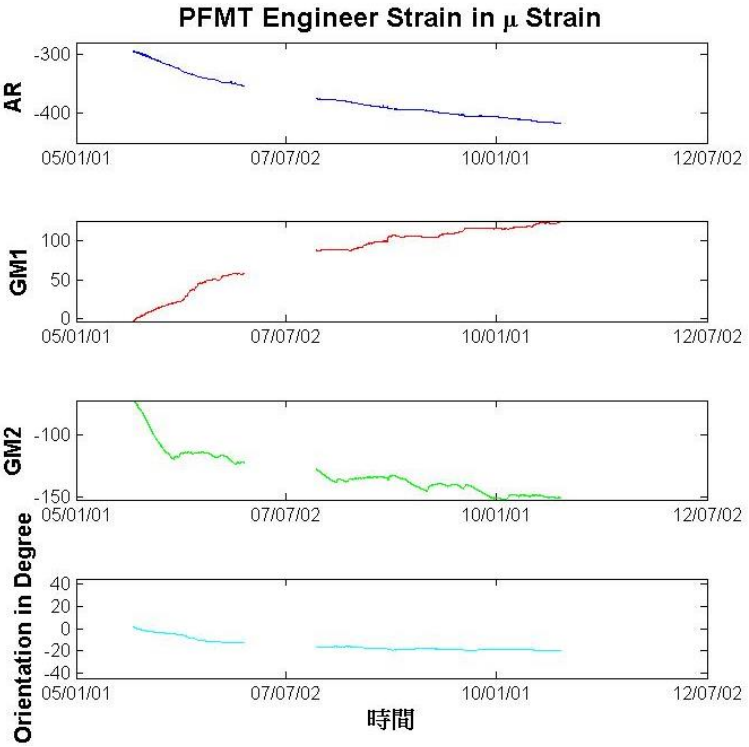


圖 3.31 梅花國小測站應變方向。於 2005 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

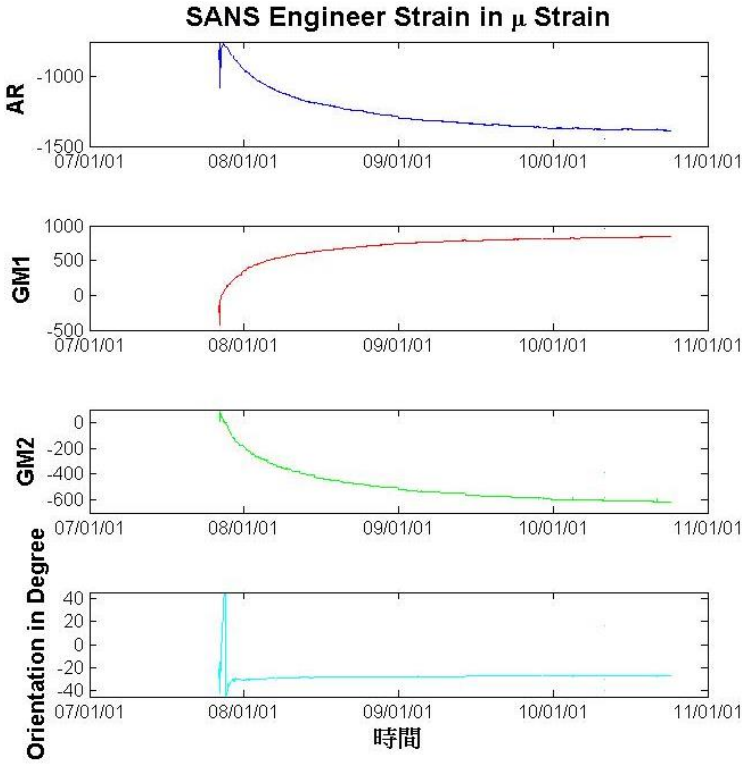


圖 3.32 明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

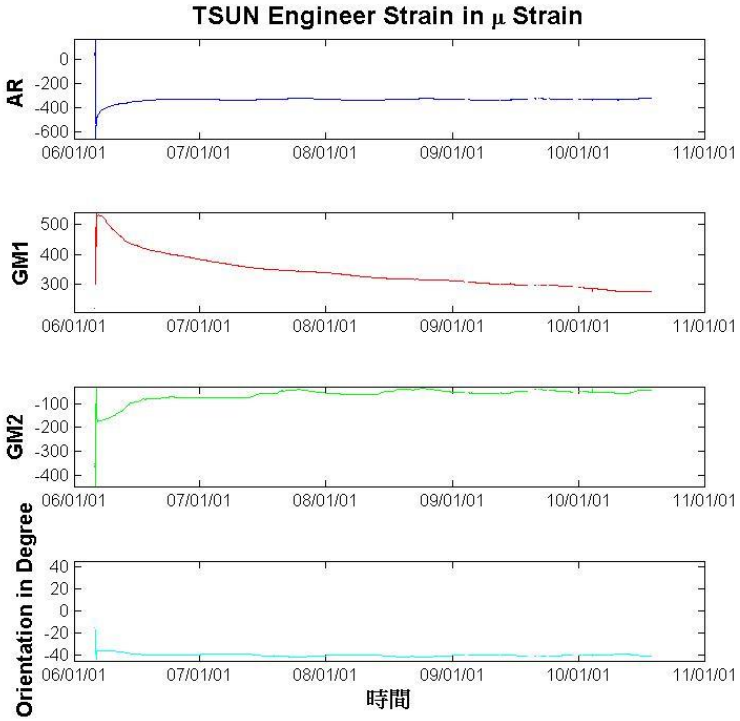


圖 3.33 中興國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

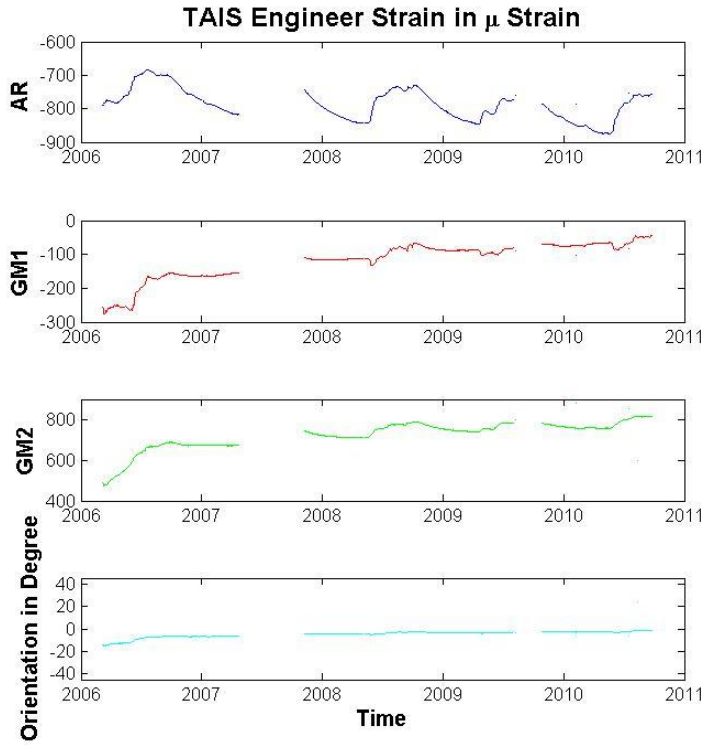


圖 3.34 太興國小測站應變方向。於 2006 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

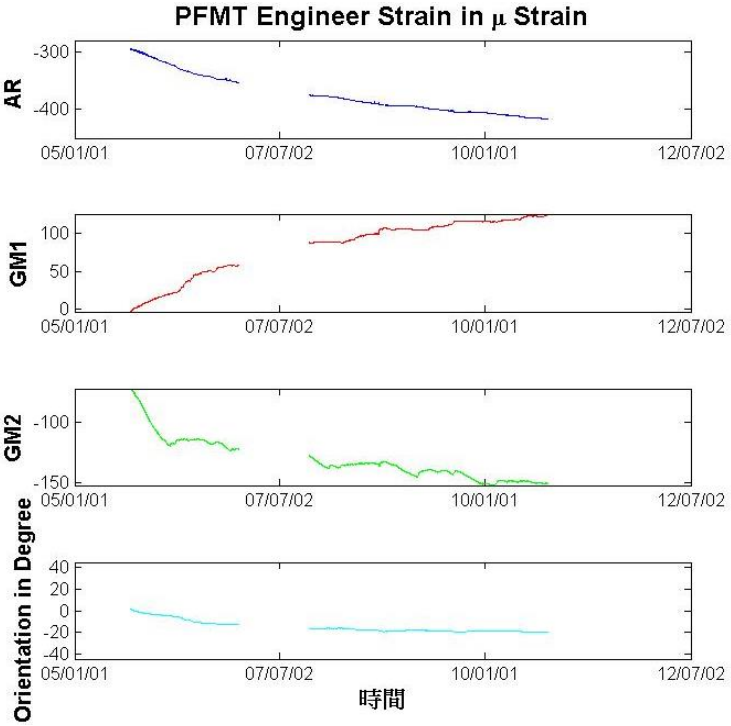


圖 3.35 梅花國小測站應變方向。於 2005 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

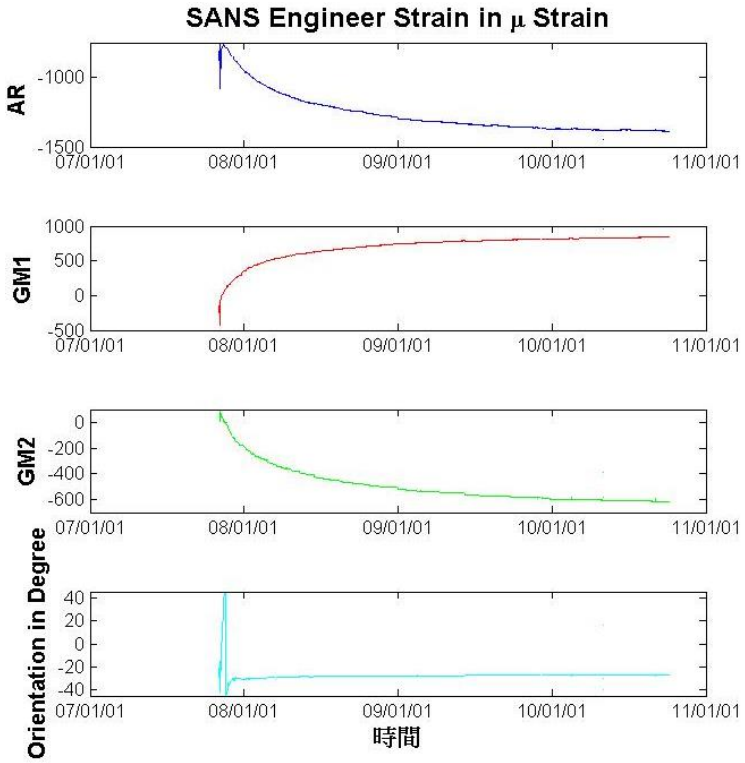


圖 3.36 明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

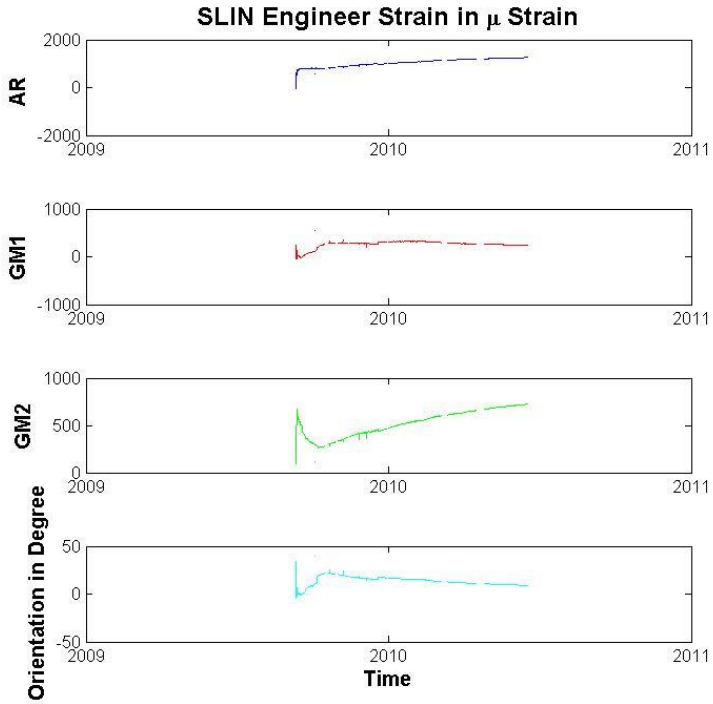


圖 3.37 樹林測站應變方向。於 2009 年到 2010 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

在應變與應變公式的理論推導中，一個平面上若能量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(θ) 及剪應變量 γ(θ)，即

$$e(\theta) = \tfrac{1}{2}e_a + \tfrac{1}{2}\gamma_1 \cos 2\theta + \tfrac{1}{2}\gamma_2 \sin 2\theta$$

$$\gamma(\theta) = -\gamma_1 \sin 2\theta + \gamma_2 \cos 2\theta \ \text{(engineering shear)}$$

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 3.38 至圖 3.46 顯示所比較的結果。這些比較可以顯示各測站各軸方向的正確性。為了更進一步的證實，我們也會將前所述的面積應變的量個檢驗量，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 ε_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 ε_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. Gledwin 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。

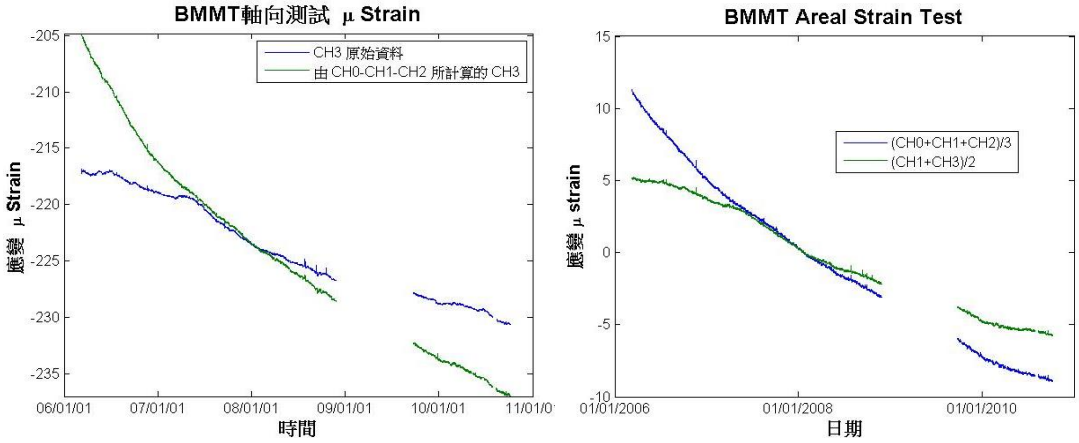


圖 3.38 大坪國小測站的比較檢核。利用大坪國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

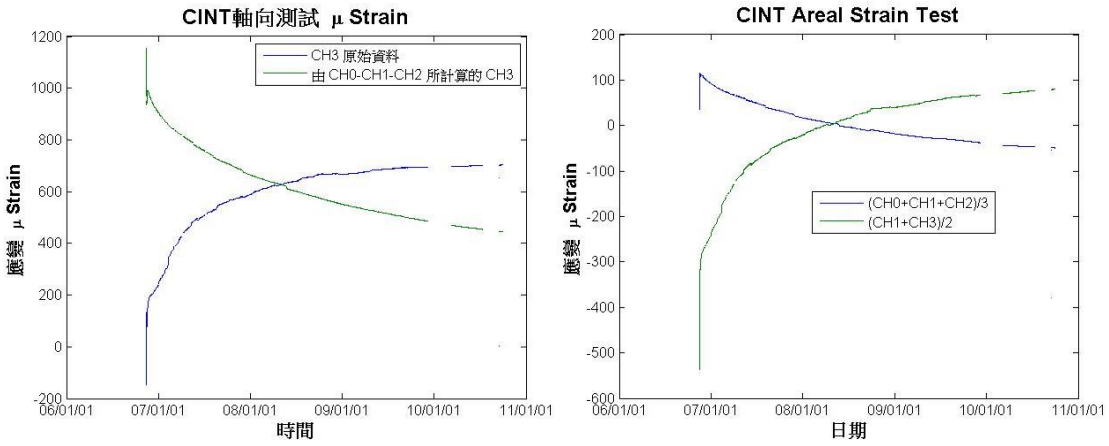


圖 3.39 新樂國小測站的比較檢核。利用新樂國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

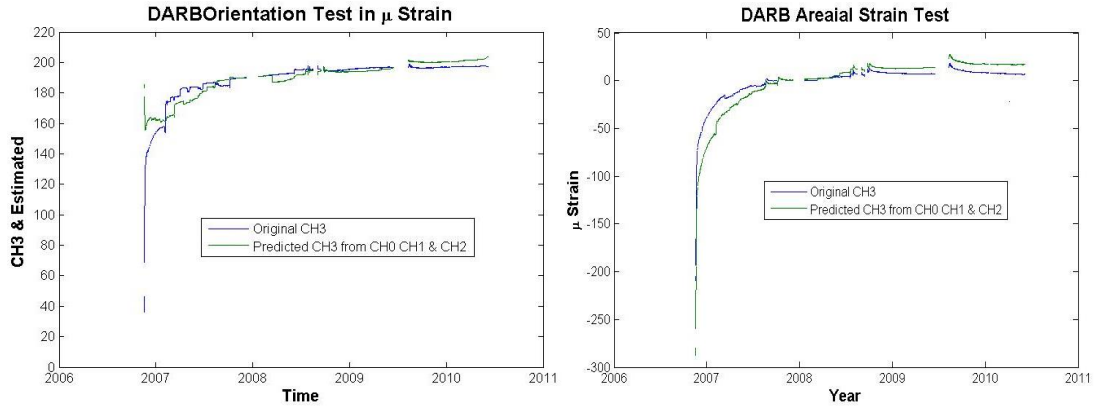


圖 3.40 達邦測站的比較檢核。利用達邦測站的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

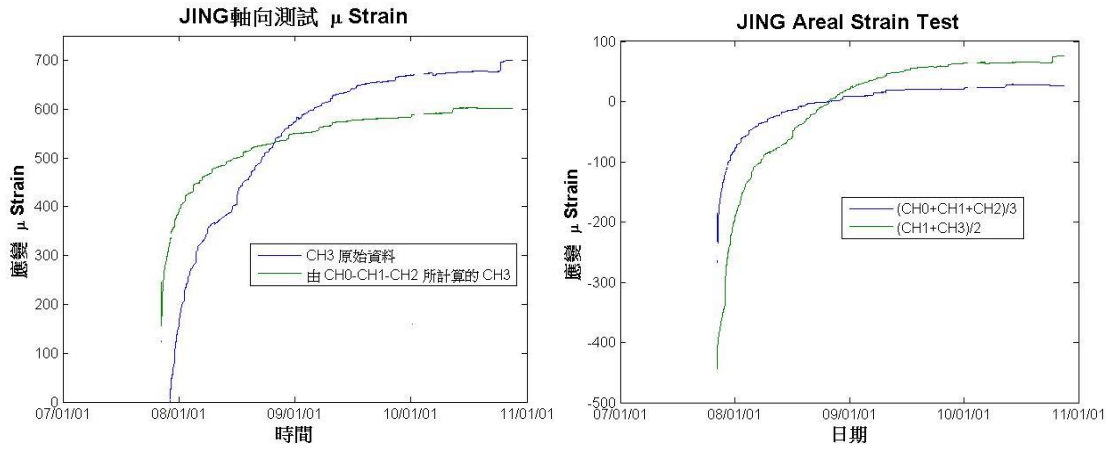


圖 3.41 錦和國小測站的比較檢核。利用錦和國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

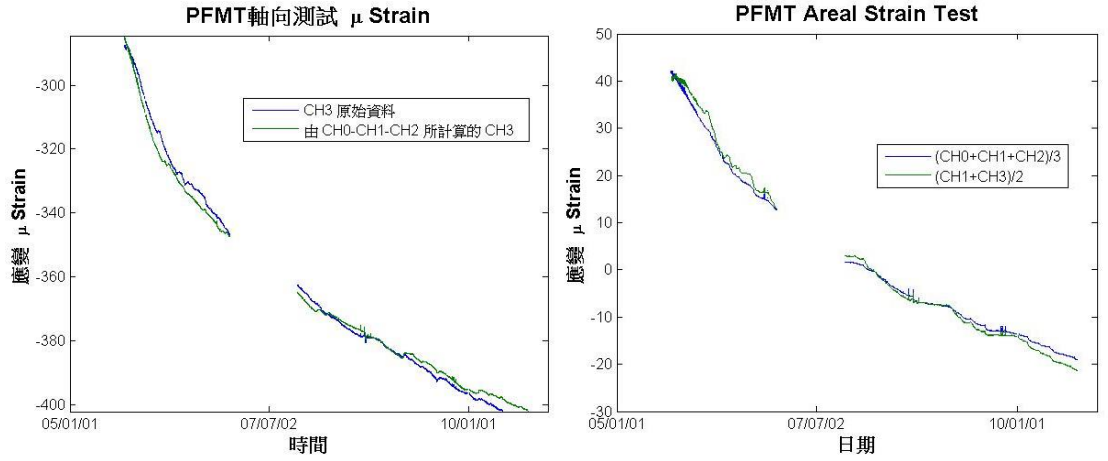


圖 3.42 梅花國小測站的比較檢核。利用梅花國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

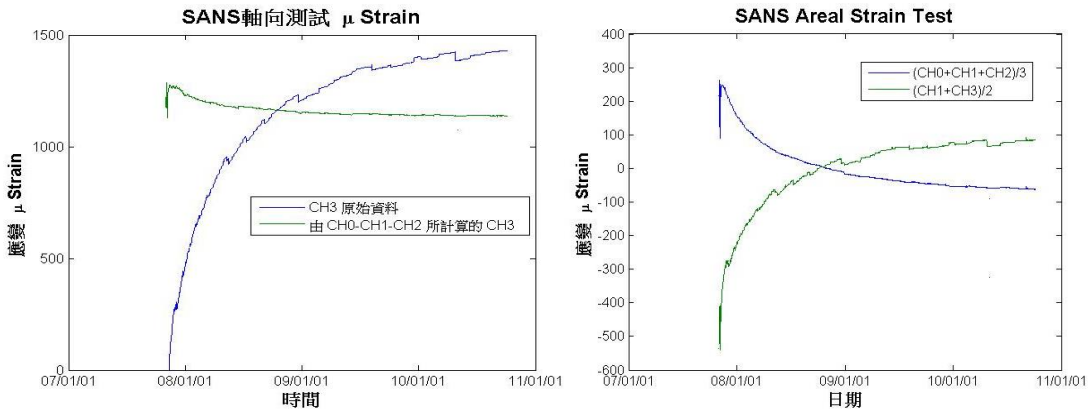


圖 3.43 明德中學測站的比較檢核。利用明德中學測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

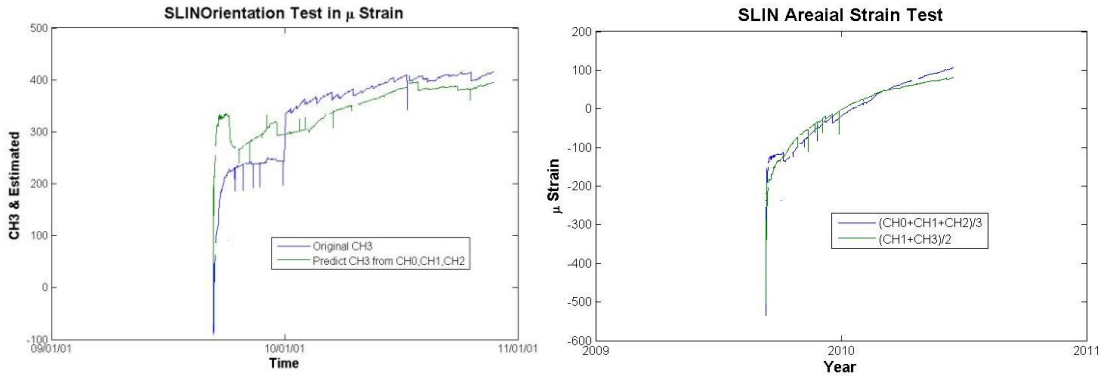


圖 3.44 樹林測站的比較檢核。利用樹林測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

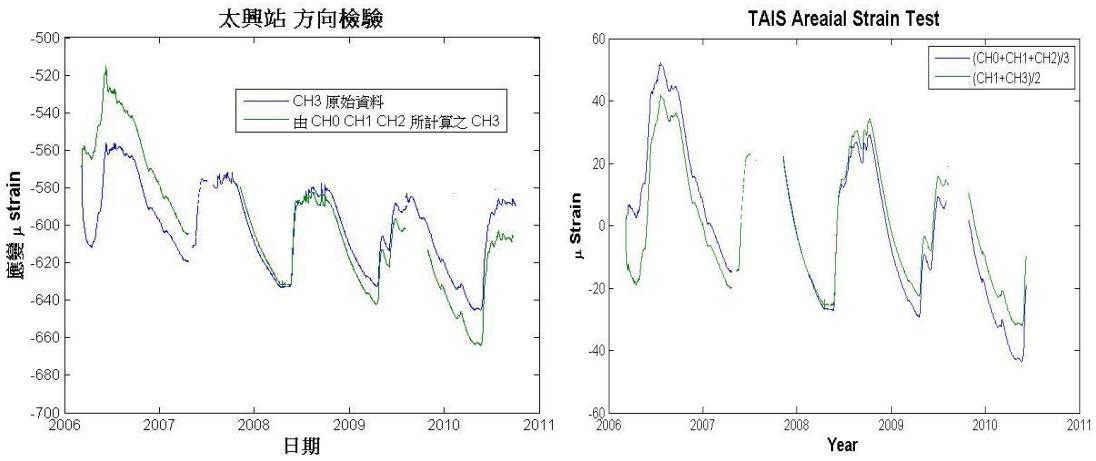


圖 3.45 太興國小測站的比較檢核。利用太興國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

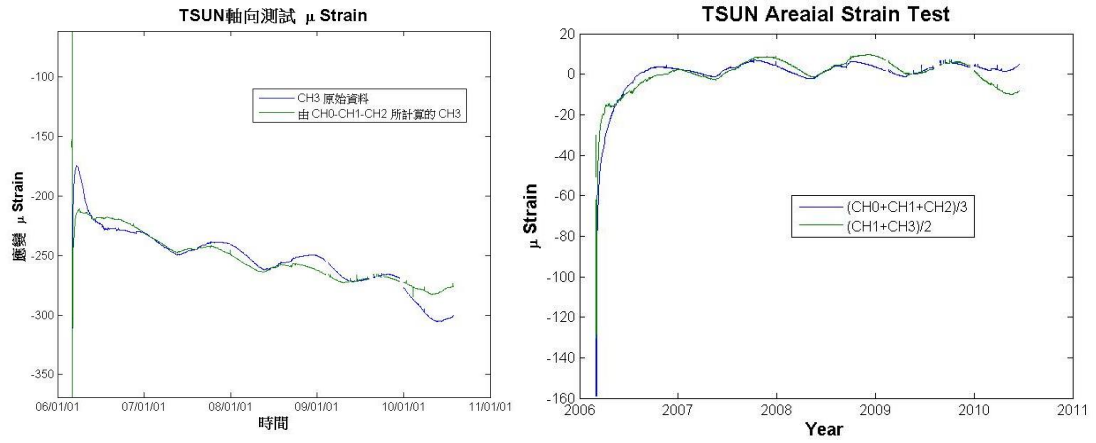


圖 3.46 中興國小測站的比較檢核。利用中興國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄(CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值 (CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

3-6-2 井下應變儀資料與地下水變化

井下應變儀的儀器所記錄的的資料，除了受到板塊活動施加於岩石的應變外，另外還會受到地下水層水壓改變、溫度改變與大地上的氣壓改變的影響。一

般而言，氣壓的影響比較直接，通常氣壓的變化牽涉的區域較廣，所以其影響量能直接達於深部，所產生的影響也較接近於線性的變化。溫度的變化一般較小，除非儀器斷電，或者重新起動，改變了儀器產生的熱量，造成了記錄上的變化。而最重要的影響可能來自地下水的變化，特別是在水庫附近的幾個測站，如中興國小、太興國小及達邦測站，尤其太興國小測站在原始資料中幾乎無法看出井孔鬆弛效應。為了分析此效應，我們找了該站的地下水位資料，做逐一分量的分析，以及總和面積應變量的分析，如圖 3.47 所示的總和面積應變量變化曲線，與地下水位的變化幾乎完全同步，根據迴歸分析得結果，可看出 1 公尺的水位變化可以造成約 5.0275 μstrain 的變化。井下應變儀受到地下水壓的作用，一大部分是直接加壓在應變儀上，僅有一小部分是經過岩石受壓應變後再影響應變儀記錄，因此這數值的正確與否，需在裝設儀器前就做實驗。

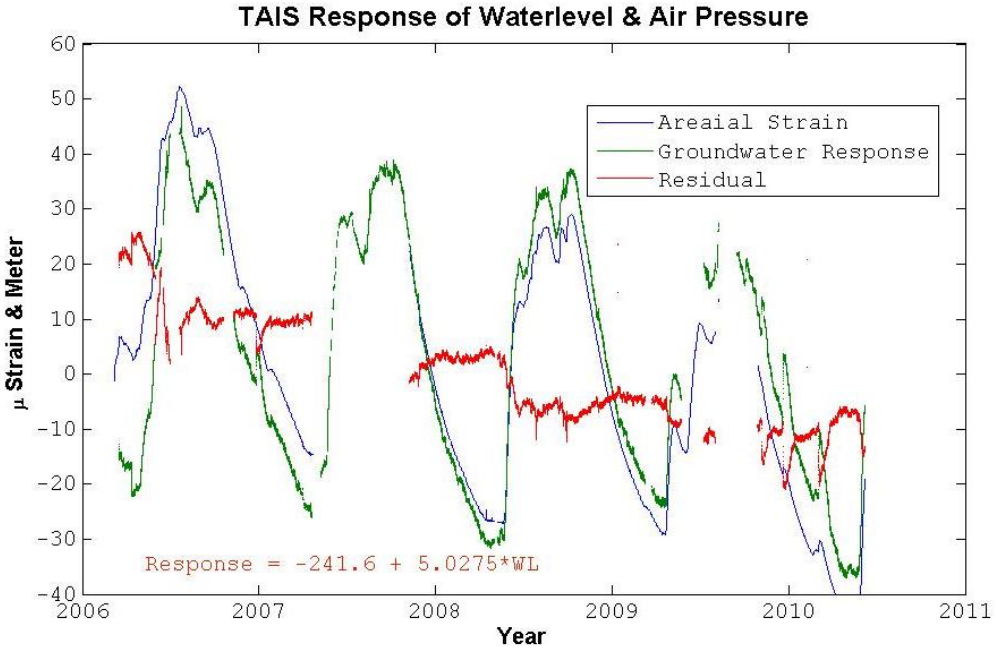


圖 3.47 太興國小測站面積應變與地下水壓變化。太興國小測站面積應變原始記錄受到地下水壓變化的影響，看不出鬆弛效應的影響，所得的殘差變化幾乎與水位變化同步(單位不同)。

為了要分析地下水位對應變儀的影響，我們將這站的四個分量分別對水位變化最回歸分析，看各方向記錄對水位之響應是否有所不同，若各方向都相同，代表地下水在岩石孔隙中能是符合準靜平衡(hydrostatic)的原理，並無方向性，也代表岩石在這數 10 公分的範圍內也無特別的方向性。各分量對地下水位的響應呈現於圖 3.48~3.51 中，由其中可看出四個分量的響應分別為 5.0275、4.3657、6.0976 與 4.7251 μstrain /m，與面積應變的響應 5.0275 μstrain/m 相去不多，由此

可看出每次在低水位時，應變儀的記錄都有約-5μstrain/m 左右的變化，而水位上升下降變化有時高達 10 公尺以上，如圖 3.52 所示，應變量隨之變化，最後可影響至數十到近百個 μstrain，遠大於每日地潮接近 0.7 μstrain 的變化。應變與地下水間為簡單線性關係，即每 1.0 公尺的地下水變化，可造成約 5.0 μstrain/m 的響應關係，這與去年分析曾文水庫附近三個測站與曾文水庫有效蓄水量間的關係類似，可惜那三個站無地下水水位的觀測記錄。根據臺灣地區曾文水庫水位變化的長期資料與這三個測站地下水位的關係，可看出除了中興國小的變化略為延遲外，其餘地下水位變化與曾文水庫幾乎是同步，且所以水位變化都是一年一個周期，每年都是在夏天水位驟然上升，春天近入乾水期前水位驟然下降。今年將持續在嘉義地區有地下水觀測井共站資料的三個站，更直接分析地下水位與地殼應變間的關係，進一步探討這樣的變化到底是真的產生地殼應變，還是只是水壓增加影響到應變儀器的記錄，而非真的伴隨著地殼的應變。

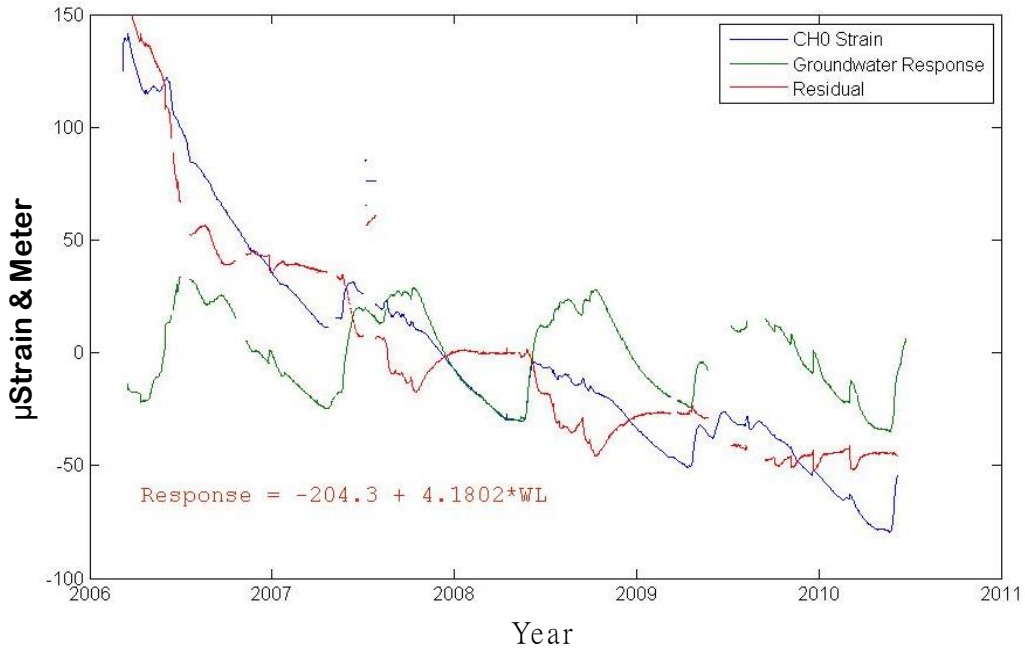


圖 3.48 太興國小測站 CH0 分量應變與地下水壓變化。太興國小測站 CH0 分量應變原始記錄(藍色)受到地下水壓變化的影響，這是本站唯一可看到鬆弛效應影響的分量，所得的地下水位響應(綠色)幾乎與與應變同等級變化。

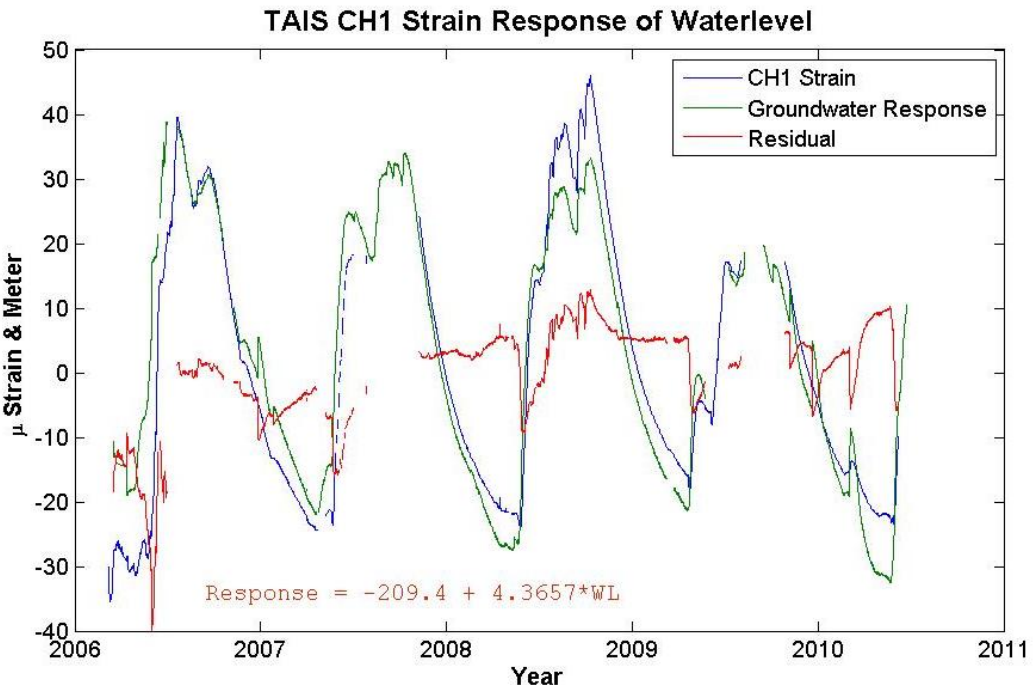


圖 3.49 太興國小測站 CH1 分量應變與地下水壓變化。太興國小測站 CH1 應變原始記錄(藍色)受到地下水壓變化的影響，看不出鬆弛效應的影響，所得的地下水位響應(綠色)幾乎與與應變同等級變化，其殘差變化(紅色)可看出孔隙鬆弛效應的影響。

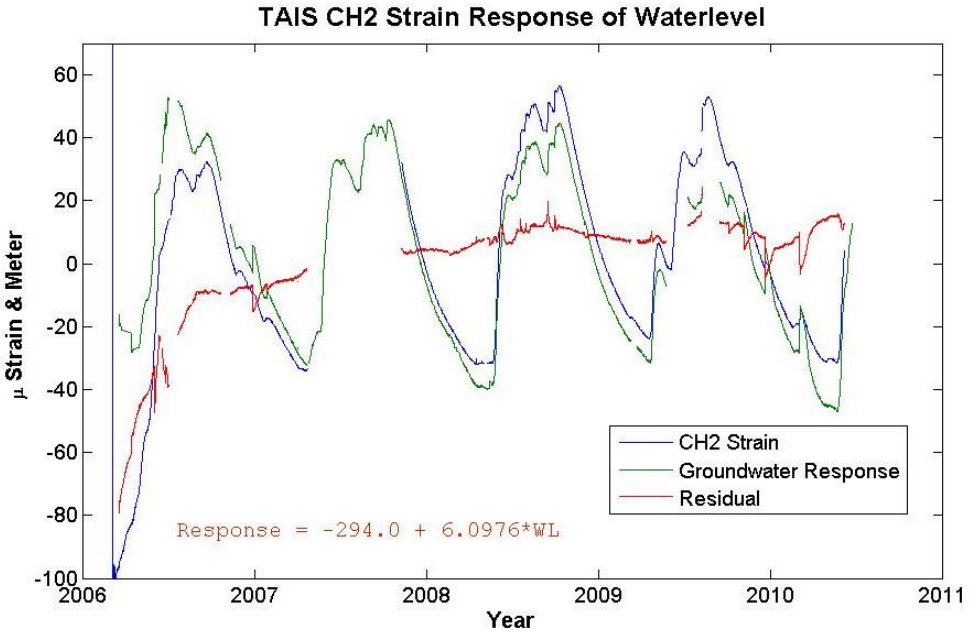


圖 3.50 太興國小測站 CH2 分量應變與地下水壓變化。太興國小測站 CH2 應變原始記錄(藍色)受到地下水壓變化的影響，看不出鬆弛效應的影響，所得的地下水位響應(綠色)幾乎與與應變同等級變化，其殘差變化(紅色)可看出孔隙鬆弛效應的影響。

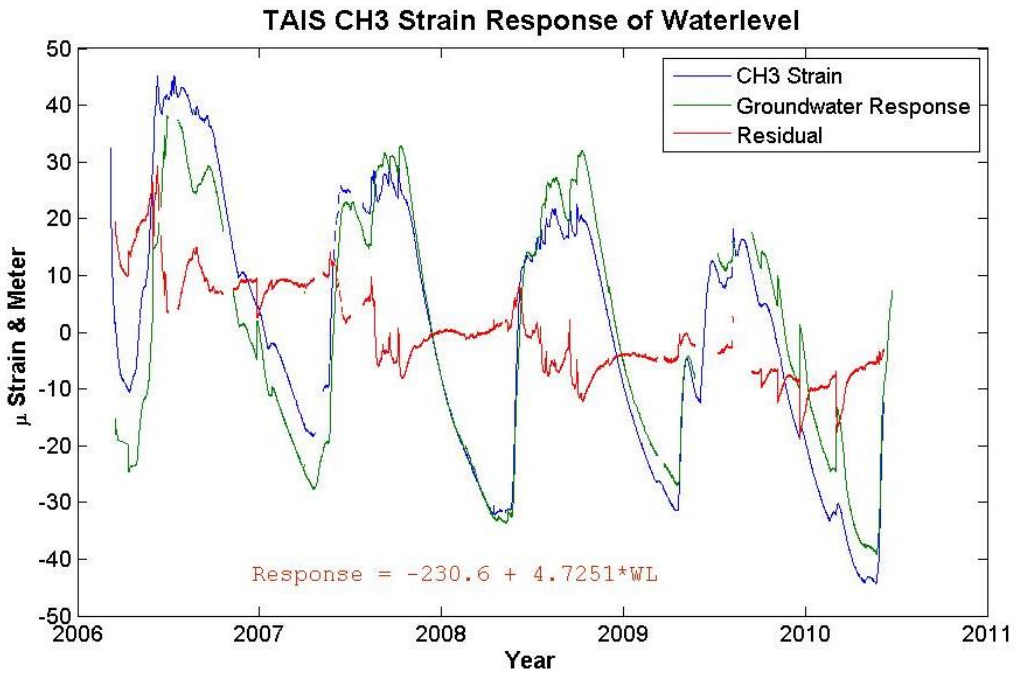


圖 3.51 太興國小測站 CH3 分量應變與地下水壓變化。太興國小測站 CH3 應變原始記錄(藍色)受到地下水壓變化的影響，看不出鬆弛效應的影響，所得的地下水位響應(綠色)幾乎與與應變同等級變化，其殘差變化(紅色)可看出孔隙鬆弛效應的影響。

3-6-3 地下水影響量之移除

根據以上之分析，在達邦、太興國小與中興國小三個測站的地下水位變化大，且井下應變儀資料受其影響也深，然而這影響量之估計並不太容易，因為各測站在較大地下水影響時，無法先有效的移除井孔鬆弛效應，因此也很難單獨的移除地下水的影響效應。而在數學模式上，也無法同時估計雙自然對數的井孔鬆弛模式與地下水位相關的線性模式。因此，我們只好先以最簡單的線性迴歸，再加以經驗的判斷，即是基於兩個假設：

1. 地下水對井下應變儀的效應為線性影響
2. 當正確修正時，在井下應變儀資料上看不出明顯的周期性變化。

根據此原則，嘗試對每站做地下水影響的修正。各站的修正模式如圖 3.52 至圖 3.54 所示，圖中包括各站的原始資料(藍色線)與修正後之結果(綠色線)。其中達邦與中興國小在修正前與修正後都可明顯看到井孔鬆弛的效應，而太興國小在修正前完全看不到井孔鬆弛的效應，但修正後略可看出井孔鬆弛的效應。

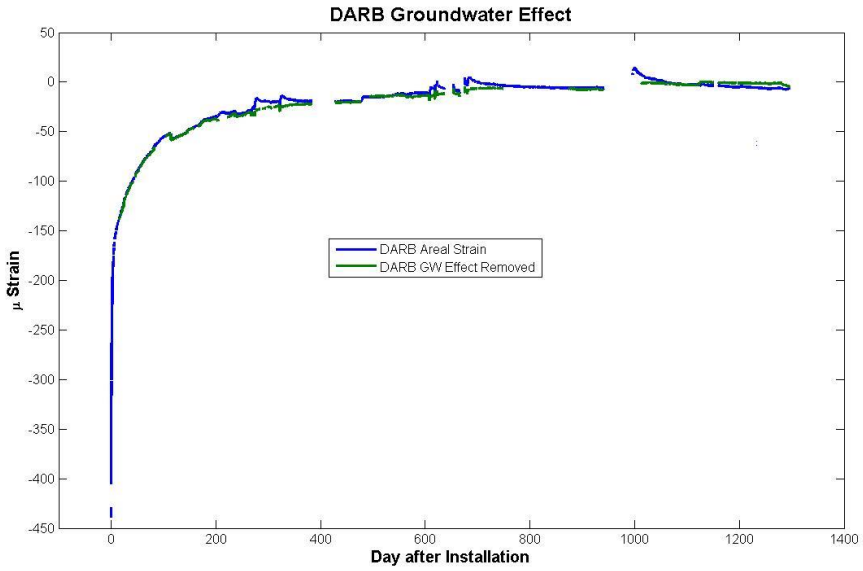


圖 3.52 達邦地下水對井下應變儀資料的線性影響模式修正，修正前與修正後都可明顯看到井孔鬆弛的效應。

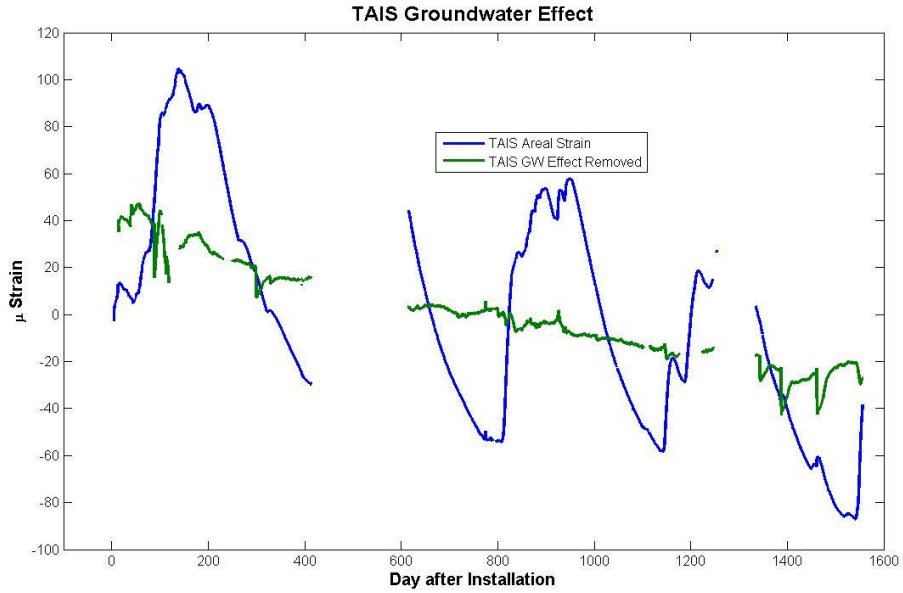


圖 3.53 興國小地下水對井下應變儀資料的線性影響模式修正，修正前完全看不到井孔鬆弛的效應，但修正後略可看出井孔鬆弛的效應。

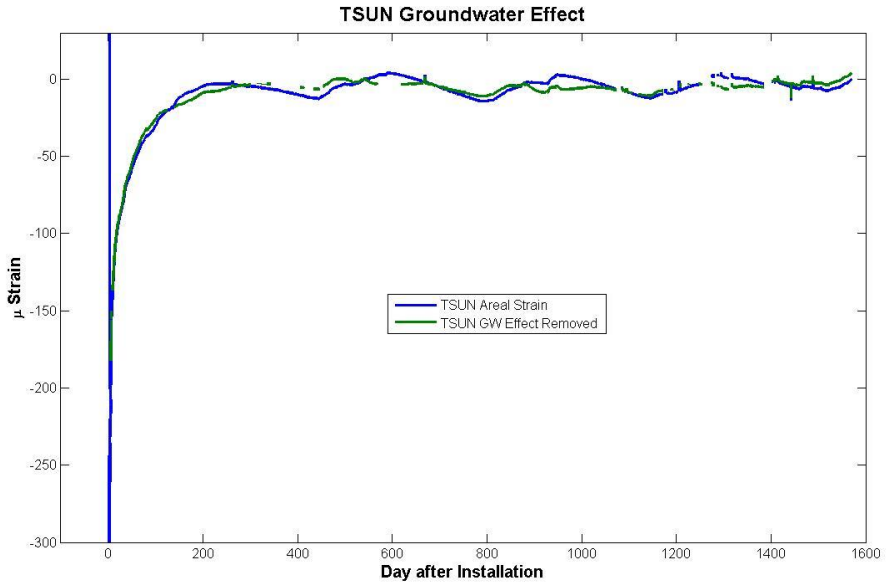


圖 3.54 中興國小地下水對井下應變儀資料的線性影響模式修正，修正前與修正後都可明顯看到井孔鬆弛的效應。

根據這些線性模式的修正後，再去做雙自然對數的井孔鬆弛模式的估計與修正，可以得到更好的井下應變資料，如圖 3.55 到圖 3.57 所示，其儀中藍色曲線代表做過地下水模式修正的資料，綠色曲線為雙自然對數的井孔鬆弛模式曲線，另一條紅色曲線為殘餘之量，也就是我們可以拿來當作地殼應變之量。以下的嘉義網異常應變之分析均是以此量之分析結果。

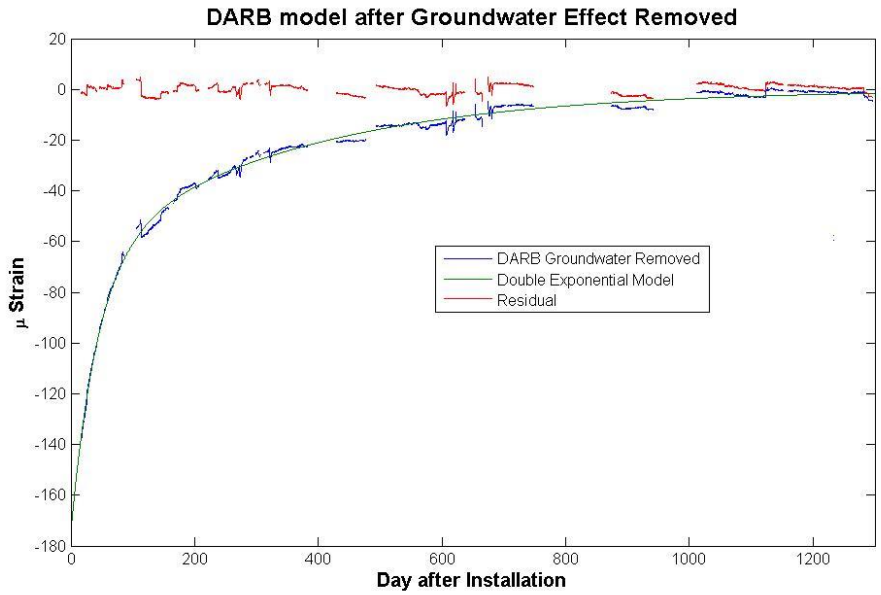


圖 3.55 達邦站的井孔鬆弛分析，藍色曲線代表做過地下水模式修正的資料，綠色曲線為雙自然對數的井孔鬆弛模式曲線，另一條紅色曲線為殘餘之量，也就是我們可以拿來當作地殼應變之量。

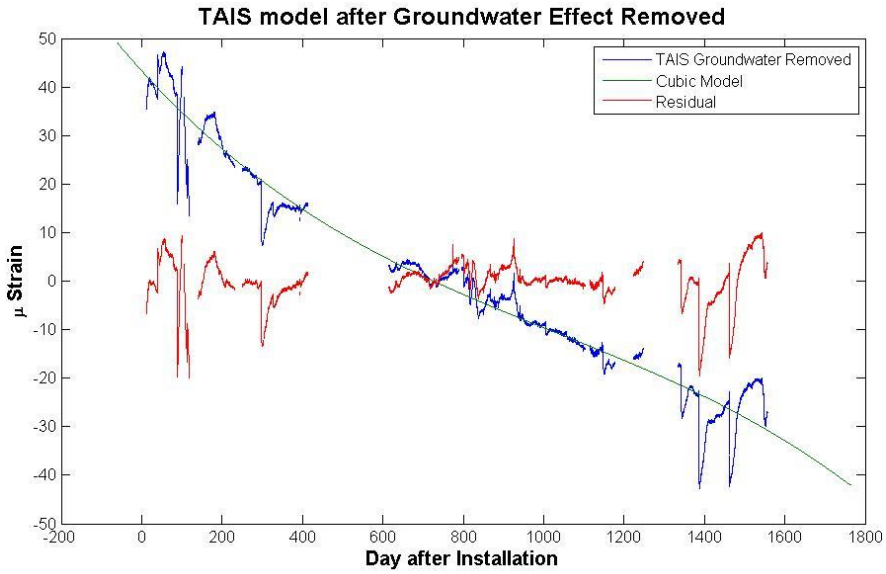


圖 3.56 太興國小站的井孔鬆弛分析，藍色曲線代表做過地下水模式修正的資料，綠色曲線為雙自然對數的井孔鬆弛模式曲線，另一條紅色曲線為殘餘之量，也就是我們可以拿來當作地殼應變之量。

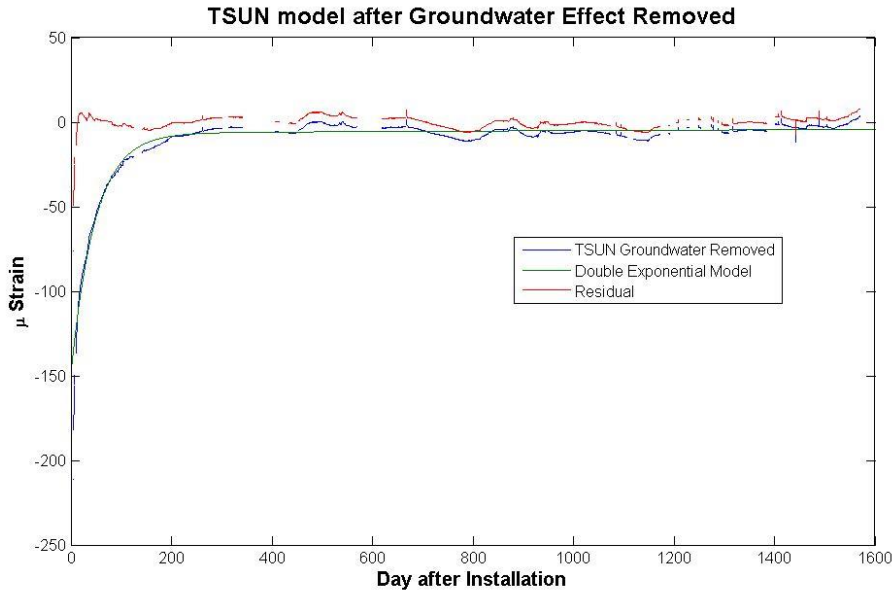


圖 3.57 中興國小站的井孔鬆弛分析，藍色曲線代表做過地下水模式修正的資料，綠色曲線為雙自然對數的井孔鬆弛模式曲線，另一條紅色曲線為殘餘之量，也就是我們可以拿來當作地殼應變之量。

3-7 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷

本計畫經過兩年之資料處理與分析，對井下應變儀儀器之特性有了相當的了解，並且對應該修正的一些非地體構造活動的影響因素也有事當的了解與處理，因此，開是常是建立異常資料辨識的工作。由於地殼變動相當複雜，尚非現今人類知識所能掌握，因此對於與斷層活動相關的異常現象往往無法正確的掌握，有些仍端賴各人的自由意志去判斷。本計畫將先嘗試對於地震相關或其它觀測也有相同異常的例子作為探討對象，在逐漸累積經驗後再加以量化。因此，本章節先由影響應變儀資料的各種因素談起，再看可能的幾個異常案例，最後對近兩年嘉義地區的應變及鄰近 GPS 觀測站的應變觀測共同來討論其與地震的關係。

3-7-1 影響應變儀資料變化的因素

（一） 井孔鬆弛效應

- 必須以長時間資料來估計
- 較大的永久性應變或地下水影響會影響到模式估計
- 錯誤的模式會影響到擠壓或伸張的相反判斷
- 通常影響周期都較長，在安裝一年後若只想看到幾天的變動，不一定要先消除此因素

（二） 地潮與海潮

- 大小約在 0.5 微應變 (μstrain) 左右
- 若只想看到較大的應變事件，不一定要消除地潮或海潮
- 錯誤的潮汐移除會增加一些奇怪的周期性變化，徒增困擾
- 資料越長越不容易精確的移除
- 若要看幾天之到一個月內小於一微應變左右的變化，可在觀看之前再移除

（三） 地體活動所產生地殼應變的特性

- 板塊擠壓或板塊間相對運動，不論在時間序列上或在空間分布上，一般而言相當穩定
    - 通常在數年間都是穩定的累積速率
    - 要一個網一個網的觀察，同一區應該大致上相同
    - 可與 GPS 所觀測到的應變比較
- 斷層活動
    - 在 5~100 km 範圍間緩慢的變化，依斷層長度或深度而定。
    - 在站與站之間的變化可用錯動理論模式來推估或建立模式。
    - 在此類的觀測，GPS 所得的結果有可能與井下應變儀的結果相同，也有可能完全相反，端視該斷層是否滑動而定。

（四） 環境影響因素

- 溫度 (井下儀器附近的溫度)

Gladwin 型式的應變儀，因為電子設備在井底下，於停電再復電時，儀器四周的溫度會改變，影響到應變儀的記錄，會有突然變高在逐漸降低的現象

- 溫度 (地表溫度)

  這會影響到儀器記錄的精度，以及地表溫度對地殼本身的影響。影響量尚未有完整的理論或實際資料分析。

- 大氣壓力

  這很明顯的會直接加壓於地殼上，對儀器附近的地殼會因岩石彈性產生水平應變，但是快速的壓力變化與緩慢的壓力變化或許並不一定有相同的關係，大變化與微小變化也或許不是一樣的線性關係，因為由線性回歸非析中，尚無法有效的消除所有的壓力效應。

- 地下水壓 (孔隙壓力)

  地下水壓很明顯的會直接影響到井下應變儀的記錄，但這項因素並不會影響到 GPS 所記錄到的地表應變。

3-7-2 檢視井下應變儀資料中異常事件的方法

有鑑於影響井下應變儀資料記錄的因素相當複雜，各種影響因素的處理方法於時機各異，基本原則是可以正確移除的影響先行移除，不會影響到觀測精度的因素則不隨便做沒把握的修正。所以，若地下水因素不會影響到井孔鬆弛效應的估計時，則先行以長期資料建立井孔鬆弛效應模式，並加以修正，越長的資料越能正確的估計此一模式。若地下水明顯影響到井孔鬆弛效應的估計時，則要先行處理地下水壓的影響效應，然後再以長期資料建立井孔鬆弛效應模式，並加以修正。在做完以上的修正之後，即可以開始搜尋可能的異常，若有模糊不確定的異常時，可再加以氣壓與潮汐修正。

至於異常事件的判斷，一般是指其變化有異於其背景變化時稱之。因此，當以每天資料、每星期資料、每月資料甚至於每年資料來判斷時，可能會有不同的結果，在此階段尚無定論，一開始時先以每星期資料來做判斷，找到一些可能的異常，然而單一站的異常，通常不是事件太小，無探討的價值，不然就是儀器本身的問題，所以觀測異常事件時，宜以一個網(3~4 站)一個網微單位，至少有兩個測站同時有異常時，才值得探討。所以本次觀測將測站以網為單位

（一） 將資料分成四個網

- 曾文水庫網：ECT (甲仙)、RST (曾文南)、RNT (曾文北)
- 嘉義網：DARB(達邦)、TAIS(太興)、TSUN(中興)
- 新竹網：BMMT(大坪)、CINT(新樂)、LMMT(瑞峰)、PFMT(梅花)

- 台北網：JING(錦和)、SANS(三峽明德)、SLIN(樹林)

（二） 台北網太新，資料短尚不穩定，跳脫頻繁，未在此次探討。

（三） 曾文舊資料都已看過，新資料不多，此次有一事件與嘉義網同時觀測到。

資料處理方式

- 將同一網之資料，以應變資料十分鐘一筆，氣壓資料半小時一筆，整合成一資料檔
- 已完成曾文(舊有)、新竹、嘉義與台北網之資料

已寫好 MatLab 之程式，可選定一張圖所要顯示的日期長度，將一時段的所有資料一張一張的顯示，依個人判斷，可決定是否要儲存檔案

根據以上的原則，可找出各網的異常事件，其中較有意思的異常如下：

■ 嘉義網 2010/03/04

這是 2010 年三月甲仙地震的同震變化，圖 3.58 中可看出中興與太興國小的記錄都有明顯同震的變化，達邦則只有微小不顯著的變化，這三站距震央都有數十公里的距哩，太興變化約為中興的兩倍，各站間的差異應該與岩性相關。

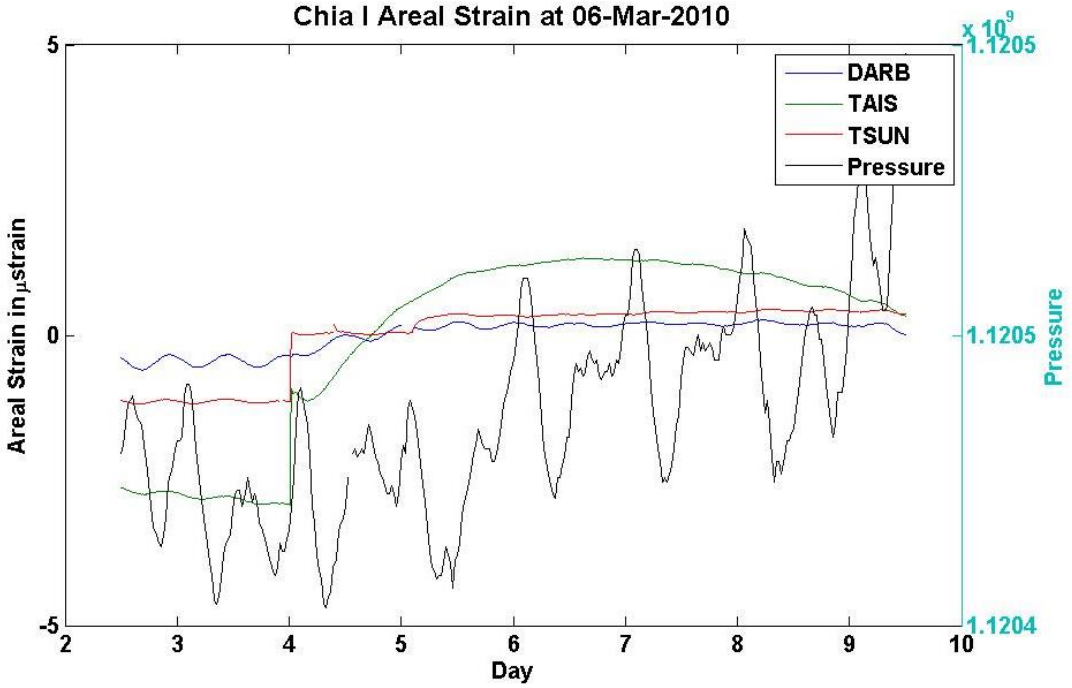


圖 3.58 嘉義地區井下應變儀因 2010 年 3 月甲仙地震所產生的同震變化。

■ 2007/10/06 新竹、嘉義與臺南都有異常

這是在嘉義氡氣觀測站所先看到異常現象，而在曾文南井下應變儀站也不利觀測到有異常的現象，今年在嘉義網 (圖 3.60) 及新竹網(圖 3.59)都同時觀測到異常，可見這事件範圍極廣，本來以為跟前一天的 Krosa 颱風有關，但從圖 3.60

的氣壓變化可看出，各站變化各自不同，且與氣壓並非同步，所以這並非氣壓所引起的同步變化的效應，而應該與 2007 年 12 月在東部發生颱風所引發的慢地震一樣，也是個慢地震。

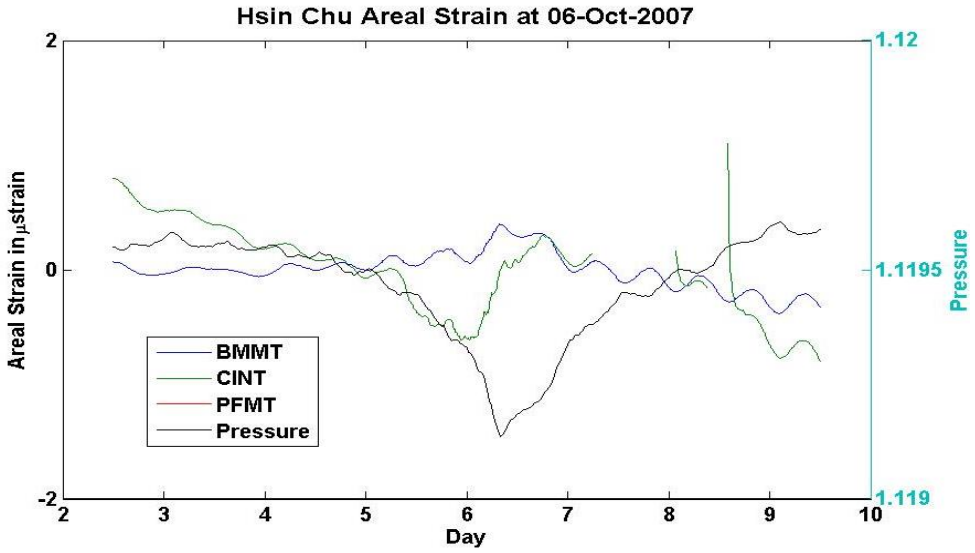


圖 3.59 新竹地區的井下應變儀在 2007 年 10 月 06 日所觀測到的異常與臺南、嘉義地區的觀測有相同的特性，可能是個慢地震。

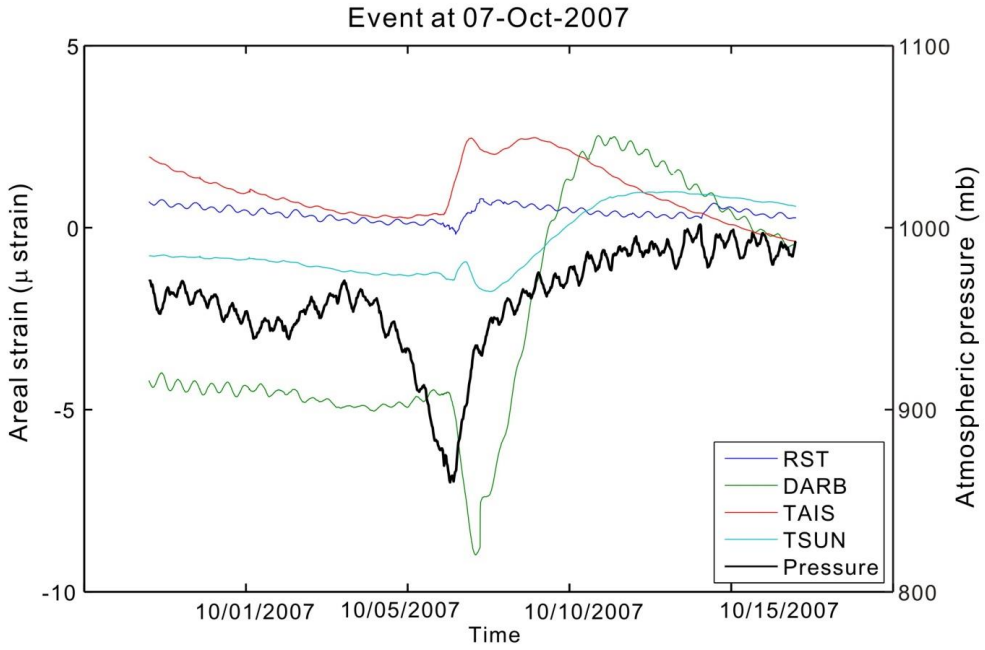


圖 3.60 臺南曾文南井下應變儀觀測站（RST）與嘉義地區的井下應變儀觀測站在 2007 年 10 月 06 日所觀測到的異常，其變化各自不同，且與氣壓並非同步，可能是個慢地震。

■ 2010/05/23 嘉義網的異常

圖 3.61 可看出嘉義地區三站在 2010 年 5 月 23 日接近同時都有變化，但氣壓變化並不大，尚看不出是何種變化。

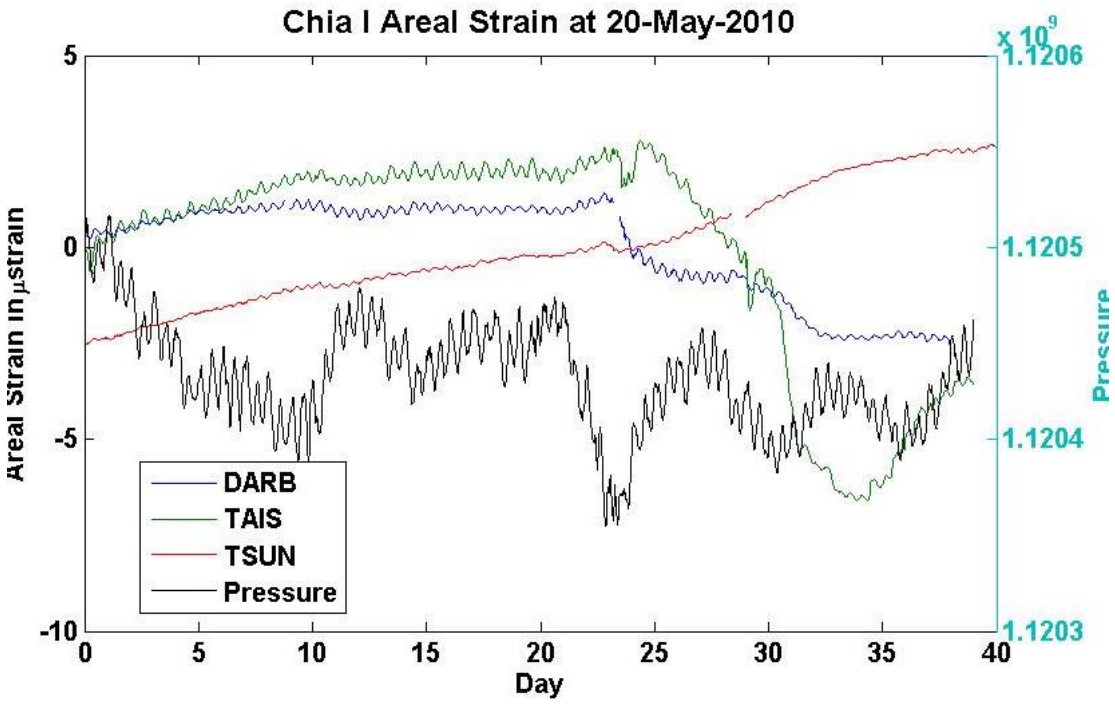


圖 3.61 嘉義地區的三個井下應變儀觀測站在 2010 年 05 月 23 日所觀測到的異常，其變化各自不同，但氣壓變化並不大，還看不出是受甚麼影響。

若將井下應變儀的資料與 GPS 地表應變的資料一起參照，則可能得到更多的資訊。由於 GPS 應變是由一天一個基線解所求得的，所以無法看太短期的變化。圖 3.62 顯示 2009 年 08 月到 2010 年 07 月的嘉義井下應變儀三站(DARB、TAIS、TSUN)的應變與同時間嘉義石桌附近的 GPS 觀測網 GS05-GS07-GS17 所算出的面積應變一起觀測，可看出其一致性與不一致性。在這段期間有幾個有趣的變化，其中較顯著的是在 2009 年 10 月 3 日與 12 月 19 的兩個花蓮磯崎附近的地震，規模分別為 M=6.1 與 M = 6.9，前者有太興站與 GPS 都是由之前的壓縮變回鬆弛，後者所有的觀測都在地震前明顯的鬆弛。又在 2009 年 11 月 5 日的南投名間地震(M = 6.2) 雖太興站有明顯的同震現象，但並無前震，其它站變化也不顯著。至於 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震(M=6.6)與 3 月 8 日的兩個臺南地震 (M=4.9) 則各站變化迥異，須與其他資料再詳細參照。

甲仙地震, M= 6.4 發生於 UTC 2010 年 03 月 04 日 00 時 18 分 52.1 秒;

臺南地震, M = 4.9 發生於 UTC 2010 年 03 月 08 日 09 時 26 分 22.9 秒;

臺南地震, M = 4.9 發生於 UTC 2010 年 03 月 08 日 09 時 26 分 24.0 秒;

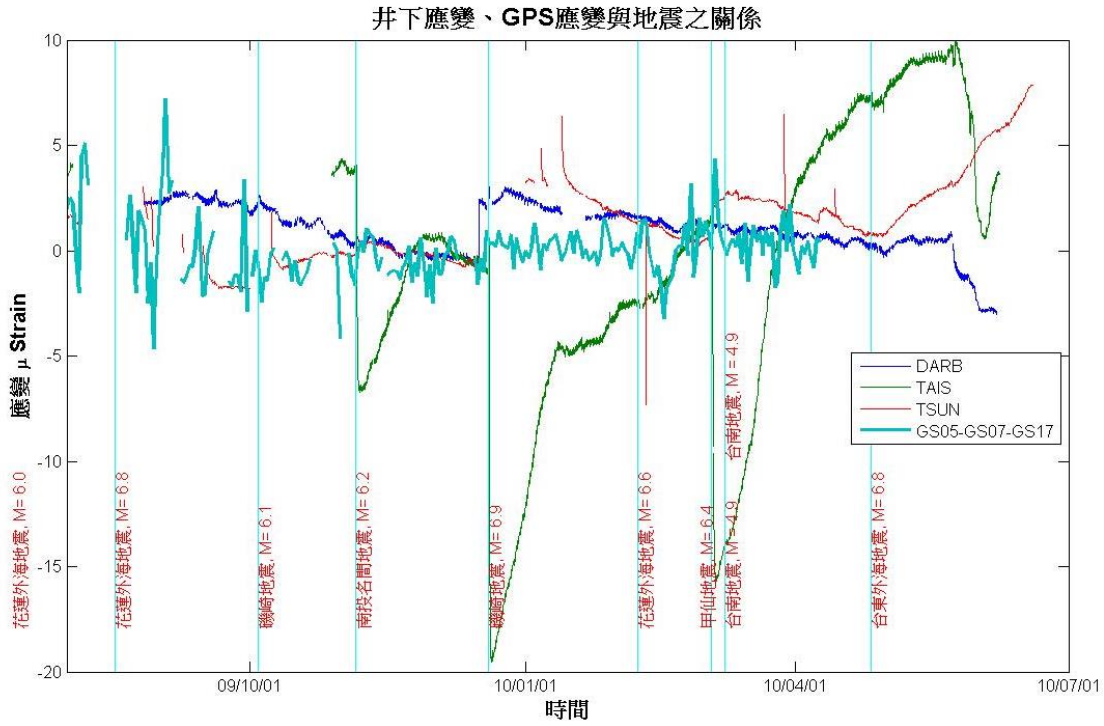


圖 3.62 嘉義的井下應變儀記錄與石桌附近的 GPS 觀測網 GS05-GS07-GS17 所算出的地表應變一起做觀測，有同有異，但其變化能隱約可看出與地震間的關係。

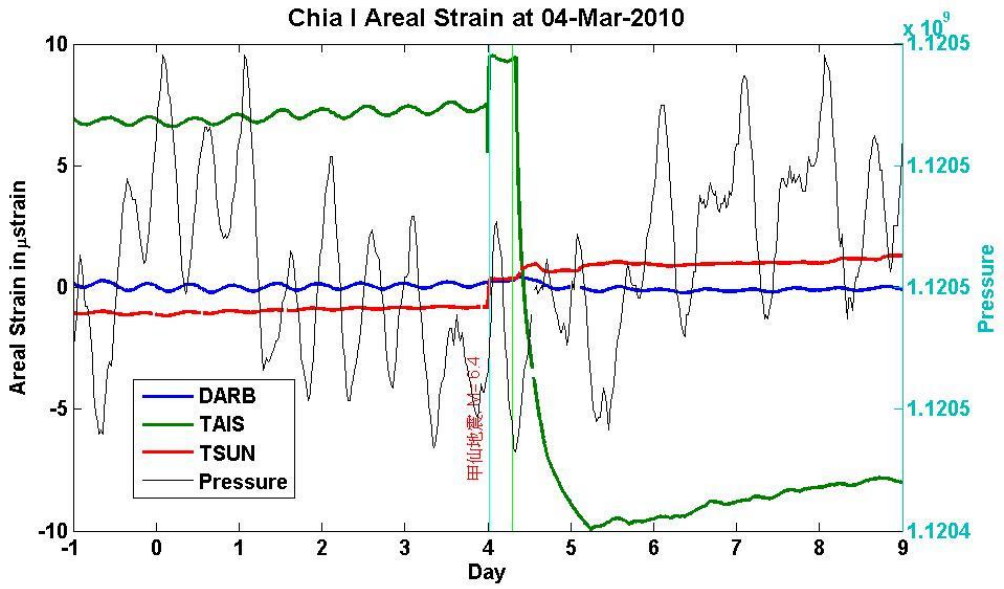


圖 3.63 嘉義的井下應變儀記錄在 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震有明顯的變動，有同有異，但其變化能隱約可看出在地震前幾小時就又變化。

在圖 3.63 中顯示嘉義的井下應變儀記錄在 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震有明顯的變動，有同有異，但其變化能隱約可看出在地震前就又變化，其中太興國小站(TAIS)在地震前先有擠壓(向下) 約 1.5 微應變 (μstrain)的變動，然後再鬆弛(往上) 約 3.5 微應變 (μstrain)時地震即發生。而在約八小時之後，太興國小站的資料又顯示開始擠壓，持續將近 24 小時共擠壓約 20 微應變 (μstrain) 左右。而鄰近的達邦(DARB)與中興國小(TSUN)測站則變化較小，前者電話量極微，但後者也相當明顯。圖 3.64 者又將此變化放大，可明顯看到劇烈變動的整個過程再地震前數十分鐘就開始了。

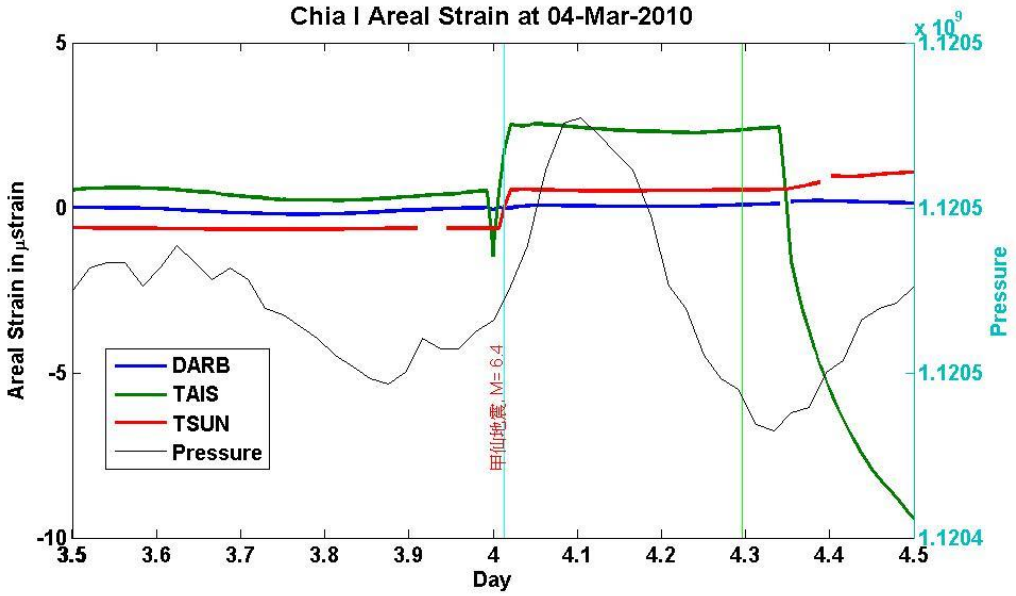


圖 3.64 嘉義的井下應變儀記錄在 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震有明顯的變動，可明顯看到劇烈變動的整個過程再地震前數十分鐘就開始了。

四、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，活躍的板塊運動使臺灣的地震頻繁，根據以往地震的歷史記錄，臺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、台中烈震是由於獅潭斷層及屯子腳斷層錯動造成；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，中央地調所針對全臺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臺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，並以臺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，就必須進行變形性量測，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型推估之。

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(A_f)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 D 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 slip deficit，中文為滑移赤字或滑移虧損。

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 E。

14. 地震重複週期：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	● 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。 ● 既有鑽探瞭解跨斷層之地層差異。 ● 根據既有地質鑽探建構地質剖面。
	斷層分段與分支	● 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	● 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	● 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	● 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	● 歷史文獻資料有關地震記載。 ● 古地震研究（既有槽溝開挖、跨斷層河階定年）。
	平均滑移速率	● 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。
	活動間隔	● 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	● 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。

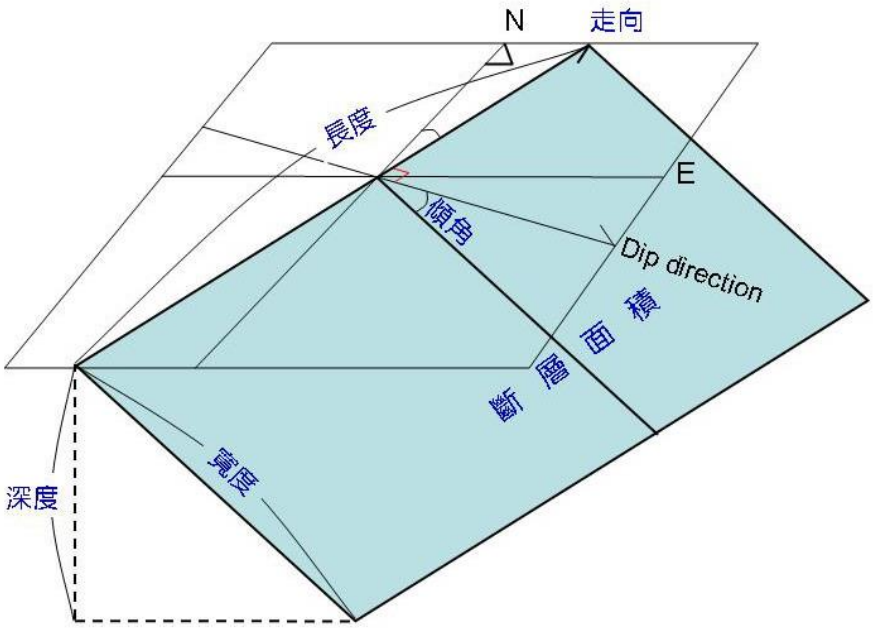


圖 4.1 斷層幾何參數示意圖。

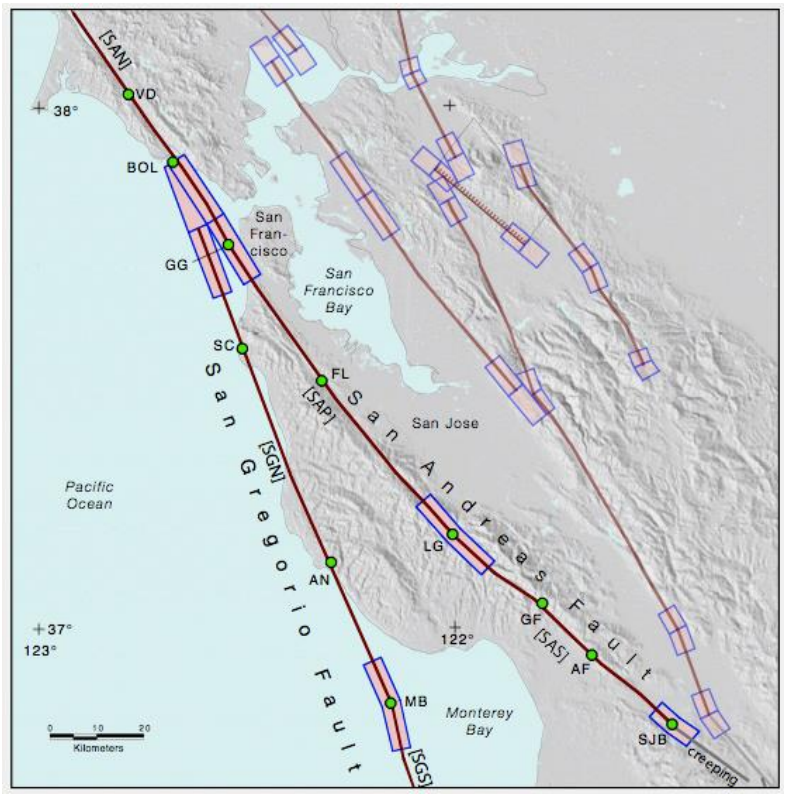


圖 4.2 斷層分段分布圖。San Andreas Fault 之分段：SAN、SAP、SAS； San Gregorio Fault 之分段：SGN、SGS（摘錄自 WG02，2003）。

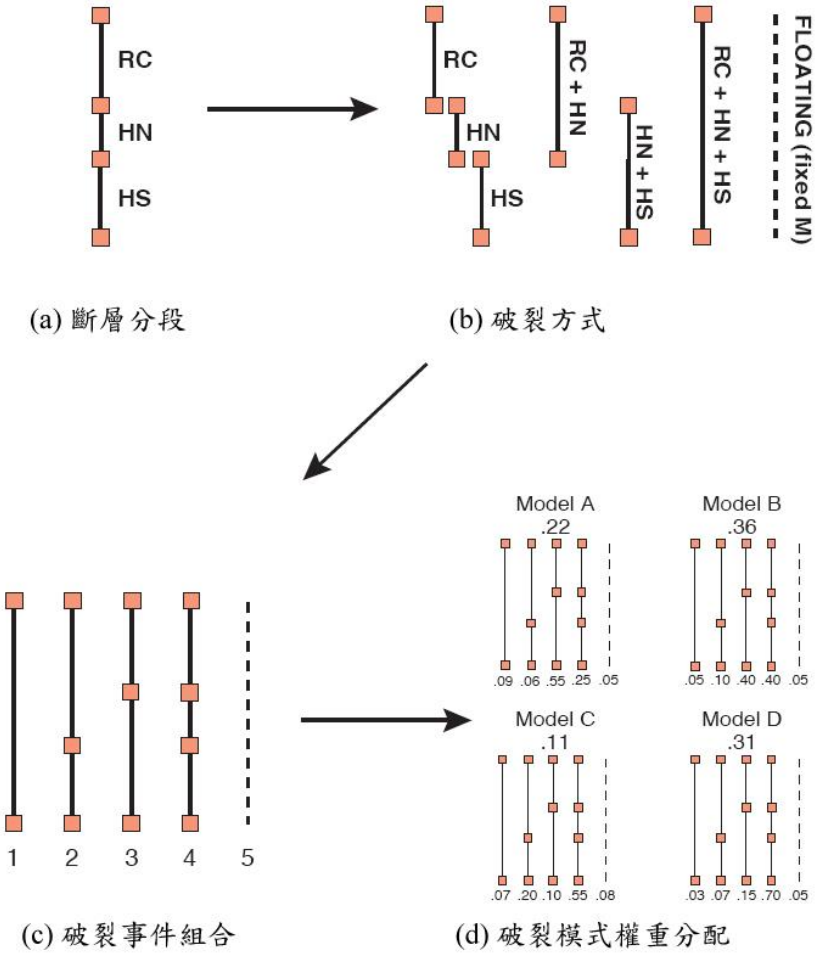


圖 4.3 由斷層分區建立斷層破裂模式。(a) 圖中橘色方框為分區之邊界，以 Hayward -Rodgers Creek fault 為例，先劃分三個斷層分區；(b) 分區中可產生六種破裂組合（加上不明破裂方式 floating earthquake）；(c) 建立破裂事件；(d) 將各破裂模式及事件進行權重分配（摘錄自 WG02，2003）。

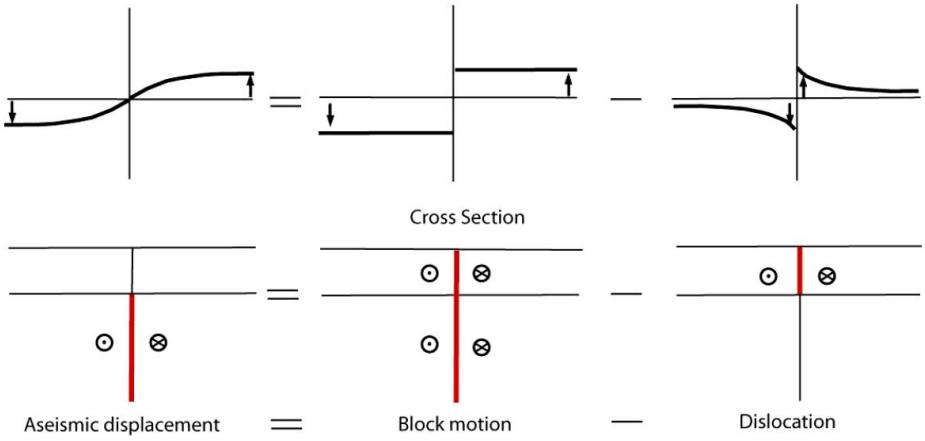


圖 4.4 間震期之變形模式即為剛體運動剪去彈性錯位變形，滑移赤字（slip deficit）=剛體運動（Block motion）－間震變形（Aseismic displacement）。

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，臺灣過去有許京穎（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 G。
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 F 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 3×10^{11}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。

4. 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）×W（寬度）×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。

5. 斷層滑移速率：使用古地震研究的槽溝開挖成果，以長期滑移速率為主。
6. Gutenberg-Richter 關係式中的 b 值：許京穎（2008）曾以臺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，本計畫則是以斷層面的範圍選取地震，使用截切指數模式以最大概似估計法(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，因為地震危害度分析中通常假定地震發生是符合卜桑過程(Merz and Cornell, 1973; Ang and Tang, 1975; Cornell and Winterstein, 1986)，但實際地震發生時大多數會有前震及餘震序列。所以地震目錄必須先去除與主震相依的前震與餘震，並進行統計檢定以確定該地區地震發生過程能符合所假定的機率模式(Anagnos and Kiremidjian, 1988)。Coppersmith (1991)、美國 National Research Council (1988)、Kramer (1996)認為，機率式地震危害度分析採用的地震目錄必須以 Wyss (1979)、Arabasz and Robinson (1976)、Gardner and Knopoff (1974)或 Uhrhammer (1986)所提出的主震與前餘震序列的時間視窗與距離視窗經驗關係式，來去除與主震有關的前震及餘震，而獲得獨立事件主震目錄，並要求其符合卜桑模式，而使地震的發生率不隨時間變化。在 MLE 法中，因為大規模地震次數較少，其地震發生率的誤差分布範圍較大；反之，小規模地震次數多，地震發生率誤差分布範圍較小。
7. 最大可能地震規模推估：參考斷層參數表當中，使用 Wells and Coppersmith （1994）及吳相儀（2000）的斷層破裂面積與地震矩規模 M_W 的關係式，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：

$$P(T \leqq t \leqq T+\Delta T \mid t > T) = [F(T)-F(T+\Delta T)] / F(T) \qquad (式\ 4\text{-}1)$$

其中

$$F(T)=\int_{T}^{\infty} f(t)dt \qquad \text{(式 4-2)}$$

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合成之條件機率機率，可以使用下列計算方式：

Ptotal=1-（1-P1）（1-P2）（1-Pn） (式 4-3)

其中 Ptotal 為將所有斷層之發生率交集後之發生率，P1 至 Pn 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-PA）（1-PB） (式 4-4)

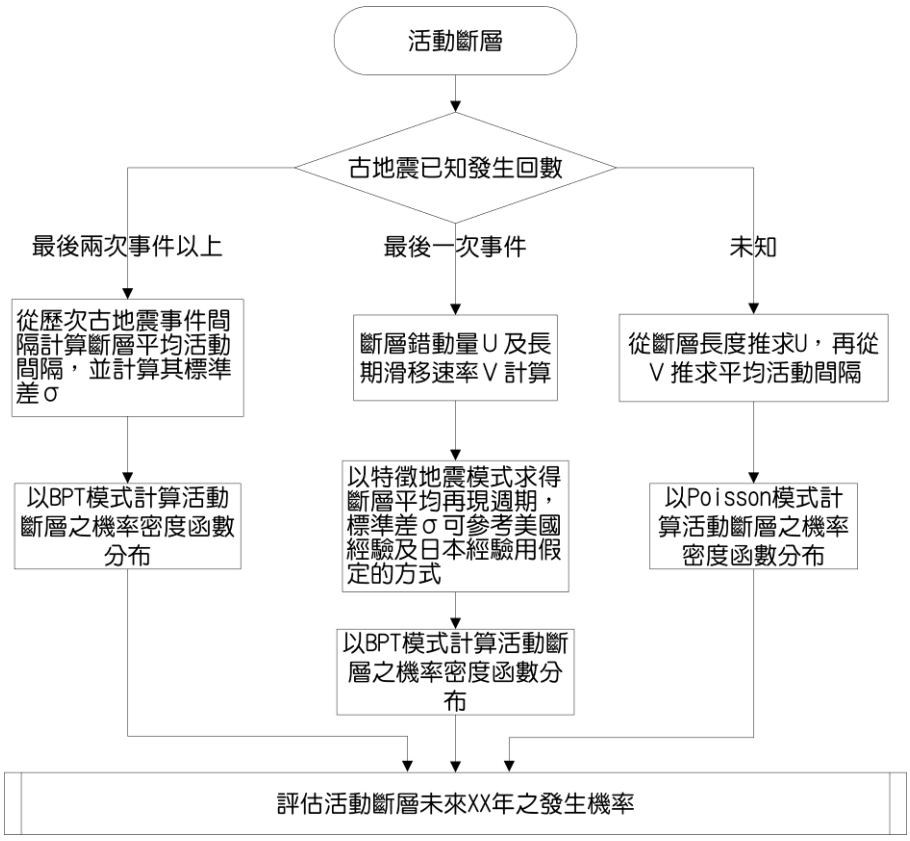


圖 4.5 活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖。

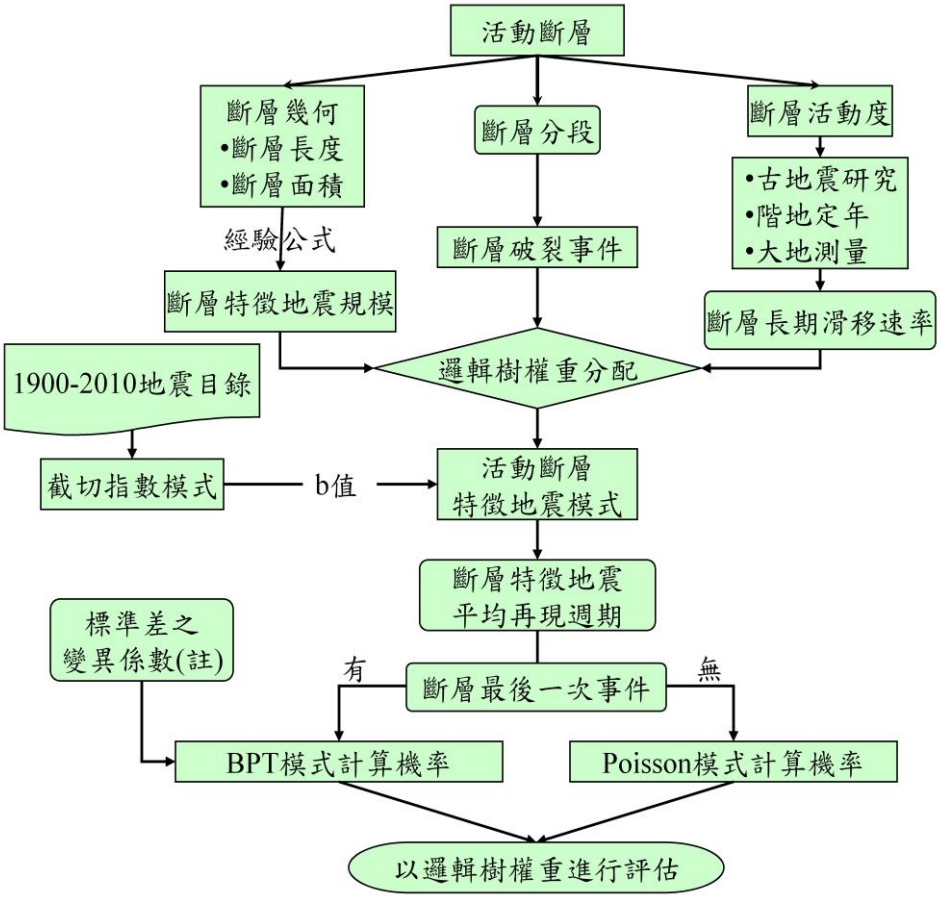


圖 4.6 活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。

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

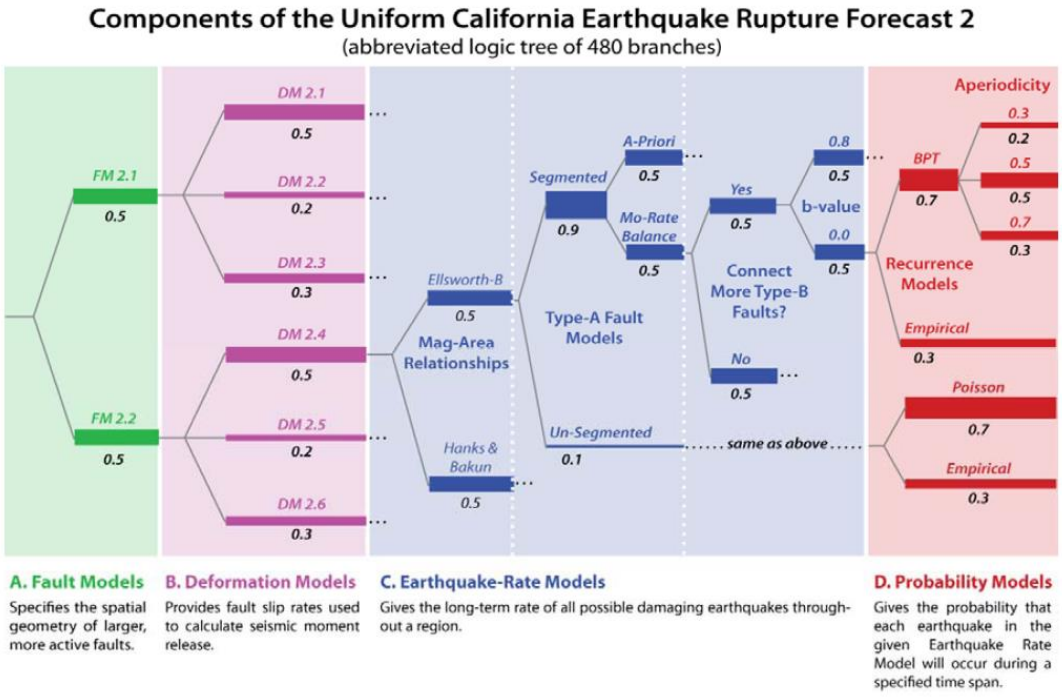


圖 4.7 加州地區地震潛勢評估邏輯樹（摘錄自 WG07，2008）。

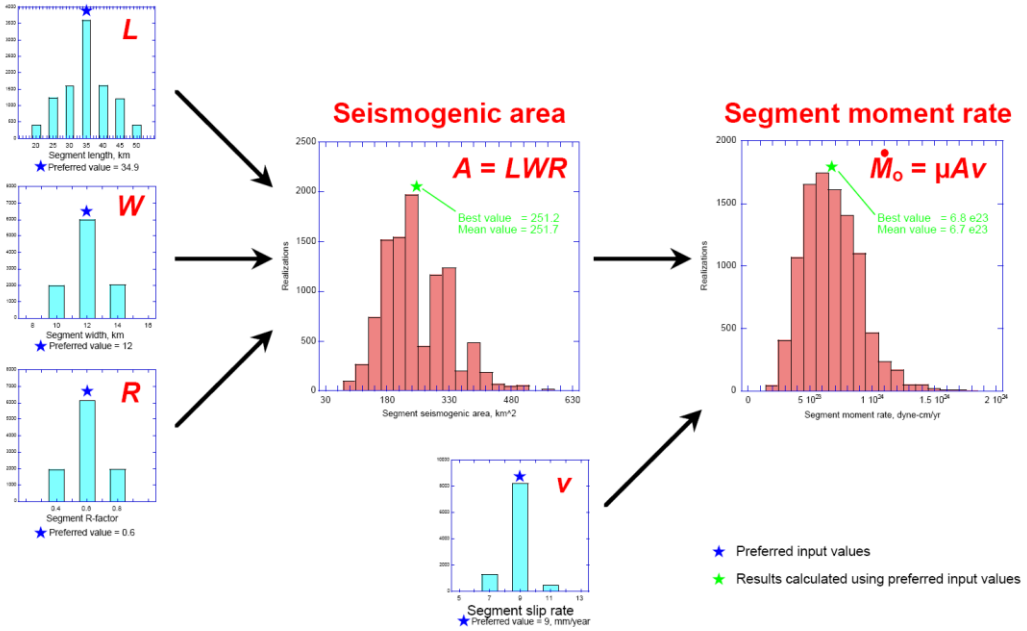


圖 4.8 WG02 模式評估示意圖，藍色長條圖橫軸為長度、寬度、地震滑移尺度及滑移速率之參數值，縱軸為發生頻率（10000 次實況模擬獲得）。紅色長條圖為面積及地震矩率之計算（摘錄自 WG02，2003）。

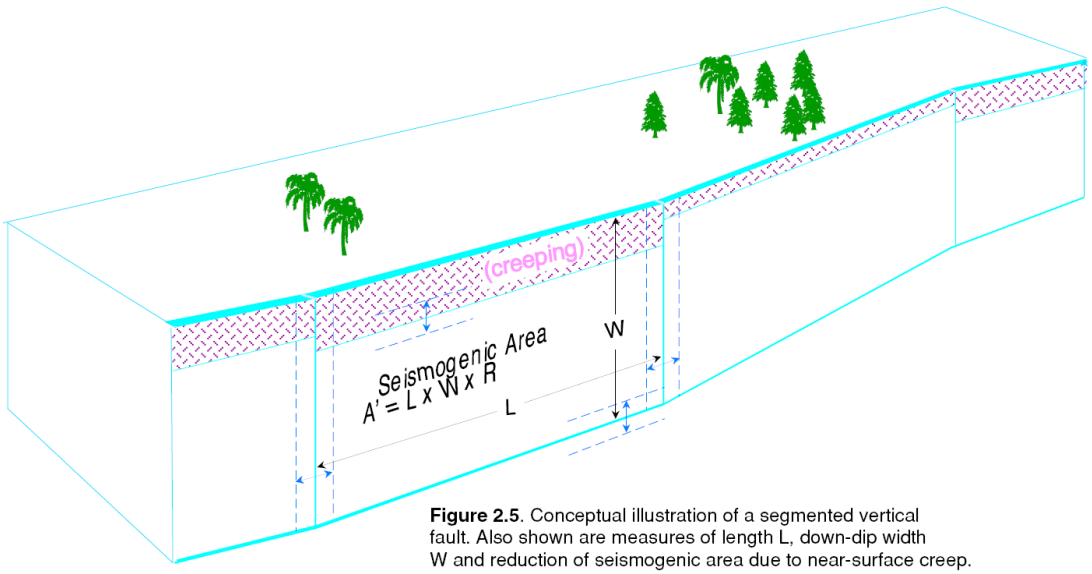


Figure 2.5. Conceptual illustration of a segmented vertical fault. Also shown are measures of length L, down-dip width W and reduction of seismogenic area due to near-surface creep. Dashed lines illustrate uncertainties in segment endpoint position and other quantities.

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）。

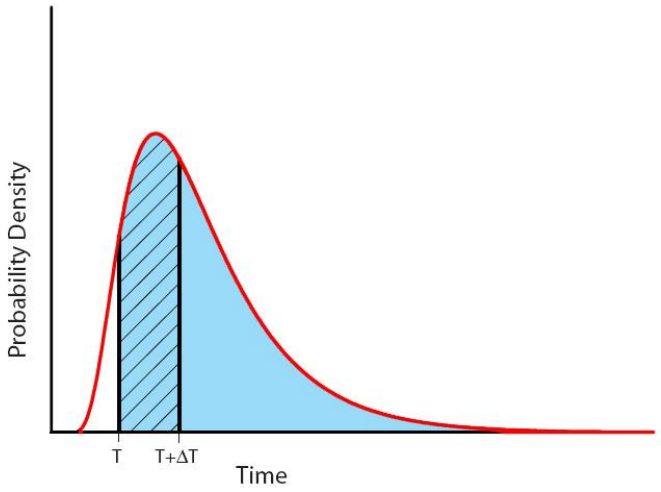


圖 4.10 機率密度函數分布圖，圖中紅色線段表示機率密度函數之線段，Time 為 0 代表最近一次地震發生之時間，Time 為 T 代表發生地震後經過了 T 時間。

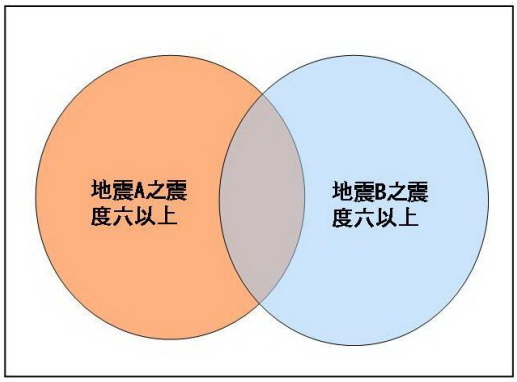


圖 4.11 計算震度 6 級以上之區域機率理論（摘錄自日本全國地震動預測地圖，2008）。

4-3 活動斷層發生機率潛勢評估

根據上述圖 4.5 活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖，以下將以車籠埔斷層、山腳斷層及新城斷層為例，進行活動斷層潛勢評估，其中車籠埔斷層屬於第一種（已知古地震發生次數有 2 次以上）斷層；山腳斷層由於其最後一次發生之時間有爭議(康熙台北湖的形成)，因此以第二種（僅知道古地震最後一次發生的時間）及第三種（古地震最後一次事件未知）斷層進行評估；新城斷層則屬於第二種（僅知道古地震最後一次發生的時間）斷層。

4-3-1 車籠埔斷層

1999 年 9 月 21 日發生芮氏規模 7.3 的強震，震央位於臺灣南投縣集集鎮，震源深度 10 公里，此次地震在地表造成的破裂帶，主要是車籠埔斷層 76 公里的錯動外，還包括斷層北端在豐原市北陽里以東之新破裂，長度約 16 公里，及大尖山斷層，長度約 11 公里。本計畫蒐集了車籠埔斷層相關之斷層參數，彙整成表 4.2 之格式以供參考。

由於車籠埔斷層有槽溝開挖多期之資料，足以進行再現週期與變異係數之估算，因此該斷層不使用邏輯樹與特徵地震模式估算此兩者之數值。從車籠埔斷層沿線之槽溝中可觀察到五個古地震事件（Chen et al., 2007），距今的破裂時間分別為 365、735、830、1540、1805，則各古地震事件之間隔則為 365、370、95、710、265（圖 4.12），其平均值 μ 為：

$$\mu=(365+370+95+710+265)/5=361 \text{ (單位:年)}$$

其標準差 σ 為：

$$\sigma=\sqrt{\frac{(365-361)^2+(370-361)^2+(95-361)^2+(710-361)^2+(265-361)^2}{5}}=200.93$$

其變異係數 α 為：

$$\alpha=\frac{\sigma}{\mu}=\frac{200.93}{361}=0.5566$$

將 μ 及 α 帶入 BPT 統計模式中，BPT 統計模式詳如附錄 G 所示：

$$f_{BPT}(t)=\sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2t^3}}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu t\alpha^2}}$$

$$F(T)=\int_T^{\infty}f(t)dt$$

圖 4.13 所示即為 $f_{BPT}(t)$之函數分布，其中 t=0 之處表示大地震最後一次的發生時間（1999 年 921 集集地震），推估車籠埔斷層於未來 30、50、100 年之發震條件機率為：

$$P_{30}=\frac{F(T)-F(T+\Delta T)}{F(T)}=\frac{F(10)-F(10+30)}{F(10)}\approx 0\%$$

$$P_{50}=\frac{F(T)-F(T+\Delta T)}{F(T)}=\frac{F(10)-F(10+50)}{F(10)}\approx 0\%$$

$$P_{100}=\frac{F(T)-F(T+\Delta T)}{F(T)}=\frac{F(10)-F(10+100)}{F(10)}\approx 1.9\%$$

表 4.2 車籠埔斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
車籠埔斷層	斷層分支	整段	北段	地形、航照判釋、集集地震地表破裂判釋	林啟文等，2000
			南段		
	長度 (km)	整段 76~92	北段 38~42		
			南段 38~50		
	寬度 (km)	23.3~31.1		深度/sin（傾角）	
	深度 (km)	15.0~20.0		統計於車籠埔斷層地震目錄深度	中央氣象局地震目錄
	面積 (km^2)	整段 1773~2862	北段 887~1307	長度× 寬度	
			南段 887~1555		
	走向	約呈南北走向		地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	林啟文等，2000
	傾斜角度 (度)	東傾 40°		震測、重力、地面調查建立之平衡剖面	楊耿明等，2003
	斷層機制	具左移分量的逆斷層		集集地震震源機制解	Kao and Chen, 2000
	短期滑移速率（mm/yr）	全段平行斷層走向 1.1~6.1 全段垂直斷層走向 0.4~8.9 全段抬升率 0.5~19.1	北段平行斷層走向 1.1 北段垂直斷層走向 0.4 北段抬升率 0.5	GPS1996~1999 之速度場分析	饒瑞鈞等，2006
			南段平行斷層走向 4~6.1 南段垂直斷層走向 3.5~8.9 南段抬升率 1.0~19.1		

	長期滑移速率 (mm/yr)	全段 1.9~5.0	北段 1.9~3.4	槽溝之古地震事件	Chen et. al., 2007
			南段 3.1~5.0		
	單一事件變位量(m)	在北段的同震抬升量平均可達 3.6 公尺，南段則為平均 1.5 公尺			
	最大可能地震規模 (M_W)	7.6			1999 年 921 集集地震
		全段 7.01~7.68	北段 6.65~7.26	M_W= 5.00+1.22 log L σ=0.28	Wells and Coppersmith, 1994
			南段 6.65~7.35		
		全段 7~7.69	北段 6.73~7.38	M_W =4.33+0.9 log A σ=0.25	
			南段 6.73~7.45		
		全段 6.94~7.78	北段 6.58~7.29	M_W= (1.32±0.122) log (L)+(4.817±0.132)	吳相儀，2000
			南段 6.58~7.40		
		全段 6.9~7.83	北段 6.68~7.53	M_W = (0.82±0.071) log (A)+(4.61±0.141)	
			南段 6.68~7.60		
	地震重複週期 (年)	200~700		車籠埔斷層帶數個槽溝古地震事件定年	Chen et. al.., 2007
	最近一次活動時間	西元 1999 年		1999 年 921 集集大地震	

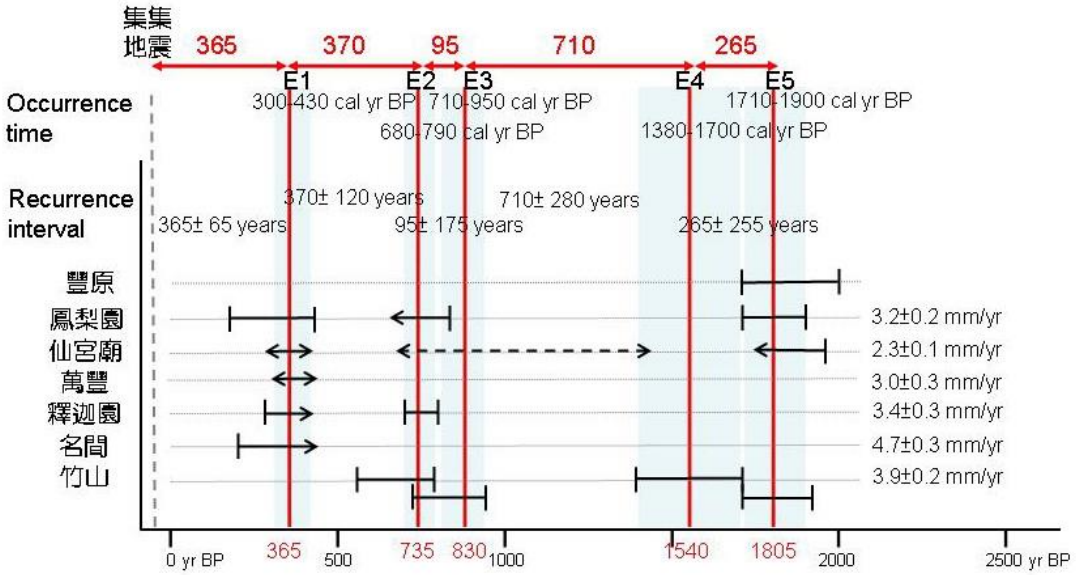


圖 4.12 車籠埔斷層之歷史地震槽溝之比較，灰色虛線表示 1999 年集集地震，黑色實線表示各事件在各槽溝中之年代分布情形（Chen et al., 2007）。

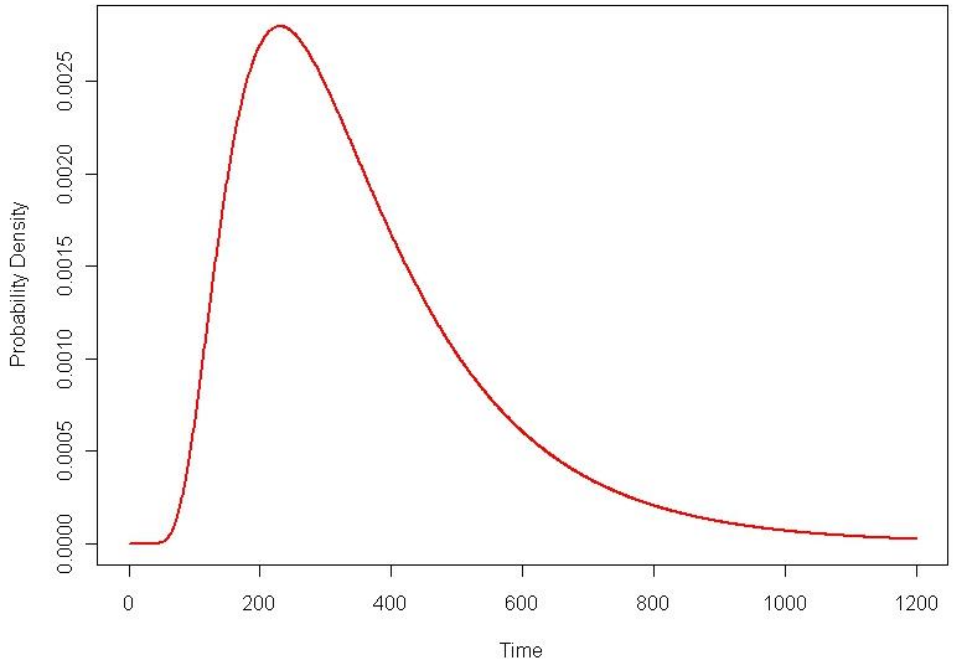


圖 4.13 車籠埔斷層之 BPT 機率密度函數，其中 X 軸為 t，在 t=0 的地方表示 1999 年集集大地震，t=200 表示集集地震後經過兩百年；Y 軸則為機率密度函數。

4-3-2 山腳斷層

4-3-2-1 參數表建立

山腳斷層分為南北兩段，南段自台北縣樹林向北延伸至台北市北投區，共 13 公里；北段由北投向北延伸至台北縣金山，共 21 公里。觀察關渡平原之震測線（圖 4.14）（石瑞銓，2003），山腳斷層是以高角度向東南傾斜。

地調所自 93 年起執行四年之「大台北地區特殊地質災害調查與監測-地熱流與海域火山活動調查與監測計畫」（王天楷等，2007）中，針對臺灣東北海域進行了密集之震測施測，如圖 4.15 所示。海上震測反射剖面顯示金山斷層延伸入海是一系列的區域性正斷層，唯主要斷層線附近有花狀平移斷層的構造，透過寬頻聲納剖面顯示金山斷層兩側不相同之沉積構造，代表了斷層之落差。經由震測對比而獲得之臺灣東北外海斷層分布，將震測剖面中之斷層構造線連接，繪製成臺灣東北外海的斷層分布圖，如圖 4.16 所示。目前海域震測結果，對於山腳斷層在海域延伸性與連接性仍存有疑慮。

圖 4.17 所示為成子寮剖面之排鑽（劉桓吉等，2000；蘇泰維等，2003），山腳斷層東側之盆地區基盤明顯較深，顯然是由於山腳斷層之陷落而造成，推斷其機制為東傾之正斷層。

本計畫為了獲得斷層之幾何面積，參考邱俊穎（2008）的方式建立山腳斷層之幾何形貌，如圖 4.18、圖 2.34 所示，並假設斷層往外海延伸約 16 公里，從斷層模型中求得斷層之總面積為 1200 平方公里（北段 888 平方公里；南段 312 平方公里）。

在短期活動度上，饒瑞鈞等（2006）依據地調所 GPS 測量資料，分析個別活動斷層兩側的位移速度變化，包括水平速度與垂直速度的變化量。山腳斷層北段剖面在 2002~2006 年間，跨過山腳斷層北段的速度場變化量，平行斷層走向的分量為 1.1 mm/yr，呈左移形式，垂直斷層走向的分量為 3.1 mm/yr，呈壓縮形式，高程方向抬升量為 5.5 mm/yr。跨山腳斷層南段的速度場變化量，平行斷層走向的分量為 3.8mm/yr，呈左移形式，垂直斷層走向的分量為 0.1 mm/yr，呈壓縮形式，高程方向沉陷量為 8.5 mm/yr。

地調所於 1992~2000 間跨山腳斷層之水準資料顯示（余水倍，2000；桓吉等，2000），山腳斷層無顯著因正移斷層造成的滑落現象。但於 2002~2006 的精密水準測量結果（饒瑞鈞等，2006），則指出山腳斷層仍有陷落之可能。

在斷層長期活動度上，黃韶怡（Huang et.al., 2007）分析成子寮、五股、樹林等地區山腳斷層兩側的鑽井岩芯記錄與定年資料，研判在 14,000 年內山腳斷層造成的落差至少有 10 m，期間至少有三次古地震事件，分別為 11,100 年前左右、9100~9300 年前及 8400~8600 年前，分別各有 2.3 m、3.3~4.5 m 及 3.7 m 的垂直位移量，並推算山腳斷層南段在過去 1 萬年內上盤下陷速率約為 1.8 mm/yr；至於斷層北段在過去 1 萬 5 千年間滑移速率則為 0.69 mm/yr。

斷層之最大可能規模則用斷層長度及斷層幾何模型之面積分別帶入 Wells

and Coppersmith (1994)及吳相儀（2000）之經驗公式求得。

關於最近一次活動時間，目前並無記錄到和山腳斷層活動有關之大規模地震目錄，也無槽溝開挖之資料，僅能從鑽探資料或歷史文獻中推測之，根據黃韶怡（Huang et.al., 2007）分析地調所鑽井的結果，得知最近一次活動時間約在8400~8600 年前。歷史記載則根據郁永河（1697）所著『裨海記遊』中提到，台北盆地於 1694 年由於發生地震而陷落，形成所謂「康熙台北湖」。林朝棨（1957）認為該次地震地面陷落約 5 公尺，因此推斷該次地震為山腳斷層最近一次之活動。然而李錦發等（1999）考證康熙台北湖的淹沒範圍與文獻資料，無法確定與山腳斷層有關。

根據以上所蒐集的資料，將山腳斷層之參數彙整於表 4.3。

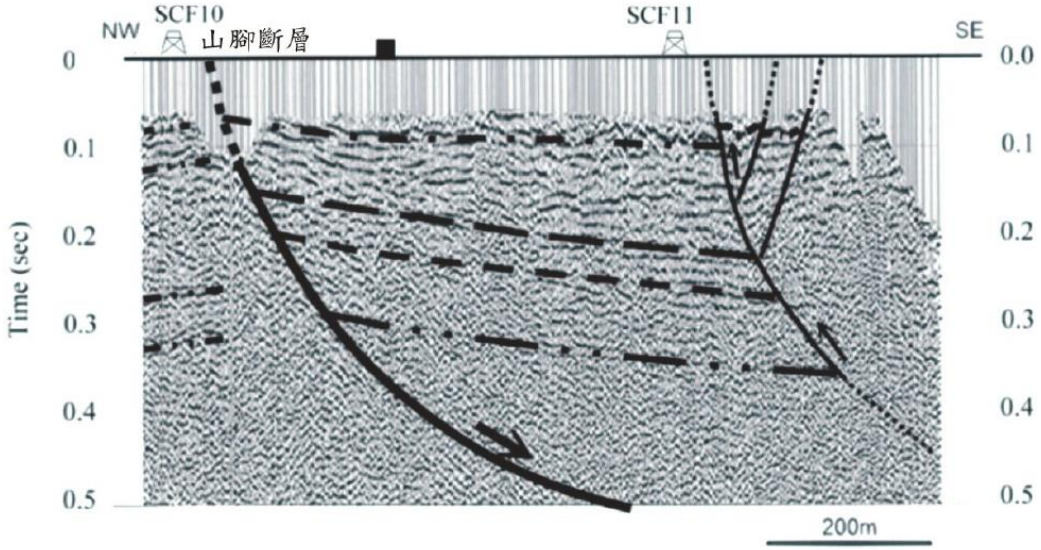


圖 4.14 關渡平原的淺層震測結果，圖左側為山腳斷層（石瑞銓等，2003）。

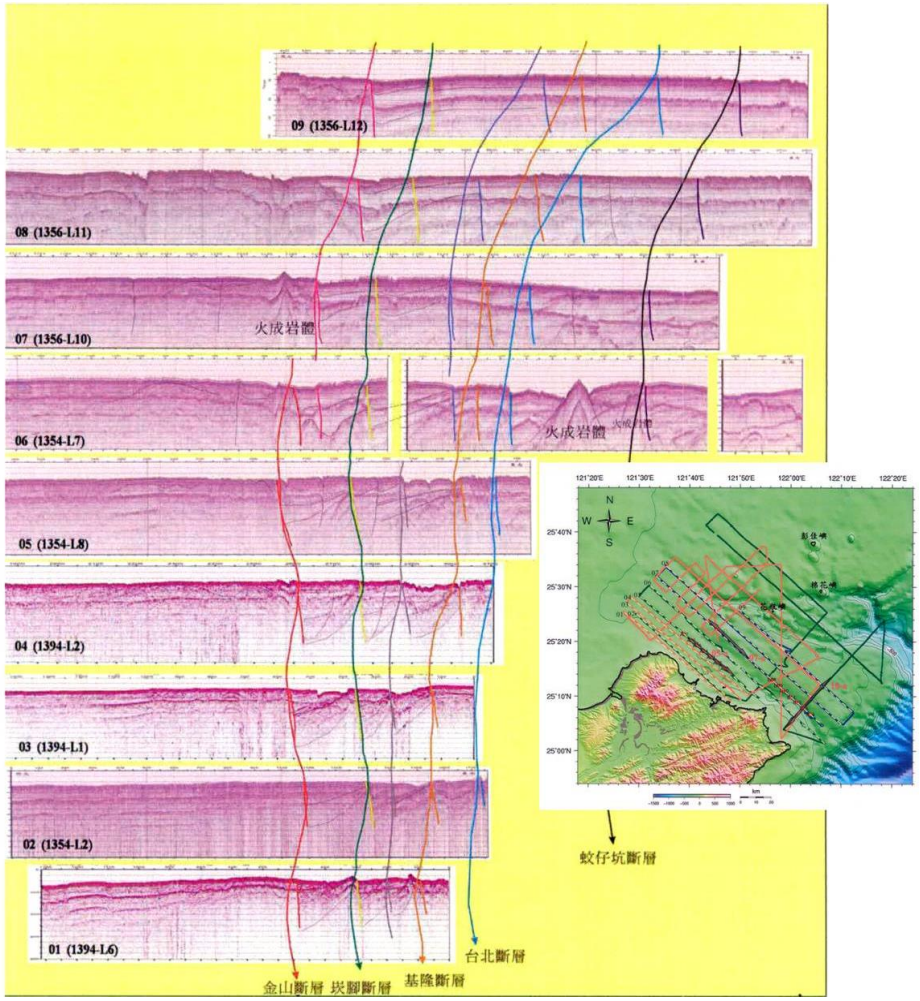


圖 4.15 臺灣東北部海域震測分布及震測剖面斷層延伸位置對比圖（王天楷等，2007）。

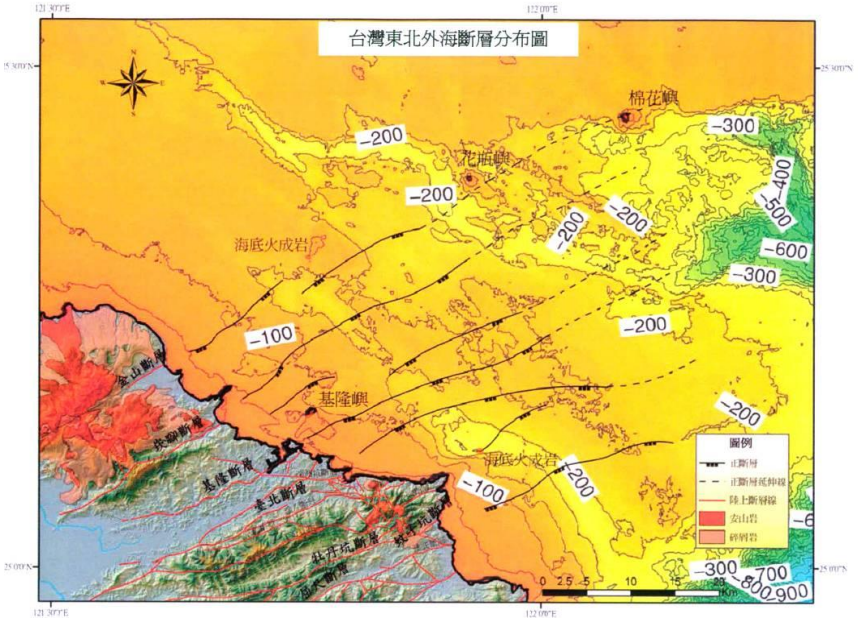


圖 4.16 震測資料對比之臺灣東北外海斷層分布圖（王天楷等，2007）。

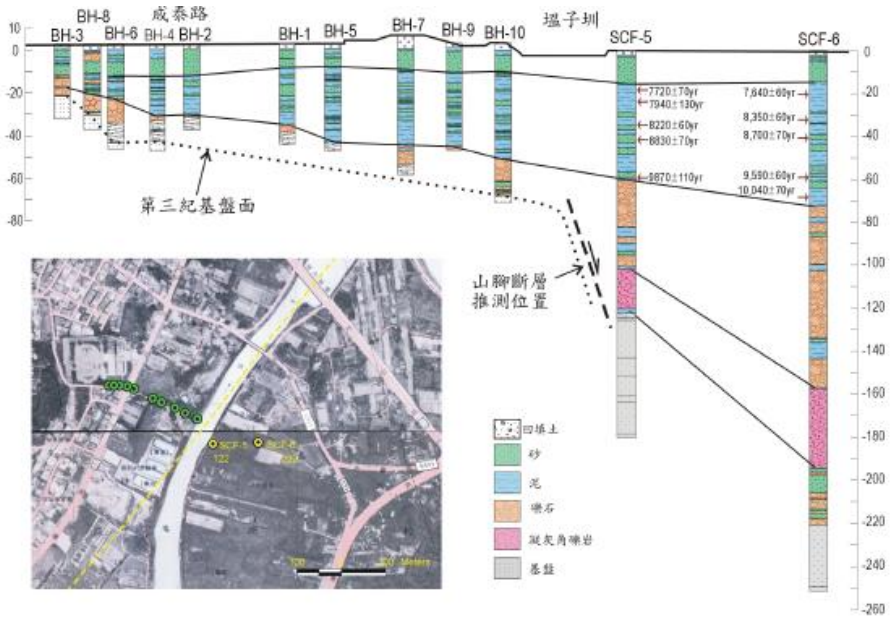


圖 4.17 台北盆地的地下剖面，成子寮剖面（劉桓吉等，2000；蘇泰維等，2003）。

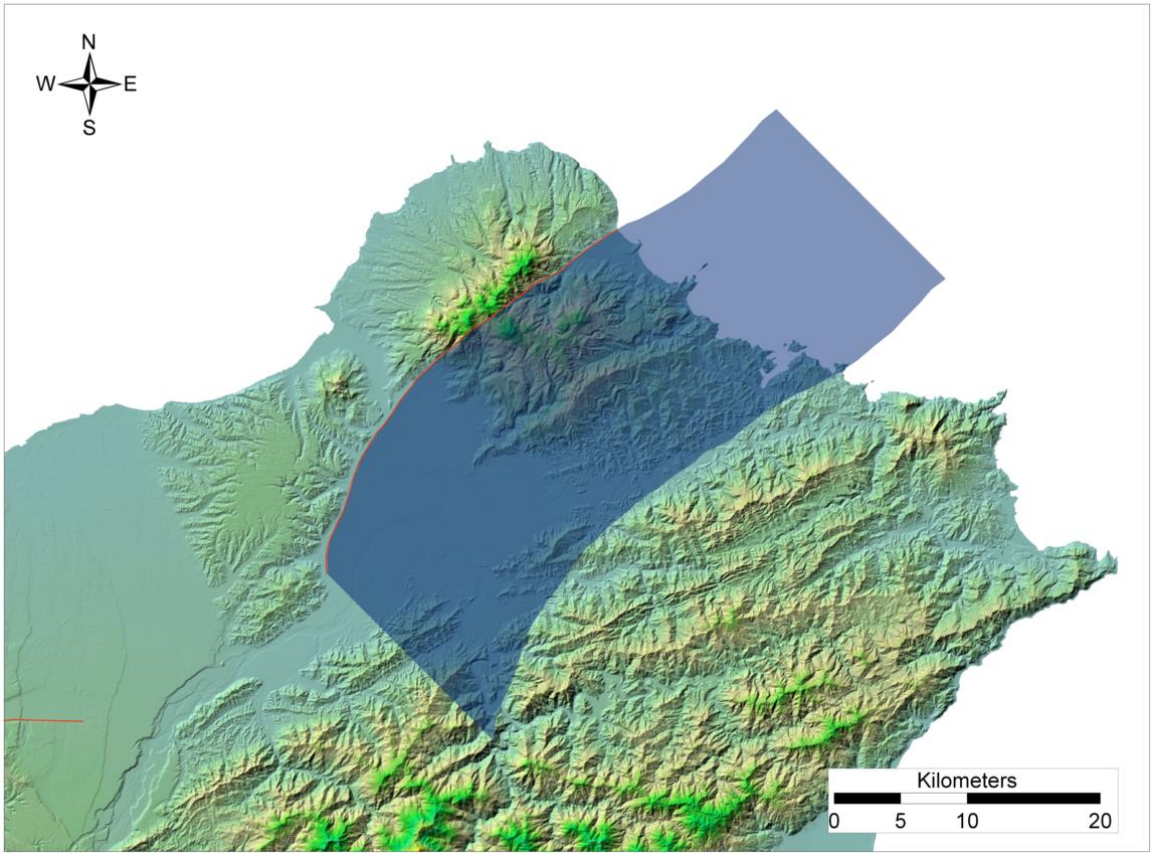


圖 4.18 本計畫之山腳斷層三維斷層幾何模型平面分布圖。

表 4.3 山腳斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
山腳斷層	斷層分支	整段	北段	南段自台北縣樹林向北延伸至台北市北投區； 北段由北投向北延伸至台北縣金山	丹桂之助，1939；林朝棨，1957；王執明等，1978；林朝宗，2005
			南段		
	長度 (km)	整段 50	北段 37(海域 16km)	1.遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 2.地表地質調查與河階地形研究。 3.地物探勘瞭解地下地層錯動情形。 4.既有鑽探瞭解跨斷層之地層差異。	
			南段 13		
	深度 (km)	10.30		斷層面 3D 幾何模型	本計畫建置斷層面幾何模型
	面積 (km^2)	整段 1200	北段 888		
			南段 312		
	走向	北北東		地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	林啟文等，2000
	傾斜角度 (度)	0~2.5 公里：80 度 2.5~6.0 公里：70 度 6.0~8.0 公里：60 度 8 公里以下：25~50 度		斷層面 3D 幾何模型	本計畫建置斷層面幾何模型
	斷層機制	正斷層		1.斷層鄰近地震機制 2.跨山腳斷層鑽井資料 3.遙測地形判釋	丹桂之助，1939；林朝棨，1957；王執明等，1978；林啟文等，2000；林朝宗，2005 ；詹瑜璋等，2005；詹瑜璋等，2006；饒瑞鈞等，2006。
	短期滑移速率（mm/yr）	北段	平行斷層走向 1.1(左移) 垂直斷層走向 3.1(壓縮) 抬升率 5.5	GPS1996~2006 之速度場分析	饒瑞鈞等，2006
		南段	平行斷層走向 3.8(左移) 垂直斷層走向 0.1(壓縮)		

			沉陷率 8.5		
	長期滑移速率 (mm/yr)	整段 0.69~1.80	北段 0.69 南段 1.80	分析山腳斷層兩側的鑽井岩芯紀錄與定年資料。	Huang et.al., 2007
	滑移赤字				
	單一事件變位量 (m)	1. 2.3 公尺的垂直位移量。 2. 3.3~4.5 公尺的垂直位移量。 3. 3.7 公尺的垂直位移量。		分析山腳斷層兩側的鑽井岩芯紀錄與定年資料。	Huang et.al., 2007
	最大可能地震規模(M_W)	7.10	6.93 6.33	$M_W = 4.86+1.32 \log L, \sigma=0.34$	Wells and Coppersmith, 1994（正斷層）
		7.07	6.94 6.47	$M_W = 3.93+1.02 \log A, \sigma=0.25$	
		7.06	6.89 6.29	$M_W = (1.32\pm0.122) \log (L)+(4.817\pm0.132)$	吳相儀，2000
		7.13	6.66 7.03	$M_W = (0.82\pm0.071) \log (A)+(4.61\pm0.141)$	
	地震重複週期 (年)	NA		NA	NA
	最近一次活動時間	1694（？）		歷史文獻《裨海記遊》記載，康熙台北湖之古地震事件	郁永河，1697

4-3-2-2 山腳斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估山腳斷層之破裂模式，共分為 3 種事件來探討，圖 4.19 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(0.2)、B(0.4)、C(0.4)。山腳斷層之邏輯樹建立如圖 4.20 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，根據參數表，北段滑移速率為 0.69mm/yr，南段滑移速率為 1.8 mm/yr，本計畫設定代表整段破裂的 A 事件滑移速率為 0.69 mm/yr、1.8 mm/yr 以及取此兩數的平均值 1.25 mm/yr 分別權重；代表北段破裂的 B 事件滑移速率取 0.69 mm/yr 以及加減 0.69 mm/yr 之一半的 1.04 mm/yr 及 0.35 mm/yr 分別權重;代表南段的 C 事件，滑移速率取 1.8 mm/yr 以及加減 1.8 mm/yr 之一半的 0.9 mm/yr 及 2.7 mm/yr 分別權重。各事件之最大可能地震規模則代入吳相儀（2000）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，並加減其標準差後分別權重之。權重的分配詳如圖 4.20 所示。

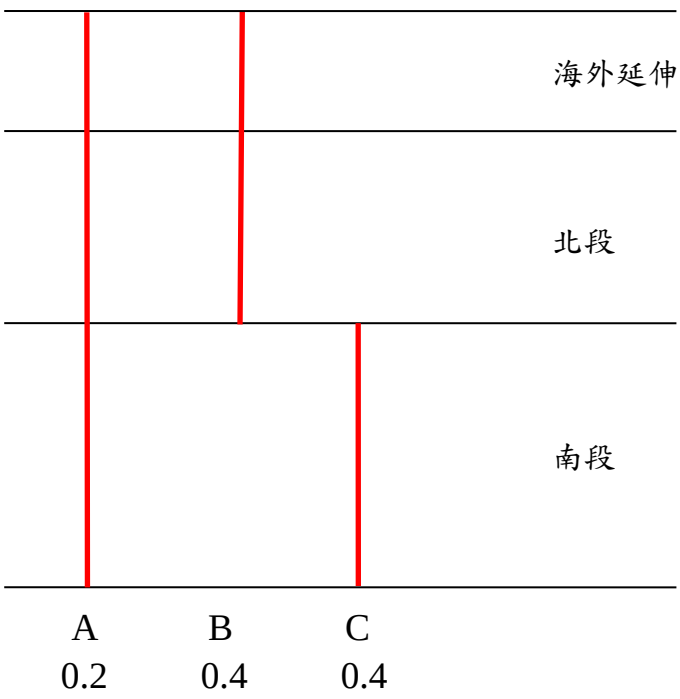


圖 4.19 山腳斷層之破裂模式及權重分配。

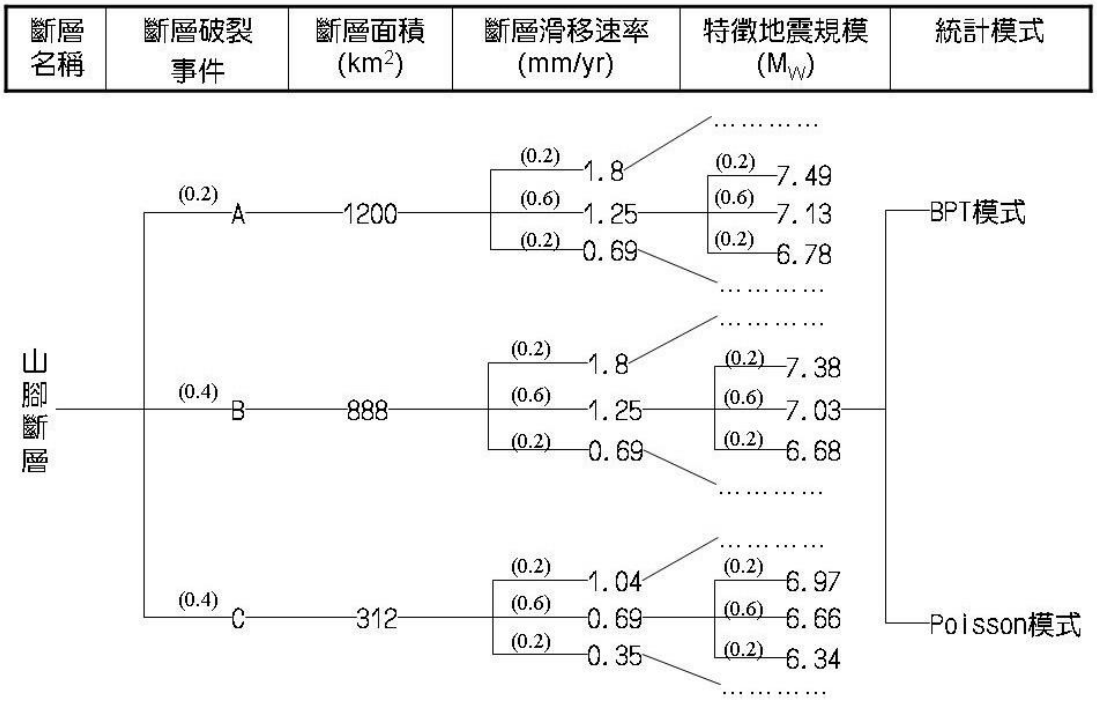


圖 4.20 山腳斷層邏輯樹。

4-3-2-3 山腳斷層特徵地震模式

圖 4.20 的邏輯樹可產生 27 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 4.21~圖 4.23 為 3 個事件之特徵地震模式分布情形。在美國舊金山灣地區，評估活動斷層潛勢曾用地震矩規模 6.7 以上為評估之標準，且 6.7 以上之地震足以達到致災之程度，因此本計畫後續之評估工作會以地震矩規模 6.7 以上之機率進行評估。

A 事件得到的地震矩規模 6.7 以上之再現週期及權重分別為 1182(0.008)、429(0.024)、143(0.008)、1703(0.024)、617(0.072)、206(0.024)、3084(0.008)、1118(0.024)及 374(0.008)；B 事件得到的再現週期及權重分別為 1190(0.016)、427(0.048)、-(0.016)、1714(0.048)、615(0.144)、-(0.048)、3105(0.016)、1114(0.048)及-(0.016)；C 事件得到的再現週期及權重分別為 1747(0.016)、-(0.048)、-(0.016)、2633(0.048)、-(0.144)、-(0.048)、5190(0.016)、-(0.048)及-(0.016)。其中有些分支事件由於規模未達 6.7，不會發生地震矩規模 6.7 以上之地震，因此再現週期以-表示。

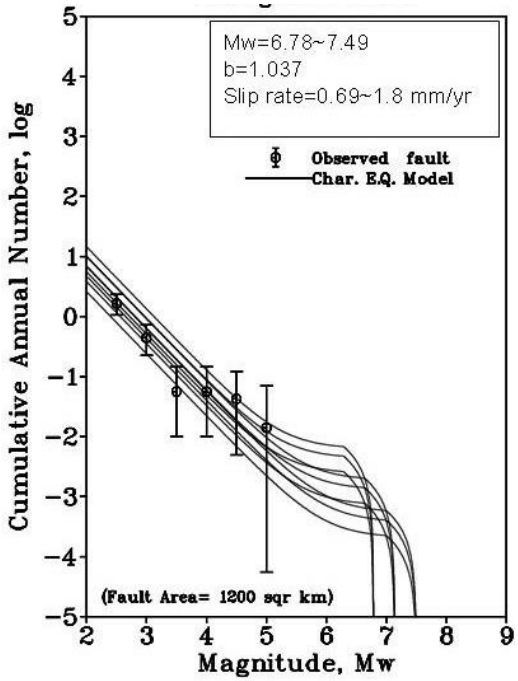


圖 4.21 事件 A 之特徵地震模式。

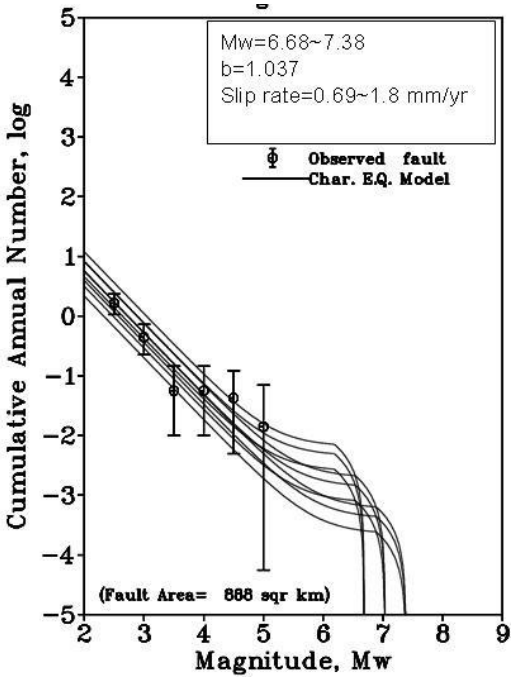


圖 4.22 事件 B 之特徵地震模式。

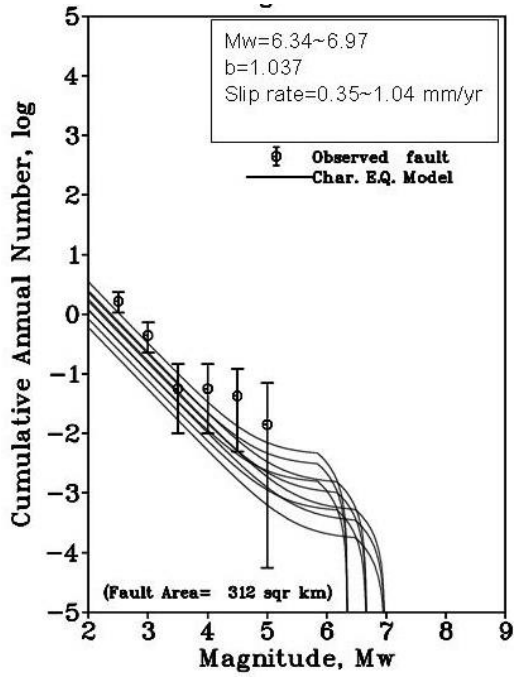


圖 4.23 事件 C 之特徵地震模式。

4-3-2-4 山腳斷層發生機率評估

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 模式估算山腳斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，雖然歷史文獻記載了 1694 年康熙台北湖事件，但是其正確性仍有許多討論空間，因此本計畫除了假設 1694 年為山腳斷層最後一次事件來進行 BPT 模式評估，另外也使用 Poisson 模式進行

評估。表 4.4~4.6 為使用 BPT 模式評估山腳斷層各事件之發生機率，表 4.7~4.9 為使用 Poisson 模式評估山腳斷層各事件之發生機率。表 4.10 為山腳斷層 BPT 模式及 Poisson 模式綜合評估之結果，採用式 4-3 的計算方式，BPT 模式得到山腳斷層未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 3.0%、4.8%及 9.0%；Poisson 模式得到山腳斷層未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 2.5%、4.0%及 7.4%。

表 4.4 山腳斷層破裂事件 A 以 BPT 模式評估之發生機率

事件 A (週期)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1182	1694	0.4%	0.8%	2.2%	0.008
429	1694	10.9%	17.8%	33.6%	0.024
143	1694	36.2%	52.8%	77.6%	0.008
1703	1694	0.0%	0.1%	0.2%	0.024
617	1694	5.2%	8.9%	18.5%	0.072
206	1694	26.6%	40.3%	64.5%	0.024
3084	1694	0.0%	0.0%	0.0%	0.008
1118	1694	0.6%	1.1%	2.9%	0.024
374	1694	13.4%	21.7%	39.6%	0.008
權重後加總		1.7%	2.7%	4.7%	0.2

表 4.5 山腳斷層破裂事件 B 以 BPT 模式評估之發生機率

事件 B (週期)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1190	1694	0.4%	0.8%	2.2%	0.016
427	1694	11.0%	17.9%	33.8%	0.048
-	1694	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
1714	1694	0.0%	0.1%	0.2%	0.048
615	1694	5.3%	9.0%	18.6%	0.144
-	1694	0.0%	0.0%	0.0%	0.048
3105	1694	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
1114	1694	0.6%	1.1%	2.9%	0.048
-	1694	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
權重後加總		2.0%	1.3%	2.2%	4.5%

表 4.6 山腳斷層破裂事件 C 以 BPT 模式評估之發生機率

事件 C (週期)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1747	1694	0.03%	0.06%	0.20%	0.016
-	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.048
-	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.016
2633	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.048
-	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.144
-	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.048
5190	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.016
-	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.048
-	1694	0.00%	0.00%	0.00%	0.016
權重後加總		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

表 4.7 山腳斷層破裂事件 A 以 Poisson 模式評估之發生機率

事件 A (週期)	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1182	2.5%	4.1%	8.1%	0.008
429	6.8%	11.0%	20.8%	0.024
143	18.9%	29.5%	50.3%	0.008
1703	1.7%	2.9%	5.7%	0.024
617	4.7%	7.8%	15.0%	0.072
206	13.6%	21.6%	38.5%	0.024
3084	1.0%	1.6%	3.2%	0.008
1118	2.6%	4.4%	8.6%	0.024
374	7.7%	12.5%	23.5%	0.008
權重後加總	1.2%	1.9%	3.5%	0.2

表 4.8 山腳斷層破裂事件 B 以 Poisson 模式評估之發生機率

事件 B (週期)	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1190	2.5%	4.1%	8.1%	0.016
427	6.8%	11.1%	20.9%	0.048
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
1714	1.7%	2.9%	5.7%	0.048
615	4.8%	7.8%	15.0%	0.144
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.048
3105	1.0%	1.6%	3.2%	0.016
1114	2.7%	4.4%	8.6%	0.048
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
權重後加總	1.3%	2.1%	4.0%	0.4

表 4.9 山腳斷層破裂事件 C 以 Poisson 模式評估之發生機率

事件 C (週期)	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1747	1.7%	2.8%	5.6%	0.016
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.048
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
2633	1.1%	1.9%	3.7%	0.048
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.144
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.048
5190	0.6%	1.0%	1.9%	0.016
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.048
-	0.0%	0.0%	0.0%	0.016
權重後加總	0.1%	0.2%	0.3%	0.4

表 4.10 山腳斷層發生機率評估

	M_W	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
		BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
P_A	≧6.7	1.7%	1.2%	2.7%	1.9%	4.7%	3.8%
P_B		1.3%	1.3%	2.2%	2.1%	4.5%	4.0%
P_C		0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	0.3%
P_{total}	≧6.7	3.0%	2.5%	4.8%	4.0%	9.0%	7.4%

註：P_{total} 見式 4-3

4-3-3 新城斷層

4-3-3-1 參數表建立

在地調所出版之「臺灣北部的活動斷層」特刊第 19 號，新城斷層以頭前溪為界分為 2 段，北段由新竹縣芎林鄉頭前溪向東延伸至關西南方，長約 12 公里；南段由新竹縣竹東鎮頭前溪附近向南延伸至苗栗縣頭份東北方，長約 16 公里。北段為東北東走向，南段則為東北走向（圖 4.24）。

在斷層幾何形貌上，過去有許多震測資料足以了解新城斷層的地下構造形貌（Namson, 1984；楊潔豪與郭泰融，1991；楊耿明，1995），其中地調所 2004 年之「臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)-臺灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析」報告，為黃旭燦等人根據中油之震測剖面及鑽探資料建立之地下構造平衡剖面，有兩條跨越過新城斷層（圖 4.25）。本計畫參考黃旭燦平衡剖面，建立新城斷層之幾何面，如圖 4.26 所示。

在短期滑移速率上，饒瑞鈞等（2006）由 GPS 資料分析橫跨斷層的位移速度場變化，在跨過新城斷層的速度場變化量，其平行斷層走向的分量為 -0.7mm/yr，呈右移形式；垂直斷層走向的分量為 1.5mm/yr，呈壓縮形式；高程方向沉陷量為 1.9mm/yr，根據速度分析結果研判，新城斷層於 2002~2006 年間為鎖定狀態。

在長期滑移速率上，石同生等（2003）綜合新城斷層地表與鑽井資料，以斷層傾角 34 度計算滑移速率，如表 4.11 所示，其結論為斷層的滑移速率最快可達 1.6mm/yr，最慢也應超過 0.7mm/yr，由於不確知新城斷層是否伴隨任何橫移分量，因此前述的滑移速率僅計算斷層之逆衝分量，實際速率將有可能更快。

單一事件變位量，由地調所於新城斷層開挖的 3 座槽溝資料（陳文山等，2002，2003），1 號槽溝中礫石層上下盤之垂直移距約 1.8 公尺； 2 號槽溝剖面中沙岩與泥岩互層計算上下盤的垂直移距約 1.3 公尺；3 號溝中斷層兩側的垂直移距約 1.85 公尺。

由槽溝中可以觀察到 2 次的古地震事件，但是由於地表受到人為擾動的影

響，無法從槽溝資料得知新城斷層最近一次活動時間，另由階地定年之結果，新城斷層最近一次活動約在距今 300 年內。

新城斷層之參數表詳如表 4.12 所示。

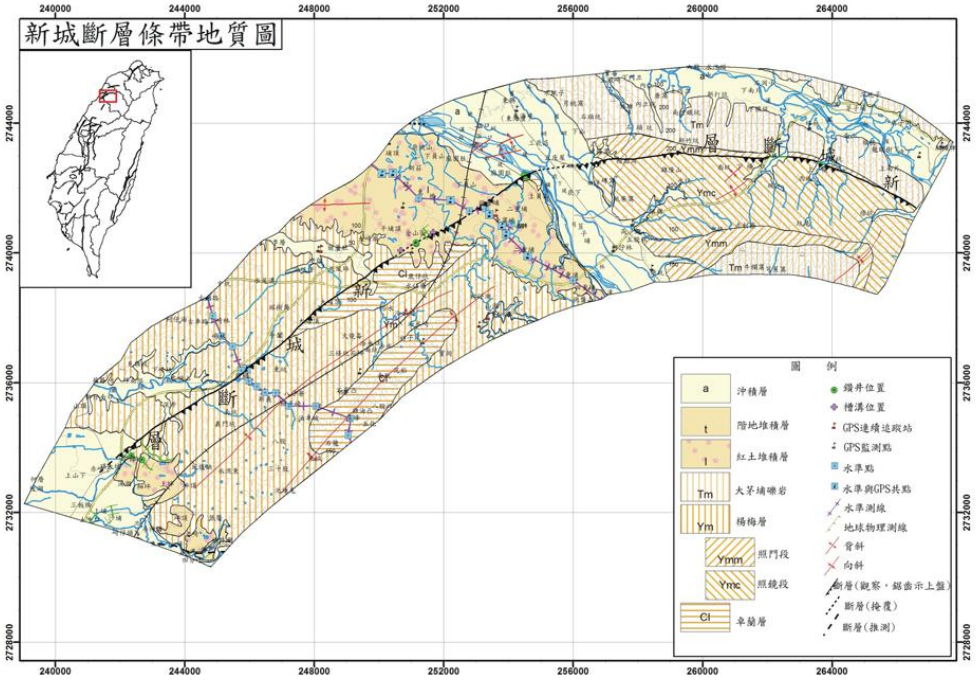


圖 4.24 新城斷層條帶地質圖。(林啟文等, 2007)。

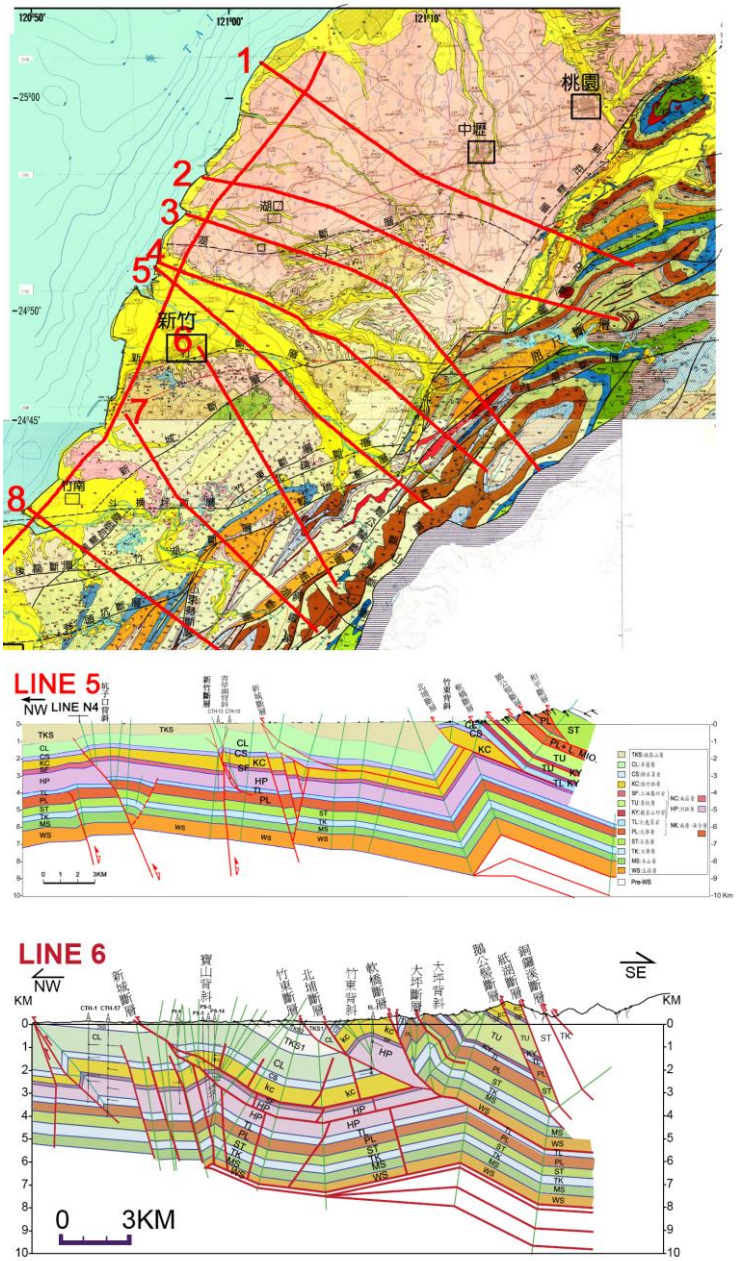


圖 4.25 新竹地區地質圖及剖面位置圖，下方則為 LINE 5 及 LINE 6 兩條平衡剖面(地質圖摘自中油公司桃園、苗栗、台中地質圖)（黃旭燦等，2004）。

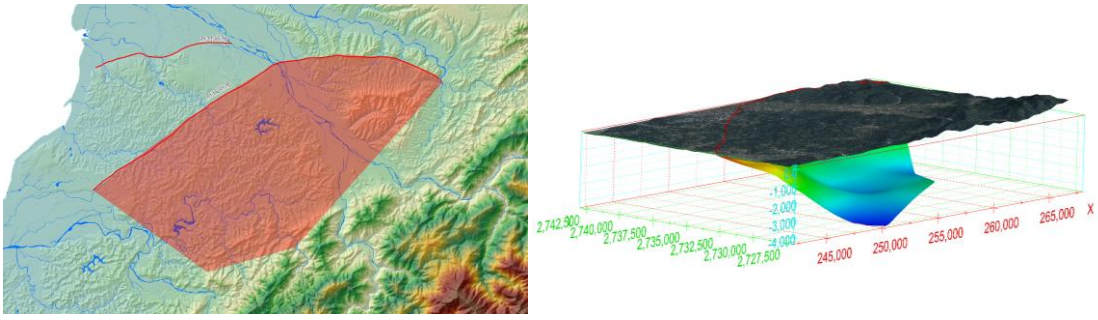


圖 4.26 新城斷層三維幾何模型。（a）新城斷層平面圖分布；（b）新城斷層三維幾何面。

表 4.11 石同生等推估新城斷層滑移速率（石同生等，2003）

	資料	假設或前提 （斷層角度以 34 度計算）	垂直抬升速率 （mm/yr）	淨滑移速率 （mm/yr）
方法 1	LT4>碳十四定年上限（陳文山等，2002） 37000±37（劉仁正，2001） LT4 臨崖之落差 35 公尺(石再添等,1985)	LT4 暫估 40,000 年至另一級數 400,000 年（LT4 應不老於四十萬年）	0.88~0.088	1.6~0.16
方法 2	井深 15.32 公尺年代>48100 年 井深 20.8 公尺年代 28540±260 年 井深 7.5 公尺（上盤）和 17.9 公尺（下盤）處為風化礫石土層和岩盤的交界面	井深 20.8 公尺處位在下盤，設該斷層上盤地表年代老於此處之年代，則斷層垂直至少抬升 20.8 公尺	>0.73	>1.3
		設此二交界面原為同一界面，則斷層垂直抬升 10.4 公尺。(若考慮抬升受侵蝕後再風化，實際抬升量將大於 10.4 公尺。)	>0.37	>0.65
方法 3	斷層垂直層位落差（throw）700 公尺(Tang and Hsu, 1970)	頭嵙山礫岩底部沉積（0.8 Ma）後活動	0.88	1.6
		香山砂頁海相岩層中段沉積後 （NN19b, 1.24 Ma）後活動	0.57	1.0

表 4.12 新城斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
新城斷層	斷層分支	北段 南段	北段由新竹縣芎林鄉頭前溪向東延伸至關西南方；南段由新竹縣竹東鎮頭前溪附近向南延伸至苗栗縣頭份東北方	Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005
	長度 (km)	16~32	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。	
	寬度 (km)	11~13	利用平衡剖面建立新城斷層之 3D 構造幾何模型	黃旭燦等，2004；本計畫斷層面幾何模型
	深度 (km)	4		
	面積 (km^2)	188~238		
	走向	北段東北東 南段東北	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。	Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005
	傾斜角度(度)	30~45	利用平衡剖面建立新城斷層之 3D 構造幾何模型	黃旭燦等，2004；本計畫斷層面幾何模型
	斷層機制	逆斷層	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。 3.槽溝開挖上盤地層逆衝於下盤地層之上。	Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005
	短期滑移速率 (mm/yr)	平行斷層走向-0.7(右移) 垂直斷層走向分量 1.5 高程方向沉陷量 1.9	GPS2002~2006 之跨斷層速度場量測，觀測結果研判為鎖定狀態	饒瑞鈞等，2006
	長期滑移速率 (mm/yr)	0.7~1.6	1.利用頭前溪兩岸之河階高度及定年推估長期滑移速率 2.利用鑽井資料中上下盤之高度及定年推估長期滑	石同生等，2003

			移速率	
	滑移赤字			
	單一事件變位量(m)	1.30~1.85	新城斷層沿線三槽溝之垂直抬升量	陳文山，2003
	最大可能地震規模(M_W)	6.47~6.77	M_W= 5.00+1.22 log L	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		6.38~6.47	M_W =4.33+0.9 log A	
		6.41~6.73	M_W = (1.32±0.122) log (L)+(4.817±0.132)	吳相儀，2000
		6.47~6.56	M_W = (0.82±0.071) log (A)+(4.61±0.141)	
	地震重複週期(年)	NA	NA	NA
	最近一次活動時間	約距今 300 年內	頭前溪之 FT1 階地定年	陳文山等，2006

4-3-3-2 新城斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估新城斷層之破裂模式，共分為 2 種事件來探討，圖 4.27 為此三種破裂模式之示意圖， A 與 B 事件之權重均為 0.5。新城斷層之邏輯樹建立如圖 4.30 所示，其不確定性的部份為斷層滑移速率及特徵地震規模，根據參數表，滑移速率為 0.7 mm/yr~1.6 mm/yr，本計畫設定 A、B 事件滑移速率為 0.7 mm/yr、1.6 mm/yr 以及取此兩數的平均值 1.15 mm/yr 分別權重。各事件之最大可能地震規模則代入吳相儀（2000）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，並加減其標準差後分別權重。權重的分配詳如圖 4.28 所示。

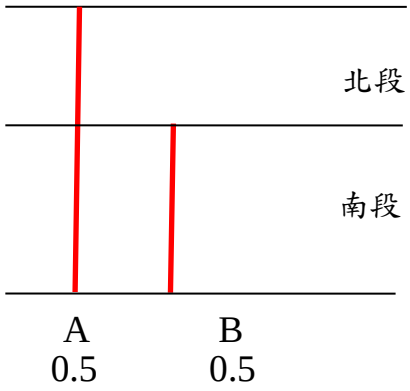


圖 4.27 新城斷層之破裂模式及權重分配。

斷層名稱	斷層分段	斷層面積 (km^2)	斷層滑移速率 (mm/yr)	特徵地震規模 (M_W)	BPT model 變異係數

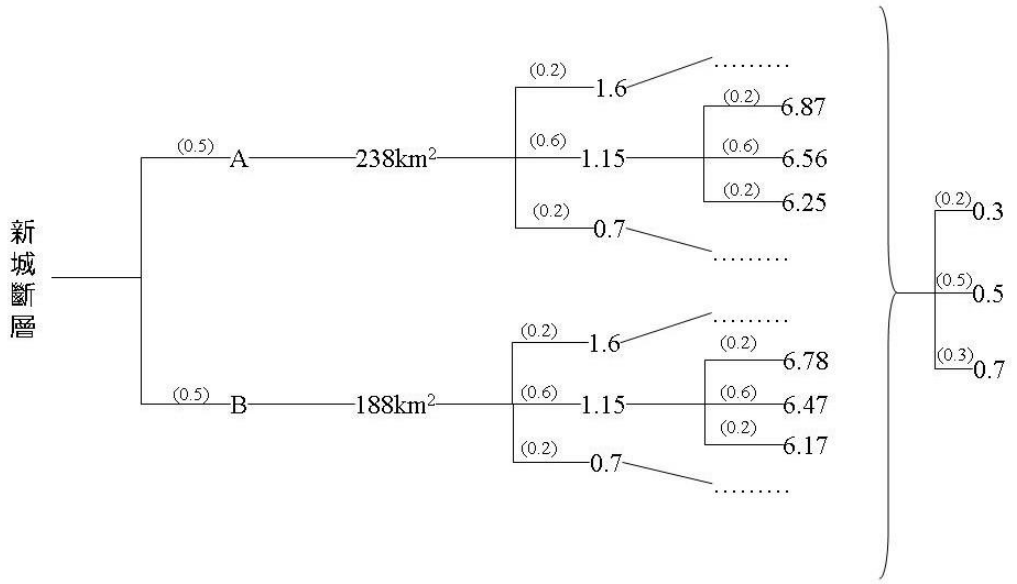


圖 4.28 新城斷層邏輯樹。

4-3-3-3 新城斷層特徵地震模式

圖 4.30 的邏輯樹可產生 18 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 4.29 及圖 4.30 為 2 個事件之特徵地震模式分布情形。同樣的是以地震矩規模大於 6.7 以上為主，A 事件得到的再現週期及權重分別為 1098(0.02)、-(0.06)、-(0.02)、1528(0.06)、-(0.18)、-(0.06)、2511(0.02)、-(0.06)及-(0.02)；B 事件得到的再現週期及權重分別為 1036(0.02)、-(0.06)、-(0.02)、1441(0.06)、-(0.18)、-(0.06)、2368(0.02)、-(0.06)及-(0.02)。

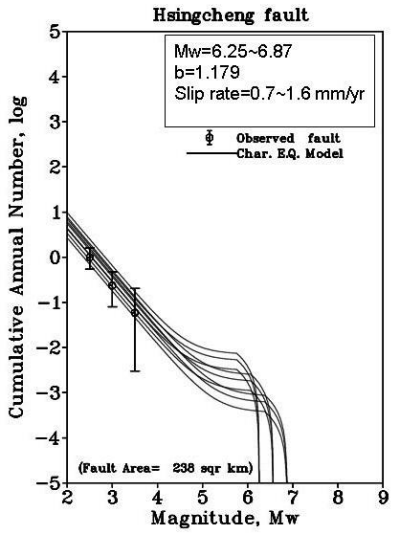


圖 4.29 事件 A 之特徵地震模式。

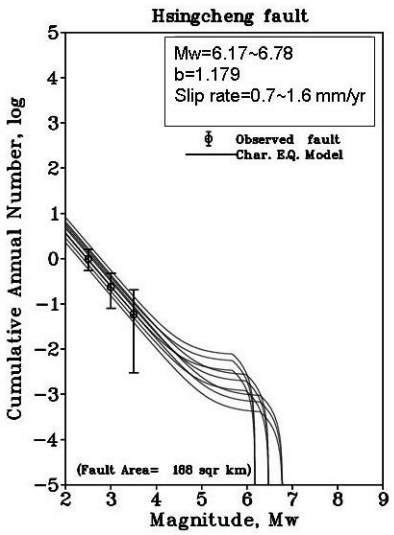


圖 4.30 事件 B 之特徵地震模式。

4-3-2-4 新城斷層發生機率評估

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 模式估算新城斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，根據前述，新城斷層以階地定年結果顯示，其最後一次發生時間約為 300 年前，因此本計畫以 300 年帶入 BPT 模式中評估。表 4.13 及 4.14 為使用 BPT 模式評估新城斷層各事件之發生機率。表 4.15 為新城斷層 BPT 模式綜合評估之結果，採用式 4.3 的計算方式，得到新城斷層未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 0.0%、0.0%及 0.2%。

表 4.13 新城斷層破裂事件 A 以 BPT 模式評估之發生機率

事件 A(週期)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1098	300 年前	0.5%	1.0%	2.7%	0.02
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.06
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.02
1528	300 年前	0.1%	0.1%	0.4%	0.06
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.18
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.06
2511	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.02
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.06
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.02
權重後加總		0.0%	0.0%	0.1%	0.5

表 4.14 新城斷層破裂事件 B 以 BPT 模式評估之發生機率

事件 B(週期)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	weight
1036	300 年前	0.7%	1.3%	3.5%	0.02
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.06
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.02
1441	300 年前	0.1%	0.2%	0.6%	0.06

-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.18
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.06
2368	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.02
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.06
-	300 年前	0.0%	0.0%	0.0%	0.02
權重後加總		0.0%	0.0%	0.1%	0.5

表 4.15 新城斷層發生機率評估

	M_W	30 年機率	50 年機率	100 年機率
P_A	≧6.7	0.0%	0.0%	0.1%
P_B		0.0%	0.0%	0.1%
P_{total}	≧6.7	0.0%	0.0%	0.2%

註：P_{total} 見式 4-3

4-4 美國與日本之研究進程

活動斷層潛勢分析之成果，可以參考美、日兩國之展示方式，圖 4.31 所示，為全日本活動斷層的潛勢分析成果圖，圖中包含了各活動斷層之分布位置、發生機率高低及發生之規模，且活動斷層潛勢以不同之顏色來表示。至於美國的展示方式則類似於日本，如圖 4.32 所示為未來 30 年規模大於 6.7 之活動斷層分布及機率。

根據美國 SCEC 之「Community Fault Model」，於南加州地區已建立活動斷層之三維斷層幾何模型，圖 4.33 所示為南加州活動斷層三維幾何模型分布圖。活動斷層三維模型之建立可準確的劃分活動斷層之地震目錄，圖 4.34 為將地震目錄及活動斷層幾何模型描繪於 3D GIS 上展示情形。此外，活動斷層幾何模型可用來區分塊體區域（block region）（圖 4.35），並以塊體區域進行物理模擬，從能量在塊體上之累積（塊體變形），推估塊體邊界（活動斷層）之滑移虧損及可能發生之地震規模。

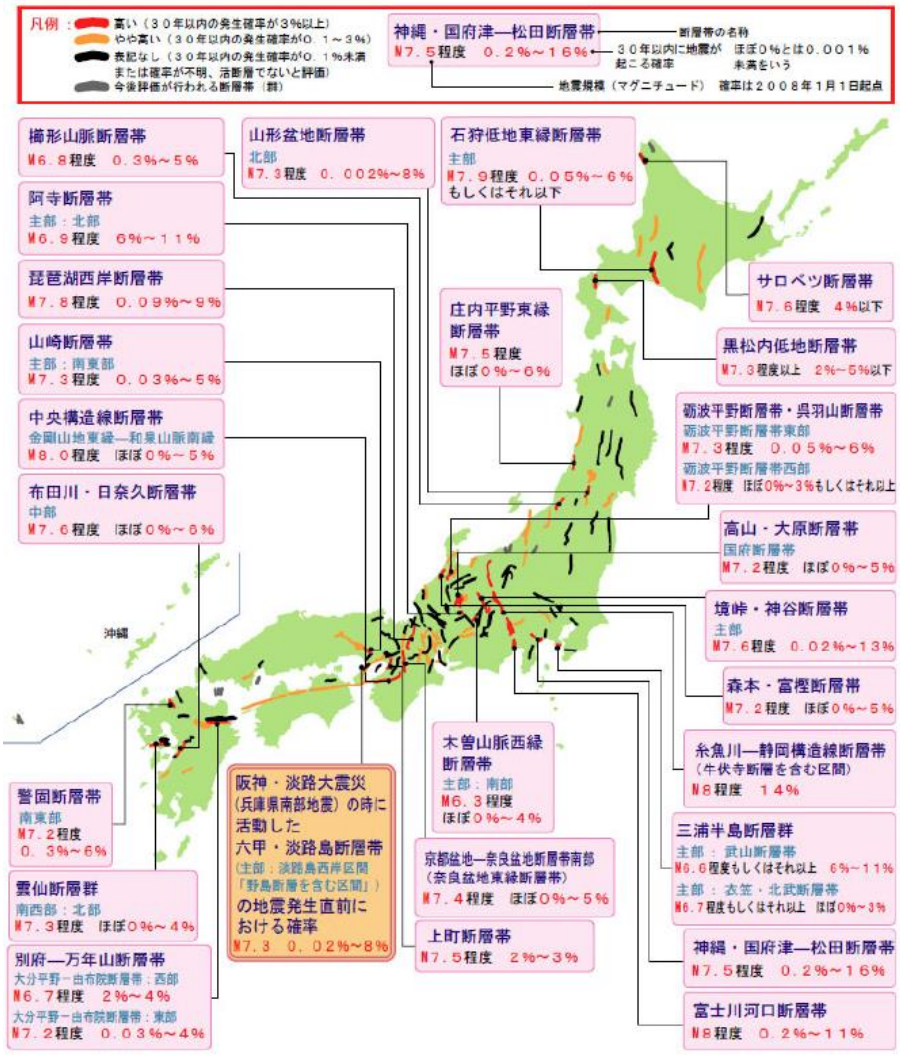


圖 4.31 日本主要活動斷層潛勢評估成果（摘錄自日本全國地震動預測地圖， 2008）。

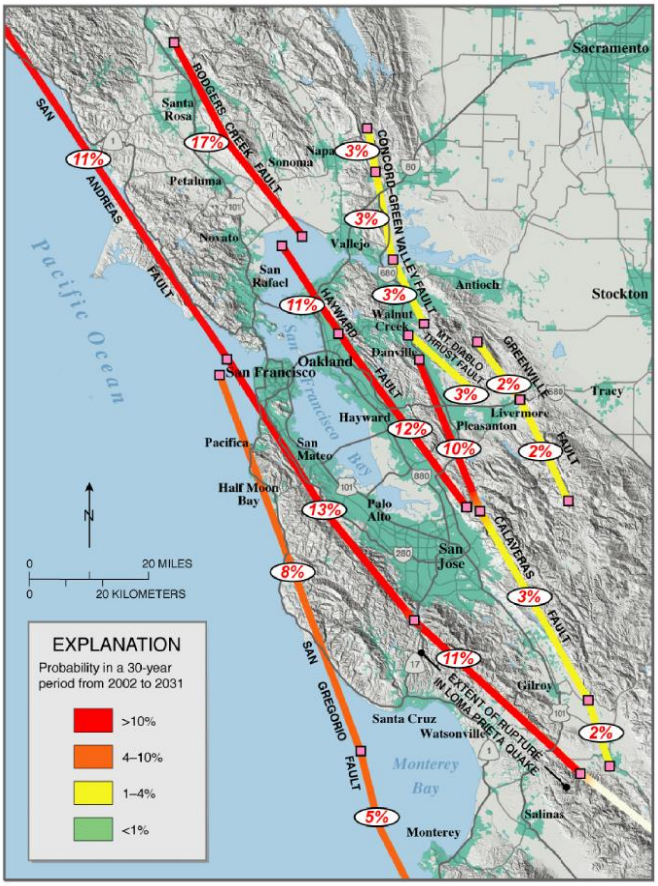


圖 4.32 美國舊金山灣地區活動斷層在未來 30 年內發生規模≧6.7 之機率（摘錄自 WG02，2003）。

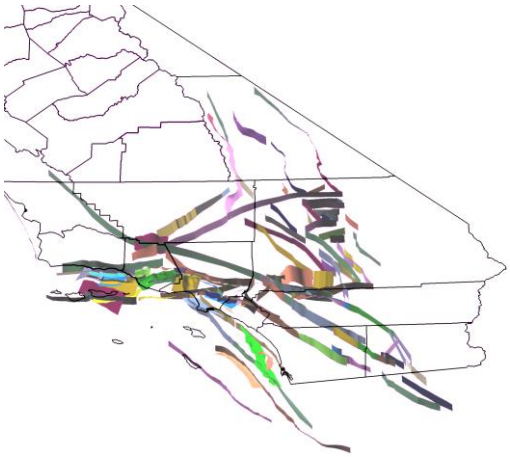


圖 4.33 美國南加州之三維斷層模型（Shaw et al., 2004）。

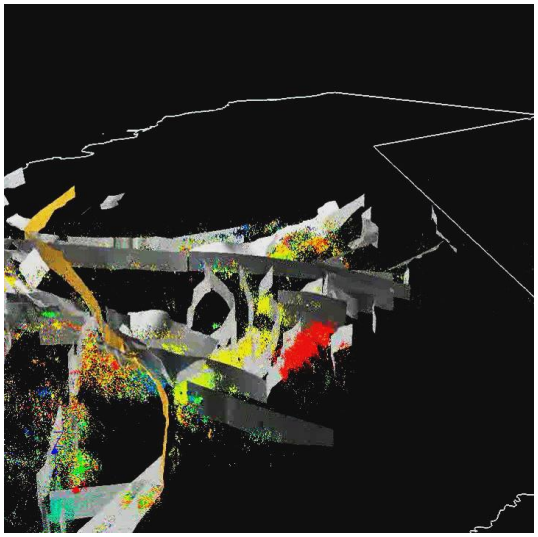


圖 4.34 美國南加州之活動斷層三維模型及區域地震目錄投影（Shaw et al., 2004）。

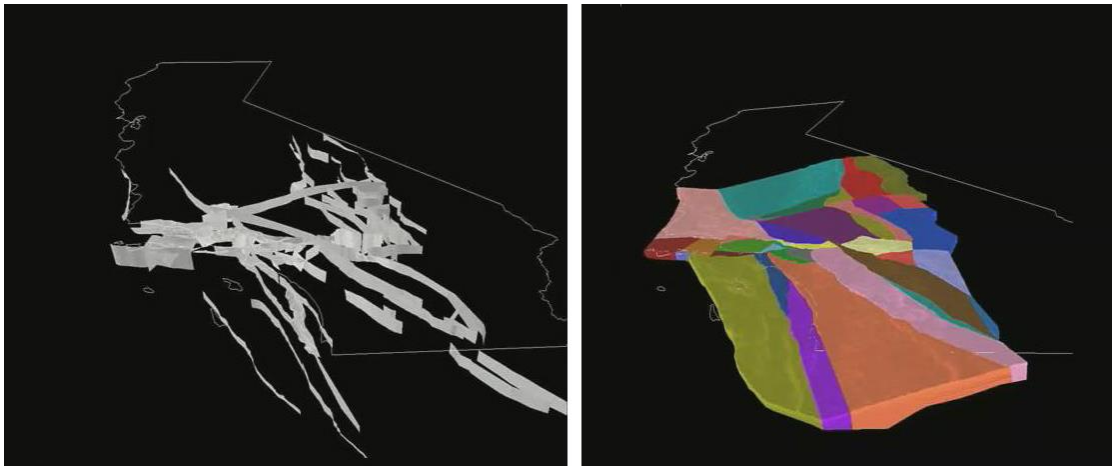


圖 4.35 美國南加州之活動斷層三維模型及用此模型建立之 block region（Shaw et al., 2004）。

4-5 小結

臺灣近年來由於中央地調所致力推動之「活動斷層資料庫建置」計畫，對於臺灣幾條主要活動斷層已累積不少之資料，包括斷層位置、分段特性、大地測量、槽溝古地震研究等，這些資料可以提供用來建立活動斷層參數表。本計畫 99 度已建立山腳斷層與新城斷層之斷層參數表。

本計畫已參考美、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論，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(如車龍埔斷層)；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（古地震最後一次事件未知）斷層進行評估(如：大茅埔--雙冬斷層)。

另參考美國南加州地區建立各活動斷層的三維幾何模型經驗，本計畫充分運用山腳斷層與新城斷層參數，建立兩活動斷層之三維幾何模型，除了在視覺展示上更具效果，在斷層潛勢分析或是力學模擬都有所幫助。

透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，再根據活動斷層參數表，經瞭解斷層的重複間隔相關資訊後，可用來推算地震規模機率密度函數，可進一步評估斷層的活動潛勢以及進行地震危害度分析，而參數表亦可提供工程建設需求之地震參數，以及耐震設計評估參用，在工程應用上十分具有實用價值。

本計畫 99 年度活動斷層潛勢經評估成果，山腳斷層潛勢未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.7 以上之機率為 3.0%、4.8%及 9.0%；而新城斷層潛勢未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 0.0%、0.0%及 0.2%。

五、整合觀測資料分析

本計畫期末報告，將綜合井下應變儀、地球化學監測站資料、與區域地震活動前兆異常與規模六以上地震做時間相關性分析。

5-1 2006-2010 井下應變儀異常與大地震活動、地化異常之關係

去年度計畫與今年度期中計畫，氡氣異常記錄與全臺灣大地震相關係已初步探討，今將井下應變儀觀測異常綜合討論時間相關性。如圖 5.1 示，23 個異常有 6 個與 M6 地震的時間差小於 1 個月。這 6 個疑似和 M6 地震相關的異常有 5 個出現在 M6 地震前，然而此異常點並不完全與氡氣異常吻合，僅有 4 個共通的異常時間(2009/7/13, 2009/11/5,2009/12/19, 2010/3/4)。在 2009/10/3 這一天沒有井下應變異常，卻有地化異常。在 2009/12/19 和 2010/3/4 這兩個時間點井下應變儀異常與大地震時間幾乎同步。

然而，欲將井下應變異常與地化異常整合討論時，我們發現先前所使用地化異常資料，來源為不同觀測網，其資料時間不一致、判定異常標準不一致(如圖 5.1 方形所示)，這些因素造成綜合分析的困難度。因此，在 5-3 節我們將以 M6 地震時間點入手，一一探討其發生前，是否在井下應變儀、地化觀測站、及地震活動記錄上，分別觀測到前兆異常。

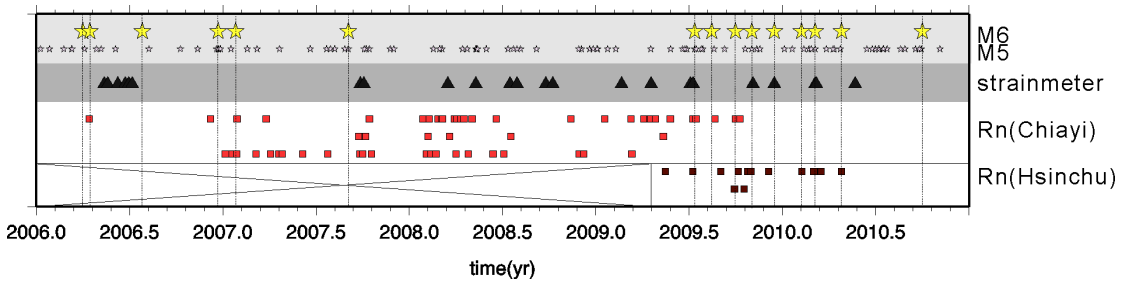


圖 5. 1 2006 年至今規模六、規模五地震與井下應變儀異常、氡氣異常的時間相關性。氡氣異常在嘉義觀測網記錄(地調所測站, 2005/11/23~2009/10/8)以紅色方形表示，而在新竹觀測網（國家地震工程中心, 2009/01/01~2010/06/13）以棕色方形表示。井下應變儀異常觀測以黑色三角形表示。規模五、六地震分別以灰色星形、黃色星形表示。

5-2 2006-2010 井下應變儀與地震訊號觀測異常

利用自 2006 年來井下應變儀記錄的異常時間，我們分析當天的地震波形，在目前檢驗過的六個異常時間點中，有兩個時間點出現深低頻振動(deep low-frequency tremors, 後簡稱為 tremor)(圖 5.2 – 5.3)。

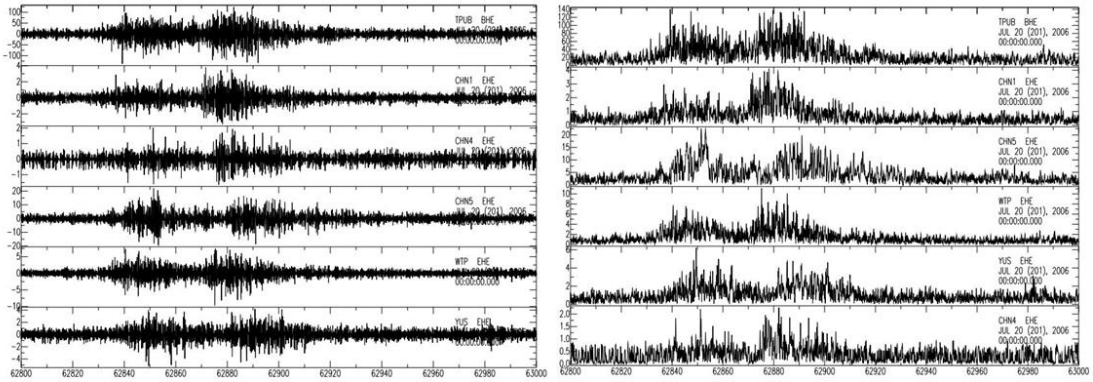
此種異常地震觀測為類似雜訊的特殊地震訊號，其特徵為(1) 主要頻率為 1-8 Hz; (2)

無明顯的 P 波、S 波到時; (3)長為數分鐘至數天的能量持續時間; (4)在相距數公里至數十公里不等的不同測站被發現具有一致的到達時間。火山地區常有相似的低頻訊號特徵，以往被理解與岩漿體的移動(magma movement)有關，在火山爆發前的此低頻訊號的異常活動被視作是爆發前兆。在非火山區域深低頻振動近年來屢在隱沒帶(Obara, 2002; Roger and Dragert, 2003; Kao et al., 2005)及地殼尺度的斷層系統(Nadeau and Dolenc, 2005; Gomberg et al., 2008)被發現，其釋放的地震矩能量可對等於規模六的地震事件，因此被視作是地震潛能計算中不可忽略的重點研究。低頻振動的週期行為在許多地區已證明和 GPS 以及井下傾斜儀記錄到的無震滑移事件(slow slip events)相關(Dragert et al, 2001; Hirose and Obara, 2006)。

2006/7/20當天共有4個疑似深低頻振動的時段，持續時間分別為30、70、90、100秒，當天持續時間最長的如圖5.2所示。由於遠距地震的P波、S波段易被誤判為深低頻振動，為排除此種可能性，我們假設在包絡線(envelop)的兩個能量封包是P波、S波能量所造成。利用S、P波到時差推估之距離，我們可尋找在此距離內曾經發生過的中大規模地震是否吻合深低頻振動記錄時間。當天這4個疑似深低頻振動的事件裡，兩兩能量封包間的時間差粗估為40~50s不等，假定Vp=6 km/s, Vs=3.648 km/s，對應之可能震源距離為350~500 km。然而，在當天並無任何規模大於5的遠距地震(teleseismic earthquake, 大於1000 km以外)及中距地震(regional earthquake, 介於100~1000km範圍內)發生，而臺灣的區域地震(local earthquake, 小於100 km範圍內)之搜尋結果，我們亦無發現2006/7/20當天M>3的地震。若將搜尋時間拉長至2006/7/20前後兩天，我們發現在鄰近嘉義地區2006/7/22有規模大於三的地震。

2008/3/12當天共有2個疑似深低頻振動的時段，持續時間分別為100及500秒，當天持續時間最長的如圖5.3所示。搜尋當天遠距、中距、區域地震亦無所獲，但鄰近嘉義地震在2008/3/10,11,13,14皆有規模三的區域地震，此點與前一個2006/7/20的例子雷同。在同一深低頻振動事件、不同測站的震波圖上，我們發現TPUB測站總是收到最大能量，與其他測站相比，TPUB包絡線的振幅高達十倍以上，因此初步推測其對應之能量源應位於TPUB附近。圖5.4說明TPUB測站的位置、井下應變儀觀測異常測站位置、以及異常前後兩天區域地震之位置。井下應變記錄異常的觀測測站(綠色實方形)及深低頻振動觀測測站之空間相近，說明此兩種異常觀測可能是區域性的、局部集中在嘉義附近。而兩個異常時間點的綜合比較則顯示，在井下應變儀異常記錄後兩天內，50 km內有M>3地震發生，而井下應變儀的異常觀測當天，地震資料亦有象徵深部滑移行為的深低頻振動被發現，由震波振幅顯示此活動靠近TPUB地震站。

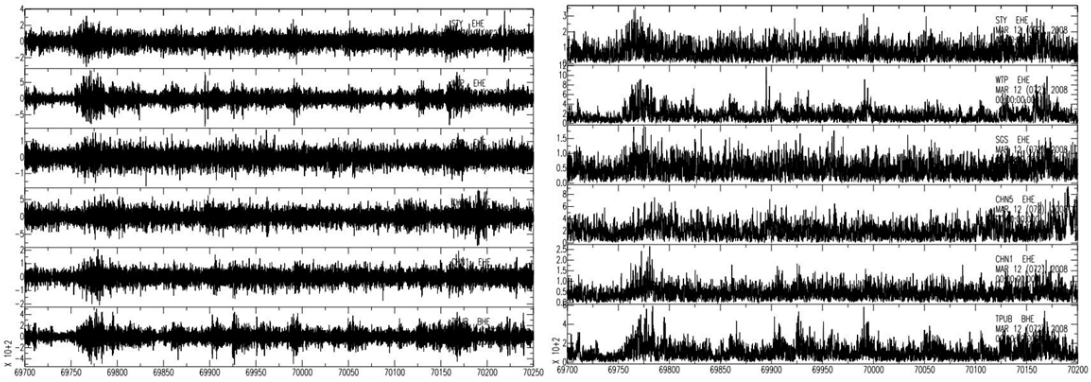
Time(seconds from 00:00:00)	Duration(seconds)	Stations
62830-62930	100	TPUB CHN1 CHN4 CHN5 WTP YUS



2-8 Hz filtered seismogram　　Envelope

圖 5.2 2006/7/20 當天發現持續時間最久的地震波異常記錄(100s)。深低頻振動地震圖(左)及包絡線(右)。地震記錄長度為 100 秒，帶通濾波至 2~8 Hz。包絡線強調此頻率範圍的能量持續超過一分鐘，並在不同的測站有一致的到達時間和特徵。

Time(seconds from 00:00:00)	Duration(seconds)	Stations
69700-70200	500	WTP STY CHN5 CHN1 TPUB



2-8 Hz filtered seismogram　　Envelope

圖 5.3 2008/3/12 當天發現持續時間最久的地震波異常記錄(500s)。深低頻振動地震圖(左)及包絡線(右)。地震記錄長度為 100 秒，帶通濾波至 2~8 Hz。包絡線強調此頻率範圍的能量持續超過一分鐘，並在不同的測站有一致的到達時間和特徵。

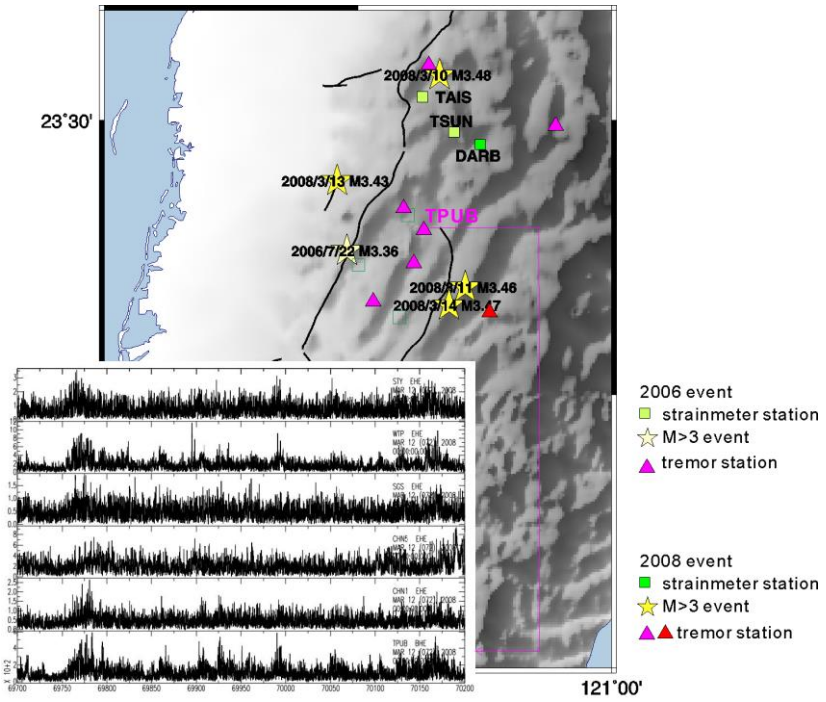


圖 5.4 井下應變儀異常、深低頻振動觀測站之空間分布，以及異常前後兩天內鄰近 M<4 地震之分布圖。箭頭指示 TPUB 測站，其為深低頻振動活動能量最高之測站。

與 M5+(規模五以上)地震的空間、時間比較如圖 5.5 所示。和 M5+地震的時間差距皆大於一星期、並無一致的震前或震後相關性（2006/7/20 井下應變記錄異常發生在 7/28 *M*6.0 地震前八天，而 2008/3/12 異常則發生在 3/4 *M*5.2 地震後八天），因此難以合併解釋為地震前兆異常。

根據分析，深低頻振動與井下應變儀同步，在此我們初步推測為與地殼深部無震滑移相關。而深低頻振動持續時間僅數分鐘，顯示若對應到深部無震滑移，其規模可能過小，難以對應到可辨別的地表變形。未來擬針對尚未檢驗的井下應變儀異常時間點進行後續分析，期能深入探討井下應變儀觀測異常之機制。

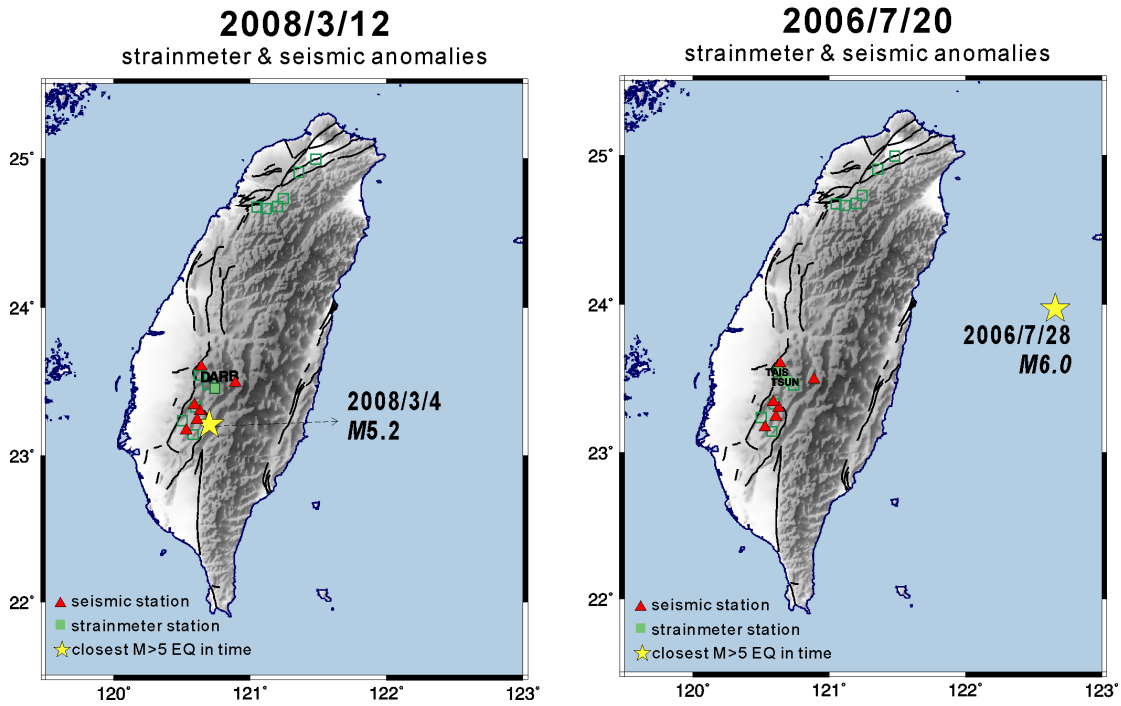


圖 5. 5 同時有井下應變儀和地震觀測記錄異常之測站分布。發現井下應變儀異常測站(右圖 DARB 測站，左圖 TAIS 及 TSUN 測站)以綠色實方形表示，空心方行為其他井下應變儀測站。發現深低頻振動記錄的地震測站以紅色三角形標示。最靠近異常時間點的 M>5 地震以黃星標示。

5-3 臺灣規模六大地震前兆異常整合分析

5-3-1 區域地震活動異常分析

2009 至今，臺灣規模大於六的地震分布如圖 5.6 所示。絕大多數發生於臺灣東部及外海，僅有兩個地震發生於臺灣西部。地震間的時間差距極小，皆發生在兩個月內。。大地震前一個月的背景地震空間分布如圖 5.7~5.14 所示，我們發現八個地震前的背景地震活動分布相似、難以判別活動異常。若針對出現異常的測站區域（新竹、嘉義區域如圖 5.6 黃圈），將地震前一月(至兩月不等)的地震活動速率畫出如圖 5.14。我們發現震前活動異常高以嘉義區域最為明顯，分別發生在 2009/8/17M6.8 及 2010/4/26 M6.8 的地震前。新竹區域由於背景小地震數目少，判斷異常活動度更為主觀，2009/10/4 M6.1 及 2009/11/5M6.2 震前顯現些微異常。

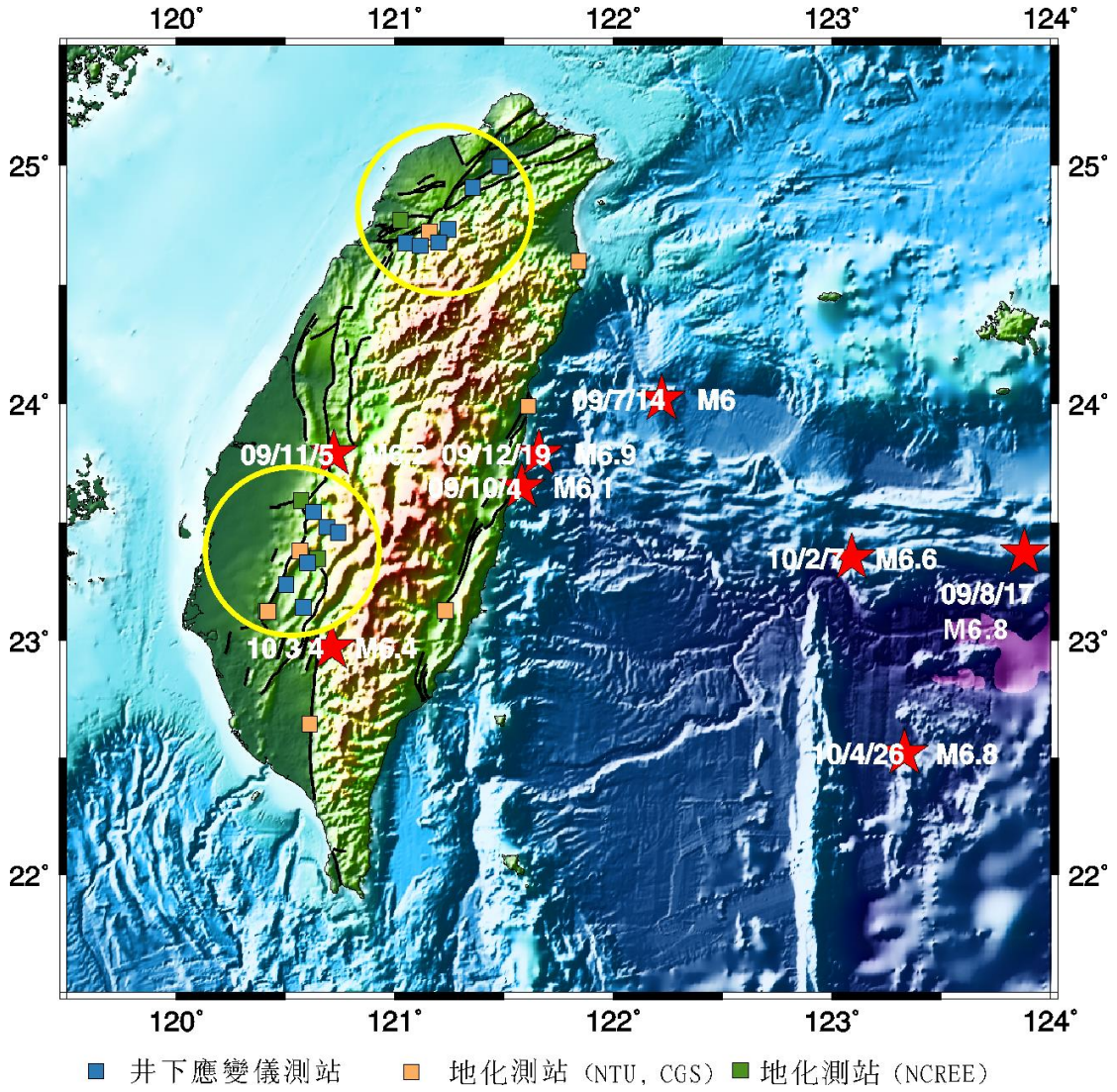


圖 5. 6 2009/1-2010/9 規模六地震與地化觀測站、井下應變儀測站分布示意圖。黃色圓圈為分析地震活動異常的選取區域。此期間共有 9 個規模六以上地震，唯 2010/10/4 M6.8 地震發生位置超出本圖(125.3˚, 23.75˚)，但仍為分析範圍。

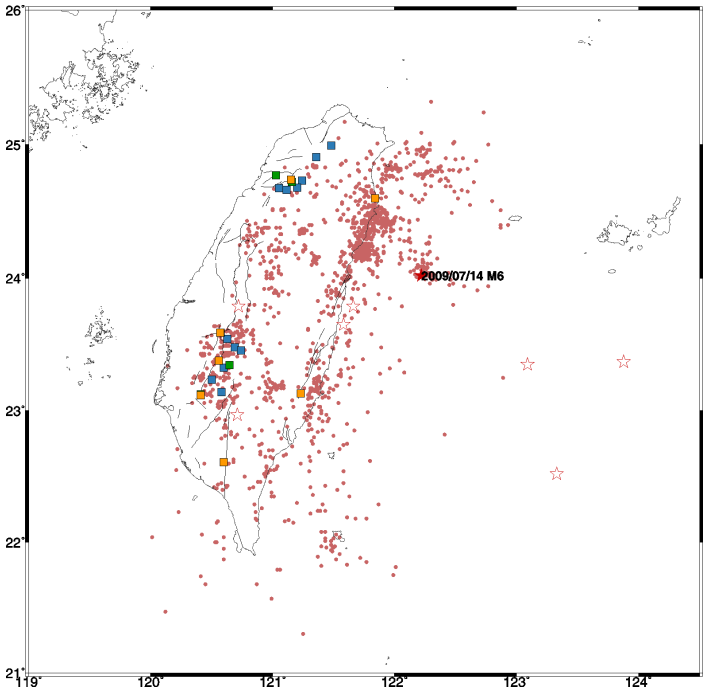


圖 5. 7 2009/7/14 M6 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

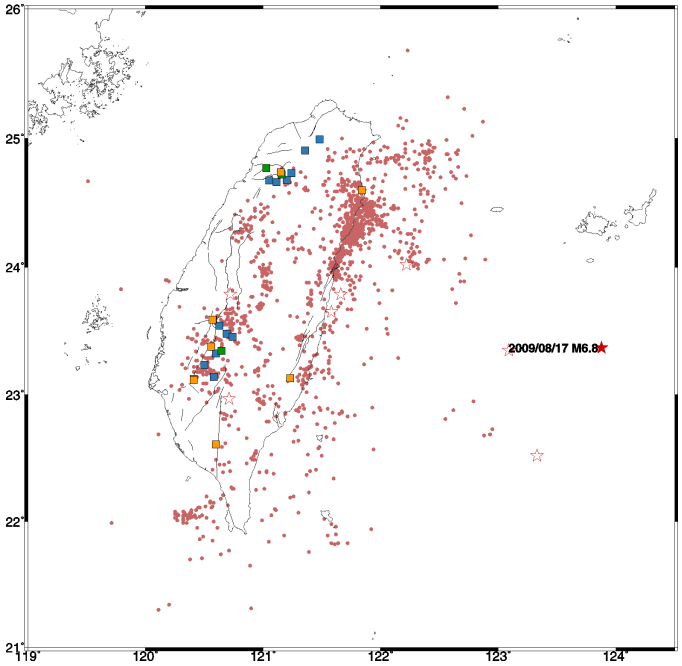


圖 5. 8 2009/8/17 M6.8 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

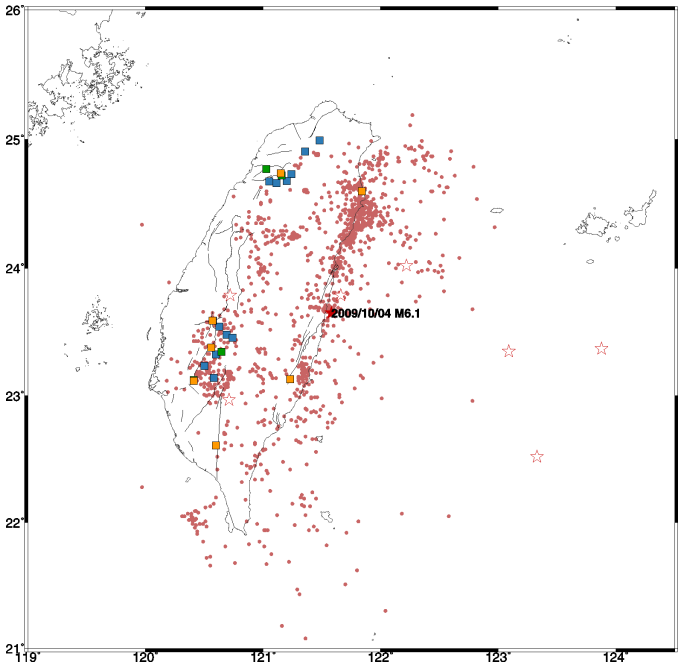


圖 5. 9 2009/10/4 M6.1 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

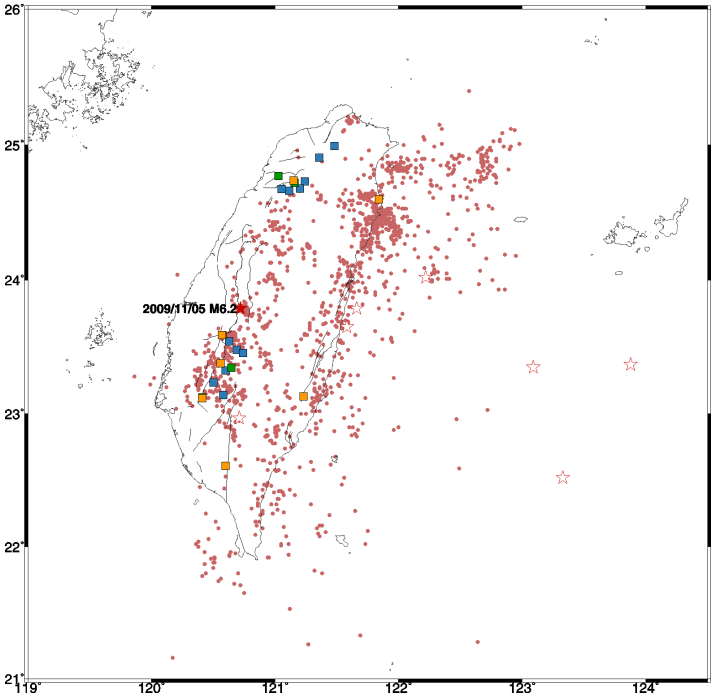


圖 5. 10 2009/11/5 M6.2 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

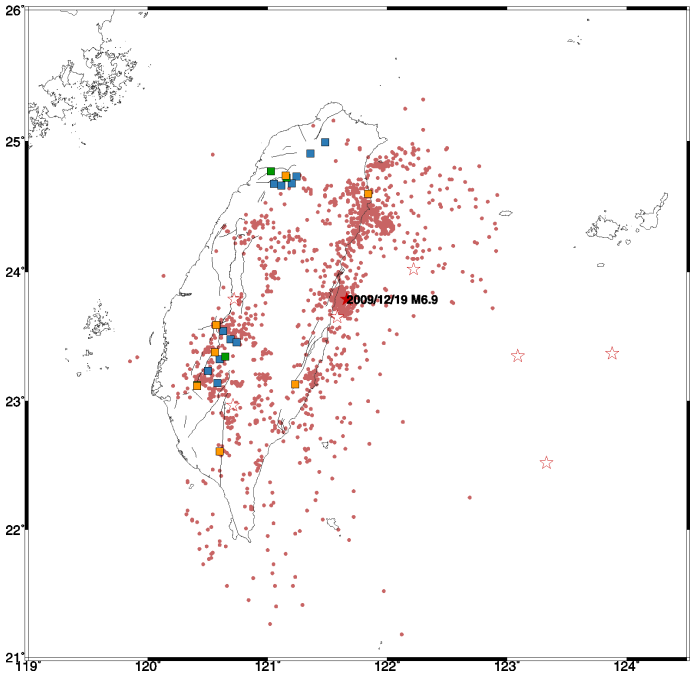


圖 5. 11 2009/12/19 M6.9 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

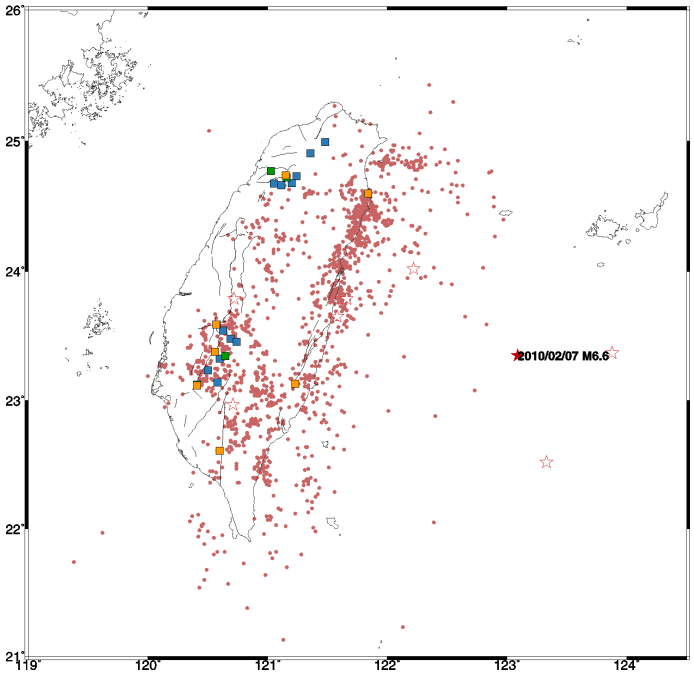


圖 5. 12 2010/2/7 M6.6 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

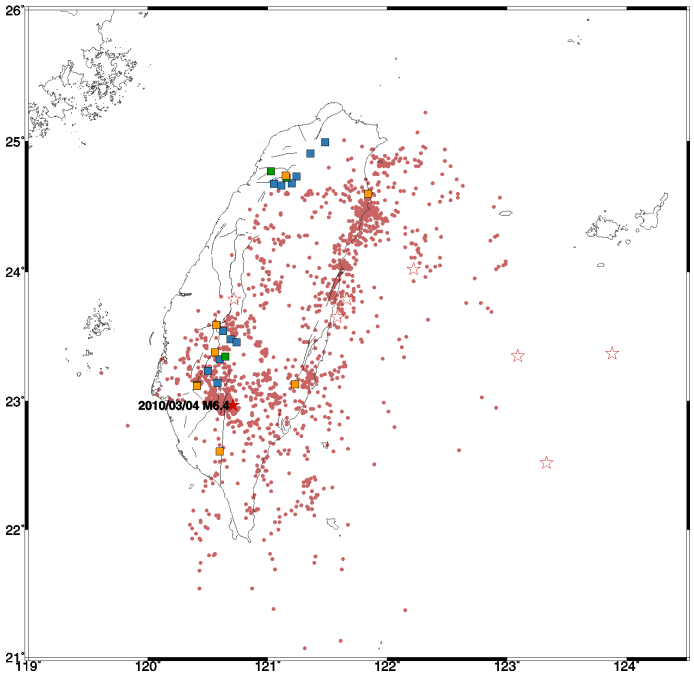


圖 5. 13 2010/3/4 M6.4 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

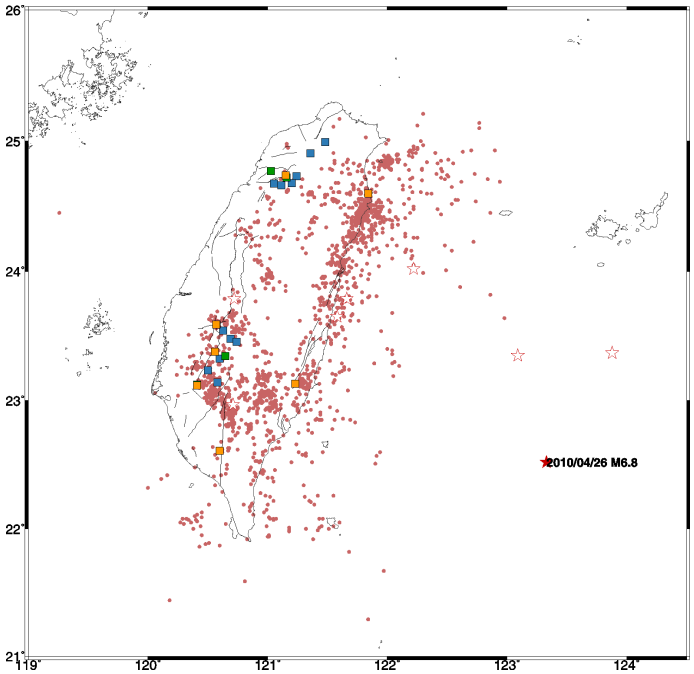


圖 5. 14 2010/4/26 M6.8 震前一個月背景地震活動分布圖。藍色、黃色、綠色方形分別為井下應變儀測站、地化觀測站(地調所)、及地化觀測站(國家地震工程中心)。

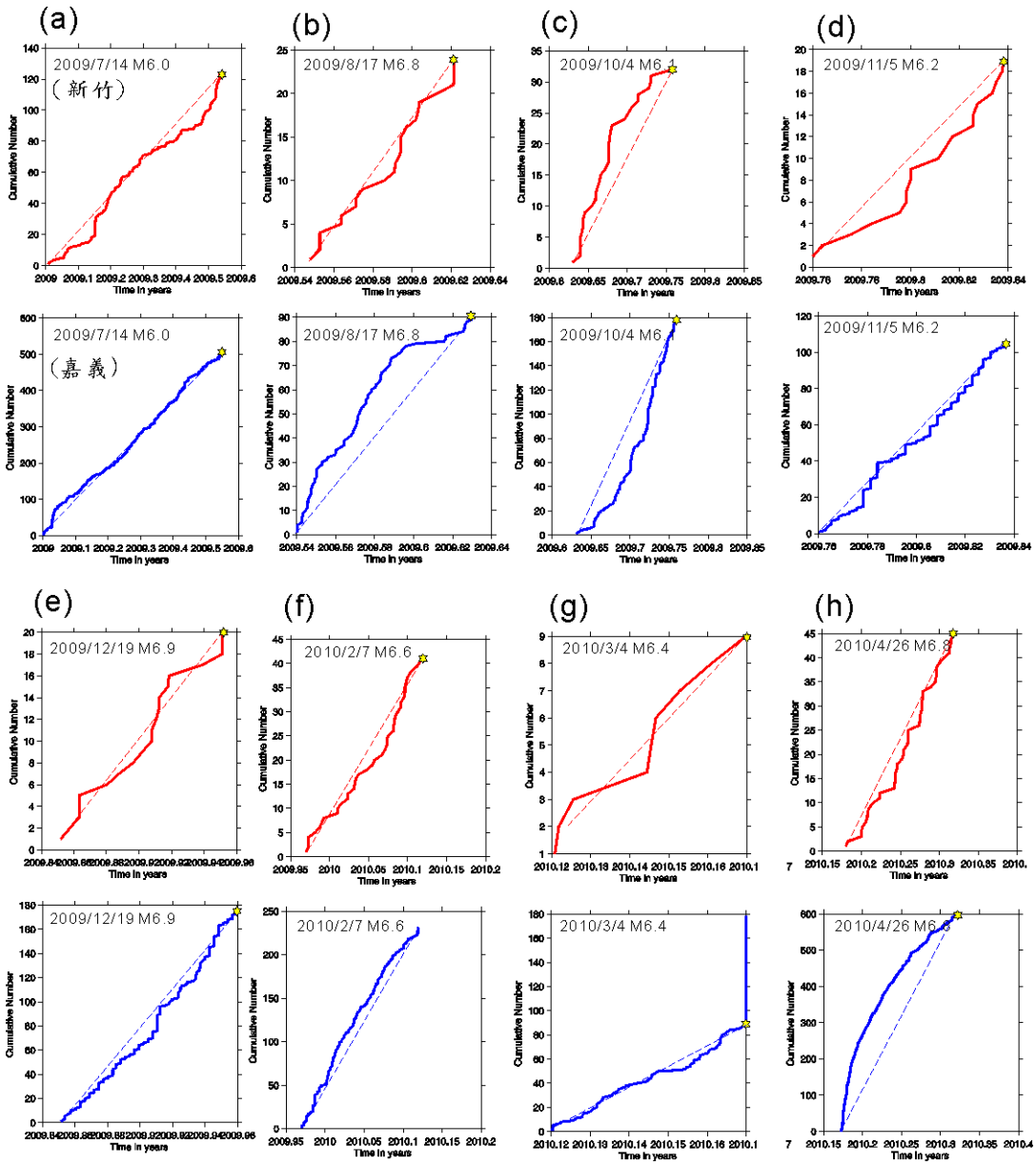


圖 5. 15 (a)~(h)為 8 個不同的規模六事件在新竹地區（紅線）與嘉義地區（藍線）大震前背景地震活動速率。資料的尾端為當次規模六事件，資料的開始是前一個大地震。虛線為頭尾資料點連接的結果。

5-3-2 前兆異常綜合分析

將背景地震活動速率異常、井下應變儀異常、與氡氣異常綜合分析結果如圖 5.16 所示。我們發現八個事件中有四個同時有氡氣及井下應變儀異常，而僅有一個同時具氡氣、井下應變儀、及地震活動異常。此一事件為發生新竹與嘉義之間的 2009/11/5M6.2 地震，是同時最靠近新竹、嘉義兩地區的強震事件。下一年度計畫擬進一步量化背景地

震活動之異常，以與其他異常觀測作更客觀的比較。

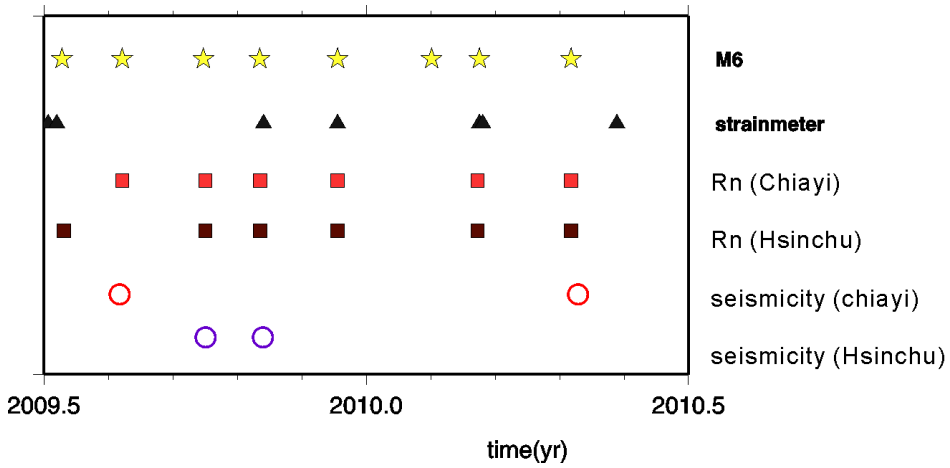


圖 5. 16 八個不同的規模六事件在井下應變儀偵測到之前兆異常、氡氣異常、與震前地震活動異常的時間相關圖。新竹地區與嘉義地區大震前背景地震活動速率異常以紫色空心圓、紅色空心圓表示。新竹地區與嘉義地區觀測站記錄之氡氣異常分別以棕色方形、紅色方形表示。井下應變儀記錄異常以黑色三角形表示。規模六地震以黃星表示。

六、結論與建議

（一）GPS 連續觀測站：

1. 臺灣地區速度場相對於澎湖 S01R 在北部地區移動量小且方向由西北轉北至宜蘭地區呈現東南方向移動，在新竹地區多呈現西北方向與臺北地區速度長呈現連續性的順時鐘方向旋轉。
2. 在中部地區由於測站多位於車籠埔斷層下盤，速度場移動量相較於其他上盤測站較小，往南至嘉義地區速度場移動量則明顯增加，方向為向西北方移動，至臺南地區則速度場量級變化不大但方向漸偏西，至屏東平原則速度場增大速度場方向則偏向西南方向移動，呈現一逆時鐘旋轉之現象。
3. 臺灣北部、東北部至宜蘭地區、中央山脈延伸至屏東恆春半島地區呈現伸張之主軸應變且最大伸張面膨脹率達 1.32 μstrain/yr；西部海岸平原壓縮量較小，西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈之主軸應變為壓縮應變，最大壓縮面膨脹率達 1.97 μstrain/yr。
4. 旋轉率是由花蓮北部沿中央山脈雪山山脈向東北方向順時鐘變化並增加旋轉角度，臺南、高雄北部地區也為順時針旋轉，另一方面苗栗至台中地區亦呈現順時鐘旋轉的變化；海岸山脈至中央山脈東側及屏東恆春半島地區則呈現明顯的逆時針旋轉。
5. 山腳斷層地區平均應變率沿山腳斷層分布之最大主應力方向為西北西-東南東走向，向南及向東的最大主應力變化則呈逆時針旋轉為東-西走向。本區域中大部分為伸張的主軸應變率，僅在局部地區呈現壓縮變化；而沿新城斷層分布之最大主應力方向為東南東-西北西走向。應變率場顯示沿新城斷層之應力皆為壓縮應力，顯示此斷層為逆斷層。
6. 山腳斷層滑移速率的模擬的結果中，斷層面的平均滑移速率為 5.33mm/yr，8 公里深以上的滑移量平均 2.91mm/yr，8 公里深以下的滑移量平均 5.86mm/yr。北段斷層面的滑移速率較南段不平均，主要是集中 8 公里深以下，而滑移速率不連續的地方往往會是應力集中的地方，很可能指示著未來地震發生的區域。
7. 結果顯示新城斷層主要的震間滑動發生在深度大於 3 公里處，滑移速率具有每年約 17 mm的逆衝分量。注意的是此模型雖然沒有加入可能存在的深部（>5km）滑脫面（detachment）所造成的影響，所預估的地表形變已接近觀測值，顯示新城斷層的震間行為並不明顯地受到滑脫面的影響。未來應加入遠場（東南方）的 GPS 速度觀測來進一步測試這個推論。

（二）井下應變儀觀測：

井下應變儀部分，在七站(大坪國小、新樂國小、錦和國小、瑞峰國小、梅花國小、明德中學及樹林)資料中，除了瑞峰國小測站因兩個分量資料不正常外，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)，不會像嘉義地區的測站受地下水變化的影響。

臺灣地區曾文水庫水位變化的長期資料與這三個測站地下水位的關係，可看出除了中興國小的變化略為延遲外，其餘地下水位變化與曾文水庫幾乎是同步，且所以水位變化都是一年一個周期。在地下水影響量之移除之部份，根據分析，達邦、太興國小與中興國小三個測站的地下水位變化大，且井下應變儀資料受其影響也深，然而這影響量之估計並不太容易，因為各測站在較大地下水影響時，無法先有效的移除井孔鬆弛效應，因此也很難單獨的移除地下水的影響效應。而在數學模式上，也無法同時估計雙自然對數的井孔鬆弛模式與地下水位相關的線性模式。因此，我們只好先以最簡單的線性迴歸，再加以經驗的判斷。

本計畫也嘗試對於地震相關或其它觀測也有相同異常的例子作為探討對象，在逐漸累積經驗後再加以量化，而根據井下應變異常事件的判斷原則，找出較有意思的異常事件有：2010 年 3 月甲仙地震、2007/10/06 之地震以及 2010/05/23 之地震。而在 2009 年 08 月到 2010 年 07 月的嘉義井下應變儀三站(DARB、TAIS、TSUN)的應變與同時間嘉義石桌附近的 GPS 觀測網 GS05-GS07-GS17 所算出的面積應變一起觀測，可看出其一致性與不一致性。在這段期間有幾個有趣的變化，其中較顯著的是在 2009 年十月三日與十二月十九的兩個花蓮磯崎附近的地震，規模分別為 M=6.1 與 M = 6.9，前者有太興站與 GPS 都是由之前的壓縮變回鬆弛，後者所有的觀測都在地震前明顯的鬆弛。又在 2009 年 11 月 5 日的南投名間地震(M = 6.2) 雖太興站有明顯的同震現象，但並無前震，其它站變化也不顯著。至於 2010 年 3 月 4 日的甲仙地震(M=6.6)與 3 月 8 日的兩個臺南地震 (M=4.9) 則各站變化迥異，須與其他資料再詳細參照。

（三）斷層潛能分析模式之評估

1. 本計畫參考黃旭燦平衡剖面，建立新城斷層之幾何面，利用GeoSec軟體建立新城斷層三維構造幾何模型得知斷層寬度、深度以及面積分別為11-13公里、4.3公里及188-238平方公里。
2. 歷史文獻記載了 1694 年康熙台北湖事件，但是其正確性仍有許多討論空間，因此本計畫除了假設 1694 年為山腳斷層最後一次事件來進行 BPT 模式評估，另外也使用 Poisson 模式進行評估。BPT 模式得到山腳斷層未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 3.0%、4.8%及 9.0%；Poisson 模式得到山腳斷層未來 30 年、50 年及 100 年之機率為 2.5%、4.0%及 7.4%。
3. 新城斷層以階地定年結果顯示，其最後一次發生時間約為300年前，因此本計畫以300年帶入BPT模式中評估。採用BPT模式得到新城斷層未來30年、50年及100年之機率為0.0%、0.0%及0.2%。

（四）整合觀測資料進行分析：

將背景地震活動速率異常、井下應變儀異常、與氡氣異常綜合分析結果如圖 5.12 所示。我們發現八個事件中有四個同時有氡氣及井下應變儀異常，而僅有兩個同時具氡氣、井下應變儀、及地震活動異常。此兩個事件為發生在 2009/10/4 M6.1 及 2009/11/5 M6.2，是最靠近新竹地區的兩個強震事件。

根據分析，深低頻振動與井下應變儀同步，在此我們初步推測為與地殼深部無震滑移相關。而深低頻振動持續時間僅數分鐘，顯示若對應到深部無震滑移，其規模可能過小，難以對應到可辨別的地表變形。

七、參考文獻

王天楷、徐春田、李昭興、許樹坤、黃怡陵，2007，大臺北地區特殊地質災害調查與監測：地熱流與海域火山活動調查與監測(4/4)。經濟部中央地質調查所報告96-05號，共190頁。

王執明、鄭穎敏、王源，1978，臺北盆地之地質及沈積物研究。臺灣鑛業，第30卷，第4期，第78-108頁。

丹桂之助，1939，臺北盆地之地質學考察。矢部教授還曆紀念論文集，第1卷，371~380頁。

石同生、盧詩丁、林偉雄、李元希，2003，新城斷層定位與斷層活動性研究，經濟部中央地調所特刊，第 14 號，第 37-52 頁。

石瑞銓、詹益湘、劉桓吉，2003，山腳斷層於關渡平原之淺層震測調查。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 1-11 頁。

石再添、鄧國雄、張瑞津、楊貴三（1985）竹東台地的活動斷層與地形面。國立臺灣師範大學地理教育，第 9 期，第 1-16 頁。

地震調査研究推進本部，2001:日本地震調査研究推進本部地震調査委員会，長期的な地震発生確率の評価手法について。

李錫堤，1993，活斷層工程評估的新發展。地工技術，第44期，第5-18頁。

李錦發、林朝宗、賴典章、蘇泰維、邱禎龍、曾俊傑，1999，臺北盆地成因之探討，經濟部中央地質調查所特刊，第11號，第207-226頁。

吳相儀，2000，臺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。

余水倍，2000，八十八年下半年及八十九年度都會區地下地質與工程環境調查研究—臺北都會區工程地質—活動斷層及地盤下陷水準測量。中央地質調查所報告第89-11號，共89頁。

林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000，臺灣活動斷層概論，第 2 版。經濟部中央地質調查所，共 122 頁。

林啟文、鍾瑋、侯進雄，2005，臺灣北部新城斷層與新竹斷層的一些構造特性，經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，第 41-54 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧，2007，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 19 號，共 130 頁。

林朝棨，1957，臺灣地形。臺灣省文獻委員會，共424頁。

林朝宗，2005，山腳斷層與臺北盆地西緣的地質構造。大臺北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集，第191-197頁。

邱俊穎、胡植慶、陳致言、劉桓吉，2008，山腳斷層再活動對於臺北盆地內地形變化之探討。經濟部中央地質調查所特刊第 20 號，第 97-110 頁。

胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞、張午龍、陳卉瑄、鄭錦桐，2009，斷層活動性觀測研究第二階段—斷層監測與潛勢分析研究(1/4)。經濟部中央地質調查所研究報告98-07號，共179頁。

郁永河，1697，裨海紀遊。

許京穎，2008，臺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。

黃旭燦、楊耿名、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏，2004，臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)-臺灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，經濟部中央地質調查所報告 93-13 號。

陳文山，李錫堤，陳于高，2002，槽溝開挖與古地震研究計畫(1/5)。經濟部中央地質調查所「地震地質調查與活動斷層資料庫建置計畫」研究報告，共 109 頁。

陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、李元希、林偉雄、石同生，2003，新城斷層的古地震研究。經濟部中央地調所特刊，第 14 號，第 11-23 頁。

陳文山，2006，槽溝開挖與古地震研究計畫(總報告)—「槽溝開挖與古地震研究」與「光螢光定年」。經濟部中央地質調查所報告，95-08-1。

陳致言，2007，臺灣西南部井下應變研究。95 年度研究發展報告，經濟部中央地質調查所，共 51 頁。

張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁，1998，臺灣活動斷層概論－五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第十號，共 103 頁。

詹瑜璋、李建成、鄭鼎耀、劉進金、陳文山、胡植慶、陳柔妃、徐偉城，2005，大臺北地區特殊地質災害調查與監測－高精度空載雷射掃描(LiDAR)地形測製與構造地形

分析(1/3)。經濟部中央地質調查所報告94-06號，共143頁。

詹瑜璋、李建成、劉進金、鄭鼎耀、徐偉成、陳文山、胡植慶、陳柔妃，2006，大臺北地區特殊地質災害調查與監測─高精度空載雷射掃描(LiDAR)地形測製與構造地形分析(2/3)。經濟部中央地質調查所95年研究計畫報告，共123頁。

楊耿明、吳榮章、丁信修、王佳彬，1995，竹苗麓山帶地下地質構造與油氣儲集。探採研究彙報，第 17 期，第 24-53 頁。

楊耿明、黃旭燦、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏，2003，斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究：臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(4/5)－臺灣中部麓山帶地區。經濟部地質調查所，共51頁。

楊潔豪、郭泰融，1991，新城斷層之地球物理研究。第三屆臺灣地區地球物理研討會論文集，第 337-352 頁。

塗明寬與陳文政，1991，五萬分之一臺灣地質圖說明書─竹東，經濟部中央地質調查所，共 87 頁。

劉仁正，2001，篤行營區新城斷層調查工作報告。新竹科學工業園區管理局。

劉桓吉、蘇泰維、李錦發、紀宗吉、林朝宗，2000，山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響，經濟部89年度研究發展報告，共30頁。

蔡主權、葉永田、鄭世楠，1987，南化水庫設計反應譜及人造合成地震之研究。南化水庫計畫檢討報告，NO.16，中央研究院地球科學研究所，六月。

蘇泰維、劉桓吉、劉憲德、黃健政，2003，臺北盆地西緣山腳斷層調查研究初步成果─環境與工程地質調查研究。91年度經濟部中央地質調查所年報，第118-121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-活動斷層監測系統計畫(5/5)。經濟部中央地質調查所研究報告95-10號，共241頁。

Anagnos, T., and Kiremidjian, A.S., 1988. A review of earthquake occurrence models for seismic hazard analysis. Probabilistic Engineering Mechanics, 3, 3-11.

Anderson, J.G., 1979. Estimating the Seismicity From Geological Structure for Seismic-Risk Studies. Bull. Seism. Soc. Am., 69, 135-158.

Anderson, J.G., and Luco, J.E., 1983. Consequences of Slip Rate Constraints on Earthquake Occurrence Relations. Bull. Seism. Soc. Am., 73, 471-496.

Ang, A.H.S., and Tang, W.H., 1975. Probability concepts in engineering planning and design. Vol. 1, Basic Principles, Wiley, N. Y.

Arabasz, W. J. and Robinson, R., 1976. Microseismicity and geologic structure in the northern south island, New Zealand. J. Geol. Geophys., 19, 569-601.

Bollina, M.G., 1970. Surface faulting and related effects: in Earthquake Engineering. R. L. Wiegel, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 47-74.

Cervelli, P., Murray, M.H., Segall, P., Aoki, Y. and Kato, T., 2001. Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan, J. Geophys. Res., 106(B6), 11,217–11,237.

Chapman, S., and Lindzen, R.S., 1970. Atmospheric Tides. D. Reidel Publishing, Dordrecht-Holland. 200pp.

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. Seismol. Soc. Am., 97(1B), 1-13.

Coppersmith, K.J., 1991. Seismic source characterization for engineering seismic hazard analyses. Proceeding Fourth International Conference on Seismic Zonation. Stanford University, 4, 3-60.

Cornell, C.A., and Winterstein, S.R., 1986. Applicability of the Poisson earthquake-occurrence model, in seismic hazard Methodology for the Central Eastern Unite Sates. EPRI Research Report NP-4736, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Comninou, M.A. and Dunders, J., 1975. The angular dislocation in a half-space. J. Elasticity, 5, 203-216.

Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996. Structural geology of rocks and regions. New York: John Wiley & Sons., 1-492

Davison, F.C., and Scholz, C.H., 1985. Frequency-Moment Distribution of Earthquakes in the Aleutian Arc, A Test of the Characteristic Earthquake Model. Bull. Seismo. Soc. Am., 75, 1349-1361.

Dragert, H., Wang, K. and James, T.S., 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia

subduction interface, Science, 292, 1525–1528.

Ellsworth, W.L., Matthews, M.V., Nadeau, R.M., Nishenko, S.P., Reasenberg, P.A., and Simpson, R.W., 1999. A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities. U. S. Geological Survey, OFR 99-522.

Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, eith aftershocks removed, poissonian? Bull. Seism. Soc. Am., 64, 1363-1367.

Gladwin, M.T., 1974. Ultrasonic stress monitoring in active sites: observation of the time dependence of stress relief mechanisms in mining pillars. Eos Trans. AGU, 55, 1192.

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., Gwyther, R.L., Higbie, J.W. and Hart, R.G., 1991. A medium term precursor to the Loma Prieta earthquake? Geophys. Res. Lett. 18, 1377-1380.

Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1944. Frequency of earthquake in California. Bull. Seism. Soc. Am., 34, 185-188.

Gomberg, J., et al., 2008. Widespread Triggering of Nonvolcanic Tremor in California, Science, 319(173), doi:10.1126/science.1149164.

Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. J. Geophys. Res., 84, 2348-2350.

Huang S.Y., Rubin, C.M., Chen, Y.G. and Liu. H.C., 2007. Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences 31, 265-276.

Hirose, H. and Obara, K., 2005. Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan. Earth, Planets and Space, 57, 961-972.

Hirose, H. and Obara, K., 2006. Short-term slow slip and correlated tremor episodes in the Tokai region, central Japan, Geophysical Research Letters, 33, L17311, doi:10.1029/2006

GL026579.

Ide et al., 2007. A scaling law for slow earthquake, Nature, 447, 76-79.

Johnston, M.J.S., Linde, A.T., Sacks, I.S. and Myren, D., 1986. Borehole dilatometer strain array- Preliminary results from Mojave Desert. Eos Trans. AGU, 63, 430.

Johnston, M.J.S., Linde, A.T. and Agnew, D.C., 1994. Continuous borehole strain in the San Andreas Fault zone before, during, and after the 28 June 1992, Mw 7.3 Landers, California Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 799-805.

Kao, H., Shan, S., Dragert, H., Rogers, G., Cassidy, J.F. and Ramachandran, K., 2005. A wide depth distribution of seismic tremors along the northern Cascadia margin, Nature, 436, 841-844.

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.

Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes. J. Geophys. Res., 82, 2981-2987.

Kagan, Y.Y. and Knopoff, L., 1987. Random stress and earthquake statistics; time dependence. J. Geophys. Res., 88, 723-731.

Kramer, S. L., 1996. Geotechnical Earthquake engineering. Prentic-Hall, Upper Saddle River. 653 pp.

La Rocca et al., 2009. Cascadia Tremor Located Near Plate Interface Constrained by S Minus P Wave Times, Science, 323, 620-623.

Lin, K.C., Hu, J.C., Ching, K.E., Angelier, J., Rau, R.J., Yu, S.B., Tsai, C.H., Shin, T.C. and Huang, M.H., 2010. GPS crustal deformation, strain rate and seismic activity after the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. J. Geophys. Res., doi:10.1029/2009JB006417. (in press)

Lee, S.J., and Ma, K.F., 2000. Rupture process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake from the inversion of teleseismic data. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 11, 591-608.

Matsuda, T., 1975. Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault associated. J. Seism. Soc., 2, 28, 268-283.

McCausland, W., Malone, S. and Johnson, D., 2005. Temporal and spatial occurrence of deep

non-volcanic tremor: From Washington to Northern California, Geophysical Research Letters, 32(24), L24311, doi:10.1029/2005GL024349.

Merz, H.A., and Cornell, C.A., 1973. Seismic Risk Analysis based on a Quadratic Magnitude-Frequency Law. Bull. Seism. Soc. Am., 63, 1999-2006.

Namson, J., 1984. Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan: (III) central part: Petrol. Geol. Taiwan, no. 20, 35-52.

National Research Council, 1988. Probabilistic Seismic Hazard Analysis. National Academic Press, Washington, D.C., 97pp.

Nikolaidis, R., 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Univ. of Calif. San Diego, San Diego., 249 pp.

Nadeau, R. and Dolenc, D., 2005. Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas Fault, Science, 307, 389.

Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, 296, 1679-1681.

Obara, K. and Hirose, H., 2006. Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone, Tectonophysics, 417(1-2), 33-51.

Roeloffs, E., 2005. Long-term trends in borehole strainmeter and tiltmeter data. 2005 Strainmeter and Tiltmeter Course.

Rogers, G. and Dragert, H., 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, Science, 300,1942-1943.

Schwartz, D.P., and Coppersmith, K.J., 1984. Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Example From the Wasatch and San Andreas Fault Zones. J. Geophys. Res., 89, 5681-5698.

Shaw, J., Plesch, A. and Planansky, G., 2004. Community Fault Model. Harvard College Geology Department.

Smith, R.B. and Bruhn, R.L., 1984. Intraplate extensional tectonics of the eastern Basin-Range: Inferences on structural style from seismic reflection data, regional tectonics, and thermo-mechanical models of brittle-ductile transition. J. Geophys. Res., 89, 5733-5762.

Slemmons, D.B., 1982. Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. Proceedings, 3rd International Earthquake Microzonation conference, Seattle, Washington, 1, 119-130.

Szeliga, W., Melbourne, T., Miller, M. and Santillian, V., 2004. Southern Cascadia episodic slow earthquakes, Geophysical Research Letters, 31, L16602, doi:10.1029/2004GL 020824.

Shelly et al., 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, Nature, 446, 305-307.

Schwartz, S.Y. and Rokosky, J.M., 2007. Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones, Reviews of Geophysics, 45, doi:10.1029/2006RG 000208.

Takemoto, S., Yamamoto, T., Mukai, A., Otsuka, S. and Fujimori, K., 2003. Crustal strain observation for nine years with a laser strainmeter in Kobe, Japan. J. Geody., 35, 483-498.

Tang, C.H., 1968. Photogeological observations on the low hilly terrain and coastal plain area of Hsinchu, Taiwan, Petroleum geology of Taiwan, no. 4, 35-52.

Thomas, A.L., 1993. Ploy3D: A three-dimensional, polygonal element, displacement discontinuity boundary element computer program with application to fractures, faults and cavities in the Earth's crust. M.S. Thesis, Stanford University, Stanford, CA, 97pp.

Uhrhammer, R.A., 1986. Characteristic of northern and central California seismicity. Abs. Earthquake Notes, 1, 21.

Wallace, R.E., 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. Geol. Soc. Am. Bull., 81, 2875-2889.

Watanabe, T., Hiramatsu, Y. and Obara, K., 2007. Scaling relationship between the duration and the amplitude of non-volcanic deep low-frequency tremors, Geophys. Res. Lett., 34, L07305, doi:10.1029/2007GL029391.

Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 974-1002.

Wesnousky, S.G., 1994. The Gutenberg-Richter or Characteristic Earthquake Distribution, Which Is It? Bull. Seismo. Soc. Am., 84, 1940-1959.

WG07, 2008, 2007 Working Group On California Earthquake Probabilities. The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2. USGS Open-File Report 07-1437.

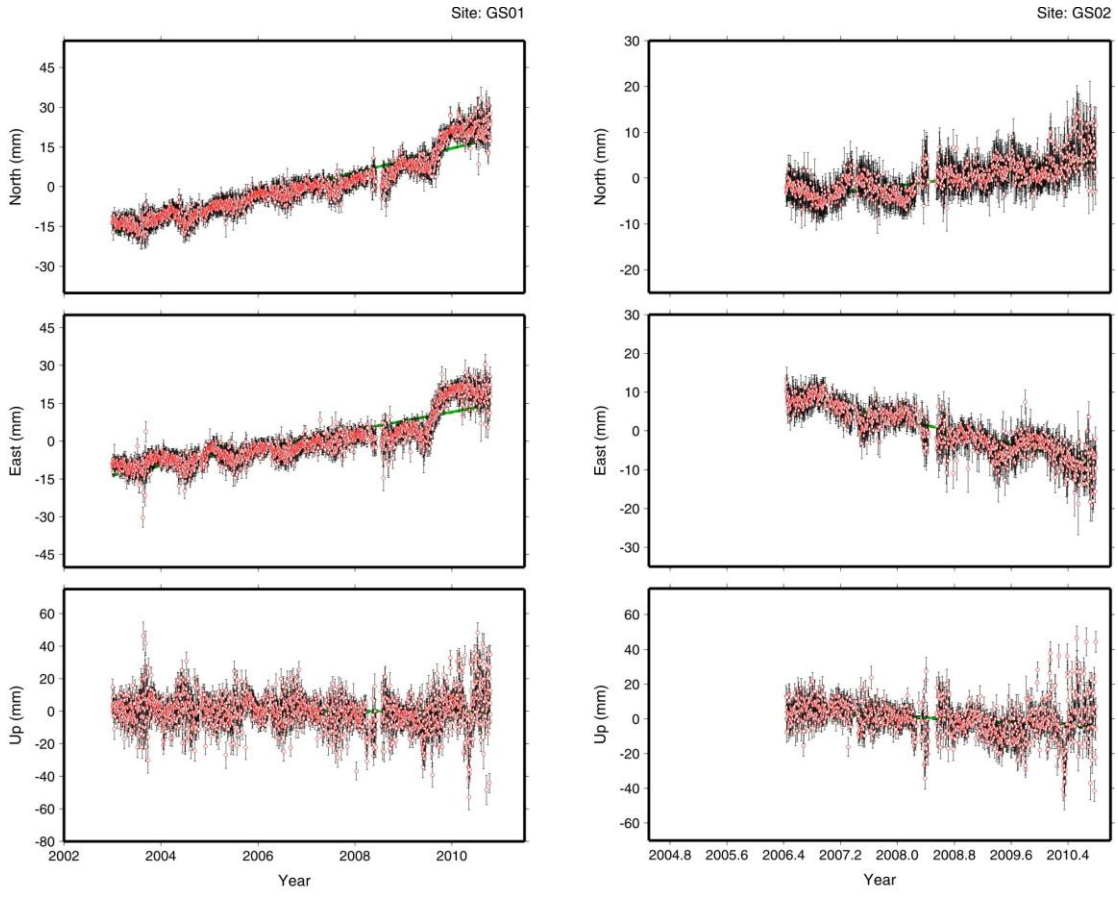
Working Group On California Earthquake Probabilities, 2003. Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002-2031.USGS Open-File Report 03-214.

Wyss, M., 1979. Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions. Geology, 7, 336-340.

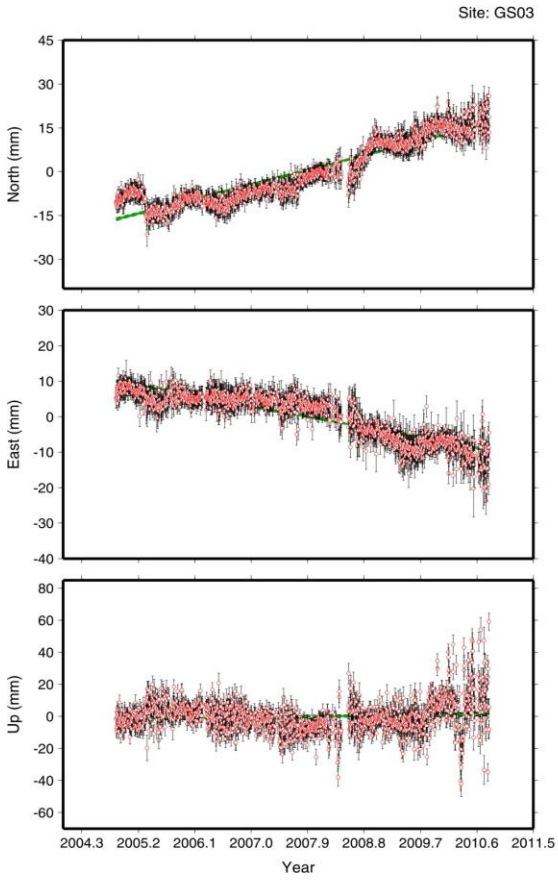
Youngs, R.R. and Coppersmith, K.J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bull. Seism. Soc. Am., 75, 939-964.

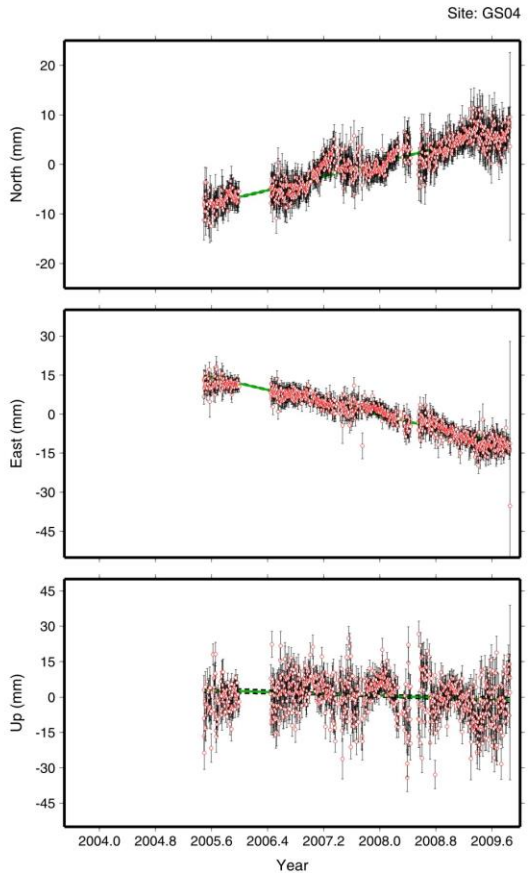
Zadro, M., Plenizio, E., Ebblin, C. and Chiaruttini, C., 1988. Influence of groundwater table level variations and of rainfall on tilting in the Friuli area, NE, Italy. Acta Geophysica Polonica, 35, 323-338.

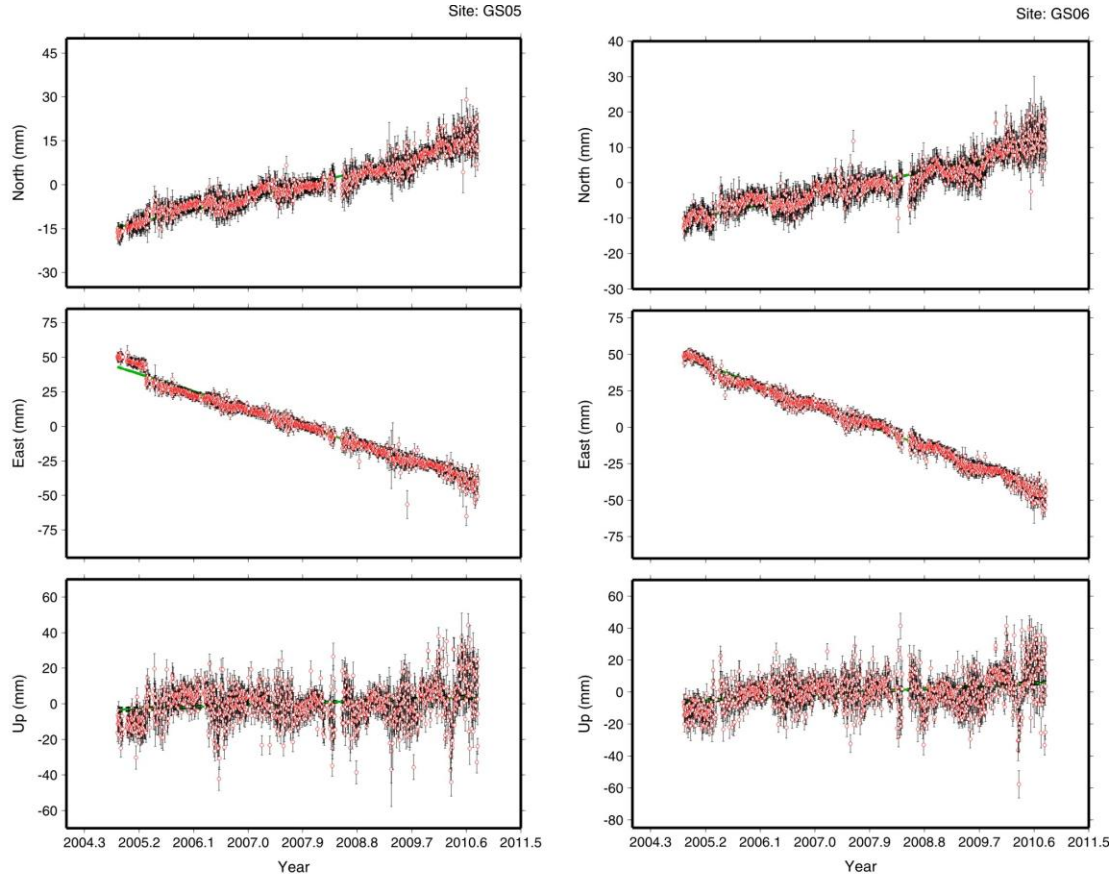
附錄 A 中央地質調查所 GPS 連續站時間序列


Site: GS01
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

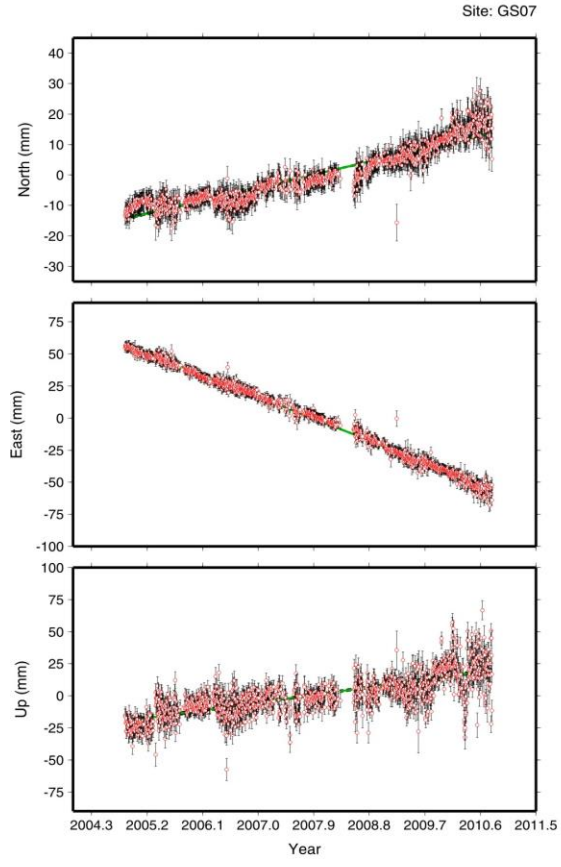
Site: GS02
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

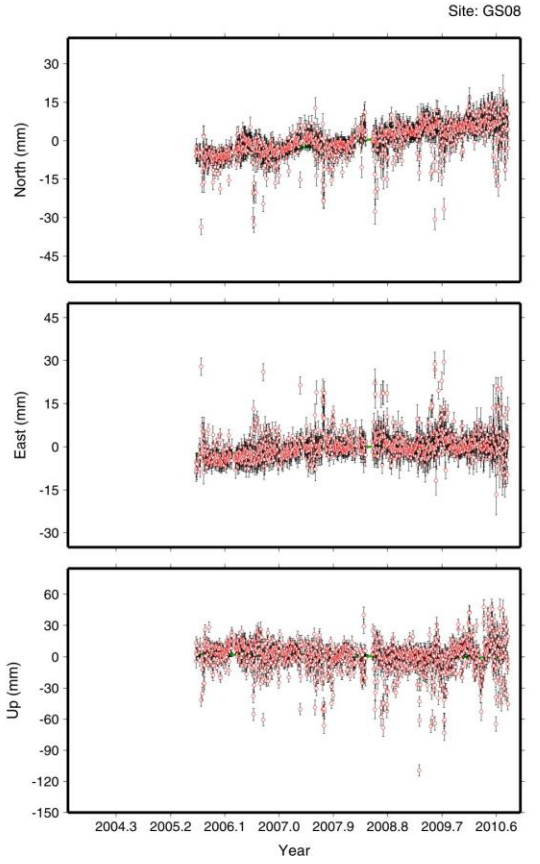

Site: GS03
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

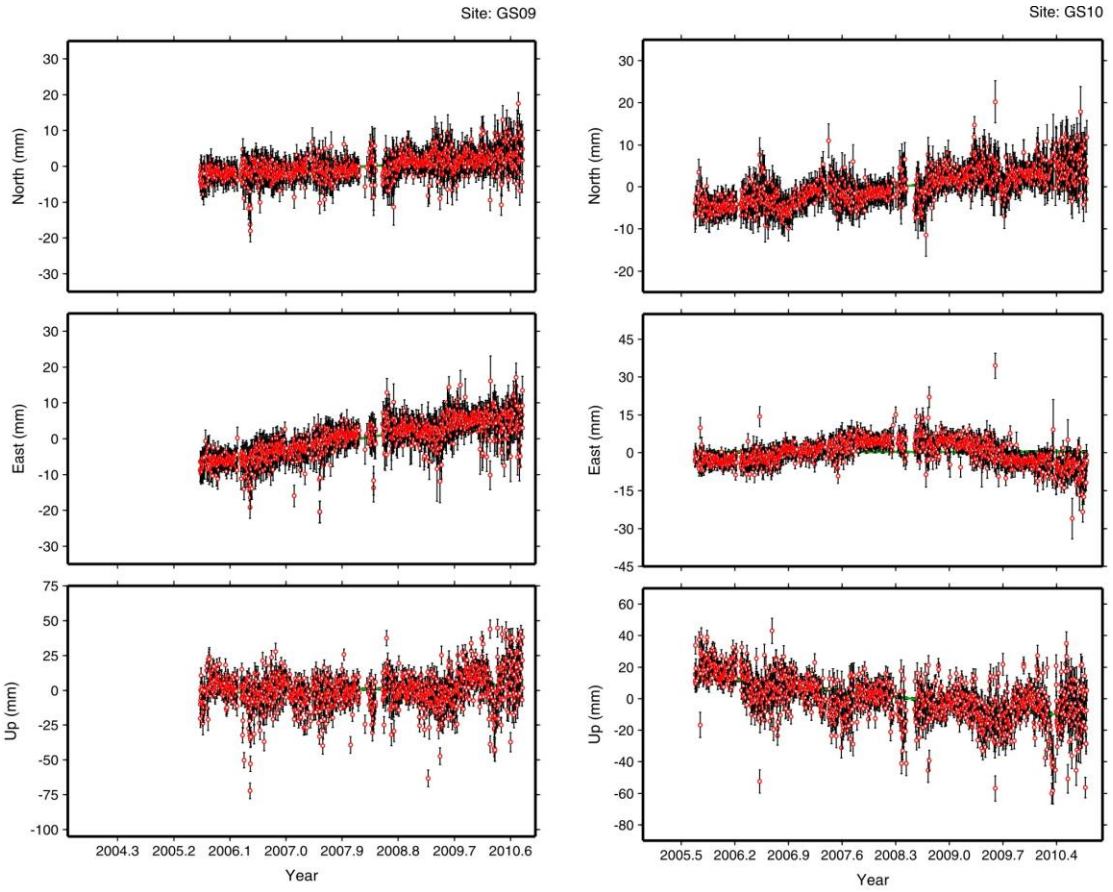

Site: GS04
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year


Site: GS05
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6 2011.5

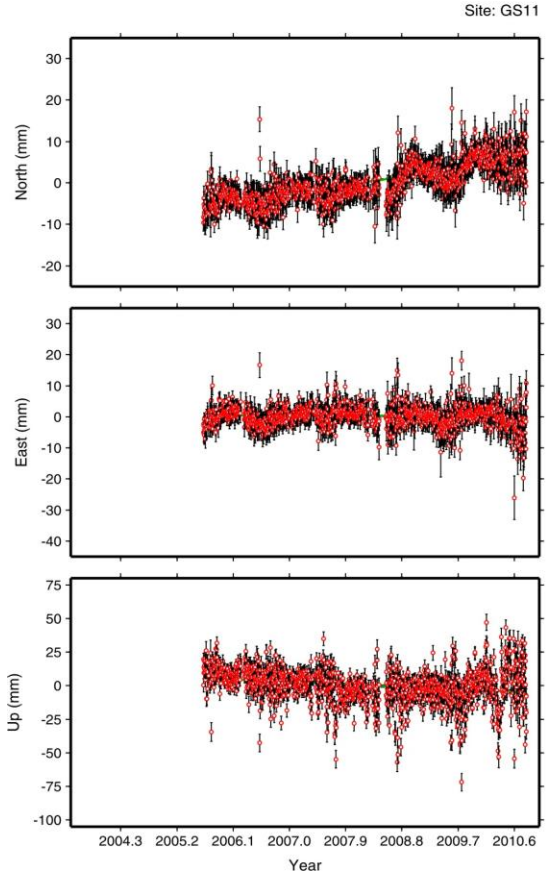
Site: GS06
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6 2011.5

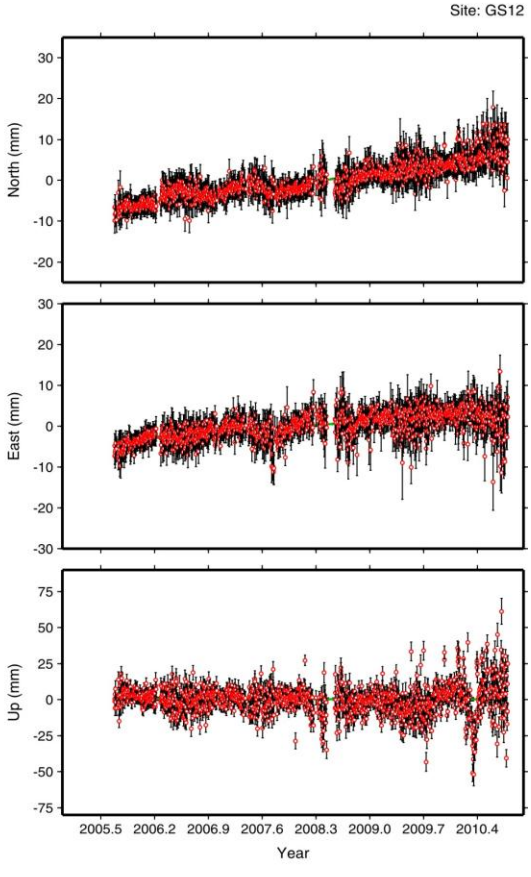

Site: GS07
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6 2011.5

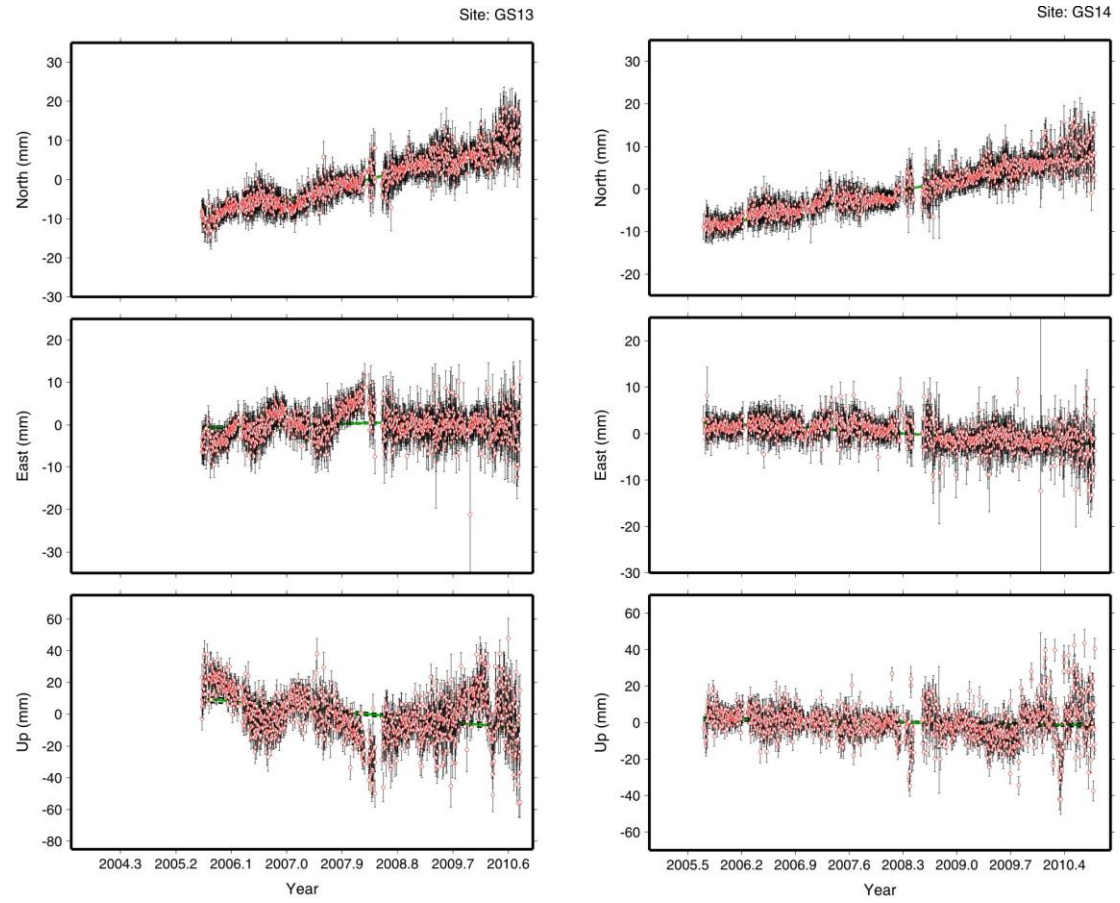

Site: GS08
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6


Site: GS09
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6
Year

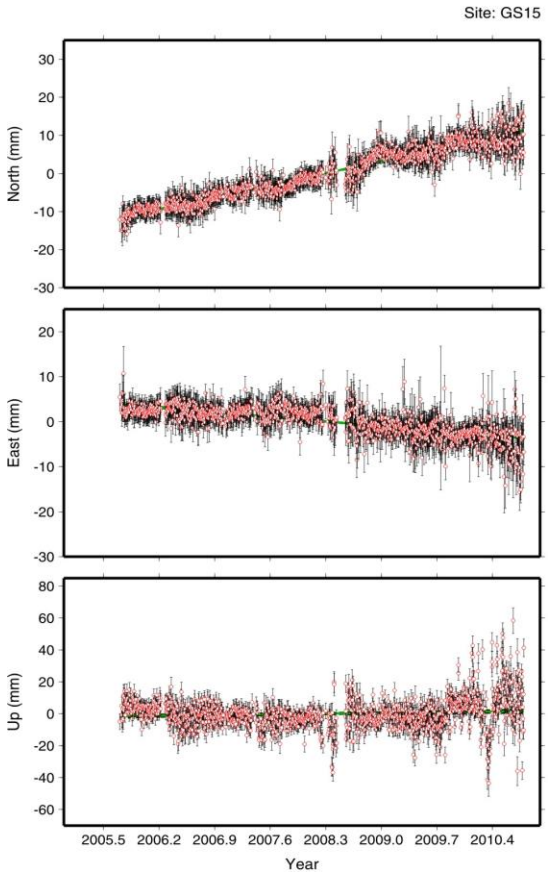
Site: GS10
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2005.5 2006.2 2006.9 2007.6 2008.3 2009.0 2009.7 2010.4
Year

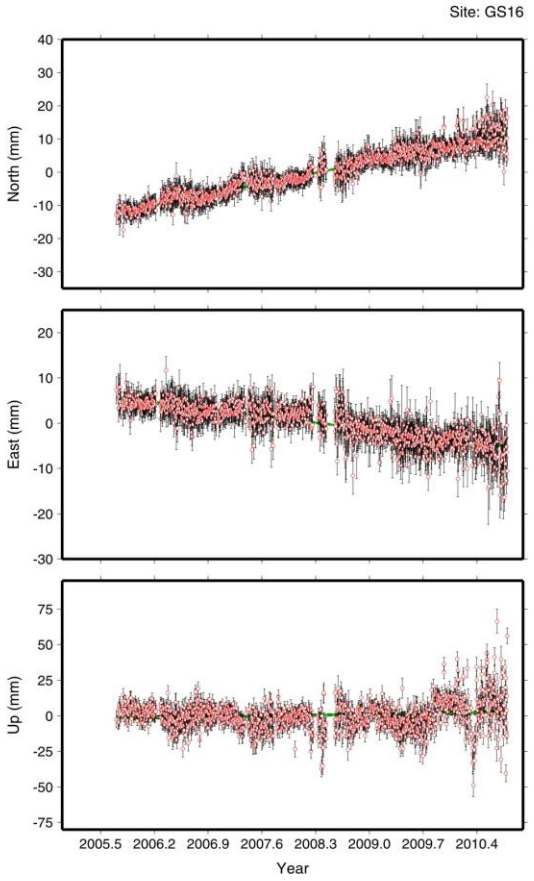

Site: GS11
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6
Year

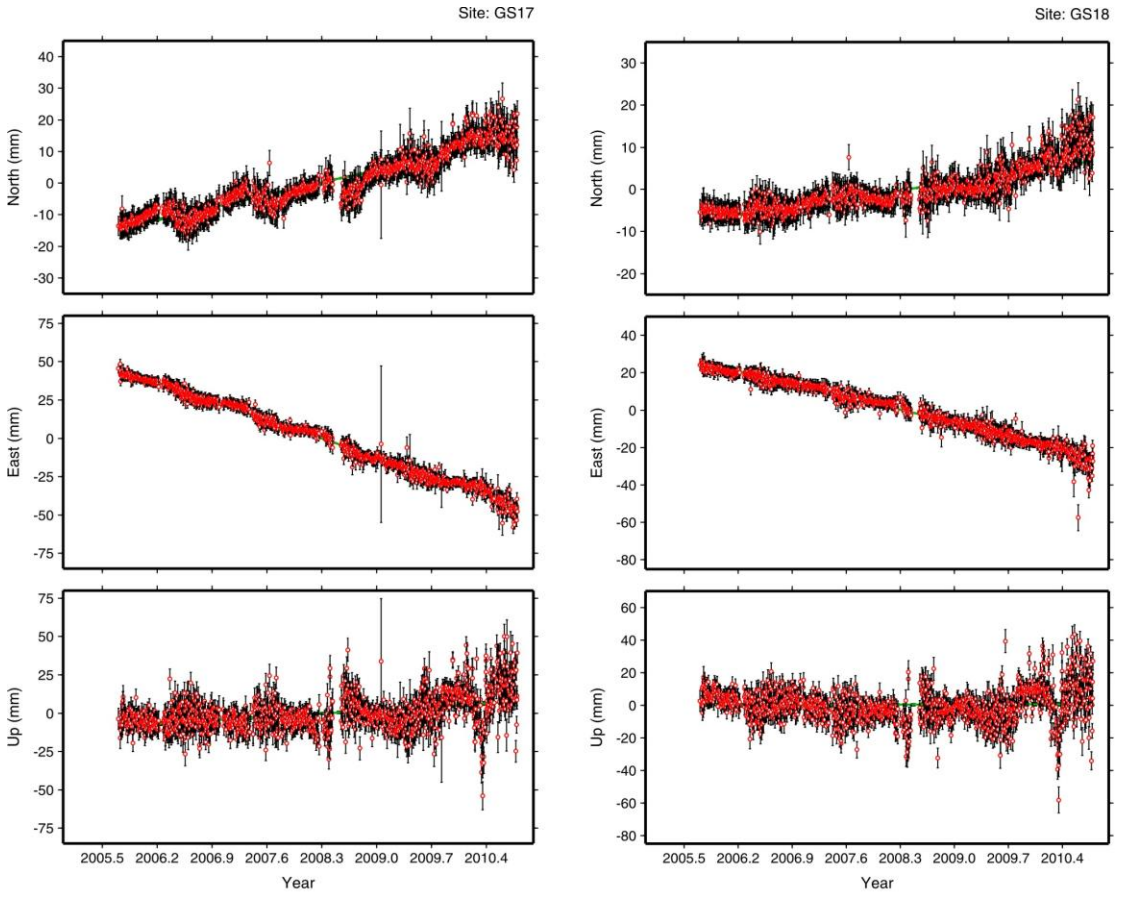

Site: GS12
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2005.5 2006.2 2006.9 2007.6 2008.3 2009.0 2009.7 2010.4
Year

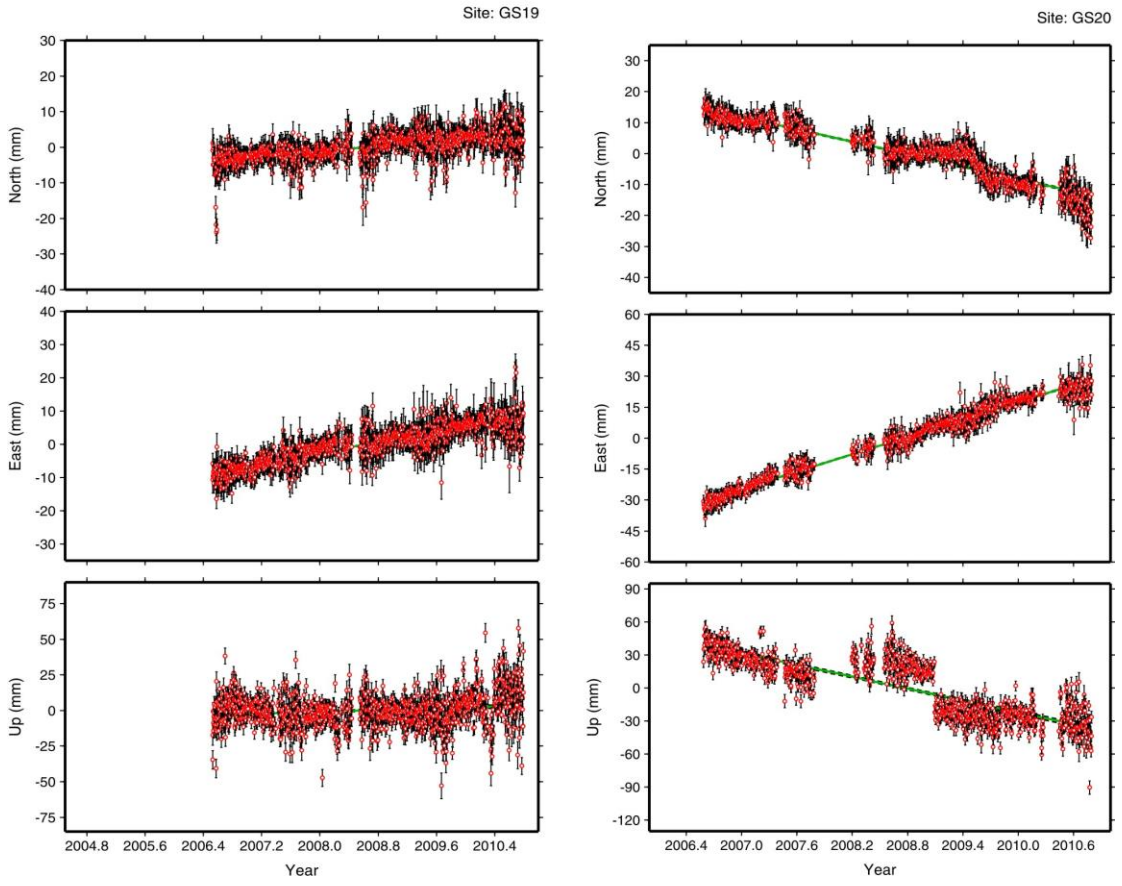

Site: GS13
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.3 2005.2 2006.1 2007.0 2007.9 2008.8 2009.7 2010.6
Year

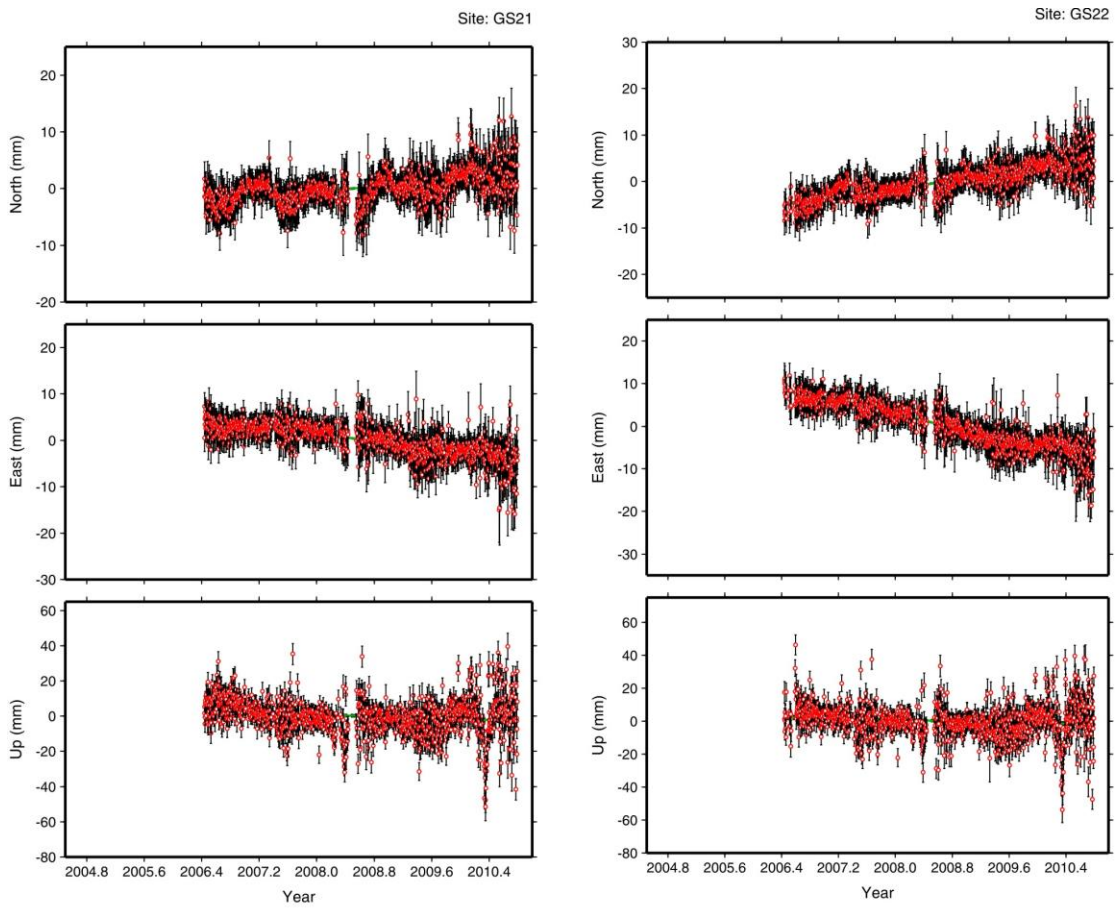
Site: GS14
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2005.5 2006.2 2006.9 2007.6 2008.3 2009.0 2009.7 2010.4
Year


Site: GS15
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2005.5 2006.2 2006.9 2007.6 2008.3 2009.0 2009.7 2010.4
Year

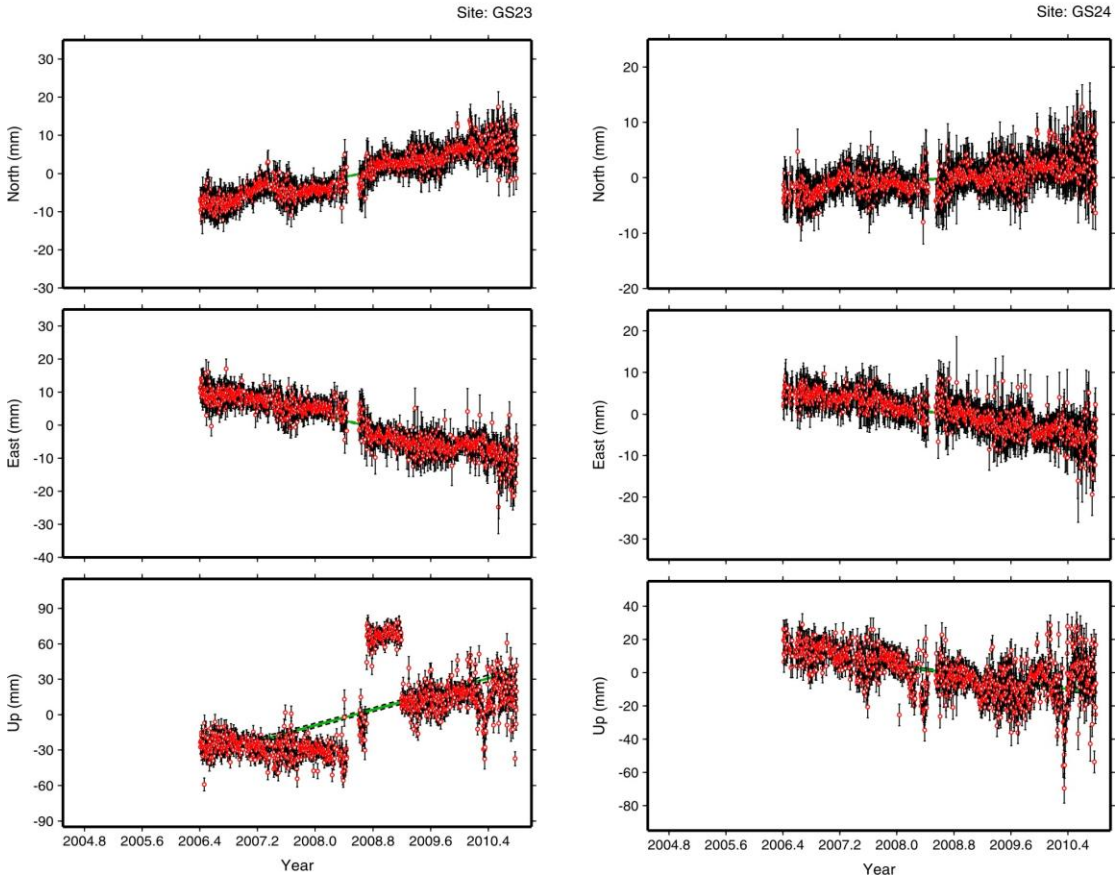

Site: GS16
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2005.5 2006.2 2006.9 2007.6 2008.3 2009.0 2009.7 2010.4
Year


Site: GS17
Site: GS18
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2005.5 2006.2 2006.9 2007.6 2008.3 2009.0 2009.7 2010.4
Year

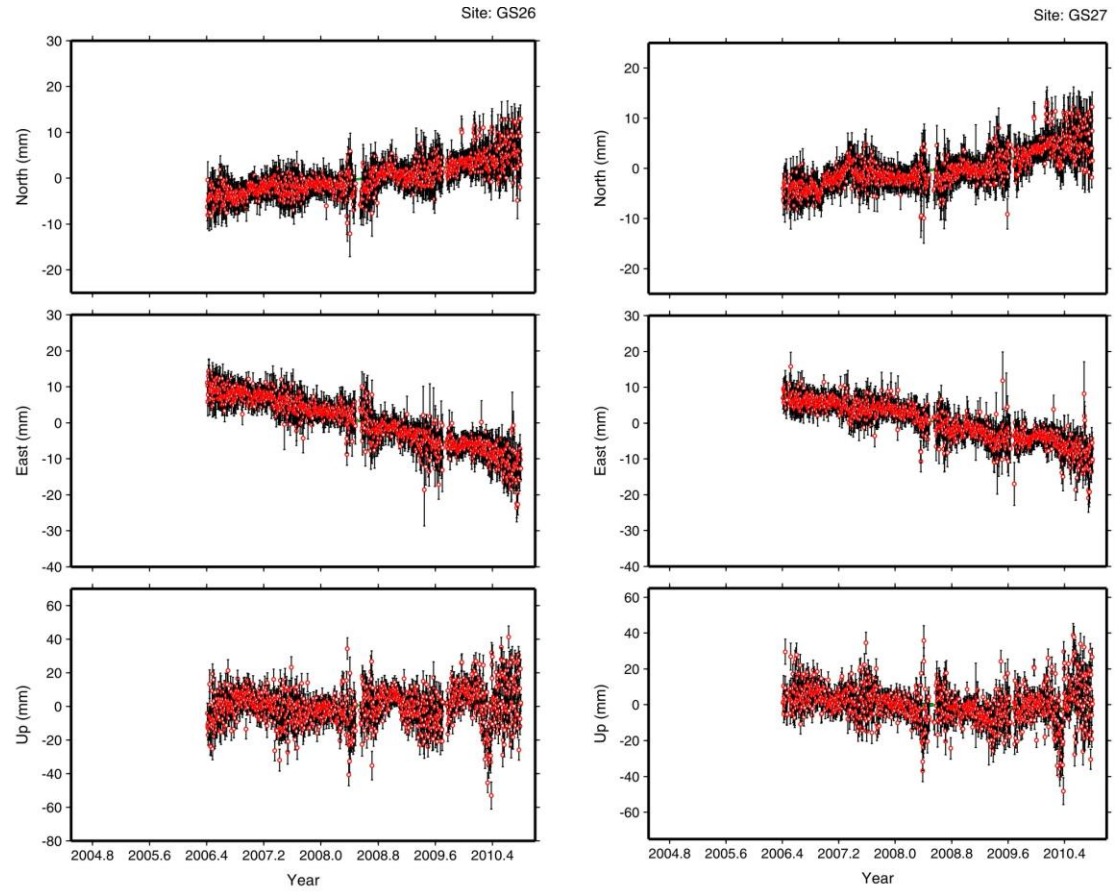

Site: GS19
Site: GS20
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4
2006.4 2007.0 2007.6 2008.2 2008.8 2009.4 2010.0 2010.6
Year


Site: GS21
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4
Year

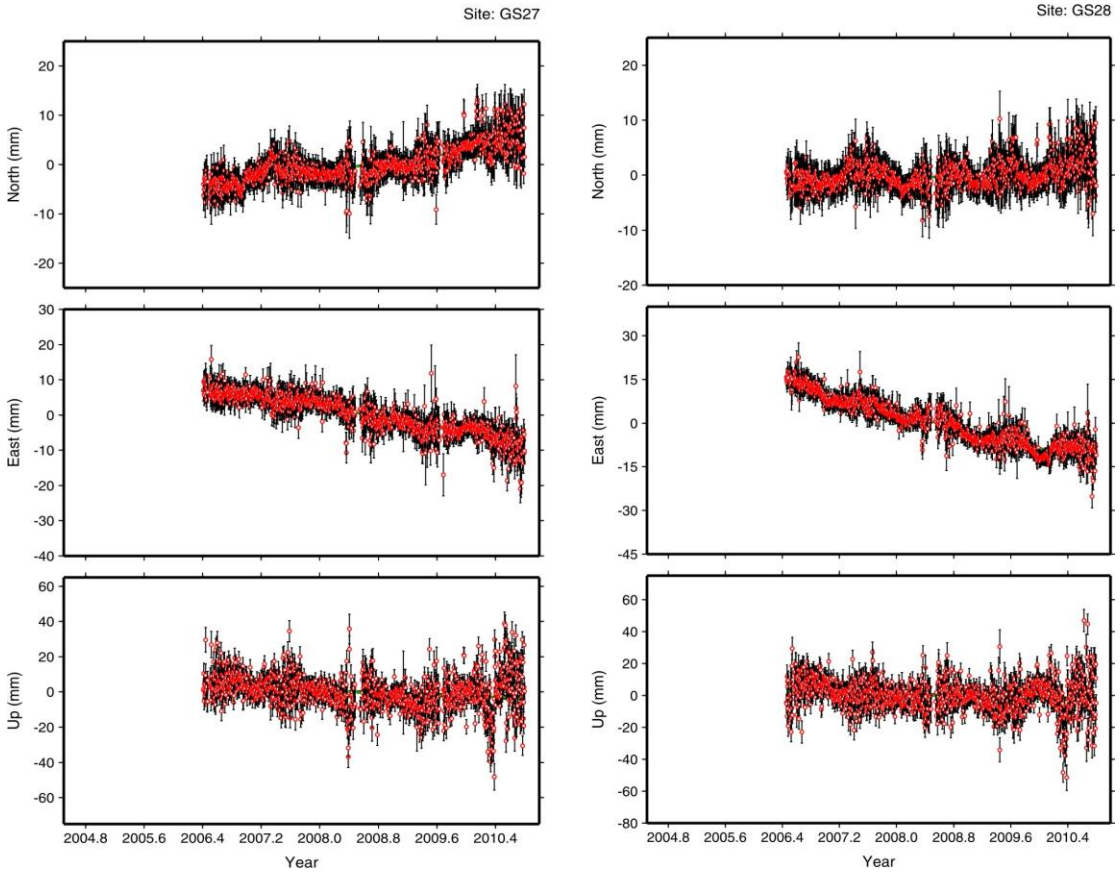
Site: GS22
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4
Year

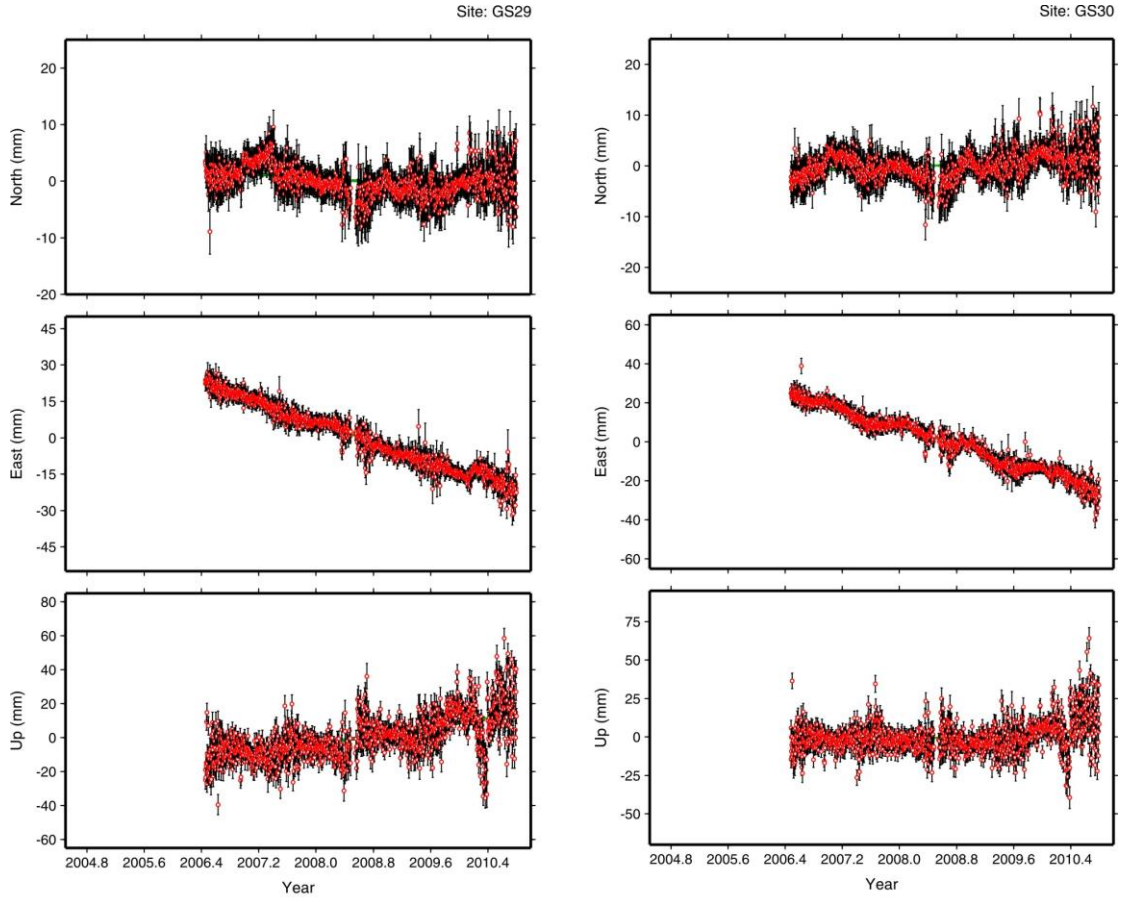

Site: GS23
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4
Year

Site: GS24
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4
Year

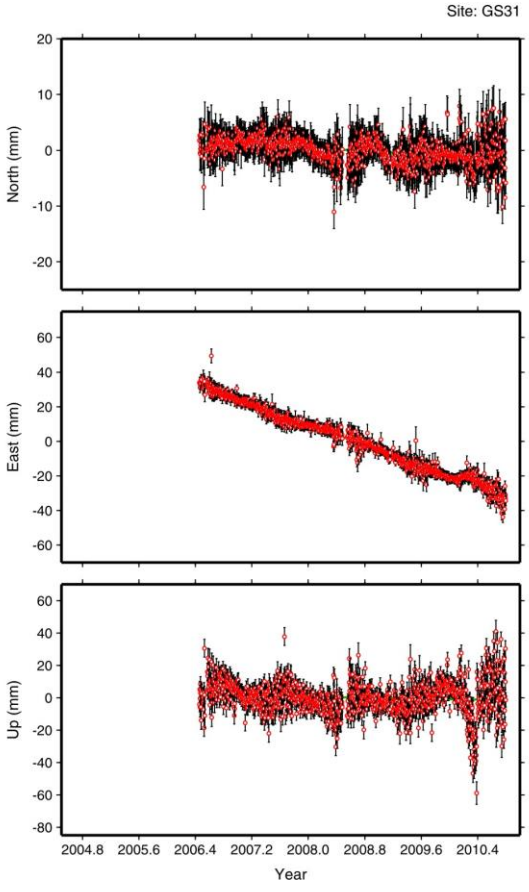

Site: GS26
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

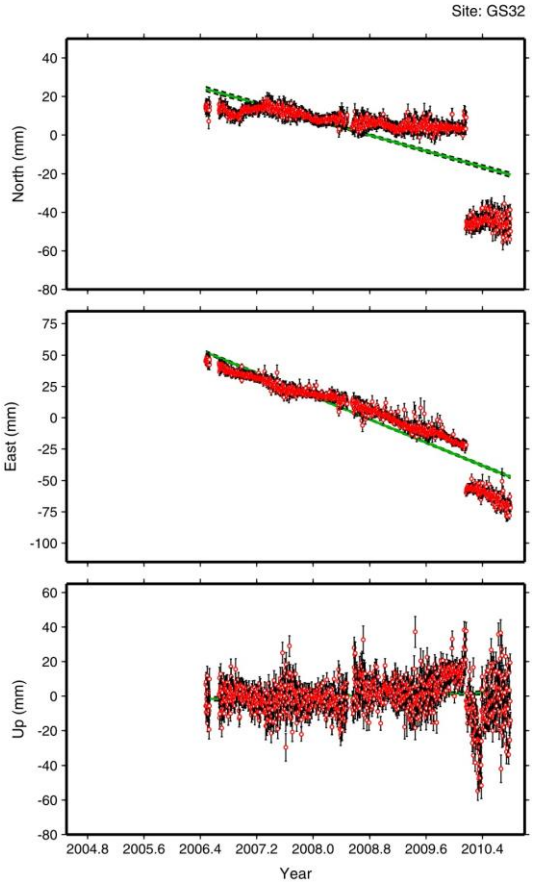
Site: GS27
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

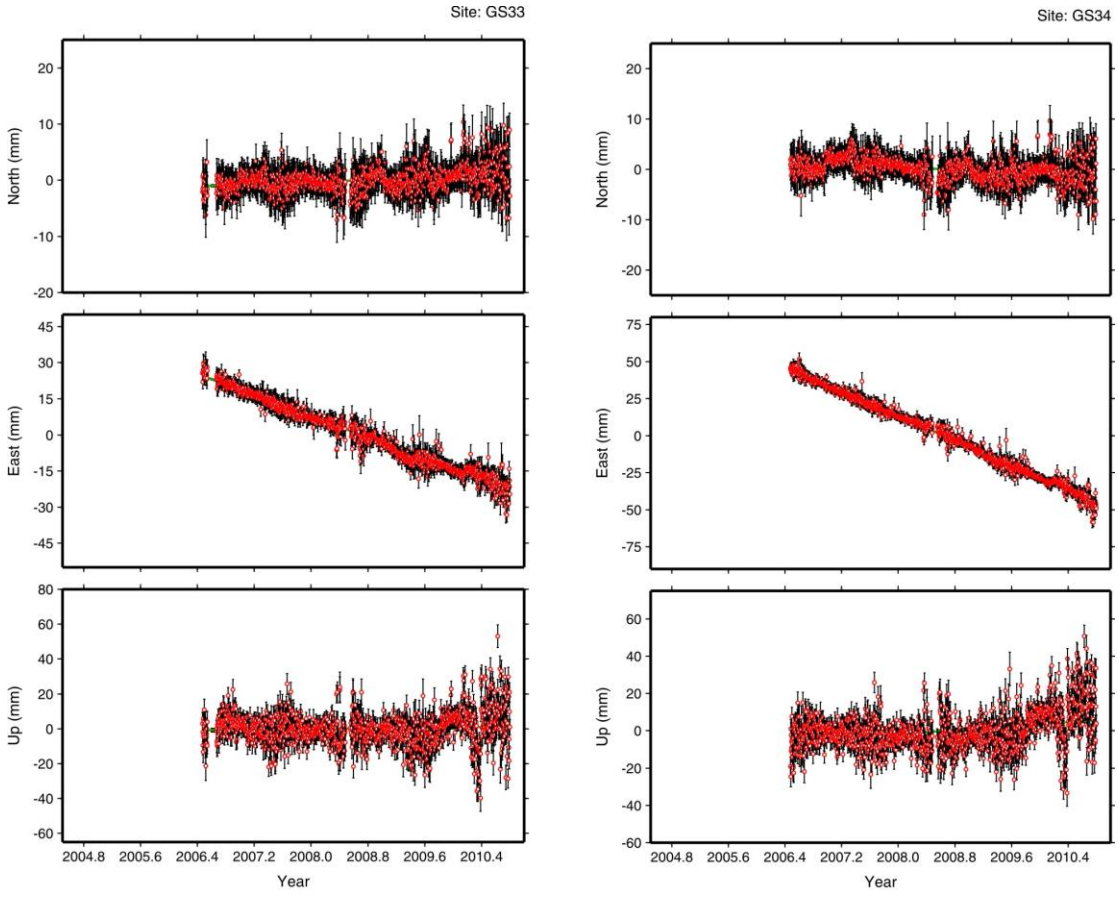

Site: GS27
Site: GS28
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4


Site: GS29
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

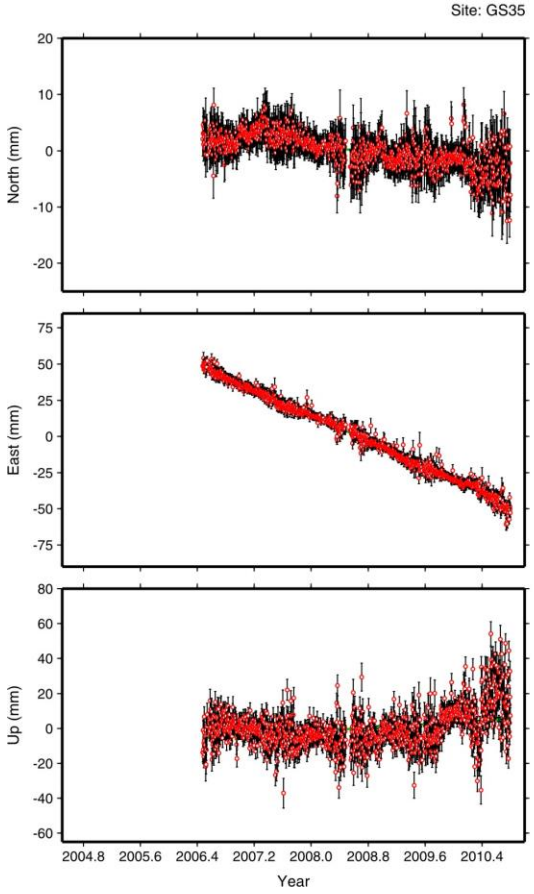
Site: GS30
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

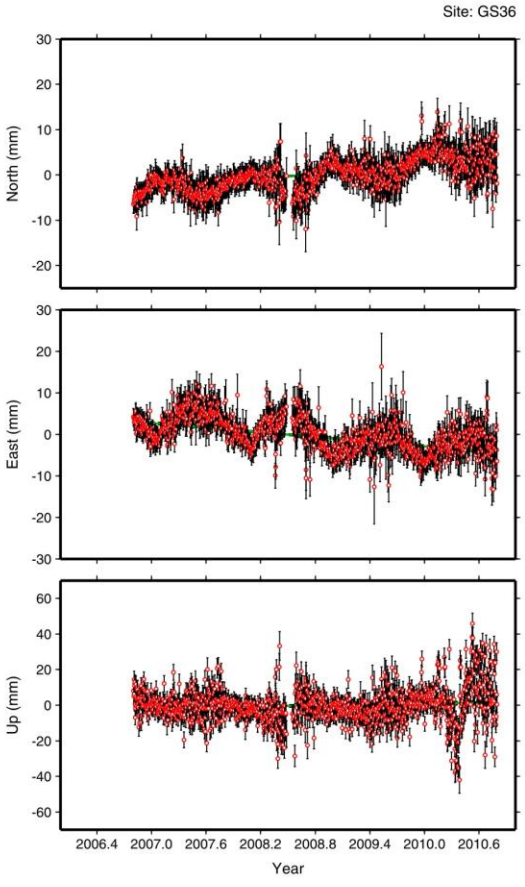

Site: GS31
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

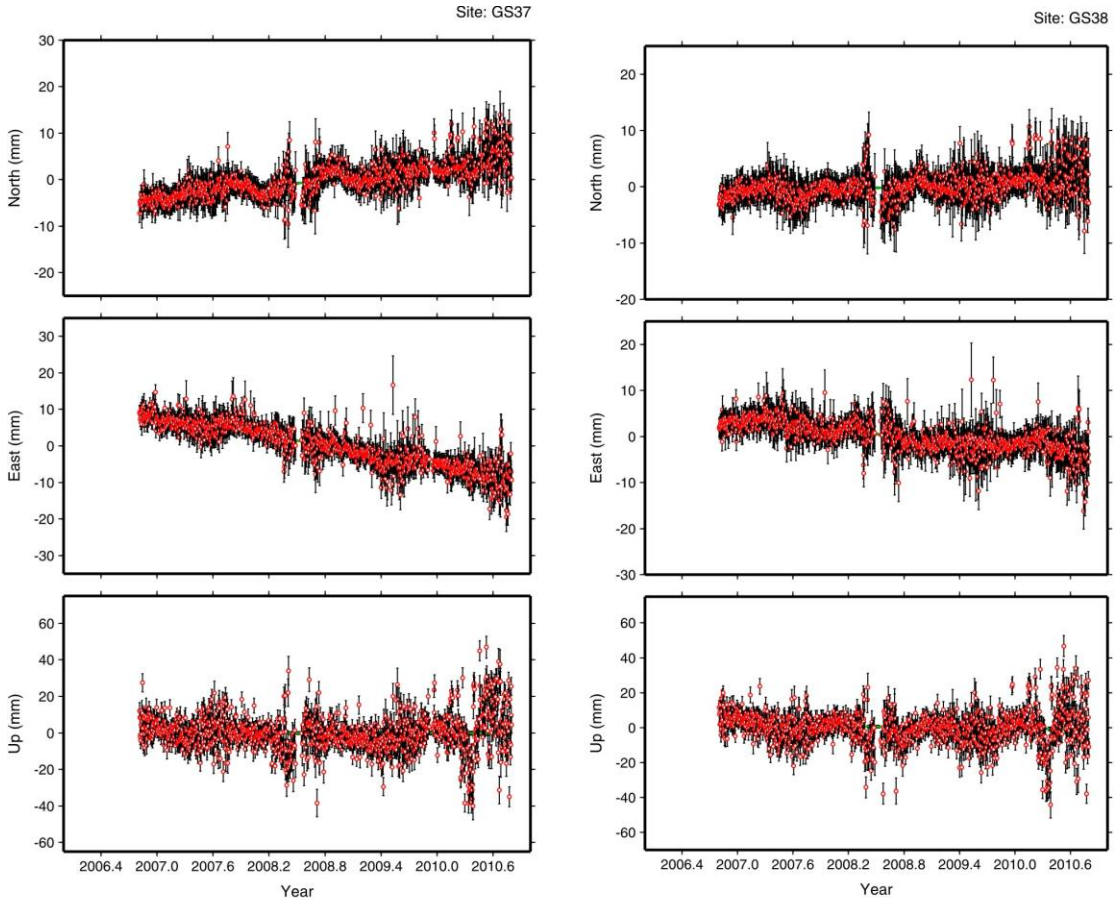

Site: GS32
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

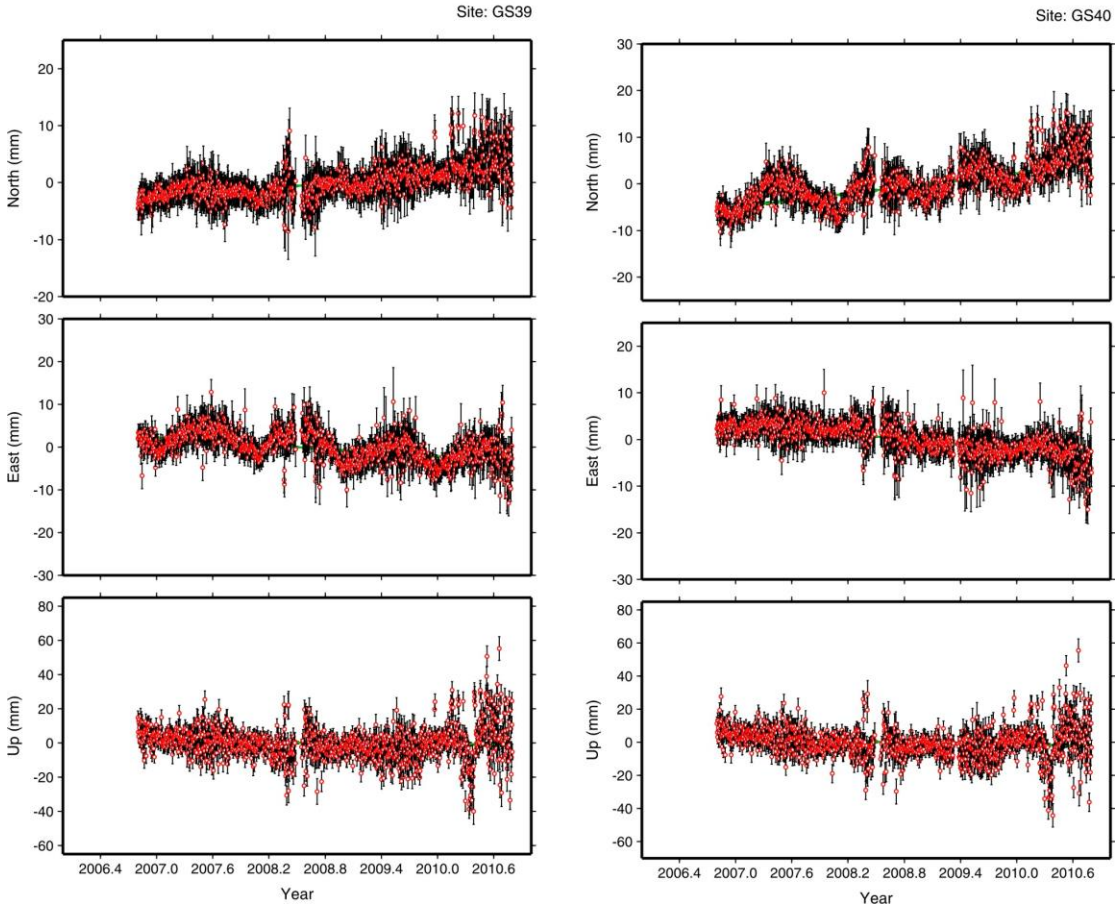

Site: GS33
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

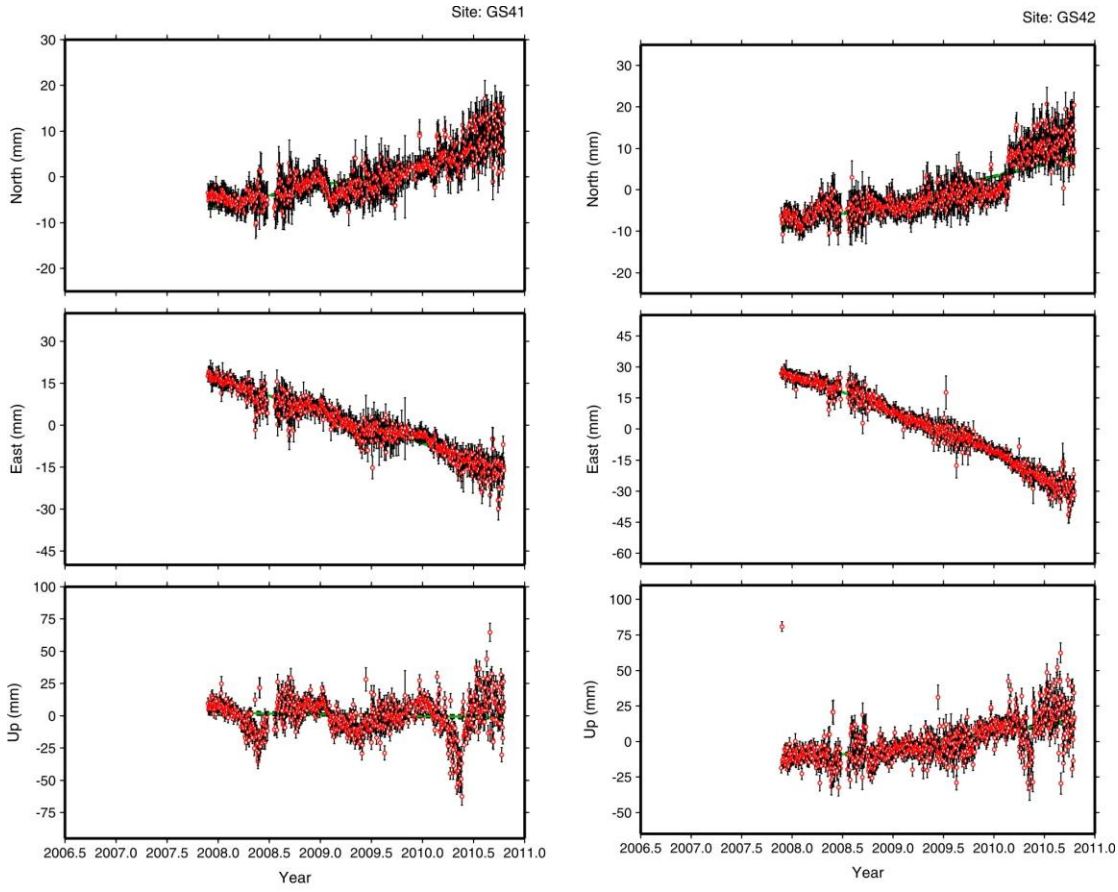
Site: GS34
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

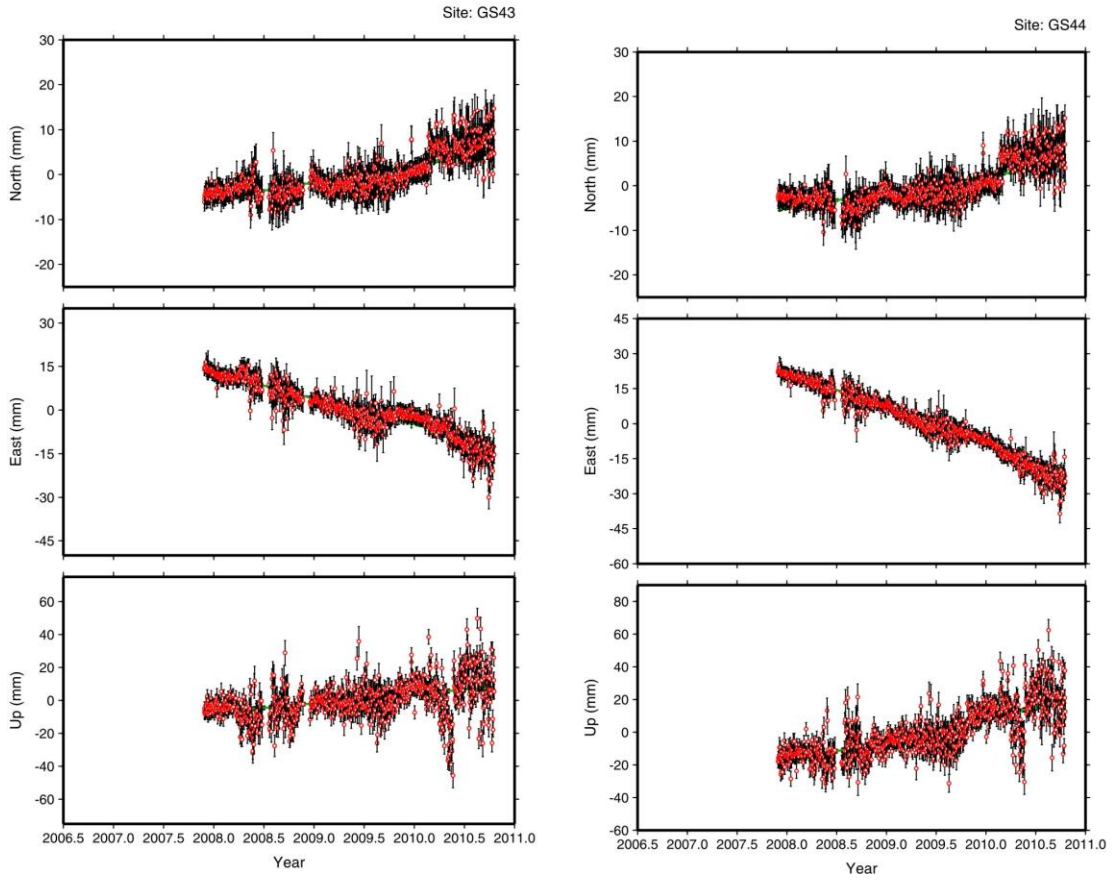

Site: GS35
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2004.8 2005.6 2006.4 2007.2 2008.0 2008.8 2009.6 2010.4

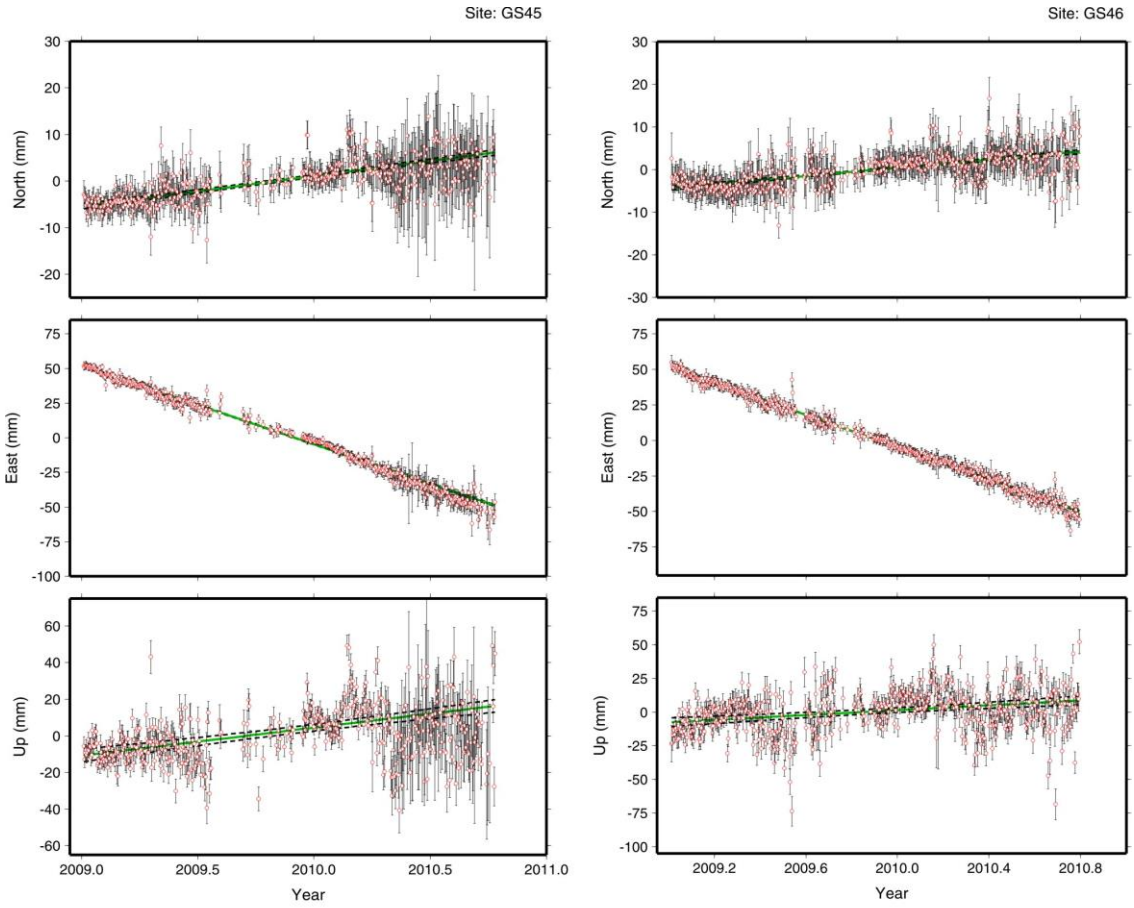

Site: GS36
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2006.4 2007.0 2007.6 2008.2 2008.8 2009.4 2010.0 2010.6


Site: GS37
Site: GS38
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2006.4 2007.0 2007.6 2008.2 2008.8 2009.4 2010.0 2010.6
Year

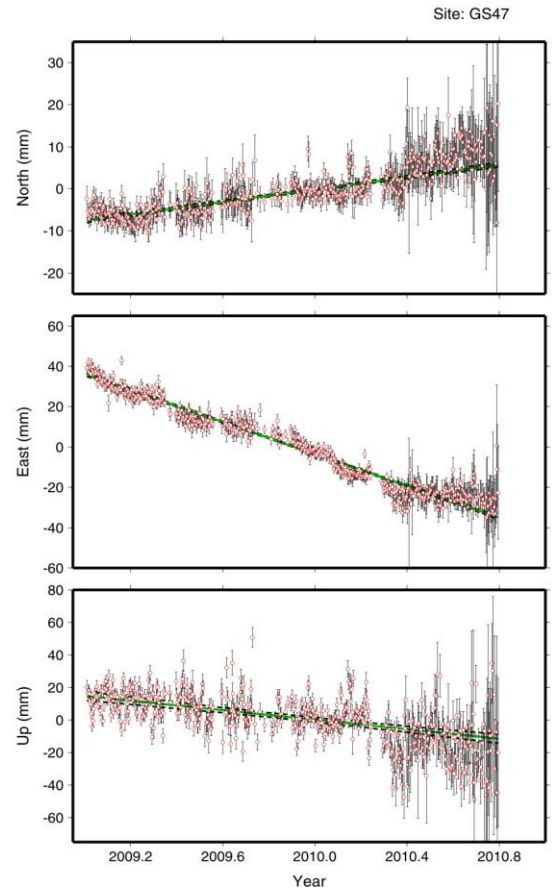

Site: GS39
Site: GS40
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2006.4 2007.0 2007.6 2008.2 2008.8 2009.4 2010.0 2010.6
Year

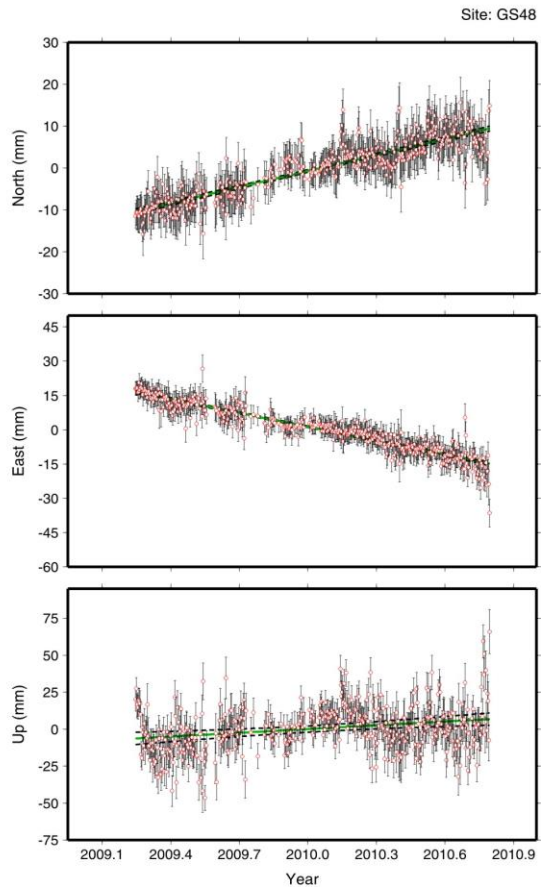

Site: GS41
Site: GS42
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2006.5 2007.0 2007.5 2008.0 2008.5 2009.0 2009.5 2010.0 2010.5 2011.0

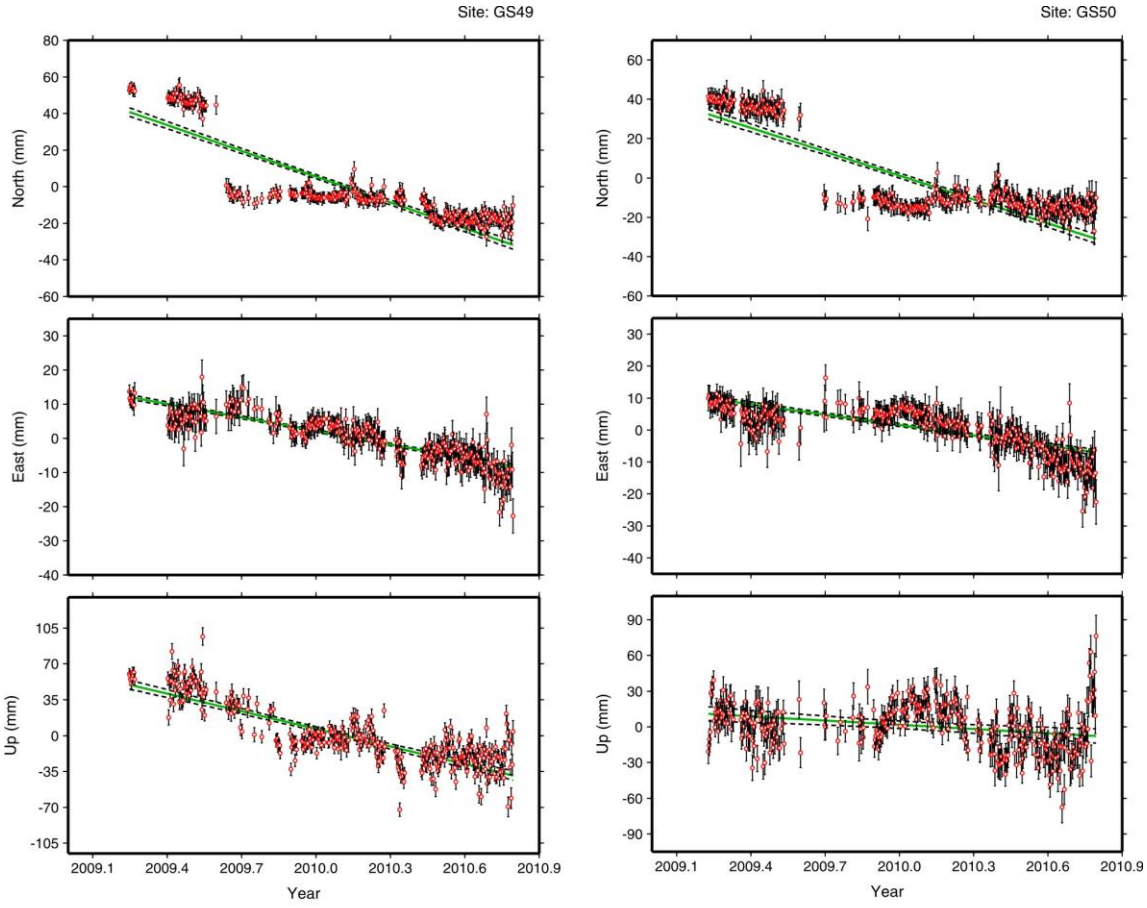

Site: GS43
Site: GS44
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2006.5 2007.0 2007.5 2008.0 2008.5 2009.0 2009.5 2010.0 2010.5 2011.0

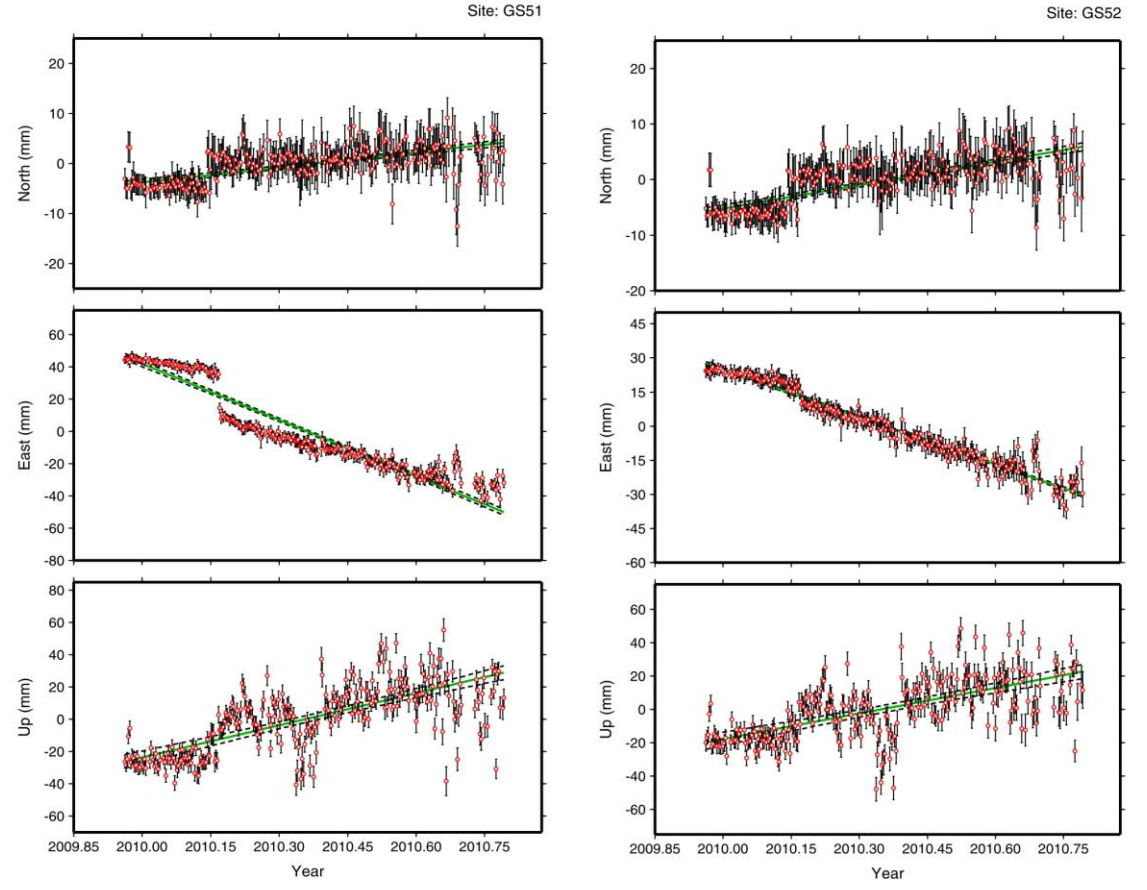

Site: GS45
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

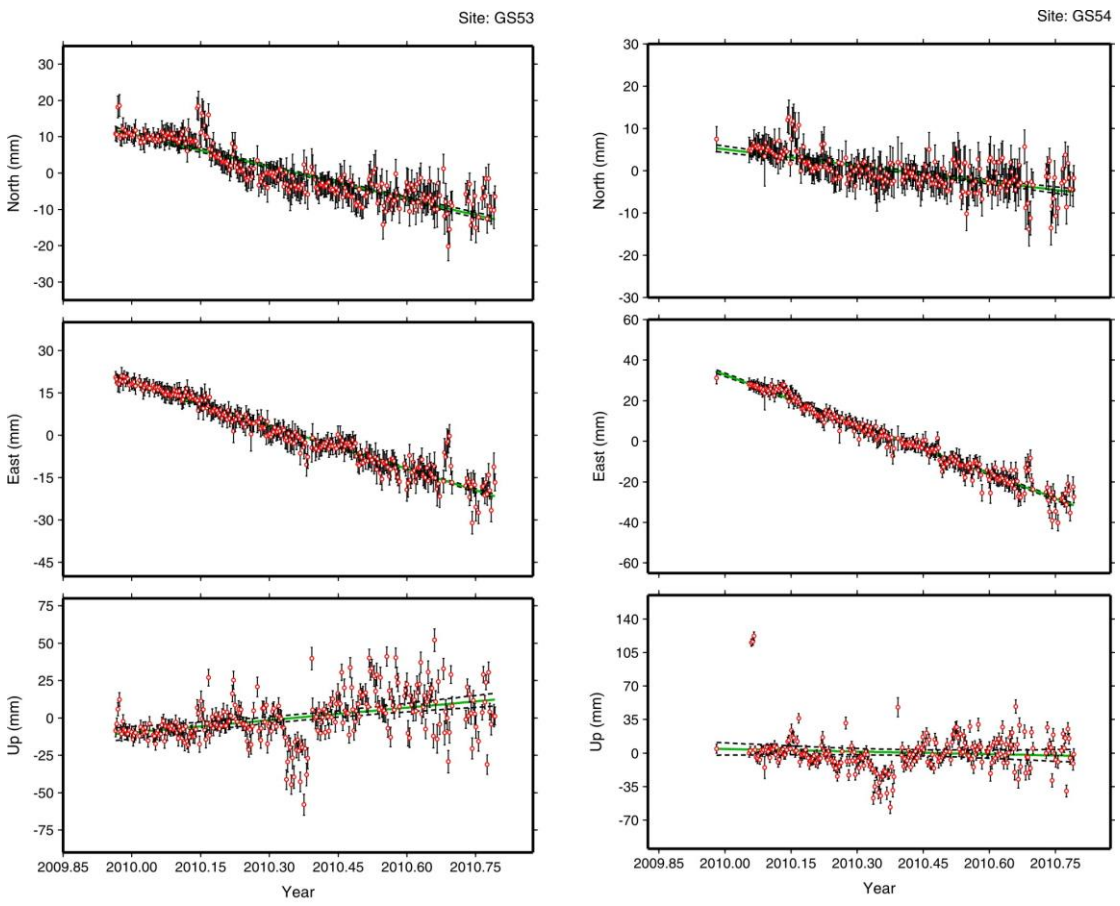
Site: GS46
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year


Site: GS47
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

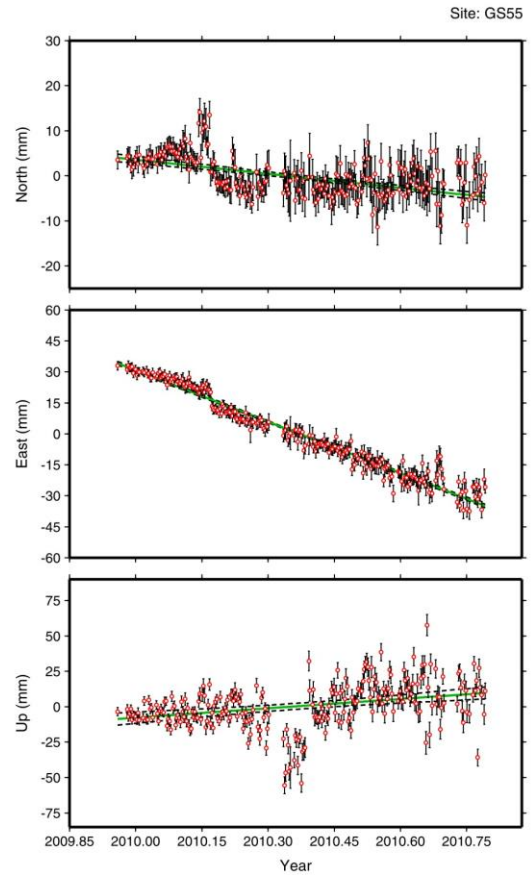

Site: GS48
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

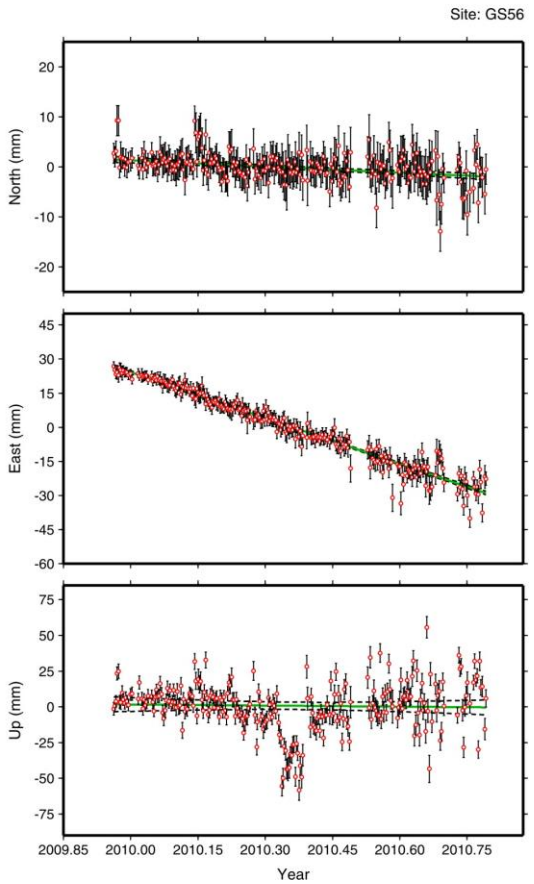

Site: GS49
Site: GS50
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

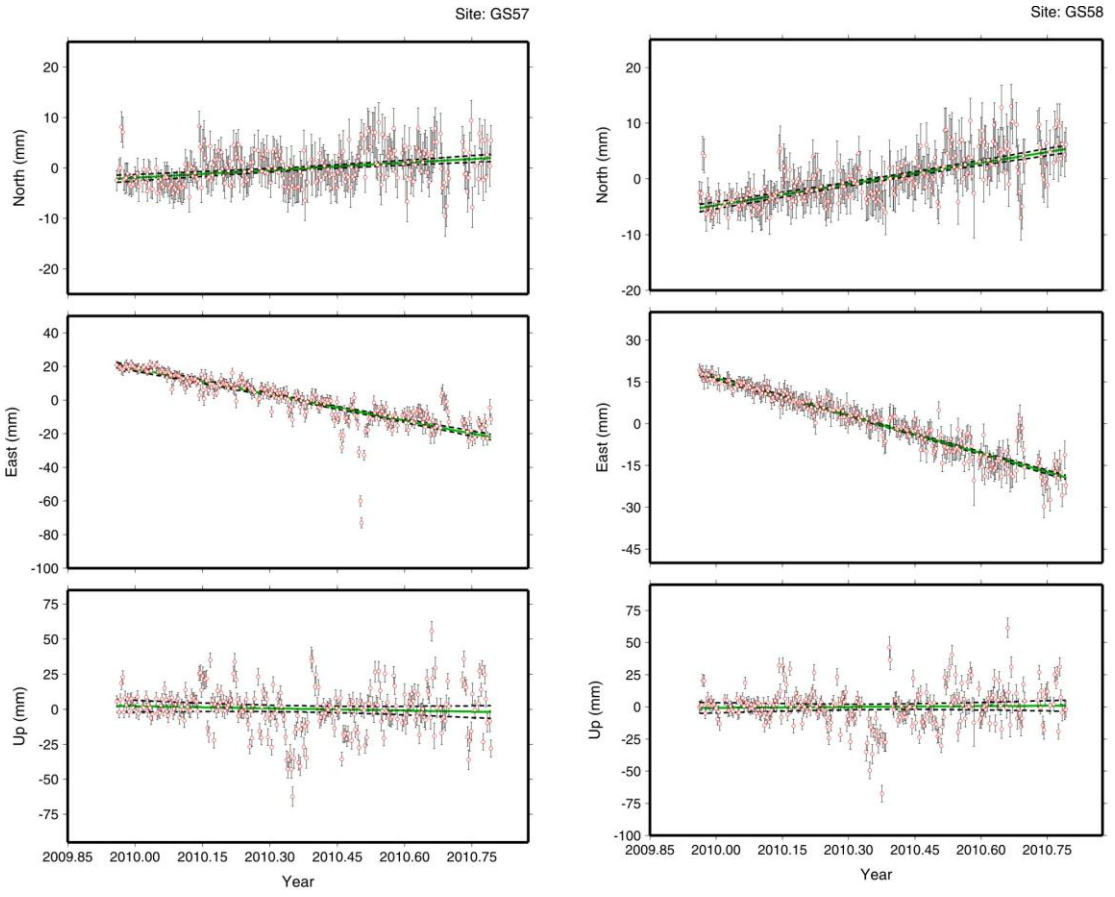

Site: GS51
Site: GS52
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

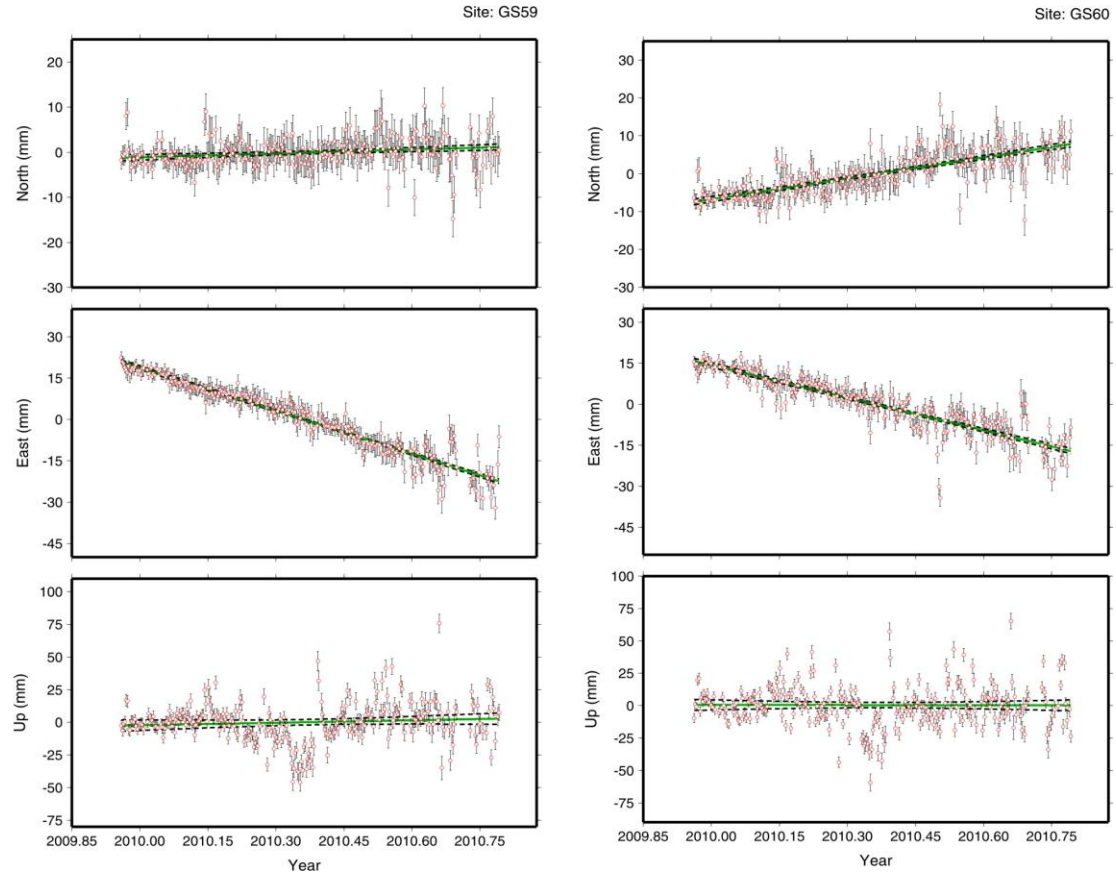

Site: GS53
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2009.85 2010.00 2010.15 2010.30 2010.45 2010.60 2010.75
Year

Site: GS54
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2009.85 2010.00 2010.15 2010.30 2010.45 2010.60 2010.75
Year


Site: GS55
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2009.85 2010.00 2010.15 2010.30 2010.45 2010.60 2010.75
Year


Site: GS56
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2009.85 2010.00 2010.15 2010.30 2010.45 2010.60 2010.75
Year


Site: GS57
Site: GS58
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2009.85
2010.00
2010.15
2010.30
2010.45
2010.60
2010.75


Site: GS59
Site: GS60
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2009.85
2010.00
2010.15
2010.30
2010.45
2010.60
2010.75

附錄 B　Poly3D 理論基礎簡介

在本計畫中，以 Poly3D 軟體進行斷層面錯動對地表地形變動的模擬分析，本節中將先就 Poly3D 理論基礎簡要說明。

Poly3D 為 Thomas (1993)以 C 語言所撰寫而成的，是以邊界元素法（BEM，Boundary Element Method）及位移不連續的多邊形平面元素來計算線彈性、均值且等向之空間中的準靜態位移。每個多邊形元素可視為斷層面的一部分，每個元素由斷層面上數個網格點（vertex）依一定順序連結而成，將元素集合則可成為一個物件，如斷層面（圖B.1）。

在 Poly3D 程式中將岩體視為均勻分布的格點之集合，以離散數學的概念，將連續體分解成許多格點來模擬原來連續體的形貌。這樣的方式使得代表岩體的格點可視為結晶晶格中的原子排列，而當晶格受外力會使原子產生錯動（Dislocation），可視為岩體的錯動（圖B.2），錯動的方向與錯動量便可用柏格向量（Burgers vector）來表示。這樣的觀念再經由角度錯動（Angular dislocation）理論，最後則可以疊加方式產生多邊形元素的錯動柏格向量（圖B.3、B.4），同時更將角度錯動導入無限空間的彈性場中，進而可以知道空間中某一點由於角度錯動而產生的位移分量。

在半空間中的任意座標點 x，其位移的分量 u_i 可由角度錯動所產生：

$$\vec{u}_i = U_{ij}\left(x;\xi,\beta,\omega\right)\vec{b}_j \tag{B-1}$$

（F-1）式中，U_{ij} 是『位移影響係數』（displacement influence coefficients），藉由 ξ、β、ω 所定義的柏格向量 b（Burgers Vector）可以計算出半空間中 x 位置的位移分量。如果物件是由一個以上的元素所組成，那麼M 個多邊形元素對 x 位置造成的位移 u 可以疊加的方式求得：

$$\vec{u}_i = \sum_{m=1}^{M} {}^{m^e}U_{ij}\,\vec{b}_j^{\,m} \tag{B-2}$$

其中 ${}^{m^e}U_{ij}$ 為第m個元素的位移影響係數，$\vec{b}_j^{\,m}$ 為第 m 個元素的柏格向量。

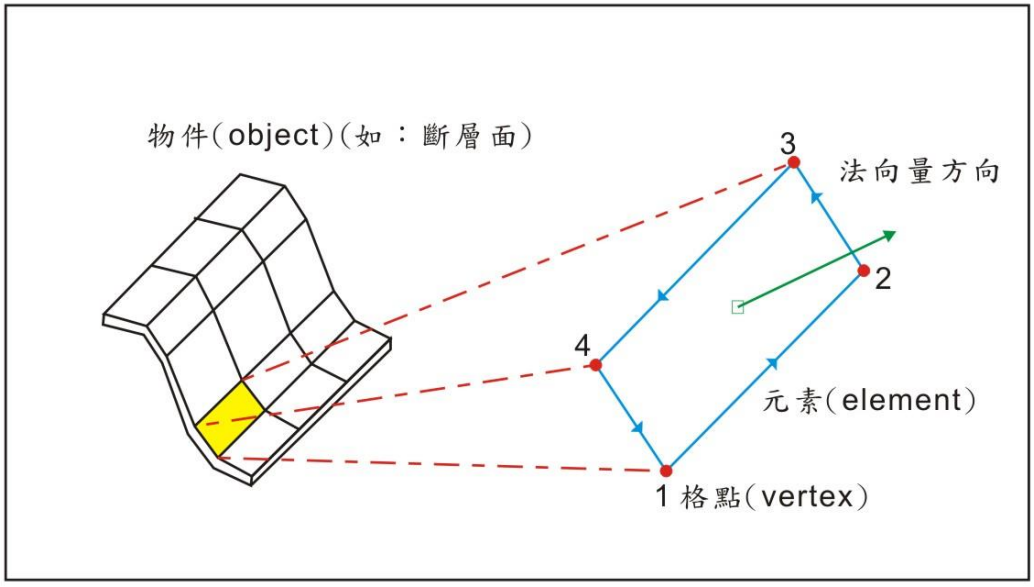


圖 B. 1 Poly3D 中物件與元素示意圖。圖中當元素以標號 1、2、3、4 之格點逆時鐘組成時，遵循右手定則，法向量指向右上方，反之則指向左下方，多邊形元素的正負會對調。物件則由一個以上的元素所組成（Thomas, 1993）。

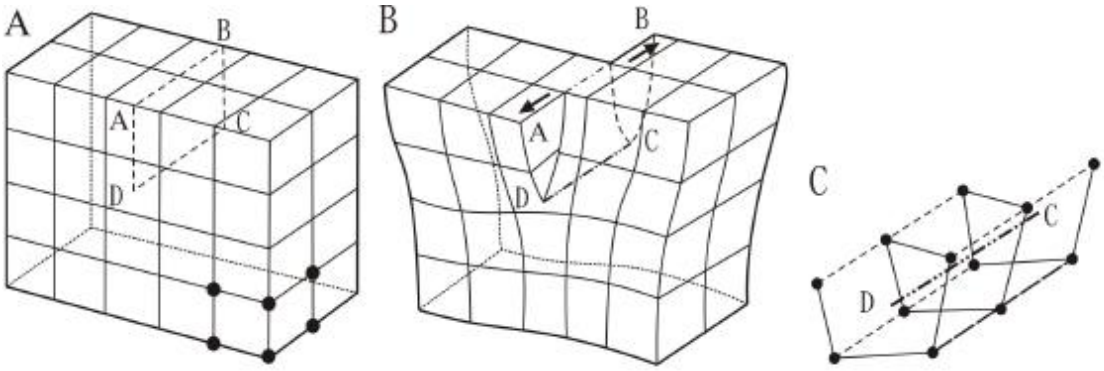


圖 B. 2 晶格受力產生螺旋錯位(Screw dislocation：晶格錯位中的一種)。A 為完整晶格，CD 視為錯位軸線。B 圖中 ABCD 面上造成了螺旋錯位。C 圖中說明 CD 軸旁的原子間的鏈結受錯位影響，重新連結（Davis and Reynolds, 1996）。

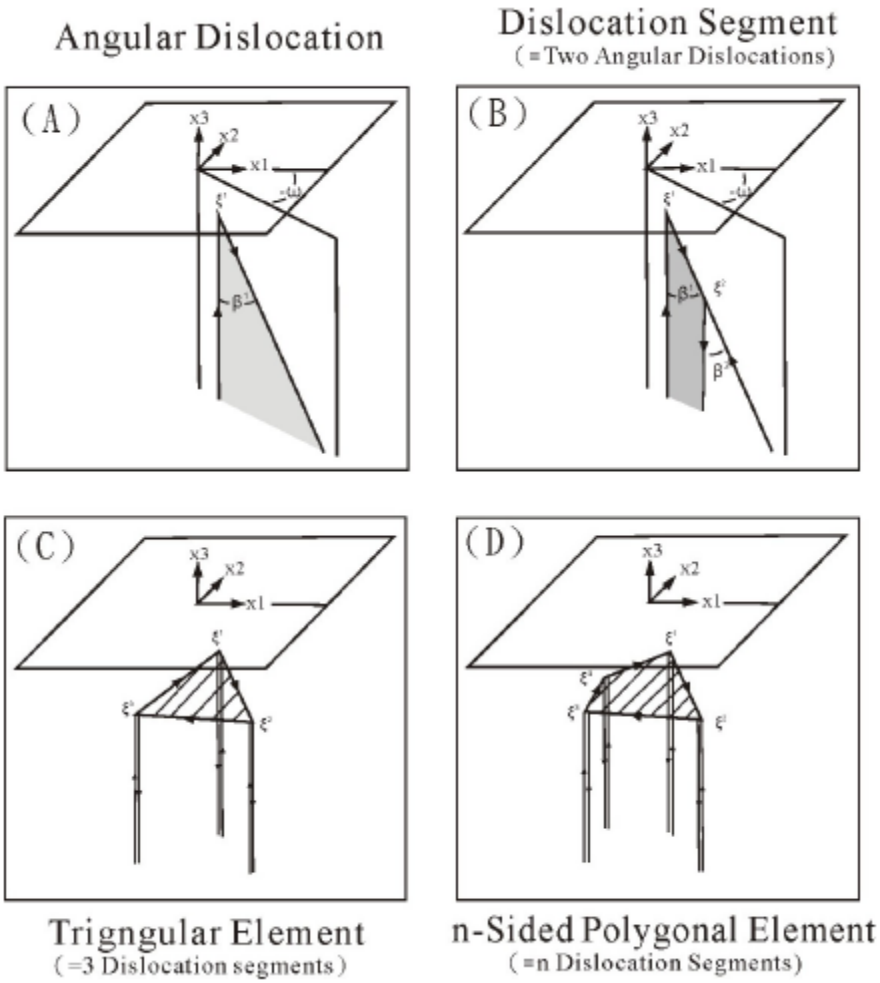


圖 B. 3 Angular Dislocation 示意圖(修改自 Thomas, 1993)。(A) Comninou & Dunders (1975) 的角度錯動示意圖。ζ 表示半空間中的格點；ω 代表 ζ 與下一個格點連線與 x1 軸的夾角；β 角為 ζ 與下一個格點連線與 x3 軸的夾角。圖中灰色為錯動面。(B) 相互作用的兩個 Angular Dislocation，經由疊加產生一錯動單元。(C)與(D)表是由某一平面上的三組以上錯動單元所構成的多邊形元素。

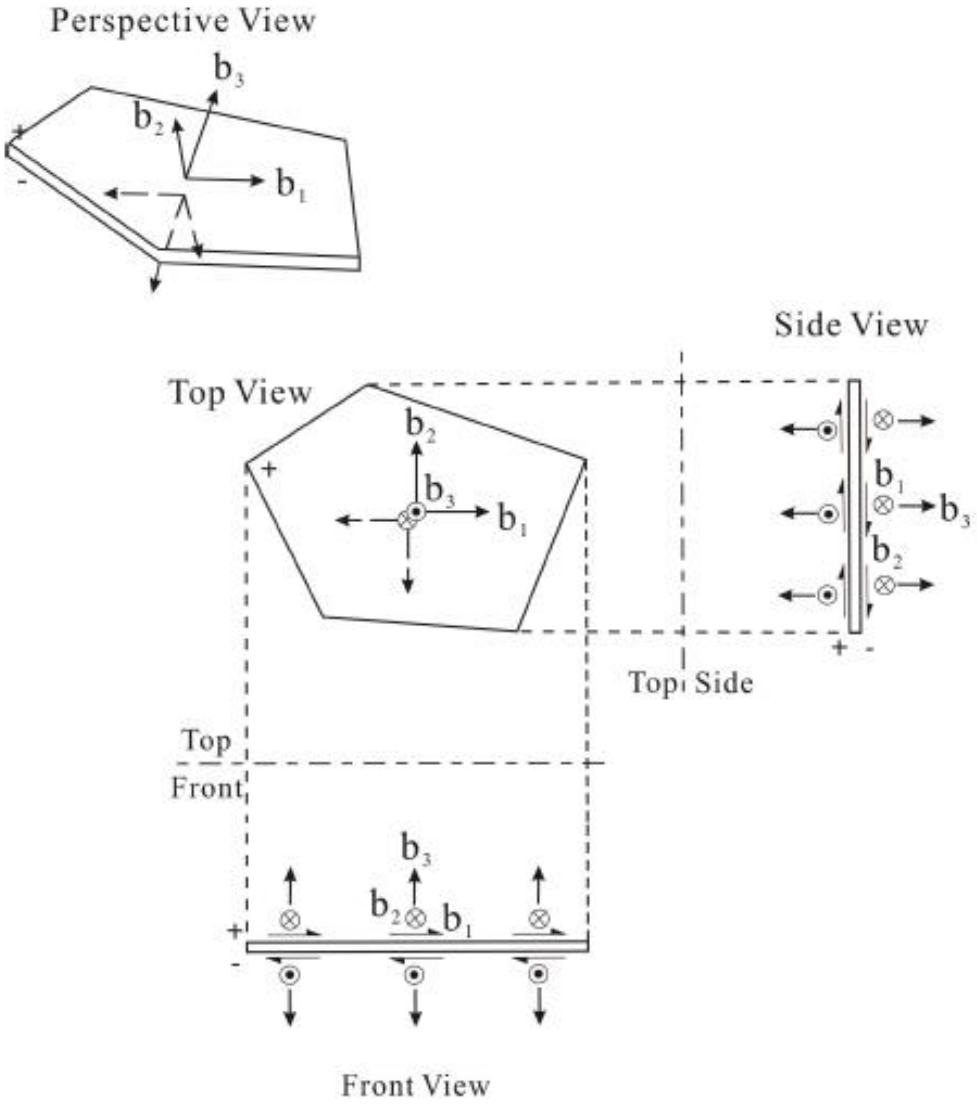


圖 B. 4 Poly3D 中多邊形元素柏格向量 b 示意圖。在一個多邊形元素中的位移不連續是均質一致的，由柏格向量來表示（b_1, b_2, b_3），也可以稱為該元素的位移不連續邊界條件，b_1 的方向平行元素的走向方向。b2 指向元素傾角方向，b_3 指向元素法向量的方向。以一個斷層面上的滑動而言，b_3 的值為零（Thomas, 1993）。

Poly3D 建立三角形斷層面單元之錯移的原理如圖B.3 所示，圖B.3A 中的垂直面位在一個半空間中，該面的走向與x1 軸之夾角為ω，位在該面上的ξ^1 為半空間之中的一個格點，陰影部份代表一個角狀錯動（angular dislocation）。該錯動的一邊平行於x3 軸，另一邊則與x3 軸夾β^1 度。圖4-3B 則有另一反方向運動的格點ξ_2 加入，該格點的角狀錯移角度β^2 等於β^1，由於ξ^1 的面積大於ξ_2，因此會留下一個不被兩個相反運動之錯移互相抵銷掉的區塊（即圖B.2B 之中殘餘的陰影區域）。同理，若加入另一個垂直面，建立了第三個格點ξ^3，則新建立的面會與第一個面交於一線（圖B.3A 中的x3 軸），接

下來就可以利用此面上的角狀錯移與ξ^1 共同建立三角形斷層面單元上的另一邊($\xi^1\xi^3$ 的連線，圖B.3C）。一旦建立了基本的三角形斷層面單元後，就可以將眾多的三角形斷層面單元結合成為較大的多邊形斷層面（圖B.2D 中的ξ^n），而此斷層面的形貌即可使用其他地質或地球物理資料作為控制，建立出最適合的幾何模型。

Poly3D 利用角狀錯移的原理將地表觀測到的位移逆推至斷層面上，若地表上的點(p)受到斷層單元(e)滑移m^e 後產生了d^p 的位移，其關係式如下：

$$d^p = G^{e,p} m^e + E \qquad \text{（B-3）}$$

其中，E 代表地表觀測值的誤差，$G^{e,p}$ 則代表格林函數（Green's functions）。

這個公式除了可以將已知幾何形貌的斷層面上之滑移量順推至地表上，亦可將地表觀測到的位移逆推至地下未知形貌的斷層面上。在未知斷層面的確切幾何形貌之下，使用Poly3D 的原則為先建立簡單的斷層幾何形貌（曲度小、轉折少），然後將地表的位移觀測值逆推至斷層面上成為斷層面滑移量，而後再將滑移量順推回地表面，將之與實際觀測到的地表位移值比較。比較地表面上的實際位移與模擬位移之後，再調整斷層面的幾何形貌，或是增加斷層面的複雜度，再利用以上的順推與逆推步驟反覆調整斷層面的形貌，使地表觀測值與模擬值趨近相似，進而建立出一個接近實際斷層形貌之模型。

由於斷層面上的滑移量來自於地表位移量的逆推，因此會受到區域性的資料差異造成斷層面上滑移量的不均勻，但從野外實際測量到的資料中的經驗知道，斷層面的滑移大多是平滑且連續的變化，因此Poly3D 使用了以下公式將斷層面上的滑移量平滑化：

$$m = (G^T W_e G + \varepsilon^2 D^T D)\, G^T W_e\, d \qquad \text{（B-4）}$$

m：斷層面上的滑移量

G^T, G：格林函數（Green's functions）

$\varepsilon^2 D^T D$：斷層面的平滑參數

W_e：全部模擬值誤差的權重矩陣

d：地表面上的位移觀測值

利用以上的平滑度公式配合（B-3）式的錯移公式，Poly3D 就可以將地表的位移逆推至斷層面上以及順推回地表面，而位移的量值則會平滑的分布在斷層面以及順推之後的地表面上。

附錄C 井下應變儀維護紀錄表對巡察及維護之效益

實際應用井下應變儀維護記錄表

在去年(九十八年)的計畫內已擬定井下應變儀維護記錄的標準表格格式，然而要維持觀測儀器的健康狀況，除了從網路直接連線進行資料檢核外，定期現場巡查主動發現問題也很重要。設計此表格的目的是為了在進行現場儀器檢查時能有一標準程序，供每個進行現地巡查人員快速確實的進行系統檢查，確保系統、電力、通訊等部分皆處於一正常狀態，發現問題時能即時排除，以維護觀測資料品質的穩定性。

為了解擬訂之流程與表格是否符合現場檢查人員之習慣與現地實際情形，本研究團隊在 9 月針對新竹地區的觀測站實際進行現地檢查工作。在進行巡察前須對巡查人員進行簡單的訓練工作。除基本的檢測儀器操作外，還必須說明各觀測儀器燈號與顯示訊息的意義，有關這些部分可詳見去年提送之報告附錄 C 應變儀維護記錄表格。

實際應用井下應變儀維護記錄表於新竹地區大坪、瑞峰、梅花與新樂等站，巡查結果如表 C.1 至表 C.5。其中各站除瑞峰站雨量計有些許落葉堵塞(圖 C.1)，大坪與瑞峰站水壓計不能連線外，其他觀測儀器燈號、連線一切正常。其他現地照片詳圖 C.2 至圖 C.5。

表 C.1 大坪站應變儀維護記錄表

站名：大坪　檢查日期時間：09/25-26　天氣狀況：晴　測試人員：邱俊穎

儀器	正常	檢查項目	備註(記錄儀器異常後處理情形)
系統檢測			
POWER BOX	√	輸出電壓值是否在12v~14.5v範圍	
	√	輸出至電瓶電流值是否正常	
Osc Board	√	檢查燈號是否正常	
RT0~4 Board	√	檢查燈號及顯示是否正常	
LoggerBoard	√	檢查燈號是否正常	
	√	測試可否以USB隨身碟下載資料	
	√	登入測試網路傳輸狀況是否正常	
Q330	√	檢查燈號是否正常	
	√	測試可否正常登入	
Q330 Bailer	√	檢查燈號是否正常	
	√	測試可否正常登入	
水位計		測試可否正常登入	無法連線.
雨量計	√	檢查有無遭異物阻塞	
	√	接點有無潮濕、鬆動等	
電力檢測			
蓄電池	√	測量電壓是否在12.5V以上狀況顯示燈是否正常	
太陽能光電板	√	現場日照條件下，測量輸出電壓是否正常	
	√	測量輸出電流是否正常	
電源轉換器(Inverter)	√	測量輸出電壓值是否在12v~14.5v正常值內	
	√	測量有無正常輸出電流至POWER BOX	
電源插座	√	電源座是否老化或破損	
不斷電系統（UPS）	√	檢查燈號及輸出電壓（110V）是否正常	
通訊測試			
ADSL數據機	√	檢查連線燈號（WAN/ADSL、LAN）有無異常	
	√	實際對外連線，測試網路連線是否正常	
MODEM 機（僅ECT）	√	檢查連線燈號（RD,TD,CD,OH,MR）有無異常顯示	
	√	撥號測試電話線路是否暢通	
路由器（IP分享器）	√	檢查各連線燈號是否正常	
	√	對外連線，測試連線狀況是否正常	
無線發射器（僅RNT）	√	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
訊號強波器（僅RNT）	√	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
雜項			

表 C.1 大坪站應變儀維護記錄表（續）

訊號線接頭	✓	訊號檢查,是否表皮脫落或老化	
電源延長線	✓	是否表皮脫落或老化	
網路/電話線，	✓	網路線線路檢查	
外觀檢查與清潔			
一般項目	✓	太陽能板清潔	
	✓	雨量計清潔	
	✓	觀測站整體清潔	
	✓	觀測站周圍除草，樹木修剪	
其他應註記事項			

注意事項：

1. 請測試人員進行各項儀器檢測工作後，若儀器測試正常，則在欄位打勾，若否則進行初步故障排除作業，並將結果記錄於備註部分。
2. 測試人員應確實填寫測試日期時間與天氣狀況，以後未來進行資料檢測之參考。
3. 測試人員應於每次進行測試填寫此表，並於右上方簽名，以示負責。

表 C.2 瑞峰站應變儀維護記錄表

站名：瑞峰　檢查日期時間：09/25-26　天氣狀況：晴　測試人員：邱俊翔

儀器	正常	檢查項目	備註(記錄儀器異常後處理情形)
系統檢測			
POWER BOX	✓	輸出電壓值是否在12v~14.5v範圍	
	✓	輸出至電瓶電流值是否正常	
Osc Board	✓	檢查燈號是否正常	
RT0~4 Board	✓	檢查燈號及顯示是否正常	
LoggerBoard	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否以USB隨身碟下載資料	
	✓	登入測試網路傳輸狀況是否正常	
Q330	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否正常登入	
Q330 Bailer	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否正常登入	
水位計		測試可否正常登入	無法連線.
雨量計		檢查有無遭異物阻塞	輕微堵塞，已清理。
	✓	接點有無潮濕、鬆動等	
電力檢測			
蓄電池	✓	測量電壓是否在12.5V以上狀況顯示燈是否正常	
太陽能光電板	✓	現場日照條件下，測量輸出電壓是否正常	
	✓	測量輸出電流是否正常	
電源轉換器(Inverter)	✓	測量輸出電壓值是否在12v~14.5v正常值內	
	✓	測量有無正常輸出電流至POWER BOX	
電源插座	✓	電源座是否老化或破損	
不斷電系統（UPS）	✓	檢查燈號及輸出電壓（110V）是否正常	
通訊測試			
ADSL數據機	✓	檢查連線燈號（WAN/ADSL、LAN）有無異常	
	✓	實際對外連線，測試網路連線是否正常	
MODEM 機（僅ECT）	✓	檢查連線燈號（RD,TD,CD,OH,MR）有無異常顯示	
	✓	撥號測試電話線路是否暢通	
路由器（IP分享器）	✓	檢查各連線燈號是否正常	
	✓	對外連線，測試連線狀況是否正常	
無線發射器（僅RNT）	✓	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
訊號強波器（僅RNT）	✓	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
雜項			

表 C.2 瑞峰站應變儀維護記錄表（續）

訊號線接頭	✓	訊號檢查,是否表皮脫落或老化	
電源延長線	✓	是否表皮脫落或老化	
網路/電話線，	✓	網路線線路檢查	
外觀檢查與清潔			
一般項目	✓	太陽能板清潔	
	✓	雨量計清潔	
	✓	觀測站整體清潔	
	✓	觀測站周圍除草，樹木修剪	
其他應註記事項			

注意事項：

1. 請測試人員進行各項儀器檢測工作後，若儀器測試正常，則在欄位打勾，若否則進行初步故障排除作業，並將結果記錄於備註部分。
2. 測試人員應確實填寫測試日期時間與天氣狀況，以後未來進行資料檢測之參考。
3. 測試人員應於每次進行測試填寫此表，並於右上方簽名，以示負責。

表 C.3 新樂站應變儀維護記錄表

站名：新樂　檢查日期時間：09/25-26　天氣狀況：晴　測試人員：好像報

儀器	正常	檢查項目	備註(記錄儀器異常後處理情形)
系統檢測			
POWER BOX	✓	輸出電壓值是否在12v~14.5v範圍	
	✓	輸出至電瓶電流值是否正常	
Osc Board	✓	檢查燈號是否正常	
RT0~4 Board	✓	檢查燈號及顯示是否正常	
LoggerBoard	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否以USB隨身碟下載資料	
	✓	登入測試網路傳輸狀況是否正常	
Q330	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否正常登入	
Q330 Bailer	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否正常登入	
水位計	✓	測試可否正常登入	
雨量計	✓	檢查有無遭異物阻塞	
	✓	接點有無潮濕、鬆動等	
電力檢測			
蓄電池	✓	測量電壓是否在12.5V以上狀況顯示燈是否正常	
太陽能光電板	✓	現場日照條件下，測量輸出電壓是否正常	
	✓	測量輸出電流是否正常	
電源轉換器(Inverter)	✓	測量輸出電壓值是否在12v~14.5v正常值內	
	✓	測量有無正常輸出電流至POWER BOX	
電源插座	✓	電源座是否老化或破損	
不斷電系統（UPS）	✓	檢查燈號及輸出電壓（110V）是否正常	
通訊測試			
ADSL數據機	✓	檢查連線燈號（WAN/ADSL、LAN）有無異常	
	✓	實際對外連線，測試網路連線是否正常	
MODEM 機（僅ECT）	✓	檢查連線燈號（RD,TD,CD,OH,MR）有無異常顯示	
	✓	撥號測試電話線路是否暢通	
路由器（IP分享器）	✓	檢查各連線燈號是否正常	
	✓	對外連線，測試連線狀況是否正常	
無線發射器（僅RNT）	✓	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
訊號強波器（僅RNT）	✓	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
雜項			

表 C.3 新樂站應變儀維護記錄表（續）

訊號線接頭	✓	訊號檢查,是否表皮脫落或老化	
電源延長線	✓	是否表皮脫落或老化	
網路/電話線，	✓	網路線線路檢查	
外觀檢查與清潔			
一般項目	✓	太陽能板清潔	
	✓	雨量計清潔	
	✓	觀測站整體清潔	
	✓	觀測站周圍除草，樹木修剪	
其他應註記事項			

注意事項：

1. 請測試人員進行各項儀器檢測工作後，若儀器測試正常，則在欄位打勾，若否則進行初步故障排除作業，並將結果記錄於備註部分。
2. 測試人員應確實填寫測試日期時間與天氣狀況，以後未來進行資料檢測之參考。
3. 測試人員應於每次進行測試填寫此表，並於右上方簽名，以示負責。

表 C.4 梅花站應變儀維護記錄表

站名：梅花	檢查日期時間：09/25-26	天氣狀況：晴	測試人員：邱俊穎
儀器	正常	檢查項目	備註(記錄儀器異常後處理情形)
系統檢測			
POWER BOX	✓	輸出電壓值是否在12v~14.5v範圍	
	✓	輸出至電瓶電流值是否正常	
Osc Board	✓	檢查燈號是否正常	
RT0~4 Board	✓	檢查燈號及顯示是否正常	
LoggerBoard	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否以USB隨身碟下載資料	
	✓	登入測試網路傳輸狀況是否正常	
Q330	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否正常登入	
Q330 Bailer	✓	檢查燈號是否正常	
	✓	測試可否正常登入	
水位計	✓	測試可否正常登入	
雨量計	✓	檢查有無遭異物阻塞	
	✓	接點有無潮濕、鬆動等	
電力檢測			
蓄電池	✓	測量電壓是否在12.5V以上狀況顯示燈是否正常	
太陽能光電板	✓	現場日照條件下，測量輸出電壓是否正常	
	✓	測量輸出電流是否正常	
電源轉換器(Inverter)	✓	測量輸出電壓值是否在12v~14.5v正常值內	
	✓	測量有無正常輸出電流至POWER BOX	
電源插座	✓	電源座是否老化或破損	
不斷電系統（UPS）	✓	檢查燈號及輸出電壓（110V）是否正常	
通訊測試			
ADSL數據機	✓	檢查連線燈號（WAN/ADSL、LAN）有無異常	
	✓	實際對外連線，測試網路連線是否正常	
MODEM 機（僅ECT）	✓	檢查連線燈號（RD,TD,CD,OH,MR）有無異常顯示	
	✓	撥號測試電話線路是否暢通	
路由器（IP分享器）	✓	檢查各連線燈號是否正常	
	✓	對外連線，測試連線狀況是否正常	
無線發射器（僅RNT）	✓	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
訊號強波器（僅RNT）	✓	登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
雜項			

表 C.4 梅花站應變儀維護記錄表（續）

訊號線接頭	✓	訊號檢查,是否表皮脫落或老化	
電源延長線	✓	是否表皮脫落或老化	
網路/電話線，	✓	網路線線路檢查	
外觀檢查與清潔			
一般項目	✓	太陽能板清潔	
	✓	雨量計清潔	
	✓	觀測站整體清潔	
	✓	觀測站周圍除草，樹木修剪	
其他應註記事項			

注意事項：

1. 請測試人員進行各項儀器檢測工作後，若儀器測試正常，則在欄位打勾，若否則進行初步故障排除作業，並將結果記錄於備註部分。
2. 測試人員應確實填寫測試日期時間與天氣狀況，以後未來進行資料檢測之參考。
3. 測試人員應於每次進行測試填寫此表，並於右上方簽名，以示負責。

表 C.5 新竹地區應變儀觀測站巡查結果

站名:新竹地區 4 站	檢查日期 2010/9/3		天氣狀況:晴		
站名	應變儀	地震儀	水壓計	雨量計	備註
大坪	正常	無	無法連線	正常	
瑞峰	正常	無	無法連線	輕微堵塞	已清理
梅花	正常	無	正常	正常	
新樂	正常	正常	正常	正常	



圖 C.1 瑞峰站雨量計因落葉而有阻塞現象，若未清理將會影響雨量觀測結果。



圖 C.2 瑞峰站太陽能板。



圖 C.3 大坪站應變儀資料記錄器。



圖 C.4　梅花應變儀觀測站外觀。

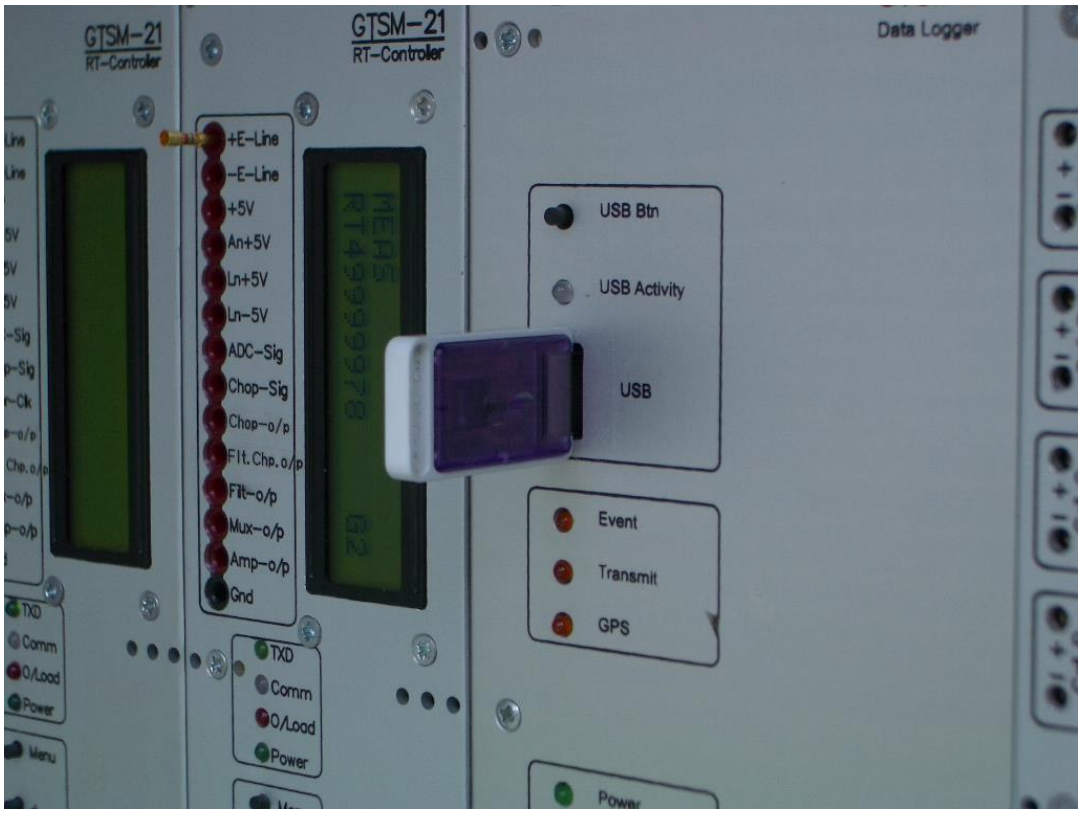


圖 C.5 新樂站透過 USB 下載觀測資料，但未能成功。

巡查表格之調整與效益

基本上，依據巡查表進行逐項檢查並未造成太大的困難，確實能方便巡查人員快速進行儀器功能的檢測，部分工作可事先於室內透過連線方式相進行檢查，如此到現場後將可再簡化檢查流程。如有關各觀測儀器之連線可先於室內進行測試，了解各儀器的連線狀況，在現場則可透過攜帶式電腦直接進入 IP 分享器內連線記錄器，檢視網路連線狀況，確保網路連線順暢是影響資料接收品質的重要因素。巡查過程中有測試各站 USB 下載功能，不知是否硬體限制還是故障，皆無法順利進行，幸而透過區域網路設定仍可存取資料記錄器內的記錄。在實際檢查觀測站的過程中，並未發現有不斷電系統，據地調所人員表示由於實用性不高，多數觀測站中之不斷電系統已移作他途，因此該項目建議移除。曾文北站先前由於採用無線電傳輸方式進行資料傳輸，現已改為至現地下載方式，相關儀器也已拆除，因此曾文北中的無線發射器與訊號強波器等項目也建議刪除。

透過標準化的表格與檢查流程，可減少進行檢測時的疏漏與增加檢查品質的穩定性，讓實地檢測人員依照檢查手冊與標準表格指示皆可進行初步的巡查檢測工作。應變儀是連續觀測的資料，若發生故障後能夠透過現場檢查迅速排除，將可確保最佳的資料接收品質，因此為維持資料品質，除須培養現場檢測人員外，也必須準備足夠的備品與

具良好訓練的技術人員，在發生儀器故障損壞時進行更換維修，才是確保觀測站持續正常使用的唯一辦法。但是受限於觀測儀器設計原理，應變儀的一大致命傷就是雷擊，由於應變儀埋入地下後即以水泥封住，因此若感應器發生故障則無法取出，也就宣告了觀測的結束。今年度中興站在 8 月以後就發生資料的中斷，經詢地調所檢查結果後認為是遭受雷擊所造成，在 10 月更換地表觀測儀器後檢視觀測資料則顯示不正常的變化情形，顯示地下感應器可能已經受損。

雖然定期的現場巡查檢測工作有增加資料品質，減短資料漏失，增加儀器壽命等明顯效益，但是對於雷擊事件的發生卻難以有所幫助，可能必須基於儀器設計原理上進行全面性的防雷檢討，才是減少事件發生的解決方法。

附錄 D 斷層滑移速率

活動斷層研究成果可用來建立地震規模與發震率(earthquake recurrence)之關係，其基本假設是斷層滑移速率(slip-rate)可反映斷層地震能量(strain energy)的累積與釋放速率。所謂斷層滑移速率是指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。

(1) 斷層滑移速率與地震矩

就單一地震而言，依 Kanamori （1977）對地震矩（seismic moment, M_0）之定義，地震釋放的能量可用斷層破裂面積(A_f)、平均滑移距離(D)與剪力模數(shear modulus, μ)來表示，即

$$M_0 = \mu A_f D \qquad \text{(式 D.1)}$$

若考慮多次地震活動與斷層能量釋放，則斷層滑移速率(slip rate, S)及地震矩率(seismic moment rate, $\dot{M}_0$)之關係可表示為(Anderson, 1979; Anderson and Luco, 1983)：

$$\dot{M}_0 = \mu A_f S \qquad \text{(式 D.2)}$$

上式中，斷層滑移速率(S)單為 mm/yr，地震矩率($\dot{M}_0$)單位為 dyne-cm/yr，亦代表斷層能量釋放的速率。

目前國內外分析多採用地震矩規模(moment magnitude, M_W)，因為其可直接以具有地震能量觀念之地震矩(M_0)表示之(Kanamori, 1977; Hanks and Kanamori, 1979)。地震矩規模(M_W)與地震矩(M_0)如下所示：

$$\log M_0 = cm + d \qquad \text{(式 D.3)}$$

上式中，m 即為地震矩規模(M_W)，而係數 c=1.5、d=16.1。

上述地震矩(M_0)亦可由地震波逆推出斷層面上的滑移(錯動)量分布(slip distribution)來獲得(Lee and Ma, 2000)。再者，透過斷層槽溝開挖之古地震研究獲得斷層滑移(錯動)量(D)，並且由構造解釋或是微震分布來推估活動斷層破裂面積(A_f)，即可間接推估 M_W 大小。

(2) 地震再現週期

平均滑移速率是評估斷層活動性的重要指標，滑移速度越快則斷層活動程度也越高(Bollina, 1970; Matsuda, 1975; Slemmons, 1982)。對於工程評估上，斷層的滑移速率測定極為重要，若知道斷層的滑移速率及一次地震之錯移量，可推估地震重複間隔(李錫堤，1993)，即為地震重複之再現週期。一般可根據 Wallace (1970)的公式來推求之：

$$RI = D/(S-C) \qquad (式\ D.4)$$

式中，RI 是平均重複間隔；D 是單一且典型的斷層活動滑移(錯動)；S 是與大規模歷史地震活動有關的斷層滑移速率；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，所以地震重複間隔可簡示為 RI = D/S，亦即滑移速率 S =D/ RI。

斷層槽溝探挖的古地震研究、地形學研究以及第四紀沈積物定年的新地體構造(neotectonics)研究都有助於長時期、地震重複間隔及斷層滑移速率推估。測定滑移速率通常可藉由地形、地物及地貌標誌的錯移量來計算。例如：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，若能加上定年資料，則可計算出滑移速率。

在野外若能發現斷層擦痕(slickensides)及傾角，則能明確指出滑移速率的淨值與滑移方向。現今亦可利用精密的 GPS 測量、精密大地三角測量或三邊測量、水準測量，經過數年的重複觀測後計算出斷層附近的滑移速率，但是此方式求得的滑移速率時間較短，亦可能僅表現出斷層的潛移量，因此使用時須特別注意(李錫堤，1993)。

以實際研究調查成果為例，圖 D.1 說明 Schwartz and Coppersmith 調查 Wasatch 斷層地質時，在 Utah 州 Nephi 市區域發現 North Creek 古沖積扇被斷層錯移的露頭，測得三次地震共垂直錯移 7m，再根據碳 14(^{14}C)定年資料研判，古沖積表層土壤面約距今 4,580 年，藉由式(2.15)初步求得斷層的垂直滑移速率約為 1.5 mm/yr 左右，以及斷層活動的再現週期在 1,500 年左右。

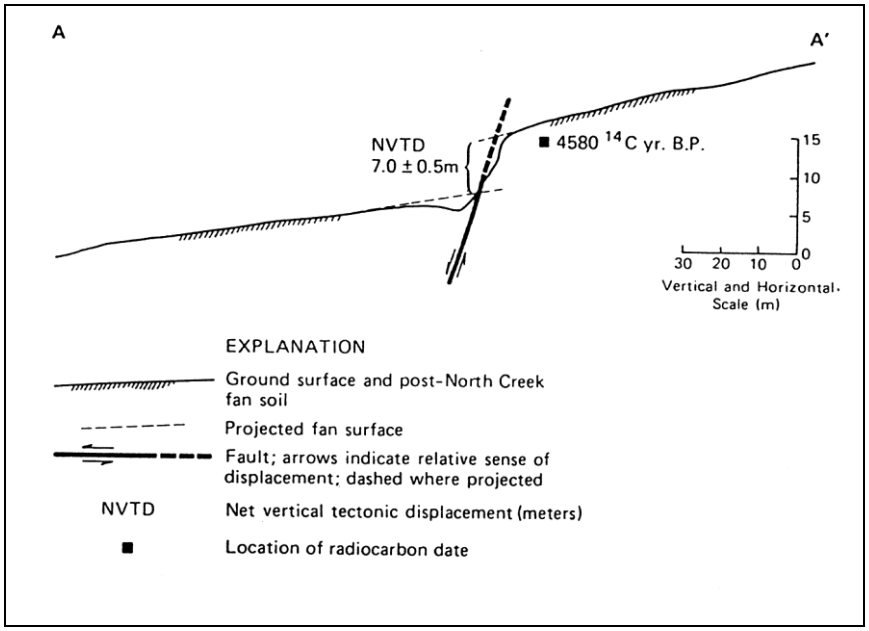


圖 D.1 活動斷層錯移之露頭可用來評估斷層之滑移速率。(摘自 Schwartz and Coppersmith, 1984) 。

附錄E 活動斷層幾何特性和地震矩規模

在活動斷層潛勢分析中常利用斷層幾何特性，間接採用各種斷層的地質調查結果，如斷層破裂長度、最大垂直抬升量、最大滑移量等證據，來推估斷層之最大可能地震規模，或彙整各區域震源內所有活動斷層分布與幾何關係，來決定區域震源其最大可能地震規模。蔡主權等人（1987）曾統計臺灣地區的地震與斷層長度關係，得到以下的結果：

$$L = \exp (1.006\ M_L - 3.232) \qquad \text{(式 E.1)}$$

其中 M_L 為地震規模，L 為斷層破裂長度(km)，統計之標準差 sln(L) = 0.422，其分布如圖 E.1 所示。

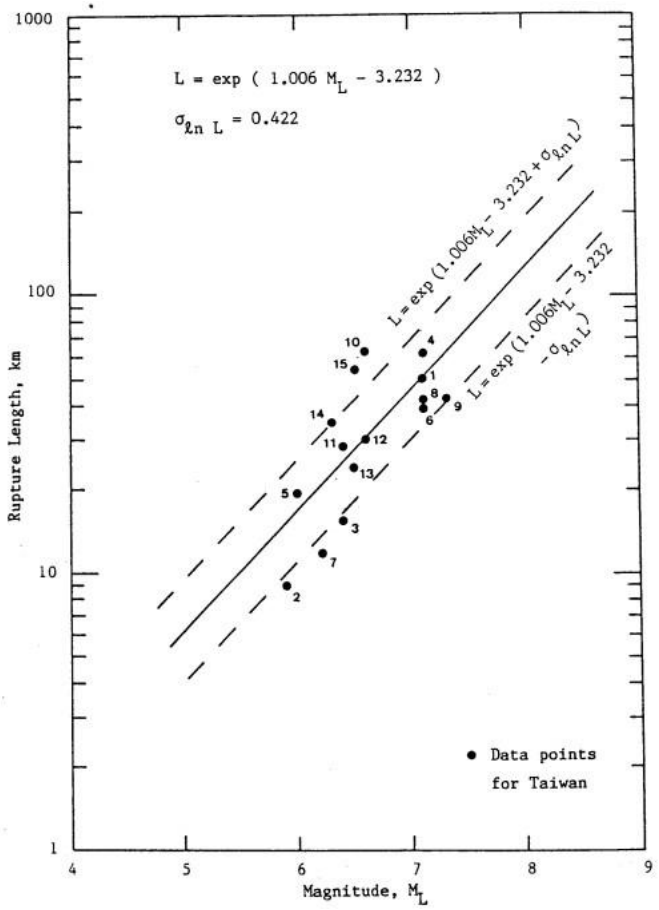


圖 E.1 臺灣地區的地震規模與斷層長度關係（蔡主權等人，1987）。

Wells and Coppersmith（1994）彙整並建置包含 244 個地震的資料庫，利用此資料庫中的資料，可以回歸分析出各型態的斷層性質（如走向、正、逆斷層）對地震規模、斷層長、斷層寬、斷層面積、地表位移之間的關係式（表 E.1）。

吳相儀（2000）研究臺灣地區 93 年至今，規模大於 5，震央位於島內，震源深度在 20 公里以上的 6 個地震，以及 99 年的集集地震、嘉義地震及嘉義地震之最大餘震（規模 6.0）。求得之地震矩規模與震源參數斷層長（L）、斷層面積（A）、斷層平均滑

移距（D）間的關係，如圖 E.2、圖 E.3 所示，其經驗公式為：

$$M_W = (1.32\pm0.122)\log(L)+(4.817\pm0.132) \quad \text{(式 E.2)}$$

$$M_W = (0.82\pm0.071)\log(A)+(4.61\pm0.141) \quad \text{(式 E.3)}$$

$$M_W = (1.83\pm0.39)\log(D)+(6.85\pm0.23) \quad \text{(式 E.4)}$$

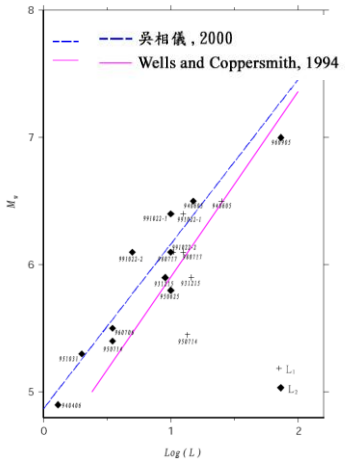


圖 E.2 地震矩規模與斷層長度之關係。

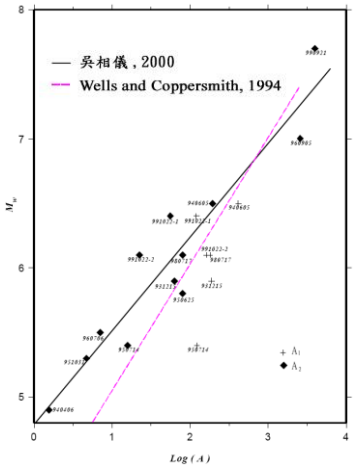


圖 E.3 地震矩規模與斷層面積之關係。

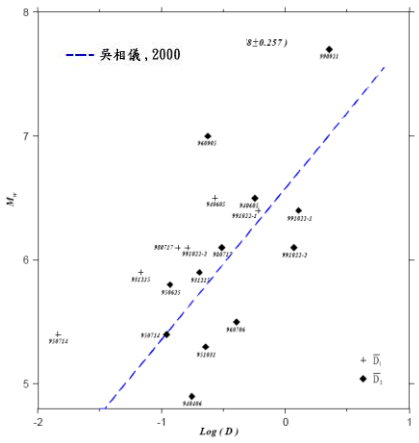


圖 E.4 地震矩規模與斷層平均錯動量之關係。

表 E.1 Wells and Coppersmith（1994）彙整之斷層參數及地震矩規模關係式

斷層類型	參數	次數	經驗公式	S (MW)	經驗公式	Slog(L,A, or D)
平移斷層	破裂長度 L（km）	43	M_W =5.16+1.l2 log L	0.28	log L=0.74 M_W -3.55	0.23
逆斷層		19	M_W =5.00+1.22 log L	0.28	log L = 0.63 M_W -2.86	0.20
正斷層		15	M_W =4.86+1.32 log L	0.34	log L = 0.50 M_W -2.01	0.21
全部		77	M_W = 5.08+1.l6 log L	0.28	log L = 0.69 M_W -3.22	0.22
平移斷層	破裂面積 A（km^2）	83	M_W =3.98+ 1.02 log A	0.23	log A = 0.90 M_W 3.42	0.22
逆斷層		43	M_W =4.33+0.90 log A	0.25	Log A = 0.98 M_W -3.99	0.26
正斷層		22	M_W =3.93+1.02 log A	0.25	Log A = 0.82 M_W -2.87	0.22
全部		148	M_W =4.07+0.98 log A	0.24	Log A = 0.91 M_W -3.49	0.24
平移斷層	地表錯動量 D（m）	43	M_W =6.81+0.78 log D	0.29	Log D= 1.03 M_W -7.03	0.34
逆斷層		21	M_W = 6.52+0.44 log D	0.52	1og D= 0.29 M_W - 1.84	0.42
正斷層		16	M_W =6.61+0.71 log D	0.34	Log D = 0.89 M_W -5.90	0.38
全部		80	M_W=6.69+0.74 log D	0.40	Log D = 0.82 M_W -5.46	0.42

附錄F 活動斷層特徵地震模式

地震規模與發生率間的關係式，一般可以分為兩類：(1)截切指數模式(truncated exponential model)或稱指數規模分布模式(exponential magnitude distribution)，以及(2)特徵地震模式(characteristic earthquake model) (Youngs and Coppersmith, 1985)。

截切指數模式一般適用於無確定活動斷層的區域震源，其地震規模與累積發生次數分布較符合 Gutenberg-Richter 函數(Gutenberg and Richter, 1944)。針對已知斷層而言，將單一斷層系統分段較符合特徵地震模式(Youngs and Coppersmith, 1985; Wesnousky, 1994)，但若有數條活動斷層系統的區域，則其整體之規模分布會呈現截切指數模式。另外，已經有多位國外學者建議，已知斷層震源或隱沒帶板塊介面型震源之地震規模與發生率間，應以特徵地震模式來描述較為合理(Schwartz and Coppersmith, 1984; Youngs and Coppersmith, 1985; Wesnousky, 1994; Davison and Scholz, 1985)。上述兩類模式均可利用斷層滑移速率或地震矩率、b 值(Gutenberg and Richter, 1944)及最大可能地震建立之(Youngs and Coppersmith, 1985)。

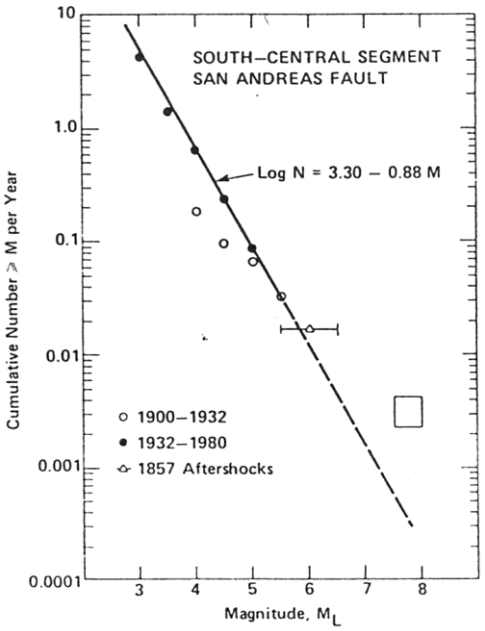


圖 F.1 San Andreas 斷層中南段之特徵地震模式，圖中實心黑圓點、空心圓點、空心三角形皆為地震目錄資料，而空心方塊為活斷層槽溝探挖與地質調查所獲得的資料誤差範圍，實線為 G-R 關係式，而虛線部分為外差結果。(摘自 Schwartz and Coppersmith, 1984)。

特定斷層震源如果採用指數分布模式，以中、小規模地震的發生率趨勢來外插推估大規模地震發生次數時，常會有低估的情形，而且活斷層通常會以適當的間隔重複發生特定規模大小的地震。為避免低估大規模地震的發生率，許多學者建議採用特徵地震模式來描述斷層的地震發生率(Schwartz and Coppersmith, 1984; Coppersmith, 1991;

Davison and Scholz, 1985; Wesnousky, 1994)。大規模地震的發生率必須藉由地質資料來推估，如古地震及斷層長期滑移速率的研究成果，Schwartz 與 Coppersmith (1984) 進行 Wasatch 斷層及 San Andreas 斷層的中南段調查時，驗證了此兩斷層屬特徵地震模式，圖 F.1 為 San Andreas 斷層的中南段，驗證此斷層屬特徵地震模式。

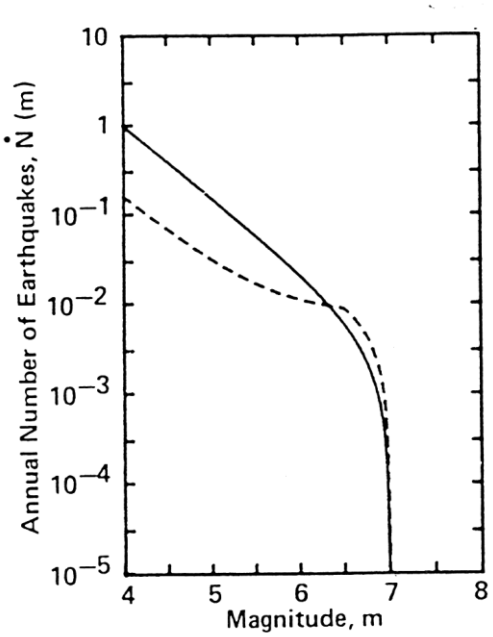


圖 F.2 假定相同滑移速率情形下比較指數地震分布模式與特徵地震模式的差異，實線為截切指數模式分布，虛線為特徵地震模式分布(摘自 Youngs and Coppersmith, 1985)。

附錄G 機率密度函數

機率密度函數的選擇跟孕震之區域性、時間性、資料完整性有關，在 WG02 報告中針對舊金山灣區採用五種機率模式，敘述如下：

1. Poisson model

大地震在時間上的分布常以廣義包桑模式（Poisson model）來解釋，此模式假設地震在時間上會有群聚現象，且群聚間是互不相關的。一系列地震事件時間之分布狀況由長期平均發震速率控制，可得下式：

$$f_{Exp}(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad \text{(式 G.1)}$$

其中 λ 為每個活動斷層震源之地震發生率。在 Poisson model 中，對於一指定之時間間隔的條件機率只考慮間隔長度 Δt，及每個破裂面的長期地震發生率。因此發震的機率為：

$$1 - e^{-\lambda \Delta t} \qquad \text{(式 G.2)}$$

用於區域性震源統計及活動斷層活動性不明確之情形，例如背景地震發生率。

2. Empirical Model（Reasenberg et al., 2003）

自 1906 年，舊金山灣地區便用規模大於 5.5 的地震目錄來修正 Poisson model，也就是說，在原來的機率函數中，加入長年觀察的結果，可得到一變異函數 λ（t）。

$$\gamma(t) = \lambda(t) / \lambda \qquad \text{(式 G.3)}$$

估算在未來一段時間（t, t+Δt）之機率，γ（t）是外插進來的一平均率。因此，經驗模式在斷層 i 之機率如下：

$$P_i^{Emp} = 1 - e^{-\bar{\gamma}\lambda_i \Delta t} \qquad \text{(式 G.4)}$$

其中 $\bar{\gamma}$ 等於 γ（t）在整個（t , t+Δt）的平均值。

經驗模式假定在活動斷層中機率隨著時間變化，考慮與時間相依之分布，保留斷層中地震規模分布，因此，地質架構、古地震歷史、斷層分區、潛移等因素均被保留。

3. Brownian Passage Time（BPT）model

當一地震在一斷層區發生地震後，除非這個區域再度累積一定時間之能量，不然不大可能發生另一地震（Ellsworth et al., 1999; Kagan and Knopoff, 1987）。要敘述這種模式至少需要兩個參數以及最後之地震記錄，其中一個參數為活動間隔 μ，另外一個是標準差 σ，公式如式 G.5。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \qquad \text{(式 G.5)}$$

BPT 分布機率密度函數如下，其中 α=σ/μ：

$$f_{BPT}(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}}\, e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu t\alpha^2}} \qquad \text{(式 G.6)}$$

$$h_{BPT}(t) = f_{BPT}(t) / F_{BPT}(t) \qquad \text{(式 G.7)}$$

危險函數（hazard function）hBPT（t）在 t=0 時為零，並會隨時間漸漸趨於一最大值。BPT 的行為模式取決於 α，當 α 越小 fBPT（t）將呈現較高之峰值；當 α 值越大，延遲時間和結束時間變短，fBPT（t）函數更近似於 Poisson（圖 G.1）。

4.BPT-step Model

區域應力的突然增加或減少會影響狀態函數，使上述模型在時間軸上並非漸進前進，這個模型具體描述了區域應力變化之於狀態函數的關係。亦即，考慮地震對區域產生應力改變之影響，BPT-step Model 考慮了區域發生大地震，可能對鄰近的活動斷層應力產生影響，應力釋放則發震機率會減少；應力累積則會造成發震機率增加。BPT-step Model 是經專家評估此影響後，再將權重加到 BPT 模式中進行活動斷層機率的估算。

5.Time Predictable Model

考慮最近期的地震滑移量在完整地震週期內扮演的角色。當應變累積到等同於上一次地震滑移量時，下一個地震就會發生。亦即，根據最近幾次在斷層上滑移造成的地震推估下一次地震到來時的預期時間。WG88 及 WG90 利用 time predictable model 進行 30 年之機率計算，採用 lognormal 分布。在 WG02 中，採用 BPT 分布來描述再現時間分布。在 WG02 中，Time Predictable Model 只用在 San Andreas fault，這是由於其他斷層的不確定性及資料的缺乏。

日本地區在評估陸域活動斷層發震之條件機率，採用 BPT 模式（圖 G.2）。BPT 模式符合彈性回彈理論，函數近似於對數常態分布，且在時間無限延伸時，其條件機率不會有顯著降低（圖 G.3）。但是要進行 BPT 模式評估，需要斷層最後一次活動時間，且其最後一次活動時間若超過其再現周期太多，其條件機率會有高估之情形。因此日本地區在無法得知斷層最後一次活動時間的情形下，仍採用 Poisson 模式來評估斷層之發震機率。

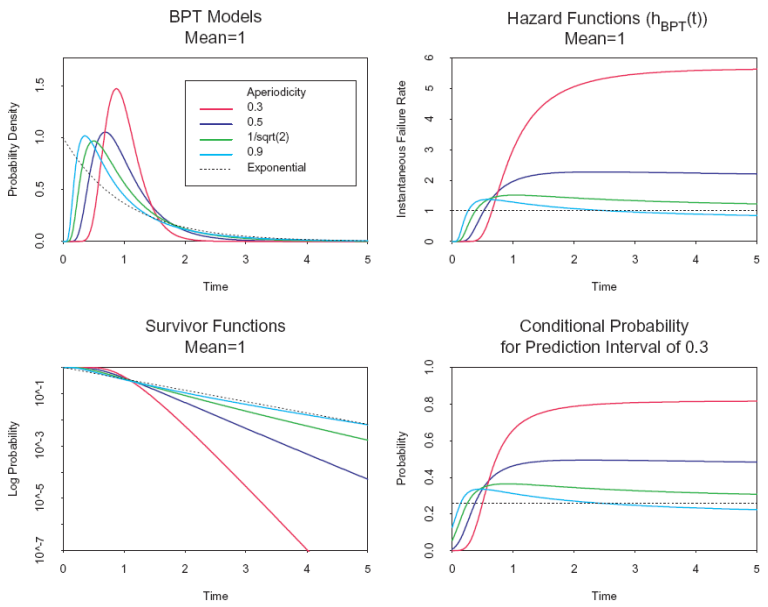


圖 G.1 不同 α 值（紅線 0.3、紫線 0.5、藍線 0.9）對 BPT 模式之影響。四張圖分別為機率密度、危險、存活及條件機率函數（Ellsworth et al., 1999）。

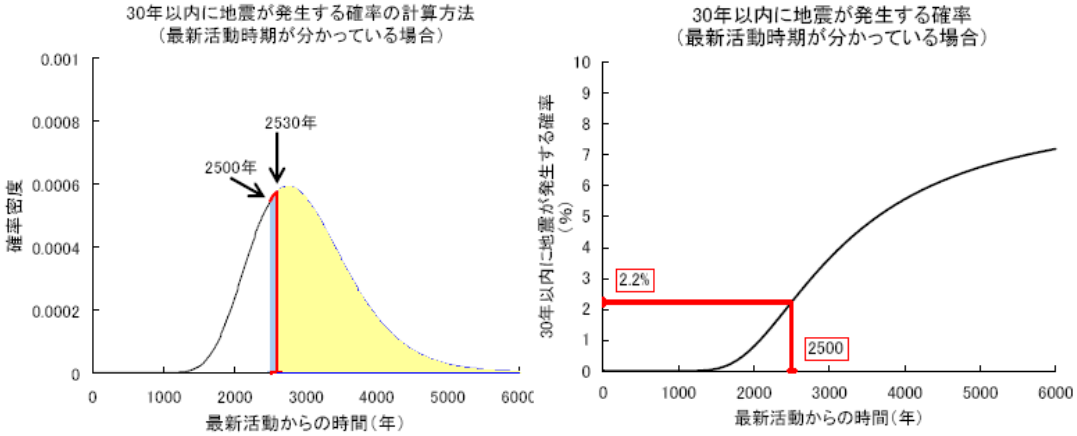


圖 G.2 日本 BPT 模式評估示意圖（摘自日本全國地震動預測地圖，2008）。

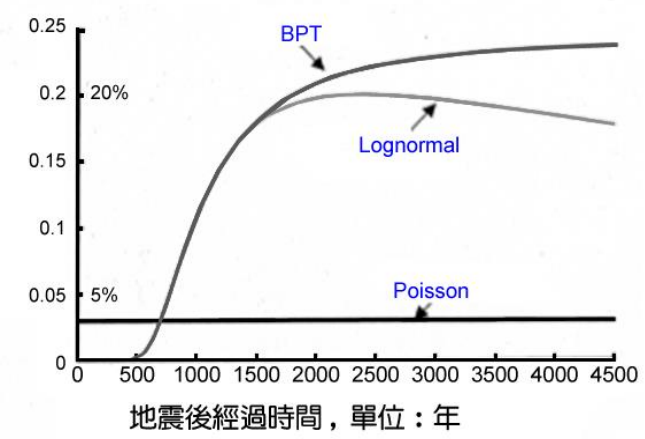


圖 G.3 各統計模型之條件機率比較，X 軸為地震後經過時間，Y 軸為發生率。

附錄H 審查委員意見

期中審查（委員綜合意見）：

期中審查意見	處理情形
1. P.Ⅷ99 年甘梯圖項下期中報告應修正與契約書之期程一致(為 6 月中至 7 月中)。	1. 感謝委員指正，遵照辦理。
2. 工作內容及工作項目，請製作表格依不同年份清楚描述。	2. 僅描述本年度計畫工作內容及項目。
3. P.Ⅹ全程甘梯圖斷層潛能分析評估應隨各年度變化而調整。	3. 已更正。
4. 圖例宜一致，且要中文化，避免重複（如圖 1-2、圖 2-4 及圖 2-5）。	4. 感謝委員指正，遵照辦理。
5. P.4 圖 1.2 中，有不正常的速度場不宜置於報告中，避免被錯誤引用。	5. 已將不正常速度場值移除、修正。
6. 本年度計畫期中成果（P.8）中，整合觀測資料進行分析，其文字內容均為地化觀測站成果的描述，無關整合觀測資料，往後請就相關的觀測資料成果，進行關聯性的整合分析，以符計畫的目標。	6. 在期末報告綜合應變儀、地化、地震活動異常進行整合分析。
7. P.13 及 P.14 中恆春地區有一測點約 270-280 度完全一樣，請再確認。	7. 其中一圖的 KDNM 站之速度場誤植，已修正。
8. 報告中所有速度場、應變率的圖表說明，均無起迄時間，應立即改善；另速度場部份亦應註明相對於澎湖 S01R 或 ITRF2005。	8. 感謝委員指正，會加以改進。

期中審查意見	處理情形
9. P.31~34 是否期中報告僅討論現象，如斷層兩側差異，P.34 圖中旋轉率之差異是否有意義？未來可加以討論！	9. 感謝委員指正，會加以改進。
10. P.49 表 3.2 應變儀之埋設深度請確認後修改。	10. 感謝委員指正，會加以改進。
11. P.50 Level-1 第一段與 3.1 節完全重複，可刪除。	11. 感謝委員指正，會加以改進。
12. P.51 宜注意有效位數。	12. 感謝委員指正，遵照辦理。
13. 圖 3.15 ~ 圖 3.19、圖 3.22 及圖 3.23，圖與圖說不同；圖 3.27 ~圖 3.35，圖與圖說應一致，如 CH1 ~ CH4 或 CH0 ~ CH 3，應修改。	13. 感謝委員指正，遵照辦理。
14. 缺圖 3.40，3.41，文中面應變響應 5.0275μstrain/m 為中興站之結果，是否可與太興比較？。	14. 感謝委員指正，會加以改進。
15. 山腳斷層與新城斷層分段的依據為何？是否依照 P.72 的 4 -1-2 中 2 之說明？	15. 山腳斷層與新城斷層之分段依據乃參考地調所二萬五千分之一活動斷層條帶地質圖說明書之敘述。
16. P.80 公式（4-14）、(4-18)、P.85 第四點與附錄 B，附 10 頁第 34.35 點一樣，似乎本期中報告仍用舊版，請修改！	16. 感謝委員指正，遵照辦理。
17. P.92 第三段應往後移，先有圖 4.26、4.27 之資料才能建構 4.25 之模型。山腳北段	17. 感謝委員指正，已修改山腳斷層說明之文字排序。另外 GPS 資料在換

期中審查意見	處理情形
之抬升如何解釋，與斷層之機制關係如何？	算抬升量時較易產生誤差，根據精密水準 2002~2006 測量之結果（饒瑞鈞等，2006）跨山腳段層北段無明顯之高程變化，而南段於山腳斷層東側則有陷落之情形，指示山腳斷層可能仍有造成陷落。
18. 山腳斷層三維斷層幾何模型的建立（圖 4.25）與圖 4.24 之間關聯？南段、北段的分界在哪裡？斷層深多少？是否明白表示說明（用圖 4.34）；另表 4.4 中斷層參數，34~45 km 是什麼意思？又表中斷層寬度是什麼？短期滑移速率中北段之抬升率 5.5 mm/yr 的意義為何？	18. 山腳斷層三為幾何模型之淺部斷層傾角參考淺層震測頗面資料，包括圖 4.24。 34 公里為斷層於陸域之長度，45 公里則是加上了斷層可能延伸至外海之長度。斷層寬度為斷層面之寬度。抬升速率 5.5 mm/yr 可能是由於 GPS 在換算抬升量時造成之誤差，需以水準測量驗證其真實性。
19. 表 4.4 有關 1694 地震事件是否有直接證據，請再確認。	19. 目前無直接證據證明 1694 事件為山腳斷層錯動造成，也無槽溝資料發現山腳斷層最近一次活動時間，但是對於斷層潛勢分析而言，仍需有最後一次活動時間進行評估，因此本計畫仍將以 1694 作為假設之最後一次事件來計算，且繼續蒐集文獻釐清斷層之最後一次活動之事件。
20. 山腳斷層與金山斷層的關係在圖 4.24、圖 4.26、圖 4.27 中請說明。	20. 山腳斷層斷層面淺部，在北段位於金山斷層上盤，而在南段則位於金山斷層下盤，深部則可能與金山斷層共用同一斷層面。 因目前地調所公布之活動斷層已不包含金山斷層，因此在圖中並未將

期中審查意見	處理情形
	金山斷層列出。
21. P.95 模型的建立宜注意比例尺的問題。	21. 感謝委員建議。
22. 新城斷層的分段，正好在頭前溪？分段的依據為何？表 4.6 中斷層名稱誤植玉里斷層！	22. 新城斷層之分段依據乃參考地調所二萬五千分之一活動斷層條帶地質圖說明書之敘述。玉里斷層誤植部份已修正於於修改之報告中。
23. 圖 4.33 及圖 4.34 之速度場及滑移速率模擬其原理是否先以簡單之示意圖加以說明，俾便讀者較易理解！	23. 此部分會更加詳盡說明，感謝委員建議。
24. 山腳斷層的模擬，期中報告表示已完成其模擬結果，但文中缺乏較仔細的方法、假設及資料的完整介紹，希望期末報告能有較完整的介紹。	24. 此部分會更加詳盡說明，感謝委員建議。
25. 第五章地化資料內容宜再補充（如 0304 甲仙地震是否有異常關聯性），並與附錄 C 作整合。	25. 在期末報告以 2009 年來規模六以上地震（包含甲仙地震）進行整合分析
26. 特徵地震模式及分析機率模式期中尚無成果，即便符合表 A 中之甘梯圖，期中之後請加強辦理。	26. 感謝委員指正，遵照辦理。
27. 斷層分段特性，不應只參考資料易取的 San Andreas Fault，應注意大地構造環境的差異。	27. 相關討論已加入第四章中。
28. 此計畫為綜合性計畫，希望在成果顯示時，能寫入由那位主持人執行的成果。	28. 感謝委員指正，遵照辦理。

期中審查意見	處理情形
29. 平均速度場等圖是否能加上觀測時間之說明？	29. 感謝委員指正，會加以改進。
30. GPS 為連續性資料,但目前的分析並無應用此連續資料的好處,僅以時間段的起與始作分析，甚為可惜。	30. GPS 的連續記錄觀測對於降低速度場及應變率估算之誤差有著直接的貢獻。另外連續記錄對於監測活動斷層震間及震後隨時間變化行為也提供重要的資料。以後本研究將多方面朝這個方向進行。
31. 井下應變儀之分析成果宜再加速！	31. 感謝委員指正，遵照辦理。
32. 時間序列宜將 GPS、應變儀、地化、地震規模做整合繪出，俾以了解其關聯性。	32. 在期末報告綜合應變儀、地化、地震活動異常進行整合分析。

期末審查（委員綜合意見）:

期末審查意見	處理情形
1. 摘要 P.ⅩⅣ山「角」斷層錯別字請修正為山腳斷層；第 3 段「…嘗試對”於”地震相關…」請修正錯別字。(斷層潛勢)	1. 感謝委員指正，已修正。
2. P.1 本所之 GPS 追蹤站至 99 年底止，應不只 60 站，請查明後更新。	2. 感謝委員建議。經查證，地調所連續站於 99 年 10 月~11 月新增 GS61~GS68 等八站，內文與附圖已改成共 68 站。但由於資料解算時間至 2010 年 10 月，新建之站尚未有足夠資料以解算速度場等資料，故僅依據工作項目內所列之測站作解算。

期末審查意見	處理情形
3. P.7 圖 1.6 何謂中大規模？請說明。	3. 此圖所述中大規模指的是規模 4 以上之地震。
4. P.11 第 1 段第 2 行本年度計畫應計算 2009 年 10 月至 2010 年 10 月。(GPS)	4. 感謝委員建議，已修改。
5. P.14 圖 2.1 建議將共點設在最西邊？(GPS)	5. 圖 2.1 使用的參考共點為 S01R 站。
6. P.17 圖 2.4 圖說之 GPS 相對站請修改。(GPS)	6. 圖 2.4 誤植為其他張圖，感謝委員建議，已修改。
7. P.17 圖 2. 4 灰色箭頭為其他單位測站之速度場，請於圖中補列。(GPS)	7. 圖 2.4 誤植為其他張圖，感謝委員建議，已修改。
8. P.19、P.25、P.30 及 P.33 方位角之角度下標「o」請修正為上標「^{o}」。(GPS)	8. 內文格式有誤，感謝委員建議，已修改。
9. P.19 圖 2.1 應修正為圖 2.6。(GPS)	9. 感謝委員建議，已修改。
10. P.19 圖 2.6 無測站處，如何能有資料？請修改。(GPS)	10. 計算應變率、旋轉率時使用以 0.1 度網格、計算指定半徑內所選測站之資料，無測站處所顯示的資料是經過內插計算後的結果。
11. P.20 圖 2.7 未標示龜山島。(GPS)	11. 此圖之範圍為本區域主要探討之活動構造所在，並未將所有臺灣北部測站列入。龜山島測站至速度場可參考圖 2-4。
12. P.20 未來需加入氣象資料，進一步估證是否與季節變化有關，請問未來是下一年度或何時？請說明。(GPS)	12. 下一年度的工作項目將以時間序列的週期性變化作為探討的項目，依據氣象資料（降雨、氣溫、氣壓…

期末審查意見	處理情形
	等）來佔證其相關性。
13. P.23 “與前一台北地區 GS11 測站具有相同趨勢”，請稍加敘述緣由。(GPS)	13. 感謝委員建議，已於內文 P.23 倒數第四行加入敘述:「由長時間的時間序列觀測瞭解其變化為週期性的波動，唯 GS03 與 GS11 在該時間段變化速率加快且明顯， 目前週期性影響仍無法確定主要影響因子，需在往後的研究中探討該一科學問題，以獲得解答」。
14. 圖 2.29 圖 2.31 未標示 GPS 速度場。(GPS)	14. 圖說部分文字有誤，感謝委員建議，已修正為「綠色三角形是使用到的 GPS 連續站，藍色虛線為斷層位置」。
15. P.42「…發生深度大於 3 公尺」請修正為 3 公里。(GPS)	15. 感謝委員指正，新城斷層斷層參數反演之內文已重新撰寫，相關誤植文字也一併更正。
16. P.45 最後一行”模式為了演算出這些分量所造成的結果”，未敘述完整，請補充說明。(GPS)	16. 感謝委員指正，已更正文字敘述。
17. P.49 第 2 段「 3×10-9cm 」請修正「3×10^{-9}cm」。(井下應變)	17. 已修正。
18. P.57 時間系統資料分析，採用 visual signal 時頻分析工具，僅說明工具本身，並未將分析結果多加描述，請多加補充。(井下應變)	18. 感謝委員建議，本計畫未來將於資料庫系統中嘗試列入 visual signal 時頻分析對於井下應變儀時間序列分析之初步成果，已提供後續分析之綜觀。

期末審查意見	處理情形
19. P.73 圖 3.26 圖說應為樹林觀測站非梅花國小測站。(井下應變)	19. 已修正。
20. P.78 圖 3.33 圖說應為中興觀測站非太興觀測站。(井下應變)	20. 已修正。
21. P.79 圖 3.34 圖說應為太興觀測站非中興觀測站。(井下應變)	21. 已修正。
22. P.81 最後一行，比較各分量的真正的方向角與記錄有差異，請就其差異性多作一些分析解釋。(井下應變)	22. 已加說明。
23. 附錄 A GPS 連續站時間序列附 14~附 15 頁之測站 GS45~GS50 資料應補齊。(GPS)	23. 先前使用之畫圖呈現方式不佳，誤將繪圖時間段選取太大，看起來有很多資料空缺，已修改為較適合的時間段，感謝委員建議。
24. 報告書內文與圖說文字之錯別字或不符合，應詳加校閱修改。	24. 感謝委員指正，遵照辦理。
25. 內文中之年月日，請統一用阿拉伯數字。(GPS、井下應變、斷層潛勢、地化整合)	25. 遵照辦理。
26. 本文中所有位移量宜統一單位，不宜有的用 cm/yr，有的用 cm/yr，依本計畫之位移量大小建議使用 mm/yr。(GPS、井下應變、斷層潛勢、地化整合)	26. 遵照辦理。
27. 在報告書中的速度場、旋轉等所使用的資料年限，應加入圖中，並將資料所得結果與以前資料作比較。(GPS)	27. 感謝委員指正，已將使用資料時間段說明加於圖中或圖說部分。另外於內文 P.11 加入本計畫的連續 GPS 觀測結果所獲得相對於澎湖 S01R

期末審查意見	處理情形
	速度場與余水倍 1997 年所發表屬於震間速度場相比較之結果(附圖於 P.17)。
28. 此計畫目前之報告,較前期計畫成果更為完整，但目前為止對 GPS 連續觀測站的連續資料，仍未有實際的應用，對於未來的工作，在連續資料的分析，能更仔細的分析。(GPS)	28. 感謝委員建議。下年度在 GPS 連續觀測站的連續資料的部分，除了繼續解算觀測資料外，將進一步對部分測站之時間序列的年週期性現象分析其是否為氣象變化所影響，或是其他原因造成；並針對應變資料，提出相關之模型解釋。
29. 在 GPS 的模擬中，明顯的 over parametrization ,在未來模擬時，能加以修飾此計算。(GPS)	29. 感謝委員指正，未來會針對此部加強說明。
30. 平均應變率的推求於跨斷層線的應變意義為何？(GPS)	30. 震間期時斷層上盤呈現鎖定狀態（lock），距地表某個深度的斷層面穩定滑動，沿斷層面上的應變累積，直到發生地震時應變釋放，在地表產生破裂。 跨斷層之平均應變率計算即是為了監測近斷層處的應變率，斷坡至其延伸到斷坪的範圍反應至地表的應變率均較大。而不同的斷層類型需要考慮的範圍也有所不同：橫移斷層之傾角幾乎垂直，應變計算僅沿地表斷層線兩側數公里；正斷層與逆斷層則在深部的斷坪部分可能延伸至數公里至數十公里外、至其他斷層之下，因此需要推求跨斷層線的平均應變率。

期末審查意見	處理情形
31. 斷層分段，是否列入目前資料？模型之「斷層面」之資料如何？請說明。(斷層潛勢)	31. 目前國內缺乏相關的物理模擬或是地震紀錄可供進行分段，分段依據仍是參考地調所公佈之條帶地質圖說明書，或是以地形變化處及斷層走向變化處為分段之依據。雖然在中央地質調查所所公布的山腳斷層是分為南段與北段，但以目前的地質資料來說，在基盤以下不論北段或南段的活動很可能只是在相同的斷層面上有不同的活動形式，因此本計畫在建構斷層模型時，山腳斷層是一個連續的曲面。
32. 新城斷層斷層幾何型態必須正確引用資料。(斷層潛勢)	32. 感謝委員指正，目前可作為斷層幾何面之參考者主要為黃旭燦平衡剖面資料，本計畫目前所建置的斷層幾何面也是採用平衡剖面之成果。若是無平衡剖面經過之斷層則會蒐集地物探勘或是鑽井資料來建立合理之斷層面幾何模型。
33. 機率的分析中，山腳斷層的可能活動與新城斷層比較起來機率相當，但新城斷層已定義為活動斷層，但山腳斷層尚未有清楚的意義，希望未來文中有所討論及未來建議。(斷層潛勢)	33. 本計畫在進行活動斷層發震機率評估時均假設斷層為活動斷層且會依循特徵地震模式之破裂情形，斷層若非屬於活動斷層則不適用於此評估方法。
34. 斷層參數反演，斷層面的形貌與傾角的合理性是否加強說明。山腳斷層宜考慮水平位移，是否與伸張、正斷層為主的大地地體構造差異太大？在一不均勻的滑向位移場中，表示平均滑移的意義為何？請說	34. 在本計畫中，斷層面的形貌除了根據地表斷層跡與鄰近地區之震測剖面，同時也考慮地表速度場反演後是否與原來之速度場相符，進而修正斷層面知幾何型態。

期末審查意見	處理情形
明。(GPS)	本計畫之斷層面滑移速度場是在假設「間震時期地表速度場大部分是由於底下斷層面的滑移所貢獻」這個前提之下，所反演之結果。修正模式後的結果大致可以符合目前對山腳斷層是是帶有左移分量之正斷層之說法。 不均均的滑向位移場可了解斷層面不同的活動性，而平均滑移量之數值除了有利於概念性描述斷層的活動量，並且可簡化斷層潛勢之演算。
35. 機率評估的相關界限為何？請說明。(斷層潛勢)	35. 本計畫本次參考美國評估舊金山灣區之方式,採用地震矩規模 6.7 以上進行機率之評估,因為考慮到 6.7 以上之地震足以引發地表破裂及造成災害,未來則可能依循各活動斷層之特性而會調整地震矩規模之下限值.
36. tremor 應有中譯、遠距之定義？請說明。(地化整合)	36. 我們將 tremor 改譯為”非火山顫動”。 遠距、中距、區域定義如下，已修改於期末報告中。遠距(teleseismic): 000km; 中距 (regional): 100~1000 km;近距(local)<100 km。
37. 在 tremors 的分析中，尚無法確切定義 tremors 文中所表現的資料,似乎較類似 P 波，S 波而非 tremors。(地化整合)	37. 我們依據地震目錄的搜尋、及其他測站地震波的展現，已確定非為 P、S 的能量包。詳細資料處理方式將列於修改版之期末報告。

期末審查意見	處理情形
38. 資料分析章節有關「地震」之各種用字宜界定清楚。(地化整合)	38. 已修正。
39. 應變資料，仍處於資料彙整，尚未有模型解釋。(GPS)	39. 感謝委員建議。下年度在 GPS 連續觀測站的連續資料的部分，除了繼續解算觀測資料外，將進一步對部分測站之時間序列的年週期性現象分析其是否為氣象變化所影響，或是其他原因造成；並針對應變資料，提出相關之模型解釋。
40. GPS 分析各區均出現影響分析結果之特異資料，在分析時應嘗試將此資料刪除並請地調所檢查異常站之站址是否受到其他場址環境的影響。(GPS)	40. 感謝委員建議，將依照建議做修正，將在分析時將特異資料刪除，並請相關單位檢查異常站之站址是否受其他環境影響。
41. 井下應變儀受地下水變化，1m 可達 5μ strain 是否符合岩石力學特性，請討論。請將地下水位的原始資料與精度作說明。(井下應變)	41. 這需做實驗才能說明。井下應變儀受到地下水壓的作用，一大部分是直接加壓在應變儀上，僅有一小部分是經過岩石受壓應變後再影響應變儀記錄，因此這數值的正確與否，需在裝設儀器前就做實驗。