經濟部

中央地質調查所報告第 100-07 號
計畫編號：100-5226904000-03-01

經濟部中央地質調查所

100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(3/4)」(第三年度)

全 程 計 畫：自98年5月至101年12月止
本年度計畫：自100年1月至100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 100 年 12 月

中央地質調查所報告第 100-07 號
計畫編號：100-5226904000-03-01

經濟部中央地質調查所

100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(3/4)」(第三年度)

全 程 計 畫：自98年5月至101年12月止
本 年 度 計 畫：自100年1月至100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 100 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(3/4)
(第三年度)

計畫主持人：胡植慶
協同主持人：劉啟清
饒瑞鈞
研　究　員：張午龍
鄭錦桐
陳卉瑄
李元希
吳善薇
唐昭榮

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學

中　華　民　國　100　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 IV
圖目錄 V
摘要 XVII
ABSTRACT XIX
一、緒　論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2　98~99 年度工作成果 9
1-3 本年度工作內容概述 12
1-3-1 本年度預期成果 14
二、GPS 及精密水準測量 17
2-1 工作項目 17
2-1-1 工作進度 22
2-1-2 2011 年 GPS 施測成果 27
2-1-3 2011 年精密水準測量成果 40
2-2 地表變形研究成果 75
2-2-1 GPS 連續記錄資料成果分析 75
2-2-2 嘉南地區現今地殼變形分析 92
2-2-3 中部地區現今地殼變形分析 100
三、井下應變儀之研究方法與成果 103
3-1 井下應變儀資料處理 103
3-1-1 LEVEL-0 106
3-1-2 LEVEL-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正 107
3-1-3 LEVEL-2：包含正確原始面積應變、剪應變 114
3-1-4 井孔回復效應與水泥膨脹效應的估算與濾除 121
3-1-5 資料完整性測試 133
3-2 時間序列資料分析 138
3-2-1 分析方法 138
3-2-2 分析流程 142
3-3 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷 145
3-3-1 影響應變儀資料變化的因素 145
3-3-2 檢視井下應變儀資料中異常事件 153

3-3-3 潮汐效應評估的方法初步測試.....172
3-4 井下應變儀資料管理系統網站.....188
3-4-1 資料庫管理系統網頁簡介.....188
3-4-2 資料更新與使用者權限建立.....190
3-4-3 透過網頁繪製時頻圖.....199
3-4-4 未來建議工作項目.....200
3-5 井下應變儀相關建議事項.....201
四、斷層活動潛勢分析.....205
4-1 前言.....205
4-2 分析流程.....205
4-2-1 活動斷層調查與參數蒐集.....205
4-2-2 活動斷層潛勢評估流程.....211
4-3 活動斷層發生機率潛勢評估.....217
4-3-1 六甲斷層.....217
4-3-2 木屐寮斷層.....223
4-3-3 六甲斷層及木屐寮斷層潛勢評估.....229
4-4 小結.....233
五、整合觀測資料分析.....235
5-1 異常紀錄與大地震活動之關係.....235
5-2 井下地震儀異常資料庫建置.....239
5-2-1 異常地震訊號-長微震基本介紹.....239
5-2-2 背景雜訊與長微震偵測之關係.....239
5-2-3 2008 年以來目錄建置.....241
5-3 整合分析架構.....243
六、結論與建議.....245
參考文獻.....247
附錄 A GPS 資料檢核成果
附錄 B 精密水準測量資料檢算成果
附錄 C 應變率計算方法
附錄 D 井下應變儀儀器原理
附錄 E 井下應變儀維護紀錄表對巡察及維護之效益
附錄 F 井下應變儀觀測站觀測系統校正與檢修完工報告書
附錄 G 斷層滑移速率
附錄 H 活動斷層幾何特性和地震矩規模

附錄 I 活動斷層特徵地震模式
附錄 J 機率密度函數
附錄 K 去除前餘震說明
附錄 L 委員審查意見

表目錄

表 A：本年度預期進度甘梯圖(GANTT CHART)。 XII
表 B：預期進度查核點(CHECK POINT)。 XIII
表 C：全程計畫預期進度甘梯圖。 XIV
表 D：期末須交付之各項工作項目。 XV
表 1.1：中央地質調查所建置的 68 個連續 GPS 追蹤站資料接收起始時間表。 7
表 1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。 8
表 1.3：地球化學觀測站資料接收起始時間表。 8
表 2.1：GPS 測量進度表。 17
表 2.2：水準測線測量進度表。 18
表 2.2：水準測線測量進度表（續）。 19
表 2.3：縣 174_北門至楠西精密水準測線約制站抬升速率表。 93
表 3.1：井下應變儀測站的經緯度與資料日期。 104
表 3.2：井下應變儀測站的安裝日期、儀器與各分量的方位角。 105
表 3.3：主要天文角度變化速率及週期。 173
表 3.4：天文潮汐調和函數分量表。 174
表 3.5：潮汐資料主要調和頻率組成。 176
表 3.6：多變數迴歸法補遺使用之頻率。 180
表 4.1：活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式。 208
表 4.2：鑽井岩芯資料表。[修改自*楊志成*，2005] 220
表 4.3：六甲斷層參數表。 221
表 4.4：木屐寮斷層參數表。 227
表 4.5：六甲+木屐寮斷層狀況 1，M_w≧6.7 之發生機率。 232
表 4.6：六甲+木屐寮斷層狀況 1，M_w≧7.0 之發生機率。 232
表 4.7：六甲+木屐寮斷層狀況 2，M_w≧6.7 之發生機率。 232
表 4.8：六甲+木屐寮斷層狀況 2，M_w≧7.0 之發生機率。 233
表 5.1：規模大於五之地震事件列表。 236
表 5.2：2009 年至-2011 年 10 月規模大於五地震之異常紀錄對應比較表。 238
表 5.3：2008 年一月至四月長微震目錄。 242

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。 6

圖 1.2：地質調查所設置的 68 個連續觀測站與其它單位交換 129 個連續觀測站分布圖。 13

圖 1.3：2002 年至 2010 年 GPS 移動站及水準測線分布與施測次數圖。 14

圖 2.1：2002 年 3 月至 2011 年 10 月 GPS 點位施測次數圖。 20

圖 2.2：2002 年 2 月至 2011 年 10 月精密水準測線施測次數圖。 21

圖 2.3：2011 年度新增點位分布圖。 25

圖 2.4：臺灣地區 GPS 測站分布圖。 26

圖 2.5A：2002-2010 年及 2011 年 GPS 點位坐標殘差分布圖。 28

圖 2.5B：2002-2010 年及 2011 年 GPS 點位均方根誤差分佈圖。 28

圖 2.6：台北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 29

圖 2.7A：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 30

圖 2.7B：連續站 THAI 及 FUSI、移動站 GE11、GE16、GE17、GF19、GF24 及 GF25 2008-2011 年解算時間序列圖。 30

圖 2.8：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 31

圖 2.9：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 32

圖 2.10：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 33

圖 2.11：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 35

圖 2.12：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 35

圖 2.13：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 36

圖 2.14：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 38

圖 2.15：全臺灣應變率場分布圖。 39

圖 2.16：精密水準測量結果分析圖。 40

圖 2.17：台 2_石門至萬里測線水準垂直速度圖。 42

圖 2.18：士林至三芝測線水準垂直速度圖。 43

圖 2.19：淡水至士林測線水準垂直速度圖。 44

圖 2.20：五股至臺北測線水準垂直速度圖。 46

圖 2.21：縣 115_新屋至童話世界測線水準垂直速度圖。 47

圖 2.22：縣 122_新竹至五峰測線水準垂直速度圖。 48

圖 2.23：縣 117_新竹至峨眉測線水準垂直速度圖。 49

圖 2.24：苗栗至南庄測線水準垂直速度圖。 51

圖 2.25：縣 132_大安至東勢測線水準垂直速度圖。 52

圖 2.26：縣 136_龍井至太平測線水準垂直速度圖。 53

圖 2.27：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準垂直速度圖。 55
圖 2.28：縣 150-台 16_北斗至水里測線水準垂直速度圖。 56
圖 2.29：縣 164_金湖至瑞峰測線水準垂直速度圖。 57
圖 2.30：縣 174_北門至楠西測線水準垂直速度圖。 59
圖 2.31：台 19 甲_善化至關廟測線水準垂直速度圖。 60
圖 2.32：縣 182_安平至龍崎測線水準垂直速度圖。 61
圖 2.33：縣 184_路竹至茂林主副線水準垂直速度圖。 63
圖 2.34：台 22_岡山至安坡測線水準垂直速度圖。 64
圖 2.35：佳冬至七佳測線水準垂直速度圖。 66
圖 2.36：恆春西台地至佳樂水測線水準垂直速度圖。 67
圖 2.37：台 26_恆春至鵝鑾鼻主副線水準垂直速度圖。 68
圖 2.38：嶺頂至瀧澗測線水準垂直速度圖。 70
圖 2.39：豐濱至光復測線水準垂直速度圖。 71
圖 2.40：靜浦至紅葉測線水準垂直速度圖。 72
圖 2.41：富岡至東成測線水準垂直速度圖。 73
圖 2.42：台 2_梗枋至東澳測線水準垂直速度圖。 73
圖 2.43：選定作為參考站之 14 站國際 IGS 站分布圖。 76
圖 2.44：選定之 25 站國內核心站分布圖。 77
圖 2.45：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖，共 197 站。 78
圖 2.46：每日座標解之時間序列經處理成殘差（RESIDUAL）之流程示意圖。 79
圖 2.47：IGS05 參考框架所選定之核心站。 79
圖 2.48：測站 S01R 每日解時間序列。 80
圖 2.49：1995-2010 年間相對於 S01R 之速度場。 82
圖 2.50：1995-2010 年之位移軌跡圖。 83
圖 2.51：測站 ILAN 與 SUAO 每日解及基線變化時間序列。 84
圖 2.52：測站 ILAN 與 SUAO 位移軌跡圖。 85
圖 2.53：測站 FLNM 與 HUAL 每日解及基線變化時間序列。 86
圖 2.54：測站 FLNM 與 HUAL 位移軌跡圖。 86
圖 2.55：測站 CHEN 每日解時間序列。 87
圖 2.56：測站 CHEN 位移軌跡圖。 88
圖 2.57：測站 SUNM 每日解時間序列。 89
圖 2.58：測站 SUNM 位移軌跡圖。 89
圖 2.59：測站 HENC 與 KDNM 每日解及基線變化時間序列。 90
圖 2.60：測站 HENC 與 KDNM 位移軌跡圖。 91

圖 2.61：嘉南地區 GPS 水平速度場與縣 174_北門至楠西水準測線分布圖。 97
圖 2.62：二維彈性斷層模型示意圖。 97
圖 2.63：圖 2.61 中剖面內水準與 GPS 速度場比較圖。 98
圖 2.64：斷層模擬結果。 98
圖 2.65：嘉南地區 GPS 水平速度場與縣 164_金湖至瑞峰水準測線分布圖。 99
圖 2.66：圖 2.61 中剖面內水準與 GPS 速度場比較圖。 99
圖 2.67：斷層模擬結果。 100
圖 2.68：中部地區 GPS 水平速度場與縣 148_王功至草屯、縣 150_北斗至水里水準測線分布圖。 ..102
圖 2.69：縣道 150_北斗至水里斷層模擬結果。 102
圖 3.1：瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料之異常狀況。 106
圖 3.2：曾文水庫南測站應變分量。 108
圖 3.3：曾文水庫北測站應變分量。 108
圖 3.4：甲仙十八灣測站應變分量。 109
圖 3.5：梅花國小測站應變分量。 109
圖 3.6：大坪國小測站應變分量。 110
圖 3.7：中興國小測站應變分量。 110
圖 3.8：太興國小測站應變分量。 111
圖 3.9：新樂國小測站應變分量。 111
圖 3.10：達邦測站應變分量。 112
圖 3.11：錦和國小測站應變分量。 112
圖 3.12：明德中學測站應變分量。 113
圖 3.13：樹林觀測站應變分量。 113
圖 3.14：曾文水庫南測站應變方向。 115
圖 3.15：曾文水庫北測站應變方向。 115
圖 3.16：甲仙十八灣測站應變方向。 116
圖 3.17：梅花國小測站應變方向。 116
圖 3.18：大坪國小測站應變方向。 117
圖 3.19：中興國小測站應變方向。 117
圖 3.20：太興國小測站應變方向。 118
圖 3.21：新樂國小測站應變方向。 118
圖 3.22：達邦國小測站應變方向。 119
圖 3.23：錦和國小測站應變方向。 119
圖 3.24：明德中學測站應變方向。 120
圖 3.25：樹林測站應變方向。 120

圖 3.26：曾文水庫南測站原始面應變與模式修正。 121
圖 3.27：曾文水庫北測站原始面應變與模式修正。 122
圖 3.28：甲仙十八灣測站原始面應變與模式修正。 123
圖 3.29：梅花國小測站原始面應變與模式修正。 124
圖 3.30：大坪國小測站原始面應變與模式修正。 125
圖 3.31：中興國小測站原始面應變與模式修正。 126
圖 3.32：太興國小測站原始面應變與模式修正。 127
圖 3.33：新樂國小測站原始面應變與模式修正。 128
圖 3.34：達邦測站原始面應變與模式修正。 129
圖 3.35：錦和國小測站原始面應變與模式修正。 130
圖 3.36：明德國中測站原始面應變與模式修正。 131
圖 3.37：樹林測站原始面應變與模式修正。 132
圖 3.38：曾文水庫南測站的比較檢核。 133
圖 3.39：曾文水庫北測站的比較檢核。 134
圖 3.40：梅花國小測站的比較檢核。 134
圖 3.41：大坪國小測站的比較檢核。 134
圖 3.42：中興國小測站的比較檢核。 135
圖 3.43：太興國小測站的比較檢核。 135
圖 3.44：新樂國小測站的比較檢核。 135
圖 3.45：達邦測站的比較檢核。 136
圖 3.46：錦和國小測站的比較檢核。 136
圖 3.47：明德中學測站的比較檢核。 136
圖 3.48：樹林測站的比較檢核。 137
圖 3.49：達邦站地下水位與面應變的相關圖。 145
圖 3.50：太興站地下水位與面應變的相關圖。 146
圖 3.51：中興站地下水位與面應變的相關圖。 146
圖 3.52：嘉義地區三個測站的面積應變資料於 2008 年 12 月在做地下水影響修正前之資料。 147
圖 3.53：2008 年 12 月嘉義三個測站的面積應變在做地下水影響修正後之資料。 147
圖 3.54：嘉義三個測站的面積應變資料在做了地下水與氣壓影響修正後，面積應變變化更清楚。 148
圖 3.55：嘉義三個測站於 2011 年 2 月初的面積應變在做地下水影響修正後之時間序列。 149
圖 3.56:嘉義三個測站的面積應變資料在做了地下水與氣壓影響修正後,太興站仍有分氣壓相關的變化。 149
圖 3.57：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。 150
圖 3.58：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小地下水位持續下降。 151

圖 3.59：2009 年至 2011 年 10 月井下應變儀地震前兆相關之地震。 154
圖 3.60：2009 年 1 月 23 日規模 5.3，蘭嶼南方的地震。在嘉義網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 155
圖 3.61：2009 年 1 月 23 日規模 5.3，蘭嶼南方的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 155
圖 3.62：2009 年 4 月 17 日規模 5.3，花蓮外海的地震。在新竹網各測站都有明顯的應變異常。 156
圖 3.63：2009 年 5 月 27 日規模 5.7，高雄外海的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 157
圖 3.64：2009 年 6 月 28 日規模 5.3，花蓮秀林外海的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 158
圖 3.65：2009 年 7 月 26 日規模 5.4，花蓮玉里的地震。在嘉義網太興測站顯示同震變形，有明顯的應變異常。 159
圖 3.66：2009 年 9 月 12 日規模 5.1，花蓮市外海的地震。在嘉義網達邦測站顯示同震變形，有明顯的應變異常。 160
圖 3.67：2009 年 10 月 4 日規模 6.1，花蓮市外海的地震。在嘉義網達邦測站顯示同震變形，達邦站與中興站有明顯的應變異常。 161
圖 3.68：2009 年 12 月 19 日規模 6.9，花蓮市外海的地震。在嘉義網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 162
圖 3.69：2010 年 3 月 4 日規模 6.4，甲仙地震。嘉義網。 163
圖 3.70：2010 年 3 月 4 日規模 6.4，甲仙地震。在嘉義網太興國小與及中興國小測站都顯示震前應變斜率的改變，有明顯的應變異常。 163
圖 3.71：2010 年 4 月 9 日規模 5.1，宜蘭外海的地震；與 2010 年 4 月 11 日規模 5.4，台東成功外海地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 164
圖 3.72：2010 年 4 月 23 日規模 5，宜蘭蘇澳外海的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。 165
圖 3.73：2010 年 7 月 3 日規模 5.1，屏東縣的地震；2010 年 7 月 9 日規模 5.3，宜蘭南澳外海的地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。 166
圖 3.74：2010 年 7 月 3 日規模 5.1，屏東縣的地震；2010 年 7 月 9 日規模 5.3，宜蘭南澳外海的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。 166
圖 3.75：2010 年 9 月 29 日規模 5，花蓮外海地震；10 月 1 日規模 5.1，宜蘭地震；10 月 3 日規模 5，宜蘭南澳地震；10 月 4 日規模 6.6，宜蘭外海地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。 167
圖 3.76：2011 年 3 月 20 日規模 5.8，台東外海的地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。 168

圖 3.77：2011 年 4 月 29 日規模 5.8，台東外海的地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。 169
圖 3.78：2011 年 4 月 29 日規模 5.8，台東外海的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。 169
圖 3.79：2011 年 6 月 26 日規模 5.0，南投的地震。在嘉義網達邦測站顯示有明顯的應變異常。 170
圖 3.80：2011 年 6 月 26 日規模 5.0，南投的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。 170
圖 3.81：2011 年 9 月 9 日規模 5.0，台東外海的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。 171
圖 3.82：日月星體造成潮汐變化示意圖。 173
圖 3.83：1 日潮汐主要分量的變化的示意組合。 177
圖 3.84：地球潮汐與潮位站觀測的流程圖。 178
圖 3.85：多變數迴歸法資料補遺。 181
圖 3.86：嘉義網在柯羅莎颱風期間的原始變形。 182
圖 3.87：達邦觀測站在柯羅莎颱風期間的潮汐分析。 183
圖 3.88：太興國小觀測站在柯羅莎颱風期間的潮汐分析。 183
圖 3.89：中興國小觀測站在柯羅莎颱風期間的潮汐分析。 184
圖 3.90：嘉義網各測站在柯羅莎颱風期間的潮汐估計。 184
圖 3.91：嘉義網在甲仙地震期間的原始變形。 185
圖 3.92：達邦觀測站在甲仙地震期間的潮汐分析。 185
圖 3.93：太興國小觀測站在甲仙地震期間的潮汐分析。 186
圖 3.94：中興國小觀測站在甲仙地震期間的潮汐分析。 186
圖 3.95：嘉義網各測站在甲仙地震期間的潮汐估計。 187
圖 3.96：井下應變儀資料庫管理系統網站首頁。 189
圖 3.97：2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間降雨資料比對。 202
圖 3.98：井下應變儀中的原始氣壓記錄。 203
圖 3.99：氣象局屬自計站氣壓記錄。 204
圖 4.1：斷層幾何參數示意圖。 209
圖 4.2：斷層分段分布圖。 209
圖 4.3：由斷層分區建立斷層破裂模式。 210
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）。 210
圖 4.5：活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖。 214
圖 4.6：活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。 214
圖 4.7：加州地區地震潛勢評估邏輯樹。 215
圖 4.8：WG02 模式評估示意圖。 215

圖 4.9：斷層破裂面積示意圖。 216
圖 4.10：機率密度函數分布圖。 216
圖 4.11：計算震度 6 級以上之區域機率理論。 216
圖 4.12：六甲斷層及木屐寮斷層平面分布圖。 218
圖 4.13：P-P'剖面圖。 219
圖 4.14：EE'剖面及投影至剖面 GPS 測站之水平速度。 219
圖 4.15：六甲斷層莿桐崎附近 4 口鑽井點位分布圖。 219
圖 4.16：中油十萬分之一地質圖與震測剖面線分布圖。 224
圖 4.17：木屐寮斷層之震測剖面，(A) D 剖面，(B) E 剖面。 224
圖 4.18：木屐寮斷層附近 1999~2006 年間 GPS 測量結果。 225
圖 4.19：1941 年嘉義中埔地震震央位置與木屐寮斷層之相對位置圖。 226
圖 4.20：六甲+木屐寮斷層之三維幾何面。 229
圖 4.21：六甲+木屐寮斷層之邏輯樹分布。 229
圖 4.22：台灣地區淺層區域震源劃設。 230
圖 4.23：淺層震源分區 S07 區之截切指數模式。 230
圖 4.24：四個邏輯樹分支參數所畫出之特徵地震模式。 231
圖 5.1：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 237
圖 5.2：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之異常紀錄對應比較圖。 237
圖 5.3：六個長微震事件波形示意圖。 240
圖 5.4：2010.05.21 長微震事件之雜訊以及信噪比頻譜圖。 241
圖 5.5：利用白天晚上雜訊品質不等的特性，本研究將每天的連續波形紀錄每 500s 進行平均震幅計算、與雜訊震幅相除(此比值稱作 NAA，如上圖及中間放大圖)，與各個測站的濾波至 2-8Hz 包絡線(ENVELOPE)進行相關係數運算。當 NAA 值大於 1 、並在超過五個測站有高於 0.95 的相關係數、小於 10s 的時間差時，累績計算持續時間，持續時間超過 500s 即為長微震紀錄。 242
圖 5.6：整合分析架構圖。 243

表 A：本年度預期進度甘梯圖(Gantt Chart)。

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究（3/4）

月次 / 工作項目	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)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
GPS 連續站資料檢核及分析解算(由成大工作團隊負責)													
GPS 及水準測量規劃、督導(由成大工作團隊負責)													
井下應變資料校正及計算分析(由臺大工作團隊負責)													
第二季查核點													
地質及地震資料整理(由臺大工作團隊負責)													
期中報告													
維護資料庫(由臺大工作團隊負責)													
第三季查核點													
計算結果檢驗及分析(由臺大與成大工作團隊負責)													
斷層活動度與地震潛能分析(由臺大工作團隊負責)													
整合並綜合分析觀測資料(由臺大工作團隊負責)													
期末報告													
第四季查核點													
預定進度（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

說明： (1)工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期，期末報告必須明列於本表中。

(2)預定進度百分比一欄係為配合追蹤考核作業所需，累計百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。

表 B：預期進度查核點(Check Point)。

序號	查核點 交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（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. 應變儀資料校正及計算分析 1-2 月 b. GPS 及水準資料查核 1-2 月 c. 六甲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. 應變儀資料校正及計算分析 3-5 月 b. GPS 及水準資料查核 3-5 月 c. 木屐寮斷層之斷層面幾何參數 d. 整合觀測資料至最新	六月三十日	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 會議紀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 及水準資料查核 6-7 月 b. 應變儀資料校正及計算分析 6-7 月 c. 六甲與木屐寮斷層之 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 及水準資料 8-9 月查核及分析 b. 應變儀資料校正及計算分析 8-9 月 c. 綜合分析觀測資料 d. 估算斷層之再現週期 e. 完成資料庫系統維護 2. 期末報告書初稿	十一月三十日	期末報告書面資料初稿 會議紀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：斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究								
年次 / 工作項目	第 1 年期中報告	第 1 年期末報告	第 2 年期中報告	第 2 年期末報告	第 3 年期中報告	第 3 年期末報告	第 4 年期中報告	第 4 年期末報告
GPS 連續站資料檢核與計算								
井下應變儀資料檢核與分析								
GPS 速度場計算應變率變化								
整合 GPS 交換站、地質及地震、地化資料進行相關性比對								
資料庫安全性提升與維護								
井下應變儀維護記錄格式，供巡察維護								
瑞穗及車籠埔斷層潛能分析評估								
山腳及新城斷層潛能分析評估								
六甲及木屐寮斷層潛能分析評估								
池上及小崗山斷層潛能分析評估								
臺北盆地與新竹地區斷層模型參數設定								
中部及嘉義地區斷層模型參數設定								
臺南及高屏地區斷層模型參數設定								
GPS 測量及水準外業								
預定進度(累積數)	12%	25%	37%	50%	62%	75%	87%	100%

表 D：期末須交付之各項工作項目。

	工作項目	章節
GPS 及 精密水準測量	1. 進行 2011 年度新設監測樁位之規劃協助與施工督導。及 2011 年度外業施測作業督導（GPS 測量全臺灣共督導 40 點、水準測量每測線督導 1 測段）、GPS 分區測量數量之 10%（小數點以下四捨五入）抽測、GPS 測量成果與抽測結果基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。	第 2-1-1 節 (p.22-24) 附件光碟-附錄 A 附件光碟-附錄 B
	2. 藉由 GPS 移動站（依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位）與連續站（以經濟部中央地質調查所設置為主）及精密水準測量資料計算地表位移向量來推求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 連續站時間序列分析，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，解析出是否有慢地震徵兆。	第 2-1-2 節至第 2-1-2-8 節 (p.27-34) 第 2-1-3-2 節 (p.41-74) 第 2-2-1 節 (p.75-91)
	3. GPS 與水準測量歷年成果分析（項目至少包含 GPS 與水準測量之誤差及成果分析、集集地震之震後變形、斷層位置及其變形特徵、斷層短期滑移速率及隨時間應變速率變化情形等）。	第2-1-2-1節 (p.27-28) 第2-1-3-1節 (p.40) 第2-2-1-2節 (p.80-91) 第2-1-3-2節 (p.41-73) 第2-2-2節至第 2-2-3節 (p.92-101)
	4. 利用所得之地表速度場及應變率，對中部地區及嘉義地區進行斷層模型參數（以地調所 2010 年公告之活動斷層為主）反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據，以及針對斷層模型中誤差較大的參數部分，再收集水準測量及 GPS 移動站之資料以補強原資料不足的觀測結果。	第 2-2-2 節至第 2-2-3 節 (p.92-101)

井下應變儀資料檢核與分析	1. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係。	第 3-1 節 (p.103-137 附件光碟-附錄 D-3
	2. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。並經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。	第 3-3 節 (p.145-187) 附件光碟-附錄 D-2
	3. 完成資料庫整合，同時建立使用者層級區分使用權限。	第 3-4-2 小節 (p.190-198)
	4. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。	第 3-4-4 小節 (p.200)
	5. 實際應用 98 年建立之井下應變儀維護紀錄表標準格式，檢討本案巡察及維護使用後之效益。	附件光碟-附錄 E
斷層活動潛勢分析	1. 蒐集並確定六甲斷層與木屐寮斷層(註：若所分析之斷層參數不足時，屆時會依其重要性或已確定之活動斷層，將另行選定其他斷層進行分析研究)之斷層參數：包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複週期、最大地震規模等。	第 4-3 節 (p.217-233) 表 4.3 (p.221) 表 4.4 (p.227)
	2. 進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估，說明各項參數計算與求取之考量；同時詳細標註資料來源及參考文獻。	附件光碟-附錄 I
整合觀測資料分析	1. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站之資料加以比較，找出其相關性。	第 5-1 節 (p.235-238)
	2. 將利用地球化學監測站資料與井下應變資料比對出的共同異常事件，再進行與 GPS 連續站資料及地震資料(以規模大於 6 地震時間點及背景地震活動為主)統合，綜合以上觀測資料分析其相關性，進一步探討異常事件發生機制。	第 5-1 節 (p.235-238)
	3. 以井下應變儀時間點為主，分析連續地震資料，理解是否有無慢地震徵兆、以進一步解釋應變異常。	第 5-2 節 (p.239-242)

摘要

本計畫本年度的主要執行重點為：(1) 分析地調所架設的 68 個連續 GPS 測站及 13 站井下應變儀之時間序列；(2) 藉由移動式 GPS 測站、精密水準測線和連續 GPS 觀測網的觀測，分析主軸應變率、剪應變率和旋轉率，以了解地殼變形之型態，並利用數值模式，反演臺灣中部及嘉義地區斷層面上的鎖定率、滑移虧損和滑移率；(3) 比較井下應變儀和連續 GPS 觀測站的長期應變率，分析應變速率改變的因素；(4) 由地球化學觀測的異常事件資料，配合連續 GPS 觀測和井下應變儀，評估地震發生前的應變異常現象；(5) 斷層活動潛勢分析方面則是評估地震機率模型應用在臺灣的可行性，藉由美國和日本發展地震機率模型經驗，分析六甲斷層和木屐寮斷層的活動潛勢；(6) 維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性。因此本計畫的執行，旨在結合 GPS 測量與井下應變儀觀測，結合地質構造、地震活動觀測、數值模擬和斷層活動度的研究，期能提供近斷層活動性及其潛勢、發震構造、斷層力學和可能地震前兆的重要資訊。

本期末報告在 GPS 及精密水準測量部份，工作內容主要包含 (1) GPS 及精密水準資料計算結果；(2) GPS 連續站時序資料分析；(3) 中部及嘉南地區地表變形分析。今年我們已進行全臺灣 8 個地區 GPS 及 41 條水準測線的資料解算分析。GPS 的速度場分布均與 2002-2010 年一致；水準測段每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 92.1 %，且所有的測段閉合差均符合規範。透過 GPS 觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出，嘉南地區六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層滑移速率分別為 15.4±4.3 mm/yr、5.6±1.7 mm/yr 及 29.6±3.8 mm/yr；其鎖定深度則分別是 3.4±0.6 km、2.5±1.2 km 與 3.7±1.1 km。假設六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層長度分別為 23 km、27 km 與 25 km，則各斷層每年累積之能量分別為 6.67±1.87 × 1023 dyne-cm、4.59±2.17 × 1023 dyne-cm 與 1.85 ±0.25 × 1024 dyne-cm。中部地區彰化及車籠埔斷層之斷層滑移速率分別為 18.3±13.9 mm/yr 及 25.5±8.7 mm/yr；其鎖定深度則分別是 3.7±0.7 km 與 2.8±0.5 km。

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，除繼續處理嘉義網六個測站外，並處理大坪國小(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)七個測站資料，以利未來時間序列分析之用。其中瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理，而甲仙十八灣(ECT)因雷擊而故障，於 2004 年 12 月之後資料不全。除此之外，所有測站資料均轉成應變分量。另外本計畫也利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與地震相關的應變"異常"。從 2009 年至 2011 年 10 月，我們在嘉義網發現 14 個應變異常事件，新竹網則有 13 個應變異常事件，其中 5 次異常事件同時在兩個測網中被觀測到。

井下應變資料在移除地下水與氣壓的影響之後，每日的潮汐訊號就更為明顯，因此開始撰寫程式來估計各站的潮汐，在無太大的異常資料干擾 (如同震應變或颱風應變) 時，已可有效得移除潮汐，然而如何在有異常訊號時仍能正確的估計潮汐，尚待進一步

的測試。

斷層活動潛勢分析部分，期中階段已蒐集了六甲斷層與木屐寮斷層之參數，在地震規模、斷層長度和破裂面積的尺度關係評估，則新增 *Yen and Ma* （2011）的研究成果，並考慮兩條斷層同時破裂的情況下，參考 *Hung, et. Al.*（1999）之構造剖面來建立斷層面的三維幾何模型。為建立此一活動斷層系統之發震機率評估，考慮兩種情況，一為以 1941 年的中埔地震為最近一次地震，採用 BPT 模式來評估，二為忽略中埔地震，以 Poisson 模式來做斷層潛勢評估。

整合分析部分，共包括(1) 地下水位異常(2)地化異常(3)井下應變儀異常(4)地震訊號異常之整合，整合期間含跨 2009 年整年到 2011 年 10 月間 87 個地震事件。分析將針對井下應變儀應變異常、地下水及地化異常建表以尋找共同事件，並針對在新竹地區和嘉義地區觀測網共同異常事件尋找是否伴隨長微震事件，於 2009/12/19(M6.9，花蓮外海)和 2011/3/20(M5.8，台東外海)都有發現共同的異常事件。另外，2008 年三月一整月的長微震事件已確認完畢、並已針對井下應變異常時間點進行比對，目的為在未來整合資料分析時，和地化、水位、井下應變儀之異常綜合比較。

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

For the 2011 final report, we focus on the topics of (1) examinations of results of GPS and precise leveling data; (2) analysis of time-series of continuous GPS stations; and (3) analysis of surface deformation in Central Taiwan and Chaiyi-Tainan areas. We first process the measurements from compaign-mode GPS in 8 areas of whole Taiwan and 41 precise leveling lines. The GPS velocity field is consistent with the GPS velocities from 2002 to 2010. Precisions of 92.1% leveling sections are less than 2.0 mm per kilometer, and all sections are within the closure. In terms of analysis of GPS and leveling measurements and results of fault model, the fault slip rates of the Liuchia fault, Chukou fault, and Chutouchi fault are 15.4±4.3 mm/yr, 5.6±1.7 mm/yr, and 29.6±3.8 mm/yr, respectively. The locking depths of these three faults are 3.4±0.6 km, 2.5±1.2 km, and 3.7±1.1 km, respectively. Assuming the fault lengths of the Liuchia fault, Chukou fault, and Chutouchi fault are 23 km, 27 km, and 25 km, respectively, the accumulative moments of these three faults are 6.67±1.87 × 1023 dyne-cm, 4.59±2.17 × 1023 dyne-cm, and 1.85±0.25 × 1024 dyne-cm, respectively. The fault slip rates of the Changhua fault and Chelungpu fault in Central Taiwan are 18.3±13.9 mm/yr and 25.5±8.7 mm/yr, respectively. The locking depths of these faults are 3.7±0.7 km and 2.8±0.5 km, respectively.

Other than maintaining borehole strainmeter database, we continue to process the six stations in Chiayi network and we have also processed strainmeter data at seven stations in Hsinchu and Taipei networks: BMMT, CINT, JING, LMMT, PFMT,

SANS, and SLIN. We found that the anomalous data of channels 01 and 02 in LMMT station, thus we can't process it to Level-1. The ECT station was out of work due to lightning strike since December 2004. All the raw data are processed to the component of strain of each channel. We also start to establish the air pressure correction model for the borehole-strainmeter data by using the collected observations during the large air-pressure variation durations. The strain residual after, removing the groundwater and air pressure effects can be used for pre-seismic anomaly searching. During the period from 2009 to Oct. 2011, 14 and 13 events of strain anomalies are observed in Chiayi and Hsinchu networks respectively. It is worthy to note that 5 events are observed common in both networks.

After removal of air pressure and ground water effects on strain observations, daily tidal effect is then notable among all different signals in strainmeter data. A new program is addressed and successful if no outlier or alien signals interferes the estimation. But studies are always focus on episodic signals like strain effect due to typhoons or earthquakes, which is a task we will keep study how to extract them during tidal estimation.

For the analysis of probability of seismic hazards of the Muchiliao and Liuchia faults, we have collected the fault parameters of these two faults. In addition, we consider Hung et al. structural profile to reconstruct the 3-D fault model of these two faults. We also consider the situation of both faults were broken simultaneously. Two probability models of potential fault activity were estimated based on two situations. First, consider the 1941 ChungPu earthquake as the most recent event on these faults and using BPT model for estimation. Second, ignore the 1941 earthquake (without known recent event) and use Poisson model for estimation.

We have collected the anomalous events in geochemical, hydrological observation, borehole strainmeter and seismological observations during January 2009 to October 2011 for combined analysis. Totally there are 87 earthquakes with magnitude greater then 5.0 act as the reference timeline for all the observations. 2 major events: 2009/12/19 (M6.9, Offshore, Hualien) and 2011/3/20(M5.8, Offshore, Taitung) are all found with several different anomalies. We also checked all the tremor events on March 2008 and use them to compare the anomalous events from borehole strainmeters and geochemical stations.

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，已逐年在台灣陸上活動斷層帶設置監測點位，包括全球定位系統(Global Positioning System，簡稱 GPS)與井下應變儀(borehole strainmeter)。累積至 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 8 個地球化學觀測站(圖 1.1 和表 1.3)。99 年「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)」計畫已將 68 個連續記錄式全球衛星定位系統（CGPS），解算 GPS 每日座標解，提供地殼活動觀測資料，將有助於吾人瞭解該地區之斷層、地震活動與觀測結果之關聯性。另外分析位於梅花國小(PFMT)、瑞峰國小(LMMT)、大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)、中興國小(TSUN)、太興國小(TAIS)N)、樹林(SLI)、曾文水庫北(RNT)、達邦(DARB)、曾文水庫南(RST)、甲仙十八灣(ECT)、錦和(JING)及明德中學(SANS)等 13 個井下應變儀資料，討論該區域之觀測數據的可靠性，資料分析包含：估計因自然環境對應變資料的影響量、估計井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，本年度計畫將再進行氣壓、水文、地潮及海潮效應的影響量等修正和移除不正常的突出資料。

本計畫除了每年持續搜集、計算累積至最新的 GPS 追蹤站及應變儀觀測資料，同時還會將地震資料、GPS 監測點、連續追蹤站及井下應變儀資料整合分析探討，本團隊也會利用地質調查所 98 至 99 年度之委辦計畫（斷層活動性觀測研究第二階段-斷層活動性之地球化學觀測與研究)之地球化學觀測站資料加以比對，期望能找出良好的地球物理與地球化學資料相關性。斷層活動性觀測研究第二階段-斷層活動性之地球化學觀測與研究委辦計畫中，主要著重於台灣各活動斷層區設置氣體與水位遠端傳輸觀測站及地下水氡與溶解氣體之調查工作，以瞭解不同構造區觀測結果之異同，探討台灣南部與北部不同構造區對於觀測結果之影響，並評估觀測站氣體成份與水位觀測結果，及作為斷層與地震活動之可能前兆訊息。該研究團隊發現，以歷年大平地觀測站的觀測結果為例，地震若發生距觀測站不遠的地方，通常在數天至數小時前，氡氣濃度皆呈現異常升高的變化情形，在排除氣象因子及人為因素影響後，這些的異常值出現很明顯的就是該次地震發生前的地震前兆訊息。就整體的來說，大平地觀測站的變化可以反映出台灣北部地區地殼的活動情形，特別是發生在觀測站周遭數十公里內及宜蘭平原內的地震事件。另外，經過長期觀測結果顯示，測站中崙濁水潭氣體之 CO_2/CH_4 比值有最明顯的變化，其變化與地震活動也最有關連。利用分析儀器，就地分析當地土壤氣體成份，於 2002 年 11 月 1 日開始發現其氣體成份有非常明顯的成份變化，且於一星期後本地區發生了規模 4.1，深約 11.2 公里的地震（震央便在觀測站附近），而於地震發生約兩天後，

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

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

另外，本案（計畫期程：98-101 年）規劃於今年度（100 年）開始執行 GPS 測量與水準測量外業檢核，並進行 GPS 及水準測量資料計算及分析工作。

全程計畫預期進度甘梯圖請見表 C，全程計畫工作內容說明如下：

98 年：

(1) 連續 GPS 追蹤站

a. 完成地調所設置 GPS 連續觀測站資料檢核及計算。針對每年的觀測結果進行校驗、誤差分析與測站觀測品質查核。

b. 完成地調所設置 GPS 連續觀測站時間序列解算。將 GPS 時間序列擬合，並去除大誤差量之觀測天數，分析年週期與半年週期效應，求得各測站之地表水平與垂直方向的位移量，並分析鄰近斷層的滑移速率與區域之應變率之改變。

c. 整合地調所與其他單位交換之 GPS 連續觀測站解算之結果加入分析，完成全台各區域之應變率之計算。

(2) 井下應變儀觀測

a. 多分量井下應變儀的檢校，完成包含曾文（南）、曾文（北）、十八灣、中興、太興、達邦等 6 站井下應變儀軸向校正與氣壓、潮汐及井孔溫度變化之響應校正，並持續分析應變累積與地震之關係。

b. 完成各觀測站之資料收集及編修，並進行面應變、剪應變分析。

c. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析應變儀觀測站及水位觀測井之資料與相關斷層之活動關聯性並建立異常資料事件檔，期能歸納出可靠之斷層活動潛勢因子與經驗法則。

d. 建立井下應變儀維護紀錄表標準格式，供本案巡察及維護之參考。

e. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。

(3) 整合觀測資料進行分析

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

(4) 斷層潛能分析模式之評估

a. 分析比較美國及日本之斷層活動度與地震潛能分析模式，並剖析其優缺點。

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

99 年：

(1) GPS 連續追蹤站

a. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及解算地表水平與垂直方向的位移量及速度場，並提供區域之主應變率、剪應變率、及跨斷層的滑移速率分析。

b. 進行 GPS 時間序列分析，去除大量誤差之觀測及分析年週期與半年週期效應，並探討各測站的雜訊特性。所得之時間序列將與地震資料進行比對，期望解析出慢地震效應與台灣各不同地區之變形特性。

c. 利用所得之地表速度場及應變率，對台北盆地地區及新竹地區進行斷層模型參數反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據。

(2) 井下應變儀觀測

a. 多分量井下應變儀的檢校，完成包含大坪、瑞峰、梅花、新樂、明德及錦和等 6 站井下應變儀軸向校正與氣壓、潮汐及井孔溫度變化之響應校正，並持續分析應變累積與地震之關係。

b. 完成各觀測站之資料收集及編修，並進行面應變、剪應變分析。

c. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析應變儀觀測站及水位觀測井之資料與當地斷層、地震活動之關聯性並建立異常資料事件檔，期能歸納出可靠之斷層活動潛勢因子與經驗法則。

d. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。

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

(3) 整合觀測資料進行分析

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

(4) 斷層潛能分析模式之評估

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

100－101 年：

(1) GPS 連續追蹤站

a. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及解算地表水平與垂直方向的位移量及速度場，並提供區域之主應變率、剪應變率、及跨斷層的滑移速率分析。

b. 進行 GPS 時間序列分析，去除大量誤差之觀測及分析年週期與半年週期效應，並探討各測站的雜訊特性。所得之時間序列將與地震資料進行比對，期望解析出慢地震效應與台灣各不同地區之變形特性。

c. 利用所得之地表速度場及應變率，對中部地區、嘉義地區（100 年），台南地區及高屏地區（101 年）進行斷層模型參數反演，推估這兩區域內活斷層之地下形貌及震間滑移速率；並推算斷層的能量累積率及其與可能之最大地震規模間的關係，提供地震潛能分析模式之依據。

d. 針對斷層模型中誤差較大的參數部分，再收集所需資料補強資料不足的觀測結果。

(2) 井下應變儀觀測

a. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係。

b. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。

c. 經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。

d. 完成資料庫整合，導入即時接收分析，同時建立使用者層級區分使用權限。

e. 持續建立資料庫（收集並處理資料）。

f. 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。

g. 於 101 年完成井下應變儀資料庫建置，完成應變分析成果展示軟體開發。

(3) GPS 測量及水準測量外業檢核與資料分析

a. 當年度新設監測樁位之規劃與施工督導。

b. 當年度外業施測作業督導、抽測與成果檢核。

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

(4) 整合觀測資料進行分析

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

(5) 斷層潛能分析模式之評估

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

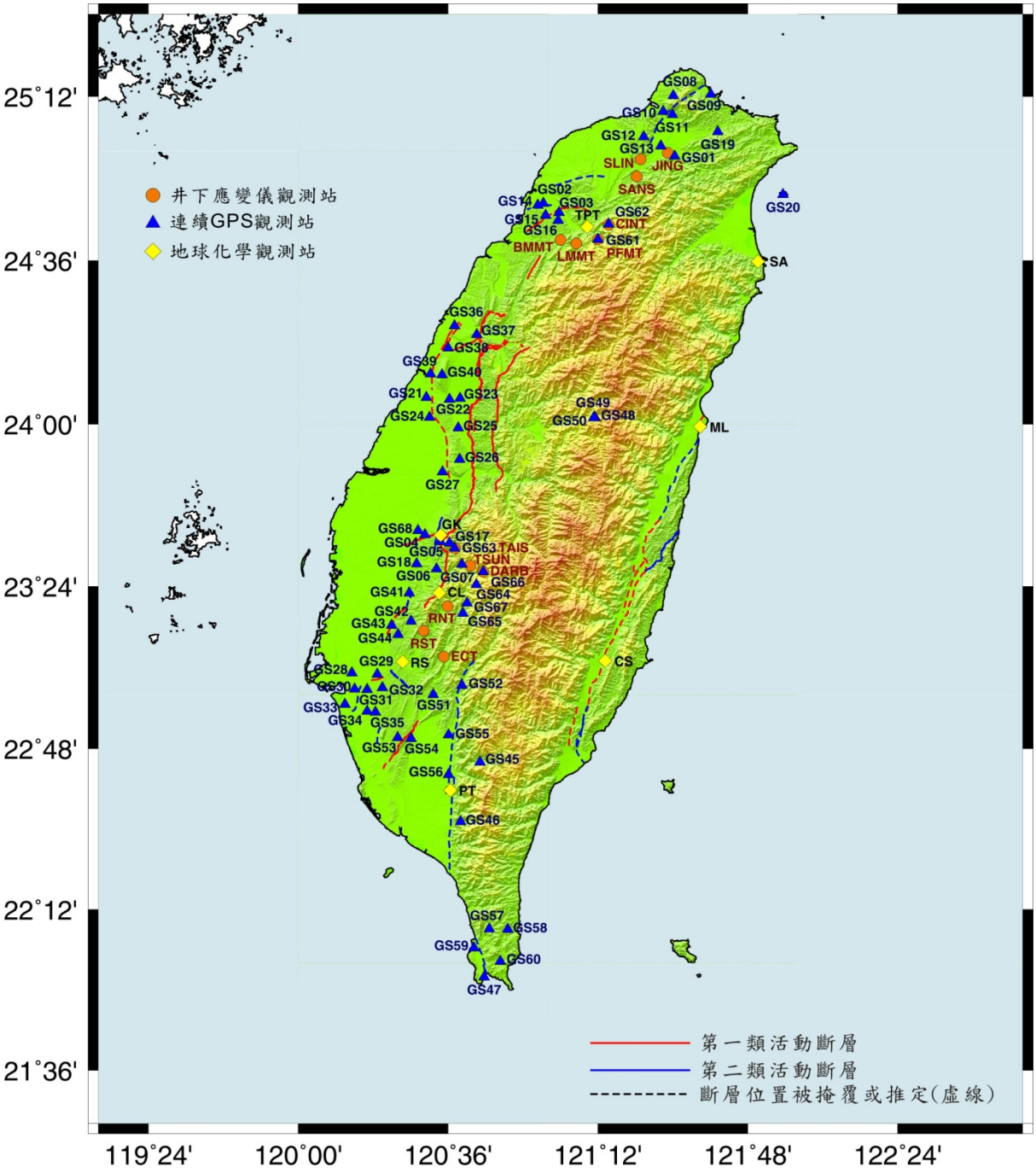


圖 1.1：中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀及地球化學觀測站分布圖。

表 1.1：中央地質調查所建置的 68 個連續 GPS 追蹤站資料接收起始時間表。

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002.06.17	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	2006.08.04	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	2010.10.05
GS28	中崙加壓站	2006.06.17	GS62	新樂國小	2010.10.05
GS29	潭頂自來水廠	2006.06.16	GS63	太興國小	2010.10.05
GS30	大橋國小	2006.06.25	GS64	里佳國小	2010.10.05
GS31	西勢國小	2006.06.17	GS65	茶山國小	2010.10.05
GS32	虎頭埤	2006.06.23	GS66	達邦	2010.10.05
GS33	永華國小	2006.06.22	GS67	新美國小	2010.10.05
GS34	成大航太實驗場	2006.06.24	GS68	三和國小	2010.12.17

表 1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。

編號	測站代碼	站名	資料起迄時間		Coordinate		
			起始	結束	經度	緯度	高程(m)
1	RST	曾文水庫南	2004/07/18	2011/10	120°30’4.65	23°14’10.97	110
2	RNT	曾文水庫北	2004/04/15	2011/10	120°35’53.58	23°19’39.92	252
3	ECT	甲仙十八灣	2004/04/16	2007/07	120°34’57.69	23°08’29.21	448
4	PFMT	梅花國小	2005/09/14	2011/10	121°12’1.73	24°40’43.69	496
5	LMMT	瑞峰國小	2005/06/07	2011/10	121°6’49.85	24°39’47.49	247
6	BMMT	大坪國小	2005/06/09	2011/10	121°3’1.92	24°40’34.52	195
7	TSUN	中興國小	2006/06/06	2011/10	120°41’21.04	23°28’42.48	1370
8	TAIS	太興國小	2006/03/04	2011/10	120°37’36.95	23°32’34.1	790
9	CINT	新樂國小	2006/11/15	2011/10	121°14’32.12	24°43’57.08	505.2
10	DARB	達邦	2006/11/19	2011/10	120°44’29.39	23°27’22.27	952.8
11	JING	錦和國小	2007/11/20	2011/10	121°28’49.31	24°59’35.89	19
12	SANS	明德中學	2007/11/12	2011/10	121°21’21.01	24°54’28.51	80
13	SLIN	樹林國小	2009/09/11	2011/10	121°22’10.36	24°58’10.81	77

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	經緯座標	資料接收起始時間
TPT	新竹大平地觀測站	(121°9’6.552, 24°43’19.092)	2005/12
GK	雲林古坑觀測站	(120°33’42.768, 23°35’30.984)	2006/11
CL	嘉義中崙觀測站	(120°33’6.552, 24°43’19.092)	2004/04
RS	台南二溪觀測站	(121°9’6.42.84, 23°22’54.984)	2006/11
PT	屏東科大觀測站	(120°24’42.876, 23°7’18.948)	2008/10
SA	宜蘭蘇澳觀測站	(121°49’54.624, 24°36’7.236)	2009/12
CS	台東池上觀測站	(121°13’18.912, 23°7’55.092)	2008/10
ML	花蓮美崙觀測站	(121°36’6.732, 23°59’31.164)	2010/10

1-2 98~99 年度工作成果

本計畫在 98~99 年度的工作成果主要為連續 GPS 速度場和應變場解算以及時間序列的分析，13 個井下應變儀觀測資料的分析，車籠埔斷層、瑞穗斷層、山腳斷層和新城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。

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、台南地區、高屏地區及東部地區 7 個測網，解算 68 個中央地質調查所 GPS 連續站與其他單位交換 129 個 GPS 連續觀測站之速度場和應變場。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。目前時間序列中所觀察到的週期性變化之原因尚未明瞭，部分測站的週期為 1 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，以釐清週期性變化之原因。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。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、樹林等 7 站的資料，發現地下水位高低，在某些測站造成影響極大，例如達邦測站，在除去了井孔效應以後，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 5 μstrain 的變化。因此，利用多變數因子的回歸模式，建立起井下應變儀的修正模式，可以針對地下水變化影響較大的測站先移除其效應，然後再除去井孔效應，可以得到相當好的結果。另外，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，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，因為方向與其它測站不一致，所以很可能是個慢地震，而且在新竹地區的井下應變儀觀測資料也在大約前半天的時間有同樣的異常，所以這應該是一個分布相當廣的慢地震(代表應該是深層的斷層滑動)。

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，但能隱約看出在地震前就有變化。其中太興國小站(TAIS)在地震前先有擠壓（向下）約 1.5μstrain 的變動，然後再鬆弛（往上）約 3.5μstrain 時，地震即發生。而在約 8 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 20μstrain0 左右。

而鄰近的達邦(DARB)與中興國小(TSUN)測站則變化較小，前者變化量極微，但後者也相當明顯。

斷層活動度與地震潛能分析模式評估部分，98 年度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的情況，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，此部分需要加入 GPS 觀測資料來輔助釐清。利用 BPT 統計模式估算發震機率，推估車籠埔斷層全段於未來 30 年、50 年及 100 年之發震條件機率分別為 7.48×10-7%、4.00×10-3% 和 0.72%。瑞穗斷層於未來 30 年、50 年及 100 年之發震條件機率分別為 27.71%、36.56% 和 65.31%。99 年度本計畫參考美、日之研究方法及結果，進一步建立評估臺灣地區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(如車籠埔斷層)；第二種僅知道古地震最後一次發生的時間(如新城斷層)；第三種為無任何古地震事件資料的斷層進行評估(如大茅埔--雙冬斷層)。另外本研究參考美國南加州地區建立各活動斷層的三維構造模型經驗，本計畫運用山腳斷層與新城斷層地質和地球物理資料，建立兩活動斷層之三構造何模型，除了在視覺展示上更具效果外，在斷層潛勢分析或是斷層面滑移量模擬都有所幫助。山腳斷層及新城斷層之破裂可能發生事件、滑移速率及最大可能地震規模以邏輯樹的方式進行權重，邏輯樹之各分支以特徵地震模式求得地震矩規模大於 6.7 之再現週期，再代入機率密度函數評估其發生機率。山腳斷層假設西元 1694 年為最後一次發生時間，以 BPT 模式評估地震矩規模大於 6.7 之未來 30 年、50 年及 100 年之發震機率分別為 3.0%、4.8%及 9.0%；新城斷層以 300 年前當做最後一次事件，以 BPT 模式評估地震矩規模大於 6.7 之未來 30 年、50 年及 100 年之發震機率分別為 0.0%、0.0%及 0.2%。

在整合觀測資料分析部分，去年度計畫我們已初步探討井下應變儀觀測異常、氡氣異常記錄與臺灣及鄰近地區規模大於 6 的地震相關係。23 個異常中有 6 個與地震規模大於 6 的發生時間差小於 1 個月。這 6 個疑似和規模大於 6 地震相關的異常有 5 個出現在規模大於 6 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，我們發現去年期中報告時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，這些因素造成綜合分析的困難度。因此，在去年期末報告時我們以規模大於 6

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、及地震活動記錄上有觀測到前兆訊號。而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,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。本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。

1-3 本年度工作內容概述

本計畫目標在藉由地調所設置的 68 個 GPS 連續追蹤站和其它單位交換的 129 個連續觀測站（圖 1.2 及表 1.1）、GPS 移動站（圖 1.3a）、精密水準測線（圖 1.3b）、井下應變儀（表 1.2）及地球化學觀測站（表 1.3）的監測資料（圖 1.1），同時配合地質構造、數值模擬與斷層活動度研究，分析測站鄰近斷層滑移速率的變化及地殼變形特性，評估斷層活動度與地震潛能，以瞭解各區域斷層的活動特性及可能的孕震、發震構造（如活動斷層、盲斷層及地震活動密集區）並進行持續性的監測。除了可精確瞭解斷層活動的狀況，定出斷層的滑移速率外，再配合重點區域進行的微震觀測，希望可釐清斷層的地下形貌、應力累積、釋放過程及分布概況，將有助於國土建設、規劃及地震災害防救工作之規劃。本計畫今年度工作內容概述如下：（各 GPS 及應變儀觀測站之觀測資料分析將視地調所所能提供之資料為限）

(1) 新設監測點位之規劃協助與施工督導以及測量外業督導（GPS 測量全臺灣共督導 40 點、水準測量每測線督導 1 測段）、GPS 分區測量數量之 10%（小數點以下四捨五入）抽測、GPS 測量成果與抽測結果基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。

(2) 藉由 GPS 移動站（依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位）與連續站（以經濟部中央地質調查所設置為主）及精密水準測量資料，計算地表位移向量，來推求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。

(3) 分析 GPS 連續站時間序列分析，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，解析出是否有慢地震效應，並比較臺灣各不同地區之變形特性。

(4) GPS 與水準測量歷年成果分析（項目至少包含 GPS 與水準測量之誤差及成果分析、集集地震之震後變形、斷層位置及其變形特徵、斷層短期滑移速率及隨時間應變速率變化情形等）。

(5) 分析井下應變儀資料，校正氣壓和水文效應、井孔與灌漿回復效應和潮汐校正，求取各站面應變及剪應變隨時間變化之趨勢。

(6) 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。

(7) 井下應變儀資料庫展示系統介面升級，提供管理者與使用者權限以建立安全機制。

(8) 井下應變儀應變率異常評估：綜合地化異常討論是否為前兆訊號，以及綜合地震觀測資料討論是否與慢地震有關。

(9) 針對規模大於 6 的地震評估：利用井下應變儀、地化測站及地震活動（地震安靜期）探討是否有前兆訊號？

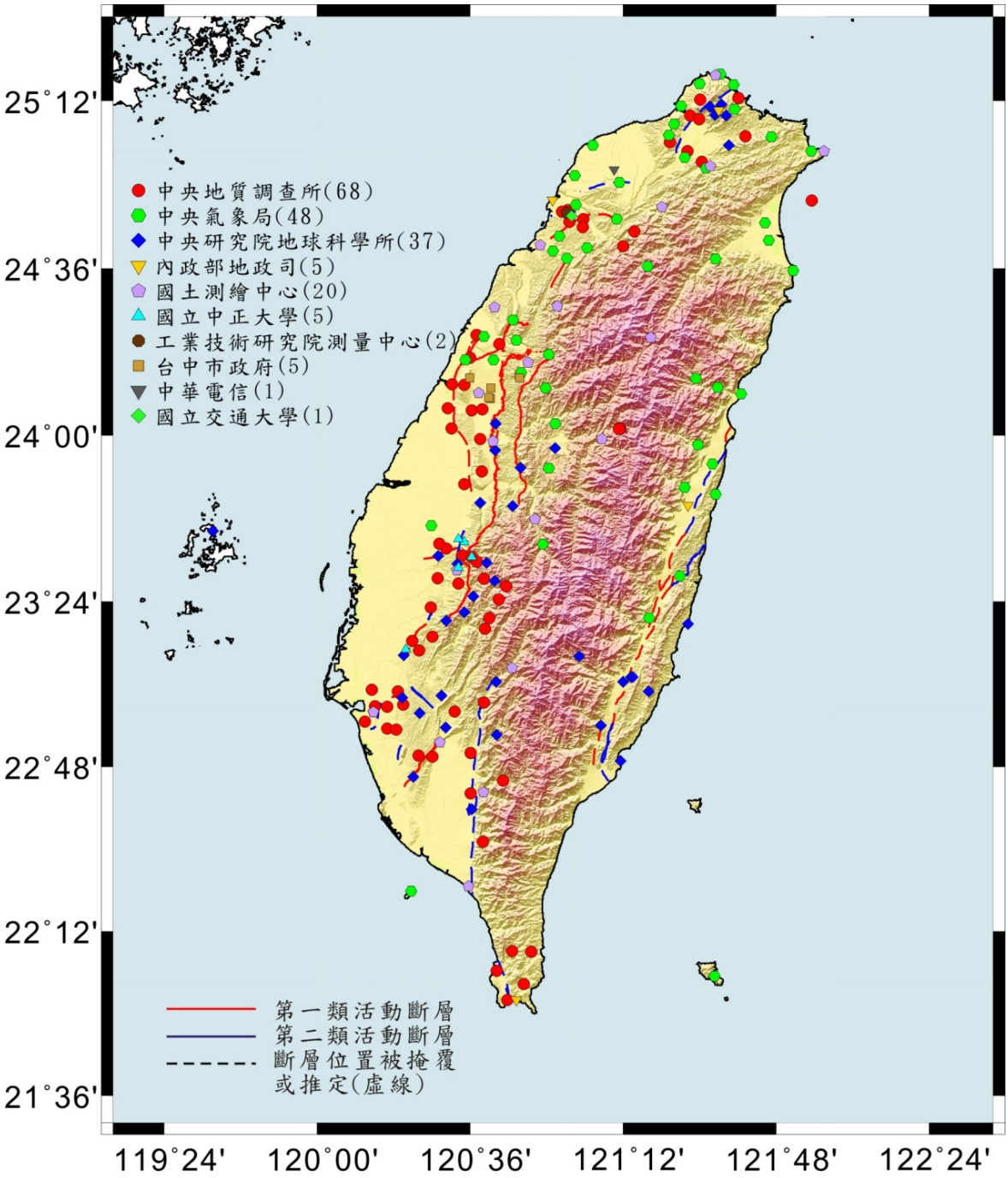


圖 1.2：地質調查所設置的 68 個連續觀測站與其它單位交換 129 個連續觀測站分布圖。

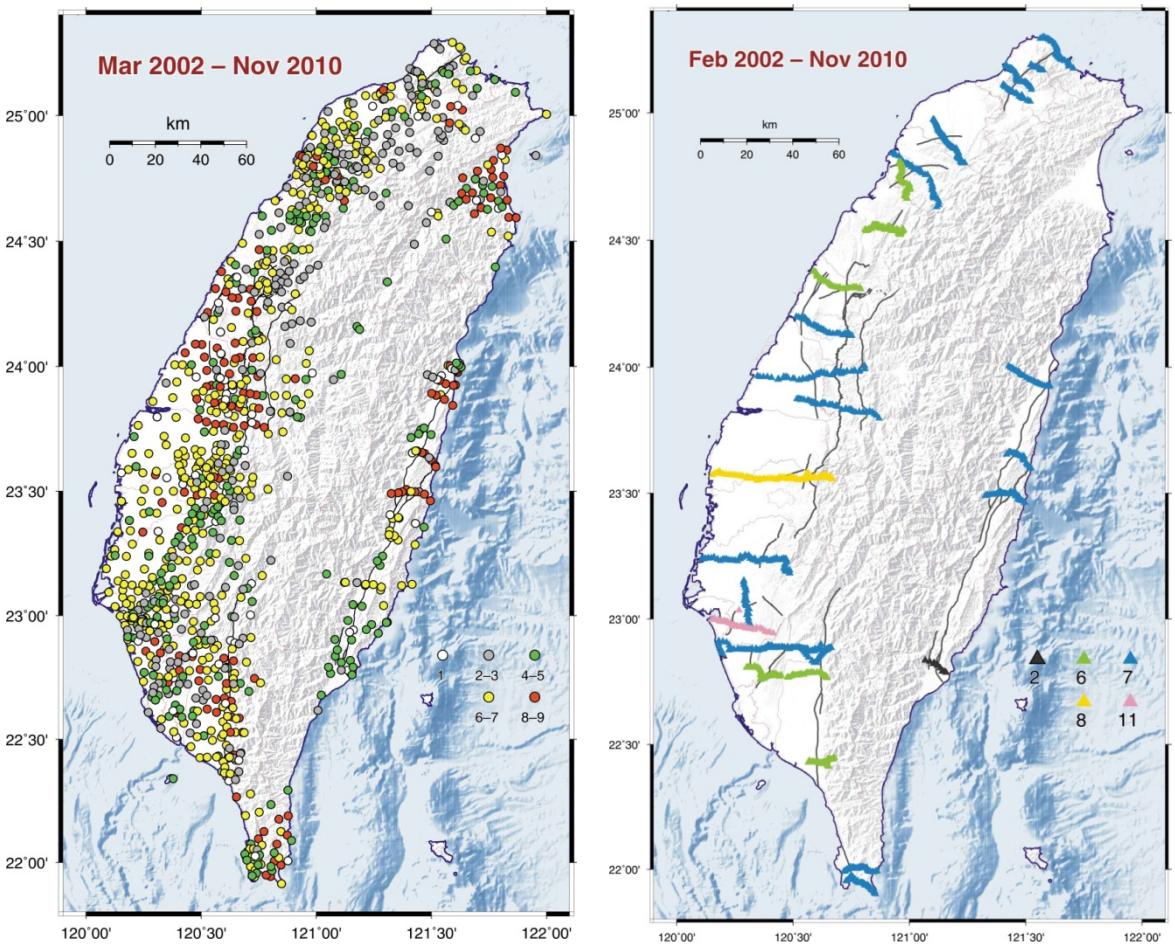


圖 1.3：2002 年至 2010 年 GPS 移動站及水準測線分布與施測次數圖。（a）圖中圓點表各 GPS 移動站點位的位置，點位的顏色代表其施測次數（以年為單位）。（b）圖中三角點表各精密水準點位的位置，點位的顏色代表其施測次數（以年為單位）。

1-3-1 本年度預期成果

◎ GPS 連續追蹤站 、移動站和精密水準測線

(1) 完成測量外業規劃、監工及資料檢算，分析 2011 年測量資料與歷年速度場相較之穩定性。

(2) 完成全臺灣 GPS 與水準資料之解算分析，推求全臺灣速度場及應變速率之空間分布情形。

(3) 完成 GPS 移動站、連續站及水準測量資料之時間序列分析，並解析出是否有慢地震效應和臺灣各地區之變形特性研究。

(4) 完成臺灣中部及嘉義地區之斷層模型建置與斷層參數推求。

(5) 綜合歷年計畫之成果，討論中部及嘉義地區斷層系統的斷層參數、活動行為、地震潛能及塊體模型之合理性。

◎ 井下應變儀觀測

(1) 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓、潮汐影響及井孔溫度校正，估計自然環境對應變資料的影響量，以及地調所既有 13 測站之井孔回復與水泥膨脹效應的影響。計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積異常與地震之關係。

(2) 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。

(3) 經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。

(4) 完成資料庫整合，同時建立使用者層級區分使用權限。

(5) 持續建立資料庫（收集並處理資料）。

(6) 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。

◎斷層活動度與地震潛能分析模式之評估

(1) 挑選六甲斷層與木屐寮斷層(註：若所分析之斷層參數不足時，屆時會依其重要性或已確定之活動斷層，將另行選定其他斷層進行分析研究)，蒐集並確定斷層參數：包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率（slip rates）、滑移赤字（slip deficit）及地震重複週期（recurrence Interval）、最大地震規模（maximum possible earthquake magnitude）等。

(2) 進行斷層活動度與地震潛能分析模式之評估，說明各項參數計算與求取之考量；同時詳細標註資料來源及參考文獻。

◎整合觀測資料進行分析

(1) 將利用地球化學監測站資料與井下應變資料比對出的共同異常事件，再進行與 GPS 連續站資料及地震資料(以規模大於 6 地震時間點及背景地震活動為主)統合，綜合以上觀測資料分析其相關性，進一步探討異常事件發生機制。

(2) 以井下應變儀時間點為主，分析連續地震資料，理解是否有無慢地震徵兆、以進一步解釋應變異常。

二、GPS 及精密水準測量

2-1 工作項目

在 2011 年計畫之 GPS 及精密水準測量工作項目中，依據透空度及其與斷層距離遠近之差異，預先規劃施測約 900 個 GPS 移動站點位(實際點位以測量工作進度為主）及 40 條（後增設 1 條宜蘭測線，總數成為 41 條）橫跨活動斷層總長度為約 1,000 公里（實際里程以測量工作進度為主）的精密水準測線來進行 GPS 與精密水準測線之觀測。與此同時，本計畫也收集 197 個 GPS 連續站之觀測資料來進行資料分析。

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

(1) 利用軟體解算 GPS 連續站資料，其中包含 68 個中央地質調查所 GPS 連續站，以及與其他單位交換約 129 個 GPS 連續觀測站之資料，進而計算其速度場和應變場並探討 GPS 時間序列之週期性效應。

(2) 針對 2002-2010 年所設置之 GPS 與精密水準測量監測網進行重複觀測，並規劃針對歷年 GPS 及精密水準遺失或毀損之點位進行補設作業。

(3) 藉由全臺 GPS 站點及精密水準之測量資料，計算地表位移向量來推求應變速率之空間分布情形，以瞭解地殼變形狀況。並透過資料的時序分析，闡明地殼變形與地震發生間之關係。

(4) 利用斷層模型之建立評估斷層滑移型態、斷層滑移速率及各個斷層參數（包含斷層幾何，閉鎖深度，斷層面積等）。並結合大地測量、地質及地震資料，解析各主要斷層之地震潛能之問題。

表 2.1：GPS 測量進度表。

項次	地區	預計測量時間	實際測量時間
1	臺北地區	10 月	10/03-10/20
2	桃竹苗地區	5 月	05/02-05/31
3	中部地區	8 月	08/01-08/30
4	嘉南地區	6 月	06/01-06/28
5	高屏地區	7 月	07/04-07/24
6	恆春半島地區	4 月	04/18-04/23
7	宜蘭地區	10 月	10/21-10/27
8	花東地區	9 月	09/05-09/26

表 2.2：水準測線測量進度表。

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

表 2.2：水準測線測量進度表（續）。

項次	測線名稱	預計測量時間	實際測量時間
27	縣 174_北門至楠西測線	4 月	04/01-04/10
28	台 19 甲_善化至關廟測線	10 月	10/11-10/15
29	縣 182_安平至龍崎測線	5 月	05/24-05/31
30	縣 184_路竹至茂林主線	2 月	02/14-02/24
31	台 27_路竹至茂林副線		
32	台 22_岡山至安坡測線	5 月	05/18-05/23
33	佳冬至七佳測線	9 月	09/26-09/28
34	台 26_恆春至鵝鑾鼻主線	4 月	04/10-04/13
35	恆春至鵝鑾鼻副線		
36	恆春西台地至佳樂水	4 月	04/07-04/09
37	嶺頂至瀧澗測線	11 月	11/01-11/04
38	豐濱至光復測線	11 月	11/25-11/29
39	靜浦至紅葉測線	11 月	11/05-11/24
40	富岡至東成測線	11 月	11/15-11/23
41	台 2_梗枋至東澳測線	10 月	10/17-10/26

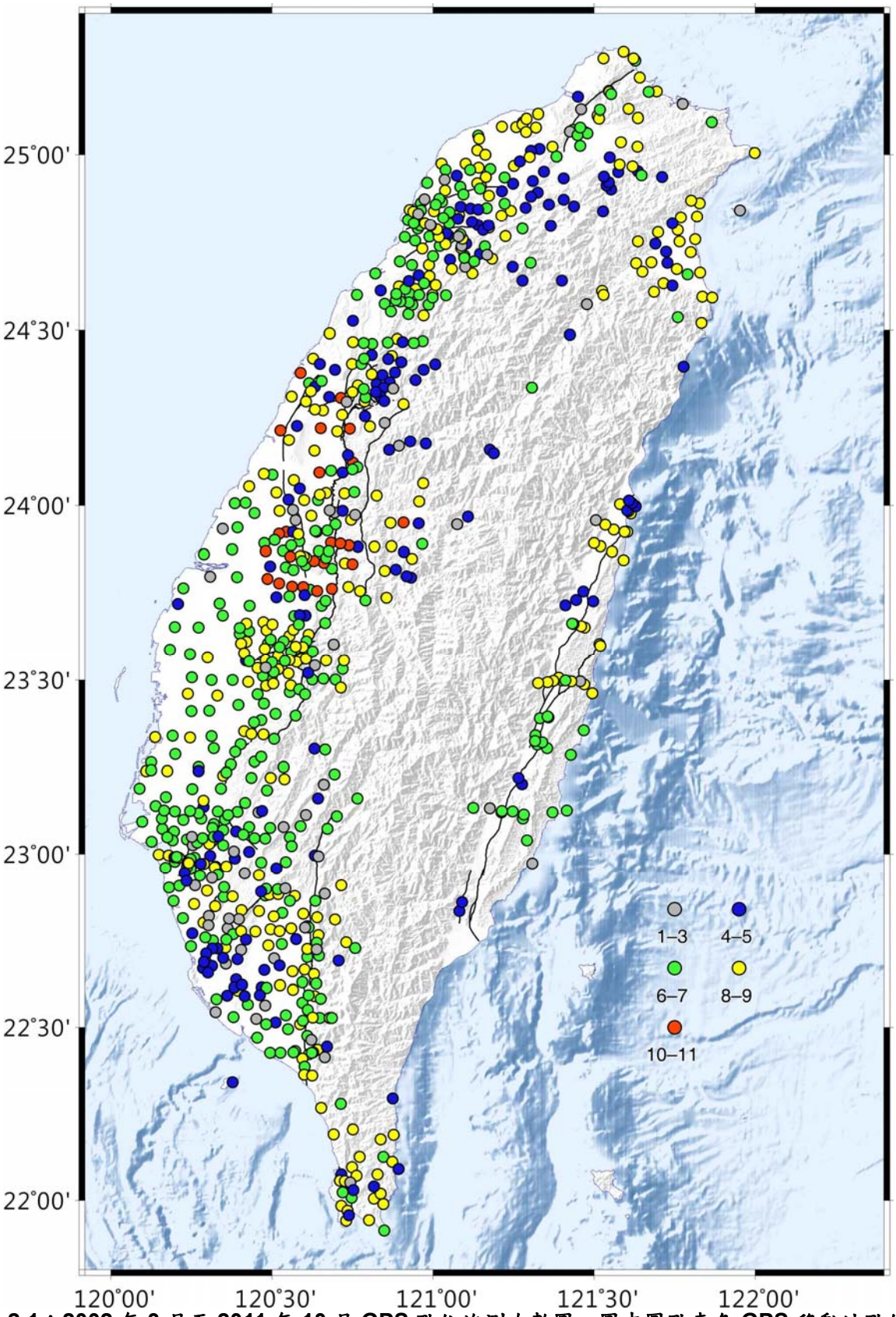


圖 2.1：2002 年 3 月至 2011 年 10 月 GPS 點位施測次數圖。圖中圓點表各 GPS 移動站點位的位置，點位的顏色代表其施測次數（以年為單位）。黑線為 2010 年地調所公布之活動斷層位置。

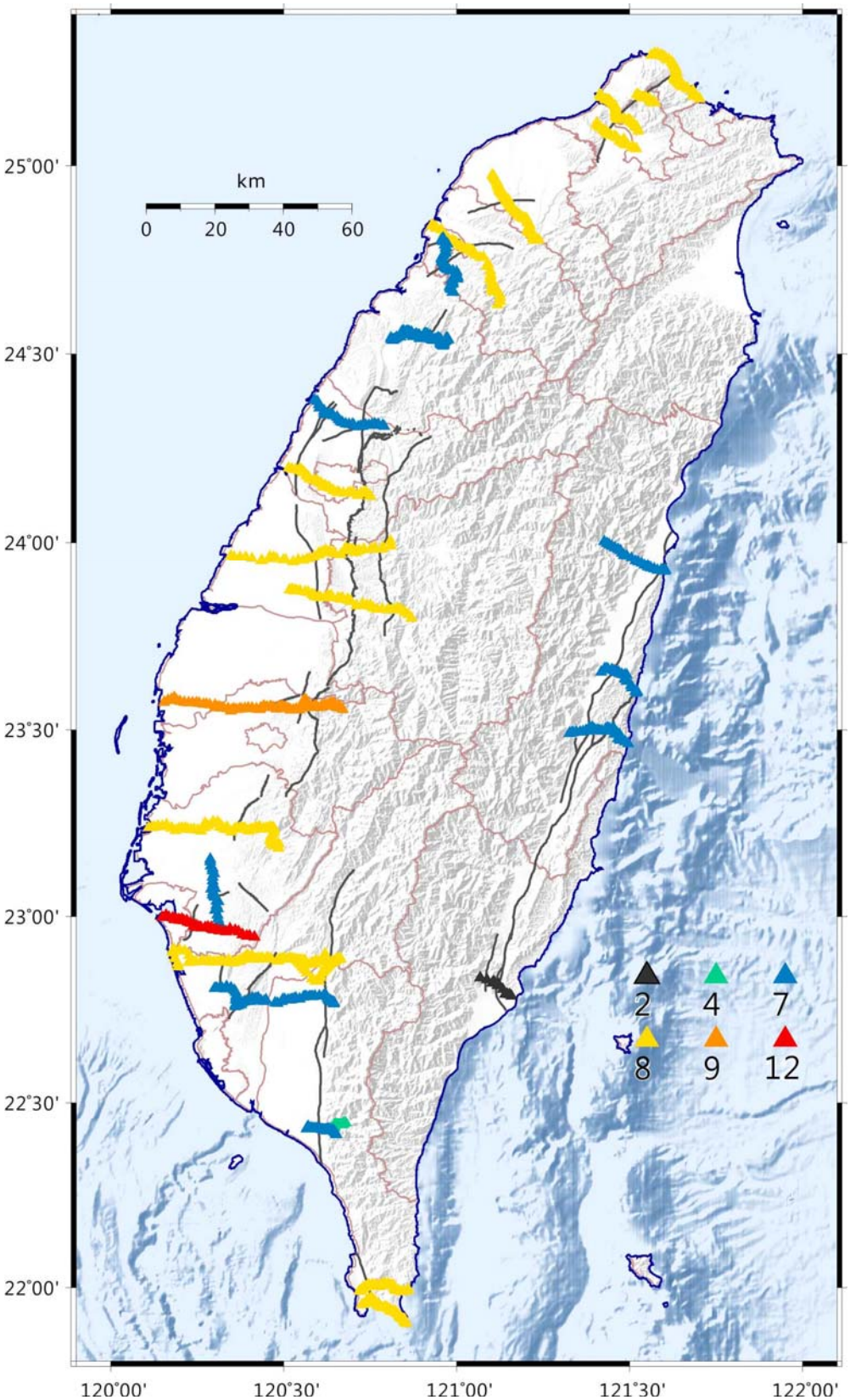


圖 2.2：2002 年 2 月至 2011 年 10 月精密水準測線施測次數圖。圖中三角點表各精密水準點位的位置，點位的顏色代表其施測次數（以年為單位）。黑線為 2010 年地調所公布之活動斷層位置。

2-1-1 工作進度

由於本分項計畫之工作為分析大地測量資料，以及進行 GPS 及精密水準測量之監工，因此於此節中，我們將今年度（2011 年）計畫之工作進度區分為「外業工作」及「計畫研究工作」等二個部份之工作項目，以下針對 6 月至 11 月的工作情形進行條列描述。

外業工作

(1) 06/01-06/28　嘉南地區 GPS 測量，27-30 日進行監工及檢核測量。

(2) 06/13-06/19　縣 122_新竹至五峰測線水準測量，13 日監工。

(3) 06/20-06/25　縣 117_新竹至峨眉測線水準測量，23 日監工。

(4) 07/04-07/24　高屏地區 GPS 測量，8 月 2-3 日進行監工及檢核測量。

(5) 07/18-07/25　縣 115_新屋至童話世界測線水準測量，22 日監工。

(6) 08/01-08/11　中部地區跨車籠埔斷層測線（共 5 條）水準測量，分別於 1 日（中興新村）、2 日（烏溪南岸）、3 日（五光至黃竹）、5 日（曾厝至霧峰）及 11 日（北市至峰谷）監工。

(7) 08/01-08/30　中部地區 GPS 測量，24-26 日進行監工及檢核測量。

(8) 09/01-09/03　淡水至士林測線水準測量，3 日監工。

(9) 09/01-09/04　台 2_石門至萬里測線水準測量，4 日監工。

(10) 09/04-09/07　五股至臺北測線水準測量，5 日監工。

(11) 09/05-09/06　士林至三芝測線水準測量，6 日監工。

(12) 09/05-09/26　花東地區 GPS 測量，10 月 3-5 日進行監工及檢核測量。

(13) 09/26-09/28　佳冬至七佳測線水準測量，26 日監工。

(14) 10/03-10/27　臺北地區及宜蘭地區 GPS 測量，分別於 9 日、24 日進行監工，並分別於 11 月 7-8 日、11 月 9 日進行檢核測量。

(15) 10/01-10/07　嘉義地區跨梅山斷層測線（共 7 條）水準測量進行中，分別於 1、2、3、4、5、6、7 日進行監工。

(16) 10/11-10/15　台 19 甲_善化至關廟測線水準測量，14 日監工。

(17) 10/17-10/26　台 2_梗枋至東澳測線水準測量，20 日監工。

(18) 11/01-11/04　嶺頂至瀧澗測線水準測量，4 日監工。

(19) 11/05-11/24　靜浦至紅葉測線水準測量，5 日監工。

(20) 11/15-11/23　富岡至東成測線水準測量，23 日監工。

(21) 11/25-11/29　豐濱至光復測線水準測量，25 日監工。

計畫研究工作

(19) 2011/01/12-迄今　歷年資料時序分析及斷層活動機制探討工作。

(20) 2011/02/16-迄今　地質、地震資料整理，斷層地震潛能解析及斷層模型建置工作。

(21) 2011/03/23-迄今　臺灣地區 GPS 連續站資料計算及時間序列分析。

(22) 01/12-12/12　　歷年資料時序分析及斷層活動機制探討工作。

2-1-1-1 2011 年新點規劃

本年度新增埋設 99 個點位，包含 39 個精密水準測線遺失點位之補設，以及高屏嘉南地區 6 個及北部地區 22 個 GPS 加密點位，並新設 TC29、TC30、TC31 三個台電 GPS 監測點位，主要著重在加密各監測網之點位密度，並強化斷層活動性之解析能力。另外新增宜蘭地區的水準測線，於內政部台 2 線梗枋至東澳段的原有測線加密 32 個點位。此外新增台北地區 1 個及宜蘭地區 3 個連續站（圖 2.3）。本計畫希望加強宜蘭地區監測網密度之原因詳述如下。

2011 年 3 月 11 日發生於日本 M_W 9.0 宮城外海地震所產生之地表震動，不僅為日本東北及關東地區帶來災害性之人員傷亡與建物損毀，更對沿岸地區帶來嚴重之海嘯侵襲。臺灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊之擠壓碰撞帶，同樣具有活躍之地震活動。此次發生於日本外海 M_W 9.0 的事件，再次提醒我們兩個重要的訊息：（1）雖然臺灣本島內部發生 M_W ~ 9.0 地震之機率並不高，但是位於臺灣東部與南部之琉球隱沒帶與馬尼拉隱沒帶皆具有發生 M_W ~ 9.0 之地震潛能；（2）臺灣東北部若發生大地震，由於盆地效應的影響，有相當高的機率會在台北地區造成相當嚴重的災情。

藉由近年來地質調查與鑽井資料之分析結果指出，山腳斷層被認為是大台北都會區中最主要之活動斷層[e.g., *Teng et al.*, 2001; *Huang et al.*, 2007; *Chen et al.*, 2010]。為了監控山腳斷層之活動行為，大量之 GPS 連續站圍繞著山腳斷層而設立（圖 2.3、圖 2.4）。自 2002 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-活動斷層監測系統計畫」開始，同樣為了解析山腳斷層之活動特性，中央地質調查所也在其四周設置大量之 GPS 監測點與跨越山腳斷層之四條精密水準路線（圖 2.3、圖 2.4）。然而，2011 年發生於日本外海 M_W 9.0 的地震事件提醒我們，臺灣東北部地區之琉球隱沒帶同樣也蘊含有發生大地震之潛能，此地區之地震活動隨時可能對大台北地區造成危害，如 2002 年 M_W 7.1 花蓮外海 331 地震的發生，台北市因盆地的共振效應，震度高達 5 級，遠大於 1999 年 M_W 7.6 集集大地震產生之震度 4 級，台北市因而出現嚴重災情。其中包含，正在施工之台北 101 國際金融大樓塔式吊車坍倒，造成五人死亡的災難及承德路 3 段 178 號一棟五樓老舊公寓的倒塌，一、二樓前半部分全被震垮。

雖然在地調所公告的活動斷層分布圖中，宜蘭地區並無任何一條活動斷層的存在，但是近年來的一些研究結果與地震活動皆指出，宜蘭地區的構造活動相當活躍且確實具有相當高之地震潛能，因此，對於宜蘭地區活動構造的監測工作應該被重視。

在過去的震測與活動斷層調查工作中就指出，宜蘭平原下至少有礁溪斷層、宜蘭斷層與濁水斷層的存在[*Chiang*, 1976; *Lee et al.*, 1998]。近期地形分析的工作中也指出，宜蘭平原的南北緣存在著正斷層的活動證據[*Shyu et al.*, 2005]。雖然過去對於精密水準[*Liu*, 1995]和 GPS [*Hou et al.*, 2009]的結果分析皆認為此地區之地殼變形主要是反映沖繩海槽的張裂，但是簡單的模型分析[*Rau et al.*, 2008]就已指出此地區的地表變形確實顯示這個區域之斷層是有在累積能量。2005 年的宜蘭雙主震就是一個很好的證據，說明這個地方的構造活動是有在活動的[*Lai et al.*, 2009]。在 *Ku et al.* （2009）的文章中，也將宜蘭近海地區的震測資料和地震活動結合，說明這個地區確實存在主要的活動構造（比較文章中提及的位置就相當於是濁水斷層的位置）。查詢氣象局之地震紀錄，可以發現這個地區的地震活動相當頻繁，同時也聚集成一系列近東西走向的地震帶，其中一個地震帶更被定義為「羅東地震密集帶」[*Lee et al.*, 1998]。此外，地熱研究也指出此地區具有一條相當高溫的地熱帶（geothermal reservoir）[*Tong et al.*, 2008]。然而，目前對於這條地熱帶所代表的意義及是否會造成危害並不是太清楚。另一方面，宜蘭地區和台北都會區之間的距離非常接近，此地區之地震活動非常容易就對台北都會區造成災害。但是，由於宜蘭地區之構造多被覆蓋在沖積層之下，傳統地質的調查工作不易判斷出這些構造所具有之地震危害度。相反地，透過大地測量的方式，反而可以協助我們逐步釐清此地區之地震潛能。

在新設置之精密水準路線與 GPS 連續站部分，由於宜蘭地區之構造主要由近乎東西向之正斷層或逆斷層（板塊交界面）所組成，因此垂直運動分量之監測乃是相當重要的工作，可以很好地協助我們辨明及約制活動構造之位置及幾何形貌。台 2 線本身即為內政部之南北向水準路線（圖 2.3），且已有發表之成果，所以本計畫建議加密此路線之水準點，並持續進行精密水準之施測。由於濁水斷層之活動性已經被過去之 GPS 研究所觀察到[*Rau et al.*, 2008; *Hou et al.*, 2009]，然而此地區之 GPS 連續站分布並不足夠，因此 GPS 連續站之建置位置，將建議分布於濁水斷層兩側。GPS 連續站之設置希望能（1）辨明宜蘭地區淺層活動構造之位置、活動性及其發震特性；（2）監測琉球隱沒帶之發震特性。

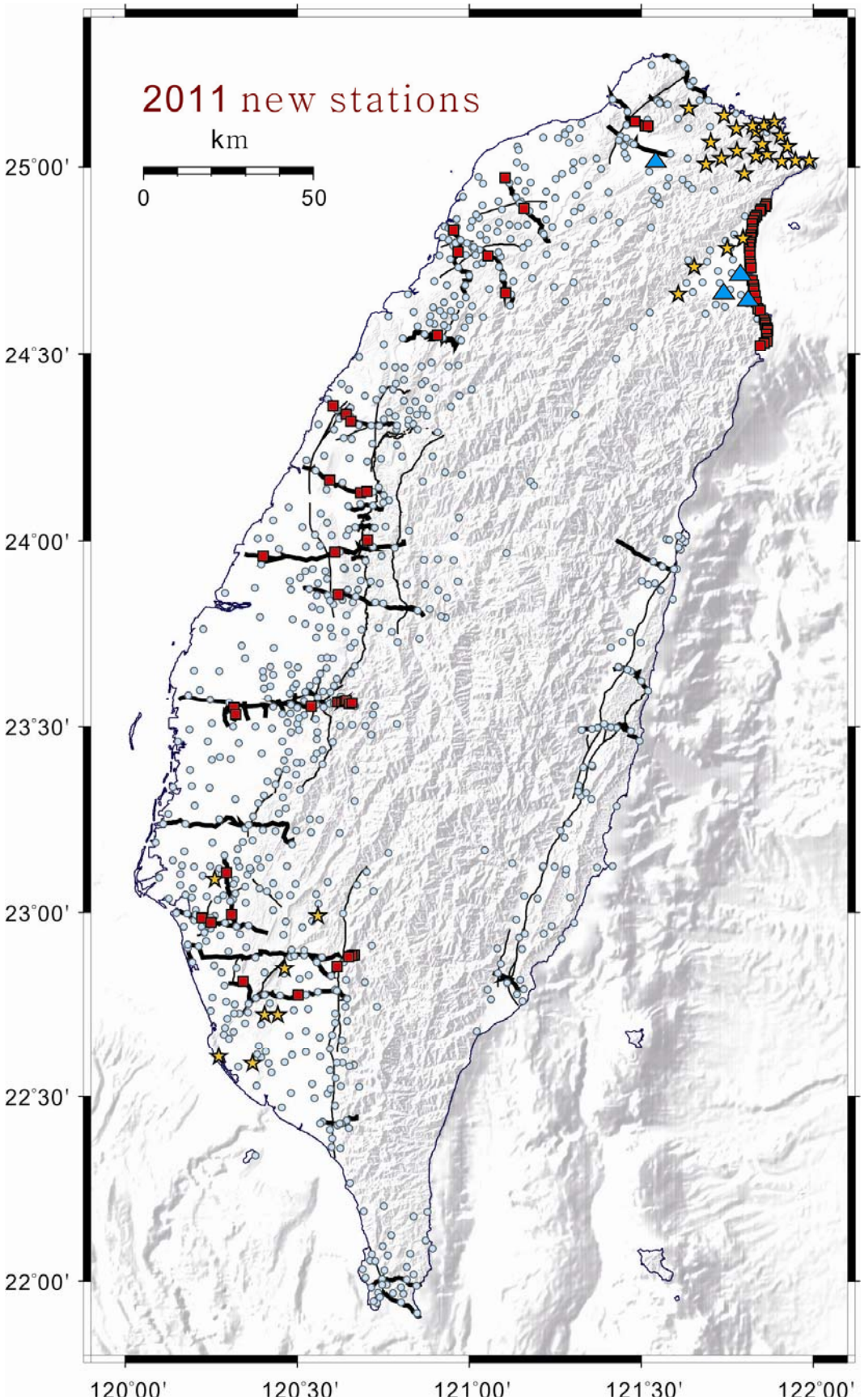


圖 2.3：2011 年度新增點位分布圖，灰色圓形為既有之 GPS 移動站，黑線為既有之水準路線。紅色方形表示水準新設及補點點位，黃色星形為 GPS 補點加密點位，藍色三角形為新設 GPS 連續站點位。

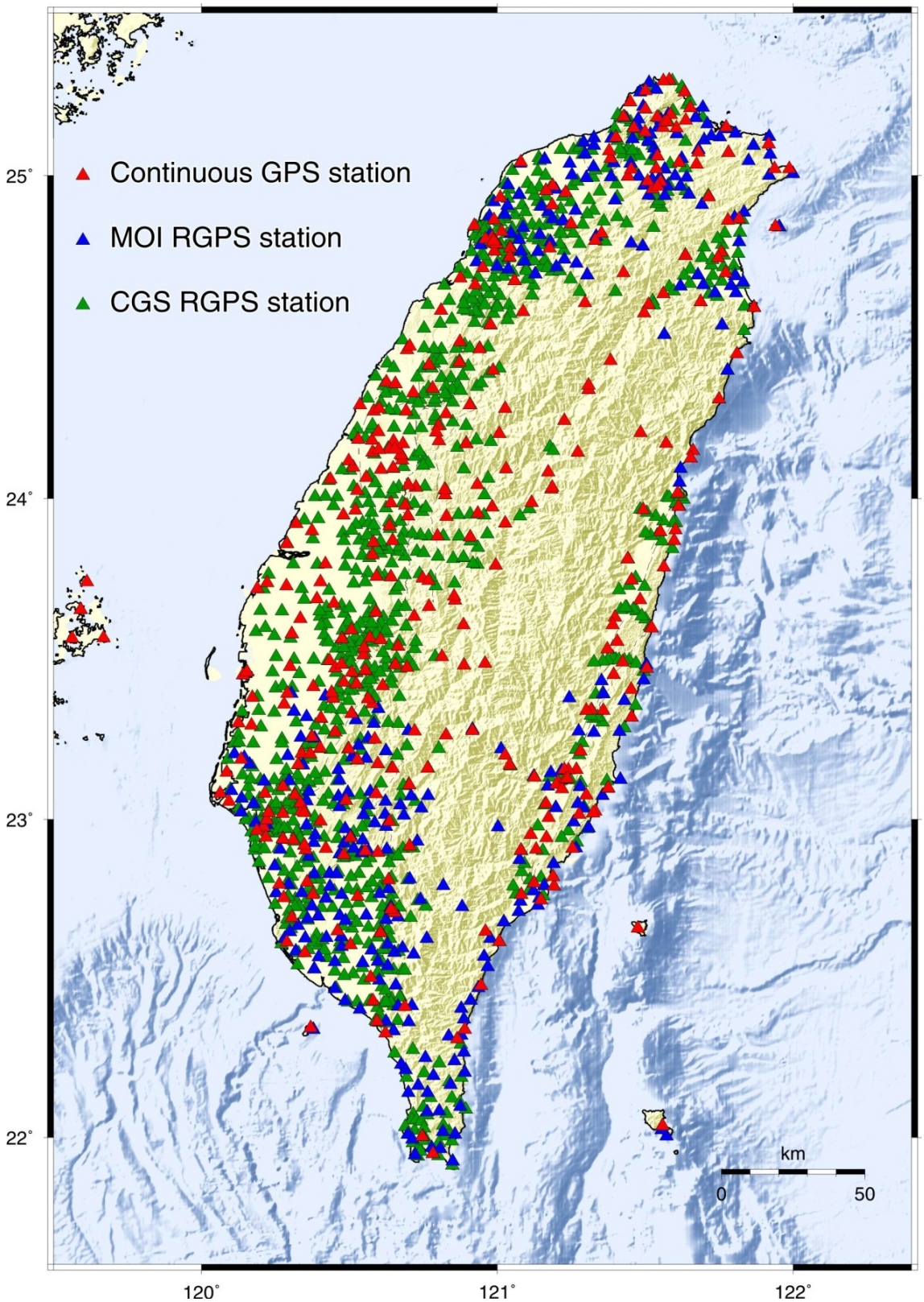


圖 2.4：臺灣地區 GPS 測站分布圖。紅色三角形為 GPS 連續觀測站；綠色三角形為經濟部中央地質調查所設立之 GPS 移動站；藍色三角形為內政部設立之 GPS 移動站。

2-1-2 2011 年 GPS 施測成果

在 GPS 資料處理方面，本計畫主要以移動站之觀測資料為主，再配合部分連續站的觀測資料，進行臺灣地區斷層活動之監測。本研究 GPS 觀測資料之解算與網形平差，是採用 Bernese 5.0 [*Dach et al.*, 2007]解算軟體進行。Bernese 軟體是由瑞士伯恩（Berne）大學所研發。除一般性 GPS 資料處理功能外，另有計算軌道參數、極運動（polar motion）參數、電離層模式推求、對流層折射附加參數等功能。

2-1-2-1 GPS 座標計算穩定度分析

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

座標殘差分析

由圖 2.5a 可知 2002-2010 年及 2011 年 GPS 觀測資料之座標殘差分布情形。2002-2010 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.09 ± 8.36 mm(2 倍標準差)、E 方向為 0.01 ± 12.18 mm 及 H 方向為 0.03 ± 31.21 mm。在 2011 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.21 ± 5.78 mm、E 方向為 0.01 ± 6.07 mm 及 H 方向為 0.71 ± 11.52 mm。

均方根誤差分析

均方根誤差分析為針對測站每次解算時，所產生的均方根誤差量（RMS error）做其統計。本計畫採用水平及垂直兩分量來分析。由統計結果(圖 2.5b)可看出 2002-2010 年水平方向之均方根誤差平均值為 9.46 mm，垂直方向為 22.34 mm，及 2011 年水平方向之均方根誤差平均值為 7.61 mm，垂直方向為 22.99 mm。

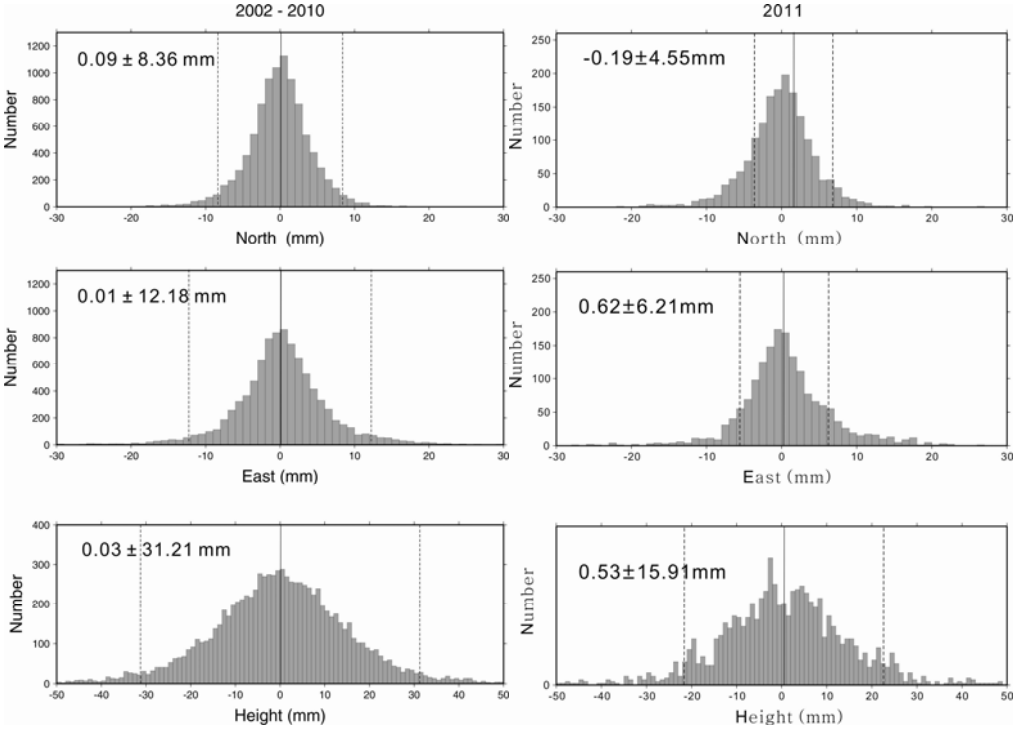


圖 2.5a：2002-2010 年及 2011 年 GPS 點位坐標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

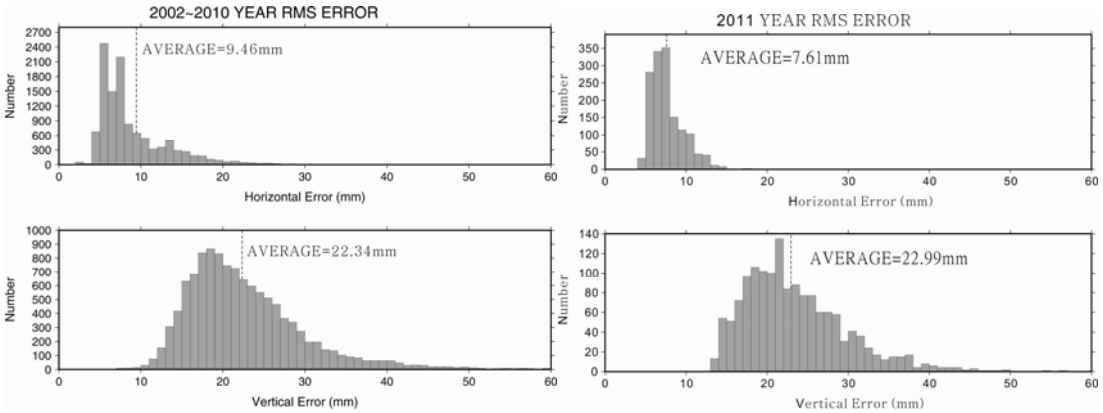


圖 2.5b：2002-2010 年及 2011 年 GPS 點位均方根誤差分佈圖。

2-1-2-2 各地區 GPS 觀測成果分析

臺北地區 GPS 觀測成果分析

本計畫將臺北地區 2004-2010 年及 2011 年所測量之觀測資料作時序分析，藉由各站的坐標時間序列可知各點之位移變化情形，臺北地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2011 年，測量次數介於 3 至 8 次。由圖 2.6 可知，本區域速度場主要朝西北北方向，值約在 0-4 mm/yr。

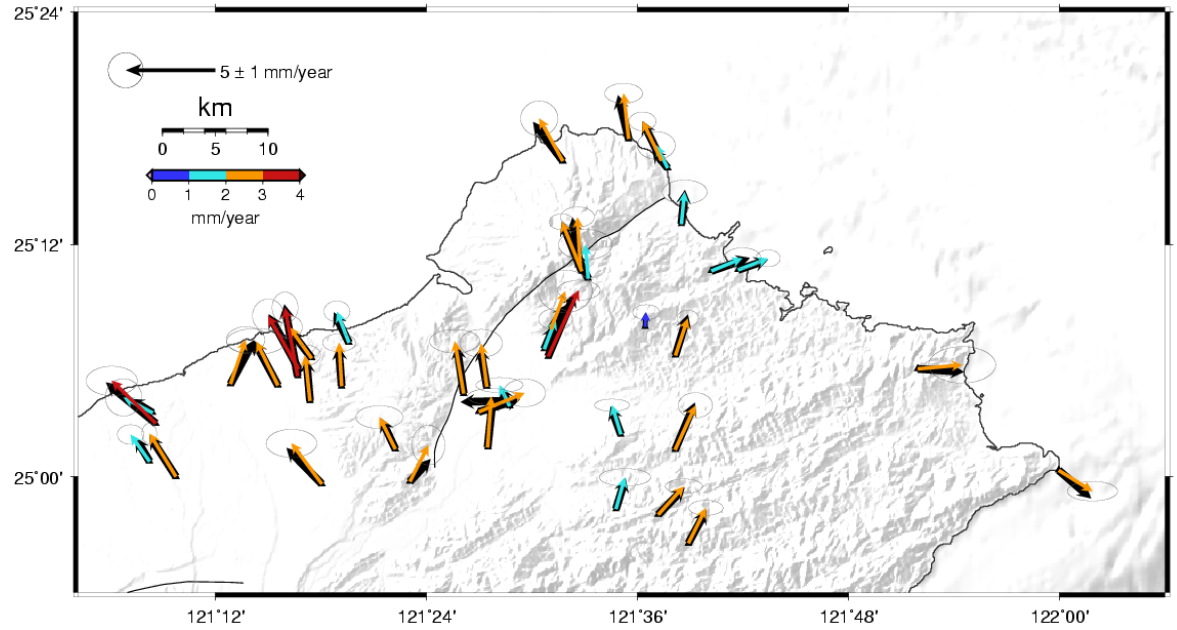


圖 2.6：台北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階速度場箭頭表示 2004-2011 年測量資料所求得之速度場分布情形，黑色速度場箭頭表示 2004-2010 年速度場分布情形。

桃竹地區 GPS 觀測成果分析

桃竹苗地區 GPS 資料觀測時間自 2003 至 2011 年，測量次數介於 2 至 8 次，本區遺失點位為 1 點。由圖 2.7a 可知，在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由圖 2.7b 可知加進今年解算資料後，2008 年起施測之新設點位（圖 2.7b，GE11、GE16、GE17、GF19、GF24、GF25 等）速度偏移量較大且偏向西北向，其觀測次數為 4 次因此速度場受單次解算結果影響較大，以連續站 FUSI 及 THAI 之時間序列圖可知該點位速度場符合該區長期觀測速度趨勢，由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢。

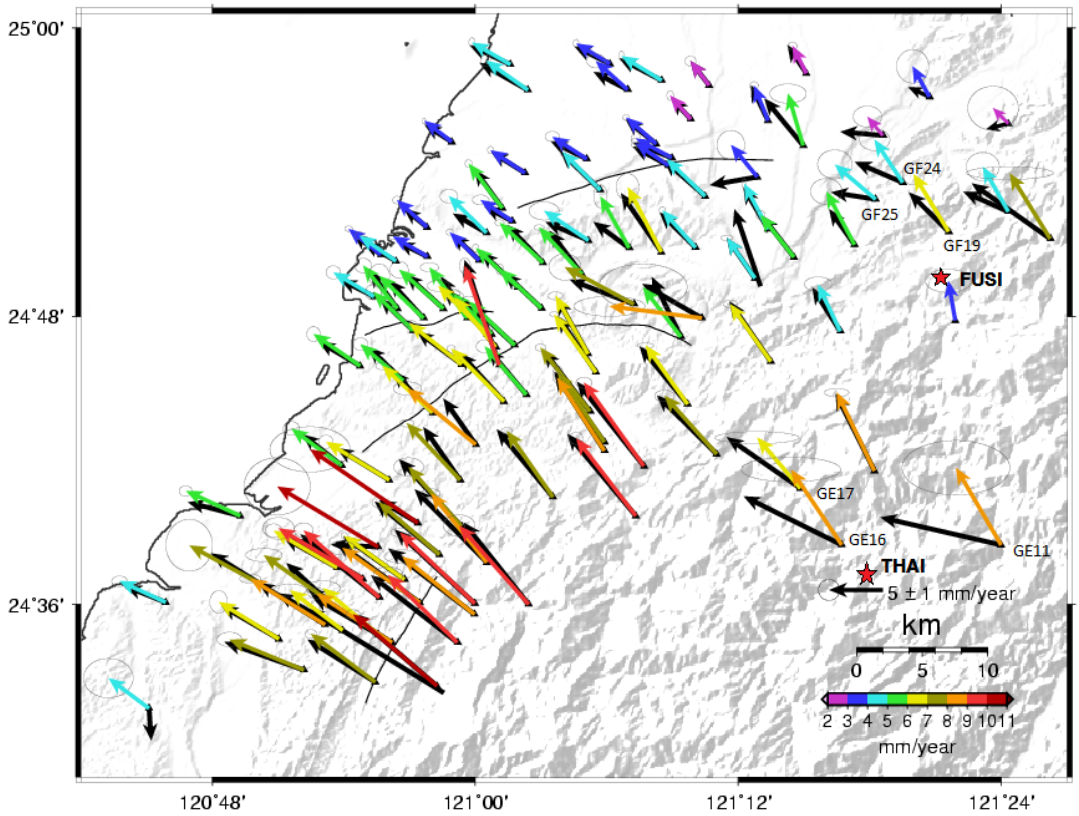


圖 2.7a：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階顯示速度場表示加入今年測量資料所求得之速度場分布情形（2003-2011 年），黑色速度場表示 2003-2010 年速度場分布情形。

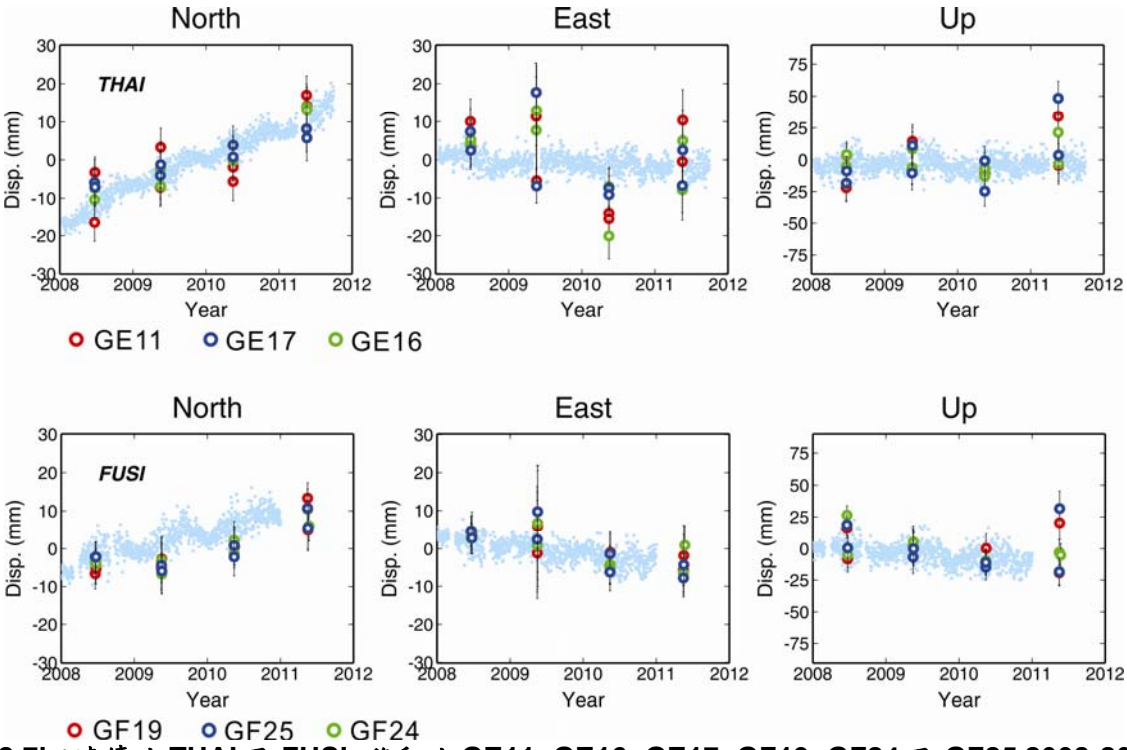


圖 2.7b：連續站 THAI 及 FUSI、移動站 GE11、GE16、GE17、GF19、GF24 及 GF25 2008-2011 年解算時間序列圖，淺藍色為連續站長期位移結果，紅、藍、綠分別代表移動站四次解算結果之位移。

中部地區 GPS 觀測成果分析

中部地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2011 年，測量次數介於 3 至 10 次。由圖 2.8 可知在大茅埔斷層以東速度場約 30-45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16-20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6-15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12-16 mm/yr。

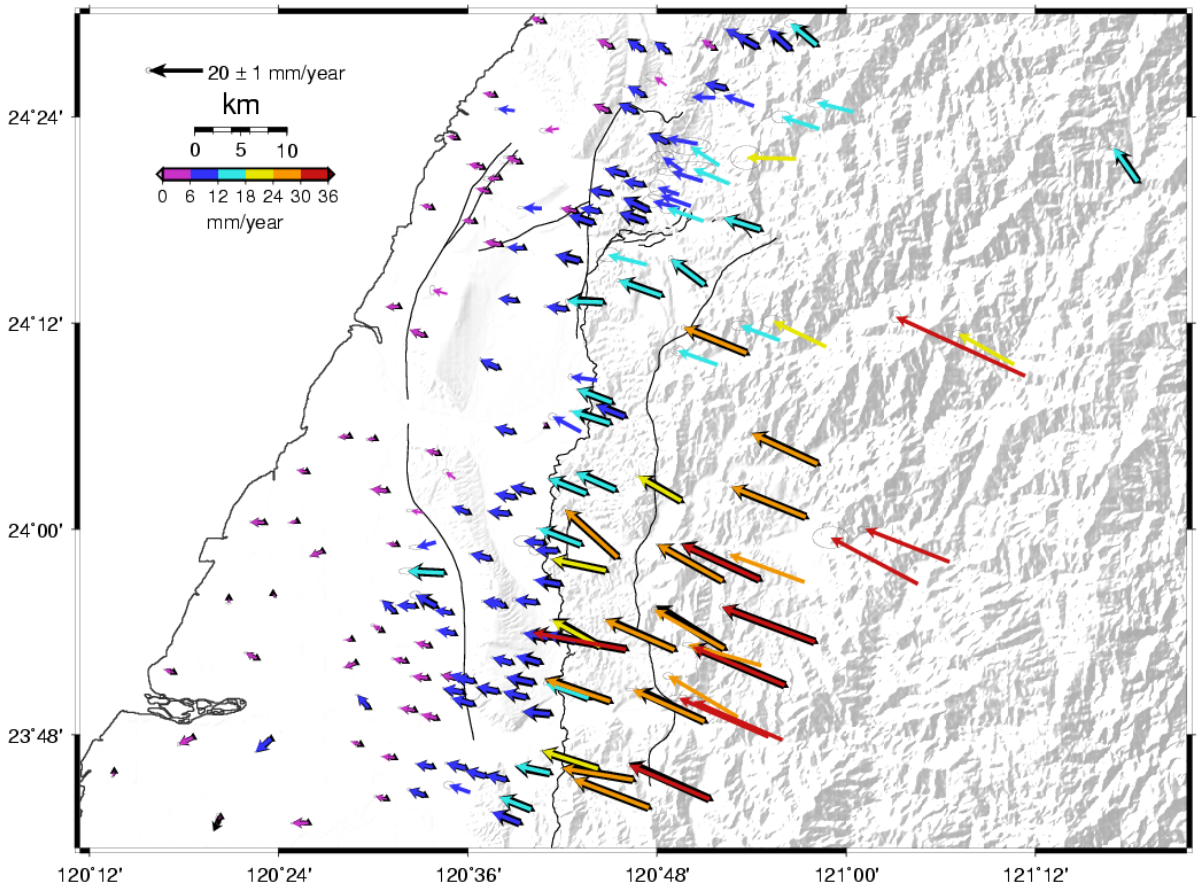


圖 2.8：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階速度場箭頭表示 2002-2011 年測量資料所求得之速度場分布情形，黑色速度場箭頭表示 2002-2010 年速度場分布情形。

嘉南地區 GPS 觀測成果分析

嘉南地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2011 年，測量次數介於 3 至 10 次。由圖 2.9 可知，嘉義南部至臺南北部地區在觸口斷層和九芎坑斷層－木屐寮斷層－六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑－木屐寮－六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12-15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15-20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增。

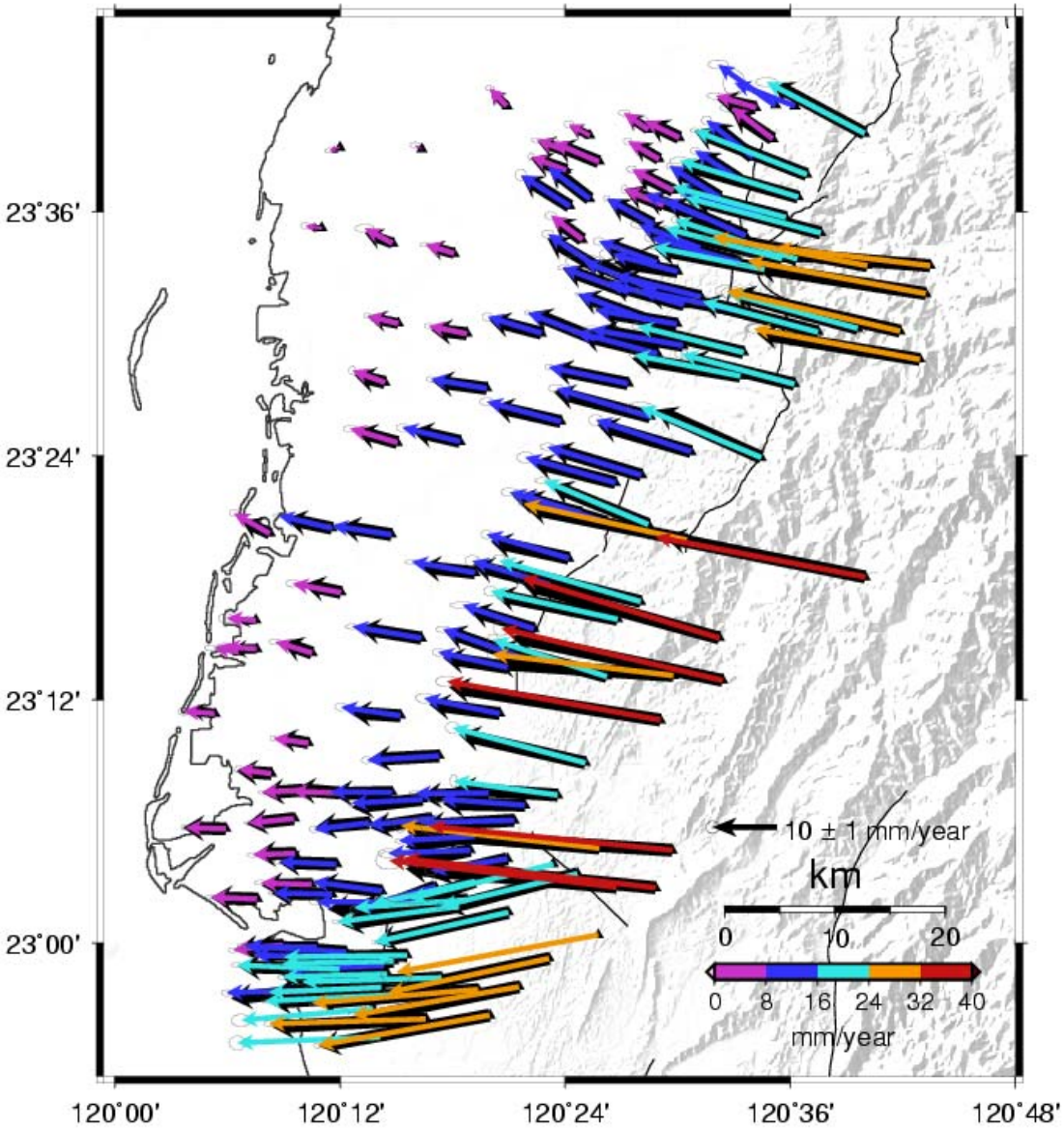


圖 2.9：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階速度場箭頭表示 2002-2011 年測量資料所求得之速度場分布情形，黑色速度場箭頭表示 2002-2010 年速度場分布情形。

高屏地區 GPS 觀測成果分析

高屏地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2011 年，測量次數介於 3 至 10 次。由圖 2.10 可知，本區域主要之活動構造為東北－西南走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，跨過潮州斷層及恆春斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr。

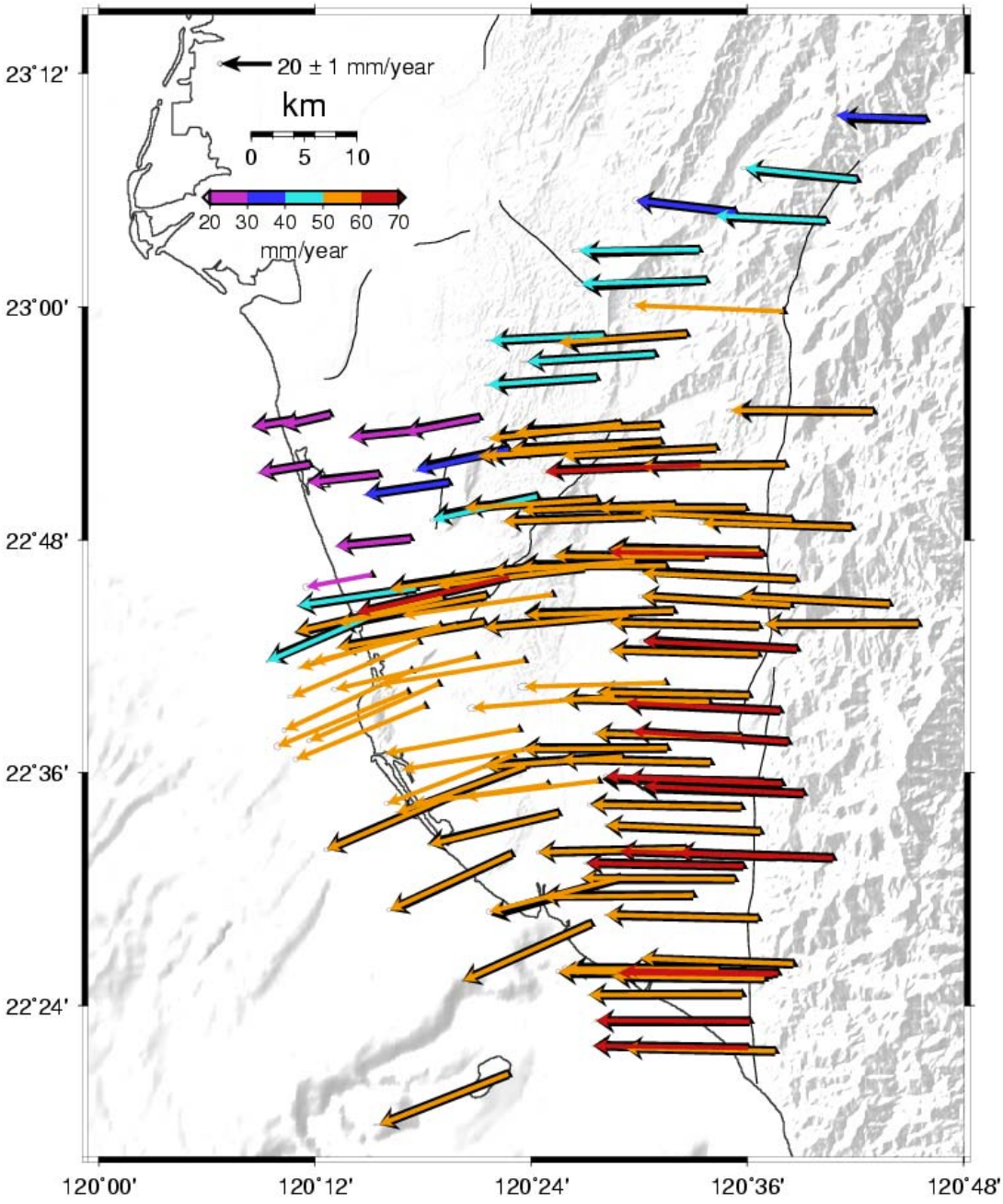


圖 2.10：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階速度場箭頭表示 2002-2011 年測量資料所求得之速度場分布情形，黑色速度場箭頭表示 2002-2010 年速度場分布情形。

恆春地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，由於 2006 年 12 月 26 日發生屏東外海地震對恆春地區之 GPS 速度場造成影響，觀察本區各站之時間序列可得知地震前後之速度場略有不同，因此為了解恆春地區在地震前後地表速度場之差異，將此區之速度場區分為地震前以及地震後，分別推算其速度值。

恆春地區各觀測點位之速度值如圖 2.11 所示，震前資料之觀測時間為 2003 年至 2006 年，速度量值 49-66 mm；震後資料之觀測時間為 2007 至 2011 年，速度量值 43-61 mm。地震後除恆春斷層西側較靠近斷層之點位，其餘各測站之速度量值與震前大致相仿，但震後速度場相較於震前具有逆時針偏轉角度約 2-3°，且呈現回復至震前速度場之趨勢。

花東地區 GPS 觀測成果分析

花東地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2011 年，測量次數介於 3 至 8 次。此地區之速度場（圖 2.13）顯示，速度向量自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20-40 mm/yr 增加至 50-70 mm/yr 再減少為 20-60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸變大的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

宜蘭地區 GPS 觀測成果分析

本計畫將宜蘭地區歷年所測量之觀測資料作時序分析，藉由各站的坐標時間序列可知各點之位移變化情形，宜蘭地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2011 年，測量次數介於 3 至 10 次。由圖 2.12 可知，本區域在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化亦是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 3-40 mm/yr。

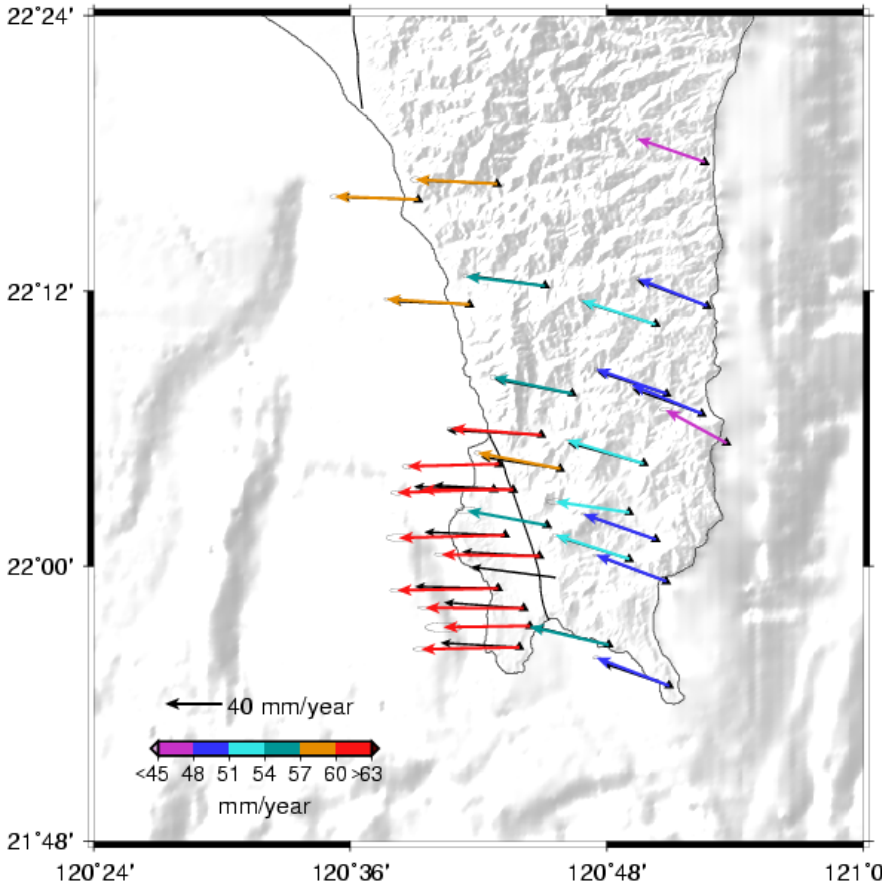


圖 2.11：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階箭頭表示屏東外海地震後速度場（2007-2011），黑色箭頭表示震前速度場（2003-2006）。

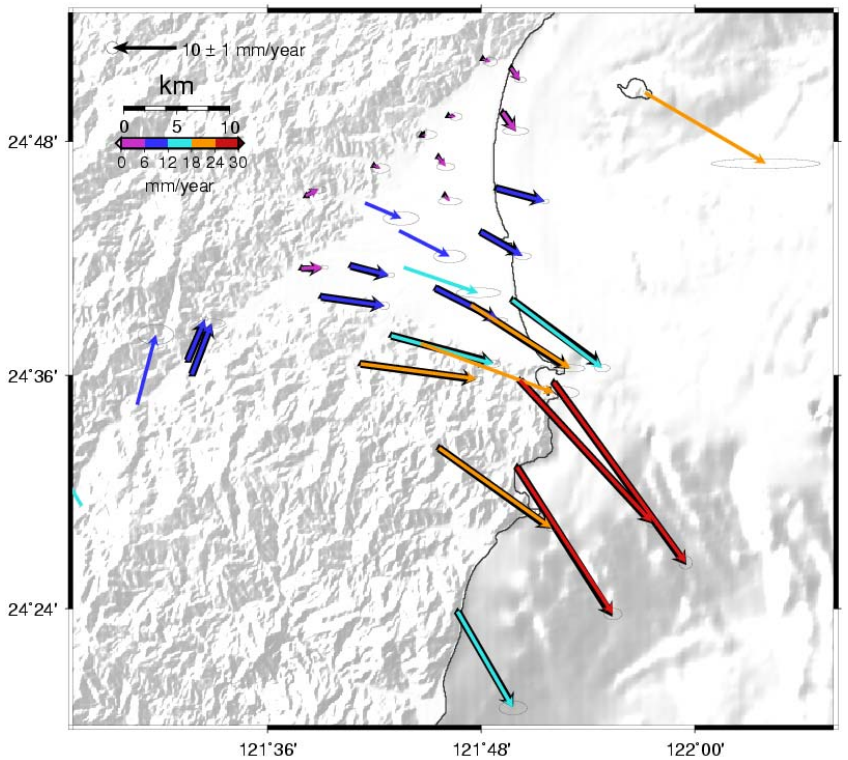


圖 2.12：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階速度場箭頭表示 2002-2011 年測量資料所求得之速度場分布情形，黑色速度場箭頭表示 2002-2010 年速度場分布情形。

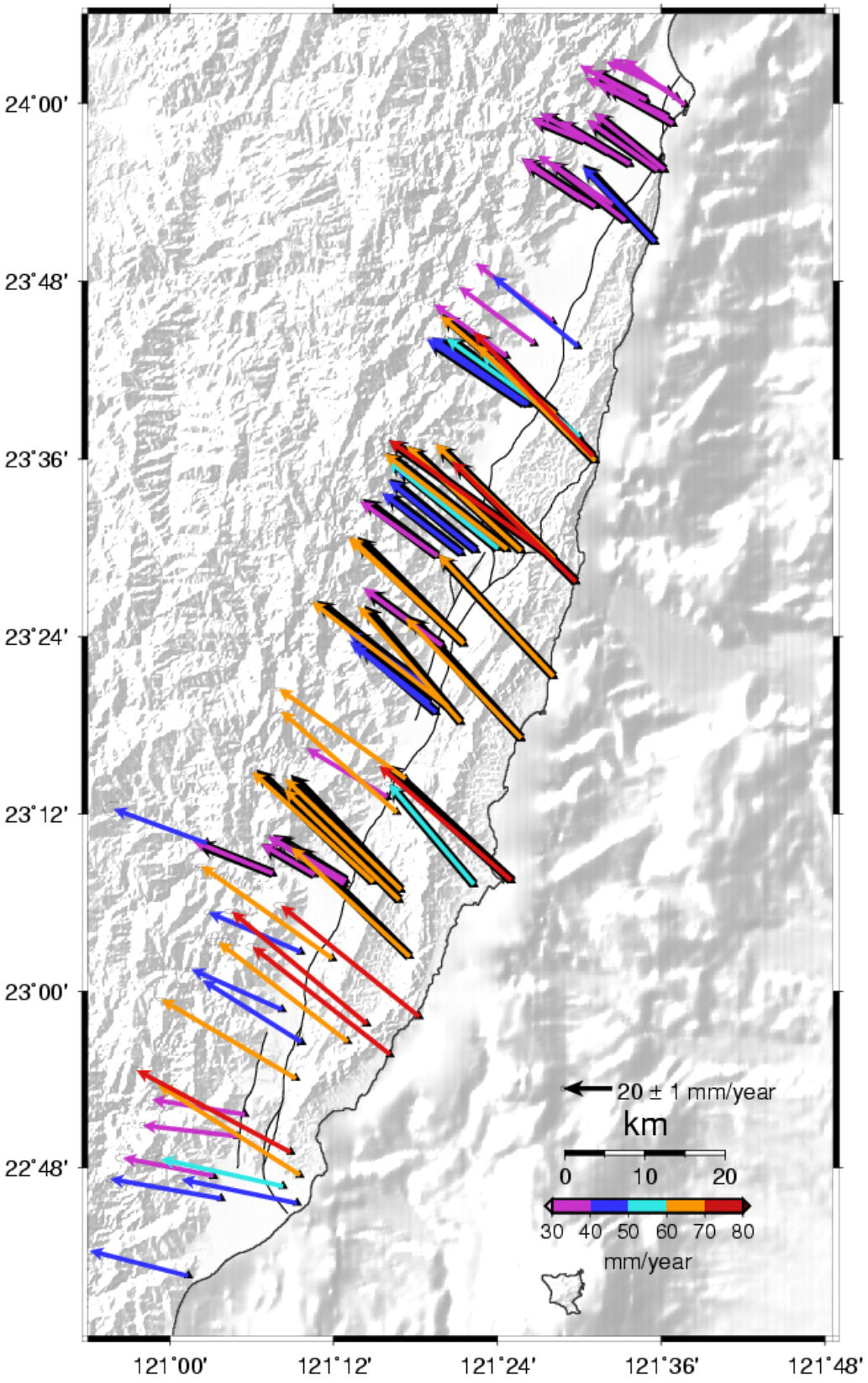


圖 2.13：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階速度場箭頭表示 2004-2011 年測量資料所求得之速度場分布情形，黑色速度場箭頭表示 2004-2010 年速度場分布情形。

2-1-2-3 臺灣地區 2002-2011 年應變率場

2002-2011 年平面應變速率場乃是由 GPS 平面速度場（圖 2.14）計算而得（方法詳見附件光碟-附錄 C），其結果如圖 2.15 所示，最大之壓縮應變率集中於縱谷地區，該區域之量值約-1 至-6 μstrain/yr，壓縮軸之軸向與板塊聚合方向相符，皆為 NW-SE 方向。而台灣西部之主要應變行為亦是壓縮應變（約-0.5 至-1.5 μstrain/yr），壓縮軸軸向大致為 E-W 方向；其中，車籠埔斷層南段之壓縮應變率是僅次於縱谷地區的量值大小，約-1.2 至-1.5 μstrain/yr，該數值在集集震後有增強之趨勢；觸口斷層往南延伸一帶具有壓縮應變，約-1 至-1.5 μstrain/yr，壓縮軸方向大致為 E-W；其餘各處如桃竹苗地區及高屏地區其應變速率介於-0.5 至 0.5 μstrain/yr，變形型態介於壓縮與伸張之間，壓縮軸方向亦大致為 E-W。蘭陽平原次有伸張應變約 1 μstrain/yr，伸張軸方向為 NW-SE，應變量值較集集震前為弱。恆春半島南端之伸張應變漸大，較集集震前為強，約 0.5 至 2 μstrain/yr，伸張軸方向為 NE-SW。

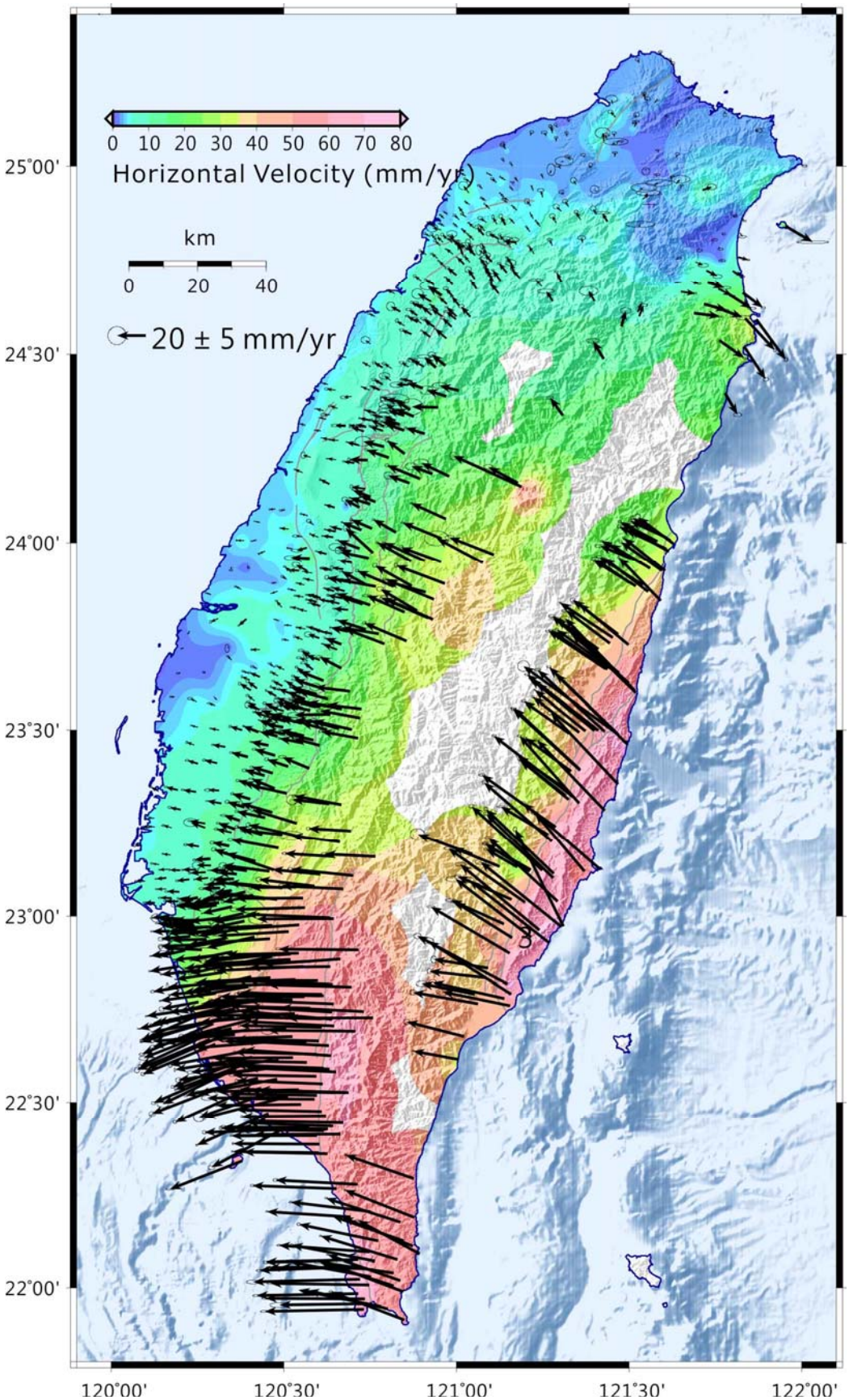


圖 2.14：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階反映 2002-2011 年測量資料所求得之速度場量值大小，黑色箭頭表示 2002-2011 年速度場方向及大小之分布情形。

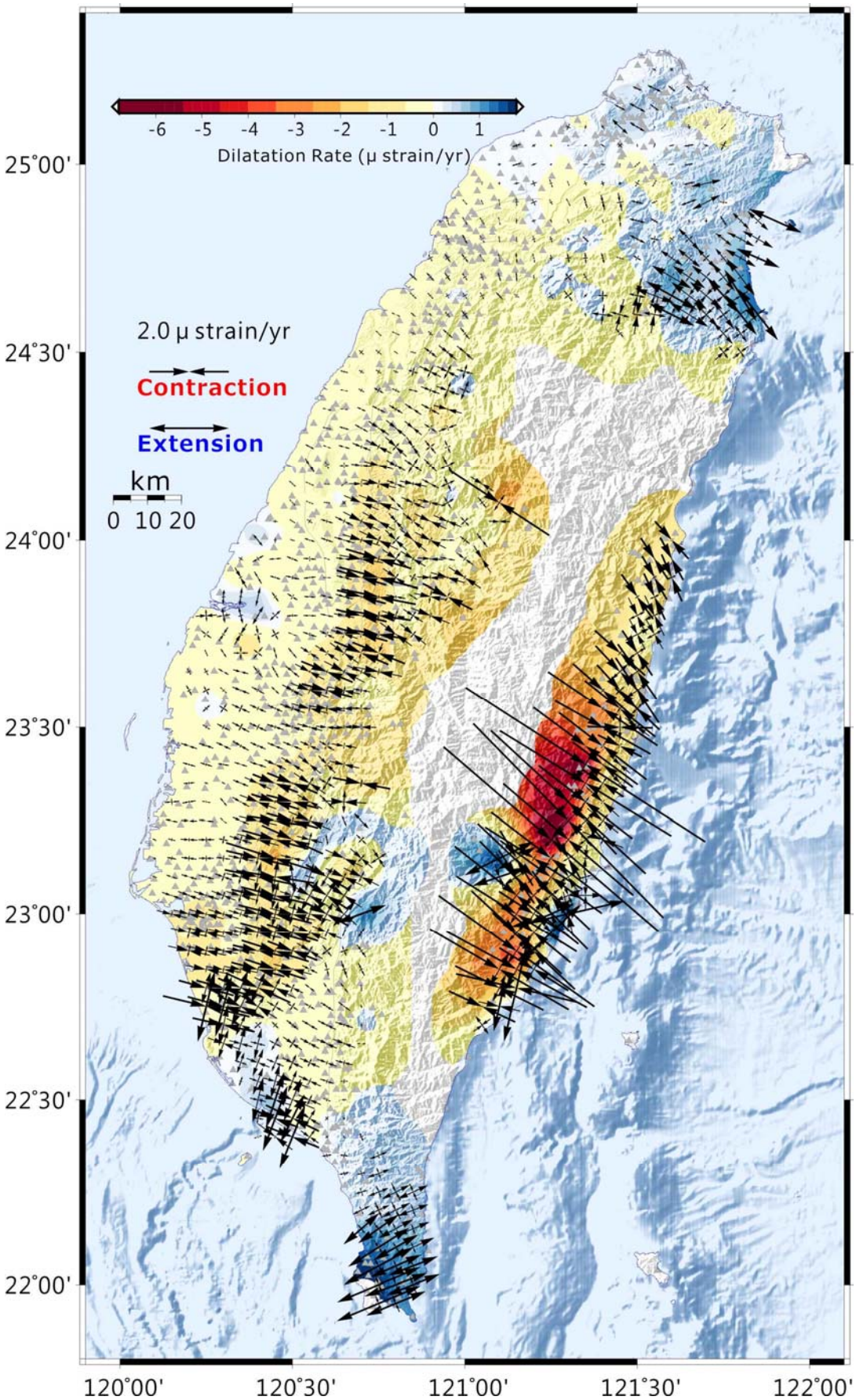


圖 2.15：全臺灣應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

2-1-3 2011 年精密水準測量成果

2-1-3-1 精密水準測量精度分析

在本年度計畫中，針對 2002-2010 年所設置之精密水準測量監測網進行重複觀測。總計本年度須施測之精密水準測線共 41 條（原 40 條，因今年增設台 2_梗枋至東澳測線，故測線數量增加 1 條），總長度大於 1000 公里（表 2.2）。

2011 年所獲得之測量資料包含有石門至萬里、士林至三芝、淡水至士林、五股至臺北、新屋至童話世界、新竹至五峰、新竹至峨眉、苗栗至南庄、大安至東勢、龍井至太平、王功至草屯、北斗至水里、金湖至瑞峰、北門至楠西、善化至關廟、安平至龍崎、路竹至茂林、岡山至安坡、佳冬至七佳、恆春西台地至佳樂水、恆春至鵝鑾鼻、嶺頂至瀧澗、豐濱至光復、靜浦至紅葉、富岡至東成、梗枋至東澳等測線，施測成果如 1-3-2 節所示。共計 2011 年所獲得之 962 個測段其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 924 個測段（圖 2.16a），佔所有測段比例之 96.0 %。重新計算各測段之施測精度，測段往返閉合差精度小於$1.5\sqrt{k}$者，佔所有測段比例為 86.6 %（833 個測段）；測段往返閉合差精度小於$2.0\sqrt{k}$者，則佔所有測段比例為 99.1 %（953 個測段）。考慮與測段距離的關係後[*Bomford*, 1985]，每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 886 個測段達 92.1 %（圖 2.16b），顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

精密水準測量中，除縣台 2_梗枋至東澳僅第一次測量、富岡至東成測線有 3 次測量記錄外，其餘測線皆有 7 次以上之測量資料。

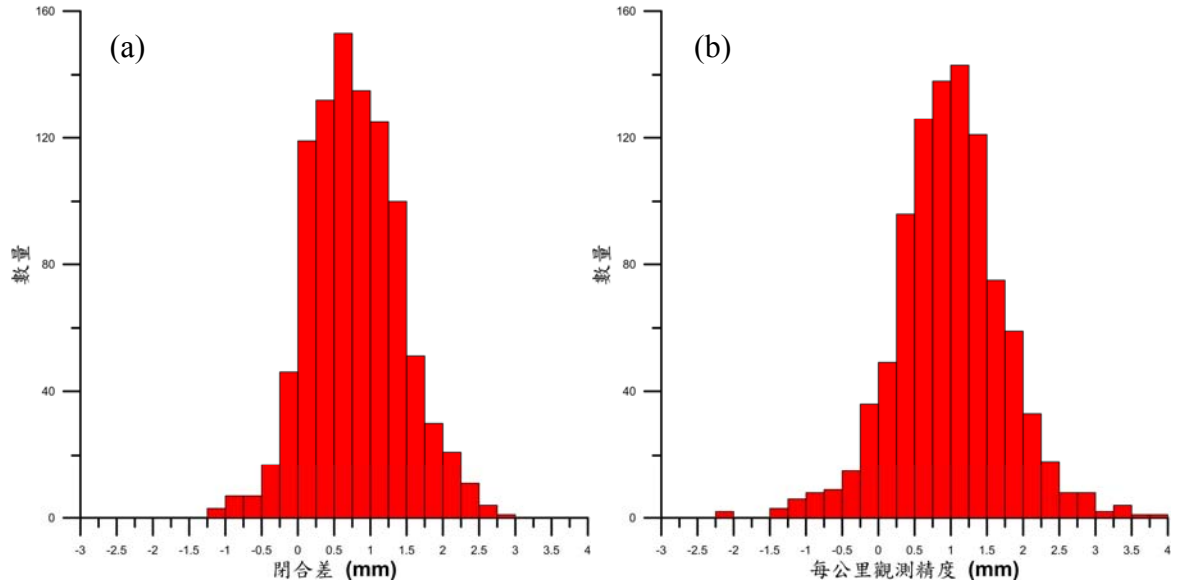


圖 2.16：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a)為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.50 mm 上。(b)為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 1.00 mm 上。

2-1-3-2 各測線高程變化分析

台 2_石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 30 公里，本水準測線於此測線於 2004 至 2011 年間共施測 8 次，分別於 2004-2005 及 2007-2011 年間的 9 月份、2006 年 8 月間進行。由垂直速度變化顯示，本測線跨斷層並未有大於±3 mm/yr 的明顯高程差變化量（圖 2.17），此結果顯示 2004-2011 年間，山腳斷層在該區域並未有明顯之活動性，然該測線點位在由西 7-10 km 處有~4 mm/yr 的變化，是否屬於山腳斷層的活動現象，值得持續觀察以解釋該現象。此外，該測線之點位時間序列斜率亦沒有明顯之變化。

士林至三芝測線

本測線亦跨越山腳斷層，測線長約 9 公里。該測線 2004 至 2011 年間之 8 次測量分別於 2004-2005 及 2007-2011 年的 9 月、2006 年 8 月間進行。此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側（GB11 及 GB12），由垂直速度之結果顯示，本區域跨斷層之水準垂直速度變化並未有大於 5 mm/yr 的明顯高程差變化量（圖 2.18），然而與台 2_石門至萬里測線相較之下，由西約 0.2 km 處垂直速度大於 5 mm/yr，向東至 4 km 處逐漸遞減至約 2 mm/yr，而後又向東繼續抬升至約 10 mm/yr，測線的垂直速度有較大之變化，據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能較為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要長時間的監測以及與其他資料的佐證。同時，該測線之點位時間序列斜率亦沒有明顯之變化，此點可供垂直速度變化之佐證。

淡水至士林測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 21 公里，在 2004 年 9 月進行第一次施測之後，又分別於 2005 年 10 月、2006 年 8 月、2007-2011 年的 9 月間進行第 2 至第 8 次的施測。由圖 2.19 中得知，山腳斷層東側 3.5 公里內的垂直速度皆顯示顯著的沉陷（0959 至 B229，臺北市大度路知行路口至大度路中央北路二段 257 巷路口），其最大沉陷量為-25.9 mm/yr；而點位時間序列亦在此區段間呈現下陷的趨勢。觀察 2004-2006 及 2007-2011 之每 2 年間高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由-30 mm 至-10 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。由於該區位於基隆河與淡水河的匯流處，屬於河流下游沙洲的一部分，此明顯的變化應與該區域因地表未固結岩體之壓密與固結岩層之排水結合高密度人為活動，以及部分斷層活動而產生的地表沉陷有關。

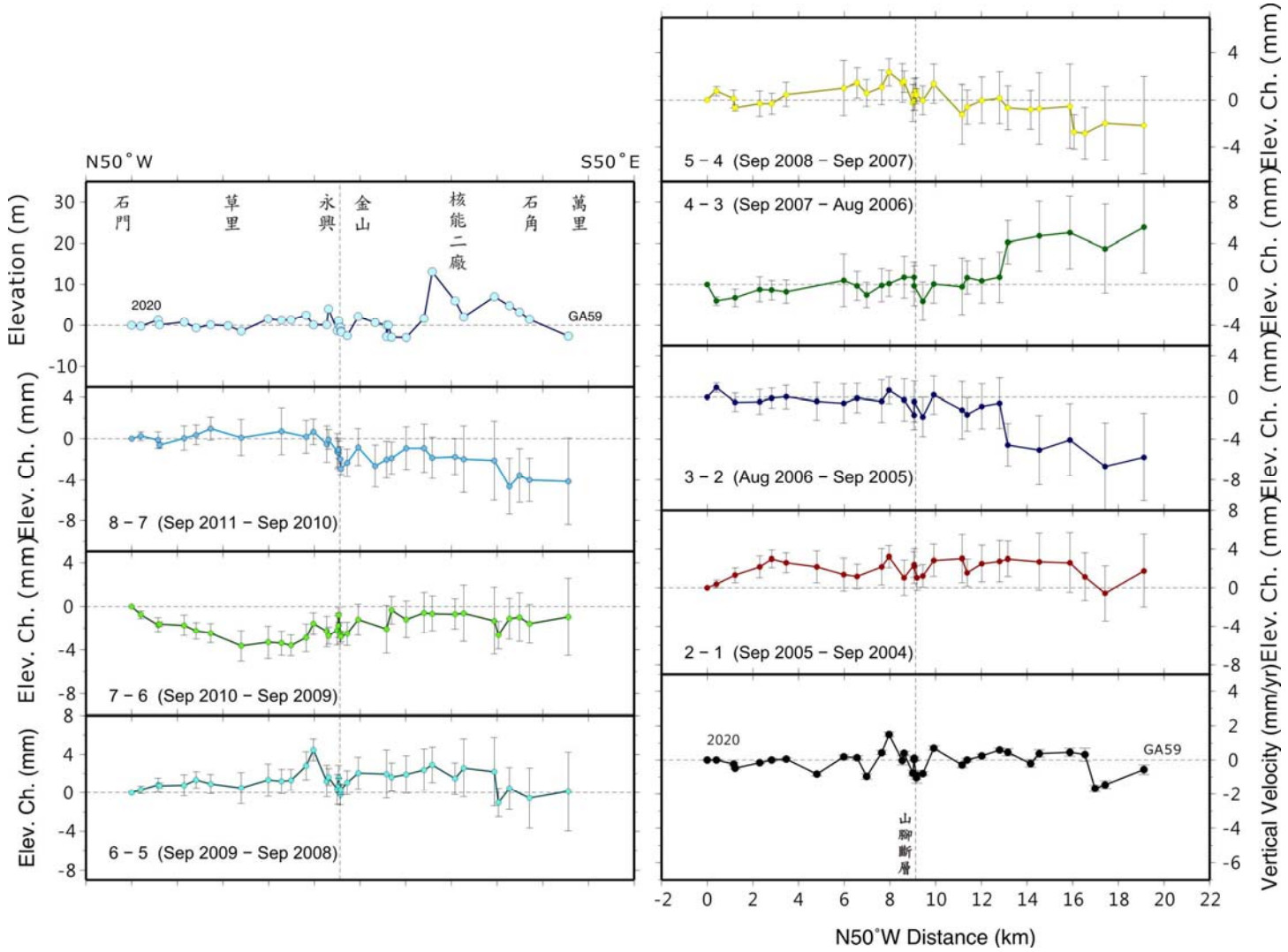


圖 2.17：台 2_石門至萬里測線水準垂直速度圖。右側最上一欄為固定最西側點位高程為 0 m 之地形變化，左側最下一欄為相對 S01R 之精密水準抬升速率。當中各欄為相鄰兩次測量相減的高程變化曲線。垂直虛線為地調所 2010 年公布之活動斷層與地調所各區域地質圖中繪製之褶皺軸的地表出露位置，水平虛線為垂直速度與高程為零之位置。圖中測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

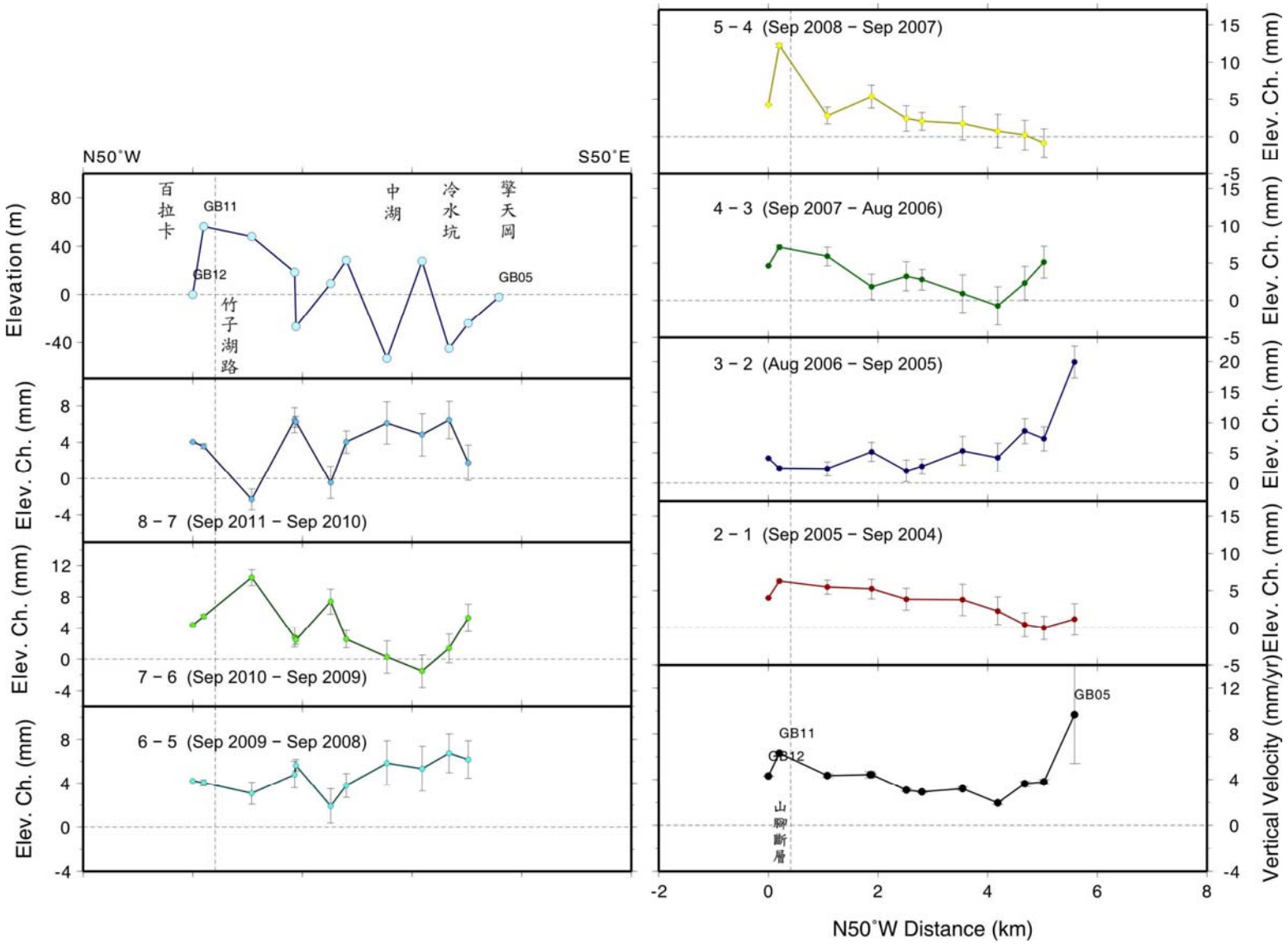


圖 2.18：士林至三芝測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

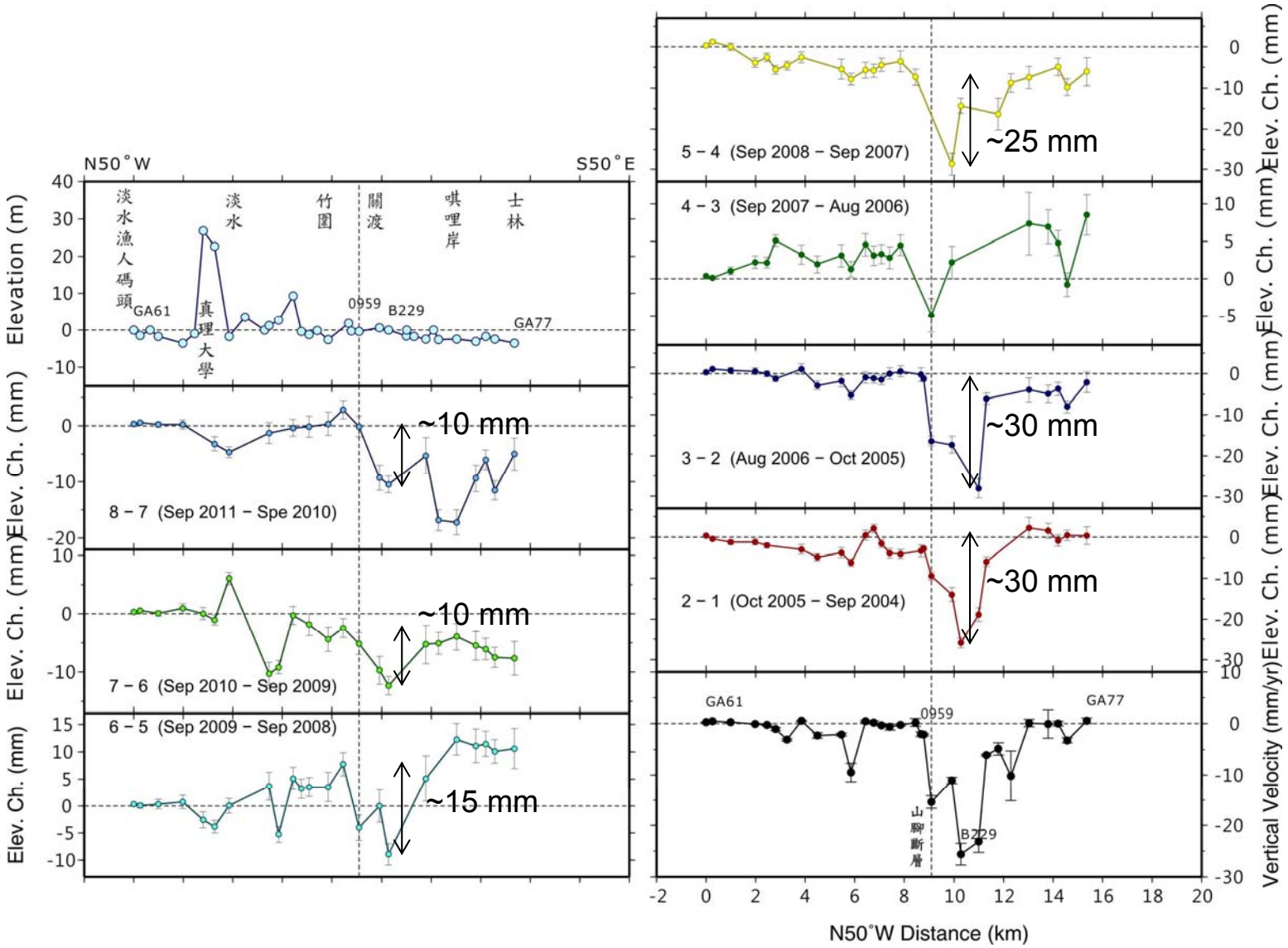


圖 2.19：淡水至士林測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

五股至臺北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 19 公里。此水準測線於 2004 及 2006 年的 8 月、2005 及 2007-2011 年的 9 月間進行 8 次的施測。由水準垂直速度的變化說明，點位五股至五股濕地公園間（1153 至 GA85）有最大垂直速度變化約-11 mm/yr（圖 2.20），此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。斷層東側之地表活動可分為沉陷（2005-2006、2009-2010）與抬升（2004-2005、2006-2007）兩類。依據經濟部水利署於 2007 年 9 月 17 日所發佈之新聞稿，臺北局部地區（臺北縣三重市、蘆洲鄉、新莊市、臺北市中山區）於 2004-2006 年間出現較明顯地層下陷徵兆，最大年平均下陷速率約 26 mm/yr，與我方之垂直速度相較，說明 2007 年至 2009 年間地表下陷情形雖有略微緩減，但該地區仍為地表沉陷。

縣 115_新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層與大平地斷層（本斷層於 2010 年地調所新公布之活動斷層中因活動跡象不明顯已除名），測線長 34 公里，水準測線於 2004 年 6 月、2005-2011 年的 7 月間進行 8 次的施測作業。整條水準測線之垂直速度均落在 0-5 mm/yr 之內（圖 2.21），而時間序列亦呈現此一結果。由垂直速度的變化顯示近 6 年來雙連坡斷層的活動性並不顯著（跨斷層變化< 1 mm/yr）；而大平地斷層則有較大之垂直速度變化（~4 mm/yr）。

縣 122_新竹至五峰測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及大平地斷層，測線長 46 公里之縣 122_新竹至五峰水準測線，於 2002 年 10 月、2004 年 3 月、2005 年 6 月、2006 年 4 月、2008-2011 年的 6 月間進行共 8 次的施測。由 8 次的結果顯示整條水準測線之垂直方向速度幾乎均落在 0-6 mm/yr 之內（圖 2.22），最大速度變化為跨越新城斷層的 6 mm/yr。藉由時間序列的趨勢線斜率均大致相同，顯示於 2002-2011 年間，該區域斷層活動並不明顯。

縣 117_新竹至峨眉測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層，測線長 31 公里，此測線於 2004-2005 及 2008-2011 年的 6 月、2006 年 7 月間進行共 7 次的施測。整條測線的垂直速度（圖 2.23）及時間序列並未有明顯的變化，由垂直速度指出新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層並無產生顯著垂直變形之趨勢。另 2005-2006 年間之高程變化與其他時段（2004-2005、2006-2010）不同，疑與 2006 年 7 月凱米颱風（KAEMI）之降雨有關（警報期間：7/23-7/26；水準測量期間：7/10-8/01）。

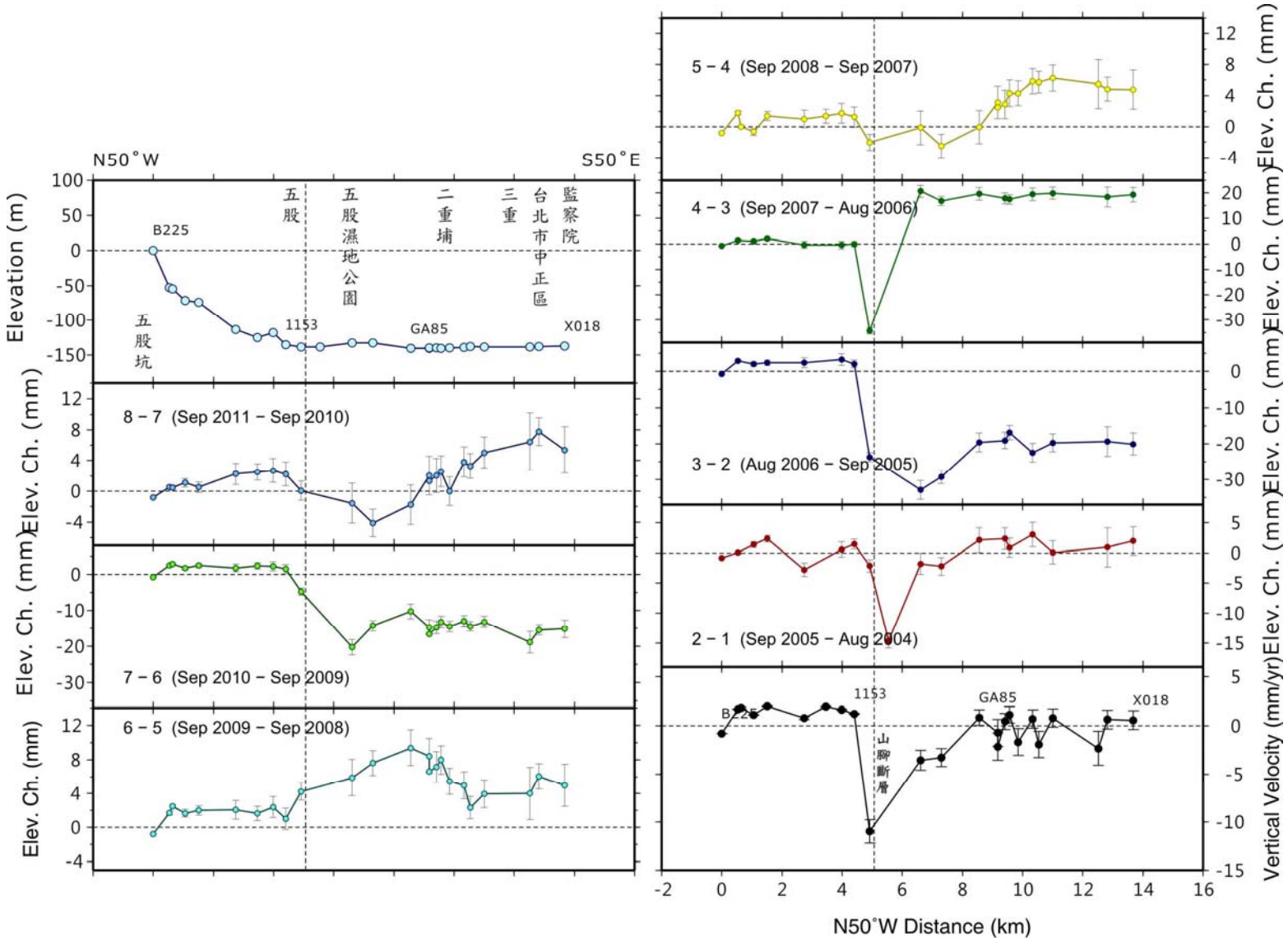


圖 2.20：五股至臺北測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

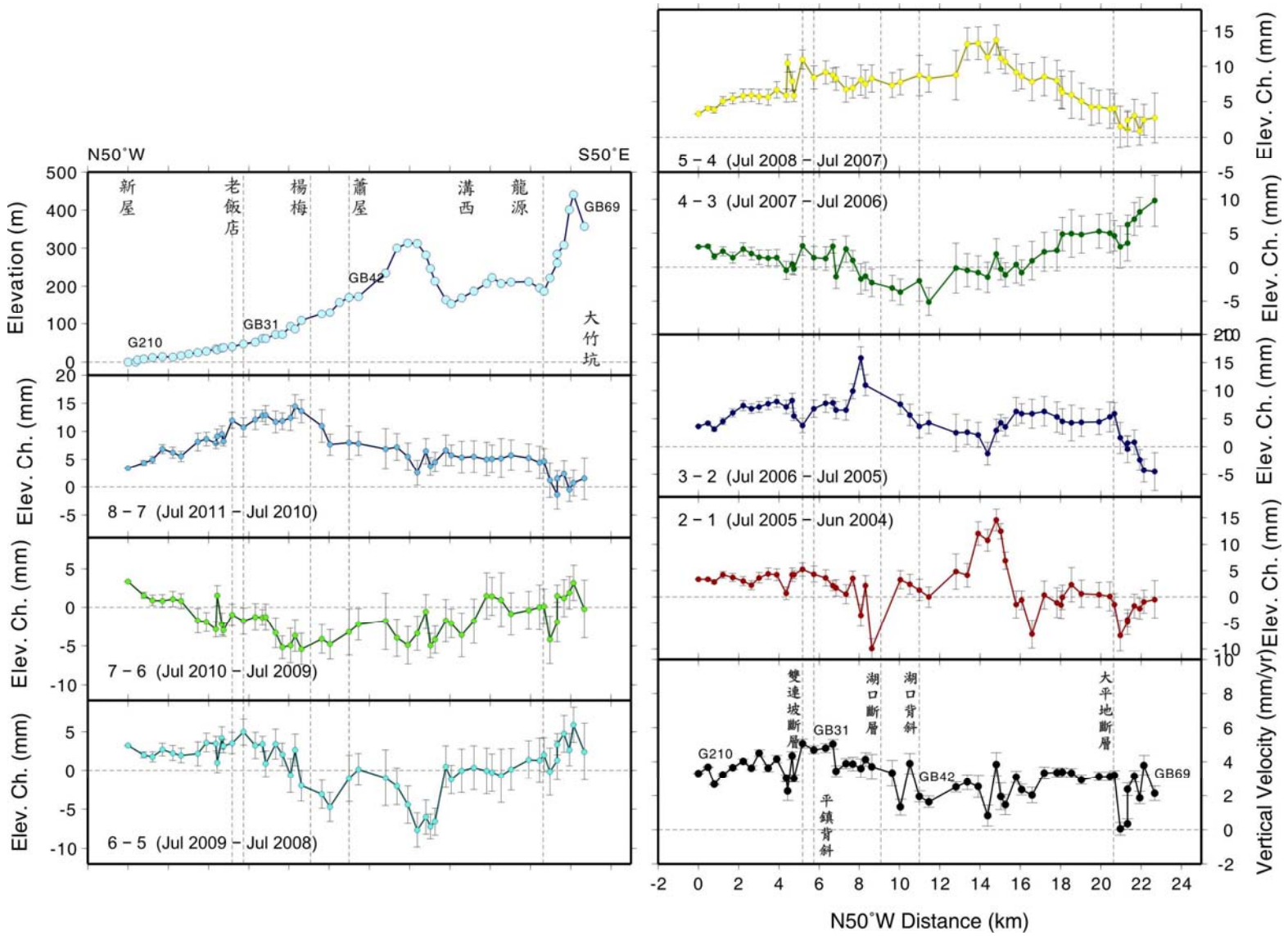


圖 2.21：縣 115_新屋至童話世界測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

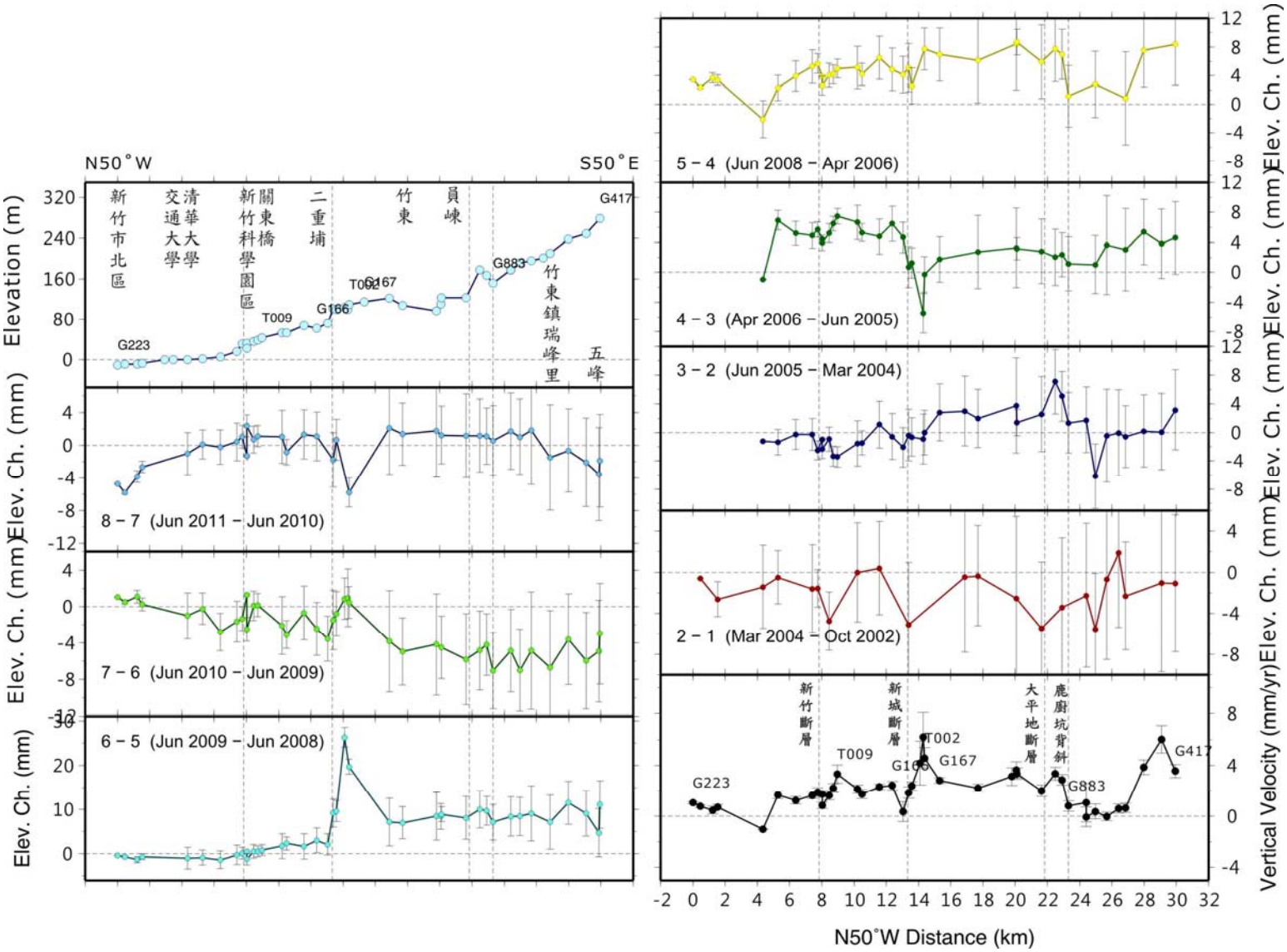


圖 2.22：縣 122_新竹至五峰測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

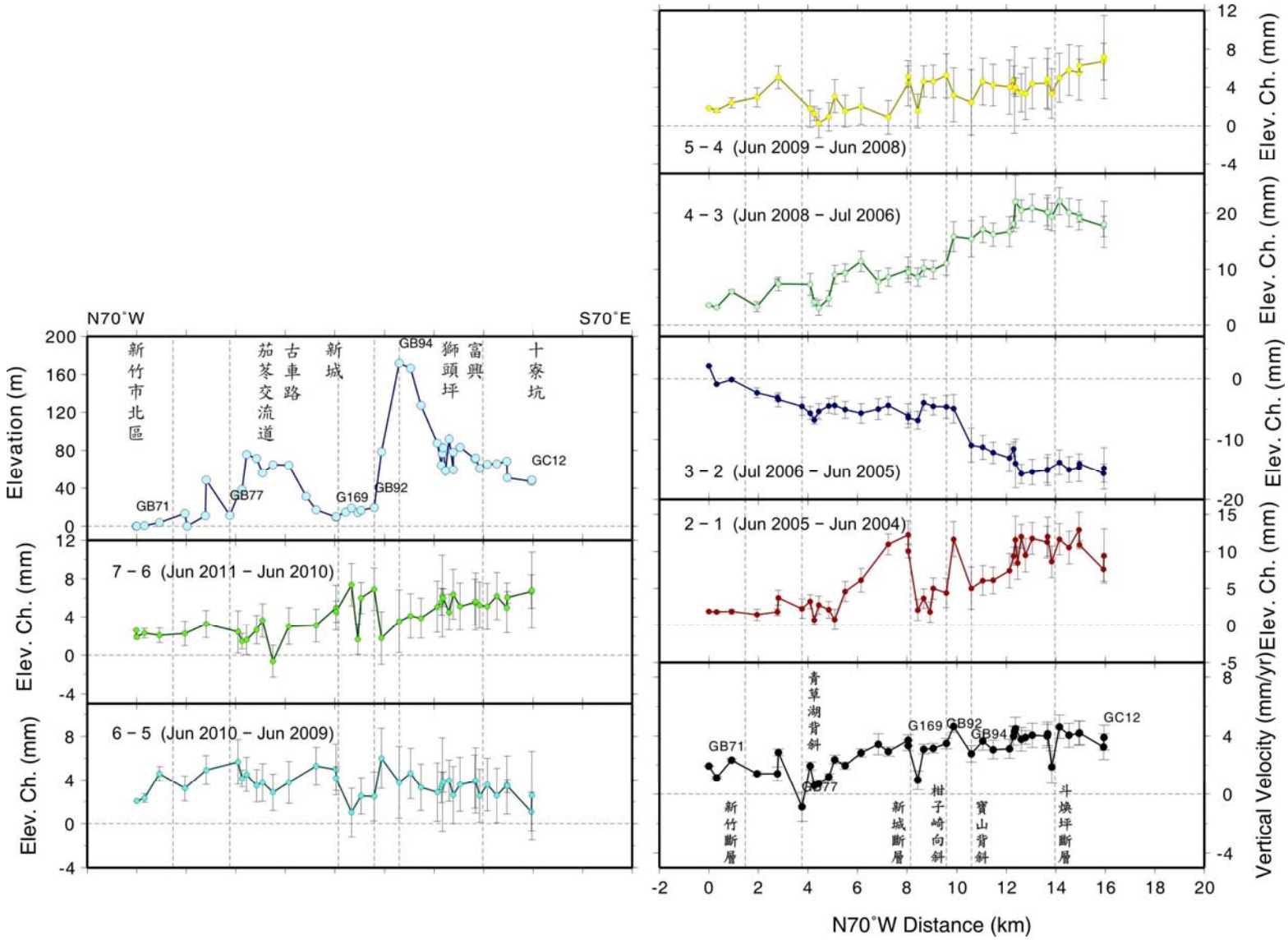


圖 2.23：縣 117_新竹至峨眉測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長 43 公里，此測線於 2005 年及 2007-2011 年的 8 月、2006 年的 9 月間共進行 7 次的施測。整條測線的水準垂直速度在±4 mm/yr 之間（圖 2.24），除 2009-2010 年間之高程變化接近地形變化外，2005-2009 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。此結果可能暗示此地區之斷層滑移量主要是集中在滑脫面上。而由時間序列發現自石觀音（GD33）起，點位略微呈現逐年抬升的趨勢。

縣 132_大安至東勢測線

本測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 31 公里。本測線除 2005 年於 7 月、2006 年於 5 月進行測量外，2004 年、2008-2011 年皆在 3-4 月間施測，共計有 7 次的觀測資料。就水準垂直速度之變化而言，各處之垂直速度多在 0-4 mm/yr 之間（圖 2.25），且自外埔（G905）至后里（G912）間的垂直速度呈現下滑的趨勢，通過三義斷層後又上揚至測線末端顯示屯子腳斷層北側有略微下陷的現象，而三義斷層的上盤正持續抬升。另海墘（G091）至大甲東（G901）之間的高程變化於 2004-2010 年呈現規律之起伏（圖 2.25），說明該段區域有以年為週期的變化。

縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨彰化斷層，測線長約 35 公里，於 2004 年 6 月、2005 年及 2007-2011 年的 7 月、2006 年 11 月間進行共 8 次的施測。整條水準測線之垂直速度除 25 km 附近有顯著抬升外，其餘大多在-4-0 mm/yr 之內（圖 2.26）。橫跨清水斷層區域（G924 至 G926）的水準抬升速率有~3 mm/yr 的變化（圖 2.26）；而在跨越車籠埔斷層區域（G948 至 AF25）的水準抬升速率亦有 6.1 mm/yr 的最大變化量（圖 2.26），兩者均可說明此兩斷層有持續性的活動現象。依時間序列圖中，南寮至一江橋（G926 至 G951）的地表有逐年緩慢下陷的趨勢。此外由歷次水準觀測變化可以發現，G948 至 G950（太平市山腳至一江橋東岸）間由 2004 至 2005 年間之沉陷持續變化至 2006 至 2011 年間之抬升，此區域之垂直變形反映車籠埔斷層的震後地表活動模式。

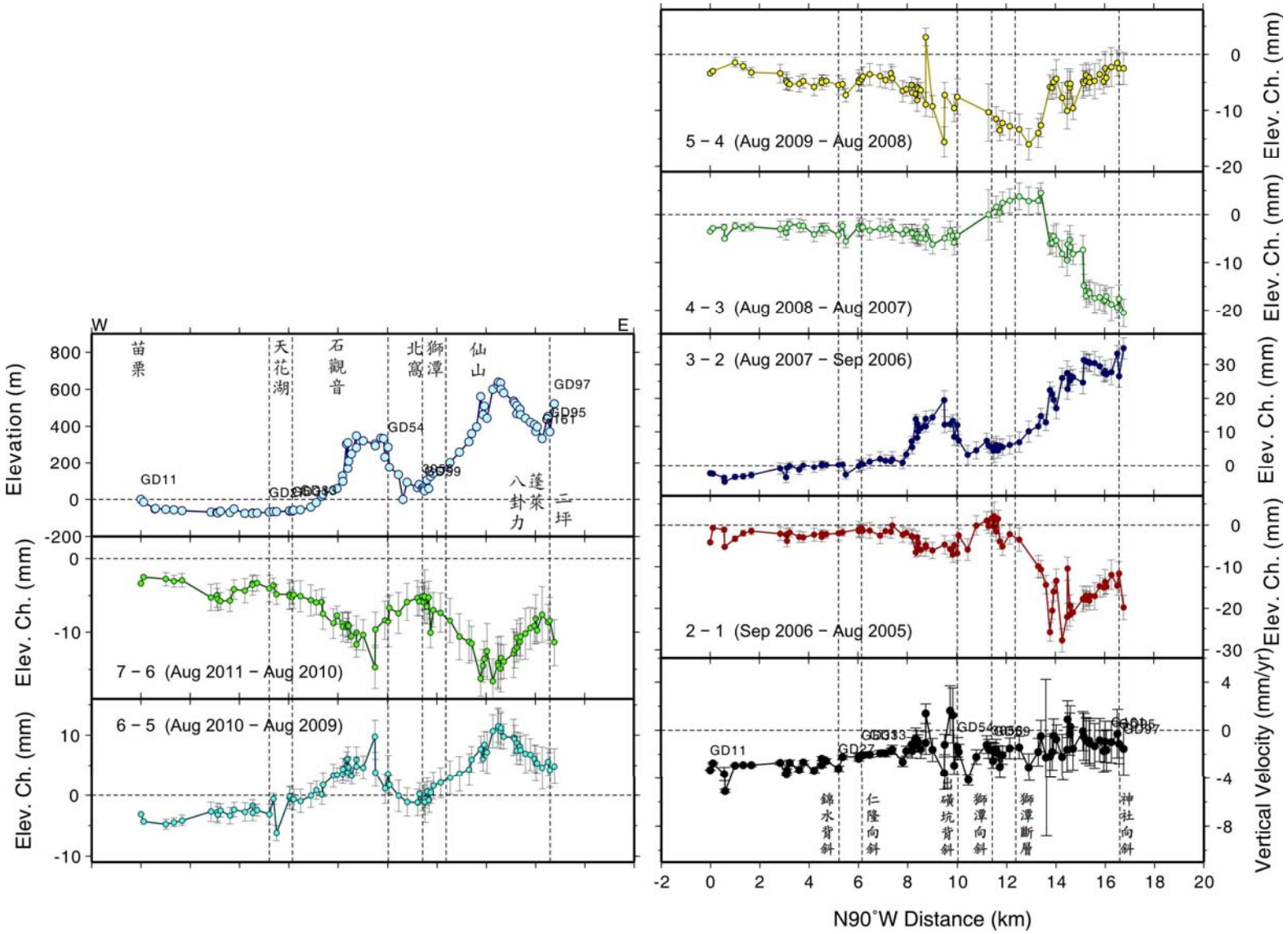


圖 2.24：苗栗至南庄測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

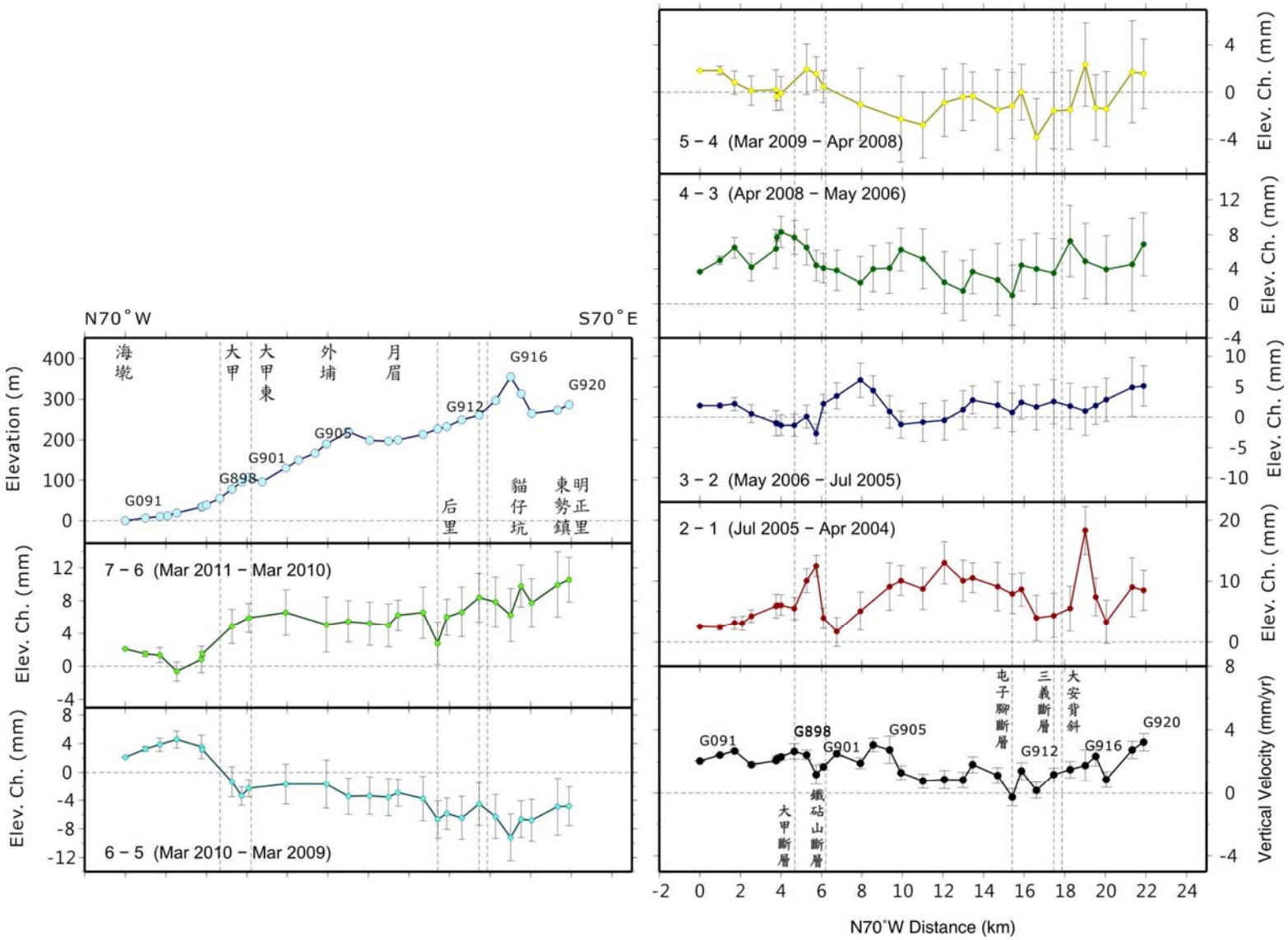


圖 2.25：縣 132_大安至東勢測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

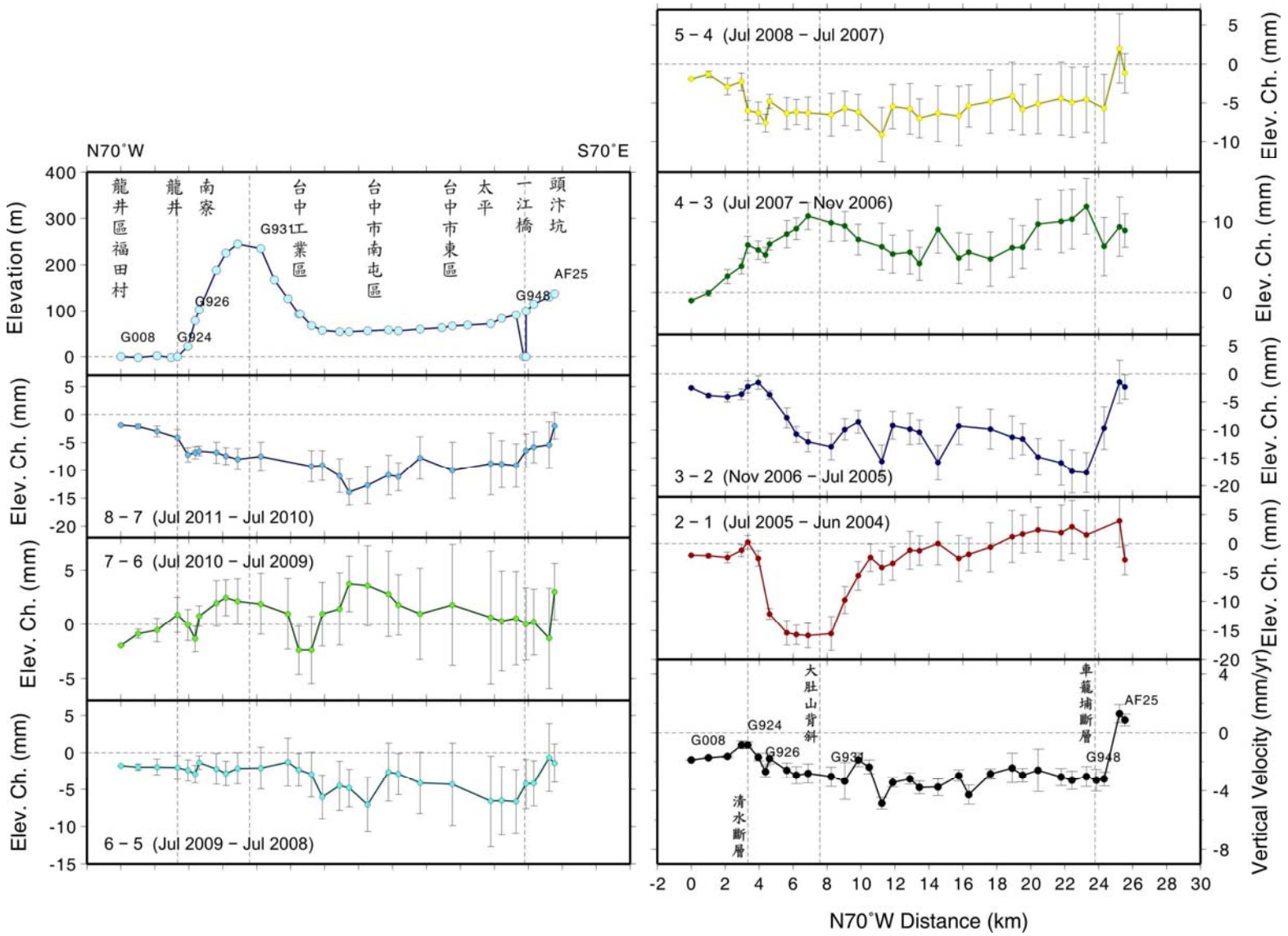


圖 2.26：縣 136_龍井至太平測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

縣 148-台 14_王功至草屯測線

橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層長約 63 公里之縣 148-台 14_王功至草屯水準測線於 2002 年 7 月、2004 年 2 月、2005 及 2008 年 4 月、2006 年 6 月、並 2009-2011 年 3 月進行共 8 次施測。員林（X112）以西一帶可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速度最大可達~90 mm/yr（圖 2.27）。自彰化斷層以東區域之垂直速度均在-10-0 mm/yr 之間，然通過車籠埔斷層區域（X115 至 T057，草屯至富功國小）有 0 至-10 mm/yr 之垂直速度變化，相對於大茅埔－雙冬斷層地區（C014 至 C015，雙冬國小至粗坑橋）之變化在-8 至-10 mm/yr 之間，橫跨車籠埔斷層之改變較為顯著。此結果顯示大茅埔-雙冬斷層在此地區的活動性較不明顯。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，點位 X112 以東之地表垂直變化相對而言較不顯著。

縣 150-台 16_北斗至水里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 45 公里，於 2002 年 8 月、2004 年 1 月、2005 及 2008 年 4 月、2006 年 11 月、與 2009-2011 年 3 月進行共 8 次之施測。本測線彰化斷層以西（點位 1107，北斗）之垂直速度不似縣 148-台 14 測線可見明顯的地層下陷現象（圖 2.28）。而自彰化斷層以東地表有顯著的抬升趨勢，通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的 12 km 區段，該地表抬升的狀況更為明顯（由 0 mm/yr 至~16 mm/yr），然而於通過大茅埔－雙冬斷層地區（G279 至 X118，水里隧道至頂崁）轉為下陷之趨勢（由~16 mm/yr 至~8 mm/yr），此結果可能顯示斷層滑移量於集集地震過後約 10 年仍然集中於車籠埔斷層以東之滑脫面。比較於本測線北方之縣 148-台 14 測線，不論是西側的地層下陷情形，與通過車籠埔斷層以東地區的地表抬升趨勢，兩者有明顯的差異存在，此結果是否說明南投市南北兩段的變形前緣或車籠埔斷層的運動模式有所不同，需要進一步的地質資料與模型加以分析與解釋。

縣 164_金湖至瑞峰測線

橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及大尖山斷層長 61 km 之縣 164_金湖至瑞峰水準測線有 9 次水準測量結果，分別於 2003 年 8 月、2004 年 7 月、2005-2011 年的 9 月間完成。在重複測量之結果中，G256 以東之垂直速度變化並不明顯（圖 2.29），2003-2004、2007-2010 年間之高程變化在土厝以東有相似之變化。0-4 km 間有明顯之垂直速度變化，且內政部 2002-2007 年之台 17 線該測段水準測量資料亦符合此結果，參考中油公司地質圖幅顯示，金湖至口湖地區有 B 構造貫穿其間。通過大尖山斷層至 G799，垂直速度則略微增加（最大 12.6 mm/yr），顯示大尖山斷層或九芎坑斷層處於活動狀態。

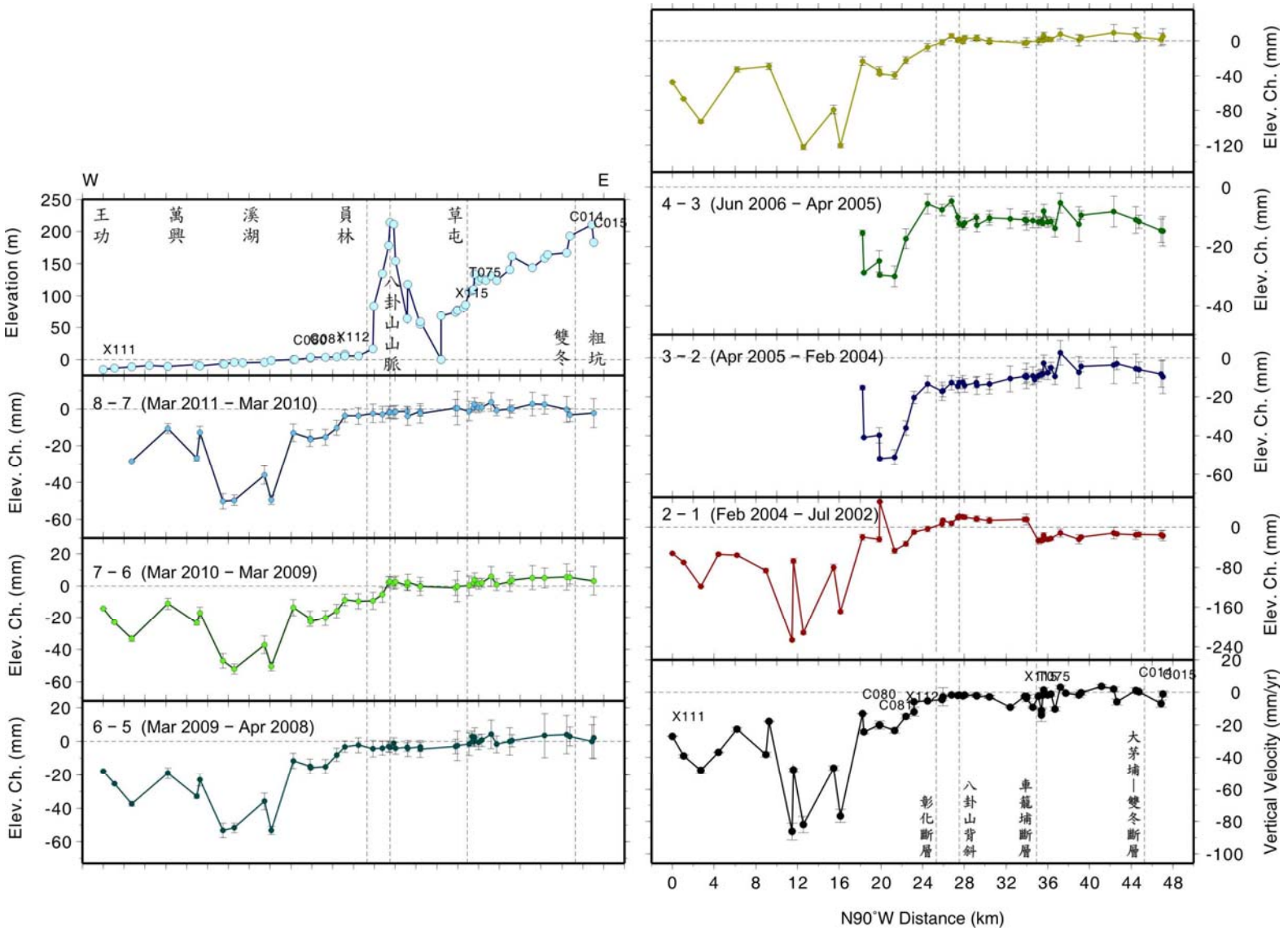


圖 2.27：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

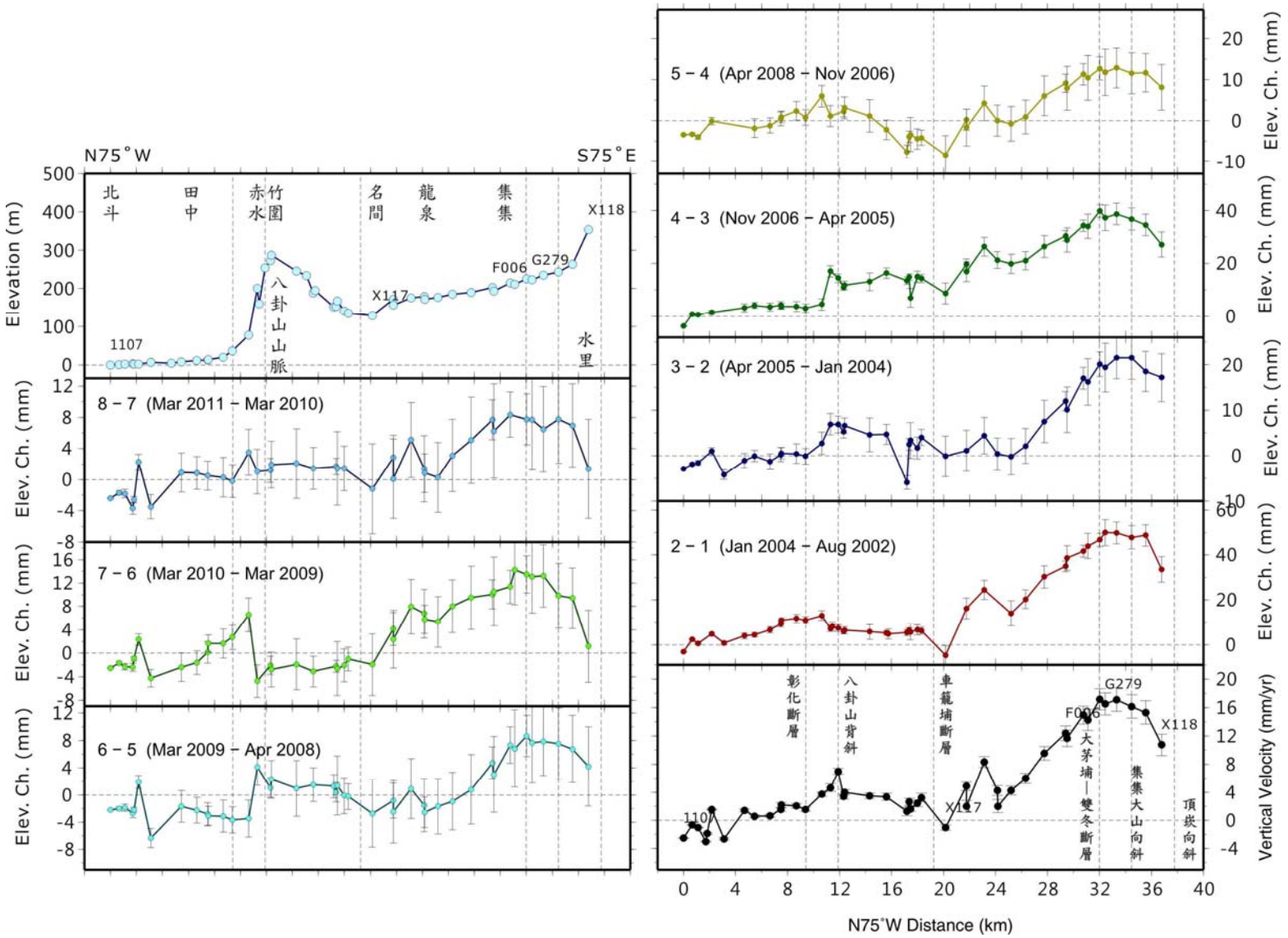


圖 2.28：縣 150-台 16_北斗至水里測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

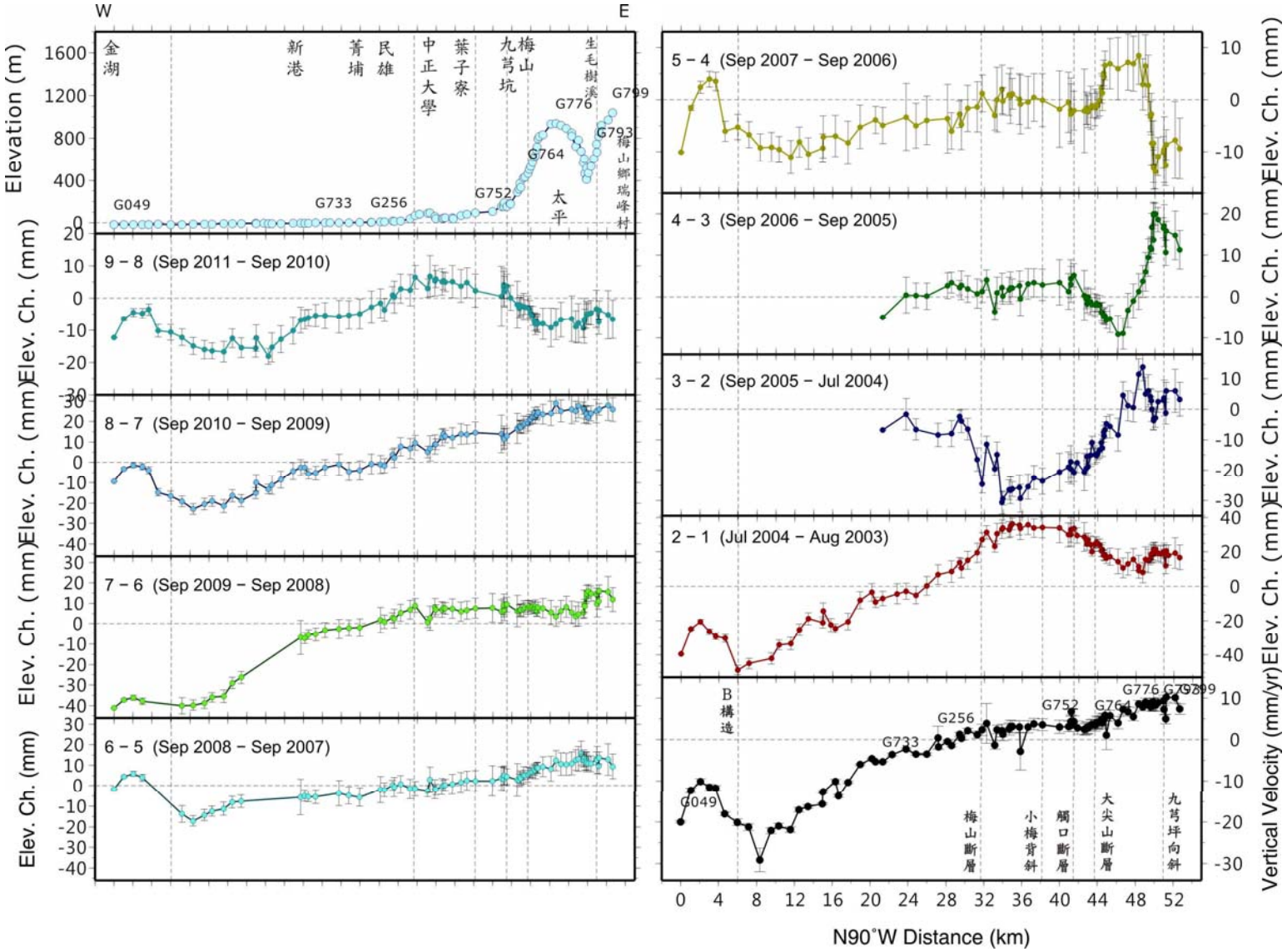


圖 2.29：縣 164_金湖至瑞峰測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層及觸口斷層，測線長約 66 公里之縣 174_北門至楠西水準測線與內政部一等二級水準路線重複，故有 31 個點位（46%）和內政部一等二級水準點位重複。內政部一等二級水準之測量時間為 2002 年 10 月，而地調所的施測則於 2003 年 8 月、2004 年 10 月、2005 及 2008 年 3 月、2006 年 9 月、2009-2011 年 4 月共進行 8 次施測。在通過六甲斷層之地區（I086）至觸口斷層以西之間的 5 公里內有達~10 mm/yr 的垂直抬升速度（圖 2.30），此結果若非反應六甲斷層在此 8 年內均保持著活動性，即表示六甲斷層與觸口斷層間存在的北勢坑斷層[*張憲卿*，2008]為一活動構造。本測線自 G816（水庫管理局）起，點位的高程時間變化趨勢線變得較陡，顯示自進入山區地段（即六甲斷層以東），地表高程活動性增加。

台 19 甲_善化至關廟測線

橫跨新化斷層的台 19 甲_善化至關廟水準測線，測線長度約為 29 公里。此測線共有 8 次水準測量，分別於 2002 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 11 月、2007-2011 年的 10 月進行。在跨新化斷層（G372 至 G370，新市鄉遠東技術學院至新化）有較顯著的水準抬升速率及 GPS 垂直速度場變化（各約 10 mm/yr），表示新化斷層帶有傾向滑移之趨勢（圖 2.31）。

縣 182_安平至龍崎測線

本縣道 182 測線橫跨台南台地與後甲里斷層，從台南安平至龍崎，全長約 38 公里，此測線共有 12 次水準測量，分別於 2001 年 6 月、10 月、2002 年 5 月、10 月、2003 年 6 月、11 月、2005 年 3 月、2006 年 7 月、2008-2011 年間的 5 月完成。不論由地形剖面、高程相鄰兩次變化及垂直抬升速率圖上均可明顯見到台南台地之存在（台南市中西區至仁德一帶），且台地之東緣隨時間而有往東延伸之趨勢；在台南台地的西緣（台南市中西區）開始，至台地的東緣（虎尾寮、仁德）止，由 GPS 垂直速度場及水準高程變化可發現該區域有穩定的 3-5 mm/yr 之地表抬升速率趨勢（圖 2.32），但整體的地表垂直變化量並不明顯；另外在虎尾寮地區跨過後甲里斷層的兩個點之抬升速率每年均有抬升的趨勢，平均抬升速率變化約為 6 mm/yr，且通過斷層後（仁德）立即有下陷的變化，最大差異量達 7 mm/yr（圖 2.32），此現象或可說明後甲里斷層為一活躍之活動構造，然因垂直速度變化量均在 1 cm/yr 以下，故在最近 10 年內該斷層之垂直方向的活動性並不顯著。

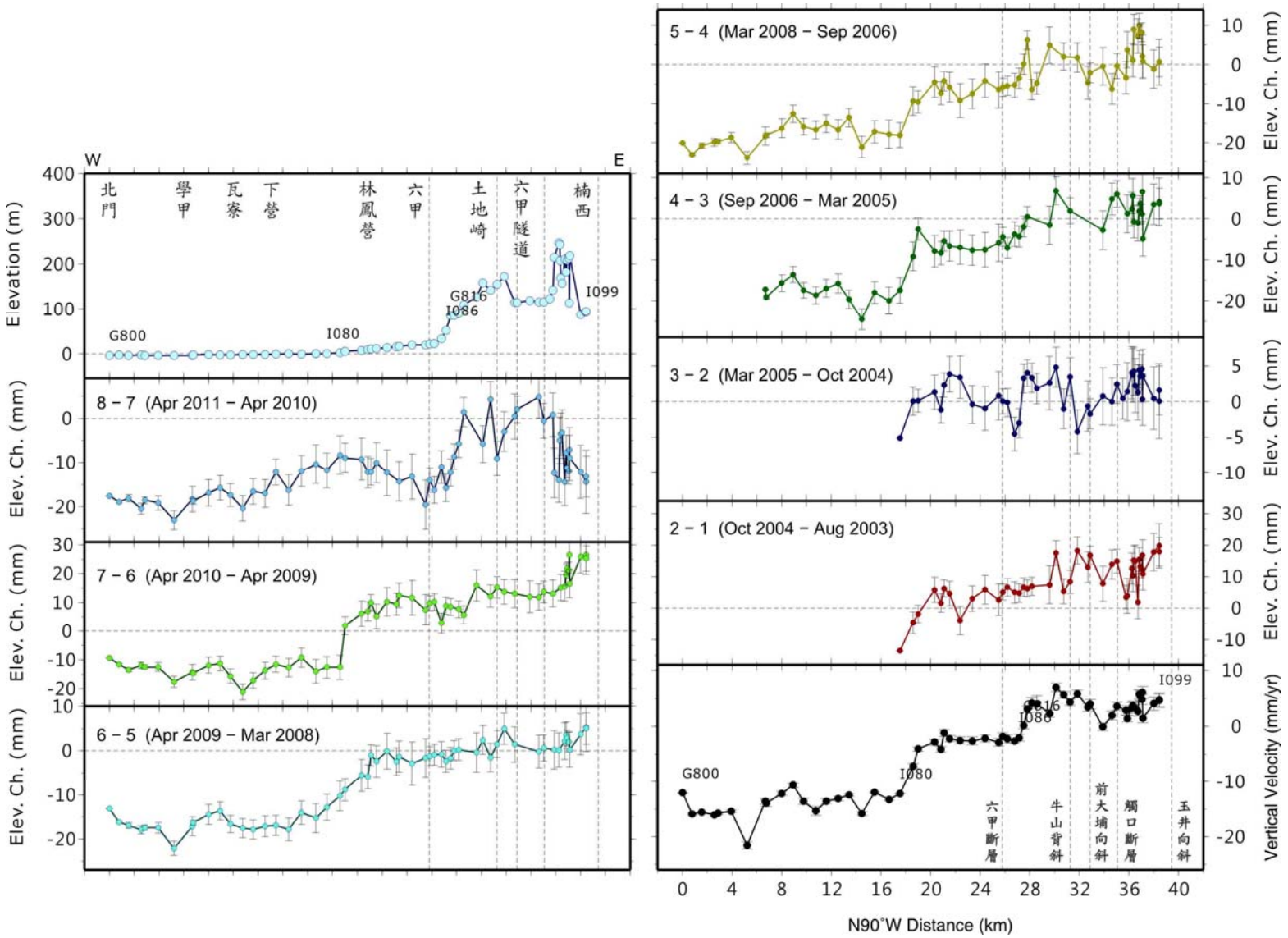


圖 2.30：縣 174_北門至楠西測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

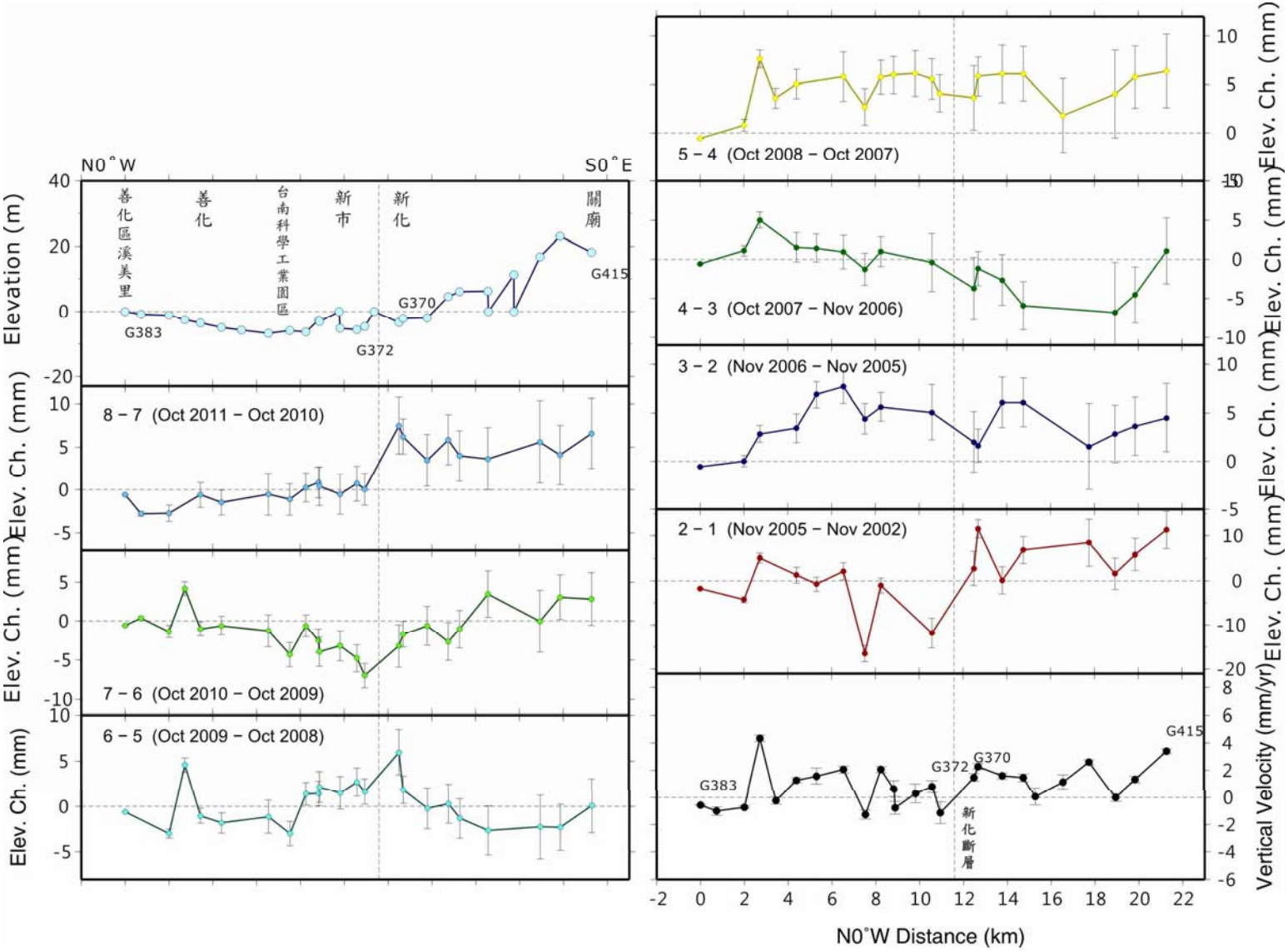


圖 2.31：台 19 甲_善化至關廟測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

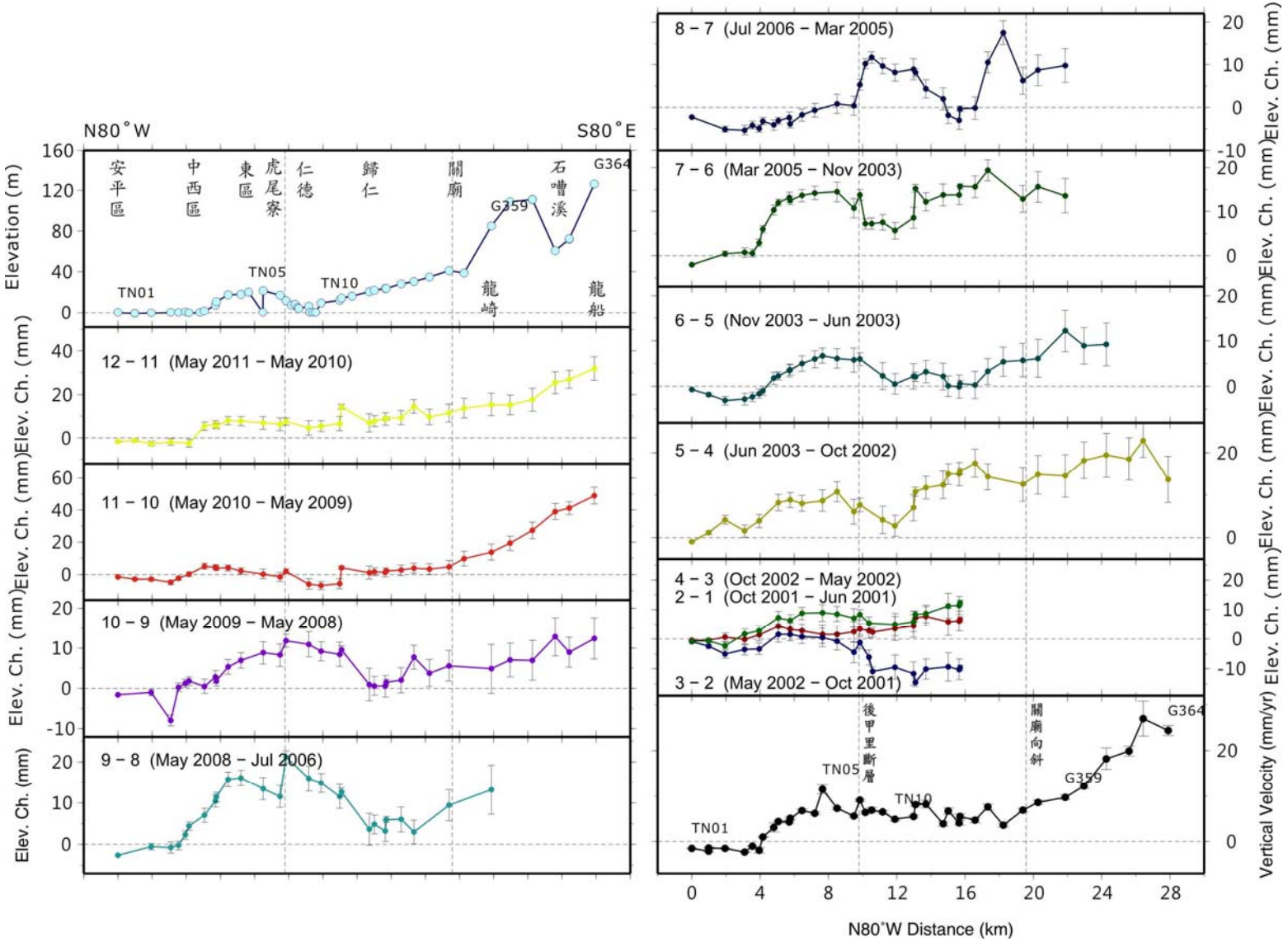


圖 2.32：縣 182_安平至龍崎測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

縣 184_路竹至茂林測線及其副線

橫跨小崗山、旗山斷層及潮州斷層長 90 公里之縣 184_路竹至茂林水準測線於 2002、2004 及 2008-2011 年 2 月、2005 年 4 月、2006 年 5 月間進行共 8 次之施測。縣 184_路竹至茂林測線於中壇（B232）分成北（縣 184_路竹至茂林主線）與南（台 27_路竹至茂林副線）兩條水準測線。由圖 2.33 顯示，縣 184_路竹至茂林主線於 G471 至 G474（阿蓮至田寮鄉崇德國小）垂直速度場及水準高程變化均持續增加（垂直速度最大達 ~25 mm/yr），與地形剖面比較，垂直抬升速率增加之處與地形高區並不吻合，又該位置與古亭坑斷層位置接近，顯示此地表抬升現象可能與古亭坑斷層或小崗山斷層的活動有關。台 27_路竹至茂林副線顯示跨越潮州斷層區域（R013 以東，高樹鄉大津至茂林國小一帶）略有地表沉陷速率變化（由約 4 mm/yr 降至~2 mm/yr）（圖 2.33），此變化與地形起伏並不相符，可能與該測段位於濁口溪曲流攻擊坡上，可能造成邊坡滑動有關，故目前水準之測量資料未能明確表示此區有地下構造之活動，另一方面參考測線鄰近區域（南北各 5 公里內）未有足夠之 GPS 垂直速度場資料以供判明（共 5 個點位，潮州斷層東側僅有 1 個點位），因而以現階段之資料量較難以斷定潮州斷層在此區域中之活動性如何。另由水準高程時間序列分析，自旗山至竹子門地區，歷年來均呈現沉陷的趨勢，而稍南邊的副線卻未有相同的表現，此現象是否反映旗山斷層下盤區域的地表沉陷情形，需配合地體構造等其他證據加以分析、討論。

台 22_岡山至安坡測線

本測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 50 公里，於 2004 年 3 月、2005 至 2006 年 5 月、2008 至 2011 年間的 5 月進行施測（圖 2.34）。在橫跨旗山斷層及潮州斷層區域（G533 至 G536，燕巢鄉橫山國小至深水國小；G560 至 G568，高樹鄉泰山國小至三地門鄉口社國小），水準高程變化並未有明顯之變化量（分別為 1.1 mm/yr 及 0.5 mm/yr），或可說明旗山斷層及潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生。另由各相鄰兩次之高程差變化圖及 GPS 與水準垂直抬升速率比較圖中均可看出，在嶺口至泰山之間有與地形剖面不同之地表下陷趨勢，並在載興至新南勢之間有最大的下陷量（-9.3 mm/yr）；該地為跨越紅橋溪之高樹大橋，由測量資料可發現高樹大橋有逐年下陷的現象（圖 2.34）。由高程時間序列上，義守大學醫學院至橫山國小（G530 至 G533）及里嶺大橋（G544）以東均為地表高程逐年下陷之趨勢，然在跨過潮州斷層以東（泰山國小，R020），其下陷趨勢減緩；此現象與 GPS 垂直速度場有相同的表現。

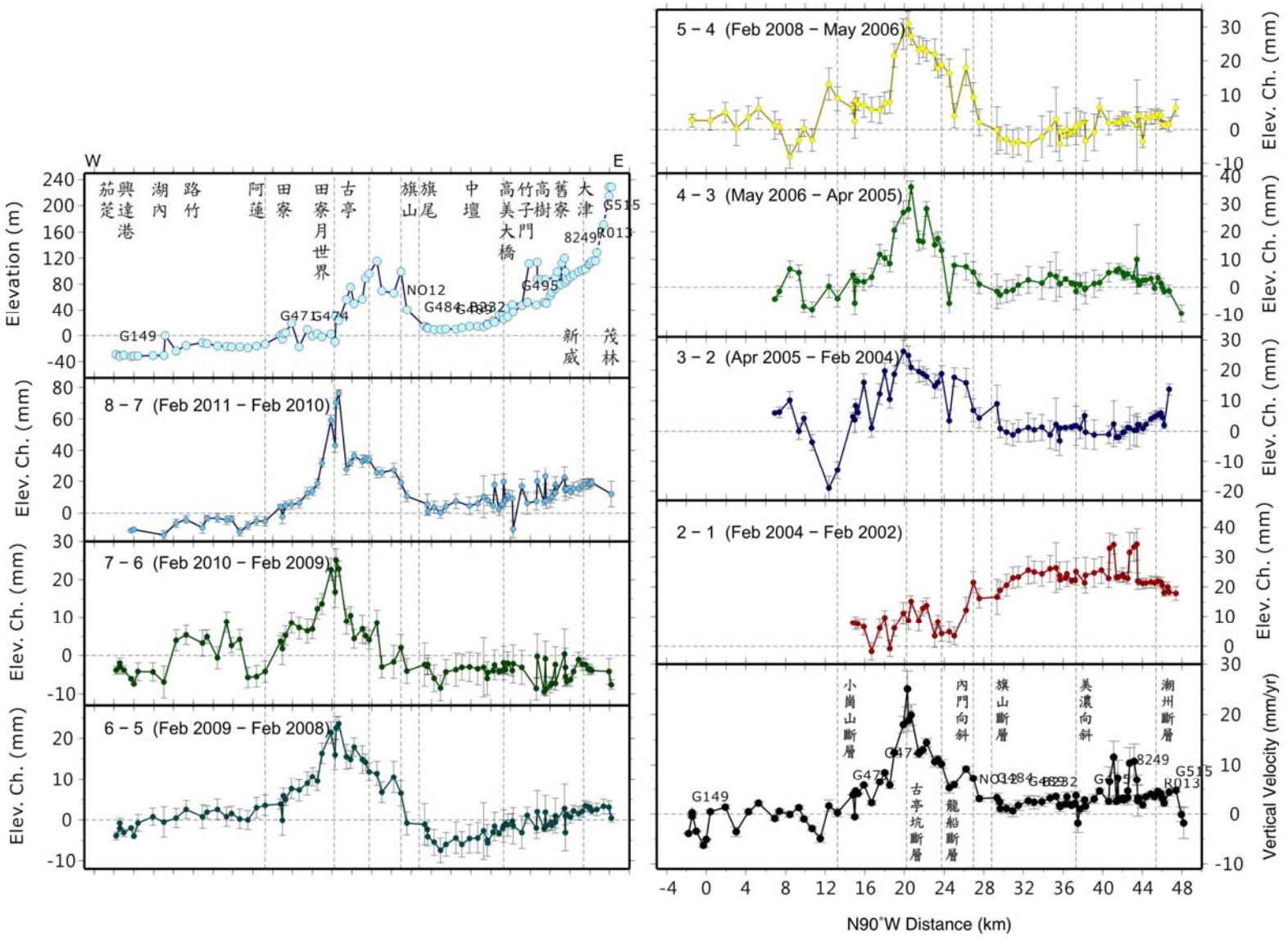


圖 2.33：縣 184_路竹至茂林主副線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

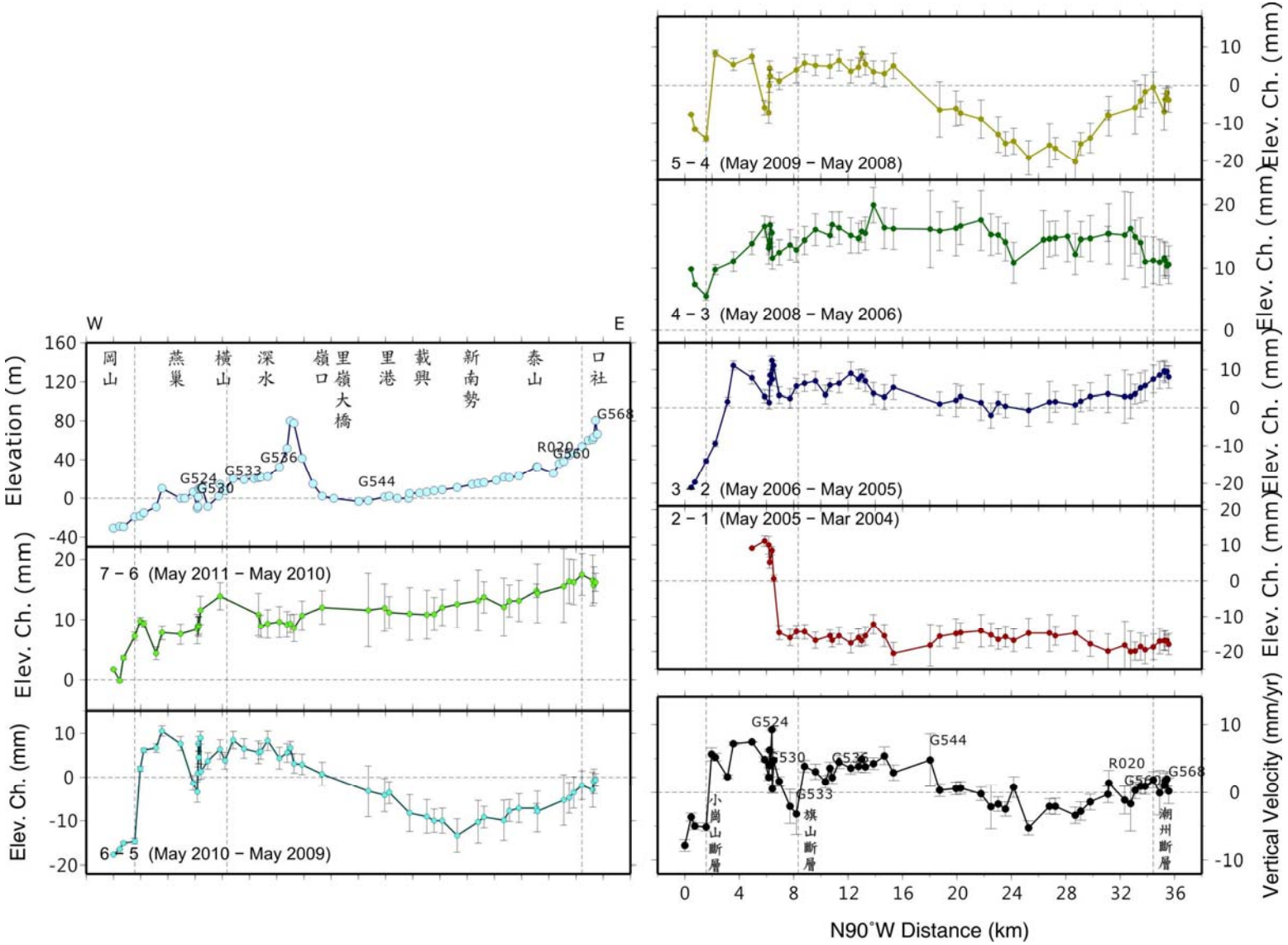


圖 2.34：台 22_岡山至安坡測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮洲斷層，長約 21 公里，於 2005-2011 年的 9 月間共進行了 7 次的施測，本測線主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。該測線於 2007-2008 年間之高程變化與其他時段（2005-2007、2008-2010）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19-8/21；水準測量期間：9/04-9/09；圖 2.35）。在通過大響營農場處至 GC81，仍存在 7.6 mm/yr 的垂直速度變化，整體的時間序列趨勢仍是處於抬升的狀態，透露潮州斷層西側有新期的活動產生。

恆春半島地區測線

恆春斷層為恆春半島地區地調所公布之唯一一條活動斷層，地調所於恆春半島佈設三條水準測線，分別為恆春西台地至佳樂水（長約 19 公里）、台 26_恆春至鵝鑾鼻主線（長約 19 公里）及恆春至鵝鑾鼻副線（長約 5 公里）。本地區之水準測線於 2002 年 1 月、2004 及 2008 年 3 月、2005 年 6 月、2006 年 8 月、2009-2011 年 4 月共計進行 8 次的施測。由圖 2.36 至圖 2.37，2006 年以前在橫跨恆春斷層時水準高程變化並無明顯之改變（0.5-0.6 mm/yr），顯示 2006 年以前恆春斷層並無顯著之活動性。但在 2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之 M_W 7.0 的災害性地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層西側於近兩年間（2006 年 8 月至 2008 年 3 月）在德和至恆春一帶有最大約 80 mm 的沉陷現象，而在南灣以西地區也有約 60 mm 的沉陷；並相對於斷層東側較無明顯的高程變化，在西側有相對的下陷發生（南樹林至馬鞍山一帶），說明在 2006 年的地震中，恆春斷層並未有顯著的活動，而恆春地區主要的震後變形為恆春斷層西側的沉陷。此外，2010-2011 年的高程變化量之變化型態已與 2006-2010 年間不同，可能說明自 2011 年起恆春半島的地表垂直變形已脫離同震位移的影響。

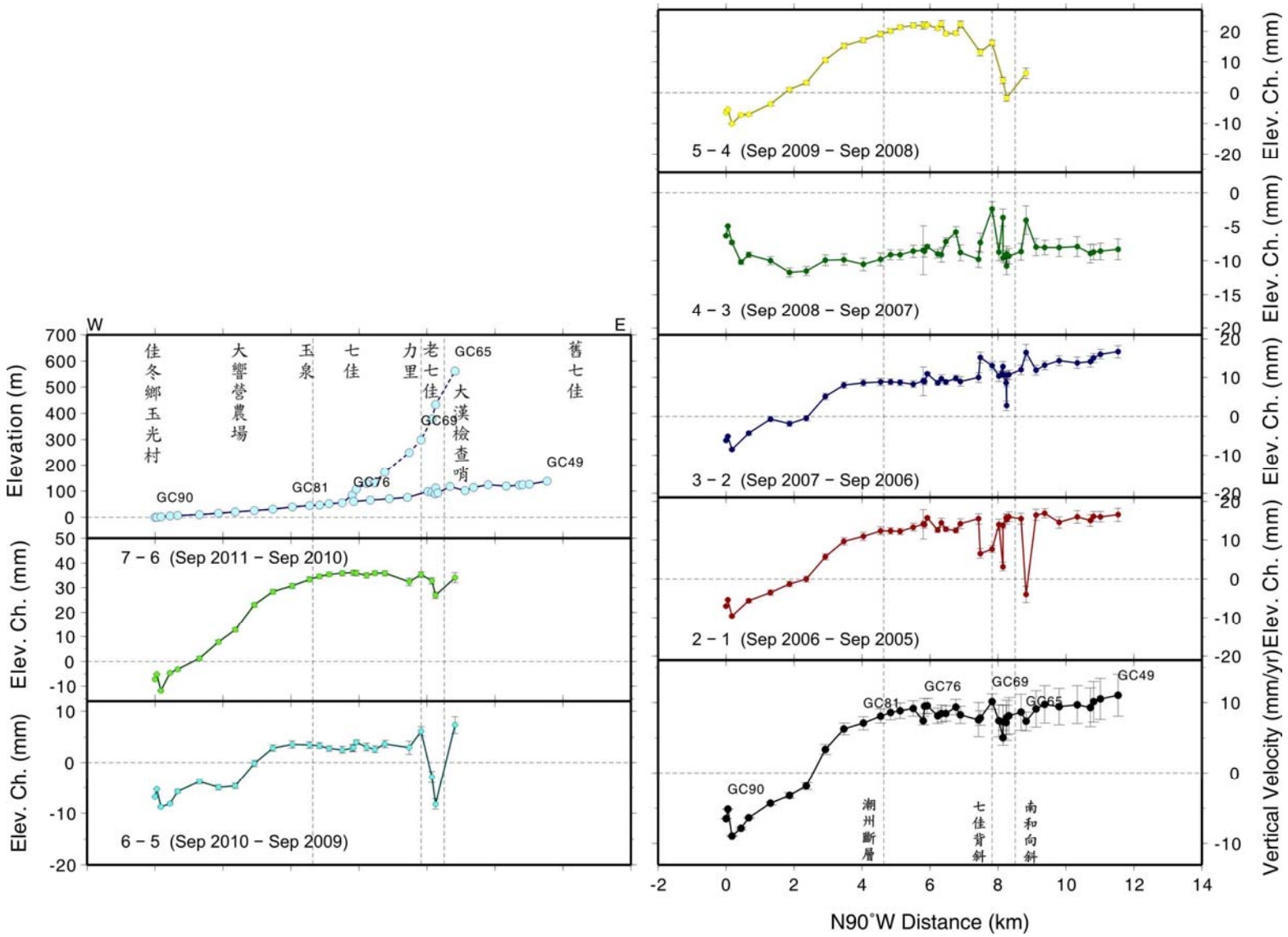


圖 2.35：佳冬至七佳測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

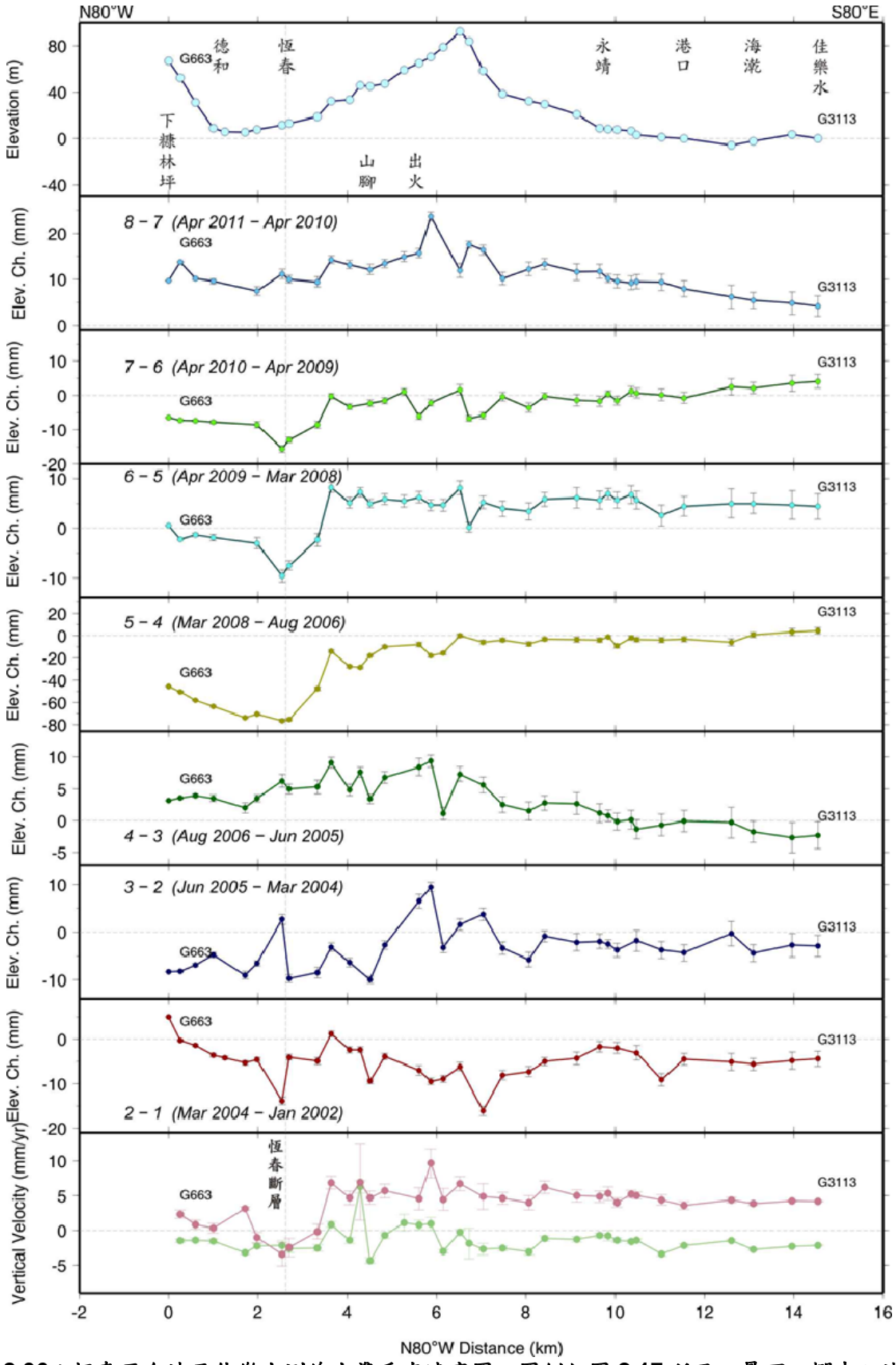


圖 2.36：恆春西台地至佳樂水測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。最下一欄中之淡綠色為 2002-2006 年恆春地震震前垂直速度，淡紅色為 2006-2011 年恆春地震震後垂直速度。

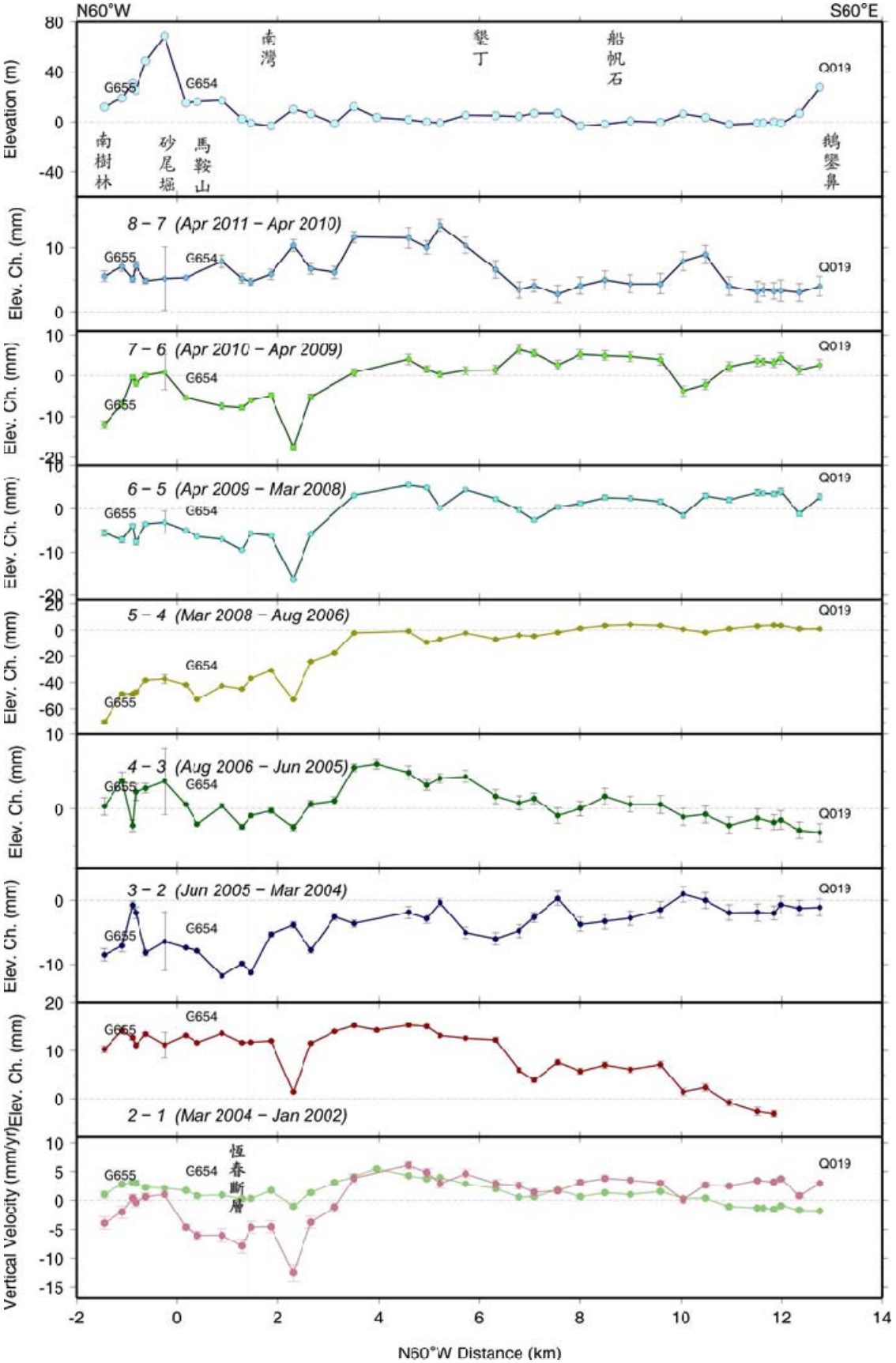


圖 2.37：台 26_恆春至鵝鑾鼻主副線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。最下一欄中之淡綠色為 2002-2006 年恆春地震震前垂直速度，淡紅色為 2006-2011 年恆春地震震後垂直速度。

嶺頂至瀧澗測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 25 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 10 月、2007-2011 年的 11 月進行共 8 次的施測。該測段之每 2 年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2.38），然在嶺頂斷層東側之垂直速度與地形並不一致，呈現下陷的趨勢。

豐濱至光復測線

本測線位於奇美斷層的西側，測線長約 22 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 10 月、2007-2011 年的 11 月進行共 8 次的施測。於圖 2.39 顯示，在 G995 至 A103（泰來至豐富）有-28.7 mm/yr 的水準抬升速率變化，同時此段之 GPS 垂直速度場亦呈現一致之趨勢。此結果說明奇美斷層以西之海岸山脈內有活動構造之發育，或說明海岸山脈確實持續在抬昇中。

靜浦至紅葉測線

本測線橫跨奇美斷層、瑞穗斷層及玉里斷層，測線長 33 公里，分別於 2004 年 10 月、2005-2011 年的 11 月進行共 8 次的施測。在 GA34 至 GA22（瑞穗牧場至瑞穗鄉猴仔山）之間，水準抬升速率的變化（7.7 mm/yr）可說明瑞穗斷層與玉里斷層之活動（圖 2.40）。同時，跨越奇美斷層之區域（GA14 至 GA08，阿魯驚至亂石）由水準抬升速率變化有明顯之下陷區（-12.8 mm/yr），然而 GPS 垂直速度場並未有相稱的趨勢（-2.4 mm/yr）。

富岡至東成測線

本測線橫跨利吉斷層及鹿野斷層，測線長 25 公里，分別於 2009-2011 年的 11 月進行共 3 次的施測。該測線之每 2 年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2.41），然在岩灣至臺東大橋段之垂直速度變化較地形高度改變大，呈現較明顯之沉陷（速度變化約-12 mm/yr），且鹿野斷層以西之垂直速度呈現下降的趨勢，亦與地形變化不一致。

台 2_梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長 61 公里，於 2011 年的 11 月進行首次的施測。該測線之地形受沖繩海槽弧後塌陷的影響，呈現較明顯之沉陷（圖 2.42）。

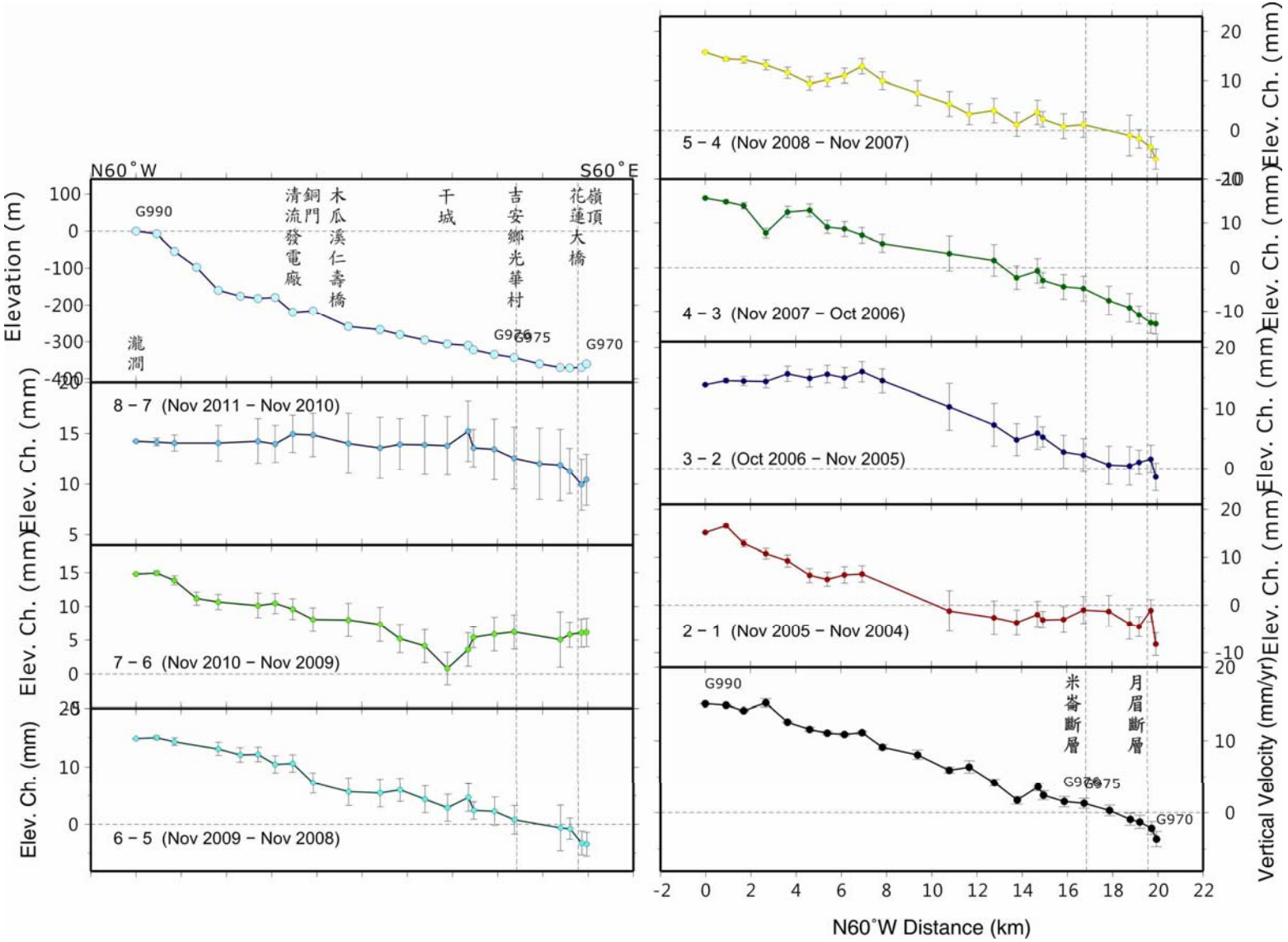


圖 2.38：嶺頂至瀧澗測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

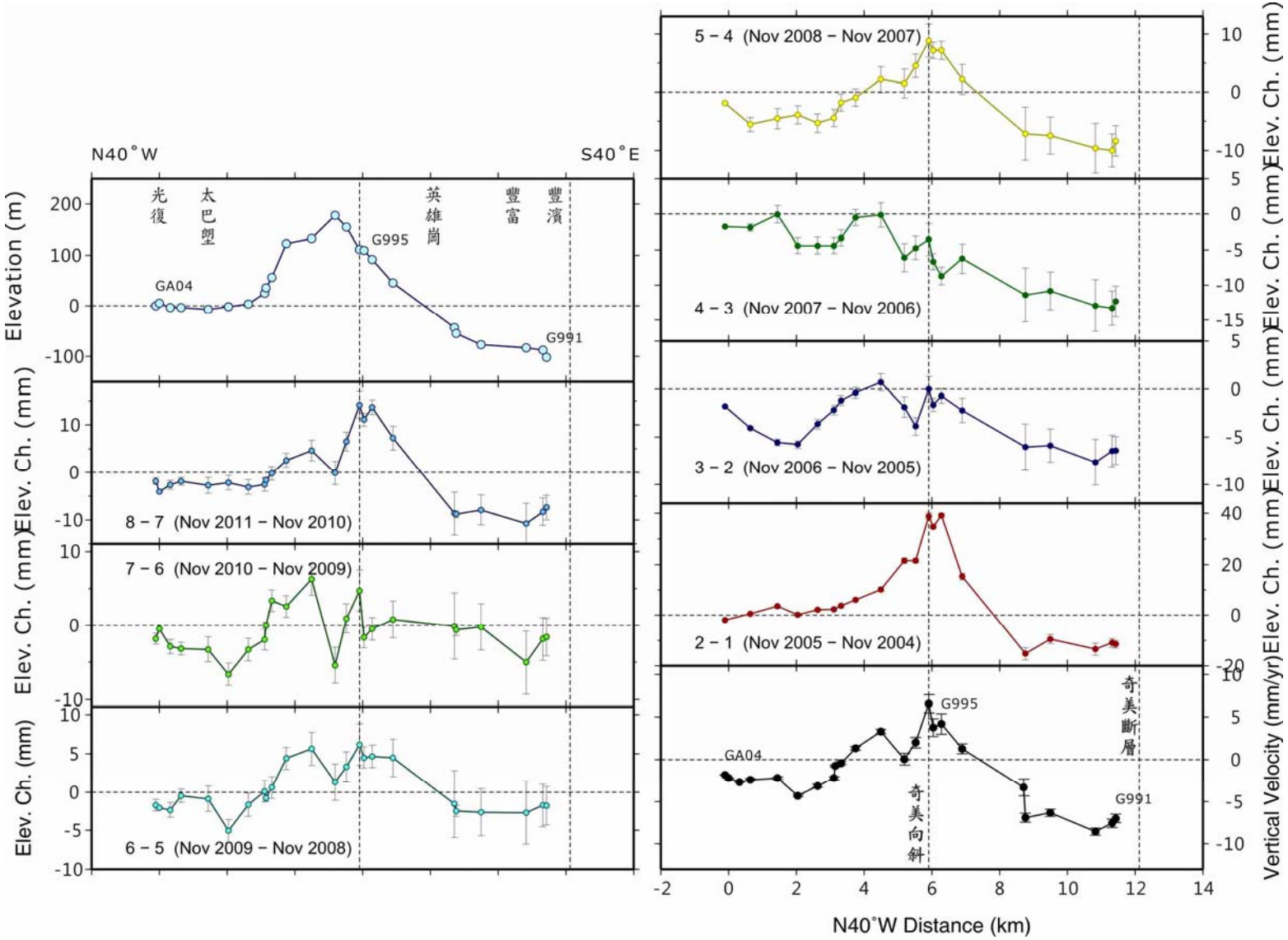


圖 2.39：豐濱至光復測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

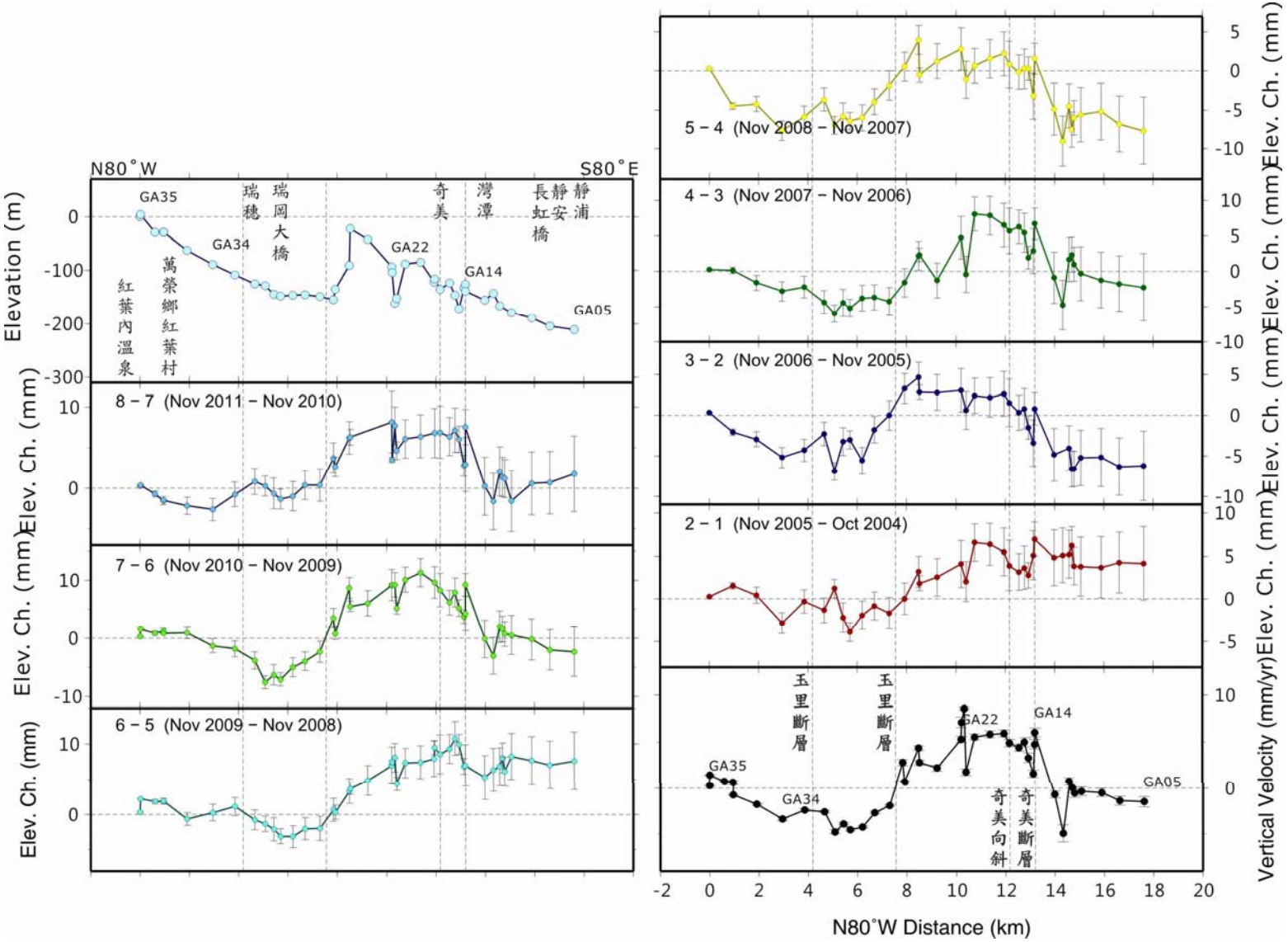


圖 2.40：靜浦至紅葉測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

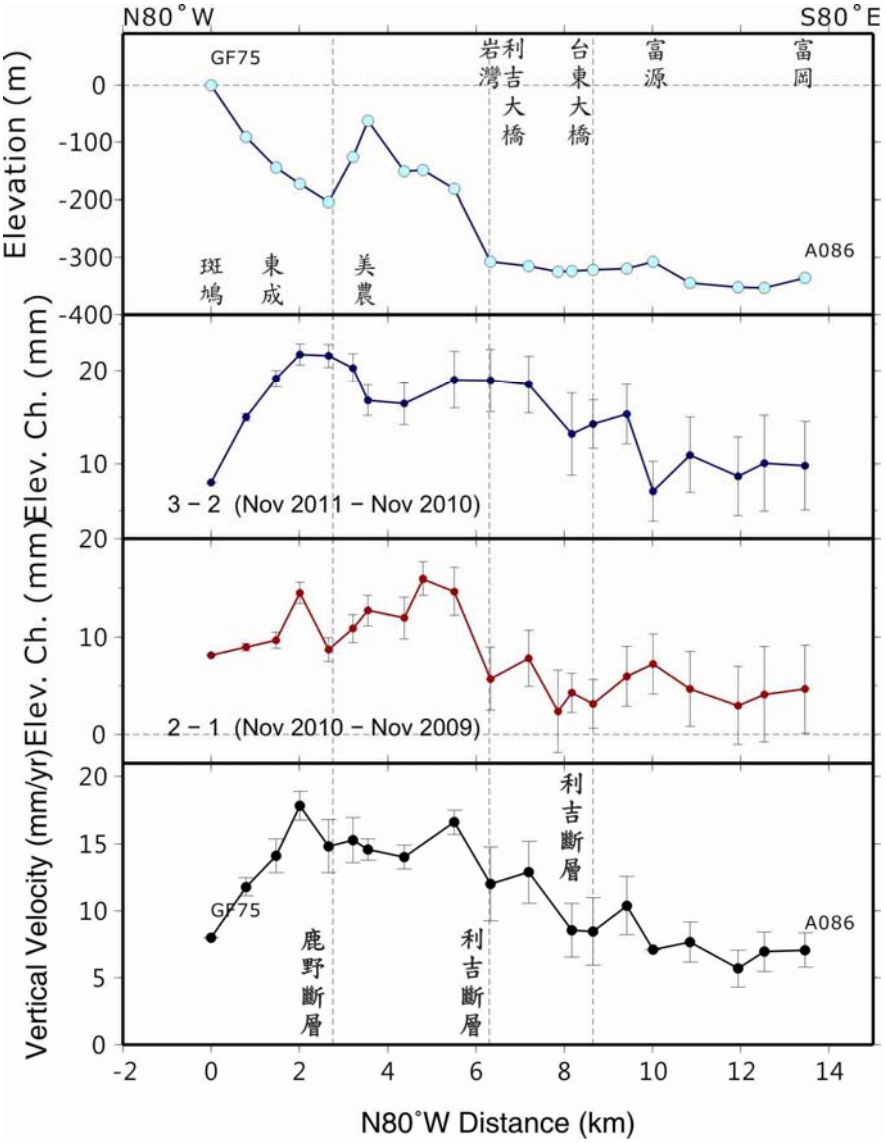


圖 2.41：富岡至東成測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

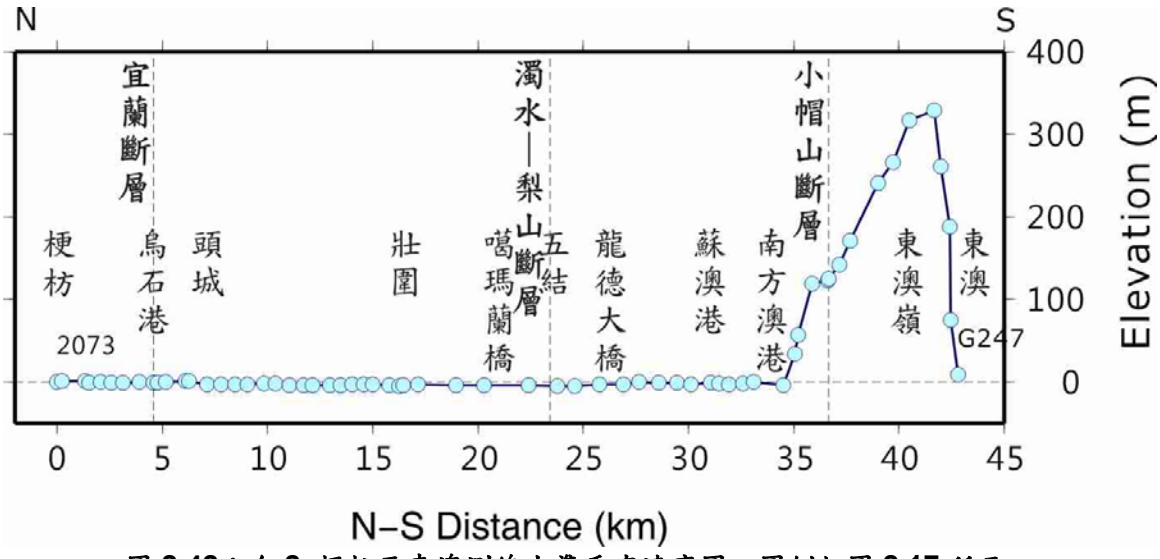


圖 2.42：台 2_梗枋至東澳測線水準垂直速度圖。圖例如圖 2.17 所示。

2-1-3-3 小結

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

2-2 地表變形研究成果

本章節針對 GPS 連續站之解算策略、GPS 時間序列、以及 1995-2010 年間大規模地震事件對地表變形與水平速度場的影響進行分析討論。

2-2-1 GPS 連續記錄資料成果分析

本研究使用之 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、工業技術研究院、國土測繪中心、中正大學等單位，共 197 站，以下為計算每日座標解之方法與流程。

2-2-1-1 GPS 連續站計算方法與解算策略

首先我們以 ITRF2005 國際框架為基準，選定鄰近臺灣之 14 個國際 IGS 站為參考站（圖 2.43），再從臺灣選取 25 個觀測時間較長之測站（國內核心站，圖 2.44）與國際站進行聯算，取得國內核心站在 ITRF2005 下之座標與速度場。接著再從國內核心站選取座標穩定之 9 個測站為參考站，與國內其它連續站進行聯算（圖 2.45）。由於軟體運算效率之限制，我們將所有 197 站以站數及網型幾何為原則切割成 9 個子網分別計算，其網型分布如圖 2.45。每個子網之計算均包含 9 個已估計座標與速度場之核心站，並於最後整體網型平差時提供一致之約制。

GPS 計算軟體介紹與參數詳細設定

本計畫所使用之座標解算軟體為 GAMIT/GLOBK 10.35。GAMIT 是由 MIT（Massachusetts Institute of Technology）、SIO（Scripps Institution of Oceanography）與 CfA（Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics）共同研發之高精度 GPS 科學解算軟體，而 GLOBK 同樣為 MIT 所撰寫之大地測量之網型平差軟體[*Herring et al.*, 2008]。GAMIT 軟體在 10.3 版本後修正成模組式計算，對於一般解算每日解成果之用戶，只需安排好正確之控制檔及觀測量，之後再執行其批次檔及輸入相關參數，即可自動化解算。GLOBK 則主要用來合併不同時段或不同觀測量之整體網型平差軟體，對於目前高精度 GPS 解算之主流軟體，如 GAMIT、BERNESE 和 GIPSY 等，以上軟體所計算之自由網均可相容於 GLOBK 並進行合併工作。除此之外，對參考站之約制 GLOBK 有兩種方法可供選擇；一為有限約制法（finite constraints），此法可對各參考站自行定義容許移動量，缺點為在不了解參考站之真實位移下，容易產生過度約制（over constraints）之情形，進而造成網型之扭曲。二為估計約制法（generalized constraints），藉由對各參考站與待測站所組成之基線網，利用平移、旋轉等方式得到一最小平差量之解[*Dong et al.*, 1998]，不會造成過度約制之問題。在本研究中，均利用估計約制法進

行參考站之約制工作。

本研究即利用 GAMIT 軟體進行每日之自由網鬆馳解計算，之後再以 GLOBK 進行框架約制獲得所有連續站時間序列及速度場，其中在 GAMIT 軟體計算下之詳細參數設定如下：

a. 是否加入地面參考站控制對衛星軌道進行估計：是
b. 是否估計極潮（pole tide）、固體潮（earth tide）及海潮（ocean tide）效應：是
c. 取樣時間間隔：30 秒。
d. 衛星截止角（cut off angle）：15 度。
e. 對流層估計：初始氣象參數模式採 GPT50 [*Boehm et al*., 2007]，乾、濕映射函數（mapping function）採 GMF 模式（Global Mapping Function）[*Boehm et al*., 2006]，估計間隔為 2 小時。
f. 固體潮模式：IERS2003。
g. 海潮模式：FES2004。

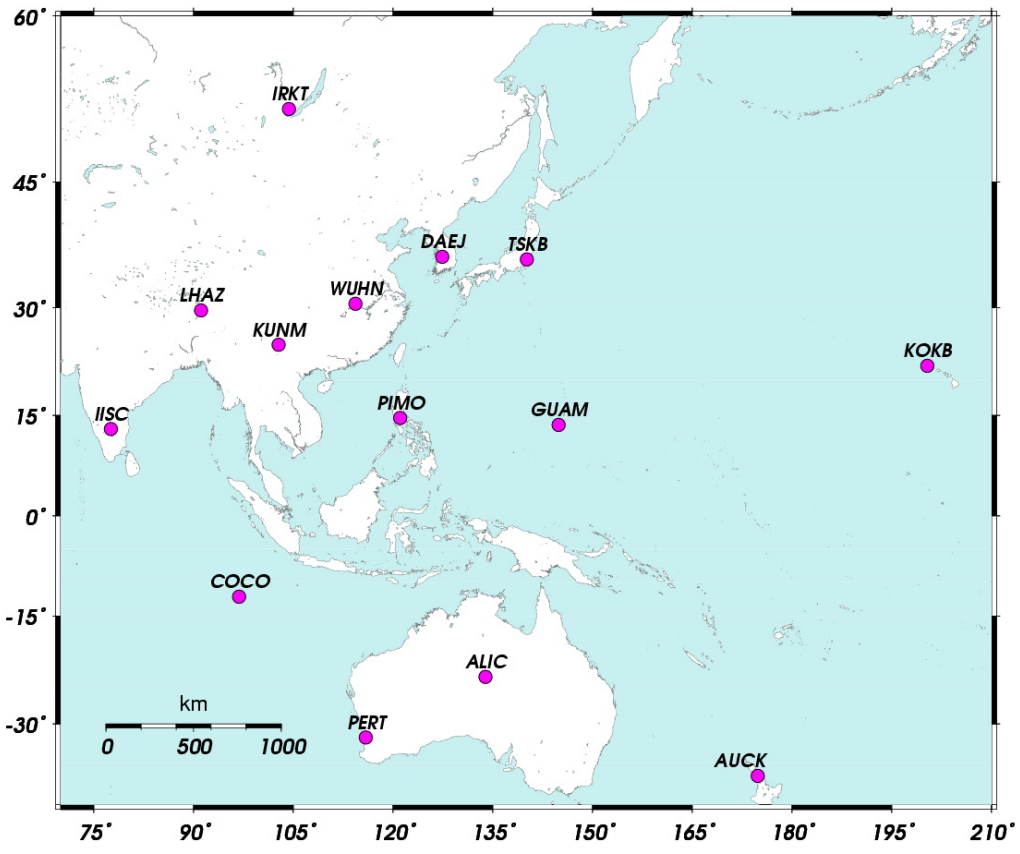


圖 2.43：選定作為參考站之 14 站國際 IGS 站分布圖。

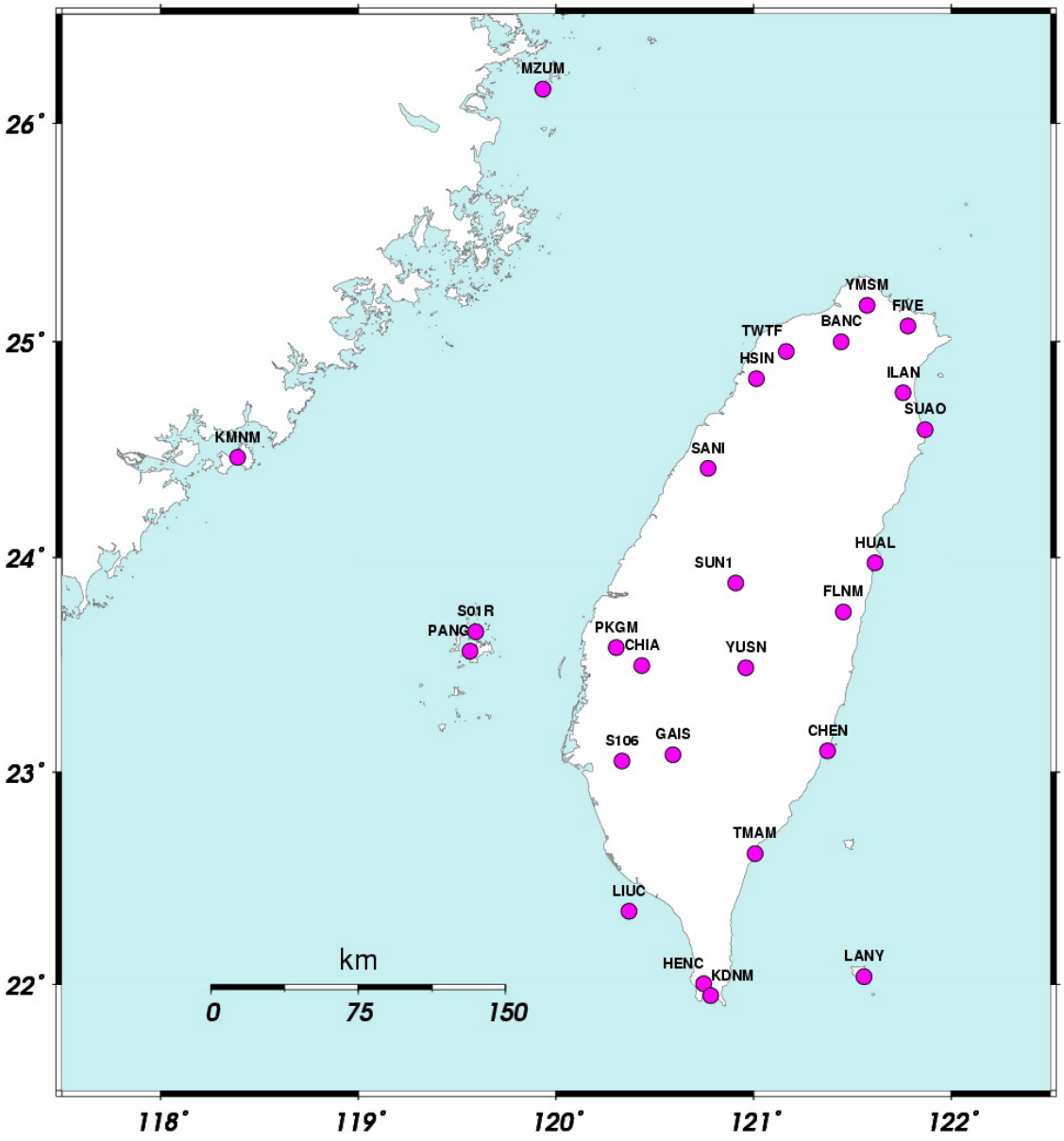


圖 2.44：選定之 25 站國內核心站分布圖。

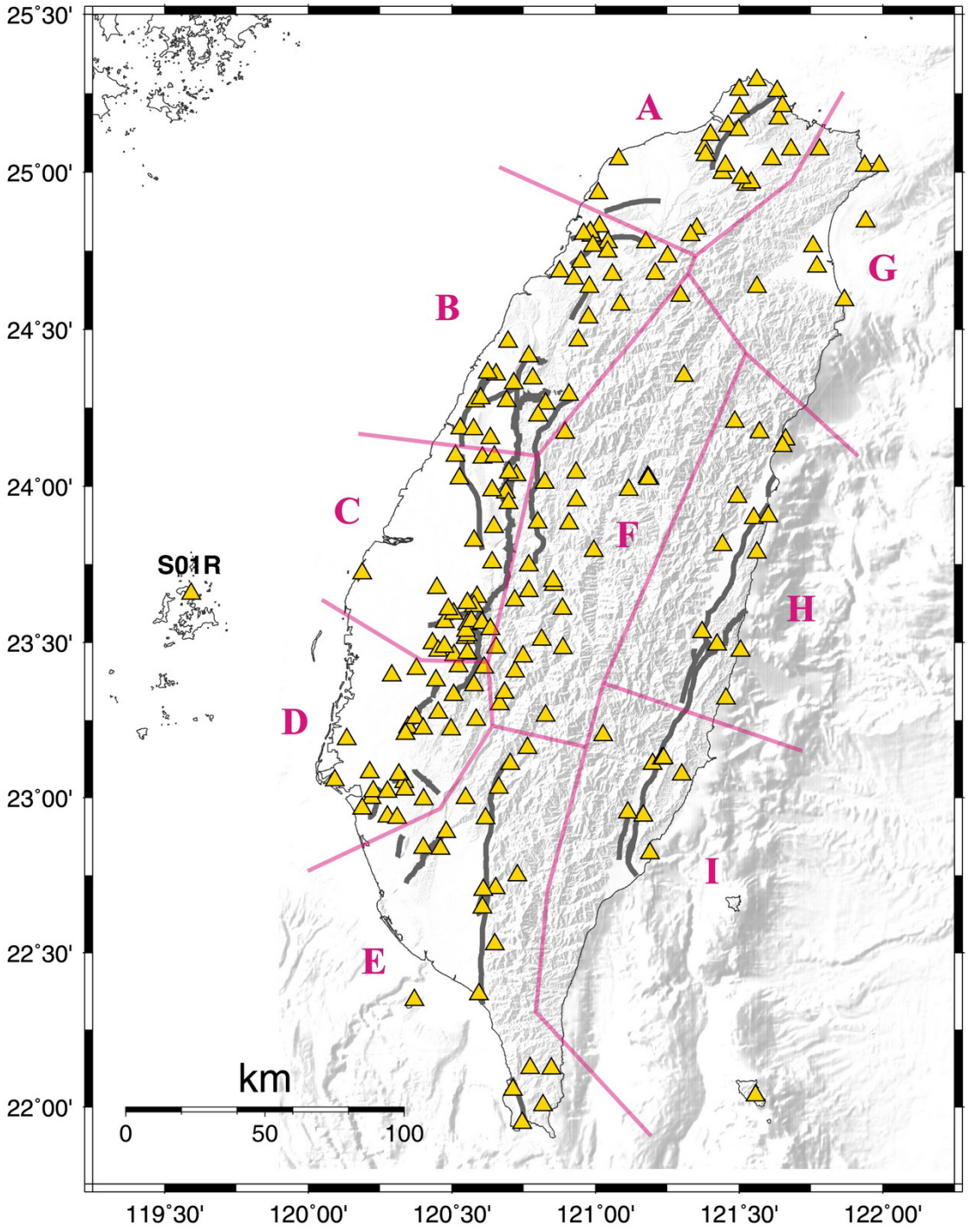


圖 2.45：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖，共 197 站。圖中的各分網乃先行分別計算後再合併所有網進行網型平差，最後取得每站在一致之框架下之時間序列。

時間序列分析方法

在 CGPS 時間序列處理方面，利用 *Nikolaidis* [2002]之加權最小二乘法估計式 2.1 之參數，其中 **b** 為速度場，**c**、**d** 為年週期參數，**e**、**f** 為半年週期參數，**g**、**k** 分別為同震與震後效應，**h** 為震後所改變之速度場，**v** 則為殘差，處理示意圖如圖 2.46。

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

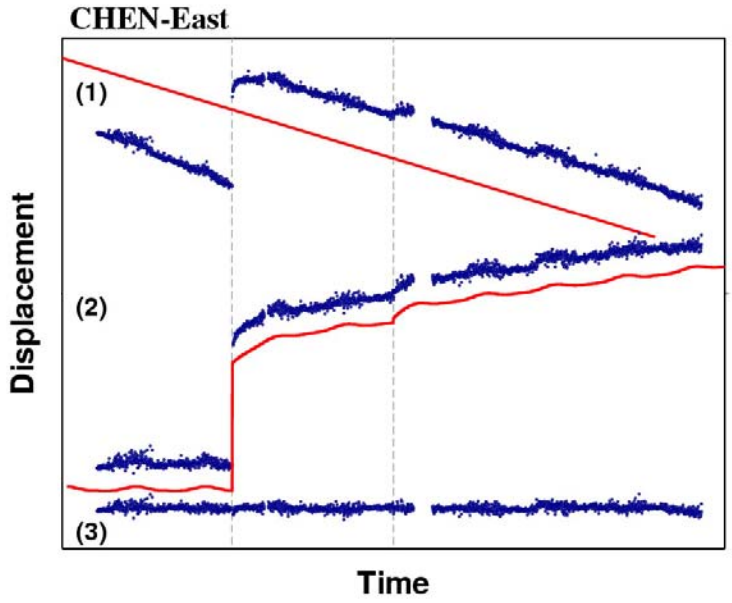


圖 2.46：每日座標解之時間序列經處理成殘差（Residual）之流程示意圖。(1)為原始時間序列，(2)為去除線性趨勢線後所得之結果，(3)為自(2)時間序列中去除同震、震後與週期性效應後之殘差。灰色虛線由左而右分別為 1999 年集集地震與 2003 年成功地震。

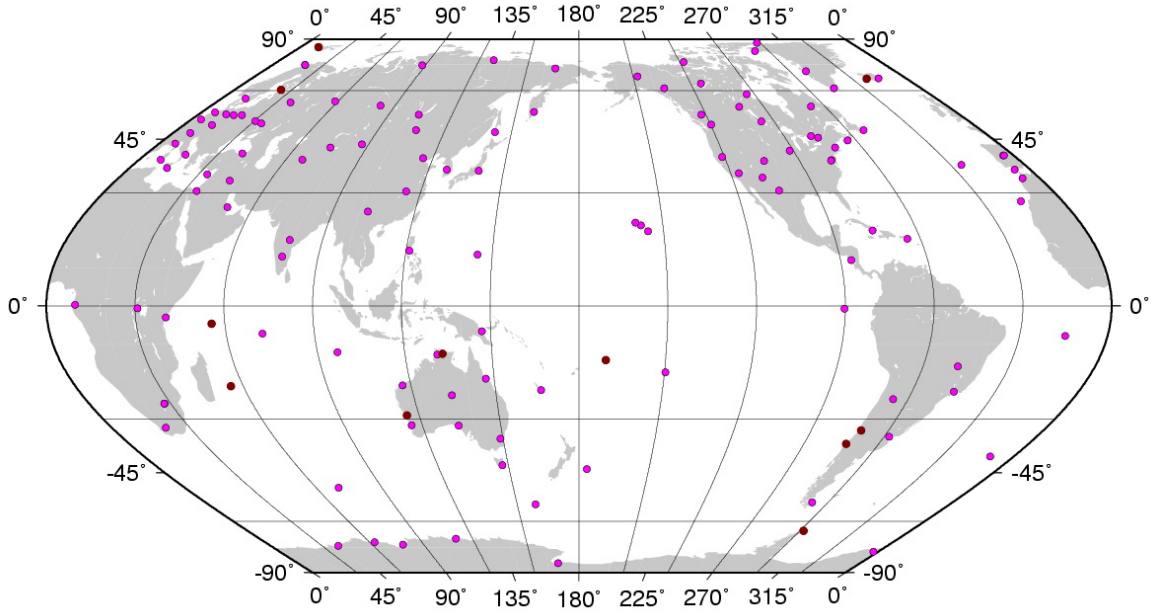


圖 2.47：IGS05 參考框架所選定之核心站。紫紅色點為本計畫所使用之約制站，咖啡色點由於時間序列變動較大或資料缺漏較多，因此去除不與約制。

2-2-1-2 臺灣 1995-2010 年 GPS 座標時間序列之變化

為了研究板塊速度變化，中央研究院在 1989 年建立臺灣第一個 GPS 觀測網（Taiwan GPS Network），而後，GPS 觀測資料在臺灣逐漸被各單位進行相關工作與研究之用。在探討地震前後之速度變化，首先必須確認在解算過程中之參考點不受地震同震或震後影響。由於 1995-2010 年間，IGS 國際站之點位分布與資料品質均有所改變，因此我們將 SOPAC 公布之每日世界網成果（h-files）與國內已解算之每日鬆馳解進行合併，再選定 IGS05 之 120 個核心站（圖 2.47）以 ITRF2005 之座標速度場定義進行非固定約制，以確保臺灣所計算之連續站座標之高穩定性，進而突顯位移的高精確度。

外島澎湖白沙站 S01R

澎湖白沙站（S01R）位於台灣本島之西側，是臺灣最早架設的 GPS 連續站之一。圖 2.48 展示 S01R 自 1995-2010 年之座標三方向時間序列。S01R 在 16 年間更換了三次天線盤，分別於 1998 年、2004 年及 2009 年，圖 2.48 中已修正更換天線盤之效應。觀察座標重複性在 1995-1996 年時段之座標離散度較大，此乃由於早年 IGS 站數較少，網型幾合差、基線也較長。此外，圖 2.48 顯示，S01R 在 1999 年集集地震時分別在南北向、東西向及垂直方向產生了-4.6 mm、26.4 mm 及 4.8 mm 之同震位移量，但無明顯之震後變形。由圖 2.48 時間序列可知 S01R 在資料觀測期間相當穩定，相較於台灣本島之地質構造為板塊交界帶，該站可視為穩定大陸邊緣，因此常被用以做為約制固定站，探討台灣本島相對於澎湖白沙站（S01R）之地表變形。

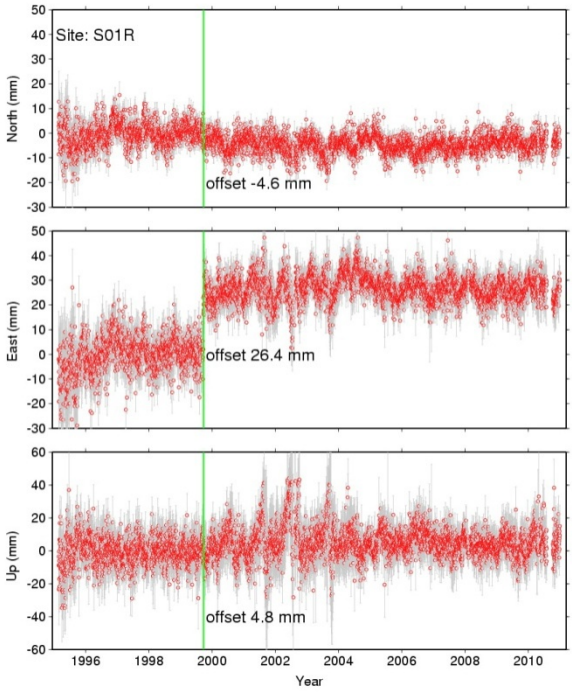


圖 2.48：測站 S01R 每日解時間序列。圖中綠線為 1999 年集集地震發震時間。

圖 2.49 展示台灣 19 個 GPS 連續站在 1995-2010 年間相對於澎湖白沙站 S01R 之速度場。1995-2010 年間經歷有 1999 集集地震、2002 花蓮地震、2003 年成功地震、2005 年宜蘭地震，以及 2006 年恆春地震，為了探討震間期之速度變化，圖 2.49 中將此 16 年間的速度場濾除同震及震後效應(式 2.1)，切割成集集地震前(1995-1999 年)、集集地震後 1-6 年內（2001-2005 年)、以及集集地震後 6-11 年內（2006-2010 年）此三時段來表示，並比較三時段之速度場差異。觀察圖 2.49 可知，位於台灣西部變形前緣之測站，如 YMSM、BANC、HSIN、SANI、PKGM、CHIA，及外島 S01R、PANG 等站，在三時段之速度量值變化不顯著。中部 SUNM 與東部 ILAN、SUAO、HUAL、FLNM、CHEN，以及南部 TMAM、HENC、KDNM、LANY 等測站，在集集地震後 1-6 年內（2001-2005 年，圖 2.49 紅色箭頭）相較於集集震前速度場（1995-1999 年，圖 2.49 綠色箭頭)有速度增快之趨勢，其中以測站 SUNM、SUAO、HUAL、FLNM、CHEN 最為顯著，速度差異量多達 5-15 mm/yr。將集集地震後 6-11 年內之速度場(2006-2010 年，圖 2.49 藍色箭頭)與震前速度場(圖 2.49 綠色箭頭)比較，測站 SUNM、SUAO、HUAL、FLNM 仍有差異量約 3-5 mm/yr。

以下由北至南針對連續站之座標時間序列具有同震及震後效應，並且速度變化顯著的 8 個測站（ILAN、SUAO、HUAL、FLNM、CHEN、SUNM、HENC、KDNM)，固定參考站為澎湖白沙站 S01R，繪製位移軌跡圖（圖 2.50)，並逐站或者依地區性探討相鄰成對之 GPS 測站隨時間之速度變化。

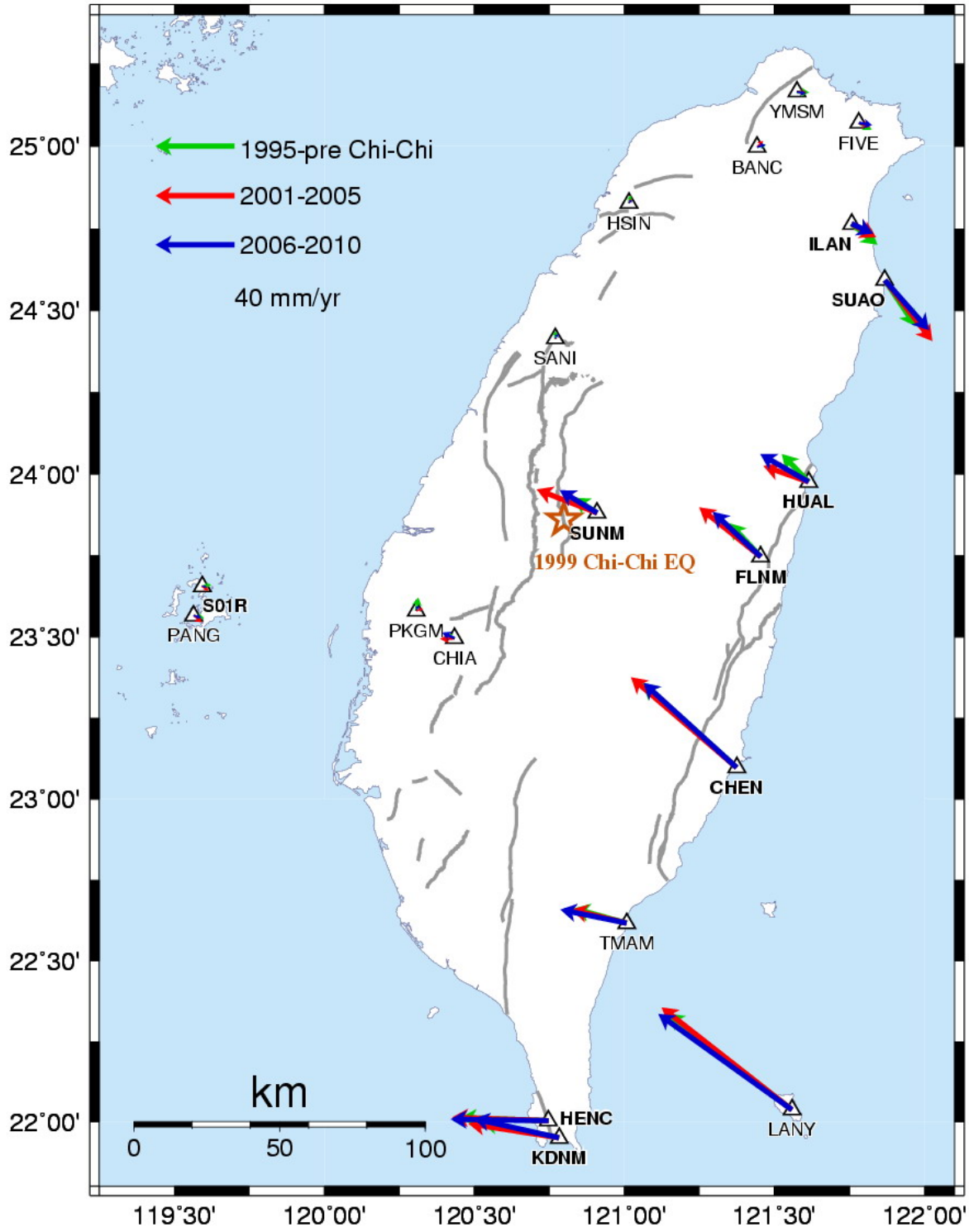


圖 2.49：1995-2010 年間相對於 S01R 之速度場。綠色箭頭為集集地震震前時段（1995-1999 年）、紅色箭頭為集集地震後 1-6 年內時段（2001-2005 年）、藍色箭頭為集集地震後 6-11 年內時段（2006-2010 年）。紅色星號標記集集地震震央位置。

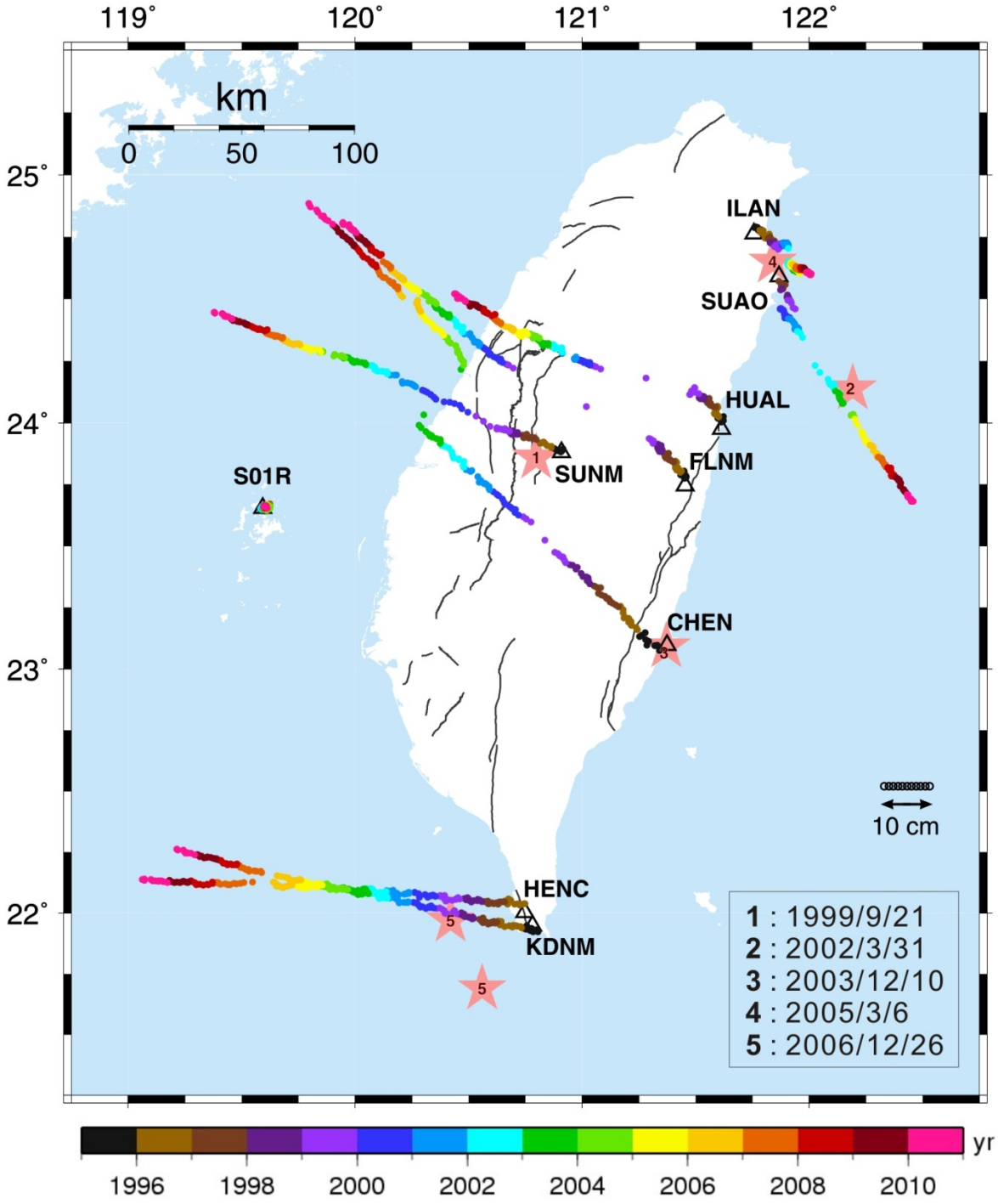


圖 2.50：1995-2010 年之位移軌跡圖。各測站之位移軌跡隨觀測年份以色彩變化表示。圖中紅色星號位置為觀測期間所發生的地震事件，星號內數字 1 至 5 依序為：1999 年集集地震、2002 年花蓮地震、2003 年成功地震、2005 年宜蘭地震、2006 恒春雙地震。測站 SUNM 在 1999 年集集地震之水平同震位移量超過 1 公尺，為了圖面展示的易讀性，本圖中將該同震位移量扣除，以利位移軌跡改變之觀察。

東北部地區（ILAN、SUAO）

宜蘭站 ILAN 以及蘇澳站 SUAO（地理位置詳見圖 2.50），由圖 2.51 時間序列以及圖 2.52 位移軌跡圖可明顯觀察到兩測站受到 1999 年集集地震、2002 年花蓮地震以及 2005 年宜蘭地震之影響，具有同震及震後變形。兩測站大致往東南方向移動，並且有下陷現象。集集地震震後 SUAO 運動速度加快、ILAN 運動速度減慢；花蓮地震震後兩測站運動速度皆加快；宜蘭地震震後兩測站運動速度則變慢，速度量與 1999-2002 年期間相似。圖 2.51 中之綠線為 ILAN 與 SUAO 兩站自 1995-2010 年間之基線變化，結果顯示 16 年間兩測站在水平方向逐漸遠離（累積南北向約 40 cm、東西向約 15 cm），垂直方向漸近約（累積約 10 cm）。

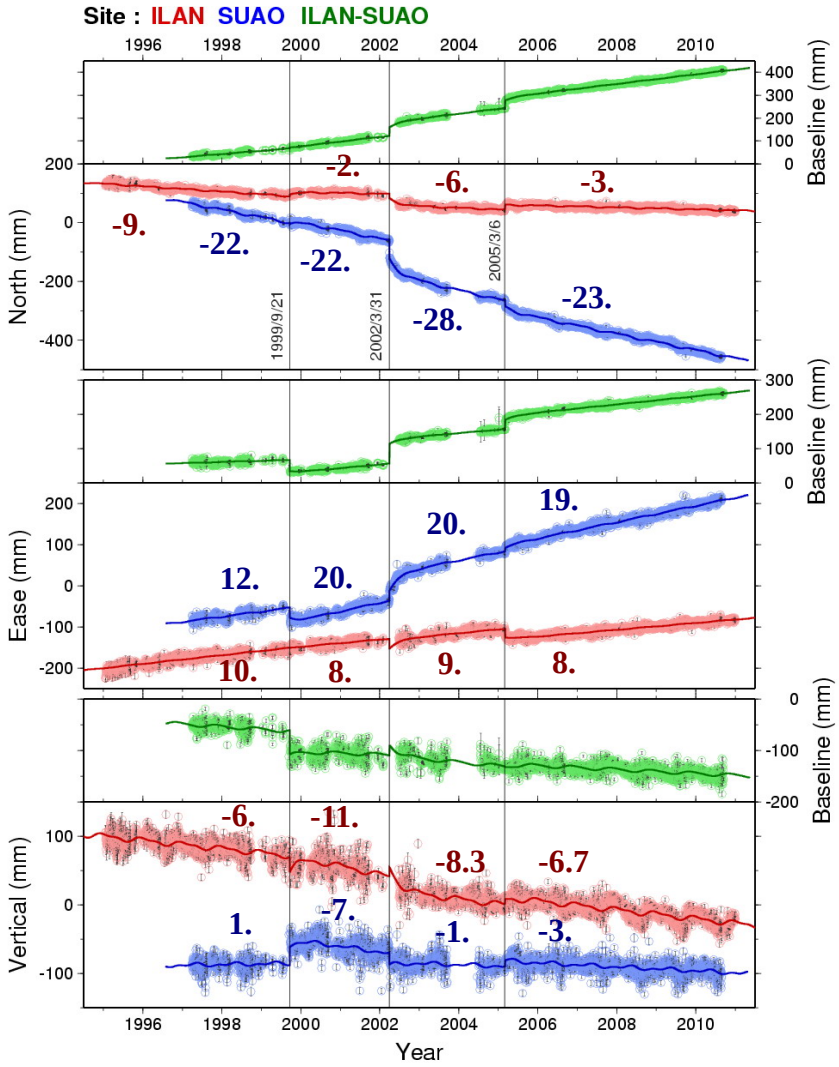


圖 2.51：測站 ILAN 與 SUAO 每日解及基線變化時間序列。圖中黑線分別為 1999 年集集地震、2002 年花蓮地震以及 2005 年宜蘭地震發震時間。

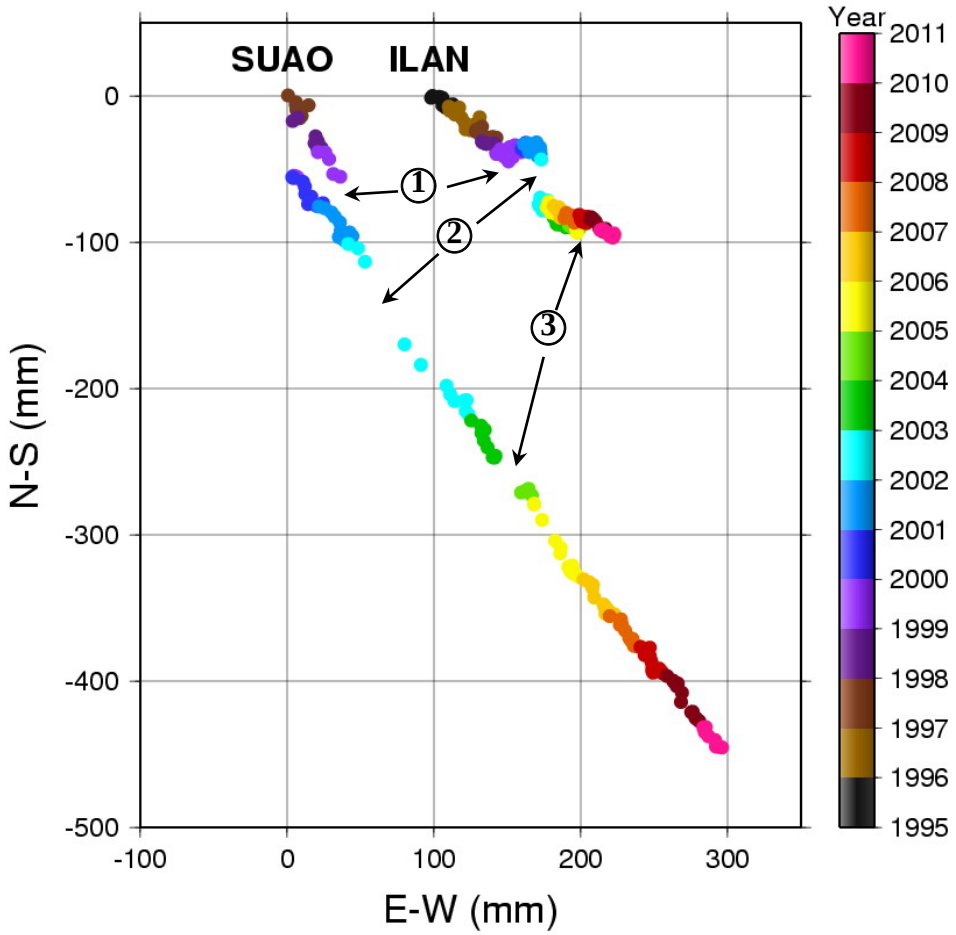


圖 2.52：測站 ILAN 與 SUAO 位移軌跡圖。圖中標誌之數字 1、2、3 分別代表 1999 年集集地震、2002 年花蓮地震以及 2005 年宜蘭地震之同震位移。

東部地區（HUAL、FLNM、CHEN）

接著討論花蓮站 HUAL 以及鳳林站 FLNM（地理位置詳見圖 2.50），由圖 2.53 時間序列以及圖 2.54 位移軌跡圖可明顯觀察到兩測站受到 1999 年集集地震、2002 年花蓮地震以及 2005 年宜蘭地震之影響，具有同震及震後變形。兩測站大致往西北方向移動，並且有下陷現象。集集地震震後 FLNM 運動速度加快，HUAL 向西運動速度加快、向北速度減慢；花蓮地震震後兩測站運動速度皆減慢；宜蘭地震前後之兩測站運動速度變化不顯著。圖 2.53 中之綠線為 FLNM 與 HUAL 兩站自 1995-2010 年間之基線變化，結果顯示 16 年間兩測站在東西方向逐漸遠離（累積約 15 cm），南北方向逐漸靠近（累積約 30 cm），垂直方向在花蓮地震震前遠離約 0.5 cm，花蓮地震震後變化不顯著。

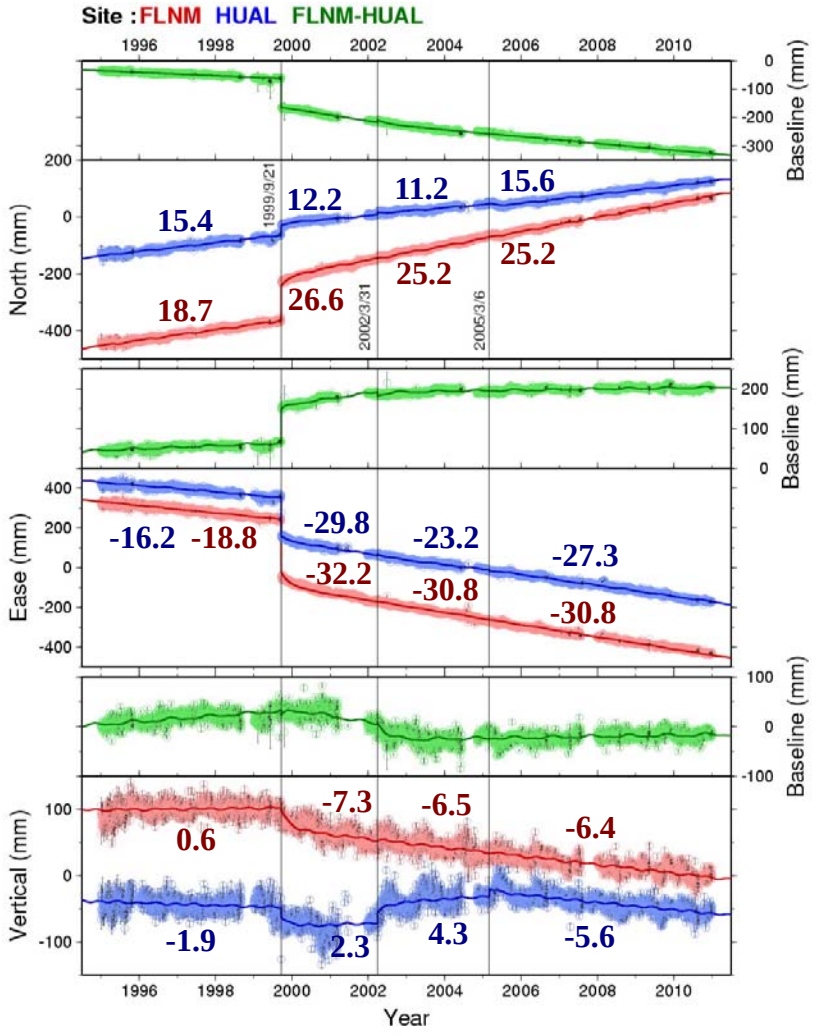


圖 2.53：測站 FLNM 與 HUAL 每日解及基線變化時間序列。圖中黑線分別為 1999 年集集地震、2002 年花蓮地震以及 2005 年宜蘭地震發震時間。

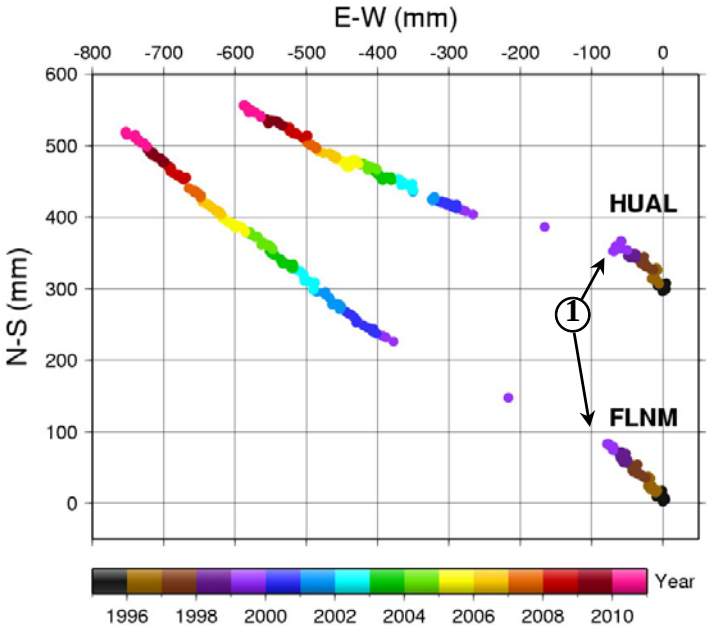


圖 2.54：測站 FLNM 與 HUAL 位移軌跡圖。圖中標誌數字 1 代表 1999 年集集地震之同震位移。

成功站 CHEN（地理位置詳見圖 2.50），由圖 2.55 時間序列以及圖 2.56 位移軌跡圖可明顯觀察到，在 1999 年集集地震與 2003 年成功地震皆發生明顯的同震位移，並具有非線性之震後效應。集集地震前（1995-1999 年）CHEN 以向北 45.8 mm/yr、向西-53.6 mm/yr 及下陷-0.2 mm/yr 之速度朝穩定大陸邊緣擠壓；集集地震後，速度增為向北 47.6 mm/yr、向西-56.5 mm/yr，並且轉為抬升 0.8 mm/yr；成功地震後又減速為向北 45.0 mm/yr、向西-49.9mm/yr 及抬升 2.2 mm/yr。

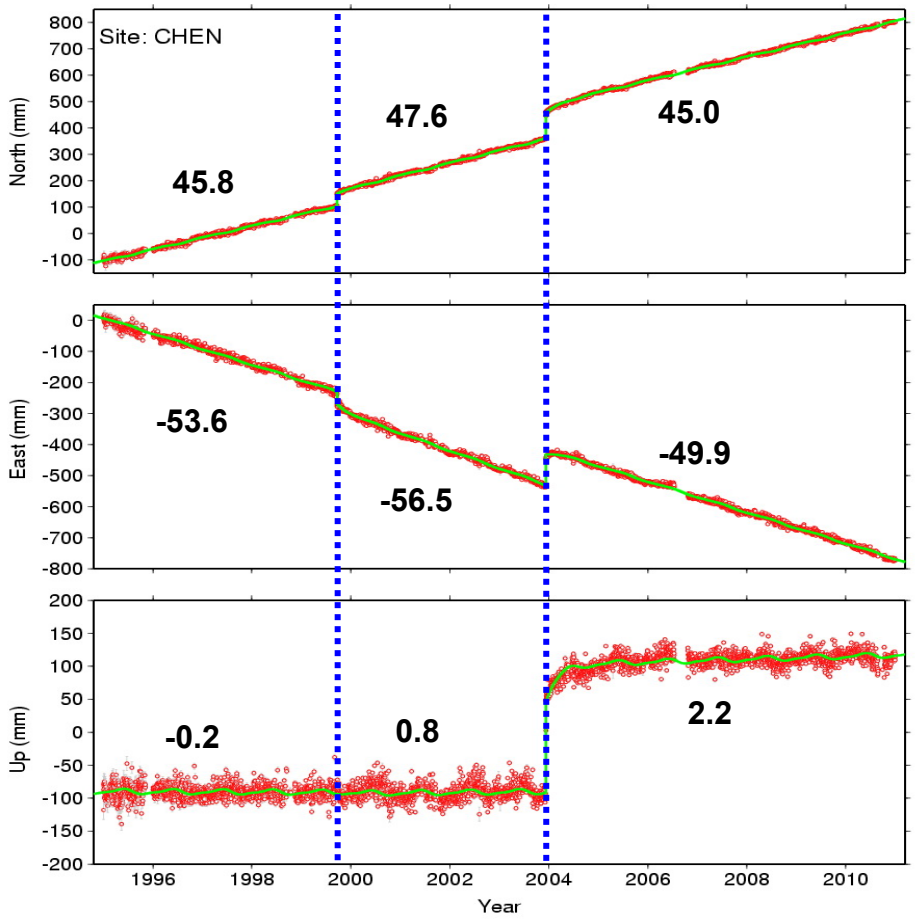


圖 2.55：測站 CHEN 每日解時間序列。圖中藍線分別為 1999 年集集地震及 2003 年成功地震發震時間。

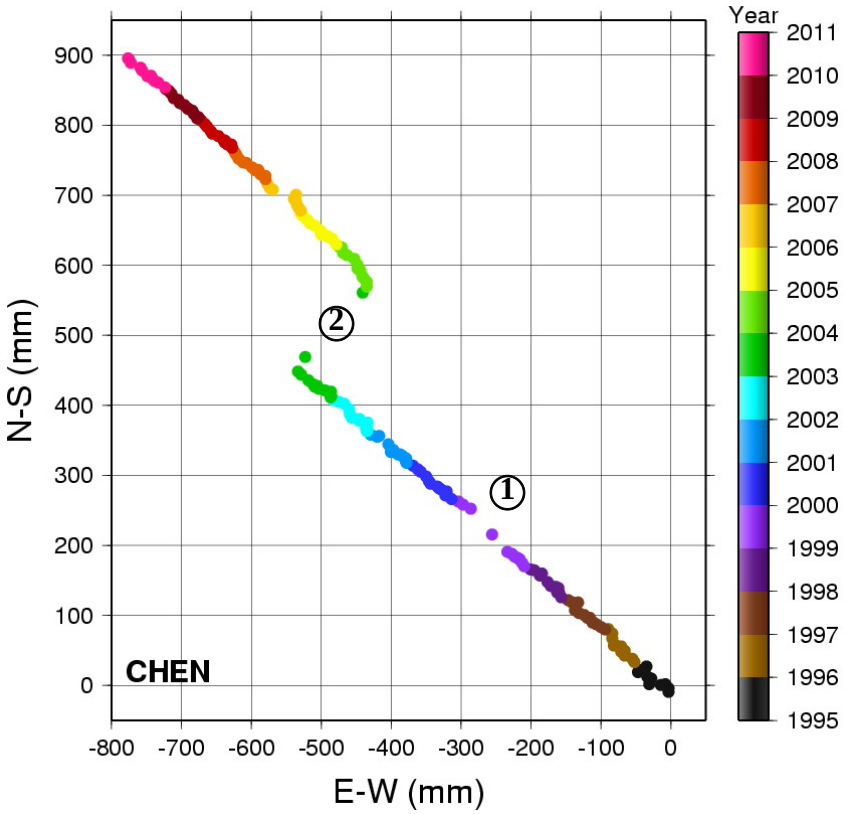


圖 2.56：測站 CHEN 位移軌跡圖。圖中標誌之數字 1、2 分別代表 1999 年集集地震以及 2003 年成功地震之同震位移。

中部地區（SUNM）

日月潭站SUNM距離1999年集集地震震央西方約10公里處(地理位置詳見圖2.50，該站在集集地震時產生了極大的同震位移量，分別為向北 1.0 m、向西 1.7 m 以及下陷 0.1 m [*Yu et al.*, 2001]。並在集集地震後至 2000 年 12 月間，產生向北 93.7 mm、向西 135.9 mm 以及抬升 18.6 mm 之震後位移[*Yu et al.*, 2003]。本研究計算成果展示於圖 2.57 時間序列以及圖 2.58 位移軌跡圖。由於 SUNM 在集集地震之同震位移量過大，為了圖形展示的易讀性與震後速度量改變之觀察，圖 2.57 及圖 2.58 已將同震位移量扣除，前後座標接合。根據本研究計算成果，SUNM 在集集震前之速度為向北 7.8 mm/yr、向西-12.0 mm/yr。震後之速度增加為向北 11.6 mm/yr、向西-19.1 mm/yr。圖中可發現水平方向位置變化在震後約一年內呈非線性的速度改變，同時在高程向也有非線性之抬升行為。SUNM 之位移速度在集集震後大約沿著原方向劇烈加快，直到震後約一年以後速度逐漸減緩，至今已趨近於線性之速度模式，但速度仍較集集震前為快。

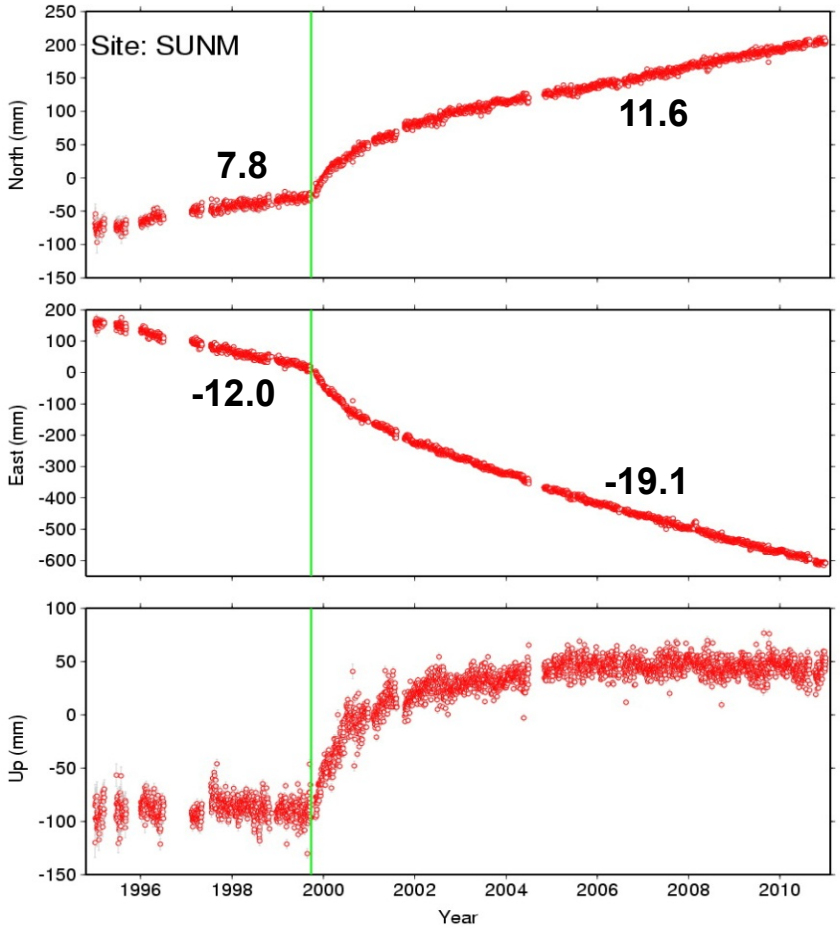


圖 2.57：測站 SUNM 每日解時間序列。圖中之綠線為 1999 年之集集地震發震時間。由於 SUNM 在集集地震之同震位移量極大，本圖將該同震位移量扣除並接合前後座標，以利圖面展示及觀察。

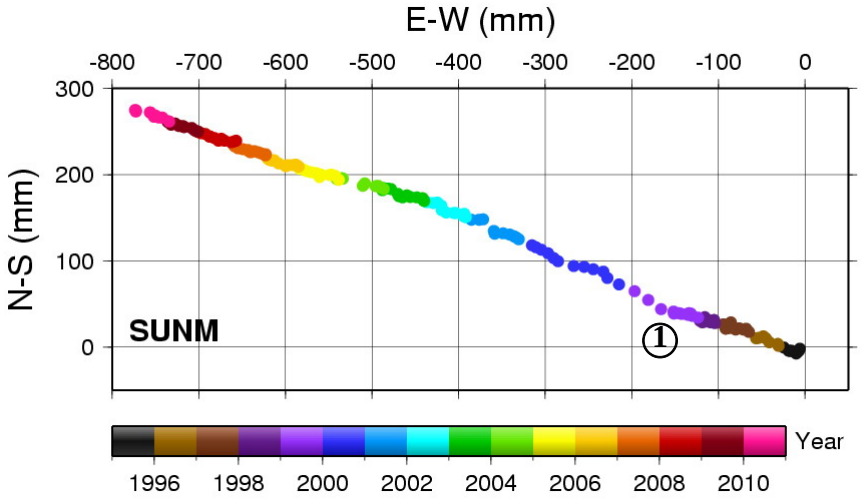


圖 2.58：測站 SUNM 位移軌跡圖。圖中標誌數字 1 代表位移軌跡經歷 1999 年集集地震之處。

南部地區（HENC、KDNM）

恆春站 HENC 以及墾丁站 KDNM（地理位置詳見圖 2.50），由圖 2.59 時間序列以及圖 2.60 位移軌跡圖可明顯觀察到，兩測站受到 2006 年恆春地震之影響，具有同震及震後變形。HENC 之運動速度在震前向北 3.9 mm/yr，震後減慢為 2.1 mm/yr；震前向西-52.0 mm/yr，震後增快為-52.4 mm/yr；在垂直方向震前-3.1 mm/yr，震後下陷至-5.7 mm/yr。KDNM 之運動速度在震前向北 9.6 mm/yr，震後增快至 11.3 mm/yr；震前向西-48.3 mm/yr，震後減慢為-46.0 mm/yr；在垂直方向震前 2.6 mm/yr，震後抬升至 5.8 mm/yr。圖 2.59 中之綠線為 HENC 與 KDNM 兩站自 1995-2010 年間之基線變化，結果顯示 16 年間兩測站在東西方向逐漸遠離（累積約 10 cm），南北方向逐漸靠近（累積約 12 cm），垂直方向遠離約 18 cm。

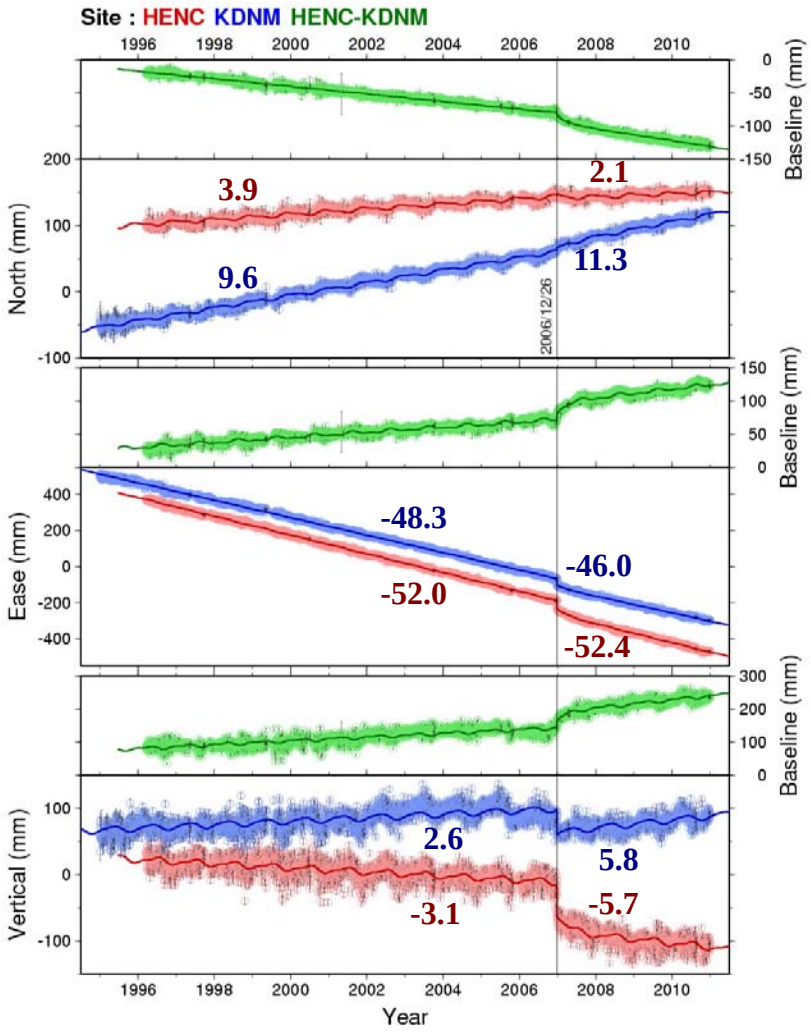


圖 2.59：測站 HENC 與 KDNM 每日解及基線變化時間序列。圖中黑線為 2006 年恆春地震發震時間。

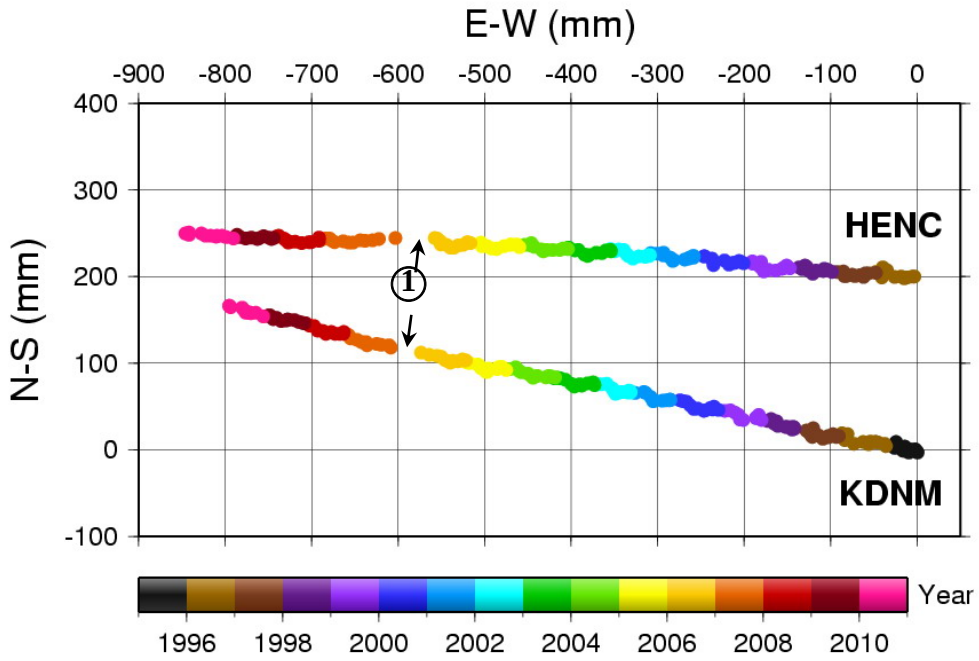


圖 2.60：測站 HENC 與 KDNM 位移軌跡圖。圖中標誌數字 1 代表 2006 年恆春地震之同震位移。

2-2-1-3 小結

本研究利用 1995-2010 年間之 GPS 連續觀測資料進行座標每日解計算，得到長達 16 年之測站位移時間序列以及基線變化。成果顯示，台灣島西側之澎湖白沙站（S01R）在資料觀測期間相當穩定，可做為約制固定站，探討台灣本島相對於 S01R 之地表變形行為。經分析 ILAN、SUAO、HUAL、FLNM、CHEN、SUNM、HENC、KDNM 等 8 站之速度變化，發現 1999 年集集地震之震後效應影響甚劇，台灣中部、東部以及東北部之測站在集集地震後皆有加速情形，雖然集集震後至今仍經歷有 2002 年花蓮地震、2003 年成功地震以及 2005 年宜蘭地震，僅有 CHEN 近乎回復至震前速度量值，其餘各站之移動速度仍較集集震前為快。此外，南部的 HENC 與 KDNM 兩測站在 2006 年恆春地震後，移動速度有小幅增加。此外，關於慢地震徵兆的方面，由於 GPS 連續站的測量資料為單日解，其解析精度與地震記錄無法有良好的解釋，需日後以不同的資料解析方法進行討論之。

2-2-2 嘉南地區現今地殼變形分析

由於觸口斷層周遭地區具有較高之擠壓應變速率[*Yu and Chen*, 1994; *Yu et al.*, 1997]，使得嘉南地區一直被認為是具有高地震潛能的區域，然而地質調查與槽溝開挖之研究皆未能明確指示斷層在近代的活動週期[*黃鑑水等*，1994；*齊士崢、宋國城*，2000]。因此探討嘉南地區之斷層活動行為及其地震潛能就成為研究此地區地殼變形之重要目的。

根據地形、流域型態（drainage pattern）與地層記錄分析結果，嘉南地區由西向東大致可以區分為平原（plain）、台地（tilted tableland）與丘陵（low hills）[*Yang et al.*, 2007]。其中，北北東-南南西走向且向西逆衝之觸口斷層（於此區域又被稱做為崙後斷層）即為丘陵地區（low hills）內之主要斷層。經由震測及地電探勘分析指出，此斷層之斷層面向東傾斜且呈 listric 型態，近地表斷層面約 60°，向下漸緩至 30°-40°，並與數條斷層滑動面結合成斷層帶[*石瑞銓*，2003]。往西，台地（tilted tableland）與丘陵（low hills）之邊界為六甲-木屐寮斷層系統[*Yang et al.*, 2007]。此斷層系統在航照判釋中雖然具有明顯地形特徵，但野外缺乏地表地層錯動之證據[*Sun*, 1971]。再往西，藉由地形分析以及針對此地區全新世沉積物之放射性碳同位素定年法結果，*Yang et al.* [2007]指出平原（plain）與台地（tilted tableland）間之交界處存在一條盲斷層（blind thrust），此斷層可能標示著臺灣西南部造山帶變形前緣的位置。

依據 1996-2006 年間相對於澎湖白沙（S01R）之 GPS 水平速度場分析結果指出，此地區自東南到西北，速度向量由 54 mm/yr、方位角 272°顯著遞減至約 1 mm/yr、方位角 252°[*郭素妙等*，2008]。其中，同屬覆瓦狀構造的六甲-木屐寮斷層系統與觸口斷層之間，具有 15 mm/yr 的顯著水平縮短量，顯示兩構造線間正在持續累積應變[*郭素妙等*，2008]。而在六甲斷層系統以西約 10 km 的範圍內仍有約 10 mm/yr 之水平速度量[*郭素妙等*，2008]，似乎也暗示著平原（plain）與台地（tilted tableland）間之盲斷層（blind thrust）現今仍為一條活躍之活動構造。

2-2-2-1 縣 174_北門至楠西精密水準測線成果分析

長約 66 公里之縣 174_北門至楠西水準測線於嘉南地區橫跨六甲斷層及觸口斷層（圖 2.61），地調所沿此測線重複施測 8 次，分別於 2003 年 8 月、2004 年 10 月、2005 年 3 月、2006 年 9 月、2008 年 3 月、2009 年 4 月及 2011 年 4 月進行。由於此測線幾乎與內政部一等二級水準路線重疊，為了解析精密水準測量所提供之地表變形資訊，於計算精密水準垂直運動量時，本計畫可以約制 X204 等 30 個點位之抬升速率（表 2.3），該速率為相對於澎湖白沙 GPS 連續站

S01R 之垂直運動速率，推求自 2000-2008 年內政部一等水準測量與 GPS 連續站觀測資料 [*Ching et al.*, 2011]。

相鄰兩次測量之高程變化量沿東西方向之剖面分布形態顯示，六甲斷層（測站 G816）以東地區之垂直運動型態大致上以抬升為主；相反地，測站 I080 以西區域之垂直運動型態則以沉降為主；介於測站 I080 與測站 G816 間之區域，在 2004-2005 年與 2008-2011 年期間主要為抬升，而 2005-2008 年間則近乎無垂直運動。

本計畫接著藉由最小二乘法來推求各水準點於 2003-2011 年間之平均垂直運動速率（圖 2.62）。其結果顯示，於測站 I080 以西之區域，具有約為 10 mm/yr 之沉降速率；在測站 G816 以東之區域，其垂直抬升速率大致在 10 mm/yr 左右，且最大抬升速率約為 12.5 mm/yr。值得注意的是，在測站 I080 與測站 G816 間之區域，雖然平均垂直運動速率只有約 2-3 mm/yr，配合相鄰兩次測量之高程變化量型態，此區域於 2003-2011 年間確實是處於抬升的環境。

表 2.3：縣 174_北門至楠西精密水準測線約制站抬升速率表。

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

2-2-2-2 二維彈性斷層模型

為了擷取測量資料中所隱含的構造意義，本計畫初步採用二維彈性斷層模型來反演 GPS 與精密水準的資料，推求斷層面上之滑移速率並搜尋各主要斷層幾何之最佳解。我們首先假設此一斷層系統是由一個滑脫面（décollement）和數個分支斷層（branched fault）所組成，這些分支斷層即是我們所熟知的活動斷層。再假設滑脫面上完全是潛移的狀態，即不會發生地震；而任一分支斷層上盤

滑脫面之滑移量（S_1），要等於該分支斷層下盤滑脫面之滑移量（S_2）與此分支斷層上之滑移量（S_3）的總和（圖 2.63）。由於斷層淺部可能因摩擦力作用而發生鎖定並持續累積能量，本模型簡單地假設鎖定深度以上之斷層滑移速率為零；換言之，斷層鎖定深度必須小於或等於該斷層之實際深度。在給定斷層幾何型貌與斷層滑移量後，透過 *Okada* [1985]所提供之方程式，即可求得地表之位移速率。

我們利用最小二乘法，藉由反演地表位移量來求解斷層滑移量及斷層幾何參數。其中，地表位移量與斷層滑移速率間為線性關係，每一條斷層之格林函數（**G**）由 *Okada* [1985]所提供之方程式求得；每條斷層上之滑移速率為 *s*；地表位移量以 *d* 來描述。地表位移量及斷層滑移速率參數間之關係式以 **G***s* = *d* 來表示。我們以速度誤差之倒數為權重，藉由計算下式之最小值來求得各參數之最佳解。

$$F(\mathbf{s},\beta)=\left\|\sum^{-1/2}(Gs-d)\right\|^2 \qquad \text{（式 2.2）}$$

為了使計算結果符合實際觀測，我們在反演的過程中給予 1 個約制條件：在震間時期（interseismic period），斷層滑移速率必須為正值。因為上述約制條件和地表位移場為線性關係，因此我們使用 Matlab 所提供之 lsqlin 函式反演斷層面上之滑移速率分布。另一方面，斷層幾何參數與地表位移量之間則為非線性關係。為了求得合理之斷層幾何（斷層傾角、斷層位置、斷層深度、鎖定深度），我們依據 2004 年中央地質調查所報告「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」之構造平衡剖面作為起始模型及約制條件，利用蒙地卡羅演算法推算最佳之斷層幾何參數。

六甲—木屐寮—觸口斷層地區

就資料使用部分，我們將 GPS 水平速度場分解為為垂直斷層與平行斷層走向分量，因為我們是採用 2 維斷層模型，故水平速度場剖面是採用垂直斷層走向之速度分量（圖 2.63）。由於 GPS 與精密水準垂直速度場在六甲斷層以西約 6 公里處向西直到海岸線間的區域以沉陷為主，反映此地區因人工抽水而造成顯著之地層下陷（圖 2.63），因此爲了避免斷層滑移速率估算錯誤，我們主要是採用六甲斷層西側約 6 公里處以東之垂直速度值。另外，本區域由西向東分別涵蓋了六甲斷層、觸口斷層、竹頭崎斷層及平溪斷層（圖 2.61），根據速度剖面的變化指出（圖 2.63），六甲斷層、觸口斷層及竹頭崎斷層皆有對應到顯著之速度差異，因此本計畫主要針對這三條斷層對地表變形之貢獻進行模擬。反演所獲得之最小 L2 norm 值為 14.0 mm/yr，其斷層幾何參數為，六甲斷層向東傾斜 32.8°±1.3°，斷層底部與滑脫面相交深度為 4.6±0.4 km；觸口斷層向東傾斜 53.5°±1.0°，斷層底部與滑脫面相接深度為 5.1±0.4 km；竹頭崎斷層向東傾斜 46.9°±2.5°，斷層底

部深度為 6.6±0.3 km（圖 2.64）。六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層滑移速率分別為 15.4±4.3 mm/yr、5.6±1.7 mm/yr 及 29.6±3.8 mm/yr；其鎖定深度則分別是 3.4±0.6 km、2.5±1.2 km 與 3.7±1.1 km（圖 2.64）。假設六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層長度分別為 23 km、27 km 與 25 km，則各斷層每年累積之能量（moment）分別為 6.67±1.87 × 10^{23} dyne-cm、4.59±2.17 × 10^{23} dyne-cm 與 1.85±0.25 × 10^{24} dyne-cm。假設累積 100 年的時間，各斷層所累積的能量則分別相當於 M_w 6.66±0.28、M_w 6.76±0.19 與 M_w 6.71±0.28 之地震。

九芎坑—大尖山斷層地區

在嘉南地區北邊，縣 164_金湖至瑞峰水準測線橫跨九芎坑斷層、大尖山斷層及鹿窟斷層地區（圖 2.65）。根據速度剖面的變化指出（圖 2.66），九芎坑斷層、大尖山斷層及鹿窟斷層有對應到顯著之速度差異，針對這三條斷層對地表變形之貢獻進行模擬。反演所獲得之最小 L2 norm 值為 217.9 mm/yr，其斷層幾何參數為，九芎坑斷層向東傾斜 31.0°±1.5°，斷層底部與滑脫面相交深度為 2.7±0.1 km；觸口斷層向東傾斜 41.5°±0.6°，斷層底部與滑脫面相接深度為 3.5±0.2 km；鹿窟斷層向東傾斜 64.0°±1.0°，斷層底部深度為 6.5±0.6 km（圖 2.67）。九芎坑、觸口及鹿窟斷層之斷層滑移速率分別為 10.1 mm/yr、13.2 mm/yr 及 15.4 mm/yr；其鎖定深度則分別是 2.3±0.1 km、2.9±0.1 km 與 5.0±0.7 km（圖 2.67）。

2-2-2-3 討論

我們同樣將精密水準測量之平均垂直抬升速率與 GPS 移動站所求解之垂直速率進行比較，大趨勢上，雖然 GPS 垂直速度場由西向東也是呈現由沉降至抬升之型態，但是可以很顯著地發現精密水準垂直速度場之空間解析度的確遠高於 GPS 垂直速度場之空間解析度。

嘉南地區已知的活動構造較清楚也較單純，由西向東，分別為盲斷層、六甲斷層及觸口斷層。透過 GPS 觀測與精密水準測量之結果指出，盲斷層、六甲斷層及觸口斷層皆可與地表變形做一比對，其中，測站 I080 的位置可能大致位於盲斷層的頂點。根據相鄰兩次測量之高程變化量型態顯示，該盲斷層之活動極可能具有週期性的變化，就 2003-2011 年間之觀測指出，在 2004-2005 年與 2008-2011 年期間為斷層潛移的型態；在 2005-2008 年間則為斷層鎖定之型態。

就斷層錯位模型而言，竹頭崎斷層具有相當高的斷層滑移速率，在這個區域內也具有相對較深之鎖定深度（圖 2.64）；而鹿窟斷層與竹頭崎斷層相似，有高的斷層滑移速率及相對較深的鎖定深度（圖 2.67），顯示這兩個斷層均是值得我們高度關切之斷層。然而我們可以注意到竹頭崎斷層的建立及估算，主要是依據 GPS 垂直抬升速率的變化，且在 GPS 水平速度場的變化來看，跨越竹頭崎斷層

並沒有顯著之差異（圖 2.64）。在前面的段落就已經提及 GPS 垂直速度場之空間解析度並不佳，顯然在日後的工作中，將精密水準路線向東延伸並跨越竹頭崎斷層對於我們了解竹頭崎斷層之活動性是有必要的。最後，於下個階段的工作中，我們將期望能進一步建立更可靠之斷層模型並加入地質資料來評估各斷層所蘊含之地震潛能。

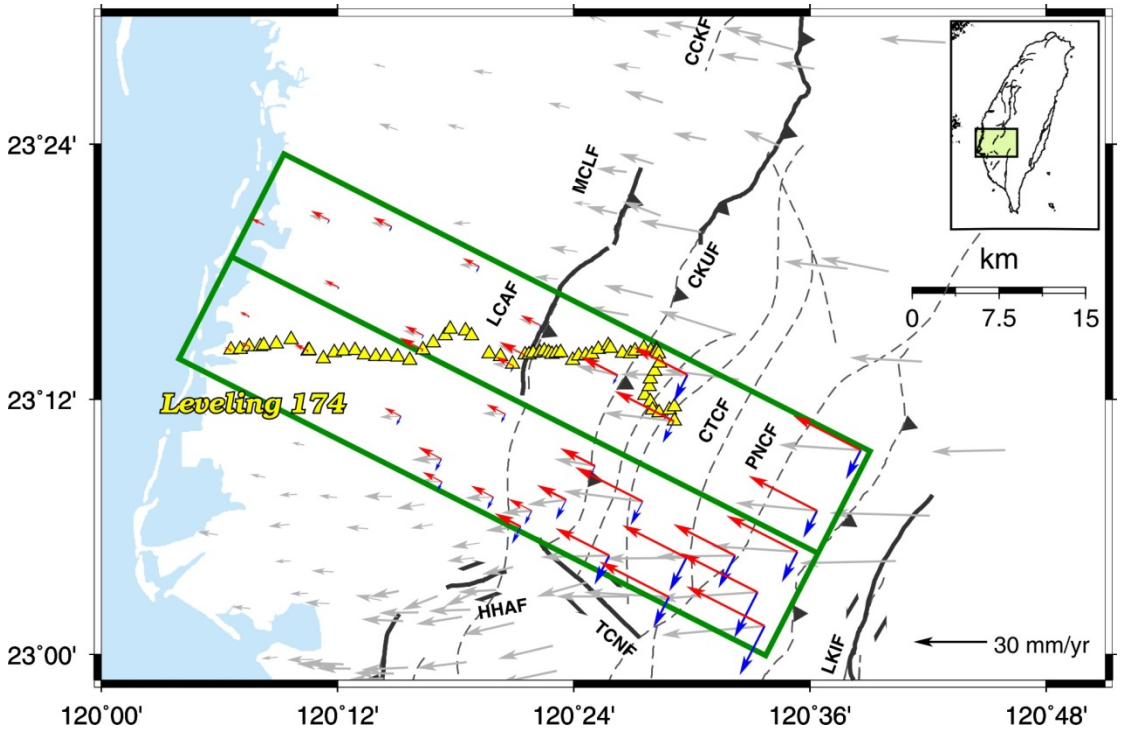


圖 2.61：嘉南地區 GPS 水平速度場與縣 174_北門至楠西水準測線分布圖。灰色箭頭為 GPS 水平速度向量，紅色箭頭為剖面中水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色箭頭為剖面中水平速度向量平行斷層走向之分量。黃色三角形為水準點位置。LCAF 為六甲斷層、MCLF 為木屐寮斷層、CKUF 為觸口斷層、CTCF 為竹頭崎斷層、PNCF 為平溪斷層。

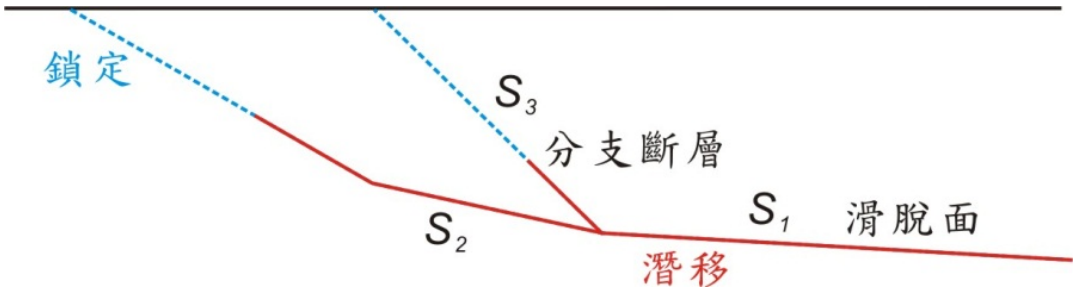


圖 2.62：二維彈性斷層模型示意圖。

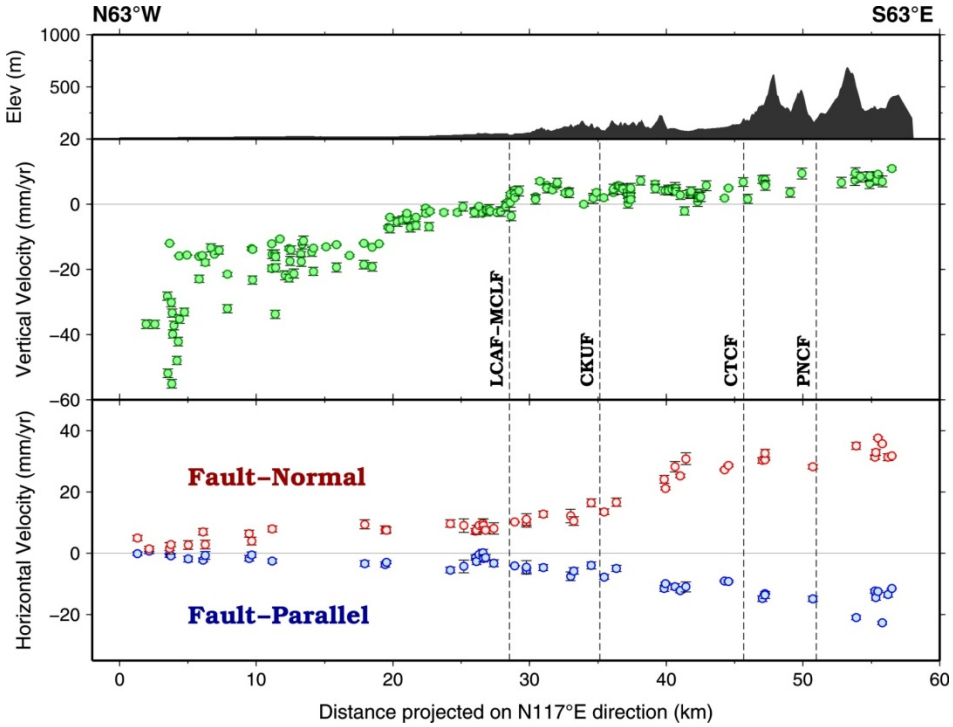


圖 2.63：圖 2.61 中剖面內水準與 GPS 速度場比較圖。綠色圓圈為水準垂直速度值，紅色圓圈為 GPS 水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色圓圈為 GPS 水平速度向量平行斷層走向之分量。LCAF-MCLF 為六甲-木屐寮斷層、CKUF 為觸口斷層、CTCF 為竹頭崎斷層、PNCF 為平溪斷層。

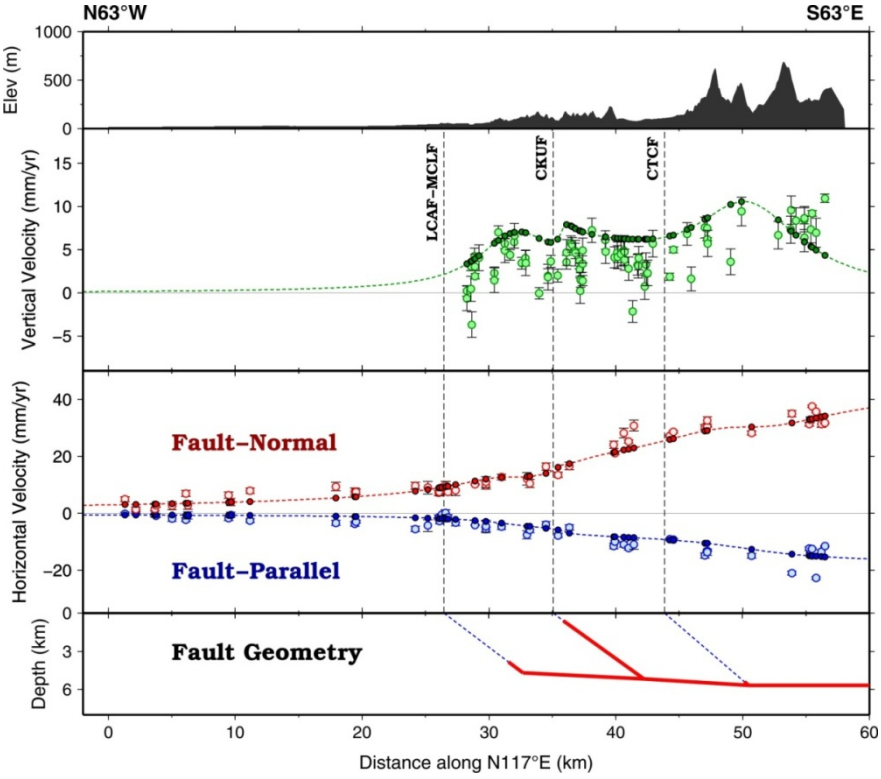


圖 2.64：斷層模擬結果。由上而下分別是精密水準抬升速率、GPS 水平速度分量、GPS 垂直分量及斷層幾何分布。綠色圓圈為觀測值；綠色虛線為計算值。藍色虛線為斷層鎖定位置，紅色實線為斷層潛移區段。灰色虛線為斷層投影位置。LCAF-MCLF 為六甲-木屐寮斷層、CKUF 為觸口斷層、CTCF 為竹頭崎斷層。

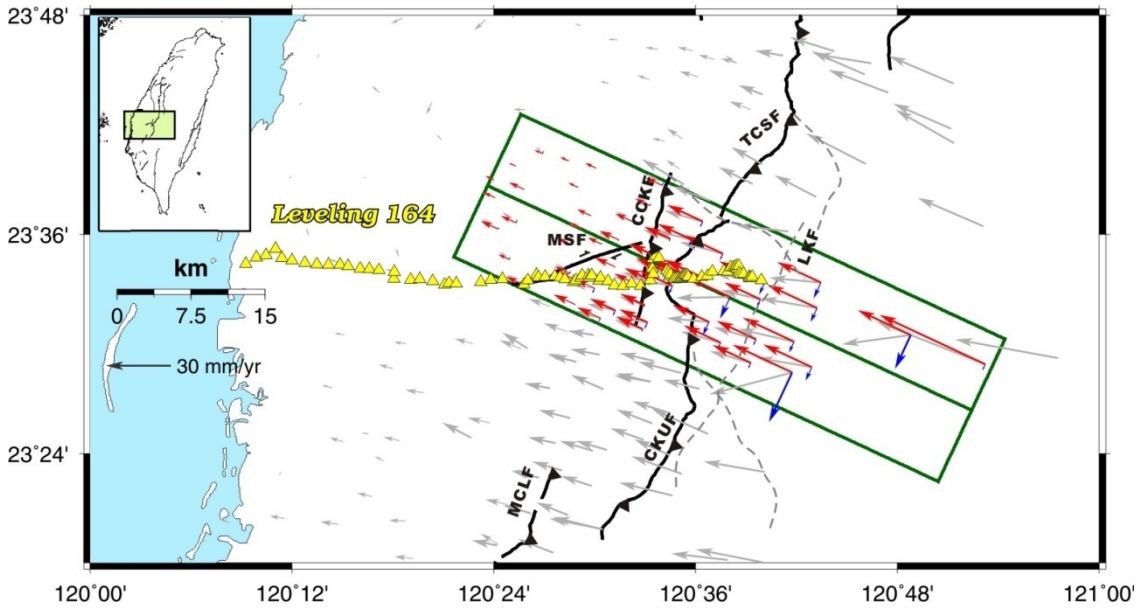


圖 2.65：嘉南地區 GPS 水平速度場與縣 164_金湖至瑞峰水準測線分布圖。灰色箭頭為 GPS 水平速度向量，紅色箭頭為剖面中水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色箭頭為剖面中水平速度向量平行斷層走向之分量。黃色三角形為水準點位置。MSF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、TCSF 為大尖山斷層、LKF 為鹿窟斷層、CKUF 為觸口斷層、MCLF 為木屐寮斷層。

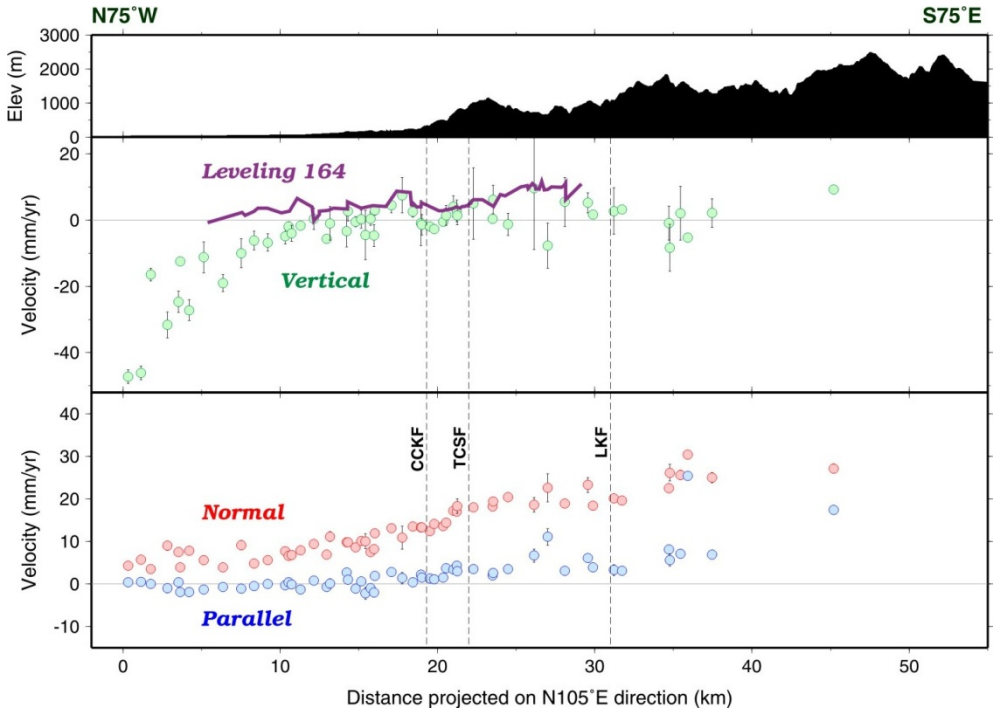


圖 2.66：圖 2.61 中剖面內水準與 GPS 速度場比較圖。紫色實線為水準垂直速度值，綠色圓圈為 GPS 垂直速度值，紅色圓圈為水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色圓圈為水平速度向量平行斷層走向之分量。CCKF 為九芎坑斷層、TCSF 為大尖山斷層、LKF 為鹿窟斷層。

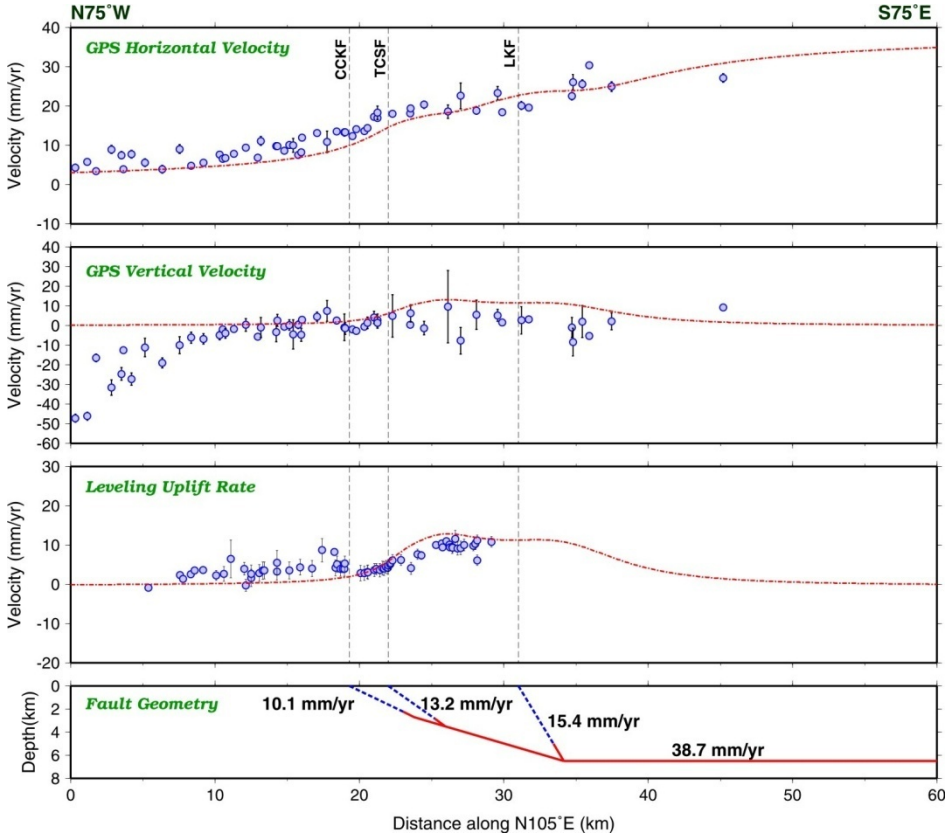


圖 2.67：斷層模擬結果。由上而下分別是 GPS 水平速度分量、GPS 垂直分量、精密水準抬升速率及斷層幾何分布。藍色圓圈為觀測值；紅色虛線為計算值。藍色虛線為斷層鎖定位置，紅色實線為斷層潛移區段。灰色虛線為斷層投影位置。CCKF 為九芎坑斷層、TCSF 為大尖山斷層、LKF 為鹿窟斷層。

2-2-3 中部地區現今地殼變形分析

2-2-3-1 二維彈性斷層模型

我們利用最小二乘法，藉由反演地表位移量來求解斷層滑移量及斷層幾何參數。解算方法如 2-2-2-1 節所描述。為了求得合理之斷層幾何（斷層傾角、斷層位置、斷層深度、鎖定深度），我們依據 2004 年中央地質調查所報告「台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）—台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析」之構造平衡剖面作為起始模型及約制條件（圖 2.68），利用蒙地卡羅演算法推算最佳之斷層幾何參數。

就資料使用部分，我們將 GPS 水平速度場分解為為垂直斷層與平行斷層走向分量，因為我們是採用 2 維斷層模型，故水平速度場剖面是採用垂直斷層走向之速度分量（圖 2.69）。由於垂直速度場在彰化斷層以西之平原地區直到海岸線間的區域以沉陷為主，反映此地區因人工抽水而造成顯著之地層下陷（圖 2.69），因此爲了避免斷層滑移速率估算錯誤，就縣道 150_北斗至水里水準路線剖面之速度資料，我們主要是採用沉陷速率小於 10 mm/yr 以東之地區（距剖面西側約

5 公里處）的垂直速度值。另外，本區域由西向東分別涵蓋了彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔—雙冬斷層（圖 2.69，根據速度剖面的變化指出（圖 2.69），彰化斷層及車籠埔斷層皆有對應到速度差異，因此本計畫主要針對這二條斷層對地表變形之貢獻進行模擬。

就縣道 150_北斗至水里水準路線剖面，速度資料反演所獲得之最小 L2 norm 值為 36.7 mm/yr，其斷層幾何參數為，彰化斷層向東傾斜 18.5°±2.4°，斷層底部與滑脫面相交深度為 6.0±1.3 km；車籠埔斷層向東傾斜 25.6°±0.9°，斷層底部與滑脫面相接深度為 9.4 ± 1.0 km（圖 2.69）。彰化及車籠埔斷層之斷層滑移速率分別為 18.3±13.9 mm/yr 及 25.5±8.7 mm/yr；其鎖定深度則分別是 2.9±1.2 km 與 6.8 ± 1.2 km（圖 2.69）。

2-2-3-2 討論

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

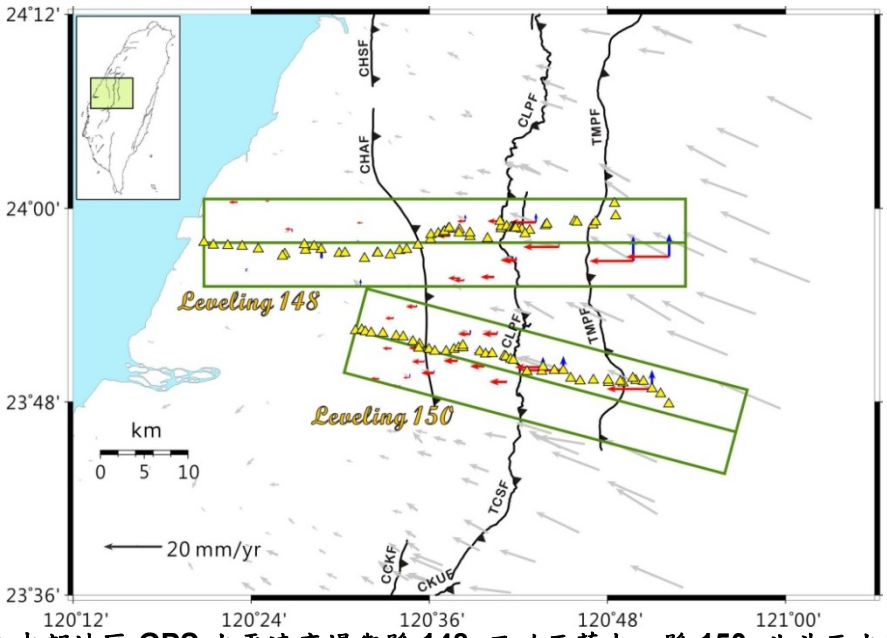


圖 2.68：中部地區 GPS 水平速度場與縣 148_王功至草屯、縣 150_北斗至水里水準測線分布圖。灰色箭頭為 GPS 水平速度向量，紅色箭頭為剖面中水平速度向量垂直斷層走向之分量，藍色箭頭為剖面中水平速度向量平行斷層走向之分量。黃色三角形為水準點位置。CHSF 為清水斷層、CHAF 為彰化斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TCSF 為大尖山斷層、CKUF 觸口斷層、TMPF 為大茅埔—雙冬斷層。

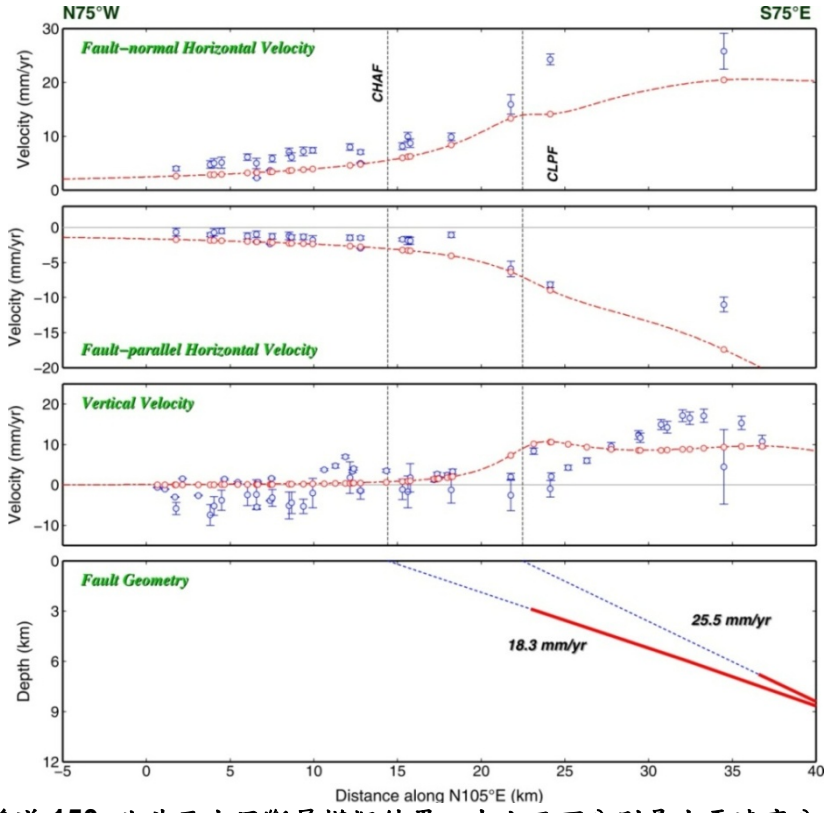


圖 2.69：縣道 150_北斗至水里斷層模擬結果。由上而下分別是水平速度分量、垂直速度分量及斷層幾何分布。藍色圓圈為觀測值；紅色虛線為計算值。藍色虛線為斷層鎖定位置，紅色實線為斷層潛移區段。灰色虛線為斷層投影位置。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

三、井下應變儀之研究方法與成果

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

目前井下應變儀部份，除了持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性，並繼續處理與計算分析各測站資料，包含：移除不正常的突出資料、估計井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢與估計因自然環境對應變資料的影響量，其中包含地下水影響與氣壓影響分量的初步估計與移除，並以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與地震相關的應變"異常"。

3-1 井下應變儀資料處理

今年將所有井下應變儀測站資料一起處理，其中大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)、錦和國小(JING)、瑞峰國小(LMMT)、梅花國小(PFMT)、明德中學(SANS)、樹林(SLIN)、中興國小(TSUN)、太興國小(TAIS)以及達邦(DARB)等 10 站是屬於 GTSM21 井下應變儀，與在臺灣最早裝置的三個站曾文水庫南(RST)、曾文水庫北(RNT)及甲仙十八灣三站(ECT)的 GTSM1000 儀器不同。資料處理以 10 分鐘一筆的資料為處理主軸，其所有測站資料期間如表 3.1 所示。由於甲仙十八灣(ECT)於 2004 年 12 月 5 之後資料品質不佳，且 2007 年後無資料，未來不再處理 ECT 測站資料，目前本報告資料只呈現至 2004 年。

表 3.1：井下應變儀測站的經緯度與資料日期。

編號	測站代碼	站名	資料起迄時間		Coordinate		
			起始	結束	經度	緯度	高程(m)
1	RST	曾文水庫南	2004/07/18	2011/10	120°30'4.65	23°14'10.97	110
2	RNT	曾文水庫北	2004/04/15	2011/10	120°35'53.58	23°19'39.92	252
3	ECT	甲仙十八灣	2004/04/16	2007/07	120°34'57.69	23°08'29.21	448
4	PFMT	梅花國小	2005/09/14	2011/10	121°12'1.73	24°40'43.69	496
5	LMMT	瑞峰國小	2005/06/07	2011/10	121°6'49.85	24°39'47.49	247
6	BMMT	大坪國小	2005/06/09	2011/10	121°3'1.92	24°40'34.52	195
7	TSUN	中興國小	2006/06/06	2011/10	120°41'21.04	23°28'42.48	1370
8	TAIS	太興國小	2006/03/04	2011/10	120°37'36.95	23°32'34.1	790
9	CINT	新樂國小	2006/11/15	2011/10	121°14'32.12	24°43'57.08	505.2
10	DARB	達邦	2006/11/19	2011/10	120°44'29.39	23°27'22.27	952.8
11	JING	錦和國小	2007/11/20	2011/10	121°28'49.31	24°59'35.89	19
12	SANS	明德中學	2007/11/12	2011/10	121°21'21.01	24°54'28.51	80
13	SLIN	樹林國小	2009/09/11	2011/10	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。另外為了考慮孔隙與水泥的恢復效應，需要用到儀器型態與裝儀器的時間，也一併列入表 3.2 中。

表 3.2：井下應變儀測站的安裝日期、儀器與各分量的方位角。

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

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

3-1-1 LEVEL-0

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

在本次的測站，資料的起始期間自 2003 年 10 月到 2009 年 9 月都有，有三個測站有較明顯問題，未來可以建議可以首先對這三個測站進行維護與保養的工作：

(1) 瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理，如圖 3.1 所示。

(2) 甲仙十八灣(ECT)因雷擊而故障，於 2004 年 12 月之後也無資料。

(3) 曾文水庫南(RST)的 CH1 感應器於 2005 年 4 月之後一直都沒有接收到資料(圖 3.2)。

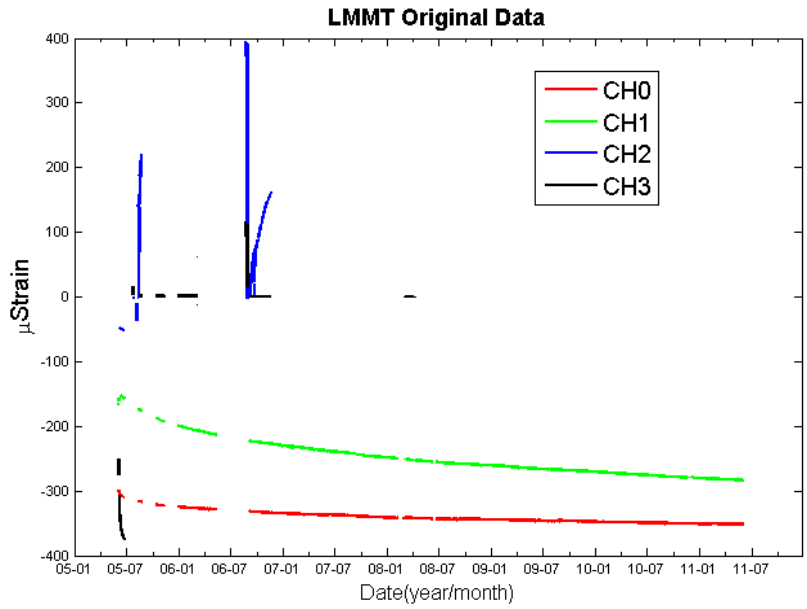


圖 3.1：瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料之異常狀況。

3-1-2 LEVEL-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正

儀器 GTSM21(圖 D.4)中

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

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

本儀器的 $d_1 = 200\mu m$；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 $1/2 \times 10^8 = 50{,}000{,}000$，此時 $R_0/(1-R_0) = 1.0$，其餘時間所得的變形量可相對於之前 t = 0 時間之相對變形。由此公式所求得各測站的資料轉變成應變後，如圖 3.2 至圖 3.13 所示。

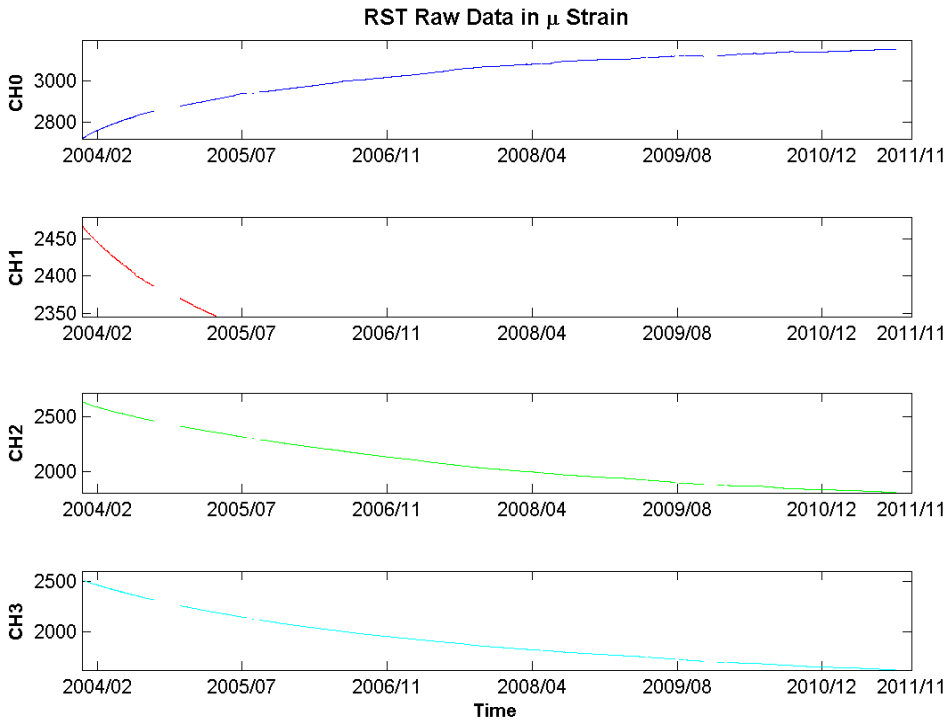


圖 3.2：曾文水庫南測站應變分量。2003-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

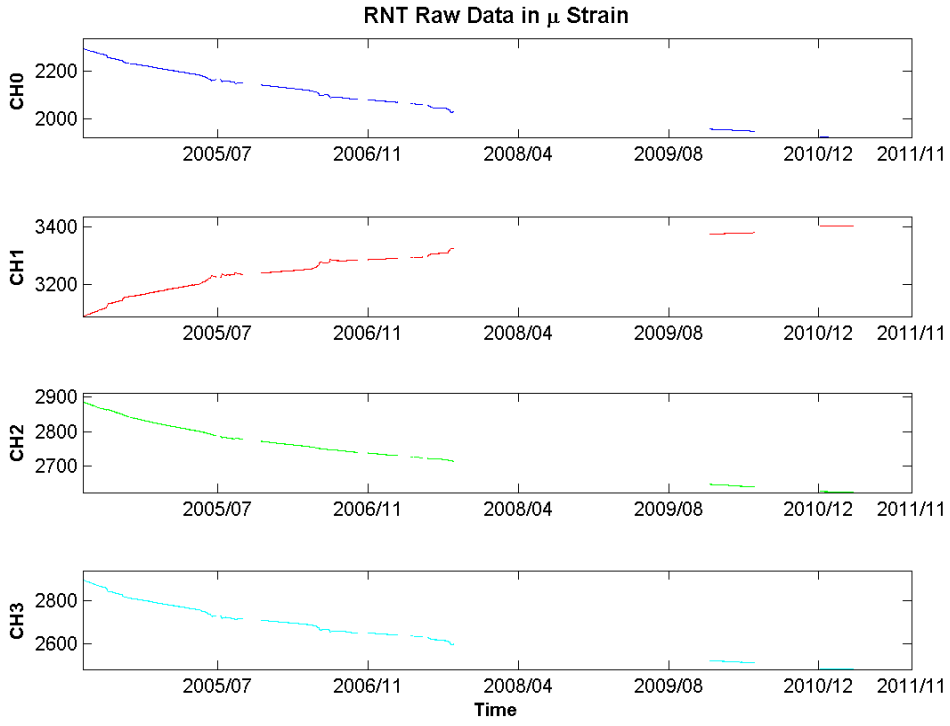


圖 3.3：曾文水庫北測站應變分量。2003-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

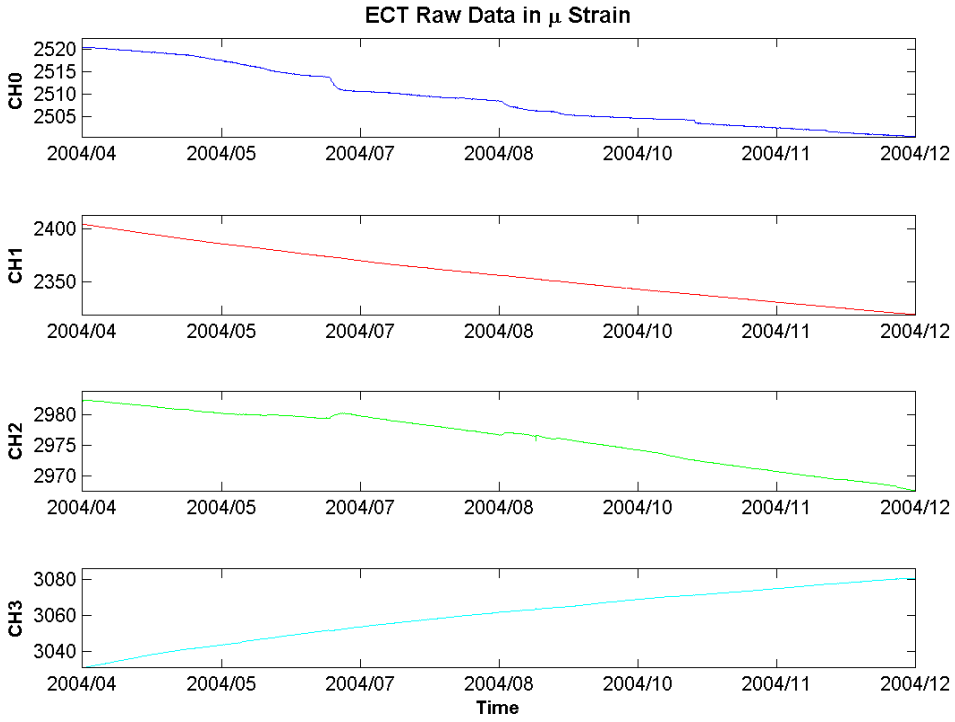


圖 3.4：甲仙十八灣測站應變分量。2003-2004 年的資料轉變成應變後，各分量之資料。

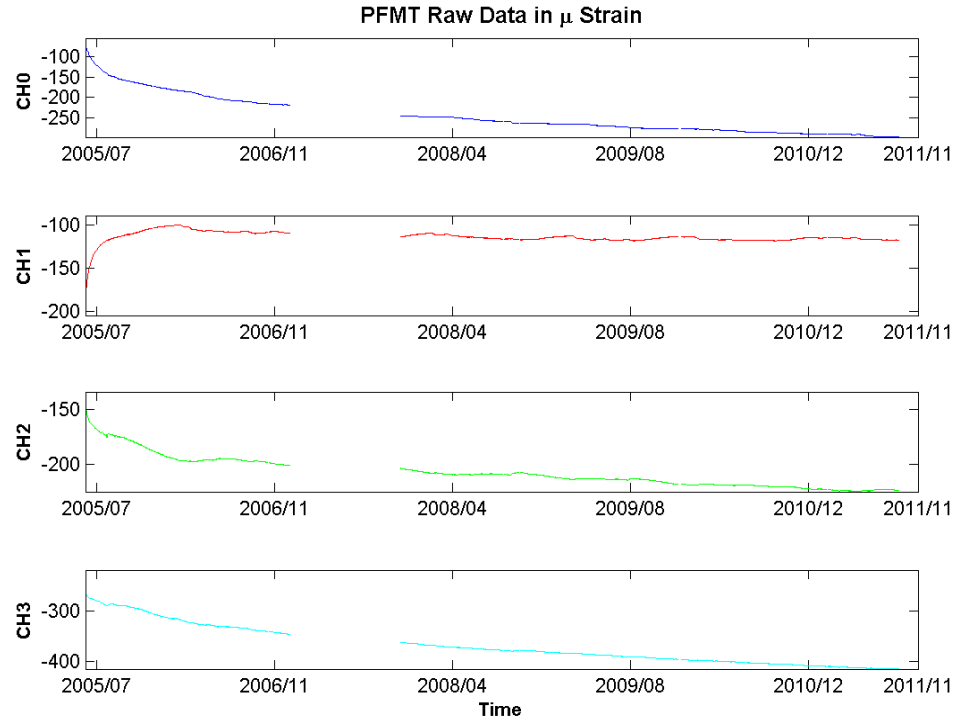


圖 3.5：梅花國小測站應變分量。2005-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

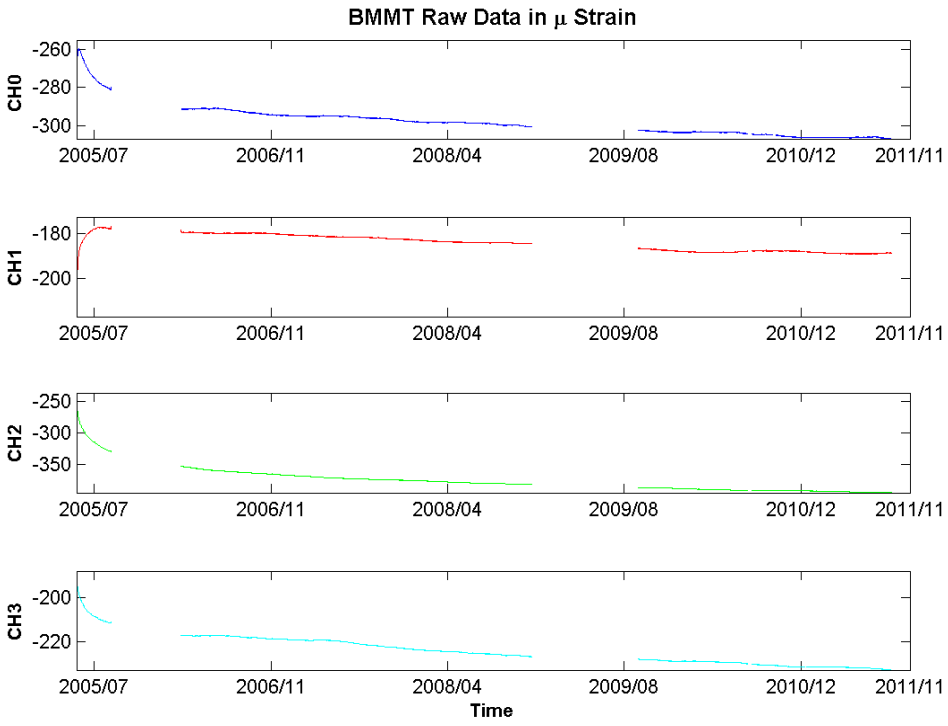


圖 3.6：大坪國小測站應變分量。2005-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

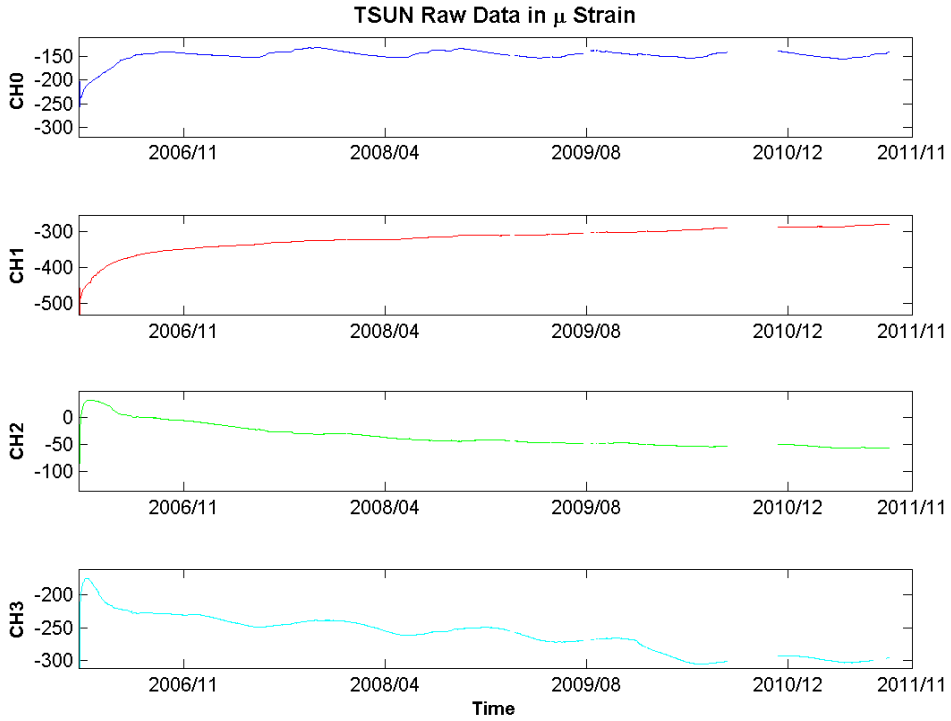


圖 3.7：中興國小測站應變分量。2006-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

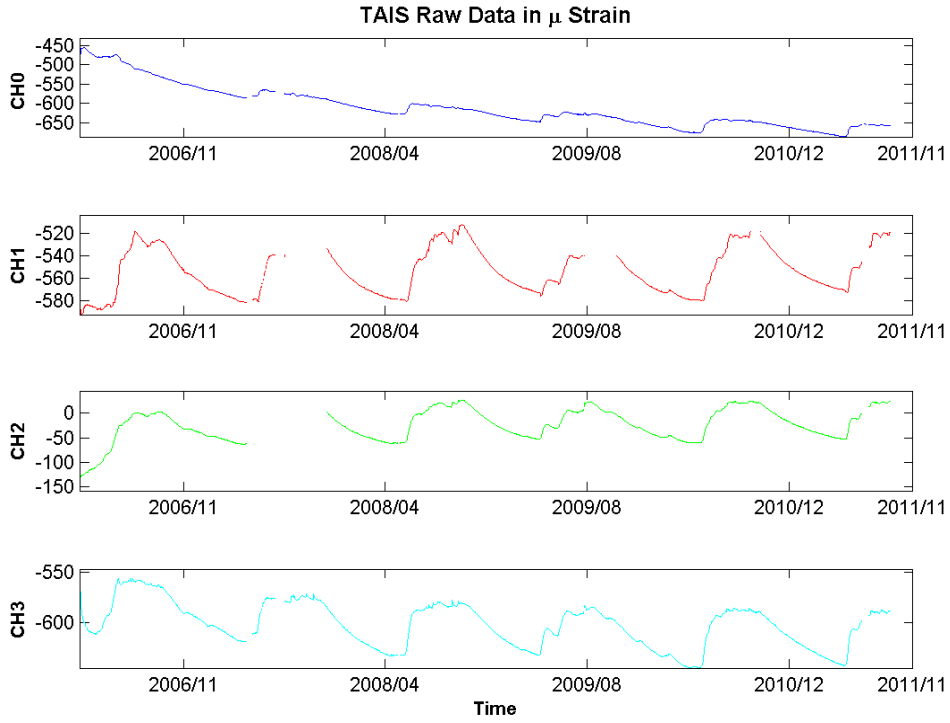


圖 3.8：太興國小測站應變分量。2006-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

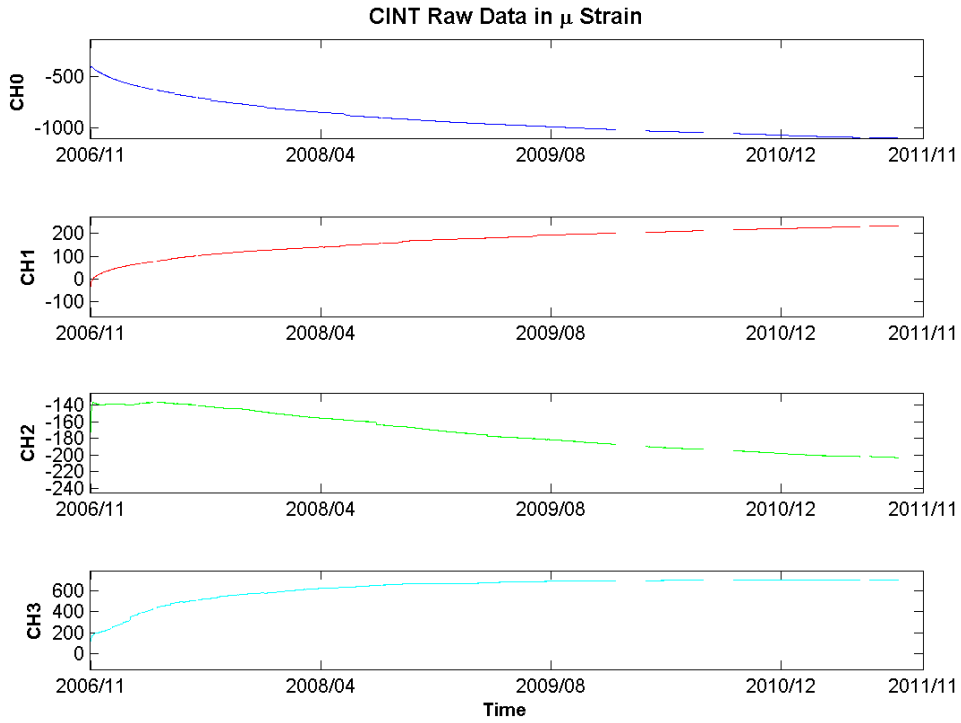


圖 3.9：新樂國小測站應變分量。2006-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

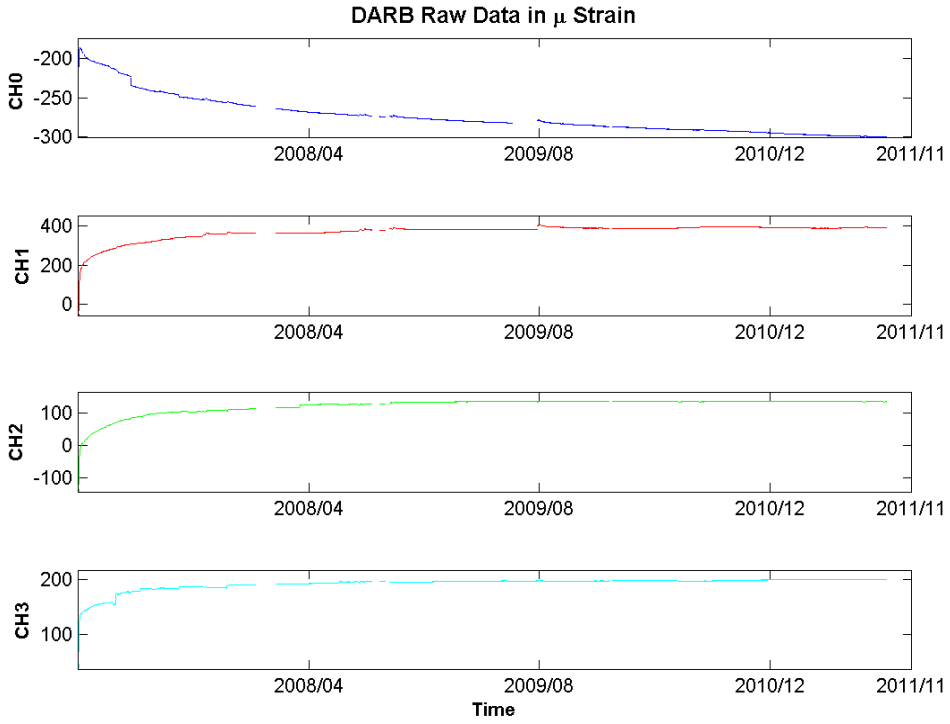


圖 3.10：達邦測站應變分量。2006-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

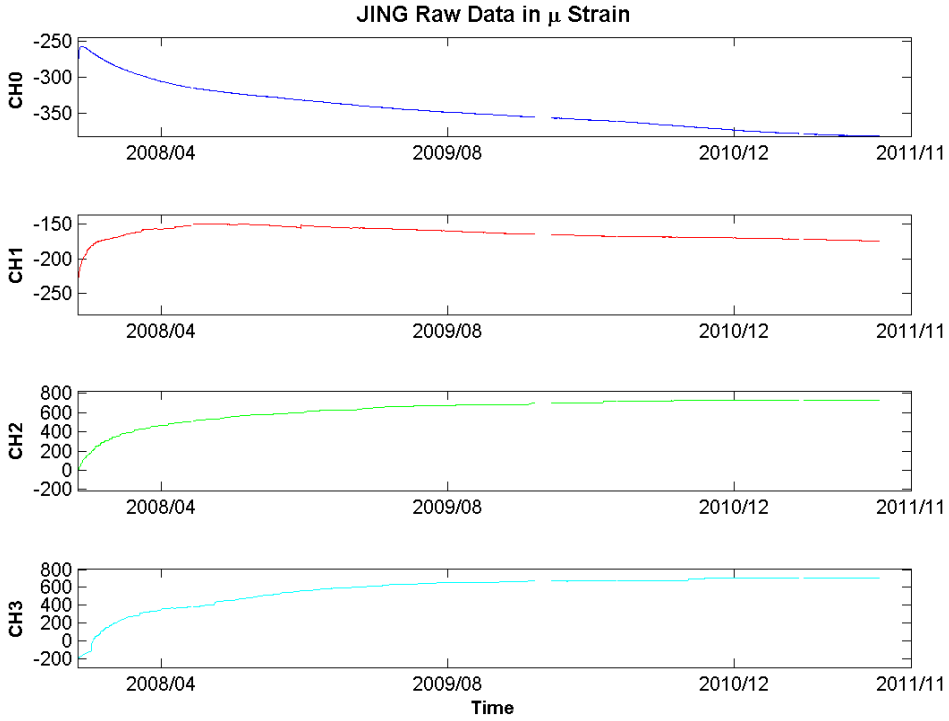


圖 3.11：錦和國小測站應變分量。2007-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

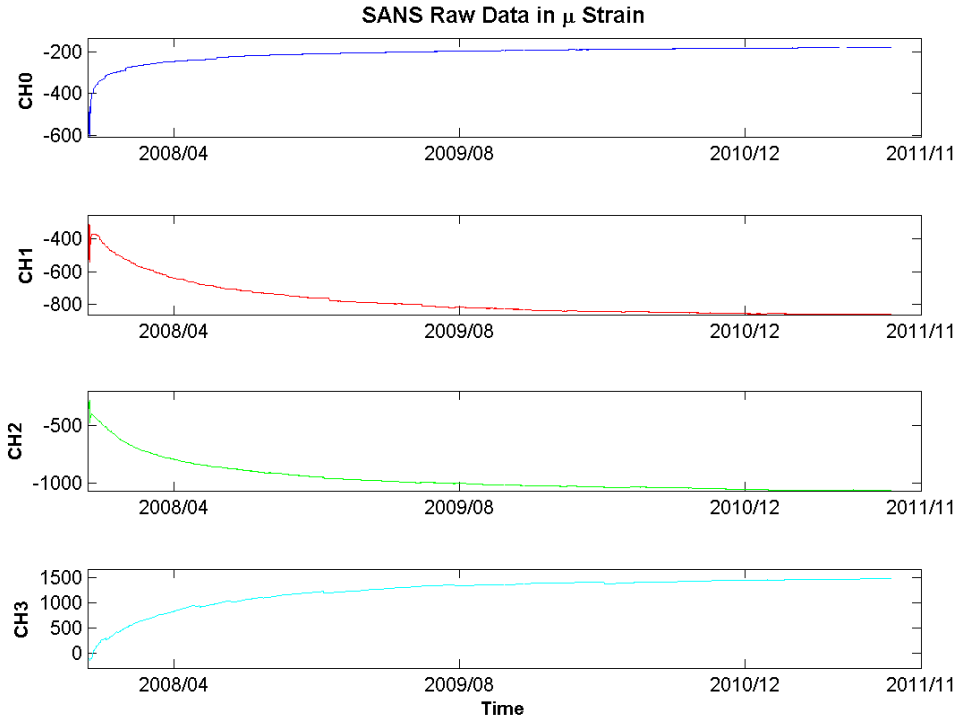


圖 3.12：明德中學測站應變分量。2007-2011 年 10 月資料轉變成應變後，各分量之資料。

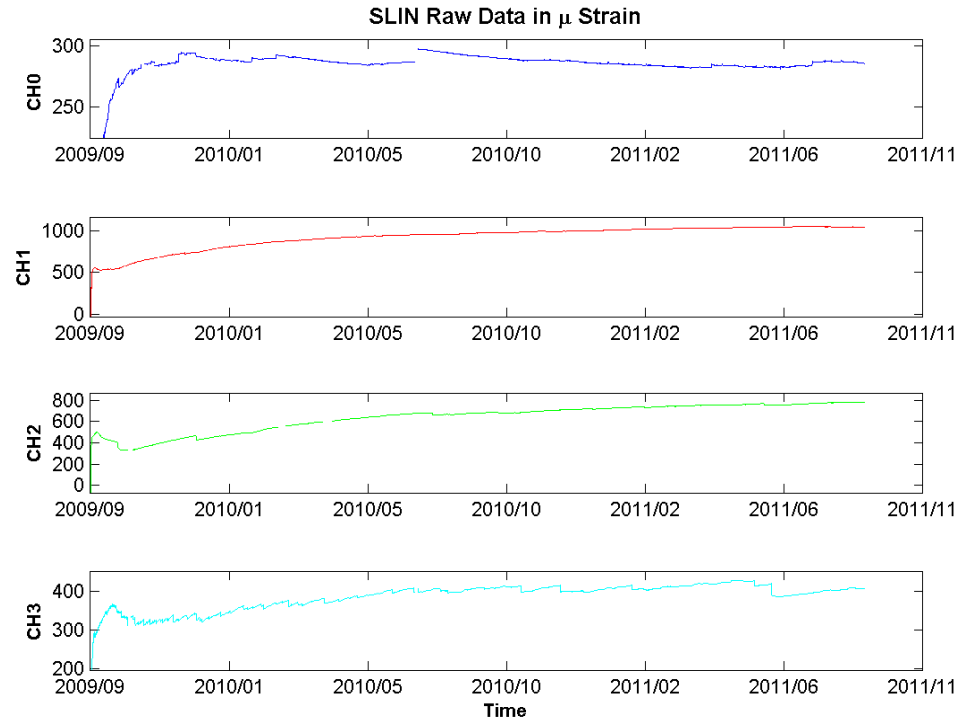


圖 3.13：樹林觀測站應變分量。2009-2011 年 10 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

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

3-1-3 LEVEL-2：包含正確原始面積應變、剪應變

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

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

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，

$\cos2\theta_2=\cos2(\theta_1+90°)=-\cos2\theta_1$；而 $\sin2\theta_2=\sin2(\theta_1+90°)=-\sin2\theta_1$，因此，若前三個方向有良好的應變記錄，則可簡易求得 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量，其中 ε_a 是面積應變，γ_1 是跨過西北(Northwest)或東北(Northeast)平面的最大純工程剪斜(Engineering Shear)應變量，而 γ_2 是跨過東西或南北平面的最大純工程剪斜應變量，也就是說，γ_1 在東西或南北平面產生了最大的延伸(Extension)量，而 γ_2 在西北或東北平面產生了最大的延伸量。

為了資料分析及解釋，將各分量之資料轉換成面積應變與剪斜應變則是最基本的資料處理程序。在此同時，可由前三個方向所估計出來的三個工程量 ε_a、γ_1、γ_2 來估計第四個分量之值，以作為檢核之用。圖 3.14 至圖 3.25 為轉換成 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量所的的結果。

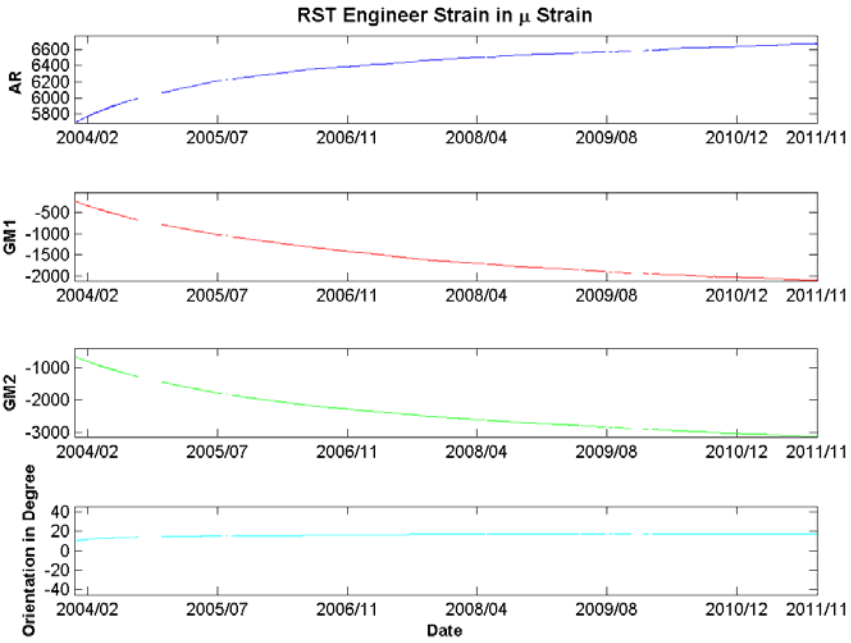


圖 3.14：曾文水庫南測站應變方向。於 2003 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

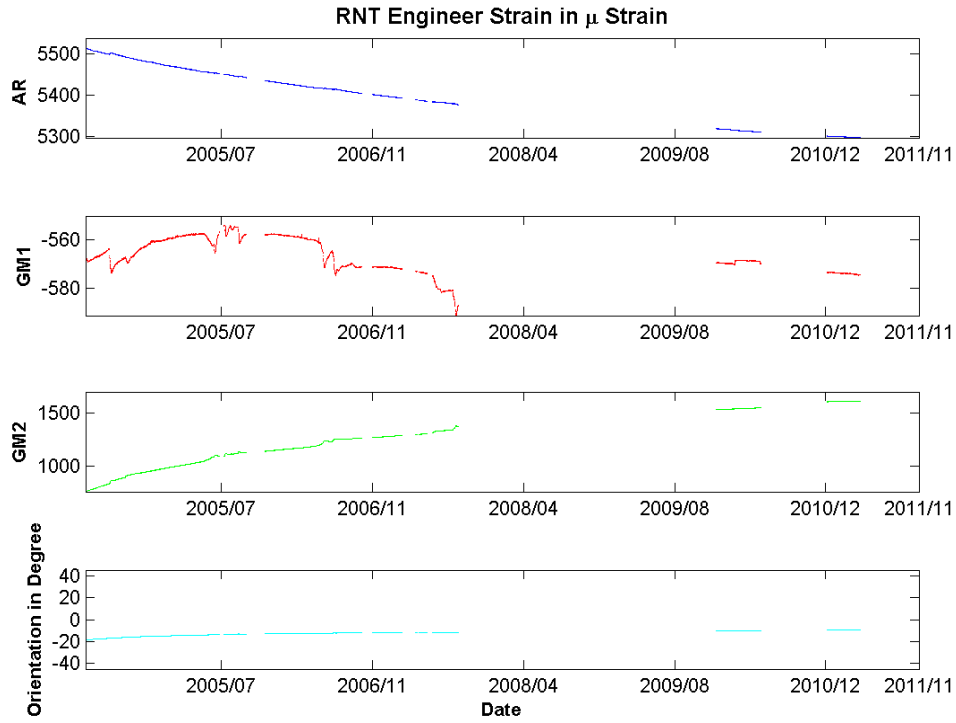


圖 3.15：曾文水庫北測站應變方向。於 2003 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

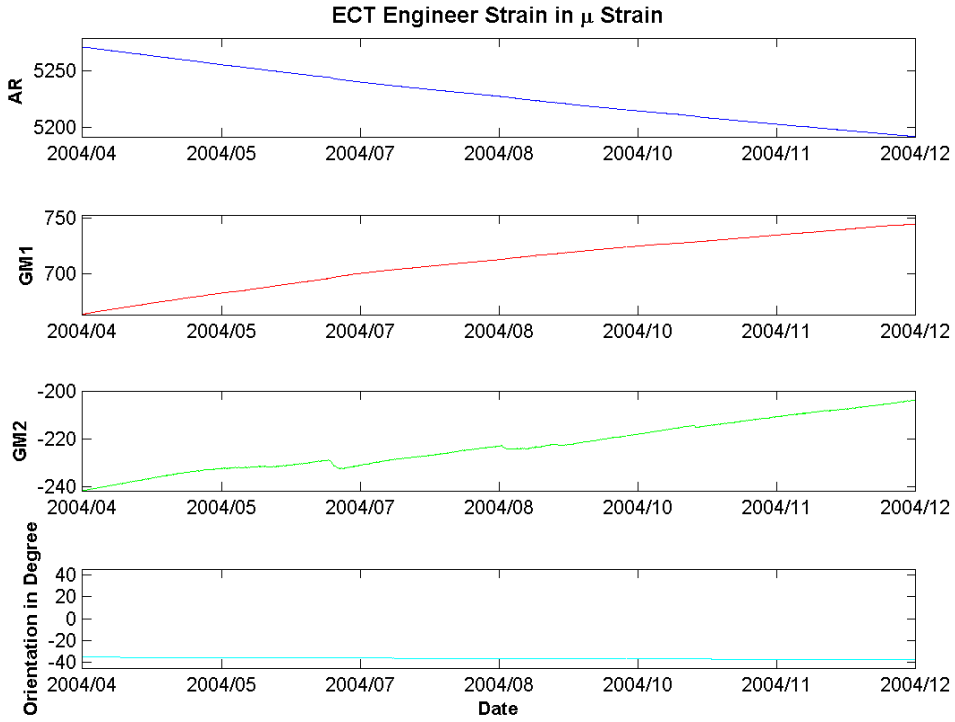


圖 3.16：甲仙十八灣測站應變方向。於 2003 年到 2004 年資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

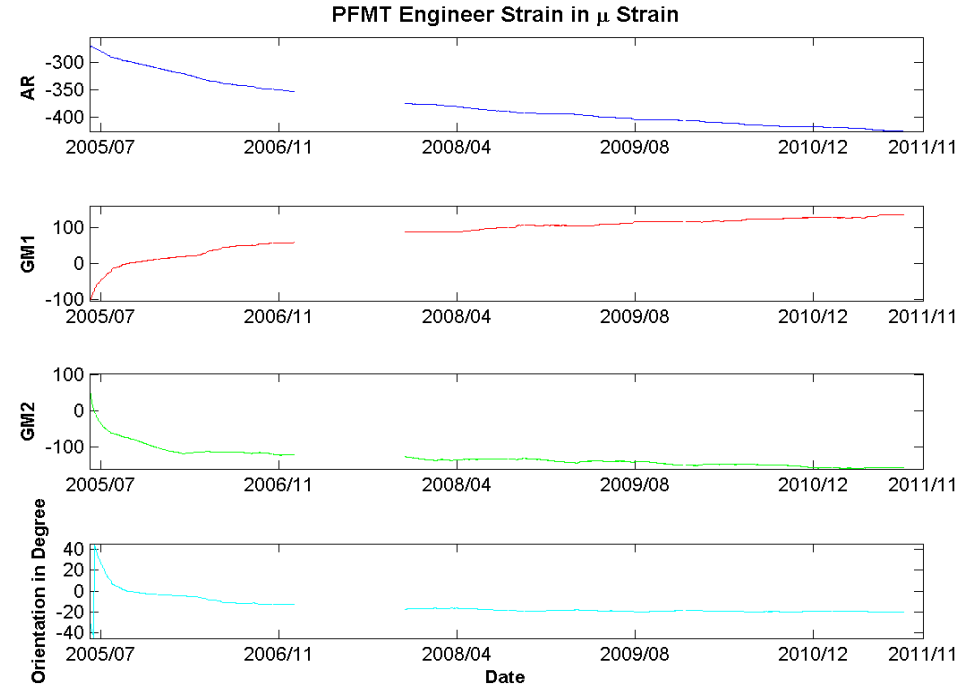


圖 3.17：梅花國小測站應變方向。於 2005 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

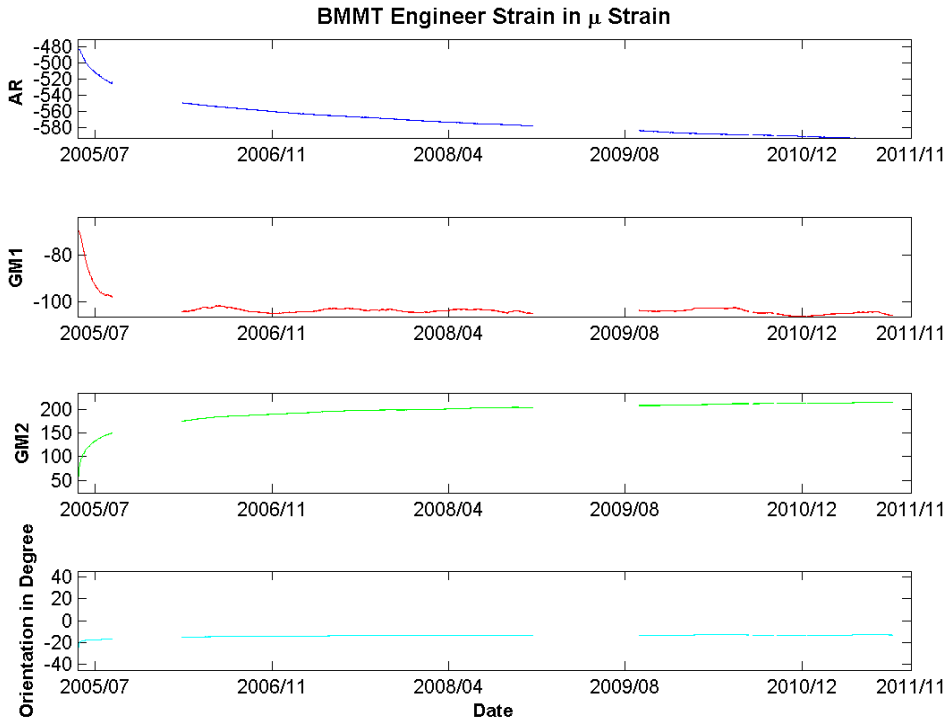


圖 3.18：大坪國小測站應變方向。於 2005 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

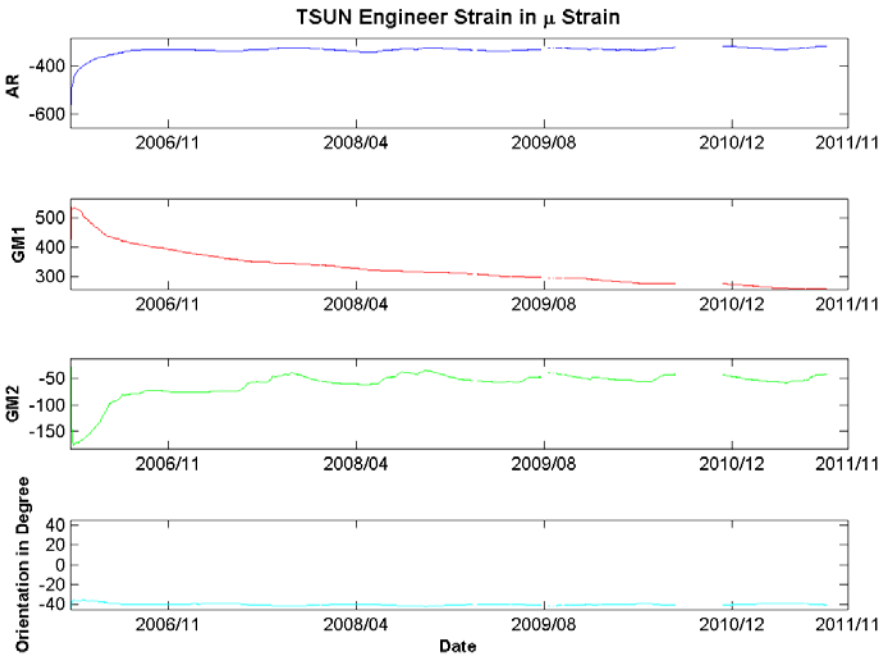


圖 3.19：中興國小測站應變方向。於 2006 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

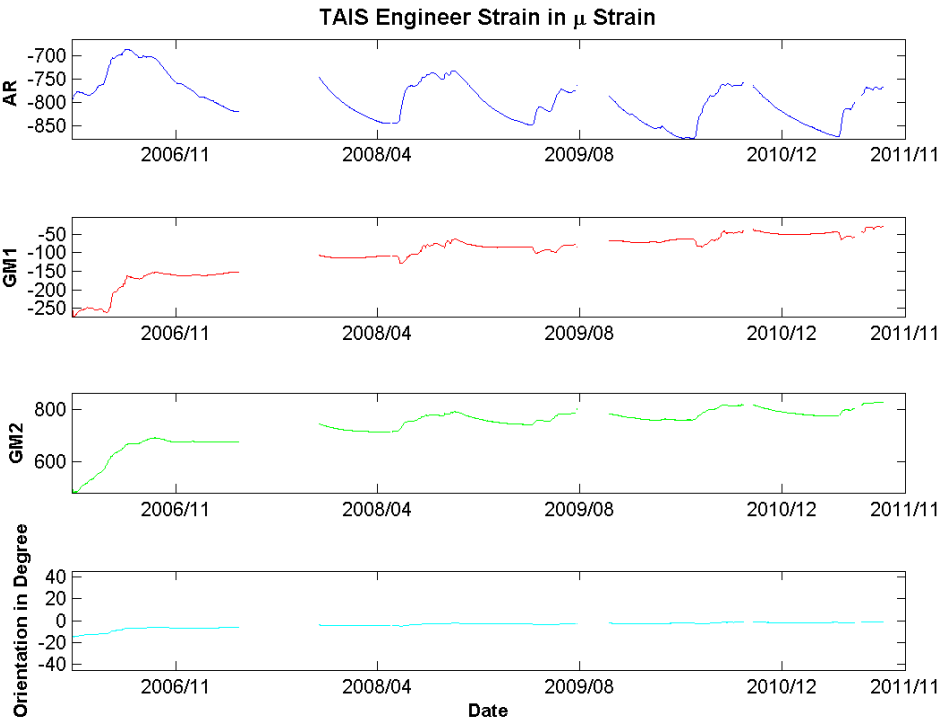


圖 3.20：太興國小測站應變方向。於 2006 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

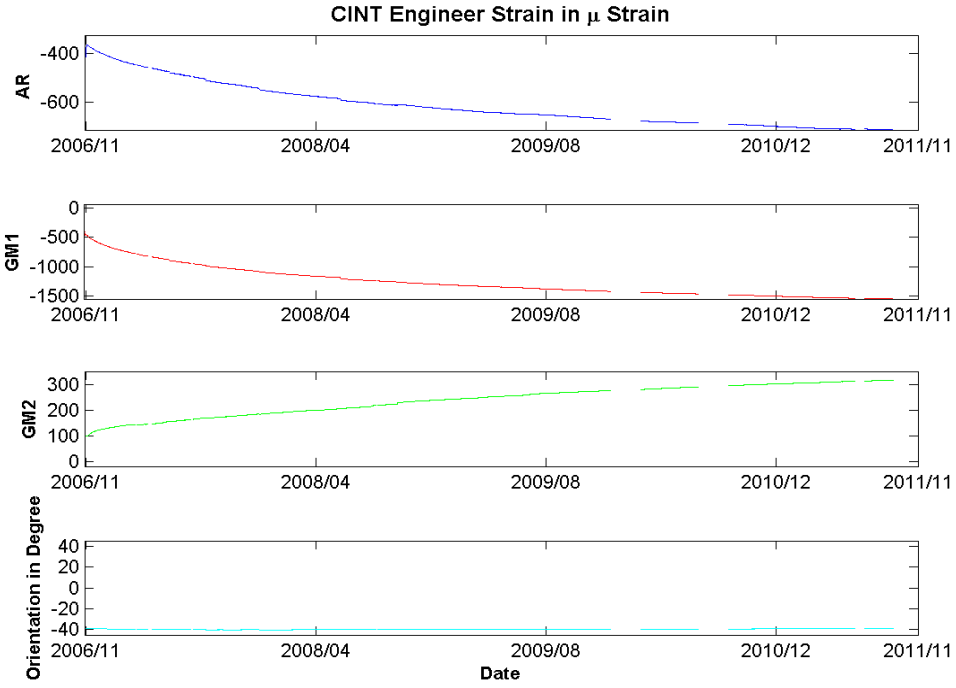


圖 3.21：新樂國小測站應變方向。於 2006 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

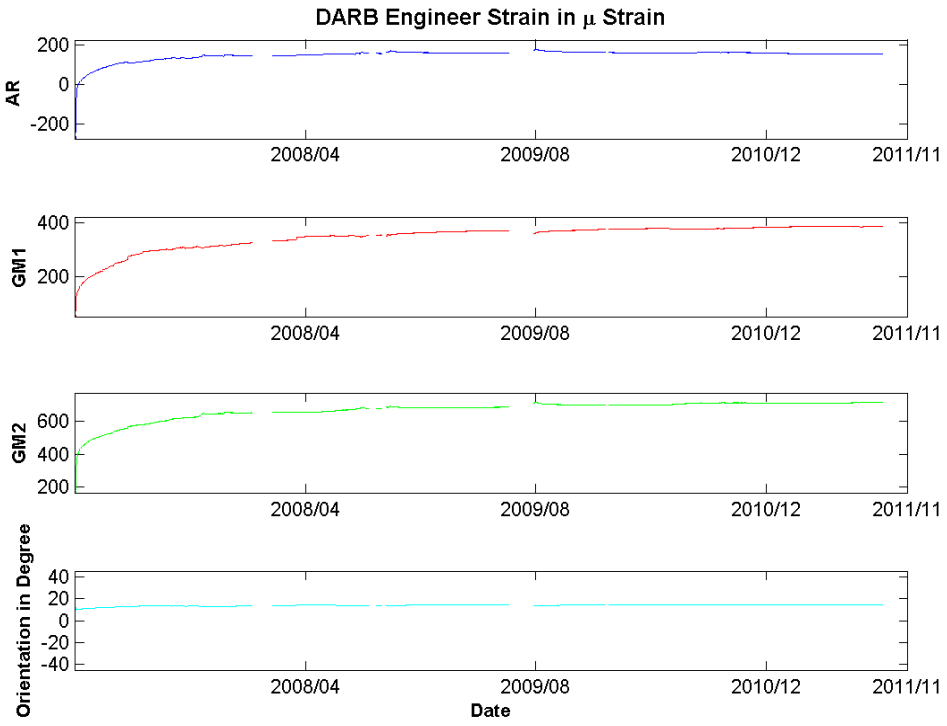


圖 3.22：達邦國小測站應變方向。於 2006 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

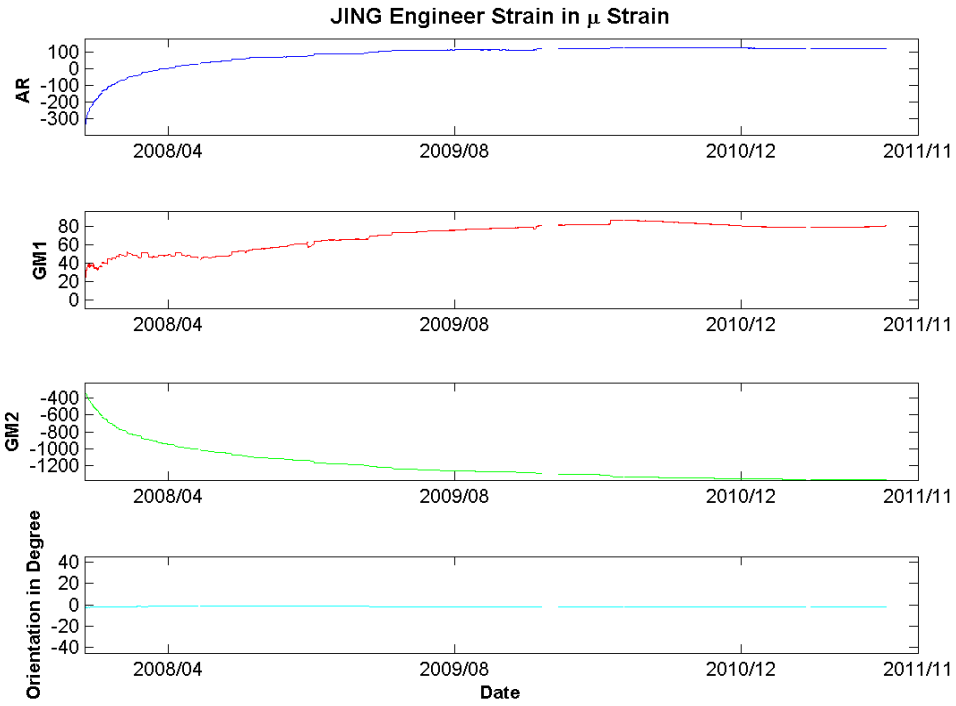


圖 3.23：錦和國小測站應變方向。於 2007 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

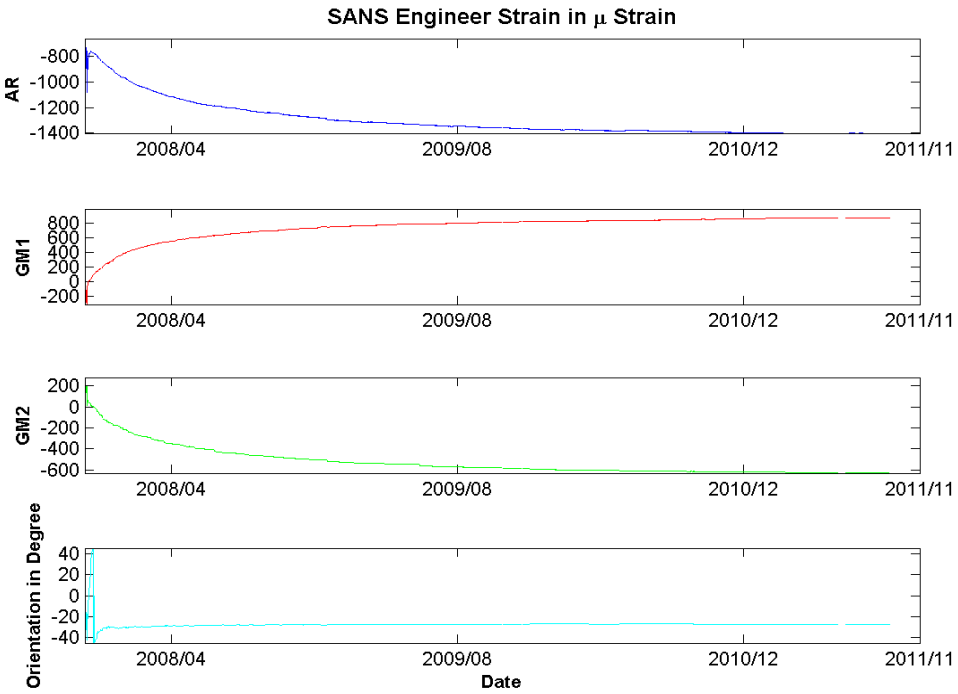


圖 3.24：明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

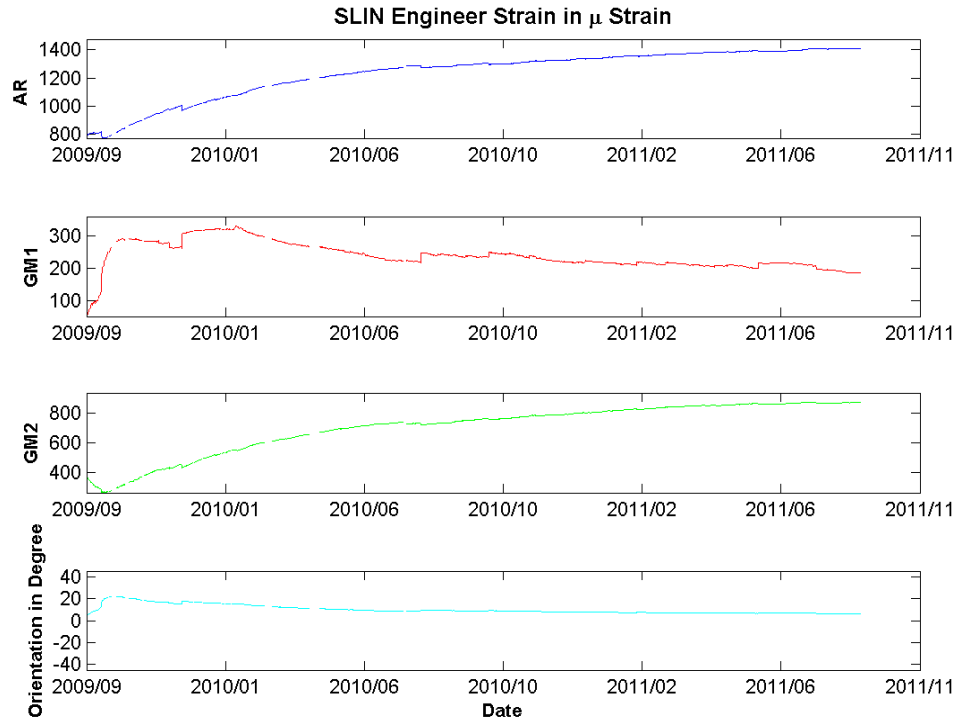


圖 3.25：樹林測站應變方向。於 2009 年到 2011 年 10 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

3-1-4 井孔回復效應與水泥膨脹效應的估算與濾除

當井下應變儀的儀器安裝在井洞之內後，用不收縮水泥封井，並藉以結合岩石與儀器。當不縮收水泥乾涸時，最先數十小時會釋放出許多熱量，導致溫度急遽上升，其所造成的效應在不同應變儀會有不同的反應，而且相當複雜，通常棄而不用。之後在數年之內，被挖開的井會慢慢恢復，岩石、水泥與儀器會結合成一體，不收縮水泥也會些許膨脹，慢慢的達到平衡，這兩種效應都會以自然對數的負指數方式衰減(附件光碟-附錄 D)，因此可藉由函數回歸模式來做修正，以下為各測站回歸模式的參數與修正後的資料(圖 3.26 至圖 3.37)。

RST	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = -57.14 (-157.9, 43.66) b = 330 (176.1, 483.9) c = 410.3 (335.7, 484.8) d = 791 (591, 991) e = -4.439e-014 (fixed at bound) f = 4862 (4836, 4889)	Goodness of fit: SSE: 9233 R-square: 0.9999 Adjusted R-square: 0.9999 RMSE: 0.424

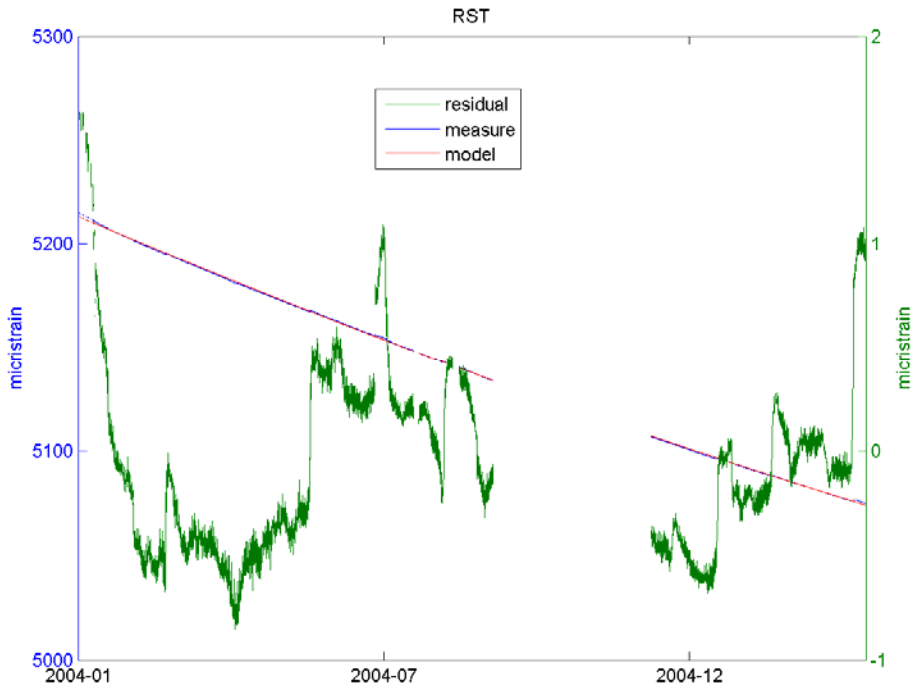


圖 3.26：曾文水庫南測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

RNT	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 11.52 (11.34, 11.69) b = 186 (183.1, 188.9) c = 890.4 (831.2, 949.6) d = 4664 (4477, 4851) e = 0.06619 (0.06078, 0.07161) f = 4614 (4555, 4674)	Goodness of fit: SSE: 1.377e+05 R-square: 0.9998 Adjusted R-square: 0.9998 RMSE: 0.9345

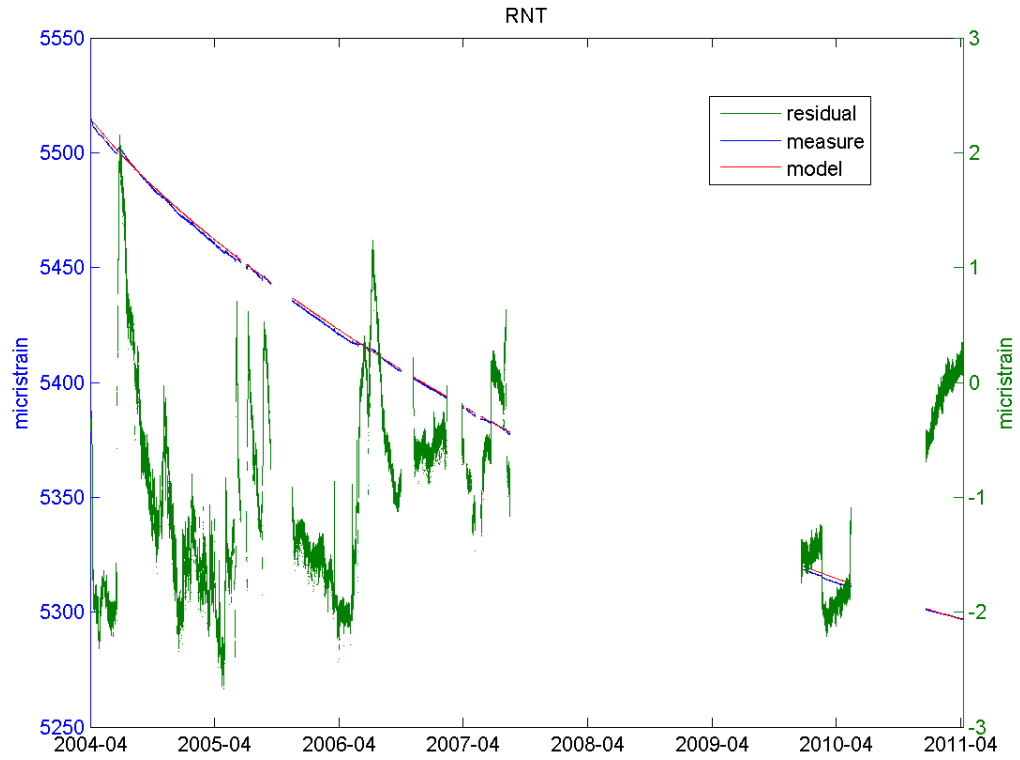


圖 3.27：曾文水庫北測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

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

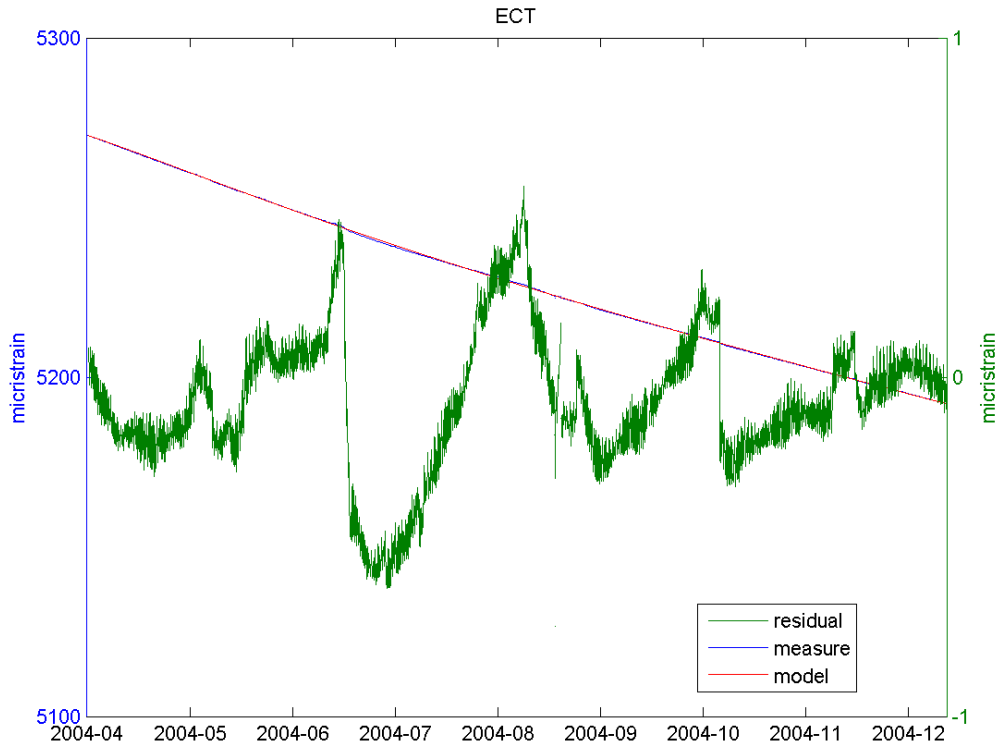


圖 3.28：甲仙十八灣測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

PFMT	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 10.94 (10.85, 11.03) b = 29.19 (28.71, 29.67) c = 85.75 (85.69, 85.81) d = 451 (450.1, 451.9) e = -0.02809 (-0.02813, -0.02805) f = -362 (-362, -361.9)	Goodness of fit: SSE: 3.23e+05 R-square: 0.9991 Adjusted R-square: 0.9991 RMSE: 1.136

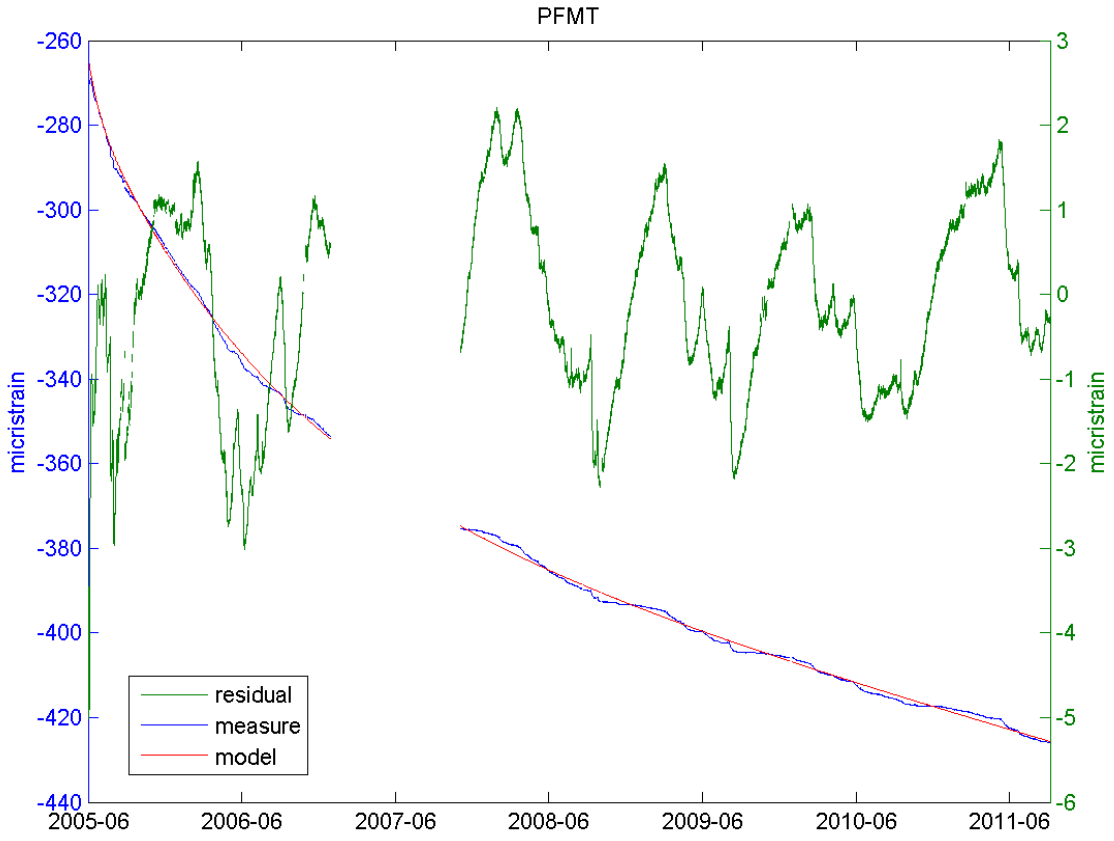


圖 3.29：梅花國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

BMMT	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 55.77 (55.74, 55.81) b = 76.91 (76.83, 76.99) c = 44.42 (44.05, 44.78) d = 1085 (1076, 1094) e = -0.007458 (-0.007573, -0.007343) f = -582.4 (-582.8, -582)	Goodness of fit: SSE: 1.377e+05 R-square: 0.9998 Adjusted R-square: 0.9998 RMSE: 0.9345

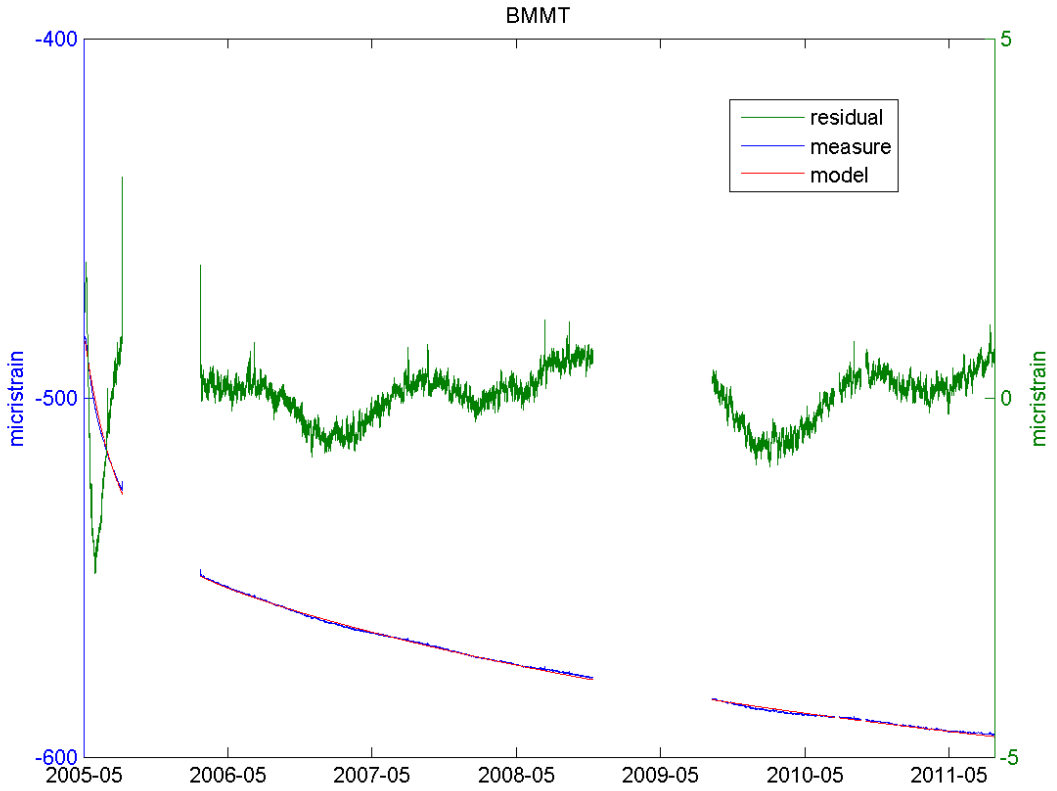


圖 3.30：大坪國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

TSUN	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = -138.1 (-138.4, -137.9) b = 49.64 (49.48, 49.8) c = -0.0006065 (-15.58, 15.58) d = 5735 (-7.103e+007, 7.104e+007) e = 0.003385 (0.001844, 0.004926) f = -335.7 (-351.3, -320.2)	Goodness of fit: SSE: 5.692e+006 R-square: 0.9177 Adjusted R-square: 0.9177 RMSE: 4.864

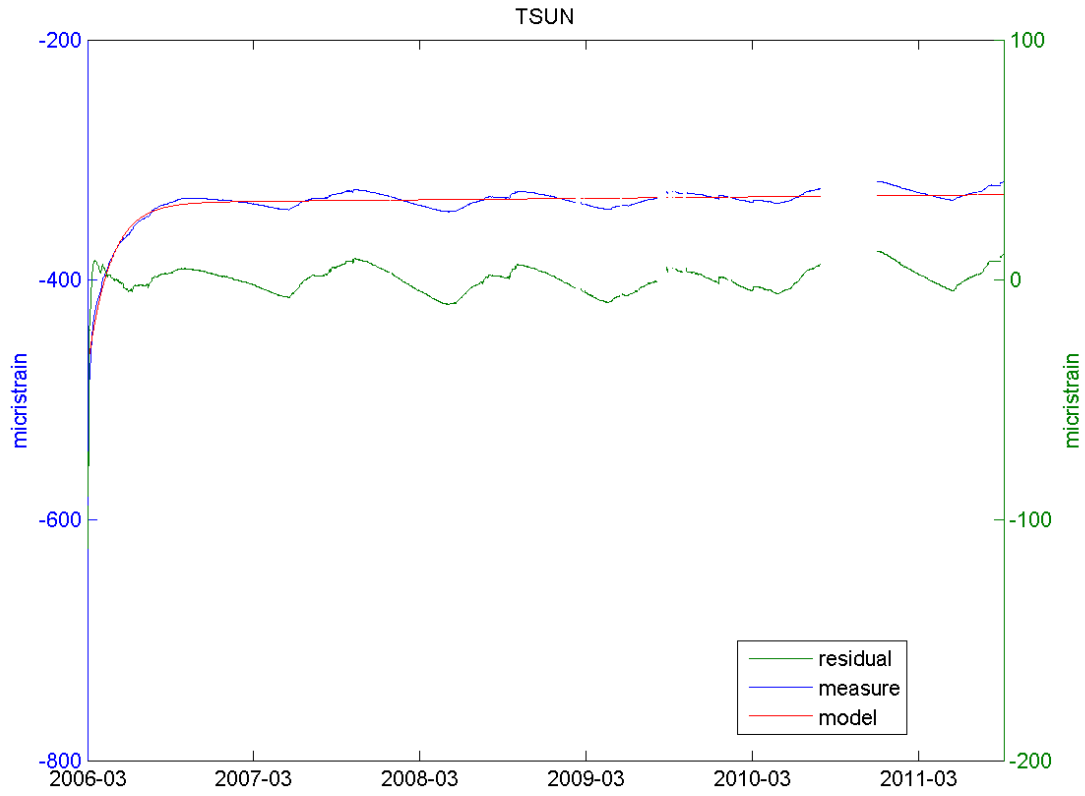


圖 3.31：中興國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

TAIS	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 37.87 (-127.7, 203.4) b = 399.1 (-334, 1132) c = 4.316 (-2.59e+004, 2.591e+004) d = 4609 (-1.72e+007, 1.721e+007) e = -0.03332 (-2.409, 2.342) f = -773.7 (-2.684e+004, 2.529e+004)	Goodness of fit: SSE: 3.108e+008 R-square: 0.3708 Adjusted R-square: 0.3708 RMSE: 37.15

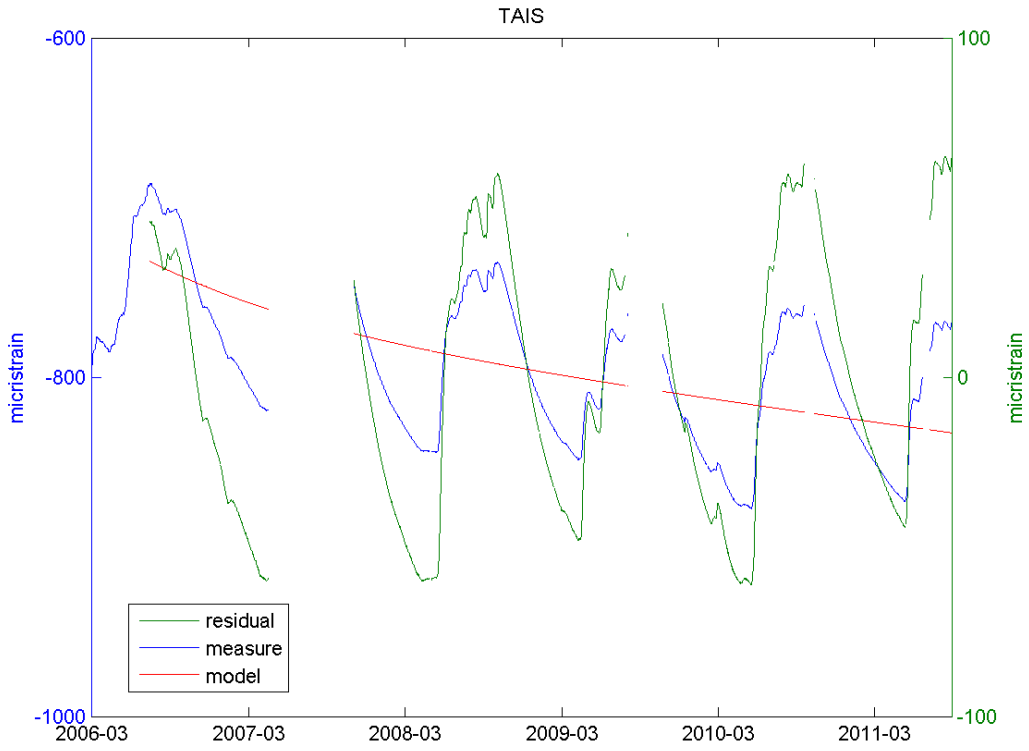


圖 3.32：太興國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

CINT	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 26.91 (26.75, 27.07) b = 19.63 (19.4, 19.85) c = 225.1 (225, 225.3) d = 397.2 (396.7, 397.7) e = -0.06403 (-0.06414, -0.06391) f = -610.6 (-610.8, -610.4)	Goodness of fit: SSE: 5.179e+05 R-square: 0.9996 Adjusted R-square: 0.9996 RMSE: 1.656

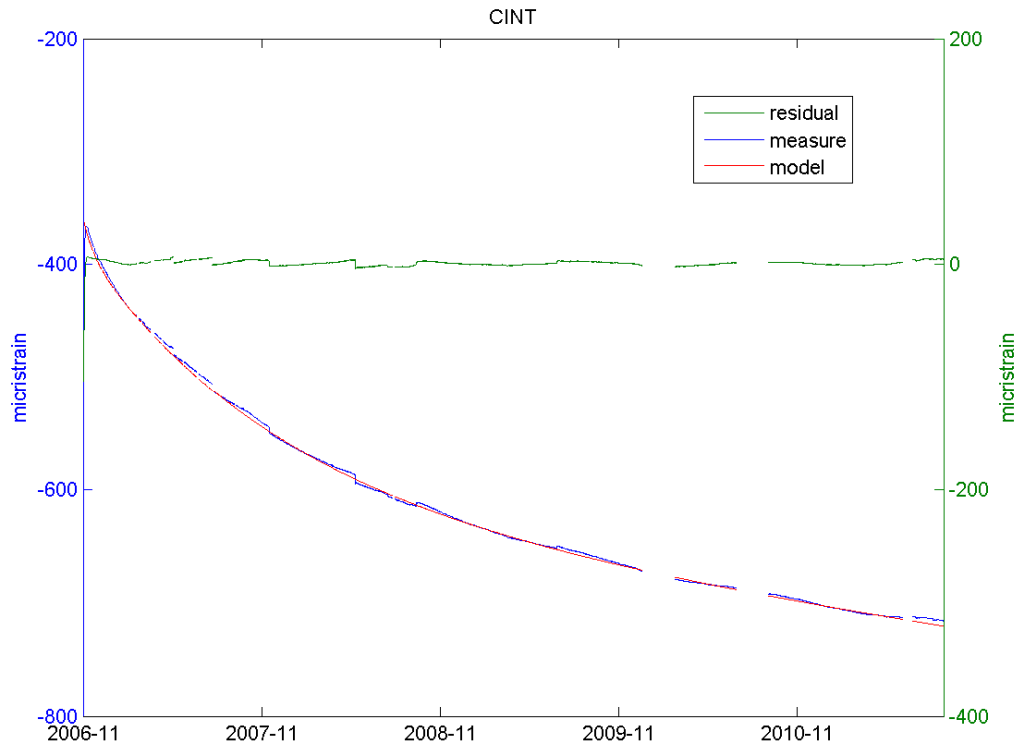


圖 3.33：新樂國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

DARB	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = -155.6 (-156.1, -155.1) b = 10 (9.938, 10.06) c = -107.9 (-108.1, -107.7) d = 174.4 (173.7, 175) e = -0.001923 (-0.002023, -0.001823) f = 161 (160.9, 161.1)	Goodness of fit: SSE: 4.469e+06 R-square: 0.97 Adjusted R-square: 0.97 RMSE: 4.691

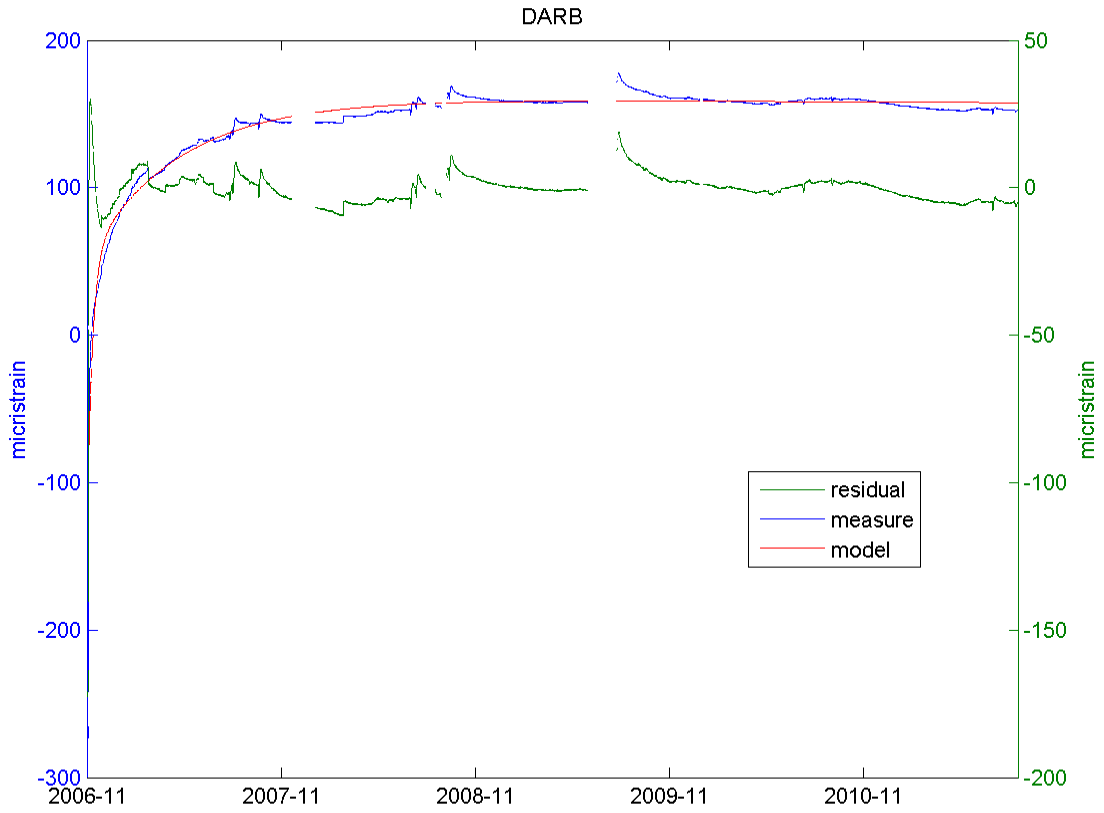


圖 3.34：達邦測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

JING	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = -230.7 (-231, -230.3) b = 22.74 (22.67, 22.81) c = -236 (-236.3, -235.8) d = 218.6 (218, 219.2) e = 0.003232 (0.002977, 0.003486) f = 121.5 (121.3, 121.8)	Goodness of fit: SSE: 3.187e+06 R-square: 0.9965 Adjusted R-square: 0.9965 RMSE: 4.253

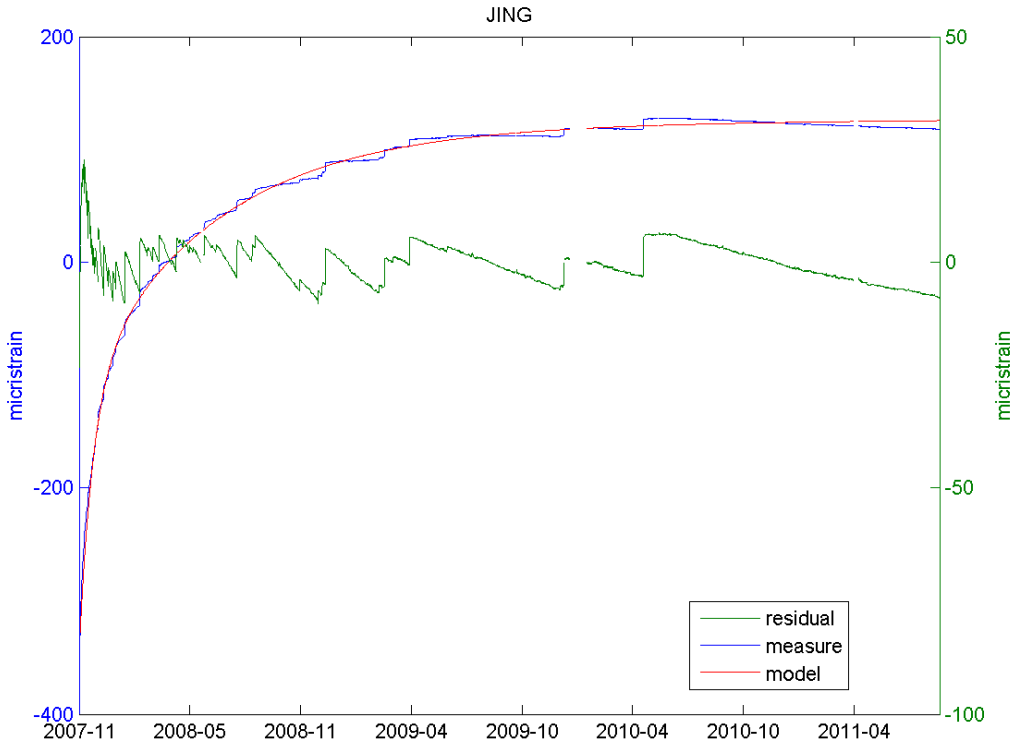


圖 3.35：錦和國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

SANS	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 238.2 (237.6, 238.8) b = 57.18 (57.02, 57.35) c = 390.9 (390.6, 391.2) d = 300 (299, 301) e = -0.02277 (-0.0232, -0.02233) f = -1378 (-1378, -1377)	Goodness of fit: SSE: 1.715e+006 R-square: 0.9995 Adjusted R-square: 0.9965 RMSE: 4.253

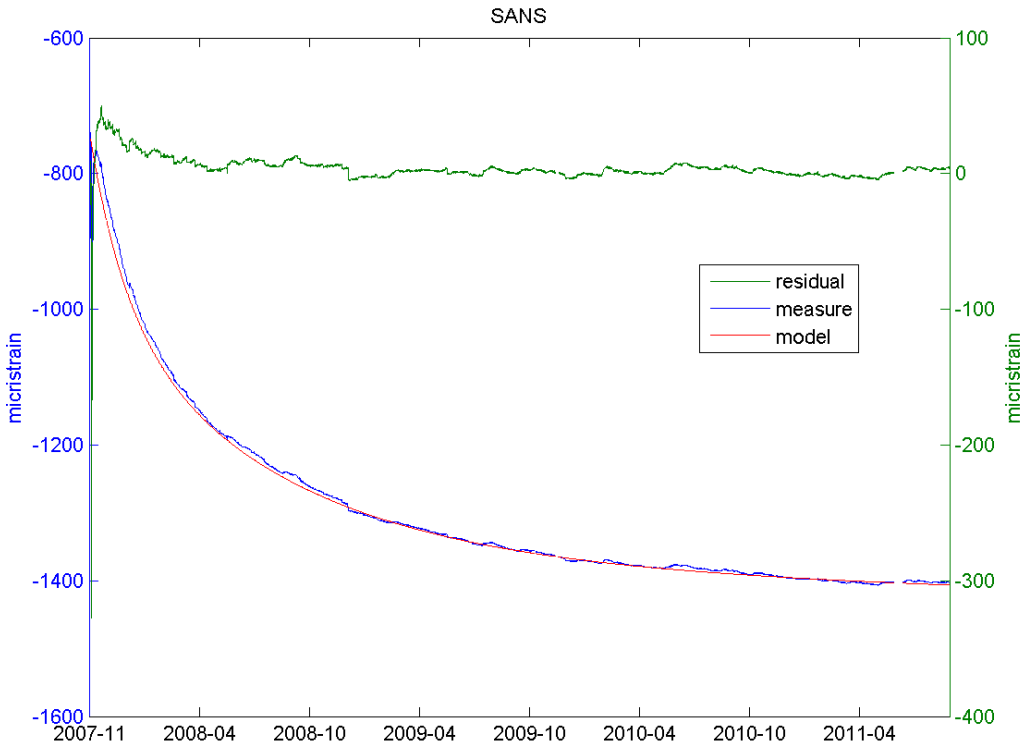


圖 3.36：明德國中測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

SLIN	
General model: f(x) = a*exp(-x/b)+c*exp(-x/d)+e*x+f Coefficients (with 95% confidence bounds): a = -537 (-603.6, -470.5) b = 138.2 (130.8, 145.6) c = 9649 (-3.624e+005, 3.817e+005) d = 4979 (-9.705e+004, 1.07e+005) e = 1.969 (-33.34, 37.28) f = -8337 (-3.805e+005, 3.638e+005)	Goodness of fit: SSE: 5.483e+006 R-square: 0.9969 Adjusted R-square: 0.9969 RMSE: 8.244

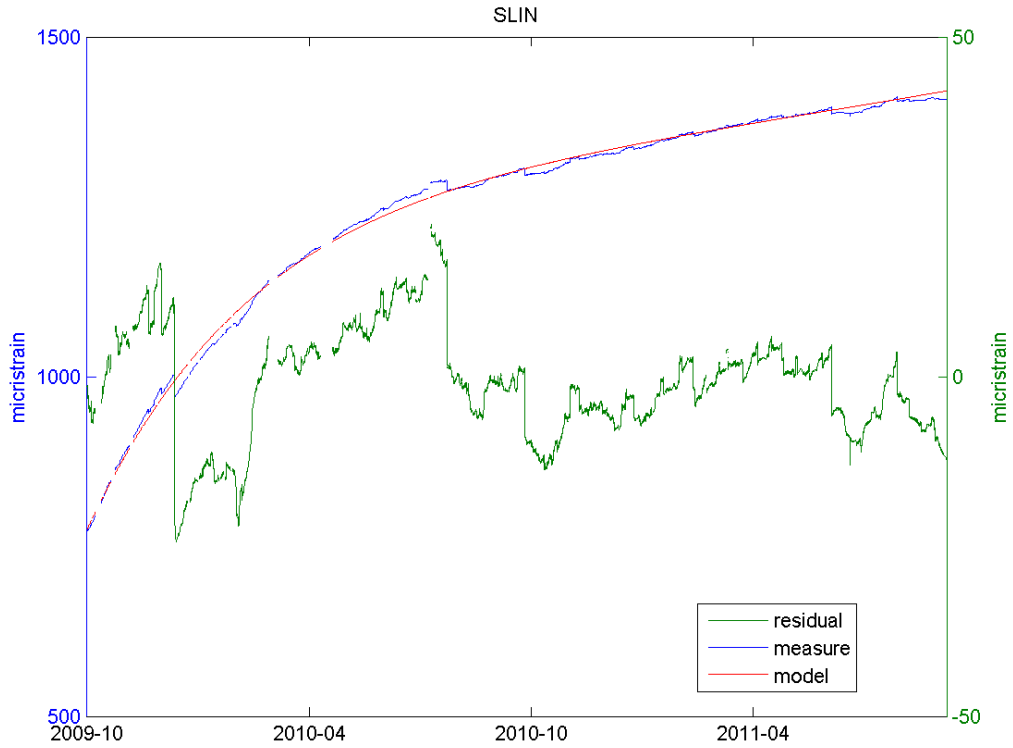


圖 3.37：樹林測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

3-1-5 資料完整性測試

在應變與應變公式的理論推導中，一個平面上若能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 3.48 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兩個檢驗量，即將 GTSM 井下應變儀的三個平面上各成 60 度角的平均值即為其面積應變 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. Gladwin 討論這問題，但他認為不可能儀器裝置錯誤，而未再討論，僅說可能是其它環境或地形因素所造成的。所以所有的資料計算仍然根據原廠商所提供的角度資料來計算，將來有足夠的資料時再做進一步的探討。

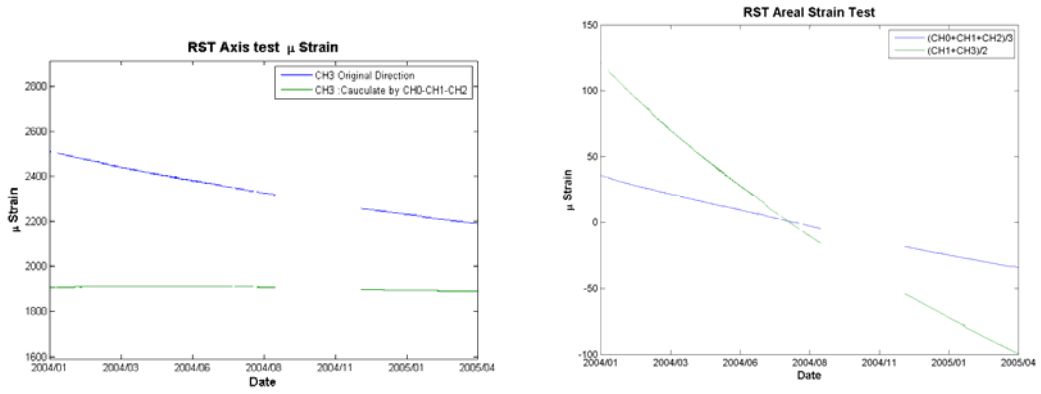


圖 3.38：曾文水庫南測站的比較檢核。利用曾文水庫南測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

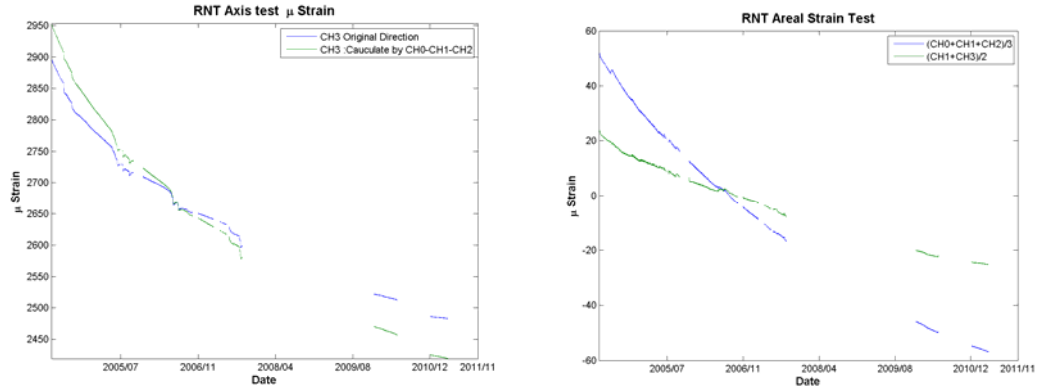


圖 3.39：曾文水庫北測站的比較檢核。利用曾文水庫北測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

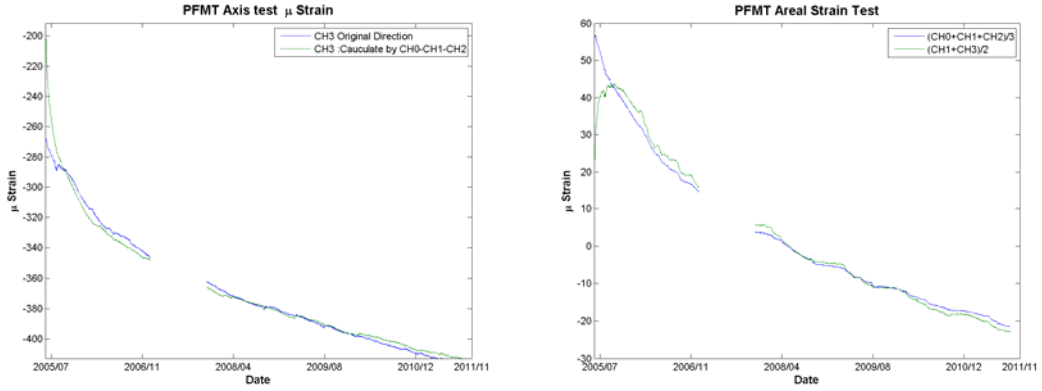


圖 3.40：梅花國小測站的比較檢核。利用梅花國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

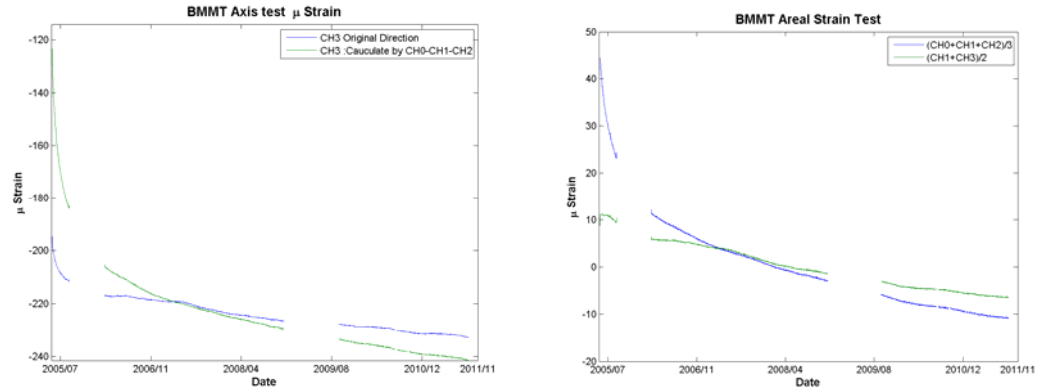


圖 3.41：大坪國小測站的比較檢核。利用大坪國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

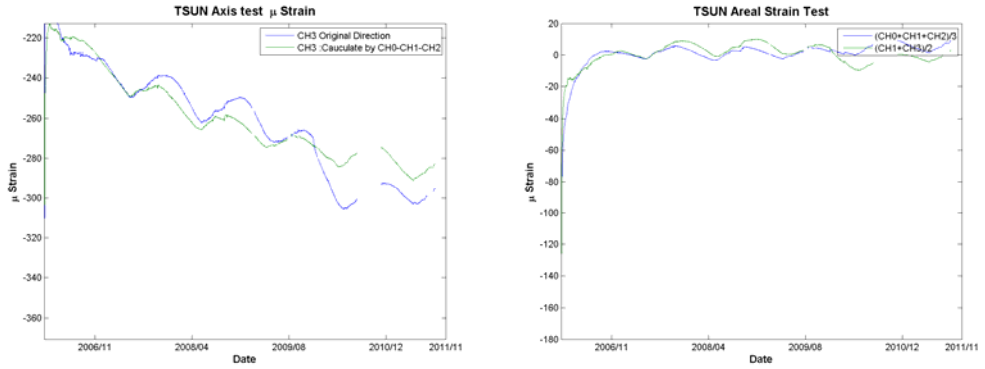


圖 3.42：中興國小測站的比較檢核。利用中興國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

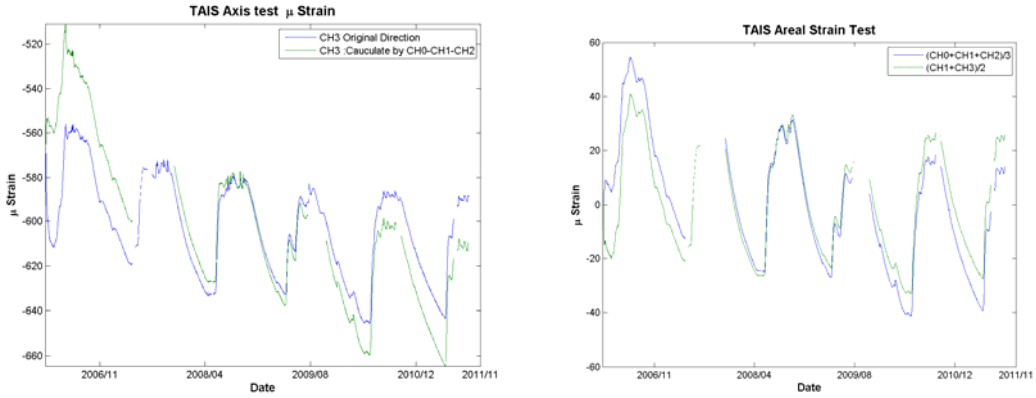


圖 3.43：太興國小測站的比較檢核。利用太興國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

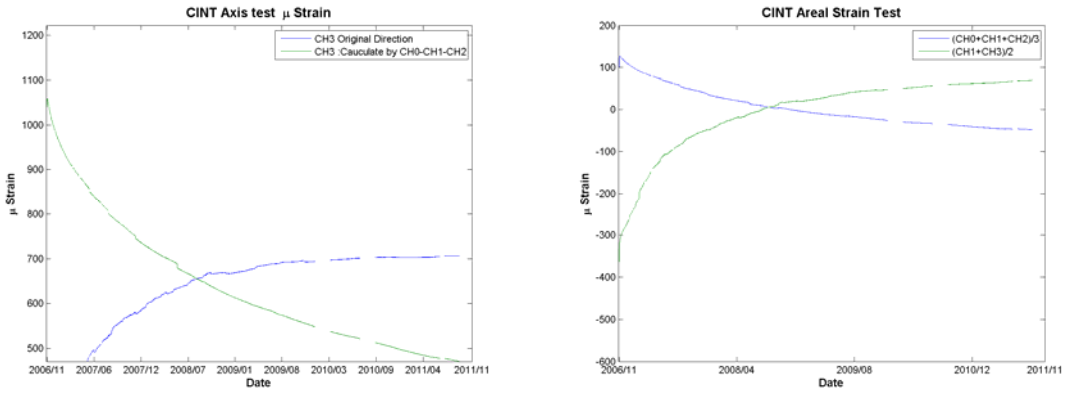


圖 3.44：新樂國小測站的比較檢核。利用新樂國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

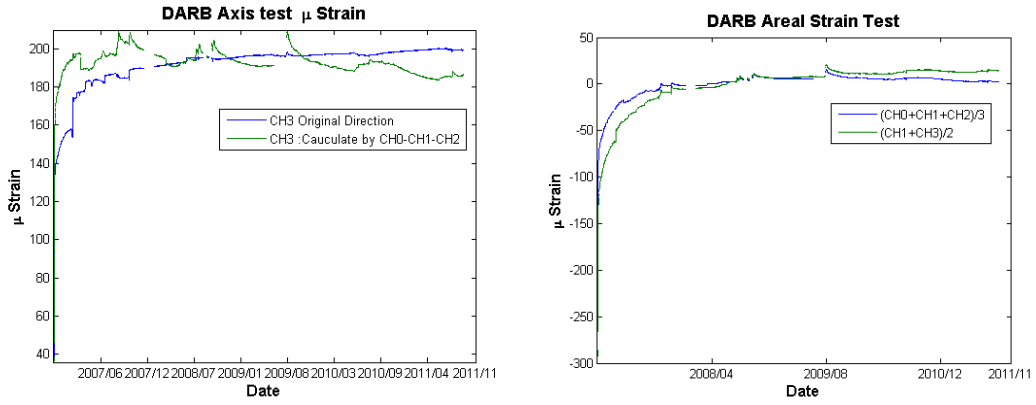


圖 3.45：達邦測站的比較檢核。利用達邦測站的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

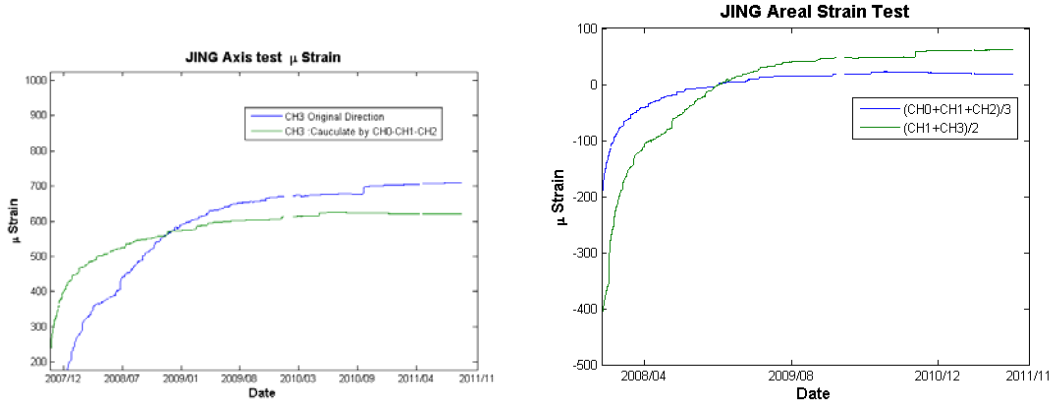


圖 3.46：錦和國小測站的比較檢核。利用錦和國小測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

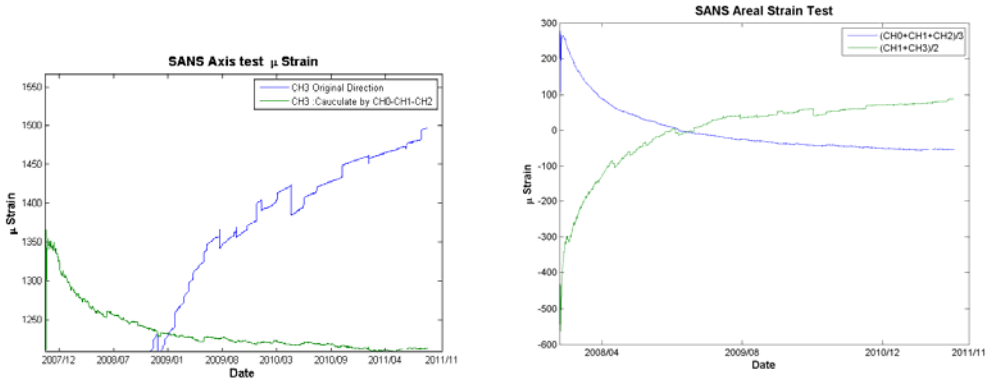


圖 3.47：明德中學測站的比較檢核。利用明德中學測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

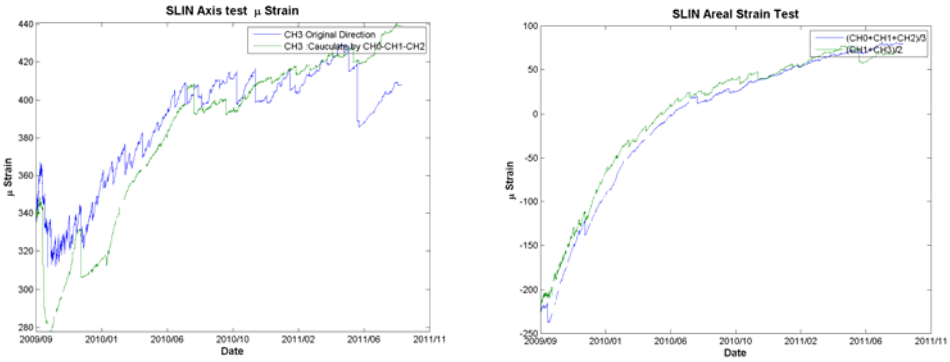


圖 3.48：樹林測站的比較檢核。利用樹林測站的工程應變量的面積應變 ε_a 及剪應變(γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變(Predicted)，與原記錄 (CH3) 比較的結果(左圖)以及第 1 到第 3 支應變平均值(CH0+CH1+CH2)/3 與第 2 支及第 4 支的平均值 (CH1+CH3)/2 的比較檢核。

3-2 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。

3-2-1 分析方法

採用 Visual Signal 視覺化訊號分析軟體對訊號進行前處理，首先重新取點使時間軸每個點之間間隔等距（指令名稱 To Regular）後，移除 Bump 值（指令名稱 Remove Bump），移除趨勢（指令名稱 Trend），根據訊號特性採用短時傅立葉轉換（STFT）繪製時頻圖，其分析方法可透過伺服器端之 Visual Signal 程式編輯修改。

1.時間軸等間距處理

假設時間間隔為不等間距，轉換成等時間距訊號的過程可選擇對輸入訊號重新取樣，重新取樣的方法有 FillGap 與 RemoveGap。假設輸入訊號為 $X^{(I)} = \left\{x_0^I, x_1^I, \ldots x_{N-1}^I\right\}$，時間起始點是 t_0，取樣週期為 $\Delta t_k^{(I)}$，資料個數為 $N^{(I)}$，輸入訊號 $X^{(I)}$ 之時間軸可表示為：

$$t_j^{(I)} = t_0 + \sum_{k=1}^{j} \Delta t_k^{(I)} \quad , \quad 1 \le j \le N^{(I)} - 1$$

其中 $t_j^{(I)}$ 代表訊號資料點 $x_j^{(I)}$ 對應的時間。而 FillGap 與 RemoveGap 計算如

下。

A) Fill Gap

時間軸資料以下式計算：

$$t_m^{(o)} = t_0 + m \times \Delta t^{(o)} \quad , \quad 1 \le m \le N^{(o)} - 1 \quad , \quad \Delta t^{(o)} \le 1.5 \times Min(\Delta t^{(I)})$$

其中 $t_m^{(o)}$ 代表等間隔排列(regular)的訊號時間軸，$\Delta t^{(o)}$ 代表重新取樣的週期，$N^{(o)}$ 代表輸出訊號之資料個數;須注意 $\Delta t^{(o)}$ 要小於等於 1.5 倍 $\Delta t^{(I)}$ 之最小值，且由於 FillGap 會進行補值，所以輸出訊號 $X^{(o)}$ 的資料個數 $N^{(o)}$ 會大於等於 $N^{(I)}$ 。

輸出訊號資料 $X^{(o)}$ 之計算如下：

若 $\Delta t_j^{(I)} > 1.5 \times Min(\Delta t^{(o)})$ ，則對應之輸入訊號 $x_i^{(I)}$ 與 $x_{j-1}^{(I)}$ 間會以下列補值方法求出 $x_j^{(o)}$ ，而因補值新增的資料個數由 $\Delta t_i^{(I)} / \Delta t^o$ 的整數部份決定。

Fix：以固定值進行補值。
Prev：以前面那點的值補值。
Next：以後面那點的值補值。
Linear Interpolation：以線性內差的方法補值。
Spline Interpolation：以 Spline 內差的方法補值。
Monotonic Cubic Spline：為有 damping 的三次內插法，此法在處理在斜率很大的訊號(如方波)時，可避免劇烈振盪，較 Spline 為佳。
No Fill：缺值維持 NaN。

若 $\Delta t_j^{(I)} < 1.5 \times Min(\Delta t^{(o)})$ ，則對應輸入訊號 $x_j^{(I)}$ 間會直接傳至輸出訊號 $x_j^{(o)}$ 。

B) Remove Fill Gap

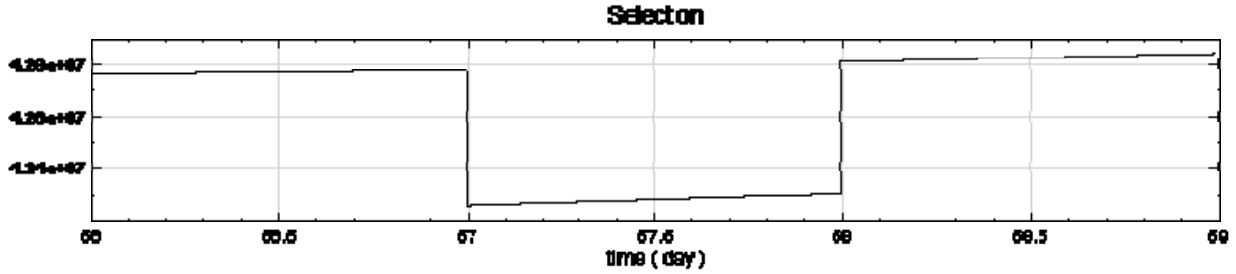
依據 $\Delta t^{(o)}$ 重新計算時間軸 $t^{(o)}$ ，將輸入訊號 $X^{(I)}$ 的時間軸 $t^{(I)}$ 置換為 $t^{(o)}$ 。$t^{(o)}$ 之算式為

$$t_m^{(o)} = t_0 + m \times \Delta t^{(o)} \quad , \quad 1 \le m \le N^I - 1$$

因此 RemoveGap 的輸出訊號個數 $N^{(o)}$ 與輸入訊號時數 $N^{(I)}$ 相同，僅改變輸入訊號時間軸為等間隔排列。

2.移除 Bump 值

各種的訊號都可能會因量測硬體的影響（如校正基準點產生偏差等），造成訊號產生不連續現象（Bump 或是 Jump），如下圖：



Remove Bump 目的在將上述不連續點移除，再以平滑曲線連接之，還原本訊號。此法是以兩個條件之交集判定是否發生 Bump 或 Jump 說明如下：

A) 判斷訊號是否有一連串資料值皆超過臨界值 S_{crit}，並且連續遞增或 連續遞減值。

B) 另外判斷該點資料之斜率是否超過臨界斜率 J_{crit}

C) 若訊號點之 S 與 J 皆超過臨界值，則視為 Bump 並修正之

其中 J_{crit} 臨界遞增值、J 的比例係數 J_{ratio} 、S_{crit} 臨界斜率、S 的比例係數 S_{ratio}、欲處理訊號不連續處之時間起點（Start Position）、終點（End Position）皆可調整。

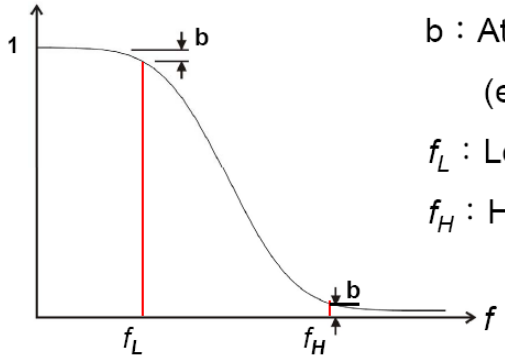
3. 移除趨勢

各種訊號大部分可視為一周期性訊號加上非週期性訊號。透過 Iterative Gaussian Filter (Smoothing) 得到其周期性部分或非周期性部分的訊號。說明如下：

對訊號 $\{y_i\}$ 每一點而言，其高斯平均（Guassian Average）：

$$y_i = \frac{1}{L} \sum_{i=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(t_i - t_j)^2}{2\sigma^2}}$$

此數學式說明 $\{\overline{y_i}\}$ 點的值乃由其鄰近的點的平均值來代表，離 j 點愈遠其權重愈小。 $\{\overline{y_i}\}$ 所組成的新訊號較 $\{y_i\}$ 平滑，也就是其高頻部分 $\{y_j^1\} = \{y_j - \overline{y_j}\}$ 被平滑化後消失了。再將 y_j^1 做高斯平均，疊代(反覆此步驟)若干次後得到的 y_j^m ，(m 為疊代次數) 的總和即為周期性訊號趨勢訊號。原訊號減去周期性訊號即為其較低頻的趨勢訊號。數學上可證明 Gaussian Filter 相當於如下圖的濾波器。



b：Attenuation factor
(e.g. b=0.01)
f_L：Low frequency
f_H：High frequency

以趨勢訊號(low pass filter) 為例，會將小於 F_L 的部分完全通過，而濾除(絕大部分)大於 F_H 而中間的部分則為高斯分佈。疊代次數 m 與參數σ可由 F_L 、F_H 以及 b (Attenuation Factor) 求得。b 為很小的值，較常用的值為 0.01 或 0.001，F_H/F_L 可選定為 2 至 10。

4.短時傅立葉轉換繪製時頻圖

傅立葉轉換（Fourier Transform）是將時間訊號轉換至頻率域。相較於傅立葉轉換，僅能呈現訊號振幅與相位隨頻率變化，但無法知道該頻率發生的時間點。而短時傅立葉轉換（Short-Term Fourier Transform, STFT, or spectrogram）用以計算訊號強度與相位隨時間與頻率的分佈，解決傅立葉轉換（Fourier Transform）無法得知頻率發生的時間的缺點。其數學式為

$$STFT[x(t)] = X(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t-\tau)e^{-i\omega t}dt$$

其中，$x(t)$ 是輸入訊號，$\omega(t-\tau)$ 是一個窗函數。數學式中的意義為：每一時間點 τ 對 $x(t)\omega(t-\tau)$ 作傅立葉轉換，再將窗函數沿著時間軸方向挪移並計算得到的結果即為 $X(\tau,\omega)$ 代表了訊號某一時間與頻率上的強度或相位。各窗函數的定義，請參閱 Fourier transform。

Windows size 與 Frequency resolution 之間的關係如下：

$$Window\ Size = \frac{f_s}{\Delta f}$$

$$Freq\ Resolution = 2 \cdot \frac{f_s}{Window\ Size}$$

其中，f_s，Frequency Resolution 設定的越低，計算窗函數會越長，訊號周期性越強，所以頻率越確定，時間不確定。Frequency Resolution 設定的越高，計算訊號的窗函數越短，時間越確定，頻率不確定。

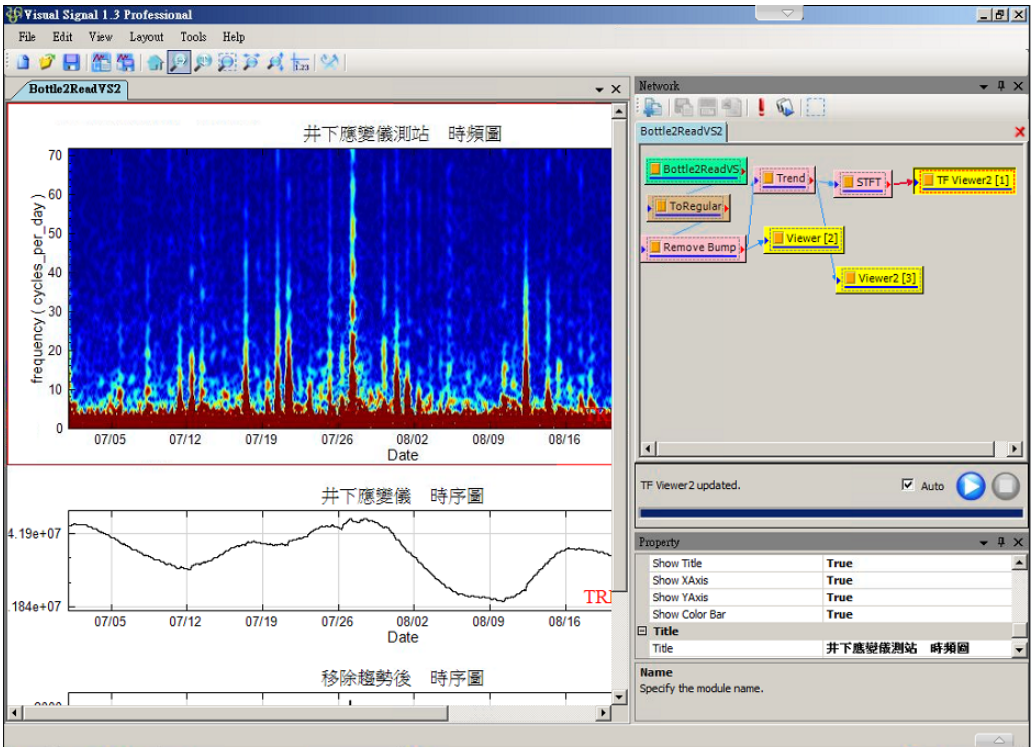
3-2-2 分析流程

1.使用者自網站選取資料時間區段(最大不得超過兩個月)



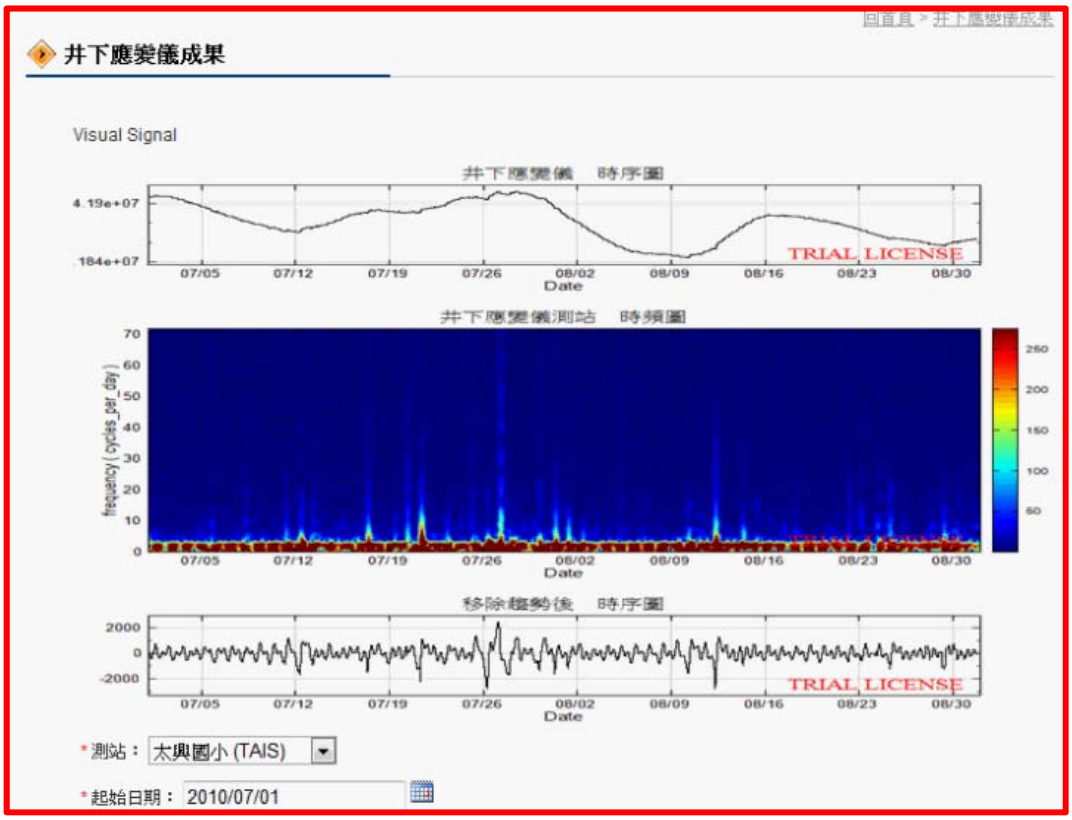
2.呼叫伺服器端讀取檔案，解開於指定資料夾

3.於背景程式開啟視覺化訊號分析軟體 Visual Signal 執行資料處理（移除 Bump、填補空值、移除趨勢 1）及時頻圖繪製。當沒有資料時，以應變儀之極大值 99999 填補。



4.儲存時序圖與時頻圖於指定資料夾

5.呼叫結果於網頁供使用者瀏覽



3-3 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷

3-3-1 影響應變儀資料變化的因素

井下應變儀是一種相當敏感的地殼變形監測儀器，通常需要埋設於地底下壹至兩百公尺深度以下，以減少溫度變化或其它環境或地表活動所產生的地殼變形。然而，縱使如此細心的設計，仍然無法排除所有的環境變化因素，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、地表空氣壓地變化、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形...等。在先前的研究中估計嘉義地區各測站受地下水的影響量約在 0.56 ~9.16 μstrain/meter(圖 3.49 至圖 3.51)，而且是地下水壓增加時，應變儀呈現面積應變膨脹的現象，這是因為地下水壓增加時，會讓岩石孔隙壓力增加，可以抵消外來的應力。這個影響量的係數會差異高達十倍以上，主要是因為每個站的地下水文不同，地下水壓儀器所設置的水層與附近岩石孔隙壓力的代表性也不同，很難一概而論，甚至若地下水壓觀測儀器放在與地表水較相通的地方，未必能代表岩石附近的孔隙水壓，則水壓增加時，可能只會因水的負載重量而使井下應變儀呈現壓縮的現象。圖 3.52 與圖 3.53 顯示嘉義地區三個測站的面積應變資料於 2008 年 12 月在做地下水影響修正前後的差異，地下水影響的修正可以使資料的細節變化更能顯現出來，並顯現出空氣壓力的負向影響，亦即氣壓增大時岩石呈現壓縮的現象。

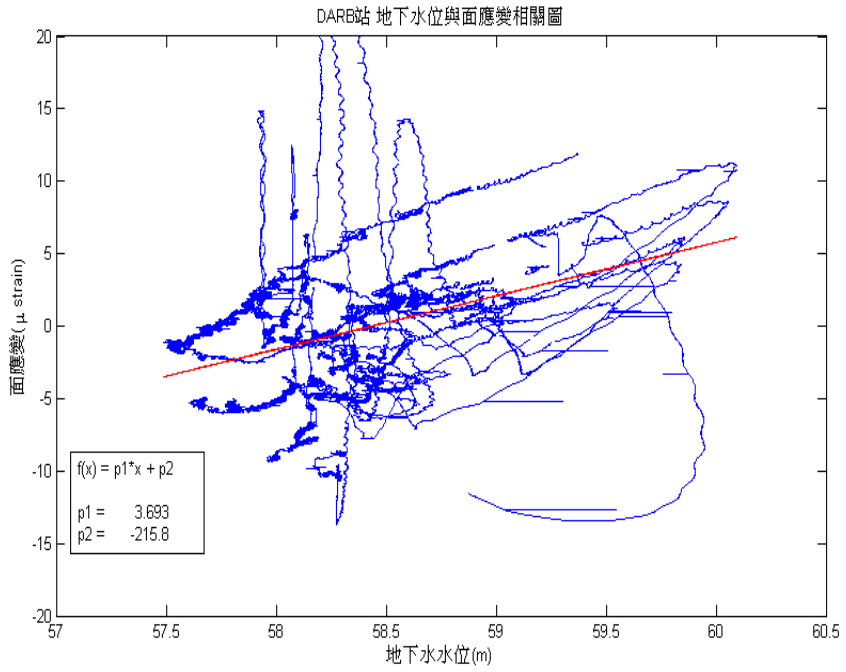


圖 3.49：達邦站地下水位與面應變的相關圖。

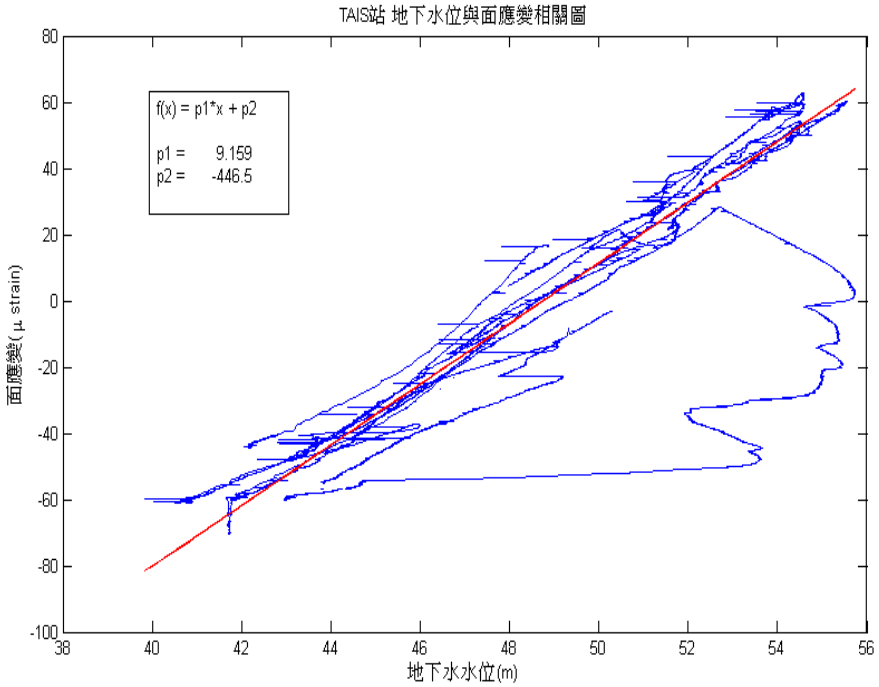


圖 3.50：太興站地下水位與面應變的相關圖。

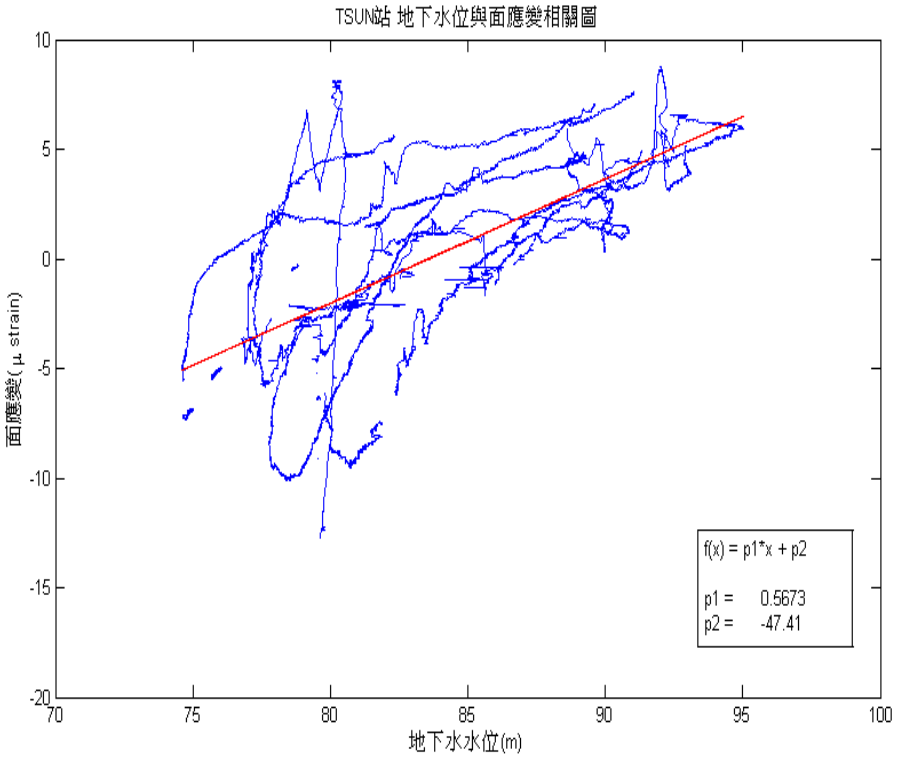


圖 3.51：中興站地下水位與面應變的相關圖。

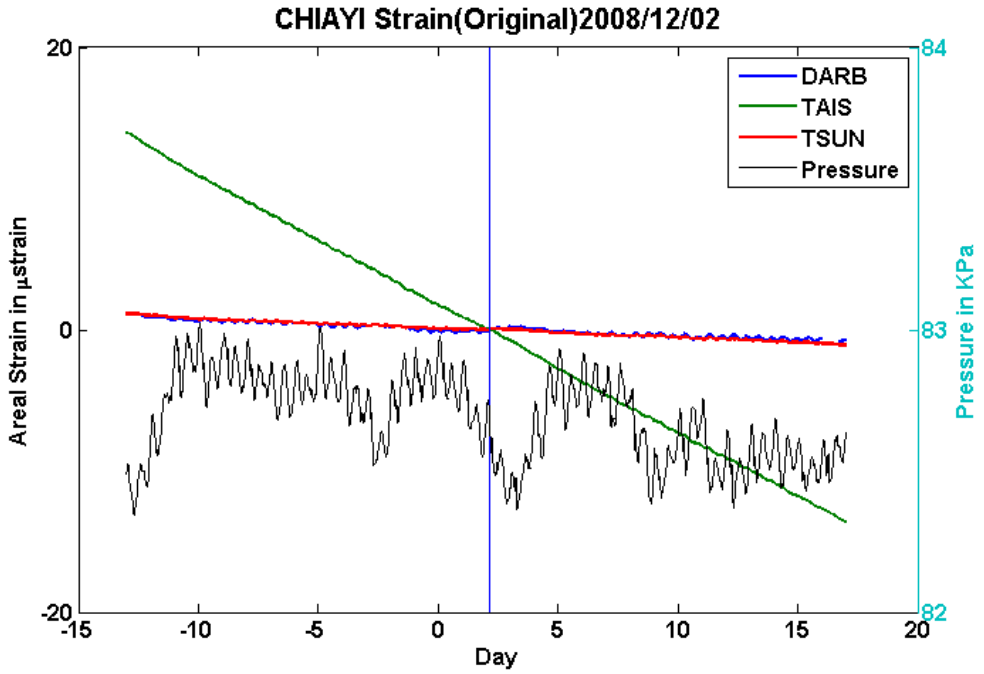


圖 3.52：嘉義地區三個測站的面積應變資料於 2008 年 12 月在做地下水影響修正前之資料。圖中黑色資料為氣壓變化。

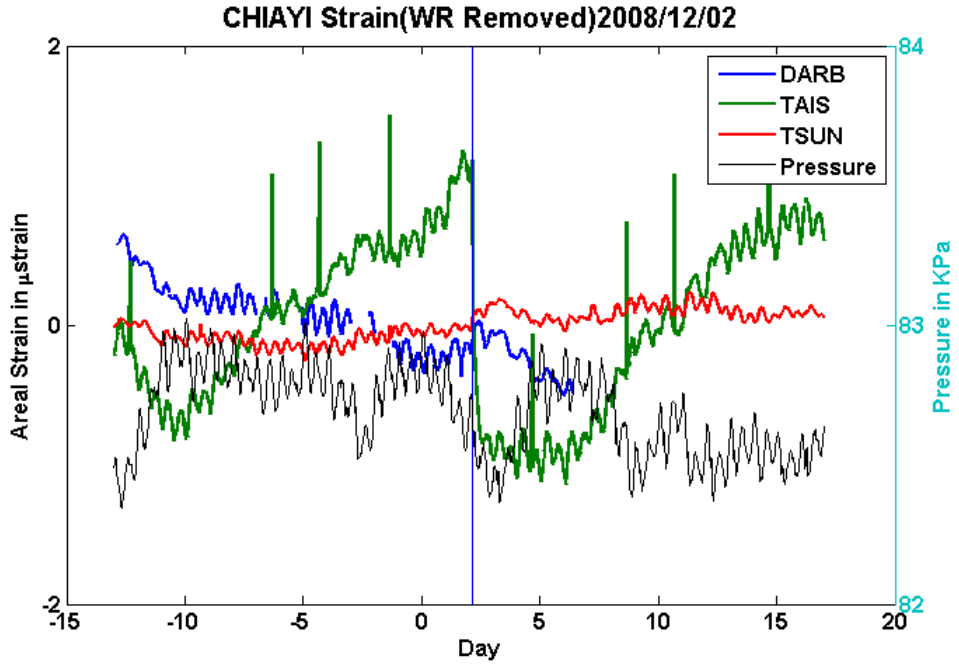


圖 3.53：2008 年 12 月嘉義三個測站的面積應變在做地下水影響修正後之資料。

在圖 3.53 中，垂直線代表 2008 年 12 月 2 日花蓮玉里地震，太興測站(TAIS，綠色)資料在移除地下水效應後，可以清楚地看出同震效應，然而其他兩站的同震效應則不明顯。太興與達邦測站(DARB，藍色)資料都顯示與氣壓有負相關，若再以三個測站分別為 0.9 (for DARB)、1.3 (for TAIS) 與 0.5 (for TSUN) μstrain/KPa 的改正量來修正，則如圖 3.54 所顯示，達邦站資料變的更線性，幾乎看不出同震變化，也看不出氣壓的影響，太興站的資料除了同震的面積壓縮應變外，在地震前後的斜率(應變累積率)大略相同。中興測站(TSUN，紅色)資料則斜率變的更平緩，也無明顯的同震效應，三個測站在地震前九天左右斜率都有突然改變。

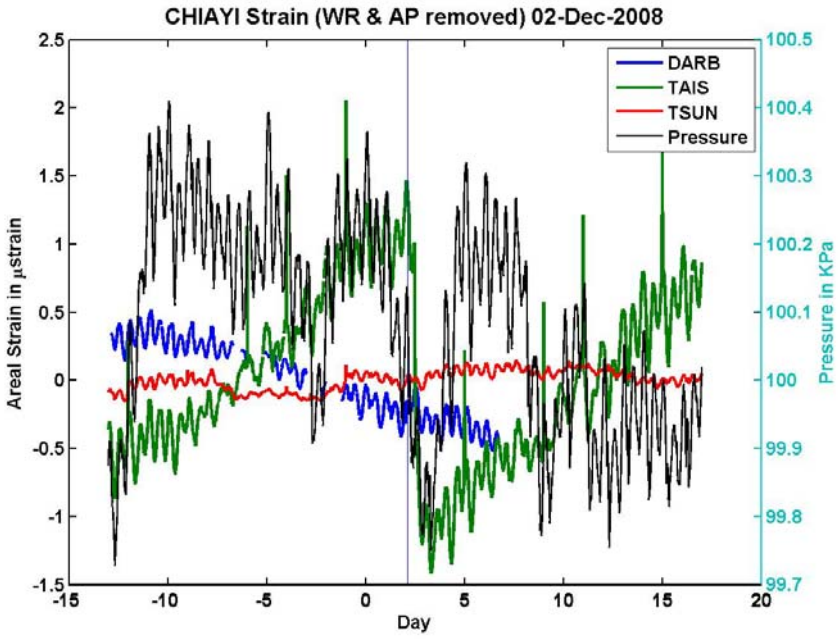


圖 3.54：嘉義三個測站的面積應變資料在做了地下水與氣壓影響修正後，面積應變變化更清楚。

然而並非所有的變化都如此可由氣壓直接解釋，如同樣的嘉義三個測站，在 2011 年二月初十多個宜花邊界的有感地震，最大規模為 5.5，在作氣壓修正前(如圖 3.55)可看到達邦與太興測站的變化幾乎完全一致，看來都是氣壓的影響，中興測站則變化較大，不易看出是否受氣壓影響。圖 3.56 則是在作了氣壓修正後之時間序列，達邦站的變化則完全是平緩的直線，已無氣壓或地下水的影響，只看到明顯的潮汐變化，太興站則仍有變化，這是氣壓影響修正過頭了，還是真正的地殼應變？中興站在這段時間無地下水資料，無法作地下水影響的修正。

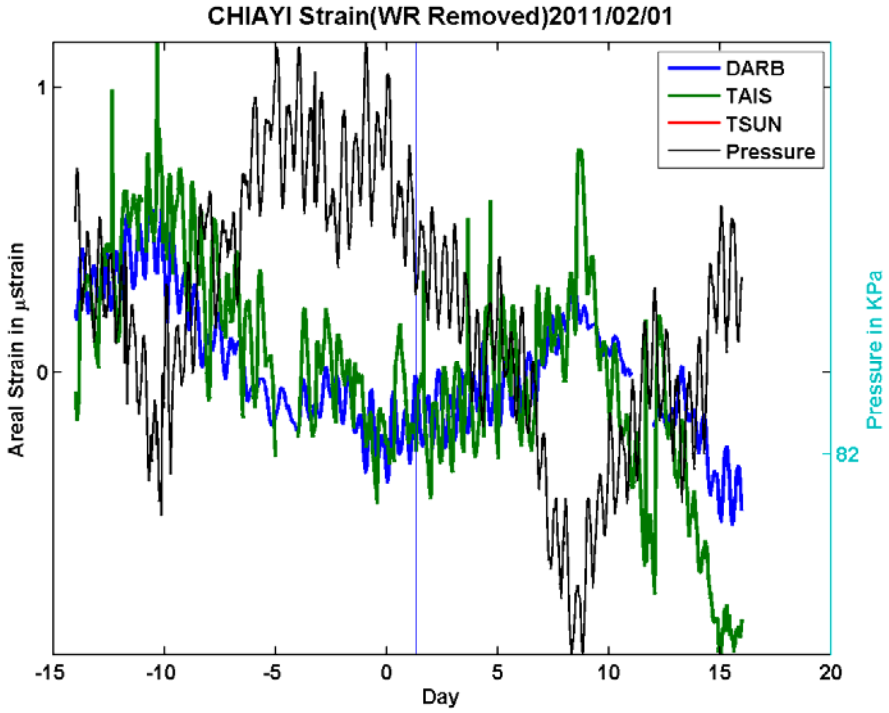


圖 3.55：嘉義三個測站於 2011 年 2 月初的面積應變在做地下水影響修正後之時間序列。

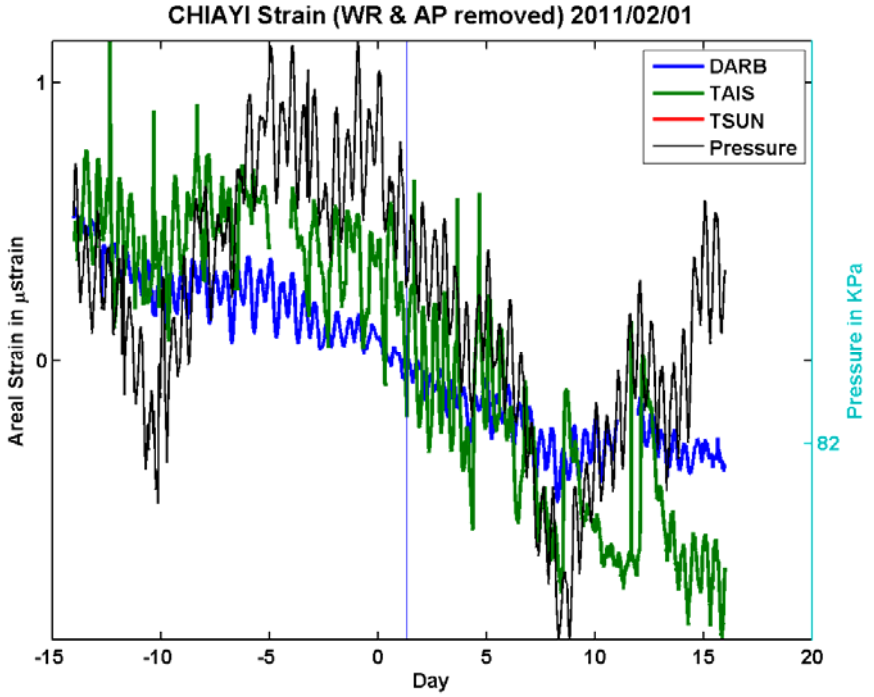


圖 3.56：嘉義三個測站的面積應變資料在做了地下水與氣壓影響修正後，太興站仍有分氣壓相關的變化。

由上面的初步探討，可以看出在估計各種因素對井下應變儀的影響，不可僅有單一種因素來估計，也無法由幾個單一時間多種因素來做回歸分析，畢竟在這階段還無法把所有會影響井下應變儀的所有因素都放在多變數回歸模式中，不完整的回歸模式會因為各種變數間的高相關而產生錯誤的回歸模式，例如颱風來時的低氣壓往往伴隨著很大的降雨量，氣壓、氣溫、潮汐與地下水都有很明顯的年週期，各變數間的高相關性很容易產生偏差的模式，因此，本計畫將依各站各變數一步一步的試圖建立起正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，然後才在剩餘的資料中，試圖找出可能的地震前兆訊號，或是由與地震相關的變化找出斷層在地震前、後或同震的活動狀況。

在過去對資料分析的成果中，已能正確的建立各測站的井孔恢復效應，並在嘉義各測站資料中看出此區域的地下水變化相當大，可高達 20 公尺(圖 3.57)，而每公尺地下水變化可能相對於岩層中的孔隙水壓的變化，對岩層會產生約 0.56 ~ 9.16 μstrain /meter 的應變影響，因此這一地區的資料一定要先移除地下水效應(或孔隙水壓效應)的影響，否則無法估計其它的效應。在新竹地區的地下水資料則較不完全(圖 3.58)，大坪國小(BMMT)測站無地下水的觀測資料，瑞峰國小(LMMT)測站的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全，新樂國小(CINT)測站的地下水資料變化不大，約在 61~64 公尺之間，其對井下應變儀的效應則約為 4.0μstrain/meter，梅花國小(PFMT)測站的地下水變化約在 115~132 公尺之間，於 2005 年至今持續的下降，水位的年變化不大，看不出週期性，但這一站的井下應變儀資料並看不出持續下降的變化，這也有可能是在移除井孔效應時，這長期的線性變化也一併的被移除了。所以對新竹地區的應變資料無法先移除地下水的影響量。

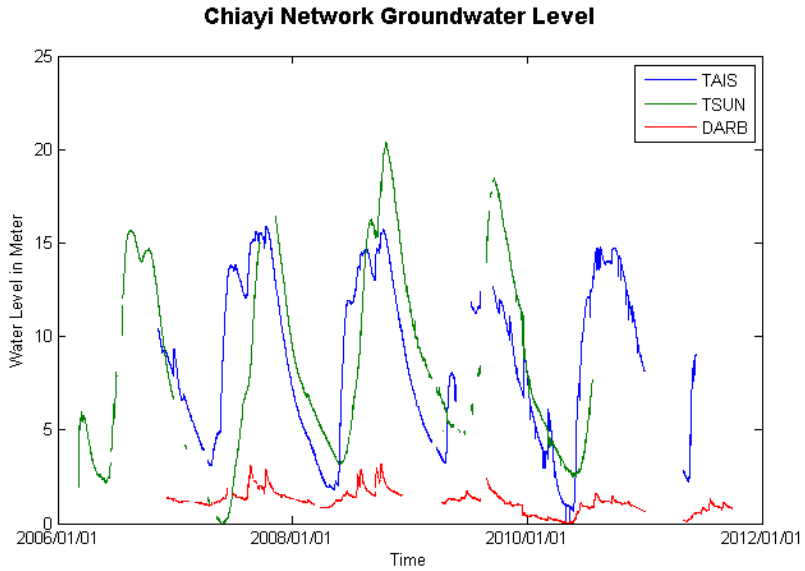


圖 3.57：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。

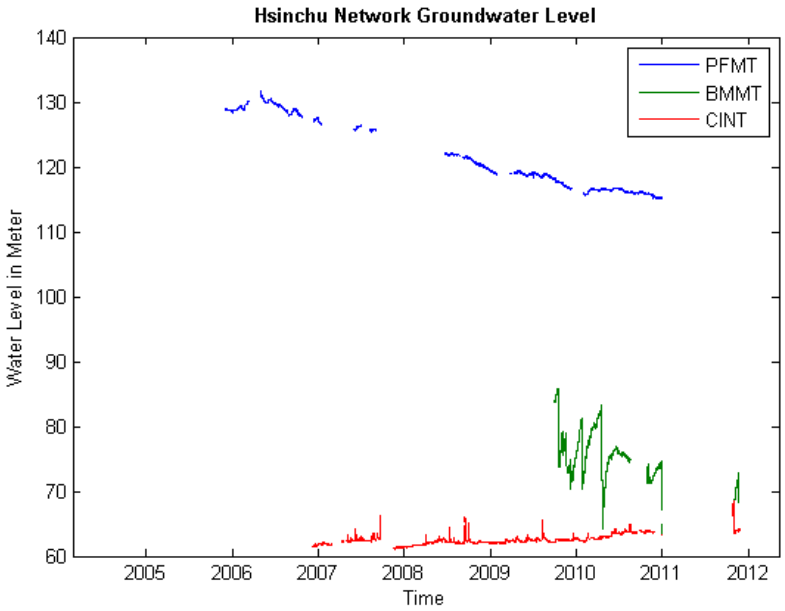


圖 3.58：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小地下水位持續下降。

在建立各種修正模式之前，必須先對各效應做物理性的探討，簡單敘述如：

1.地下水效應

由於地下水儀器並非與井下應變儀設置在同一深度，也非同一井孔，所以地下水資料一般是代表儀器周遭岩層的孔隙水壓，以及代表儀器上方地下水的多寡量，前者孔隙水壓增大時，可抵消岩層外來的應力，減少岩層的擠壓應變(或增加其膨脹應變)，但後者所代表的物理效應是增加儀器上方的垂直負載，其效應與氣壓變化相同，與孔隙水壓效應相反。由於地下水壓代表這兩種相反的效應，各測站會因為地下水壓計所設置的含水層的位置、水層分布範圍的大小以及水層與地表水的相通程度而有很大的不同反應，當然儀器附近岩層的孔隙率與透水性也是主要的因素。若地下水壓計是設置在封閉的含水層，則其四周岩層的體積應變也會改變水層中的水壓，因此這水壓變化會與井下應變儀同步，如此去除地下水效應也可能移除了真正的岩層應變資訊。不過還好，應該沒有完全封閉的地下水層，水層本身的體積應變僅能短期的增加其中的水壓，並不會有長期的效應。所以移除地下水壓變化對井下應變儀資料的效應，該還是可以保留地殼的長期應變。依照現在所分析的幾個測站來看，地下水的影響量約在 0.56 ~ 9.16 μstrain/meter 之間。

2.氣壓的影響量

大氣壓力的變化，通常是較大區域的，除了在鋒面邊緣，否則氣壓是均勻的

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

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

依照這樣的原則，可以適當的刪去正確的氣壓修正模式。

3.何謂井下應變儀資料的異常

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

a. 因為尚未修正潮汐與降雨的效應，本計劃僅搜尋台灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於變化小於潮汐變化(約 0.2 μstrain)的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。這是因為台灣地區規模大於 5.0 的地震，在過去兩年多來共有 87 個，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。
b. 對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線(意指忽略每日潮汐的變化後)。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。
c. "異常"前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件，其一是在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳(徒升或突降)，也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內，任何半個月前或一個月前的地殼應變應該與地震不相關。其二是在附近幾個井下應變儀觀測站中至少有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現

"異常"，若只有一站的明顯"異常"僅能存疑。其三是對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，適當的資料補遺與篩選是必要的程序，"異常"資料的再確認也是必須的。

根據以上的思考與原則，我們先測試兩個井下應變儀網，即嘉義網，包括達邦(DARB)、太興國小(TAIS)與中興國小(TSUN)三站；以及新竹網，包括大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)與梅花國小(PFMT)三站。為了避免因為環境因子的資料缺失或不同採樣率，而在做環境因子的模式修正時損失了部份的觀測量，所以原來地下水每分鐘一筆的資料下降到每十分鐘一筆，氣壓資料量原為每卅分鐘一筆，而且多有缺失，先將同一地區的氣壓資料互相補遺，也就是假設同一地區氣壓在短時期的變化大致相同，若其中某一站氣壓資料缺失一小段時期，則可以用另外一站的氣壓變化值補遺。如此各網的三個站互相補遺，可以得到完整的資料。然後再用適當的內差法，將每卅分鐘一筆的資料內差成每十分鐘一筆，如此所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都有相同的取樣率，依照上面的原則建立環境因子模式，並做修正，然後再依上述原則判斷所有規模大於五的地震（依氣象局公告）是否有同震以及震前的異常應變。在修正的資料中，由於新竹網的大坪國小地下水觀測紀錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。

3-3-2 檢視井下應變儀資料中異常事件

2009 年至 2011 年 10 月期間，針對規模 5 以上的地震，在井下應變儀資料中，新竹網可發現 13 個應變異常事件；嘉義網則可發現 14 個應變異常事件，其中 5 次異常事件同時在兩個測網中被觀測到，如圖 3.59 所示，以下針對有應變前兆反應的地震事件做說明。

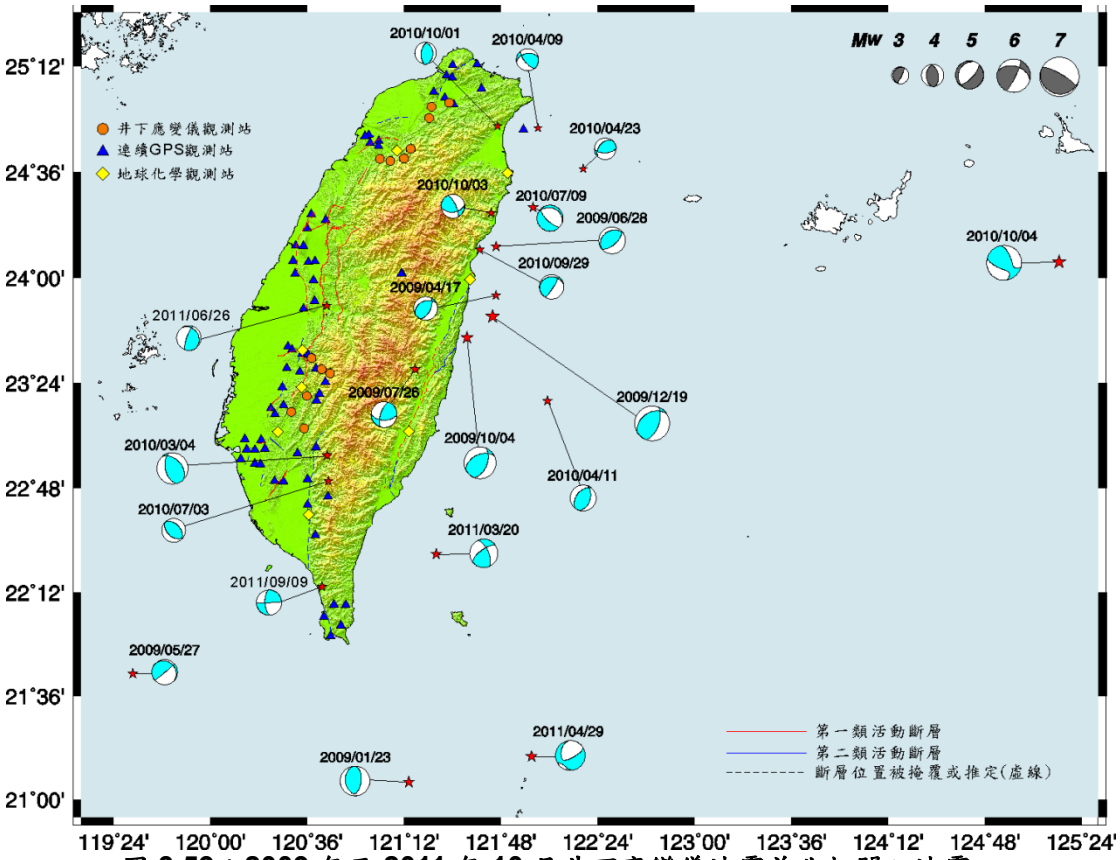


圖 3.59：2009 年至 2011 年 10 月井下應變儀地震前兆相關之地震。

(1) 2009 年 1 月 23 日規模 5.3 蘭嶼南方的地震

在嘉義網（圖 3.60）與新竹網（圖 3.61）都有同震與前兆的變形：在圖 3.31 中可看到太興與中興兩站的同震變形，太興在 1 月 12 日有改變斜率，中興在 14~15 日間則明顯有擠壓的應變，新竹網的新樂站在 14 日也有明顯的斜率改變，最重要的是所有的站都在發震前數小時到一天都已經開始有應變了。各測站的震後變形也都非常的明顯。

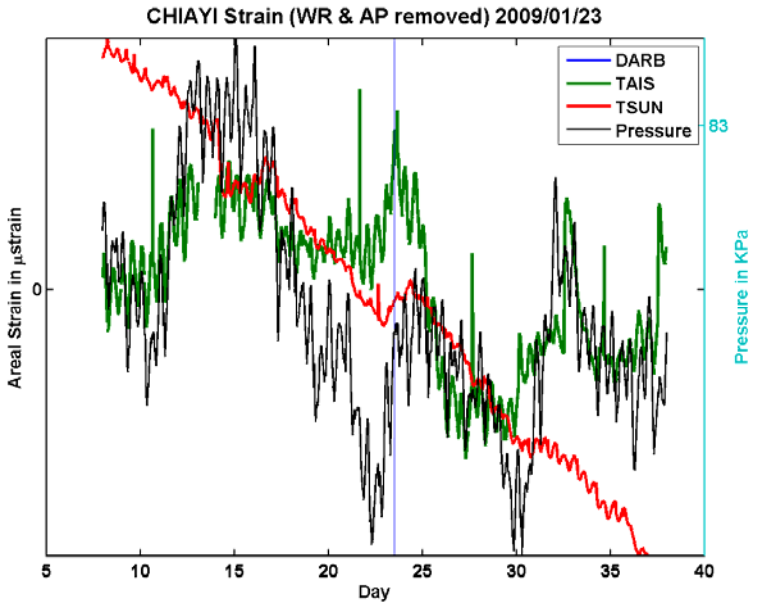


圖 3.60：2009 年 1 月 23 日規模 5.3，蘭嶼南方的地震。在嘉義網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

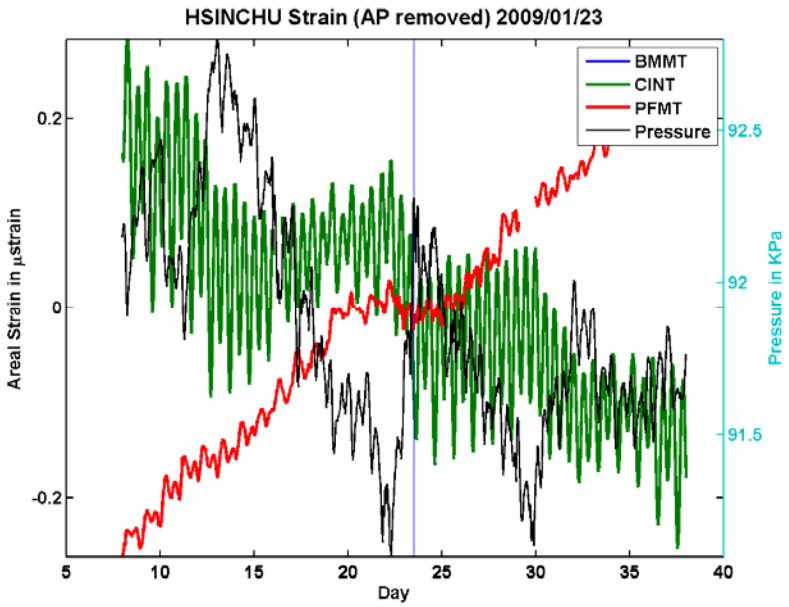


圖 3.61：2009 年 1 月 23 日規模 5.3，蘭嶼南方的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(2) 2009 年 4 月 17 日規模 5.3 花蓮外海的地震

在新竹網(圖 3.62)可觀察到大約地震前兩天梅花站就開始有明顯的斜率改變，新樂站由於地潮訊號振幅較大，震前的應變變化較不容易觀察，但仍然可以發現地震前約 3 天就開始有應變斜率的改變，明顯是地震的前兆。

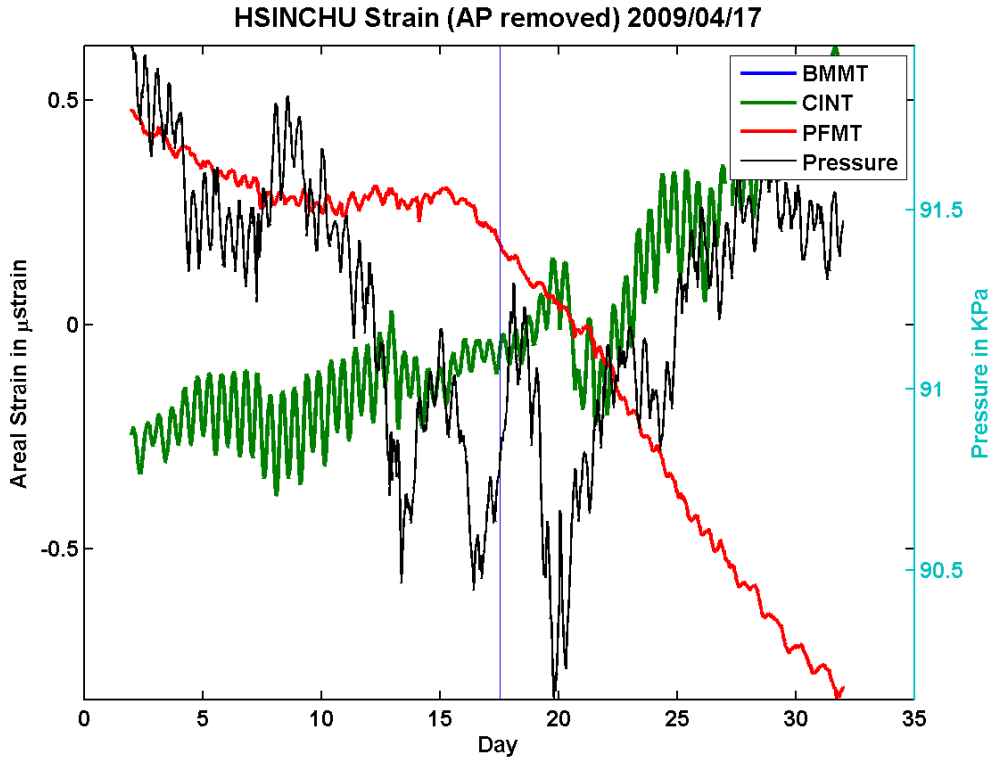


圖 3.62：2009 年 4 月 17 日規模 5.3，花蓮外海的地震。在新竹網各測站都有明顯的應變異常。

(3) 2009 年 5 月 27 日規模 5.7 高雄外海的地震

新竹網(圖 3.63)新樂站與梅花站在地震前數小時就可明顯發現應變下降，並且大約在地震前四天就開始有應變斜率的改變，明顯有同震與地震前兆的變形。但較特別的是新樂站與梅花站於 6 月 4 日應變的突降，與梅花站在 6 月 5 日之後的應變下降，經比對降雨資料與地下水資料後發現，該區域於 6 月 4 日連續降雨兩天，並且在之後梅花站地下水位開始上升約 0.2 公尺，前者短時間對於應變給予一個壓力，使應變下降，但梅花站地下水水位的上升與卻反而與應變下降有正相關，這現象與嘉義網剛好相反，這有待進一步探討。

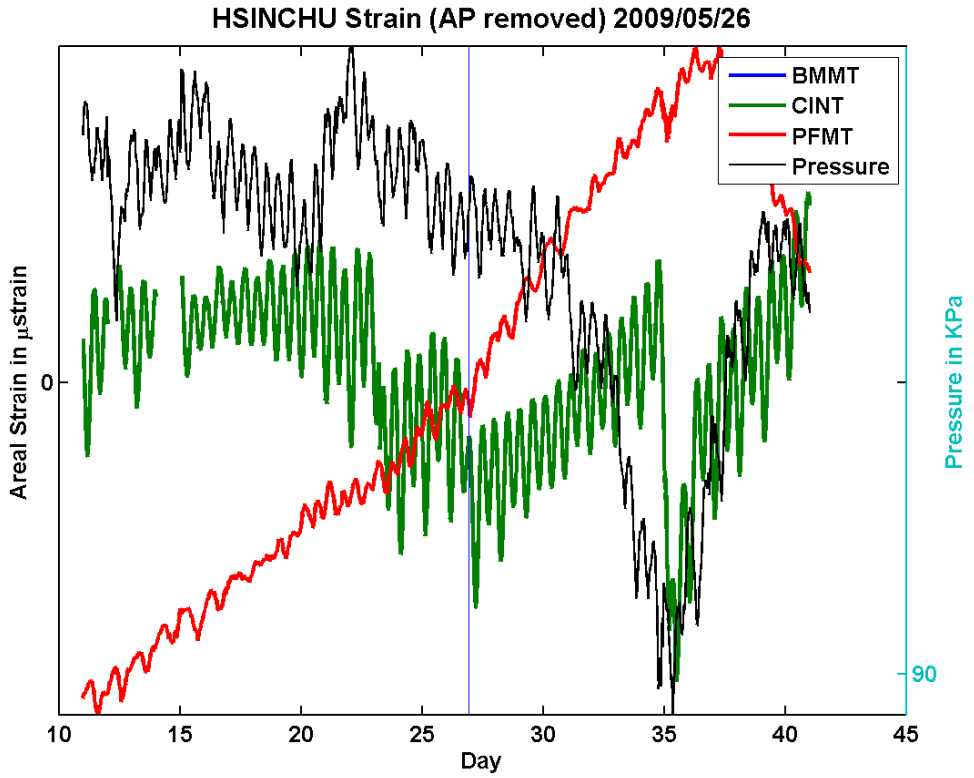


圖 3.63：2009 年 5 月 27 日規模 5.7，高雄外海的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(4) 2009 年 6 月 28 日規模 5.3 花蓮秀林外海的地震

新竹網(圖 3.64)在 6 月 26 日左右就有明顯應變斜率的變化，同震時新樂站的應變變化較梅花站明顯，但仍有變化，明顯有應變異常。但新竹網測站目前因地下水資料問題暫時無法直接去除其影響效應，因此於圖中仍可發現消除氣壓影響後殘餘變化，可能會是與地下水的起伏相關。

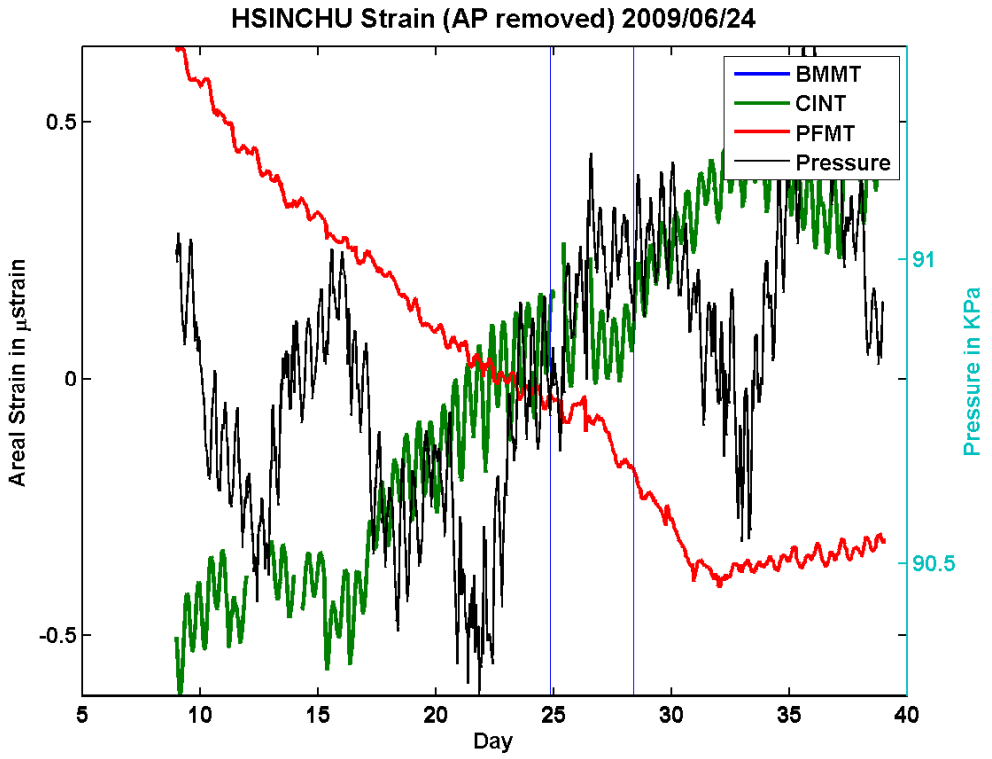


圖 3.64：2009 年 6 月 28 日規模 5.3，花蓮秀林外海的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(5) 2009 年 7 月 26 日規模 5.4 花蓮玉里的地震

雖然嘉義網(圖 3.65)在該時段只有太興站有資料，但濾除地下水與氣壓變化影響後，可以發現在 7 月 17 後左右應變有突跳並且斜率改變，地震的同震變形也非常明顯，應該有同震與前兆的變形。

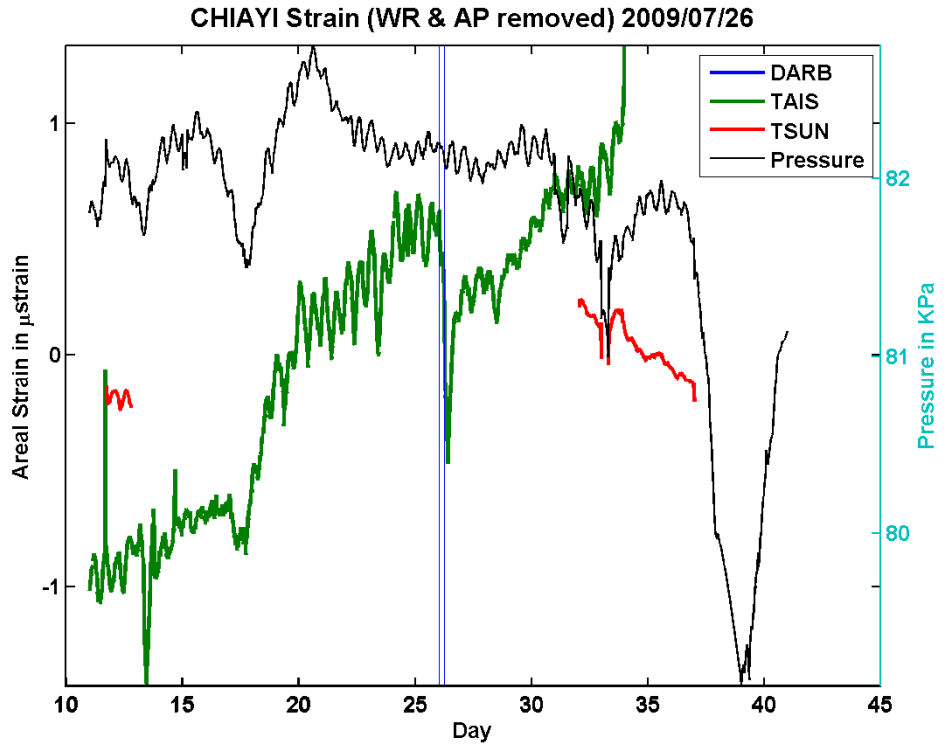


圖 3.65：2009 年 7 月 26 日規模 5.4，花蓮玉里的地震。在嘉義網太興測站顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(6) 2009 年 9 月 12 日規模 5.1 花蓮市外海的地震

嘉義網(圖 3.66)在該時段只有達邦站有較完整的資料，大約在地震前約 9 月 3 日有應變突升的訊號，同震的變化也明顯可看出來，應該可確認為地震前兆的應變異常。

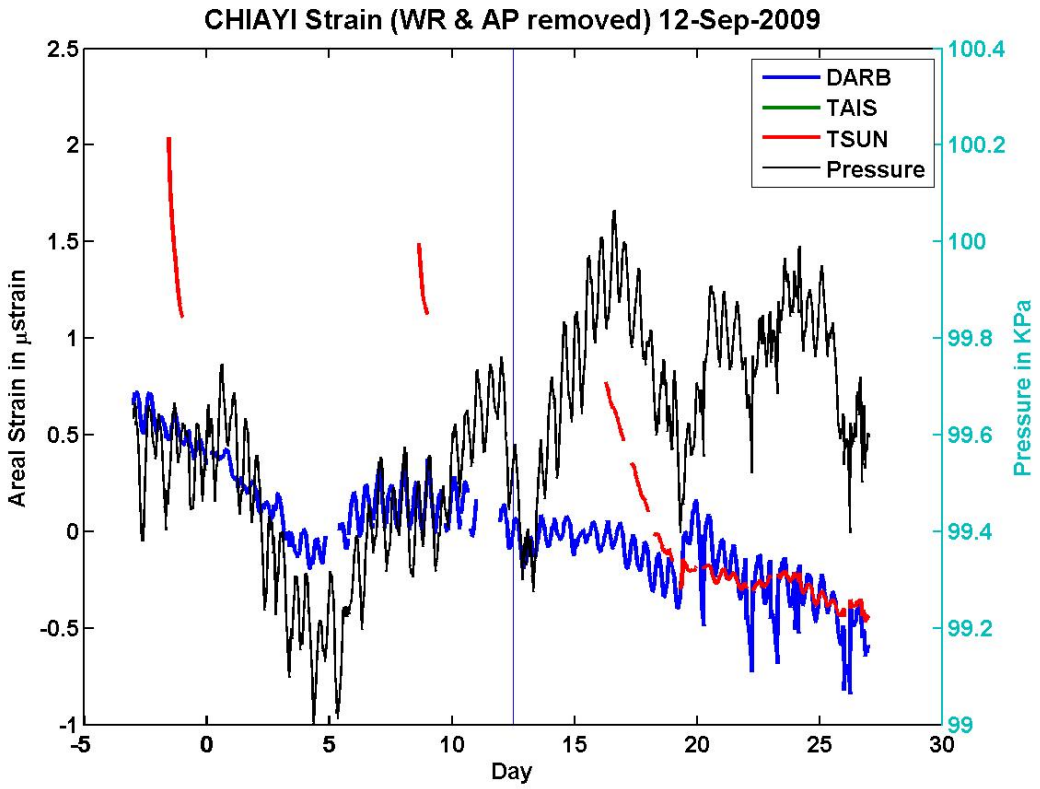


圖 3.66：2009 年 9 月 12 日規模 5.1，花蓮市外海的地震。在嘉義網達邦測站顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(7) 2009 年 10 月 4 日規模 6.1 花蓮市外海的地震

嘉義網(圖 3.67)的達邦站與中興站在地震前 9 月 30 日左右有應變斜率的變化，且達邦站同震與震後的應變斜率都很明顯，可以確認為地震前兆的應變異常。

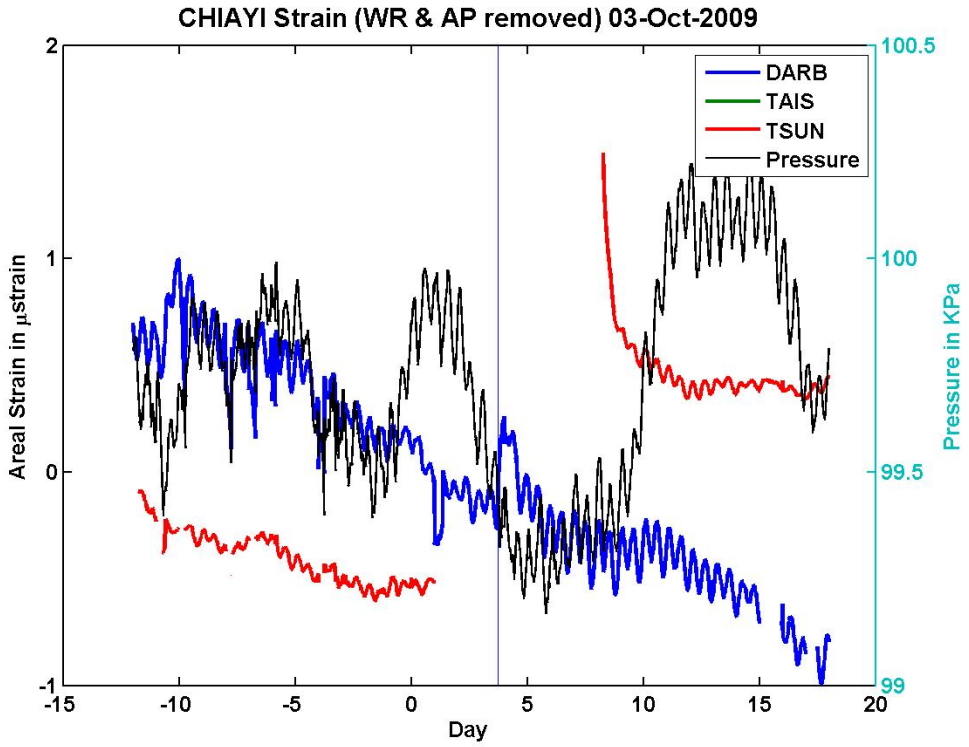


圖 3.67：2009 年 10 月 4 日規模 6.1，花蓮市外海的地震。在嘉義網達邦測站顯示同震變形，達邦站與中興站有明顯的應變異常。

(8) 2009 年 12 月 19 日規模 6.9 花蓮市外海的地震

該地震於嘉義網(圖 3.68)的同震變化非常明顯，達邦站於地震前 6 月 16 日又異常突跳，太興站與中興站於 10 日至 15 日間也可以發現開始有應變斜率的改變，可以確認為地震前兆的應變異常。

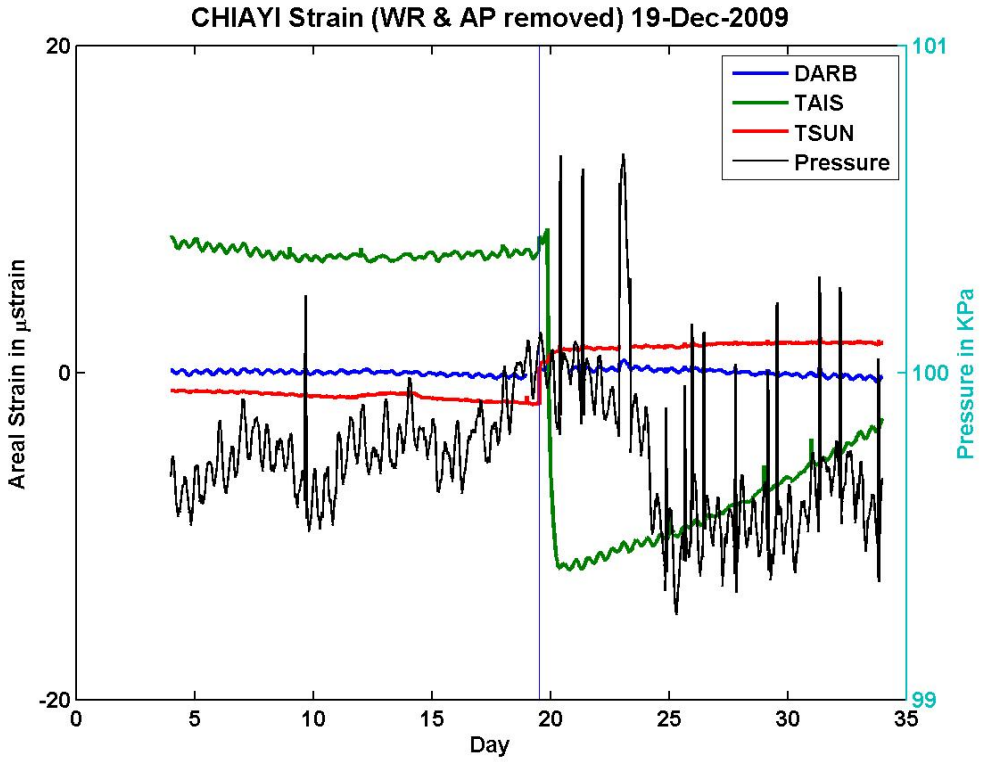


圖 3.68：2009 年 12 月 19 日規模 6.9，花蓮市外海的地震。在嘉義網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(9) 2010 年 3 月 4 日規模 6.4 甲仙地震

嘉義網(圖 3.69) 顯示太興國小與中興國小都對地震有同震的反應，當我們來看地震前十幾天的變化(圖 3.70)，可看出地震前太興國小站(TAIS)與中興國小(TSUN)在地震前的應變斜率有明顯改變，可以確認為地震前兆的應變異常。

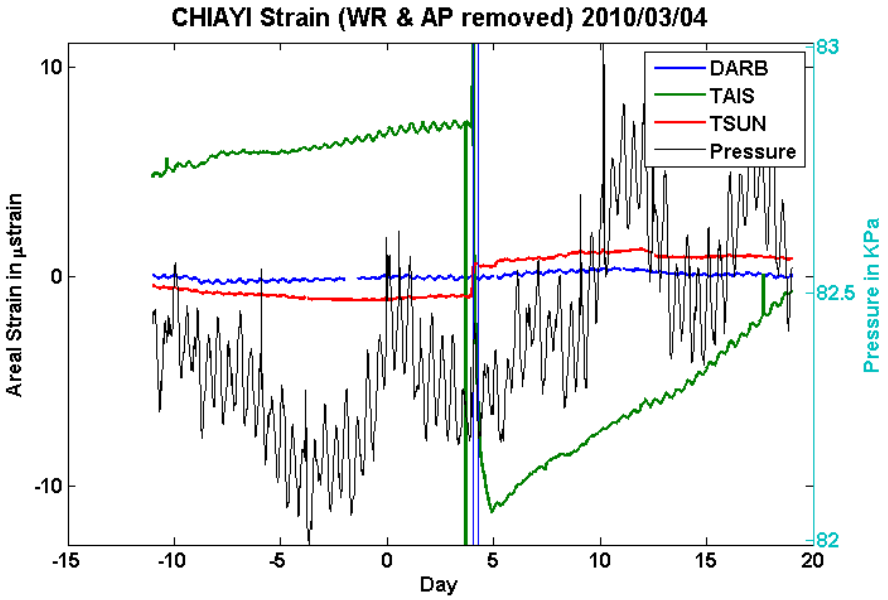


圖 3.69：2010 年 3 月 4 日規模 6.4，甲仙地震。嘉義網。

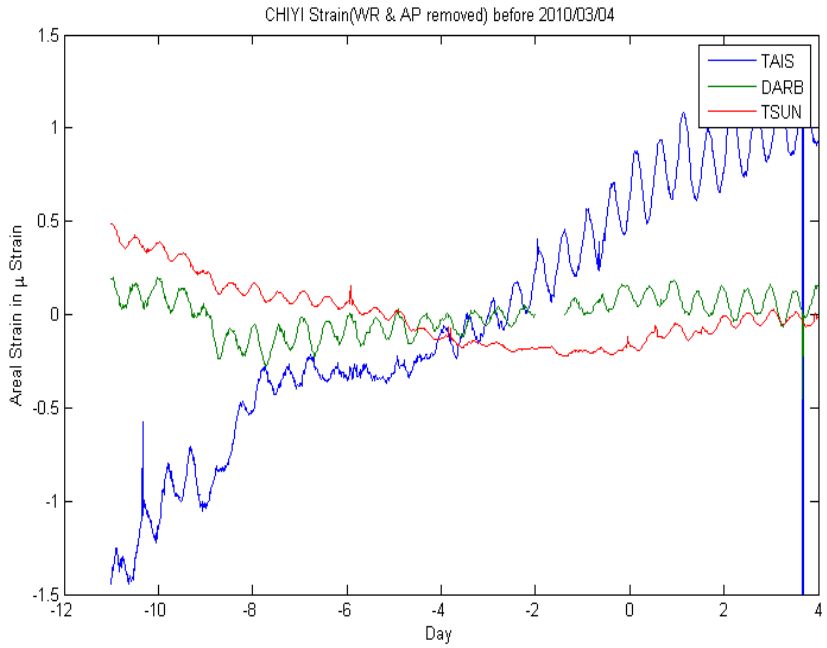


圖 3.70：2010 年 3 月 4 日規模 6.4，甲仙地震。在嘉義網太興國小與及中興國小測站都顯示震前應變斜率的改變，有明顯的應變異常。

(10) 2010 年 4 月 9 日規模 5.1 宜蘭外海的地震與 2010 年 4 月 11 日規模 5.4 台東成功外海地震

新竹網(圖 3.71)各測站都可以發現在 4 月 2 日開始有應變斜率改變，同震變形與地震後應變斜率改變都很明顯，可以確認為地震前兆的應變異常。

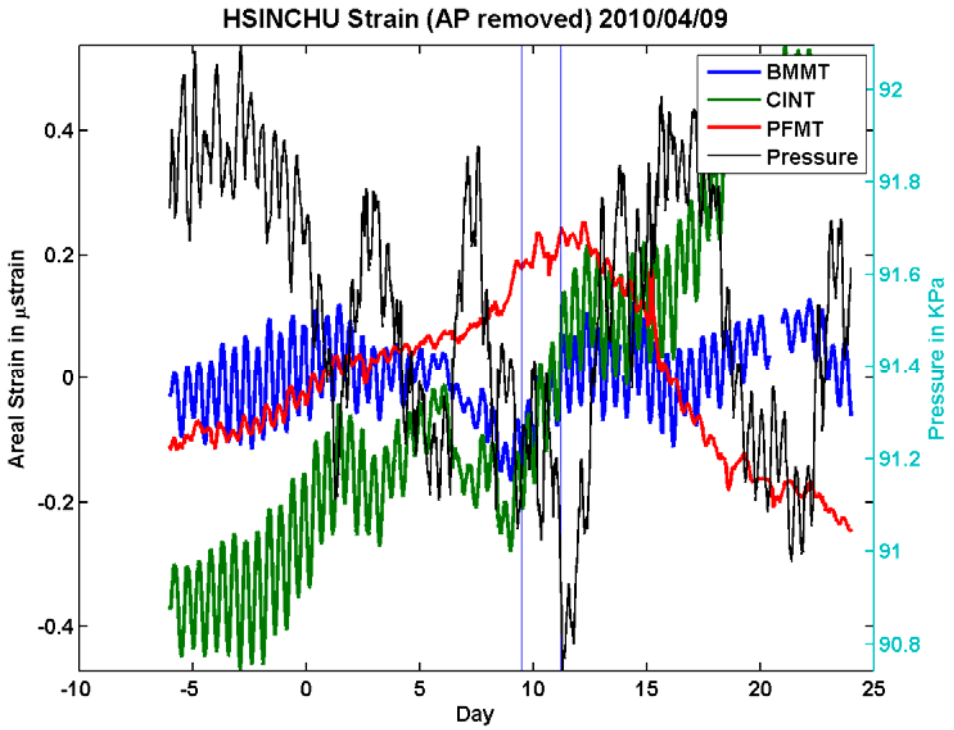


圖 3.71：2010 年 4 月 9 日規模 5.1，宜蘭外海的地震；與 2010 年 4 月 11 日規模 5.4，台東成功外海地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(11) 2010 年 4 月 23 日規模 5 宜蘭蘇澳外海的地震

新竹網(圖 3.72)顯示在 6 月 16 日左右各站的應變開始有斜率的變化，新樂站與大坪站的同震應變變化較為明顯，而地震後三個測站都有應變斜率的改變，應該可以確認為此異常為地震前兆。但要特別注意 4 月 11 號左右的應變斜率改變為 2010 年 4 月 11 日規模 5.4 台東成功外海地震的同震變化，並非地震前兆之異常。

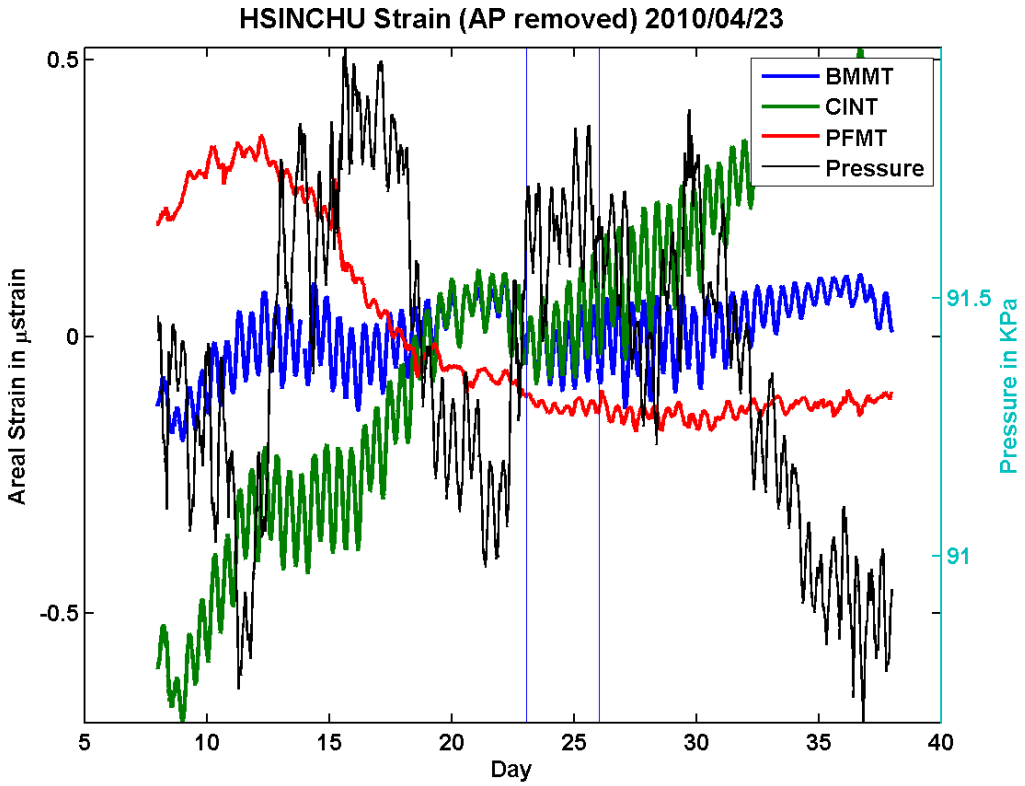


圖 3.72：2010 年 4 月 23 日規模 5，宜蘭蘇澳外海的地震。在新竹網各測站都顯示同震變形，有明顯的應變異常。

(12) 2010 年 7 月 3 日規模 5.1 屏東縣的地震與 2010 年 7 月 9 日規模 5.3 宜蘭南澳外海的地震

這兩次地震同時在嘉義網(圖 3.73)與新竹網(圖 3.74)都有發現地震前與地震後的應變斜率改變，其時間點不論在嘉義網或新竹網都大約在 6 月 29 日左右。

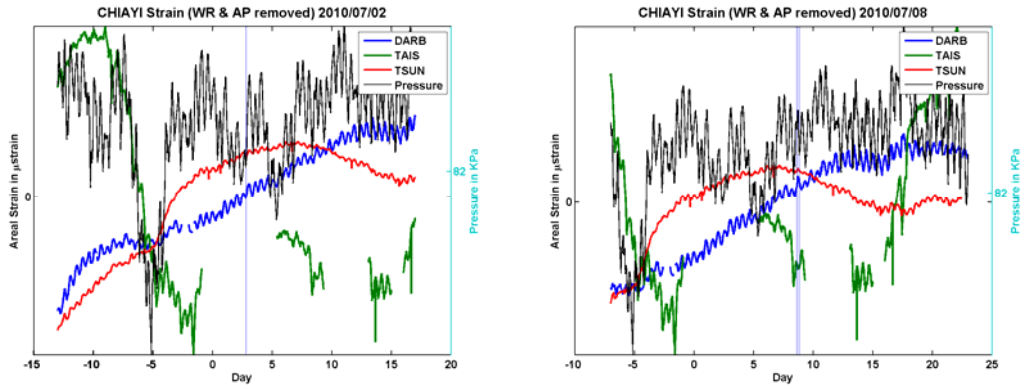
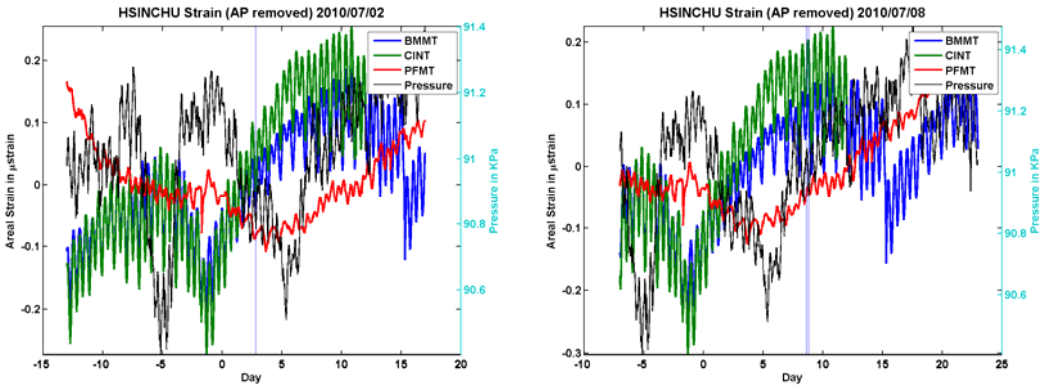


圖 3.73：2010 年 7 月 3 日規模 5.1，屏東縣的地震；2010 年 7 月 9 日規模 5.3，宜蘭南澳外海的地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。



.

圖 3.74：2010 年 7 月 3 日規模 5.1，屏東縣的地震；2010 年 7 月 9 日規模 5.3，宜蘭南澳外海的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。

(13) 2010 年 9 月 29 日規模 5 花蓮外海地震、10 月 1 日規模 5.1 宜蘭地震、10 月 3 日規模 5 宜蘭南澳地震與 10 月 4 日規模 6.6 宜蘭外海地震

嘉義網(圖 3.75)觀察到這四起地震 9 月 21 日左右，達邦站與太興站都有明顯應變突跳與斜率的改變，可判斷為地震前兆的應變異常。但地震期間只剩下達邦站有資料，同震的變形似乎比地潮週期訊號的振幅要小，因此並不明顯。

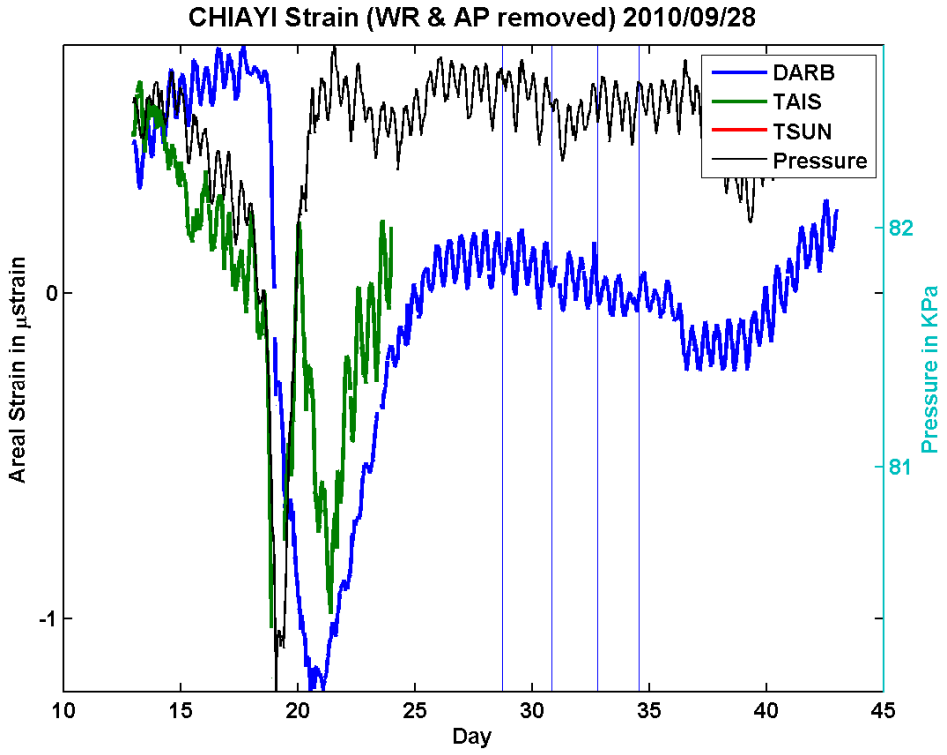


圖 3.75：2010 年 9 月 29 日規模 5，花蓮外海地震；10 月 1 日規模 5.1，宜蘭地震；10 月 3 日規模 5，宜蘭南澳地震；10 月 4 日規模 6.6，宜蘭外海地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。

(14) 2011 年 3 月 20 日規模 5.8 台東外海的地震

嘉義網(圖 3.76)的三個測站在地震前約 3 月 11 日左右有應變斜率的改變，中興站也在相同時間發生應變突跳，太興的同震變化較其他兩站為明顯，但可惜在該時間區段中興站缺地下水資料，無法做地下水效應的去除。

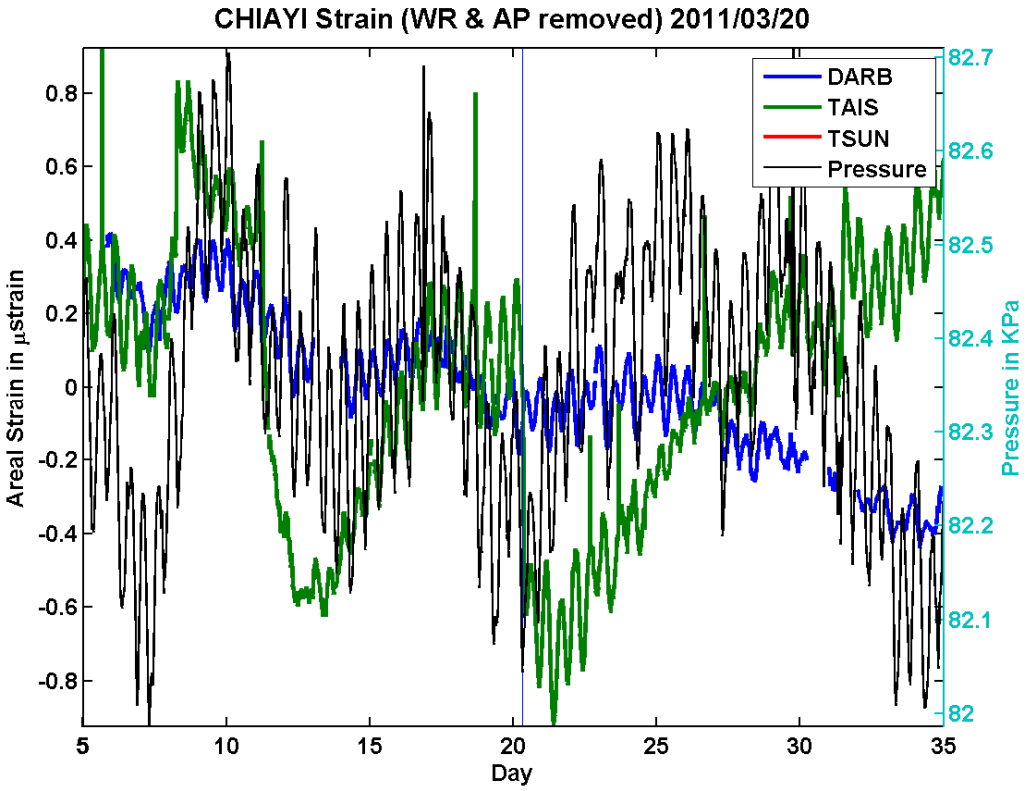


圖 3.76：2011 年 3 月 20 日規模 5.8，台東外海的地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。

(15) 2011 年 4 月 29 日規模 5.8 台東外海的地震

嘉義網(圖 3.77)在地震前約 4 月 18 日都有發現應變斜率的改變，嘉義網的太興站的震前應變變化都有斜率的改變，而新竹網因為地潮週期訊號的振幅較大，不容易看出同震的變化。新竹網(圖 3.78)的新樂站在 18 日有異常突跳，之後約在 22 日開始應變突降並伴隨著斜率的改變。綜合兩地區的應變資料，確認應該為地震前兆的應變異常。

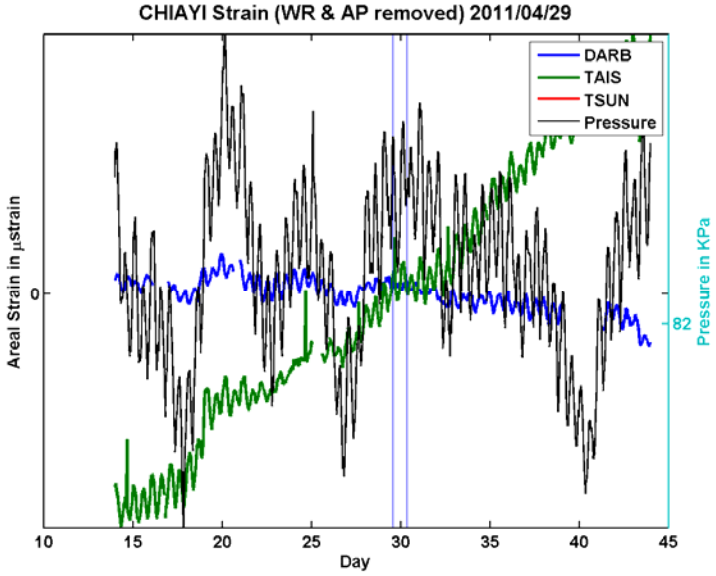


圖 3.77：2011 年 4 月 29 日規模 5.8，台東外海的地震。在嘉義網各測站都顯示有明顯的應變異常。

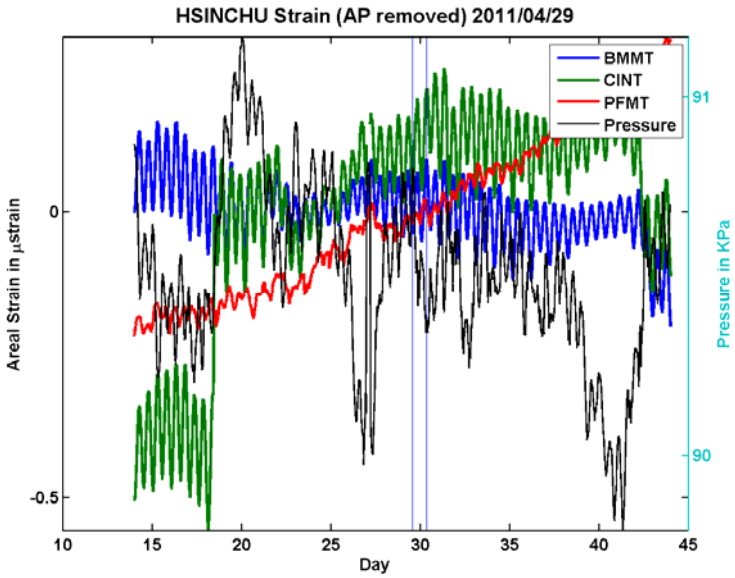


圖 3.78：2011 年 4 月 29 日規模 5.8，台東外海的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。

(16) 2011 年 6 月 26 日規模 5.0 南投的地震

不論嘉義網(圖 3.79)或新竹網(圖 3.80)，在地震前都有明顯的應變斜率改變，且達邦站與梅花站，確認應該有地震的前兆之應變異常。達邦站於 18 號左右應變下降約 0.2 μstrain，然後於 24 號左右開始應變持續下降，而新竹網的梅花國小站與大坪國小站則是在 25 號左右開始改變應變斜率，確認應該為地震前兆的應變異常。

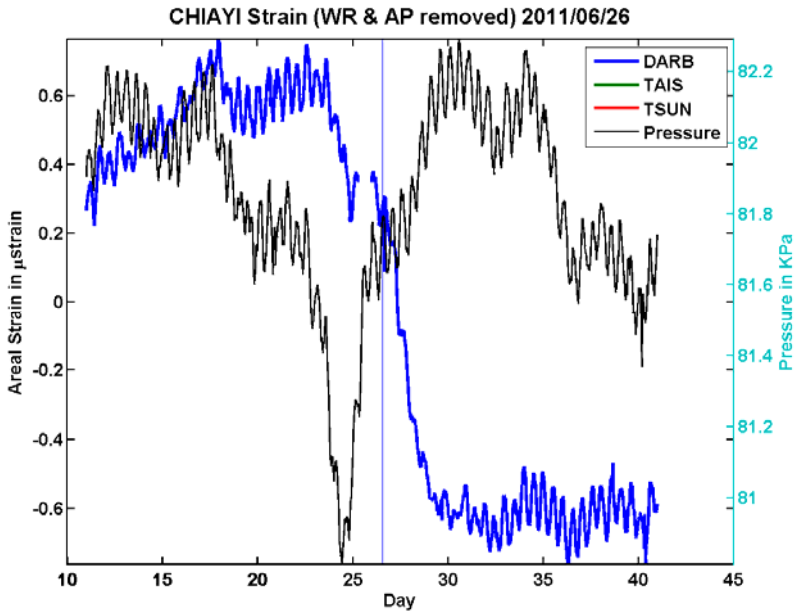


圖 3.79：2011 年 6 月 26 日規模 5.0，南投的地震。在嘉義網達邦測站顯示有明顯的應變異常。

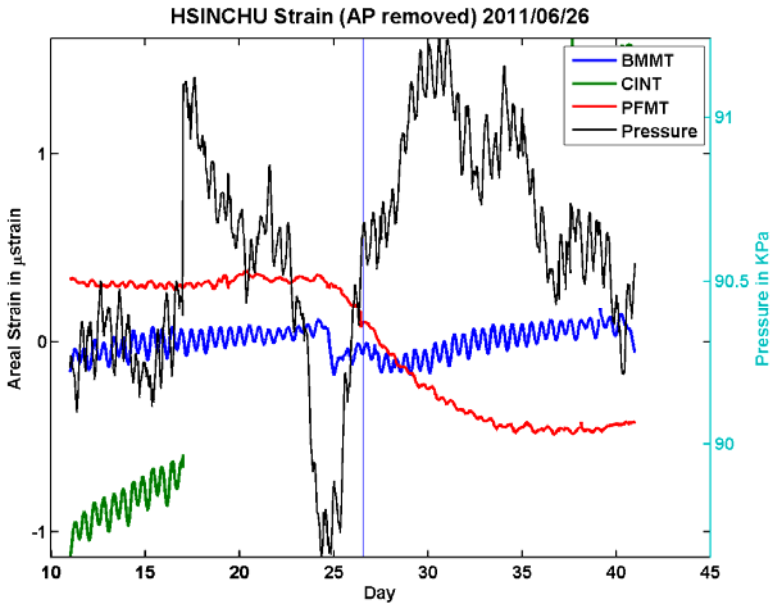


圖 3.80：2011 年 6 月 26 日規模 5.0，南投的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。

(17) 2011 年 9 月 9 日規模 5.0 台東外海的地震

新竹網(圖 3.81)在地震前約 9 月 1 日都有發現應變的突降與斜率的改變，其中梅花國小站於地震前應變也產生突降，確認應該為地震前兆的應變異常。

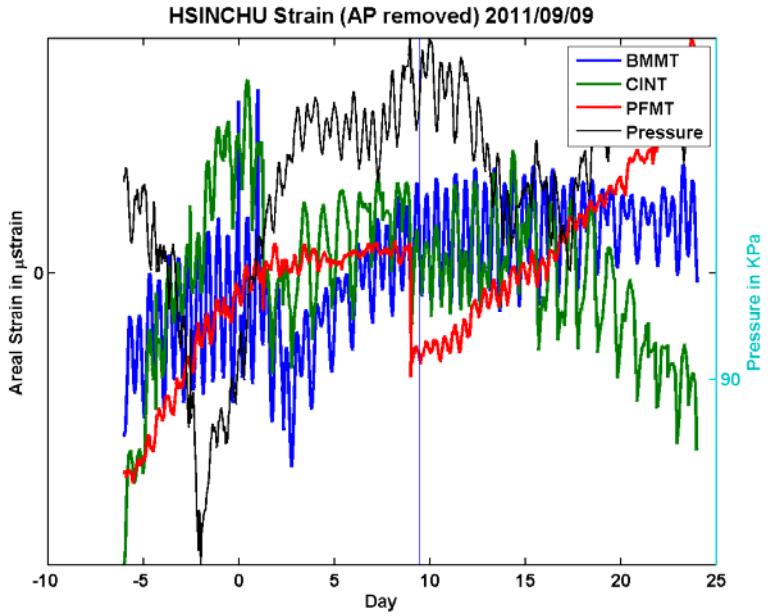


圖 3.81：2011 年 9 月 9 日規模 5.0，台東外海的地震。在新竹網各測站都顯示有明顯的應變異常。

3-3-3 潮汐效應評估的方法初步測試

造成潮汐的最基本力量就是太陽、地球與月亮之間的萬有引力，這也就是維持它們在其各自軌道，天體運行的同一個力量。一般而言，主要只考慮太陽與月亮萬有引力的影響，其餘星球的引力很少在潮汐分析中被加入考慮。然而當我們要以調和函數來分析時，通常可細分為數十個到數百個分量，其週期也從十多小時到十多年不等，這主要是因為在調和函數分析時，每個分量都是以固定振幅的正弦或餘弦函數來表示，也就是用下列公式表示：

$$Z_i(t) = Z_0 + \sum^{N} H_j \cos\left[\sigma_j t - g_j + \left(V_j + u_j\right)\right] \qquad \text{（式 3.1）}$$

其中 $Z_i(t)$ 代表 i 站在 t 時間的潮位高，

Z_0 代表平均潮位高

H_j 代表 j 分量的固定振幅

σ_j 、g_j 、V_j 、u_j 各代表 j 分量的角速度、起始相位、儀器延遲與附近海底地形的延遲量。

因此，我們一般認知的地球一天繞太陽一圈，月亮一個月繞地球一圈，地球上在背對星體或面向星體時，都會是高潮（圖 3.82；*NOAA*,2000）；但面向星體時的起潮量會大於背對星體，因此在調和函數分析中，可用半天潮來表達平均起潮量的部分，而其餘和半天潮差異的起潮量則可以用全日潮及半日潮主頻率再加減些微的偏移頻率的餘弦函數來補償，而這些都只是代表圓形軌道的部分，實際上的軌道是橢圓的，被旋轉體是在橢圓兩個圓心中的一個，並且軌道面與地球赤道面間有傾斜角，因此這些都需要用偏移的頻率來吸收這些非均勻旋轉的部分，才形成許多潮汐分量的分析方法。一般而言，起潮函數（Tide Generating Function）主要是太陽、月亮相對於地心的距離，以及它們在黃道面（Ecliptic）上的經緯度的函數，在加上五個天文角度變化的關係（表 3.3）。

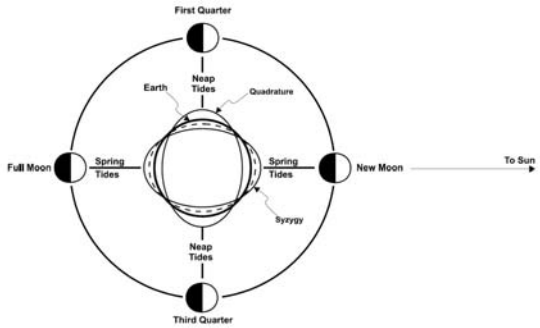


圖 3.82：日月星體造成潮汐變化示意圖。

表 3.3：主要天文角度變化速率及週期。

天文角度	說明	角速度	週期
S	月亮的平經度	0.549017 °/hr	27.321582 days
h	太陽的平經度	0.041069 °/hr	365.242199 days
p	月亮軌道近地點的經度	0.004642 °/hr	8.847 years
N	月亮軌道升交點的平經度	-0.002206 °/hr	18.613 years
p_s	太陽軌道近地點的經度	0.000002 °/hr	20940 years

因此，可列出幾個較顯著的天文潮汐調和函數之分量如表 3.4。

表 3.4：天文潮汐調和函數分量表。

名稱	分量	角速度（°/hr）	相對振幅
長周期：			
M_N	N'	0.0022	0.0655
S_a	$h-p_s$	0.0411	0.0118
S_{sa}	2h	0.0821	0.0729
M_{sm}	s-2h+p	0.4715	0.0158
M_m	s-p	0.5444	0.0825
M_{sf}	2s-2h	1.0159	0.0137
M_f	2s	1.0980	0.1564
M_{fN}	2s+N'	1.1002	0.0648
M_t	3s-p	1.6424	0.0300
M_{tt}	3s-p+N'	1.6446	0.0124
全日潮：			
Q_1	15°t+h-3s+p-90°	13.3987	0.0722
O_1	15°t+h-2s-90°	13.9430	0.3769
P_1	15°t-h-90°	14.9589	0.1785
K_1	15°t+h+90°	15.0411	0.5305
J_1	15°t+h+s-p+90°	15.5854	0.0296
OO_1	15°t+h+2s+90°	16.1391	0.0162
半日潮：			
$2N_2$	30°t+2h-4s+2p	27.8953	0.0230
μ_2	30°t+4h-4s	27.9682	0.0278
N_2	30°t+2h-3s+p	28.4397	0.1739
v_2	30°t+4h-3s-p	28.5126	0.0330
M_2	30°t+2h-2s	28.9841	0.9081
L_2	30°t+2h-s-p+180°	29.5285	0.0257
T_2	$30°t+h+p_s$	29.9589	0.0248
S_2	30°t	30.0000	0.4236
K_2	30°t+2h	30.0821	0.1151

常態的潮汐預測是基於簡單的線性理論，認為潮汐可以歸納成數個或數十個力量（萬有引力）所造成各種潮汐的變化現象，其中可顯現潮汐變化的現象包括海水、地下水、井水、河流水位的潮汐，另外重力儀、井下應變儀、GPS、水準測量、伸張儀、地表應變儀、形變計等也都會記錄到潮汐現象。因此，處理這一些資料時可以利用一些已知的天文潮汐的頻率來進行調和函數分析，認為這些頻率在經過各種傳遞物質或環境變化的影響之後，仍然可維持固定的頻率，所以在不同的測站，所測得潮汐振幅大小與相位可能會因為傳遞物質的衰減而有不同的差異，但其頻率仍應維持相同，而各頻率的振幅相對變化亦可維持在一個極小的範圍內。潮汐現象會因各記錄儀器的不同而表現出不同的物理特性，大致上包括位移、重力、應力、應變、壓力等等物理量。

基本上，海水潮汐主要由地球與鄰近天文星體間的吸引力，尤其是月球、太陽與地球的相對位置造成的影響最大。而這個系統的變化並非純粹是線性的，因此所有的潮汐預測加總、相對差異以及頻率的調和性質，都要考慮非線性所產生的誤差[*Schureman*,1941]。

在所有各種潮汐觀測中，以海水面高度變化的潮汐觀測歷史最悠久，觀測量也最多，因此在考慮潮汐分析的方法時，大多可參考海洋潮汐資料的分析方法。在開放性的海岸進行觀測，通常需有相當長時間的潮汐觀測資料，方可用來估計各天文潮汐頻率的振幅及相位大小，以便來進行良好的潮汐預測。美國海洋測量局（National Ocean Service, NOS）的參考潮位站，通常至少須使用一年的逐時資料來分析半日及一日的潮汐分量，對於半年或一年的潮汐分析，則更需數年或數十年的月平均值來進行調和分析。*Scherer*（1990）認為要解出 S_a、S_{sa} 的分量，可能至少需用數十年的資料方能求得良好的結果。美國海洋測量局用 37 個主要的天文頻率進行潮汐的分析，其中 12 個主要頻率及其相對振幅大小如表 3.3[*NOAA*, 2000]所示。

表 3.5：潮汐資料主要調和頻率組成。

Species and name	Symbol	Period Solar hours	Relative Size
Semi-diurnal:			
Principal lunar	M_2	12.42	100
Principal solar	S_2	12.00	47
Larger lunar elliptic	N_2	12.66	19
Luni-solar semi-diurnal	K_2	11.97	13
Diurnal:			
Luni-solar diurnal	K_1	23.93	58
Principle lunar diurnal	O_1	25.82	42
Principle solar diurnal	P_1	24.07	19
Larger lunar elliptic	Q_1	26.87	8
Long period:			
Lunar fortnightly	M_f	327.9	17
Lunar monthly	M_m	661.3	9
Solar semi-annual	S_{sa}	4383	8
Solar annual	S_a	8766	1

表3.5中數值的相對大小，是指該頻率在平衡潮理論[*Schureman*,1941]中，以月球半日潮汐M_2的理論振幅當做100所計算出的大小。在平衡潮理論中是假設地球表面佈滿了水，並且不考慮潮水流動產生的阻力，這是用較簡化的方法來描述大量潮水的特性。此外，月亮的緯度變化也會造成一個18.6年周期的總和變化。一般而言，利用（M, S, N, K）$_2$，（K,O,P）$_1$幾個主要的分量就可以組成90%的潮汐變化，圖3.83[*NOAA*, 2000]是1日潮汐主要分量變化的示意組合。

Species and name	Symbol	Period Solar hours	Relative Size
Semi-diurnal:			
Principal lunar	M_2	12.42	100
Principal solar	S_2	12.00	47
Larger lunar elliptic	N_2	12.66	19
Luni-solar semi-diurnal	K_2	11.97	13
Diurnal:			
Luni-solar diurnal	K_1	23.93	58
Principle lunar diurnal	O_1	25.82	42
Principle solar diurnal	P_1	24.07	19
Larger lunar elliptic	Q_1	26.87	8
Long period:			
Lunar fortnightly	M_f	327.9	17
Lunar monthly	M_m	661.3	9
Solar semi-annual	S_{sa}	4383	8
Solar annual	S_a	8766	1

圖 3.83：1 日潮汐主要分量的變化的示意組合。

至於天文潮汐與海水潮汐的差異，通常受到氣象因素的影響，但在不同地點受到不同的地區效應，各潮汐分量的變化不同，其振幅變化亦有差異，通常 $M_2/S_2=2.15$ 與 $O_1/P_1=2.15$ 通常被認為可以維持較穩定的相對關係，S_a 的一年週期潮汐則受溫度與氣壓的年週期變化高度相關，在潮汐分析時最好有氣壓資料一起分析。

由於潮汐並非影響各種觀測量變化的唯一因素，其它如溫度、氣壓對所有觀測量的影響，浪、風、洋流、河流出口、漩渦、鹽度、及全球海水總量的變化對海水潮汐觀測的影響，地下水、大地應力、井孔回溯效應、斷層活動、板塊擠壓、海水潮汐負載等效應對井下應變觀測的影響，均會造成相當的觀測變化。各種潮汐觀測站所記錄到的資料與訊號來源（起潮位能與環境因素等）的關係，如圖 3.84 所示。

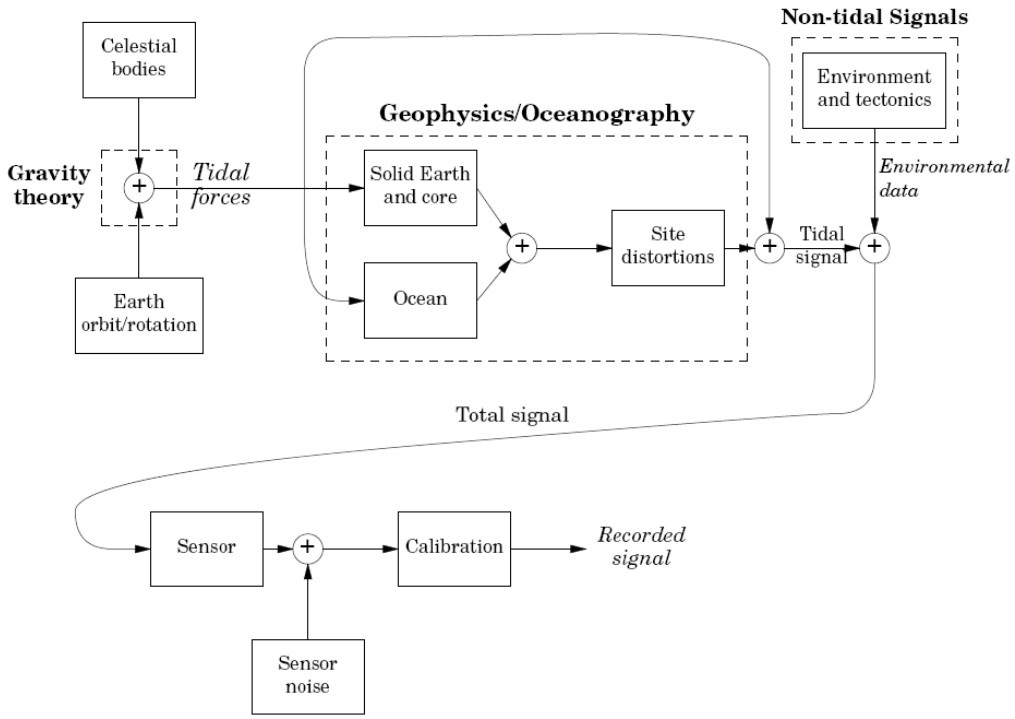


圖 3.84：地球潮汐與潮位站觀測的流程圖。

潮汐變化並非真正的線性過程，所以潮汐觀測資料的分析，必須要有一個基礎信念，就是要相信它可以用一些線性的系統來組成，調和函數的分析，就是將潮汐分成幾個完美的週期變化，每一個週期都應該是穩定的圓周運動，例如 M_2 就是月亮以 12.42 小時繞著地球做等速的圓周運動，這是最主要的一次項近似，對於未完美的部分，如月地的橢圓軌道與其間距離的變化，則再拆開成其擾動的週期，如此，單獨考慮月繞地與地繞日，及其共同組合的月地繞日，就可以拆成數十個週期，在加上地球轉軸的變動，地球的進動與章動，總共可有數百個週期。

在 19 世紀以前，潮汐資料都是直接取其平均值，在 20 世紀時的科學家則再加上一些統計的概念，第一位提出潮汐資料分析的人則是 *Munk & Cartwright*（1966）。假設潮汐資料可以用下式來表示：

$$y(t) = \int x_T(t-\tau)h_T(\tau)d\tau + \int x_B(t-\tau)h_B(\tau)d\tau + n(t) \qquad \text{（式 3.2）}$$

其中 $y(t)$ 是潮汐觀測的時間序列

$x_T(t)$ 是理論潮汐

$x_B(t)$ 是區域的氣壓或更多的環境因素

$n(t)$ 是雜訊

$n(t)$ 是指任何不能以理論地潮或氣象因素解釋的訊號，如儀器的飄移、測站的不穩定、短期的颱風、地震及暴潮等影響，或長期的地殼變動，若純粹考慮潮汐，則這些都是雜訊，否則 $n(t)$ 是在除去可解釋的潮汐部份後，可以清楚看到平均海水面、地殼變動、地震活動、暴潮等，是最佳的研究對象。

若對 3.2 式進行傅立葉轉換（Fourier Transform），則可從時間序列轉換成頻率的資訊，包括每一個頻率的振幅與相位，在海水潮汐分析中，由主要頻率的振幅可看出海岸地殼受海水重力負載的影響量，而相位更能看出海底地形、潮流所造成的延遲現象。但在這樣的分析中，最怕海洋中有相近頻率的震盪，這些可能從海峽的共振、週期性氣象因素的影響，所幸海洋中較少發現有相近的頻率，若有也是不穩定的，在海水高度變化時就改變了，倒是溫度與氣壓的年週期變化影響較大，這可由氣壓與海水溫度的觀測來解決。另外就是地心的自由章動（Free Core Nutation）會產生穩定的相近頻率，還好其振幅不大，還不至於影響到資料的分析。在井下應變記錄的潮汐分析中，由於斷層活動、板塊擠壓、地下水變化、水庫儲水負載、地震活動、氣壓變化等都會產生比每日潮汐更顯著的變化。

在傅立葉分析中，振幅大小是一個絕對量，但相位則有 2 種選擇，一是當地的相位，在起潮位能最高時，所有頻率在當時都同時相位達到零點，因此由當時起算，其他時間各個頻率都會有不同的相位，一天會有一次歸零的時刻。另一種表示法是稱為格林威治相位（Greenwich phase），就是以格林威治當天的最高起潮時刻所有相位歸零時起算，計算其它地方的相位差，這種表示法可以幫助來做潮流的計算，也可比較鄰近兩站的相位差異與潮位特性。各地的格林威治相位計算與頻率、精度及球諧函數中的度（Order）有關。

利用起潮頻率的分析法大致上可分為 3 種，其目的都是在分析潮位資料中的理論地潮部份，在用途上，則可以做潮汐預測之用，也可以消除潮汐資料中的理論地潮部份，如此，可以看清楚其餘的潮位資料中的訊息，加以分析，當有缺資料時，可以避免理論潮汐因為周期不完整所產生的偏差。這三種潮汐的分析法，大致續述如下：

1. 響應分析法[*Munk&Cartwright*,1966]：這是利用傅立葉轉換或是快速傅立葉轉換將在時間領域的潮位資料轉換成頻率領域，並求取個頻率的響應（振幅）與相位。在早期因計算能力的限制，無法做大量資料的快速處理，所以必須選擇幾個主要週期共同倍數的時間長，例如選用 3 個陰曆月的潮位資料來分析，才能得到好結果。最近因為計算能力的進步，可以用較長的時間，例如 19 年或數個 18.6 年（或許 93 年是個最好長度），就看潮汐觀測站是不是能保持穩定的觀測環境，這樣才能有穩定的週期及相位。當然，在分析 19 年資料時，可以用每小時的資料，但在分析 93 年的資料，可能只能用每日的平均值，此時，如何在取每日平均時，不會影響到各頻率相位的不連續，就是一個很重要的因素，一般認為以適當不會產生相位

偏移的慮波器來取代日平均值的處理方式才是最適當的。

2. 多變數迴歸法[*Haubrich*, 1965]：這是利用固定幾個主要得起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，在加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應，這方法在近年來有一廣被採用的程式 BAYTAP-G，是由日本人 *Tamura et.al.*（1996）所發展出來，廣被使用。本方法需要蒐集氣壓資料（若有溫度資料更好）。
3. 預測潮汐法[*Le Prevost et. al.*, 1991]：此法是在電腦技術發達以後才建立起來的，採用大量的潮位分量，包括各分潮的振幅比例來估計一些平常潮汐分析不易得到的分量。本法須要有精密的海岸線來估計海潮負載的部份，由於臺灣海岸線的精密坐標一直都未在外流傳，一般程式都無法對本地做很好的潮位預測。

本計畫利用多變數迴歸法來分析井下應變儀觀測中的潮汐分量，其原理就是利用半天、一天、半月及一月週期的顯著頻率的正弦與餘弦函數做成相同時間的序列，利用多變數迴歸法來分析潮位。

利用多變數迴歸法進行潮位資料分析，*Rossiter*（1972）同時考慮海水面高度所受的不同影響因素，利用迴歸分析的方法，求出各種因素對潮汐的影響。他所用的公式如下：

$$Z_t = \sum a_p t^p + \sum b_r B_r(t) + \sum \left[c_i \cos 2\pi\omega_i t\right] + \sum \left[d_i \sin 2\pi\omega_i t\right] + \varepsilon_t \qquad （式 3.3）$$

其中 Z_t 是在 t 時間的海水面高度，是 P 次多項式來表示長期性的變動

B_r 代表各種不同的氣象因素，如氣壓、氣溫降雨量等，

ω_i 則是各種天文潮汐分量的角頻率

ε_t 則是其他為考慮進去的各種殘餘影響量及誤差

c_i 、d_i 為各種週期天文潮汐之振幅

本計畫中利用多變數迴歸補遺法主要參照 3.3 式，但選擇 p=1 以消除資料的整體斜率。另外，氣壓效應與地下水影響已經消除，所以 b_rB_r 項可以不用，而 ω_i 項則只採用 9 個主要頻率，如表 3.6 所示。

表 3.6：多變數迴歸法補遺使用之頻率。

名稱	頻率(cycle/hr)	名稱	頻率(cycle/hr)	名稱	頻率(cycle/hr)
O_1	0.0387307	M_2	0.0805114	S_2	0.0833333
K_1	0.0417807	P_1	0.0415526	N_2	0.0789992
K_2	0.0835615	M_F	0.0030501	M_M	0.0015122

一般而言，以一個月當一個視窗來處理，只要資料缺失不超過一半以上，所求出來的潮汐誤差大概不超過 10%，如圖 3.85 所示，圖中藍色表示原有資料，綠色為所估計之理論值，紅色則為實測資料與理論值之差異。此例所示雖然遺缺一半左右，但仍可得好的估計潮汐。

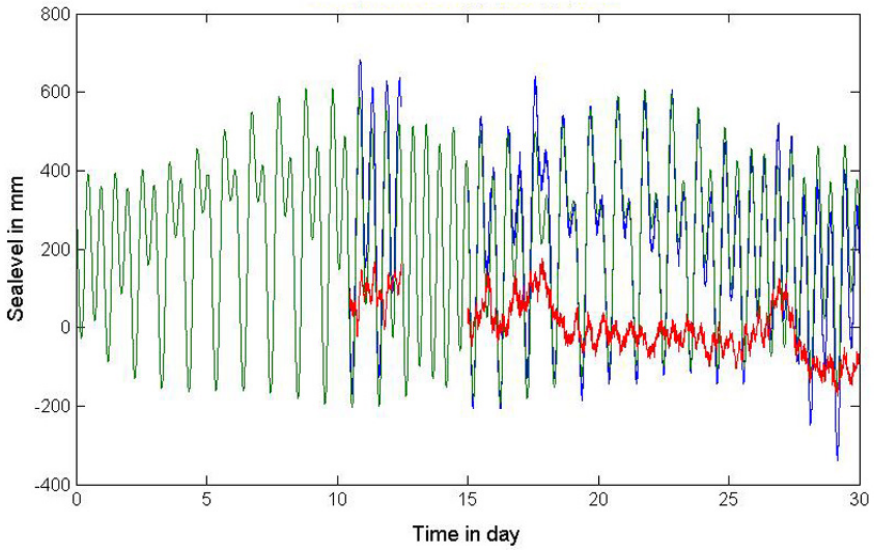


圖 3.85：多變數迴歸法資料補遺。

多變數迴歸法原理簡單，執行迅速，成功率與精度都高，一次處理一個月到三個月的資料，不至於造成長期的系統誤差，當然與其它的起潮頻率分析相同，越長期的資料若能得到顯著的成果則越好，否則容易造成系統誤差。另外，過大或具有與主要潮汐分量相近頻率的雜訊也會干擾到簡諧函數的估計，往往會造成錯誤的結果。因此，我們對幾個具有較大地震同震變形或颱風變形的時段（如甲仙地震與柯羅莎颱風）做進一步的分析。

在本期的計畫中，我們編輯以及測試了潮汐分析的程式，基本上對於無特殊事件（如颱風、地震、突跳等事件）以外，大多可將潮汐週期變化移除 90%以上，但對於有特殊事件的時段，雖然也可以明顯移除大部份的潮汐變化，但有時會修正過度，有時會因特殊事件的訊號而產生潮汐的週期訊號，這些可以用甲仙地震與柯羅莎颱風時段的資料來作說明。

圖 3.86 是嘉義網在 2007 年 10 月 6 日柯羅莎颱風前後各一個半月期間的資料，其中達邦測站(DARB)與中興國小(TSUN)資料較完整，且在颱風期間都有疑似慢地震的異常應變，而附近的太興國小(TAIS)則缺部分資料，所有測站資料都偶有缺失與斷電(產生突跳)的現象，我們先嘗試直接作潮汐估計。

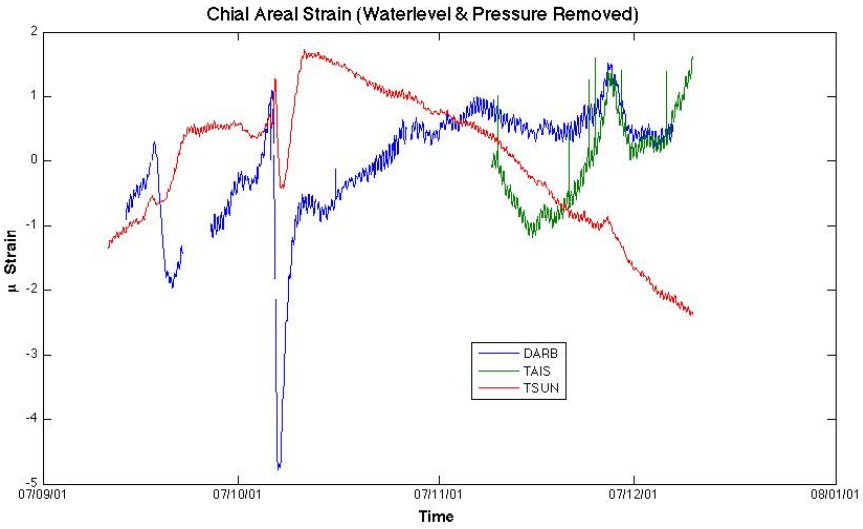


圖 3.86：嘉義網在柯羅莎颱風期間的原始變形。

圖 3.87～圖 3.89 是達邦、太興國小與中興國小測站的潮汐估計，圖 3.87 是達邦站估計潮汐的結果，藍色曲線是原始的應變資料，綠色曲線是所估計出來的潮汐變化，紅色曲線則是兩者的差異，也就是去除潮汐後的實際應變資料。由紅色資料可看出大致上的曲線（紅色）還是沿著原來的曲線（藍色），但是週期性的起伏比原來的還小，這表示已經有效地移除了潮汐，而且所移除的每日潮汐沒有太大的偏差。

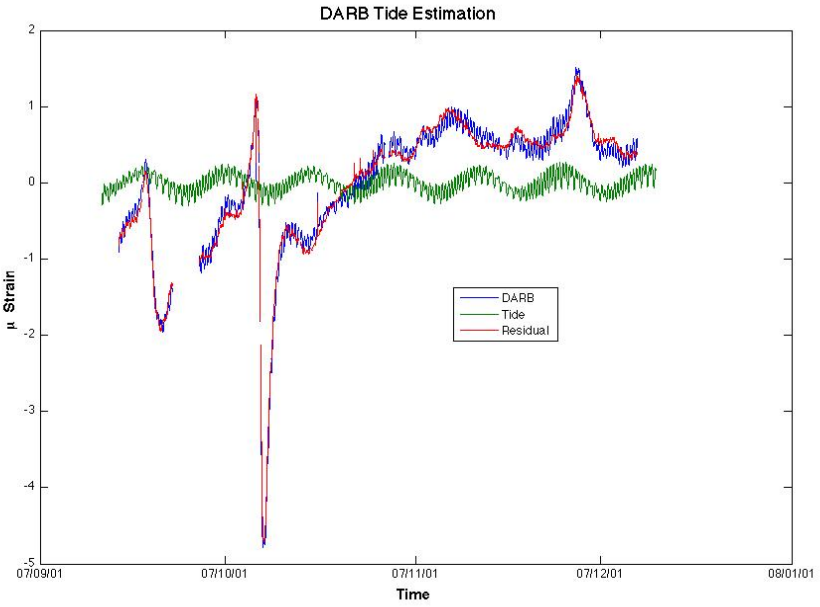


圖 3.87：達邦觀測站在柯羅莎颱風期間的潮汐分析。

圖 3.88 太興國小的資料因只有最後的 1/3，所得到的潮汐明顯偏大，使得最後的紅色曲線已經明顯偏離了原來的藍色曲線，這主要的原因是因為整段資料都顯示有一個低頻的上下震盪，這個近似週期性的變化被潮汐估計程式誤認為是潮汐的週期，而放大了該頻率的振幅。

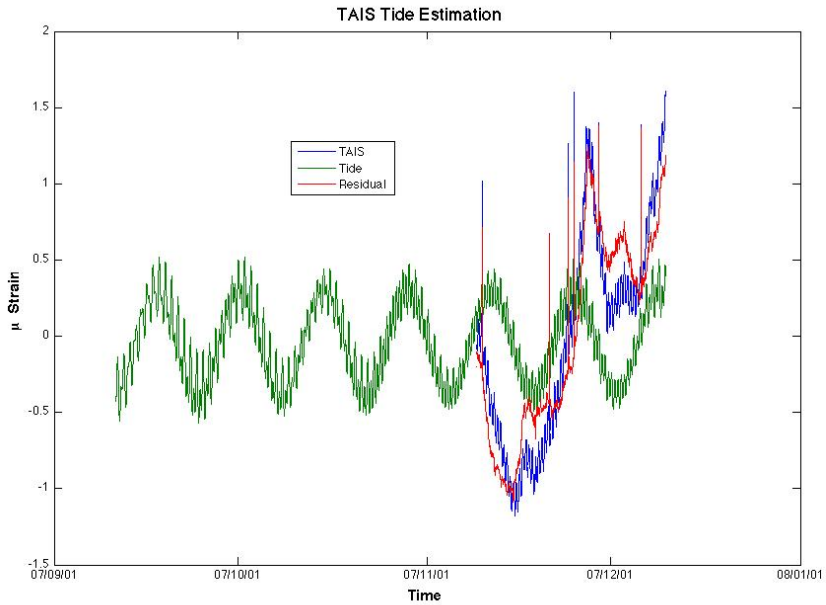


圖 3.88：太興國小觀測站在柯羅莎颱風期間的潮汐分析。

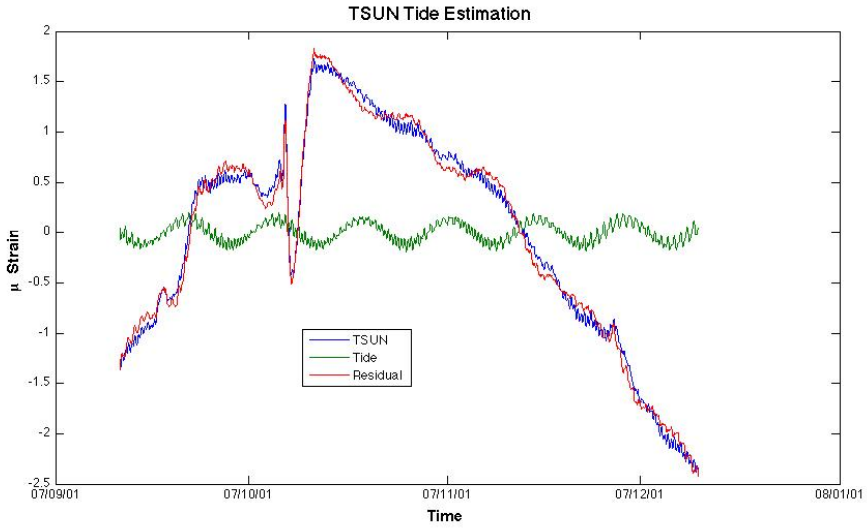


圖 3.89：中興國小觀測站在柯羅莎颱風期間的潮汐分析。

圖 3.89 中興國小的資料雖然也有上下震盪，但並無明顯的週期性，所以不會明顯的影響潮汐的估計，所以得到的潮汐較正常，由資料可看出大致上還是沿著原來的藍色曲線，但在颱風之後略有上下起伏，表示所得的潮汐在相位上可能不正確，這表示颱風後的異常訊號已經影響潮汐的估計，或許要用人工先臨時切除該異常訊號，待正確的估計潮汐之後，再恢復該資料。

綜合嘉義觀測網在這時段的測試，圖 3.90 是把三測站所估計的潮汐畫在一起，可明顯地看出，太興國小與達邦兩站有相同的潮汐相位變化，但太興國小的振幅是達邦的兩倍以上。而中興國小則相反，與達邦有相同的振幅，但是相位卻有 1/4 週期的偏移，這些現象就如上面所說明，必須要有更多的經驗來設定原則，以得到正確的潮汐估計。

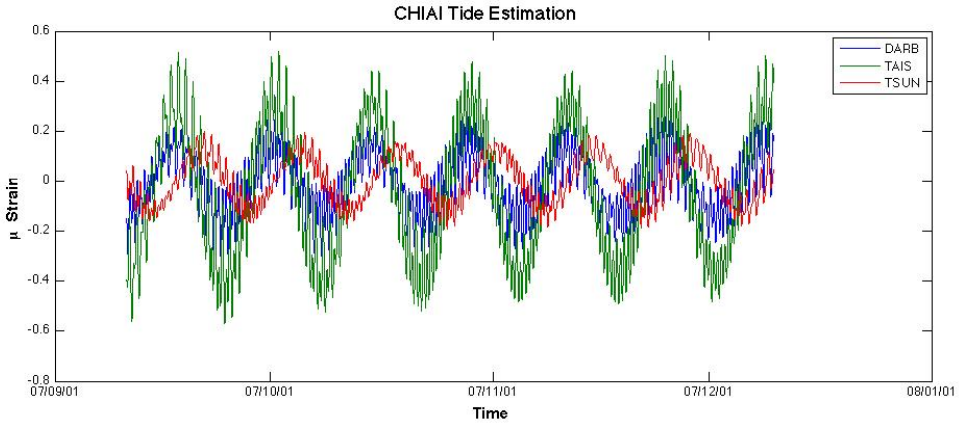


圖 3.90：嘉義網各測站在柯羅莎颱風期間的潮汐估計。

圖 3.91 是嘉義網在 2010 年 3 月 4 日甲仙地震前後各一個半月期間的資料，每站的資料都大致完整，其中達邦測站(DARB)無明顯地同震應變，中興國小(TSUN) 與太興國小(TAIS)有相當明顯的同震應變，且所有測站資料都偶有缺失與斷電(產生突跳)的現象，我們也先嘗試直接作潮汐估計。

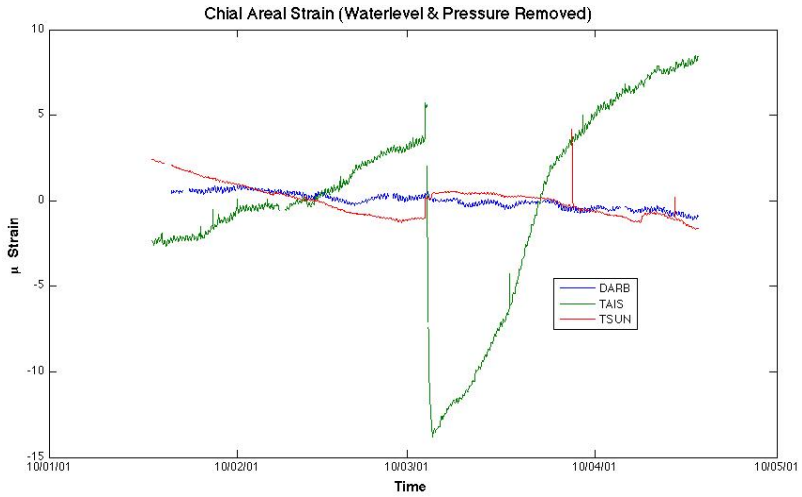


圖 3.91：嘉義網在甲仙地震期間的原始變形。

圖 3.92～圖 3.94 是達邦、太興國小與中興國小測站的潮汐估計。圖 3.92 是達邦站估計潮汐的結果，因沒有同震的變異量，去除潮汐後的實際應變資料（紅色）還是沿著原來的曲線（藍色），但是週期性的起伏比原來的還小，這表示已經有效地移除了潮汐，而且所移除的每日潮汐沒有太大的偏差。更重要的是這段期間所估計的潮汐最大振幅與 2007 年柯羅莎颱風期間所得的潮汐有相同的振幅，這也給我們對達邦站的結果有更大的信心。

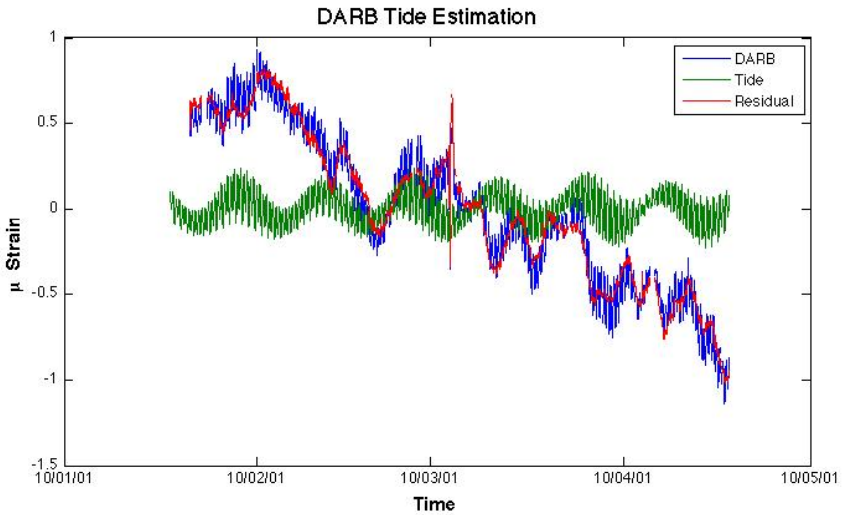


圖 3.92：達邦觀測站在甲仙地震期間的潮汐分析。

圖 3.93 太興國小的資料因有相當明顯地同震變位，所得到的潮汐明顯偏大，使得最後的紅色曲線已經明顯偏離了原來的藍色曲線，而且紅色曲線與綠色的潮汐訊號有完全相反的相位，這表示所估計的潮汐估計是過度估計。

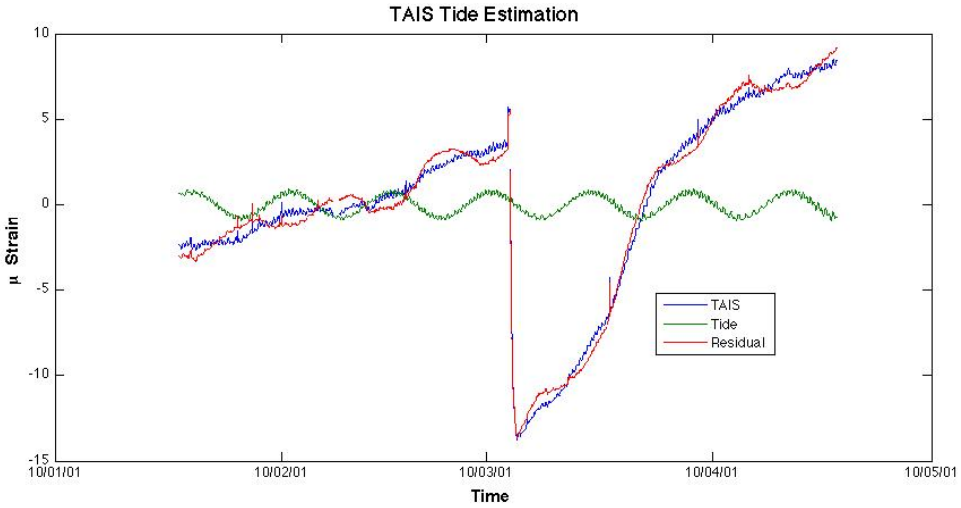


圖 3.93：太興國小觀測站在甲仙地震期間的潮汐分析。

圖 3.94 中興國小的資料也有同震的變異量，但並無明顯的週期性，由紅色資料可看出大致上還是沿著原來的藍色曲線，但潮汐週期還是存在，表示所得到的潮汐振幅太小了，這表示同震的變異量已經影響的潮汐的估計，或許要用人工先臨時切除該異常訊號，待正確的估計潮汐之後，再恢復該資料。

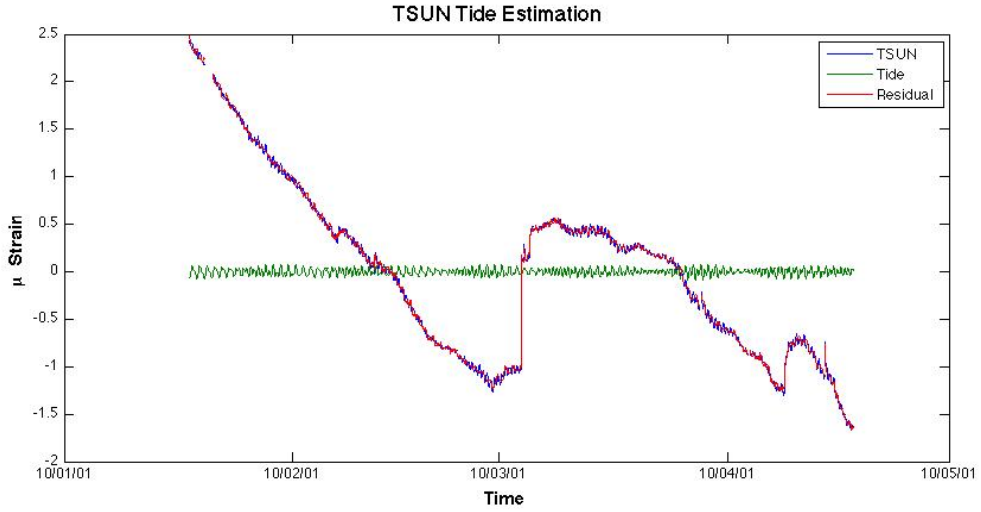


圖 3.94：中興國小觀測站在甲仙地震期間的潮汐分析。

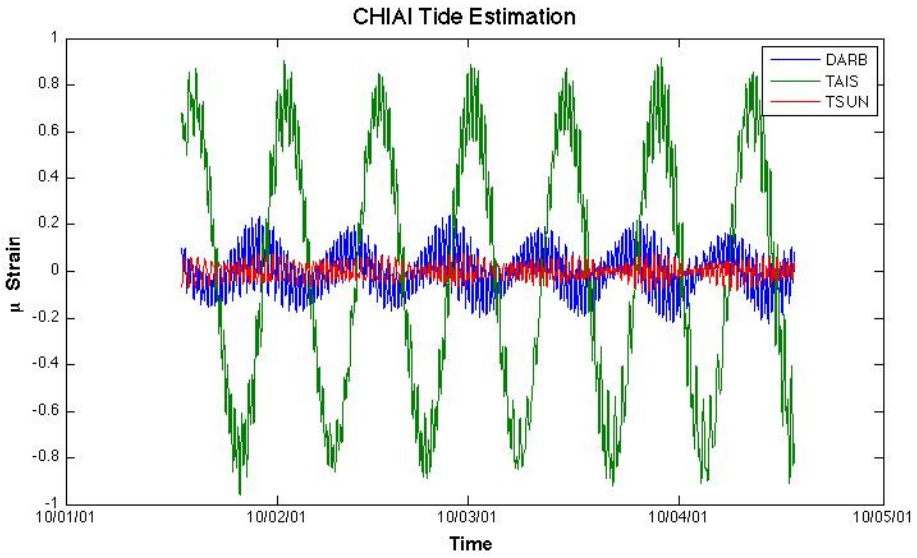


圖 3.95：嘉義網各測站在甲仙地震期間的潮汐估計。

綜合嘉義觀測網在這時段的測試，圖 3.95 是把三測站所估計的潮汐畫在一起，可明顯地看出，三站的結果完全不相同，太興國小所估計的潮汐明顯過大，約為達邦潮汐的四倍多，兩站的潮汐相位也不相同；而中興國小則相反，振幅卻只有達邦的 1/4 ，這些現象就如上面所說明，必須要有更多的經驗來設定原則，以得到正確的潮汐估計。

根據以上的測試，我們必須測試更多的異常資料對潮汐估計（或移除）的影響，若這些的影響是顯著的，則所有資料都要先對突跳的部分以人工移除，然後在估計潮汐之前也必須先將異常訊號（如：地震、颱風等）暫時移除，這部分先當作資料缺失，如此可以用潮汐的週期性同時估計並填補所有時間的潮汐現象。

3-4 井下應變儀資料管理系統網站

3-4-1 資料庫管理系統網頁簡介

本資料庫資料管理系統網站(圖 3.96)，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。後續管理及維護委託逸奇科技股份有限公司辦理。

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 3.96：井下應變儀資料庫管理系統網站首頁。

3-4-2 資料更新與使用者權限建立

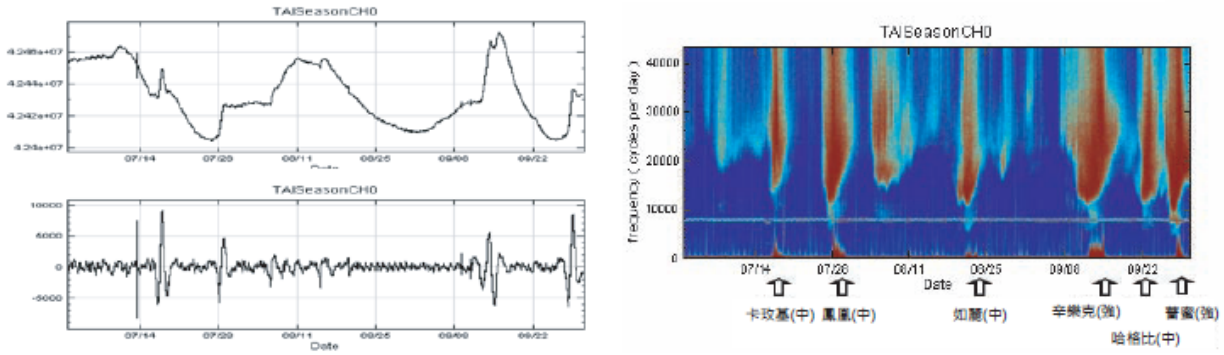
本計畫工作內容進行井下應變儀資料庫系統及地球化學資料之更新，更新之最新資料日期及 2004 年至 2010 年各站可下載檔案列表如下：

1.井下應變儀資料庫系統

根據原網站架構，井下應變儀資料庫繪圖系統使用 Matlab，地化資料則為 MSChart。目前延續原有架構，持續將新資料匯入至系統中。

除此之外，另以實驗性質透過特定分析方法，將井下應變儀原始資料做「訊號趨勢移除」，更進一步以「高解析時頻圖」分析，了解特殊應變之訊號能量(如下圖所示)。

下圖為 2008 年 7 月至 9 月嘉義太興國小的應變儀時間序列紀錄、趨勢移除與時頻圖。



資料來源：經濟部中央地質調查所

井下應變儀資料庫最新資料日期

代碼	站名	設置時間	起始時間	最新時間
BMMT	大坪國小	2005/05/18	2005/06/09	2011/10
TSUN	中興國小	2006/03/01	2006/06/06	2011/10
TAIS	太興國小	2006/03/04	2006/03/04	2011/10
ECT	甲仙十八灣	2003/10/26	2004/04/16	2007/07
SANS	明德中學	2007/11/02	2007/11/12	2011/10
PFMT	梅花國小	2005/06/04	2005/09/14	2011/10
RST	曾文水庫南	2003/10/23	2004/07/18	2011/10
RNT	曾文水庫北	2003/10/28	2004/04/15	2011/10
CINT	新樂國小	2006/11/15	2006/11/15	2011/10
LMMT	瑞峰國小	2005/06/04	2005/06/07	2011/10
DARB	達邦	2006/11/19	2006/11/19	2011/10
SLIM	樹林國小	2009/09/11	2009/09/11	2011/10
JING	錦和國小	2007/11/07	2007/11/20	2011/10

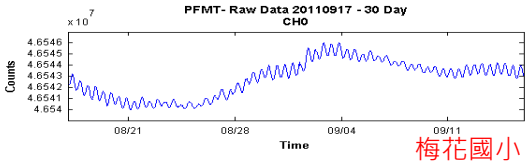
井下應變儀資料庫自 2004 年至 2011 年間各測站資料可下載檔案列表

代碼	BMMT	TSUN	TAIS	ECT	SANS	PFMT	RST	RNT	CINT	LMMT	DARB	SLIM	JING
站名	大坪國小	中興國小	太興國小	甲仙十八灣	明德中學	梅花國小	曾文水庫南	曾文水庫北	新樂國小	瑞峰國小	達邦	樹林國小	錦和國小
2011	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
2010	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
2009	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
2008	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
2007	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●
2006	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●		
2005	●			●		●	●	●		●			
2004				●			●	●					

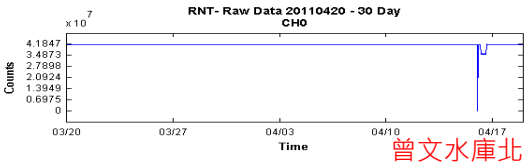
以上資料統計至 2011/10/31

2.資料庫網站井下應變儀展示資料更新。

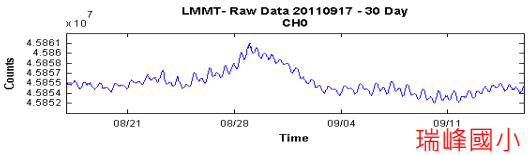
以 30 天為例，下圖資料統計至 2011/10/31



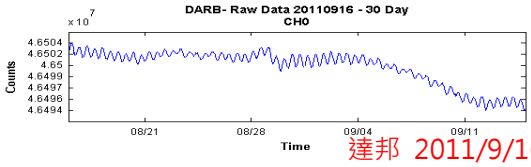
梅花國小



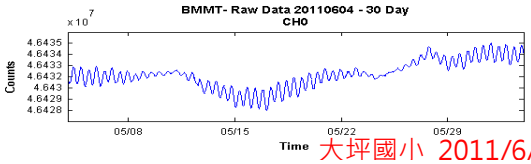
曾文水庫北



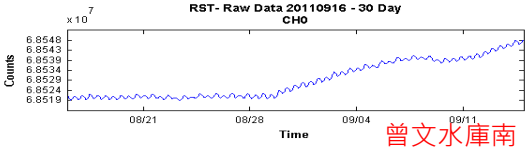
瑞峰國小



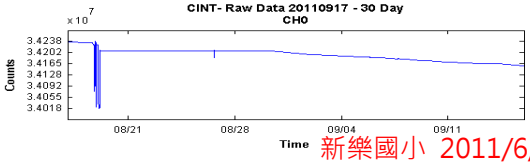
達邦 2011/9/16



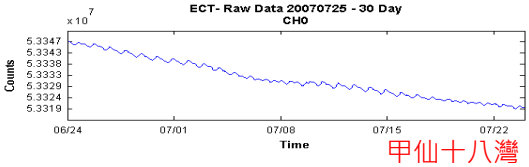
大坪國小 2011/6/4



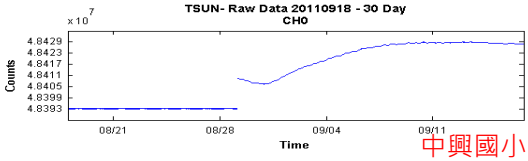
曾文水庫南



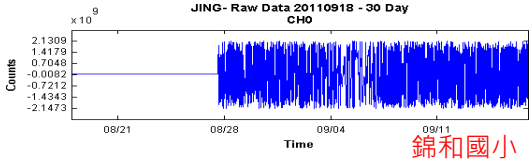
新樂國小 2011/6/4



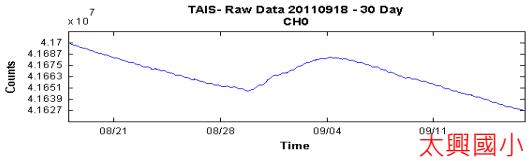
甲仙十八灣



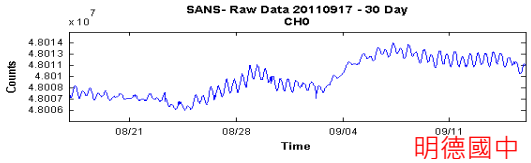
中興國小



錦和國小



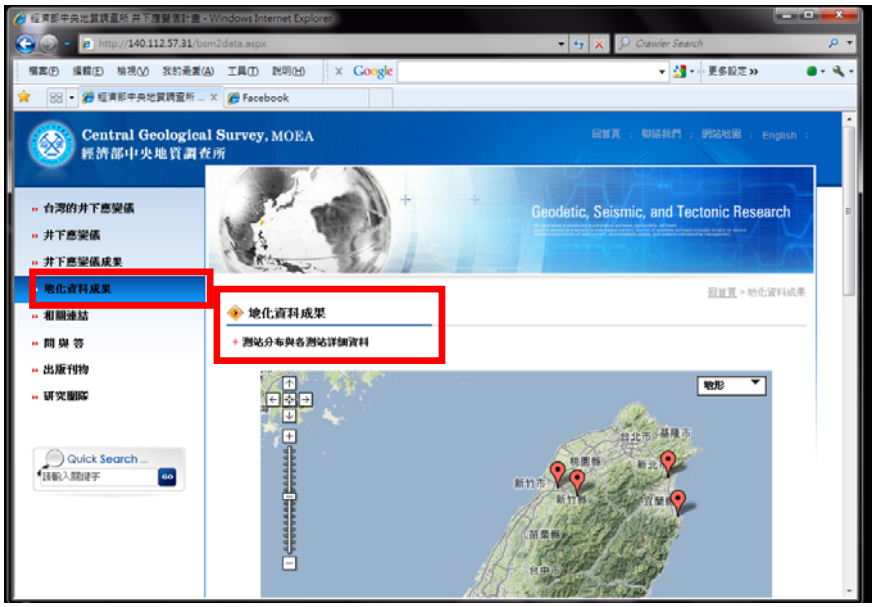
太興國小



明德國中

3.地化資料庫系統更新

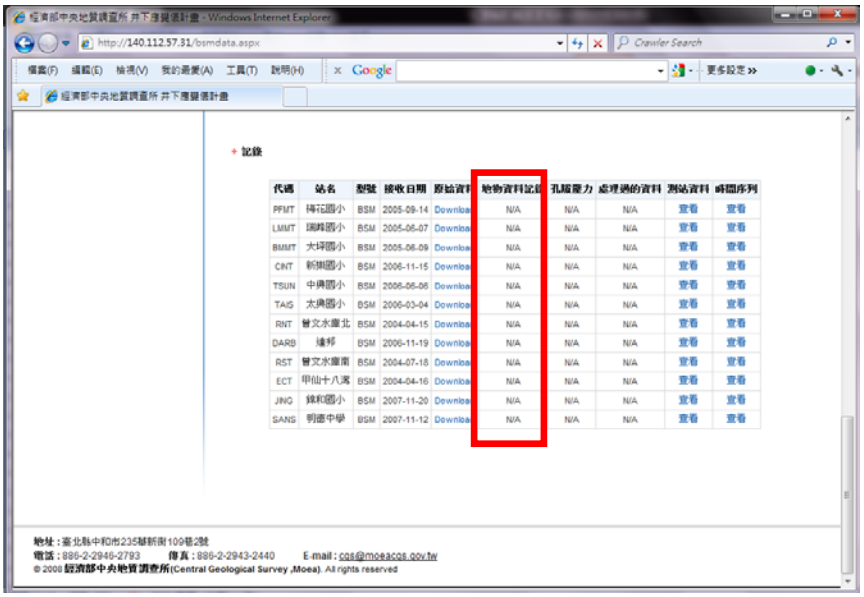
網站內容新增地球化學資料內容選項（如下圖）：



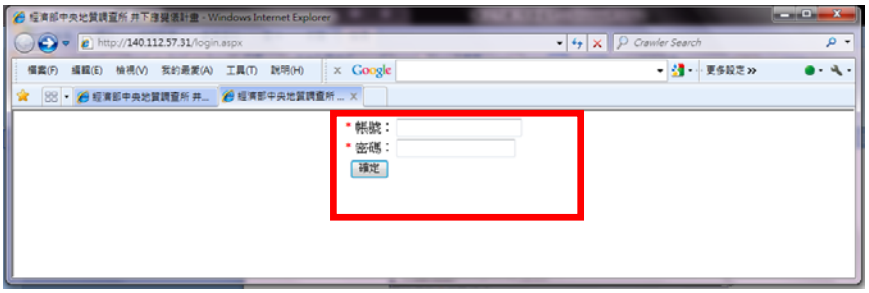
使用者可透過網站直接選擇測站、時間、資料類型等項目（如下圖）：



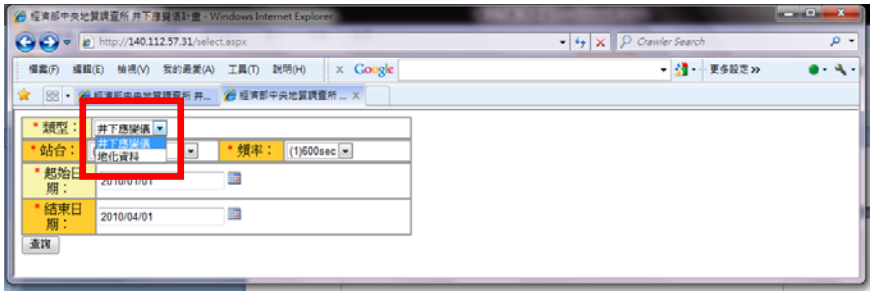
網站提供原始資料下載處（如下圖）：



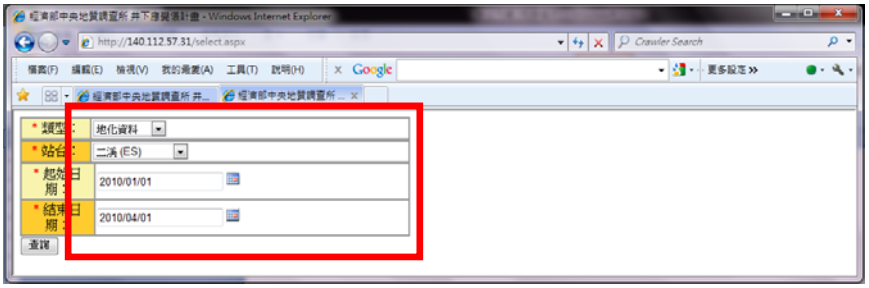
使用者透過權限建立，輸入帳號/密碼方可進入下載頁面（如下圖）：



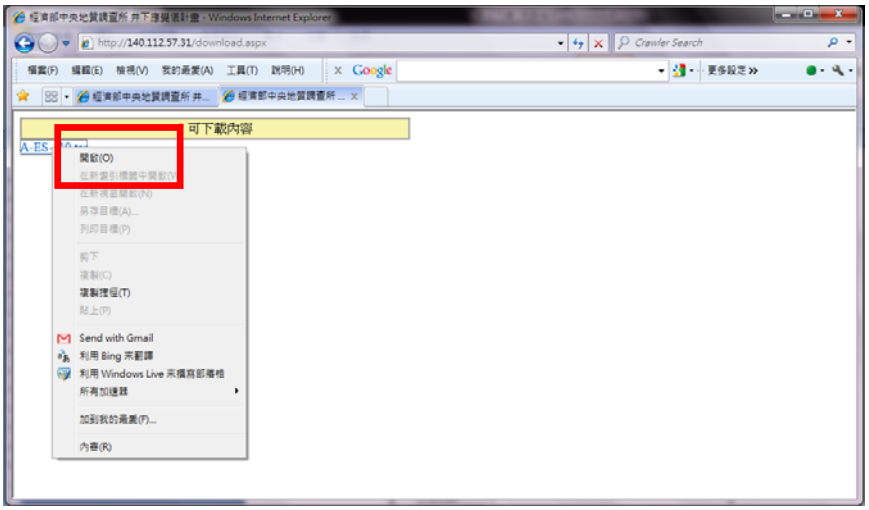
再針對所選項目範圍篩選出資料進行下載點選下拉式選單，選擇檔案下載類型（如下圖）：



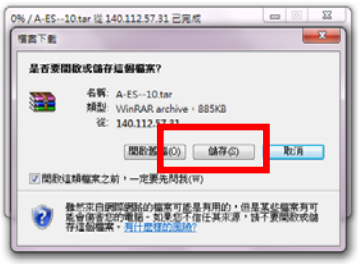
下載「地化資料」原始資料，選擇站台、起始日期、結束日期（如下圖）：



進入查詢頁面後，點選檔案名稱按滑鼠右鍵（如下圖）：



跳出視窗選擇儲存（如下圖）：



地化資料庫最新資料日期

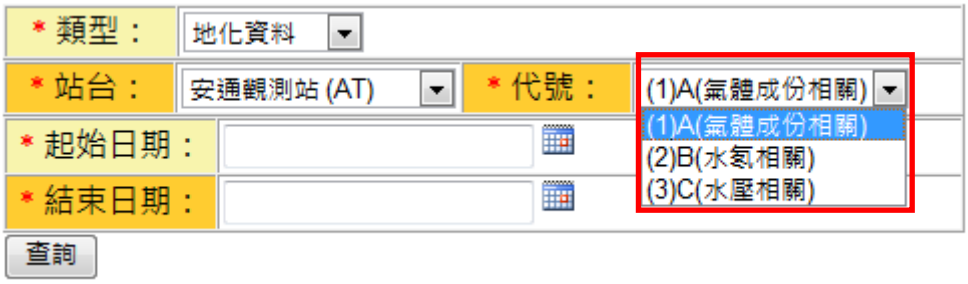
代碼	站名	設置時間	起始時間	最新時間	備註
ES	二溪觀測站	2006/11/15	2009/11/01	2010/07/20	類型 A
TPT	大平地觀測站	2005/09/14	2009/10/25	2011/07/05	類型 A
CL	中崙觀測站	2005/06/09	2009/10/25	2011/07/05	類型 A
GK	古坑觀測站	2005/06/07	2009/11/01	2011/07/05	類型 A
CS	池上觀測站	2006/03/04	2009/10/18	2011/07/05	類型 A
PT	屏東觀測站	2006/06/06	2009/09/01	2011/07/05	類型 A
MS	梅山測站	2006/08/	2009/10/25	2011/05/03	類型 A
HH	新化觀測站	2006/06/06			類型 A
HC	新城觀測站	2006/06/06			類型 A
JS	礁溪觀測站	2006/03/04			類型 A
SA	蘇澳觀測站	2006/03/04	2009/12/10	2010/07/27	類型 A
AT	安通觀測站	2010/12/01	2010/12/01	2011/08/25	類型 B
ST		2010/02/02	2010/02/02	2011/08/25	類型 B
MH	梅花觀測站	2005/06/01	2010/01/02	2011/04/29	類型 C
SLN	樹林觀測站	2009/09/01	2010/01/01	2011/10/18	類型 C
TS	太興觀測站	2006/03/01	2010/01/01	2011/04/29	類型 C
YS	沄水觀測站	2006/11/01	2010/01/01	2011/04/29	類型 C

地化資料庫自 2004 年至 2011 年間各測站資料可下載檔案列表

類別	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	C	C
代碼	ES	TPT	CL	GK	CS	PT	MS	HH	HC	JS	SA	AT	ST	MH	SLN	TS	YS
站名	二溪觀測站	大平地觀測站	中崙觀測站	古坑觀測站	池上觀測站	屏東觀測站	梅山測站	新化觀測站	新城觀測站	礁溪觀測站	蘇澳觀測站	安通觀測站		梅花觀測站	樹林觀測站	太興觀測站	沄水觀測站
2011		●	●	●	●	●	●					●	●	●	●	●	●
2010					●									●			
2009																	
2008																	
2007																	
2006																	
2005																	

以上資料統計至 2011/10/31

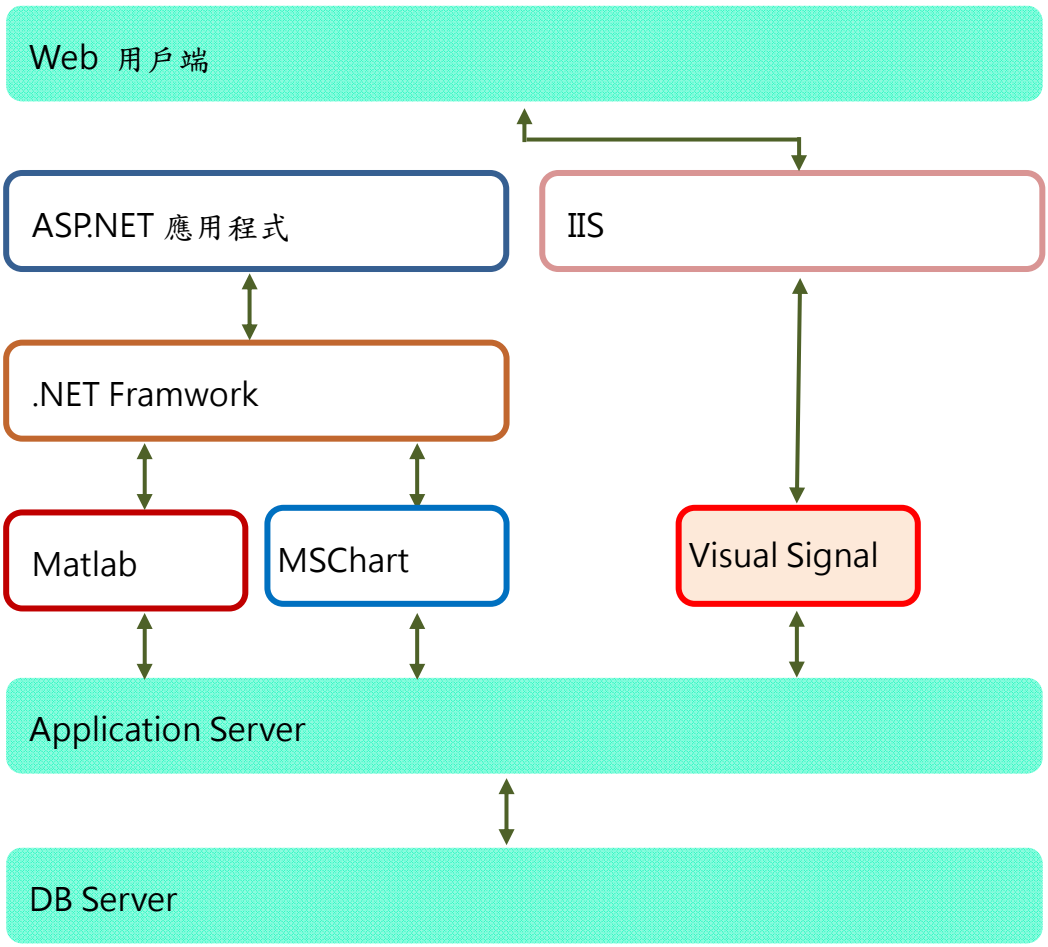
4.地化資料庫檔案下載頁面補正測站中文名稱並新增類別 (1)A (2)B (3)C





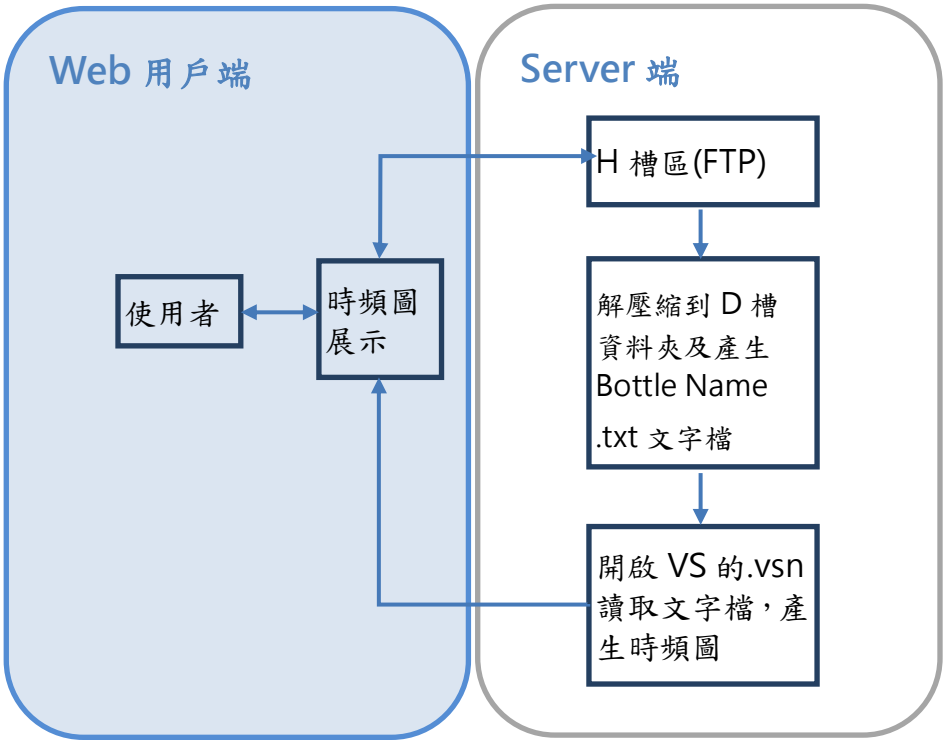
5.資料庫網站更新架構

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

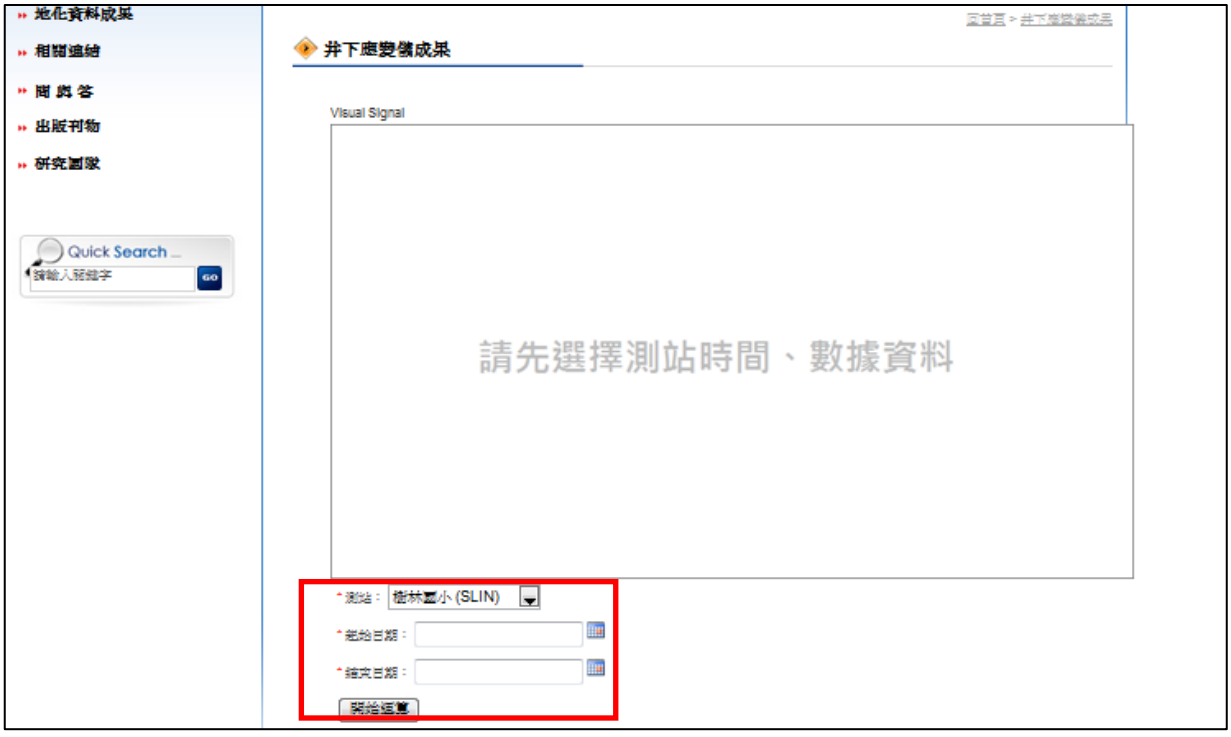


3-4-3 透過網頁繪製時頻圖

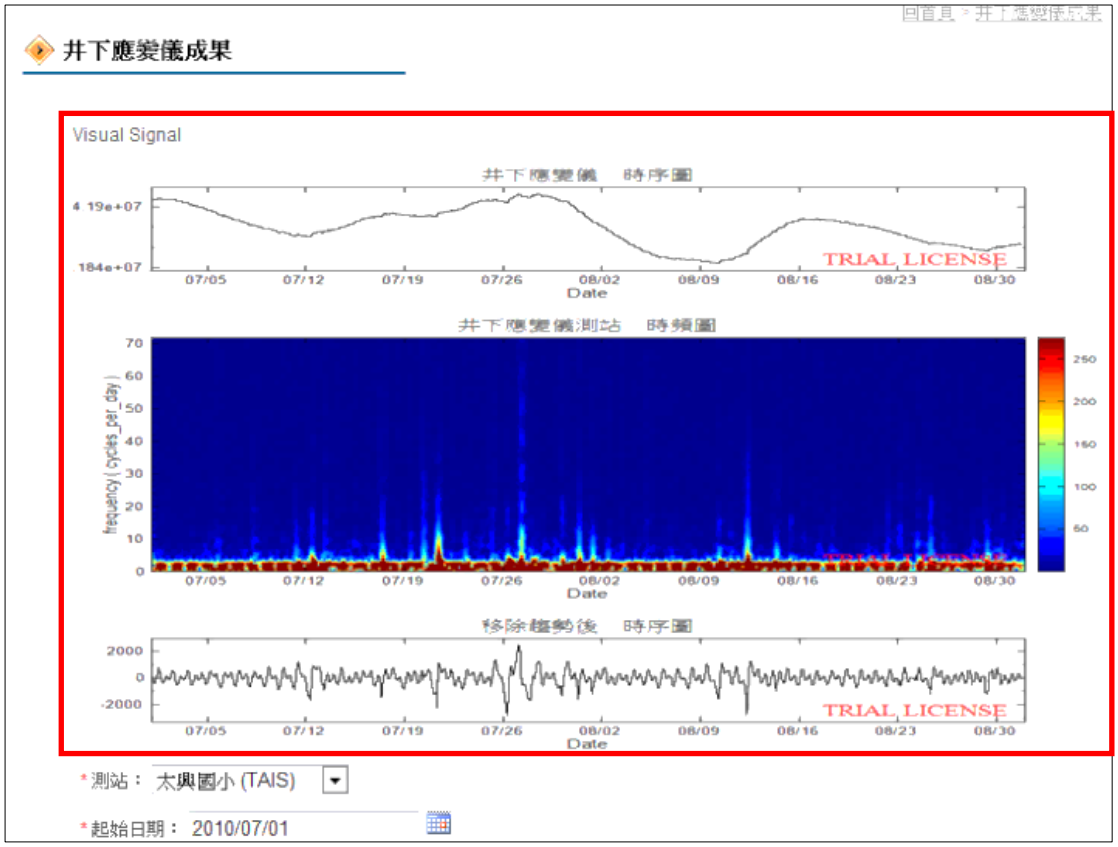
透過網頁繪製時頻圖，架構及網站操作如下：



1.選擇測站、起始時間、結束時間：(最大時間長度為一個月)



2.繪製時頻圖與時序圖



3-4-4 未來建議工作項目

1.資料更新定期排程

(1) 監測資料(井下應變儀/地球化學資料)定期匯入資料庫。

(2) 井下應變儀與地球化學測站資料更新。

2.時頻圖功能選項提供

(1) 起迄時間時頻圖展示，使用者判斷運算區段提供。

(2) 井下應變儀面應變計算之時頻圖提供。

3.權限分級建立

(1) 後台管理系統建置。

(2) 資料開放程度設定。

3-5 井下應變儀相關建議事項

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

1. 三個測站的應變計有較明顯問題，未來可以建議可以首先對這三個測站進行維護與保養的工作：

(1) 瑞峰國小(LMMT)的 CH2 與 CH3 資料一直都不正常，無法處理，如圖 3.1 所示。
(2) 甲仙十八灣(ECT)因雷擊而故障，於 2004 年 12 月之後也無資料。
(3) 曾文水庫南(RST)CH1 感應器於 2005 年 4 月之後一直都沒有接收到資料(圖 3.2)。

2. 井下應變儀中雨量計資料缺失

當我們將井下應變儀降雨資訊與氣象局的降雨資料做比對後，會發現應變儀的雨量資料有許多缺漏，如梅花國小站(PFMT)在 2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間資料顯示沒有降雨，但從氣象局的資訊的確可以得知在這段期間的總降雨量高達 150 毫米以上(圖 3.97)。目前已知降雨的確會對應變計造成負載壓縮的應變，未來如果要完整且即時地從應變資訊中濾除降雨的影響，勢必須有相對正確且完整的降雨資訊，才得以進行這項工作，建議未來必須對應變儀中的雨量計進行維修以確保雨量資訊的正確性。

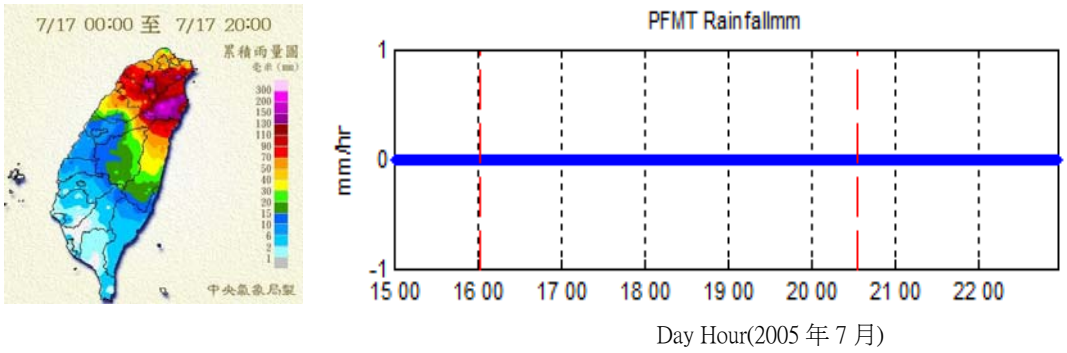


圖 3.97：2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間降雨資料比對。左圖為氣象局 7/17 當日 0 時累計至 22 時的雨量分布圖；右圖為井下應變儀梅花國小站的從 7/15-7/22 的降雨資料。

3. 井下應變儀中氣壓計異常問題

首先是氣壓量值並不正確，以海平面平均氣壓 1013 hPa 與每上升 100 公尺氣壓大約下降 10hPa 的概念來計算各測站在所在海拔高度下的理論氣壓，我們可以得到嘉義網 DARB 站(952 m)、TAIS(790 m)及 TSUN(1370 m) 的平均理論氣壓值分別為 918 hPa、934 hPa 及 876 hPa，而新竹網 BMMT 站(195 m)、PFMT(496 m)及 CINT(505 m) 的平均氣壓理論值分別為 993 hPa、964 hPa 及 963 hPa。但圖 3.98 井下應變儀氣壓計的數值偏離理論值太多，並且出現海拔較高測站的氣壓值比相對低海拔測站還要高的現象(圖 3.98)。

另外藉由鄰近這些測站地區的氣象局屬自計站的氣壓資料作為比對(圖 3.99)，長時間下來的氣壓變化是穩定的，並沒有像應變儀氣壓計訊號有跳階與趨勢上升或下降的現象。

由於井下應變儀的資料處理同時也必許考慮到氣壓的影響，這些非氣壓變動所造成的氣壓數值將會在資料處理的過程帶入，最後會造成判斷構造活動訊號的困難。目前的處理是考慮鄰近測站(包含井下應變儀與氣象局屬自計站)的氣壓數值來調整異常氣壓。建議未來必須對這些應變儀的氣壓計儀器進行校正與維修，以保持訊號的穩定性，則有利進一步邁向即時資料處理與呈現的目標。

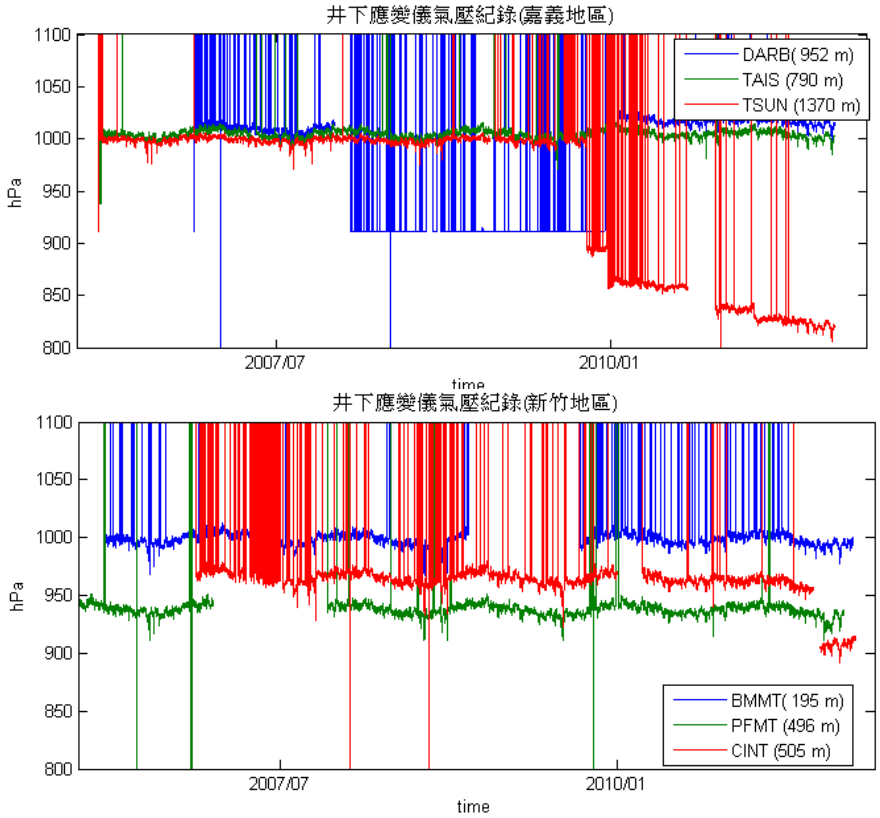


圖 3.98：井下應變儀中的原始氣壓記錄。上圖為嘉義地區測站，下圖為新竹地區測站。

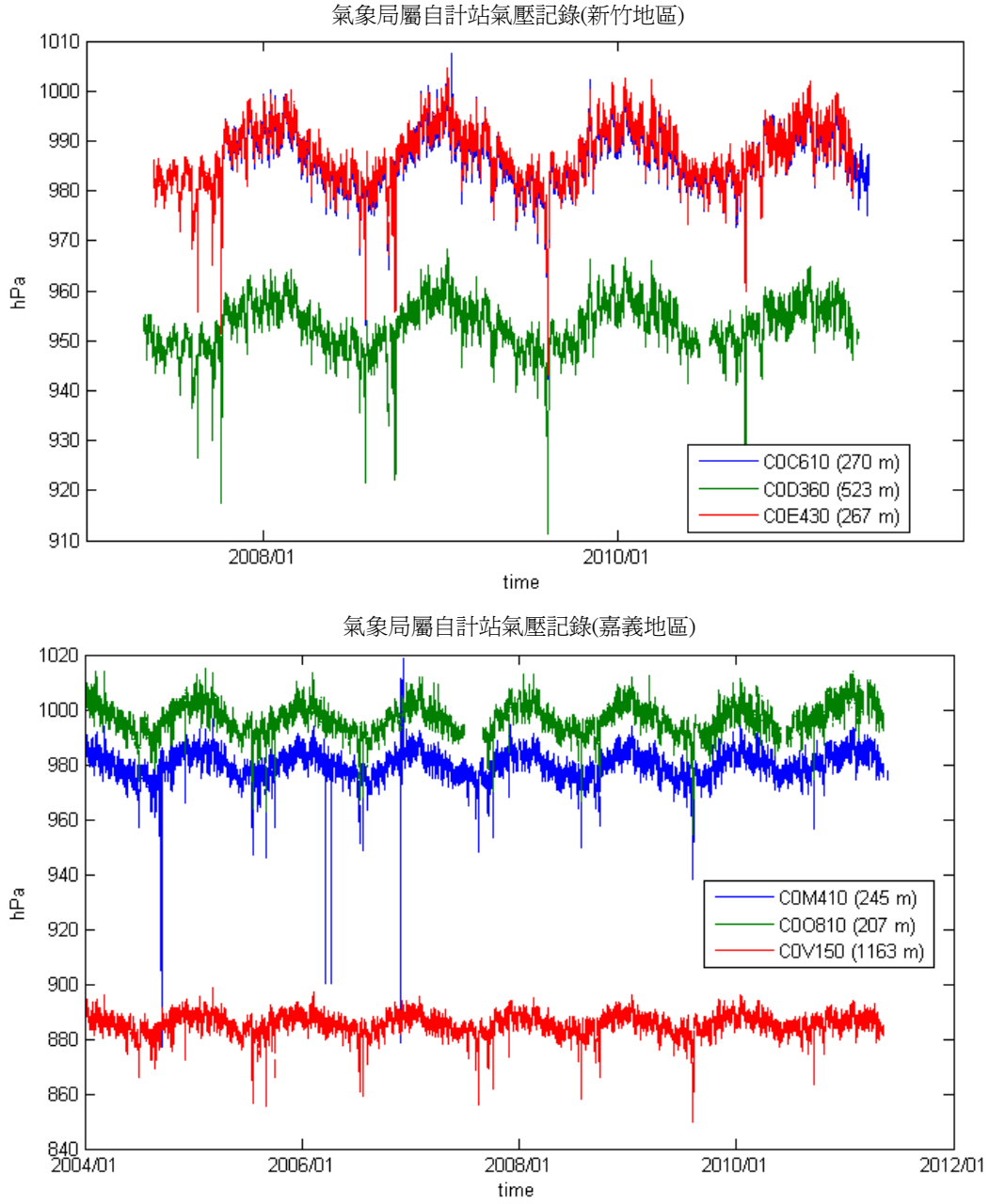


圖 3.99：氣象局屬自計站氣壓記錄。上圖為嘉義地區測站，下圖為新竹地區測站。

4. 共站地下水測站的資料的重要性

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

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

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

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

4-2 分析流程

4-2-1 活動斷層調查與參數蒐集

活動斷層調查主要可分為兩部份，一為斷層位置及幾何特性，二為斷層活動性與變形性，斷層各特性的調查方式如表 4.1 所示，首先蒐集調查區域之相關文獻及地質圖資，確定主要活動斷層之位置，然後進行航照或是遙測影像判釋地表之線形，並配合現地勘查確定斷層於地表之延伸及確切位置，之後藉地球物理探勘方式（震測或地電阻），了解斷層的地下形貌及幾何情形，並搭配跨斷層面之槽溝開挖及鑽探資料，瞭解斷層之古地震及活動情形，完成斷層幾何面及活動性的調查。如果此斷層是一條活動斷層，就必須進行變形性量測，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形推估之。

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

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

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

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

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

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

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

14. 地震復發間隔：表示地震會重複發生特徵地震之間隔時間。

15. 最近一次活動時間：為活動斷層最後一次發生特徵地震之時間。

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

表 4.1：活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式。

斷層參數		調查方法與分析模式
斷層位置與特性	斷層位置與長度	● 遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 ● 地表地質調查與河階地形研究。 ● 地物探勘瞭解地下地層錯動情形。 ● 鑽探瞭解跨斷層之地層差異。 ● 根據地質鑽探建構地質剖面。
	斷層分段與分支	● 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（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。
	地震復發間隔	● 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。

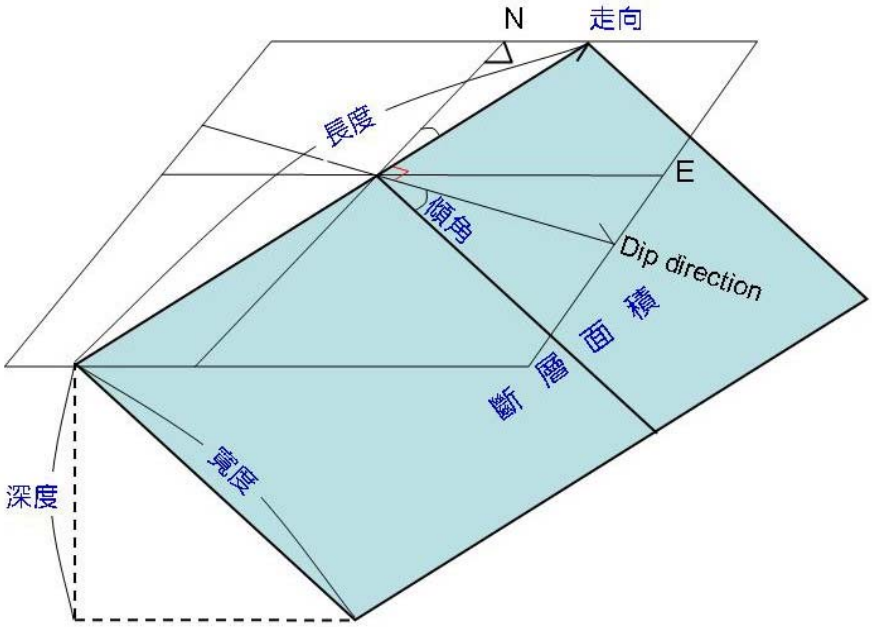


圖 4.1：斷層幾何參數示意圖。

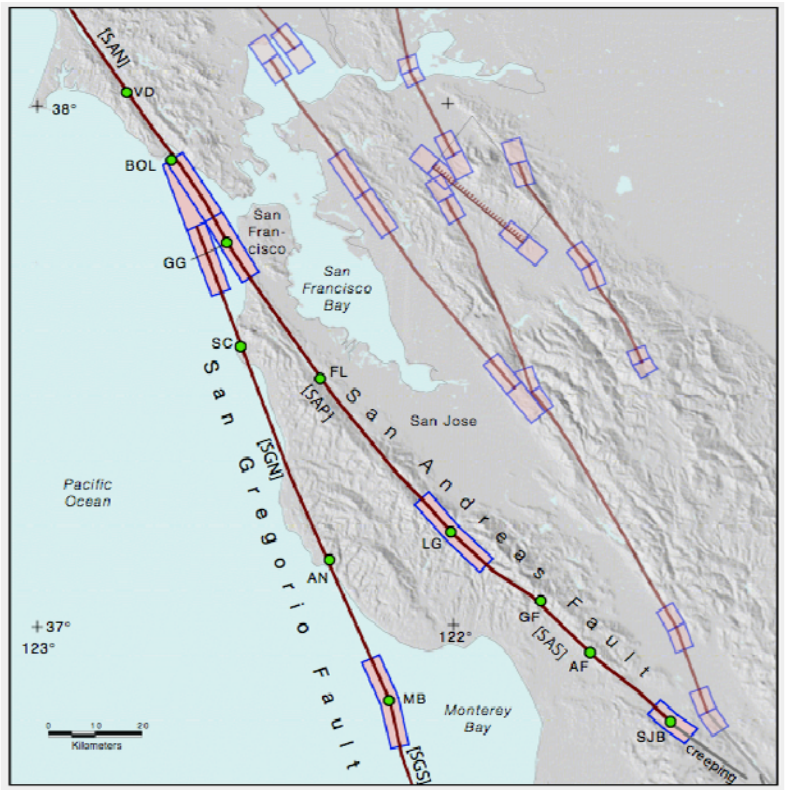


圖 4.2：斷層分段分布圖。San Andreas Fault 之分段：SAN、SAP、SAS； San Gregorio Fault 之分段：SGN、SGS[摘錄自 *WG02*, 2003]。

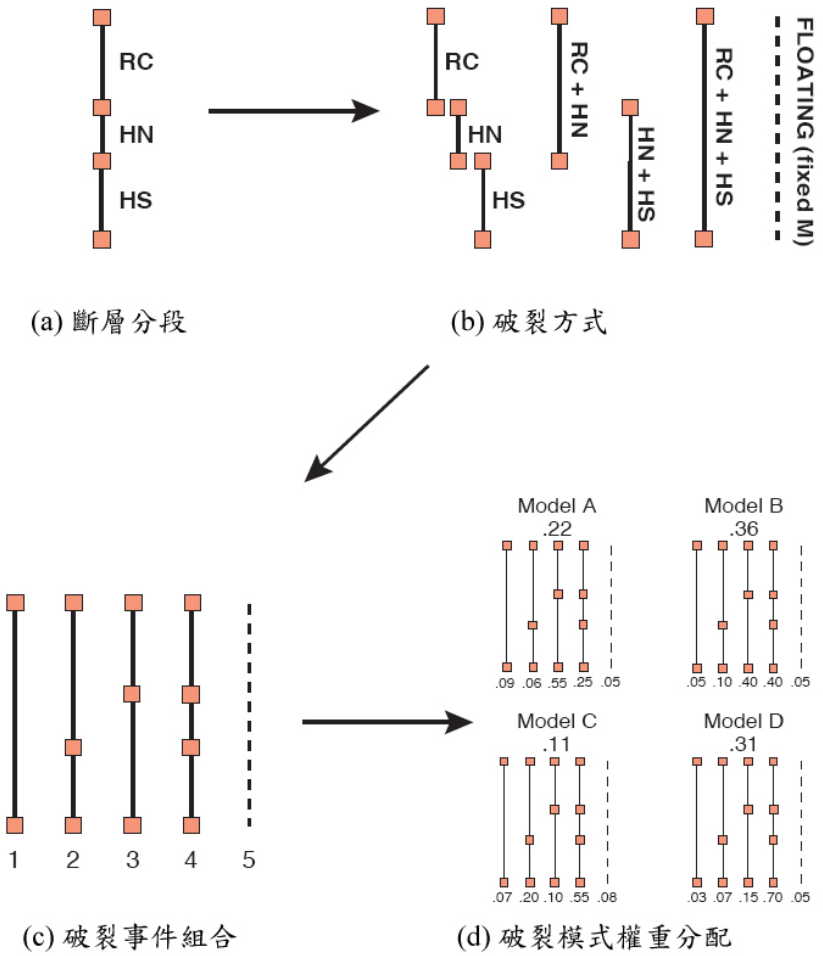


圖 4.3：由斷層分區建立斷層破裂模式。（a）圖中橘色方框為分區之邊界，以 Hayward -Rodgers Creek fault 為例，先劃分三個斷層分區；（b）分區中可產生六種破裂組合（加上不明破裂方式 floating earthquake）；（c）建立破裂事件；（d）將各破裂模式及事件進行權重分配。[摘錄自 *WG02*, 2003]

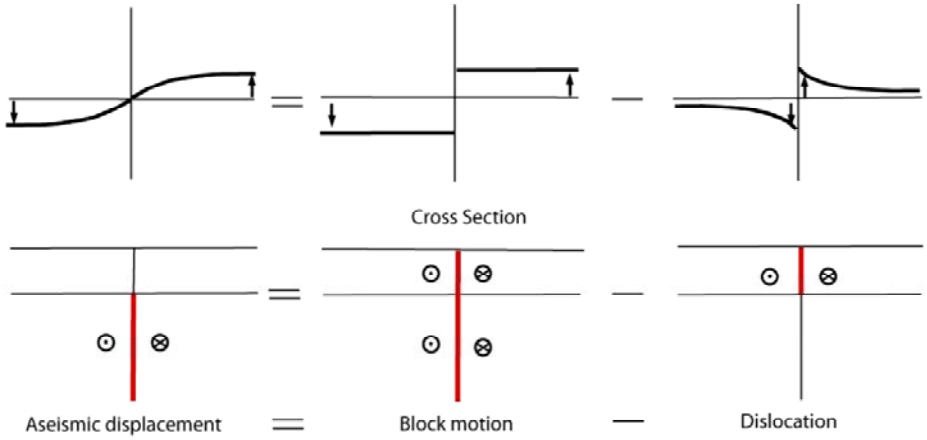


圖 4.4：間震期之變形模式即為剛體運動剪去彈性錯位變形，滑移赤字（slip deficit）= 剛體運動（Block motion）－間震變形（Aseismic displacement）。

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，台灣過去有*許京穎*（2008）評估活動斷層之潛勢，以對數常態分布之統計模式進行評估，本計畫考慮斷層之活動特性符合彈性回彈理論，建議採用 BPT 機率密度函數來進行評估，各機率密度函數之說明詳如附件光碟-附錄 J。
2. 第二種是僅知道古地震最後一次發生的時間：需藉由斷層古地震之錯動量及定年推算斷層之長期滑移速率。在描述斷層的地震年發生率上，本計畫建議採用特徵地震模式，需要長期滑移速率、斷層面面積及特徵地震規模等參數，特徵地震模式之理論及公式說明詳如附件光碟-附錄 I 所示，所得特徵地震之年發生率倒數即為再現週期，以 BPT 模式進行評估，變異係數則參考美、日兩國之經驗予以假定，例如美國 BPT 模式的變異係數為 0.7（0.3），0.5（0.5），0.3（0.2）[*WG02*, 2003]；日本則採用 0.24 為變異係數[*地震調查研究推進本部*，2001]。
3. 第三種為古地震最後一次事件未知的情形：斷層之特徵地震規模及斷層一次事件錯動量 U 是以經驗公式帶入求得，則斷層之活動間隔即為 U/V，其中 V 為活動斷層之長期滑移速率，由於不清楚最後一次地震發生時間，因此機率密度函數選擇 Poisson 模式進行評估。

本計畫活動斷層潛勢評估之詳細流程如圖 4.6 所示，首先針對活動斷層進行參數之蒐集，包含斷層之幾何特性、分段特性及斷層活動度。斷層之幾何特性可藉由經驗公式獲得斷層之特徵地震規模，斷層分段則用來劃分斷層破裂事件，斷層活動度之研究則可以得到斷層之長期滑移速率及古地震事件之年代及次數。由於活動斷層調查之參數均有其不確定性，考慮這些不確定性的影響，本計畫採用邏輯樹之概念，將各參數之不確定性分別給予權重，圖 4.7 為美國評估加州地區地震所採用之邏輯樹，分為斷層模型、斷層變形模型、地震發生率模型及機率模型之不確定性，依此邏輯樹劃分可以產生 480 種不同權重之事件，將這 480 個事件之權重加總後即為 1。

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

斷層滑移速率、剛性或是剪力模數(rigidity shear modulus)(一般為 3×10^{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。各參數詳細說明如下：

1. 斷層破裂面積：一般是指斷層幾何面面積，在 WG02 針對 SFBR 區域所做的斷層潛勢評估中，將斷層幾何面積乘上地震滑移尺度因子 R，圖 4.8 所示即為計算 North Hayward Fault 的面積和地震矩率所選用的參數，其中 A=L（長度）×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。
2. 斷層滑移速率：以長期滑移速率為主。
3. Gutenberg-Richter 關係式中的 b 值：*許京穎*（2008）曾以台灣電力公司核電廠耐震安全評估中使用之震源分區來計算各分區之 b 值，本計畫則建議以 *Cheng et. al.*, (2007)的震源分區選取地震，使用截切指數模式以最大概似估計法(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，詳如附件光碟-附錄 K。
4. 最大可能地震規模推估：參考附件光碟-附錄 H，藉由 scaling law 來推估斷層的最大可能地震。

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

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

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

$$P(T \leqq t \leqq T+\Delta T \mid t > T) = [F(T)-F(T+\Delta T)] / F(T) \qquad (式\ 4.1)$$

其中

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

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：

$$P_{total}=1-(1-P1)(1-P2)\ldots\ldots(1-Pn) \quad \text{(式 4.3)}$$

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：

$$P=1-(1-PA)(1-PB) \quad \text{(式 4.4)}$$

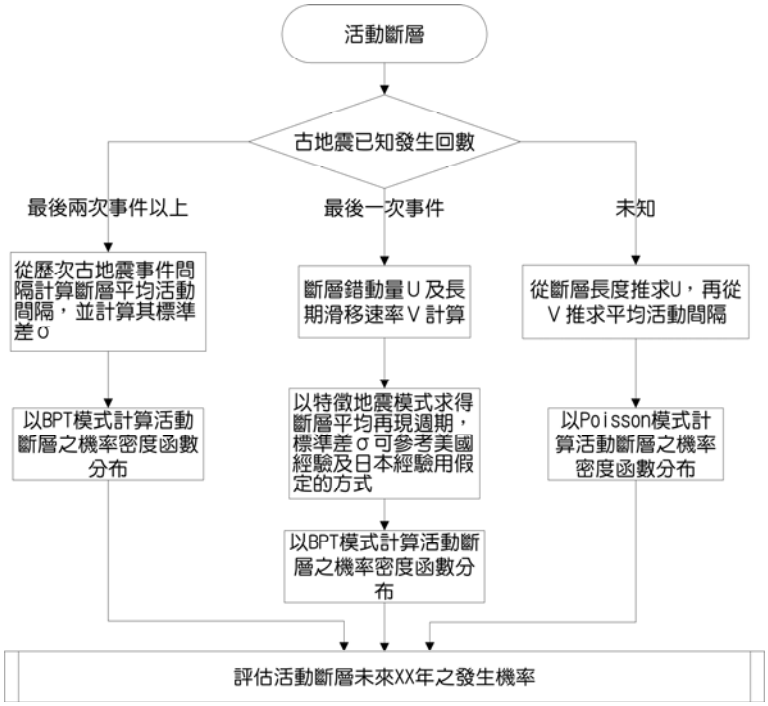


圖 4.5：活動斷層發生機率潛勢評估手法概念圖。

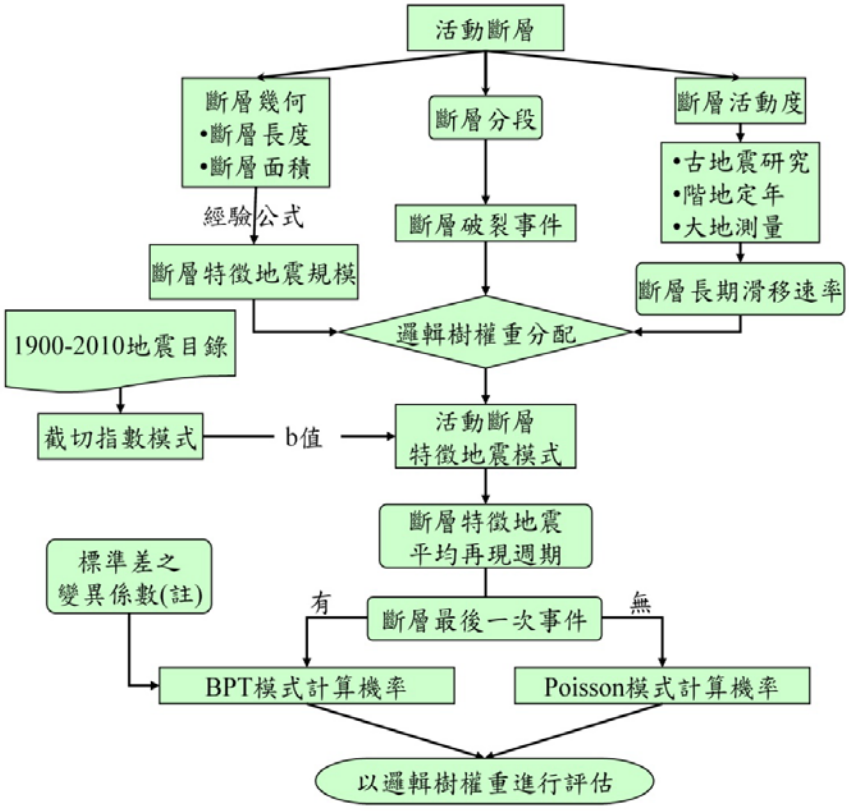


圖 4.6：活動斷層發生機率潛勢評估流程圖。

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

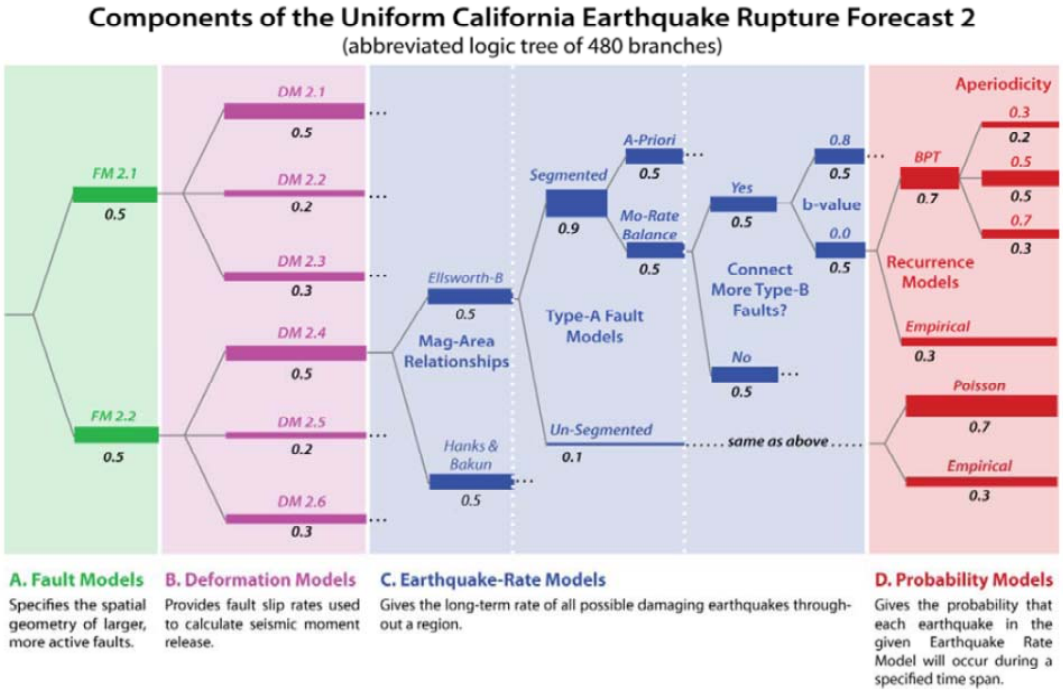


圖 4.7：加州地區地震潛勢評估邏輯樹。[摘錄自 *WG07*, 2008]。

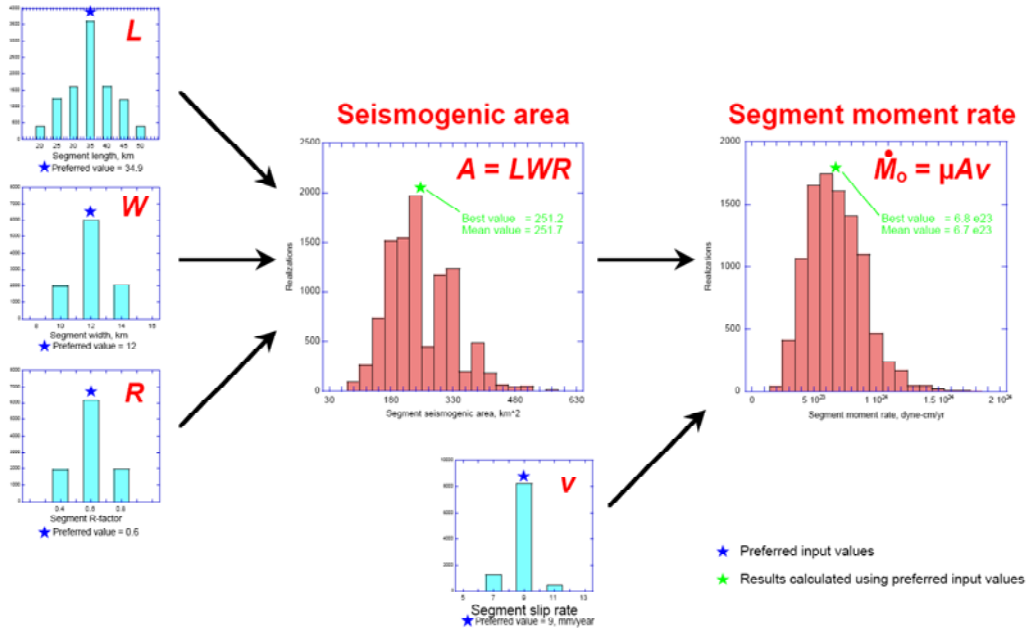


圖 4.8：WG02 模式評估示意圖。藍色長條圖橫軸為長度、寬度、地震滑移尺度及滑移速率之參數值，縱軸為發生頻率（10000 次實況模擬獲得），紅色長條圖為面積及地震矩率之計算。[摘錄自 *WG02*, 2003]。

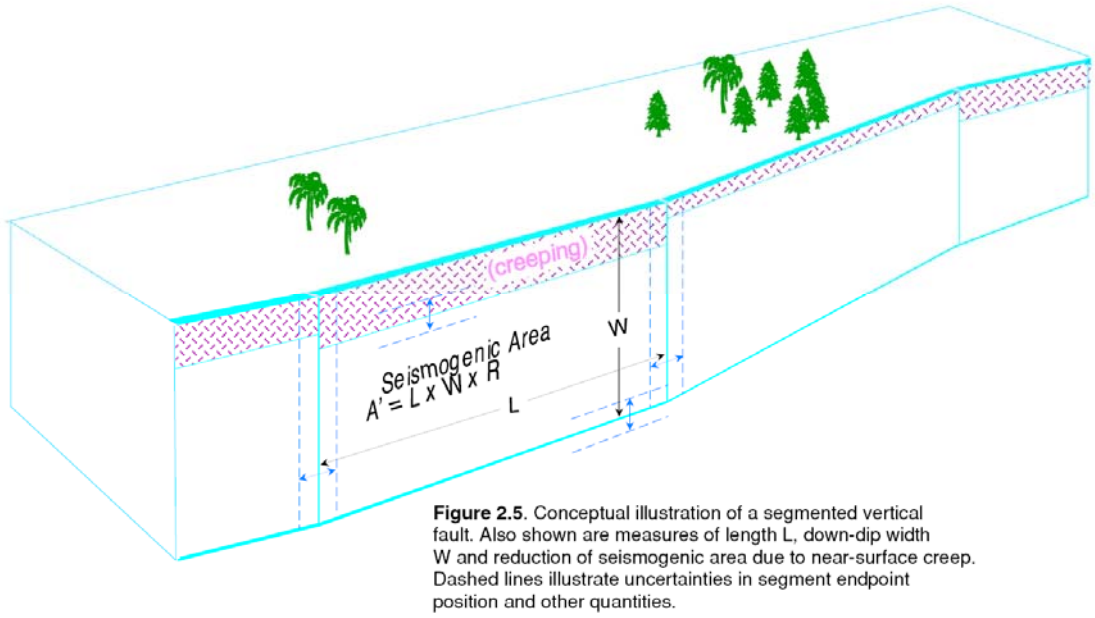


Figure 2.5. Conceptual illustration of a segmented vertical fault. Also shown are measures of length L, down-dip width W and reduction of seismogenic area due to near-surface creep. Dashed lines illustrate uncertainties in segment endpoint position and other quantities.

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]。

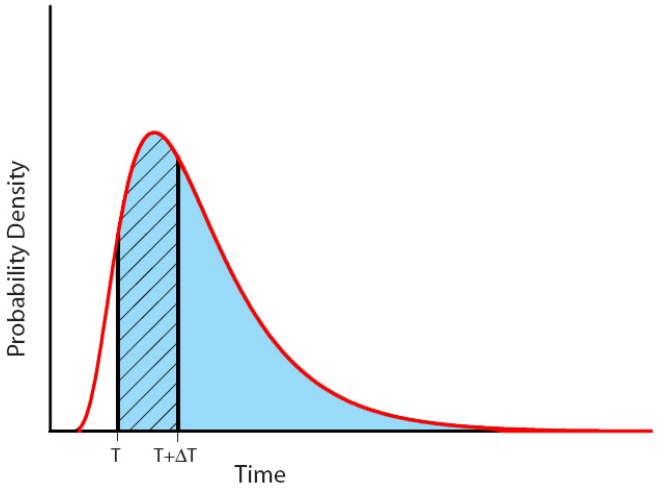


圖 4.10：機率密度函數分布圖。圖中紅色線段表示機率密度函數之線段，Time 為 0 代表最近一次地震發生之時間，Time 為 T 代表發生地震後經過了 T 時間。

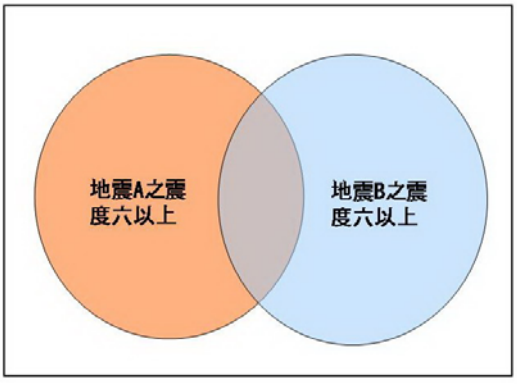


圖 4.11：計算震度 6 級以上之區域機率理論。[摘錄自 *日本全國地震動預測地圖*，2008]。

4-3 活動斷層發生機率潛勢評估

4-3-1 六甲斷層

六甲斷層為逆移斷層，位於嘉義丘陵與嘉南平原的交接帶，呈北北東走向，由台南縣白河鎮蓮桐崎向南延伸至六甲鄉烏山頭附近，長約 21 公里[*張徽正等*，1998；*林啟文等*，2000；*楊志成等*，2005]，圖 4.12 為六甲斷層及木屐寮斷層之平面分布圖，斷層線形參考中央地調所 2010 年活動斷層分布圖，圖中之黃色圓點為鑽井點位，P-P'為*楊智成*(2005)繪製之剖面線，E-E'為 *Hung et al*(1999)繪製之剖面線。

中油公司在牛山背斜軸部的鑽井（NS-27）結果，深度約 3,350 公尺處鑽遇一傾角約 43 度的斷面[*Hu and Sheen*, 1989]，斷坡（ramp）大致以 30~45 度的傾角向西逆衝到地表，而斷坪（flat）則約位於地下 4~5 公里處，圖 4.13 為 PP' 之剖面圖，顯示不對稱的牛山背斜隨六甲斷層擴展至地表而形成，且於六甲斷層下盤在 5000 年來有新營斷層的發育。圖 4.14 為 EE'之剖面圖[*Hung et al.*, 1999]，圖中之六甲斷層並無出露至地表，牛山背斜主要受控於深部構造而形成。

地調所在六甲斷層的蓮桐崎附近有 4 口鑽井，鑽井點位分布如圖 4.15 所示。各鑽井鑽遇剪切面之深度及定年資料詳如表 4.2 所示，表中的定年資料也顯示剪切面之年代均有 2 萬年以上。由各個鑽井資料連結所建立的剖面顯示[*陳文山等*，2006]，六甲斷層在地下淺部的斷層面位態為 N40E/30E，為兼具左移分量的逆移斷層。

短期滑移速率部份，*饒瑞鈞等*（2006）由 GPS 資料分析近斷層水平位移剖面結果，在 1999~2006 年間，橫跨六甲斷層的速度場變化量，平行斷層走向的分量為-1.8 公厘/年，呈右移形式；其垂直斷層走向的分量為 2.4 公厘/年，呈壓縮形式，高程方向抬升量為 6.8 公厘/年。依據內政部在 2002 年 10 月的一等二級水準測量資料與本所 3 次的測量結果，橫跨六甲及觸口斷層的測段卻無明顯的高程變化量。

長期滑移速率部份，*楊志成等*（2005）由六甲斷層上下盤岩層的對比與定年結果，來分析斷層上盤相對下盤的長期滑移速率，其計算結果顯示斷層的抬升速率為 5.5 公厘/年，投影到傾角 43 度之斷層面上則為 8.1 公厘/年。另*陳文山等*（2006）整合野外露頭、鑽井及定年資料分析，估計六甲斷層的長期滑移速率：六甲斷層的長期垂直滑移速率約為 6.33±0.06 公厘/年，投影到傾角 43 度之斷層面上則為 9.3 公厘/年。

單一事件變位量，六甲斷層並無槽溝古地震或是歷史地震可供參考，根據 *Wells and Coppersmith*(1994)之經驗公式，以六甲斷層之長度，會產生 1.20±

0.42 公尺的變位量。

最大可能地震規模，本計畫將 *Wells and Coppersmith*(1994)、*吳相儀*(2000)及 *Yen and Ma*(2011)之尺度經驗公式放在參數表中以茲比較。

根據表 4.2 鑽井剪切帶之定年，均大於 2 萬年以上，在進行斷層活動潛勢評估時，本計畫假設其最後一次活動時間是未知，因此將採用 Poisson 模式進行評估。

六甲斷層之參數表詳如表 4.3 所示。

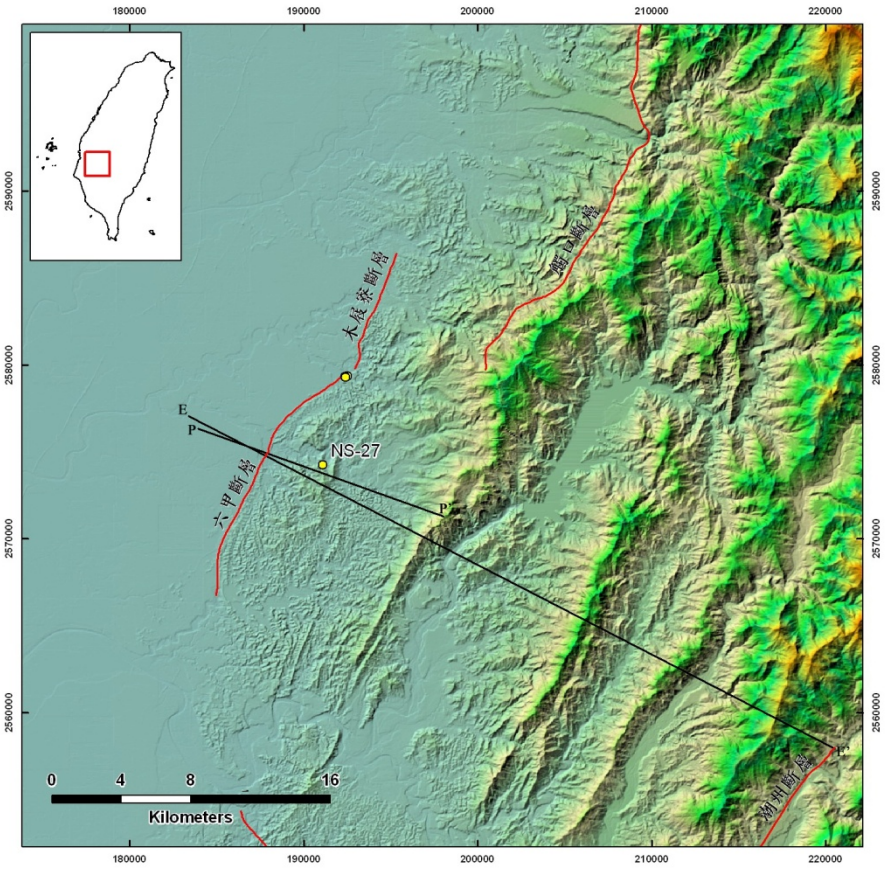


圖 4.12：六甲斷層及木屐寮斷層平面分布圖。

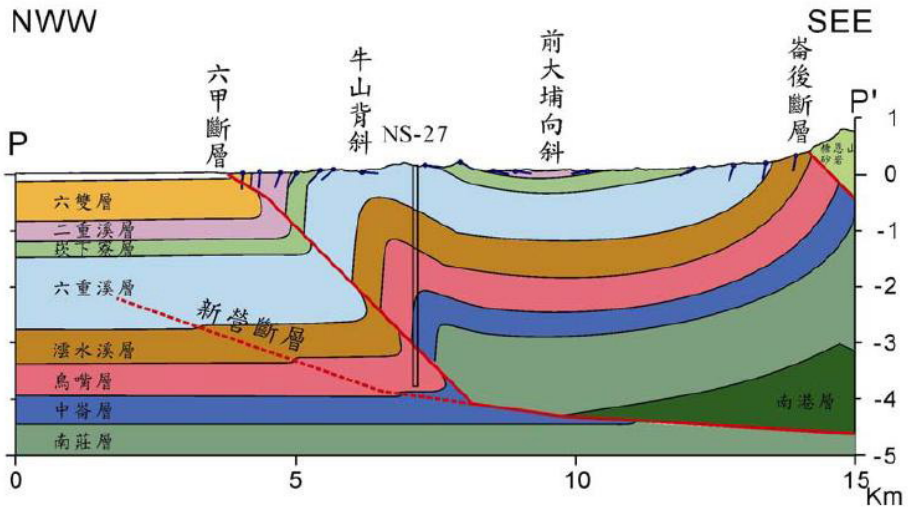


圖 4.13：P-P'剖面圖。[*楊志成*，2005]

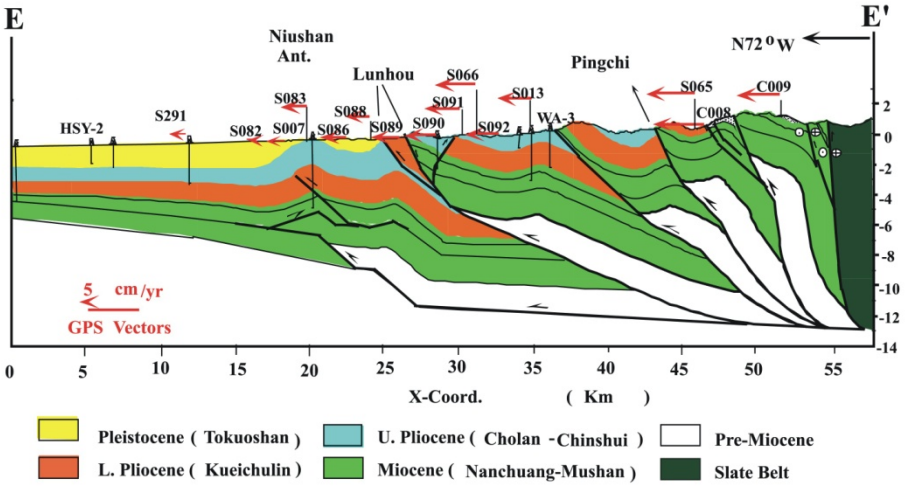


圖 4.14：EE'剖面及投影至剖面 GPS 測站之水平速度。[*Hung et al.*,1999]

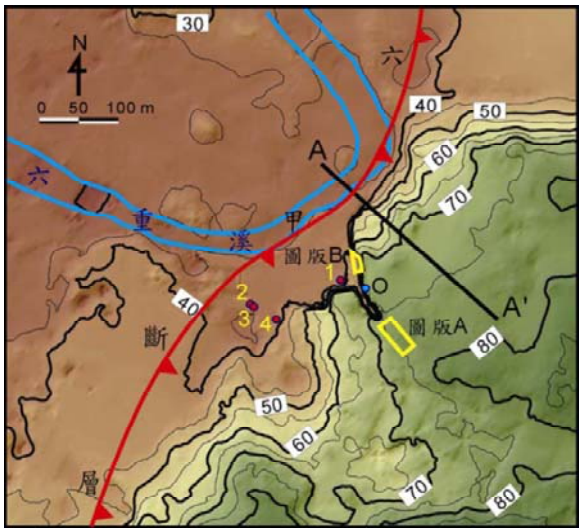


圖 4.15：六甲斷層蓊桐崎附近 4 口鑽井點位分布圖。[摘自*楊志成*，2005]

表 4.2：鑽井岩芯資料表。[修改自楊志成，2005]

編號	地表高程(公尺)	井深(公尺)	構造特徵	定年標本
			井下(公尺)	Conventional Radiocarbon Age
1	40	56	斷層泥	33110±430 BP
			(44.4-44.8)	-52.7
2	37	25	剪切面	41500±1280 BP
			-21.4	-21.8
3	37	60	剪切面	>47200 BP
			-25.5	-27.7
4	37	50	剪切面	22820±120 BP
			-40.6	-45.8

表 4.3：六甲斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
六甲斷層	斷層分支	NA		
	長度(km)	21	台南縣白河鄉頭崎內里的六重溪南岸向南延伸至台南縣官田鄉社子村	*林啟文等*，2007
	寬度(km)	24.4	本計畫建置之斷層面	
	深度（km）	8.4	跨斷層構造地質剖面	*Hung et al.*,1999
	面積(km2)	490.5	本計畫建置之斷層面	
	走向	北北東轉南北走向	地表地質調查	*林啟文等*，2007
	傾斜角度(度)	0~6 公里：43 度 6~8 公里：18 度 8~8.4 公里：2.5 度	本計畫建置之斷層面	*楊志成等*，2005
	斷層機制	略具左移分量逆斷層	鑽井、地物探勘及地表地質調查	*陳文山等*，2006
	短期滑移速率(mm/yr)	平行斷層走向分量-1.8（右移） 垂直斷層走向分量 2.4（壓縮） 高程抬升量 6.8	1999~2006 GPS 測量及分析結果	*饒瑞鈞等*，2006
		無明顯高程變化	水準測量	內政部及地調所測量結果
	長期滑移速率(mm/yr)	8.1	上下盤岩層的對比與定年結果	*楊志成等*，2005
		9.3	整合野外露頭、鑽井及定年資料分析	*陳文山等*，2006
	滑移赤字			
	單一事件變位量(m)	1.20±0.42	1og D = 0.29 Mw - 1.84	*Wells and Coppersmith*, 1994
	最大可能地震規模(Mw)	7.00	Mw =4.33+0.90 log A（逆斷層）	*Wells and Coppersmith*, 1994
		6.88	Mw =5.00+1.22 log L（逆斷層）	
		7.15	Mw = (0.82±0.071) log (A)+(4.61±0.141)	*吳相儀*，2000

		6.86	Mw = (1.32±0.122) log (L)+(4.817±0.132)	
		6.47	log (Le) = (1/2)log(M0) - 8.08 Mw =(log(M0) - 9.1)/1.5	*Yen and Ma*, 2011
	地震重複週期(年)	201~309	特徵地震模式計算地震矩規模 6.7 以上之復發間隔（與木屐寮斷層合併）。	
	最近一次活動時間	2 萬年以上	鑽井定年結果	*楊志成等*，2005

4-3-2 木屐寮斷層

木屐寮斷層位於嘉南隆起海岸平原與嘉義丘陵的交接帶，長約 7 公里，由數值地形模型（DTM，40 公尺一格點）與衛星遙測影像發現，在木屐寮斷層跡附近均呈現相當明顯的線形（圖 4.12），線形北起頭前溪橋南側的山豬崁，向南延伸至六重溪北岸，此線形區隔東側地勢較高的丘陵區與西側平緩的平原區，兩側地勢落差約數十公尺。*王宏霖*（2006）曾針對木屐寮斷層施測震測剖面，其平面分布如圖 4.16 所示，其中跨越木屐寮斷層之 D 剖面及 E 剖面可以發現地層上有明顯的轉折（圖 4.17），應為受木屐寮斷層擾動所造成。

在短期滑移速率上，綜合 1999~2006 年的分析結果[*饒瑞鈞等*，2006]，跨過木屐寮及六甲斷層的速度場變化量（圖 4.18A），其平行斷層走向的分量為-1.8 公厘/年，呈右移形式（圖 4.18B）；其垂直斷層走向分量為 2.4 公厘/年，呈壓縮形式；高程方向抬升量為 6.8 公厘/年。根據速度分析結果顯示，由於跨斷層之相對運動量並不大，顯示木屐寮及六甲斷層於 1995~2006 年間為鎖定狀態。

在長期滑移速率上，中央地調所藉由白河與六重溪場址之鑽探及定年，估算各井位置的抬升速率，六甲斷層及木屐寮斷層下盤的抬升速率為 3.4±1.0 mm/yr，上盤為 9.0±1.0 mm/yr，推算木屐寮斷層抬升率為 5.6±2.0 mm/yr。

單一事件變位量，木屐寮斷層並無槽溝古地震或是歷史地震可供參考，根據 *Wells and Coppersmith*(1994)之經驗公式，以木屐寮斷層之長度，會產生 0.81±0.42 的變位量。

1941 年 12 月 17 日，嘉義中埔附近（北緯 23.4 度，東經 120.475 度，震源深度 12 公里）發生 M_L=7.1 的強震，震央位置如圖 4.19 所示，造成嘉義地區之災情慘烈，包括 360 人死亡，房屋傾倒，軌道彎曲，山崩，地裂，地滑及噴砂等現象。此地震震央位置距離木屐寮斷層十分接近，但是震後卻沒有發現斷層在地表錯動之現象，因此無法斷定此地震是由木屐寮斷層之錯動所造成。

木屐寮斷層之參數表詳如表 4.4 所示。

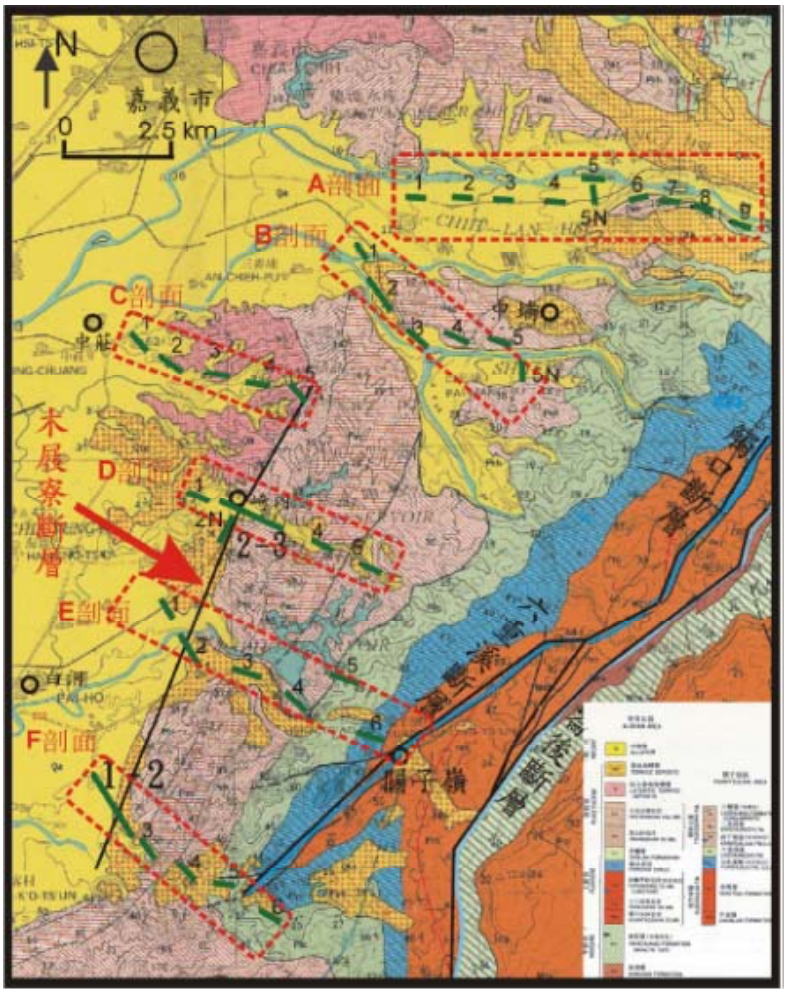


圖 4.16：中油十萬分之一地質圖與震測剖面線分布圖。[*王宏霖*, 2006]

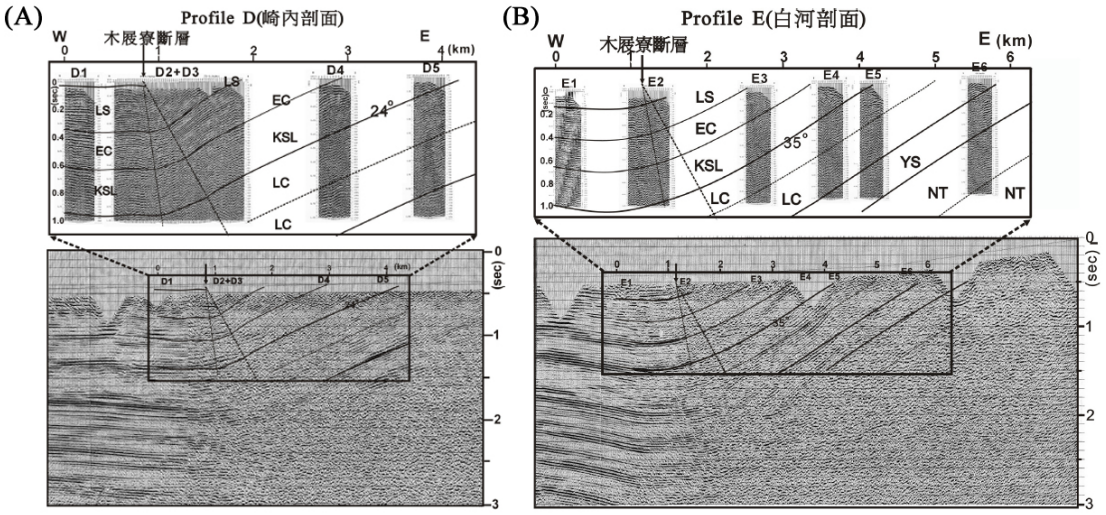


圖 4.17：木屐寮斷層之震測剖面，（A）D 剖面，（B）E 剖面。[*王宏霖*, 2006]

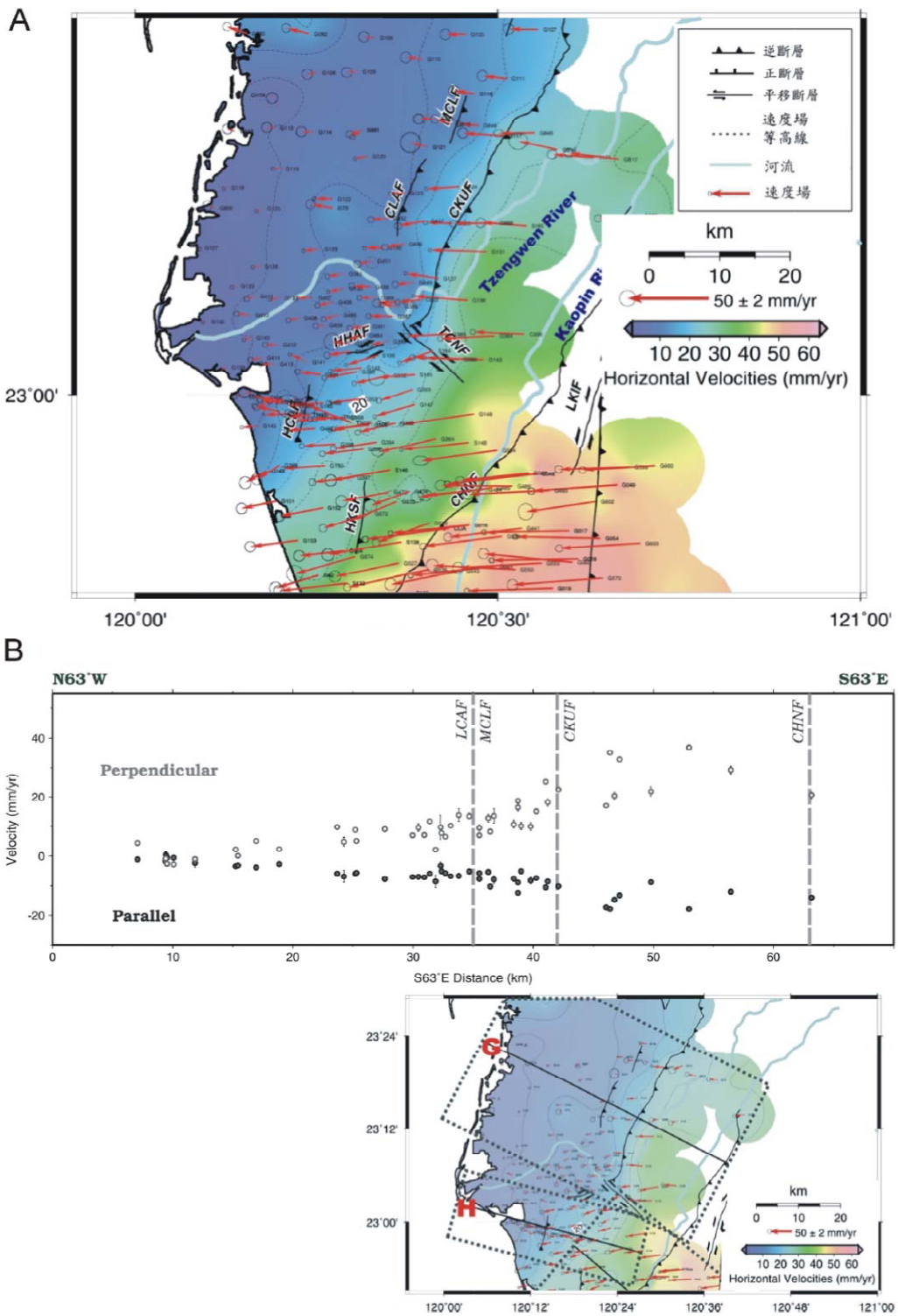


圖 4.18：木屐寮斷層附近 1999~2006 年間 GPS 測量結果。A：水平位移場。B：跨斷層水平速度場剖面與剖面位置。[摘自 *饒瑞鈞等*，2006]

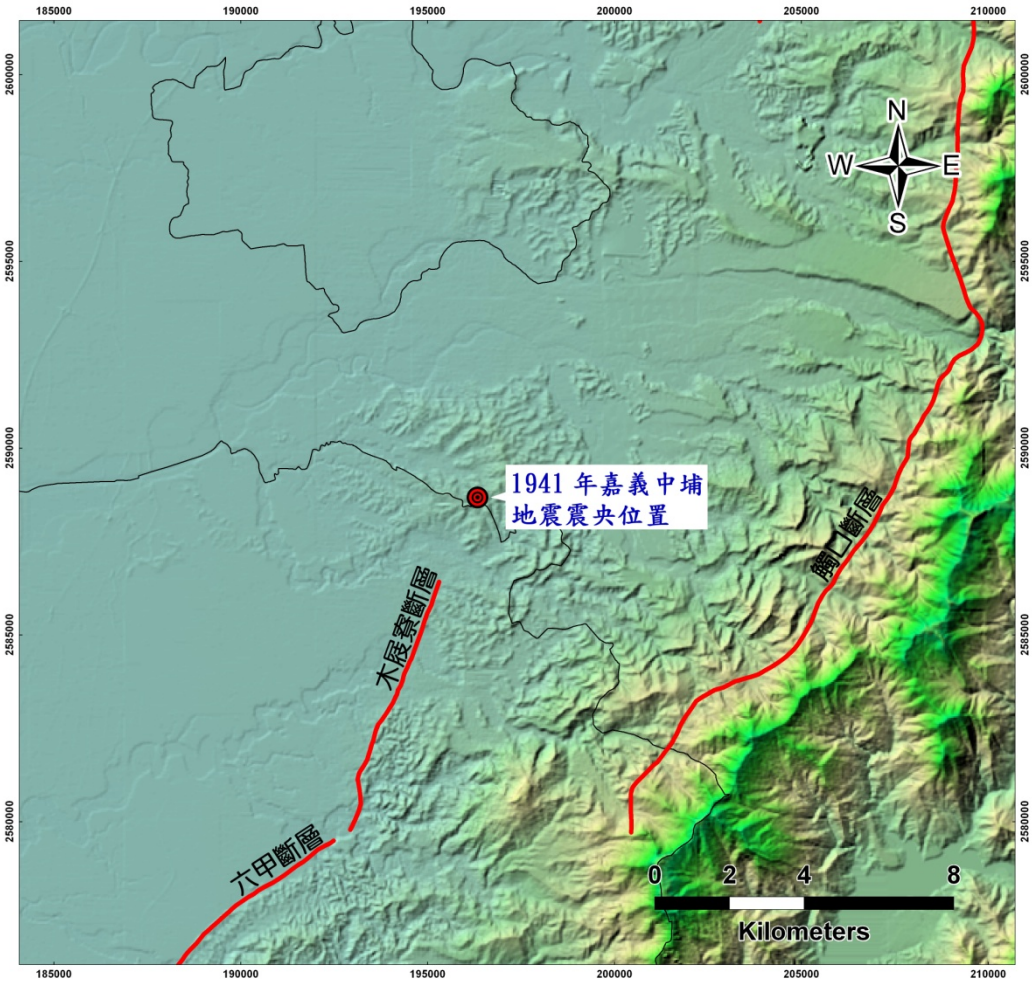


圖 4.19：1941 年嘉義中埔地震震央位置與木屐寮斷層之相對位置圖。

表 4.4：木屐寮斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
木屐寮斷層	斷層分支	無		
	長度(km)	7	由台南縣白河鄉頭崎內里向南延伸至六重溪北岸崁內里	*Sun*, 1970；*張徽正等*，1998
	寬度(km)	24.4	本計畫建置之斷層面	
	深度（km）	8.4		
	面積(km2)	163.5		
	走向	北北東	地形、航照判釋	*Sun*, 1970；*張徽正等*，1998
	傾斜角度(度)	0~6 公里：43 度 6~8 公里：18 度 8~8.4 公里：2.5 度	本計畫建置之斷層面	
	斷層機制	逆移斷層	1.遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 2.地物探勘瞭解地下地層錯動情形。	*Sun*, 1970；*張徽正等*，1998
	短期滑移速率(mm/yr)	平行斷層走向分量-1.8（右移） 垂直斷層走向分量 2.4（壓縮） 高程抬升量 6.8	1999~2006 GPS 測量及分析結果	*饒瑞鈞等*，2006
	長期滑移速率(mm/yr)	5.6±2.0(抬升)	藉由白河與六重溪場址之鑽探及定年，估算各井位置的抬升速率	*陳文山等*，2008
	單一事件變位量(m)	0.81±0.42	log D = 0.29 Mw - 1.84	*Wells and Coppersmith*, 1994

	最大可能地震規模(Mw)	6.57	Mw =4.33+0.90 log A（逆斷層）	*Wells and Coppersmith*, 1994
		6.28	Mw =5.00+1.22 log L（逆斷層）	
		6.72	Mw = (0.82±0.071) log (A)+(4.61±0.141)	*吳相儀*，2000
		6.17	Mw = (1.32±0.122) log (L)+(4.817±0.132)	
		5.83	log (Le) = (1/2)log(M0) - 8.08 Mw =(log(M0) - 9.1)/1.5	*Yen and Ma*, 2011
	地震重複週期(年)	201~309	特徵地震模式計算地震矩規模 6.7 以上之復發間隔（與六甲斷層合併）。	
	最近一次活動時間	1941(?)		

4-3-3 六甲斷層及木屐寮斷層潛勢評估

本計畫在進行六甲斷層及木屐寮斷層之潛勢評估，是考慮兩條斷層合在一起破裂之情形，在斷層幾何面建置上，參考了圖 4.14 之剖面，深度 0~6 公里，斷層傾角設為 43 度；深度 6~8 公里，斷層傾角設為 18 度；深度 8~8.4 公里，斷層傾角設為 2.5 度。其建立之斷層面幾何模型如圖 4.20 所示，得到之斷層面積為 654 平方公里。

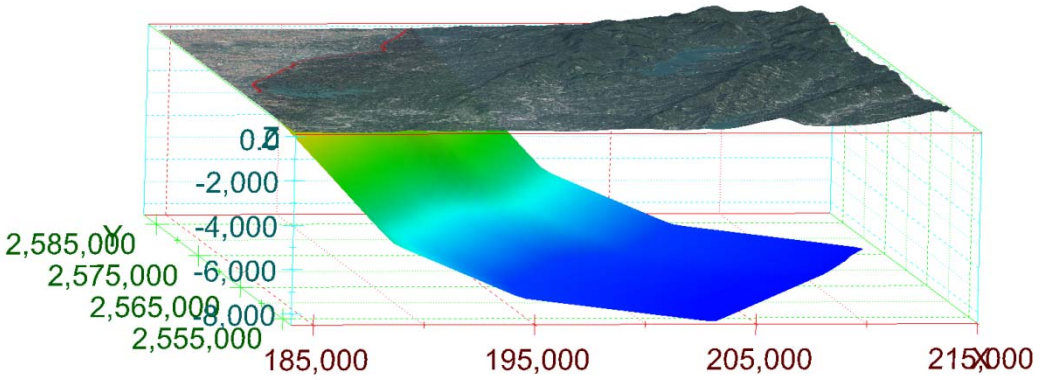


圖 4.20：六甲+木屐寮斷層之三維幾何面。

在斷層長期滑移速率上，分別考慮*楊志成等*(2005)之 8.1 公厘/年及*陳文山等*(2006)之 9.3 公厘/年，用邏輯樹給予其權重各為 0.5。

在最大可能地震規模（m_u）上，將斷層面面積分別帶入 *Wells and Coppersmith*(1994)及*吳相儀*(2000)之公式中，得到之 M_w 分別為 7.11 及 7.26，在邏輯樹中分別給予 0.5 之權重。六甲+木屐寮斷層之邏輯樹如圖 4.21 所示。

斷層名稱	斷層分段	斷層面積(km²)	斷層滑移速率(mm/yr)	m_u (M_w)

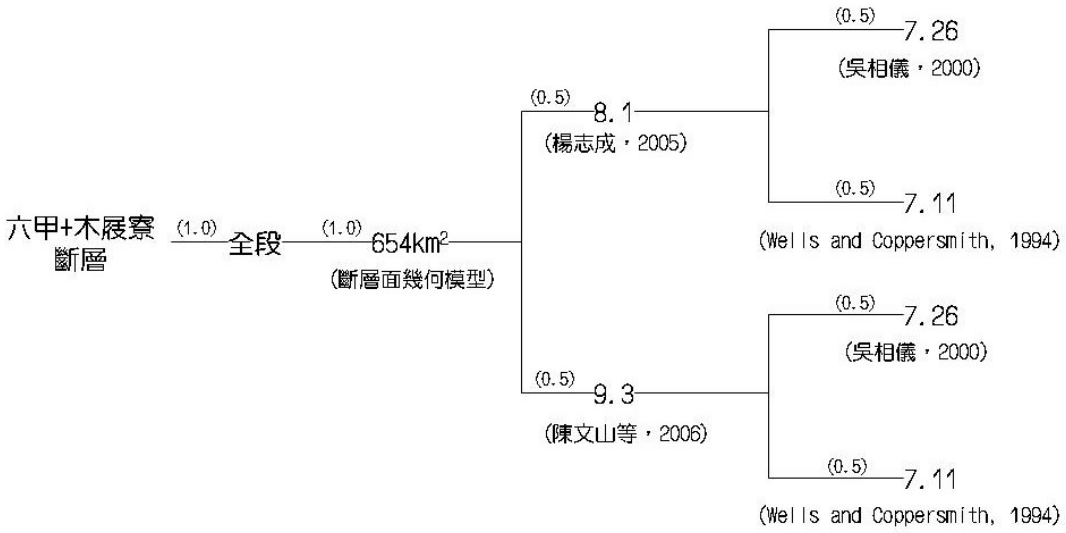


圖 4.21：六甲+木屐寮斷層之邏輯樹分布。

特徵地震模式之 b 值採用*鄭錦桐*（2002）淺層震源分區 S07 區之 b 值 0.643，淺層震源分區及 S07 區之劃設如圖 4.22 所示，S07 區之截切指數模式如圖 4.23 所示。

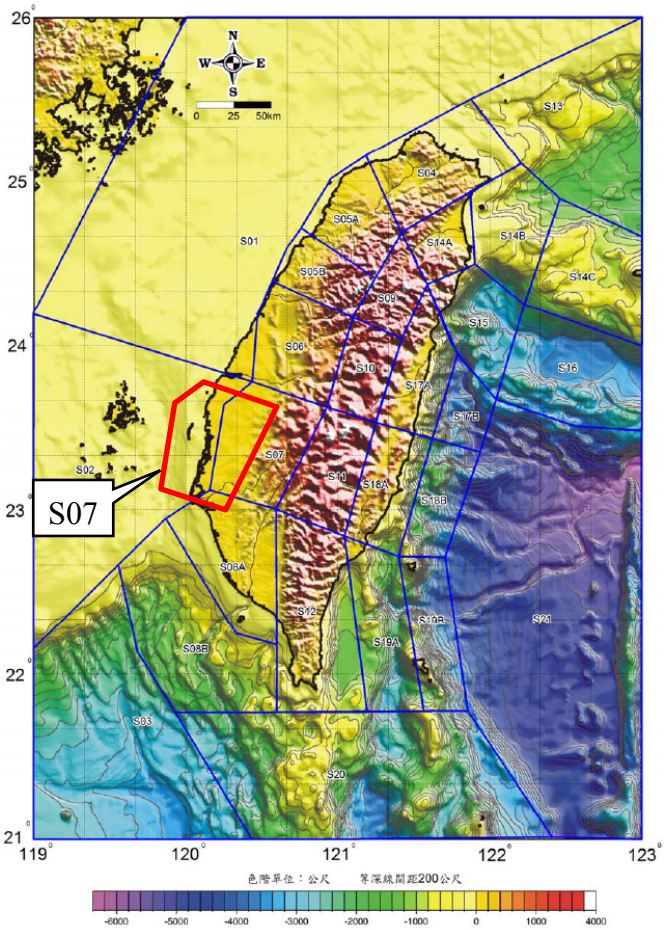


圖 4.22：台灣地區淺層區域震源劃設。[摘自鄭錦桐，2002]

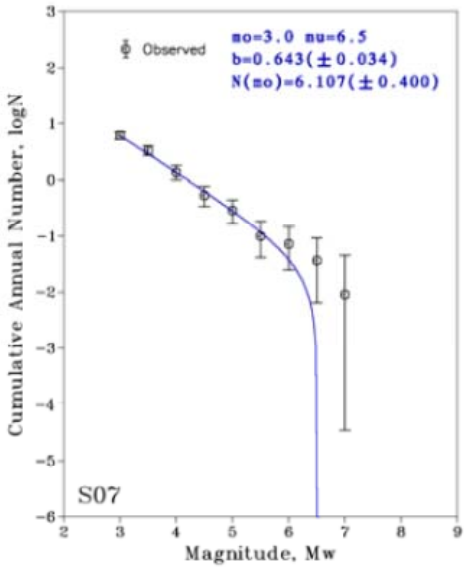


圖 4.23：淺層震源分區 S07 區之截切指數模式。[摘自鄭錦桐，2002]

六甲+木屐寮斷層之特徵地震模式如圖 4.24 所示，圖中可知規模 $M_w \geqq 6.7$ 之復發間隔分別為 309、231、269、201 年；規模 $M_w \geqq 7.0$ 之復發間隔分別為 611、861、533、750 年。

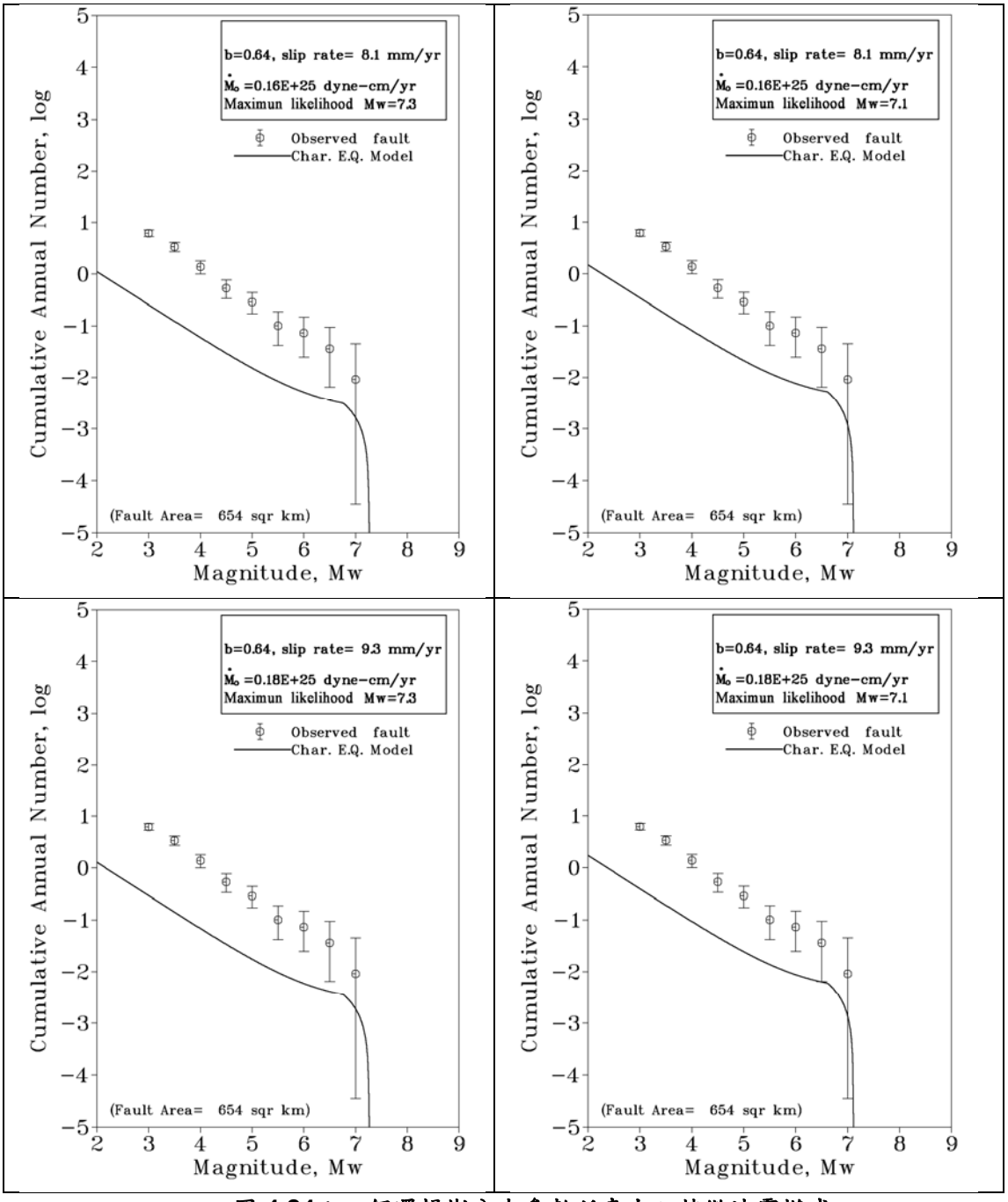


圖 4.24：四個邏輯樹分支參數所畫出之特徵地震模式。

在評估六甲+木屐寮斷層未來 30 年、50 年及 100 年 $M_w \geqq 6.7$ 之機率及 $M_w \geqq 7.0$ 時，本計畫考慮了兩種狀況。

狀況 1：斷層最後一次事件為未知，機率密度函數採用 Poisson 模式，$M_w \geqq 6.7$ 其 30 年、50 年及 100 年之機率如表 4.5 所示，分別為 11.46%，18.35%，33.26%；M_w

≧7.0 其 30 年、50 年及 100 年之機率如表 4.6 所示，分別為 4.40%，7.23%，13.91%。

表 4.5：六甲+木屐寮斷層狀況 1，M_w≧6.7 之發生機率。

週期	最後一次事件	特徵地震規模 Mw	機率密度函數	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
309	NA	6.7	Poisson	0.0925	0.1494	0.2765	0.25
231	NA	6.7	Poisson	0.1218	0.1946	0.3514	0.25
269	NA	6.7	Poisson	0.1055	0.1696	0.3105	0.25
201	NA	6.7	Poisson	0.1386	0.2202	0.3920	0.25
				11.46%	18.35%	33.26%	1

表 4.6：六甲+木屐寮斷層狀況 1，M_w≧7.0 之發生機率。

週期	最後一次事件	特徵地震規模 Mw	機率密度函數	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
611	NA	7.0	Poisson	0.047914	0.078574	0.150975	0.25
861	NA	7.0	Poisson	0.034243	0.056418	0.109653	0.25
533	NA	7.0	Poisson	0.05473	0.089543	0.171068	0.25
750	NA	7.0	Poisson	0.039211	0.064493	0.124827	0.25
				4.40%	7.23%	13.91%	1

狀況 2：假設 1941 年之中埔地震已釋放了六甲+木屐寮斷層所累積的能量，以西元 1941 年當做最後一次事件，採用 BPT 模式，M_w≧6.7 其 30 年、50 年及 100 年之機率如表 4.7 所示，分別為 5.17%，11.13%，30.46%；M_w≧7.0 其 30 年、50 年及 100 年之機率如表 4.8 所示，分別為 0.01%，0.05%，0.62%。

表 4.7：六甲+木屐寮斷層狀況 2，M_w≧6.7 之發生機率。

週期	最後一次事件	特徵地震規模 Mw	機率密度函數	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
309	1941	6.7	BPT	0.015905	0.043073	0.168139	0.25
231	1941	6.7	BPT	0.060567	0.130664	0.350511	0.25
269	1941	6.7	BPT	0.031948	0.076932	0.247699	0.25
201	1941	6.7	BPT	0.098219	0.194466	0.451875	0.25
				5.17%	11.13%	30.46%	1

表 4.8：六甲+木屐寮斷層狀況 2，M_w≧7.0 之發生機率。

週期	最後一次事件	特徵地震規模 Mw	機率密度函數	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
611	1941	7.0	BPT	6.05E-05	0.000414	0.006826	0.25
861	1941	7.0	BPT	5.51E-07	8.21E-06	0.000436	0.25
533	1941	7.0	BPT	0.000261	0.001399	0.015964	0.25
750	1941	7.0	BPT	4.44E-06	4.68E-05	0.001483	0.25
				0.01%	0.05%	0.62%	1

4-4 小結

台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，對於台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 100 年度已建立六甲斷層與木屐寮斷層之斷層參數表。

本計畫已參考美、日之研究方法及結果，建立台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，本計畫充分運用六甲斷層與木屐寮斷層參數，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 100 年度六甲斷層與木屐寮斷層斷層潛勢經評估後，考慮兩種情況：狀況 1 為未知活動斷層最近一次活動時間，以 Poisson 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生規模≧6.7 之機率為 11.46%，18.35%，33.26%；M_w≧7.0 之機率為 4.40%，7.23%，13.91%；狀況 2 為假設 1941 年中埔地震為最近一次發生時間，以 BPT 模式評估未來 30 年、50 年及 100 年發生規模≧6.7 之機率為 5.17%，11.13%，30.46%；M_w≧7.0 之機率為 0.01%，0.05%，0.62%。

五、整合觀測資料分析

5-1 異常紀錄與大地震活動之關係

針對規模五以上地震事件，尋找可能的異常紀錄，是本整合分析重點之一。異常紀錄包含(1) 地下水位異常(2)地化異常(3)井下應變儀異常(4)地震訊號異常。期末報告共累計 2009 年一月至 2011 年十月中 87 個地震事件，如表 5.1 詳列。其中規模最大為 M6.9，發生在花蓮市地震站東南約 20 公里外海。其空間分布及對應的震源機制如圖 5.1 所示。在 87 個規模五以上事件中，約 78%的地震皆發生於台灣東部及外海。共有 11 個規模大於六的地震，亦大多為東部外海的地震，僅有兩個地震分別發生在高雄甲仙(M6.4, 2010/3/4)和南投名間(M6.2, 2009/11/05)。這些規模六的地震僅有一個事件同時觀測到(1) 地下水位(2)地化氣體(3)井下應變儀記錄三樣異常，此事件為規模最大的 M6.9 地震。

異常紀錄統計圖如圖 5.2 所示。所有的事件僅有嘉義網的觀測具有三種或以上的同步異常訊號，分別是事件 27 和 72，發生於 2009/12/19(規模 6.9，花蓮外海)和 2011/3/20(規模 5.8，台東外海)。而由於規模 5.8 的地震事件又同時有對應到慢滑事件(slow slip event)的長微震(tremor)之紀錄，我們初步排除規模 5.8 地震事件的同步異常觀測為前兆型異常。

表 5.1：規模大於五之地震事件列表。

2009年~2011年10月規模大於5之87個地震事件(中央氣象局)			
ID	西元時間	規模	詳細資料
1	2009/01/02 09:39	5.1	屏東恆春地震站西偏南 94.0 公里
2	2009/01/04 06:04	5.1	花蓮秀林地震站東偏北方 16.2 公里
3	2009/01/23 20:38	5.3	台東蘭嶼地震站南偏西方 116.2 公里
4	2009/04/17 20:37	5.3	花蓮市地震站東南方 9.5 公里
5	2009/05/27 06:27	5.7	高雄市地震站西南方 120.8 公里
6	2009/06/20 11:44	5.4	宜蘭南澳地震站東偏南方 82.2 公里
7	2009/06/25 05:09	5	花蓮市地震站東方 68.6 公里
8	2009/06/28 17:34	5.3	花蓮秀林地震站東北方 18.8 公里
9	2009/07/14 02:05	6	花蓮市地震站東方 61.9 公里
10	2009/07/16 18:48	5.4	花蓮市地震站東方 69.1 公里
11	2009/07/17 02:42	5.1	花蓮市地震站東方 69.0 公里
12	2009/07/26 09:00	5.4	南投名間地震站東南方 34.3 公里
13	2009/07/26 14:10	5.4	花蓮玉里地震站北方 8.8 公里
14	2009/07/30 00:53	5.8	屏東恆春地震站西方 27.8 公里
15	2009/08/17 08:05	6.8	花蓮市地震站東偏南方 240.4 公里
16	2009/08/17 18:10	5.9	花蓮市地震站東偏南方 221.6 公里
17	2009/08/20 22:18	5.5	花蓮市地震站東偏南方 205.2 公里
18	2009/08/22 04:57	5.1	屏東枋寮地震站西方 16.9 公里
19	2009/09/12 20:05	5.1	花蓮市地震站東方 89.3 公里
20	2009/10/04 01:36	6.1	花蓮西林地震站東南方 23.0 公里
21	2009/10/11 14:42	5	屏東恆春地震站西偏南 14.8 公里
22	2009/10/23 07:05	5.1	台東市地震站東偏南方 35.1 公里
23	2009/11/05 17:32	6.2	南投名間地震站南偏東方 10.1 公里
24	2009/11/05 19:34	5.7	南投名間地震站南偏東方 13.6 公里
25	2009/11/15 22:47	5.5	基隆市地震站東偏南方 46.3 公里
26	2009/11/22 01:27	5	花蓮秀林地震站東北方 22.4 公里
27	2009/12/19 21:02	6.9	花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里
28	2010/01/05 03:27	5.5	花蓮秀林地震站東偏北方 25.8 公里
29	2010/01/19 14:09	5.6	花蓮市地震站南偏東方 18.2 公里
30	2010/02/07 14:10	6.6	花蓮市地震站東偏南方 165.7 公里
31	2010/02/09 13:02	5.4	台東蘭嶼地震站南方 118.1 公里
32	2010/02/12 10:42	5.2	花蓮西林地震站西偏北方 37.1 公里
33	2010/02/22 13:21	5.6	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 160.0 公里
34	2010/02/26 09:07	5.8	花蓮市地震站東偏南方 131.7 公里
35	2010/03/04 08:18	6.4	高雄甲仙地震站東偏南方 17.0 公里
36	2010/03/04 15:07	5.1	台東成功地震站東偏南方 62.5 公里
37	2010/03/10 14:27	5.1	花蓮市地震站東偏南方 161.4 公里
38	2010/03/18 17:01	5	宜蘭蘇澳地震站東南方 26.3 公里
39	2010/03/27 07:07	5.2	花蓮秀林地震站東方 13.2 公里
40	2010/04/09 19:49	5.1	宜蘭市地震站東偏北方 29.7 公里
41	2010/04/11 12:57	5.4	台東成功地震站東偏北方 76.5 公里
42	2010/04/23 09:49	5	宜蘭蘇澳地震站東方 45.3 公里
43	2010/04/26 10:59	6.8	台東蘭嶼地震站東偏北方 190.4 公里
44	2010/05/03 21:38	5.1	花蓮市地震站東偏南方 203.5 公里
45	2010/06/15 08:31	5.5	花蓮秀林地震站東南方 3.7 公里
46	2010/06/27 02:05	5.1	宜蘭牛鬥地震站北偏西方 6.2 公里
47	2010/07/03 03:11	5.1	屏東市地震站東北方 30.0 公里
48	2010/07/09 03:43	5.3	宜蘭南澳地震站東方 25.9 公里
49	2010/07/09 08:41	5.8	宜蘭蘇澳地震站東方 81.5 公里
50	2010/07/17 17:04	5.2	花蓮玉里地震站東偏北方 47.3 公里
51	2010/07/18 21:03	5.2	宜蘭南澳地震站東偏南方 69.2 公里
52	2010/07/25 11:52	5.7	屏東市地震站東偏北方 30.6 公里
53	2010/08/22 00:37	5.3	花蓮西林地震站東南方 34.7 公里
54	2010/08/30 16:45	5.2	基隆市地震站東偏南方 48.8 公里
55	2010/09/04 03:06	5	宜蘭南澳地震站東偏南方 87.4 公里
56	2010/09/20 11:17	5.1	花蓮西林地震站東偏南方 34.7 公里
57	2010/09/29 01:33	5	花蓮秀林地震站東北方 11.3 公里
58	2010/10/01 03:56	5.1	宜蘭市地震站北方 11.4 公里
59	2010/10/03 03:23	5	宜蘭南澳地震站南偏西方 6.9 公里
60	2010/10/04 21:28	6.6	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 362.5 公里
61	2010/10/12 14:43	5	基隆市地震站東偏南方 50.5 公里
62	2010/10/14 14:06	5	屏東恆春地震站東南方 51.1 公里
63	2010/11/08 21:01	5.2	台南東山地震站西偏南 10.1 公里
64	2010/11/12 21:08	5.3	宜蘭南澳地震站東偏南方 82.5 公里
65	2010/11/12 23:39	5.3	屏東枋寮地震站南方 20.4 公里
66	2010/11/21 20:31	6.1	花蓮市地震站南偏東方 15.5 公里
67	2010/12/06 10:14	5.2	花蓮西林地震站南方 15.0 公里
68	2010/12/07 10:46	5.1	台東成功地震站南方 14.8 公里
69	2010/12/10 04:42	5.2	台東蘭嶼地震站東南方 98.9 公里
70	2011/02/01 16:16	5.5	花蓮縣政府東北方 30.6 公里外海
71	2011/02/15 15:18	5.5	台東縣政府南方 174.1 公里外海
72	2011/03/20 16:00	5.8	台東縣政府東南方 41.9 公里外海
73	2011/04/29 21:12	5.9	台東縣政府南偏東方 182.5 公里外海
74	2011/04/30 16:35	5.8	宜蘭縣政府南偏東方 10.1 公里
75	2011/05/03 23:52	5.2	花蓮縣政府東偏南方 10.7 公里外海
76	2011/05/22 09:34	5	花蓮縣政府東北方 20.3 公里外海
77	2011/06/03 01:07	5.2	台東縣政府南偏東方 63.4 公里外海
78	2011/06/10 09:25	5.1	花蓮縣政府南方 46.8 公里外海
79	2011/06/26 21:19	5	南投縣政府東方 31.9 公里 (位於南投縣仁愛鄉)
80	2011/07/12 19:17	5.3	花蓮縣政府南偏西方 53.9 公里 (位於花蓮縣近海)
81	2011/07/13 15:19	5.4	宜蘭縣政府東方 206.8 公里 (位於台灣東部海域)
82	2011/07/18 22:48	5.1	花蓮縣政府東偏南方 88.2 公里 (位於台灣東部海域)
83	2011/09/09 11:26	5	台東縣政府南偏西方 52.4 公里 (位於台灣東部海域)
84	2011/09/12 13:15	5.1	花蓮縣政府東偏南方 128.2 公里 (位於台灣東部海域)
85	2011/09/22 06:18	5.1	花蓮縣政府北偏東方 11.9 公里 (位於花蓮縣近海)
86	2011/10/30 11:23	**6.3**	基隆市政府東方 141.4 公里 (位於台灣東北部海域)
87	2011/10/31 23:17	**5**	宜蘭縣政府東北方 26.3 公里 (位於台灣東部海域)

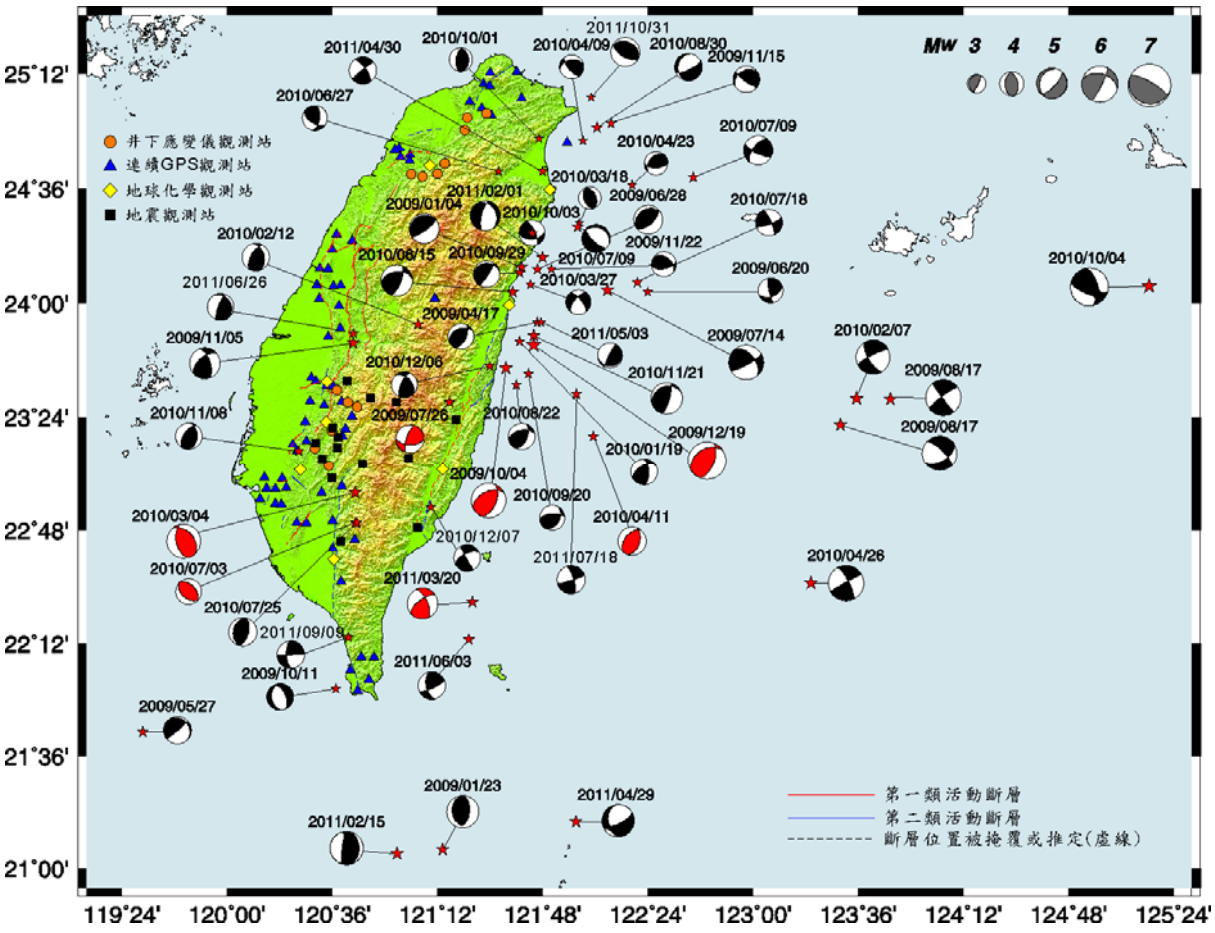


圖 5.1：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形、和黑色方形分別代表星號代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、GPS、地化觀測(氣體和水位)及地震觀測站。紅色海灘球為所有觀測網中觀測到至少三種或以上之異常訊號。

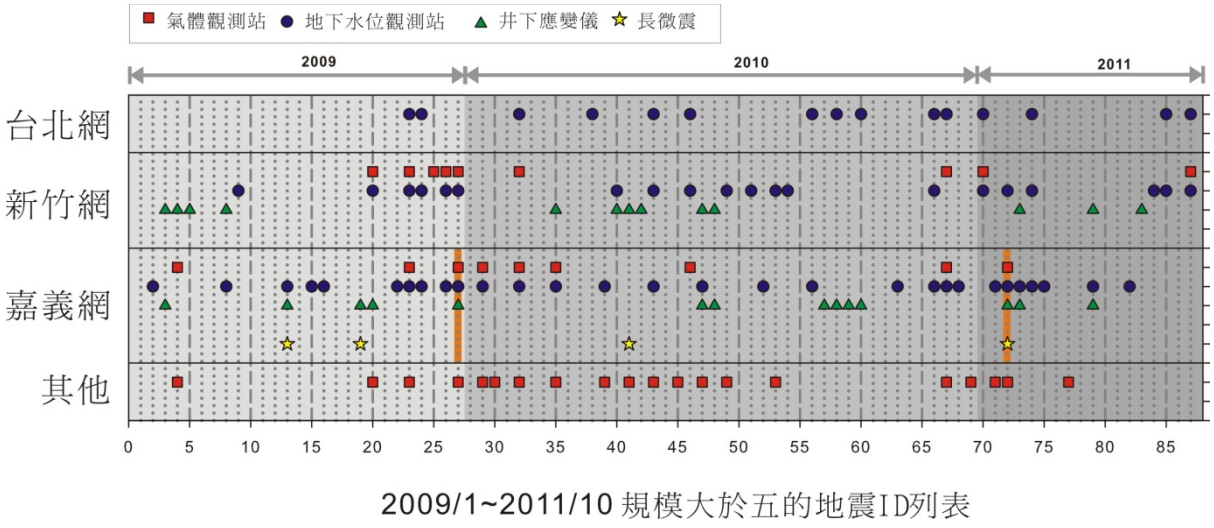


圖 5.2：2009 年至 2011 年 10 月規模大於五地震之異常紀錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID(表 5.1)，紅色方形、藍圓圈、綠三角形、和黃星分別代表氣體觀測、地下水位、井下應變儀、和地震訊號異常，而垂直橘線則代表有三個或以上的同步異常觀測。

表 5.2：2009 年至-2011 年 10 月規模大於五地震之異常紀錄對應比較表。

地震事件			台北網				新竹網						嘉義網								其他
ID	西元時間	規模	錦和水位觀測站	樹林水位觀測站	明德水位觀測站	GPS異常時間	大平地(TPT)氣體觀測站	雙溪水位觀測站	新興水位觀測站	瑞峰水位觀測站	井下應變儀異常時間	GPS異常時間	中崙(CL)氣體觀測站	中興水位觀測站	太興水位觀測站	建邦水位觀測站	泓水水位觀測站	井下應變儀異常時間	GPS異常時間	長源泉	其他氣體觀測站
1	2009/01/02 09:39	5.1																			
2	2009/01/04 06:04	5.1												前兆							
3	2009/01/23 20:38	5.3									2009/01/22							2009/1/13~16			
4	2009/04/17 20:37	5.3					不確定				2009/04/15		前兆								池上
5	2009/05/27 06:27	5.7									2009/05/23		不確定								
6	2009/06/20 11:44	5.4																			
7	2009/06/25 05:09	5																			
8	2009/06/28 17:34	5.3									2009/06/28						前兆				
9	2009/07/14 02:05	6					不確定		前兆												
10	2009/07/16 18:48	5.4																			
11	2009/07/17 02:42	5.1																			
12	2009/07/26 09:00	5.4																			
13	2009/07/26 14:10	5.4													前兆			2009/07/17		2009/7/16-	
14	2009/07/30 00:53	5.8																			
15	2009/08/17 08:05	6.8															前兆				
16	2009/08/17 18:10	5.9															前兆				
17	2009/08/20 22:18	5.5																			
18	2009/08/22 04:57	5.1																			
19	2009/09/12 20:05	5.1																2009/09/03		2009/9/2-3	
20	2009/10/04 01:35	6.1					前兆		前兆									2009/09/30			屏東
21	2009/10/11 14:42	5																			
22	2009/10/23 07:05	5.1															前兆				
23	2009/11/05 17:32	6.2	前兆		前兆		前兆		前兆				前兆	前兆		前兆	前兆				二溪、屏東、池上
24	2009/11/05 19:34	5.7	前兆		前兆				前兆					前兆		前兆	前兆				
25	2009/11/15 22:47	5.5					前兆														
26	2009/11/22 01:27	5					前兆		前兆							前兆	前兆				
27	2009/12/19 21:02	6.9					前兆	前兆					前兆	前兆			前兆	2009/12/16			池上
28	2010/01/05 03:27	5.5																			
29	2010/01/19 14:09	5.6											前兆			前兆	前兆				池上
30	2010/02/07 14:10	6.6																			池上
31	2010/02/09 13:02	5.4																			
32	2010/02/12 10:42	5.2	前兆	前兆	前兆		前兆						前兆				前兆				古坑、池上
33	2010/02/22 13:21	5.6																			
34	2010/02/26 09:07	5.8																			
35	2010/03/04 09:18	6.4					不確定				2010/02/22		前兆		前兆						古坑、屏東、池上、社頂水氣觀測站
36	2010/03/04 15:07	5.1																			
37	2010/03/10 14:27	5.1																			
38	2010/03/18 17:01	5	前兆	前兆	前兆																
39	2010/03/27 07:07	5.2							疑似								前兆				古坑、池上
40	2010/04/09 19:49	5.1							前兆		2010/04/02										
41	2010/04/11 12:57	5.4									2010/04/02									2010/04/17	古坑、池上
42	2010/04/23 09:49	5									2010/04/10										
43	2010/04/26 10:59	6.8	前兆	前兆	前兆				前兆					前兆			前兆				池上
44	2010/05/03 21:38	5.1																			
45	2010/06/15 08:31	5.5																			池上
46	2010/06/27 02:05	5.1		前兆	前兆				前兆				前兆								
47	2010/07/03 03:11	5.1									2010/06/29			前兆		前兆	前兆	2010/06/29			池上
48	2010/07/09 03:43	5.3									2010/06/29							2010/06/29			
49	2010/07/09 08:41	5.8							前兆												池上
50	2010/07/17 17:04	5.2																			
51	2010/07/18 21:03	5.2							前兆	前兆											
52	2010/07/25 11:52	5.7															前兆				
53	2010/08/22 00:37	5.3							前兆	前兆											池上
54	2010/08/30 16:45	5.2							前兆												
55	2010/09/04 03:06	5																			
56	2010/09/20 11:17	5.1	前兆	前兆	前兆										前兆	前兆	前兆				
57	2010/09/29 01:33	5																2010/09/21			
58	2010/10/01 03:56	5.1	前兆	前兆	前兆													2010/09/21			
59	2010/10/03 03:23	5																2010/09/21			
60	2010/10/04 21:28	6.6	前兆	前兆	前兆													2010/09/21			
61	2010/10/12 14:43	5																			
62	2010/10/14 14:06	5																			
63	2010/11/08 21:01	5.2															前兆				
64	2010/11/12 21:08	5.3																			
65	2010/11/12 23:39	5.3																			
66	2010/11/21 20:31	6.1	前兆		疑似				前兆								前兆				
67	2010/12/06 10:14	5.2	前兆		前兆		前兆						前兆				前兆				池上
68	2010/12/07 10:46	5.1															前兆				
69	2010/12/10 04:42	5.2																			屏東
70	2011/02/01 16:16	5.5	前兆	前兆	前兆		前兆		前兆												
71	2011/02/15 15:18	5.5															前兆				屏東
72	2011/03/20 16:00	5.8							前兆				前兆				前兆	2011/03/11		Trigger Tremor	屏東、池上
73	2011/04/29 21:12	5.9									2010/04/18					前兆	前兆	2011/04/18			
74	2011/04/30 16:35	5.8	前兆		前兆			疑似	前兆								前兆				
75	2011/05/03 23:52	5.2															前兆				
76	2011/05/22 09:34	5																			
77	2011/06/03 01:07	5.2														疑似					池上
78	2011/06/10 09:25	5.1																			
79	2011/06/26 21:19	5									2011/06/17					前兆	前兆	2011/06/17			
80	2011/07/12 19:17	5.3																			
81	2011/07/13 15:19	5.4																			
82	2011/07/18 22:48	5.1															前兆				
83	2011/09/09 11:26	5									2011/09/01										
84	2011/09/12 13:15	5.1							前兆												
85	2011/09/22 06:18	5.1	前兆	疑似	疑似			前兆	前兆												
86	2011/10/30 11:23	6.3																			
87	2011/10/31 23:17	5	前兆	前兆	前兆		前兆		前兆												

5-2 井下地震儀異常資料庫建置

自 2008 年起，針對每天的紀錄資料進行分析、以提供獨立的異常觀測資料庫，是本整合分析重點之二。

5-2-1 異常地震訊號-長微震基本介紹

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。取其振幅小持續時間卻長之特徵，以下稱之長微震。訊號火山地區常有相似的訊號特徵，以往被理解與岩漿體的移動(magma movement)有關，在火山爆發前這些訊號的異常活動被視作是爆發前兆。在非火山區域長微震近年來屢在隱沒帶[*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，對應到 GPS 紀錄之慢滑事件(slow slip event)，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。

長微震被發現可以受遠距地震表面波的觸發，觸發距離可以長達處百公里，而大地震也在鄰近區域，影響了長微震的頻繁度，說明下部地殼的觸發特徵具有爭議性。在上部地殼尺度，一般地震的觸發型態為密集的餘震；特殊的重複地震其觸發型態為縮短的重複週期、規模的微量變動、亦伴隨密集的震後事件；而在下部地殼尺度，長微震的觸發型態為頻繁的活動、以及與遠距表面波的到時同步。

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

5-2-2 背景雜訊與長微震偵測之關係

為制定一套客觀偵測標準，必須藉由雜訊的分析，以釐清背景雜訊的日夜差距，如何響長微震之判定。由發現的長微震事件(圖 5.3)之發生時間可看出，這六個事件例均發生於當地時間清晨一點至六點之間，雖然樣本數量並不多，但由研究區域測站雜訊之日夜變化情形或許能夠提供解釋。由 2010.05.21 當日之日間雜訊與夜間雜訊頻譜圖(圖 5.4a、b)可見，夜間雜訊於 2-8Hz 普遍較低，日間雜訊於 2-8Hz 則普遍較高，此一特徵於觀測到 Tremor 的測站相當明顯。因此無法排除 Tremor 事件於當地日間發生的可能性，惟發生於日間的 Tremor 事件可能因雜訊訊號強過 Tremor 訊號而因此無法被清楚區別出來。這樣的特性亦曾於日本地區被提出[*Maeda and Obara*, 2009]。

以 2010.05.21 之長微震事件為例(圖 5.3f)，取 17:22:00 至 17:27:00，共 300 秒之長微震訊號 (圖 5.4c、d 黑色實線)，並分別取 19:12:00 至 19:17:00 共 300 秒做為夜間

雜訊(圖 5.4a)，04:07:36 至 04:12:36 共 300 秒做為日間雜訊(圖 5.4b)，並分別做日、夜之頻譜噪訊比分析(Spectrum Signal-Noise ratio)(圖 5.4c、d)。我們發現，觀測到長微震訊號之測站於 2-8Hz 具有較高之信噪比(圖 5.4c、d 黑色實線)，但亦可發現部分測站雖無觀測到長微震訊號，但於 2-8Hz 之信噪比亦呈現較高的值(圖 5.4c、d 灰色實線)，顯示於長微震事件發生時，研究區域有部分測站於 2-8Hz 具有較高的雜訊，使得長微震訊號可能混雜於雜訊當中而無法被偵測到。因此無法完全由收到 Tremor 訊號之測站分布決定其震源之空間侷限性。

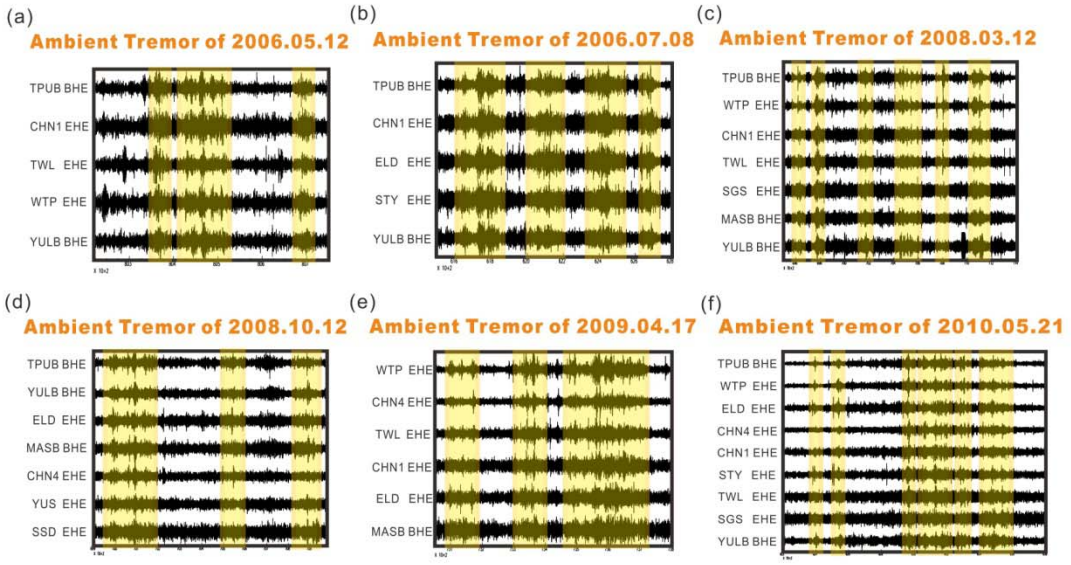


圖 5.3：六個長微震事件波形示意圖。圖中所示之波形均經帶通濾波 2-8Hz，訊號至各測站均有一致的到時，黃色色塊標示出長微震訊號中主要的能量封包。

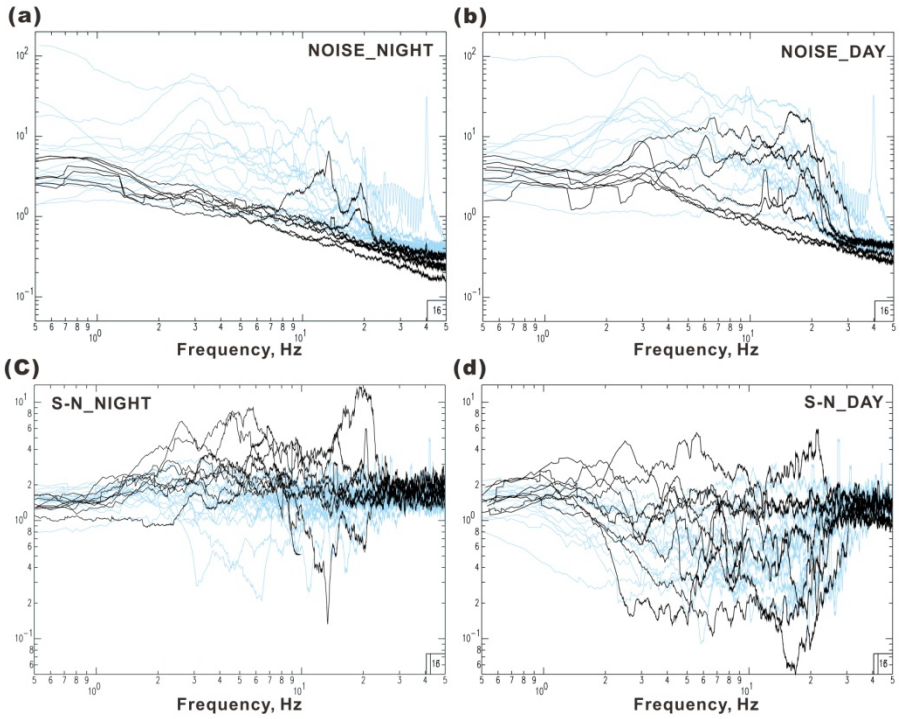


圖 5.4：2010.05.21 長微震事件之雜訊以及信噪比頻譜圖。(a)研究區域測站之夜間雜訊頻譜。(b)研究區域之日間訊頻譜。(c)長微震事件與夜間雜訊之信噪比頻譜。(d)長微震事件與日間雜訊之信噪比頻譜。圖中黑色實線均代表觀測到長微震訊號之測站；藍色實線均代表未觀測到長微震訊號之測站。

5-2-3 2008 年以來目錄建置

考慮到雜訊分析白天晚上不一的特性，利用連續紀錄地震訊號的振幅與雜訊相除所得之比值(NAA)當門檻，我們已初步發展一套自動化偵測系統，能搜尋長微震事件(圖5.5)。目前利用此法配合人工判釋，已建立 2008 年 1 月至今的長微震目錄如表 5.3 所示。

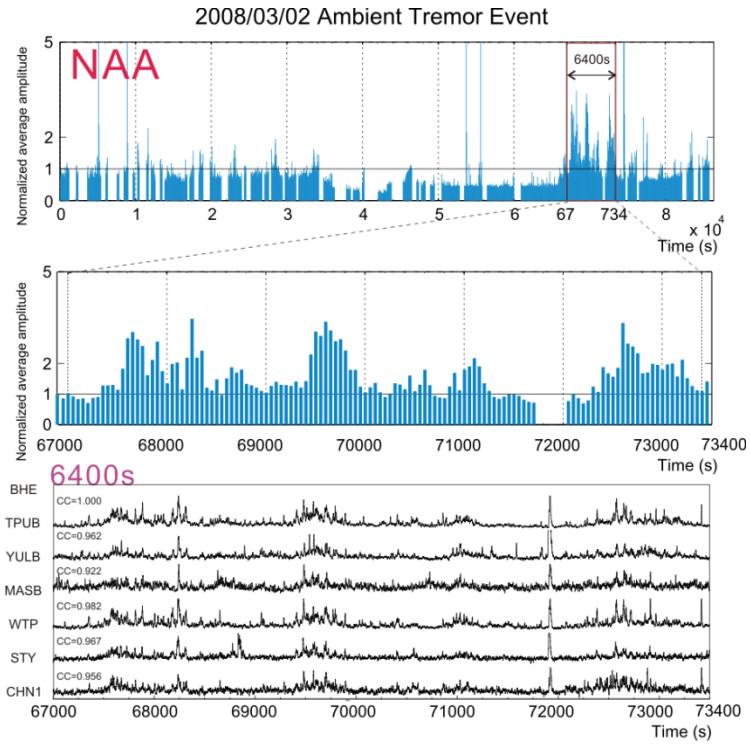


圖 5.5：利用白天晚上雜訊品質不等的特性，本研究將每天的連續波形紀錄每 500s 進行平均震幅計算、與雜訊震幅相除(此比值稱作 NAA，如上圖及中間放大圖)，與各個測站的濾波至 2-8Hz 包絡線(envelope)進行相關係數運算。當 NAA 值大於 1 、並在超過五個測站有高於 0.95 的相關係數、小於 10s 的時間差時，累積計算持續時間，持續時間超過 500s 即為長微震紀錄。下圖即為長達 6400s 的長微震事件。

表 5.3：2008 年一月至四月長微震目錄。

日期	起始時間	結束時間	持續時間(秒)
20080302	67354	68504	1150
20080302	68604	70154	1550
20080302	72304	73454	1150
20080312	69486	71386	1900
20080316	72743	73443	700
20080323	48407	49107	700
20080331	73133	74583	1450
20080407	75301	75851	550
20080420	74796	75596	800

5-3 整合分析架構

未來整合分析架構如圖 5.6 所示，待井下應變異常和長微震資料齊全後，將針對五個不同的連續資料記錄進行展開比對。

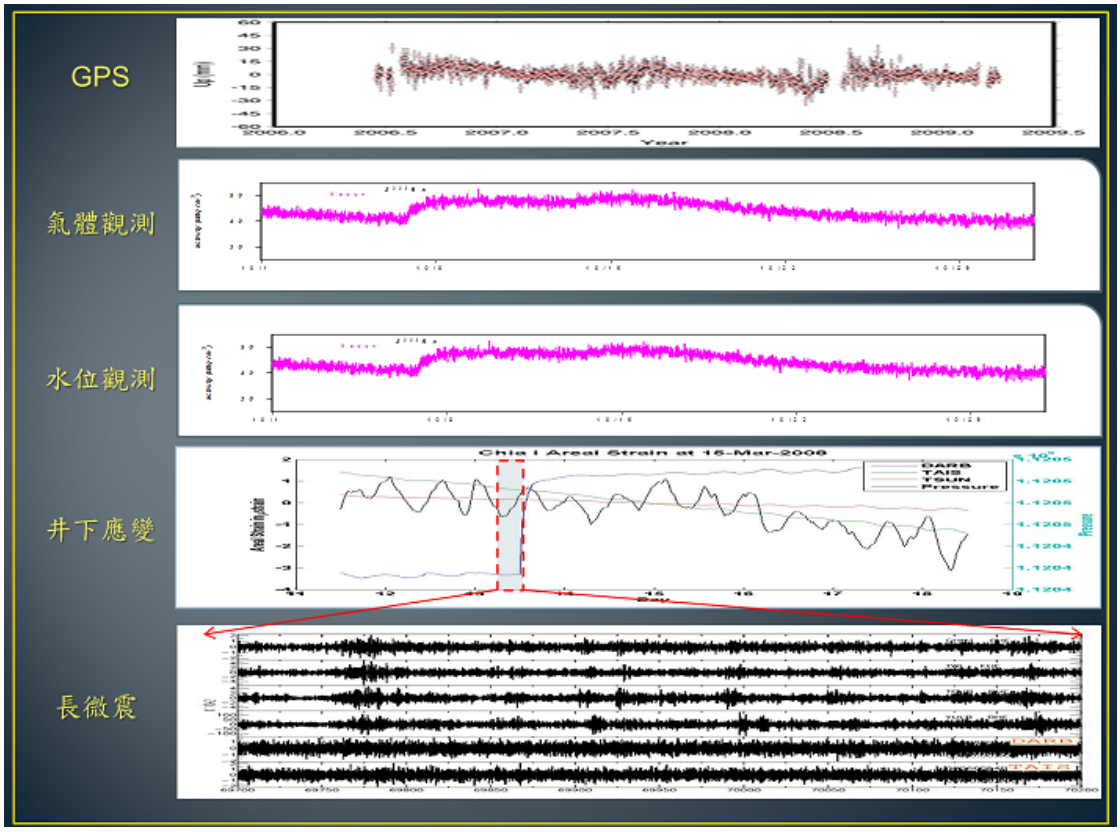


圖 5.6：整合分析架構圖。

六、結論與建議

（一）GPS 及精密水準測量：

1. 至十月底止我們已進行臺灣地區GPS及15條水準測線的資料解算分析。GPS的速度場分布均與2002-2010年一致；水準測段每公里觀測精度小於2.0 mm以下者有92.1 %，且所有的測段閉合差均符合規範。顯示外業觀測品質相當穩定可靠。
2. 中部地區彰化及車籠埔斷層透過GPS觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出，滑移速率分別為8.4 mm/yr及24.6 mm/yr；其鎖定深度則分別是3.7±0.7 km與2.8±0.5 km。然而縣148_王功至草屯與縣150_北斗至水里兩測線之間南北相距雖僅10-20 km，其所獲得之結果與地表垂直速度分布型態有相當大的差異，此情況反映車籠埔斷層的活動行為迄今仍受到1999年集集地震的震後變形所影響，進而導致斷層面上的滑移量在空間上有極大的差異。
3. 嘉南地區六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層透過GPS觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出，滑移速率分別為17.0 mm/yr、11.3 mm/yr及15.8 mm/yr；其鎖定深度則分別是3.4±0.6 km、2.5±1.2 km與3.7±1.1 km。假設六甲、觸口及竹頭崎斷層之斷層長度分別為23 km、27 km與25 km，則各斷層每年累積之能量分別為$7.36\pm1.33 \times 10^{23}$ dyne-cm、$2.85\pm1.36 \times 10^{23}$ dyne-cm與$6.00\pm1.81 \times 10^{23}$ dyne-cm。由上述之結果顯示，竹頭崎斷層具有相當高的斷層滑移速率，在這個區域內也具有相對較深之鎖定深度。

（二）井下應變儀資料檢核與分析：

1. 已完成持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性的作業，以利未來時間序列分析之用。
2. 目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與地震相關的應變"異常"。在嘉義網發現14個應變異常事件，新竹網則有13個應變異常事件，其中5次異常事件同時在兩個測網中被觀測到。
3. 在資料經過地下水與氣壓修正後，開始編輯程式做潮汐的估計與移除，已可有效估計以三個月資料為期的潮汐並移除之，但由於多種環境因素影響地下岩層的應變遠大於每日潮汐，特別是與斷層滑移相關的活動，這些會嚴重影響所估計潮汐的正確性，將考慮以切除較大的異常訊號後再估計潮汐，現有程式已可以容許30%左右的資料遺缺，所以切除較大異常訊號尚不會造成困擾，但需要對所求得的潮汐做正確性的分析。

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

（三）斷層潛能分析模式之評估：

1. 本計畫在進行六甲斷層與木屐寮斷層潛勢評估時，是考慮兩條斷層同時破裂之情形，並參考*Hung et al.*（1999）之構造剖面建立斷層面之三維幾何模型，面積為654平方公里。
2. 在進行活動斷層發震機率評估時，考慮兩種情況：狀況1為未知活動斷層最近一次活動時間，以Poisson模式評估未來30年、50年及100年發生規模≧6.7之機率為11.46%，18.35%，33.26%；M_w≧7.0之機率為4.40%，7.23%，13.91%；狀況2為假設1941年中埔地震為最近一次發生時間，以BPT模式評估未來30年、50年及100年發生規模≧6.7之機率為5.17%，11.13%，30.46%；M_w≧7.0之機率為0.01%，0.05%，0.62%。
3. 建議明年召開專家諮詢會議，針對所分析斷層潛勢的邏輯樹和權重分配進行討論，取得共識。

（四）整合觀測分析：

1. 針對規模五以上地震事件,尋找可能的異常紀錄,其中包含(1)地下水位異常(2)地化異常(3)井下應變儀異常(4)地震訊號異常，觀測期間自2009年一月至2011年十月。
2. 累計87個規模大於5.0的地震事件,其空間分布約78%的地震發生於台灣東部及外海。以規模而言，總計共有10個規模大於6.0，其中有兩個地震發生在西部，分別為高雄甲仙(M6.4,2010/3/4)和南投名間(M6.2,2009/11/05)。在這些規模大於6.0的地震中僅有一個規模最大(M6.9)的地震同時觀測到(1)地下水位(2)地化氣體(3)井下應變儀記錄三樣異常。
3. 異常紀錄統計結果，所有的事件僅有嘉義網的觀測具有三種或以上的同步異常訊號,分別發生於2009/12/19(規模6.9,花蓮外海)和2011/3/20(規模5.8,台東外海)。而由於規模5.8的地震事件又同時有對應到慢滑事件(slow slip event)的長微震(tremor)之紀錄,我們初步排除規模5.8地震事件的同步異常觀測為前兆型異常。

參考文獻

王天楷、徐春田、李昭興、許樹坤、黃怡陵（2007）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(4/4)。經濟部中央地質調查所報告96-05號，共190頁。

王宏霖（2006）以反射震震測法研究木屐寮斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，台灣中壢，共 118 頁。

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

王乾盈、楊榮塋、蔡道賜（1991）爆竹震源淺層反射震測探測新城斷層。第三屆臺灣地區地球物理研討會論文集，382-395 頁。

日本地震調查研究推進本部地震調查委員會（2008）全國地震動預測地圖 2008 年版。

日本地震調查研究推進本部地震調查委員会（2001）長期的な地震発生確率の評価手法について。

丹桂之助（1933）台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*，14 號，第 37-52 頁。

石瑞銓（2003）地震地質調查及活動斷層資料庫建置：地球物理探勘計畫（2/5）。經濟部中央地質調查所報告，92-8 號，99-121。

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*， 15號，1-11頁。

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

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

吳相儀（2000）台灣地區中大型地震震源參數分析。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

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—台北都會區工程地質—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）台灣活動斷層概論，第二版。經濟部中央地質調查所，共 122 頁。

林啟文、鍾瑋、侯進雄（2005）台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*，16 號，41-54 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧（2007）台灣北部的活動斷層-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*，19 號，共 130 頁。

林朝棨（1957）台灣地形。台灣省文獻委員會，共424頁。

林朝宗（2005）山腳斷層與台北盆地西緣的地質構造。大台北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集，191-197。

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

郁永河（1697）裨海紀遊。

許京穎（2008）台灣潛勢地震之發生機率評估。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 133 頁。

黃旭燦、楊耿名、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004）台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）-台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。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。

張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）台灣活動斷層概論－五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。*經濟部中央地質調查所特刊*，10 號，共 103 頁。

張憲卿（2008）五萬分之一臺灣區域地質圖，嘉義圖幅。經濟部中央地質調查所編印。

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*，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。

陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2008）地震地質與地變動潛勢分析計畫：斷層長期滑移速率與再現週期研究(2/4)。經濟部中央地質調查所研究報告 97-9 號，共 75 頁。

陳致言（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。

郭素妙、景國恩、饒瑞鈞、侯進雄（2008）由 1996-2006 年之 GPS 資料探討臺南地區地殼變形。*經濟部中央地質調查所特刊*，20 號，1-16。

黃鑑水、劉桓吉、張憲卿（1994）臺灣南部觸口斷層之地質調查與探勘。*經濟部中央地質調查所彙刊*，9 號，51-76。

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）大台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）大台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。

楊志成、顏一勤、宋時驊、黃能偉、陳勇全、陳文山、陳于高、吳樂群、張徽正、侯進雄、林啟文（2005）六甲斷層近萬年來滑移速率之探討。*經濟部中央地質調查所特刊*，16 期，1-16。

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：台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(4/5)－台灣中部麓山帶地區。經濟部地質調查所，51頁。

楊耿明、吳榮章、丁信修、王佳彬（1994）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，337-352 頁。

塗明寬與陳文政(1991)五萬分之一台灣地質圖說明書─竹東。經濟部中央地質調查所，共 87 頁。

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。

齊士崢、宋國城（2000）臺灣界線斷層帶上沖積扇階地地形發育的複雜性。*環境與世界*，4 期，77-92。

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，16 號，中央研究院地球科學研究所，六月。

鄭錦桐（2002）台灣地區地震危害度的不確定性分析與參數拆解。國立中央大學地球物理研究所博士論文，227頁。

蘇泰維、劉桓吉、劉憲德、黃健政（2003）台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。

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

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.

Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, H. Schuh (2006) Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.

Boehm, J., R. Heinkelmann, and H. Schuh (2007) Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications, *Journal of Geodesy*, 81(10), 679-683, 10.1007/s00190-007-0135-3.

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

Bomford, G. (1985) Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.

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.

Chen, C.-T., J.-C. Lee, Y.-C. Chan, and C.-Y. Lu (2010) Growth normal faulting at the western edge of the metropolitan Taipei, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, *21*, 409-428.

Cheng, C. T., Chiou, S. J., Lee, C. T., Tsai, Y.B. (2007) Study on probabilistic seismic hazard maps of Taiwan after Chi-Chi earthquake, *J. GeoEngineering*, 2(1), 19-28.

Chiang, S.-C. (1976) Seismic prospecting in the Ilan Plain, *Miner. Technol.*, *14*, 215-221. (In Chinese)

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.

Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl (Eds.) (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Berne, 612 pp.

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.

Dong, D., T. A. Herring, and R. W. King (1998) Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, 72(4), 200-214, 10.1007/s001900050161.

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.

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

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

Hanks, T. C., and Bakun, W. H. (2008) M- log A observations for recent large earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am*., 98, 490–494.

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

Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky (2008) Introduction to GAMIT/GLOBK, Mass Inst. of Technol., Cambridge.

Hou, C.-S., J.-C. Hu, K.-E. Ching, Y.-G. Chen, C.-L. Chen, L.-W. Cheng, C.-L. Tang, S.-H. Huang, and C.-H. Lo (2009) The crustal deformation of the Ilan Plain acted as a westernmost extension of the Okinawa Trough, *Tectonophysics*, 466, 344-355.

Hu, C.C., and Sheen, H.C. (1989) An evaluation on the hydrocarbon potential of the Niushan and Lungtien structures in the Tainan area. *Petrol. Geol. Taiwan*, 25, 11-34.

Huang, S. Y., C. M. Rubin, Y. G. Chen, and H. C. Liu (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan, *J. Asian Earth Sci.*, *31*, 265-276.

Hung, J.H., Wiltschko, D.V., Lin, H.C., Hickman, J.B., Fang, P., and Bock, Y. (1999) Structure and Motion of the Southwestern Taiwan Fold and Thrust Belt, *TAO*, 10(3), 543-568.

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.

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.

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.

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

Ku, C.-Y., S.-K. Hsu, J.-C. Sibuet, and C.-H. Tsai (2009), The Neo-Tec tonic Structure of the South western Tip of the Okinawa Trough, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, *20*, 749-759.

Lai, K.-Y., Y.-G. Chen, Y.-M. Wu, J.-P. Avouac, Y.-T. Kuo, Y. Wang, C.-H. Chang, and K.-C. Lin (2009), The 2005 Ilan earthquake doublet and seismic crisis in northeastern Taiwan: evidence for dyke intrusion associated with on-land propagation of the Okinawa Trough, *Geophys. J. Int.*, *179*, 678-686.

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.

Lee, Y.H., Chen, G.T., Rau, R.J., and Ching, K.E. (2008) Coseismic displacement and tectonic implication of 1951 Longitudinal Valley earthquake sequence, eastern Taiwan, *J. Geophysical Res.-Solid Earth*, 113, 13.

Liu, C.-C. (1995), The Ilan plain and the southwestward extending Okinawa trough, *J. Geol. Soc. China*, *38*, 229-242.

Maeda, T., and Obara, K. (2009) Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, 17.

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

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.

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

Namson, J. (1984) Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan: (III) central part, *Petrol. Geol. Taiwan*, no. 20, p. 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. thesis thesis, Univ. of Calif., San Diego*.

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

Okada, Yoshimitsu (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.

Prescott, W. H., J. C. Savage, and W. T. Kinoshita (1979) Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978, *J. Geophys. Res.*, 84, 5423-5435.

Rau, R.-J., K.-E. Ching, J.-C. Hu, and J.-C. Lee (2008), Crustal deformation and block kinematics in transition from collision to subduction: GPS measurements in northern Taiwan, 1995 - 2005, *J. Geophys. Res.*, *113*, B09404, doi:10.1029/2007JB005414.

Reasenberg, P.A., Hanks, T.C., and Bakun, W.H. (2003) An empirical model for earthquake probabilities in the San Francisco Bay region, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 1-13.

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.

Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada (2000) Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *PAGEOPH*, 157, 2303-2322.

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.

Shao-Yi Huang, Charles M. Rubin, Yue-Gau Chen, Huan-Chi Liu (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan, Journal of Asian Earth Sciences., 31, 265-276.

Shaw, B. E. (2009) Constant stress drop from small to great earthquakes in magnitude-area scaling, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 871–875.

Shaw, John. Plesch, Andreas. Planansky, George. (2004) Community Fault Model, Harvard College Geology Department.

Shen, Z. K., D. D. Jackson, and B. X. Ge (1996) Crustal deformation across and

beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *J Geophys. Res.*, 101, 27957-27980.

Shyu, J.B.H., K. Sieh, Y.-G. Chen and C.-S. Liu (2005) Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, *J. Geophys. Res.*, *110*, B08402, doi:10.1029/2004JB003251.

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

Sun, S. C. (1970) Photogeologic study of the Tainan-Hsinying coastal plain area, Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*, 7, 133-144.

Sun, S. C. (1971) Photogeologic study of the Hsinying-Chiayi coastal plain, *Petrol. Geol. Taiwan*, 8, 65-76.

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, *Petrol. Geol. Taiwan*, no. 4, 35-52.

Tang, C.H. and Hsu, C.H. (1970) Subsurface Geology and Petroleum Deposits in the Hsinchu Area, *Petrol. Geol. Taiwan*, no.7, 89-101.

Teng, L. S., C. T. Lee, C. H. Peng, W. F. Chen, and C. J. Chu (2001), Origin and geological evolution of the Taipei Basin, Northern Taiwan, *West. Pac. Earth Sci.*, *1*, 115-142.

Tong, L.-T., S. Ouyang, T.-R. Guo, C.-R. Lee, K.-H. Hu, C.-L. Lee, and C.-J. Wang (2008) Insight into the Geothermal Structure in Chingshui, Ilan, Taiwan, Terr. Atmos. Ocean. Sci., 19, 413-424.

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.

Ward, S. N. (1994) A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1293-1309.

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.

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

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

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

Yang, K.M., Wu, J.C., Ting, H.H., Wang, J.B. and Chi, W.R. (1994) Sequential deformation in foothills belt, Hsinchu and Miaoli areas: Implications in hydrocarbon accumulation, *Petrol. Geol. Taiwan*, 29, 47-74.

Yang, K.M., Wu, J.C., Wickham, J.S., Ting, H.H., Wang, J.B. and Chi, W.R. (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural mode and Evolution in the foothills belt, northwestern Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*, 30, 111-150.

Yang, K. M., Huang, S. T., Wu, J. C., Ting, H. H., Mei, W. W., lee, M., Hsu, H. H. and Lee, C. J. (2007) 3D geometry of the Chelungpu thrust system in central Taiwan: Its implications for active tectonics, *TAO*, 18, 143-181.

Yen, Y. T. and Ma, K. F. (2011) Source-Scaling Relationship for M 4.6–8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(2), 464–481.

Yu, S. B., and H. Y. Chen (1994) Global positioning system measurement of crustal deformation in the Taiwan arc-continent collision zone, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 5, 477-498.

Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, 274, 41-59.

Yu, S. B., L. C. Kuo, Y. J. Hsu, H. H. Su, C. C. Liu, C. S. Hou, J. F. Lee, T. C. Lai, C. C. Liu, C. L. Liu, T. F. Tseng, C. S. Tsai, and T. C. Shin (2001) Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 995-1012.

Yu, S. B., Y. J. Hsu, L. C. Kuo, and C. C. Liu (2003) GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 108, 2520, 15 pp.

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.