經濟部

計畫編號：B11027

經濟部中央地質調查所

110年度委託專業服務期末報告書(完稿)

「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（1/2）」

（第1年度）

全 程 計 畫：自110年04月至111年12月止
本年度計畫：自110年04月至110年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立成功大學

中 華 民 國 110 年 12 月

計畫編號：B11027

經濟部中央地質調查所

110年度委託專業服務期末報告書(完稿)

「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（1/2)」

（第1年度）

全 程 計 畫：自110年04月至111年12月止
本年度計畫：自110年04月至110年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立成功大學

中 華 民 國 110 年 12 月

重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（1/2）
（第1年度）

計畫主持人：景國恩

協同主持人：李易叡、張午龍、莊昀叡

研　究　員：顏銀桐、莊怡蓉、邵國士

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立成功大學

中　華　民　國　110　年　12　月

目錄

目錄 .....
表目錄 V
圖目錄 VII
摘要 XX
Abstract XXI

第一章、緒　論 1

1-1 計畫整體概述 1

1-2 研究目的 9

1-3 本年度工作概述 10

第二章、大地測量資料分析 17

2-1 GNSS 連續站資料解算與分析 17
2-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程 17
2-1-2 GNSS 連續站坐標時間序列擬合 18

2-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析 21
2-2-1 本年度（2021 年）GNSS 移動站抽樣檢核 21
2-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析 25
2-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析 28
2-2-3-1 臺北地區 GNSS 監測網 28
2-2-3-2 恆春地區 GNSS 監測網 32
2-2-3-3 桃竹苗地區 GNSS 觀測網 37
2-2-3-4 嘉南地區 GNSS 觀測網 41
2-2-3-5 高屏地區 GNSS 觀測網 46
2-2-3-6 中部地區 GNSS 觀測網 51
2-2-3-7 花東地區 GNSS 觀測網 56
2-2-3-8 宜蘭地區 GNSS 觀測網 60

2-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析 65
2-3-1 本年度（2021 年）精密水準測量資料檢核 65
2-3-2 精密水準測量資料解算與精度分析 66
2-3-3 臺北地區精密水準測線 68
2-3-3-1 石門至萬里測線 68
2-3-3-2 士林至三芝測線 71
2-3-3-3 淡水至士林測線 74
2-3-3-4 五股至台北測線 77
2-3-4 桃竹苗地區精密水準測線 81
2-3-4-1 新屋至童話世界測線 81
2-3-4-2 新竹至五峰測線 84
2-3-4-3 新竹至峨嵋測線 87
2-3-4-4 苗栗至南庄測線 90

2-3-5 中部地區精密水準測線.....93
2-3-5-1 大安至東勢測線.....93
2-3-5-2 龍井至太平測線.....96
2-3-5-3 五光至黃竹測線.....99
2-3-5-4 王功至草屯至埔里測線.....102
2-3-5-5 北斗至水里測線.....105
2-3-6 嘉南地區精密水準測線.....109
2-3-6-1 金湖至瑞峰測線.....109
2-3-6-2 北門至楠西測線.....112
2-3-6-3 善化至關廟測線.....115
2-3-6-4 安平至龍崎測線.....119
2-3-6-5 玉井至新化測線.....123
2-3-7 高屏地區精密水準測線.....126
2-3-7-1 路竹至茂林測線.....126
2-3-7-2 岡山至安坡測線.....129
2-3-7-3 佳冬至七佳測線.....133
2-3-8 恆春地區精密水準測線.....136
2-3-8-1 恆春西臺地至佳樂水測線.....136
2-3-8-2 南樹林至鵝鑾鼻測線.....139
2-3-8-3 車城至牡丹測線.....143
2-3-9 東部地區精密水準解算.....144
2-3-9-1 嶺頂至龍澗測線.....144
2-3-9-2 光復至豐濱測線.....148
2-3-9-3 紅葉至靜浦測線.....151
2-3-9-4 東成至富岡測線.....154
2-3-10 精密水準測量資料可靠度分析.....157
2-4 重要區域三維速度場分析.....177
2-4-1 重要區域水平與垂直速度場.....177
2-5 全臺地表速度場.....186
第三章、南部地區地表變形強度計算與繪製.....192
3-1 應變速率場計算.....192
3-1-1 採用 Shen et al.（1996）方法推求應變速率.....192
3-1-2 採用速度反演成果推求應變速率.....200
3-2 地表變形強度.....205
3-2-1 地表變形相關規範彙整.....205
3-2-2 地表變形強度分級標準表建置.....207
3-3 地表變形強度分布圖.....211
第四章、南部地區重要斷層參數分析.....213
4-1 斷層資料蒐集.....213
4-1-1 旗山斷層.....213
4-1-2 車瓜林斷層.....226

4-1-3 小崗山斷層 236
4-1-4 其他主要斷層 243
4-2 二維斷層模型與最佳斷層幾何參數推求 255
4-2-1 速度剖面分析 255
4-2-2 二維斷層模型原理與假設 257
4-2-3 最佳斷層參數搜尋 258
第五章、南部地區斷層模型建置 268
5-1 BLOCKS 斷層模型 268
5-1-1 斷層模型原理 268
5-1-2 斷層模擬結果 268
5-2 DEFNODE 斷層模型 282
5-2-1 斷層模型原理 282
5-2-2 斷層模擬結果 285
5-3 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model） 303
5-3-1 斷層模型原理與使用參數 303
5-3-2 斷層模擬結果 306
5-4 南部地區之斷層滑移虧損速率 320
第六章、南部地區斷層活動潛勢圖 329
6-1 旗山斷層 329
6-1-1 旗山斷層參數 329
6-1-2 旗山斷層規模與年發生率之關係 332
6-1-3 旗山斷層機率評估 334
6-2 車瓜林斷層 335
6-2-1 車瓜林斷層參數 335
6-2-2 車瓜林斷層規模與年發生率之關係 338
6-2-3 車瓜林斷層機率評估 340
6-3 小崗山斷層 341
6-3-1 小崗山斷層參數 341
6-3-2 小崗山斷層規模與年發生率之關係 343
6-3-3 小崗山斷層機率評估 345
6-4 潮州斷層 346
6-4-1 潮州斷層參數 346
6-4-2 潮州斷層規模與年發生率之關係 347
6-4-3 潮州斷層機率評估 350
6-5 恆春斷層 351
6-5-1 恆春斷層參數 351
6-5-2 恆春斷層規模與年發生率之關係 354
6-5-3 恆春斷層機率評估 356
6-6 斷層活動潛勢圖成果 357

第七章、南部地區景況地震動與景況同震位移分布圖 360
7-1 景況地震動分布圖 360
7-1-1 斷層破裂三維網格與地面計算網格建立 360
7-1-2 地面網格與斷層面最短距離估算 362
7-1-3 地震動放大效應評估 363
7-1-4 地震動值評估與分布 364
7-2 景況同震位移分布圖 378
7-2-1 地表同震位移網格建立 378
7-2-2 潛在震源位置與各斷層同震滑移量推估 378
7-2-3 各斷層景況同震位移分布圖 379

第八章、結論 386
Conclusions 390

參考文獻 394

期中委員審查意見 398
期末委員審查意見 402

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1] 110 年期末_GNSS 連續站時間序列
[附錄 2] 110 年期末_GNSS 連續站速度表
[附錄 3] 110 年期末_GNSS 移動站時間序列
[附錄 4] 110 年期末_GNSS 移動站速度表
[附錄 5] 110 年期末_精密水準時間序列
[附錄 6] 110 年期末_精密水準速度表
[附錄 7] 110 年期末_旗山斷層平衡剖面
[附錄 8] 110 年期末_成果圖初稿之電子檔
[附錄 9] 110 年期末_成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）

表目錄

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。.....XVI
表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。..... XVII
表 C：期末須交付之各項工作項目。.....XIX
表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GNSS 連續觀測站列表.....4
表 1-1.2：110 年至 111 年分年目標表.....6
表 1-3.1：GNSS 移動站預計施測與檢測時間表.....13
表 1-3.2：精密水準測量預計施測時間表.....16
表 2-2.1：GNSS 移動站施測與檢核時間表.....24
表 3-2.1：常時橋面之不連續變位限制.....206
表 3-2.2：地表變形強度分級表。.....210
表 4-1.1：旗山斷層野外露頭彙整。.....217
表 4-1.2：旗山斷層傾角參數與文獻彙整。.....222
表 4-1.3：旗山斷層破裂深度參數與文獻彙整。.....223
表 4-1.4：旗山斷層滑移速率參數與文獻彙整。.....226
表 4-1.5：車瓜林斷層野外露頭與地質剖面。.....230
表 4-1.6：車瓜林斷層傾角參數與文獻彙整。.....232
表 4-1.7：小崗山斷層傾角參數與文獻彙整。.....242
表 4-1.8：小崗山斷層破裂深度參數與文獻彙整。.....242
表 4-1.9：小崗山斷層滑移速率參數與文獻彙整。.....243
表 4-1.10：潮州斷層幾何參數與文獻彙整。.....247
表 4-1.11：恆春斷層幾何形貌相關文獻。.....252
表 4-1.12：恆春斷層長期滑移速率相關文獻。.....254
表 4-2.1：最佳斷層幾何參數.....267
表 5-1.1：2003-2010 年間 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。.....271
表 5-1.2：2010-2016 年間 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。.....274
表 5-1.3：2016-2021 年間 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。.....276
表 5-2.1：圖 5-2.1 中所示斷層之幾何參數。.....285
表 5-2.2：三個測地資料時期中，各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓。.....300
表 5-2.3：斷層之地質滑移速率值及三個時期由塊體模型所估算的長期滑移速率與滑移虧損率。.....302
表 5-3.1：斷層平均滑移速率。.....311
表 5-4.1：本計畫模型一之加權平均斷層滑移虧損率。.....322
表 5-4.2：本計畫模型二之加權平均斷層滑移虧損率。.....324
表 5-4.3：本計畫模型三之加權平均斷層滑移虧損率。.....326
表 6-1.1：旗山斷層分段破裂模式及權重.....330
表 6-1.2：旗山斷層之各破裂事件規模計算結果.....330
表 6-1.3：旗山斷層抬升速率之各調查方法數值權重及信心度.....331
表 6-1.4：本計畫旗山斷層發生機率評估.....334
表 6-2.1：車瓜林斷層分段破裂模式及權重.....336
表 6-2.2：車瓜林斷層之各破裂事件規模計算結果.....337

表 6-2.3：本計畫車瓜林斷層發生機率評估 340
表 6-3.1：小崗山斷層分段破裂模式及權重 342
表 6-3.2：小崗山斷層之各破裂事件規模計算結果 342
表 6-3.3：小崗山斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度 342
表 6-3.4：本計畫小崗山斷層發生機率評估 345
表 6-4.1：潮州斷層分段破裂模式及權重 346
表 6-4.2：潮州斷層之各破裂事件規模計算結果 347
表 6-4.3：本計畫潮州斷層發生機率評估 350
表 6-5.1：恆春斷層分段破裂模式及權重 352
表 6-5.2：恆春斷層之各破裂事件規模計算結果 352
表 6-5.3：恆春斷層抬升速率之各調查方法數值權重及信心度 353
表 6-5.4：本計畫恆春斷層發生機率評估 356

圖目錄

圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。 3
圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。 5
圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 6
圖 1-1.4：計畫執行架構圖。 7
圖 1-1.5：110 年至 111 年分年目標重要區域。 8
圖 1-3.1：GNSS 移動站觀測分區圖。 14
圖 1-3.2：精密水準測量測線分布圖。 15
圖 2-1.1：GNSS 連續站 AKND 坐標時間序列擬合結果。 20
圖 2-1.2：GNSS 連續站 AKND 時間序列之殘差結果。 20
圖 2-2.1：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖。 22
圖 2-2.2：臺灣地殼變形監測網。灰色圓圈為 GNSS 移動站。 26
圖 2-2.3：2002 – 2021 年截至 10 月底 GNSS 點位坐標殘差分布圖。 27
圖 2-2.4：2003 – 2021 年 GNSS 點位均方根誤差分布圖。 27
圖 2-2.5：臺北地區 GNSS 連續及移動測站分布情形。 28
圖 2-2.6：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較。 30
圖 2-2.7：移動站點位 GG44 與連續站 GOLI 之時間序列比較。 30
圖 2-2.8：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場。 31
圖 2-2.9：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場。 31
圖 2-2.10：恆春地區 GNSS 連續及移動測站分布情形。 32
圖 2-2.11：移動站點位 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較。 34
圖 2-2.12：移動站點位 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較。 34
圖 2-2.13：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場。 35
圖 2-2.14：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場。 36
圖 2-2.15：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 37
圖 2-2.16：移動站點位 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較果 38
圖 2-2.17：移動站點位 G198 與連續站 FCWS 之時間序列比較。 38
圖 2-2.18：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場。 39
圖 2-2.19：桃竹苗地區 2002 – 2021 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場。 .40
圖 2-2.20：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形。 42
圖 2-2.21：移動站點位 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較。 43
圖 2-2.22：移動站點位 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較。 43
圖 2-2.23：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。 .44
圖 2-2.24：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 45
圖 2-2.25：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形。 47
圖 2-2.26：移動站點位 GC48 與連續站 CHIE 之時間序列比較 48
圖 2-2.27：移動站點位 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較。 48
圖 2-2.28：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 49
圖 2-2.29：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 50
圖 2-2.30：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形。 52
圖 2-2.31：移動站點位 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較 53

圖 2-2.32：移動站點位 G964 與連續站 YUNL 之時間序列比較 53
圖 2-2.33：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。 .54
圖 2-2.34：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。 55
圖 2-2.35：東部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形。 57
圖 2-2.36：移動站點位 GE64 與連續站 PEPU 之時間序列比較 58
圖 2-2.37：移動站點位 E415 與連續站 NDH3 之時間序列比較 58
圖 2-2.38：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 59
圖 2-2.39：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場 59
圖 2-2.40：宜蘭地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 61
圖 2-2.41：移動站點位 G250 與連續站 YILN 之時間序列比較 62
圖 2-2.42：移動站點位 G244 與連續站 LTUN 之時間序列比較 62
圖 2-2.43：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 63
圖 2-2.44：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場 64
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 65
圖 2-3.2：新增與 GNSS 連續站共點之精密水準測站分布圖 67
圖 2-3.3：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較。 ...68
圖 2-3.4：石門至萬里測線水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較。 ...68
圖 2-3.5：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 69
圖 2-3.6：台 2_石門至萬里測線水準歷年高程差。 70
圖 2-3.7：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較。 71
圖 2-3.8：士林至三芝測線水準高程變化圖。 72
圖 2-3.9：士林至三芝測線水準歷年高程差。 73
圖 2-3.10：淡水至士林水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較。 74
圖 2-3.11：淡水至士林測線水準高程變化圖。 75
圖 2-3.12：淡水至士林測線水準歷年高程差。 76
圖 2-3.13：五股至台北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較。 77
圖 2-3.14：五股至台北測線水準高程變化圖。 78
圖 2-3.15：五股至台北測線水準歷年高程差。 79
圖 2-3.16：五股至台北測線之部份時間序列。 80
圖 2-3.17：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。 81
圖 2-3.18：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 82
圖 2-3.19：新屋至童話世界測線水準歷年高程差 83
圖 2-3.20：新竹至五峰水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較.....84
圖 2-3.21：新竹至五峰世界測線水準高程變化圖。 85
圖 2-3.22：新竹至五峰測線水準歷年高程差。 86
圖 2-3.23：新竹至五峰測線之部份時間序列。 86
圖 2-3.24：新竹至峨眉水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較。 87
圖 2-3.25：新竹至峨眉世界測線水準高程變化圖。 88
圖 2-3.26：新竹至峨眉測線水準歷年高程差。 89
圖 2-3.27：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較 90
圖 2-3.28：苗栗至南庄世界測線水準高程變化圖。 91
圖 2-3.29：苗栗至南庄測線水準歷年高程差。 92
圖 2-3.30：大安至東勢水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較 93

圖 2-3.31：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 94
圖 2-3.32：縣 132_大安至東勢測線水準歷年高程差。 95
圖 2-3.33：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較。 96
圖 2-3.34：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 97
圖 2-3.35：縣 136_龍井至太平測線水準歷年高程差。 98
圖 2-3.36：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較。 99
圖 2-3.37：五光至黃竹測線水準高程變化圖。 100
圖 2-3.38：五光至黃竹測線水準歷年高程差。 101
圖 2-3.39：王功至草屯測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較.102
圖 2-3.40：縣 148-台 14_王功至草屯水準高程變化圖.....103
圖 2-3.41：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準歷年高程差。 104
圖 2-3.42：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較.....105
圖 2-3.43：北斗至水里水準點位 G297 與連續站 VR03 之時間序列比較.....106
圖 2-3.44：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖。 107
圖 2-3.45：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準歷年高程差。 108
圖 2-3.46：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較.....109
圖 2-3.47：金湖至瑞峰水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較.....109
圖 2-3.48：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖。 110
圖 2-3.49：縣 164_金湖至瑞峰測線水準歷年高程差。 111
圖 2-3.50：點位 G757 之座標時間序列。 111
圖 2-3.51：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較....112
圖 2-3.52：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 113
圖 2-3.53：縣 174_北門至楠西測線歷年高程差。 114
圖 2-4.54：善化至關廟水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較。 116
圖 2-4.55：善化至關廟水準點位 B299 與連續站 GS89 之時間序列比較。 116
圖 2-3.56：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 117
圖 2-3.57：台 19 甲_善化至關廟測線歷年高程差。 118
圖 2-3.58：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較。 120
圖 2-3.59：安平至龍崎水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較.....120
圖 2-3.60：安平至龍崎測線水準高程變化圖。 121
圖 2-3.61：安平至龍崎測線歷年高程差。 122
圖 2-3.62：新化至玉井水準點位 N8537 與連續站 GS88 之時間序列比較。 123
圖 2-3.63：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖。 124
圖 2-3.64：台 20_新化至玉井測線歷年高程差。 125
圖 2-3.65：路竹至茂林水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較 126
圖 2-3.66：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖。 127
圖 2-3.67：台 28_路竹至茂林主、副線歷年高程差。 128
圖 2-3.68：岡山至安坡水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較.....129
圖 2-3.69：岡山至安坡水準點位 G536 與連續站 GS77 之時間序列比較.....130
圖 2-3.70：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖 131
圖 2-3.71：台 22_岡山至安坡測線歷年高程差。 132
圖 2-3.72：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較。....133
圖 2-3.73：佳冬至七佳測線高程變化圖。 134
圖 2-3.74：佳冬至七佳測線測線歷年高程差 135

圖 2-3.75：恆春西臺地至佳樂水測線水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。 136
圖 2-3.76：恆春西台地至佳樂水測線高程變化圖。 137
圖 2-3.77：恆春西台地至佳樂水測線歷年高程差。 138
圖 2-3.78：南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。 139
圖 2-3.79:南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較。 140
圖 2-3.80：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 141
圖 2-3.81：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準歷年高程差。 142
圖 2-3.82：車城至牡丹測線位置分布圖。 143
圖 2-3.83：嶺頂至瀧澗水準點位 G970 與連續站 YENL 之時間序列比較。.....145
圖 2-3.84：嶺頂至瀧澗水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較 145
圖 2-3.85：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖。 146
圖 2-3.86：嶺頂至瀧澗測線歷年高程差。 147
圖 2-3.87：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較。.....148
圖 2-3.88：光復至豐濱測線高程變化圖 149
圖 2-3.89：光復至豐濱測線歷年高程差。 150
圖 2-3.90：紅葉至靜浦水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較。 151
圖 2-3.91：紅葉至靜浦測線高程變化圖。 152
圖 2-3.92：紅葉至靜浦測線歷年高程差。。 153
圖 2-3.93：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。 154
圖 2-3.94：東成至富岡測線高程變化圖。 155
圖 2-3.95：東成至富岡測線歷年高程差。 156
圖 2-3.96：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場。 158
圖 2-3.97：桃竹苗地區 2002 – 2021 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場。159
圖 2-3.98：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 160
圖 2-3.99：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 161
圖 2-3.100：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 162
圖 2-3.101：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 163
圖 2-3.102：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 164
圖 2-3.103：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 165
圖 2-3.104：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 166
圖 2-3.105：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 167
圖 2-3.106：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 168
圖 2-3.107：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 169
圖 2-3.108：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 170
圖 2-3.109：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 171
圖 2-3.110：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 172
圖 2-3.111：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。.....173
圖 2-3.112：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 174
圖 2-3.113：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 175
圖 2-3.114：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 176
圖 2-4.1：高屏地區橋頭科學園區 2021 年新增設之 32 個 GNSS 移動站。 178

圖 2-4.2：高屏地區橋頭科學園區 2021 年新增設立 32 個 GNSS 移動站之二次觀測水平方向位移量。 179
圖 2-4.3：高屏地區橋頭科學園區 2021 年新增設立 32 個 GNSS 移動站之二次觀測垂直方向位移量。 179
圖 2-4.4：高屏地區高雄都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。 180
圖 2-4.5：高屏地區高雄科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。 181
圖 2-4.6：高屏地區橋頭科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。 182
圖 2-4.7：高屏地區高雄都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場。 183
圖 2-4.8：高屏地區高雄科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場。 184
圖 2-4.9：高屏地區橋頭科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場。 185
圖 2-5.1：臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場。 190
圖 2-5.2：2002 年至 2021 全臺垂直速度場。 191
圖 3-1.1：全臺 7 時期最大主應變速率場。 196
圖 3-1.2：全臺 7 時期最大剪應變速率場。 197
圖 3-1.3：全臺 7 時期應變率強度（第二不變量）分布圖 198
圖 3-1.4：南部地區 3 時期最大主應變速率場。 199
圖 3-1.5：南部地區最大剪應變速率場。 199
圖 3-1.6：南部地區應變速率強度分布圖。 199
圖 3-1.7：觀測點與網格三頂點示意圖。 202
圖 3-1.8：速度反演之全台 3 時期網格化連續性速度場。 203
圖 3-1.9：速度反演方法推算之南部地區 3 時期最大主應變速率場。 203
圖 3-1.10：速度反演方法推算之南部地區 3 時期最大剪應變速率場。 204
圖 3-1.11：速度反演方法推算之南部地區 3 時期應變速率強度分布圖。 204
圖 3-2.1：橋面平行移動之變位型態 207
圖 3-2.2：橋面折角之變位型態。 207
圖 3-3.1：重要區域地表變形強度分布圖。 211
圖 3-3.2：全臺地表變形強度分布圖。 212
圖 4-1.1：地調所旗山斷層條帶地質圖與本計畫建議之斷層分段點 214
圖 4-1.2：淺層反射震測 219
圖 4-1.3：田寮 3 號高架橋之地質剖面。 219
圖 4-1.4：L-L’地質平衡剖面圖。 220
圖 4-1.5：西南部地區地質剖面圖。 220
圖 4-1.6：西南部地區跨龍船斷層及旗山斷層的地質剖面圖 221
圖 4-1.7：跨小崗山斷層、旗山斷層平衡剖面。 221
圖 4-1.8：穿越台灣西南部褶皺逆衝帶地質剖面圖。 221
圖 4-1.9：旗山斷層幾何調查資料分布圖。 222
圖 4-1.10：旗山斷層破裂深度調查資料分布圖。 223
圖 4-1.11：旗山斷層滑移速率調查資料分布圖。 225

圖 4-1.12：車瓜林斷層條帶地質圖 227
圖 4-1.13：(左) 車瓜林斷層周圍地形，(右) 斷層分段位置及野外露頭中斷層位態分布。 228
圖 4-1.14：車瓜林斷層 AA'二維剖面。 233
圖 4-1.15：車瓜林斷層 BB'二維剖面。紅 233
圖 4-1.16：車瓜林斷層 CC'二維剖面。 234
圖 4-1.17：根據 2011 年 11 月至 2014 年 10 月大地測量資料塊體模擬之成果。 235
圖 4-1.18：小崗山斷層位置圖。 237
圖 4-1.19：地調所旗山地質圖幅 B-B'地質剖面圖及 C-C'地質剖面圖 238
圖 4-1.20：永安到小崗山斷層帶之震測剖面及地下構造示意。 240
圖 4-1.21：小崗山斷層鑽井柵狀剖面、地層對比與沉積環境 240
圖 4-1.22：跨小崗山斷層、旗山斷層平衡剖面 241
圖 4-1.23：小崗山斷層幾何調查資料分布圖。 241
圖 4-1.24：小崗山斷層滑移速率調查資料分布圖 243
圖 4-1.25：潮州斷層條帶地質圖與分段 245
圖 4-1.26：Vs 擾動（Perturbation）震波層析成 246
圖 4-1.27：潮州斷層傾角（左圖）及斷層深度（右圖）調查資料分布圖。 246
圖 4-1.28：潮州斷層滑移速率調查資料分布圖。 247
圖 4-1.29：恆春斷層分段破裂模式。海底地形取自中興公司。 249
圖 4-1.30：台灣南部跨過恆春半島-蘭嶼之地體構造剖面。 250
圖 4-1.31：台灣南部跨恆春半島 A-A'震測剖面圖。 250
圖 4-1.32：台灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。 251
圖 4-1.33：恆春斷層傾角（左圖）及破裂深度（右圖）調查資料分布圖。 251
圖 4-1.34：南部斷層幾何形貌設定。上圖為臺灣南部活動斷層分布圖 253
圖 4-1.35：恆春斷層滑移速率調查資料分布圖。修改自林啟文等（2009）。..254
圖 4-2.1：本計畫所分析之 A 至 D 速度剖面分布圖。 256
圖 4-2.2：二維斷層模型示意圖。 258
圖 4-2.3：A–A'速度剖面移除西側垂直速度場後之二維斷層模型擬合。 261
圖 4-2.4：A–A'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。 262
圖 4-2.5：A–A'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。 263
圖 4-2.6：B–B'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。 264
圖 4-2.7：C–C'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。 265
圖 4-2.8：D–D'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。 266
圖 5-1.1：台灣西南部五條重點斷層模擬初始值。 269
圖 5-1.2：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2003-2010 年 507 個測站之水平速度場，模擬成果之總滑移速率。 272
圖 5-1.3：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2003-2010 年 507 個測站之水平速度場，傾向滑移速率模擬成果。 272
圖 5-1.4：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2003-2010 年 507 個測站之水平速度場，走向滑移速率模擬成果。 273
圖 5-1.5：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2010-2016 年 473 個測站之水平速度場，模擬成果之總滑移速率。 274
圖 5-1.6：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2010-2016 年 473 個測站之水

平速度場，傾向滑移速率模擬成果。 275
圖 5-1.7：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2010-2016 年 473 個測站之水平速度場，走向滑移速率模擬成果。 275
圖 5-1.8：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2016-2021 年 445 個測站之水平速度場，模擬成果之總滑移速率。 276
圖 5-1.9：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2016-2021 年 445 個測站之水平速度場，傾向滑移速率模擬成果。 277
圖 5-1.10：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2016-2021 年 445 個測站之水平速度場，走向滑移速率模擬成果。 277
圖 5-1.11：使用 2003-2010 年共 507 個測站之水平速度場，臺灣五條重點斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果。 279
圖 5-1.12：使用 2010-2016 年共 473 個測站之水平速度場，臺灣五條重點斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果。 280
圖 5-1.13：使用 2016-2021 年共 445 個測站之水平速度場，臺灣五條重點斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果。 281
圖 5-2.1：(a)臺灣南部三維塊體模型及活動斷層分布。(b)三個時間段的 GNSS 資料所觀測到的平均水平速度場。 284
圖 5-2.2：(a) 三個時期的最佳塊體模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。(b) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。 289
圖 5-2.3：三個時期：(A)2003-2009; (B) 2010-2015; (C) 2016-2021 的斷層滑移速率變化圖。(a) 斷層長期滑移速率。(b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由(a)圖減去(c)圖所得到的斷層間震期滑移速率。 292
圖 5-2.4：三個時期中(a) GNSS 觀測水平速度場，黑線代表各塊體的地表位置。(b) 最佳塊體模型所預估的水平速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。 295
圖 5-2.5：三個時期中(a) GNSS 及精密水準所觀測的垂直速度場。(b) 最佳塊體模型所預估的地表垂直速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。 298
圖 5-2.6：三個時期各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。 299
圖 5-3.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。 305
圖 5-3.2：臺灣南部地區 GNSS 連續站、移動站相對於測站 S01R 為之水平速度場（右邊）。 312
圖 5-3.3：臺灣南部地區相對於測站 S01R 為之垂直速度場。藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層。 313
圖 5-3.4：模型一使用 2002–2010 年速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。 314
圖 5-3.5：模型二使用 2010–2016 年速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。 315
圖 5-3.6：模型三使用 2016–2021 年速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。 316
圖 5-3.7：模型一使用 2002–2010 年速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 317

圖 5-3.8：模型二使用 2010–2016 年速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 318
圖 5-3.9：模型三使用 2016–2021 年速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 319
圖 5-4.1：本計畫模型一之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.1。.323
圖 5-4.2：本計畫模型一之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.2。.325
圖 5-4.3：本計畫模型三之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.3。.327
圖 5-4.4：本計畫 3 個時期重要區域（高雄都會區、高雄科學園區、橋頭科學園區）斷層滑移虧損速率分布圖 328
圖 6-1.1：旗山斷層抬升速率累積加權分布。 331
圖 6-1.2：旗山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。 332
圖 6-1.3：旗山斷層之全部分支規模-權重分布圖。 333
圖 6-1.4：旗山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 333
圖 6-2.1：車瓜林斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。 338
圖 6-2.2：車瓜林斷層之全部分支規模-權重分布圖。 339
圖 6-2.3：車瓜林斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 339
圖 6-3.1：小崗山斷層滑移速率累積加權分布。 343
圖 6-3.2：小崗山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。 344
圖 6-3.3：小崗山斷層之全部分支規模-權重分布圖。 344
圖 6-3.4：小崗山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 344
圖 6-4.1：潮州斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。 349
圖 6-4.2：潮州斷層之全部分支規模-權重分布圖。 349
圖 6-4.3：潮州斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 349
圖 6-5.1：恆春斷層抬升速率累積加權分布。 354
圖 6-5.2：恆春斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。 355
圖 6-5.3：恆春斷層之全部分支規模-權重分布圖。 355
圖 6-5.4：恆春斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 355
圖 6-6.1：臺灣南部重要區域斷層活動機率圖。 358
圖 7-1.1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布。 361
圖 7-1.2：最短距離（RupD）、地面虛擬測站點及三維分布斷層面空間關係示意圖。 362
圖 7-1.3：Vs30 及三條評估活動斷層之分布圖。 364
圖 7-1.4：岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之小崗山斷層之景況地震動分布圖。 368
圖 7-1.5：岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之車瓜林斷層之景況地震動分布圖。 369
圖 7-1.6：岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之旗山斷層之景況地震動分布圖 370
圖 7-1.7：考慮側向場址條件之小崗山斷層之景況地震動分布圖。 371
圖 7-1.8：考慮側向場址條件之車瓜林斷層之景況地震動分布圖 372
圖 7-1.9：考慮側向場址條件之旗山斷層之景況地震動分布圖。 373
圖 7-1.10：小崗山斷層之橋頭科學園區及高雄科學園區之景況地動分布圖 374
圖 7-1.11：車瓜林斷層之橋頭科學園區及高雄科學園區之景況地動分布圖 375
圖 7-1.12：旗山斷層之橋頭科學園區及高雄科學園區之景況地動分布圖 376
圖 7-1.13：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表。 377
圖 7-2.1：小崗山斷層之景況同震位移分布圖 380
圖 7-2.2：車瓜林斷層之景況同震位移分布圖。 381

圖 7-2.3：旗山斷層之景況同震位移分布圖。 382
圖 7-2.4：小崗山斷層於橋頭科學園區之景況同震位移分布圖 383
圖 7-2.5：小崗山斷層於高雄科學園區之景況同震位移分布圖 383
圖 7-2.6：車瓜林斷層於橋頭科學園區之景況同震位移分布圖 384
圖 7-2.7：車瓜林斷層於高雄科學園區之景況同震位移分布圖 384
圖 7-2.8：旗山斷層於橋頭科學園區之景況同震位移分布圖 385
圖 7-2.9：旗山斷層於高雄科學園區之景況同震位移分布圖 385

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。

Table A：Gantt Chart of expected progress.

計畫名稱：重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（1/2）													
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													
第二季查核點													
期中報告													
第三季查核點													
期末報告													
第四季查核點													
GNSS 移動站抽樣檢測與檢核（由成大工作團隊負責）													
GNSS 移動站資料平差解算與分析（由成大工作團隊負責）													
精密水準測量成果檢核與資料解算分析（由成大工作團隊負責）													
GNSS 連續觀測站資料解算與分析（由成大工作團隊負責）													
三維速度場整合與分析（由成大工作團隊負責）													
重要區域鄰近區域地表變形與斷層活動潛勢評估求（由成大與中興社工作團隊負責）													
重要區域斷層活動潛勢圖與景況地震動分布圖（由中興社工作團隊負責）													
整體目前進度													
預定進度（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。

Table B：Check point of expected progress

序號	查核點 請詳填交付項目	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.工作進度報告表 a. 水準資料檢測2 月 b. GNSS 連續站計算及分析 11-1 月	四月三十日	契約書與工作計畫書修正，
2	（第二季查核點） 1.工作進度報告表 a. 水準資料檢測 3-5 月 b. GNSS 移動站檢測 3-5 月 c. GNSS 連續站計算及分析2-4 月	六月三十日	第二季工作進度報告與繳交文件
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. 會計報表 5. 第一期款請款收據	八月三十一日	期中報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況、第一期請款（新台幣壹佰玖十萬元整）
4	（第三季查核點） 1.工作進度報告表 a. 水準資料檢測6-8 月 b. GNSS 移動站檢測 6-8 月 c. GNSS 連續站計算及時序分析至5-7 月	九月三十日	第三季工作進度報告與繳交文件
5	（期末報告） 1.工作進度報告表 a. 水準資料檢測9-10 月 b. GNSS 移動站檢測 9-10 月 c. GNSS 連續站計算及分析 8-9 月 d. 重要區域地表水平與垂直速度場 e. 重要區域地表水平應變速率場 f. 重要區域斷層滑移虧損速率與斷層活動潛勢圖 g. 重要區域景況地震動分布圖 2.期末報告書面資料初稿	十一月三十日	期末報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況

6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書及每項成果圖資 20 份 2. 正式研究成果報告書電子檔1 份 3. 會計報表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	清點所有交付項目與教育訓練等契約承諾、尾款請款（新台幣壹佰玖十萬元整）

表 C：期末須交付之各項工作項目。

Table C：Final report content

工作項目	章節
1. 抽樣檢測 GNSS 移動站各分區 10%（小數點以下四捨五入）以上之數量，並完成基線差及水準測量成果閉合差檢核之報告。	第 2 章
2. 彙整全臺可取得之 GNSS 連續站、移動站及精密水準觀測資料進行資料處理、解算與時序分析，以獲得地表水平與垂直速度場，並針對本年度重要區域繪製分布圖。	第 2 章
3. 針對 GNSS 連續站及移動站彙整所得之水平速度場進行內插，以獲得地表水平應變速率場並針對本年度重要區域繪製分布圖。	第 3 章
4. 透過上一期計畫工作所提供之斷層幾何參數及各斷層相關文獻進行斷層幾何參數探討，採用至少三種斷層模型推求並繪製主要斷層之斷層滑移虧損速率分布圖，並結合滑移虧損速率分布進行分析，評估並繪製斷層活動潛勢圖。	第 4 章 第 5 章 第 6 章
5. 藉由斷層滑移虧損速率分布了解斷層面能量累積處，進而依據地動預估式推求地震發生時，本年度重要區域及其鄰近區域可能之景況地震動分布範圍。 6. 採用三維斷層錯動模式進行斷層正演，推求本年度重要區域及其鄰近區域範圍內之活動斷層引致地震時，地表上可能之景況同震位移分布範圍。	第 7 章
期末成果報告書及每項成果圖資各 20 份，以及電子檔各 1 份。	

摘要

本計畫彙整並分析全臺之大地測量資料，進行地表變形強度分布範圍之劃設，同時透過斷層模型之建立整合測量與地質資料，推估臺灣南部地區重要區域鄰近斷層之斷層滑移虧損速率與斷層活動機率分析，並提供活動斷層地質敏感劃設之參考。本年度之工作區域為南部地區（高雄地區），報告完成之主要工作為：（1）解算本年度至 2021 年 9 月止，全臺共約 572 個 GNSS 連續站、798 個 GNSS 移動站，以及 29 條主線與 1 條副線之精密水準測線等觀測資料，進行資料檢核、坐標解算及時間序列分析，再透過與長期觀測資料之彙整分析，獲得南部地區地表水平與垂直地表速度場；（2）計算全臺應變速率場並以全臺應變率強度分布作為地表變形強度分級基礎，以 1.7 μstrain/yr 為級距，劃分為 0 至 5 共 6 個等級。同時整合交通領域針對地表變形所訂定之相關規範與需求，完成初版之地表變形強度分級標準表，並根據此分級繪製地表變形強度分布圖；（3）整合過去計畫工作以及近期相關文獻與研究，進行旗山斷層、車瓜林斷層、小崗山斷層、潮州斷層以及恆春斷層之斷層幾何參數探討與分析，結合二維與三維斷層模型進行最佳斷層幾何參數搜尋與速度場反演，求得前述各斷層之斷層滑移虧損速率分布。三維斷層模型採用 2002 至 2010 年（甲仙地震前）、2010 至 2016 年（甲仙地震後）、2016 至 2021 年（美濃地震後）所觀測到的 GNSS 速度場及精密水準資料進行斷層滑移模擬，本次模型結果得到以下三條斷層之數值：2002 至 2010 年結果中潮州、恆春與小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率分別為 8.9 mm/yr、19.0 mm/yr 與 18.3 mm/yr；2010 至 2016 年結果中潮州、恆春與小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率分別為 11.4 mm/yr、10.9 mm/yr 與 19.9 mm/yr；2016 至 2021 年結果中潮州、恆春與小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率分別為 8.5 mm/yr、14.3 mm/yr 與 21.9 mm/yr。並依據基線應變反演模型成果，根據經驗式與機率模式推求與繪製斷層活動潛勢圖；最後，（4）本計畫根據斷層幾何參數之探析與斷層滑移虧損速率分布，經由地動預估式與三維斷層錯位模型，推估並繪製旗山斷層、車瓜林斷層以及小崗山斷層於重要區域之景況地震動與同震位移分布圖。

關鍵詞：大地測量、地表變形強度分布、斷層活動機率、景況地震動圖、景況同震位移圖

Abstract

In this project, we first analyzed geodetic data to generate the surface deformation level map. The fault model was adopted to integrate the geodetic observations with geological materials. Then the fault slip deficit rates were inferred and applied to the estimation of earthquake rupture probability for major faults near the protected objects in southern Taiwan. The working area in this year is the Kaohsiung area. We have completed the following missions: (1) The daily solutions from 572 continuous GNSS stations, 798 campaign-mode GNSS stations, and 29 leveling routes were calculated for the following time series analysis to get the velocity field of southern Taiwan with respect to station S01R. (2) The strain rate field of Taiwan was calculated and the second invariant was used as the basis of surface deformation level. The surface deformation was separated into six level (0–5), 1.7 μstrain/yr was set as the second invariant interval. We also collected the surface deformation regulation related to conventional and high-speed railway simontaneously to propose the preliminary version of surface deformation level table. (3) The fault parameters of the Chishan fault, Chegualin fault, Hsiaokangshan fault, Chaochou fault, and Hengchun fault were evaluated based on previous studies. Then the optimal fault geometry was estimated using the 2D fault model constrained by the aforementioned geological information, and the slip deficit rates of each fault were derived through the 3D fault model. The geodetic data in three periods were adopted in this project, 2002-2010 (before Jiashian earthquake), 2010-2016 (after Jiashian earthquake) and 2016-2021 (after the Meinong earthquake). According to the modeling results, the average slip deficit rates of Chishan fault, Chegualin fault, and Hsiaokangshan fault are respectively 8.9 mm/yr, 19.0 mm/yr, and 18.3 mm/yr during 2002-2010; the average slip deficit rates of these three faults are respectively 11.4 mm/yr, 10.9 mm/yr, and 19.9 mm/yr during 2010-2016; the average slip deficit rates of these three faults are respectively 8.5 mm/yr, 14.3 mm/yr, and 21.9 mm/yr during 2016-2021. Finally, the earthquake potential of each fault was derived through empirical functions and probabilistic model using the derived slip defiit rate. We also estimated the scenario ground motions and coseismic displacements by the GMPE and 3D fault model with optimized fault geometry and slip deficit rate.

KEYWORDS: geodesy, surface deformation level, earthquake rupture probability, scenario shaking map, scenario coseismic displacement map

第一章、緒　論

1-1 計畫整體概述

發生於 2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 日本宮城外海地震，提醒我們兩件重要之事情：（1）辨識已知與未知高發震潛勢構造的位置及（2）評估其所蘊含之地震潛能。這些高發震潛勢構造不一定會通過主要城市，然其引發之重大地震卻會對周遭城市造成慘重之災情，因此瞭解活動斷層現今之活動性及分析潛在孕震斷層的潛勢評估是地震與活動斷層危害度評估的重要參考數據。此外，由於臺灣地區都市化程度的日益升高，未來因斷層潛移活動直接導致之建物破壞與經濟損失，以及斷層鎖定所引致的地震災損可能更會為嚴重。故對於活動斷層的加強調查與持續性觀測，與瞭解活動斷層的運動特性與危害度分析就顯得非常急迫與重要。

經濟部中央地質調查所於民國 91－95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，逐年在臺灣陸上活動斷層帶設置全球導航系統（Global Navigation Satellite System，簡稱 GNSS）監測網與精密水準測線。於民國 96－99 年「地震地質與地變動潛勢分析」計畫中，除了逐步累積 GNSS 與精密水準之觀測成果，並開始嘗試各種斷層模型建置之測試，試圖藉由斷層模型來擷取地表變形資訊所顯示之斷層運動特性。在民國 98－101 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」與民國 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫至今，已完成 86 站 GNSS 連續站（表 1-1.1）、773 站 GNSS 移動站及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線）之設置（圖 1-1.1），並藉由高精度的 GNSS 與水準觀測數據分析，瞭解各斷層於震間、同震以及震後的變形型態變化，進一步計算出震間期的斷層滑移速率與同震及震後的斷層面滑移特性。另外，PS-InSAR 衛星影像分析技術也在這一時期之計畫工作中被引進（圖 1-1.2；圖 1-1.3），可針對大範圍的地表地形變化進行觀測，快速的獲得大區域面狀的地殼變形資訊。故經由過去近十年之大地測量監測資料，已觀測到包含東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部等數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域。

另一方面，在民國 98－101 年之「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測與潛勢分析研究」計畫中，還針對臺灣 8 條活動斷層（瑞穗斷層、車籠埔斷層、

山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層和小崗山斷層）嘗試進行斷層活動度及地震潛能分析，逐步研究詳細的斷層幾何參數並評估其地震發生機率。在民國 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中，透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料，並參考日本地震研究推進本計畫及美國加州之經驗方法，將各孕震構造之活動特性予以統計數量化，以製作臺灣地區第一版之斷層活動潛勢圖。然而在此工作中，並未很好的將大地測量監測資料引用至此斷層活動潛勢分析工作中。

在民國 106－109 年「斷層活動性觀測研究第四階段－地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫中，（1）著重在活動斷層模型的建置工作上，利用近十數年來的地表變形觀測結果，同時針對活動斷層及潛在的活動構造，採用三種以上的斷層模型進行參數反演，推估斷層短期滑移虧損率等資訊，並將民國 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中所提出的斷層幾何參數進行評估，找出最佳的斷層幾何參數組合結果，並將其結果納入斷層潛勢分析計畫整體評估。此外，（2）由於過去礙於大地測量資料蒐集時間長度之不足，特別是 GNSS 移動站資料，難以對垂直速度場有足夠的解析能力，然而在蒐集近十數年的大地測量監測資料後，此階段計畫也嘗試分析 GNSS 移動站之垂直速度場，並嘗試建立臺灣地區三維地表速度場之時空變化。（3）另外，此階段計畫也利用精密單點定位技術（PPP）發展連續 GNSS 近即時資料解算技術，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一週內完成連續 GNSS 同震位移場之解算工作。

接續歷年的工作成果，本階段「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估」計畫將進一步利用大地測量資料產製具體之應用成果，解析並綜合判釋重要活動斷層地區之地表變形，並評估其活動潛勢。本計畫預計以 2 年（民國 110 年至 111 年）為工作期程（表 1-1.2），進行全臺之大地測量觀測成果分析與目標區域之地表變形強度分布圖、斷層活動潛勢圖、景況地震動分布圖與景況同震位移圖（圖 1-1.4）。此外，延續上一期計畫「斷層活動性觀測研究第四階段」，本計畫將針對重要之活動斷層與重要區域（表 1-1.2；圖 1-1.5）進行最新地質調查研究成果資料之持續蒐集，以便分年更新各該區域主要活動斷層的發震潛勢，並搭配既已規畫更新的臺灣活動斷層分布圖，滾動更新新增減的活動斷層，以納入斷層潛勢評估的標的。

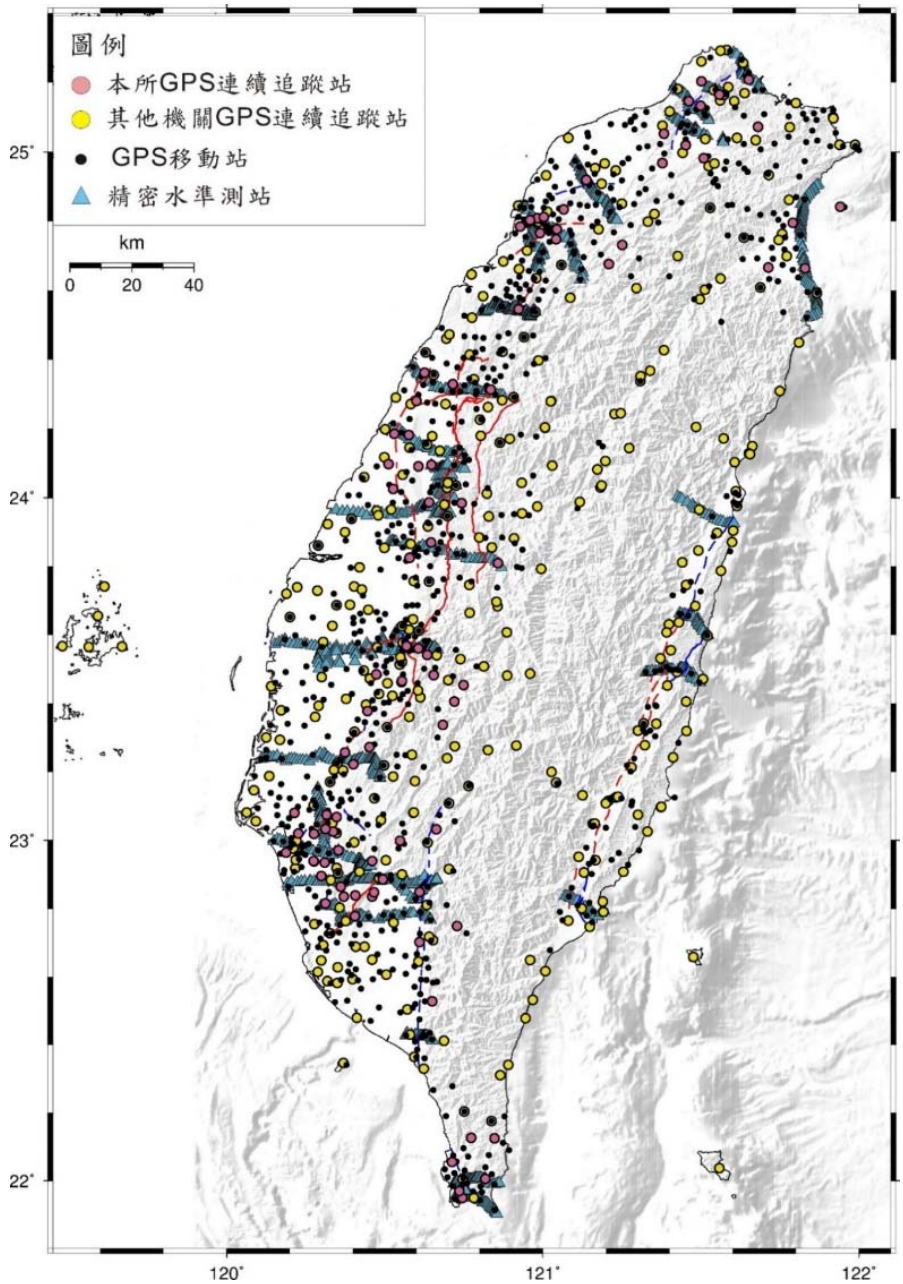


圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。觀測網包含 86 站 GNSS 連續站、773 站 GNSS 移動站以及 42 條精密水準測線。

Figure 1-1.1: CGS geodetic network for active fault monitoring, including 86 continuous GNSS stations, 773 campaign-mode GNSS stations and 42 pricise leveling routes.

表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GNSS 連續觀測站列表

Table 1-1.1: Continuous GNSS stations installed by CGS

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	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS02	新竹高工（2015.08.17 廢站）	2004/10/21	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS03	工研院	2004/10/19	GS52	新發國小（2020.9 廢站）	2009/12/18
GS04	大埔美農場（2009.11.11 廢站）	2004.10.16	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS54	大洲國中（2013.7.12 廢站）	2009/12/15
GS06	民和國中	2004/10/21	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS07	培英國小	2004/10/21	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS08	興華國小（2020.03.26 廢站）	2005/08/15	GS57	石門國小（2016.12.27 廢站）	2009/12/15
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS58	高士國小	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS11	北投國小	2005/08/15	GS60	永港國小	2009/12/18
GS12	樂善國小（2018.3.8 廢站）	2005/09/06	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS13	國光國小	2005/08/16	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS14	西門國小	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS65	茶山國小（2011.7.28 廢站）	2010/10/14
GS17	太平國小	2005/09/14	GS66	達邦	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS67	新美國小	2010/09/28
GS19	保長國小（2012.5.25 廢站）	2006/07/12	GS68	三和國小	2010/12/17
GS20	龜山島	2006/08/04	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS73	新光國小	2012/11/03
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/03
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS75	旗美高中	2012/11/01
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS76	新興國小	2012/11/03
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS77	深水國小	2012/11/15
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS78	溪洲國小	2013/10/21
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS79	中路國小	2013/10/21
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS80	田寮國中	2013/10/21
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS81	嘉興國中	2013/10/21
GS33	永華國小	2006/06/22	GS82	卓蘭實中	2014/11
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS83	土城國小	2014/11
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS84	水里國中	2014/11
GS36	德化國小	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2014/11
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS86	水美國小	2015/09/15
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS40	龍峰國小（2016.11.7 廢站）	2006/10/21	GS89	新化國中	2015/09/14
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS90	新埔工作站（2019.07.01 廢站）	2016/09/02
GS42	東原國中	2007/11/23	GS91	香山高中	2016/09/02
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS93	七星山	2017/01/01
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS94	中湖	2017/12/20
GS46	來義國小	2009/01/06	GS95	八煙	2017/12/20
GS47	台電南展館（2013.7.25 廢站）	2009/01/05	GS96	二溪國小	2020/02/07
GS48	警光山莊	2009/04/01	GS97	玉井國小	2020/02/07
GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01			

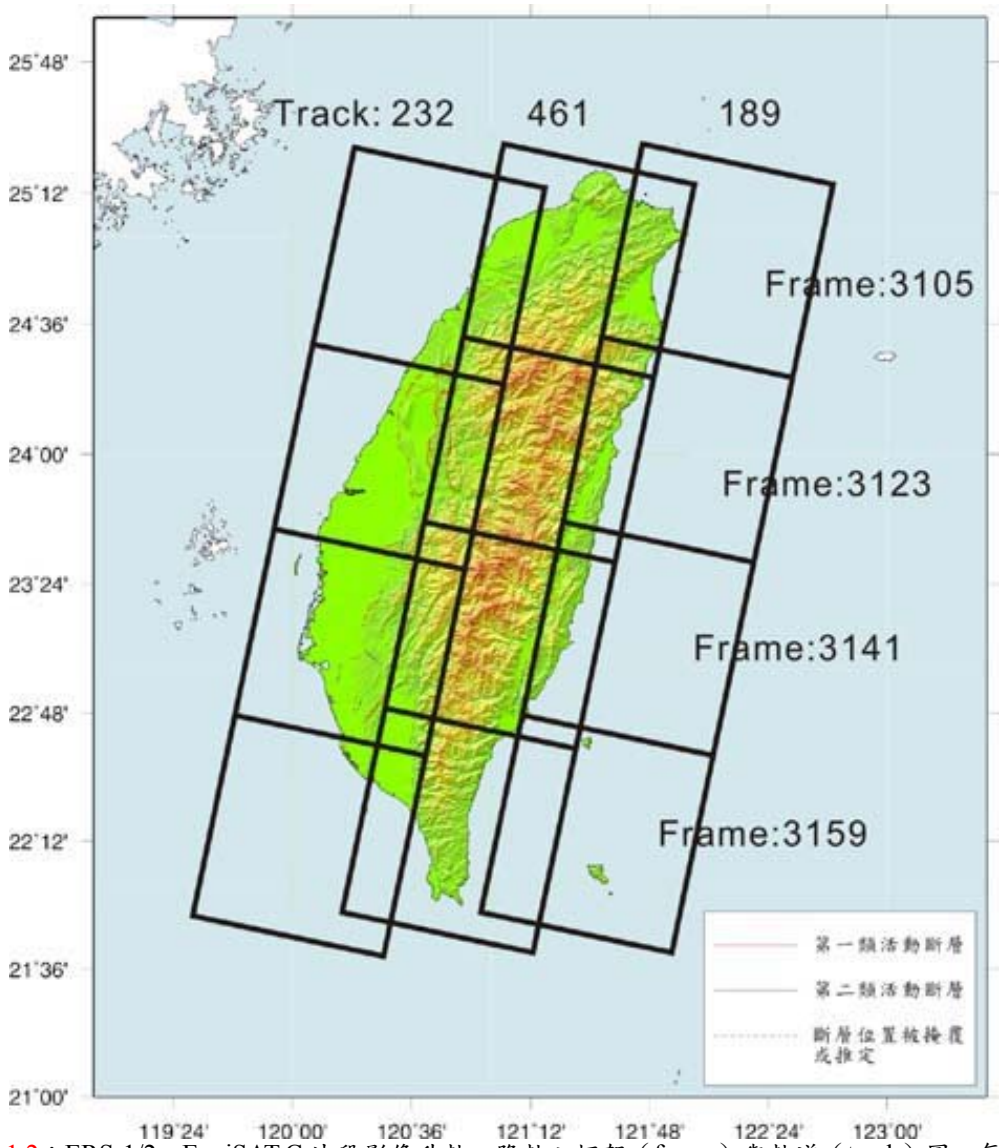


圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

Figure 1-1.2: Frames and tracks of ascending and descending orbits of ERS-1/2 (C-band) and EnviSAT (C-band) satellite images. Area of SAR image is about 110 km × 110 km per frame.

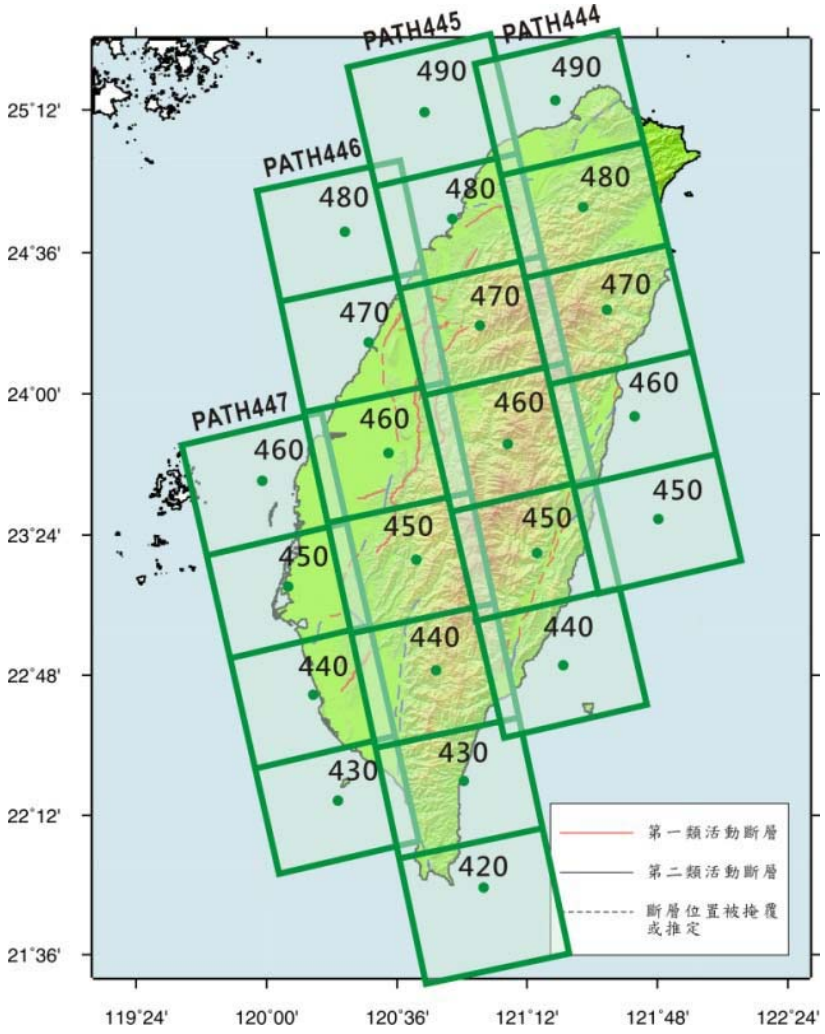


圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-1.3: Ascending tracks of ALOS satellite images.

表 1-1.2：110 年至 111 年分年目標表
Table 1-1.2: Objects in 2021 and 2022

年度	目　標	重要區域
110	南部地區斷層潛勢分析 （包含小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層、車瓜林斷層等區域）	橋頭科學園區 高雄科學園區 高雄都會區
111	嘉南地區斷層潛勢分析 （包含九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層、木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、口宵里斷層等區域）	臺南科學園區 沙崙綠能科學城 臺南都會區

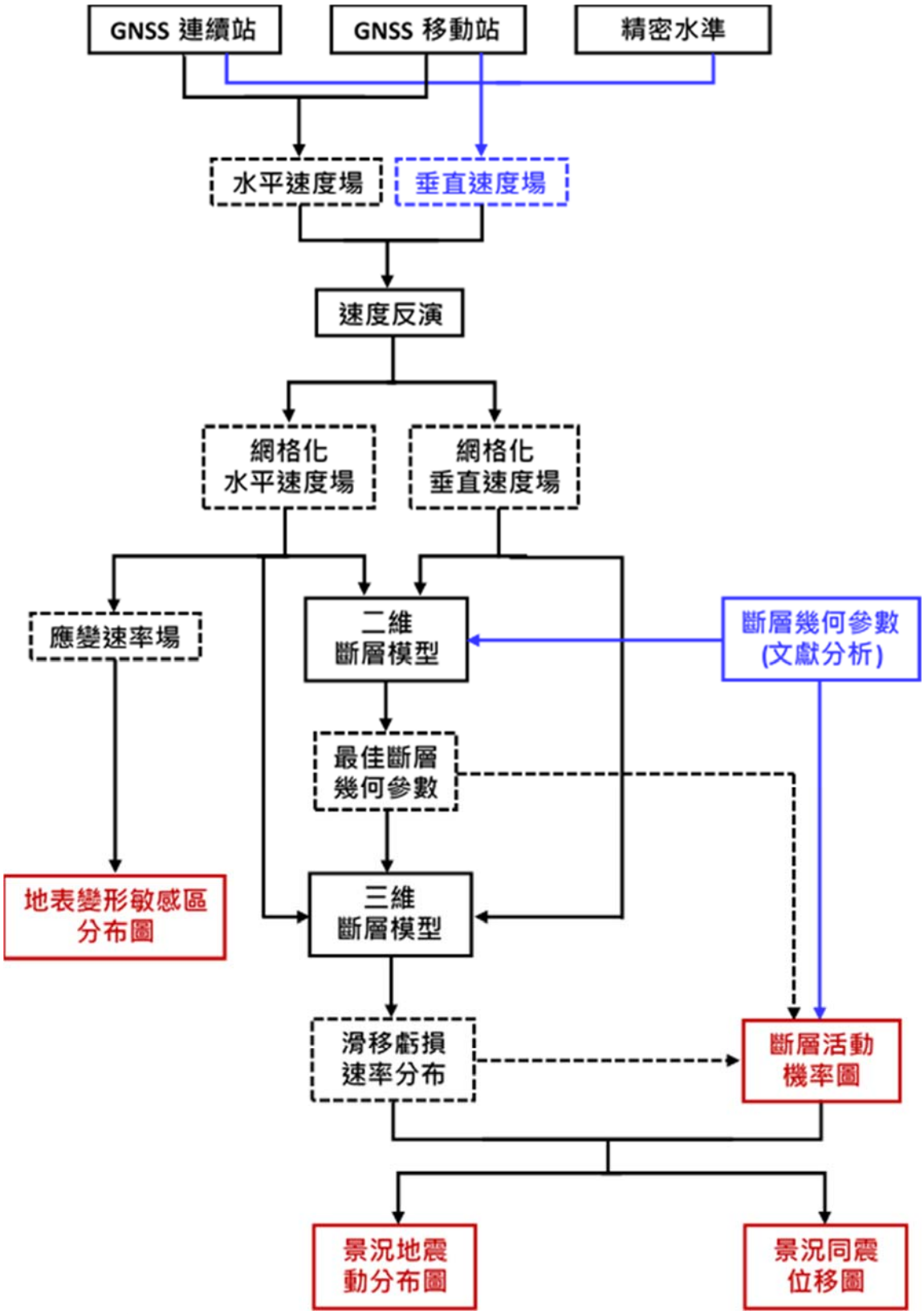


圖 1-1.4：計畫執行架構圖。

Figure 1-1.4: Framework of the project.

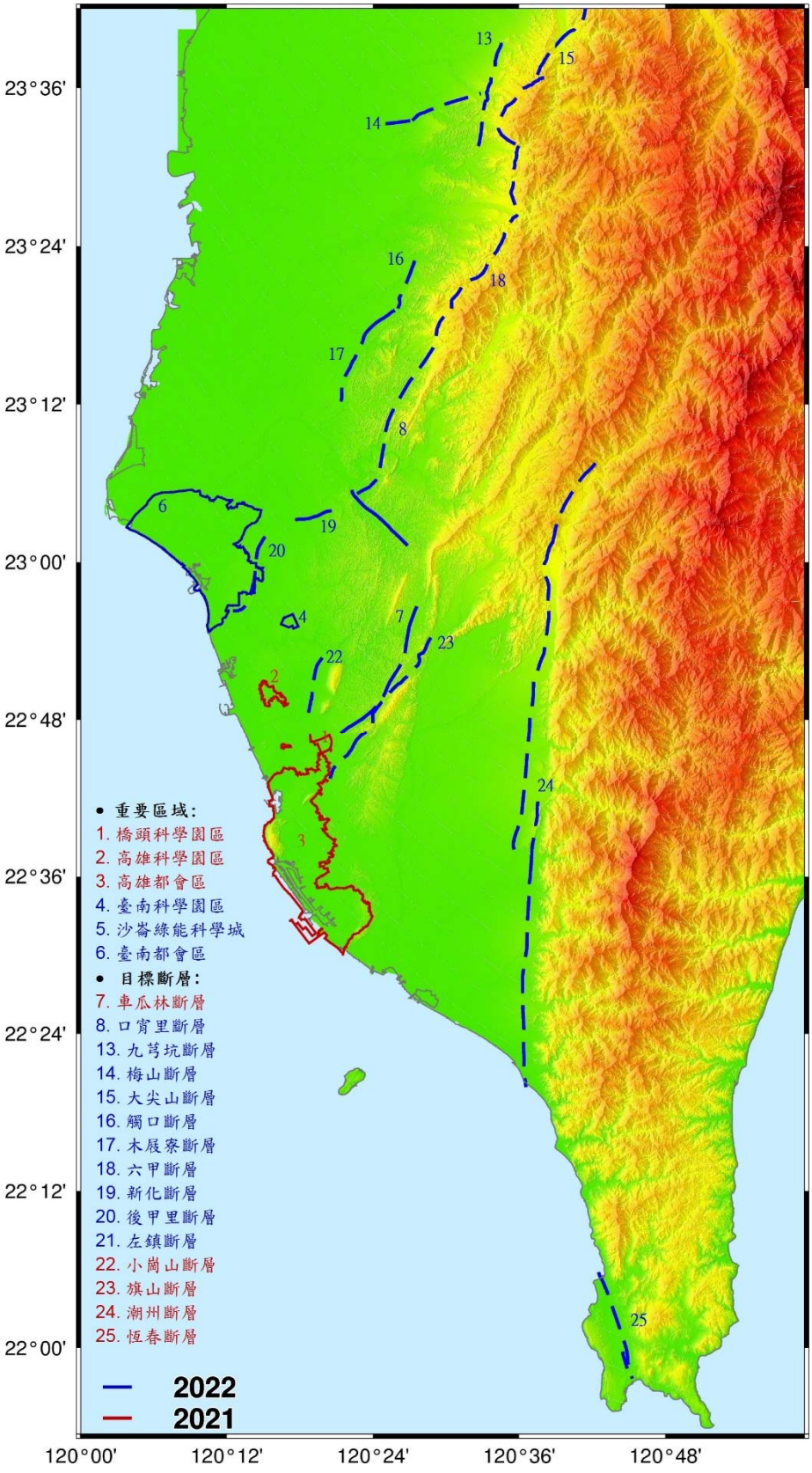


圖 1-1.5：110 年至 111 年分年目標重要區域。
Figure 1-1.5: Object area of 2021 and 2022.

1-2 研究目的

本計畫之研究目的為：(1)相對於數百年週期地震活動所造成之短時間大規模破壞，平時即持續不斷地不等量地表變形，就會以緩慢且逐步地方式造成線性結構物、維生管線與大型結構物等基礎建設或重要設施的損毀。雖然地表應變速率圖為最直接反映不等量地表變形資訊的重要圖資，但是地表應變速率對於各領域之應用並不直觀，故本計畫將參考活動斷層分級之概念，制定一套符合社會各界需求之地表應變速率場分級標準，並據此繪製地表變形強度分布圖。(2)雖然過去的計畫已經將斷層模型應用在短期斷層滑移虧損速率的推求，但是由於斷層幾何參數不確定性並不明確，因此無法合理地評估斷層滑移虧損速率的可信度。因此本期計畫將審慎地檢視主要斷層之幾何參數可信範圍，並採用二維斷層模型來整合地質調查、地球物理測勘與大地測量所獲得之觀測資料，推求最佳之斷層幾何參數，並將其成果應用到後續的工作項目中。(3)本階段計畫同時也嘗試藉由斷層滑移虧損速率分布，了解斷層面在震間期可能之能量累積處（地栓），在考慮主要斷層之可能最大地震規模後，依據地動預估式推求地震發生時，工作地區重要區域鄰近區域可能之景況地震動分布範圍，並利用三維斷層錯動模式推求地表上可能發生之景況同震位移分布圖。

1-3 本年度工作概述

本年度為 110－111 年「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估」之第一年，本年度之計畫分析目標，將著重於包含小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層、車瓜林斷層等活動斷層之臺灣南部地區，重要區域以橋頭科學園區、高雄科學園區與高雄都會區為主（表 1-1.2），由於「小崗山斷層」、「旗山斷層」與「車瓜林斷層」是三條圍繞著主要重要區域之活動斷層，因此本年度的計畫將著重於分析這三條斷層之斷層幾何參數與其活動性。以下將概述這三條斷層之地質背景：

1. 小崗山斷層

小崗山斷層為逆衝斷層，全長約 8 公里，呈北北東走向，由高雄縣阿蓮鄉南蓮村向南延伸至燕巢鄉瓊林村，位於大、小崗山台地的西側（Sun, 1964）。Sun（1964）依據航照判釋結果指出，小崗山西側有 5 段排列成線狀的斷層小崖，東側為上升側，推測存在一條向東傾之逆衝斷層，Hsu & Chang（1979）推測在小崗山及阿蓮鄉之間為一逆衝斷層所造成的斷層線崖，東側為上衝斷塊，可能仍處於活動中。陳文山等（2009）藉由位於大崗山西側的四孔淺層鑽探，分析沉積層年代與古環境深度計算得出此地區抬升速率是由東向西逐漸減小，並配合淺層震測剖面解釋，推估主斷層面的傾角約 45°，淨滑移速率為 5.7 ± 1.4 mm/yr。目前《活動斷層地質敏感區（F0022 小崗山斷層）劃定計畫書草案》中，根據前述文獻以及宏偉工程（2012）、顏一勤（2020）之地質鑽探資料與剖面，公告小崗山斷層為向東傾之逆斷層。

另一方面，雖然研判小崗山斷層是位於大崗山背斜西側，但是該斷層並未出露地表。翁群評（2001）利用淺層反射震測法調查，結果顯示在斷層崖階附近皆出現地層攪動之跡象，又由於大崗山及小崗山台地位於大崗山背斜之上（Gong et al., 1996），因此推測小崗山斷層為泥貫入體（mud diapir）抬升所導致，主因為大崗山背斜下泥體上升所造成不同的地層間錯動所形成，應為一向西傾之正斷層。

如前所述，彙整過往地質調查、前人研究及目前之公告草案可發現，小崗山斷層之斷層型態仍存在部分爭議。

2. 旗山斷層

旗山斷層為長約 30 公里呈東北走向的逆衝斷層，由高雄市旗山鎮附近向西

南延伸至高雄市仁武鄉附近（吉田要，1932；鳥居敬造，1933；耿文溥，1967；Tsan & Keng, 1968），是臺灣西南部西部麓山帶中位於最東側的逆衝斷層，可能是西南部西部麓山帶中最先形成的逆衝斷層，形成時代為早期更新世。耿文溥（1981）認為旗山斷層走向為北偏東 30 至 50 度，在斷面近於直立時具有左移的特性，斷層在南端於橫山附近被階地堆積層覆蓋，過去認為此斷層北端連接至內英斷層（大井上義近等，1928），但根據陳文山等（2005）之調查結果顯示，此兩斷層特性不同，本區位於西部麓山帶南端，斷層為山麓地形，西側為丘陵地形，斷層兩側地勢有明顯落差，下盤以古亭坑泥岩層為主，上盤以烏山砂岩層為主。陳文山等（2005）認為旗山斷層南段區域斷層上盤的烏山層逆衝到古亭坑層之上，斷層兩側地層垂直錯距至少有 2000 公尺。根據沿著主斷層之斷層跡調查結果顯示，旗山斷層主斷面擦痕及斷層帶中破裂面上的擦痕皆指出，旗山斷層為具左移分量之逆衝斷層。陳柏村（2005）利用影像判釋與野外調查結果，同樣判定旗山斷層是具左移分量的逆衝斷層。然而，Lacombe et al.（2001）分析地震及 GNSS 資料（Yu et al., 1997），提出臺灣西南部之地體構造模型為脫逸構造（Lu & Malavieille, 1994；Lu et al., 1998），並建議旗山斷層應為具有右移分量之逆衝斷層。Ching et al.（2007）根據臺灣西南部加密之 GNSS 速度場的分析結果，同樣指出旗山斷層為具有右移分量之逆衝斷層。。

對於旗山斷層之滑移行為，部分研究認為旗山斷層應為左移之逆衝斷層（耿文溥，1981；陳文山，2005；陳柏村，2005；張鴻成，2005），但卻有另一部分研究認為旗山斷層應為右移之逆衝斷層（宋國城等，2003；Lacombe et al., 2001；Ching et al., 2007）。張鴻成（2005）認為旗山斷層具有左移或右移分量之爭論，可能出於不同研究所用的 GNSS 資料與旗山斷層之距離遠近所導致。若 GNSS 測站距離旗山斷層較遠，則空間解析力較差，將會獲得旗山斷層具有右移之運動分量；但若 GNSS 測站靠近旗山斷層，則能獲得較高之空間解析力，因此可得到旗山斷層具有左移之運動分量。

3. 車瓜林斷層

車瓜林斷層位於臺灣西南部，為全長約 25 公里東北走向之逆衝斷層，由高雄市內門區附近向西南連接至崎溜（林啟文等，2012）。於南勢湖北方有一個車瓜林斷層的露頭（林啟文，2013），因斷層西南端地處階地堆積與沖積層覆蓋的環境，並無法準確得知斷層的蹤跡與延伸位置。早期研究中由大廓亭山經崎溜至

燕巢段之斷層於徐慶雲（1975）之地質圖中，將此段定義為龍船斷層南段，但林啟文等（2012）則認為該斷層兩側之岩層及其斷層特性與龍船斷層有所差異，為避免混淆，因此將該斷層命名為車瓜林斷層。過去之研究將車瓜林斷層在大廍亭山附近連接至西北走向之龍船斷層，但林啟文等（2012）於崑山西方之觀察結果卻顯示，西北走向的泥岩夾砂岩層與東北走向的泥岩與薄層砂岩互層呈現正交的關係，因此認為龍船斷層被東北走向之車瓜林斷層截切，在地體構造意義上，龍船斷層扮演逆衝岩片（thrust sheet）的逆衝斷層角色，而車瓜林斷層則扮演側向斷坡（lateral ramp）的角色，兩斷層於造山過程中代表不同之構造意義，因此過去所稱之龍船斷層南段，即現今之車瓜林斷層北段（謝尊堯，2020）。

本年度之主要工作重點內容則為（1）大地測量資料之整合運用與分析：本計畫將彙整近十數年之 GNSS 連續站、GNSS 移動站以及精密水準測量等長期觀測資料，進行資料檢核、坐標解算及時間序列分析，提升觀測成果精度與解析力，以獲得包含地表水平與垂直分量之三維地表速度場，進而計算應變速率場；（2）地表變形強度分布圖：以應變速率場所反映之地表變形型態為基礎，整合各領域之規範與需求，訂定分級標準，依據分級繪製地表變形強度分布圖；（3）最佳斷層幾何參數搜尋與斷層活動潛勢推求：整合上一期計畫「斷層活動性觀測研究第四階段」工作以及近期相關文獻與研究，進行斷層幾何參數探討與分析，以二維斷層模型搜尋最佳斷層幾何參數，並藉由三維斷層模型進行速度場反演，推求斷層滑移速率分布，並提供斷層活動潛勢圖；（4）景況地震動與同震位移分布推估：根據斷層幾何參數之探析與斷層滑移虧損速率分布，依地動預估式與三維斷層錯位模型，推估景況地震動與同震位移分布圖。前述之工作重點可細分如下：

1. 測量外業檢測與檢核部分

在測量外業檢測部分，由於 GNSS 移動站測量分為臺北地區、桃竹苗地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區、恆春半島地區、宜蘭地區、花東地區等 8 個地區來進行（表 1-3.1；圖 1-3.1），因此本計畫將在各分區實際觀測時間的前後，抽樣 10% （小數點以下四捨五入）以上之 GNSS 移動站數量進行檢測。

在測量外業檢核部分，本計畫將針對 GNSS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核，同時針對精密水準測量成果之閉合差進行檢核（表 1-3.1；表 1-3.2；圖 1-3.1；圖 1-3.2）。

2. 應變速率與地表變形強度分布推求

(1) 針對各領域不均勻地表變形影響之相關規範與敏感度需求，彙整建議之格點距離，進而推求地表應變速率場。

(2) 彙整各領域針對不均勻地表變形影響之相關規範與敏感度需求，制定分級地表應變速率場標準，據此劃設地表變形強度分布範圍，提供各界應用參考。

3. 斷層幾何參數分析與斷層滑移虧損速率推求

(1) 彙整「斷層活動性觀測研究第四階段」計畫之成果與相關文獻，進行南部地區主要斷層之幾何參數分析。

(2) 利用二維斷層模型反演三維地表變形速率，測試本年度彙整分析之主要斷層幾何參數，提供同時符合地質、地球物理觀測成果與地表變形速率成果之最佳斷層幾何參數。

(3) 利用至少三種不同的斷層模型，使用二維斷層模型提供之最佳斷層幾何，反演短期斷層滑移虧損速率並進行整合分析，提供斷層潛勢分析、景況地震動分布與景況同震位移場推求工作所需。

4. 重要區域鄰近區域地表變形與斷層活動潛勢評估

(1) 整合斷層幾何參數與斷層滑移虧損速率與相關文獻資料，評估南部地區重要區域鄰近區域之斷層活動機率。

(2) 藉由斷層滑移虧損速率分布了解斷層面在震間期可能之能量累積處，在考慮主要斷層之可能最大地震規模後，依據地動預估式推求地震發生時，可能之景況地震動分布範圍。

(3) 藉由評估之主要斷層斷層滑移虧損速率與地震重複週期，採用三維斷層錯動模式進行斷層正演，推求地震發生時地表上可能之景況同震位移分布範圍。

表 1-3.1：GNSS 移動站預計施測與檢測時間表

Table 1-3.1: Schedule of campaign mode GNSS surveying and validation

預計施測月份	預計檢核月份	地區
3 月	3 月	台北
4 月	4 月	恆春
5 月	5 月	桃竹苗
6 月	6 月	嘉南
7 月	7 月	高屏
8 月	8 月	中部
9 月	9 月	花東
10 月	10 月	宜蘭

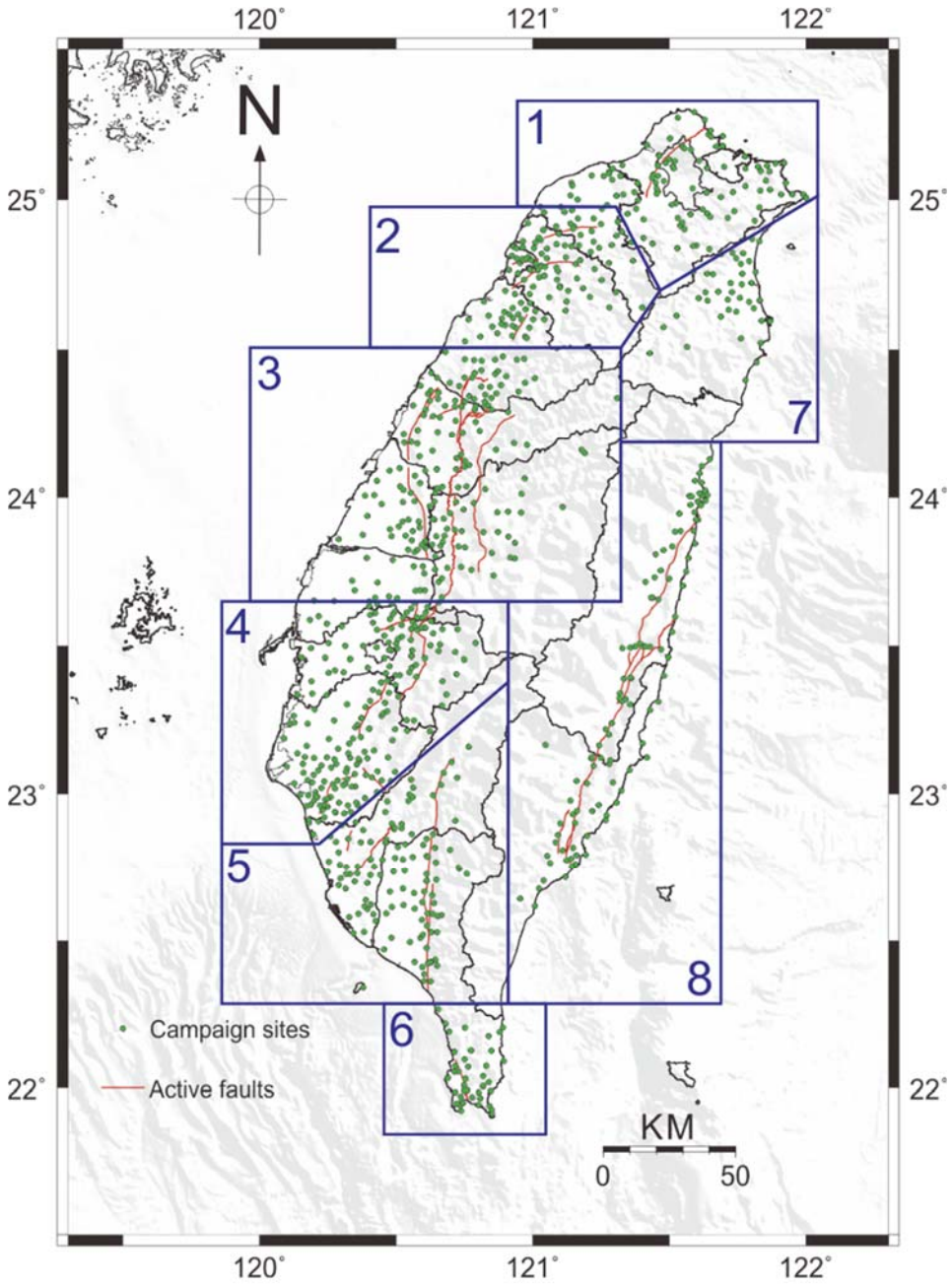


圖 1-3.1：GNSS 移動站觀測分區圖。綠色圓圈為移動站之坐標；藍色框為移動站分區。
Figure 1-3.1: Distribution and sections of campaign mode GNSS stations. Green circles are campaign mode GNSS stations; blue rectangles are sections.

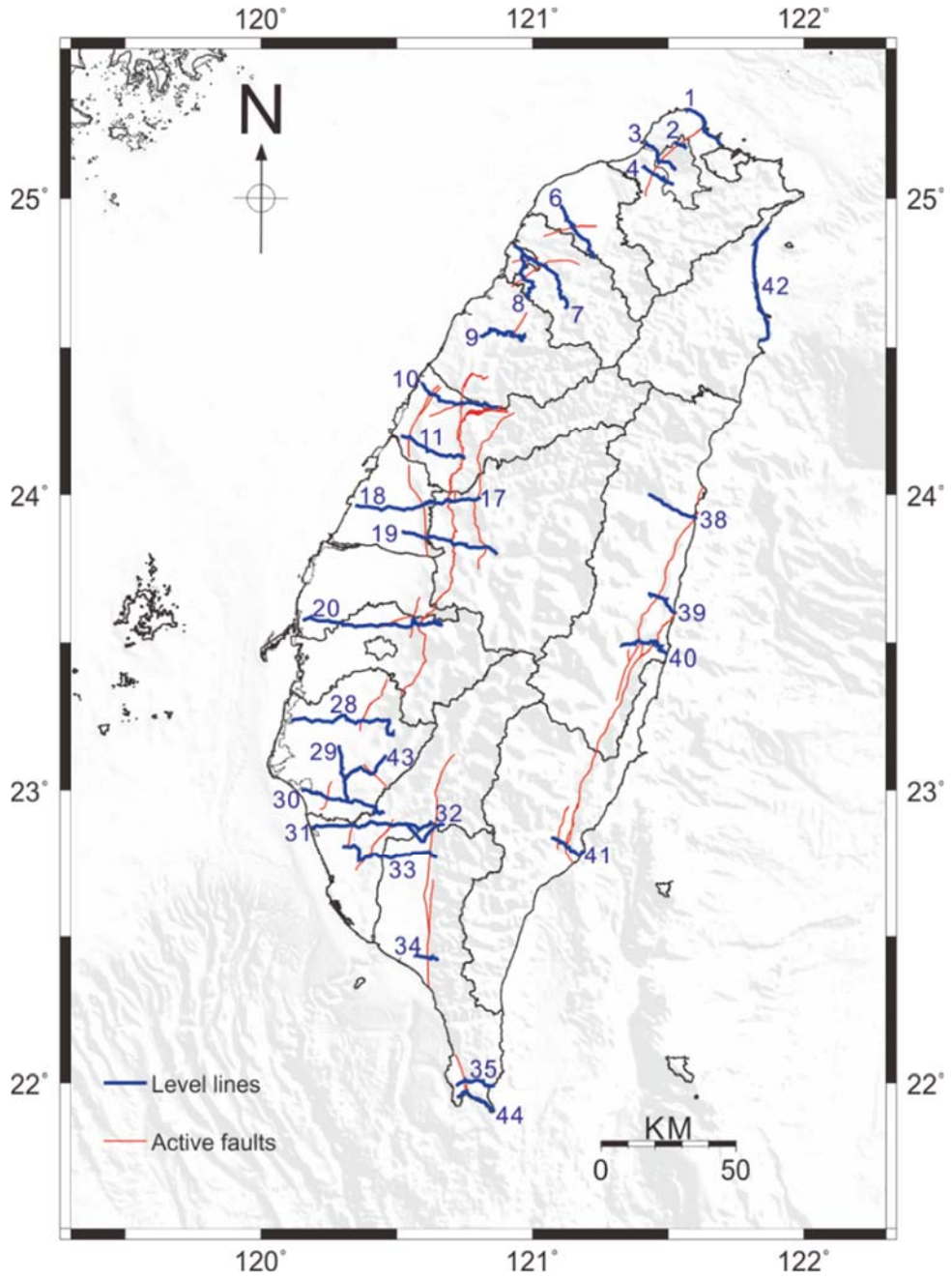


圖 1-3.2：精密水準測量測線分布圖。
Figure 1-3.2: Distribution of leveling lines.

表 1-3.2：精密水準測量預計施測時間表
Table 1-3.2: Schedule of leveling surveying

測線編號	測線名稱	測線長度（km）		預計施測時間
		山區	平地	
1	石門-萬里測線	0	25	9 月
2	士林-三芝測線	0	10	9 月
3	淡水-士林測線	0	21	9 月
4	五股-臺北側線	0	19	9 月
6	新屋-童話世界測線	0	33	7 月
7	新竹-五峰測線	0	46	6 月
8	新竹-峨眉測線	7	22	6 月
9	苗栗-南庄測線	6	37	8 月
10	大安-東勢測線	11	32	3 月
11	龍井-太平測線	0	35	7 月
12	五光-黃竹測線	0	16	8 月
16	草屯-埔里測線	0	16	3 月
17	王功-草屯測線	5	43	3 月
19	北斗-水里測線	0	46	3 月
20	金湖-瑞峰測線	29	62	9 月
28	北門-楠西測線	0	61	4 月
29	善化-關廟測線	0	29	10 月
30	安平-龍崎測線	16	30	5 月
31	路竹-茂林主線	3	54	2 月
32	路竹-茂林副縣	3	20	2 月
33	岡山-安坡測線	8	43	5 月
34	佳冬-七佳測線	8	4	9 月
35	恆春西臺地-佳樂水	13	7	4 月
38	嶺頂-龍澗測線	16	9	10 月
39	光復-豐濱測線	15	7	10 月
40	紅葉-靜浦測線	23	10	10 月
41	東成-富岡測線	14	11	10 月
42	梗枋-東澳測線	18	42	10 月
43	玉井-新化測線	0	26	5 月
44	楠樹林-鵝鑾鼻測線	0	20	4 月

第二章、大地測量資料分析

2-1 GNSS 連續站資料解算與分析

本次報告所使用之 GNSS 連續站資料由經濟部中央地質調查所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央研究院、中央氣象局、內政部、國土測繪中心及經濟部水利署等單位，共 572 站。以下為計算每日坐標解之方法與流程。

2-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程

本研究利用美國 NASA 噴射推進研究室（JPL）目前所研發新一代解算軟體 GipsyX 計算求解精密之測站坐標。GipsyX 是利用精密單點定位（Precise Point Positioning，PPP）之技術計算求解各測站之精密座標，相較於前一代的 GIPSY-OASIS 可支援處理多衛星系統（如俄羅斯的 GLONASS、歐盟的 GALILEO、中國的 BEIDOU 及日本的 QZSS）觀測資料，並將開發所需程式與應用工具由 Fortran/C/C-Shell/Perl/Python 簡化為 C++/Python（Zumberge et al., 1997；Bertiger et al., 2020；Helfin et al., 2020）。其優點為相較於 GAMIT/GLOBK 不需要以分割子網方式解算，處理速度較快，且各測站的解算結果具有獨立性，不會受到資料品質較差的測站干擾。在計算參數上採用 JPL 的 Gerald Bierman 改進的卡曼濾波算法，該算法不但計算快速，且數據穩定、精確，但不能如 GAMIT/GLOBK 和 Bernese 等基線解算軟體般，採用雙差分方法消除共同誤差來源，且在使用參數處理誤差設定上較為麻煩，需仰賴外部資料或依據使用者自身經驗。雖然如此，GipsyX 可以透過 Blewitt 於 2008 年提出的 Ambizap 演算法消除共同誤差項以提高解算精度。其中本次在 GipsyX 軟體計算下之詳細參數設定如下：

(1) 使用 JPL 提供之最終（Final）軌道解（https://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GNSS_Products/Final）。\

(2) 參考框架：IGb14。

(3) 截切角度（cutoff angle）：10°。

(4) 估算極潮（pole tide）、固體潮（earth tide）及海潮（ocean tide）等效應。

(5) 對流層估計：初始氣象參數模式採 GPT50；乾、濕映射函數（mapping function）則採用 VMF1 模式（Vienna Mapping Function 1; Böhm et al., 2008），

估計間隔為 300 秒。

(6) 固體潮模式：IERS 2010。

(7) 海潮模式：FES2014b（網格精度為 0.0625° × 0.0625°）

(8) 高階電離層修正（Garcia-Fernandez et al., 2013）：使用 IGS 全球電離層濃度網格模型（IONEX），地球磁場為 IGRF-13（International Geomagnetic Reference Field 2013）。

(9) 天線相位中心修正：igs14.atx。

而 GipsyX 數據處理流程主要分為數據預處理（gde）、軌道計算和參數解算（rtgx）三個階段，最終從相位或偽距觀測數據中計算得出測站坐標及精度估計。而這裡的數據處理採取了以下步驟：

(1) 在 International GNSS Service（IGS）和 JPL 網站上獲取相應觀測日的精密衛星軌道、精密衛星時鐘改正、衛星掩蔽信息及有關地球的時間、極移、旋轉和極軸方向等資料。這些資料在數據處理中當作已知項，不再進行解算。

(2) 採用精密單點定位方法對測網網各觀測日的所有站點進行單獨處理，獲得各點的單日坐標解，然後將所有觀測站的單日坐標解合併，獲得觀測網內全部測站之坐標及共變異數矩陣的單日鬆弛約束解。並自 PPP 解出之測站坐標與共變異數矩陣中取出坐標與時間，形成測站坐標之時間序列，並轉換至地理坐標上。

2-1-2 GNSS 連續站坐標時間序列擬合

時間序列（time series）和速度場（velocity field）是 GNSS 資料處理的主要成果，可反映地表與地下構造的運動情形，提供重要的地殼變形訊息。本次報告彙整 1993 年至 2021 年 5 月為止，本計畫可取得之 GNSS 連續站資料，輔以各測站從設站以來長時間資料解算的結果，就測站移動速度場或地震跳階影響加以探討。

就連續站而言，為了對觀測資料做有效的時間序列分析，首先需要對所有的 GNSS 觀測數據辨別雜訊並加以剔除，如此才能真正地觀測時間序列上的微小變動，藉以瞭解斷層活動的特性。由於觀測值中的離群點會影響時間序列模型擬合的結果，因此在進行時間序列分析之前，我們針對每日解坐標誤差大於 1 cm 的資料先剔除，剩餘的坐標資料才進行進一步的時間序列分析。此外，為確保各

GNSS 點位之資料品質，需再藉由統計分析的方式，於坐標時間序列分析時，將資料較佳與較差的點位挑出，並篩選出資料時間至少兩年以上的測站進行速度場分析。對於 GNSS 時間序列資料之分析，將考慮長時間的地殼變動、週期性之變化以及地震引發的同震與震後活動。諸歸於此類的時間序列模式可以用下式表示（Nikolaidis, 2002）：

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

（式 2-1.1）

其中，a 為截距，b 為震間期（interseismic period）地殼運動速率；係數 c、d 為年週期（annual period）變化之震幅；係數 e、f 為半年週期（semi-annual period）變化之震幅；g 表示時間序列中的不連續跳動，可能為地震造成的同震位移或是人為天線更換；h 為震後線性速率改變量；k 為震後變形呈指數衰減的現象；最後 v 為殘差項；其中 H 為階梯函數（Heaviside step function），τ 為鬆弛時間（relaxation time），代表震後變形衰減至總變形量的 1/e 所需時間。

而本計畫於進行坐標時間序列擬合前，先將各測站依其測站位置進行分區，以便針對各區域曾發生之重大歷史地震事件、區域性之地表位移或速度變化進行擬合。其中，同震位移部分，本計畫主要擬合中部區域以 1999 年集集地震、2013 年南投地震；南部區域 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震以及 2016 年美濃地震；東部則針對 2003 年成功地震、2013 年瑞穗地震、2018 年花蓮地震等之重大地震事件擬合。擬合成果範例如圖 2-1.1 所示（其餘測站之時間序列請見附錄）。此外，由於環境變化與隨機誤差的存在，即使已完成同震位移與速度變化等事件之擬合，GNSS 坐標時間序列仍會呈現離散跳動的型態（圖 2-1.2），此離散跳動即為坐標殘差，由此圖可知測站 AKND 之於 N 方向之精度約 9 mm，E 方向之精度約 11 mm，U 方向則約為 20 mm。而本計畫之重要區域經坐標時間序列分析所獲得之速度場將於 2-4 節進行分析。

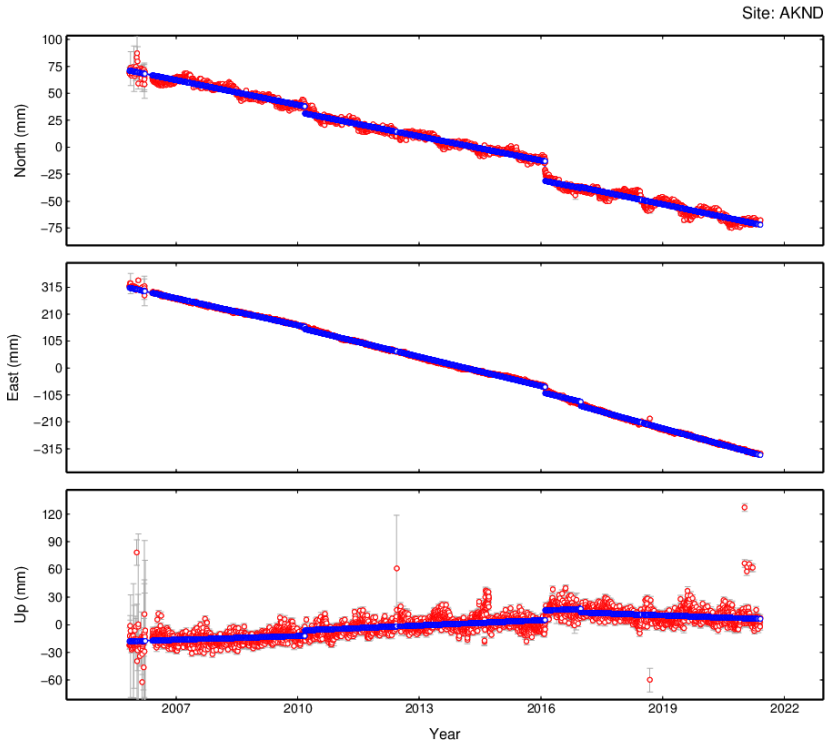


圖 2-1.1：GNSS 連續站 AKND 坐標時間序列擬合結果。紅色圓圈為原始坐標時間序列，藍色圓圈為坐標計算值。

Figure 2-1.1: Coordinate time series of GNSS station AKND. Red circles are observations; blue circles are calculation.

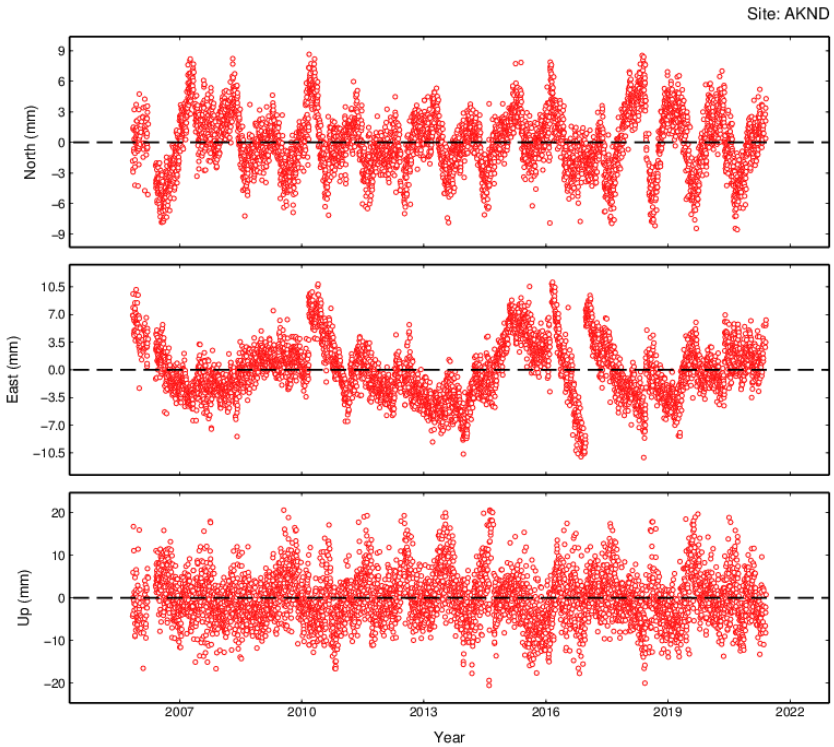


圖 2-1.2：GNSS 連續站 AKND 時間序列之殘差結果。紅色圓圈為移除地表運動速率及地震瞬時位移等事件後之殘差值。

Figure 2-1.2: Residual time series of GNSS station AKND. Red circles are residuals of the time series which have removed the interseismic velocities and coseismic displacements.

2-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析

2-2-1 本年度（2021 年）GNSS 移動站抽樣檢核

本年度至 10 月為止，GNSS 移動站部分台北地區於 3 月 9 日至 20 日完成 73 個點位施測、恆春地區於 4 月 6 日至 9 日完成 40 點位施測、桃竹苗地區於 5 月 17 日至 28 日完成 98 個點位施測，嘉南地區於 6 月 7 日至 27 日完成 165 個點位施測、高屏地區於 7 月 5 日至 16 日完成 99 個點位施測、中部地區於 8 月 9 日至 26 日完成 149 個點位施測、花東地區於 9 月 6 日至 14 日完成 101 個點位施測、宜蘭地區於 10 月 12 日至 15 日完成 39 個點位施測。

另外今年度於橋頭科學園區新增設 GNSS 移動站，橋頭科學園區於 6 月 28 日至 30 日完成 34 點位之第一次施測施測，於 9 月 22 日至 24 日完成 32 點位之第二次施測施測。

以上今年度共計完成 798 點 GNSS 移動站的施測（圖 2-2.1）。

根據測量外業檢核規範要求，GNSS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣 GNSS 移動站分區測量數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核測量。檢核採取靜態測量方式觀測，同一個測點連續觀測 6 小時以上。

檢核成果計算採用研究用軟體 Bernese 5.2、配合 IGS 精密星曆解算，重複基線須小於 $5\ mm + 0.2\ ppm \times L$（基線長：公尺)。

GNSS 移動站檢核截至 10 月為止已完恆春、桃竹苗、嘉南、高屏、中部、花東、宜蘭地區測量外檢核，恆春地區於 4 月 10 日至 11 日完成 4 個點位施測檢核，桃竹苗地區於 6 月 23 日至 25 日完成 9 個點位施測檢核，嘉南地區於 6 月 7 日至 27 日完成 165 個點位施測、高屏地區於 7 月 5 日至 16 日完成 99 個點位施測、中部地區於 8 月 9 日至 26 日完成 149 個點位施測、花東地區於 9 月 6 日至 14 日完成 101 個點位施測、宜蘭地區於 10 月 12 日至 15 日完成 39 個點位施測。另外今年度新增設橋頭科學園區 GNSS 移動站，橋頭科學園區於 6 月 28 日至 30 日完成 34 點位施測，於 9 月 22 日至 24 日完成 32 點位施測（表 2-2.1）。

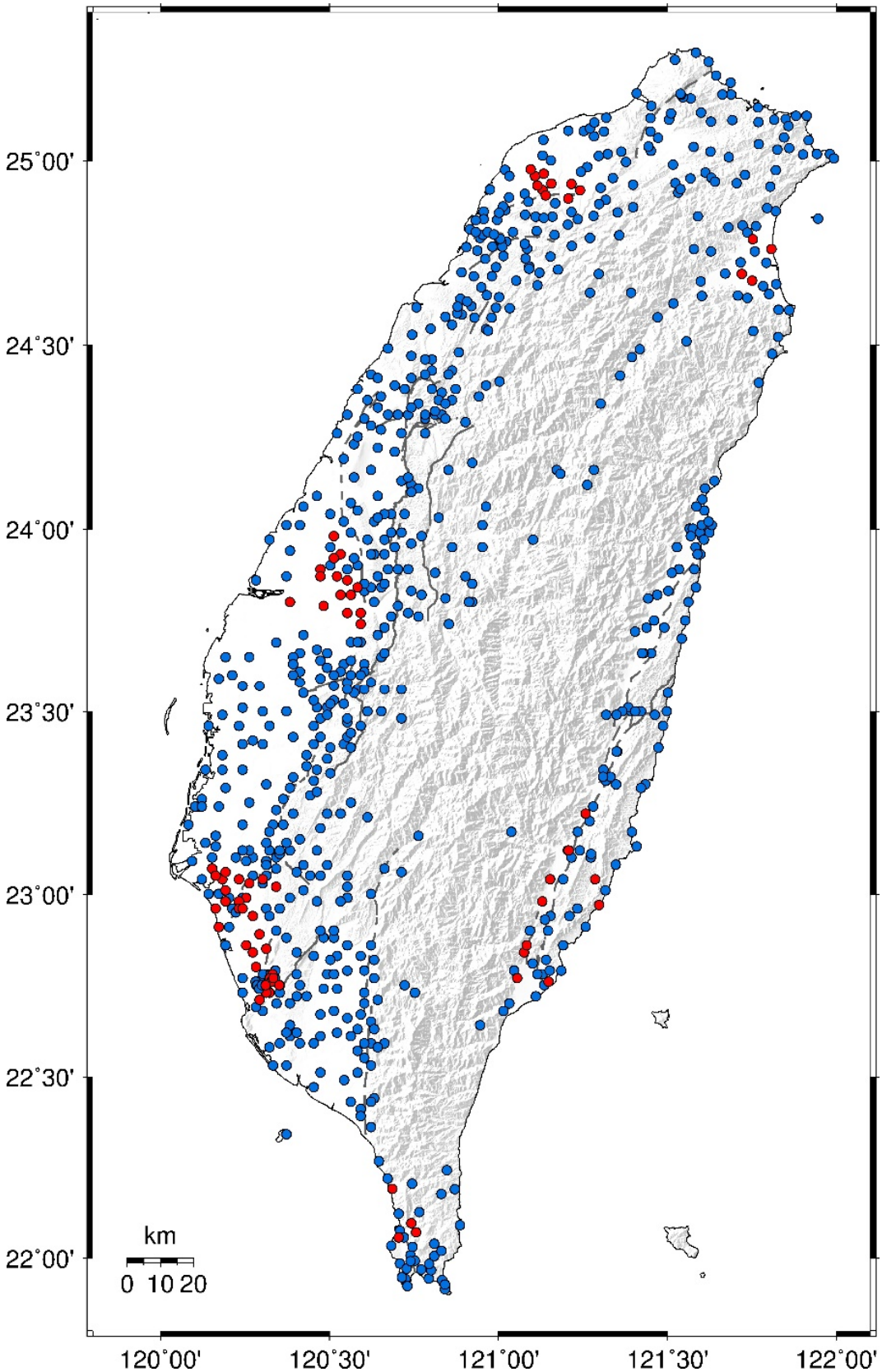


圖 2-2.1：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖。藍色圓圈為施測點位，紅色圓圈為檢核點位。

Figure 2-2.1: Distribution of surveyed campaign-mode GNSS stations and check points. Blue circles are surveyed stations. Red circles are checked points.

恆春地區共有 40 個移動站點位數，故在此區選擇 4 個點位進行檢核，共有 7 條基線。本區 7 條基線之長度落在 5,029 m 至 15,102 m，基線差規範值在 1.0 mm 至 7.8 mm 之間，計算後的基線差在 4.5 mm 至 7.3 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

桃竹苗地區共有 98 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 43 條基線。本區 43 條基線之長度落在 2,268 m 至 12,247 m，基線差規範值在 0.1 mm 至 6.9 mm 之間，計算後的基線差在 1.1 mm 至 8.3 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

嘉南地區共有 165 個移動站點位數，故在此區選擇 17 個點位進行檢核，共有 78 條基線。本區 78 條基線之長度落在 3,192 m 至 20,124 m，基線差規範值在 5.6 mm 至 9.0 mm 之間，計算後的基線差在 1.4 mm 至 7.7 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

高屏地區共有 99 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 21 條基線。本區 21 條基線之長度落在 9,402 m 至 10,152 m，基線差規範值在 5.3 mm 至 10.1 mm 之間，計算後的基線差在 0.3 mm 至 7.2 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

中部地區共有 149 個移動站點位數，故在此區選擇 15 個點位進行檢核，共有 40 條基線。本區 40 條基線之長度落在 2,337 m 至 27,807 m，基線差規範值在 5.5 mm 至 10.5 mm 之間，計算後的基線差在 0.5 mm 至 9.8 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

花東地區共有 101 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 28 條基線。本區 28 條基線之長度落在 7,629 m 至 54,392 m，基線差規範值在 6.5 mm 至 15.8 mm 之間，計算後的基線差在 0.3 mm 至 12.3 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

橋頭科學園區於 6 月份進行第一次施測，共有 34 個移動站點位數，故在此區選擇 3 個點位進行檢核，共有 6 條基線。本區 6 條基線之長度落在 1,802 m 至 4,154 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 5.8 mm 之間，計算後的基線差在 3.0 mm 至 4.6 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

橋頭科學園區於 9 月份進行第二次施測，共有 32 個移動站點位數，故在此區選擇 3 個點位進行檢核，共有 6 條基線。本區 6 條基線之長度落在 728 m 至

4,154 m，基線差規範值在 5.1 mm 至 5.8 mm 之間，計算後的基線差在 2.3 mm 至 4.9 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

宜蘭地區共有 39 個移動站點位數，故在此區選擇 4 個點位進行檢核，共有 6 條基線。本區 6 條基線之長度落在 6,286 m 至 80,589 m，基線差規範值在 5.6 mm 至 8.3 mm 之間，計算後的基線差在 3.9 mm 至 6.8 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

表 2-2.1：GNSS 移動站施測與檢核時間表

Table 2-2.1: Schedule of campaign-mode GNSS surveying, supervising and validation

測量月份	點位數量	地區	檢核點數	中興測量	檢核結果細項說明
				施測日期	檢核日期
4	40	恆春	**4**	2021/04/26 ~ 2021/04/29	2021/04/27 ~ 2021/04/28
5	98	桃竹苗	**10**	2021/05/17 ~ 2021/05/28	2021/06/23 ~ 2021/06/25
6	165	嘉南	**17**	2021/06/07 ~ 2021/06/27	2021/07/05 ~ 2021/07/08
6	34	橋頭	**3**	2021/06/28 ~ 2021/06/30	2021/07/19
7	99	高屏	**10**	2021/07/05 ~ 2021/07/16	2021/07/20 ~ 2021/07/21
8	149	中部	**15**	2021/08/09 ~ 2021/08/26	2021/08/10 ~ 2021/08/12
9	101	花東	**10**	2021/09/06 ~ 2021/09/14	2021/09/14 ~ 2021/09/15
9	32	橋頭	**3**	2021/09/22 ~ 2021/09/24	2021/09/28
10	39	宜蘭	**4**	2021/10/12 ~ 2021/10/15	2021/10/20

2-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析

本計畫利用約制臺灣 5 個連續站於 ITRF2014 框架下之坐標，解算 GNSS 移動站資料，此 5 個連續站分別為陽明山站（YMSM）、鳳林站（FLNM）、北港站（PKGM）、墾丁站（KDNM）、澎湖站（S01R）、金門站（KMNM）。為了確保此 5 個連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性，同時將此 5 個臺灣連續站資料與 IGS（International GNSS Service）國際連續站資料進行聯合解算，求解此 5 個臺灣連續站於 ITRF2014 框架之坐標時間序列。IGS 國際連續站分別為中國北京站（BJFS）、澳洲科科島站（COCO）、南韓大田站（DAEJ）、澳洲達爾文市站（DARW）、美國關島站（GUAM）、中國拉薩站（LHAZ）、菲律賓馬尼拉站（PIMO）、台灣新竹站（TNML）及日本筑波站（TSKB）。本計畫利用 IGS 公告各連續站於 ITRF2014 坐標框架下之坐標及速度，以線性關係式推出各個連續站於任一觀測時刻之坐標，並約制此國際連續站之坐標，求解臺灣 5 個連續站於 ITRF2014 坐標框架之時間序列，確認此 5 個臺灣連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性，並求出各測站之線性速度，即可以任一觀測時刻之作標，作為移動站解算時之約制條件。

在 GNSS 移動站資料解算流程部分，本計畫採用 Bernese 軟體求解各測站之坐標。資料處理所需的衛星軌道資料是直接採用 IGS 提供的精密星曆，極運動改正是採用 International Earth Rotation Service 的 Bulletin B 公佈值，修正 UTC 與 UT1 之差值，並將坐標值由瞬間極坐標系統修正至 J2000 平均極（CIO）坐標系統。接著利用電碼資料進行測站單點定位及接收儀時鐘改正量計算。計算出的時鐘改正量會在利用相位觀測量進行定位的步驟中被採用，使接收儀之時間能準確至 10^{-6} 至 10^{-7} 秒。下一步，將所有測站依觀測量數目的多寡，選擇兩測站間共同觀測量最多之測站組何組成基線並進行一次差分。再透過三次差分對精密星曆與衛星時錶資料進行資料編修、週波脫落之補正、時錶差修正、錯誤觀測量之移除。最後，將篩選過之相位觀測量，利用無電離層線性組合信號（L3）來解算週波未定值，並組成二次差觀測量以求解坐標參數。為避免低仰角觀測時伴隨之較大雜訊，本計畫僅處理仰角 15°以上的觀測資料。因對流層折射效應對於 GNSS 的高程定位精度有著顯著的影響，本計畫採用 Saastamoinen model（Saastamoinen, 1973），以海平面標準氣象資料推求各測站的對流層改正起始值，並引用大氣資

料進行對流層折射影響量的改正參數。以各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式加以吸收殘留的對流層折射誤差。

由於環境變化與隨機誤差的存在，使得 GNSS 坐標時間序列會呈現離散跳動的型態，因此本計畫採用坐標殘差及均方根誤差分析兩種方式來查核資料計算結果的穩定性。坐標殘差（residual）分析是將各站每次測量所獲得之坐標觀測值與擬合曲線上之坐標計算值相減，將所獲得之坐標殘差值進行統計，在測量學中又稱為外部誤差。在理想狀況下，如果坐標計算成果是穩定的，此殘差值會近乎等於零；均方根誤差（RMS error）分析為針對各測站每次坐標解算時所產生的均方根誤差量進行統計，在測量學中又稱為內部誤差。

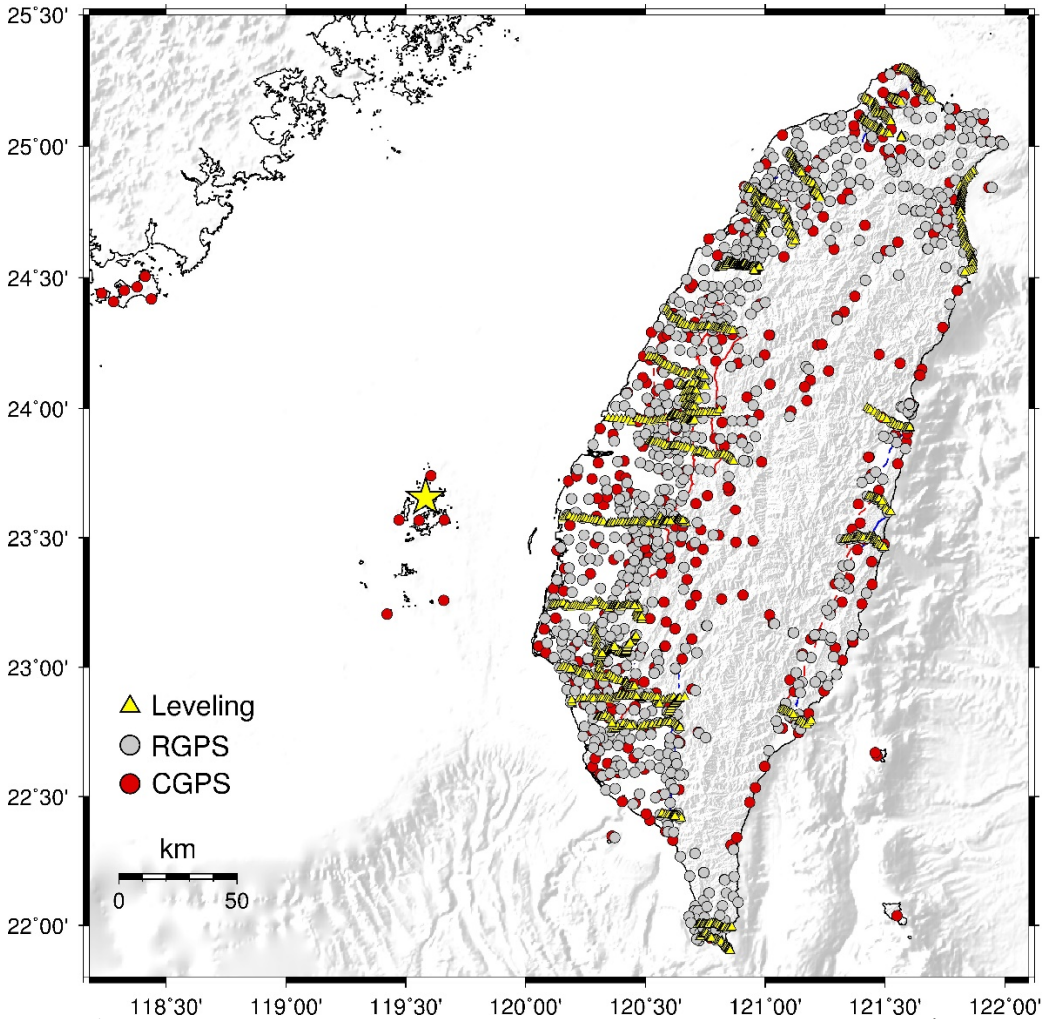


圖 2-2.2：臺灣地殼變形監測網。灰色圓圈為 GNSS 移動站，紅色圓圈為 GNSS 連續站，黃色三角形為精密水準點位，黃色星號為澎湖 S01R 連續站。紅色實線與藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層分布位置。

Figure 2-2.2: Taiwan crustal deformation monitoring network. Grey circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations; Yellow triangles are precise leveling benchmarks; The yellow star is S01R continuous GNSS station. Red solid lines and blue dashed lines represent the active faults reposrted by the CGS.

根據 GNSS 坐標殘差之分布情形指出（圖 2-2.3），2002－2021 年 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.10± 13.9 mm；E 方向為 0.0 ± 20.6 mm；U 方向為-0.2 ± 51.6 mm。而 2002－2021 年平面坐標之均方根誤差平均值為 3.2 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 9.1 mm（圖 2-2.4）。

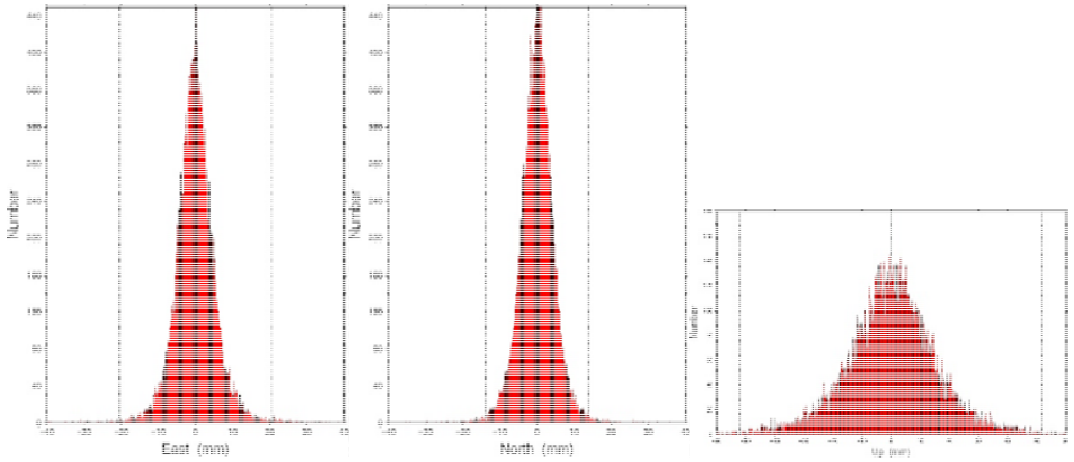


圖 2-2.3：2002－2021 年截至 10 月底 GNSS 點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。
Figure 2-2.3: GNSS coordinates residuals during 2002 – Oct2021. The dashed lines indicate 95% confidence interval.

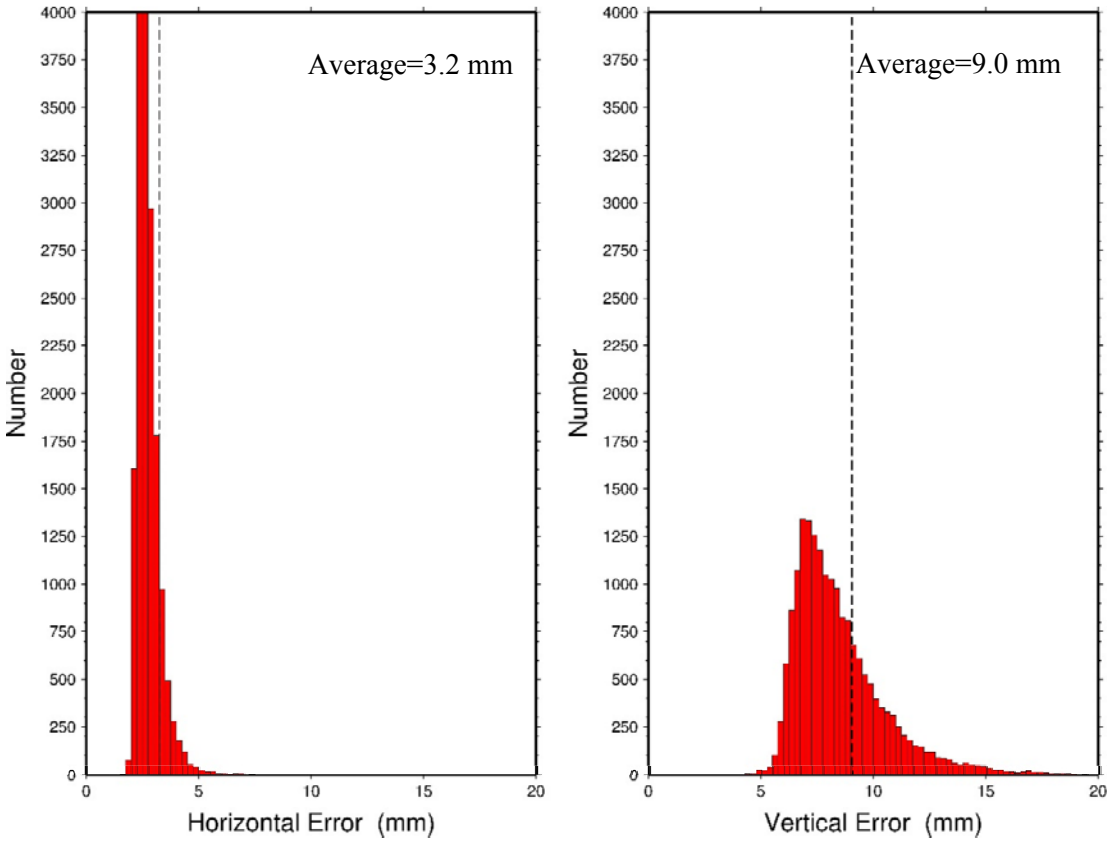


圖 2-2.4：2003－2021 年 GNSS 點位均方根誤差分布圖。
Figure 2-2.4: GNSS RMS error during 2003 – 2021.

2-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析

2-2-3-1 臺北地區 GNSS 監測網

本節針對今年已完成測量之臺北地區（圖 2-2.5）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站 73 點位施測。藉由高時間解析之 GNSS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GNSS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列。

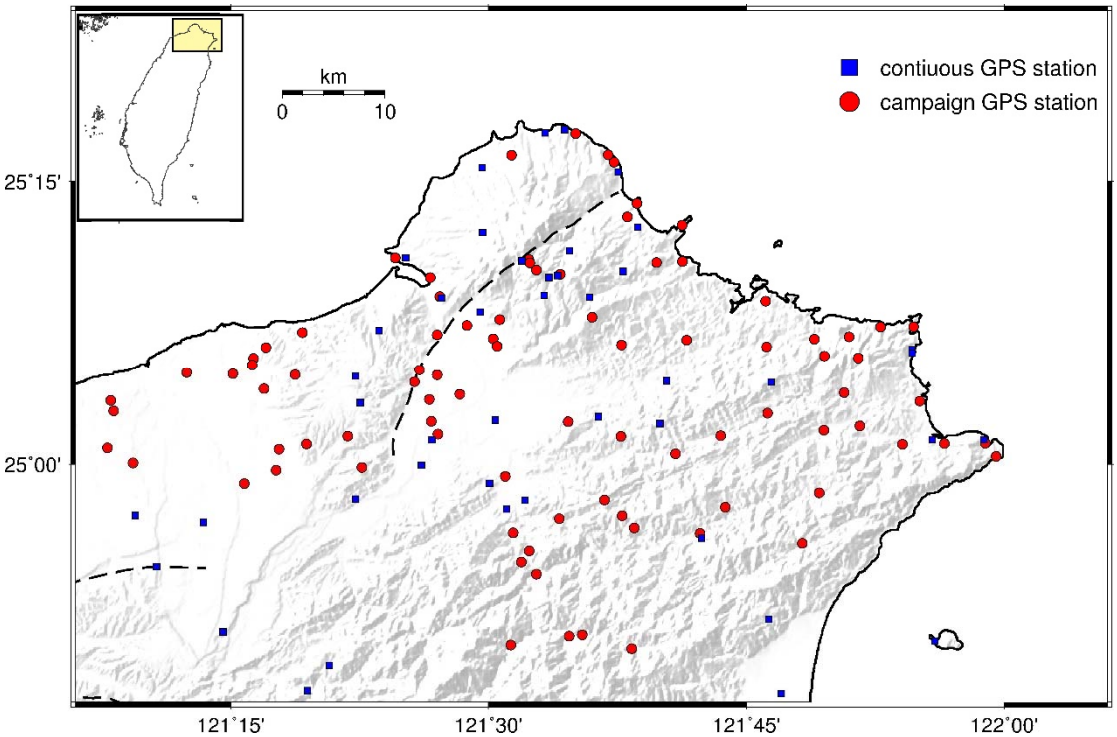


圖 2-2.5：臺北地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.5: GNSS distribution in Taipei area. Blue squares are continuous GNSS stations; Red circles are campaign-mode GNSS stations.

本計畫首先挑選出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站對（圖 2-2.5），進行時間序列結果比較（圖 2-2.6、圖 2-2.7）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GB05 及連續站 YMSM（圖 2-2.6）與 GNSS 移動站 GG44 及連續站 GOLI（圖 2-2.7）。其中 YMSM 為移動站解算中約制站之一， 資料與 IGS 國際連續站資料進行聯合解算，已確認此連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性。藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，臺北地區移動站與連續站坐標時間序列型態皆相符。

臺北地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-2.8 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2021 年之 GNSS 移動站速度場，由結果可知本區速度場 2002－2021 年大致朝東北向運動為主，由南向北略呈順時針旋轉，速度量值集中在 2.3 - 2.6 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-2.9 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10 mm/yr 內。此外，比較山腳斷層兩側之水平速度場指出，斷層東側平行斷層走向分量約為朝北北東 2.0～3.0 mm/yr；斷層西側平行斷層走向分量約為朝北北東 1.0～2.0 mm/yr，故指出該斷層具有左移分量。然而，除了臺北盆地有較明顯的沉陷量，其他跨越山腳斷層之垂直速度場並沒有太顯著的變化。

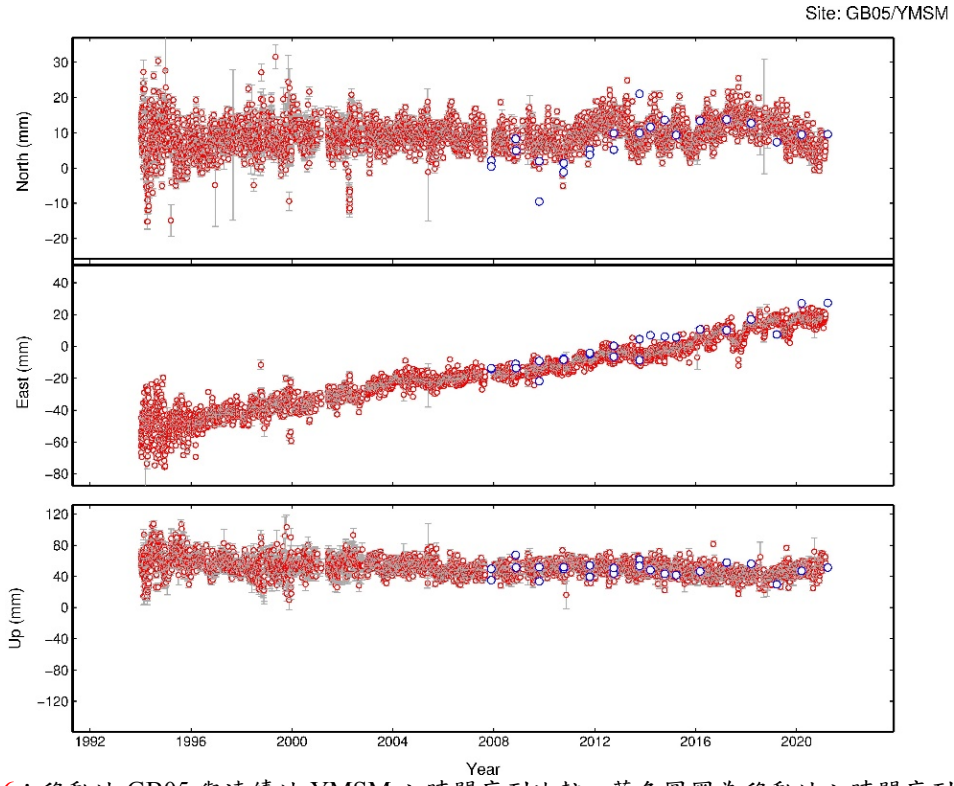


圖 2-2.6：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2-2.6: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GB05 (blue circles) and continuous GNSS station YMSM (red circles).

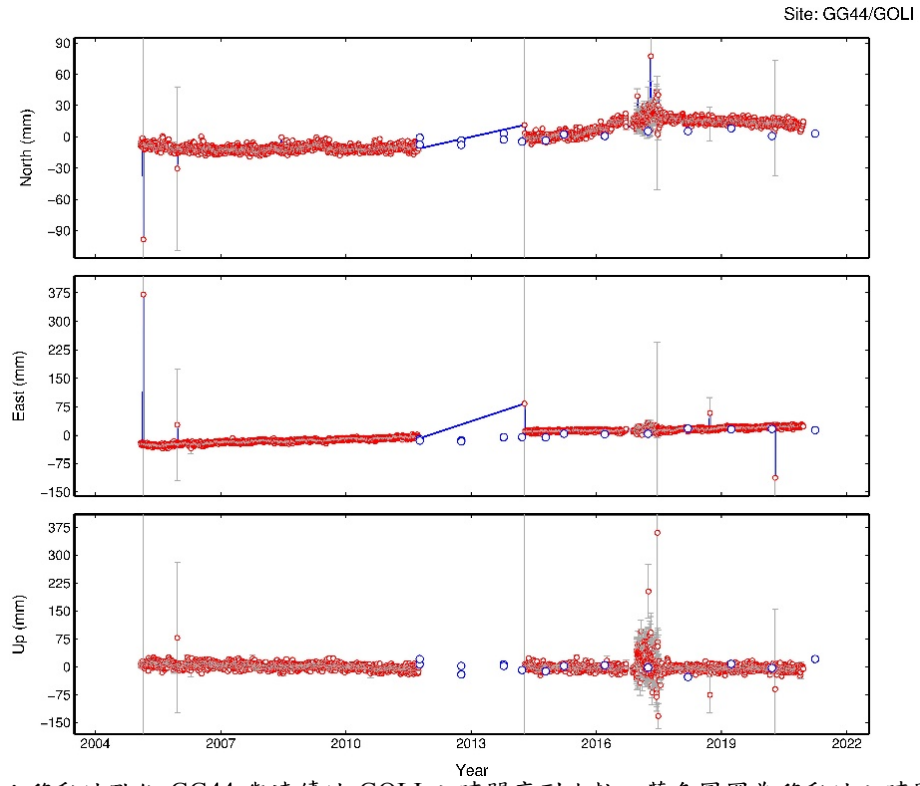


圖 2-2.7：移動站點位 GG44 與連續站 GOLI 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2-2.7: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GG44 (blue circles) and continuous GNSS station GOLI (red circles).

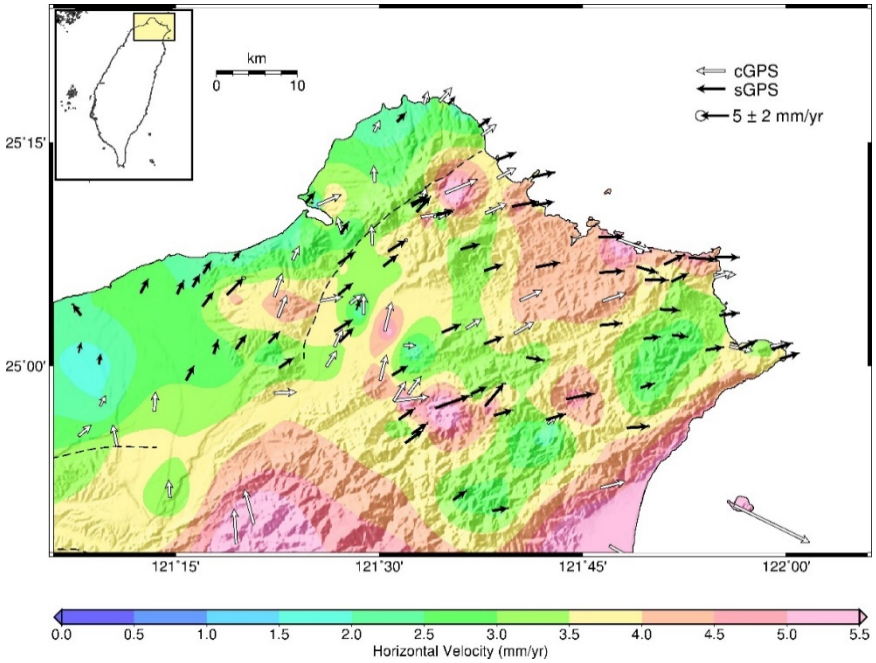


圖 2-2.8：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場，彩色色階為 2002 – 2021 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2-2.8: GNSS horizontal velocity field relative to station S01R in Taipei area. The colored map represents the horizontal velocities from 2004 to 2021. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

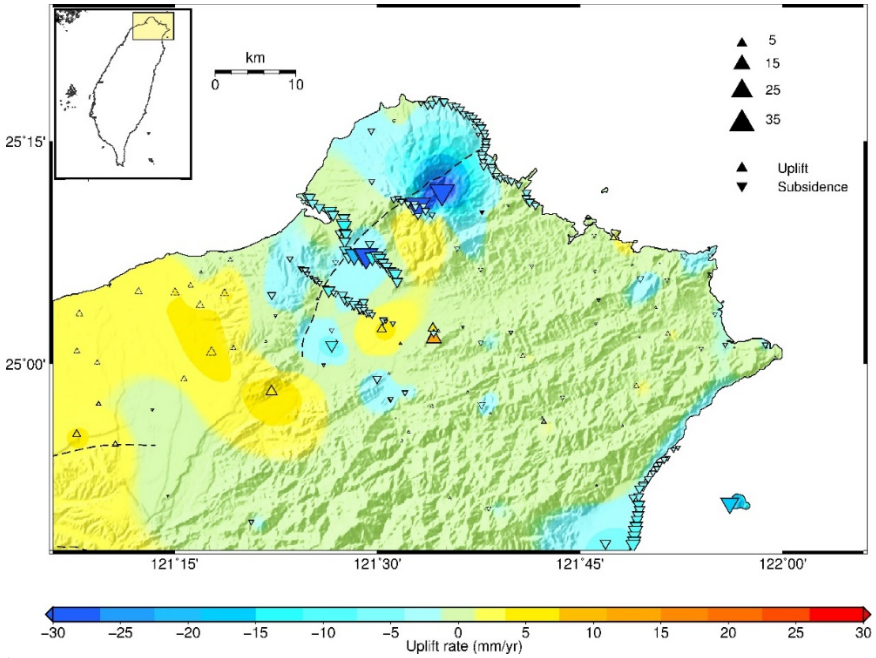


圖 2-2.9：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站、虛線邊框表示 GNSS 連續站，GNSS 觀測時間為 2004 – 2021 年，精密水準觀測時間為 2002 – 2021 年。

圖 2-2.9: Vertical velocity field relative to station S01R in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. The duration of GNSS observation is from 2004 to 2021; while pricise leveling is from 2004 to 2021.

2-2-3-2 恆春地區 GNSS 監測網

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站 40 點（圖 2-2.10），藉由高時間解析之 GNSS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GNSS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列。

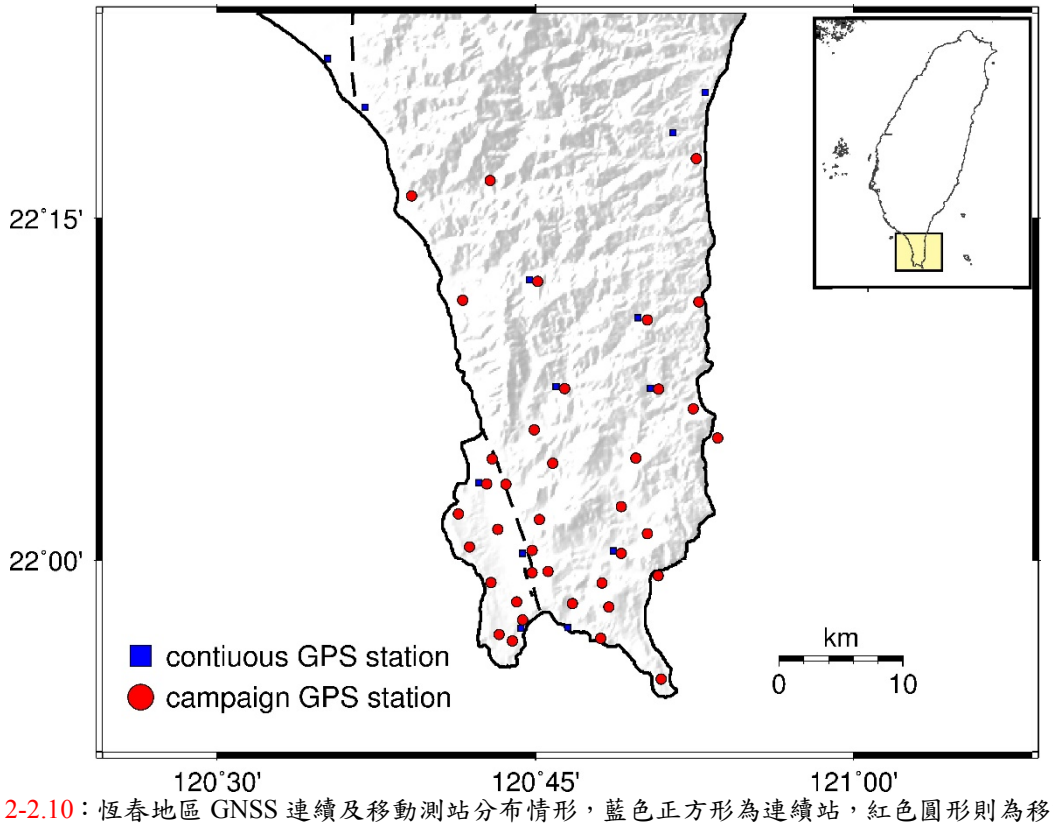


圖 2-2.10：恆春地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.10: GNSS distribution in Hengchun area. Blue triangles are continuous GNSS stations, and red circles are campaign-mode GNSS stations.

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站對（圖 2-2.10），進行時間序列結果比較（圖 2-2.11、圖 2-2.12）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G669 及連續站 HENC（圖 2-2.11）與 GNSS 移動站 G643 及連續站 KDNM（圖 2-2.12）。藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，恆春地區的移動站在水平分量上符合連續站趨勢，然而在高程方向可發現在 2006 年 12 月屏東外海地震之後，移動站坐標時間序列與 HENC 連續站型態分布不同，震前垂直速度值亦有所差異。推測造成高程方向時間序列的差異可能是由於此二測站皆位於斷層帶上，又由於垂直分量之變化對於傾向滑移斷層之活動相當敏感，因此短距離之差異就有可能產生不同之高程變化。另一組之移動站與連續站坐標時間序列型態則相符。

恆春地區各觀測點位之水平速度場（圖 2-2.13）指出，2002 至 2016 年屏東外海地震前之速度場量值為 50.5 – 55.6 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場量值為 48.6 – 54.3 mm/yr， 2010 年中至 2015 年之速度場，速度量值 46.7 – 50.9 mm/yr，2015 年之後之速度場，速度量值 35.7 – 40.6 mm/yr。

恆春地區各觀測點位之垂直速度場（圖 2-2.14）指出，以斷層東邊約兩公里為分界，兩條測線在震後均呈現不同的運動型態，西側為沉陷、東側為抬升。其中較南邊的南樹林至鵝鑾鼻測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為 2.4 mm/yr，2010 年至今的平均速率約為-0.4 mm/yr；較北邊的恆春西台地至佳樂水測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為-10.9 mm/yr，2010 年至今的平均速率約為-0.7 mm/yr，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2021 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

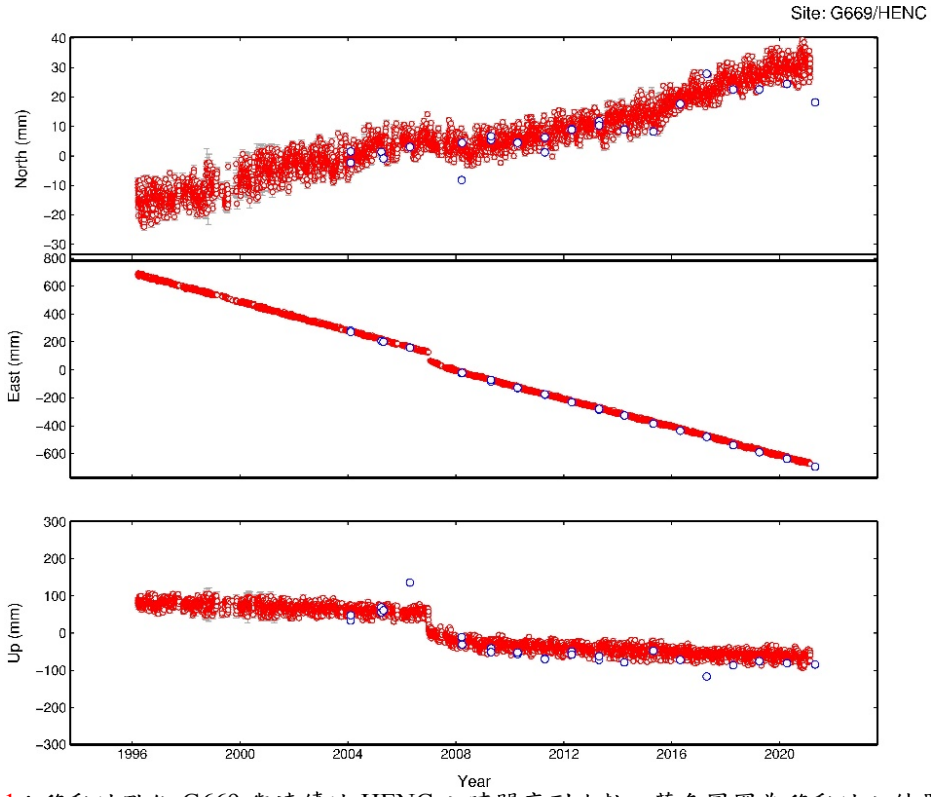


圖 2-2.11：移動站點位 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.11: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G669 (blue circles) and continuous GNSS station HENC (red circles).

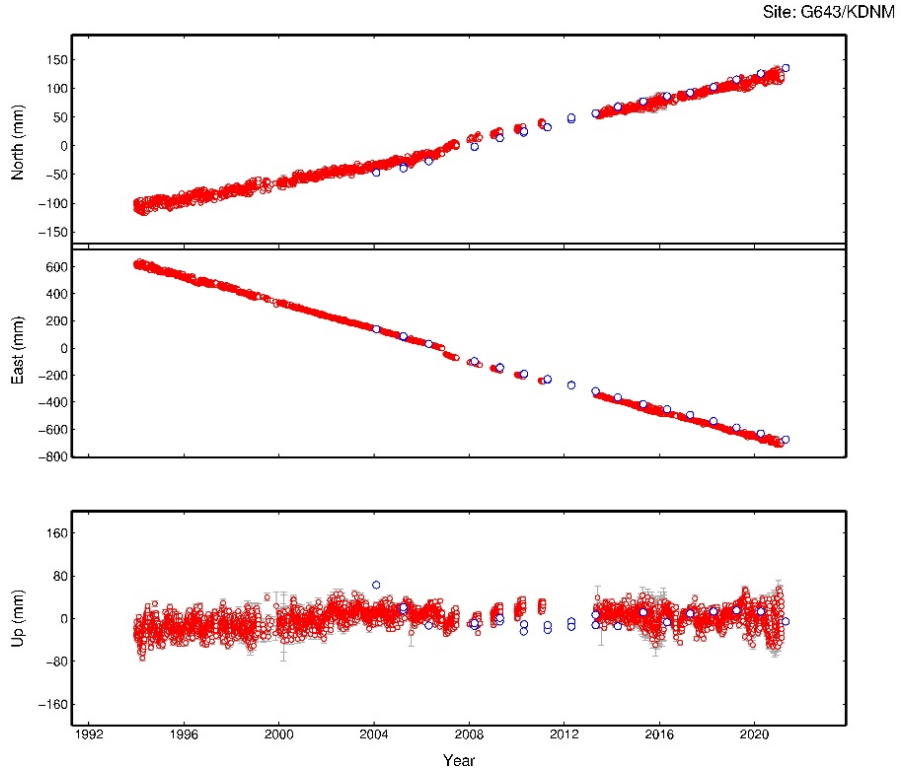


圖 2-2.12：移動站點位 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.12: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G643 (blue circles) and continuous GNSS station KDNM (red circles).

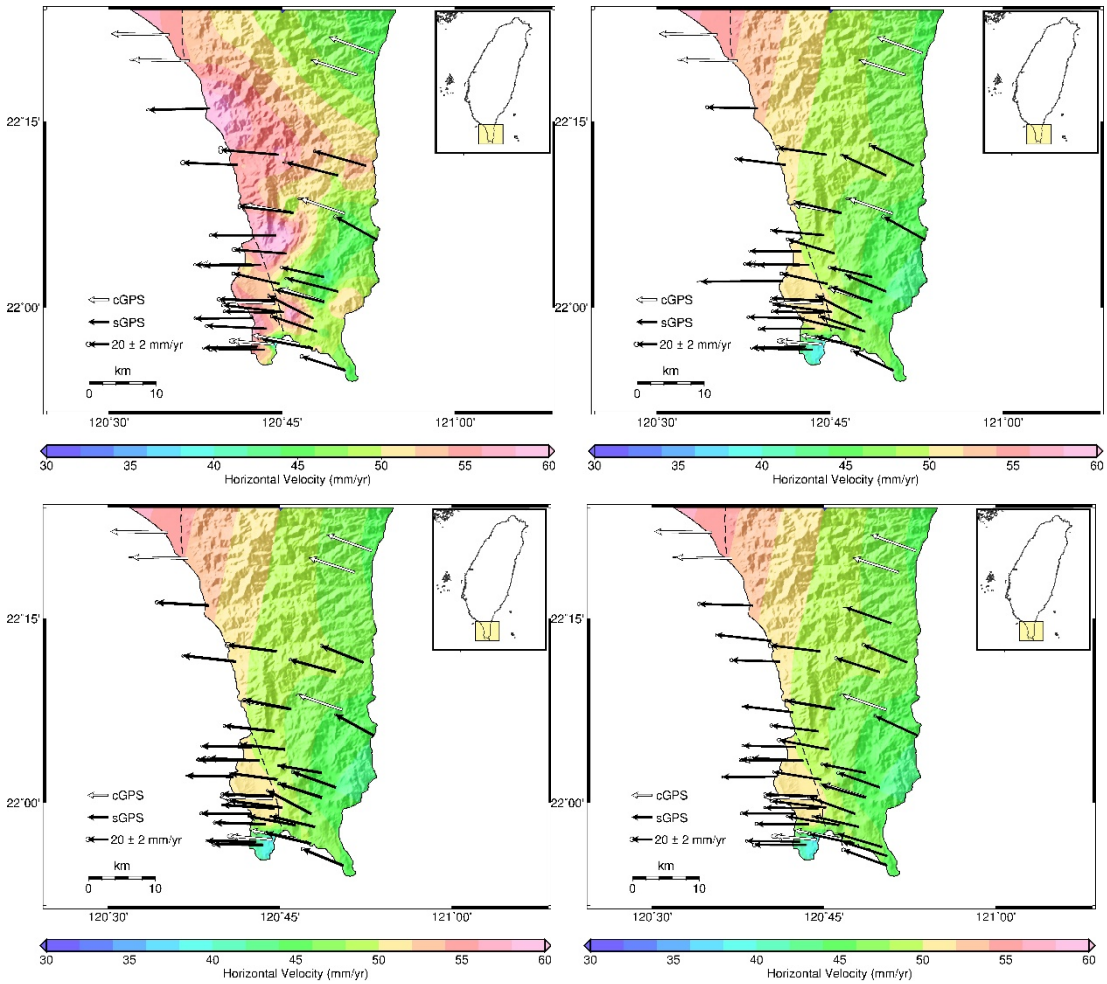


圖 2-2.13：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場。左上表示 2002 至 2006 年屏東外海地震前速度場，右上表示 2006 年震後至 2010 年之速度場，左下表示 2010 年至 2015 年速度場，右下為 2015 年至 2021 年速度場。

Figure 2-2.13: GNSS horizontal velocity field relative to station S01Rin Hengchun area. The top left figure is the velocity field from 2002 to 2006 Pingtung offshore earthquake; the top right one is velocity field from 2006 event to 2010; the bottom left is the 2010 – 2015 velocity field; th bottom right is the 2015 – 2021 velocity field.

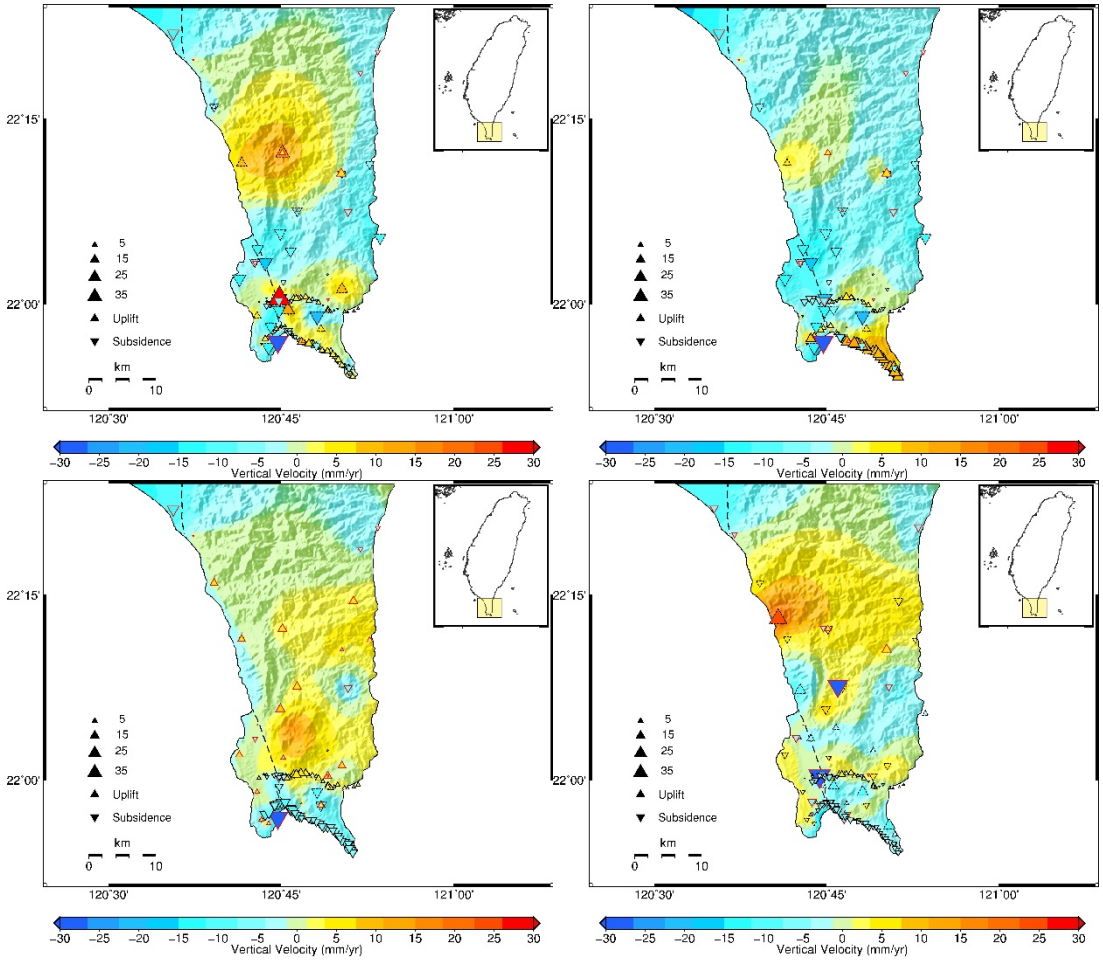


圖 2-2.14：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，左上表示 2002 至 2006 年屏東外海地震前速度場，右上表示 2006 年震後至 2010 年之速度場，左下表示 2010 年至 2015 年速度場，右下為 2015 年至 2021 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 2-2.14: Vertical velocity relative to station S01R in Hengchun area. The top left figure is the velocity field from 2002 to 2006 Pingtung offshore earthquake; the top right one is velocity field between 2006 event and 2010; the bottom left is the 2010 – 2015 velocity field; the bottom right is the 2015 – 2021 velocity field. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling is shown in dark frame; campaign-mode GNSS is shown in green frame; continuous GNSS is shown in red frame.

2-2-3-3 桃竹苗地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之桃竹苗地區觀測資料進行分析，截至 5 月底為止完成 GNSS 移動站 98 點（圖 2-2.15）。藉由高時間解析之 GNSS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GNSS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列。

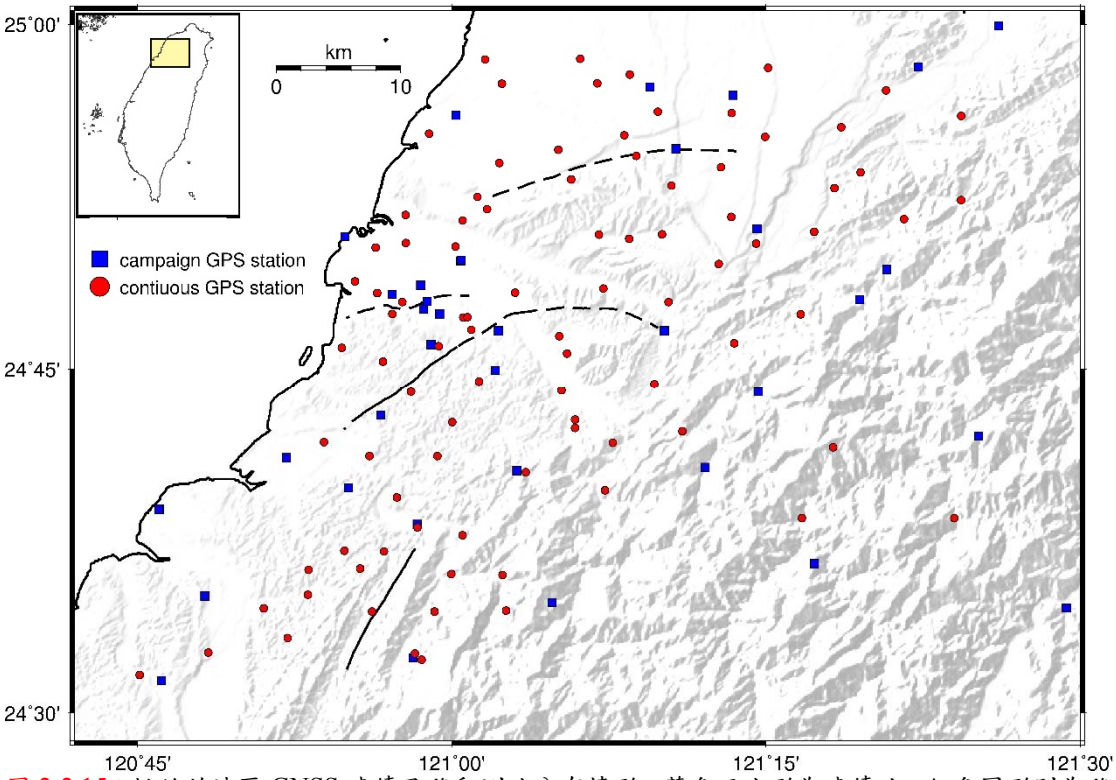


圖 2-2.15：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.15: GNSS distribution in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

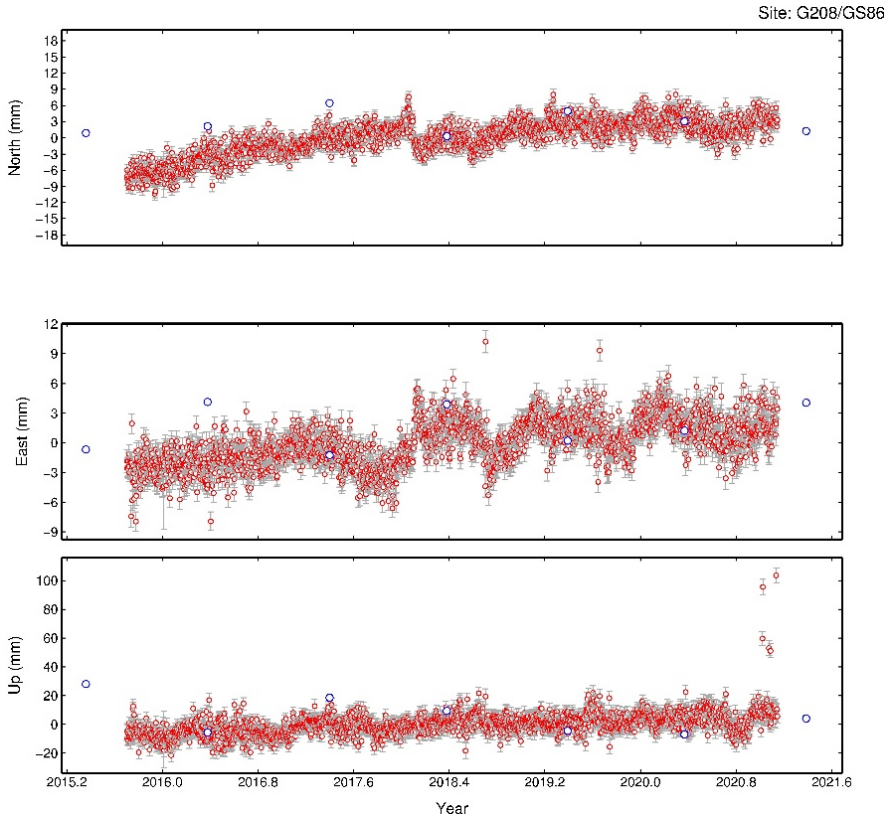


圖 2-2.16：移動站點位 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 2-2.16: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G208 (blue circles) and continuous GNSS station GS86 (red circles).

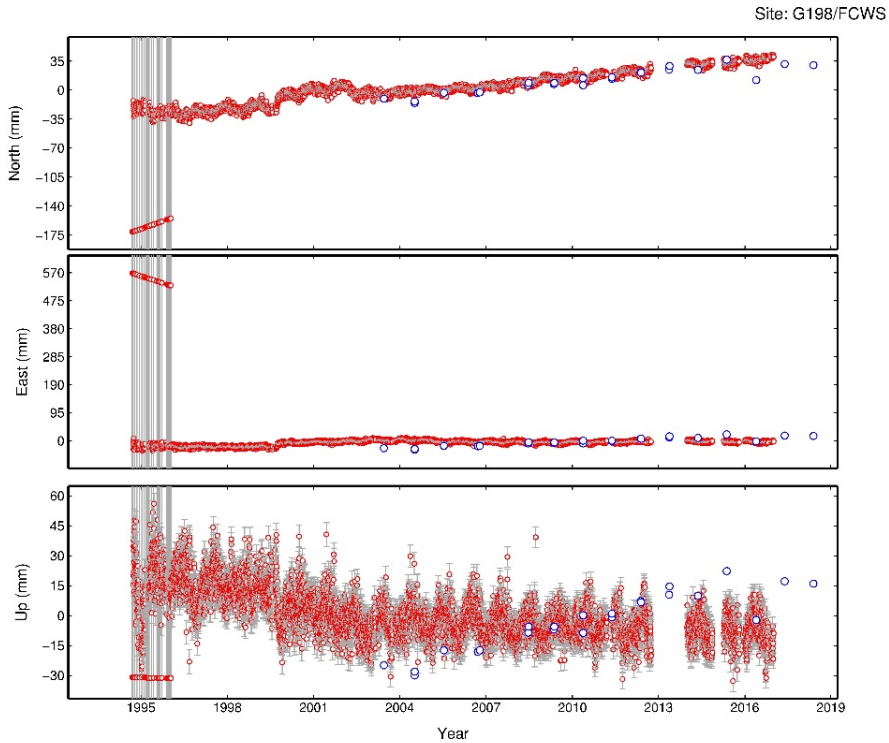


圖 2-2.17：移動站點位 G198 與連續站 FCWS 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.17: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G198 (blue circles) and continuous GNSS station FCWS (red circles).

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站對（圖 2-2.15），進行時間序列結果比較（圖 2-2.16、圖 2-2.17）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G208 及連續站 GS86（圖 2-2.16）與 GNSS 移動站 G198 及連續站 FCWS（圖 2-2.17）。藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，桃竹苗地區移動站與連續站坐標時間序列型態大致相符。

桃竹苗地區各觀測點位相對於 S01R 測站之水平速度場（圖 2-2.18）指出，本區於 2002－2021 年間朝西北向運動，速度量值約為 3.4－5.5 mm/yr。

相對於 S01R 測站之垂直速度場（圖 2-2.19）指出，本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 8.0 mm/yr 內。

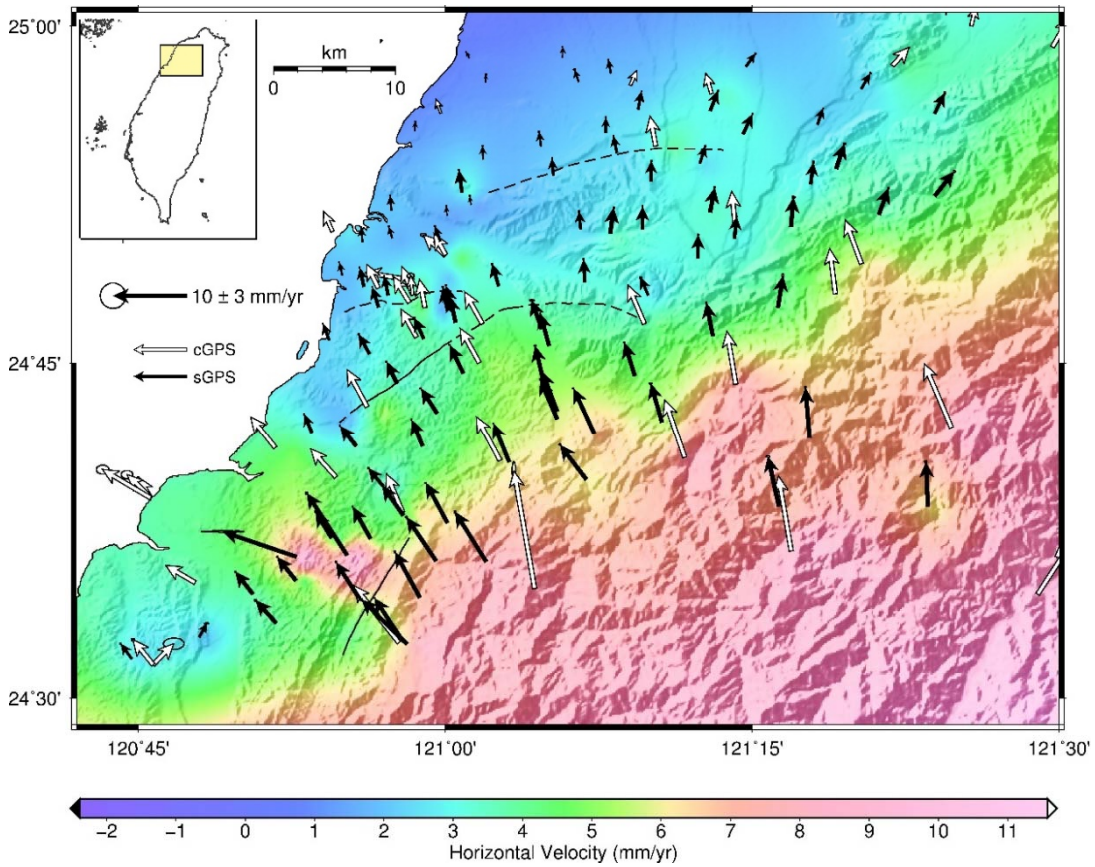


圖 2-2.18：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場，彩色色階為 2002 – 2021 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2-2.18: GNSS horizontal velocity field relative to station S01R in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. The colored map represents the horizontal velocities from 2002 to 2021. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

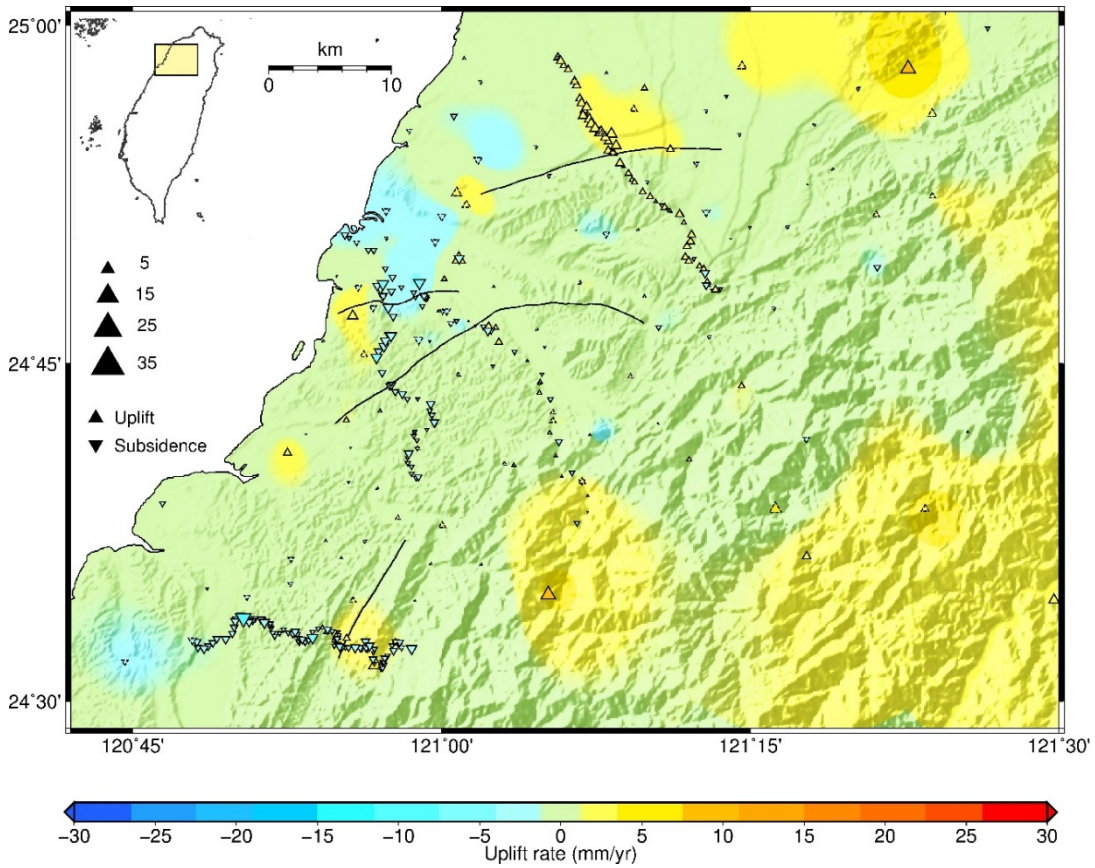


圖 2-2.19：桃竹苗地區 2002 – 2021 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站、虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2-2.19: Vertical velocity field relative to station S01R in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2021. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-4 嘉南地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GNSS 移動站 165 點（圖 2-2.20），以及 5 條精密水準測線之施測。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2-2.21、圖 2-2.22）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G390 及連續站 GS88（圖 2-2.21）與 GNSS 移動站 G392 及連續站 SHWA（圖 2-2.22），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，高屏地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，嘉南地區移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2021 年三個時間段分別估算速度場。嘉南地區各觀測點位之速度場如圖 2-2.23 和圖 2-2.24，相對於 S01R 測站，嘉南地區的水平運動方向呈順時針旋轉，而越往嘉南平原其水平速度量值則越小。雲林沿海一帶沉降速度最大達到 30.0 mm/yr，推測與超抽地下水導致地層下陷有關，而嘉義地區在沿海一帶的垂直沉降速度也達到 15.0 至 20.0 mm/yr，進入嘉南地區的山區則有約 3.0 mm/yr 的抬升速度。台南地區之沿海亦呈現約 10.0 mm/yr 之平均沉陷速率，山區則有約 7.0 mm/yr 的平均抬升速率。善化-關廟地區之垂直速度約在 0.0 至 4.0 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20.0 mm/yr 的抬升速度。

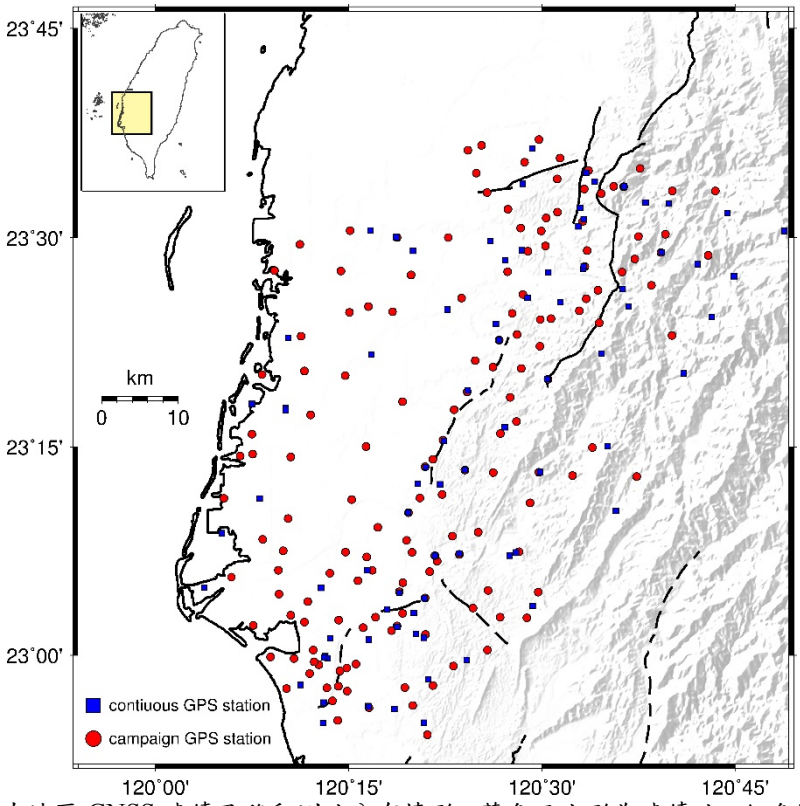


圖 2-2.20：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.20: GNSS distribution in the Chiayi, Tainan areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

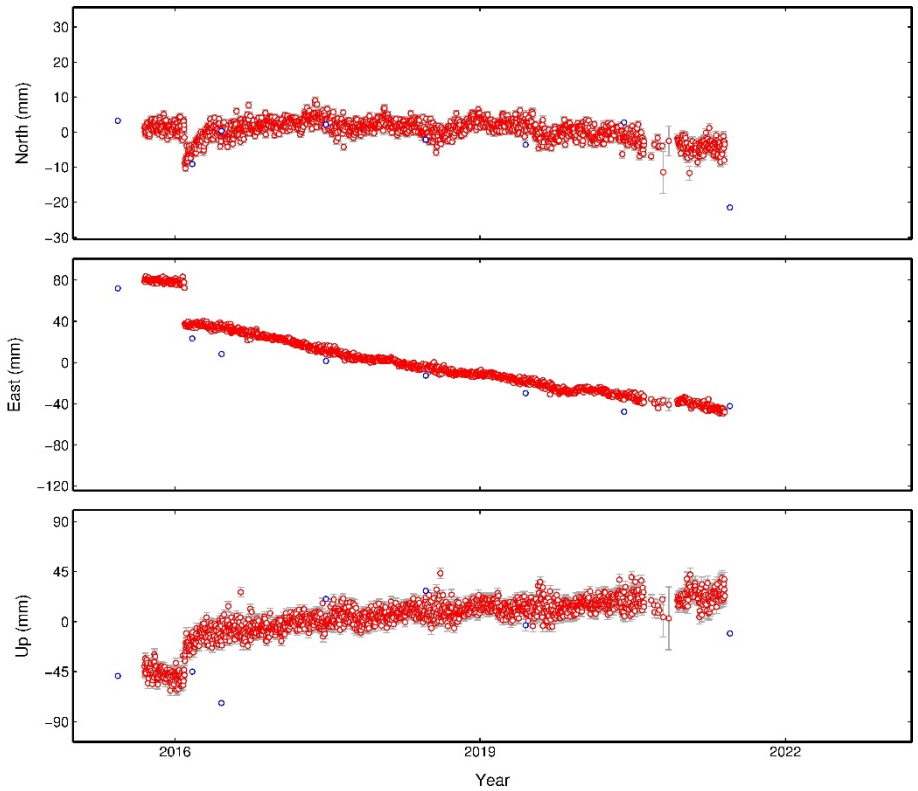


圖 2-2.21：移動站點位 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.21: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G390(blue circles) and continuous GNSS station GS88 (red circles).

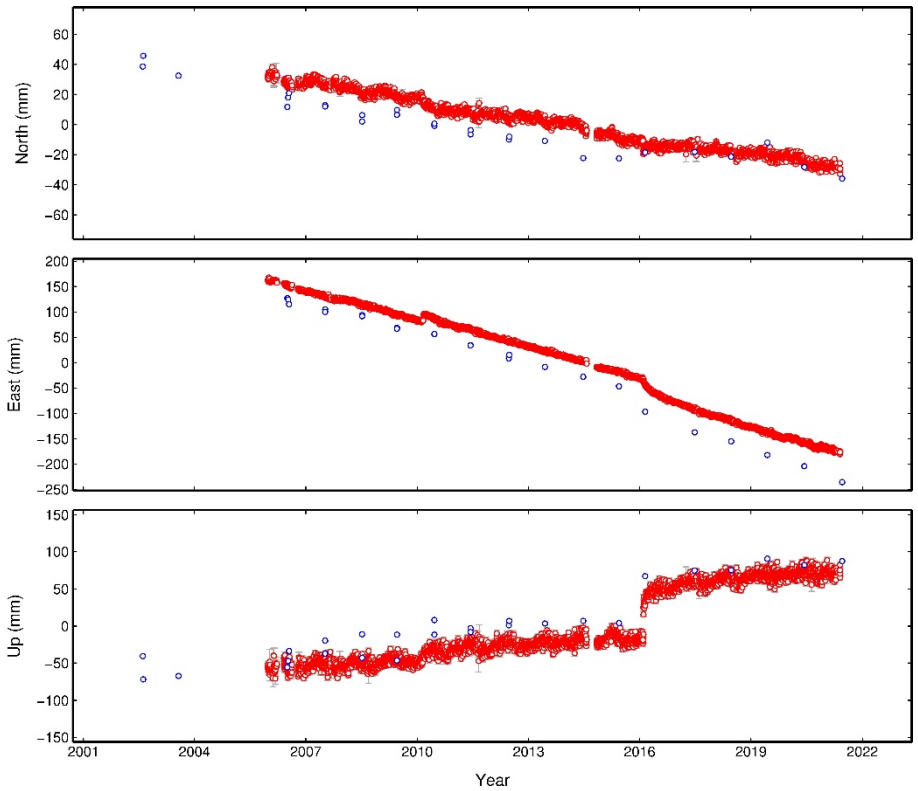


圖 2-2.22：移動站點位 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.22: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G392 (blue circles) and continuous GNSS station SHWA (red circles).

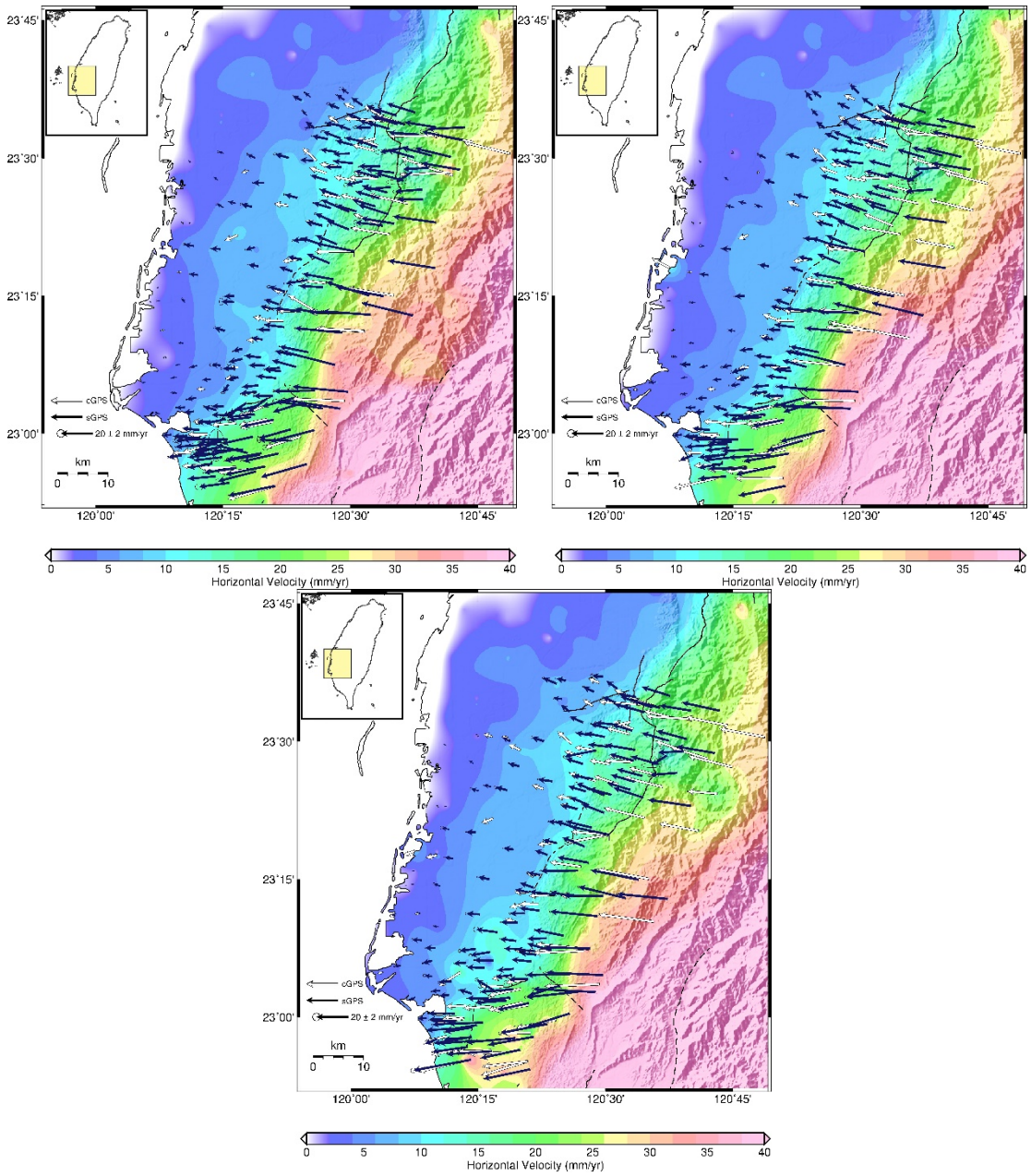


圖 2-2.23：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，彩色色階為速度場分布色階圖。，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2021 年速度場。

Figure 2-2.23: Chiayi, Tainan areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity. The left figure is the velocity field from 2002-2010; while the right one is from 2010-2016; The down figure is the velocity field from 2016-2021.

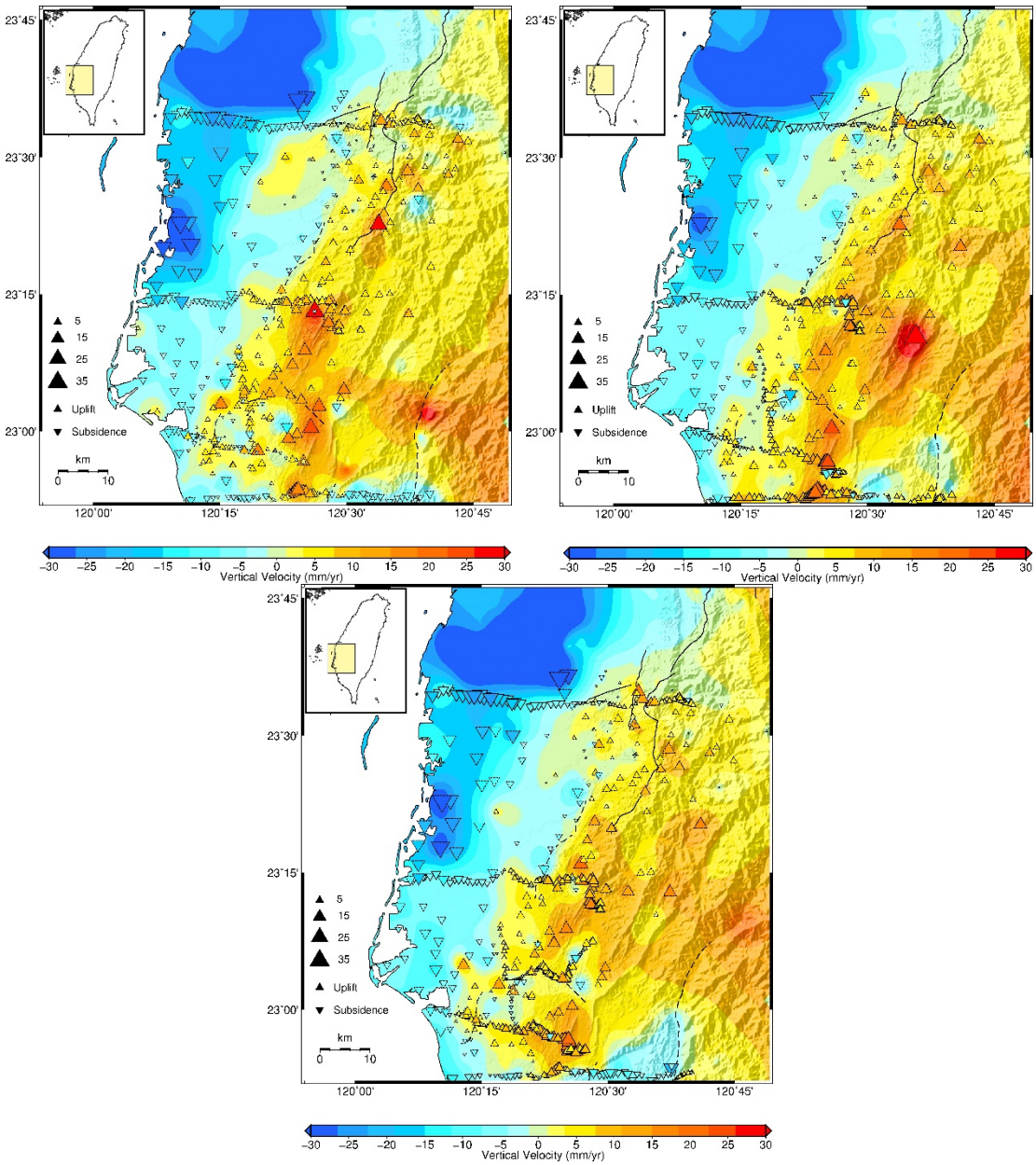


圖 2-2.24：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2021 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站；虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2-2.24: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (Left figure) and 2010-2016 (Right figure) and 2016-2021 (Down figure) in Chiayi, Tainan areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame.

2-2-3-5 高屏地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GNSS 移動站 99 點（圖 2-2.25），以及 3 條精密水準測線之施測。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2-2.26、圖 2-2.27）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GC48 及連續站 CHIE（圖 2-2.26）與 GNSS 移動站 G003 及連續站 GS56（圖 2-2.27），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，高屏地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

高屏地區各觀測點位之速度場如圖 2-2.28 和圖 2-2.29，因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2021 年三個時間段分別估算速度場。高屏地區的各觀測點位相對於 S01R 測站之水平速度場（圖 2-2.28）指出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近乎無差異。在垂直速度場部分（圖 2-2.29），高屏地區沿海地區以沉降速率為主，而旗山斷層周遭有 5 至 15 mm/yr 的抬升速度，小崗山斷層於 2010 甲仙地震後周遭型態有約 0 至 5 mm/yr 的沉降速率。屏東地區在潮州斷層以西約有約 10 至 20 mm/yr 的沉陷速度，東側周遭則有約 5 至 10 mm/yr 的抬升速度。

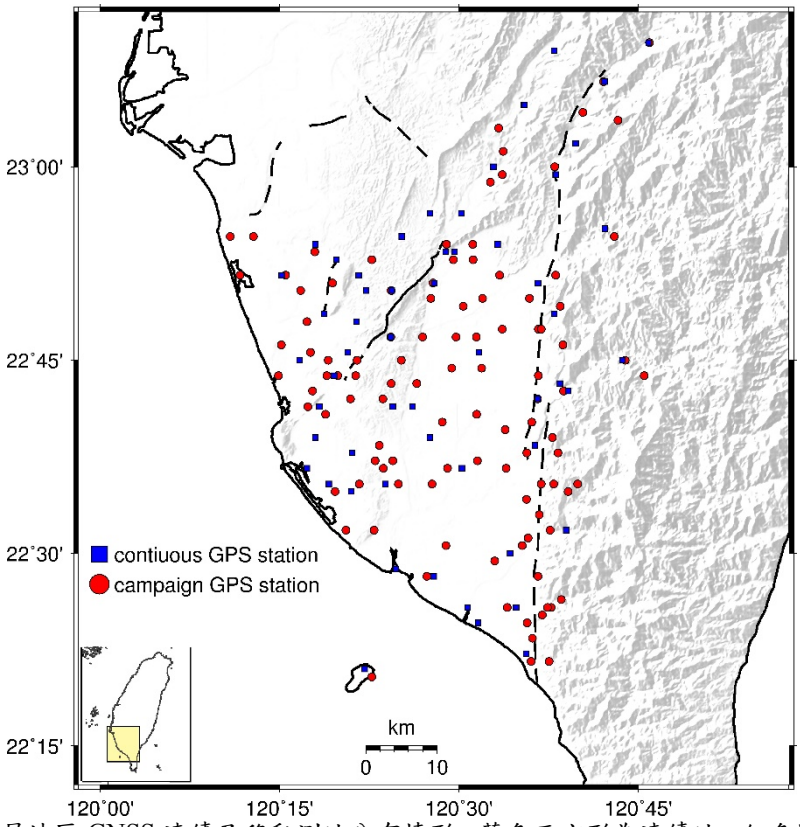


圖 2-2.25：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.25: GNSS distribution in the Kaohsiung and Pingtung areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

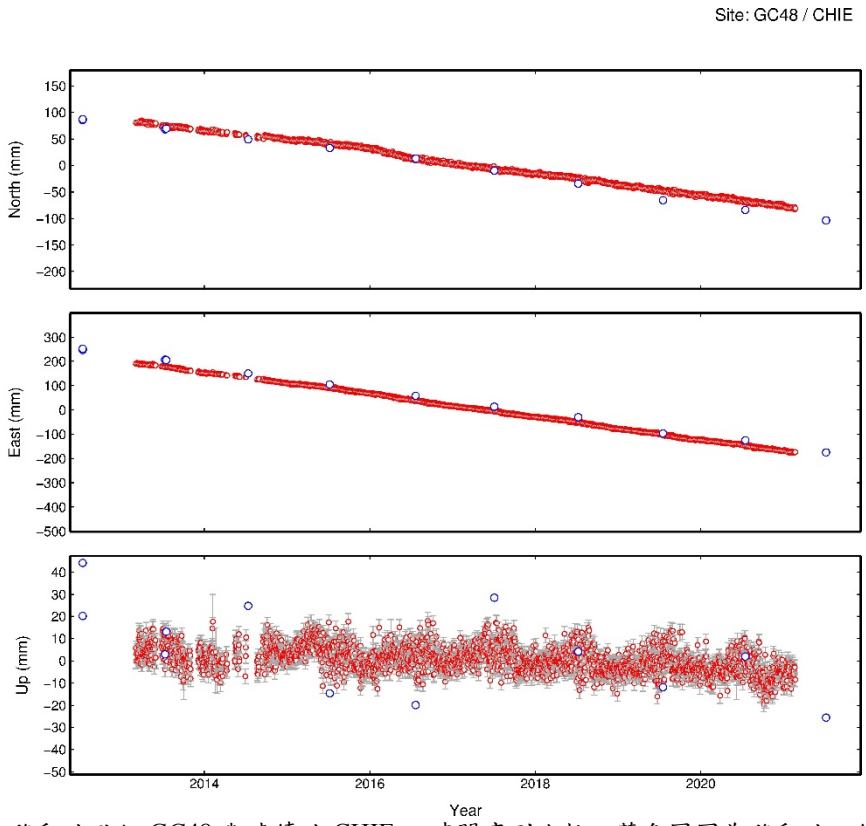


圖 2-2.26：移動站點位 GC48 與連續站 CHIE 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 2-2.26: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GC48 (blue circles) and continuous GNSS station CHIE (red circles).

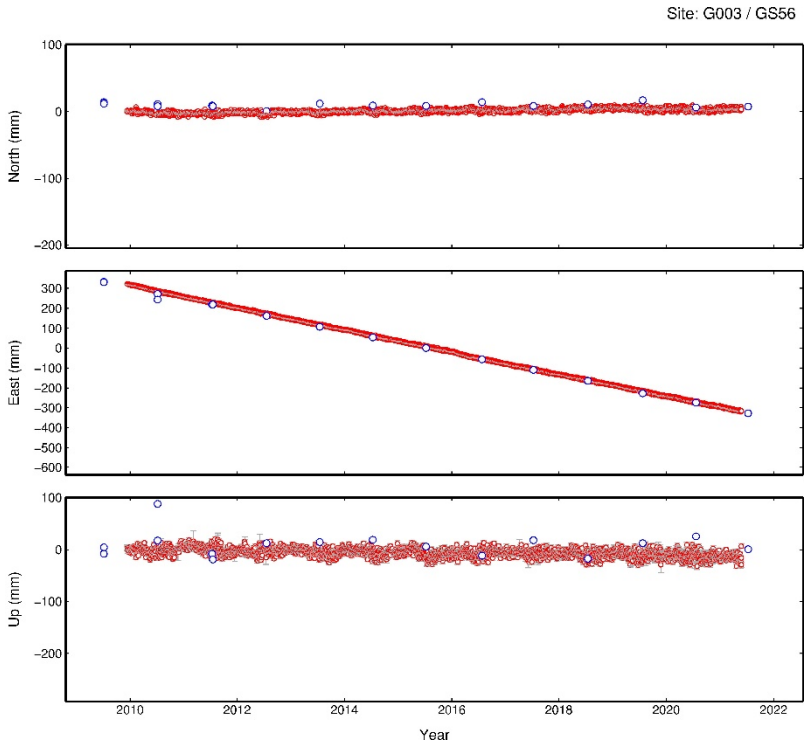


圖 2-2.27：移動站點位 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.27: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G003 (blue circles) and continuous GNSS station GS56 (red circles).

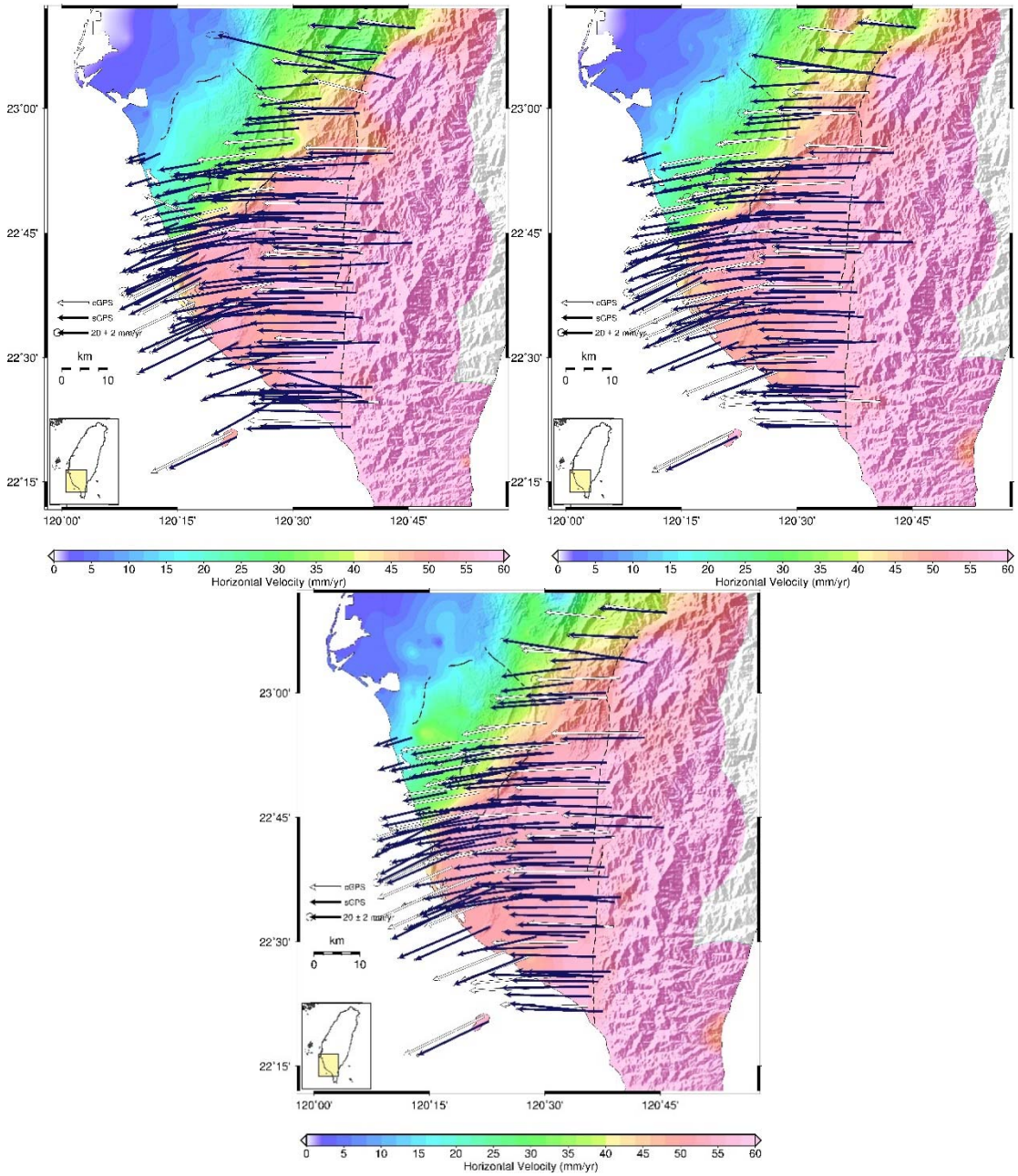


圖 2-2.28：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2021 年速度場。

Figure 2-2.28: Kaohsiung and Pingtung areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The left figure is the velocity field from 2002-2010; while the right one is from 2010-2016; The down figure is the velocity field from 2016-2021.

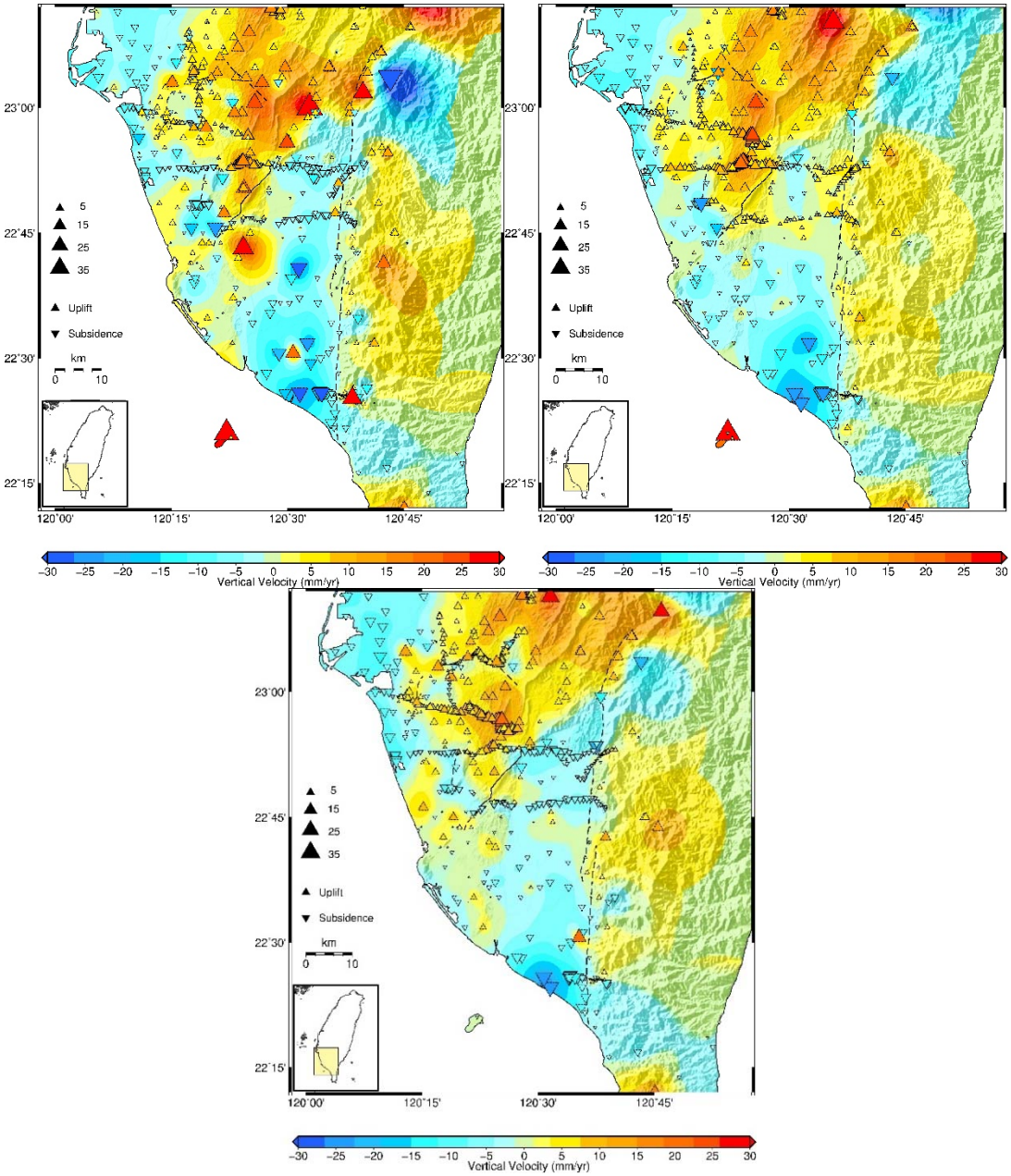


圖 2-2.29：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2021 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準；虛線邊框表示 GNSS 移動站、連續站。

Figure 2-2.29: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (Left figure) and 2010-2016 (Right figure) and 2016-2021 (Down figure) in Kaohsiung and Pingtung areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode and continuous GNSS shows in dotted line frame.

2-2-3-6 中部地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之中部地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GNSS 移動站 149 點（圖 2-2.30），以及 5 條精密水準測線之施測。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2-2.31、圖 2-2.32）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 AF24 及連續站 FNGU（圖 2-2.31）與 GNSS 移動站 G964 及連續站 YUNL（圖 2-2.32），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，中部地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

中部地區各觀測點位之速度場如圖 2-2.33 和圖 2-2.33，因 2007 年時間序列可看出有速度轉折，而 2013 年 6 月 ML 6.5 之南投地震，改變了本地區之速度場。因此在估算臺灣中部地區速度場時，本研究將速度場區分為 2002－2007 年、2007－2013 年以及 2013－2021 年三個時間段分別估算速度場。

中部地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-2.33 所示，由結果可知本區速度大致朝西北向運動，2004-2013 年速度約為 3.8 ~ 10.9 mm/yr，2013-2021 年速度約為 3.4 ~ 10.7 mm/yr。

垂直速度場如圖 2.34，台中地區跨斷層之垂直速度並無明顯變化。彰化、雲林地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，沉降速度值約為最大 35.0 mm/yr，進入南投山區則呈抬升，最大速度值達到約 10.0 mm/yr。

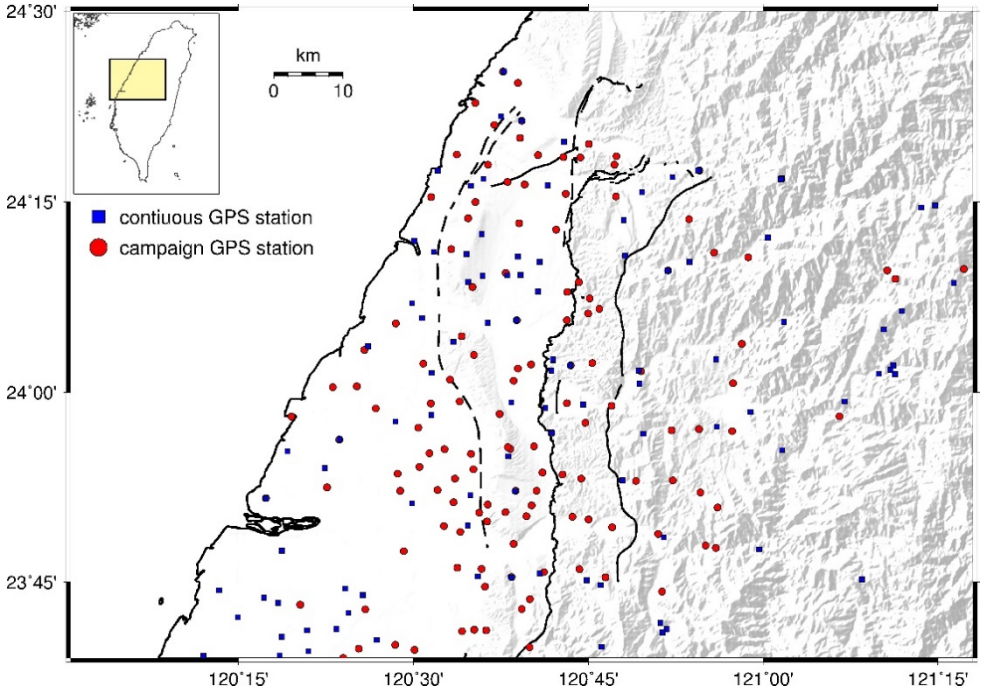


圖 2-2.30：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.30: GNSS distribution in the Central Taiwan areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

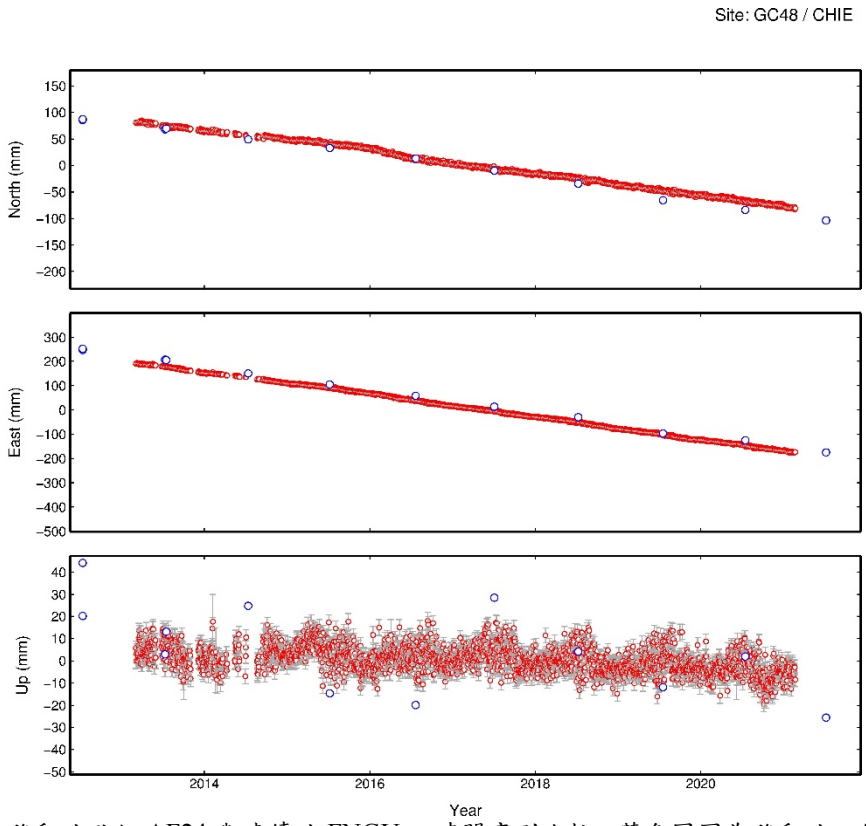


圖 2-2.31：移動站點位 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 2-2.31: Time series comparison between campaign-mode GNSS station AF24 (blue circles) and continuous GNSS station FNGU (red circles).

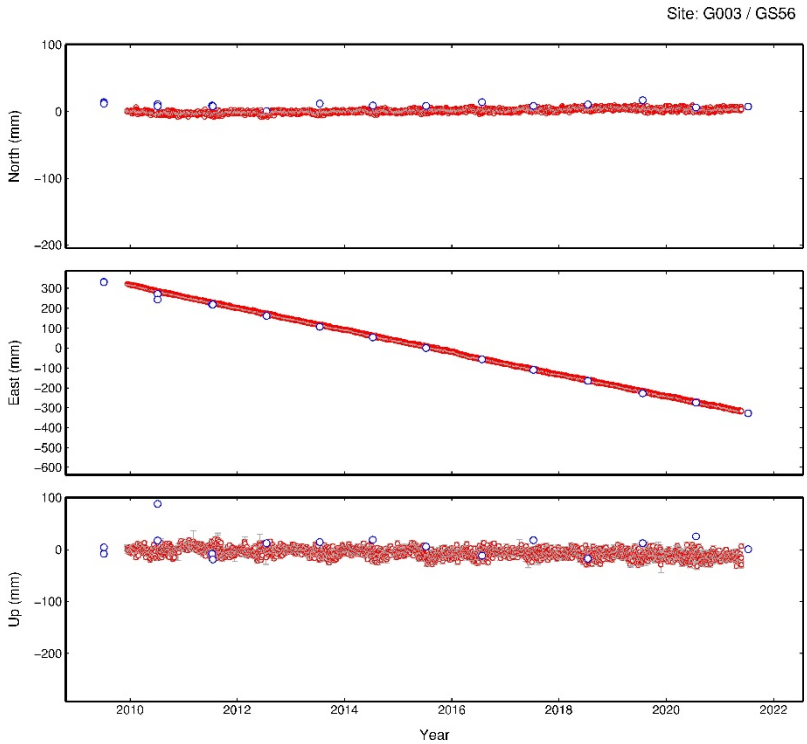


圖 2-2.32：移動站點位 G964 與連續站 YUNL 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.32: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G964 (blue circles) and continuous GNSS station YUNL (red circles).

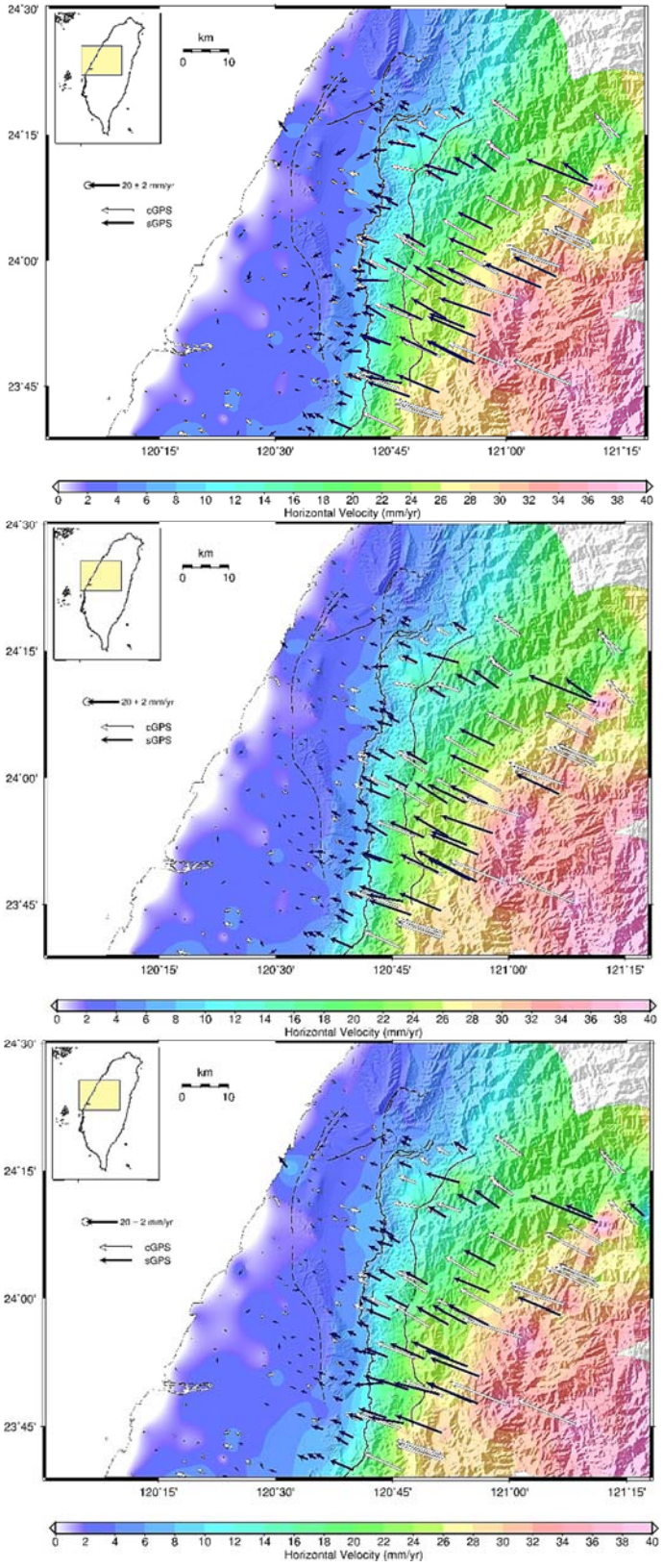


圖 2-2.33：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，上圖表示 2004-2007 年速度場，下圖表示 2007-2013 年速度場，下圖表示震後 2013-2021 年速度場。

Figure 2-2.33: Central Taiwan areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figure is the velocity field from 2004-2007; the middle one is from 2007-2013; while the bottom one is from 2013-2021.

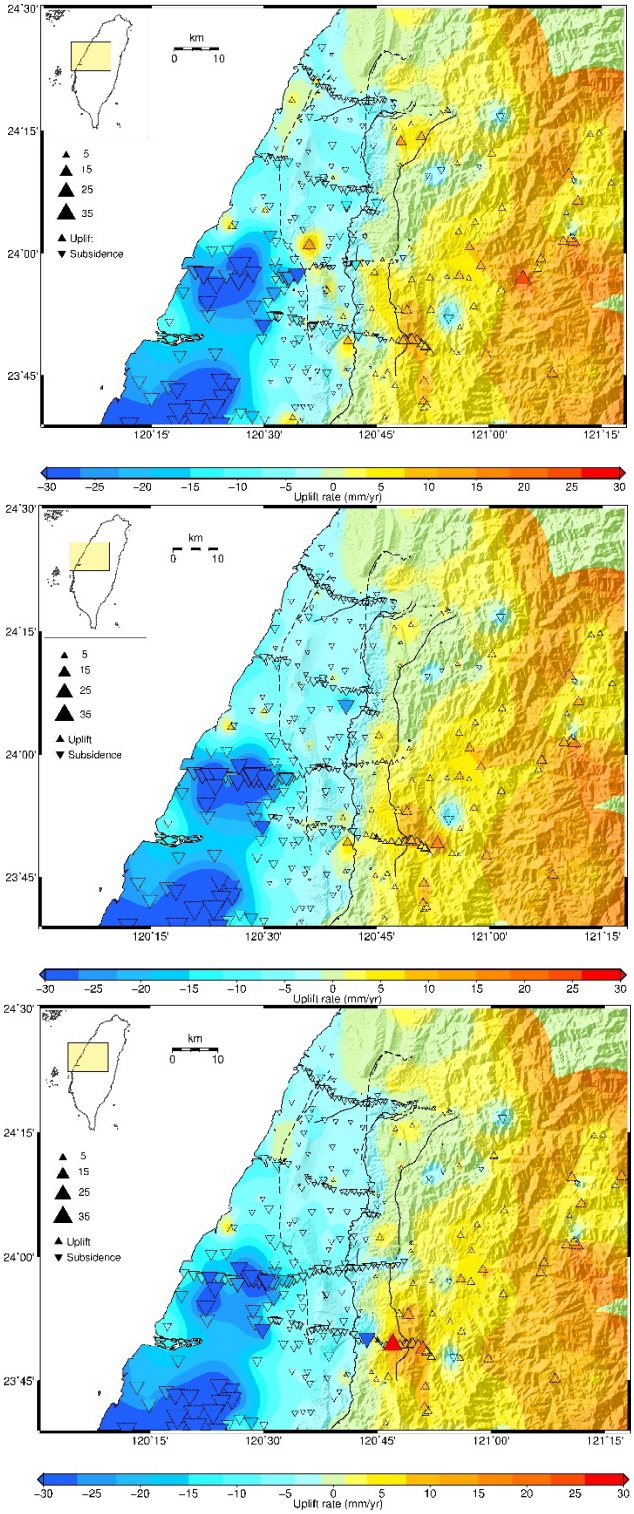


圖 2-2.34：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。左上圖表示 2004-2007 年速度場，下圖表示 2007-2013 年速度場，下圖表示震後 2013-2021 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準；虛線邊框表示 GNSS 移動站、連續站。

Figure 2-2.34: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Central Taiwan. The top figure is the velocity field from 2004-2007; the middle one is from 2007-2013; while the bottom one is from 2013-2021.

. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode and continuous GNSS shows in dotted line frame.

2-2-3-7 花東地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之花東地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GNSS 移動站 101 點（圖 2-2.35），以及 4 條精密水準測線之施測。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2-2.36、圖 2-2.37）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GE64 及連續站 PEPU（圖 2-2.36）與 GNSS 移動站 E415 及連續站 NDH3（圖 2-2.37），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，花東地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

花東地區各觀測點位之速度場如圖 2-2.38 和圖 2-2.39， 2013 年之瑞穗地震、2018 年之花連地震，改變了本地區之速度場。因此在估算臺灣花東地區速度場時，本研究將速度場區分為 2002－2013 年、2013－2018 年以及 2018－2021 年三個時間段分別估算速度場。

花東地區各觀測點位之速度場如圖 2-2.38 和圖 2-2.39，花東地區的水平速度相對於 S01R 測站，大致呈現往西北 50 ~ 80 mm/yr 速度運動，在池上斷層東西側也有約 10 mm/yr 的水平速度落差。從垂直方向的速度場可觀察到跨池上斷層的兩側有不同的運動方向，東側約有 10mm/yr 的抬升速度，而西側約有 10 mm/yr 的沉降速度。

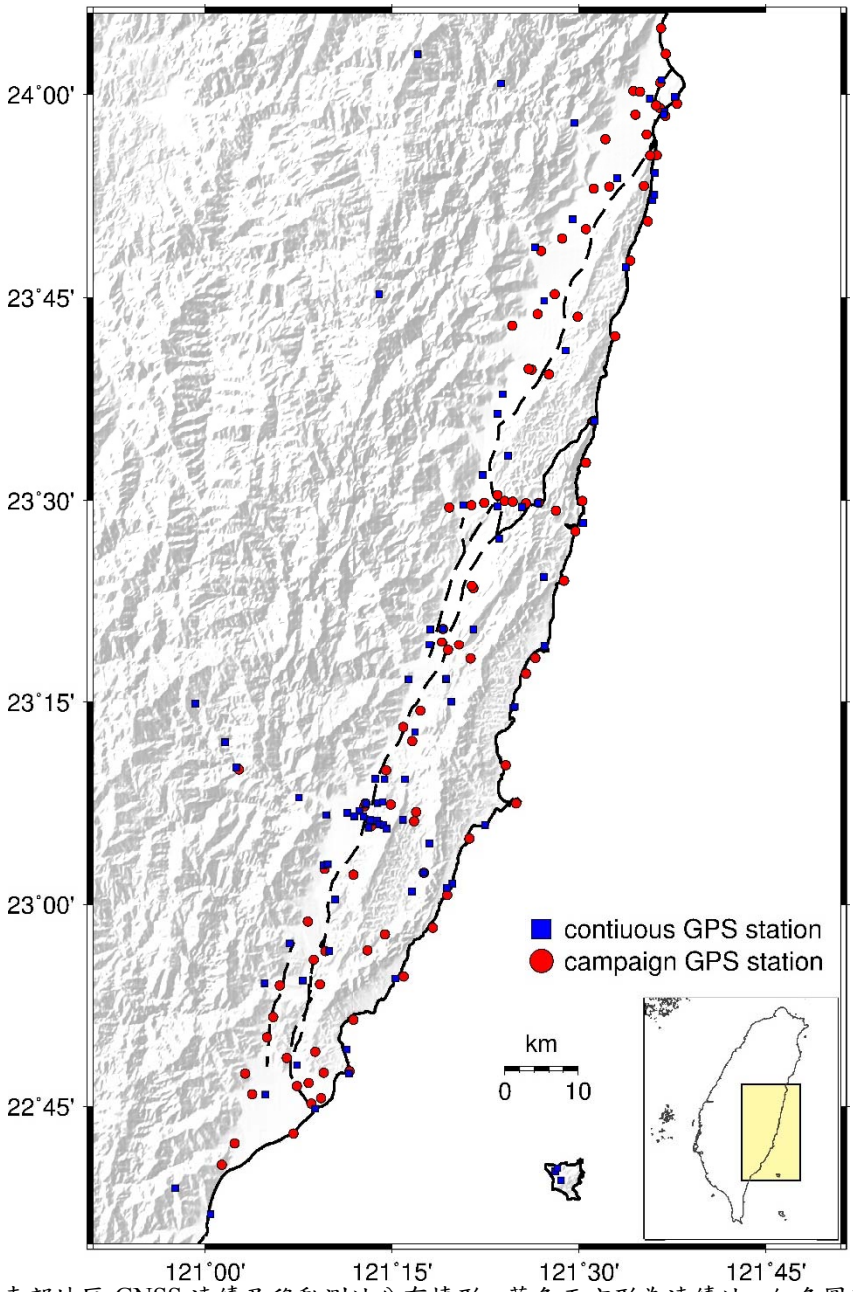


圖 2-2.35：東部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.35: GNSS distribution in the Eastern areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

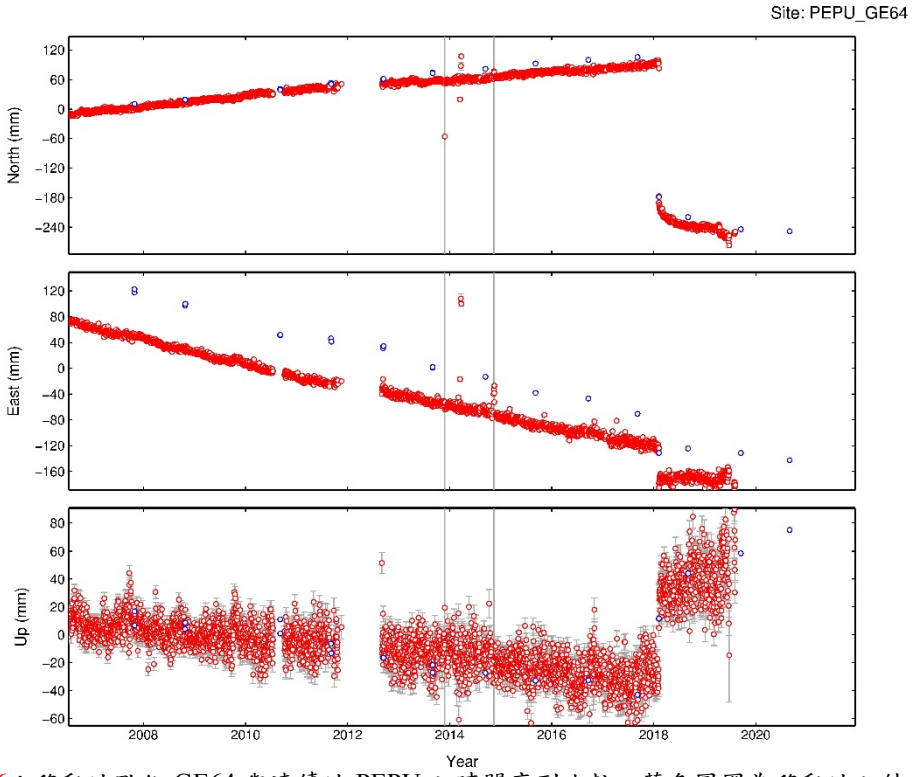


圖 2-2.36：移動站點位 GE64 與連續站 PEPU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 2-2.36: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GE64 (blue circles) and continuous GNSS station PEPU (red circles).

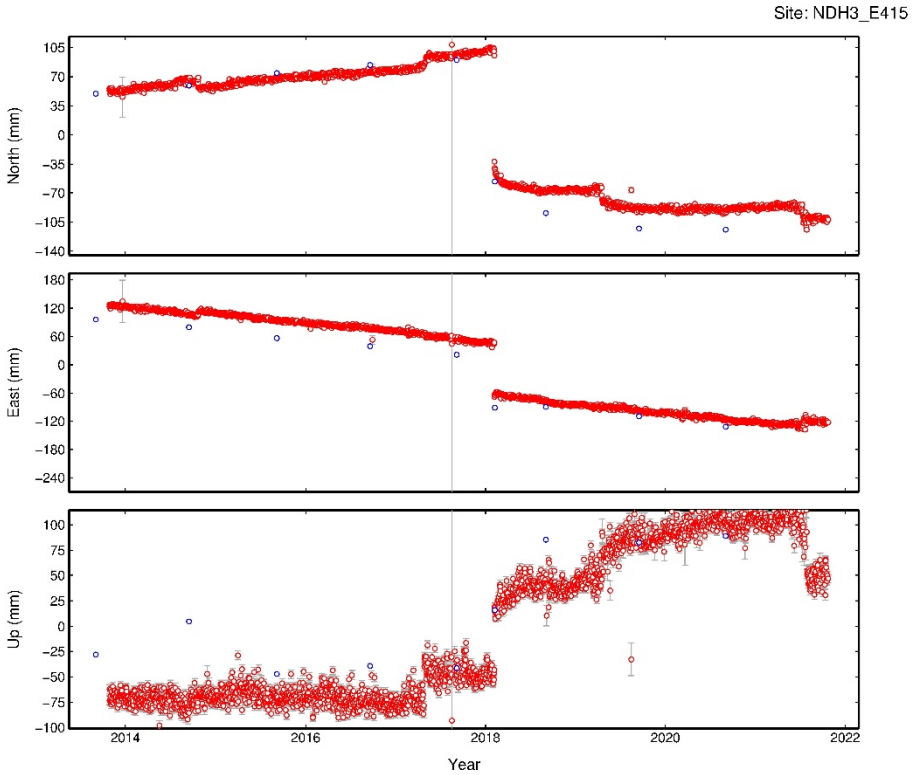


圖 2-2.37：移動站點位 E415 與連續站 NDH3 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 2-2.37: Time series comparison between campaign-mode GNSS station E415 (blue circles) and continuous GNSS station NDH3 (red circles).

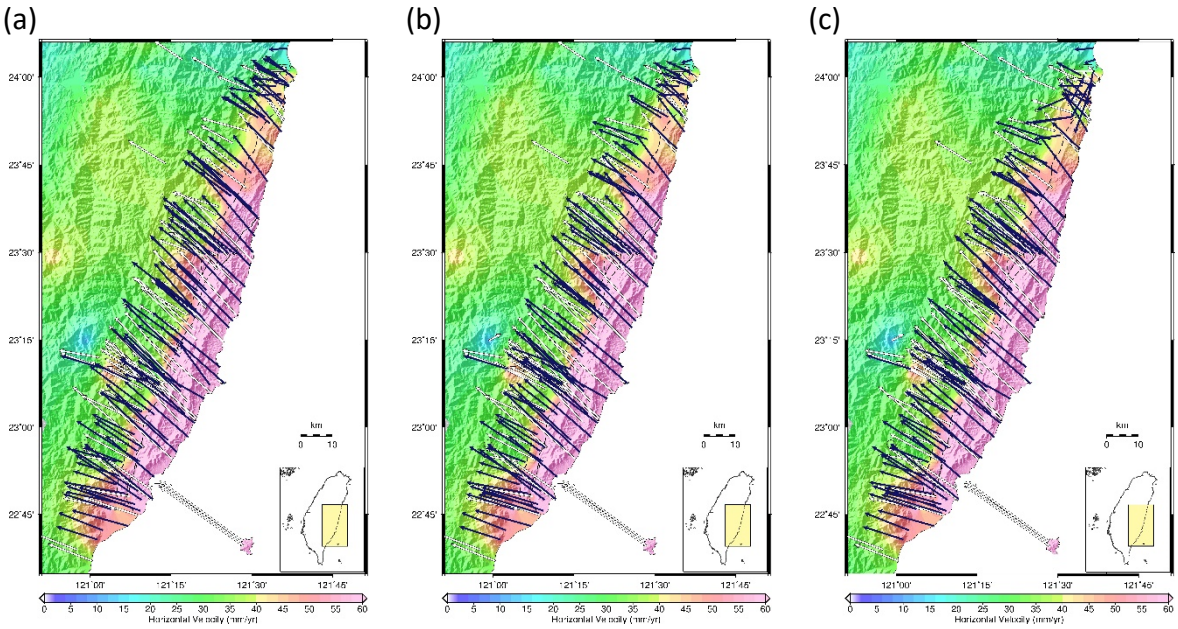


圖 2-2.38：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，彩色色階為資料解算之速度場分布色階圖。(a)表示 2002-2013 年速度場，(b)表示震後 2013-2018 年速度場，(c)表示震後 2018-2021 年速度場。

Figure 2-2.38: Eastern areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity. Figure (a) is the velocity field from 2002-2013; Figure (b) is from 2013-2018; while figure (c) is from 2018-2021.

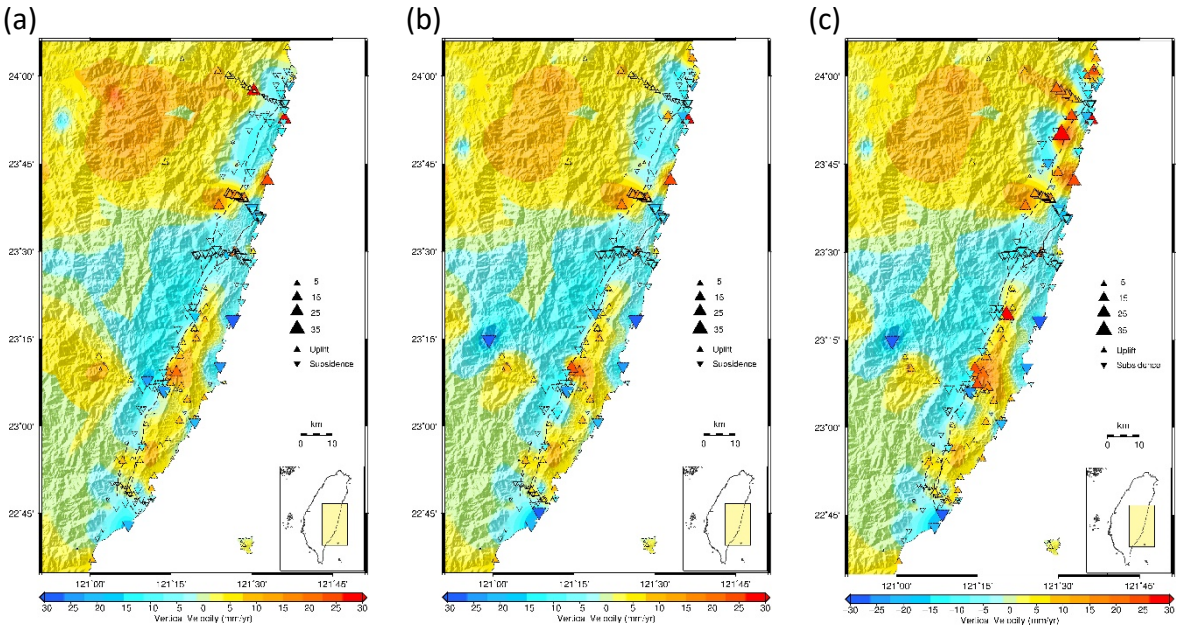


圖 2-2.39：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，(a)表示 2002-2013 年速度場，(b)表示震後 2013-2018 年速度場，(c)表示震後 2018-2021 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準；虛線邊框表示 GNSS 移動站、連續站。

Figure 2-2.39: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Eastern areas. Figure (a) is the velocity field from 2002-2013; Figure (b) is from 2013-2018; while figure (c) is from 2018-2021. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode and continuous GNSS shows in dotted line frame.

2-2-3-8 宜蘭地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之宜蘭地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站 28 點（圖 2-2.40）以及 1 條精密水準測線，宜蘭地區移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2-2.41、圖 2-2.42）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G250 及連續站 YILN（圖 2-2.41）與 GNSS 移動站 G244 及連續站 LTUN（圖 2-2.42），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，東部地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

宜蘭地區各觀測點位之速度場如圖 2-2.43 和圖 2-2.44， 2018 年之花連地震，改變了本地區之速度場。因此在估算臺灣宜蘭地區速度場時，本研究將速度場區分為 2004－2018 年以及 2018－2021 年二個時間段分別估算速度場。

宜蘭地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-2.43，2004 至 2018 年速度量值 4.5 ~ 33.5 mm/yr，震後 2018 至 2021 年速度量值也有約 5 mm/yr 的水平速度落差。

垂直速度場如圖 2-2.44，2004 至 2018 年在蘭陽平原垂直方向大致為沉陷，其沉陷量由北至南先增加後再減少，往南至南澳亦呈現沉陷，整體值約 0.5～26.8 mm/yr，震後 2018 至 2021 年速度量值部份往南地區有轉為抬升的趨勢。

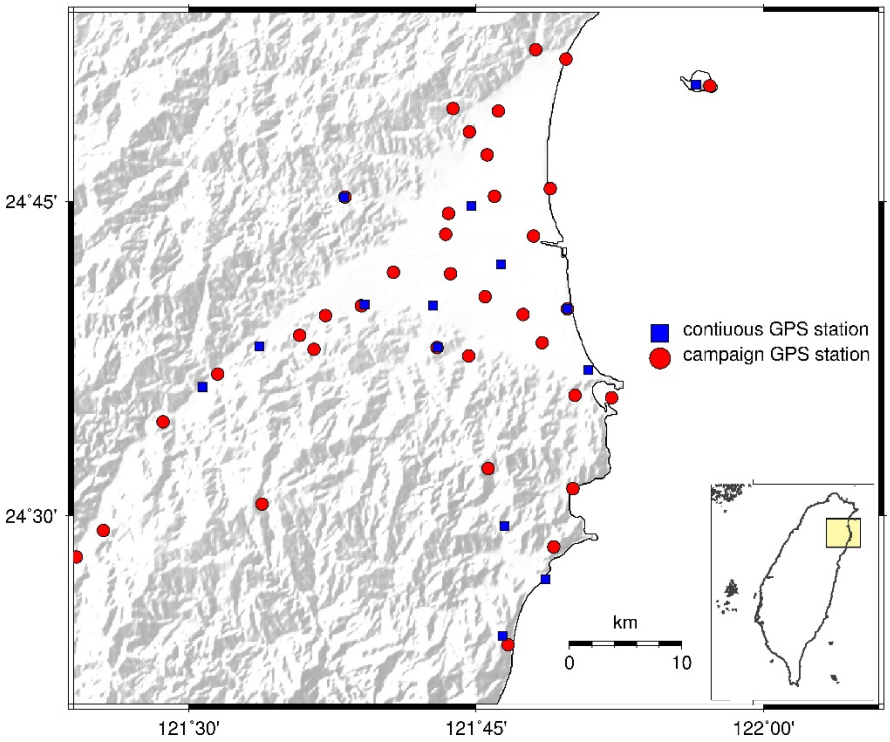


圖 2-2.40：宜蘭地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-2.40: GNSS distribution in the Yilan areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

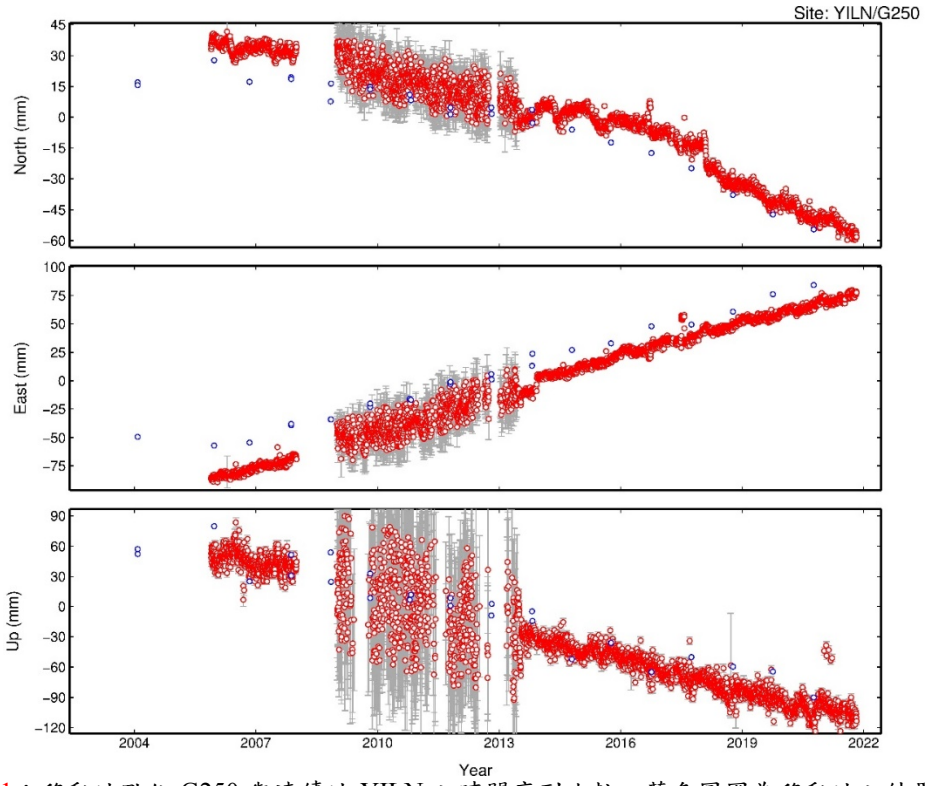


圖 2-2.41：移動站點位 G250 與連續站 YILN 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 2-2.41: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G250 (blue circles) and continuous GNSS stationYILN (red circles).

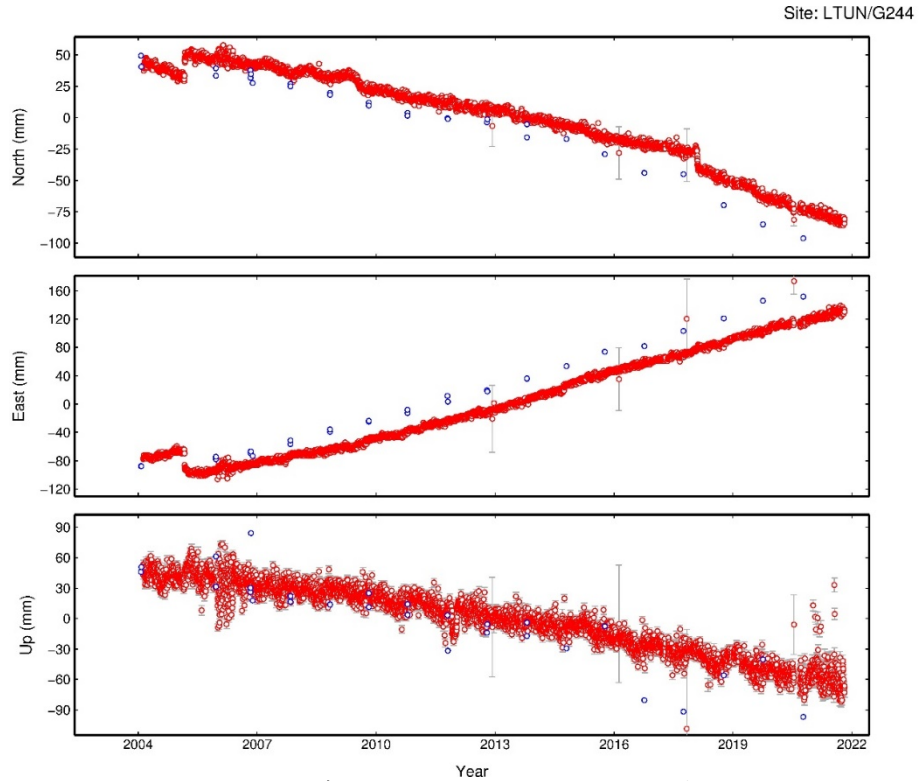


圖 2-2.42：移動站點位 G244 與連續站 LTUN 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 2-2.42: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G244 (blue circles) and continuous GNSS station LTUN (red circles).

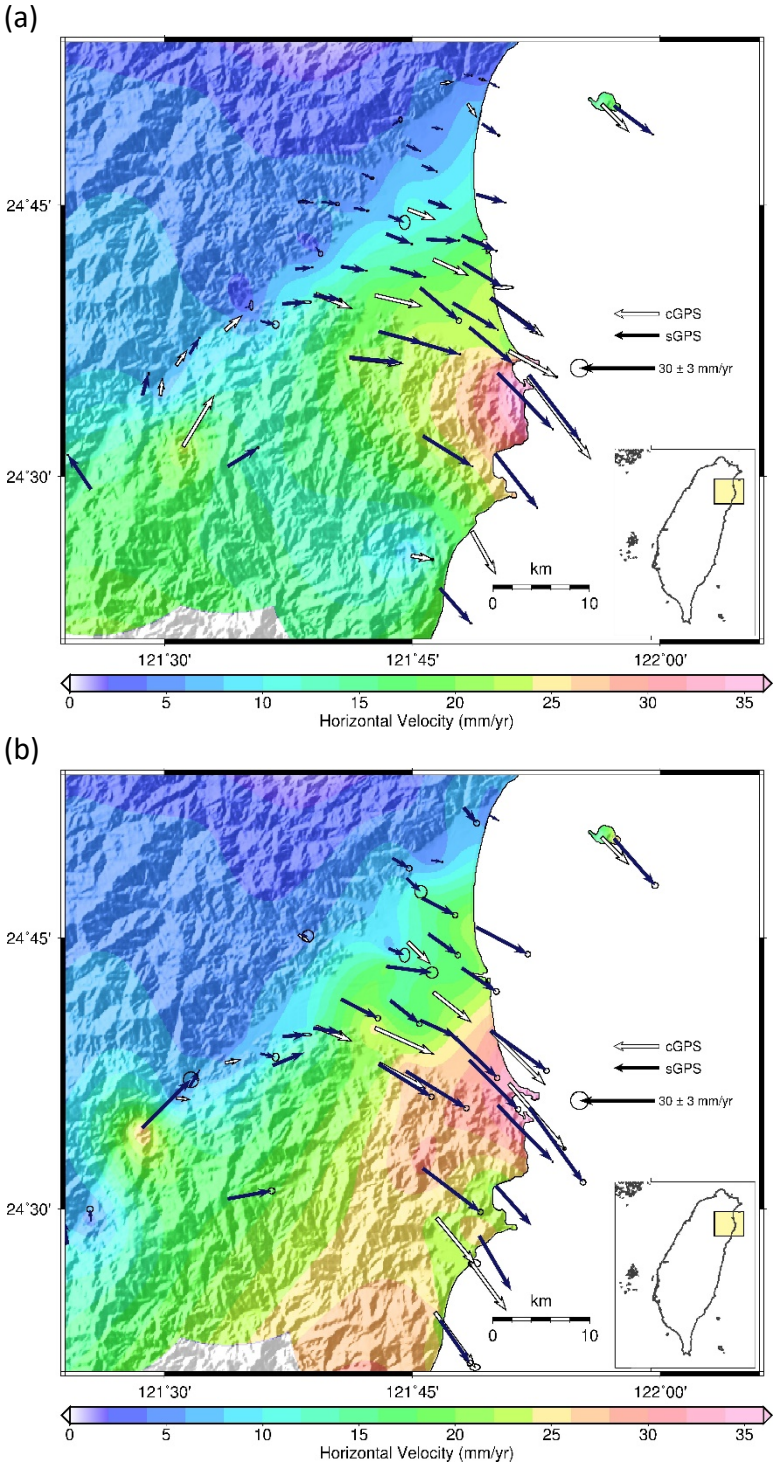


圖 2-2.43：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，彩色色階為資料解算之速度場分布色階圖。(a)表示 2002-2018 年速度場，(b)表示震後 2018-2021 年速度場。

Figure 2-2.43: Yilan areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity. Figure (a) is the velocity field from 2002-2018; Figure (b) is from 2018-2021.

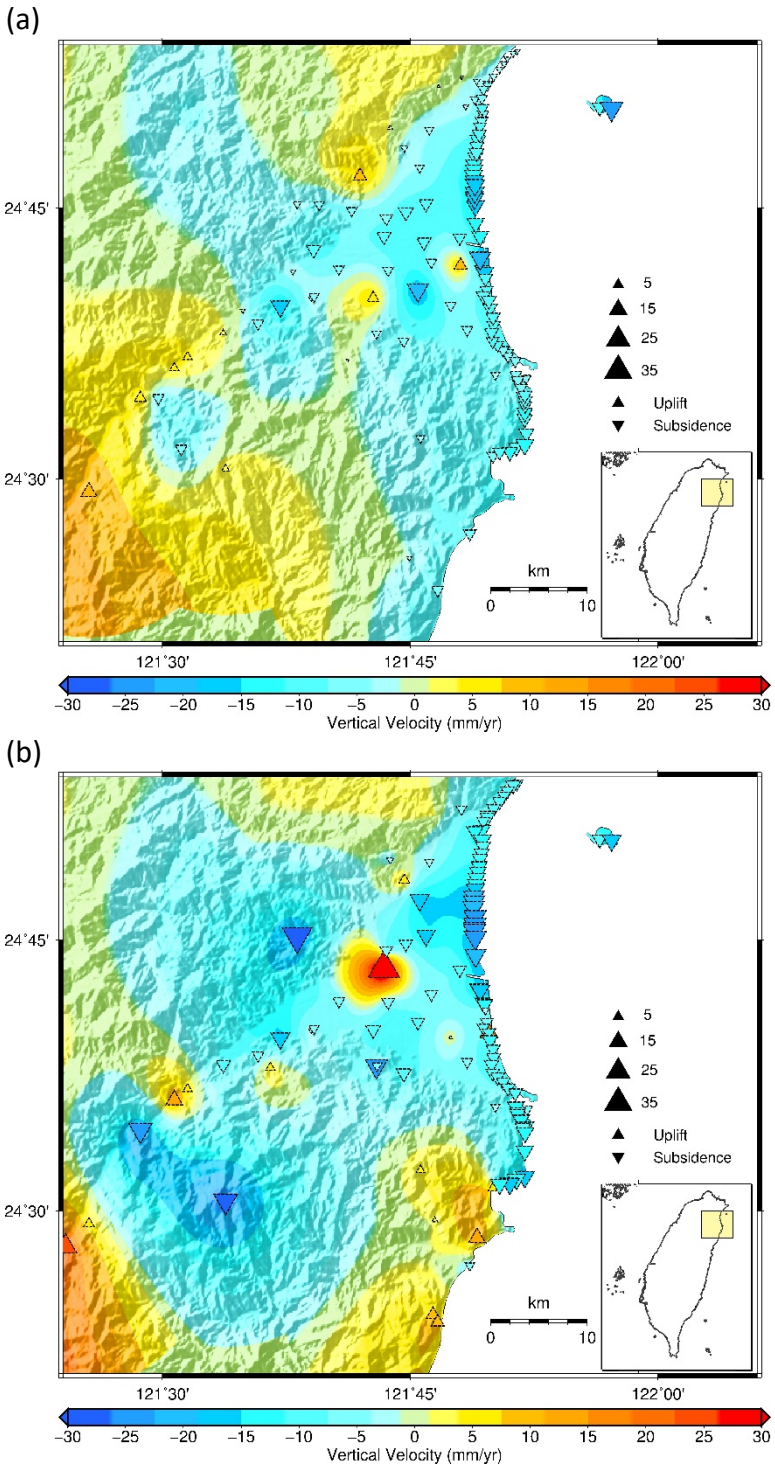


圖 2-2.44：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，(a)表示 2002-2018 年速度場，(b)表示震後 2018-2021 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準；虛線邊框表示 GNSS 移動站、連續站。

Figure 2-2.44: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Yilan areas. Figure (a) is the velocity field from 2002-2018; Figure (b) is from 2018-2021. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode and continuous GNSS shows in dotted line frame.

2-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析

2-3-1 本年度（2021 年）精密水準測量資料檢核

2021 年 9 月底前所獲得共計 1080 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 1070 個測段（圖 2-3.1a），佔所有測段比例之 99.1 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 99.0 %（1069 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 99.9 %（1079 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 1062 個測段達測段達 98.3 %（圖 2-3.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

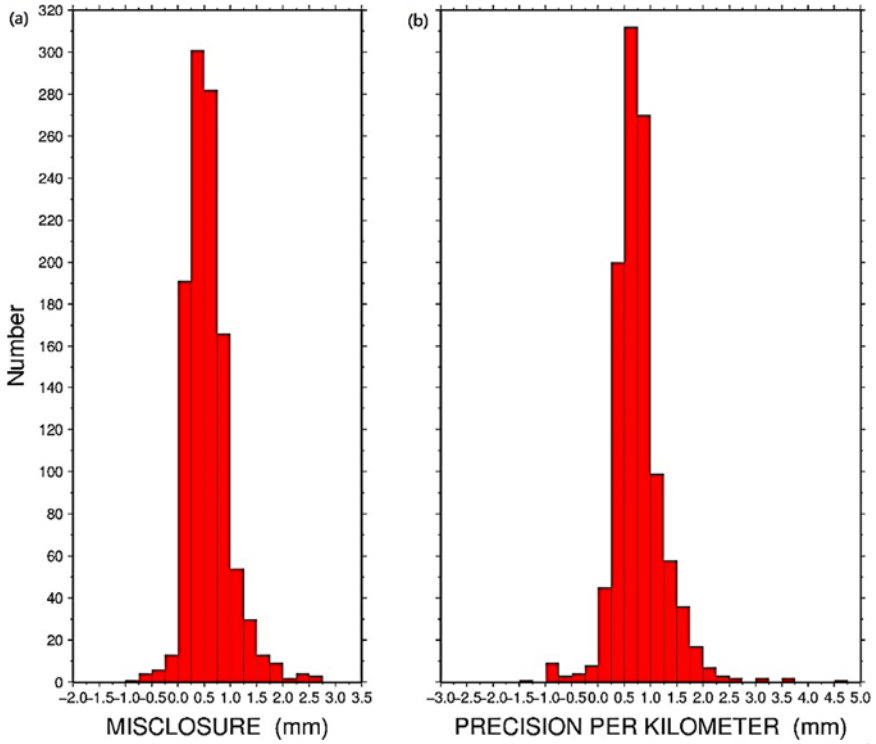


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。（a）為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。（b）為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

Figure 2-3.1: Diagram of precise leveling data. Red column is the amount of 0.25 mm statistics value. (a) The error of closure, maximum is around 0.5~0.75 mm. (b) Observation accuracy of every kilometer, maximum is around 0.5~0.75 mm.

2-3-2 精密水準測量資料解算與精度分析

水準測量是獲得高精度相對高程的測量方法。水準測量誤差來源分為儀器誤差、觀測誤差及受外界因素影響的自然誤差。按其影響的性質則分為偶然誤差(隨機誤差)和系統誤差兩類。對系統誤差而言，有些可通過選線或觀測的安排加以消除或減弱 （許榮欣和高書屏，1996)。在精密水準測量中，最常注意的系統誤差包括有：(1) 視準軸誤差、(2) 折射誤差、(3) 地球曲率改正、(4) 水準尺溫度改正、(5) 水準尺刻劃改正與 (6) 正高改正。這些系統誤差在嚴格的精密測量程序中，如：規定往返測必須在不同的環境中進行、相鄰兩測站採用不同之觀測次序、每測段的總測站為偶數等方法，均可消除一些系統性誤差的影響。然而，縱使依照如此嚴格的觀測程序，最後仍會存有部分的系統誤差必須依靠儀器之校準與修正模式來消除或降低（劉啟清，1986)。這些系統誤差的修正方法，主要參照 Ching et al.（2011b）使用的方式。其中，因為本研究分析水準資料的目的在於求取垂直速度場，在此計算過程中，正高改正量會因為是定值而被移除掉，所以不進行正高改正的系統誤差修正。

就精密水準的測量成果而言，採與 GNSS 移動站相同之方法來擬合水準坐標時間序列，推估精密水準資料之垂直速度場。由於精密水準獲得之高程坐標為相對高程值，會受到參考點高程設定之不同而變化。此外參考點坐標時間序列的穩定性，也會因誤差傳播的效應，影響其他水準點位之速度精度。因此，本計畫會先測試不同參考點之時間序列穩定性，挑選最佳之參考點來計算該測線之相對垂直速度場。然而，在討論水平速度場時，根據 Yu et al.（1997）的建議，本計畫水平速度場採用之參考站為澎湖白沙 S01R 站。因此，為了讓臺灣地表速度場有統一的參考點，且澎湖白沙站相對於地心也確實近乎不動，本計畫採用以下的策略，重新計算各水準垂直速度場相對 S01R 測站之速度值。首先，假設 GNSS 連續站與水準點共點，則兩者之垂直速度差異，即是兩個速度場參考點的速度差異，因此可直接將水準垂直速度場修正至相對 S01R 測站之速度值。若該水準測線上並無和 GNSS 連續站共點之水準點，我們可以合理地假設，如果 GNSS 連續站和水準點位間的距離越接近，則兩者的垂直速度將越一致。因此，本計畫會尋找距離水準點位最接近且坐標時間序列較穩定的 GNSS 連續站，假設該站與其最近之水準點為共點，來進行速度場參考站之轉換，獲得相對於測站 S01R 的

垂直速度場，截至 2018 為止，已增設 19 點精密水準測線與連續站（圖 2-3.2），惟部分 GNSS 連續站因架設時間較晚且該地區發生速度變化，因此僅在較穩定之區域約制該共點站速度。

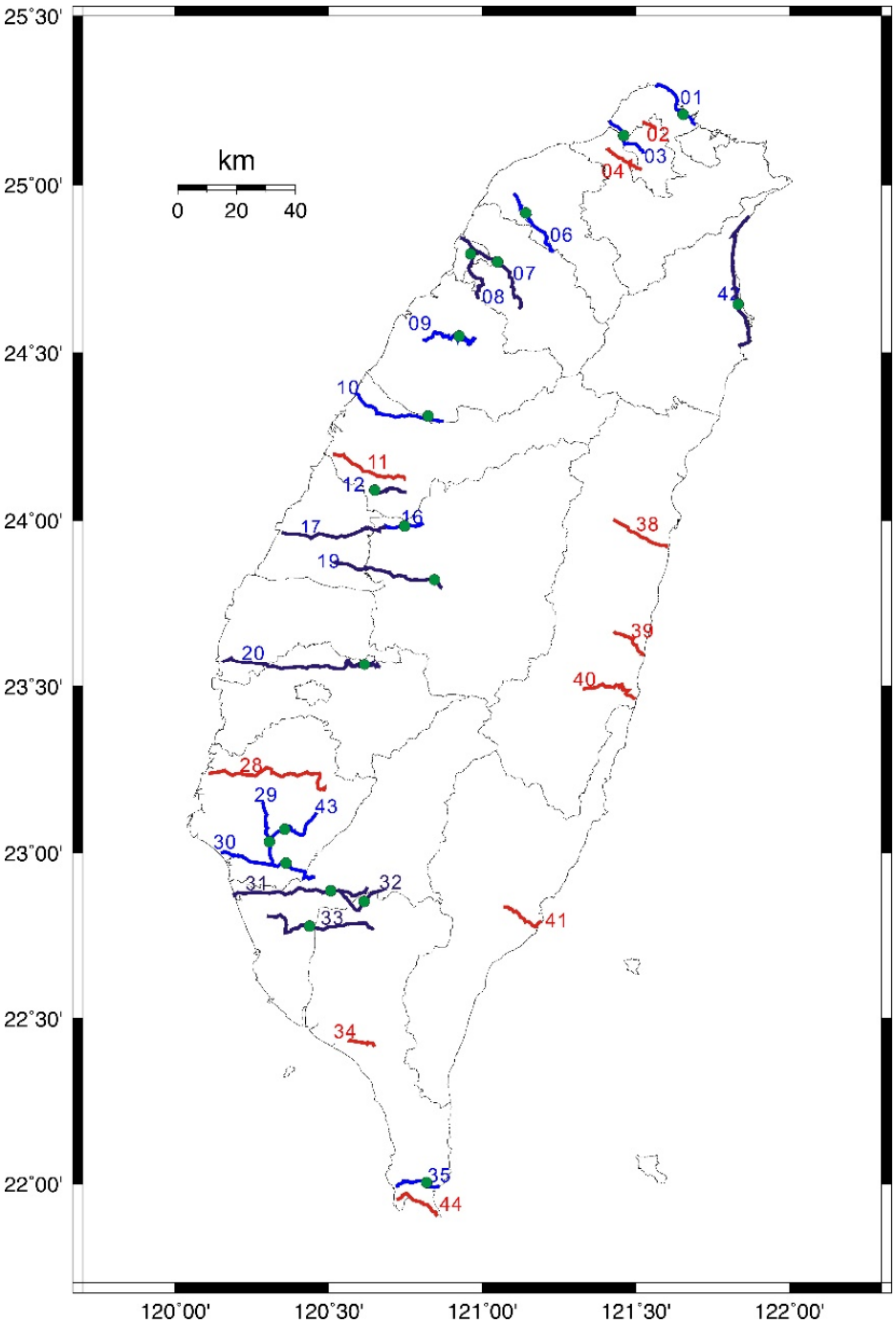


圖 2-3.2：新增與 GNSS 連續站共點之精密水準測站分布圖，藍色表示新增共點之測線，紅色表示尚未新增之測線，綠色點位表示共點點位位置。

Figure 2-3.2: New overlapping location of GNSS and pricise leveling. Blue lines are the new overlapping lines, red lines are those have not yet added, the green dots are the overlapping location of GNSS and pricise leveling.

2-3-3 臺北地區精密水準測線

2-3-3-1 石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層（圖 2-3.5a），測線剖面投影長度為 18.3 公里，2004 至 2021 年間共進行 18 次施測。本測線以 GNSS 連續站 GS09 之垂直速率（0.0 mm/yr），自 2005 年開始作為約制站來校正 2027 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.3）。

本測線垂直速度均落在 -3.0 至 0 mm/yr 之間（圖 2-3.5b），而跨斷層點位之垂直速度變化< 1.0 mm/yr，此結果說明近幾年山腳斷層在該區域並未有明顯之活動跡象。

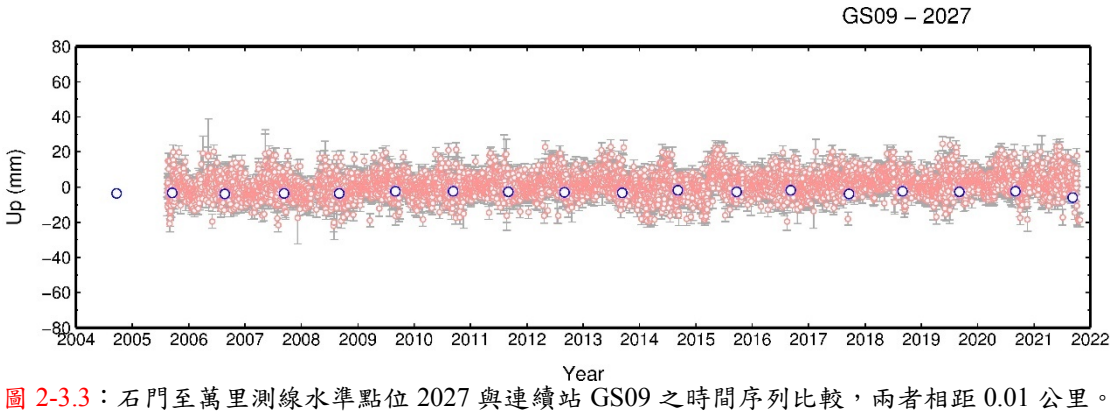


圖 2-3.3：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。
Figure 2-3.3: Time series comparison between Shihmen-Wanli leveling bench mark 2027 and continuous GNSS station GS09. The distance between two stations are 0.01 km.

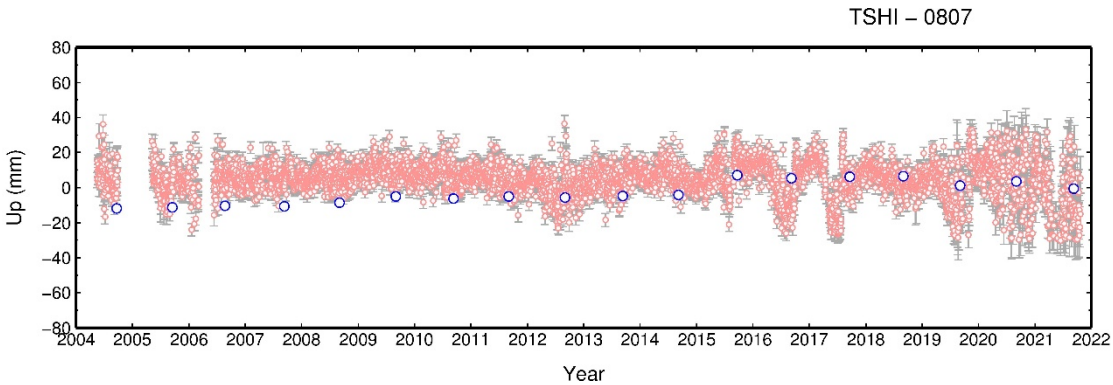


圖 2-3.4：石門至萬里測線水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較，兩者相距 0.08 公里。
Figure 2-3.4: Time series comparison between Shihmen-Wanli leveling bench mark 0807 and continuous GNSS station TSHI. The distance between two stations are 0.08 km.

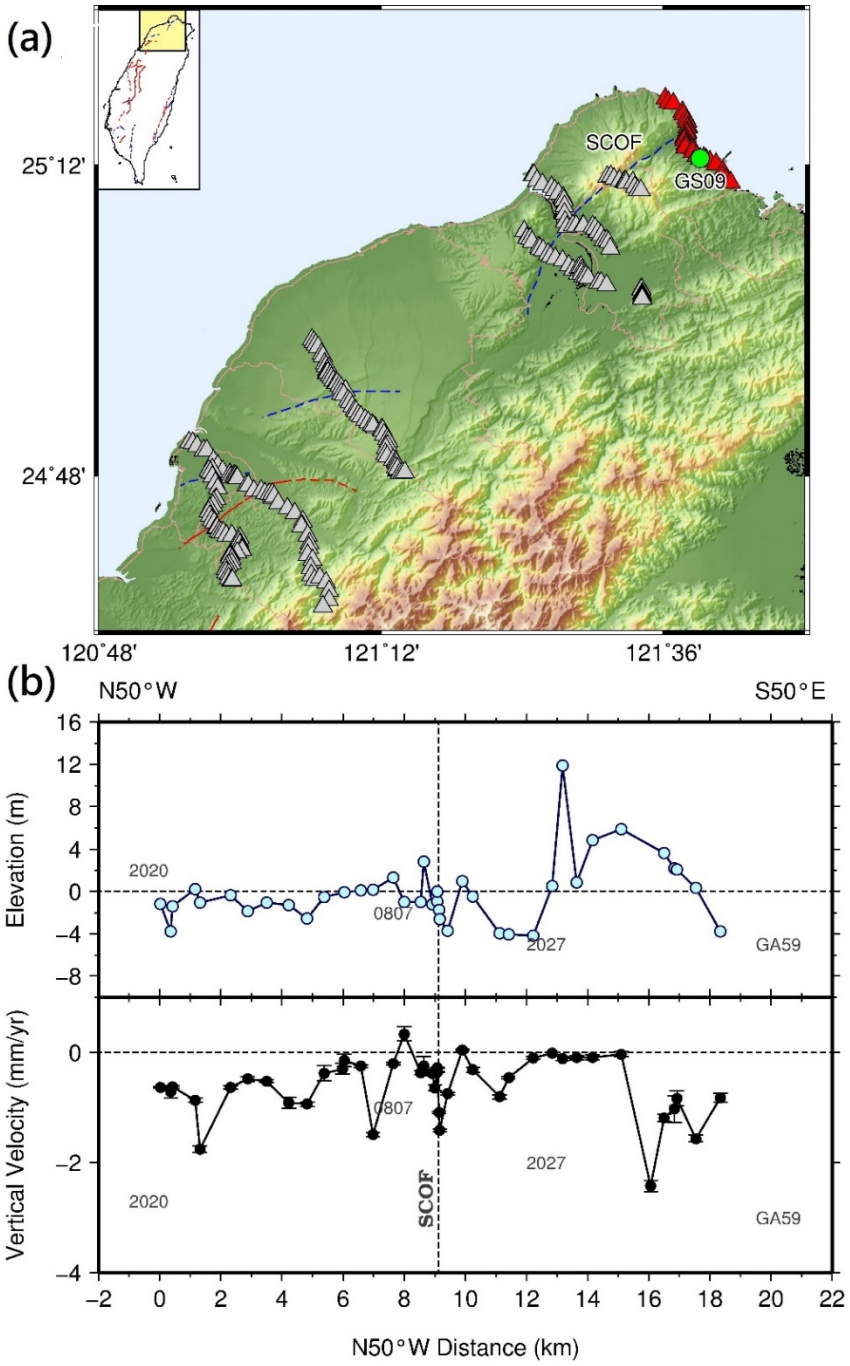


圖 2-3.5：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b) 下欄為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.5: Elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. (a) Tthe distribution of leveling route. (b) Elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile.SCOF is Sanchiao fault.

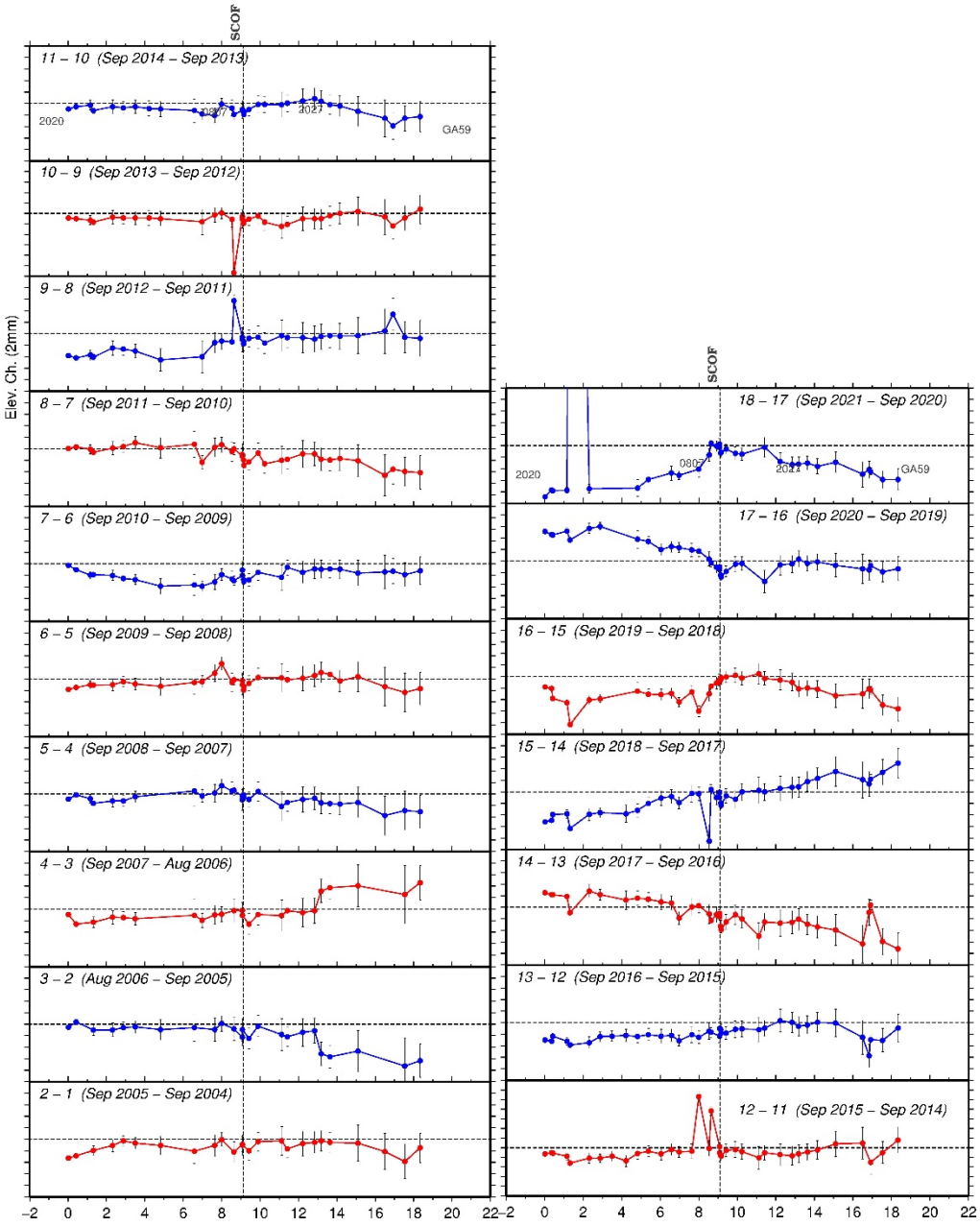


圖 2-3.6：台 2_石門至萬里測線水準歷年高程差。每個刻度代表 **2** mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.6 Difference of the Shihmen-Wanli leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents **2** mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-2 士林至三芝測線

士林至三芝測線跨越山腳斷層（圖 2-3.8a），測線剖面投影長度為 5.0 公里。該測線 2004 至 2021 年間共進行 18 次測量。本測線以 GNSS 連續站 YMSM 之垂直速率（-0.5 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 GB06 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.7）。

此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側（圖 2-3.8b），整條水準的垂直速度均介於 -2.1 至 0.0 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度非常不明顯（約 0 至 1 公里之測段），僅有約 0.3 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化。據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能略為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要更長時間的監測以及與其他資料來佐證。

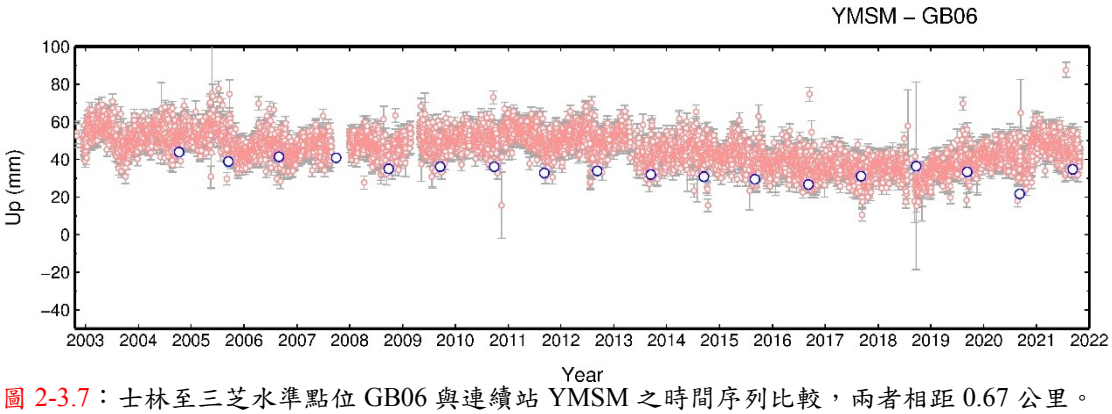


圖 2-3.7：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.67 公里。
Figure 2-3.7: Time series comparison between Shilin-Sanzhi leveling bench mark GB06 and continuous GNSS station YMSM. The distance between two stations are 0.67 km.

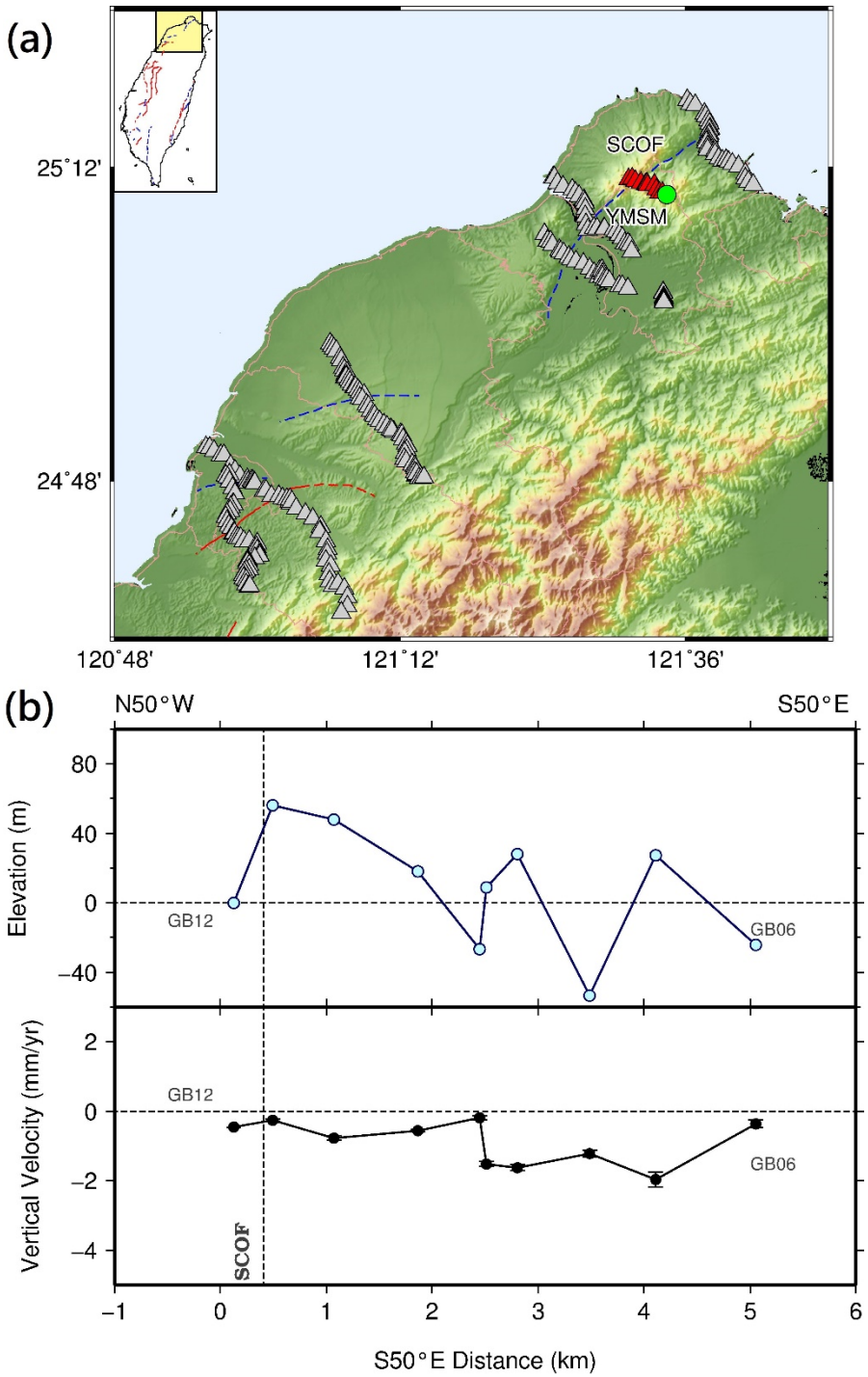


圖 2-3.8：士林至三芝測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.8: Elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile.SCOF is Sanchiao fault.

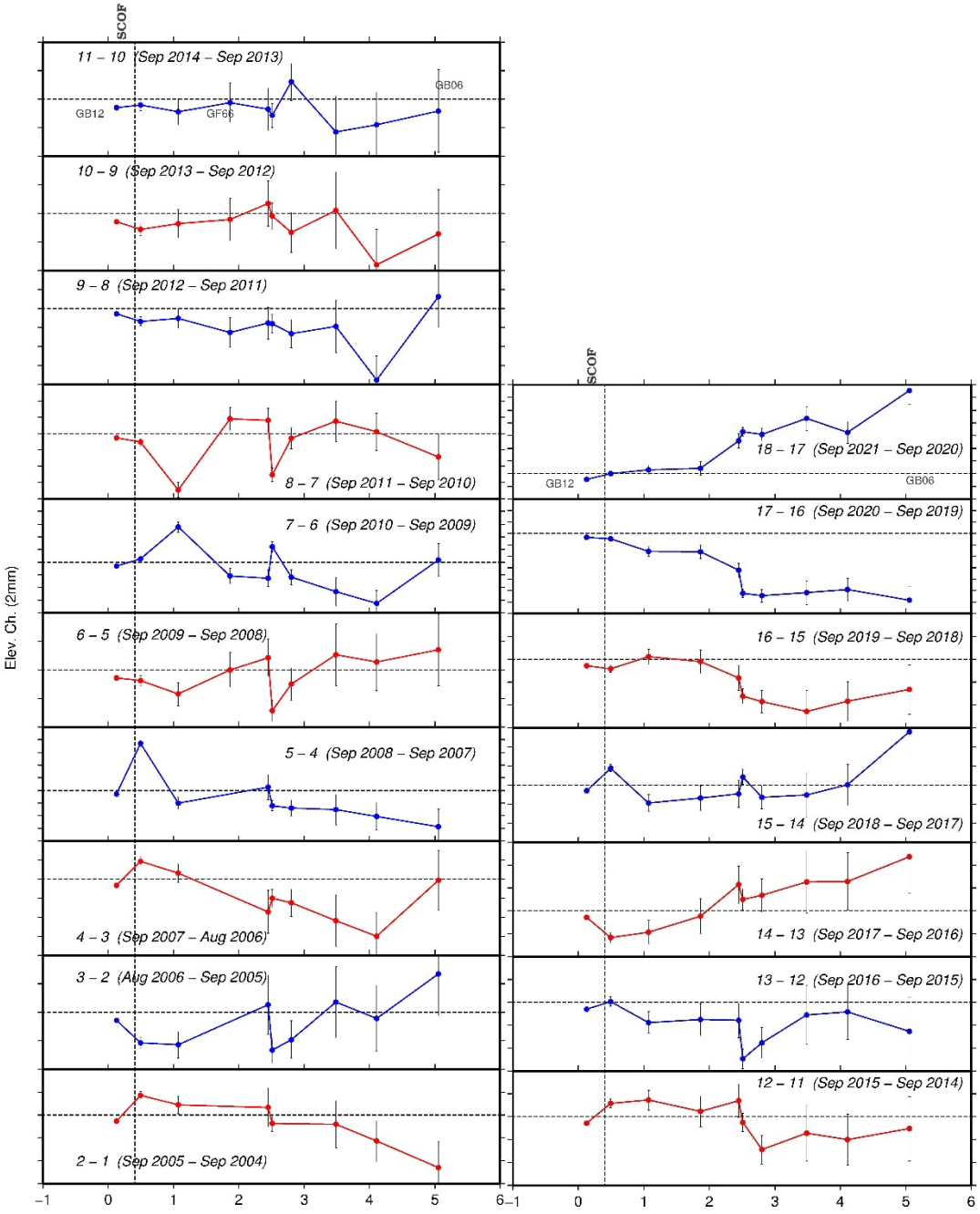


圖 2-3.9：士林至三芝測線水準歷年高程差。每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.9: Difference of the Shilin-Sanzhi leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 2 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層（圖 2-3.11a），測線剖面投影長度為 15.3 公里，在 2004 至 2021 年間進行共 18 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 GS10 之垂直速率（-6.0 mm/yr），作為約制點來校正 GA69 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.10）。

此測線之垂直速度在跨斷層有達 20.0 mm/yr 的沉降變化量（圖 2-3.11b）；在斷層東側的垂直速率呈現逐漸增加的趨勢，觀察歷年之高程變化數值（圖 2-3.12），山腳斷層東側的沉陷值為 10.0-35.0 mm。

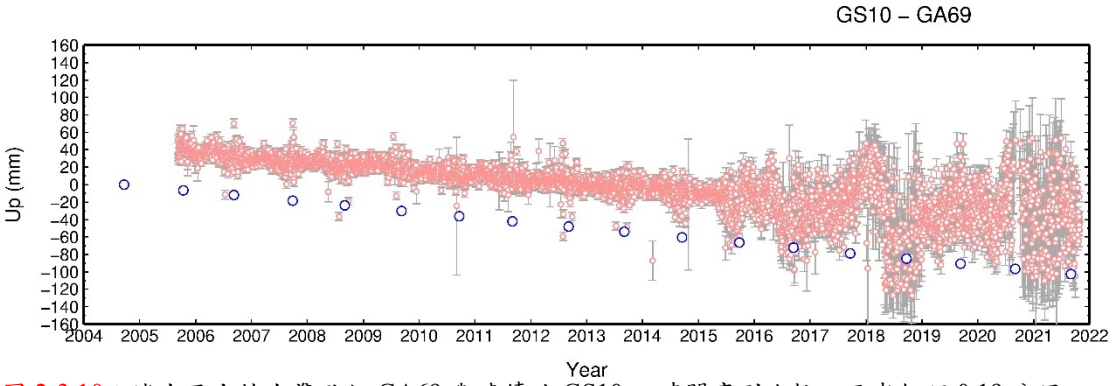


圖 2-3.10：淡水至士林水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較，兩者相距 0.19 公里。
Figure 2-3.10: Time series comparison between Tamsui-Shihlin leveling bench mark GA69 and continuous GNSS station GS10. The distance between two stations are 0.19 km.

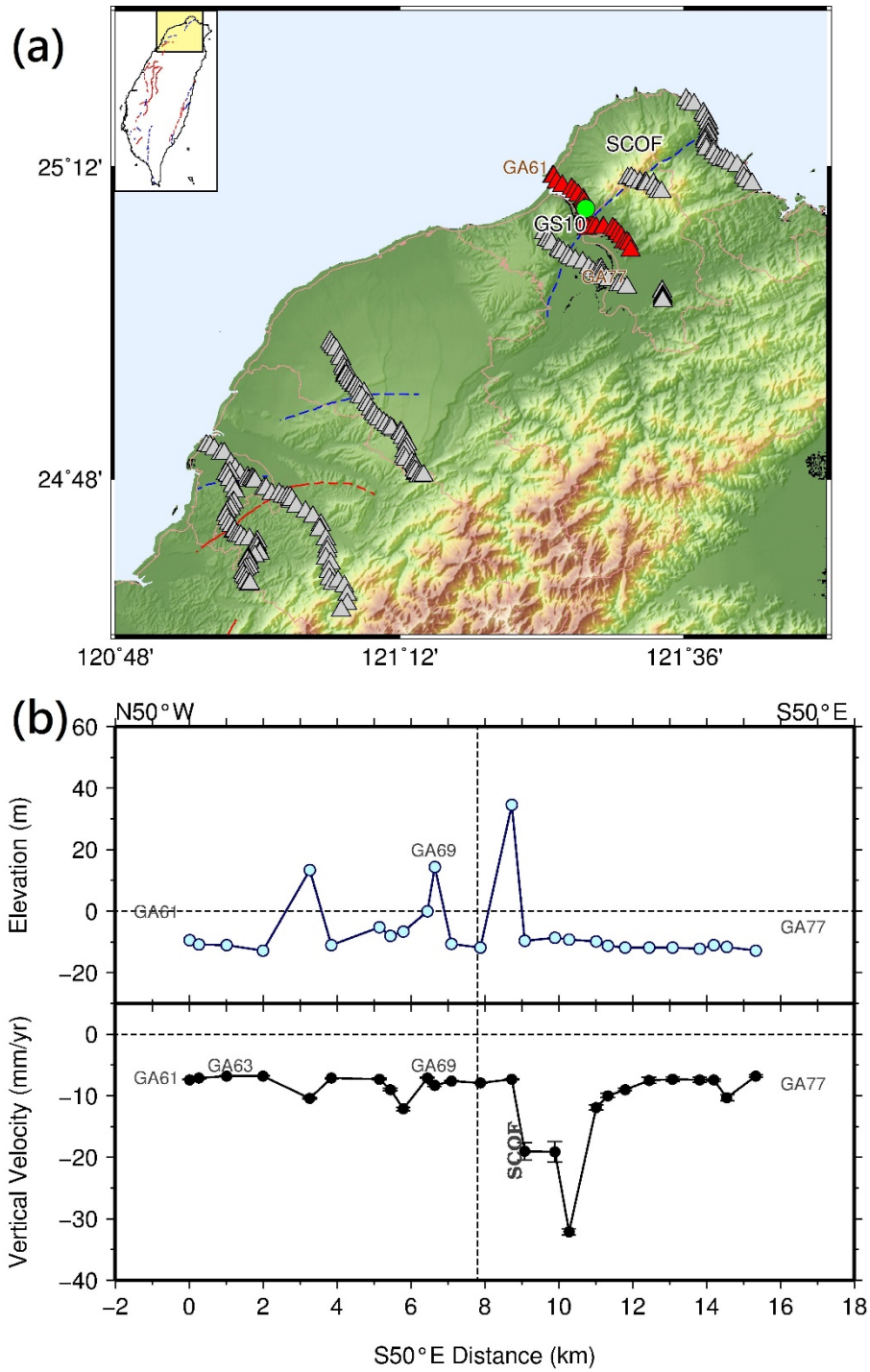


圖 2-3.11：淡水至士林測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.11: Difference of the Tamsui-Shihlin leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile.SCOF is Sanchiao fault.

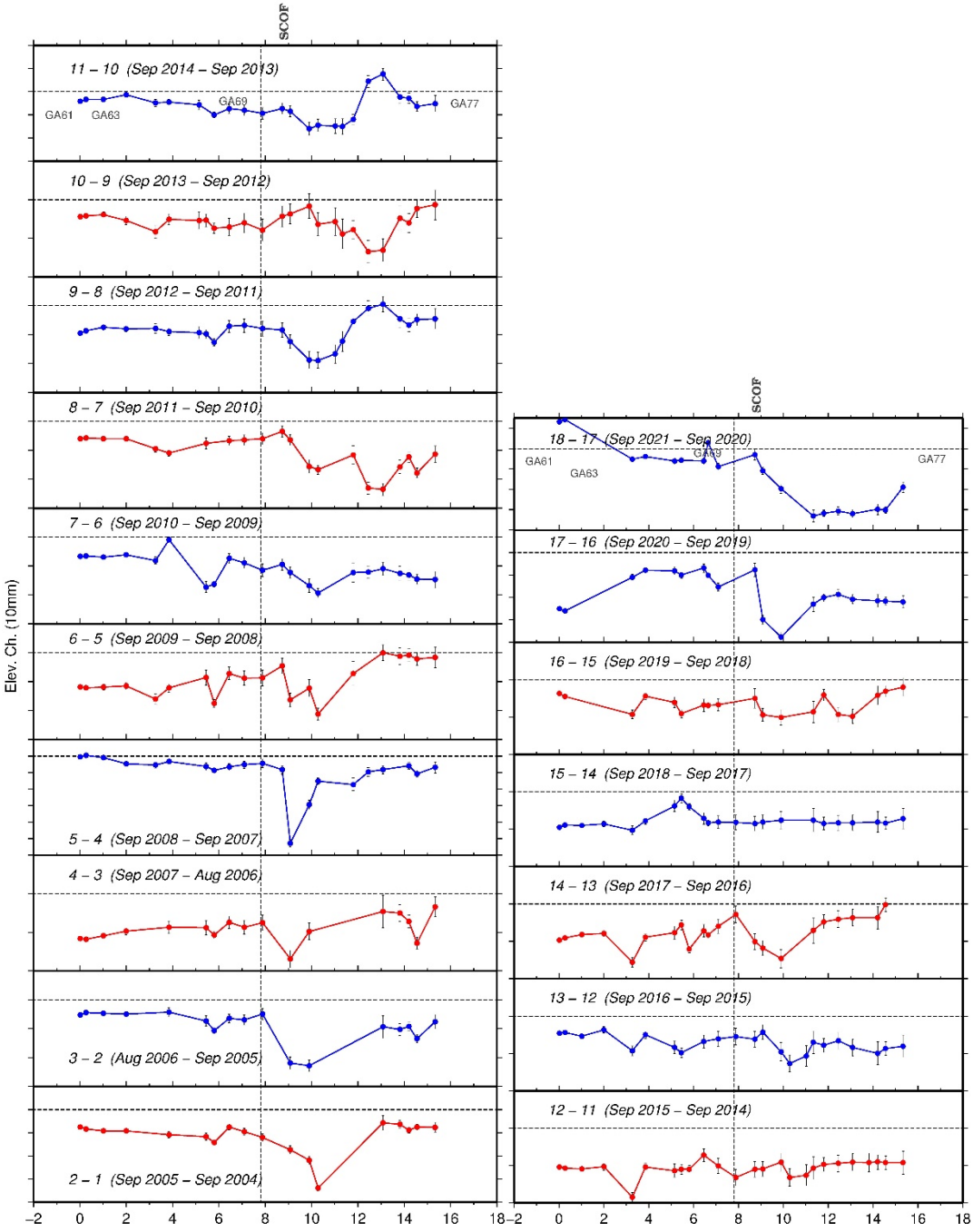


圖 2-3.12：淡水至士林測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.12: Difference of the Tamsui-Shihlin leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-4 五股至台北測線

本測線橫跨山腳斷層（圖 2-3.14a），測線長為 13.6 公里。此水準測線於 2004 至 2021 年間共進行 18 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 WUKU 之垂直速率（-3.9 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 GA78 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.13）。

從歷年高程變化來看（圖 2-3.14b），2008 年至 2013 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象，2014 年起至今變化則較不明顯。

此外，點位 GA83 之時間序列之形態與其他點位相較明顯不同（圖 2-3.16），沉陷速率也較大。該點為水準與 GNSS 移動站共同監測點位，其 GNSS 觀測結果也與該區速度場趨勢不符。根據實地勘驗，由於該點位於台 107 甲（新五路二段）與市道 108（中興路四段）高架聯絡道下方交會處，推測可能原因為該地該架工程載重及五股溼地地質影響（工程於 2006 年開工，2009 年竣工）。

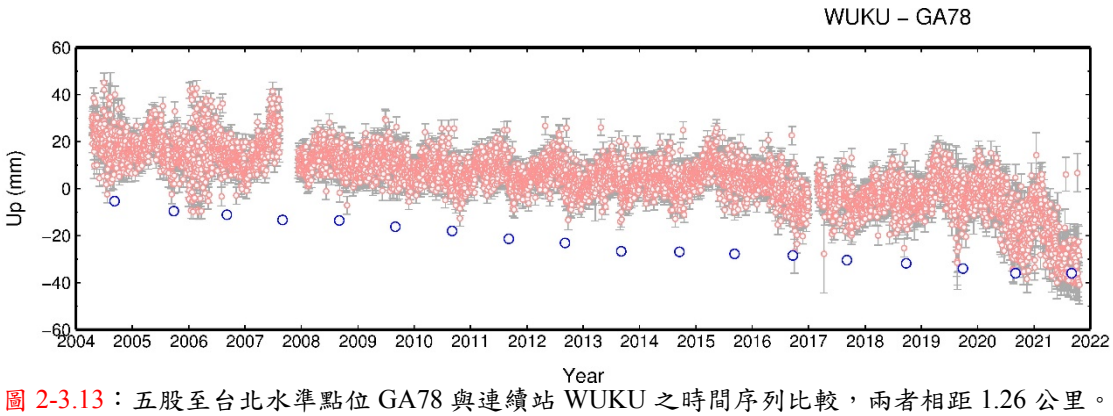


圖 2-3.13：五股至台北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。
Figure 2-3.13: Time series comparison between Wugu-Taipei leveling bench mark GA78 and continuous GNSS station WUKU. The distance between two stations are 1.26 km.

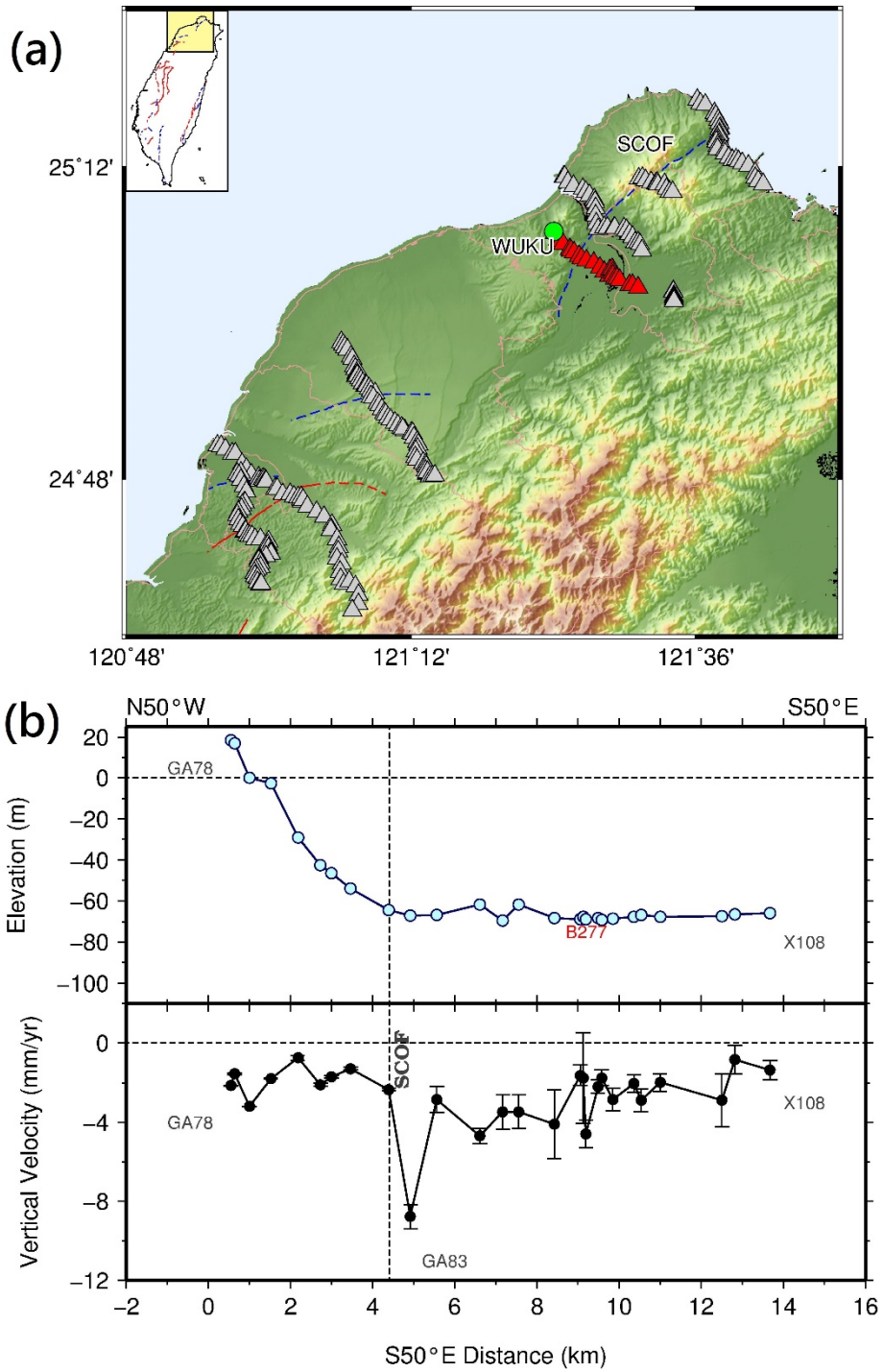


圖 2-3.14：五股至台北測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)下欄為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.14: Elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile.SCOF is Sanchiao fault.

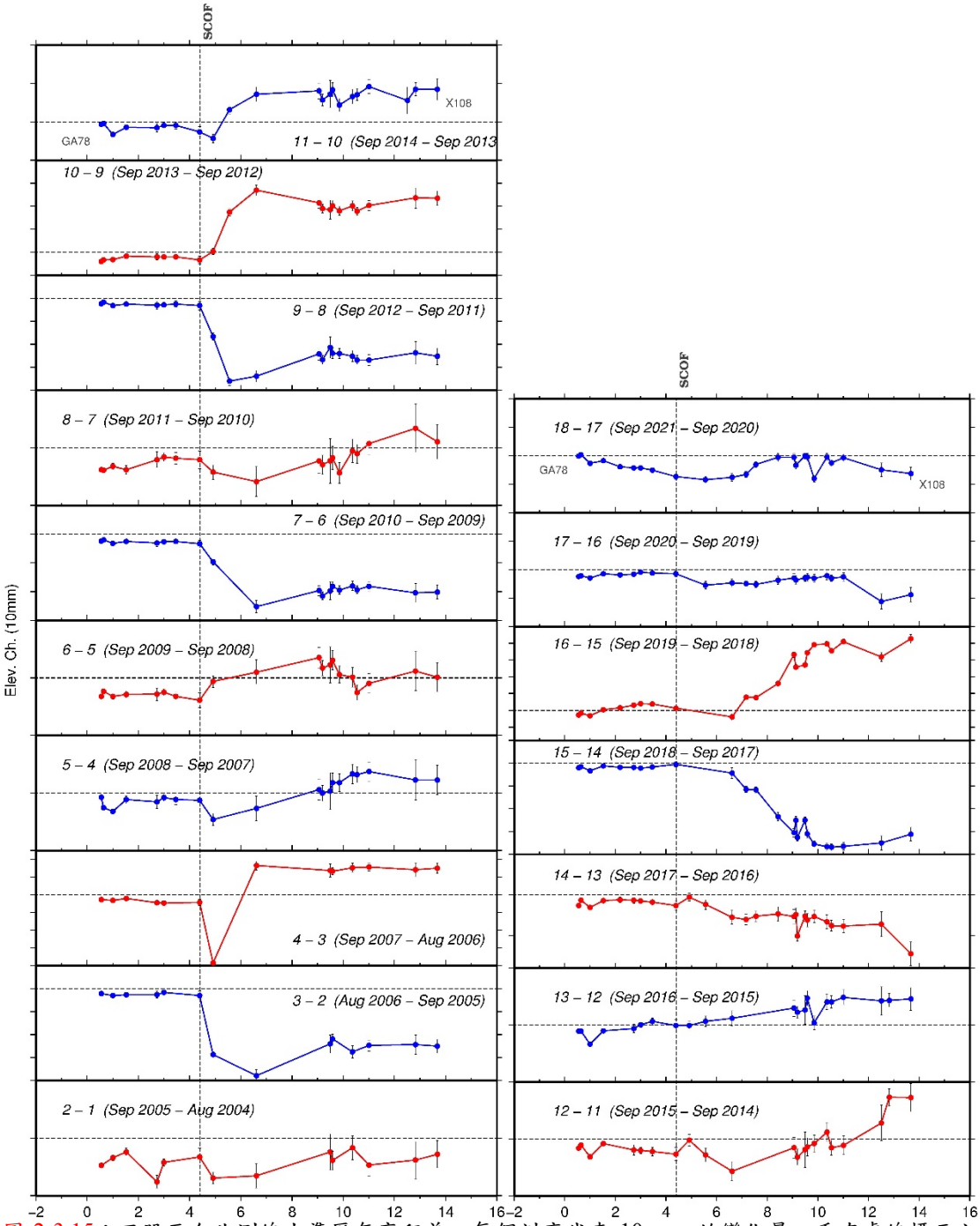


圖 2-3.15：五股至台北測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.15: Difference of the Wugu-Taipei leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

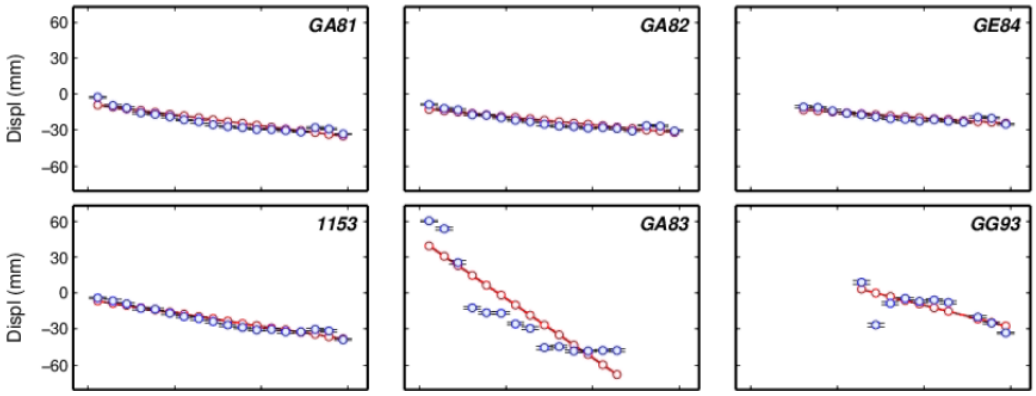


圖 2-3.16：五股至台北測線之部份時間序列。

Figure 2-3.16: Part of leveling time series of the Wugu-Taipei leveling route.

2-3-4 桃竹苗地區精密水準測線

2-3-4-1 新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層（圖 2-3.18a），測線長為 22.4 公里，並於 2004 至 2021 年間共進行 17 次的施測。該測線以 GNSS 連續站 YAME 之垂直速率（2.7 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 GB40 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.17）。

此測線之垂直速度在南往北跨越湖口斷層有較顯著抬升，斷層以北抬升速度約為 1-4 mm/yr（圖 2-3.18b）。

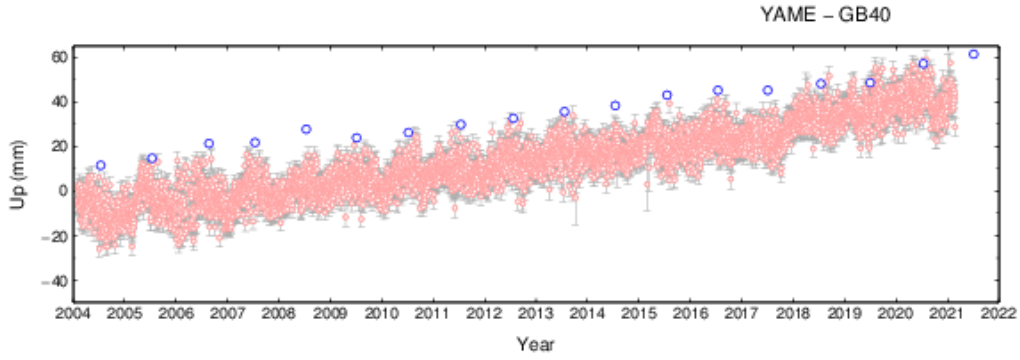


圖 2-3.17：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。兩者相距 3.3 公里。

Figure 2-3.17: Time series comparison between Xinwu-Guanxi leveling benchmark GB40 and continuous GNSS station YAME. The distance between two stations are 3.3 km.

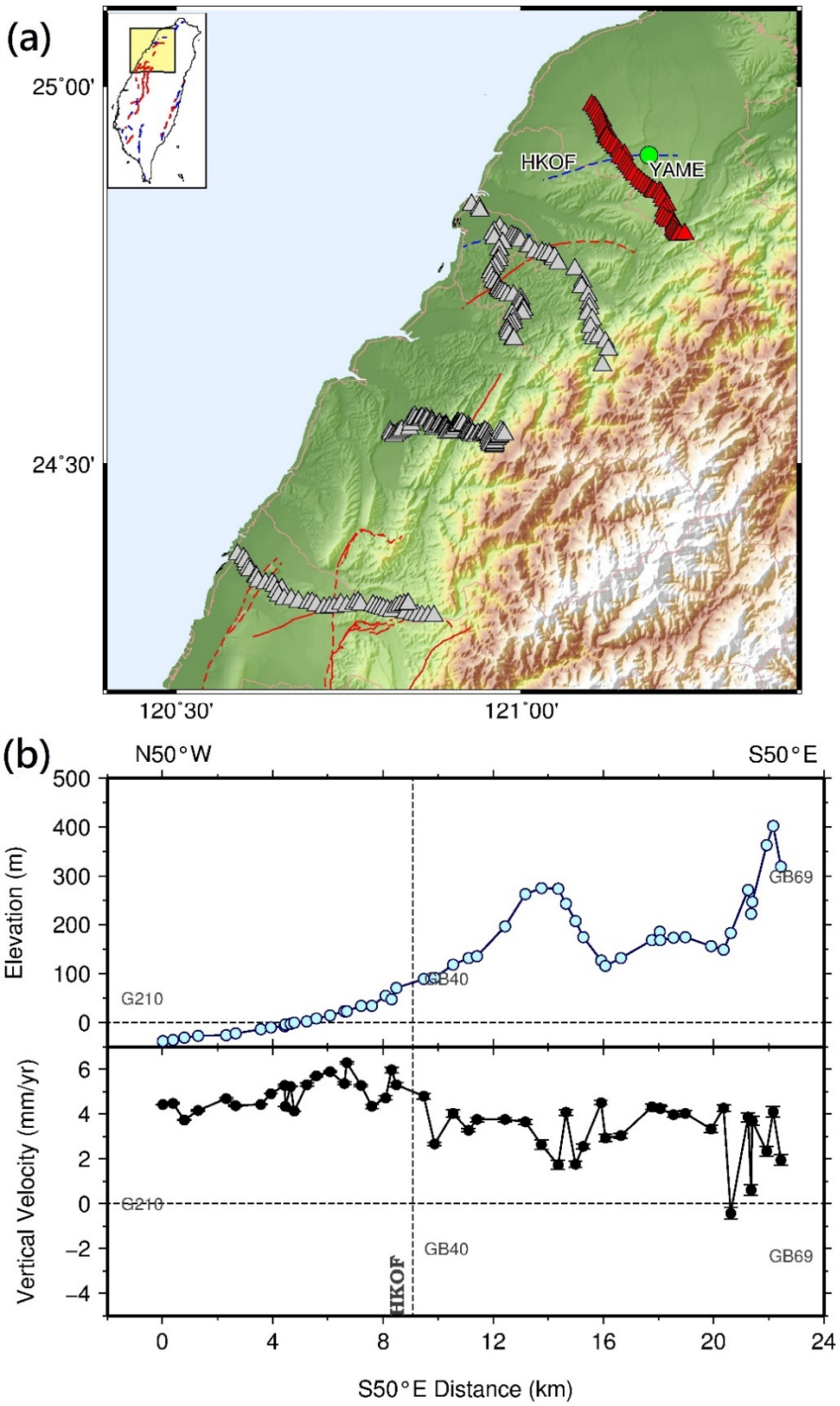


圖 2-3.18：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層。

Figure 2-3.18: Elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKOF is the Hukou fault.

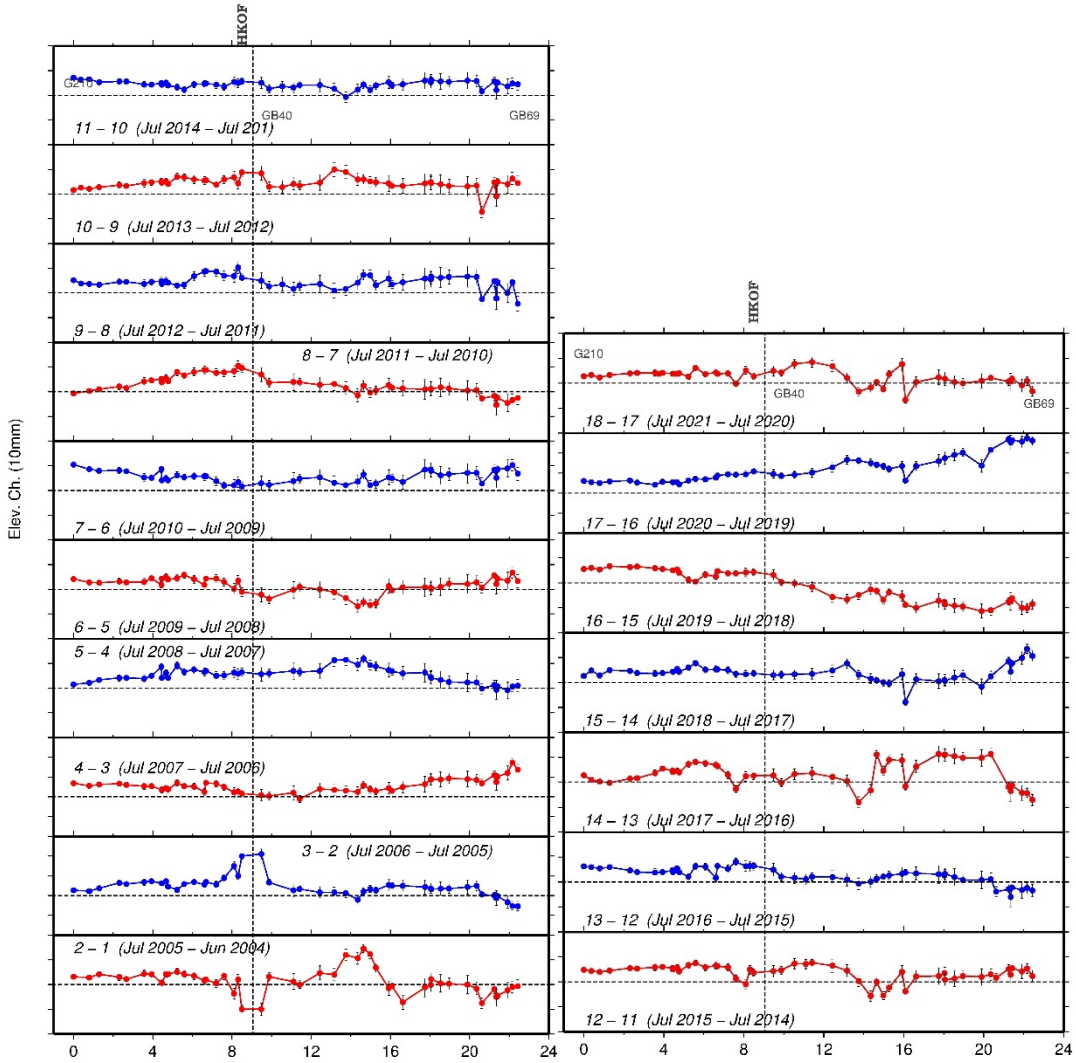


圖 2-3.19：新屋至童話世界測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層。

Figure 2-3.19: Difference of the Xinwu-Guanxi leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKOF is the Hukou fault.

2-3-4-2 新竹至五峰測線

縣 122_新竹至五峰測線橫跨新竹斷層及新城斷層（圖 2-3.21a），測線長為 30.0 公里（投影至剖面的長度），此測線於 2002 至 2021 年間共進行 17 次的施測。本測線分別以 GNSS 連續站 GS03 之垂直速率（-0.6 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 HCCA 相對於 GNSS 連續站 S01R 之垂直速率之垂直速率（圖 2-3.20）。

此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化（圖 2-3.21b），變化量皆< 2.0 mm/yr，但在跨新城斷層有約 4.0 mm/yr 的垂直速度變化量（約-2.0～2.0 mm/yr）。從歷年高程變化來看，水準點位 G416（五峰國小）2013 至 2014 年間年下陷約 2.1 cm，而此點 GNSS 之觀測資料也與鄰近地區之速度型態不一致（圖 2-3.23）。經實地勘查後發現，點位本身並無損壞，由於該校位於山坡地，因此這段時間的變位是否和該地區的邊坡運動有關，需要進一步分析與討論。不過長期來看，此點建議仍然可以繼續觀測，但在資料使用上須要特別注意。

另外，根據此測線 G429、T004、T003 三個點位之時間序列顯示（圖 2-3.23），在工研院竹東院區附近，其時間序列變化明顯與鄰近點位不同，需要注意此區域是否有地滑現象。

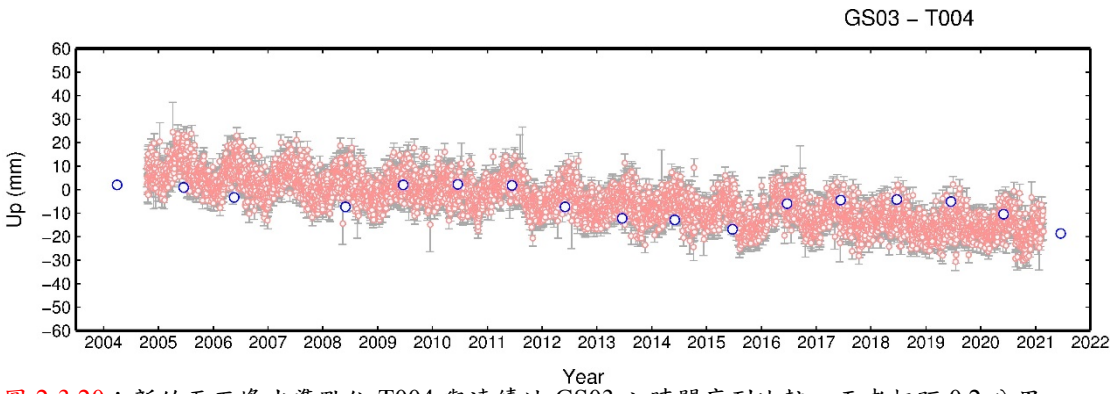


圖 2-3.20：新竹至五峰水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里

Figure 2-3.20: Time series comparison between Hsinchu-Wufeng leveling benchmark T004 and continuous GNSS station GS03. The distance between two stations are 0.2 km.

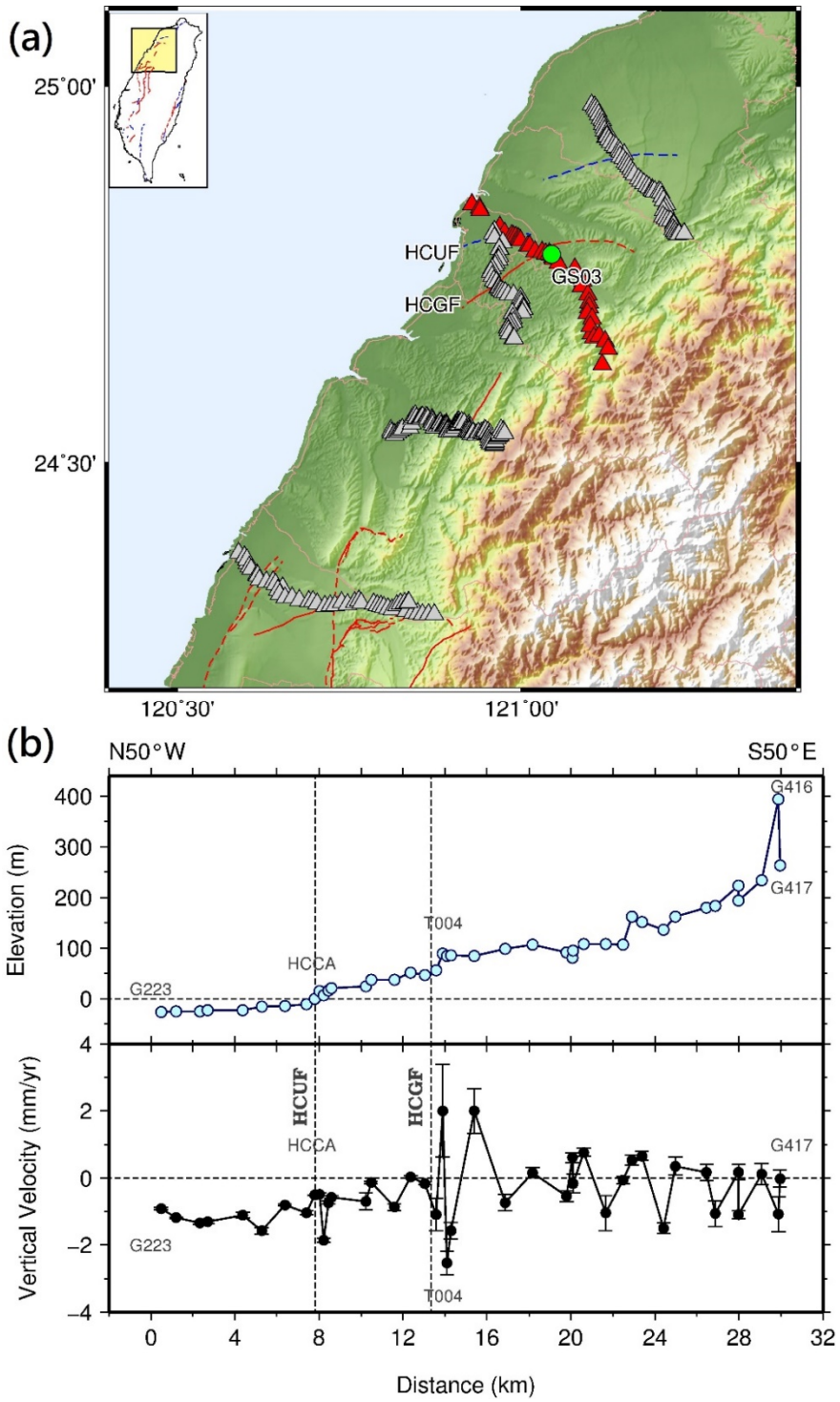


圖 2-3.21：新竹至五峰世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.21: Elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

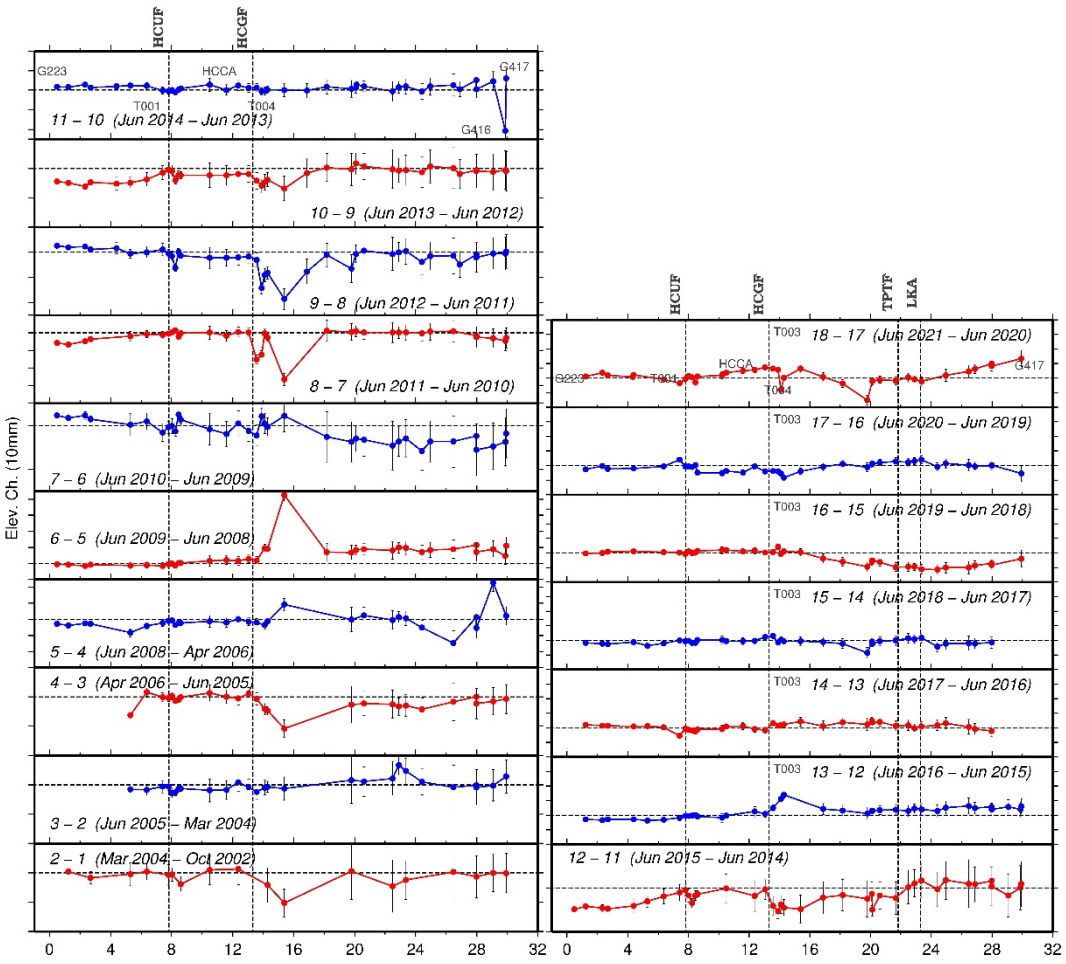


圖 2-3.22：新竹至五峰測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.22: Difference of the Hsinchu-Wufeng leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

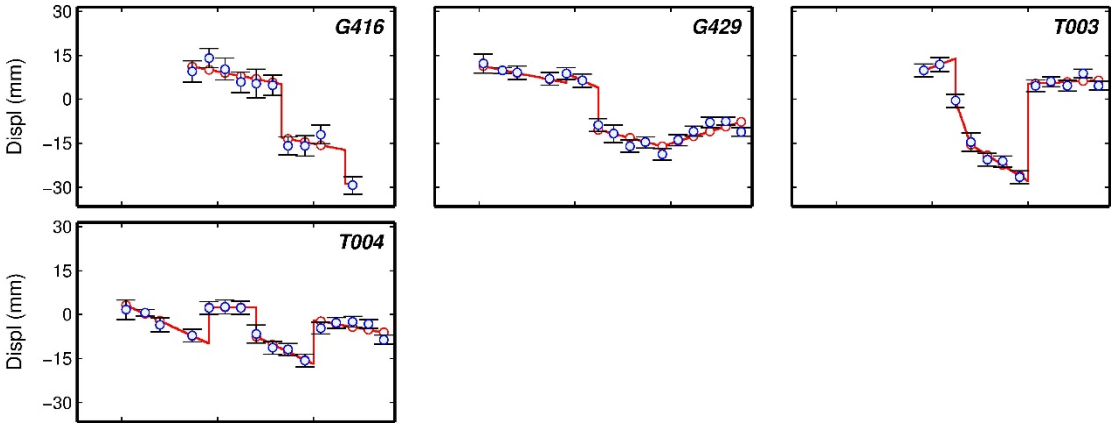


圖 2-3.23：新竹至五峰測線之部份時間序列。

Figure 2-3.23: Part of leveling time series of the Hsinchu-Wufeng leveling route.

2-3-4-3 新竹至峨嵋測線

縣 117_新竹至峨眉測線跨新竹斷層及新城斷層（圖 2-3.25a），測線長為 16.0 公里（投影至剖面的長度），此測線於 2004 至 2021 年間共進行 15 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 GS14 之垂直速率（-4.0 mm/yr），自 2005 年開始作為約制 GB72 相對於 GNSS 連續站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.24）。

此測線的垂直速度由南往北逐漸由 0.0 mm/yr 增加至 3.2 mm/yr 沉陷（圖 2-3.25b）。然而，跨越新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的速度變化，變化量皆< 1.0 mm/yr。

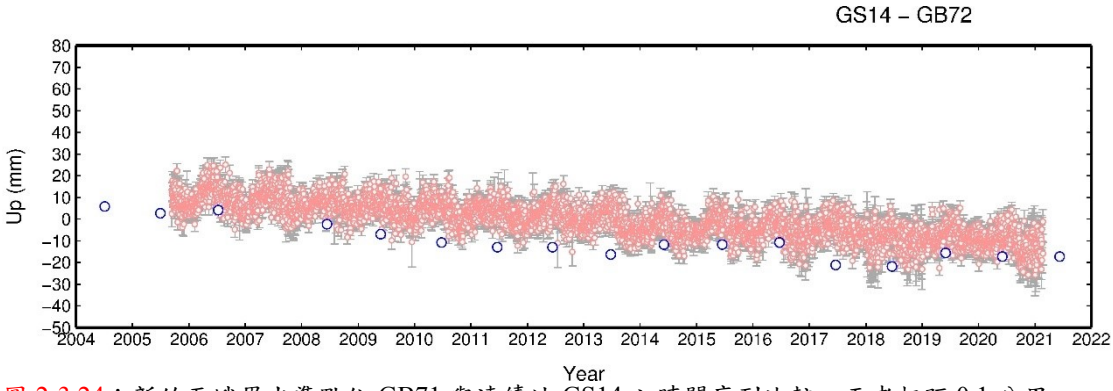


圖 2-3.24：新竹至峨眉水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。
Figure 2-3.24: Time series comparison between Hsinchu-Emei leveling benchmark GB71 and continuous GNSS station GS14. The distance between two stations are 0.1 km.

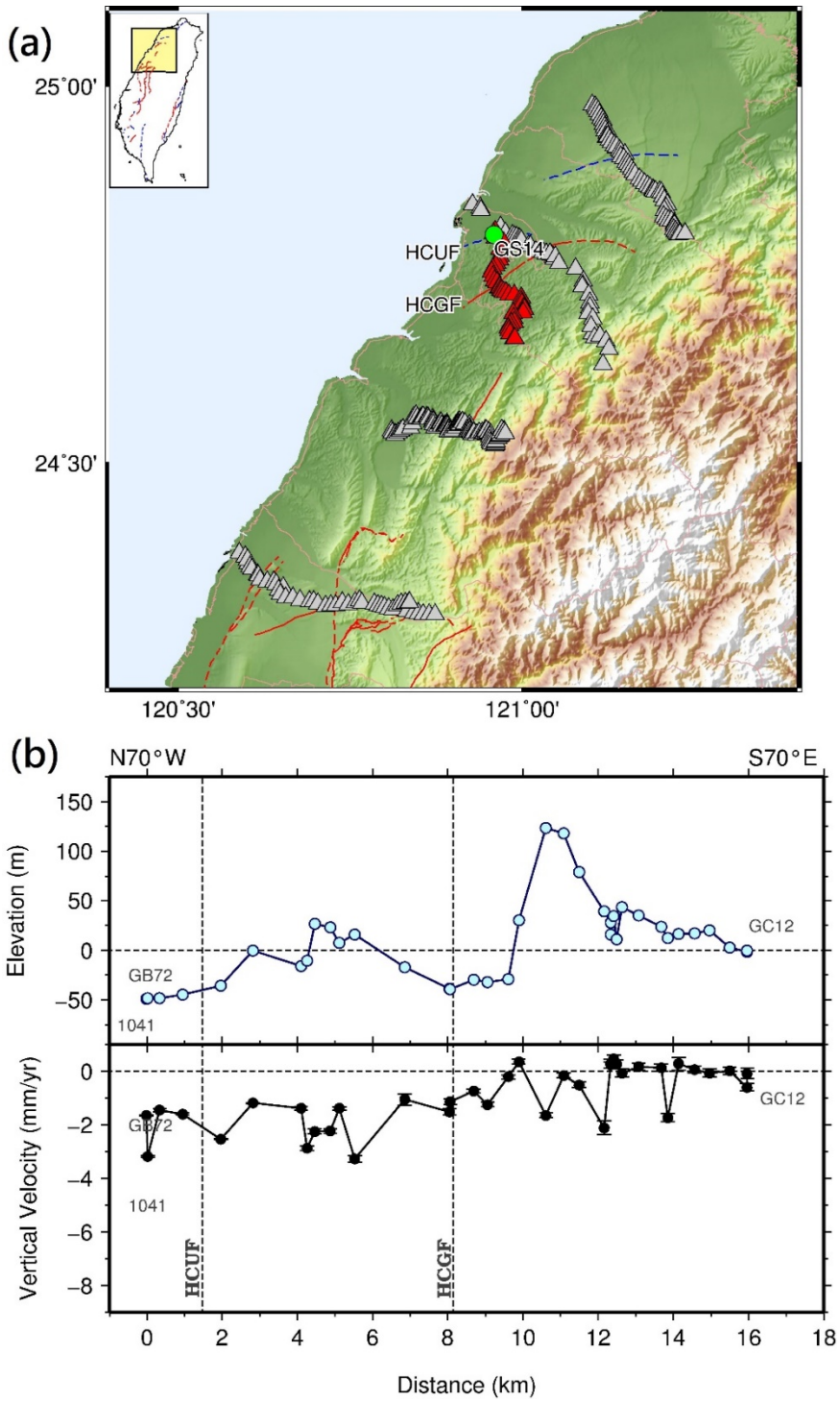


圖 2-3.25：新竹至峨眉世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.25: Elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

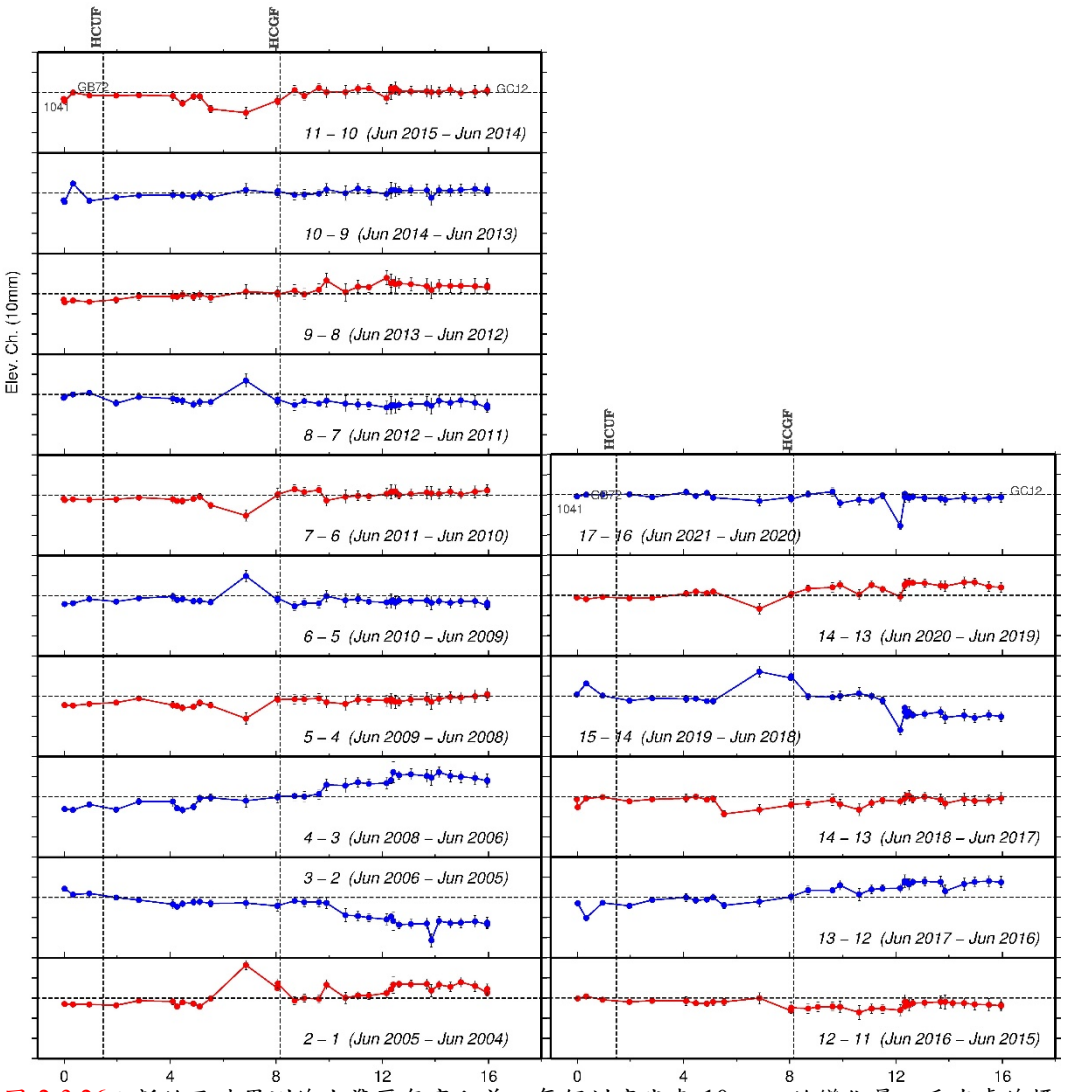


圖 2-3.26：新竹至峨眉測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.26: Difference of the Hsinchu-Emei leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

2-3-4-4 苗栗至南庄測線

苗栗至南庄測線橫跨獅潭斷層（圖 2-3.28a），測線長為 16.8 公里，此測線於 2005 至 2021 年間共進行 15 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 PENL 之垂直速率（-3.1 mm/yr），2005 年至 2016 年作為約制點 GD97 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.27）。

整條測線的水準沉陷速率大多在 2.0-4.0 mm/yr 之間（圖 2-3.28b），少數最大沉陷速率可達 7.0 mm/yr。跨獅潭斷層區域之速率變化並不顯著（變化量< 1.0 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，在 2005~2009 年、2010~2016 年及 2017~2021 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化（圖 2-3.29）。

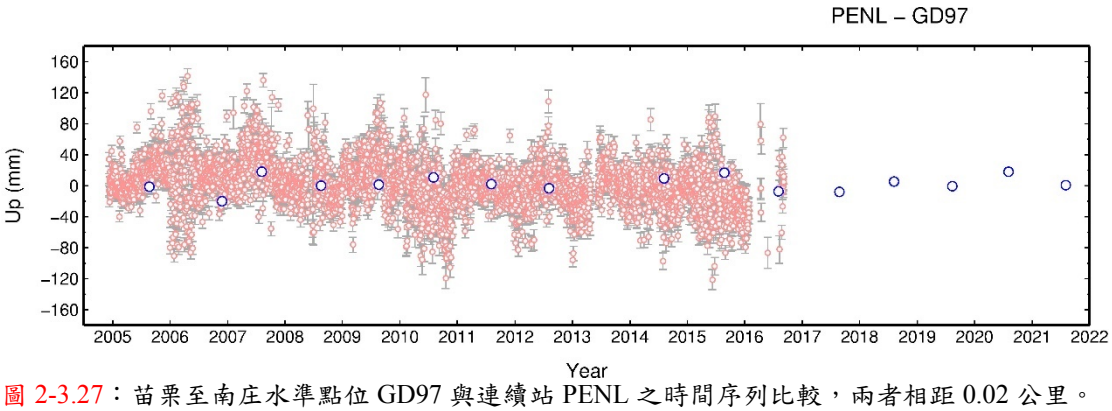


圖 2-3.27：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 2-3.27: Time series comparison between Miaoli-Nanzhuang leveling benchmark GD97 and continuous GNSS station PENL. The distance between two stations are 0.02 km.

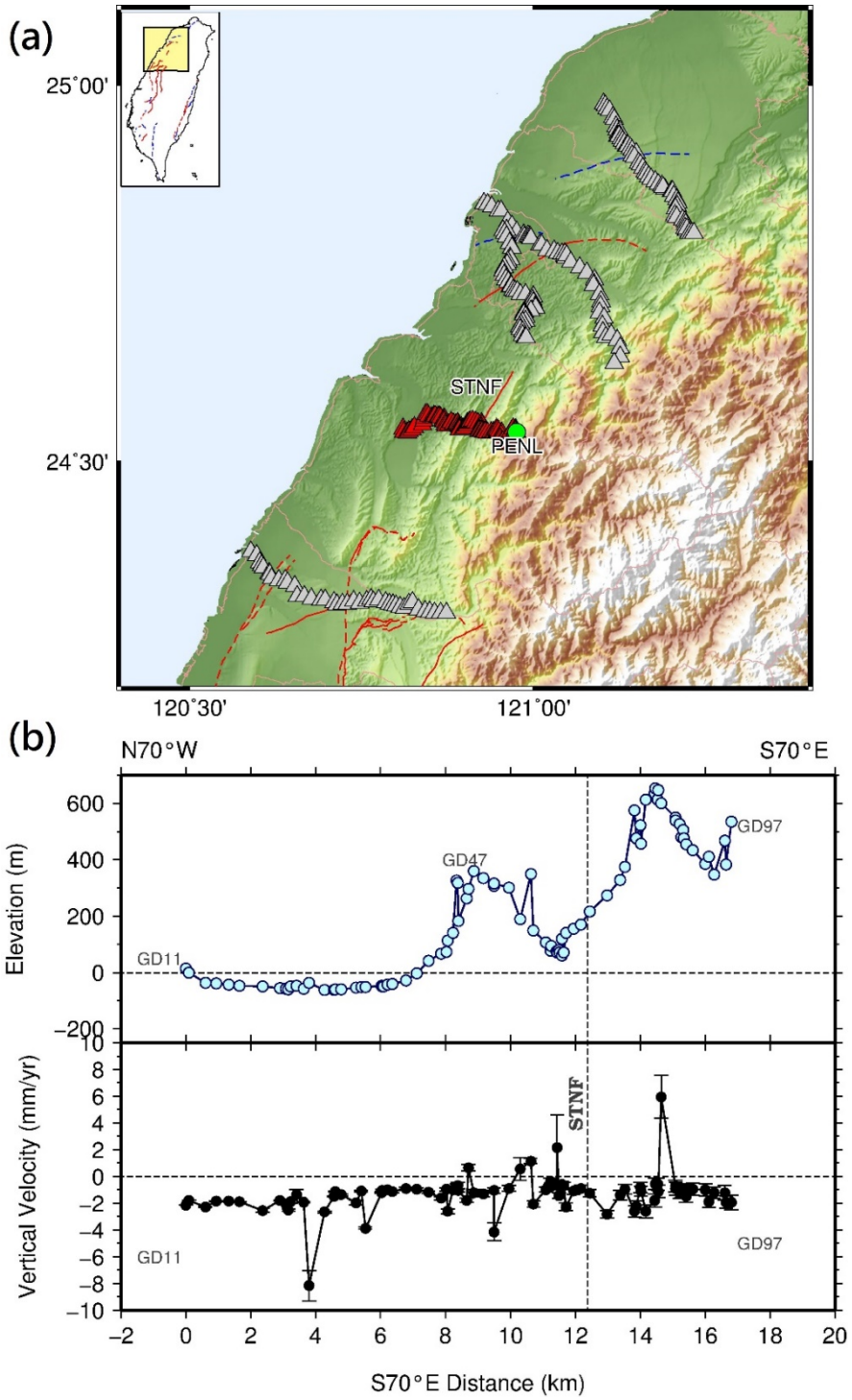


圖 2-3.28：苗栗至南庄世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 2-3.28: Elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. STNF is the Shihtan fault.

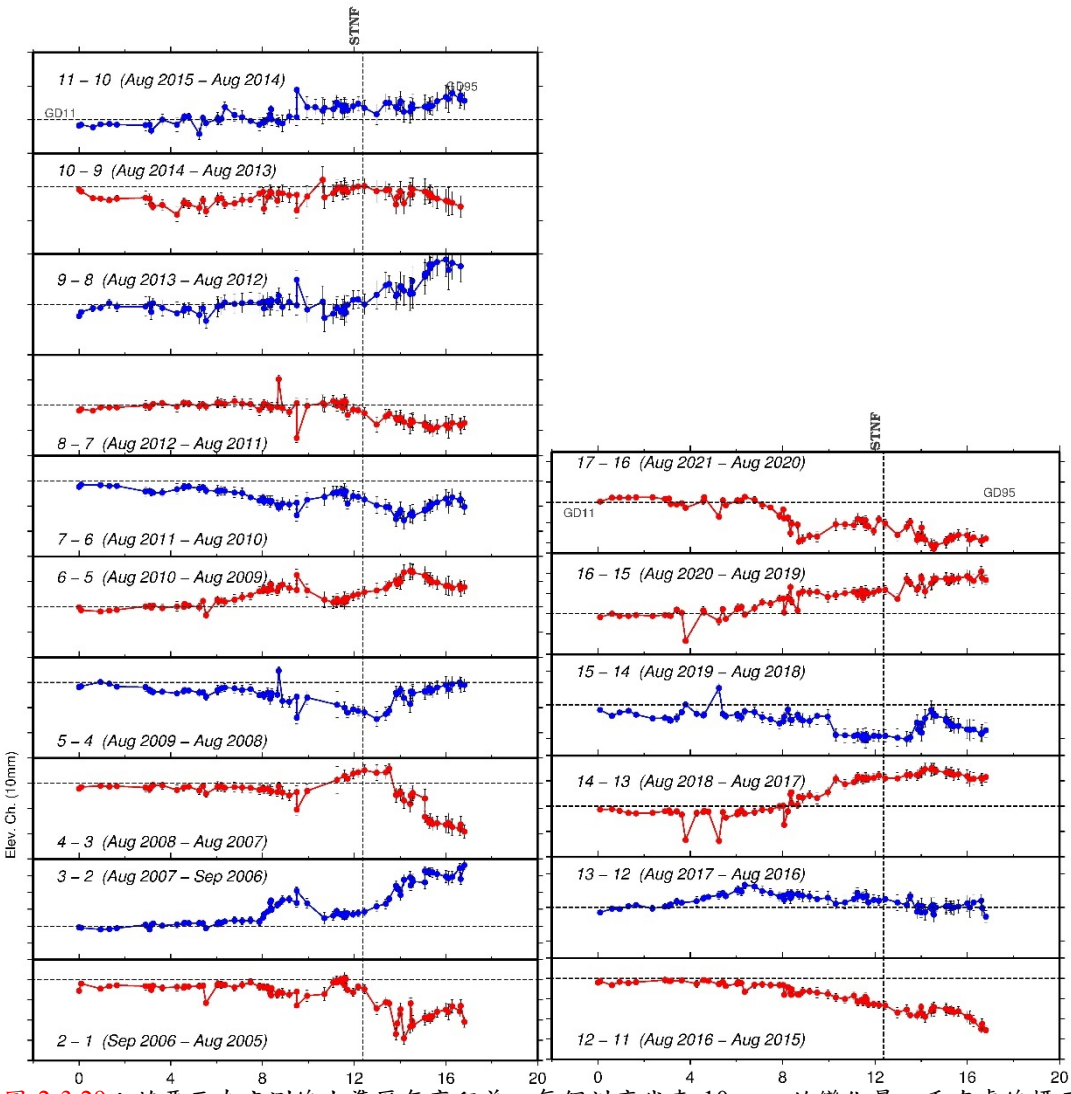


圖 2-3.29：苗栗至南庄測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 2-3.29: Difference of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. STNF is the Shihtan fault.

2-3-5 中部地區精密水準測線

2-3-5-1 大安至東勢測線

大安-東勢測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層（圖 2-3.31a），測線長 30.2 公里（投影至剖面的長度），並於 2015 年後段新設 14 個測站，從 2004 年至 2021 年止共計有 17 次施測。2015 年起由 GF44（卓蘭國小）延伸測線至 B283（卓蘭實驗高中），該點位位於連續站 GS82 天線盤支架結構體上，因此使用 GNSS 連續站 GS82 之垂直速率（-0.5 mm/yr）作為約制站，自 2016 年以來校正 B283 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.30)。

大安-東勢測線各水準點之垂直速度多在-4.0 mm/yr 至 2.0 mm/yr 間（圖 2-3.31b），而 G920 以東之水準點因測量次數過少建議持續監測。且自鐵砧山至屯子腳斷層間（東陽國小至內埔國小）持續呈現下陷（約-3.0 mm/yr），但高程地形卻是逐漸抬升。在通過三義斷層後的垂直速度（貓仔坑至明正國小）逐漸由-4.0 mm/yr 增加至測線末端的-2.0 mm/yr 至 2.0 mm/yr 間，反映三義斷層的上盤相對其下盤正持續抬升。

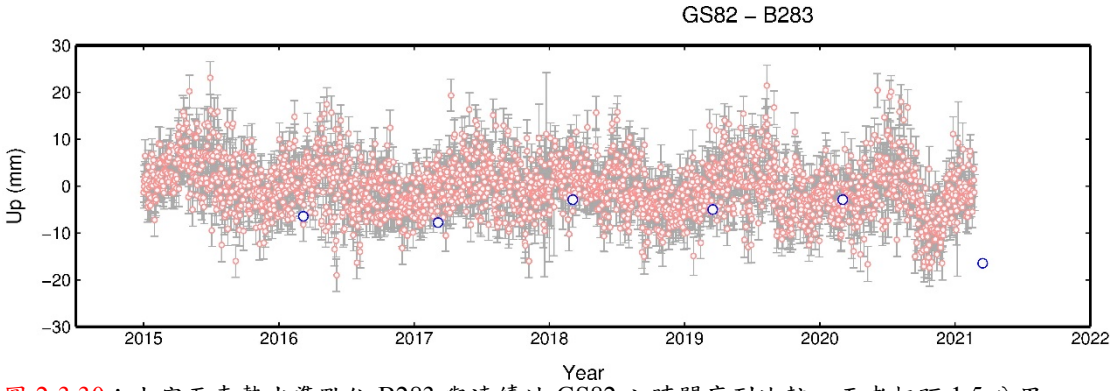


圖 2-3.30：大安至東勢水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。
Figure 2-3.30: Time series comparison between Da'an-Dongshi leveling bench mark B283 and continuous GNSS station GS82. The distance between two stations are 1.5 km.

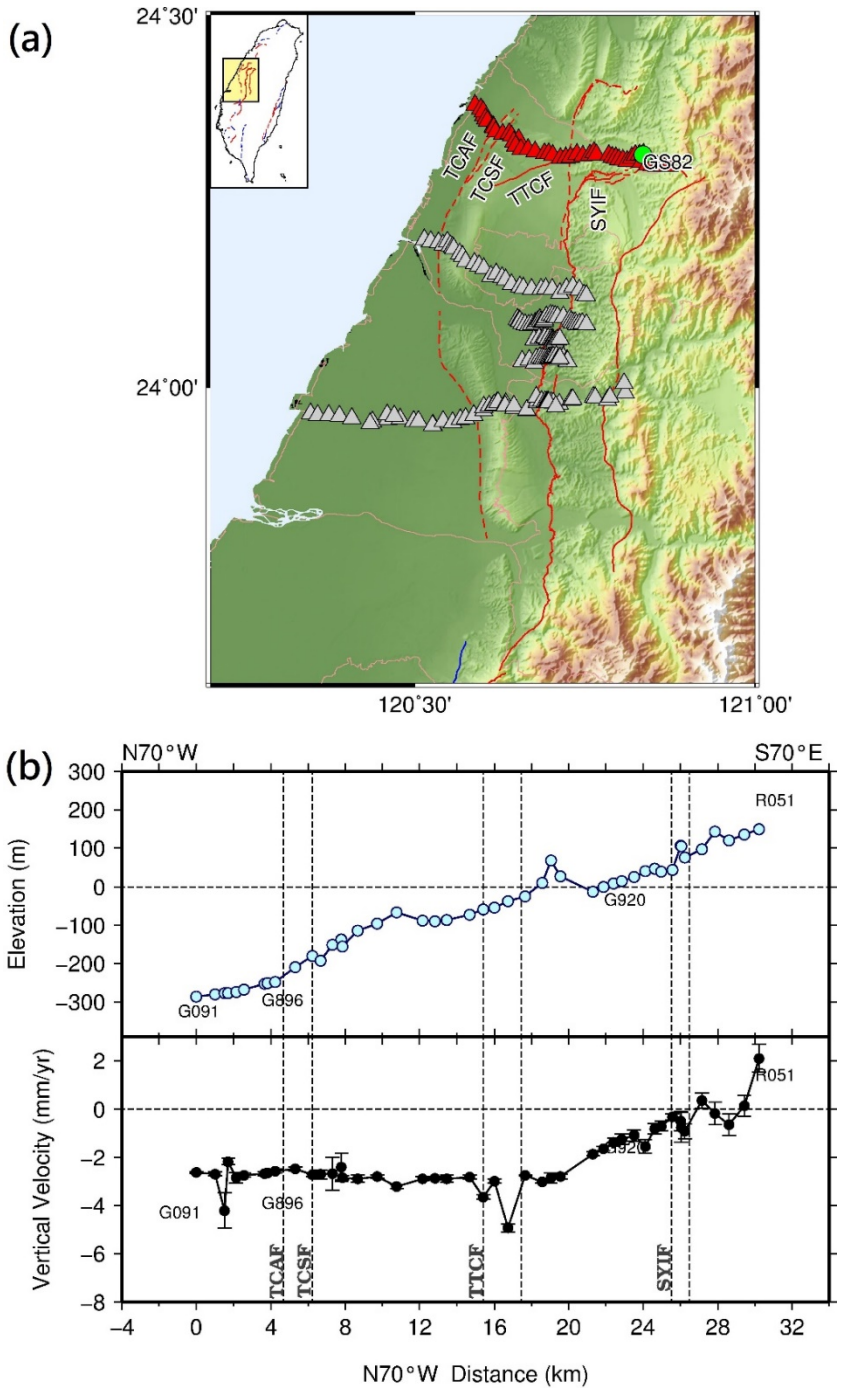


圖 2-3.31：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

Figure 2-3.31: Elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, and SYIF is Sanyi fault.

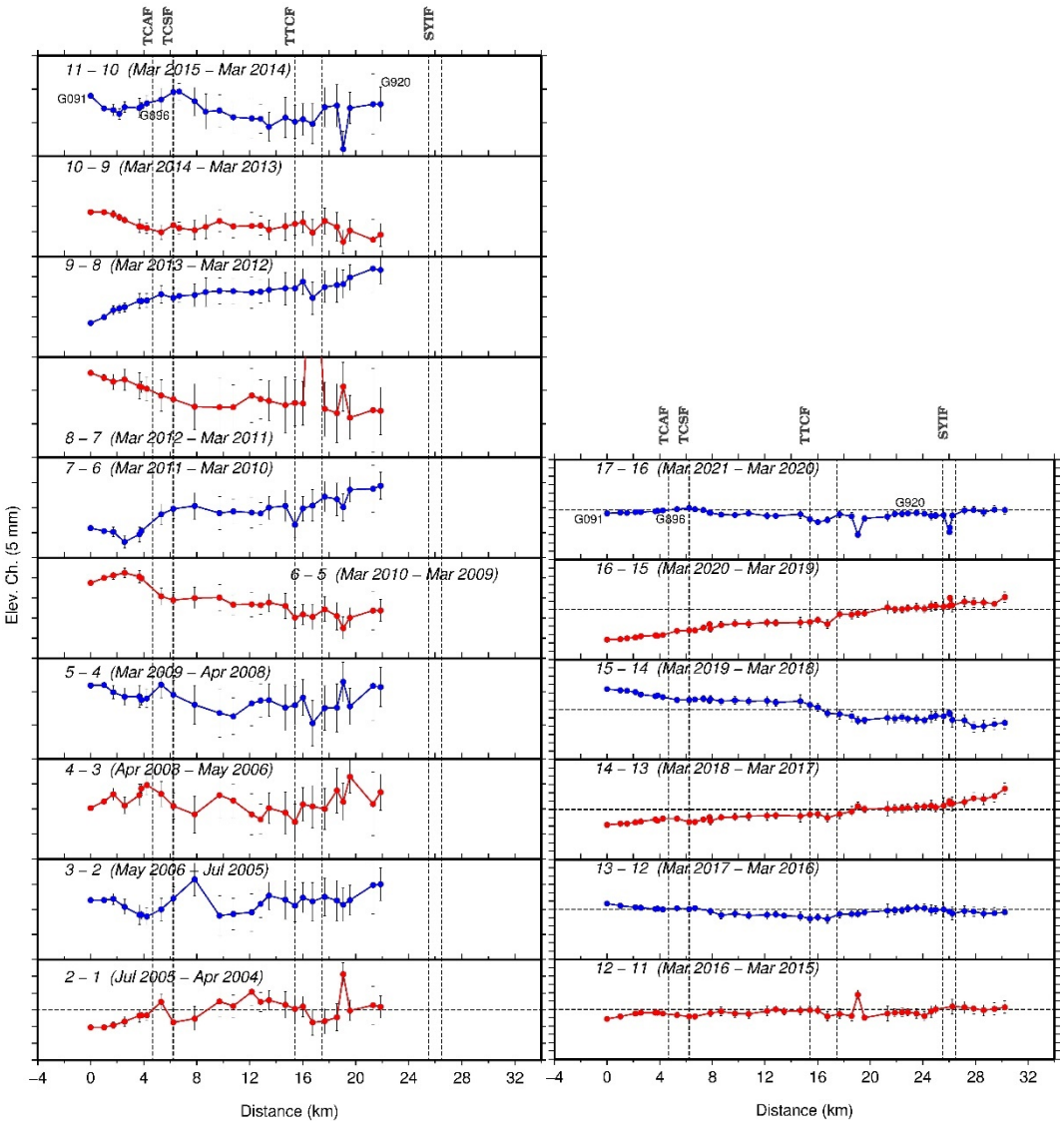


圖 2-3.32：縣 132_大安至東勢測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

Figure 2-3.32: Difference of the Da'an-Dongshi leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, and SYIF is Sanyi fault.

2-3-5-2 龍井至太平測線

龍井至太平測線橫跨車籠埔斷層以及彰化斷層（圖 2-3.34a），測線長約 25.5 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2021 年間，共進行 17 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 LSB0 之 2013 年地震前垂直速率（-4.0 mm/yr），及 2013 年至今之垂直速率（-1.8 mm/yr），自 2007 年以來作為約制點 G937 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.33）。

此測線 2013 年 6 月前之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率在 0.0-7.0 mm/yr 之間（圖 2-3.34b），而 2013 年 6 月後之垂直速度減小，其值在 0.0-4.0 mm/yr 之間，彰化斷層西側轉為抬升。

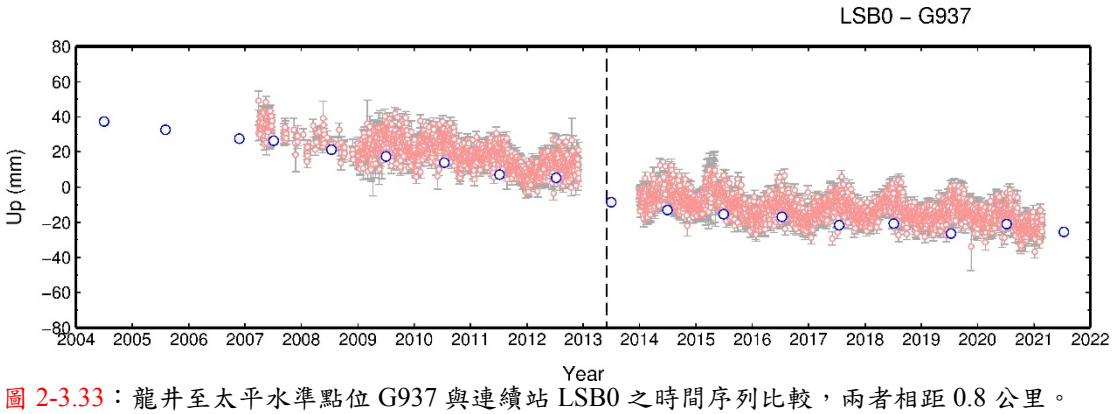


圖 2-3.33：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

Figure 2-3.33: Time series comparison between Longjing-Taiping leveling bench mark G937 and continuous GNSS station LSB0. The distance between two stations are 0.8 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

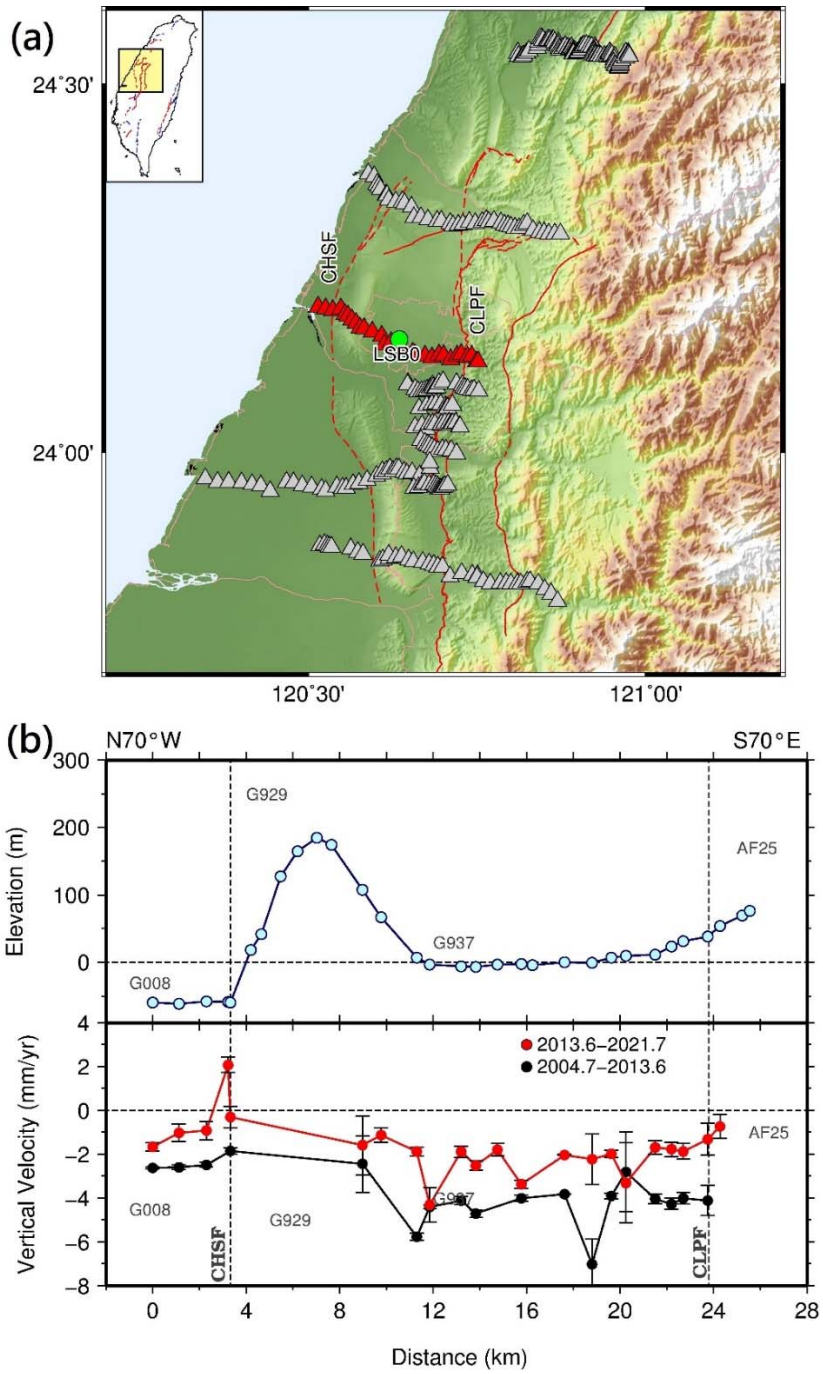


圖 2-3.34：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2004 - 2013 年南投地震震前垂直速度、紅色為 2013 至至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2-3.34: Elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. lack is the vertical velocity before the Nantou earthquake of 2004-2013 , red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, CLPE is Chelungpu fault.

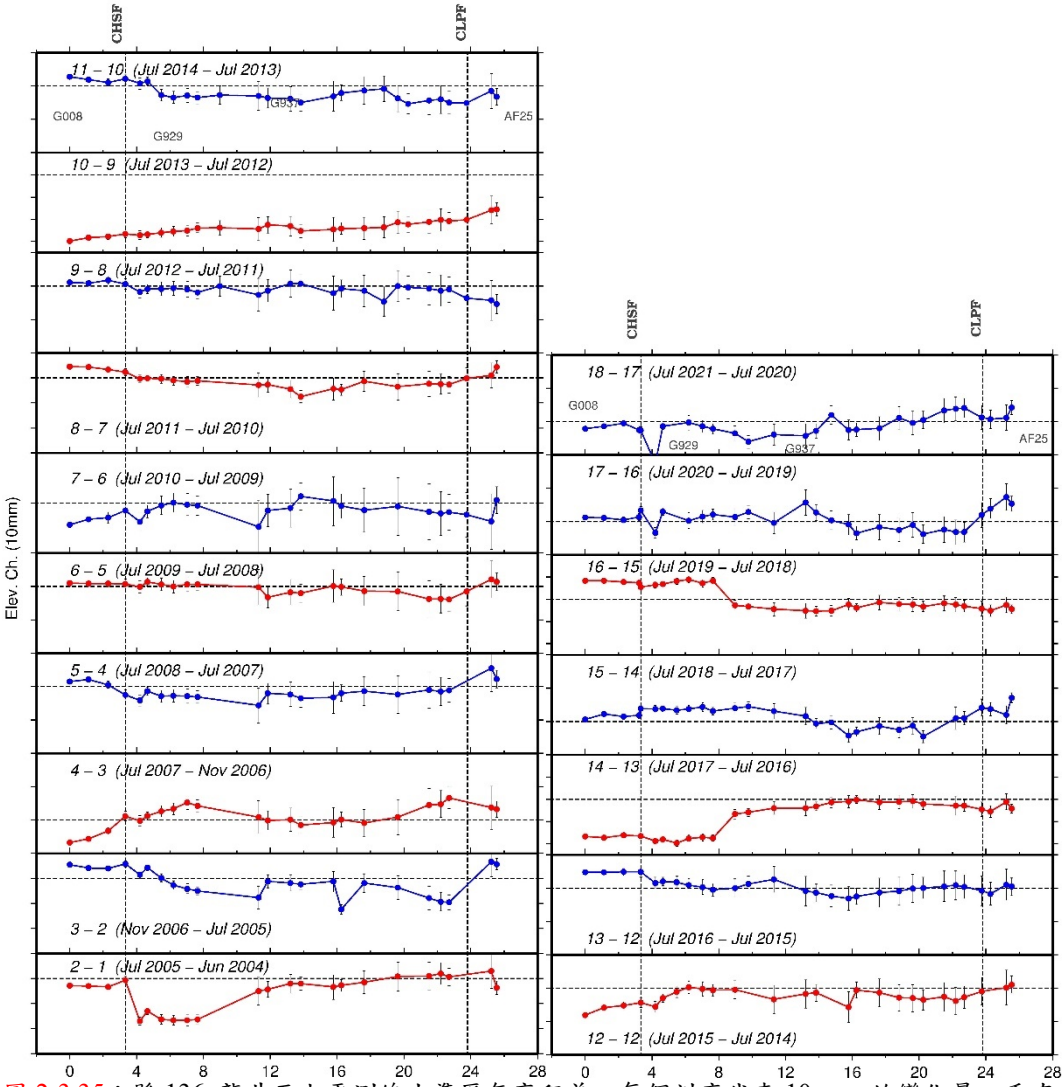


圖 2-3.35：縣 136_龍井至太平測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。T TCAF 為大甲斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2-3.35: Difference of the Longjing-Taiping leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, CLPE is Chelungpu fault.

2-3-5-3 五光至黃竹測線

五光-黃竹測線橫跨車籠埔斷層（圖 2-3.37a），總長為 11.0 公里（投影至剖面的長度），自 2006 至 2021 年止共計施測 16 次，每年施測一次。本測線以 GNSS 連續站 GS23 之 2013 年地震前垂直速率（-4.7 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.6 mm/yr），自 2006 年開始作為約制點來校正 AF15 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.36）。

從垂直速度及歷年高程變化來看（圖 2-3.37b），此測線 2013 年 6 月前與後的垂直速度並無太多變化亦無顯著抬升變化，近幾年並無明顯之變化呈現相對穩定的狀態。

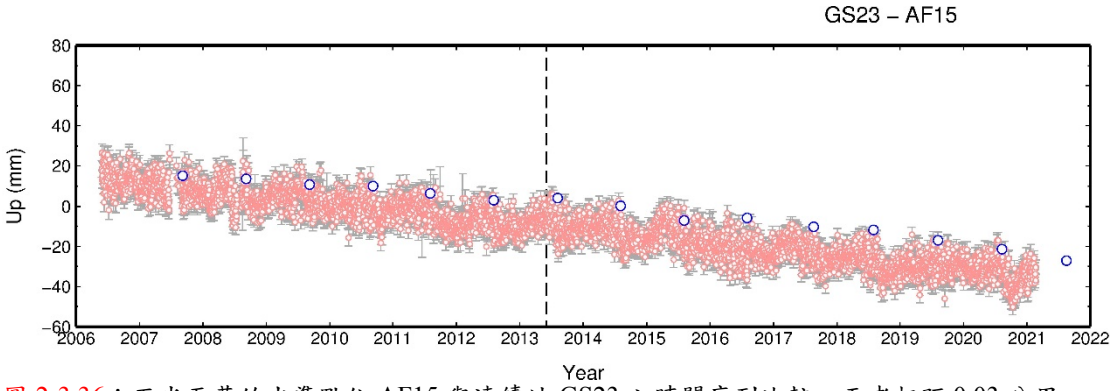


圖 2-3.36：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

Figure 2-3.36: Time series comparison between Wuguang-Huangzhu leveling bench mark AF15 and continuous GNSS station GS23. The distance between two stations are 0.03 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

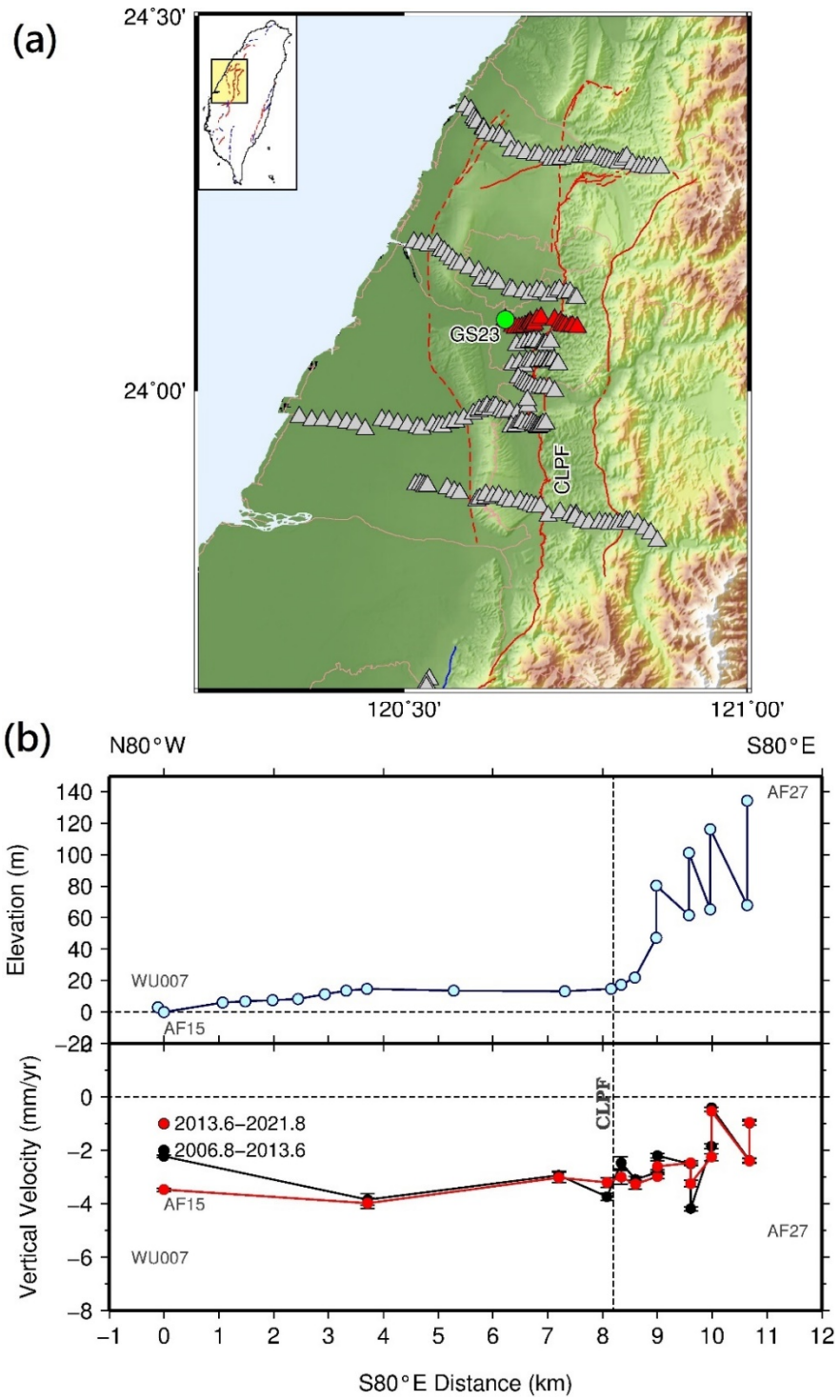


圖 2-3.37：五光至黃竹測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2-3.37: Elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPE is Chelungpu fault.

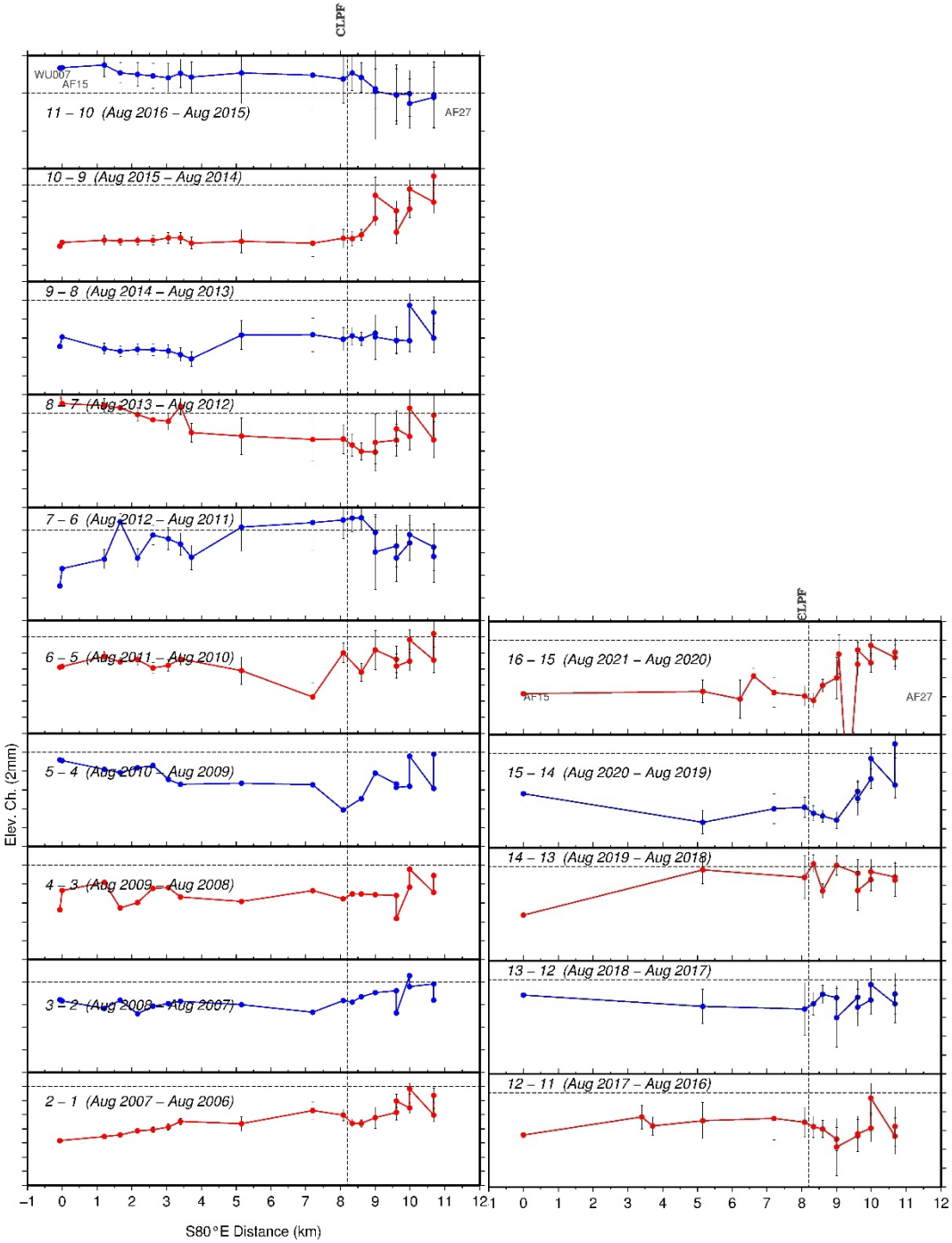


圖 2-3.38：五光至黃竹測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2-3.38: Difference of the Wuguang-Huangzhu leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPE is Chelungpu fault.

2-3-5-4 王功至草屯至埔里測線

王功-草屯-埔里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層（圖 2-3.40a），總長為 47.0 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2021 年共計有 18 次施測。本測線以 GNSS 連續站 CAOT 之 2013 年地震前垂直速率（-2.3 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率(-5.3 mm/yr)，自 2005 年以來作為約制站來校正 T075 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.39）。

由精密水準時間序列得知本測線於 2003 年以及 2007 年發生速度變化，因此以 2007 年為速度變化分界；南投在 2013 年 3 月和 6 月各發生一次規模 6 以上的地震。

彰化斷層以西（王功至員東國小）可見明顯之地層下陷現象（圖 2-3.40b），其沉陷速率最大可達約 55.0 mm/yr，但高程地形卻沒有太大的變化；彰化斷層以東跨車籠埔斷層至大茅埔－雙冬斷層一帶（八卦山山脈至雙冬國小），平均垂直速度均約在-10.0 ~ 0.0 mm/yr 之間，雖然八卦山背斜一帶地形較高，但垂直速度未有明顯變化。相較於彰化斷層西側，東側之垂直速度變化並不顯著。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，彰化斷層以東之垂直速度變化相對而言較不顯著。

在 2013 年南投地震中，跨越大茅埔-雙冬斷層和車籠埔斷層區域，同震位移場主要為抬升，其值在 0.0-10.0 mm 之間。接近彰化斷層前轉為沉陷，跨過斷層後的沉陷量有越來越大的趨勢，其值在 0.0-22 .0mm 之間。隨後在接近海岸線時又轉為抬升，其值在 0.0-22.0 mm 之間（圖 2-3.41）。

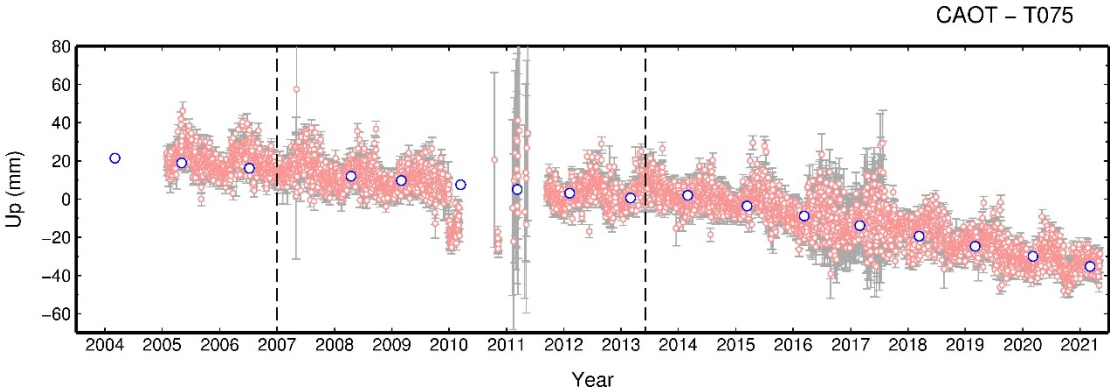


圖 2-3.39：王功至草屯測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左側虛線為 2007 年速度轉折，右側虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.39: Time series comparison between Wanggong-Caotun and Caotun-Puli leveling bench mark T075 and continuous GNSS station CAOT. The distance between two stations are 0.3 km. The left dashed line is the 2007 velocity change event and the right is June 2nd 2013 Nantou earthquake.

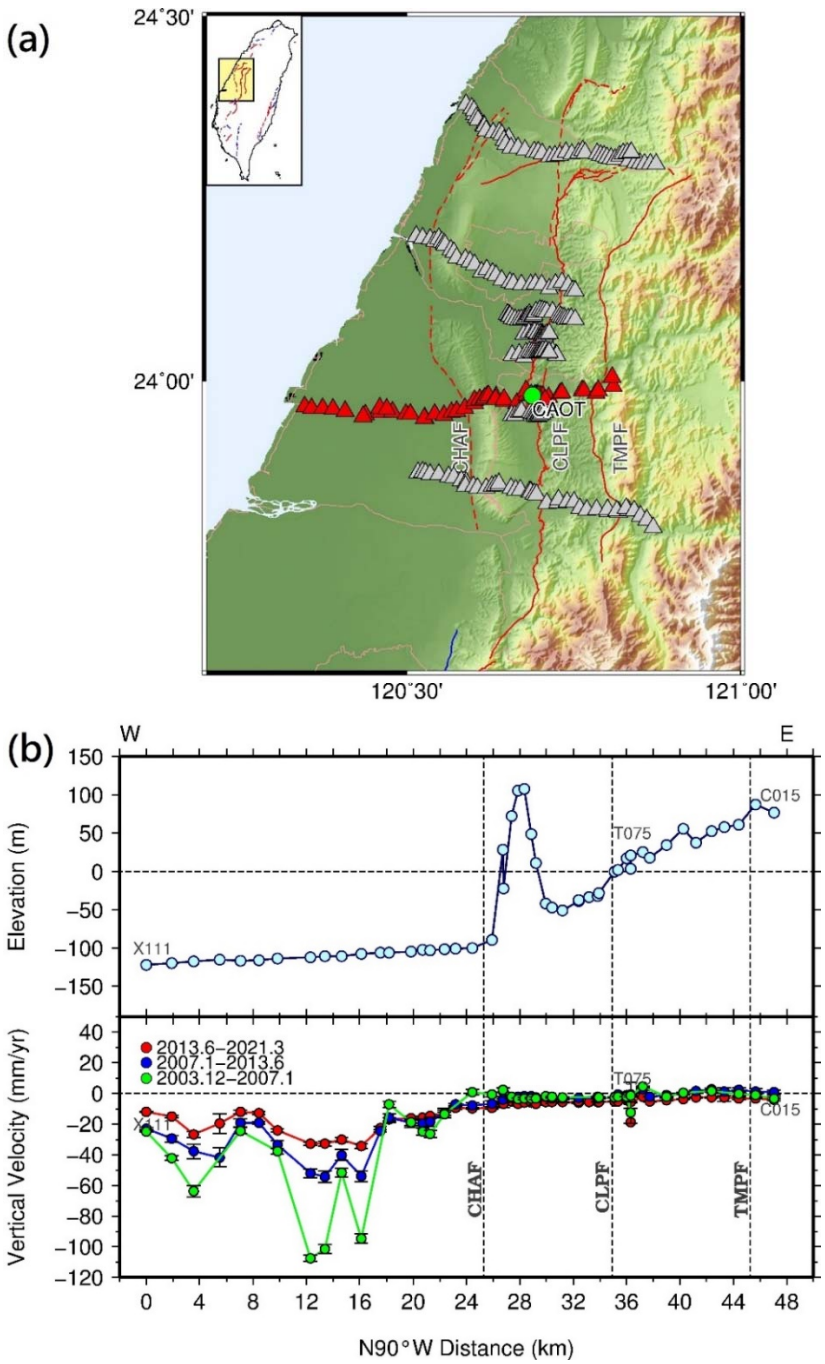


圖 2-3.40：縣 148-台 14_王功至草屯水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2-3.40: Elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

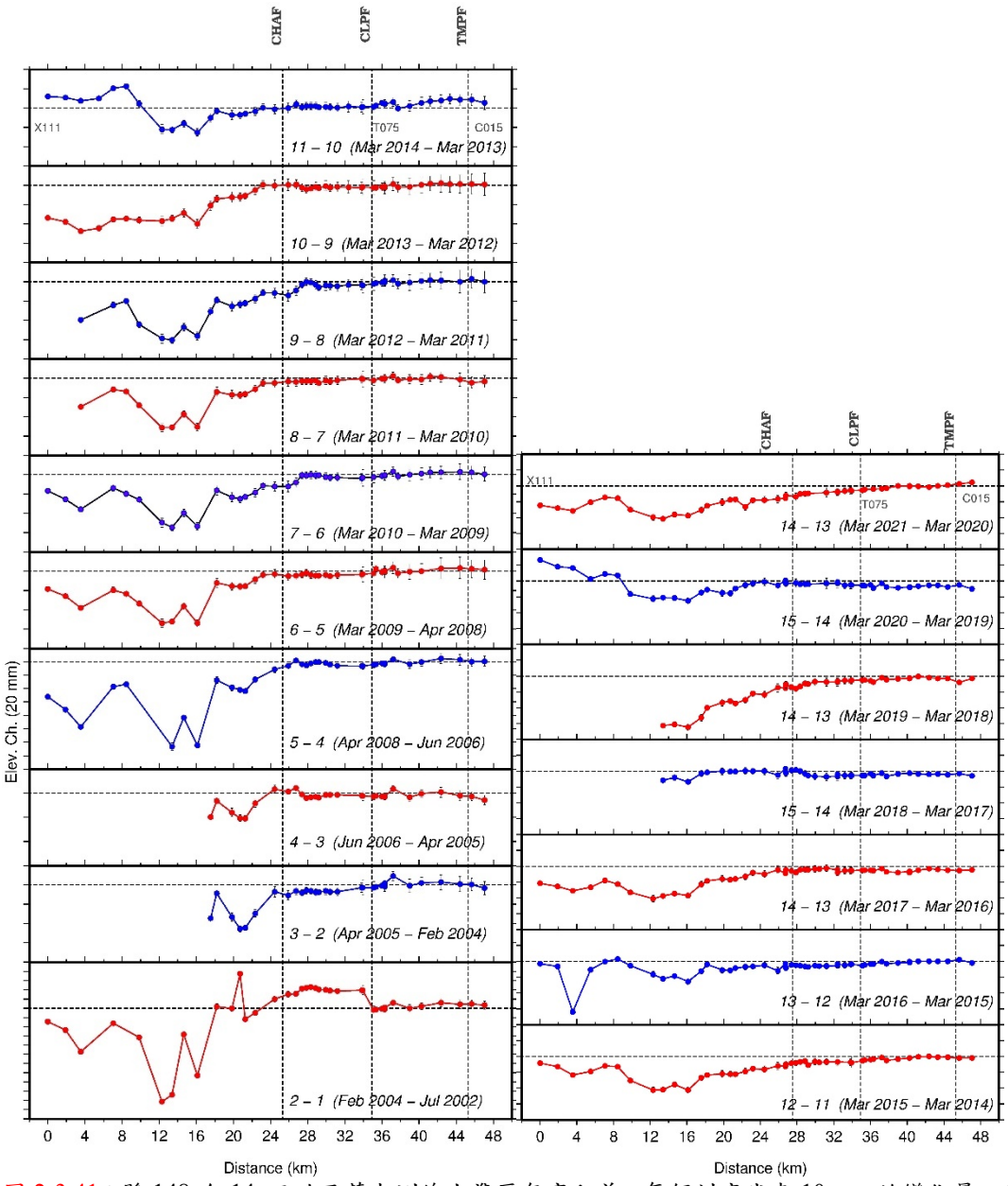


圖 2-3.41：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2-3.41: Difference of the Wuguang-Huangzhu leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-3-5-5 北斗至水里測線

北斗-水里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層（圖 2-3.44a），測線長為 36.8 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2021 年共計有 18 次施測。本測線以 GNSS 連續站 GS26 之 2013 年地震前垂直速率（-2.9 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-2.9 mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 MX83 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.42），在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 以上的南投地震，造成此測線各點位有 0.0 mm 到 79.0 mm 的同震位移量。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮南投地震同震位移之影響。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G285 已滅失，無法繼續觀測。

根據圖 2-3.44b，2007 年前之垂直速度大致呈現抬升現象，除彰化斷層以西沉降速度約為 10 mm/yr，越往東之抬升速度逐步上升至約 12 mm/yr，2007 年至 2013 年間彰化斷層以西之垂直速度雖沉陷（最大值約-6.0 mm/yr），但不似王功至埔里測線可見明顯的地層下陷現象（最大值約-80.0 mm/yr）。而彰化斷層以東至赤水派出所一帶，高程地形有顯著抬升，但垂直速度變化不大。2013 年後之垂直運動在通過彰化斷層後亦逐步抬升，且最大值約為 12 mm/yr，較往年數值更為增加。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間國小至水里隧道），高程地形與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由-7.0 ~ 10.0 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr。

在 2013 年南投地震中，此測線由西向東跨過大茅埔-雙冬斷層前，以同震抬升為主，量值在 6.0-79.0 mm 之間。接著在跨越車籠埔斷層前，抬升量大幅減少，其值落在 6.0-26.0 mm 之間（圖 2-3.45）。

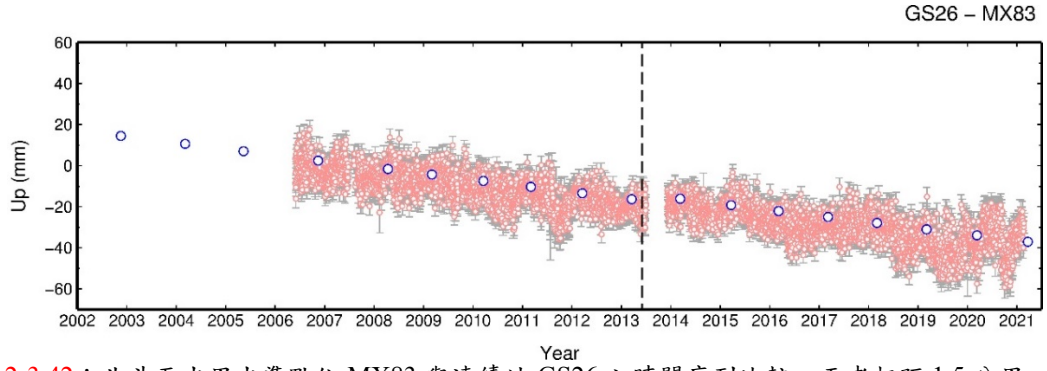


圖 2-3.42：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.42: Time series comparison between Beidou-Shuili leveling bench mark MX83 and continuous GNSS station GS26. The distance between two stations are 1.5 km. Dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

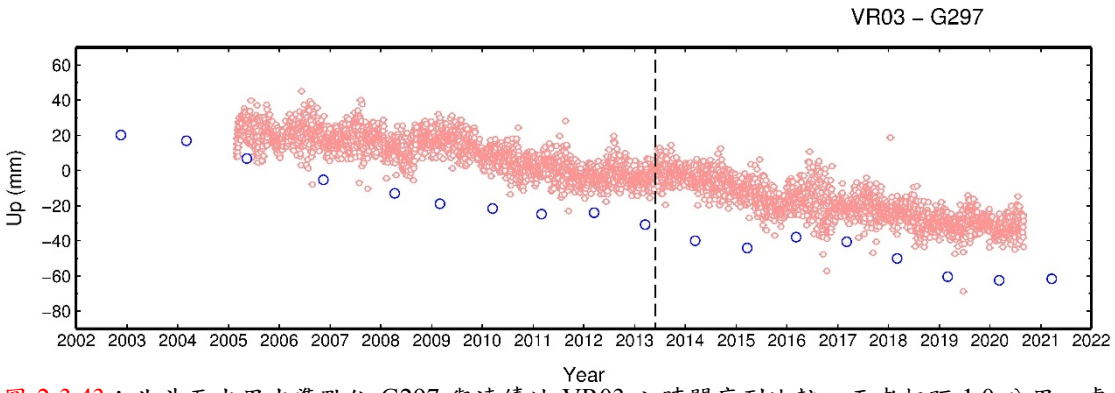


圖 2-3.43：北斗至水里水準點位 G297 與連續站 VR03 之時間序列比較，兩者相距 1.0 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.43: Time series comparison between Beidou-Shuili leveling bench mark G297 and continuous GNSS station VR03. The distance between two stations are 1.0 km. Dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

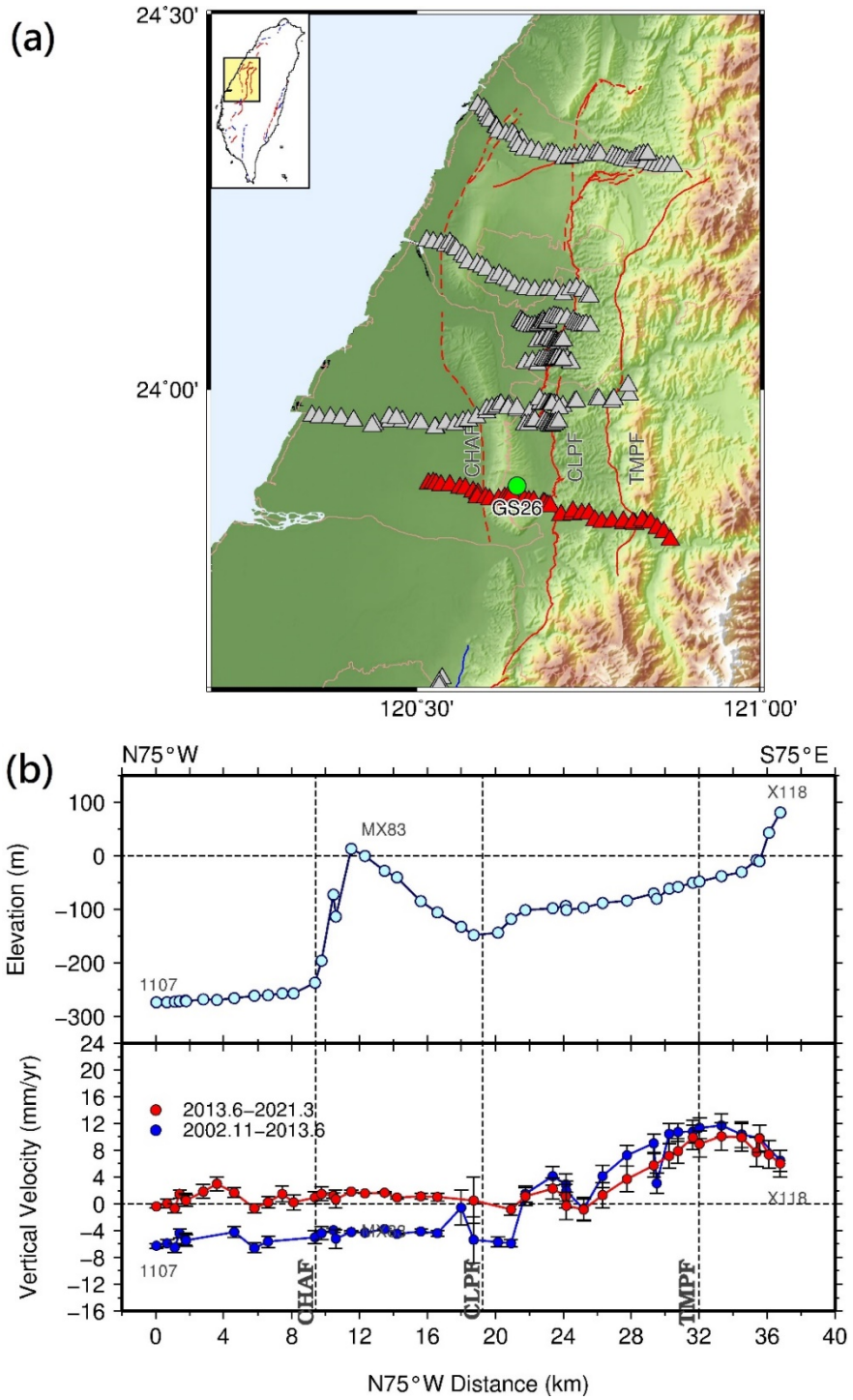


圖 2-3.44：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

Figure 2-3.44: Elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

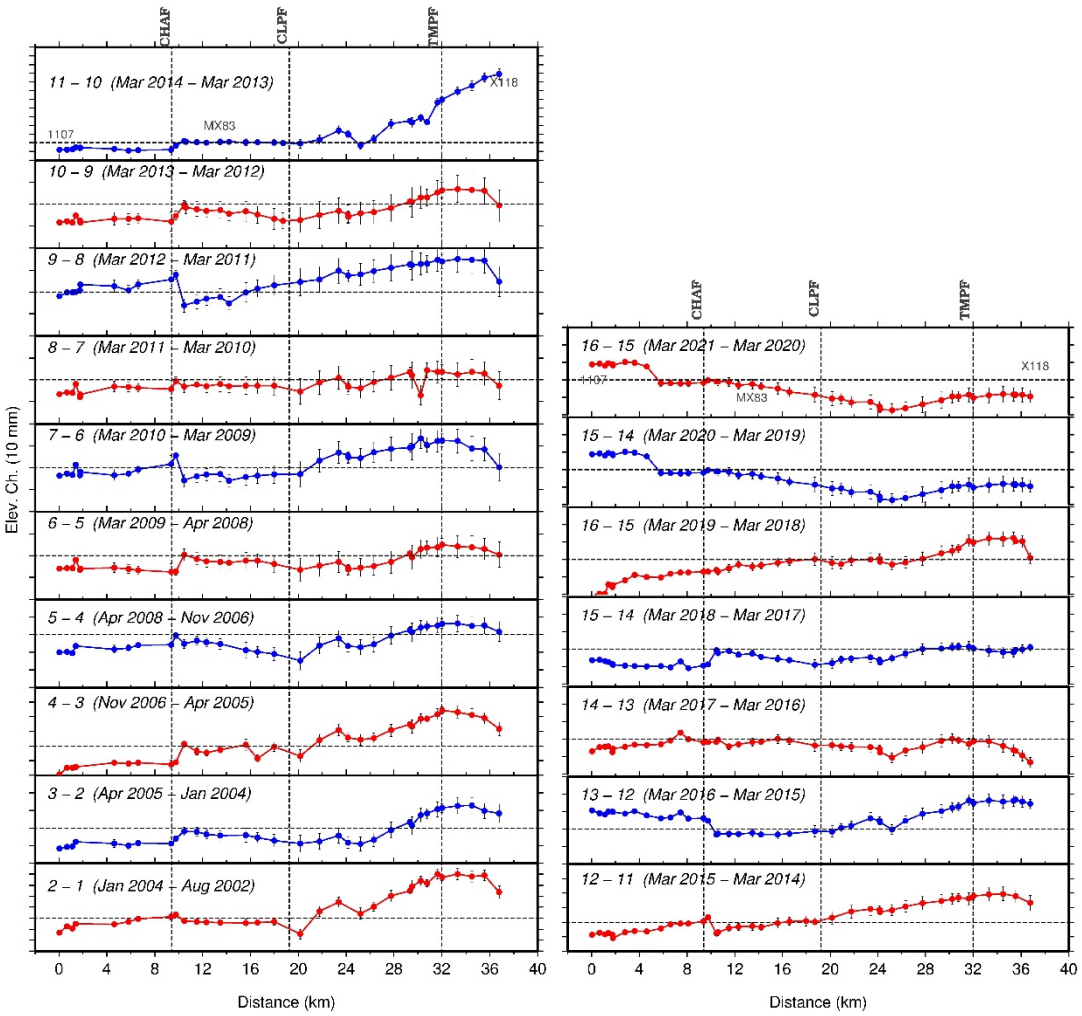


圖 2-3.45：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

Figure 2-3.45: Difference of the Wuguang-Huangzhu leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-3-6 嘉南地區精密水準測線

2-3-6-1 金湖至瑞峰測線

金湖至瑞峰測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層（圖 2-3.48a），投影至剖面的長度為 52.6 公里，2003 年至 2021 年間共進行 19 次施測，點位 G718 於今年損毀。本測線以 GNSS 連續站 GS17 及之垂直速率（2.3 mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 G776 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.46)。

此測線梅山斷層以西之垂直速度變化較大（圖 2-3.48b），最大沉陷值達 24.6 mm/yr，九芎坑斷層以東則大多介在-2.0 至 9.0 mm/yr 之間，往東有抬升越顯著的趨勢，樁點 G757 速度達到 86.6 mm/yr 下陷（圖 2-3.50），可能為地滑所導致。

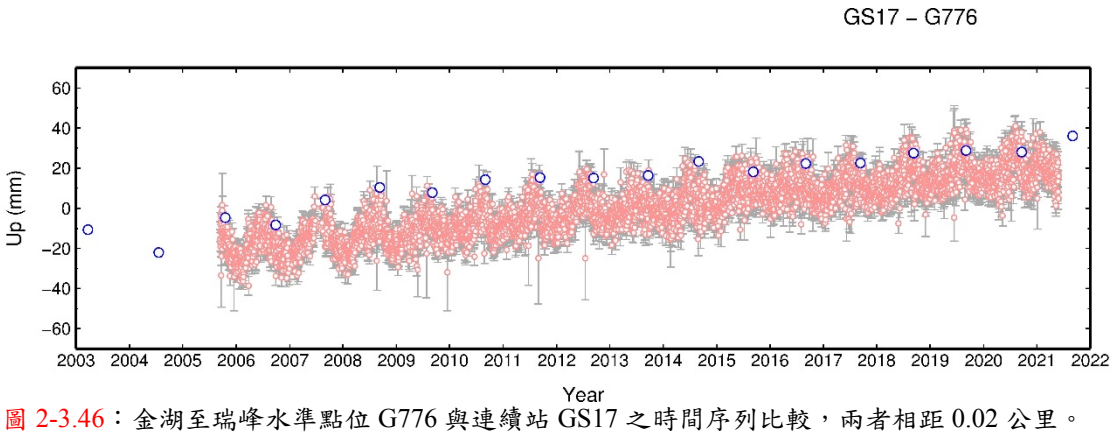


圖 2-3.46：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 2-3.46: Time series comparison between Jinhu-Ruifeng leveling bench mark G776 and continuous GNSS station GS17. The distance between two stations are 0.02 km.

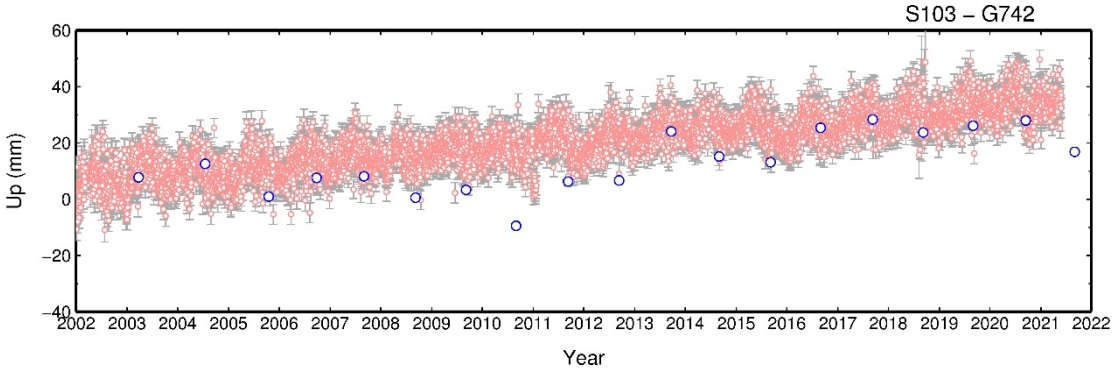


圖 2-3.47：金湖至瑞峰水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較，兩者相距 0.78 公里。
Figure 2-3.47: Time series comparison between Jinhu-Ruifeng leveling bench mark G742 and continuous GNSS station S103. The distance between two stations are 0.78 km.

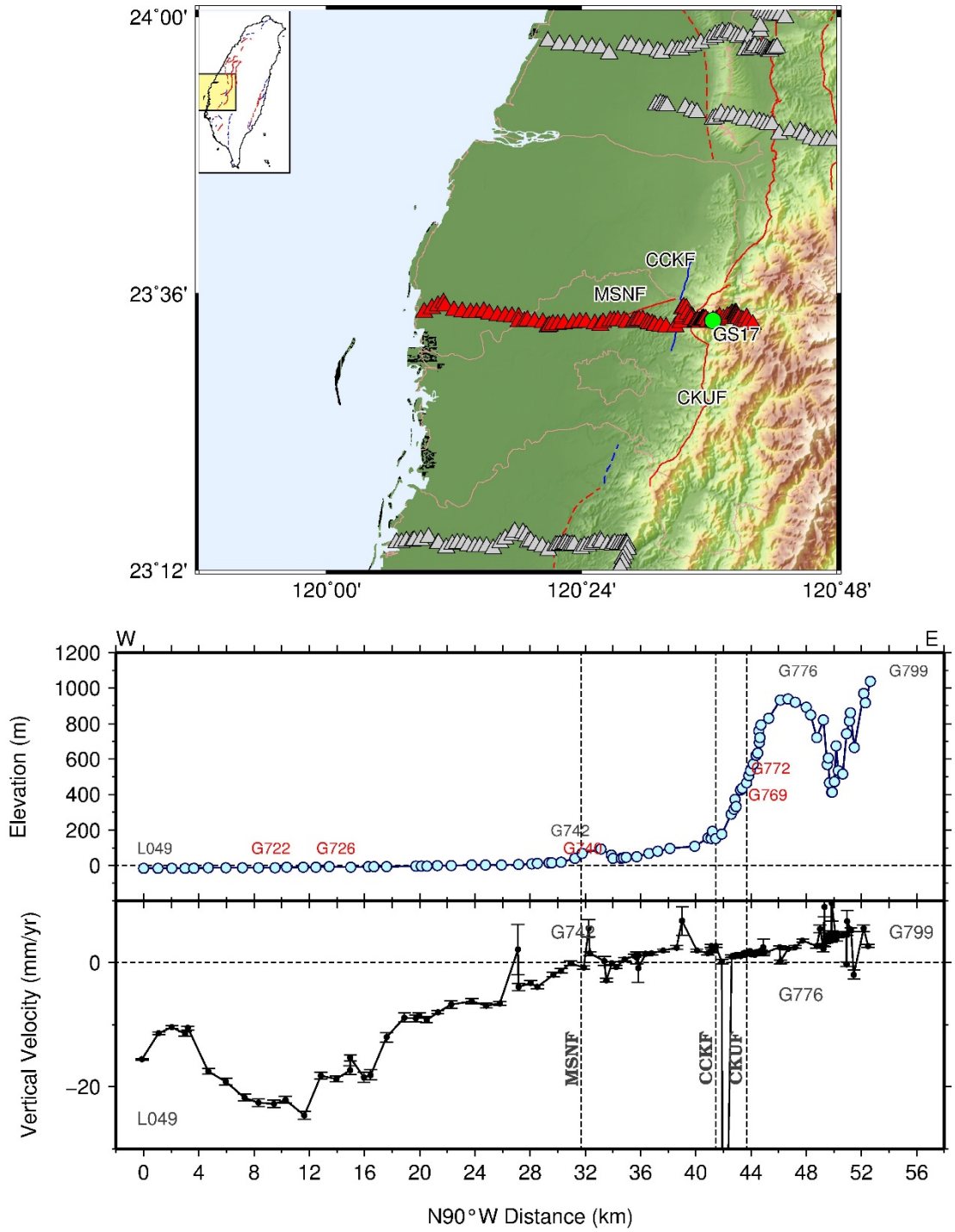


圖 2-3.48：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2-3.48: Elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

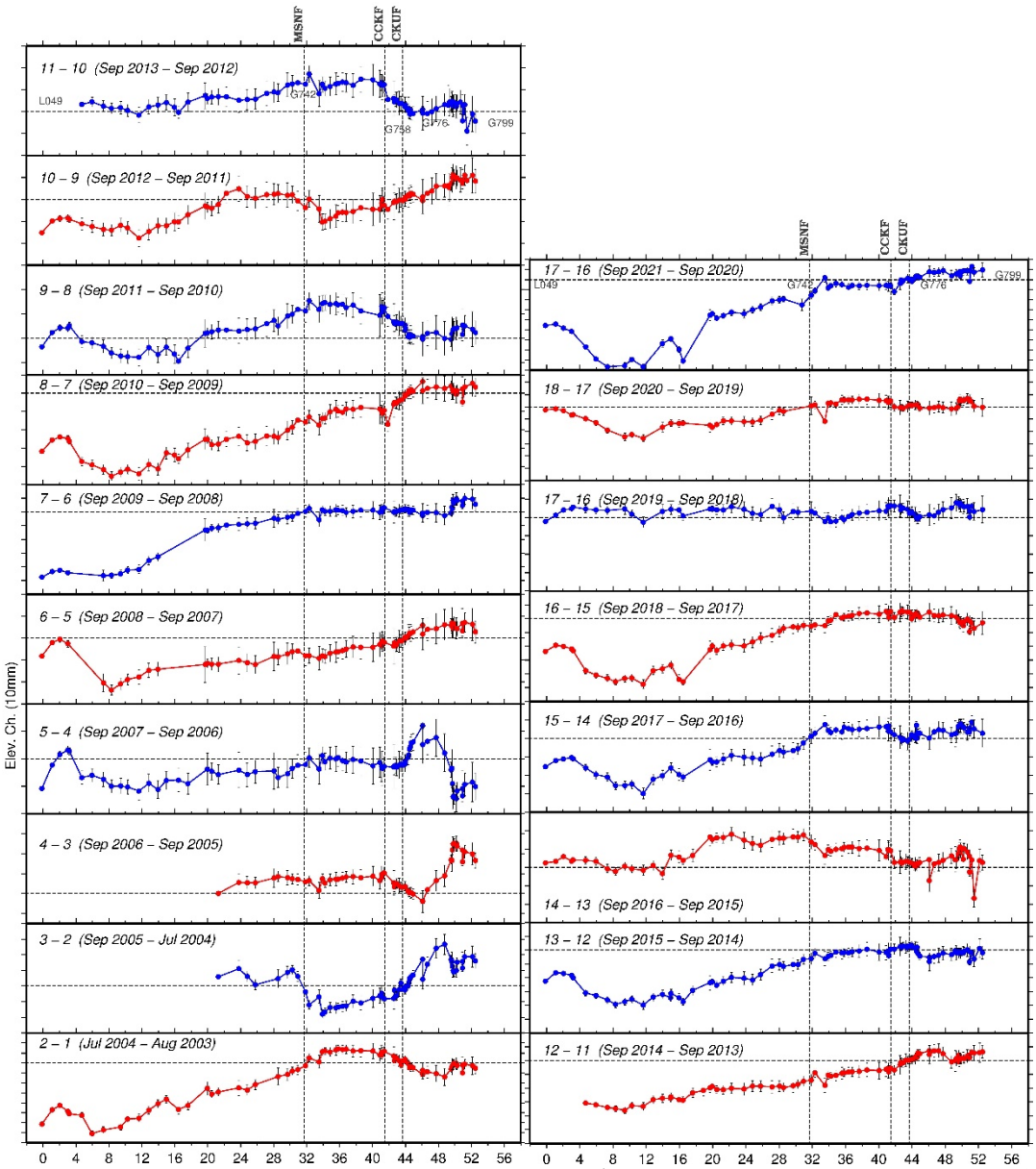


圖 2-3.49：縣 164_金湖至瑞峰測線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2-3.49: Difference of the Jinhu-Ruifeng leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

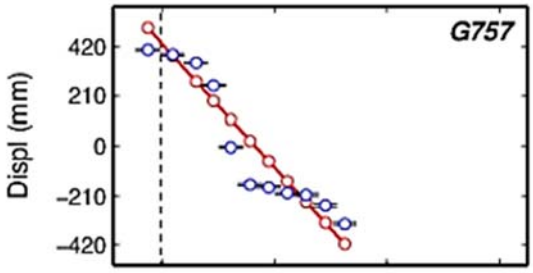


圖 2-3.50：點位 G757 之座標時間序列。

Figure 2-3.50: Site G757 of coordinate time series.

2-3-6-2 北門至楠西測線

嘉南地區完成的精密水準測線為北門-楠西測線（圖 2-3.52a），該測線橫跨六甲斷層與口宵里斷層。測線剖面投影長度為 40.0 公里（圖 2-3.52a），從 2003 年至 2021 年共計施測 18 次，每年施測一次。各年度之水準施測成果，以相鄰年度之高程變化（圖 2-3.53）與累積高程展示。本測線以 GNSS 連續站 GS44 作為約制點，自 2008 年以來校正水準點 I088 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.51）。GS44 與 I088 間之點位距離為 1.0 公里。點位 GS44 於 2003 年至 2010 年甲仙地震間之垂直速率為 8.6 mm/yr；2010 年甲仙地震震後至 2016 年美濃地震間之垂直速率為 8.6 mm/yr；2016 年美濃地震後至今之垂直速率為 6.7 mm/yr。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 2-3.52b）：黑色為 2003 年 10 月至 2010 年甲仙地震期間之垂直速度、紅色為 2010 年甲仙地震至 2016 年美濃地震間之垂直速度、綠色為 2016 年美濃地震至 2021 年 4 月之垂直速度。六甲斷層以西為西部海岸平原，地形高程變化和緩，在六甲斷層以西 18 公里至六甲斷層間呈 0.0-4.0 mm/yr 之抬升，然而在六甲斷層以西 18 公里以西之區域，有約 0-11.0 mm/yr 之沉陷量。在接近六甲斷層逐步轉為為抬升，斷層以東有達到 16.0 mm/yr 以上的垂直抬升速度。由於本測線自六甲斷層以東點位的地形變化趨勢變得較顯著，顯示自進入山區地段，地表垂直運動活動性增加，其中 G824 在美濃地震以後更有高達 51.7 mm/yr 的沉陷。在 2016 年美濃地震中，北門-楠西水準測線跨同震位移場主要為抬升，其值在 0-20 mm 之間（圖 2-3.53）。

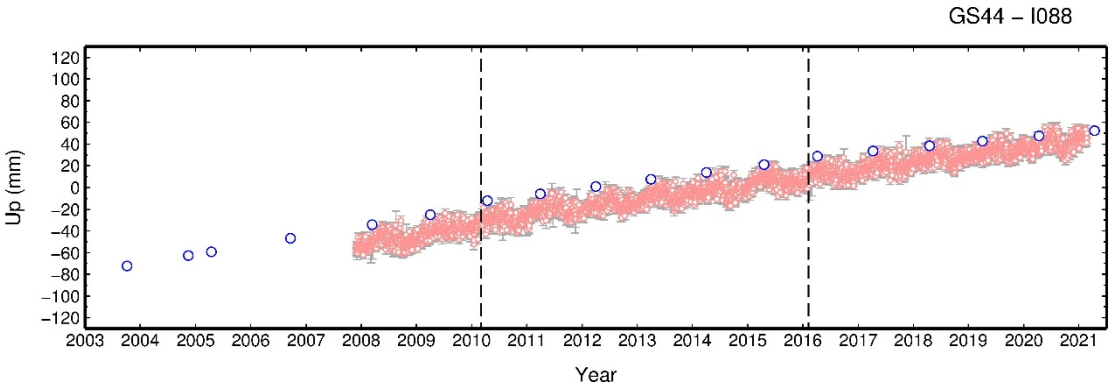


圖 2-3.51：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-3.51: Time series comparison between Beimen-Nanxi leveling bench mark I088 and continuous GNSS station GS44. The distance between two stations are 0.9 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

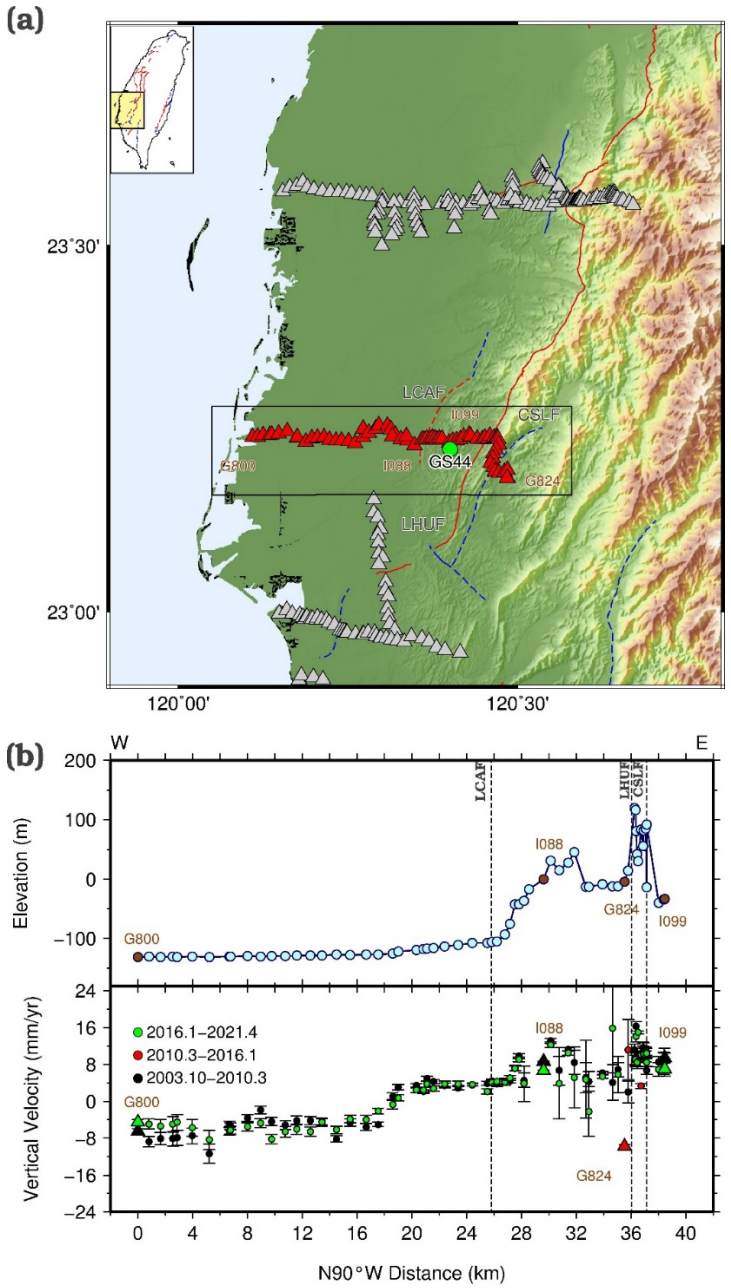


圖 2-3.52：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖，(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口斷層 CSLF 為口宵里斷層。

Figure 2-3.52: Elevation change of the Beimen-Nanxi leveling route. (a)The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to 2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present. LCAF is Liuchia fault.

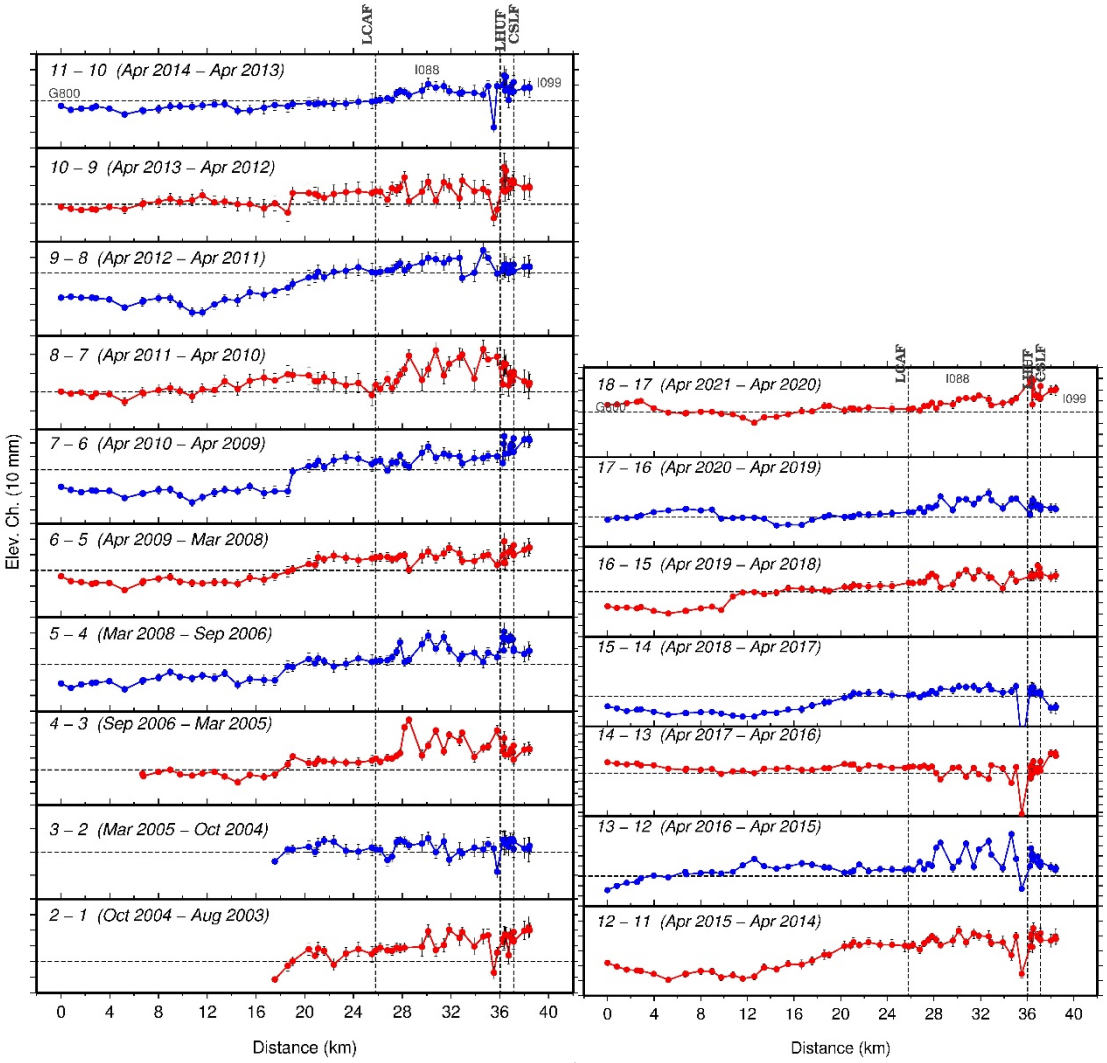


圖 2-3.53：縣 174_北門至楠西測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口斷層，CSLF 為口宵里斷層。

Figure 2-3.53: Difference of the Beimen-Nanxi leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LCAF is Liuchia fault.

2-3-6-3 善化至關廟測線

善化至關廟測線由北往南走橫跨新化斷層（圖 2-3.56a），測線剖面投影長度為 21.3 公里（圖 2-3.56b），從 2003 年至 2021 年共計有 18 次施測，每年施測一次。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G378 已滅失，無法繼續觀測。本測線以 GNSS 連續站 GS29 之垂直速率，自 2017 年以來作為約制站來校正 G377 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.55）。點位 GS29 於 2003 年至 2010 年甲仙地震間之垂直速率為 6.1mm/yr；2010 年甲仙地震震後至 2016 年美濃地震間之垂直速率為 1.5 mm/yr；2016 年美濃地震後至今之垂直速率為 1.7 mm/yr。

2016 年美濃地震造成此水準測線點位有-7.0-39.0 mm 之同震位移量（圖 2-3.57）。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在測線南段（約新化區至關廟區一帶）最大變化量達 39.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮地震之同震位移之影響。

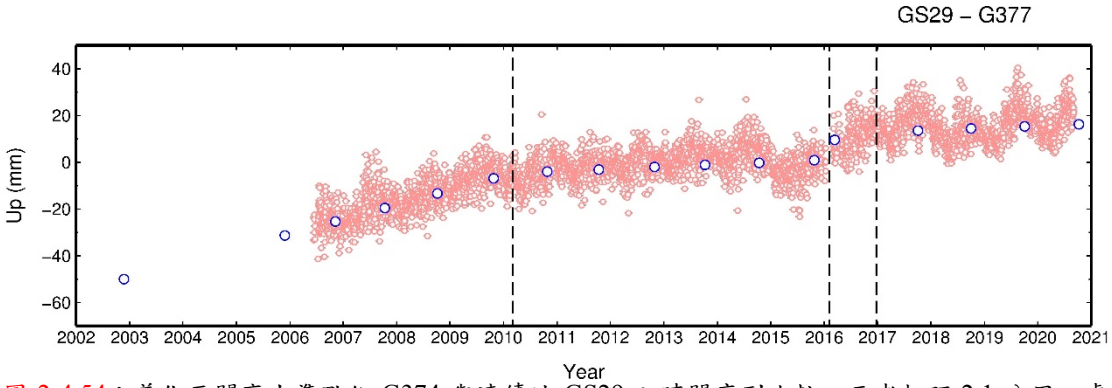


圖 2-4.54：善化至關廟水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震、2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正震後位移影響。

Figure 2-4.54: Time series comparison between Shanhua-Guanmiao leveling bench mark G377 and continuous GNSS station GS29. The distance between the two is 2.1 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is them correction of coseismic slip event.

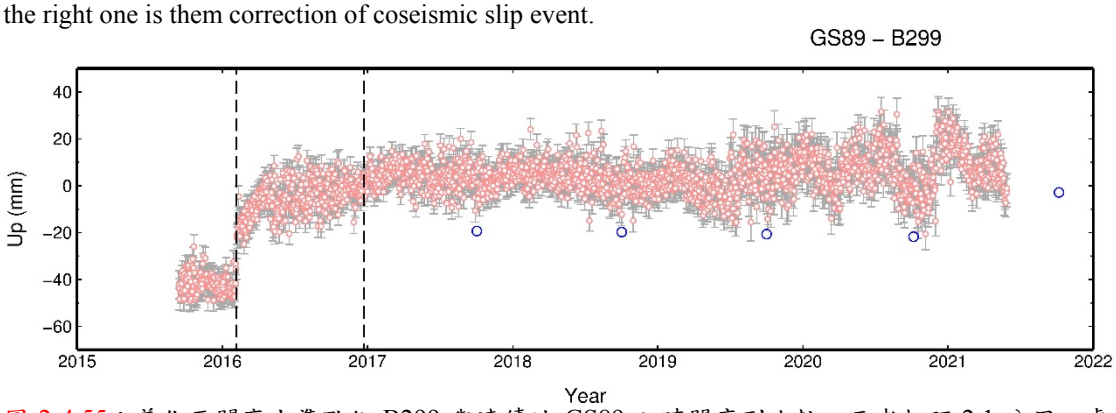


圖 2-4.55：善化至關廟水準點位 B299 與連續站 GS89 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正震後位移影響。

Figure 2-4.55: Time series comparison between Shanhua-Guanmiao leveling bench mark B299 and continuous GNSS station GS89. The distance between the two is 2.1 Km. The left dashed line is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is them correction of coseismic slip event.

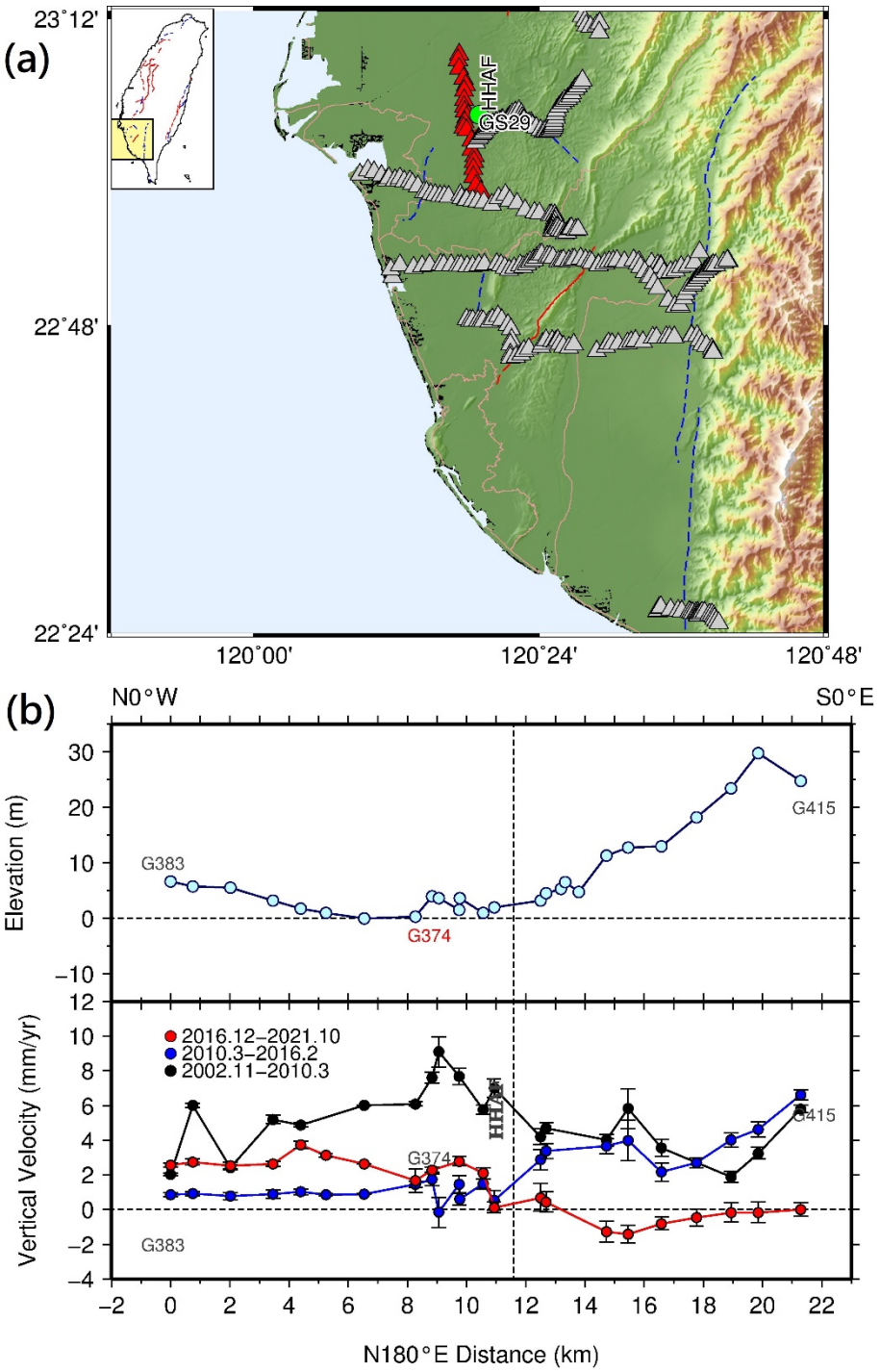


圖 2-3.56：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

Figure 2-3.56: Elevation change of the Beimen-Nanxi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to 2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present. HHAF is Hsinhua fault.

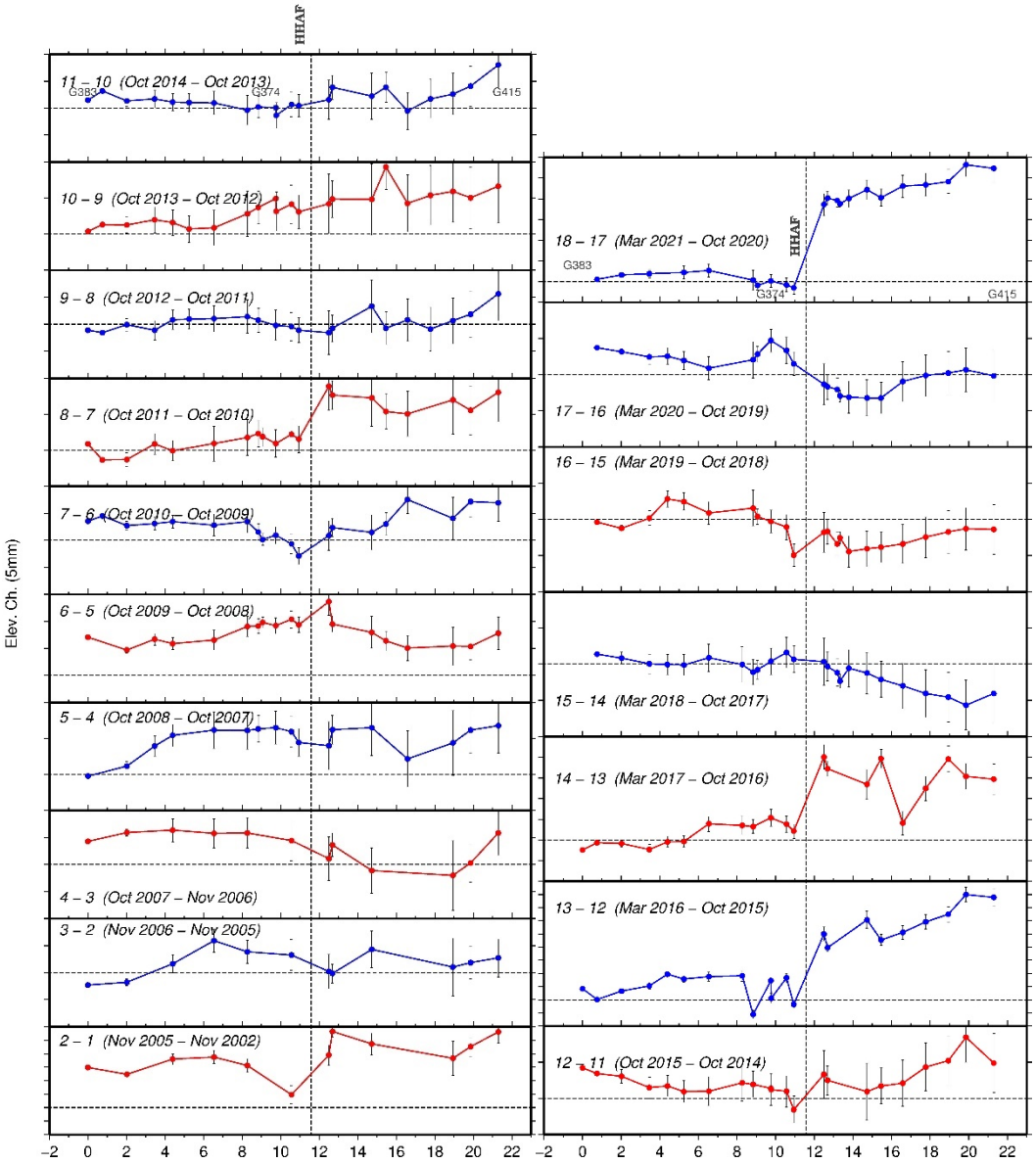


圖 2-3.57：台 19 甲_善化至關廟測線歷年高程差。每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

Figure 2-3.57: Difference of the Beimen-Nanxi leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault.

2-3-6-4 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層(圖 2-3.60a)，從臺南安平區至龍崎區，2013 年起延伸至高雄市內門區，測線剖面投影長度為 32.3 公里，從 2001 年至 2021 年共計有 22 次施測。本測線以 GNSS 連續站 CKSV 之 2001 年 7 月至 2003 年 12 月成功地震垂直速率（0.4 mm/yr）、成功地震至 2010 年 3 月甲仙地震垂直速率（0.4 mm/yr）、震後至 2016 年 2 月美濃地震垂直速率（1.4mm/yr）以及美濃地震至今之垂直速率(1.7 mm/yr)，自 2007 年以來作為約制點來校正 TN04 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.59）。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 2-3.60b）：黑色為 2001 年 7 月至 2003 年 12 月之垂直速度，在跨越後甲里斷層前後皆為沉降，其值在 5.0-10.0 mm/yr 之間，越靠近龍船斷層時逐步抬升；綠色為 2003 年 12 月至 2010 年 3 月之垂直速度，跨越後甲里斷層前為 5.0-10.0 mm/yr 沉降，但跨越斷層後沉降速度有明顯減緩之情況，靠近龍船斷層前逐步轉為抬升；藍色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月之垂直速度，在後甲里斷層以西為 5.1-9.4 mm/yr 沉降，通過後甲里斷層後速度無顯著變化，往東接近龍船斷層逐轉為抬升；紅色為 2016 年 2 月至 2021 年 5 月之垂直速度，後甲里斷層以西呈現 0.0 -5.4 mm/yr 沉降，而往東通過斷層後呈現抬升，以 0-20.0 mm/yr 的數值往東遞增。

由歷年高程變化圖可知（圖 2-3.61），美濃地震在關廟至龍船斷層附近有產生同震抬升的型態。由東向西跨過甲里斷層前有較大同震位移量，其值在 12.0-151.0 mm 之間，跨過斷層後抬升量減少至 3.0-32 .0mm，在接近海岸時轉為沉陷，其值在 4.0-8.0 mm 之間。

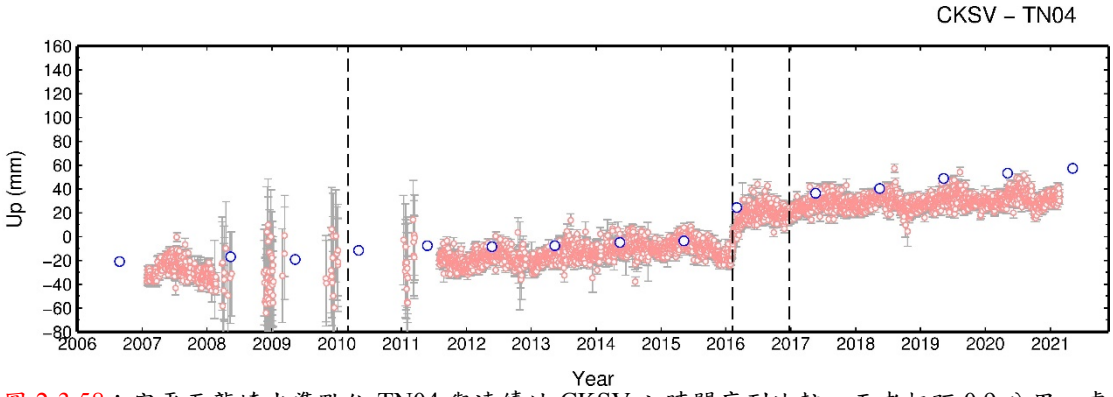


圖 2-3.58：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.58: Time series comparison between Anping-Longci leveling bench mark TN04 and continuous GNSS station CKSV. The distance between two stations are 1.4 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the right one is the correction of postseismic slip event.

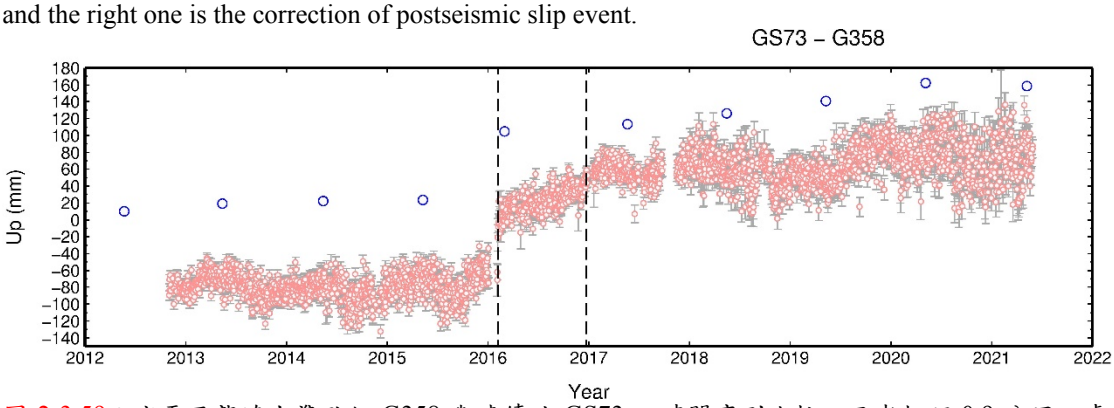


圖 2-3.59：安平至龍崎水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.59: Time series comparison between Anping-Longci leveling bench mark G358 and continuous GNSS station GS73. The distance between two stations are 1.4 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the right one is the correction of postseismic slip event.

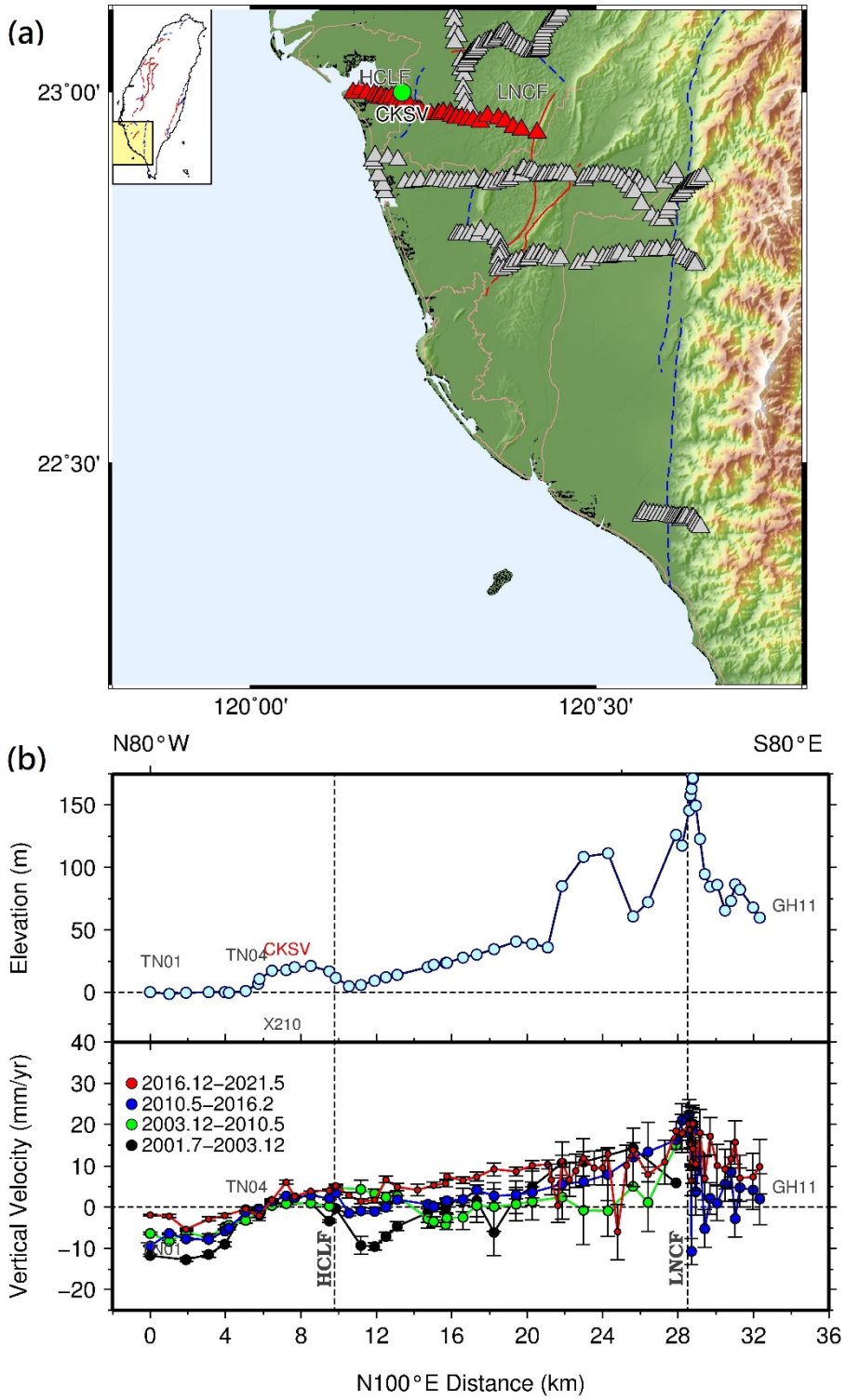


圖 2-3.60：安平至龍崎測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 2-3.60: Elevation change of the Anping-Longci leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to 2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present. HCLF is the Houchiali fault and LNCF is Lungchuan fault.

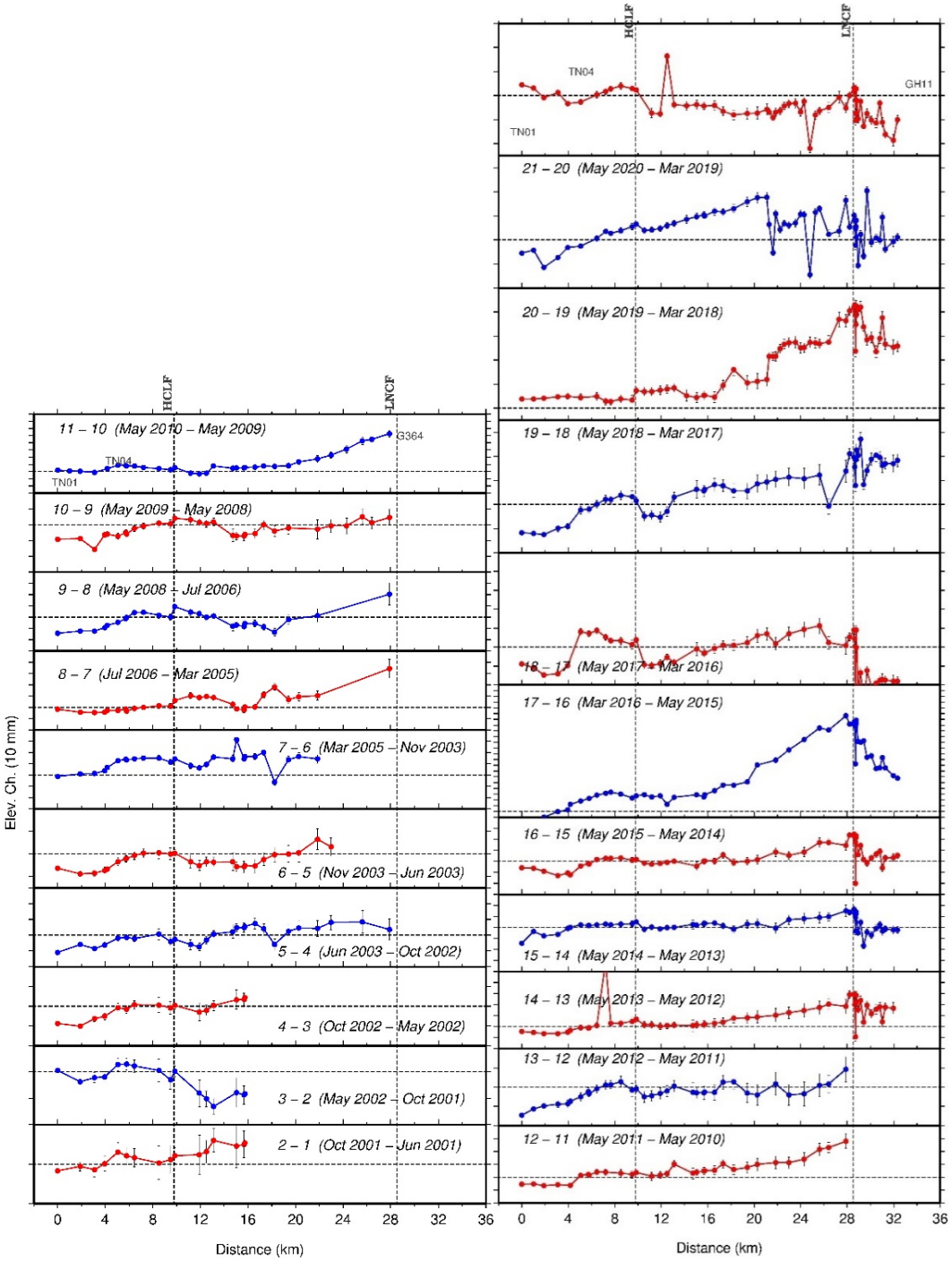


圖 2-3.61：安平至龍崎測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 2-3.61: Difference of the Anping-Longci leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCLF is the Houchiali fault and LNCF is Lungchuan fault.

2-3-6-5 玉井至新化測線

玉井至新化精密水準測線橫跨左鎮斷層（圖 2-3.63a），測線剖面投影長度為 17.2 公里，從 2016 年至 2021 年共計有 6 次施測。本測線以 GNSS 連續站 GS88 之垂直速率（-0.4 mm/yr），自 2016 年以來作為約制點來校正 J006 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.62）。

此測線新化斷層兩側有明顯垂直速度的變化(圖 2-3.63b)，西側以約 3 mm/yr 沉降速率運動，跨越斷層後逐步增加至約 3 mm/yr 的抬升速率。而橫跨左鎮斷層兩側並無明顯垂直運動方向差異，但抬升速度逐步增加至約 5 mm/yr。此外本測線的 J006（新化高中）與善化至關廟測線共點，所以台 20_新化至玉井測線、善化至關廟與安平至龍崎測線可以組成更好的垂直速度場監測網。

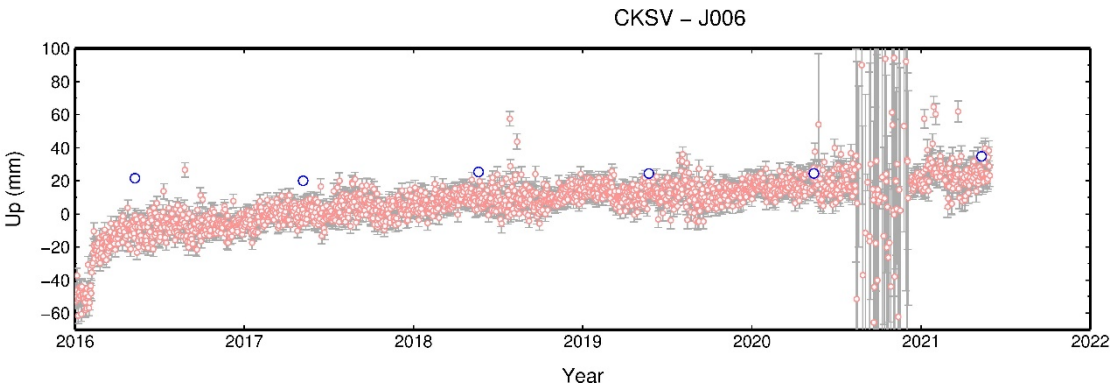


圖 2-3.62：新化至玉井水準點位 N8537 與連續站 GS88 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。
Figure 2-3.62: Time series comparison between Yujing-Xinhua leveling benchmark N8537 and continuous GNSS station GS88. The distance between two stations are 0.05 km.

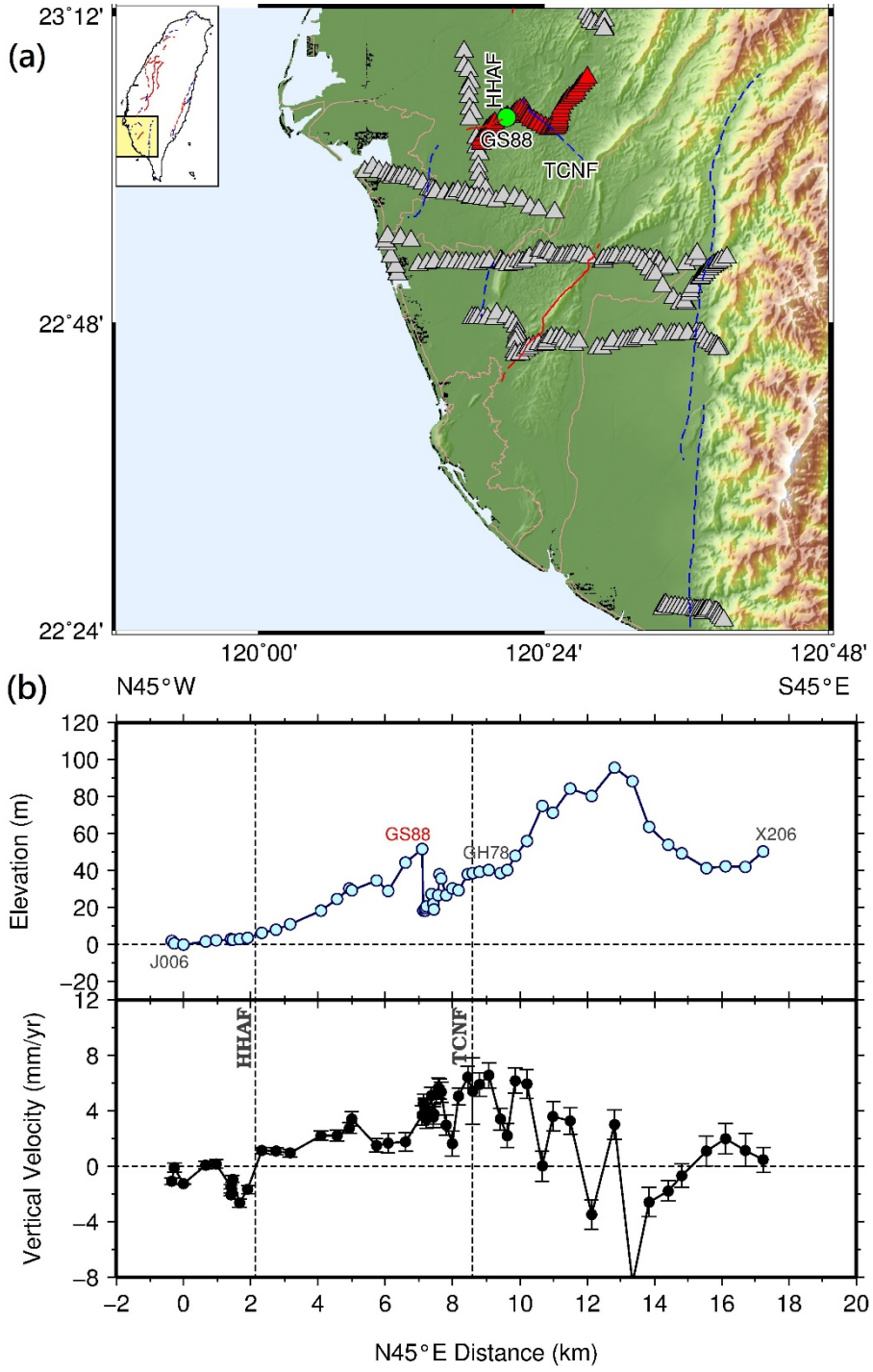


圖 2-3.63：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 2-3.63: Elevation change of the Yujing-Xinhua leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. HHAF is Hsinhua fault, and TCNF is Tsochen fault.

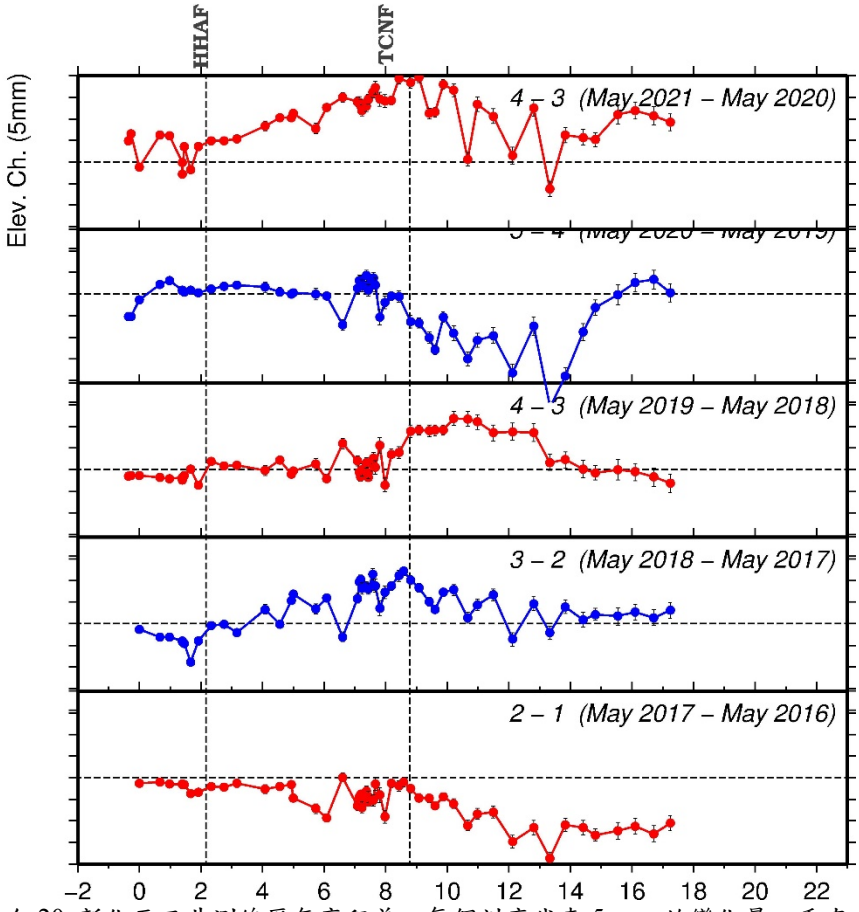


圖 2-3.64：台 20_新化至玉井測線歷年高程差。每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 2-3.64: Difference of the Yujing-Xinhua leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault, and TCNF is Tsochen fault.

2-3-7 高屏地區精密水準測線

2-3-7-1 路竹至茂林測線

高屏地區完成的精密水準測線為路竹-茂林測線（圖 2-3.66a），其橫跨小岡山、旗山及潮州斷層，測線長為 48.3 公里（投影至剖面的長度），從 2002 年至 2021 年共計有 18 次施測。本測線以 GNSS 連續站 GS55 至 2010 年 3 月甲仙地震垂直速率（10.2 mm/yr）、震後至 2016 年 2 月美濃地震垂直速率（2.5mm/yr）以及美濃地震至今之垂直速率(-1.6mm/yr），作為約制點來校正 R016 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.65）。

台 28_路竹至茂林測線於中壇附近分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線。圖 2-3.66b 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中藍色為 2002 年 12 月至 2010 年 3 月、紅色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、黑色為 2016 年 12 月至 2020 年 2 月，主線於小崗山斷層的垂直速率持續增加（約 0.0～20.0 mm/yr），與地形剖面比較，此區域（月世界一帶）垂直速率增加之處與地形高程變化並不吻合，目前對於此結果的解釋仍然沒有定論，可能與小崗山斷層的運動、活動背斜的活躍或是泥貫入體的發育有關。

在 2016 年美濃地震中，潮州斷層與旗山斷層區之間同震位移場主要為沉陷（圖 2-3.67），其值在 0.0-29.0 mm 之間。該水準測線在接近旗山斷層到海岸線一帶為抬升，其值在 3.0-91.0 mm 之間。

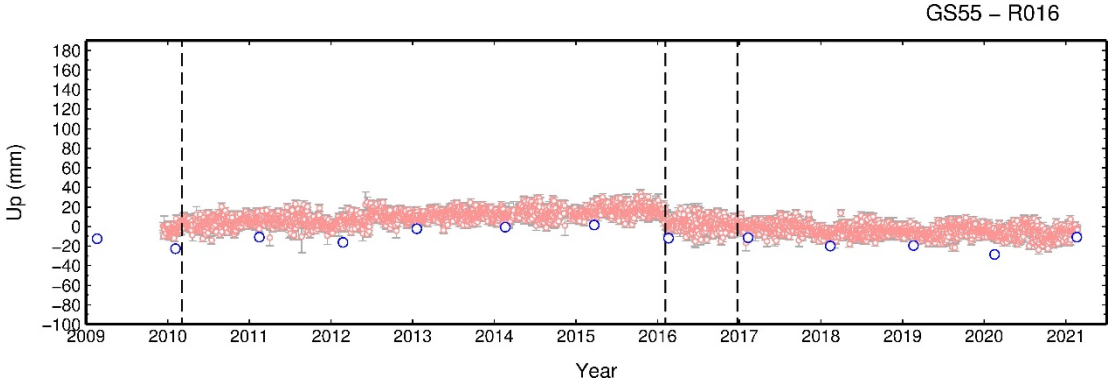


圖 2-3.65：路竹至茂林水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.65: Time series comparison between Luzhu-Maolin leveling bench mark R016 and continuous GNSS station GS55. The distance between two stations are 0.05 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the right one is the correction of postseismic slip event.

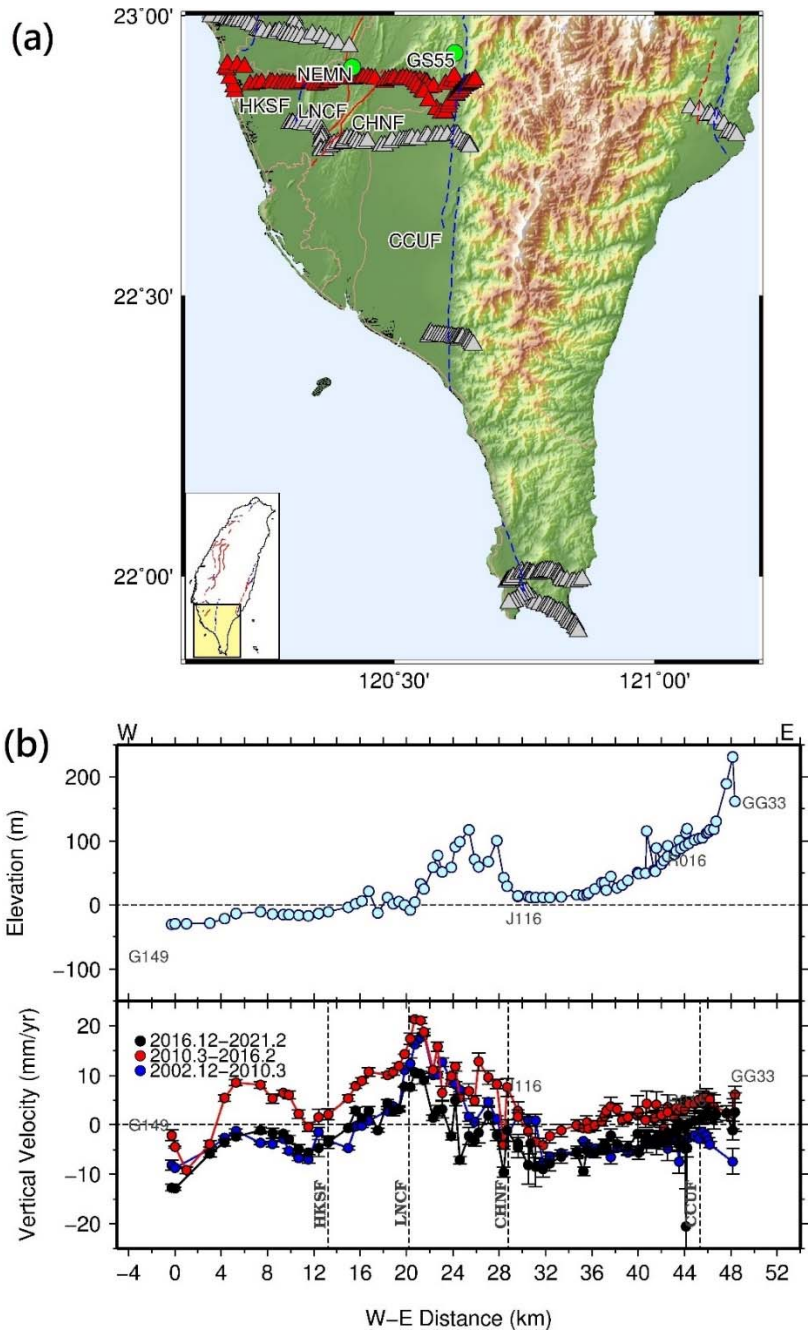


圖 2-3.66：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 2-3.66: Elevation change of the Luzhu-Maolin leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to 2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, CCUF is Chaochou fault and LNCF is Lungchuan fault.

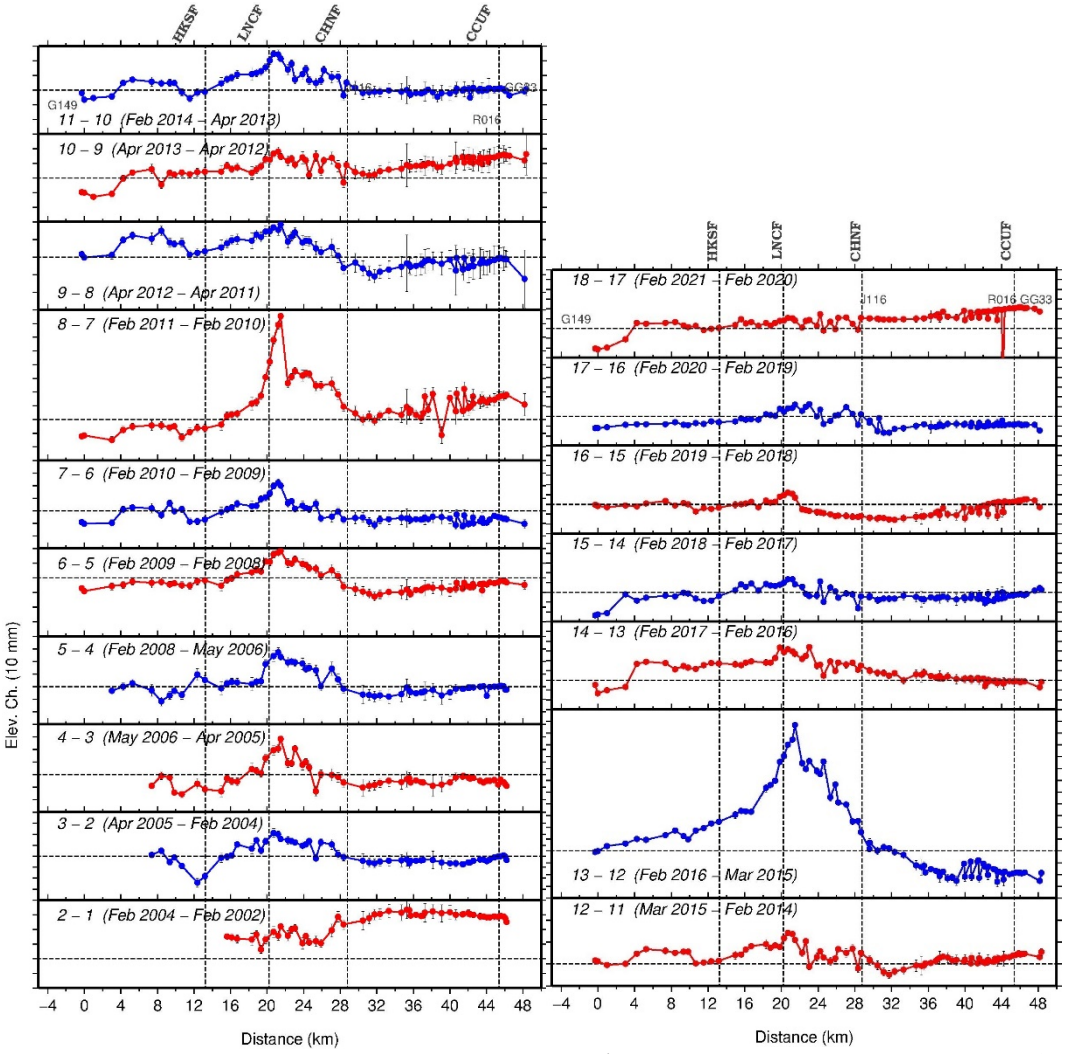


圖 2-3.67：台 28_路竹至茂林主、副線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 2-3.67: Difference of the Luzhu-Maolin leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, CCUF is Chaochou fault and LNCF is Lungchuan fault.

2-3-7-2 岡山至安坡測線

岡山至安坡測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層（圖 2-3.70a），測線長為 35.4 公里（投影至剖面的長度），從 2004 年至 2021 年共計 16 次施測。本測線以 GNSS 連續站 AKND 至 2010 年 3 月甲仙地震垂直速率（6.0 mm/yr）、震後至 2016 年 2 月美濃地震垂直速率（10.4mm/yr）以及美濃地震震後至今之垂直速率(-4mm/yr)，自 2006 年以來作為約制點來校正 G526 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.68）。今年新增的點位為 GI78、GI79、R044A、GI80、GI81、GI82、GI83、YCHD、TPC656、GI84、GI85、GI86、3212、GI87 以及 GI88。

根據圖 2-3.70b，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 3 月至 2010 年 3 月、藍色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、紅色為 2016 年 2 月至 2021 年 5 月，垂直速度在跨越小崗山斷層至旗山斷層之間有明顯的運動方向改變，約由沉降運動在 2010 年改變成抬升運動，美濃地震後又變回沉降；而旗山斷層至潮州斷層之間也有相同趨勢。2016 年 2 月美濃地震造成此水準測線點位有-16.0 -30.0 mm 之同震位移量（圖 2-3.71）。

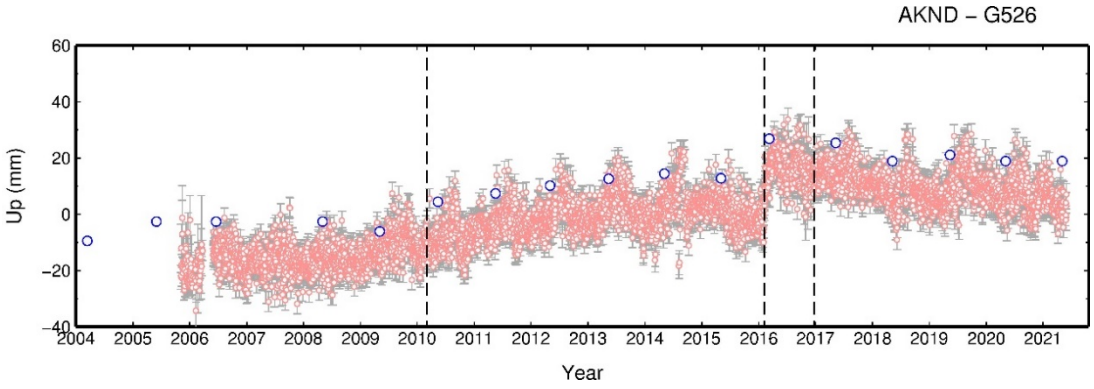


圖 2-3.68：岡山至安坡水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.68: Time series comparison between Kangshan-Anpo leveling bench mark G526 and continuous GNSS station AKND. The distance between two stations are 0.8 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the right one is the correction of postseismic slip event.

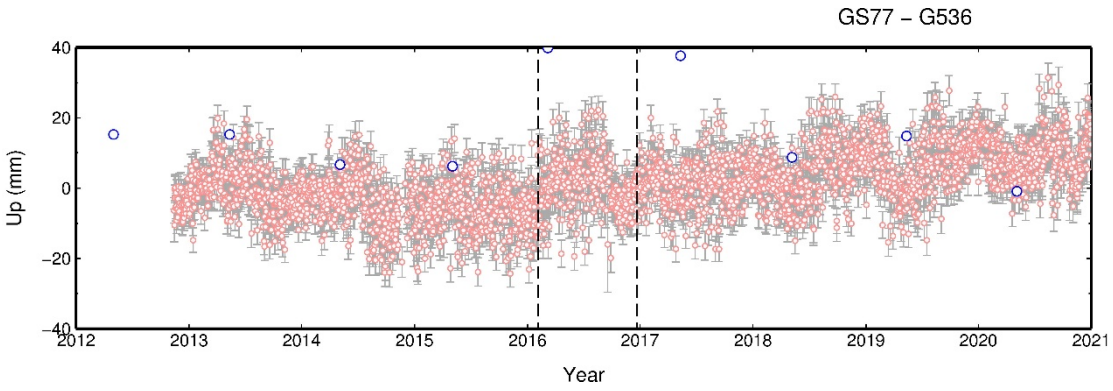


圖 2-3.69：岡山至安坡水準點位 G536 與連續站 GS77 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.69: Time series comparison between Kangshan-Anpo leveling bench mark G536 and continuous GNSS station GS77. The distance between two stations are 0.8 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the right one is the correction of postseismic

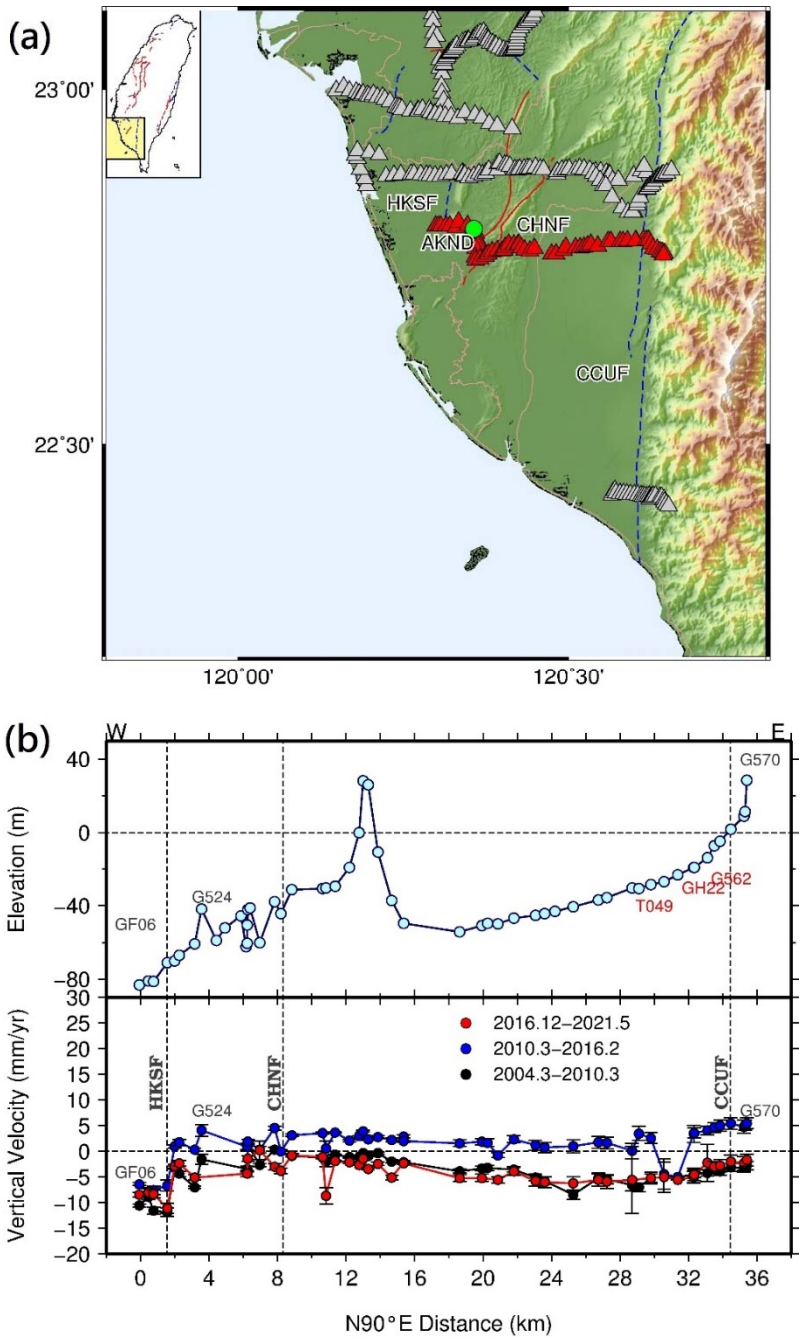


圖 2-3.70：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.70: Elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to 2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

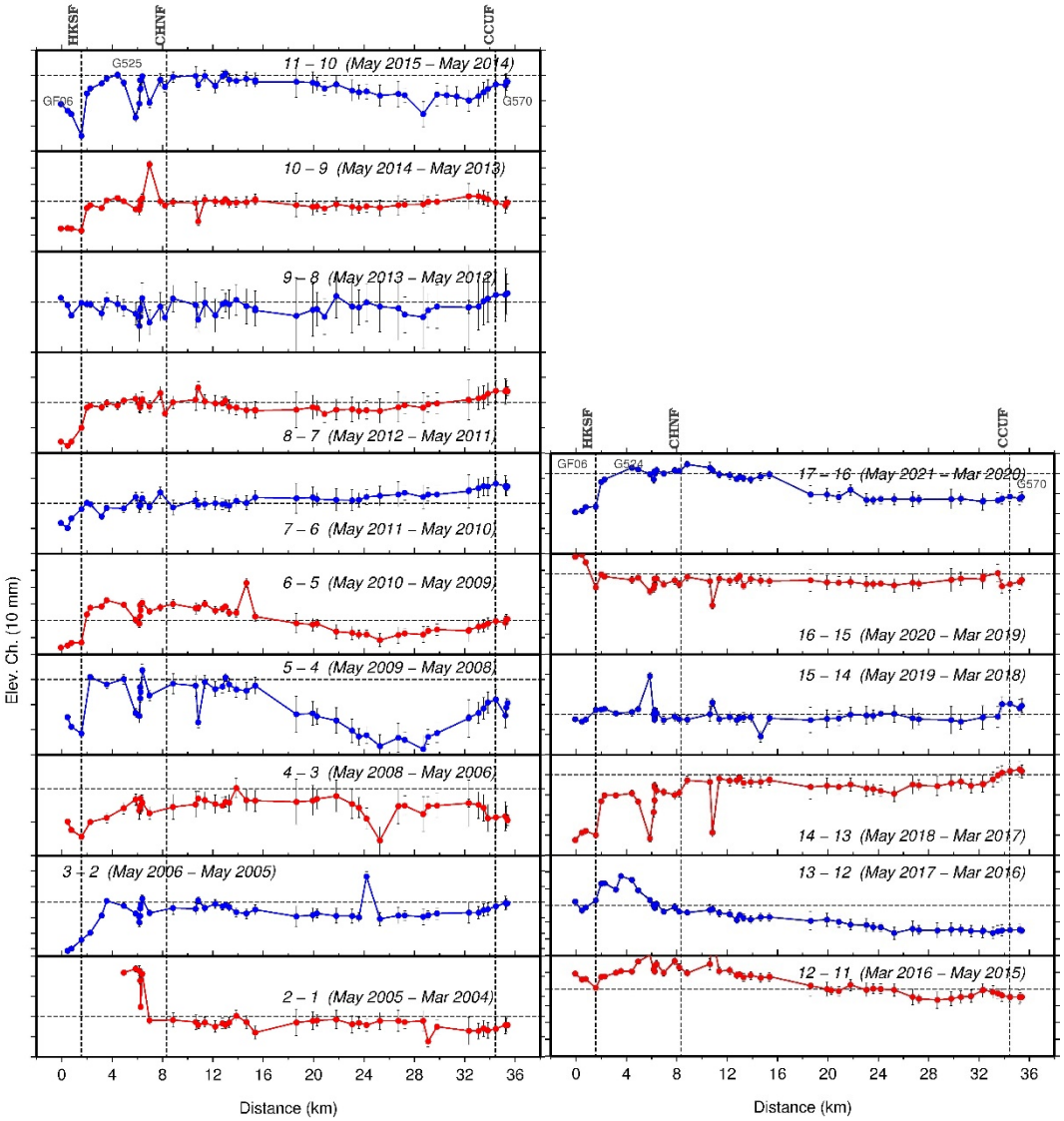


圖 2-3.71：台 22_岡山至安坡測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.71: Difference of the Kangshan-Anpo leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

2-3-7-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層（圖 2-3.73a），測線長為 8.5 公里（投影至剖面的長度），於 2005 至 2021 年間共進行了 17 次的施測，主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GNSS 連續站 CLON 之垂直速率（-14.0 mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 GC85 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.72）。

該測線於 2007~2008 年間之高程變化與其他時段（2005~2007 年、2008~2010 年）不同（圖 2-3.73b），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）。潮州斷層西側之垂直速度變化較明顯，最大值達-17.2 mm/yr；而斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在-0.2-1.0 mm/yr 之間。

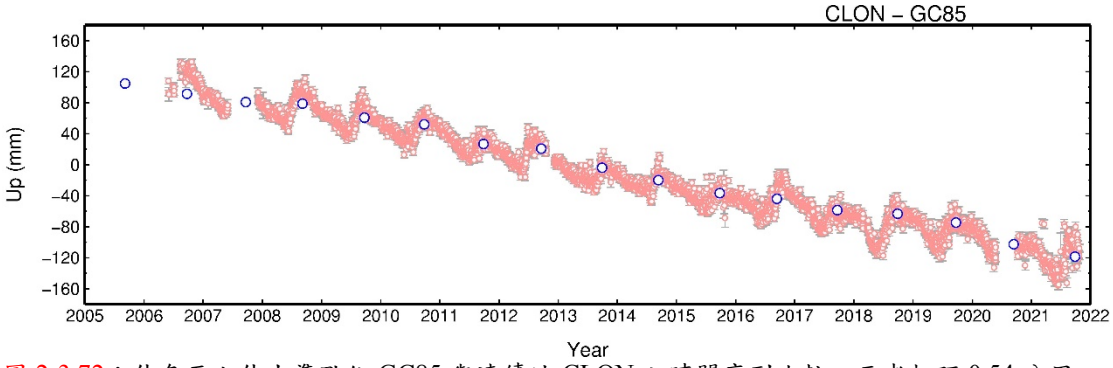


圖 2-3.72：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較，兩者相距 0.54 公里。
Figure 2-3.72: Time series comparison between Jiadong-Qijia leveling bench mark GC85 and continuous GNSS station CLON. The distance between two stations are 0.54 km.

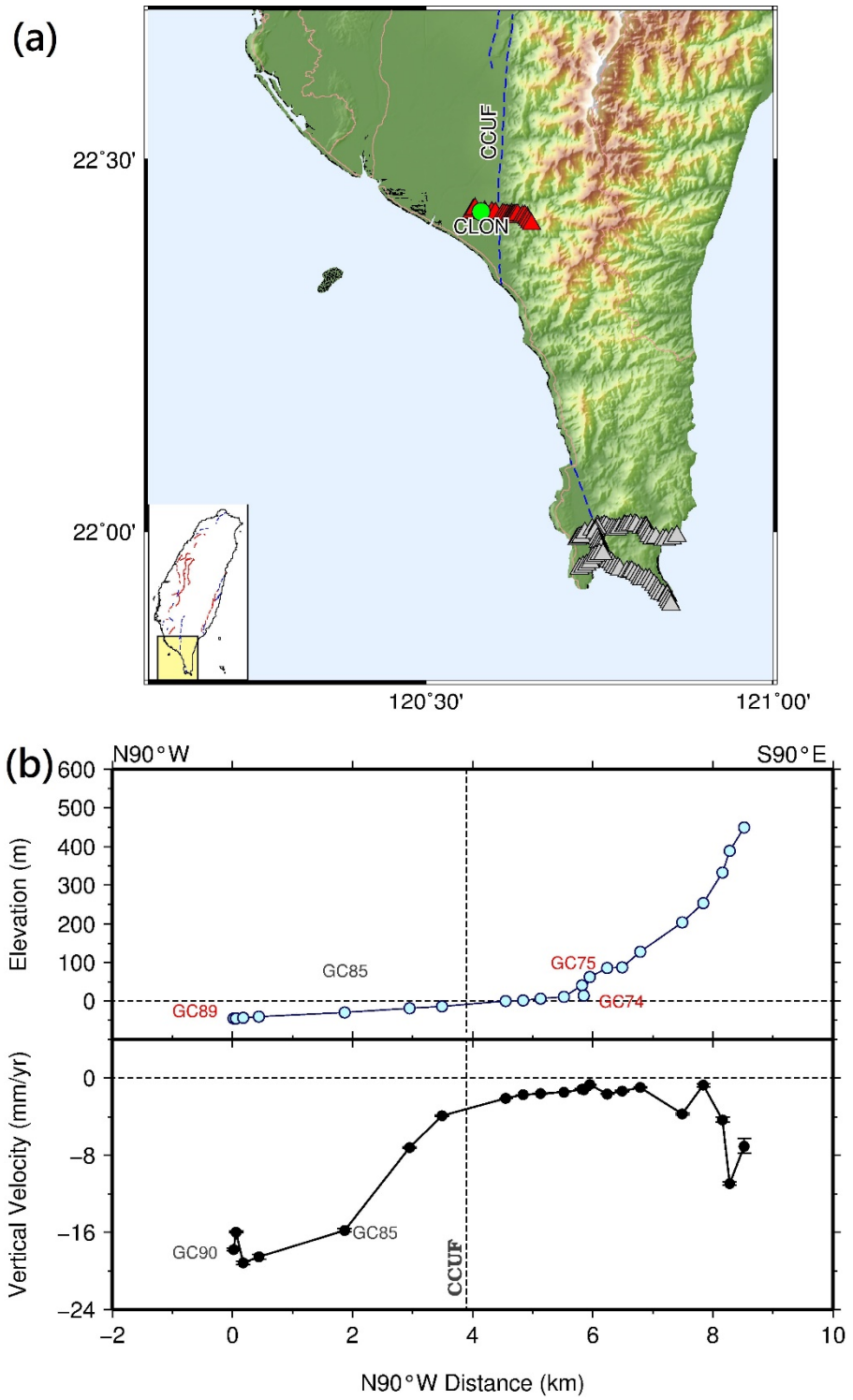


圖 2-3.73：佳冬至七佳測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.73: Elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

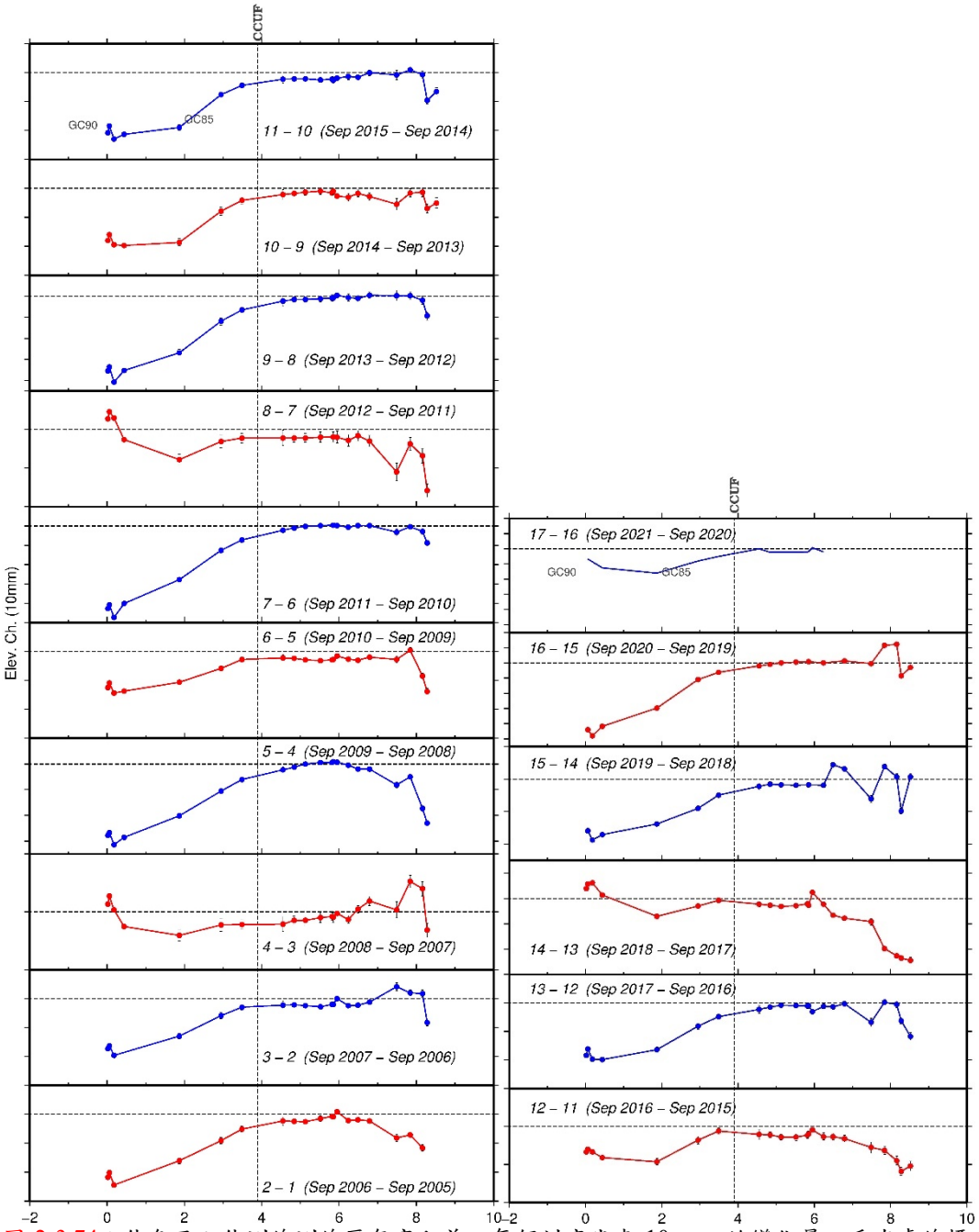


圖 2-3.74：佳冬至七佳測線測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.74: Elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

2-3-8 恆春地區精密水準測線

2-3-8-1 恆春西臺地至佳樂水測線

恆春西台地至佳樂水測線投影至剖面的長度為 14.5 公里（圖 2-3.76a），至 2021 年止有 18 次的測量資料。精密水準資料處理時，以 GNSS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-2.0 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（-9.0 mm/yr）、2010 至 2016 年垂直速率（-2.5 mm/yr）及 2016 年至今之垂直速率（-2.8 mm/yr），自 20000 年以來作為約制點來校正 G670 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.75）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 Q053 已滅失，無法繼續觀測，新增點位為 Q053A、HC19 、HC18、HC20、HC22、HC23、HH18 和 HH09。

2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯位移。恆春西台地至佳樂水測線之點位，最大同震沉降量達 61.4 mm（圖 2-3.77）。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

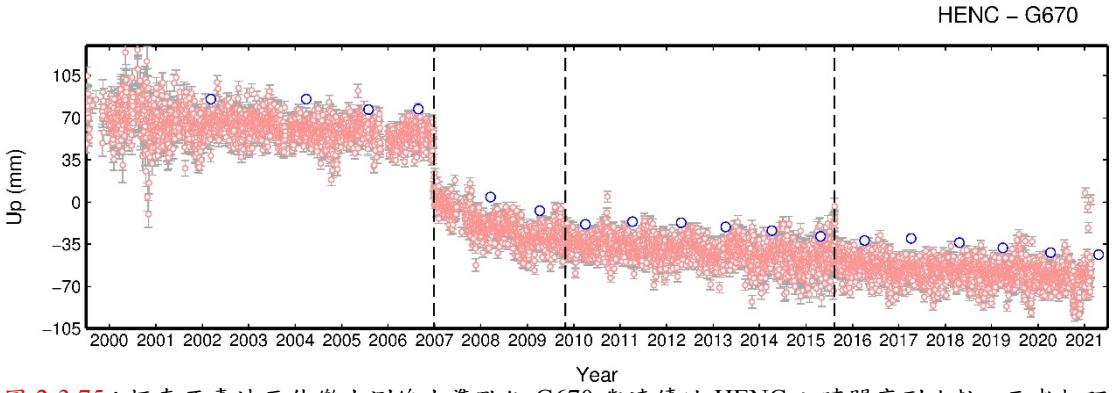


圖 2-3.75：恆春西臺地至佳樂水測線水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震，及 2010 年 2 月速度發生變化及 2016 年 2 月速度發生變化。

Figure 2-3.75: Time series of comparison between Hengchun-Jialeshuei leveling route bench mark G670 and continuous GNSS station HENC. The distance between the two is 0.1 Km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle is the correction of February2010 and the right one is the correction of February 2016 velocity change event.

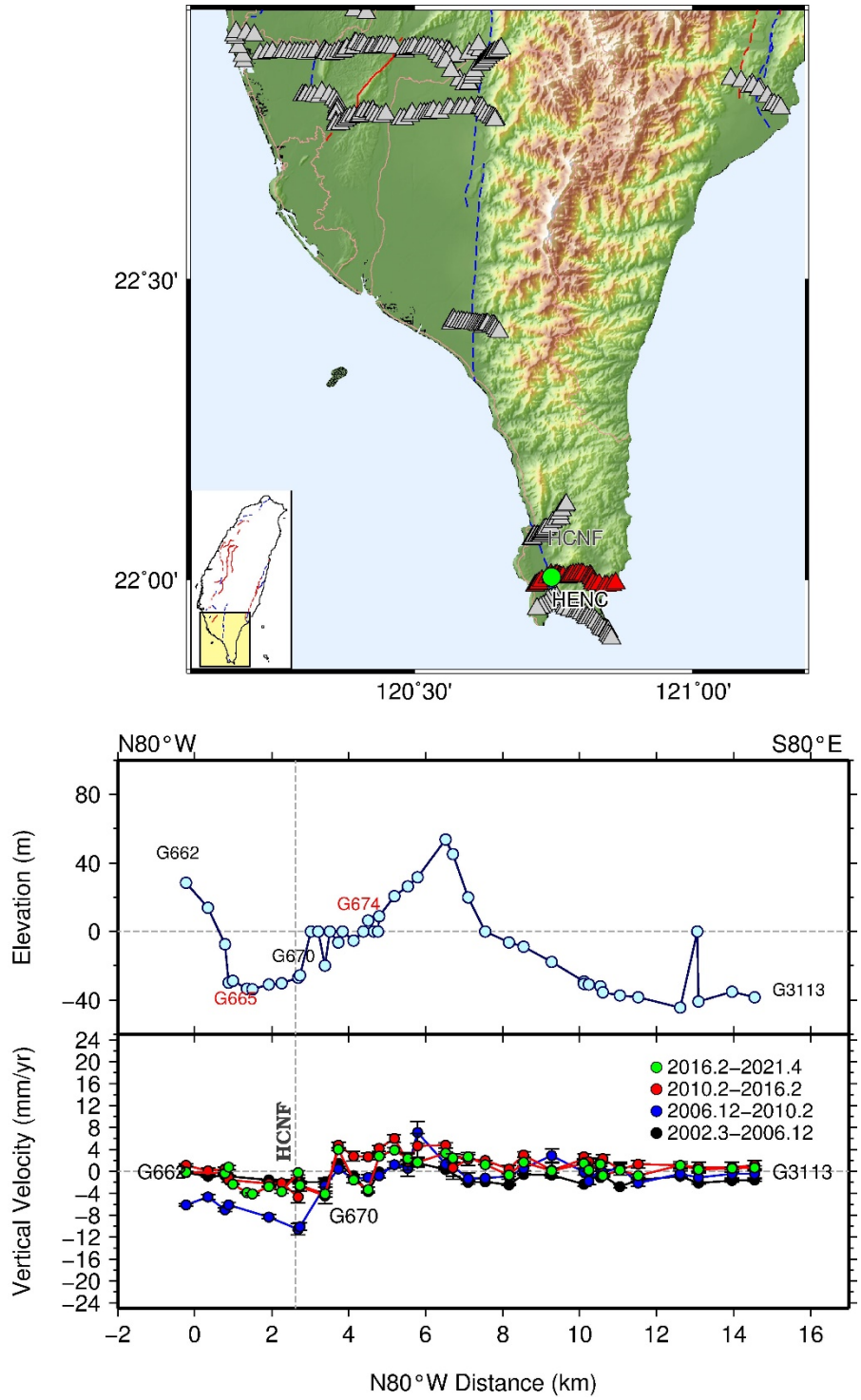


圖 2-3.76：恆春西台地至佳樂水測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。黑為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.76: Elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2010, red is the vertical velocity of 2010-2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present.Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

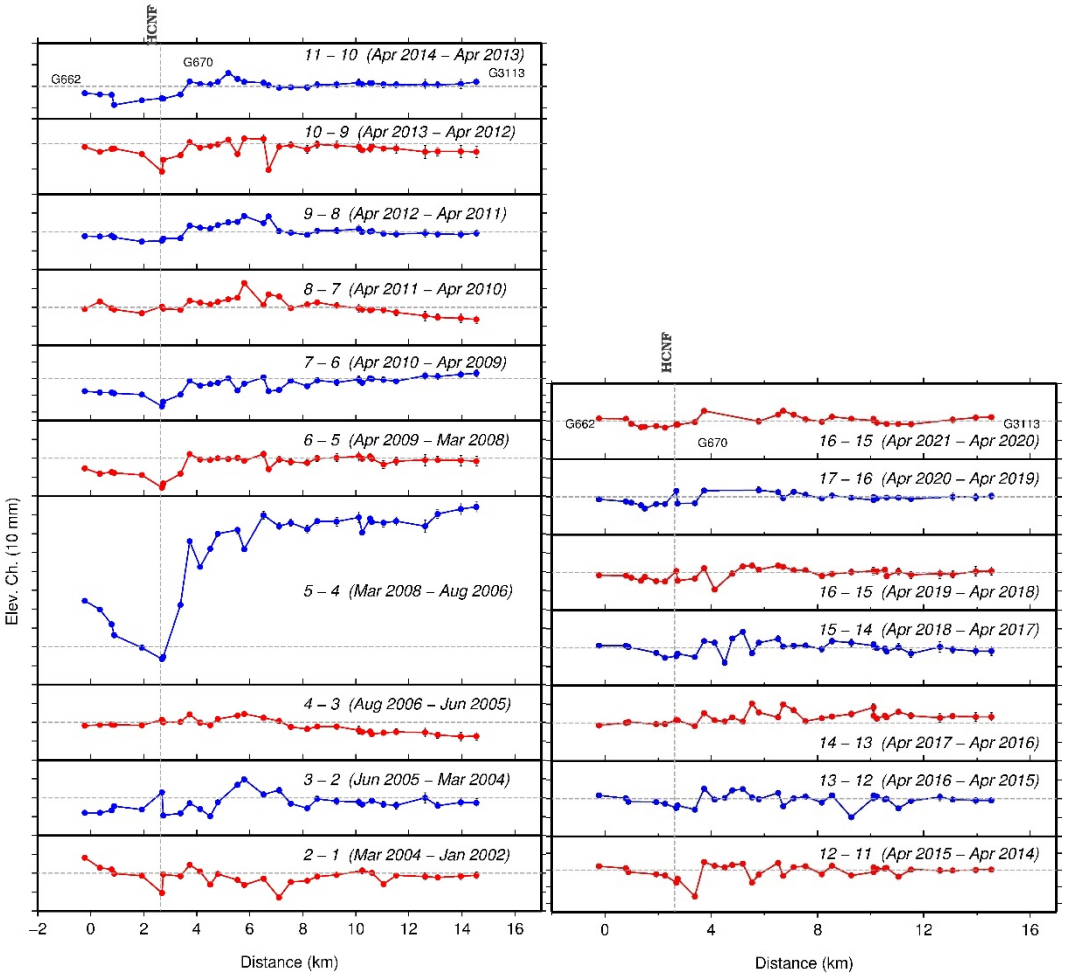


圖 2-3.77：恆春西台地至佳樂水測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.77: Elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-8-2 南樹林至鵝鑾鼻測線

恆春西台地至佳樂水測線投影至剖面的長度為 12.7 公里（圖 2-3.80a），至 2021 年止有 18 次的測量資料。台 26_南樹林至鵝鑾鼻則以 GNSS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（3.1 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（10.7 mm/yr）與 2010 年至 2016 年（-3.9mm/yr）、2016 年今之垂直速率（-0.4 mm/yr），自 2002 年以來作為約制點來校正 Q014 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.78)。今年新增之點位為 HC02、Q01A 以及 HC24。

各時間分段之水準平均抬升速率（圖 2-3.80b），黑色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月，大致呈現沉降速度約 5 mm/yr；藍色為 2006 年 12 月至 2010 年 2 月，跨斷層兩側出現明顯垂直運動的不同，斷層西側逐漸抬升至約 6 mm/yr；紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月，跨斷層西側的抬升速度減緩至 1 mm/yr；綠色為 2016 年 2 月至 2021 年 4 月，跨斷層兩側亦出現明顯垂直運動的不同，斷層西側抬升速度至約 3 mm/yr。

2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化（圖 2-3.81）。南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震沉降量達 29.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

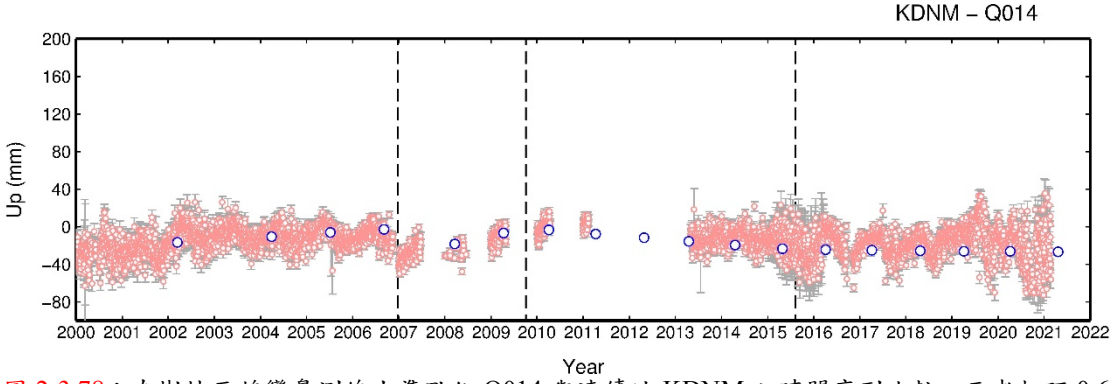


圖 2-3.78：南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.6 公里。虛虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年及 2016 速度發生變化。

Figure 2-3.78: Time series comparison between Nanshulin-Eluanbi leveling route bench mark Q014 and continuous GNSS station KDNM. The distance between the two is 0.6 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle is the correction of February2010 and the right one is the correction of February 2016 velocity change event.

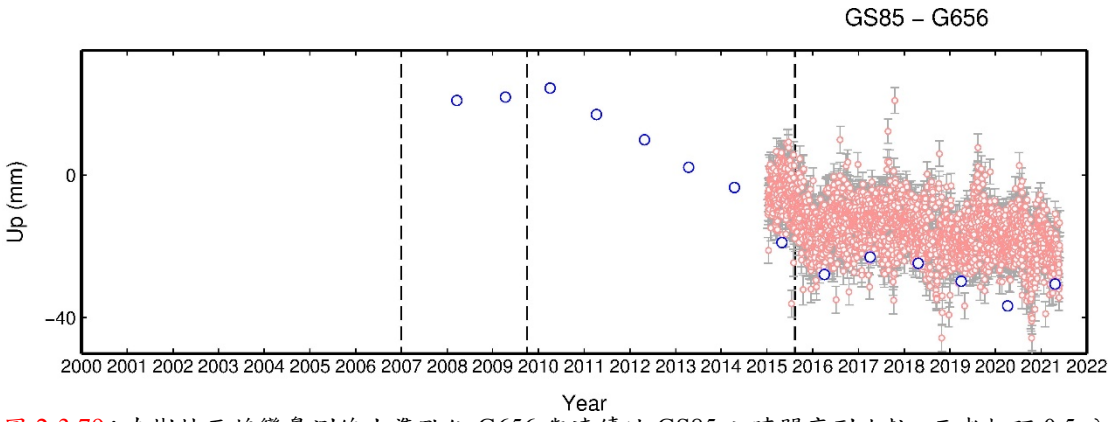


圖 2-3.79：南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較，兩者相距 0.5 公里。虛虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年及 2016 速度發生變化。

Figure 2-3.79: Time series comparison between Nanshulin-Eluanbi leveling route bench mark G656 and continuous GNSS station GS85. The distance between the two is 0.5 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle is the correction of February2010 and the right one is the correction of February 2016 velocity change event.

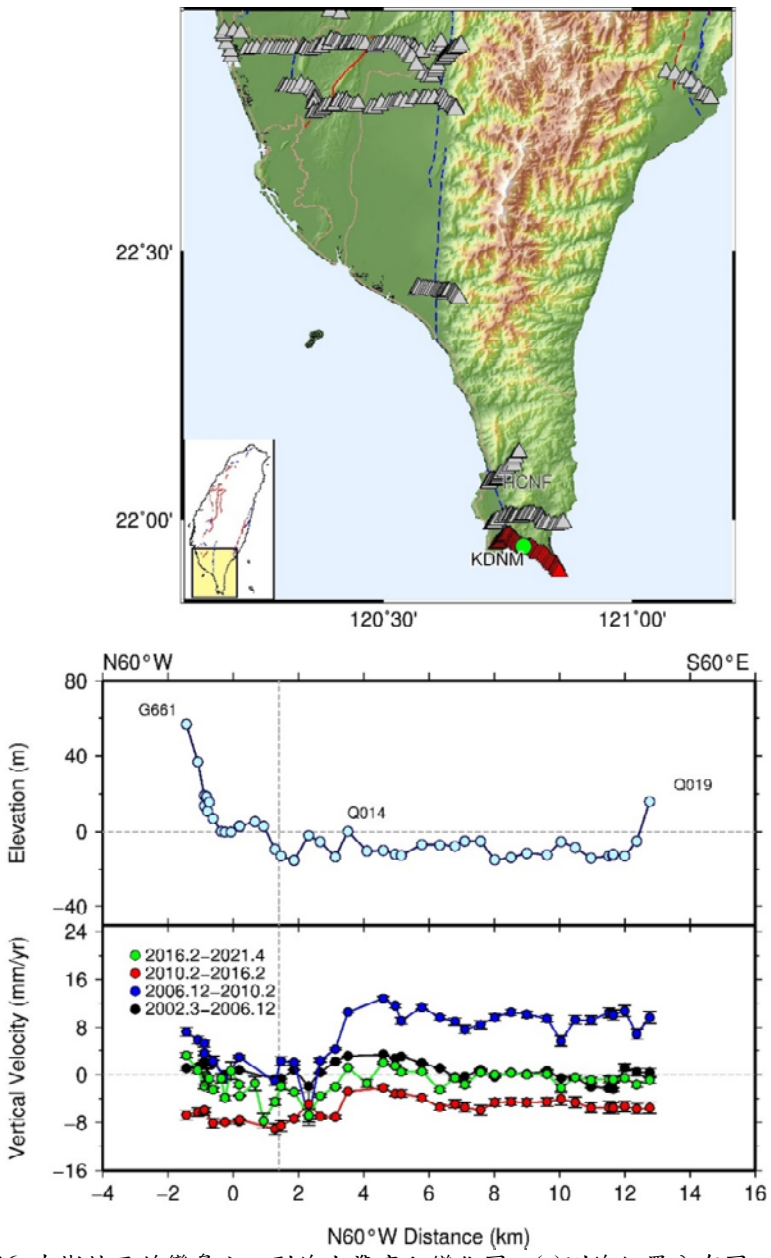


圖 2-3.80：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。黑色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.80: Elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2010, red is the vertical velocity of 2010-2016, green is the vertical velocity from 2016 to the present.Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

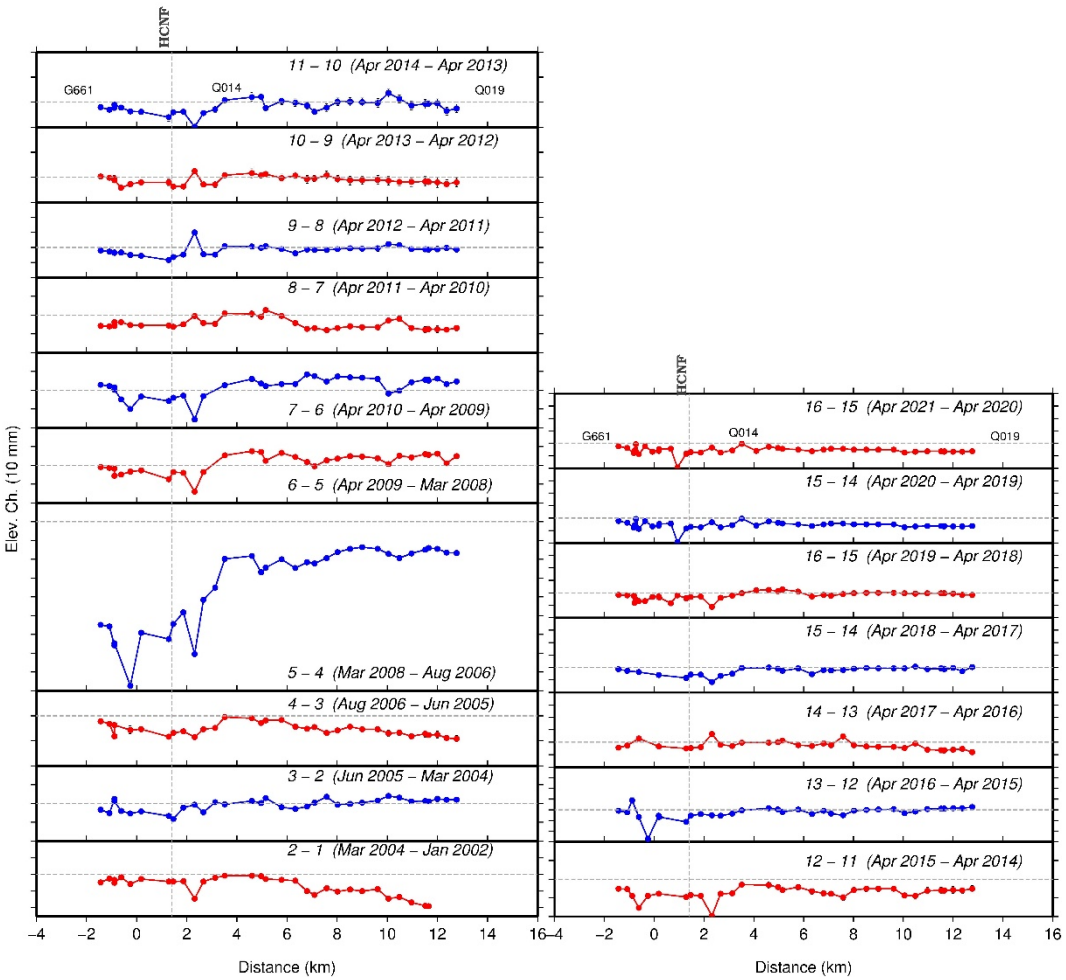


圖 2-3.81：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.81: Elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-8-3 車城至牡丹測線

車城至牡丹為今年新建立的水準測線，測線長為 8.0 公里（投影至剖面的長度），橫跨恆春斷層，總共有 22 個點位（圖 2-3.82）。

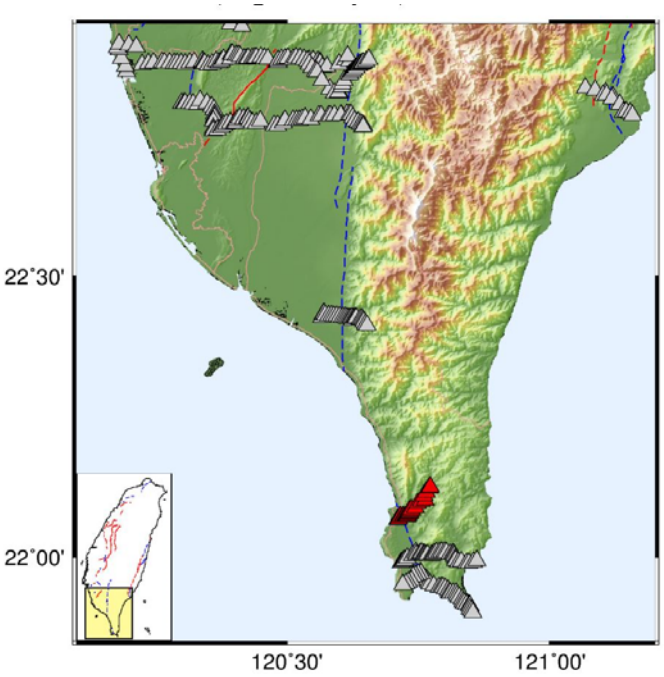


圖 2-3.82：車城至牡丹測線位置分布圖。
Figure 2-3.82: Elevation change of the Checheng-Mudan leveling route.

2-3-9 東部地區精密水準解算

2-3-9-1 嶺頂至龍澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層（圖 2-3.85a），測線長為 20.0 公里，從 2004 年至 2021 年共計有 19 次施測，其中 2018 年因為花蓮地震，故在該年 2、10 月進行施測。本測線以 GNSS 連續站 YENL 之 2018 年震前垂直速率（-9.2 mm/yr）及 2018 年至今之垂直速率（-1.3 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 G979 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.83）。由於道路坍方故自 2016 年後僅有 N670 以東之垂直速度資料。

2018 年以後此測線在嶺頂斷層西側之垂直速度約由 20.8 mm/yr 降至-10.3 mm/yr（圖 2-3.85b），以靠山區之測站較以往增加最大差約 13.9 mm/yr 之抬升速率，而嶺頂斷層東側與以往相似皆呈沉陷之趨勢約 10.1mm/yr。在 2018 花蓮地震中，抬升量在 8.0-214.0 mm 之間（圖 2-3.86）。

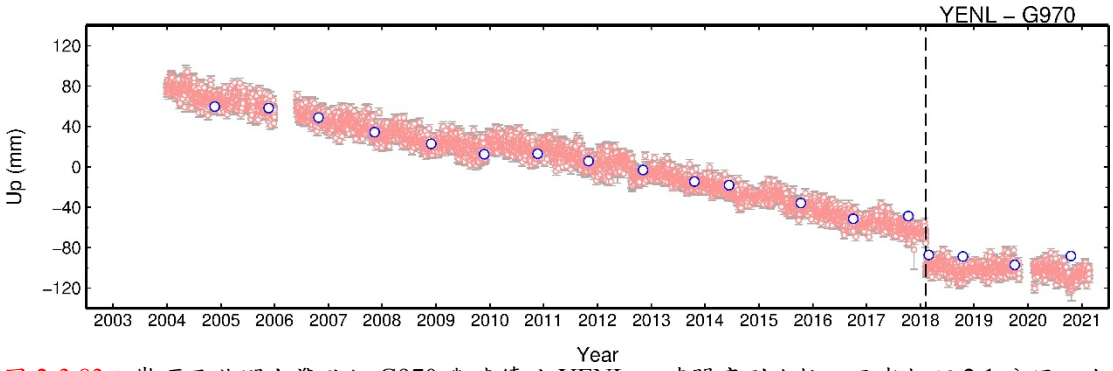


圖 2-3.83：嶺頂至瀧澗水準點位 G970 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.83: Time series comparison between Lingding-Takigami leveling bench mark G970 and continuous GNSS station YENL. The distance between two stations are 2.1 km. The right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

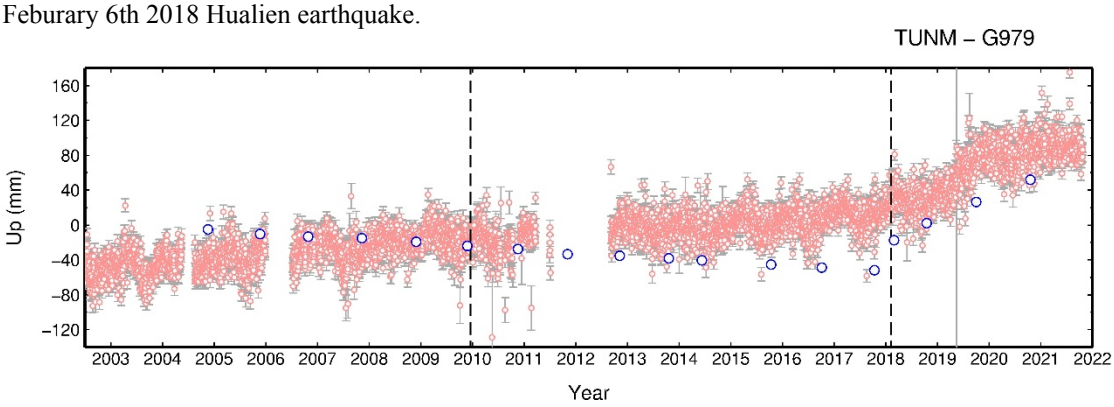


圖 2-3.84：嶺頂至瀧澗水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較，兩者相距 4.8 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.84: Time series comparison between Lingding-Takigami leveling bench mark G979 and continuous GNSS station TUNM. The distance between two stations are 4.8 km. The left dashed line is the March 6th 2009 Suao earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

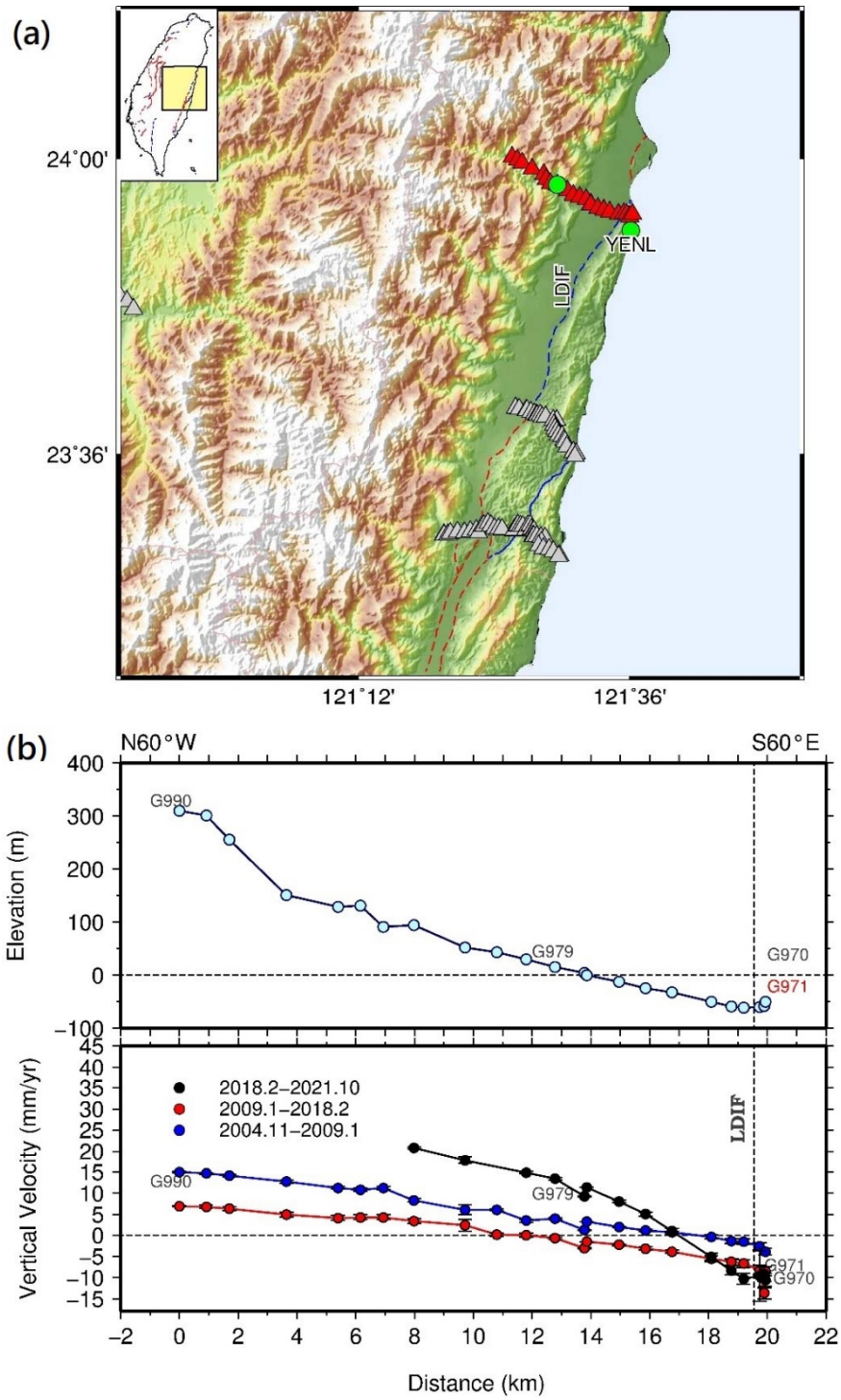


圖 2-3.85：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。藍色為 2004 - 2009 年垂直速度、紅色為 2009 年 1 月至 2018 年 2 月、黑色為 2018 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 2-3.85: Elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Blue is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, red is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2018 , black is the vertical velocity from 2018 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

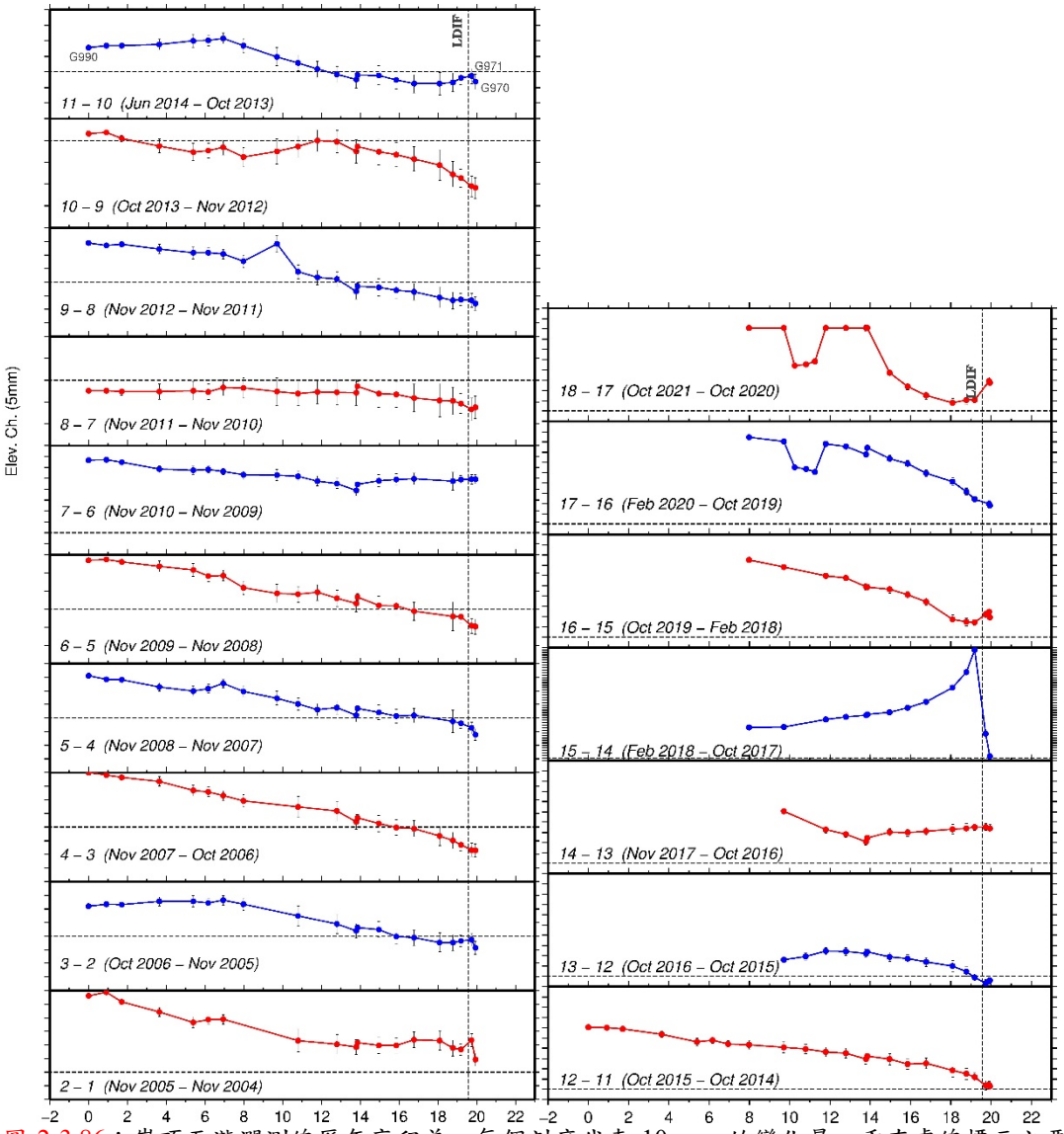


圖 2-3.86：嶺頂至瀧澗測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 2-3.86: Elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

2-3-9-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層（圖 2-3.88a），測線長為 12.1 公里(投影至剖面的長度)，從 2004 年至 2021 年共計有 19 次施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GNSS 連續站 FONB 之 2009 年地震前垂直速率（-9.3 mm/yr）、2009 年震後至 2013 年垂直速率（-9.3 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-9.9 mm/yr），自 2010 年作為約制點來校正 G991 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.87）。

此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致（圖 2-3.88b）。2018 年花蓮地震前此測線以沉陷為主，震後在瑞穗斷層西側之垂直速度為 12.8-20.9 mm/yr 沉陷，跨斷層後則逐漸抬升至 0.1 mm/yr。在跨奇美斷層後之地表高程約有 4.5 mm 的沉陷量，而垂直速度則從-12.3 mm/yr 緩升至-11.3 mm/yr。

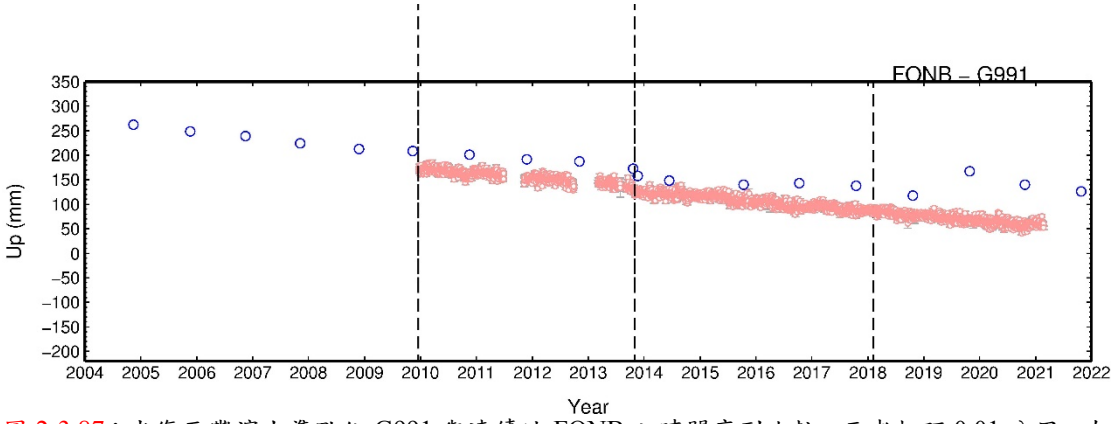


圖 2-3.87：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.87: Time series comparison between Guangfu-Toyohama leveling bench mark G991 and continuous GNSS station FONB. The distance between the two is 1.0 Km, the left one is the December 19th 2009 Hualien earthquake, the middle one is the October 31th 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

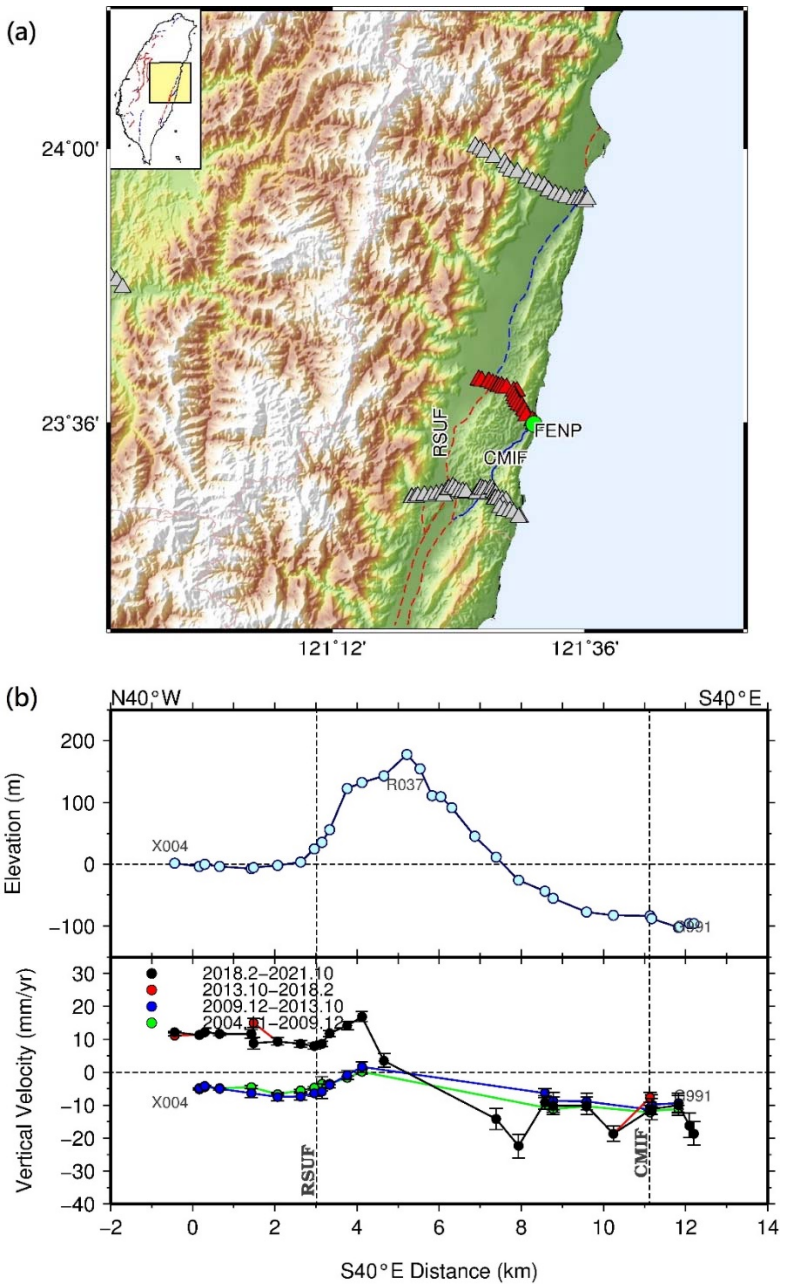


圖 2-3.88：光復至豐濱測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。藍色為 2004 - 2009 年垂直速度、紅色為 2009 年 1 月至 2018 年 2 月、黑色為 2018 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.88: Elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity after the 2013 Ruisui earthquake of 2013-2018, black is the vertical velocity from 2018 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. RSUF is Rueyshui fault, CMIF is Chimei fault.

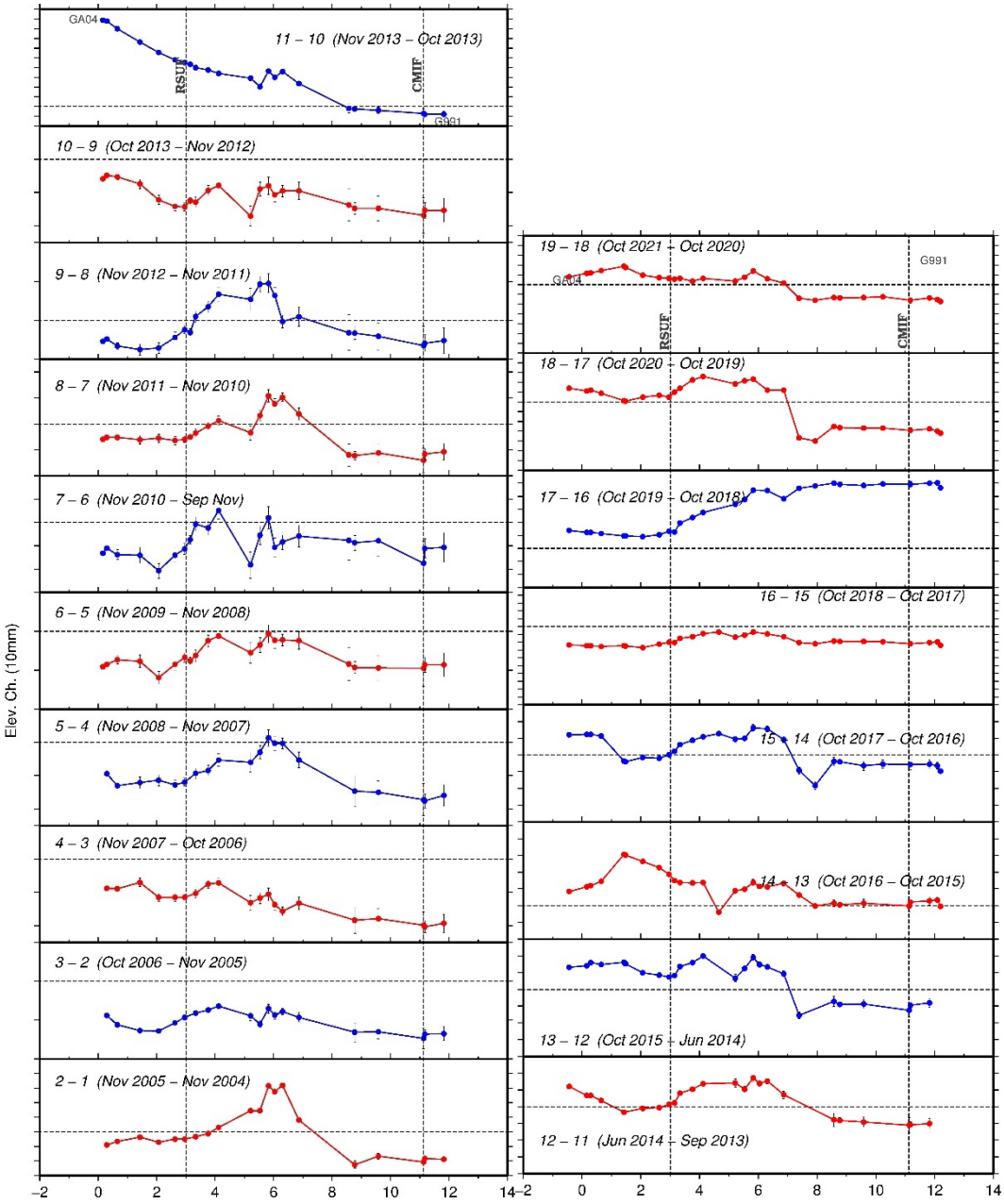


圖 2-3.89：光復至豐濱測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.89: Elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. RSUF is Rueyshui fault, CMIF is Chimei fault.

2-3-9-3 紅葉至靜浦測線

紅葉至靜浦測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層（圖 2-3.91a），測線長為 18.0 公里，2004 年至 2021 年間進行共 19 次的施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GNSS 連續站 KNKO 之垂直速率之 2009 年地震前垂直速率（-7.7 mm/yr）、2009 年震後至 2013 年垂直速率（--7.8 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-9.5 mm/yr），自 2004 年以來作為控制點來校正 GA22 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.90）。

根據圖 2-3.91b，此測線在玉里斷層左側之垂直速度約由-4.4 mm/yr 降至-8 mm/yr，在玉里斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-9.5 mm/yr 緩升至 1.9 mm/yr，可說明此測線跨過的三條斷層仍有地質活動。

此測線在 2013 年瑞穗地震由西向東抬升量由 22.0 mm 逐漸減少至 4.0 mm。橫跨嶺頂斷層和奇美斷層的光復-豐濱測線由西向東抬升量由 100.0 mm 到逐漸減少至 30.0 mm，然後驟減至幾乎無抬升（圖 2-3.92）。

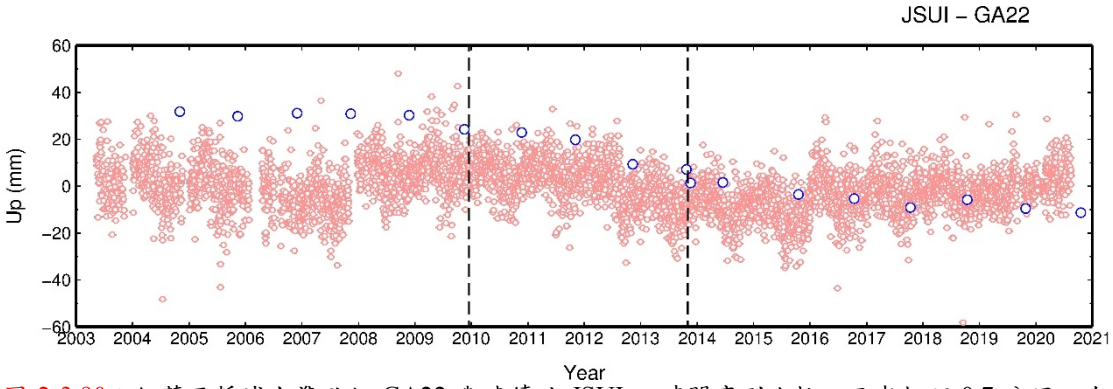


圖 2-3.90：紅葉至靜浦水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

Figure 2-3.90: Time series comparison between Hongye-Jingpu leveling bench mark GA22 and continuous GNSS station JSUI. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the March 6th 2009 Suao earthquake and the right one is the October 31st 2013 Ruisui earthquake.

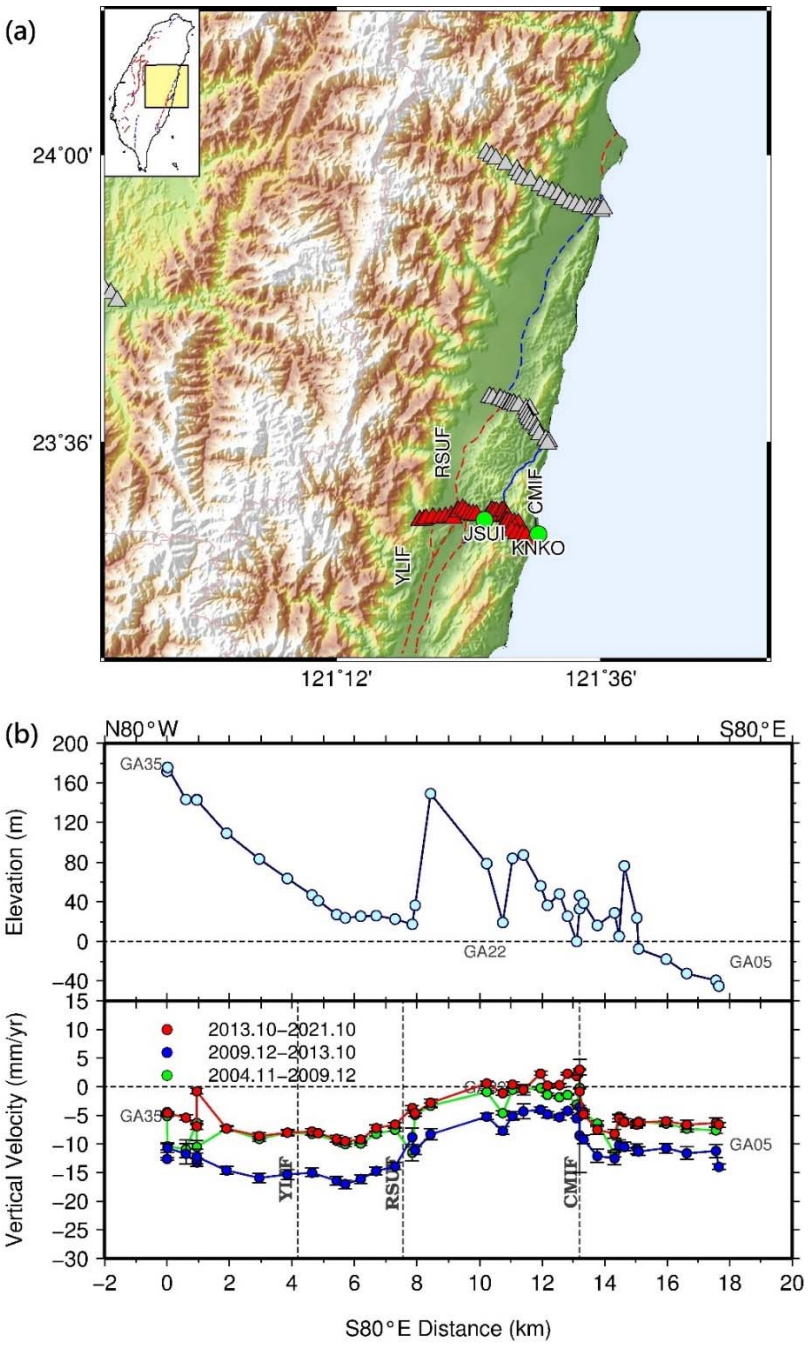


圖 2-3.91：紅葉至靜浦測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.91: Elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present.Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, CMS is Chimei syncline, CMIF is Chimei fault.

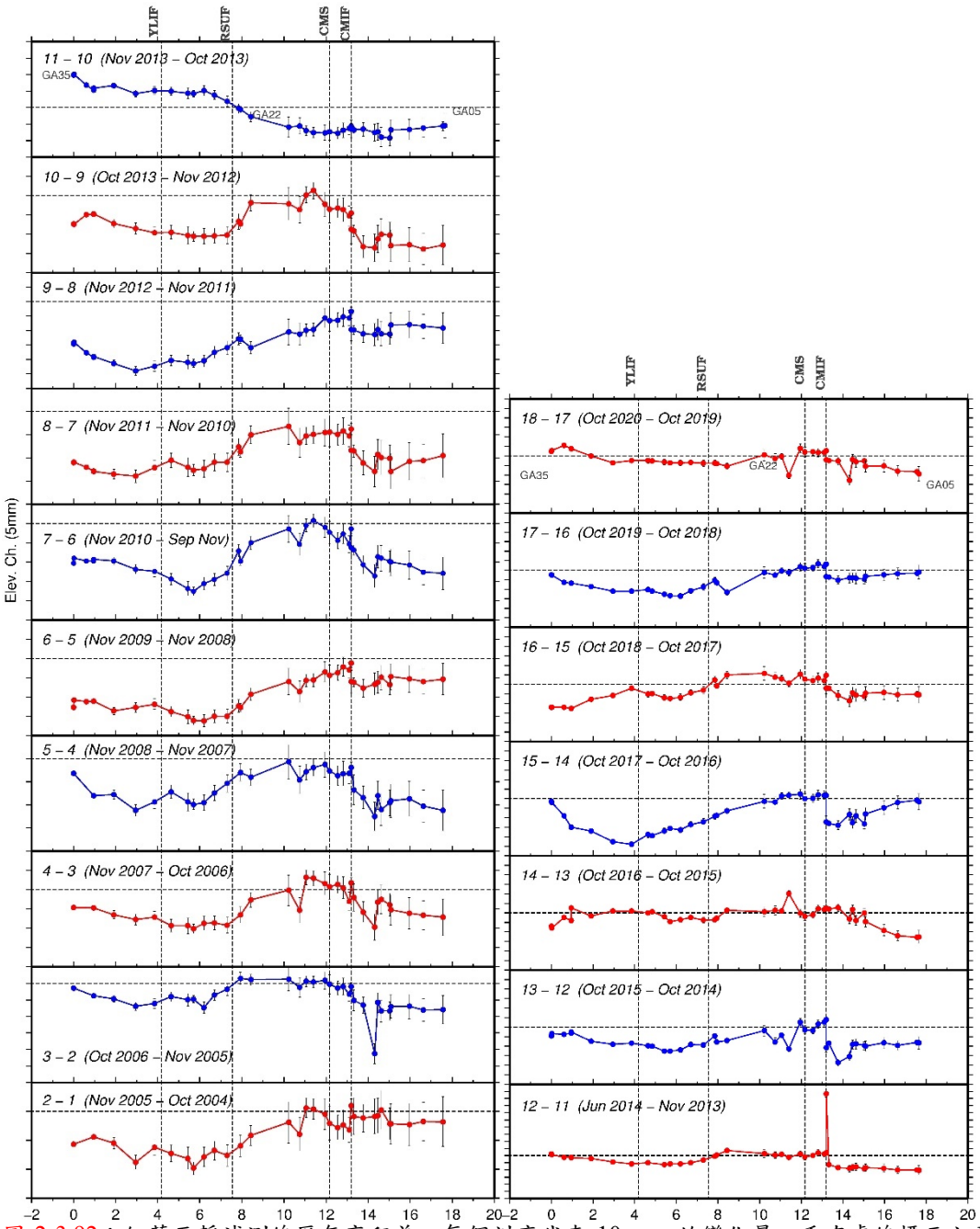


圖 2-3.92：紅葉至靜浦測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.92: Elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, CMS is Chimei syncline, CMIF is Chimei fault.

2-3-9-4 東成至富岡測線

東成至富岡測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層（圖 2-3.94a），測線長約 14 公里，2009 年至 2021 年間共進行 13 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 FUGN 之 2013 震前垂直速率（-2.3 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（0.6 mm/yr），自 2009 年以來作為控制點來校正 A086 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.93）。

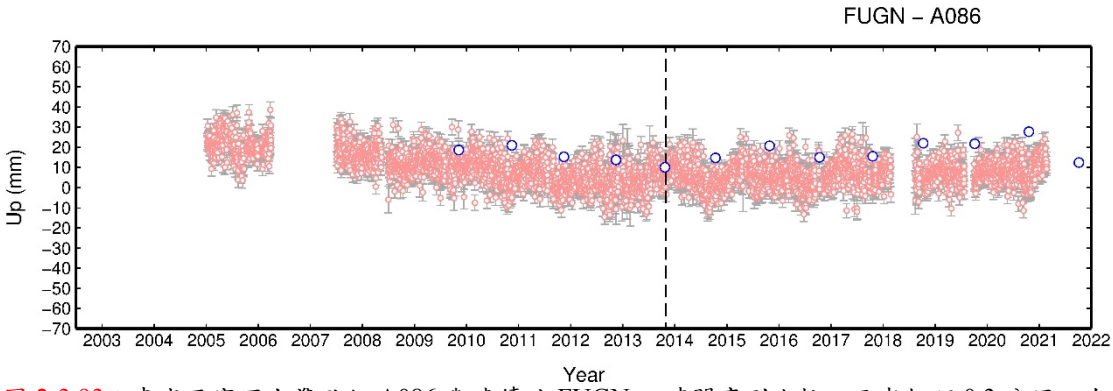


圖 2-3.93：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2015 年 2 月 14 日台東外海地震。

Figure 2-3.93: Time series comparison between Dongcheng-Fugang leveling bench mark A086 and continuous GNSS station FUGN. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the October 31st 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 14th 2015 Taitung offshore earthquake.

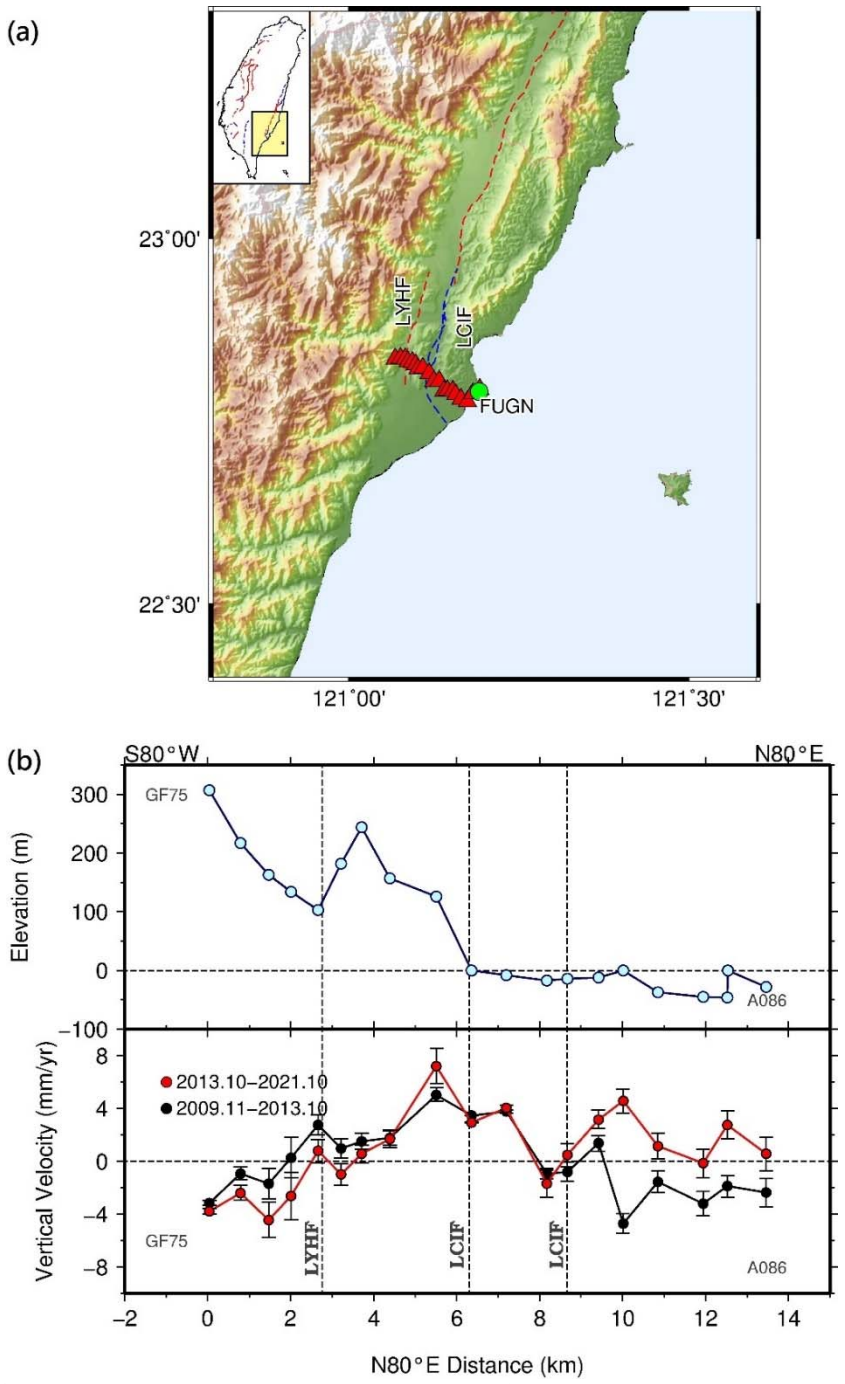


圖 2-3.94：東成至富岡測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 2-3.94: Elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the 2013 Ruisui earthquake earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular. LYHF is Luyeh fault, LCIF is Lichi fault.

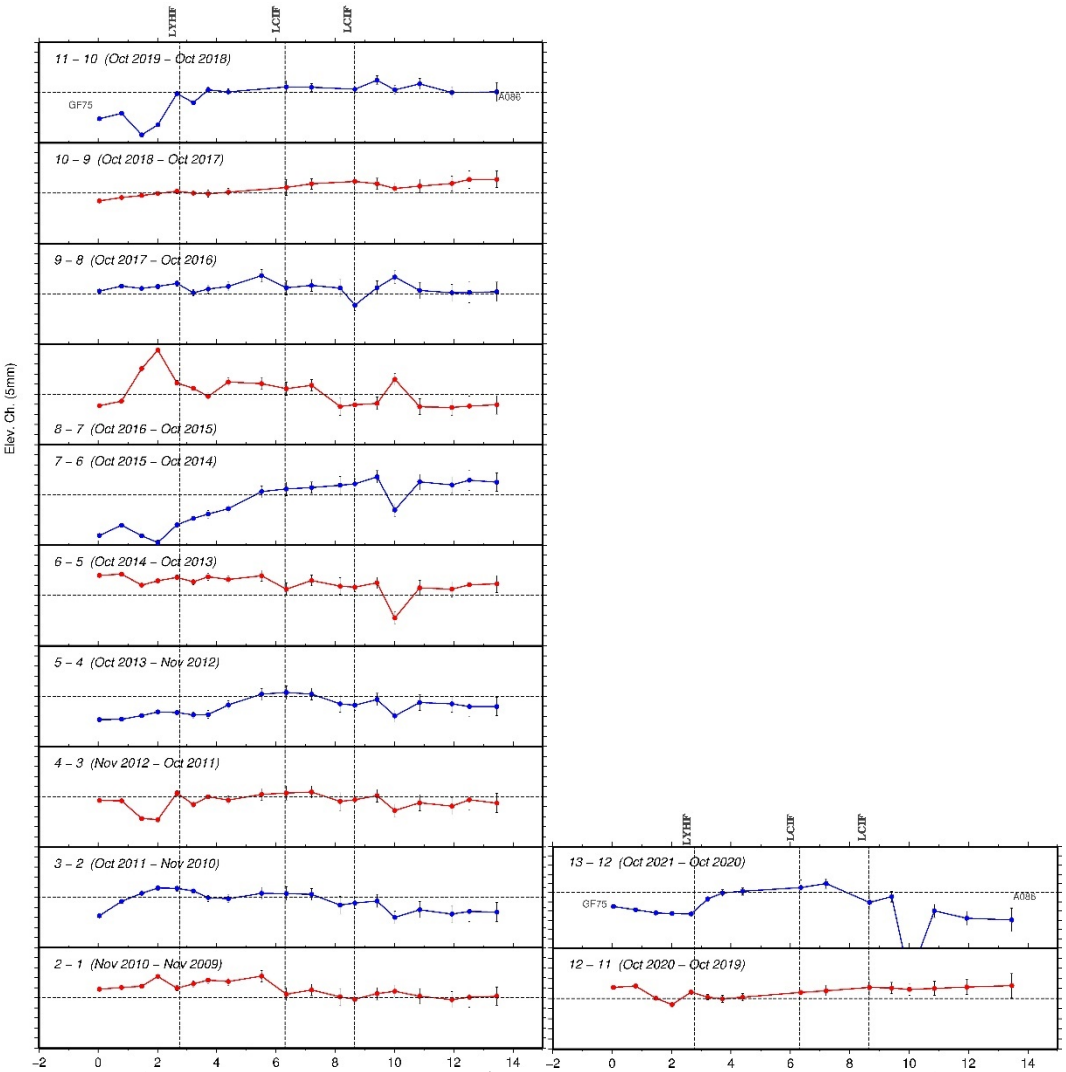


圖 2-3.95：東成至富岡測線歷年高程差。每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 2-3.95: Elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. Each line is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LYHF is Luyeh fault, LCIF is Lichi fault.

2-3-10 精密水準測量資料可靠度分析

為了分析精密水準資料可靠度，我們使用 GNSS 連續站、GNSS 移動站和精密水準所觀測各地區與時段之速度場展圖比較。

台北地區山腳斷層兩側主要以沉陷為主（圖 2-3.96）。桃竹苗地區慈顯著抬升或沉陷（圖 2-3.97）。

中部地區 2004-2007 年和 2007-2013 年不管是水準、GNSS 連續站與 GNSS 移動站速度場型態都有相當好的一致性（圖 2-3.98-100），尤其在 2013 年前彰化沿海地區都有顯著的沉陷量。

嘉南地區從 2001 年至今年不管是水準、GNSS 連續站與 GNSS 移動站速度場型態都相當類似（圖 2-3.101-104），九芎坑斷層、六甲斷層與後甲里斷層以西為抬升，東側接近海岸線為沉降。

高屏地區 2001-2010 年以及 2010-2016 年岡山至安坡測線主要為抬升（圖 2-3.105-107），但是附近 GNSS 連續站與 GNSS 移動站主要呈現沉陷。2016 年轉為沉陷，與周圍 GNSS 測站相似。路竹至茂林測線之速度場自 2001 年以來與附近 GNSS 連續站與 GNSS 移動站都有類似型態。

2006 年恆春地震前恆春地區水準與 GNSS 連續站速度大小及方向幾乎一致（圖 2-3.108-111），但與移動站卻不吻合。地震後至 2010 年南樹林至鵝鑾鼻測線主要為抬升，但附近 GNSS 連續站、GNSS 移動站以及幾乎恆春半島都呈現沉降。2010 年以後恆春西臺地至佳樂水測線以北在恆春斷層東側呈現抬升，其他地區主要為沉陷，三種觀測方式都在空間中呈現相當好的一致性。

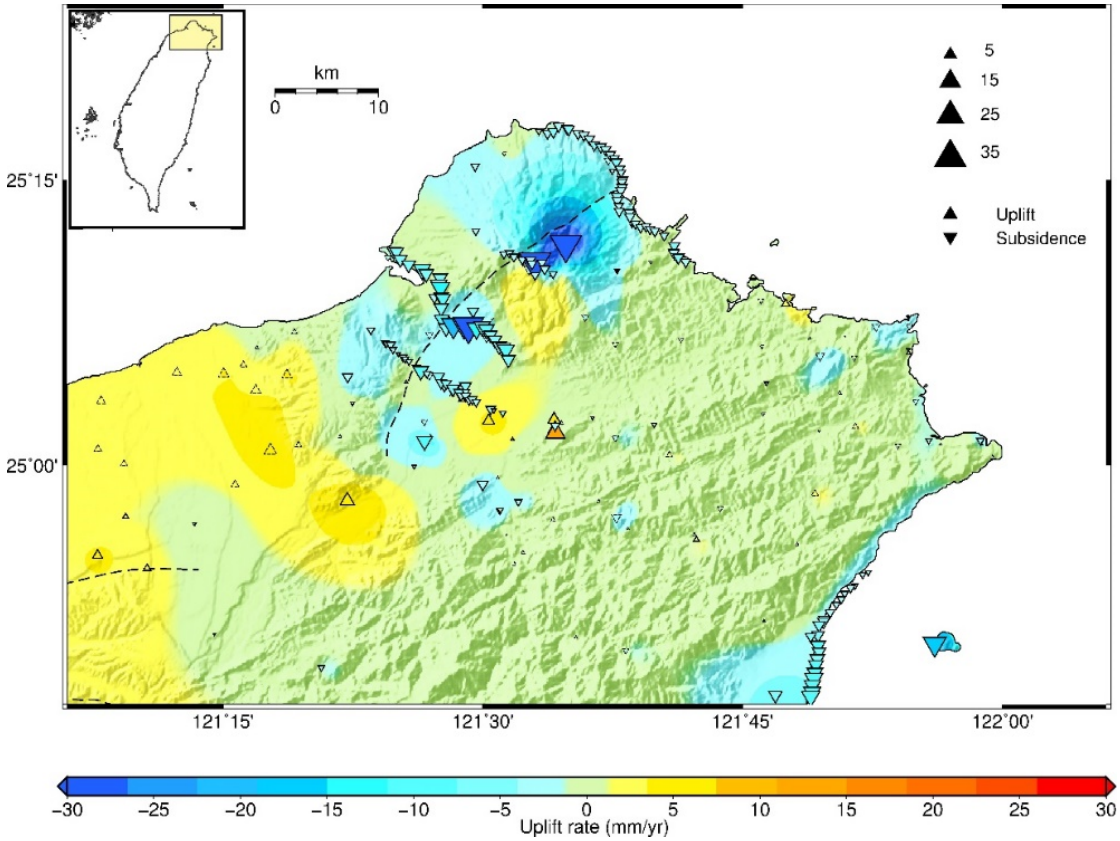


圖 2-3.96：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站、虛線邊框表示 GNSS 連續站，GNSS 觀測時間為 2004 – 2021 年，精密水準觀測時間為 2002 – 2021 年。

Figure 2-3.96: Vertical velocity field relative to station S01R in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. The duration of GNSS observation is from 2004 to 2021; while pricise leveling is from 2004 to 2021.

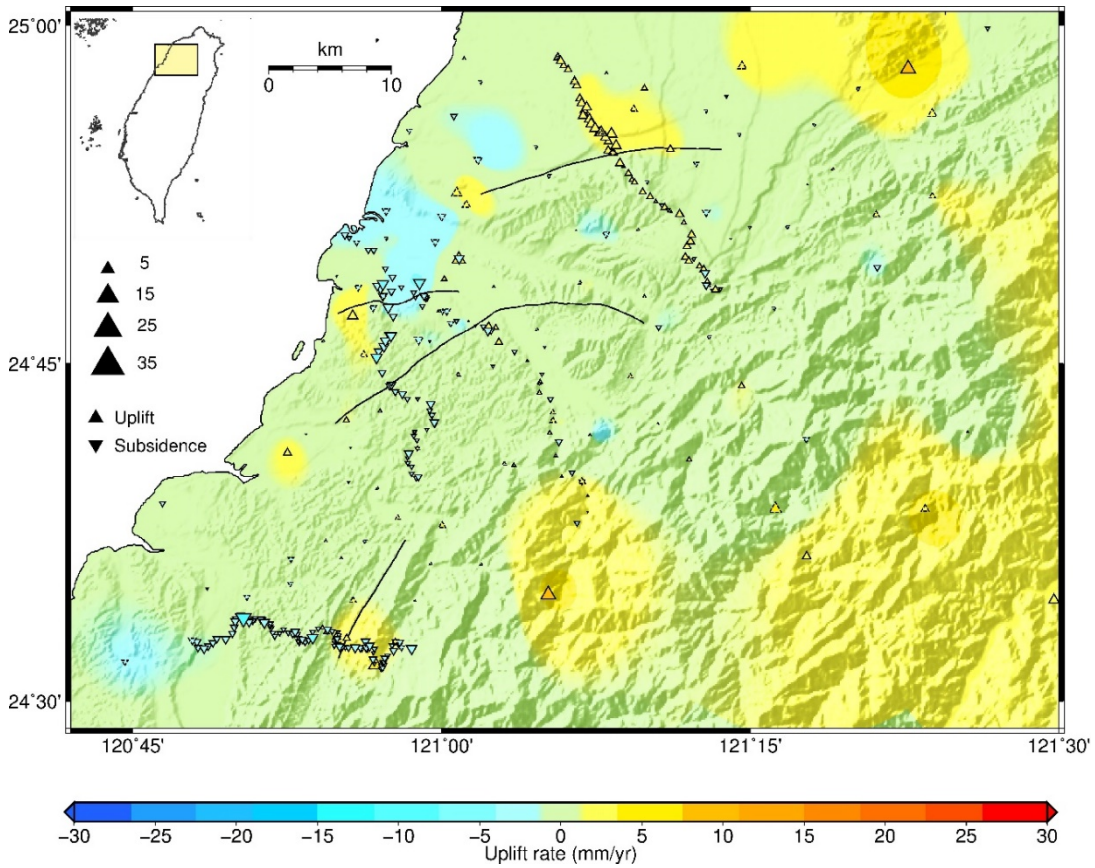


圖 2-3.97：桃竹苗地區 2002 – 2021 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站、虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2-3.97: Vertical velocity field relative to station S01R in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2021. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

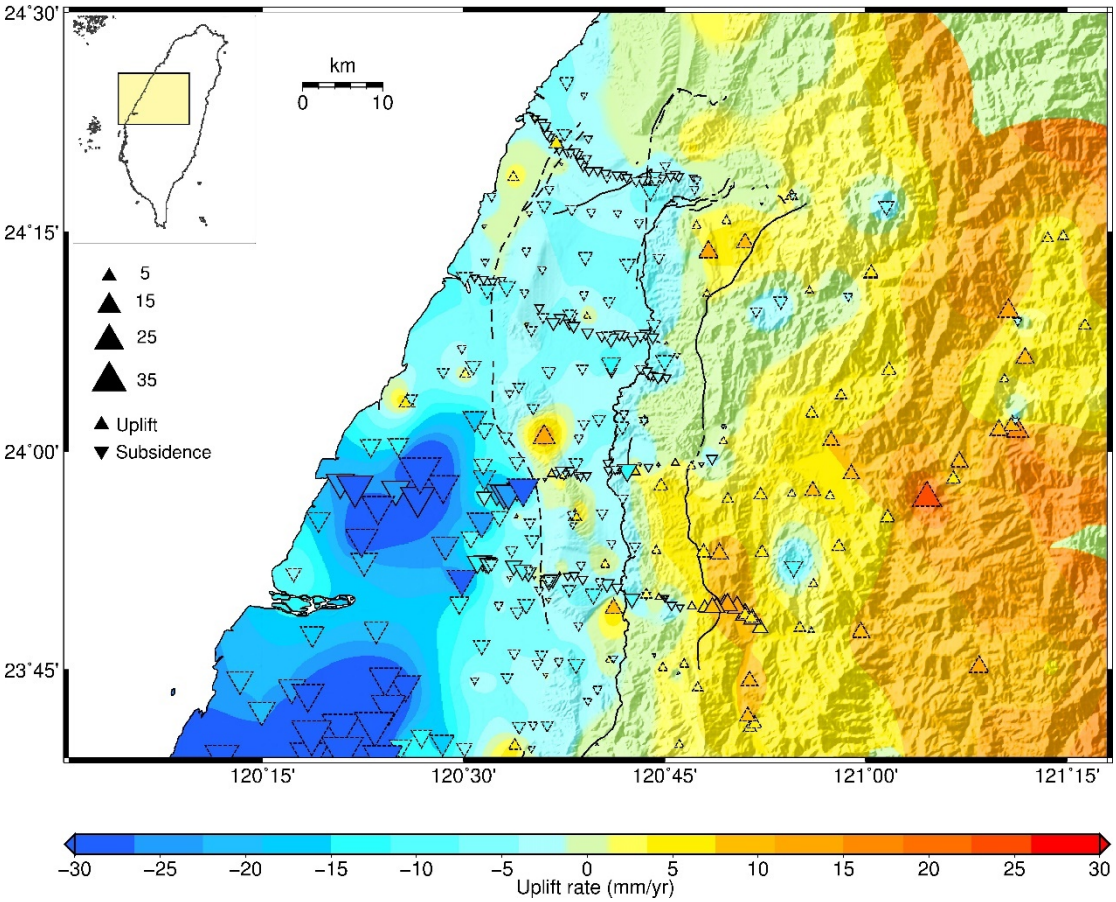


圖 2-3.98：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2004-2007 年，精密水準站觀測時間為 2004-2007 年。

Figure 2-3.98: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2004-2007 in Central Taiwa. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2004-2007, while precise leveling is from 2004-2007.

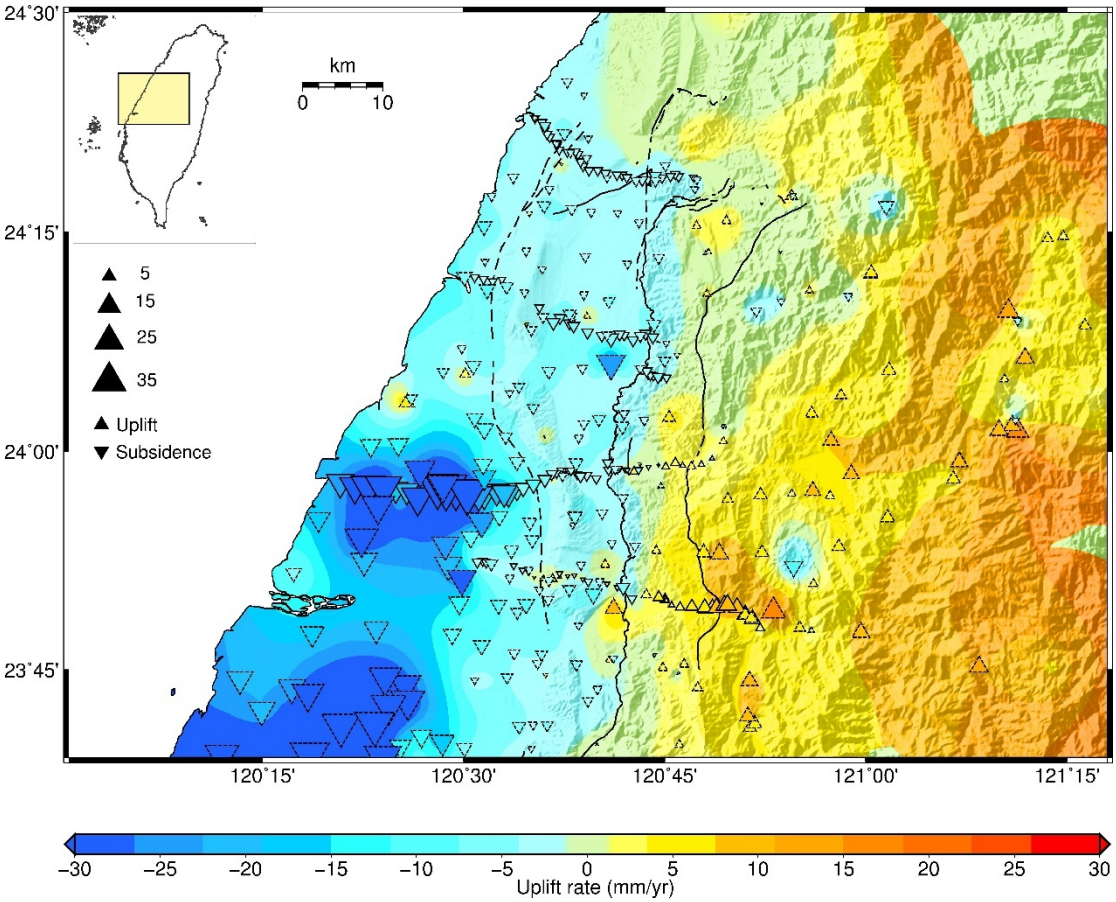


圖 2-3.99：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2007-2013 年，精密水準站觀測時間為 2007-2013 年。

Figure 2-3.99: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2007-2013 in Central Taiwa. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2007-2013, while precise leveling is from 2007-2013.

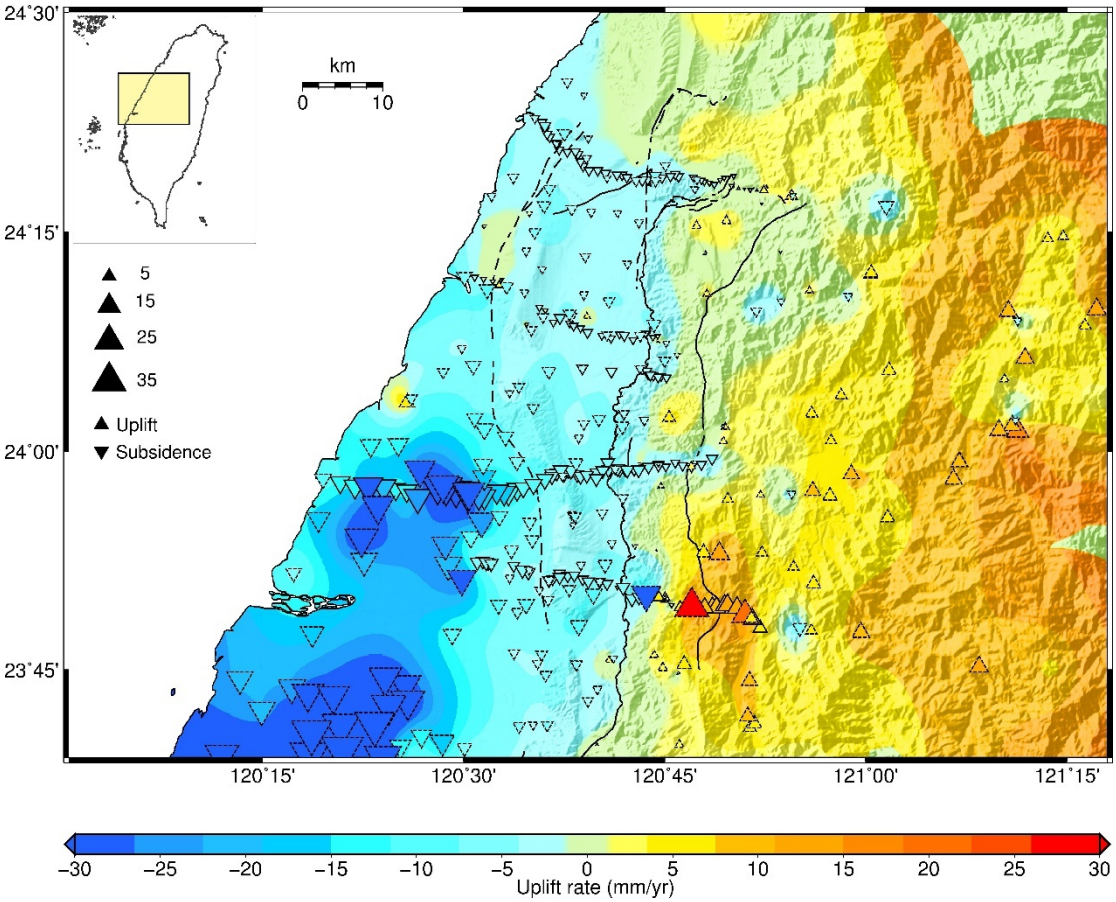


圖 2-3.100：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2013-2020 年，精密水準站觀測時間為 2013-2021 年。

Figure 2-3.100: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2013-2021 in Central Taiwa. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2013-2020, while precise leveling is from 2013-2021.

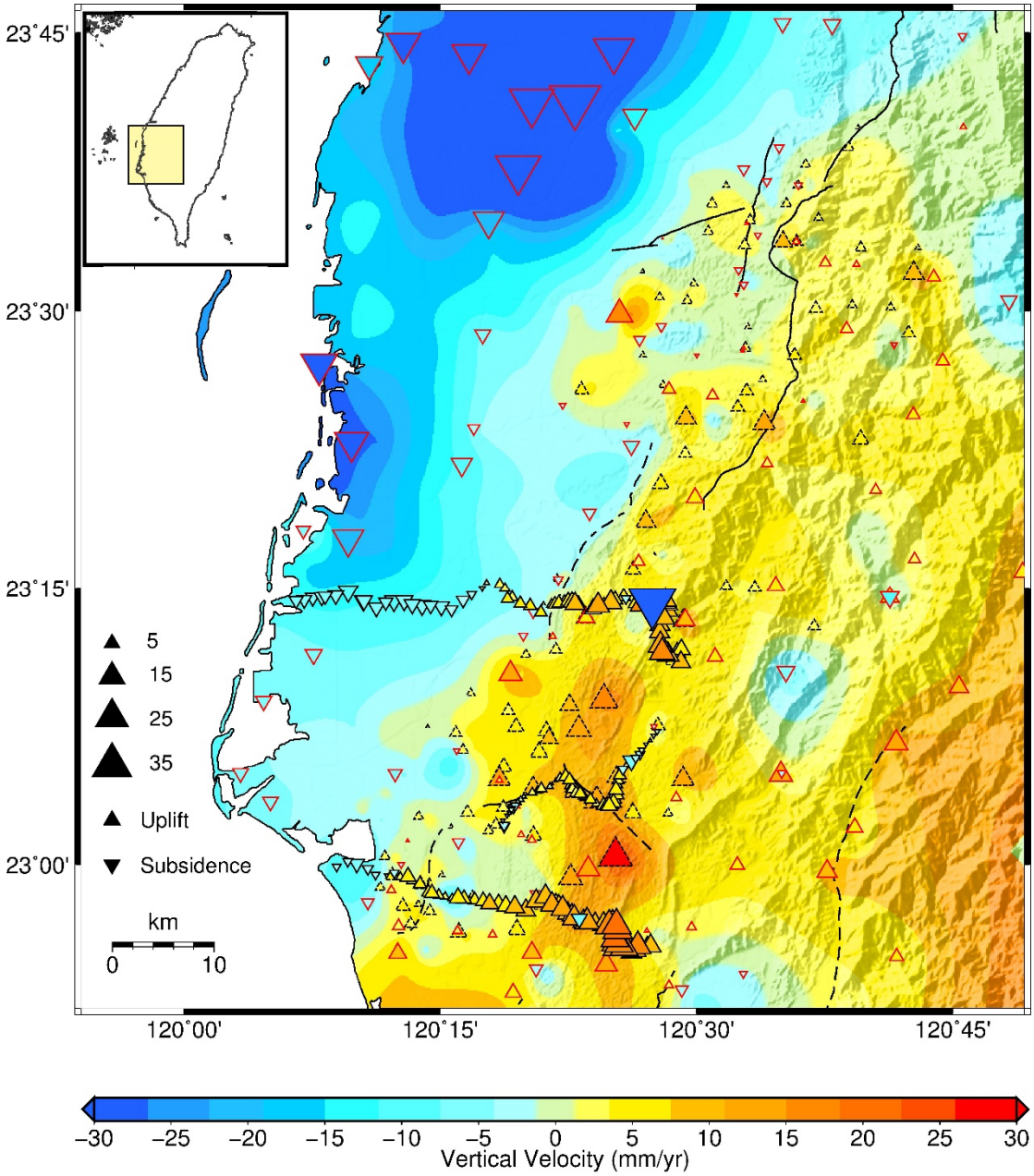


圖 2-3.101：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2001-2003 年，精密水準站觀測時間為 2001-2003 年。

Figure 2-3.101: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2001-2003 in Chiayi and Tainan area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2001-2003, while precise leveling is from 2001-2003.

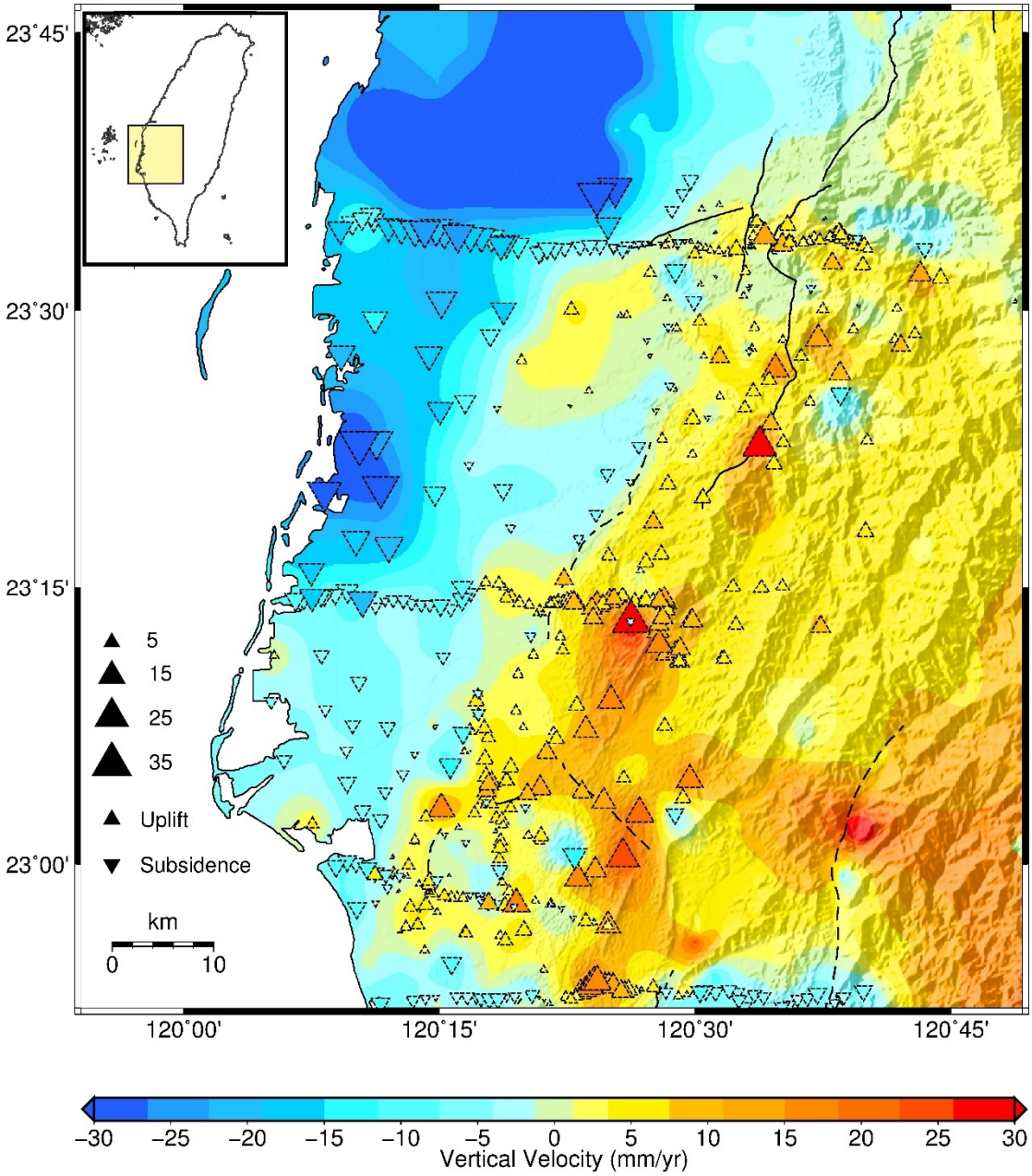


圖 2-3.102：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2003-2010 年，精密水準站觀測時間為 2003-2010 年。

Figure 2-3.102: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2003-2010 in Chiayi and Tainan area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2003-2010, while precise leveling is from 2003-2010.

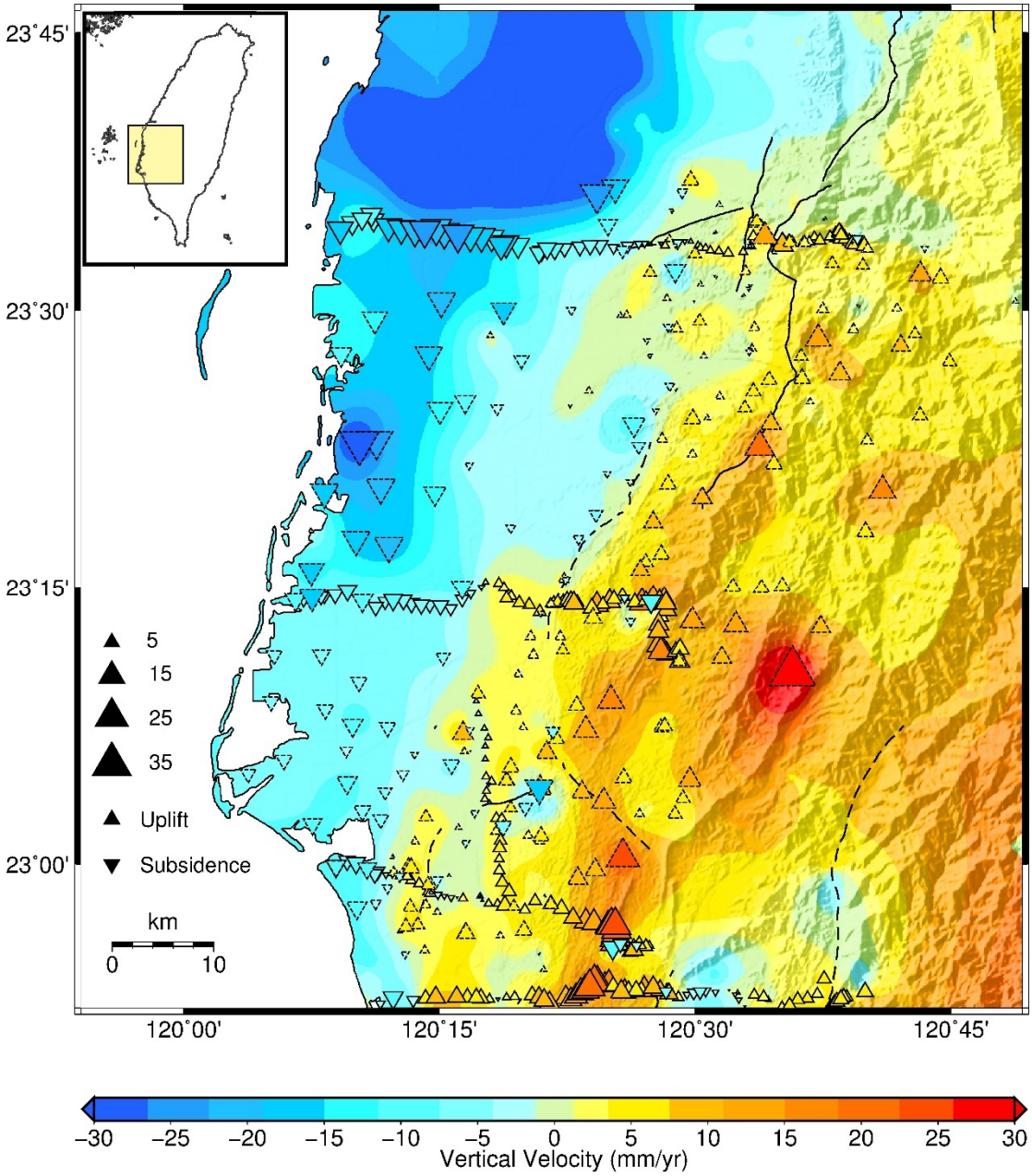


圖 2-3.103：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2010-2016 年，精密水準站觀測時間為 2010-2016 年。

Figure 2-3.103: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2010-2016 in Chiayi and Tainan area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2010-2016, while precise leveling is from 2010-2016.

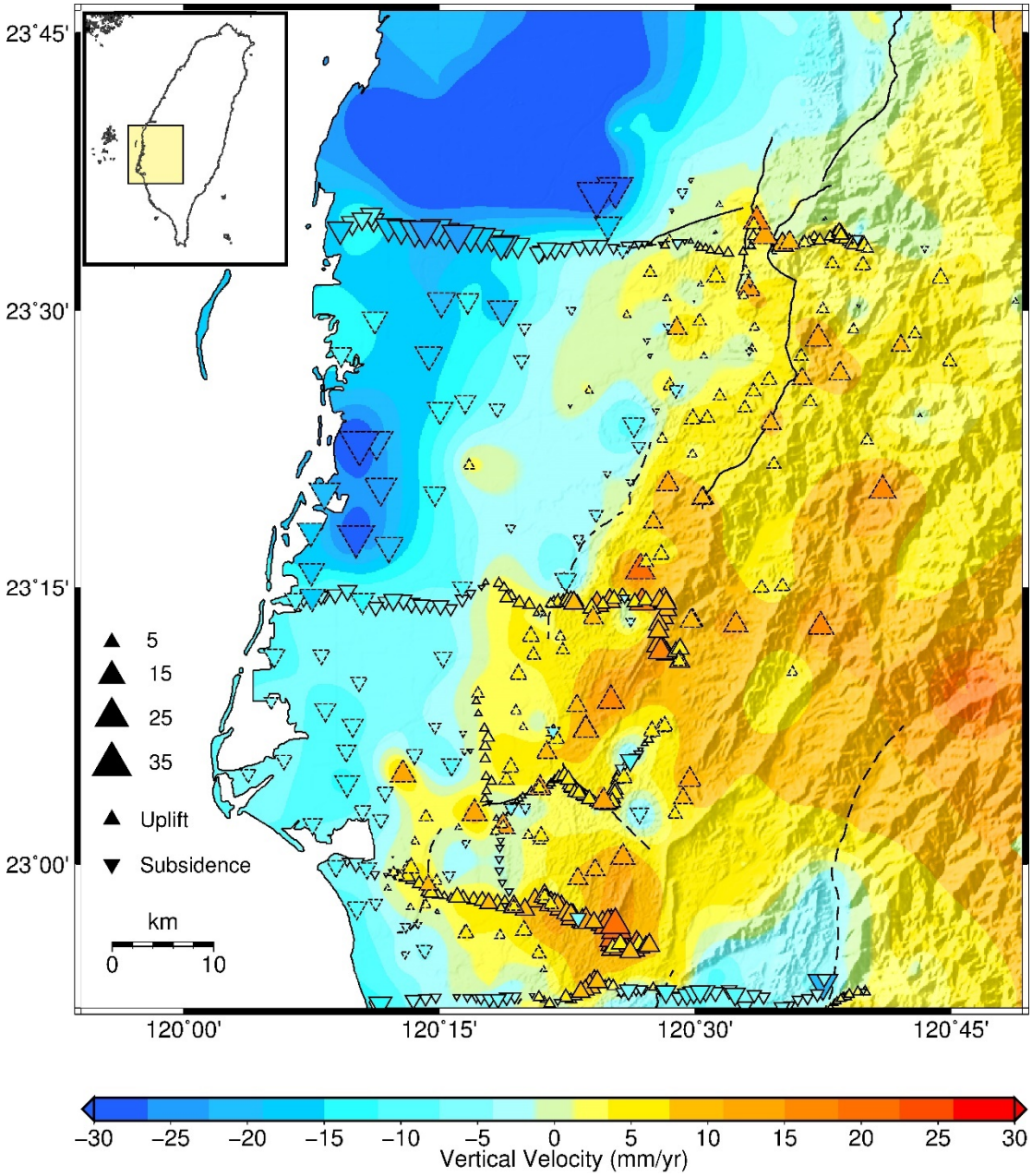


圖 2-3.104：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2016-2020 年，精密水準站觀測時間為 2016-2021 年。

Figure 2-3.104: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2016-2021 in Chiayi and Tainan area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2016-2020, while precise leveling is from 2016-2021.

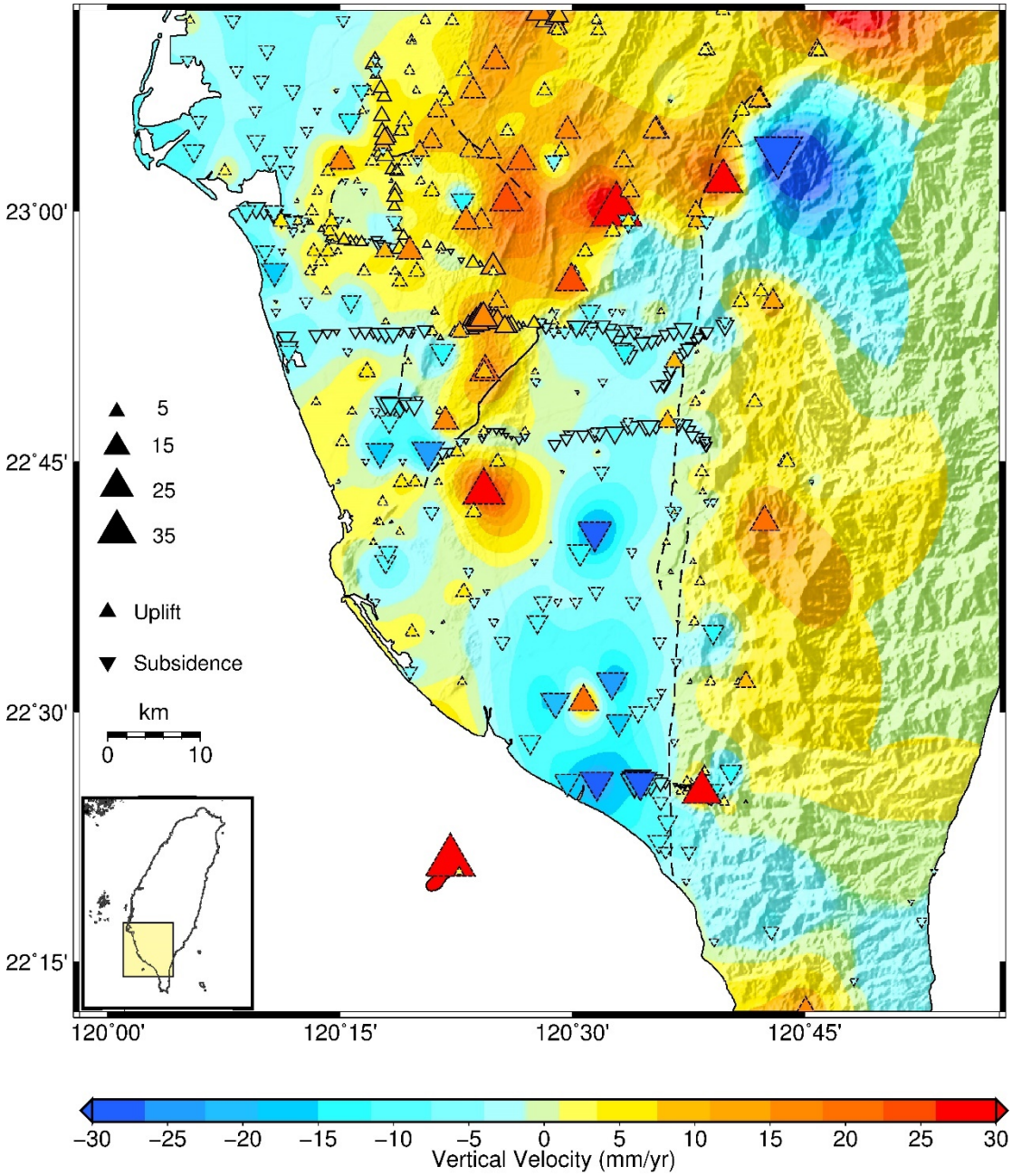


圖 2-3.105：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2004-2010 年，精密水準站觀測時間為 2004-2010 年。

Figure 2-3.105: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2004-2010 in Kaohsiung and Pingtung area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2004-2010, while precise leveling is from 2004-2010.

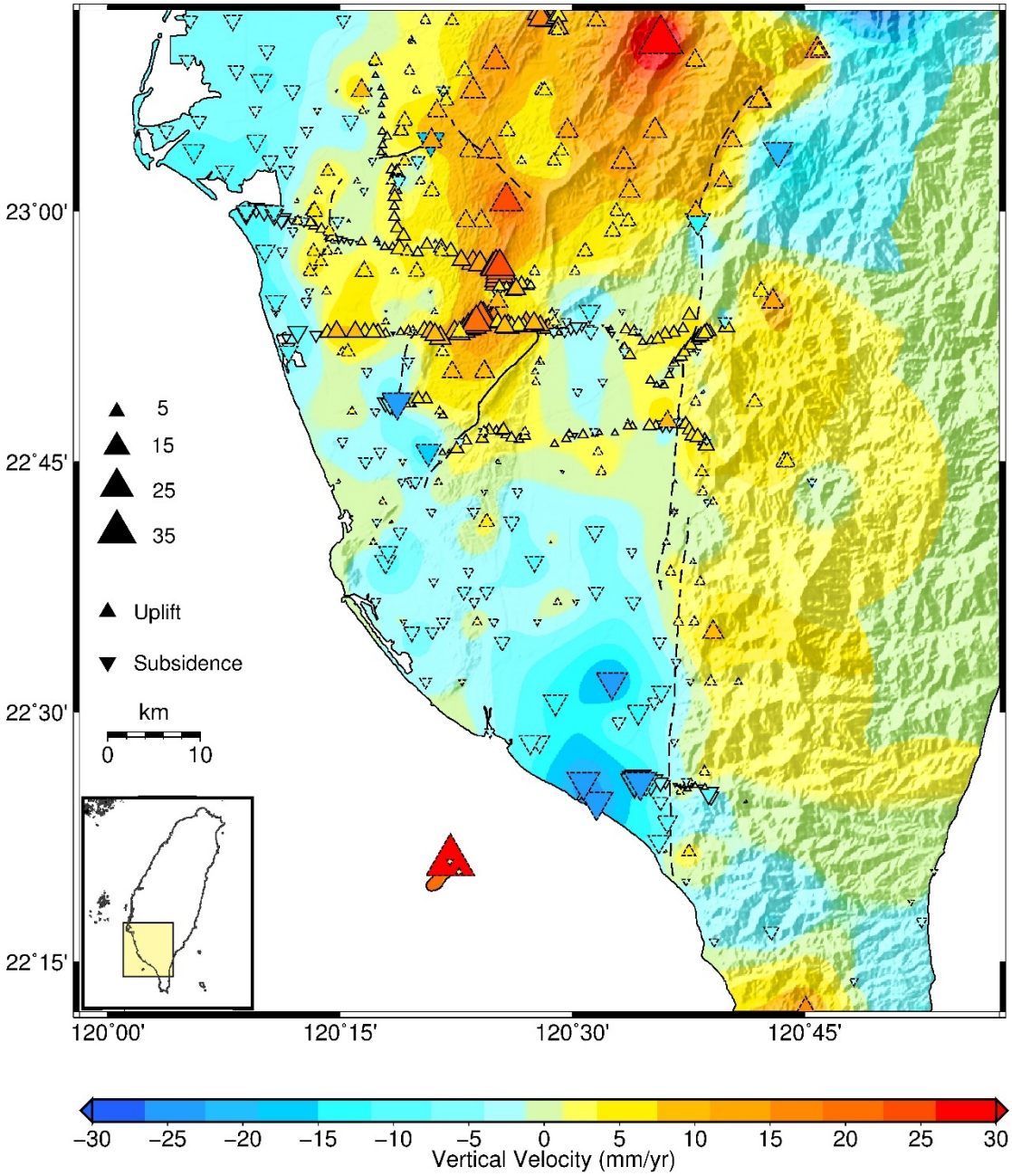


圖 2-3.106：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2010-2016 年，精密水準站觀測時間為 2010-2016 年。

Figure 2-3.106: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2010-2016 in Kaohsiung and Pingtung area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2010-2016, while precise leveling is from 2010-2016.

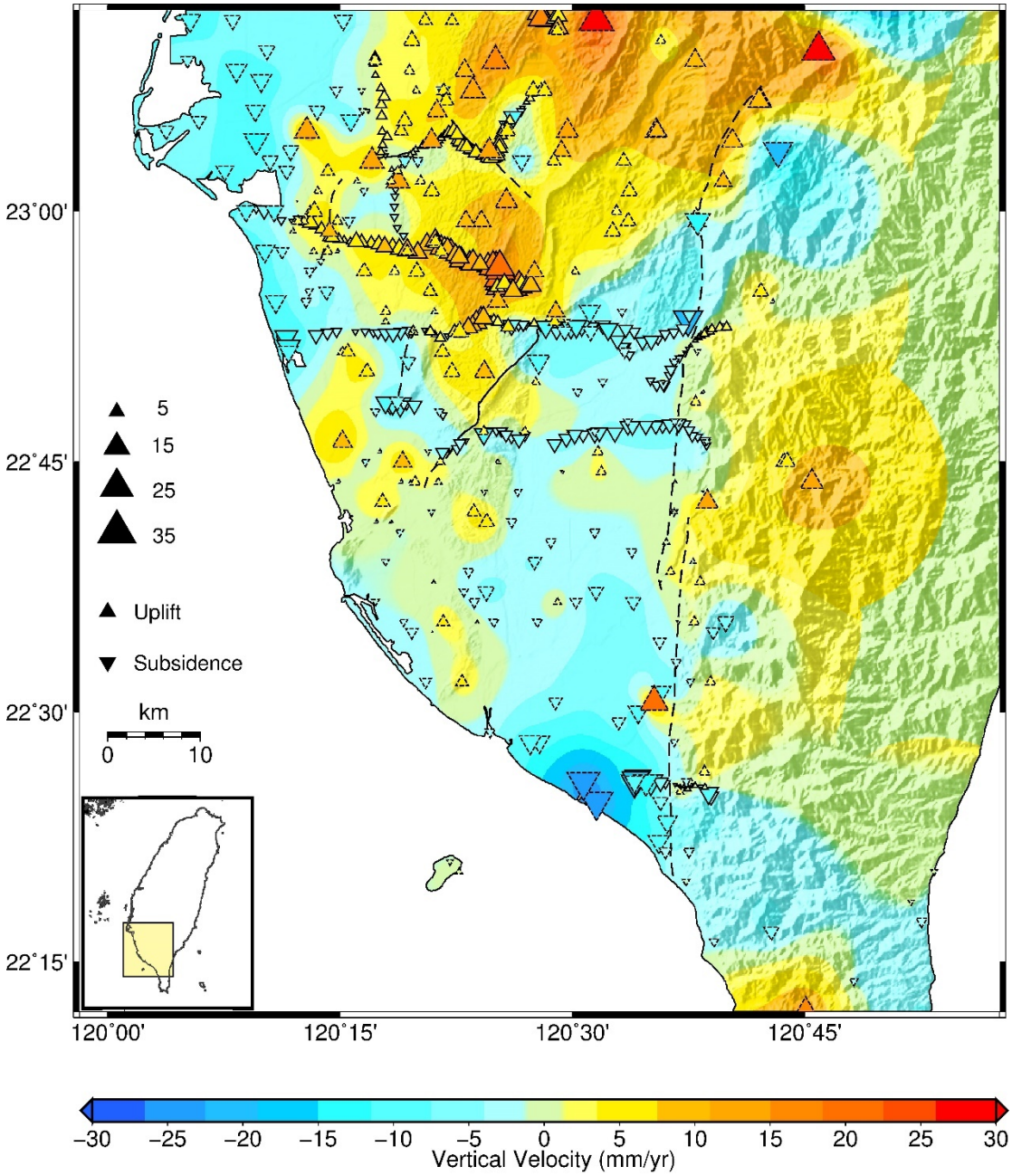


圖 2-3.107：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2016-2020 年，精密水準站觀測時間為 2016-2021 年。

Figure 2-3.107: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2021 in Kaohsiung and Pingtung area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2016-2020, while precise leveling is from 2016-2021.

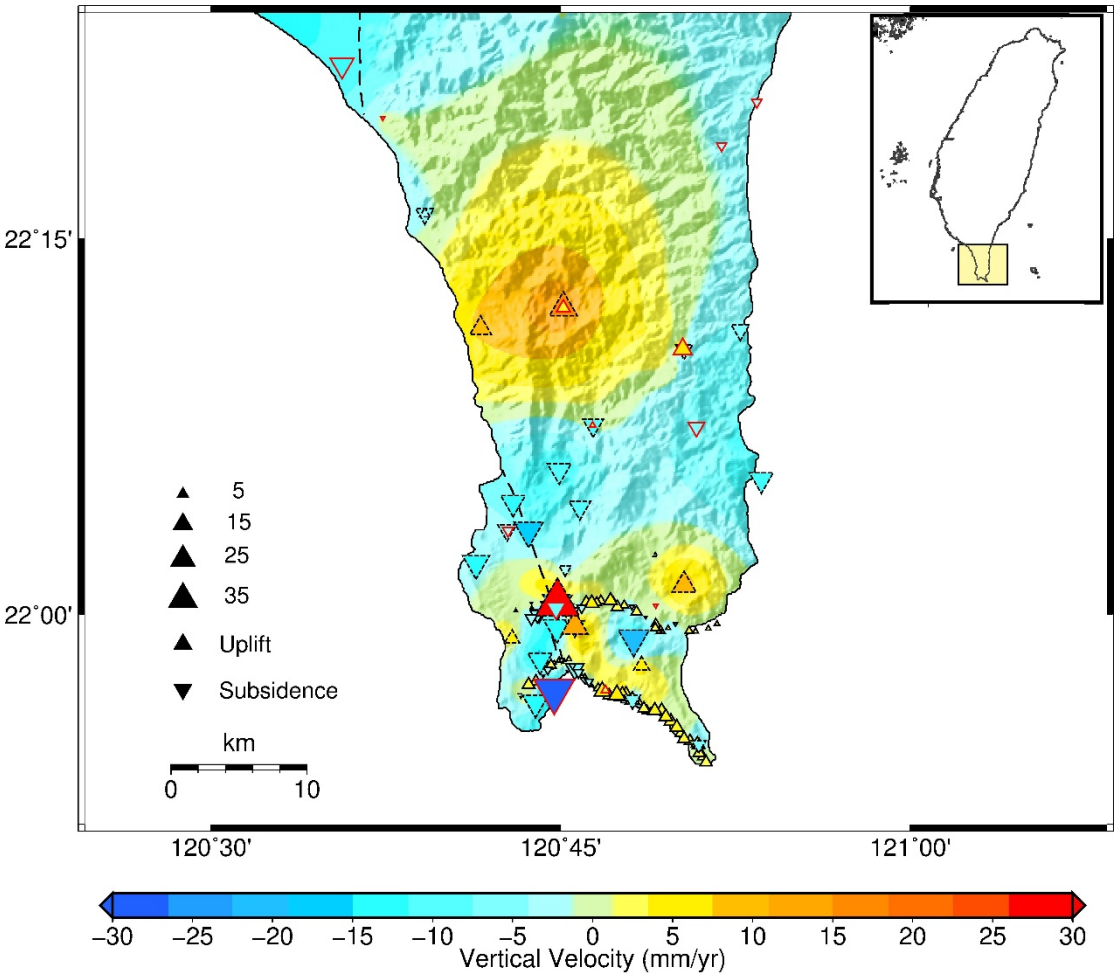


圖 2-3.108：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2002-2006 年，精密水準站觀測時間為 2002-2006 年。

Figure 2-3.108: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Hengchun area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2002-2006, while precise leveling is from 2002-2006.

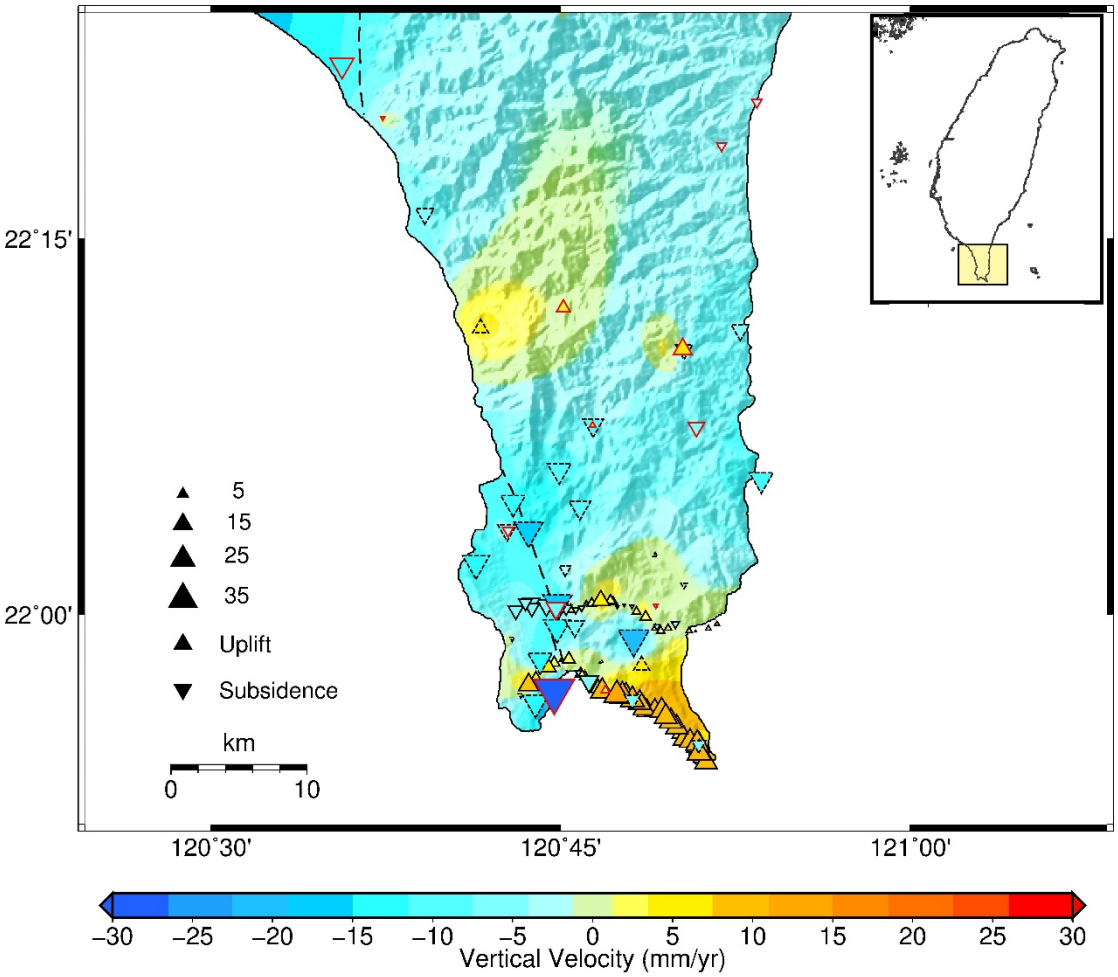


圖 2-3.109：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2006-2010 年，精密水準站觀測時間為 2006-2010 年。

Figure 2-3.109: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Hengchun area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2006-2010, while precise leveling is from 2006-2010.

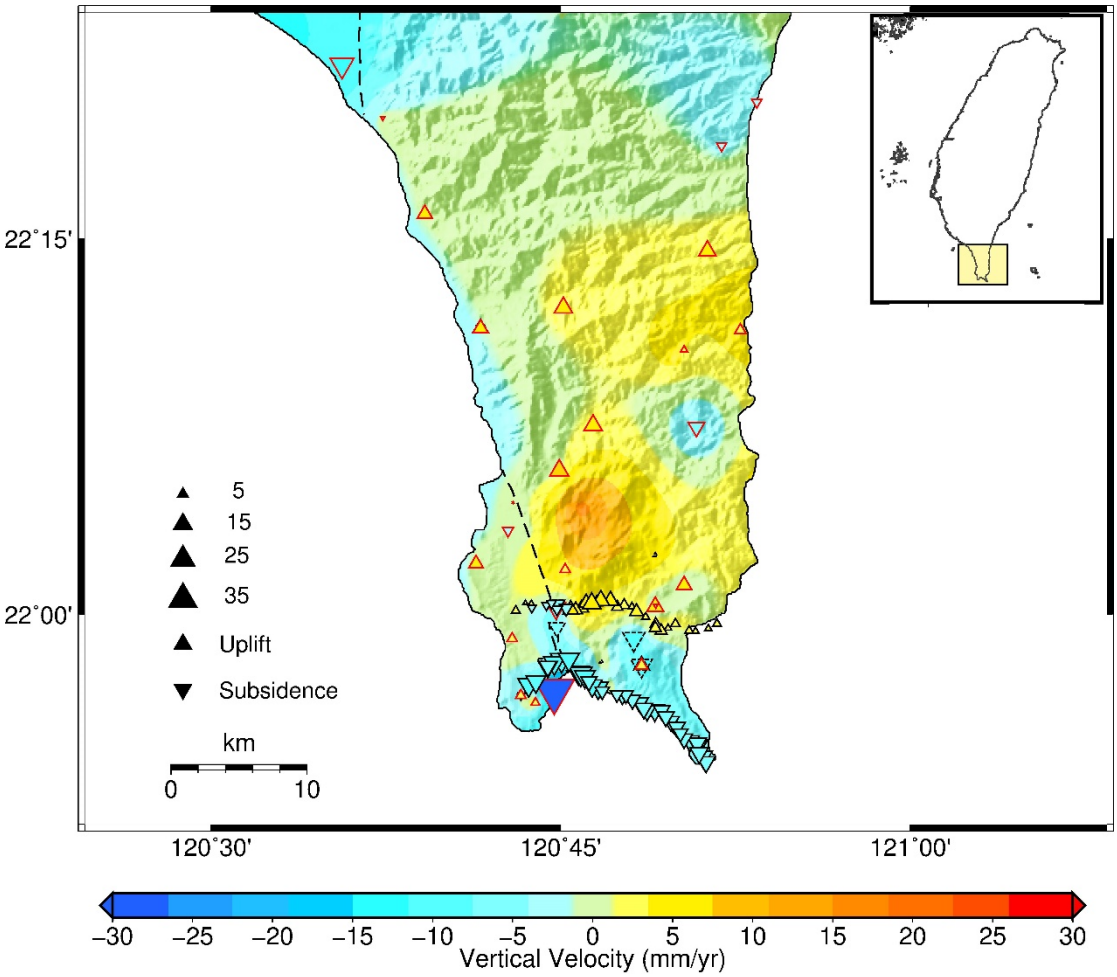


圖 2-3.110：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2010-2015 年，精密水準站觀測時間為 2010-2015 年。

Figure 2-3.110: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Hengchun area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2010-2015, while precise leveling is from 2010-2015.

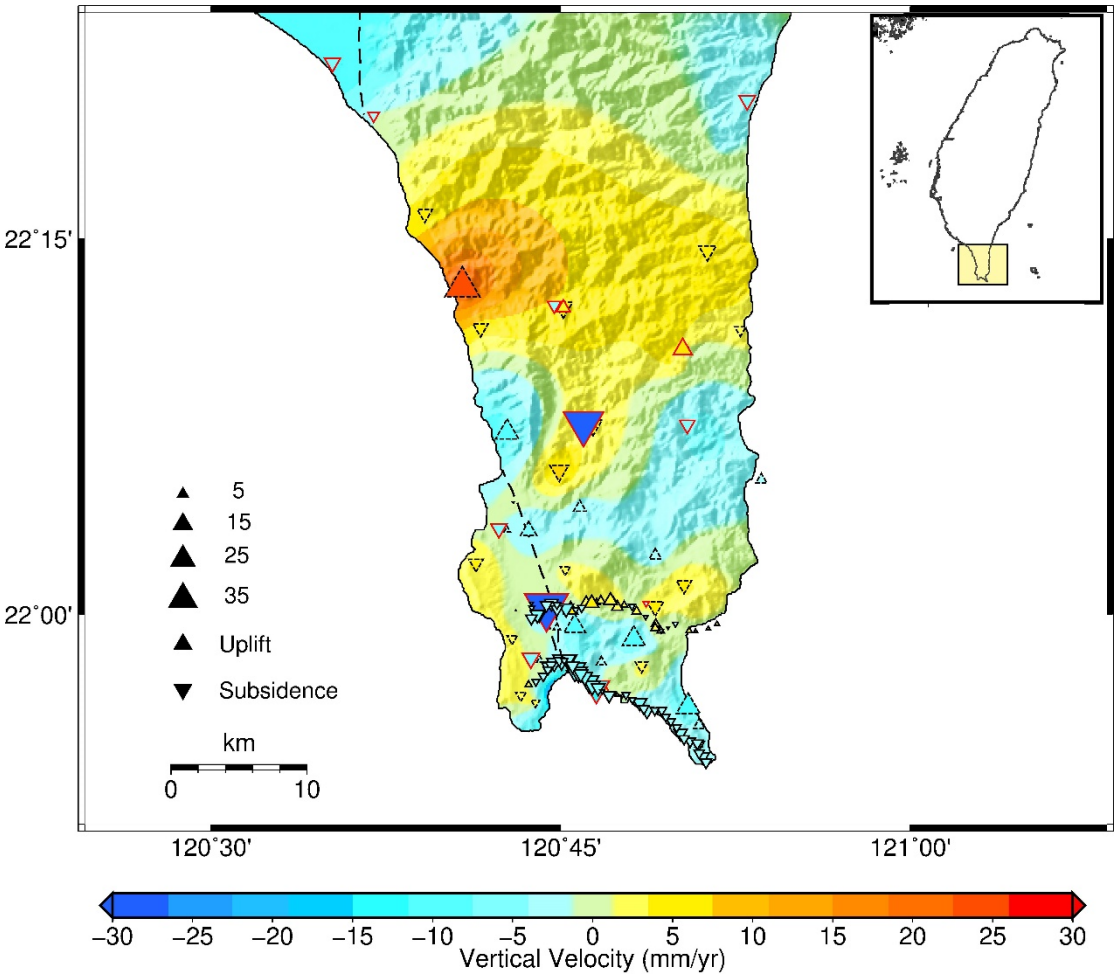


圖 2-3.111：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2015-2021 年，精密水準站觀測時間為 2015-2021 年。

Figure 2-3.111: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Hengchun area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2015-2021, while precise leveling is from 2015-2021.

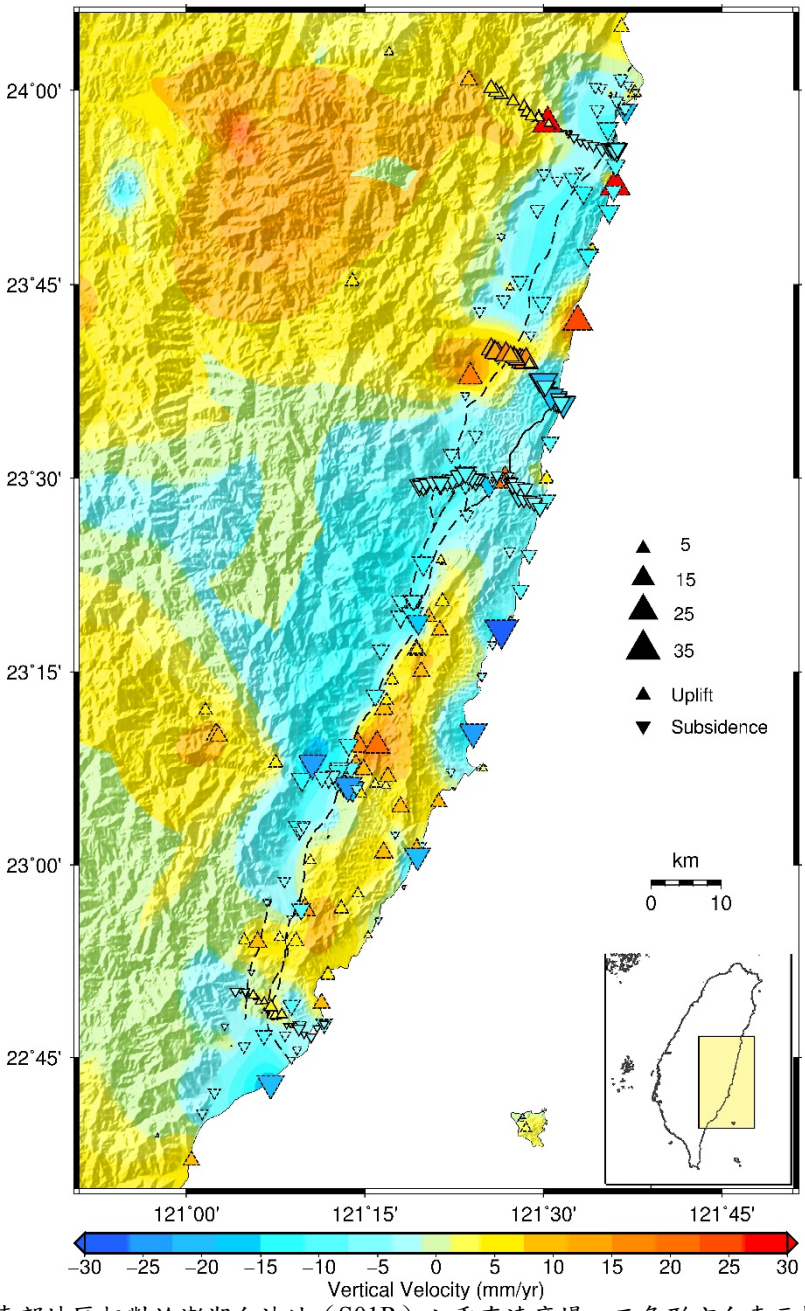


圖 2-3.112：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2004-2013 年，精密水準站觀測時間為 2004-2013 年。

Figure 2-3.112: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2004 to 2013 in Eastern areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2004-2013, while precise leveling is from 2004-2013.

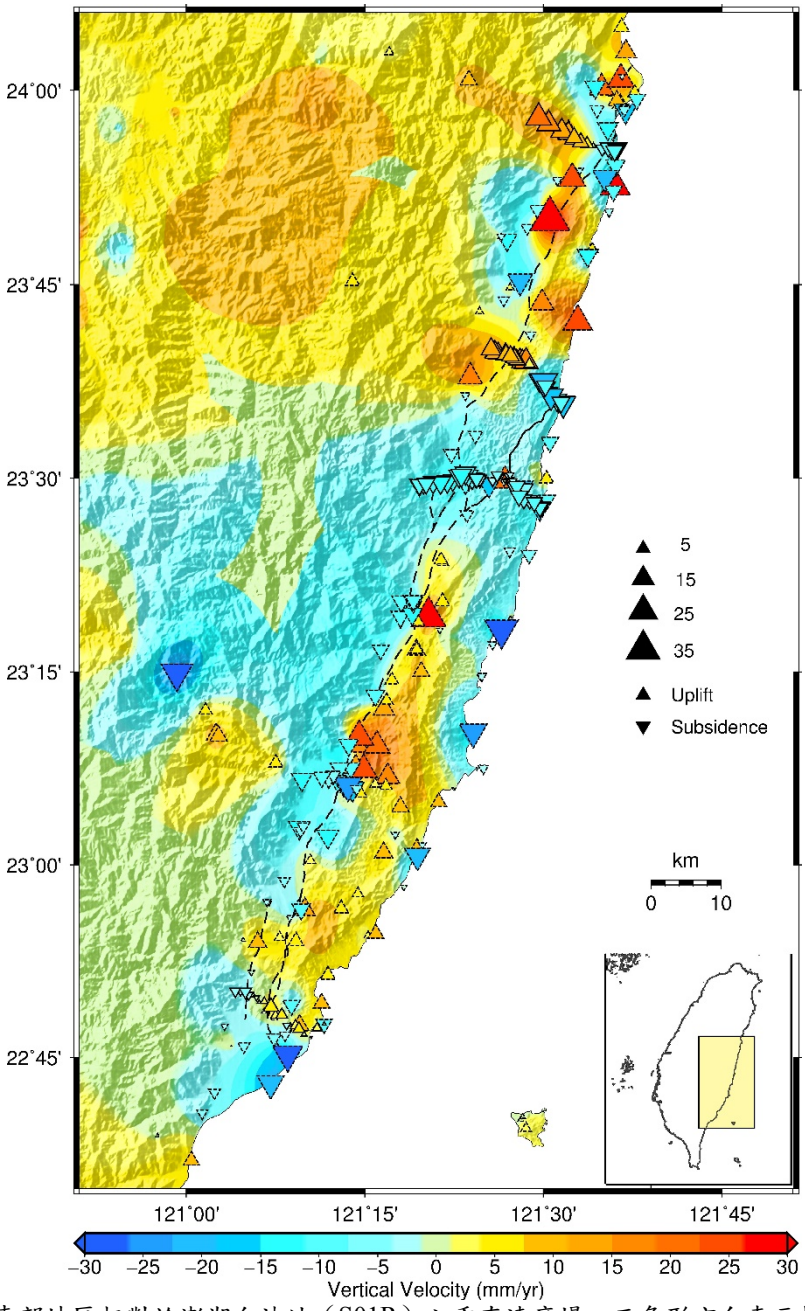


圖 2-3.113：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2013-2018 年，精密水準站觀測時間為 2013-2018 年。

Figure 2-3.113: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 20013to 2018 in Eastern areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2013-2018, while precise leveling is from 2013-2018.

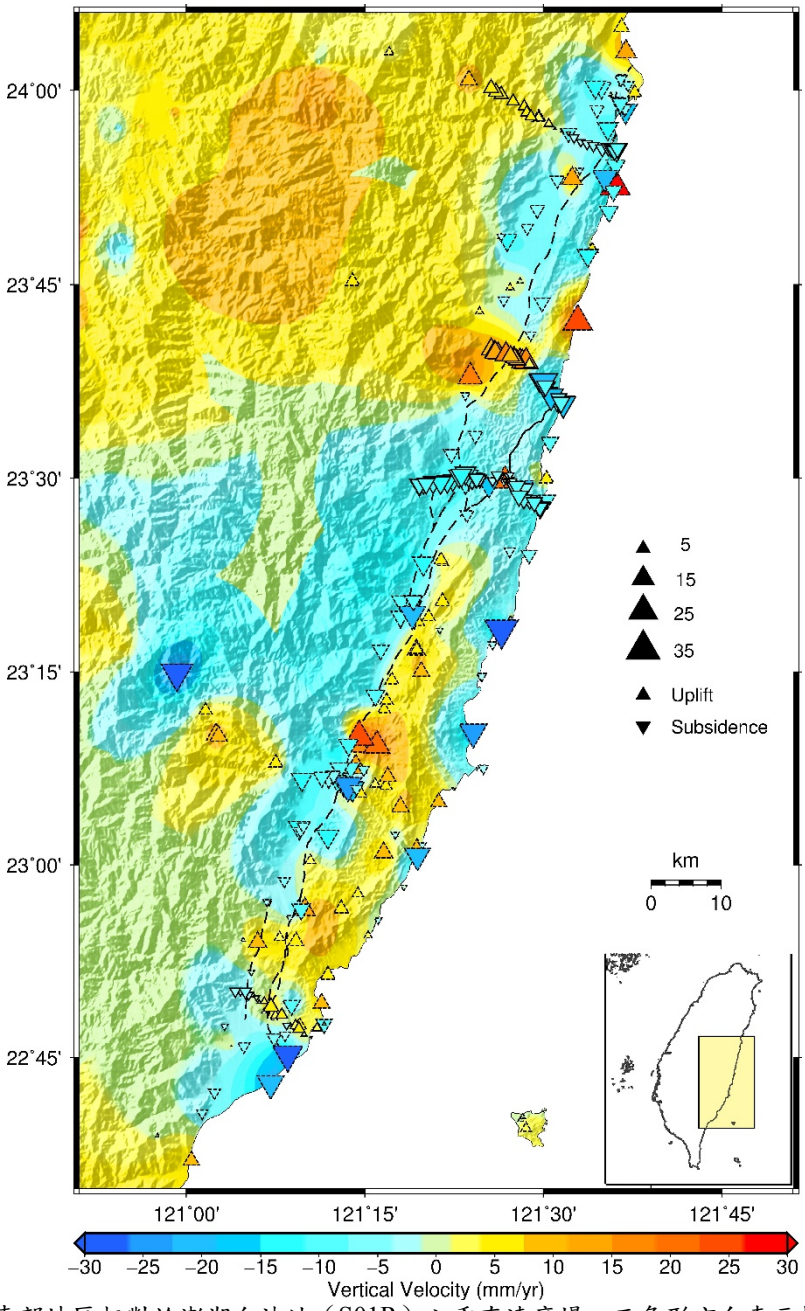


圖 2-3.114：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 站觀測時間為 2018-2021 年，精密水準站觀測時間為 2018-2021 年。

Figure 2-3.114: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2018 to 2021 in Eastern areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The duration of continuous GNSS observation is from 2018-2021, while precise leveling is from 2018-2021.

2-4 重要區域三維速度場分析

2-4-1 重要區域水平與垂直速度場

本年度之重要區域範圍涵蓋高雄都會區、高雄科學園區、橋頭科學園區。年度截至 2021 年 10 月止高屏地區 GNSS 移動站完成 99 個點位施測。另外今年度於橋頭科學園區周遭新增設 32 個 GNSS 移動站（圖 2-4.1），並於 6 月份、9 月份進行了二次施測，但由於新增設之測站截至目前僅施測兩次且施測時間僅間隔 2 個月，所以資料結果趨勢尚未穩定，故目前僅展示測站位置，待施測資料更齊全後將會展示。

本年度重要區域之速度場如圖 2-4.2 至圖 2-4.7。因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2021 年三個時間段分別估算速度場。

高雄都會區域範圍涵蓋之岡山至安坡測線於 2010-2016 年主要為抬升（圖 2-4.5），但是附近 GNSS 連續站與 GNSS 移動站主要呈現沉陷，2016 年轉為沉陷，與周圍 GNSS 測站相似。路竹至茂林測線之速度場自 2001 年以來與附近 GNSS 連續站與 GNSS 移動站都有類似型態。高雄都會區域涵蓋之車瓜林斷層周遭有 5.0 mm/yr 的抬升速度，小崗山斷層西側有約 5.0-10.0 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0.0 至 3.0 mm/yr。水平速度場顯示（圖 2-4.2）。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，整體區域的速度值約為 60 mm/yr。

高雄科學園區由於區域內尚未有測站分佈，從周遭測站整體分布型態來看水平速度場整體區域的速度值約為 25-35 mm/yr（圖 2-4.3）；垂直速度場主要呈現僅約 0.0-5.0 mm/yr 的抬升趨勢（圖 2-4.6）。

橋頭科學園區區域內新設立之測站截至目前為止共施測二次，二次的測量結果之位移差分別為，E 方向位移差-1.5 mm/yr；N 方向位移差-4.2 mm/yr；U 方向位移差-7.3 mm/yr，水平方向之位移差尚未有明顯趨勢，而垂直方向位移差有沉降的趨勢形態。然而，由於新設立之測站資料結果趨勢尚未穩定故目前沒有速度場展示，從周遭既有測站整體分布型態來看水平速度場整體區域的速度值約為 35-55 mm/yr（圖 2-4.4）；垂直速度場主要呈現僅約 0.0-10.0 mm/yr 的沉陷趨勢，

但在 2016 年美濃地震後受周遭測站影響有部份轉為約 0.0-5.0 mm/yr 的抬升趨勢（圖 2-4.7）。

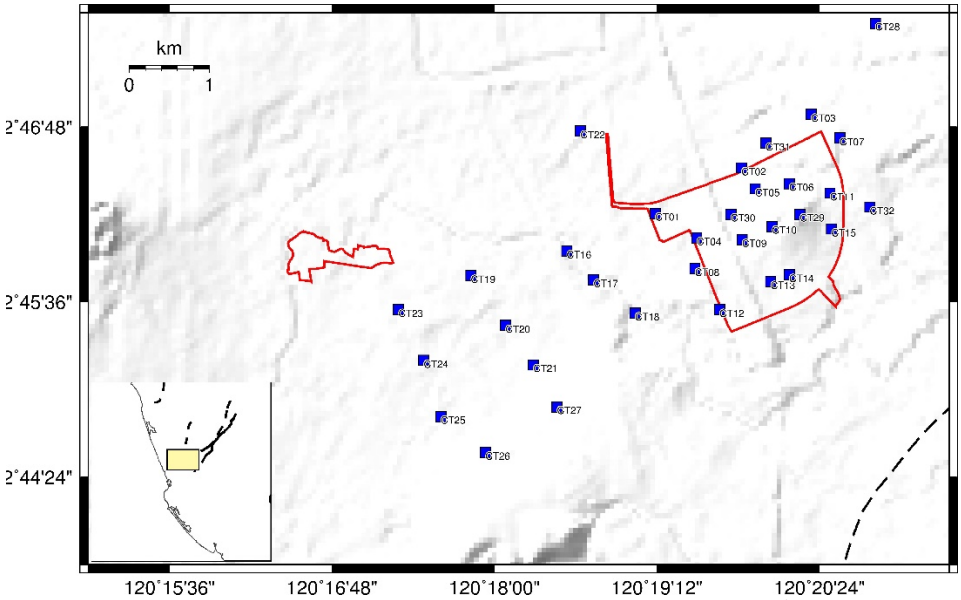


圖 2-4.1：高屏地區橋頭科學園區 2021 年新增設之 32 個 GNSS 移動站，藍色方形為新設立之移動站。

Figure 2-4.1: The newly established 32 campaign-mode GNSS stations in 2021 at Kaohsiung Qiaotou Science Park. The blue squares are the newly campaign-mode GNSS stations.

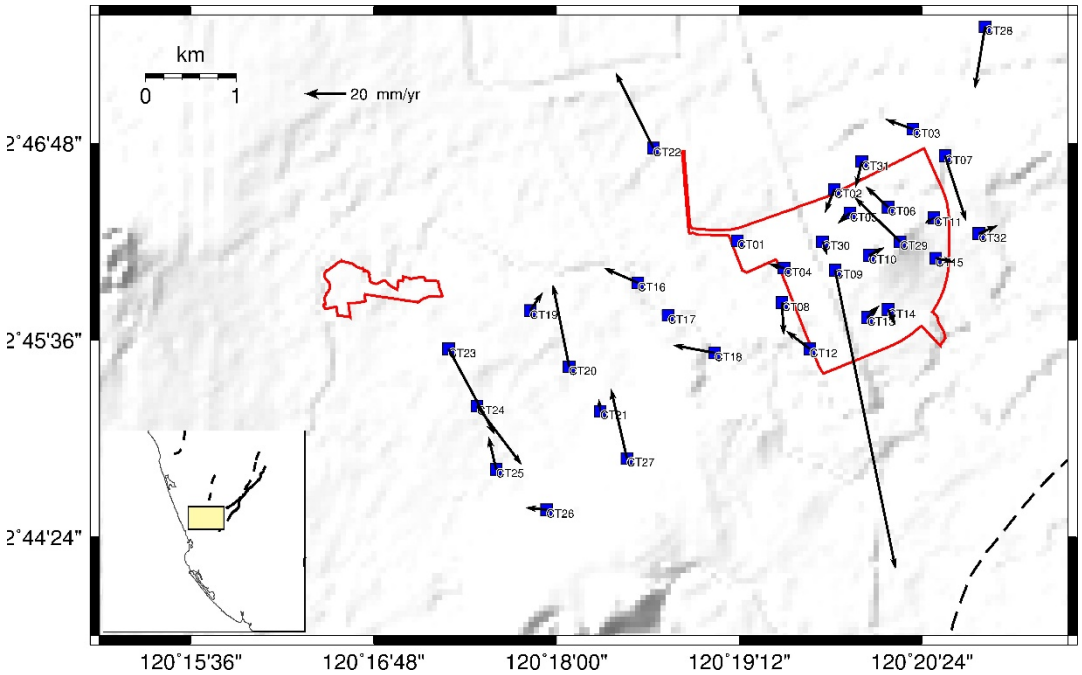


圖 2-4.2：高屏地區橋頭科學園區 2021 年新增設立 32 個 GNSS 移動站之二次觀測水平方向位移量，藍色方形為新設立之移動站。

Figure 2-4.2: Second observation of horizontal displacement by the newly established 32 campaign-mode GNSS stations in 2021 at Kaohsiung Qiaotou Science Park. The blue squares are the newly campaign-mode GNSS stations.

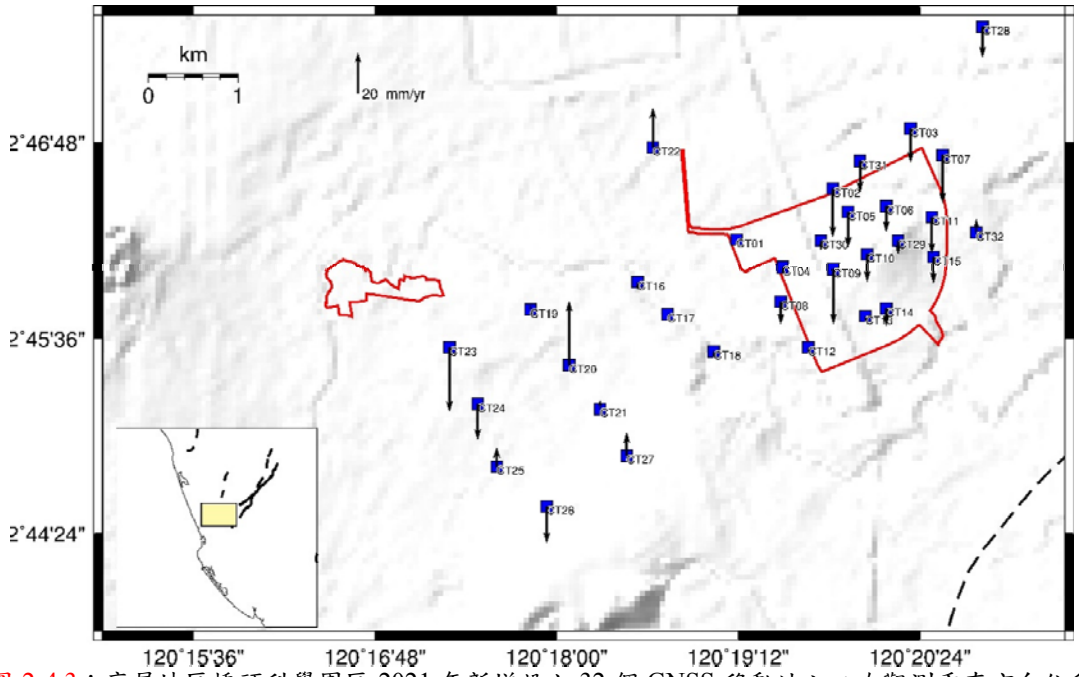


圖 2-4.3：高屏地區橋頭科學園區 2021 年新增設立 32 個 GNSS 移動站之二次觀測垂直方向位移量，藍色方形為新設立之移動站。

Figure 2-4.3: Second observation of vertical displacement by the newly established 32 campaign-mode GNSS stations in 2021 at Kaohsiung Qiaotou Science Park. The blue squares are the newly campaign-mode GNSS stations.

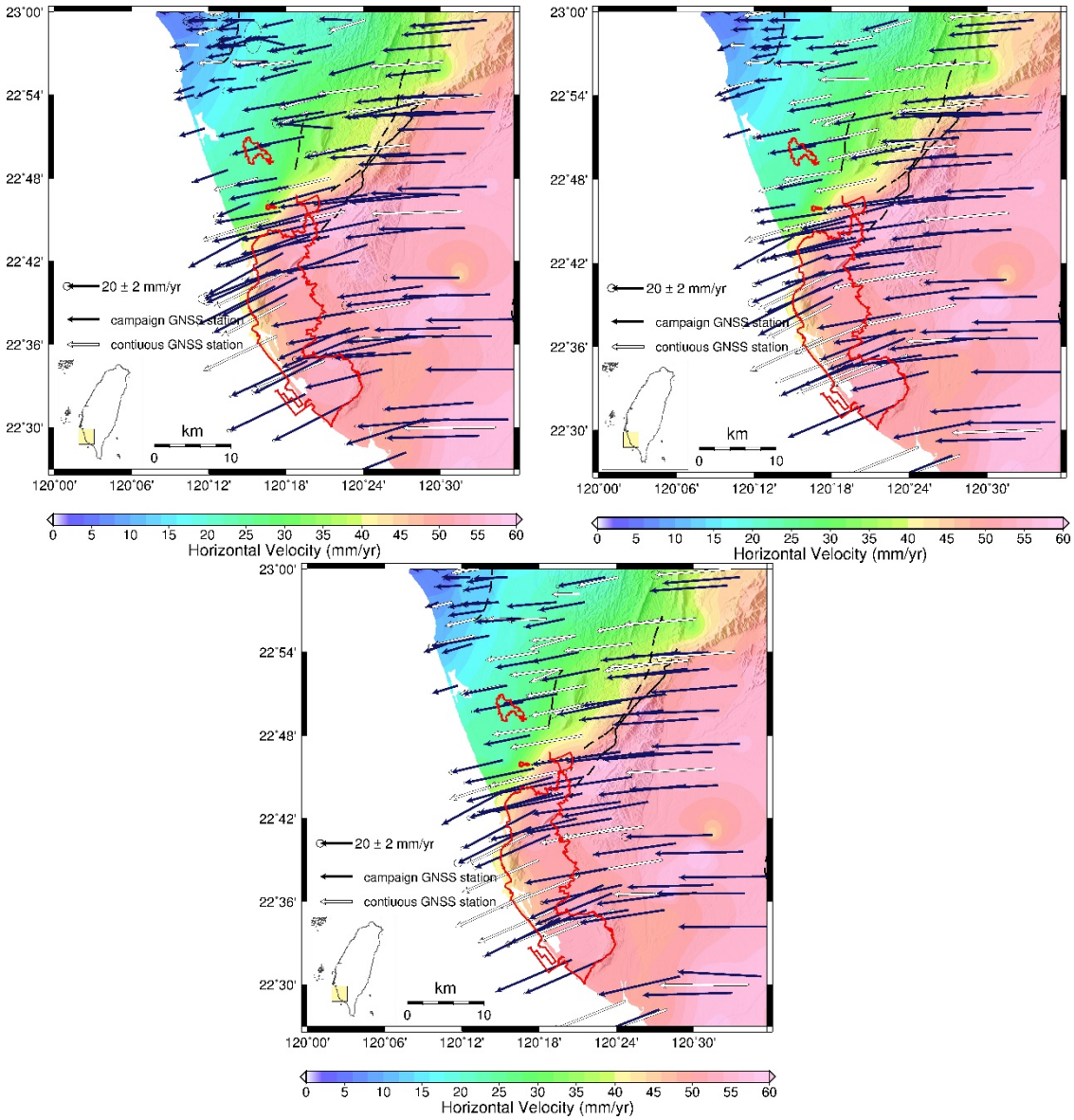


圖 2-4.4：高屏地區高雄都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場，左上表示甲仙地震前 2002~2010 年速度場，右上表示震後 2010~2016 年速度場，下方圖表示美濃地震 2016~2021 年速度場。白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站。

Figure 2-4.4: Kaohsiung city GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top left figure is the velocity field from 2002~2010；the top right one is from 2010~2016；the bottom is from 2016~2021.

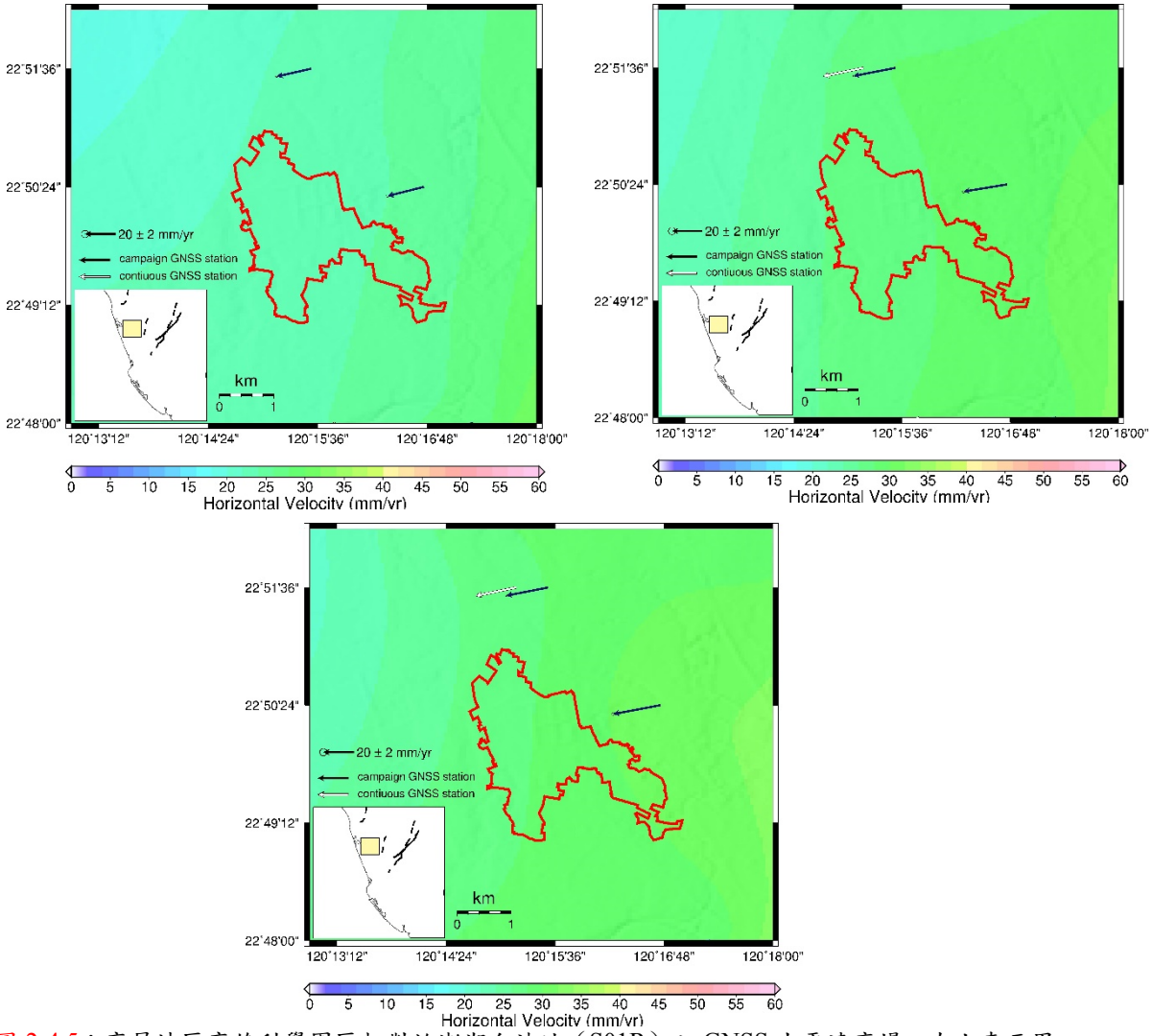


圖 2-4.5：高屏地區高雄科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場，左上表示甲仙地震前 2002~2010 年速度場，右上表示震後 2010~2016 年速度場，下方圖表示美濃地震 2016~2021 年速度場。白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站。

Figure 2-4.5: Kaohsiung Science Park GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top left figure is the velocity field from 2002~2010；the top right one is from 2010~2016；the bottom is from 2016~2021.

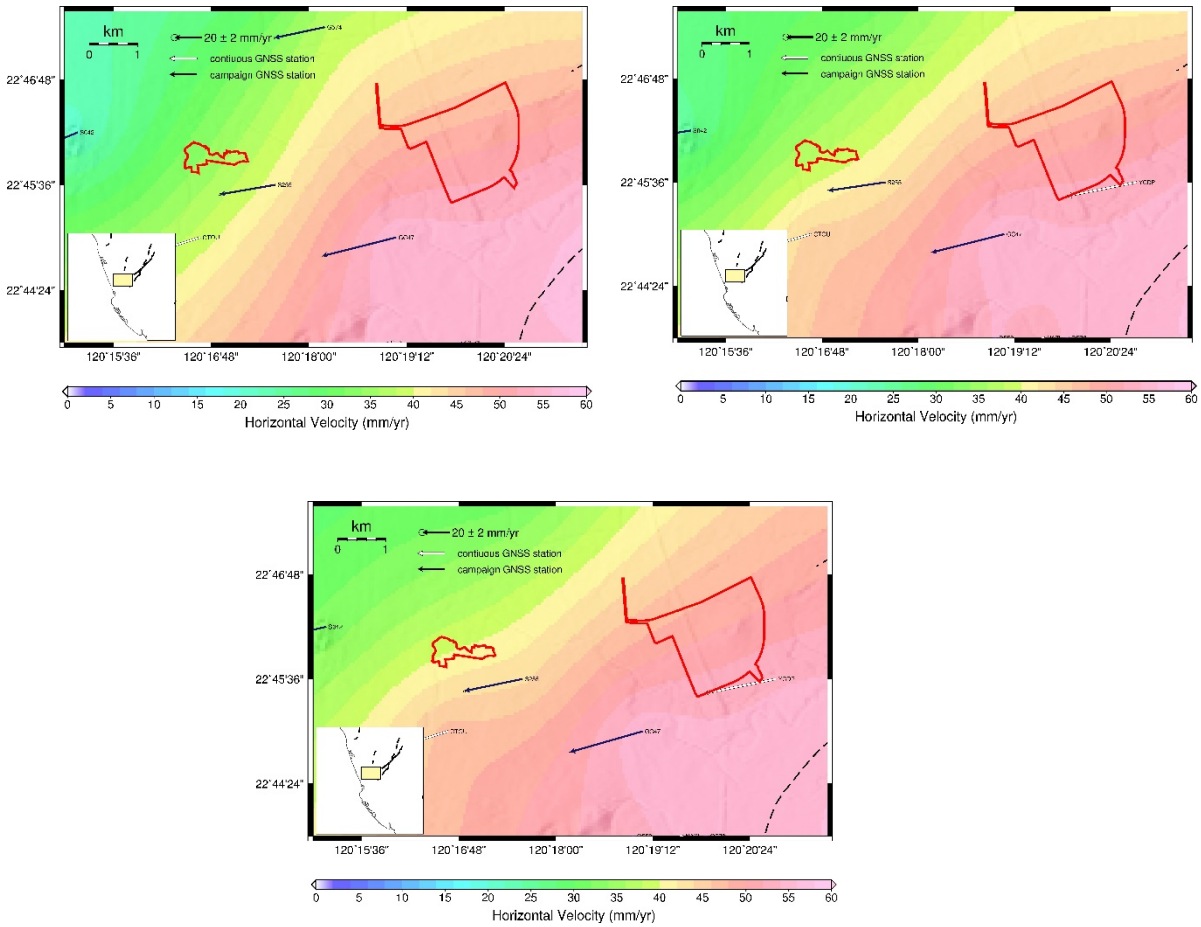


圖 2-4.6：高屏地區橋頭科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場，左上表示甲仙地震前 2002~2010 年速度場，右上表示震後 2010~2016 年速度場，下方圖表示美濃地震 2016~2021 年速度場。白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站。

Figure 2-4.6: Kaohsiung Qiaotou Science Park GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top left figure is the velocity field from 2002~2010；the top right one is from 2010~2016；the bottom is from 2016~2021.

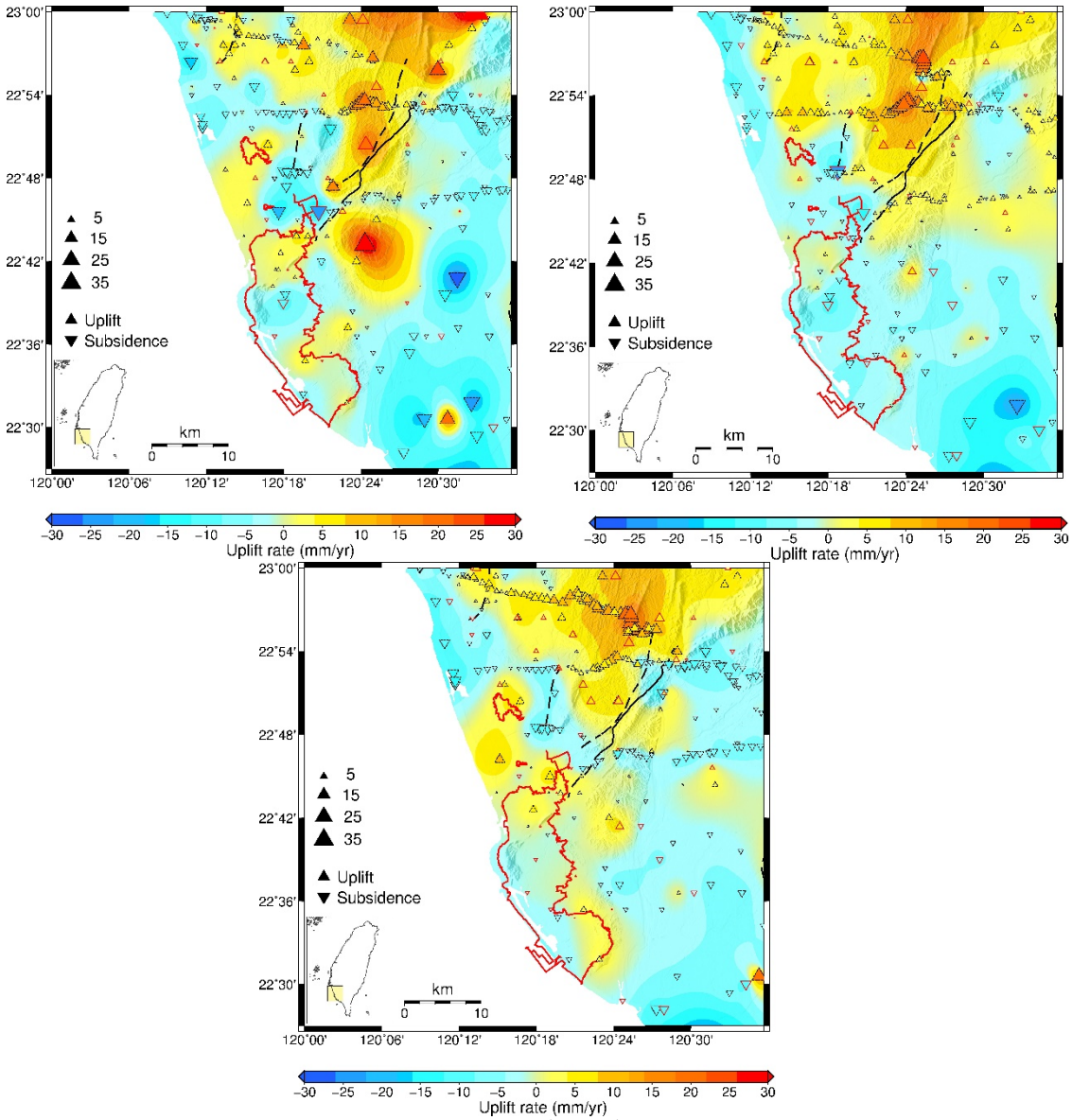


圖 2-4.7：高屏地區高雄都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準；黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。左上表示甲仙地震前 2002~2010 年速度場，右上表示震後 2010~2016 年速度場，下方圖表示美濃地震 2016~2021 年速度場。

Figure 2-4.7: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung city. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The top left figure is the velocity field from 2002~2010；the top right one is from 2010~2016；the bottom is from 2016~2021.

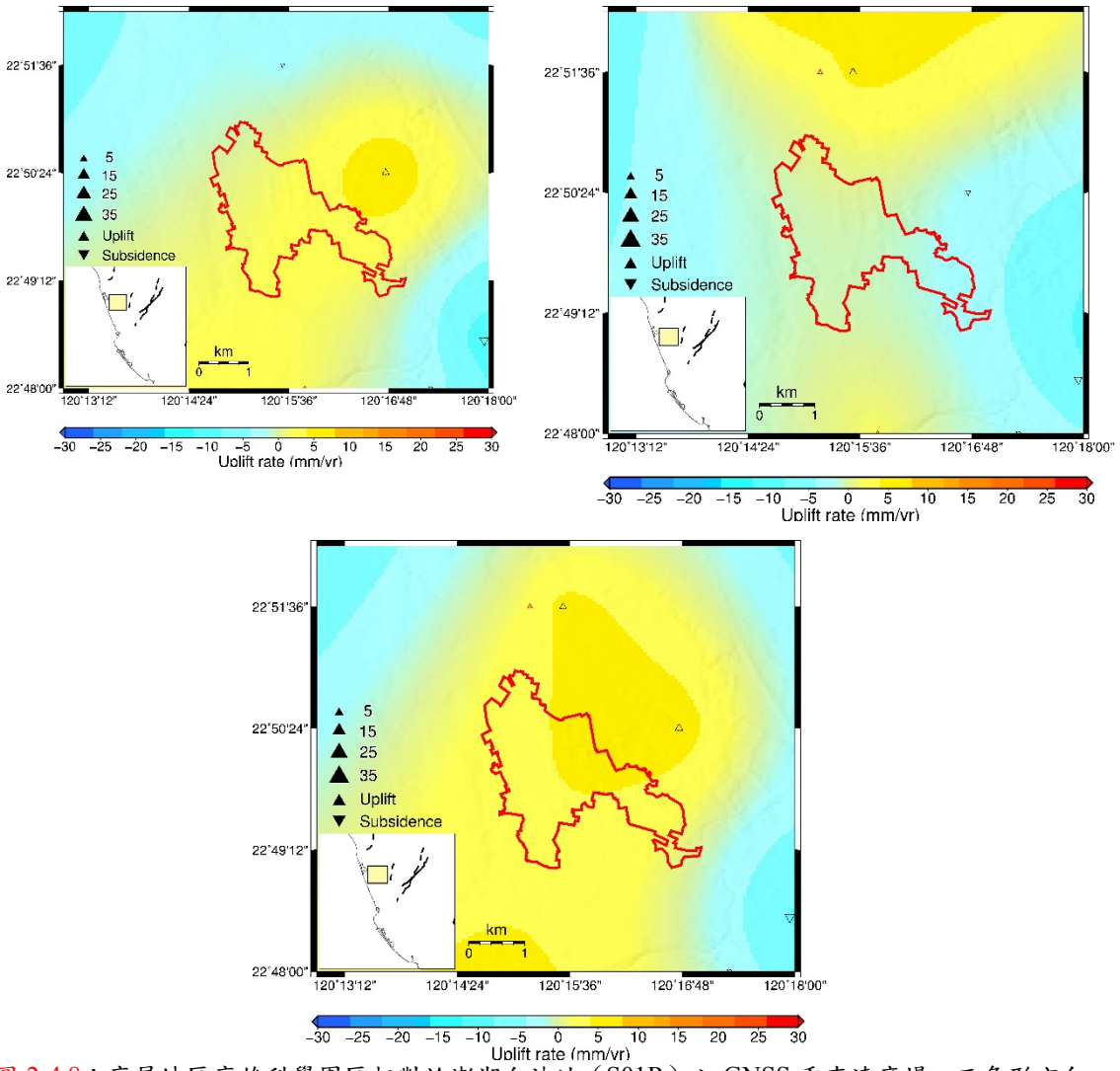


圖 2-4.8：高屏地區高雄科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。左上表示甲仙地震前 2002~2010 年速度場，右上表示震後 2010~2016 年速度場，下方圖表示美濃地震 2016~2020 年速度場。

Figure 2-4.8: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung Science Park. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The top left figure is the velocity field from 2002~2010；the top right one is from 2010~2016；the bottom is from 2016~2021.

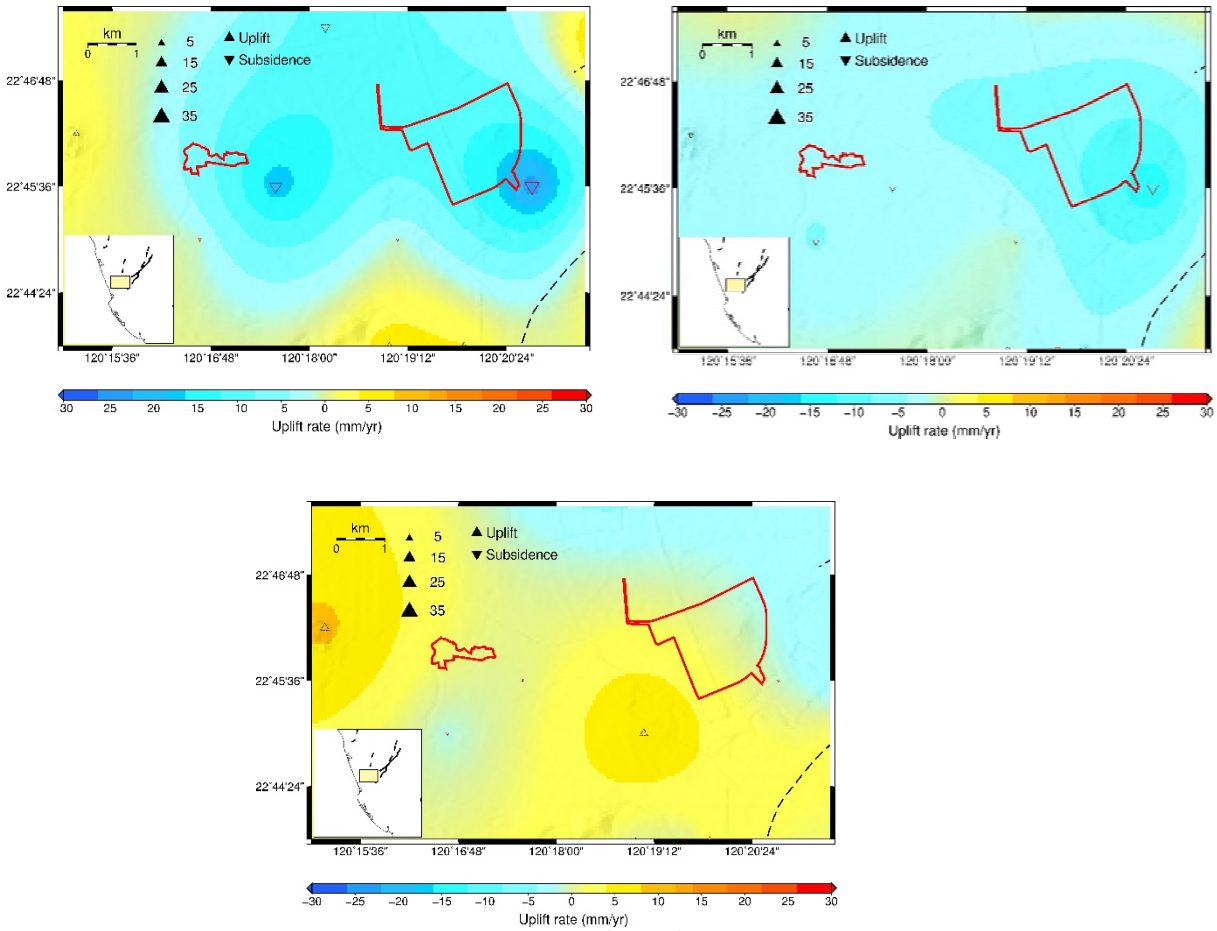


圖 2-4.9：高屏地區橋頭科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。左上表示甲仙地震前 2002~2010 年速度場，右上表示震後 2010~2016 年速度場，下方圖表示美濃地震 2016~2020 年速度場。

Figure 2-4.9: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung Qiaotou Science Park. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS shows in dark frame; continuous GNSS shows in dotted line frame. The top left figure is the velocity field from 2002~2010；the top right one is from 2010~2016；the bottom is from 2016~2021.

2-5 全臺地表速度場

藉由檢視 GNSS 移動站、連續站及精密水準測量之坐標時間序列可發現，地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此我們針對 2006 年屏東外海地震（恆春地區）、2007 年中部地區速度轉折（中部地區）、2010 年甲仙地震（高屏地區）、恆春速度轉折（恆春地區）、2013 年南投地震（中部地區）、2013 年瑞穗地震（花東地區）、2016 年美濃地震（嘉南與高屏地區）、恆春速度轉折（恆春地區）及 2018 花連地震（花東與宜蘭地區）等，分為七個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-5.1 及圖 2-5.2。

自 2002 年起，北部地區無經歷重大地震事件，因此長期速度趨勢穩定。大台北地區水平速度場分布大致呈 0~10 mm/yr 西北往東南方向移動趨勢；垂直速度場皆以沉陷為主，約在 10 mm/yr 內。桃竹苗地區水平速度場顯示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，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。本區速度場分布大致呈西北向，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0~10 mm/yr；垂直速度場顯示，苗栗地區長期速度趨勢穩定，跨斷層之垂直速度場變化並不顯著，皆為沉陷，沉陷速度約在 5 mm/yr 上下。新竹地區跨斷層之垂直速度亦無明顯變化，垂直速度約 0 至 5 mm/yr 之沉陷量左右。桃園地區跨湖口斷層及沿海地區附近點位有約 0 至 5 mm/yr 的些微抬升速度，其餘點位之垂直速度皆顯示約 0 至 2 mm/yr 之沉陷量。

宜蘭平原地區因受 2018 年花蓮地震影響，使該地區於 2018 年花蓮地震後出現速度變化。宜蘭地區之水平速度場由西向東，其速度由朝西北方以順時針方向轉為東南向，越靠近沿海之速度越大，由西向東由約 2 mm/yr 增加至 35 mm/yr。宜蘭地區垂直速度場在地震發生前，沉陷速度約 0 至 10 mm/yr，地震事件發生後沉陷速度轉為 0 至 25 mm/yr。

中部地區在三義斷層與車籠埔斷層北段交接處，以及車籠埔斷層南段下盤等南北兩處之點位，在 2007 年出現速度改變。由於 2007 年間在中部地區並沒有主要地震的發生，因此 2007 年出現的速度變化事件，可能反映 1999 年集集地震的非線性震後變形。另外，2013 年 6 月 M_L 6.5 之南投地震，也改變了本地區

之速度場。因此本研究分別估算臺灣中部地區 2002–2007 年、2007–2013 年以及 2013–2021 年三個時間段之速度場。水平速度場顯示，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；往西至彰化斷層及車籠埔斷層間，速度逐漸縮小至 6~15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西；再往西至沿海地區，其速度場值小於 5 mm/yr；卓蘭地區及獅潭地區之點位速度場轉為西北向，速度約 12~16 mm/yr。比較 GNSS 連續站、移動站與精密水準垂直速度場之解算結果，指出不同資料獲得之垂直速度場在空間中有相當好的一致性。本區域由西向東橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層等地區，自 2007 年速度改變後，中間段顯示有由沉陷轉為抬升的趨勢，並且在 2013 年南投地震後抬升量更為顯著，2007 年前之垂直速度大致呈現抬升現象。除彰化斷層以西沉陷速度約為 10 mm/yr，越往東之抬升速度逐步上升至約 12 mm/yr。彰化斷層以東至赤水派出所一帶，高程雖然顯著增加，但垂直速度變化卻不大。2013 年後之垂直運動在通過彰化斷層後亦逐步抬升，且最大值約為 12 mm/yr，較往年數值更為增加。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間國小至水里隧道），高程與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由-7.0～10.0 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr。而大部份資料顯示沿海地區為顯著下陷區，而由西向東跨車籠埔、大茅埔斷層呈現抬升。

嘉南地區因受 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震影響，使該地區於兩次地震後出現速度變化，因此本研究分別估算台灣嘉南地區 2002–2010 年、2010–2016 年以及 2016–2021 年三個時間段之速度場。水平速度場顯示，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，速度場值由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑－木屐寮－六甲斷層系統，速度場值由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr；再往西部海岸平原，其水平速度皆小於 10 mm/yr；臺南地區速度場分布以後甲里斷層為分界，斷層以西速度場約 12~15 mm/yr，斷層以東速度場約 15~20 mm/yr 呈西向東逐漸遞增，速度值約為 10 至 40 mm/yr。垂直速度場顯示在 2016 年美濃地震中，北門-楠西水準測線跨同震位移場主要為抬升，其值在 0~20 mm 之間，另外美濃地震在關廟至龍船斷層附近有產生同震抬升的型態。由東向西跨過甲里斷層前有較大同震位移量，其值在 12.0~151.0 mm 之間，跨過斷

層後抬升量減少至 3.0~32 .0 mm，在接近海岸時轉為沉陷，其值在 4.0~8.0 mm 之間。

高屏地區因受 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震，使該地區於 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震後出現速度變化，因此本研究分別估算台灣高屏地區 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2021 年三個時間段之速度場。水平速度場顯示，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，高屏地區跨過潮州斷層之東西向壓縮量極小，整體區域的速度值約為 60 mm/yr，恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41~62 mm。垂直速度場顯示垂直速度在跨越小崗山斷層至旗山斷層之間有明顯的運動方向改變，約由沉陷運動在 2010 年改變成抬升運動，美濃地震後又變回沉陷；而旗山斷層至潮州斷層之間也有相同趨勢。

恆春地區因受 2006 年屏東外海地震、2010 年恆春速度轉折及 2016 年恆春速度轉折影響，因此本研究分別估算臺灣恆春地區 2002－2006 年、2006－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2021 年四個時間段之速度場。水平速度場顯示，2002 至 2016 年屏東外海地震前之速度場值為 50.5～55.6 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場值為 48.6～54.3 mm/yr，2010 年中至 2016 年之速度場，速度場值 46.7~50.9 mm/yr，2016 年之後之速度場，速度場值 35.7～40.6 mm/yr。垂直速度場顯示，恆春斷層以東約兩公里為分界，水準測線在震後均呈現不同的運動型態，西側為沉陷、東側為抬升。其中較南邊的南樹林至鵝鑾鼻測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速度約為 2.4 mm/yr，2010 年至今的平均速度約為-0.4 mm/yr；較北邊的恆春西台地至佳樂水測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速度約為-10.9 mm/yr，2010 年至今的平均速度約為-0.7 mm/yr，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2021 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

花東地區因受 2013 年瑞穗地震、2018 年花連地震，該地區於 22013 年瑞穗地震、2018 年花連地震後出現速度變化，因此本研究分別估算臺灣花東地區 2002－2013 年、2013－2018 年以及 2018－2021 年三個時間段之速度場。水平速度場顯示，花蓮北段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，東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。垂直速度場顯示，嶺頂-瀧澗測線橫跨嶺頂斷層於 2018 年以後此測線在嶺頂斷層西側之垂直速度約由 20.8 mm/yr 降至-10.3 mm/yr，靠山區之測站較以往增加最大差約 13.9 mm/yr 之抬升速率，嶺頂斷層東側與以往相似皆呈沉陷之趨勢約 10.1mm/yr；光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層於 2018 年花蓮地震前此測線以沉陷為主，震後在瑞穗斷層西側之垂直速度為 12.8~20.9 mm/yr 沉陷，跨斷層後則逐漸抬升至 0.1 mm/yr。在跨奇美斷層後之地表高程約有 4.5 m 的沉陷量，而垂直速度則從-12.3 mm/yr 緩升至-11.3 mm/yr。

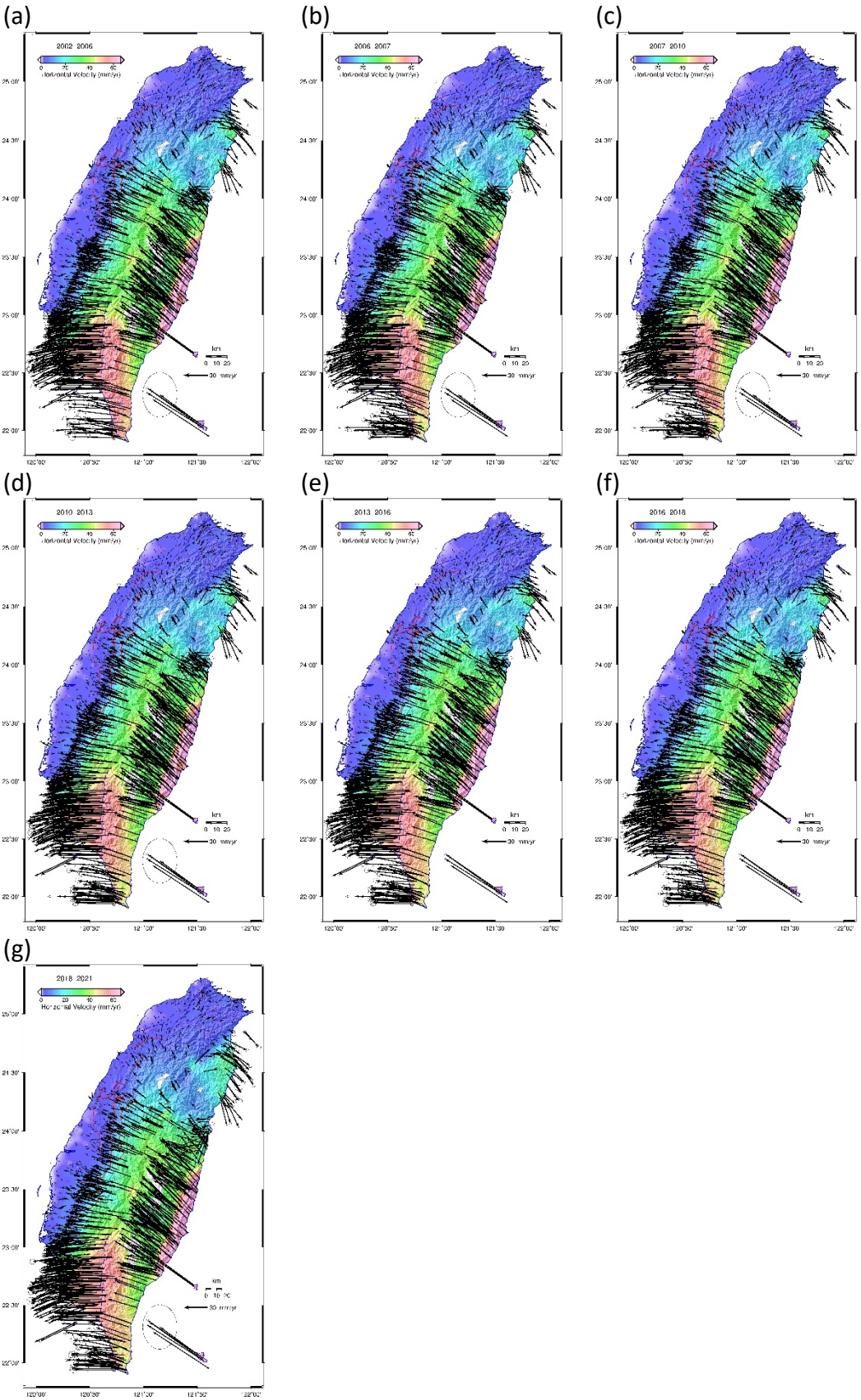


圖 2-5.1：臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場。
Figure 2-5.1: Taiwan horizontal velocity field relative to Penghu Paisha station (S01R).

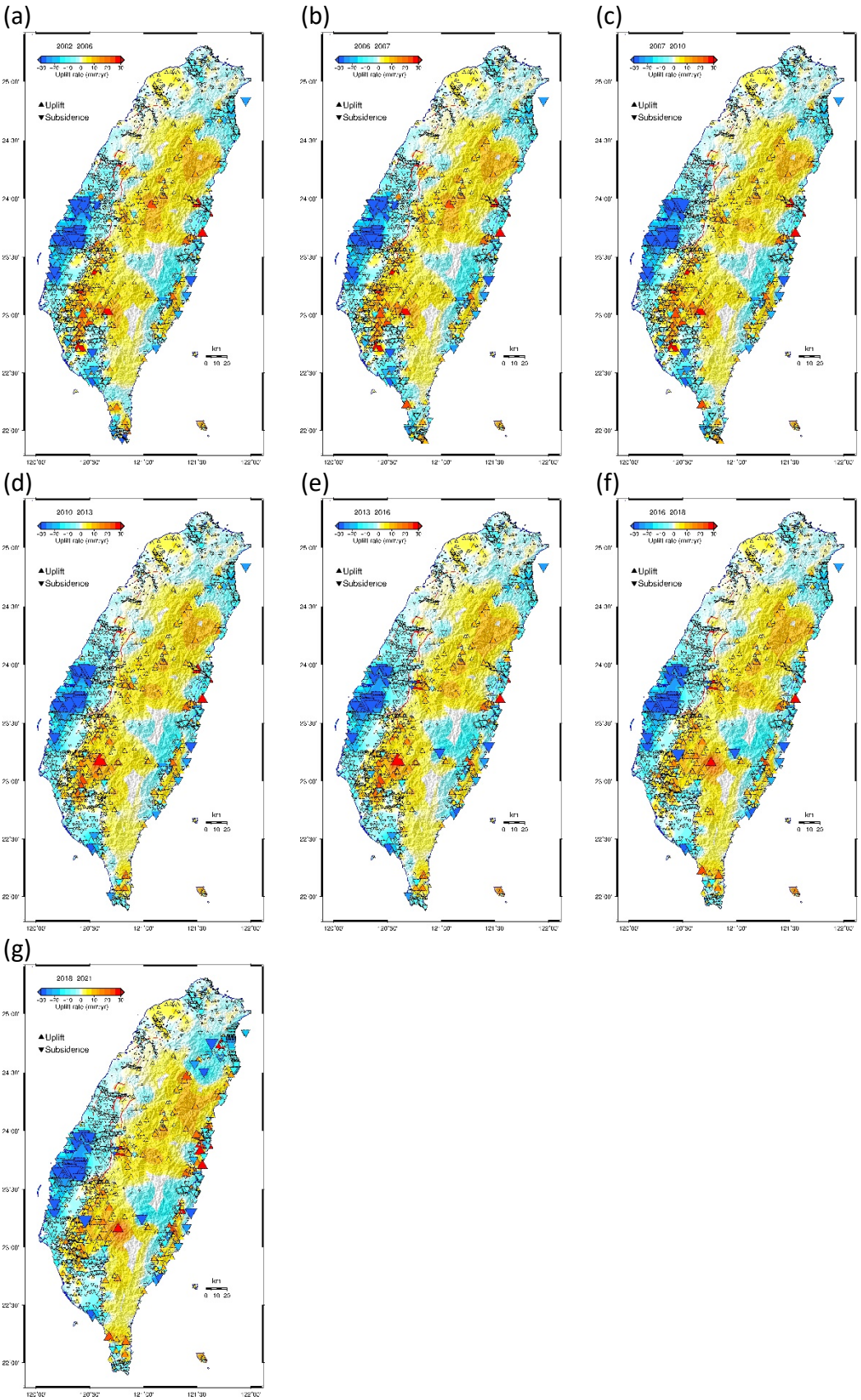


圖 2-5.2：2002 年至 2021 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 2-5.2: Taiwan vertical velocity field from 2002 to 2021. Warm-colored triangles are uplift while cool-colored inverse triangles are subsidence. Size of triangles represent amount of velocities.

第三章、南部地區地表變形強度計算與繪製

3-1 應變速率場計算

地表速度場及應變速率場之變化皆可以反映斷層活動的特徵，協助我們判定地表變形之位置、種類及特徵，並闡明其活動特性。例如，地表速度場在空間中之變化與斷層活動之關係大致如下：以走向滑移分量為主之斷層，可以藉由GNSS 水平速度場的分析得知；正斷層之活動，可以藉由水準高程之沉降及水平速度場之伸張特徵進行判釋；顯示在水平速度場之縮短應變及水準高程之抬升，可解讀為逆斷層之活動。因此，分析重複觀測之 GNSS 速度場及水準高程資料，可協助我們判定活動斷層的類型與位置，並闡明該斷層之活動特性。然而，地表之速度向量於空間中分布的形貌特性，會因為坐標框架的選擇不同而有所變化。而應變速率反映的是各測站間的速度梯度變化，此特性得以使應變速率於空間中分布的型態變化獨立於不同坐標框架的選擇。因此，利用應變速率於空間中分布的特性，可以有效地協助我們討論各個區域應變累積及其地震危害度之問題（Ward, 1994）。在多數研究中，多採用 Shen et al.（1996）提出之方法直接由水平速度場求得連續性地表應變速率場。而在本計畫中，為了求得一個符合諧和（compatibility）條件之連續應變速率場，我們同時嘗試透過速度反演取得網格化速度場，再藉由格點間的速度梯度計算應變速率。以下將就兩個應變速率計算方式進行說明。

3-1-1 採用 Shen et al.（1996）方法推求應變速率

應變速率計算的基本計算原理是基於平面應變的假設，在考慮一個物體受到應力作用後，應變只反映在 x-y 平面上，z 方向則無應變發生。正值表示伸張，負值則表示縮短。在早期研究中，應變速率的計算是將測網分成各個多邊形，並

計算每個測網內的應變速率。測網內任一測線的應變率（$\dot{\varepsilon}$）可以寫成：

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(dL/dt)}{L} \qquad \text{（式 3-1.1）}$$

其中是L 基線長，是dL 基線長變化量，dt 是時間間距，故dL/dt 為基線長度之變化速率。而應變速率$\dot{\varepsilon}$ 與應變率張量$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$ 之關係為：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta + \dot{\varepsilon}_{en}\sin\theta\cos\theta + \dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta \qquad \text{（式 3-1.2）}$$

其中θ為自正北以順時鐘方向量度之測線方位角，應變率張量的參考坐標為e 軸向東、n 軸向北之地平坐標系。$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 之正值表示伸張，負值則表示縮短；$\dot{\varepsilon}_{en}$ 正值表示沿南北方向有左旋剪切應變率。若同一測網內有三條以上不同方向的測線，則可利用最小二乘法求得該測網之應變速率張量 $\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$（Prescott et al., 1979）。

依循應變速率場計算之基本原理，Shen et al.（1996）同樣藉由大地測量資料所求得之速度場計算研究區域內待求格點之應變速率場。但不同的是，此計算方法首先假設整個觀測網內的應變速率場為均勻一致，並透過最小二乘法反演速度場以求得各待求點應變率張量$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$及旋轉率$\dot{\omega}$：

$$\begin{bmatrix} V_e^1 \\ V_n^1 \\ V_e^2 \\ V_n^2 \\ \vdots \\ V_e^i \\ V_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \\ 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_e^j \\ V_n^j \\ \dot{\varepsilon}_{ee}^j \\ \dot{\varepsilon}_{en}^j \\ \dot{\varepsilon}_{nn}^j \\ \dot{\omega}^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_e^1 \\ e_n^1 \\ e_e^2 \\ e_n^2 \\ \vdots \\ e_e^i \\ e_n^i \end{bmatrix}$$

（式 3-1.3）

由於測站並非均勻分布，各測站與待求點位間之距離各異，故在此透過兩者

間之距離作為權重設定以計算各測站對於待求點之影響：

$$E_{ij} = C_{ij} \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{\sigma_D^2}\right) \quad \text{（式 3-1.4）}$$

其中，d_{ij} 為第 i 個觀測點和第 j 個待求點間之距離，σ_D 為控制不同觀測點對待求點速度貢獻量之特性長度。

隨後，便可進一步利用應變率張量，透過下列各式計算各待求點之最大主應變率與最大剪應變率的大小與方位（Prescott et al., 1979），以及應變率強度：

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) + \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{（式 3-1.5）}$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) - \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{（式 3-1.6）}$$

$$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[2\dot{\varepsilon}_{en} / \left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right)\right] \quad \text{（式 3-1.7）}$$

$$\Delta = \dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn} \quad \text{（3.8）}$$

$$\Sigma = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2 / 4} \quad \text{（3.9）}$$

$$\psi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right) / 2\dot{\varepsilon}_{en}\right] \quad \text{（3.10）}$$

$$I_2 = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ee}^2 + \dot{\varepsilon}_{nn}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{en}^2} \quad \text{（3.11）}$$

其中 $\dot{\varepsilon}_1$ 為最大主應變率，$\dot{\varepsilon}_2$ 為最小主應變率，ϕ 為 $\dot{\varepsilon}_1$ 之方位角，Δ 為面膨脹率，Σ 為最大剪應變率，ψ 為 Σ 之方位角，I_2 為應變率強度。各項參數中，面膨脹率可用來反映和正向滑移斷層（dip-slip faulting）有關之水平變形特性，最大剪應變率則高度反映和走向滑移斷層（strike-slip faulting）有關之變形特性（Sagiya et al., 2000），應變率強度則為應變率張量之第二不變量，可視為面應變與剪應變之總和（e.g., Kreemer et al., 2003；張午龍等，2016）。

根據全臺大地測量資料之坐標時間序列，全臺速度場約可劃分為 2002–2007、2007–2010、2010–2013、2013-2016、2016–2018、2018–2021，共 6 個時

期，依照相同時間段，本計畫計算並繪製全臺最大主應變速率場及面膨脹率分布圖（圖 3-1.1）、最大剪應變速率場分布圖（圖 3-1.2），以及應變速率強度（第二不變量）分布圖（圖 3-1.3）。由最大主應變速率場及最大剪應變速率場可看出（圖 3-1.1 及圖 3-1.2），全臺主要的壓縮發生在花東縱谷地區與西南部麓山帶前緣。局部性的伸張發生在北臺灣、宜蘭地區與中央山脈東側。花東縱谷區域的壓縮應變軸方向與板塊運動方向相似，而臺灣西南部的壓縮應變軸方向則略為轉至東西向。中臺灣地區，應變率以壓縮為主，方向與板塊運動方向相似，但量值較東臺灣小，且在西部麓山帶以西到平原區之應變率量值極小。

此外，針對本次報告所探討之南部地區，則以 2010 年甲仙地震與 2016 年美濃地震切分為 3 個時期，進行應變速率場之計算、繪製與分析（圖 3-1.4）。其結果指出，主應變速率場的壓縮量主要集中於小崗山與旗山斷層之間，方向多為西北西－東南東走向，其中又以車瓜林及旗山斷層沿線量值較為顯著；伸張量則約平行於小崗山斷層走向，且由北往南量值漸增，以車瓜林及旗山斷層南段之伸張量最大。

剪應變速率場部分（圖 3-1.5），同樣以旗山斷層至小崗山斷層之間最為顯著，右剪應變大致呈西南－東北走向，3 時期皆以車瓜林斷層南段至近沿海地區之剪應變量較大。小崗山斷層之斷層東側右剪應變略大於西側，顯示小崗山斷層應具有較小的右移分量。旗山斷層整體而言，斷層西側之右剪應變量大於東側，且其南段之剪應變量值明顯大於中斷及北段。總體而言，2002 年至 2010 年期間之剪應變量值相較於另外 2 個時期更為顯著。

應變率強度部分（圖 3-1.6），因反映主應變率與最大剪應變速率之總和，故其分布型態與前兩者相似，以旗山斷層至小崗山斷層之間最為顯著，並主要沿車瓜林及旗山斷層分布，3 個時期的最大量值分別位於車瓜林與旗山斷層南段約 4.1 μstrain/yr，以及高雄及橋頭科學園區西南側約 3.0 μstrain/yr。

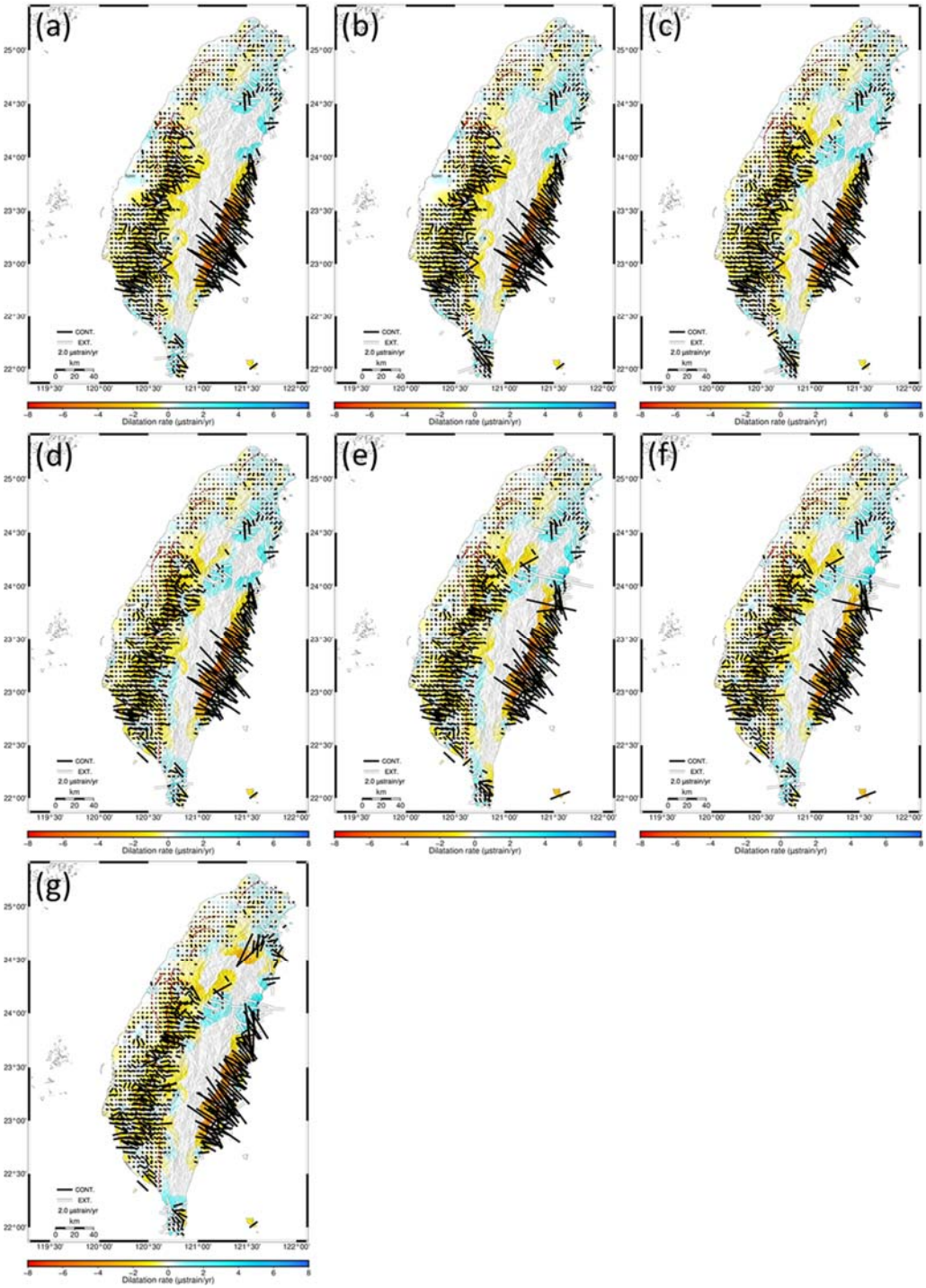


圖 3-1.1：全臺 7 時期最大主應變速率場。(a) 2002 至 2006 年最大主應變速率場；(b) 2006 至 2007 年最大主應變速率場；(c) 2007 至 2010 年最大主應變速率場；(d) 2010 至 2013 年最大主應變速率場；(e) 2013 至 2016 年最大主應變速率場；(f) 2016 至 2018 年最大主應變速率場；(g) 2018 至 2021 年最大主應變速率場。

Figure 3-1.1: Distribution of principal strain rates in 7 time periods. (a) Period of 2002-2006; (b) Period of 2006-2007; (c) Period of 2007-2010; (d) Period of 2010-2013; (e) Period of 2013-2016; (f) Period of 2016-2018; (g) Period of 2018-2021.

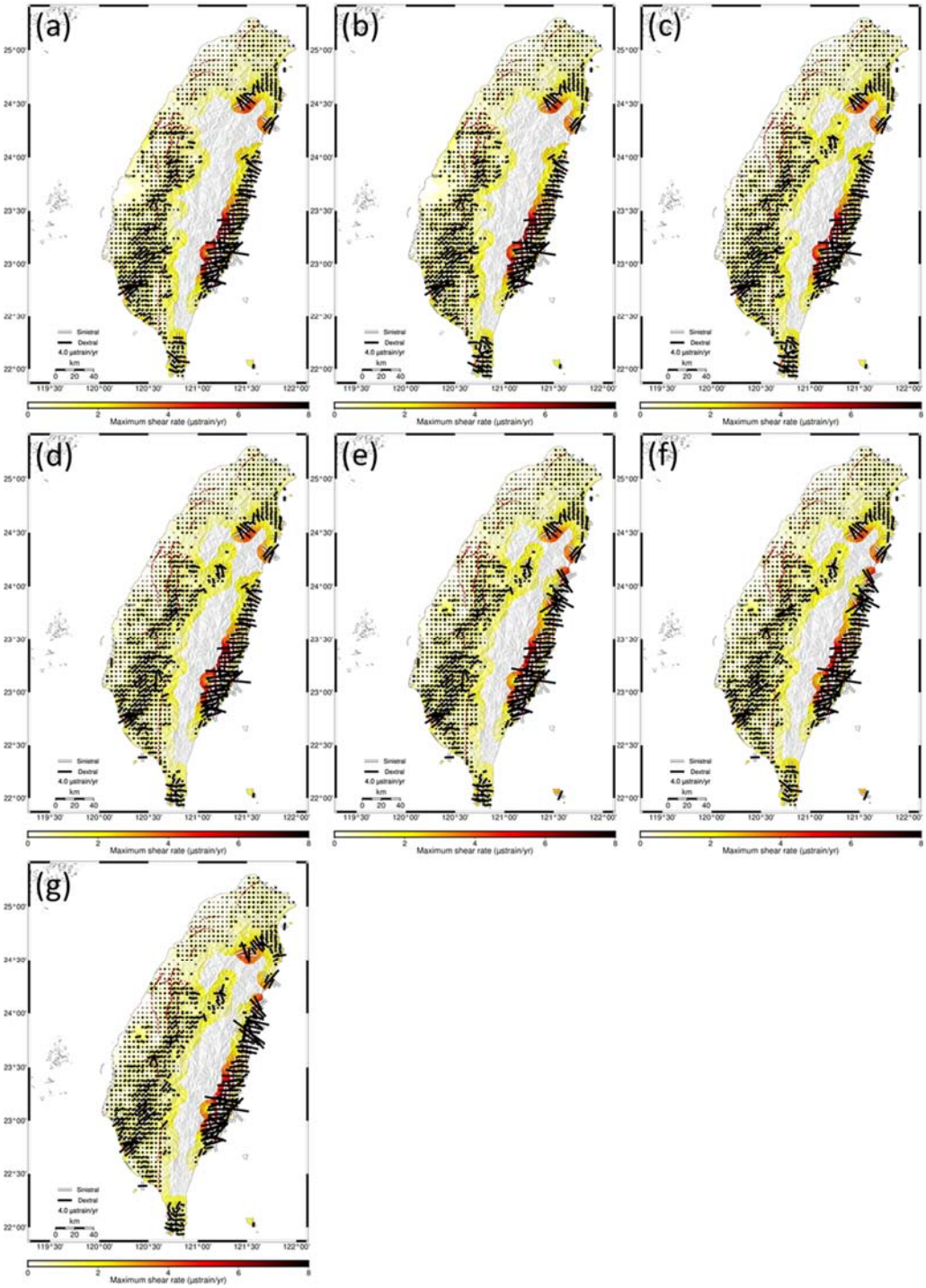


圖 3-1.2：全臺 7 時期最大剪應變速率場。(a) 2002 至 2006 年最大剪應變速率場；(b) 2006 至 2007 年最大剪應變速率場；(c) 2007 至 2010 年最大剪應變速率場；(d) 2010 至 2013 年最大剪應變速率場；(e) 2013 至 2016 年最大剪應變速率場；(f) 2016 至 2018 年最大剪應變速率場；(g) 2018 至 2021 年最大剪應變速率場。

Figure 3-1.2: Distribution of maximum shear strain rates in 7 time periods. (a) Period of 2002-2006; (b) Period of 2006-2007; (c) Period of 2007-2010; (d) Period of 2010-2013; (e) Period of 2013-2016; (f) Period of 2016-2018; (g) Period of 2018-2021.

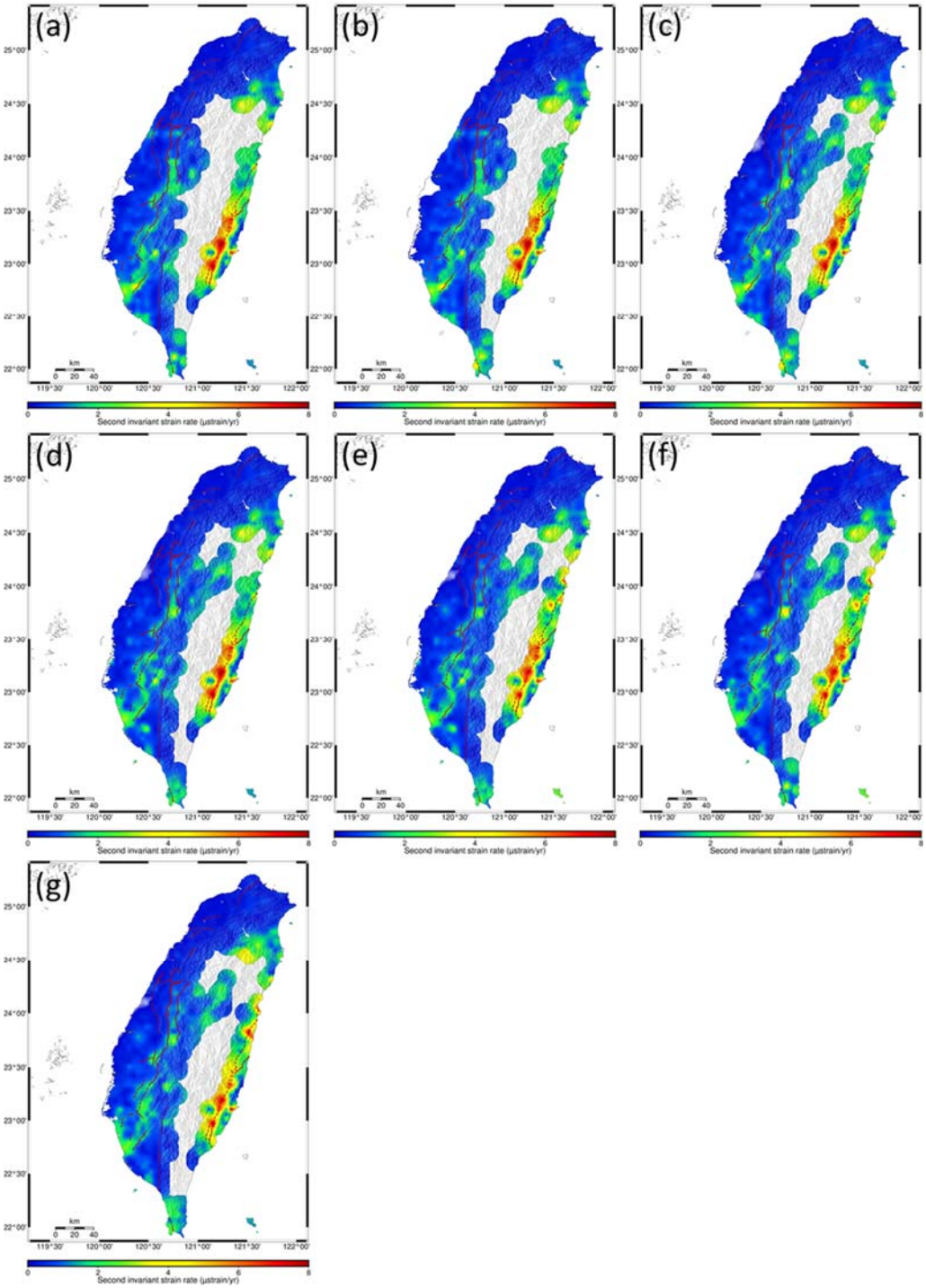


圖 3-1.3：全臺 7 時期應變率強度（第二不變量）分布圖。(a) 2002 至 2006 年應變率強度分布圖；(b) 2006 至 2007 年應變率強度分布圖；(c) 2007 至 2010 年應變率強度分布圖；(d) 2010 至 2013 年應變率強度分布圖；(e) 2013 至 2016 年應變率強度分布圖；(f) 2016 至 2018 年應變率強度分布圖；(g) 2018 至 2021 年應變率強度分布圖。

Figure 3-1.3: Distribution of second invariants in 7 time periods. (a) Period of 2002-2006; (b) Period of 2006-2007; (c) Period of 2007-2010; (d) Period of 2010-2013; (e) Period of 2013-2016; (f) Period of 2016-2018; (g) Period of 2018-2021.

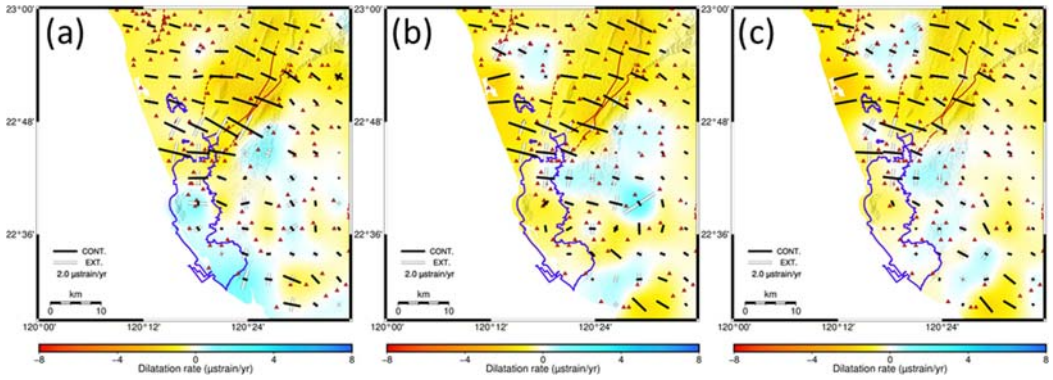


圖 3-1.4：南部地區 3 時期最大主應變速率場。(a) 2002–2010 年最大主應變速率場；(b) 2010–2016 年最大主應變速率場；(c) 2016–2021 年最大主應變速率場。

Figure 3-1.4: Distribution of principal strain rates in southern Taiwan in 3 time periods. (a) Period of 2002-2010; (b) Period of 2010-2016; (c) Period of 2016-2021.

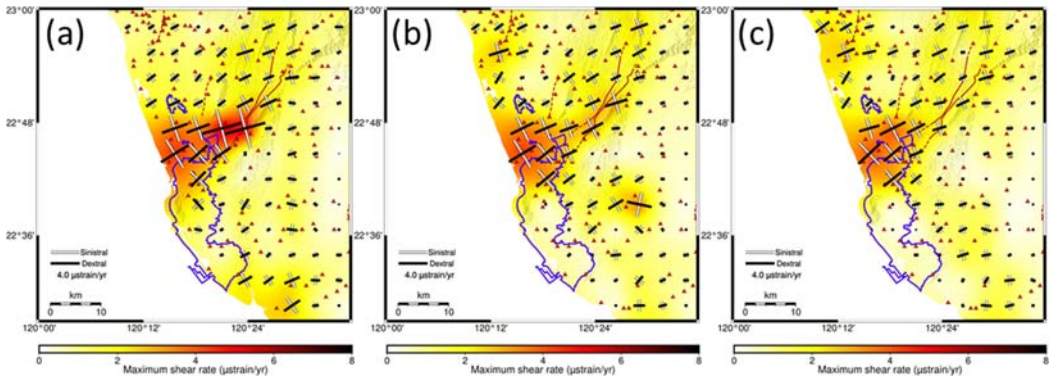


圖 3-1.5：南部地區最大剪應變速率場。(a) 2002–2010 年最大剪應變速率場；(b) 2010–2016 年最大剪應變速率場；(c) 2016–2021 年最大剪應變速率場。

Figure 3-1.5: Distribution of maximum shear strain rates in southern Taiwan in 3 time periods. (a) Period of 2002-2010; (b) Period of 2010-2016; (c) Period of 2016-2021.

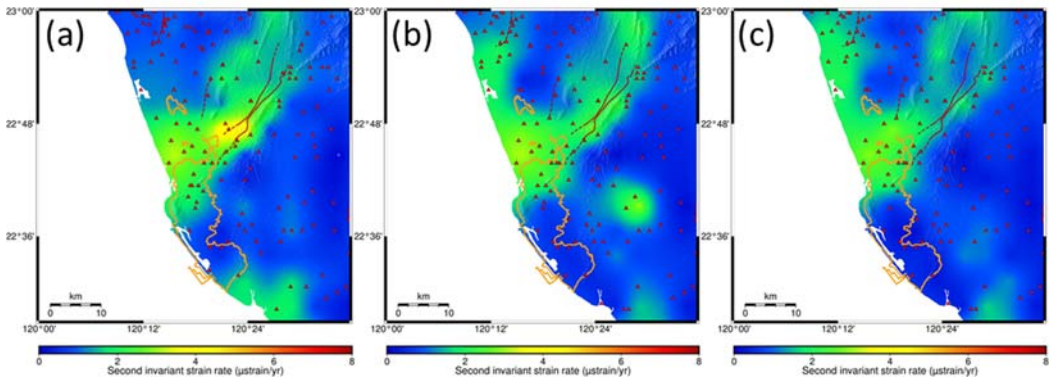


圖 3-1.6：南部地區應變速率強度分布圖。(a) 2002–2010 年應變率強度分布圖；(b) 2010–2016 年應變率強度分布圖；(c) 2016–2021 年應變率強度分布圖。

Figure 3-1.6: Distribution of second invariants in southern Taiwan in 3 time periods. (a) Period of 2002-2010; (b) Period of 2010-2016; (c) Period of 2016-2021.

3-1-2 採用速度反演成果推求應變速率

本計畫之主要目的為評估重要活動斷層之斷層潛勢與重要保全對象之災害潛勢，因此，大地測量資料空間解析力之提升亦為本計畫期望可進行的工作之一，其中，InSAR 即為提升資料空間解析力極佳的大地測量資料。故本計畫先在此提出透過速度反演之方法整合並推求連續性之速度場與應變速率場，以便後續可獲得如 InSAR 等其他觀測資料時，進行如 GNSS、精密水準測量以及 InSAR 等相異基準框架之大地測量資料。

首先，為了整合相異基準框架之大地觀測資料，並獲得連續性之速度場，Wang and Wright （2012）和 Walters et al.（2014）提出，利用三角網格進行線性內插來結合高精度的 GNSS 三分量觀測資料以及分布廣泛的 DInSAR 單分量觀測值，以推求研究區域之三分量速度場。本方法將研究區域分為三角形網格，並假設速度場沿經度、緯度呈線性變化，因此網格內任意一觀測點與網格三節點的關係可由線性內插公式（Shape function，N）$N_m = a_m + b_m x + c_m y$ 表示，其中 x、y 為網格內觀測點之坐標，a_m、b_m、c_m 為節點 m 與另兩個節點相關的係數。假設三節點 1、2、3 的坐標分別為（x_1,y_1）、（x_2,y_2）、（x_3,y_3）（圖 3-1.7），以節點 1 為例：

$$a_1 = (x_2y_3 - x_3y_3) / \Delta$$
$$b_1 = (y_2 - y_3) / \Delta$$
$$c_1 = (x_2 - x_3) / \Delta$$
$$\Delta = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \quad （式 3-1.12）$$

其中，Δ 為三角形面積。由此推廣可得網格內觀測點與網格三節點關係式 N_1、N_2、N_3。因此若已知三頂點速度場，且速度場沿經度、緯度呈線性變化，則可藉由下列 Shape function 求得觀測點速度場：

$$U(x,y) = \sum_{m=1}^{3} N_m u_m \quad （式 3-1.13）$$

其中，N_m、u_m 分別為節點 m 之 Shape function 以及其三分量速度，此式可進一步改寫為：

$$U(x,y) = [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad \text{（式 3-1.14）}$$

根據上式，Wang and Wright（2012）提出下式：

$$\begin{bmatrix} G_{sar} & G_{orb} & G_{atm} \\ G_{gps} & 0 & 0 \\ k^2\nabla^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vel} \\ m_{orb} \\ m_{atm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{（式 3-1.15）}$$

其中，G_{sar} 為與 InSAR 相關的格林函數，包含觀測點與節點的 shape function N，以及將三分量速度值合成至 LOS 方向的單位向量。G_{gps}為與 GNSS 相關的格林函數，為觀測點與節點的 shape function N，G_{orb}、G_{atm} 為與 InSAR 觀測資料中軌道殘差以及大氣效應相關的格林函數。m_{vel}、m_{orb}、m_{atm}分別為節點三分量速度場模型、軌道殘差模型以及大氣效應模型。d_{sar}、d_{gps}分別為 InSAR 觀測值、GNSS 觀測值。k^2控制節點速度平滑程度的參數。∇^2為拉普拉斯運算子（Laplacian smoothing operator）（Desbrun et al., 1999）。

本次報告中，由於本計畫僅採用 GNSS 連續站、移動站以及精密水準資料，因此，將式 3-1.15 修改如下：

$$\begin{bmatrix} G_{gnss} \\ G_{level} \\ k^2\nabla^2 \end{bmatrix} [m_{vel}] = \begin{bmatrix} d_{gnss} \\ d_{level} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{（式 3-1.16）}$$

其中，G_{gnss}及G_{level}為與 GNSS 及精密水準相關的格林函數，包含觀測點與節點的 shape function N。m_{vel}為節點三分量速度場模型。d_{gnss}、d_{level}分別為 GNSS 觀測值、精密水準觀測值。k^2控制節點速度平滑程度的參數。∇^2為拉普拉斯運算子（Laplacian smoothing operator）。

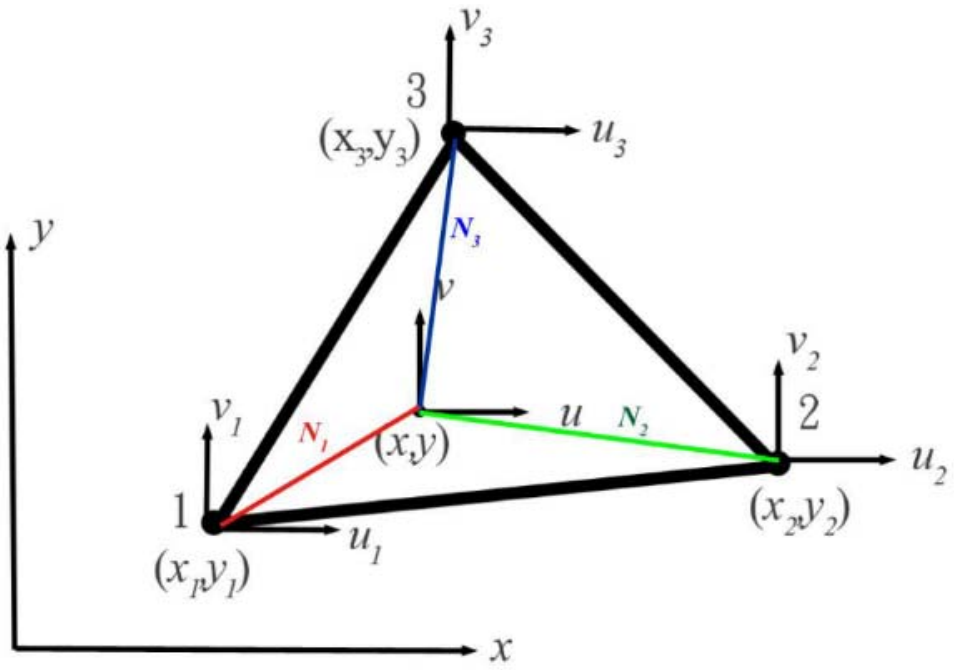


圖 3-1.7：觀測點與網格三頂點示意圖。

Figure 3-1.7: Relationship between observations and the interpolation points of triangle.

本年度報告中，僅先採用 GNSS 連續站及移動站進行速度反演，以作為連續性水平速度場與應變計算之初步測試。圖 3-1.8 即為速度反演之成果，雖僅納入 GNSS 資料無法看出相異基準框架之整合效果，但由此測試仍可看出經反演後之速度場由於網格之設定，相較於原始速度場，其於空間上之分布更為平均。也因此，在後續的應變計算中，雖同採 Shen et al.（1996）之方法（詳如 3-1-1 節所述），但在此方法中，由於已先進行網格化處理，因此各網格點之應變速率計算僅須計算相鄰網格之速度梯度便可獲得，於應變速率之計算上更為快速簡易，且根據先進行速度反演後，再計算而得之最大主應變速率場、最大剪應變速率場以及應變率強度分布可發現（圖 3-1.9 至圖 3-1.11），相較於直接採用 Shen et al.（1996）之方法（圖 3-1.4 至圖 3-1.6），最大主應變速率場之壓縮量值減少約 1 μstrain/yr，且其面膨縮率之分布型態差異較大，而其相異處以於沿海區域為主，故推測造成此問題之可能原因與速度反演之格點分布有關。最大剪應變速率場與前者相同，量值部分亦減少約 1 μstrain/yr；應變率強度之分布型態則與前述兩者成

果相近。綜合上述 3 種應變相關計算成果與分布圖可知，由於速度反演之方法是先透過透過測站分布與地形建置合理之網格後，再反演相異地表變形資料，且相較於直接採用 Shen et al.（1996）之方法，各測站之速度值會先與相鄰測站及鄰近區域之速度值進行平滑化處理與計算，此過程可降低偏差值較大之測站資料所帶來的影響，使得全臺速度場與應變速率場呈更連續性之分布（圖 3-1.8 至圖 3-1.11），並將使後續之斷層活動潛勢分析工作與成果更加合理而有效。

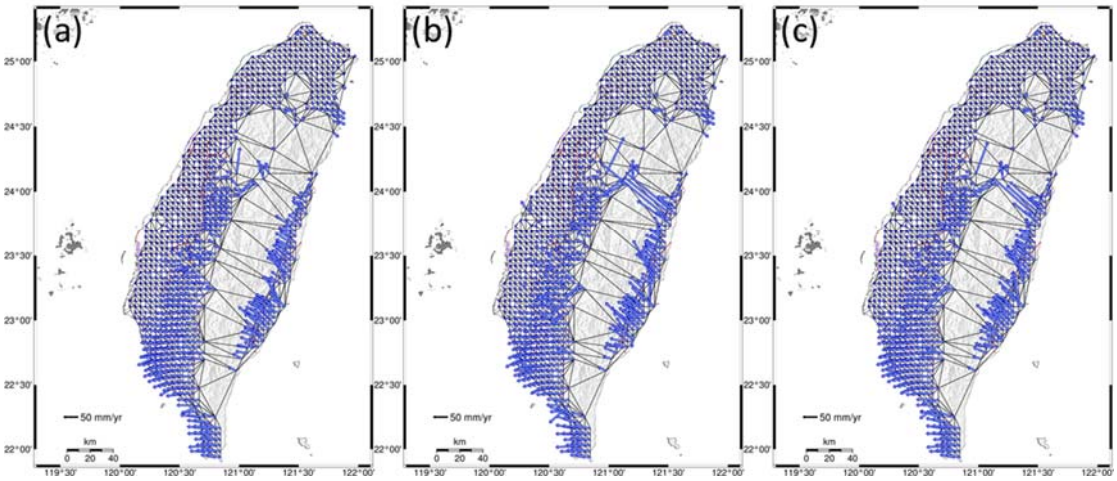


圖 3-1.8：速度反演之全台 3 時期網格化連續性速度場。

Figure 3-1.8: Grid velocities derived from velocity inversion.

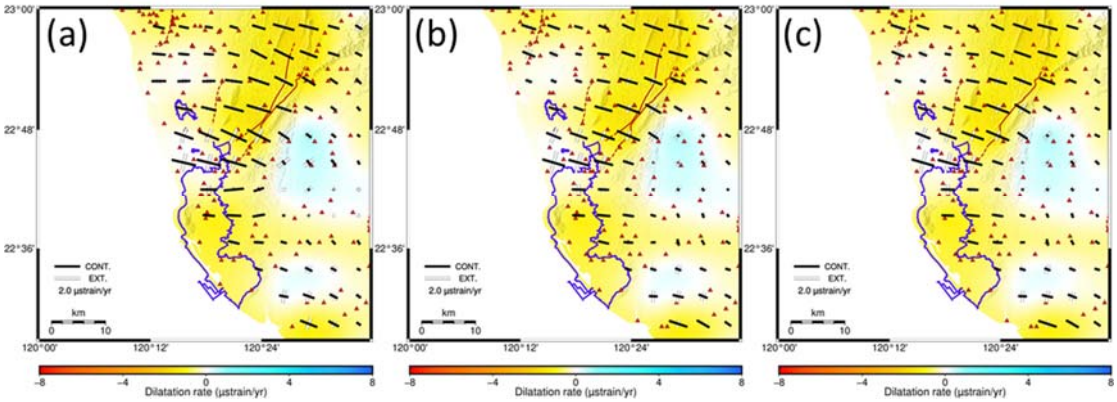


圖 3-1.9：速度反演方法推算之南部地區 3 時期最大主應變速率場。(a) 2002–2010 年最大主應變速率場；(b) 2010–2016 年最大主應變速率場；(c) 2016–2021 年最大主應變速率場。

Figure 3-1.9: Distribution of principal strain rates in southern Taiwan using the velocity inversion results in 3 time periods. (a) Period of 2002-2010; (b) Period of 2010-2016; (c) Period of 2016-2021.

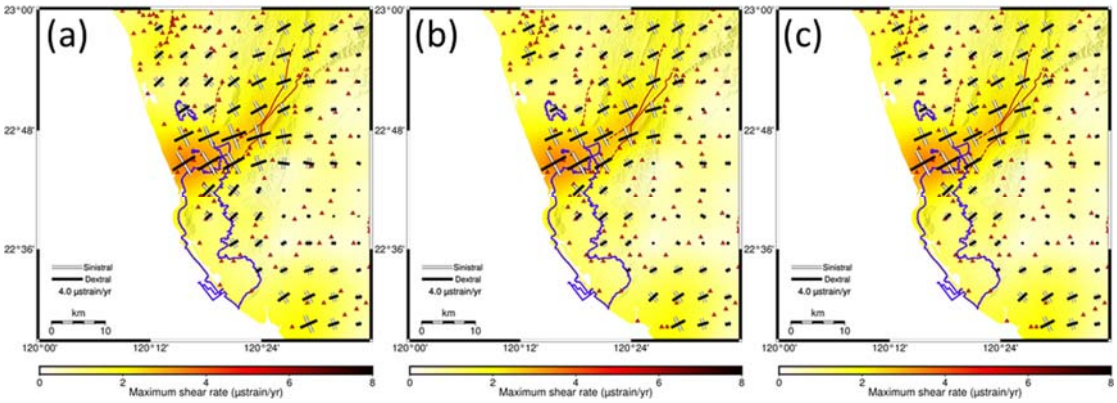


圖 3-1.10：速度反演方法推算之南部地區 3 時期最大剪應變速率場。(a) 2002–2010 年最大剪應變速率場；(b) 2010–2016 年最大剪應變速率場；(c) 2016–2021 年最大剪應變速率場。

Figure 3-1.10: Distribution of maximum shear strain rates in southern Taiwan using the velocity inversion results in 3 time periods. (a) Period of 2002-2010; (b) Period of 2010-2016; (c) Period of 2016-2021.

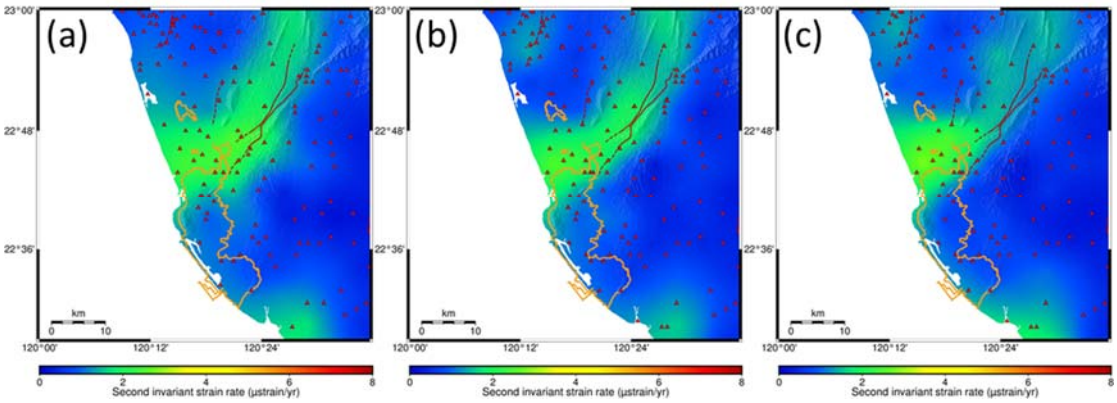


圖 3-1.11：速度反演方法推算之南部地區 3 時期應變速率強度分布圖。(a) 2002–2010 年應變率強度分布圖；(b) 2010–2016 年應變率強度分布圖；(c) 2016–2021 年應變率強度分布圖。

Figure 3-1.11: Distribution of second invariant strain rates in southern Taiwan using the velocity inversion results in 3 time periods. (a) Period of 2002-2010; (b) Period of 2010-2016; (c) Period of 2016-2021.

3-2 地表變形強度

有鑑於如國土規劃、測繪應用、交通運行設施、土木工程結構設計等各領域之應用範圍與標的物不盡相同，其對於地表變形之敏感度與規範亦有所差異。因此，本計畫藉由參考活動斷層分級與震度分級之概念，彙整如上述各相異領域間針對其應用範圍與標的，對於不均勻地表變形影響而訂定之相關規範及敏感度需求，制定一套符合社會各界需求之分級標準，進而根據此分級標準，繪製地表變形強度分布圖，以提供政府主管機關及社會大眾相關之不等量地表變形資訊，作為國土利用規劃提前避開潛在的地質危害區域，或是對應之土木工程結構設計等重要參考。此外，由於臺灣位處板塊交界處，地表變形速率之時空變化相當快速，故本次報告僅提供初步版本，後續將持續進行探討與更新。

3-2-1 地表變形相關規範彙整

本次報告中，以交通運行設施相關領域為主，彙整了臺灣傳統鐵路與高速鐵路針對鐵路橋梁等變位影響所制定之相關規範。為確保列車行駛期間之安全性，中華民國交通部頒布了《鐵路橋梁設計規範》（中華民國交通部，2004）、《鐵路法》（中華民國交通部，2020）及《鐵路兩側禁建限建辦法》（中華民國交通部，2016），除明確訂定臺灣鐵路常時橋面之不連續變位限制（表 3-2.1）外，亦針對高速鐵路之設施容許變形量進行規範（表 3-2.2）。其中，雖然相關規範針對垂直及水平方向之最大容許變位量皆有規定，但由於鐵路橋梁的結構設計可以承受較大之垂直變形，因此水平方向之地表變形對於列車行駛之安全性影響最為顯著，故本計畫先就水平方向之變位規範進行探討與後續分析。

臺灣鐵路運行中之各級列車最高行駛速度各異，且列車之車速因行駛期間之交通環境與軌道狀況等而有所不同，因此《鐵路橋梁設計規範》針對臺灣鐵路中，所有可能之列車行駛速度及橋面不同的變形狀況訂定其最大容許變位量。根據表 3-2.1 可知，不論列車行駛速度為何，其最大水平錯位量皆不得大於 2 mm，當列車行駛速度達 260 km/h 以上時，其最大容許錯位量降為 1.5 mm；若變位方式為

平行移動或折角則依鐵路或橋梁跨徑長度（L）計算其夾角（θ）（圖 3-2.1；圖 3-2.2），當列車行駛速度介於 70 km/h 至 260 km/h 時，平行移動之最大容許變位夾角由 $\frac{6}{1000}$ 漸減至 $\frac{1.5}{1000}$；折角之最大容許變位夾角則同樣由 $\frac{6}{1000}$ 漸減至 $\frac{2}{1000}$。而根據《鐵路法》第 61 條之 5 規定訂定之《鐵路兩側禁建限建辦法》第 14 條規定：高速鐵路禁建、限建範圍內進行本法（鐵路法）第 61 條之 2 第 1 項各款行為產生之鐵路設施變形累積總量，不得超過附件三（高速鐵路設施容許變形值）之容許變形值。因此，參照《高速鐵路設施容許變形值》（表 3-2.2）之規範，高速鐵路於高架橋段、隧道段及路堤路塹段等結構之水平最大容許變位值皆為 $\frac{0.65}{1000}$，台北隧道段結構則為 $\frac{1.3}{1000}$。而由前述規範彙整可知，相較於臺灣鐵路列車，高速鐵路列車之行駛速度較快，故而其變位量規範亦較為嚴謹。

表 3-2.1：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004）

Table3-2.1: Discontinuous displacement limitation of bridge

變位方向	列車速度（km/h）	錯 位（mm）	夾 角 θ (1/1000)	
			平 行 移 動	折 角
			L≦50m	L≦50m
垂 直	70	2	7	7
	110		6	6
	160		5	5
	210		4	4
	260		3	3
水 平	70	2	6	6
	110		4	5
	160		3	3.5
	210		2.5	3
	260	1.5	1.5	2

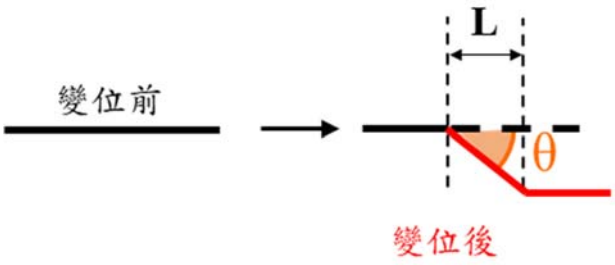


圖 3-2.1：橋面平行移動之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

Figure3-2.1: Parallel displacement pattern of bridge. Red line represents the change of bridge location after displacement; L is the span length (m); θ is the deflection angle ($\frac{1}{1000}$).

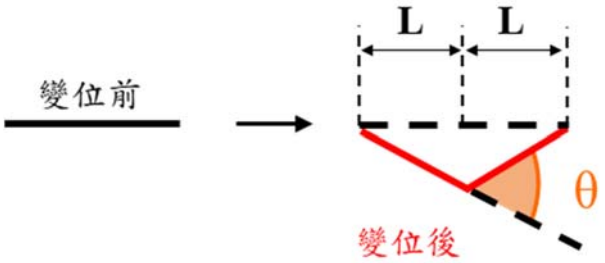


圖 3-2.2：橋面折角之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

Figure3-2.2: Angular deflection pattern of bridge. Red line represents the change of bridge location after displacement; L is the span length (m); θ is the deflection angle ($\frac{1}{1000}$).

3-2-2 地表變形強度分級標準表建置

為了便於一般民眾、土木工程領域或政府主管機關等更容易瞭解不均勻地表變形所帶來之影響，並提供國土利用、工程設計與交通安全規劃等作為重要參考指標，本計畫參照中央地質調查所活動斷層分級以及中央氣象局震度分級表之概念，依據全臺應變速率分布現狀，將其劃分為 6 個等級，制定全臺地表變形強度分級標準表。

如 3-1 節所述，根據應變速率之計算方法，分別可獲得地表之主應變、剪應變以及第二不變量，其中，主應變與剪應變皆與受力及沿受力方向之變化有關，

雖於土木工程等相關領域中，應變之方向性為結構物安全設計時之重要考量因素，但如同中央氣象局設計震度分級表時，僅採用 3 維向量之合成震波所計算得之最大地動加速度（Peak ground acceleration，PGA）之原因：對於一般社會大眾而言，相較於須進一步解析不同方向性所帶來之差異與影響之向量數值，經合成計算而得之總和量值，更易於瞭解與判斷相異數值及其可能帶來影響之差異。

由 GNSS 及精密水準測量之坐標時間序列可知，地表速度場通常伴隨重大地震事件之發生而有所轉變，而依本次報告之分析結果，全臺地表速度場約可根據劃分為 6 個時期，故全臺第二不變量之計算與分布亦隨之劃分為 6 個時期。觀察 6 個時期之速度場與應變速率場可發現(圖 3-2.1)，不同時期之第二不變量之最大值與分布型態相近，而據本計畫分析，全臺第二不變量最大值約達 8.5 μstrain/yr。因此，本計畫首先將全臺第二不變量平均劃分為 0 至 5，總共 6 個等級。0 級為第二不變量量值為 0 μstrain/yr 之區域，表示該地區無不均勻地表變形之發生，爾後每一級之第二不變量級距為 1.7 μstrain/yr，並依據各領域地表變形相關規範之安全管理值中之警戒值、行動值及危險值，計算不同等級之地表變形強度下，各領域之結構物或相關設施可能之耐受年限。本次報告中主要彙整臺灣鐵路與高速鐵路之相關規範，計算並表列出各等級下，不同規範依據、變形型態及安全管理值之年限。由表 3-2.1 中可發現，不論臺灣鐵路或高速鐵路，據目前之計算結果，各管理值之年限皆達數十年甚或至數千年之久，但實際上臺灣部分地區已發現結構物受地表變形影響而潛在受損或造成安全疑慮之可能性，而造成此結果之可能原因為：本計畫可取得之大地測量資料以公部門所提供之 GNSS 觀測站與精密水準測量為主，雖臺灣之觀測網相較於其他國家而言已屬密度極高者，但由於臺灣地體構造與地質環境較為複雜，根據部分如臺灣西南部地區研究顯示（e.g., 張李群，2014；陳勇昇，2015；蕭立揚，2020；謝尊堯，2020），於加入相關單位為工程安全監測所架設之高密度 GNSS 觀測站、導線測量、結構細部測量，抑或是 InSAR 等可提高空間解析度之大地測量資料後，如車瓜林斷層、小崗山斷層等鄰近區域之高度不均勻地表變形亦隨之反映而得。是以，為使此分級表可涵蓋全臺

更完整之不均勻地表變形情形，若本計畫後續可取得更高密度之大地測量資料，此地表變形分級表之應變率量值亦將隨之更新。同時，後續亦將擴增其他應用領域地表變形相關規範之蒐集與彙整，以使此分級表可更完善並廣泛的應用到各領域。

表 3-2.2：地表變形強度分級表。

Figure3-2.2: Table of surface deformation level.

分級	應變率第二不變量 n (μstrain/yr)	台鐵	高鐵
0	0	1. 鐵路橋梁與軌道無平行移動 2. 鐵路橋梁與軌道無轉折	橋梁與軌道無水平變位
1	$0 < n \leq 1.7$	1. 平行移動 約 660 年達警戒值；約 1000 年達行動值；約 2000 年達危險值。 2. 轉折 約 730 年達警戒值；約 1130 年達行動值；約 2330 年達危險值。	約 140 年達警戒值；約 220 年達行動值；約 430 年達危險值。
2	$1.7 < n \leq 3.4$	1. 平行移動 約 330 年達警戒值；約 500 年達行動值；約 1000 年達危險值。 2. 轉折 約 360 年達警戒值；約 560 年達行動值；約 1160 年達危險值。	約 70 年達警戒值；約 110 年達行動值；約 210 年達危險值。
3	$3.4 < n \leq 5.1$	1. 平行移動 約 220 年達警戒值；約 330 年達行動值；約 730 年達危險值。 2. 轉折 約 240 年達警戒值；約 370 年達行動值；約 770 年達危險值。	約 45 年達警戒值；約 70 年達行動值；約 140 年達危險值。
4	$5.1 < n \leq 6.8$	1. 平行移動 約 160 年達警戒值；約 250 年達行動值；約 500 年達危險值。 2. 轉折 約 180 年達警戒值；約 280 年達行動值；約 580 年達危險值。	約 35 年達警戒值；約 55 年達行動值；約 105 年達危險值。
5	$6.8 < n$	1. 平行移動 約 130 年達警戒值；約 200 年達行動值；約 2000 年達危險值。 2. 轉折 約 140 年達警戒值；約 220 年達行動值；約 460 年達危險值。	約 25 年達警戒值；約 40 年達行動值；約 85 年達危險值。

3-3 地表變形強度分布圖

本計畫根據前述地表變形強度分級表，繪製重要區域與全臺地表變形強度分布圖如圖 3-3.1 及圖 3-3.2。其中，白色部分為變形強度 0 級之區域，主要為中央山脈等大地測量監測站未覆蓋之區域；由藍色至紅色分別表示 1 至 5 級，紅色表示其為全臺地表變形強度最大之區域，其第二不變量超過 6.8 μstrain/yr 以上。而由此地表變形強度分布圖中可發現，全臺地表變形強度最高之區域為花東縱谷地區，該處為歐亞板塊與菲律賓海板塊之聚合帶，由北起米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層等，至南段之池上斷層、利吉斷層與鹿野斷層，形成了縱谷斷層系統，根據觀測資料及以往許多學者針對此區域所進行之研究（e.g., Hsu & Burgmann, 2006；Hsu et al., 2009；Yu et al., 1994；Yu & Kuo, 2001；Yen et al., 2010；Champenois et al., 2012；劉亭妤，2016）可知，花東縱谷為臺灣地表變形速度最快、地震最為頻仍之區域，且縱谷斷層南段之地表潛移速度極快，顯示本計畫之計算結果與前人之研究成果相符。

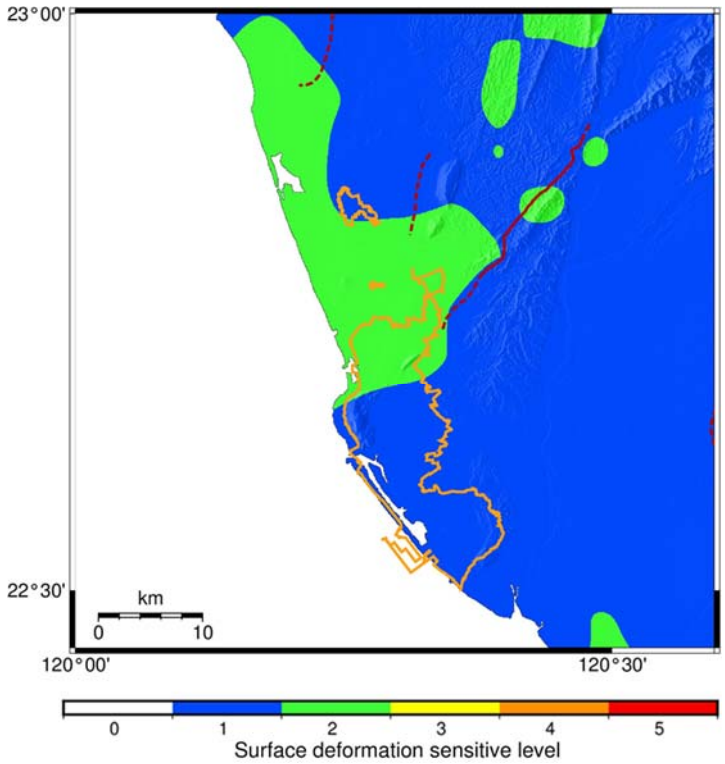


圖 3-3.1：重要區域地表變形強度分布圖。

Figure 3-3.1: Distribution of surface deformation level in object area.

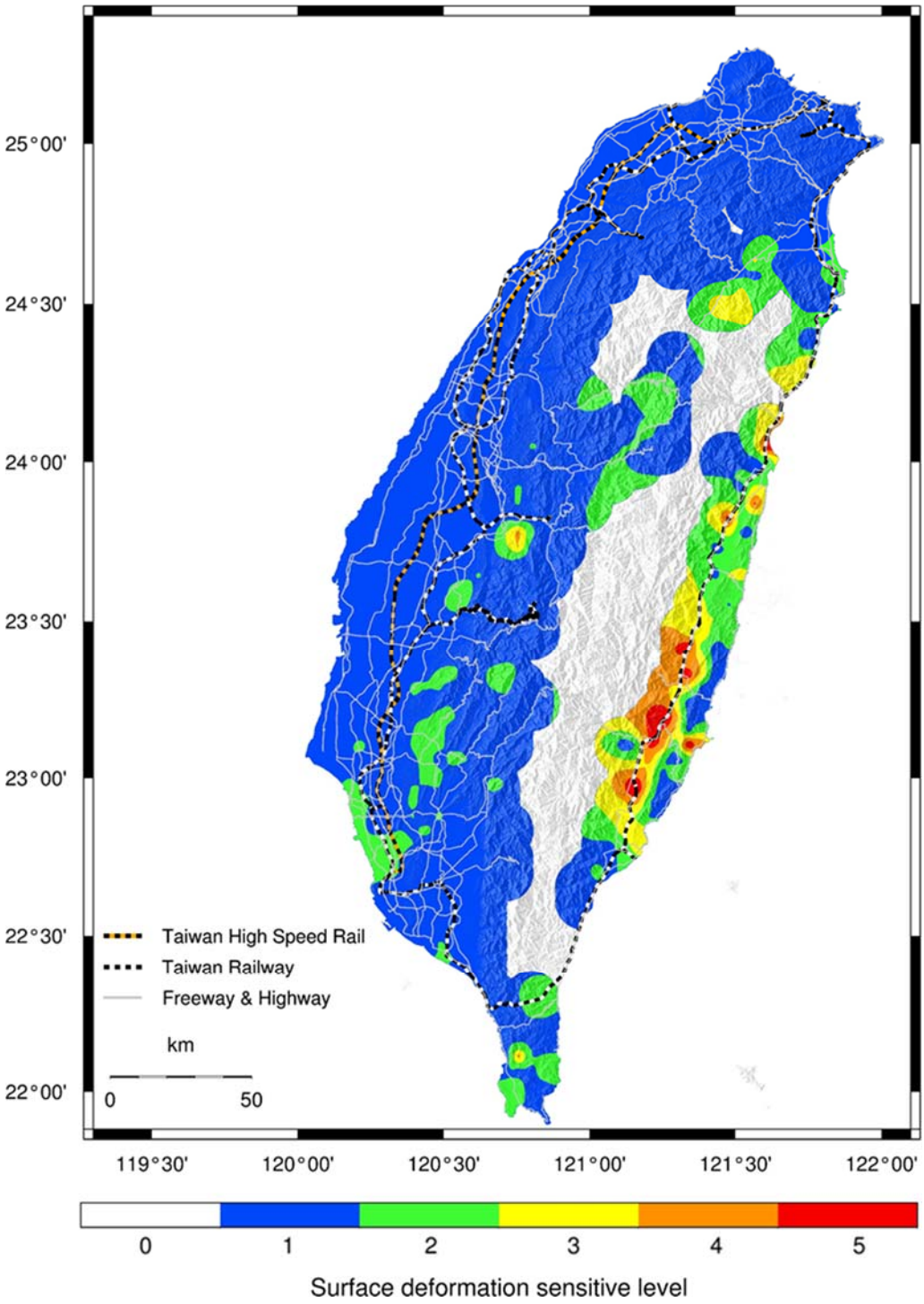


圖 3-3.2：全臺地表變形強度分布圖。

Figure 3-3.2: Distribution of surface deformation level.

第四章、南部地區重要斷層參數分析

4-1 斷層資料蒐集

今年度之計畫區域為臺灣南部地區，包含五條活動斷層，分別為：旗山斷層、車瓜林斷層、小崗山斷層、潮州斷層、恆春斷層。以下將就各斷層之幾何斷層、滑移速率、活動性進行彙整與分析：

4-1-1 旗山斷層

1. 長度與分段破裂事件

根據條帶地質圖（林啟文等，2009），旗山斷層往北至高雄旗山鎮附近，往南至高雄市大社、仁武附近，長度約 30 公里。斷層於旗山通過嶺口礫岩及古亭坑層邊界，於中寮通過烏山層及古亭坑層邊界，於大社進入沖積層而斷層跡變得較不明顯。國道 3 號中寮隧道自 2000 年通車以來不斷有位移現象，根據大地測量資料，旗山斷層兩側在垂直向量上有顯著差異，斷層西側相較於東側抬升速率快且呈現伸張運動（楊名，2018）。在田寮三號高架橋的長期改善策略中，拆除田寮隧道北洞口既有結構物，同時於高架橋路段填築路堤（Hsiao et al., 2016），在北洞口與新北洞口之間邱奕維等（2019）於現地進行地質調查，認為可能是古亭坑層遇水軟化，加上受到相對較硬的烏山層推擠作用，使局部泥岩向上推擠溢出。此區域現象有別旗山斷層其他地區所呈現的斷層特性，故本計畫針對古亭坑層-烏山層岩性邊界之旗山斷層獨立分段（圖 4-1.1）。



圖 4-1.1：地調所旗山斷層條帶地質圖與本計畫建議之斷層分段點（修改自林啟文等，2009）

Figure 4-1.1: Strip geological map of the Chishan fault from the Central Geological Survey and the locations of fault segmentation suggested in this project (modified from 林啟文等，2009).

2. 斷層幾何(傾角與深度)

針對旗山斷層的幾何調查，主要調查結果與推估敘述如下：

(1) 野外露頭：旗山鎮西南方武鹿坑溪北側露頭中，斷層位態為 N30°E，78°E。（林啟文等，2009）。中寮隧道附近斷層露頭，斷層傾角約 50–60°向南（陳柏村，2005；邱奕維等，2019）。隧道的開挖面可觀察到數處溢水。深水溪的露頭中，烏山層與沖積層間的斷層位態為 N55°E，66°S（林啟文等，2009）。斷層位置彙整於表 4-1.1，初步研判斷層位態無明顯空間變化。

(2) 震測資料：大社的淺層反射震測資料可觀察到 300 公尺深以內地層有擾動，但斷層面仍不易解析，張家鳳（2005）認為此為旗山斷層，傾角大約 65°（圖 4-1.2）。由於剖面僅造成地層擾動，不易解析斷層面，本計畫不建議採用，

僅供參考。

(3) 地質剖面：蕭秋安（Hsiao et al., 2016）於中寮隧道繪製之地質剖面如圖 4-1.3，剖面中包含龍船斷層（本計畫稱車瓜林斷層）、旗山斷層，在隧道中還有 3 個斷層破裂帶，北洞口外車瓜林斷層及旗山斷層之間有 3 個剪裂破裂帶，車瓜林斷層的西側有一剪裂破裂帶（376k+296 公里處）。斷層及剪裂破裂帶傾向皆向東。岩層傾向在 376k+296 公里處以西為向西傾，以東皆向東傾。

(4) 平衡剖面：Rodriguez-Roa and Wiltschiko（2010）建立之平衡剖面解釋旗山斷層淺部 0–3 公里深處為低角度逆衝斷層，深部 3–12 公里轉為傾角 60°東傾斷層，斷層深度在約 12 公里處接到滑脫面（圖 4-1.4）。陳文山等（2011）認為臺灣西南部的逆斷層與前陸盆地形成有關，斷層發育由老至新（由東至西）為潮州斷層、平溪斷層-旗山斷層、木屐寮斷層-六甲斷層-中洲斷層。根據台南 1 號井（TN-1）推估台南背斜下方的滑脫面約為 5 公里，滑脫面深度向東漸深，至龍船斷層下方深度約達 10.5 公里，至旗山斷層下方深度約達 11.5 公里深。剖面中旗山斷層傾角在深部 3.0–11.5 公里為 40°傾角，淺部 3 公里內為 35–60°傾角（圖 4-1.5）。洪日豪（2006）建立的地質剖面中，旗山斷層為一約 65°東傾之斷層，斷層深度在 13.5 公里處接到滑脫面（圖 4-1.6）。鄭宏祺（2000）建立之平衡剖面在深度 0–9 公里旗山斷層傾角為 57°，9.0–12.5 公里為 38°（圖 4-1.7）。Rodriguez-Roa and Wiltschiko（2010）及陳文山等（2011）建立之平衡剖面位置通過內英斷層，而非本計畫的旗山斷層，故不採納。

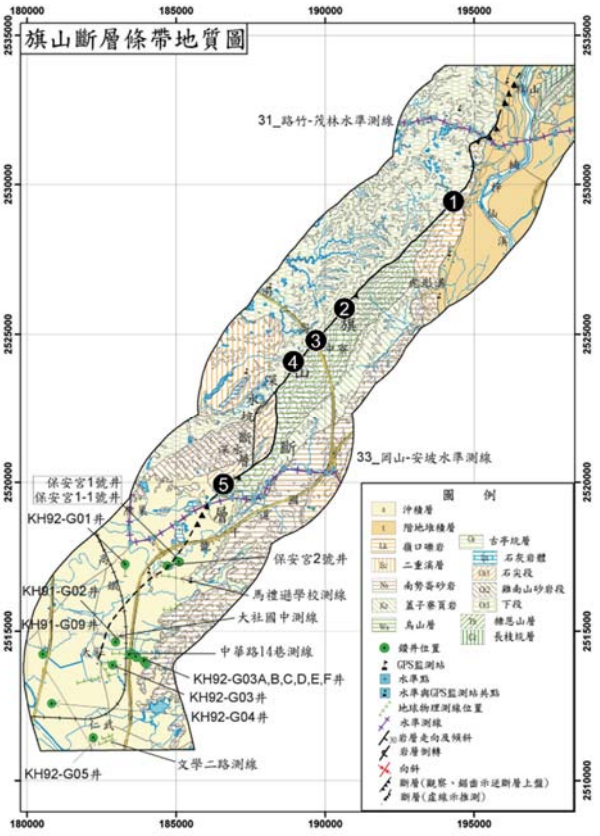
(5) 地球物理資料：Camanni et al.（2016）根據實驗室岩石試驗並配合地溫，推估台灣西南部的地下 P 波速度在≧5 km/s 時會進入基盤岩，因此 Camanni et al.（2016）以 P 波速度等於 5.2 km/s 作為前始新世基盤頂部的介面，他強調雖然這並不會在各處符合實際基盤面，但在缺乏直接證據情況下仍可作為第一版的地殼構造解釋用，本計畫認為這可以作為間接推估旗山斷層破裂深度

的參考。Biete et al.（2018）利用速度構造解析岩層深部分布情形，認為基盤深度在旗山地區大約位於 8 公里深（圖 4-1.8），相較平衡剖面推估結果較淺，建議結合其他深度資料再做判讀。

綜合以上資料，斷層傾角根據野外露頭、震測資料、地質剖面、平衡剖面可能落於 55–65°之間（圖 4-1.9、表 4-1.2），深度根據平衡剖面、地球物理資料可能在 8.0–13.5 公里之間（圖 4-1.10、表 4-1.3）。以上資料未發現斷層幾何有空間上的變化。

表 4-1.1：旗山斷層野外露頭彙整。

Table 4-1.1: Outcrops of the Chishan fault.



（修改自林啟文等，2009）

① 武鹿坑溪北側旗山斷層露頭



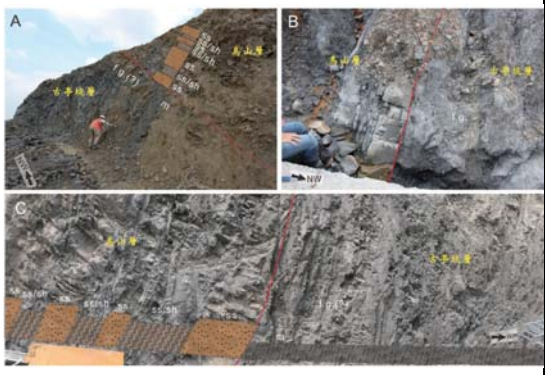
位於旗山鎮西南方武鹿坑溪以北約200公尺，露頭上嶺口礫岩(Lk)不整合於古亭坑層(Gt)之上，不整合面低角度向東傾斜，嶺口礫岩西側與古亭坑層泥岩呈斷層接觸，斷層面位態（N30°E, 78°E)，斷面擦痕顯示為橫移斷層，斷層帶寬約30公分，靠近斷層帶的礫岩呈現點壓破與剪碎，岩層有拖曳現象（林啟文等，2009）。

② 高雄市田寮區烏山之旗山斷層露頭



旗山斷層在高雄燕巢鄉深水村的深水溪一處露頭已錯動河階礫石層（宋國城，2003）。

③ 中寮隧道北洞口開挖後斷層露頭



古亭坑層與烏山層的斷層接觸即為旗山斷層主斷層。上盤烏山層為晚中新世，下盤古亭坑層為上新世，旗山斷層的位態為N46°E，59°E，斷層帶寬約100–140公尺。A：開挖面東側旗山斷層露頭；B：隧道開挖面西側旗山斷層露頭；C：開挖面東側緊鄰隧道旁的旗山斷層露頭（邱奕維等，2019）。

④ 南勢湖露頭



斷層面位態為N30°E，50°S，上盤為塊狀細粒砂岩與砂頁岩薄互層，下盤為厚約30公尺的變形帶。主斷面1.5公尺以內為強烈剪切帶，由深灰色至黑色具葉理的斷層泥帶與角礫岩帶所組成，由剪裂帶擦痕及上下盤的拖曳褶皺，顯示主斷層以逆滑形式為主兼具左滑分量（陳柏村，2005）。

⑤ 深水溪斷層露頭



位於橫山加壓站西北方的深水溪溪溝露頭，烏山層覆於礫石層之上，礫石層膠結良好具層理，向東傾約40–50度，烏山層與沖積層間的斷層位態為N55°E，66°S（林啟文等，2009）。

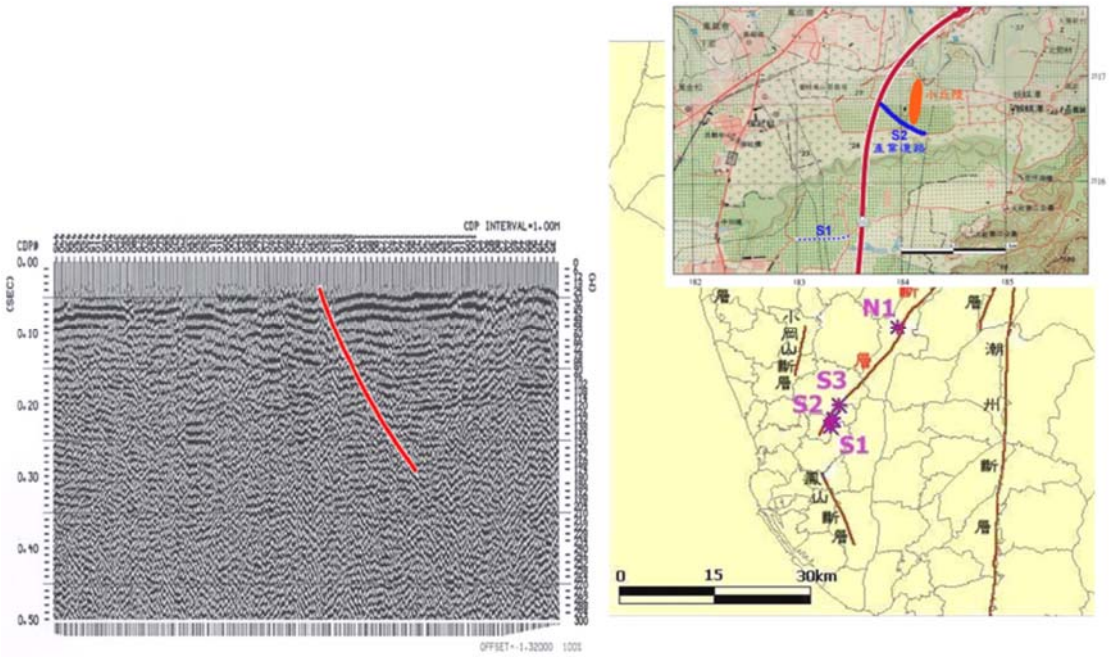


圖 4-1.2：淺層反射震測（張家鳳，2005）

Figure 4-1.2: Shallow seismic reflection profile across the Chishan fault (張家鳳，2005).

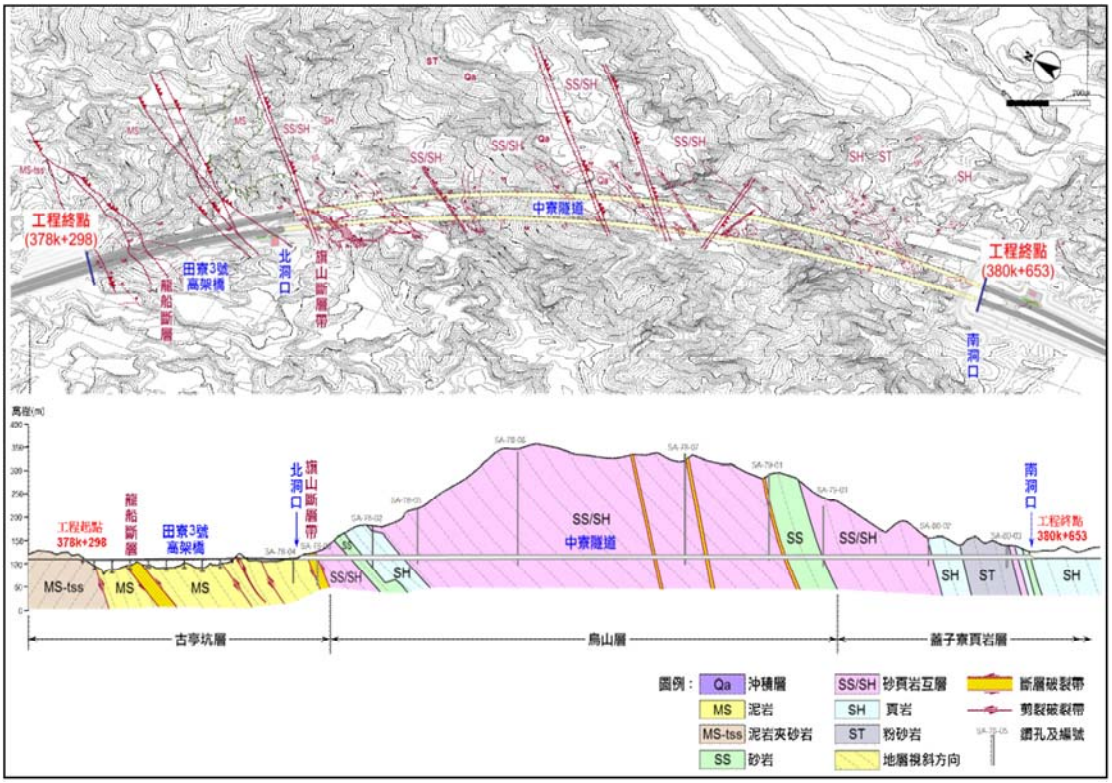


圖 4-1.3：田寮 3 號高架橋之地質剖面（Hsiao et al., 2016）。

Figure 4-1.3: Geological profile at the Tianliao No.3 Viaduct (Hsiao et al., 2016).

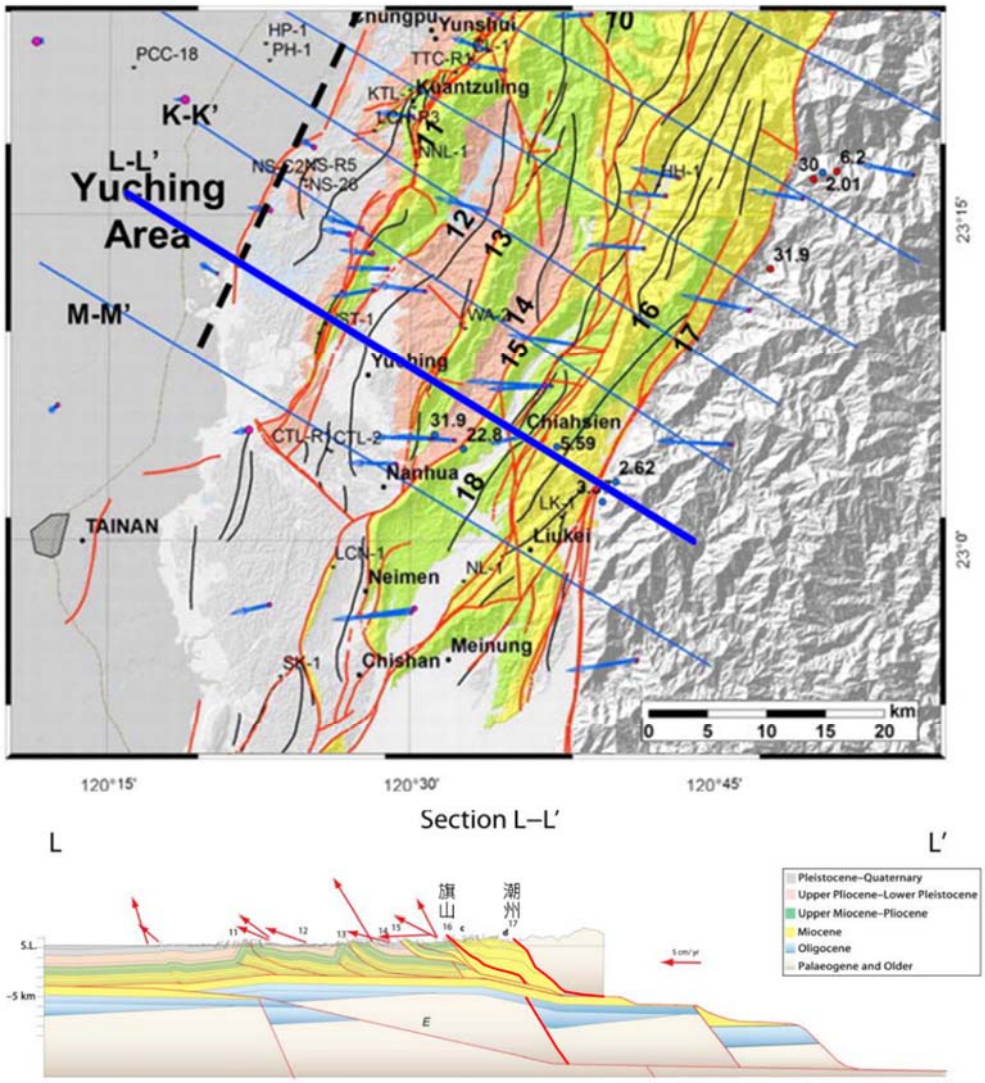


圖 4-1.4：L-L'地質平衡剖面圖（Rodriguez-Roa and Wiltschiko, 2010）。

Figure 4-1.4: Balanced cross section L-L' (Rodriguez-Roa and Wiltschiko, 2010).

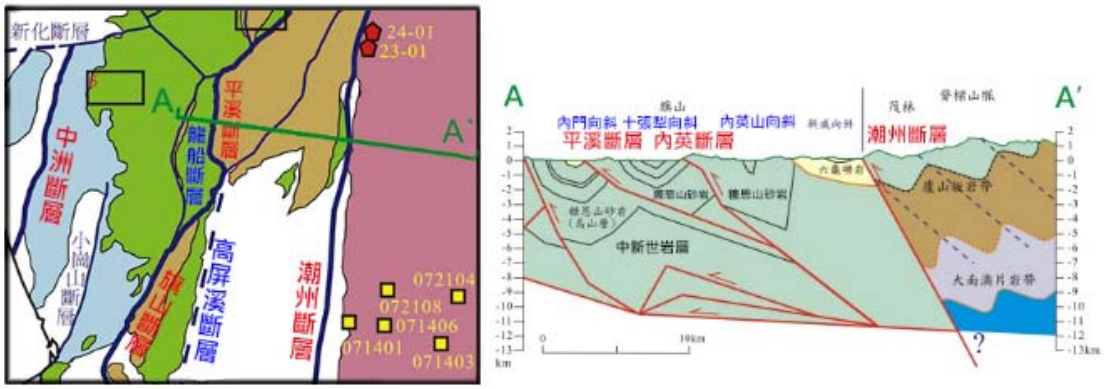


圖 4-1.5：西南部地區地質剖面圖（陳文山等，2011）。

Figure 4-1.5: Geological cross section of the southwestern Taiwan (陳文山等，2011).

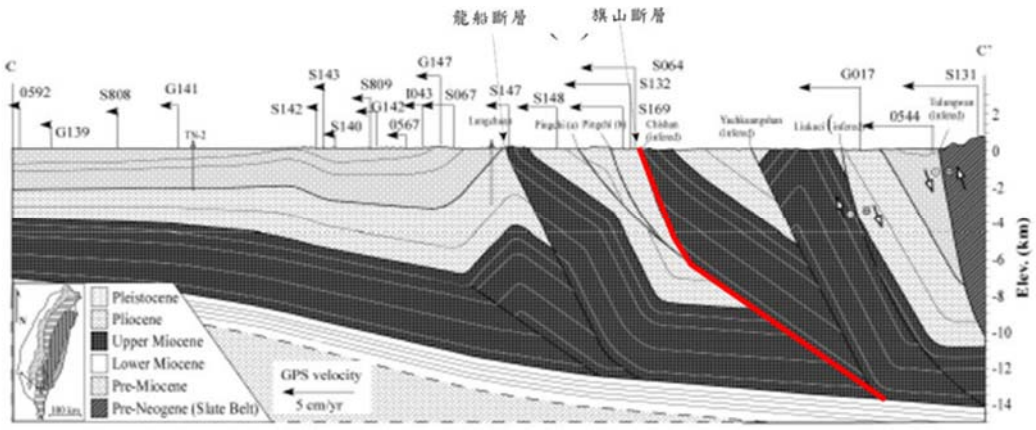


圖 4-1.6：西南部地區跨龍船斷層及旗山斷層的地質剖面圖（洪日豪，2006）。

Figure 4-1.6: Geological cross section which crosses the Lungchuan fault and the Chishan fault (洪日豪，2006).

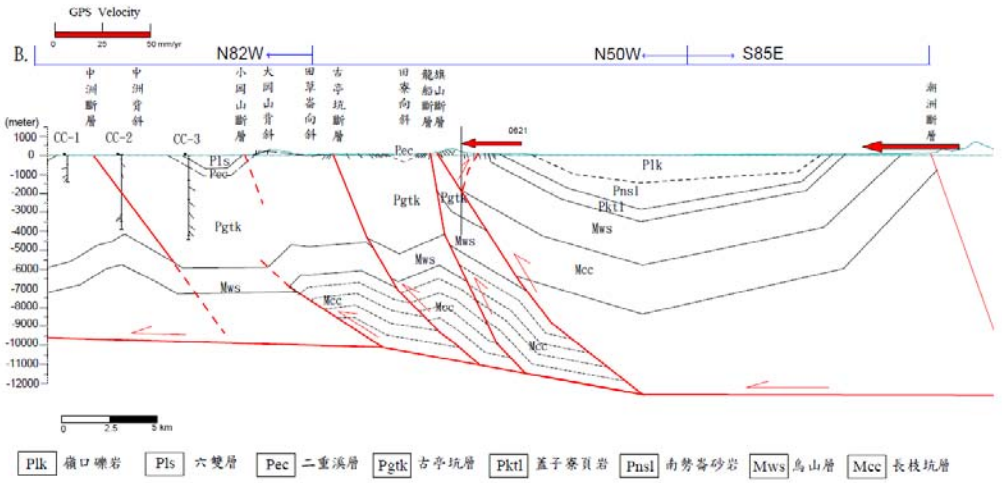


圖 4-1.7：跨小崗山斷層、旗山斷層平衡剖面（鄭宏祺，2000）。

Figure 4-1.7: Balanced cross section which crosses the Hsiaokangshan fault and the Chishan fault (鄭宏祺，2000).

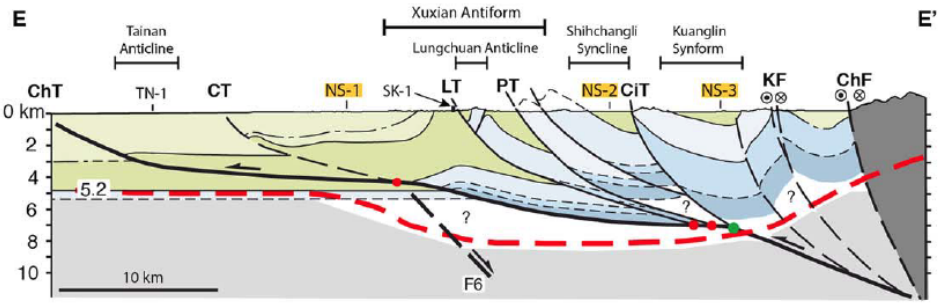


圖 4-1.8：穿越台灣西南部褶皺逆衝帶地質剖面圖。紅色虛線代表 Vp = 5.2 km/s 之深度（Biete et al., 2018）。

Figure 4-1.8: Geological cross section through the southwestern Taiwan fold-and thrust belt. Red dashed line is the 5.2 km/s Vp contour (Biete et al., 2018).

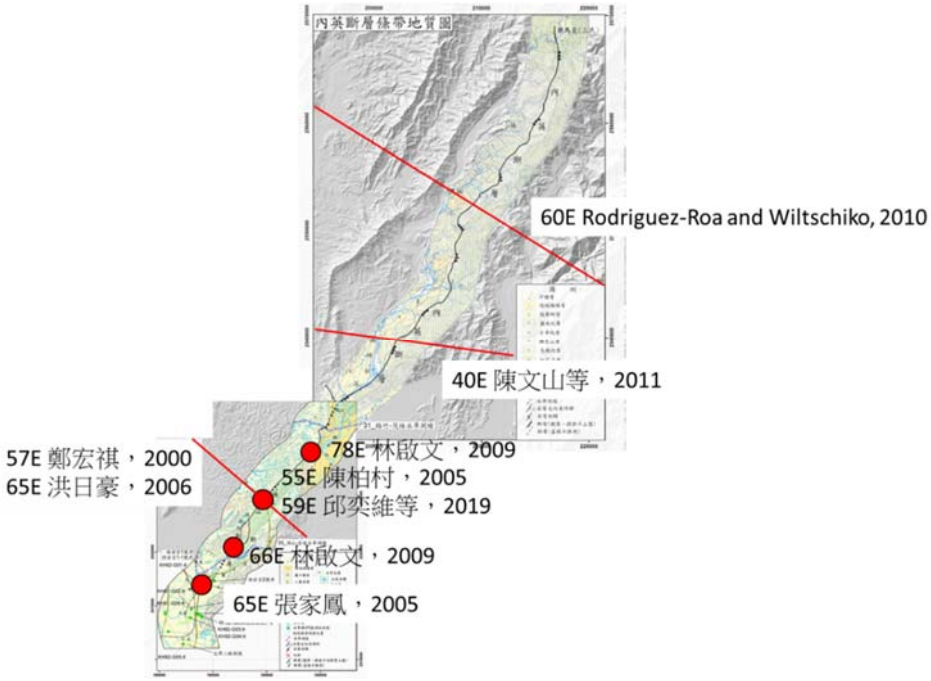


圖 4-1.9：旗山斷層幾何調查資料分布圖。

Figure 4-1.9: Distribution map of the survey data for geometry of the Chishan fault.

表 4-1.2：旗山斷層傾角參數與文獻彙整。

Table 4-1.2: Parameters and references of dip angle of the Chishan fault.

參考文獻	方法	傾角（度）	採納數據	統計
林啟文等（2009）	武鹿坑溪露頭	78E	78E	範圍 55-65 中間值 60
林啟文等（2009）	深水溪露頭	66E	66E	
陳柏村（2005）	野外露頭觀察	50-60E	55	
邱奕維等（2019）	野外現地調查	59E	59	
張家鳳（2005）	淺層反射震測	65E	斷層面解析不佳不採納	
洪日豪（2006）	地質剖面圖	65E	65	
Rodriguez-Roa and Wiltschiko（2010）	參考地表地質圖、地層位態及速度場建立地質剖面圖	30E (0–3 km) 60E (3–12 km)	不採納內英斷層幾何	
陳文山等（2011）	平衡剖面	35E (0–1 km) 60E (1–3 km) 40E (3–11.5 km)	不採納內英斷層幾何	
鄭宏祺（2000）	平衡剖面	57E (0–9 km) 38E (9–13 km)	57	

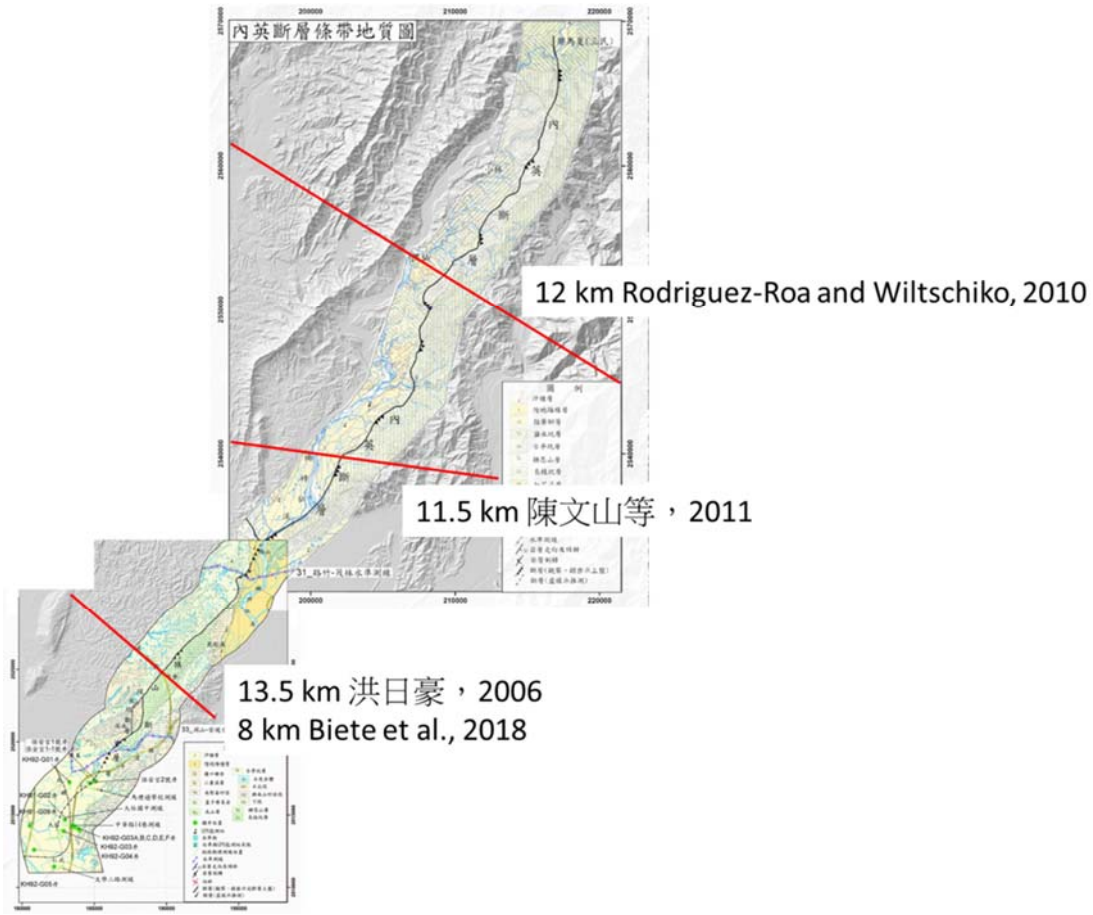


圖 4-1.10：旗山斷層破裂深度調查資料分布圖。

Figure 4-1.10: Distribution map of the survey data for rupture depth of the Chishan fault.

表 4-1.3：旗山斷層破裂深度參數與文獻彙整。

Table 4-1.3: Parameters and references of rupture depth of the Chishan fault.

參考文獻	方法	深度	
洪日豪（2006）	平衡剖面	13.5 公里	平均值 11 標準差 4
陳文山等（2011）	平衡剖面	11.5 公里 不採納內英斷層幾何	
Rodriguez-Roa and Wiltschiko（2010）	平衡剖面	12 公里 不採納內英斷層幾何	
Biete et al.（2018）	基盤深度	8 公里	

3. 旗山斷層滑移速率與活動性

(1) 鑽井：目前所蒐集之鑽井資料，主要來自於旗山斷層南端之大社及仁武地區

甲、大社 A 剖面：對於大社剖面有三種不同的解讀，陳文山等（2012）於大社 A 剖面，認為旗山斷層是位於 KH92-G02 及 KH92-G03-F 之間，位於上盤的三口井(KH92-G03-F、KH92-G03-E、KH92-G03-D)抬升速率為 3.4±0.8 mm/yr 至 4.0±0.3 mm/yr，下盤 KH92-G02 抬升速率為 2.4±0.7 mm/yr，兩者相減得到旗山斷層的抬升速率為 1.0~1.6 mm/yr，Shyu et al.（2020）在彙整旗山斷層滑移速率，也是按照此方式獲得。然而，顏銀桐等（2020）認為旗山斷層變形帶有可能已經延伸到 KH92-G02，因此旗山斷層上盤於大社 A 剖面的抬升速率為 2.4–4.0 mm/yr，而下盤的抬升速率未知，因此假設下盤為 0，以旗山斷層抬升速率 2.4–4.0 mm/yr 去換算至斷層面上。

乙、大社 B 剖面：陳文山等（2012）於大社 B 剖面，認為旗山斷層是位於大社 2 號井及 KH92-G03 之間，位於上盤的 KH92-G03 抬升速率為 3.3±0.9 mm/yr，下盤大社 2 號井抬升速率為 2.8±0.6 mm/yr，兩者相減得到旗山斷層的抬升速率為 0.5 mm/yr，Shyu et al.（2020）在彙整旗山斷層滑移速率，也是按照此方式獲得。顏銀桐等（2020）認為大社 B 剖面已位於旗山斷層末端，不具參考意義，因此未採用此數據。

(2) 大地監測：根據國道 3 號中寮隧道的監測結果，旗山斷層兩側有 8 cm/yr 垂直向的活動速率，斷層西側相較於東側抬升速率快（楊名等，2018），此變形特徵與旗山斷層特性不符。

根據鑽井資料，旗山斷層長期滑移速率範圍為 1.1–5.3 mm/yr，而大地監測資料顯示中寮隧道區域滑移特性有別於大社、仁武，故本計畫建議將古亭坑層-烏山層岩性邊界之旗山斷層獨立分段（圖 4-1.11、表 4-1.4）。

在斷層活動性方面，根據深水溪北岸露頭的調查，發現旗山斷層截切全新世河階礫石層，礫石層與崩積層年代為 7189±160 yr BP，顯示全新世以來仍有活動（陳文山等，2005），屬於第一類活動斷層。

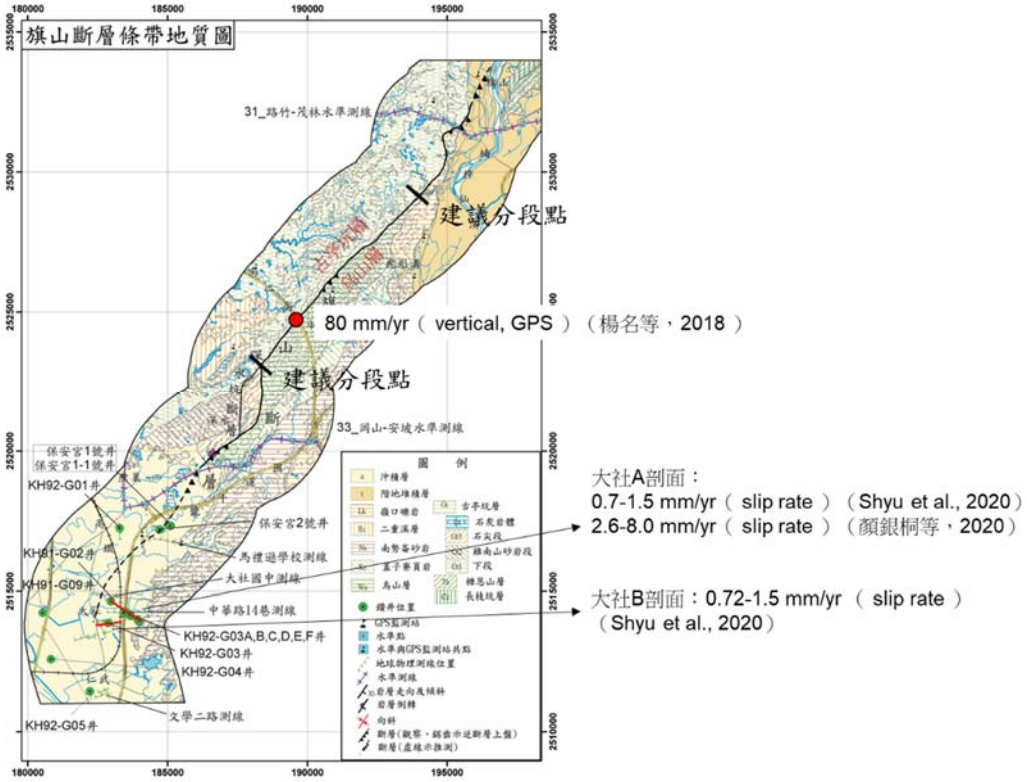


圖 4-1.11：旗山斷層滑移速率調查資料分布圖（修改自林啟文等，2009）。

Figure 4-1.11: Distribution map of the survey data for slip rate of the Chishan fault.

表 4-1.4：旗山斷層滑移速率參數與文獻彙整。

Table 4-1.4: Parameters and references of slip rate of the Chishan fault.

位置	參考文獻	方法	結果
大社 A	陳文山等(2012) Shyu et al. (2020)	上下盤鑽井抬升速率差(KH92-G02 為下盤)	1.0~1.6 (uplift rate)
	顏銀桐等（2020）	上下盤鑽井抬升速率差(KH92-G02 為上盤，下盤假設為 0)	2.4~4.0 (uplift rate)
大社 B	陳文山等(2012) Shyu et al. (2020)	上下盤鑽井抬升速率差	0.5 (uplift rate)

4-1-2 車瓜林斷層

1. 長度與分段破裂事件

車瓜林斷層早期由林啟文等（2012）提出，位於旗山斷層西側，通過國道 3 號，在大廓庭山與龍船斷層相截切。斷層走向為東北向，為古亭坑層中的逆斷層，野外可觀察到斷層露頭，斷層面傾向東南。斷層北起高雄市內門，往西南方經山區的大廓庭山，最後延伸至燕巢區崎溜，崎溜以南由於受階地堆積層覆蓋而難以判釋，其長度約 22 公里（劉彥求與林啟文，2019）（圖 4-1.12）。

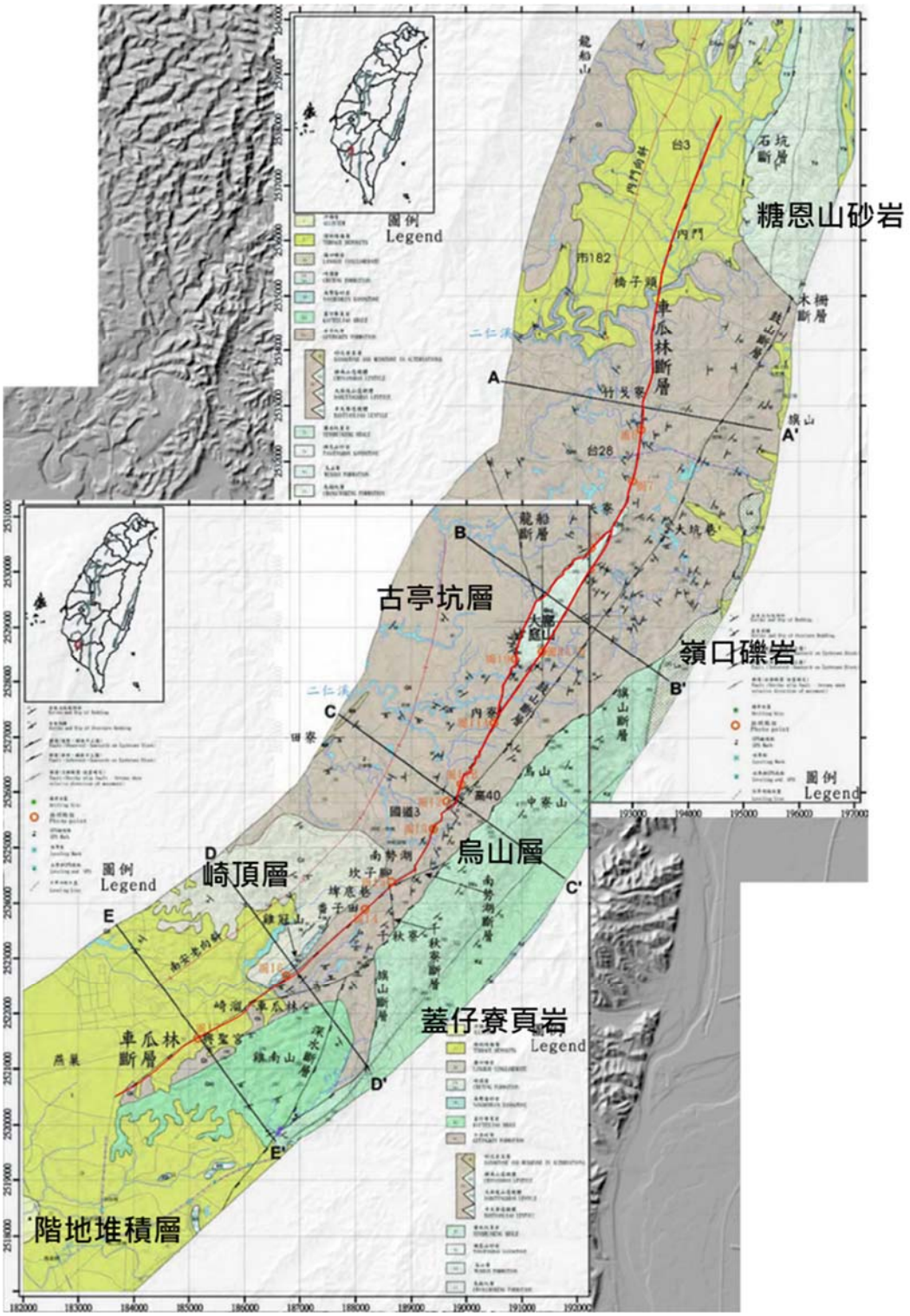


圖 4-1.12：車瓜林斷層條帶地質圖(修改自劉彥求與林啟文，2019)。

Figure 4-1.12: Strip geological map of the Chekualin fault (modified from Liu and Lin, 2019).



圖 4-1.13：（左）車瓜林斷層周圍地形（劉彥求與林啟文，2019），（右）斷層分段位置及野外露頭中斷層位態分布。

Figure 4-1.13: (Left) Topography map around Chekualin fault (Liu and Lin, 2019). (Right) The location of fault segmentation and the distribution of fault outcrops with attitude.

2. 斷層幾何（傾角、深度）

(1) 野外調查：劉彥求與林啟文（2019）針對車瓜林斷層沿線進行斷層特性調查，於野外發現斷層露頭及岩層位態。該調查量測所得之斷層位態如圖 4-1.13，大廓庭山以北斷層露頭傾角多為 60°以上，大廓庭山以南傾角多為 60°以下。斷層露頭彙整於表 4-1.5。

(2) 地質剖面：通過中寮隧道之地質剖面（Hsiao et al., 2016）詳見 4-1-1 節說明（圖 4-1.3）。

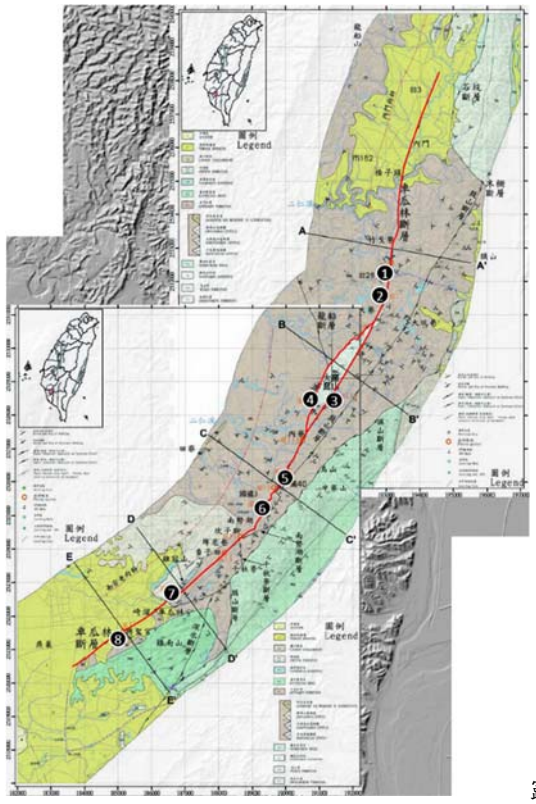
(3) 平衡剖面：車瓜林斷層與旗山斷層相鄰，兩者最近距離位於中寮國道 3 號，僅約 500 公尺，在斷層幾何上需要考慮與旗山斷層的關係。根據 4-1-1 節所述，旗山斷層深度根據洪日豪（2006）、陳文山等（2011）、Rodriguez-Roa and Wiltschiko（2010）所建立之平衡剖面範圍為 12.0–13.5 公里。滑脫面深度為車瓜林斷層最大深度，實際斷層深度還需視是否與旗山斷層相截切。

(4) 地球物理資料：根據 Biete et al.（2018）速度構造分析，此區域基盤深度可能位於約 8 公里深。地球物理資料無法直接推估車瓜林斷層深度，此深度僅代表斷層深度最大值。

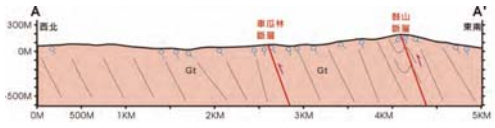
綜合以上資料，車瓜林斷層傾角根據野外露頭在大廓庭山以北平均 68°，大廓庭山以南平均 51°（表 4-1.6）。斷層深度參考平衡剖面與地球物理資料推測可能有兩種模式，一種為向下延伸至與旗山斷層相同的滑脫面，深度不超過 11 公里；另一種模式為與旗山斷層相連，可能成為旗山斷層前緣的分支斷層。為了進一步了解車瓜林斷層幾何形貌，並了解與鄰近的旗山斷層間的幾何關係，本計畫建立北、中、南二維剖面，在北邊的 A 剖面（圖 4-1.14）中，車瓜林斷層的傾角較陡而旗山斷層的傾角較緩，於地底下兩斷層不會互相截切，最後可能連到同一基底滑脫面。車瓜林斷層於大廓庭山以南傾角變得較緩，中間 B 剖面（圖 4-1.15）選擇通過小崗山斷層山腳下一號井、國道中寮隧道的位置，與旗山斷層位置相當靠近，推測車瓜林斷層在地下可能與旗山斷層相連，斷層深度與旗山斷層間的距離有關；最南邊的 C 剖面（圖 4-1.16）選在雞南山以南，車瓜林斷層與旗山斷層間的距離變得較遠，推測車瓜林斷層截切至旗山斷層的深度變得越來越深，最後又回到滑脫面。整體而言，車瓜林斷層深度於中寮隧道一帶最淺，而越往南、北兩側深度漸深。

表 4-1.5：車瓜林斷層野外露頭與地質剖面，資料彙整自劉彥求與林啟文（2019）。

Table 4-1.5: Outcrops and geological profiles of the Chekualin fault. Data from Liu and Lin (2019).



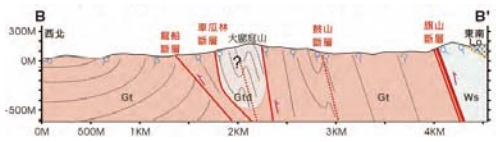
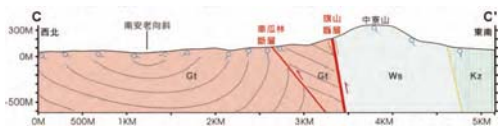
露頭及剖面分布圖



①台 28 線旗亭巷北側車瓜林斷層帶



下盤泥岩剪裂為厚約1公尺斷層泥帶，並發育小型反向逆斷層，上盤砂岩離斷為斷層角礫，推測此處為車瓜林斷層主斷層位置。

	②半天寮北側至台 28 線之間  大廊庭山透鏡體北方出露數股高角度斷層泥帶。
	③大廊庭山東側與南側車瓜林斷層上盤分支斷層帶。  ④內寮以北與大廊庭山剖面  谷地北端車瓜林斷層帶，斷面位態N19°E/74°E，由砂岩構成。
	⑤高 40 線南側車瓜林斷層連續剖面  古亭坑層受擾動或剪裂，上盤有數條與主斷層平行的分支斷層，岩層傾角向東逐漸變緩。
	⑥南勢湖剖面  上下盤岩層皆屬古亭坑層。上盤岩層位態北30度東，向東傾斜38°；主斷層帶呈現數條超過2公尺

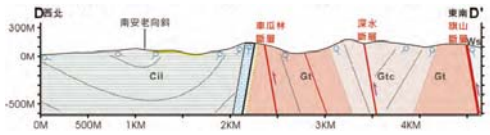
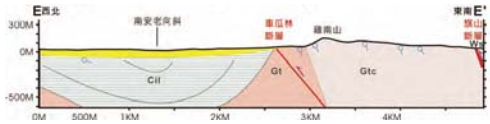
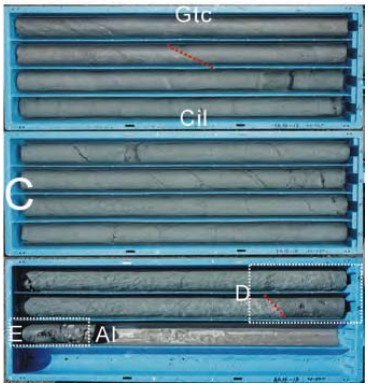
	厚黑色剪裂泥；斷層帶內岩層多受染黃，下盤岩層向西傾斜接近鉛直。
	⑦雞冠山東緣  厚層泥岩受錯動為斷層帶，斷層泥帶厚約1公尺。
	⑧車瓜林1B井  在44.53公尺深處由上盤古亭坑層(Gtc)鑽至下盤崎頂層(Cil)，49.8公尺處疏鬆砂岩（推測屬崎頂層）逆衝至沖積層(Al)上，斷面傾角約50°。

表 4-1.6：車瓜林斷層傾角參數與文獻彙整。

Table 4-1.6: Parameters and references of dip angle of the Chekualin fault.

斷層分段	參考文獻	方法	傾角	採納數據	統計
大廓庭山以北	劉彥求與林啟文（2019）	野外露頭調查	55–80°	68°	68
大廓庭山以南	劉彥求與林啟文（2019）	野外露頭調查	31–75°	51°	51

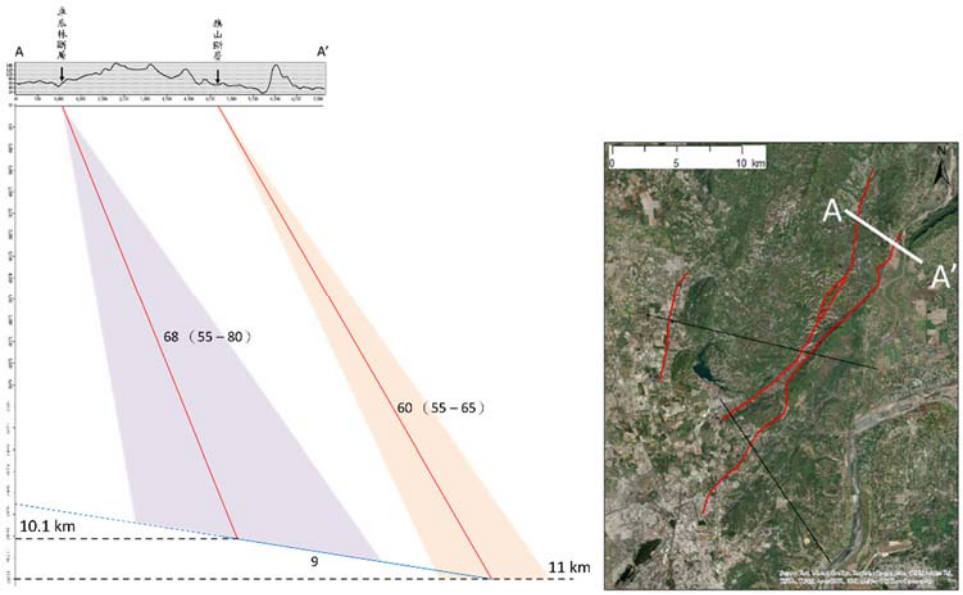


圖 4-1.14：車瓜林斷層 AA'二維剖面。紅線代表車瓜林斷層及旗山斷層，藍線代表滑脫面，車瓜林斷層幾何的範圍如紫色區域所示，旗山斷層幾何的範圍如橘色區域所示。

Figure 4-1.14: Profile AA' of the Chekualin fault. The red lines are Chekualin fault and Chishan fault. The blue line is the detachment. The purple area is the fault dip range of Chekualin fault. The orange area is the fault dip range of Chishan fault.

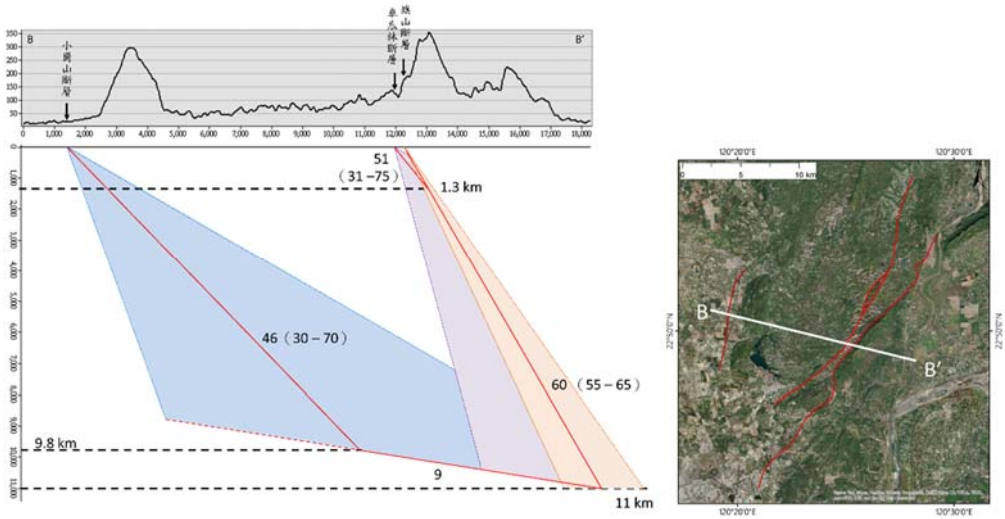


圖 4-1.15：車瓜林斷層 BB'二維剖面。紅色實線為斷層，小崗山斷層幾何範圍如藍色區域所示，車瓜林斷層幾何的範圍如紫色區域所示，旗山斷層幾何的範圍如橘色區域所示。

Figure 4-1.15: Profile BB' of the Chekualin fault. The red lines are faults. The blue area is the fault dip range of Hsiaokangshan fault. The purple area is the fault dip range of Chekualin fault. The orange area is the fault dip range of Chishan fault.

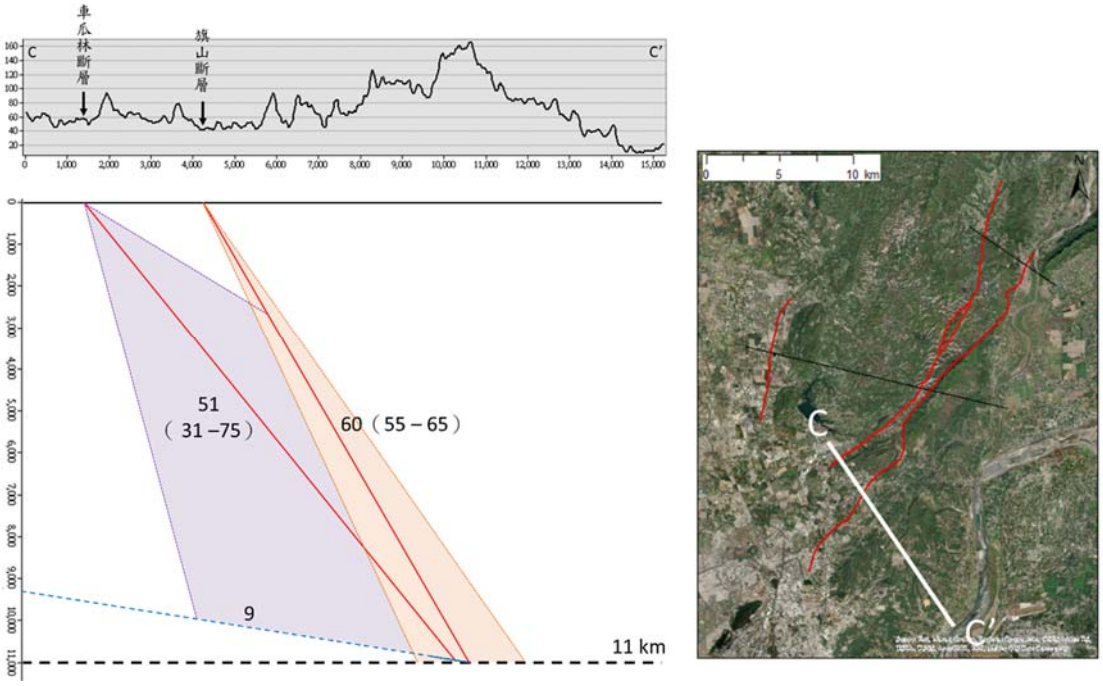
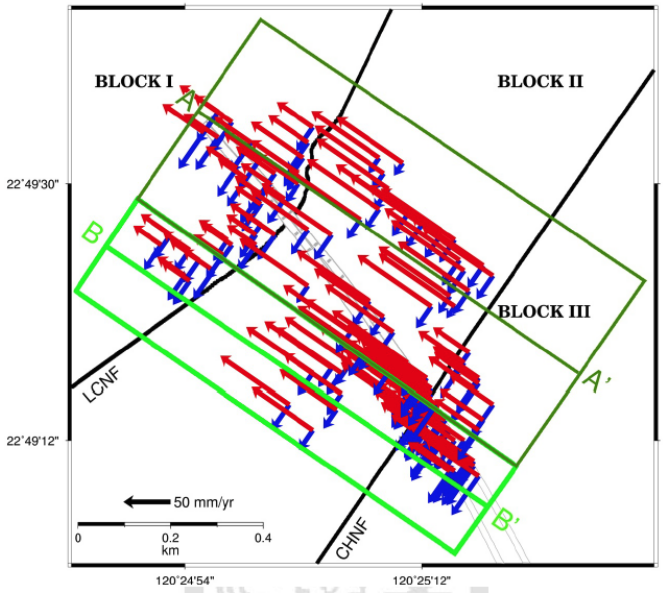


圖 4-1.16：車瓜林斷層 CC'二維剖面。紅線代表車瓜林斷層及旗山斷層，藍線代表滑脫面，車瓜林斷層幾何的範圍如紫色區域所示，旗山斷層幾何的範圍如橘色區域所示。

Figure 4-1.16: Profile CC' of the Chekualin fault. The red lines are Chekualin fault and Chishan fault. The purple area is the fault dip range of Chekualin fault. The orange area is the fault dip range of Chishan fault.

3. 車瓜林斷層滑移速率與活動性

斷層滑移速率目前未有地質資料可供長期滑移速率計算，在短期滑移速率方面，陳勇昇（2015）利用國公局國道 3 號田寮 3 號高架橋及中寮隧道累積 3 年的觀測資料（2011 年 11 月至 2014 年 10 月）進行分析，將該區域分為三個塊體（Block I 至 Block III）進行模擬，兩條剖面線（A-A'與 B-B'）所得到的參數解如圖 4-1.17，該研究認為龍船斷層（本計畫稱車瓜林斷層）可能有潛移活動，A-A'剖面解算得到的間震滑移速率為 1.3 mm/yr，B-B'剖面解算得到的間震滑移速率為 1.2 mm/yr（B-B'剖面）。建議車瓜林斷層的滑移速率採用本報告 5-4 節之滑移虧損速率來進行後續評估。



剖面	A-A'		B-B'	
斷層	LCNF	CHNF	LCNF	CHNF
斷層位置(km)	0.32	0.77	0.34	0.76
斷層傾角(度)	40.73	65.54	31.78	66.06
斷層鎖定深度(km)	0.14	0.28	0.11	0.53
間震滑移速率(mm/yr)	1.3	57.9	1.2	63
參考塊體之垂直斷層速率(mm/yr)	33.74		-26.23	
參考塊體之平行斷層速率(mm/yr)	-31.34		-31.56	
參考塊體之垂直速率(mm/yr)	10.23		26.57	

圖 4-1.17：根據 2011 年 11 月至 2014 年 10 月大地測量資料塊體模擬之成果。上圖為 AA'及 BB'剖面位置，下表為二維斷層模型參數解，LCNF 龍船斷層為本計畫之車瓜林斷層，CHNF 為旗山斷層（陳勇昇，2015）。

Figure 4-1.17: The block model result based on geodetic data from 2011 Nov. to 2014 Oct.. The upper figure shows the location of profile AA' and BB', and the lower table shows the 2-D fault model pareameters. LCNF is Lungchuan fault (that is Chekualin fault in this project), and CHNF is Chishan fault (Chen, 2015).

4-1-3 小崗山斷層

1. 長度與分段破裂事件

Sun（1964）利用航照判讀認為在二仁溪與阿公店溪之間的大小崗山西側存在一呈南北走向線型崖，命名為小崗山斷層。沈淑敏等（2006）發現有 6 段斷續可連成線形的小崖，東高西低，崖高約 5 公尺。根據地調所條帶地質圖（林啟文等，2009），小崗山由高雄縣阿蓮鄉南蓮村向南延伸至燕巢鄉瓊林村，總長約 9 公里，位置如圖 4-1.18。

圖 4-1.19 為地調所五萬分之一旗山地質圖幅之 B-B’剖面，位於小崗山斷層北側，圖中顯示崎頂層（Cil）與古亭坑層（Gt）均向西傾斜，且傾角並無顯著變化，本計畫據此推測小崗山斷層並未往北延伸至此。

林啟文等（2010）經由鑽井調查認為，小崗山斷層可能屬於盲斷層，根據旗山圖幅之 C-C’剖面（圖 4-1.19）（林啟文，2013），小崗山斷層地表呈現撓曲現象，但斷層尖端未出露地表，屬於盲斷層。

陳文山等（2010）根據海階地形分布及上下盤地層分析，認為小崗山斷層可能向南延伸接到右昌斷層，如圖 4-1.18 的紅色虛線，陸域總長度約為 25 公里。本計畫雖未對右昌斷層的活動性進行探討，然而於第六章的發震機率評估中，建議可加入小崗山斷層延伸至右昌斷層的破裂模式進行評估。

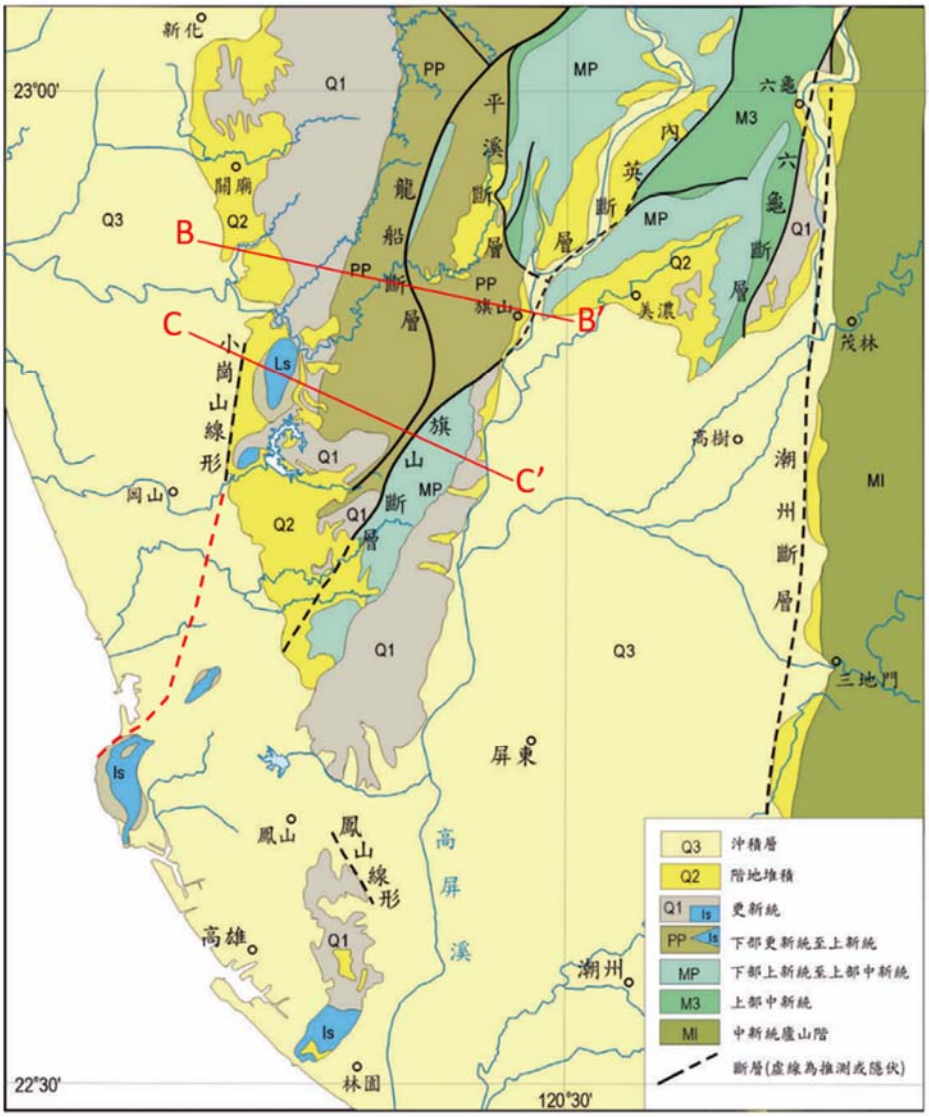


圖 4-1.18：小崗山斷層位置圖（摘自林啟文等，2010）。

Figure 4-1.18: Location of the Hsiaokangshan fault (from 林啟文，2010).

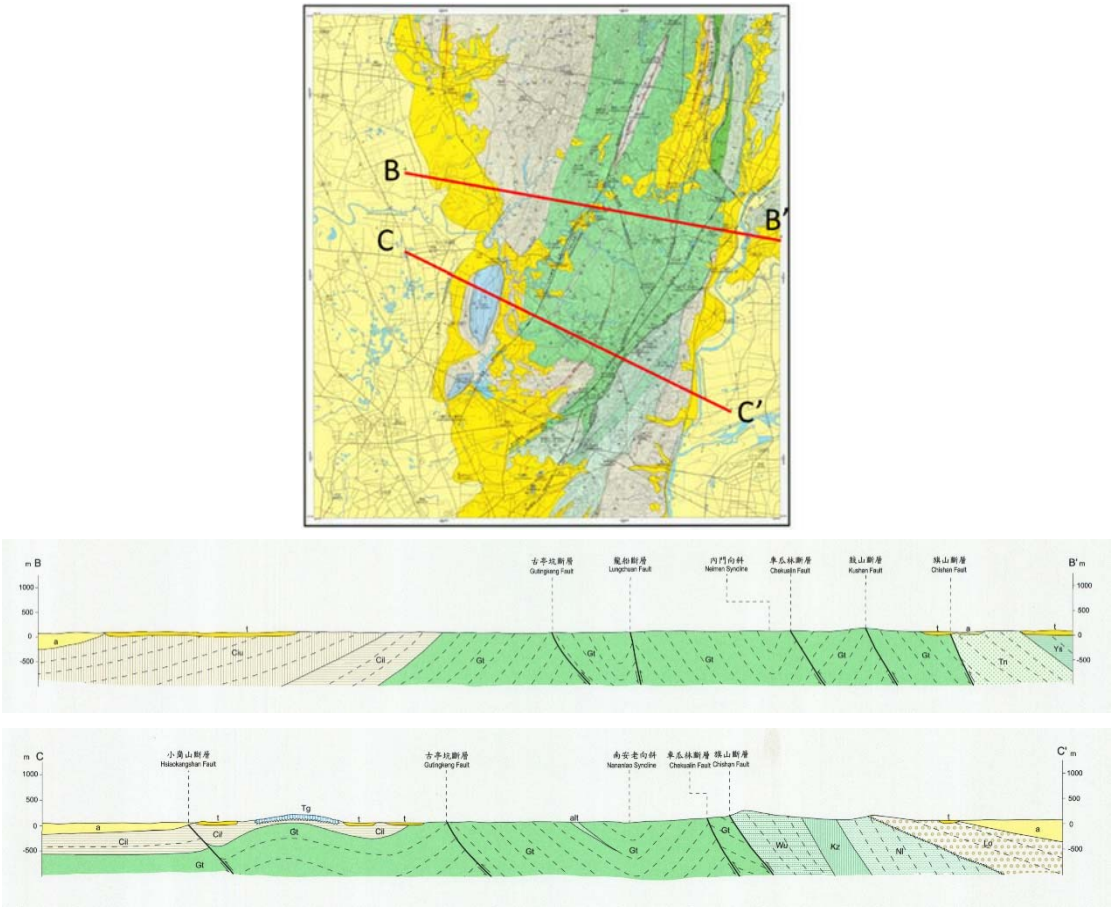


圖 4-1.19：地調所旗山地質圖幅 B-B'地質剖面圖及 C-C'地質剖面圖（摘自林啟文，2013）。

Figure 4-1.19: B-B' and C-C' cross sections from the CGS geological map of the Qishan sheet (from Lin, 2013).

2. 斷層幾何（傾角與深度）

針對小崗山斷層的幾何調查，主要的調查結果與推估敘述如下：

(1) 淺層震測：翁群評（2001）於永安到大小崗山的震測結果及構造解釋，如圖 4-1.20，翁群評（2001）推測小崗山斷層為大崗山背斜下之泥貫入體向上抬升，造成不同地層之間的錯動所形成的。石瑞銓等（2008）於小崗山沿線實施 3 條淺層震測測線，其中於台 19 甲線以西的剖面中（08P-HKS-AL-1）觀察到基盤由東往西漸深，古亭坑泥岩與其西側六雙層之間為一向東約 45°的界面，並認為該界面可能是小崗山斷層的位置。經本計畫檢視，認為淺層震測剖面並無法明確解析斷層面，可能的原因是小崗山斷層位於古亭坑層中，對於震測剖面而言難以判釋古亭坑

層層序，也有可能是小崗山斷層屬於地下盲斷層，僅造成地表沉積層的撓曲。

(2) 鑽井資料：陳文山等（2010）於斷層上盤有四口鑽井，小崗山 1 至 3 號井、山腳下 1 號井（圖 4-1.21）。山腳下 1 號與小崗山 1 號井顯然都位於小崗山斷層上盤，此兩口井都未鑽穿斷層帶，因而無法研判斷層傾角。但是兩口井的古亭坑層具有密集的剪切構造，陳文山等（2010）認為剪切面與層面傾斜角度大致平行，傾角約 50–70°。本計畫認為這是小崗山斷層調查資料中，唯一可以間接推估斷層傾角的方式。

(3) 平衡剖面：圖 4-1.22 為鄭宏祺（2000）的平衡剖面，鄭宏祺（2000）認為大崗山背斜下有一盲斷層發育，深度約 5.5–7.0 公里，約 30–40°向東傾，於 10 公里深左右與滑脫面相連。至於小崗山斷層，鄭宏祺（2000）認為很可能為在大崗山底部受斷層持續擴展，使得大崗山背斜持續抬升所造成地層錯動的現象。鄭宏祺（2000）認為此區域滑脫面，應位在長枝坑層底部或更深。

綜合以上蒐集資料，斷層傾角根據淺層震測、鑽井、平衡剖面可能落於 30–70°度之間（圖 4-1.23、表 4-1.7）。斷層深度部分，從地震深度分布及地球物理速度構造剖面均難以解析小崗山斷層的幾何及破裂深度，僅鄭宏祺（2000）於此區設定滑脫面深度可達 10 公里，若延伸至旗山斷層，則深度約為 12 公里。本計畫建議目前僅能以此作為破裂深度參考，另外可參考跨旗山斷層的相關剖面與旗山斷層幾何之間的關係進行調整。目前資料不足以提供斷層沿線的幾何變化，因此小崗山斷層幾何並未有沿走向的變化。

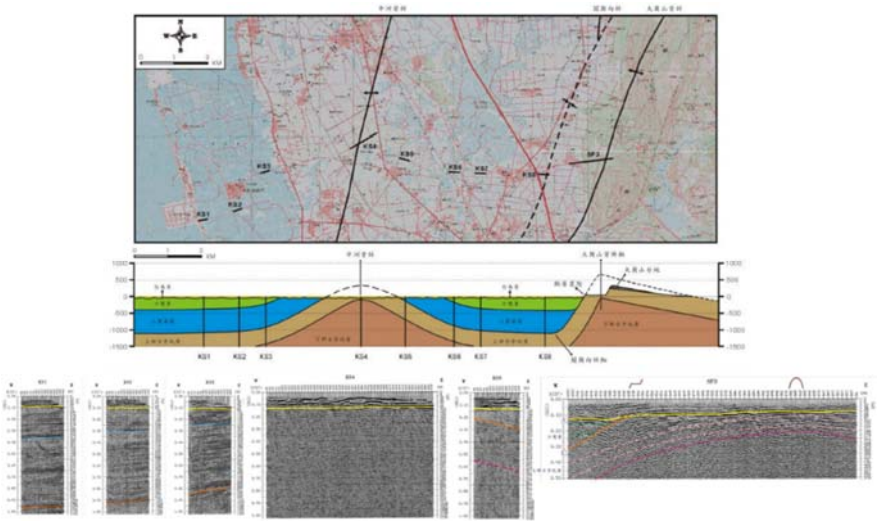


圖 4-1.20：永安到小崗山斷層帶之震測剖面及地下構造示意（摘自翁群評，2001）。

Figure 4-1.20: Seismic profiles located from Yongan to the Hsiaokangshan fault zone and the schematic diagram of subsurface structure (from Weng, 2001).

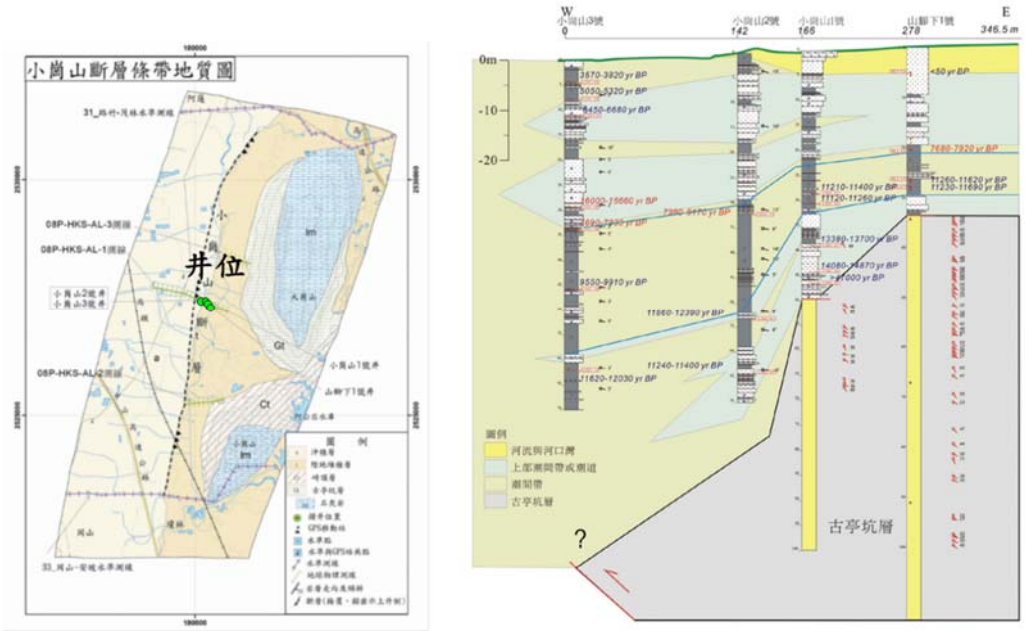


圖 4-1.21：小崗山斷層鑽井柵狀剖面、地層對比與沉積環境（陳文山等，2010）。

Figure 4-1.21: A cross-section of shallow borehole transects illustrates a sequence of tidal flat, estuarine, and fluvial deposits folded across the Hsiaokangshan fault zone (from Chen et al., 2010).

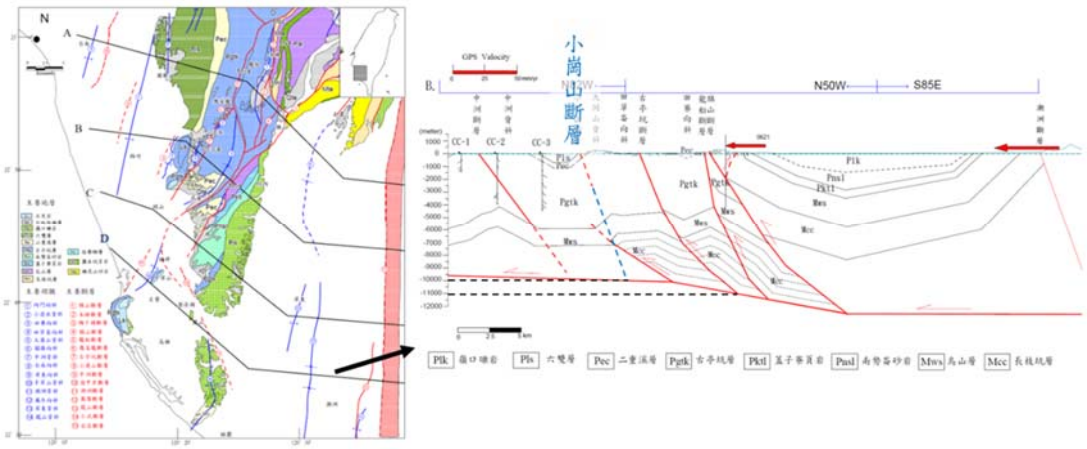


圖 4-1.22：跨小崗山斷層、旗山斷層平衡剖面（鄭宏祺，2000）。

Figure 4-1.22: Balanced cross section which crosses the Hsiaokangshan fault and the Chishan fault (Cheng, 2000).

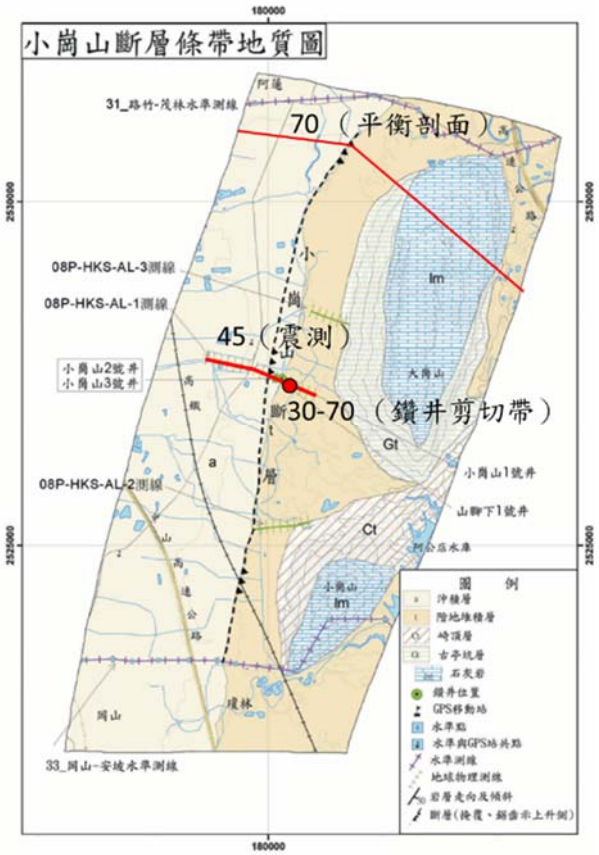


圖 4-1.23：小崗山斷層幾何調查資料分布圖（修改自林啟文等，2009）。

Figure 4-1.23: Distribution map of the survey data for geometry of the Hsiaokangshan fault. Modified from Lin et al. (2009).

表 4-1.7：小崗山斷層傾角參數與文獻彙整。

Table 4-1.7: Parameters and references of dip angle of the Hsiaokangshan fault.

參考文獻	方法	傾角	採納數據	統計
石瑞銓等（2008）	淺層震測剖面	約 45°	45°	範圍 30–70 平均值 46
陳文山等（2010）	古亭坑層剪切帶	30–70°剪切帶 平均值 46.8° 標準差 16.1°	46.8°	
鄭宏祺（2000）	平衡剖面	約 70°向東	不採用	

表 4-1.8：小崗山斷層破裂深度參數與文獻彙整。

Table 4-1.8: Parameter and reference of rupture depth of the Hsiaokangshan fault.

參考文獻	方法	滑脫面深度	採納數據
鄭宏祺（2000）	平衡剖面	10 公里	10 公里

3. 小崗山斷層滑移速率與活動性

(1) 鑽井：根據陳文山等（2012）鑽井資料，山腳下 1 號井平均抬升速率為 4.4 ±0.6 mm/yr；小崗山 1 號井平均抬升速率為 4.1±0.6 mm/yr；小崗山 2 號井平均抬升速率為 1.4±0.6 mm/yr；小崗山 3 號井平均抬升速率為 1.1±0.5 mm/yr。因四口井均位於斷層變形帶上，不確定是位於小崗山斷層的上盤或下盤，顏銀桐等（2020）假設均位於斷層上盤，得到抬升速率為 1.1–4.4 mm/yr，換算至斷層傾角上可得到滑移速率 1.6–6.2 mm/yr。

(2) 階地推估：臺灣地震模型（Shyu et al., 2020）根據小崗山斷層上盤珊瑚礁年代與階地錯動量估算得到斷層滑移速率為 0.8–7.9 mm/yr。

根據鑽井、階地資料，小崗山斷層長期滑移速率分布及數值彙整如圖 4-1.24、表 4-1.9。根據山腳下 1 號井岩芯定年結果，地表沖積層年代不老於 1.1 萬年，若地表地形撓曲與斷層活動有關，則小崗山斷層於全新世以來可能有活動。然而，未來仍需釐清小崗山背斜是否與泥貫入機制有關。

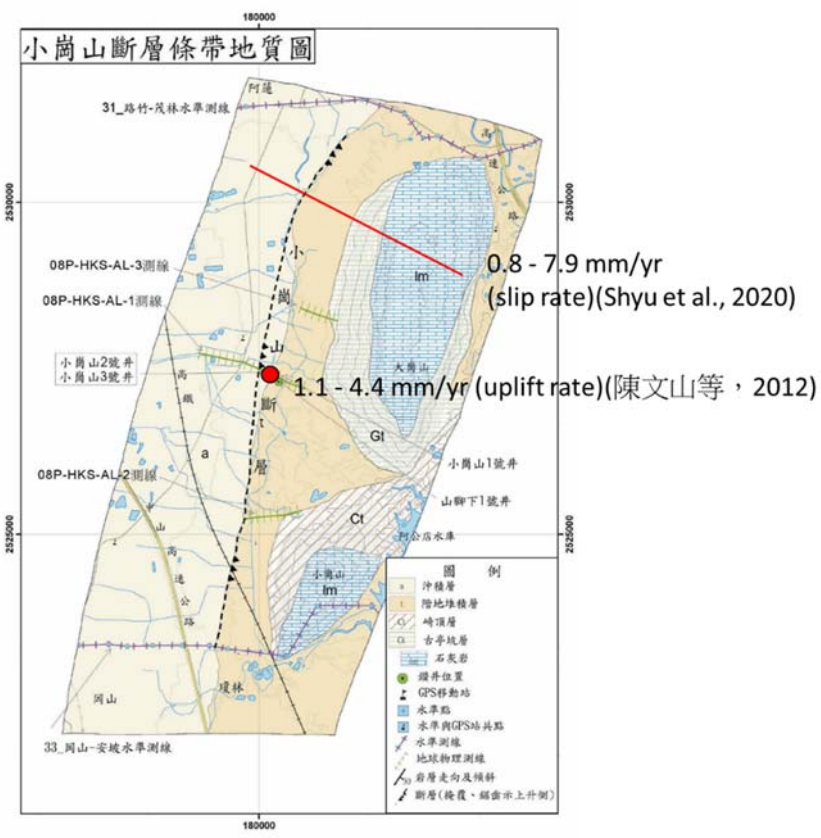


圖 4-1.24：小崗山斷層滑移速率調查資料分布圖（修改自林啟文等，2009）。

Figure 4-1.24: Distribution map of the survey data for slip rate of the Hsiaokangshan fault. Modified from Lin et al. (2009).

表 4-1.9：小崗山斷層滑移速率參數與文獻彙整。

Table 4-1.9: Parameters and references of slip rate of the Hsiaokangshan fault.

參考文獻	方法	滑移速率
陳文山等（2012）	鑽井資料樣本及定年計算抬升速率	1.1–4.4 mm/yr（Uplift rate）
Shyu et al.（2020）	階地年代推估	0.8–7.9（Slip rate）

4-1-4 其他主要斷層

1. 潮州斷層

在「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫中，潮州斷層可分為四段，由北至南分別為土壟灣斷層段(長度 16 公里)、北段(長度 44 公里)、南段(長度 30 公里)、南段延伸(長度 16 公里)。土壟灣斷層段與北段的分段點位於

六龜；北段與南段的分段點位於平頂山之南；南段與南段延伸的分段點位於加祿村（地調所潮州斷層條帶地質圖之最南側）（林啟文等，2009）（圖 4-1.25）。

從蒐集到的地質剖面，顯示潮州斷層約 60–70°，例如陳文山等（2011、2012）地質剖面，潮州斷層傾角為 60°，Wiltschko et al.（2010）剖面則顯示潮州斷層傾角為 65°。另外，Cheng et al.（2012）之地震深度分布剖面，剖面圖顯示在潮州斷層（CF）下方均有叢集地震，推估潮州斷層應為高角度斷層，孕震深度可達 20 公里。陳文山等（2019）利用震波層析成像構造、震源機制、地震分佈解析臺灣南部地質構造，其中 Vs 擾動（Perturbation）的震波層析成像中可看到以潮州斷層為界，東側呈現較高的 Vs 值，西側呈現較低的 Vs 值。本計畫根據該研究判釋的斷層線簡單推估潮州斷層地下幾何形貌，其深度約 10~12 公里深，傾角約 55~75 度；北邊剖面 1~3 中潮州斷層深度約 10 公里，傾角 55~60 度；南邊剖面 4~6 中潮州斷層深度 12 公里，傾角 70~75 度；剖面 7~12 的潮州斷層已超過陸域範圍，本計畫不納入考量（圖 4-1.26）。潮州斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 4-1.10，各調查之空間分布詳如圖 4-1.27。潮州斷層傾角根據震測資料、平衡剖面、地球物理資料範圍為 55-80 度。斷層深度主要參考地球物理資料為 10–20 公里。

長期滑移速率根據臺灣地震模型（Shyu et al., 2020）利用階地錯移量及推估之年代得到斷層滑移速率為 0.4–2.3 mm/yr，該研究調查地點如圖 4-1.28。

潮州斷層南段的新埤附近，斷層在近地表處造成沖積扇礫石層的撓曲，板岩逆衝於礫石層之上，研判潮州斷層在更新世晚期可能有活動，屬於第二類活動斷層。與潮州斷層平行的副斷層經過更新世的紅土階地及全新世尚未紅土化的沖積河階（Bonilla, 1975），若副斷層與主斷層同時破裂，則主斷層於全新世以來可能曾經活動。



圖 4-1.25：潮州斷層條帶地質圖與分段（修改自林啟文等，2009）。

Figure 4-1.25: Strip geological map of the Chaochou fault and locations of the fault segmentation. Modified from Lin et al. (2009).

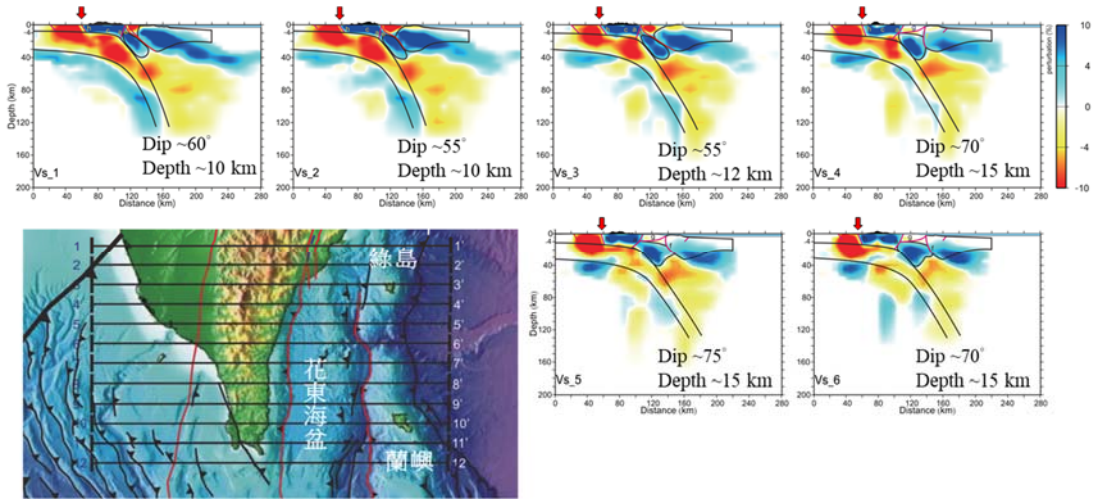


圖 4-1.26：Vs 擾動（Perturbation）震波層析成像（修改自陳文山等，2019）。潮州斷層位置如紅色箭頭所示，斷層傾角及深度標註於各剖面圖中。

Figure 4-1.26: Shear-wave velocity perturbation from Chen et al. (2019). The location of Chaochou fault is shown at red arrow, and the fault dip and the fault depth are shown in each section.

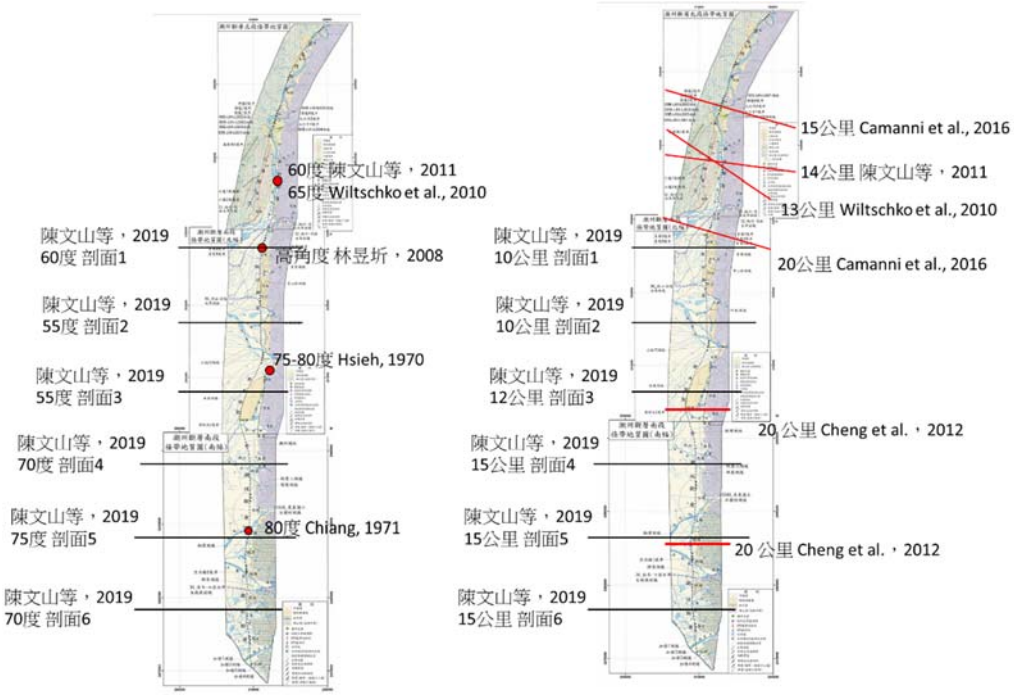


圖 4-1.27：潮州斷層傾角（左圖）及斷層深度（右圖）調查資料分布圖（修改自林啟文等，2009）。

Figure 4-1.27: Distribution map of the survey data for dip (left picture) and rupture depth (right picture) of the Chaochou fault. Modeified from Lin et al. (2009).

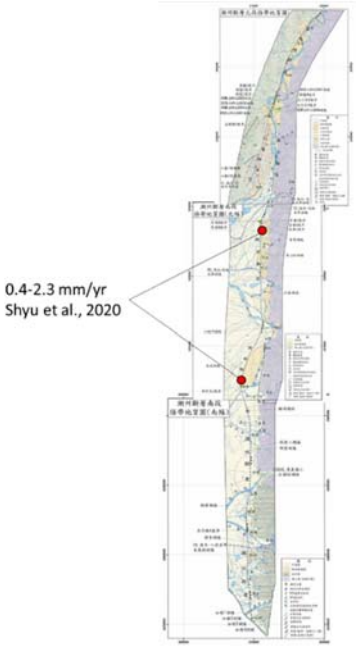


圖 4-1.28：潮州斷層滑移速率調查資料分布圖（修改自林啟文等，2009）。

Figure 4-1.28: Distribution map of the survey data for slip rate of the Chaochou fault. Modeified from Lin et al. (2009).

表 4-1.10：潮州斷層幾何參數與文獻彙整。

Table 4-1.10: Parameters and references of geometry of the Chaochou fault.

參考文獻	調查方法	傾角	深度
謝世雄（Hsieh, 1970）	重力資料	東傾 75–80°	-
Chiang（1971）	震測與鑽井剖面	50°	-
林昱圻（2008）	淺層震測資料	高角度	-
Wiltschko et al.（2010）	構造地質剖面	深度 0–9 km，65° 深度 9–13 km，30°	13 km
陳文山等（2011）	構造地質剖面	深度 0–14 km，62°	14 km
Cheng et al.（2012）	地震深度分布剖面	-	孕震帶約 15–20 公里
Camanni et al.（2016）	速度構造及地震分布	-	孕震帶約 15–20 公里
陳文山等（2019）	震波層析成像速度構造	本計畫估算傾角約 55~75 度	本計畫估算深度約 10–12 公里

2. 恆春斷層

恆春斷層陸域部份為 16 公里，由屏東縣車城鄉海口向南延伸至恆春鎮南灣（林啟文等，2009），往北延伸部分，根據陳文山等（2014）於楓港地區發現全新世隆起珊瑚礁，認為恆春斷層往北可延伸至楓港造成珊瑚礁的抬升，北段出海後延伸長度為 12 公里。南段外海延伸部分，中興公司（2012）利用多音束海底地形進行判釋，恆春斷層於南灣外海仍有一明顯地形崖至北緯 21°5’附近，且為一東西向水道所分隔，此延伸之線型長度可達 23 公里。本計畫恆春斷層分段點及長度如圖 4-1.29 所示。

根據跨恆春半島地體構造剖面（圖 4-1.30），恆春半島是位於隱沒帶板塊之間的增積岩體，由一系列向西的逆衝斷層構成，其中恆春斷層為中新統與更新統的分界（陳文山等，2005）。圖 4-1.31 為跨恆春半島震測剖面（Lin et al., 2009），從震測剖面圖中推估增積岩體上發育的逆斷層向下止於隱沒板塊頂部，而位於恆春半島的恆春斷層應是一高角度斷層。McIntosh et al.（2013）描繪臺灣南部恆春半島之地震活動分布及速度構造剖面（圖 4-1.32），顯示恆春半島之地震深度約在 15 公里，然而根據其描繪隱沒板塊上部（圖 4-1.32 黑色虛線）深度，於恆春半島處則可達到 25 公里。

恆春斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於圖 4-1.33 及表 4-1.10。本計畫認為恆春斷層幾何可考慮地震深度分布，也需考慮與隱沒帶板塊幾何的關係，參考 SSHAC Level 3 計畫，將臺灣南部斷層設定綁定三種幾何情形（圖 4-1.34），其中恆春斷層之傾角設定分別為向東傾 60/75/75 度，斷層深度皆延伸至馬尼拉隱沒帶板塊界面。恆春斷層三個幾何情形分別為：Case 1 深度 0–15 km，傾角 60°；Case 2 深度 0–20 km，傾角 75°；Case 3 深度 0–25 km，傾角 75°。

恆春斷層滑移速率，各調查方法及斷層參數彙整於圖 4-1.35 及表 4-1.11。

恆春斷層的抬升速率根據階地、鑽井資料範圍為 1.5–6.9 mm/yr，根據顏銀桐等（2020）以斷層傾角（60°，75°）及滑移角（50–70°）換算至斷層面上之淨滑移速率範圍為 1.7–10.4 mm/yr。恆春斷層截切晚期更新世的石灰岩層，列第二類

活動斷層（林啟文等，2009）；東恆春斷層最近一次活動時間以海口珊瑚礁定年分析，為距今 4,450–4,310 年（陳文山等，2006）。

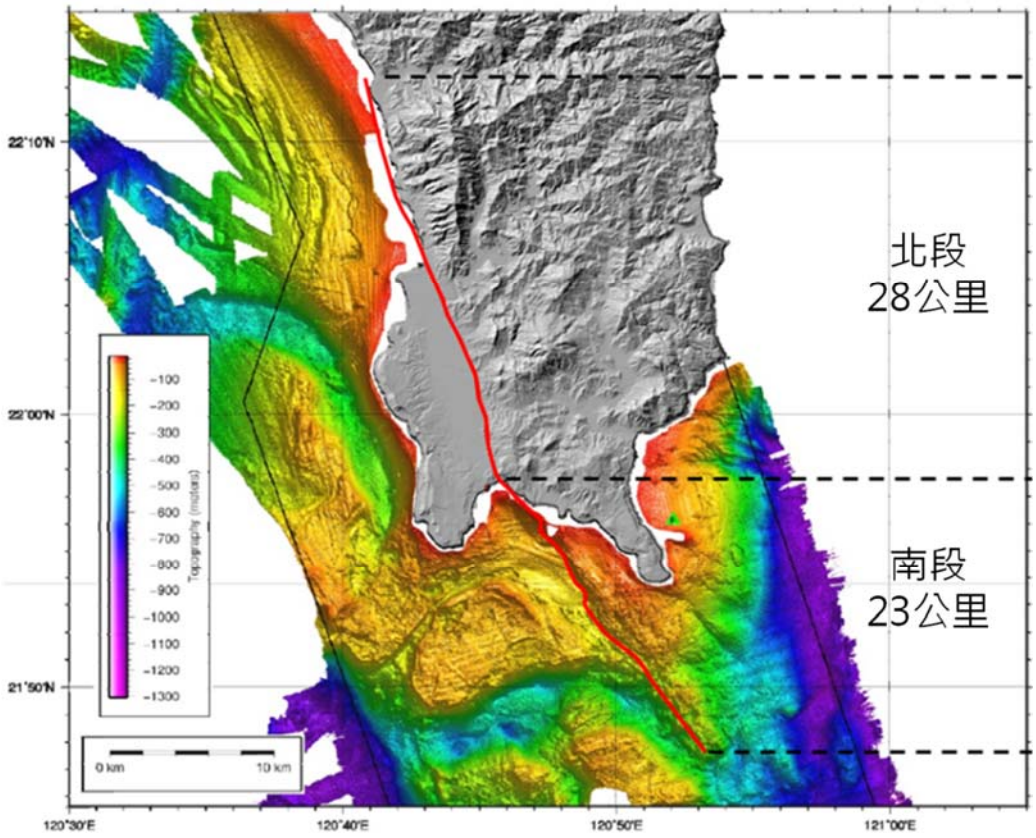


圖 4-1.29：恆春斷層分段破裂模式。海底地形取自中興公司（2012）。

Figure 4-1.29: Fault segmentation of the Hengchun fault. The offshore bathymetry is from Sinotech (2012).

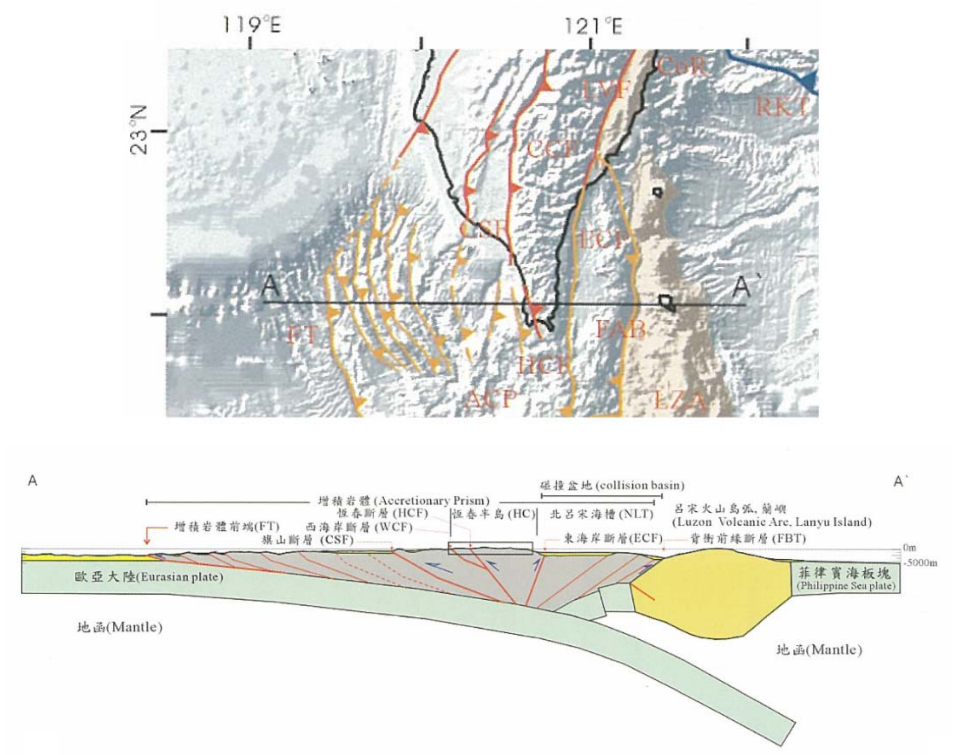


圖 4-1.30：台灣南部跨過恆春半島-蘭嶼之地體構造剖面。上圖為海陸域地形及構造分布圖，其中 ACP 為增積岩體，HCF 為恆春斷層。下圖為 A-A' 地體構造剖面（陳文山等，2005）。

Figure 4-1.30: Schematic geological cross-section across the Hengchun Peninsula-Lanyu Island (陳文山等，2005).

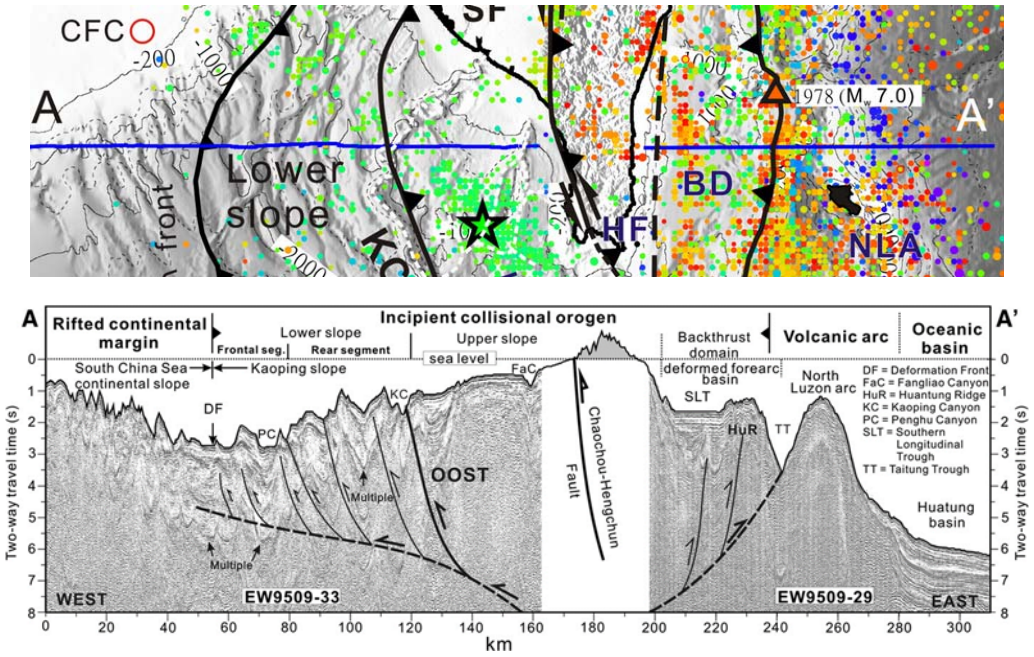


圖 4-1.31：台灣南部跨恆春半島 A-A'震測剖面圖（Lin et al., 2009）。

Figure 4-1.31: Seismic sections with interpretations to the east and to the west of the Hengchun Peninsula (Lin et al., 2009).

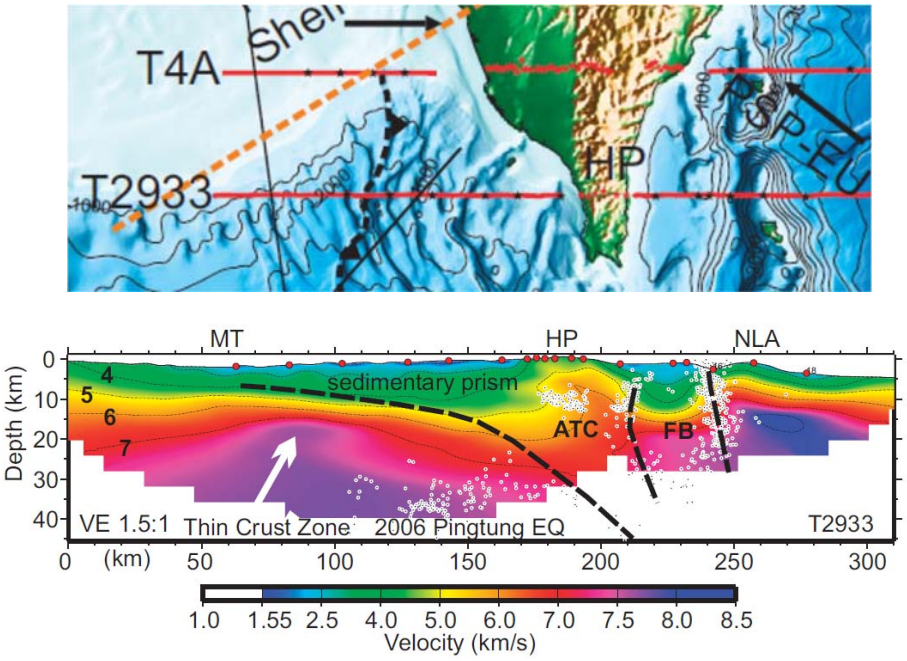


圖 4-1.32：台灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。上圖為 T2933 速度構造剖面分布圖；下圖為 T2933 速度構造及重定位地震剖面（McIntosh et al., 2013）。

Figure 4-1.32: T2933 tomographic models with relocated seismicity across southern Taiwan (McIntosh et al., 2013).

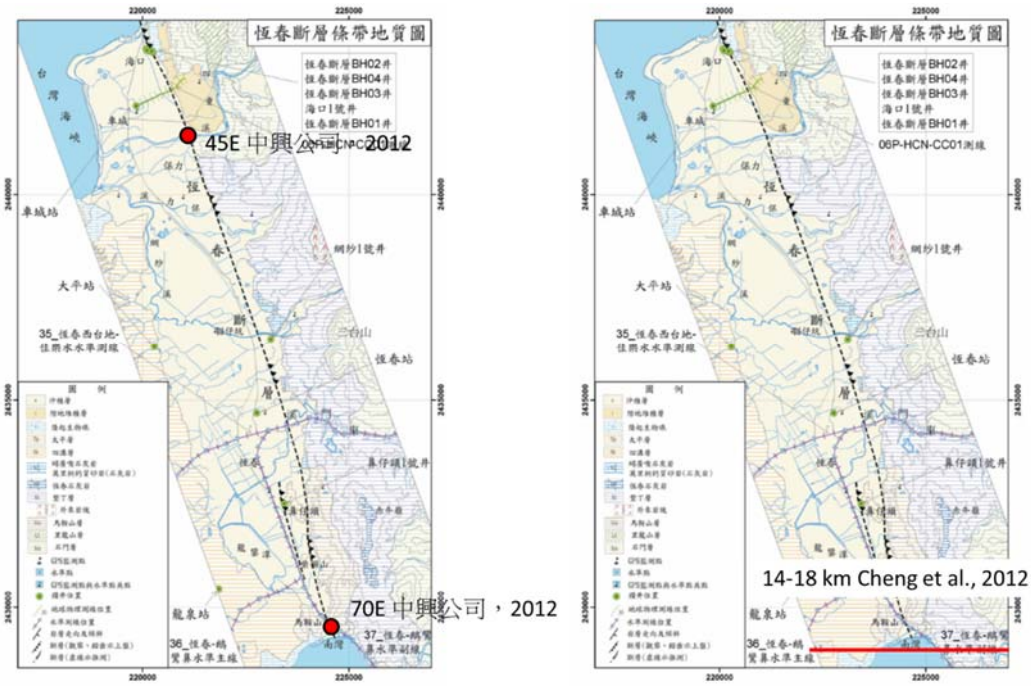


圖 4-1.33：恒春斷層傾角（左圖）及破裂深度（右圖）調查資料分布圖，修改自林啟文等（2009）。

Figure 4-1.33: Distribution map of the survey data for dip (left picture) and rupture depth (right picture) of Hengchun fault. Modified from Lin et al. (2009).

表 4-1.11：恆春斷層幾何形貌相關文獻。

Table 4-1.11: Parameters and references of geometry of the Hengchun fault.

文獻	方法	傾角	深度
詹新甫（1974）	斷層兩側之岩層與地形	向東傾 70 度	-
張若磐（1993）	重力、線性逆推	向東傾高角度	-
李奕亨（2001）	鼻仔頭地區淺層反射震測	高角度	-
Vita-Finzi and Lin（2005）	參考地調所地質圖	向東傾 70 度	-
中興公司（2012）	地質鑽探剖面	西恆春斷層 45 度 南灣地區 70 度	-
李珀儂（2008）； 中興公司（2012）	海域震測剖面	高角度	-
Cheng et al.（2012）	P 波速度構造剖面及附近地震群深度分布	-	孕震深度 14–18 公里
Lin et al.（2009）	恆春半島震測剖面	高角度斷層	-
McIntosh et al.（2013）	地震活動分布及速度構造剖面	-	地震深度約 15 公里，隱沒板塊上部深度達 25 公里

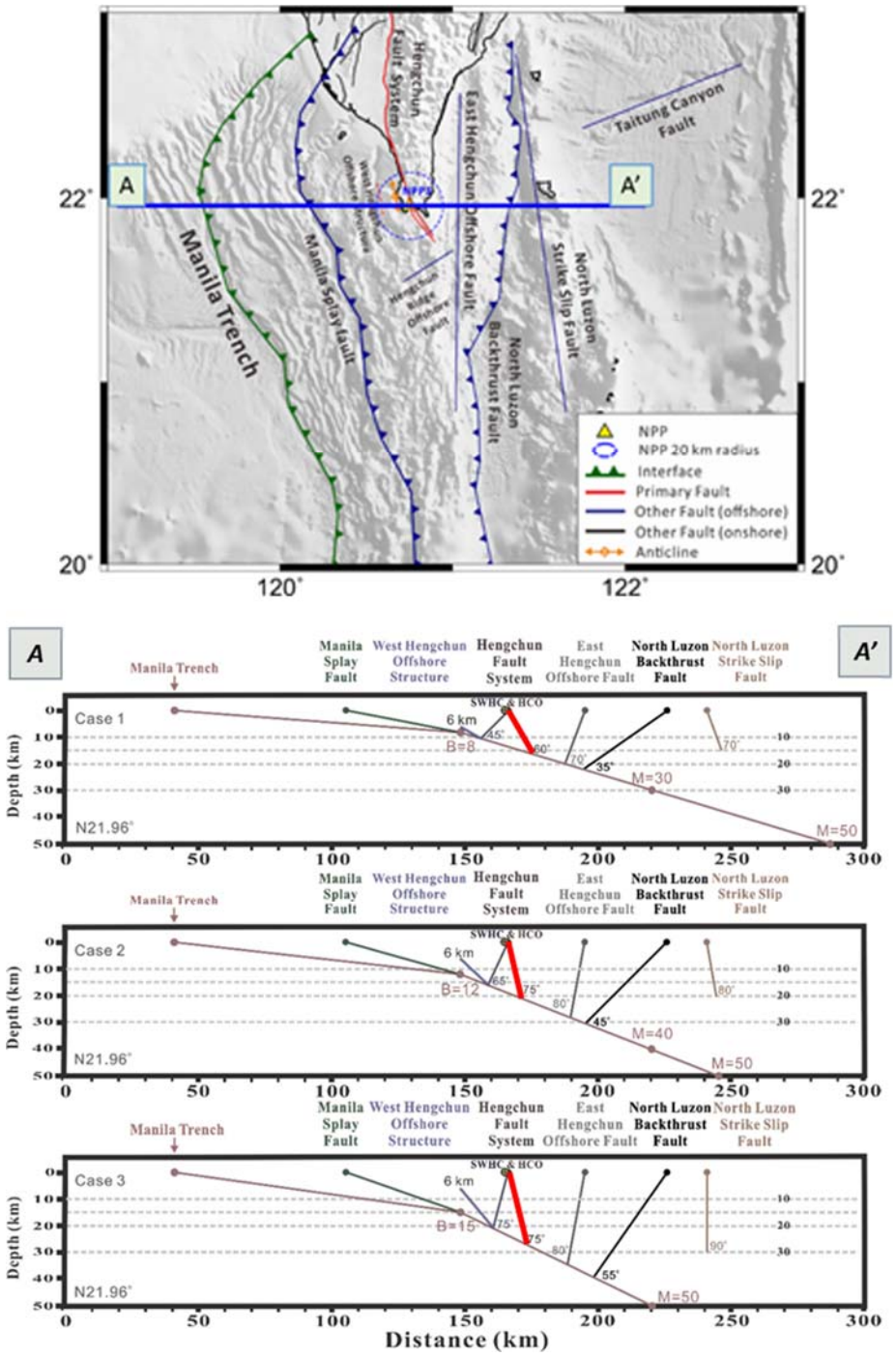


圖 4-1.34：南部斷層幾何形貌設定。上圖為臺灣南部活動斷層分布圖，下圖為臺灣南部活動斷層 AA’ 剖面之幾何形貌，其中 HCO 即恆春斷層，修改自黃世建（2018）。

Figure 4-1.34: Fault geometry setting of the fault system in southern Taiwan. The upper figure is fault distribution map in southern Taiwan. The lower figure is the profile showing the fault geometry across AA’ line. Modified from Huang (2018).

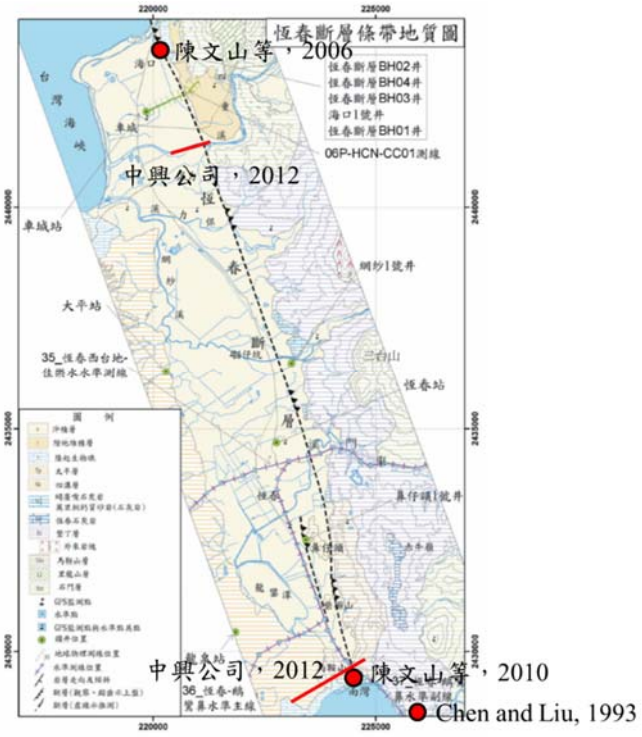


圖 4-1.35：恆春斷層滑移速率調查資料分布圖。修改自林啟文等（2009）。

Figure 4-1.35: Distribution map of the survey data for slip rate of the Hengchun fault. Modified from Lin et al. (2009).

表 4-1.12：恆春斷層長期滑移速率相關文獻。

Table 4-1.12: Parameters and references of slip rate of the Hengchun fault

參考文獻	方法	垂直抬升速率(mm/yr)
Chen and Liu（1993）	海階定年，主要為珊瑚礁 ^{14}C 定年	5.3–6.3(海口)
		6.1–6.9(石牛橋)
		3.4–3.8(潭仔灣)
		3.8–4.3(墾丁)
陳文山等（2006）	鑽井及珊瑚礁 ^{14}C 定年計算抬升率	5.9±0.1(海口)
陳文山等（2010）	階地珊瑚礁定年，與恆春谷地鑽探剖面對比	4.2±0.2(墾管處)
中興公司（2012）	四重溪鑽探剖面對比	~1 (西恆春斷層)
	南灣鑽探剖面對比	0.3 (下盤)
		1.5 (上盤)
陳文山等（2014）	隆起珊瑚礁海階年代及抬升量	3.4±0.4 (楓港地區)
		4.2±1.3 (海口地區)
		5.7±1.2 (南灣地區)

4-2 二維斷層模型與最佳斷層幾何參數推求

如 4-1 節所彙整之相關斷層資料與文獻，一般而言，為了瞭解活動斷層之幾何型態，主要會透過野外露頭、鑽井資料、震測資料等斷層型態相關之地質證據或地球物理資料進行分析，而本計畫所加入之水平與垂直速度場雖然亦可反映斷層錯動造成之地表變形，但相較於前述之地質與地球物理調查成果，測地資料無法直接透過觀測結果推估獲得斷層幾何，因此必須透過斷層模型來協助模擬可能之斷層幾何型態。本節將詳細說明本計畫如何透過二維模型推求南部地區重要斷層之最佳幾何參數。

4-2-1 速度剖面分析

首先，為了分析南部地區斷層活動之行為，本計畫針對以 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震為劃分之南部地區 3 個時期之地表速度場，進行速度剖面之切分與分析。而由於本年度主要之分析目標為小崗山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層，為了更完整地解析車瓜林與旗山斷層之斷層型態與斷層幾何，又由於 2010 年甲仙地震後至 2016 美濃地震前，國道 3 號田寮 3 號高架橋及中寮隧道附近有密集的觀測資料，故本計畫採用此期間之速度場，並依 4-1 節之分析與建議之分段點，將此區域切分為 A–A’至 D–D’四個剖面（圖 4-2.1），並將各剖面之地表水平速度場拆解為平行斷層與垂直斷層分量以利後續二維模型進行模擬與分析。首先，若僅就各剖面觀察其速度場，在小崗山斷層區域，由 A–A’剖面可看到，於垂直斷層之分量上約有 5 至 10 mm/yr 的速度增加量，在平行斷層的分量上，約為 1 至 3 mm/yr 左右的速度差異量，而垂直分量上來看，跨斷層處之速度變化則較不顯著，僅可看出斷層以東主要以抬升為主（圖 4-2.3）。接著，車瓜林與旗山斷層部分則分為南、中、北三段，其中，於南段速度剖面 B–B’中，不論於垂直或平行斷層之分量上，可發現速度差異量較顯著處皆為跨車瓜林斷層處，其速度差約 5 至 10 mm/yr；而垂直分量上來看，跨斷層處則僅約 1 至 2 mm/yr 之差異；跨旗山斷層處較無明顯差異（圖 4-2.4）。中段之 C–C’剖面部分，由於加入中寮隧

道處之加密 GNSS 觀測資料，因此可清楚地看到，跨車瓜林斷層後至旗山斷層間速度變化急遽，水平速度場部分以垂直斷層分量較為顯著，其於跨車瓜林斷層處速度增加了約 40 mm/yr；旗山斷層後則快速減少約 50 至 60 mm/yr；垂直速度部分之變化則更大，其跨車瓜林斷層之差異量約 60 mm/yr；跨旗山斷層後速度差更高達 80 mm/yr（圖 4-2.5）。而北段之 D–D’剖面部分，由於水平速度資料較少，於垂直斷層之分量上僅跨旗山斷層處約有 5 至 10 mm/yr 的速度增加量，在平行斷層分量上的速度差異量，則亦為 5 mm/yr 左右，而垂直分量上來看，跨車瓜林及旗山斷層 2 處之速度變化較同樣皆約 5 mm/yr（圖 4-2.6）。

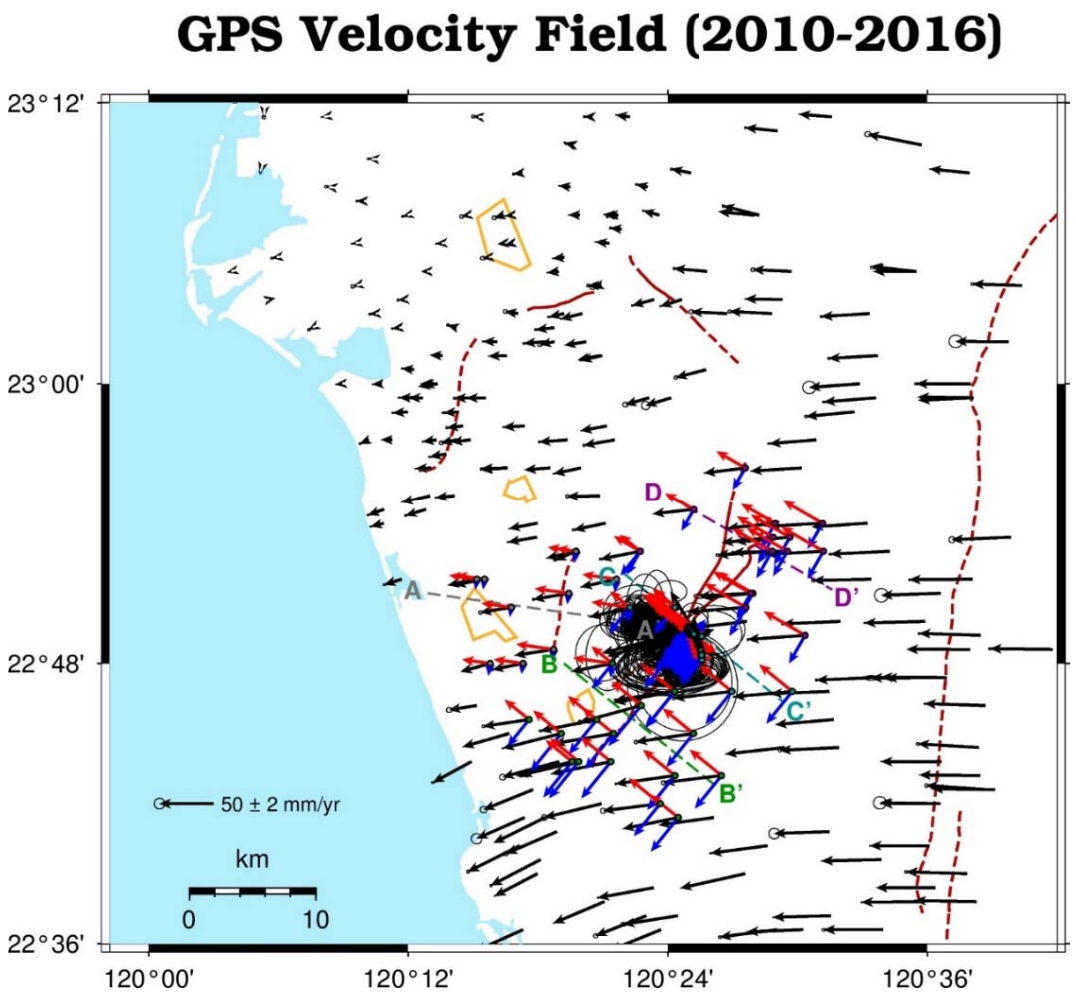


圖 4-2.1：本計畫所分析之 A 至 D 速度剖面分布圖。

Figure 4-2.1: Velocity profiles A to D.

4-2-2 二維斷層模型原理與假設

二維斷層模型之建構主要依循 Matsu'ura et al.（1986）所提出的概念，此模型將斷層分為深部（下部韌性區）及淺部（上部脆性區）兩部分，並假設斷層深部及淺部之區段分別為潛移（creeping）與鎖定（locked）。亦即斷層深部之塊體則可持續運動，同時緩慢釋放能量；斷層淺部因摩擦力之作用，致使塊體間無法產生錯動而將應力累積於斷層中。此外，斷層面上能量之釋放是透過滑移速率進行描述，包含短期滑移速率、長期滑移速率及滑移虧損速率。其中，短期滑移速率是根據大地測量資料所獲得之震間期地表變形所推估而得之斷層滑移速率，又稱震間滑移速率；長期滑移速率是藉由地質相關證據所觀察而得之地表變形所推估而得之斷層滑移速率，時間尺度為數千年以上；而滑移虧損速率則是斷層面上因摩擦力作用產生之能量減損所產生之虧損速率，需由大地測量資料推求。此外，三者間之關係為：震間期之斷層滑移速率為長期斷層滑移速率（long-term slip rate）及斷層滑移虧損速率（slip deficit rate）之和。

為使斷層幾何參數之推估更加容易，本計畫首先針對二維模型進行假設如下（圖 4-2.2）：（1）斷層系統是由數個分支斷層（branched fault）所組成，其底部由同一個滑脫面連接在一起，這些分支斷層即為活動斷層；（2）相異分支斷層間除了底部由滑脫面連接外，不得相互交錯；（3）斷層系統中，後端之分支斷層深度不得大於前端之分支斷層，亦即越往斷層系統末端，其分支斷層之底部深度越淺；（4）滑脫面之總滑移速率則為後端各分支斷層上斷層滑移速率之總和，如圖 4-2.2 中，S1 至 S6 為斷層面滑速率，其中 S6 = S5，S3= S4 + S5，S1= S2 + S3；（5）根據二維斷層模型之理論，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，故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底部深度。根據以上假設，並給定斷層幾何型貌與斷層滑移量後，便可透過 Okada（1985）所提供之方程式，求得地表之位移速率。

後續本計畫再利用馬可夫鏈蒙地卡羅（Markov chain Monte Carlo，MCMC）方法，藉由給定之斷層滑移量及斷層幾何參數，正演地表位移量。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 **Gs** = **d** 來表示。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。

$$F(s, \beta) = \| \Sigma^{-\frac{1}{2}} \ (Gs - d) \ \|^2 \qquad （式 4-2.1）$$

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），本計畫根據「斷層活動性觀測研究第四階段」計畫工作以及近期相關文獻與研究，進行探討與分析後所獲得之斷層幾何參數參考值作為起始約制條件，相關內容於下一節中描述。

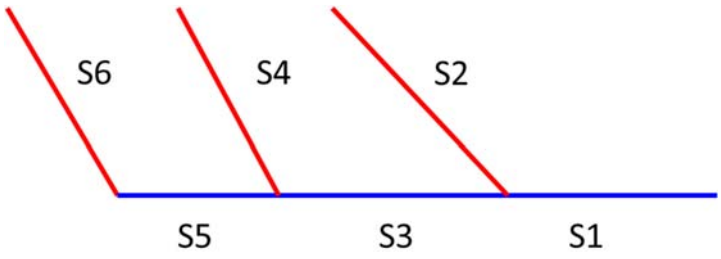


圖 4-2.2：二維斷層模型示意圖。紅色線段為斷層系統中各分支斷層；藍色線為底部滑脫面；S1 至 S6 為斷層面滑移速率。

Figure4-2.2: Assumption of 2D elastic fault model.

4-2-3 最佳斷層參數搜尋

本計畫在進行斷層參數反演測試時，先以 4-1 節所彙整各斷層之走向、傾角、深度範圍進行初步設定，以限縮範圍並快速進行擬合。本團隊於擬合測試時，首先同時匯入水平與垂直速度場進行擬合，然而初步結果除了 C–C'剖面外，其餘剖面皆難以同時擬合三方向之速度場，可能原因為垂直方向的觀測資料還受到泥體變形之因素影響。因此本年度之二維模型中，本團隊以 opening-mode dislocation

針對泥體變形等可能產生垂直地表變形之構造進行模擬。為了完整擬合三方向速度場，本團隊進行擬合工作時，首先以水平速度場方向為主，待平行斷層及垂直斷層方向之速度分量趨勢以斷層活動所可能產生之地表變形大致擬合完成後，再以 opening-mode dislocation 針對垂直速度場中無法單純以斷層活動型態模擬之部分進行擬合。以 A－A’ 剖面之速度場擬合模擬為例，本團隊首先以同時擬合三維速度場為主要目標，卻發現水平速度場與垂直速度場難以同時擬合，且整體趨勢易受垂直速度場影響。因此，本團隊先將可能非斷層活動造成之西側垂直速度場移除，再針對平行斷層及垂直斷層方向之速度分量進行擬合（圖 4-2.3）。隨後，以該模擬所蒐尋到的最佳幾何參數作為約制，將原先移除之西側垂直速度場放回擬合，確認斷層東西兩側之速度場抬升，無法單純以斷層活動之形式進行擬合（圖 4-2.4），因此，本團隊最終在斷層西側約 4.5 公里處以西及東側 2 公里以東，分別放置一個約 6 公里及 3.5 公里長的泥體構造，成功擬合該區域之地表變形（圖 4-2.5）。

其中，透過 opening-mode dislocation 模擬之泥體變形時，其活動所產生之變形方式除了影響主要之垂直向變形外，對於水平變形部分亦有少量影響，以前述 A–A’剖面之速度場擬合之例子而言，若過程中本團隊未加強斷層幾何參數之約制強度，則於加入泥體變形構造後，原始搜尋而得知斷層幾何參數便會隨之改變進而使得水平向之擬合精度下降，故使用 opening-mode dislocation 進行擬合時，須依據測試成果進行參數搜尋範圍與約制強度之調整，以確保更精確之擬合成果，並獲得較可靠之幾何參數。根據前述模型原理與方法，本團隊完成 A–A’至 D－D’速度剖面之擬合成果如圖 4-2.5 至圖 4-2.8，並獲得之最佳斷層參數如表 4-2.1。

其中，由各剖面之擬合成果與表 4-2.1，小崗山斷層可能為傾角約 42.5˚向東傾、斷層深度約 9 km，具右移分量之逆斷層；旗山斷層及車瓜林斷層則分為北、中、南三段，北段部分，兩斷層於近地表處皆為高傾角斷層，並於深度 5 km 左右轉為角度極緩之帶右移分量之逆斷層；而中段即為鄰近中寮隧道部分，此段之

旗山斷層型態呈傾角約 63.2°之東傾正斷層，車瓜林斷層則仍為傾角約 61.4°之東傾逆斷層，兩者底部深度約 8.5 km；最後，兩斷層於南段部分則有較明顯之傾角差異，旗山斷層為傾角 57.1°、深度約達 14.0 km 深之東傾逆斷層，車瓜林斷層則轉為 46.6°、深度約 9.9 km 右移分量較為顯著之東傾逆斷層。上述之最佳斷層幾何參數將提供後續三維斷層模型建置時使用。

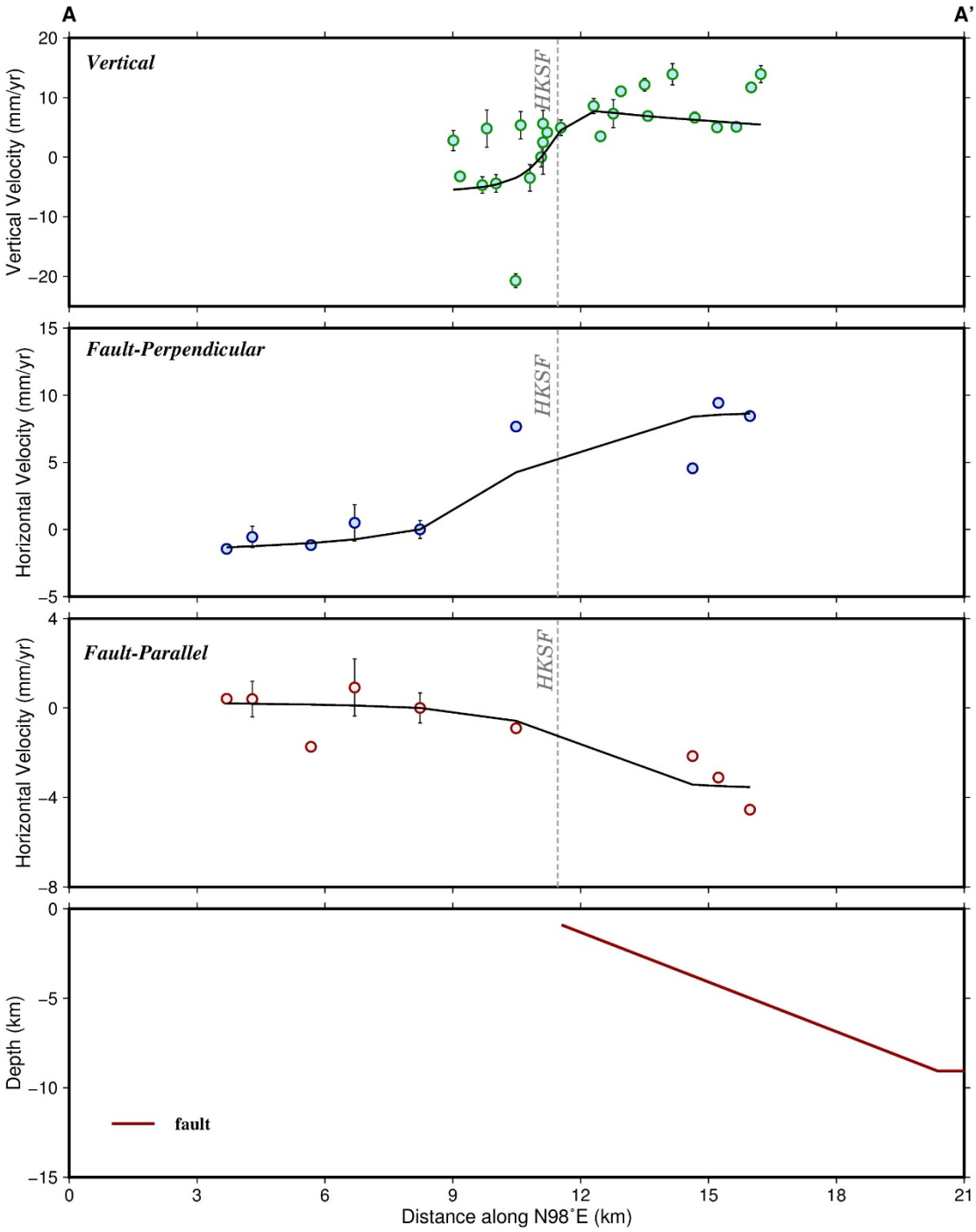


圖 4-2.3：A–A’速度剖面移除西側垂直速度場後之二維斷層模型擬合。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層分量；紅色圓圈為平行斷層分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何；藍色虛線為其他可能構造。

Figure4-2.3: 2D elastic fault modeling result of A–A’ profile (without westside vertical velocity).

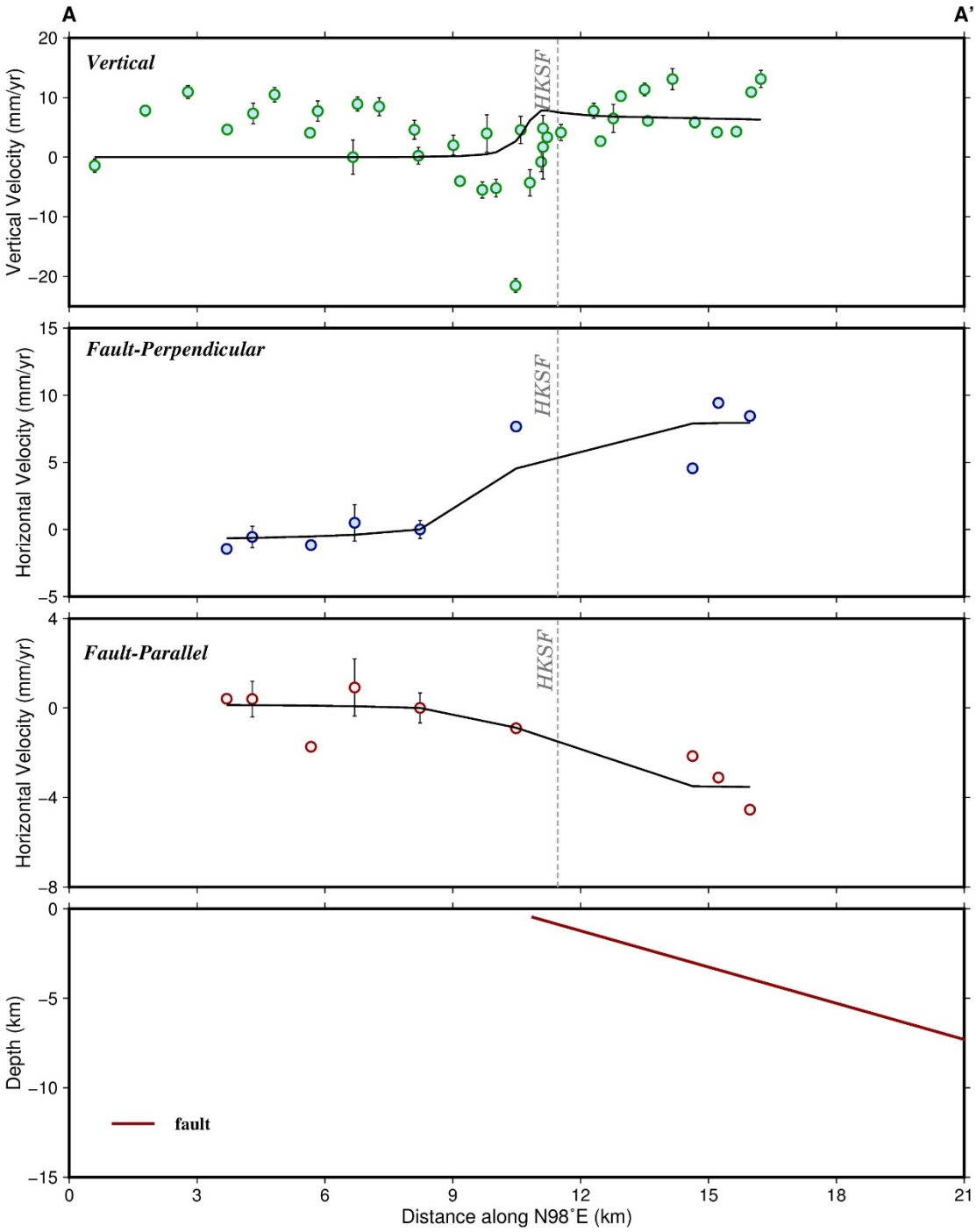


圖 4-2.4：A–A’速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層分量；紅色圓圈為平行斷層分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何；藍色虛線為其他可能構造。

Figure4-2.4: 2D elastic fault modeling result of A–A’ profile.

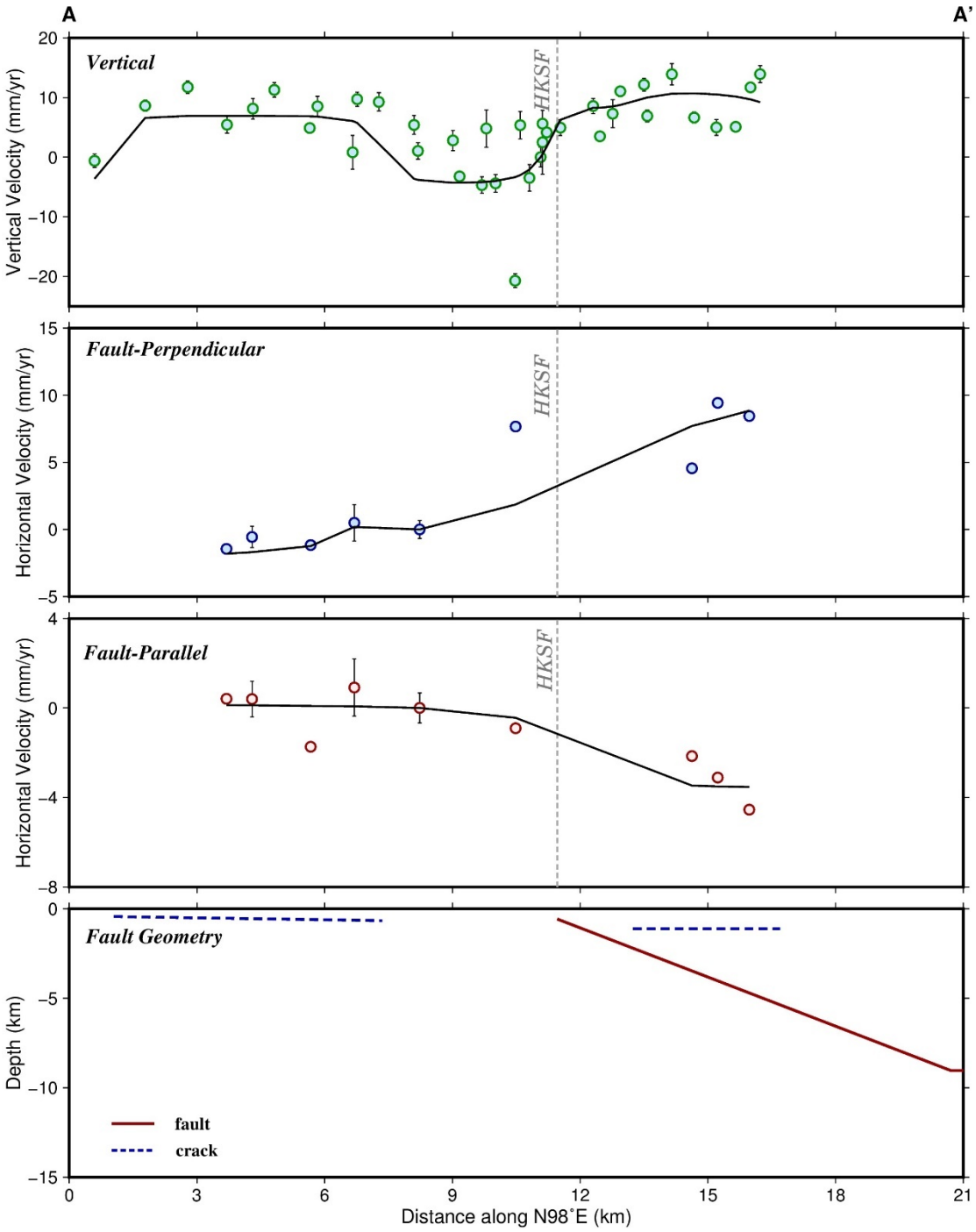


圖 4-2.5：A–A’速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層分量；紅色圓圈為平行斷層分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何；藍色虛線為其他可能構造。

Figure4-2.5: 2D elastic fault modeling result of A–A’ profile.

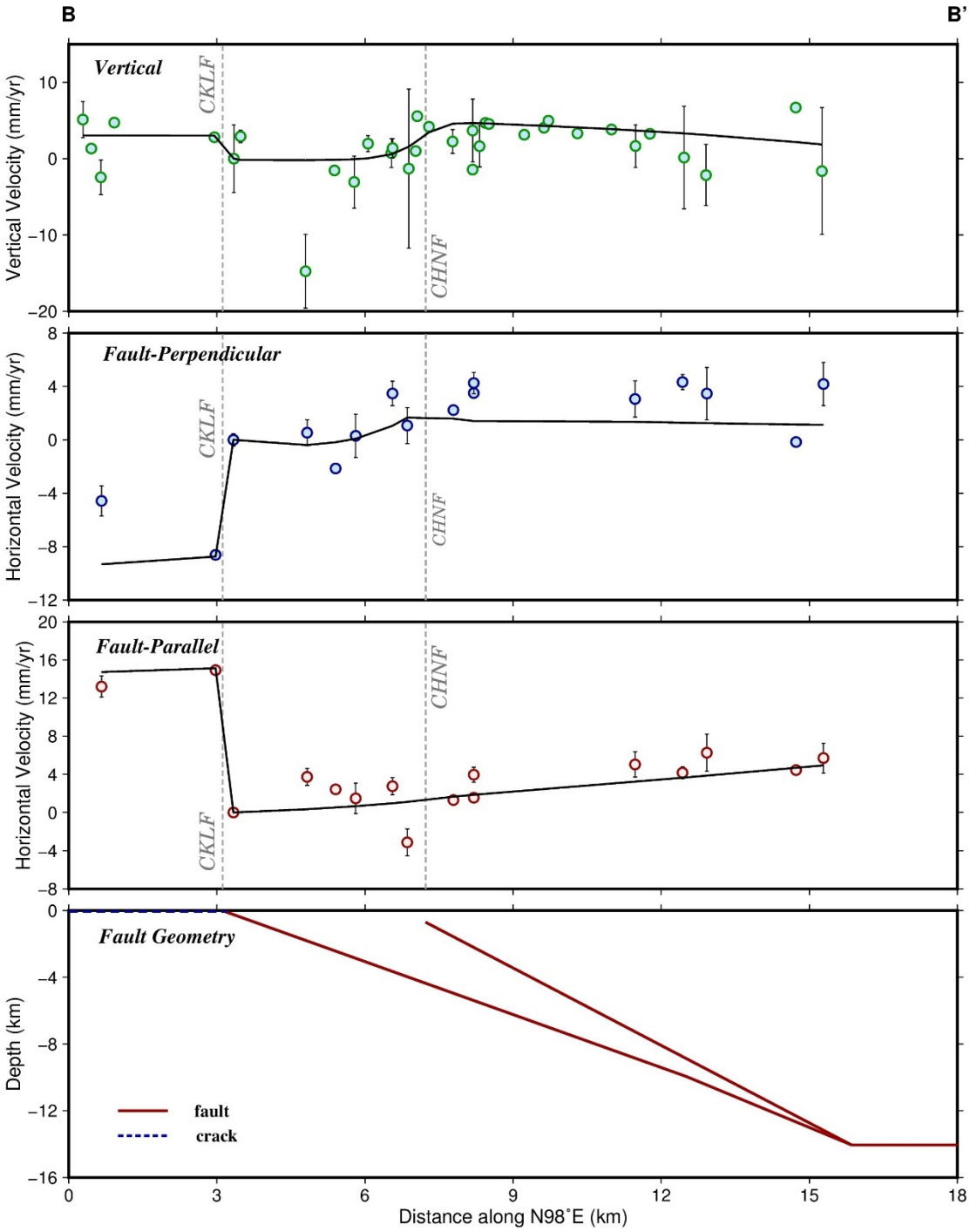


圖 4-2.6：B–B’速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層分量；紅色圓圈為平行斷層分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何；藍色虛線為其他可能構造。

Figure4-2.6: 2D elastic fault modeling result of B–B’ profile.

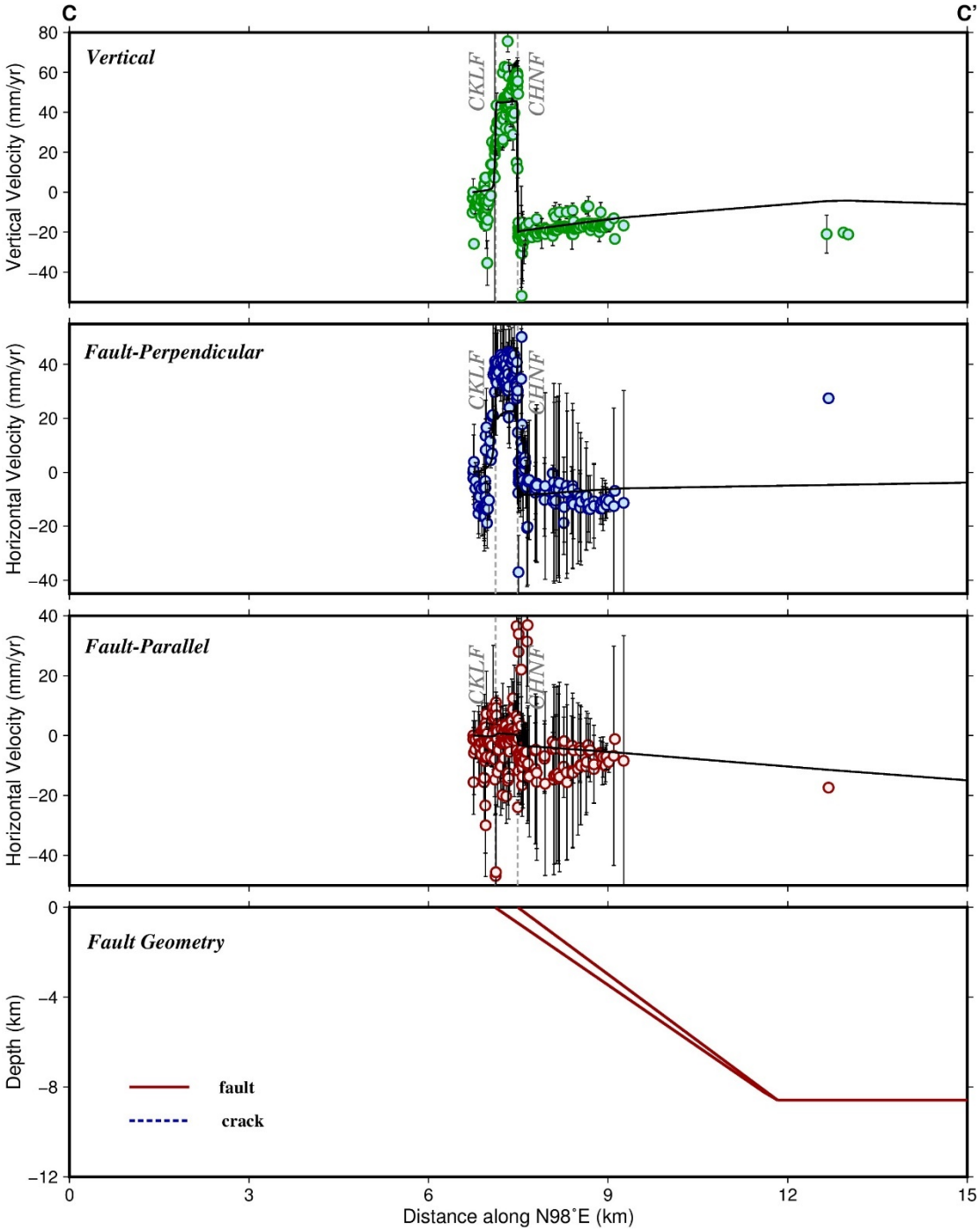


圖 4-2.7：C–C’速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層分量；紅色圓圈為平行斷層分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何。

Figure4-2.7: 2D elastic fault modeling result of C–C’ profile.

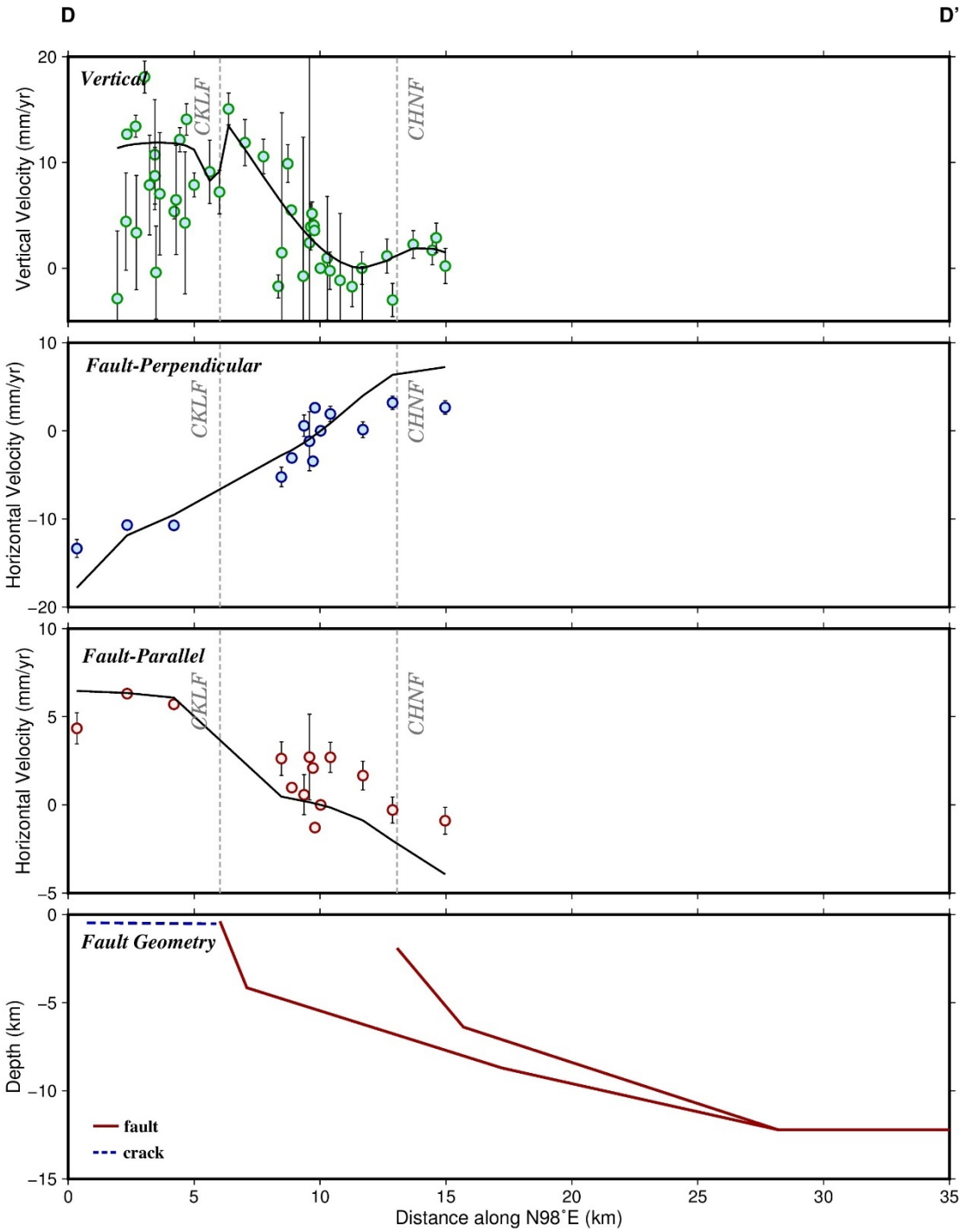


圖 4-2.8：D–D’速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層分量；紅色圓圈為平行斷層分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何；藍色虛線為其他可能構造。

Figure4-2.8: 2D elastic fault modeling result of D–D’profile.

表 4-2.1：最佳斷層幾何參數

Table 4-2.1: Optimal fault geometry derived from 2D elastic fault model

	斷層名稱		傾角（°）	斷層頂部深度（km）	斷層底部深度（km）	滑移速率 (mm/yr)	滑移角（°）
1	旗山斷層	北	上 59.5	0.0	6.4	11.2	127.4
			下 25.0	6.4	12.2		
		中	63.2	0.0	8.6	73.4	-92.9
		南	57.1	0.0	14.0	6.3	84.3
2	車瓜林斷層	北	上 74.2	0.0	4.2	34.8	99.0
			下 24.2	4.2	8.7		
		中	61.4	0.0	8.2	48.9	88.5
		南	46.6	0.0	9.9	19.9	141.1
3	小崗山斷層		42.5	0.0	9.0	19.7	102.2
4	潮州		70	-	17.5 km	-	-
5	恆春		75	-	20.0 km	-	-

第五章、南部地區斷層模型建置

5-1 BLOCKS 斷層模型

5-1-1 斷層模型原理

此斷層模型為 Meade 與 Loveless 所開發的 Block Model（Meade and Hager, 2009），主要的計算原理為將區域視為各斷層作為邊界所劃分而成的塊體，並以地表速度去反推斷層面滑移速度，再以求得之斷層滑移速度推求地表變動速度，使得與真實地表變動速度相互比較驗證模型，又 Block Motion 只考慮塊體之旋轉，故模擬中無需垂直向資料，其可以較容易的建構三維斷層幾何與較快速的計算。

5-1-2 斷層模擬結果

BLOCKS 斷層滑移速率模擬，今年針對臺灣西南部區域重點五條斷層進行斷層膜擬，分別為：車瓜林斷層（CGLF）、小崗山斷層（HKSF）、旗山斷層（CSF）、潮州斷層（CCF）、恆春斷層（HCF）等（圖 5-1.1）。其中旗山斷層自東北至西南主要分為三段，使斷層傾角分別為 59.5˚東傾、63.2˚東傾、57.1˚東傾；車瓜林斷層亦由東北至西南分為三段進行模擬，斷層傾角分別為 74.2˚東傾、61.4˚東傾、46.6˚東傾，小崗山斷層傾角較緩為 42.5˚東傾，而潮州斷層 70˚東傾與恆春斷層 75˚東傾則相對角度較高。BLOCKS 可以加入地質滑移速率協助斷層模擬，故參考徐浩德教授（Shyu et al., 2016）發表之地值速率，提供小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層做為模擬初始約制，車瓜林斷層則參考中央地質調查所 2019 年依地質調查所發表特刊（劉彥求與林啟文，2019）速率。

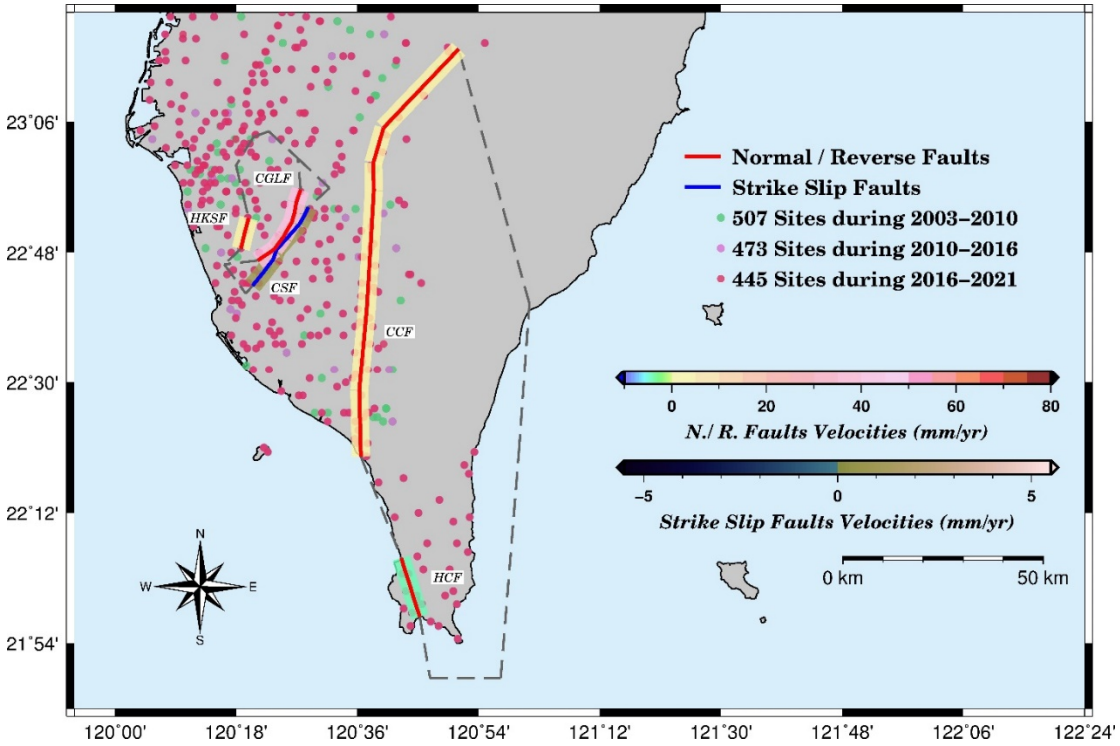


圖 5-1.1：台灣西南部五條重點斷層模擬初始值。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N./ R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。三種顏色的圓點代表三個時期不同的速度場測站。

Figure 5-1.1: The input values of the BLOCK model with different GNSS sites during 3 corresponding times computed by National Cheng Kung University. The blue lines indicate strike-slip faults and red lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars down to the figure.

本次五條斷層可由三個封閉的塊體邊界描述（圖 5-1.1），於所有塊體外圍設一點，使外圍標訂為相對不動之塊體。其中同前述地質調查約制速率所參考文獻，本次五條斷層運動模式除旗山斷層是以走向滑移為主要運動模式外(圖中以藍色線段標示)，另四條之小崗山斷層、車瓜林斷層、潮州斷層、恆春斷層等則是以傾向滑移運動為主的活動斷層，圖中以紅色線段標示（圖 5-1.1）。

地表長期變動速率使用 GNSS 速度場表示，使用成功大學團隊所提供之測站解算速率，而依 2010 年甲仙地震與 2016 年美濃地震為分界，將速度場劃為三個時段分別擬合（圖 5-1.1），故斷層模擬將有三時段相應之正演成果。

本次斷層經 BLOCKS 模擬成果，斷層由各分段平均滑移速率成果如表 5-1.1、表 5-1.2、表 5-1.3，走向滑移速率中，正值顯示為左移，負值為右移，而傾向滑

移速率中，正值表示為逆斷層，負值表正斷層。可見三個時間區段中，小崗山斷層其各小段皆有 3.0 mm/yr 以內的右移分量（圖 5-1.4、圖 5-1.7、圖 5-1.10），又斷層北段與中段有 10.0 mm/yr 以內的正斷層分量，最北段最大，沿斷層線轉至最南段則轉為逆斷層分量。而其餘四條重點斷層含斷層幾何皆為左移性質，而傾向滑移分量中，僅恆春斷層為正斷層運動型態，其餘各斷層各分段皆為逆斷層運動分量（圖 5-1.3、圖 5-1.6、圖 5-1.9）。旗山斷層各小段於三個時間分段中，走向滑移速率皆一致，傾向滑移則皆為中段較南北段略大，但單段於三時期中，單段落差僅 0.1mm/yr。而潮州斷層同樣於三時段中，各小段運動型態一致，每一時期間落差於 1.0 mm/yr 內，最北段為逆衝斷層略帶左移分量，自中段起轉至南北走向各分段則皆改為左移運動為主略帶逆衝分量。恆春斷層則於此三時期間，變化速率一致，各分段之左移與逆衝分量量值不相上下，落差於 0.5 mm/yr 以內。三組時段模擬成果中，與其他斷層相較，滑移量明顯較大者為車瓜林斷層，而各期間單段相對變化量值較大者，亦為車瓜林斷層，變化量落差於北段中可達 13.0 mm/yr。

綜觀三時期各斷層分段，參考表 5-1.1、表 5-1.2、表 5-1.3 與圖 5-1.2、圖 5-1.5、圖 5-1.8，總變動量皆相近，而車瓜林斷層與小崗山斷層之斷層整體，則於 2016-2021 時段速率較前兩期小，總滑移量分別為 27.2 mm/yr、3.9 mm/yr。其中車瓜林斷層各分段於此一時段之左移分量皆減少約 4.0 mm/yr，走向滑移分量上於最北三小段有最明顯速度減少，差值分別為 7.1 mm/yr、11.4 mm/yr、11.3 mm/yr。小崗山斷層則主要改變的落差量在右移分量，量值自北往南各分段減少了 1.3 mm/yr、1.3 mm/yr、1.2 mm/yr。

表 5-1.1：2003-2010 年間 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

Table 5-1.1: The result values of each fault model with 2003-2010 GNSS velocity field. The positive strike-slip rates indicates left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數 / 項目 / 斷層名稱	2021 BLOCKS 台灣西南部重點斷層模擬成果(2003-2010 速度場)		
	平均走滑速率 (s.s. mm/yr)	平均傾向滑移速率 (d.s. mm/yr)	總滑移速率 (mm/yr)
旗山斷層(北段)	0.8±0.0	0.6±0.1	1.0±0.0
旗山斷層(中段)	0.7±0.0	1.1±0.1	1.3±0.1
旗山斷層(南段)	0.7±0.1	0.7±0.2	1.0±0.1
車瓜林斷層(北段)	18.1±1.9	70.7±17.8	73.2±16.7
車瓜林斷層(中段)	15.8±1.6	19.8±7.0	25.6±5.9
車瓜林斷層(南段)	12.7±0.2	6.0±3.8	14.4±1.6
小崗山斷層	-2.7±0.1	-1.1±5.7	5.2±2.2
潮州斷層	3.9±0.6	3.4±3.4	5.7±2.2
恆春斷層	4.1±0.0	-4.2±0.3	5.9±0.2

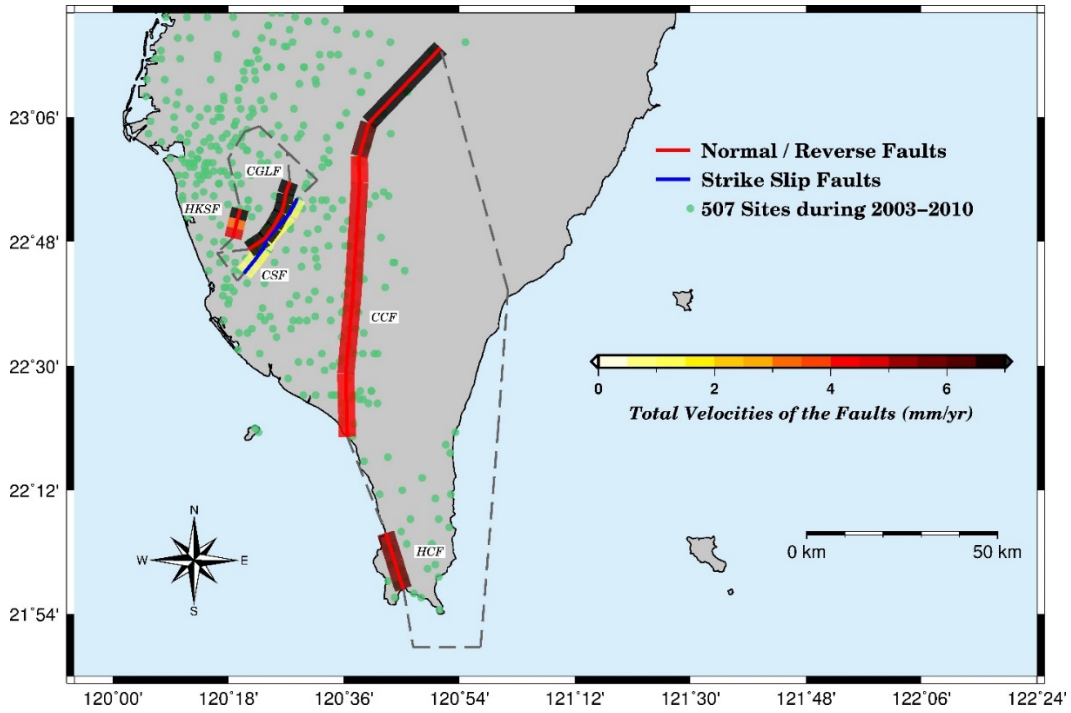


圖 5-1.2：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2003-2010 年 507 個測站之水平速度場，模擬成果之總滑移速率。

Figure 5-1.2: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 507 GNSS velocity field during 2003-2010.

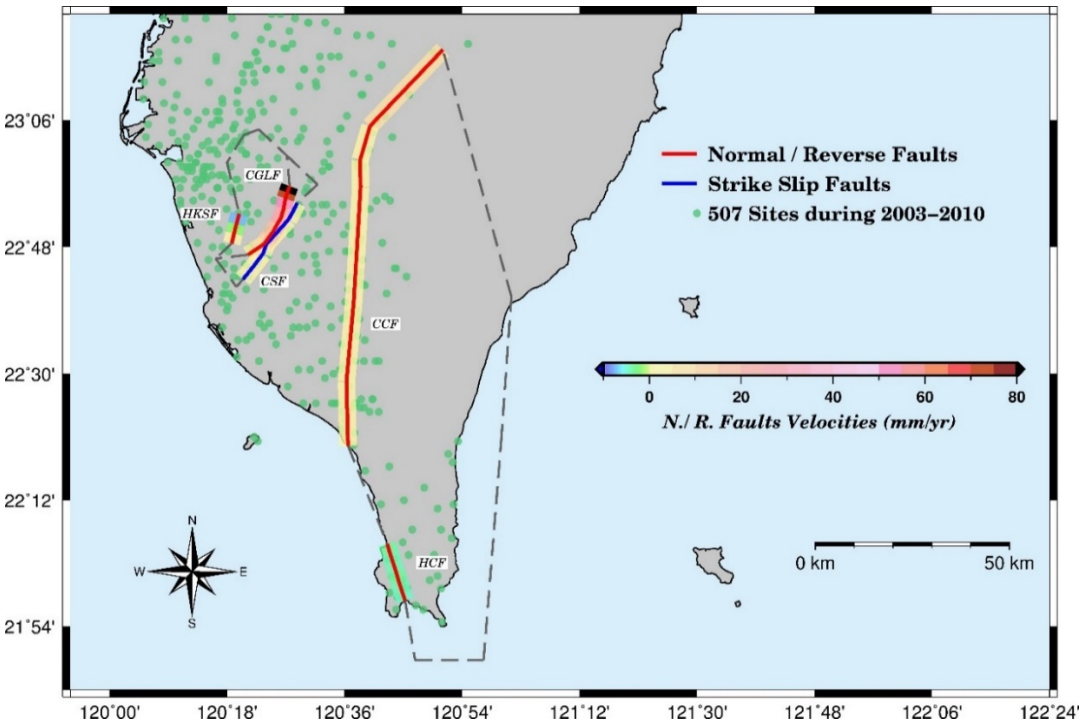


圖 5-1.3：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2003-2010 年 507 個測站之水平速度場，傾向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.3: The dip-slip rates of each segment modeled with 507 GNSS velocity field during 2003-2010.

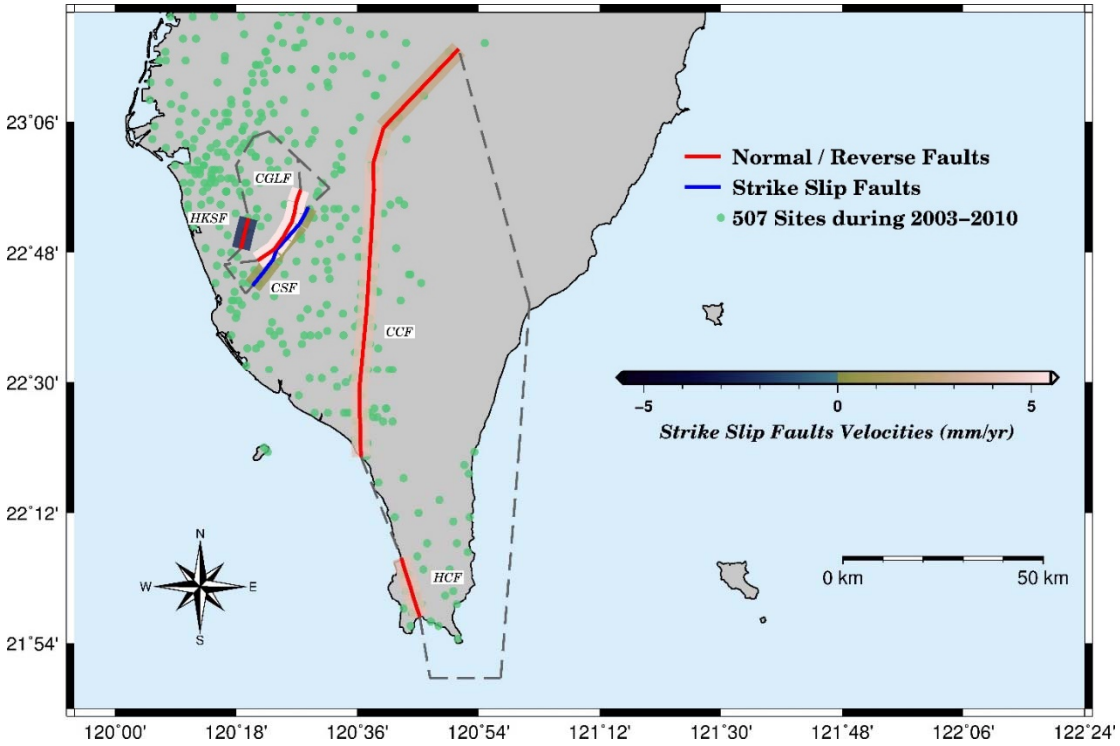


圖 5-1.4：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2003-2010 年 507 個測站之水平速度場，走向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.4: The strike-slip rates of each segment modeled with 507 GNSS velocity field during 2003-2010.

表 5-1.2：2010-2016 年間 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

Table 5-1.2: The result values of each fault model with 2010-2016 GNSS velocity field. The positive strike-slip rates indicates left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數 / 項目 / 斷層名稱	2021 BLOCKS 台灣西南部重點斷層模擬成果(2010-2016 速度場)		
	平均走滑速率 (s.s. mm/yr)	平均傾向滑移速率 (d.s. mm/yr)	總滑移速率 (mm/yr)
旗山斷層(北段)	0.8±0.0	0.6±0.1	1.0±0.0
旗山斷層(中段)	0.7±0.0	1.1±0.1	1.3±0.1
旗山斷層(南段)	0.7±0.1	0.6±0.2	1.0±0.1
車瓜林斷層(北段)	17.2±1.8	67.1±16.7	69.5±15.6
車瓜林斷層(中段)	15.0±1.5	19.3±6.4	24.7±5.6
車瓜林斷層(南段)	11.9±0.2	6.4±3.5	13.8±1.6
小崗山斷層	-3.0±0.1	-1.6±5.3	5.2±2.1
潮州斷層	3.9±0.6	3.3±3.4	5.7±2.2
恆春斷層	4.1±0.0	-4.2±0.3	5.9±0.2

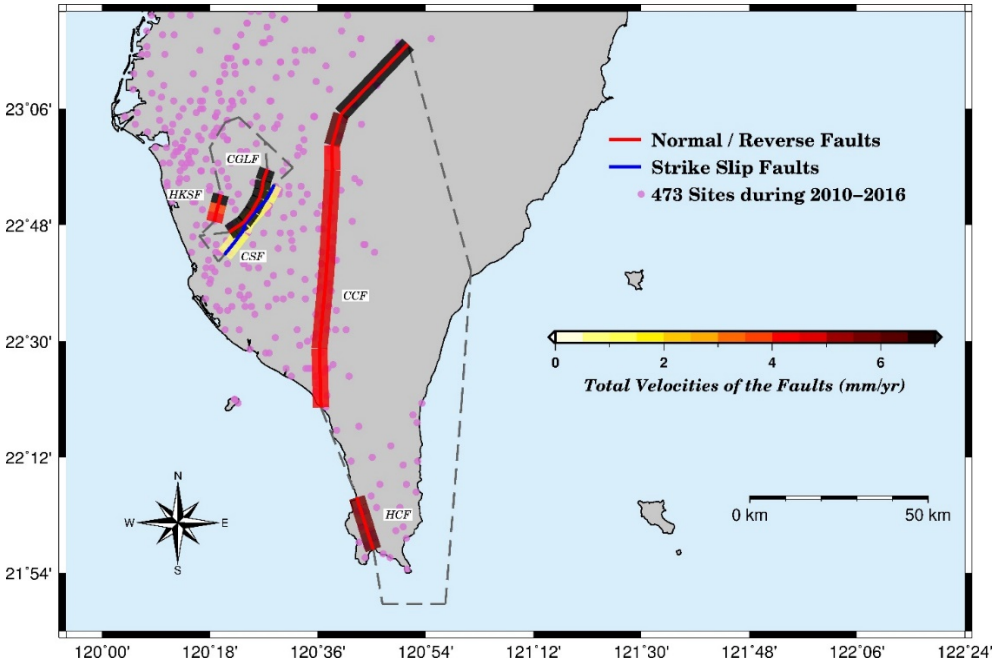


圖 5-1.5：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2010-2016 年 473 個測站之水平速度場，模擬成果之總滑移速率。

Figure 5-1.5: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 473 GNSS velocity field during 2010-2016.

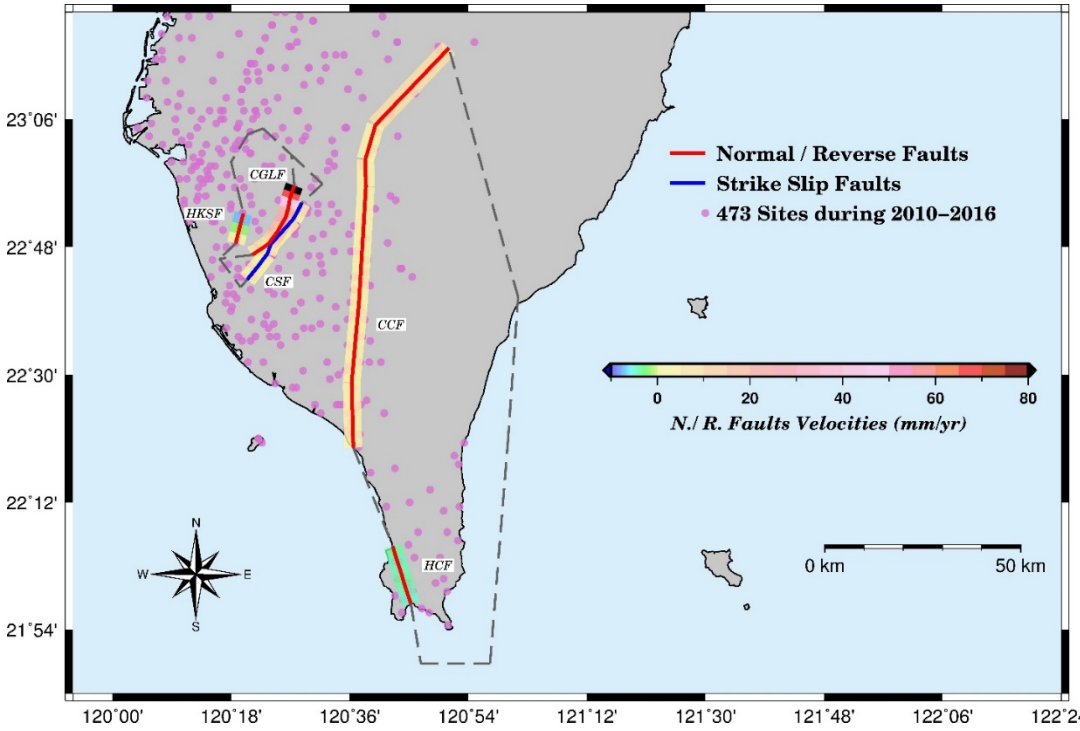


圖 5-1.6：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2010-2016 年 473 個測站之水平速度場，傾向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.6: The dip-slip rates of each segment modeled with 473 GPS velocity field during 2010-2016.

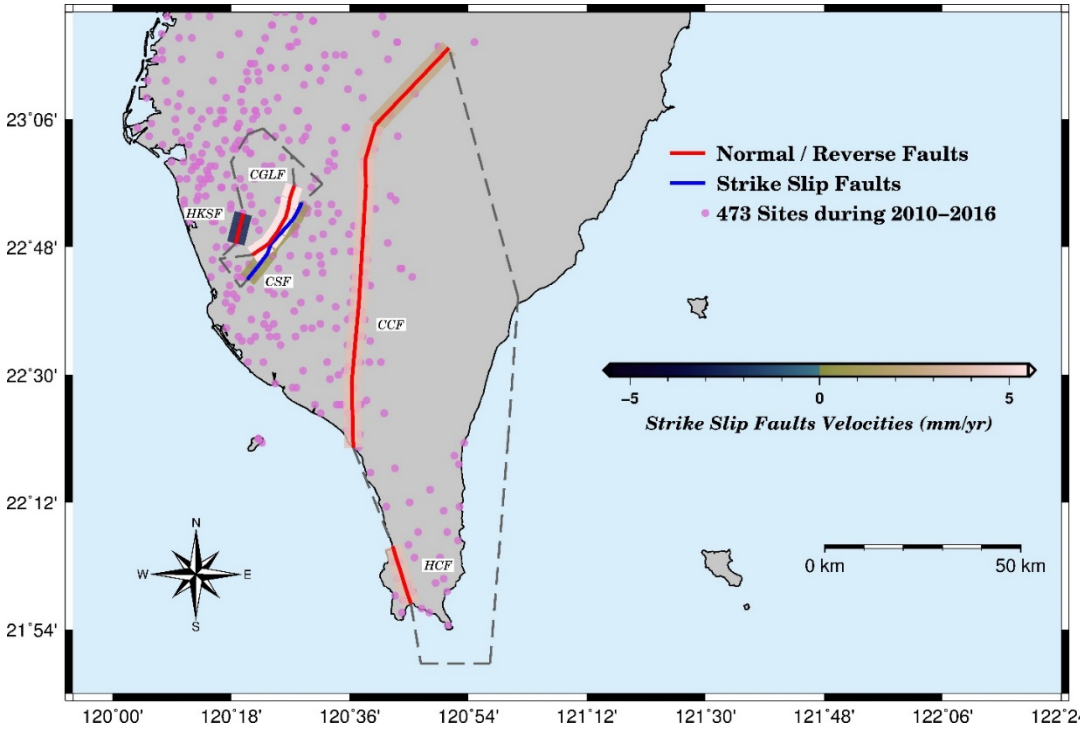


圖 5-1.7：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2010-2016 年 473 個測站之水平速度場，走向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.7: The strike-slip rates of each segment modeled with 473 GNSS velocity field during 2010-2016.

表 5-1.3：2016-2021 年間 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

Table 5-1.3: The result values of each fault model with 2016-2021 GNSS velocity field. The positive strike-slip rates indicates left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數 / 斷層名稱 / 項目	2021 BLOCKS 台灣西南部重點斷層模擬成果(2016-2021 速度場)		
	平均走滑速率 (s.s. mm/yr)	平均傾向滑移速率 (d.s. mm/yr)	總滑移速率 (mm/yr)
旗山斷層(北段)	0.8±0.0	0.6±0.1	1.0±0.0
旗山斷層(中段)	0.7±0.0	1.0±0.1	1.2±0.0
旗山斷層(南段)	0.7±0.1	0.7±0.2	1.0±0.1
車瓜林斷層(北段)	13.3±1.5	56.4±13.5	58.1±12.7
車瓜林斷層(中段)	11.4±1.3	16.1±5.5	19.9±4.9
車瓜林斷層(南段)	9.0±0.1	4.8±2.9	10.4±1.4
小崗山斷層	-1.7±0.0	-1.7±4.4	3.9±2.1
潮州斷層	3.9±0.6	3.0±3.3	5.5±2.1
恆春斷層	4.1±0.0	-4.2±0.3	5.9±0.2

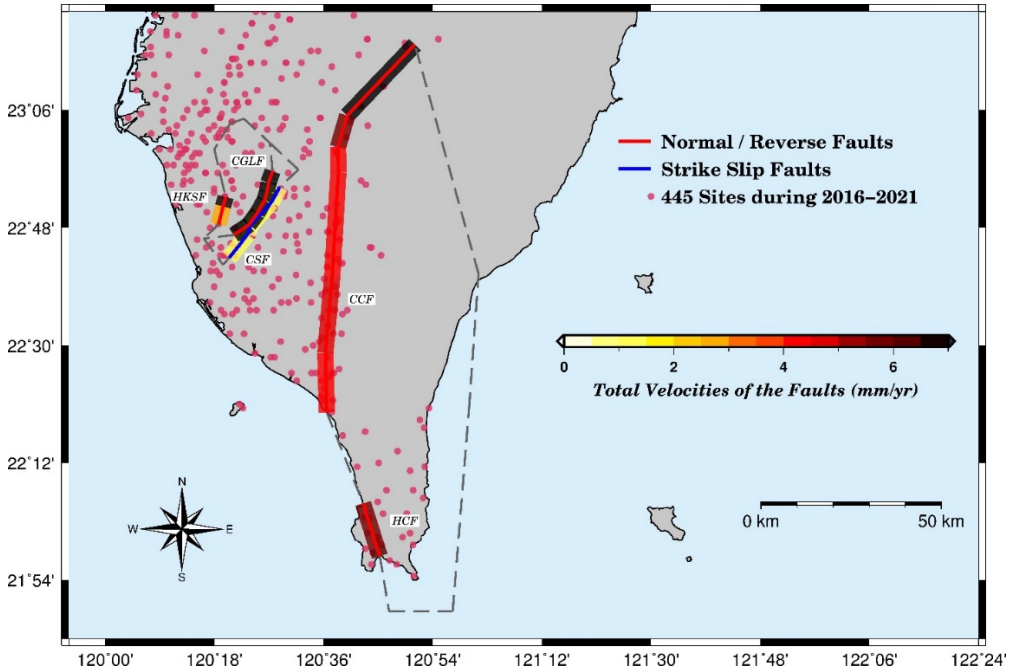


圖 5-1.8：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2016-2021 年 445 個測站之水平速度場，模擬成果之總滑移速率。

Figure 5-1.8: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 445 GNSS velocity field during 2016-2021.

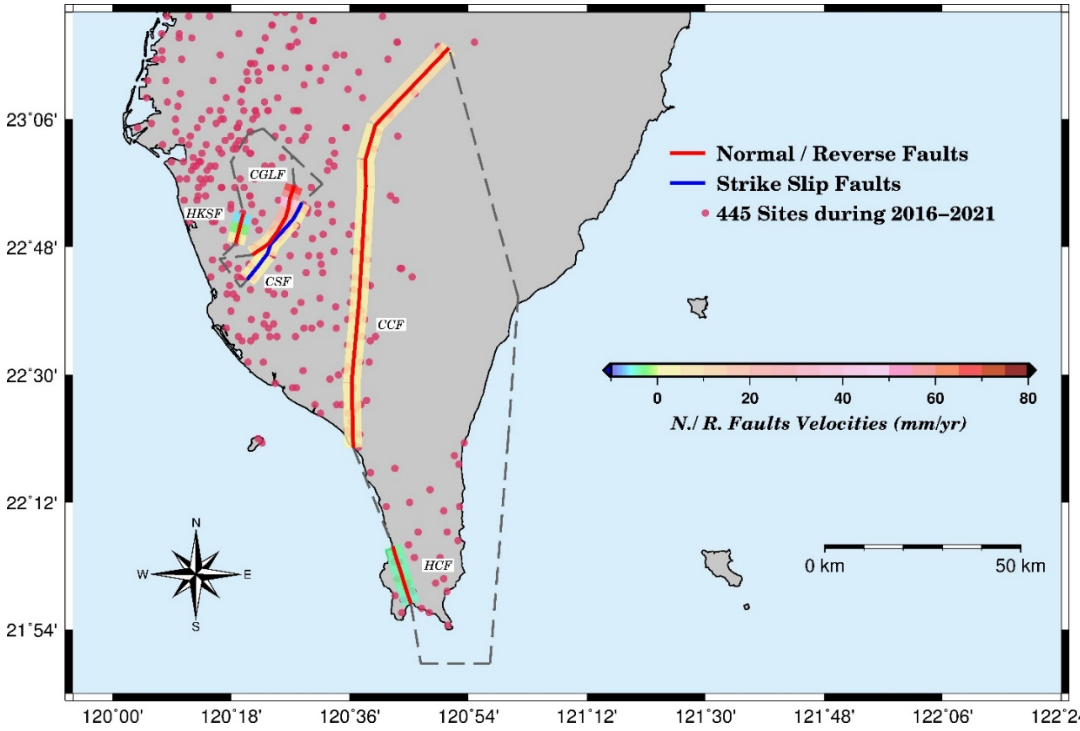


圖 5-1.9：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2016-2021 年 445 個測站之水平速度場，傾向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.9: The dip-slip rates of each segment modeled with 445 GNSS velocity field during 2016-2021.

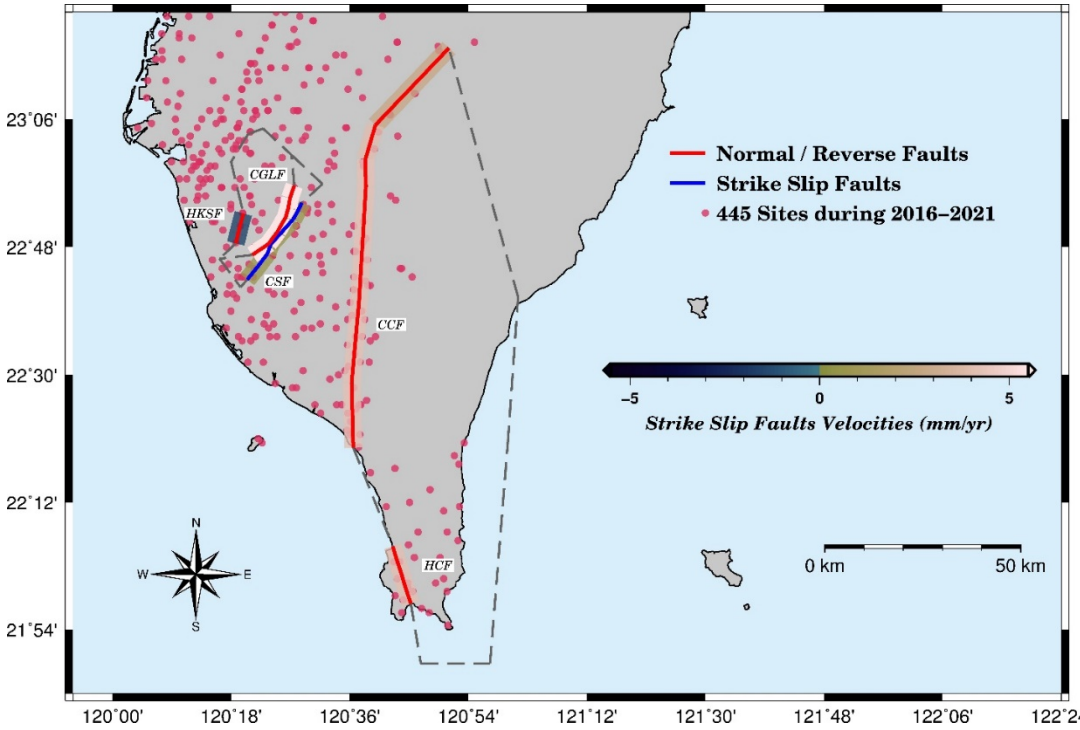


圖 5-1.10：2021 年臺灣西南部五條重點斷層，使用 2016-2021 年 445 個測站之水平速度場，走向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.10: The strike-slip rates of each segment modeled with 473 GNSS velocity field during 2016-2021.

我們可以藉由地表 GNSS 正演之水平速度場來探討模型所模擬之斷層滑移是否合理。下圖 5-1.11 至圖 5-1.13 為地表速度場模擬成果，包含本次台灣西南部重點五條斷層涵蓋區域範圍。三個時段之速度場模擬成果皆可見潮州斷層北段鄰近測站模擬速度略小於測站真實速度，且略帶一逆時針旋轉量，往南沿線速度方向近一致，南段後至恆春斷層處又有明顯的逆時針旋轉量差，而模擬數值有增加，較接近原值，而模擬數值於潮州斷層西側愈近海區有更明顯順時針的落差。整體而言，量值落差最大的速度測站約位於西南沿海鄰近區域。三時段正演之速度場相較原始速度場之 RMS 值分別為 23.339、16.155、15.903。

臺灣西南部五條重點斷層模擬成果中，由於地質滑移速率一致，而 RMS 值於 2016-2021 期間速度場落差最小，同時前段敘述中表 5-1.3 亦顯示滑移量降低，故此一時段之速度場應相對較可表達斷層長期滑移速率。然從三時段各斷層小段運動型一致且量值落差皆在 13.0 mm/yr 內的成果可見，速度場分三時段並未有關鍵影響。

與地質滑移速率約制相左者包含：旗山斷層中段逆衝分量量值大於左移分量、車瓜林斷層南段左移分量量值大於逆衝分量、前兩時期之小崗山斷層中段右移分量量值大於正斷層分量。而單量值而言，除車瓜林斷層外，皆顯示了有效的約制成果。而距斷層線與塊體邊界較遠處，正演速度之落差較大，推測應與塊體空間分布未定義相關。而就滑移速率最大之車瓜林斷層而言，各段左移分量皆大於約制分量，而傾向滑移分量之北段大於約制分量，中段與南段皆小於約制分量許多。此等現象應與臺灣西南部多為泥岩組成，然而 BLOCKS 假設前提為均質塊體旋轉，所產生之斷層(邊界)走向滑移運動推擬，而因此而使模擬成果有影響。而車瓜林斷層中段東側相較於南北段測站缺乏，又鄰近區域於 2016-2021 期間測站變動，因而影響測站連線組成之幾何，故模擬成果相較原始速率低，可見對於斷層滑移速率 BLOCKS 模擬提供較為保守之成果。

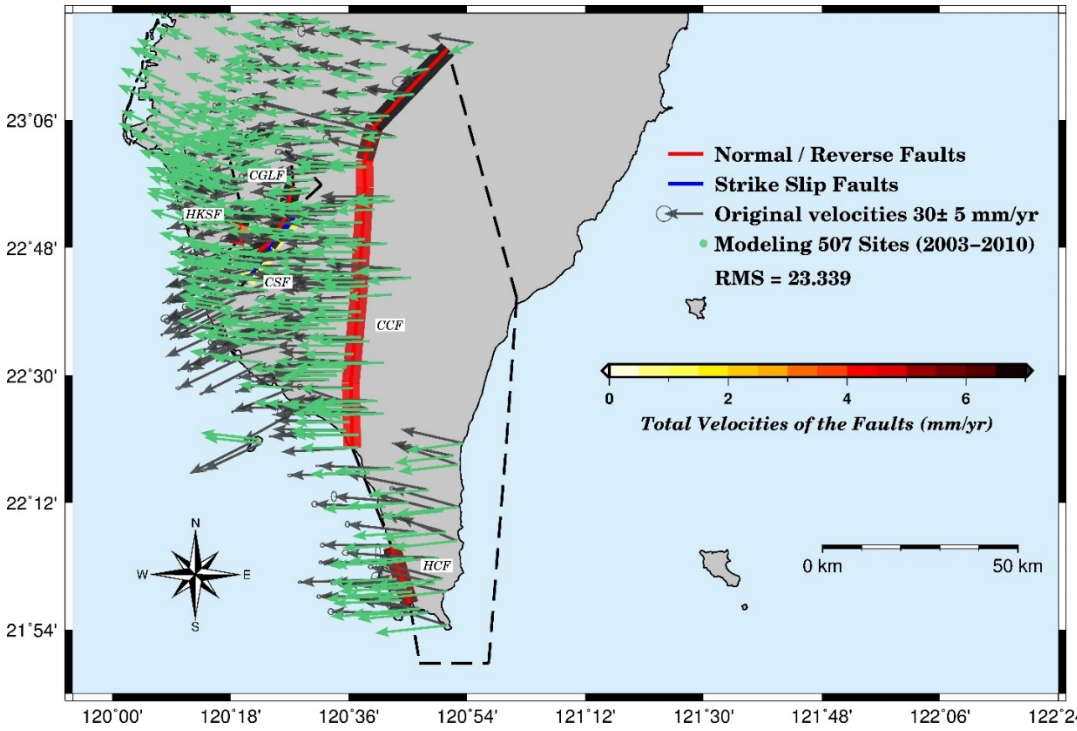


圖 5-1.11：使用 2003-2010 年共 507 個測站之水平速度場，臺灣五條重點斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值為 23.339。綠色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，紅色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 5-1.11: The GNSS velocity field modeled with 507 GNSS sites velocity field during 2003-2010 which the standard deviation is 23.339. The green arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

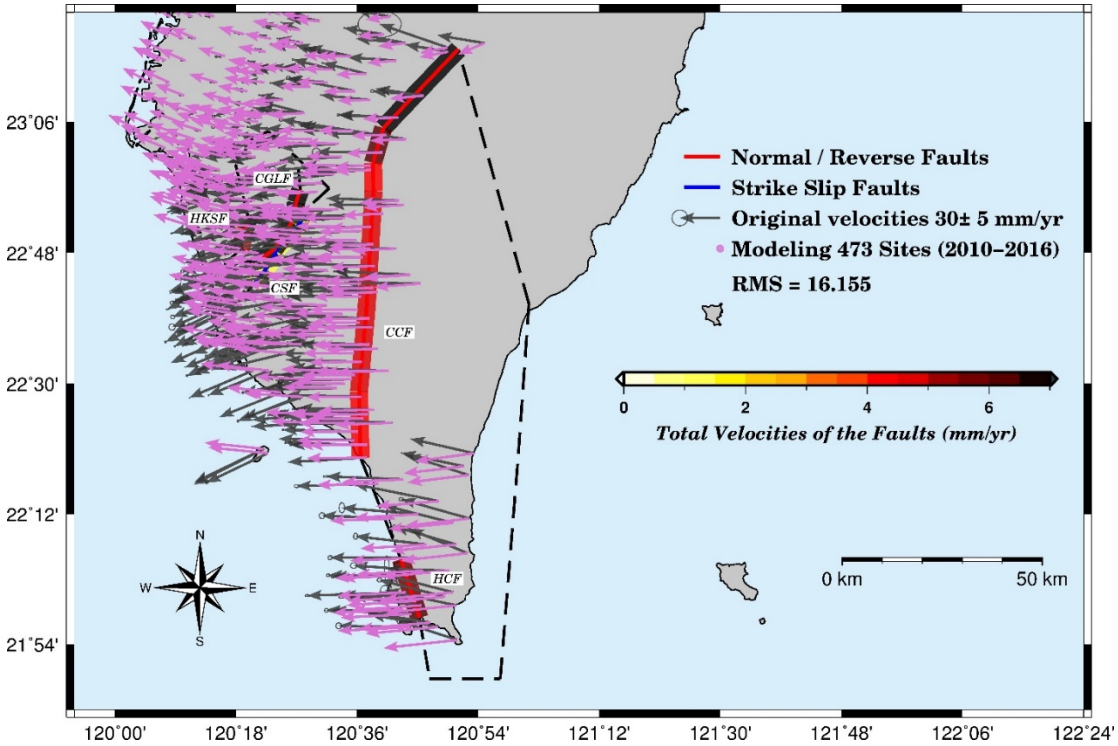


圖 5-1.12：使用 2010-2016 年共 473 個測站之水平速度場，臺灣五條重點斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值為 16.155。粉紫色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，紅色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 5-1.12: The GNSS velocity field modeled with 473 GNSS sites velocity field during 2010-2016 which the standard deviation is 16.155. The pink purple arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

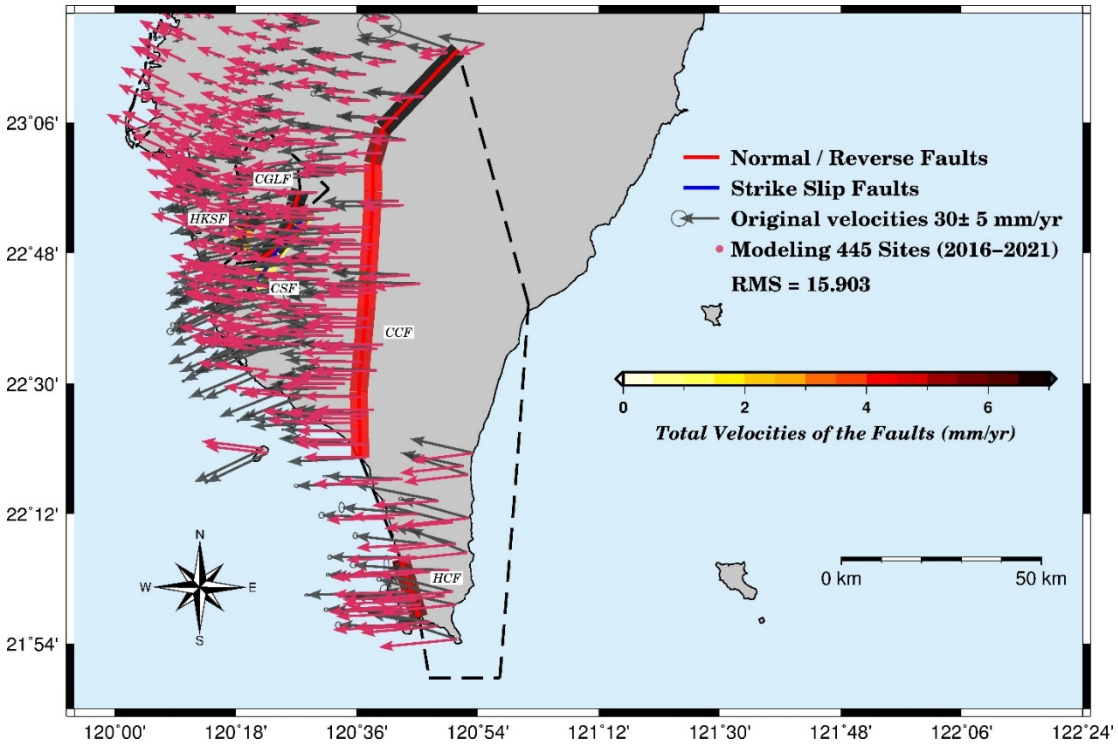


圖 5-1.13：使用 2016-2021 年共 445 個測站之水平速度場，臺灣五條重點斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值為 15.903。莓紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，紅色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 5-1.13: The GNSS velocity field modeled with 445 GNSS sites velocity field during 2016-2021 which the standard deviation is 15.903. The rose red arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

5-2 DEFNODE 斷層模型

5-2-1 斷層模型原理

依彈性回彈理論指出，板塊之間的相對運動，會使應變在彈性地殼中累積。其中對斷層系統而言，是以剪應變形式的應變能累積為主。斷層破裂時可能的能量釋放比例可藉由各種地殼變形測量結果獲得，其中短期的斷層滑移速率可藉由大地測量的方式，如 GNSS 及水準測量，量測斷層兩側之相對地表變形而得。

本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE （McCaffrey, 2005）來進行斷層現今滑移速率及滑移虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每條斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al. （2011）曾將臺灣地區幾條重要的斷層視為塊體邊界，再利用塊體模型來探討臺灣現今的地殼運動情形。我們除了根據前一期計畫，在 Ching et al. （2011）的模型所加入的 TAST、CYMT、HSS1、SYSG 等塊體及其幾何修正外，為了符合地調所公布的活動斷層資料，我們也修正了 EKSH、KHSC 等塊體，以使左鎮斷層能對應其塊體邊界（圖 5-2.1），另外新增了車瓜林斷層（表 5-2.1）。

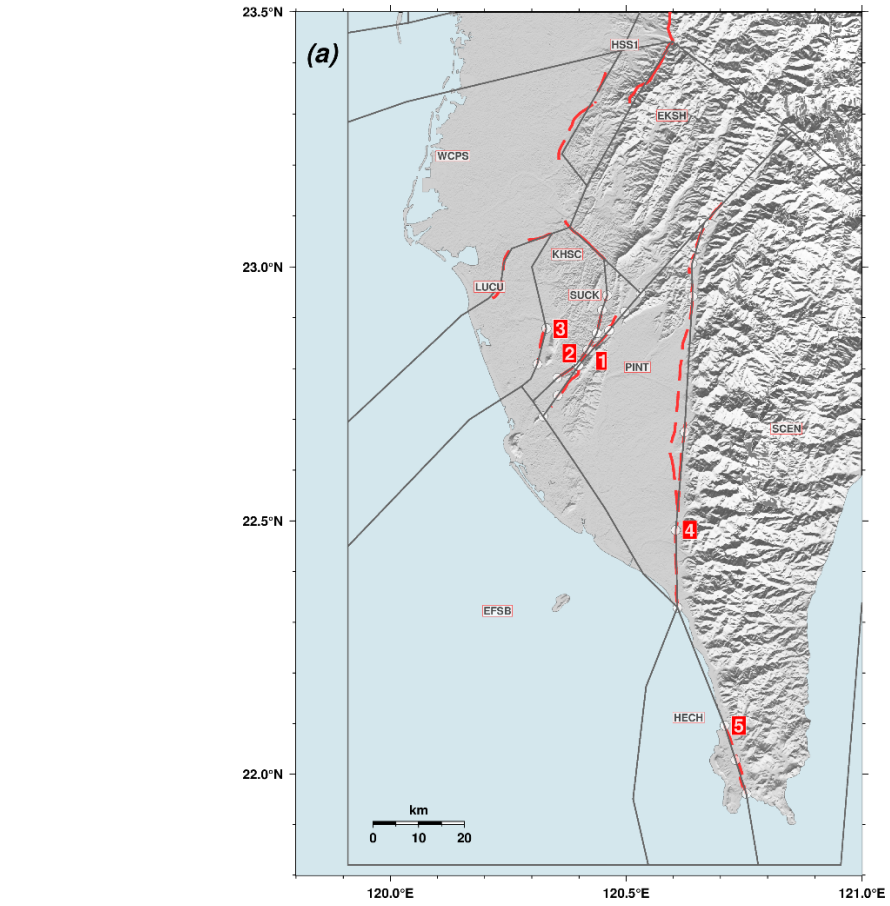
本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 5-2.1a），並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體上有部份水平速度是相對於 EURA 的剛體旋轉所造成，DEFNODE 即以此計算各塊體的剛體轉動角速度及斷層面（塊體邊界）上各節點的長期滑移速率以及滑移虧損率。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道各邊界斷層（表 5-2.1）的總滑移速率值、因此我們將塊體模型所得之各斷層節點上的值取平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率分布較不平均，則所得的速率標準差也會相對較大。

由圖 5-2.1(a)可看出，各塊體的邊界幾乎都和地表的斷層線一致，而有些延伸的斷層邊界主要是為了符合塊體在幾何上的連續性以供數值模型所需。圖中邊界上的圓圈代表節點，塊體模型即是用來估算斷層面在各節點上的滑移速率

值。

為了求取各斷層面上的間震期滑移速率及滑移虧損率，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由整理臺灣南部活斷層的各種地質及地球物理文獻及證據，並使用二維模型分析出的旗山斷層、車瓜林斷層、小崗山斷層、潮州斷層、恆春斷層的斷層參數（表 5-2.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型（圖 5-2.1）。注意除了如圖 5-2.1(a)中所示的地表節點外（深度為 0 km），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

本次研究中在模型反演過程中加入塊體內部形變，此時各塊體將不再是剛性塊體，塊體內部的速度梯度可產生內部形變，較符合臺灣目前大地構造，並加入由地質研究方法推估的斷層滑移速率（表 5-2.3, Shyu et al., 2016）作為反演過程的約束值，以得到能符合不同觀測資料的模型結果。



(b)

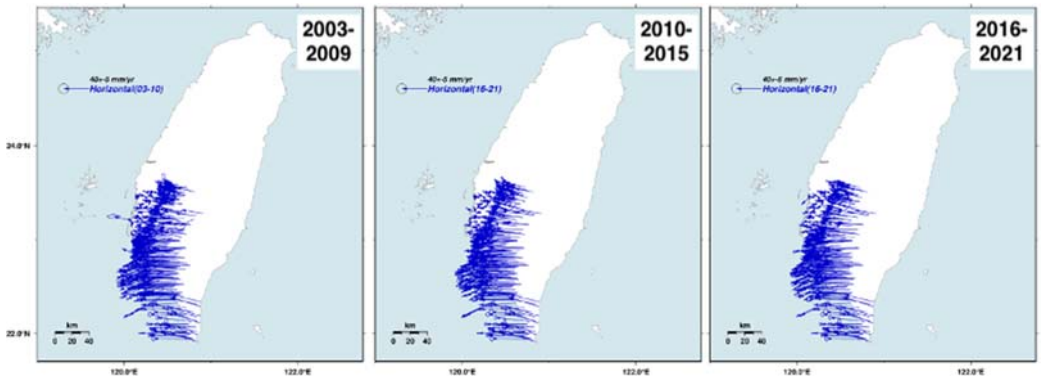


圖 5-2.1：(a)臺灣南部三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公布之活斷層，紅色虛線表是推測或隱伏斷層。紅色數字代表之斷層分別為： 1. 旗山斷層；2. 車瓜林斷層；3. 小崗山斷層；4.潮州斷層；5.恆春斷層。(b)三個時間段的 GNSS 資料所觀測到的平均水平速度場（藍色箭號）(相對於澎湖白沙站)。

Fgure 5-2.1: (a) The digital terrain model of southern Taiwan. Black lines represent the boundary of blocks with their name marked within the black. Red line and white dots show the active faults and their nods used in our 3D model: 1. Chishan fault; 2. Chekualin fault; 3. Hsiaogangshan fault; 4. Chaochou fault; 5. Hengchun fault. (b) Horizontal GNSS velocity field used in our model (blue arrows) with the 68% confidence error ellipse.

表 5-2.1：圖 5-2.1 中所示斷層之幾何參數。

Table 5-2.1: The geometry parameters of the faults in figure 5-2-1.

	斷層名稱		傾角（°）		斷層頂部深度（km）	斷層底部深度（km）	滑移速率 (mm/yr)	滑移角（°）
1	旗山斷層	北	上	59.5E	1.9	6.4	11.2	127.4
			下	25.0E	6.4	12.2		
		中	63.2E		0.0	8.6	73.4	-92.9
		南	57.1E		0.7	14.0	6.3	84.3
2	車瓜林斷層	北	上	74.2E	0.4	4.2	34.8	99.
			下	24.2E	4.2	8.7		
		中	61.4E		0.0	8.2	48.9	88.5
		南	46.6E		0.0	9.9	19.9	141.1
3	小崗山斷層		42.5E		0.6	9.0	19.7	102.2
4	潮州		70E		-	17.5 km	-	-
5	恆春		75E		-	20.0 km	-	-

5-2-2 斷層模擬結果

本次計畫以 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震為界，將 508 個 GNSS 測站測得的地表速度場分為三個時期，分別為(A) 2003-2009、(B) 2010-2015、(C) 2016-2021（圖 5-2.1b），並利用這些速度場及各塊體相對位置及邊界斷層參數，估算此三個期間最符合觀測資料的塊體旋轉軸及旋轉角速度（圖 5-2.2a、b 及表 5-2.2）。圖 5-2.3a、b、c、d 則分別顯示此三個期間的斷層長期滑移速率、斷層鎖定係數、滑移虧損率及間震期滑移速率等值。圖 5-2.4 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GNSS 觀測值(a)、塊體模型之估計值(b)以及上述兩者的差別（殘差值,c）。由此圖 5-2.4c 可知，三個時期在大部分地區，觀測值和塊體模型預估的水平運動在大部分地區皆有很好的一致性。其中塊體 WPCS 的東側部分、南側部分測站殘差值較大，且方向有一致性，可能因那裏有本次模型沒考慮到的斷層，因而影響模型結果；而旗山斷層與小崗山斷層南端也有部分測站殘差值較大，我們認為除該區域斷層幾何較為複雜外，也可能受到鳳山轉形

帶的影響。最後，南端的恆春斷層可能受到斷層潛移的影響，使模型無法順利擬合斷層的滑移情形。整體來看，垂直運動的擬合結果（圖 5-2.5）則明顯不如水平運動，此現象可能因臺灣西南部的地表垂直運動包含了一些非斷層活動的雜訊（如：地層下陷、地下水位變化、活動褶皺；泥灌入體等），未來將透過其他分析方法來改善此問題。

除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形（internal deformation），我們利用 Block Modeling 來推算研究區域塊體的內部應變率（internal strain rate）。結果如圖 5-2.6 所示，2010 年甲仙地震後，塊體 SUCK 的內部應變率明顯的由拉張轉變為擠壓。2016 年美濃地震後，塊體 PINT 的內部應變率由擠壓轉變為拉張。其餘塊體的內部應變在不同時期並無太大改變。

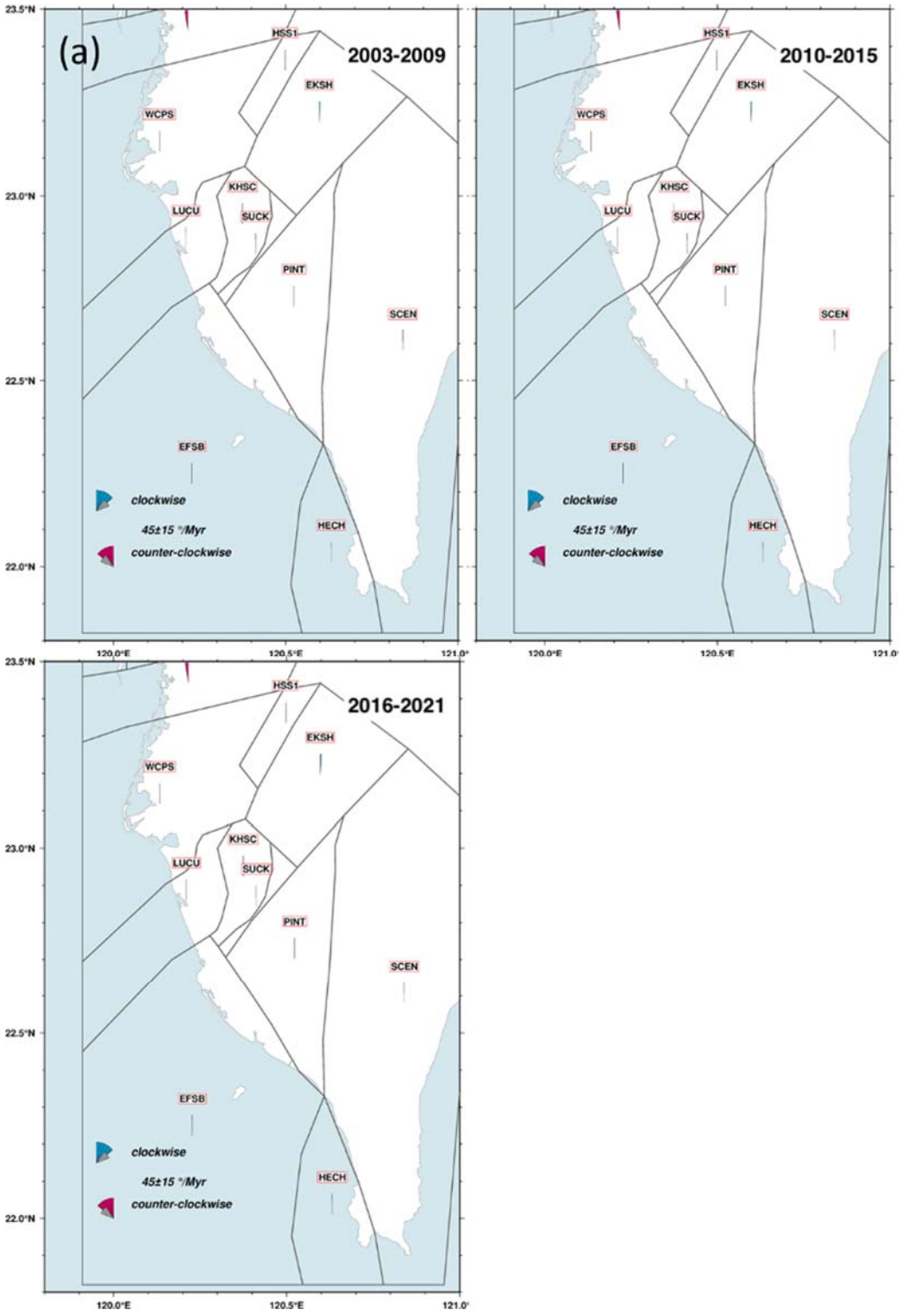
圖 5-2.3 顯示本研究中設置的邊界斷層上各節點之滑移速率平均值，並於表 5-2.3 中展示這些斷層之平均長期滑移速率及平均滑移虧損率，及其對應之標準差。這些測地長期平均滑移速率（geodetic long-term slip rate）是由近十年測地資料（GNSS, 水準等）所得的地表運動推估而得，因此和利用地質資料(槽溝開挖或河階等）所觀測的地質長期（數百~數千年)滑移速率（geologic long-term slip rate）存在有本質上的差異。若假設斷層的震間能量累積速率為常數，則 geodetic 和 geologic slip rates 應該相同。然而由於板塊構造及運動的複雜性，在地質時間的尺度下，斷層活動應存在變異性，所以許多研究都曾指出這兩種斷層滑移速率的差別（e.g., Ward, 1998）。評估 geodetic long-term slip rate 的方法，除了和 geologic long-term slip rate 進行比較外，也可以由地震活動度等資料來間接進行。

在此針對本階段計畫之 5 條南部的斷層構造進行分析討論，結果陳述如下。首先，我們比較模型所估算的斷層測地長期滑移速率與地質長期滑移速率，結果顯示五個斷層在三個時期測地滑移速率接大於地質長期滑移速率，從圖 5-2.3 顯示 2010 年甲仙地震後，甲仙斷層的長期滑移速率在斷層南部高於北部，其餘四個斷層長期滑移速率值皆下降。2016 年美濃地震後，甲仙斷層的長期滑移速率

在斷層北部高於南部，旗山斷層、車瓜林斷層長期滑移速率值皆下降，小崗山斷層的平均滑移虧損率有顯著下降。

從圖 5-2.4 顯示區域的速度場有明顯的逆時針旋轉，造成在恆春斷層兩側的速度場方向有明顯改變，此現象可以視為恆春斷層面上有較快速錯動的原因之一，然而會造成斷層兩側速度改變的除塊體的長期滑移外，也可能受潛移等其他變形影響，因而造成兩種滑移速率間較大的差異。此外因滑移虧損率為長期滑移速率乘以斷層鎖定係數，所以在長期滑移速率較快的斷層面上往往也會有較高的滑移虧損率，因此非常高的滑移虧損率，可能是因長期滑移速率被高估的影響。

塊體模型所計算的斷層滑移速率主要是受到地表水平運動所影響。本研究加入的垂直速度場資料仍會影響傾角方向的滑移速率估算。但垂直速度場可能紀錄到非構造活動的垂直向地表運動，使得垂直向速度場擬合不如水平向。未來工作將持續探討非構造活動造成的垂直向速度場以及其他測地資料（如：InSAR、精密水準資料）對塊體模型模擬結果的影響。


(a)
2003-2009
2010-2015
2016-2021
HSS1
EKSH
WCPS
KHSC
LUCU
SUCK
PINT
SCEN
EFSB
HECH
clockwise
45±15 °/Myr
counter-clockwise
23.5°N
23.0°N
22.5°N
22.0°N
120.0°E
120.5°E

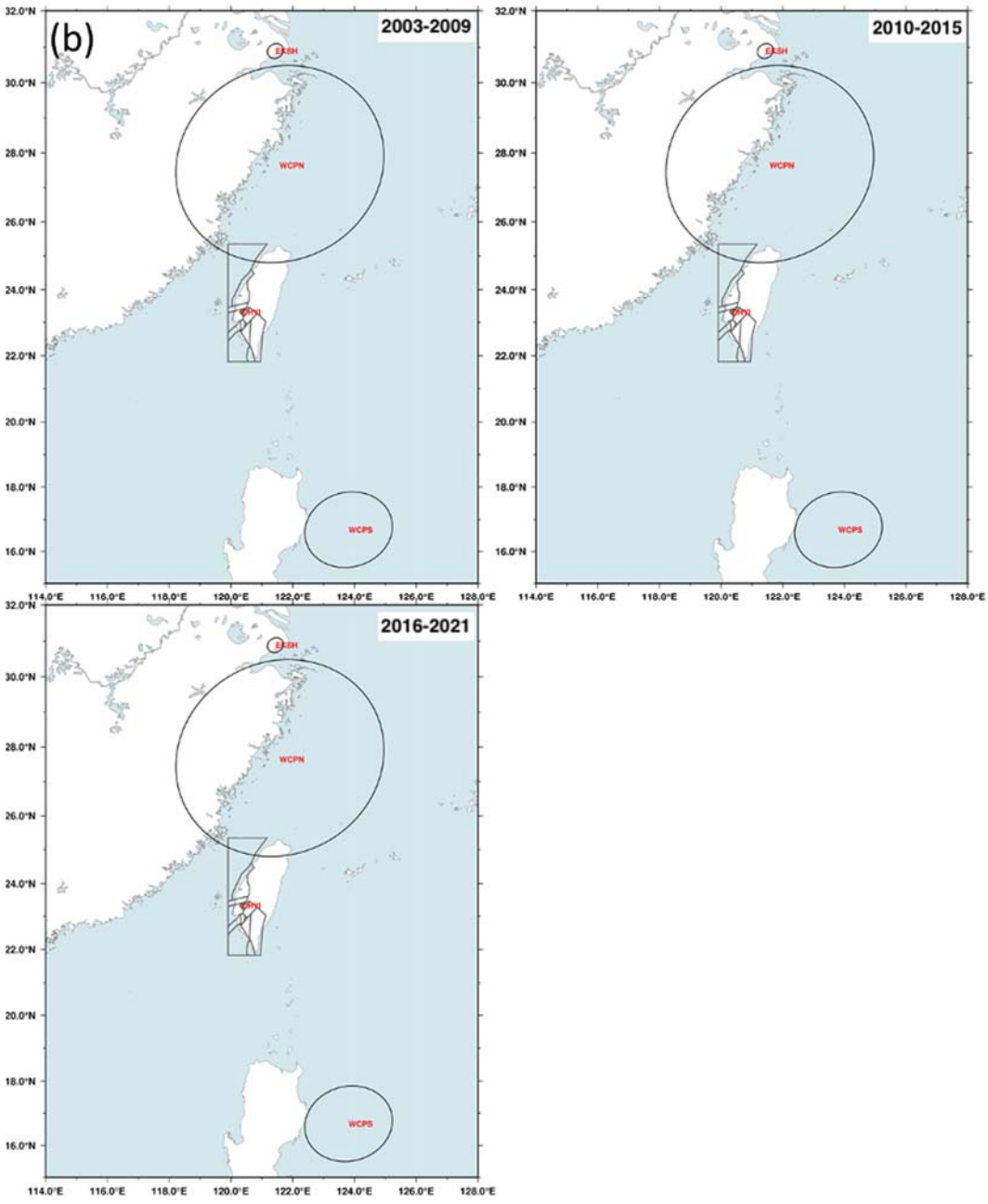
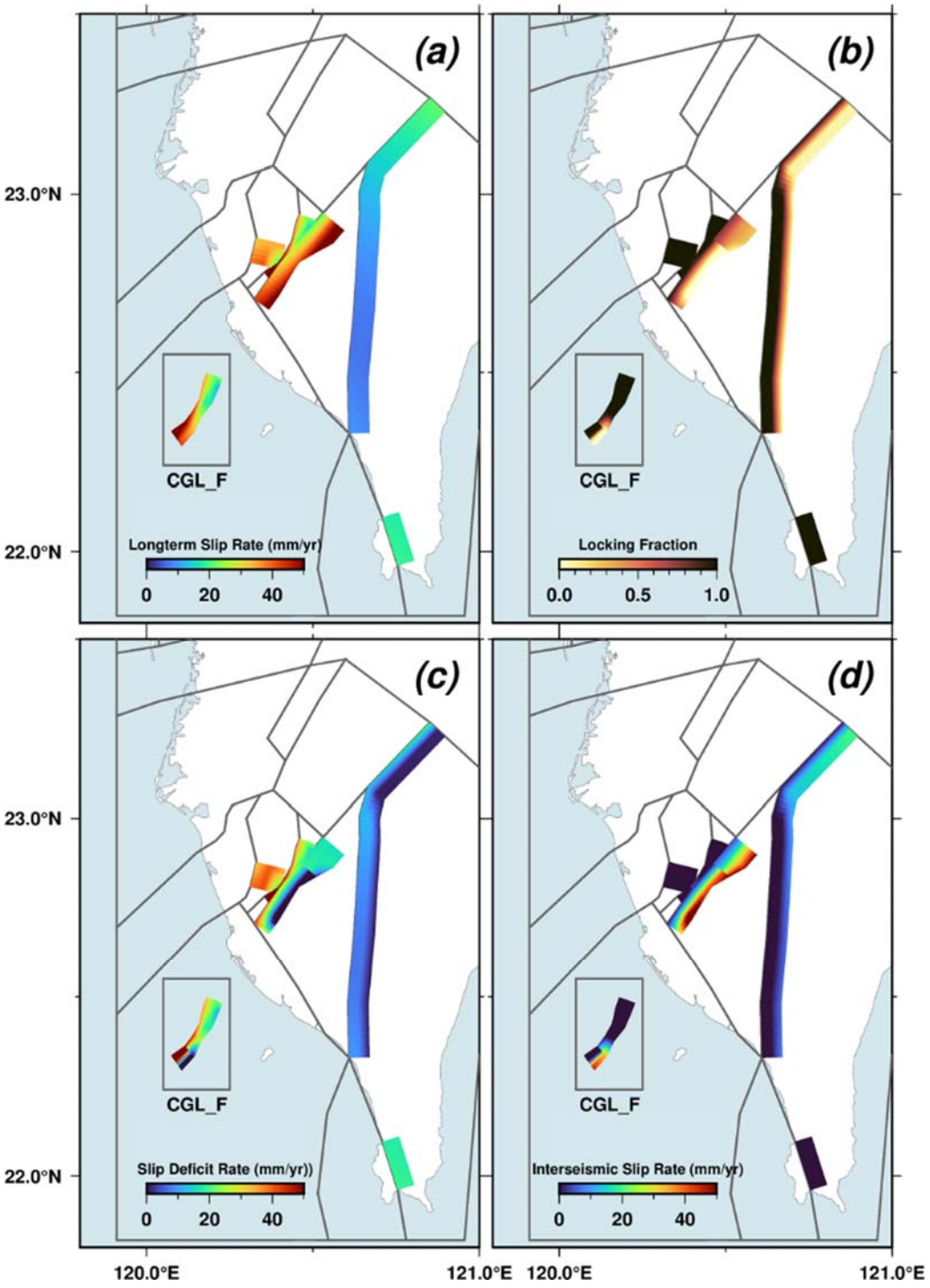


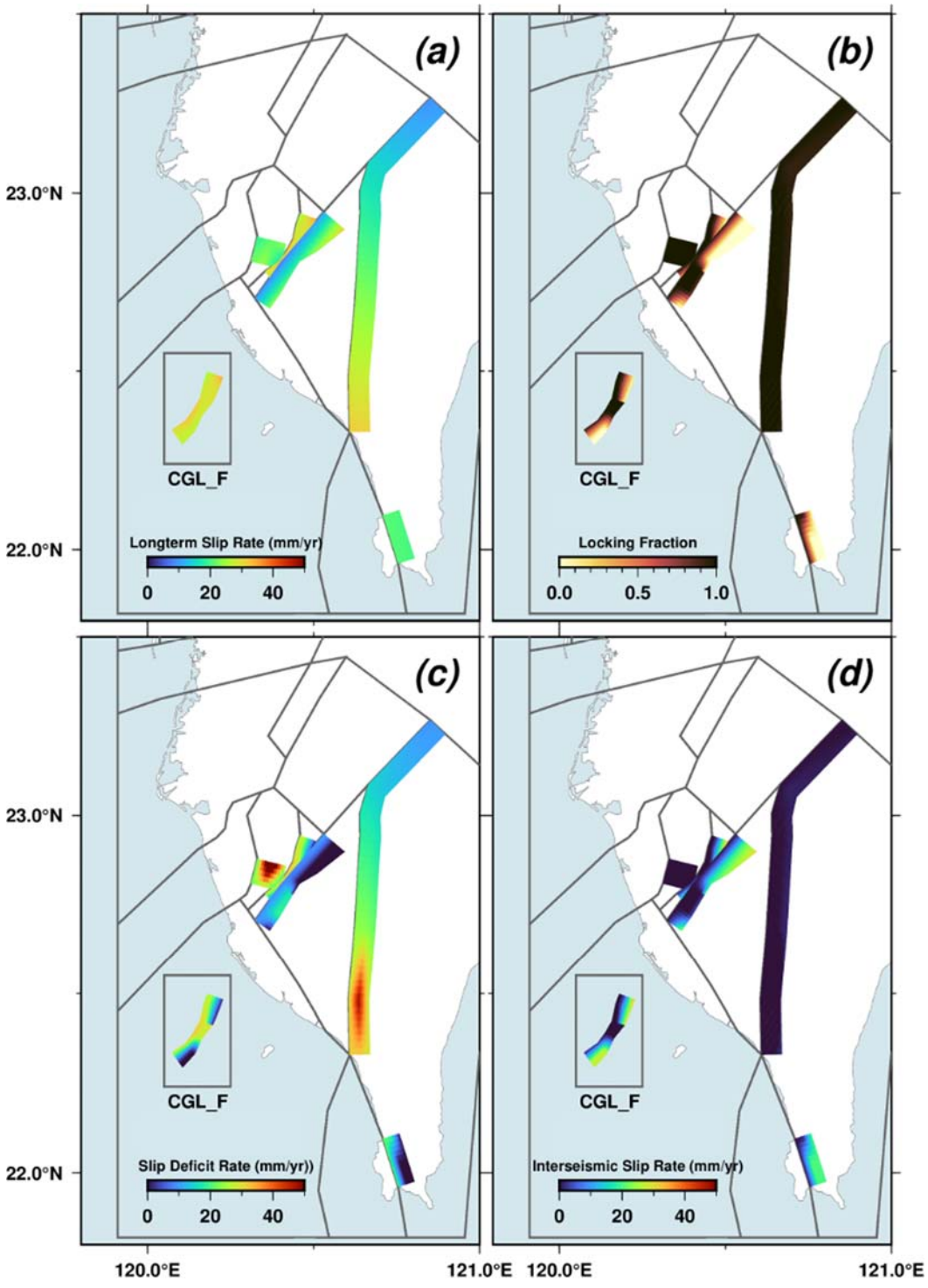
圖 5-2.2：(a) 三個時期的最佳塊體模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15°/My 的角速度。(b) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 5-2.1）。

Fgure 5-2.2: (a) The rotation rate of blocks in the three time periods. Blue for clockwise rotation, and red for counter-clockwise rotation. (b) The location of the rotation poles for each block were marked along with the 95% confidence error.

(A) 2003-2009


(a)
(b)
(c)
(d)
23.0°N
22.0°N
120.0°E
121.0°E
CGL_F
Longterm Slip Rate (mm/yr)
Locking Fraction
Slip Deficit Rate (mm/yr))
Interseismic Slip Rate (mm/yr)
0
20
40
0.0
0.5
1.0

(B) 2010-2015


(a)
(b)
(c)
(d)
23.0°N
22.0°N
120.0°E
121.0°E
CGL_F
Longterm Slip Rate (mm/yr)
Locking Fraction
Slip Deficit Rate (mm/yr))
Interseismic Slip Rate (mm/yr)
0
20
40
0.0
0.5
1.0

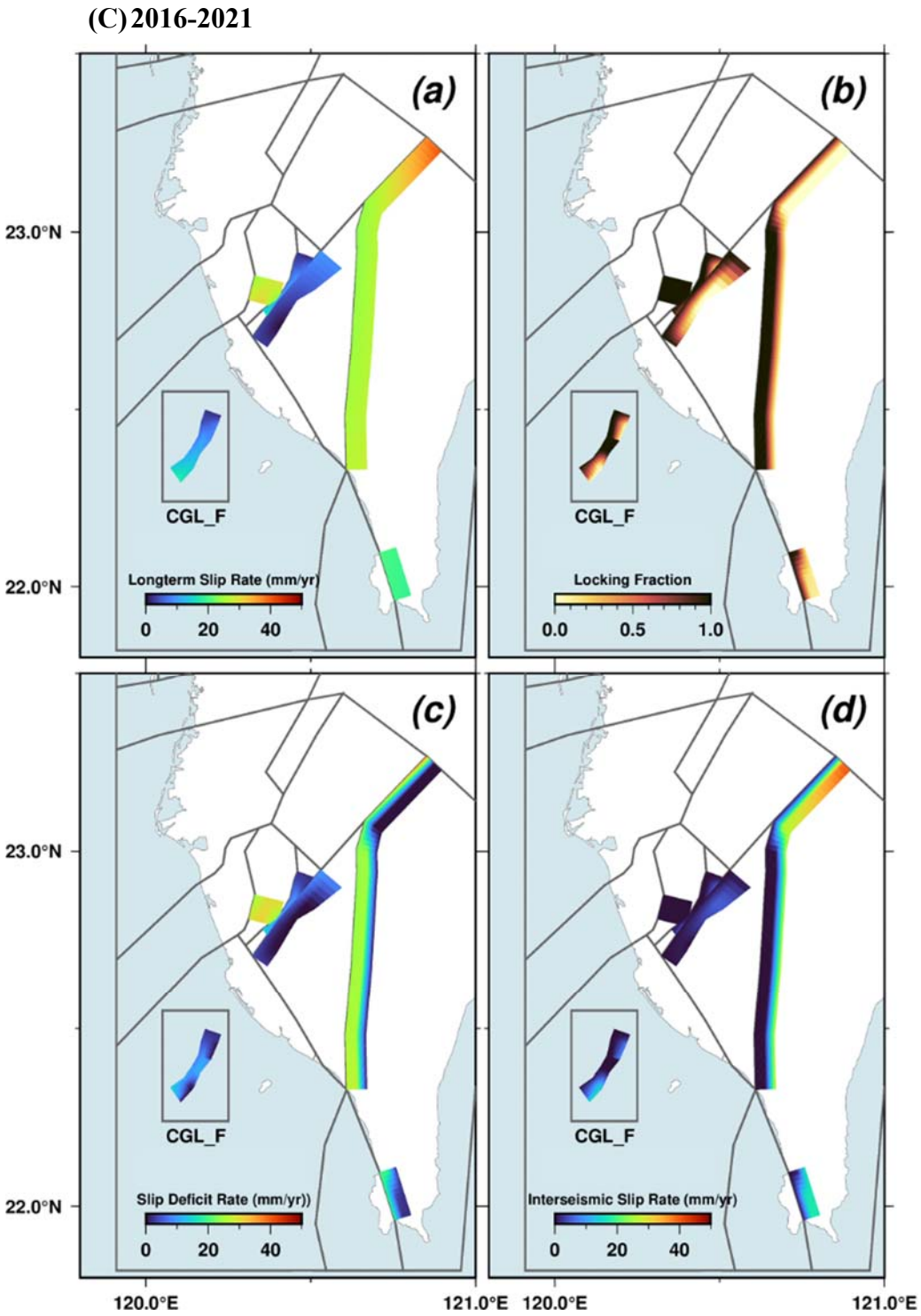
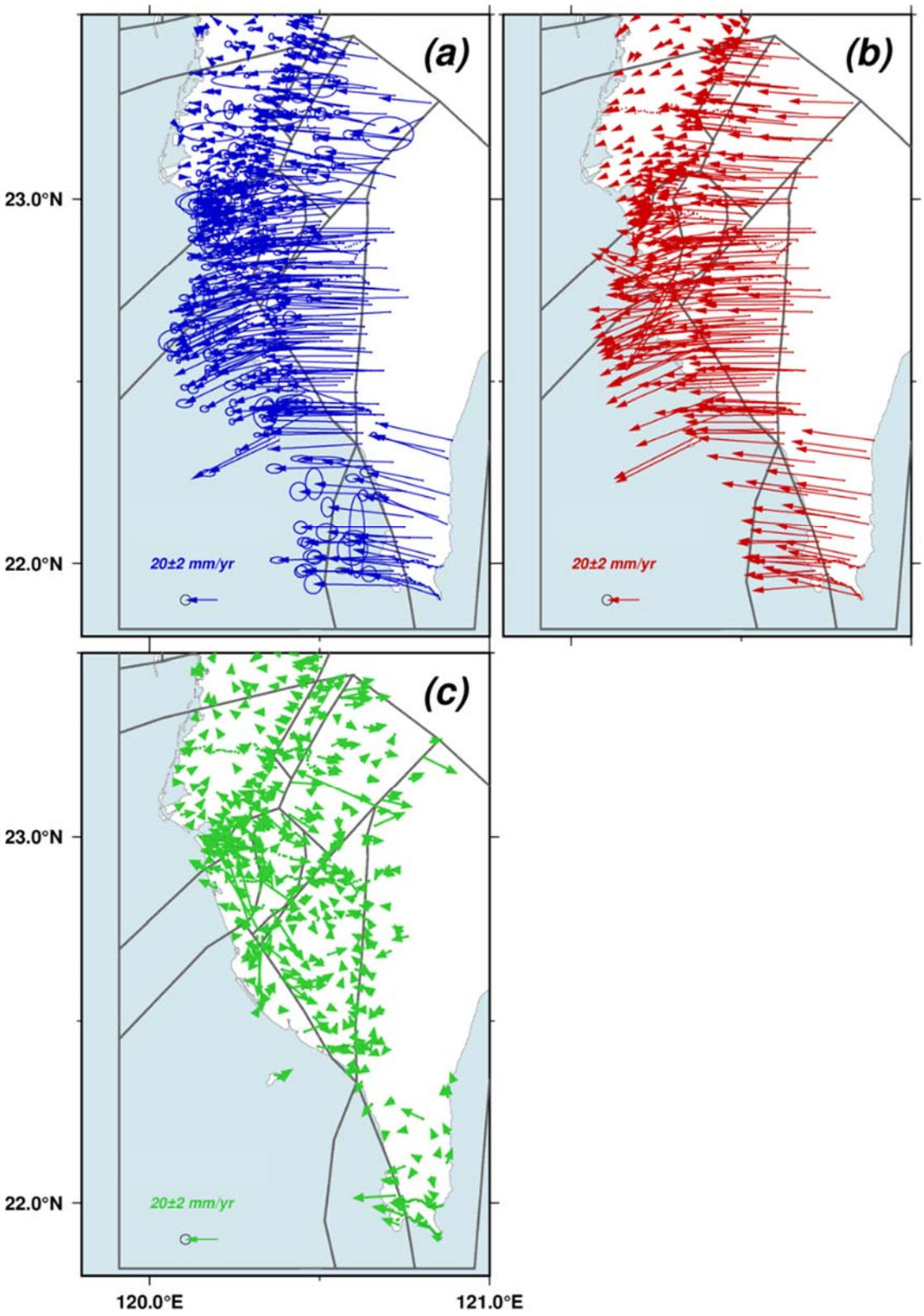


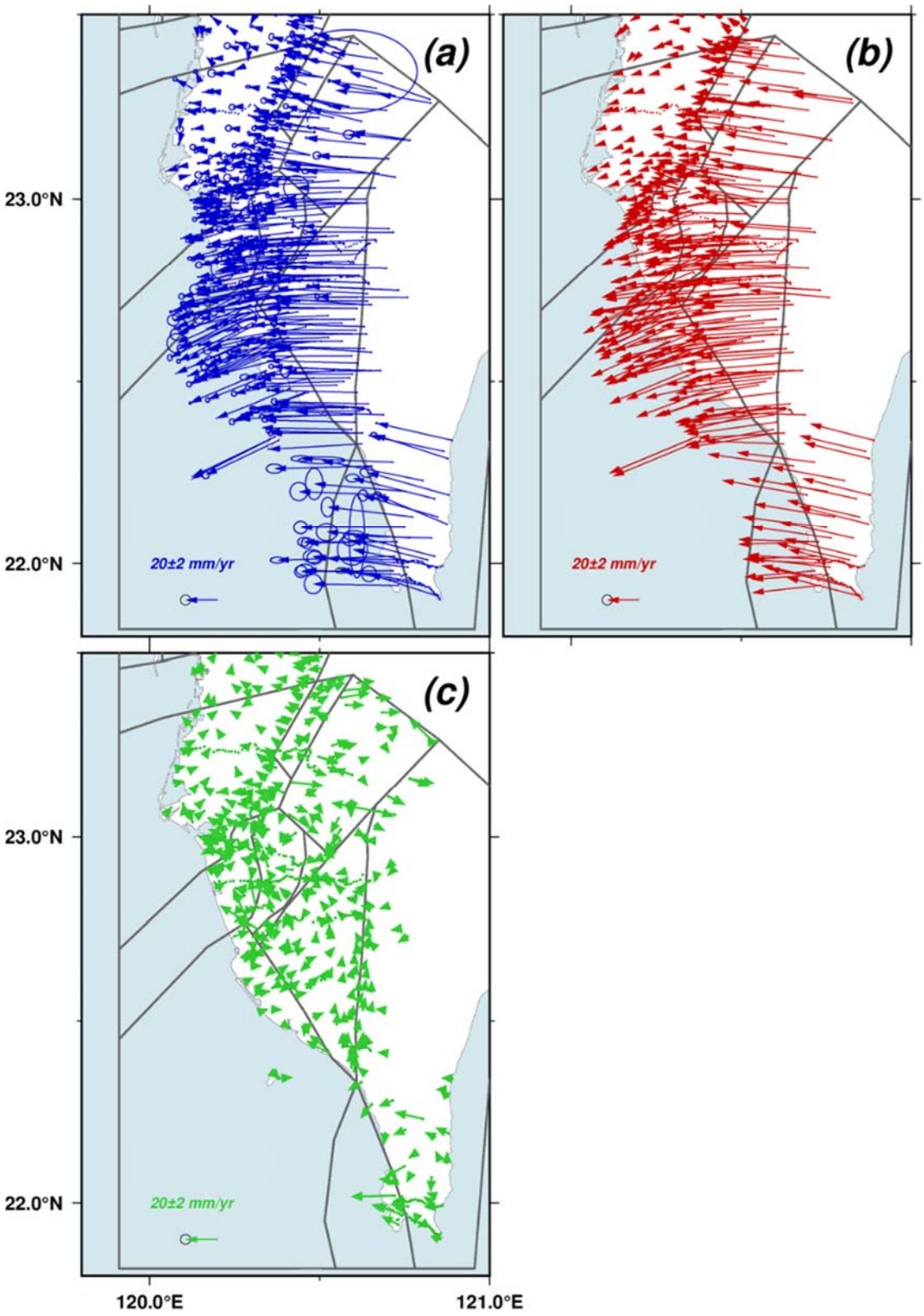
圖 5-2.3：三個時期：(A)2003-2009; (B) 2010-2015; (C) 2016-2021 的斷層滑移速率變化圖。（a）斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置，暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b) 各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。（c）各斷層面的滑移虧損率。（d）由(a)圖減去(c)圖所得到的斷層間震期滑移速率。

Fgure 5-2.3: Map showing changes of fault slip rates in the three periods. (a) The longterm fault slip rates. (b) The distribution of coupling coefficients. (c) The fault deficit rates. (d) Interseismc slip rates, obtained by substracting the deficit rates in (c) from the longterm slip rates in (a).

(A) 2003-2009


(a)
(b)
(c)
20±2 mm/yr
20±2 mm/yr
20±2 mm/yr
23.0°N
22.0°N
23.0°N
22.0°N
120.0°E
121.0°E

(B) 2010-2015



(C) 2016-2021

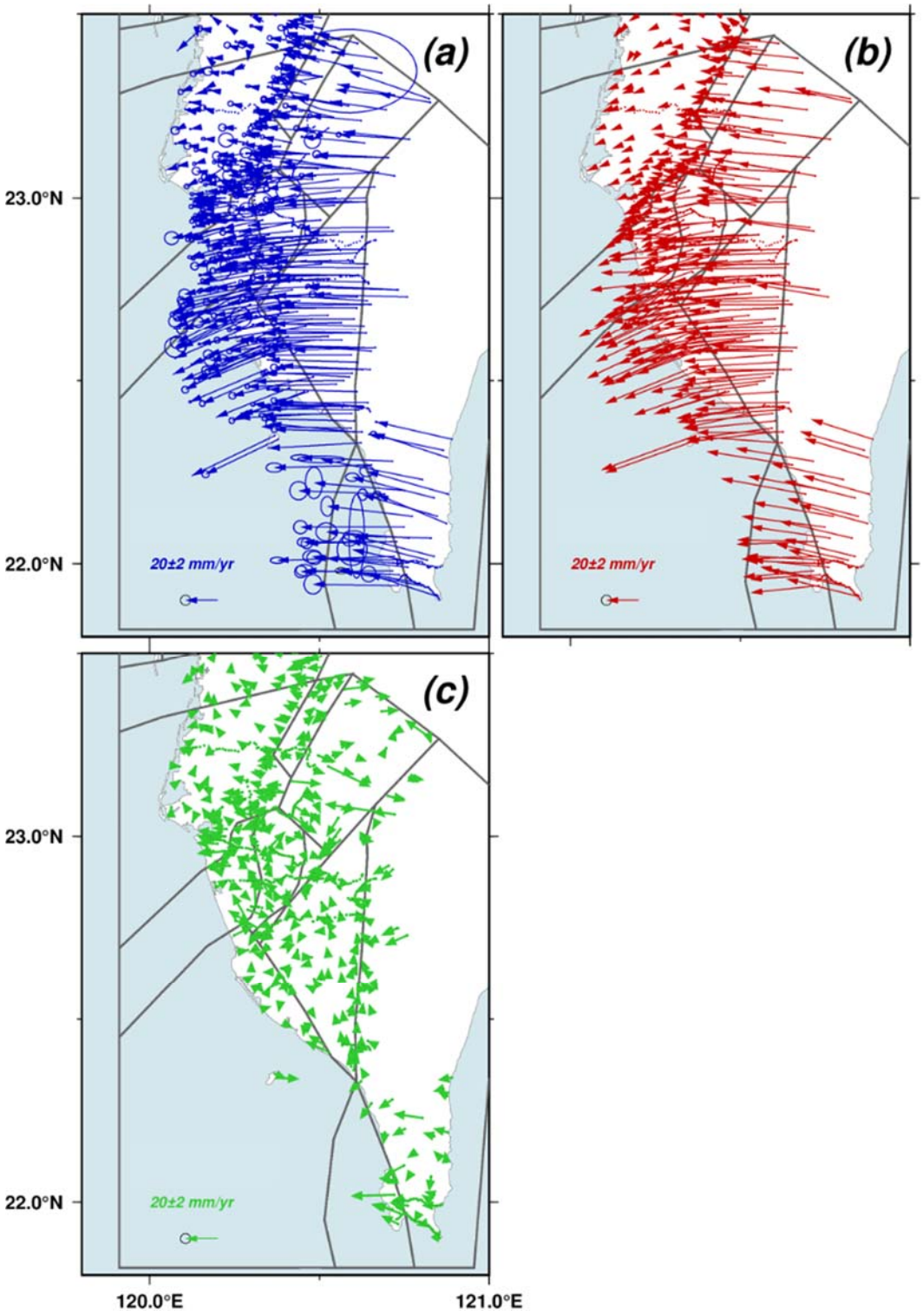
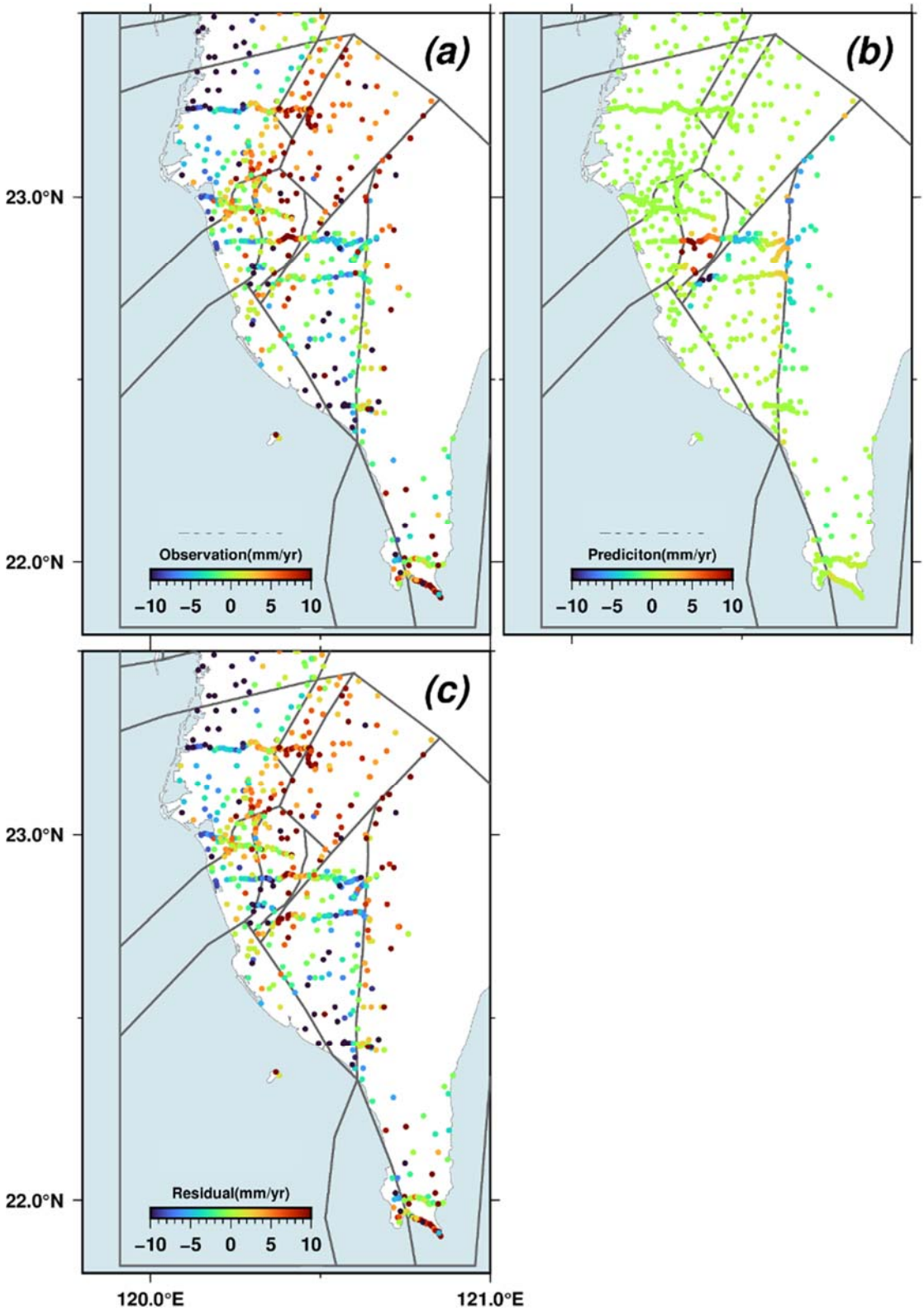


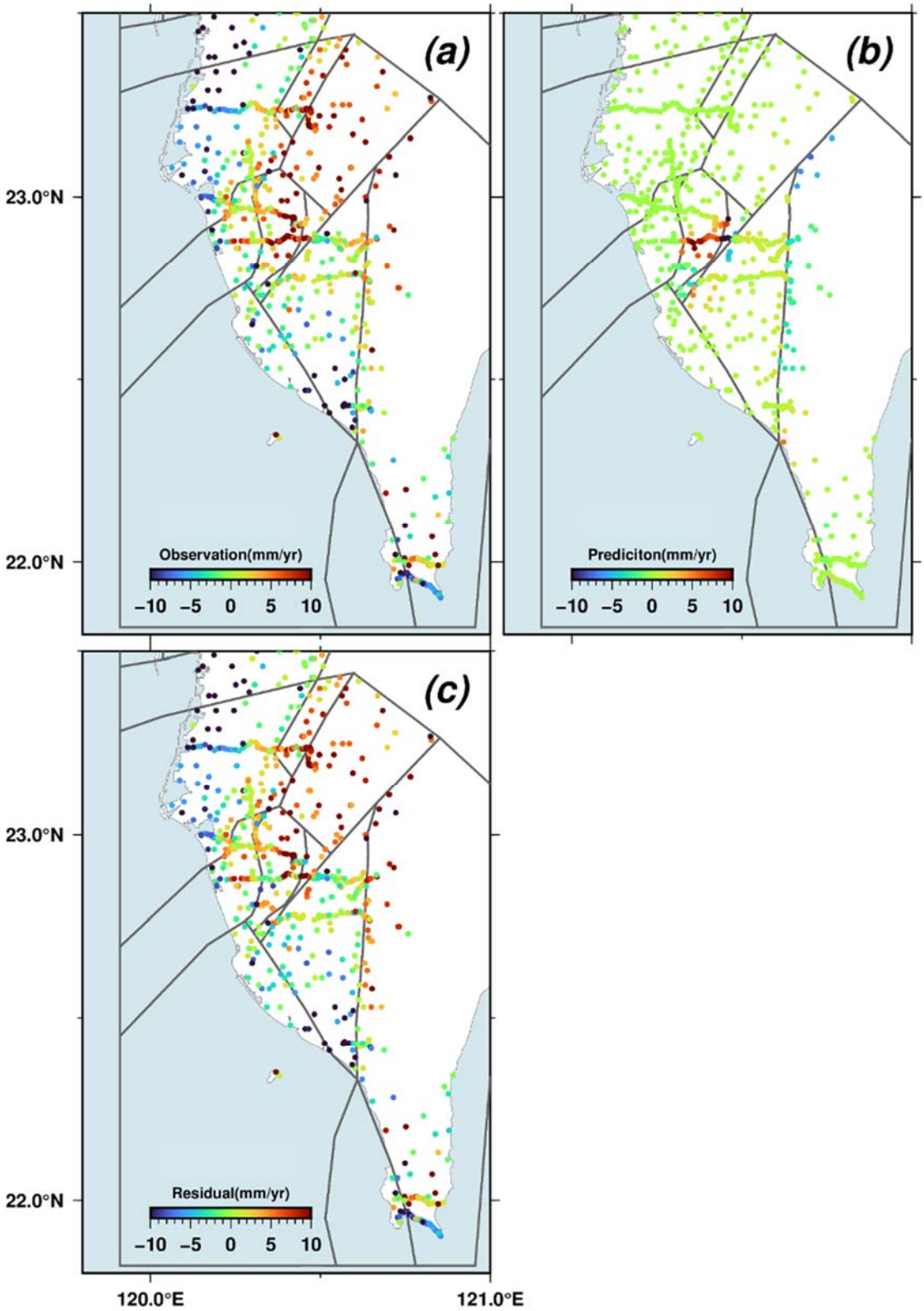
圖 5-2.4：三個時期中(a) GNSS 觀測水平速度場，黑線代表各塊體的地表位置。(b) 最佳塊體模型所預估的水平速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。

Figure 5-2.4: For the three time periods: (a) Blue arrows show the horziontal components of the GNSS velocity field. Black lines are the boundary of blocks. (b) The modeled horziontal velocities. (c) The residual between our modeled and the observed velocities.

2003-2009


(a)
(b)
(c)
23.0°N
22.0°N
Observation(mm/yr)
Prediciton(mm/yr)
Residual(mm/yr)
−10 −5 0 5 10
120.0°E
121.0°E

(A) 2010-2015


(a)
(b)
(c)
23.0°N
22.0°N
Observation(mm/yr)
Prediciton(mm/yr)
Residual(mm/yr)
−10 −5 0 5 10
120.0°E
121.0°E

(B) 2016-2021

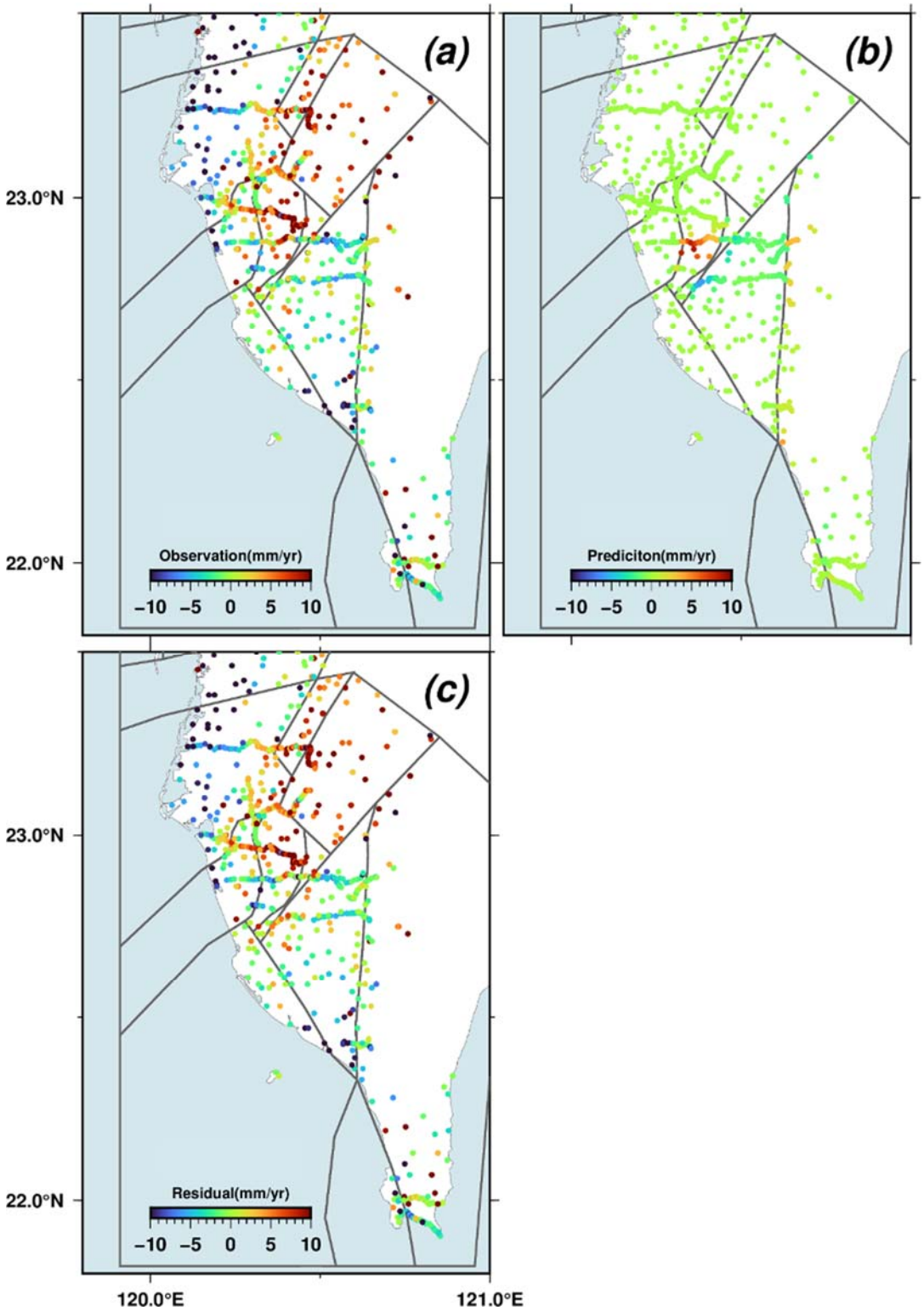


圖 5-2.5：三個時期中(a) GNSS 及精密水準所觀測的垂直速度場。(b) 最佳塊體模型所預估的地表垂直速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。

Figure 5-2.5: For the three different time periods: (a) Points show the vertical motion measured by GNSS and precise leveling. (b) The modeled vertical velocities. (c)The residual between our estimated and the observated vertical velocities.

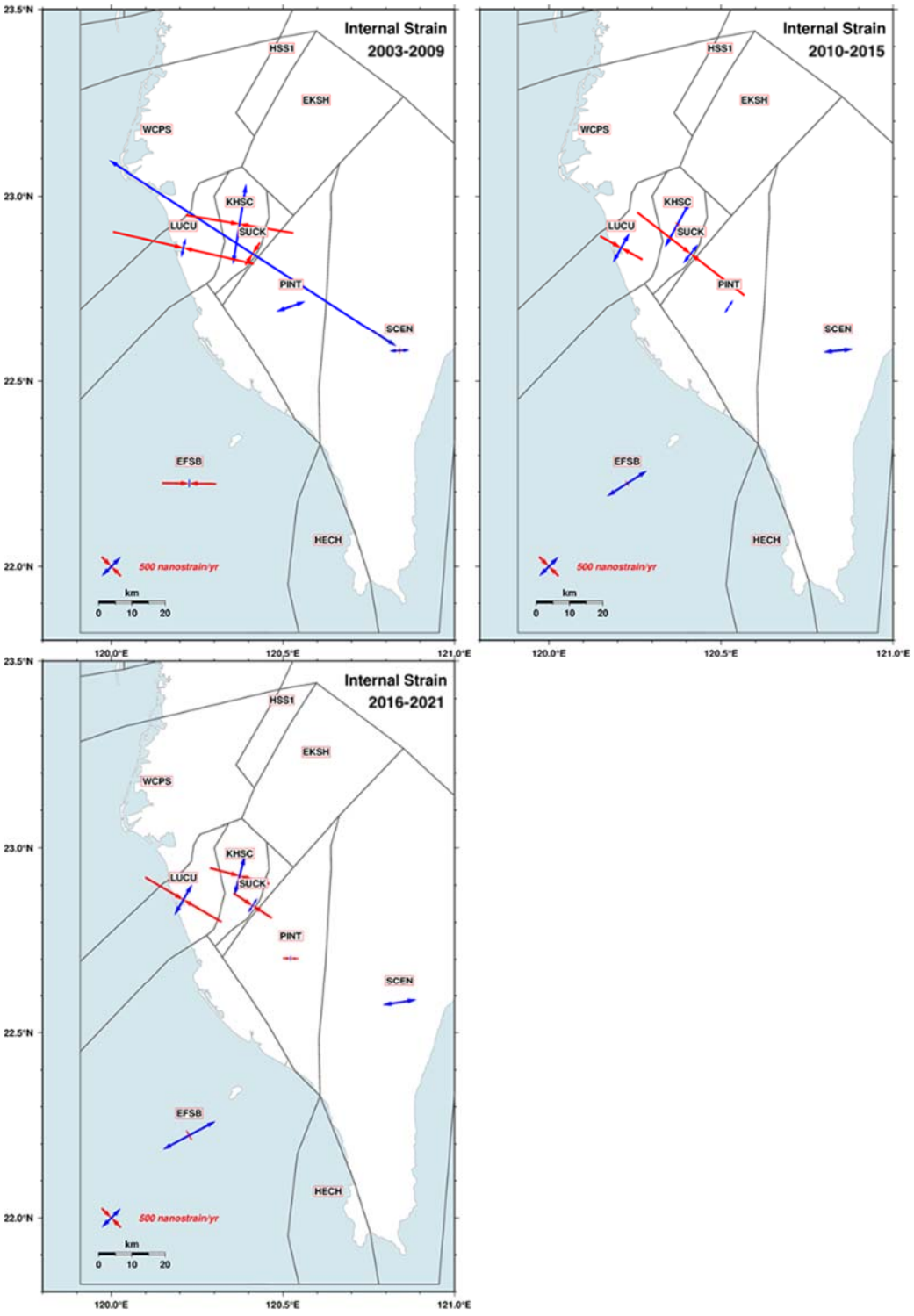


圖 5-2.6：三個時期各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

Figure 5-2.6: Internal strain within each block in three period. Red and blue arrows reprsent maxmim and minmim principle strain rate.

表 5-2.2：三個測地資料時期中，各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓。

Table 5-2.2: The location of rotation poles, the angular velocities and their standard error of each block, and the maximum and minimum principal axes and azimuths of the error ellipse for each pole in the three periods of geodetic data.

名稱	經度	緯度	角速度（deg/my）	角速度誤差（deg/my）	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長（deg）	誤差橢圓長軸方位角
(A) 2003-2009							
EURA	180	0	0	0	長軸方位角	0	0
CHYI	120.348	23.309	8.9	0.1	66.3	1.1	1.0
WCPS	123.812	16.674	0.3	0.1	74.4	30.5	25.8
EKSH	121.441	30.885	-2.5	0.16	59.4	5.1	4.4
LUCU	142.677	-13.832	0.20	0	0	0	0
SUCK	44.981	75.435	-0.69	0	0	0	0
KHSC	184.612	-40.089	0.21	0	0	0	0
PINT	322.477	77.123	-0.5	0	0	0	0
EFSB	161.87	-34.992	0.6	0	0	0	0
SCEN	109.902	-22.453	0.6	0	0	0	0
HSS1	121.664	49.649	-0.4	0.3	39.6	48.4	41.7
HECH	130.591	-40.924	0.5	0	0	0	0
HSS1	121.664	49.649	0.1	0.1	60.3	67.9	61.5
名稱	經度	緯度	角速度（deg/my）	角速度誤差（deg/my）	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長（deg）	誤差橢圓長軸方位角
(B) 2010-2015							
EURA	180	0	0.0	0.0	長軸方位角	0	0
CHYI	120.348	23.309	8.9	0.2	66.3	1.1	1.0
WCPS	123.812	16.674	0.3	0.2	74.4	30.5	25.8
EKSH	121.441	30.885	2.4	0.3	59.4	5.1	4.4
LUCU	141.246	-32.738	0.3	0.0	0	0	0
SUCK	129.765	-40.062	0.5	0.0	0	0	0
KHSC	172.509	-50.796	0.2	0.0	0	0	0
PINT	148.842	-59.904	0.5	0.0	0	0	0
EFSB	159.671	-48.218	0.7	0.0	0	0	0
SCEN	107.502	-23.014	0.6	0.0	0	0	0
HSS1	121.664	49.649	0.4	0.4	39.6	48.4	41.7
HECH	130.591	-40.924	0.5	0.0	0	0	0
HSS1	121.579	27.643	0.1	0.1	60.3	67.9	61.5

名稱	經度	緯度	角速度（deg/my）	角速度誤差（deg/my）	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長（deg）	誤差橢圓長軸方位角
(C) 2016-2021							
EURA	180	0	0.0	0.0	長軸方位角	0	0
CHYI	120.348	23.309	8.9	0.2	66.3	1.1	1.0
WCPS	123.812	16.674	0.3	0.2	74.4	30.5	25.8
EKSH	121.441	30.885	2.4	0.3	59.4	5.1	4.4
LUCU	136.185	-23.157	0.3	0.0	0	0	0
SUCK	128.045	-10.604	0.7	0.0	0	0	0
KHSC	40.472	67.297	0.3	0.0	180	0	0
PINT	135.654	-44.971	0.5	0.0	0	0	0
EFSB	161.033	-55.281	0.8	0.0	0	0	0
SCEN	108.063	-13.306	0.6	0.0	0	0	0
HSS1	121.664	49.649	0.4	0.4	39.6	48.4	41.7
HECH	130.591	-40.924	0.5	0.0	0	0	0
HSS1	121.579	27.643	0.1	0.1	60.3	67.9	61.5

表 5-2.3：斷層之地質滑移速率值(Shyu et al., 2016)及三個時期由塊體模型所估算的長期滑移速率與滑移虧損率。

Table 5-2.3: The geological fault slip rates, and the longterm and slip deficit rates derived from our block models in the three periods.

斷層名稱	地質長期滑移速率最小值 (mm/yr)	地質長期滑移速率最大值 (mm/yr)	測地模型之長期滑移速率（mm/yr）	標準差 (mm/yr)	測地模型之滑移虧損率（mm/yr）	標準差 (mm/yr)
(A) 2003-2009						
小崗山	1.1	5.5	31.8	11.7	32.9	12.2
車瓜林	Nan	Nan	33.8	13.7	34.8	49.0
恆春	5.9	6.4	18.5	0.6	18.5	0.6
潮州	0.6	2.9	12.0	4.6	6.7	6.0
旗山	0.7	1.5	41.1	12.5	14.9	12.9
(B) 2010-2015						
小崗山	1.1	5.5	21.8	2.6	30.1	20.3
車瓜林	Nan	Nan	29.1	2.5	18.2	14.6
恆春	5.9	6.4	20.6	0.4	9.3	11.0
潮州	0.6	2.9	20.5	7.2	21.0	9.4
旗山	0.7	1.5	16.7	6.4	6.7	7.1
(C) 2016-2021						
小崗山	1.1	5.5	26.9	4.3	27.5	4.5
車瓜林	Nan	Nan	10.0	4.7	6.0	5.2
恆春	5.9	6.4	19.7	0.4	10.1	9.4
潮州	0.6	2.9	27.7	4.8	15.0	13.6
旗山	0.7	1.5	4.5	2.5	2.9	3.4

5-3 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model）

5-3-1 斷層模型原理與使用參數

本計畫使用 Johnson（2013） 基於 Okada（1985, 1992）彈性半無限空間斷層錯位模型所開發的基線應變模型。基本原理和塊體模型近乎一致，在塊體模型中假設震間速度場是由於塊體旋轉和斷層鎖定造成之地表速度梯度所組成。斷層錯位模型是基線應變模型的基礎是採用根據彈性錯動理論（Steketee, 1958）所建立之斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992），其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體（Poisson solid），即彈性模量（elastic modulus）（λ）等於剪切模量（shear modulus）（μ）之彈性體。沿著斷層（fault patch/fault element）的斷層滑移量Δu_j（ξ_1, ξ_2, ξ_3）會使均質均向的彈性體表面產生位移場Δu_i（x_1, x_2, x_3），其關係如式 5-4.1 所列。

$$\boldsymbol{u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\, v_k d\sum} \qquad \text{（式 5-4.1）}$$

其中，F 為施力點之作用力；δ_{jk}為克羅內克函數（Kronecker delta），當 j＝k 時，δjk＝1，否則為 0；v_k為正交於地表單位（surface element）$d\sum$之餘弦函數方向。Δui 和Δuj 的單位是一致的，如果是模擬地表速度場，則常見的單位為 mm/yr；如果是模擬同震位移場，則常見的單位為 mm 或是 m。根據式 5-4.1，亦即每一個斷層面單位（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單位產生對應之地表位移量；而任一地表單位之位移量，會等於所有斷層單位上滑移量作用在該地表單位位移量的總和。

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。其中，斷層位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度（圖 5-3.1）。斷層滑移量（fault slip）包

含三個方向的分量[S_1, S_2, S_3]，分別以左移（left-lateral strike slip）、逆衝（reverse dip slip）及伸張（tensile slip）為正方向。在進行對雙偶合震源之斷層活動分析時，一般只會考慮走向滑移量（S_1，strike slip）與傾向滑移量（S_2，dip slip）；在進行火山之岩漿沿岩脈運動分析時，才會採用伸張滑移量（S_3）。斷層滑移角（rake）指示斷層上盤相對於下盤之運動方向，其和斷層滑移量之關係為 tan(rake) = S_2 / S_1。地表位移量（displacement）同樣也包含三個方向的分量[U_1, U_2, U_3]，分別以東（East）、北（North）與上（Up）為正方向。水平位移量（horizontal displacement）則為 sqrt($U_1^2 + U_2^2$)。

在基線應變正演模型中，假設是「地表的應變率是來自於斷層鎖定所造成之彈性變形」，因此基於彈性錯動理論可以估算斷層滑移虧損速率所造成各測站之速度場，進一步可以計算個測站間之基線應變率（Johnson, 2013）。測站間基線之建立採用建立德勞內三角形（Delaunay triangle）的方式，對各測站之坐標計算後而得。各基線之伸長率（elongation rate）定義，為將基線兩端測站速度差異向量，投影至基線方向之向量，亦即每年該基線長度之變化量，最後再除以原基線長（式 5-4.2）（Johnson, 2013）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad （式 5-4.2）$$

其中 e 為伸長率；ΔL 為每年基線長度之變化量，亦即基線兩端測站速度差異向量在基線上之投影量；L_0 為基線原始長度。

就基線應變反演模型，本計畫給定斷層幾何參數，地表基線伸長率與斷層滑移虧損率間之格林函數 G 由 Okada（1985, 1992）所提供之方程式求得，斷層滑移虧損速率矩陣為 s，地表基線伸長率矩陣為 d，則地表速度及斷層滑移虧損率間之關係式以 Gs = d 來表示。本研究以地表速度場誤差之倒數為權重，利用最小二乘法計算式 3 之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\boldsymbol{Gs} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad （式 5-4.3）$$

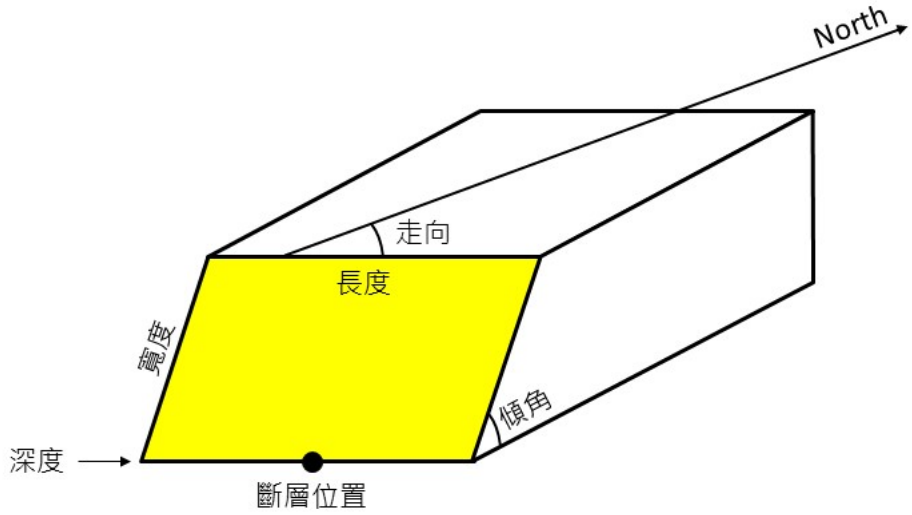


圖 5-3.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

Figure 5-3.1: Perspective schematic view of fault dislocation model and its fault geometry parameters. Fault geometry parameters include fault location (km), depth (km), length (km), width (km), strike (°) and dip (°).

5-3-2 斷層模擬結果

本研究主要為臺灣南部地區，共有五條主要斷層，使用臺灣南部地所觀測到的 GNSS 及精密水準資料（圖 5-3.2、圖 5-3.3），進行臺灣南部地區活動斷層及其潛在活動構造斷層模擬，推求此地區主要活動斷層滑移虧損速率分布。利用基線應變模型反演此水平速度分量，計算臺灣南部地區各斷層滑移虧損率平均值（表 5-3.1）。本研究藉由基線應變反演模型之建立，避開傳統塊體模型難以估算塊體運動量的困難，直接求取可以用來評估地震潛勢之斷層滑移虧損速率。

由坐標時間序列分析可知，臺灣南部地區自 2002 年至今的地表速度場可以區分成三個不同時間段，不同時段的速度場相互間並不相同，其中 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震是南部地區速度場發生改變的兩個時間點。換言之，要完整了解臺灣南部地區斷層隨時間受大地應力影響的反映，需要針對三個時期 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2021 年三個時間段的速度場成果分別進行斷層模擬（圖 5-3.2、圖 5-3.3）。

模型一使用 2002－2010 年之速度（圖 5-3.2(a)、圖 5-3.3(a)），結果顯示當平滑參數為 -1.5 時，所得到斷層滑移虧損速率分布為最佳模型，不符值為 643.9 mm/yr（圖 5-3.4）。其最佳模型指出，車瓜林斷層為逆斷層，於車瓜林斷層北段其平均斷層滑移虧損速率為 14.1±12.1 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–4 公里範圍內，有最大滑移虧損率 10.5 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.7）；車瓜林斷層中段為左移斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 20.1±10.8 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–5 公里範圍內，有最大滑移虧損率 8.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.7）；車瓜林斷層南段為右移斷層，車瓜林斷層南段周遭 GNSS 測站分佈稀少，平均斷層滑移虧損速率為 0.8±0.2 mm/yr，較無明顯滑移虧損率於此處累積（圖 5-3.7）。車瓜林斷層測地矩虧損速率為 1.56 × 10^{23} dyne-cm/yr。

旗山斷層北段為逆斷層其平均斷層滑移虧損速率為 2.2±1.4 mm/yr（圖 5-37）；旗山斷層中段為正斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 1.5±0.8 mm/yr，然而

旗山斷層北段與中段周遭GNSS測站分佈稀少較無明顯滑移虧損率於此處累積；旗山斷層南段為左移斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 0.3±0.2 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–6 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 5.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.7）。旗山斷層測地矩虧損速率為 8.36 × 10^{22} dyne-cm/yr。

小崗山斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 16.8±6.9 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–6 公里範圍內，有最大滑移虧損率 6 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.7），測地矩虧損速率為 5.21 × 10^{22} dyne-cm/yr。

潮州斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 14.3±12.1 mm/yr，主要集中於斷層北段與中段，其斷層北段主要集中於深度約 0–8 公里範圍內，有最大滑移虧損率 35 mm/yr 於此處累積，斷層中段主要集中於深度約 0–12 公里範圍內，有最大滑移虧損率 50 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.7），測地矩虧損速率為 1.31 × 10^{25} dyne-cm/yr。

恆春斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 32.7±10.3 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–10 公里範圍內，有最大滑移虧損率 5.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.7），測地矩虧損速率為 5.95 × 10^{22} dyne-cm/yr。

模型二使用 2010–2016 年之速度（圖 5-3.2(b)、圖 5-3.3(b)），結果顯示當平滑參數為 -1.5 時，所得到斷層滑移虧損速率分布為最佳模型，不符值為 619.6 mm/yr（圖 5-3.5）。其最佳模型指出，車瓜林斷層北段其平均斷層滑移虧損速率為 29.8±10.1 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–4 公里範圍內，有最大滑移虧損率 5.5 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.8）；車瓜林斷層中段其平均斷層滑移虧損速率為 11.5±6.8 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–5 公里範圍內，有最大滑移虧損率 3.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.8）；車瓜林斷層南段為右移斷層，車瓜林斷層南段周遭 GNSS 測站分佈稀少，平均斷層滑移虧損速率為 0.2±0.7 mm/yr，較無明顯滑移虧損率於此處累積（圖 5-3.8）。車瓜林斷層測地矩虧損速率為 1.60 × 10^{22} dyne-cm/yr。

旗山斷層北段與中段較無明顯滑移虧損率於此處累積，其平均斷層滑移虧

損速率分別為，斷層北段平均斷層滑移虧損速率為 1.3±1.0 mm/yr（圖 5-3.8）；斷層中段其平均斷層滑移虧損速率為 0.3±0.2 mm/yr，而旗山斷層南段為左移斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 0.1±0.1 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–10 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 9.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.8）。旗山斷層測地矩虧損速率為 2.07 × 10^{23} dyne-cm/yr。

小崗山斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 24.4±6.2 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–6 公里範圍內，有最大滑移虧損率 6 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.8），測地矩虧損速率為 6.68 × 10^{22} dyne-cm/yr。

潮州斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 7.5±5.5 mm/yr，主要集中於斷層北段與中段，其斷層北段主要集中於深度約 0–8 公里範圍內，有最大滑移虧損率 20-30 mm/yr 於此處累積，斷層中段主要集中於深度約 0–8 公里範圍內，有最大滑移虧損率 25 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.8），而潮州斷層南段深度約 0–8 公里範圍內，也有約 25 mm/yr 之滑移虧損率於此處累積，測地矩虧損速率為 9.22 × 10^{24} dyne-cm/yr。

恆春斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 17.6±5.6 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–8 公里範圍內，有最大滑移虧損率 3.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.8），測地矩虧損速率為 1.47 × 10^{21} dyne-cm/yr。

模型三使用 2016－2021 年之速度（圖 5-3.2(c)、圖 5-3.3(c)），結果顯示當平滑參數為 -1.4 時，所得到斷層滑移虧損速率分布為最佳模型，不符值為 551.0 mm/yr（圖 5-3.6）。其最佳模型指出，車瓜林斷層北段其平均斷層滑移虧損速率為 30.7±11.3 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–4 公里範圍內，有最大滑移虧損率 3.5 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.9）；車瓜林斷層中段其平均斷層滑移虧損速率為 11.7±7.1 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–5 公里範圍內，有最大滑移虧損率 5.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.9）；車瓜林斷層南段為右移斷層，車瓜林斷層南段周遭 GNSS 測站分佈稀少，平均斷層滑移虧損速率為 0.2±0.5 mm/yr，較無明顯滑移虧損率於此處累積（圖 5-3.9）。車瓜林斷層測地矩虧損速率為 4.93 × 10^{22}

dyne-cm/yr。

旗山斷層北段與中段較無明顯滑移虧損率於此處累積，其平均斷層滑移虧損速率分別為，斷層北段平均斷層滑移虧損速率為 0.4±0.5 mm/yr（圖 5-3.9）；斷層中段其平均斷層滑移虧損速率為 0.3±0.2 mm/yr，而旗山斷層南段為左移斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 0.1±0.2 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–10 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 9.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.9）。旗山斷層測地矩虧損速率為 1.75×10^{23} dyne-cm/yr。

小崗山斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 34.2±11.0 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–6 公里範圍內，有最大滑移虧損率 5 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.9），測地矩虧損速率為 3.17×10^{22} dyne-cm/yr。

潮州斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 5.0±5.2 mm/yr，主要集中於斷層北段與中段，其斷層北段主要集中於深度約 0–8 公里範圍內，有最大滑移虧損率 25-35 mm/yr 於此處累積，斷層中段主要集中於深度約 0–8 公里範圍內，有最大滑移虧損率 35 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.9），而潮州斷層南段深度約 0–8 公里範圍內，也有約 20 mm/yr 之滑移虧損率於此處累積，測地矩虧損速率為 9.98×10^{24} dyne-cm/yr。

恆春斷層為逆斷層，其平均斷層滑移虧損速率為 26.9±11.2 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–6 公里範圍內，有最大滑移虧損率 3.0 mm/yr 於此處累積（圖 5-3.9），測地矩虧損速率為 1.18×10^{22} dyne-cm/yr。

三個時期模型中可發現車瓜林斷層北段相較於中段與南段有較大的平均斷層滑移虧損速率，由速度場型態可發現斷層中段與南段的測站分佈較為稀疏，而斷層北段在甲仙地震後垂直速度場有水準測線的加密並且有較大的抬升速率，這可能是車瓜林斷層北段有較大的平均斷層滑移虧損速率的原因之一。

而小崗山斷層於甲仙地震後也有較大的平均斷層滑移虧損速率，從垂直速度場型態分佈來看可明顯看出小崗山斷層北段周遭於甲仙地震後有由沉降轉為抬升的速率，而於美濃震後斷層北段西邊有轉為沉降的趨勢，東邊依然保持抬

升趨勢，這樣明顯的速度型態變化可能是造成小崗山斷層有著較大的平均斷層滑移虧損速率原因之一。

另外恆春斷層也有較大的平均斷層滑移虧損速率，由於恆春斷層兩側的速度場方向有明顯改變，速度場顯示由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向兩測速度場明顯方向變化，此現象可以視為恆春斷層面上有較快速錯動的原因之一，然而會造成斷層兩側速度改變的除塊體的長期滑移外，也可能受潛移等其他變形影響，由於恆春斷層在 2006 年 12 月之後，正在經歷疑似慢滑移事件的發生，所以會高估恆春斷層的斷層滑移虧損速率。換言之，本計畫未來需要針對恆春斷層進行更進一步的研究工作，釐清疑似慢滑移事件對於斷層滑移虧損速率的影響量。

表 5-3.1：斷層平均滑移速率。

Table 5-3.1: Average slip deficit rates.

	斷層名稱	平均走滑移速率（s.s.mm/yr）	平均傾向滑移速率（d.s. mm/yr）	斷層平均滑移速率（mm/yr）	標準差（mm/yr）
模型一 2002-2010 年之速度	潮州斷層	13.3	1.5	14.3	12.1
	恆春斷層	17.2	26.4	32.7	10.3
	小崗山斷層	15.7	5.7	16.8	6.9
	車瓜林斷層（北）	1.1	13.9	14.1	12.1
	車瓜林斷層（中）	20.0	0.6	20.1	10.8
	車瓜林斷層（南）	0.7	0.3	0.8	0.2
	旗山斷層（北）	0.4	2.0	2.2	1.4
	旗山斷層（中）	1.5	0.1	1.5	0.8
	旗山斷層（南）	0.0	0.3	0.3	0.2
模型二 2010-2016 年之速度	潮州斷層	4.7	3.0	7.5	5.5
	恆春斷層	6.9	15.6	17.6	5.6
	小崗山斷層	15.4	18.1	24.4	6.2
	車瓜林斷層（北）	21.2	20.9	29.8	10.1
	車瓜林斷層（中）	11.5	0.0	11.5	6.8
	車瓜林斷層（南）	0.0	0.2	0.2	0.7
	旗山斷層（北）	1.3	0.1	1.3	1.0
	旗山斷層（中）	0.1	0.3	0.3	0.2
	旗山斷層（南）	0.0	0.0	0.1	0.1
模型三 2016-2021 年之速度	潮州斷層	2.4	2.8	5.0	5.2
	恆春斷層	7.6	24.6	26.9	11.2
	小崗山斷層	23.8	23.1	34.2	11.0
	車瓜林斷層（北）	22.2	21.0	30.7	11.3
	車瓜林斷層（中）	11.7	0.1	11.7	7.1
	車瓜林斷層（南）	0.0	0.1	0.2	0.5
	旗山斷層（北）	0.4	0.0	0.4	0.5
	旗山斷層（中）	0.0	0.3	0.3	0.2
	旗山斷層（南）	0.1	0.0	0.1	0.2

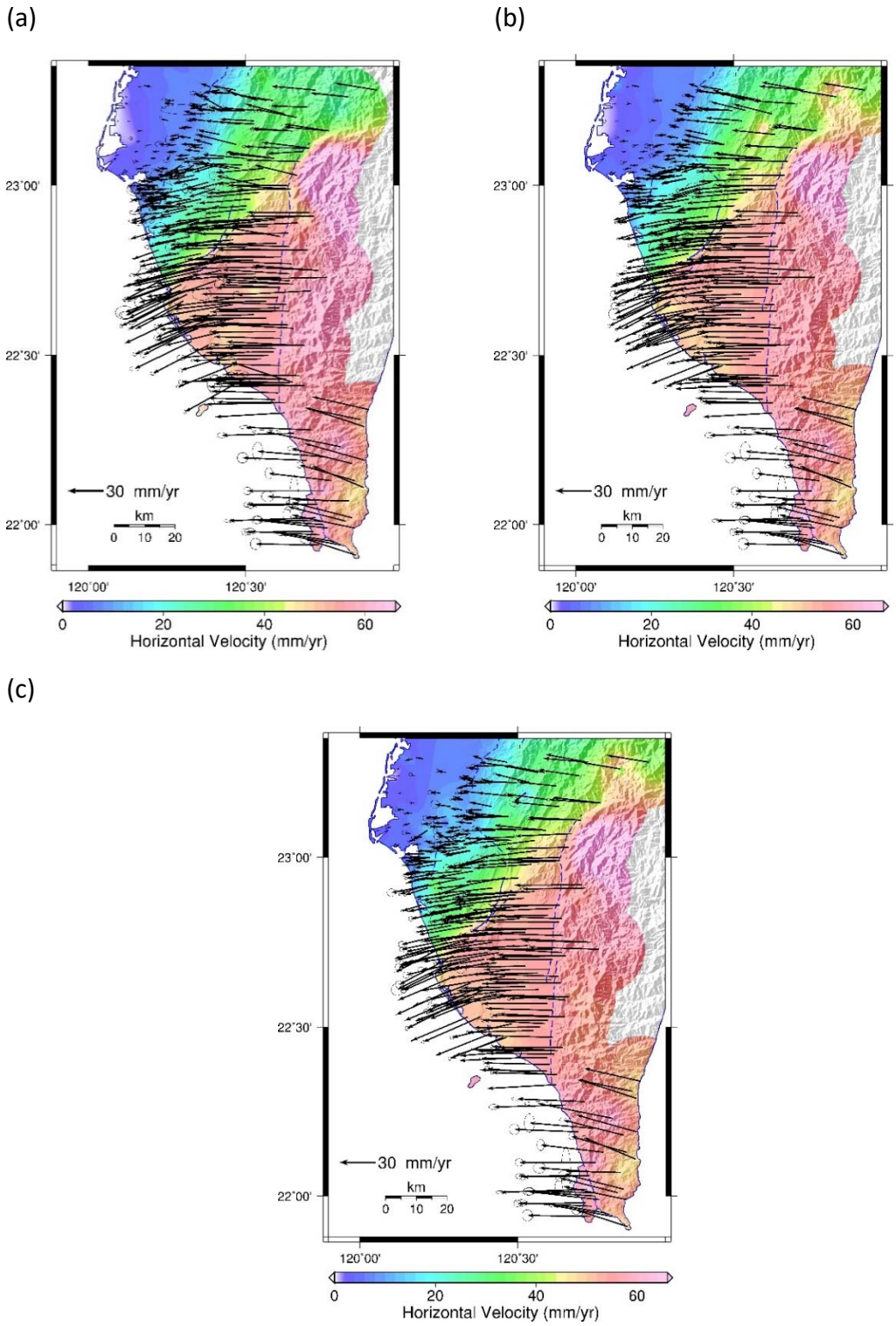


圖 5-3.2：臺灣南部地區 GNSS 連續站、移動站相對於測站 S01R 為之水平速度場（右邊）。藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層。(a) 表示 2002-2010 年水平速度場，(b) 表示 2010-2016 年水平速度場，(c) 表示 2016-2021 年水平速度場。

Figure 5-3.2: Horizontal GNSS velocity of SW Taiwan. The velocity of CGNSS and RGNSS are relative to S01R station. Blue dashed lines indicate the active faults defined by CGS. (a) The velocity field from 2002-2010; (b) The velocity field from 2010-2016; (c) The velocity field from 2016-2021.

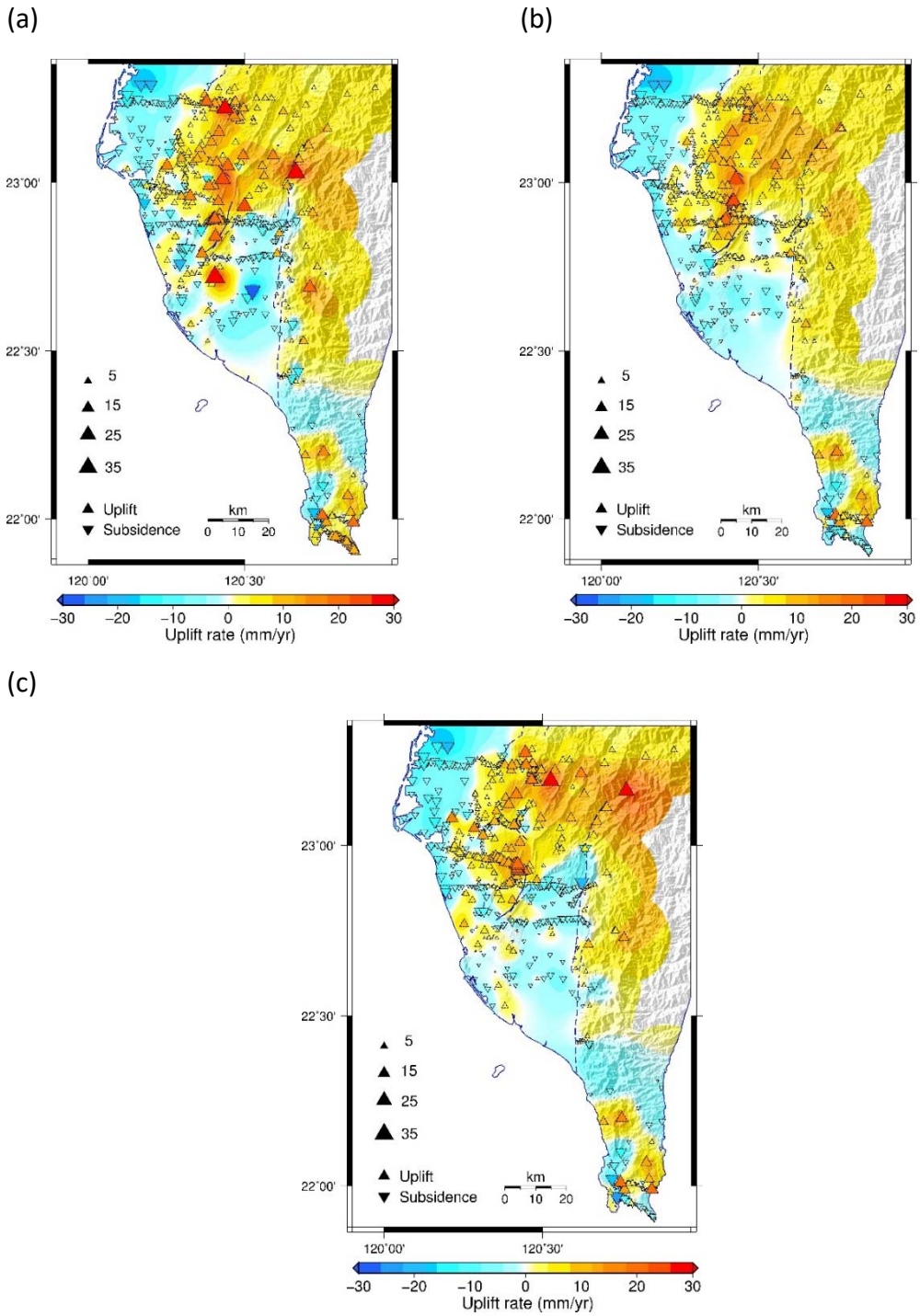


圖 5-3.3：臺灣南部地區相對於測站 S01R 為之垂直速度場。藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層。(a) 表示 2002-2010 年水平速度場，(b) 表示 2010-2016 年水平速度場，(c) 表示 2016-2021 年水平速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 5-3.3: Vertical velocity of SW Taiwan relative to S01R station. Blue dashed lines indicate the active faults defined by CGS. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors show uplift while cold colors show subsidence. (a) Velocity field from 2002-2010; (b) Velocity field from 2010-2016; (c) Velocity field from 2016-2021.

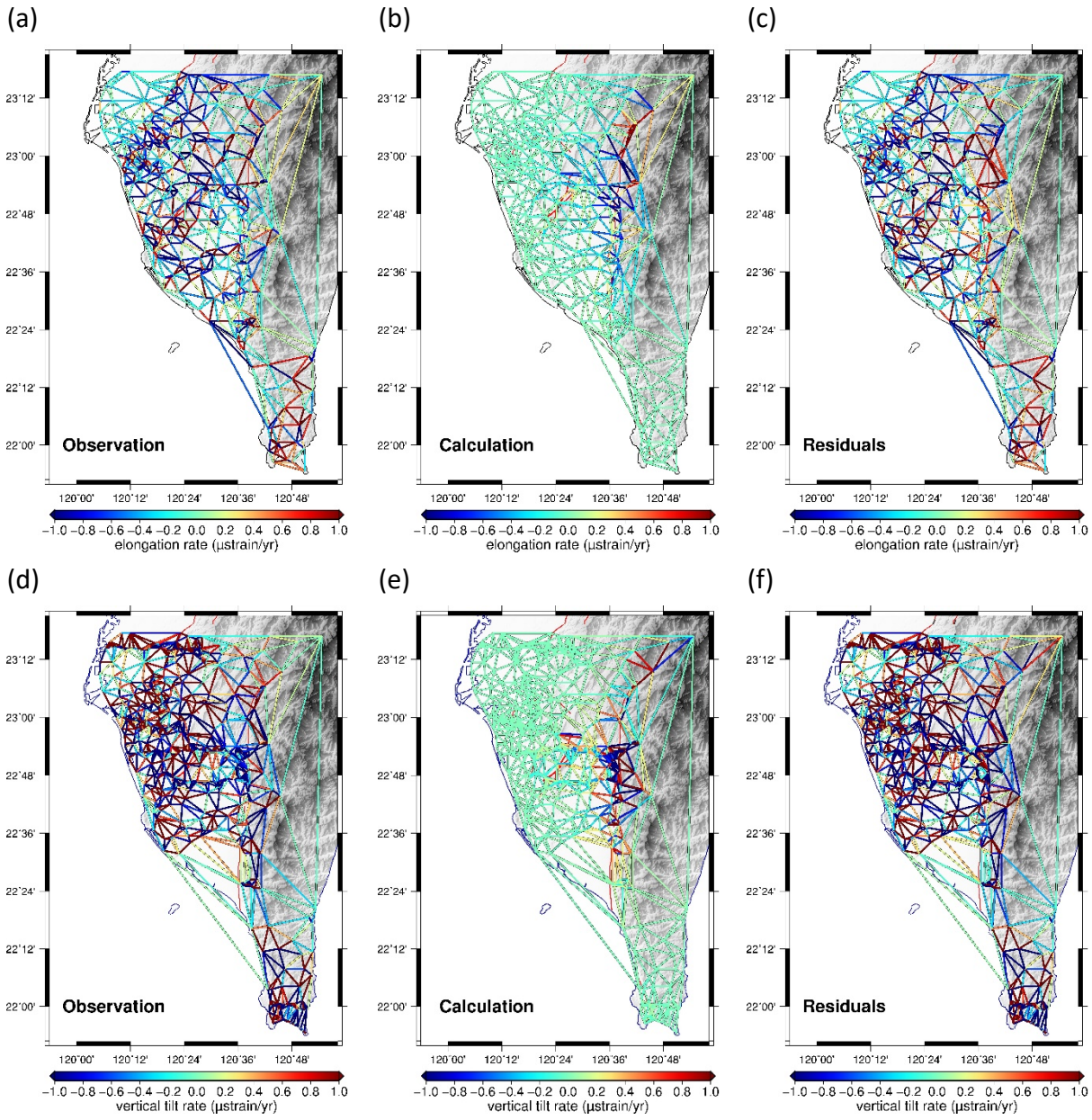


圖 5-3.4：模型一使用 2002–2010 年速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值、(b) 水平速度場計算值、(c) 水平速度場殘差；(d) 垂直速度場觀測值、(e) 垂直速度場計算值、(f) 垂直速度場殘差。

Figure 5-3.4: The 1st model applies the velocity from 2002 to 2010. (a) Horizontal velocity observation; (b) Horizontal velocity calculation; (c) Horizontal velocity residuals; (d) Vertical velocity observation; (e) Vertical velocity calculation; (f) Vertical velocity residuals.

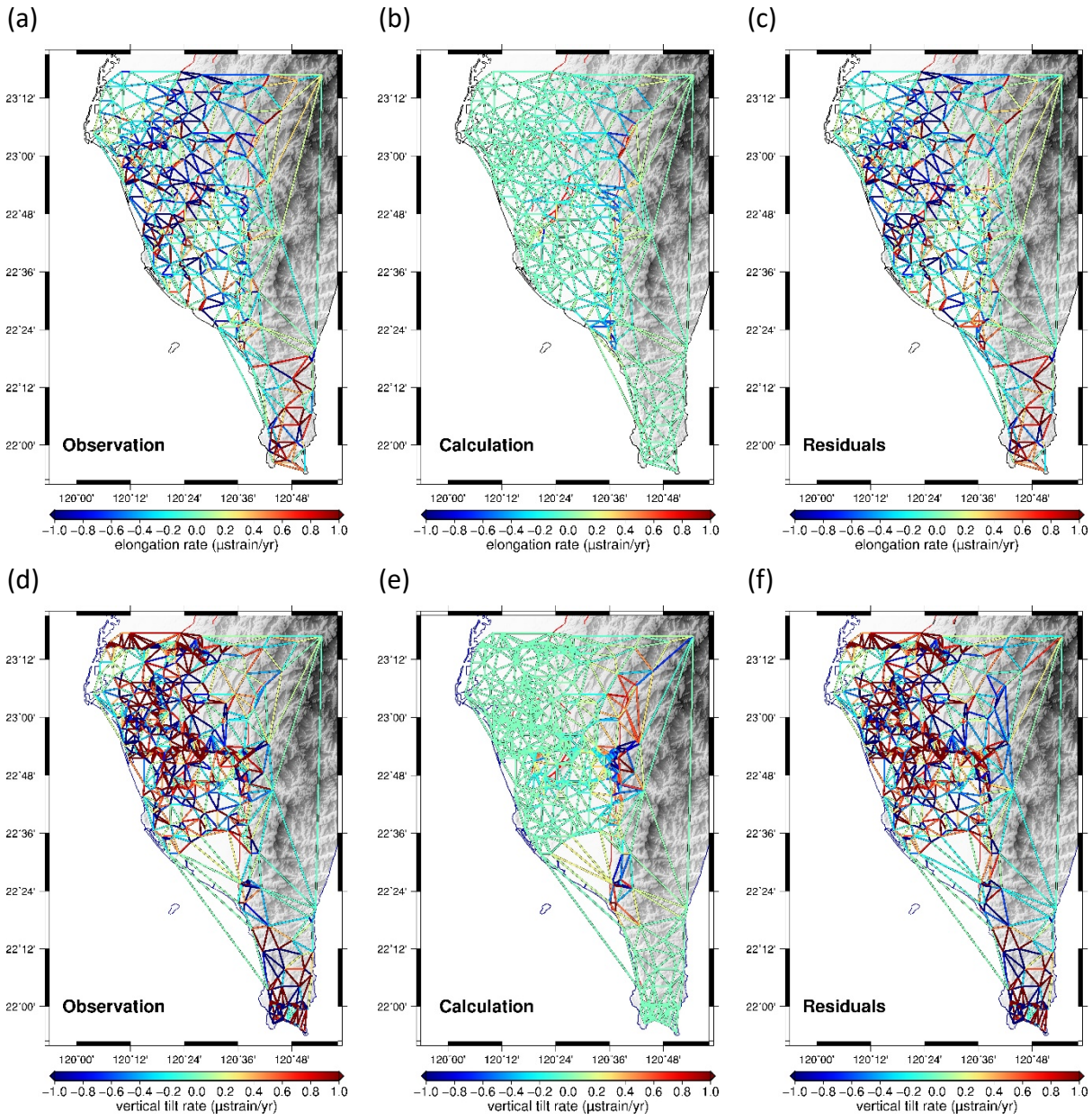


圖 5-3.5：模型二使用 2010–2016 年速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值、(b) 水平速度場計算值、(c) 水平速度場殘差；(d) 垂直速度場觀測值、(e) 垂直速度場計算值、(f) 垂直速度場殘差。

Figure 5-3.5: The 2st model applies the velocity from 2010 to 2016. (a) Horizontal velocity observation; (b)Horizontal velocity calculation;(c)Horizontal velocity residuals;(d)Vertical velocity observation; (e) Vertical velocity calculation ; (f) Vertical velocity residuals.

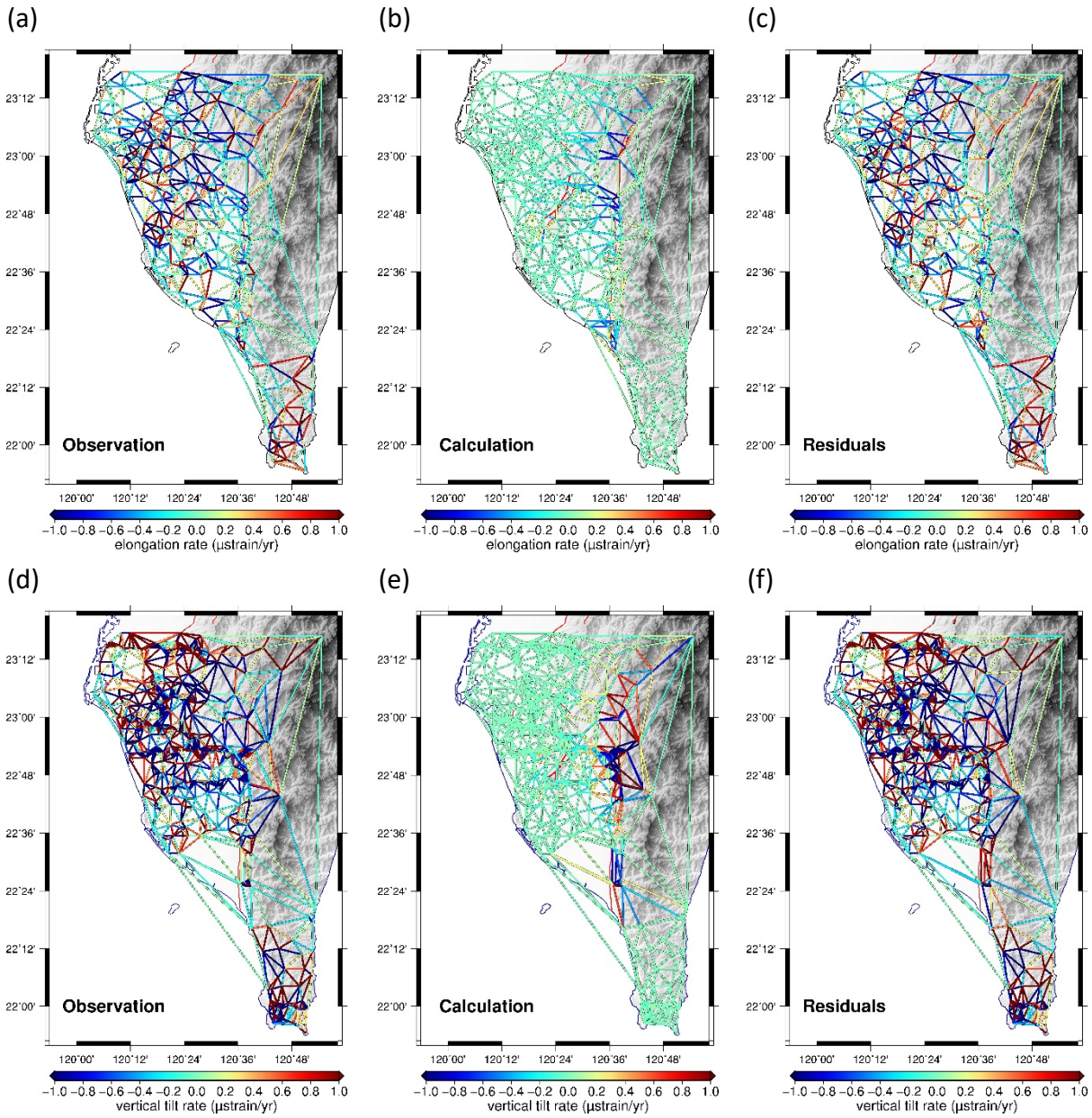


圖 5-3.6：模型三使用 2016–2021 年速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值、(b) 水平速度場計算值、(c) 水平速度場殘差；(d) 垂直速度場觀測值、(e) 垂直速度場計算值、(f) 垂直速度場殘差。

Figure 5-3.6: The 3st model applies the velocity from 2016 to 2021. (a) Horizontal velocity observation; (b) Horizontal velocity calculation; (c) Horizontal velocity residuals; (d) Vertical velocity observation; (e) Vertical velocity calculation; (f) Vertical velocity residuals.

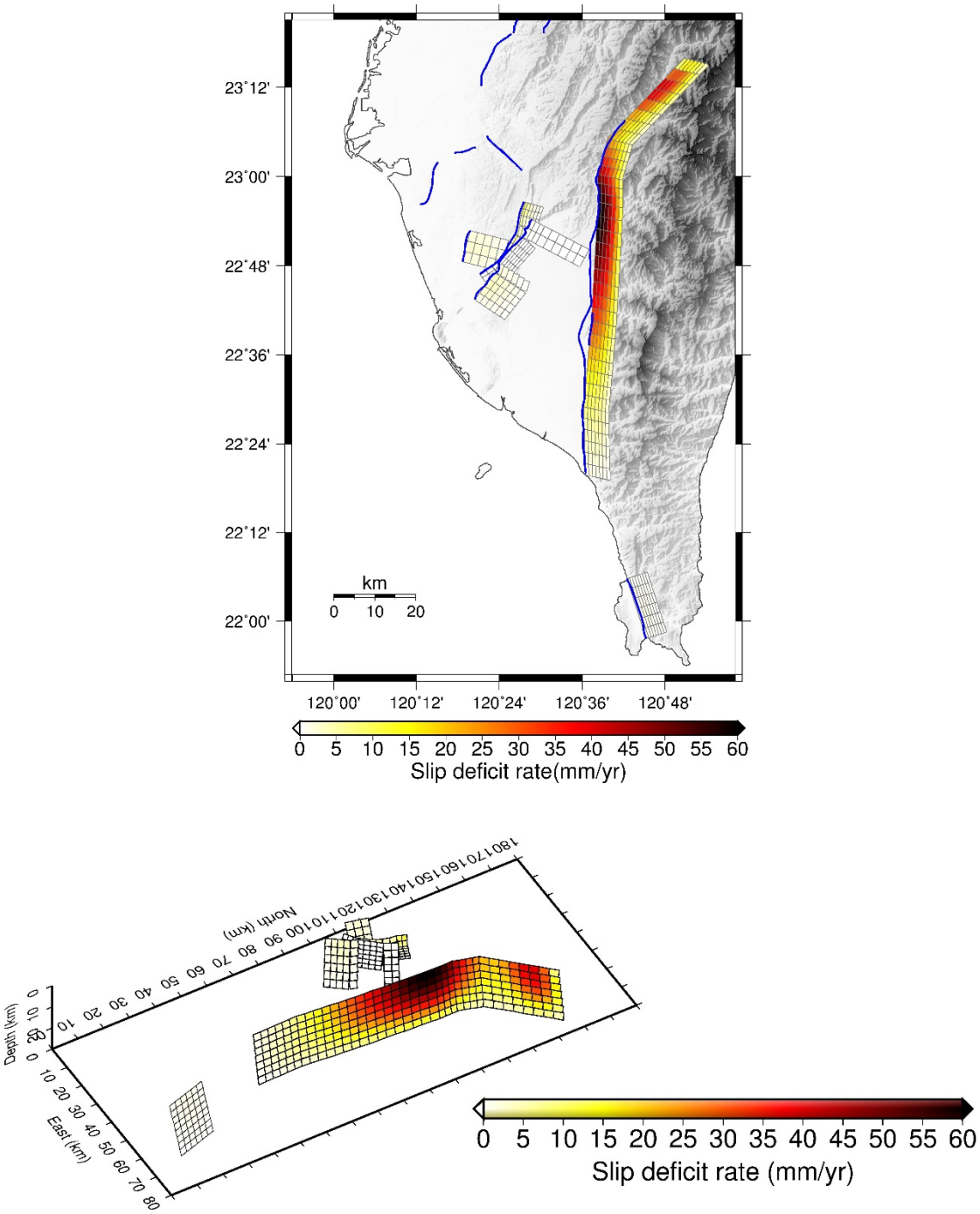


圖 5-3.7：模型一使用 2002–2010 年速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-3.7: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2002 to 2010 velocity.

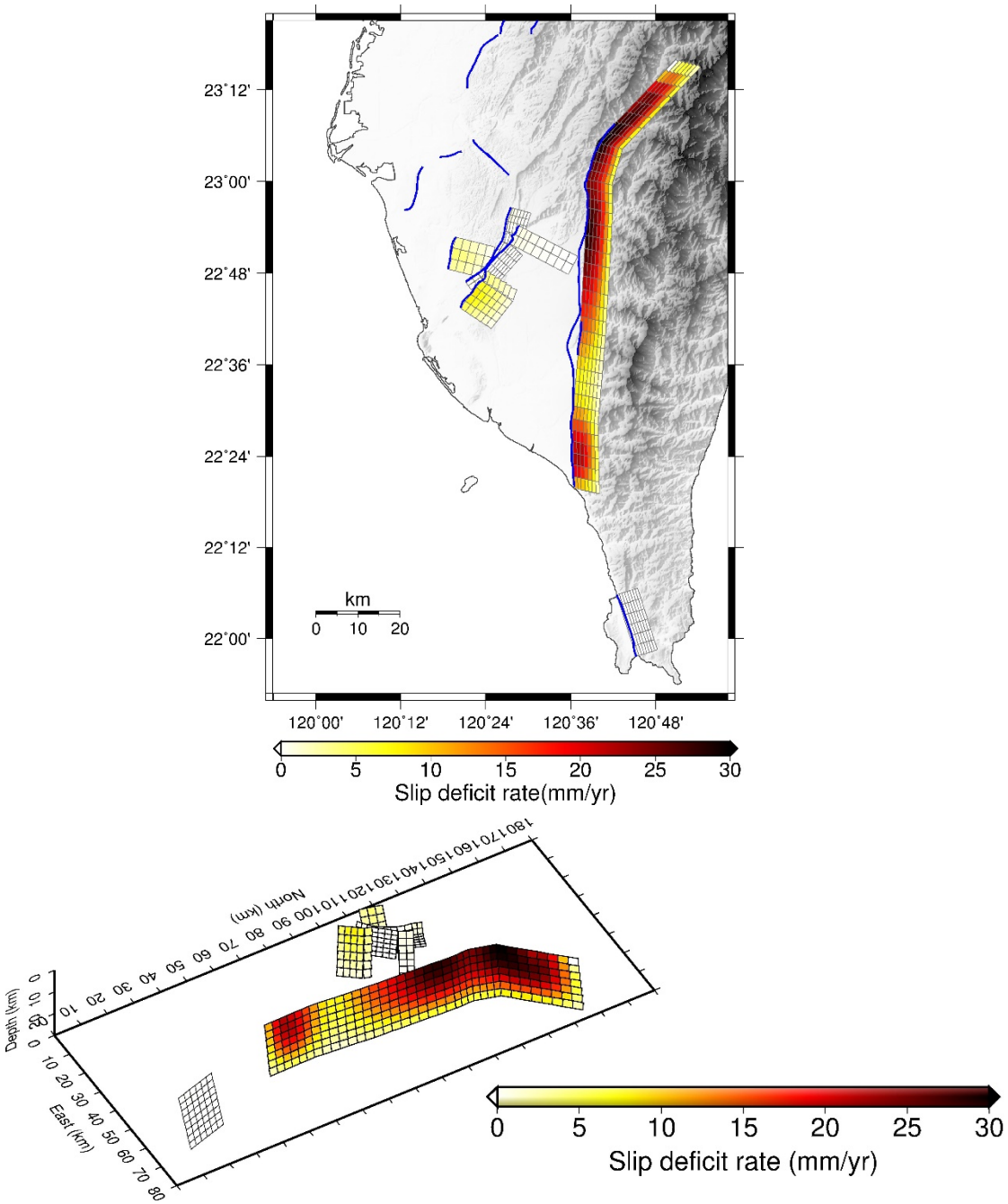


圖 5-3.8：模型二使用 2010–2016 年速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-3.8: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2010 to 2016 velocity.

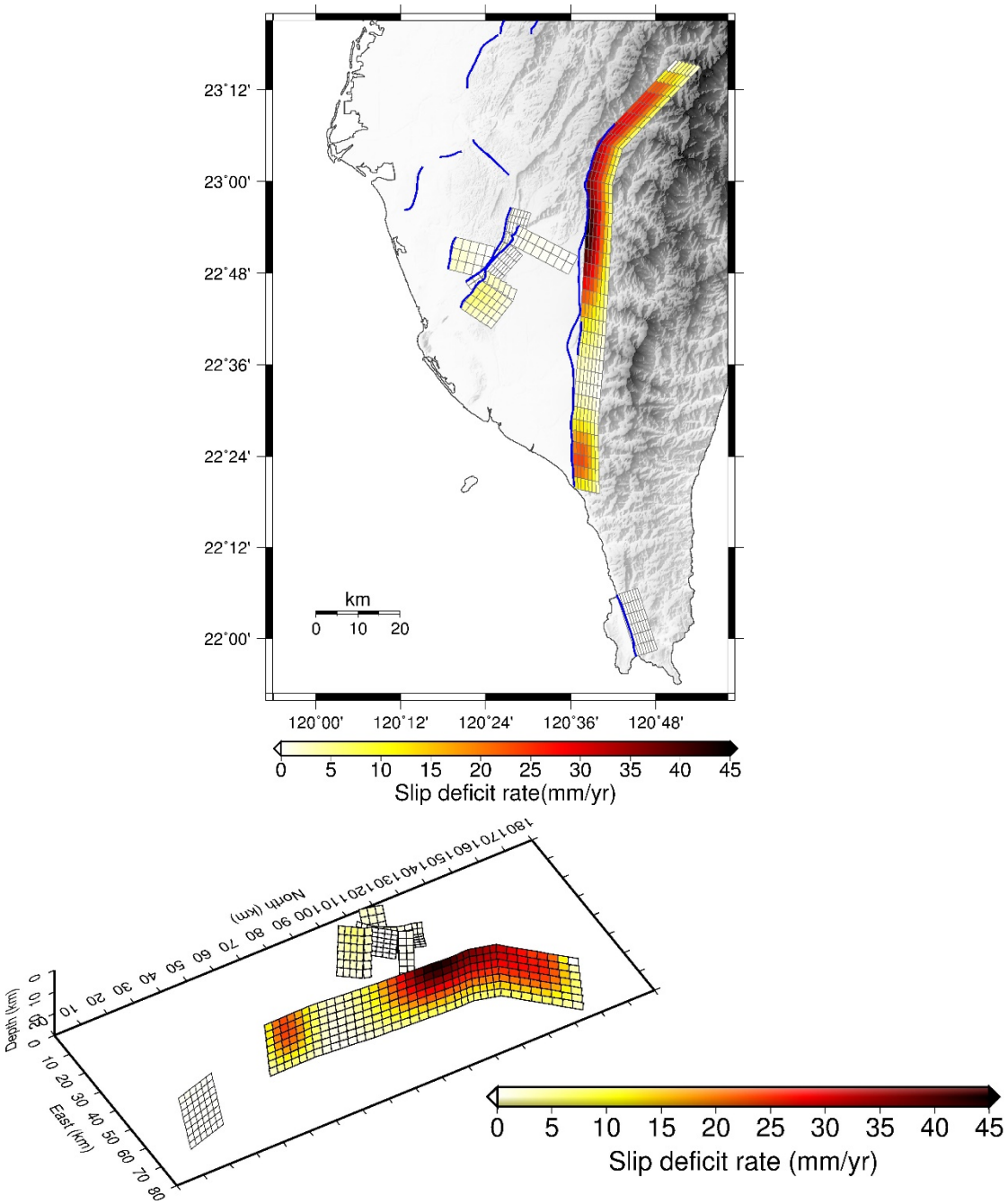


圖 5-3.9：模型三使用 2016–2021 年速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-3.9: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2016 to 2021 velocity.

5-4 南部地區之斷層滑移虧損速率

今年針對臺灣南部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析，包含五條活動斷層，分別為：旗山斷層、車瓜林斷層、小崗山斷層、潮州斷層、恆春斷層。接著以 BLOCKS 程式、DEFNODE 程式與基線應變模型計算各斷層的平均滑移虧損速率，南部地區參考 2002 至 2010 年（甲仙地震前）、2010 至 2016 年（甲仙地震後）、2016 至 2021 年（美濃地震後）所觀測到的 GNSS 速度場及精密水準資料，進行斷層滑移模擬。

今年南部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果（2002 至 2010 年（甲仙地震前）、2010 至 2016 年（甲仙地震後）、2016 至 2021 年（美濃地震後）如下：BLOCKS 模型一（2002 至 2010 年）結果中，旗山斷層北中南段分別為 1.0±0.0 mm/yr、1.3±0.1 mm/yr 及 1.0±0.1 mm/yr，車瓜林斷層北中南段分別為 73.2±16.7 mm/yr、25.6±6.0 mm/yr 及 14.4±1.6 mm/yr，小崗山斷層為 5.2±2.2 mm/yr，潮州斷層為 5.7±2.2mm/yr，恆春斷層為 5.9±0.2 mm/yr；模型二（2010 至 2016 年）結果中，旗山斷層北中南段分別為 1.0±0.0 mm/yr、1.3±0.1 mm/yr 及 1.0±0.1 mm/yr，車瓜林斷層北中南段分別為 69.5±15.6 mm/yr、24.7±5.6 mm/yr 及 13.8±1.6 mm/yr，小崗山斷層為 5.2±2.1 mm/yr，潮州斷層為 5.7±2.2mm/yr，恆春斷層為 5.9±0.2 mm/yr；模型三（2016 至 2021 年）結果中，旗山斷層北中南段分別為 1.0±0.0 mm/yr、1.3±0.0 mm/yr 及 1.0±0.1 mm/yr，車瓜林斷層北中南段分別為 58.1±12.7 mm/yr、19.9±4.9 mm/yr 及 10.4±1.4 mm/yr，小崗山斷層為 3.9±2.1 mm/yr，潮州斷層為 5.5±2.1mm/yr，恆春斷層為 5.9±0.2 mm/yr。依 DEFNODE 模型一（2002 至 2010 年）結果中，旗山斷層整體為 14.9±12.9 mm/yr，車瓜林斷層整體為 34.8±49.0 mm/yr，小崗山斷層為 32.9±12.1 mm/yr，潮州斷層為 6.7±6.0mm/yr，恆春斷層為 18.5±0.6 mm/yr；模型二（2010 至 2016 年）結果中，旗山斷層整體為 6.6±7.1 mm/yr，車瓜林斷層整體為 18.2±14.6 mm/yr，小崗山斷層為 30.1±20.3 mm/yr，潮州斷層為 21.0±9.4mm/yr，恆春斷層為 9.2±11.0 mm/yr；模型三（2016 至 2021 年）結果

中，旗山斷層整體為 2.8±3.4 mm/yr，車瓜林斷層整體為 6.0±5.2 mm/yr，小崗山斷層為 27.5±4.5 mm/yr，潮州斷層為 15.0±13.6mm/yr，恆春斷層為 10.1±9.4 mm/yr。於基線應變反演模型中，模型一（2002 至 2010 年）結果顯示旗山斷層北中南段分別為 2.2±1.4 mm/yr、1.5±0.8 mm/yr 及 0.3±0.2 mm/yr，車瓜林斷層北中南段分別為 14.1±12.1 mm/yr、20.1±10.8 mm/yr 及 0.8±0.2 mm/yr，小崗山斷層為 16.8±6.9 mm/yr，潮州斷層為 14.3±12.1mm/yr，恆春斷層為 32.7±10.3 mm/yr；模型二（2010 至 2016 年）結果顯示旗山斷層北中南段分別為 1.3±1.0 mm/yr、0.3±0.2 mm/yr 及 0.1±0.1 mm/yr，車瓜林斷層北中南段分別為 29.8±10.1 mm/yr、11.5±6.8 mm/yr 及 0.2±0.7 mm/yr，小崗山斷層為 24.4±6.2 mm/yr，潮州斷層為 7.5±5.5 mm/yr，恆春斷層為 17.6±5.6 mm/yr；模型三（2016 至 2021 年）結果顯示旗山斷層北中南段分別為 0.4±0.5 mm/yr、0.3±0.2 mm/yr 及 0.1±0.2 mm/yr，車瓜林斷層北中南段分別為 30.7±11.3 mm/yr、11.7±7.1 mm/yr 及 0.2±0.5 mm/yr，小崗山斷層為 34.2±11.0 mm/yr，潮州斷層為 5.0±5.2mm/yr，恆春斷層為 26.9±11.2 mm/yr

而針對三種模型皆成功模擬得到合理斷層滑移速率之斷層，本計畫進一步計算其斷層滑移虧損速率之加權平均值與上下界（表 5-4.1 至表 5-4.3、圖 5-4.1 至圖 5-4.3），其中上界為中值加兩倍標準差，下界為中值減兩倍標準差。則本次期中可得到以下三條斷層之數值：模型一（2002 至 2010 年）結果中潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.9 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 19.0 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 18.3 mm/yr；模型二（2010 至 2016 年）結果中潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 11.4 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 10.9 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 19.9 mm/yr；模型三（2016 至 2021 年）結果中潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.5 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 14.3 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 21.9 mm/yr。

表 5-4.1：本計畫模型一之加權平均斷層滑移虧損率。

Table 5-4.1: Weighted average slip deficit rate in this project.

			BLOCKS Model	DEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率（mm/yr）
	斷層名稱		總變動量（mm/yr）	平均值滑移虧損率（mm/yr）	斷層滑移速率平均值（mm/yr）	
模型一 2002-2010 年之速度	潮州斷層	上界	10.1	18.7	38.5	22.4
		平均	5.7 ± 2.2	6.7 ± 6.0	14.3 ± 12.1	8.9
		下界	1.2	0.0	0.0	0.4
	恆春斷層	上界	6.3	19.7	53.3	26.4
		平均	5.9 ± 0.2	18.5 ± 0.6	32.7 ± 10.3	19.0
		下界	5.5	17.3	12.1	11.6
	小崗山斷層	上界	9.6	57.3	30.6	32.5
		平均	5.2 ± 2.2	32.9 ± 12.2	16.8 ± 6.9	18.3
		下界	0.7	8.5	3	4.1
	車瓜林斷（北）	上界	106.5	132.8	38.3	
		平均	73.2 ± 16.7	34.8 ± 49.0	14.1 ± 12.1	
		下界	39.9		0.0	
	車瓜林斷（中）	上界	37.4		41.7	
		平均	25.6 ± 5.9		20.1 ± 10.8	
		下界	13.7		0.0	
	車瓜林斷（南）	上界	17.5		1.2	
		平均	14.4 ± 2.0		0.8 ± 0.2	
		下界	11.2	0.0	0.4	
	旗山斷層（北）	上界	1.1	40.7	5	
		平均	1.0 ± 0.0	14.9 ± 12.9	2.2 ± 1.4	
		下界	0.9		0.0	
	旗山斷層（中）	上界	1.3		2.3	
		平均	1.3 ± 0.1		1.5 ± 0.8	
		下界	1.2		0.0	
	旗山斷層（南）	上界	1.2		0.7	
		平均	1.0 ± 0.1		0.3 ± 0.2	
		下界	0.8	0.0	0.0	

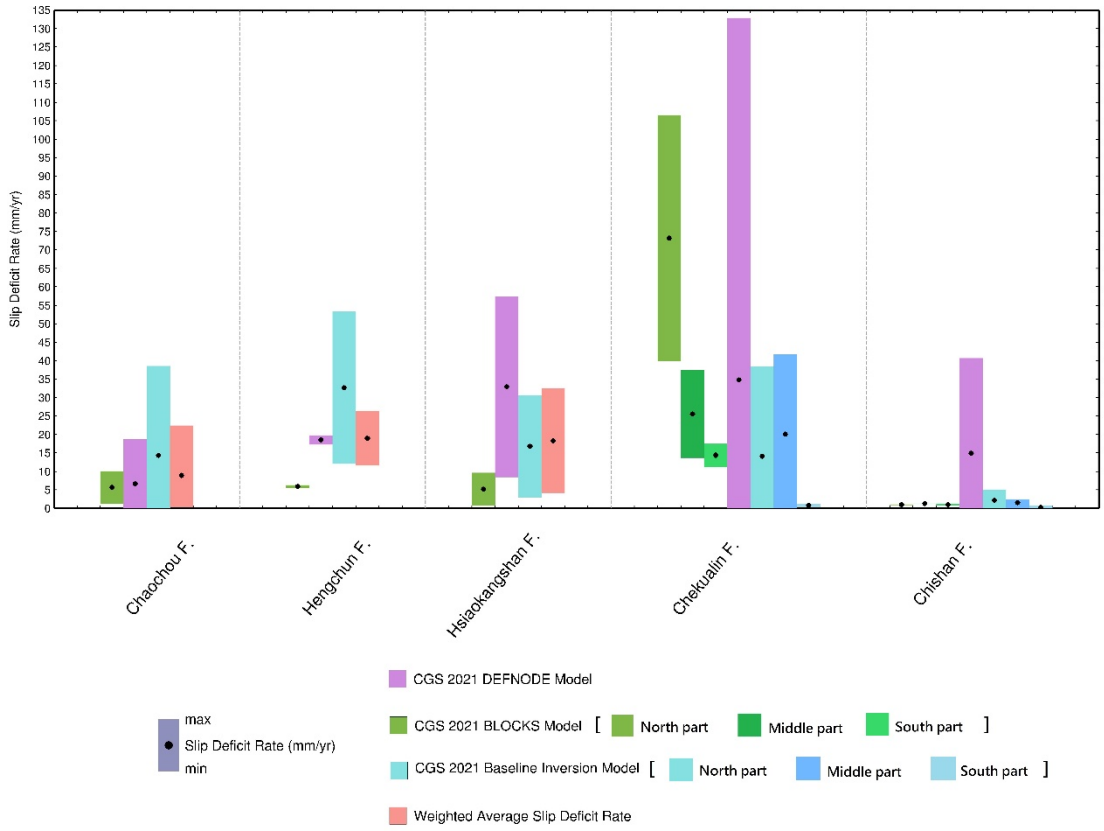


圖 5-4.1：本計畫模型一之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.1。

Figure 5-4.1: Weighted average slip deficit rate in this project.

表 5-4.2：本計畫模型二之加權平均斷層滑移虧損率。

Table 5-4.2: Weighted average slip deficit rate in this project.

			BLOCKS Model	DEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率（mm/yr）
	斷層名稱		總變動量（mm/yr）	平均值滑移虧損率（mm/yr）	斷層滑移速率平均值（mm/yr）	
模型二 2010-2016 年之速度	潮州斷層	上界	10.1	39.8	18.5	22.8
		平均	5.7 ± 2.2	21.0 ± 9.4	7.5 ± 5.5	11.4
		下界	1.2	2.2	0.0	1.1
	恆春斷層	上界	6.3	31.2	28.8	22.1
		平均	5.9 ± 0.2	9.2 ± 11.0	17.6 ± 5.6	10.9
		下界	5.5	0.0	6.4	4.0
	小崗山斷層	上界	9.4	70.7	36.8	39.0
		平均	5.2 ± 2.1	30.1 ± 20.3	24.4 ± 6.2	19.9
		下界	1.0	0.0	12	4.3
	車瓜林斷（北）	上界	100.8	47.4	50	
		平均	69.5 ± 15.6	18.2 ± 14.6	29.8 ± 10.1	
		下界	38.2		9.6	
	車瓜林斷（中）	上界	35.8		25.1	
		平均	24.7 ± 5.6		11.5 ± 6.8	
		下界	13.5		0.0	
	車瓜林斷（南）	上界	17.0		1.6	
		平均	13.9 ± 1.6		0.2 ± 0.7	
		下界	10.5	0.0	0.0	
	旗山斷層（北）	上界	1.1	20.8	3.3	
		平均	1.0 ± 0.0	6.6 ± 7.1	1.3 ± 1.0	
		下界	0.9		0.0	
	旗山斷層（中）	上界	1.4		0.7	
		平均	1.3 ± 0.1		0.3 ± 0.2	
		下界	1.2		0.0	
	旗山斷層（南）	上界	1.2		0.3	
		平均	1.0 ± 0.1		0.1 ± 0.1	
		下界	0.8	0.0	0.0	

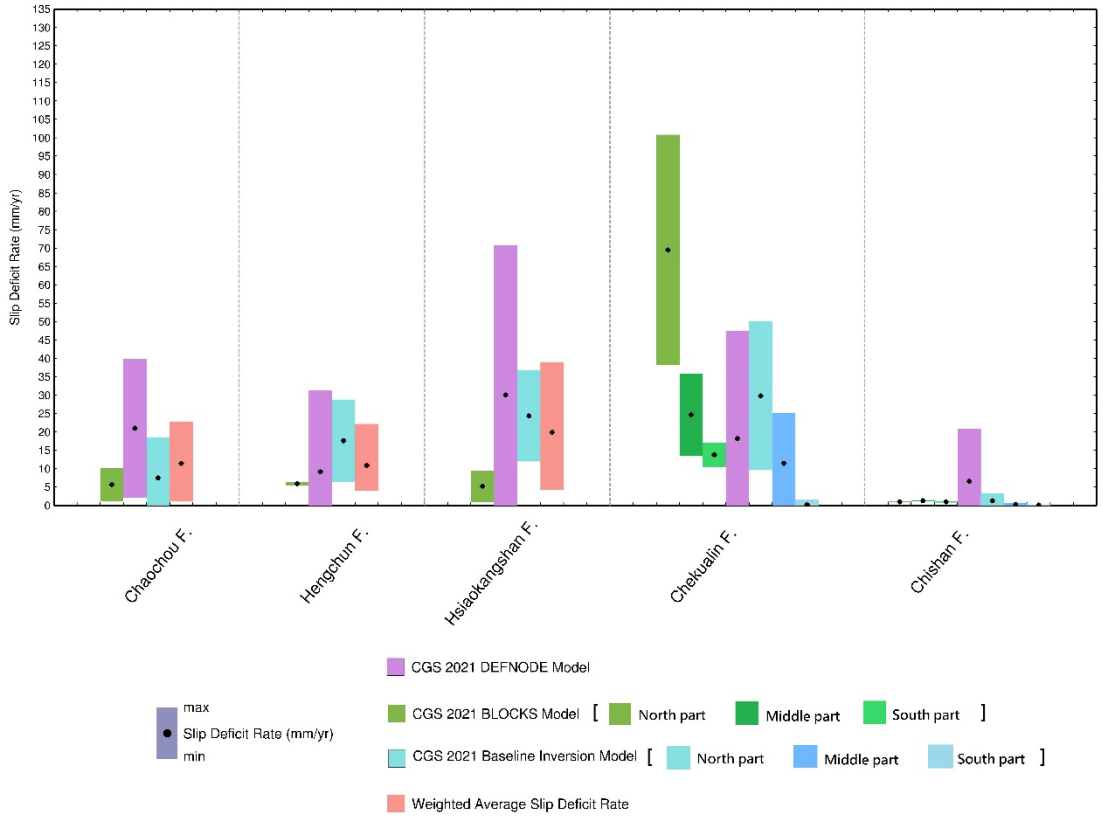


圖 5-4.2：本計畫模型一之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.2。

Figure 5-4.2: Weighted average slip deficit rate in this project.

表 5-4.3：本計畫模型三之加權平均斷層滑移虧損率。

Table 5-4.3: Weighted average slip deficit rate in this project.

			BLOCKS Model	DEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率（mm/yr）
	斷層名稱		總變動量（mm/yr）	平均值滑移虧損率（mm/yr）	斷層滑移速率平均值（mm/yr）	
模型三 2016-2021 年之速度	潮州斷層	上界	9.7	42.2	15.4	22.4
		平均	5.51± 2.1	15.0 ± 13.6	5.0 ± 5.2	8.5
		下界	1.3	0.0	0.0	0.4
	恆春斷層	上界	6.3	28.9	49.3	28.2
		平均	5.9 ± 0.2	10.1 ± 9.4	26.9 ± 11.2	14.3
		下界	5.5	0.0	4.5	3.3
	小崗山斷層	上界	8.2	36.5	56.2	33.6
		平均	3.9 ± 2.1	27.5 ± 4.5	34.2 ± 11.0	21.9
		下界	0.0	18.5	12.2	10.2
	車瓜林斷（北）	上界	83.4	16.4	53.3	
		平均	58.1 ± 12.7	6.0 ± 5.2	30.7 ± 11.3	
		下界	32.8		8.1	
	車瓜林斷（中）	上界	29.7		25.9	
		平均	19.9 ± 4.9		11.7 ± 7.1	
		下界	10.1		0.0	
	車瓜林斷（南）	上界	13.1		1.2	
		平均	10.4 ± 1.4		0.2 ± 0.5	
		下界	7.7	0.0	0.0	
	旗山斷層（北）	上界	1.1	9.6	1.4	
		平均	1.0 ± 0.0	2.8 ± 3.4	0.4 ± 0.5	
		下界	0.9		0.0	
	旗山斷層（中）	上界	1.3		0.7	
		平均	1.2 ± 0.0		0.3 ± 0.2	
		下界	1.2		0.0	
	旗山斷層（南）	上界	1.2		0.5	
		平均	1.0 ± 0.1		0.1 ± 0.2	
		下界	0.8	0.0	0.0	

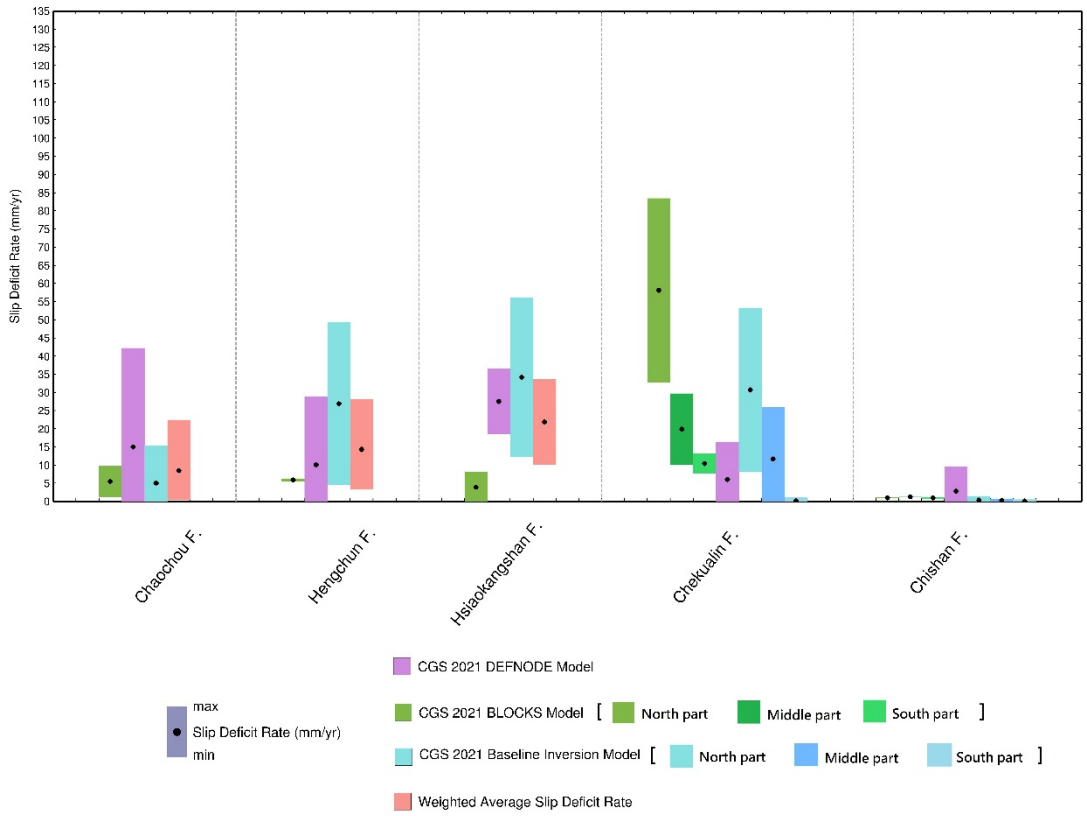


圖 5-4.3：本計畫模型三之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.3。

Figure 5-4.3: Weighted average slip deficit rate in this project.

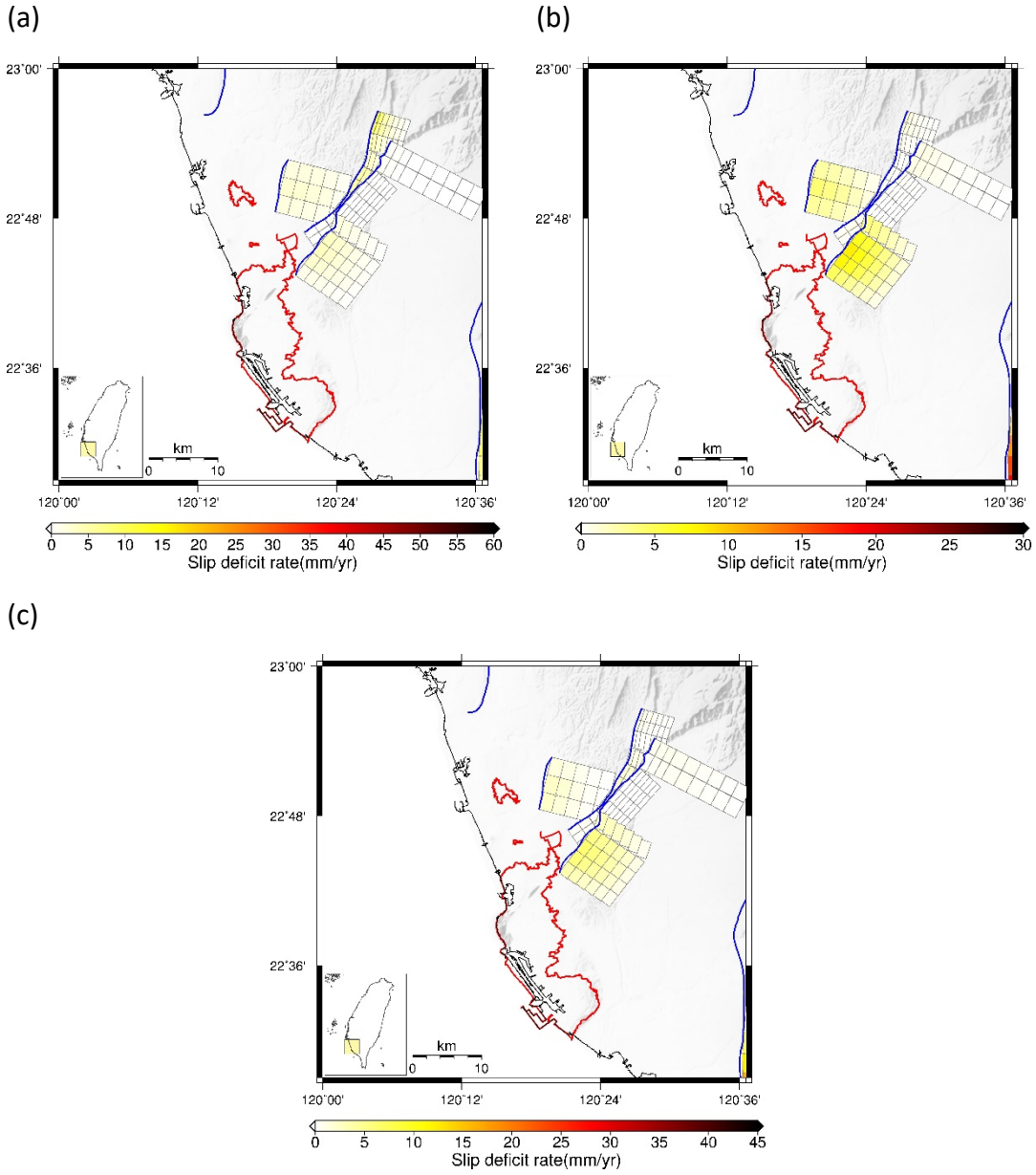


圖 5-4.4：本計畫 3 個時期重要區域（高雄都會區、高雄科學園區、橋頭科學園區）斷層滑移虧損速率分布圖。（a）表示 2002-2010 年度場之斷層滑移虧損速率分布圖，（b）表示 2010-2016 年速度場之斷層滑移虧損速率分布圖，（c）表示 2016-2021 年速度場之斷層滑移虧損速率分布圖。

Figure 5-4.4: Distribution of fault slip deficit rates with the object areas (Kaohsiung metropolitan area, Kaohsiung Science Park, and Kaohsiung Qiaotou Science Park). (a) The velocity field from 2002-2010 of fault slip deficit rates; (b) The velocity field from 2010-2016 of fault slip deficit rates; (c) The velocity field from 2016-2021 of fault slip deficit rates.

第六章、南部地區斷層活動潛勢圖

6-1 旗山斷層

6-1-1 旗山斷層參數

旗山斷層根據本計畫模型，分為北中南三段，可排列出六種可能的破裂模式，權重分配如表 6-1.1 所示。

旗山斷層幾何採用本計畫模型反演之參數：

北段：深度 1.9~6.4 公里，傾角為 59.5°；深度 6.4~12.2 公里，傾角為 25°。

中段：深度 0~8.6 公里，傾角為 63.2°。

南段：深度 0.7~14 公里，傾角為 57.1°。

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 6-1.2 所示為各破裂事件之地震矩規模。

旗山斷層長期滑移速率，本計畫預計針對各調查方法的數值，給予其權重，如表 6-1.3 所示，各調查方法的上下界值權重仍為 0.2，中值為 0.6。另外，表 6-1.3 中針對不同的調查方法及資料位置，給予其信心度（0~1），對於該調查方法的可信度越高，信心度值就越高。雖然各方法採用的都是鑽井資料，顏銀桐等（2020）在下盤並無參考資料，抬升速率是假設為 0，因此信心度較低（0.7）；其他資料則有設定上下盤抬升速率進行相減，信心度較高（0.9）。位置信心度方面，大社 A 剖面位置是位於旗山斷層上，然而已靠近斷層末端，信心度無法達到 1，只給予其 0.8；大社 B 剖面位置相對於大社 A 剖面，信心度更低（0.6）。將權重乘上信心度則是我們對該數值的加權值。圖 6-1.1 為抬升速率累積加權的結果，紅色虛線則為趨勢線，本計畫根據此趨勢線公式得到抬升速率下界 0.2 mm/yr（累積信心度 10%）、中值 1.4 mm/yr（累積信心度 50%）、及上界 3.3 mm/yr（累積信

心度 90%)。以本計畫傾角 57.1°並假設滑移角範圍為 50~70 度換算至斷層面上，得到滑移速率下界 0.3 mm/yr（權重 0.2）、中值 2.0 mm/yr（權重 0.6）、及上界 4.6 mm/yr（權重 0.2）。

旗山斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-1.1：旗山斷層分段破裂模式及權重

Table 6-1.1: Rupture cases and weights of the Chishan fault

分段名稱	長度(km)	A	B	C	D	E	F
北	6	■	■	■			
中	9		■	■	■	■	
南	12			■		■	■
權重		0.25	0.1	0.05	0.25	0.1	0.25

表 6-1.2：旗山斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-1.2: Magnitude calculation results for each rupture case of the Chishan fault

破裂事件	長度(km)	傾角(度)	深度(km)	寬度(km)	面積(km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(M_w)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式)(M_w)
						-σ	中值	+σ	
A	6	59.5	1.9~6.4	5.2	113	5.9	6.2	6.5	6.1
		25	6.4~12.2	13.7					
B	15	A+D			200	6.1	6.4	6.7	6.3
C	27	A+D+F			390	6.4	6.7	7.0	6.6
D	9	63.2	0~8.6	9.6	87	5.8	6.1	6.4	5.9
E	21	D+F			277	6.2	6.5	6.8	6.4
F	12	57.1	0.7~14	15.8	190	6.1	6.4	6.7	6.3

表 6-1.3：旗山斷層抬升速率之各調查方法數值權重及信心度

Table 6-1.3: Weight and confidence of each survey's uplift rate of the Chishan fault

位置	參考文獻	抬升速率	權重	方法信心度	位置信心度	權重×信心度
大社A	陳文山等(2012) Shyu et al. (2020)	1	0.2	0.9	0.8	0.144
		1.3	0.6	0.9	0.8	0.432
		1.6	0.2	0.9	0.8	0.144
	顏銀桐等（2020）	2.4	0.2	0.7	0.8	0.112
		3.2	0.6	0.7	0.8	0.336
		4	0.2	0.7	0.8	0.112
大社B	陳文山等(2012) Shyu et al. (2020)	0.25	0.2	0.9	0.6	0.108
		0.5	0.6	0.9	0.6	0.324
		0.75	0.2	0.9	0.6	0.108

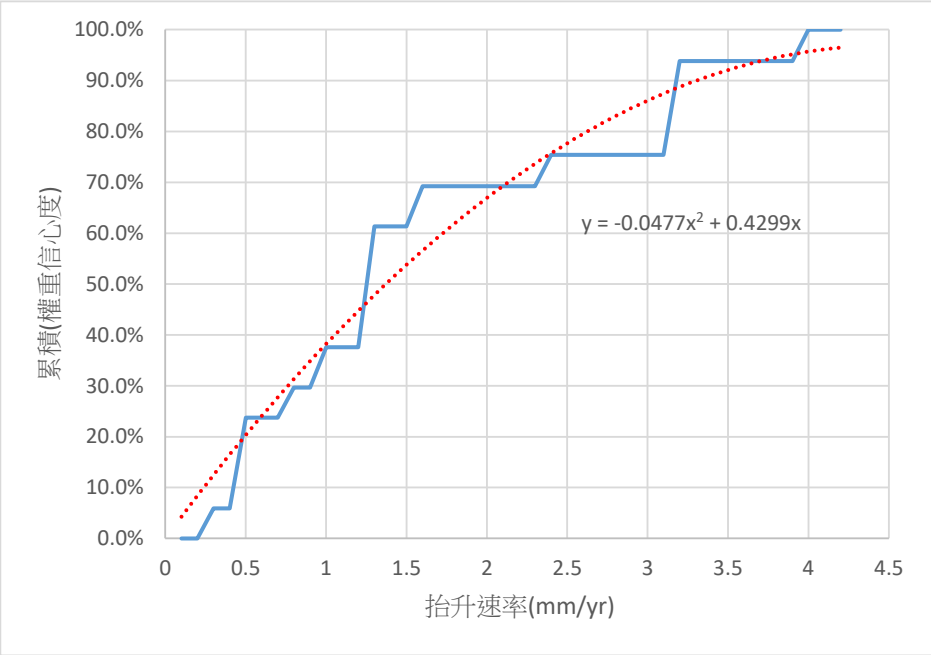


圖 6-1.1：旗山斷層抬升速率累積加權分布。

Figure 6-1.1: The cumulatively weighted distribution for the uplift rate of the Chishan fault.

6-1-2 旗山斷層規模與年發生率之關係

本計畫以特徵地震模式計算旗山斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-1.2 為 6 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

旗山斷層每一組參數皆有其權重，將 6 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-1.3 之旗山斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.1 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-1.4 之旗山斷層地震復發間隔時間-權重分布圖，圖中可見週期在 100~200 年的權重較高。

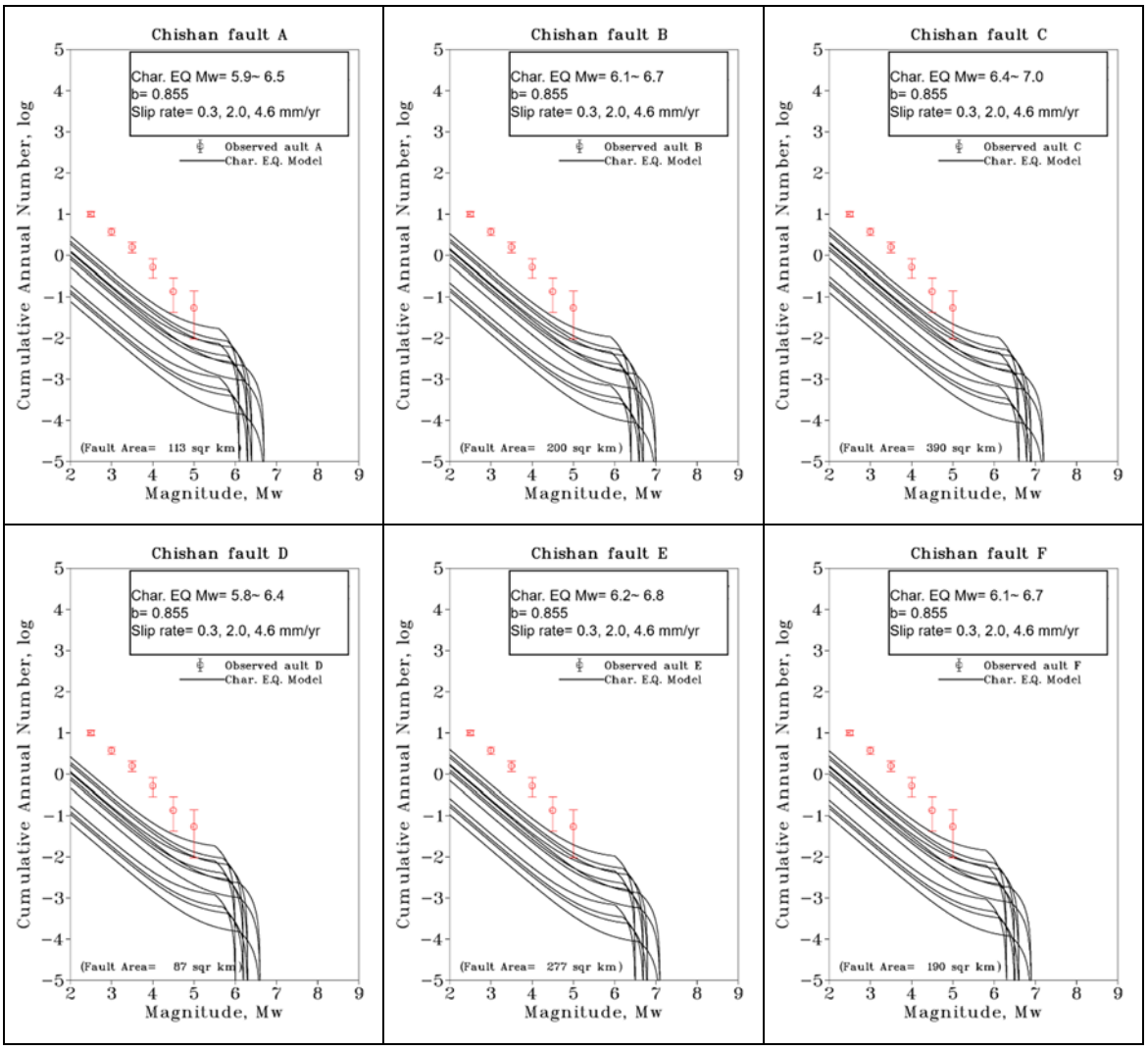


圖 6-1.2：旗山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-1.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chishan fault.

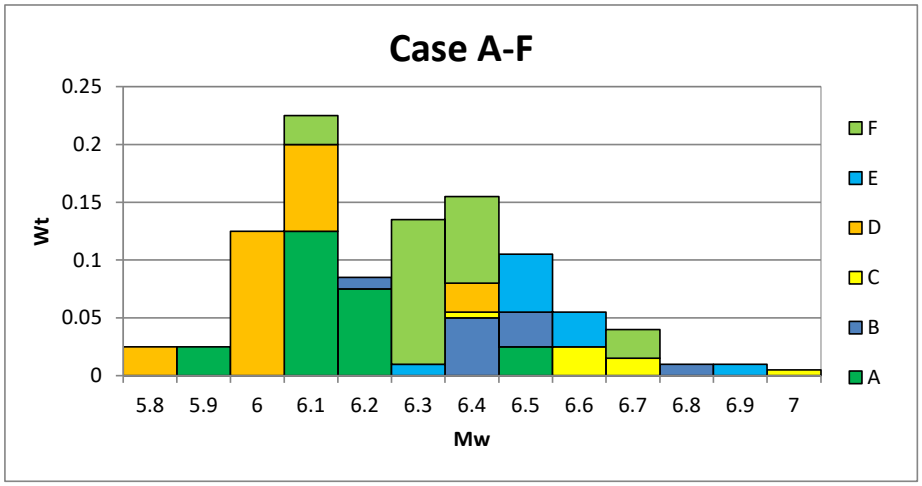


圖 6-1.3：旗山斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-1.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Chishan fault.

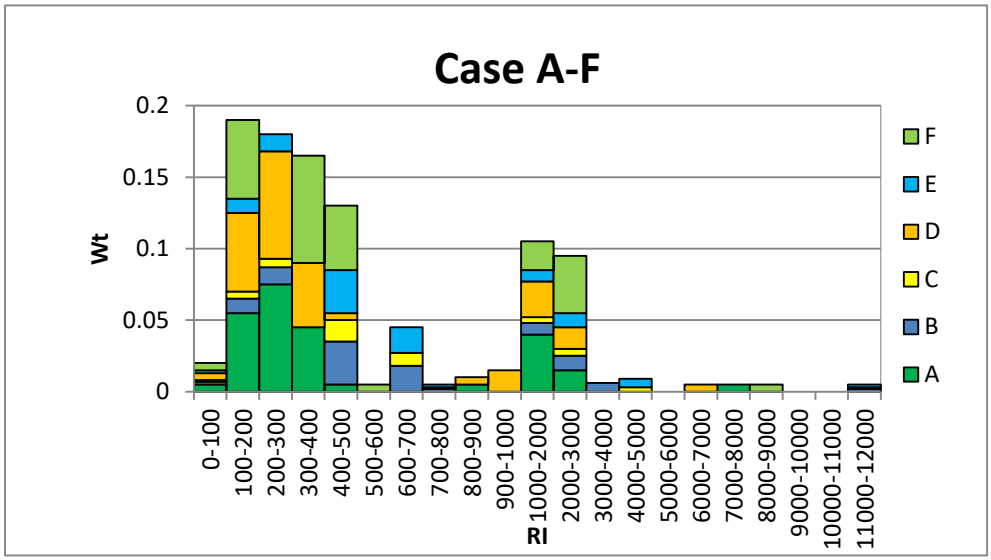


圖 6-1.4：旗山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-1.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Chishan fault.

6-1-3 旗山斷層機率評估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，旗山斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-1.4 為旗山斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2021 年，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 1.1%、1.8%及 3.4%。

表 6-1.4：本計畫旗山斷層發生機率評估

Table 6-1.4: Earthquake probabilities for the Chishan fault in this project

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
5.8≦ M ≦7.0	9.4%	14.8%	26.1%
M ≧ 6.5	1.1%	1.8%	3.4%
M ≧ 7.0	0.01%	0.02%	0.03%

6-2 車瓜林斷層

6-2-1 車瓜林斷層參數

車瓜林斷層根據本計畫模型，分為北中南三段，可排列出六種可能的破裂模式，權重分配如表 6-2.1 所示。

車瓜林斷層幾何採用本計畫模型反演之參數：

北段：深度 0.4~4.2 公里，傾角為 74.2°；深度 4.2~6.0 公里，傾角為 24.2°。

中段：深度 0~8.2 公里，傾角為 61.4°。

南段：深度 0~5 公里，傾角為 46.6°。

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 6-2.2 所示為各破裂事件之地震矩規模。

車瓜林斷層長期滑移速率，根據本計畫 2016~2021 基線應變反演之結果，北段為 30.7 mm/yr（破裂模式 A），中段為 11.7 mm/yr（破裂模式 D），南段為 0.2 mm/yr（破裂模式 F）。

破裂模式 B 長期滑移速率則根據能量累計公式計算，如下式：

$$\mu \cdot A_{(北+中)} \cdot v_{(B)} = \mu \cdot A_{北段} \cdot v_{北段} + \mu \cdot A_{中段} \cdot v_{中段}$$

上式中 A 為面積，移項得到

$$v_{(B)} = \frac{A_{北段} \cdot v_{北段} + A_{中段} \cdot v_{中段}}{A_{(北+中)}}$$

各段面積參照表 6-2.2，得到破裂模式 B 長期滑移速率 17.9 mm/yr。

破裂模式 C 長期滑移速率則根據能量累計公式計算，如下式：

$$\mu \cdot A_{(北+中+南)} \cdot v_{(C)} = \mu \cdot A_{北段} \cdot v_{北段} + \mu \cdot A_{中段} \cdot v_{中段} + \mu \cdot A_{南段} \cdot v_{南段}$$

上式中 A 為面積，移項得到

$$v_{(C)} = \frac{A_{北段} \cdot v_{北段} + A_{中段} \cdot v_{中段} + A_{南段} \cdot v_{南段}}{A_{(北+中+南)}}$$

各段面積參照表 6-2.2，得到破裂模式 C 長期滑移速率 14.7 mm/yr。

破裂模式 E 長期滑移速率則根據能量累計公式計算，如下式：

$$\mu \cdot A_{(中+南)} \cdot v_{(E)} = \mu \cdot A_{中段} \cdot v_{中段} + \mu \cdot A_{南段} \cdot v_{南段}$$

上式中 A 為面積，移項得到

$$v_{(E)} = \frac{A_{中段} \cdot v_{中段} + A_{南段} \cdot v_{南段}}{A_{(中+南)}}$$

各段面積參照表 6-2.2，得到破裂模式 E 長期滑移速率 8.8 mm/yr。

將上述車瓜林斷層各破裂事件滑移速率彙整於表 6-2.1 中。

車瓜林斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-2.1：車瓜林斷層分段破裂模式及權重

Table 6-2.1: Rupture cases and weights of the Chekualin fault

分段名稱	長度(km)	A	B	C	D	E	F
北	6	■	■	■			
中	11		■	■	■	■	
南	5			■		■	■
權重		0.25	0.1	0.05	0.25	0.1	0.25
滑移速率(mm/yr)		30.7	17.9	14.7	11.7	8.8	0.2

表 6-2.2：車瓜林斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-2.2: Magnitude calculation results for each rupture case of the Chekualin fault

破裂事件	長度 (km)	傾角 (度)	深度 (km)	寬度 (km)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (M_w)			Yen and Ma, 2011 (破裂面積-規模關係式)(M_w)
						-σ	中值	+σ	
A	6	74.2	0.4~4.2	8.3	50	5.6	5.9	6.2	5.7
		24.2	4.2~6.0						
B	17	A+D			153	6.0	6.3	6.6	6.2
C	22	A+D+F			187	6.1	6.4	6.7	6.3
D	11	61.4	0~8.2	9.3	103	5.8	6.1	6.4	6.0
E	16	D+F			137	6.0	6.3	6.6	6.1
F	5	46.6	0~5.0	6.9	34	5.4	5.7	6.0	5.5

6-2-2 車瓜林斷層規模與年發生率之關係

本計畫以特徵地震模式計算車瓜林斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-2.1 為 6 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

車瓜林斷層每一組參數皆有其權重，將 6 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-2.2 之車瓜林斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.1 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-2.3 之車瓜林斷層地震復發間隔時間-權重分布圖，圖中可見週期在 0~100 年的權重較高。

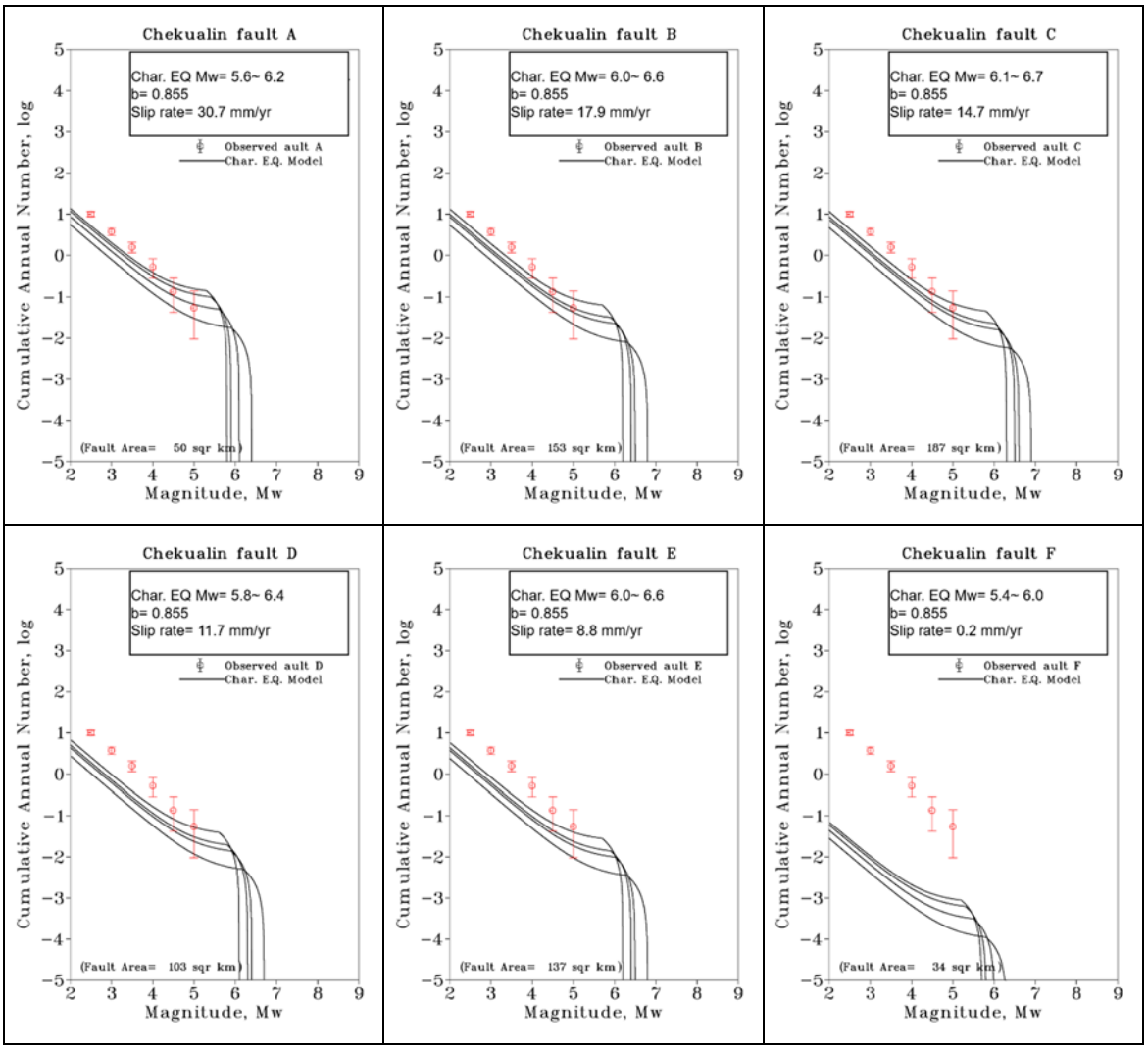


圖 6-2.1：車瓜林斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-2.1: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chekualin fault.

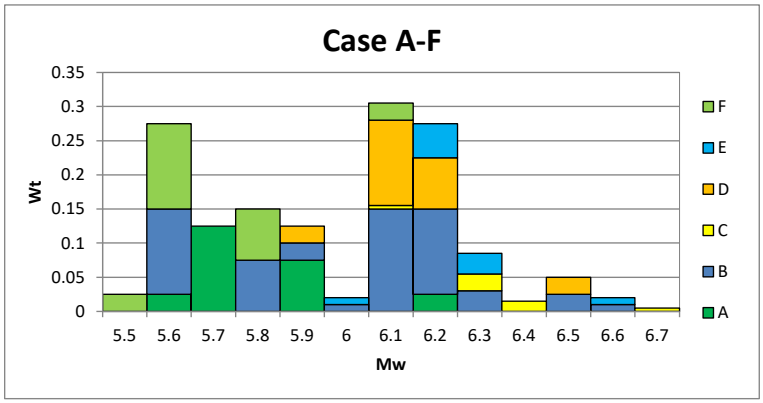


圖 6-2.2：車瓜林斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-2.2: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Chekualin fault.

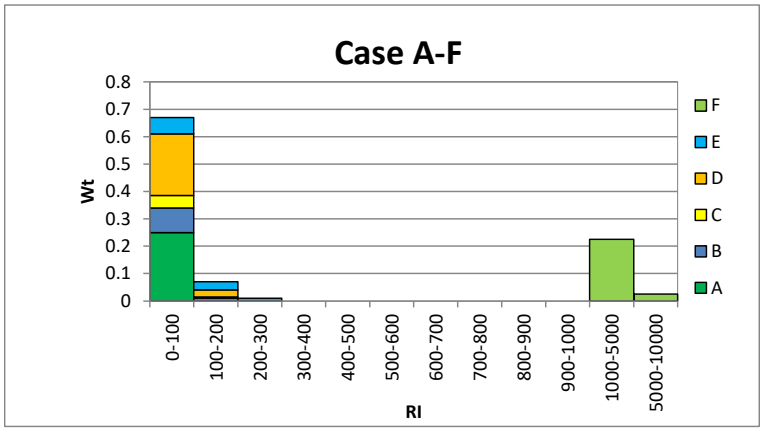


圖 6-2.3：車瓜林斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-2.3: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Chekualin fault.

6-2-3 車瓜林斷層機率評估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，車瓜林斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-2.3 為車瓜林斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2021 年，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.7%、1.2%及 2.1%。

表 6-2.3：本計畫車瓜林斷層發生機率評估

Table 6-2.3: Earthquake probabilities for the Chekualin fault in this project

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
5.5≦ M ≦6.7	43.0%	53.4%	65.8%
M ≧ 6.5	0.7%	1.2%	2.1%

6-3 小崗山斷層

6-3-1 小崗山斷層參數

根據 4-1-3 節，小崗山斷層分為兩段，可排列出三種可能的破裂模式，權重分配如表 6-3.1 所示。

小崗山斷層幾何採用本計畫模型反演之參數，傾角為 42.5°，深度為 0.6~9.0 公里。

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 6-3.2 所示為各破裂事件之地震矩規模。

小崗山斷層長期滑移速率，本計畫預計針對各調查方法的數值，給予其權重，如表 6-3.3 所示，各調查方法的上下界值權重仍為 0.2，中值為 0.6。另外，表 6-3.3 中針對不同的調查方法及資料位置，給予其信心度(0~1)，對於該調查方法的可信度越高，信心度值就越高。顏銀桐等（2020）參考陳文山等（2012）於小崗山斷層的鑽井，下盤並無參考資料，下盤抬升速率是假設為 0，因此信心度較低(0.7)；Shyu et al.（2020）階地年代推估由於無上下盤地層對比，信心度給予 0.7。位置信心度方面，顏銀桐等（2020）及 Shyu et al.（2020）評估的資料均位於小崗山斷層中間，信心度為 1。將權重乘上信心度則是我們對該數值的加權值。圖 6-3.1 為滑移速率累積加權的結果，紅色虛線則為趨勢線，本計畫根據此趨勢線公式得到滑移速率下界 0.9 mm/yr(累積信心度 10%)，中值 4.1 mm/yr(累積信心度 50%)，及上界 7.0 mm/yr(累積信心度 90%)，權重分別為 0.2、0.6、0.2。

小崗山斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-3.1：小崗山斷層分段破裂模式及權重

Table 6-3.1: Rupture cases and weights of the Hsiaokangshan fault

分段名稱	長度(km)	A	B	C
小崗山斷層段	9	■		■
南部延伸段	16		■	■
權重		0.4	0.4	0.2

表 6-3.2：小崗山斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-3.2: Magnitude calculation results for each rupture case of the Hsiaokangshan fault

破裂事件	長度(km)	傾角(度)	深度(km)	寬度(km)	面積(km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(M_w)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式)(M_w)
						-σ	中值	+σ	
A	9	42.5	0.6~9.0	12.4	112	5.9	6.2	6.5	6.0
B	16				199	6.1	6.4	6.7	6.3
C	25				311	6.3	6.6	6.9	6.5

表 6-3.3：小崗山斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度

Table 6-3.3: Weight and confidence of each survey's slip rate of the Hsiaokangshan fault

參考文獻	方法	滑移速率(mm/yr)	權重	方法信心度	位置信心度	權重×信心度
顏銀桐等（2020）	陳文山等（2012）鑽井資料樣本及定年計算抬升速率	1.6	0.2	0.7	1	0.14
		3.9	0.6	0.7	1	0.42
		6.2	0.2	0.7	1	0.14
Shyu et al.（2020）	階地年代推估	0.8	0.2	0.7	1	0.14
		4.4	0.6	0.7	1	0.42
		7.9	0.2	0.7	1	0.14

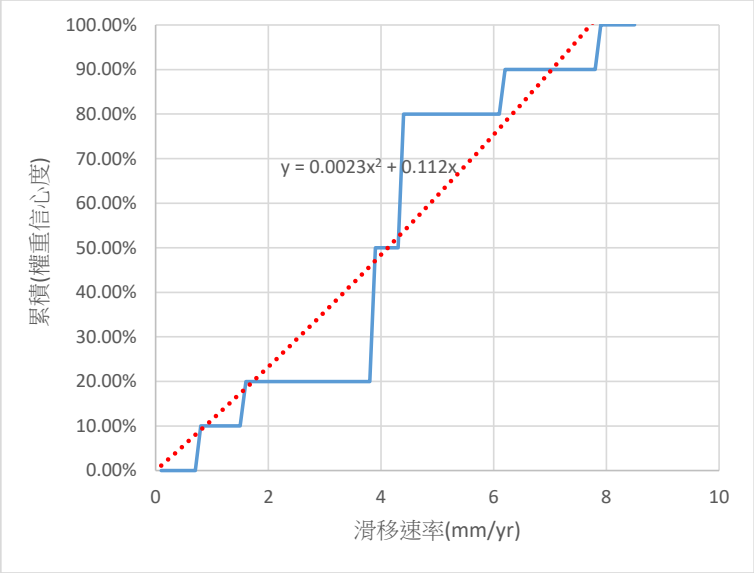


圖 6-3.1：小崗山斷層滑移速率累積加權分布。

Figure 6-3.1: The cumulatively weighted distribution for the slip rate of the Hsiaokangshan fault.

6-3-2 小崗山斷層規模與年發生率之關係

本計畫以特徵地震模式計算小崗山斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-3.2 為 3 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

小崗山斷層每一組參數皆有其權重，將 3 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-3.3 之小崗山斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.1 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-3.4 之小崗山斷層地震復發間隔時間-權重分布圖，圖中可見週期在 100~200 年的權重較高。

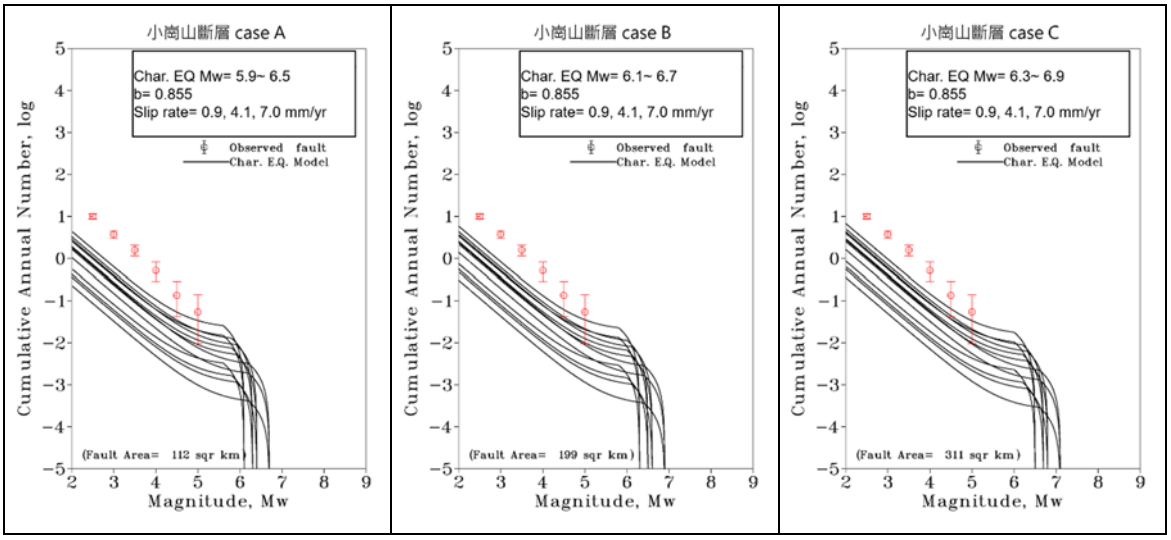


圖 6-3.2：小崗山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-3.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Hsiaokangshan fault.

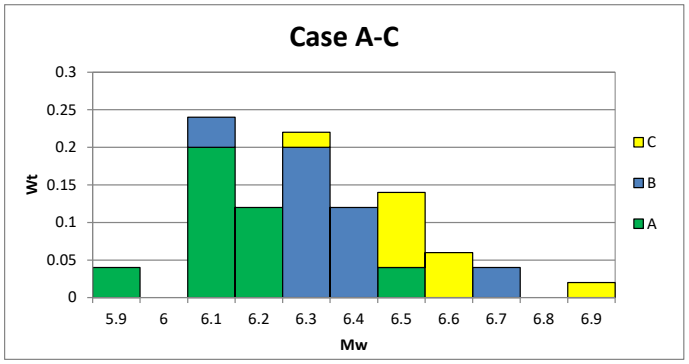


圖 6-3.3：小崗山斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-3.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Hsiaokangshan fault.

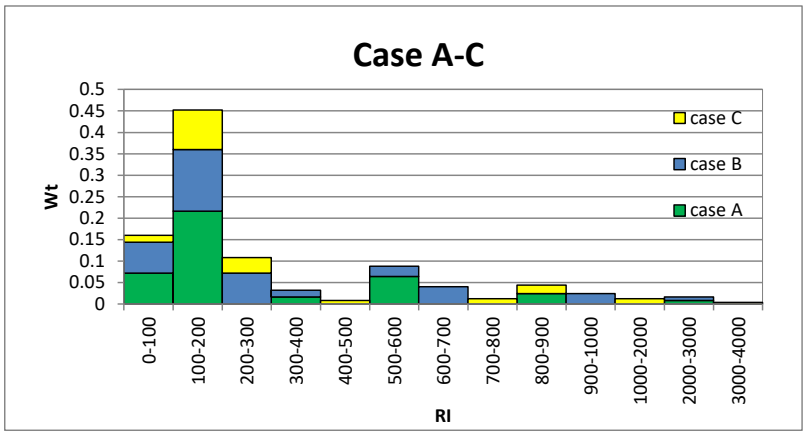


圖 6-3.4：小崗山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-3.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Hsiaokangshan fault.

6-3-3 小崗山斷層機率評估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，小崗山斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-3.4 為小崗山斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2021 年，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 2.5%、4.0%及 7.2%。

表 6-3.4：本計畫小崗山斷層發生機率評估

Table 6-3.4: Earthquake probabilities for the Hsiaokangshan fault in this project

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
5.9≦ M ≦6.9	16.5%	25.4%	42.2%
M ≧ 6.5	2.5%	4.0%	7.2%

6-4 潮州斷層

6-4-1 潮州斷層參數

根據 4-1-4 節，潮州斷層分為四段，本計畫據此排列出十種可能的破裂模式，權重分配如表 6-4.1 所示。

潮州斷層幾何採用本計畫模型反演之參數，傾角為 70°，深度為 17.5 公里。

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 6-4.2 所示為各破裂事件之地震矩規模。

潮州斷層長期滑移速率僅一個調查結果，因此不評估信心度。根據 Shyu et al.（2020）利用階地錯移量及推估之年代得到斷層滑移速率中值為 0.7 mm/yr，上下界分別為 2.3 mm/yr 及 0.4 mm/yr。由於滑移速率對評估結果的不確定性及敏感度較高，本計畫考慮以權重分配的方式進行評估，分別是 0.4 mm/yr（權重 0.2），0.7 mm/yr（權重 0.6），2.3 mm/yr（權重 0.2）。

潮州斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-4.1：潮州斷層分段破裂模式及權重

Table 6-4.1: Rupture cases and weights of the Chaochou fault

分段名稱	長度 (km)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
土壟灣斷層段	16	■	■	■	■						
北段	44		■	■	■	■	■	■			
南段	30			■	■		■	■	■	■	
南段延伸段	16				■			■		■	■
權重		0.16	0.09	0.04	0.01	0.16	0.09	0.04	0.16	0.09	0.16

表 6-4.2：潮州斷層之各破裂事件規模計算結果

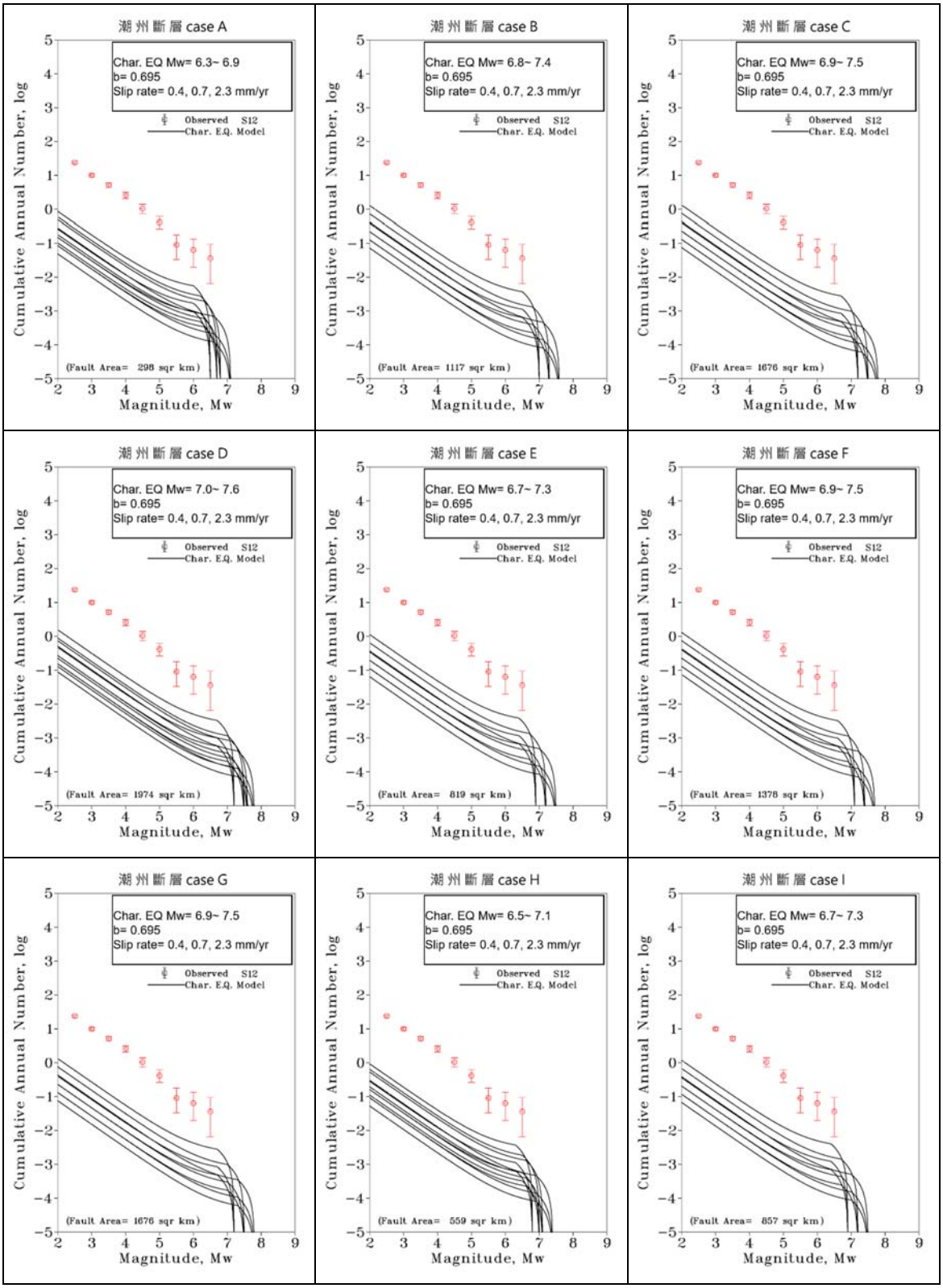
Table 6-4.2: Magnitude calculation results for each rupture case of the Chaochou fault

破裂事件	長度 (km)	傾角 (度)	深度 (km)	寬度 (km)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (M_w)			Yen and Ma, 2011 (破裂面積-規模關係式)(M_w)
						-σ	中值	+σ	
A	16	70	17.5	18.6	298	6.3	6.6	6.9	6.5
B	60				1117	6.8	7.1	7.4	7.0
C	90				1676	6.9	7.2	7.5	7.3
D	106				1974	7.0	7.3	7.6	7.4
E	44				819	6.7	7.0	7.3	6.9
F	74				1378	6.9	7.2	7.5	7.2
G	90				1676	6.9	7.2	7.5	7.3
H	30				559	6.5	6.8	7.1	6.7
I	46				857	6.7	7.0	7.3	6.9
J	16				298	6.3	6.6	6.9	6.5

6-4-2 潮州斷層規模與年發生率之關係

本計畫以特徵地震模式計算潮州斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-4.1 為 10 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

潮州斷層每一組參數皆有其權重，將 10 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-4.2 之潮州斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 7.0 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-4.3 之潮州斷層地震復發間隔時間-權重分布圖，圖中可見週期在 2000~3000 年的權重較高。


潮州斷層 case A
Char. EQ Mw= 6.3~ 6.9
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 298 sqr km)
潮州斷層 case B
Char. EQ Mw= 6.8~ 7.4
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 1117 sqr km)
潮州斷層 case C
Char. EQ Mw= 6.9~ 7.5
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 1676 sqr km)
潮州斷層 case D
Char. EQ Mw= 7.0~ 7.6
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 1974 sqr km)
潮州斷層 case E
Char. EQ Mw= 6.7~ 7.3
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 819 sqr km)
潮州斷層 case F
Char. EQ Mw= 6.9~ 7.5
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 1378 sqr km)
潮州斷層 case G
Char. EQ Mw= 6.9~ 7.5
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 1676 sqr km)
潮州斷層 case H
Char. EQ Mw= 6.5~ 7.1
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 559 sqr km)
潮州斷層 case I
Char. EQ Mw= 6.7~ 7.3
b= 0.695
Slip rate= 0.4, 0.7, 2.3 mm/yr
Observed S12
Char. EQ. Model
(Fault Area= 857 sqr km)
Cumulative Annual Number, log
Magnitude, Mw

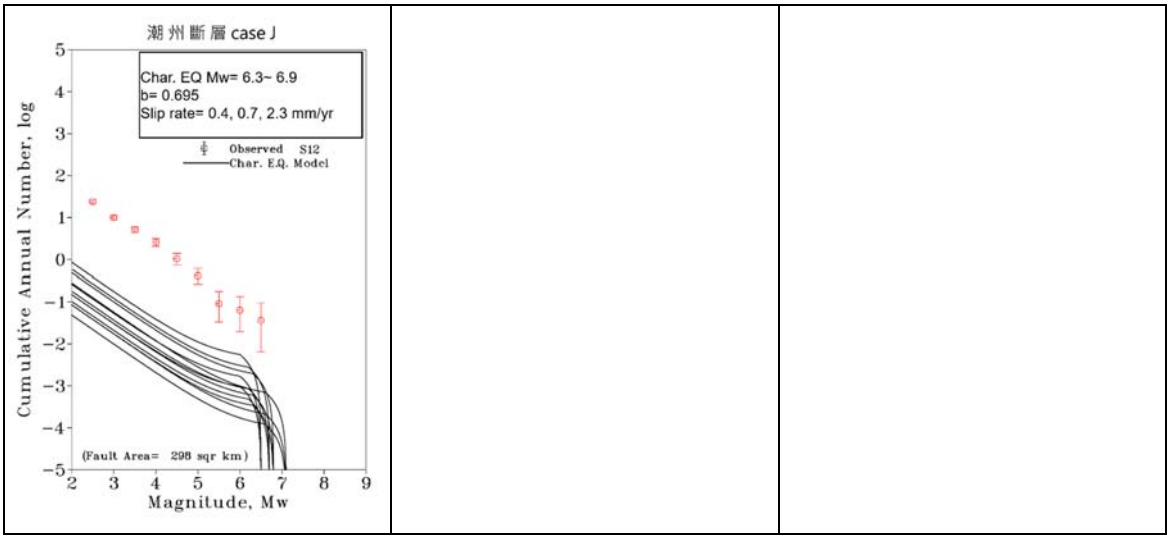


圖 6-4.1：潮州斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-4.1: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chaochou fault.

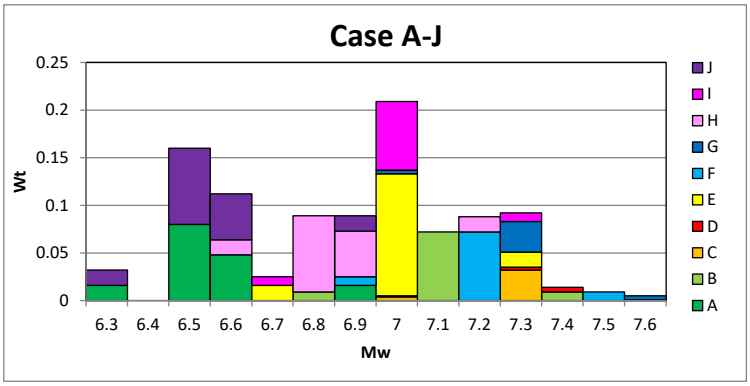


圖 6-4.2：潮州斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-4.2: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Chaochou fault.

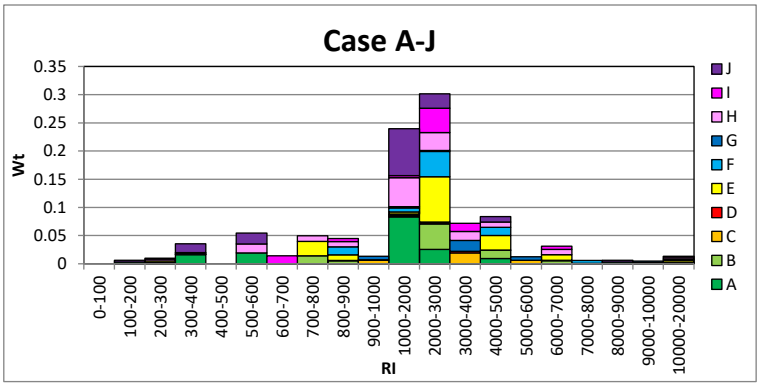


圖 6-4.3：潮州斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-4.3: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Chaochou fault.

6-4-3 潮州斷層機率評估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算潮州斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，潮州斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-4.3 為潮州斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2021 年，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 2.1%、3.4%及 6.6%。

表 6-4.3：本計畫潮州斷層發生機率評估

Table 6-4.3: Earthquake probabilities for the Chaochou fault in this project

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.3≦ M ≦7.6	2.3%	3.8%	7.3%
M ≧ 6.5	2.1%	3.4%	6.6%
M ≧ 7.0	0.7%	1.2%	2.4%

6-5 恆春斷層

6-5-1 恆春斷層參數

根據 4-1-4 節，恆春斷層分為兩段，可排列出三種可能的破裂模式，權重分配如表 6-5.1 所示。

恆春斷層幾何採用本計畫模型反演之參數，傾角為 75°，深度為 20 公里。

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 6-5.2 所示為各破裂事件之地震矩規模。

恆春斷層長期滑移速率，本計畫預計針對各調查方法的數值，給予其權重，如表 6-5.3 所示。各調查方法的上下界值權重為 0.2，中值為 0.6；部分文獻僅提供上下界值，則權重分配為各 0.5；部分文獻結論只有單一值，權重為 1。另外，表 6-5.3 中針對不同的調查方法及資料位置，給予其信心度（0~1）。Chen and Liu（1993）、陳文山等（2006）、陳文山等（2014）均是計算恆春斷層上盤隆起珊瑚礁海階抬升速率，然而並無減去下盤之抬升速率，方法信心度給其 0.7；而陳文山等（2010）則有採用下盤南灣鑽井做對比，信心度稍高（0.8）；中興公司（2012）於四重溪鑽探剖面僅彙整各單一鑽井之抬升速率，方法信心度給其 0.7，而在南灣地區鑽井剖面則有上下盤抬升速率相減，信心度稍高（0.8）。位置信心度方面，海口、潭仔灣、墾管處、南灣均是位在恆春斷層，然而並不是位於斷層中間段，信心度給 0.8；Chen and Liu（1993）中的石牛橋及墾丁剖面位於斷層南端且已遠離斷層線，信心度較低，分別為 0.7 及 0.6；陳文山等（2014）楓港地區其實是位於恆春斷層北段延伸處，信心度較低（0.6）。將權重乘上信心度則是我們對該數值的加權值。圖 6-5.1 為抬升速率累積加權的結果，紅色虛線則為趨勢線，本計畫根據此趨勢線公式得到抬升速率下界 1.3 mm/yr（累積信心度 10%）、中值 4.3 mm/yr（累積信心度 50%）、及上界 6.3 mm/yr（累積信心度 90%）。以本計畫傾角

75°並假設滑移角範圍為 50~70 度換算至斷層面上，得到滑移速率下界 1.6 mm/yr（權重 0.2）、中值 5.2 mm/yr（權重 0.6）、及上界 7.7 mm/yr（權重 0.2）。

恆春斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-5.1：恆春斷層分段破裂模式及權重

Table 6-5.1: Rupture cases and weights of the Hengchun fault

分段名稱	長度(km)	A	B	C
北段	28	■		■
南段	23		■	■
權重		0.4	0.4	0.2

表 6-5.2：恆春斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-5.2: Magnitude calculation results for each rupture case of the Hengchun fault

破裂事件	長度(km)	傾角(度)	深度(km)	寬度(km)	面積(km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(M_w)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式)(M_w)
						-σ	中值	+σ	
A	28	75	20	20.7	580	6.5	6.8	7.1	6.8
B	23				476	6.4	6.7	7.0	6.7
C	51				1056	6.8	7.1	7.4	7.0

表 6-5.3：恆春斷層抬升速率之各調查方法數值權重及信心度

Table 6-5.3: Weight and confidence of each survey's uplift rate of the Hengchun fault

參考文獻	方法	抬升速率 (mm/yr)	權重	方法信心度	位置信心度	權重×信心度
Chen and Liu（1993）	海階崖高及定年推估，主要為珊瑚礁 ^{14}C 定年(海口)	5.3	0.5	0.7	0.8	0.28
		6.3	0.5	0.7	0.8	0.28
	海階崖高及定年推估（石牛橋）	6.1	0.5	0.7	0.7	0.245
		6.9	0.5	0.7	0.7	0.245
	海階崖高及定年推估（潭仔灣）	3.4	0.5	0.7	0.8	0.28
		3.8	0.5	0.7	0.8	0.28
	海階崖高及定年推估（墾丁）	3.8	0.5	0.7	0.6	0.21
		4.3	0.5	0.7	0.6	0.21
陳文山等（2006）	鑽井及珊瑚礁 ^{14}C 定年計算抬升率(海口)	6	0.2	0.7	0.8	0.112
		5.9	0.6	0.7	0.8	0.336
		5.8	0.2	0.7	0.8	0.112
陳文山等（2010）	階地珊瑚礁定年，與恆春谷地鑽探剖面對比(墾管處)	4.4	0.2	0.8	0.8	0.128
		4.2	0.6	0.8	0.8	0.384
		4	0.2	0.8	0.8	0.128
中興公司（2012）	四重溪鑽探剖面對比	1	1	0.7	0.7	0.49
	南灣鑽探剖面對比	1.2	1	0.8	0.8	0.64
陳文山等（2014）	隆起珊瑚礁海階年代及抬升量(楓港地區)	3.8	0.2	0.7	0.6	0.084
		3.4	0.6	0.7	0.6	0.252
		3	0.2	0.7	0.6	0.084
	隆起珊瑚礁海階年代及抬升量(海口地區)	5.5	0.2	0.7	0.8	0.112
		4.2	0.6	0.7	0.8	0.336
		2.9	0.2	0.7	0.8	0.112
	隆起珊瑚礁海階年代及抬升量(南灣地區)	6.9	0.2	0.7	0.8	0.112
		5.7	0.6	0.7	0.8	0.336
		4.5	0.2	0.7	0.8	0.112

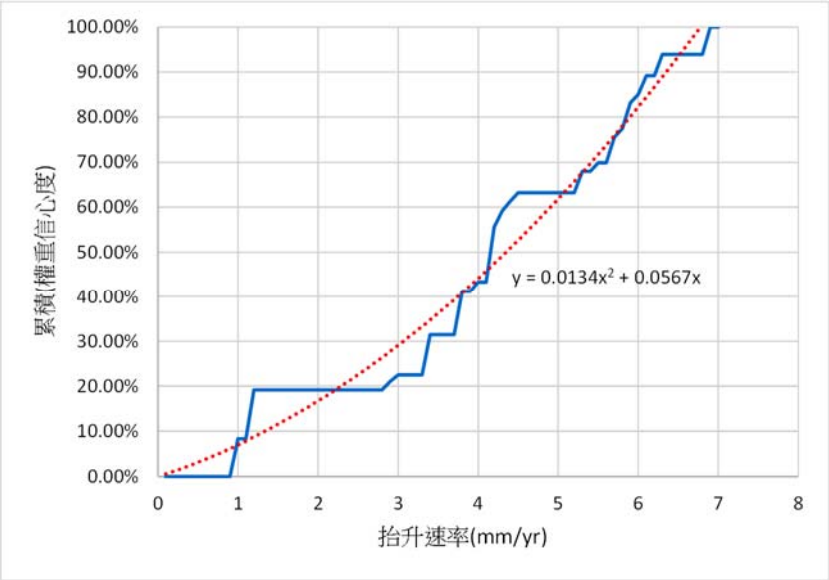


圖 6-5.1：恆春斷層抬升速率累積加權分布。

Figure 6-5.1: The cumulatively weighted distribution for the uplift rate of the Hengchun fault.

6-5-2 恆春斷層規模與年發生率之關係

本計畫以特徵地震模式計算恆春斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-5.2 為 3 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

恆春斷層每一組參數皆有其權重，將 3 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-5.3 之恆春斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.8 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-5.4 之恆春斷層地震復發間隔時間-權重分布圖，圖中可見週期在 100~200 年的權重較高。

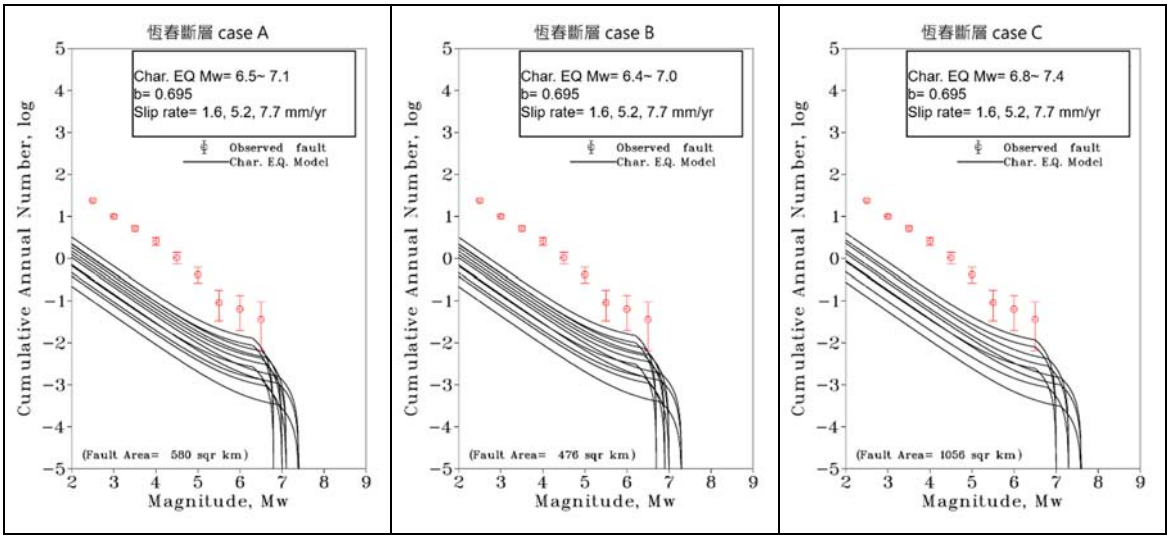


圖 6-5.2：恆春斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-5.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Hengchun fault.

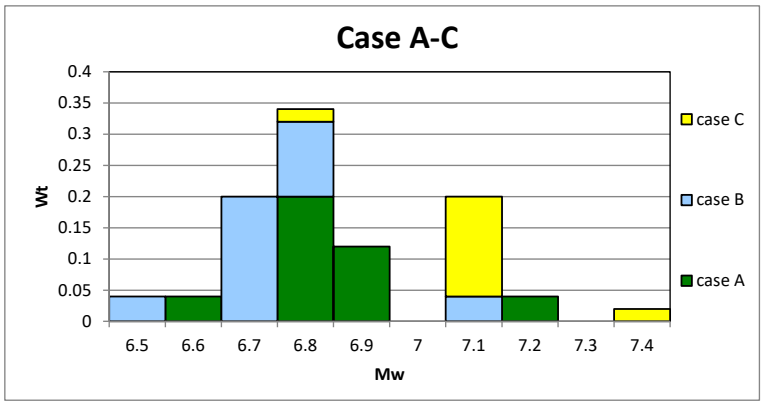


圖 6-5.3：恆春斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-5.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Hengchun fault.

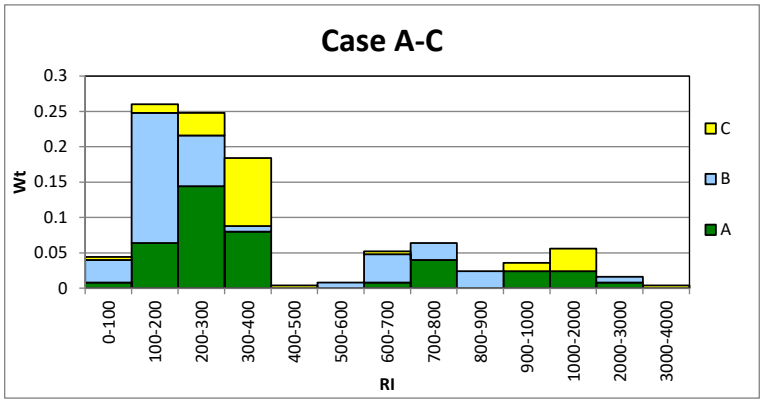


圖 6-5.4：恆春斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-5.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Hengchun fault.

6-5-3 恆春斷層機率評估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，恆春斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 6-5.4 為恆春斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2021 年，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 11.1%、17.6%及 31.1%。

表 6-5.4：本計畫恆春斷層發生機率評估

Table 6-5.4: Earthquake probabilities for the Hengchun fault in this project

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.5≦ M ≦7.4	11.1%	17.6%	31.1%
M ≧ 7.0	1.6%	2.6%	4.8%

6-6 斷層活動潛勢圖成果

本年度斷層潛勢圖為南部重要區域活動斷層潛勢評估之成果，名為「臺灣南部重要區域斷層活動機率圖」（圖 6-6.1）。是以地表變形強度分布圖為底圖，套疊旗山斷層、小崗山斷層、車瓜林斷層之線型及每條活動斷層未來 50 年地震矩規模 6.5 以上之發生機率圖框。

使用者須知如下：

1. 活動斷層之復發間隔是根據斷層滑移速率之研究與調查成果所推估，進一步再計算活動斷層發生大地震之機率。斷層滑移速率之推估受限於有限之地質調查資料，仍有不確定性，故發生機率需謹慎參考使用。
2. 活動斷層錯動與大規模地震時間受限於觀測時間不足及統計之不確定性，本機率圖不宜作為地震預測之用途。機率較低之斷層不代表不會優先發生地震。
3. 本機率圖只推估各活動斷層錯動之大地震規模，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

圖版說明如下：

1. 製圖日期：中華民國 110 年 12 月
2. 底圖：地表變形強度分布圖
3. 活動斷層：參考中央地質調查所臺灣活動斷層分布圖第三版（2012）
4. 斷層活動機率起算時間：西元 2021 年
5. 統計模式：已知上一次斷層錯動與大規模地震之發生時間得採用 BPT 模式（假設發生率會隨時間變化）；未知上一次斷層錯動與大規模地震之發生時間得採用 Poisson 模式（假設發生率固定，不隨時間變化）
6. 考慮折減：玉里-池上斷層系統由於間震期會藉由潛移釋放部分能量，需考慮折減地震矩率以符合目前觀測之現況

圖例則包含重要區域範圍、斷層線形、鄉鎮市區公所、消防隊、醫院、學校、台鐵路線、高鐵路線、國省道（含快速公路）。

潛勢圖正下方則提供地調所官網首頁之網址及 QR 碼，方便民眾查詢。

臺灣南部重要區域斷層活動機率圖

ACTIVE FAULT PROBABILITIES OF THE OBJECT AREAS IN SOUTHERN TAIWAN

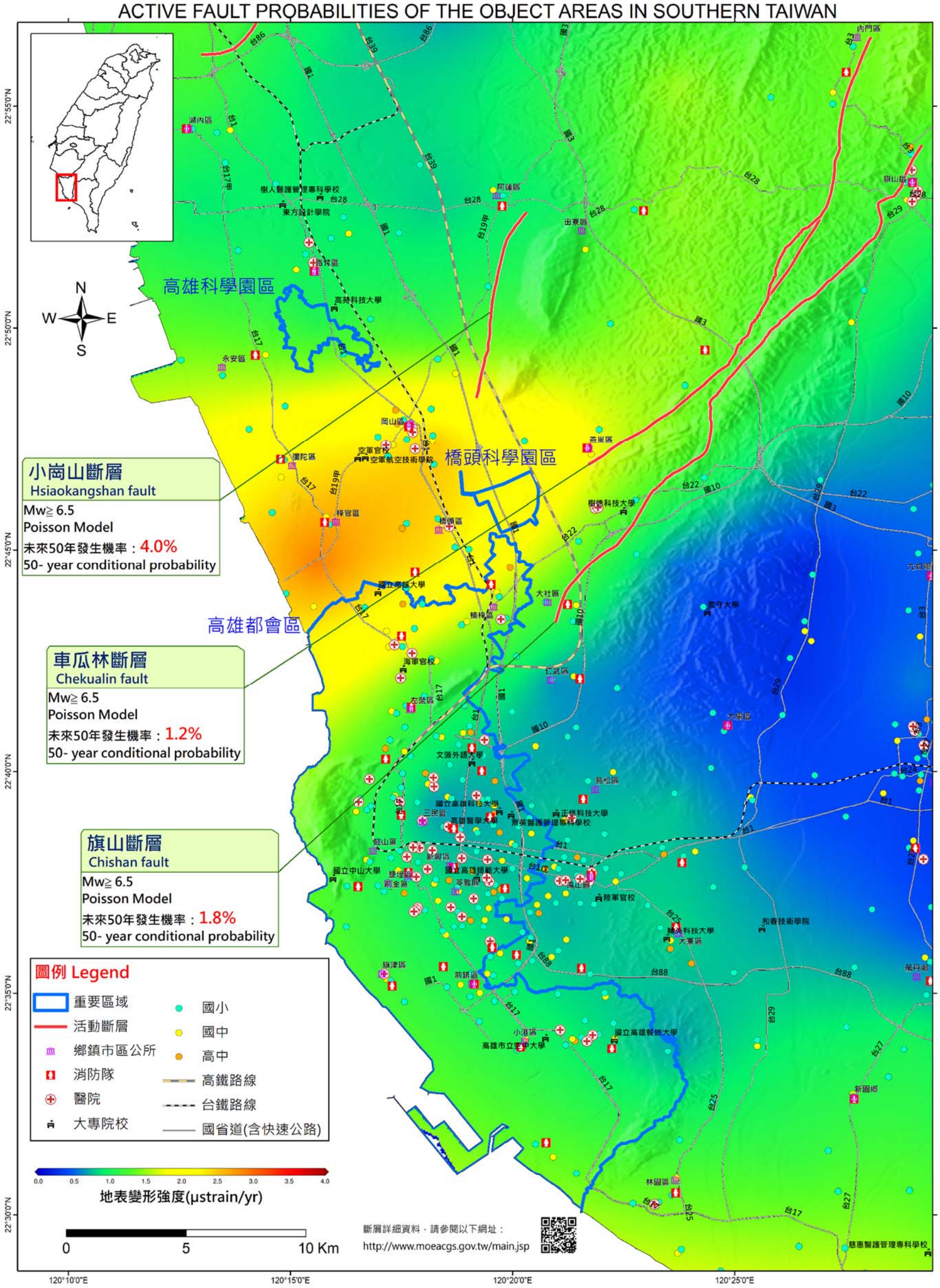


圖 6-6.1：臺灣南部重要區域斷層活動機率圖。

Figure 6-6.1: Active fault probabilities of the object area in southern Taiwan.

第七章、南部地區景況地震動與景況同震位移分布圖

7-1 景況地震動分布圖

依據第四章闡述經持續蒐集最新之地質地物調查研究成果資料，進行整合評估獲得最合宜之斷層幾何參數的參考值，並選取該目標區域內數個跨斷層之地表速度剖面，利用二維斷層模型，以前述所得之斷層幾何參數作為參考值進行約制，完成最佳斷層幾何參數之搜尋。所推估並建立斷層幾何參數之餘，亦根據所建立之斷層模型估算其可能最大規模，另行考慮區域地表場址特性後，則可透過地動預估式評估計算，繪製當斷層發震並引致斷層面錯動破裂時，鄰近區域所產生之地震動型態以及可能之震動程度，亦即景況地震動分布圖。其圖資可供重要區域及鄰近區域於斷層錯動引致大規模地震發生前，規劃適宜之防救災準則，也可供土木結構設計人員規劃適宜之制震工法，降低重要設施因震災所可能帶來的風險，另可提供中央地質調查所之活動斷層敏感區劃設建議，亦能作為各地方政府災防責管單位擇定重要區域之優先防災規劃參考。

7-1-1 斷層破裂三維網格與地面計算網格建立

採用本計畫建立之最佳斷層三維斷層模型，產出計算景況地震動評估所需之斷層破裂三維分析網格。前述大地測量反演模型之分項工作，以 GNSS 觀測站及精密水準測量資料，整合地質與地球物理測勘及相關文獻與研究，經評估分析後分別獲得小崗山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層之斷層最佳幾何參數，經該幾何參數可產製景況地動分析所需之三維空間分布數值座標。另，配合本計畫鄰近斷層之重要區域所需，產製景況地動分布圖之前，事先規畫建立及計算地面虛擬測站網格點。

地面虛擬網格點之空間尺度，係依據場址地盤條件資料評估所獲得之放大因

子資料庫空間解析度隔距，經規劃設計，訂定每個網格點間隔大小為 0.01 度。景況地動圖分布範圍則涵蓋重要區域，設定為邊界東經 120.000 度至 120.595 度及北緯 22.450 度至 23.000 度之間，範圍涵蓋高雄都會區、高雄科學園區、橋頭科學園區。同時，為避免產製景況地動圖於邊界範圍可能產生數值計算插值所可能出現之誤差數據，於實際計算之地面網格範圍往外略加延伸，加大計算地動預估值之範圍，確保產製景況地動圖數值正確。延伸之範圍為東經 119.800 度至 121.000 度，北緯 22.200 度至 23.400 度之間。延伸範圍之網格總數為 14641 點，本計畫所繪製範圍使用之網格數為 3360 點。產製景況地動圖範圍之地面網格分布情形及重要區域之分布位置如圖 7-1.1 所示。

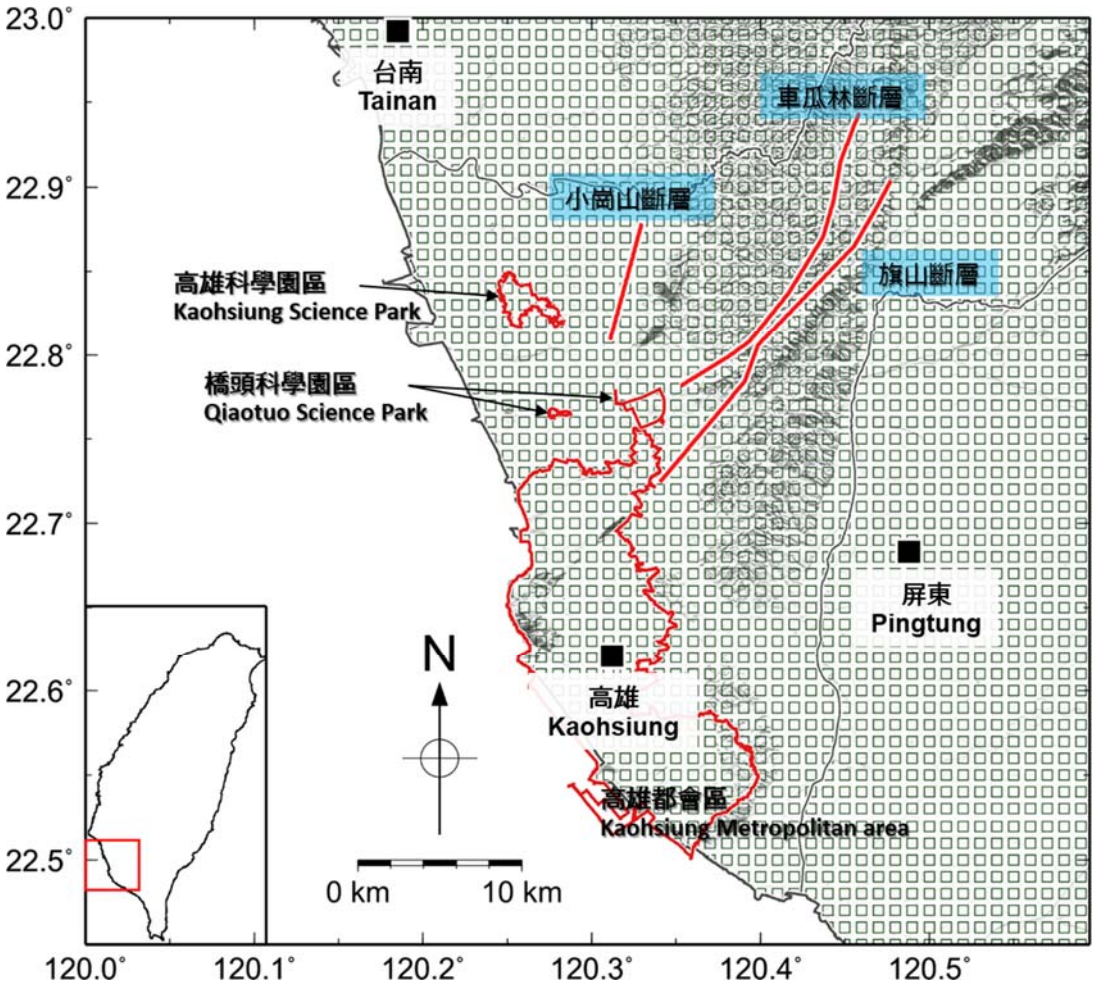


圖 7-1.1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布。

Figure 7-1.1: The distribution of grid points on the surface for scenario ground-motion simulation.

7-1-2 地面網格與斷層面最短距離估算

評估計算景況地震動分布圖，係由地動預估式推求活動斷層錯動時所引致之地表地震動值。其中，欲推估地動值之每個地表網格點位與斷層面之最短距離，為地動預估式所需重要參數之一。其中地動預估式考慮之斷層面（Fault plane）與測站點（Site）之距離定義為三維空間中之最短距離（RupD），而非距離地表斷層線型（Surface fault trace）之距離。如圖 7-1.2 所示，地面網格點與斷層面三維空間分布，存在一最短距離（RupD），該距離之定義可由示意圖清楚表示。

為提供後續景況地震動評估計算步驟所需，本分項工作分別計算小崗山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層之三維分布斷層面離散格點與所建立之地面網格點之最短距離。各別虛擬測站網格點評估之最短距離資料，將提供後續地動預估式計算。

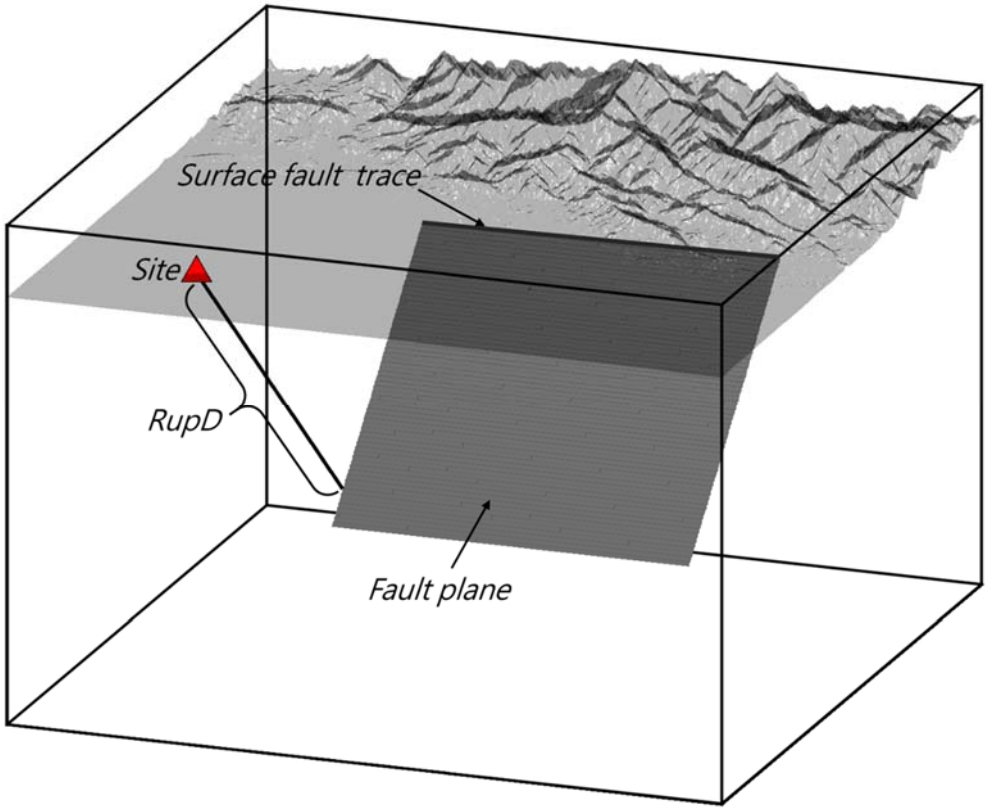


圖 7-1.2：最短距離（RupD）、地面虛擬測站點及三維分布斷層面空間關係示意圖。

Figure 7-1.2: A schema defines the spatial relation of RupD, virtual stations and 3D fault plane.

7-1-3 地震動放大效應評估

地震波於自由場地表之特性，會受到近地表剪力波速分布之特性影響，進而造成地震波振幅放大現象，此現象稱為地震波場址放大效應（site effect）。由於地震波放大振幅的特性與近地表地層之剪力波速分布息息相關，因此為評估震波放大效應，地層剪力波速分布係為關鍵參數。一般使用於考量場址效應的數據為Vs30，亦即地表下 30 公尺內平均剪力波速（e.g., Borcherdt, 1994），工程應用上使用地動預估式計算地動值時，過往已廣泛採用 Vs30 數值做為地層波速之簡化參數。該參數已由許多研究證實與場址特性及地震波放大振幅相關。本計畫因此採用 Vs30 參數評估震波放大效應，以 Lee and Tsai （2008）發表之全臺灣圖資（以下簡稱 LT08 Vs30），做為地動預估式評估之場址輸入參數。

交通部中央氣象局於 2005 年底完成 257 口強震測站鑽井工作，鑽探同時執行懸盪式波速井測（Suspension PS logging）及標準灌入試驗（SPT-N）。LT08 Vs30 利用其中施測品質良好之 230 口井之剪力波速與 N 值資料，建立了 N 值與剪力波速之關係式，該關係式進一步應用至中央地質調查所 GEO2005 資料庫，從資料庫 19154 口井中挑選深度超過或至少 30 公尺之井孔，總共使用了 4885 口工程鑽井所獲得之 N 值資料，再經由 N 值與剪力波速之關係式轉換至剪力波速。上述彙整波速資料所計算之 Vs30，透過適當之空間插值法產製全臺灣 Vs30 分布圖。本研究依據所欲評估斷層及重要區域之相關位置，選定 Vs30 分布區域及三條評估斷層（小崗山斷層、車瓜林斷層及旗山斷層）之空間分布如圖 7-1.3 所示。

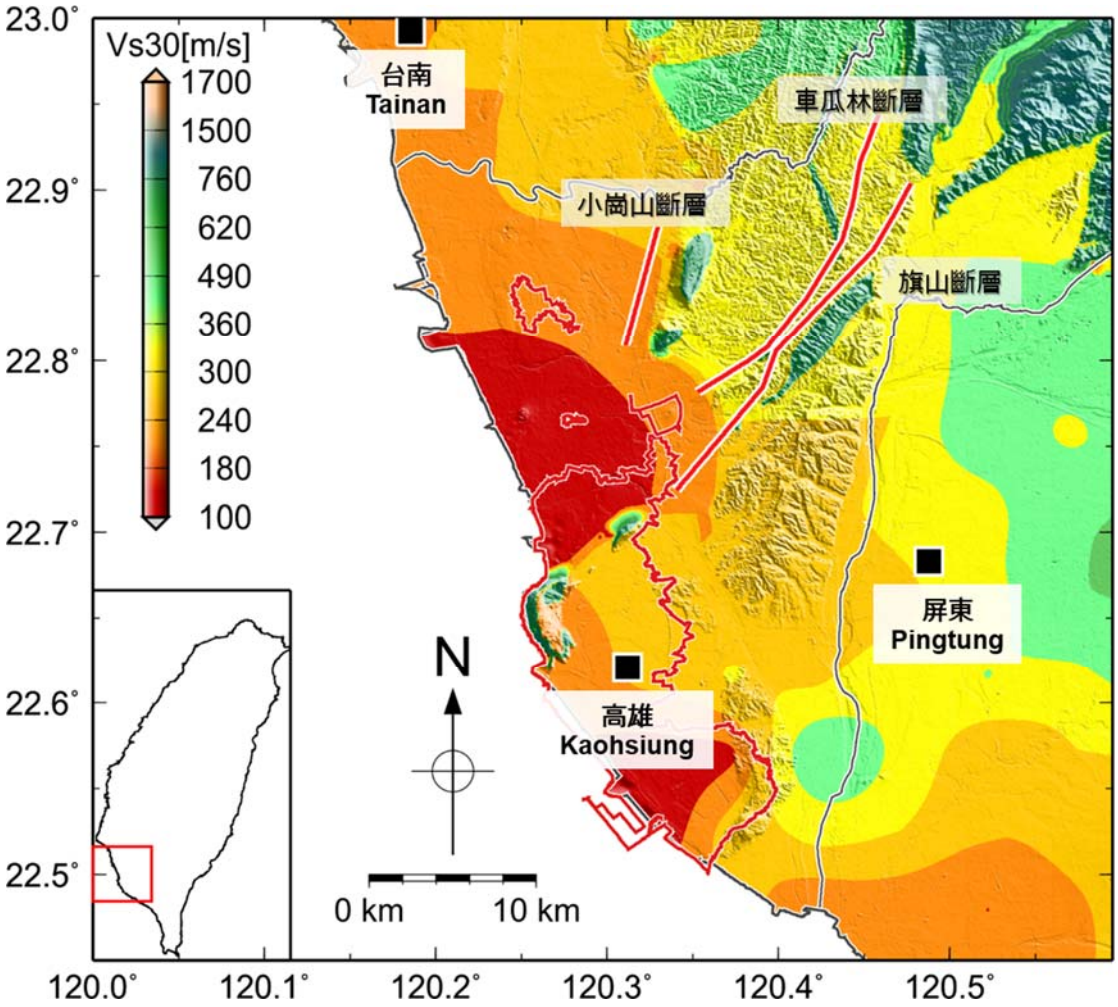


圖 7-1.3：Vs30 及三條評估活動斷層之分布圖。

Figure 7-1.3: The distribution of Vs30 and active faults.

7-1-4 地震動值評估與分布

本計畫進行評估地表地震動值，採用兩套地動預估式，包含林柏伸（2009）所建立之地動預估式（Ground Motion Prediction Equation, GMPE），以下簡稱 GMPE Lin09，以及 Chao et al.(2020)發展之地動預估式，以下簡稱 GMPE Chao20。

GMPE Lin09 使用交通部中央氣象局執行之自由場強地動觀測網計畫（Taiwan Strong-Motion Instrument Program, TSMIP）所布設全台灣 700 多處測站所收錄之豐富強震資料，挑選了 60 個地殼地震，共計 5968 筆經過基線校正及帶通濾波之強震紀錄，利用混合效應模型（mixed-effect model）以最大概似法進行

地動預估式之迴歸分析所建立。GMPE Lin09 地動預估模式之數學式如式 7-1.1。

$$\ln PGA = 1.0109 + F_1 + (-1.1634 + 0.1722(M_w - 6.3)) \times \ln\left(\sqrt{R^2 + e(1.15184)^2}\right) - 0.1907F_{NM} + 0.1322F_{RV} - 0.4741 \ln(V_{S30}/1130)$$

（式 7-1.1）

$$\begin{cases} F_1 = 0.3822(M_w - 6.3) & \text{where } M_w \le 6.3 \\ F_1 = (-1.5184 \times 0.1722)(M_w - 6.3) & \text{where } M_w > 6.3 \end{cases}$$

其中，M_w 為地震矩規模，R 為距斷層面最短距離（RupD），Vs30 為地下 30 公尺內的平均剪力波速（m/s）。F_{NM}用於表示正斷層（當 rake 角-120~-60 度之間，F_{NM}=1，其他角度F_{NM}=0），F_{RV}用於表示逆斷層 （當 rake 角 30~150 度之間，F_{RV}=1，其他角度F_{RV}=0）

Chao et al.（2020）利用兩步驟最大概似法（Chao and Chen, 2019）為地動預估式之迴歸分析工具，開發了最新的水平向地動預估模式。GMPE Chao20 作為較近期發表之地動預估式，解決了許多過去地動預估式的缺點，例如 GMPE Chao20 考量了地殼震源及隱沒帶震源類型差異性，斷層型態以及斷層破裂距離地表深度，主震或餘震型態等有關震源影響因子納入考量以精進地動預估式；另外，也考量了場址項，以 Vs30 參數反應淺部地層場址效應，及 Z1.0 參數（剪力波速達 1 km/s 時之深度）做為反應深部地層影響之場址效應，其中 Z1.0 為一較不易取得之參數，GMPE Chao20 提供如無自訂 Z1.0 參數時之預設 Vs30-Z1.0 轉換關係式，如式 7-1.1

$$\ln(Z_{1.0}) = \frac{-4.08}{2} \ln\left(\frac{{V_{S30}}^2 + 355.4^2}{1750^2 + 355.4^2}\right) \qquad \text{（式 7-1.2）}$$

除了線性場址效應，非線性場址效應因子也納入該預估式中，以評估不同地盤對地震動強度之影響。

GMPE Chao20 建議的地動模型如式 7-1.3:

$$lnS_a = lnS_a^{ref} + S_{source} + S_{path} + S_{site,lin} + S_{site,non} + \delta_e + \delta_s + \delta_r \quad \text{（式 7-1.3）}$$

其中S_a為觀測加速度譜，S_a^{ref}為預測中值參考加速度譜，S_{source}描述震源效應項，S_{path}描述路徑效應項，$S_{site,lin}$為線性場址效應項，$S_{site,non}$為非線性場址效應項，δ_e，δ_s，δ_r分別為事件，測站與特定紀錄之殘差。

根據第 6 章以兩種模式（Wells and Coopersmith, 1994；Yen and Ma, 2011）分別推估小崗山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層所可能發生之規模分別為 6.2、6.4、6.7 以及 6.0、6.3、6.6。本計畫地動值評估所需之規模，係考量兩種模式推估結果之平均值，各斷層規模分別為小崗山斷層之地震矩規模（Mw）6.1，車瓜林斷層之地震矩規模（Mw）6.35，旗山斷層之地震矩規模（Mw）6.65。而三個斷層皆屬於逆衝斷層型態。透過 GMPE Lin09 與 GMPE Chao20，結合前述章節格點化之地面網格點位，網格點位與斷層之最短距離，以及震波場址放大因子（Vs30），進而得以分別計算小崗山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層之地面地動值。其中，本工作地動預估值的計算，除了考慮反映真實地表場址條件之場址放大因子（LT08 Vs30）外，也額外呈現考慮場址位於岩盤場址條件（Vs30=760 m/s）下之地動值分布情形。

由於兩套地動預估模式計算結果存在顯著差異，且兩套模式各有其參數與模式考量上優劣的情況下，將兩套地動預估模式計算結果取其平均值是為一合理做法。而 GMPE Chao20 為最新發表之地動預估模式，其使用資料及考量參數皆較 GMPE Lin09 為豐富。在此情況之下，本計畫以適度之權重對其進行平均，其平均pga_{avg}計算方式如式 7-1.4 所示:

$$pga_{avg} = pga_{Lin09} \times 0.3 + pga_{Chao20} \times 0.7 \qquad （式 7-1.4）$$

根據地動預估式之評估推算結果，分別繪製三個斷層之景況地震動分布圖。涵蓋高雄都會區，由小崗山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層發震所引致於岩盤條件下之景況地震動分布圖如圖 7-1.4 至圖 7-1.6 所示。另，經評估各地表虛擬觀測點所額外考量現地之 Vs30 數值，小崗山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層考慮真實地表場址條件下之景況地震動分布圖則各別呈現於圖 7-1.7 至圖 7-1.9。小崗山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層於岩盤條件及考慮真實地表場址條件下，高雄

科學園區及橋頭園區之景況地震動分布圖如圖 7-1.10 至圖 7-1.12 所示。

地震動值大小（PGA 值）反應地表搖晃程度， 地震動值越高，即代表地表搖晃程度越大。氣象局地震震度分級表（舊制，如圖 7-1.13）即根據 PGA 值定義震度，其中 PGA<0.8 cm/s2 為震度 0 級，PGA≥0.8 cm/s2 且 PGA<2.5 cm/s2 為震度 1 級，PGA≥2.5 cm/s2 且 PGA<8.0 cm/s2 為震度 2 級，PGA≥8.0 cm/s2 且 PGA<25 cm/s2 為震度 3 級，PGA≥25 cm/s2 且 PGA<80 cm/s2 為震度 4 級，PGA≥80 cm/s2 且 PGA<250 cm/s2 為震度 5 級，PGA≥250 cm/s2 且 PGA<400 cm/s2 為震度 6 級， PGA>400 cm/s2 為震度 7 級。

PGA 值越高或震度越大，一般而言越可能對建物帶來損壞。然而，建物因地震動所造成的損壞也與建物本身自然週期及地震動的週期相關，此種複雜的地震建物損害現象，目前也仍為地震工程所亟欲了解的議題之一。儘管如此，本報告所產製之景況地震動圖仍具有一定災防參考價值。

考慮側向場址條件之小崗山斷層景況地動分布，除在小崗山鄰近產生 7 級震度外，位於重要區域高雄科學園區及橋頭科學園區皆可能產生 6 級震度，而高雄都會區大部分區域震度為 5 級。

車瓜林斷層之景況地震動分布，鄰近斷層帶具有 7 級震度，重要區域橋頭科學園區也落在 7 級震度範圍，而高雄科學園區大部分區域落在 5 級震度範圍，東部部分區域具有 6 級震度，高雄都會區北部具有 6 級震度，大部分區域震度則為 5 級。

旗山斷層之景況地震動分布，鄰近斷層帶具有 7 級震度，重要區域橋頭科學園區東部區域有 7 級震度，而西部區域具有 6 級震度，高雄科學園區整體具有 5 級震度，高雄都會區北段震度為 6 級，南段具有 5 級震度。

整體而言，小崗山斷層對高雄科學園區具有較大影響；車瓜林斷層對於橋頭科學園區具有較大影響；旗山斷層對於高雄都會區具有較大影響。

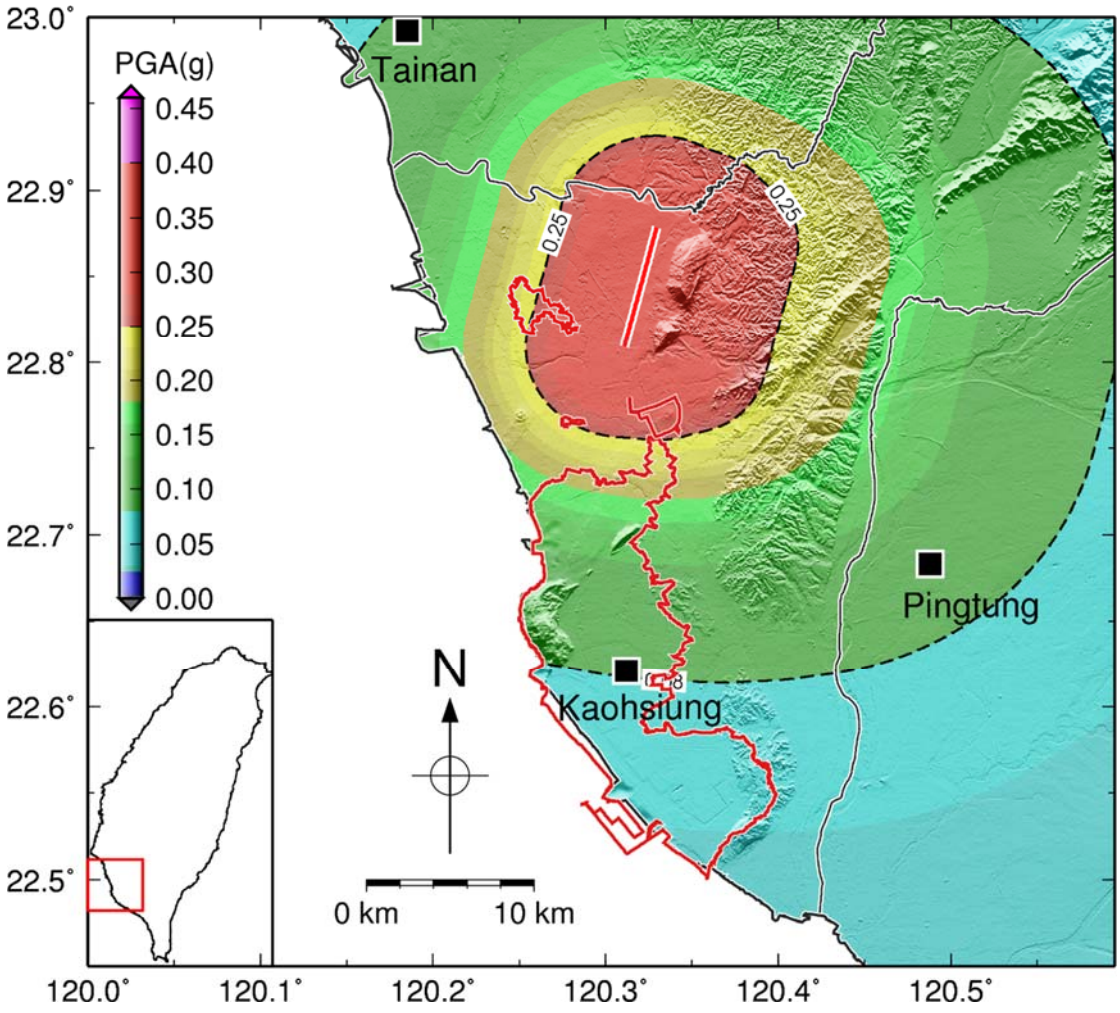


圖 7-1.4：岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之小崗山斷層之景況地震動分布圖。

Figure 7-1.4: Scenario earthquake shaking map of the Hsiaokangshan fault with a site condition of 760 m/s.

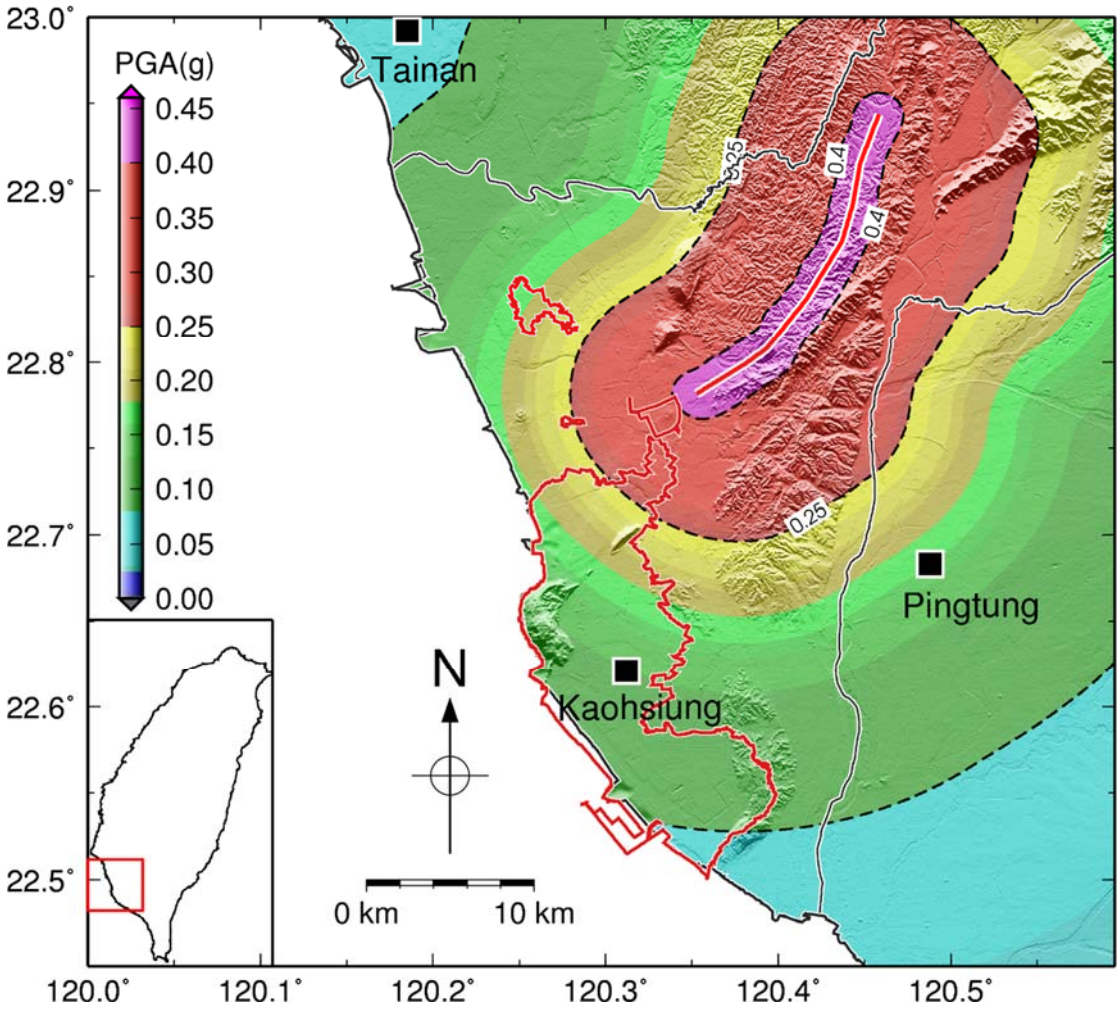


圖 7-1.5：岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之車瓜林斷層之景況地震動分布圖。
Figure 7-1.5: Scenario earthquake shaking map of the Chekualin fault with a site condition of 760 m/s.

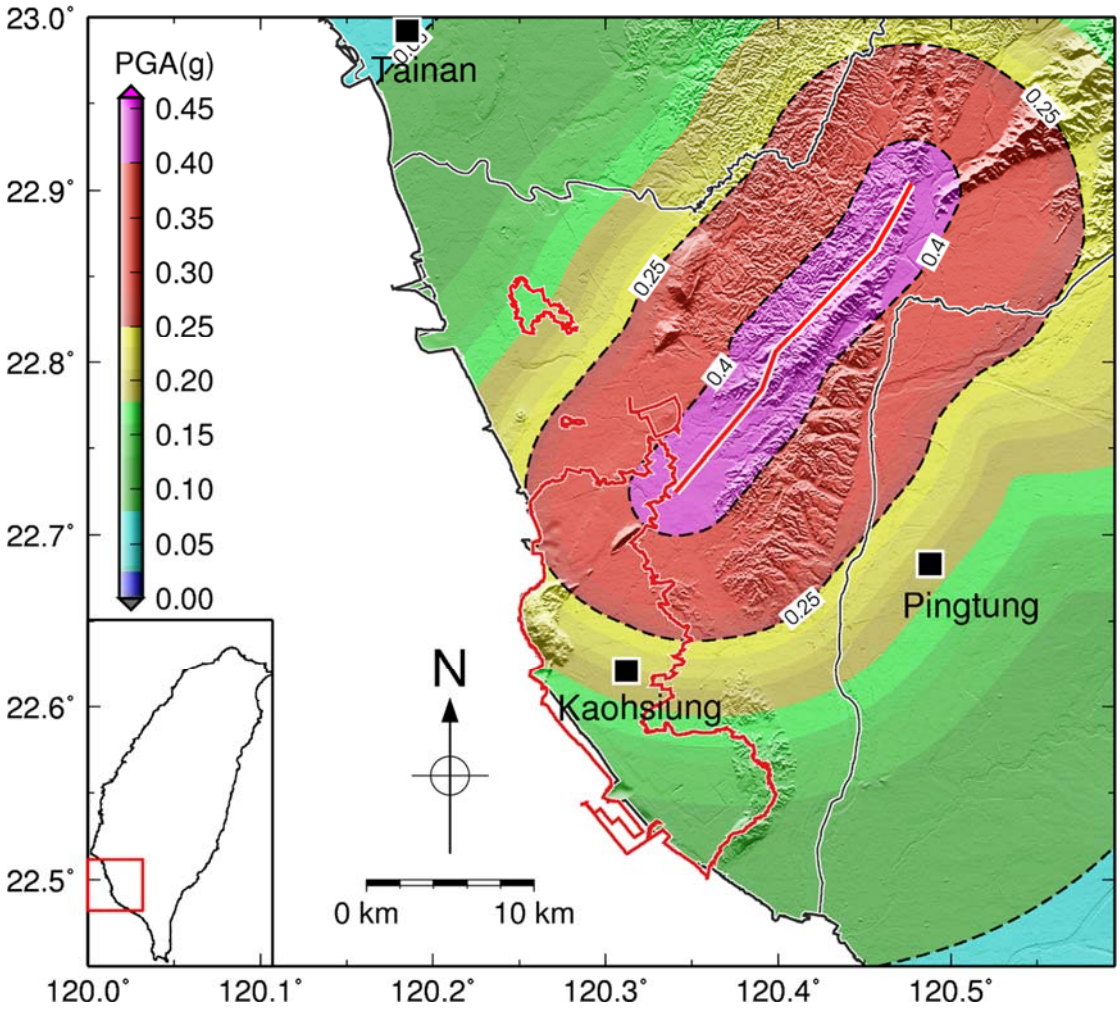


圖 7-1.6：岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之旗山斷層之景況地震動分布圖

Figure 7-1.6: Scenario earthquake shaking map of the Chishan fault with a site condition of 760 m/s.

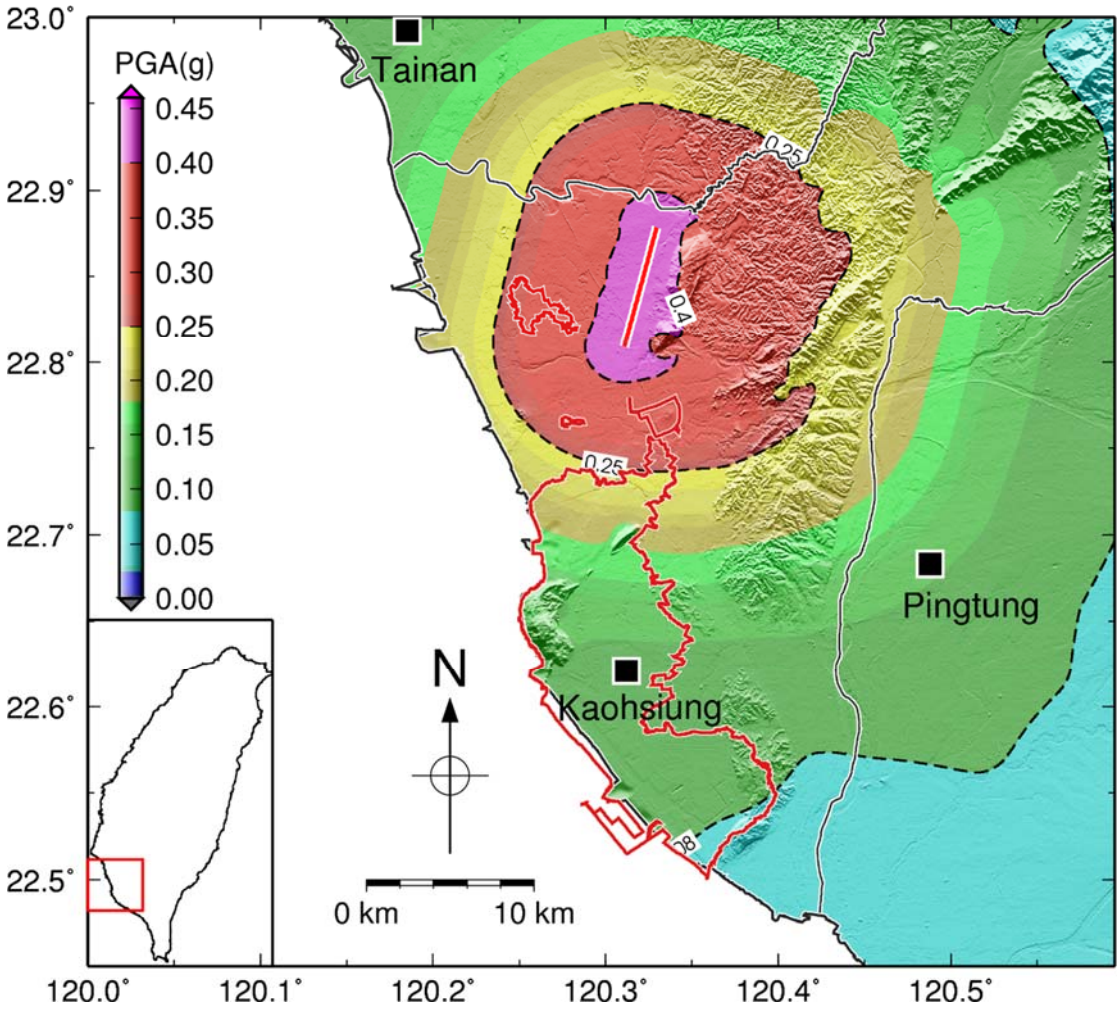


圖 7-1.7：考慮側向場址條件之小崗山斷層之景況地震動分布圖。

Figure 7-1.7: Scenario earthquake shaking map of the Hsiaokangshan fault with a specific site condition correction.

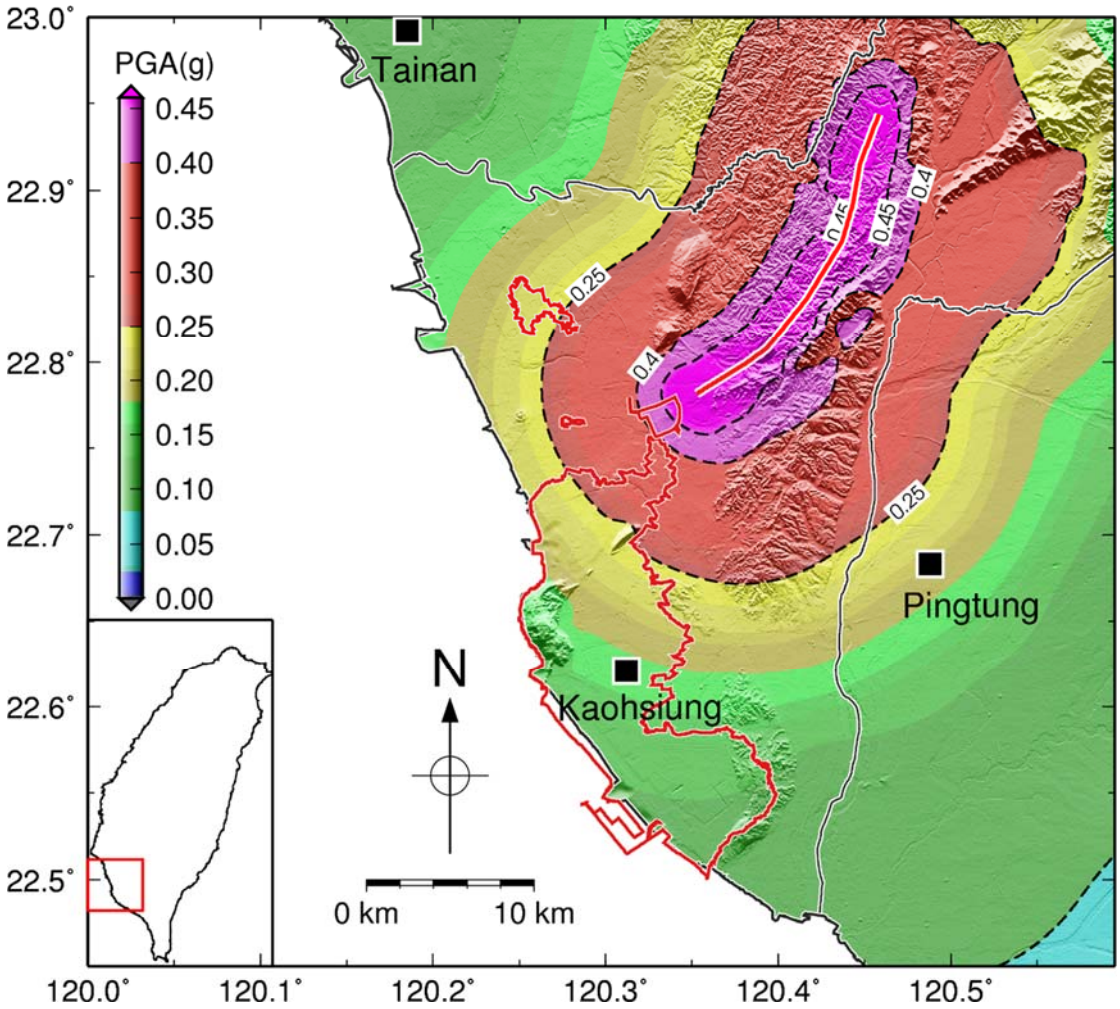


圖 7-1.8：考慮側向場址條件之車瓜林斷層之景況地震動分布圖

Figure 7-1.8: Scenario earthquake shaking map of the Chekualin fault with a specific site condition correction.

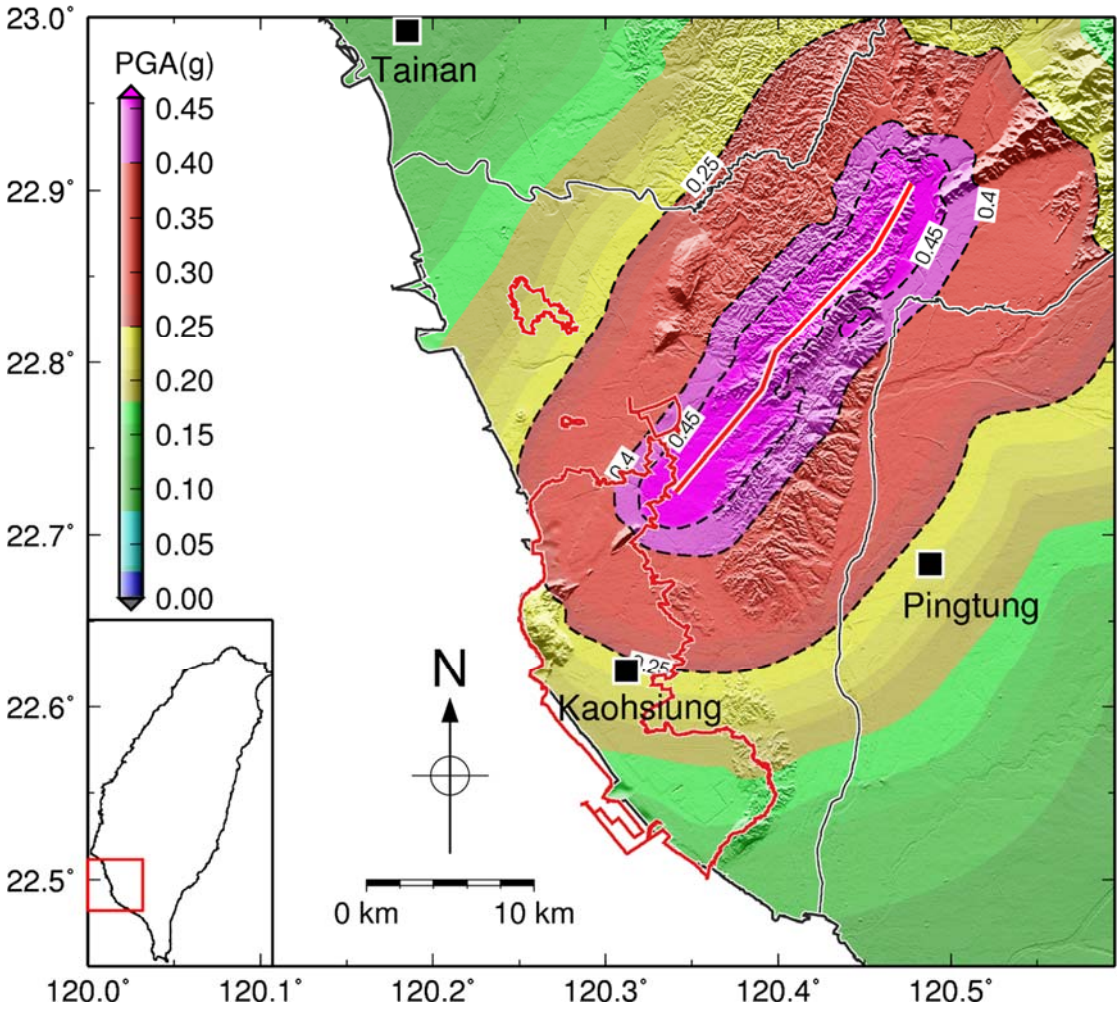


圖 7-1.9：考慮側向場址條件之旗山斷層之景況地震動分布圖。

Figure 7-1.9: Scenario earthquake shaking map of the Chishan fault with a specific site condition correction.

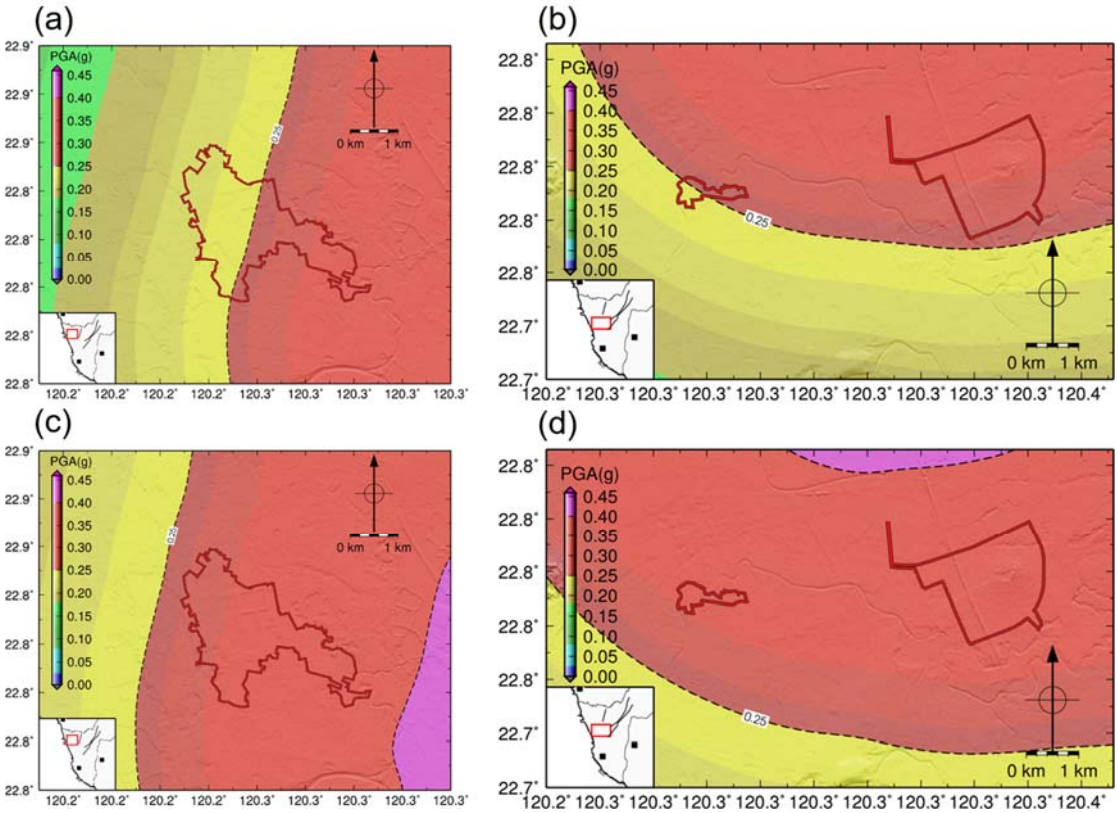


圖 7-1.10：小崗山斷層之橋頭科學園區及高雄科學園區之景況地動分布圖，(a)，(b) 為岩盤條件 Vs30 為 760 m/s，(c)、(d) 為考慮側向場址條件。

Figure 7-1.10: Scenario earthquake shaking map of the Hsiaokangshan fault for Qiaotau and Kaohsiung Science Park, (a), (b) with a site condition of 760 m/s and (c), (d) with a specific site condition correction

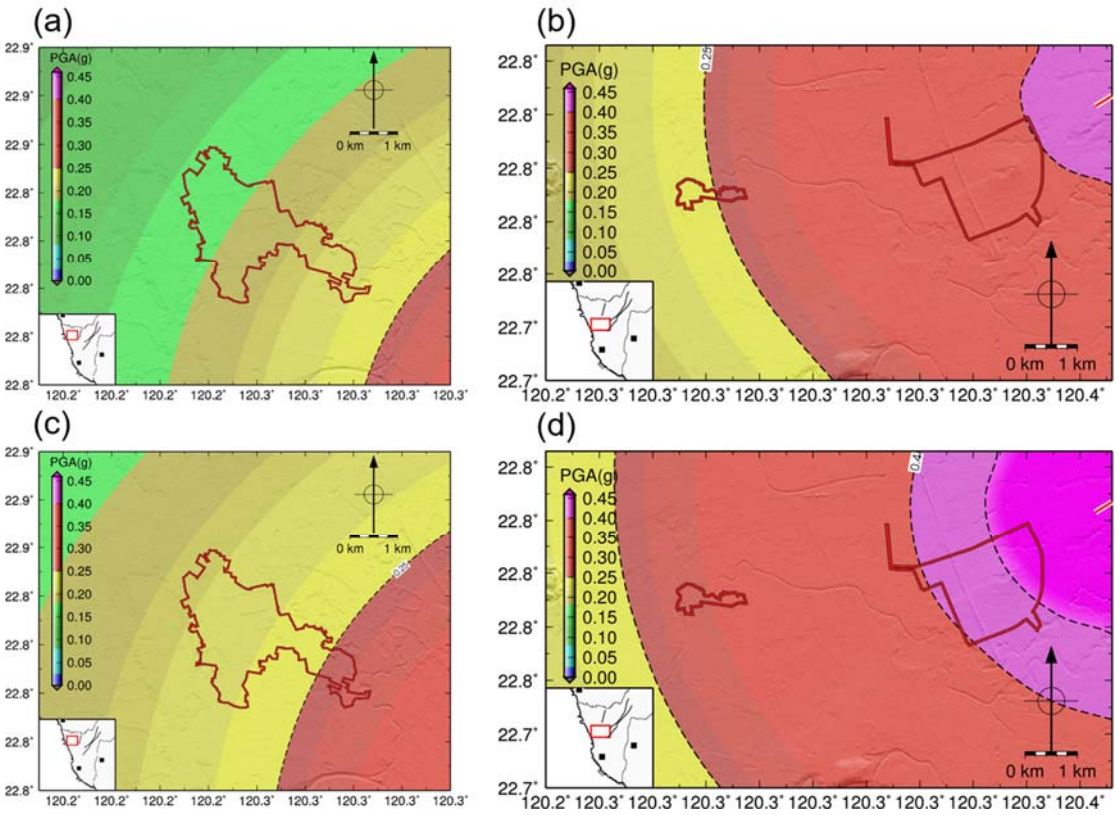


圖 7-1.11：車瓜林斷層之橋頭科學園區及高雄科學園區之景況地動分布圖，(a)，(b) 為岩盤條件 Vs30 為 760 m/s，(c)、(d) 為考慮側向場址條件。

Figure 7-1.11: Scenario earthquake shaking map of the Chekualin fault for Qiaotau and Kaohsiung Science Park, (a), (b) with a site condition of 760 m/s and (c), (d) with a specific site condition correction.

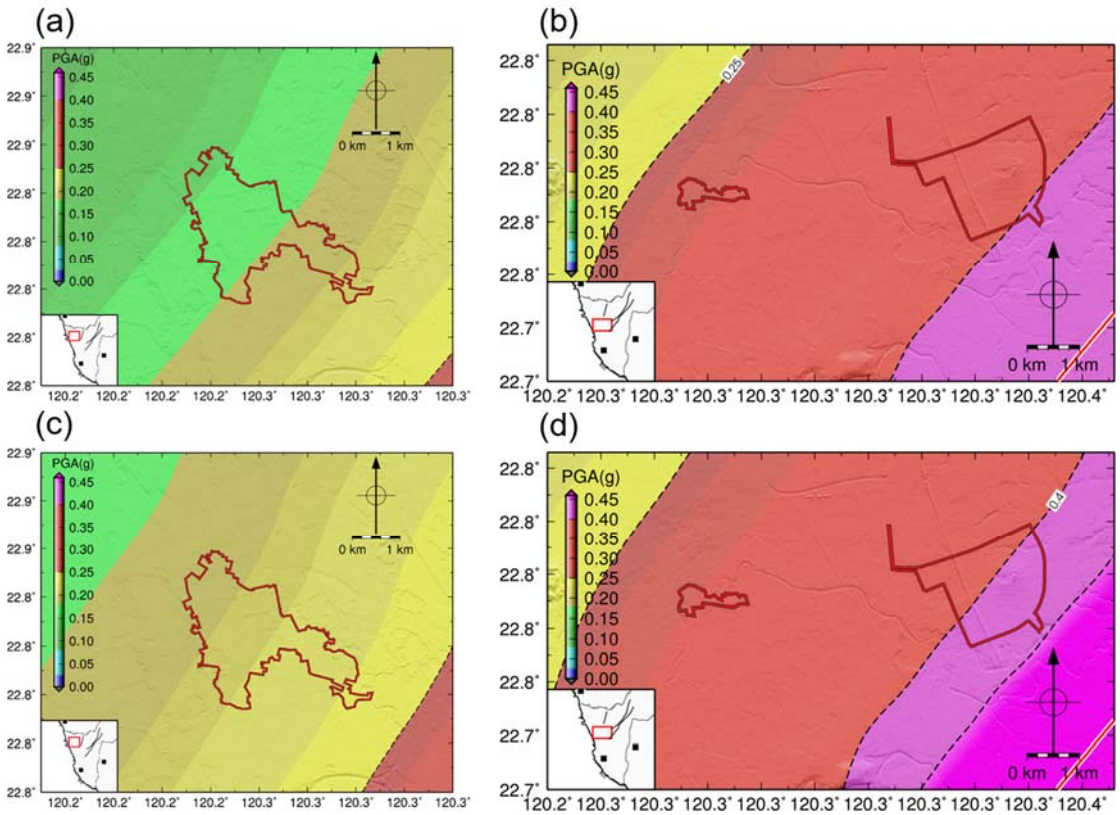


圖 7-1.12：旗山斷層之橋頭科學園區及高雄科學園區之景況地動分布圖，（a）、（b）為岩盤條件 Vs30 為 760 m/s，（c）、（d）為考慮側向場址條件。

Figure 7-1.12: Scenario earthquake shaking map of the Chishan fault for Qiaotau and Kaohsiung Science Park,（a）,（b）with a site condition of 760 m/s and（c）,（d）with a specific site condition correction.

交通部中央氣象局地震震度分級表(2000年8月1日公告)					
震度分級		地動加速度 (cm/s²,gal)	人的感受	屋內情形	屋外情形
0	 無感	0.8 以下	人無感覺		
1	 微震	0.8~2.5	人靜止時可感覺微小搖晃		
2	 輕震	2.5~8.0	大多數的人可感到搖晃，睡眠中的人有部分會醒來	電燈等懸掛物有小搖晃	靜止的汽車輕輕搖晃，類似卡車經過，但歷時很短
3	 弱震	8~25	幾乎所有的人都感覺搖晃，有的人會恐懼感	房屋震動，碗盤門窗發出聲音，懸掛物搖擺	靜止的汽車明顯搖動，電線略有搖晃
4	 中震	25~80	有相當程度的恐懼感，部分的人會尋求躲避的地方，睡眠中的人幾乎都會驚醒	房屋搖棟甚烈，底坐不穩物品傾倒，較重傢俱移動，可能有輕微災害	棄車駕駛人略微有感，電線明顯搖晃，步行中的人也感到搖晃
5	 強震	80~250	大多數人會感到驚嚇恐慌	部分牆壁產生裂痕，重家具可能翻倒	汽車駕駛人明顯感覺地震，有些牌坊煙囪傾倒
6	 烈震	250~400	搖晃劇烈以致站立困難	部分建築物受損，重傢俱翻倒，門窗扭曲變形	汽車駕駛人開車困難，出現噴沙噴泥現象
7	 劇震	400以上	搖晃劇烈以致無法依意志行動	部分建築物受損嚴重或倒塌，幾乎所有傢俱都大幅移位或掉落地面	山崩地裂，鐵軌彎曲，地下管線破壞

圖 7-1.13：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表。

Figure 7-1.13: Comparison table of ground acceleration PGA and the degree of damage.

7-2 景況同震位移分布圖

活動斷層指過去十萬年內有活動證據之斷層。當活動斷層因各種原因發生錯動時，斷層兩側之塊體易受活動斷層錯動或地表破裂而造成影響。此影響範圍，即為活動斷層地質敏感區。位於活動斷層地質敏感區內的土地並非完全被禁止使用，但需要藉由基地地質調查與地質安全評估來確定土地開發行為的適當性，遠離災害風險較高區域或因應風險大小調整土地利用強度與密度，以提升土地利用的合理性與安全性，避免未來斷層活動時造成重大災害與損失。

若該活動斷層為潛移斷層，則可以根據現今之測地資料判定斷層兩側之塊體受活動斷層錯動及地表破裂所造成的影響範圍進行劃設。然而，臺灣地區多數的活動斷層為鎖定斷層，換言之，這些斷層在地震發生前，並不會出現顯著之相對位移。因此，如何在地震發生前，利用科學方法合理地估算地震發生時所造成的同震位移場，再根據此結果推求地震發生時，斷層兩側之塊體受活動斷層錯動及地表破裂所造成的影響範圍，即可更合理地劃設活動斷層地質敏感區，同時也可以提供重要區域進行防災規劃。

7-2-1 地表同震位移網格建立

本年度景況同震位移圖之預設成果範圍同 7-1 節之景況地震動分布圖，涵蓋高雄都會區、高雄科學園區、橋頭科學園區等保全對象之重要區域，因此邊界同樣設定為延伸後之範圍：東經 119.8°至 121.0°，北緯 22.4°至 23.4°之間。此外，為了便於本計畫、其他領域使用者或一般民眾可將景況同震位移分布圖與景況地震動分布圖進行分析與比較，地表同震位移網格點亦設計為間隔大小為 0.01°之格點分布。

7-2-2 潛在震源位置與各斷層同震滑移量推估

根據過去針對隱沒帶地震的研究指出，利用震間期測地資料估算出來具有滑移虧損速率的位置，多和大地震發生時的地栓（Asperity）位置重疊（van Rijsingen et al., 2020）。換言之，滑移虧損速率的分布位置可以被假設為未來大地震可能發生的區塊（圖 5-2.3c、圖 5-3.5、圖 5-3.6）。由本計畫重點斷層三維斷層模型成

果可知，小崗山斷層之斷層滑移虧損速率主要集中於約 2–3 km 深之斷層面淺部；車瓜林斷層與旗山斷層則皆以斷層南段之斷層面淺部為主要分布範圍，意即小崗山斷層整體斷層面淺部區域皆為潛在之震源區域，車瓜林斷層與旗山斷層則以南段之近地表處為潛在震源位置。

獲得潛在震源位置後，根據本計畫 6-1 節依經驗式所進行之推估與平均計算，小崗山斷層之 *Mw* 為 6.1，車瓜林斷層之 *Mw* 為 6.35，旗山斷層之 *Mw* 為 6.65。接著，分別結合由三維斷層模型所推估而得各斷層之滑移虧損速率，本計畫可推求出小崗山斷層之地震重複週期（recurrence interval）約為 536 年；車瓜林斷層之地震重複週期約為 896 年；旗山斷層則約為 650 年。隨後再將各斷層之地震重複週期乘上斷層滑移虧損速率，即可分別獲得未來小崗山斷層、車瓜林斷層及旗山斷層於未來發生地震時，可能的同震斷層滑移分布量。最後，根據各斷層之斷層滑移分布，本計畫變可藉由三維斷層錯位模型進行正演，計算地表所有網格點之同震位移場，此即為景況同震位移分布圖。

7-2-3 各斷層景況同震位移分布圖

圖 7-2.1 為本計畫針對小崗山斷層所繪製之景況同震位移分布圖，由該分布型態可發現，其景況同震位移量多分布於小崗山斷層東側，主要之位移方向為由東北往南並於斷層東北側開始向南偏轉；斷層西側則以由西往西北之位移為主，隨後於斷層西南側逐漸向西偏轉。同震位移之最大量值落於斷層東側，約達 70.6 cm。圖 7-2.2 為本計畫針對車瓜林斷層所繪製之景況同震位移分布圖，其景況同震位移量主要分布於斷層中段至北段之東西兩側，位移方向於斷層中段開始，東側部分位移主要由南往北，隨後逐漸向東偏轉；斷層西側則由斷層北段開始由北往南至車瓜林斷層中段後逐漸轉為向西偏轉，整體變形帶有顯著之左移分量。其同震位移之最大量值落於斷層之中北段，約達 117.1 cm。圖 7-2.3 則為本計畫針對旗山斷層所繪製之景況同震位移分布圖，該斷層之景況同震位移量主要分布範圍位於旗山斷層中、南段，其同震位移主要集中於旗山斷層南段東側，且整體而言斷層西側之位移方向與車瓜林斷層相似，帶有強烈之左移分量，斷層西側為由北往南止斷層中南段轉往向西，東側則為由南往北向於斷層靠近中段轉折處後轉往向東之趨勢，其最大量值高達 220.8 cm。此外，針對本計畫重要區域：橋頭科

學園區與高雄科學園區所繪製之景況同震位移分布圖如圖 7-2.4 至圖 7-2.9。

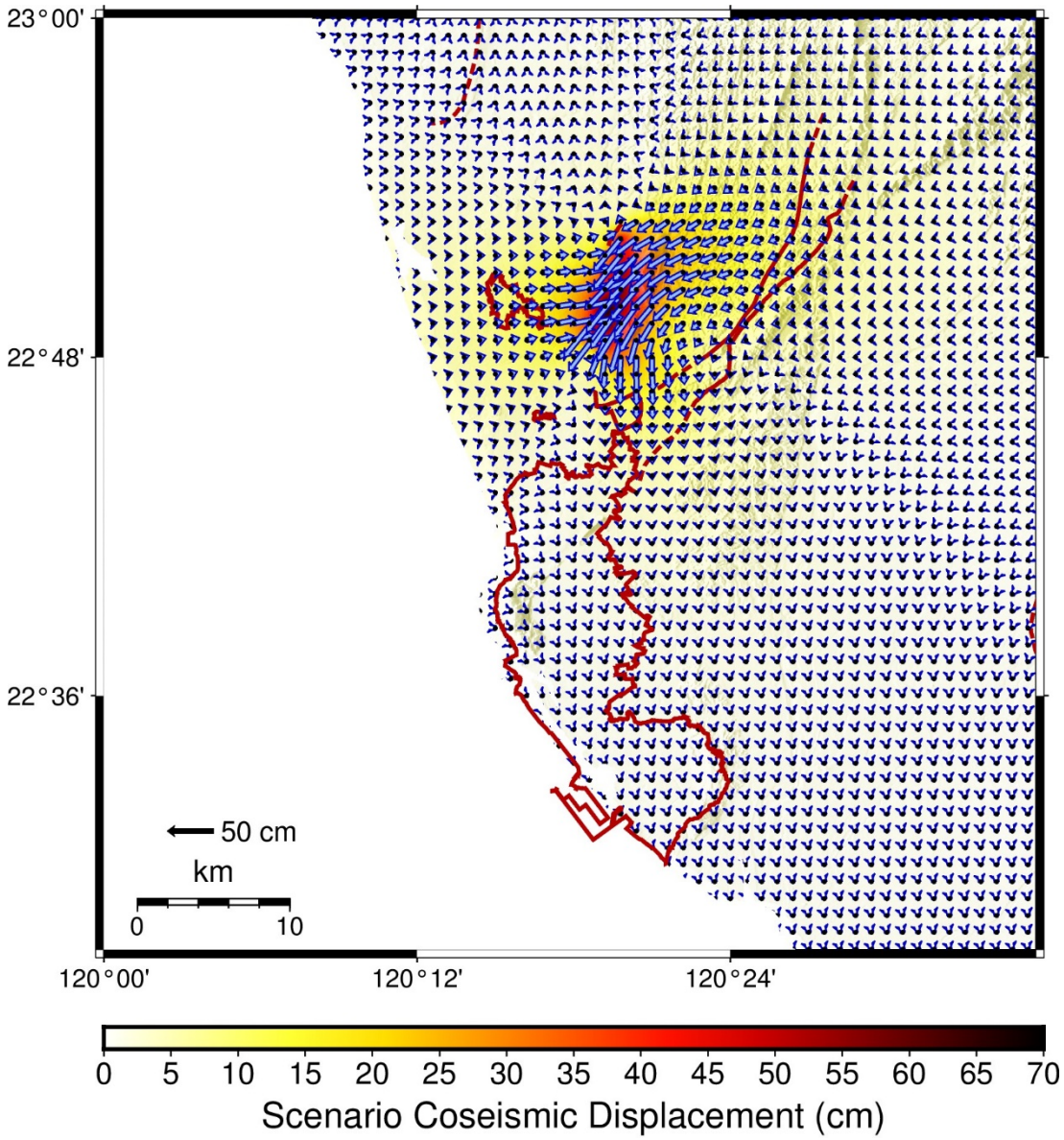


圖 7-2.1：小崗山斷層之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.1: Scenario coseismic displacement map of the Hsiaokangshan fault.

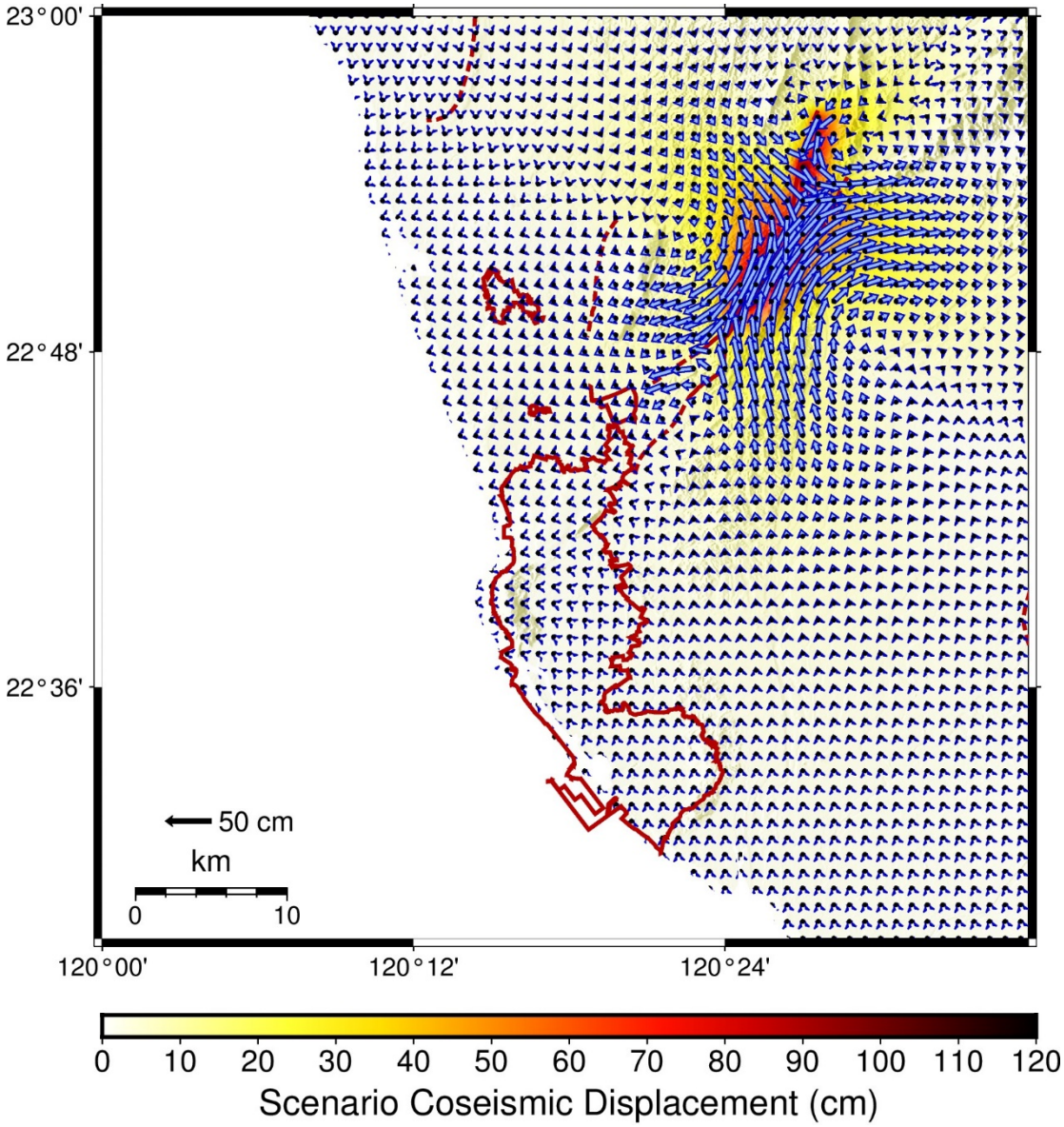


圖 7-2.2：車瓜林斷層之景況同震位移分布圖。

Figure 7-2.2: Scenario coseismic displacement map of the Chekualin fault.

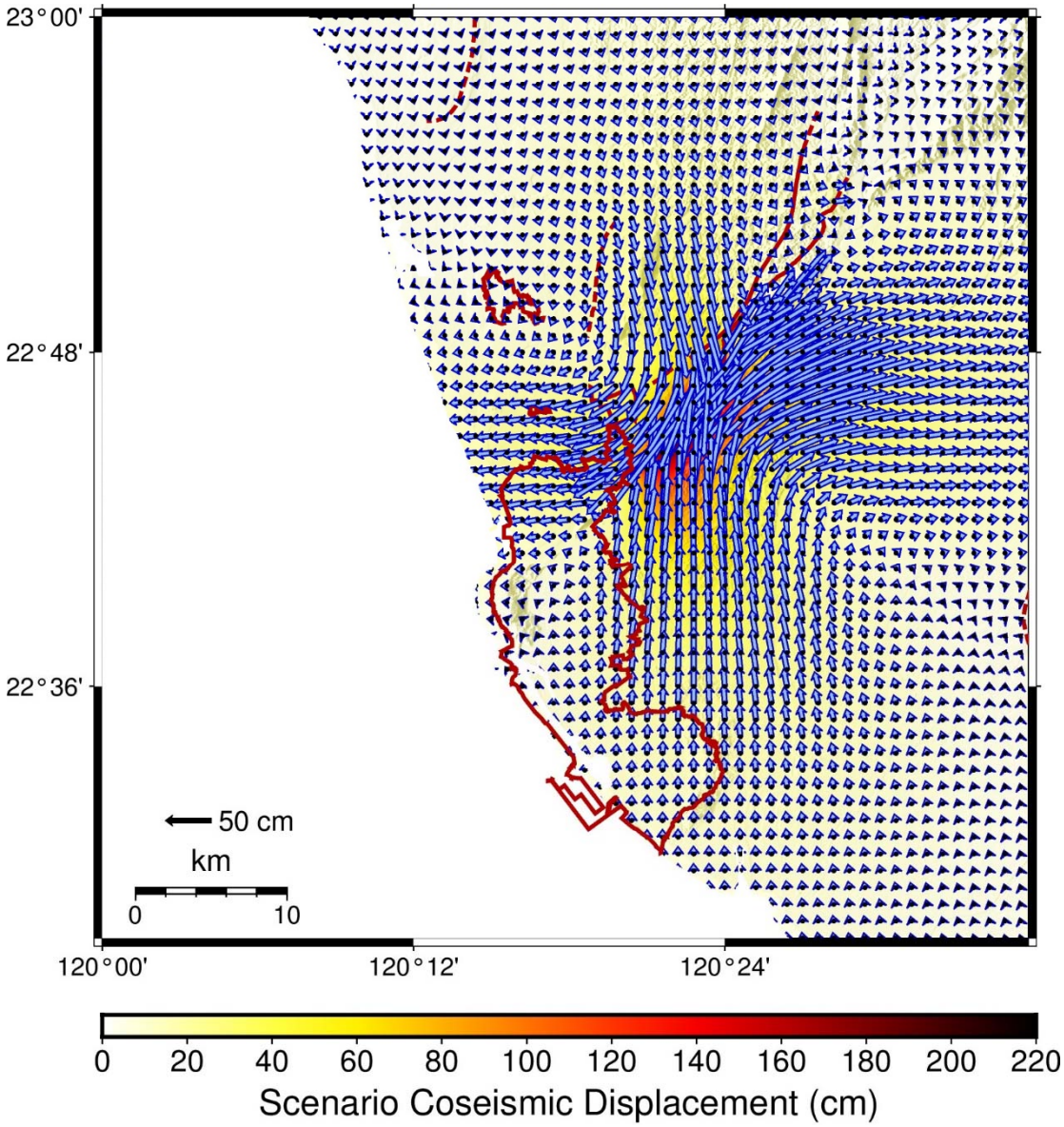


圖 7-2.3：旗山斷層之景況同震位移分布圖。

Figure 7-2.3: Scenario coseismic displacement map of the Chishan fault.

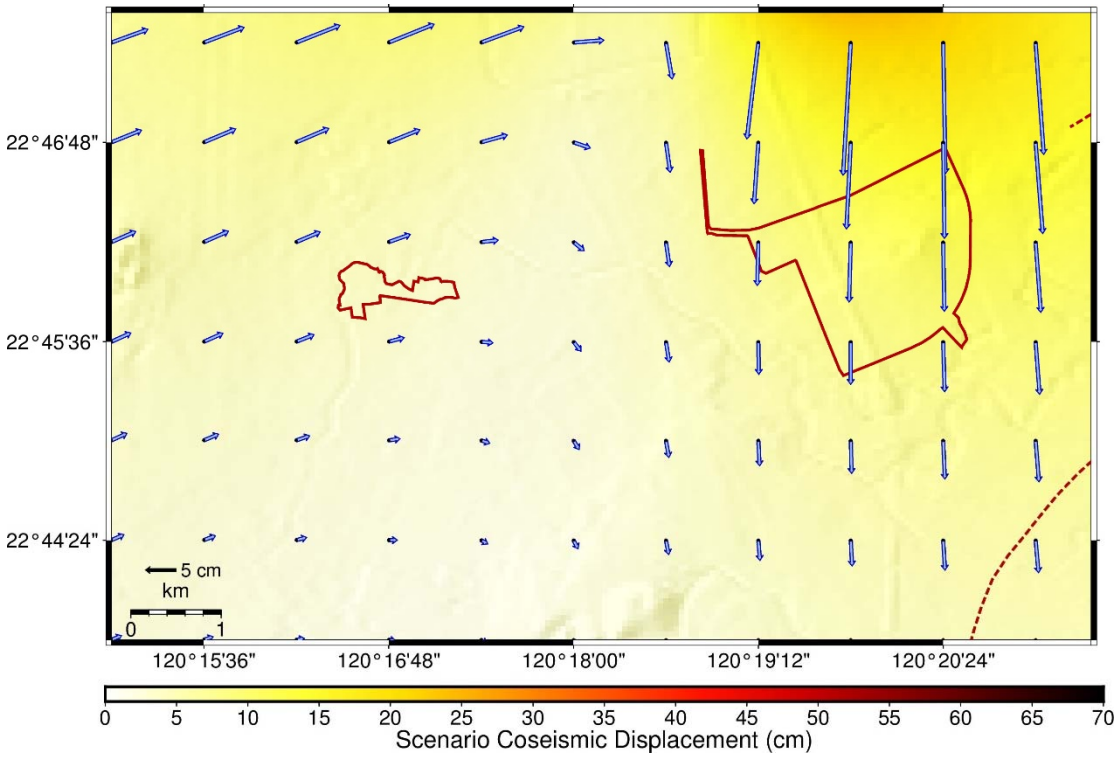


圖 7-2.4：小崗山斷層於橋頭科學園區之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.4: Scenario coseismic displacement map of the Hsiaokangshan fault in Qiaotau Science Park.

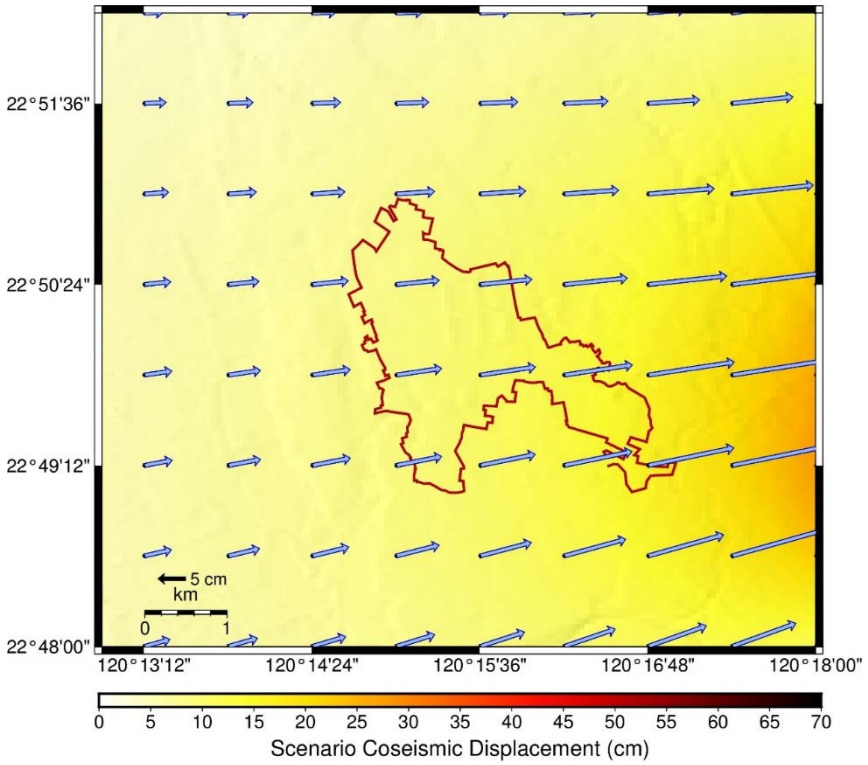


圖 7-2.5：小崗山斷層於高雄科學園區之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.5: Scenario coseismic displacement map of the Hsiaokangshan fault in Kaohsiung Science Park.

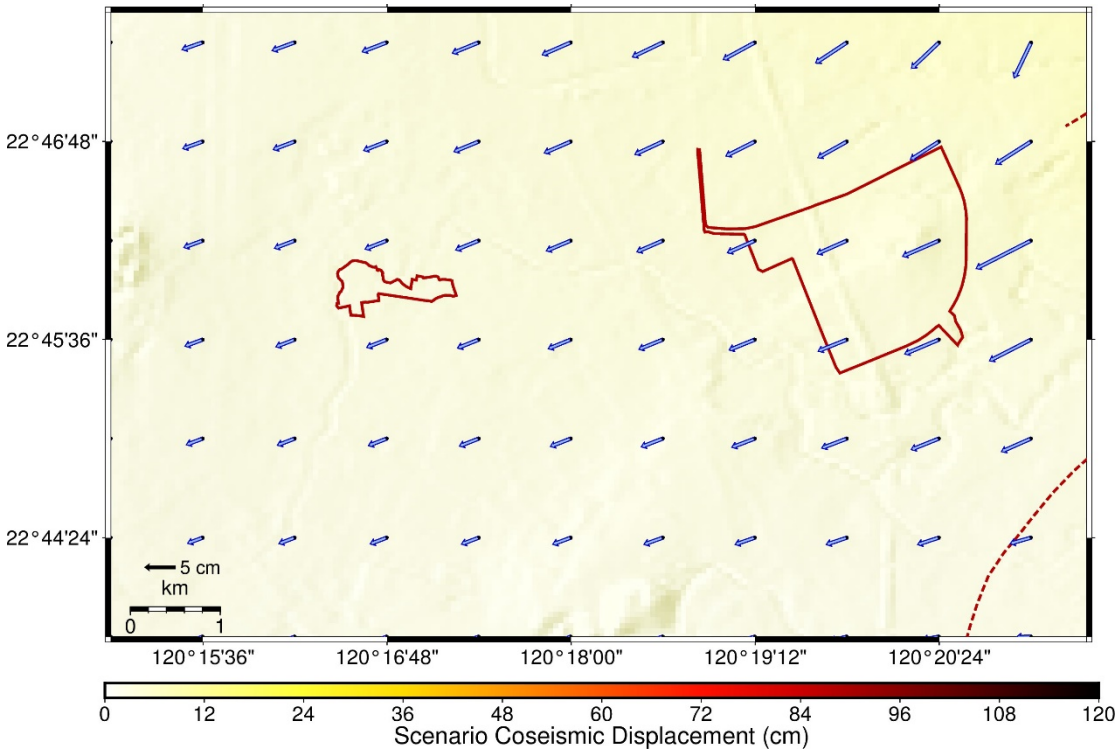


圖 7-2.6：車瓜林斷層於橋頭科學園區之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.6: Scenario coseismic displacement map of the Chekualin fault in Qiaotau Science Park.

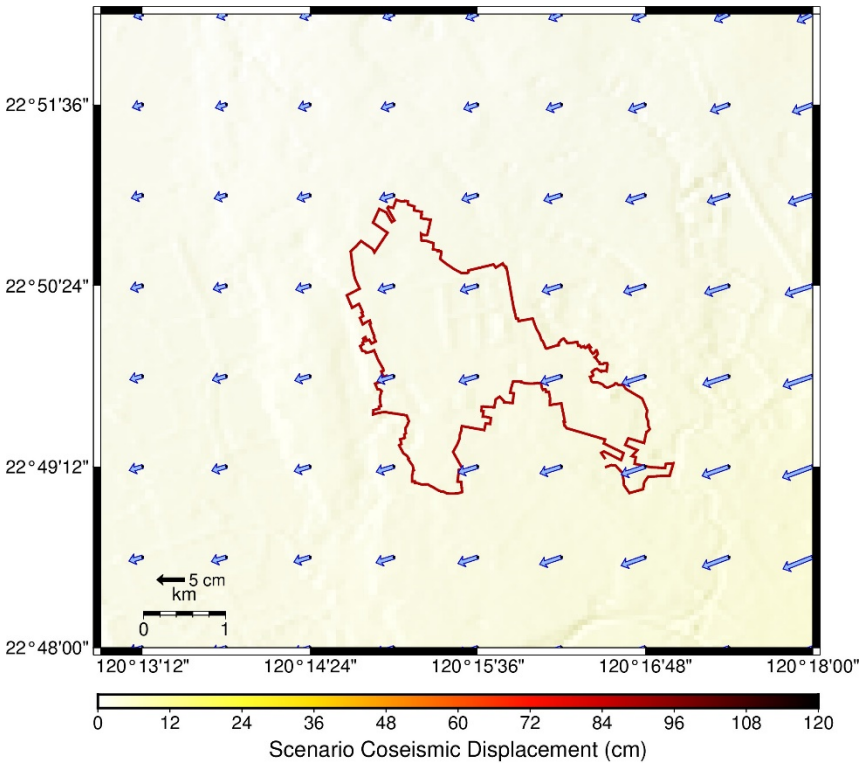


圖 7-2.7：車瓜林斷層於高雄科學園區之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.7: Scenario coseismic displacement map of the Chekualin fault in Kaohsiung Science Park.

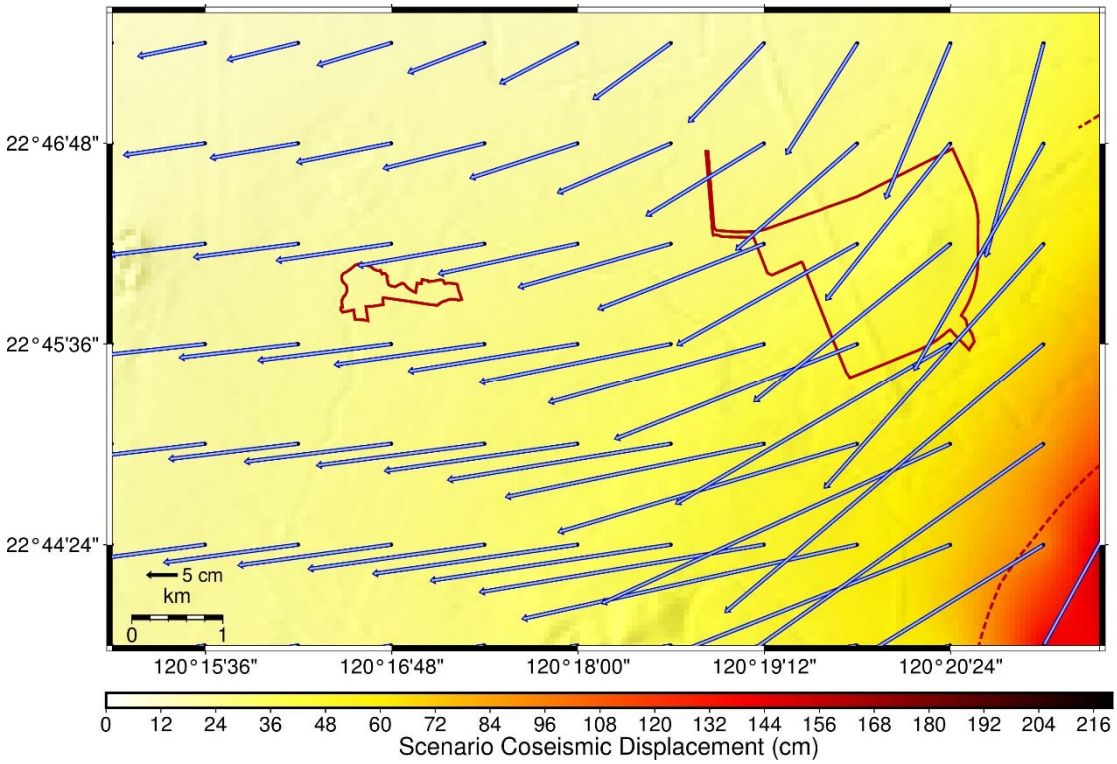


圖 7-2.8：旗山斷層於橋頭科學園區之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.6: Scenario coseismic displacement map of the Chishan fault in Qiaotau Science Park.

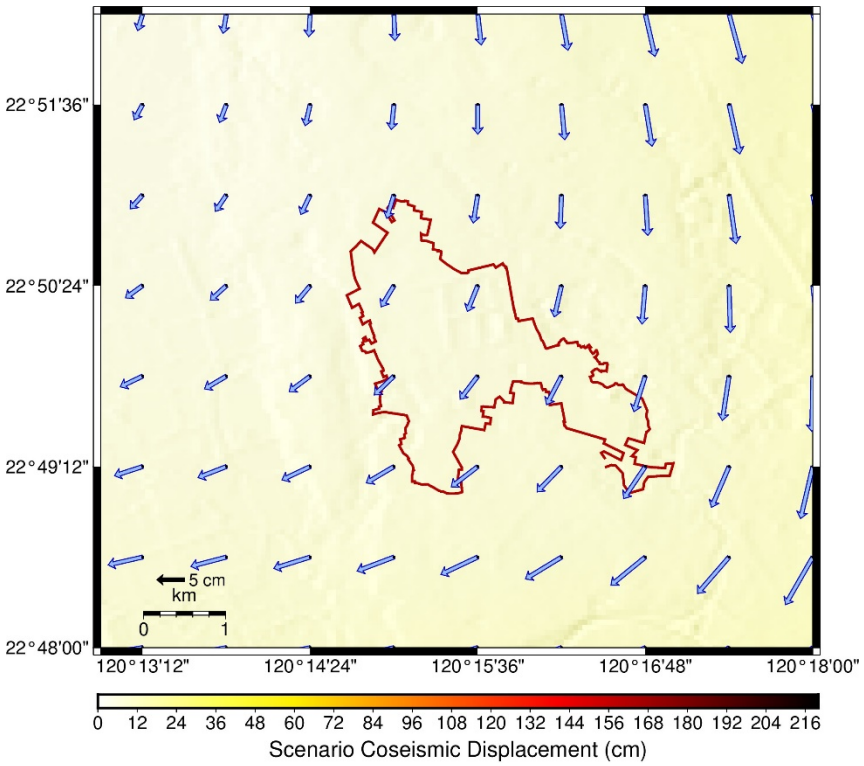


圖 7-2.9：旗山斷層於高雄科學園區之景況同震位移分布圖

Figure 7-2.9: Scenario coseismic displacement map of the Chishan fault in Kaohsiung Science Park.

第八章、結論

本期計畫的主要工作重點在於（1）整合分析大地測量資料以求解包含地表三維地表速度場，並進而計算應變速率場；（2）彙整鐵路相關規範與需求訂定分級標準，並依據分級與應變速率場繪製地表變形強度分布圖；（3）利用二維模型整合地質與大地測量資料，搜尋最佳斷層幾何參數；（4）藉由三維斷層模型反演地表速度場，推估斷層滑移虧損速率，並分析斷層活動潛勢；（5）根據斷層幾何參數之探析與斷層滑移虧損速率分布，利用地動預估式與三維斷層錯位模型，推估景況地震動與同震位移分布圖。

在 GNSS 連續站資料處理方面，計算累積至 2021 年 9 月全臺連續 GNSS 測站約 572 站之資料。在 GNSS 移動站與精密水準資料處理方面，本年度至 9 月底為止，GNSS 移動站部分共完成 798 點的施測，精密水準則完成共計 29 條主線測線及 1 條水準副線測線之施測。本計畫重要區域相對於 S01R 測站之速度場顯示，南部地區之地表運動主要由東往西南西方向移動，整體平均速度場約 50.0 mm/yr。垂直速度場部分，車瓜林斷層周遭有約 5.0 mm/yr 的抬升速度，小崗山斷層西側有約 5.0–10.0 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0.0 至 3.0 mm/yr。

獲得地表速度場後，為了解南部地區及全臺地表變形強度，本計畫分別藉由 Shen at al.（1996）及加入速度反演之方法計算應變速率場，根據以 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震所劃分之 3 時期應變速率計算結果指出，主應變速率及剪應變速率主要集中於小崗山至旗山斷層之間。應變率強度主要分布部分範圍則以車瓜林斷層至旗山斷層間以及小崗山斷層南側之沿海地區最為顯著，3 個時期的最大量值分別位於車瓜林與旗山斷層南段約 4.1 μstrain/yr，以及高雄及橋頭科學園區西南側約 3.0 μstrain/yr。此外，本計畫參考活動斷層分級與震度分級之概念建立地表變形強度分級表，將全臺第二不變量最大值 8.5 μstrain/yr 劃分為 0 至 5 級，0 級表示該地區無不均勻地表變形之發生，之後每一級之級距為 1.7 μstrain/yr。接著，本計畫彙整了臺灣傳統鐵路與高速鐵路針對鐵路橋梁等變位影響所制定之相關規範，計算並表列出各等級下，不同規範依據變形型態及安全管理值之年限，並根據前述分級繪製全臺地表變形強度分布圖，以供各領域使用者及一般民眾參考。

針對南部地區重要斷層活動潛勢分析，首先蒐集了旗山斷層、車瓜林斷層、小崗山斷層、潮州斷層、恆春斷層之斷層幾何、滑移速率以及斷層活動性等相關文獻。根據彙整結果，旗山斷層部分，其長度約 30 公里，傾角可能範圍落於 55°–65°之間，深度則可能在 8.0–13.5 公里之間。車瓜林斷層則以野外露頭調查結果為主，總長約 22 公里，以大廍庭山為分段點，大廍庭山以北之斷層傾角範圍約為 55°–80°，以南則介於 31°–75°間，深度部分以旗山斷層之深度為主要判斷依據；小崗山斷層總長約 9 公里，斷層傾角可能落於 30°–70°之間，深度部分難以解析，故建議採鄭宏祺（2000）設定之滑脫面深度 10 公里；潮州由北至南分別為土壟灣斷層段（長度 16 公里）、北段（長度 44 公里）、南段（長度 30 公里）、南段延伸（長度 16 公里），斷層傾角範圍為 60°–80°。參考地球物理資料指出，斷層深度為 15–20 公里。恆春斷層長度於陸域部分約為 16 公里，斷層傾角則為約 60°–75°左右，深度約 15–25 公里。接著，本計畫採用前述分析建議之斷層幾何與分段點作為初步設定，進行速度剖面分析並利用二維斷層模型反演三維地表變形型態，透過馬可夫鏈蒙地卡羅法（Markov chain Monte Carlo，MCMC），進行最佳斷層幾何參數之測試與搜尋。根據搜尋結果，旗山斷層分為北中南三段，其傾角分別為 59.5°–25.0°、63.2°及 57.1°；車瓜林斷層亦分為北中南三段，其傾角分別為 74.2°–24.2°、61.4°及 46.6 °；小崗山斷層之傾角則為 42.5°。斷層深度部分，旗山斷層北段於 6.4 km 處轉為較緩之傾角，模型結果提供斷層底部深度約為 12.2 km，中段約 8.6 km 深，北段約 14.0 km 深；車瓜林斷層北段與旗山斷層相同有傾角轉變，其約於 4.2 km 處轉為較緩之傾角，斷層最底部深度約為 8.7 km，中段部分則為 8.2 km，南段部分為 9.9 km。

根據二維模型取得之最佳幾何參數，本計畫接著採用 BLOCKS、DEFNODE 以及基線應變反演模型三種模型，進行南部地區以 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震為界所劃分之三個時期地表速度場的斷層滑移虧損速率推估。其中，幾何參數部分，本團隊測發現三維模型中，因斷層幾何參數於走向方向上可能有顯著之變化，導致部分區域可以見到旗山斷層與車瓜林斷層仍有相截切之狀況，考慮到三維模型僅計算斷層滑移虧損速率及本區域之斷層鎖定深度相當淺，故在三維模型中，車瓜林北段底部深度修改設定為 6.0 公里深、南段部分則修正為 5.0 公里進行模擬。最終，彙整三種模型成果並透過加權平均，可計算得到以下三條斷層之滑移虧損速率：2002 年至 2010 年結果中，潮州斷層之加權平均滑移虧損速

率為 8.9 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 19.0 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 18.3 mm/yr；2010 年至 2016 年結果中，潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 11.4 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 10.9 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 19.9 mm/yr；2016 至 2021 年結果中，潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.5 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 14.3 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 21.9 mm/yr。

隨後，本計畫採用前述所獲得之斷層幾何參數與斷層滑移速率，藉由經驗式推估最大地震規模，並利用特徵地震模式計算各斷層之年發生率，再以機率密度函數模式探討各斷層之活動潛勢。本計劃重要斷層解採 Poisson 模式評估進行評估，由西元 2021 年起算，各斷層之計算結果如下：旗山斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率分別為 1.2%、2.0%及 3.7%；車瓜林斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.7%、1.2%及 2.1%；小崗山斷層於未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.1%、4.9%及 8.5%；潮州斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 2.1%、3.4%及 6.6%；恆春斷層於未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率則分別為 11.1%、17.6%及 31.1%。

除了斷層活動潛勢圖外，本計畫此次更加入重要區域之景況地震動與同震位移分布之估算與繪製，以提供地震相關的災害衝擊及災損資訊，並協助相關單位可根據科學方法之模擬，瞭解未來地震發生時，可能之地震動或同震位移影響範圍，以利進行相關地質或災害敏感區域之劃設，進而提供重要區域防災規劃之參考。首先，由景況地震動分布圖可發現，各斷層地震動之分布以斷層線為中心往四周延伸，主要影響範圍約 15-20 公里遠，若加入測量場址條件進行考量，則地震動之範圍約大於半徑 20 公里以上，其中又以旗山斷層之地振動影響範圍最大。景況同震位移部分，由各斷層之分布型態可發現，小崗山斷層之同震位移量集中於斷層東側約達 70.6 cm；車瓜林斷層之最大景況同震位移量約 117.1 cm，整體變形帶有顯著之左移分量；旗山斷層部分，其同震位移主要集中於旗山斷層東南側，最大量值高達 220.8 cm，整體而言與車瓜林位移型態相似。而本次重要保全對象高雄都會區、高雄科學園區及橋頭科學園區中，由於橋頭科學園區之位置較接近此三條重要斷層，故模擬而得之地振動值與同震位移量值在此區皆較為顯著。

最後，綜合前述所有工作之討論與評估，雖然本團隊已嘗試根據科學方法建立景況地振動與景況同震位移圖，然而，景況地振動和同震位移場之模擬與斷層的長度、走向、傾角、距離遠近有直接的關係，意即斷層幾何參數的誤差將會貢獻至景況地震動與景況同震位移圖，是以此模擬結果仍可能與實際發生狀況有較大之偏差。因此，在接下來的景況同震位移圖研究工作中，本計畫將嘗試（1）納入同震應變量的計算；（2）估算景況同震位移場之合理誤差量，以利更加精確的評估與模擬斷層發震時所可能帶來之災害與損失。

Conclusions

The missions of the project are: (1) Analyzing the geodetic data to obtain the 3 dimentional velocity field and calculate the strain rate field. (2) Collecting the surface deformation regulation related to conventional and high-speed railway simontaneously to propose the preliminary version of surface deformation level table and the suface deformation sensitive area map based on the strain rate field. (3) Searching for the optimized fault geometry using the combination of geological and geodetic data by 2D model. (4) Estimating the slip deficit rate through 3D fault model inversion and analyzing the earthquake rupture probability for major faults near the target area in southern Taiwan. (5) Then we can estimate the scenario ground motions and coseismic displacements by the GMPE and 3D fault model with optimized fault geometry and slip deficit rate.

First, for geodetic data, 572 CGNSS stations, 798 SGNSS stations and 30 leveling routes are processed. The velocity field relative to S01R of target area were analyzed and shows that the horizontal velocity of southern Taiwan goes from east to west-south-west with the value of 50 mm/yr. The vertical velocity reveals that the area near Chegualin fault is 5.0 mm/yr uplifting and susinding in the vicinity of Hsiaokangshan fault with 5.0-10.0 mm/yr and 0.0-3.0 mm/yr in the west and east side of the fault respectively. After Obtaining the surface velocity, we caculated the strain rate field through both the equation proposed by Shen at al.（1996）and the method of velocity inversion. According to the strain rate field of 3 time period which are separated by 2010 Jiashien earthquake and 2016 Meinong earthquake, the principle and shear strain rate mainly distributed in the area between Hsiaokangshan fault and Chihshan fault. The large second invariant is located at the coastal area near Hsiaokangshan fault and the area between Chegualin fault and Chihshan fault. And the maximum value in each period are 4.1 μstrain/yr in southern Chegualin and Chihshan fault, 3.0 μstrain/yr in Kaohsiung Science park and 3.0 μstrain/yr in Qiaotou Science park. On the other hand, refer to the active fault category of Cental Geological Suevey and the ground motion level published by Central Weather Bureau, we tried to classify the suface deformation level and plot the sensitivity map by the second invariant value. We then proposed the 6 levels table and map through the second invariant distribution and the deformation regulation related to conventional and high-speed railway to provide not only the civil

enigeneers but also the citizens a user-friendly deformation sensitivity area map.

For the fault earthquake rupture probability analyzation of southern Taiwan, the fault parameters of the Chishan fault, Chegualin fault, Hsiaokangshan fault, Chaochou fault, and Hengchun fault were evaluated based on previous studies. The studies reveals that Chihshan fault is 30 km long with dip angle as 55°-65° and the depth of 8.0-13.5 km; Chegualin fault is 22 km long, and the dip angles are respectively 55°-80° and 31°-75° in the southern and nother portion with the similar depth of Chihshan fault; Hsiaokangshan fault is 9 km long with dip angle as 30°-70°, and the depth might be 10 km based on the decollement depth prosed by Cheng (2020); Chaochou fault is separated as 16 km, 44 km, 30 km and 16 km long from north to south with dip angle as 60°-80° and the depth is about 15-20 km; onland Hengchun fault is around 16 km with dip angle as 60°-75° and the depth is about 15-25 km. Subsequently, the optimal fault geometry was estimated using the 2D fault model constrained by the aforementioned geological information, and the slip deficit rates of each fault were derived through the 3D fault model. The 2D modeling results show that Chihshan fault is divided into three sections, with dip angles of 59.5°-25.0°, 63.2°, and 57.1°; Chegualin fault is also divided into three sections, with dip angles of 74.2°-24.2°, 61.4° and 46.6°, respectively; the dip angle of the Hsiaokangshan fault is 42.5°. As for the depth of the fault, the northern section of the Chihishan fault turns to lower dip at 6.4 km and the bottom depth turns out to be 12.2 km, the middle section is about 8.6 km deep, and the northern section is about 14.0 km; the northern section of the Chegualin fault is similar to the Chihishan fault, which turns to a lower dip angle at about 4.2 km and the bottom depth of the fault is about 8.7 km, the middle section is 8.2 km, and the southern section is 9.9 km.

Obtaining the optimized fault feometry, we then estimate the slip deficit rate by 3 different 3D models as BLOCKS、DEFNODE and baseline inversion model. Due to the limitation of some model, we only got the weighted average of slip deficit rate of 3 faults: for Chaozhou fault, the weighted average slip deficit rate is 8.9 mm/yr, 11.4 mm/yr and 8.5 mm/yr in the time period of 2002-2010, 2010-2016 and 2016-2021, respectively. Hengchun Fault are respectively 19.0 mm/yr, 10.9 mm/yr, and t14.3 in the time period of 2002-2010, 2010-2016 and 2016-2021. And the weighted average slip deficit rate of Hsiaokangshan fault, is 8.9 mm/yr, 11.4 mm/yr and 8.5 mm/yr, respectively.

And then, we estimated maximum earthquake magnitude through the empirical functionm and used the characteristic seismic model to calculate the recurrence interval of each fault, and then anlayzed the earthquake rupture probability by Probability Density Function (PDF). The earthquake rupture probability of major faults in this project are evaluated by Poisson model. Starting from 2021, the ruputure probability with a seismic moment larger than 6.5 of each fault within 30 years, 50 years and 100 years are as follows: Chihishan fault are 1.2%, 2.0% and 3.7%; Chegualin fault are 0.7%, 1.2% and 2.1%; Hsiaokangshan fault are 3.1%, 4.9% and 8.5%; Chaozhou fault are 2.1%, 3.4% and 6.6%; and Hengchun fault are 11.1%, 17.6%, and 31.1%, respectively.

We also proposed the map of scenario ground motion and coseismic displacement field of the target area to provide the seismic hazard potential and the possible influence through scientific estimation. Hope it coluld facilitate the delineation of related geological or disaster sensitive areas, and provide a reference for disaster prevention planning in target areas. According to the scenario ground motion, we found that the ground motion of each fault distributed along the fault, and the main impact range is about 15-20 km. If considering the site effect, the scenario ground motions become larger than the radius of 20 km. For the scenario coseismic displacement field, it shows that the coseismic displacement field of Hsiaokangshan fault is concentrated on the east side of the fault and reaches about 70.6 cm; the maximum coseismic displacement of the Chegualin fault is about 117.1 cm with left lateral component; the coseismic displacement field of Chihshan fault is mainly distribued in the southeast side of the Chihshan fault with the maximum value as 220.8 cm. Furthermore, in the target area of this project, we can see that the scenario ground motion and coseismic displacements field of Qiaotou Science Park are more significant due to the cloest location to the 3 major fault in this area.

Over viewing the work which have been done, though we tried to establish the scenario ground motion and coseismic displacement map based on scientific methods, the simulation of scenario ground motion and coseismic displacement field has a direct relationship with the length, strike, dip, and distance of the fault, which means fault the uncertainties of the fault geometry will contribute to the scenario ground motion and coseismic displacement map, so the simulated results might have large deviation from the pratical situation. Therefore, in the future works, we will try to (1) calculate the coseismic strain field; (2) estimate the reasonable uncerntainties of the coseismic

displacement field, for estimating and and simulating the damage and losses more accurately if an earthquake occurs.

參考文獻

吉田要（1932）高雄州旗山南西部油田調查報告及旗山南西部油田地質圖（三萬分之一），台灣總督府殖產局，第 610 號，1-37 頁（日文）。

鳥居敬造（1933），高雄州旗山油田調查報告及旗山油田地質圖（三萬分之一），台灣總督府殖產局，第 633 號，共 36 頁。

耿文溥（1967）台灣南部甲仙及旗山間之地質，台灣省地質調查所彙刊，第 19 號，1-13 頁。

耿文溥（1981）臺南以東丘陵區之地質，經濟部中央地質調查所彙刊，第 1 號，1-31 頁。

大井上義近、佐藤戈止、村山賢一、飯塚保五郎、千谷好之助（1928）臺灣油田地質概查報告，日本東京市海軍省，共 186 頁（日文）。

張鴻成（2005），旗山斷層左移或右移。中國地質學會九十四年年會暨學術研討會，第 274 頁。

宋國城（2003）有關旗山斷層的一些新觀察。第十屆臺灣地區地球物理研討會論文集，第 430-431 頁。

黃世建（2018）強震資料庫建置、強地動模擬、地震危害度分析及場址效應分析計畫-SSC 模型與邏輯樹建置成果報告。核能設施地震危害重新評估計畫，執行單位財團法人中興工程顧問社，共 359 頁。

吳榮章、梅文威（1985）高雄縣旗山至鳳山地區新第三紀及第四紀地層之生物地層與古沉積環境。探採研究彙報，第 8 期，第 58－75 頁。

吳榮章、梅文威（1992）高雄縣旗山至鳳山地區生物地層與古沉積環境研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 6 號，第 263－295 頁。

許榮欣、高書屏（1996）臺灣地區一等水準網測量殘留之系統誤差之研究。行政院國家科學委員專題研究計畫成果報。

劉啟清（1986） 水準測量的系統誤差，第五屆測量學術及應用研討會論文集。國科會工程研究中心及成功大學，F1-F25。

劉彥求、林啟文 (2019) 臺灣南部車瓜林斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 34 號，第 53-82 頁

林柏伸 (2009)，臺灣地區強地動衰減式研究與路徑效應分析，博士論文，國立中央大學地球物理研究所。

林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）台灣東部與南部的活動斷層。二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號，第 111–131 頁。

林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）臺灣東部與南部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號，第 99–110 頁。

林啟文、陳文山、林燕慧、饒瑞鈞、劉彥求（2010）臺灣南部小崗山線形與鳳山線形的探討。經濟部中央地質調查所特刊，第 24 號，第 39-60 頁。

林啟文、游鎮源、洪國騰、周稟珊（2012）臺灣南部臺南—高雄泥岩區的地質構造研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 25 號，第 143–174 頁。

林啟文、洪國騰（2012）五萬分之一臺灣地質圖說明書圖幅第五十七號美濃。經濟部中央地質調查所。

林啟文（2013）旗山圖幅及說明書-五萬分之一臺灣地質圖及說明書，第 56 號。經濟部中央地質調查所出版，共 93 頁。

林啟文（2013）五萬分之一臺灣地質圖說明書-旗山。經濟部中央地質調查所。

林昱圻（2008）潮州斷層之淺層震測研究。國立中正大學地震研究所暨應用地球物理研究所碩士論文，共 68 頁。

邱奕維、蘭于鈞、黃文正、顏一勤、波玫琳、李元希（2019）臺灣西南部中寮隧道北端口旗山斷層帶構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 34 號，第 83–100 頁

洪日豪（2006）台灣西南部前陸地區斷層演化與具油氣潛能之地塊構造。行政院國家科學委員會經濟部能源局九十五年度能源科技學術研討暨成果發表會。

洪崇勝、謝凱旋（2007）臺灣第四紀磁生物地層及蓬萊造山運動事件。經濟部中央地質調查所特刊，第 18 號，第 51－83 頁。

張家鳳（2005）旗山斷層的淺層震測探勘。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 67 頁。

陳文山、黃能偉、游能悌、周飛宏、顏一勤、宋時驊、楊志成、楊小青（2005），地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-槽溝開挖與古地震研究計畫(4/5)-旗山與龍船斷層條帶地質圖說明書。經濟部中央地質調查所報告，第 94-08-2 號，共 48 頁。

陳文山、陳于高、楊小青（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置－槽溝開挖與古地震研究計畫（4/5）。經濟部中央地質調查所研究報告，第 94–7 號，共 165 頁。

陳文山、松多信尚、石瑞銓、楊志成、游能悌、朱曜國、陳志壕、林啟文、劉桓吉、盧詩丁、劉彥求、林燕慧、陳柏村（2010）台灣西部平原區隱伏在全新世沉積層下的新期構造－以小崗山斷層為例。經濟部中央地質調查所特刊，第 24 號，第 75–91 頁。

陳文山、黃能偉、楊志成（2011）臺灣西南部更新世沈積層序特性與前陸盆地演化。經濟部中央地質調查所特刊，第 25 號，第 1–38 頁。
陳文山、黃能偉、楊志成（2011）臺灣西南部更新世沈積層序特性與前陸盆地演化。經濟部中央地質調查所特刊，第 25 號，第 1–38 頁。
陳文山、游能悌、楊小青（2012）重要活動斷層構造特性調查研究計畫─斷層活動特性分析與評估(2/4)。經濟部中央地質調查所報告，第 101–9 號，共 130 頁。
陳柏村（2005）旗山斷層南段變形特性之研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
陳志雄、吳樂群、王源（1993）高雄地區旗山斷層兩側地層年代之探討。地質，第 13 卷，第 1 期，第 37－56 頁。
鄭紹安（2020）利用解壓密方法探討末次最大冰期以來臺灣西南部褶皺逆衝斷層帶前緣與前陸盆地的構造特性。臺灣大學地質科學研究所碩士論文。doi: 10.6342/NTU202000553.
鄭宏祺（2000）臺灣西南部台南至屏東地區地質構造之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 92 頁。
顏銀桐、徐澔德、張玉彝、李易叡、謝寶珊、謝銘哲、莊怡蓉（2020）臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估。經濟部中央地質調查所 109 年度委託技術服務執行總結報告書，共 388 頁。
顏銀桐、徐澔德、張玉彝、李易叡、謝寶珊、謝銘哲、莊怡蓉（2020）臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估。經濟部中央地質調查所 109 年度委託技術服務執行總結報告書。
楊名、景國恩、楊智堯、吳宗翰、吳文隆、蕭秋安（2018）廣域大地變位之利用 GPS 監測分析與解算—以國道 3 號田寮 3 號高架橋及中寮隧道大地變位監測為例。中華技術，第 119 號，第 122–135 頁。
宋國城、陳力、陳彥傑（2004）有關旗山斷層的一些新觀察。地質，第 23 卷，第 3 期。第 31–40 頁。
劉彥求、林啟文（2019）臺灣南部車瓜林斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 34 號，第 53–82 頁。
石瑞銓、王維豪、李元希（2008）地震地質與地變動潛勢分析─斷層帶地下構造調查研究（2/4）。經濟部中央地質調查所報告，第 97–11 號，共 127 頁。
沈淑敏、張瑞津、楊貴三（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置—活動構造地形判釋及資料建置分析（2/2）。經濟部中央地質調查所研究報告，第 95–13 號，共 174 頁。
翁群評（2001）小崗山斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 84 頁。
謝凱旋、洪崇勝、何信昌、陳華玟、陳政恆（1998）旗山圖幅。八十七年度中央地質調查所年報，第 8－9 頁。
謝尊堯（2020）利用 2016-2019 年之大地測量資料探討車瓜林斷層及其西延構造現行之間震變形特性。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，共 104 頁。
Biete, C., J. Alvarez-Marron, D. Brown, and H. Kuo-Chen (2018) The structure of southwest Taiwan: The development of a fold-and-thrust belt on a margins outer shelf and slope. Tectonics, 37. https://doi.org/10.1029/2017TC004910.
Bonilla, M.G (1975) A review of recently active fault in Taiwan: U. S. Geological Survey Open-File Report, 75–41, 58p.
Borcherdt, R.D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), Earthquake Spectra 10, 617-654.
Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey A., Haines B., Harvey N., Hemberger, D., Heflin, M., Lu, W., Miller, M., Moore, A. W., Murphy, D., Ries, P., Romans, L., Sibois, A., Sibthorpe, A., Szilagyi, B., Vallisneri, M., & Willis, P. (2020), GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. Advances in Space Research. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015.
Blewitt, G. (2008), Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap, J. Geophys. Res., 113, B12410, doi:10.1029/2008JB005736.
Chi, W.-R. (1978) The late Neogene nannobiostratigraphy in the Tainan foothills region, southern Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 15, p.89125.
Chi, W.-R. (1979) A Biostratigraphic study of the late Neogene sediments in the Kaohsiung area based on calcareous nannofossils. Proc. Geol. Soc. China, 22, 121-144.
Chao, S.H., Chen, Y.H.（2019）A novel regression analysis method for randomly truncated strong-motion data. Earthquake Spectra, 35（2）, 977–1001.
Chao, S.H., Chiou, B., Hsu, C.C., and Lin, P.S.（2020）A horizontal ground-motion model for crustal and subduction earthquakes in Taiwan. Earthquake Spectra, 36（2）, 463–506.
Camanni, G., J. Alvarez-Marron, D. Brown, C. Ayala, Y.-M. Wu, H.-H. Hsieh (2016) The deep structure of south-central Taiwan illuminated by seismic tomography and earthquake hypocenter data. Tectonophysics, 679, 235–245.
Cheng, W.-B., S.-K. Hsu, C.-H. Chang (2012) Tomography of the southern Taiwan subduction zone and possible emplacement of crustal rocks into the forearc mantle. Global and Planetary Change, 90–91, 20–28.

Chiang, S.-C. (1971) Seismic Study of the Chaochou structure, Pingtung, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 8, 281–294.
Chi, W.R. (1979) A biostratigraphic study of the late Neogene sediments in the Kaohsiung area based on calcareous nannofossil. Proc. Geol. Soc. China, 22, 121–144.
Carrere L., F. Lyard, M. Cancet, A. Guillot, N. Picot: FES2014, a new tidal model –Validation results and perspectives for improvements, presentation to ESA Living Planet Conference, Prague 2016.
Ching, K. E., R. J. Rau, J. C. Lee, and J. C. Hu (2007), Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-2005, Earth Planet. Sci. Lett., 262, 601-619.
Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Hu, and J.-C. Lee (2011b) Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, J. Geophys. Res., 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.
Garcia-Fernandez, M., S. D. Desai, M. D. Butala, and A. Komjathy (2013), Evaluation of different approaches to modeling the second-order ionospheric delay on GPS measurements, J. Geophys. Res., 118 (12), 7864-7873, doi:10.1002/2013JA019356.
Hsiao C.-A., C.-C. Hsu, P.-S. Lin, C.-S. Wang, S.-F Lin, and C.-Y. Yang (2016) Deformation monitoring and strategy of long-term improvement of the Tian-Liao No.3 viaduct. Proceedings of the 11th US-Taiwan Bridge Engineering Workshop, Taipei, Taiwan.
Hsieh, S.-H. (1970) A study on geology and gravity anomaly on the Pingtung Plain, Taiwan: Proc. Geol. Soc. China, 13, 76–89.
Helfin, M., Donnellan, A., Parker, J., Lyzenga, G., Moore, A., Ludwig, L. G., et al. (2020). Automated estimation and tools to extract positions, velocities, breaks, and seasonal terms from daily GNSS measurements: illuminating nonlinear Salton Trough deformation. Earth and Space Science, 7, e2019EA000644. https://doi.org/10.1029/2019EA000644.
J. Böhm, J. Kouba, and H. Schuh (2008), Forecast Vienna Mapping Functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations, J. Geodesy.
Lacombe, O., F. Mouthereau, J. Angelier, and B. Deffontaines (2001), Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan, Tectonophysics, 333, 323-345.
Lu, C. Y. and J. Malavieille (1994), Oblique convergence, indentation and rotation tectonics in the Taiwan Mountain Belt： insights from experimental modeling. Earth Planet. Sci. Lett. 121, 477–494.
Lu, C. Y., F. S. Jeng, K. J. Chang, and W. T. Jian (1998), Impact of basement high on the structure and kinematics of western Taiwan thrust wedge：insights from sandbox models. Terr. Atmos. Ocean Sci. 9, 533-550.
Lee, C. T. and B. R. Tsai, (2008): Mapping Vs30 in Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 19, 671-682, doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.671(PT)
Lyard F., L. Carrere, M. Cancet, A. Guillot, N. Picot: FES2014, a new finite elements tidal model for global ocean, in preparation, to be submitted to Ocean Dynamics in 2017.
McCaffrey, R. (2005) Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data, J. Geophys. Res., 110, B07401, doi:10.1029/2004JB003307.
Meade, B.J. and J.P. Loveless (2009), Block modeling with multiple fault network geometries and a linear elastic coupling estimator in spherical coordinates, Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6).
Rodriguez-Roa, F.A. and D.V. Wiltschko (2010) Thrust belt architecture of the central and southern Western Foothills of Taiwan. Geol. Soc., London, Spec. Pub., 348, 137–168.
Saastamoinen, I.I. (1973) Contribution to the theory of atmospheric refraction. Bull. Geodesique, 107, 13-34.
Suppe J. (1983) Geometry and kinematics of fault-bend folding. Am. J. Sci., 283, 684-721.
Shyu, J. B. H., Chuang, Y. R., Chen, Y. L., Lee, Y. R. & Cheng, C. T. (2016), A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 27(3).
Shyu, J.B.H., Y.-H. Yin, C.-H. Chen, Y.-R. Chuang, and S.-C. Liu (2020) Updates to the on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 31, 469–478. doi: 10.3319/ TAO.2020.06.08.01.
Sun, S.-C. (1964) Photogeologic study of the Tainan-Kaohsiung coastal plain area, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 3, 39–51.
Tsan, S. F., and W. P. Keng (1968), The Neogene rocks and major structural features of southwestern Taiwan, Proc. Geol. Soc. China, 11, 45-49.
Ward, S. N. （1998） On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135（3）, 1011-1018.
Wiltschko, D., L. Hassler, J.-H. Hung, H.-S. Liao (2010) From accretion to collision: Motion and evolution of the Chaochou Fault, southern Taiwan. Tectonics, 29(2).
Wu, F.T., H. Kuo-Chen, K.D. McIntosh (2014) Subsurface imaging, TAIGER experiments and tectonic models of Taiwan. J. Asian Ear. Sci., 90, 173–208.

Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics 274, 41-59.
Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102 (B3), 5005-5017, doi:10.1029/96JB03860 .

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
（一）委員及其他綜合意見	
1. 地表上旗山斷層跡線平行其上盤之地層界線，強烈暗示地下斷層面平行地層界面，因此針對該斷層地下三維幾何形貌應以斷層相關摺皺的原理根據地表地層的褶皺構造建立並推估該斷層的傾角和地下底滑面的深度。	感謝委員建議，詳見附件一。
2. 本報告P.10~P.11所述之小崗山斷層、旗山斷層與車瓜林斷層等地質背景，三條斷層在過去的研究與調查中均存有若干之爭議或不明，本計劃在文獻整理與選取各項斷層參數時，如何處理此些爭議或不同看法？	目前本計畫先以斷層發育的角度為優先進行討論，並採用二維斷層模型之模擬成果，探討泥體變形的可能性。
3. 有關水準側線的抬昇速率差異及抬昇趨勢改變，如圖2-3.3和圖2-3.4上欄右側的水準平均抬昇速度差異甚大? 安平至龍崎測線(圖2-3.7)，為何在沒有地震的期間(e.g.2018-2019，2019-2020)，二次水準測量之結果差異也很大?以及北斗至水里測線(圖2-3.13)，為何2019年3月之後，CLPF以東的抬昇趨勢改變了。請試著探討造成改變之原因。	具體造成水準測線隨時間變化之原因需要相當多的時間來釐清，因此非常不容易在本計畫工作達成此目標。然而，安平至龍崎測線的垂直運動變化，極有可能與泥體變形有關；而北斗至水里測線的垂直運動變化則極有可能和 2019 年 6 月地震後的震後變形有關。
4. 地表變形並不全然由斷層活動造成，本計畫應該試著探討其他環境因子改變，對地表變形的影響。	目前本計畫先以斷層發育的角度為優先進行討論。由於本計畫工作區域位於臺灣西南部，因此本計畫採用二維斷層模型之模擬成果，探討泥體變形的可能性。
5. 應變速率（strain rate）似乎去除了同震的效應，因此為震間應變率，這是常用的方式。但是在考慮斷層活動上，似乎可以進一步探討在地震週期循環下，如何融入同震（包括震後）效應到整體的應變速率下，可能是一個未來的趨勢。	針對同震變形的影響，本計畫是採用景況地振動與景況同震位移場來進行地震發生時之影響評估。
6. “地表變形強度”是一個新名詞，是同震強度？還是震間變形強度？	是的，“地表變形強度”是一個新名詞，是震間變形強度。其意義與應

期中審查意見	處理情形
還是整體強度？究竟我們想要表示什麼強度？用意為何？需要再評估，並給予此名詞清楚的說明。	用相當類似於地震發生時，”震度”的概念。“地表變形強度”則是用來反映在震間時期，地表不等量變形的大小。
7. 地表變形強度採用 μstrain/yr 來分級。μstrain/yr 所估算出來的值，和測量點位的密度及距離有直接的關聯。在密集點位區，地表變形量 μstrain/yr 很可能遠大於10，是否再考量？	是的，地表變形強度會和測量點位的密度及距離有直接的關聯。若是遇到潛移斷層絕對會出現遠大於 10 的情況，這也是本計畫期望在接下來的工作中，能藉由整合 InSAR 的結果，將這些重要高地表變形強度地區，以合適的方式來描繪出來。
8. 如何將泥貫入體/泥火山所造成的地表變形，加入整體地表測量應變的分析，及數值模擬（斷層+泥貫入體）中，是可以在未來考量的工作。	目前本計畫先以斷層發育的角度為優先進行討論，並採用二維斷層模型之模擬成果，探討泥體變形（泥貫入體）的可能性。
9. “保全”字眼是否切合本計畫及地調所的角色，是否考慮再斟酌。	感謝委員建議，已修改為「重要區域」。
10. 地震景況模擬（地動量及位移量），目前還在科學測試探討階段，尚有不少未知及較大的不確定性。在公布成果給大眾（記者）前，可能需要說明。	感謝委員建議，於成果公布前，本團隊將與地調所進行討論，並於公布時提供較詳細之說明。
11. P.162 二維模擬成果只有模擬出斷層傾角與鎖定深度，未見斷層滑移速率，此外若用二維模擬的結果與p.191的三種模型成果差異應予以討論及分析；建議期末報告應於適當處闡釋「斷層滑移速率」及「斷層滑移虧損率」的意義與差別。	感謝委員建議，已加入。
12. P.217 臺灣南部重要區域斷層活動機率圖為本年度重要產出成果，圖中「高雄都會區」範圍的界定應再細緻一點，並與國內相關行政機關認定一致；建議底圖套疊位移場、應變場或其他資訊，應與委託機關再討論；在報告書呈現時解析度應提高，否則連文字都看不清楚。	感謝委員建議，本團隊已與委託機關討論斷層活動機率圖版面配置，並制定初步版本。因機率圖縮印會降低圖面解析度，期末報告書中會嘗試採用 A3 印製。
13. 橋頭科學園區開發近來為大眾關切議題，今年已在區域內加密GNSS移動站測量樁，觀測工作也在進行中，	感謝委員建議，已將橋頭科學園區區域內新增設之 GNSS 移動站點位展示出來，但由於新增設之測站截

期中審查意見	處理情形
期末報告應對此區觀測成果詳加討論，凸顯本期計畫執行的亮點。	至目前僅施測兩次且施測時間僅間隔 2 個月，所以資料結果趨勢尚未穩定，故目前僅展示測站位置，待施測資料更齊全後將會詳加討論。
14. 臺灣西南部幾條較長的活動斷層，如旗山、潮州斷層，其斷層滑移虧損速率有分段的差異，請說明可能原因。	世界上較長的斷層往往都有滑移速率分段的差異，這相當合理，因為在不同區段中，斷層通過的岩層岩性、水文地質條件、岩石流變特性之差異與構造等之影響，皆會造成斷層分段的出現。換言之，本計畫也可以通過斷層滑移虧損速率沿走向之有分段差異，提供斷層活動前是中，斷層分段之資訊。
15. 請補充說明表3-2.1之臺鐵或高鐵之警戒值、行動值與危險值是如何定義的？表4-1.1~4-1.9等之中間值與統計平均值是如何獲得？	臺鐵或高鐵之警戒值、行動值與危險值是直接引用《鐵路兩側禁建限建辦法》中附件三《高鐵設施容許變形值》之規範。而表 4-1.1~4-1.9 平均值的部分，為各篇文獻之數值範圍的中間值的平均值；中間值的部分，為各個調查方法中扣除資料品質不佳的結果，取其範圍之中間值。
16. 請補充說明圖5-4.2(P.193)為何斷層淺部的滑移虧損率普遍偏高?	因為斷層淺部往往較為脆性，具有較高之斷層鎖定率，因此斷層淺部的滑移虧損率普遍偏高是非常合理的。
17. 斷層“最佳”幾何參數，建議以標準差數值範圍，來取代單一值。	感謝委員建議。
（二）其他修正意見	
1. 表4-1.1與表4-1.5之野外露頭與地質剖面若是參考前人調查資料請註明引用文獻。	感謝委員建議，已修改。
2. 圖 4-1.19~4-1.20 之 BB 剖面與 CC 剖面與圖4-1.18地質圖不符，請修正？	感謝委員建議，已修改。
3. 建議報告書中之地質圖部分請再放大以利閱讀。如圖4-1.1、圖4-1.10、圖4-1.112（應為圖4-1.11，報告書中無圖4-1.12），表4-1.1、表4-1.5等等，另外圖3-1.1~圖3-1.3模糊不清，請放	已修改。

期中審查意見	處理情形
大或改善。	
4. 圖1-1-5 宜附上活動斷層位置。	感謝委員建議，已修改附上活動斷層位置。
5. P.10第三段第2、3行以西和東側應分別修正以東和西側。	感謝委員建議。
6. 期末報告請補充小崗山斷層之野外露頭與地質剖面。	感謝委員建議，小崗山斷層無野外斷層露頭，現階段僅能透過淺層震測與鑽井資料間接推估斷層幾何。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一）委員及其他綜合意見	
1. p.63-144的各精密水準測線分析，建議加入各測線約制站GNSS時間序列圖，標示使用的速度值，讓讀者瞭解約制的速度如何算出，及其合理性，對於地震造成的影響如何篩除。	已於內文中標示約制站的速度值及加入時間序列圖。此外，用 GNSS 約制水準測線會計算地震所造成的影響，例如同震位移量和速度變化，但震後非線性變形及同震位移量於分析各時段速度場時不會被計入。
2. 圖2-4.2水平位移參考圖例建議改為向左或向右以與下圖垂直方向有所區別；「區勢」修改為「趨勢」；變形結果在小區域呈現方向與大小不一，建議加強說明	感謝委員建議，已將「區勢」修改為「趨勢」。小區域和大區域的方向與大小是一致的。
3. p.210全臺地表變形強度分布圖對鐵路、公路、高鐵、隧道、橋梁、水庫…等工程影響較大，建議於圖中應展繪出來，凸顯地表變形強度分布圖使用價值；此外地表變形並不只限於水平變形，垂直變形部分是否可以納入?	由於目前所使用之大地測量資料，水平速度場之時間及空間解析力皆較垂直速度場高，因此為了架構地表變形強度分級，本計畫先以水平變形為主進行分析，垂直變形部分將在後續嘗試納入考量。
4. 景況地震動與景況同震位移圖與斷層的長度、走向、傾角、距離遠近似乎是關鍵因素，這些評估內容與未來地震發生的地表變形將直接面臨檢驗，也勢必有所出入，建議適度說明，降低衝擊。圖7-1.4~12幾個PGA值是否特別重要?內文應有所交代，例如多少PGA會影響何種建物應讓讀者瞭解。	感謝委員的建議。確實景況地震動與景況同震位移圖和斷層的長度、走向、傾角、距離遠近有直接的關係，因此斷層幾何參數的誤差將會貢獻至景況地震動與景況同震位移圖。在接下來的景況同震位移圖研究工作中，本計畫將嘗試（1）納入同震應變量的計算；（2）估算景況同震位移場之合理誤差量。 感謝委員意見。景況模擬之地動加速度 PGA 值，為對未來可能發生地震景況所做之地動推估值，對於地震災害之預防提供依據。關於景況 PGA 值與可能災損對應敘述已於報告內文補充。
5. P.16 楠樹林-鵝鑾鼻測線應為南樹林-鵝鑾鼻測線。	感謝委員建議，已修改。

期末審查意見	處理情形
6. P.117 小岡山斷層應為小崗山斷層，請全文搜尋此一狀況。	感謝委員建議，已修改。
7. p.194-197圖說明的年度期間有一些亂碼，請修正。	感謝委員提醒，已修正
8. 建議往後有關斷層參數之建立宜根據本身所掌握之各項資料，以本身之判斷和調查為之，前人研究之不同結果僅作為參考即可。	感謝委員意見，蒐集文獻仍然是本計畫設定斷層參數時重要的一環，本團隊將依據文獻中的調查方法、調查位置給予客觀的可信度判斷，除此之外，未來若有新的地質研究發表，本計畫也將納入評估中。針對參數尚不足之處則會給予所方後續調查之建議。
9. 通過旗山斷層之剖面當中模型3比其他模型更接近地表地質構造，宜考慮採用之。	本計畫的廣林向斜延伸位置參考自 Biete et al. (2018)，而模型 3 相較於模型 4 中的向斜軸更接近廣林向斜。然而屏東平原的地形上似乎沒有明顯證據顯示向斜軸的存在，建議未來蒐集屏東平原北側之震測剖面資料，以瞭解廣林向斜於屏東平原中的延伸性及其地下形貌，或許有助於建立更為準確的旗山斷層幾何參數。
10. 旗山斷層的參數中，中段比起南北段的底滑面相對的淺，宜說明之；中段所估算之滑移速率亦出現異常慢，宜說明之。	本計畫之最佳斷層幾何參數是透過地表速度場進行反演，旗山斷層中段（即中寮隧道）之抬升速率極快，推測該區域之抬升可能與泥體構造活動有關。然本次模擬中，尚未加入 opening-mode dislocation 進行擬合，故所有變形量最終皆歸因於斷層，進而使得模型成果中斷層面上之滑移速率異常高，且底滑面深度較淺，以使其所產生之地表變形與實際資料相比擬。
11. 景況地震動分佈圖出現斷層兩側是對稱分佈的樣態，宜說明之。	計畫採用地動預估式評估地動，其關鍵參數為各個網格與斷層面之最短距離，由於斷層型態為高角度，因

期末審查意見	處理情形
	此呈現對稱。
12. 建議加入有關地表變形之種類及特徵(第二章各測線及各地區之GNSS觀測站網均有提及各種地表變形之原因)或列表整合之。	地表速度場在空間中之變化與斷層活動之關係大致如下：以走向滑移分量為主之斷層，可以藉由 GNSS 水平速度場的分析得知；正斷層之活動，可以藉由水準高程之沉降及水平速度場之伸張特徵進行判釋；顯示在水平速度場之縮短應變及水準高程之抬升，可解讀為逆斷層之活動。因此，透過重複觀測之 GNSS 速度場及水準高程資料分析，可協助我們判定活動斷層的位置，並闡明該斷層之活動特性。 本團隊先以活動斷層相關之地表變形類型及特徵為主，補充於 3-1 節。
13. 第三章之地表變形強度測重於活動斷層，但如何將其他原因排除？(如P.280所述)	本計畫雖著重於重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估，然而在地表變形強度此項目之主要目的為提供各領域針對「不均勻地表變形」所帶來之影響，因為不論何種構造或因素所引起的地表變形皆可能對於鐵路、橋梁等結構物帶來破壞，故該項成果並非僅側重於活動斷層，而是針對所有地表變形進行全面考量與分級，故在此無須排除其他原因所造成之地表變形。
14. 期中委員審查意見表第2點、第4點及第8點回答均相同，是否符合問題所問？	第 2 點關於斷層文獻之處理：針對小崗山斷層之爭議，本計畫參考前人地質及地物相關調查資料，建議以逆斷層型式進行評估，而若是小崗山斷層有泥貫入體之行為，本計畫目前採用 opening-mode dislocation model，加入泥體構造進行除斷層外之環境因子，來進行地表變形模擬。針對旗山斷層是帶有左移或右移之爭議，建議依據本計

期末審查意見	處理情形
	畫大地測量之結果推估之。針對車瓜林斷層長度之爭議，建議以地調所(林啟文等，2012）之地質調查結果，將過去所稱之龍船斷層南段，劃分為車瓜林斷層。第 4 點及第 8 點關於探討泥貫入體/泥火山或其他環境因子對地表變形的影響，由於本年度目標區域為西南部，地質上以泥岩為主，故目前採用 opening-mode dislocation model，加入泥體構造進行除斷層外之環境因子，來進行地表變形模擬。詳細擬合方法與測試過程如 4-2-3 所述。
15. 由於水準的觀測第二次間隔的時間不一致，建議在比較歷年觀測結果時，可以統一y-atis的範圍，統一以垂直速度表示。	由於水準測量幾乎是一年施測一次，且施測時間幾乎固定，因此此結果和垂直速度相當接近。另外，若採用速度呈現，怕讀者會以為這樣的成果真的是該時段的速度場。本計畫在明年度會採用另一種表現方式來進行呈現，期望能獲得更佳的呈現結果。
16. P209在定義地表變形強度時有修正斷層潛移的效應嗎？為何臺灣東部的強度普遍大於西部。	本計畫於定義地表變形強度時並未修正斷層潛移效應，因為不論何種構造或因素所引起的地表變形皆可能對於鐵路、橋梁等結構物帶來破壞，因此地表變形強度分布圖是針對所有地表變形進行全面考量與分級。
17. 車瓜林斷層滑移速率可達100mm/yr？需考慮其他效應，此區的變形不全然由斷層活動造成。	本計畫另外蒐集了陳勇昇(2015)根據此區大地測量結果進行斷層模擬得到之間震期滑移速率，提供作為斷層近期活動的參考，以取代初稿中未考慮其他效應初步推估之車瓜林斷層滑移速率。後續斷層潛勢評估則是採用本計畫的模型反演結果進行計算。

期末審查意見	處理情形
18. P294-295，請注意有效數字。	感謝委員建議，已修改。
19. 請找尋水準點和GNSS測站距離差異不大的點位，直接比較水準和GNSS的時間序列，了解不同觀測時間的差異在二個獨立觀測量是一致的。	已新增水準點和 GNSS 測站距離差異不大的點位，並比較兩者的時間序列，請參照圖 2-3.4、42、46、55、59、68、79、84
20. 在口頭報告中，有提及採用opening motion 去解釋泥貫入體或泥基背斜的變形，需要opening的地方，在地質構造或地表變形有何特別之處。	根據本團隊模擬測試，需要 opening-mode dislocation 的地方，為垂直速度場與水平速度場梯度不一致的地區。換言之，單純的斷層錯動並無法擬合此地區的地表變形，因此我們需要加入 opening-mode dislocation 來擬合其他具有抬升的地方。地質上，這些地區多為背斜或推測為泥貫入體通過之區域。
21. 為何採用第二不變量(shear strain)來評估地表變形強度？臺灣地區主要是逆斷層活動，為何不採用第一變量(dilatation)。	根據 Kreemer et al. 之定義，第二不變量為 $\sqrt{\dot{\varepsilon}_{\phi\phi}^2 + \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^2 + \dot{\varepsilon}_{\phi\theta}^2}$ ，是為綜合所有平面分量計算而得之應變張量，故本團隊採用第二不變量，以進行綜合性之地表變形強度評估。
22. 第八章結論的部分請在精簡。	已進行修改與精簡。
23. P.2：地表變形強度分布圖→地表變形敏感區分布圖。	根據期初與期中地調所及部分委員之討論，建議以地表變形強度分布圖取代地表變形敏感區分布圖，以避免與地質敏感區有所混淆。
24. P. 10：因此推測小崗山斷層為泥貫入體抬升所導致，……..應為一向西傾之正斷層。……然而，小崗山斷層的存在與型態仍然是有爭議的。是如此結果?那地調所為何還要公告小崗山斷層敏感區?小崗山斷層兩側的GPS向西的水平位移量為何?鄰近小崗山斷層的GNSS 連續站都顯示上下盤為下陷。最大主應力場好像是垂直斷層走向(p.196; 圖 3-	已修改並新增部分內容至小崗山斷層之地質背景概述，請見 P. 10。目前地質界普遍對於泥貫入體的認知並不是完全正確的，泥貫入體主要的成因是和 overpressured 的泥體活動有關，而不完全是因為密度差異所造成的單純浮力活動，因此臺灣西南部目前建議的泥貫入體，更像是 mobile shale。此外，根據 Brown

期末審查意見	處理情形
1.4)。	[1990]針對泥貫入體的回顧與研究也指出，泥貫入體邊緣會出現大量斷層型態的剪切帶，與目前認定小崗山斷層的證據是一致的。換言之，本團隊在檢視過去的工作成果指出，目前的地質證據確實不能排除泥貫入體存在的可能。另外，即便可能有泥貫入體的存在，也不需要排除小崗山斷層的存在，兩者是可以並存的，所以地調所公告小崗山斷層敏感區的必要性還是存在的。而根據本團隊之分析，小崗山斷層西側之向西速度場大於東側之速度場，而垂直速度場部分，雖位置與目前公告之斷層跡稍有偏差，但整體而言東側抬升西側沉降，此外，最大主應變場與斷層幾何參數擬合搜尋，皆顯示小崗山斷層為東傾逆斷層。
25. P. 70：(淡水至士林測線)、P. 73(五股至台北測線)：山腳斷層位置應在第一個下陷點的西側。	感謝委員提醒，已更正圖 2-3.8、14。
26. p.75：(新屋至童話世界測線)：為何湖口斷層以北為抬升?	因為新屋至童話世界測線並非今年之工作重點地區，因此僅能得知湖口斷層以北為抬升，但是具體的抬升機制將於來年本計畫分析至該地區時，會再對進行細緻的討論。
27. p.79：(新竹至五峰測線)：為何有些測站每年的變動速率差異非常大，有些年呈現抬升，之後又呈現下陷的來回變動，應該評估這種測站是否受到人為擾動因素，還是自然因素。	因為新竹至五峰測線並非今年之工作重點地區，因此僅能得知每年的變動速率差異是自然因素。水準變動趨勢隨時間有很大差異的原因，並不一定直接反映在斷層的活動上，也可能是未知的長週期震盪，將要在分析該地區之地殼變形特性時，才有機會解析。因此，具體的變動速率差異機制將於來年本計畫分析至該地區時，會再對進行細緻的討論。

期末審查意見	處理情形
28. p.84：(苗栗至南庄測線)：為何多呈現下陷?是何種構造特性?還是與連續測站(PENL -3.1 mm/yr)的計算有關?而且獅潭斷層上盤的垂直變動速率，有時抬升有時下陷，且變動速率的趨勢有很大的差異，為何?	根據近年來的地表變形研究成果已指出，除了丘陵地區與山區，臺灣沿海、平原、盆地等地區其實多因各種原因在沉陷，因此此地區之沉陷並不特別，最可能是構造特性。至於獅潭斷層上盤的垂直變動速率變化，並不一定直接反映在斷層的活動上，也可能是未知的長週期震盪，將要在分析該地區之地殼變形特性時，才有機會解析。
29. p.88：(大安至東勢測線)：為何三義斷層下盤都在下陷? 此範圍涵蓋大甲、鐵鉆山與屯子腳斷層。	根據近年來的地表變形研究成果已指出，除了丘陵地區與山區，臺灣沿海、平原、盆地等地區其實多因各種原因在沉陷，因此此地區之沉陷並不特別，最可能是構造特性。
30. p.91：(龍井至太平測線)：如同上述斷層的每年變動速率差異非常大，是否應該進行所有側線與測點的整體評估，為何震間應抬升區域反而呈現下陷，或反之。此現象是否與連續測站的計算有關?還是其他自然因素如構造作用(地震)? 若與連續測站的計算有關，整體側線變動趨勢應該一致，若不一致是否與區域構造或人為因素有關。建議期末應該有一個章節來說明對於十數年以來所有測線與測站測量結果的評估。	根據近年來的地表變形研究成果已指出，除了丘陵地區與山區，臺灣沿海、平原、盆地等地區其實多因各種原因在沉陷，因此此地區之沉陷並不特別，最可能是構造特性。至於此測線的垂直變動速率變化，並不一定直接反映在斷層的活動上，也可能是未知的長週期震盪，將要在分析該地區之地殼變形特性時，才有機會解析。
31. 利用GNSS連續測站作為約制點校正，每條測線是何時開始?須說明。若連續測站位在測線上，也應該標示位置。GNSS連續測站計算的誤差值也需要註明清楚。此外每個GNSS連續測站的每年測量值是否相似?若有很大的差異為何?是否會影響到測線的變動速率?那測線長期的變動速率如何估算? 若GNSS連續測站的變動僅是佔位受到局部區域的構造影響或人為影響時，是否可以作為全段測線的校正?是否也需要每年進行評估?	已在內文加上 GNSS 連續站何時開始約制水準測線，測線分布位置圖已標示連續站位置。GNSS 連續測站計算的誤差值將會於明年的計畫中展示，不過，若外在環境沒有發生明顯變化，每個 GNSS 連續測站的每年測量值確實相似，因此多半不會影響到測線的變動速率。本計畫也會透過不同資料間的交互比對確認數值的可靠性。GNSS 連續站在進行時間序列擬合時，便已移除人為影

期末審查意見	處理情形
	響所造成之變動，才計算測線長期速率，此外，以 GNSS 校正進行水準側線校正時，亦會進行相鄰測站之時間序列比對，以排除受局部區域構造影響之測站，並盡量選取較為穩定之測站作為約制站。由於本計畫在使用 GNSS 連續站時，會先檢視該站之坐標時間序列，換言之，每次在使用資料時，都會對該測站進行評估。
32. p.96：(王功至草屯至埔里測線)：沉陷速率最大可達約55.0 mm/yr，但高程地形卻沒有太大的變化。如此大的沉陷速率是否與人為因素有關?為何西側測站的沉陷量較小?	目前初步判斷王功至草屯至埔里測線的沉陷應該和人為因素有關，但是具體的證據需要進一步去尋找。
33. p.100：(北斗至水里測線)：此側線橫跨構造區與王功至草屯至埔里測線相同，為何變動趨勢不同?初鄉斷層上盤呈現抬升現象，而剖面中為何沒有標示初鄉斷層?未來地調所可能會將初鄉斷層列為活動斷層。近兩年來的變動趨勢為何呈現很大的差異?	因為北斗至水里測線並非今年之工作重點地區，因此本計畫目前先標示已公告的活動斷層，當計畫於來年分析至該地區時，會再對初鄉斷層進行細緻的分析。
34. p.103：(金湖至瑞峰測線)：SMA是甚麼斷層?請標示。	感謝委員提醒，SMA 非斷層，已更正圖 2.3-48。
35. p.107：(北門至楠西測線)：圖中0 mm/yr的標線沒有。	感謝委員提醒，已更正圖 2-3.53
36. p.110：(善化至關廟測線)：為何新化斷層北側同樣也是抬升?	此一型態也同時有在 InSAR 的結果中見到，目前仍在釐清造成此結果的可能性。
37. p.112：(安平至龍崎測線)：為何西側測線的地形高程位在海拔0公尺以下?GNSS連續測站在哪裡?是否有校正?	感謝委員指正，已修正測線地形高程。此測線採用 GNSS 連續站 CKSV 與 GS37 進行校正，已在圖上增補。
38. p.116：(玉井至新化測線)：左鎮斷層東側為何有時抬升有時下陷? GNSS連續測站在哪裡?是否有校正?每年	目前對於此測線於左鎮斷層東側的下陷原因並不清楚。由於水準變動趨勢隨時間有很大差異的原因，並

期末審查意見	處理情形
的變動值是否有很大的變化?	不一定直接反映在斷層的活動上，也可能是未知的長週期震盪。如同安平-龍崎測線的垂直運動型態變化特性，是在累積超過十年的時間後，才確認其特殊形態變化是自然產生的，因此本測線也將須要持續長期的監測，才有機會解析。此測線採用GNSS 連續站 GS88 進行校正，已在圖上增補。
39. p.118：(路竹至茂林測線)：LNCF→龍船斷層?沒有說明。是否為泥貫入體? GNSS連續測站在哪裡?是否有校正?	感謝委員提醒，已在 2-3.66 圖說加入龍船斷層(LNCF)，此測線在甲仙地震及美濃地震可能受到泥貫入體影響，有顯著抬升。作為約制站的GNSS 連續站已標示於圖上，此水準測線是以該GNSS 連續站進行校正。
40. p.124：(佳冬至七佳測線)：為何都呈現沉陷?潮州斷層位置是否有誤? GNSS連續測站在哪裡?是否有校正?	佳冬地區為全臺地層下陷情形嚴重之區域，故呈沉陷狀態。GNSS 連續測站為 CLON，請見圖 2-3.73 (a)。此水準測線以 GNSS 連續站 CLON 進行校正。
41. p.146-147：2002-2021年，為何桃園台地的變動速率有差異?	水準變動趨勢隨時間有很大差異的原因，並不一定直接反映在斷層的活動上，也可能是未知的長週期震盪，將要在分析該地區之地殼變形特性時，才有機會解析。因此，具體的變動速率差異機制將於來年本計畫分析至該地區時，會再對進行細緻的討論。
42. p.138：(光復至豐濱測線)：在2013瑞穗地震之前，為何全線大多呈現下陷?在2013瑞穗地震之後，縱谷與脊樑山脈以及瑞穗斷層上盤大都呈現抬升。此現象為何與在2013瑞穗地震前後的紅葉與靜浦測線不同?都是呈現下陷?此種現象與全新世地形或長期垂直抬升速率(震間+同震變形)有明顯差異，為何?	光復至豐濱測線在 2013 瑞穗地震前之下陷，應該和斷層鎖定有關；而瑞穗地震後的活動則可能反映震後變形，也因此該測線的活動型態和紅葉與靜浦測線不同。具體其和全新世地形或長期垂直抬升速率之差異原因，則須要在來年本計畫分析至該地區時，才能進行細緻的討論。

期末審查意見	處理情形
43. p.148-150：中部地區相對於澎湖白沙站(S01R)之垂直速度場，為何三個時段在車籠埔斷層下盤與上盤約數公里寬都屬於下陷區域?大度與八卦台地都呈現下陷?	此結果可能暗示車籠埔斷層目前是鎖定的狀態，至於下陷的問題，則和區域構造的活動有關。
44. p.176：針對重要區域三維速度場分析時，若鄰近的GNSS連續測站或水準測站沒有橫跨時，是無法清楚看出局部構造的變動。甲方在進行匡列研究區域時就必須注意，可以另外採用InSAR雷達干涉技術進行區域性的觀測地表變形。	感謝委員的建議。本計畫也正嘗試與 InSAR 的計畫一起進行整合，期望能提升觀測資料的空間解析力。
45. p.185：全臺地表速度場針對2007 年中部地區速度轉折、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震、2016 年美濃地震及2018 花連地震等，分為六個時間段分別解算速度場，有哪些區域有水平或垂直的變化，應該有說明，不只是秀出圖(圖2-5.1 及圖2-5.2)而已。	感謝委員建議，已補充內文說明。
46. p.222、p.239：此研究採用鄭紹安(2020)論文中的數據資料時，請小心使用，這是我們未發表資料。而鄭紹安(2020)與陳文山(2010)是來自同一資料，只是計算過程不同，所以用此來算權重是否有問題(p.326，表6-1.3： p.337，表6-3.3)?	感謝委員提醒，針對表 6-1.3 同一資料來源本計畫會採用最新且已發表解釋的結果，然而因目前鄭紹安(2020)資料尚未發表，本團隊於今年度計畫中仍會呈現陳文山之結果。表 6-3.3 經本計畫查驗，並非使用同一地區鑽井資料，因此可並呈，然而也因鄭紹安(2020)資料尚未發表，本團隊今年度僅呈現陳文山之結果。期能在新資料發表後予本計畫更新並應用於潛勢評估中。
47. p. 246：「東恆春斷層最近一次活動時間以海口珊瑚礁定年分析，為距今 4,450–4,310 年（陳文山等，2006）」。我似乎沒有說最近一次活動時間。	感謝委員提醒，於定稿版修改如下：「陳文山等（2006）以海口珊瑚礁定年分析為距今 4,450–4,310 年，本計畫認為珊瑚礁抬升是恆春斷層四千年前持續活動至今造成。」
48. p. 244：表4-1.10：潮州斷層幾何參數與文獻彙整。是否也參考陳文山等(2019)經濟部中央地質調查所特刊，第三十四號，第125–140頁。此斷層傾向是依據 Vp 與Vs 擾動構造的	於 4-1-4 節中加入描述：「陳文山等（2019）利用震波層析成像構造、震源機制、地震分佈解析臺灣南部地質構造，其中 Vs 擾動（Perturbation）

期末審查意見	處理情形
震波層析成像速度構造模型所繪。	的震波層析成像中可看到以潮州斷層為界，東側呈現較高的 Vs 值，西側呈現較低的 Vs 值。本計畫根據該研究判釋的斷層線簡單推估潮州斷層地下幾何形貌，其深度約 10~12 公里深，傾角約 55~75 度；北邊剖面 1~3 中潮州斷層深度約 10 公里，傾角 55~60 度；南邊剖面 4~6 中潮州斷層深度 12 公里，傾角 70~75 度；剖面 7~12 的潮州斷層已超過陸域範圍，本計畫不納入考量。」
49. p. 353：為何本報告旗山斷層(18.1%，1.9%)、小崗山斷層(7.9%，4.9%)、車瓜林斷層(?，1.2%)、潮州斷層(4.2%，3.4%)、恆春斷層(20.8%，17.6%)之未來50 年地震矩規模6.5 以上之發生機率與先前台灣水平速度場及斷層活動潛勢圖中，旗山斷層的發生機率存在如此大的差異?原因為何?	前期計畫因有考慮旗山斷層與內英斷層的聯合破裂情形(總長度 71 km)，所以規模 6.5 以上的發生率較高。本計畫則僅評估旗山斷層(總長度 27 km)，且考慮了旗山斷層局部破裂的可能性，因此發生規模 6.5 以上的可能性就降低，然而根據本計畫評估結果，旗山斷層未來 50 年發生規模 5.8 以上的機率仍有 15.5%。