經濟部

計畫編號：B11130

經濟部中央地質調查所

111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（2/2）」

（第2年度）

全 程 計 畫：自110年04月至111年12月止
本年度計畫：自111年03月至111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 111 年 12 月

計畫編號：B11130

經濟部中央地質調查所

111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（2/2）」

（第2年度）

全 程 計 畫：自110年04月至111年12月止
本年度計畫：自111年03月至111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 111 年 12 月

重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（2/2）
（第2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：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　111　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 VI
圖目錄 VIII
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 10
1-3 本年度工作概述 11
第二章、嘉南地區之三維速度場 19
2-1 測量資料來源與說明 19
2-2 三維速度場 20
第三章、嘉南地區應變速率場及地表變形強度之計算與繪製 25
3-1 應變速率場計算 25
3-1-1 速度反演法與反演成果 25
3-1-2 應變速率場計算與分析 33
3-2 地表變形強度 39
3-2-1 地表變形相關規範彙整 39
3-2-2 地表變形強度分級標準表建置 43
3-3 地表變形強度分布圖 46
第四章、嘉南地區重要斷層參數分析 49
4-1 斷層資料蒐集 49
4-1-1 新化斷層 50
4-1-1-1 斷層長度 50
4-1-1-2 斷層傾角 52
4-1-1-3 斷層深度 55
4-1-1-4 滑移速率 56
4-1-2 後甲里斷層 59
4-1-2-1 斷層長度 59
4-1-2-2 斷層傾角 59
4-1-2-3 斷層深度 60
4-1-2-4 滑移速率 64
4-1-3 口宵里斷層 67
4-1-3-1 斷層長度 67
4-1-3-2 斷層傾角與深度 68
4-1-3-4 滑移速率 74
4-1-4 其他主要斷層 80
4-1-4-1 九芎坑斷層 80
4-1-4-2 梅山斷層 84

4-1-4-3 大尖山斷層 87
4-1-4-4 木屐寮斷層、六甲斷層 89
4-1-4-5 觸口斷層 95
4-1-4-6 左鎮斷層 99
4-2 二維斷層模型與最佳斷層幾何參數推求 102
4-2-1 速度剖面分析 102
4-2-2 二維斷層模型原理與假設 104
4-2-3 最佳斷層參數搜尋 105
第五章、嘉南地區斷層模型建置 113
5-1 BLOCKS 斷層模型 113
5-1-1 斷層模型原理 113
5-1-2 斷層幾何參數設定 113
5-1-3 斷層模擬結果 116
5-2 TDEFNODE 斷層模型 125
5-2-1 斷層模型原理 125
5-2-2 斷層模擬結果 129
5-3 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model） 150
5-3-1 斷層模型原理與使用參數 150
5-3-2 斷層模擬結果 153
5-4 嘉南地區之斷層滑移虧損速率 161
第六章、嘉南地區斷層活動潛勢 168
6-1 新化斷層 168
6-1-1 新化斷層參數設定 168
6-1-2 新化斷層規模與年發生率 170
6-1-3 新化斷層機率評估 171
6-2 後甲里斷層 172
6-2-1 後甲里斷層參數設定 172
6-2-2 後甲里斷層規模與年發生率 174
6-2-3 後甲里斷層機率評估 176
6-3 口宵里斷層 177
6-3-1 口宵里斷層參數設定 177
6-3-2 口宵里斷層規模與年發生率 178
6-3-3 口宵里斷層機率評估 179
6-4 九芎坑斷層 180
6-4-1 九芎坑斷層參數設定 180
6-4-2 九芎坑斷層規模與年發生率 183
6-4-3 九芎坑斷層機率評估 184
6-5 梅山斷層 185
6-5-1 梅山斷層參數設定 185
6-5-2 梅山斷層規模與年發生率 187
6-5-3 梅山斷層機率評估 188

6-6 大尖山斷層 189
6-6-1 大尖山斷層參數設定 189
6-6-2 大尖山斷層規模與年發生率 191
6-6-3 大尖山斷層機率評估 192
6-7 觸口斷層 193
6-7-1 觸口斷層參數設定 193
6-7-2 觸口斷層規模與年發生率 195
6-7-3 觸口斷層機率評估 196
6-8 木屐寮斷層及六甲斷層 198
6-8-1 木屐寮斷層及六甲斷層參數設定 198
6-8-2 木屐寮斷層及六甲斷層規模與年發生率 201
6-8-3 木屐寮斷層及六甲斷層機率評估 202
6-9 左鎮斷層 203
6-9-1 左鎮斷層參數設定 203
6-9-2 左鎮斷層規模與年發生率 204
6-9-3 左鎮斷層機率評估 206
6-10 斷層活動潛勢圖成果 207
第七章、嘉南地區景況地振動與景況同震位移分布圖 209
7-1 景況地振動分布圖 209
7-1-1 斷層破裂三維網格與地面計算網格建立 209
7-1-2 地面網格與斷層面最短距離估算 211
7-1-3 地振動放大效應評估 212
7-1-4 地振動值評估與分布 213
7-1-5 景況地振動分布 222
7-2 景況同震位移分布圖 230
7-2-1 地表同震位移網格建立 230
7-2-2 潛在震源位置與各斷層同震滑移量推估 230
7-2-3 各斷層景況同震位移分布圖 231
第八章、大地測量資料分析 (全臺) 238
8-1 GNSS 連續站資料解算與分析 241
8-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程 241
8-1-2 GNSS 連續站坐標時間序列擬合與坐標精度分析 242
8-1-3 GNSS 連續站資料處理與資（/雜）訊分析 246
8-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析 256
8-2-1 本年度（2022 年）GNSS 移動站抽樣檢核 256
8-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析 260
8-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析 262
8-2-3-1 臺北地區 GNSS 監測網 262
8-2-3-2 恆春地區 GNSS 監測網 266
8-2-3-3 桃竹苗地區 GNSS 觀測網 271
8-2-3-4 花東地區 GNSS 觀測網 275
8-2-3-5 嘉南地區 GNSS 觀測網 279

8-2-3-6 高屏地區 GNSS 觀測網.....284
8-2-3-7 中部地區 GNSS 觀測網.....289
8-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析.....293
8-3-1 精密水準測量資料檢核.....293
8-3-2 精密水準測量資料解算與精度分析.....294
8-3-3 恆春地區精密水準測線.....296
8-3-3-1 恆春西臺地至佳樂水測線.....296
8-3-3-2 南樹林至鵝鑾鼻測線.....299
8-3-3-3 車城至牡丹測線.....301
8-3-4 嘉南地區精密水準測線.....302
8-3-4-1 金湖至瑞峰測線.....302
8-3-4-2 北門至楠西測線.....305
8-3-4-3 安平至龍崎測線.....308
8-3-4-4 玉井至新化測線.....312
8-3-5 高屏地區精密水準測線.....315
8-3-5-1 路竹至茂林測線.....315
8-3-5-2 岡山至安坡測線.....318
8-3-5-3 佳冬至七佳測線.....322
8-3-6 中部地區精密水準測線.....325
8-3-6-1 大安至東勢測線.....325
8-3-6-2 龍井至太平測線.....328
8-3-6-3 五光至黃竹測線.....331
8-3-6-4 王功至草屯至埔里測線.....334
8-3-6-5 北斗至水里測線.....337
8-3-7 東部地區精密水準解算.....340
8-3-7-1 嶺頂至龍澗測線.....340
8-3-7-2 光復至豐濱測線.....344
8-3-7-3 紅葉至靜浦測線.....347
8-3-7-4 東成至富岡測線.....350
8-3-8 臺北地區精密水準測線.....353
8-3-8-1 石門至萬里測線.....353
8-3-8-2 士林至三芝測線.....356
8-3-8-3 淡水至士林測線.....359
8-3-8-4 五股至臺北測線.....362
8-3-9 桃竹苗地區精密水準測線.....365
8-3-9-1 新屋至童話世界測線.....365
8-3-9-2 新竹至五峰測線.....368
8-3-9-3 新竹至峨嵋測線.....371
8-3-9-4 苗栗至南庄測線.....374
8-3-10 精密水準測量資料可靠度分析.....377
第九章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果.....385
9-1 2022 年 03 月 23 日地震事件分析報告.....385
9-1-1 2022 年 03 月 23 日地震事件簡介.....385
9-1-2 2022 年 03 月 23 日地震事件震源區地質簡介.....389

9-1-3 2022 年 03 月 23 日地震事件同震位移場.....392
9-1-3-1 GNSS 連續站同震位移場.....392
9-1-3-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場.....394
9-1-4 2022 年 03 月 23 日地震事件震源模型.....395
9-1-5 2022 年 03 月 23 日地震事件討論與結論.....396
9-2 2022 年 06 月 20 日地震事件分析報告.....398
9-2-1 2022 年 06 月 20 日地震事件簡介.....398
9-2-2 2022 年 06 月 20 日地震事件同震位移場.....400
9-2-2-1 GNSS 連續站同震位移場.....400
9-2-2-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場.....401
9-2-3 2022 年 06 月 20 日地震事件震源模型.....402
9-2-4 2022 年 06 月 20 日地震事件討論與結論.....403
9-3 2022 年 09 月 18 日地震事件分析報告.....405
9-3-1 2022 年 09 月 18 日地震事件簡介.....405
9-3-2 2022 年 09 月 17 及 18 日地震事件同震位移場.....411
9-3-2-1 0917 關山地震 GNSS 連續站同震位移場.....411
9-3-2-2 0918 池上地震 GNSS 連續站同震位移場.....413
9-3-2-2 GNSS 移動站及水準同震位移場.....415
9-3-3 2022 年 09 月 17 及 18 日地震事件震源模型.....417
9-3-3-1 0917 關山地震斷層模型結果.....417
9-3-3-2 0918 池上地震斷層模型結果.....419
9-3-4 2022 年 09 月 17 及 18 日地震事件討論與結論.....421
第十章、結論.....423
參考文獻.....426
期中委員審查意見.....431
期末委員審查意見.....435

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1] 111 年期末_GNSS 連續站時間序列
[附錄 2] 111 年期末_GNSS 連續站速度表
[附錄 3] 111 年期末_GNSS 移動站時間序列
[附錄 4] 111 年期末_GNSS 移動站速度表
[附錄 5] 111 年期末_精密水準時間序列
[附錄 6] 111 年期末_精密水準速度表
[附錄 7] 111 年期末_成果圖初稿之電子檔
[附錄 8] 111 年期末_成果圖之各項數值檔、SHP、GMT 繪圖檔等電子檔

表目錄

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 7
表 1-3.1：GNSS 移動站施測與檢測時間表 15
表 1-3.2：精密水準測量施測時間表 18
表 3-2.1：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004） 40
表 3-2.2：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004） 42
表 4-1.1：斷層幾何參數資料蒐集重點 49
表 4-1.2：新化斷層傾角相關文獻彙整 54
表 4-1.3：新化斷層深度相關文獻彙整 58
表 4-1.4：後甲里斷層傾角相關文獻彙整 62
表 4-1.5：後甲里斷層深度相關文獻彙整 64
表 4-1.6：後甲里斷層長期滑移速率相關文獻彙整 66
表 4-1.7：口宵里斷層傾角相關文獻彙整 71
表 4-1.8：九芎坑斷層傾角相關文獻彙整 82
表 4-1.9：九芎坑斷層深度相關文獻彙整 82
表 4-1.10：九芎坑斷層長期滑移速率相關文獻彙整 83
表 4-1.11：梅山斷層傾角相關文獻彙整 86
表 4-1.12：梅山斷層深度相關文獻彙整 86
表 4-1.13：木屐寮–六甲斷層傾角相關文獻彙整 89
表 4-1.14：木屐寮–六甲斷層深度相關前人文獻彙整 94
表 4-1.15：木屐寮–六甲斷層長期滑移速率相關文獻彙整 94
表 4-1.16：觸口斷層傾角與深度相關文獻 97
表 4-1.17：左鎮斷層傾角相關文獻彙整 101
表 4-1.18：左鎮斷層深度相關文獻彙整 101
表 4-2.1：重要斷層最佳斷層幾何參數 112
表 5-1.1：使用 2002-2010 年 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率 117
表 5-1.2：使用 2010-2016 年 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率 118
表 5-1.3：使用 2016-2022 年 GNSS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率 119
表 5-2.1：以 2002-2010 速度場反演的各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述 144
表 5-2.2：以 2010-2016 速度場反演的各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述 145
表 5-2.3：以 2016-2022 速度場反演的各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述 146
表 5-2.4：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及以 2002-2010 資料反演的平均滑移速率 147
表 5-2.5：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及以 2010-2016 資料反演的平均滑移速率 148
表 5-2.6：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及以 2016-2022 資料反演的平均滑移速率 149
表 5-3.1：斷層平均滑移速率 154

表 5-4.1：本計畫之 2002-2010 加權平均斷層滑移虧損率(2002-2010).....162
表 5-4.2：本計畫之 2010-2016 加權平均斷層滑移虧損率(2010-2016).....163
表 5-4.3：本計畫 2016-2022 之加權平均斷層滑移虧損率(2016-2022).....164
表 6-1.1：新化斷層之各破裂事件規模計算結果.....169
表 6-1.2：本計畫模型之新化斷層加權平均斷層滑移虧損率.....169
表 6-1.3：本計畫新化斷層發生機率評估.....171
表 6-2.1：後甲里斷層之各破裂事件規模計算結果.....173
表 6-2.2：後甲里斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度.....173
表 6-2.3：本計畫後甲里斷層發生機率評估.....176
表 6-3.1：口宵里斷層之破裂事件規模計算結果.....177
表 6-3.2：本計畫模型之口宵里斷層加權平均斷層滑移虧損率.....177
表 6-3.3：本計畫口宵里斷層發生機率評估.....179
表 6-4.1：九芎坑斷層之各破裂事件規模計算結果.....181
表 6-4.2：九芎坑斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度.....182
表 6-4.3：本計畫九芎坑斷層發生機率評估.....184
表 6-5.1：梅山斷層之各破裂事件規模計算結果.....186
表 6-5.2：本計畫模型之梅山斷層加權平均斷層滑移虧損率.....186
表 6-5.3：本計畫梅山斷層發生機率評估.....188
表 6-6.1：大尖山斷層之各破裂事件規模計算結果.....190
表 6-6.2：本計畫模型之大尖山斷層加權平均斷層滑移虧損率.....190
表 6-6.3：本計畫大尖山斷層發生機率評估.....192
表 6-7.1：觸口斷層之各破裂事件規模計算結果.....194
表 6-7.2：本計畫模型之觸口斷層加權平均斷層滑移虧損率.....194
表 6-7.3：本計畫觸口斷層發生機率評估.....197
表 6-8.1：木屐寮-六甲斷層之各破裂事件規模計算結果.....199
表 6-8.2：木屐寮-六甲斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度.....200
表 6-8.3：木屐寮-六甲斷層發生機率評估.....202
表 6-9.1：左鎮斷層之各破裂事件規模計算結果.....204
表 6-9.2：本計畫模型之左鎮斷層加權平均斷層滑移虧損率.....204
表 6-9.3：本計畫左鎮斷層發生機率評估.....206
表 7-1.1：本年度重要斷層之各破裂事件規模計算結果.....223
表 8-2.1：GNSS 移動站施測與檢核時間表.....259

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 8
圖 1-1.5：110 年至 111 年分年目標重要區域 9
圖 1-3.1：新化斷層淺層震測資料 12
圖 1-3.2：1900~2015 年新化斷層地震分布及深度分布剖面 12
圖 1-3.3：GNSS 移動站觀測分區圖 16
圖 1-3.4：精密水準測量測線分布圖 17
圖 2-2.1：GNSS 連續站 GS44 時間序列圖 19
圖 2-2.2：臺南科學園區及沙崙綠能科學城新設 GNSS 移動站點位 20
圖 2-2.3：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 三維速度場 21
圖 2-2.4：嘉南地區臺南科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場 22
圖 2-2.5：嘉南地區沙崙綠能科學城相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場 23
圖 2-2.6：嘉南地區臺南都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場 24
圖 3-1.1：觀測點與網格三頂點示意圖 27
圖 3-1.2：重要區域水平速度場速度反演格點測試 30
圖 3-1.3：重要區域水平速度場速度反演平滑化測試 31
圖 3-1.4：速度反演之重要區域網格化連續性速度場 32
圖 3-1.5：重要區域最大主應變速率場 36
圖 3-1.6：重要區域最大剪應變速率場 37
圖 3-1.7：重要區域應變速率強度分布圖 38
圖 4-1.1：1946 年新化地震地表破裂調查（Bonilla, 1975） 50
圖 4-1.2：農業改良場內鑽井資料（修改自陳文山等，2011） 51
圖 4-1.3：新化斷層槽溝 AIT-3 東側壁 53
圖 4-1.4：新化斷層槽溝 NBL-1 東側壁（左）與西側壁（右）（李錫堤，2002） 53
圖 4-1.5：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007） 54
圖 4-1.6：新化斷層傾角相關資料彙整 55
圖 4-1.7：Sa2 原始震測剖面（右上圖），黃旭燦等（2004）所繪之震測剖面解釋（右中圖）及平衡剖面 57
圖 4-1.8：1973-2010 年地震深度分布圖與歷史地震位置（胡植慶等，2016） 57
圖 4-1.9：新化斷層深度調查資料分布圖 58
圖 4-1.10：Le Béon et al.（2019）所繪之 D5 震測剖面解釋圖（右上）與通過臺南台地之平衡剖面圖（右下） 61
圖 4-1.11：Huang et al.,（2004）所繪通過臺南台地平衡剖面圖 61
圖 4-1.12：後甲里斷層傾角相關文獻彙整 62

圖 4-1.13：西南部地區地質剖面圖（陳文山等，2011）.....63
圖 4-1.14：後甲里斷層深度相關文獻彙整.....63
圖 4-1.15：(a）臺南地區地層柱剖面與六千年前及一萬年前之等時線（虛線）。（b）地形高度（實線）與樣本位置（圓形、三角形及正方形符號）及地下構造解釋（修改自 Chen and Liu, 2000）。.....65
圖 4-1.16：臺南台地及鄰近地區之鑽井資料與等時線(Le Béon et al. 2019).....65
圖 4-1.17：口宵里斷層條帶地質圖（劉彥求等，2021）.....68
圖 4-1.18:口宵里斷層野外露頭,資料彙整自黃文正等(2020)及劉彥求等(2020）.....71
圖 4-1.19：五萬分之一新化圖幅 BB’地質剖面（何信昌等，2005）.....74
圖 4-1.20：劉陳灣跨口宵里斷層地質剖面圖（劉彥求等，2020）.....74
圖 4-1.21：跨烏山頭斷層與口宵里斷層地質剖面圖（劉彥求等，2021）.....75
圖 4-1.22：通過牛山背斜之平衡剖面(Suppe, 1980).....75
圖 4-1.23：Hung et al. (1999)所建立之 EE’剖面.....76
圖 4-1.24：Hickman et al. (2002)所建立之 AA’剖面與 BB’剖面.....76
圖 4-1.25：楊志成（2007）所繪之 CC’剖面.....77
圖 4-1.26：石智偉（2022）所繪之平衡剖面.....77
圖 4-1.27：口宵里斷層區域地質圖（中油，1989；劉彥求等，2021）及本計畫設定之口宵里斷層分段位置.....78
圖 4-1.28：曾文溪以北之斷層幾何模型，剖面位置見圖 4-1.27.....78
圖 4-1.29：曾文溪以南之斷層幾何模型，剖面位置見圖 4-1.27.....79
圖 4-1.30：曾文溪沿岸河階高度與碳十四定年資料（石智偉，2022）.....79
圖 4-1.31：九芎坑斷層幾何模型及權重（中興社，2020）.....81
圖 4-1.32：梅山斷層之震測結果（彭秋紋等，2004）.....85
圖 4-1.33：黃旭燦（2003）所繪之平衡剖面.....85
圖 4-1.34：1999 年 10 月 22 日嘉義地震震後兩週之餘震系列分布（Chen et al., 2008）.....86
圖 4-1.35：大尖山（北段）斷層幾何模式（中興社，2020）.....88
圖 4-1.36：大尖山（南段）斷層幾何模式（黃旭燦等，2004）.....88
圖 4-1.37：跨六甲斷層地質剖面圖（楊志成等，2005）.....90
圖 4-1.38：六甲斷層鑽井資料所建立之剖面圖（楊志成等，2005）.....90
圖 4-1.39：臺南地區構造平衡剖面及地震深度剖面(楊志成，2007).....91
圖 4-1.40：牛山背斜及南寮構造平衡剖面（Suppe, 1980）.....92
圖 4-1.41：Hung et al. (1999)所繪之平衡剖面圖.....93
圖 4-1.42：黃旭燦等（2004）所繪之平衡剖面圖.....93
圖 4-1.43：P 波速度構造與地震深度分布剖面（Camanni et al., 2016）.....94
圖 4-1.44：觸口斷層與崙後斷層之平衡剖面（楊耿明等，2001）.....96
圖 4-1.45：淺層反射震測資料與觸口斷層判釋結果（陳郁文，2006）.....97
圖 4-1.46：楊志成（2007）所繪之臺南地區構造平衡剖面與地震深度剖面.....97
圖 4-1.47：觸口斷層幾何模型及權重（中興社，2020）.....98
圖 4-1.48：五萬分之一新化地質圖幅（上）及地質剖面（下)（何信昌等，2005）.....100
圖 4-1.49：西元 1900-2015 地震深度分布（中興社，2020）.....100
圖 4-2.1：本計畫所分析之 AA’至 CC’速度剖面分布圖.....103

圖 4-2.2：二維斷層模型示意圖 105
圖 4-2.3：AA'速度剖面與二維斷層模型第一階段擬合測試成果（單一條斷層）..... 108
圖 4-2.4：AA'速度剖面與二維斷層模型擬合成果 109
圖 4-2.5：B–B'速度剖面與二維斷層模型擬合成果 110
圖 4-2.6：C–C'速度剖面與二維斷層模型擬合成果 111
圖 5-1.1：臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層之模擬初始值與三個時期相應使用之 GNSS 測站 115
圖 5-1.2：三個時段臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層之傾向滑移速率模擬成果 120
圖 5-1.3：三個時段臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層之走向滑移速率模擬成果 121
圖 5-1.4：三個時段臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層模擬成果之總滑移速率 122
圖 5-1.5：臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果 124
圖 5-2.1：臺灣西部三維塊體模型及活動斷層分布 127
圖 5-2.2：最佳塊體旋轉軸 131
圖 5-2.3：(a) 2002-2010 速度場反演得到的最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。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 45±15º/My 的角速度。(b) 由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。 131
圖 5-2.4：(a) 以 2002-2010 速度場反演推求的斷層長期滑移速率。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，得到斷層面上的震間期滑移速率。 132
圖 5-2.5：以 2002-2010 速度場反演推求的最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差 133
圖 5-2.6：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差 134
圖 5-2.7：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。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 45±15º/My 的角速度。(b) 由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。 135
圖 5-2.8：(a) 推求的斷層長期滑移速率。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，得到斷層面上的震間期滑移速率。 136
圖 5-2.9：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差 137
圖 5-2.10：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差 138
圖 5-2.11：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。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 45±15º/My 的角速度。（b）由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。 139
圖 5-2.12：（a）推求的斷層長期滑移速率。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，得到斷層面上的震間期滑移速率。 140
圖 5-2.13：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差 141
圖 5-2.14：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差 142
圖 5-2.15：塊體內部應變 143
圖 5-3.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖（Okada, 1985） 152
圖 5-3.2：2002-2010 基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果 155
圖 5-3.3：2010-2016 年基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果 156
圖 5-3.4：2016-2022 基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果 157
圖 5-3.5：2002-2010 之嘉南地區斷層滑移虧損率分布圖 158
圖 5-3.6：2010-2016 之嘉南地區斷層滑移虧損率分布圖 159
圖 5-3.7：2016-2022 之嘉南地區斷層滑移虧損率分布圖 160
圖 5-4.1：本計畫 2002-2010 之加權平均斷層滑移虧損率分布圖 165
圖 5-4.2：本計畫 2010-2016 之加權平均斷層滑移虧損率分布圖 165
圖 5-4.3：本計畫 2016-2022 之加權平均斷層滑移虧損率分布圖 166
圖 5-4.4：本計畫重要區域（臺南科學園區、沙崙綠能科學城、臺南都會區）之斷層滑移虧損速率分布圖 167
圖 6-1.1：新化斷層之破裂模式及權重 169
圖 6-1.2：新化斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 170
圖 6-1.3：新化斷層之全部分支規模-權重分布圖 171
圖 6-1.4：新化斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 171
圖 6-2.1：後甲里斷層之破裂模式及權重 173
圖 6-2.2：後甲里斷層滑移速率累積加權分布 174
圖 6-2.3：後甲里斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 175
圖 6-2.4：後甲里斷層之全部分支規模-權重分布圖 175
圖 6-2.5：後甲里斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 175
圖 6-3.1：口宵里斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 178
圖 6-3.2：口宵里斷層之全部分支規模-權重分布圖 178
圖 6-3.3：口宵里斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 178
圖 6-4.1：桐樹湖斷層和九芎坑斷層之分布 181
圖 6-4.2：九芎坑斷層抬升速率累積加權分布 182
圖 6-4.3：九芎坑斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 183
圖 6-4.4：九芎坑斷層之全部分支規模-權重分布圖 183
圖 6-4.5：九芎坑斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 184
圖 6-5.1：梅山斷層四種可能破裂長度之模式（中興社，2020） 186
圖 6-5.2：梅山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 187
圖 6-5.3：梅山斷層之全部分支規模-權重分布圖 188
圖 6-5.4：梅山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 188
圖 6-6.1：大尖山斷層之破裂模式及權重分配 190
圖 6-6.2：大尖山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 191

圖 6-6.3：大尖山斷層之全部分支規模-權重分布圖 191
圖 6-6.4：大尖山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 192
圖 6-7.1：觸口斷層各分段之分布關係及四種可能破裂之模式（中興社，2020）
..... 194
圖 6-7.2：觸口斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。 195
圖 6-7.3：觸口斷層之全部分支規模-權重分布圖 196
圖 6-7.4：觸口斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 196
圖 6-8.1：木屐寮-六甲斷層之破裂模式及權重分配（中興社，2020） 199
圖 6-8.2：木屐寮-六甲斷層滑移速率累積加權分布 200
圖 6-8.3：木屐寮-六甲斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 .201
圖 6-8.4：木屐寮-六甲斷層之全部分支規模-權重分布圖 201
圖 6-8.5：木屐寮-六甲斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 202
圖 6-9.1：左鎮斷層之破裂模式(中興社，2020） 203
圖 6-9.2：左鎮斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係 205
圖 6-9.3：左鎮斷層之全部分支規模-權重分布圖 205
圖 6-9.4：左鎮斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖 205
圖 7-1.1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布 210
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
..... 211
圖 7-1.3：Vs30 及三條評估活動斷層之分布圖 213
圖 7-1.4：由 GMPE Lin09 算得考慮側向場址條件之甲仙地震之景況地振動分布
圖。 216
圖 7-1.5：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之甲仙地震之景況地振動分布
圖。 217
圖 7-1.6：甲仙地震地振動分布圖。 218
圖 7-1.7：由 GMPE Lin09 算得考慮側向場址條件之美濃地震之景況地振動分布
圖。 219
圖 7-1.8：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之美濃地震之景況地振動分布
圖。 220
圖 7-1.9：美濃地震地振動分布圖。 221
圖 7-1.10：由 GMPE Chao20 算得岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之口宵里斷層景況地
振動分布圖。(a) 最大地震規模為 224
圖 7-1.11：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之口宵里斷層之景況地振動
分布圖。(a) 最大地震規模為 224
圖 7-1.12：由 GMPE Chao20 算得岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之新化斷層之景況地
振動分布圖。(a) 最大地震規模為 225
圖 7-1.13：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之新化斷層之景況地振動分
布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.4。(b) 最大地震規模為 M_w 6.3。(c) 最
大地震規模為 M_w 6.7。(d) 最大地震規模為 M_w 6.6。 226
圖 7-1.14：由 GMPE Chao20 算得岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之後甲里斷層之景況
地振動分布圖 227
圖 7-1.15：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之新化斷層之景況地振動分
布圖。(a) 最大地震規模為 228
圖 7-1.16：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表（修改自交通部中央氣象局，

2021)。.....229
圖 7-2.1：口宵里斷層之景況同震位移分布圖.....232
圖 7-2.2：新化斷層之景況同震位移分布圖.....233
圖 7-2.3：後甲里斷層之景況同震位移分布圖.....234
圖 7-2.4：口宵里斷層於臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之景況同震位移分布圖.....235
圖 7-2.5：新化斷層於臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之景況同震位移分布圖.....236
圖 7-2.6：後甲里斷層於臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之景況同震位移分布圖.....237
圖 8.1：GNSS 速度場時間序列擬合事件分段.....238
圖 8.2：臺灣地區 2002 至 2022 年水平方向相對於澎湖白沙站(S01R)分段時間速度場圖.....239
圖 8.3：臺灣地區 2002 至 2022 年垂直方向相對於澎湖白沙站(S01R)分段時間速度場圖.....240
圖 8-1.1：GNSS 連續站 AKND 坐標時間序列擬合結果.....244
圖 8-1.2：GNSS 連續站 AKND 時間序列之殘差結果.....244
圖 8-1.3：2002 – 2022 年截至 10 月底 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖.....245
圖 8-1.4：2003 – 2022 年 GNSS 點位均方根誤差分布圖.....246
圖 8-1.5：地調所測站 GS22（彰化快官交流道站）垂直分量的卡曼濾波分析結果.....249
圖 8-1.6：地調所測站 GS22 之南北（上方）與東西（下方）分量之時間序列.....250
圖 8-1.7：地調所全臺 97 個測站三分量時間序列之卡曼濾波雜訊分析.....251
圖 8-1.8：地調所測站 GS10（竹圍國中）與 GS28（.....252
圖 8-1.6：地調所測站 GS73（新光國小）與 GS66（達邦）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析.....253
圖 8-1.10：地調所測站 GS69（樹林垃圾掩埋場）與 GS43（果毅國小）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析.....254
圖 8-1.7：地調所測站 GS95（大屯火山區八煙站）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析.....255
圖 8-2.1：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖.....257
圖 8-2.2：2002 – 2022 年截至 10 月底 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖.....260
圖 8-2.3：2003 – 2022 年 GNSS 點位均方根誤差分布圖.....261
圖 8-2.4：臺北地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....262
圖 8-2.5：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較.....264
圖 8-2.6：移動站點位 GG44 與連續站 GOLI 之時間序列比較.....264
圖 8-2.7：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場.....265
圖 8-2.8：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場.....265
圖 8-2.9：恆春地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....266
圖 8-2.10：移動站點位 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較.....268
圖 8-2.11：移動站點位 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較.....268
圖 8-2.12：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場.....269
圖 8-2.13：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場.....270

圖 8-2.14：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 271
圖 8-2.15：移動站點位 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較 272
圖 8-2.16：移動站點位 G198 與連續站 FCWS 之時間序列比較 272
圖 8-2.17：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場 273
圖 8-2.18：桃竹苗地區 2002 – 2022 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場 ... 274
圖 8-2.19：東部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 276
圖 8-2.20：移動站點位 GE64 與連續站 PEPU 之時間序列比較 277
圖 8-2.21：移動站點位 E415 與連續站 NDH3 之時間序列比較 277
圖 8-2.22：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 ... 278
圖 8-2.23：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場 278
圖 8-2.24：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 280
圖 8-2.25：移動站點位 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較 281
圖 8-2.26：移動站點位 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較 281
圖 8-2.27：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 ... 282
圖 8-2.28：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場 283
圖 8-2.29：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 285
圖 8-2.30：移動站點位 GC48 與連續站 CHIE 之時間序列比較 286
圖 8-2.31：移動站點位 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較 286
圖 8-2.32：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 ... 287
圖 8-2.33：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場 288
圖 8-2.34：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 289
圖 8-2.35：移動站點位 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較 290
圖 8-2.36：移動站點位 G964 與連續站 YUNL 之時間序列比較 290
圖 8-2.37：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 ... 291
圖 8-2.38：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場 292
圖 8-3.1：精密水準測量結果分析圖 293
圖 8-3.2：精密水準測線與各測線約制之 GNSS 連續站分布圖 295
圖 8-3.3：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 296
圖 8-3.4：恆春西台地至佳樂水測線高程變化圖 297
圖 8-3.5：恆春西台地至佳樂水測線累積高程差 298
圖 8-3.6：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 299
圖 8-3.7：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖 300
圖 8-3.8：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準累積高程差 301
圖 8-3.9：車城至牡丹測線位置分布圖 301
圖 8-3.10：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較 302
圖 8-3.11：金湖至瑞峰水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較 302
圖 8-3.12：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖 303
圖 8-3.13：縣 164_金湖至瑞峰測線水準累積高程差 304
圖 8-3.14：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較 305
圖 8-3.15：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖 306
圖 8-3.16：縣 174_北門至楠西測線累積高程差 307
圖 8-3.17：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較 309

圖 8-3.18：安平至龍崎水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較 309
圖 8-3.19：安平至龍崎測線水準高程變化圖 310
圖 8-3.20：安平至龍崎測線累積高程差 311
圖 8-3.21：新化至玉井水準點位 J006 與連續站 CKSV 之時間序列比較.....312
圖 8-3.22：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖 313
圖 8-3.23：台 20_新化至玉井測線累積高程差 314
圖 8-3.24：路竹至茂林水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較 315
圖 8-3.25：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖 316
圖 8-3.26：台 28_路竹至茂林主、副線累積高程差 317
圖 8-3.27：岡山至安坡水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較.....318
圖 8-3.28：岡山至安坡水準點位 G536 與連續站 GS77 之時間序列比較 319
圖 8-3.29：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖 320
圖 8-3.30：台 22_岡山至安坡測線累積高程差 321
圖 8-3.31：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較.....322
圖 8-3.32：佳冬至七佳測線高程變化圖 323
圖 8-3.33：佳冬至七佳測線測線累積高程差 324
圖 8-3.34：大安至東勢水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較 325
圖 8-3.35：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖 326
圖 8-3.36：縣 132_大安至東勢測線水準累積高程差 327
圖 8-3.37：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較.....328
圖 8-3.38：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖 329
圖 8-3.39：縣 136_龍井至太平測線水準累積高程差 330
圖 8-3.40：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較.....331
圖 8-3.41：五光至黃竹測線水準高程變化圖 332
圖 8-3.42：五光至黃竹測線水準累積高程差 333
圖 8-3.43：王功至草屯測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較.334
圖 8-3.44：縣 148-台 14_王功至草屯水準高程變化圖.....335
圖 8-3.45：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準累積高程差.....336
圖 8-3.46：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較.....337
圖 8-3.47：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖 338
圖 8-3.48：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準累積高程差 339
圖 8-3.49：嶺頂至瀧澗水準點位 G970 與連續站 YENL 之時間序列比較.....341
圖 8-3.50：嶺頂至瀧澗水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較 341
圖 8-3.51：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖 342
圖 8-3.52：嶺頂至瀧澗測線累積高程差 343
圖 8-3.53：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較.....344
圖 8-3.54：光復至豐濱測線高程變化圖 345
圖 8-3.55：光復至豐濱測線累積高程差 346
圖 8-3.56：紅葉至靜浦水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較 347
圖 8-3.57：紅葉至靜浦測線高程變化圖 348
圖 8-3.58：紅葉至靜浦測線累積高程差 349
圖 8-3.59：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較 350
圖 8-3.60：東成至富岡測線高程變化圖 351
圖 8-3.61：東成至富岡測線累積高程差 352

圖 8-3.62：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較 ...353
圖 8-3.63：石門至萬里測線水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較 ...353
圖 8-3.64：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖 ...354
圖 8-3.65：台 2_石門至萬里測線水準累積高程差 ...355
圖 8-3.66：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較 ...356
圖 8-3.67：士林至三芝測線水準高程變化圖 ...357
圖 8-3.68：士林至三芝測線水準累積高程差 ...358
圖 8-3.69：淡水至士林水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較 ...359
圖 8-3.70：淡水至士林測線水準高程變化圖 ...360
圖 8-3.71：淡水至士林測線水準累積高程差 ...361
圖 8-3.72：五股至臺北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較 ...362
圖 8-3.73：五股至臺北測線水準高程變化圖 ...363
圖 8-3.74：五股至臺北測線水準累積高程差 ...364
圖 8-3.75：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較365
圖 8-3.76：新屋至童話世界測線水準高程變化圖 ...366
圖 8-3.77：新屋至童話世界測線水準累積高程差 ...367
圖 8-3.78：新竹至五峰水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較 ...368
圖 8-3.79：新竹至五峰世界測線水準高程變化圖 ...369
圖 8-3.80：新竹至五峰測線水準累積高程差 ...370
圖 8-3.81：新竹至峨眉水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較 ...371
圖 8-3.82：新竹至峨眉世界測線水準高程變化圖 ...372
圖 8-3.83：新竹至峨眉測線水準累積高程差 ...373
圖 8-3.84：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較 ...374
圖 8-3.85：苗栗至南庄世界測線水準高程變化圖 ...375
圖 8-3.86：苗栗至南庄測線水準累積高程差 ...376
圖 8-3.87：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場 ...378
圖 8-3.88：桃竹苗地區 2002 – 2021 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場 ...379
圖 8-3.89：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 ...380
圖 8-3.90：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 ...381
圖 8-3.91：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 ...382
圖 8-3.92：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 ...383
圖 8-3.93：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 ...384
圖 9-1.1：中央氣象局 20220323 地震事件報告。 ...386
圖 9-1.2：中央氣象局 20220323 地震事件。 ...387
圖 9-1.3：中央氣象局 20220323 地震事件餘震分布及剖面圖 ...388
圖 9-1.4：臺灣東部地區地質圖（Chang et al., 2001） ...389
圖 9-1.5：1951 年花蓮臺東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖（Ching et al., 2007）。 ...391
圖 9-1.6：20220323 地震事件 GNSS 同震位移 ...393
圖 9-1.7：歐洲哨兵衛星 1A 之合成孔徑雷達差分干涉同震地表變形影像 ...394
圖 9-1.8：2022 年 03 月 23 日地震斷層模型結果 ...396
圖 9-2.1：中央氣象局 20220620 地震事件報告 ...398
圖 9-2.2：中央氣象局 20220620 地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果 ...399

圖 9-2.3：2022 年花蓮光復地震 GNSS 同震位移場 401
圖 9-2.4：歐洲哨兵衛星 1A 之合成孔徑雷達差分干涉同震地表變形影像 402
圖 9-2.5：2022 年花蓮光復地震斷層模型結果 403
圖 9-3.1：中央氣象局 20220917 地震事件報告 405
圖 9-3.2：中央氣象局 20220917 地震事件震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果 406
圖 9-3.3：0917 地震事件餘震分布 407
圖 9-3.4：中央氣象局 20220918 地震事件報告 408
圖 9-3.5：中央氣象局 20220918 地震事件震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果 409
圖 9-3.6：0918 地震事件餘震分布 410
圖 9-3.7：0917 及 0918 地震地表破裂調查 410
圖 9-3.8：2022 年 9 月 17 日臺東關山地震 GNSS 同震位移場 412
圖 9-3.9：2022 年 9 月 18 日臺東池上地震 GNSS 同震位移場 414
圖 9-3.10：2022 年 9 月 17、18 日臺東關山、池上地震 GNSS 移動站及水準同震位移場 416
圖 9-3.11：2022 年臺東關山地震斷層模型水平向擬合結果 418
圖 9-3.12：2022 年臺東關山地震斷層模型垂直向擬合結果 418
圖 9-3.13：2022 年臺東關山地震斷層模型斷層面滑移分布 419
圖 9-3.14：2022 年臺東池上地震斷層模型水平向擬合結果 420
圖 9-3.15：2022 年臺東池上地震斷層模型垂直向擬合結果 420
圖 9-3.16：2022 年臺東池上地震斷層模型斷層面滑移分布 421

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（2/2）													
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振動分布圖（由中興社工作團隊負責）													
整體目前進度													
預定進度（累積數）	2%	5%	15%	25%	35%	50%	55%	60%	70%	80%	90%	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. 水準資料檢核 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. 水準資料檢核 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
4	（第三季查核點） 1. 工作進度報告表 a. 水準資料檢核 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. 水準資料檢核 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. 重要區域景況地振動分布圖 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 20 份及成果圖資 1 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	清點所有交付項目等契約承諾、尾款請款

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（嘉南地區），報告完成之主要工作為：（1）解算本年度至 2022 年 10 月止，全臺共約 572 個 GNSS 連續站、776 個 GNSS 移動站，以及 22 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，初步以 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，特別針對新化斷層、口宵里斷層及後甲里斷層之斷層幾何參數進行探討與分析，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 2016 至今（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：2016 年至今新化、口宵里與後甲里斷層之加權平均滑移虧損速率分別為 25.8 mm/yr、9.0 mm/yr 與 5.2 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，推估並繪製新化斷層、口宵里斷層以及後甲里斷層於重要區域之景況地振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、景況地振動圖、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 Chianan area. We have completed the following missions: (1) The daily solutions from 572 continuous GNSS stations, 776 campaign-mode GNSS stations, and 22 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 Hsinhua fault, Kouhsiaoli fault, and Houchiali fault were mainly 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 after the 2016 Meinong earthquake were adopted in this project. According to the modeling results, the average slip deficit rates of Hsinhua fault, Kouhsiaoli fault, and Houchiali fault are respectively 25.8 mm/yr, 9.0 mm/yr, and 5.2 mm/yr. 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。

接續過去歷年來的工作成果，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，因此本階段的研究目的為，（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，但是可能由於斷層幾何參數不確定性過大，導致其擬合成果並不佳。因此本期計畫將審慎地檢視主要斷層之斷層幾何參數可信範圍，並採用二維斷層模型來整合地質調查與地球物理

測勘所獲得之觀測資料，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，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振動分布範圍，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。

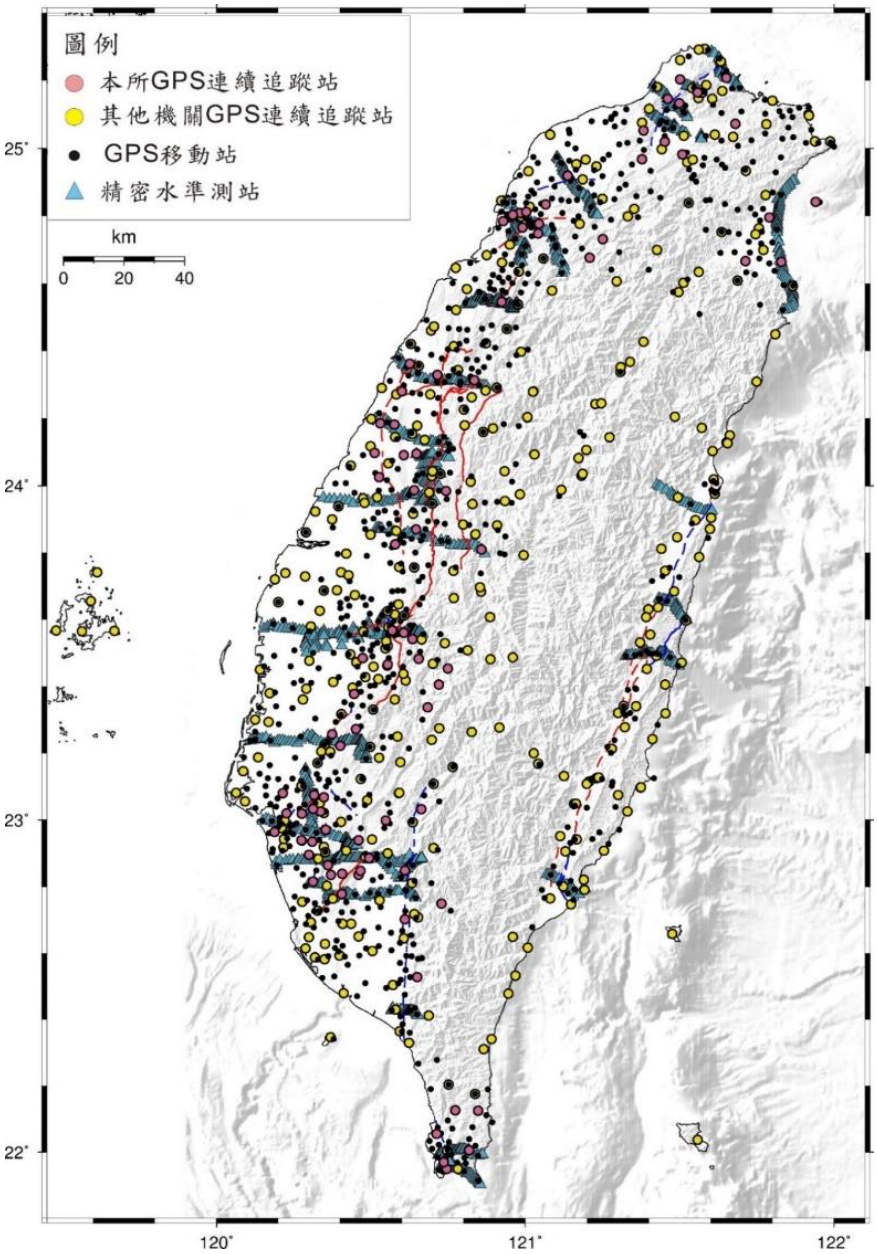


圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。觀測網包含 86 站 GNSS 連續站、773 站 GNSS 移動站以及 42 條精密水準測線。

Figure1-1.1: 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			

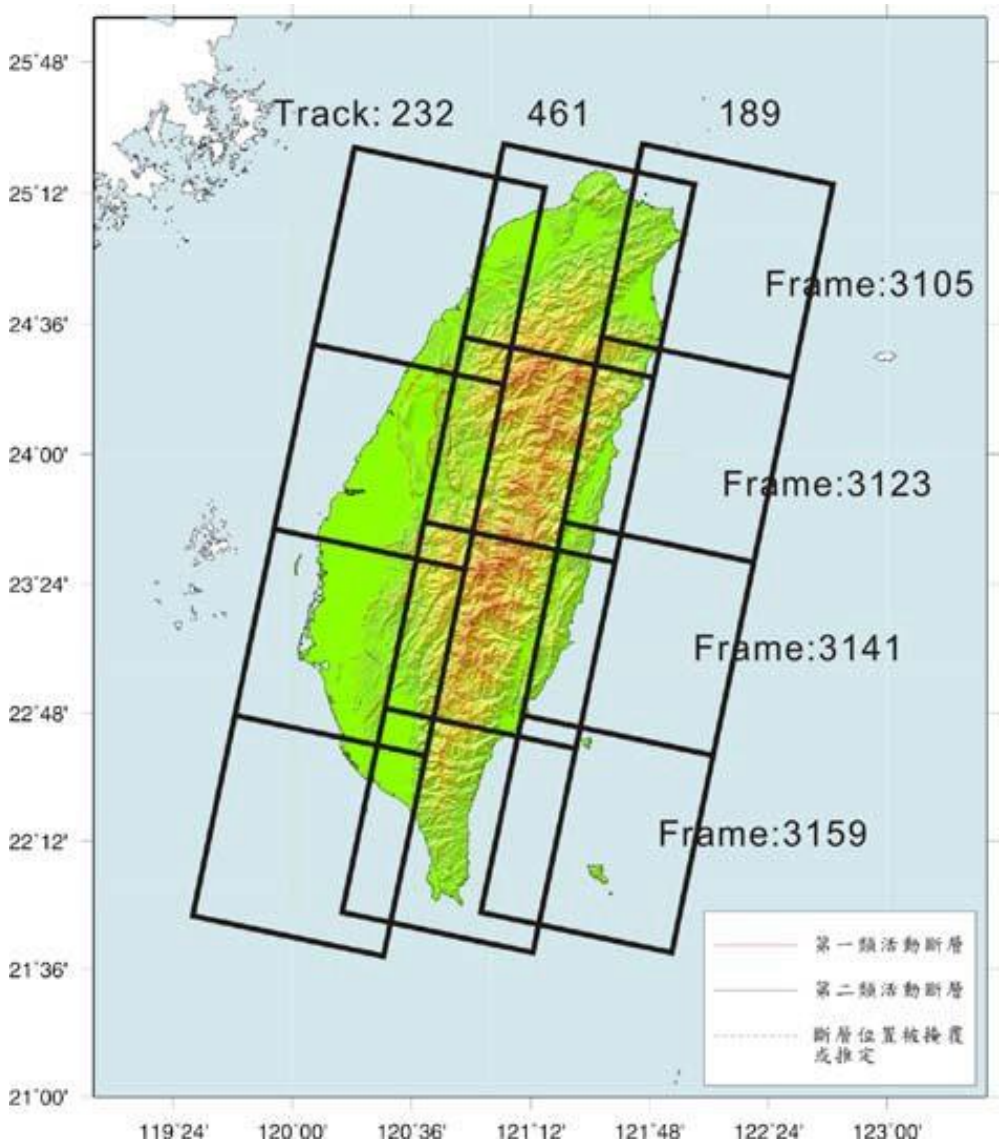


圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

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.

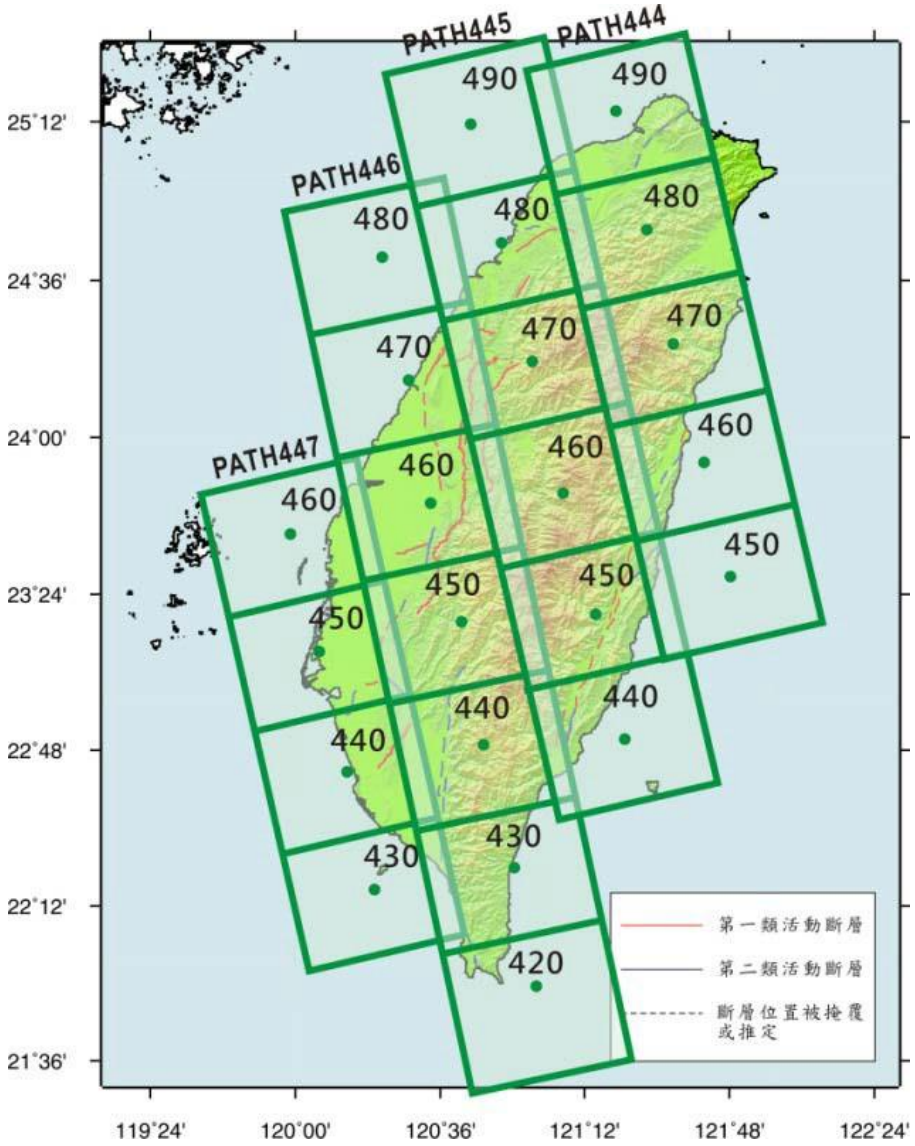


圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-1.3: Ascending tracks of ALOS satellite images.

本計畫之目標為，利用大地測量資料整合地質與地球物理測勘成果，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。因此，本計畫將致力於處理與整合 GNSS 連續站、GNSS 移動站及精密水準測量所獲得之觀測資料，透過坐標時間序列分析，獲取全臺之水平速度場及垂直速度場等觀測成果。進一步，本計畫將利用水平速度場推算應變速率，解析現今之地殼變形型態並產製地表變形強度分布圖；同時配合地質與地球物理測勘、數值模擬等資料，綜合評估主要斷層之斷層幾何參數最佳值與可信區間，並解析不同地質時間尺度下斷層滑移速率的變化及再現週期間的關係，產製斷層活動潛勢圖；最終再計算各斷層在發生可能最大地震規模時，計畫工作區域與各區域重要區域之景況地振動分布圖與景況同震位移圖，以此作為地質敏感區範圍繪製之參考依據，並提供各區域重要區域之防災規劃參考（圖 1-1.4）。又由於地表變形不僅會受到已知活動構造的影響，過去以為非活動之斷層或是深埋地下未發震的孕震構造，同樣會改變地表變形型態。因此在分析大地測量資料時，同時也需要針對盲斷層的位置與斷層幾何進行推測，此結果對於區域地震災害的評估亦有重要之貢獻。

本計畫預計以 2 年（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、景況地振動分布圖與景況同震位移圖。此外，針對上一期計畫「斷層活動性觀測研究第四階段」中，重要之活動斷層與具有重要重要區域之區域（表 1-1.2；圖 1-1.5），將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。

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

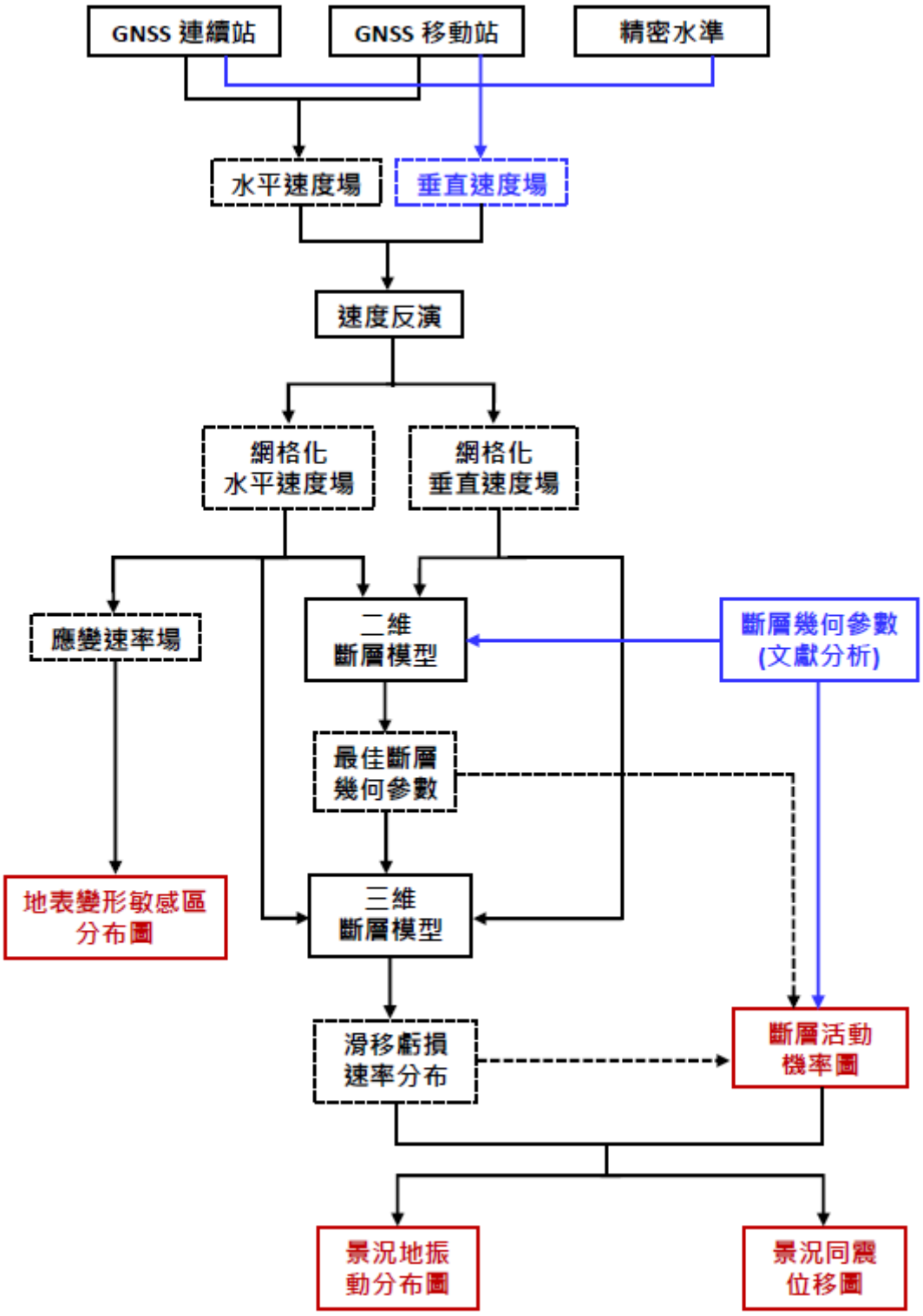


圖 1-1.4：計畫執行架構圖。
Figure 1-1.4: Framework of the project.

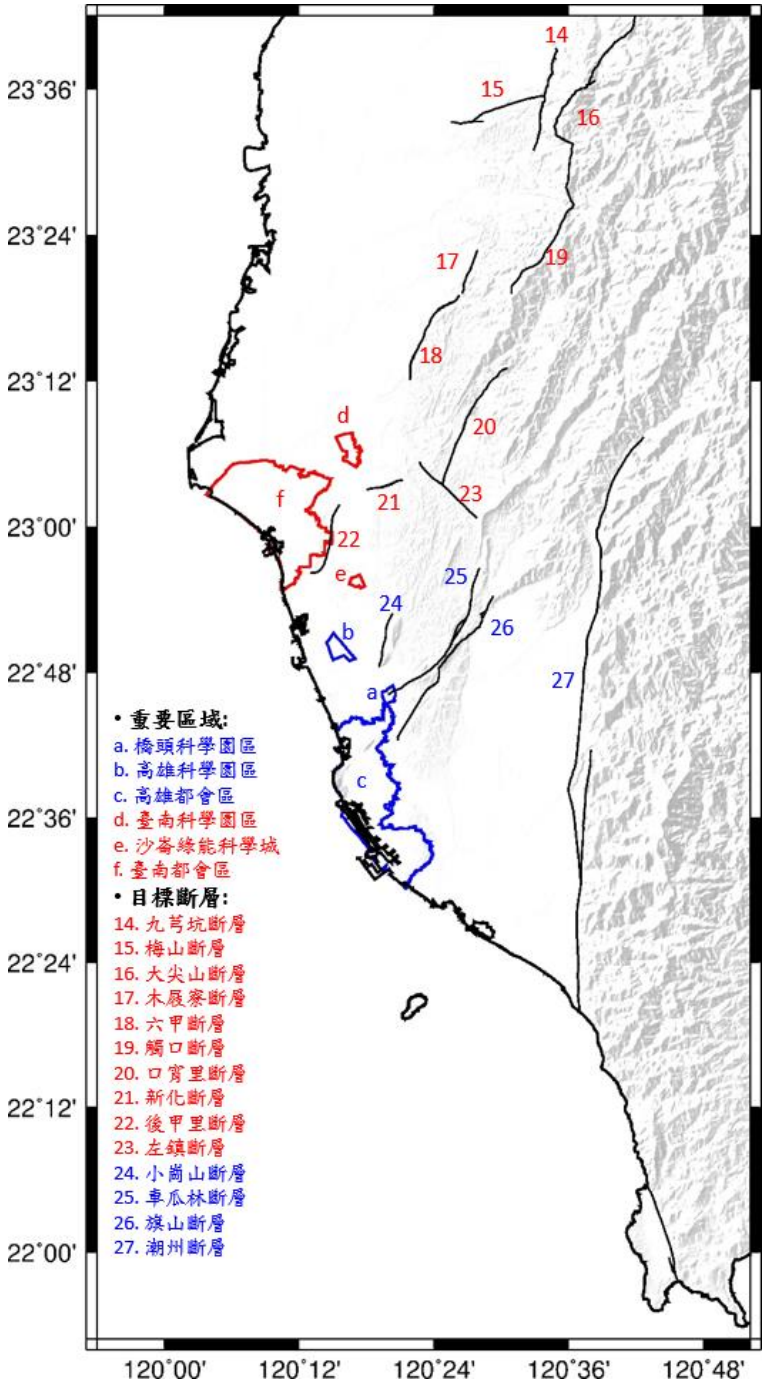


圖 1-1.5：110 年至 111 年分年目標重要區域。
Figure 1-1.5: Object area of 2021 and 2022.

執行策略上，除常規的大地測量資料檢核外，將於規劃的 2 年期程中，分別於南部與嘉南 2 個目標區域中，根據重要區域挑選主要的活動斷層或活動構造，整合最新之地質地物調查研究成果資料，利用大地測量成果與數值模擬方式來進行詳細之斷層活動性分析。並彙整此步驟之成果，以進一步推估地表變形強度分布、活動斷層潛勢、各斷層景況地振動分布圖與景況同震位移分布圖，作為地質敏感區範圍繪製之重要參考依據。

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振動分布範圍，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」之第二年，本年度之計畫分析目標，將著重於包含九芎坑斷層、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、口宵里斷層共 10 條活動斷層之臺灣南部地區，而本年度之重要區域則以臺南科學園區、沙崙綠能科學城與臺南都會區為主（表 1-1.2），其中，「新化斷層」與「後甲里斷層」是 2 條圍繞著本年度重要區域主要之活動斷層，因此本年度的計畫將著重於分析這 2 條斷層之斷層幾何參數與其活動性（表 1-1.2）。以下將概述這 2 條斷層之地質背景。

(1) 新化斷層

新化斷層為東北東走向之右移斷層，為 1946 年 12 月 5 日規模 6.3 的地震地表破裂（張麗旭等，1947）。該斷層位於新化丘陵西緣，地表破裂長度約 6 公里，東起那拔林，西至北勢附近。Bonilla（1977）認為 1946 年新化地震在現今新化斷層地表破裂之西南延伸方向，尚有約 6 公里的雁行排列破隙與撓曲現象，並有少許垂直方向的變位量，因此研判新化斷層的長度可能超過 12 公里。

根據中央地質調查所之野外調查，並未發現新化斷層的露頭，僅於新化畜產試驗所內發現 2 組雁行排列的裂隙。但林啟文等（2007）彙整 Wang et al.（1994）、邱朝聰（1997）、石瑞銓等（1998；2002）及黃勝群（2004）等之淺層震測資料分析結果指出，新化斷層淺部為寬廣的剪切帶，剪切帶內岩層被高角度不連續面截切，呈開花狀構造（圖 1-3.1），該開花狀構造於斷層東段部分不連續帶向下收斂的現象較明顯，於斷層西段往西逐漸消失，因此新化斷層被推估為高角度走向滑移斷層。此外，依 1900 – 2015 年地震深度分布剖面指出（圖 1-3.2），背景地震分布集中於 12 – 15 公里的深度附近。故前一期之計畫中，本團隊推估新化斷層之傾角依走向滑移常見之傾角 80°，若參考背景地震發震深度，則斷層深度則可能為 0.0 – 12.5 km。然而，由於新化斷層並未出露地表，鑽井時也並未鑽遇主斷層，僅可觀察到泥質岩層中有較密集的剪裂面存在，及小型斷層截切岩層。是以新化斷層之斷層幾何型態仍存有許多爭議。

關於新化斷層近期之活動性，首先新化斷層有多次古地震事件之紀錄（李錫堤等，2000；陳文山等，2002；2004），除最近的 1946 年新化地震之外，前一次約發生於 1,200 年前至 1,900 年前之間，而在 1,900 年前至 10,000 年前之間（距

今 9,095±451 年）至少有另 1 次古地震事件（陳文山等，2002；2004），保守估計在 10,000 年內至少有 3－4 次古地震事件。根據饒瑞鈞（2003）之分析，指出新化斷層應為右移斷層，其長期平均測地滑移速率約 2.5 mm/yr（中央地質調查所，2019）

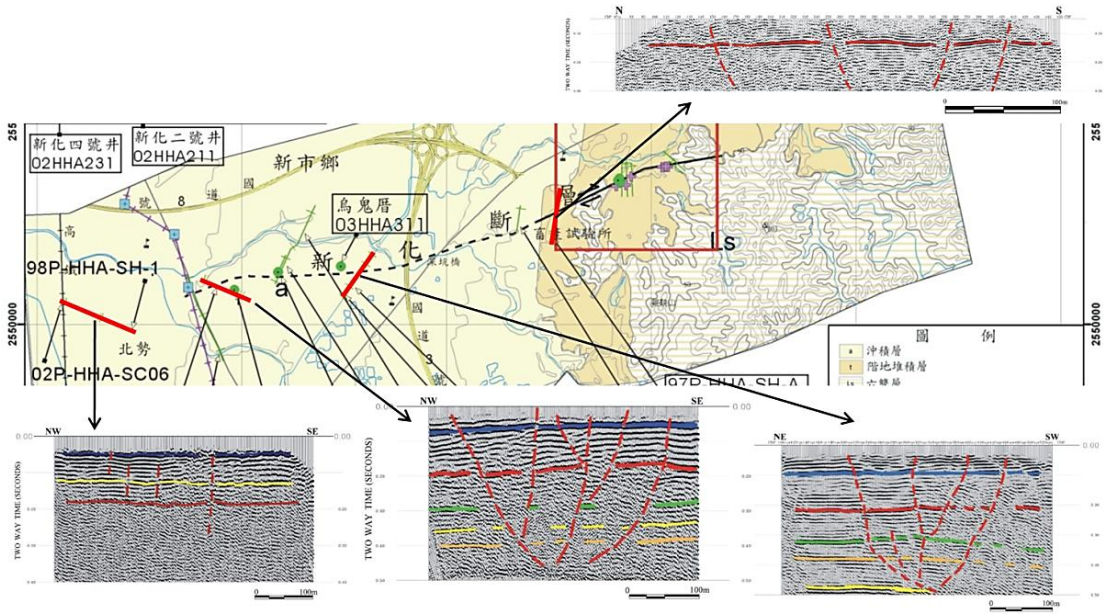


圖 1-3.1：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。

Figure 1-3.1: Seismic profile of Hsinhua Fault.

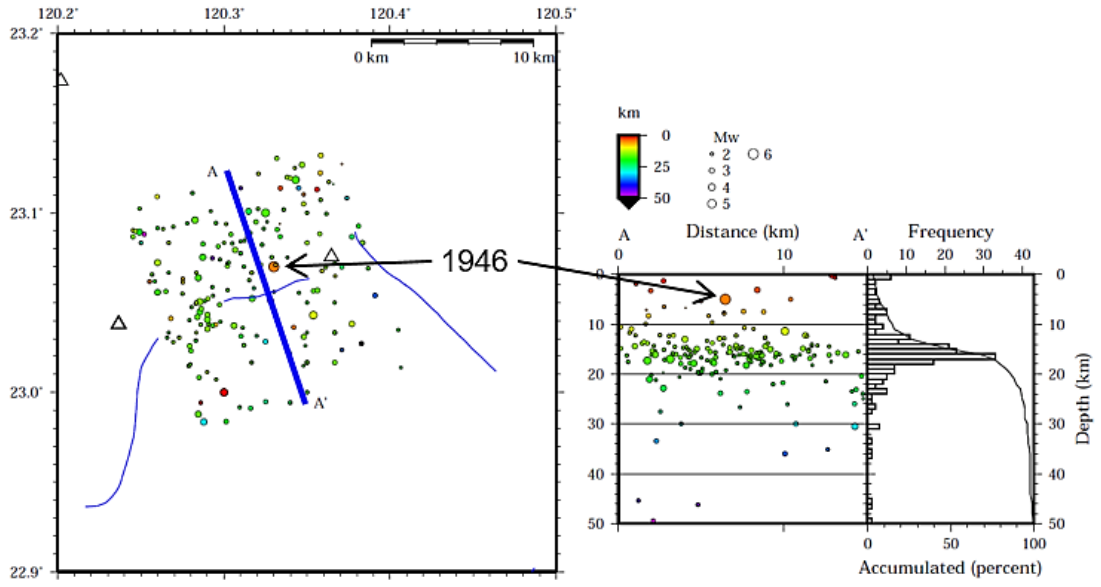


圖 1-3.2：1900~2015 年新化斷層地震分布及深度分布剖面。

Fig 1-3.2: Earthquake distribution in Hsinhua Fault, 1900~2015.

(2) 後甲里斷層

後甲里斷層為長約 12 公里呈南北走向的活動斷層，由臺南市永康區附近向南延伸至虎山，可能為臺南台地東緣線地形崖形成之主因（林朝棨，1957；Sun，1964）。林朝棨（1963）根據台地東緣之東傾 15°－30°線狀崖推測後甲里斷層為一高角度傾斜之正斷層；然而 Sun（1964）依航照圖則發現該 30 m 高之斷層崖，遭另一侵蝕平台所隔，故推斷其應為西傾逆衝斷層。根據臺南台地的槽溝開挖結果，雖可見到多組不同方向的小型斷層，但皆未發現後甲里斷層出露或截切全新世臺南層的證據，亦未挖到後甲里斷層的主斷層帶（陳文山等，2003；2006）。但中央地質調查所而後於此斷層所進行之地質鑽探綜合分析中，發現北側之玉天宮井岩芯中沒有剪切變形現象，且岩層傾角約呈水平；中段之文小六井在深 20－136 公尺的砂岩層中發育密集的小型斷層，呈逆移形式，而其下則無擾動現象推測已達斷層下盤；中南段之虎山 1 號井在井深 50 公尺以下，岩層傾角由緩變陡重覆出現，且全口岩芯中都有小型斷層與斷層擦痕，至井底 250 公尺處剪切現象並未結束，研判應位於斷層上盤。虎山 2 號井在井深 60－90 公尺之間，岩層傾角由緩變陡並有剪切變形現象；90 公尺後，岩層傾角轉為呈水平，且無剪切變形現象；研判井深 90 公尺後已進入斷層下盤。因此，由目前資料研判臺南台地東緣的後甲里斷層可能存在。且依據虎山 1 號井、2 號井剪切變形帶的深度分布，故推斷後甲里斷層為一向西傾斜的逆移斷層，斷層的傾角大於 35 度（林燕慧，2004；林啟文等，2007）。然而，由於後甲里斷層並未截穿至地表，故研判其為盲斷層。針對後甲里斷層之滑移行為，多數研究認為後甲里斷層應為西傾之逆衝斷層，並帶有右移分量（饒瑞鈞等，2003，2005；Huang et al.，2006），而根據中央地質調查所針對南部地區所進行之斷層活動性觀測研究，後甲里斷層之測地長期平均滑移速率約 7.6 mm/yr（中央地質調查所，2019）。

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)景況地振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，推估景況地振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 1-3.3），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 1-3.3；圖 1-3.4）。

2. GNSS 連續站資料處理、解算與分析

處理地調所設置及與其它單位交換之 GNSS 連續站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場。

3. GNSS 移動站及精密水準測量成果解算分析

完成全臺 GNSS 移動站與精密水準資料之時序分析，由連續 GNSS 坐標時間序列判斷地震同震變形、震後變形及其他擾動所造成地表變形之時間，確認各時期之 GNSS 移動站速度場及精密水準測量是否受相同影響，提供全臺不同時期之加密水平與垂直速度場。

4. 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。

5. 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、景況地振動分布與景況同震位移場推求工作所需。

6. 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，可能之景況地振動分布範圍。

(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 移動站施測與檢測時間表

Table 1-3.1: GNSS surveying and validation schedule for campaign-mode GNSS sites

地區	施測月份	檢核月份
臺北	3 月	3 月
恆春	4 月	4 月
花東	4 月	4 月
桃竹苗	5 月	6 月
嘉南	6 月	7 月
花東-0620 地震	7 月	7 月
高屏	7 月	7 月
中部	8 月	9 月
花東-0918 地震	10 月	10 月

註：花東地區因 3 月 23 日玉里地震，更改至 4 月份量測。
花東地區因 6 月 20 日瑞穗地震，進行花東地區北段第二次量測。
花東地區因 9 月 17.18 日關山、池上地震，進行花東地區中南段第二次量測。

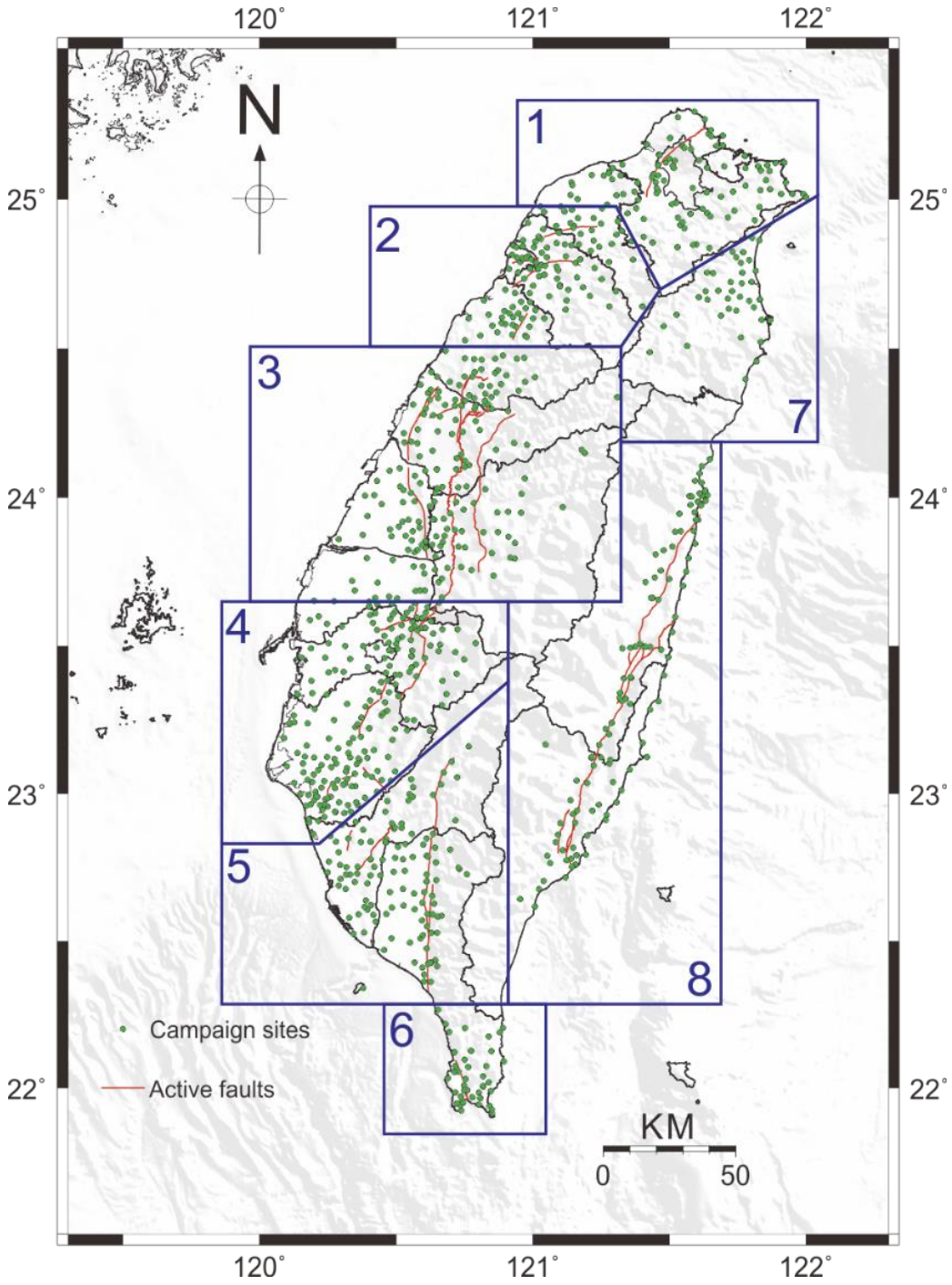


圖 1-3.3：GNSS 移動站觀測分區圖。綠色圓圈為移動站之坐標；藍色框為移動站分區。
Figure 1-3.3: Distribution and sections of campaign mode GNSS stations. Green circles are campaign mode GNSS stations; blue rectangles are sections.

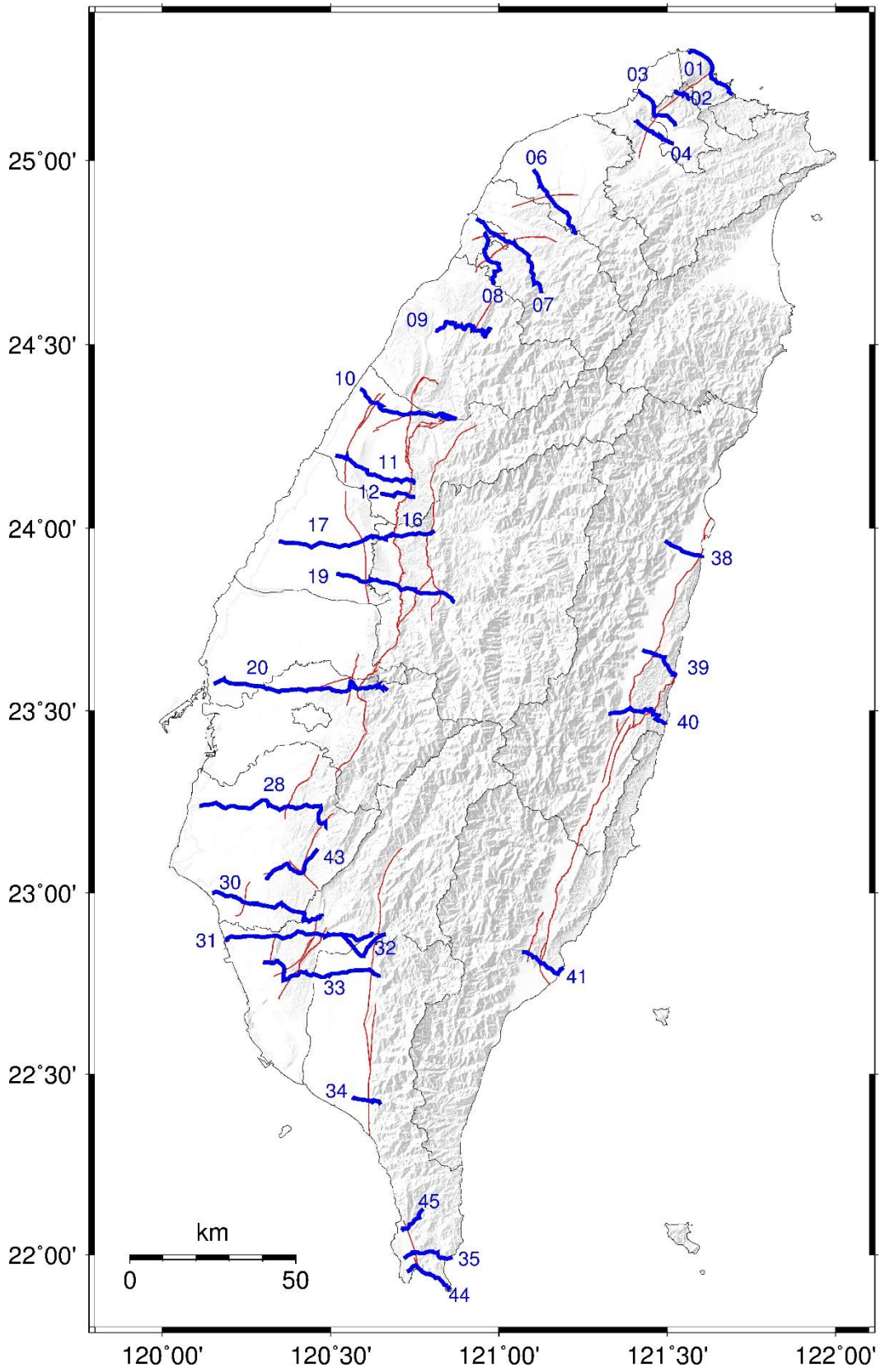


圖 1-3.4：精密水準測量測線分布圖。
Figure 1-3.4: Distribution of leveling lines.

表 1-3.2：精密水準測量施測時間表

Table 1-3.2: Surveying schedule of precise leveling

測線編號	測線名稱	測線長度（km）		施測時間
		山區	平地	
1	石門-萬里測線	0	24	9 月
2	士林-三芝測線	8	2	9 月
3	淡水-士林測線	3	18	9 月
4	五股-臺北測線	1	18	9 月
6	新屋-童話世界測線	11	21	7 月
7	新竹-五峰測線	3	39	6 月
8	新竹-峨眉測線	6	22	6 月
9	苗栗-南庄測線	27	16	8 月
10	大安-東勢測線	5	40	3 月
11	龍井-太平測線	7	29	7 月
16	草屯-埔里測線	0	16	3 月
17	王功-草屯測線	6	42	3 月
19	北斗-水里測線	5	41	3 月
20	金湖-瑞峰測線	38	53	9 月
28	北門-楠西測線	9	52	4 月
30	安平-龍崎測線	6	46	5 月
31	路竹-茂林主線	8	48	2 月
32	路竹-茂林副線	2	20	2 月
33	岡山-安坡測線	3	50	5 月
34	佳冬-七佳測線	5	7	9 月
35	恆春西台地-佳樂水	3	17	4 月
38	嶺頂-龍澗測線	0	15	4 月
39	光復-豐濱測線	8	14	4 月、7 月
40	紅葉-靜浦測線	16	17	3 月、10 月
41	東成-富岡測線	10	14	3 月、10 月
43	玉井-新化測線	1	24	5 月
44	南樹林-鵝鑾鼻測線	2	17	4 月
45	車城-牡丹測線	0	13	4 月

註：因 0620 瑞穗地震，7 月再測光復-豐濱測線；

因 0918 關山、池上地震，10 月再測紅葉-靜浦及東成-富岡測線。

第二章、嘉南地區之三維速度場

2-1 測量資料來源與說明

本年度以嘉南地區為目標，嘉南地區之重要區域範圍涵蓋臺南科學園區、沙崙綠能科學城、臺南都會區。嘉南地區之速度場為藉由分析 GNSS 連續站、GNSS 移動站及精密水準測量至 2022 年 10 月之資料而得，相關資料處理及分析描述於第八章。而因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震對臺灣西南部有顯著之地表變形影響，如 GS44（六甲國小湖東分校）之時間序列所示（圖 2-2.1：GNSS 連續站 GS44 時間序列圖。），因此本研究將嘉南地區之速度場區分為 2002–2010 年、2010–2016 年以及 2016–2022 年三個時間段分別估算速度場。

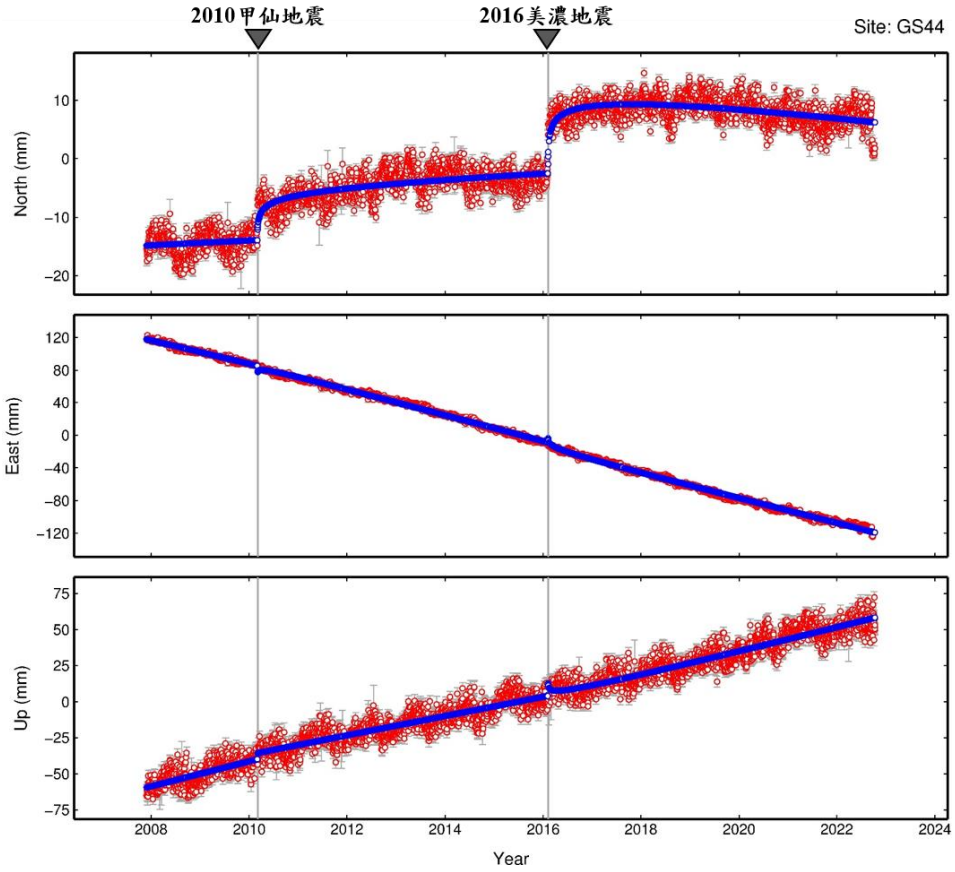


圖 2-2.1：GNSS 連續站 GS44 時間序列圖。
Figure 2-2.1: Time series of GS44.

2-2 三維速度場

嘉南地區之水平速度場如圖 2-2.3 所示，於跨斷層處有顯著的速度差，於第三章即利用嘉南地區之水平速度場資料進行此區域之應變速率場分析。本年度之重要區域範圍涵蓋臺南科學園區、沙崙綠能科學城、臺南都會區，此些區域並無活動斷層經過，因此於重要區域之速度場如圖 2-2.4 至圖 2-2.6 中，並無見到於此些區域內有顯著之速度差異，然鄰近斷層如活動，於此些區域之影響將最為直接，因此於第七張景況地振動與景況同震位移分布中，以鄰近今年度重要區域之口宵里斷層、新化斷層及後甲里斷層進行分析，藉以推估斷層活動對重要區域之影響。以下針對重要區域之三維速度場進行描述：

1. 臺南科學園區範圍東側 1 公里內有善化至關廟水準測線，於三個時間段皆以抬升為主（圖 2-2.4），但是範圍內之 GNSS 移動站於 2002-2010 年主要呈現沉陷，2010-2016 年轉為抬升，2016 年後再轉為沉陷，此區域垂直變動量值約 5 mm 以內。水平速度場顯示整體區域的速度值約為 10 mm/yr 往西偏南運動。已於今年度新設 GNSS 移動站測點（圖 2-2.2）。
2. 沙崙綠能科學城已於今年度新設 GNSS 移動站測點（圖 2-2.2），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 15 至 20 mm/yr；垂直速度場主要呈現僅約 0.0 至 5.0 mm/yr 的抬升趨勢（圖 2-2.5）。
3. 臺南都會區範圍內之安平至龍崎測線於三個時間段皆由東邊抬升往西漸轉為沉陷，垂直速度場主要呈現僅-10 至 5.0 mm/yr（圖 2-2.6）。整體水平速度量場約為 5 至 15 mm/yr 往西運動。

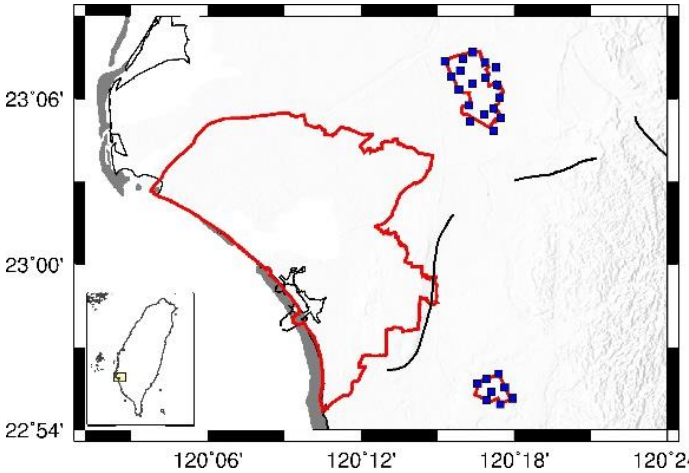


圖 2-2.2：臺南科學園區及沙崙綠能科學城新設 GNSS 移動站點位。藍色圓點表示為新設點位。
Figure 2-2.2: The new campaign GNSS distribution in Tainan Science Park and Shalun Smart Green Energy Science City, 2022. Blue circles are the campaign GNSS.

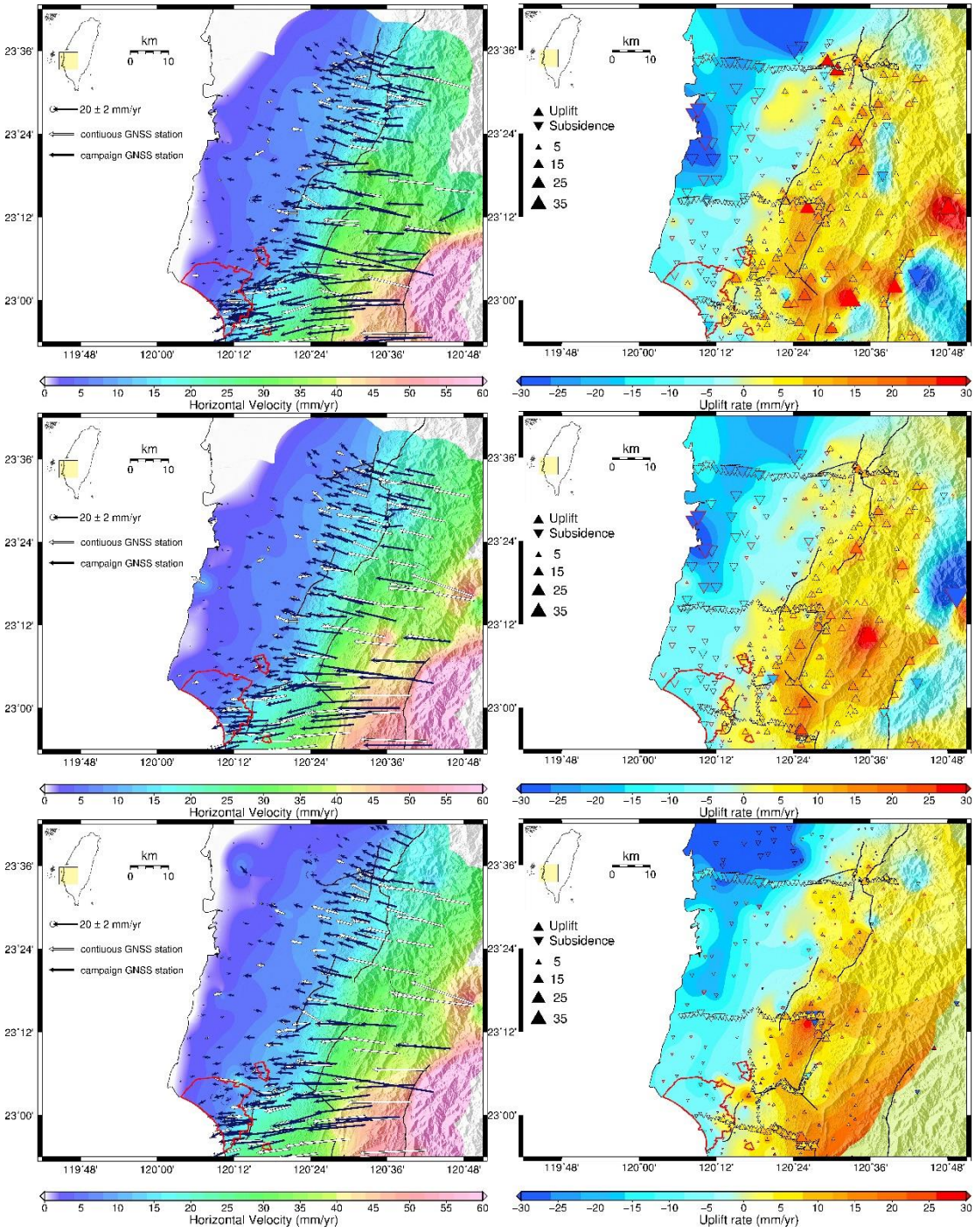


圖 2-2.3：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 三維速度場。上圖表示甲仙地震震前 2002~2010 年速度場，中圖表示甲仙地震震後 2010~2016 年速度場，下圖表示美濃地震震後 2016~2022 年速度場；左圖水平速度場，又圖為垂直速度場；白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站；抬升以三角形及暖色系表示；沉降以倒三角形及冷色系表示。

Figure 2-2.3: Chiayi and Tainan velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figures are the velocity field from 2002~2010；the middle figures are from 2010~2016；the bottom figures are from 2016~2022；the left figures are the horizontal velocity；the right figures are the vertical velocity.

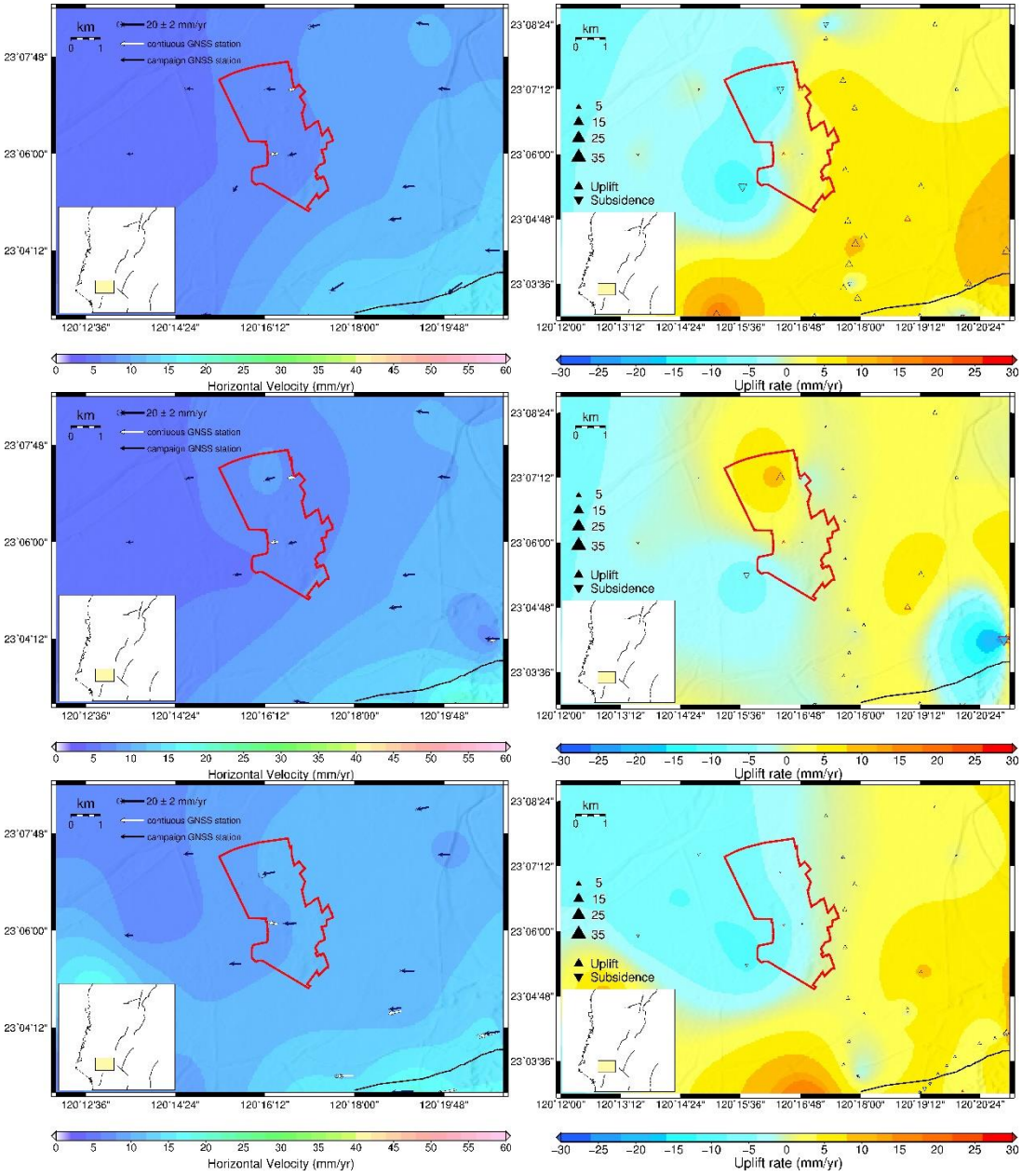


圖 2-2.4：嘉南地區臺南科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。上圖表示甲仙地震震前 2002~2010 年速度場，中圖表示甲仙地震震後 2010~2016 年速度場，下圖表示美濃地震震後 2016~2022 年速度場；左圖水平速度場，又圖為垂直速度場；白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站；抬升以三角形及暖色系表示；沉降以倒三角形及冷色系表示。

Figure 2-2.4: Tainan Science Park GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figures are the velocity field from 2002~2010；the middle figures are from 2010~2016；the bottom figures are from 2016~2022；the left figures are the horizontal velocity；the right figures are the vertical velocity.

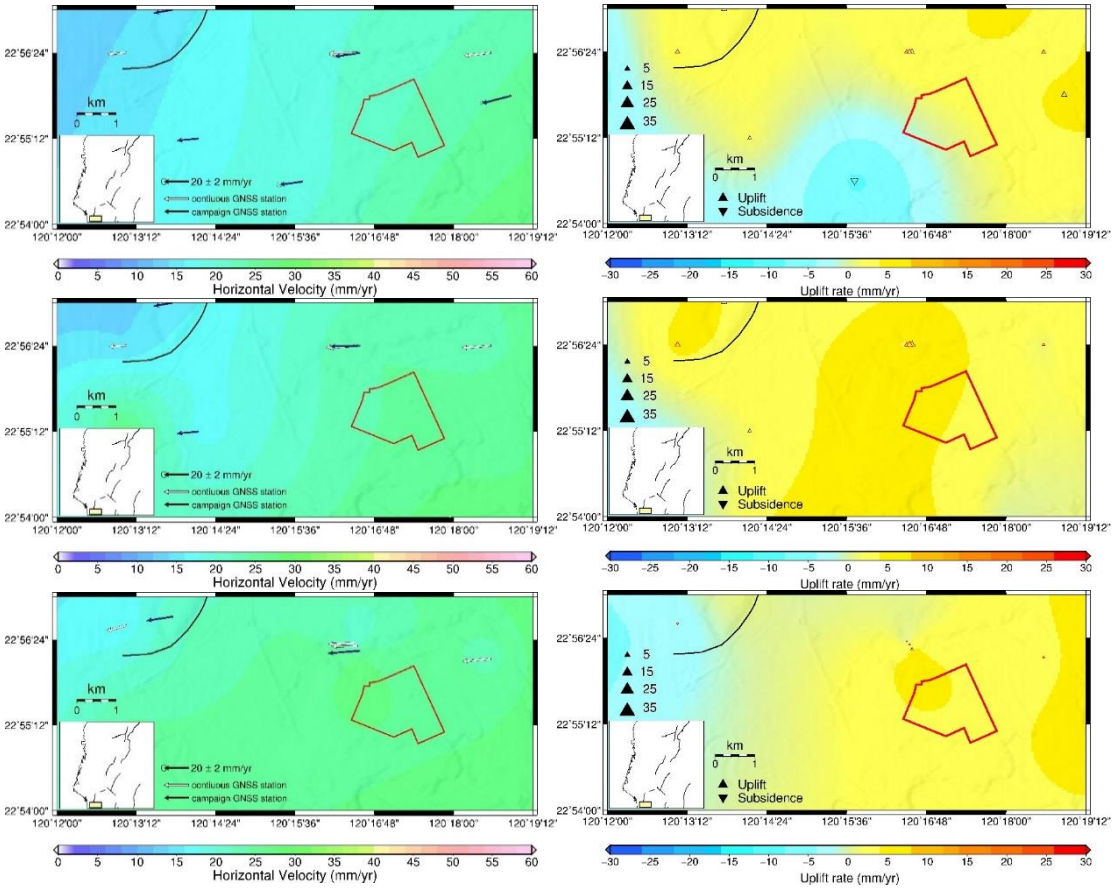


圖 2-2.5：嘉南地區沙崙綠能科學城相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。上圖表示甲仙地震震前 2002~2010 年速度場，中圖表示甲仙地震震後 2010~2016 年速度場，下圖表示美濃地震震後 2016~2022 年速度場；左圖水平速度場，又圖為垂直速度場；白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站；抬升以三角形及暖色系表示；沉降以倒三角形及冷色系表示。

Figure 2-2.5: Shalun Smart Green Energy Science City GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figures are the velocity field from 2002~2010；the middle figures are from 2010~2016；the bottom figures are from 2016~2022；the left figures are the horizontal velocity；the right figures are the vertical velocity.

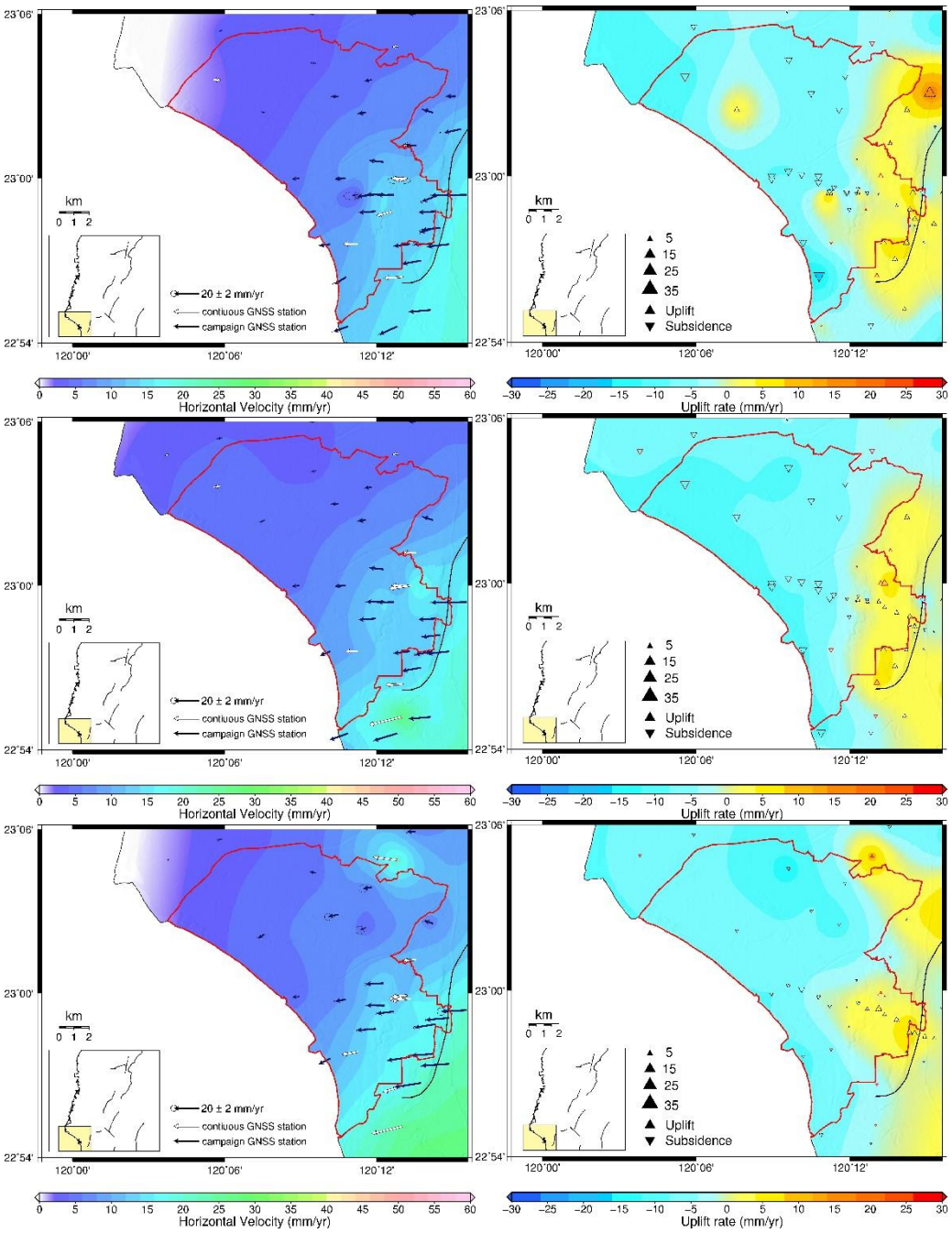


圖 2-2.6：嘉南地區臺南都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。上圖表示甲仙地震震前 2002~2010 年速度場，中圖表示甲仙地震震後 2010~2016 年速度場，下圖表示美濃地震震後 2016~2022 年速度場；左圖水平速度場，又圖為垂直速度場；白色箭頭為連續站，藍色箭頭為移動站；抬升以三角形及暖色系表示；沉降以倒三角形及冷色系表示。

Figure 2-2.6:Tainan City GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figures are the velocity field from 2002~2010；the middle figures are from 2010~2016；the bottom figures are from 2016~2022；the left figures are the horizontal velocity；the right figures are the vertical velocity.

第三章、嘉南地區應變速率場及地表變形強度之計算與繪製

3-1 應變速率場計算

地表速度場及應變速率場之空間變化皆可以反映斷層活動的特徵，協助我們判定斷層之位置、種類及特徵，並闡明其活動特性。而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，可以藉由水平速度場的分析得知；正斷層之活動，可以藉由地表沉降及水平速度場之伸張特徵進行判釋；而水平速度場之縮短應變及高程抬升，則可解讀為逆斷層之活動。因此，分析重複觀測之 GNSS 及水準資料，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，會因為參考框架的選擇不同而有所變化；相對地，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形態變化獨立於不同參考框架的選擇。因此，利用應變速率於空間中分布的特性，可以有效地協助本計畫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，普遍採用 Shen et al.（1996）提出之方法，直接由水平速度場求得地表應變速率場。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，本團隊嘗試透過速度反演法（velocity inversion）取得網格化速度場，隨後才藉由 Shen et al.（1996）提出之方法計算地表應變速率場。

3-1-1 速度反演法與反演成果

本計畫之主要目的為評估重要活動斷層之斷層活動特性與重要區域之斷層活動災害潛勢，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。故本計畫先提出透過速度反演法整合 GNSS、精密水準與 InSAR 成果，並推求連續性之

速度場與應變速率場之方法，以便後續可獲得 InSAR 成果時，可以立即進行如 GNSS、精密水準測量以及 InSAR 等各大地測量資料之分析。

首先，為了整合不同大地觀測資料，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 3-1.1），以節點 1 為例：

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

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：

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

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：

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

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）。

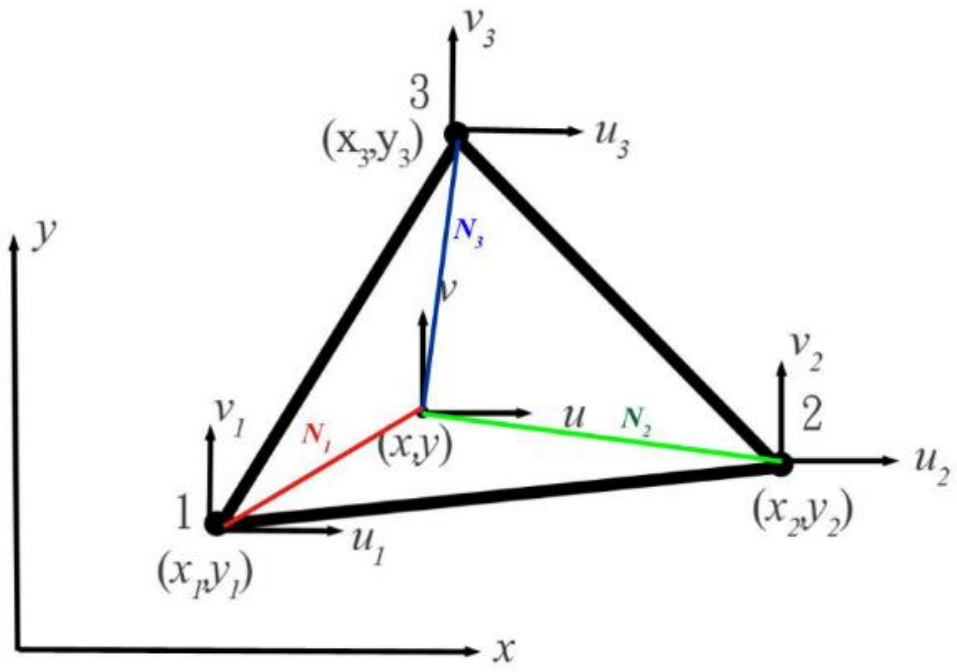


圖 3-1.1：觀測點與網格三頂點示意圖。

Figure 3-1.1: Relationship between observations and the interpolation points of triangle.

本次報告中，先採用 GNSS 連續站及移動站進行速度反演，首先，為使網格分布範圍涵蓋臺南都會區、臺南科學園區、沙崙綠能科學園區諸重要區域，本團隊設定為邊界東經 119.90°至 120.88°及北緯 22.90°至 23.70°間，而由於應變計算是採相鄰格點之速度梯度進行計算，故本團隊於設計網格時，先將範圍往外略加延伸，並進行了格點間距之測試，以確保經此方法所計算之連續性水平速度場整體趨勢與觀測值相符，且後續之應變計算成果是合理可靠的。本團隊於期中時，分別計算了 0.020°、0.030°及 0.045°為格點間距之網格化速度場。根據計算成果（圖 3-1.2b 至圖 3-1.2d），間距為 0.020°之成果雖增加了速度場之密度與連續性，但研究區域西南角，車瓜林及旗山斷層西側之速度場主要朝西，與該區整體朝西南偏轉之趨勢不甚相符（圖 3-1.2a；圖 3-1.2b）；若將間距提高至 0.030°，可看出西南部之計算結果，不論是數值大小或方向皆與 GNSS 水平速度場較相符（圖 3-1.2a；圖 3-1.2c），且網格速度之資料密度仍非常充足，此外，0.030°與實際測站之分布密度差異不至於太大，可獲得較可靠之格點速度值；若再將格點間距提高至 0.045°，則可發現重要區域東北側有數個格點速度與相鄰計算結果相比，數值與方向上皆有較大之差異，該問題可能與格點間距太大，計算時所選取的資料有所偏頗所導致。故最終本計畫選擇以格點間距為 0.030°之計算成果來進行後續之應變計算。

由間隔為 0.030°之網格化速度場可看出（圖 3-1.4），雖僅納入 GNSS 資料而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。由於速度反演之方法是先透過測站分布與地形建置合理之網格後，再反演不同地表變形資料，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，以利本年度重要區域之速度場在空間上呈現更加連續性之分布，並使後續應變計算成果之區域特性更加合理。。而根據本團隊分別測試了 gamma smmoth 值為 -0.5、-0.1、-1.5 之成果（圖 3-1.3 b 至圖 3-1.3 d），發現 gamma smmoth 值為 -0.5 時，七股區沿海區域之網格化速

度場與實際速度場方向有所偏差（圖 3-1.3 b）；若調整為 -1.0，可發現整體網格速度場與實際觀測量之型態極為相近，且幾乎沒有任何一個網格速度值出現方向或量值上突然之偏轉或偏差（圖 3-1.3c）；然而，再進一步調整至-1.5 時，則可發現計畫區域西南側出現較顯著往西南之偏轉，東北角區域更出現方向及量值明顯偏差之網點速度值，顯示此平滑化程度並不合理（圖 3-1.3d）。因此，本團隊最終選擇 gamma smmoth 值為 -1.0 之平滑化成果作為後續應變計算之速度場（圖 3-1.4）。

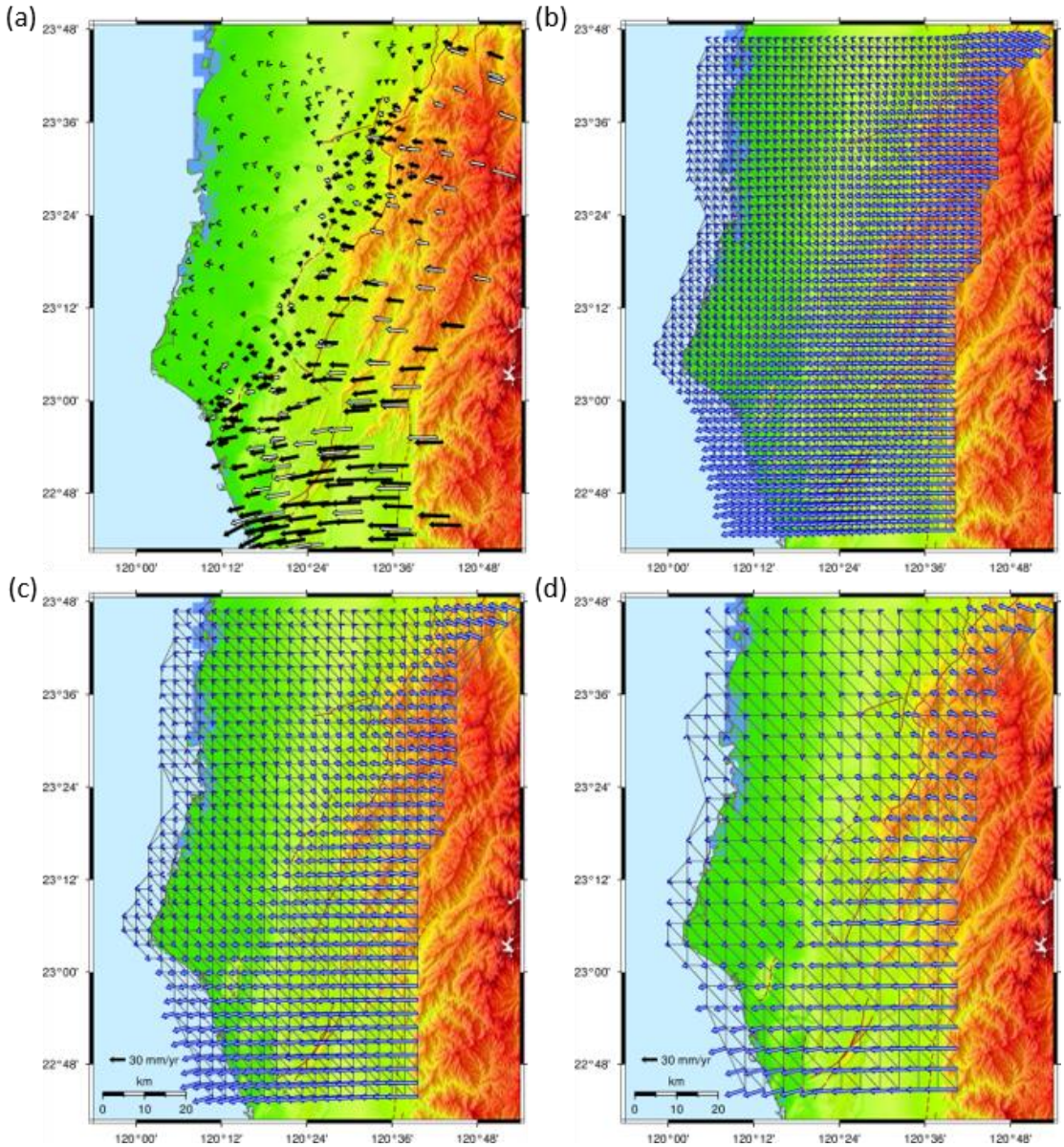


圖 3-1.2：重要區域水平速度場速度反演格點測試。(a) 原始 GNSS 水平速度場；(b) 格點間距 0.020°之測試成果；(c) 格點間距 0.030°之測試成果；(d) 格點間距 0.045°之測試成果。黑色箭頭為 GNSS 移動站水平速度場，白色為 GNSS 連續站水平速度場，藍色為經速度反演所計算之網格速度場測試成果。

Figure 3-1.2: Grid velocities derived using velocity inversion. (a) GNSS horizontal velocity field; (b) Velocity field with 0.020° grid interval; (c) Velocity field with 0.030° grid interval; (d) Velocity field with 0.045° grid interval.

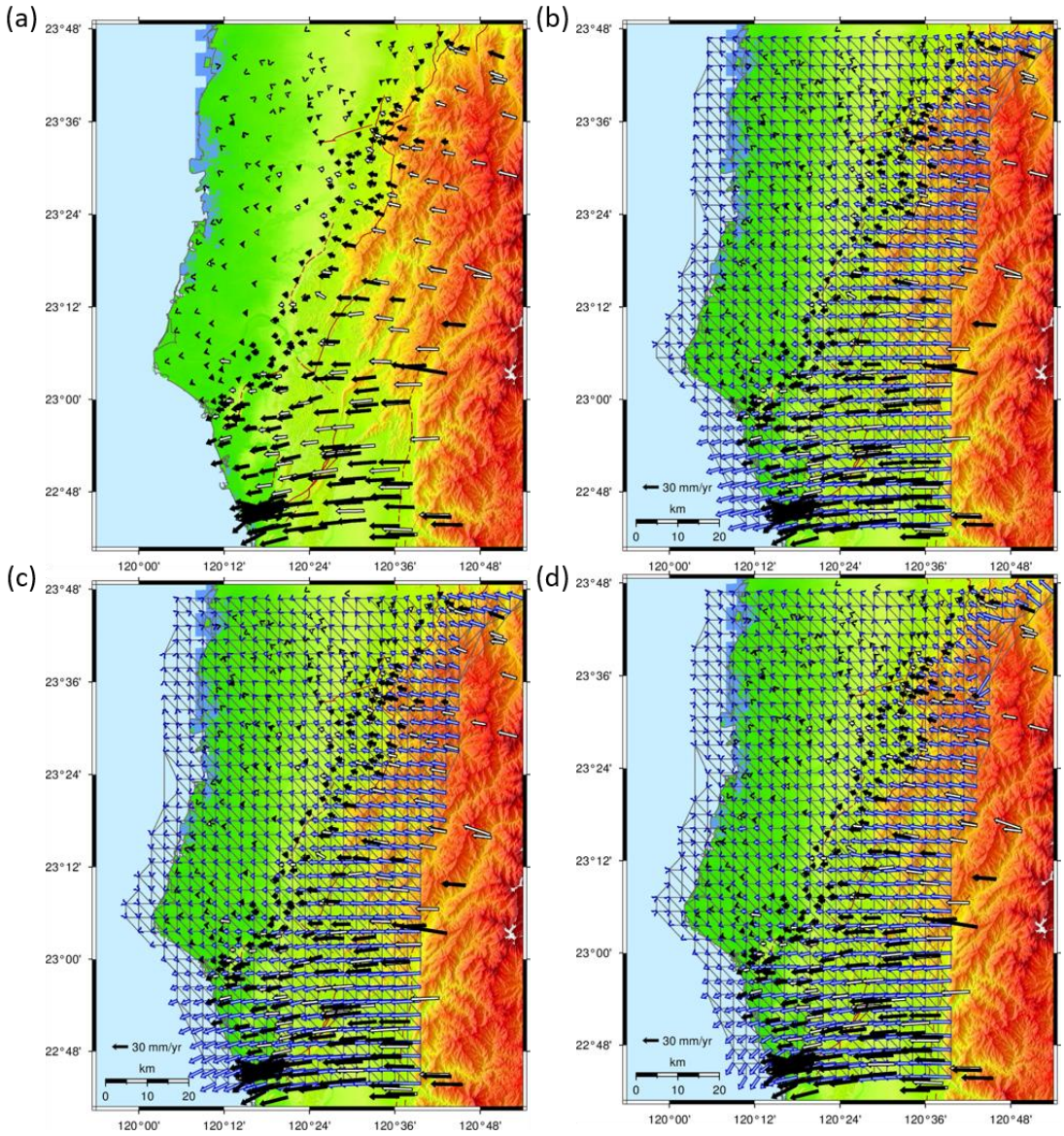


圖 3-1.3：重要區域水平速度場速度反演平滑化測試。(a) 原始 GNSS 水平速度場；(b) gamma smmoth 值為-0.5 之測試成果；(c) gamma smmoth 值為-1.0 之測試成果；(d) gamma smmoth 值為-1.5 之測試成果。黑色箭頭為 GNSS 移動站水平速度場，白色為 GNSS 連續站水平速度場，藍色為經速度反演所計算之網格速度場測試成果。

Figure 3-1.3: Grid velocities derived using velocity inversion. (a) GNSS horizontal velocity field; (b) Velocity field with gamma smmoth -0.5; (c) Velocity field with 0.030° gamma smmoth -1.0; (d) Velocity field with gamma smmoth -1.5.

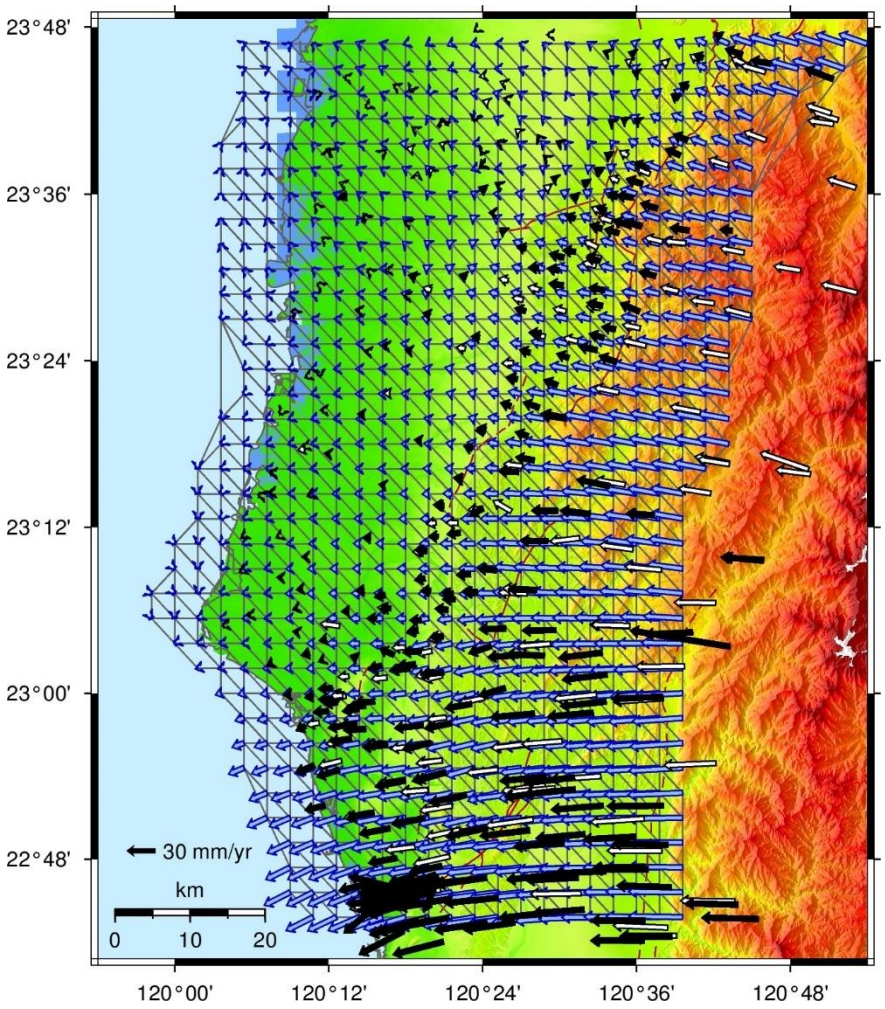


圖 3-1.4：速度反演之重要區域網格化連續性速度場。黑色箭頭為 GNSS 移動站水平速度場；白色為 GNSS 連續站水平速度場；藍色為經速度反演所計算之網格速度場。

Figure 3-1.4: Grid velocities derived using velocity inversion.

3-1-2 應變速率場計算與分析

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：

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(dL/dt)}{L} \qquad \text{（式 3-1.17）}$$

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：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta + \dot{\varepsilon}_{en}\sin\theta\cos\theta + \dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta \qquad \text{（式 3-1.18）}$$

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）。

本計畫在根據前節速度反演之方法獲得網格速度場後，後續的應變計算中，所採用之方法為 Shen et al.（1996）提出之方法，此方法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 3-1.19）

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：

$$E_{ij} = C_{ij} \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{\sigma_D^2}\right) \quad \text{（式 3-1.20）}$$

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。然本計畫採用之網格速度場，各格點間之距離是一致的，所以無須考慮距離產生之權重差異。

隨後，本計畫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：

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) + \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{（式 3-1.21）}$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) - \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{（式 3-1.22）}$$

$$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[2\dot{\varepsilon}_{en} / \left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right)\right] \quad \text{（式 3-1.23）}$$

$$\Delta = \dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn} \quad \text{（式 3-1.24）}$$

$$\Sigma = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2 / 4} \quad \text{（式 3-1.25）}$$

$$\psi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right) / 2\dot{\varepsilon}_{en}\right] \quad \text{（式 3-1.26）}$$

$$I_2 = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ee}^2 + \dot{\varepsilon}_{nn}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{en}^2} \quad \text{（式 3-1.27）}$$

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）。

根據速度反演後，再由前述之方法所計算而得之主應變速率場、剪應變速率場以及應變率強度分布可發現（圖 3-1.5 至圖 3-1.7），主應變速率場之壓縮量主要分布於本計畫重要區域之東北–西南沿線，且近斷層處尤為顯著。其中，最大壓縮量約 2.4 μstrain/yr 垂直於車瓜林斷層，分布範圍以車瓜林斷層西北側為主，並一路沿著活動斷層往東北方延伸至大尖山斷層及觸口斷層附近，其中九芎坑斷層及大尖山斷層間之壓縮量僅次於車瓜林區域約 1.6 μstrain/yr，而靠近臺南科學園區東側、新化斷層北側及口宵里西側區域之壓縮量同樣可達約 1.4 μstrain/yr。剪應變速率場部分，則同樣以車瓜林西北側之速率最大，其速率約 3.3 μstrain/yr 左右，並同樣沿著口宵里、六甲斷層等逐漸向北延伸遞降，至九坑斷層中北段復增至約 2.0 μshear/yr。此外，於臺南科學園區東側區域，口宵里斷層兩側之剪應變速率亦達約 2.1 μshear/yr。而應變率強度因反映的是主應變率與最大剪應變速率之總和，故其分布型態約等同於前兩者之綜合型態，同樣以車瓜林西側之應變率強度最高，並主要沿重要區域中之活動斷層呈現東北–西南對角線分布，分布範圍約由車瓜林斷層及後甲里斷層開始，至觸口斷層附近降至 1.0 μstrain/yr，隨後至九芎坑斷層開始才又增加至 1.5 μstrain /yr。而靠近臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區諸重要區域附近，則尤以後甲里斷層西南側、左鎮斷層兩側及口宵里兩側之應變率強度較高。

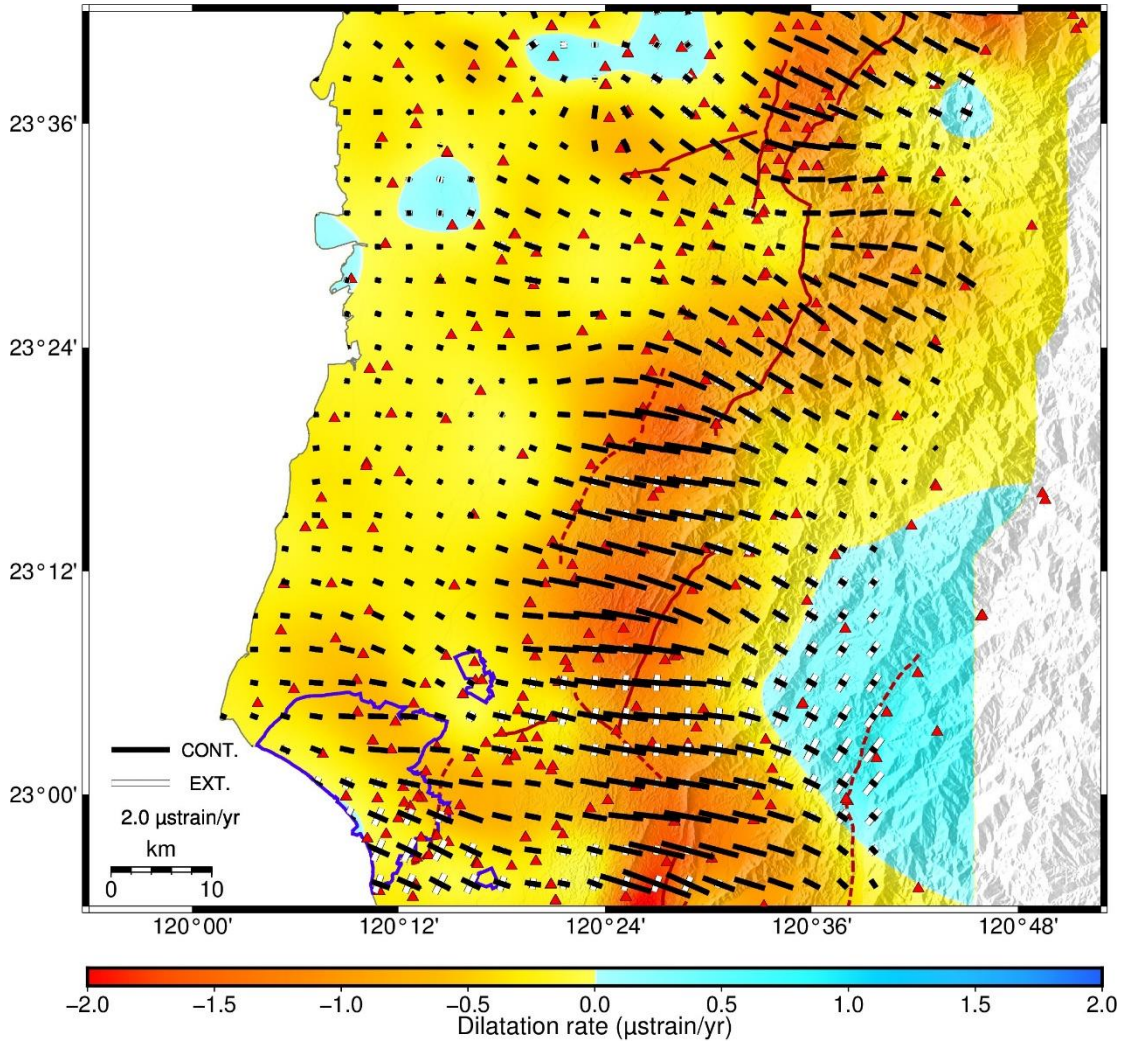


圖 3-1.5：重要區域最大主應變速率場。

Figure 3-1.5: Distribution of principal strain rates.

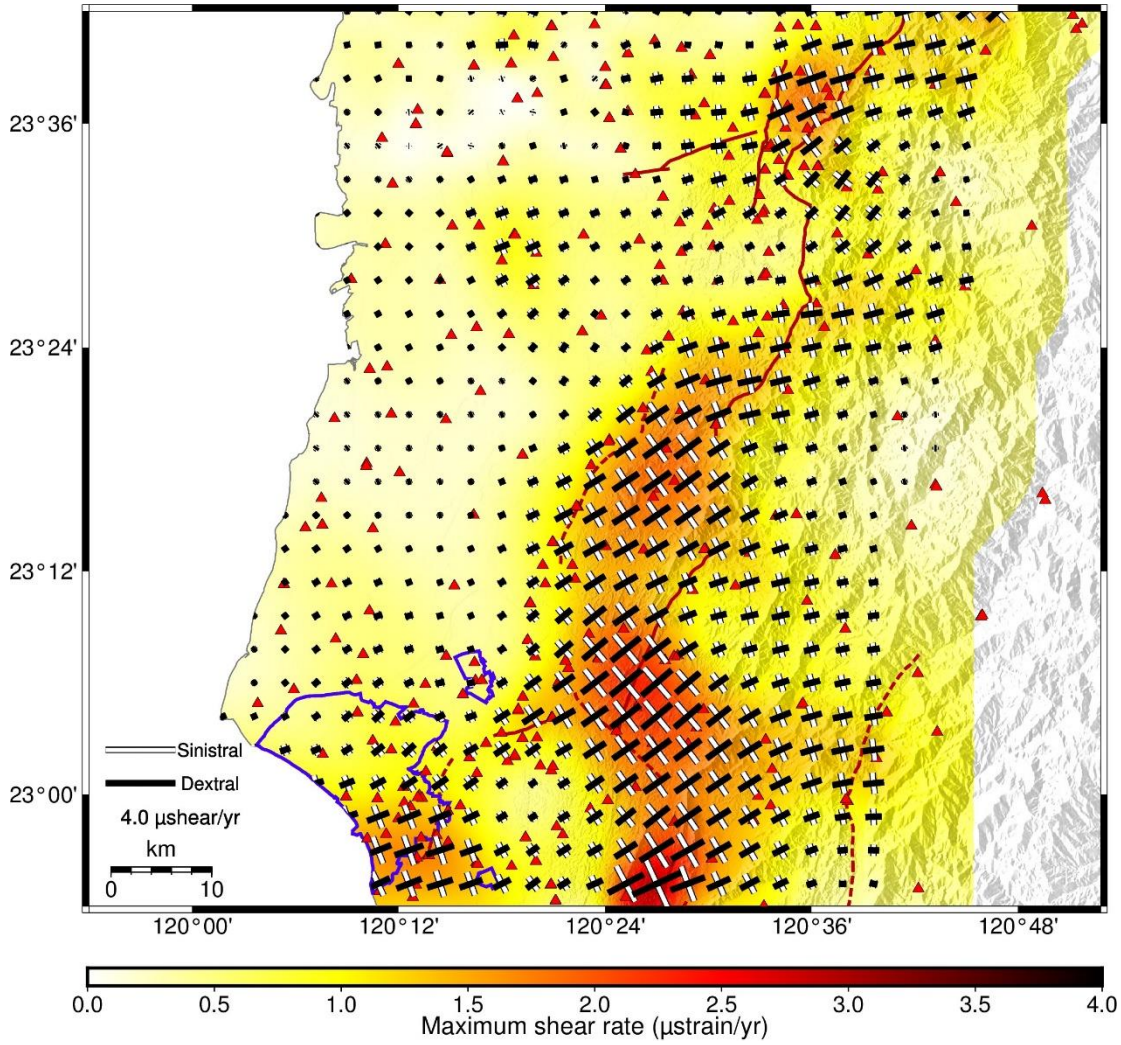


圖 3-1.6：重要區域最大剪應變速率場。

Figure 3-1.6: Distribution of maximum shear strain rates.

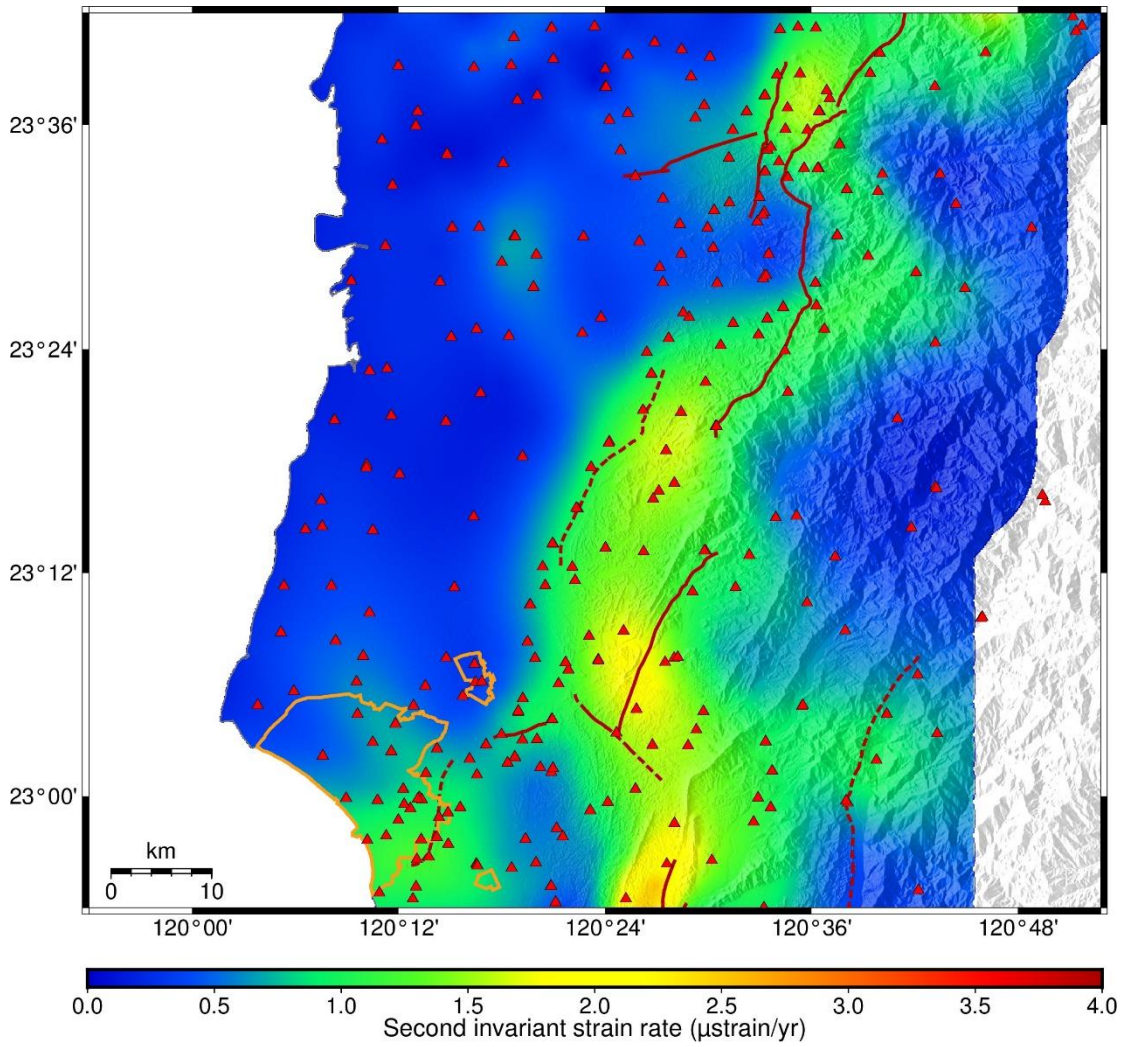


圖 3-1.7：重要區域應變速率強度分布圖。

Figure 3-1.7: Distribution of second invariant strain rates.

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次更新之版本，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 $\frac{0.65}{1000}$，臺北隧道段結構則為 $\frac{1.3}{1000}$。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

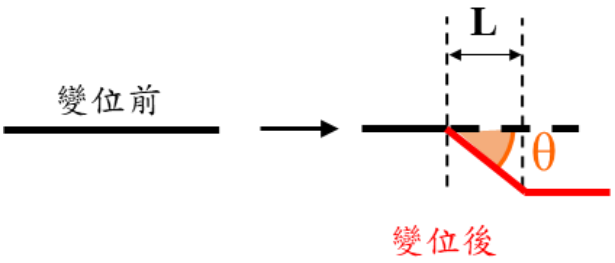


圖 3-2.1：橋面平行移動之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

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 ($\frac{1}{1000}$).

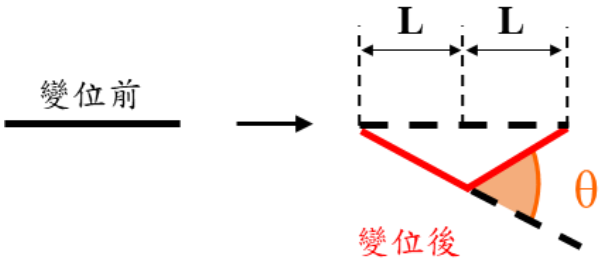
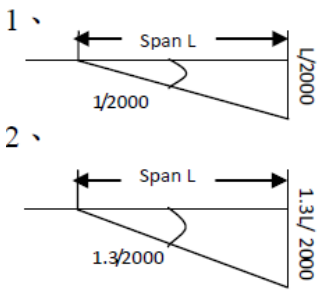
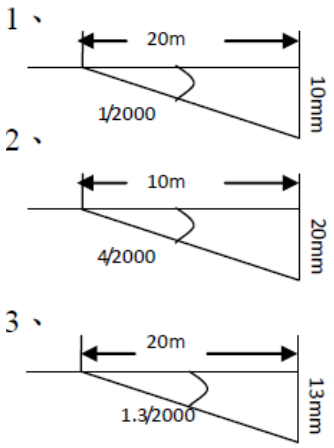
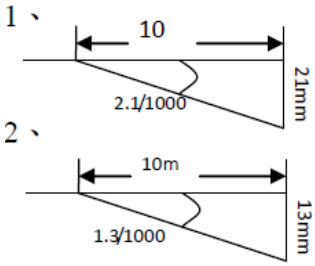


圖 3-2.2：橋面折角之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

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 ($\frac{1}{1000}$).

表 3-2.2：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004）

Table3-2. 2: Discontinuous displacement limitation of bridge

項目	容許變形值	備註
高架橋段結構	1. 垂直向沉陷容許值 M=L/1000/2 (即 θ=0.5/1000) 2. 橫向水平變位容許值 M=1.3L/1000/2 (即 θ=0.65/1000) 3. 橋墩橫向傾斜度容許值 θ=1.3*L/1000/2/H 4. 橋墩縱向傾斜度容許值 θ=25mm/H L：橋樑跨徑 H：基礎頂部至低軌頂之高度	
隧道段、路堤路塹段結構	1. 版式軌道之路床 垂直向容許角變位 M=1/2000 (即 θ=0.5/1000)或垂直向沉陷 M=10mm/20m 2. 道碴軌道之路床垂直角變位=4/2000， 或垂直沉陷=20mm/10m 3. 橫向水平容許變位值 M=1.3*10mm/20m (即 θ=1.3/2000)	
高速鐵路臺北隧道段結構	1. 垂直角變位=2.1/1000 2. 水平變位=1.3/1000	

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 3-2.3 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，根據部分如臺灣西嘉南地區研究顯示（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，如新化斷層、口宵里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 3-2.3：地表變形強度分級表。

Table3-2.3: Table of surface deformation intensity level.

分級	應變率第二不變量 n (μstrain/yr)	臺鐵	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。

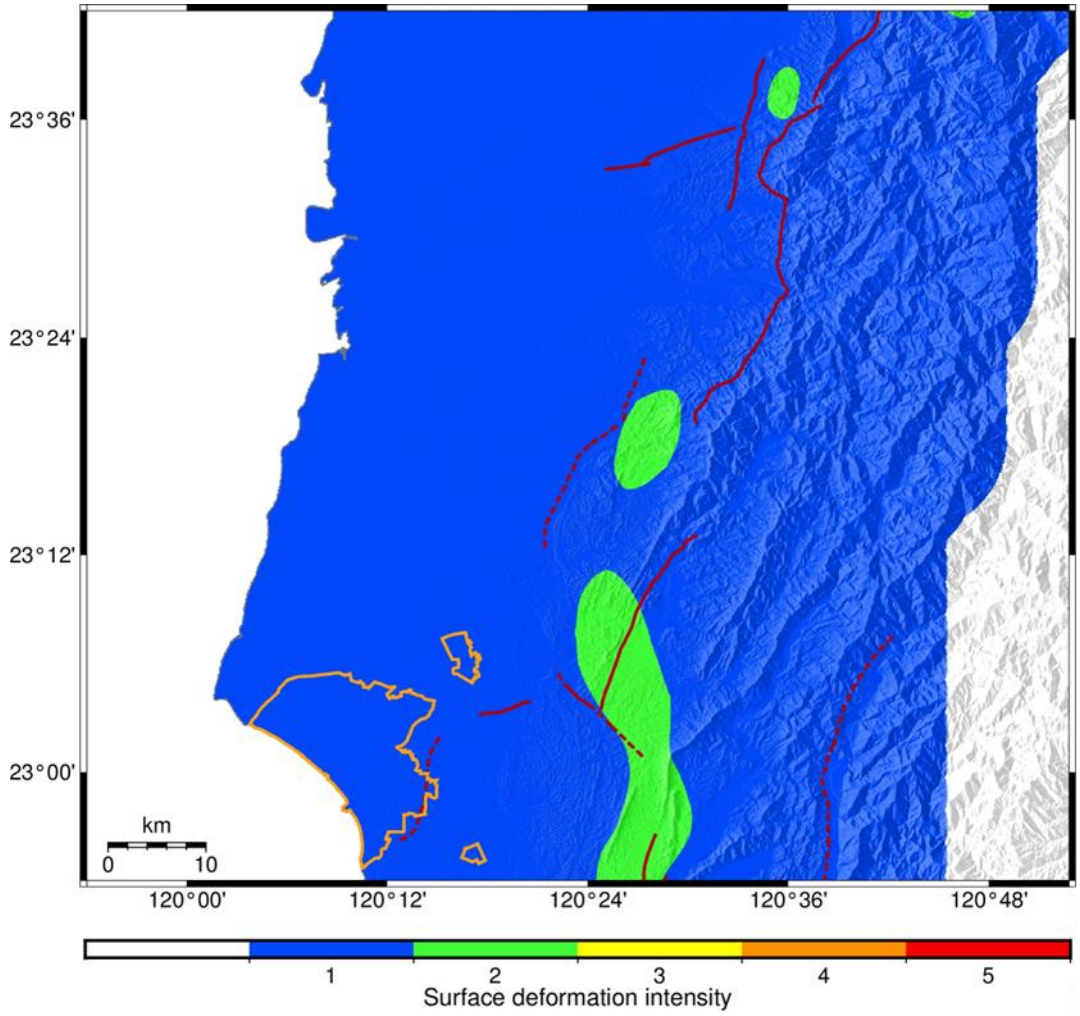


圖 3-3.1：重要區域地表變形強度分布圖。

Figure 3-3.1: Surface deformation intensity map of object area.

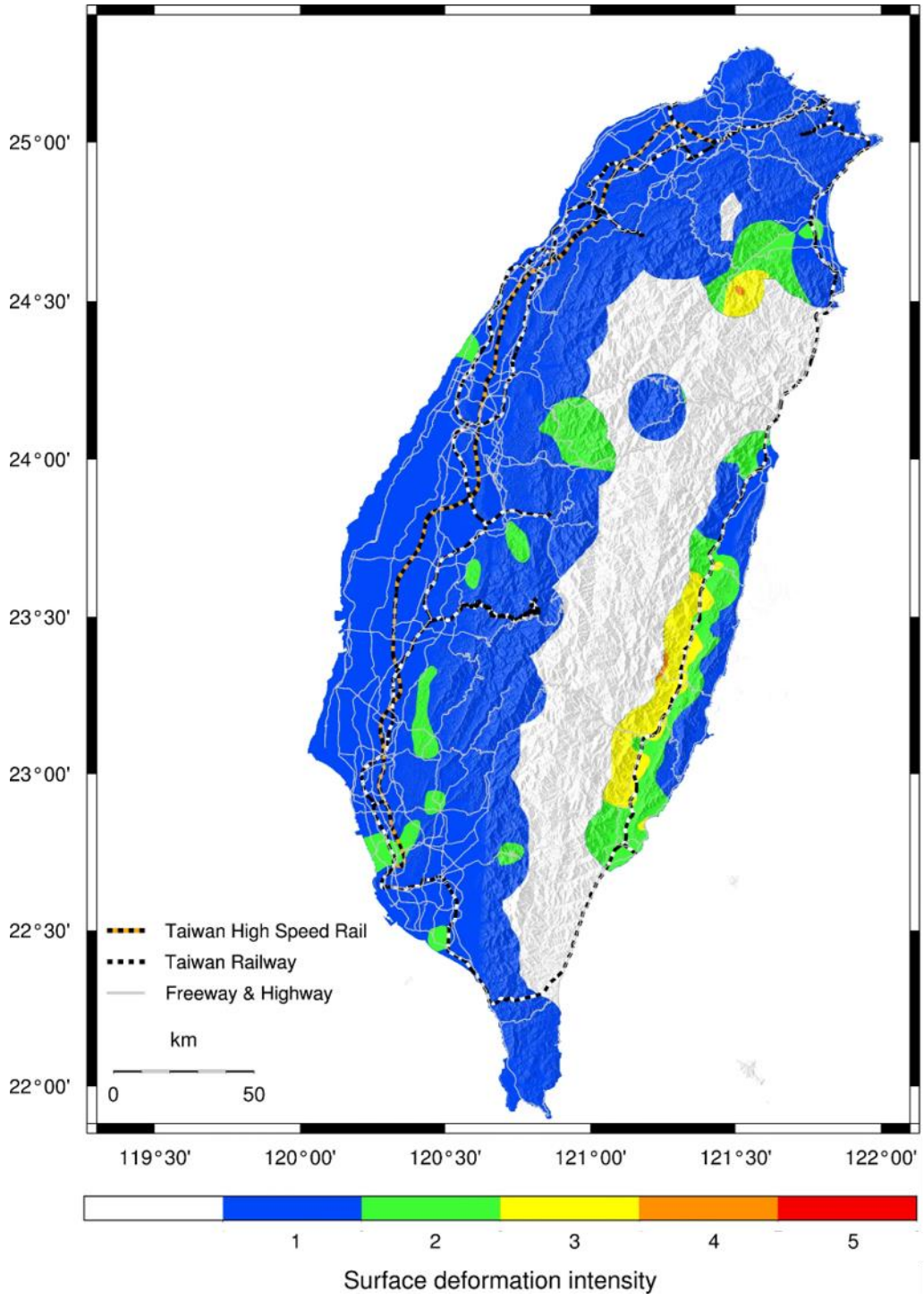


圖 3-3.2：全臺地表變形強度分布圖。

Figure 3-3.2: Surface deformation intensity map.

第四章、嘉南地區重要斷層參數分析

4-1 斷層資料蒐集

為綜整地質前人研究資料以套用至後續分析的參數中，本計畫蒐集地質調查量測之數據，例如野外露頭中靠近主斷層線跡之斷層位態，槽溝資料中地層錯位量最大之主斷層位態，平衡剖面中數學幾何推估之斷層傾角與深度，利用地震深度分布資料推估之孕震深度，本計畫以數據範圍作為參數的範圍，並且以數據之中間值（若僅有兩筆數據資料）或平均值（若有三筆以上數據資料）作為建議初始值。。各調查方法及資料蒐集重點條列於表 4-1.1。

今年度之計畫區域為臺灣嘉南地區，包含十條活動斷層。重要斷層為新化斷層、後甲里斷層、口宵里斷層，其他斷層包含九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮斷層、六甲斷層、觸口斷層、左鎮斷層。以下將就各斷層之長度、傾角、深度、滑移速率進行前人文獻彙整與分析：

表 4-1.1：斷層幾何參數資料蒐集重點。

Table 4-1.1: Key points of data collection of fault geometry parameters.

調查方法	資料蒐集重點	傾角	深度
野外露頭	根據主斷層之斷層跡位置蒐集斷層位態資料。	V	X
槽溝開挖	假設累積滑移量最大的斷層為主斷層，蒐集主斷層位態資料。	V	X
震測剖面	將測線距離單位與深度單位調整至 1:1 後量測剖面中的斷層傾角及深度。	V	依測線長度而定
平衡剖面	剖面中的斷層傾角及滑脫面深度	V	V
地球物理資料	透過速度構造剖面推估基盤深度	依解析度而定	V
地震深度分布	根據地震密集帶推估孕震深度。若地震事件與斷層地表破裂相關，可用來推估斷層深部的傾角與深度。	視地震事件分布情形而定	V

4-1-1 新化斷層

4-1-1-1 斷層長度

根據地質調查所 2021 年發布之臺灣活動斷層分布圖（林啟文等，2021），新化斷層長度約 6 公里，斷層經臺南縣新化鎮那拔里至北勢里，屬於第一類活動斷層。相關前人研究敘述如下：

1946 年 12 月 5 日在新化地區發生芮氏規模 6 以上的地震，在地表產生約 6 公里長的破裂跡，斷層為右移，而斷層南側為下降側，最大變位量於深坑橋，水平變位量 200 公分，垂直變位量 76 公分，總共斜移了 214 公分（張麗旭等，1947; Bonila, 1975）（圖 4-1.1）。

根據林慶偉（1999）的野外現勘，發現畜產試驗所中的營養館(建於 1974 年)及亨德館(建於 1968 年)產生不尋常的破裂面，可能是新化斷層潛移現象造成。

陳文山等（2011）在新化鎮臺南農業改良場內鑽了 3 口排鑽，由北而南分別為新化 3 號井、新化 4 號井、新化 2 號。根據鑽井資料，新化 2 號井岩芯中不具任何剪切構造，新化 3 號井由下至上具有密集的剪切構造，新化 4 號井中段以下也具有密集的剪切構造，推測新化斷層剪切帶之寬度約有 50 公尺（圖 4-1.2）。

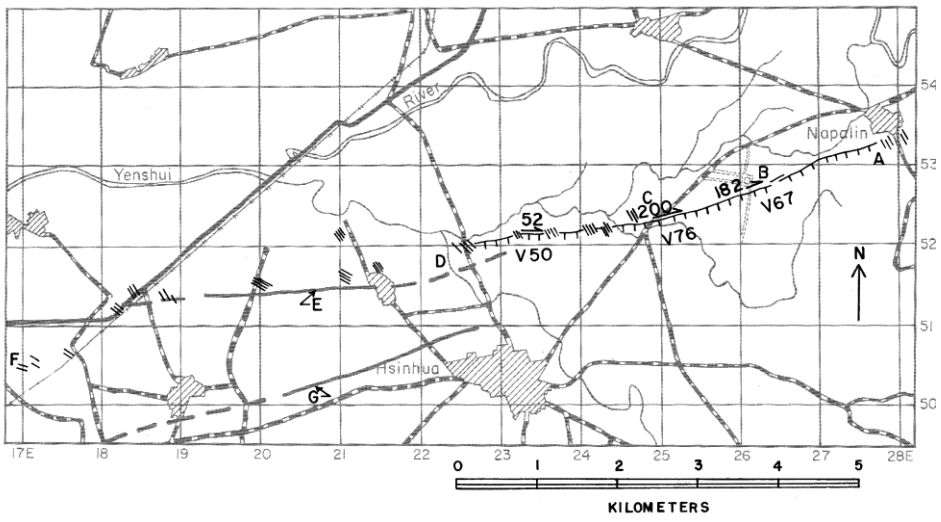


圖 4-1.1：1946 年新化地震地表破裂調查（Bonilla, 1975）。

Figure 4-1.1: Investigation of surface rupture in 1946 Hsinhua earthquake (Bonilla, 1975).

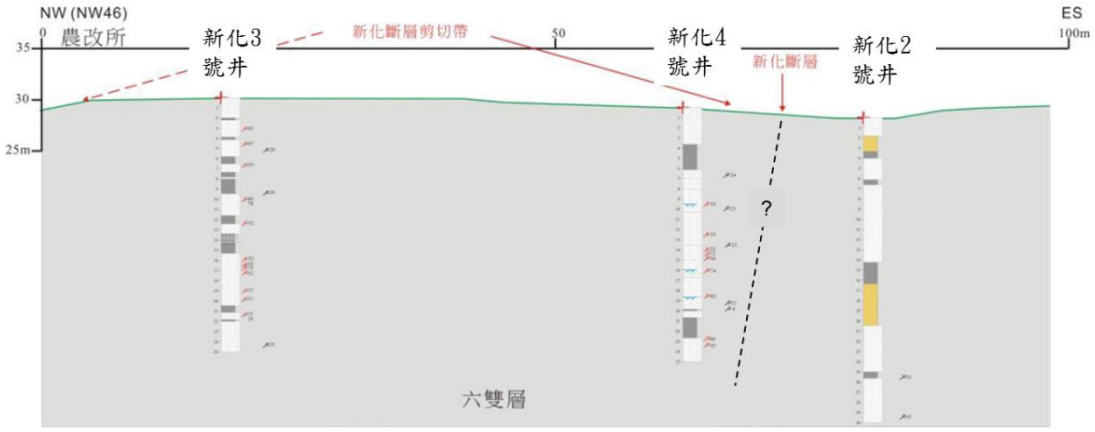


圖 4-1.2：農業改良場內鑽井資料（修改自陳文山等，2011）。

Figure 4-1.2: Drilling data in Tainan District Agricultural Research and Extension Station. COA (Chen et al., 2011).

4-1-1-2 斷層傾角

1. 槽溝資料

李錫堤等（2000）在農改場開挖三處槽溝。AIT-1 槽溝樁號 20 附近發現新化斷層的主要斷裂面，斷裂面呈高角度向東南傾斜，樁號 25 附近出現一次要斷裂面，次要斷裂面呈高角度向西北傾斜，兩斷裂面之間為地塹，屬於橫移斷層帶的花狀構造。此外，在南側壁的主要斷裂面旁，雷多裂理中的滑痕顯示為走向滑移。AIT-2 槽溝中，樁號 19 附近有一斷裂面，呈高角度向東南傾斜。AIT-3 槽溝中，新化斷層的主要斷裂面出現在樁號 20 附近，為高角度向東南傾斜，與次要斷裂面之間形成一地塹。

李錫堤等（2002）於那菝林開挖四處槽溝，NBL-1、NBL-2、NBL-3 為垂直斷層走向開挖，NBL-4 為平行斷層走向開挖。NBL-1 延伸開挖至樁號 23 附近發現斷層錯動證據（圖 4-1.4），斷層位態 N70°E，86°N。NBL-2 樁號 13~14 之間發現 1946 年新化斷層的錯動證據，斷層位態為 N74°E，88°N；樁號 13~17 之間另有高角度的次要斷層，屬於走向滑移斷層帶的花狀構造。NBL-3 樁號 11~12 之間也發現 1946 年新化斷層的錯動證據，主斷層位態 N88°E，80°N，另有其他高角度斷層所構成的花狀構造。NBL-4 中發現許多雁行排列的錯動線及雷多裂理。

2. 淺層震測

根據林啟文等（2007）淺層震測資料結果顯示（圖 4-1.5），新化斷層淺部為寬廣的剪切帶，剪切帶中的岩層被數個高角度的不連續面所截切，呈現開花狀構造。

以上文獻整理如表 4-1.2 及圖 4-1.6，根據李錫堤等（2002）那拔林槽溝量測得到的三組主斷層位態（N70°E，86°N；N74°E，88°N；N88°E，80°N），新化斷層傾角範圍為向北傾斜 80 度至 88 度，三組資料傾角之平均值為 85 度，以上參數為本計畫二維模型參數搜尋之依據。

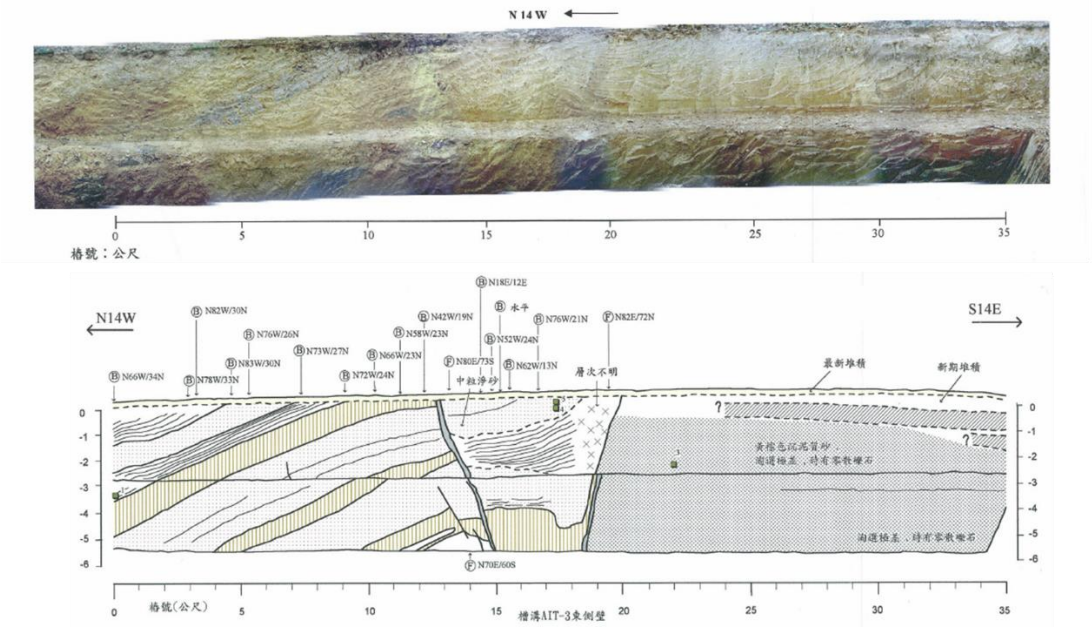


圖 4-1.3：新化斷層槽溝 AIT-3 東側壁（李錫堤，2000）。

Figure 4-1.3: The eastern wall of AIT-3 trench of Hsinhua fault (Lee, 2000).

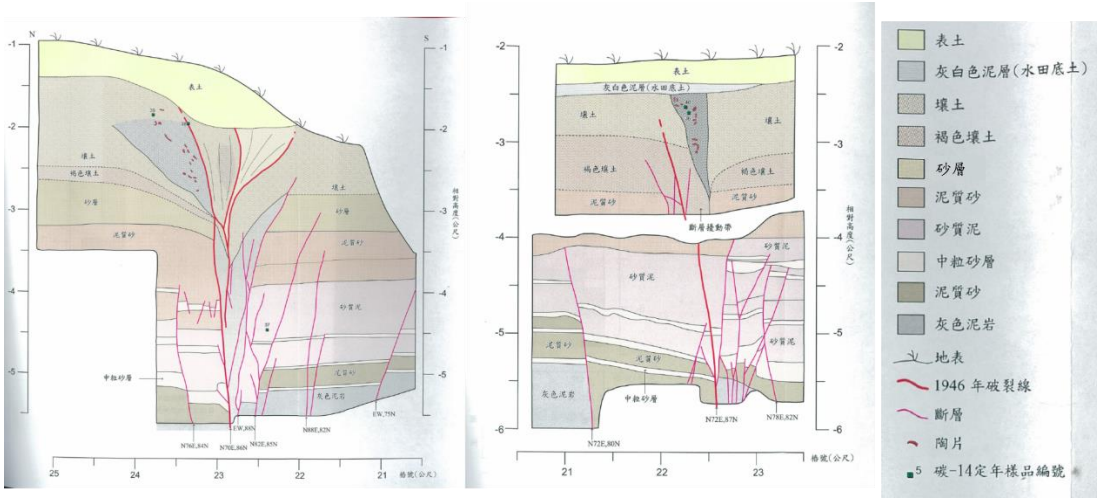


圖 4-1.4：新化斷層槽溝 NBL-1 東側壁（左）與西側壁（右）（李錫堤，2002）。

Figure 4-1.4: The eastern wall (left) and the western wall (right) of NBL-1 trench of Hsinhua fault (Lee, 2002).

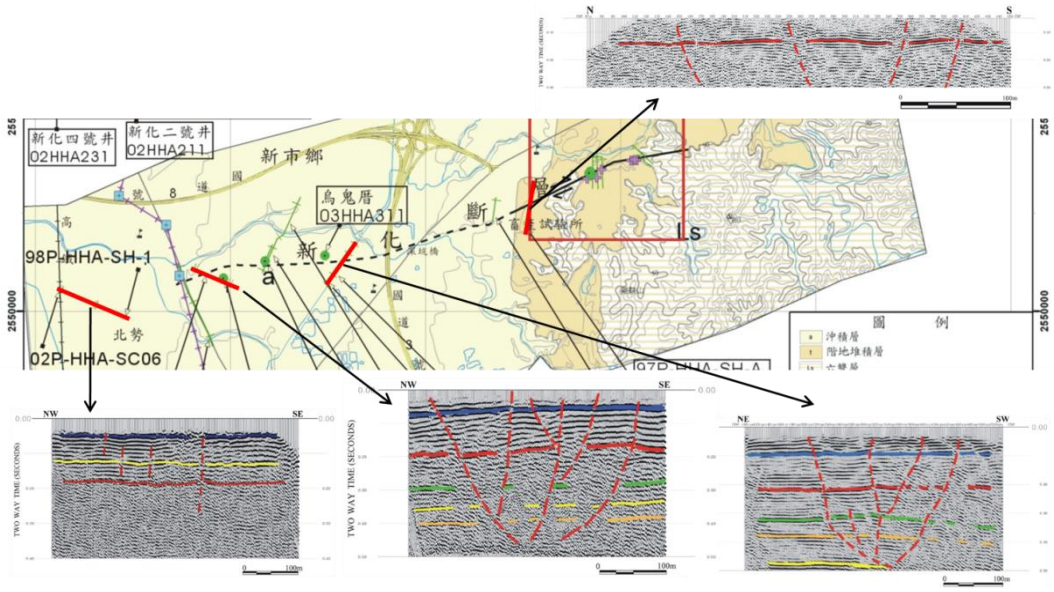


圖 4-1.5：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。

Figure 4-1.5: Seismic profile of Hsinhua fault (Lin et al., 2007).

表 4-1.2：新化斷層傾角相關文獻彙整。

Table 4-1.2: Hsinhua fault dips and references.

作者	方法	傾角
李錫堤等，2000	農改場槽溝開挖	高角度向東南傾斜
李錫堤等，2002；	那菝林槽溝開挖	N70°E，86°N（NBL-1） N74°E，88°N（NBL-2） N74°E，88°N（NBL-3）
陳文山等，2004	那菝林槽溝開挖	開花狀構造
林啟文等，2007	淺層震測	開花狀構造
傾角範圍：80~88度　建議初始值：85度		

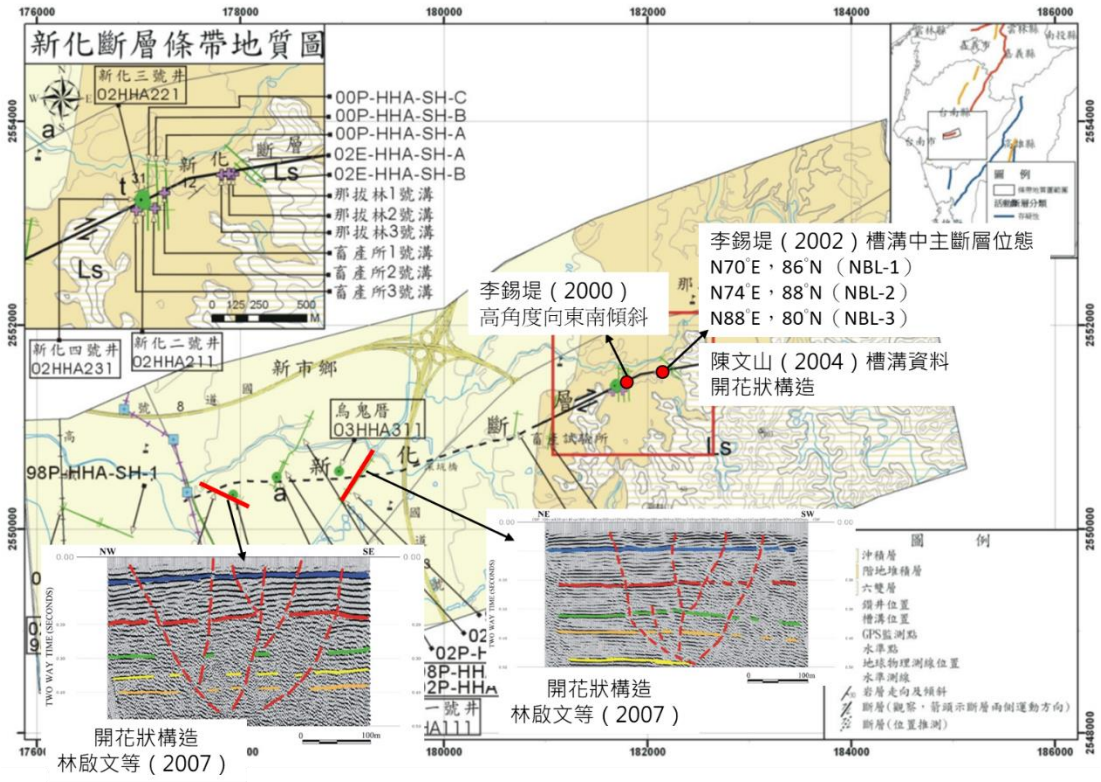


圖 4-1.6：新化斷層傾角相關資料彙整。

Figure 4-1.6: Hsinhua fault dips and references.

4-1-1-3 斷層深度

1. 平衡剖面

黃旭燦等（2004）參考 Sa1 與 Sa2 震測資料繪製平衡剖面 AA’，該剖面通過新化斷層往西的延伸線，接近臺南台地的北緣。黃旭燦等（2004）認為新化斷層為一向北傾，帶有逆衝分量的斷層，斷層於淺處呈高角度約 70 度，深處呈低角度約 17 度，斷層向北沒入沄水溪層中的滑離面，深度約 3.5 公里，滑脫面之下有另一南傾的斷層（圖 4-1.7）。本計畫認為該剖面介於後甲里斷層與新化斷層之間，因此 Sa2 震測剖面中的新化斷層有可能其實是後甲里斷層往北的延伸，而真正的新化斷層可能在淺部呈現開花狀構造而反射訊號較不明顯，或可能隱伏在後甲里斷層之下。除了文獻提供的解釋，本計劃仍然不能排除新化斷層有往下延伸的可能。

2. 地震分布

由 1973-2010 地震深度分布圖顯示此區域地震主要分布於 18 公里以內（胡

植慶等，2016）（圖 4-1.8），1946 年新化地震經鄭世楠等（1999）利用各測站 S-P 時間（氣象局館藏資料）重新定位後，結果顯示震央位於 23.025°N，120.325°E，震源深度 14（±0.5）公里。1736 年臺南地震的災害分布與震度分布情形，與 1946 年新化地震相當吻合，地震規模也與 1946 年地震相當，鄭世楠認為 1736 年地震與新化斷層有密切關連，並參考 1946 年地震參數進行重定位，1736 年震源位於 23.070°N，120.330°E，深度 5.0 公里，ML=6.1，MW=6.1。

以上文獻整理如表 4-1.3 及圖 4-1.9，本計畫綜合各個觀察數據，新化斷層深度範圍為 3.5 至 18 公里，各資料深度之平均值為 8.5 公里。

4-1-1-4 滑移速率

斷層兩側鑽井資料的垂直變動速率並無太大不同。另外東段畜產所的抬升速率為 3-4.5 mm/yr；農田區及紡織廠的抬升速率較低，為 0.8-2.3 mm/yr。因此此區域的垂直變動速率大約為 0.8-4.5 mm/yr（陳文山等，2011）。根據 Shyu et al.（2020），假設斷層角度為 80-90 度，換算沿斷層面滑移速率為 0.8-4.5 公厘/年。以上為新化斷層垂直方向的長期滑移速率，而走向滑移方向的長期滑移速率尚無法透過地質資料推估，因此本計畫採用大地測量資料的滑移虧損速率進行評估。

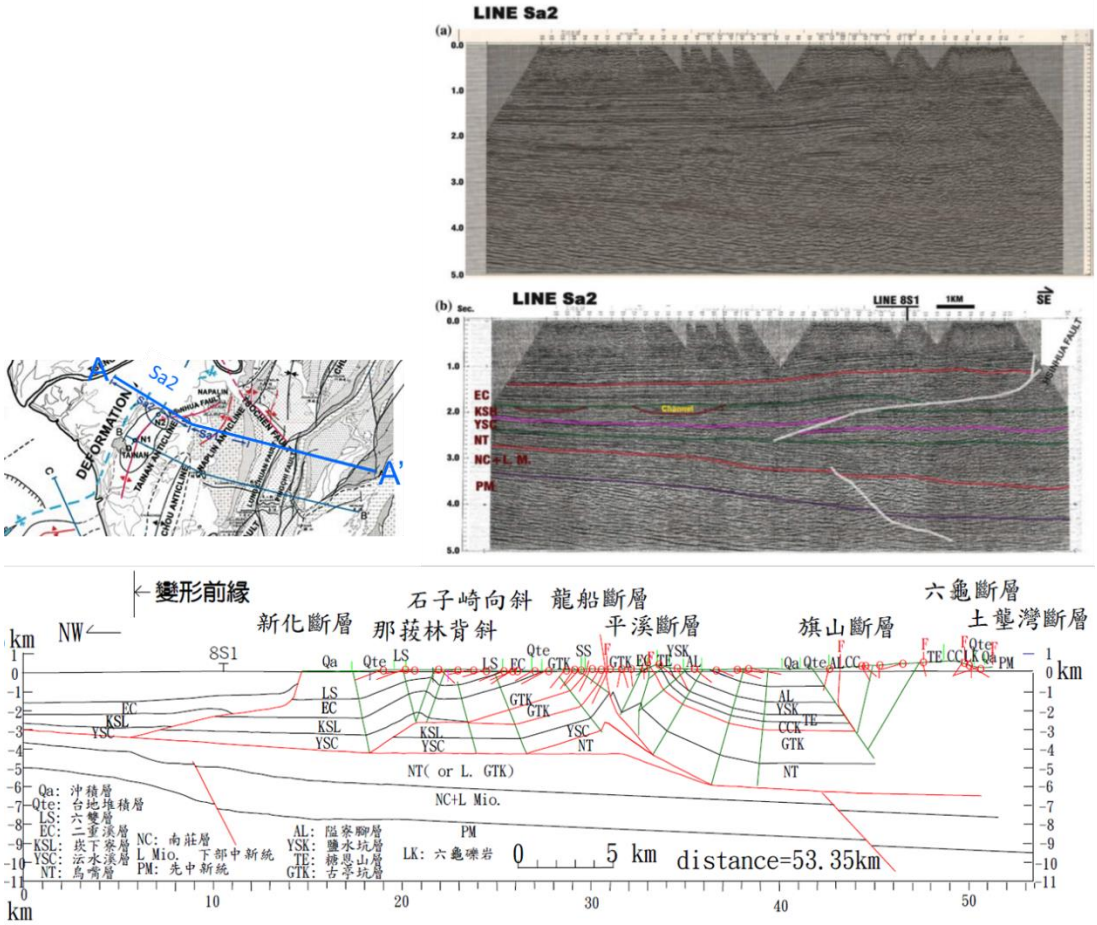


圖 4-1.7：Sa2 原始震測剖面（右上圖），黃旭燦等（2004）所繪之震測剖面解釋（右中圖）及平衡剖面（下圖）。

Figure 4-1.7: Sa2 seismic profile (right top), interpretation of seismic profile (right center), and balanced cross section (bottom) from Huang et al. (2004).

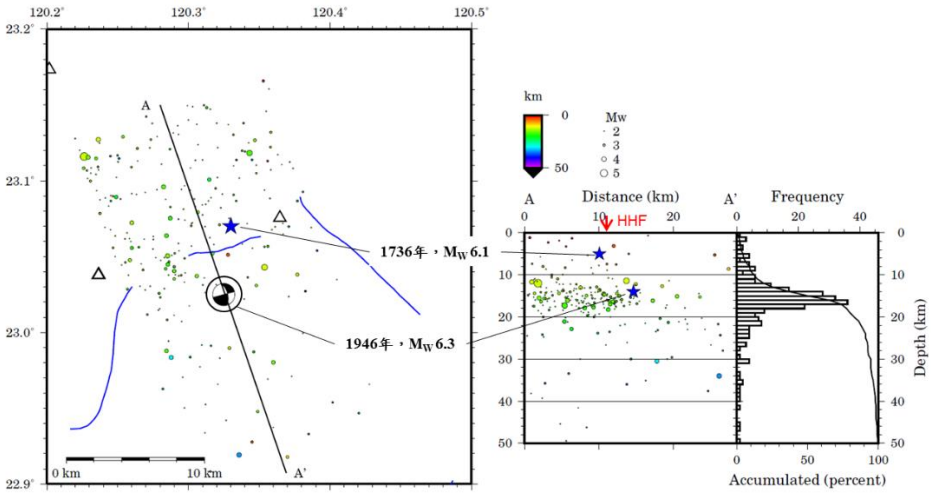


圖 4-1.8：1973-2010 年地震深度分布圖與歷史地震位置（胡植慶等，2016）。

Figure 4-1.8: 1973-2010 Seismicity data, depth distribution, and historical earthquakes (Hu et al., 2016).

表 4-1.3：新化斷層深度相關文獻彙整。

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

黃旭燦等，2004	平衡剖面	滑離面約 3.5 公里
鄭世楠等（1999）	1946 歷史地震重定位	14 公里
鄭世楠等人	1736 歷史地震重定位	5 公里
胡植慶等（2016）	1973-2010 地震分布	12-18 公里 (中間值 15 公里)
深度範圍：3.5~18 公里 平均值：8.5 公里		

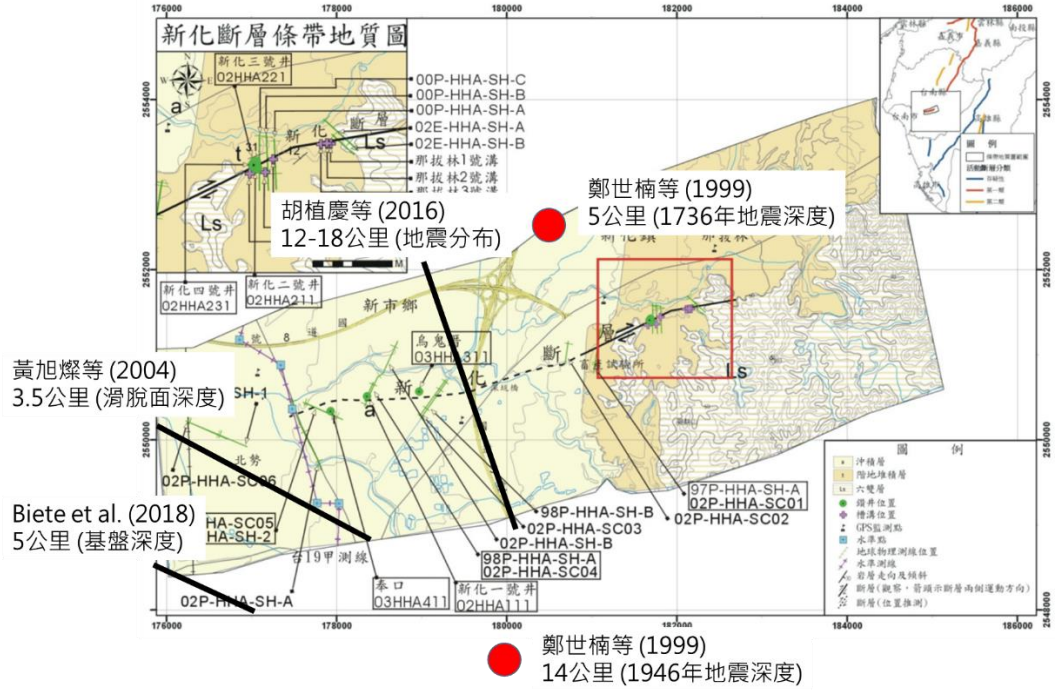


圖 4-1.9：新化斷層深度調查資料分布圖 。

Figure 4-1.9: Distribution map of the survey data for rupture depth of the Hsinhua fault.

4-1-2 後甲里斷層

4-1-2-1 斷層長度

林啟文等（2007）在虎山一號井岩心深度 50~250 公尺處發現剪切帶，虎山二號井岩心深度 60~90 公尺處也發現剪切帶，認為此為後甲里斷層存在的證據，根據兩口井的剪切帶深度判斷後甲里斷層為西傾的逆移斷層。根據地質調查所 2021 年發布之臺灣活動斷層分布圖（林啟文等，2021），後甲里斷層長度約 12 公里，屬於第二類活動斷層。

4-1-2-2 斷層傾角

1. 淺層震測

根據 Le Béon et al. (2019)台地北側的 D5 震測剖面，可觀察到一西傾約 35 度的地層不連續面（圖 4-1.10），由 pure-shear fault-bend fold model 推估斷層傾角理論值為 38 度，臺南褶皺後翼地層傾角 9 度，基部剪切層（basal shear layer）為 560 公尺厚。

2. 平衡剖面

Huang et al.（2004）的 BB’剖面中臺南台地下方約 5 公里深的古亭坑層中存在一滑脫面，滑脫面上有一西傾約 30 度的斷坡，斷坡未破裂至地表，於深度約 3.5 公里處連結至另一滑脫面，臺南台地東側的地形崖為斷坡尖端的向斜軸（圖 4-1.11）。本計畫認為 Huang et al.（2004）的 BB’平衡剖面通過後甲里斷層，因此可參考該剖面結果，傾角為 30 度。

根據 Le Béon et al. (2019)，臺南台地為兩翼不對稱的背斜，東邊坡度較西邊來的陡，東邊的坡延伸的距離較西邊來的短，臺南台地應屬於 pure shear fault bend fold，而斷層尖端未發育至地表。Le Béon et al. (2019) 利用 pure-shear fault-bend fold 理論建立臺南台地平衡剖面，剖面中斷層傾角為 45 度，滑脫面傾角為 2 度，滑脫面深度為 3.8 公里，基部剪切層（basal shear layer）為 560 公尺厚，褶皺後翼地層傾角為 22 度，縮短量為 1.1 公里（圖 4-1.10）。

前人文獻中，Huang et al.（2004）的 BB’剖面及 Le Béon et al. (2019)的平衡剖面通過後甲里斷層，Le Béon et al. (2019)的 D5 震測剖面位於後甲里斷層往北的延伸，資料彙整如表 4-1.4 及圖 4-1.12。本計畫建議後甲里斷層的傾角範圍為 30~45 度，平均值為 37.5 度。

4-1-2-3 斷層深度

1. 淺層震測

根據臺南台地北側的震測資料，Le Béon et al.（2019）在 1.5~3.0 公里深度中觀察到西傾 7~8 度的反射訊號，而越近地表的反射訊號傾斜角度越小，應屬生長型地層（growth strata），而斷層頂部尖端未出露地表。Le Béon et al.（2019）根據臺南台地北側的震測資料指出地層呈現 pure-shear fault-bend fold 樣貌，並自深約 3.8 公里處古亭坑層的滑脫面中發育出一西傾約 38 度的背衝斷層，推測為後甲里斷層（圖 4-1.10）。

2. 平衡剖面

黃旭燦等（Huang et al., 2004）平衡剖面中，臺南背斜東側有一斷坡，地表的地形崖為褶皺崖而非斷層線崖，斷坡在約 5 公里深處與滑脫面相連，滑脫面位於古亭坑層中（圖 4-1.11）。

陳文山等（2011）繪製一通過臺南台地的平衡剖面，認為臺南背斜下方有一斷坡，位於古亭坑層中，其深度約 5 公里深（圖 4-1.13）。

3. 地球物理資料

根據 Biete et al.（2018）速度構造分析，臺南地區的基盤深度約 5 公里。

以上文獻整理如表 4-1.4、表 4-1.5，綜合各個觀察數據，本計畫建議後甲里斷層深度範圍為 3.8 至 5 公里。

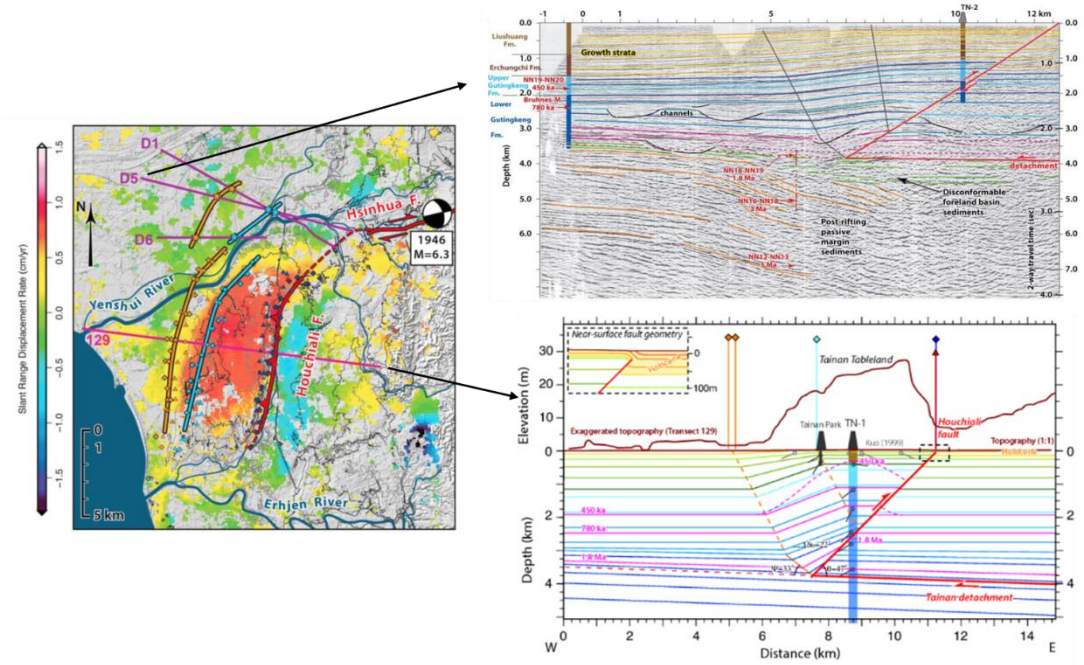


圖 4-1.10：Le Béon et al.（2019）所繪之 D5 震測剖面解釋圖（右上）與通過臺南台地之平衡剖面圖（右下）。

Figure 4-1.10: Interpretation of seismic profile (right top), balanced cross section of Tainan table land (right bottom) from Le Béon et al.（2019）.

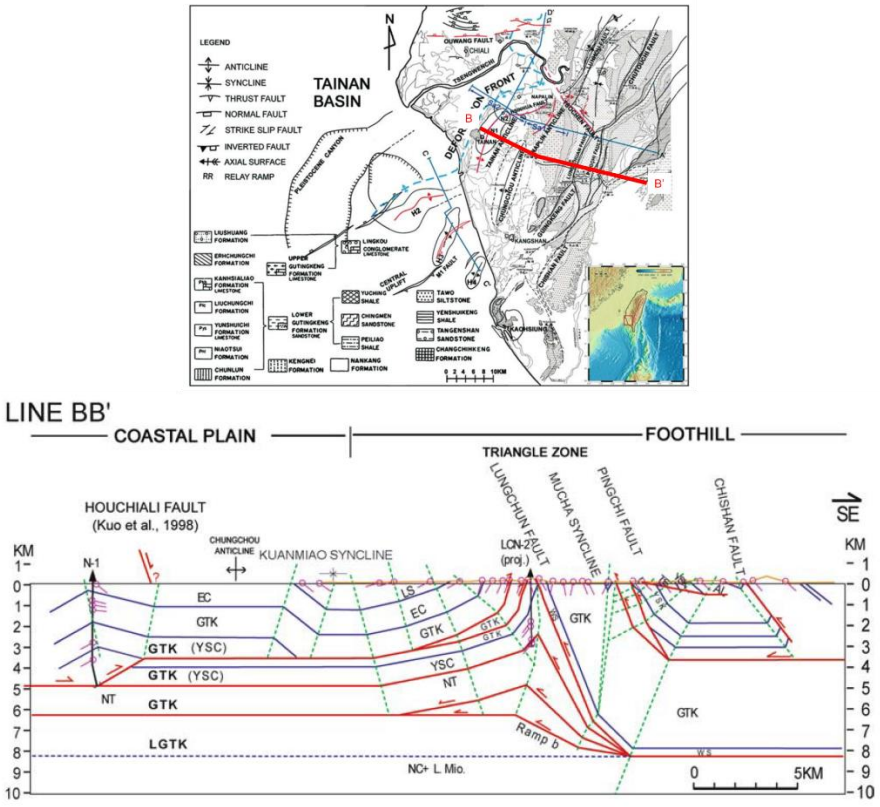


圖 4-1.11：Huang et al.,（2004）所繪通過臺南台地平衡剖面圖。

Figure 4-1.11: Balanced cross section through Tainan table land from Huang et al. (2004).

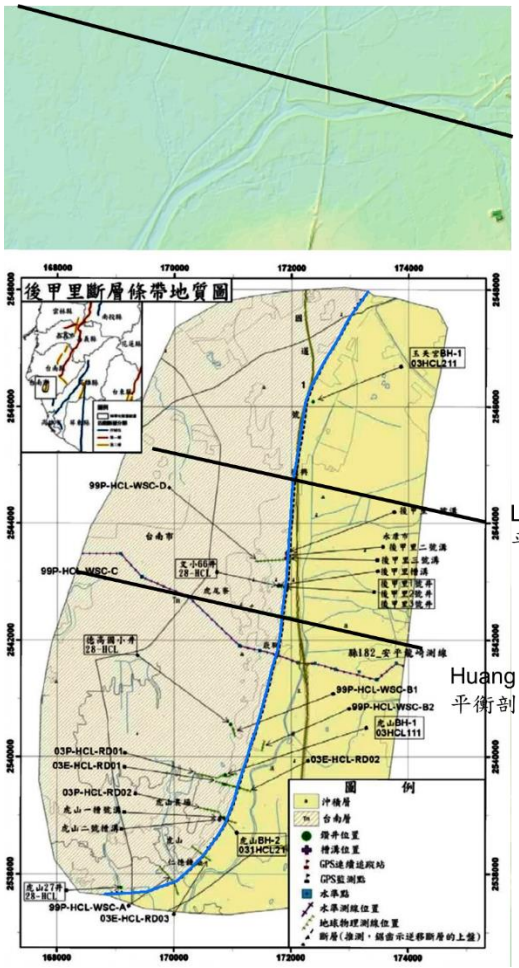


圖 4-1.12：後甲里斷層傾角相關文獻彙整。

Figure 4-1.12: Houchiali fault dips and references.

表 4-1.4：後甲里斷層傾角相關文獻彙整。

Table 4-1.4: Houchiali fault dips and references.

作者	方法	傾角
Huang et al., 2004	平衡剖面	滑脫面上的斷坡傾角 30 度
Le Béon et al., 2019	D5 震測剖面	35 度 (斷層線範圍外)
	D5 平衡剖面	38 度 (斷層線範圍外)
	臺南台地平衡剖面	45 度
陳文山等，2011	臺南背斜至潮州斷層平衡剖面	--
傾角範圍：30~45 度 平均值：37.5 (30,45)		

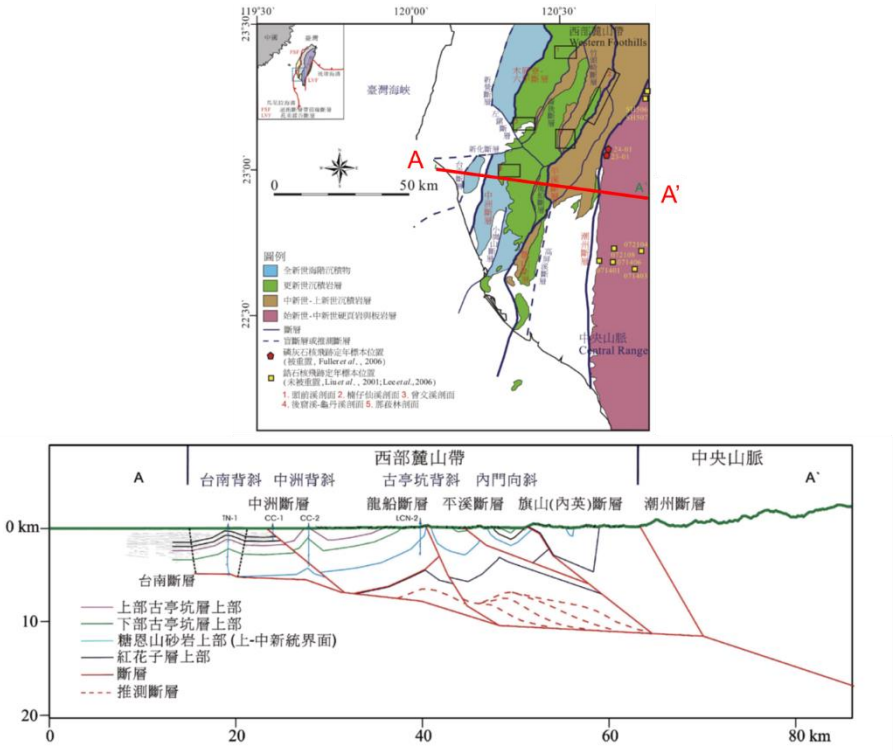


圖 4-1.13：西南部地區地質剖面圖（陳文山等，2011）。

Figure 4-1.13: Geological profile in southwestern Taiwan (Chen et al., 2011).

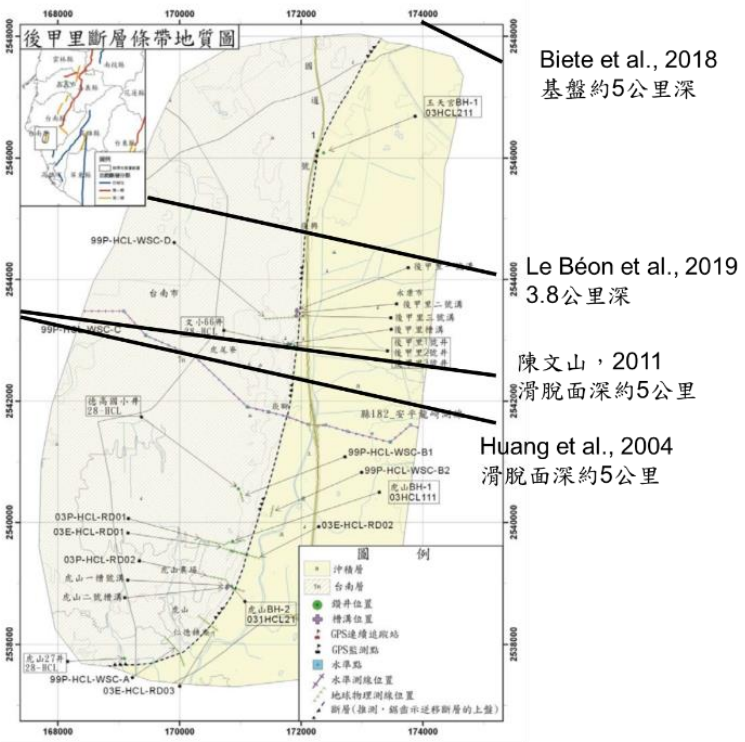


圖 4-1.14：後甲里斷層深度相關文獻彙整。

Figure 4-1.14: Houchiali fault depths and references.

表 4-1.5：後甲里斷層深度相關文獻彙整。

Table 4-1.5: Houchiali fault depths and references.

作者	方法	深度
Le Béon et al., 2019	參考鑽井資料及震測資料之地質剖面圖	滑脫面深度約 3.8 公里
Huang et al., 2004	平衡剖面	滑脫面深度約 5 公里
陳文山等，2011	平衡剖面	滑脫面深度約 5 公里
Biete et al., 2018	速度構造推估基盤深度	5 公里
深度範圍：3.8~5 公里　平均值：4.7 公里		

4-1-2-4 滑移速率

Chen and Liu（2000）根據全新世海水面變化曲線及臺南台地上之碳 14 定年推估臺南台地之長期抬升速率約為 4 mm/yr，而位於後甲里斷層下盤之大灣低地長期抬升速率約為-1 mm/yr，推估後甲里斷層有 5 mm/yr 之相對位移速率（圖 4-1.15）。

Le Béon et al（2019）彙整鑽井資料及碳同位素定年資料建立臺南台地、大灣低地、海岸平原的等時線。等時線 7.3 ka BP、8.0 ka BP、9.2 ka BP 在跨後甲里斷層處均有落差（圖 4-1.16）。本計畫假設等時線的落差與斷層的抬升有關，推估得到斷層抬升速率介於 4.4~5.9 mm/yr。

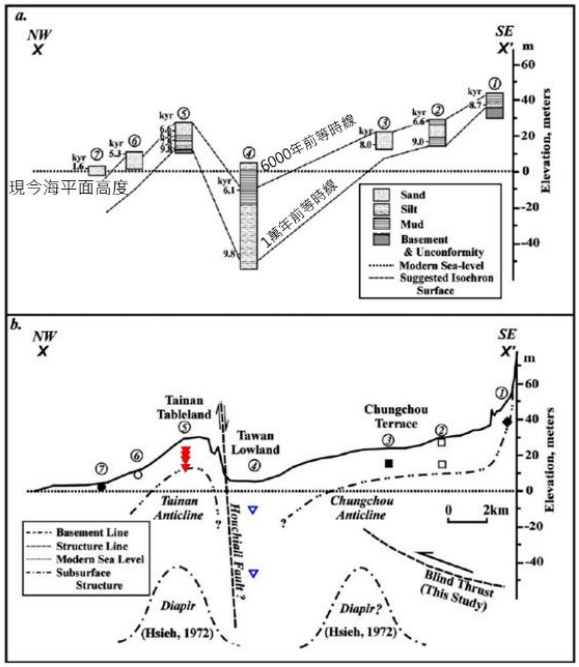


圖 4-1.15：(a) 臺南地區地層柱剖面與六千年前及一萬年前之等時線（虛線）。(b) 地形高度（實線）與樣本位置（圓形、三角形及正方形符號）及地下構造解釋（修改自 Chen and Liu, 2000）。

Figure 4-1.15: (a) Stratification column in Tainan area with 6,000 yr and 10,000 yr isochron curve. (b) topographic profile (solid line), sample location (circle, triangle, and square), and interpretation of subsurface structures (Chen and Liu, 2000).

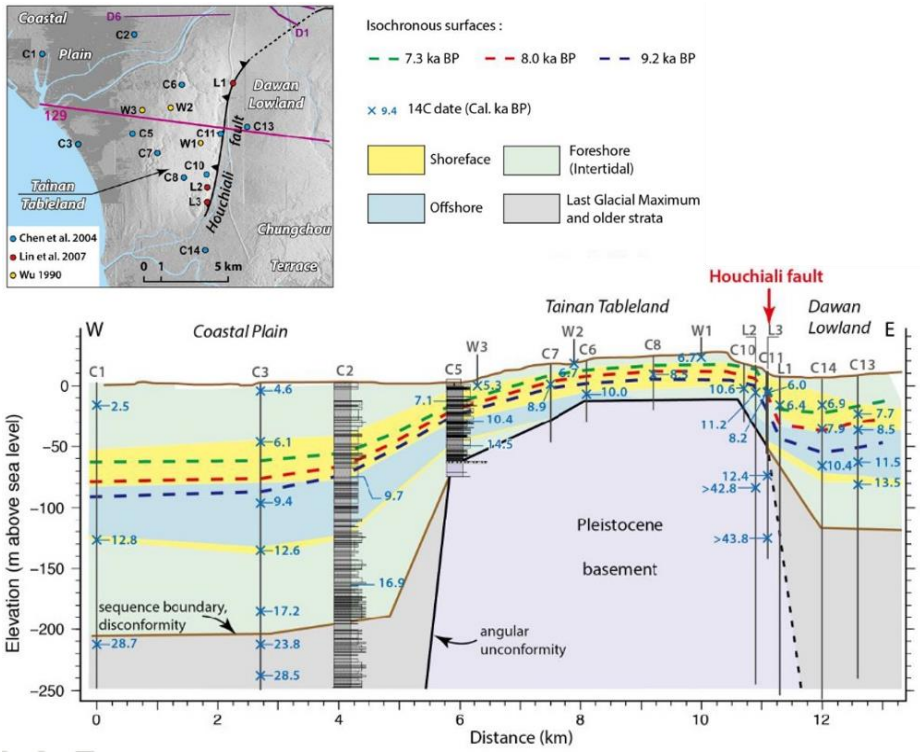


圖 4-1.16：臺南台地及鄰近地區之鑽井資料與等時線(Le Béon et al. 2019)。

Figure 4-1.16: Drilling data and isochron curve around Tainan table land (Le Béon et al. 2019).

表 4-1.6：後甲里斷層長期滑移速率相關文獻彙整。

Table 4-1.6: The long-tern slip rates of Houchiali fault and references.

作者	方法	抬升速率 (mm/yr)
Chen and Liu（2000）	全新世海水面變化曲線及台地上之碳 14 定年	5
Le Béon et al（2019）	參考鑽井資料得到碳 14 定年等時線	4.4 – 5.9
抬升速率範圍：4.4 – 5.9 mm/yr		

4-1-3 口宵里斷層

4-1-3-1 斷層長度

口宵里斷層首先由鳥居敬造（1932）於新化油田地質圖中提出，當時的斷層繪製僅於曾文溪附近至左鎮之間，而後六角兵吉等（1934）於玉井油田地質圖中延伸至嘉義縣大埔鄉。根據劉彥求等（2020）之調查，口宵里斷層向北延伸，目前可確認的斷層位置僅達到曾文二號橋，黃文正等（2020）認為口宵里斷層北段，斷層大約通過的位置可能為由東向西的方向，層面傾角明顯由低傾角轉變為高傾角的地方，或是河階地中有大約南北走向地形線形崖的崖角處。口宵里斷層南端則在左鎮區附近尖滅或被左鎮斷層截切（劉彥求等，2020；何信昌等，2005）。根據口宵里斷層條帶地質圖（劉彥求等，2019），口宵里斷層位於烏山頭斷層上盤，斷層面西傾之背衝斷層，長約 21 公里，如圖 4-1.17。地質調查所 2021 年發布之臺灣活動斷層分布圖（林啟文等，2021）中，口宵里斷層長度約 21 公里，屬於逆移形式，第二類活動斷層。

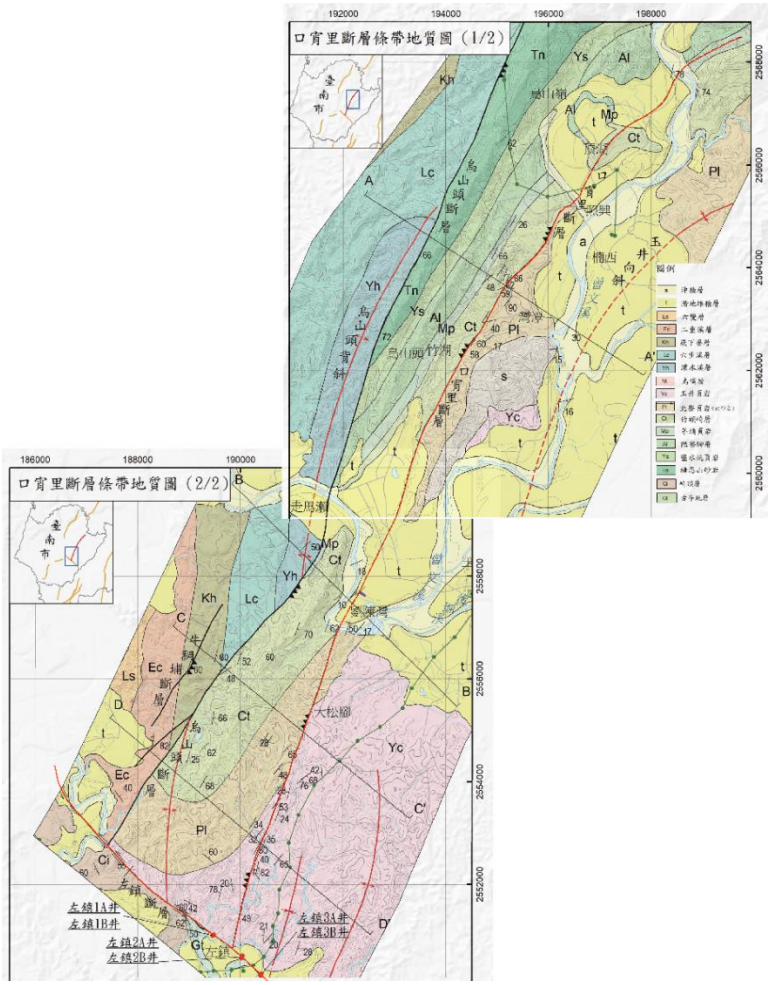


圖 4-1.17：口宵里斷層條帶地質圖（劉彥求等，2021）。

Figure 4-1.17: Strip geological map of the Kouhsiaoli fault (modified from Liu et al., 2019).

4-1-3-2 斷層傾角與深度

1. 野外露頭

① 劉陳灣剖面：曾文溪在此曲流南側為侵蝕坡，出露寬近 1 公里的連續剖面，黃文正等（2020）量測之斷層位態為 N42°E/43°W。

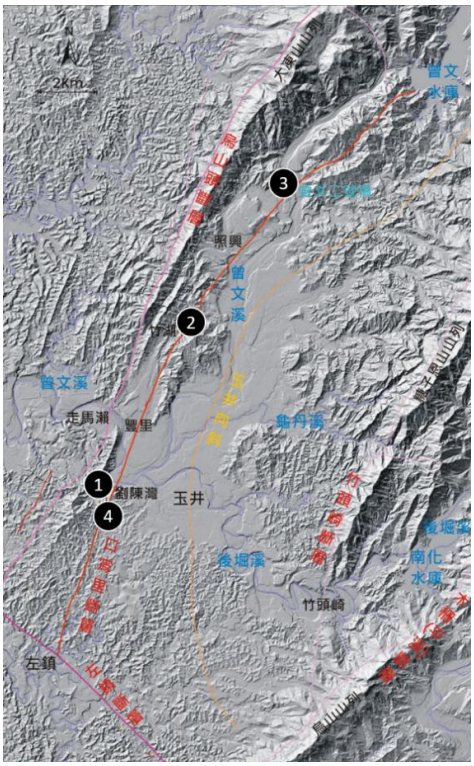
② 竹湖剖面：斷層帶位於竹頭崎層與北寮頁岩之層界附近，由區域尺度來看，呈現西側上盤為北東走向，向東傾斜約 60 度的竹頭崎層，東側下盤為近東西走向，向南傾斜十餘度的鏡面砂岩，兩者間為呈現膝折形式的單斜軸（劉彥求等，2020）。

③ 曾文二號橋：可觀察到岩層位態呈膝折形式陡變，變化處發育數道

向西傾斜約 30°~40°的逆斷層（劉彥求等，2020）。

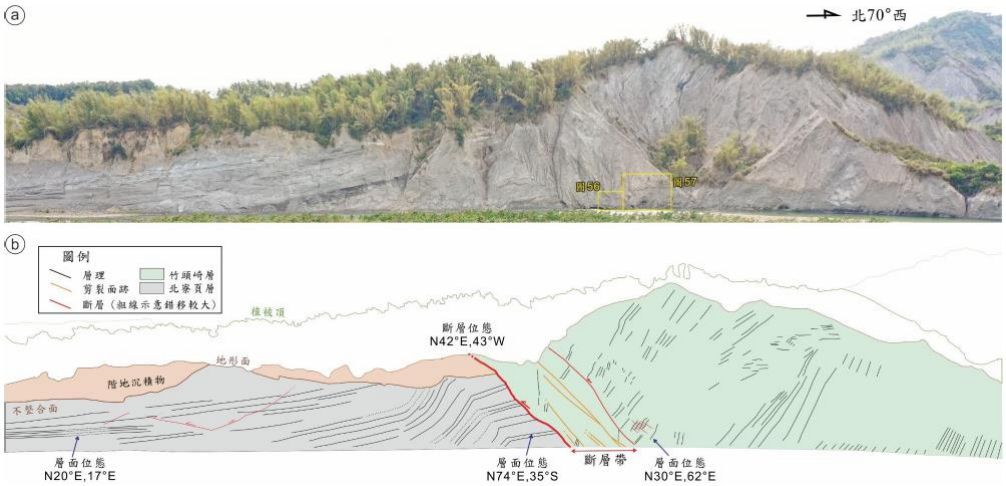
④ 貓兒干地區：可觀察到約 30°~40°向西傾斜的斷層（黃文正等，2020）。

本計畫彙整口宵里斷層沿線的斷層露頭位置與照片說明於圖 4-1.18。野外露頭量測得到的斷層位態中，傾角最小約 30 度，最大達 45 度，因此本計畫認為口宵里斷層傾角範圍應介於 30~45 度，根據各地斷層位態的量測結果：(1) N2˚E/38˚W、(2) N42˚E/43˚W、(3) N29˚E/45˚W、(4) N39˚E/42˚W、(5) N14˚E/44˚W，以上五組數據中傾角平均 42 度，此為本計畫的建議初始值（表 4-1.7）。沿斷層走向的方向上斷層傾角無明顯變化。



斷層露頭分布圖

① 劉陳灣剖面(黃文正等，2020)



斷層上盤竹頭崎層為厚層砂頁岩互層，高角度向東傾斜甚至倒轉，砂岩層遭數條低角度西傾之斷層截切與拖曳。口宵里斷層帶由北寮頁岩構成之泥岩為主，西界為竹頭崎層逆衝至北寮頁岩之上；東界為主斷層面，北寮頁岩向東逆衝至鏡面砂岩與階地堆積層之上；下盤的階地礫石受斷層拖曳呈向斜形撓曲。

② 竹湖剖面(劉彥求等，2020)



竹頭崎層與北寮頁岩之層界附近，軸部發育西傾斷層。

③ 曾文二號橋(劉彥求等，2020)



可觀察到岩層位態呈膝折形式陡變，由西側近60-70度，在地形崖東側轉為僅約10-30度，膝折帶中發育數道向西傾斜約30-40度的逆斷層。

④ 貓兒干地區(黃文正等，2020)



可觀察到向西傾斜的斷層，斷層東側出露的岩性為厚層泥岩，剪裂帶西側出露的岩性為薄層砂岩與頁岩互層，岩層的傾角相當平緩。

圖 4-1.18：口宵里斷層野外露頭，資料彙整自黃文正等(2020)及劉彥求等(2020)。

Figure 4-1.18: Outcrops of the Kouhsiaoli fault. Data from Huang et al. (2020) and Liu et al. (2020).

表 4-1.7：口宵里斷層傾角相關文獻彙整。

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

作者	方法	數據	傾角平均值
劉彥求等(2020)	劉陳灣剖面露頭	斷層位態 N2°E/38°W	40.5 (38+43)*1/2
黃文正等(2020)		斷層位態 N42°E/43°W	
劉彥求等(2020)	竹湖剖面露頭	N29°E/45°W N39°E/42°W	43.5 (45+42)*1/2
劉彥求等(2020)	曾文二號橋露頭	西傾 30~40 度	35 (取範圍中間值)
劉彥求等(2020)	劉陳灣以南至左鎮露頭	斷層位態約為 N14°E/44°W	44
黃文正等(2020)	貓兒干地區露頭 35	西傾 30~40 度	35 (取範圍中間值)
傾角範圍：30~45 度 建議初始值：42 (38+43+45+42+44)*(1/5)			

2. 地質剖面

① 何信昌等（2005）繪製五萬分之一新化圖幅，跨曾文溪的 B 剖面中口宵里斷層為一西傾之逆移斷層，西側約一公里處為東傾的烏山頭斷層（圖 4-1.19），然而烏山頭斷層與口宵里斷層於地底下的截切關係仍然未明。

② 劉彥求等（2020）依據野外岩性、層態與構造特性繪製的地下剖面（圖 4-1.20），口宵里斷層為其西側烏山頭斷層的背衝斷層，兩條斷層的距離 1~3 公里。剖面顯示口宵里斷層於深度 500 公尺接到烏山頭斷層。

③ 劉彥求等（2021）根據岩層位態、岩性、構造特性進一步由北而南繪製 A~D 地質剖面，烏山頭斷層在曾文溪以北切過一系列東傾的地層，在曾文溪以南切過一系列西傾的地層，而口宵里斷層為烏山頭斷層的背衝斷層，斷層深部終止於烏山頭斷層，深度由北而南（A~D）分別為 0.7 km、0.5 km、0.75 km、1 km（圖 4-1.21）。

3. 平衡剖面

① Suppe (1980)為最早提出通過牛山背斜平衡剖面的研究，利用斷層彎曲褶皺理論建立該區域構造於地底下的樣貌，在牛山背斜之下的南莊層之中存在一滑脫面（圖 4-1.22）。此剖面中無口宵里斷層，故本計畫不採納。

② Hung et al. (1999)的 E 剖面中牛山背斜之下約 3~6 公里深處存在一盲斷層，東側為崙後斷層，崙後斷層在地表分叉成為兩條東傾的逆移斷層，其東邊存在一條西傾的逆移斷層（圖 4-1.23）。此剖面與 Hickman et al. (2002)類似，本計畫僅採納 Hickman et al. (2002)的成果。

③ Hickman et al. (2002)所建立的 A 剖面大致與 Hung et al. (1999)類似，A 剖面中指出崙後斷層(A)、崙後斷層(B)、口宵里斷層的所在位置，B 剖面中也指出崙後斷層、口宵里斷層。崙後斷層與口宵里斷層在地下匯為一條東傾的逆移斷層（圖 4-1.24）。此剖面的口宵里斷層在深部終止於崙後斷層，本計畫認為可作為幾何模型的其中一種可能性。

④ 楊志成（2007）的 C 剖面通過六甲斷層、崙後斷層、口宵里斷層，口宵里斷層在地底下穿過崙後斷層與六甲斷層相接（圖 4-1.25）。本計畫認為此文章提出另一種口宵里斷層幾何的解釋，可做為另一種斷層幾何模型的可能性。

⑤ 石智偉（2022）的平衡剖面中，口宵里斷層發育於崙後斷層以東，向東逆衝，於地底下截切崙後斷層與烏山頭背斜，通過 WST-1 鑽井，此模型較符合大地測量與河階剖面分析的結果（圖 4-1.26）。本計畫認為此模型中口宵里斷層的深度缺乏控制，故不採納。

根據地質圖中的地層走向（圖 4-1.27）（中油，1989；劉彥求等，2021），口宵里斷層區域（烏山頭斷層以東）的地層由老至新依序為中新世糖恩山砂岩、上新世鹽水坑頁岩、隘寮腳層、茅埔頁岩、竹頭崎層、北寮頁岩，在曾文溪以北口宵里斷層走向與地層走向一致，在曾文溪以南口宵里斷層與地層走向斜交，故本計畫認為應以曾文溪為界將口宵里斷層分為南、北兩段各別探討幾何形貌。

本計畫以平衡剖面中的斷層幾何做為擬定斷層二維模型的依據，口宵里斷層及其與鄰近斷層（崙後斷層、六甲斷層）的關係整理如圖 4-1.28、圖 4-1.29。曾文溪以北的兩種斷層幾何模型（圖 4-1.28），模型 A 中口宵里斷層為崙後斷層上盤的次生斷層，口宵里斷層在深度 0~2 公里西傾 60 度接到崙後斷層；崙後斷層在深度 0~4.5 公里東傾 60 度，深度 4.5~12 公里東傾 24 度；六甲斷層在深度 0~11 公里東傾 50 度，深度 11~13 公里滑脫面東傾 4 度。模型 B 中口宵里斷層穿過崙後斷層接到六甲斷層。口宵里斷層在深度 0~5 公里西傾 70 度接到六甲斷層；六甲斷層在深度 0~4 公里東傾 40 度，深度 4~5 公里東傾 4 度，深度 5~8 公里東傾 40 度，深度 8~10 公里東傾 5 度。曾文溪以南的模型 C 中（圖 4-1.29），口宵里斷層為崙後斷層上盤的次生斷層，而六甲斷層為盲斷層。口宵里斷層在深度 0~1 公里西傾 80 度，深度 1~3 公里東傾 70 度；崙後斷層在深度 0~4.5 公里東傾 60 度，深度 4.5~12 公里東傾 24 度；六甲斷層於深度 5 公里處東傾 3 度，深度 5~12 公里東傾 28 度。

4-1-3-4 滑移速率

根據石智偉（2022）於口宵里斷層東、西兩側的階地定年調查結果，曾文溪兩岸的河階可分為五階，由新社 T3 及劉陳灣 T3 的階地高度對比及樣本碳十四定年結果，推測口宵里斷層的抬升速率為 13.7-15.7 mm/yr，以斷層傾角 42°推估斷層滑移速率為 20.0-23.0 mm/yr （圖 4-1.30）。本計畫認為該研究的階地位於崙後斷層及烏山頭背斜區域，其抬升速率可能包含其他構造的變形作用，而非全由口宵里斷層活動所造成，因此該速率應是高估的結果。

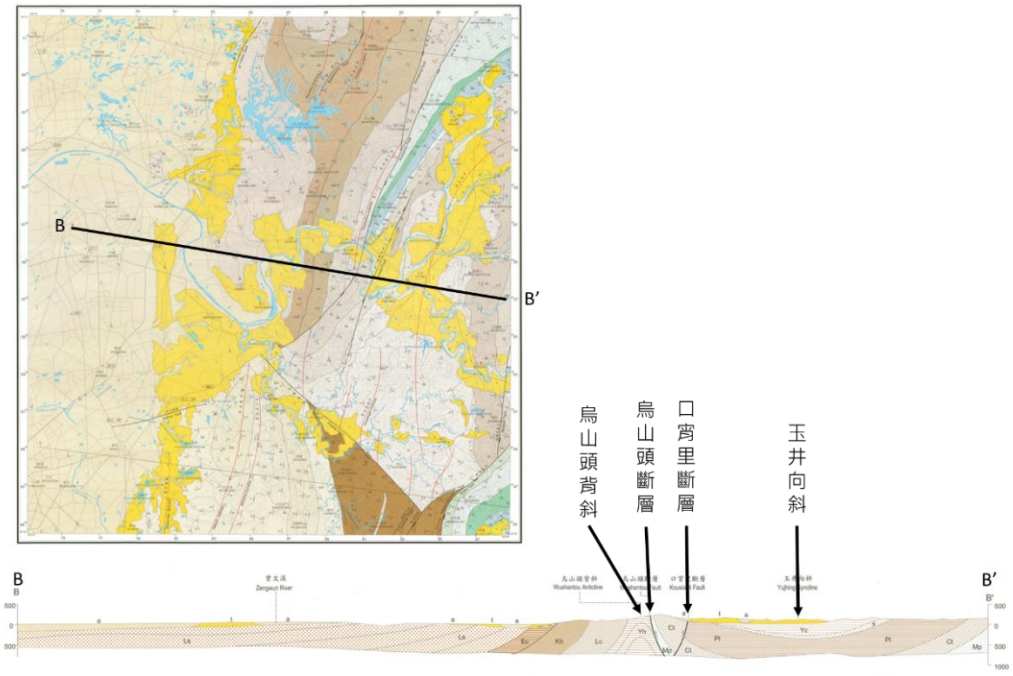


圖 4-1.19：五萬分之一新化圖幅 BB'地質剖面（何信昌等，2005）。

Figure 4-1.19: B-B' cross section from the CGS geological map of the Sinhua sheet (from Ho et al., 2005).

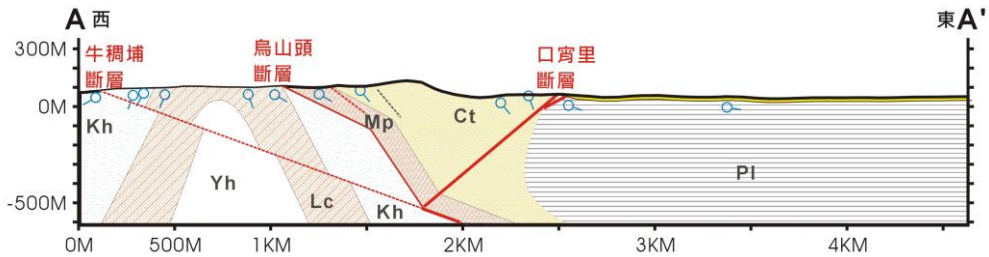


圖 4-1.20：劉陳灣跨口宵里斷層地質剖面圖（劉彥求等，2020）。

Figure 4-1.20: Geological cross section across the Kouhsiaoli fault at Liuchenwan area (from Liu et al., 2020).

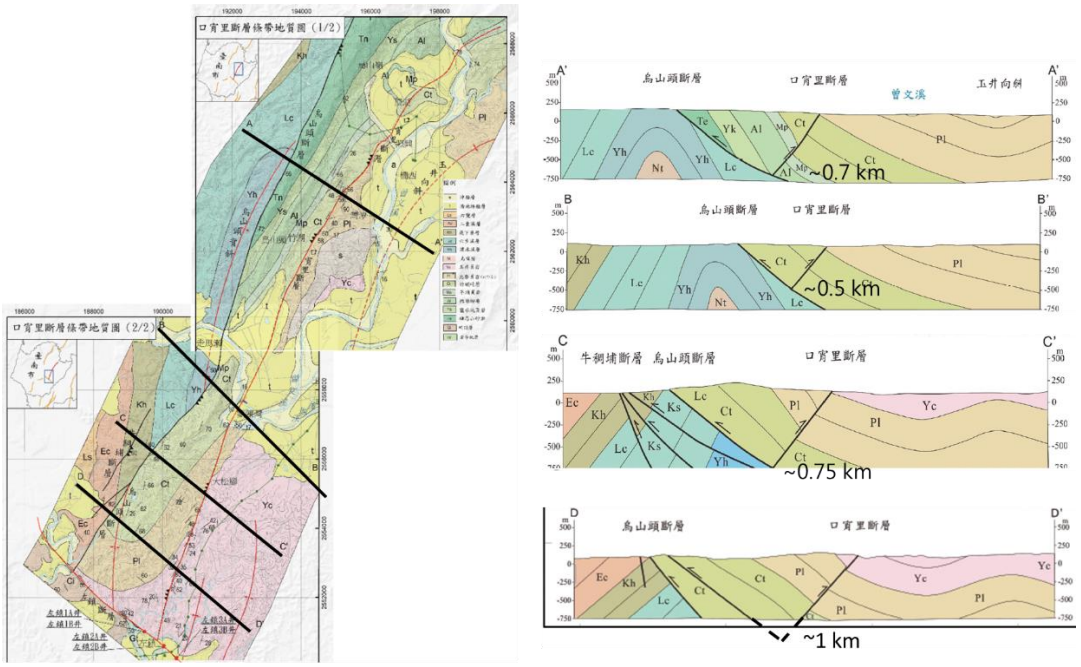


圖 4-1.21：跨烏山頭斷層與口宵里斷層地質剖面圖（劉彥求等，2021）。

Figure 4-1.21: Geological cross sections across Wushantou fault and Kouhsiaoli fault (Liu et al., 2021).

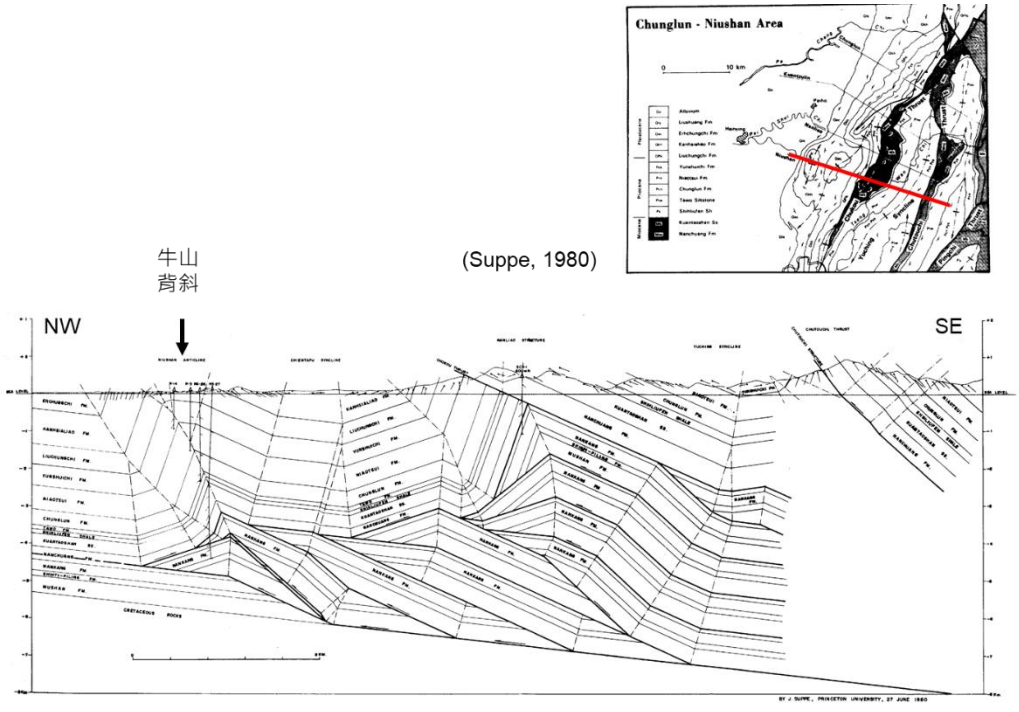


圖 4-1.22：通過牛山背斜之平衡剖面(Suppe, 1980)。

Figure 4-1.22: Balanced cross section through Niushan anticline from Suppe (1980).

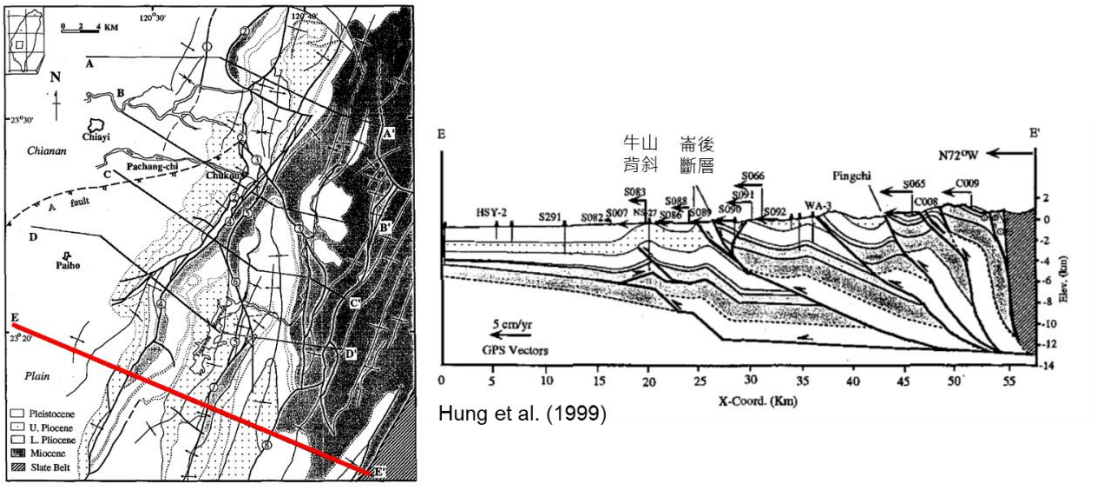


圖 4-1.23：Hung et al. (1999)所建立之 EE'剖面。

Figure 4-1.23: EE' cross profile from Hung et al. (1999)

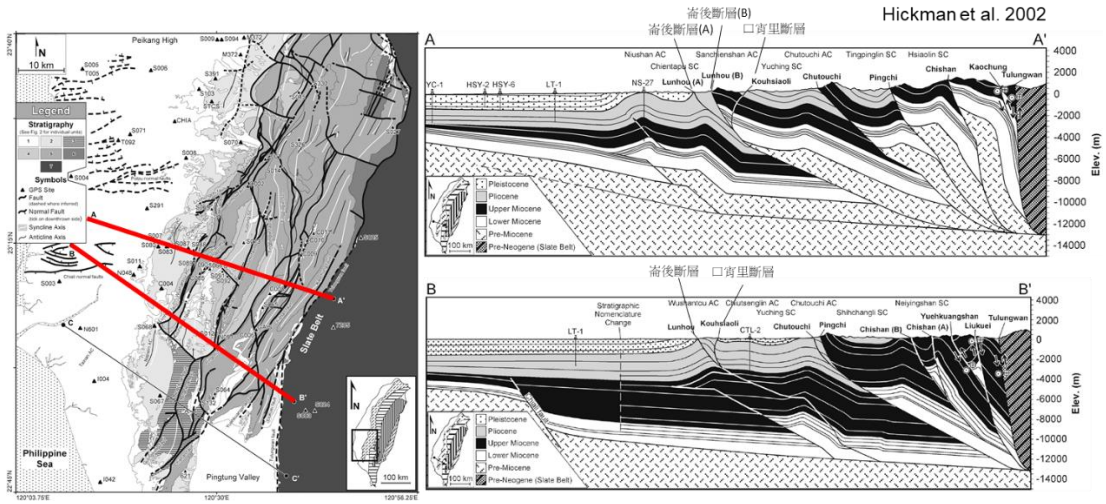


圖 4-1.24：Hickman et al. (2002)所建立之 AA'剖面與 BB'剖面。

Figure 4-1.24: AA' and BB' cross profile from Hickman et al. (2002)

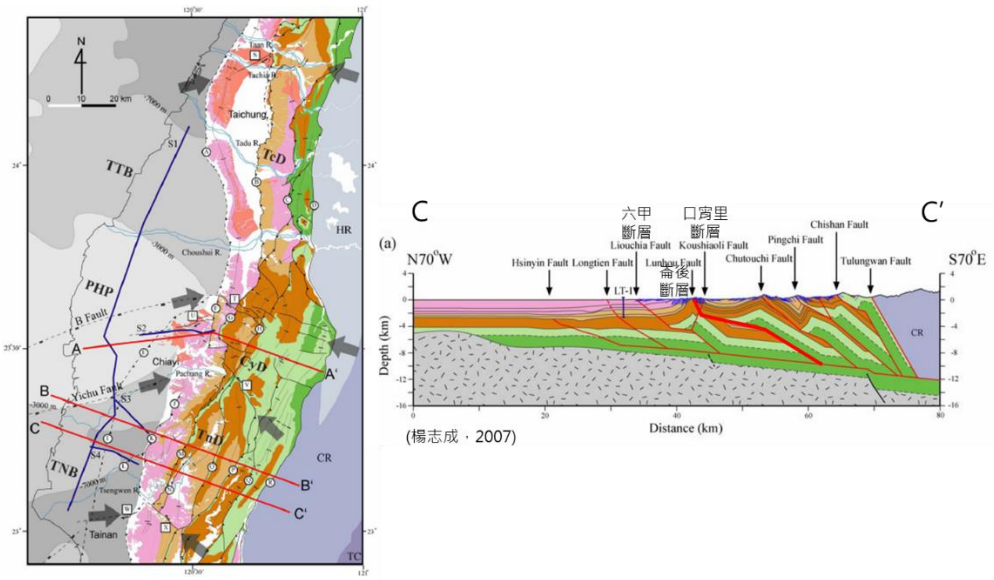


圖 4-1.25：楊志成（2007）所繪之 CC’剖面。

Figure 4-1.25: CC’ cross profile from Yang et al. (2007).

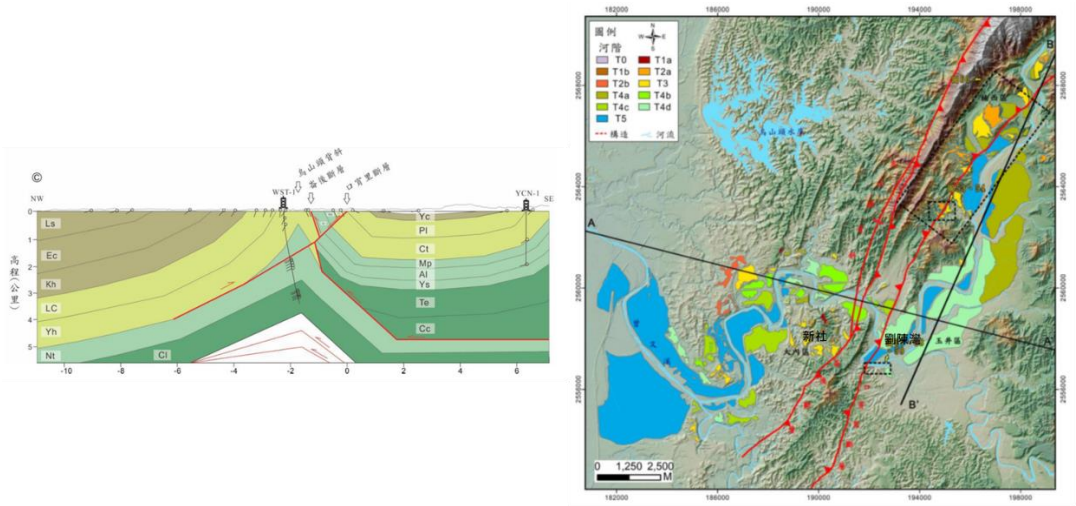


圖 4-1.26：石智偉（2022）所繪之平衡剖面。

Figure 4-1.26: Balanced cross section from Shih et al. (2022).

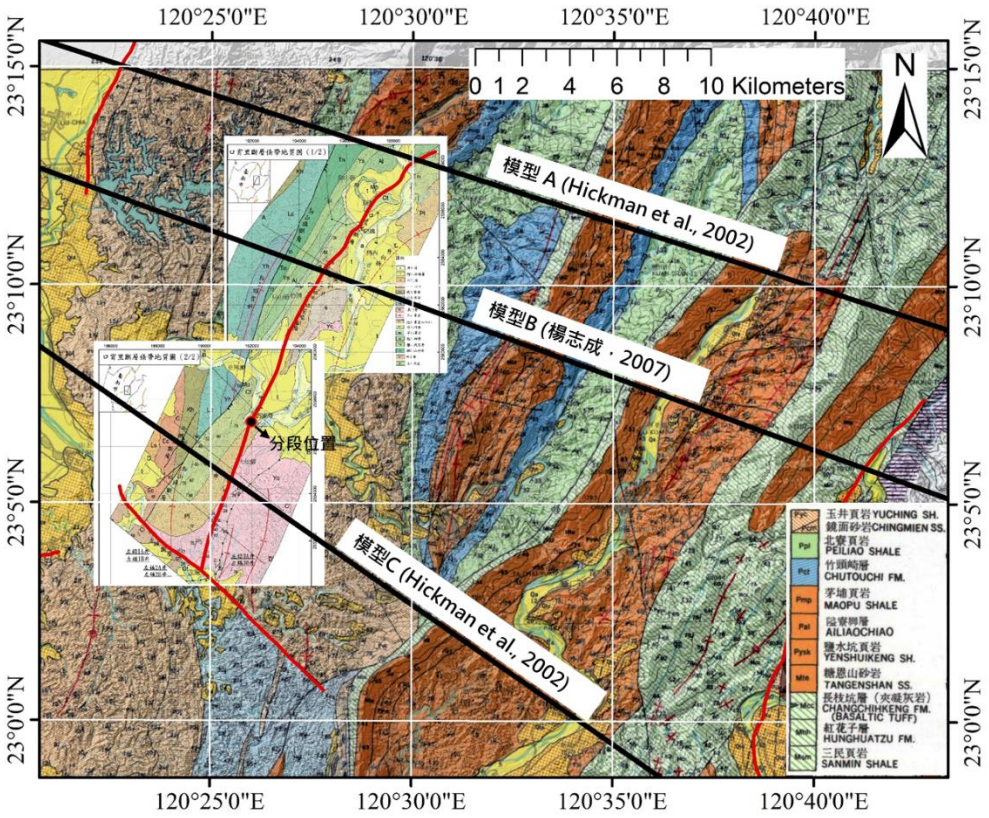


圖 4-1.27：口宵里斷層區域地質圖（中油，1989；劉彥求等，2021）及本計畫設定之口宵里斷層分段位置。

Figure 4-1.27: Geological map around Kouhsiaoli fault (CPC, 1989; Liu et al., 2021) and the location of Kouhsiaoli fault segment.

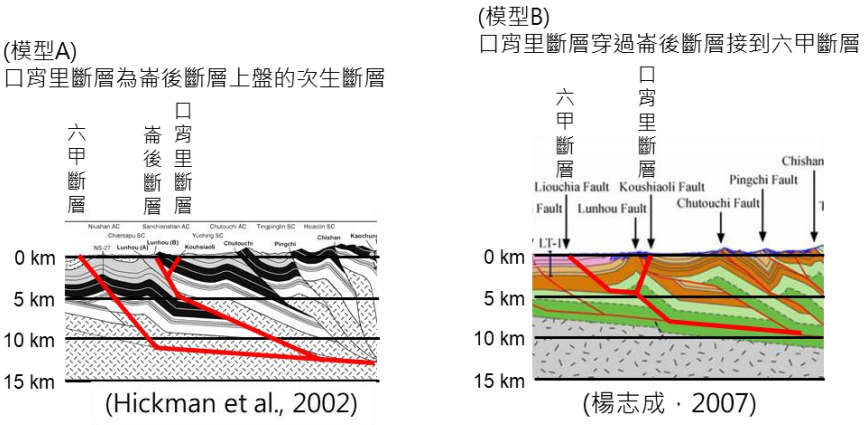


圖 4-1.28：曾文溪以北之斷層幾何模型，剖面位置見圖 4-1.27。

Figure 4-1.28: Fault Geometry Models at the northern side of Zengwen River. profile locations are shown in Figure 4-1.27.

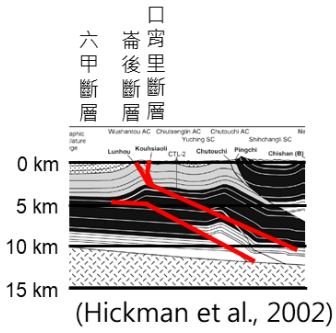


圖 4-1.29：曾文溪以南之斷層幾何模型，剖面位置見圖 4-1.27。

Figure 4-1.29: Fault Geometry Model at the southern side of Zengwen River. profile location is shown in Figure 4-1.27.

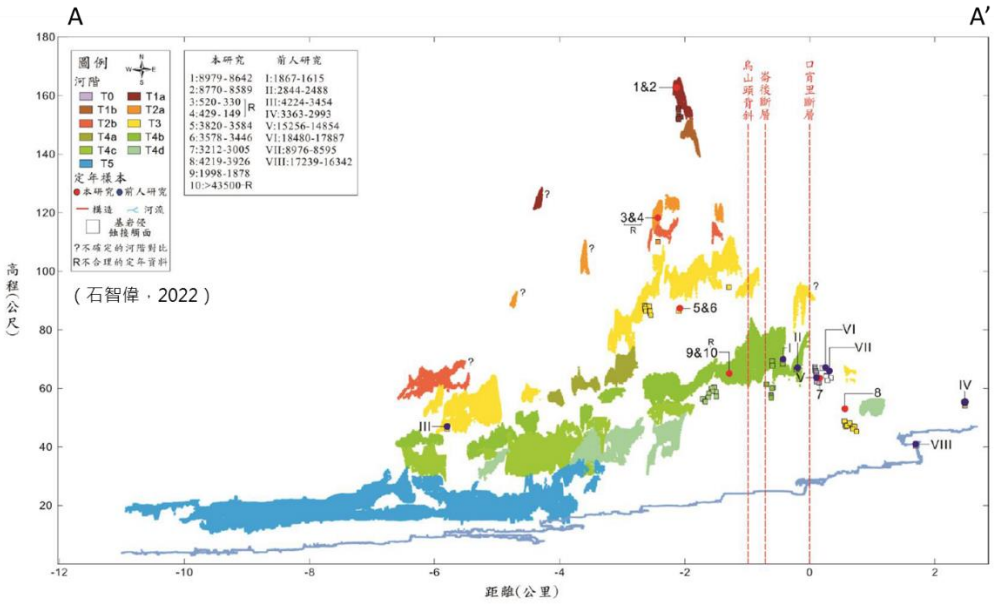


圖 4-1.30：曾文溪沿岸河階高度與碳十四定年資料（石智偉，2022）。剖面位置見圖 4-1.26。

Figure 4-1.30: The elevation distribution of terraces and radiocarbon dating samples along Zengwen River (Shih, 2022). Profile location is shown in Figure 4-1.26.

4-1-4 其他主要斷層

4-1-4-1 九芎坑斷層

九芎坑斷層首先由中國石油公司（1986）提出，由雲林縣古坑向南延伸至嘉義縣竹崎附近，介於古坑斷層與竹崎斷層之間，長約 17 公里。根據地質調查所（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，九芎坑斷層長度為 17 公里。

九芎坑斷層傾角相關文獻及數據彙整於表 4-1.8 、表 4-1.9。

中興社（2020）考慮九芎坑斷層與鄰近大尖山斷層的幾何關係，根據平衡剖面進行評估，依據黃旭燦（2004）的 LINE18 剖面及黃姝琳（2009）的 LINE19 剖面建立以下幾何模式（圖 4-1.31）。

LINE 18：深度 0-2 公里，傾角 25 度；深度 2-2.5 公里，傾角 3.5 度，深度 2.5-5 公里，傾角 30 度；

LINE 19：深度 0-1 公里，傾角 35 度；深度 1-2 公里，傾角 10 度；深度 2-7 公里，傾角 37.5 度。

本計畫依據上述幾何模式擬定九芎坑斷層幾何參數範圍，傾角範圍為 25~35 度，深度範圍為 5~7 公里。以 LINE 18 為本計畫幾何模型的建議初始值，傾角 25 度，深度 5 公里。

九芎坑斷層滑移速率之地質研究相關文獻描述如下（表 4-1.10）：

Lin et al.（2007）於大湖口溪調查九芎坑斷層露頭，量測得到位移量 4.7-9.1 公尺，經碳同位素定年法得到年代為 16540±150 yr BP，推估斷層滑移速率約為 0.28-0.55 mm/yr。Chen et al.（2009）於九芎坑斷層上盤處的華山橋發現古沖積扇露頭，光螢光定年結果顯示古沖積扇年代為 80 ka，而位在下盤的岩心資料顯示，相同年代的地層在下盤的地下深度平均約 44.8 公尺。假設斷層傾角為 25 度，可得到沿斷層面的滑移量為 117 公尺，長期滑移速率約 1.5 mm/yr。根據臺灣地震模型（Shyu et al., 2020）的資料，大湖口地區的階地依據土壤風化程度推估年代約為 5-25 ka，由 5-m DEM 量測斷層崖高，為 30-40 公尺，斷層垂直滑移量為 1.2-

8.0 公厘/年。假設斷層角度為 20-40 度，換算沿斷層面滑移速率為 1.9-23.4mm/yr。

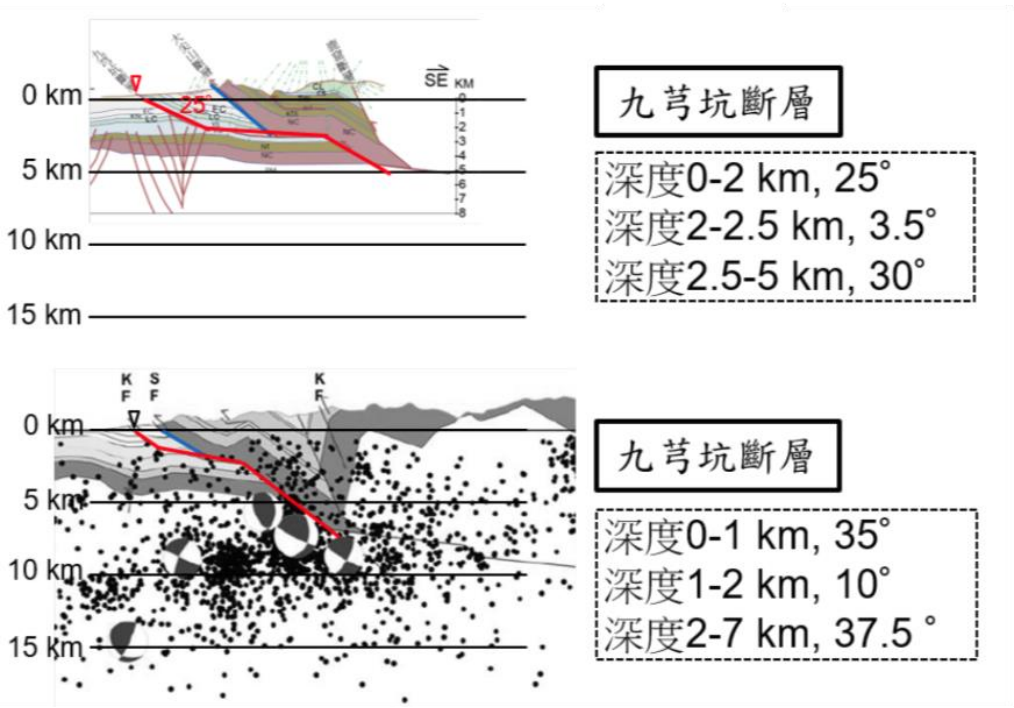


圖 4-1.31：九芎坑斷層幾何模型及權重（中興社，2020）。

Figure 4-1.31: Geometry models and weightings of Chiuchiungkeng fault (Sinotech, 2020).

表 4-1.8：九芎坑斷層傾角相關文獻彙整

Table 4-1.8: Chiuchiungkeng fault dips and references.

作者	方法	傾角	
林慶偉等，1999	大湖口、梅山等地露頭	NE20°-25° / 30°-35°E	
林煌棋，1996	鑽井與震測資料	向東南傾斜 30°	
楊耿明等，2001	震測、野外資料、井下資料	剖面 6	約 30 度向東下傾，地下 2.2 公里轉水平
		剖面 5	約 33-35 度，至深處更陡
		剖面 2	約 35 度
石瑞銓等，2003	地球物理(震測與地電)	25 度向東傾	
黃旭燦等，2004	構造平衡剖面	LINE 18	約 25 度
		LINE 19	約 35 度
翁子偉，2005	反射震測線、震測剖面	古坑到大湖口	30 度
		梅山到南勢坑	33 度
		南勢坑到竹崎	36 度
傾角範圍：25~35度 建議初始值：25度			

表 4-1.9：九芎坑斷層深度相關文獻彙整

Table 4-1.9: Chiuchiungkeng fault depths and references.

作者	方法	深度	
楊耿明等，2001	震測、野外資料、井下資料	剖面 6	2 公里處與大尖山斷層匯合，接著往東於 3.5 公里深處與鹿窟斷層相接
		剖面5	2公里深處與大尖山相接，7.5公里與鹿窟斷層相接
		剖面2	3.5-4公里
黃旭燦等，2004	構造平衡剖面	LINE 18	2.5公里接大尖山斷層
		LINE 19	2公里接大尖山斷層
深度範圍：5~7 公里 建議初始值：5 公里			

表 4-1.10：九芎坑斷層長期滑移速率相關文獻彙整。

Table 4-1.10: Longtern slip rates of Chiuchiungkeng fault and references.

作者	方法	長期滑移速率 (mm/yr)
Lin et al., 2007	斷層露頭調查、碳同位素定年	0.28-5.5
Chen et al., 2009	古沖積扇露頭、光螢光訂年、岩心資料	1.5
Shyu et al., 2020	根據階地風化程度與階地垂直錯移量推估	1.9-23.4
滑移速率範圍：0.3 - 23.4 mm/yr		

4-1-4-2 梅山斷層

根據地質調查所（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，梅山斷層長度 16 公里。

梅山斷層傾角相關文獻及數據描述如下（表 4-1.11）：

根據彭秋紋等（2004）淺層反射震測剖面，斷層在淺部為開花狀構造，斷層帶寬度達 450 公尺，為走向滑移斷層的典型特徵，主斷層為高角度向南傾斜（圖 4-1.32）。黃旭燦（2003）的剖面 LL'通過梅山斷層，斷層未破裂至地表，在深度 1 公里以下為開花狀構造，主斷層向東傾斜（圖 4-1.33）。

梅山斷層深度相關文獻及數據描述如下（表 4-1.12）：

1999 年 10 月 22 日於嘉義地區發生地震矩規模 6.4 之嘉義地震，陳于高等人（Chen et al., 2008）將震後兩週之餘震系列進行雙差分運算重定位，得到兩個主要地震叢集，空間分布深度約在 10~16 公里之間，此地震叢集正好被梅山斷層及九芎坑斷層所包圍（圖 4-1.34）。

本計畫參考以上文獻擬定梅山斷層幾何參數，梅山斷層為走向滑移斷層，淺層震測顯示開花狀構造，估計梅山斷層傾角範圍應在 75°S 至 85°S 左右，該範圍的中間值（80°S）為本計畫的建議初始值。該區域的孕震深度範圍估計為 10~15 公里，中間值（12.5 公里）為本計畫的建議初始值。

梅山斷層滑移速率之地質研究相關文獻描述如下：

根據 Shyu et al.（2020），梅山斷層的滑移速率約為 2.51 mm/yr，範圍介於 2.50-2.54 mm/yr 之間。陳文山等（2013）在好收場址的鑽井資料中，以延伸性最好的全新世沖積 Hb 層做對比。Hb 層頂面碳十四定年結果為 3360-3450 yr BP，而斷層兩側的 Hb 層頂高差約為 8.5 m，因此估算此剖面的長期垂直變動(錯移)速率約為 2.5 mm/yr。Shyu et al.（2020）假設斷層角度為 80-90 度，計算得到沿斷層面的滑移速率約為 2.5 mm/yr，而走向滑移方向的滑移速率尚無法估算。

中正大學與華南大學上的紅土台地被錯位，水平右移 2-2.5km，紅土台地碳

十四定年 38 ka。右移速率為 52.6-65.8 mm/yr（陳文山等，2003）。本計畫認為雖然陳文山等(2003)提出水平方向的長期滑移速率估算，然而斷層兩側的階崖亦有可能是河流侵蝕造成，而不見得是因斷層錯動所致，因此不採納此數據。

目前梅山斷層走向滑移方向的長期滑移速率尚無法透過地質資料推估，因此本計畫採用大地測量資料的滑移虧損速率進行評估。

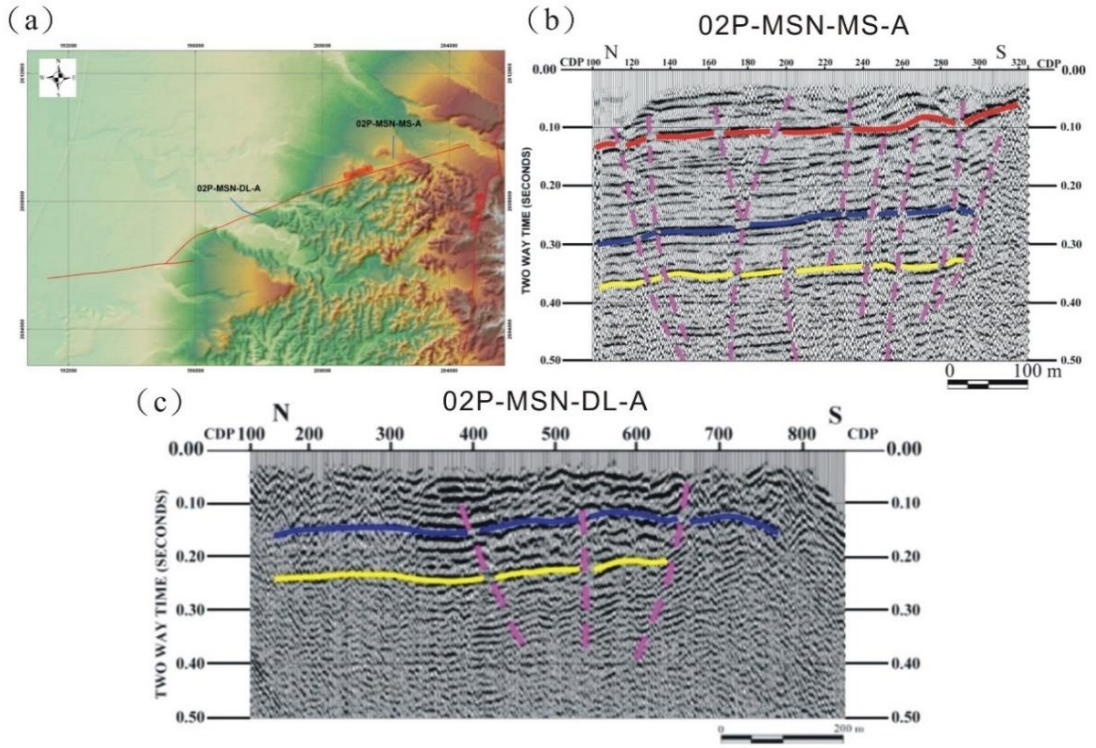


圖 4-1.32：梅山斷層之震測結果（彭秋紋等，2004）。

Figure 4-1.32: Seismic profile of Meishan fault (Peng et al., 2004).

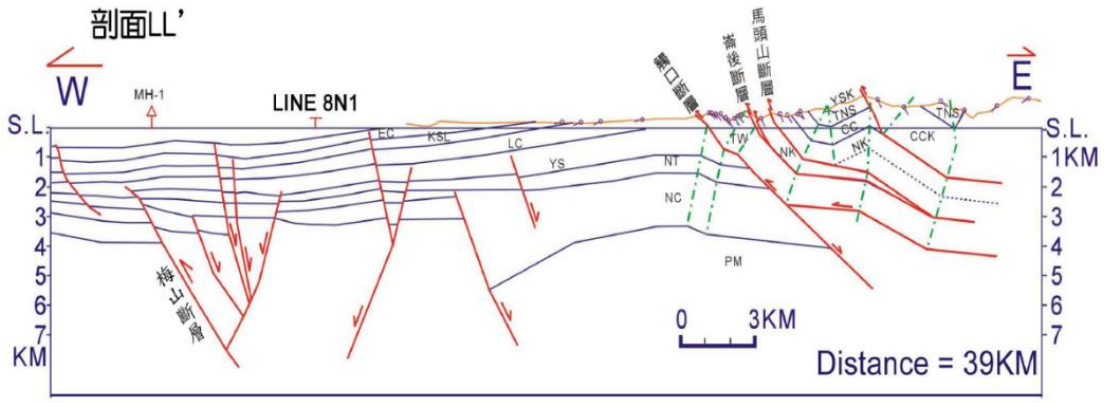


圖 4-1.33：黃旭燦（2003）所繪之平衡剖面。

Figure 4-1.33: Balanced cross section from Huang (2003).

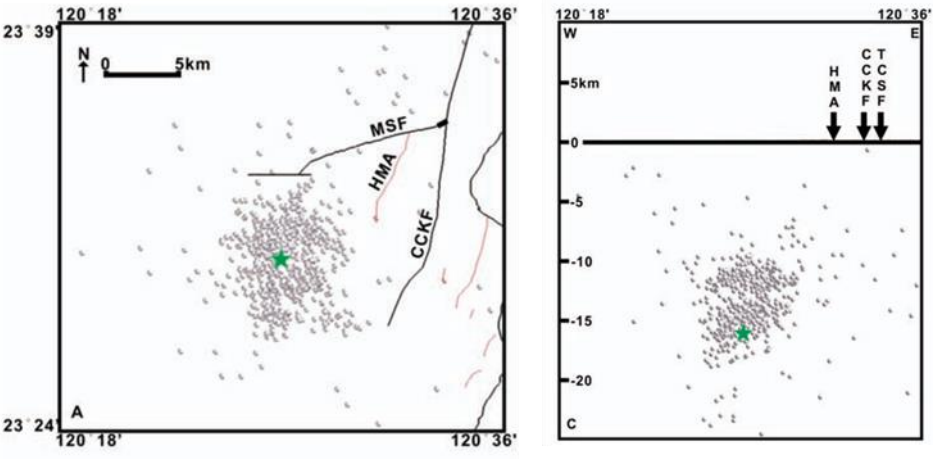


圖 4-1.34：1999 年 10 月 22 日嘉義地震震後兩週之餘震系列分布（Chen et al., 2008）。

Figure 4-1.34: October 22th, 1999, Chiayi earthquake and aftershocks in two weeks.(Chen et al., 2008)

表 4-1.11：梅山斷層傾角相關文獻彙整。

Table 4-1.11: Meishan fault dips and references.

作者	方法	傾角
彭秋紋等，2004	淺層反射震測	高角度
黃旭燦，2003	地質平衡剖面	花狀構造
傾角範圍：75~85 度 建議初始值：80 度		

表 4-1.12：梅山斷層深度相關文獻彙整。

Table 4-1.12: Meishan fault depths and references.

作者	方法	深度
Chen et al., 2008	1999.10.22 嘉義地震餘震分布	約10-16公里
深度範圍：10~15 度 建議初始值：12.5 度		

4-1-4-3 大尖山斷層

中興社（2020）在「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」中考量大尖山斷層分段破裂的可能性，以樟湖山斷層為界分為北、南兩部分，北段長度約 15 公里，南段長度約 14 公里，北段於 1999 年集集地震時曾經錯動。根據地質調查所（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，大尖山斷層總長約 30 公里。

大尖山斷層分為南、北兩段，大尖山（北段）傾角與深度參考中興社（2020）所建立之邏輯樹（圖 4-1.35），其斷層幾何分為三種模式。Case1：深度 0-8 公里，傾角 25 度；深度 8-11 公里，傾角 8.5 度。Case2：深度 0-8 公里，傾角 35 度；深度 8-10 公里，傾角 5 度。Case3：深度 0-8.5 公里，傾角 40 度；深度 8.5-14 公里，傾角 10 度。大尖山（南段）斷層幾何模式參考黃旭燦等（2004）LINE18、LINE19 平衡剖面（圖 4-1.36），LINE18 斷層傾角約 45 度，斷層深度約 5 公里；LINE17 斷層傾角約 23 度，斷層深度約 11 公里。

本計畫根據上述資料擬定大尖山斷層幾何參數，北段的傾角範圍為 25-40 度，南段的傾角範圍為 23-45 度；北段的深度範圍為 10-14 公里，南段的深度範圍為 5-11 公里。北段以權重最高的 Case2 為建議初始值，傾角 35 度，深度 10 公里；南段以中間值為建議初始值，傾角 35 度，深度 8 公里。

大尖山斷層北段與車籠埔斷層相連，滑移速率參考車籠埔斷層的滑移速率，地質研究相關文獻描述如下：

陳文山（2006）利用槽溝研究古地震的錯動量及發生時間，並計算古地震的同震累積變形量（Y）與地震時距（X）的迴歸線形方程式 Y=0.00694X+3.48，得到斷層滑移速率為 6.9 mm/yr。

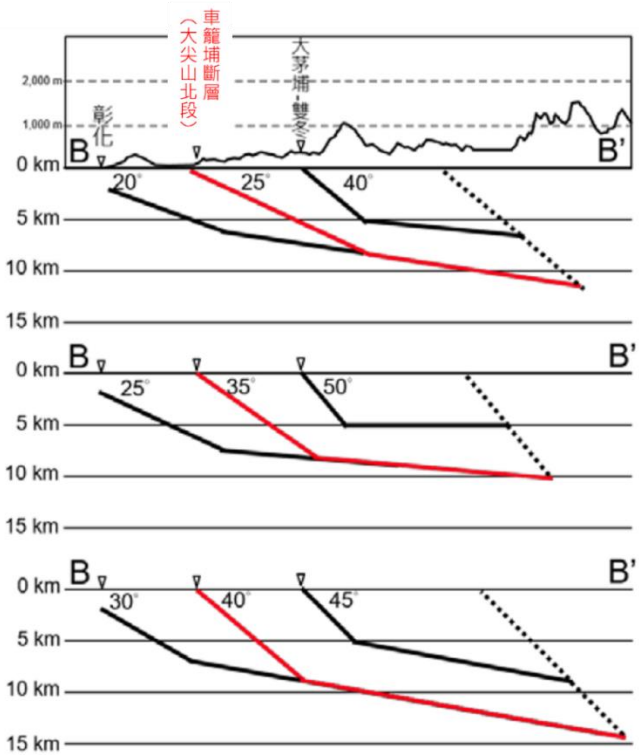


圖 4-1.35：大尖山（北段）斷層幾何模式（中興社，2020）。

Figure 4-1.35: Geometry models of Tachienshan (north) fault (Sinotech, 2020).

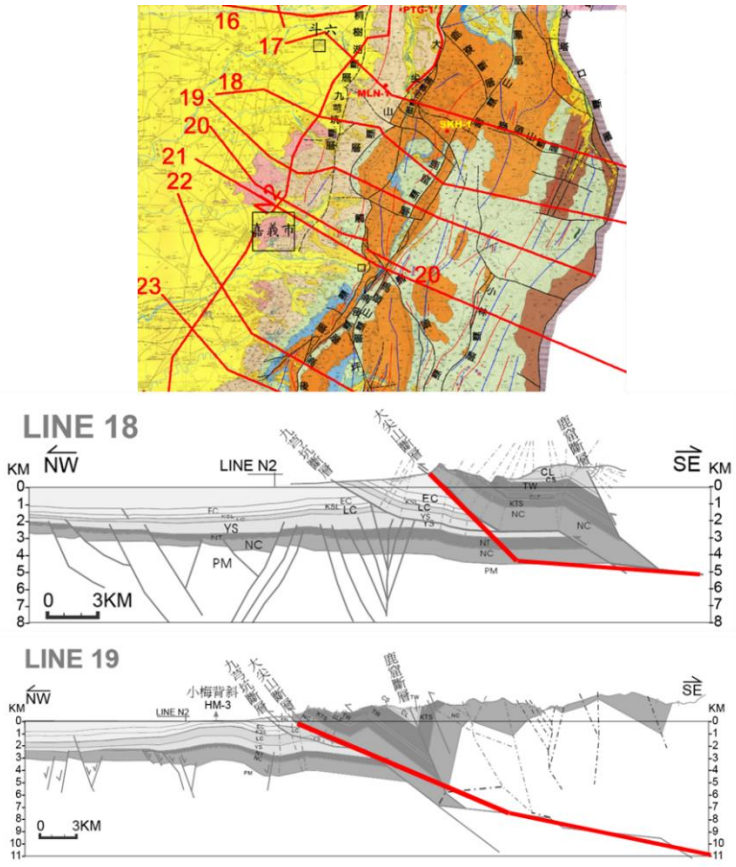


圖 4-1.36：大尖山（南段）斷層幾何模式（黃旭燦等，2004）。

Figure 4-1.36: Geometry models of Tachienshan (south) fault (Huang et al., 2004).

4-1-4-4 木屐寮斷層、六甲斷層

根據地質調查所（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，木屐寮斷層為 7 公里長，六甲斷層為 16 公里長。

斷層傾角相關文獻及數據描述如下（表 4-1.13）：

根據中油公司（Hu and Sheen, 1989）在牛山背斜軸部的鑽井資料，井深約 3,350 公尺處鑽遇一傾角約 43 度的斷面。楊志成等（2005）根據鑽井資料及野外斷層露頭推測斷層之斷坡（ramp）可能以 30~45 度的傾角向西逆衝（圖 4-1.37）。地質調查所（楊志成等，2005）在六甲斷層的薊桐崎附近有 4 口鑽井，根據各鑽井的剪切面位置，推測六甲斷層的斷層面位態為 N40E/30E（圖 4-1.38）。楊志成（2007）建立的平衡剖面中，六甲斷層在淺部於深度 0~4 公里處得斷層傾角為東傾 45 度，沿著上部滑脫面於 9 公里深處接到基底滑脫面（圖 4-1.39）。

表 4-1.13：木屐寮–六甲斷層傾角相關文獻彙整

Table 4-1.13: Muchiliao-Liuchia fault dips and references.

作者	方法	傾角
Hu and Sheen, 1989	牛山背斜軸部 NS-27 鑽井	43E
楊志成等，2005	地質剖面	30~45E
楊志成等，2005	鑽井剪切面	30E
楊志成，2007	構造剖面及地震深度剖面	深度 0~4 公里：45E
傾角範圍：30~45 度　建議初始值：39 度		

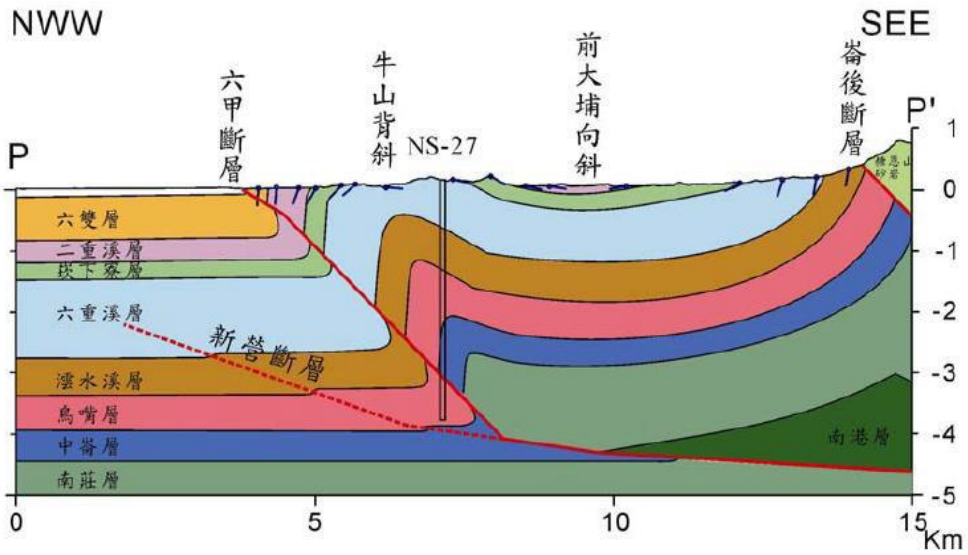


圖 4-1.37：跨六甲斷層地質剖面圖（楊志成等，2005）。

Figure 4-1.37: Geological profile across Liuchia fault (Yang et al., 2005).

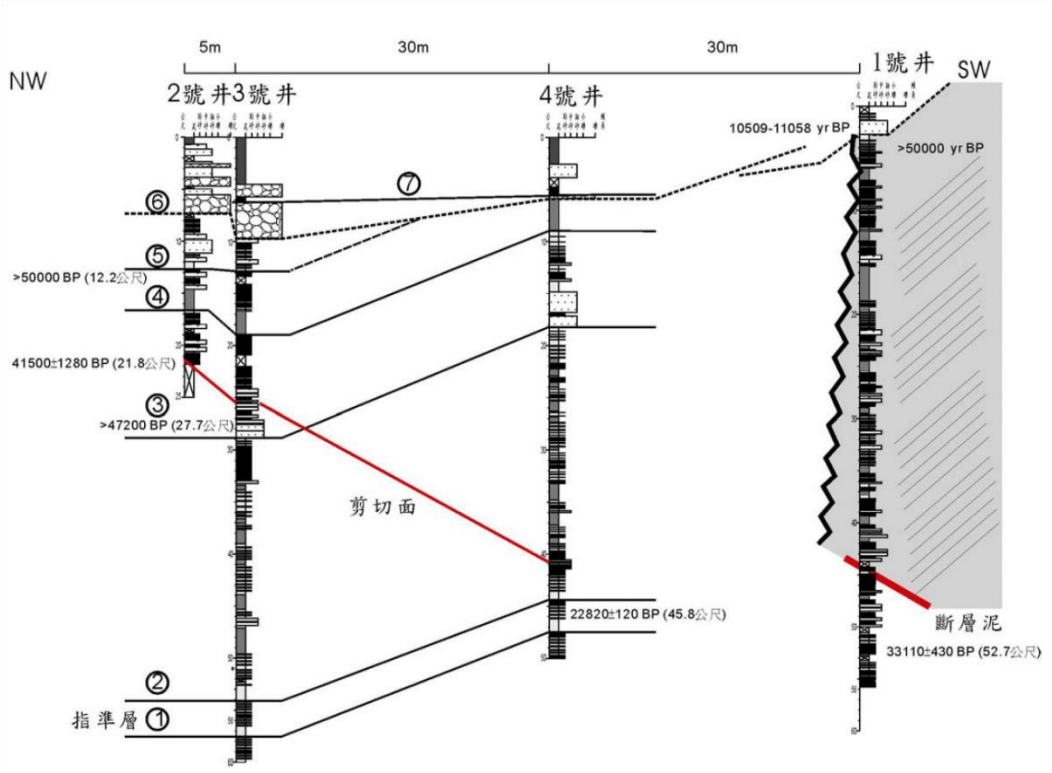


圖 4-1.38：六甲斷層鑽井資料所建立之剖面圖（楊志成等，2005）。

Figure 4-1.38: Profile of drilling data of Liuchia fault (Yang et al., 2005).

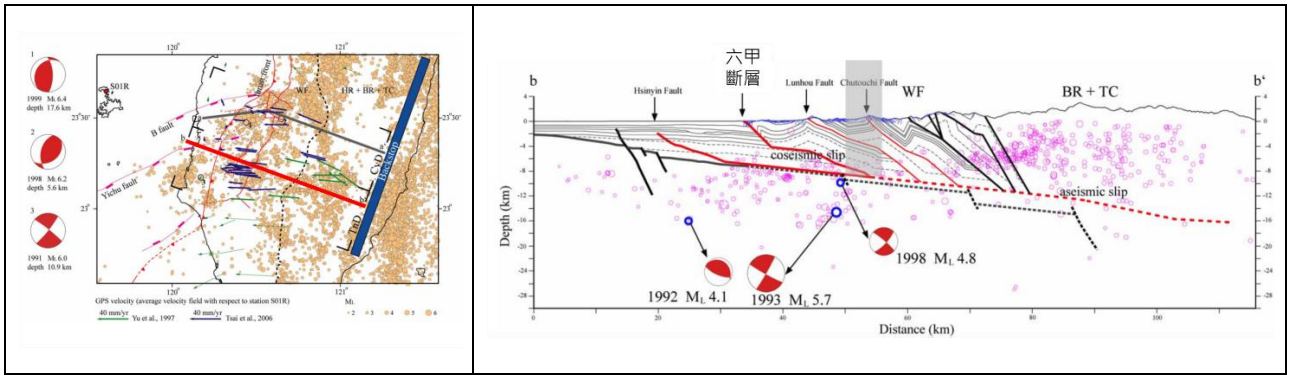


圖 4-1.39：臺南地區構造平衡剖面及地震深度剖面(楊志成，2007)。

Figure 4-1.39: Balanced cross section in Tainan area and earthquake distribution.(Yang, 2007).

斷層深度相關文獻及數據描述如下：

Suppe（1980）建立牛山地區及東側麓山帶的平衡剖面，其下部為疊瓦狀構造，而基底滑脫面至少 8 公里深（圖 4-1.40）。Hung et al.（1999）繪製的 EE'剖面中通過牛山背斜及崙後斷層，六甲斷層未出露地表，牛山背斜主要受控於深部斷坡構造而形成，上部基底滑脫面至少 8 公里深，下部基底滑脫面深度達到 12 公里（圖 4-1.41）。黃旭燦等（2004）建立之平衡剖面顯示牛山背斜為褶皺崖地形，並無描繪六甲斷層（圖 4-1.42）。楊志成（2007）在臺南地區的構造剖面中，認為六甲斷層是沿著上部滑脫面，於約 9 公里深度接到基底滑脫面（圖 4-1.39）。Camanni et al. (2016) P 波速度構造及地震深度分布剖面，其中木屐寮-六甲斷層正好位於 C-C'及 D-D'剖面之間。兩剖面中的地震主要是沿著深度約 10 公里左右的帶狀分布，推估此區域孕震深度為 10 公里左右（圖 4-1.43）。

根據以上前人研究結果（表 4-1.14），本計畫設定傾角範圍 30~45 度，深度範圍 8~12 公里，以各篇文獻數值的平均作為本計畫幾何模型的建議初始值，傾角 39 度，深度 9.7 公里。

斷層滑移速率之地質研究相關文獻描述如下（表 4-1.15）：

楊志成等（2005）由六甲斷層上下盤岩層的對比與定年結果來分析斷層上盤相對下盤的長期滑移速率，其中 C 層年代經樹輪校正為 9,559~10,147 yr，C 層垂直落差 55 公尺，計算抬升速率為 5.4~5.8 mm/yr，假設斷層傾角

30 度，滑移速率為 10.8-11.6 mm/yr。

陳文山等（2010）由白河與六重溪場址之鑽探及定年估算各井位置的抬升速率，木屐寮斷層下盤的抬升速率為 3.4±1.0 mm/yr，上盤為 9.0±1.0 mm/yr，推算木屐寮斷層抬升率為 5.6±2.0 mm/yr，假設斷層傾角為 30 度，滑移速率為 7.2-15.2 mm/yr。

杜冠穎（2013）根據龜重溪河道下切速率推估地殼抬升速率，得到六甲斷層垂直滑移速率約為 3.0-4.6 mm/yr。斷層傾角於近地表處為 30-45 度，於牛山背斜軸部為 40-55 度，估算斷層滑移速率為 4.4~7.1 mm/yr。

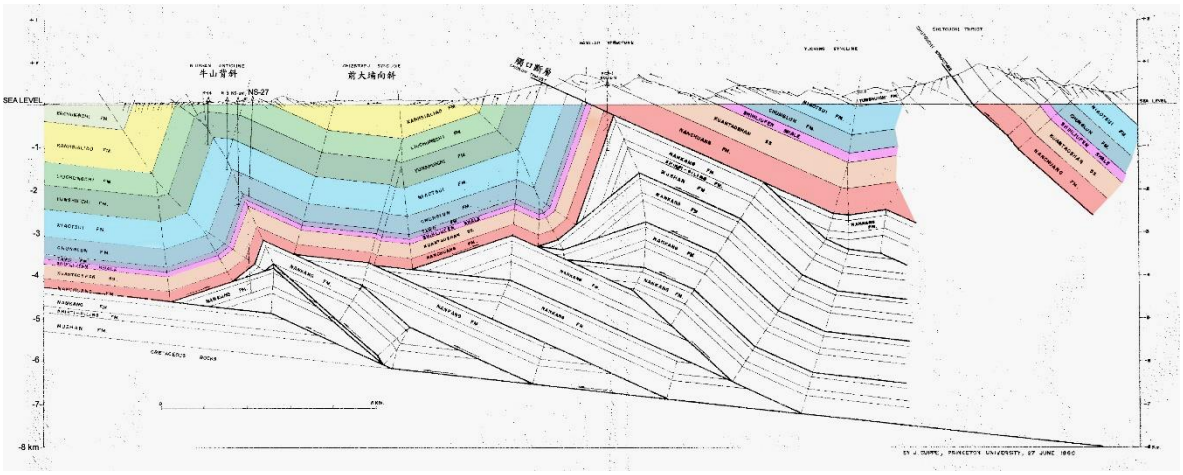


圖 4-1.40：牛山背斜及南寮構造平衡剖面（Suppe, 1980）。

Figure 4-1.40: Balanced cross section of Niushan anticline and Nanliao structure (Suppe, 1980).

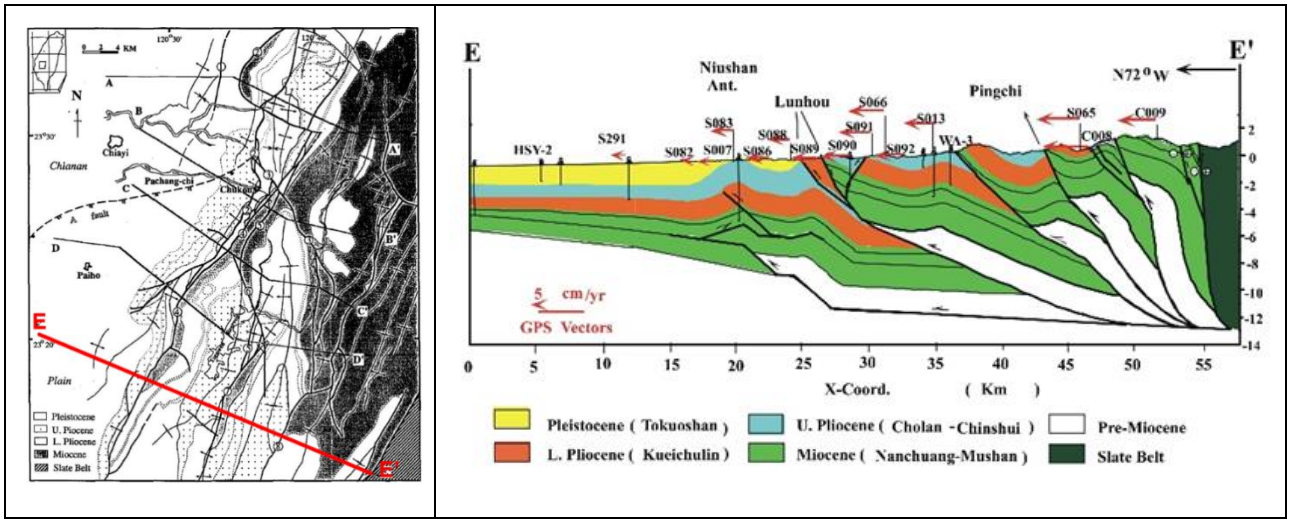


圖 4-1.41：Hung et al. (1999)所繪之平衡剖面圖。

Figure 4-1.41: Balanced cross section from Hung et al. (1999).

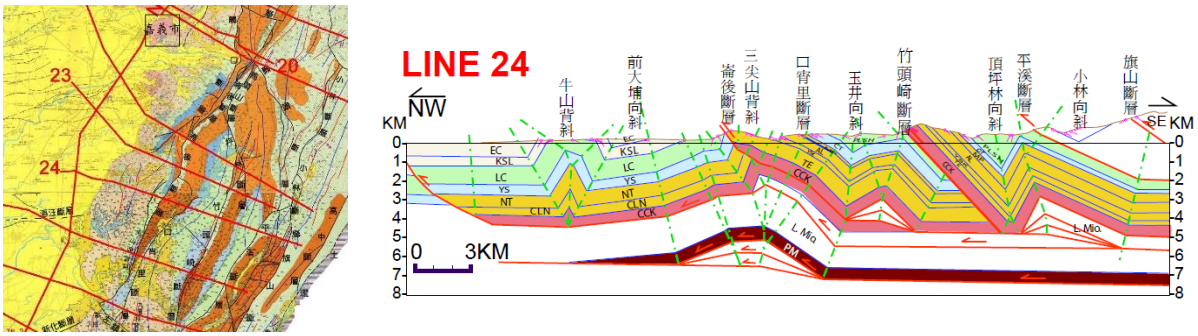


圖 4-1.42：黃旭燦等（2004）所繪之平衡剖面圖。

Figure 4-1.42: Balanced cross section from Huang et al. (2004).

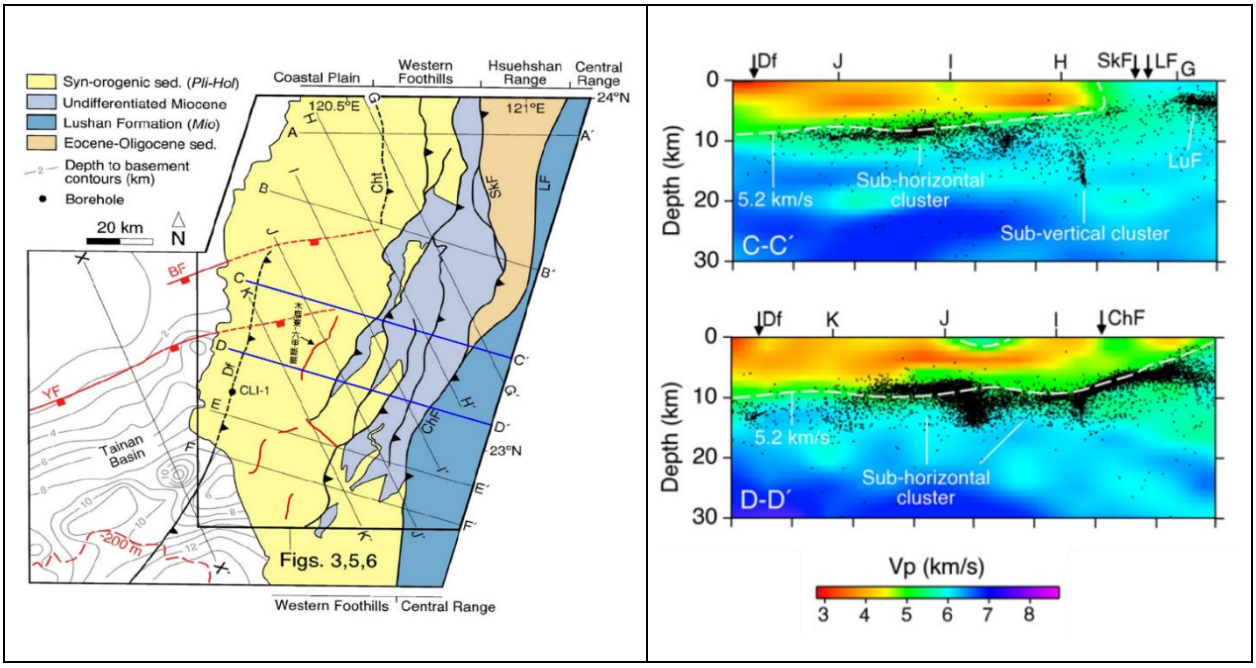


圖 4-1.43：P 波速度構造與地震深度分布剖面（Camanni et al., 2016）。

Figure 4-1.43: P-wave velocity model and seismicity dataset (Camanni et al., 2016).

表 4-1.14：木屐寮–六甲斷層深度相關前人文獻彙整。

Table 4-1.14: Muchiliao-Liuchia fault depths and references.

作者	方法	深度
Suppe, 1980	地質平衡剖面	基底滑脫面至少 8 公里
Hung et al., 1999	地質剖面	下部滑脫面 12 公里
楊志成，2007	構造剖面及地震深度剖面	約 9 公里接基底滑脫面
Camanni et al., 2016	P 波速度構造及地震深度分布剖面	地震沿著深度約 10 公里左右的帶狀分布
深度範圍：8~12 公里 建議初始值：9.7 公里		

表 4-1.15：木屐寮–六甲斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 4-1.15: Longtern slip rate of Muchiliao-Liuchia fault and references.

作者	方法	長期滑移速率 (mm/yr)
楊志成等，2005	六甲斷層野外露頭上下盤岩層錯動量及定年	10.8~11.6
陳文山，2010	白河與六重溪場址之鑽探及定年	7.2~15.2
杜冠穎，2013	六甲斷層上盤龜重溪河道下切量	4.4~7.1
滑移速率範圍：4.4 - 15.2 mm/yr		

4-1-4-5 觸口斷層

根據地質調查所（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，觸口斷層長度為 27 公里長。

觸口斷層傾角與深度相關文獻及數據描述如下：

楊耿明等人（2001）繪製的平衡剖面中（Line 2’），觸口斷層淺部的傾角為 30 度，至深度 1.7 公里轉成 55 度。剖面 Line 2 中觸口斷層傾角約 50 度，至深度約 7.5 公里始轉成水平的層間滑移斷層。Line 4 中觸口斷層以 40 度的傾角自地表下傾至約深度三公里深處轉成位於大窩細砂岩內水平層間滑移斷層。Line 1 中崙後斷層以 30 度的傾角向東下傾，於深度 4 公里以及 5.5 公里處轉成兩段水平滑移斷層（圖 4-1.44）。

陳郁文（2006）利用淺層反射震測法探討觸口斷層及其附近地下構造，在 C 剖面（八掌溪剖面）中，可看到地層大多平緩（嘉義平緩區），到了觸口斷層逆衝而上的位置，可看到斷層傾角為 35 度沿著一滑脫面低角度薄皮逆衝。Dp 測線剖面（石磆剖面）中，觸口斷層在南段的傾角增加至 40 度。E 測線剖面（中崙剖面），觸口斷層的傾角增加至 42 度（圖 4-1.45）。

楊志成（2007）在臺南地區的構造剖面中，深度 0 至 5 公里處觸口斷層傾角約為 23 度，深度 5 公里以下，傾角變為 40 度（圖 4-1.46）。

以上文獻彙整於表 4-1.16，中興社（2020）根據楊耿明等（2001）、楊志成（2007）平衡剖面建立邏輯樹，斷層幾何分為三種模式（圖 4-1.47）。Case1：深度 0-7 公里，傾角 45 度，水平延伸 12 公里。Case2：深度 0-7.5 公里，傾角 30 度；深度 7.5-8 公里，傾角 2.5 度。Case3：深度 0-5 公里，傾角 23 度；深度 5-10 公里，傾角 40 度。三種模式中以 Case 2 的權重稍高。

本計畫根據上述資料擬定觸口斷層幾何參數，傾角範圍為 23-45 度，深度範圍為 7-10 公里，權重最高的 Case2 參數為建議初始值，傾角為 30 度，深度為 8 公里。

目前無地質資料可推估觸口斷層長期滑移速率。

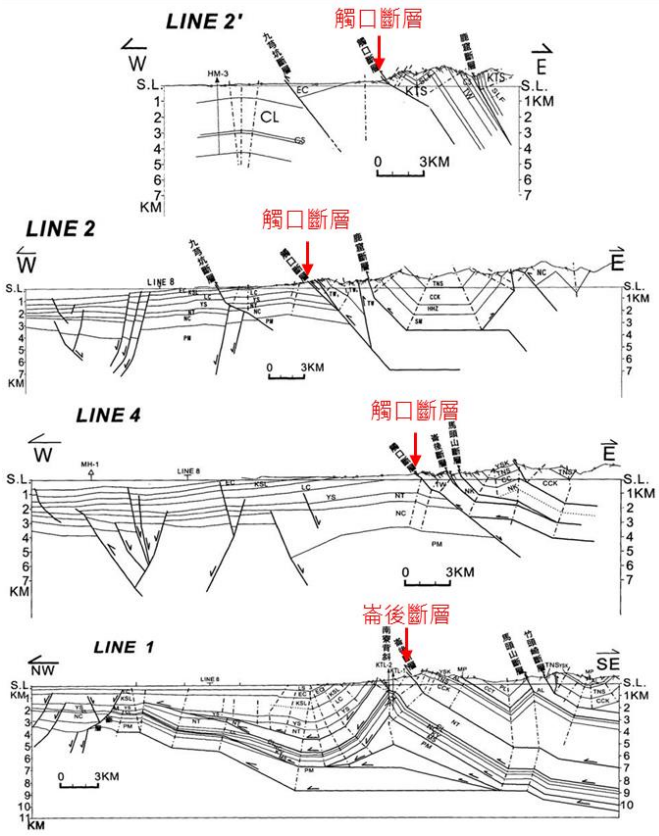
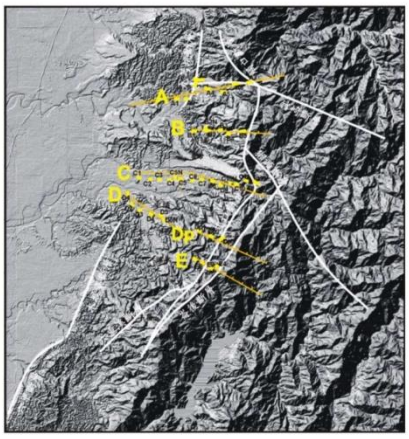


圖 4-1.44：觸口斷層與崙後斷層之平衡剖面（楊耿明等，2001）。

Figure 4-1.44: Balanced cross section of Chukou fault and Lunhou fault (Yang et al., 2001).



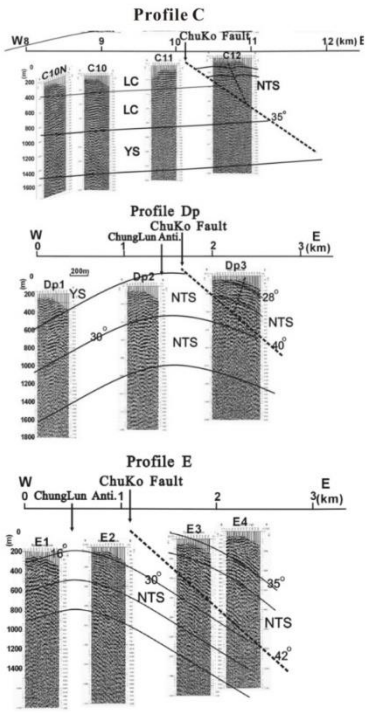


圖 4-1.45：淺層反射震測資料與觸口斷層判釋結果（陳郁文，2006）。

Figure 4-1.45: Seismic profile and interpretation of Chuko fault (Chen, 2006).

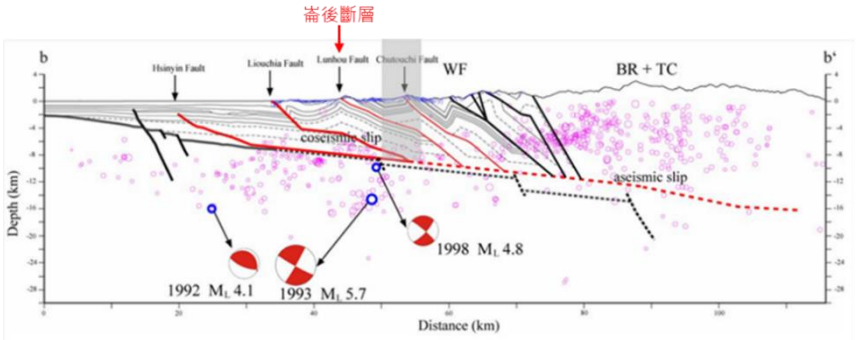


圖 4-1.46：楊志成（2007）所繪之臺南地區構造平衡剖面與地震深度剖面。

Figure 4-1.46: Balanced cross section and seismicity in Tainan area from Yang (2007).

表 4-1.16：觸口斷層傾角與深度相關文獻。

Table 4-1.16: Chukou fault dips, depths, and references.

參考文獻	方法	傾角		深度
楊耿明等，2001	震測剖面、鑽井之地下地層層位及傾角、地表地質圖幅	Line 2’	30° 1.7km ➔ 55°	
		Line 2	50°	7.5 km ➔ 水平
		Line 4	40°	3 km ➔ 水平
		Line 1 (崙後斷層)	30°	4 km ➔ 水平 5.5 km ➔ 水平
陳郁文，2006	淺層反射震測法	C 剖面	35°	
		Dp 剖面	40°	
		E 剖面	42°	
楊耿明，2007	構造剖面及地震深度剖面	深度 0~5 公里：23 E 深度 5~10 公里：40 E		約 10 公里接滑脫面

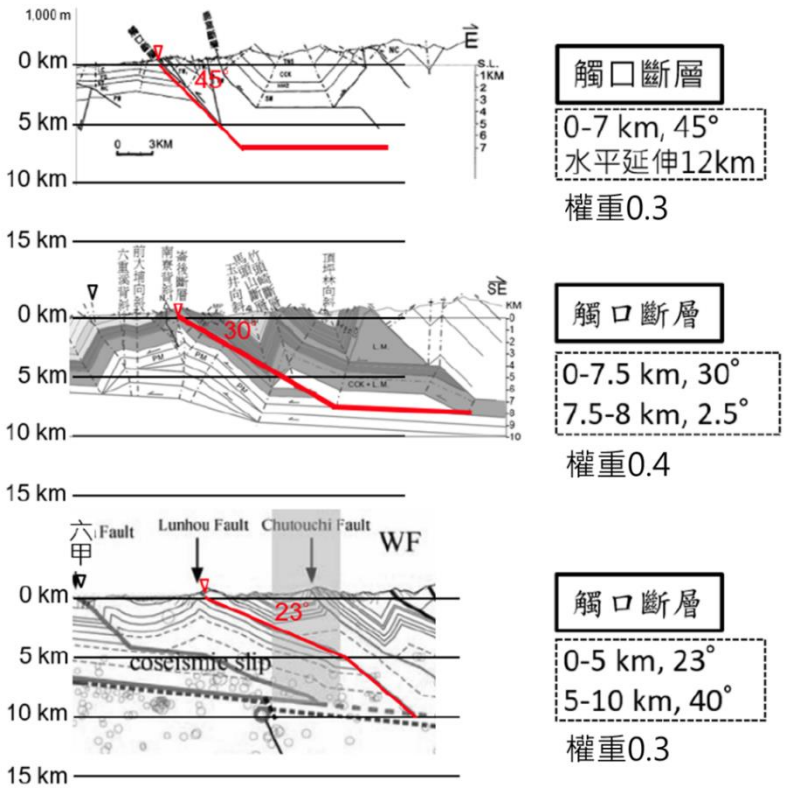


圖 4-1.47：觸口斷層幾何模型及權重（中興社，2020）。

Figure 4-1.47: Geometry models and weightings of Chukou fault (Sinotech, 2020).

4-1-4-6 左鎮斷層

根據地質調查所（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，左鎮斷層長度為 11 公里，運動方式為左移，屬於第二類活動斷層。中興社（2020）考量左鎮斷層往西延伸破裂的可能性，總長度為 20 公里。

左鎮斷層傾角與深度相關文獻及數據描述如下：

何信昌等（2005）根據野外調查繪製地質剖面，剖面中左鎮斷層為高角度斷層（圖 4-1.48）。中興社（2020）統計地震深度分布，左鎮區域主要集中於 8-14 公里深度之間（圖 4-1.49），Suppe（1980）建立的平衡剖面中，滑脫面約 8 公里深（圖 4-1.40），Hung et al.（1999）繪製的平衡剖面中滑脫面約 13 公里深（圖 4-1.41）。

以上資料彙整於表 4-1.17、表 4-1.18。中興社（2020）綜合文獻結果建立三種幾何模式，左鎮斷層之傾角分為 75 度、80 度、85 度，深度分為 8 公里、11 公里、14 公里，以上各模式接近等權重。本計畫根據以上資料擬定左鎮斷層幾何參數，傾角範圍為 75-85 度，深度範圍為 8-14 公里，三種模式中，權重最高的傾角參數為 80 度，深度參數為 11 公里，本計畫以此為二維模型的建議初始值。

目前尚無地質資料可推估左鎮斷層的長期滑移速率。

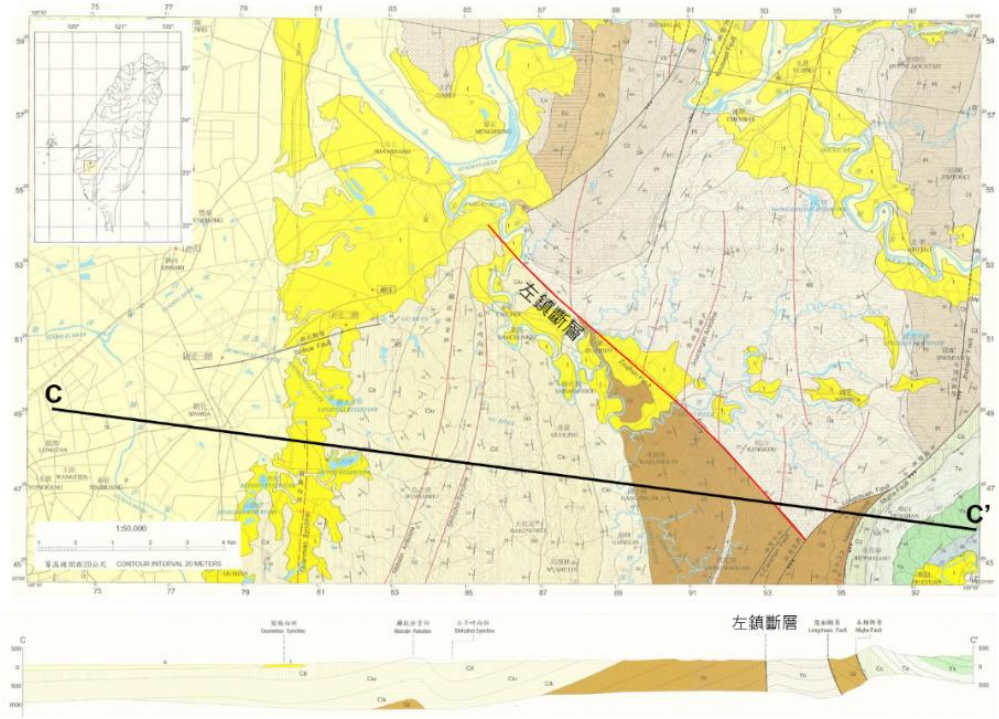


圖 4-1.48：五萬分之一新化地質圖幅（上）及地質剖面（下）（何信昌等，2005）。

Figure 4-1.48: 1:50,000 Geological map (above) of Hsinhua area and geological profiles (below) (Ho et al., 2005).

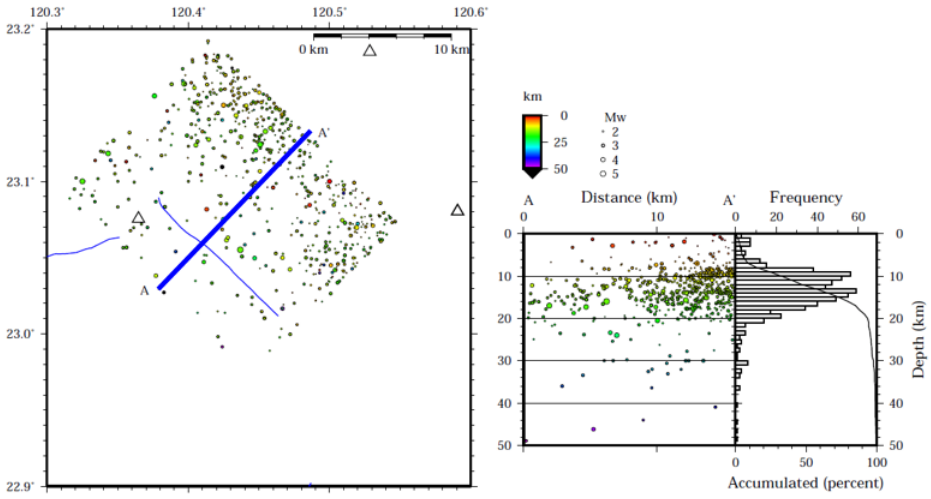


圖 4-1.49：西元 1900-2015 地震深度分布（中興社，2020）。

Figure 4-1.49: Seismicity profile and depth distribtion in 1900-2015 (Sinotech, 2020)

表 4-1.17：左鎮斷層傾角相關文獻彙整

Table 4-1.17: Tsochen fault dips and references.

作者	方法	傾角
何信昌等，2005	地質剖面	高傾角
傾角範圍：75~85 度 建議初始值：80 度		

表 4-1.18：左鎮斷層深度相關文獻彙整

Table 4-1.18: Tsochen fault depths and references.

作者	方法	深度
中興社，2020	地震深度分布	8~14 公里
Suppe, 1980	地質剖面	滑脫面 8 公里深
Hung et al., 1999	地質剖面	滑脫面 13 公里深
深度範圍：8~14 公里 建議初始值：11 公里		

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，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、震測資料等相關之地質證據或地球物理資料進行分析。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嘉南地區重要斷層之最佳幾何參數。

4-2-1 速度剖面分析

首先，為了分析嘉南地區斷層活動之行為，本計畫針對以 2016 年美濃地震後嘉南地區之地表速度場，進行速度剖面之選取與分析。由於本年度主要之分析目標為口宵里斷層、新化斷層以及後甲里斷層，故本計畫選取 AA'至 CC'三個剖面（圖 4-2.1），並將各剖面之水平速度場拆解為平行斷層走向與垂直斷層走向分量，以利後續二維模型進行模擬與分析。

若僅就各速度剖面之分析結果指出，在口宵里斷層區域，由 AA'剖面可看到，於垂直斷層走向之分量上約有 15 至 20 mm/yr 的速度增加量，在平行斷層走向的分量上，約為 5 至 10 mm/yr 左右的速度差異量；而垂直之速度分量上來看，首先，由於六甲斷層西側區域為地層下陷區，故本團隊在此移除該些測站資料，以利更精確的評估活動斷層之影響。經移除後，可看到跨口宵里斷層處之速度落差相較於水平速度場雖較不顯著，但其速度仍同樣約有 5 至 10 mm/yr 左右的速度變化（圖 4-2.3）。接著，就新化斷層部分，於速度剖面 BB'中，可以很明顯的看出其走向滑移斷層之特性，不論垂直或垂直斷層走向之分量上，皆可發現跨斷層處幾乎無速度差異量之存在；僅於平行斷層走向之分量上可看到，其於跨斷層處約有 3 至 10 mm/yr 之差異（圖 4-2.4）。CC'則為後甲里斷層之速度剖面，相較於口宵里與新化斷層，可清楚地看到，後甲里斷層於跨斷層處並無顯著之差異，該剖面之速度場於空間上之變化較具有連續性，平行斷層走向部分由西到東約有

20 mm/yr 之增加，垂直斷層走向分量部分，由西往東起跨越後甲里斷層至西側約減少 5 至 10 mm/yr；垂直速度部分於跨新化斷層處雖同樣無顯著之落差，但由西至東仍有 20 mm/yr 之速度變化（圖 4-2.5）。

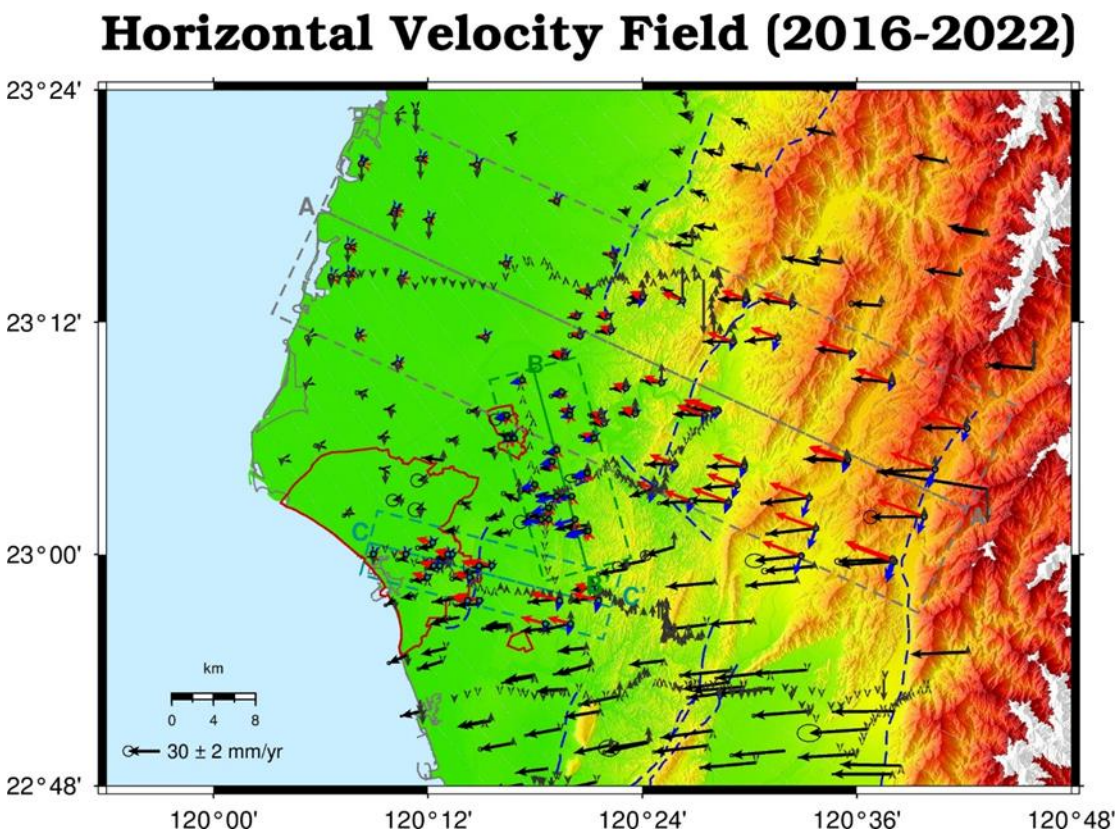


圖 4-2.1：本計畫所分析之 AA'至 CC'速度剖面分布圖。黑色箭頭為水平速度場，紅色為速度剖面中垂直斷層分量，藍色箭頭為平行斷層分量。

Figure 4-2.1: Velocity profiles AA' to CC'.

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概念，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，並給定斷層幾何形貌與斷層滑移量後，便可透過 Okada（1985）之格林函式，求得地表速率。

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）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。

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

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。

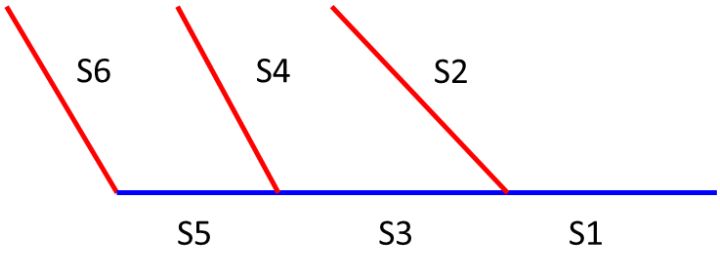


圖 4-2.2：二維斷層模型示意圖。紅色線段為斷層系統中各分支斷層；藍色線為底部滑脫面；S1 至 S6 為斷層面滑移速率。

Figure 4-2.2: 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，以限縮參數搜尋範圍來更有效率地進行擬合。本團隊於去年度進行小崗山、旗山及車瓜林斷層擬合測試時，便發現由於西南部地區受到泥體變形之因素影響，很難同時擬合速度剖面中三方向之速度場，因此本計畫之二維模型中，採用 opening-mode dislocation 來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，於進行擬合工作時，首先以水平速度場方向為主，待平行斷層及垂直斷層走向之速度分量趨勢以斷層活動所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。

而本年度針對口宵里斷層、新化斷層以及後甲里斷層進行擬合時，又發現與過去不同的問題。首先，就 AA'剖面口宵里斷層之速度場擬合模擬，根據 4-1 中彙整地質相關文獻所提出之三個構造平衡剖面（剖面 A 至剖面 C），可發現口宵里斷層、六甲斷層及崙後斷層三者間之交互關係較為複雜，由北往南之變化差距大。其中，北段剖面 A 及南段剖面 C 所提出之平衡剖面皆認為口宵里斷層為崙後斷層之分支斷層。然而，由於兩條斷層距離過於接近既有之大地測量資料空間解析度不足，因此難以解析口宵里斷層與崙後斷層在這兩個模型中之貢獻量；口宵里斷層在這兩個模型的貢獻量，將相當於崙後斷層之貢獻。此外，由於本計畫在此斷層區域所獲得之資料以北段之資料為主，且以精密水準測線資料較為密集可靠，而該測線主要分布於 4-1 中所提出口宵里北段之平衡剖面 B，且對照大地測量資料，可發現速度剖面由西至東有一較長波長之速度梯度，該類速度梯度通常由底部滑脫面產生，型態亦與剖面 B 相符，故本團隊在此以剖面 B 所提出之幾何作為參考值約制，進行口宵里斷層之擬合。以下將就口宵里斷層之斷層參數模擬建置進行詳細說明，並以此為例，闡述地質構造平衡剖面與大地測量資料之搭配應用對於斷層幾何參數精度之提升效果。

首先，由於六甲斷層西側平原區長期以來有地層下陷之現象，為避免該區域之資料影響活動斷層幾何參數之擬合與後續斷層潛勢之評估，本計畫於此先行移除六甲斷層以西之垂直速度場。隨後，根據口宵里斷層剖面之速度場資料，可發現於剖面約 40.0 至 50.0 km 處起有一較緩而顯著之速度變化，為擬合此一長波長之速度梯度，本團隊在此先嘗試放置一條斷層，測試顯示該速度梯度可能由一傾角僅約 10°之東傾斷層所產生，在此階段，垂直速度之成果仍不完善(圖 4-2.3)，但該測試成果揭示此區域之速度變化有很大的可能是由較低傾角之滑脫面所產

生。接著，為了擬合平行斷層及垂直速度場中在 40.0 km 處明顯的速度轉折，本團隊根據 4-1 節中平衡剖面 B 所提出之西傾斷層進行粗略之測試後，發現除了約 40.0 km 處需要西傾之口宵里斷層來進行擬合之外，斷層西側亦有另一較不顯著之速度梯度，落於六甲斷層附近區域。因此，本團隊最終以東傾之六甲斷層、西傾之口宵里斷層及一往東傾斜隨後轉為水平之滑脫面進行擬合，並搜尋最佳之斷層幾何參數（圖 4-2.4）。此外，在進行口宵里斷層幾何參數之最終搜尋時，本團隊亦同時嘗試統計搜尋機率，期望藉由此評估可增進瞭解斷層幾何可能之分布範圍（圖 4-2.4）。由前述過程可知，在搜尋最佳斷層幾何過程中，除了地質證據及相關研究所提出之構造平衡剖面外，大地測量資料之分析對於地質相關證據不足之區域，可提供相當大之助益與約制效果，而藉由地質與測地資料之交互參照與剖析，我們可以更好的降低斷層幾何參數之不確定性，以利後續之斷層活動潛勢評估工作能有更佳之成果。

而新化斷層之 BB’剖面，由於該斷層為北傾且以右移為主之斷層，較為單純，故無需另外調整滑脫面或使用 opening-mode dislocation 進行擬合（圖 4-2.5）。。然而，後甲里斷層 CC’剖面部分，本團隊首先欲同時擬合三維速度場時，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，本團隊先過滑脫面傾角之調整，擬合較常波長之速度趨勢，再藉由 opening-mode dislocation 於後甲里斷層延伸至地表處，以及已知為中洲背斜與龍船背斜處，分別放置一個約 0.6 km、6.8 km 及 20.3 km 長的泥體構造，以針對垂直之速度分量進行擬合（圖 4-2.6）。

根據各剖面之擬合成果，口宵里斷層可能為傾角約 32.2°向西傾、斷層滑移深度約 0.1 至 4.8 km 深之背衝斷層；新化斷層則為高傾角走滑斷層，為右移斷層，傾角約 84.0°向北傾，斷層滑移分布範圍約 0.3 至 18.0 km；後甲里斷層則為傾角約 42.3°之西傾背衝斷層，滑移分布範圍為 3.5 至 4.2 km。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（表 4-2.1）。

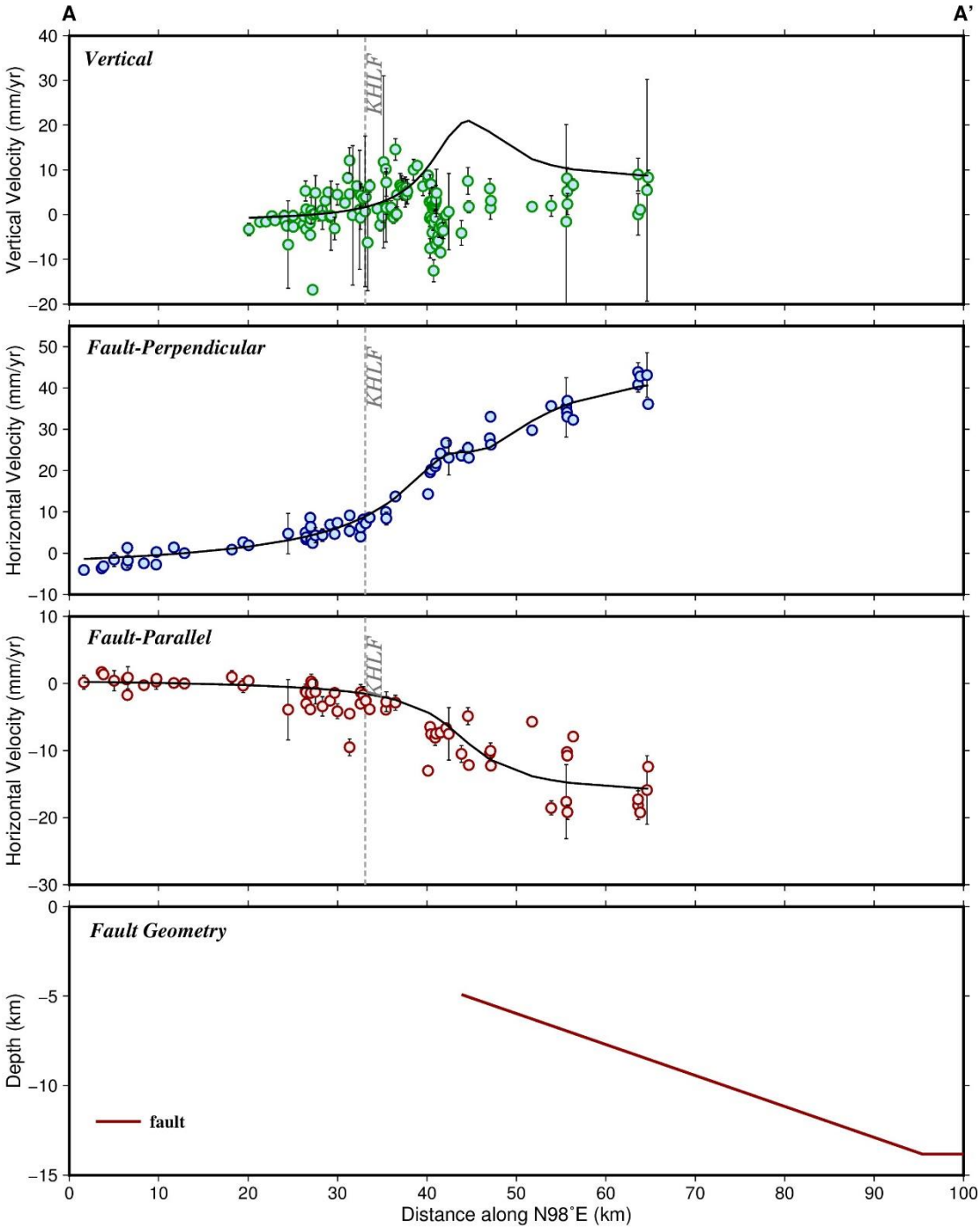


圖 4-2.3：AA'速度剖面與二維斷層模型第一階段擬合測試成果（單一條斷層）。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層走向分量；紅色圓圈為平行斷層走向分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何。

Figure 4-2.3: 2D elastic fault modeling result of AA' profile (with single fault).

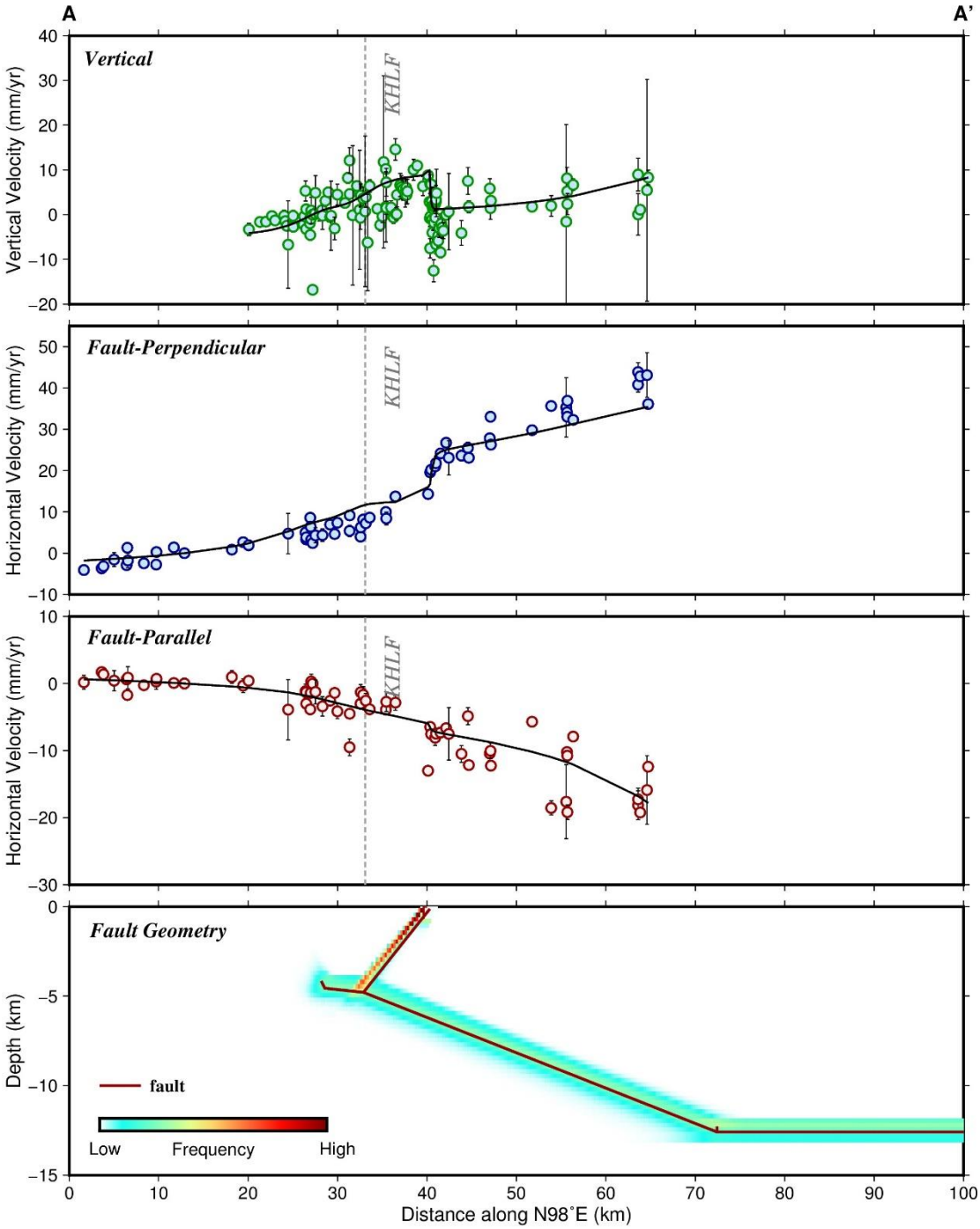


圖 4-2.4：AA'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層走向分量；紅色圓圈為平行斷層走向分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何；藍色虛線為其他可能構造。

Figure 4-2. 4: 2D elastic fault modeling result of AA' profile.

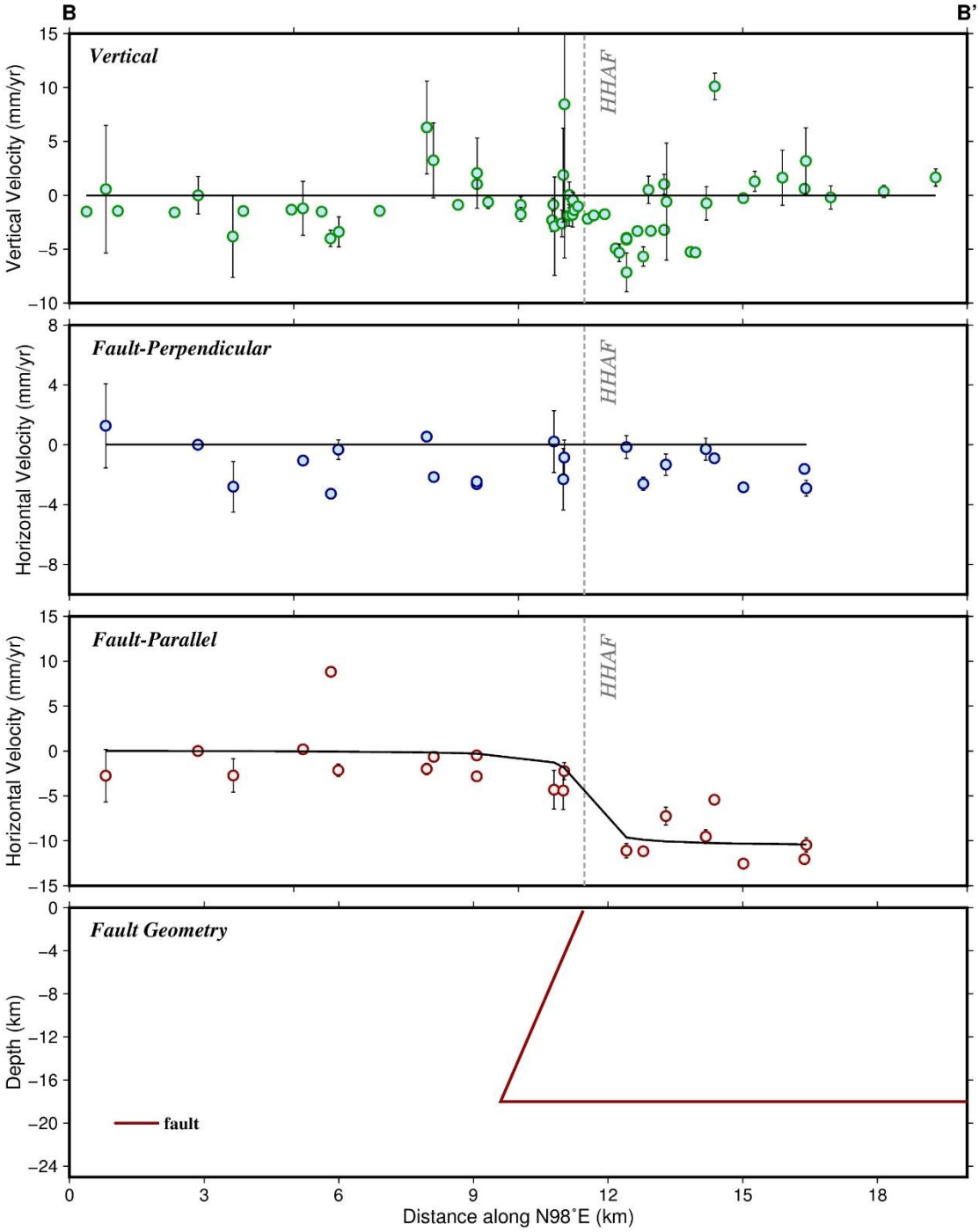


圖 4-2.5：B–B'速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層走向分量；紅色圓圈為平行斷層走向分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何。

Figure 4-2. 5: 2D elastic fault modeling result of BB' profile.

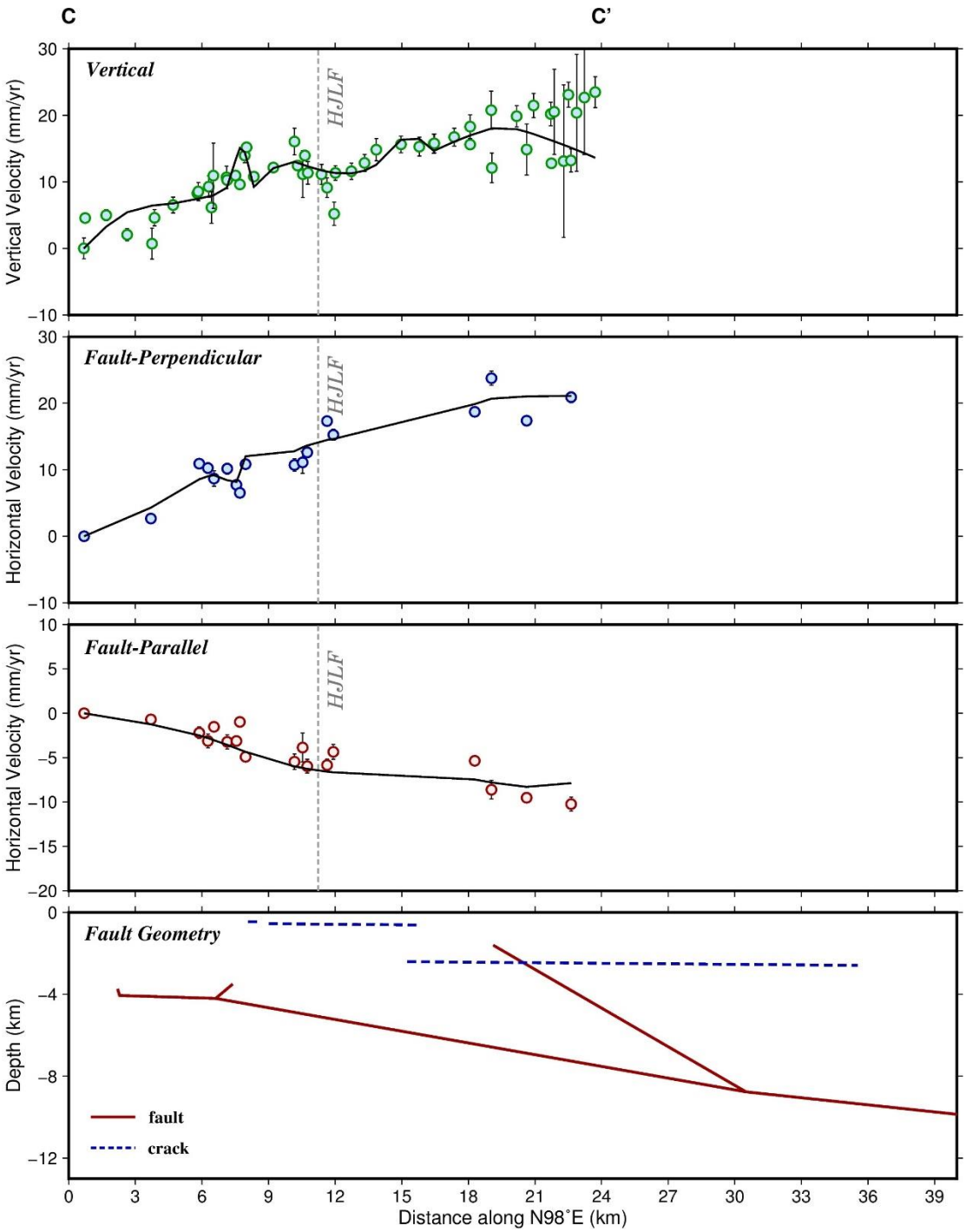


圖 4-2.6：C–C’速度剖面與二維斷層模型擬合成果。綠色圓圈為垂直速度；藍色圓圈為垂直斷層走向分量；紅色圓圈為平行斷層走向分量；黑色實線為最佳斷層幾合所得之速度擬合曲線；紅色實線為最佳斷層幾何。

Figure 4-2. 6: 2D elastic fault modeling result of CC’ profile.

表 4-2.1：重要斷層最佳斷層幾何參數

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

	斷層名稱	傾角 （°）	斷層滑移範圍 （km）	滑移速率 (mm/yr)
1	口宵里斷層	32.2° (西傾)	0.1-4.8	14.7
2	新化斷層	84.0° (北傾)	0.3-18.0	10.7
3	後甲里斷層	42.3° (西傾)	3.5-4.2	26.7

第五章、嘉南地區斷層模型建置

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正演推求地表變動速度，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，得以較容易的建構三維斷層幾何與較快速的計算。

5-1-2 斷層幾何參數設定

BLOCKS 斷層滑移速率模擬，今年針對臺灣中南部區域重點三條斷層與鄰近六條斷層進行斷層膜擬，分別為：口宵里斷層、新化斷層、後甲里斷層，與九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層(北)與大尖山斷層(南)、木屐寮斷層與六甲斷層、觸口斷層、後甲里斷層(圖 5-1.1)。透過初步二維模擬，三條主要斷層的斷層參數初始值訂為：口宵里斷層由北至南分為三小段，西傾 32.2˚，斷層深度 0.1-4.8 km；新化斷層分為東西兩段，北傾 80.0˚，斷層深度 0.3-18.0 km；後甲里斷層由北至南分為三小段，西傾 42.3˚，斷層深度 3.5-4.2 km。

此外，BLOCKS 可以加入斷層初始滑移速率協助斷層模擬。本期模擬中，口宵里斷層參考本案二維模擬成果最為滑移速率約制；而九芎坑斷層、梅山斷層、木屐寮斷層、新化斷層、後甲里斷層等五條斷層等，則參考徐浩德教授(Shyu et al., 2016) 發表之地質滑移速率作為模擬初始約制。

本期計畫臺灣西南部包含重點斷層，共有十條斷層構造，故本次模擬設定十一個塊體，而由其中五個塊體邊界描述此十條斷層。於 BLOCKS 規則中，於所

有塊體外圍設一點(座標：119.310，25.839)，使外圍標訂為相對不動之塊體。其中同根據經濟部中央地質調查所彙刊(林啟文等，2021)對活動斷層統整結果，本次十條斷層運動模式中，僅梅山斷層、新化斷層、左鎮斷層是以走向滑移為主要運動模式，圖中以藍色線段標示；他者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)。

BLOCKS 模擬時考量為大範圍塊體相對旋轉的運動，模擬初步將大地視為水平相對運動，參考 GNSS 之水平速度場。本次模擬，使用三個時段之 GNSS 連續站與移動站之水平速度場，分別為 2002-2010 年共 1121 站、2010-2016 年共 1205 站、2016-2022 年共 1269 站(圖 5-1.1)。

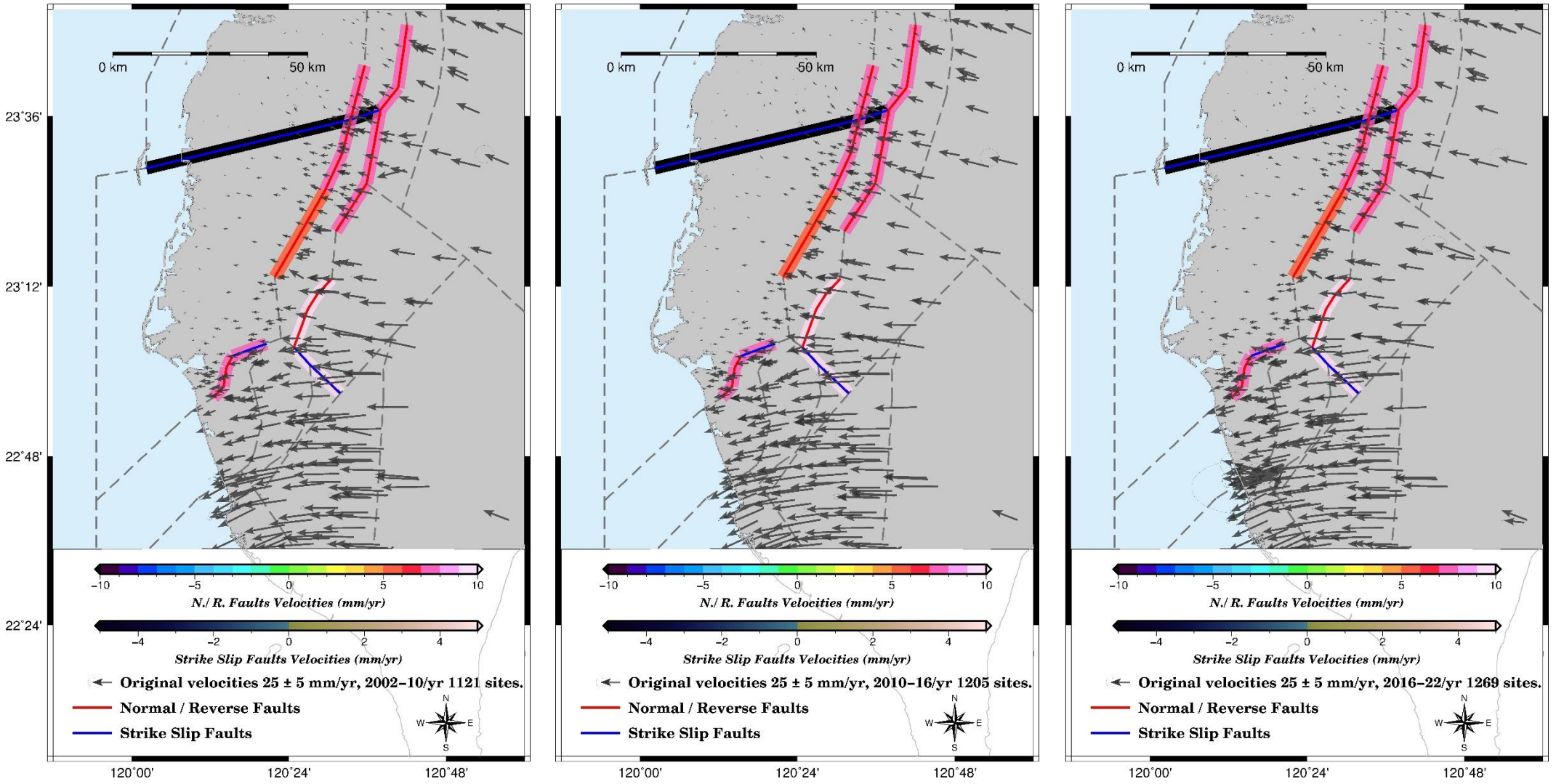


圖 5-1.1：臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層之模擬初始值與三個時期相應使用之 GNSS 測站。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N./ R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。灰色箭頭速度場為 GNSS 測站速度場，相應時間段請參考速度箭頭圖示說明。

Figure 5-1.1: The input values of the BLOCK model with the GNSS velocity field (the deep gray arrows) in three different time sections (check the legend below). The blue lines indicate strike-slip faults and red lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars down to the figure.

5-1-3 斷層模擬結果

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至表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。可見三條重點斷層中，新化斷層與後甲里斷層顯示為逆衝略帶左移分量，而後甲里斷層中段左移運動性質略大於逆衝分量，但量值相近，而於計畫中首次模擬的口宵里斷層則為略具少量右移運動型態，以逆衝分量為主之運動型態(圖5-1.2、圖5-1.3)。

中南部三條重點斷層，有自東北至西南延伸的趨勢，僅較短的新化斷層較接近水平，另口宵里斷層與後甲里斷層皆為東北-西南走向。其中最北邊的口宵里斷層北段至南段，右移分量為 6.6 mm/yr 遞減至 3.0 mm/yr (圖 5-1.3)，逆衝分量由北至南漸增(圖 5-1.2)，由 7.7 mm/yr 遞增至 13.3 mm/yr，可見其為逆衝略帶右移性質之斷層，運動量最大者為最南段 13.6 mm/yr (圖 5-1.4)。新化斷層模擬成果為明顯的逆衝運動性質，東段與西段運動量分別為: 70.5 mm/yr、64.3 mm/yr，左移分量則皆少於 0.5 mm/yr ，總運動量東段與西段分別為 70.5 mm/yr、64.3 mm/yr (圖 5-1.2、圖 5-1.3、圖 5-1.4)。後甲里斷層中段與南段逆衝分量略大於走向滑移分量，分別為 6.0 mm/yr 、5.8 mm/yr (圖 5-1.2)，於中段接近垂直走向者有較明顯的左移分量大於逆衝分量，分別為 5.6 mm/yr、2.7 mm/yr，到了最南段則又反過來為逆衝分量(5.8 mm/yr)大於左移分量(3.7 mm/yr)，運動量最大者為最北段的 7.4 mm/yr，中段與南段分別為 6.2 mm/yr、6.9 mm/yr (圖 5-1.4)。

表 5-1.1：使用 2002-2010 年 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 values of each fault modeled with 2002-2010 GNSS velocity field. The positive strike-slip rates indicate 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	2002-2010 BLOCKS 臺灣東部斷層模擬成果		
	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)
九芎坑斷層	9.5±2.0	14.7±3.0	17.5±3.6
梅山斷層	-1.8±0.0	-1.8±0.0	2.6±0.0
大尖山斷層	0.2±0.1	1.3±2.9	1.8±2.5
木屐寮-六甲斷層	6.6±0.1	5.3±4.5	8.8±2.8
觸口斷層	11.4±0.0	0.1±1.8	11.5±0.0
口宵里斷層	**10.0±1.6**	**9.8±0.1**	**14.0±1.1**
新化斷層	**0.23±0.1**	**67.4±4.4**	**67.4±4.4**
後甲里斷層	**4.6±1.0**	**4.8±1.9**	**6.9±0.6**
左鎮斷層	1.4±0.1	1.3±0.1	1.9±0.1

表 5-1.2：使用 2010-2016 年 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 values of each fault modeled with 2010-2016 GNSS velocity field. The positive strike-slip rates indicate 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	2010-2016 BLOCKS 臺灣東部斷層模擬成果		
	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)
九芎坑斷層	9.2±1.3	9.7±1.6	13.4±2.0
梅山斷層	-1.8±0.0	-1.8±0.0	2.6±0.0
大尖山斷層	0.6±0.3	1.3±1.2	1.6±1.0
木屐寮-六甲斷層	7.3±0.1	4.6±3.0	8.8±1.6
觸口斷層	11.4±0.0	0.1±1.8	11.5±0.0
口宵里斷層	**10.0±1.6**	**9.8±0.1**	**14.0±1.1**
新化斷層	**0.3±0.1**	**67.4±4.4**	**67.4±4.4**
後甲里斷層	**4.6±1.0**	**4.8±1.9**	**6.9±0.6**
左鎮斷層	1.5±0.3	1.3±0.1	2.0±0.2

表 5-1.3：使用 2016-2022 年 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 values of each fault modeled with 2016-2022 GNSS velocity field. The positive strike-slip rates indicate 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	2016-2022 BLOCKS 臺灣東部斷層模擬成果		
	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)
九芎坑斷層	8.7±0.8	6.4±0.7	10.8±1.0
梅山斷層	-1.8±0.0	-1.8±0.0	2.6±0.0
大尖山斷層	0.7±0.6	1.4±0.8	1.7±0.5
木屐寮-六甲斷層	7.4±0.0	4.6±1.6	8.7±0.9
觸口斷層	11.4±0.0	0.1±1.9	11.5±0.0
口宵里斷層	**10.0±1.6**	**9.8±0.1**	**14.0±1.1**
新化斷層	**0.3±0.1**	**67.4±4.4**	**67.4±4.4**
後甲里斷層	**4.6±1.0**	**4.8±1.9**	**6.9±0.6**
左鎮斷層	1.5±0.3	1.3±0.1	2.0±0.2

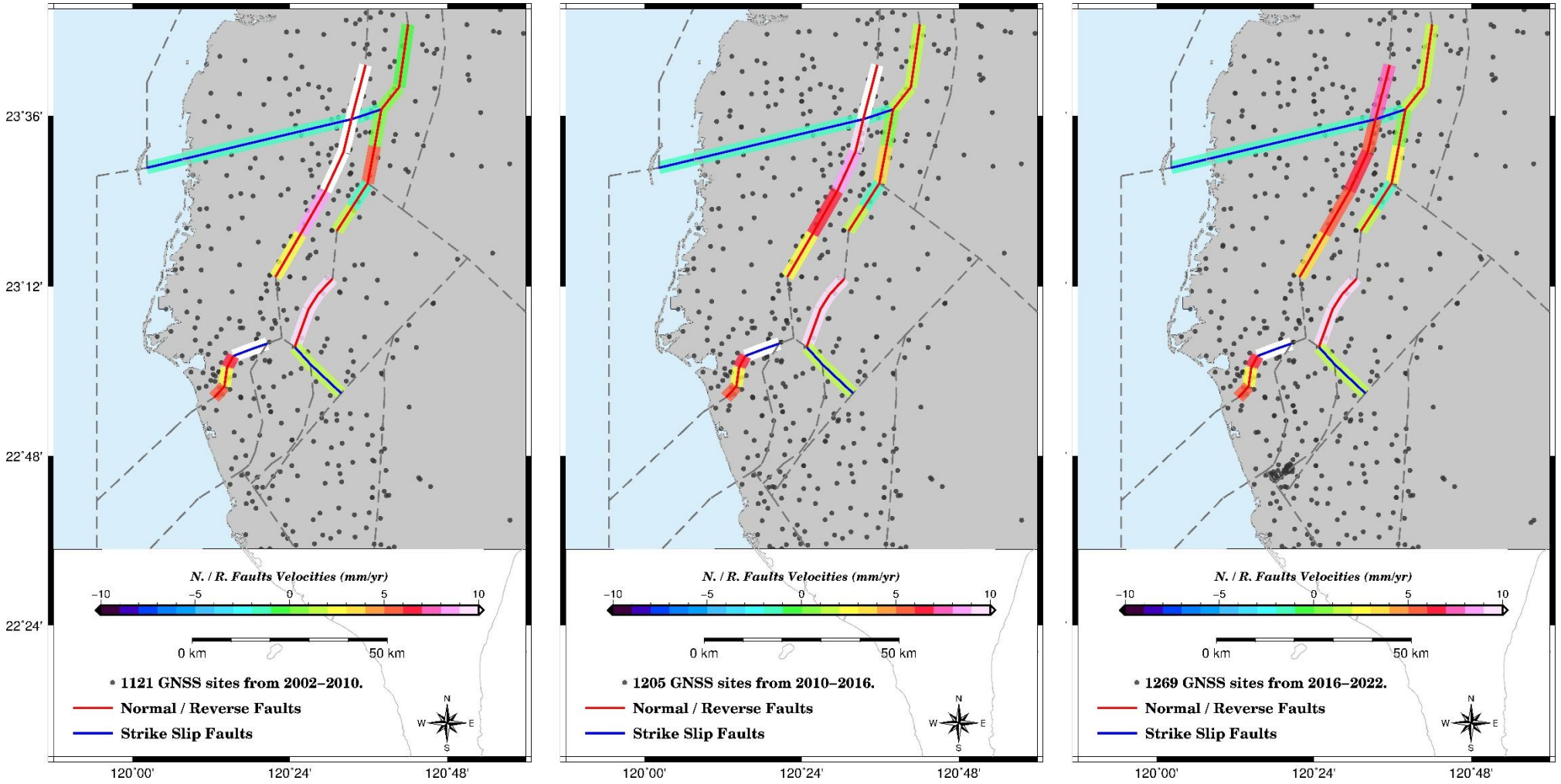


圖 5-1.2：三個時段臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層之傾向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.2: The dip-slip rates of each segment modeled with 2016-2021 GNSS velocity field.

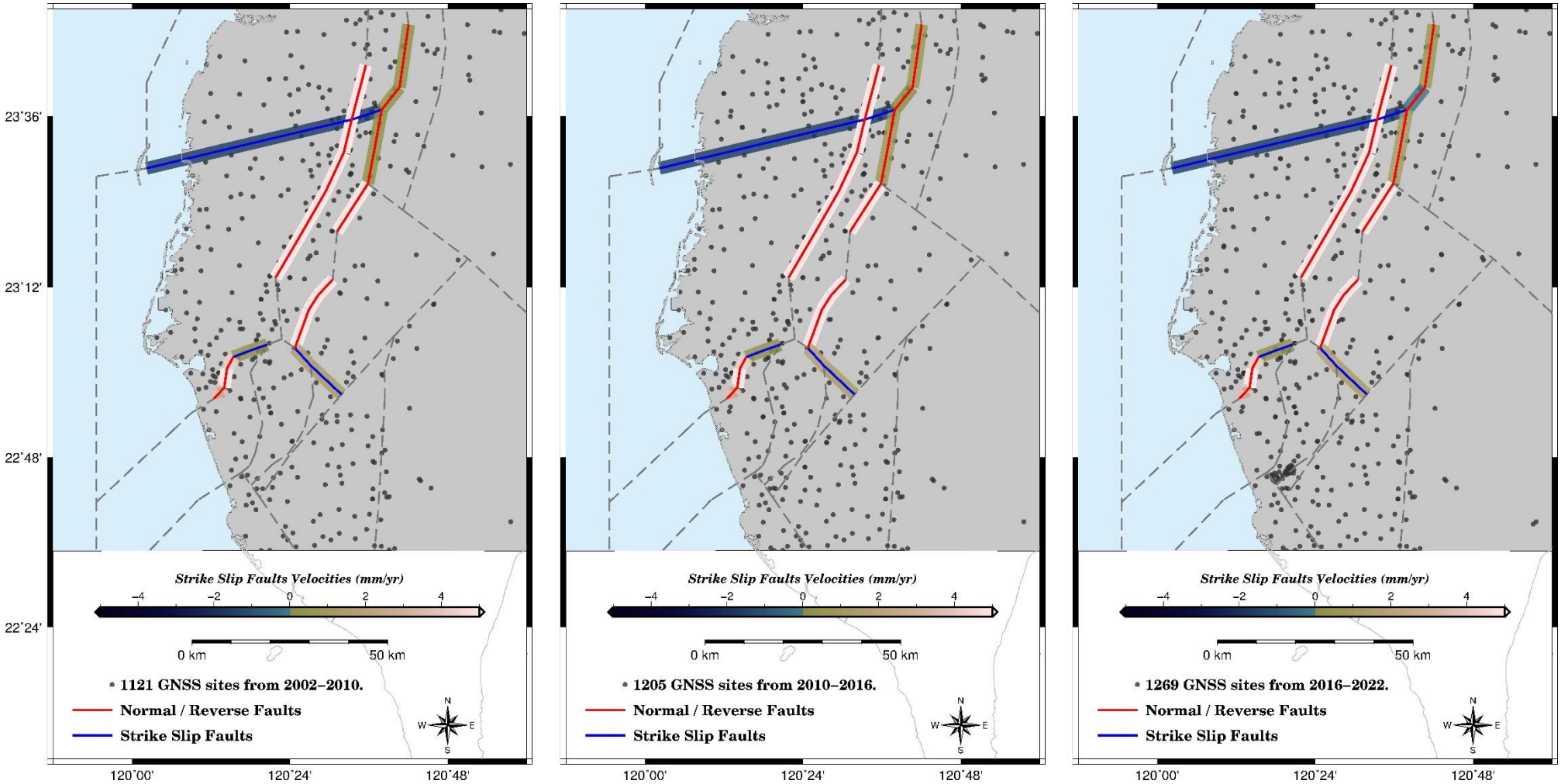


圖 5-1.3：三個時段臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層之走向滑移速率模擬成果。

Figure 5-1.3: The strike-slip rates of each segment modeled with GNSS velocity field in three different time sections.

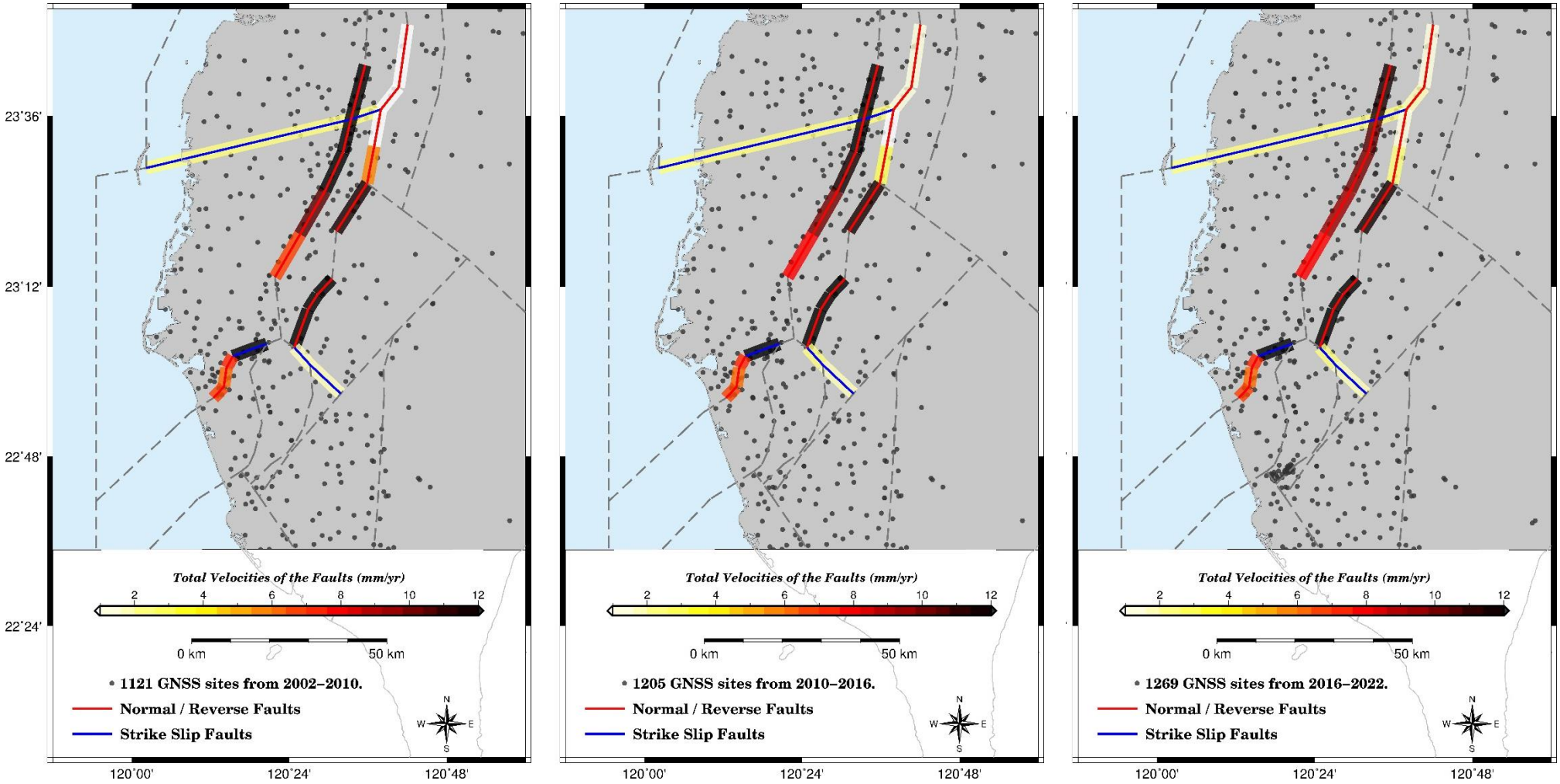


圖 5-1.4：三個時段臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層模擬成果之總滑移速率。

Figure 5-1.4: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with GNSS velocity field in three different time sections.

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 5-1.5 為三個時間區段中，地表速度場模擬成果；整體而言，鄰近本次臺灣中南部三條重點斷層範圍，紅色箭頭相對原始速率量值略大，僅 2002-2010 時期的口宵里斷層周邊模擬量略小於原始值。三時期的模擬順時針旋轉偏量則越近期越顯著，其中又以 2016-2022 年的口宵里斷層北段最為明顯；然而新化斷層與後甲里斷層兩側的模擬皆有逆時針的偏量，同時可見此處塊體構造較為密集複雜；整體旋轉量落差較大者位於圖幅中，無斷層或塊體邊界鄰近者。而區域內東北側，大尖山與觸口斷層以東的模擬結果則模擬量值明顯偏小，為全區落差最大的的地方。三時時間段正演之速度場相較原始速度場之 RMS 值分別為：2002-2010 年間 16.226、2010-2016 年間 17.660、2016-2022 年間 17.201。

本次臺灣中南部斷層模擬成果中，梅山斷層、口宵里斷層、後甲里斷層的地質等相關滑移速率皆提供了有效的約制成果，而九芎坑斷層、新化斷層則明顯大於預期的滑移量；九芎坑斷層各分段於三時期皆有顯著約 10.0 mm/yr 的左移分量，而傾向滑移有相應的約制效果，但因此仍對總滑移量有加乘影響。另一與地質滑移速率約制落差最多者為新化斷層，且運度型態與預估之右移運動相左，模擬成果兩分段皆呈現逆斷層略帶左移運動。本次計畫首次加入模擬的口宵里斷層為逆衝左移的運動模式，兩項量值相近，往南沿線經左鎮斷層西段的轉折後，新化斷層有數倍加劇的逆衝分量，左移分量則驟減至 1.0 mm/yr 以下。至更南段的後甲里斷層則於近平行的南北段逆衝分量大於左移分量，中段反之；推測新化斷層吸收了速度場中跨斷層的量值落差，可能以旋轉的方式作為抵銷。目前臺灣西南部斷層的脫逸現象常被提起，而 BLOCKS 多應用於塊體旋轉造成之邊界走向滑移運動推擬，很可能因此而同樣對模擬成果有影響。而綜觀成果，初始約制速率仍對於數值模擬有必要，另斷層幾何、有無考慮塊體邊界分布之於速度場測站分布，皆對成果解算具明顯的影響。

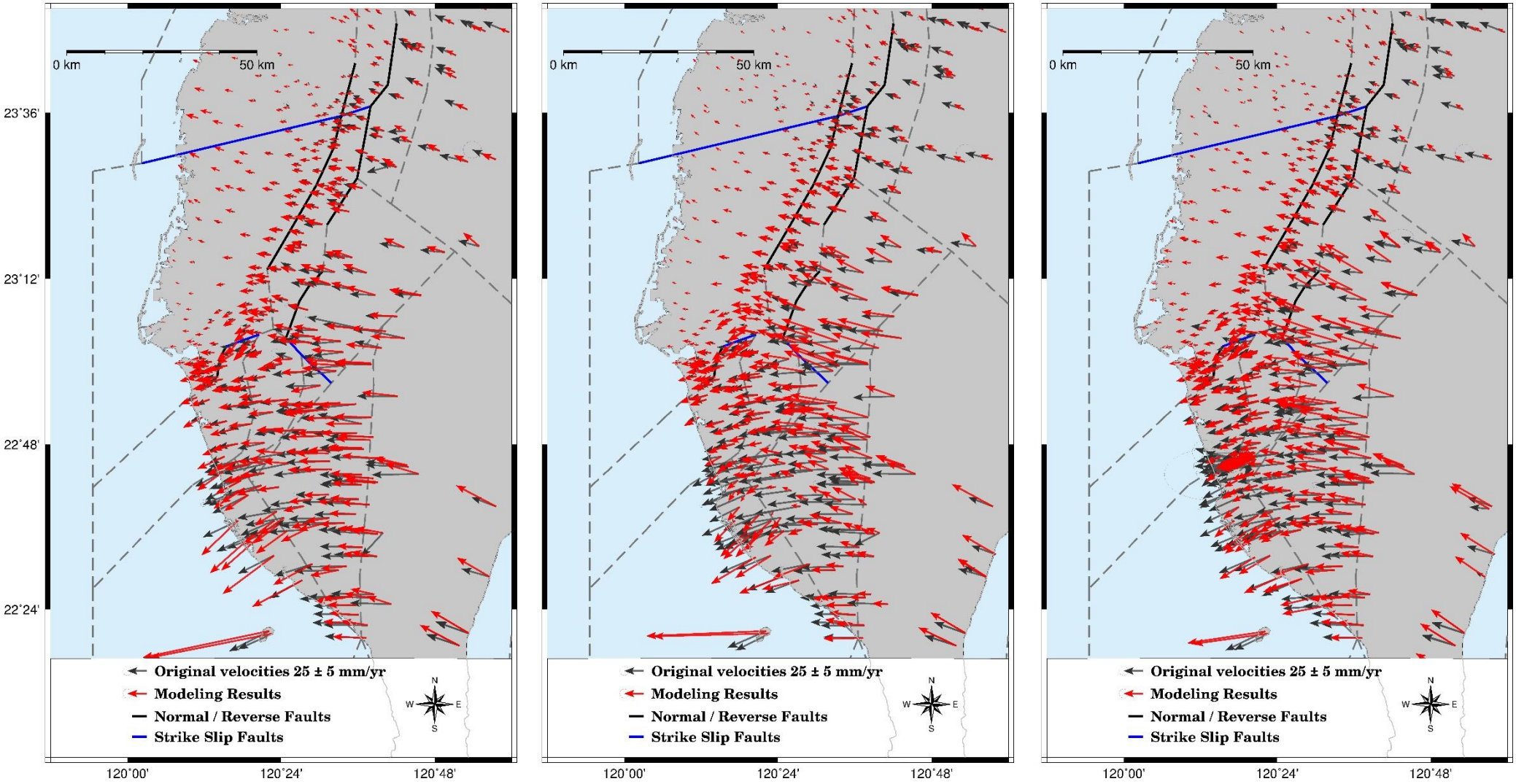


圖 5-1.5：臺灣中南部三條重點斷層與鄰近六條斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值於 2002-2010 年間為 16.226，於 2010-2016 年間為 17.660，於 2016-2022 年間為 17.201。紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，黑色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 5-1.5: The results of GNSS velocity field modeled with three different time sections of GNSS sites velocity field which the standard deviations are 16.226, 17.660, 17.201. The 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 legend within the picture.

5-2 TDEFNODE 斷層模型

5-2-1 斷層模型原理

塊體模型假設大地可以切分為數個多邊形板塊，塊體在地球上的移動可以用球面座標上的 Euler pole 與轉動速率表示，塊體邊界上任意點的移動速度則與旋轉軸間的距離成線性關係。塊體之間的邊界視為活動邊界，設定某段邊界之傾角與深度參數，則可以將該段邊界作為活動斷層來探討其行為。在地震周期中，部分塊體的斷層邊界，可能有部分或是全部的斷層面處於鎖定狀態(Locking or Coupling)，導致塊體移動原應作用於斷層面的滑移量，尚未滑移，此種現象稱之為滑移虧損(Slip Deficit)，藉由模擬塊體活動與偵測斷層鎖定造成的滑移虧損，可以反演出間震期的斷層滑移速率，以及與地震能量積蓄有關的斷層滑移虧損率。

實務操作則是蒐集間震期的大地測量資料，假設這些觀測資料綜合了塊體移動與斷層鎖定的效應，將其輸入三維塊體模型程式 TDEFNODE (McCaffrey, 2013)，本研究採用的是 2016-2021 年間的 GNSS 水平與垂直速度場。TDEFNODE (version 20201011)首先藉由線性反演，利用各塊體涵蓋的觀測資料與假設不動的參考塊體(EURA)間的相對關係，獲得各塊體轉動的初始值，再藉由模擬退火法(Simulated Annealing)與格點搜尋，最佳化每個軸的位置與轉動速率，以及各斷層面節點的鎖定率。前者可以正演得到各斷層的長期滑移速率，再將之乘以斷層鎖定率，則可以得到斷層滑移虧損率。長期滑移速率與虧損率之差，則是間震期斷層滑移速率。由於塊體可能有斷層滑移與鎖定之外的變形，例如活動摺皺等，計算滑移與鎖定速率時，亦可以同步計算塊體內均勻的平面彈性應變率。如果有可靠的地質滑移速率，計算中也可以用作約制搜尋模型參數的上下界，使計算結果更佳合理，TDEFNODE 的迭代計算過程即是試圖在前述各種機制與條件約制下，找到最能擬合觀測資料的間震期滑移速率。

本研究的塊體設計，參考了 Ching et al. (2011)與 Chang et al.(2016)先前的研究經驗，並依照中央地質調查所於 2021 年公布的最新版臺灣活動斷層加以調整。繼前一期加入車瓜林斷層之後，本次於西南部加入口宵里斷層，為了將口宵里斷層融入塊體設計，我們假設西傾的口宵里斷層的上盤塊體 HSS1 (圖 5-2.1a)位於木屐寮-六甲斷層東側，口宵里斷層向北延伸到觸口斷層，因此與觸口斷層都位於 EKSH 塊體西側。

另外依據工作會議的結論，移除了 WCPS 塊體北側的一個塊體，該塊體原先於 Ching et al. (2011)的研究中是假設梅山斷層南方有一平行的義竹斷層，由於目前尚無確切證據，因此將其移除(圖 5-2.1)。

斷層參數方面，本研究中的斷層傾角，三條重點斷層：口宵里斷層(32.1°)、新化斷層(84.0°)、後甲里斷層(42.3°)，使用本案以二維斷層模型最佳化之參數，其他則採用先前計畫中整合地質資料的傾角參數。用於約制模型的地質滑移速率則以 Shyu et al. (2020)彙整的為主，但僅部分斷層有可供使用的參數。

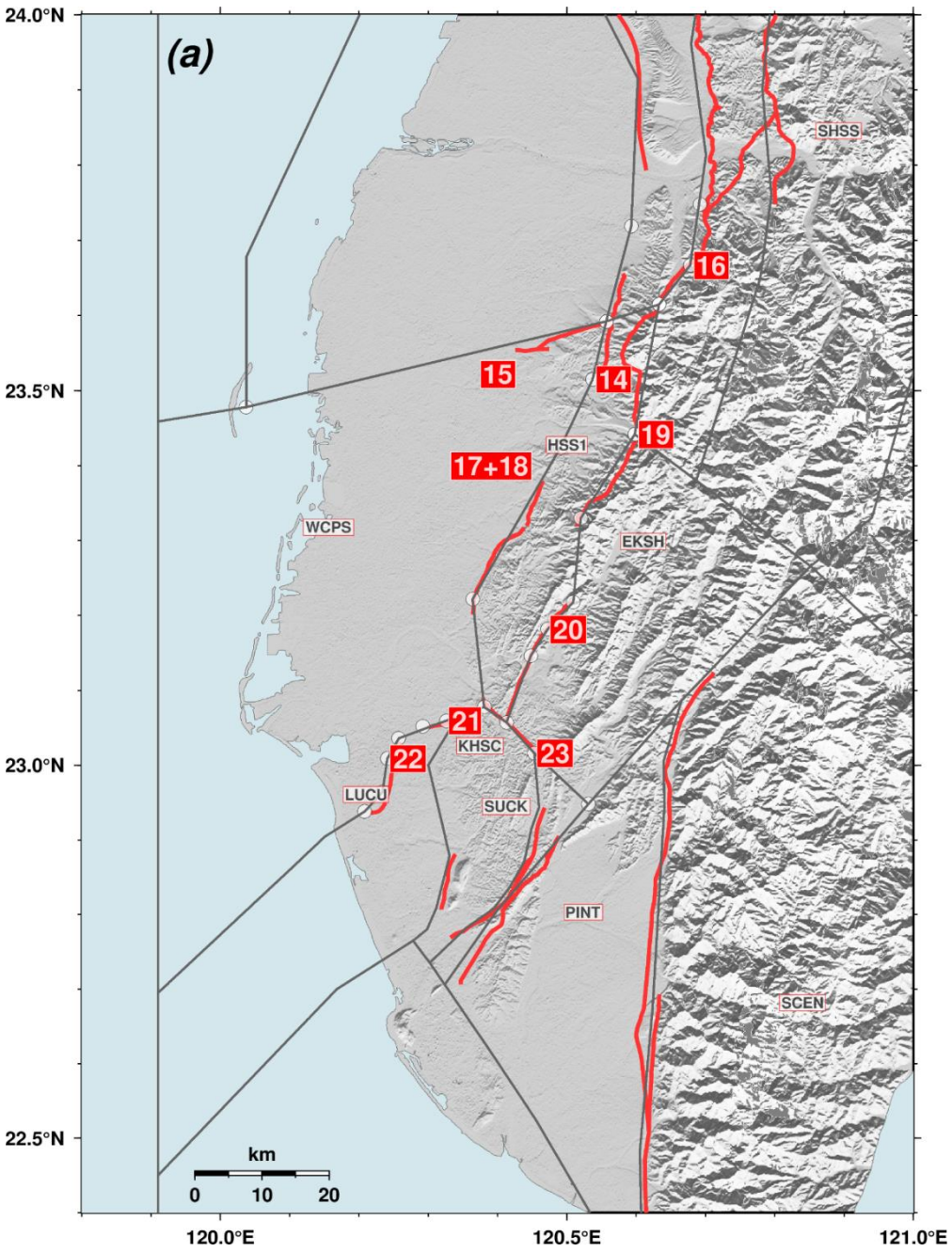


圖 5-2.1：(a)臺灣西部三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公布之活斷層，紅色虛線表是推測或隱伏斷層。紅色數字為 2021 年地調所公布之活動斷層編號，分別為： 14.九芎坑斷層；15.梅山頂斷層；16.大尖山斷層；17.木屐寮斷層；18.六甲斷層；19.觸口斷層；20.口宵里斷層；21.新化斷層；22.後甲里斷層；23.左鎮斷層。

Fgure 5-2.1: (a) The digital terrain model of southern Taiwan. The black lines represent the boundary of blocks as their name were marked on the black boxes. The red line and the dots show the activity faults and their nods used in our 3D model: 14. Chiuchiungkeng fault；15. Meishan fault；16. Tachienshan fault；17. Muchiliao fault；18. Liuchia；19.Chukou fault；20.Kouhasioli fault；21.Hsinhua fault；22.Houchiali fault；23.Tsochen fault.

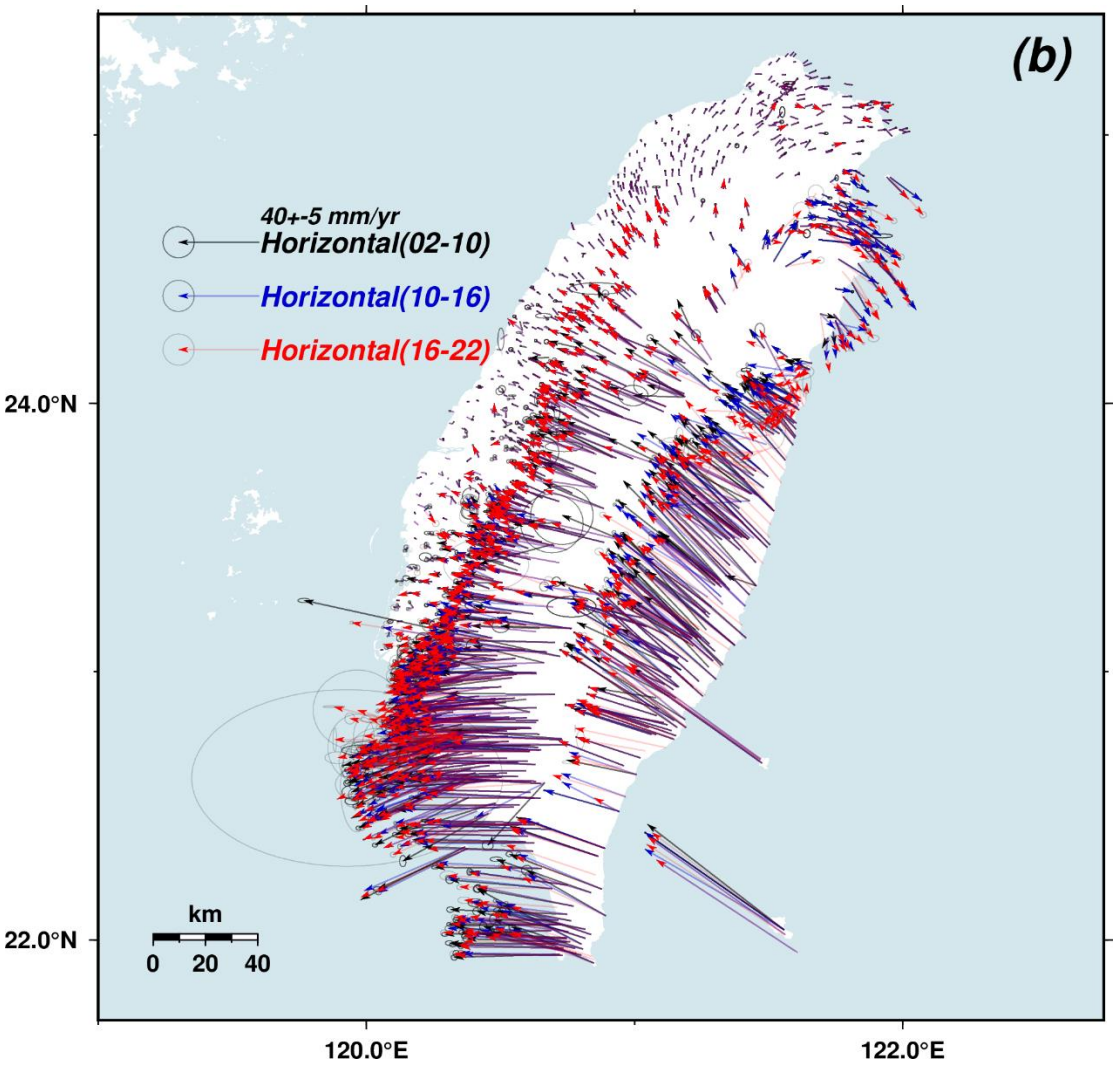


圖 5-2.1： (b)本研究使用的三期 GNSS 水平速度場，分別為 2002-2010，以黑色箭頭表示；2010-2016，以藍色箭頭表示；2016-2022，以紅色箭頭表示。

Figure 5-2.1: (b) Horizontal GNSS velocity fields used by this study. Three periods are represented by different colors. Black arrows denoted 2002-2010, blue arrows denoted 2010-2016, red arrows denoted 2016-2022.

5-2-2 斷層模擬結果

本次使用的測地資料包括 GNSS（連續站和移動站）與水準測量，並以主要地震事件分為 2002-2010、2010-2016、2016-2022 三個時期(圖 5-2.1b)。

在相同塊體架構、斷層幾何與地質速率的約制下，反演得到三個時期各自的塊體旋轉軸（Euler Pole），旋轉軸位置變動最大的塊體為 LUCU（後甲里斷層下盤），HSS1 和 WCPS 是九芎坑、木屐寮、六甲等斷層的上下盤，有較大的誤差橢圓，這幾個塊體是構成本期研究主要關注斷層的塊體(圖 5-2.2)。

各時期塊體轉動速率與相對應的地表長期位移，於圖 5-2.3、圖 5-2.7、圖 5-2.11 展示，轉動速度相差不大，從數值來說（表 5-2.1、表 5-2.2、表 5-2.3）轉動速率的差異約在小數點下二位（deg/My），並不顯著。主要的差異仍是轉動軸的座標位置，以 WCPS、HSS1、WPCS 三個塊體的誤差最大。

三個時期的斷層滑移速率也有一些變異，口宵里斷層有最高的長期滑移速率，於 2010-2016 的反演甚至高達 28.85 mm/yr，這顯示口宵里斷層鄰近的資料確實有較大的變化，本研究雖然排除了口宵里西側部份受地層下陷影響的水準與 GNSS 測站，但仍有其他資料變化反應在模型中。長期滑移速率變化較大的還有觸口斷層長期滑移速率從 11.9、7.7、12.8 mm/yr 變動，這也影響了觸口斷層的滑移虧損率和震間滑移速率的分配（圖 5-2.4、圖 5-2.8、圖 5-2.12）。

本研究專注的十條斷層中，震間滑移速率大多小於 10mm/yr，除了觸口斷層北段、梅山斷層北端、後甲里斷層南端有稍有震間滑移，其餘大多處於鎖定狀態(圖 5-2.4、圖 5-2.8、圖 5-2.12)，尤其是九芎坑斷層、六甲斷層、木屐寮等斷層由於長期滑移速率亦低，所以即使處於高度鎖定狀態，換算得到的滑移虧損亦相當低(<5mm/yr)。

最能反應地震潛勢的滑移虧損速率，則是口宵里、左鎮、後甲里等斷層變化較大。口宵里斷層在三個時期的平均滑移虧損速率為 20.2、19.1、12.0 mm/yr，在第三期顯著下降，但誤差也偏高。另外，雖然口宵里斷層在模型中被設定為可

自由發生潛移，但模型的結果仍朝向鎖定收斂，三個時期皆如此。

若是與地質滑移速率比較(表 5-2.4、表 5-2.5、表 5-2.6)，在有地質資料可以參照的斷層中，九芎坑斷層與木屐寮-六甲斷層，塊體模型的測地長期速滑移率較為接近地質速率的範圍。梅山斷層則的測地長期滑移速率(10 - 12 mm/yr)大於已知的地質速率(2.51 mm/yr)最多，這有可能是因為模型中的梅山斷層長度被向西延長，因此受到較多的測站的影響。後甲里斷層則可能是受到 2016 美濃地震的影響，在震後測地資料有顯著的變形，因此測地滑移速率(14 - 18 mm/yr)多出地質滑移速率(7.07 mm/yr)將近一倍。新化斷層的測地滑移速率(6 - 14 mm/yr)較地質滑移速率(4.56 mm/yr)多，斷層兩側也有較大的水平向殘差(圖 5-2.5、圖 5-2.9、圖 5-2.13)，也極有可能是 2016 美濃地震震後變形的訊號使得塊體模型高估了長期滑移速率。

垂直向資料的擬合是塊體模型表現較弱的部分，特別是塊體隨著極遠處的轉動軸轉動，近似平移時，僅近斷層處可以模擬少量的垂直向變形。若有因為斷層斷坪或是平緩滑脫面造成的大範圍抬升或下陷，則是塊體模型未能模擬的現象。圖 5-2.6、圖 5-2.10、圖 5-2.14 展現了塊體模型的這一特性，並且於 HSS1 塊體南段明顯錯估為下陷。

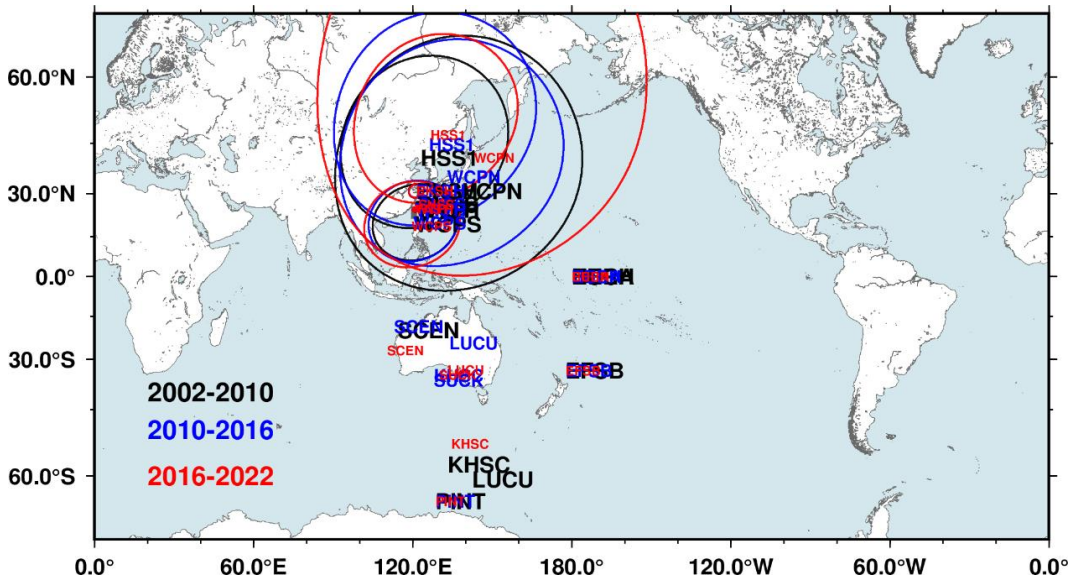


圖 5-2.2：最佳塊體旋轉軸，各時期塊體 Euler pole 所在的位置，英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 5-2.1），橢圓為該軸位置的誤差橢圓。

Fgure 5-2.2: The location of the rotation poles for each block were marked with block names (4 digits characters) and ellipses for pole location's error. Different periods are denoted by different colors.

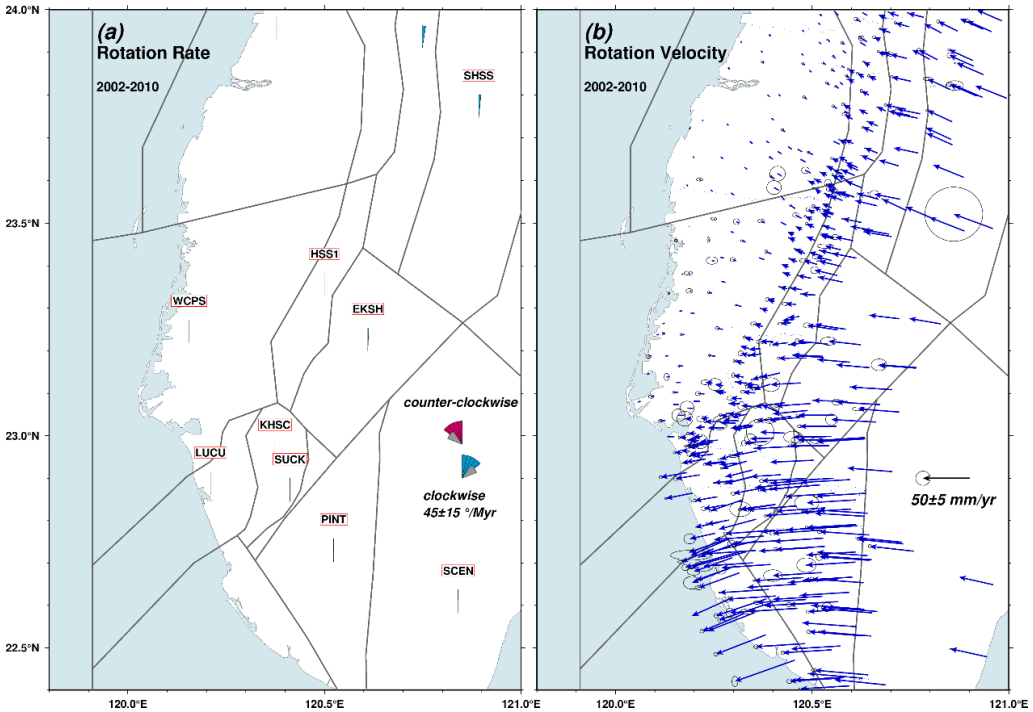


圖 5-2.3：（a）2002-2010 速度場反演得到的最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 45±15°/My 的角速度。（b）由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。

Fgure 5-2.3: (a)The rotation rate of blocks inverted from 2002-2010 velocity field. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (b) The velocity filed predicted only by block rotation.

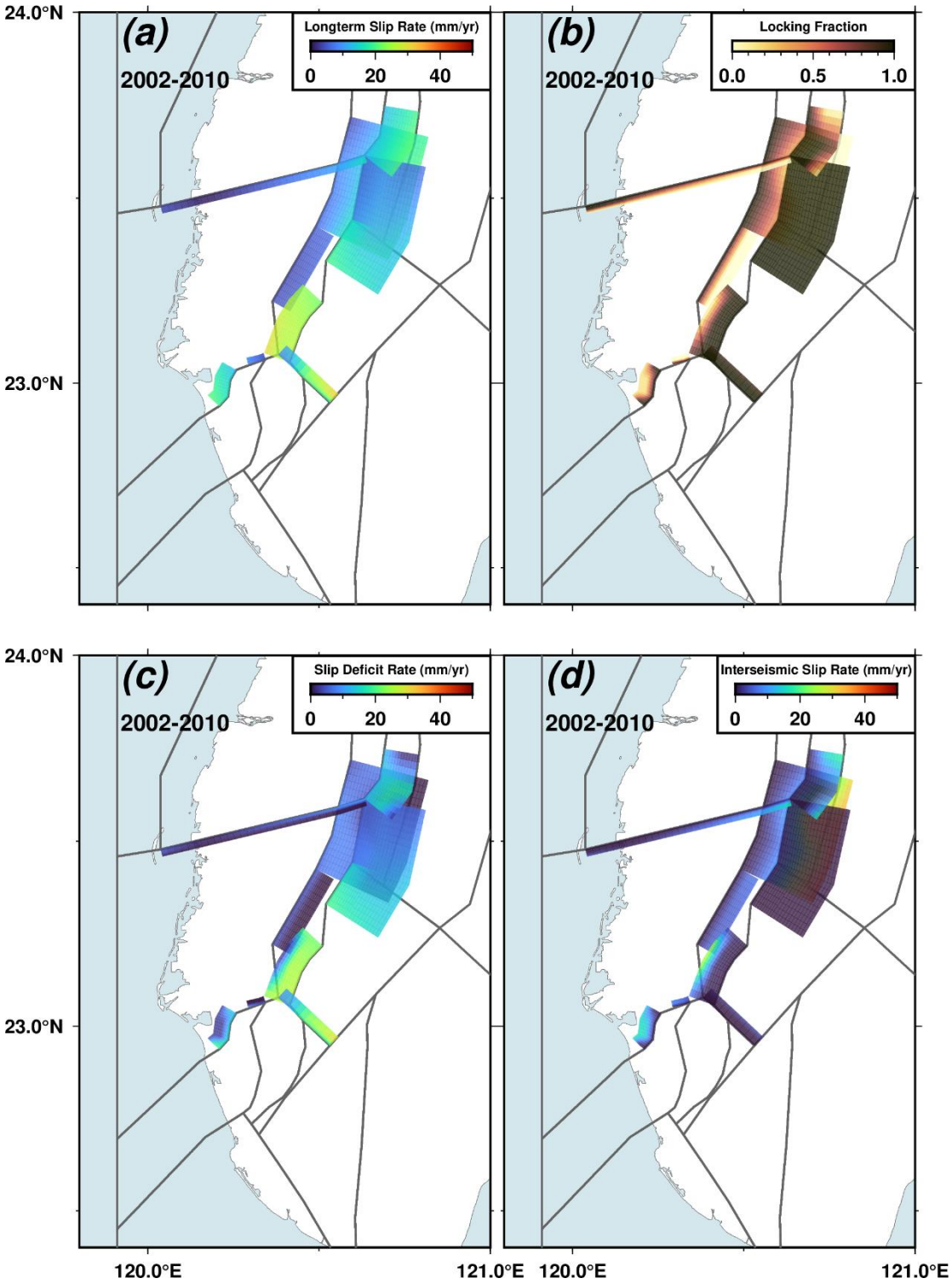


圖 5-2.4：（ a）以 2002-2010 速度場反演推求的斷層長期滑移速率。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。 (b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。（ c）各斷層面的滑移虧損率。（ d）由（ a）圖減去（ c）圖，得到斷層面上的震間期滑移速率。

Figure 5-2.4: (a) The longterm fault slip rate inverted from 2002-2010 velocity field. (b) The distribution of coupling coefficient. (c)The deficit rate on the fault surface. (d) If we take the longterm slip rate and minus deficit, we can get the interseismic slip rate.

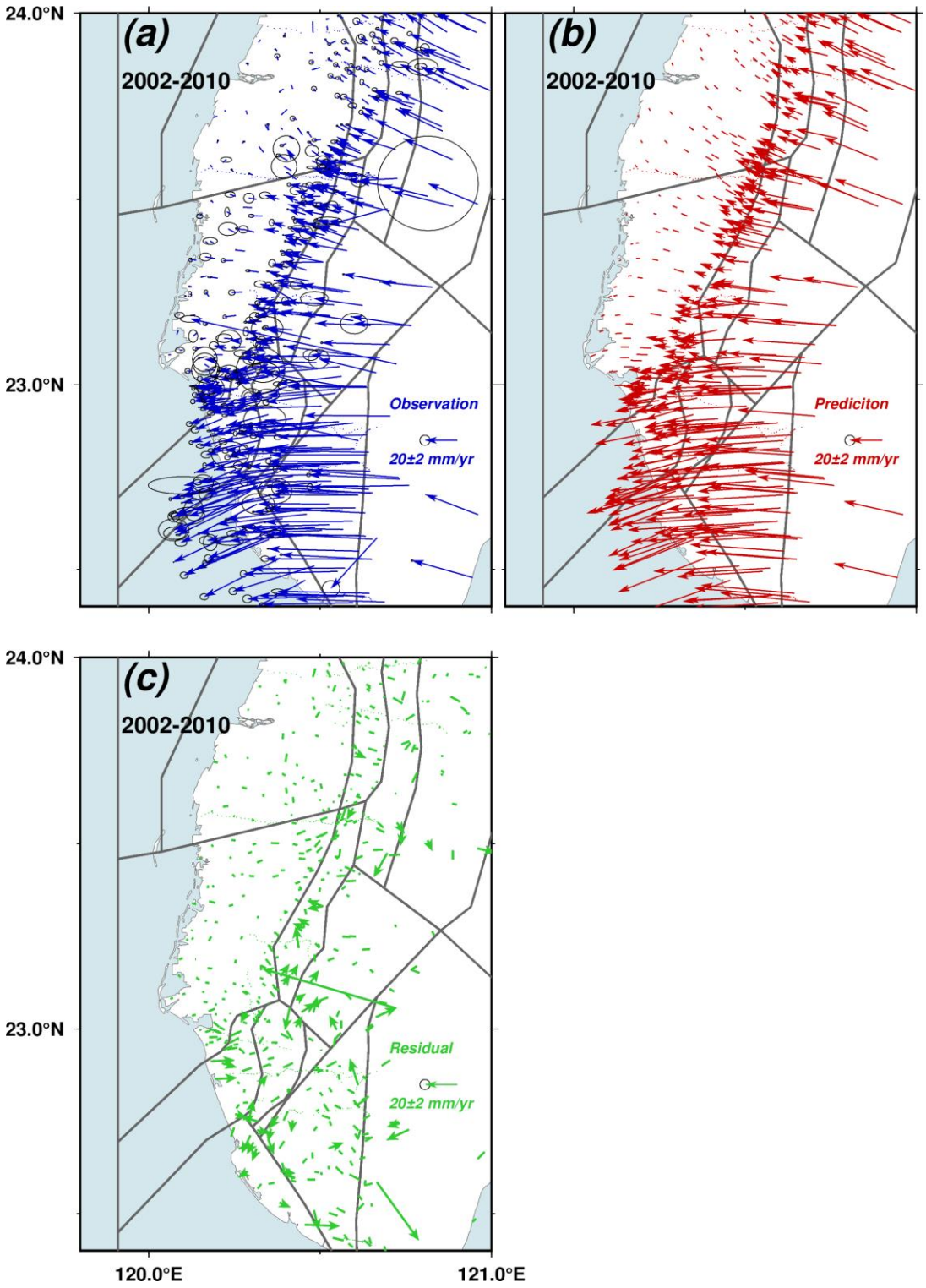


圖 5-2.5：以 2002-2010 速度場反演推求的最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差。(a) 模型使用的 2002-2010 年間，連續與移動站的 GNSS 水平速度場。 (b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 水平速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5-2.5: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS horizontal velocities from 2002 to 2010. (b) The predicted horizontal velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

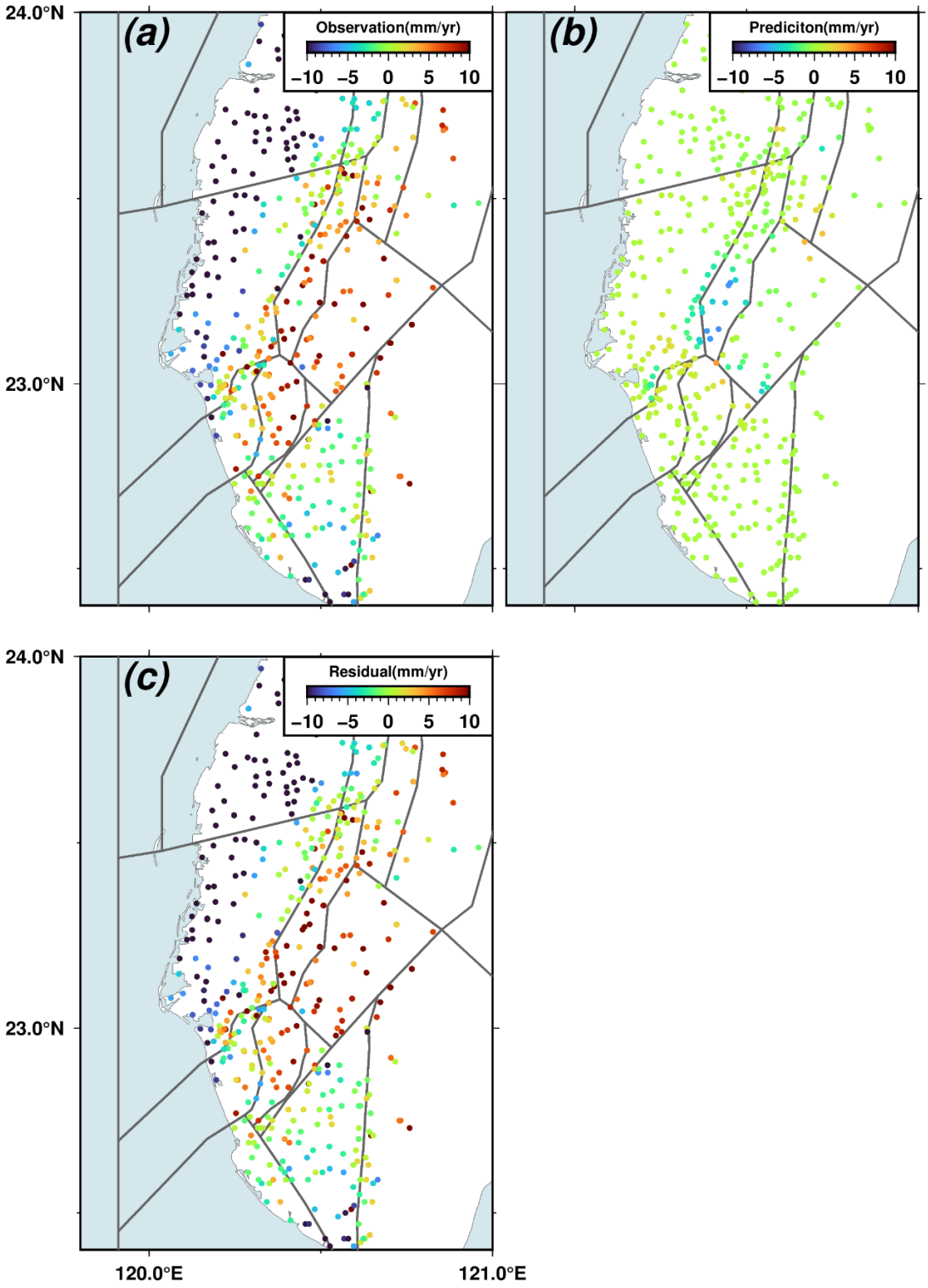


圖 5-2.6：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差。(a) 模型使用的 2002-2010 年間，連續與移動站的 GNSS 垂直速度場。(b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 垂直速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5-2.6: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS vertical velocities from 2002 to 2010. (b) The predicted vertical velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

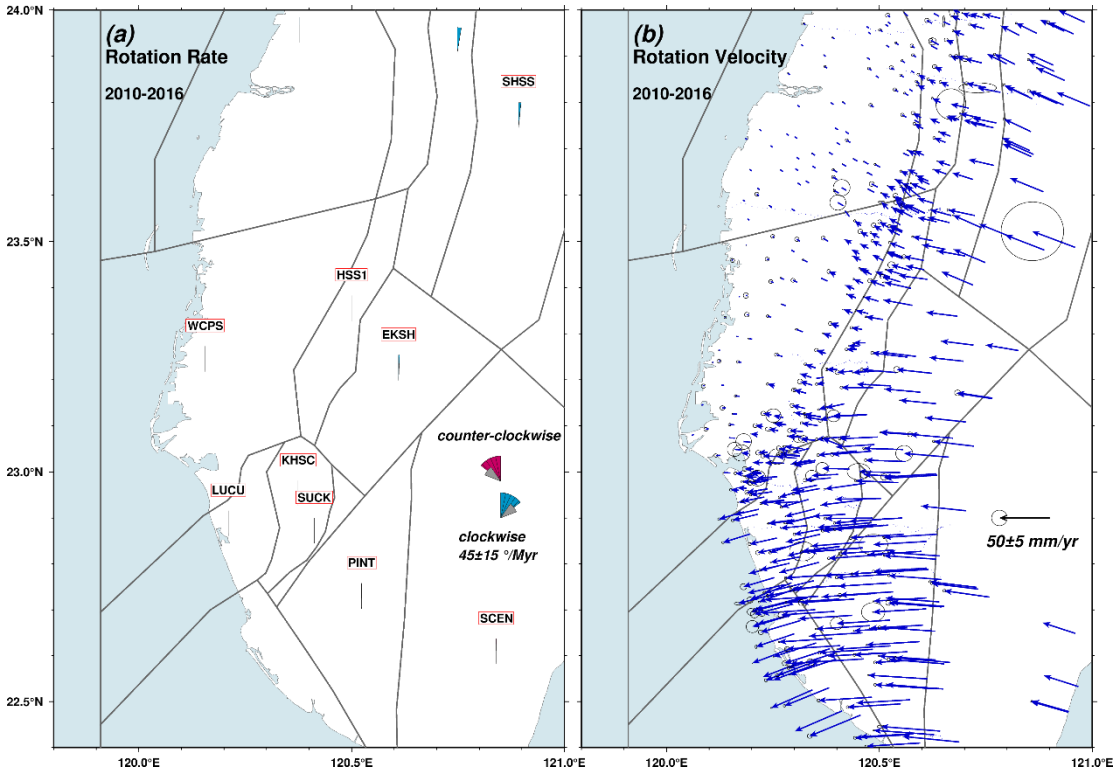


圖 5-2.7：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 45±15°/My 的角速度。(b) 由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。

Figure 5-2.7: (a)The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (b) The velocity filed predicted only by block rotation.

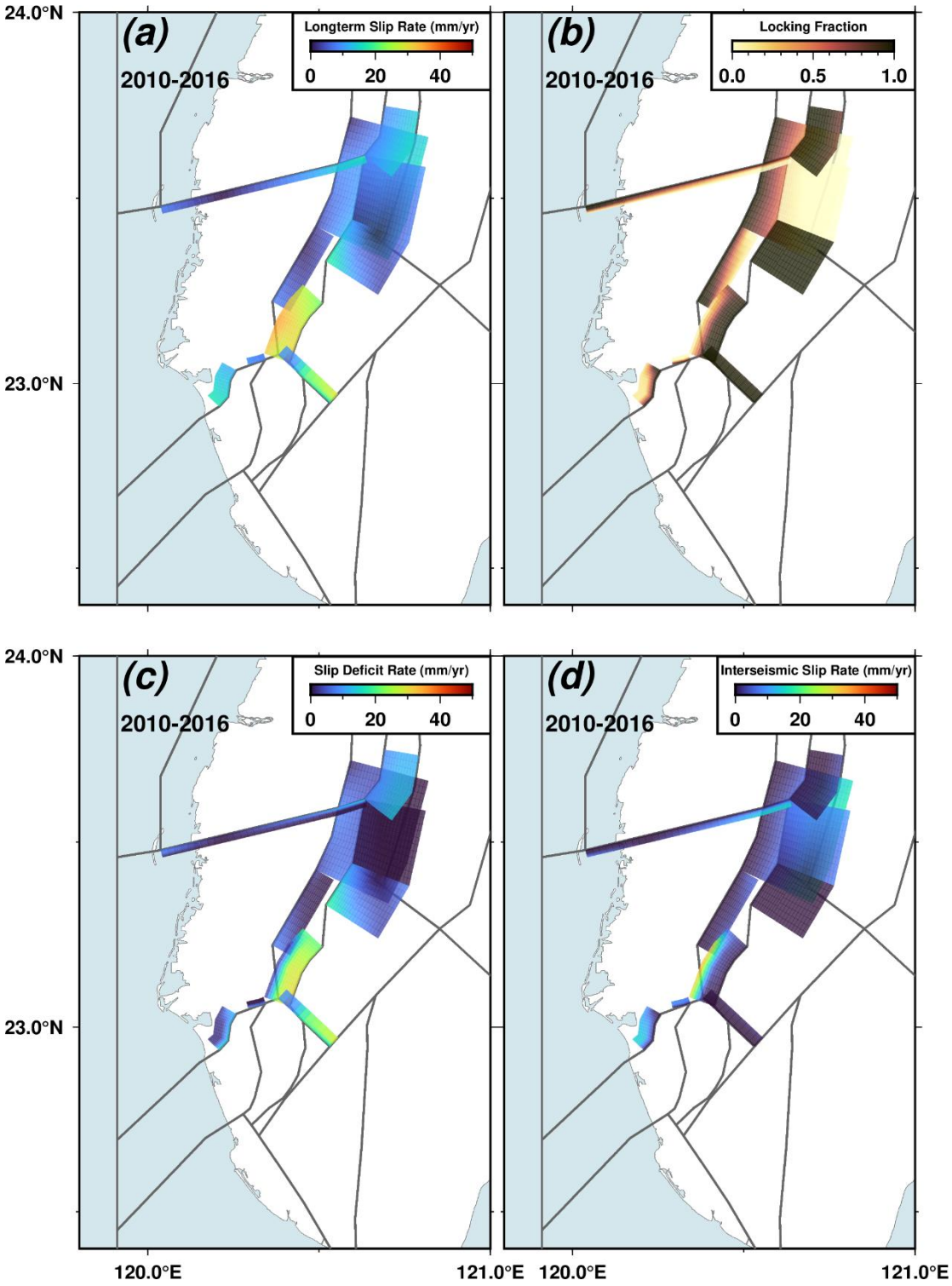


圖 5-2.8：（ a）推求的斷層長期滑移速率。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。 (b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。（ c）各斷層面的滑移虧損率。（ d）由（ a）圖減去（ c）圖，得到斷層面上的震間期滑移速率。

Figure 5-2.8: (a) The longterm fault slip rate. (b) The distribution of coupling coefficient. (c)The deficit rate on the fault surface. (d) If we take the longterm slip rate and minus deficit, we can get the interseismic slip rate.

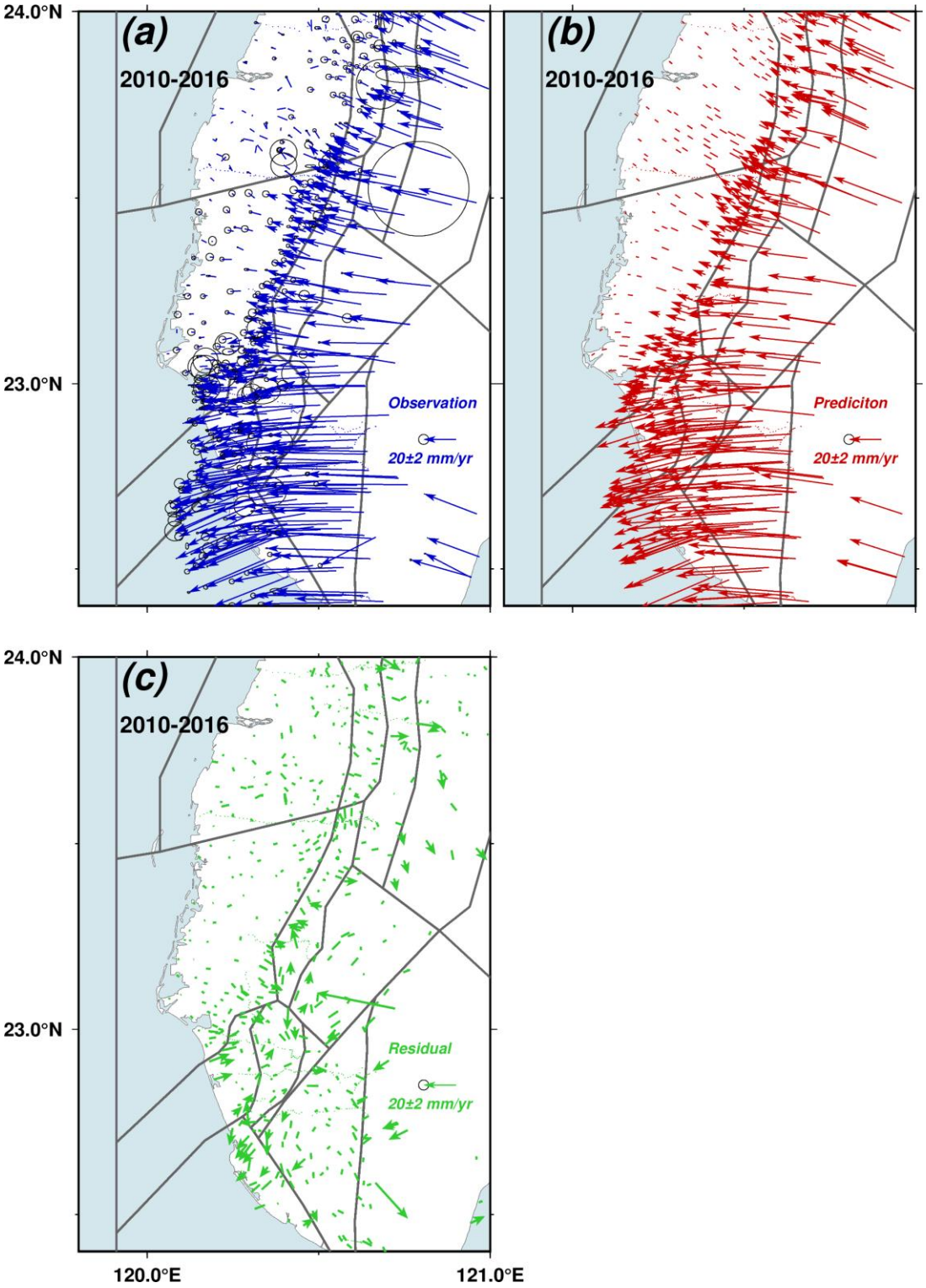


圖 5-2.9：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差。(a) 模型使用的 2010-2016 年間，連續與移動站的 GNSS 水平速度場。(b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 水平速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5-2.9: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS horizontal velocities from 2010 to 2016. (b) The predicted horizontal velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

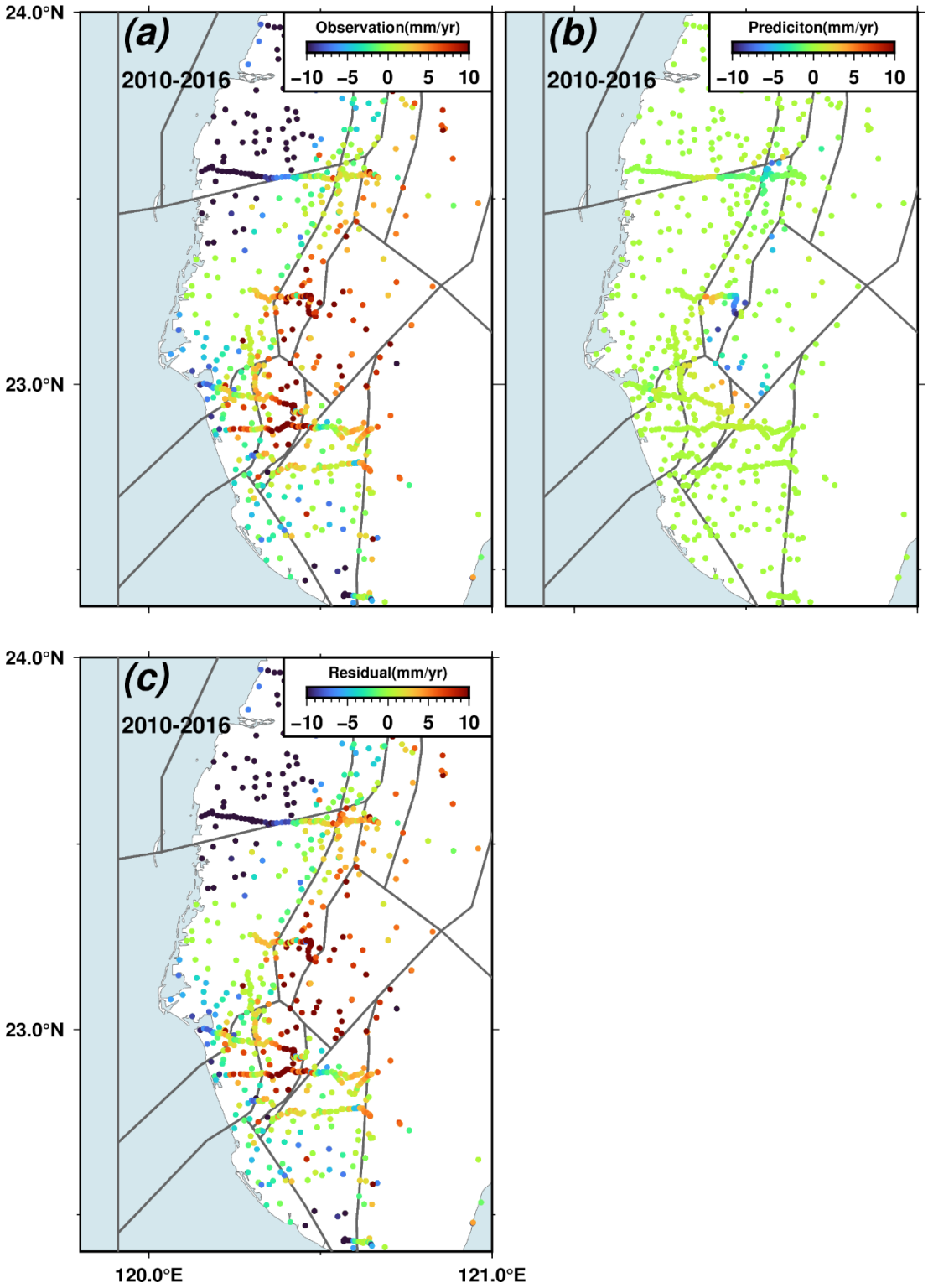


圖 5-2.10：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差。(a) 模型使用的 2010-2016 年間，連續與移動站的 GNSS 垂直速度場。 (b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 垂直速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5-2.10: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS vertical velocities from 2010 to 2016. (b) The predicted vertical velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

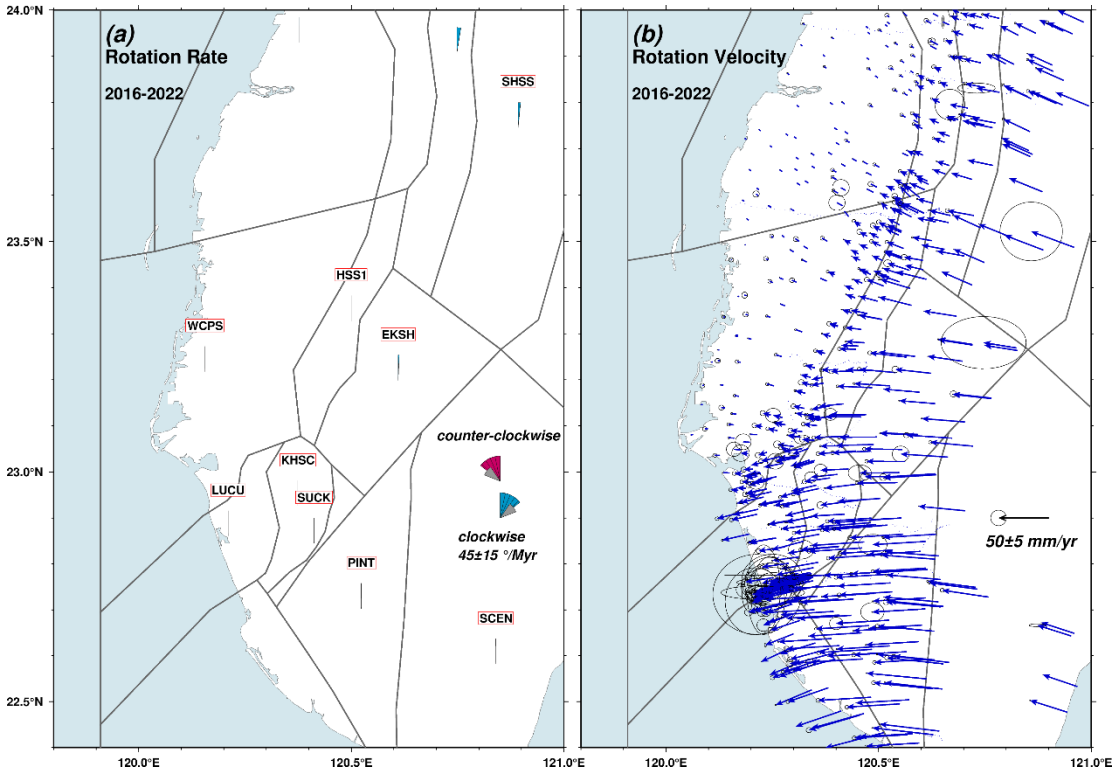


圖 5-2.11：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 45±15°/My 的角速度。(b) 由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。

Figure 5-2.11: (a)The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (b) The velocity filed predicted only by block rotation.

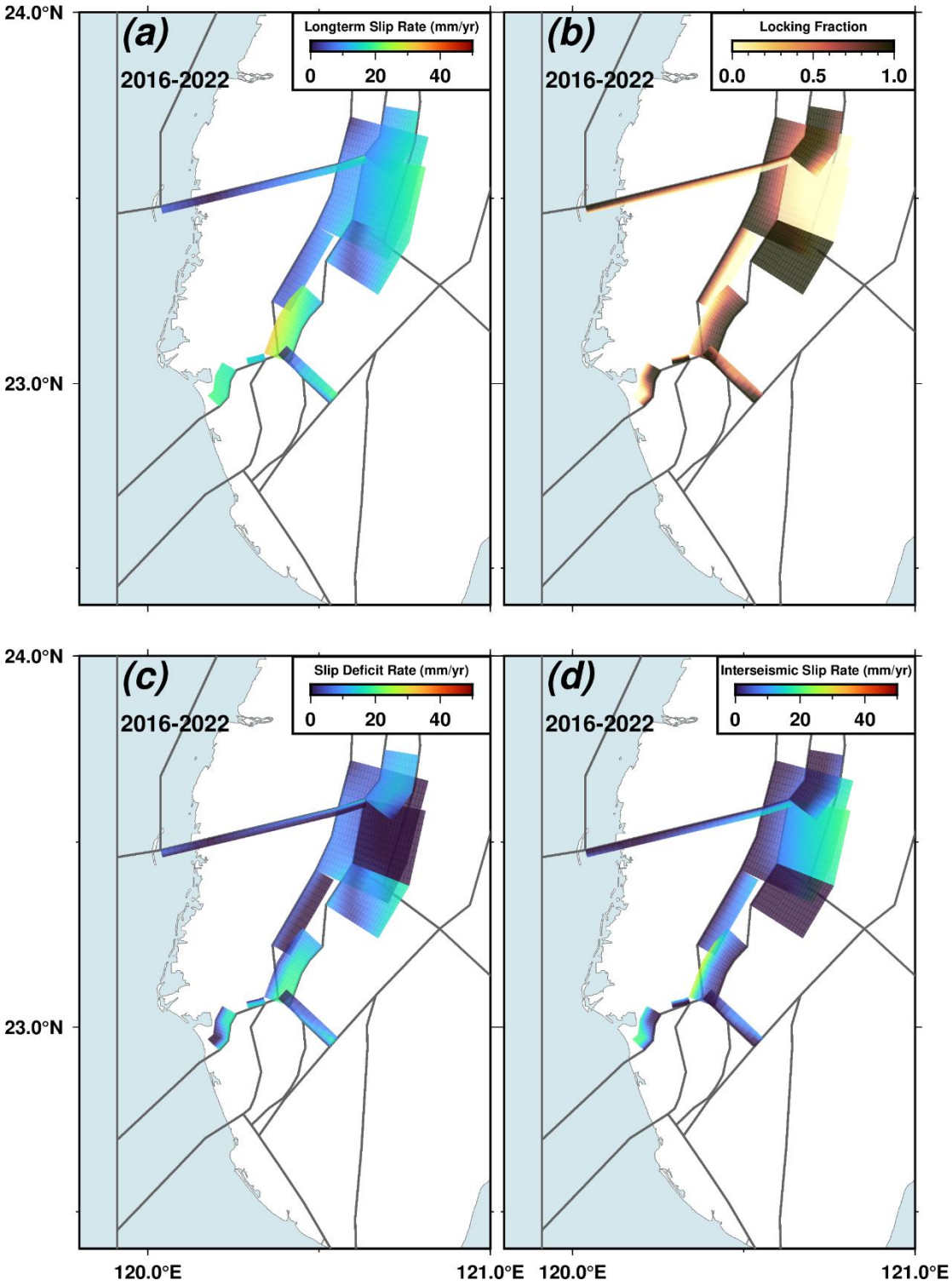


圖 5-2.12：(a）推求的斷層長期滑移速率。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。 (b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c）各斷層面的滑移虧損率。(d）由 (a）圖減去 (c）圖，得到斷層面上的震間期滑移速率。

Figure 5-2.12: (a) The longterm fault slip rate. (b) The distribution of coupling coefficient. (c)The deficit rate on the fault surface. (d) If we take the longterm slip rate and minus deficit, we can get the interseismic slip rate.

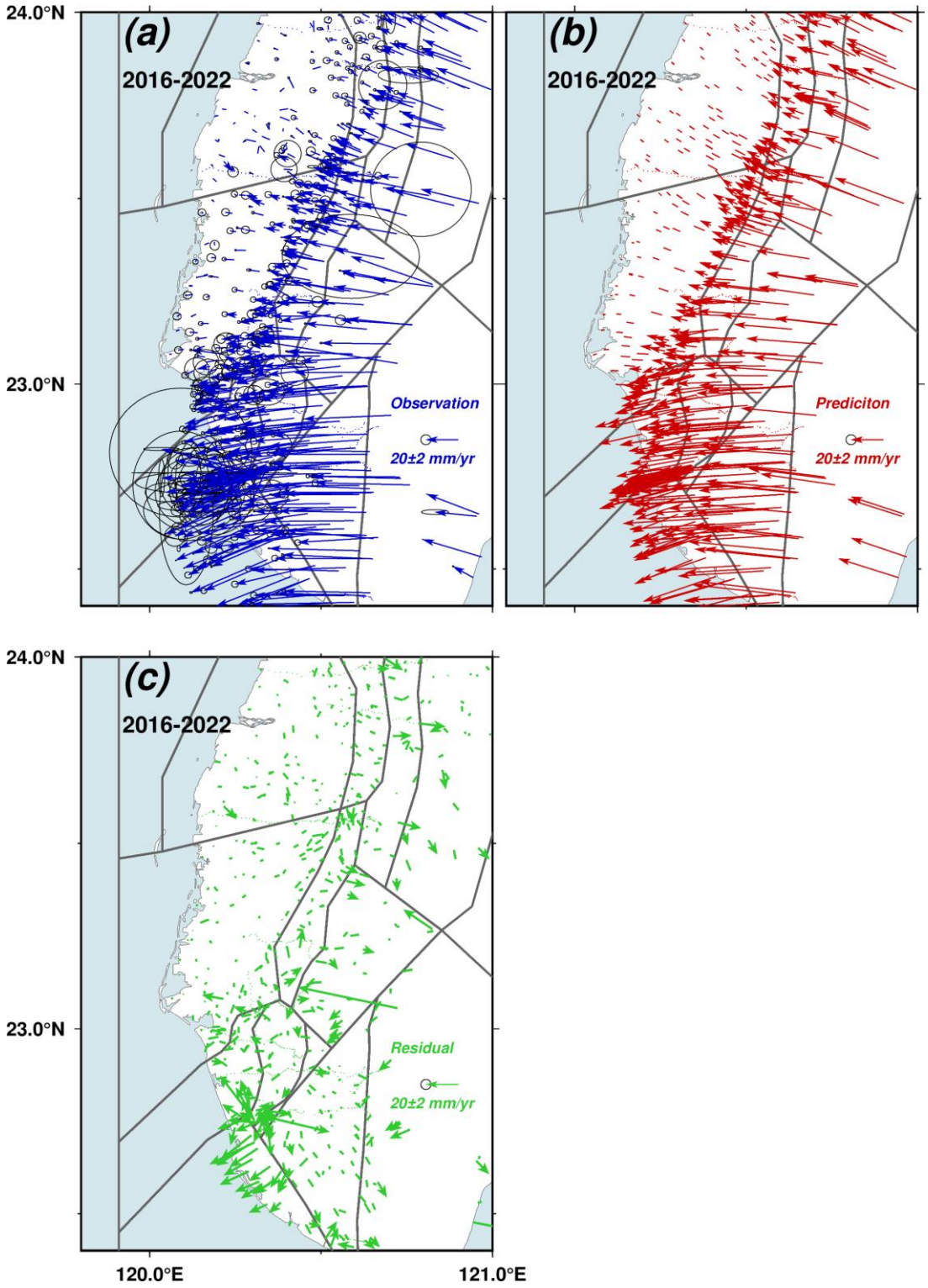


圖 5-2.13：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差。(a) 模型使用的 2016-2022 年間，連續與移動站的 GNSS 水平速度場。 (b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 水平速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5-2.13: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS horizontal velocities from 2016 to 2022. (b) The predicted horizontal velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

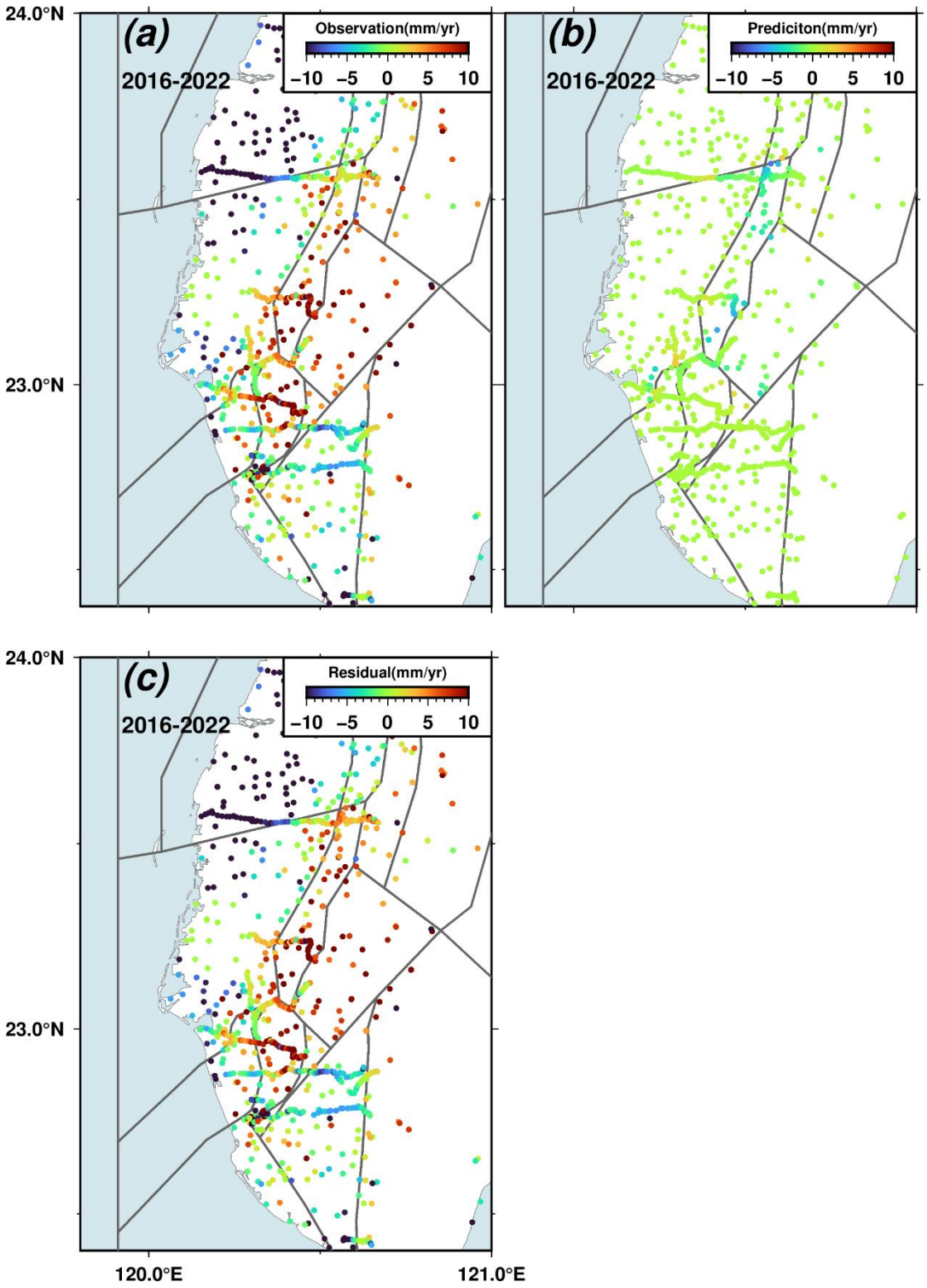


圖 5-2.14：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差。(a) 模型使用的 2016-2022 年間，連續與移動站的 GNSS 垂直速度場。 (b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 垂直速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5-2.14: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS vertical velocities from 2016 to 2022. (b) The predicted vertical velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

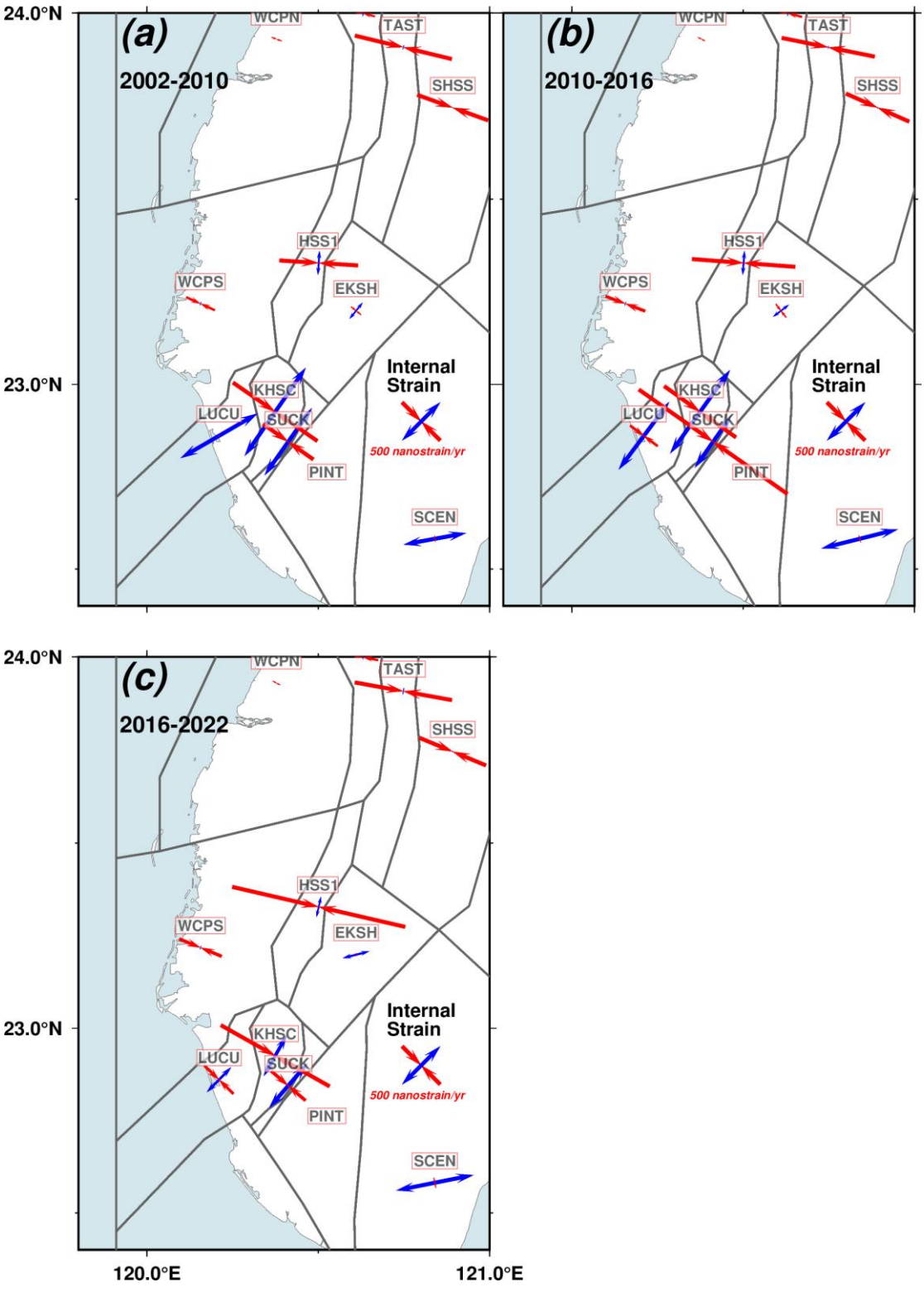


圖 5-2.15：塊體內部應變，除塊體旋轉與斷層滑移虧損外，同步搜尋各塊體內部的均勻彈性應變速率，所得結果於各塊體內部以主應變率軸表示，紅色箭頭為壓縮應變率軸方向與大小，藍色箭頭為伸張應變率軸。

Figure 5-2.15: Internal strain within each block. Red and blue arrows represent maximum and minimum principal strain rate.

表 5-2.1：以 2002-2010 速度場反演的各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。

Table 5-2.1: The location of rotation poles, the angular velocities, and the standard error of angular velocities of each block. Along with the maximum, minimum axis, and the azimuth of error ellipse for each pole. Modeled with velocity field of 2002-2010.

2002-2010 Tdefnode 臺灣西南部模擬成果							
名稱	軸經度	軸緯度	角速度 (deg/My)	角速度誤差 (deg/My)	誤差橢圓長軸方位角 (deg)	誤差橢圓長軸 (deg)	誤差橢圓短軸長 (deg)
EURA	180.00	0.00	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPS	120.84	19.49	0.26	0.12	70.55	30.68	26.34
EKSH	121.44	30.89	-2.45	0.16	59.43	5.14	4.38
LUCU	142.46	-60.65	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
SUCK	37.17	83.21	-0.50	0.00	180.00	0.00	0.00
KHSC	133.22	-57.76	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
PINT	128.53	-64.42	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
EFSB	177.58	-33.53	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
SCEN	114.36	-19.84	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00
HSS1	122.99	41.01	-0.38	0.27	48.94	49.18	42.99
HECH	180.00	0.00	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPN	135.86	30.81	-0.05	0.07	67.35	79.63	71.03
WTFH	121.03	24.58	-4.04	0.10	64.68	1.88	1.63
SHSS	122.13	26.38	-5.75	0.13	63.71	1.77	1.52
TAST	121.01	24.82	-9.46	0.09	65.17	0.73	0.64

表 5-2.2：以 2010-2016 速度場反演的各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。

Table 5-2.2: The location of rotation poles, the angular velocities, and the standard error of angular velocities of each block. Along with the maximum, minimum axis, and the azimuth of error ellipse for each pole. Modeled with velocity field of 2010-2016.

2010-2016 Tdefnode 臺灣西南部模擬成果							
名稱	軸經度	軸緯度	角速度 (deg/My)	角速度誤差 (deg/My)	誤差橢圓長軸方位角 (deg)	誤差橢圓長軸 (deg)	誤差橢圓短軸長 (deg)
EURA	180.00	0.00	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPS	120.20	19.95	0.25	0.12	69.81	32.34	27.89
EKSH	121.44	30.89	-2.45	0.16	59.43	5.14	4.38
LUCU	133.70	-24.48	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
SUCK	127.93	-36.58	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00
KHSC	128.01	-35.10	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
PINT	128.53	-64.42	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
EFSB	177.58	-33.53	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
SCEN	113.05	-18.65	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00
HSS1	126.08	44.70	-0.33	0.26	48.56	55.21	47.96
HECH	180.00	0.00	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPN	132.90	35.27	-0.07	0.07	62.12	69.13	60.50
WTFH	121.02	24.61	-4.02	0.10	64.65	1.89	1.64
SHSS	122.13	26.38	-5.75	0.13	63.71	1.77	1.52
TAST	121.00	24.79	-9.48	0.09	65.20	0.73	0.63

表 5-2.3：以 2016-2022 速度場反演的各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。

Table 5-2.3: The location of rotation poles, the angular velocities, and the standard error of angular velocities of each block. Along with the maximum, minimum axis, and the azimuth of error ellipse for each pole. Modeled with velocity field of 2016-2022.

2016-2022 Tdefnode 臺灣西南部模擬成果							
名稱	軸經度	軸緯度	角速度 (deg/My)	角速度誤差 (deg/My)	誤差橢圓長軸方位角 (deg)	誤差橢圓長軸 (deg)	誤差橢圓短軸長 (deg)
EURA	180.00	0.00	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPS	119.64	18.69	0.23	0.12	70.93	34.60	29.97
EKSH	121.44	30.89	-2.45	0.16	59.43	5.14	4.38
LUCU	133.12	-33.40	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
SUCK	130.05	-34.82	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00
KHSC	134.59	-53.33	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00
PINT	128.53	-64.42	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
EFSB	177.58	-33.53	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
SCEN	110.32	-26.89	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00
HSS1	126.86	47.12	-0.45	0.26	47.29	43.81	37.18
HECH	180.00	0.00	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPN	143.17	40.98	-0.04	0.07	66.28	88.53	79.67
WTFH	121.01	24.60	-4.04	0.10	64.65	1.89	1.64
SHSS	122.13	26.38	-5.75	0.13	63.71	1.77	1.52
TAST	120.99	24.80	-9.47	0.09	65.18	0.73	0.63

表 5-2.4：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及以 2002-2010 資料反演的平均滑移速率。

Table 5-2.4: The minimum, maximum value of geological fault slip rate and the long-term slip rate, deficit rate along with their standard error calculated by our model using velocity field of 2002-2010.

2002-2010 Tdefnode 臺灣西南部模擬成果						
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)	測地長期平均滑移速率（ mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（ mm/yr）	標準差
九芎坑	2.4	12.0	15.7	7.6	8.4	5.8
梅山	0	2.5	10.1	5.2	3.6	5.2
大尖山			16.6	3.4	10.0	7.7
木屐寮-六甲	4.4	7.1	5.3	0.9	1.6	2.4
觸口			11.9	4.7	11.9	4.7
口宵里			25.7	2.6	20.3	9.7
新化	0.8	4.5	6.3	2.0	2.1	3.3
後甲里	0	7.1	17.0	2.8	9.3	7.3
左鎮			19.6	8.4	18.9	7.9

表 5-2.5：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及以 2010-2016 資料反演的平均滑移速率。

Table 5-2.5: The minimum, maximum value of geological fault slip rate and the long-term slip rate, deficit rate along with their standard error calculated by our model using velocity field of 2010-2016.

2010-2016 Tdefnode 臺灣西南部模擬成果						
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)	測地長期平均滑移速率（ mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（ mm/yr）	標準差
九芎坑	2.4	12.0	12.0	6.3	2.9	2.6
梅山	0	2.5	12.7	4.6	5.4	7.6
大尖山			11.5	2.8	10.8	2.1
木屐寮-六甲	4.4	7.1	5.6	2.0	3.0	3.5
觸口			7.7	5.3	4.6	6.5
口宵里			28.9	4.3	19.1	12.1
新化	0.8	4.5	8.3	0.7	2.9	4.2
後甲里	0	7.1	14.1	2.2	6.7	6.0
左鎮			19.0	7.3	18.6	7.0

表 5-2.6：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及以 2016-2022 資料反演的平均滑移速率。

Table 5-2.6: The minimum, maximum value of geological fault slip rate and the long-term slip rate, deficit rate along with their standard error calculated by our model using velocity field of 2016-2022.

2010-2016 Tdefnode 臺灣西南部模擬成果						
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)	測地長期平均滑移速率（ mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（ mm/yr）	標準差
九芎坑	2.4	12.0	13.3	6.5	5.0	6.0
梅山	0	2.5	12.3	6.0	5.2	8.1
大尖山			12.4	3.1	9.6	4.0
木屐寮-六甲	4.4	7.1	7.7	3.0	1.9	3.0
觸口			12.9	5.2	5.7	7.1
口宵里			21.9	6.4	12.0	7.3
新化	0.8	4.5	14.3	0.9	9.5	7.2
後甲里	0	7.1	18.8	1.1	8.8	9.3
左鎮			10.7	7.7	7.2	6.3

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（圖 5-3.1）、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義各參數之使用符號。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。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。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\boldsymbol{Gs} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad （式 5-4.3）$$

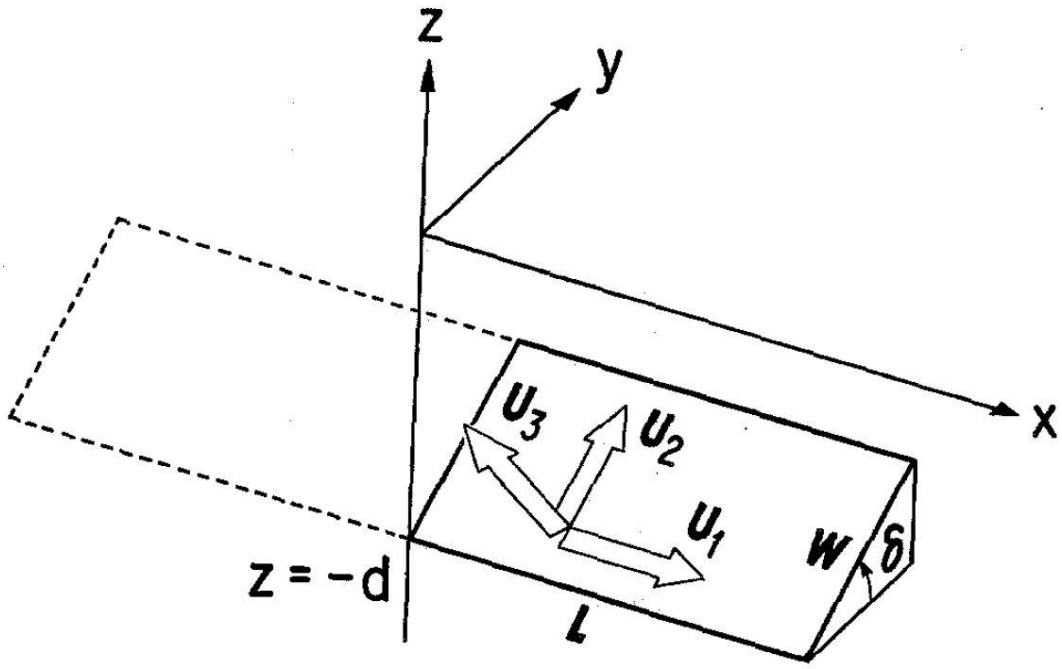


圖 5-3.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖（Okada, 1985）。斷層幾何參數包含：深度 z（km）、長度 L（km）、寬度 W（km）、傾角 δ（°）。

Figure 5-3.1: Geometry of the source model (Okada, 1985). Fault geometry parameters include fault depth: z (km), length: L (km), width: W (km) and dip: δ (°).

5-3-2 斷層模擬結果

本研究主要為臺灣嘉南地區，共有九條主要斷層，使用臺灣嘉南地區地調所觀測到的 GNSS 及精密水準資料（圖 2-2.3），進行該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，計算臺灣嘉南地區各斷層滑移虧損率平均值。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 2016–2022 年三個時間段的速度場成果分別進行斷層模擬，反演成果如圖 5-3.2 至圖 5-3.4 所示，斷層滑移虧損率則如圖 5-3.5 至圖 5-3.7。

三時期各斷層之滑移虧損率除大尖山斷層外，其他八條斷層皆隨著時間遞減，2010-2016 及 2016-2022 時期以大尖山斷層有較大之滑移虧損率，分別為 21.1 mm/yr 及 18.7 mm/yr（表 5-3.1）。嘉南三條重點斷層：口宵里斷層、新化斷層及後甲里斷層於模型成果中，並無顯著之滑移虧損率累積，口宵里斷層三個時期之滑移虧損率分別為 1.9 mm/yr、1.0 mm/yr 及 0.9 mm/yr，新化斷層三個時期之滑移虧損率分別為 0.5 mm/yr、0.5 mm/yr 及 0.3 mm/yr，後甲里斷層三個時期之滑移虧損率分別為 0.0 mm/yr、0.0 mm/yr 及 0.0 mm/yr。

表 5-3.1：斷層平均滑移速率。

Table 5-3.1: Average slip deficit rates.

	斷層名稱	平均走向滑移速率（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）
2002-2010 年速度場	九芎坑斷層	5.1	-10.6	12.6	8.2
	梅山斷層	8.0	-10.6	17.6	7.9
	大尖山斷層	3.1	-13.0	14.8	13.7
	木屐寮-六甲斷層	1.1	-4.4	5.1	5.9
	觸口斷層	1.9	-15.2	15.5	11.0
	口宵里斷層	1.3	-0.8	1.9	1.9
	新化斷層	0.0	-0.5	0.5	0.4
	後甲里斷層	0.0	0.0	0.0	0.0
	左鎮斷層	-7.9	-4.8	9.4	5.4
2010-2016 年速度場	九芎坑斷層	4.3	-7.8	10.3	11.0
	梅山斷層	1.4	-5.2	6.0	5.3
	大尖山斷層	2.6	-20.6	21.1	19.7
	木屐寮-六甲斷層	1.4	-3.4	3.9	5.4
	觸口斷層	5.3	-4.6	8.9	6.4
	口宵里斷層	1.0	-0.1	1.0	1.4
	新化斷層	0.0	-0.5	0.5	0.4
	後甲里斷層	0.0	0.0	0.0	0.0
	左鎮斷層	-0.8	-6.5	6.6	3.4
2016-2022 年速度場	九芎坑斷層	2.7	-7.4	9.0	8.8
	梅山斷層	2.3	-6.5	7.9	5.6
	大尖山斷層	1.7	-18.4	18.7	18.9
	木屐寮-六甲斷層	0.1	-2.3	2.3	4.2
	觸口斷層	1.9	-3.8	5.0	5.8
	口宵里斷層	0.8	-0.2	0.9	1.1
	新化斷層	0.0	-0.3	0.3	0.2
	後甲里斷層	0.0	0.0	0.0	0.0
	左鎮斷層	-0.4	-4.5	4.5	2.4

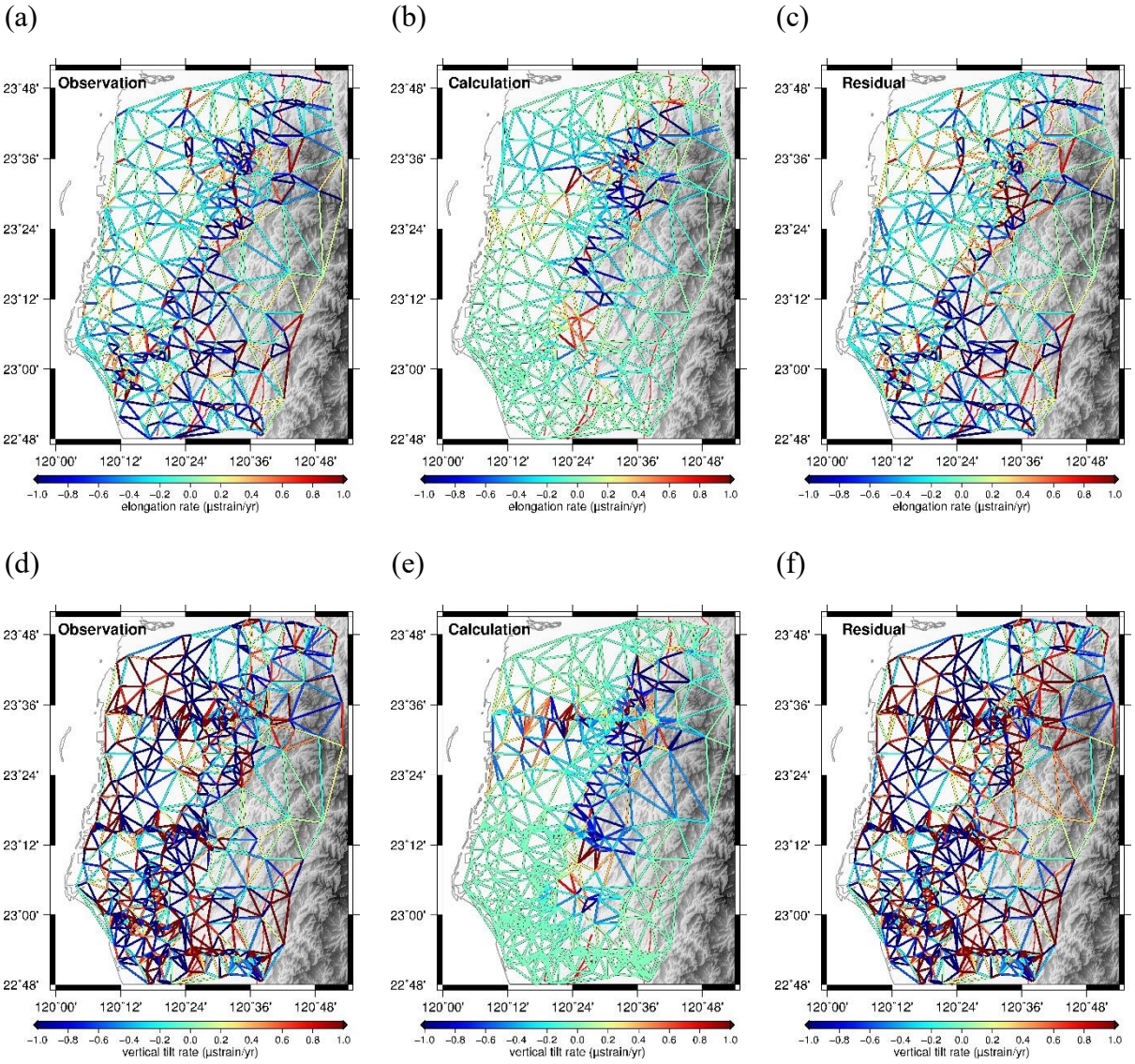


圖 5-3.2：2002-2010 基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果。(a)水平速度場觀測值、(b)水平速度場計算值、(c)水平速度場殘差；(d)垂直速度場觀測值、(e)垂直速度場計算值、(f)垂直速度場殘差。

Figure 5-3.2: The 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.

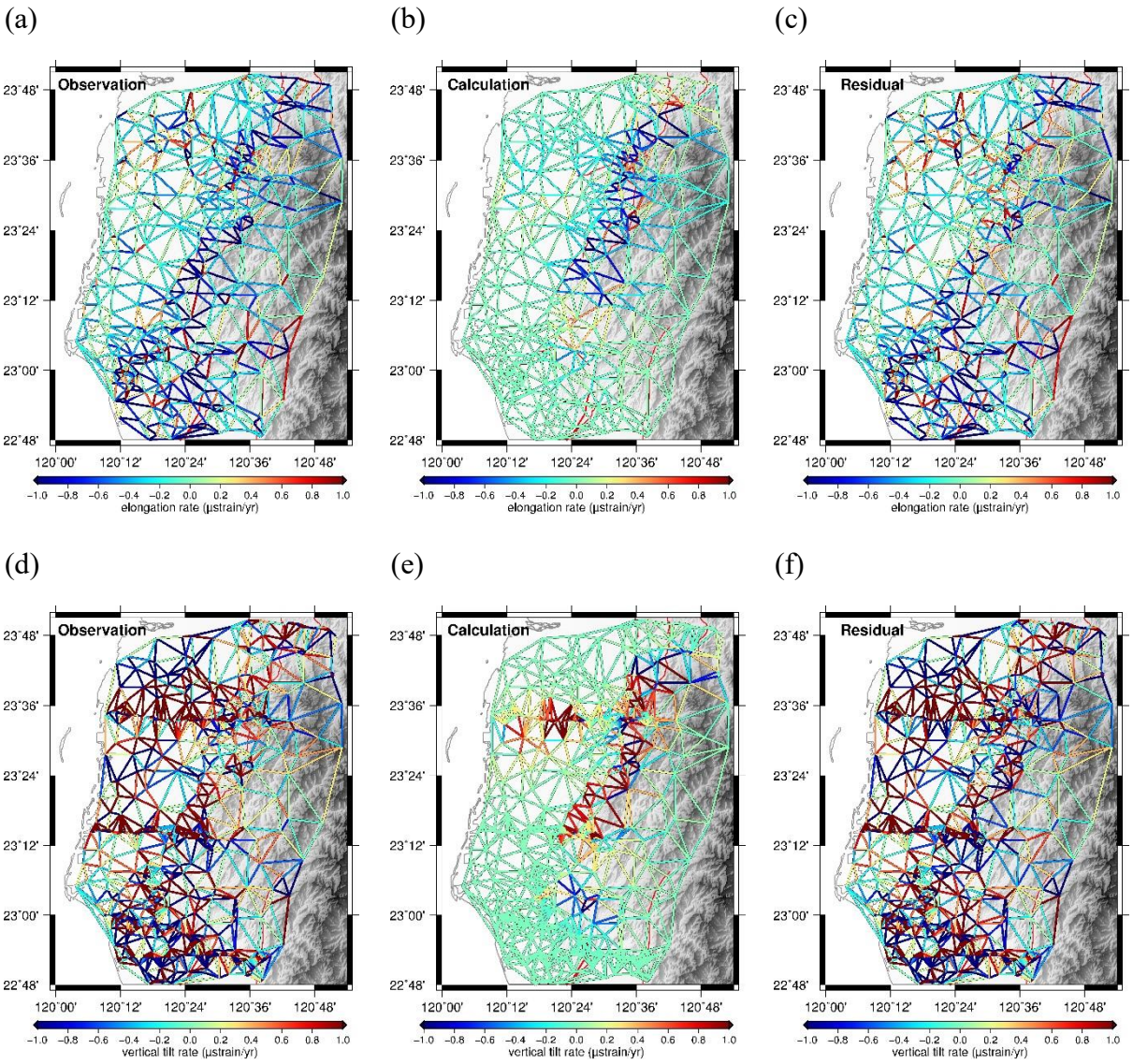


圖 5-3.3：2010-2016 年基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值、(b) 水平速度場計算值、(c) 水平速度場殘差；(d) 垂直速度場觀測值、(e) 垂直速度場計算值、(f) 垂直速度場殘差。

Figure 5-3.3: The 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.

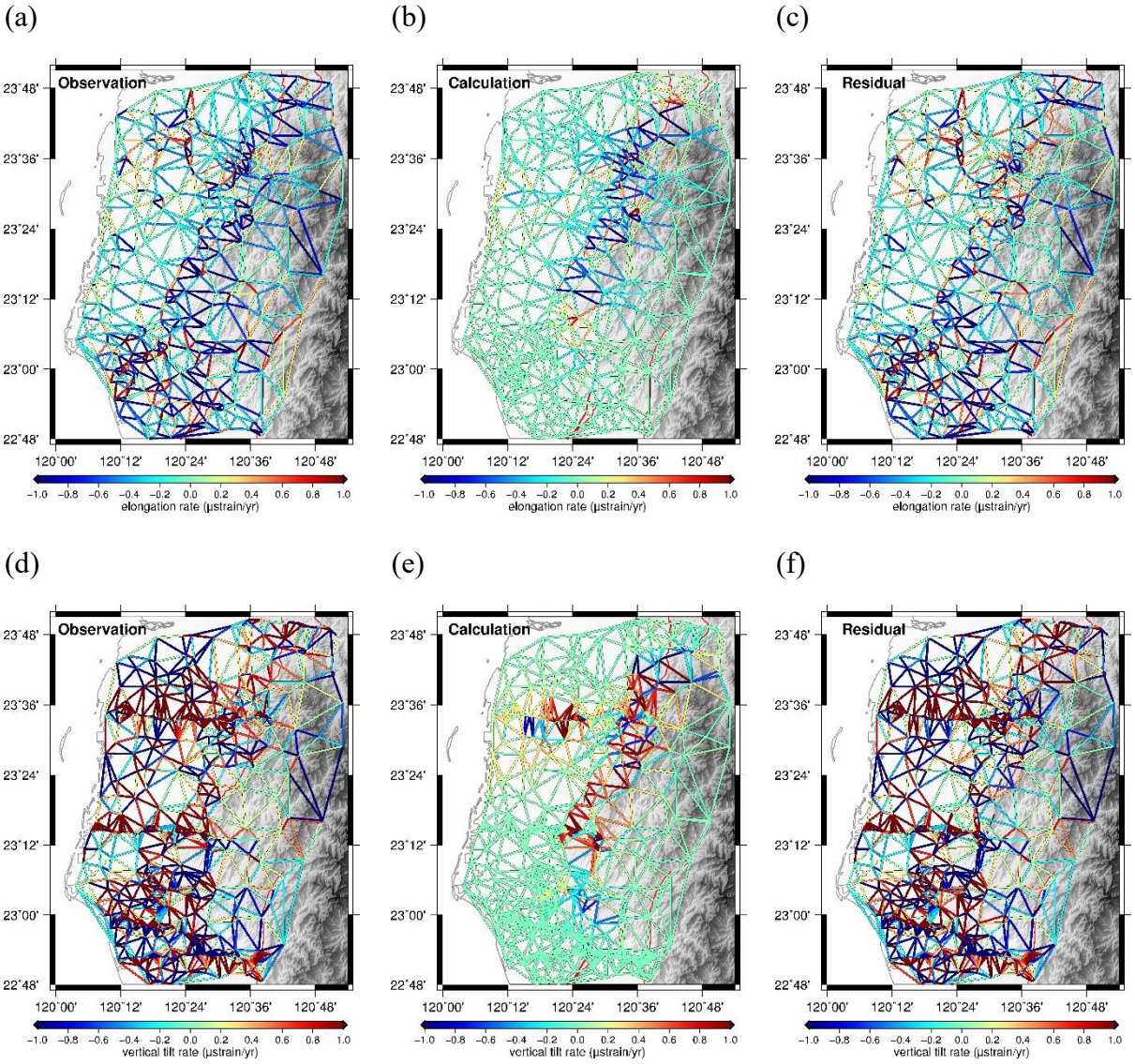


圖 5-3.4：2016-2022 基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果。(a)水平速度場觀測值、(b)水平速度場計算值、(c)水平速度場殘差；(d)垂直速度場觀測值、(e)垂直速度場計算值、(f)垂直速度場殘差。

Figure 5-3.4: The model applies the velocity from 2016 to 2022. (a) Horizontal velocity observation; (b) Horizontal velocity calculation; (c) Horizontal velocity residuals; (d) Vertical velocity observation; (e) Vertical velocity calculation; (f) Vertical velocity residuals.

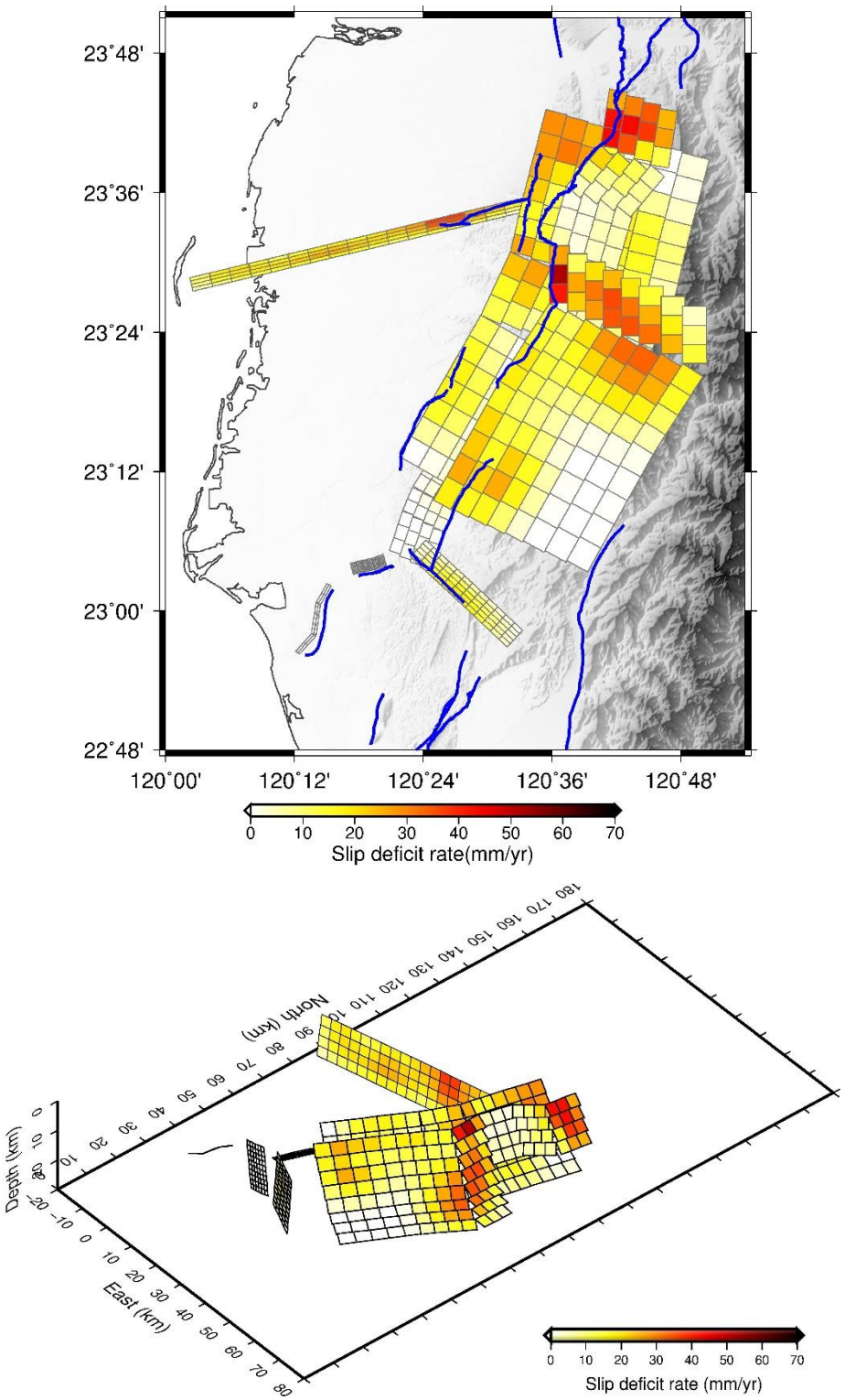


圖 5-3.5：2002-2010 之嘉南地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-3.5: Fault slip deficit rate of Chiayi-Tainan Taiwan, 2002-2010.

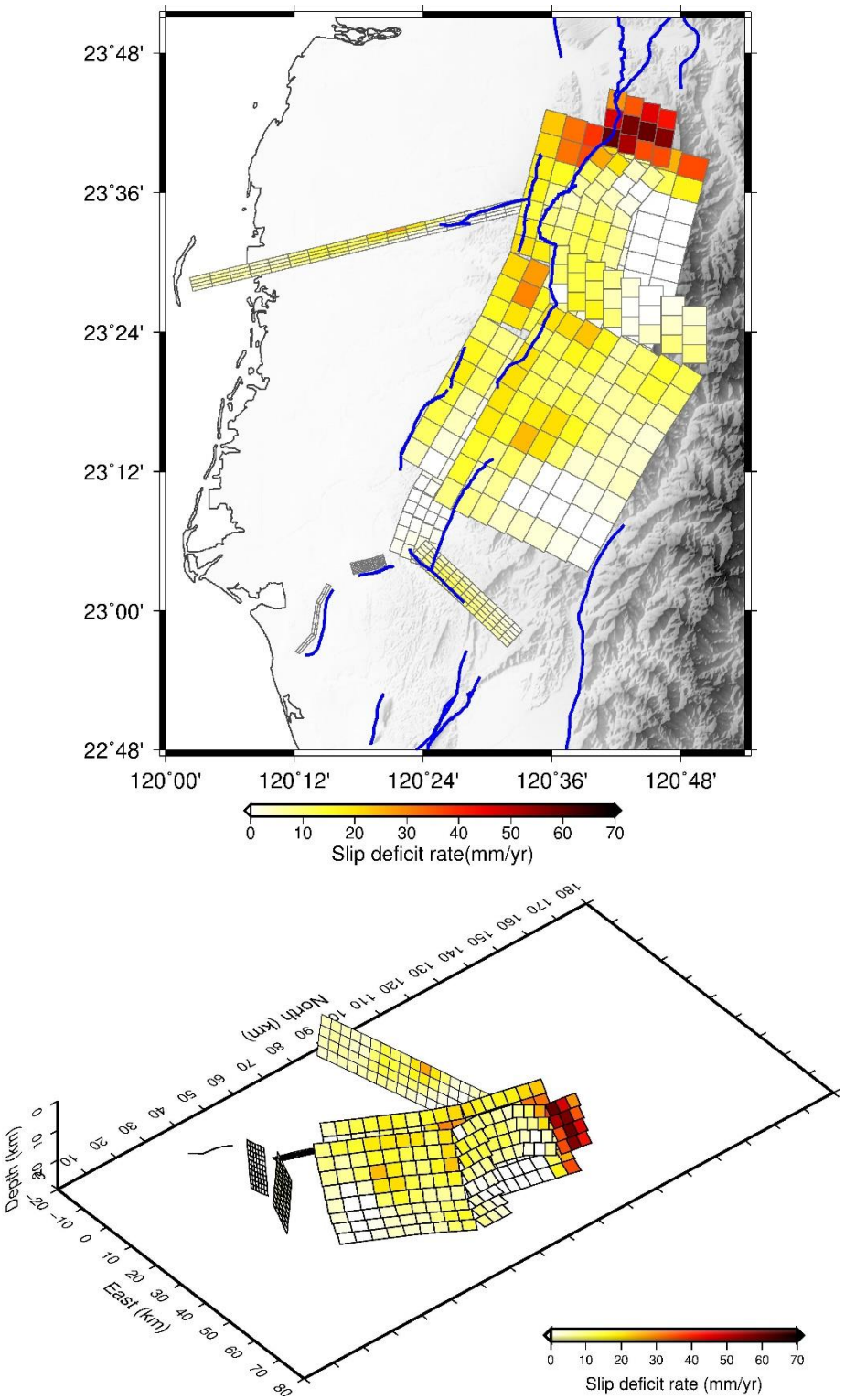


圖 5-3.6：2010-2016 之嘉南地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-3.6: Fault slip deficit rate of Chiayi-Tainan Taiwan, 2010-2016.

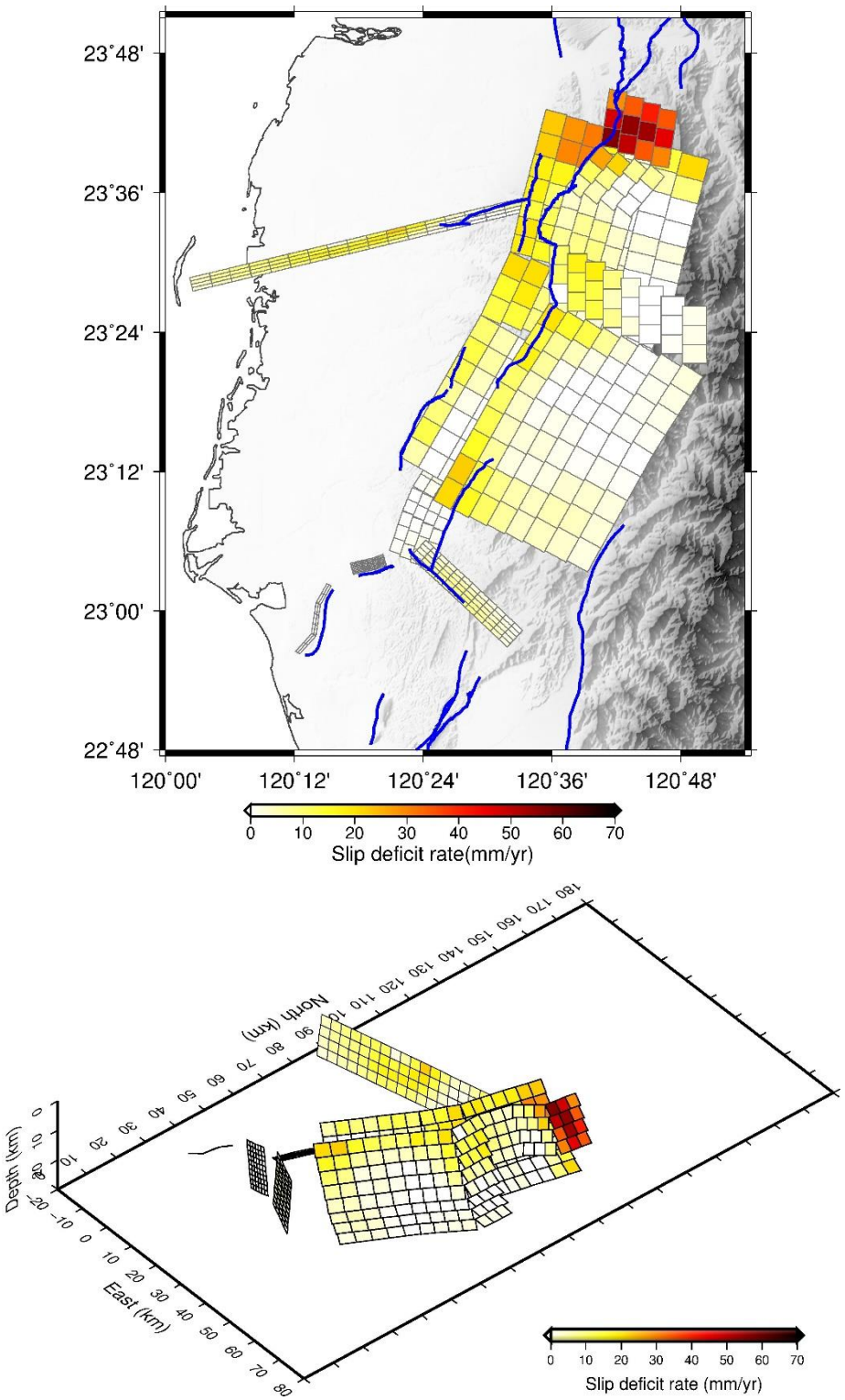


圖 5-3.7：2016-2022 之嘉南地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-3.7: Fault slip deficit rate of Chiayi-Tainan Taiwan, 2016-2022.

5-4 嘉南地區之斷層滑移虧損速率

今年針對臺灣嘉南地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析，包含九條活動斷層，分別為：九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮－六甲斷層、觸口斷層、口宵里斷層、新化斷層、後甲里斷層與左鎮斷層。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，嘉南地區參考 2002 至 2010 年（甲仙地震前）、2010 至 2016 年（甲仙地震後）、2016 至 2022 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。今年嘉南地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果如表 5-4.1 至表 5-4.3 及圖 5-4.1 至圖 5-4.3 所示，顯示各模型於三時期之滑移虧損率平均值有隨時間遞減之趨勢，其中以新化斷層之三模型成果差異最大，其次為大尖山斷層及口宵里斷層。

表 5-4.1：本計畫之 2002-2010 加權平均斷層滑移虧損率(2002-2010)。

Table 5-4.1: Weighted average slip deficit rate in this project, 2002-2010.

斷層名稱		BLOCKS Model 總變動量 （mm/yr）	TDEFNODE Model 平均值滑移虧損率 （mm/yr）	Baseline Inversion Model 斷層滑移速率平均值 （mm/yr）	加權平均滑移虧損速率 （mm/yr）
九芎坑斷層	上界	24.6	20.0	29	24.5
	平均	17.5±3.6	8.4±5.8	12.6±8.2	12.8
	下界	10.3	0	0	3.5
梅山斷層	上界	2.6	14.1	33.4	16.7
	平均	2.6±0.0	3.6±5.2	17.6±7.9	7.9
	下界	2.6	0	1.8	1.5
大尖山斷層	上界	6.8	25.5	42.2	24.8
	平均	1.8±2.5	10.0±7.7	14.8±13.7	8.9
	下界	0.0	0	0	0.0
木屐寮-六甲斷層	上界	14.4	6.4	16.9	12.6
	平均	8.8±2.8	1.6±2.4	5.1±5.9	5.2
	下界	3.2	0	0	1.1
觸口斷層	上界	11.5	21.3	37.5	23.4
	平均	11.5±0.0	11.9±4.7	15.5±11.0	13.0
	下界	11.4	2.5	0	4.7
口宵里斷層	上界	16.2	39.6	5.7	20.5
	平均	14.0±1.1	20.3±9.7	1.9±1.9	12.1
	下界	11.8	1.0	0	4.3
新化斷層	上界	-	8.8	1.3	5.0
	平均	-	2.1±3.3	0.5±0.4	1.3
	下界	-	0	0	0.0
後甲里斷層	上界	8.1	23.9	0	10.6
	平均	6.9±0.6	9.3±7.3	0.0±0.0	5.4
	下界	5.6	0	0	1.9
左鎮斷層	上界	2.0	34.7	20.2	19.0
	平均	1.9±0.1	18.9±7.9	9.4±5.4	10.1
	下界	1.8	3.0	0	1.6

註：BLOCK Model 新化斷層之成果暫不考慮。

表 5-4.2：本計畫之 2010-2016 加權平均斷層滑移虧損率(2010-2016)。

Table 5-4.2: Weighted average slip deficit rate in this project, 2010-2016.

斷層名稱		BLOCKS Model 總變動量 （mm/yr）	TDEFNODE Model 平均值滑移虧損率 （mm/yr）	Baseline Inversion Model 斷層滑移速率平均值 （mm/yr）	加權平均滑移虧損速率 （mm/yr）
九芎坑斷層	上界	17.5	8.2	32.3	19.3
	平均	13.4±2.0	2.9±2.6	10.3±11.0	8.9
	下界	9.3	0	0	3.1
梅山斷層	上界	2.6	20.5	16.6	13.2
	平均	2.6±0.00	5.4±7.6	6.0±5.3	4.7
	下界	2.6	0	0	0.9
大尖山斷層	上界	3.7	14.9	60.5	26.4
	平均	1.6±1.0	10.8±2.1	21.1±19.7	11.2
	下界	0	6.6	0	2.2
木屐寮-六甲斷層	上界	12.0	10.1	14.7	12.3
	平均	8.8±1.6	3.0±3.5	3.9±5.4	5.2
	下界	5.5	0	0	1.8
觸口斷層	上界	11.5	17.5	21.7	16.9
	平均	11.5±0.02	4.6±6.5	8.9±6.4	8.3
	下界	11.4	0	0	3.8
口甯里斷層	上界	16.2	43.3	3.8	21.1
	平均	14.0±1.1	19.1±12.1	1.0±1.4	11.4
	下界	11.8	0	0	3.9
新化斷層	上界	-	11.3	1.3	6.3
	平均	-	2.9±4.2	0.5±0.4	1.7
	下界	-	0	0	0.0
後甲里斷層	上界	8.1	20.8	0	9.6
	平均	6.9±0.6	6.7±6.0	0.0±0.0	4.5
	下界	5.6	0	0	1.9
左鎮斷層	上界	2.3	32.6	13.4	16.1
	平均	2.0±0.2	18.6±7.0	6.6±3.4	9.1
	下界	1.6	4.6	0	2.1

註：BLOCK Model 新化斷層之成果暫不考慮。

表 5-4.3：本計畫 2016-2022 之加權平均斷層滑移虧損率(2016-2022)。

Table 5-4.3: Weighted average slip deficit rate in this project, 2016-2022.

斷層名稱		BLOCKS Model 總變動量 （mm/yr）	TDEFNODE Model 平均值滑移虧損率 （mm/yr）	Baseline Inversion Model 斷層滑移速率平均值 （mm/yr）	加權平均滑移虧損速率 （mm/yr）
九芎坑斷層	上界	12.8	17.0	26.6	18.8
	平均	10.8±1.0	5.0±6.0	9.0±8.8	8.3
	下界	8.8	0	0	2.9
梅山斷層	上界	2.6	21.3	19.1	14.3
	平均	2.6±0.0	5.2±8.1	7.9±5.6	5.2
	下界	2.6	0	0	0.9
大尖山斷層	上界	2.7	17.5	56.5	25.6
	平均	1.7±0.5	9.6±4.0	18.7±18.9	10.0
	下界	0.7	1.7	0	0.8
木屐寮-六甲斷層	上界	10.4	8.0	10.7	9.7
	平均	8.7±0.9	1.9±3.0	2.3±4.2	4.3
	下界	7.0	0	0	2.4
觸口斷層	上界	11.5	19.8	16.6	16.0
	平均	11.5±0.0	5.7±7.1	5.0±5.8	7.4
	下界	11.5	0	0	3.8
口宵里斷層	上界	16.2	26.5	3.1	15.3
	平均	14.0±1.1	12.0±7.3	0.9±1.1	9.0
	下界	11.8	0	0	3.9
新化斷層	上界	-	23.9	0.7	12.3
	平均	-	9.5±7.2	0.3±0.2	4.9
	下界	-	0	0	0.0
後甲里斷層	上界	8.1	27.3	0	11.8
	平均	6.9±0.6	8.8±9.3	0.0±0.0	5.2
	下界	5.6	0	0	1.9
左鎮斷層	上界	2.3	19.8	9.3	10.5
	平均	2.0±0.2	7.2±6.3	4.5±2.4	4.6
	下界	1.6	0	0	0.5

註：BLOCK Model 新化斷層之成果暫不考慮。

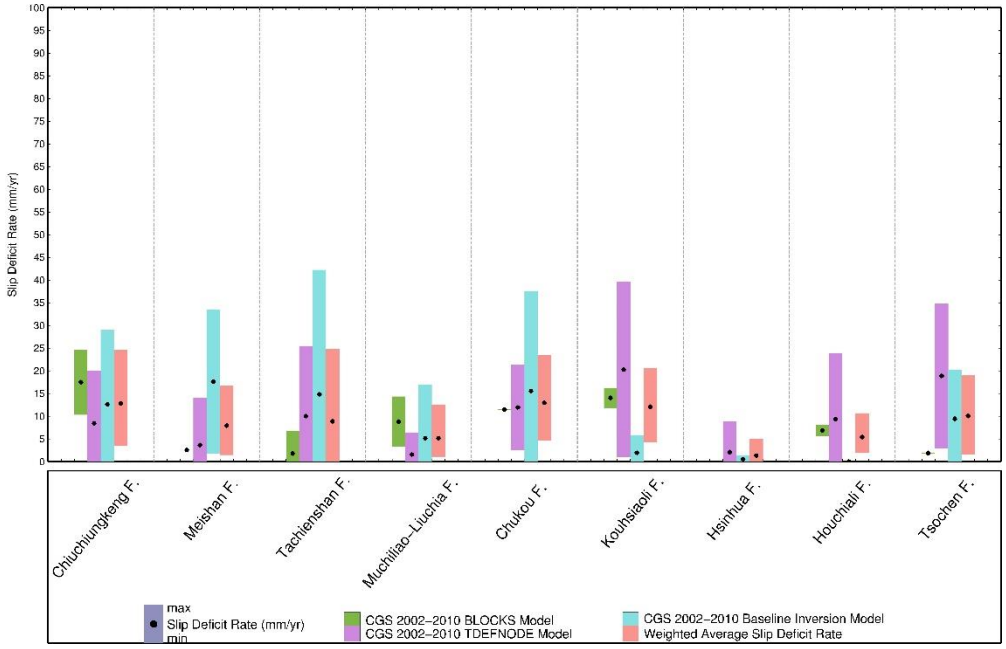


圖 5-4.1：本計畫 2002-2010 之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.1。

Figure 5-4.1: Weighted average slip deficit rate in this project, 2002-2010.

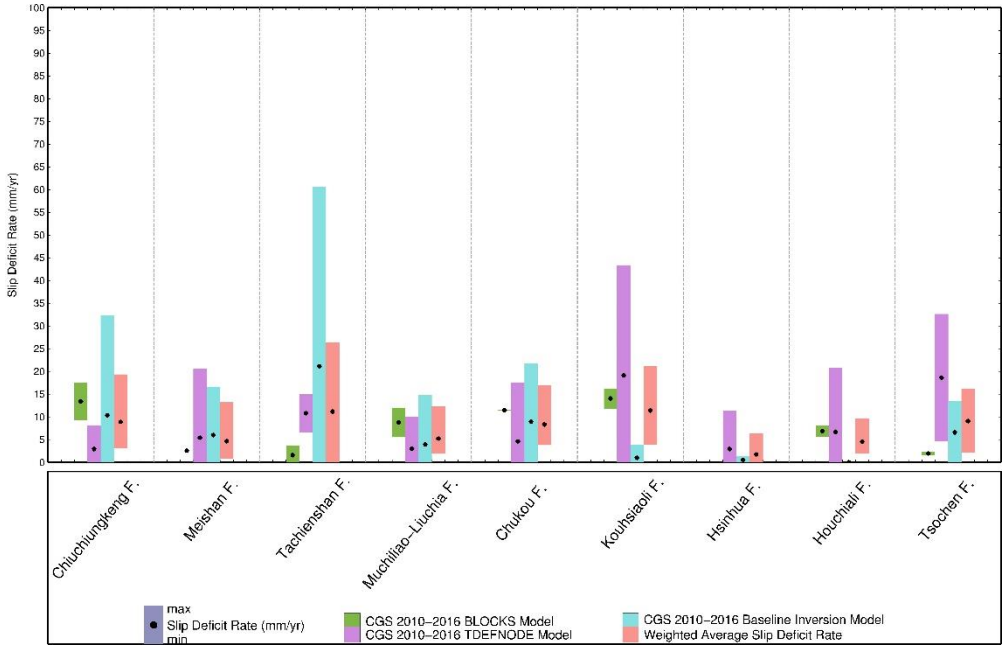


圖 5-4.2：本計畫 2010-2016 之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.2。

Figure 5-4.2: Weighted average slip deficit rate in this project, 2010-2016.

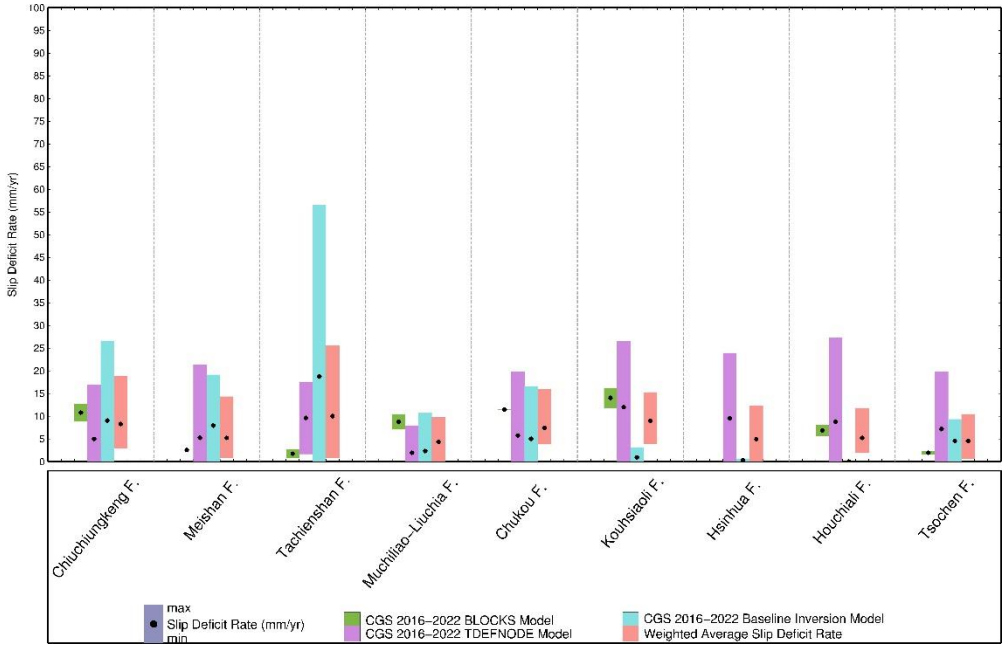
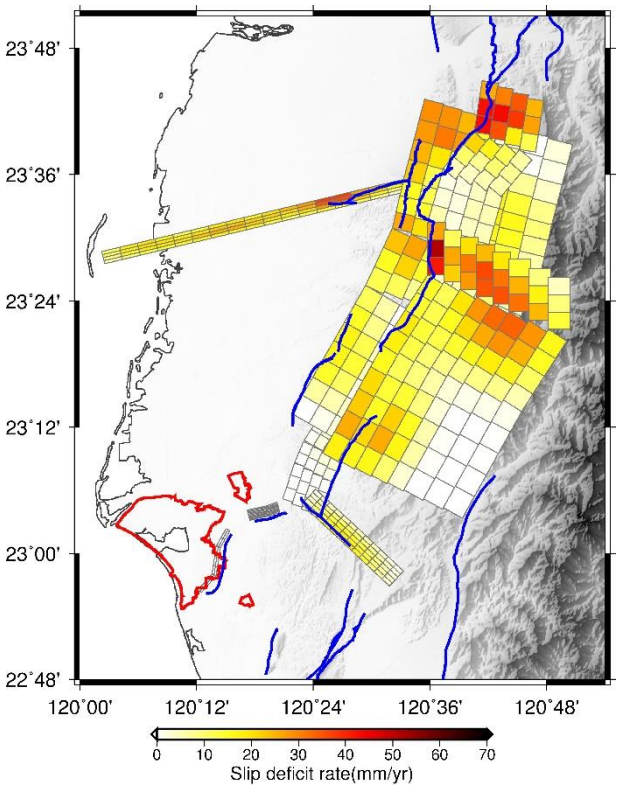


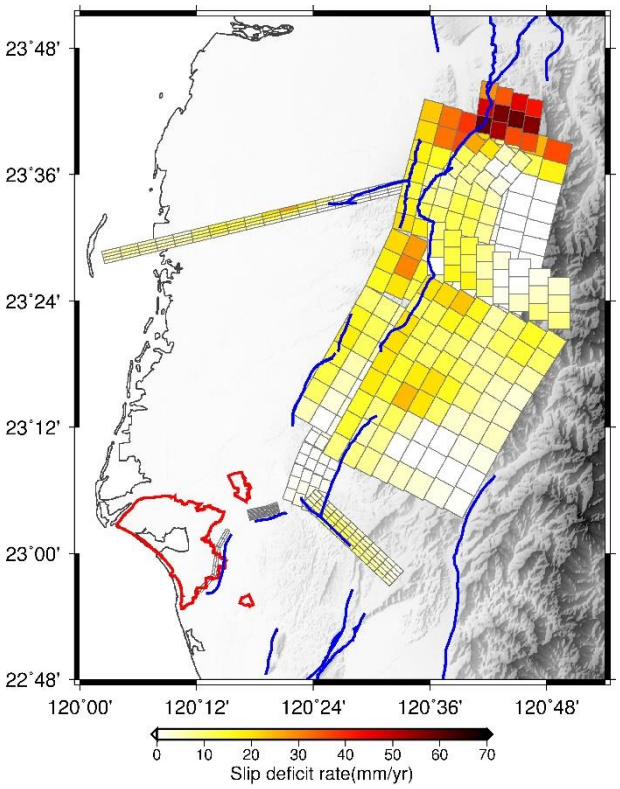
圖 5-4.3：本計畫 2016-2022 之加權平均斷層滑移虧損率分布圖，對應表 5-4.3。

Figure 5-4.3: Weighted average slip deficit rate in this project, 2016-2022.

a) 2002-2010



b) 2010-2016



c) 2016-2022

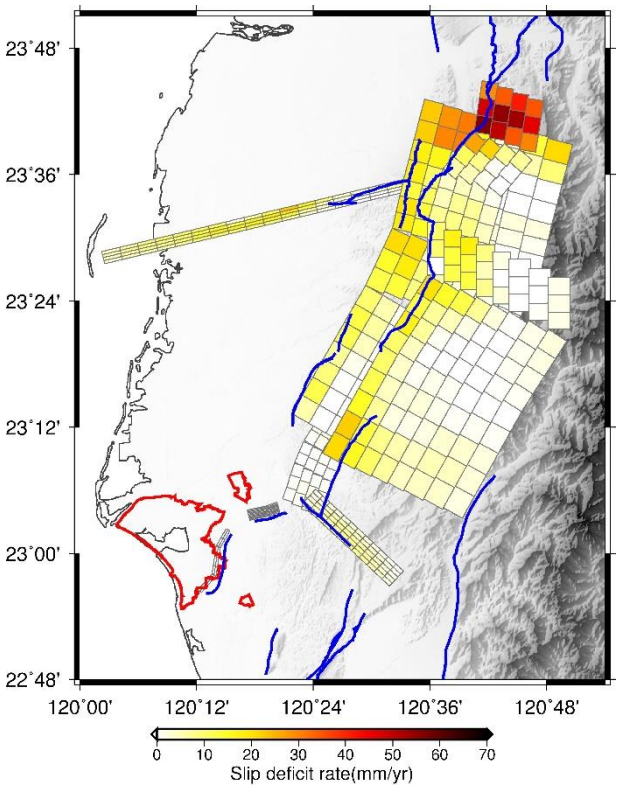


圖 5-4.4：本計畫重要區域（臺南科學園區、沙崙綠能科學城、臺南都會區）之斷層滑移虧損速率分布圖。

Figure 5-4.4: Distribution of fault slip deficit rates with the object areas (Tainan Science Park, Shalun Smart Green Energy Science City, and Tainan City).

第六章、嘉南地區斷層活動潛勢

6-1 新化斷層

6-1-1 新化斷層參數設定

新化斷層之破裂模式參照中興社（2020），共評估兩種破裂模式，A 為新化斷層與西部延伸段，長度 12 公里，B 為新化斷層至海岸延伸段，長度 24 公里。因海岸延伸段部分缺少足夠證據可佐證其延伸，權重較低，破裂模式權重分別為 A(0.7)，B(0.3)，如圖 6-1.1。

新化斷層幾何採用本計畫模型反演之參數：深度 18 公里，傾角為 84°。

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 6-1.1 所示為各破裂事件之地震矩規模。

新化斷層長期滑移速率，根據本計畫模型反演之加權平均滑移虧損率，上界為 12.3 mm/yr，中值為 4.9 mm/yr，下界為 0.0 mm/yr，如表 6-1.2 所示。因滑移速率不可能為 0，本計畫設定為 0.1 mm/yr 來評估。權重分配設定為 12.3 mm/yr (0.2)，4.9 mm/yr (0.6)，0.1 mm/yr (0.2)。

新化斷層最近一次發生時間是西元 1946 年新化地震，當時造成新化斷層沿線約 6 公里長的地表破裂（張麗旭等，1947），因此採用 BPT 模式進行評估。

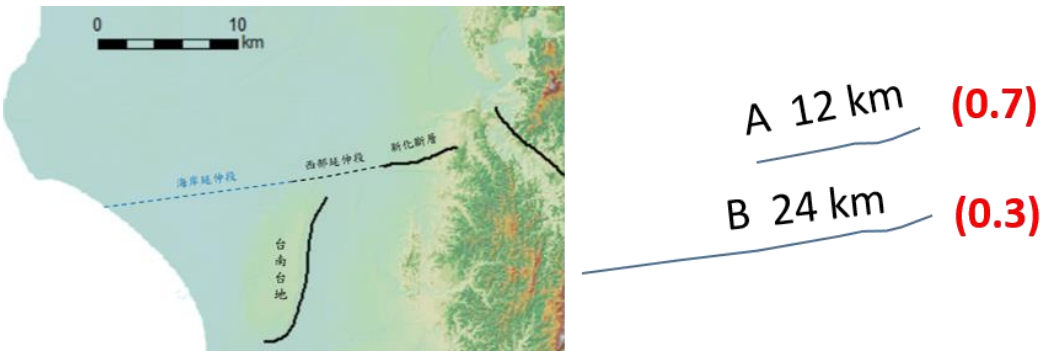


圖 6-1.1：新化斷層之破裂模式及權重。

Figure 6-1.1: Rupture cases and weights of the Hsinhua fault.

表 6-1.1：新化斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-1.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Hsinhua 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	12	84	18	18.1	217	6.2	6.4	6.6	6.3
B	24	84	18	18.1	434	6.5	6.7	6.9	6.6

表 6-1.2：本計畫模型之新化斷層加權平均斷層滑移虧損率

Table 6-1.2: Weighted average slip deficit rate of the Hsinhua fault in this project.

		BLOCKS Model	TDEFNODE 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）	
新化斷層	上界	-	23.9	0.7	12.3
	平均	-	9.5±7.2	0.3±0.2	4.9
	下界	-	0	0	0.0

6-1-2 新化斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算新化斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-1.2 為 2 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

新化斷層每一組參數皆有其權重，將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-1.3 之新化斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.4 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 之新化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。

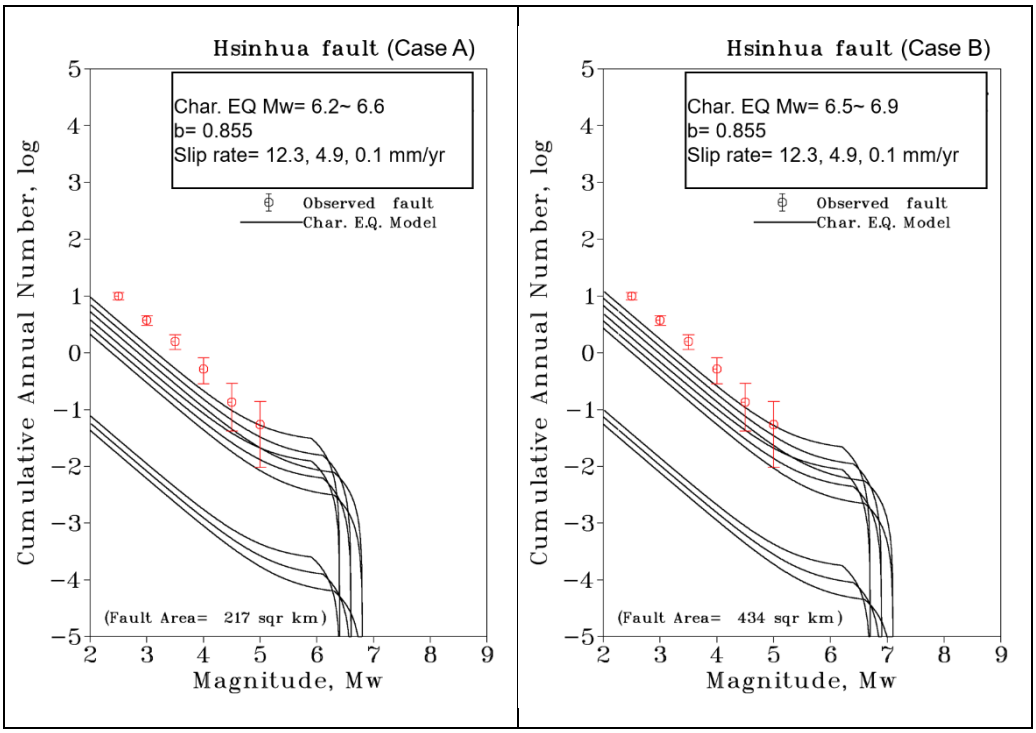


圖 6-1.2：新化斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-1.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Hsinhua fault.

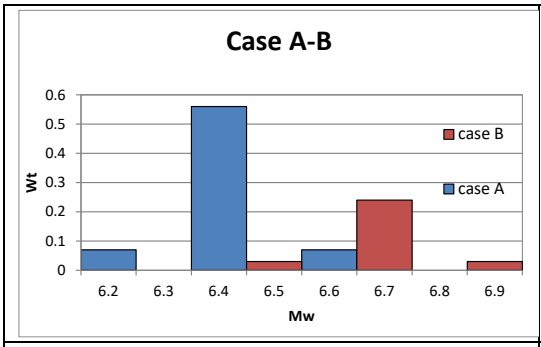


圖 6-1.3：新化斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-1.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Hsinhua fault.

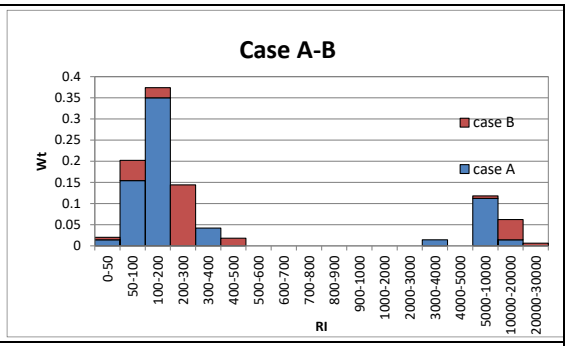


圖 6-1.4：新化斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-1.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Hsinhua fault.

6-1-3 新化斷層機率評估

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，新化斷層最後一次發生時間為西元 1946 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 6-1.3 為新化斷層 BPT 模式評估之結果，起算時間為西元 2022 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 5.1%、8.1%及 14.2%。

因新化斷層受限於斷層長度及幾何，發生規模 6.5 以上的地震機率較低，然而若是考慮規模 6.5 以下的特徵型地震，發震機率就會提高許多，本計畫認為不能忽視新化斷層規模 6.5 以下的特徵地震對臺南地區致災的可能性。

表 6-1.3：本計畫新化斷層發生機率評估

Table 6-1.3: Earthquake probabilities for the Hsinhua 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
	BPT	BPT	BPT
6.2≦ M ≦6.9	22.4%	33.0%	51.5%
M ≧ 6.5	5.1%	8.1%	14.2%

6-2 後甲里斷層

6-2-1 後甲里斷層參數設定

後甲里斷層分段破裂模式，參照中興社（2020）考慮了地調所版本的長度，另外，也考慮了 Le Béon et al. (2019)推估後甲里斷層可能往北延伸至新化斷層處，如圖 6-2.1 所示，A 為地調所版本，長度 12 公里，B 為 Le Béon 版本，長度 15 公里，權重分別為 A(0.6)，B(0.4)。

後甲里斷層幾何採用本計畫模型反演之參數：深度 4.2 公里，傾角為 42.3°(西傾)。

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 6-2.1 所示為各破裂事件之地震矩規模。

後甲里斷層長期滑移速率，本計畫預計針對各調查方法的數值，給予其權重，如表 6-2.2 所示。另外，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。目前兩筆資料都是有上下盤速率差值，信心度較高（0.8）。位置信心度方面，兩筆資料都是跨過後甲里斷層，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 6-2.2 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 5.4 mm/yr（累積信心度 10%）（權重 0.2）、中值 7.6 mm/yr（累積信心度 50%）（權重 0.6）、及上界 9.2 mm/yr（累積信心度 90%）（權重 0.2）。

後甲里斷層系統可能的最近一次發生時間，從槽溝中發現之地裂及古墳棺槨傾斜的古地震事件，可能與西元 1862 年造成千人死亡的臺南地震有關（李錫堤等，2001）。

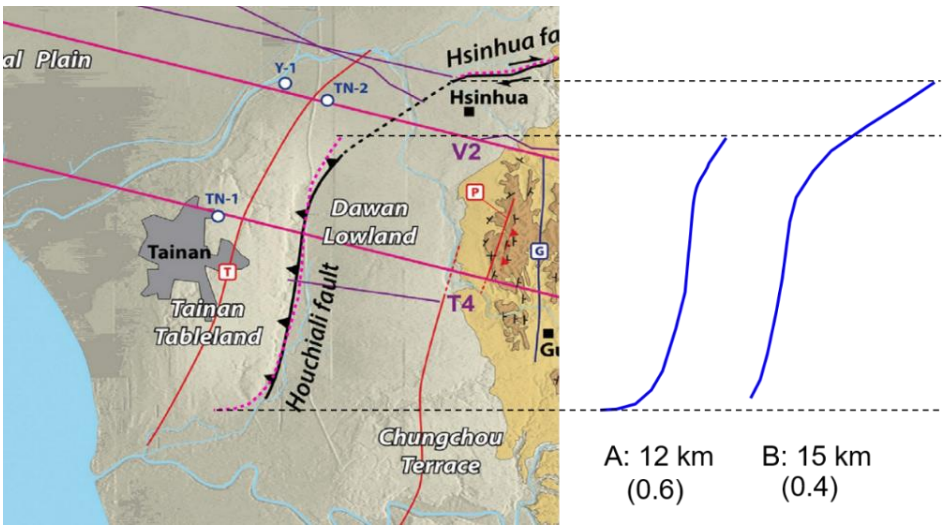


圖 6-2.1：後甲里斷層之破裂模式及權重。

Figure 6-2.1: Rupture cases and weights of the Houchiali fault.

表 6-2.1：後甲里斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-2.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Houchiali 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	12	42.3	4.2	6.2	75	5.7	6.0	6.3	5.9
B	15	42.3	4.2	6.2	94	5.8	6.1	6.4	6.0

表 6-2.2：後甲里斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度

Table 6-2.2: Weight and confidence of each survey's uplift rate of the Houchiali fault

參考文獻	抬升速率	傾角 (度)	滑移速率	權重	方法信心度	位置信心度	權重╳信心度
Chen and Liu (2012)	5	42.3	7.4	1	0.8	1	0.8
Le Béon et al. (2019)	4.4		6.5	0.5	0.8	1	0.4
	5.9		8.8	0.5			0.4

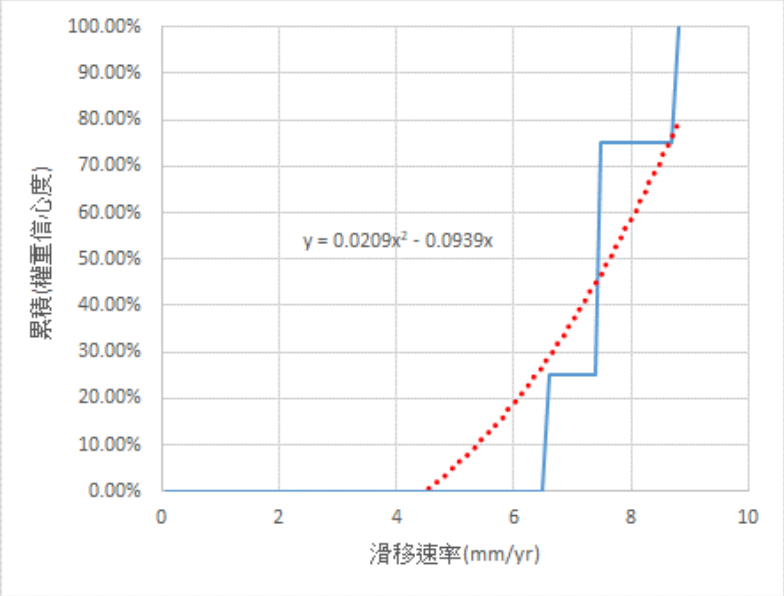


圖 6-2.2：後甲里斷層滑移速率累積加權分布。

Figure 6-2.2: The cumulatively weighted distribution for the uplift rate of the Houchiali fault.

6-2-2 後甲里斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算後甲里斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-2.3 為 2 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

後甲里斷層每一組參數皆有其權重，將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-2.4 之後甲里斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 5.9 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-2.5 之後甲里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。

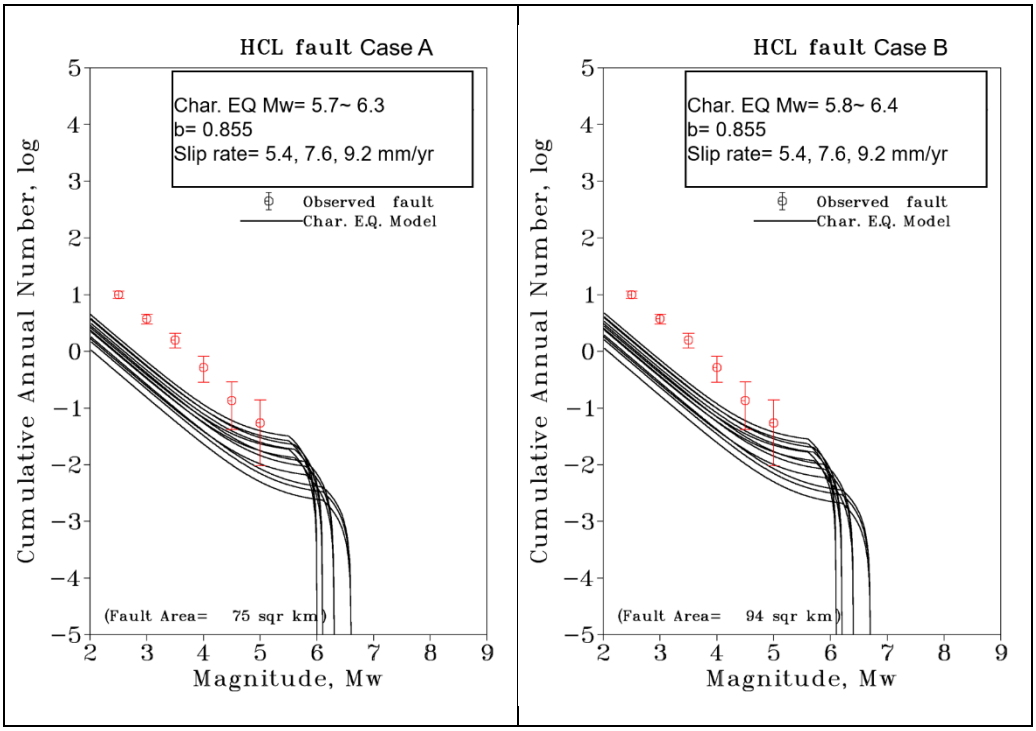


圖 6-2.3：後甲里斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-2.3: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Houchiali fault.

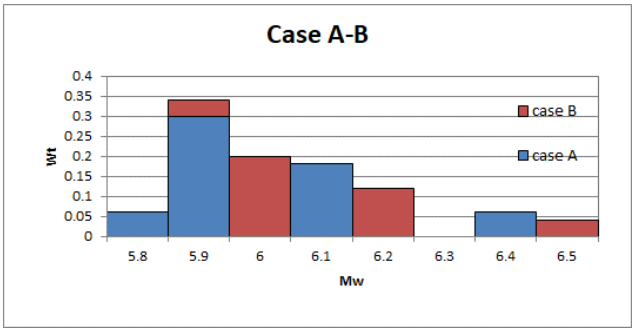


圖 6-2.4：後甲里斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-2.4: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Houchiali fault.

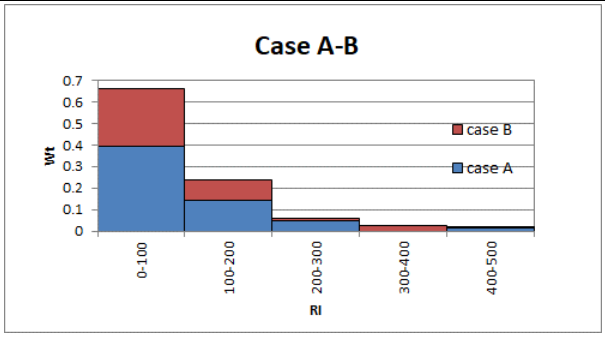


圖 6-2.5：後甲里斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-2.5: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Houchiali fault.

6-2-3 後甲里斷層機率評估

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，根據歷史地震，假設後甲里斷層最後一次發生時間為西元 1862 年，採用 BPT 模式進行評估。

表 6-2.3 為後甲里斷層系統 BPT 模式及評估之結果，起算時間為西元 2022 年，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.8~6.5 之機率為 56.9%、72.0%及 87.6%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.3%、0.6%及 1.3%。另以 POISSON 模式計算之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.8~6.5 之機率為 33.6%、48.3%及 70.4%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.3%、0.5%及 1.0%。

因後甲里斷層系統受限於斷層長度及幾何，發生規模 6.5 以上的地震機率較低，然而若是考慮規模 6.5 以下的特徵型地震，發震機率就會相對提高許多，本計畫認為不能輕忽後甲里斷層系統規模 6.5 以下的特徵地震對臺南地區致災的可能性。

表 6-2.3：本計畫後甲里斷層發生機率評估

Table 6-2.3: Earthquake probabilities for the Houchiali 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	
	BPT	POISSON	BPT	POISSON	BPT	POISSON
5.8≦ M ≦6.5	56.9%	33.6%	72.0%	48.3%	87.6%	70.4%
M ≧ 6.5	0.3%	0.3%	0.6%	0.5%	1.3%	1.0%

6-3 口宵里斷層

6-3-1 口宵里斷層參數設定

口宵里斷層未有明顯的分段點，破裂模式僅考慮整段破裂，長度 21 公里。

口宵里斷層幾何，本計畫以二維模型反演之參數作為潛勢評估之參考：深度 4.8 公里，傾角 32.2°(西傾)。

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 6-3.1 所示為口宵里斷層破裂事件之地震矩規模。

口宵里斷層長期滑移速率，根據本計畫模型反演之加權平均滑移虧損率，上界為 15.3 mm/yr，中值為 9.0 mm/yr，下界為 3.9 mm/yr，如表 6-3.2 所示。權重分配設定為 15.3 mm/yr (0.2)，9.0 mm/yr (0.6)，3.9 mm/yr (0.2)。

口宵里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：口宵里斷層之破裂事件規模計算結果

Table 6-3.1: Magnitude calculation result for one rupture case of the Kouhsiaoli 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	21	32.2	4.8	9.0	189	6.1	6.4	6.7	6.3

表 6-3.2：本計畫模型之口宵里斷層加權平均斷層滑移虧損率

Table 6-3.2: Weighted average slip deficit rate of the Kouhsiaoli fault in this project.

		BLOCKS Model	TDEFNODE 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)	
口宵里斷層	上界	16.23	26.54	3.1	15.3
	平均	14.03±1.10	12.02±7.26	0.9±1.1	9.0
	下界	11.83	0	0	3.9

6-3-2 口宵里斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算口宵里斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-3.1 為 1 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

口宵里斷層每一組參數皆有其權重，將破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-3.2 之口宵里斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.3 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-3.3 之口宵里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。

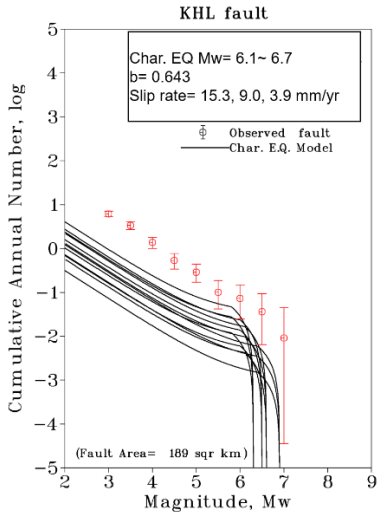


圖 6-3.1：口宵里斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-3.1: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Kouhsiaoli fault.

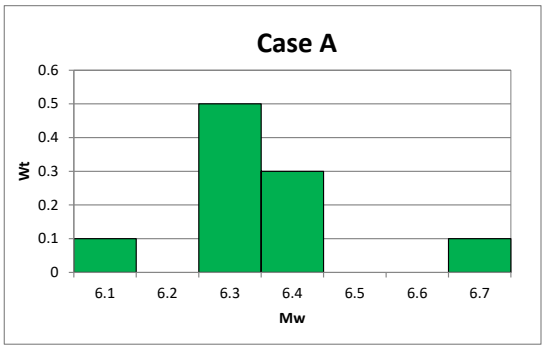


圖 6-3.2：口宵里斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-3.2: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Kouhsiaoli fault.

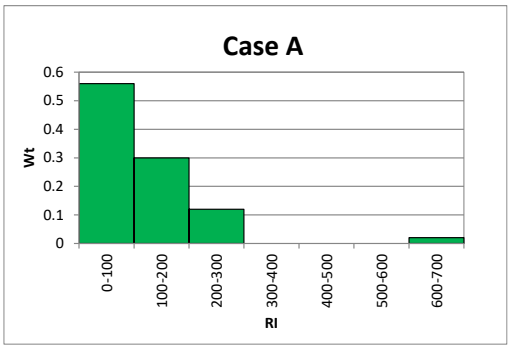


圖 6-3.3：口宵里斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-3.3: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Kouhsiaoli fault.

6-3-3 口宵里斷層機率評估

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，口宵里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 6-3.3 為口宵里斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2022 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 1.0%、1.6%及 2.9%。

口宵里斷層受限於斷層長度及幾何，發生規模 6.5 以上的地震機率較低，然而若是考慮規模 6.5 以下的特徵型地震，發震機率就會提高，本計畫認為不能忽視斷層規模 6.5 以下的特徵地震對臺南地區致災的可能性。

表 6-3.3：本計畫口宵里斷層發生機率評估

Table 6-3.3: Earthquake probabilities for the Kouhsiaoli 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
6.1≦ M ≦6.7	31.2%	45.0%	66.3%
M ≧ 6.5	1.0%	1.6%	2.9%

6-4 九芎坑斷層

6-4-1 九芎坑斷層參數設定

本計畫參考中興社（2020），在評估九芎坑斷層之破裂，除了考慮九芎坑斷層本身的破裂，也考慮了其可能會與北側桐樹湖斷層聯合破裂的事件。破裂事件主要分為 A：桐樹湖斷層+九芎坑斷層(長度 28 公里)、B：九芎坑斷層(長度 17 公里)兩種破裂模式，桐樹湖斷層和九芎坑斷層分布關係如圖 6-4.1 所示，權重設定為 A（0.4）、B（0.6）。

九芎坑斷層幾何採用 4-1-4 節彙整之參數：深度 5~7 公里，傾角 25°~35°。深度權重分配暫定為 5 km (0.3)、6 km (0.4)、7 km (0.3)；傾角權重分配暫定為 25° (0.3)、30° (0.4)、35° (0.3)。

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 6-4.1 所示為各破裂事件以傾角及深度中值計算之地震矩規模。

九芎坑斷層長期滑移速率，本計畫針對各調查方法的數值，給予其權重，如表 6-4.2 所示。另外，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，其中 Lin et al. (2007)提到他的斷層錯移量是在礫石層沉積之後，但是並不知道何時開始，因此他的數據只能代表滑移速率的最小值，信心度為 0.5；Chen et al. (2009)之鑽井資料有上下盤高差，信心度較高(0.8)；Shyu et al. (2020)是採用跨斷層地形崖計算，因地形崖會受到侵蝕等因素影響，信心度較低(0.6)。位置信心度方面，所有資料都是位於斷層中，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 6-4.2 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抬升速率下界 0.03 mm/yr（累積信心度 10%）、中值 0.46 mm/yr（累積信心度 50%）、及上界 6.31 mm/yr（累積信心度 90%）。以傾角 30°換算至斷層面上，得到滑移速率

下界 0.1 mm/yr（權重 0.2）、中值 0.9 mm/yr（權重 0.6）、及上界 12.6 mm/yr（權重 0.2）。

九芎坑斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

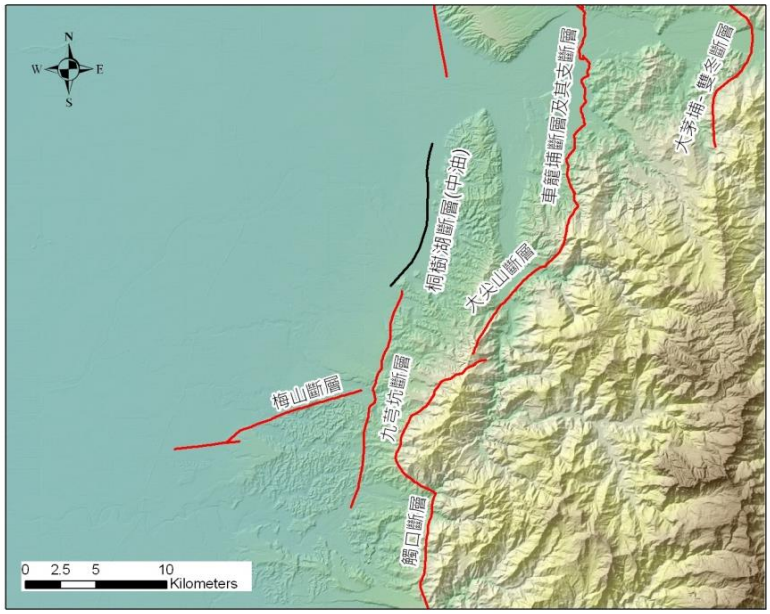


圖 6-4.1：桐樹湖斷層和九芎坑斷層之分布。

Figure 6-4.1: Location of the Tungshuhu fault and the Chiuchiungkeng fault.

表 6-4.1：九芎坑斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-4.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Chiuchiungkeng 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	30	6	12	336	6.3	6.6	6.9	6.5
B	17				204	6.1	6.4	6.7	6.3

表 6-4.2：九芎坑斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度

Table 6-4.2: Weight and confidence of each survey's uplift rate of the Chiuchiungkeng 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	權重及信心度指數
Lin et al., 2007	大湖口溪露頭，量測得到位移量 4.7 公尺，經碳同位素定年法得到年代為 16540±150 yr BP	0.28	1	0.5	1	0.5
Chen et al., 2009	華山橋古沖積扇露頭，光螢光定年年代為 80 ka，下盤的岩心資料顯示，相同年代的地層在下盤的地下深度平均約 44.8 公尺	0.56	1	0.8	1	0.8
Shyu et al., 2020	地形崖垂直高差約 30~40 公尺，年代約 5~25 千年	1.2	0.5	0.6	1	0.3
		8	0.5	0.6	1	0.3

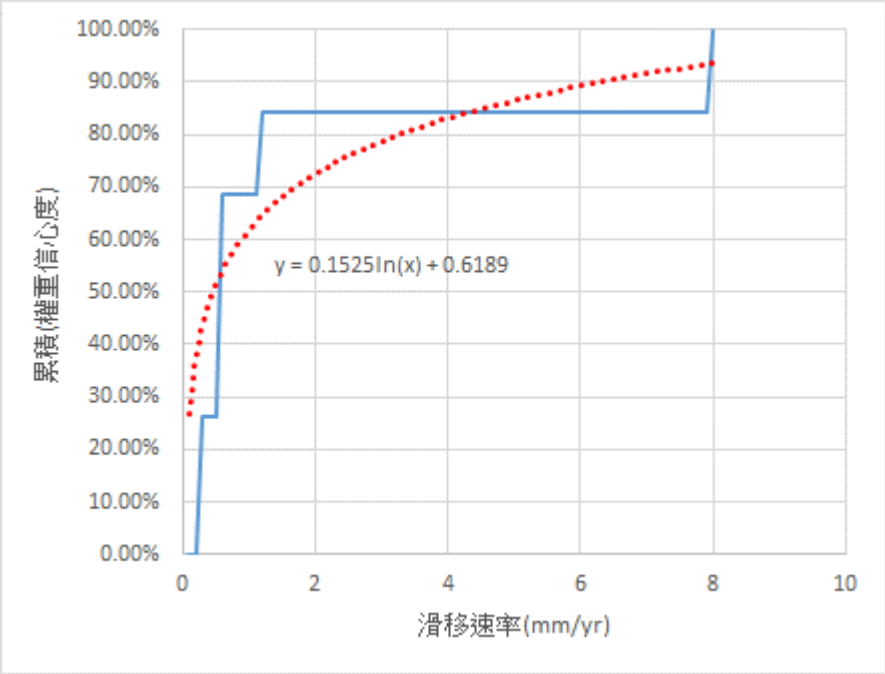


圖 6-4.2：九芎坑斷層抬升速率累積加權分布。

Figure 6-4.2: The cumulatively weighted distribution for the uplift rate of the Chiuchiungkeng fault.

6-4-2 九芎坑斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算九芎坑斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-4.3 為 2 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

九芎坑斷層每一組參數皆有其權重，將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-4.4 之九芎坑斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.4 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-4.5 之九芎坑斷層地震復發間隔時間-權重分布圖，圖中可見週期在 1000~2000 年的權重較高。

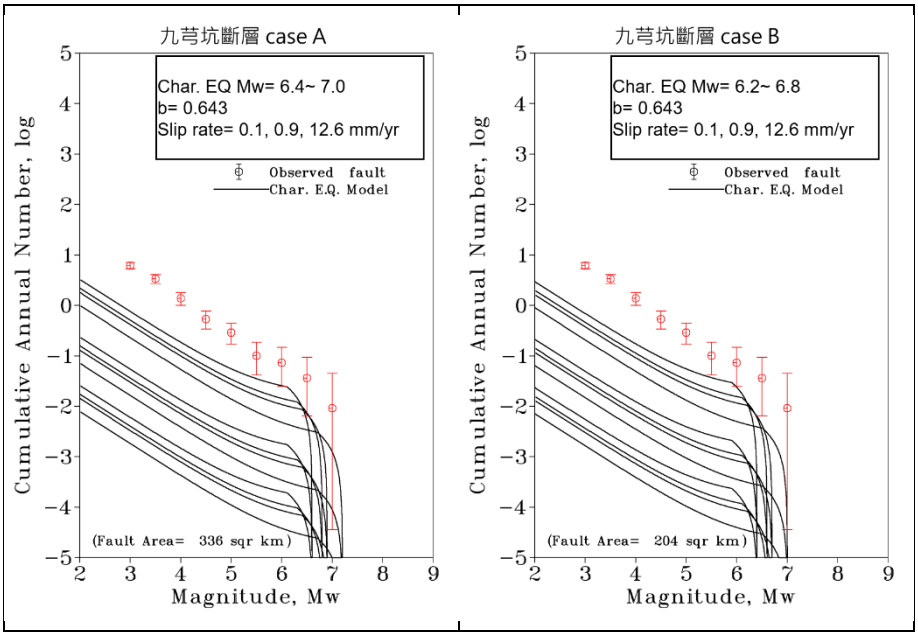


圖 6-4.3：九芎坑斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-4.3: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chiuchiungkeng fault.

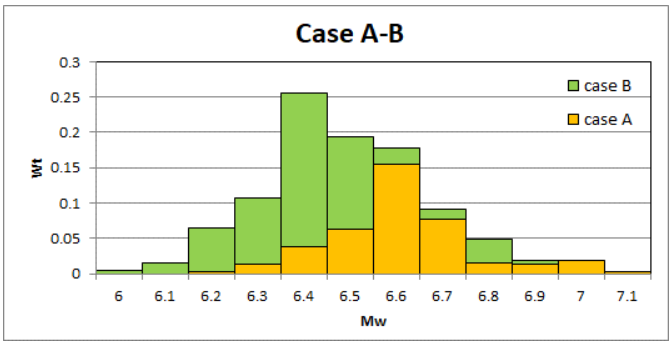


圖 6-4.4：九芎坑斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-4.4: The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Chiuchiungkeng fault.

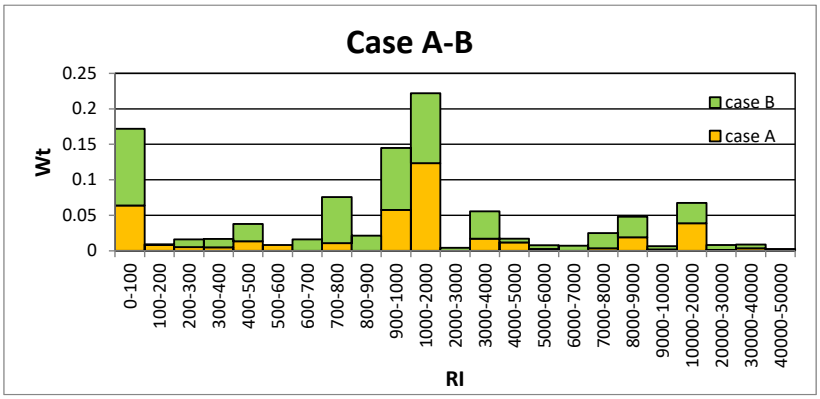


圖 6-4.5：九芎坑斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-4.5: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Chiuchiungkeng fault.

6-4-3 九芎坑斷層機率評估

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，九芎坑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 為九芎坑斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2022 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 3.8%、5.7%及 9.5%。

表 6-4.3：本計畫九芎坑斷層發生機率評估

Table 6-4.3: Earthquake probabilities for the Chiuchiungkeng 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
6.0≦ M ≦7.1	8.8%	13.1%	20.6%
M ≧ 6.5	3.8%	5.7%	9.5%

6-5 梅山斷層

6-5-1 梅山斷層參數設定

參照中興社（2020），在評估梅山斷層之破裂，是以長度不確定性來區分破裂模式，如圖 6-5.1 所示為梅山斷層四種破裂模式，權重設定為 A（0.5）、B（0.2）、C（0.2）、D（0.1）。

梅山斷層幾何採用 4-1-4 節彙整之參數：傾角範圍為 75-85 度，深度範圍為 10-15 公里。深度權重分配暫定為 10 km (0.3)、12.5 km (0.4)、15 km (0.3)；傾角權重分配暫定為 75° (0.3)、80° (0.4)、85° (0.3)。

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 6-5.1 所示為各破裂事件以傾角及深度中值計算之地震矩規模。

梅山斷層長期滑移速率，根據本計畫模型反演之加權平均滑移虧損率，上界為 14.3 mm/yr，中值為 5.2 mm/yr，下界為 0.9 mm/yr，如表 6-5.2 所示。權重分配設定為 14.3 mm/yr (0.2)，5.2 mm/yr (0.6)，0.9 mm/yr (0.2)。

梅山斷層最後一次發生時間為西元 1906 年。

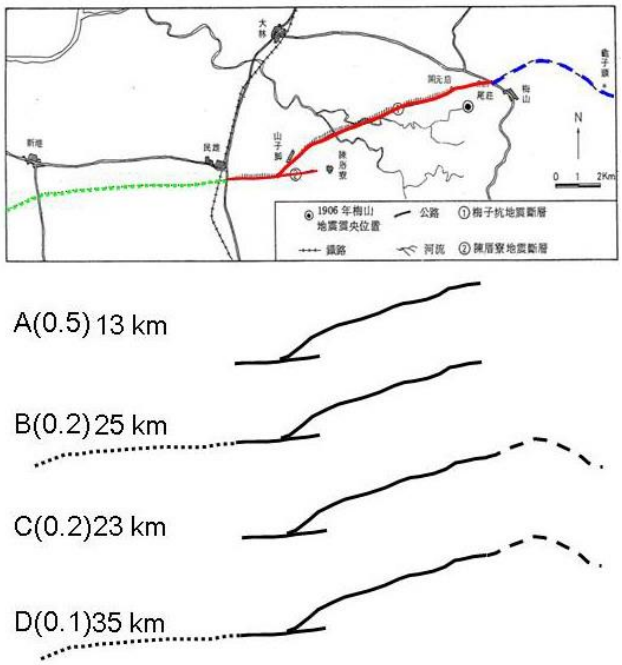


圖 6-5.1：梅山斷層四種可能破裂長度之模式（中興社，2020）。

Figure 6-5.1: Four Rupture length cases and weights of the Meishan fault (Sinotech, 2020).

表 6-5.1：梅山斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-5.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Meishan 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	13	80	12.5	12.7	165	6.0	6.2	6.4	6.2
B	25				317	6.3	6.5	6.7	6.5
C	23				292	6.3	6.5	6.7	6.5
D	35				444	6.5	6.7	6.9	6.6

表 6-5.2：本計畫模型之梅山斷層加權平均斷層滑移虧損率

Table 6-5.2: Weighted average slip deficit rate of the Meishan fault in this project.

斷層名稱		BLOCKS Model 總變動量 (mm/yr)	TDEFNODE Model 平均值滑移虧損率 (mm/yr)	Baseline Inversion Model 斷層滑移速率平均值 (mm/yr)	加權平均滑移虧損速率 (mm/yr)
梅山斷層	上界	2.55	21.34	19.1	14.3
	平均	2.55±0.0	5.24±8.05	7.9±5.6	5.2
	下界	2.55	0	0	0.9

6-5-2 梅山斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算梅山斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-5.2 為 4 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

梅山斷層每一組參數皆有其權重，將 4 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-5.3 之梅山斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.3 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 之梅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。

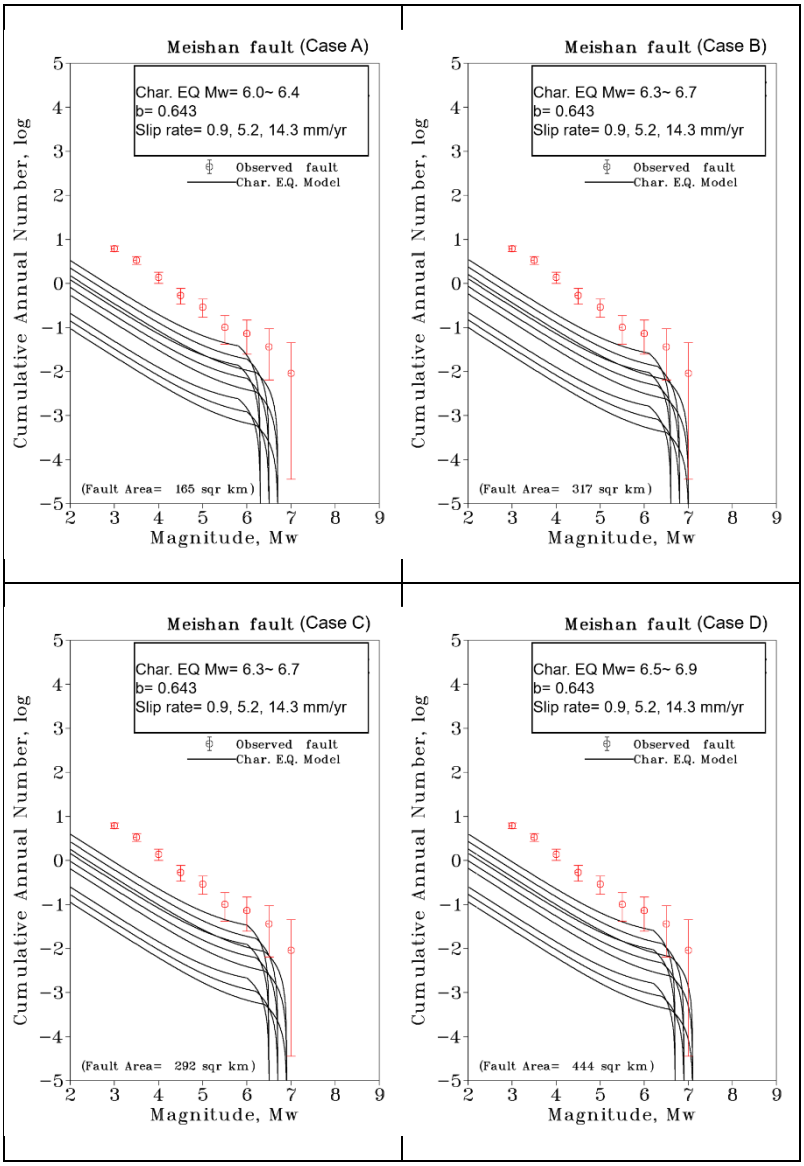


圖 6-5.2：梅山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-5.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Meishan fault.

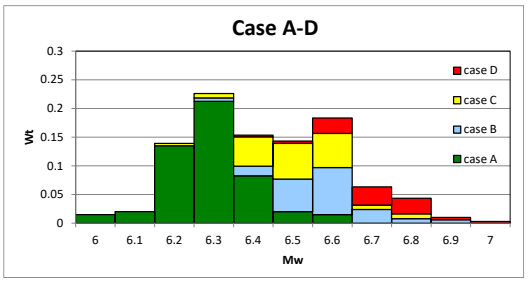


圖 6-5.3：梅山斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-5.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Meishan fault.

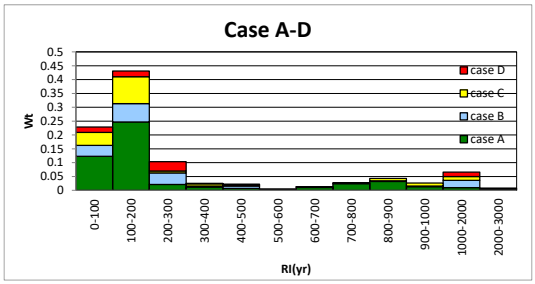


圖 6-5.4:梅山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-5.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Meishan fault.

6-5-3 梅山斷層機率評估

在獲得邏輯樹分支之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算梅山斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，梅山斷層最後一次發生時間為西元 1906 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 6-5.3 為梅山斷層 BPT 模式評估之結果，以西元 2022 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.0~7.0 之機率為 26.2%、36.4%及 51.0%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 6.9%、10.1%及 15.5%。

表 6-5.3：本計畫梅山斷層發生機率評估

Table 6-5.3: Earthquake probabilities for the Meishan 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
	BPT	BPT	BPT
6.0≦ M ≦7.0	26.2%	36.4%	51.0%
M ≧ 6.5	6.9%	10.1%	15.5%

6-6 大尖山斷層

6-6-1 大尖山斷層參數設定

中興社（2020）並未考慮大尖山斷層本身的破裂模式，而是將大尖山斷層北段併入車籠埔斷層的破裂模式中；南段則併入觸口斷層的破裂模式中。

本計畫如要評估大尖山斷層本身的潛勢，需建立大尖山斷層的分段及破裂模式。根據地調所條帶地質圖（林啟文等，2007），大尖山斷層分為南北兩段，中為內磆斷層(又稱樟湖山斷層或古坑斷層)所截。本計畫考量南北段特性之不同，認為整段破裂的可能性較低，設定的大尖山斷層破裂模式如圖 6-6.1，大尖山斷層三種破裂模式，權重設定為 A：北段（長度 15 公里，權重 0.4）、B：南段（長度 14 公里，權重 0.4）、C：整段（長度 29 公里，權重 0.2）。

大尖山斷層幾何採用 4-1-4 節彙整之參數，北段傾角 35 度，深度 10 公里；南段傾角 30 度，深度 8 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 6-6.1 所示為各破裂事件計算之地震矩規模。

大尖山斷層長期滑移速率，根據本計畫模型反演之加權平均滑移虧損率，上界為 25.6 mm/yr，中值為 10.0 mm/yr，下界為 0.8 mm/yr，如表 6-6.2 所示。權重分配設定為 25.6 mm/yr (0.2)，10.0 mm/yr (0.6)，0.8 mm/yr (0.2)。

大尖山斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

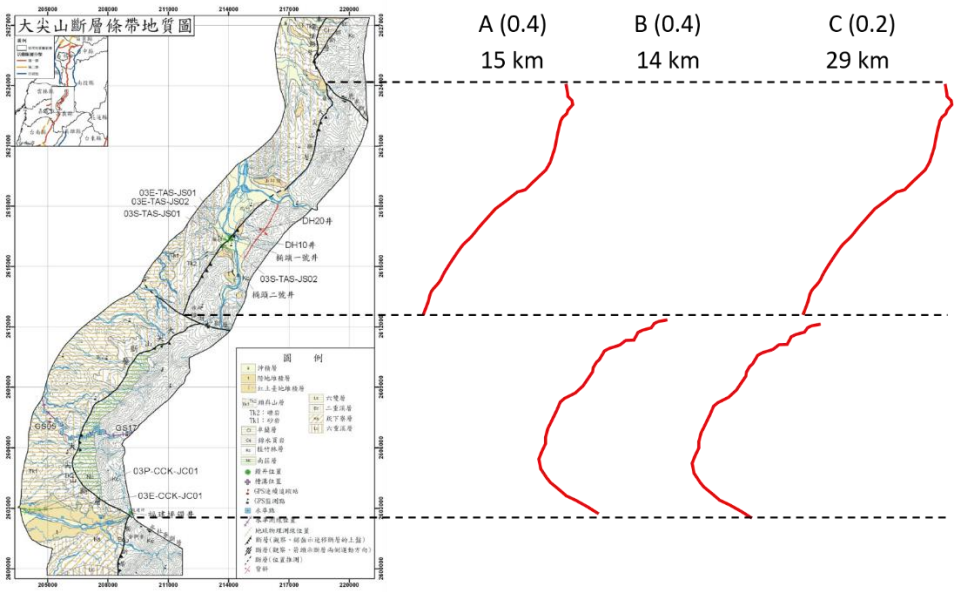


圖 6-6.1：大尖山斷層之破裂模式及權重分配。

Figure 6-6.1: Rupture cases and weights of the Tachienshan fault.

表 6-6.1：大尖山斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-6.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Tachienshan 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	15	35	10	17.4	262	6.2	6.5	6.8	6.4
B	14	30	8	16	224	6.1	6.4	6.7	6.4
C	29	A+B			486	6.4	6.7	7.0	6.7

表 6-6.2：本計畫模型之大尖山斷層加權平均斷層滑移虧損率

Table 6-6.2: Weighted average slip deficit rate of the Tachienshan fault in this project.

		BLOCKS Model	TDEFNODE 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)	
大尖山斷層	上界	2.72	17.54	56.5	25.6
	平均	1.72±0.50	9.60±3.97	18.7±18.9	10.0
	下界	0.72	1.66	0	0.8

6-6-2 大尖山斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算大尖山斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-6.2 為 3 個破裂事件計算之特徵地震模式分布情形。

大尖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 6-6.3 之大尖山斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.5 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-6.4 之大尖山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。

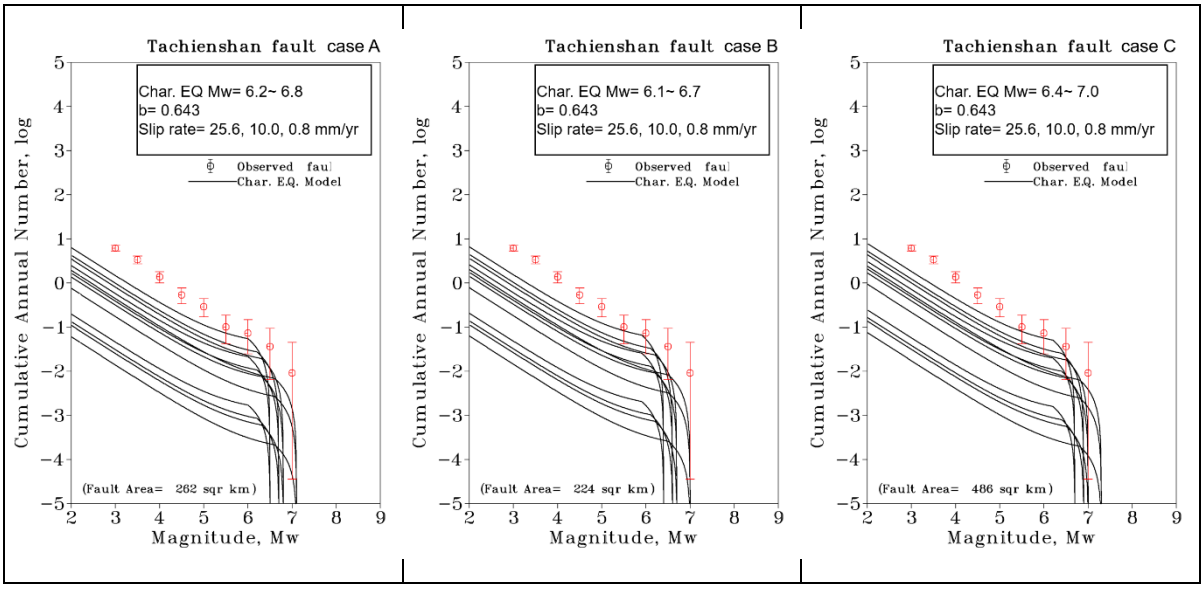


圖 6-6.2：大尖山斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-6.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Tachienshan fault.

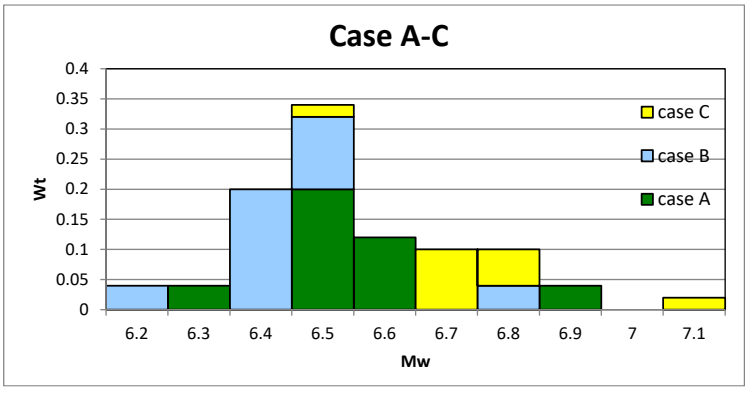


圖 6-6.3：大尖山斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-6.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Tachienshan fault.

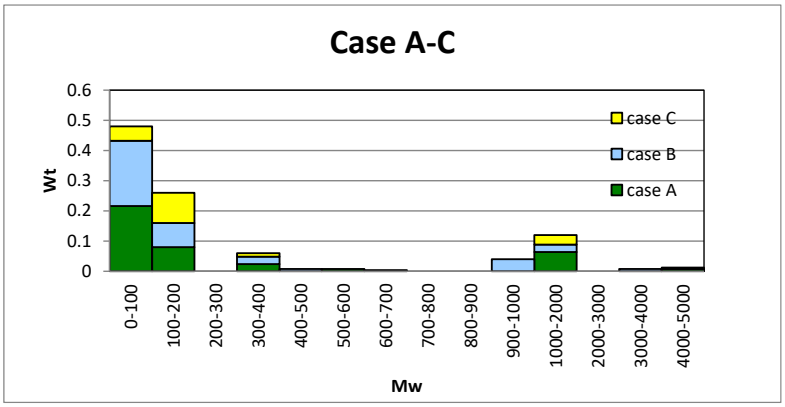


圖 6-6.4：大尖山斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-6.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Tachienshan fault.

6-6-3 大尖山斷層機率評估

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 模式估算潮州斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，大尖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 6-6.3 為大尖山斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2022 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 16.9%、24.7%及 37.5%。

表 6-6.3：本計畫大尖山斷層發生機率評估

Table 6-6.3: Earthquake probabilities for the Tachienshan 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
6.2≦ M ≦7.1	27.3%	38.9%	56.7%
M ≧ 6.5	16.9%	24.7%	37.5%

6-7 觸口斷層

6-7-1 觸口斷層參數設定

觸口斷層之破裂，參照中興社（2020）主要分為 A：觸口斷層（28 公里）、B：大尖山斷層南段+觸口斷層（14+28=42 公里）、C：觸口斷層+崙後斷層（28+30=58 公里）、D：大尖山斷層南段+觸口斷層+崙後斷層（14+28+30=72 公里）四種破裂模式，斷層分布關係及破裂模式示意如圖 6-7.1 所示，權重設定為 A（0.5）、B（0.2）、C（0.2）、D（0.1）。

觸口斷層幾何採用 4-1-4 節彙整之參數：傾角範圍為 23-45 度，深度範圍為 7-10 公里。深度權重分配為 7 km (0.3)、8 km (0.4)、10 km (0.3)；傾角權重分配為 23° (0.3)、30° (0.4)、45° (0.3)。

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 6-7.1 所示為各破裂事件以傾角及深度中值計算之地震矩規模。

觸口斷層長期滑移速率，根據本計畫模型反演之加權平均滑移虧損率，上界為 16.0 mm/yr，中值為 7.4 mm/yr，下界為 3.8 mm/yr，如表 6-7.2 所示。權重分配設定為 16.0 mm/yr (0.2)，7.4 mm/yr (0.6)，3.8 mm/yr (0.2)。

觸口斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

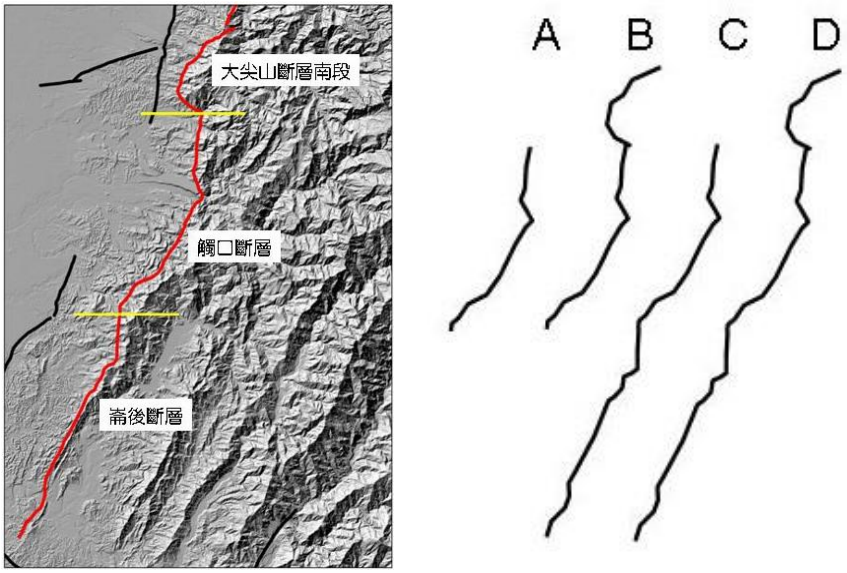


圖 6-7.1：觸口斷層各分段之分布關係及四種可能破裂之模式（中興社，2020）。

Figure 6-7.1: Rupture cases of the Chukou fault.

表 6-7.1：觸口斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-7.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Chukou 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	30	8	16	448	6.4	6.7	7.0	6.7
B	42				672	6.6	6.9	7.2	6.8
C	58				928	6.7	7.0	7.3	7.0
D	72				1152	6.8	7.1	7.4	7.1

表 6-7.2：本計畫模型之觸口斷層加權平均斷層滑移虧損率

Table 6-7.2: Weighted average slip deficit rate of the Chukou fault in this project.

		BLOCKS Model	TDEFNODE 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）	
觸口斷層	上界	11.5	19.83	16.6	16.0
	平均	11.48±0.01	5.71±7.06	5.0±5.8	7.4
	下界	11.46	0	0	3.8

6-7-2 觸口斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算觸口斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-7.2 為 4 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

觸口斷層每一組參數皆有其權重，將 4 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-7.3 之觸口斷層規模-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 6-7.4 之觸口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。

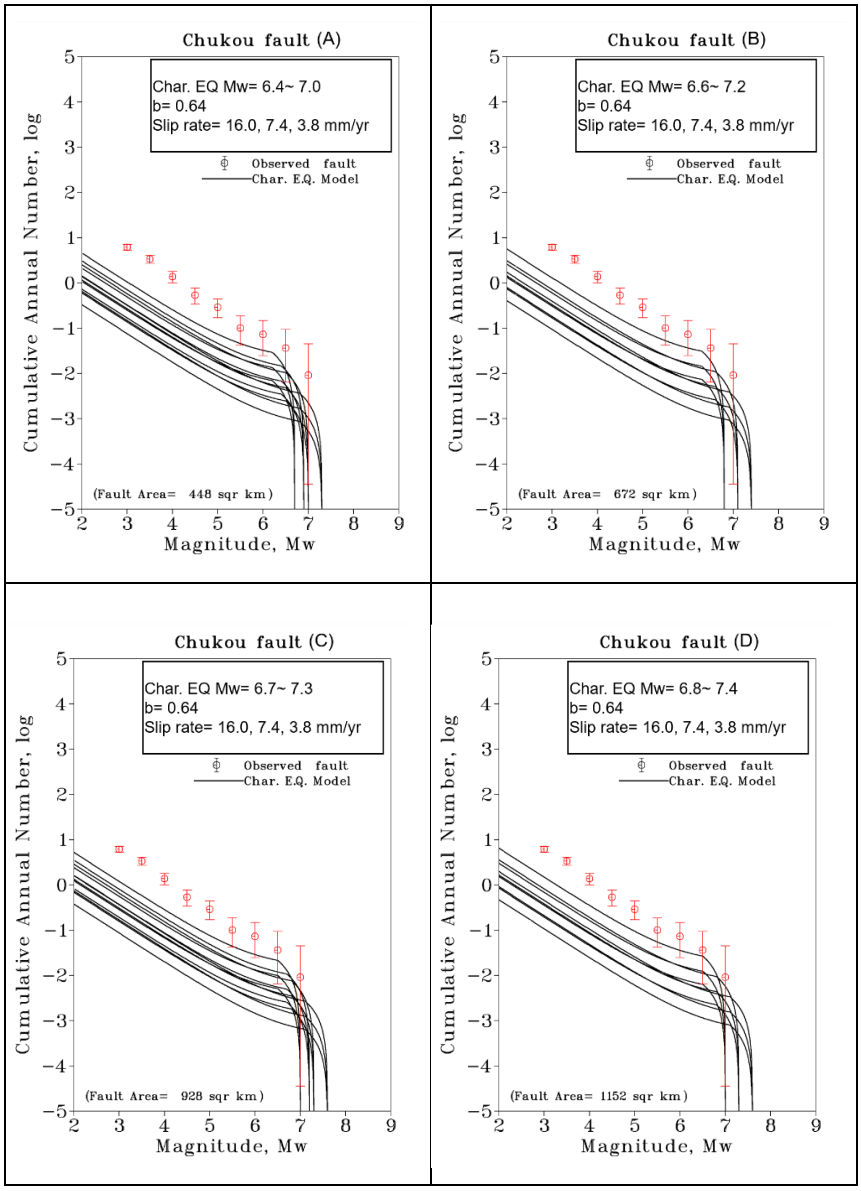


圖 6-7.2：觸口斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-7.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chukou fault.

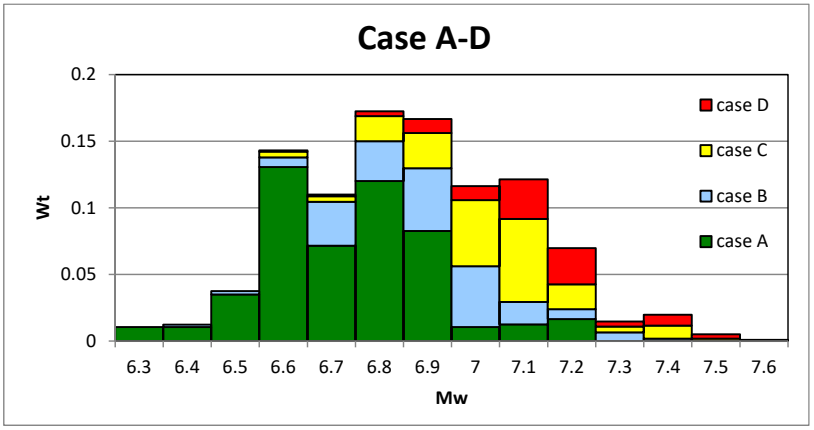


圖 6-7.3：觸口斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-7.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Chukou fault.

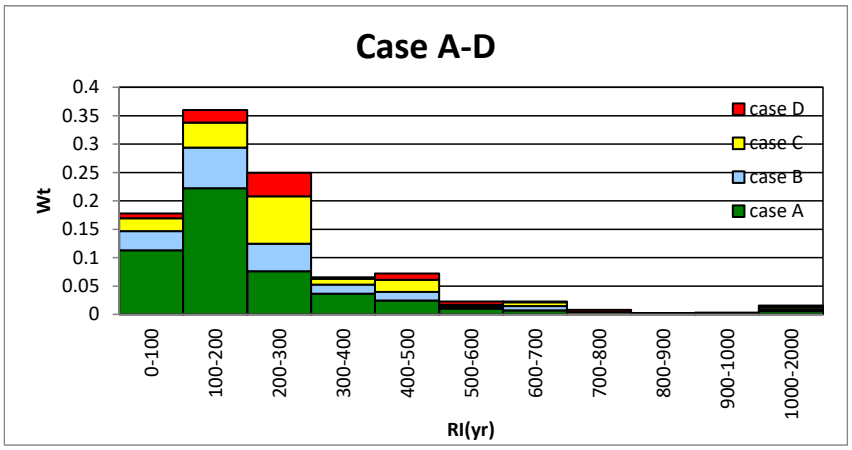


圖 6-7.4：觸口斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-7.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Chukou fault.

6-7-3 觸口斷層機率評估

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 模式估算觸口斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，觸口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 6-7.3 為觸口斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2022 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 16.6%、25.5%及 42.3%。

表 6-7.3：本計畫觸口斷層發生機率評估

Table 6-7.3: Earthquake probabilities for the Chukou 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	17.6%	26.8%	44.2%
M ≧ 6.5	16.6%	25.5%	42.3%
M ≧ 7.0	3.9%	6.2%	11.0%

6-8 木屐寮斷層及六甲斷層

6-8-1 木屐寮斷層及六甲斷層參數設定

參照中興社（2020），木屐寮-六甲斷層分段破裂模式如圖 6-8.1，木屐寮斷層往北延伸止於八掌溪，六甲斷層往南延伸止於左鎮斷層向西延伸之處。各破裂模式權重分配為 A（0.3）、B（0.3）、C（0.4）。

木屐寮-六甲斷層幾何採用 4-1-4 節彙整之參數：深度 8~12 公里，傾角 30°~45°。深度權重分配暫定為 8 km (0.2)、9.7 km (0.6)、12 km (0.6)；傾角權重分配暫定為 30° (0.2)、39° (0.6)、45° (0.2)。

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 6-8.1 所示為各破裂事件以傾角及深度中值計算之地震矩規模。

木屐寮-六甲斷層長期滑移速率，本計畫針對各調查方法的數值，給予其權重，如表 6-8.2 所示。另外，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，其中楊志成等(2005)是直接量測露頭被錯移的地層，信心度為 1；陳文山(2006)及陳文山(2010)之鑽井剖面資料均有上下盤抬升速率對比，信心度也較高(0.8)；杜冠穎(2013)則是間接採用上盤河道下切速率計算，信心度較低(0.5)。位置信心度方面，所有資料都是位於斷層中，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 6-8.2 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抬升速率下界 3.3 mm/yr（累積信心度 10%）、中值 5.7 mm/yr（累積信心度 50%）、及上界 7.2 mm/yr（累積信心度 90%）。以傾角 30°~45°換算至斷層面上，得到滑移速率下界 4.7 mm/yr（權重 0.2）、中值 9.5 mm/yr（權重 0.6）、及上界 14.4 mm/yr（權重 0.2）。

木屐寮-六甲斷層可能的最近一次發生時間，1941 年規模 6.4 的地震或許可

做為斷層的最近一次發生時間，本計畫會同時考慮 1941 年為最近一次發生時間及發生時間未知的兩種情形進行評估。

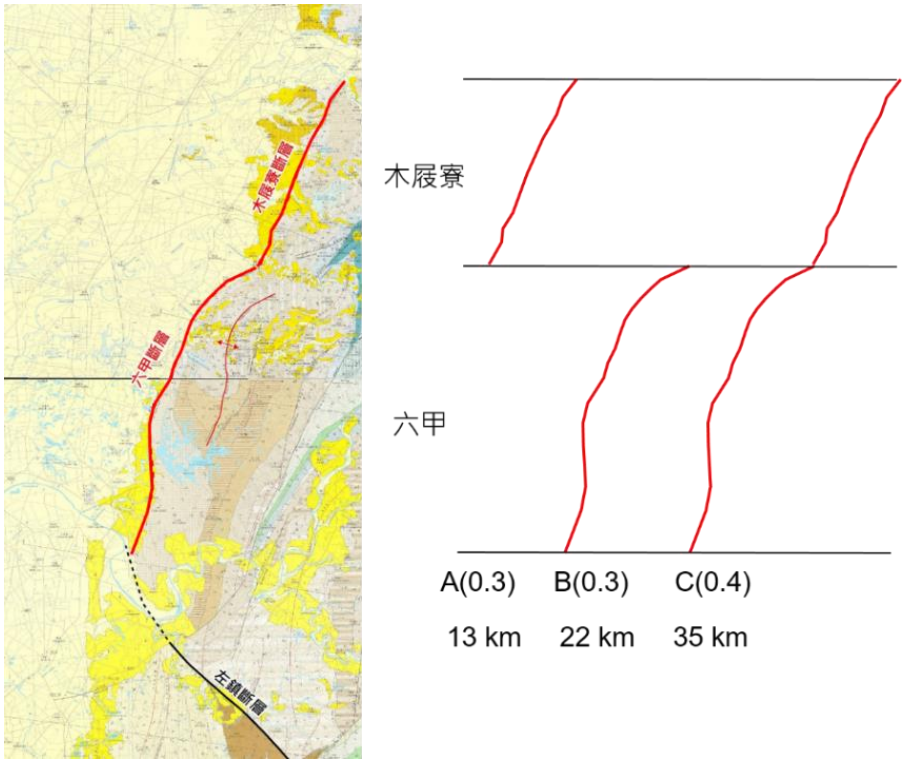


圖 6-8.1：木屐寮-六甲斷層之破裂模式及權重分配（中興社，2020）。

Figure 6-8.1: Rupture cases and weights of the Muchiliao-Liuchia fault (Sinotech, 2020).

表 6-8.1：木屐寮-六甲斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-8.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Muchiliao-Liuchia 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	13	39	9.7	15.4	200	6.1	6.4	6.7	6.3
B	22	39	9.7	15.4	339	6.3	6.6	6.9	6.5
C	35	39	9.7	15.4	539	6.5	6.8	7.1	6.7

表 6-8.2：木屐寮-六甲斷層滑移速率之各調查方法數值權重及信心度

Table 6-8.2: Weight and confidence of each survey's uplift rate of the Muchiliao-Liuchia 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	權重及信心度指數
楊志成等，2005	六甲斷層野外露頭上下盤岩層錯動量及定年	5.4	0.5	1	1	0.5
		5.8	0.5	1	1	0.5
陳文山，2006	整合野外露頭、鑽井及定年資料	6.33	1	0.8	1	0.8
陳文山，2010	白河與六重溪場址之鑽探及定年	3.6	0.5	0.8	1	0.4
		7.6	0.5	0.8	1	0.4
杜冠穎，2013	六甲斷層上盤龜重溪河道下切量	3	0.5	0.5	1	0.25
		4.6	0.5	0.5	1	0.25

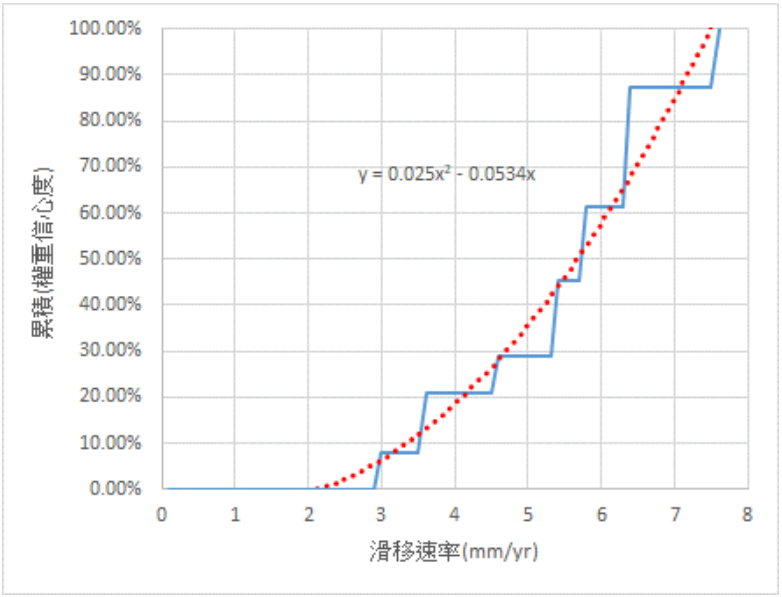


圖 6-8.2：木屐寮-六甲斷層滑移速率累積加權分布。

Figure 6-8.2: The cumulatively weighted distribution for the uplift rate of the Muchiliao-Liuchia fault.

6-8-2 木屐寮斷層及六甲斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算木屐寮斷層及六甲斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-8.3 為 3 個破裂事件以傾角及深度中值計算之特徵地震模式分布情形。

木屐寮斷層及六甲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 6-8.4 之木屐寮-六甲斷層規模-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 6-8.5 之木屐寮-六甲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。

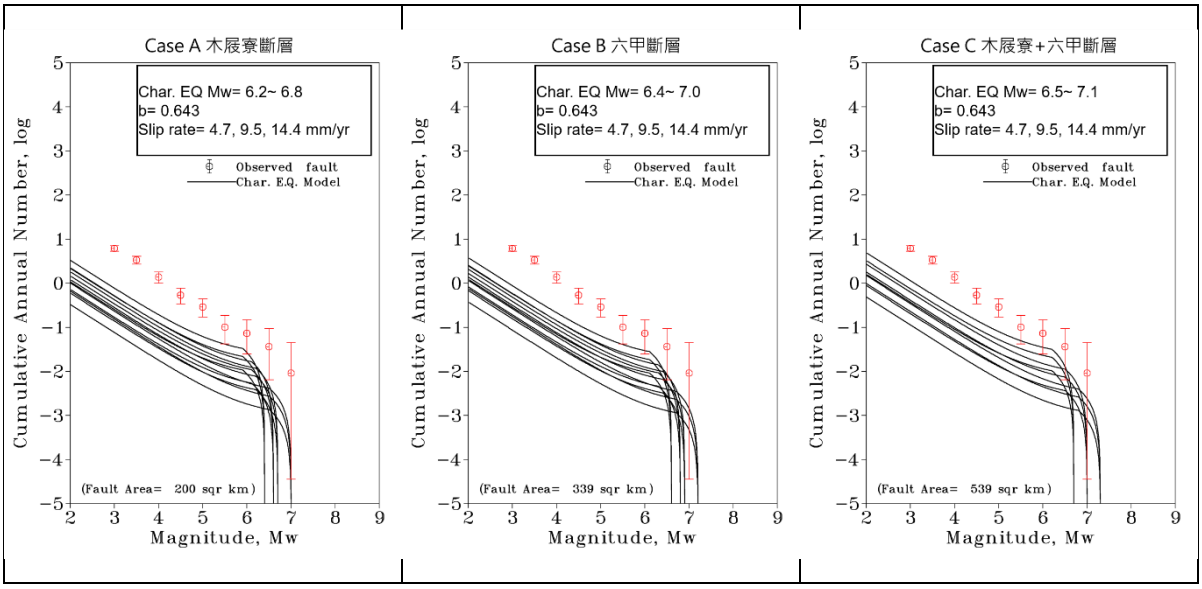


圖 6-8.3：木屐寮-六甲斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-8.3: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Muchiliao-Liuchia fault.

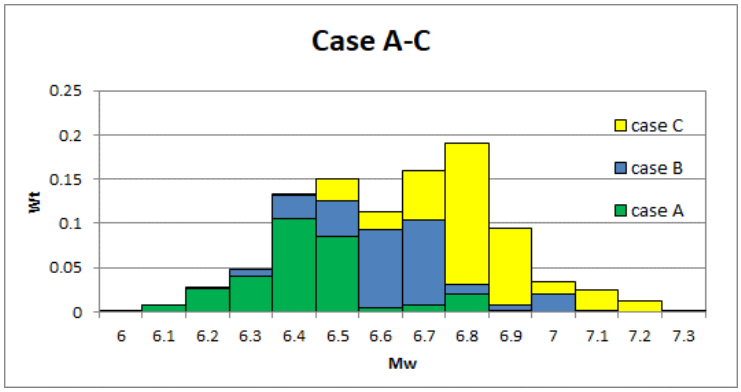


圖 6-8.4：木屐寮-六甲斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-8.4: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Muchiliao-Liuchia fault.

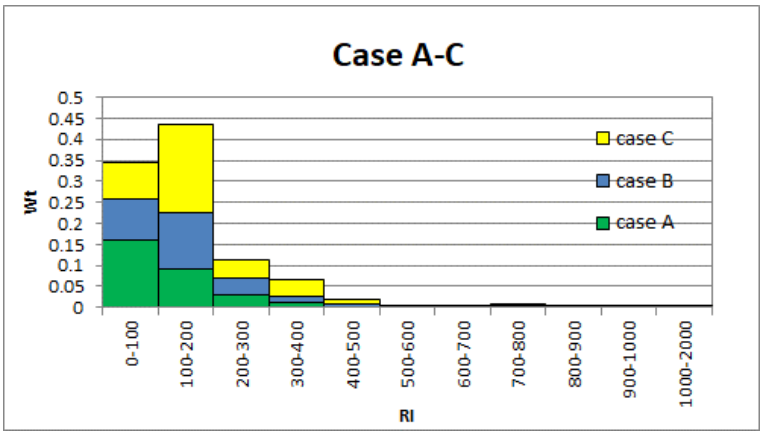


圖 6-8.5：木屐寮-六甲斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-8.5: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Muchiliao-Liuchia fault.

6-8-3 木屐寮斷層及六甲斷層機率評估

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 模式估算木屐寮-六甲斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，根據歷史地震，假設木屐寮-六甲斷層最後一次發生時間為西元 1941 年，採用 BPT 模式進行評估。另假設木屐寮-六甲斷層最後一次發生時間未知，則採用 POISSON 模式進行評估。

表 6-8.3 為木屐寮-六甲斷層 BPT 模式及評估之結果，起算時間為西元 2022 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 23.0%、33.8%及 50.9%。另以 POISSON 模式計算之結果，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 16.2%、24.6%及 40.1%。

表 6-8.3：木屐寮-六甲斷層發生機率評估

Table 6-8.3: Earthquake probabilities for the Muchiliao-Liuchia 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	
	BPT	POI	BPT	POI	BPT	POI
6.0≦ M ≦7.3	35.0%	23.8%	49.4%	35.6%	70.3%	55.9%
M ≧ 6.5	23.0%	16.2%	33.8%	24.6%	50.9%	40.1%
M ≧ 7.0	0.3%	0.6%	0.6%	1.0%	1.4%	1.9%

6-9 左鎮斷層

6-9-1 左鎮斷層參數設定

左鎮斷層之破裂模式，參考中興社（2020）僅評估一種破裂模式，長度向西延伸至地形崖消失處，為 20 公里（圖 6-9.1）。

左鎮斷層幾何採用 4-1-4 節彙整之參數：傾角範圍為 75-85 度，深度範圍為 8-14 公里。深度權重分配暫定為 8 km (0.3)、11 km (0.4)、14 km (0.3)；傾角權重分配暫定為 75° (0.3)、80° (0.4)、85° (0.3)。

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 6-9.1 所示為各破裂事件以傾角及深度中值計算之地震矩規模。

左鎮斷層長期滑移速率，根據本計畫模型反演之加權平均滑移虧損率，上界為 10.5 mm/yr，中值為 4.6 mm/yr，下界為 0.5 mm/yr，如表 6-9.2 所示。權重分配設定為 10.5 mm/yr (0.2)，4.6 mm/yr (0.6)，0.5 mm/yr (0.2)。

左鎮斷層最近一次發生時間未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

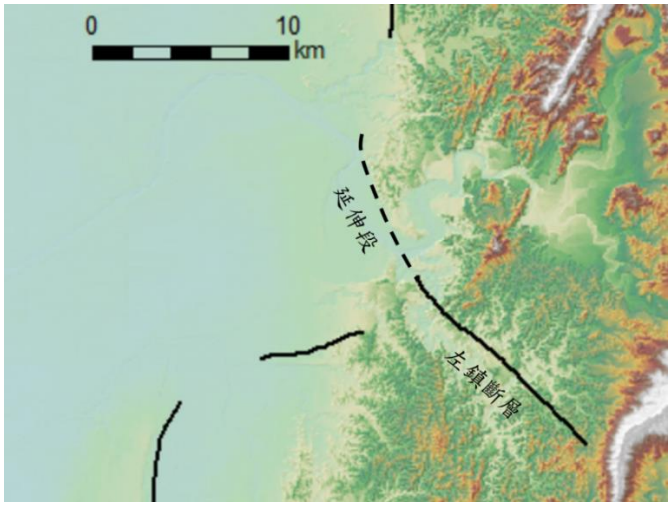


圖 6-9.1：左鎮斷層之破裂模式(中興社，2020)。

Figure 6-9.1: Rupture case of the Tsochen fault (Sinotech, 2020).

表 6-9.1：左鎮斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 6-9.1: Magnitude calculation results for each rupture case of the Tsochen 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	20	80	11	11.2	223	6.2	6.4	6.6	6.3

表 6-9.2：本計畫模型之左鎮斷層加權平均斷層滑移虧損率

Table 6-9.2: Weighted average slip deficit rate of the Tsochen fault in this project.

		BLOCKS Model	TDEFNODE 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）	
左鎮斷層	上界	2.3	19.83	9.3	10.5
	平均	1.96±0.17	7.21±6.31	4.5±2.4	4.6
	下界	1.62	0	0	0.5

6-9-2 左鎮斷層規模與年發生率

本計畫以特徵地震模式計算左鎮斷層各破裂事件之地震復發間隔，圖 6-9.2 為 1 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

左鎮斷層每一組參數皆有其權重，將破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6-9.3 之左鎮斷層規模-權重分布圖，圖中可見規模 6.4 的權重較高。將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6-9.4 之左鎮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。

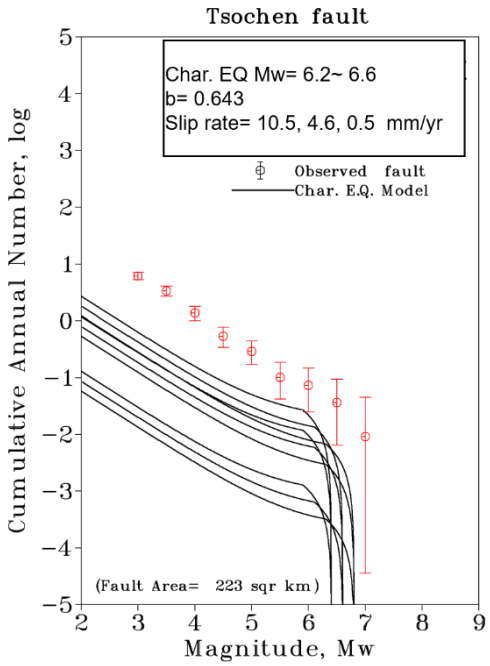


圖 6-9.2：左鎮斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係。

Figure 6-9.2: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Tsochen fault.

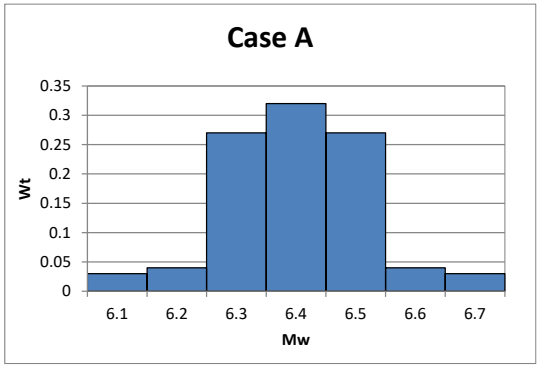


圖 6-9.3：左鎮斷層之全部分支規模-權重分布圖。

Figure 6-9.3: The summed magnitude - weighting relationship for the whole branches of the Tsochen fault.

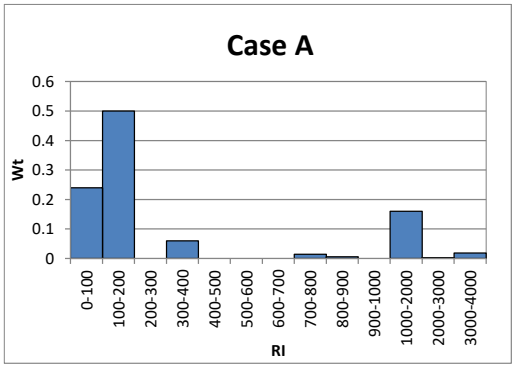


圖 6-9.4：左鎮斷層之全部分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 6-9.4: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Tsochen fault.

6-9-3 左鎮斷層機率評估

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 模式估算左鎮斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，左鎮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 6-9.3 為左鎮斷層 Poisson 模式評估之結果，起算時間為西元 2022 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 4.6%、7.2%及 12.2%。

表 6-9.3：本計畫左鎮斷層發生機率評估

Table 6-9.3: Earthquake probabilities for the Tsochen 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
6.1≦ M ≦6.7	17.1%	26.1%	42.8%
M ≧ 6.5	4.6%	7.2%	12.2%

6-10 斷層活動潛勢圖成果

本年度斷層潛勢圖為嘉南重要區域活動斷層潛勢評估之成果，名為「臺灣嘉南重要區域斷層活動機率圖」(圖 6-10.1)。以地表變形強度分布圖為底圖，套疊九芎坑斷層、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。

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、臺鐵路線、高鐵路線、國省道（含快速公路）。

本圖使用須知如下：

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，有關地振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。

臺灣嘉南重要區域斷層活動機率圖

ACTIVE FAULT PROBABILITIES OF THE OBJECT AREAS IN CHIAYI -TAINAN AREA OF TAIWAN

編號 no.	斷層名 fault name	未來50年規模6.5以上發生機率 50- year Mw≧ 6.5 conditional probability
14	九芎坑斷層 Chiuchiungkeng fault	5.7%
15	梅山斷層 Meishan fault	10.1%
16	大尖山斷層 Tachienshan fault	24.7%
17 18	木屐寮-六甲斷層 Muchiliao-Liuchia fault	33.8%
19	觸口斷層 Chukou fault	25.5%
20	口宵里斷層 Kouhsiaoli fault	1.6%
21	新化斷層 Hsinhua fault	8.1%
22	後甲里斷層 Houchiali fault	0.6%
23	左鎮斷層 Tsochen fault	7.2%



臺南科學園區

臺南市區

沙崙科學園區

圖例 Legend

重要區域
鄉鎮市區公所
消防隊
醫院
國小
國中
高中
大專院校
高鐵路線
台鐵路線
國省道(含快速公路)

N W E S

0 5 10 Km

圖 6-10.1：臺灣嘉南重要區域斷層活動機率圖。

Figure 6-10.1: Active fault probabilities of the object areas in Chiayi-Tainan area of Taiwan.

第七章、嘉南地區景況地振動與景況同震位移分布圖

7-1 景況地振動分布圖

依據第四章闡述更新之地質與地球物理調查研究成果資料，本計畫獲得最合宜之斷層幾何參數參考值，並選取該目標區域內三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參考值進行約制，完成最佳斷層幾何參數之搜尋。而後續，以南加州地震中心（Southern California Earthquake Center, SCEC）主導的 ShakeOut 計畫（Showstack, 2012）以及美國地質調查所（U.S. Geological Survey, USGS）的 ShakeMap 計畫（Worden and Wald, 2016）為例，兩項計畫之重要工作之一即針對活動斷層的地動景況評估，其中 USGS 更建置了景況目錄（Scenario Catalogs）以作為未來防災整備使用。因此，根據前述所推估之斷層幾何參數，本計畫亦進行各活動斷層可能產生之最大地震規模及斷層鎖定區域之估算。在考慮區域近地表場址特性後，透過地動預估式評估並繪製當斷層錯動發震時，鄰近區域之景況地振動分布圖。該圖資除了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，更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

本計畫採用最佳之斷層三維斷層模型，產出計算景況地振動評估所需之斷層破裂三維分析網格。在本報告前述大地測量反演模型之分項工作中，本計畫以 GNSS 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成果，經評估分析後分別獲得口宵里斷層、新化斷層、後甲里斷層之斷層最佳幾何參數，接著則產製景況地振動分析所需之三維空間分布數值坐標。另配合本計畫鄰近斷層之重要區域所需，在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°。景況地振動圖分布範圍則涵蓋重要區域，設定為邊界東經 120.00°至 120.88°及北緯 22.90°至 23.70°之間，範圍涵蓋臺南都會區、臺南科學園區、沙崙綠能科學園區。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，延伸之範圍為東經 119.90°至 121.00°，北緯 22.80°至 23.70°之間，加大計算地動預估值之範圍，以確保產製景況地動圖數值正確。本計畫所繪製範圍使用之網格數為 6918 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。

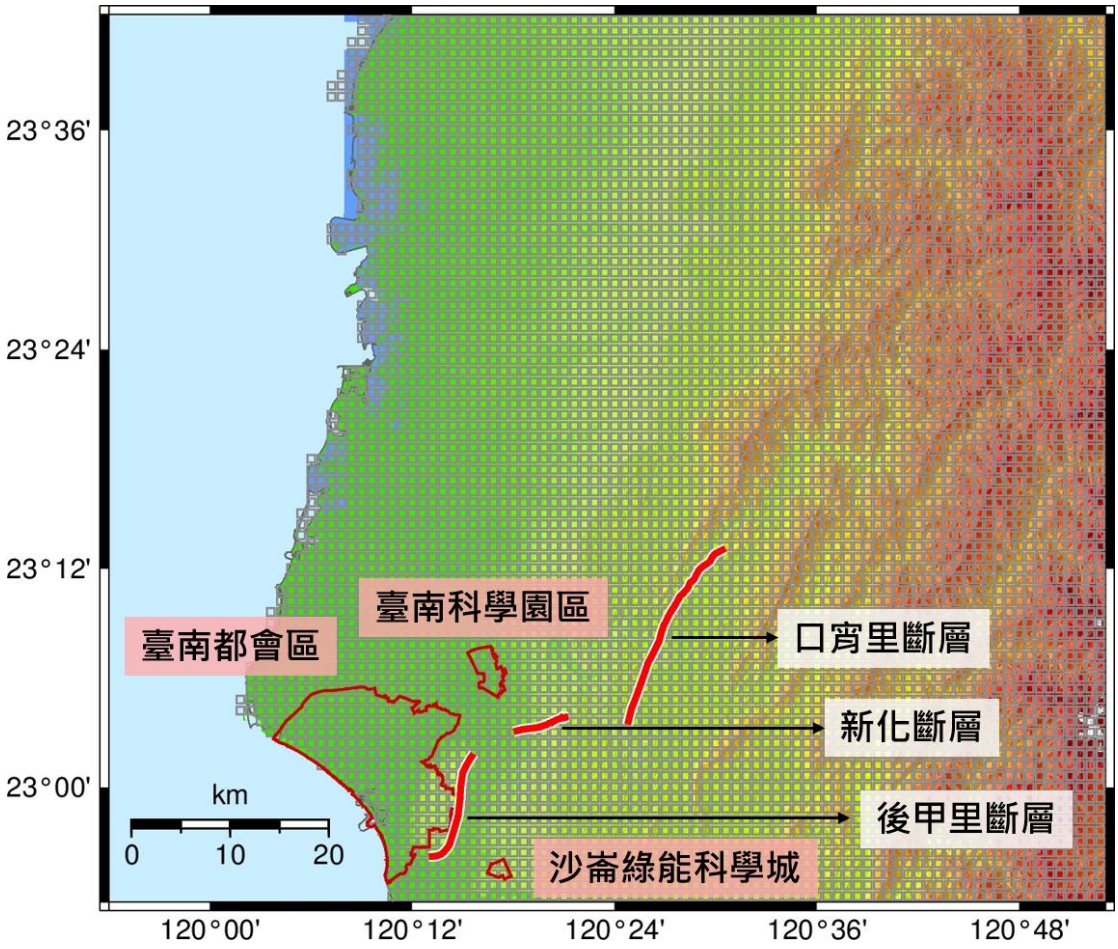


圖 7-1.1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布。
Figure 7-1.1: The distribution of grid points on the surface for scenario ground-motion simulation.

7-1-2 地面網格與斷層面最短距離估算

評估計算景況地振動分布圖，係由地動預估式推求活動斷層錯動時所引致之地表地振動值。其中，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)，而非距離地表斷層跡(Surface fault trace）之距離。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（圖 7-1.2）。

為提供後續景況地振動評估計算步驟所需，本分項工作分別計算口宵里斷層、新化斷層、後甲里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。

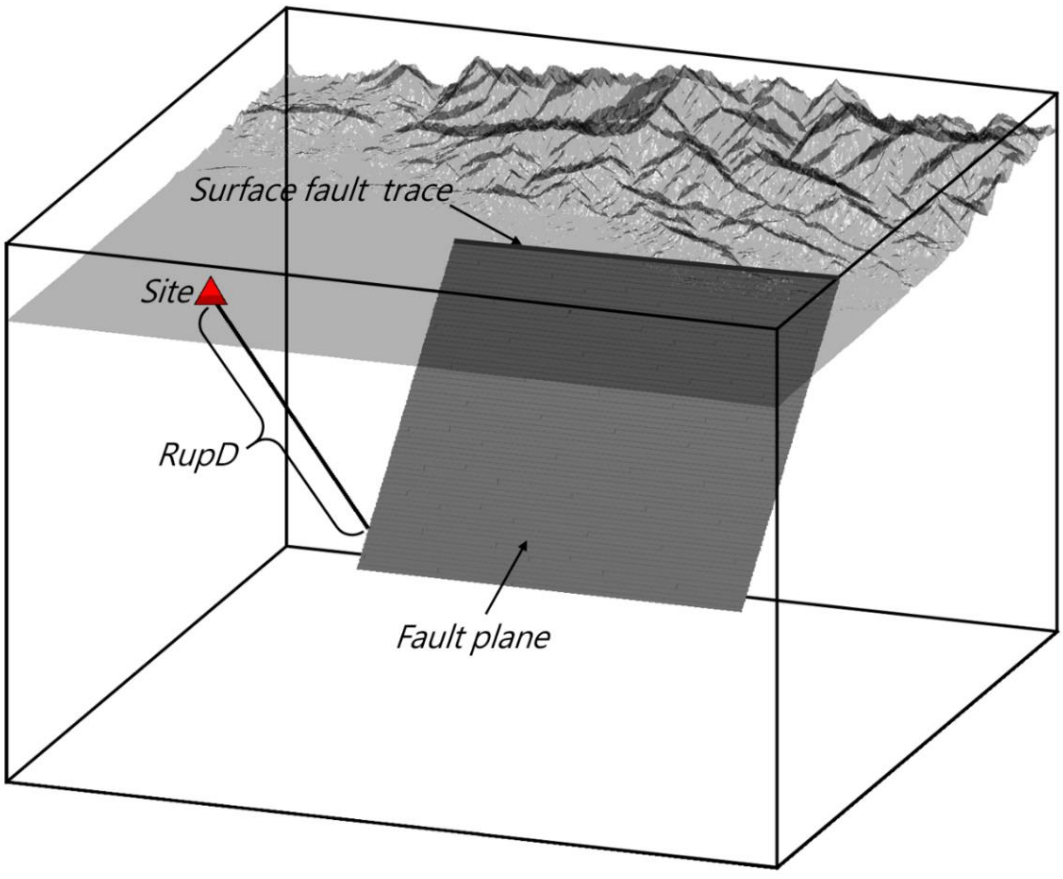


圖 7-1.2：最短距離（RupD）、地面虛擬測站點及三維分布斷層面空間關係示意圖。
Figure 7-1.2: Spatial relation of RupD, virtual stations and 3D fault plane.

7-1-3 地振動放大效應評估

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，因此地層剪力波速分布係為評估震波放大效應之關鍵參數。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 Lee and Tsai（2008）發表之全臺灣 Vs30 參數圖資（以下簡稱 LT08 Vs30），做為地動預估式評估之場址輸入參數，來評估震波放大效應。

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 19,154 口井中挑選深度超過或至少 30 公尺之井孔，總共使用了 4,885 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來產製全臺灣 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（口宵里斷層、新化斷層及後甲里斷層）之空間分布（圖 7-1.3）。

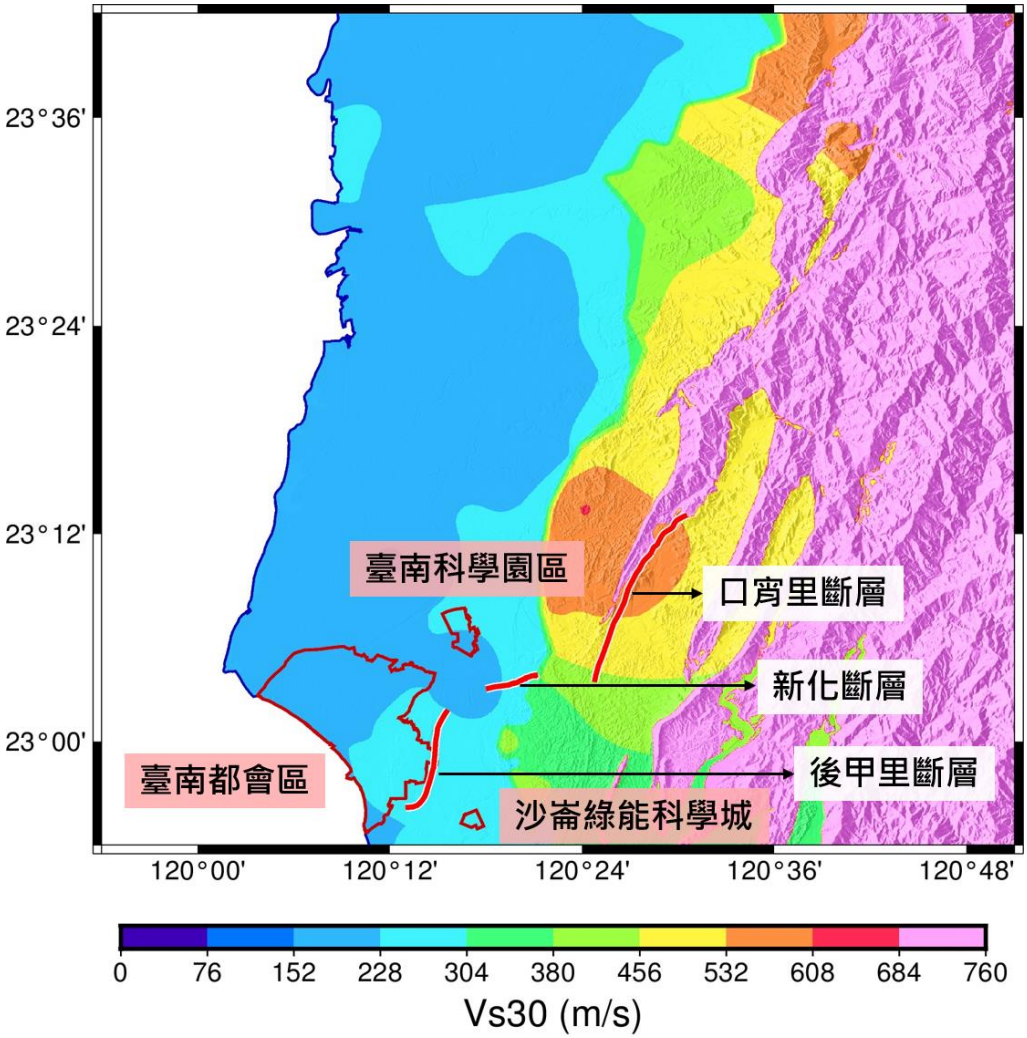


圖 7-1.3：Vs30 及三條評估活動斷層之分布圖。
Figure 7-1.3: Distribution of Vs30 and active faults.

7-1-4 地振動值評估與分布

本計畫進行評估地表地振動值，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在自由場強地動觀測網計畫（Taiwan Strong-Motion Instrument Program, TSMIP）中，布設在全臺灣 700 多處測站所收錄之豐富強震資料，挑選了 60 個地殼尺度地震，共計 5,968 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。

$$\ln PGA = 1.0109 + F_1 + （ -1.1634 + 0.1722（M_w - 6.3）） \times$$

$$\ln\left(\sqrt{R^2+e(1.15184)^2}\right)-0.1907F_{NM}+0.1322F_{RV}-0.4741\ln\left(V_{S30}/1130\right)$$

$$\begin{cases} F_1=0.3822(M_w-6.3) & \text{where } M_w\le 6.3 \\ F_1=\left(-1.5184\times 0.1722\right)(M_w-6.3) & \text{where } M_w>6.3 \end{cases}$$

（式 7-1.1）

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

$$\ln(Z_{1.0})=\frac{-4.08}{2}\ln\left(\frac{{V_{S30}}^2+355.4^2}{1750^2+355.4^2}\right)$$

（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振動強度之影響。

GMPE Chao20 建議的地動模型如式 7-1.3:

$$lnS_a=lnS_a^{ref}+S_{source}+S_{path}+S_{site,lin}+S_{site,non}+\delta_e+\delta_s+\delta_r$$

（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。

一般而言，地動值評估所需之規模，應考量所有可能破裂事件之最大地震規模，故在此採用第六章以兩種模式（Wells and Coopersmith, 1994；Yen and Ma, 2011）及不同破裂事件分別推估口宵里斷層、新化斷層以及後甲里斷層所可能發

生之規模（表 7-1.1）。其中，口宵里及後甲里皆屬於背衝斷層，新化斷層則為向北傾之右移斷層。透過 GMPE Lin09 與 GMPE Chao20，結合前節所設計之地面網格點位、網格點位與斷層之最短距離，以及震波場址放大因子（Vs30），進而分別計算口宵里斷層、新化斷層以及後甲里斷層之地面地動值。在本地動預估值的計算中，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。

而由於 GMPE Lin09 及 GMPE Chao20 兩套模式各有其參數與模式，因此本計畫首先透過西南部最重要之甲仙與美濃兩大地震事件進行測試，將兩套地動預估模式所計算之地振動分布與實際地震發生時之狀況進行比對，以評估並確認何種方法在西南部區域，可推估出更全面而合理之景況地振動。首先，針對甲仙地震，本計畫採用 Ching *et al.*（2011）藉由 GNSS 連續站之同震位移觀測資料進行反演搜尋所獲得之斷層面及滑移分布，挑選滑移量大於 60 mm 的 patch 作為主要之斷層破裂面進行預估，根據 GMPE Lin09 考慮真實側向場址條件之預估式，得到地振動成果如圖 7-1.4，其地振動最大值約為 0.9g；採用 GMPE Chao20（圖 7-1.5），則其地振動最大值約為 0.3g。若比對中央氣象局所網頁提供之 PGA 分布圖可知，實際之地振動最大值約 0.07g（圖 7-1.6），且可發現兩方法所推估之分布範圍皆與實際情況相似，而地振動值則有些許高估，但以 GMPE Chao20 之成果較為接近實際情形。而美濃地震部分，本團隊參照 Rau *et al.*（2022）藉由高頻 GNSS 連續站與強地震資料所完成之同震震源模型成果，並挑選滑移量大於 300 mm 的 patch 作為主要之斷層破裂面進行預估，根據 GMPE Lin09 考慮真實側向場址條件之估算，其地振動最大值約為 0.4g（圖 7-1.7）；採用 GMPE Chao20 方法則其地振動最大值約為 0.2g（圖 7-1.8）。而中央氣象局提供之 PGA 分布則顯示美濃地震所產生之地振動最大值約為 0.5 g（圖 7-1.9），其中 GMPE Lin09 雖然看似與實際觀測值非常接近，但考量此震源模型深度設定較深而造成地振動在兩種方法中都有低估之情形，且 GMPE Chao20 之分布型態仍與實際情況相似，故仍需與甲仙地震之結果同時進行評估。依前所述，美濃地震因震源模型深度設定較深而造成地振動在兩種方法中都有低估之情形，而甲仙地震之測試中，GMPE Chao20 之方法不論在分布型態或式量值上，皆與實際情形較為相近，故綜合評估下，本團隊於後續三條重要斷層之分析，皆採用 GMPE Chao20 之方法進行推估。

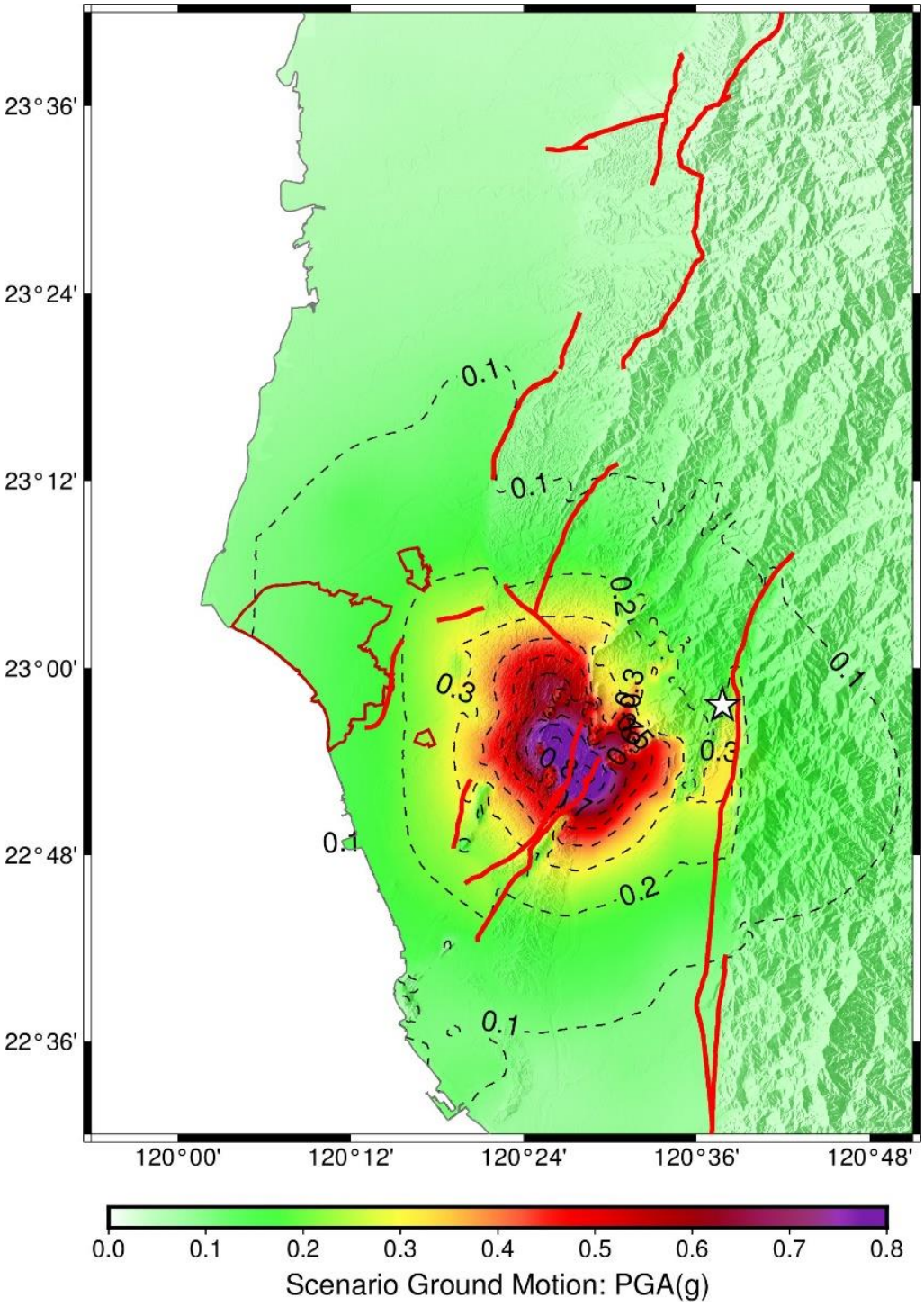


圖 7-1.4：由 GMPE Lin09 算得考慮側向場址條件之甲仙地震之景況地振動分布圖。
Figure 7-1.4 : Scenario earthquake shaking map of the Jiashian Earthquake with a specific site condition correction using GMPE Lin09.

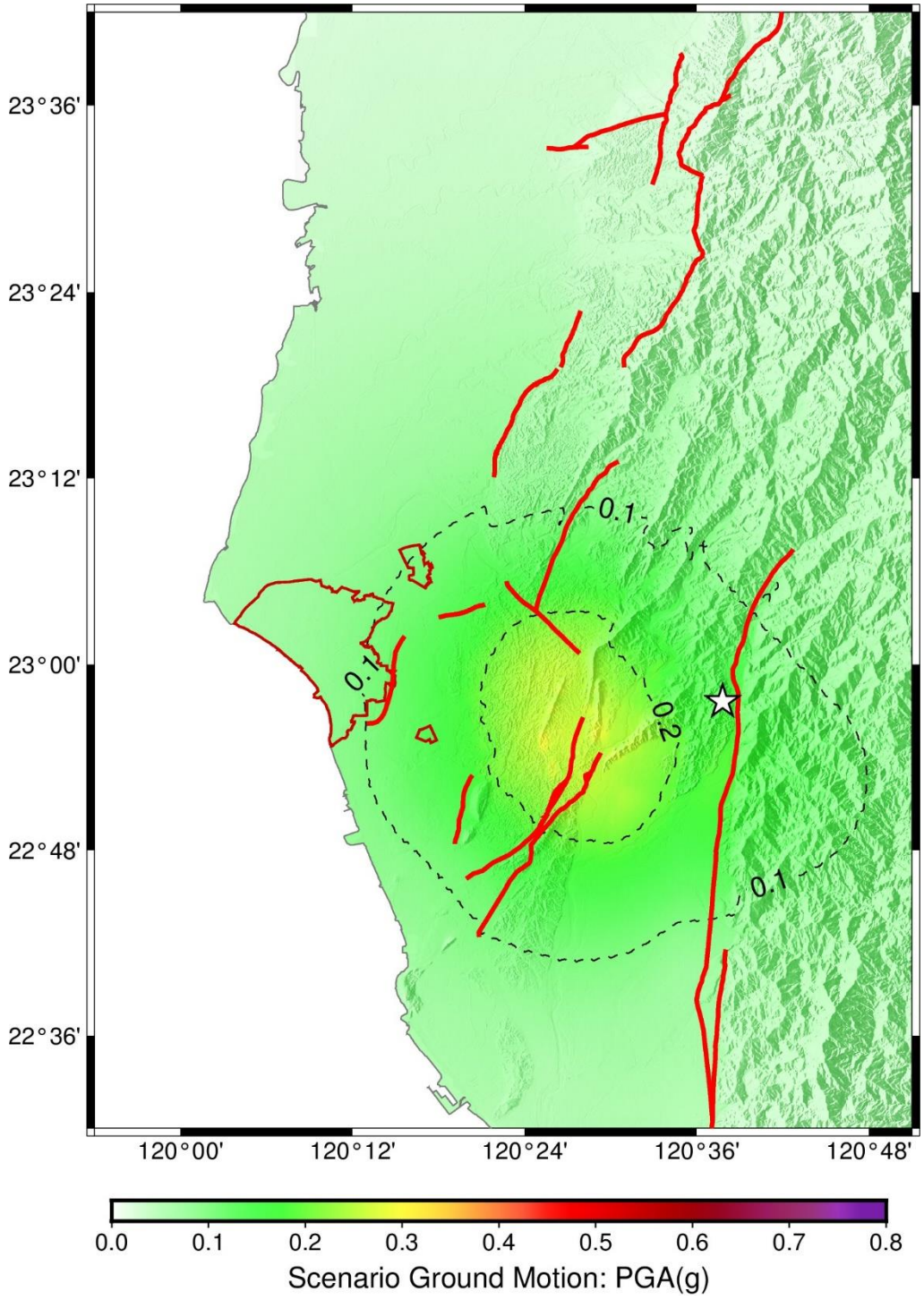


圖 7-1.5：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之甲仙地震之景況地振動分布圖。
Figure 7-1.5 : Scenario earthquake shaking map of the Jiashian Earthquake with a specific site condition correction using GMPE Chao20.

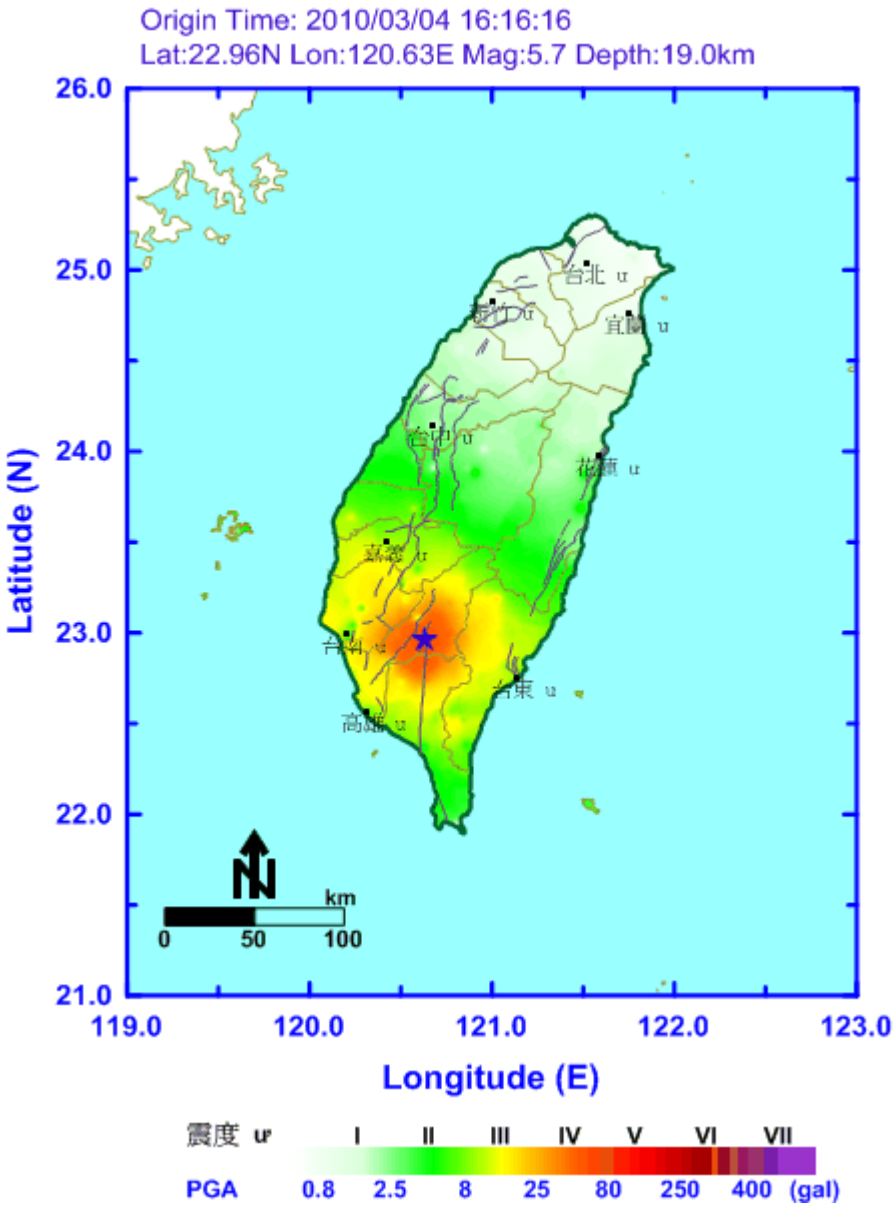


圖 7-1.6：甲仙地震地振動分布圖。
Figure 7-1.6 : PGA map of Jiashian Earthquake.

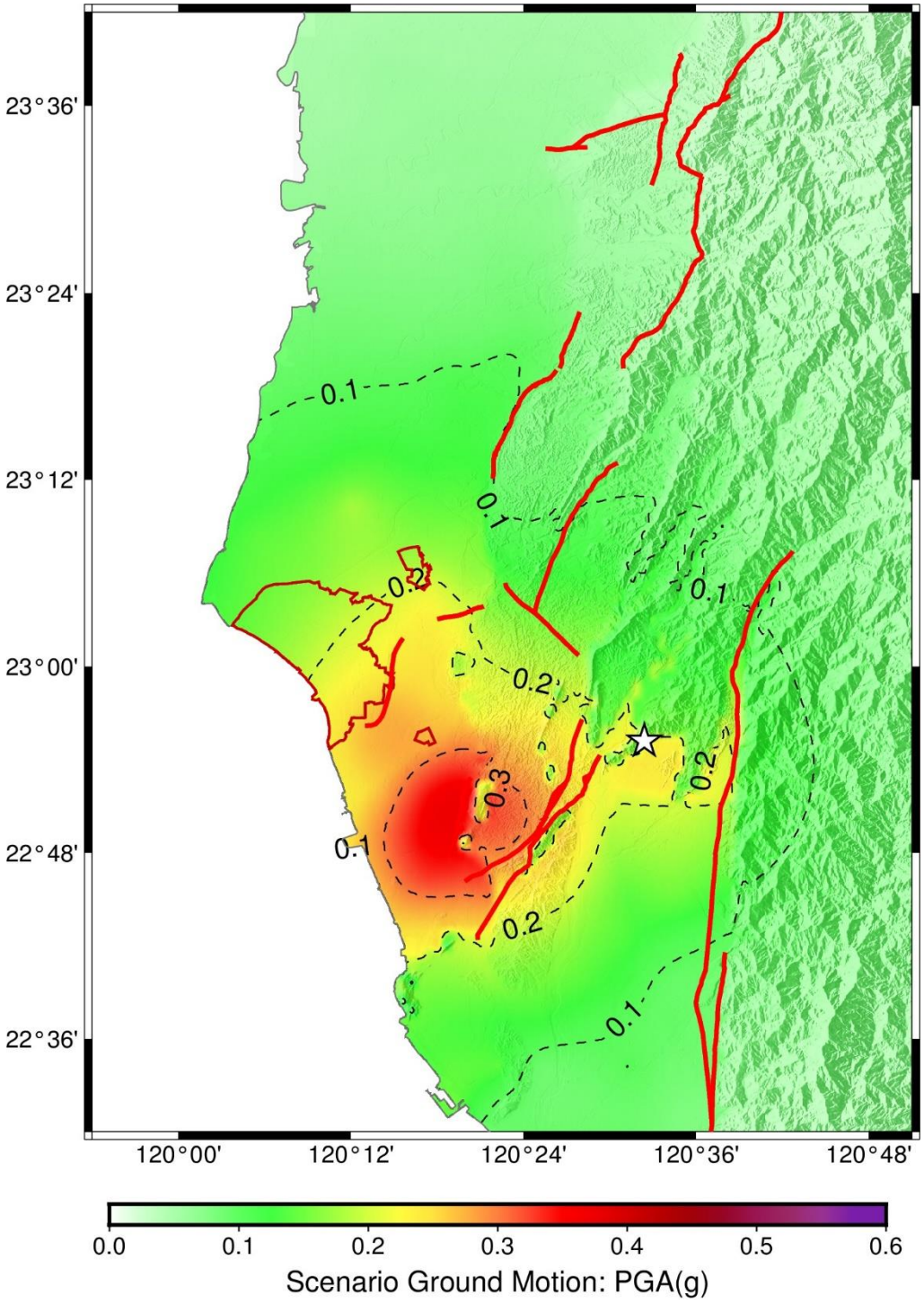


圖 7-1.7：由 GMPE Lin09 算得考慮側向場址條件之美濃地震之景況地振動分布圖。
Figure 7-1.7 : Scenario earthquake shaking map of the Meinong Earthquake with a specific site condition correction using GMPE Lin09.

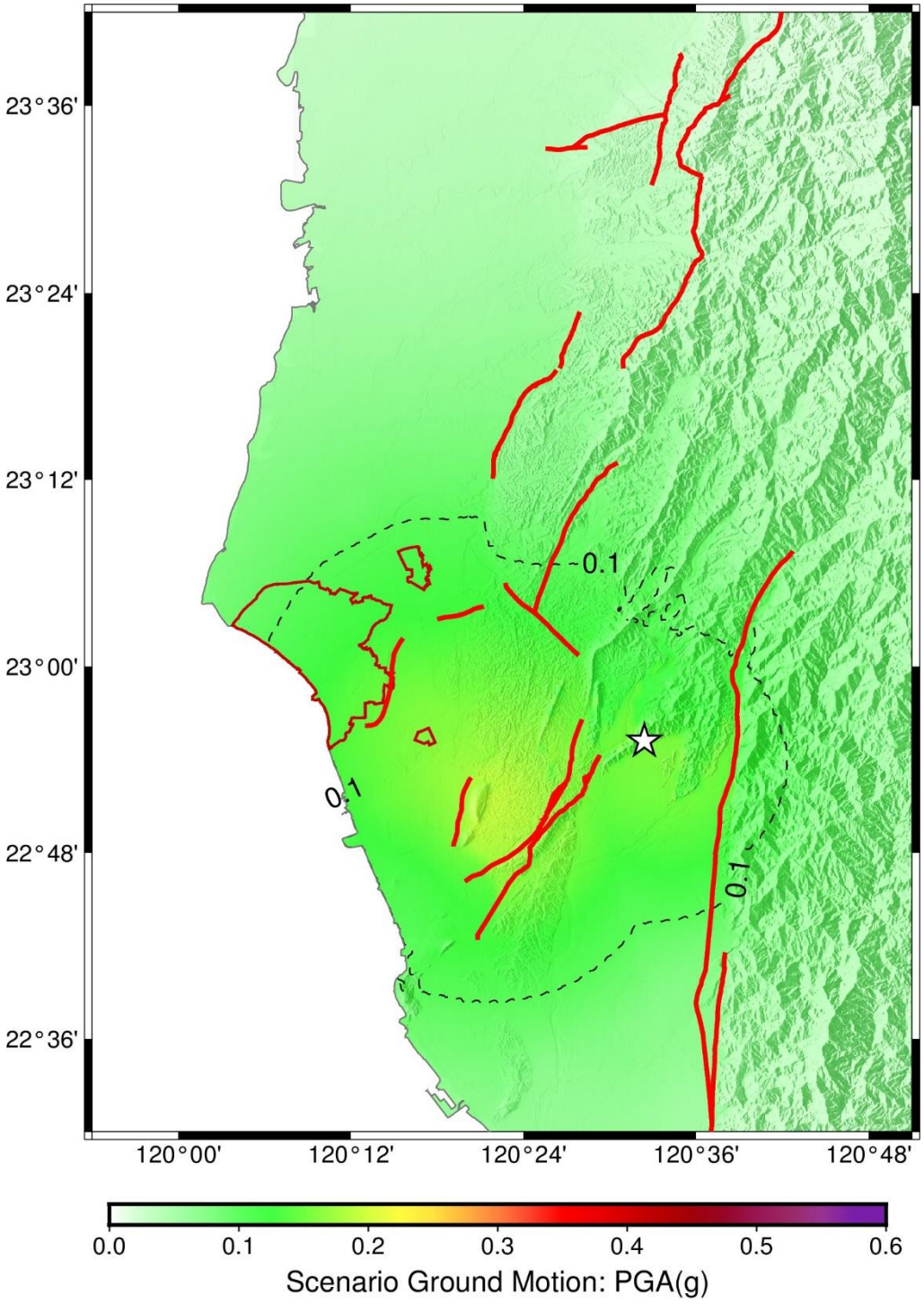


圖 7-1.8：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之美濃地震之景況地振動分布圖。
Figure 7-1.8 : Scenario earthquake shaking map of the Meinong Earthquake with a specific site condition correction using GMPE Chao20.

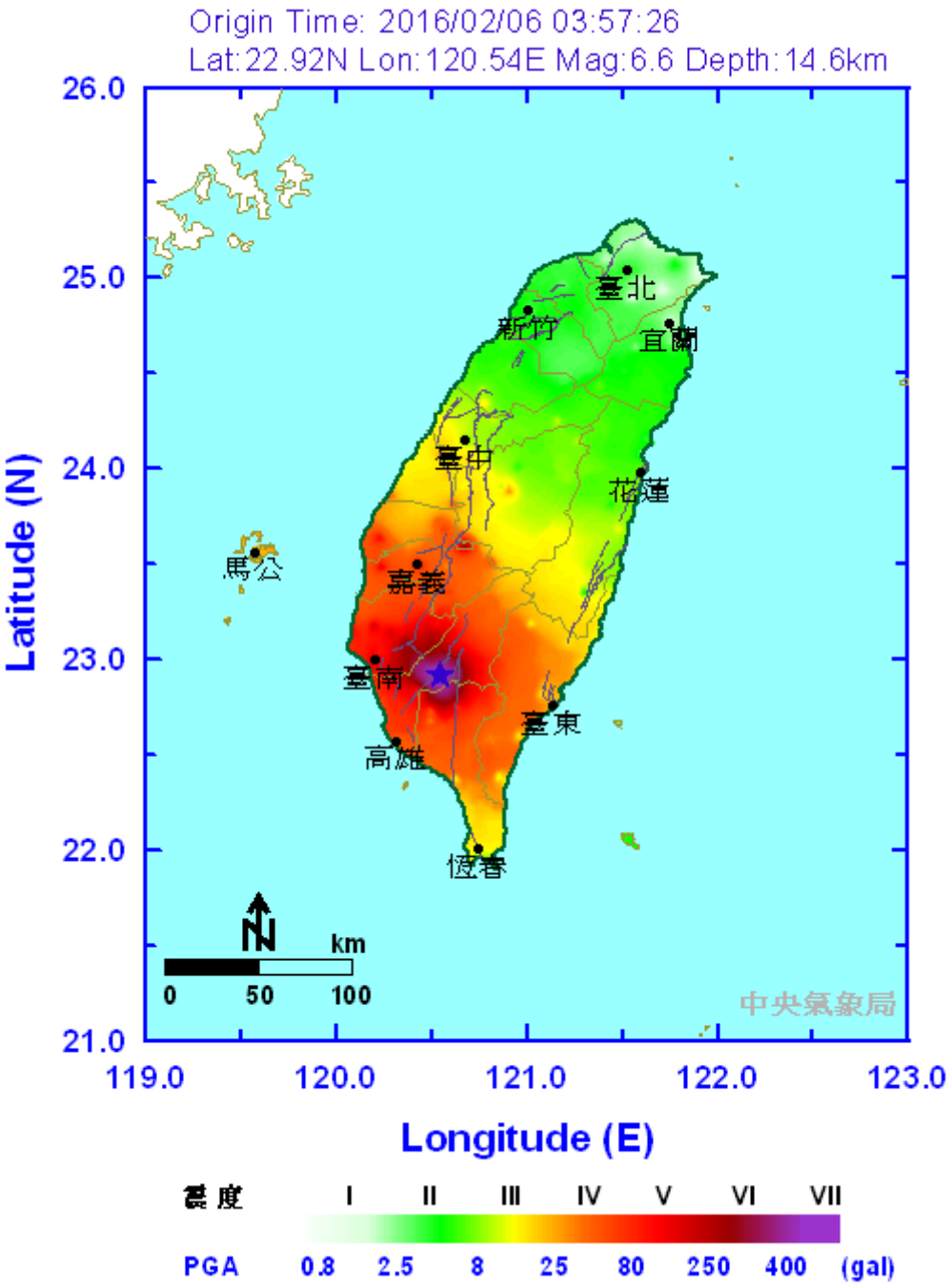


圖 7-1.9：美濃地震地振動分布圖。
Figure 7-1.9 : PGA map of Meinong Earthquake.

7-1-5 景況地振動分布

根據地動預估式之評估推算結果，本計畫分別繪製了涵蓋臺南都會區，由口宵里斷層、新化斷層以及後甲里斷層發震所引致於岩盤條件下之景況地振動分布圖（圖 7-1.10；圖 7-1.12；圖 7-1.14）。另外，經評估各地表虛擬觀測點所額外考量現地之 Vs30 數值，口宵里斷層、新化斷層以及後甲里斷層考慮真實地表場址條件下之景況地振動分布圖則各別呈現於圖 7-1.11、圖 7-1.13 及圖 7-1.15。

地振動值大小（即最大地動加速度值，PGA）反應地表搖晃程度，地振動值越高，即代表地表搖晃程度越大。中央氣象局自 2020 年起實施之地震震度分級表（圖 7-1.16）係根據最大地動加速度及速度值（PGA 及 PGV）定義震度：PGA < 0.8 cm/s^2 為震度 0 級，PGA ≥ 0.8 cm/s^2 且 PGA < 2.5 cm/s^2 為震度 1 級，PGA ≥ 2.5 cm/s^2 且 PGA < 8.0 cm/s^2 為震度 2 級，PGA ≥ 8.0 cm/s^2 且 PGA < 25 cm/s^2 為震度 3 級，PGA ≥ 25 cm/s^2 且 PGA < 80 cm/s^2 為震度 4 級；PGV ≥ 15 cm/s 且 PGA < 30 cm/s 為震度 5 弱，PGA ≥ 30 cm/s 且 PGA < 50 cm/s 為震度 5 強，PGA ≥ 50 cm/s 且 PGA < 80 cm/s 為震度 6 弱，PGA ≥ 80 cm/s 且 PGA < 140 cm/s 為震度 6 弱， PGA > 140 cm/s 為震度 7 級。而其中，5 弱以上，以 PGV 劃分之部分已考慮 PGA 之實際影響，亦即 PGA 值越高或震度越大，越可能對建物帶來損壞。而除了 PGA 之外，建物的損壞也與建物本身自然週期及地振動的週期相關，由此可知，地震造成之建物損害現象參雜之因素較為複雜，目前仍為地震工程致力解析的議題之一，但儘管如此，本報告所產製之景況地振動圖依舊可提供災防單位進行一定程度之參考而有所助益。

本計畫之地振動計算成果單位為 g，而 1g 等於 980 cm/s^2，若比對氣象局之震度圖（圖 7-1.16），由於考慮側向場址條件之計算是將各該區域之真實地表場址條件納入考量，成果較為細緻，故以下以該成果為主進行震度對照分析。口宵里斷層景況地振動分布，根據 GMPE Chao20 之成果，在口宵里鄰近區域可能產生 6 弱左右之震度，重要區域中，距離口宵里最近之臺南科學園區於計算成果中可能達 5 弱至 5 強；臺南都會區與沙崙綠能科學園區則皆可能產生約 5 弱之震度。新化斷層之景況地振動分布，以斷層東北側之震度最高，若最大地震規模為 M_w6.6 以上可達 6 弱震度，臺南科學園區東側區域具有 6 級震度，其餘區域則大部分落在 5 弱至 5 強震度。重要區域臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學

園區則皆約落在震度 5 強範圍。後甲里斷層之景況地振動分布，若最大地震規模為 M_w 6.6 以上，則可看到鄰近斷層帶具有 5 強之震度，臺南都會區西南側、臺南科學園區與沙崙綠能科學園區最大震度約 5 弱至 5 強間，而都會區之其餘大部分區域則約 5 弱。就各斷層對於各重要區域之影響，口宵里斷層與新化斷層對於臺南科學園區具有較大之影響，其中又以口宵里斷層之影響較大；後甲里斷層則對於臺南都會區及沙崙綠能科學園區具有較大影響。其中，臺南都會區西北側區域，由於皆與各斷層距離較遠，故所受震度相較於該區域之東側及東南側而言較小。

除上述成果之外，本團隊同時發現目前本計畫進行地振動預估之方式，係直接採用完整之斷層面進行推估，然而如前述甲仙及美濃地震之測試，若可取得同震時主要滑移量分布之區域，則其預估結果將與實際情形更為相符。而震間期斷層面上滑移虧損速率較高之區域即能量累積之區域，亦為下次地震發生時最有可能破裂的地方，因此，本團隊建議後續於況地振動預估時，可先行進行分析與篩選，將破裂可能性較高之區域挑出，已使得景況地振動之成果可更趨於現實情況，以利後續之防災規畫與應用。

表 7-1.1：本年度重要斷層之各破裂事件規模計算結果

Table 7-1.1: Calculated magnitudes for each rupture case of Kouhsiaoli fault, Hsinhua fault and Houjiali fault

斷層	破裂事件	長度 (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	
口宵里斷層	A	21	39	5.8	**6.4**	6.4	**6.3**
	A	12	217	6.2	**6.4**	6.6	**6.3**
新化斷層	B	24	434	6.5	**6.7**	6.9	**6.6**
	A	12	75	5.7	**6.0**	6.3	**5.9**
後甲里斷層	B	15	94	5.8	**6.1**	6.4	**6.0**
	A	21	39	5.8	**6.4**	6.4	**6.3**

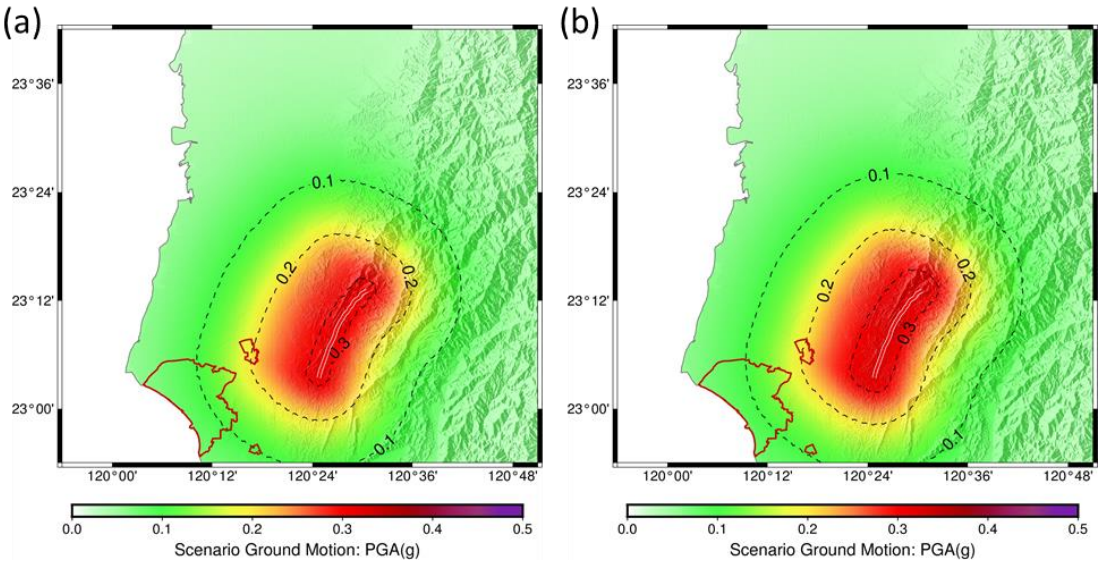


圖 7-1.10：由 GMPE Chao20 算得岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之口宵里斷層景況地振動分布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.3。(b) 最大地震規模為 M_w 6.4。

Figure 7-10.: Scenario earthquake shaking map of the Hsiaokangshan fault with a site condition of 760 m/s using GMPE Chao20. (a) Maximum eqrthquake magnitude is Mw 6.3. (b) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.4.

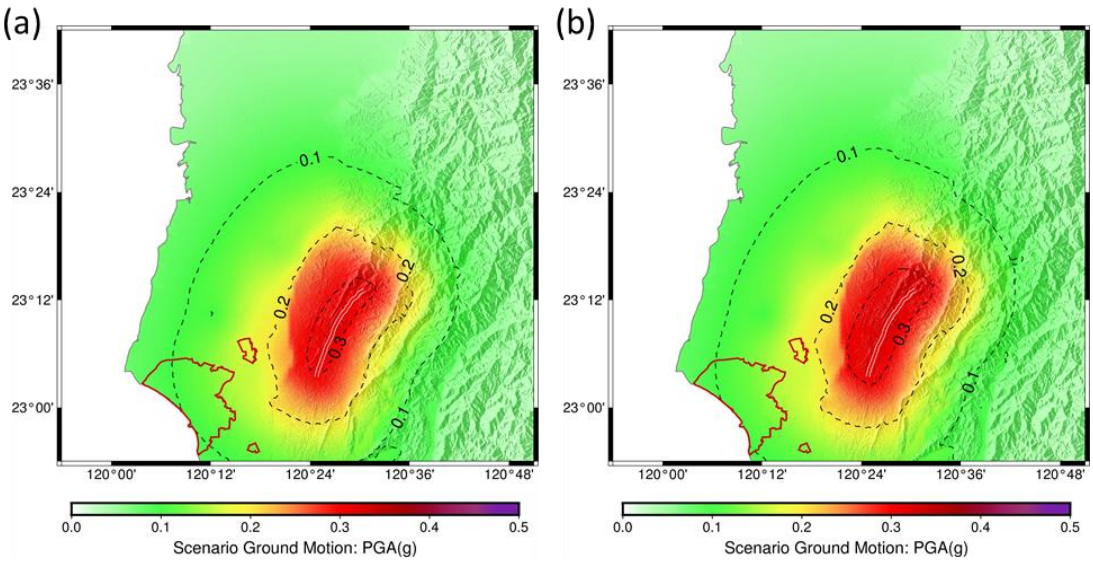


圖 7-1.11：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之口宵里斷層之景況地振動分布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.3。(b) 最大地震規模為 M_w 6.4。

Figure 7-1.11: Scenario earthquake shaking map of the Kouhsiaoli fault with a specific site condition correction using GMPE Chao20. (a) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.3. (b) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.4.

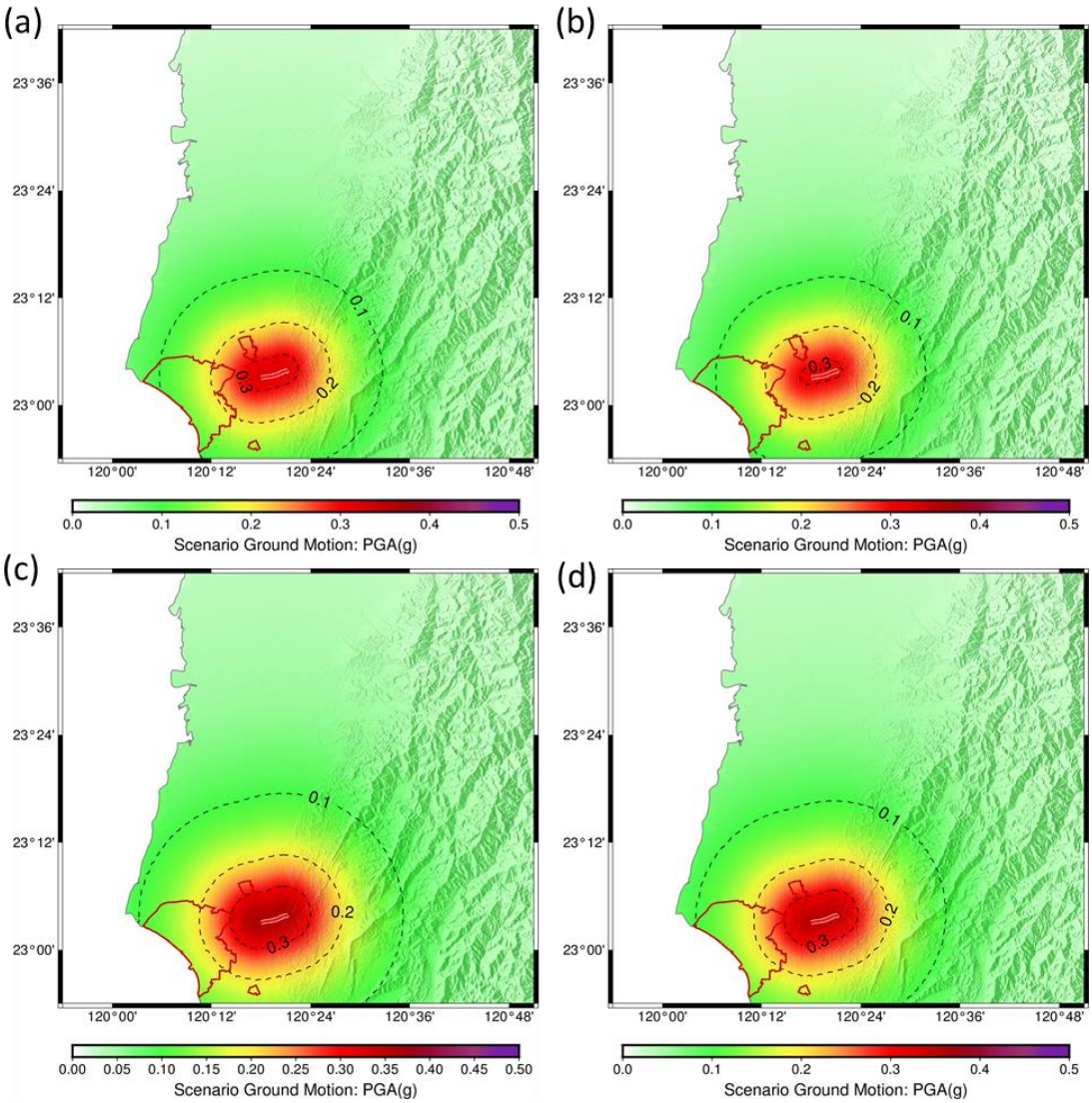


圖 7-1.12：由 GMPE Chao20 算得岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之新化斷層之景況地振動分布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.4。(b) 最大地震規模為 M_w 6.3。(c) 最大地震規模為 M_w 6.7。(d) 最大地震規模為 M_w 6.6。

Figure 7-1.12: Scenario earthquake shaking map of the Chekualin fault with a site condition of 760 m/s using GMPE Chao20. (a) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.4. (b) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.3. (c) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.7. (d) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.6.

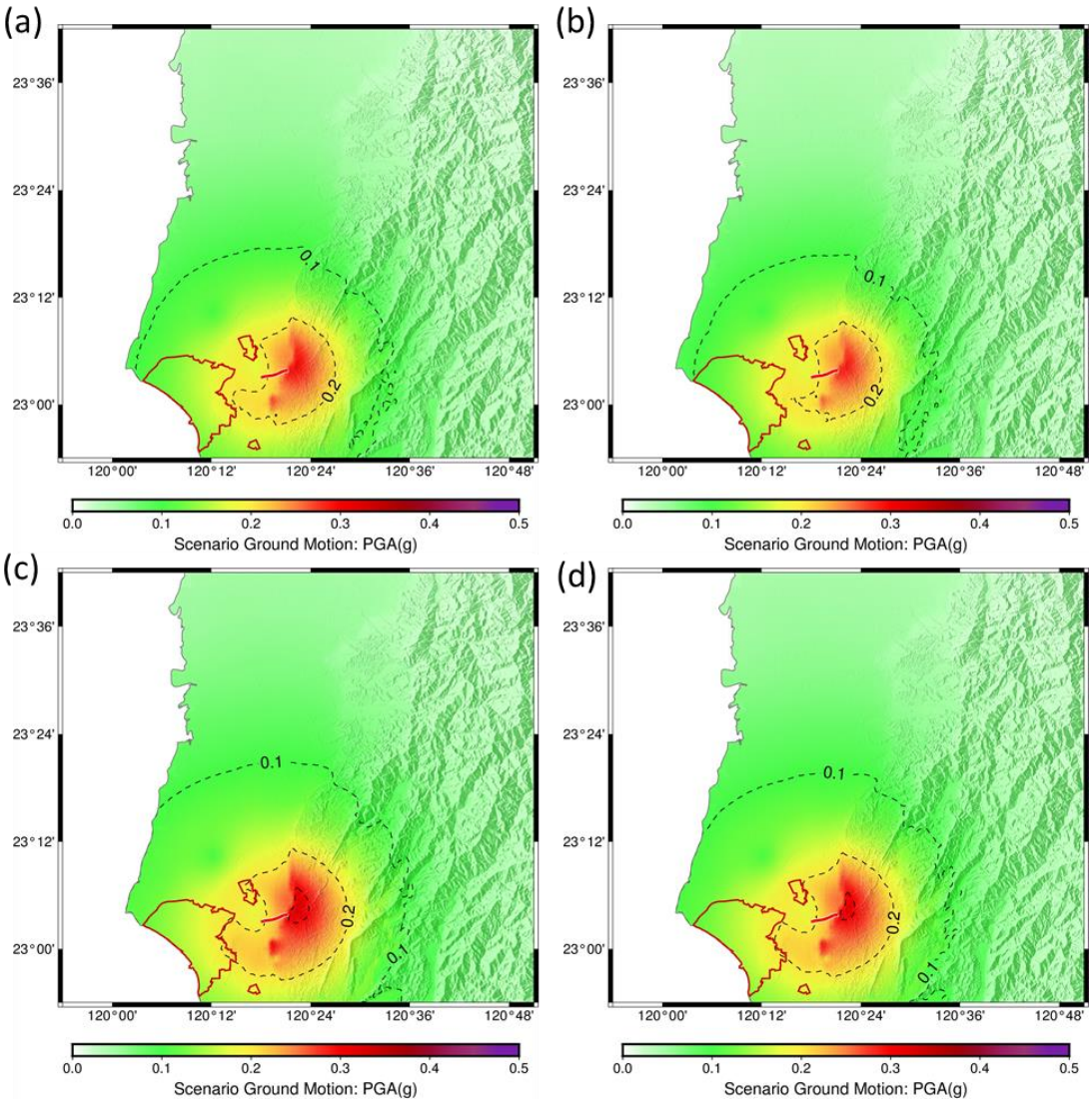


圖 7-1.13：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之新化斷層之景況地振動分布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.4。(b) 最大地震規模為 M_w 6.3。(c) 最大地震規模為 M_w 6.7。(d) 最大地震規模為 M_w 6.6。

Figure 7-1.13: Scenario earthquake shaking map of the Hsinhua fault with a specific site condition correction using GMPE Chao20. (a) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.4. (b) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.3. (c) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.7. (d) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.6.

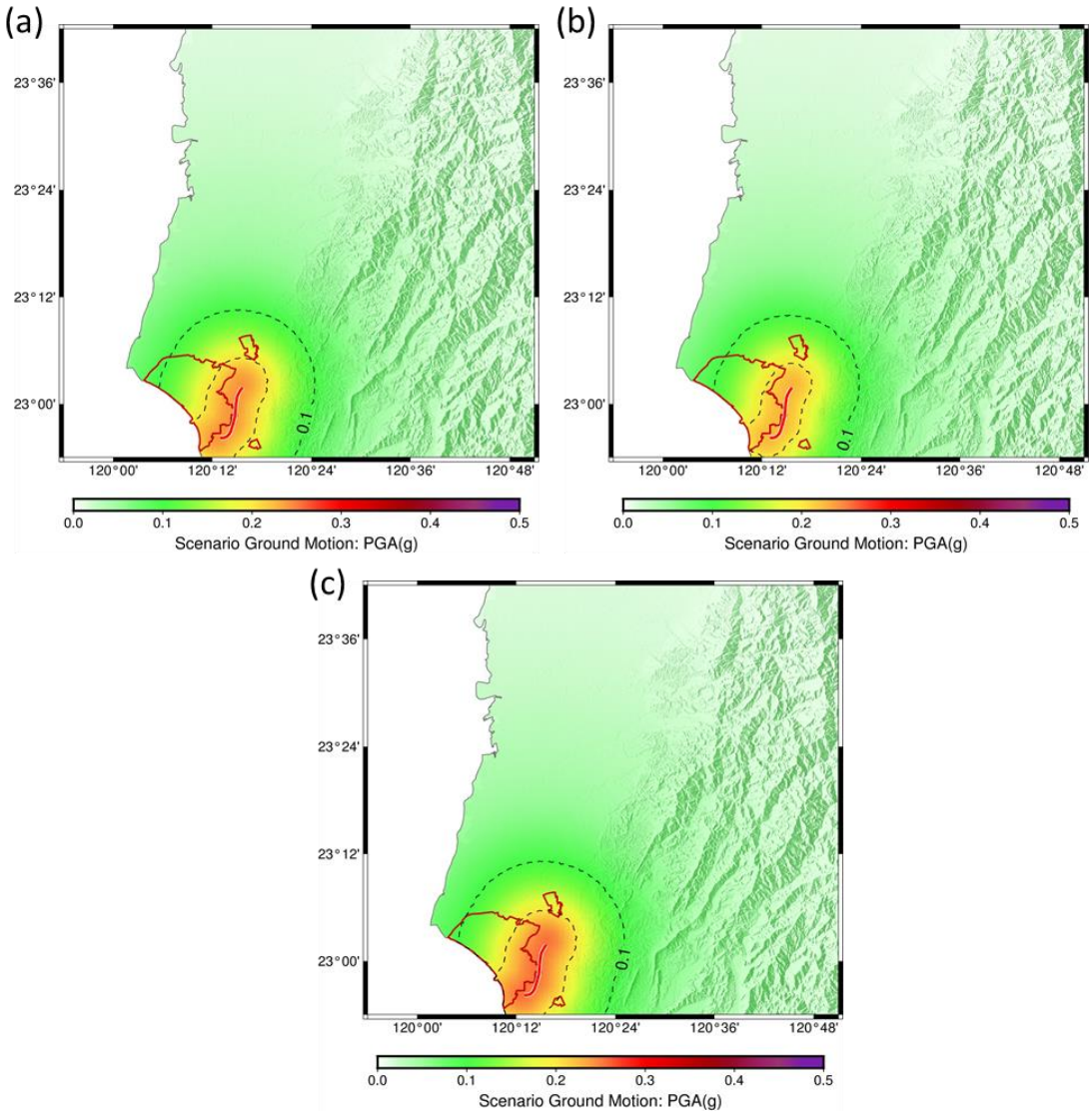


圖 7-1.14：由 GMPE Chao20 算得岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之後甲里斷層之景況地振動分布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.0。(b) 最大地震規模為 M_w 5.9。(c) 最大地震規模為 M_w 6.1。

Figure 7-1.14: Scenario earthquake shaking map of the Chishan fault with a site condition of 760 m/s using GMPE Chao20. (a) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.0. (b) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 5.9. (c) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.1.

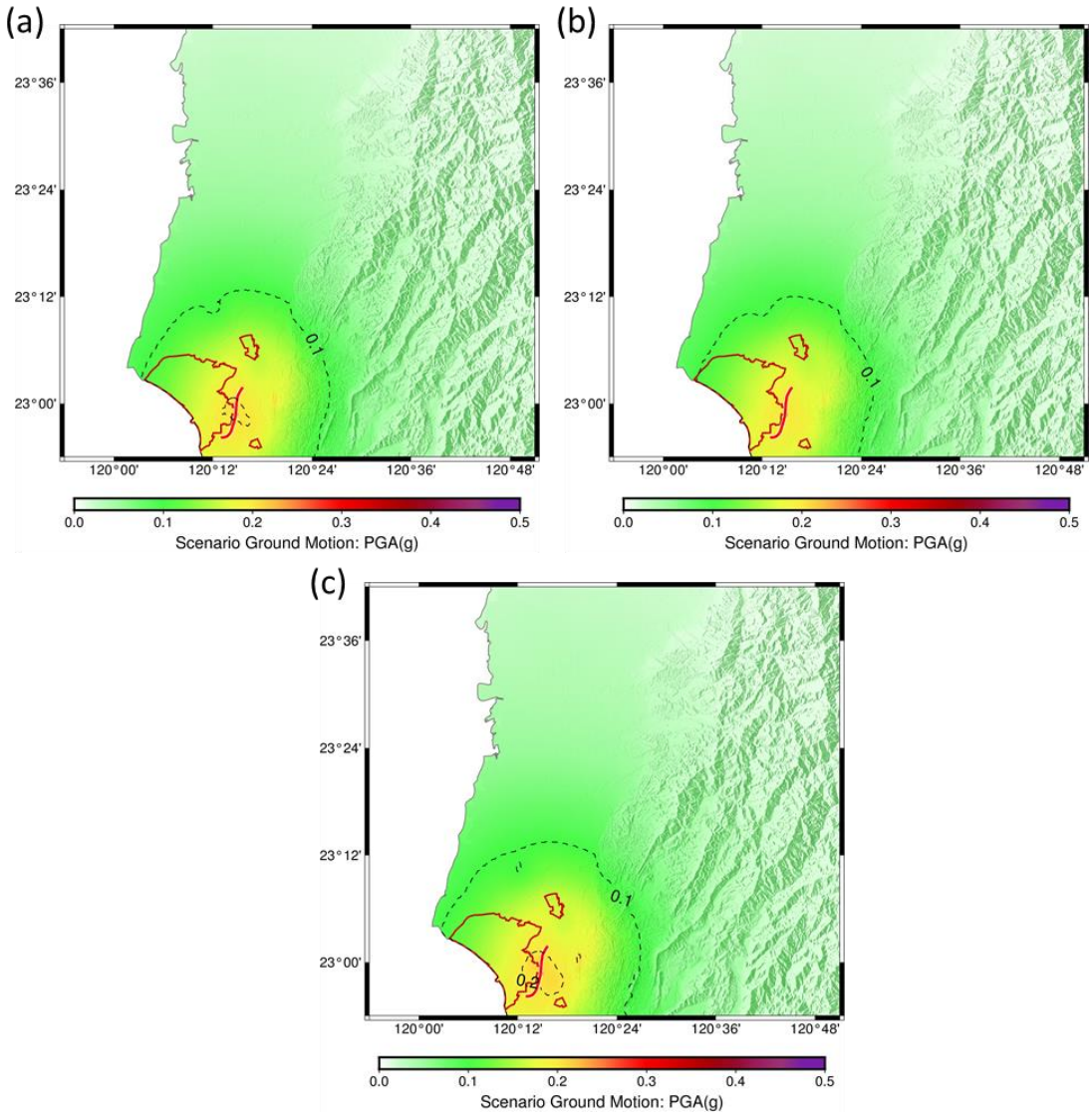


圖 7-1.15：由 GMPE Chao20 算得考慮側向場址條件之新化斷層之景況地振動分布圖。(a) 最大地震規模為 M_w 6.0。(b) 最大地震規模為 M_w 5.9。(c) 最大地震規模為 M_w 6.1。

Figure 7-1.15: Scenario earthquake shaking map of the Hsinhua fault with a specific site condition correction using GMPE Chao20. (a) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.0. (b) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 5.9. (c) Maximum eqrthquake magnitude is M_w 6.1.

震度分級		加速度 (cm/s²)	速度 (cm/s)	人的感受	屋內情形	屋外情形
0 級		0.8		人無感覺		
1 級		2.5		人靜止或位於高樓層時可感覺微小搖晃		
2 級		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 級		25		幾乎所有人都感覺搖晃，有的人會有恐懼感	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 級		80	15	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	房屋搖動甚烈，少數未固定物品可能傾倒掉落，少數傢俱移動，可能有輕微災害	電線明顯搖晃，少數建築物牆磚可能剝落，小範圍山區可能發生落石，極少數地區電力或自來水可能中斷
5 弱			30	大多數人會感到驚嚇恐慌，難以走動	部分未固定物品傾倒掉落，少數傢俱可能移動或翻倒，少數門窗可能變形，部分牆壁產生裂痕	部分建築物牆磚剝落，部分山區可能發生落石，少數地區電力、自來水、瓦斯或通訊可能中斷
5 強			50	幾乎所有的人會感到驚嚇恐慌，難以走動	大量未固定物品傾倒掉落，傢俱移動或翻倒，部分門窗變形，部分牆壁產生裂痕，極少數耐震較差房屋可能損壞或崩塌	部分建築物牆磚剝落，部分山區發生落石，鬆軟土層可能出現噴沙噴泥現象，部分地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷，少數耐震較差磚牆可能損壞或崩塌
6 弱			80	搖晃劇烈以致站立困難	大量傢俱大幅移動或翻倒，門窗扭曲變形，部分耐震能力較差房屋可能損壞或倒塌	部分地面出現裂痕，部分山區可能發生山崩，鬆軟土層出現噴沙噴泥現象，部分地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷
6 強			140	搖晃劇烈以致無法站穩	大量傢俱大幅移動或翻倒，門窗扭曲變形，部分耐震能力較差房屋可能損壞或倒塌，耐震能力較強房屋亦可能受損	部分地面出現裂痕，山區可能發生山崩，鬆軟土層出現噴沙噴泥現象，可能大範圍地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷
7 級				搖晃劇烈以致無法依意志行動	幾乎所有傢俱都大幅移動或翻倒，部分耐震較強建築物可能損壞或倒塌	山崩地裂 ，地形地貌亦可能改變，多處鬆軟土層出現噴沙噴泥現象，大範圍地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷，鐵軌彎曲

圖 7-1.16：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表（修改自交通部中央氣象局，2021）。
Figure 7-1.16: Comparison of ground acceleration PGA and the degree of damages.

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 節之景況地振動分布圖，涵蓋臺南都會區、臺南科學園區、沙崙綠能科學園區等重要區域，因此邊界同樣設定為延伸後之範圍：東經 119.90°至 121.00°，北緯 22.80°至 23.70°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振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 5-3.5）。由本計畫重點斷層三維斷層模型初步成果可知，口宵里

斷層、新化斷層以及後甲里斷層之斷層滑移虧損速率近乎為 0，無主要之滑移分布。

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，各斷層依破裂事件不同，其最大可能規模亦有所不同，而在本次報告之景況同震位移推估中，為確保災害發生時，可更快速有效的應變，採所有可能最大地震規模中之最大值來進行估算。故口宵里斷層之 *Mw* 設定為 6.4，新化斷層之 *Mw* 為 6.7，後甲里斷層之 *Mw* 為 6.1。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，本計畫可推求出口宵里斷層之地震重複週期（recurrence interval）約為 608 年；新化斷層之地震重複週期約為 16,653 年；後甲里斷層則約為 401,900 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，即可分別獲得未來口宵里斷層、新化斷層及後甲里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 為本計畫針對口宵里斷層所繪製之景況同震位移分布圖，由該分布型態可發現，其景況同震位移量主要分布於口宵里斷層北段東側至六甲斷層，主要之位移方向為由西北往東南並於近斷層處開始向東北及南方偏轉，斷層南端則有部分較小之由西南往東南逐漸轉為西北之位移量；斷層東側則以由東南往西北之位移為主。同震位移之最大量值落於斷層西側，約達 123.0 cm。圖 7-2.2 為本計畫針對新化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南北兩側偏東側之區域，位移方向於斷層東北側部分以由西南往東北，西北側部分則以正北方為主；斷層南側則由左鎮斷層南段開始由東南東往西北西，整體自觸口斷層以南至車瓜林斷層北側之變形帶有顯著之右移型態。其同震位移之最大量值落於斷層之西南段，約達 345.5 cm。圖 7-2.3 則為本計畫針對後甲里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後甲里斷層北、中段，其同震位移主要集中於後甲里斷層北段西側，且速度場以該處為中心往南北遞減，並於中段部分轉由西南往東北，其最大量值位於西北側區域，約 22.1 cm。此外，針對本計畫重要區域：臺南都會區、臺南科學園區與沙崙綠能科學園區所繪製之景況同震位移分布圖如圖 7-2.4 至圖 7-2.6。

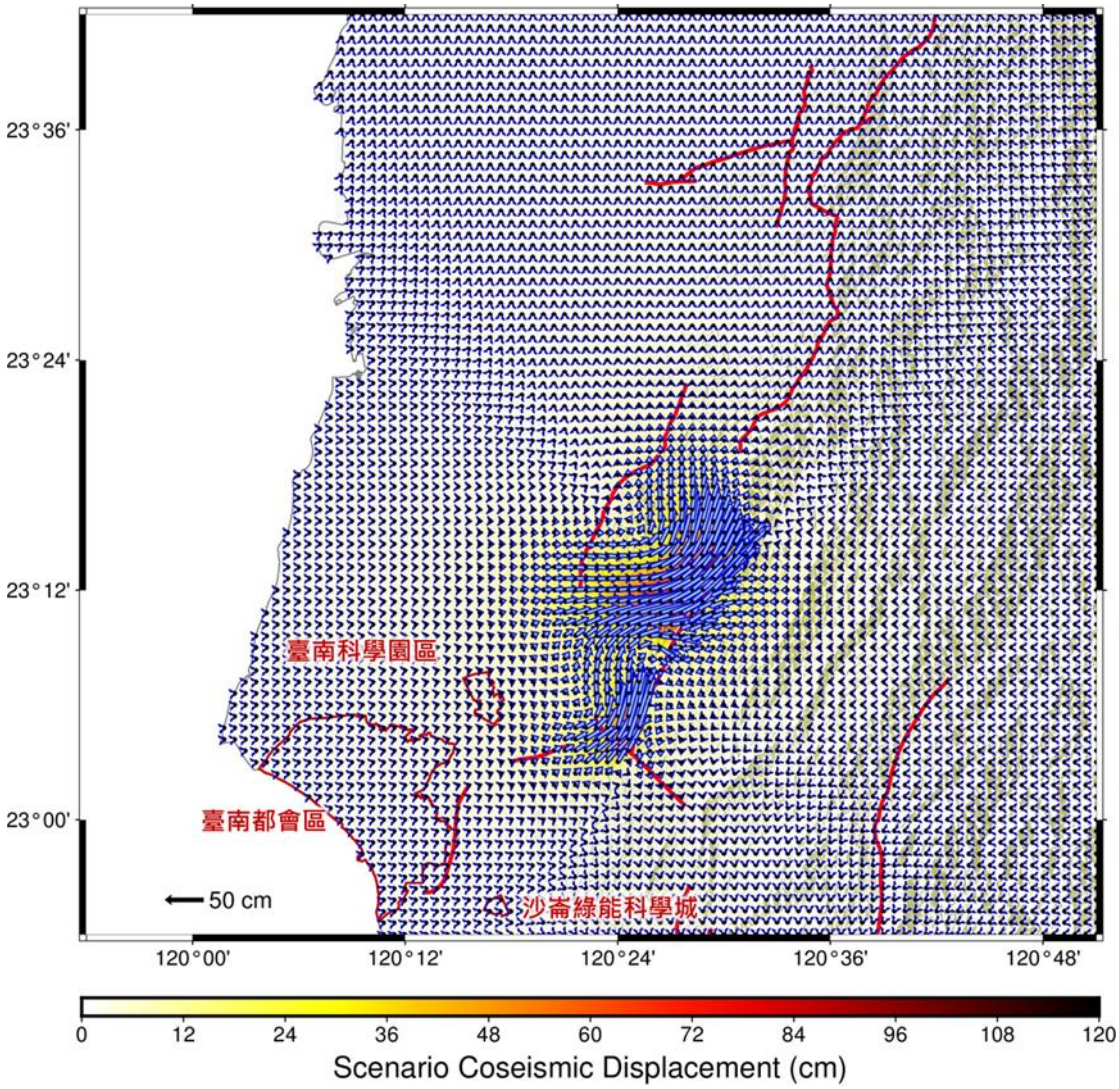


圖 7-2.1：口宵里斷層之景況同震位移分布圖。

Figure 7-2.1: Scenario coseismic displacement map of the Kouhsiaoli fault.

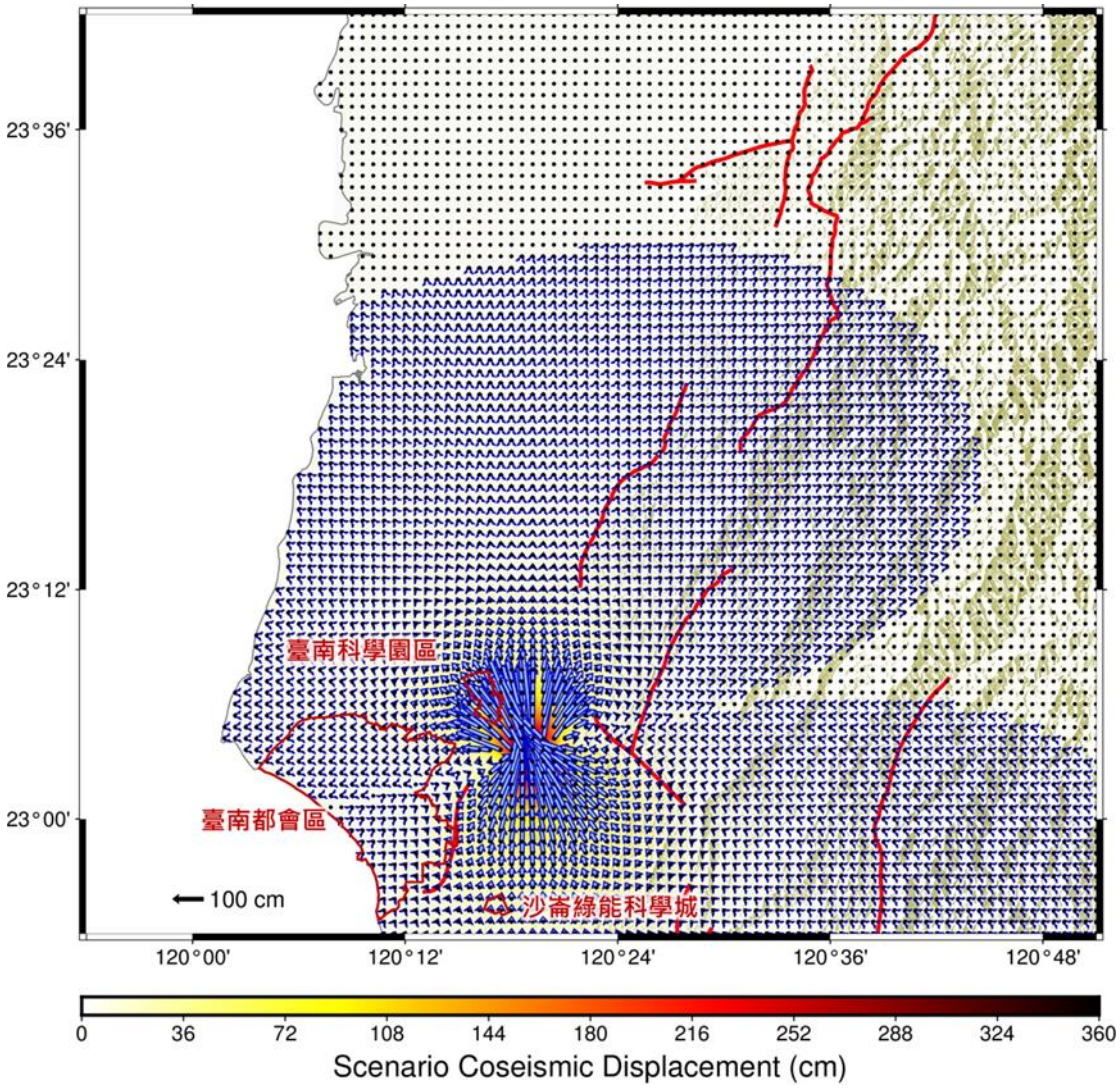


圖 7-2.2：新化斷層之景況同震位移分布圖。

Figure 7-2.2: Scenario coseismic displacement map of the Hsinhua fault.

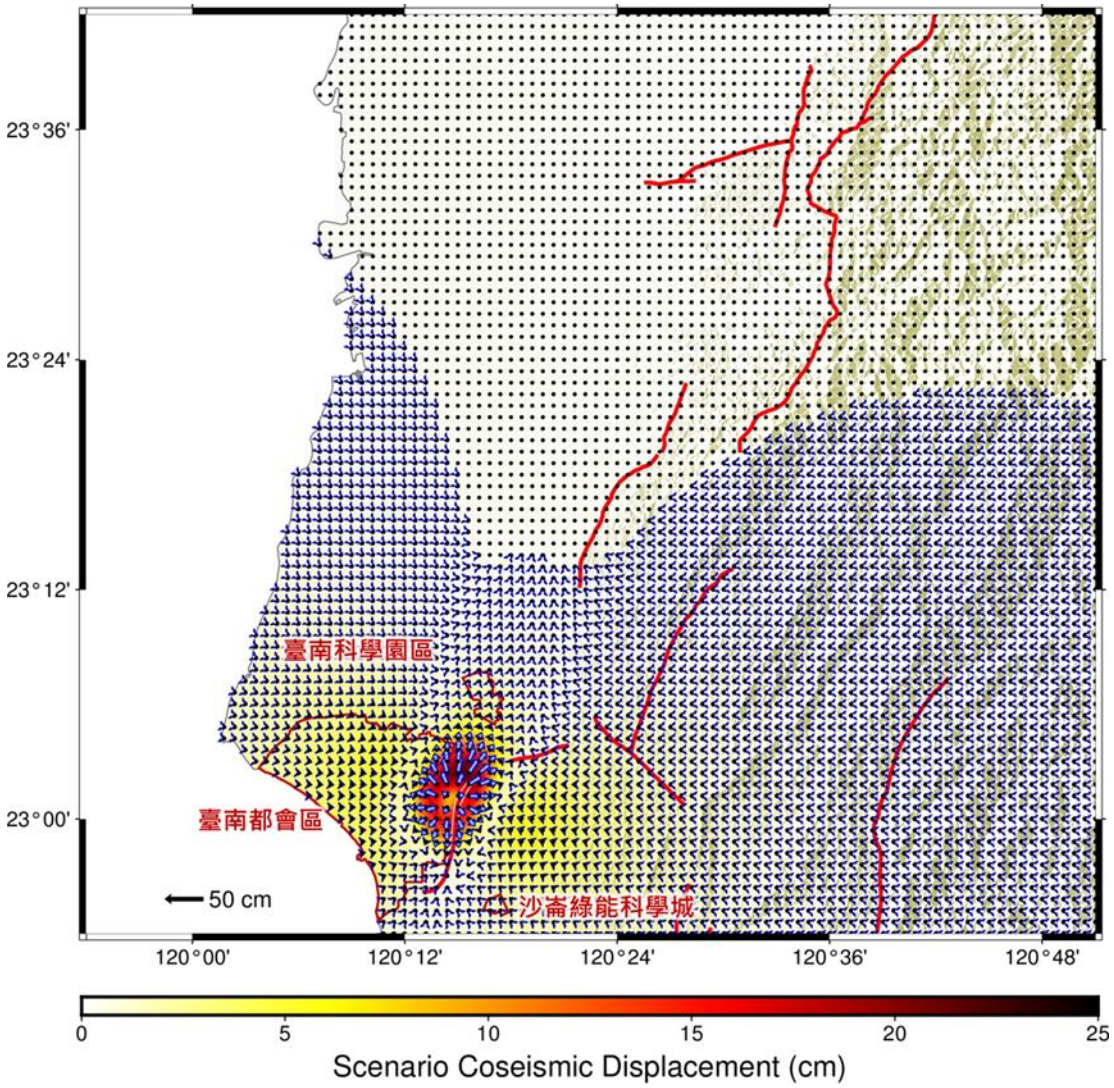


圖 7-2.3：後甲里斷層之景況同震位移分布圖。

Figure 7-2.3: Scenario coseismic displacement map of the Houjiali fault.

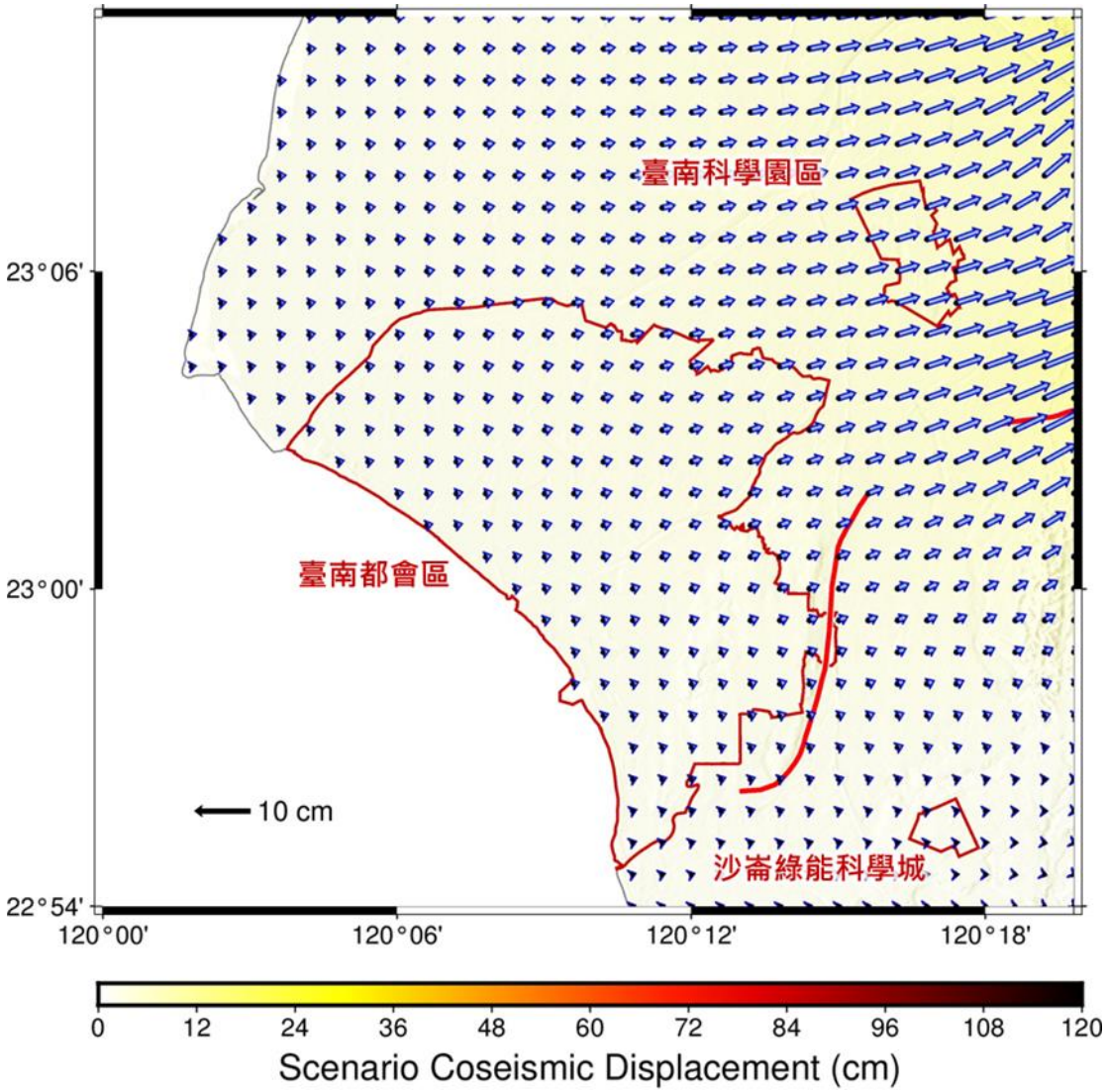


圖 7-2.4：口宵里斷層於臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之景況同震位移分布圖。
Figure 7-2.4: Scenario coseismic displacement map of the Kouhsiaoli fault in Tainan City, Tainan Science Park and Salun Science Park.

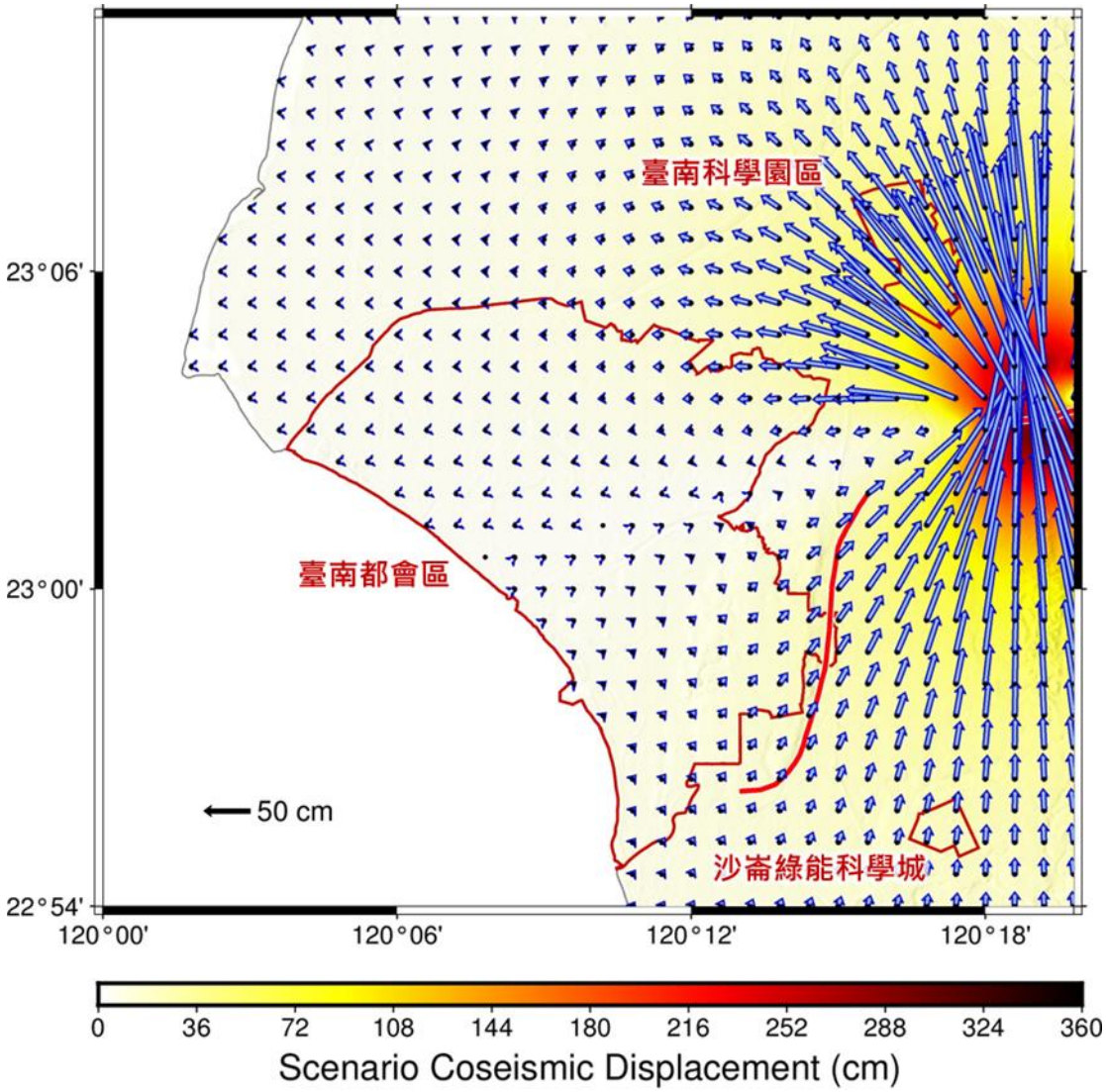


圖 7-2.5：新化斷層於臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之景況同震位移分布圖。
Figure 7-2.5: Scenario coseismic displacement map of the Hsinhua fault in Tainan City, Tainan Science Park and Salun Science Park.

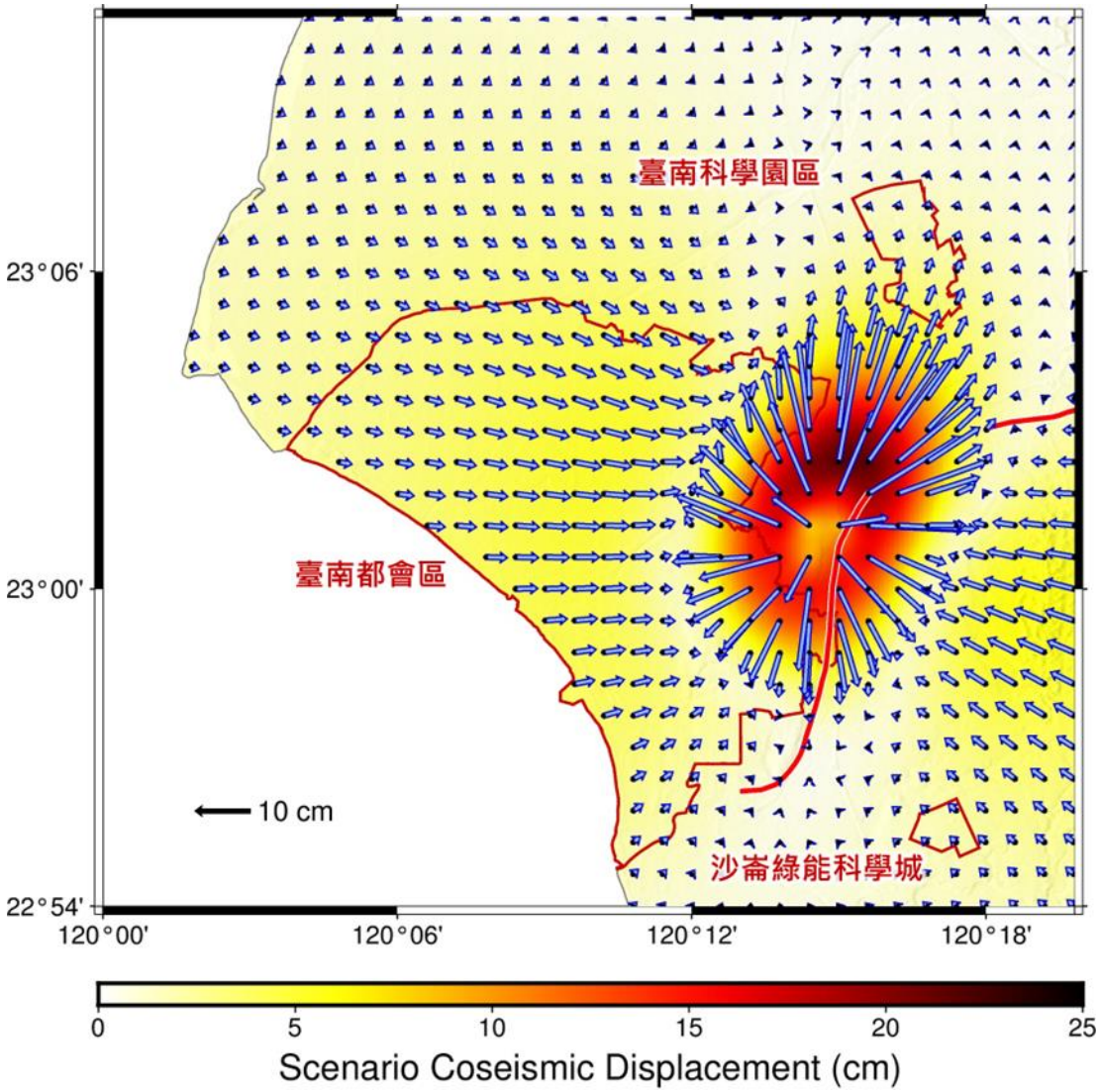


圖 7-2.6：後甲里斷層於臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之景況同震位移分布圖。
Figure 7-2.6: Scenario coseismic displacement map of the Houjiali fault in Tainan City, Tainan Science Park and Salun Science Park.

第八章、大地測量資料分析（全臺）

藉由檢視過去 GNSS 連續站、移動站及精密水準測量之坐標時間序列，發現地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此本計畫以 2006 年恆春地、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、恆春速度轉折及 2018 花連地震等，分為 6 個時間段（圖 8.1）分別解算速度場，如圖 8.2、圖 8.3 所示；各地區依地震之影響與否再區分出不同時期之速度場，如高屏地區，以 2010 甲仙地震及 2016 年美濃地震為主要影響，因此高屏地區之速度場為 2002-2010、2010-2016 及 2016-2022 三個時期，於後續 GNSS 移動站之章節分析，將以各地區之地震事件繪製速度場圖。

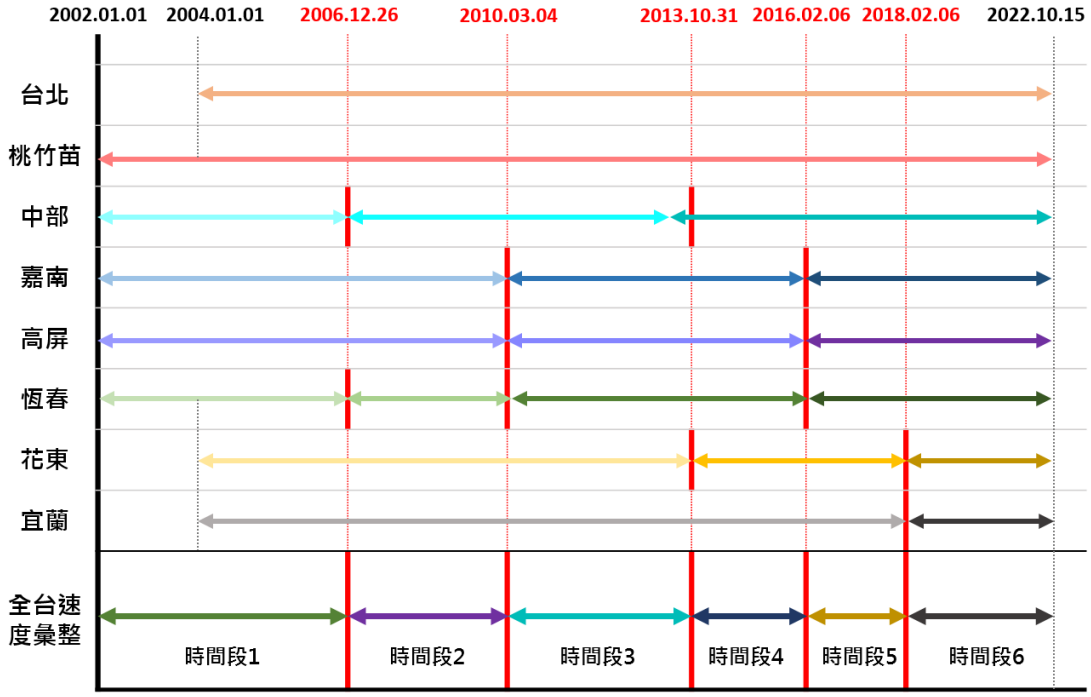


圖 8.1：GNSS 速度場時間序列擬合事件分段。
Fig8.1: 6 period of velocity field,Taiwan.

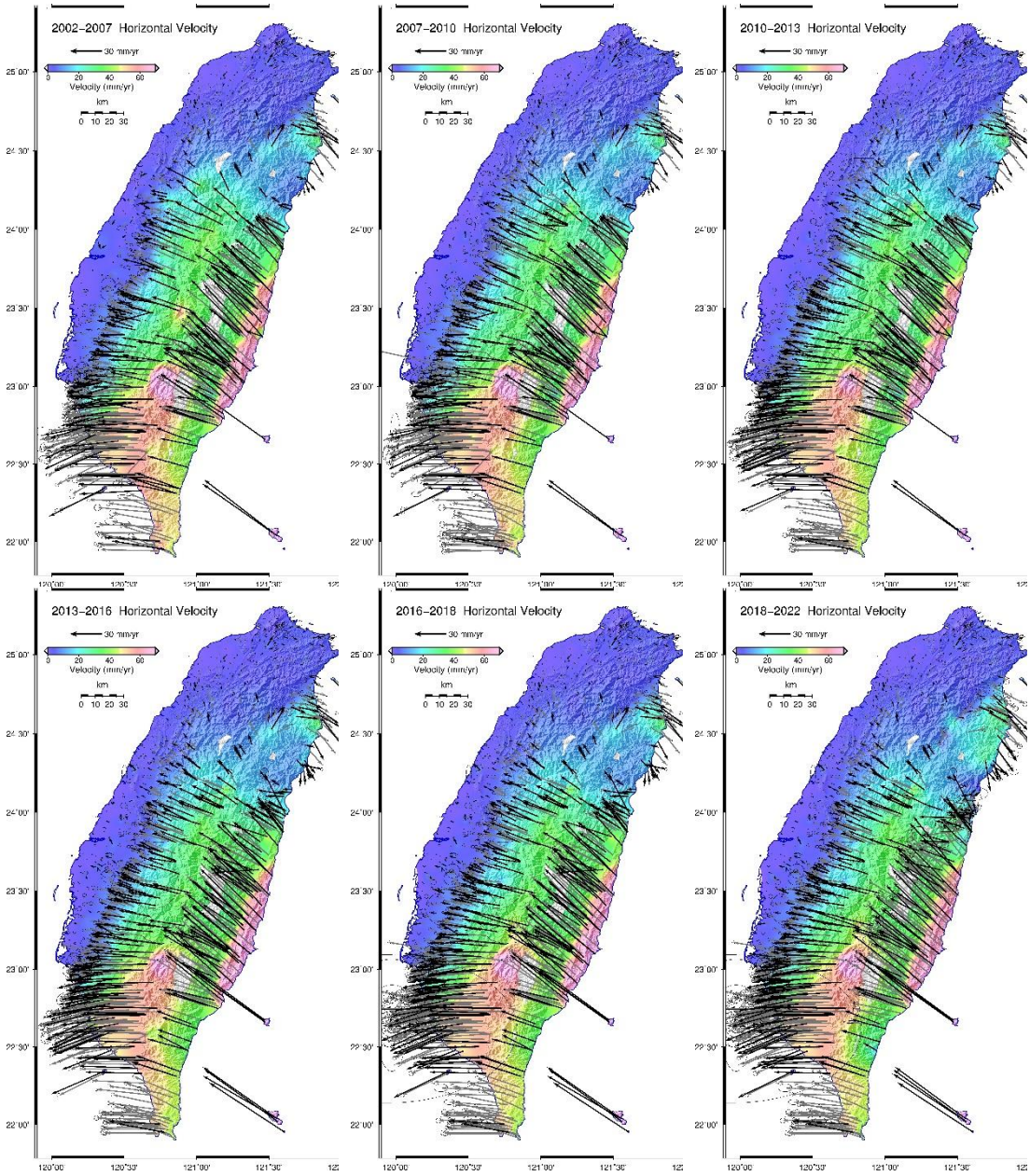


圖 8.2：臺灣地區 2002 至 2022 年水平方向相對於澎湖白沙站(S01R)分段時間速度場圖。

Fig8.2: Horizontal velocity field from 2002 to 2022, Taiwan.

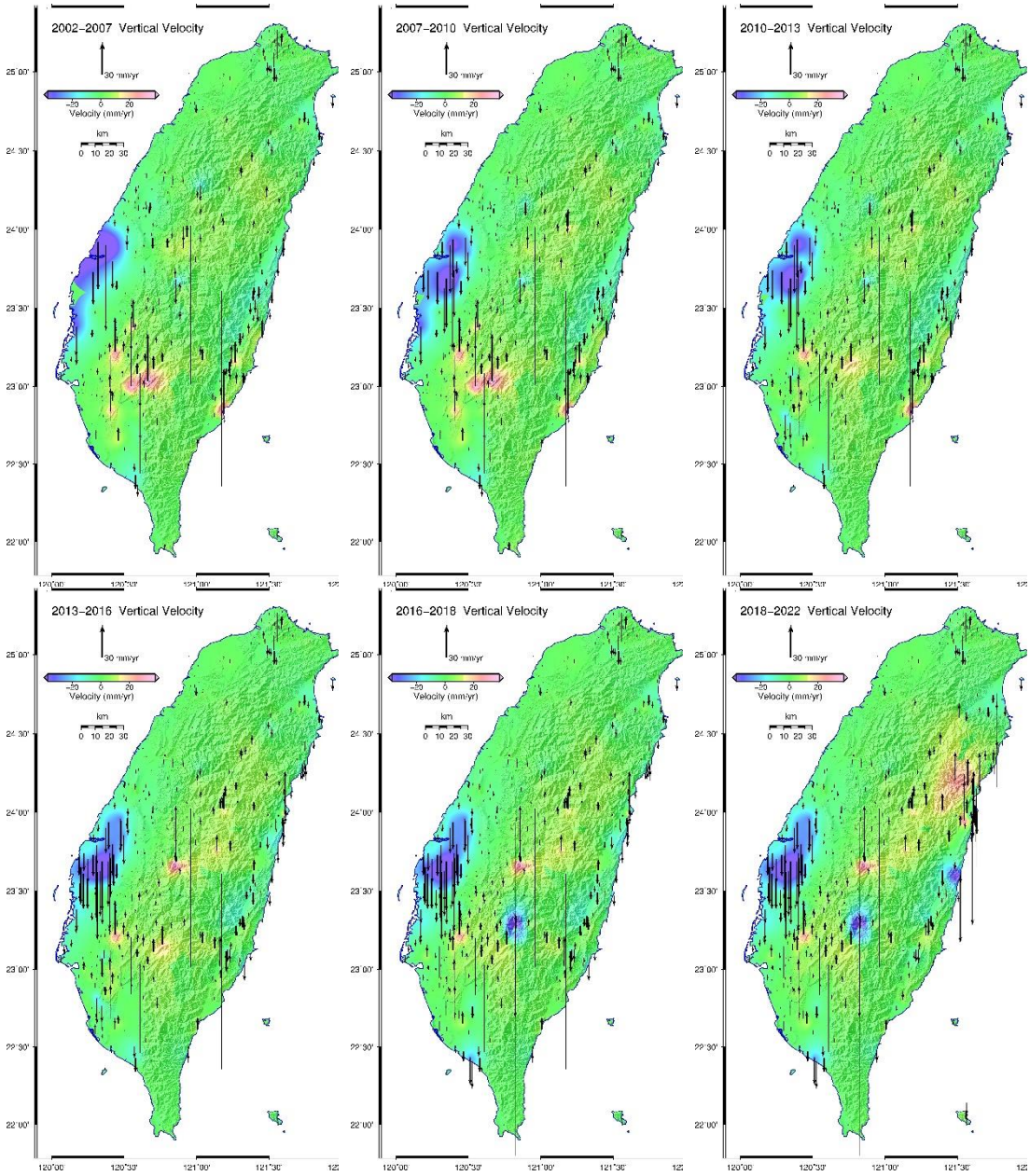


圖 8.3：臺灣地區 2002 至 2022 年垂直方向相對於澎湖白沙站(S01R)分段時間速度場圖。

Fig8.3: Vertical velocity field from 2002 to 2022, Taiwan.

8-1 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。

8-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程

本文利用美國太空總署噴射推進研究室（JPL）目前所研發新一代解算軟體 GipsyX 來解算 GNSS 連續測站資料。相較於 GAMIT/GLOBK 或 Bernese 等常用解算軟體，GipsyX 的優勢在於利用精密單點定位技術（Precise Point Positioning，PPP）對每個測站進行單獨之每日三維坐標值解算，而不須將所有測站先劃分為數個子網，因此解算速度較快，且各測站的結果有獨立性，不易受到其它資料品質較差的測站干擾。然而單站解算所引入的缺陷則為在資料處理過程中無法使用雙差分法（double difference）消除或減弱共同誤差來源（如衛星軌道誤差、鐘差和大氣誤差等），因此在設定一些誤差處理的參數時較為麻煩，需仰賴外部資料或依據使用者自身經驗。本文所使用之 GipsyX 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。

8-1-2 GNSS 連續站坐標時間序列擬合與坐標精度分析

時間序列（time series）和速度場是 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 2022 年 05 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，須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 則為鬆弛時間（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，在中部區域的同震位移部分，本計畫主要考慮 1999 年集集地震及 2013 年南投地震之影響；南部區域是 2006 年屏東外海地震、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 年花蓮地震等重大地震事件進行擬合。擬合成果範例如圖 8-1.1 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 8-1.2），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。

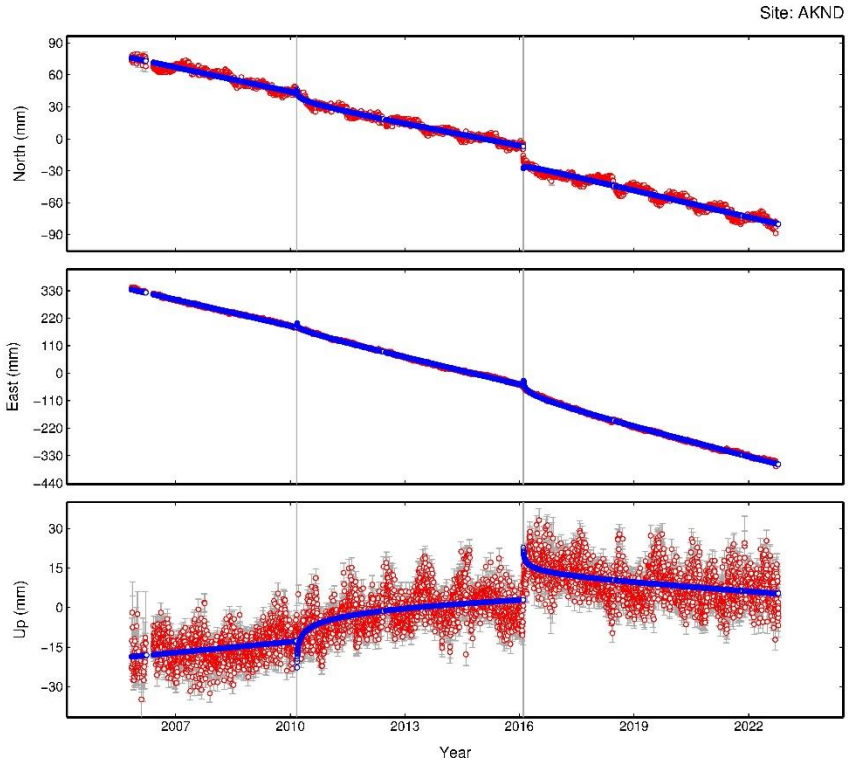


圖 8-1.1：GNSS 連續站 AKND 坐標時間序列擬合結果。紅色圓圈為原始坐標時間序列，藍色圓圈為坐標計算值。

Figure 8-1.1: Coordinate time series of GNSS station AKND. Red circles are observations; blue circles are calculation.

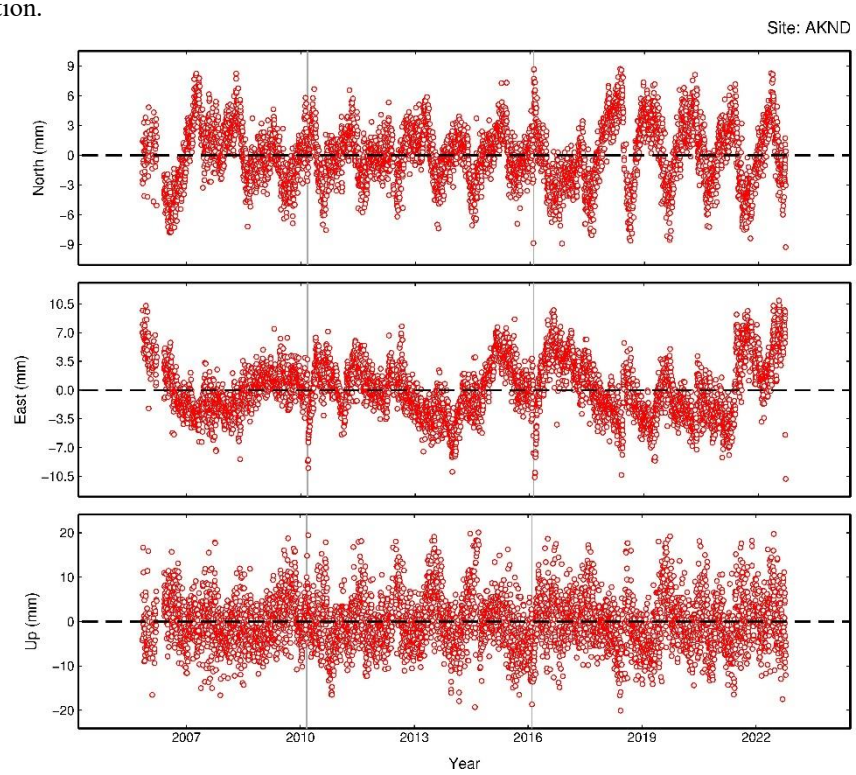


圖 8-1.2：GNSS 連續站 AKND 時間序列之殘差結果。紅色圓圈為移除地表運動速率及地震瞬時位移等事件後之殘差值。

Figure 8-1.2: Residual time series of GNSS station AKND. Red circles are residuals of the time series which have removed the interseismic velocities and coseismic displacements.

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。

根據 GNSS 連續站資料至 2022 年 10 月之監測成果，其坐標殘差之分布情形指出（圖 8-1.3），2002–2022 年 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.0 ± 6.9 mm；E 方向為-0.0 ± 7.8 mm；U 方向為-0.1 ±17.4 mm。而 2002–2022 年平面坐標之均方根誤差平均值為 1.5 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 4.6 mm（圖 8-1.4）。

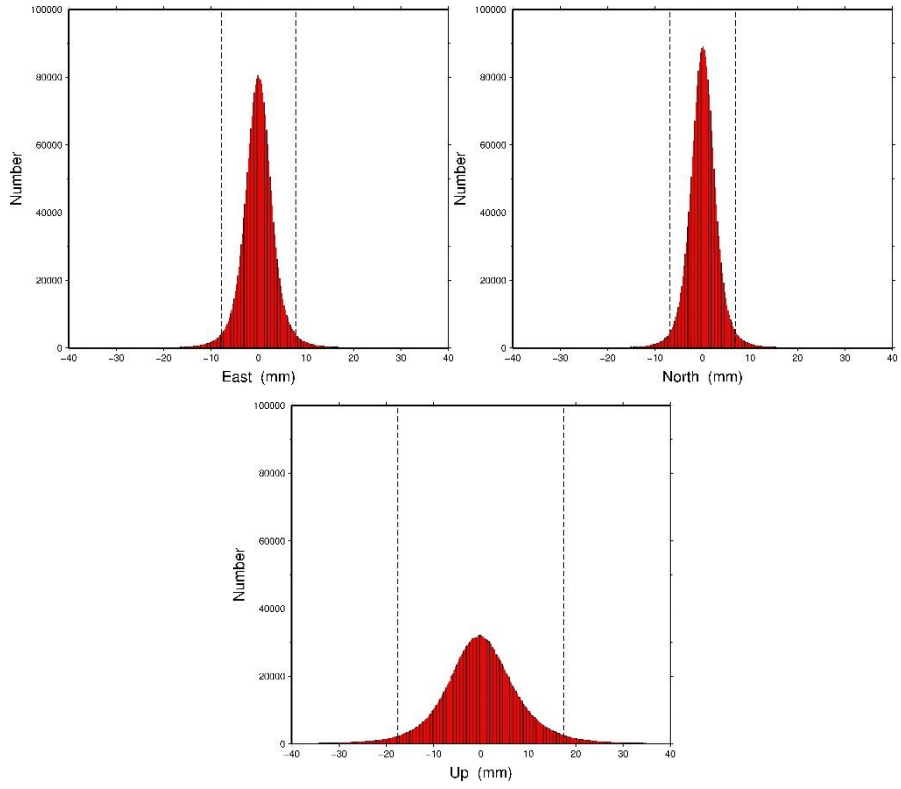


圖 8-1.3：2002 – 2022 年截至 10 月底 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。
Figure 8-1.3: GNSS coordinates residuals during 2002 – Oct. 2022. The dashed lines indicate 95% confidence interval.

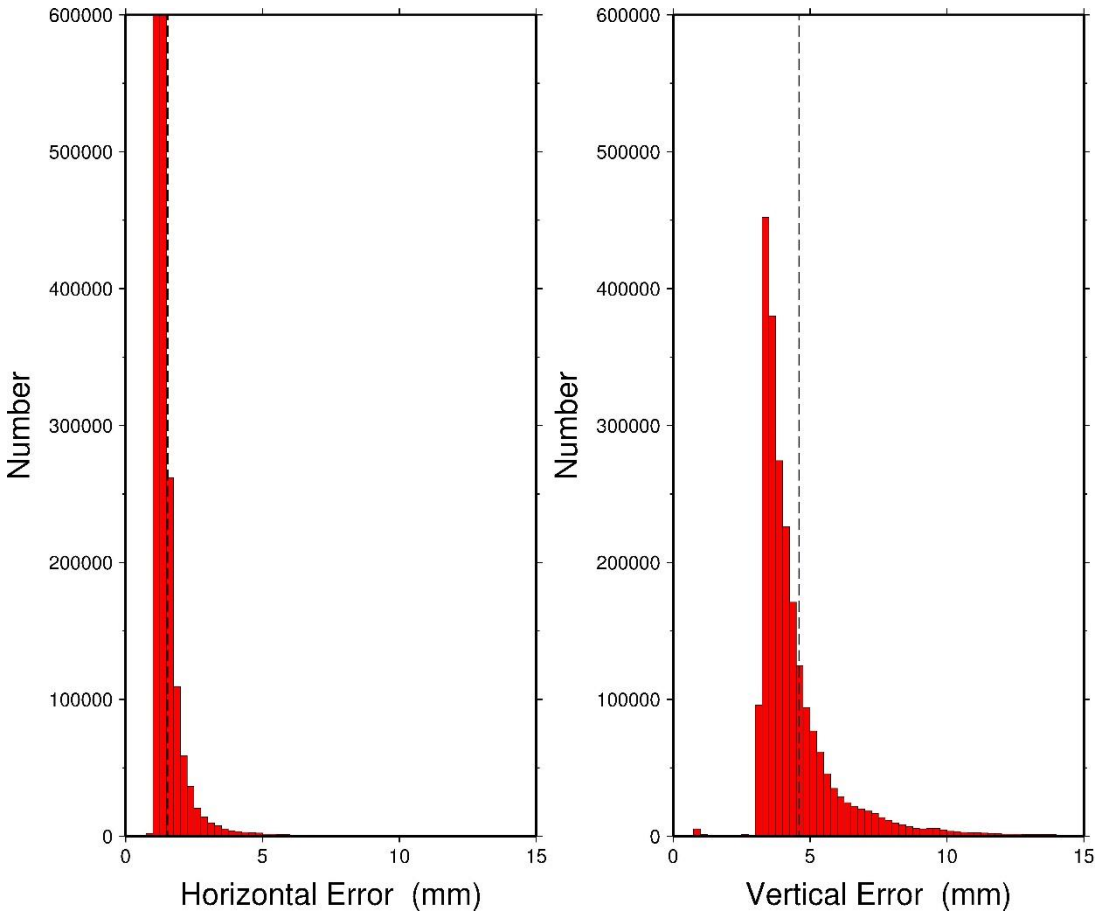


圖 8-1.4：2003 – 2022 年 GNSS 點位均方根誤差分布圖。
Figure 8-1.4: GNSS RMS error during 2003 – 2022.

8-1-3 GNSS 連續站資料處理與資（/雜）訊分析

前節中利用最小平方法進行坐標時間序列擬合時，需限定所有的係數，包括斜率及週期函數的振幅等，為不隨時間而變的常數。然而地表運動的長期速率與週期性變化可能均為時間相關（time dependent），此時以最小平方法擬合出的模型便會與實際有所偏差，導致趨勢（斜率）及週期性訊號等混雜在殘差之中，造成雜訊模型及模型參數之錯誤估計。考量此項因素，本節嘗試以卡曼濾波法（Kalman filtering）對模型參數進行動態擬合，此方法最大的特色，就是可讓模式中各項係數在給定的協方差矩陣約制下隨時間進行變動，以利最佳化描述觀測資料，提高訊噪比並"過濾"出更真實的訊號（如地表下陷趨勢等）。

此外，許多文獻指出 GNSS 時間序列普遍存在時間相關的雜訊，稱為色雜訊（color noise），如 flicker noise 或 random-walk noise 或其組合等，有別於時間上獨立（time independent）的白雜訊（white noise）。由於色雜訊成分會因時間序列

而異，本文選擇在系統的狀態函數中引入自回歸移動平均模型（ARMA）做為色雜訊之假設模型（e.g., Didova et al., 2016）。根據一些相關研究成果及本計畫的測試，本文選擇 AR(3)作為色雜訊之合理參考模型，以利描述臺灣 GNSS 測站中普遍存在的閃爍雜訊（flicker noise, e.g., 李宥葭，2018）。

圖 8-1.5 為地調所測站 GS22（彰化快官交流道站）垂直分量的卡曼濾波分析結果，可以看出無論在趨勢或振幅變化上，卡曼濾波都能更有效地描述資料隨時間的變化，且所得之斜率、年週期、半年週期等分項都具有顯著的時變性質。在 AR(3)色雜訊的頻譜分析上，其高頻部分（>30 cpy）具有明顯的冪次方衰減（power-law decay），與一般認定 GNSS 訊號所具有的 power-law noise 一致。值得注意的是，圖 8-1.5 中卡曼濾波分析所得之 GS22 垂直雜訊振幅在約 2020 年中後有明顯增大的趨勢，此現象於此站水平分量時間序列中的離散程度亦可清楚看出（圖 8-1.6），顯示 GS22 的訊號品質確有問題。除了測站環境劣化的可能性外（Google 衛星圖顯示 GS22 附近植被十分茂盛），地調所的 GPS 測站維修紀錄也顯示該站於 2018 年底至 2021 年中曾多次更換過儀器（3 次接收儀及 2 次天線）。是否此現象與儀器有關也須請地調所加以檢視。

由上例可知雜訊振幅可做為判斷測站資料品質或環境因素改變之參考。因此本文將地調所全臺 97 個測站之三分量時間序列均以卡曼濾波分析其 AR(3)色雜訊與殘差雜訊之振幅，並將結果以統計柱狀圖呈現（圖 8-1.7）。由圖可看出水平分量的雜訊多小於~4 mm，比較顯著的離群點（outliers）為 GS10（竹圍國中）與 GS28（中崙加壓站），且此兩站的垂直分量亦有最大的雜訊振幅。圖 8-1.8 是這兩站的時間序列與 KF 擬合圖，其中 GS10 於 10/2021 更換了儀器（receiver and antenna），之後其序列的發散程度有明顯收斂。GS28 於 2021 相近的時間點也有同樣的變化，但沒有找到此時的儀器更換紀錄，因此改善之原因不明。由以上這兩例可說明，更換儀器，或可能是更換儀器時順便對測站環境進行改善工作（如除草），可對其訊號品質產生明顯的影響。

垂直分量的雜訊振幅則相對較大且分佈較為離散，大部分都小於 8 mm。明顯的離群點（>10 mm）除了上述的 GS10 及 GS28 外，還 GS73（新光國小）、GS66（達邦）、GS69（樹林垃圾掩埋場）、GS43（果毅國小）、GS95（八煙）等站。這其中前四站均為建站接近或超過 10 年，分析結果也顯示近 3~5 年不論是色雜訊或殘差（白）雜訊的振幅均明顯變高（圖 8-1.9、圖 8-1.10），尤其是 GS66、

GS69、GS43 等三站於本研究期中報告時均不在離群點內，顯示近一年來它們的資料品質持續惡化。此外，這幾站時間序列的發散均與儀器更換的時間點並沒有很好的對應，也沒有測站環境改變（如植被變化）的紀錄作為佐證，因此儀器更換是否為造成雜訊振幅改變之因素仍需加以驗證。

在大屯火山區的 GS95 測站方面，圖 8-1.11 顯示在 2018 年初建站的一年內，其雜訊振幅值就顯著增加，但在 2022 年初時這些振幅與序列的發散程度均有明顯改善。由於我們並無此站的儀器更換紀錄，故猜測其雜訊振幅的降低應與測站環境因素改善有關（如除草）。但圖 8-1.11 也顯示在資料分析的末期（2022 年 10 月）其雜訊與時間序列誤差似乎有增加的趨勢，因此提醒地調所或許應再次進行此站的維修（護）工作，以確保資料品質。

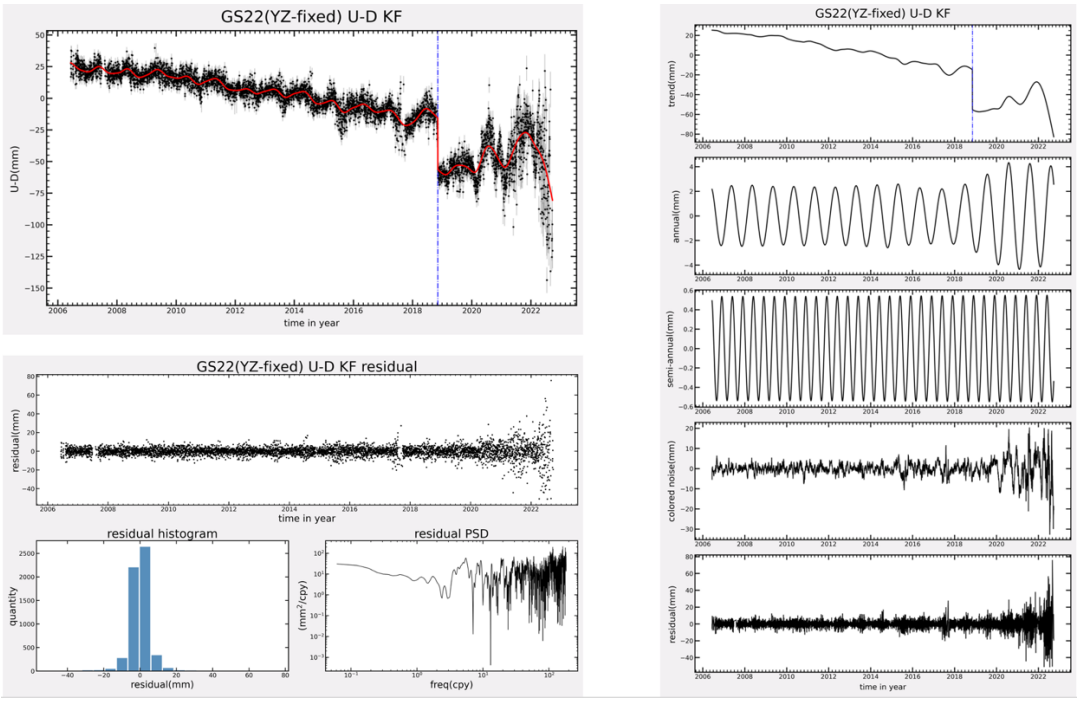


圖 8-1.5：地調所測站 GS22（彰化快官交流道站）垂直分量的卡曼濾波分析結果。左上子圖為原始時間序列（黑點）與卡曼濾波之擬合曲線（紅線）；左下子圖為擬合所得之色雜訊頻譜圖；右邊各子圖由上而下分別為擬合所得之斜率（或趨勢 trend）、年週期訊號的 sin 及 cos 分量、半年週期訊號的 sin 及 cos 分量、AR(3)色雜訊、殘差（residual）。斜率序列中藍色虛線所示之錯移（offset）為該站於 2018 年 11 月 8 日更換天線所造成。

Figure 8-1.5: Kalman-filter (KF) analysis for the vertical time series of GS22. (Left-up): the original time series data (black dots) and the KF fitting curve (red line); (Left-bottom); Left-bottom: power spectrum density, or PSD, of the AR(3) color noise obtained from KF, with the red line showing the decay of PSD with frequency; (Right): Different components of the time series from KF, from top to bottom: the slope or the trend, the sine and cosine parts of the annual oscillation, the sine and cosine parts of the semi-annual oscillation, the AR(3) color noise, and the residual noise. The blue-dash line in the slope part indicates the change of station antenna.

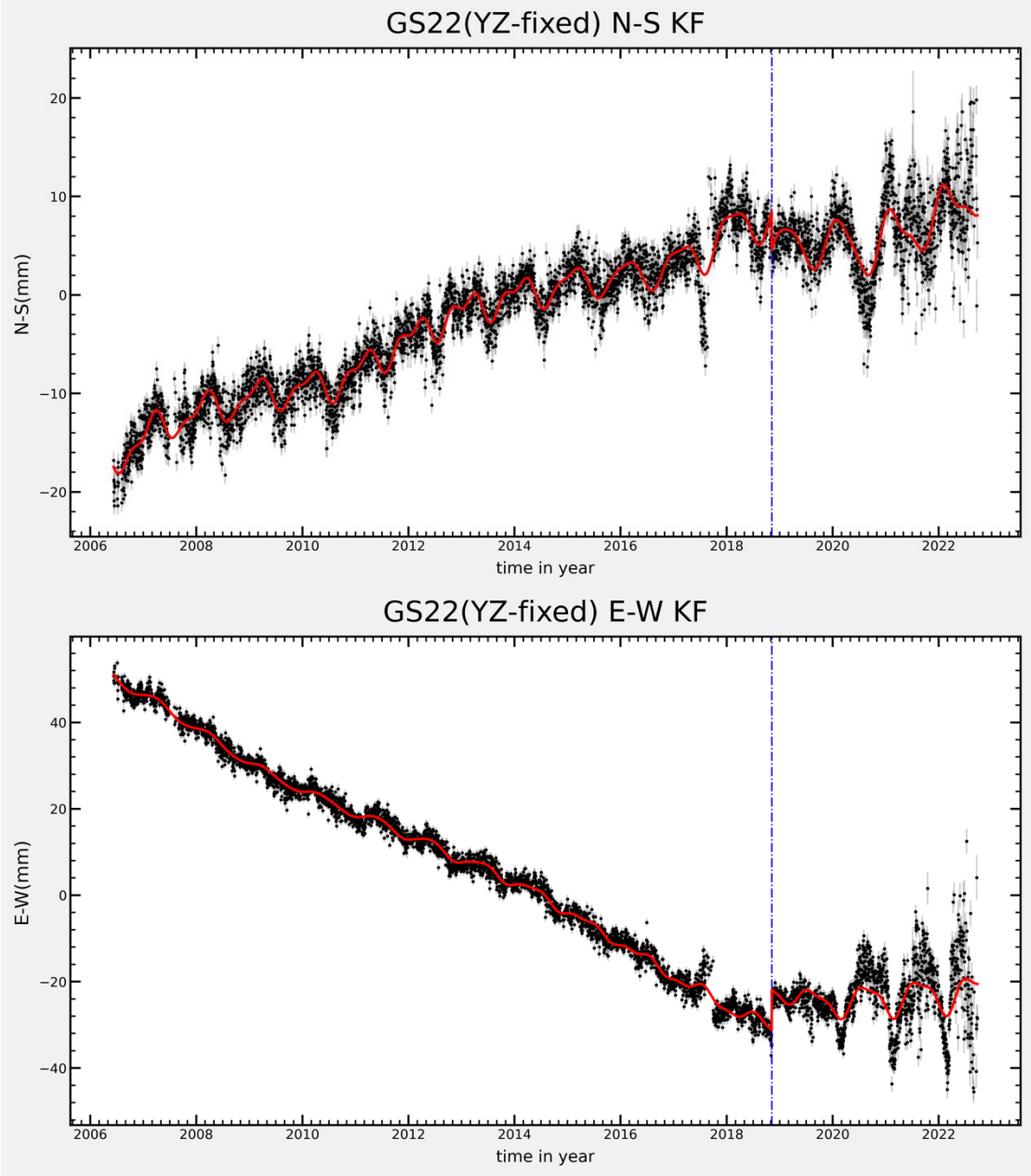


圖 8-1.6：地調所測站 GS22 之南北（上方）與東西（下方）分量之時間序列。紅色曲線為卡曼濾波之擬合結果，藍色虛線所示之錯移（offset）為該站於 2018 年 11 月 8 日更換天線所造成。
Figure 8-1.6 : The north-south (top) and east-west (bottom) time series of GS22, with red lines showing the KF-fitting results. The blue-dash line indicates the change of station antenna.

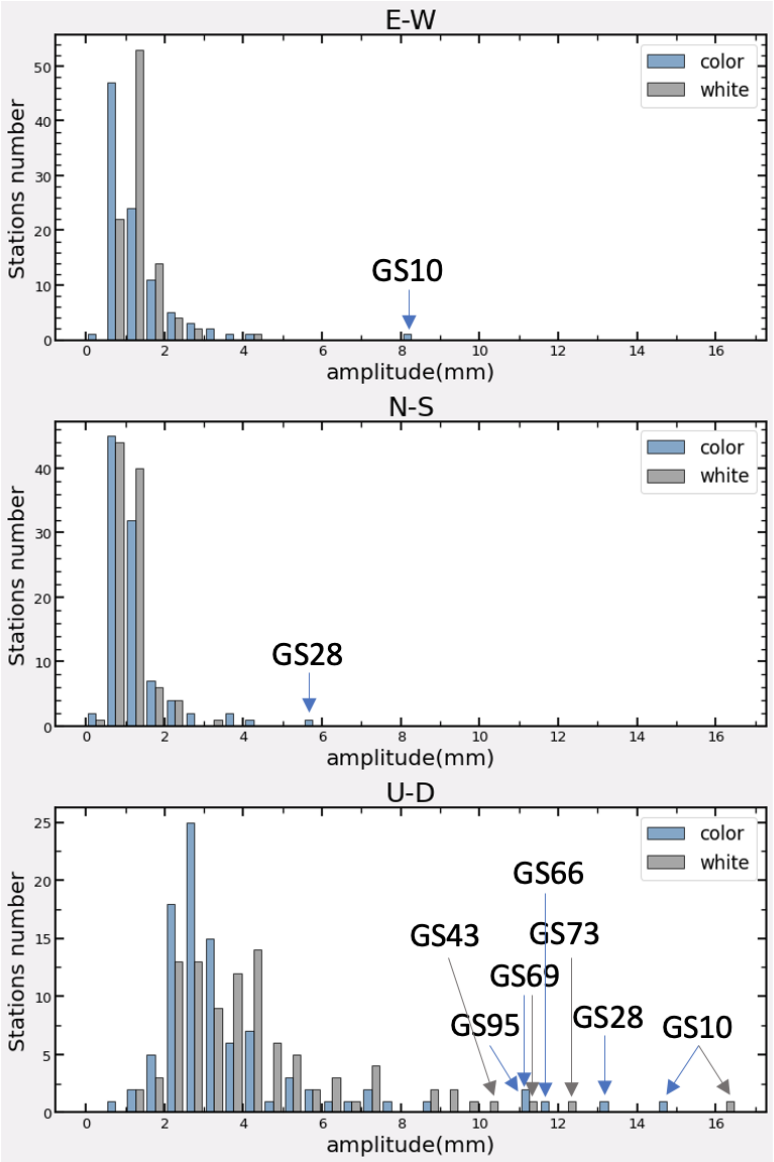


圖 8-1.7：地調所全臺 97 個測站三分量時間序列之卡曼濾波雜訊分析。柱狀圖橫軸為振幅值，縱軸為該振幅值區間（±0.1 mm）的測站數目。藍色代表 AR(3)色雜訊，灰色為殘差雜訊。

Figure 8-1.7 : Histograms show amplitude ranges of three-component noises of the 97 GNSS stations installed and maintained by the Central Geological Survey. Blue and gray bars indicate the AR(3) color noise and residual noise from our KF analysis, respectively, and the bar width indicates ±0.1 mm. Few outliers with station names are discussed in the main text.

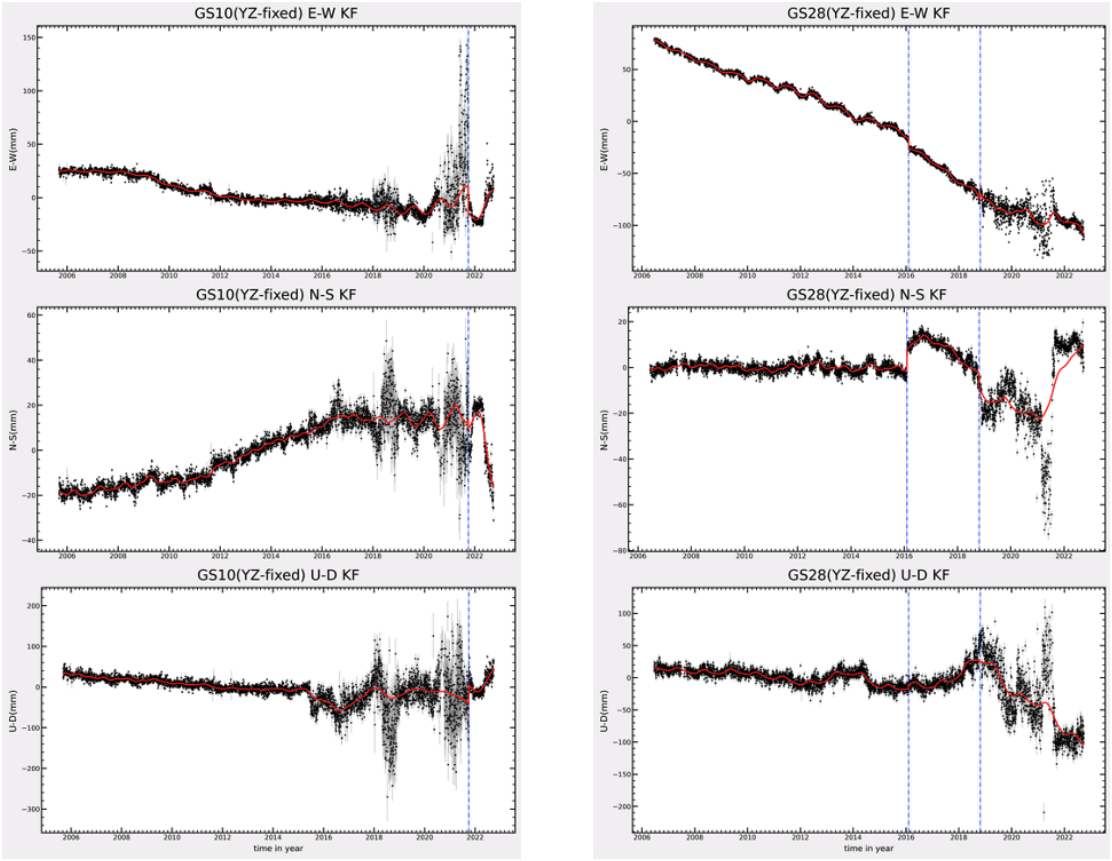


圖 8-1.8：地調所測站 GS10（竹圍國中）與 GS28（中崙加壓站）之三分量時間序列（黑點）與其卡曼濾波擬合（紅線）。GS10 於 10/2021 與 GS28 於 10/2018 的藍色虛線表示儀器更換，而 GS28 於 02/2016 的藍色虛線表示 2016 美濃地震發生日期。

Figure 8-1.8 : Three-component time series (black dots) and their KF fitting curve (red lines) of the CGS GPS stations GS10 (left) and GS28 (right). Blue dash lines indicate instrument changes (10/2021 for GS10 and 10/2018 for GS28) and the occurrence of the 2016 MeiNong earthquake (02/2016 for GS28).

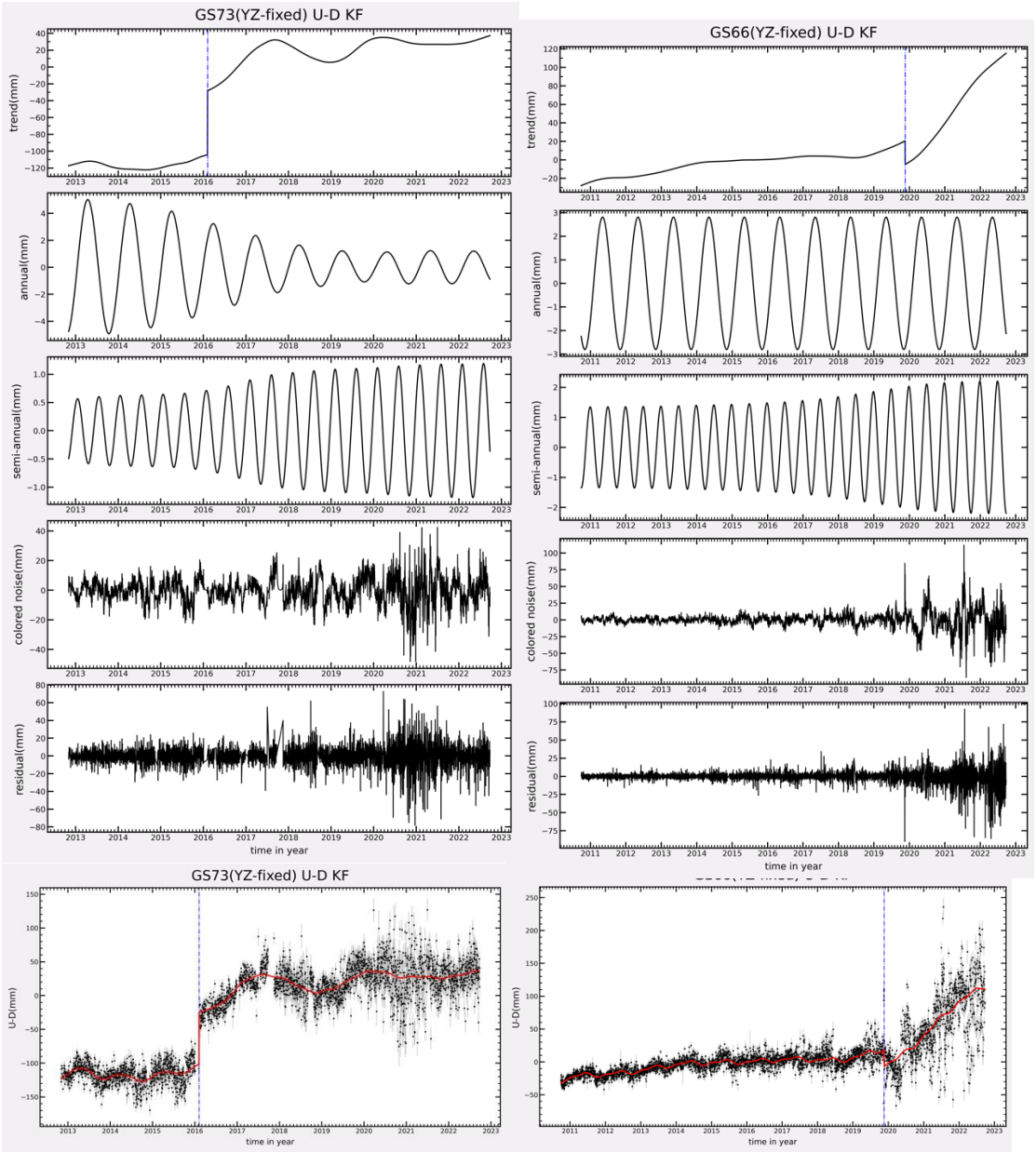


圖 8-1.6：地調所測站 GS73（新光國小）與 GS66（達邦）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明請見圖 8-1.5。GS73 與 GS66 中的藍色虛線分別對應的是 2016 年美濃地震與 2019 年底之儀器更換。

Figure 8-1.9 : Vertical time series and their KF analysis of the stations GS73 (left) and GS66 (right). See Figure 8-1.5 for subplot interpretations. The blue-dash lines in GS73 and GS66 indicate the 2016/2/6 MeiNong earthquake and an instrument change, respectively.

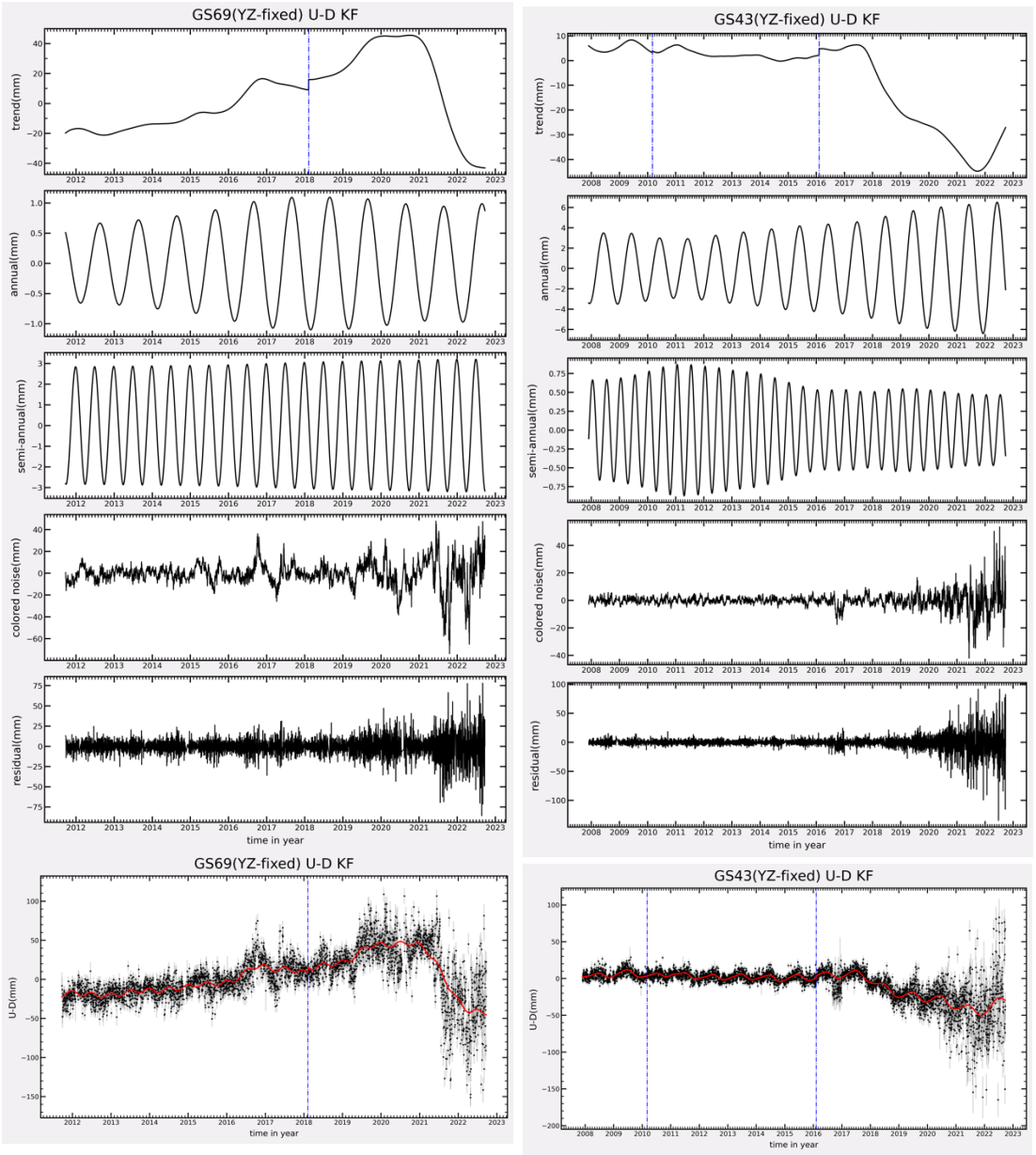


圖 8-1.10：地調所測站 GS69（樹林垃圾掩埋場）與 GS43（果毅國小）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明請見圖 8-1.5。GS69 與 GS43 中的藍色虛線分別對應的是 2018 年花蓮地震與 2016 年美濃地震。

Figure 8-1.10 : Vertical time series and their KF analysis of the stations GS69 (left) and GS43 (right). See Figure 8-1.5 for subplot interpretations. The blue-dash lines in GS69 (left) and GS43 (right) indicate the 2018 Hualien and the 2016 MeiNong earthquakes, respectively.

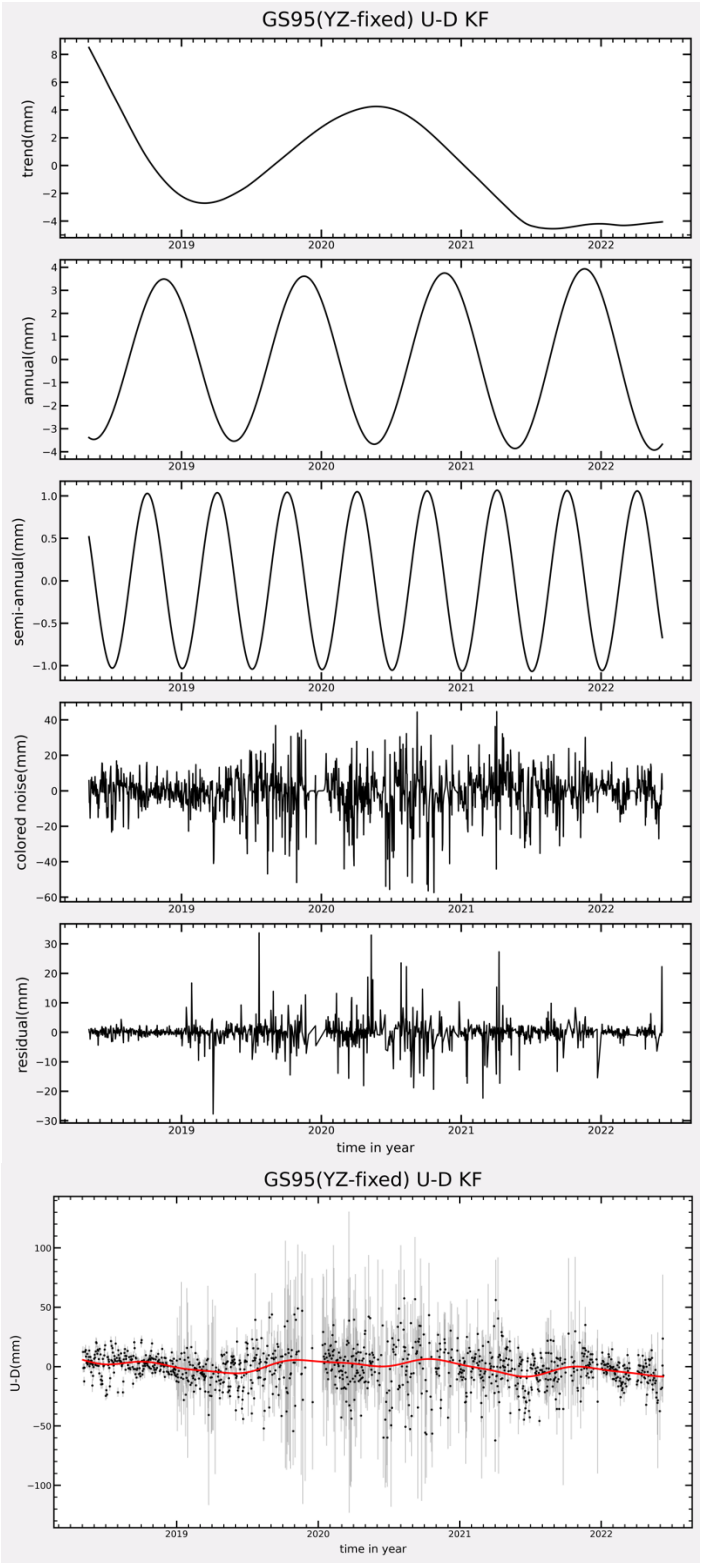


圖 8-1.7：地調所測站 GS95（大屯火山區八煙站）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明請見圖 8-1.5。

Figure 8-1.11 : Vertical time series and its KF analysis of the stations GS95. See Figure 8-1.5 for interpretations for all subplots.

8-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析

8-2-1 本年度（2022 年）GNSS 移動站抽樣檢核

本年度 GNSS 移動站臺北地區於 3 月 1 日至 12 日完成 76 個點位施測、恆春地區於 4 月 6 日至 9 日完成 39 點位施測、花東地區於 4 月 12 日至 20 日完成 100 個點位施測、桃竹苗地區於 5 月 9 日至 20 日完成 89 個點位施測、嘉南地區於 6 月 6 日至 29 日完成 189 個點位施測、高屏地區於 7 月 4 日至 21 日完成 130 個點位施測、中部地區於 8 月 8 日至 25 日完成 153 個點位施測，共計完成 776 點 GNSS 移動站的施測（圖 8-2.1）；今年度因東部地震頻繁，因此震後之檢測為主，宜蘭地區之 GNSS 移動站施測暫緩。

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。

GNSS 移動站檢核已全數完成測量外檢核：臺北地區於 3 月 21 日及 4 月 6 日完成 8 個點位施測檢核，恆春地區於 4 月 12 日完成 4 個點位施測檢核，花東地區於 4 月 26 日至 27 日完成 10 個點位施測檢核、桃竹苗地區於 6 月 27 日至 28 日完成 9 個點位施測檢核、嘉南地區於 7 月 5 日至 7 月 7 日完成 15 個點位施測檢核、高屏地區於 7 月 19 日至 7 月 20 日完成 10 個點位施測檢核、中部地區於 9 月 6 日至 9 月 7 日完成 10 個點位施測檢核（表 8-2.1）。

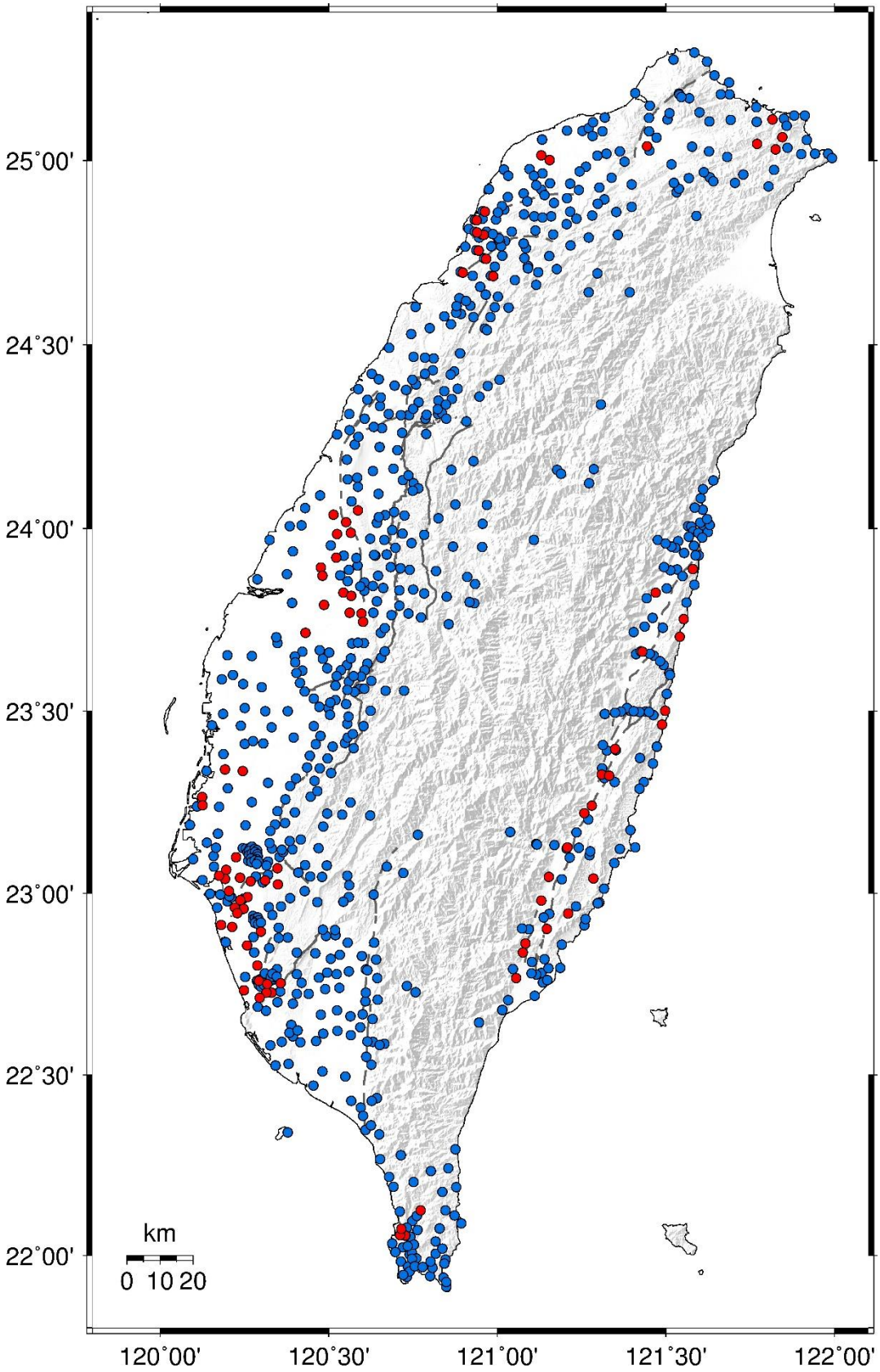


圖 8-2.1：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖。藍色圓圈為施測點位，紅色圓圈為檢核點位。

Figure 8-2.1: Distribution of surveyed campaign-mode GNSS stations and check points. Blue circles are surveyed stations. Red circles are checked points.

臺北地區共有 76 個移動站點位數，故在此區選擇 8 個點位進行檢核，共有 28 條基線。本區 28 條基線之長度落在 2,900 m 至 72,294 m，基線差規範值在 5.6 mm 至 19.7 mm 之間，計算後的基線差在 0.3 mm 至 8.2 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

恆春地區共有 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 1,574 m 至 9,976 m，基線差規範值在 5.3 mm 至 7.0 mm 之間，計算後的基線差在 1.7 mm 至 5.2 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

花東地區共有 100 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 45 條基線。本區 45 條基線之長度落在 2,307 m 至 75,931 m，基線差規範值在 5.6 mm 至 20.2 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 19.5 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

桃竹苗地區共有 89 個移動站點位數，故在此區選擇 9 個點位進行檢核，共有 36 條基線。本區 36 條基線之長度落在 2,201 m 至 19,619 m，基線差規範值在 5.9 mm 至 21.1 mm 之間，計算後的基線差在 3.9 mm 至 16.8 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

嘉南地區共有 189 個移動站點位數，故在此區選擇 19 個點位進行檢核，共有 171 條基線。本區 105 條基線之長度落在 1,902 m 至 18,344 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 114.8 mm 之間，計算後的基線差在 0.4 mm 至 8.6 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

0620 地震後於花東地區共有 36 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 543 m 至 1,843 m，基線差規範值在 5.7 mm 至 9.1 mm 之間，計算後的基線差在 3.1 mm 至 5.4 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

高屏地區共有 130 個移動站點位數，故在此區選擇 13 個點位進行檢核，共有 78 條基線。本區 45 條基線之長度落在 1,558 m 至 25,809 m，基線差規範值在 5.5 mm 至 25.0 mm 之間，計算後的基線差在 3.1 mm 至 12.4 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

中部地區共有 153 個移動站點位數，故在此區選擇 15 個點位進行檢核，共有 105 條基線。本區 45 條基線之長度落在 2,517 m 至 24,862 m，基線差規範值

在 5.5 mm 至 19.7 mm 之間，計算後的基線差在 0.7 mm 至 9.4 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

0918 地震後於花東地區共有 80 個移動站點位數，故在此區選擇 8 個點位進行檢核，共有 28 條基線。本區 28 條基線之長度落在 4,308 m 至 124,912 m，基線差規範值在 4.4 mm 至 14.4 mm 之間，計算後的基線差在 1.9 mm 至 7.5 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

表 8-2.1：GNSS 移動站施測與檢核時間表

Table 8-2.1: Schedule of campaign-mode GNSS surveying, supervising and validation

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
76	臺北	**8**	2022/03/01 ~ 2022/03/12	2022/03/21、2022/04/06
39	恆春	**4**	2022/04/06 ~ 2022/04/09	20221/04/12
100	花東	**10**	2022/04/12 ~ 2022/04/20	2022/04/26 ~ 2022/04/27
89	桃竹苗	**9**	2022/05/09 ~ 2022/05/20	2022/06/27 ~ 2022/06/28
189	嘉南	**19**	2022/06/29 ~ 2022/06/29	2022/07/05 ~ 2022/07/06
36	花東	**4**	2022/07/05 ~ 2022/07/07	2022/07/14 ~ 2022/07/15
130	高屏	**13**	2022/07/04 ~ 2022/07/21	2022/07/19 ~ 2022/07/20
153	中部	**15**	2022/08/08 ~ 2022/08/25	2022/09/06 ~ 2022/09/07
80	花東	**8**	2022/10/03 ~ 2022/10/11	2022/10/18 ~ 2022/10/20

8-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析

如同 GNSS 連續站資料，在 GNSS 移動站資料解算部分，本計畫同樣採用 GipsyX 軟體求解各測站之坐標。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。

根據臺北、桃竹苗、恆春、花東、嘉南、高屏及中部地區之 GNSS 移動站監測成果，其坐標殘差之分布情形指出（圖 8-2.2），2002–2022 年 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.3 ± 8.2 mm；E 方向為-0.0 ± 10.4 mm；U 方向為-0.4 ± 21.6 mm。而 2002–2022 年平面坐標之均方根誤差平均值為 2.9 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 8.9 mm（圖 8-2.3）。

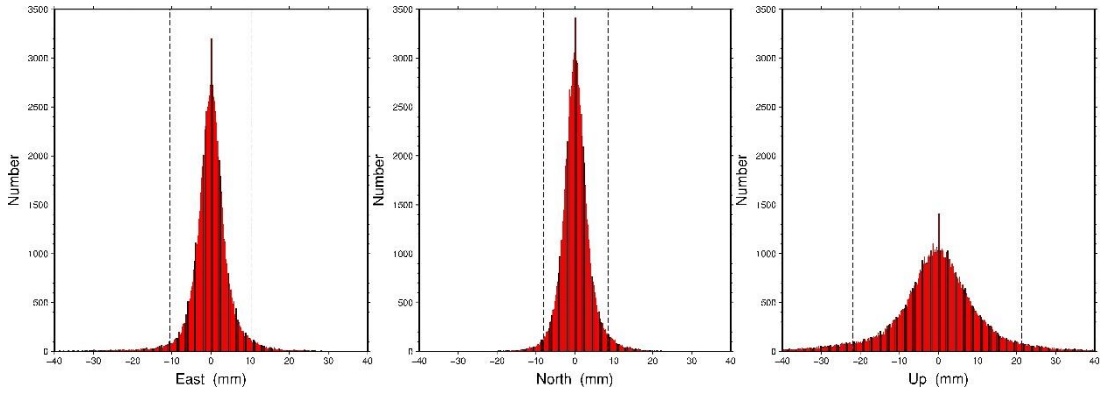


圖 8-2.2：2002 – 2022 年截至 10 月底 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 8-2.2: GNSS coordinates residuals during 2002 – Oct. 2022. The dashed lines indicate 95% confidence interval.

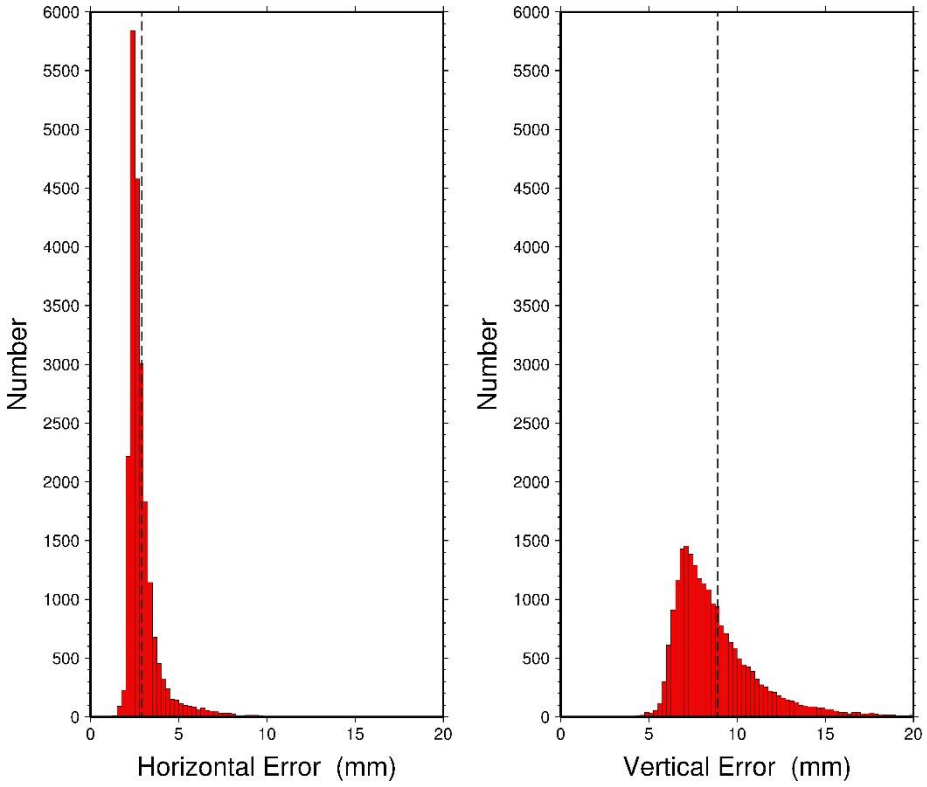


圖 8-2.3：2003 – 2022 年 GNSS 點位均方根誤差分布圖。
Figure 8-2.3: GNSS RMS error during 2003 – 2022.

8-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析

8-2-3-1 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 8-2.4）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站 76 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。

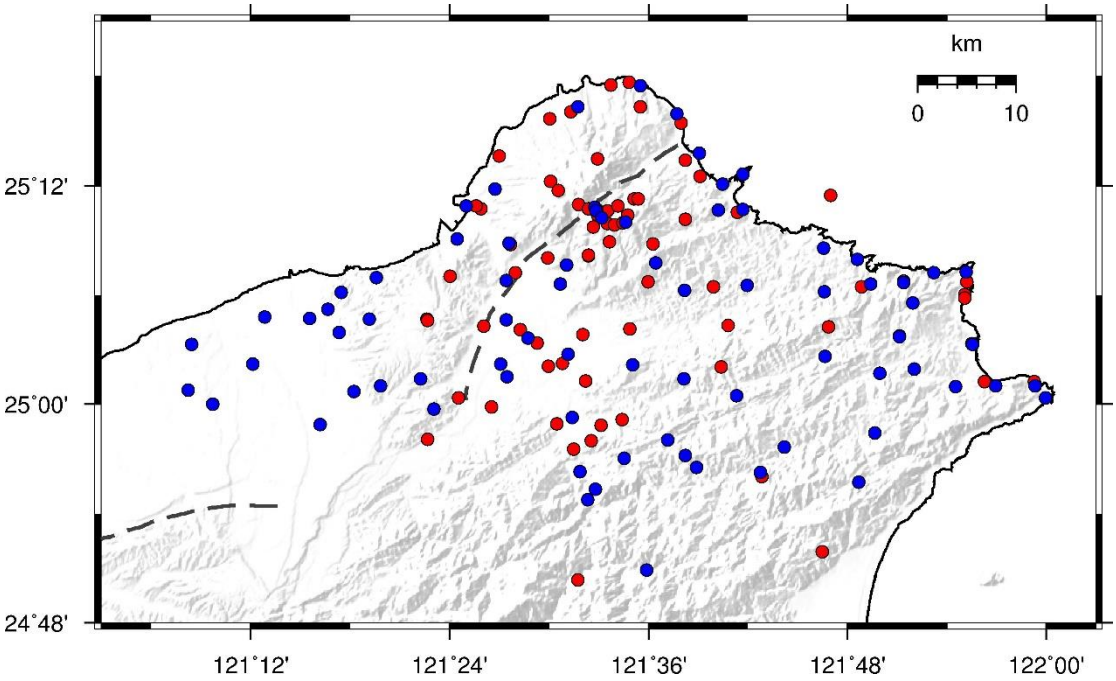


圖 8-2.4：臺北地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。
Figure 8-2.4: GNSS distribution in Taipei area. Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

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（圖 8-2.4），進行時間序列結果比較（圖 8-2.5、圖 8-2.6）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GB05 及連續站 YMSM（圖 8-2.5）與 GNSS 移動站 GG44 及連續站 GOLI（圖 8-2.6）。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 8-2.7 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2022 年之 GNSS 移動站速度場，由結果可知本區速度場 2002–2022 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 8-2.8 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。

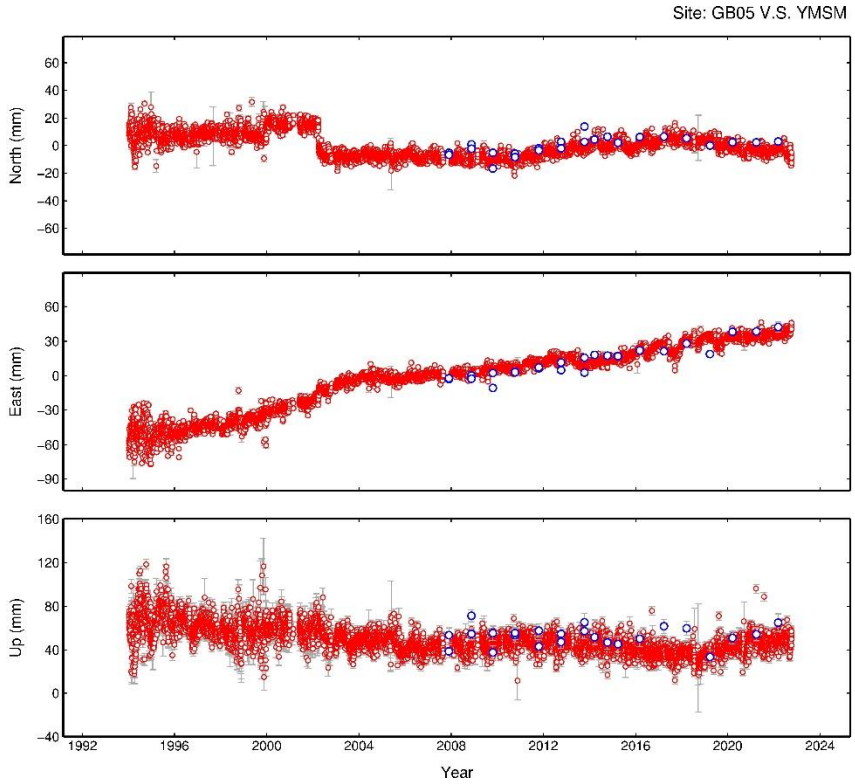


圖 8-2.5：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8-2.5: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GB05 (blue circles) and continuous GNSS station YMSM (red circles).

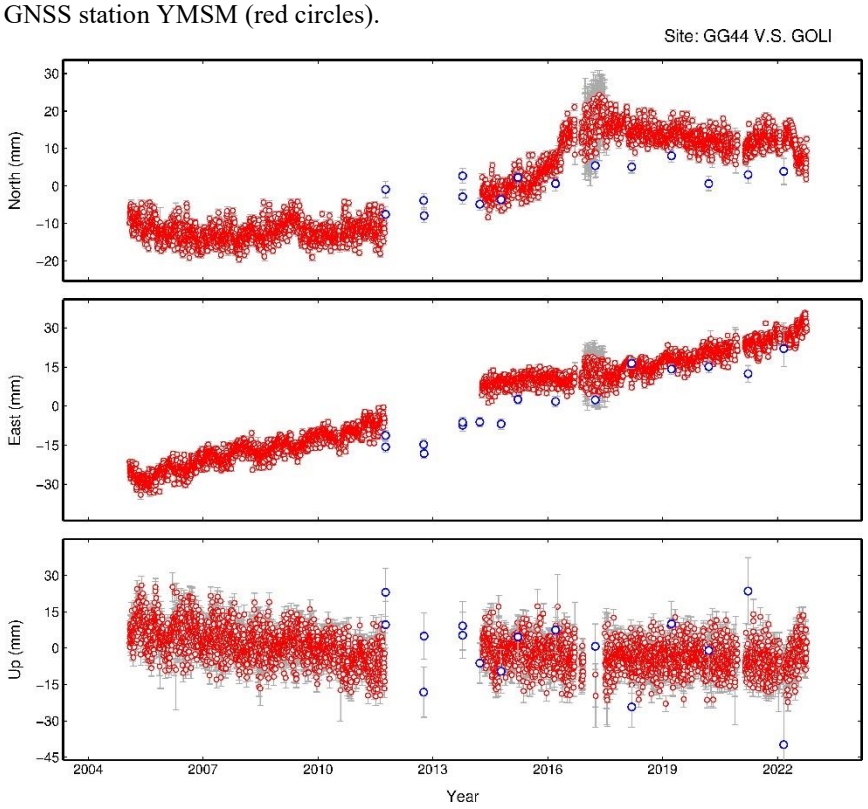


圖 8-2.6：移動站點位 GG44 與連續站 GOLI 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8-2.6: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GG44 (blue circles) and continuous GNSS station GOLI (red circles).

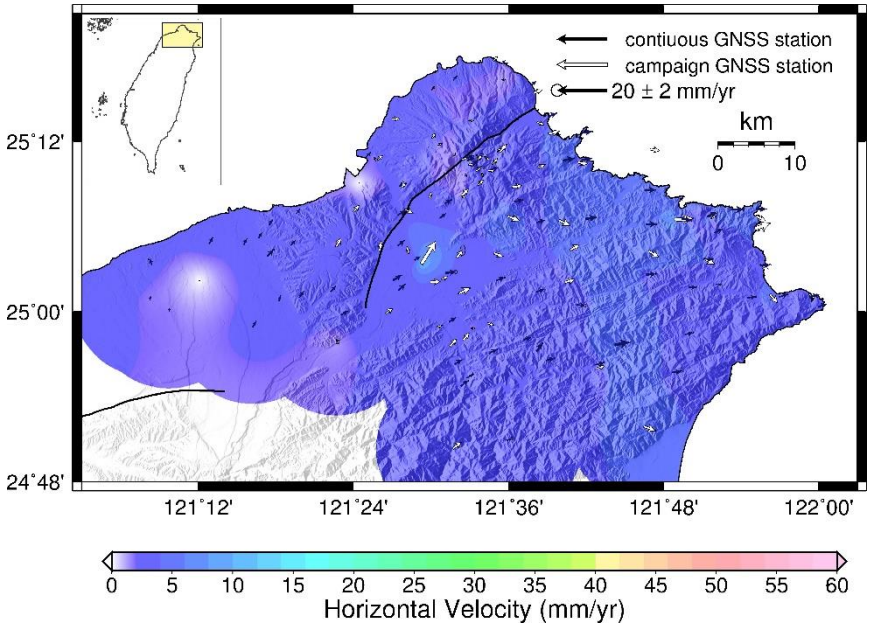


圖 8-2.7：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場，彩色色階為 2002 – 2022 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8-2.7: GNSS horizontal velocity field relative to station S01R in Taipei area. The colored map represents the horizontal velocities from 2004 to 2022. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

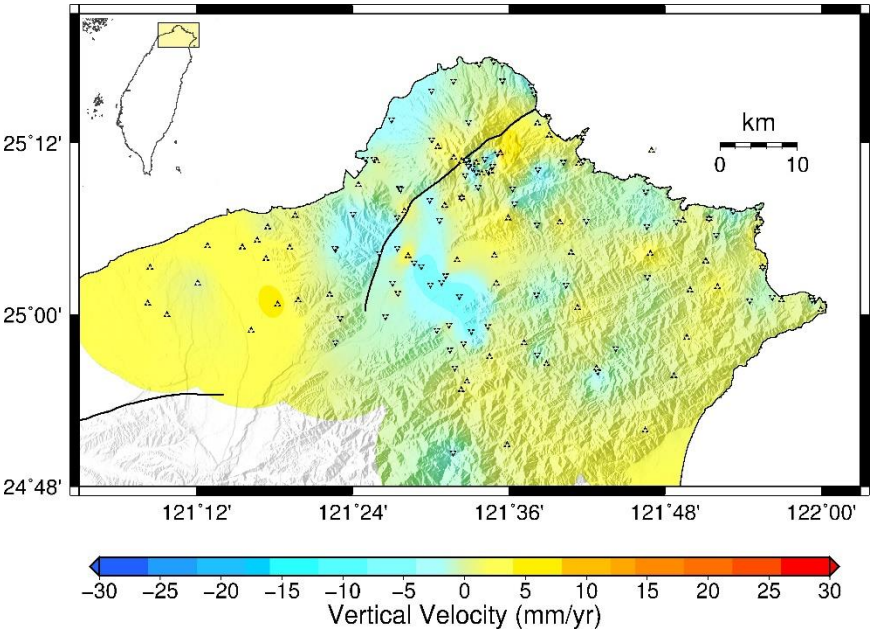


圖 8-2.8：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率，GNSS 觀測時間為 2004 – 2022 年。

圖 8-2.8: Vertical velocity field relative to station S01R in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The duration of GNSS observation is from 2004 to 2022.

8-2-3-2 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 39 點（圖 8-2.9），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。

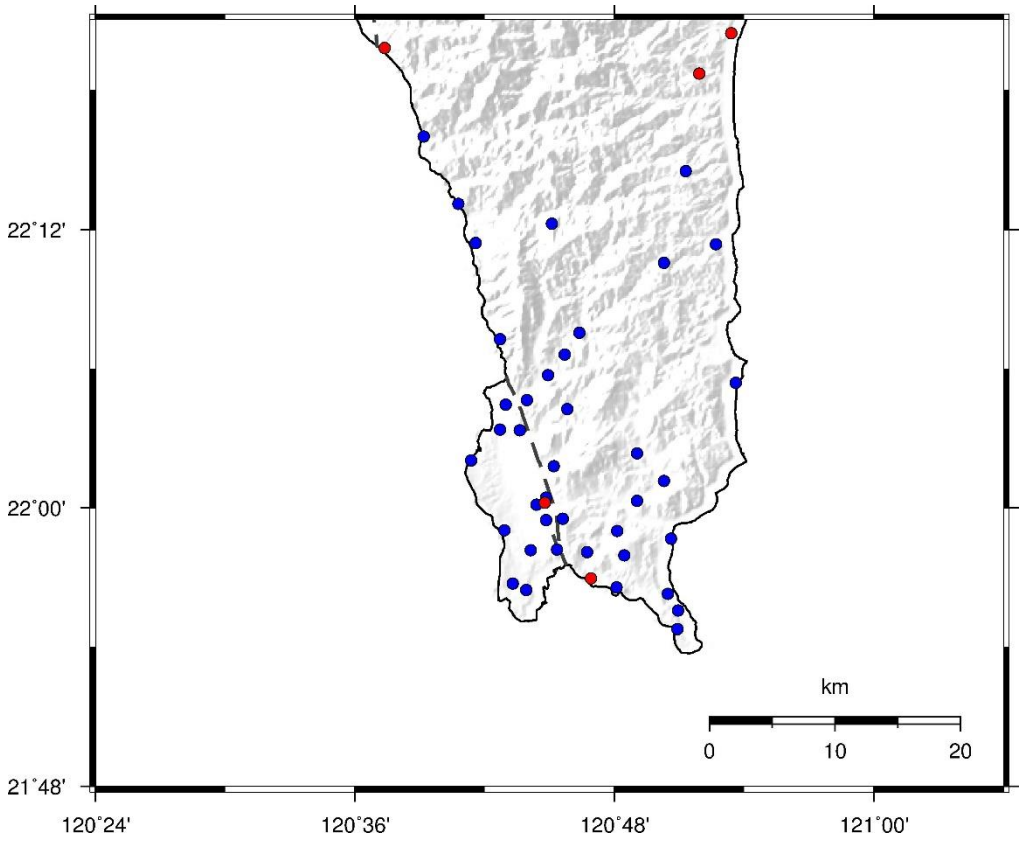


圖 8-2.9：恆春地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。
Figure 8-2.9: GNSS distribution in Hengchun area. . Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站對（圖 8-2.9），進行時間序列結果比較（圖 8-2.10、圖 8-2.11）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G669 及連續站 HENC（圖 8-2.10）與 GNSS 移動站 G643 及連續站 KDNM（圖 8-2.11）。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 8-2.12）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 8-2.13）指出，以斷層東邊約兩公里為分界，於 2010 年以後，西側為沉陷、東側為抬升。

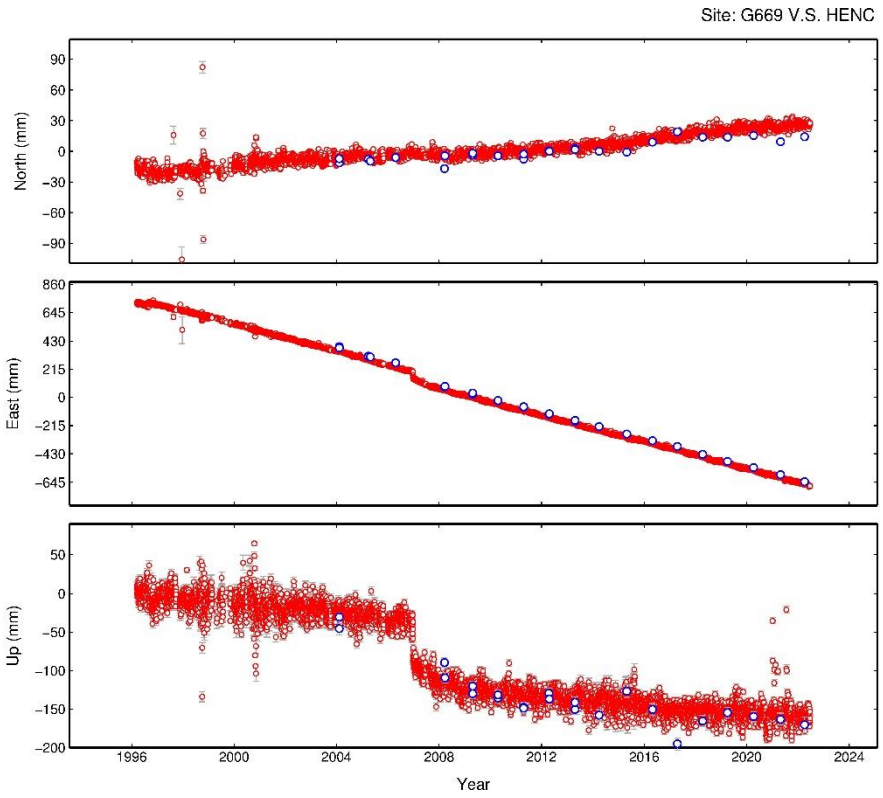


圖 8-2.10：移動站點位 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.10: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G669 (blue circles) and continuous GNSS station HENC (red circles).

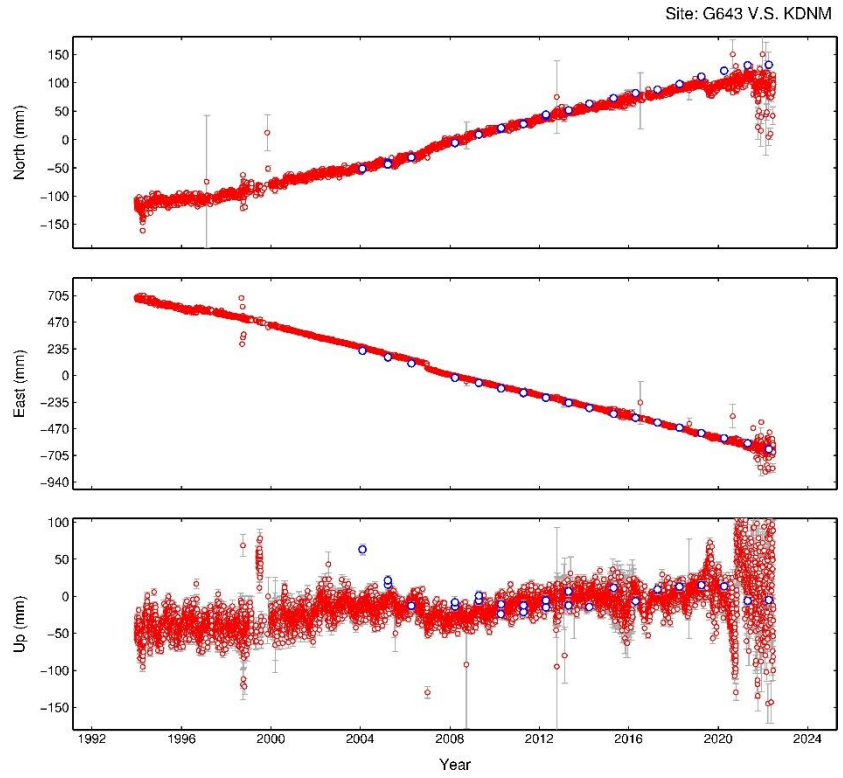


圖 8-2.11：移動站點位 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.11: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G643 (blue circles) and

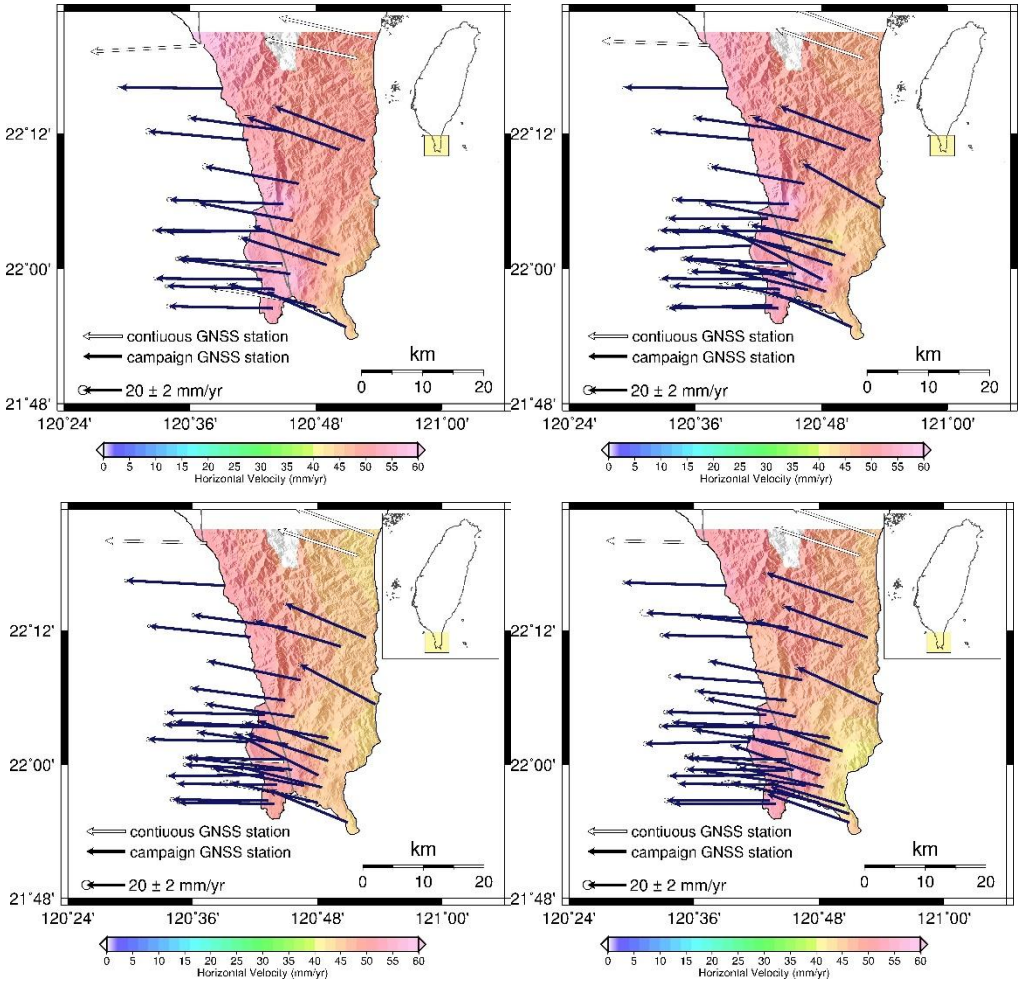


圖 8-2.12：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場。左上表示 2002 至 2006 年屏東外海地震前速度場，右上表示 2006 年震後至 2010 年之速度場，左下表示 2010 年至 2016 年速度場，右下為 2016 年至 2022 年速度場。

Figure 8-2.12: 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 – 2016 velocity field; th bottom right is the 2016 – 2022 velocity field.

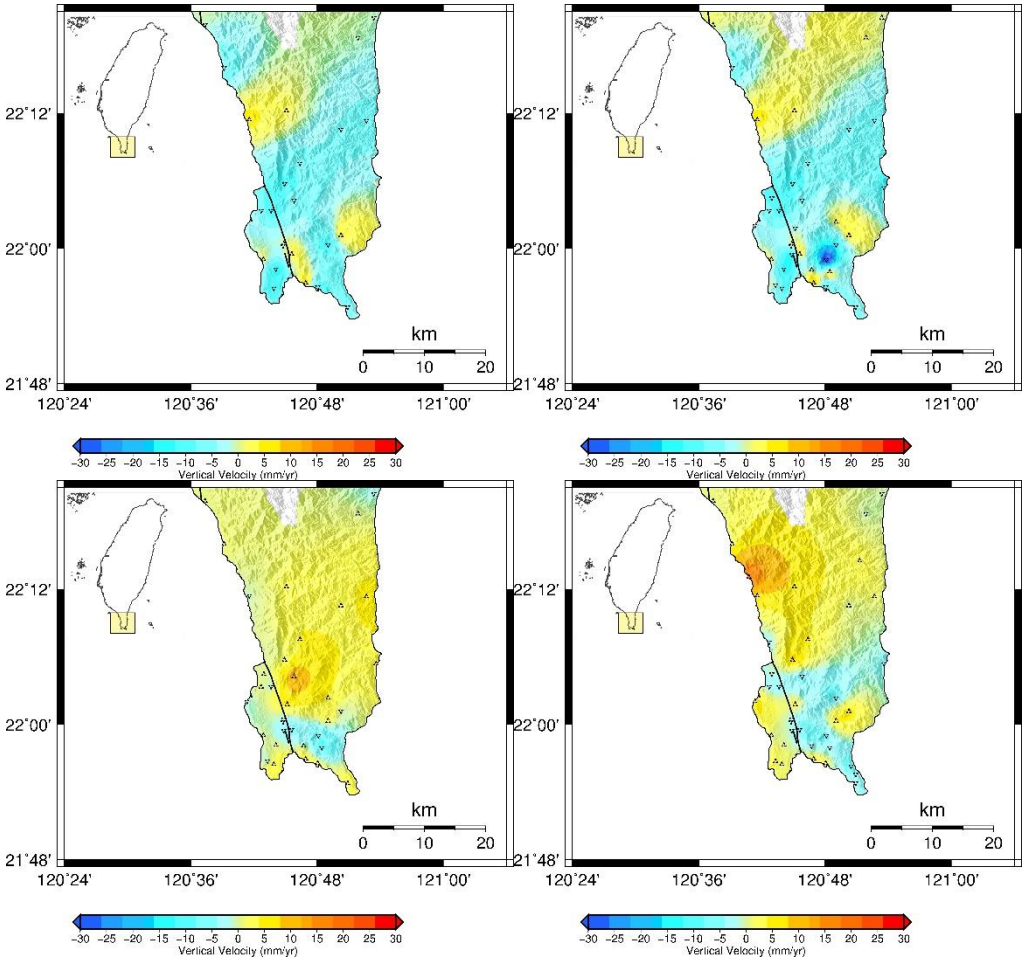


圖 8-2.13：恆春地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，左上表示 2002 至 2006 年屏東外海地震前速度場，右上表示 2006 年震後至 2010 年之速度場，左下表示 2010 年至 2016 年速度場，右下為 2016 年至 2022 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 8-2.13: 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 – 2016 velocity field; the bottom right is the 2016 – 2022 velocity field. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence.

8-2-3-3 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，已完成 GNSS 移動站 89 點（圖 8-2.14）。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。

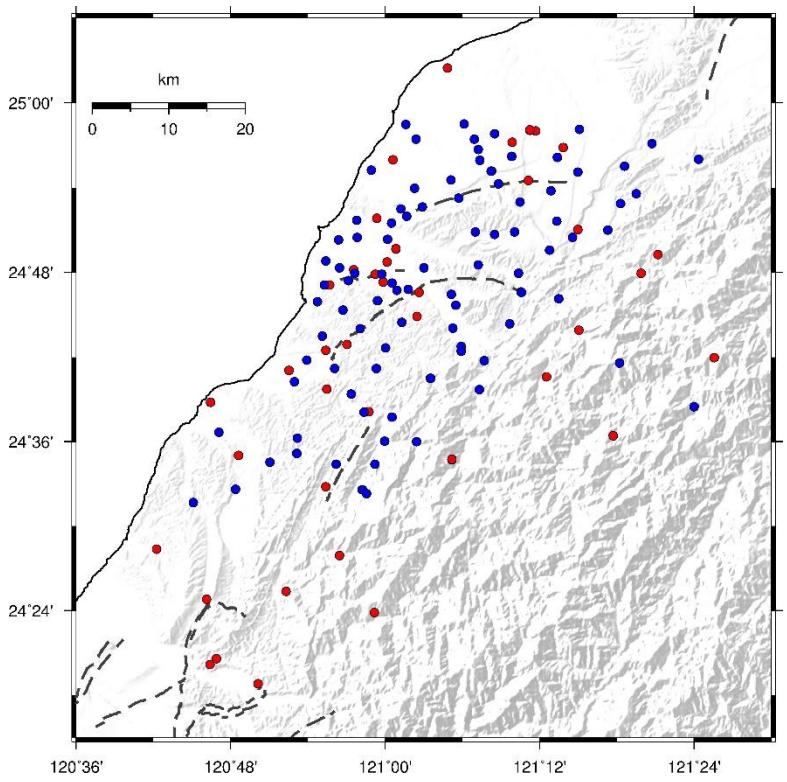


圖 8-2.14：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。

Figure 8-2.14: GNSS distribution in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

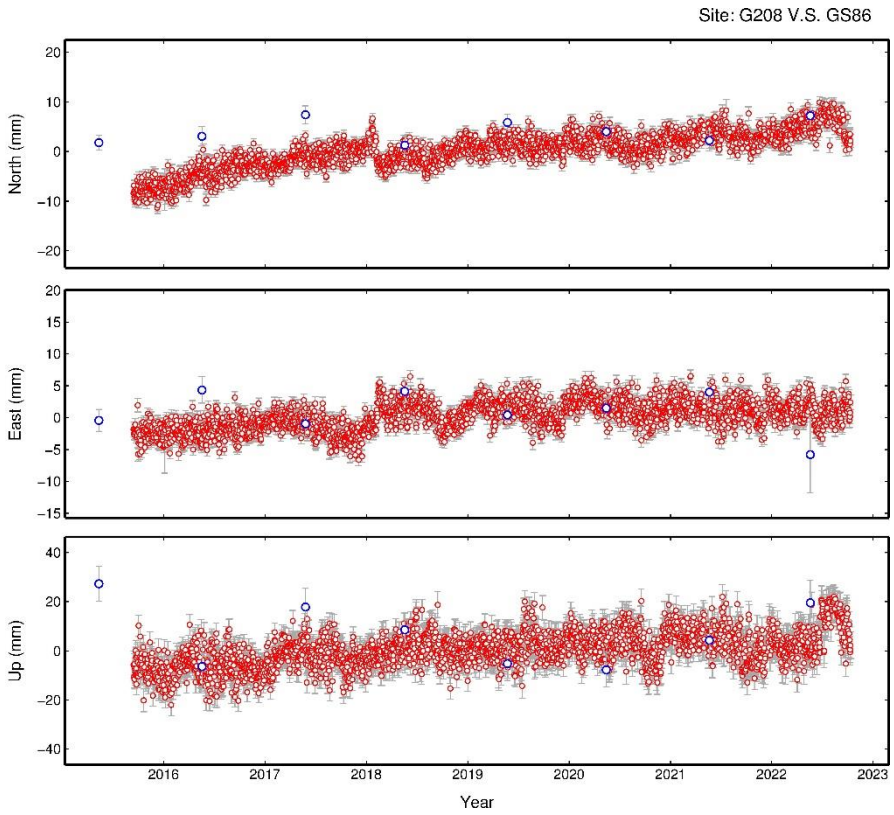


圖 8-2.15：移動站點位 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 8-2.15: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G208 (blue circles) and continuous GNSS station GS86 (red circles).

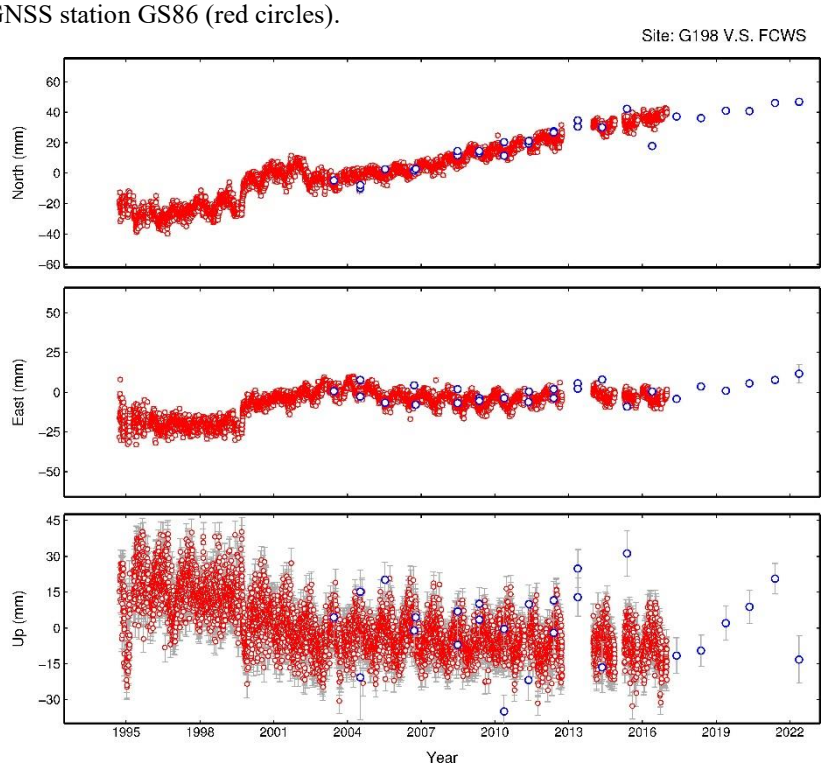


圖 8-2.16：移動站點位 G198 與連續站 FCWS 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.16: 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 8-2.14），進行時間序列結果比較（圖 8-2.15、圖 8-2.16）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G208 及連續站 GS86（圖 8-2.15）與 GNSS 移動站 G198 及連續站 FCWS（圖 8-2.16）。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 8-2.17）指出，本區於 2002–2022 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 8-2.18）指出，本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 8.0 mm/yr 內。

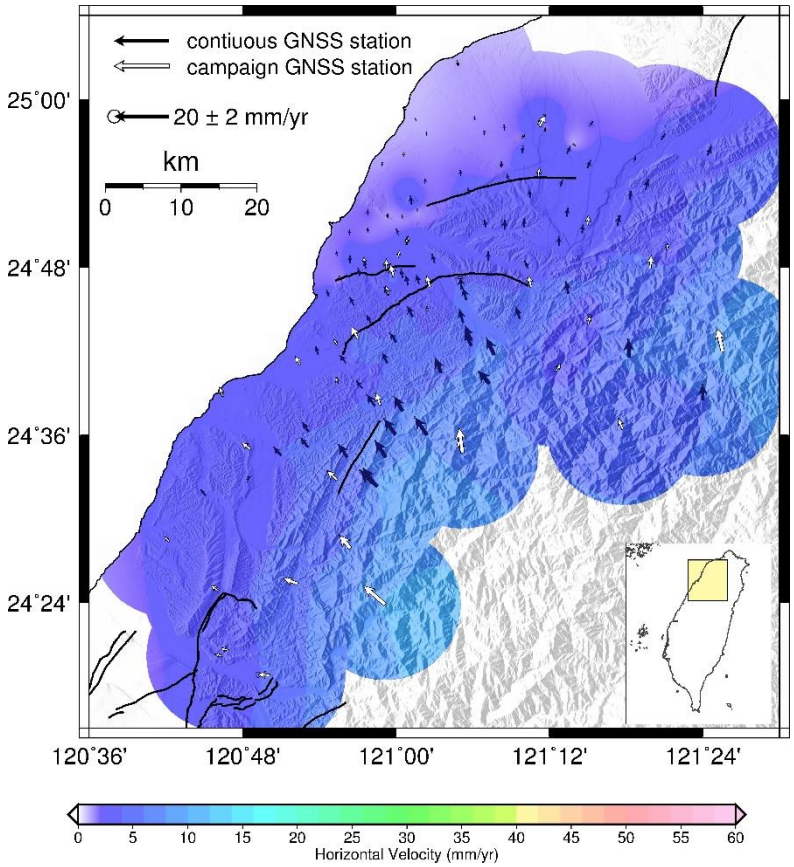


圖 8-2.17：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站 S01R 之 GNSS 水平速度場，彩色色階為 2002 – 2022 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8-2.17: 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.

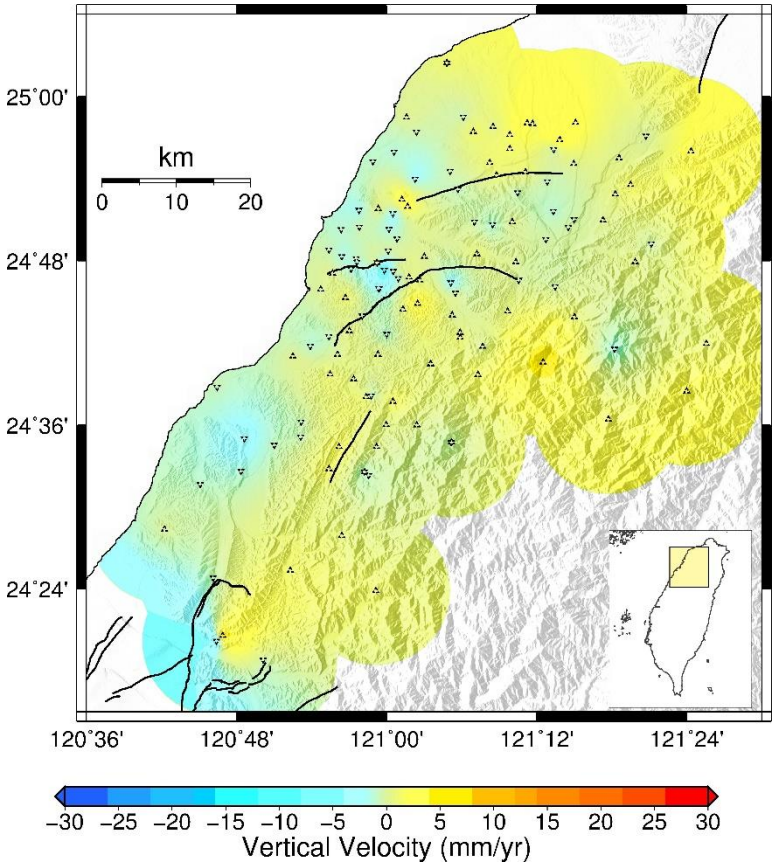


圖 8-2.18：桃竹苗地區 2002 – 2022 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 8-2.18: Vertical velocity field relative to station S01R in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2022. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence.

8-2-3-4 花東地區 GNSS 觀測網

今年已完成測量之花東地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站 100 點（圖 8-2.19）。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。

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 8-2.20、圖 8-2.21）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GE64 及連續站 PEPU（圖 8-2.20）與 GNSS 移動站 E415 及連續站 NDH3（圖 8-2.21），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 8-2.22 和圖 8-2.23， 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 2018–2022 年三個時間段分別估算速度場，2018 年花蓮地震後，於花蓮地區之水平速度場由西北運動轉為向西或西偏南運動，量值也較地震前小，震前約 20～30 mm/yr，地震後則為 10～15 mm/yr。

花東地區各觀測點位之速度場如圖 8-2.22 和圖 8-2.23，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。

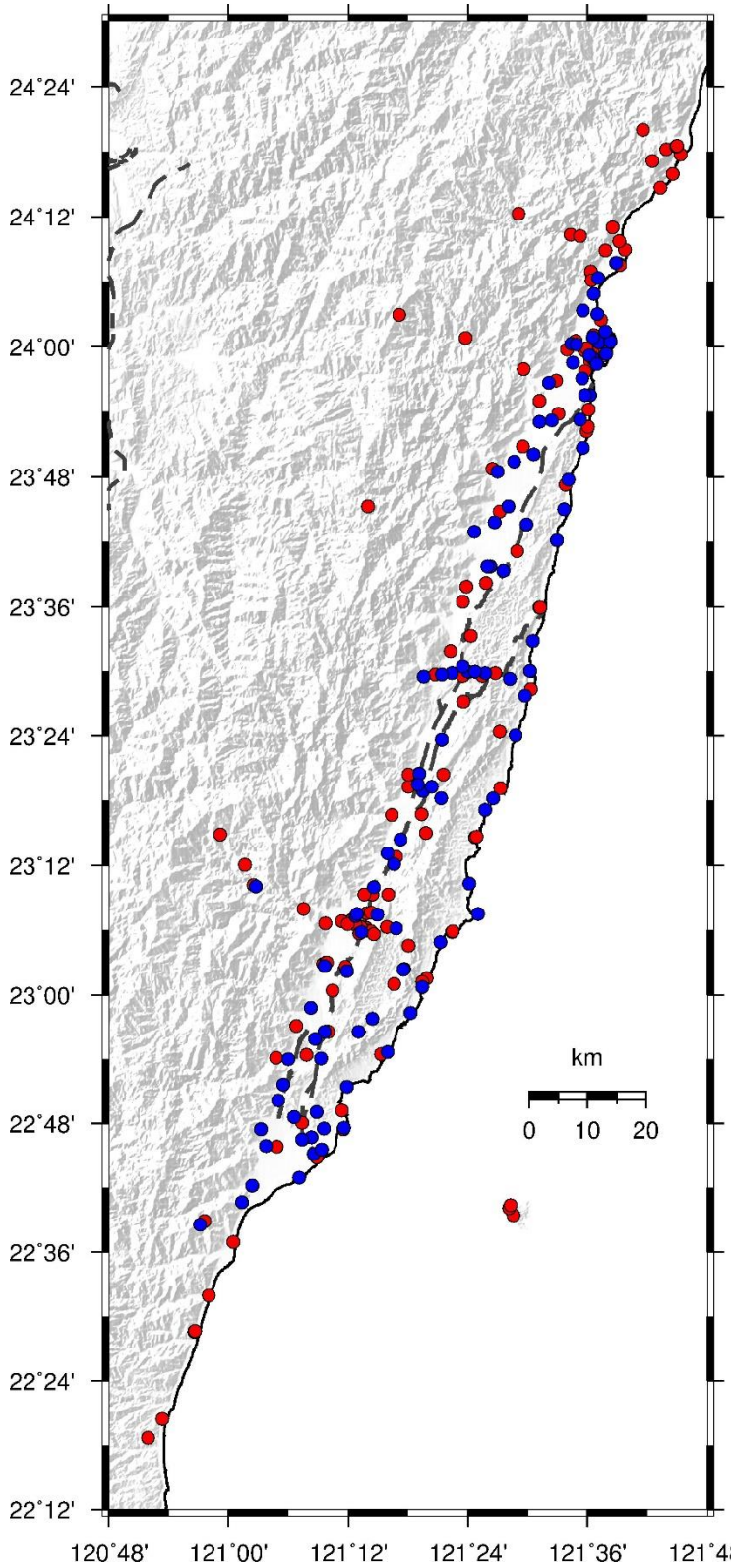


圖 8-2.19：東部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。

Figure 8-2.19: GNSS distribution in the Eastern areas. Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

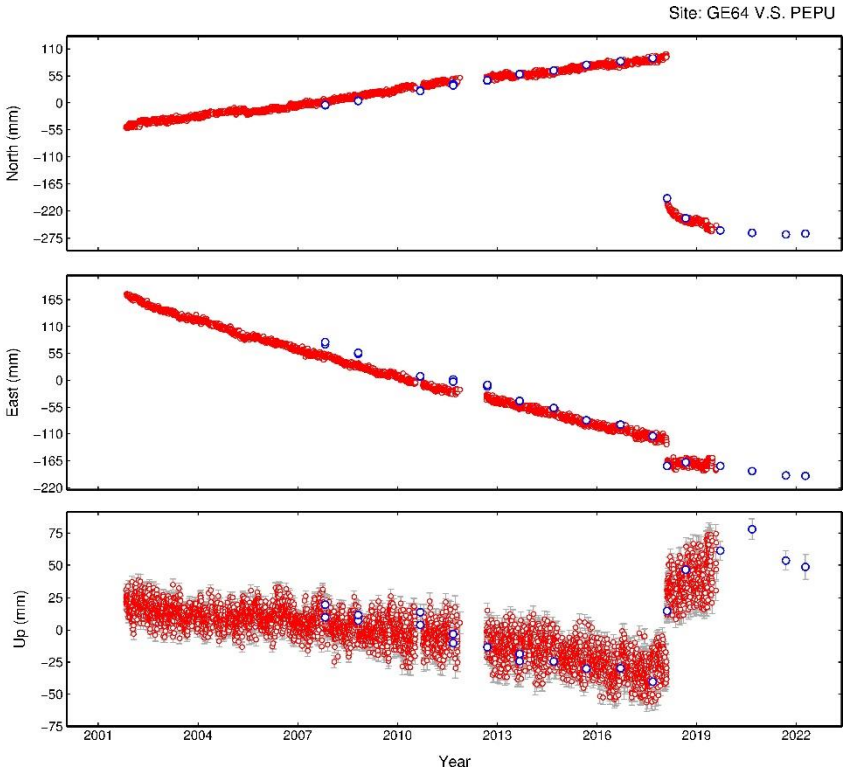


圖 8-2.20：移動站點位 GE64 與連續站 PEPU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 8-2.20: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GE64 (blue circles) and continuous GNSS station PEPU (red circles).

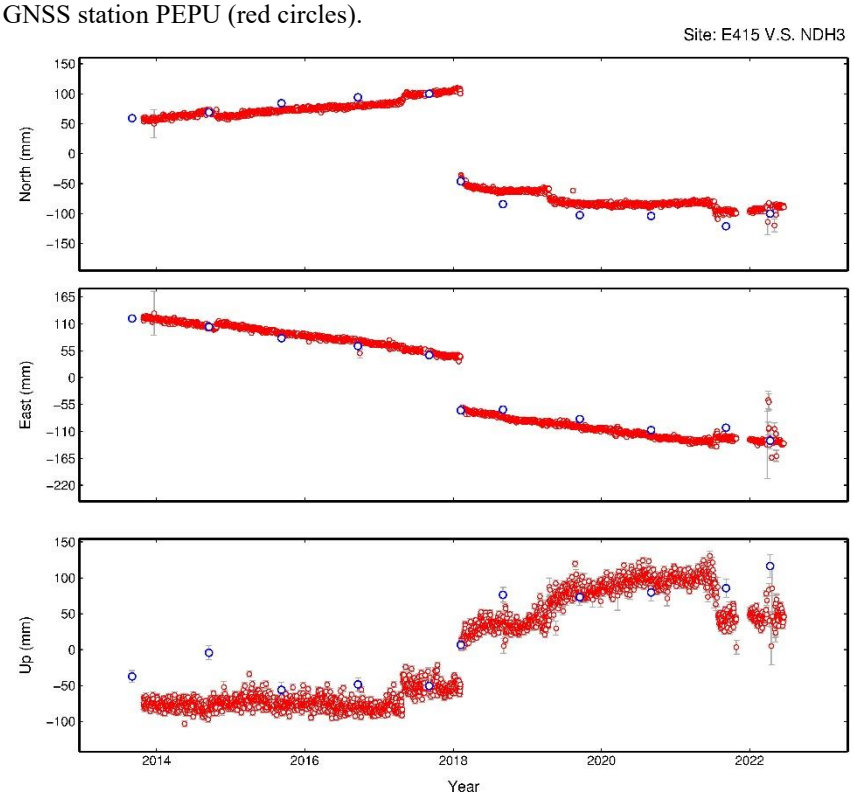


圖 8-2.21：移動站點位 E415 與連續站 NDH3 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 8-2.21: Time series comparison between campaign-mode GNSS station E415 (blue circles) and continuous GNSS station NDH3 (red circles).

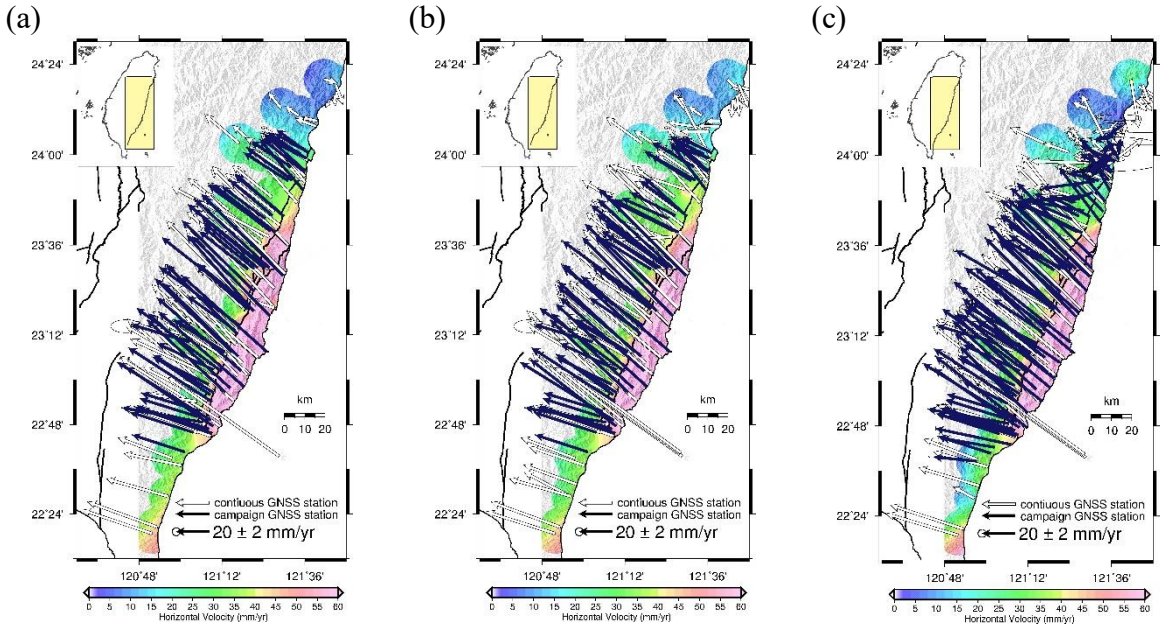


圖 8-2.22：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，彩色色階為資料解算之速度場分布色階圖。(a)表示 2002-2013 年速度場，(b)表示震後 2013-2018 年速度場，(c)表示震後 2018-2022 年速度場。

Figure 8-2.22: 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 2018-2022.

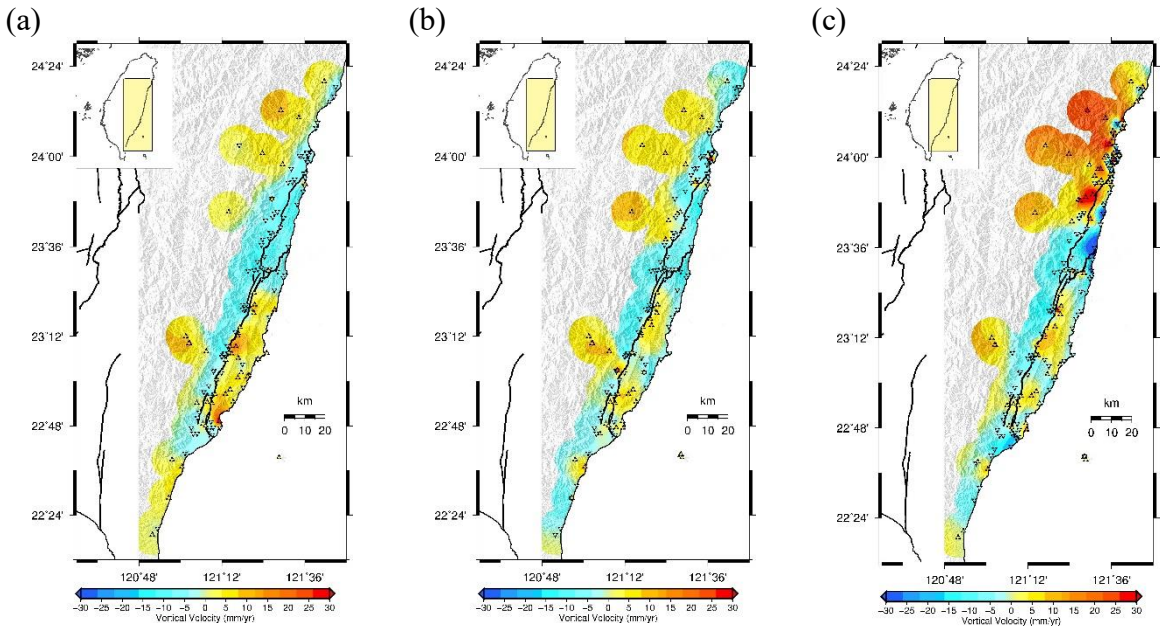


圖 8-2.23：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，(a)表示 2002-2013 年速度場，(b)表示震後 2013-2018 年速度場，(c)表示震後 2018-2022 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 8-2.23: 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 2018-2022. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence.

8-2-3-5 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 189 點（圖 8-2.24）。

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 8-2.25、圖 8-2.26）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G390 及連續站 GS88（圖 8-2.25）與 GNSS 移動站 G392 及連續站 SHWA（圖 8-2.26），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 2016–2022 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 8-2.27 和圖 8-2.28，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。臺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。

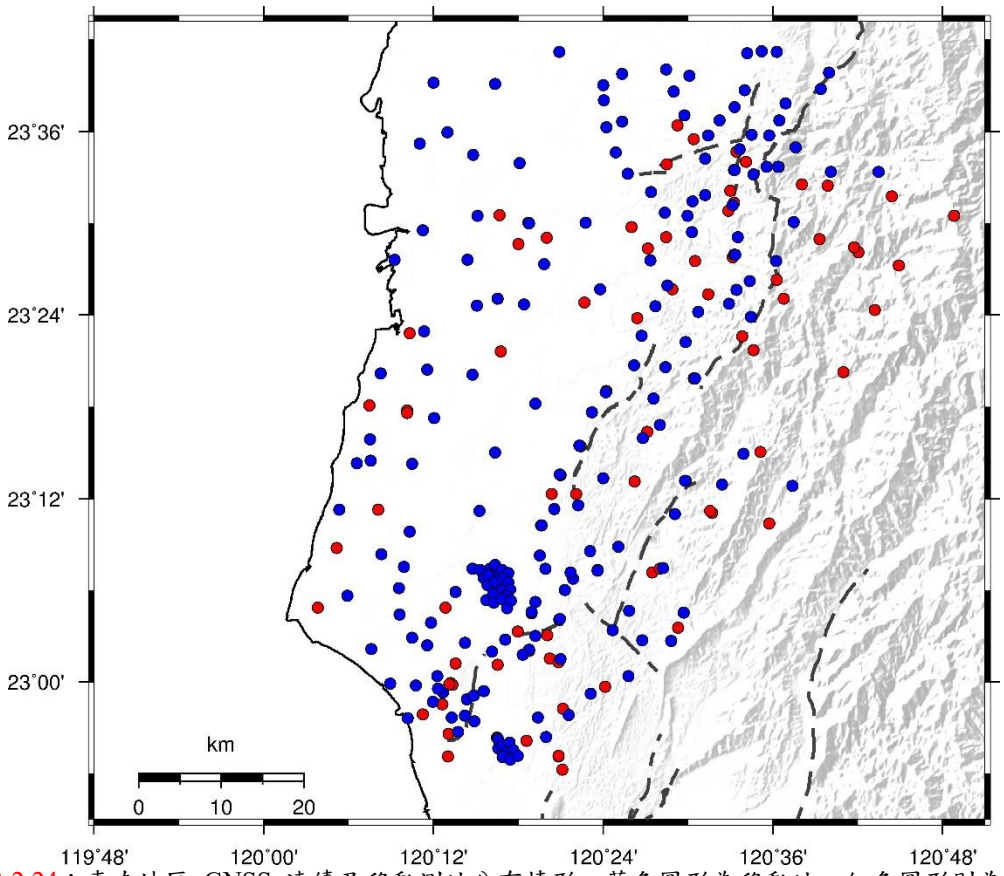


圖 8-2.24：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。

Figure 8-2.24: GNSS distribution in the Chiayi, Tainan areas. Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

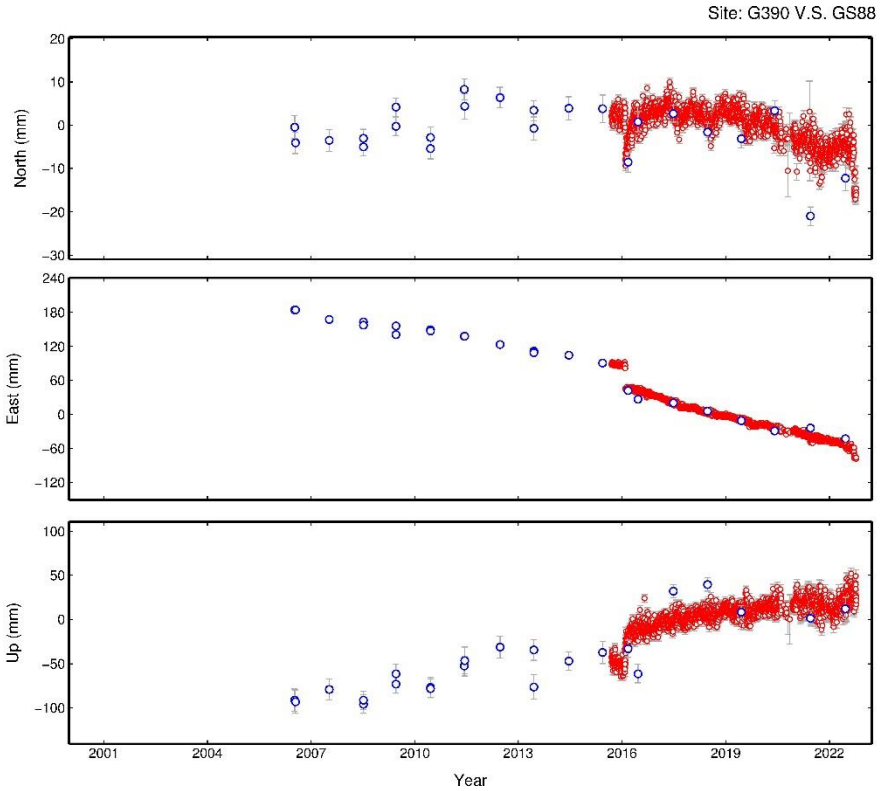


圖 8-2.25：移動站點位 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.25: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G390(blue circles) and continuous GNSS station GS88 (red circles).

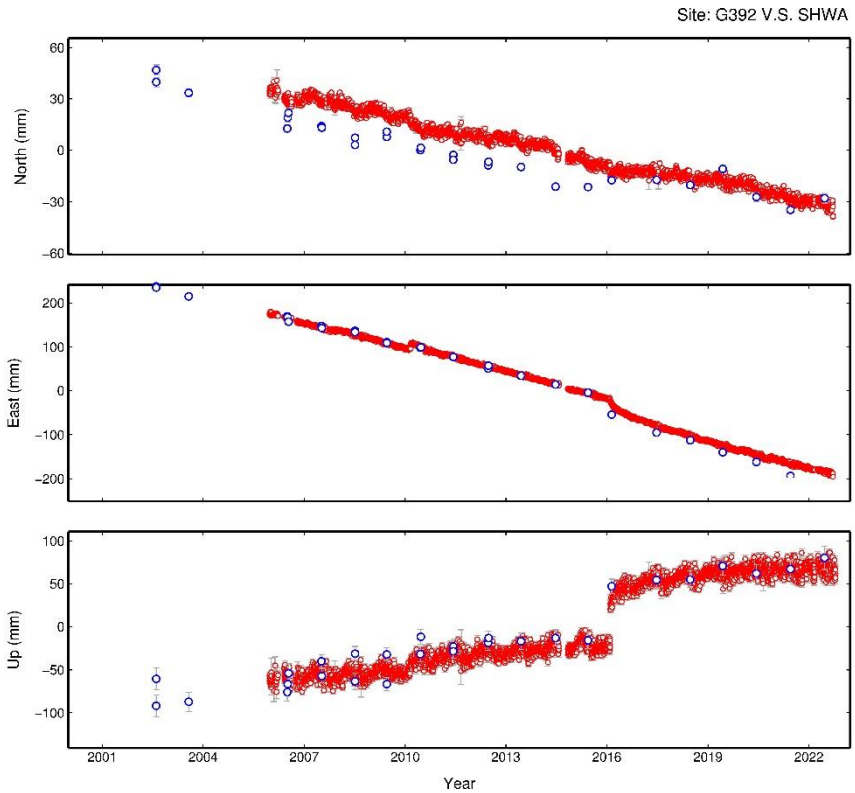


圖 8-2.26：移動站點位 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.26: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G392 (blue circles) and continuous GNSS station SHWA (red circles).

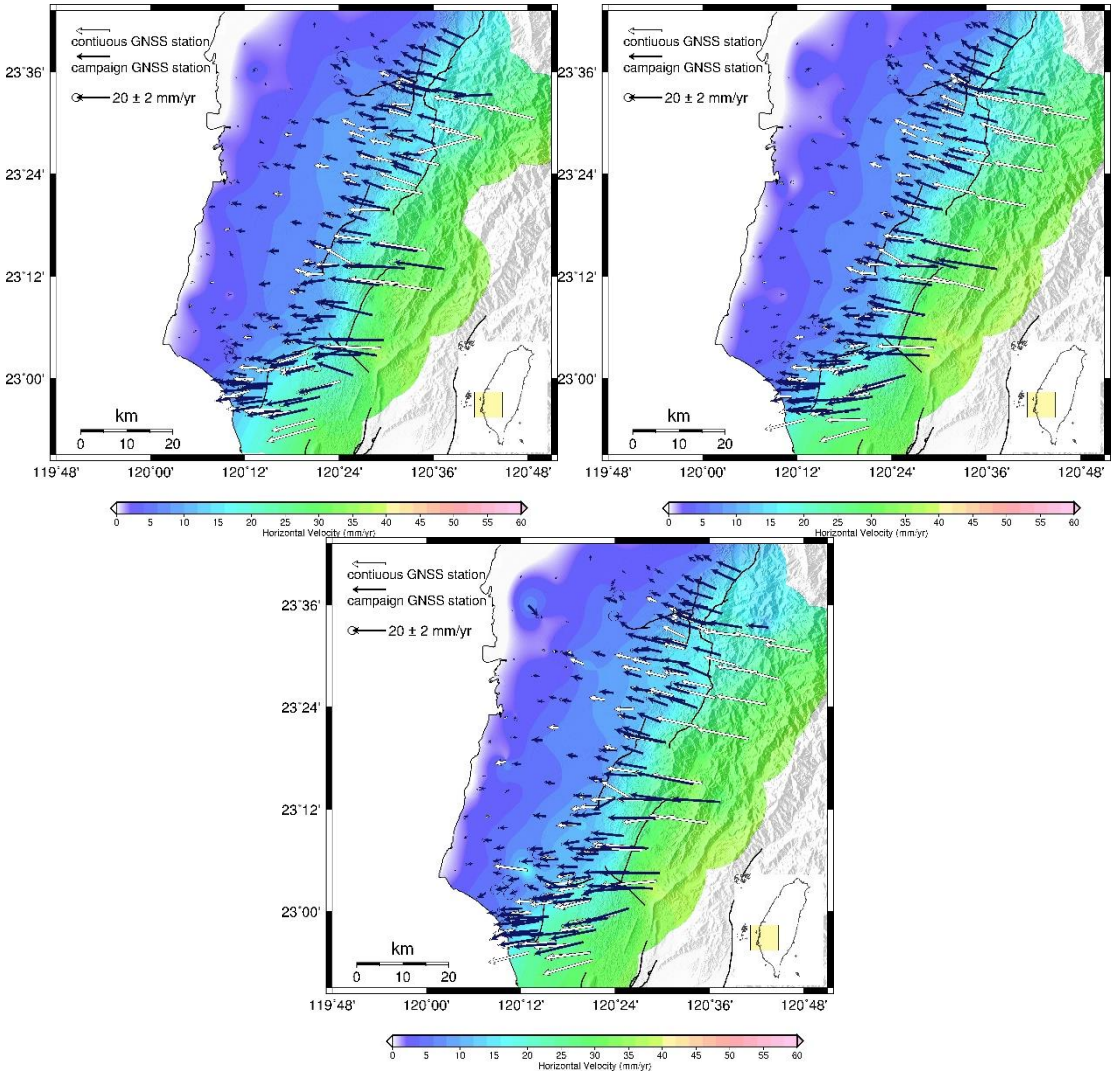


圖 8-2.27：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，彩色色階為速度場分布色階圖。，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2022 年速度場。

Figure 8-2.27: 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 2016-2022.

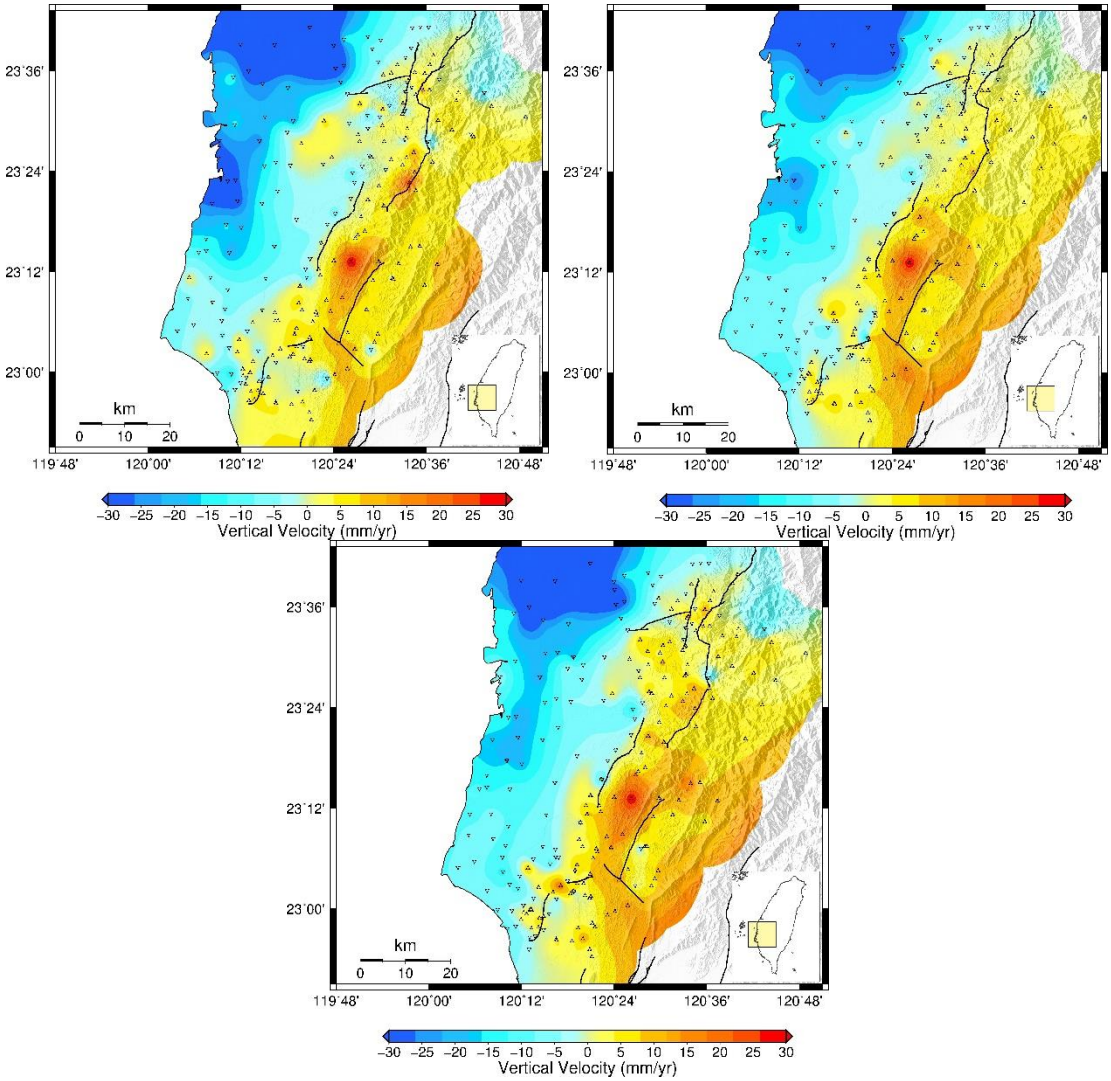


圖 8-2.28：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2022 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 8-2.28: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (Left figure) and 2010-2016 (Right figure) and 2016-2022 (Down figure) in Chiayi, Tainan areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence.

8-2-3-6 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 130 點（圖 8-2.29）。

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 8-2.30、圖 8-2.31）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GC48 及連續站 CHIE（圖 8-2.30）與 GNSS 移動站 G003 及連續站 GS56（圖 8-2.31），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 8-2.32 和圖 8-2.33，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 2016–2022 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 8-2.32）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 8-2.33），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。

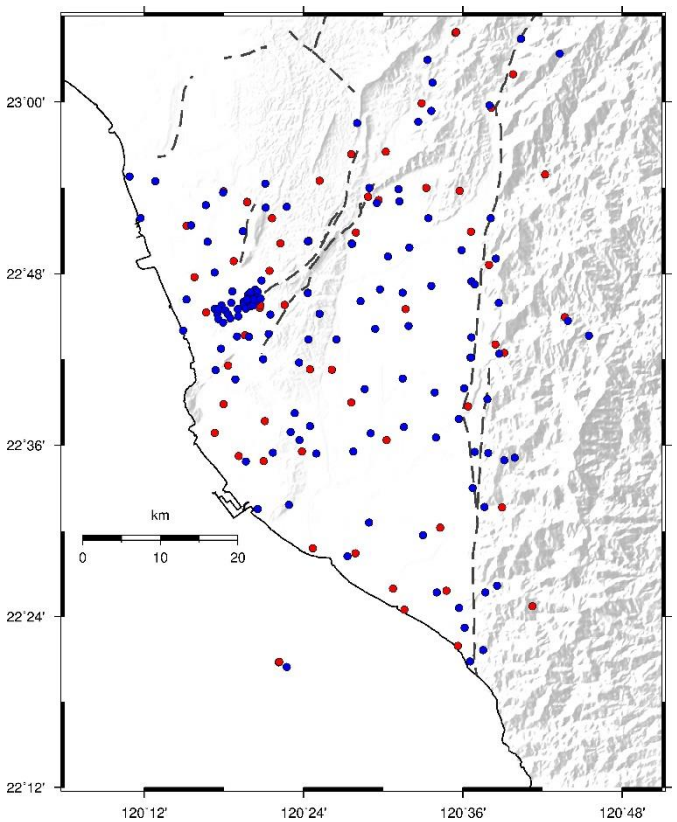


圖 8-2.29：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。

Figure 8-2.29: GNSS distribution in the Kaohsiung and Pingtung areas. Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

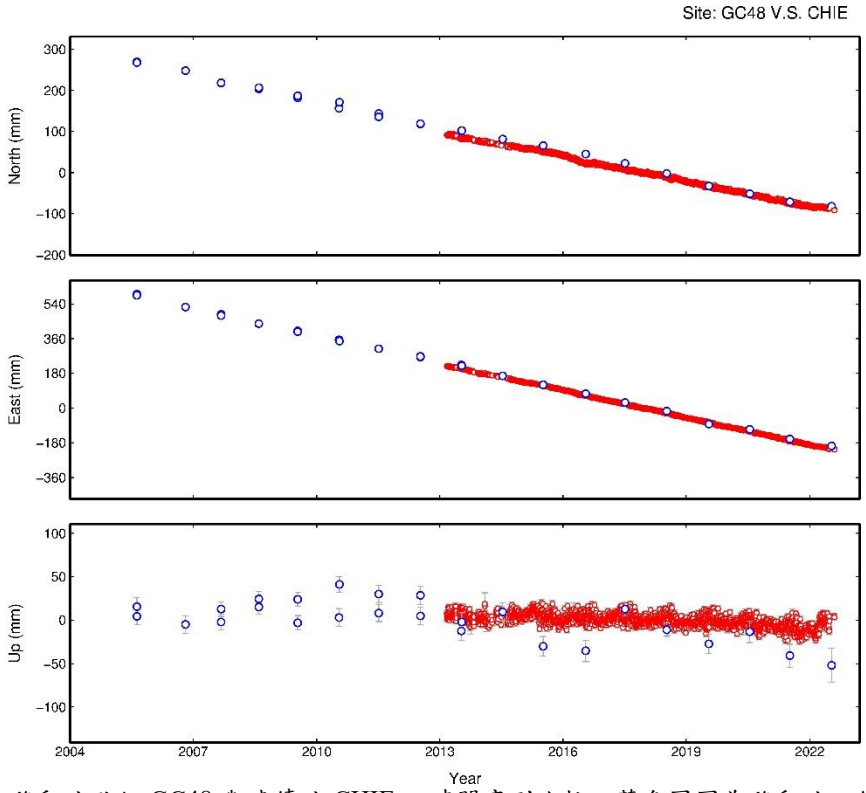


圖 8-2.30：移動站點位 GC48 與連續站 CHIE 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 8-2.30: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GC48 (blue circles) and continuous GNSS station CHIE (red circles).

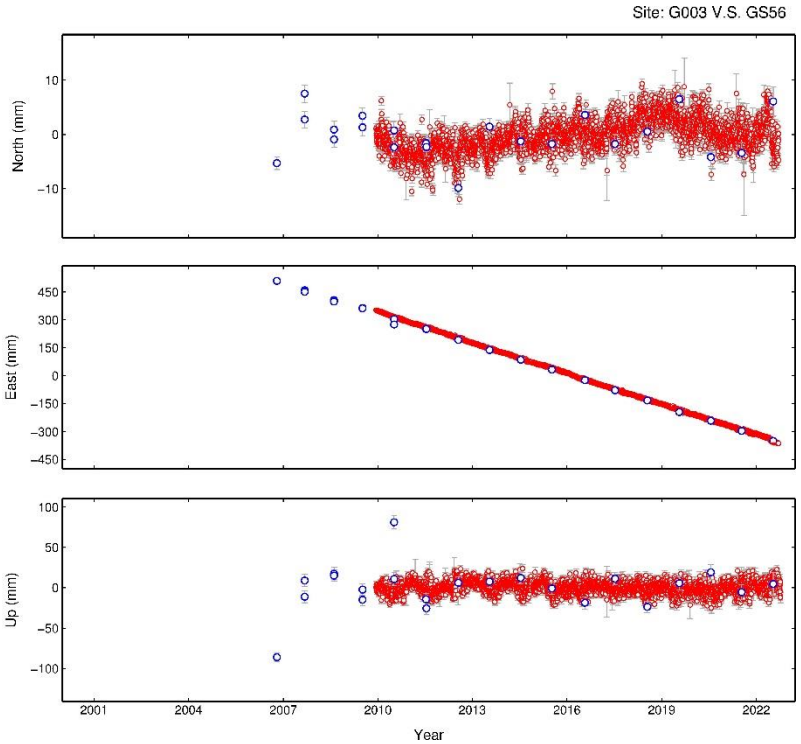


圖 8-2.31：移動站點位 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.31: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G003 (blue circles) and continuous GNSS station GS56 (red circles).

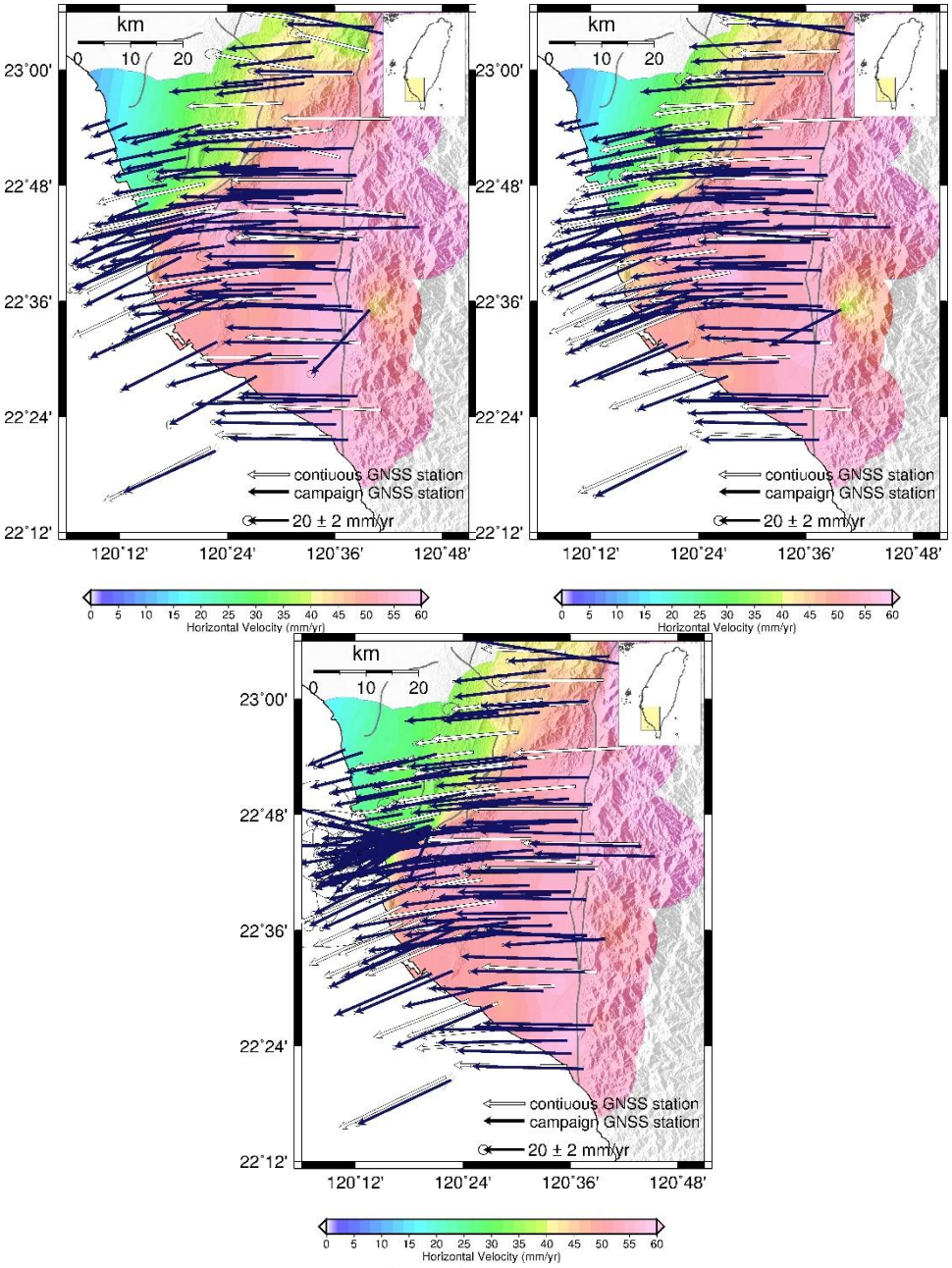


圖 8-2.32：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2022 年速度場。

Figure 8-2.32: 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 2016-2022.

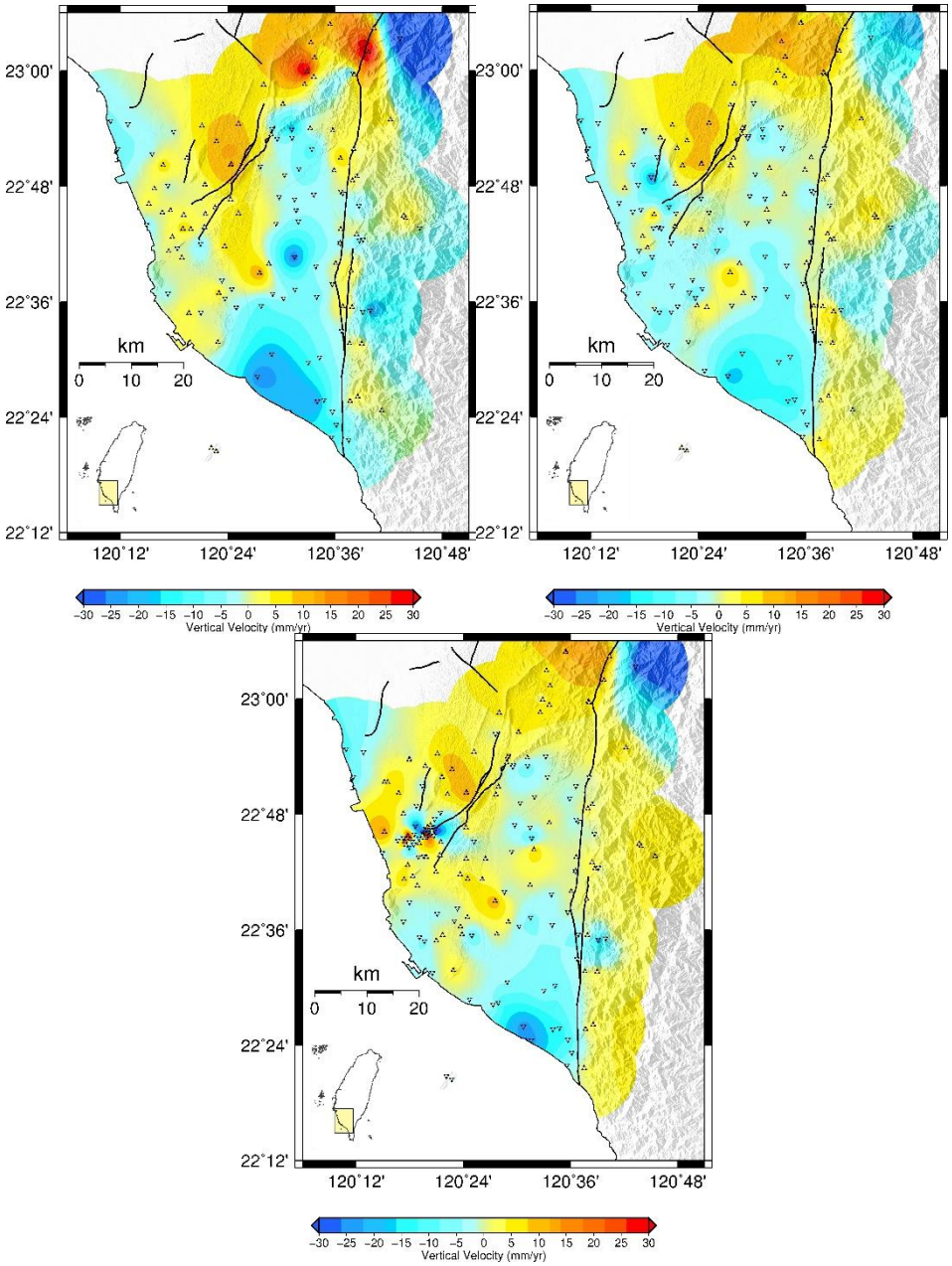


圖 8-2.33：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2022 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 8-2.33: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (Left figure) and 2010-2016 (Right figure) and 2016-2022 (Down figure) in Kaohsiung and Pingtung areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence.

8-2-3-7 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 153 點（圖 8-2.34）。

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 8-2.35、圖 8-2.36）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 AF24 及連續站 FNGU（圖 8-2.35）與 GNSS 移動站 G964 及連續站 YUNL（圖 8-2.36），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 8-2.37 和圖 8-2.38，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 2013–2022 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 8-2.37 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，2013-2022 年速度約為 3.4 ~ 10.7 mm/yr。

垂直速度場如圖 8-2.38，臺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。

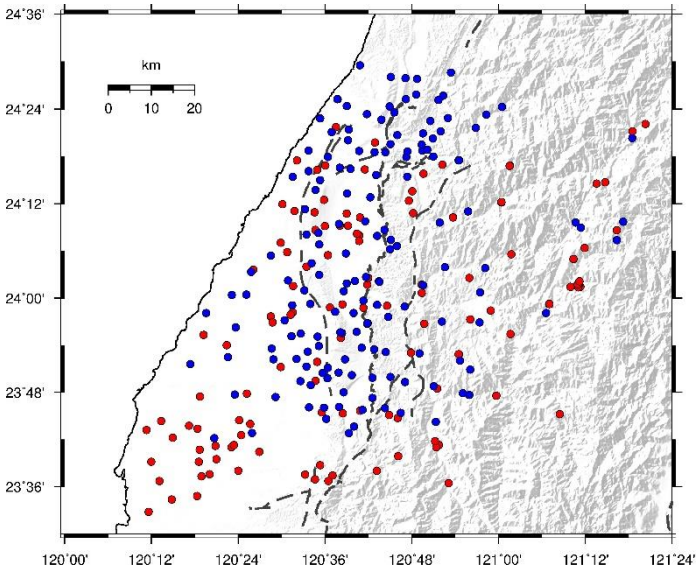


圖 8-2.34：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色圓形為移動站，紅色圓形則為連續站。

Figure 8-2.34: GNSS distribution in the Central Taiwan areas. Blue circles are campaign-mode GNSS stations; Red circles are continuous GNSS stations.

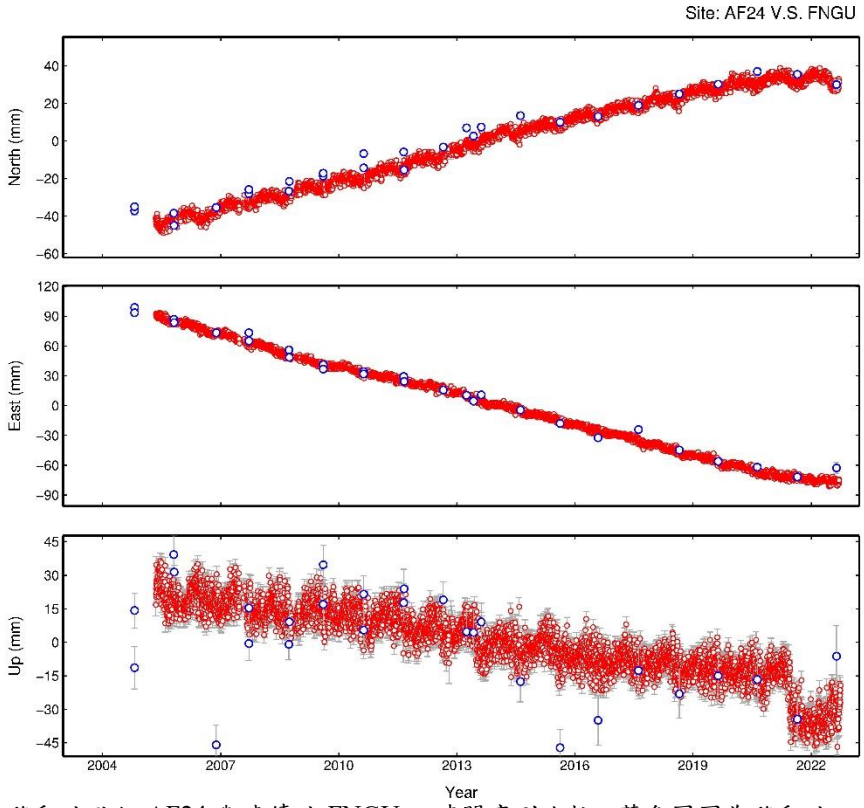


圖 8-2.35：移動站點位 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果

Figure 8-2.35: Time series comparison between campaign-mode GNSS station AF24 (blue circles) and continuous GNSS station FNGU (red circles).

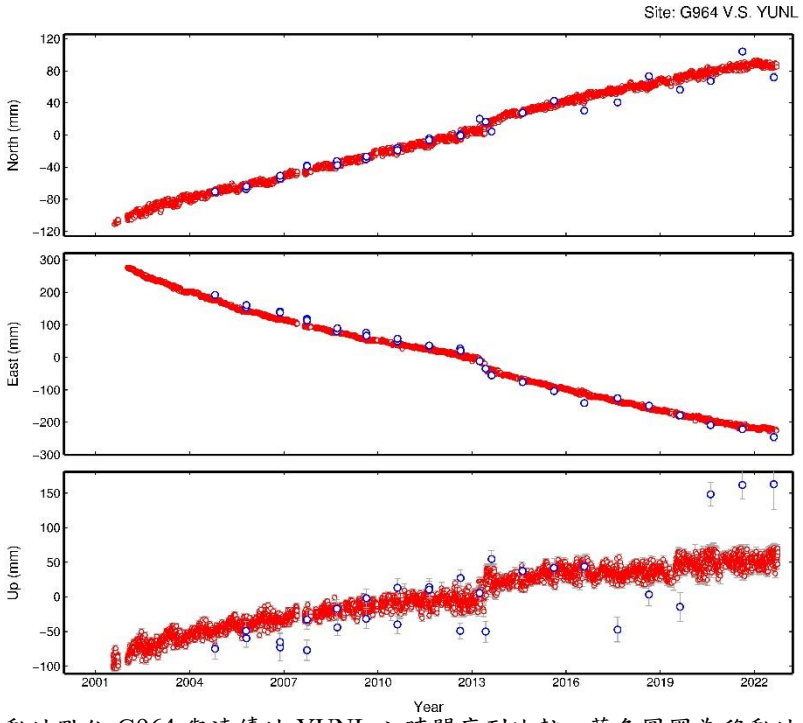


圖 8-2.36：移動站點位 G964 與連續站 YUNL 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之結果；紅色圓圈為連續站之結果。

Figure 8-2.36: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G964 (blue circles) and continuous GNSS station YUNL (red circles).

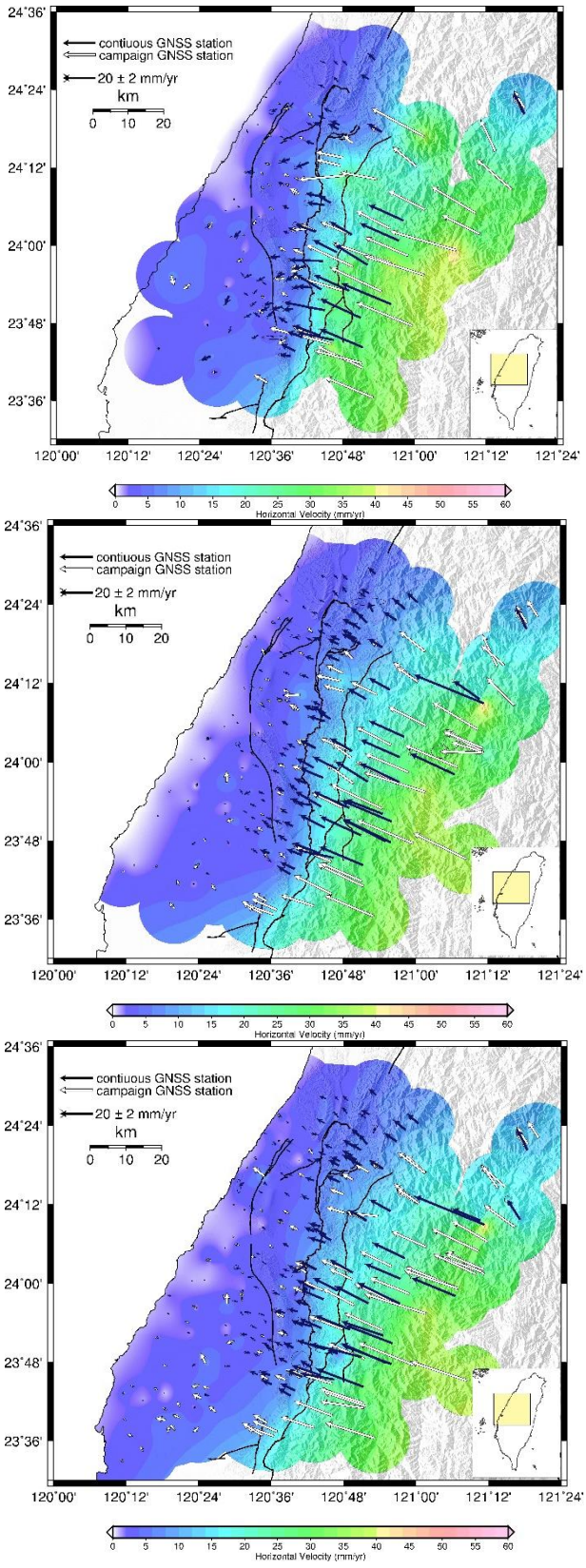


圖 8-2.37：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場，上圖表示 2004-2007 年速度場，下圖表示 2007-2013 年速度場，下圖表示震後 2013-2022 年速度場。

Figure 8-2.37: 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 2013-2022.

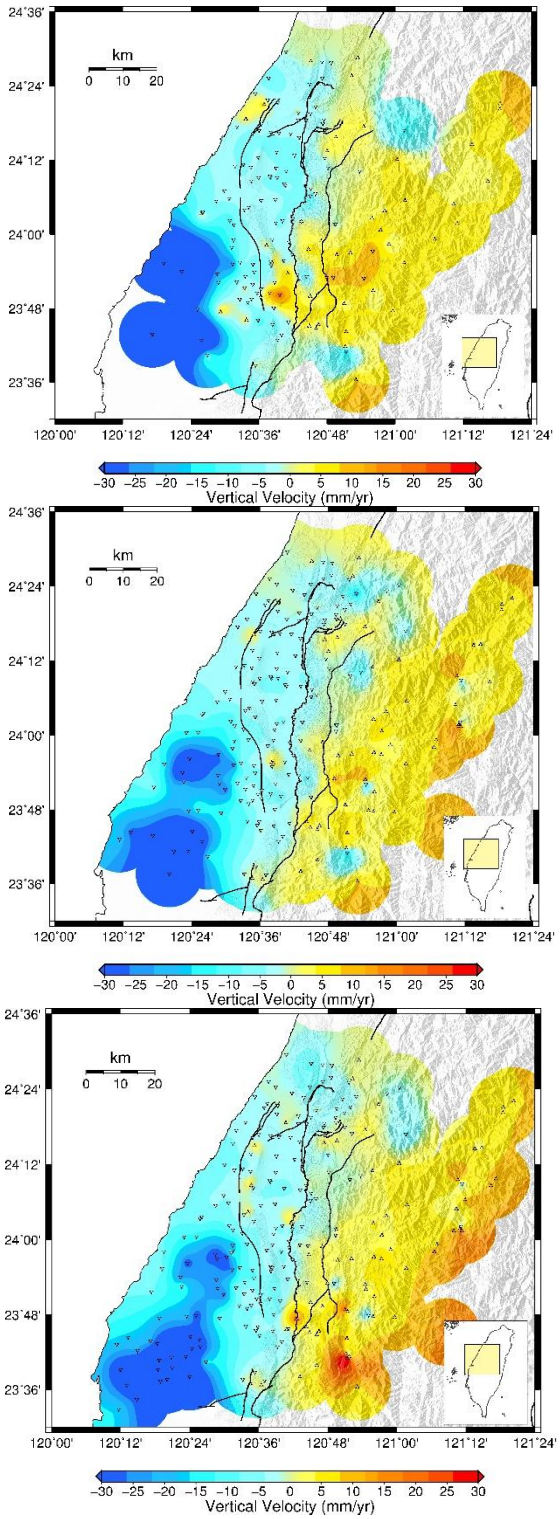


圖 8-2.38：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。左上圖表示 2004-2007 年速度場，下圖表示 2007-2013 年速度場，下圖表示震後 2013-2022 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 8-2.38: 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 2013-2022.The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence.

8-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析

8-3-1 精密水準測量資料檢核

2022 年 10 月底前所獲得共計 1171 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 1160 個測段（圖 8-3.1），佔所有測段比例之 99.1 %。

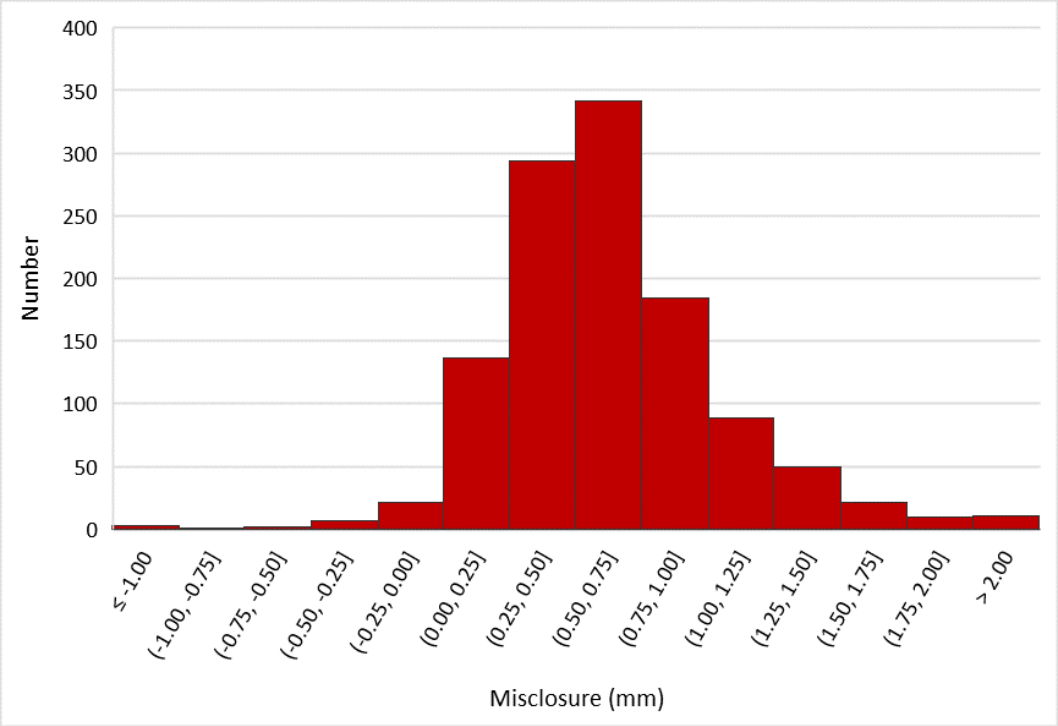


圖 8-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

Figure 8-3.1: Diagram of precise leveling data. Red column is the amount of 0.25 mm statistics value. The error of closure, maximum is around 0.5~0.75 mm.

8-3-2 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. (2011) 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（圖 8-3.2），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。

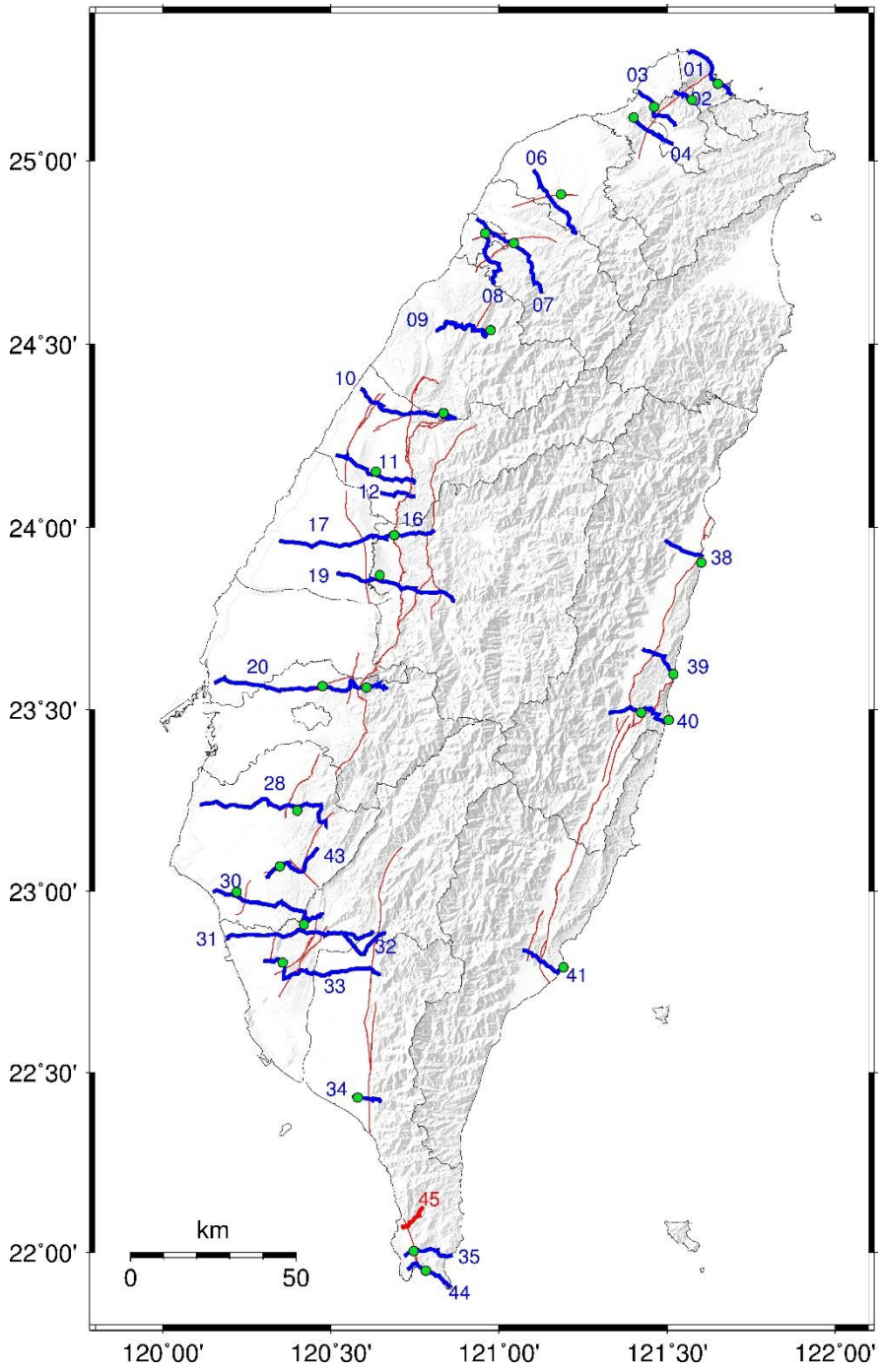


圖 8-3.2：精密水準測線與各測線約制之 GNSS 連續站分布圖，藍色表示有 GNSS 約制之測線，紅色表示尚未新增 GNSS 約制之測線，綠色點位表示 GNSS 點位位置。

Figure 8-3.2: Distribution map of the precise leveling and the GNSS continuous stations which were chose for constraining each surveying line. Green circles are the GNSS stations.

8-3-3 恆春地區精密水準測線

8-3-3-1 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 8-3.3)，至 2022 年止有 19 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 8-3.4）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G671、G677、G679、Q055、G682 已滅失，無法繼續觀測。

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 8-3.5）。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。

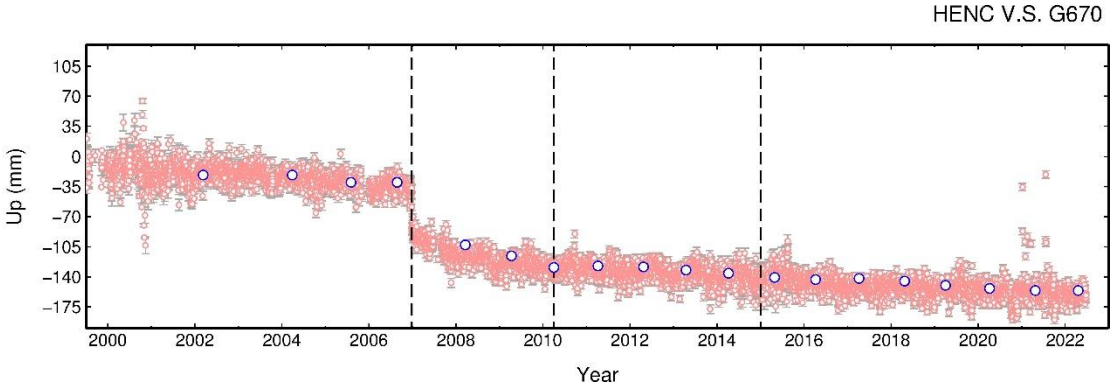


圖 8-3.3：恆春西臺地至佳樂水測線水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震，及 2010 年 2 月速度發生變化及 2016 年 2 月速度發生變化。

Figure 8-3.3: 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.

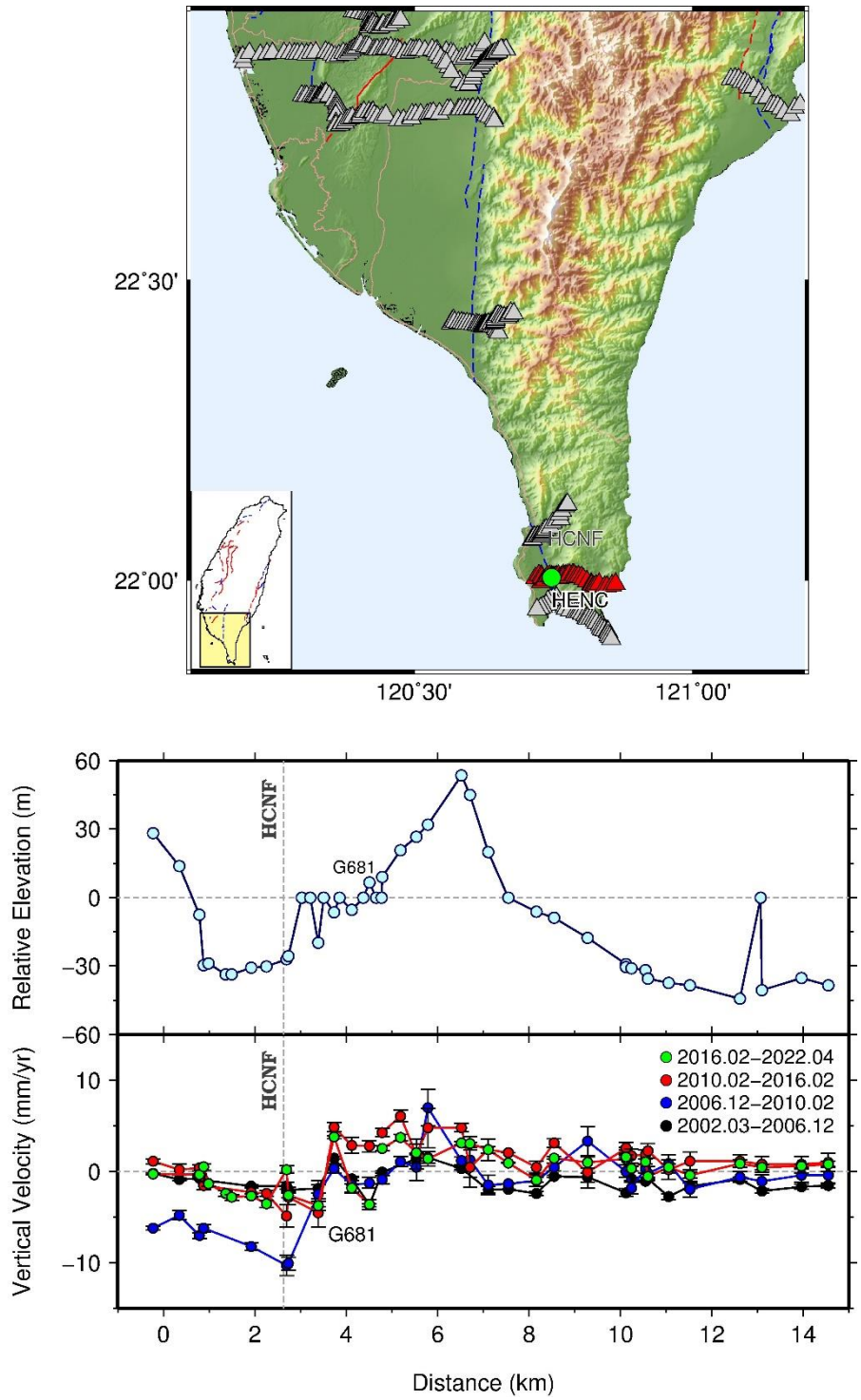


圖 8-3.4：恆春西台地至佳樂水測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。黑為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 8-3.4: 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.

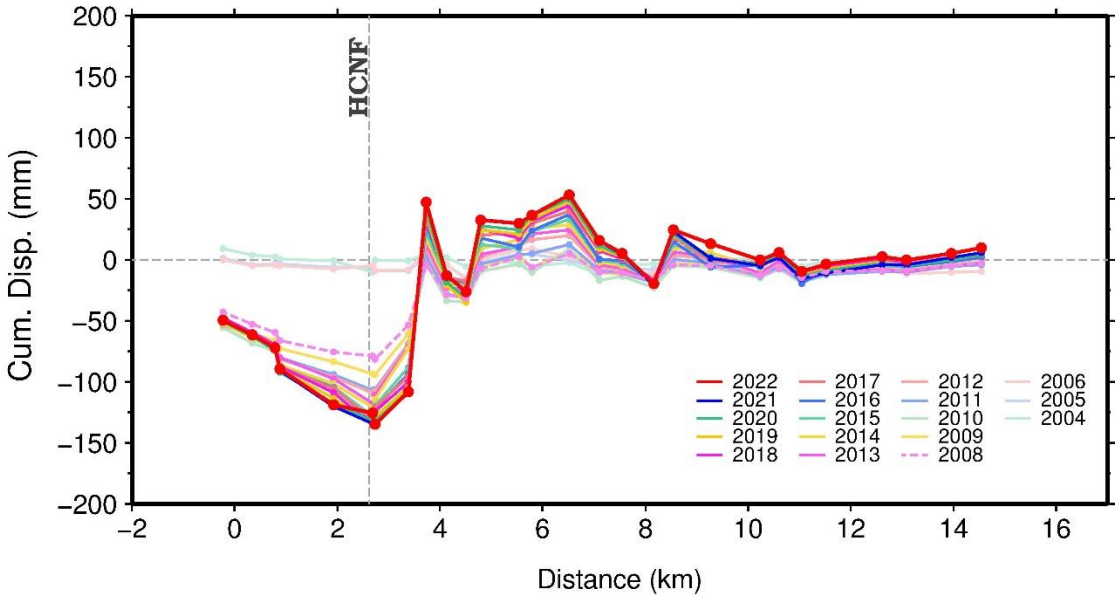


圖 8-3.5：恆春西台地至佳樂水測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF為恆春斷層。

Figure 8-3.5: Cumulative elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

8-3-3-2 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 8-3.7a)，至 2022 年止有 19 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 8-3.6）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G647 已滅失，無法繼續觀測。

各時間分段之水準平均抬升速率（圖 8-3.7b），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 8-3.8）。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。

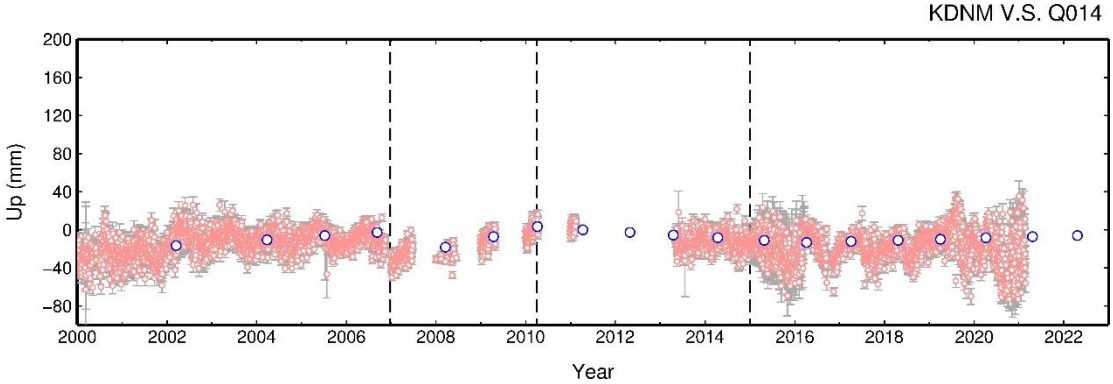


圖 8-3.6：南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.6 公里。虛虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年及 2016 速度發生變化。

Figure 8-3.6: 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.

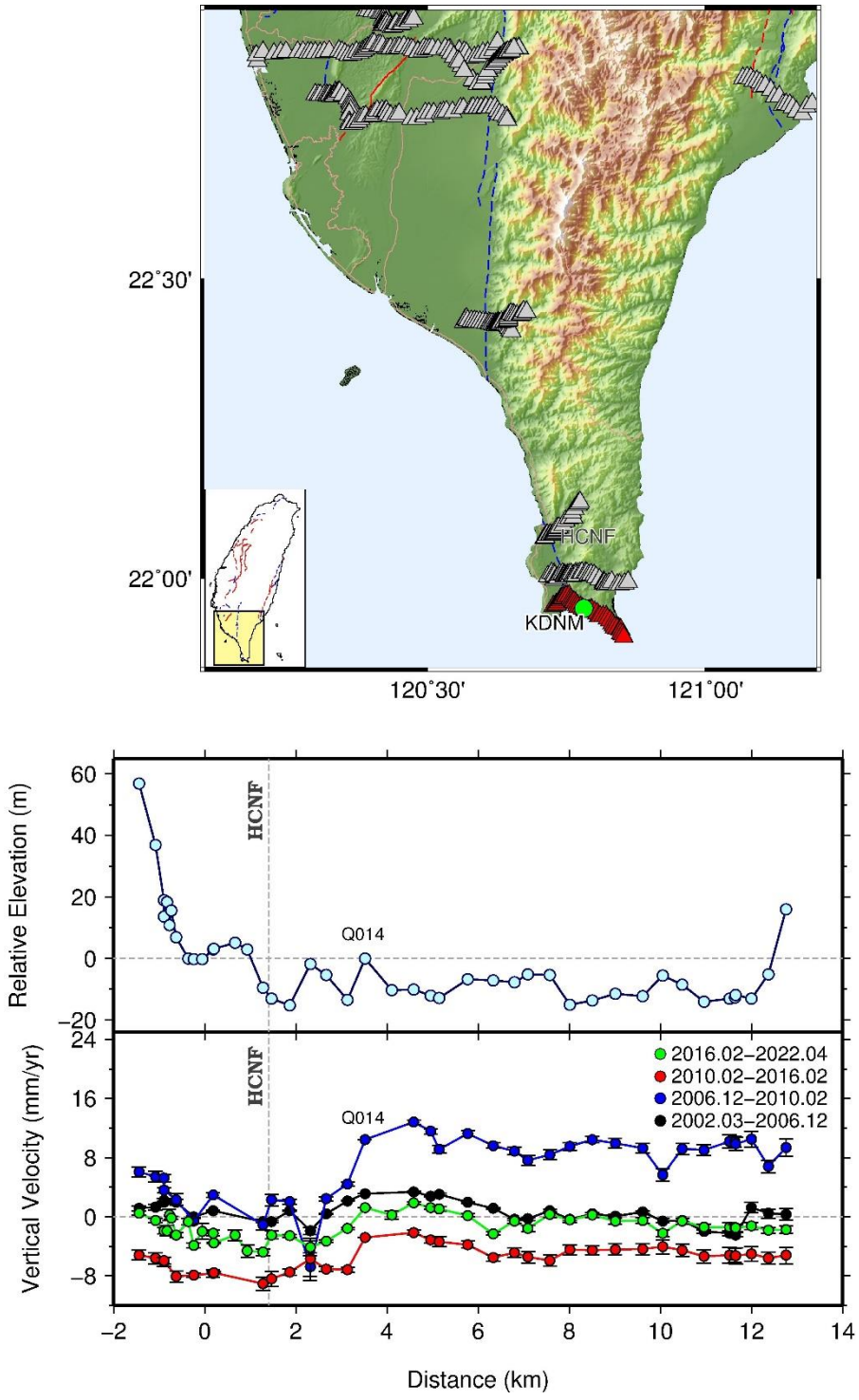


圖 8-3.7：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。黑色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 8-3.7: 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.

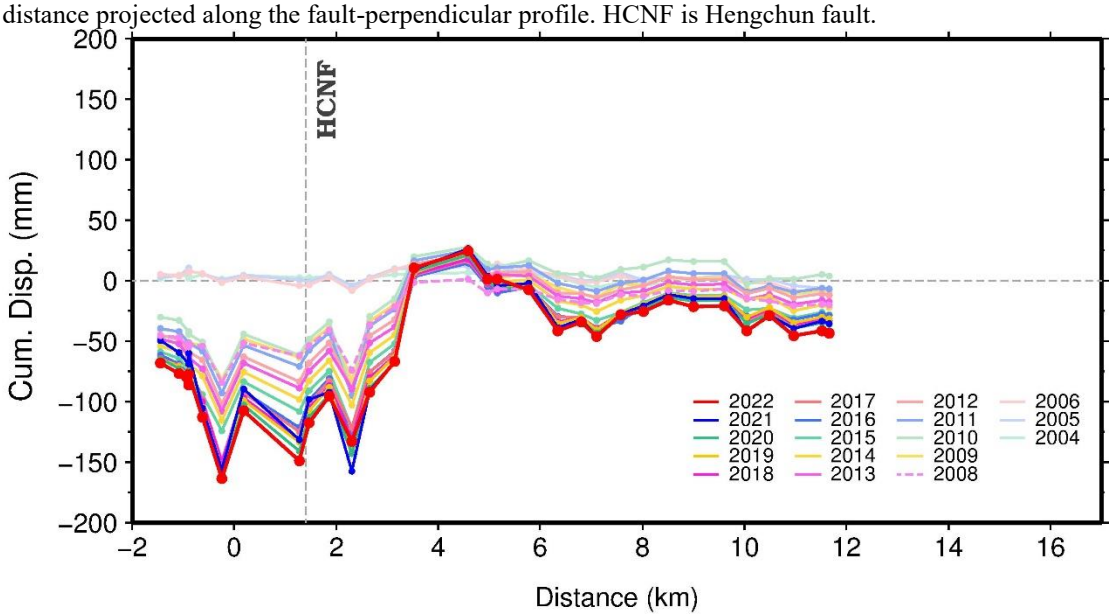


圖 8-3.8：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 8-3.8: Cumulative elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

8-3-3-3 車城至牡丹測線

車城至牡丹為去年（2021 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 26 個點位（圖 8-3.9）。從 2021 年至 2022 年止，共有 3 次的測量資料，每半年施測一次。

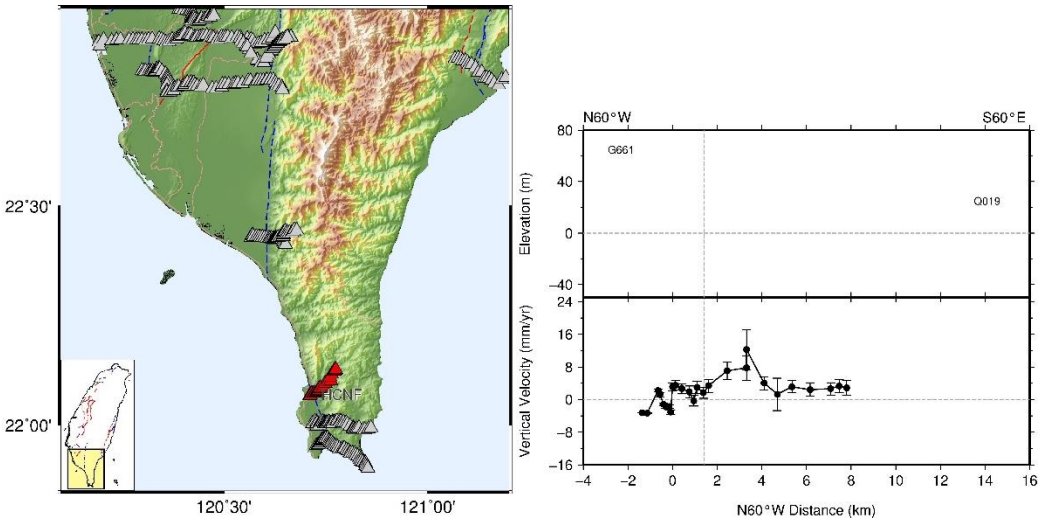


圖 8-3.9：車城至牡丹測線位置分布圖。

Figure 8-3.9: Elevation change of the Checheng-Mudan leveling route.

8-3-4 嘉南地區精密水準測線

8-3-4-1 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 8-3.12），投影至剖面的長度為 52.6 公里，2003 年至 2022 年間共進行 20 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 8-3.10)。

此測線梅山斷層以西之垂直速度變化較大（圖 8-3.12），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。而於圖 8-3.13 顯示於雲林水林鄉測段有顯著之累積下陷產生，為地層下陷之故。

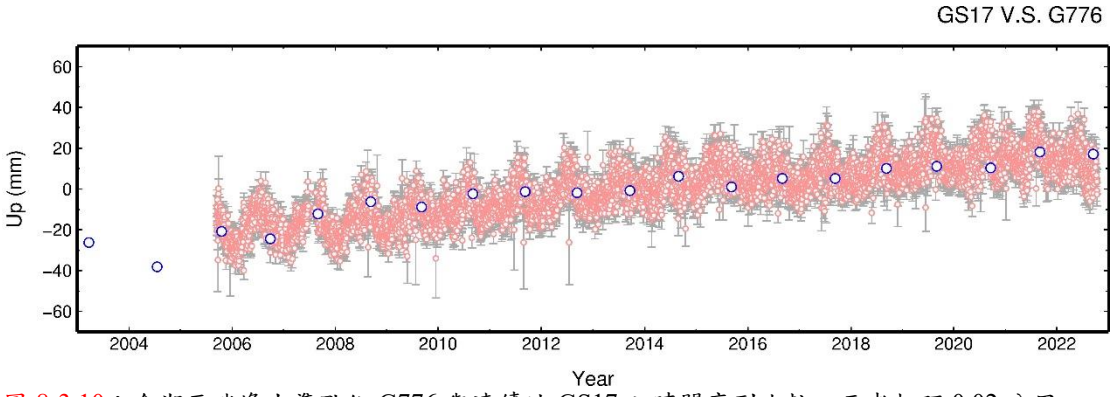


圖 8-3.10：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 8-3.10: Time series comparison between Jinhu-Ruifeng leveling bench mark G776 and continuous GNSS station GS17. The distance between two stations are 0.02 km.

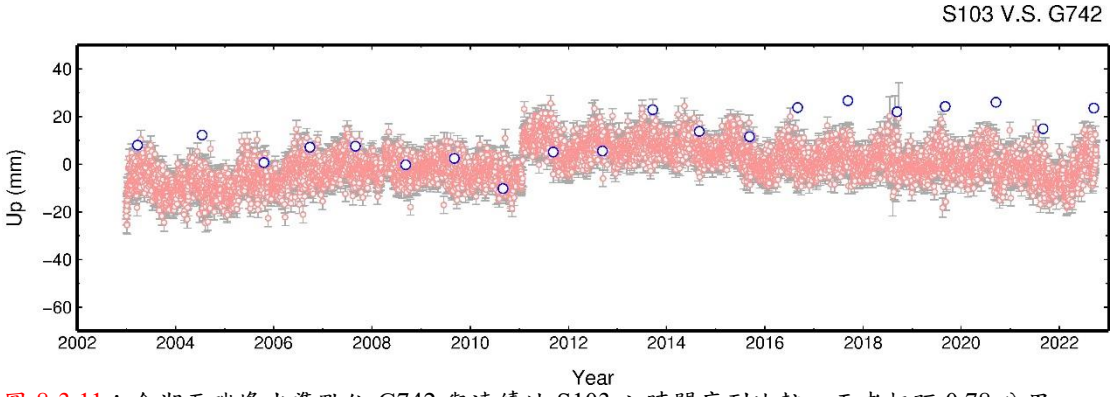


圖 8-3.11：金湖至瑞峰水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較，兩者相距 0.78 公里。
Figure 8-3.11: Time series comparison between Jinhu-Ruifeng leveling bench mark G742 and continuous GNSS station S103. The distance between two stations are 0.78 km.

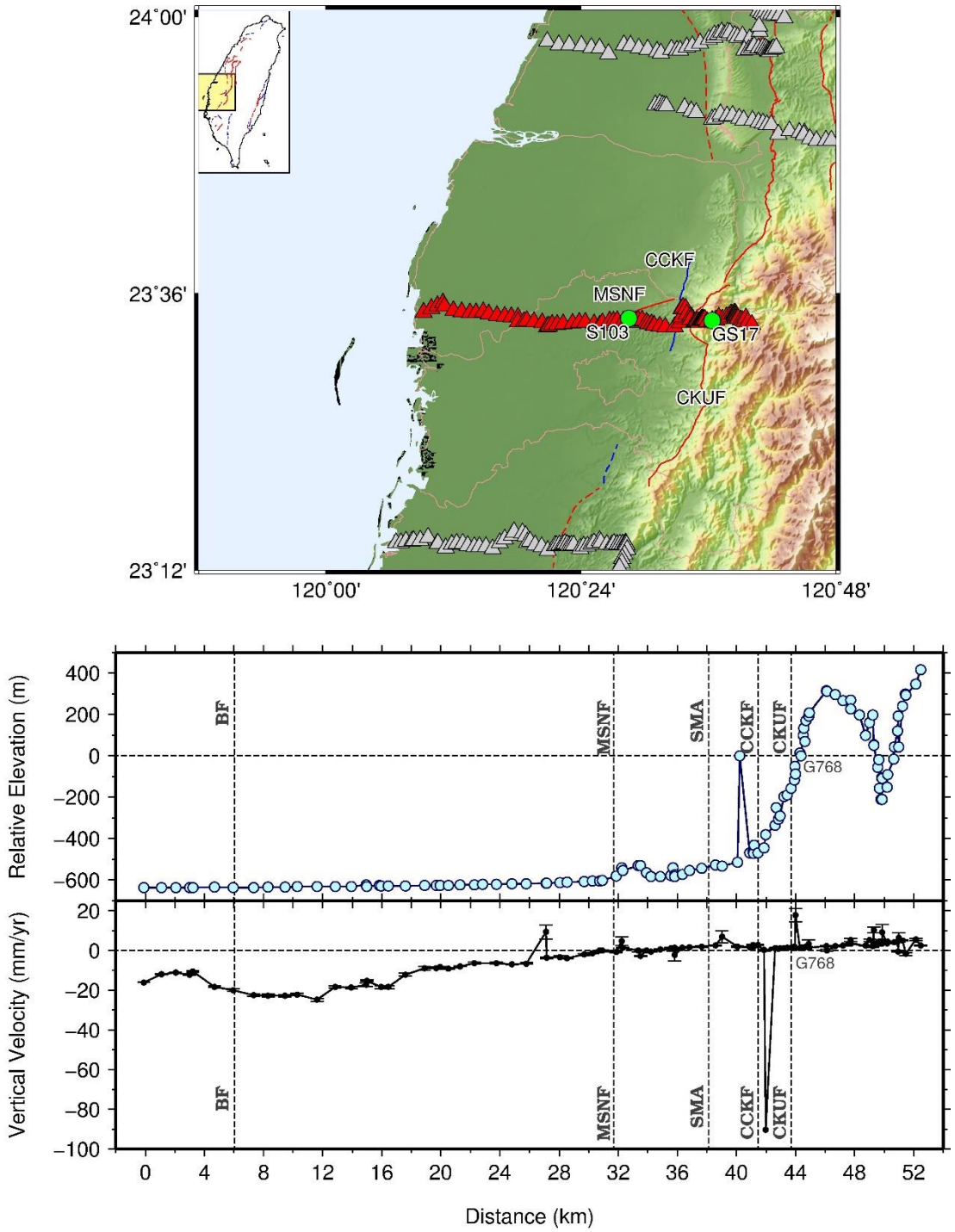


圖 8-3.12：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 8-3.12: 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.

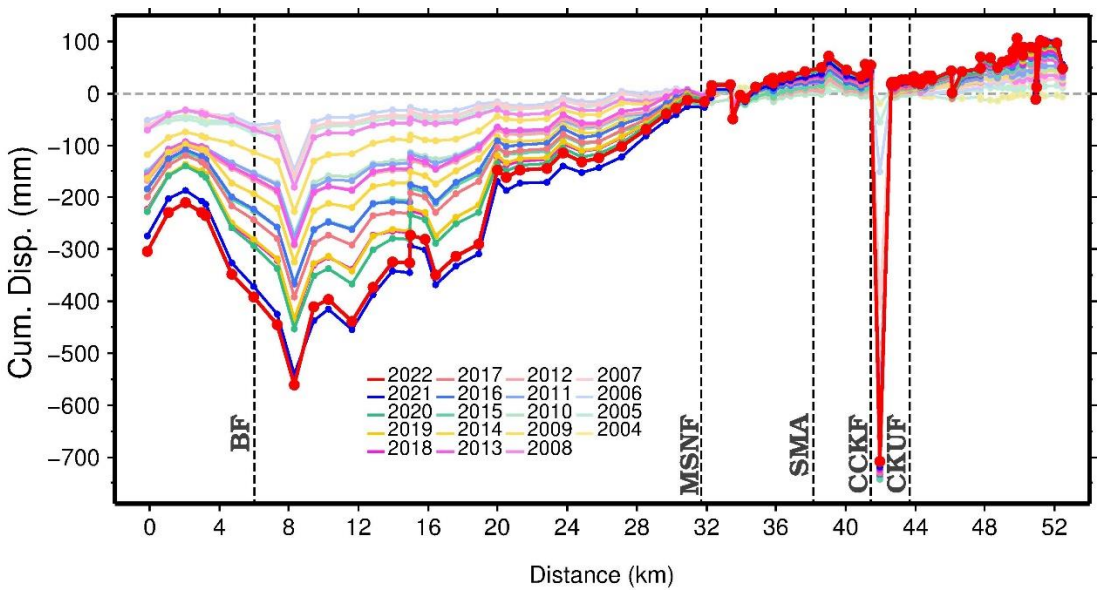


圖 8-3.13：縣 164_金湖至瑞峰測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口斷層，CSLF 為口宵里斷層。

Figure 8-3.13: Cumulative elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-4-2 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 8-3.15a），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 8-3.15 a），從 2003 年至 2022 年共計施測 19 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 8-3.16）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 8-3.14）。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 8-3.15 b）：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 8-3.16）。

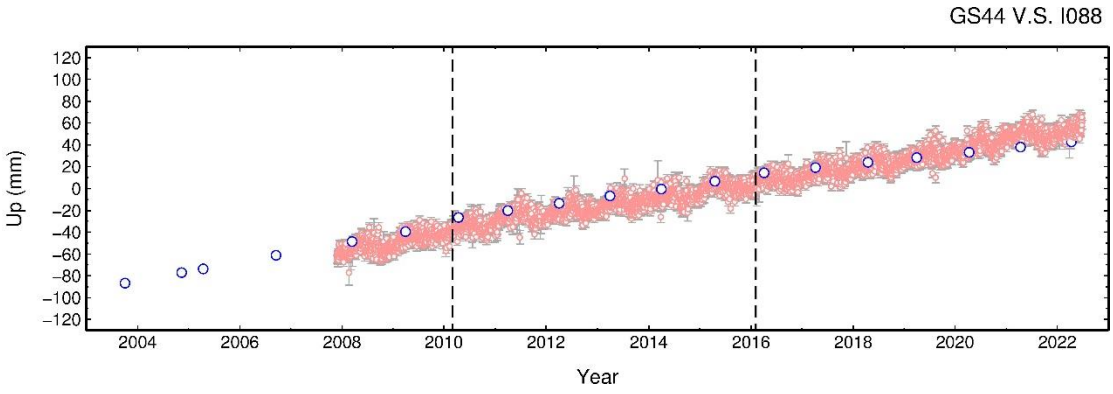


圖 8-3.14：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 8-3.14: 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.

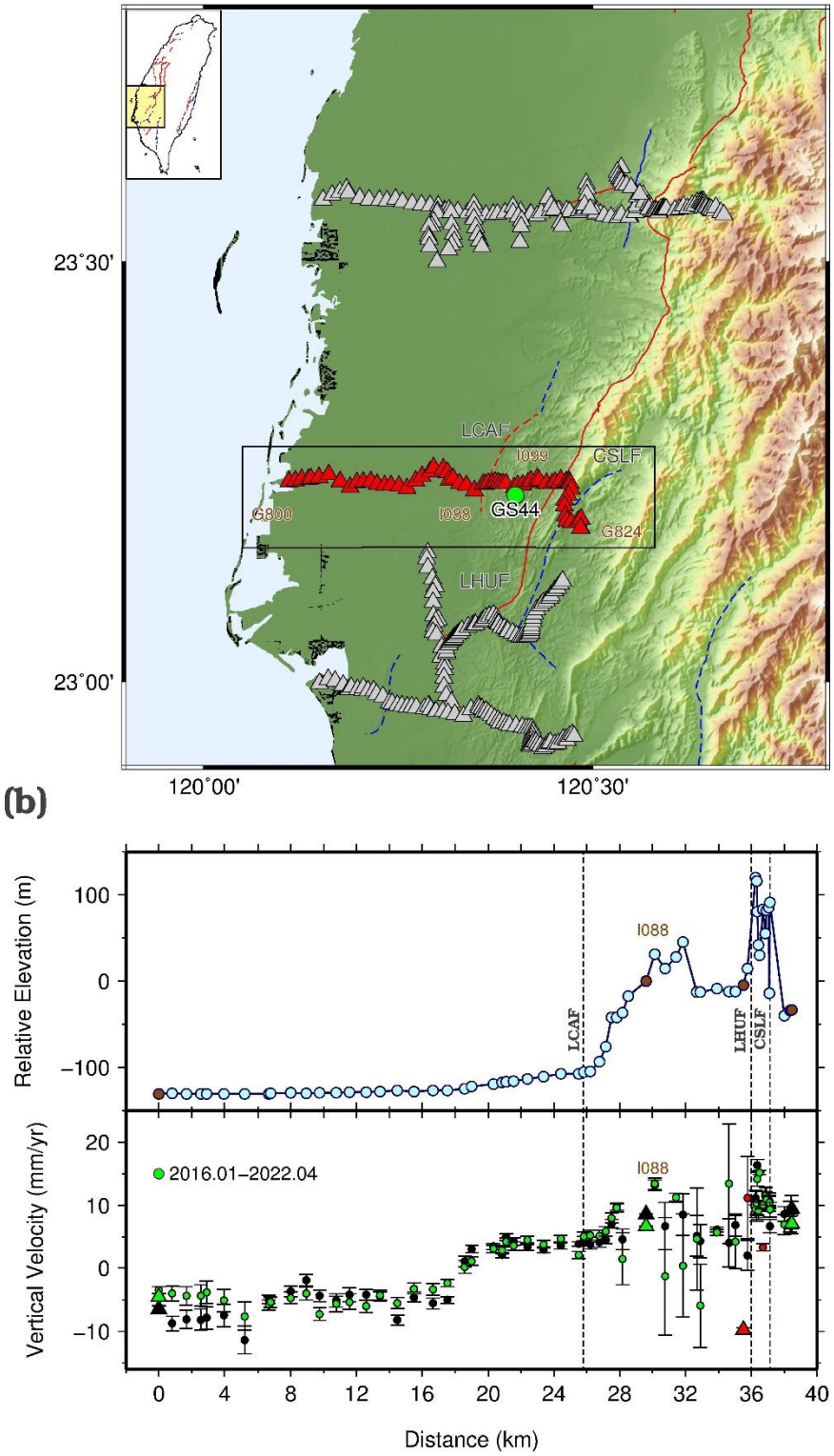


圖 8-3.15：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖，(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口斷層 CSLF 為口宵里斷層。

Figure 8-3.15: 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.

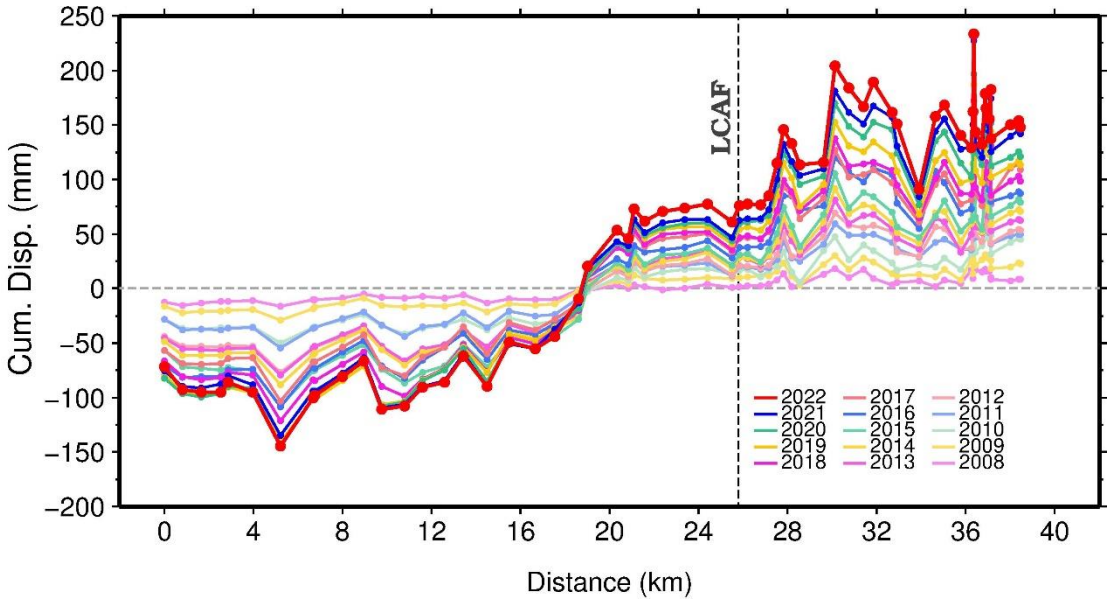


圖 8-3.16：縣 174_北門至楠西測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口斷層，CSLF 為口宵里斷層。

Figure 8-3.16: Cumulative elevation change of the Beimen-Nanxi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LCAF is Liuchia fault.

8-3-4-3 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層（圖 8-3.19 a），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 2022 年共計有 23 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 8-3.17），本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 TN07、G358、GH05 滅失，無法繼續觀測；測量樁點 TN07 有遮蔽，無法進行觀測。。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 8-3.19 b）：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 8-3.20），2016 年美濃地震在關廟至龍船斷層附近有產生顯著同震抬升的型態。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。

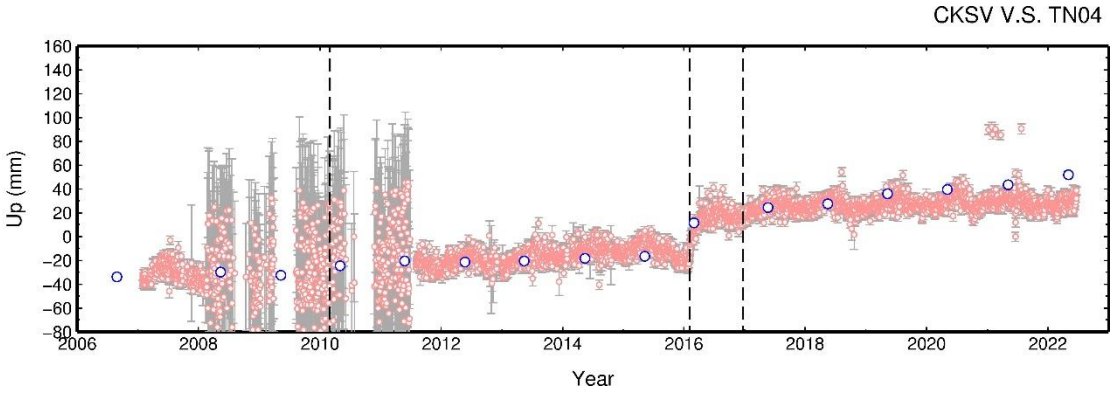


圖 8-3.17：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 8-3.17: 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.

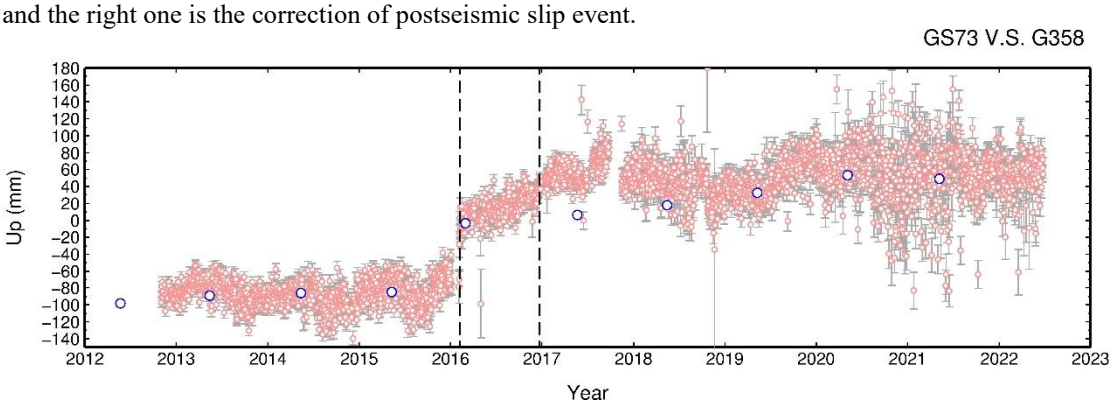


圖 8-3.18：安平至龍崎水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 8-3.18: 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.

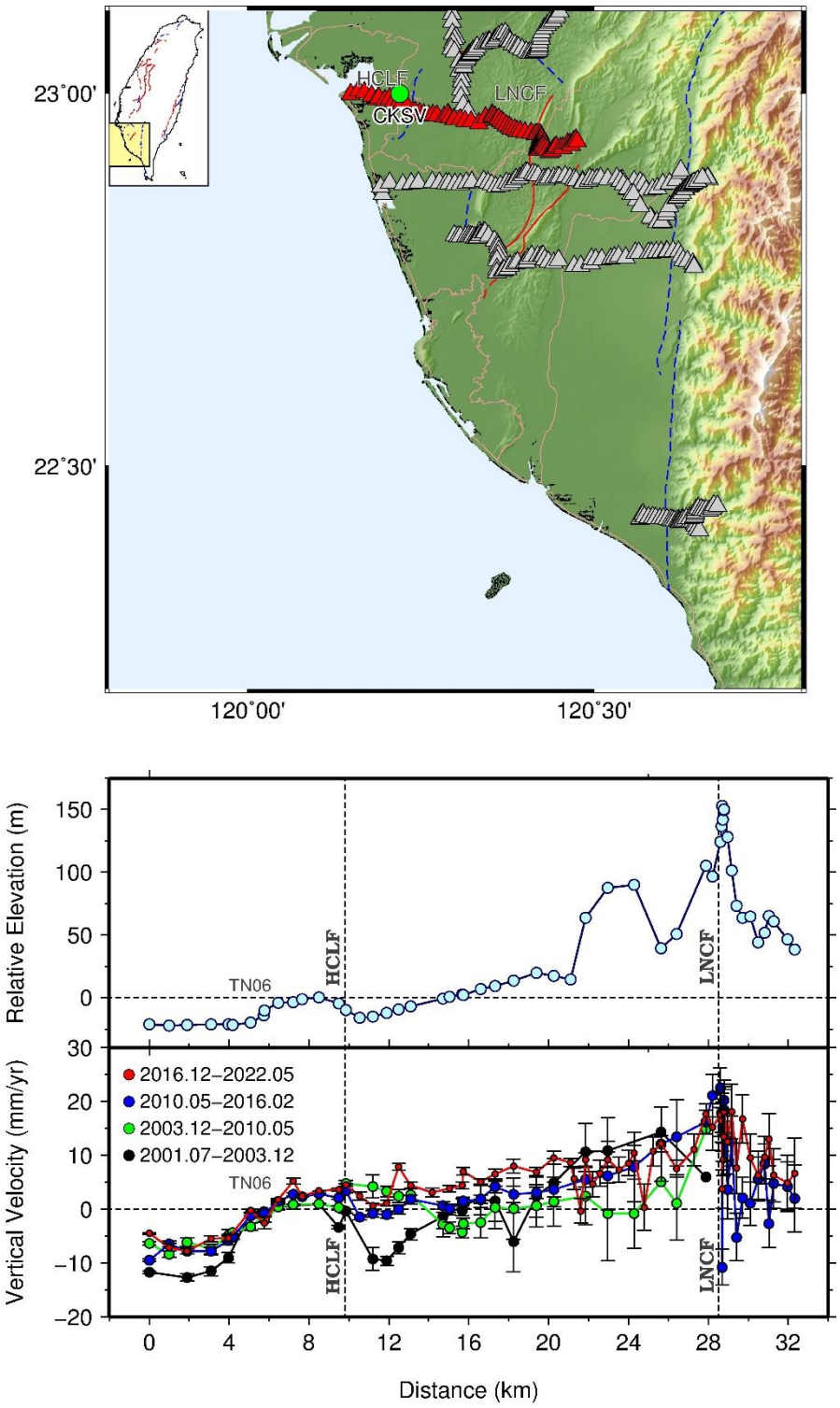


圖 8-3.19：安平至龍崎測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度、藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 8-3.19: 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.

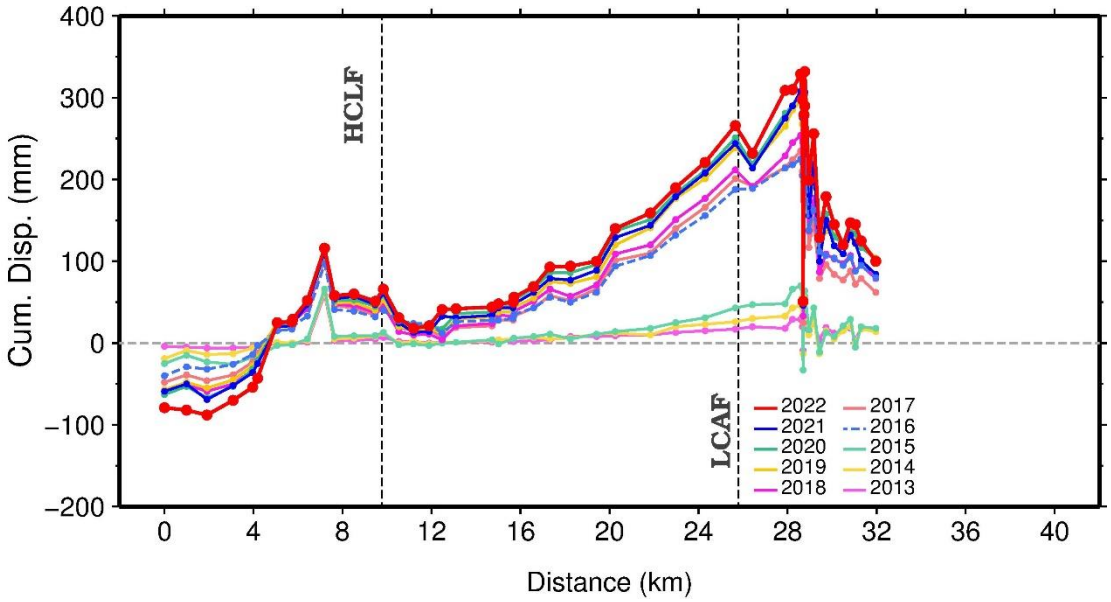


圖 8-3.20：安平至龍崎測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 8-3.20: Cumulative elevation change of the Anping-Longci leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-4-4 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 8-3.22 a），測線剖面投影長度為 17.2 公里，從 2016 年至 2022 年共計有 7 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 8-3.21）。

此測線新化斷層兩側有明顯垂直速度的變化(圖 8-3.22 b)，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。

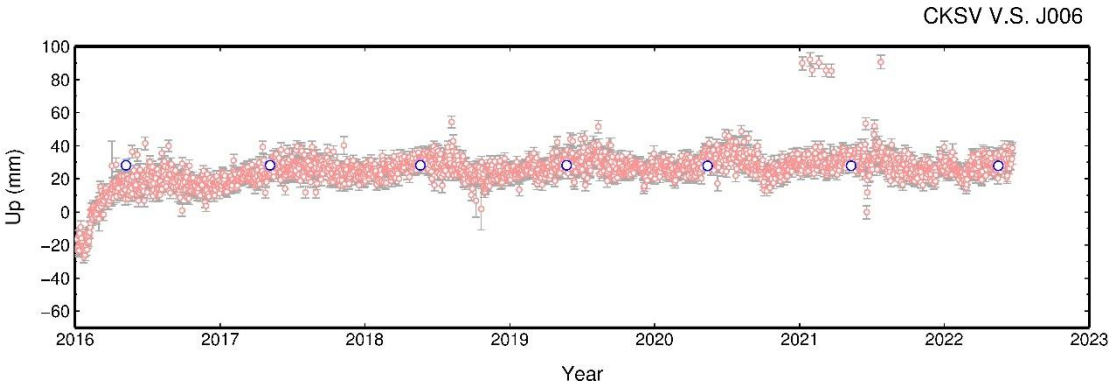


圖 8-3.21：新化至玉井水準點位 J006 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。
Figure 8-3.21: Time series comparison between Yujing-Xinhua leveling benchmark N8537 and continuous GNSS station GS88. The distance between two stations are 0.05 km.

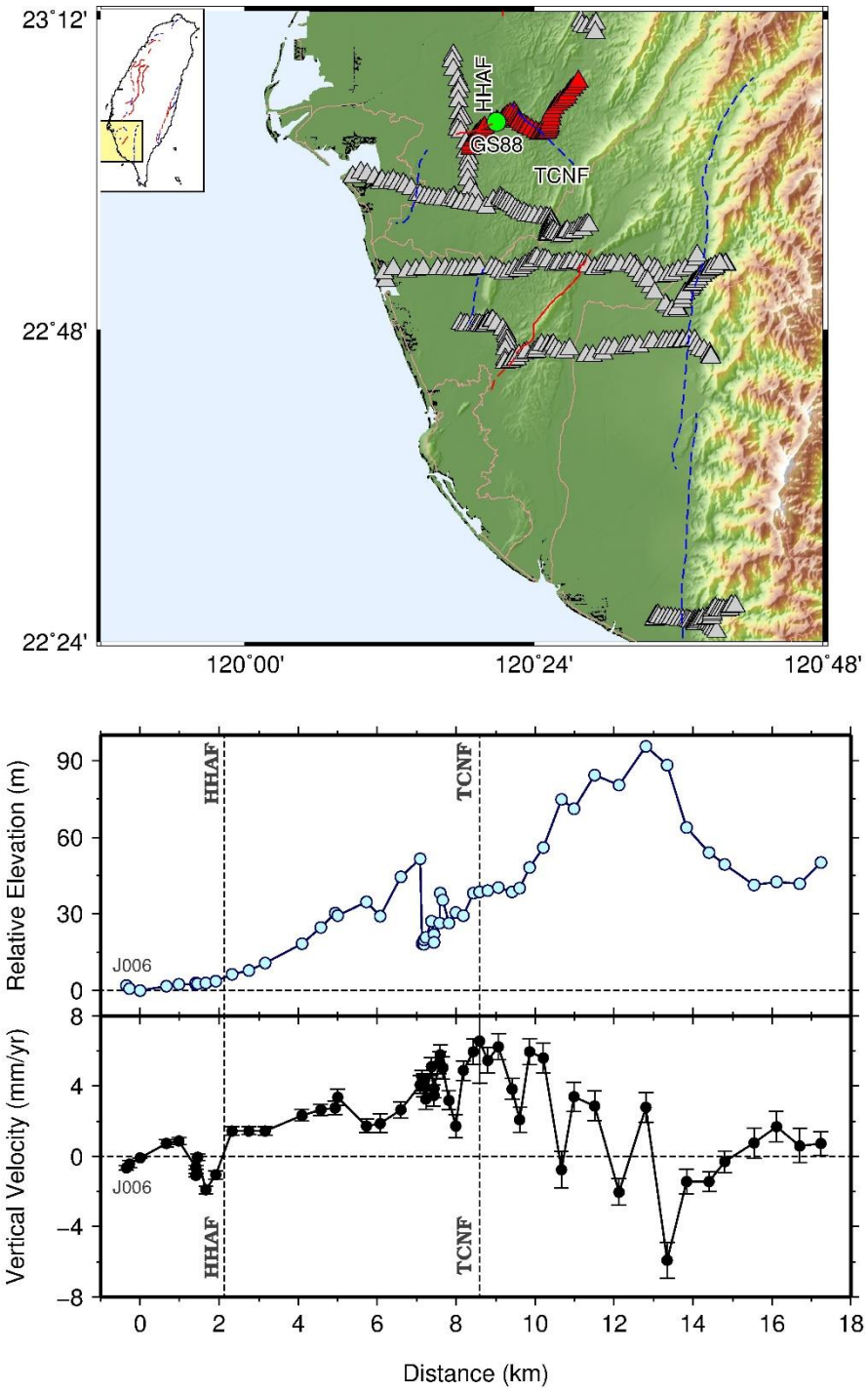


圖 8-3.22：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 8-3.22: 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.

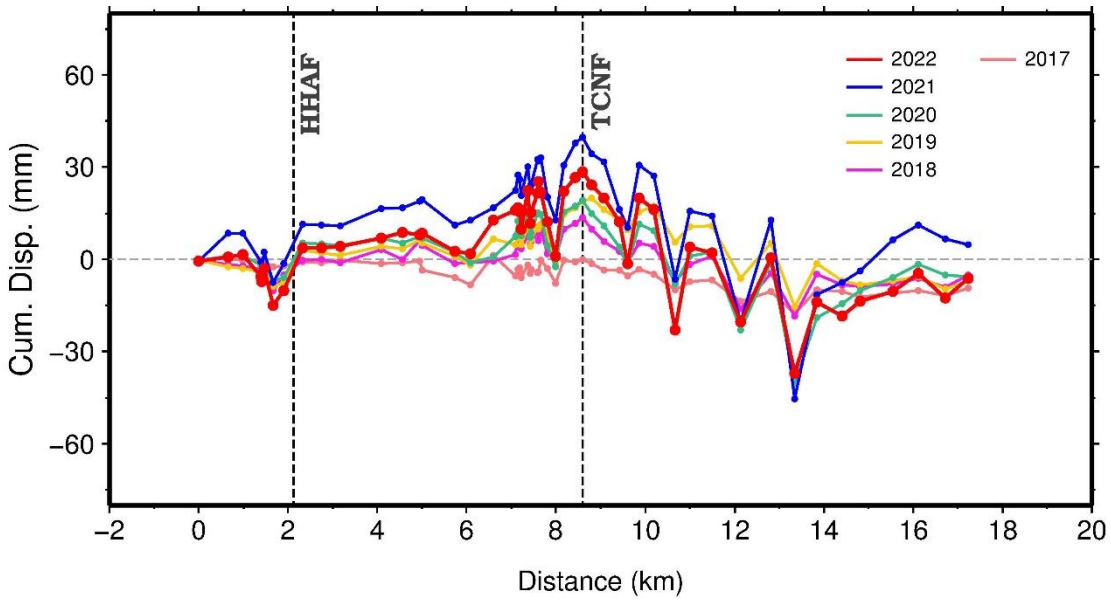


圖 8-3.23：台 20_新化至玉井測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 8-3.23: Cumulative elevation change of the Yujing-Xinhua leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-5 高屏地區精密水準測線

8-3-5-1 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 8-3.25 a），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 8-3.24）。

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 8-3.25 b 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 8-3.26），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。

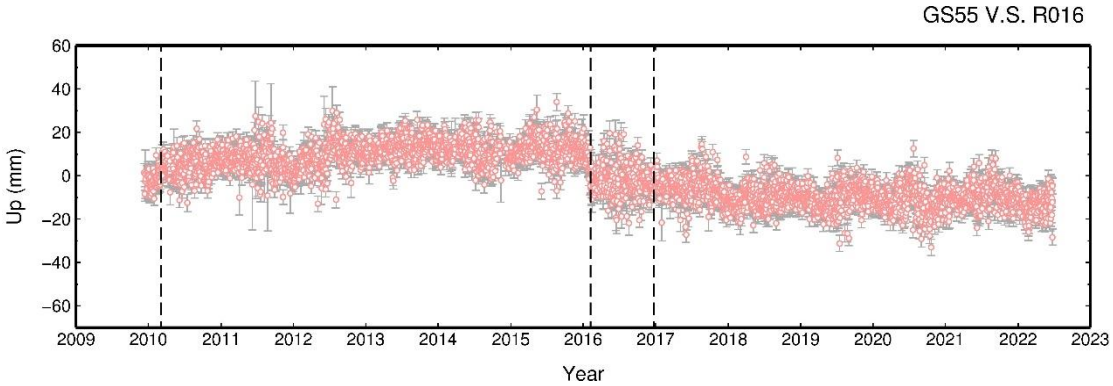


圖 8-3.24：路竹至茂林水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 8-3.24: 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.

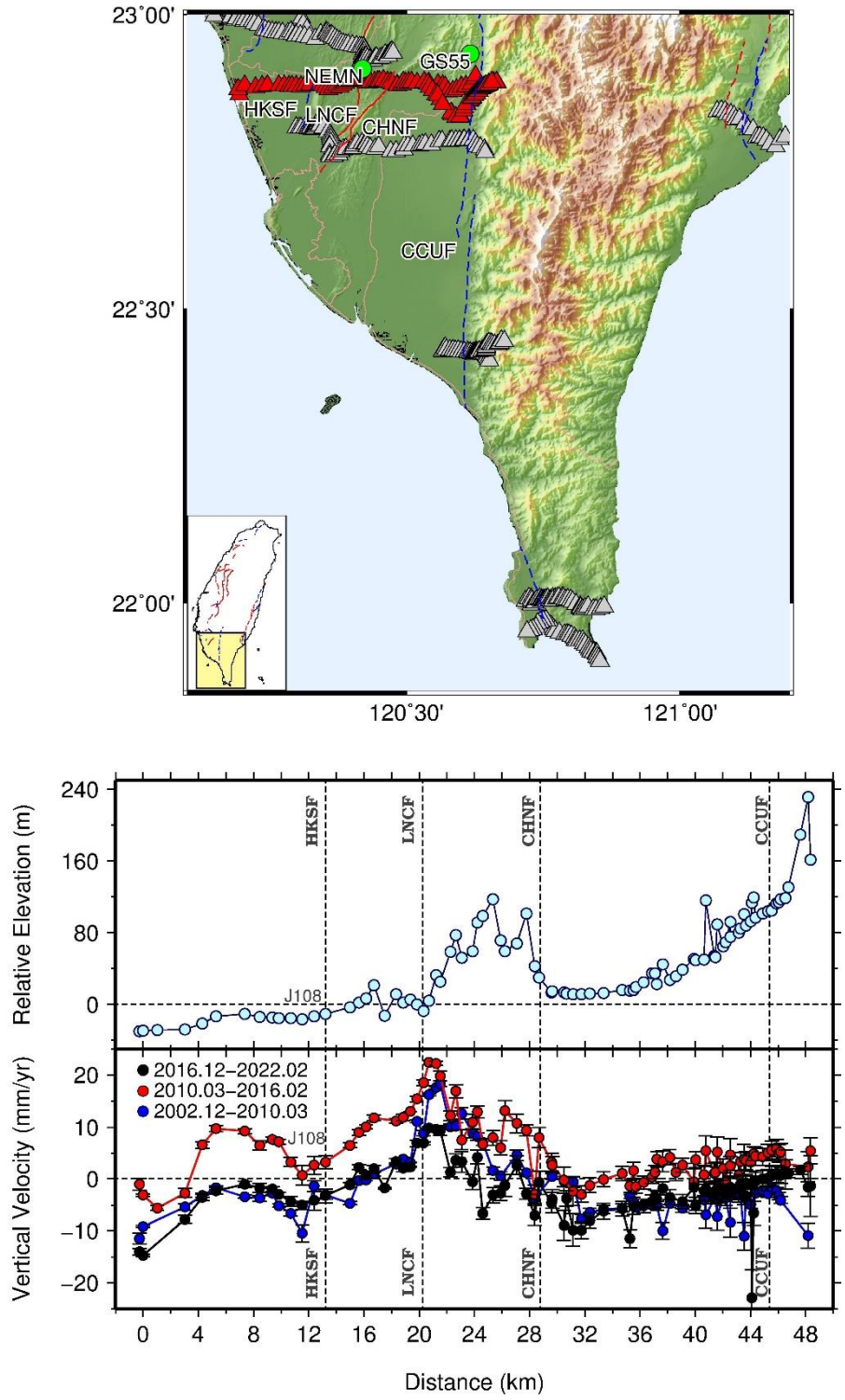


圖 8-3.25：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 8-3.25: 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.

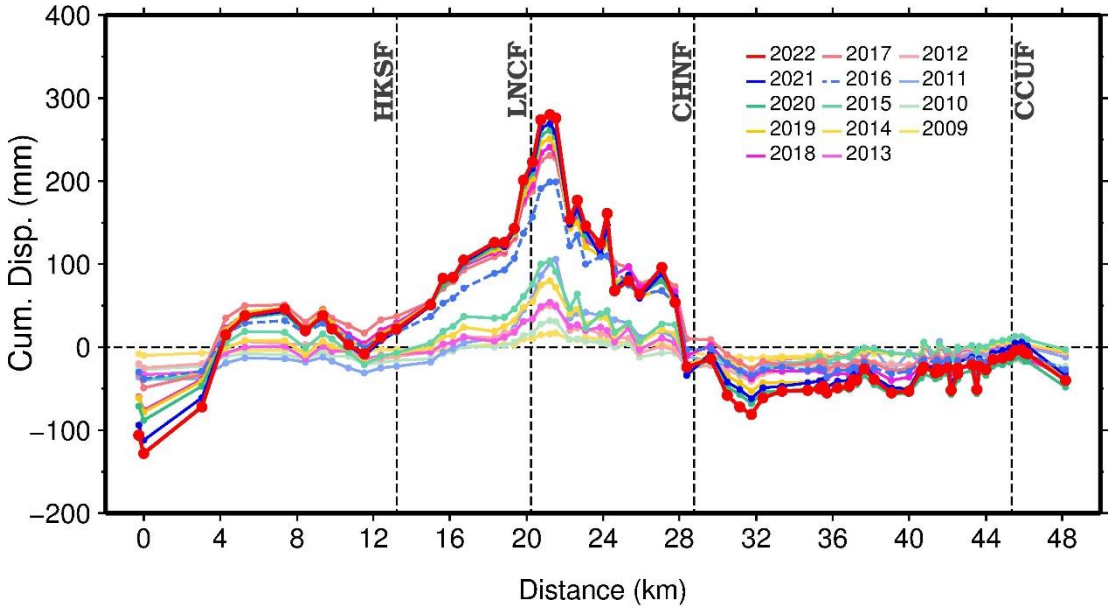


圖 8-3.26：台 28_路竹至茂林主、副線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 8-3.26: Cumulative elevation change of the Luzhu-Maolin leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-5-2 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 8-3.29 a），測線長為 35.4 公里（投影至剖面的長度），從 2004 年至 2021 年共計 18 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 8-3.27）。

根據圖 8-3.29 b，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 8-3.30）。

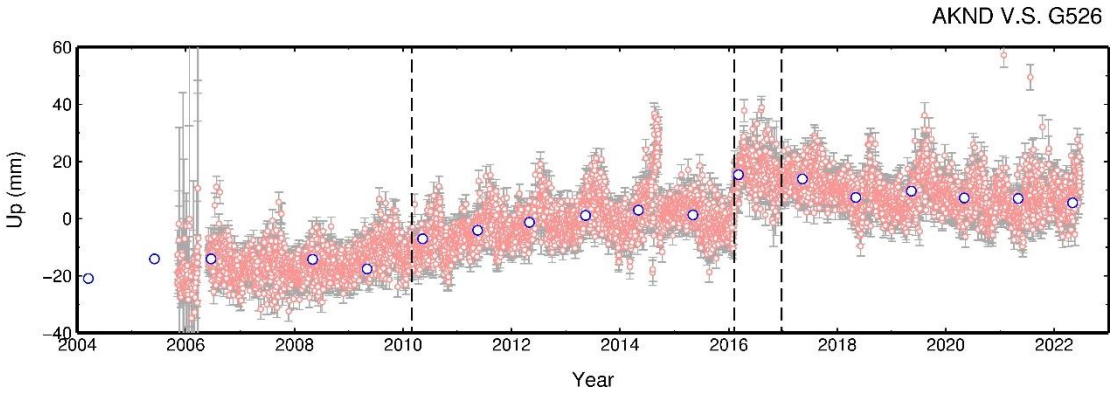


圖 8-3.27：岡山至安坡水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。
Figure 8-3.27: Time series comparison between Kangshan-Anpo leveling bench mark G526 and continuous GNSS station AKND. The distance between two stations are 0.8 km. The left dashed line is 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.

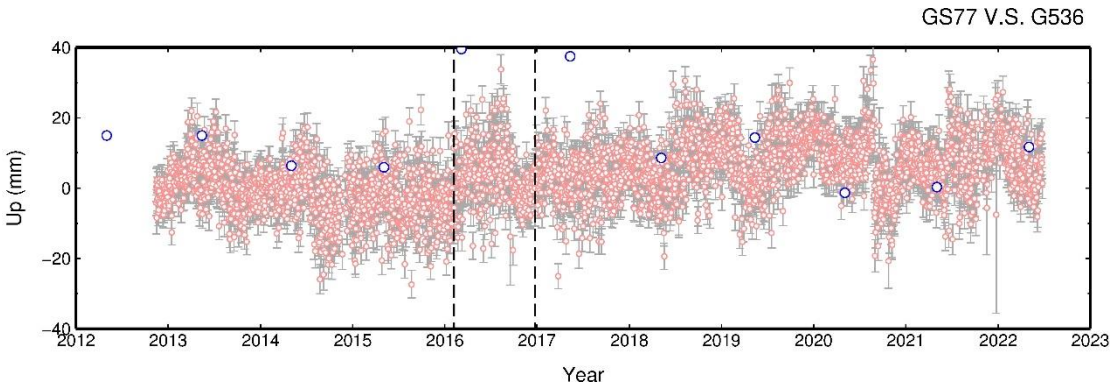


圖 8-3.28：岡山至安坡水準點位 G536 與連續站 GS77 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 8-3.28: 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

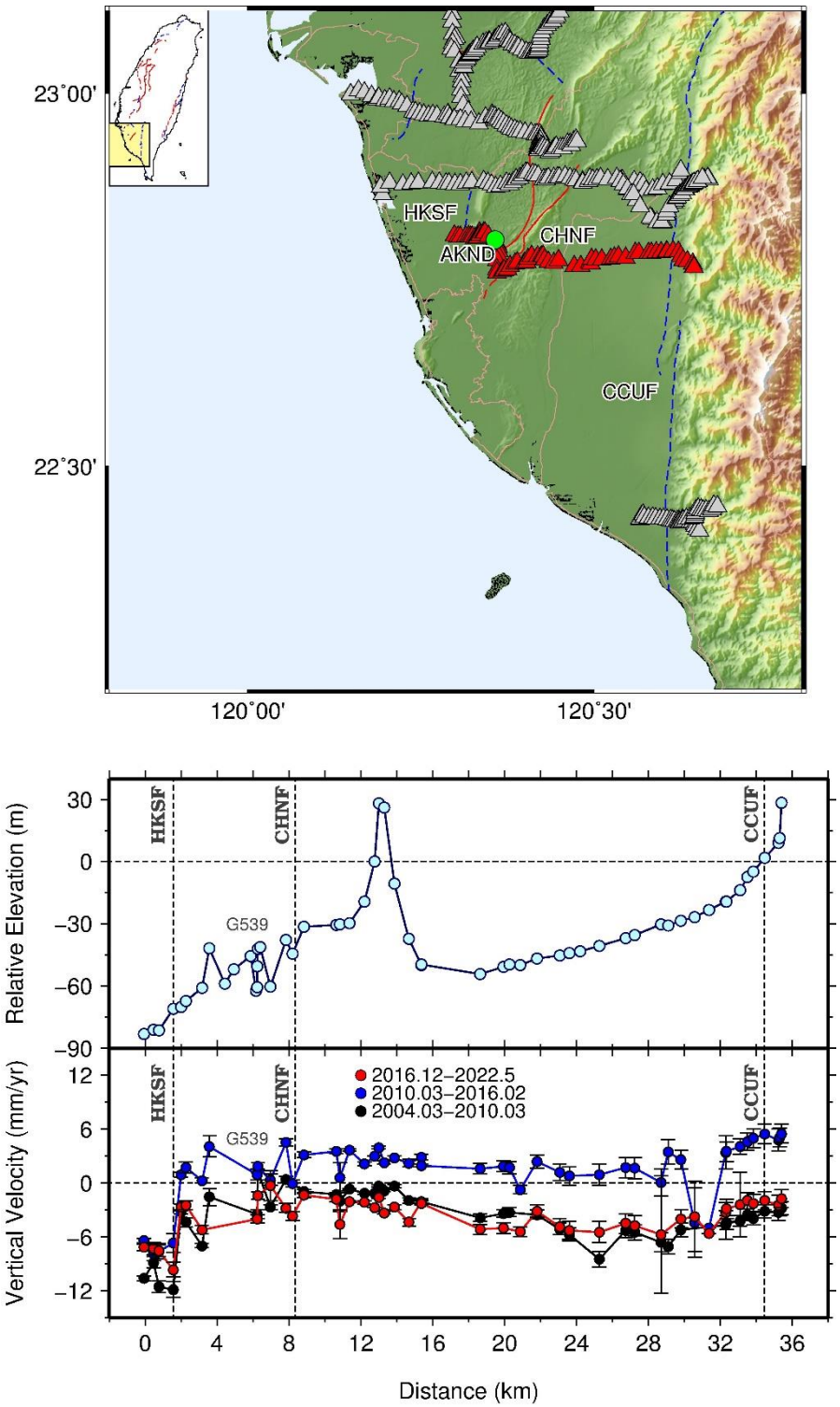


圖 8-3.29：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度、綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 8-3.29: 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.

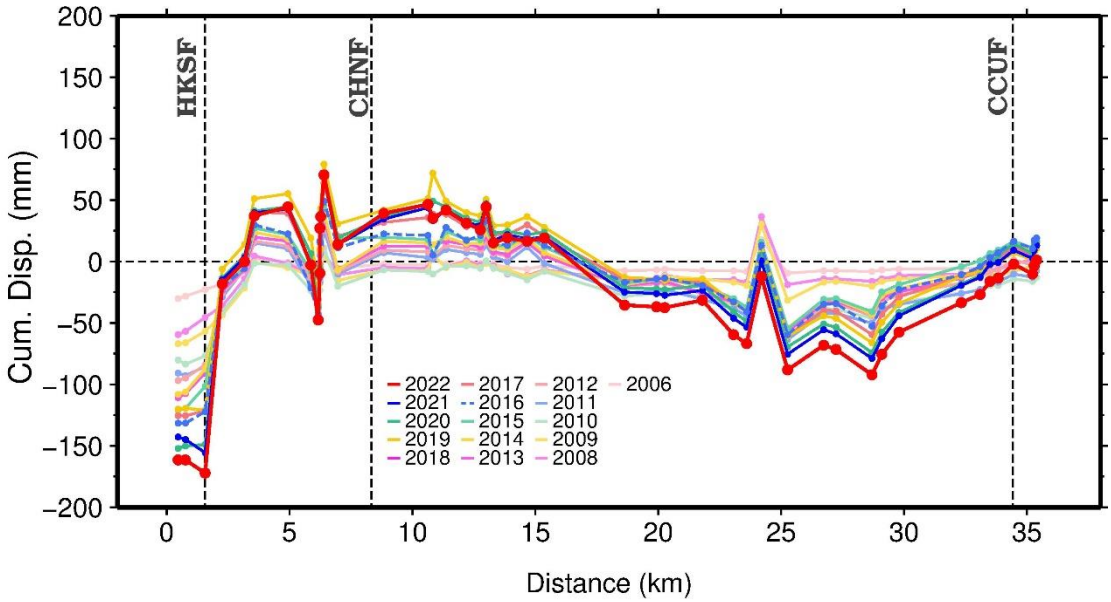


圖 8-3.30：台 22_岡山至安坡測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 8-3.30: Cumulative elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-5-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層（圖 8-3.32 a），測線長為 8.5 公里（投影至剖面的長度），於 2005 至 2022 年間共進行了 18 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 8-3.31）。

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 8-3.32 b），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。

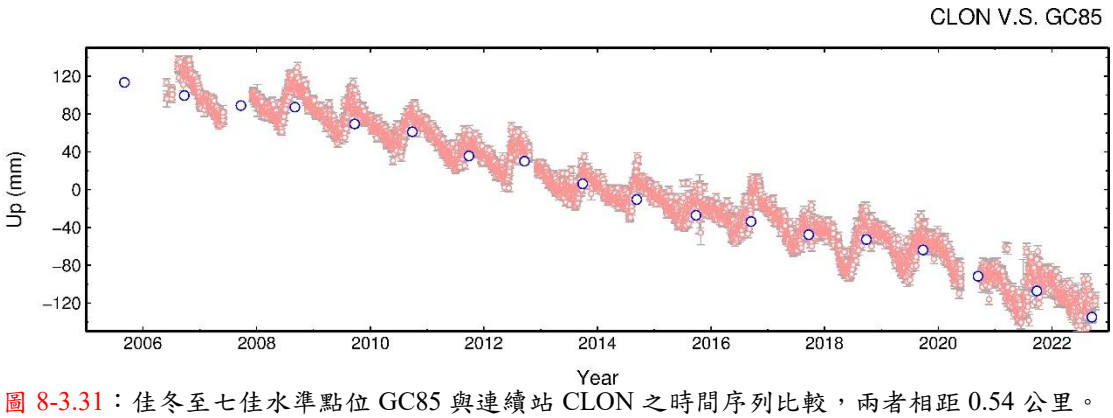


圖 8-3.31：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較，兩者相距 0.54 公里。
Figure 8-3.31: Time series comparison between Jiadong-Qijia leveling bench mark GC85 and continuous GNSS station CLON. The distance between two stations are 0.54 km.

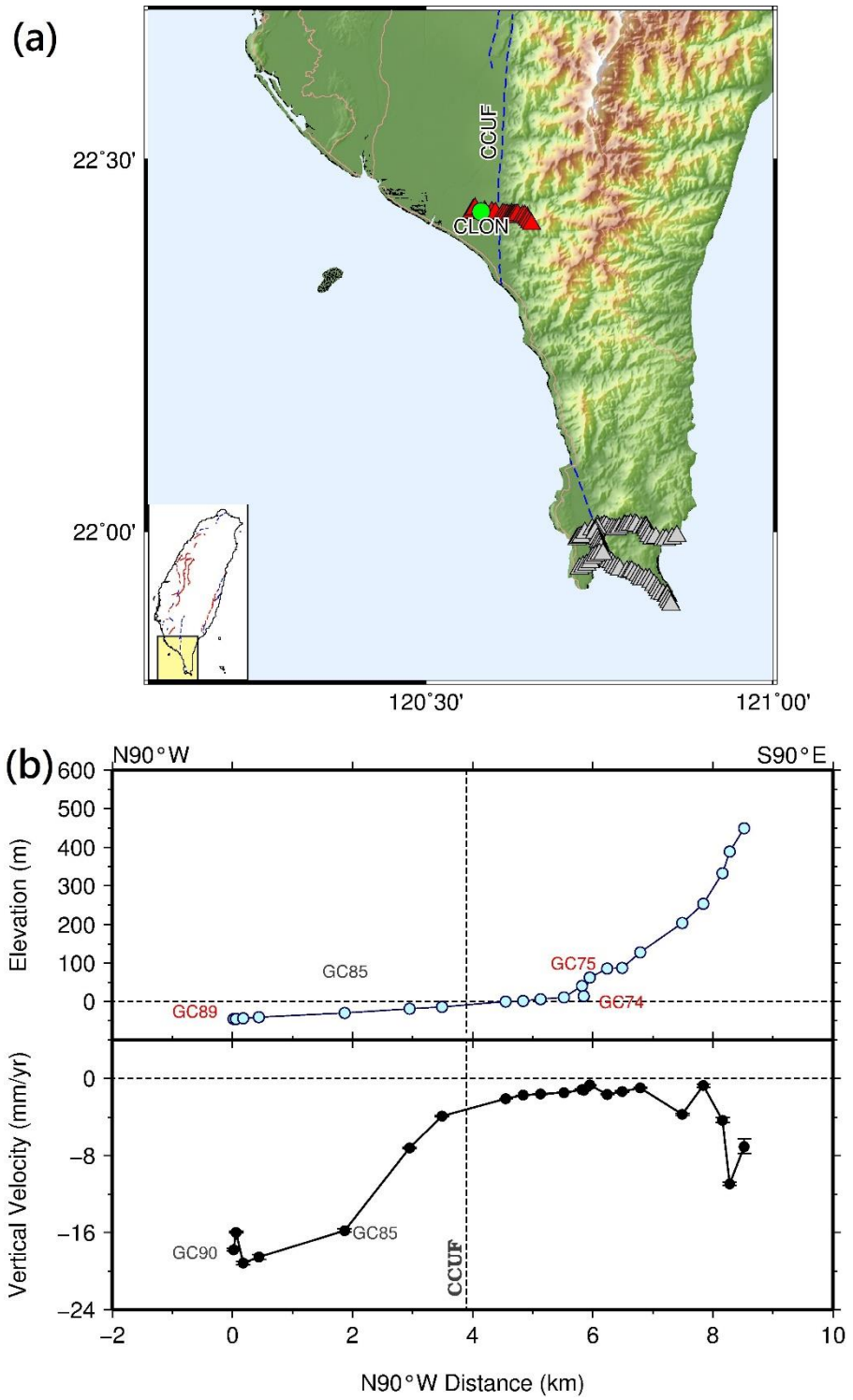


圖 8-3.32：佳冬至七佳測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 8-3.32: 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.

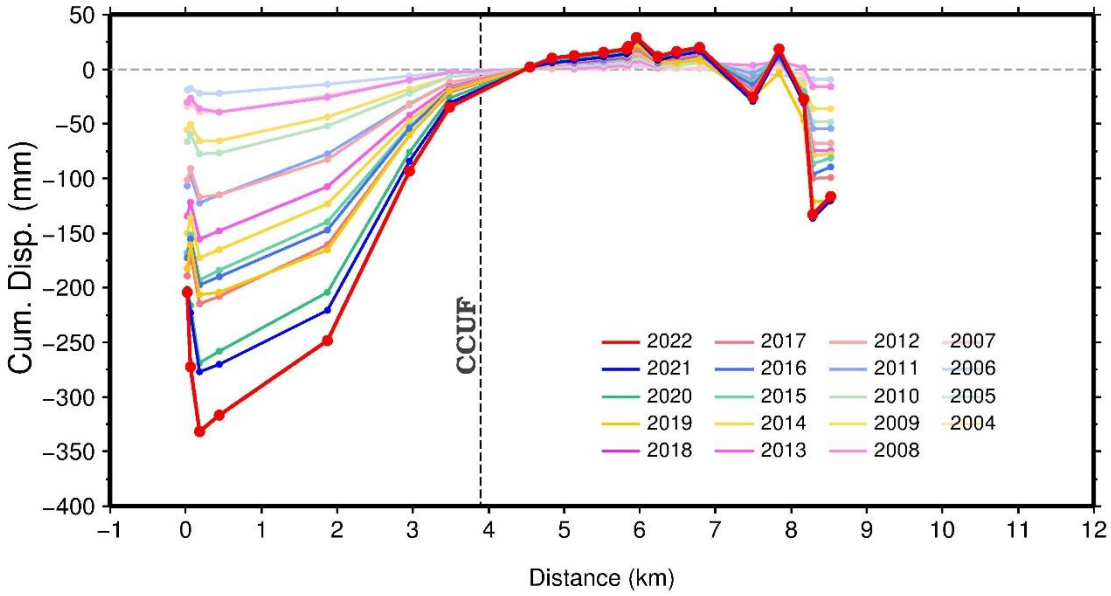


圖 8-3.33：佳冬至七佳測線測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 8-3.33: Cumulative elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

8-3-6 中部地區精密水準測線

8-3-6-1 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 8-3.35 a），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 2022 年止共計有 18 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 8-3.34)。

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 8-3.35 b），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。

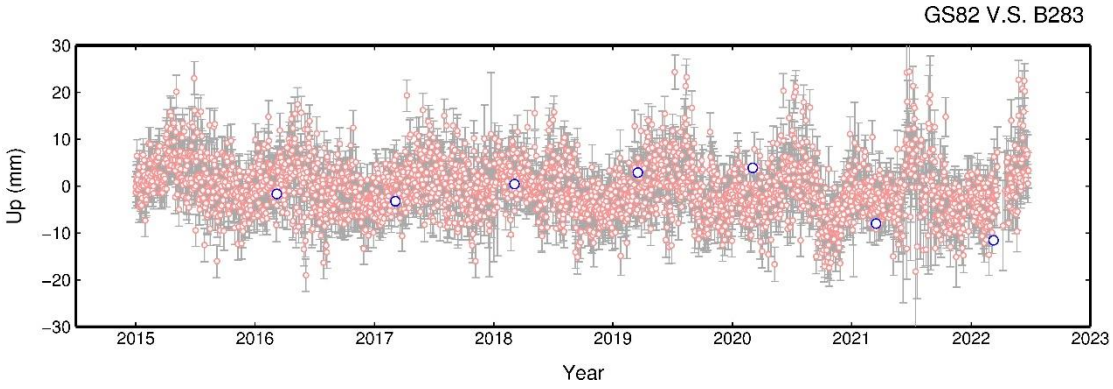


圖 8-3.34：大安至東勢水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。
Figure 8-3.34: Time series comparison between Da'an-Dongshi leveling bench mark B283 and continuous GNSS station GS82. The distance between two stations are 1.5 km.

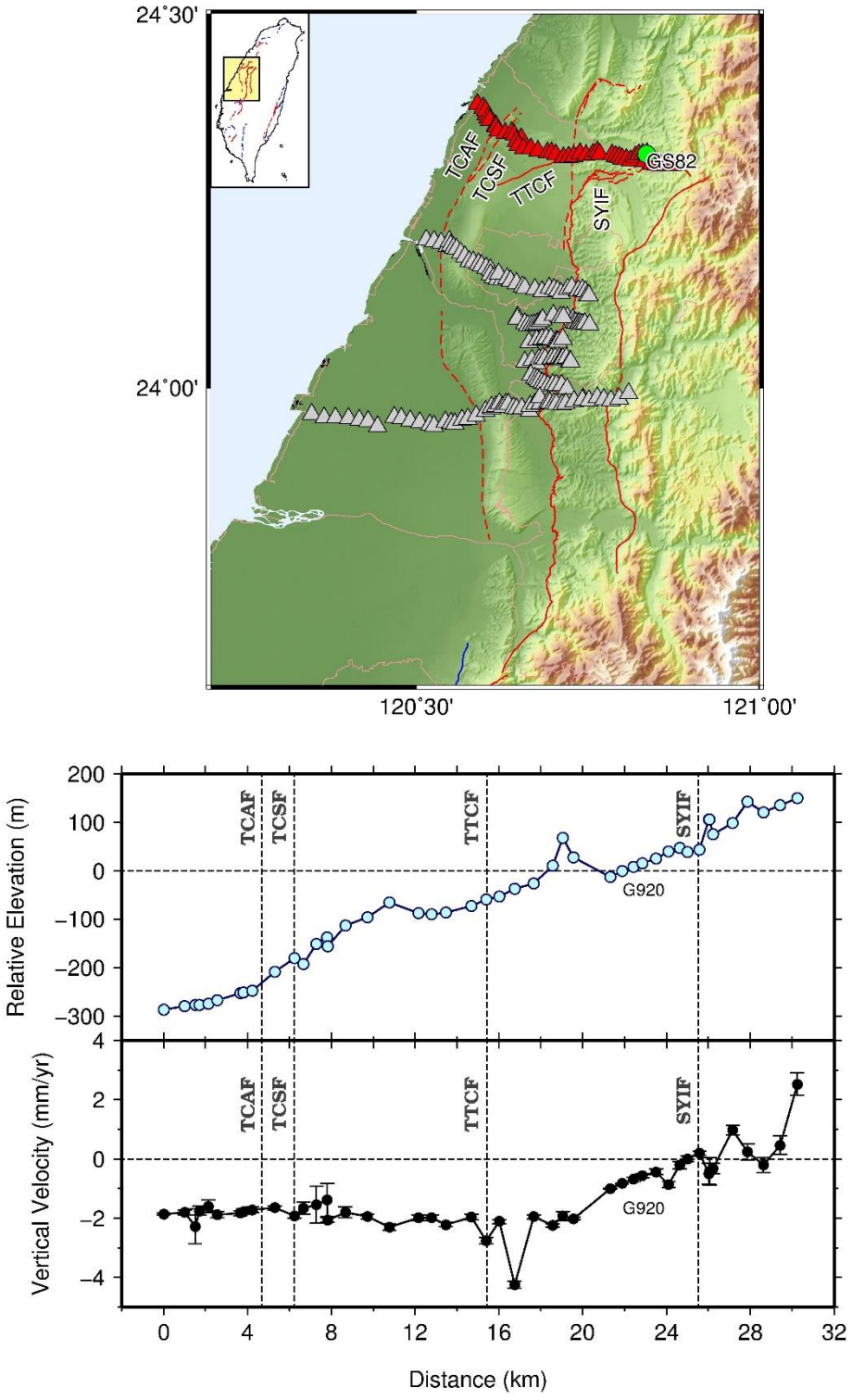


圖 8-3.35：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

Figure 8-3.35: 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.

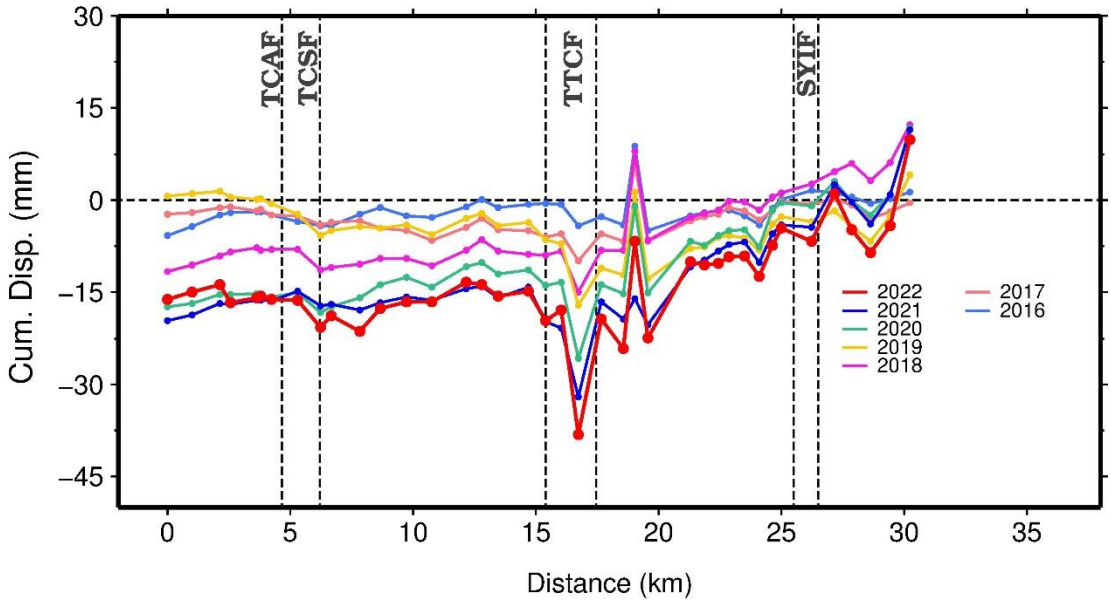


圖 8-3.36：縣 132_大安至東勢測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

Figure 8-3.36: Cumulative elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-6-2 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 8-3.38 a），測線長約 25.5 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2022 年間，共進行 18 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 8-3.37）。

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 8-3.38 b），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。

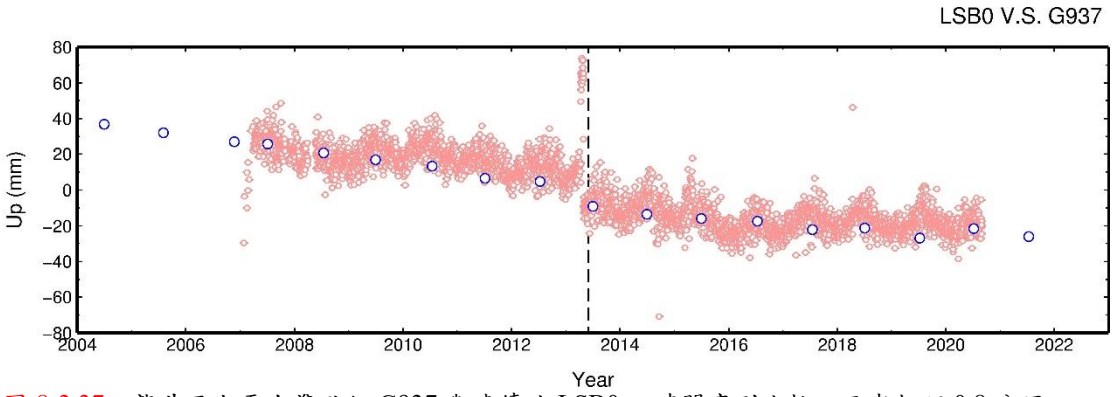


圖 8-3.37：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。
Figure 8-3.37: Time series comparison between Longjing-Taiping leveling bench mark G937 and continuous GNSS station LSB0. The distance between two stations are 0.8 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

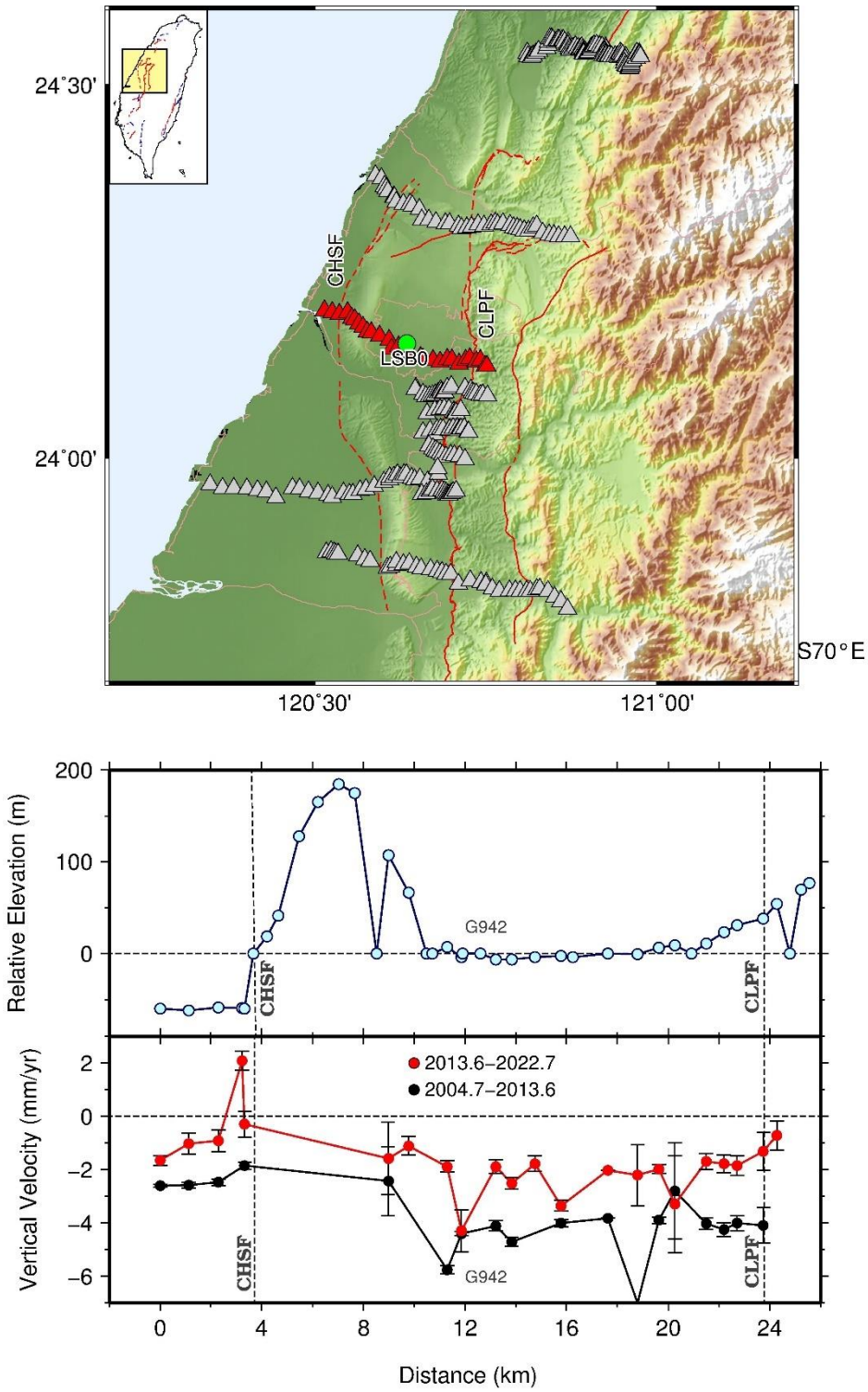


圖 8-3.38：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2004 - 2013 年南投地震震前垂直速度、紅色為 2013 至至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 8-3.38: 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.

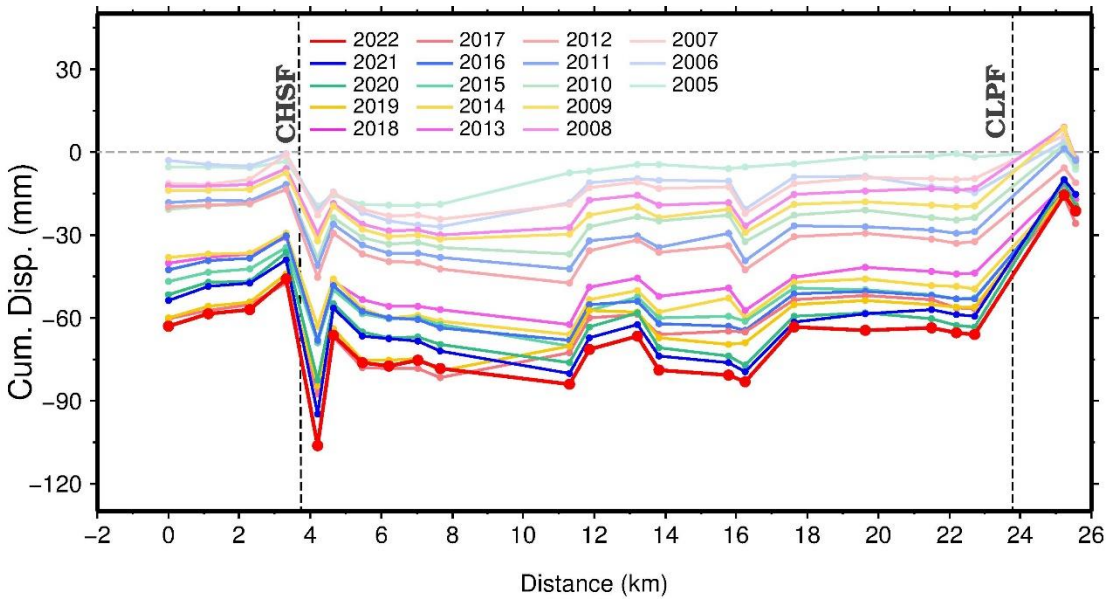


圖 8-3.39：縣 136_龍井至太平測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TTCAF 為大甲斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 8-3.39: Cumulative elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-6-3 五光至黃竹測線

五光-黃竹測線橫跨車籠埔斷層（圖 8-3.41 a），總長為 11.0 公里（投影至剖面的長度），自 2006 至 2022 年止共計施測 17 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 8-3.40）。

從垂直速度及歷年高程變化來看（圖 8-3.41 b），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穩定以 -2 ~ -3 mm/yr 之速率下陷，累積變化如圖 8-3.42。

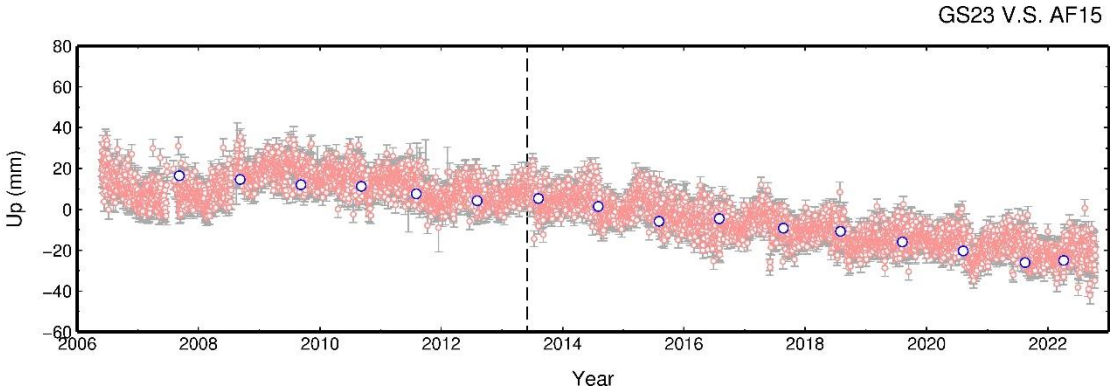


圖 8-3.40：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

Figure 8-3.40: 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.

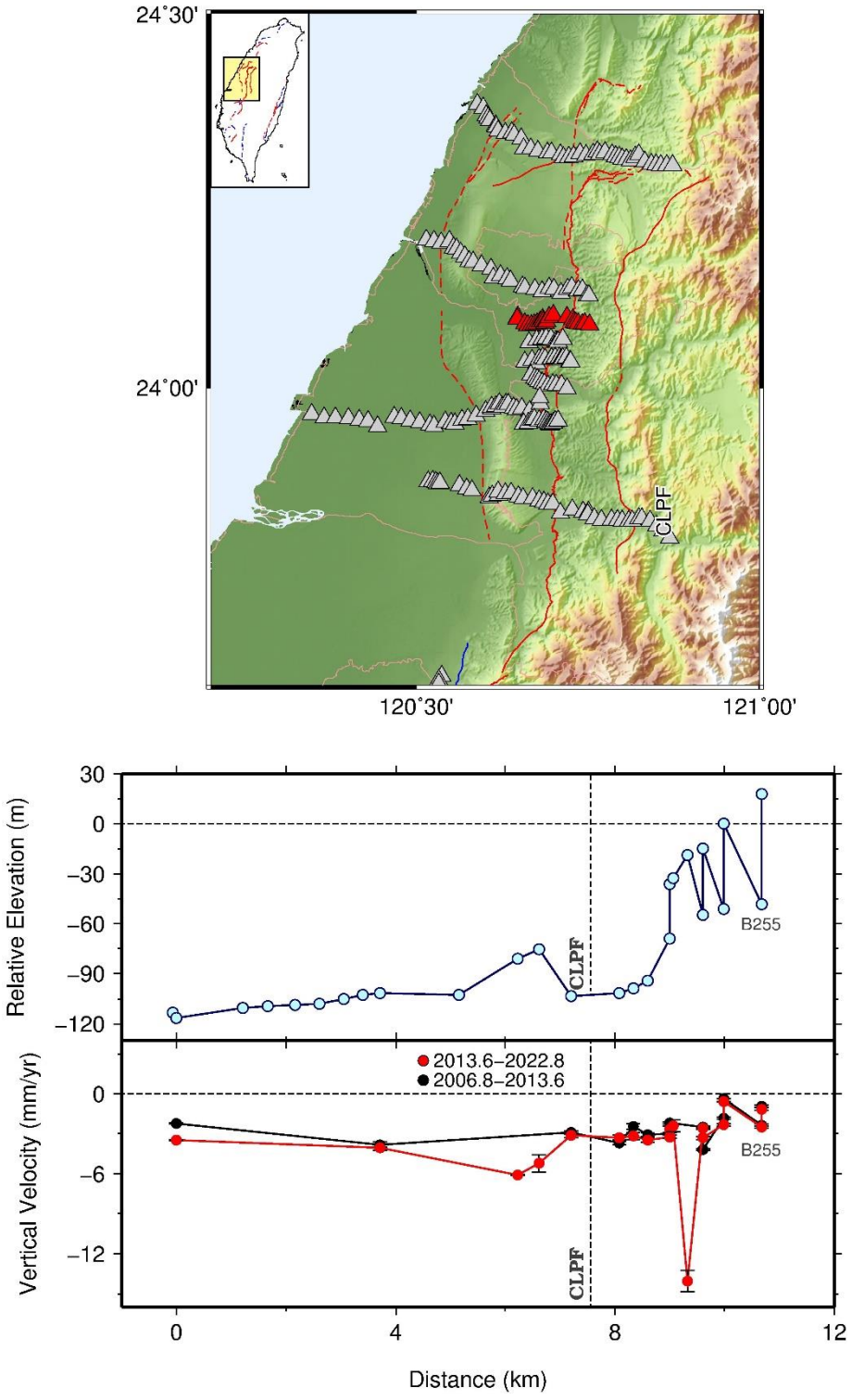


圖 8-3.41：五光至黃竹測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 8-3.41: 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.

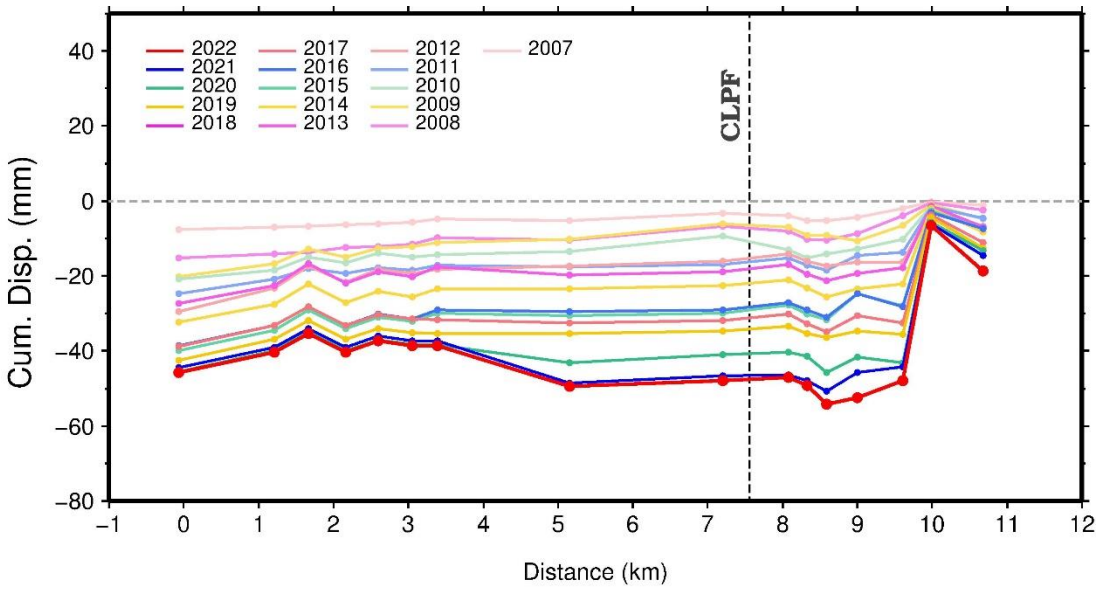


圖 8-3.42：五光至黃竹測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 8-3.42: Cumulative elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPE is Chelungpu fault.

8-3-6-4 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 8-3.44 a），總長為 47.0 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2022 年共計有 19 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 8-3.43）。

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 8-3.44 b），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（圖 8-3.45）。

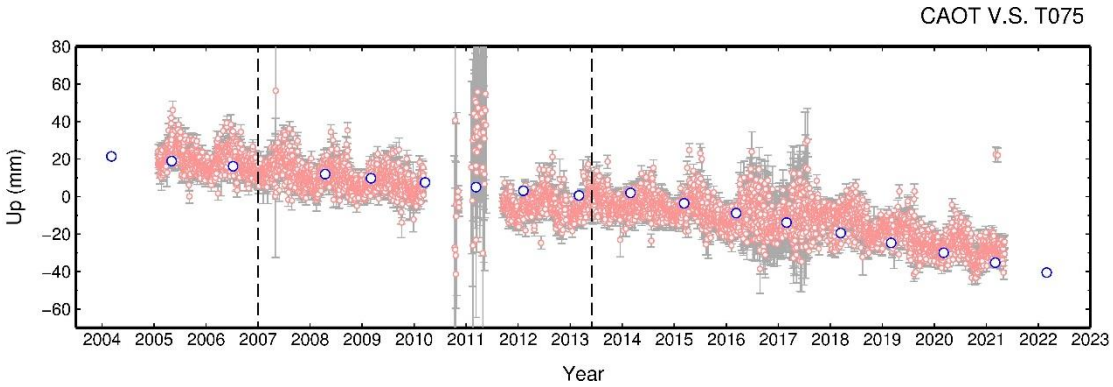


圖 8-3.43：王功至草屯測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左側虛線為 2007 年速度轉折，右側虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 8-3.43: 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.

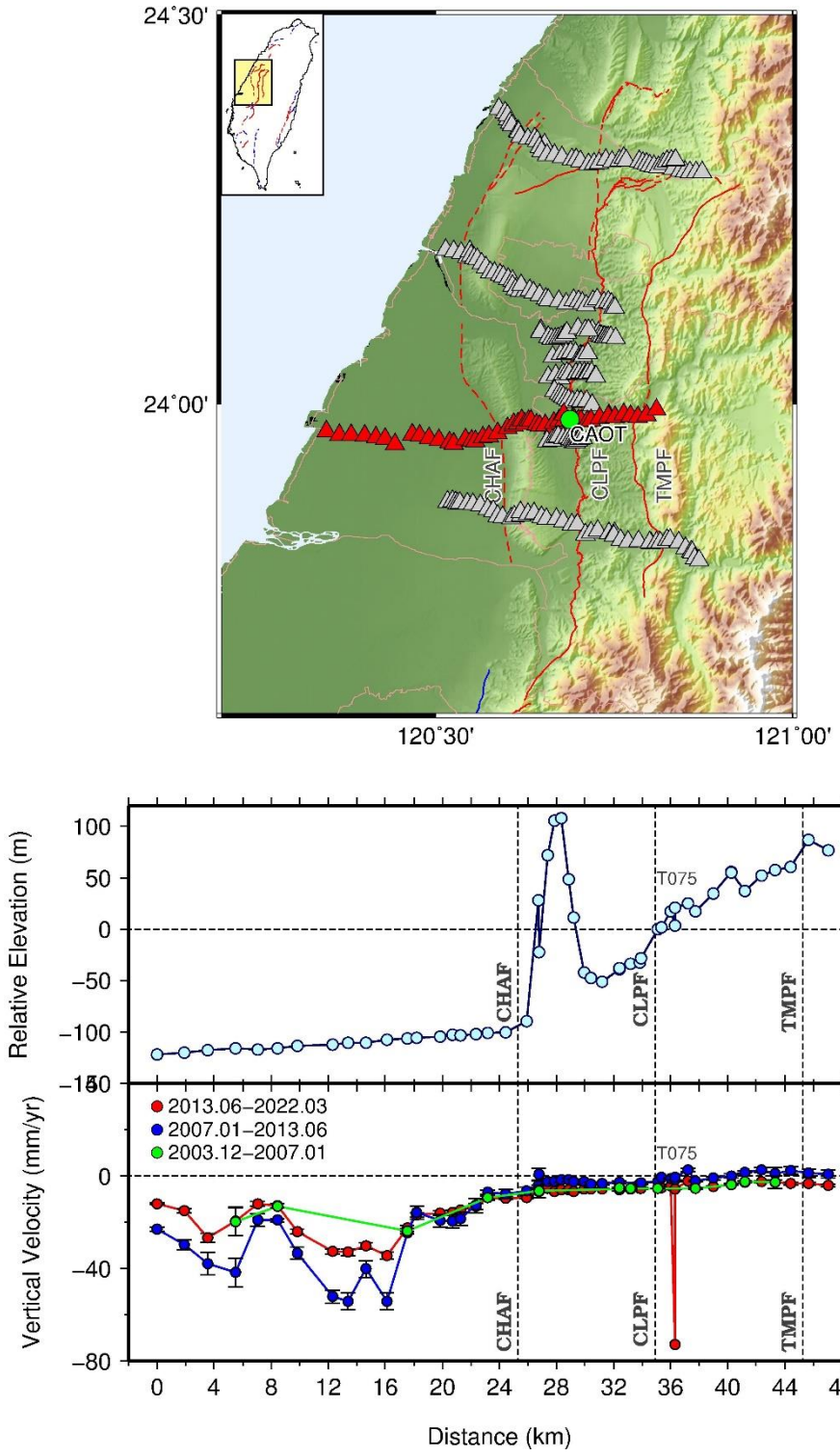


圖 8-3.44：縣 148-台 14_王功至草屯水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 8-3.44: 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.

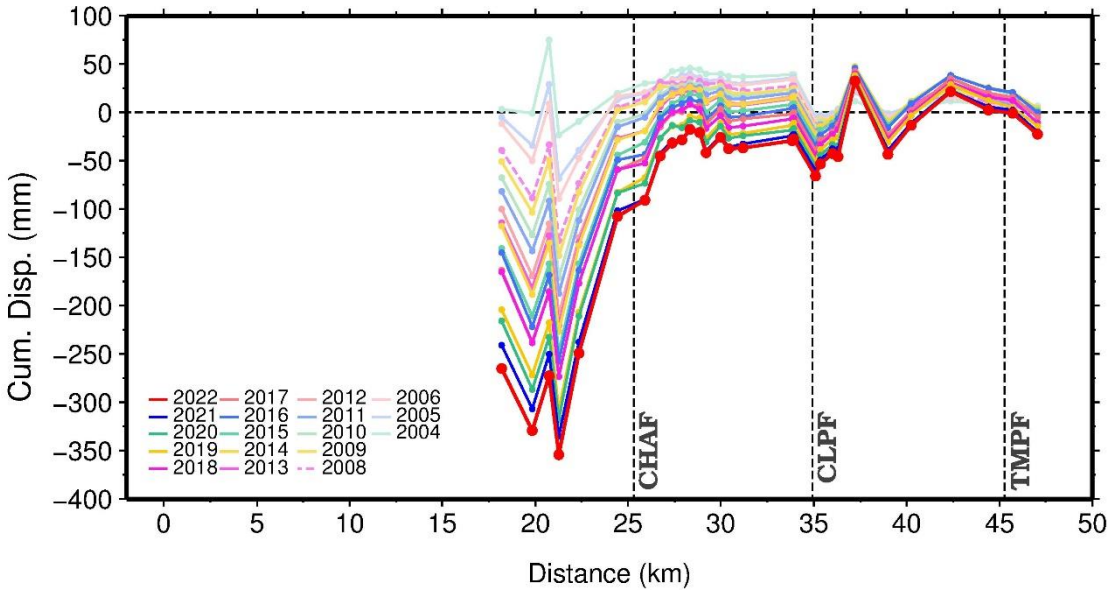


圖 8-3.45：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 8-3.45: Cumulative elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-6-5 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 8-3.47 a），測線長為 36.8 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2022 年共計有 19 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 8-3.46），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。

根據圖 8-3.47 b，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 8-3.48）。

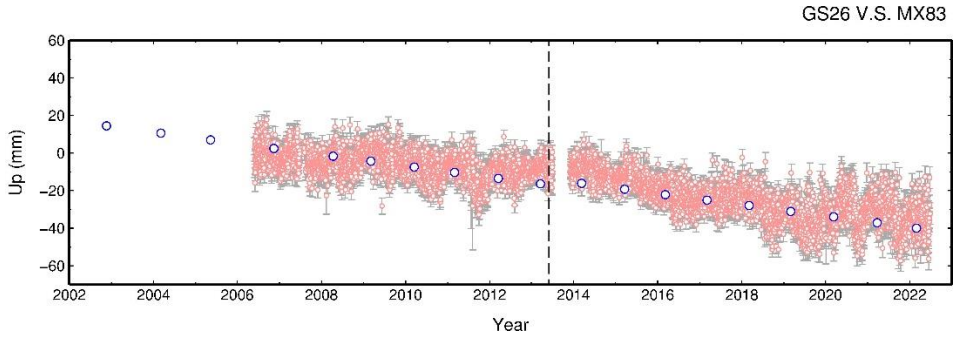


圖 8-3.46：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 8-3.46: 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.

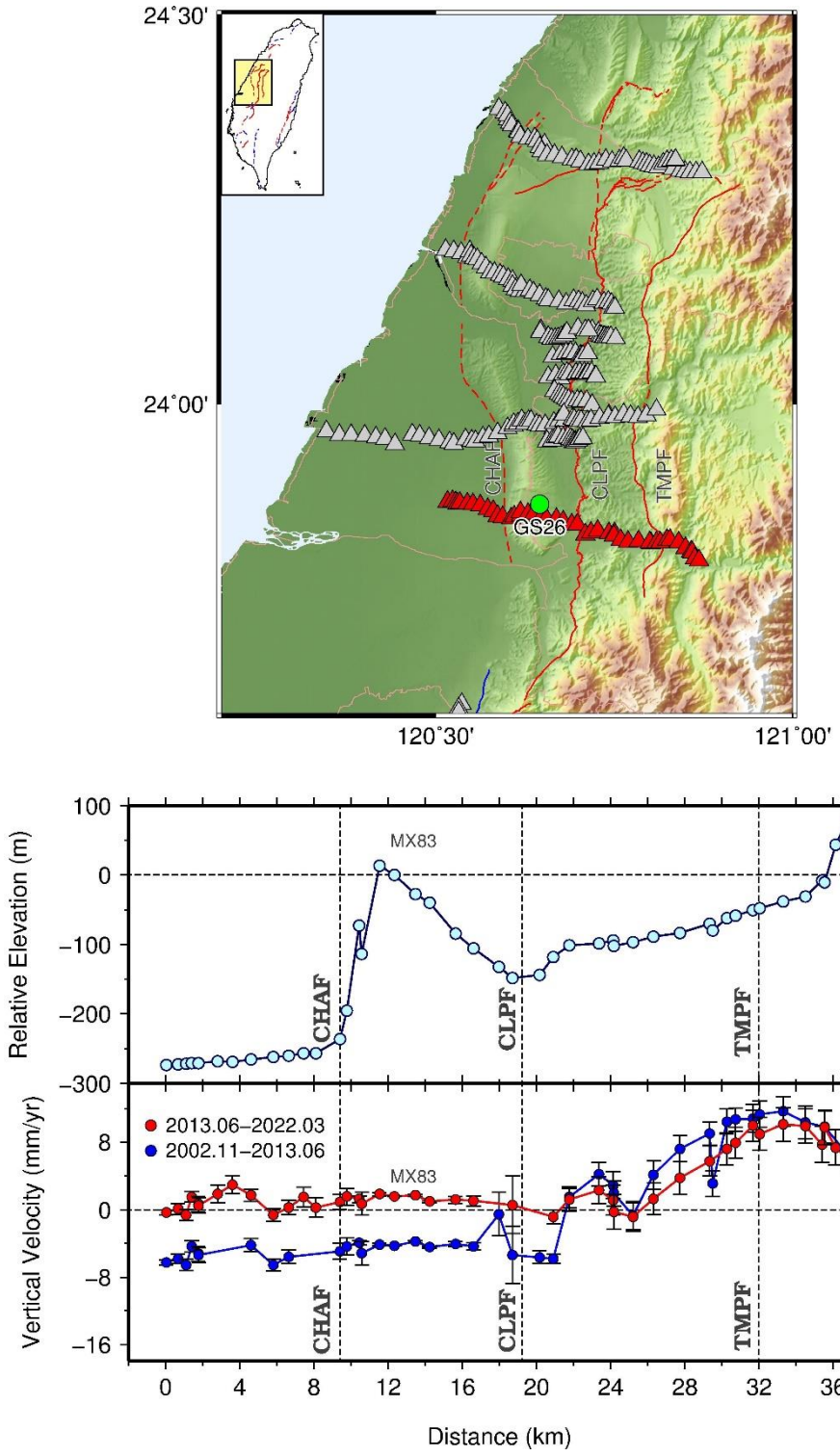


圖 8-3.47：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

Figure 8-3.47: 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.

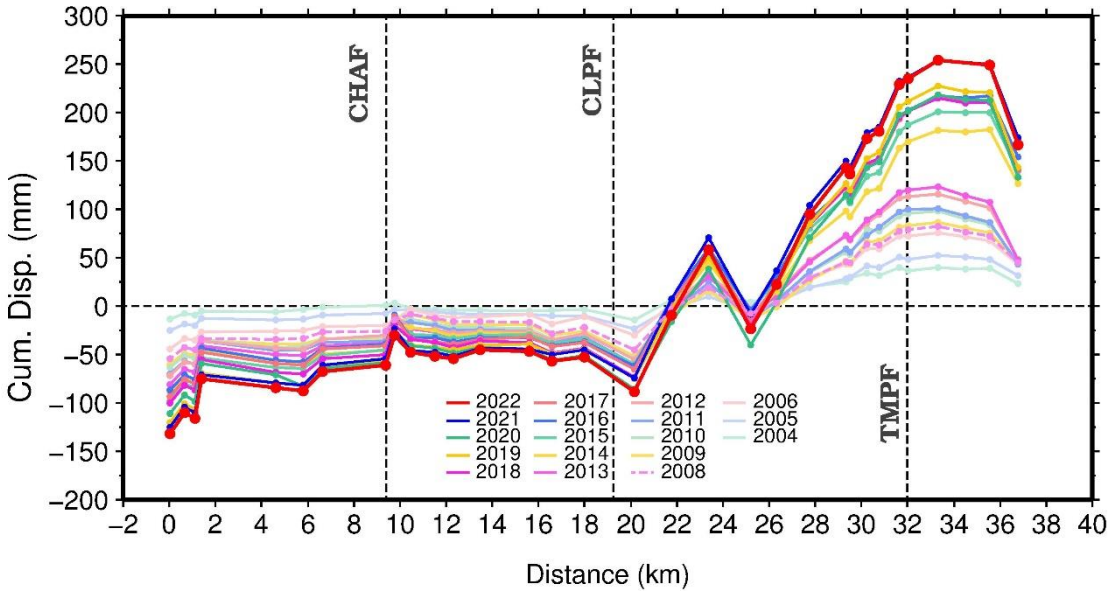


圖 8-3.48：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

Figure 8-3.48: Cumulative elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-7 東部地區精密水準解算

8-3-7-1 嶺頂至龍澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層（圖 8-3.51 a），測線長為 20.0 公里，從 2004 年至 2022 年共計有 20 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 8-3.50）。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 8-3.51 b），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 8-3.52）。

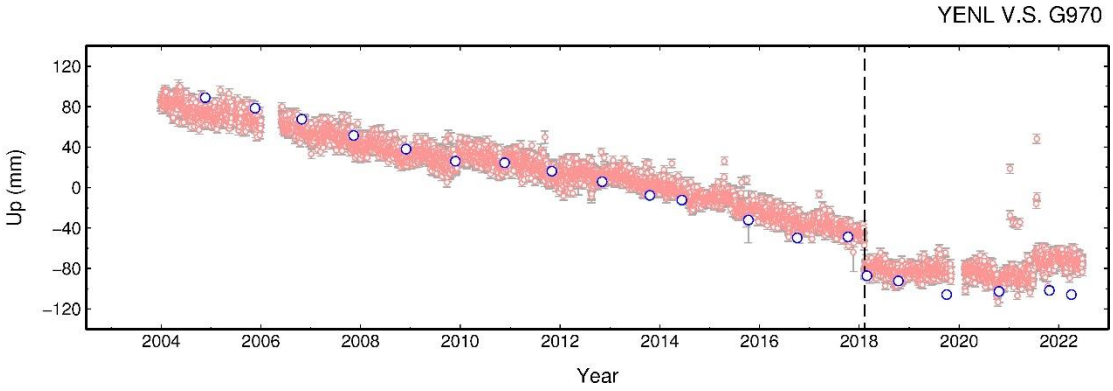


圖 8-3.49：嶺頂至瀧澗水準點位 G970 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 8-3.49: 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.

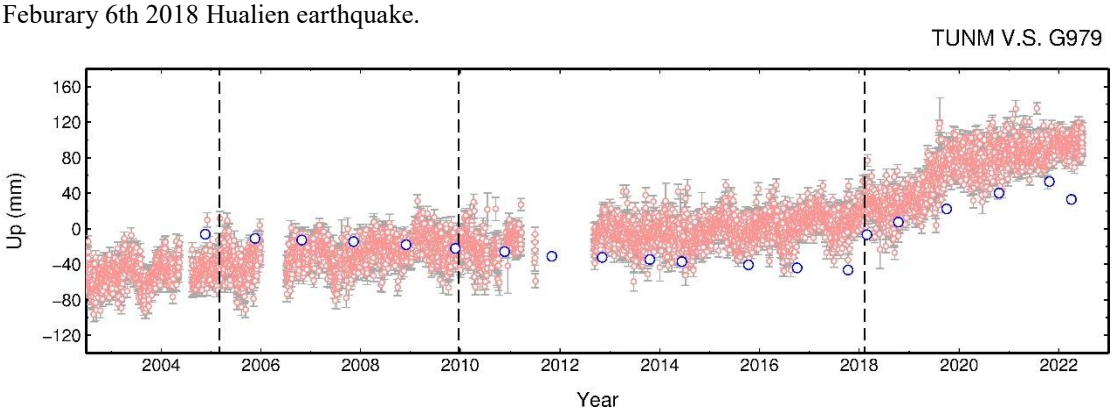


圖 8-3.50：嶺頂至瀧澗水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較，兩者相距 4.8 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 8-3.50: 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.

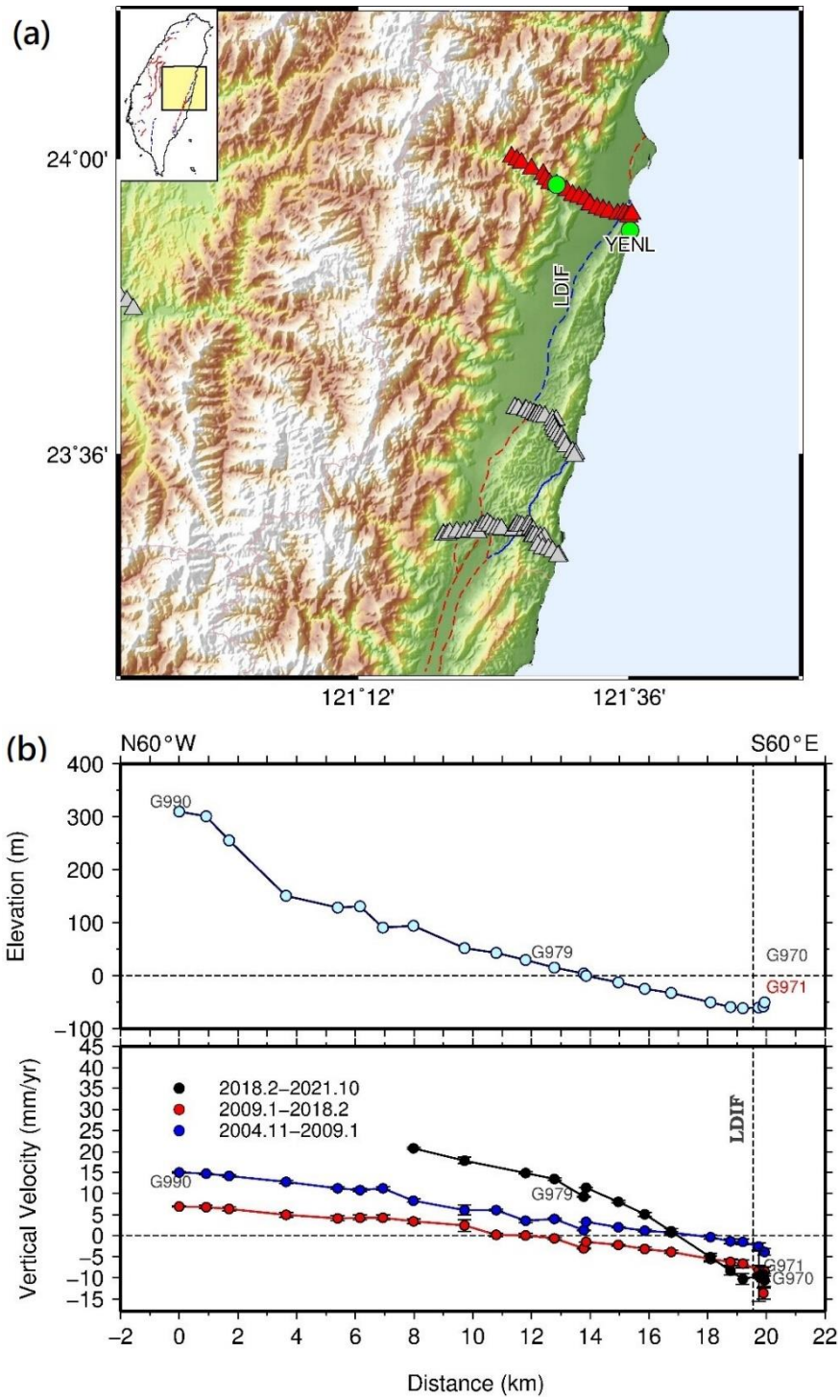


圖 8-3.51：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。藍色為 2004 - 2009 年垂直速度、紅色為 2009 年 1 月至 2018 年 2 月、黑色為 2018 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 8-3.51: 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.

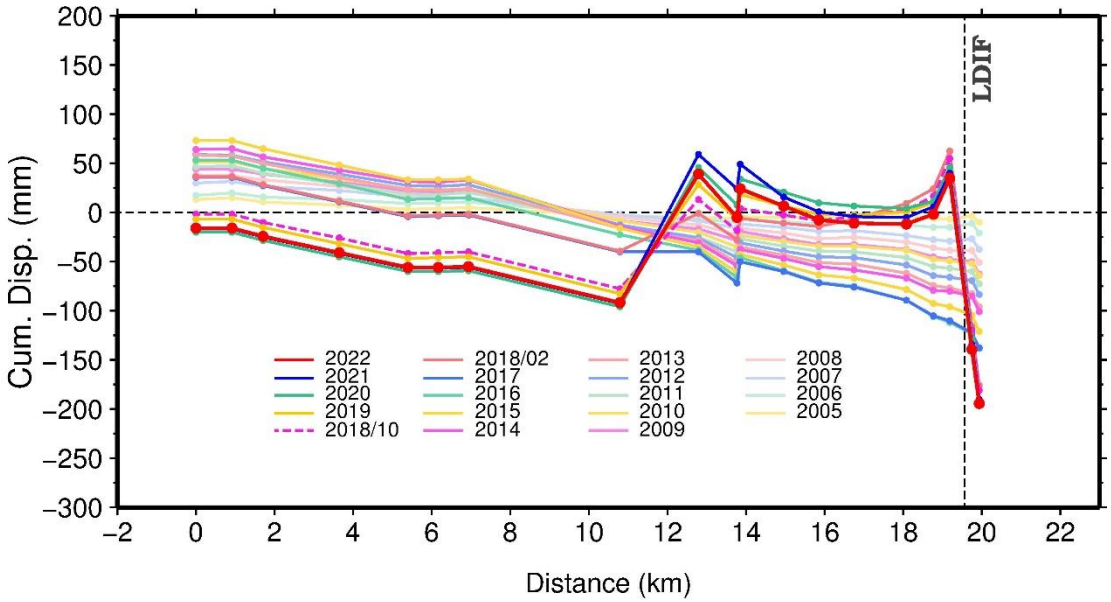


圖 8-3.52：嶺頂至瀧澗測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 8-3.52: Cumulative elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

8-3-7-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層（圖 8-3.54 a），測線長為 12.1 公里(投影至剖面的長度)，從 2004 年至 2022 年共計有 20 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 8-3.53）。

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 8-3.54 b）。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。

2022 年 3 月 23 日發生一起震央位置均位於花蓮南方外海之芮氏規模 6.7 的地震（中央氣象局地震報告編號第 111019 號），造成臺東豐濱一帶有明顯位移。

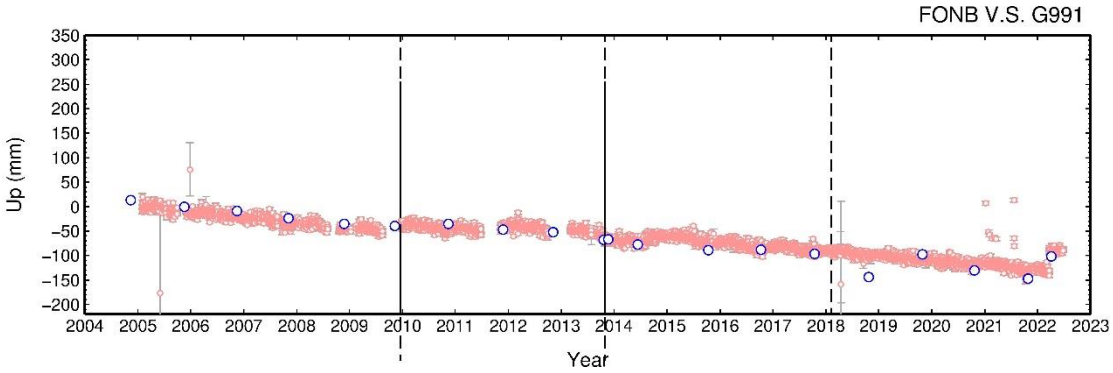


圖 8-3.53：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 8-3.53: 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.

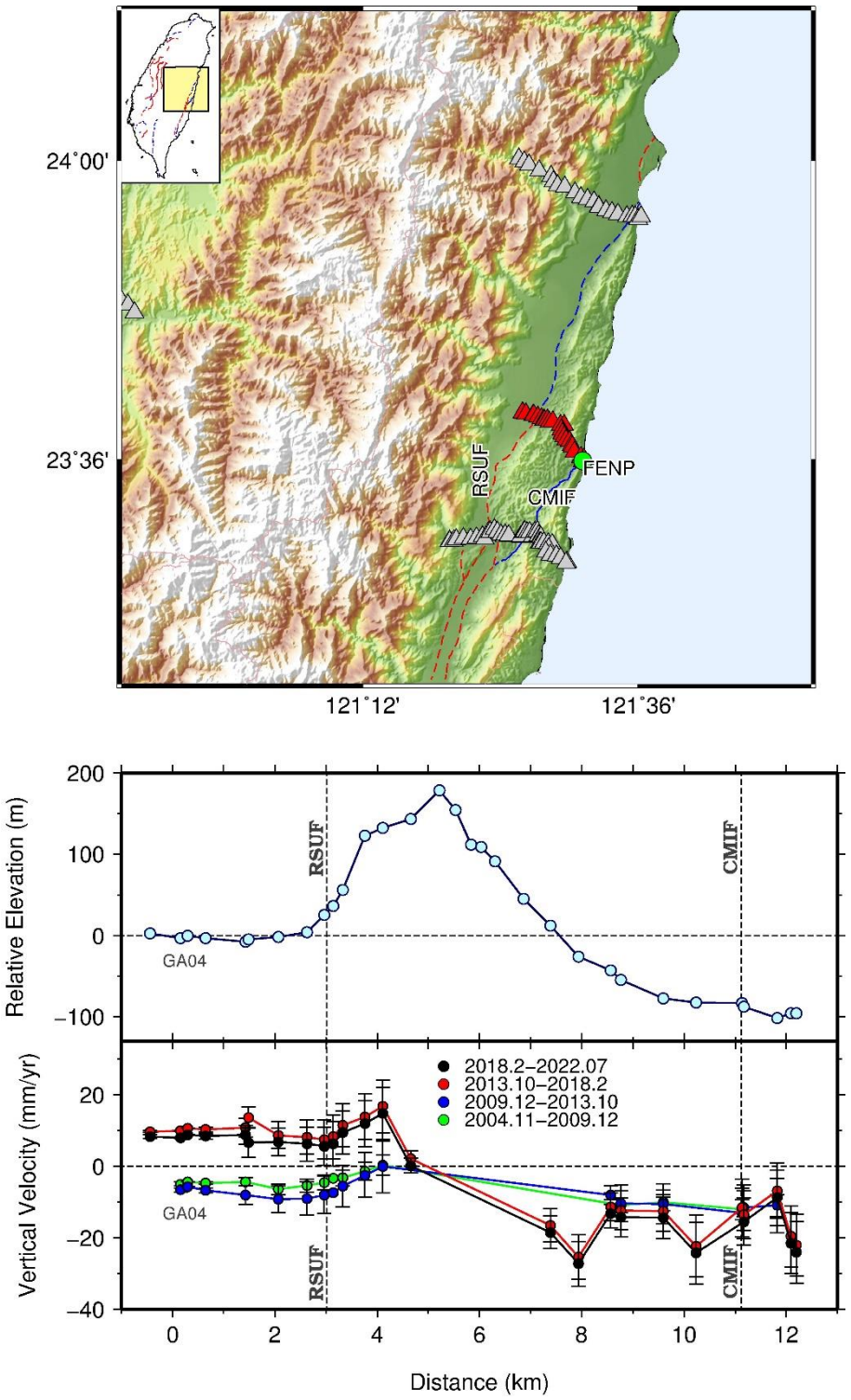


圖 8-3.54：光復至豐濱測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。藍色為 2004 - 2009 年垂直速度、紅色為 2009 年 1 月至 2018 年 2 月、黑色為 2018 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8-3.54: 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.

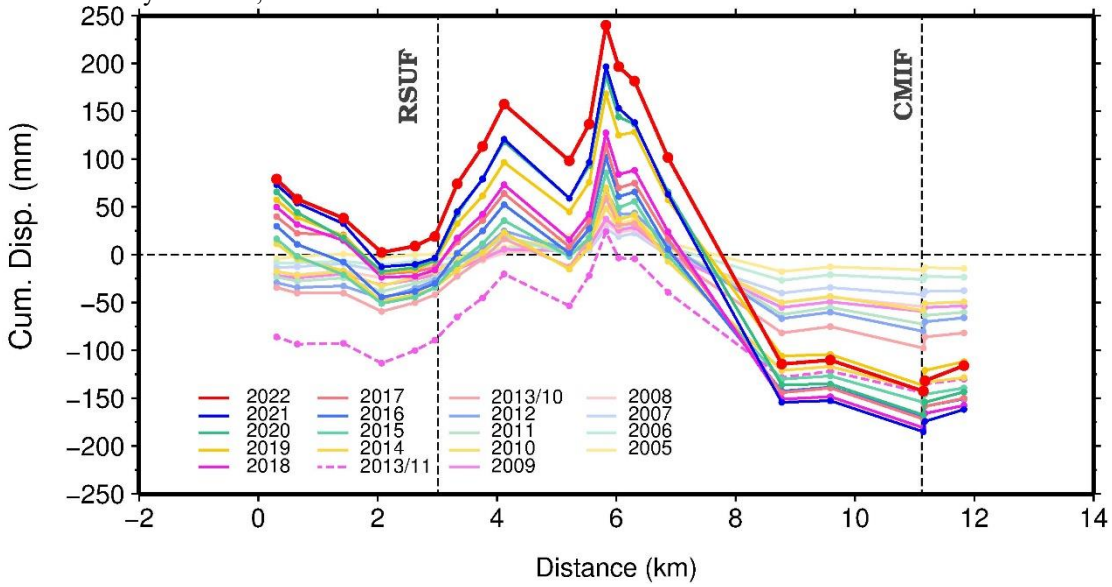


圖 8-3.55：光復至豐濱測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8-3.55: Cumulative elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-7-3 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 8-3.57 a），測線長為 18.0 公里，2004 年至 2022 年間進行共 21 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 8-3.56）。

根據圖 8-3.57 b，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 8-3.58）。

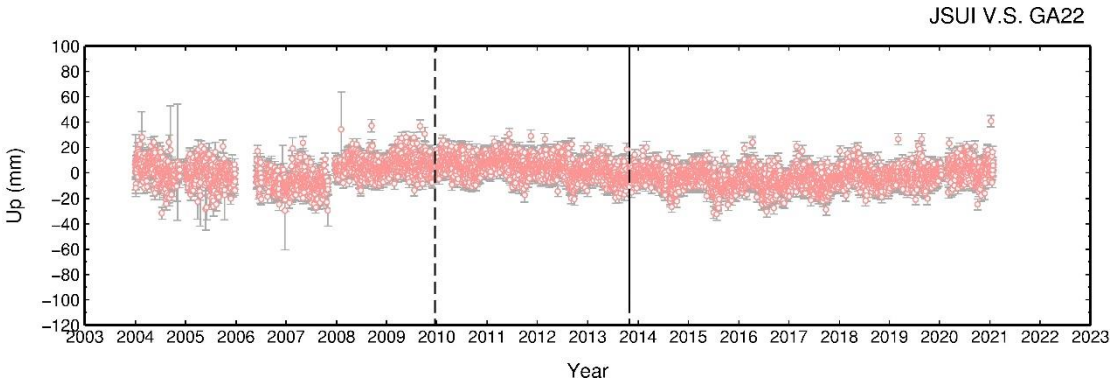


圖 8-3.56：紅葉至靜浦水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

Figure 8-3.56: 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.

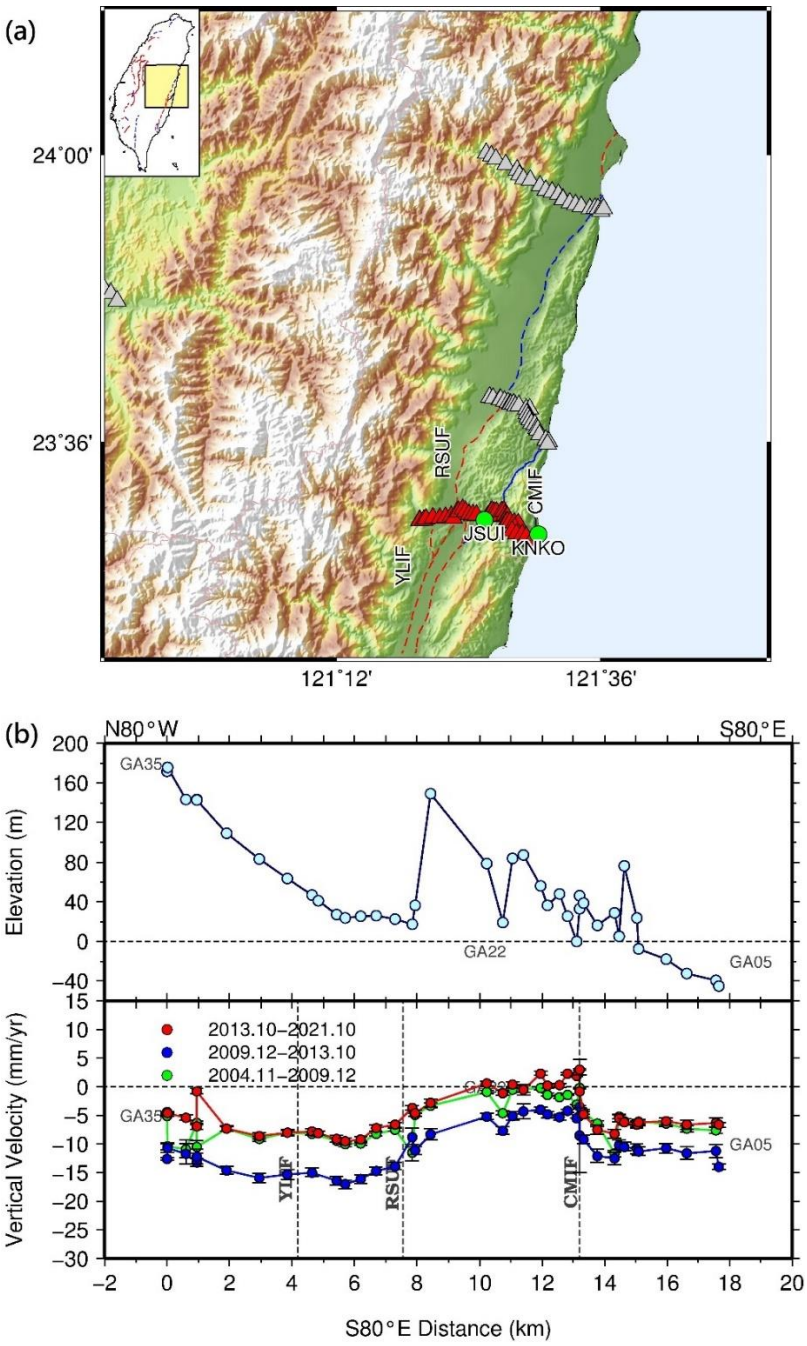


圖 8-3.57：紅葉至靜浦測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8-3.57: 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.

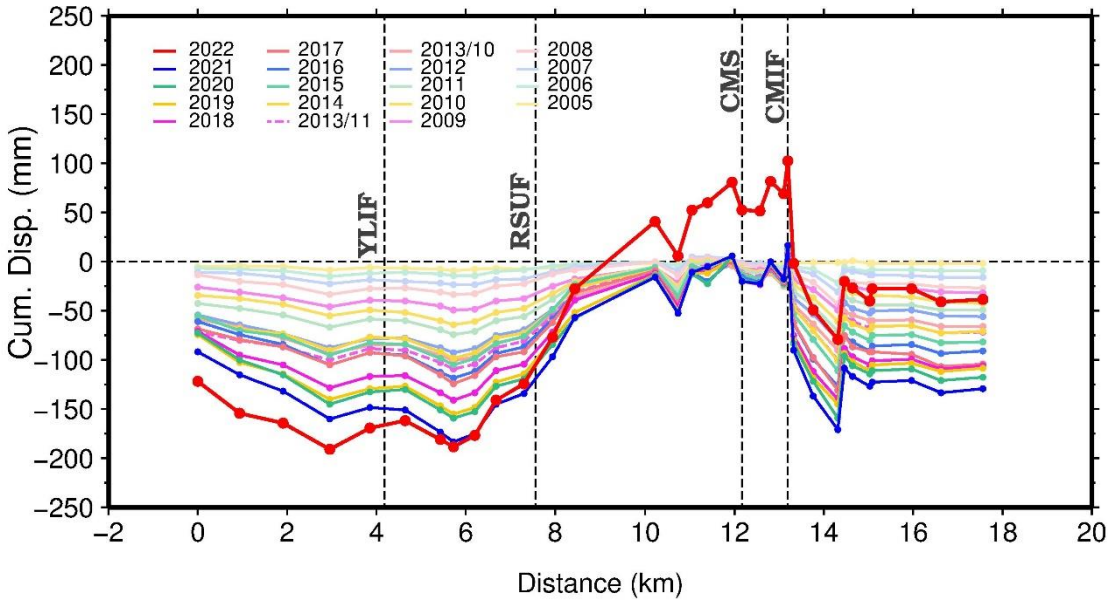


圖 8-3.58：紅葉至靜浦測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8-3.58: Cumalative elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-7-4 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 8-3.60 a），測線長約 14 公里，2009 年至 2022 年間共進行 15 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 8-3.59）。

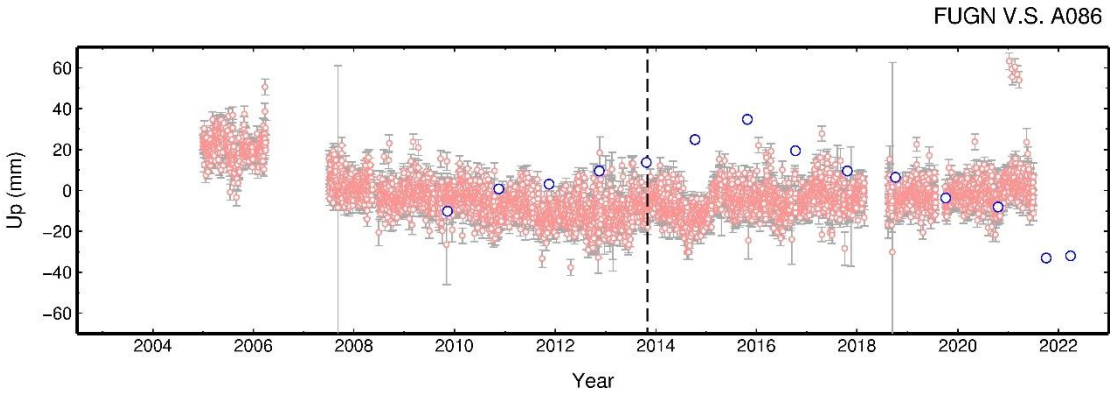


圖 8-3.59：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2015 年 2 月 14 日臺東外海地震。

Figure 8-3.59: 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.

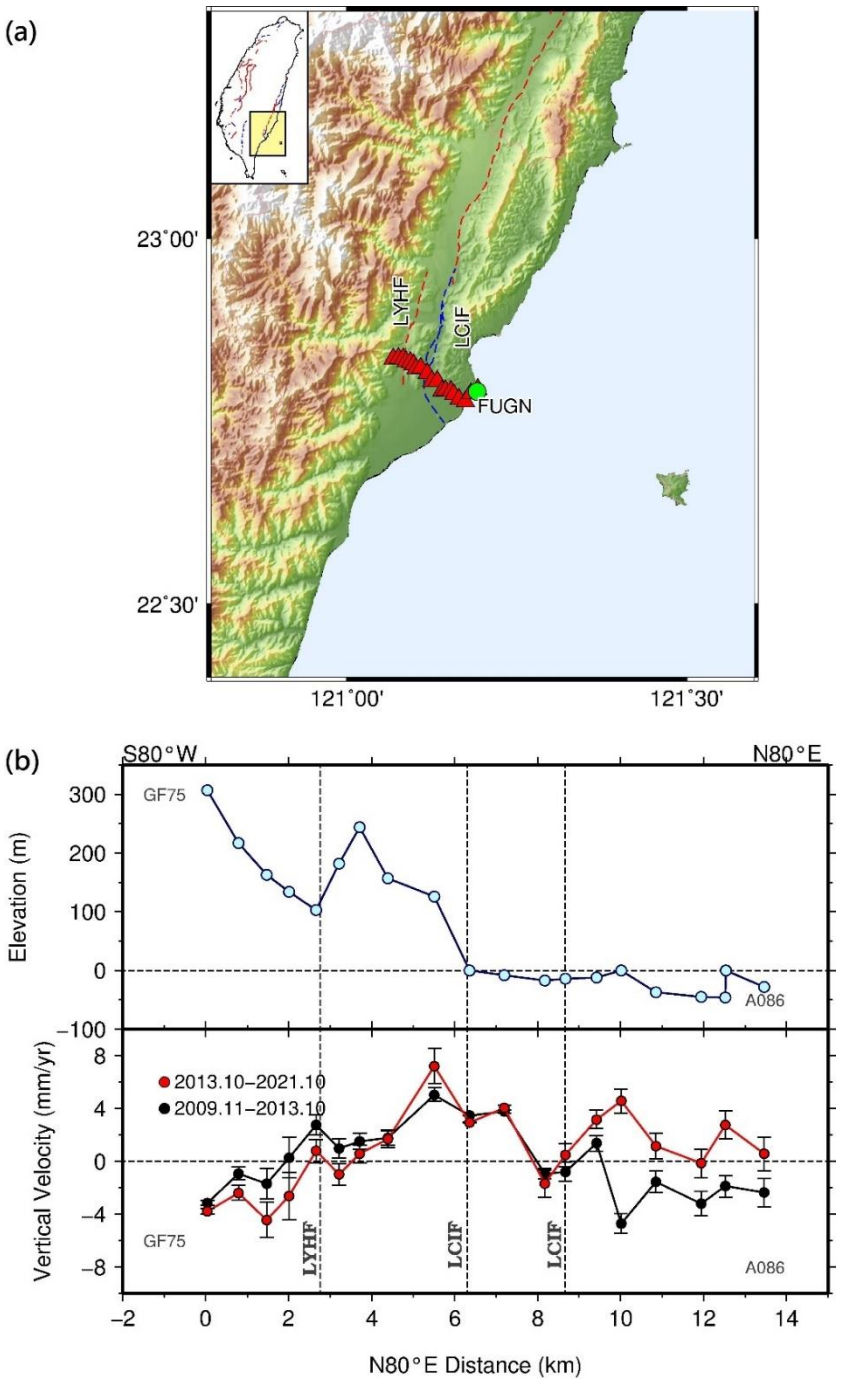


圖 8-3.60：東成至富岡測線高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 8-3.60: 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.

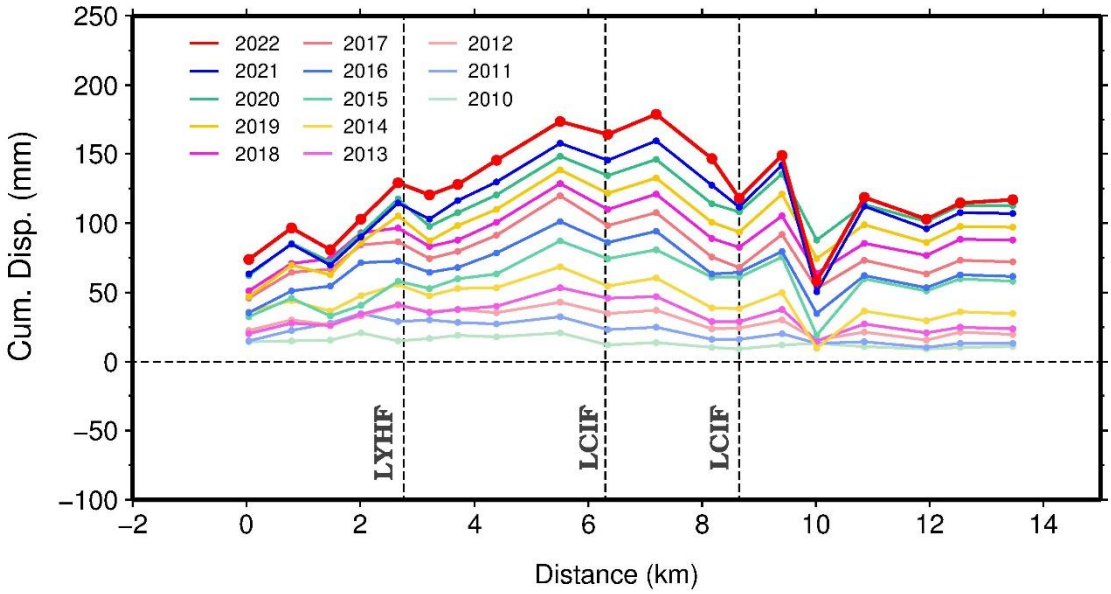


圖 8-3.61：東成至富岡測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 8-3.61: Cumulative elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. 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.

8-3-8 臺北地區精密水準測線

8-3-8-1 石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層（圖 8-3.64 a），測線剖面投影長度為 18.3 公里，2004 至 2022 年間共進行 19 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 8-3.62）。

本測線垂直速度均落在 -3.0 至 0 mm/yr 之間（圖 8-3.64 b），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。

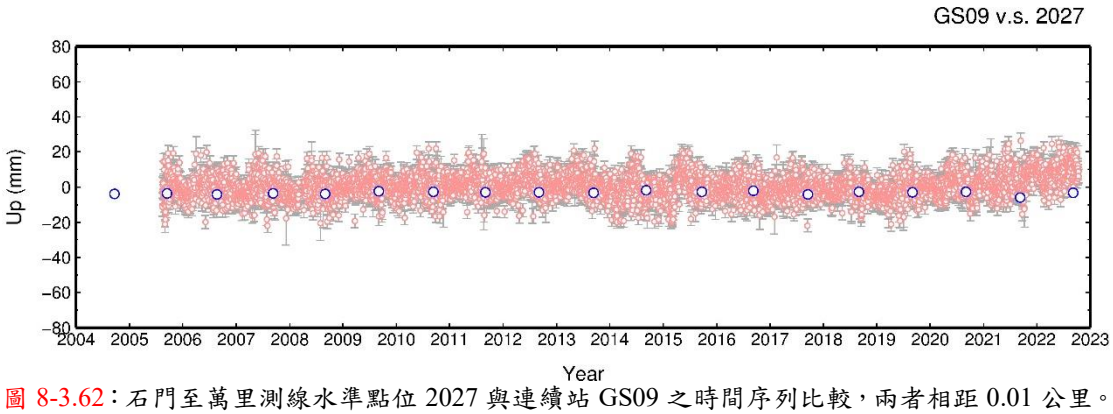


圖 8-3.62：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。
Figure 8-3.62: Time series comparison between Shihmen-Wanli leveling bench mark 2027 and continuous GNSS station GS09. The distance between two stations are 0.01 km.

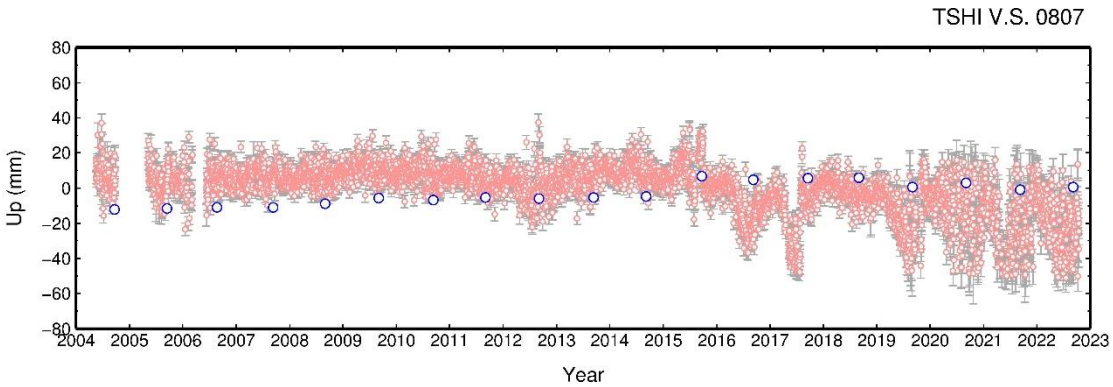


圖 8-3.63：石門至萬里測線水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較，兩者相距 0.08 公里。
Figure 8-3.63: Time series comparison between Shihmen-Wanli leveling bench mark 0807 and continuous GNSS station TSHI. The distance between two stations are 0.08 km.

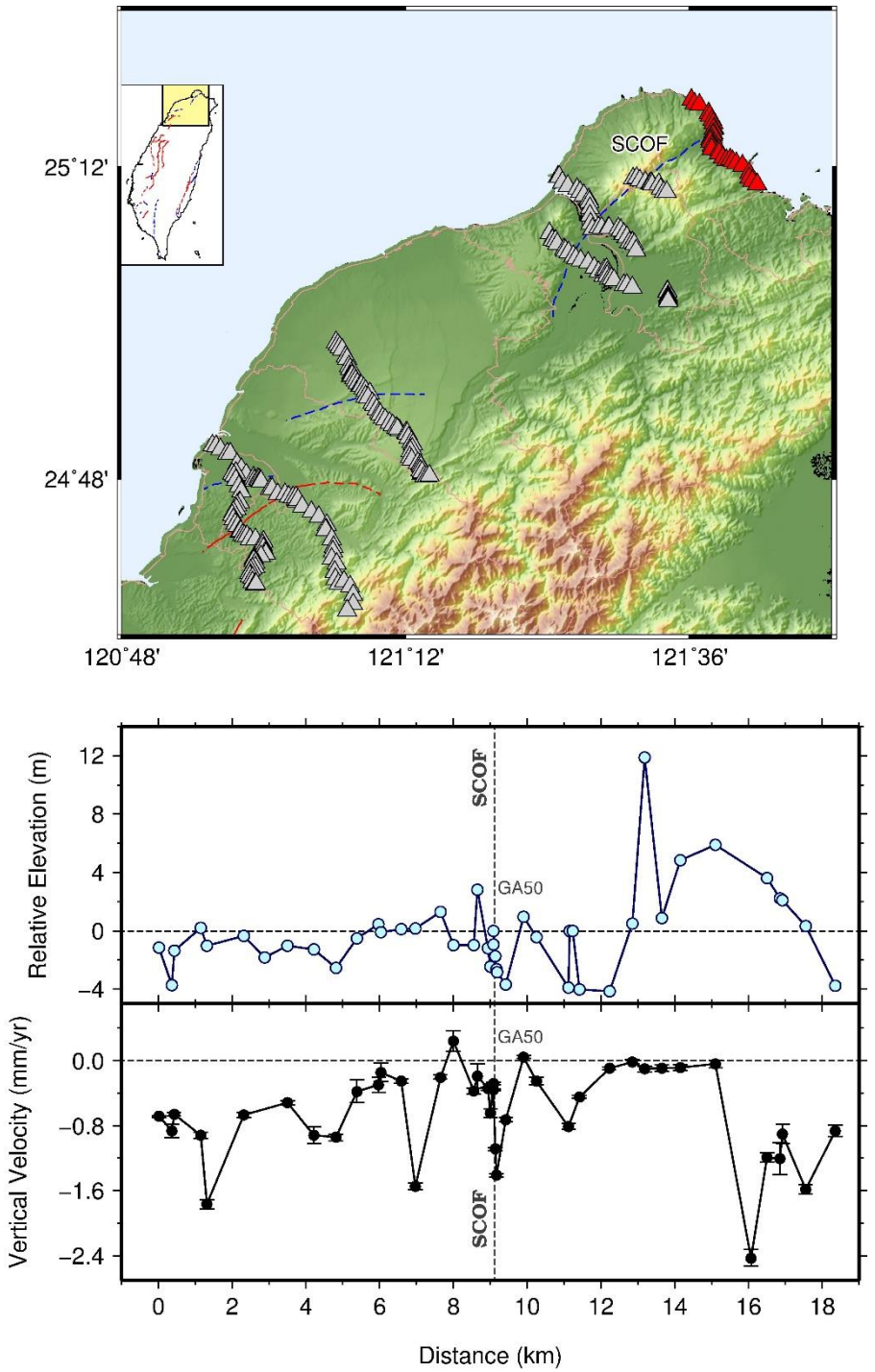


圖 8-3.64：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b) 下欄為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.65: 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.

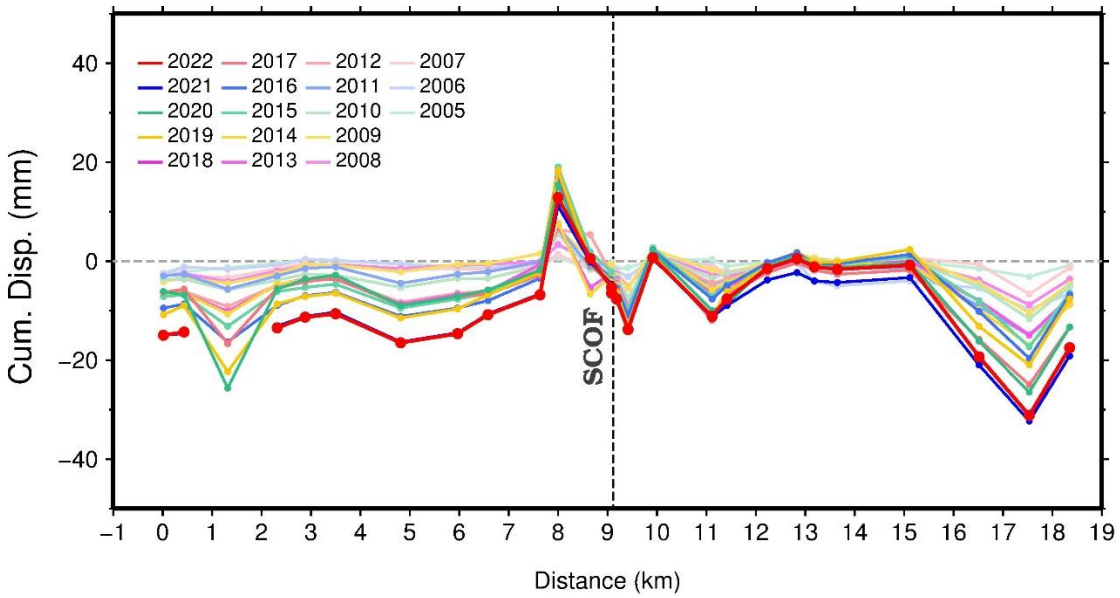


圖 8-3.65：台 2_石門至萬里測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.65: Cumulative elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-8-2 士林至三芝測線

士林至三芝測線跨越山腳斷層（圖 8-3.67 a），測線剖面投影長度為 5.0 公里。該測線 2004 至 2022 年間共進行 19 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 8-3.66）。

此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側（圖 8-3.67 b），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。

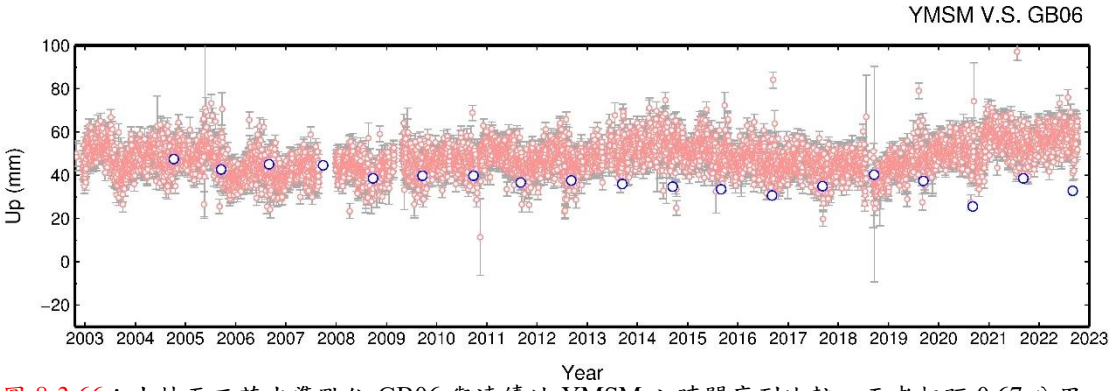


圖 8-3.66：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.67 公里。
Figure 8-3.66: Time series comparison between Shilin-Sanzhi leveling bench mark GB06 and continuous GNSS station YMSM. The distance between two stations are 0.67 km.

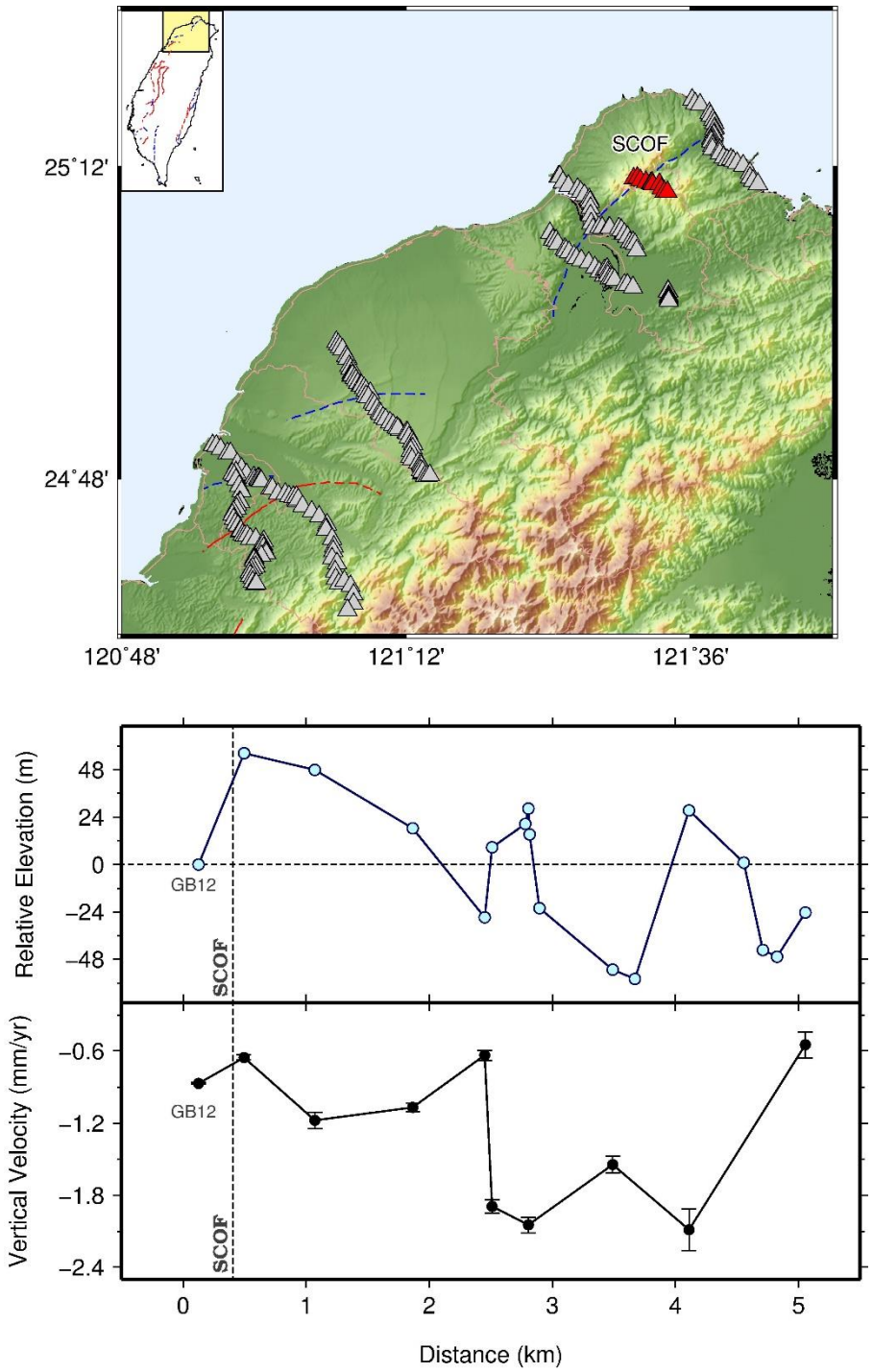


圖 8-3.67：士林至三芝測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.67: 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.

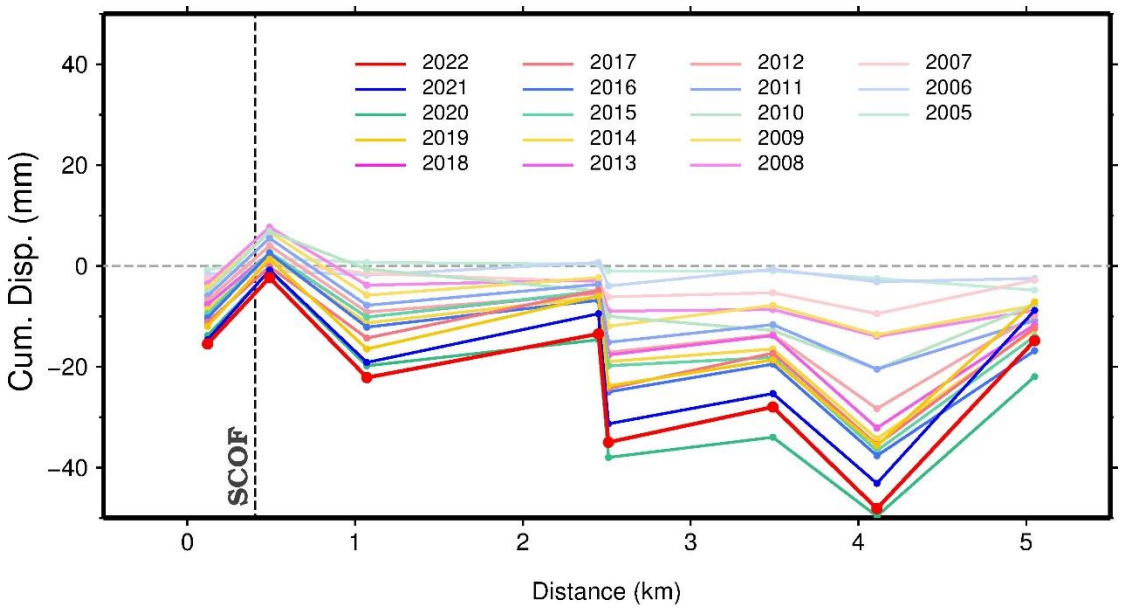


圖 8-3.68：士林至三芝測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.68: Cumulative elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-8-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層（圖 8-3.70 a），測線剖面投影長度為 15.3 公里，在 2004 至 2022 年間進行共 19 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 8-3.69）。

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 8-3.70 b）；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 8-3.71），山腳斷層東側的沉陷值為 10.0-35.0 mm。

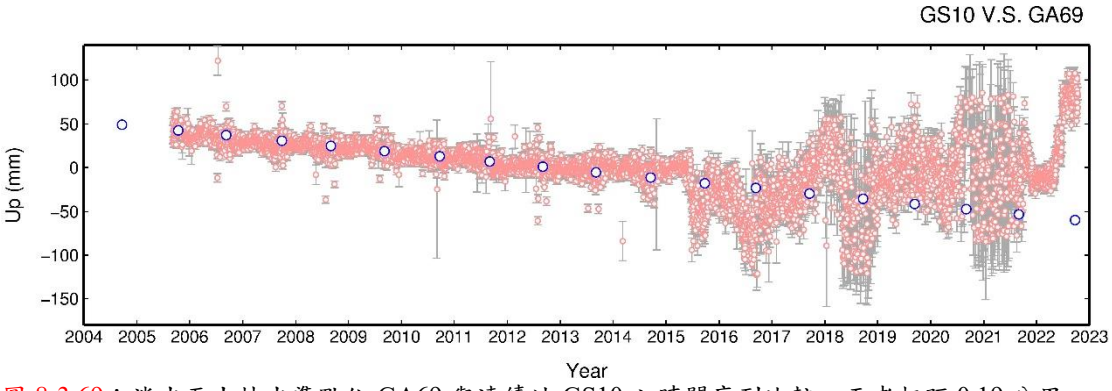


圖 8-3.69：淡水至士林水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較，兩者相距 0.19 公里。
Figure 8-3.69: Time series comparison between Tamsui-Shihlin leveling bench mark GA69 and continuous GNSS station GS10. The distance between two stations are 0.19 km.

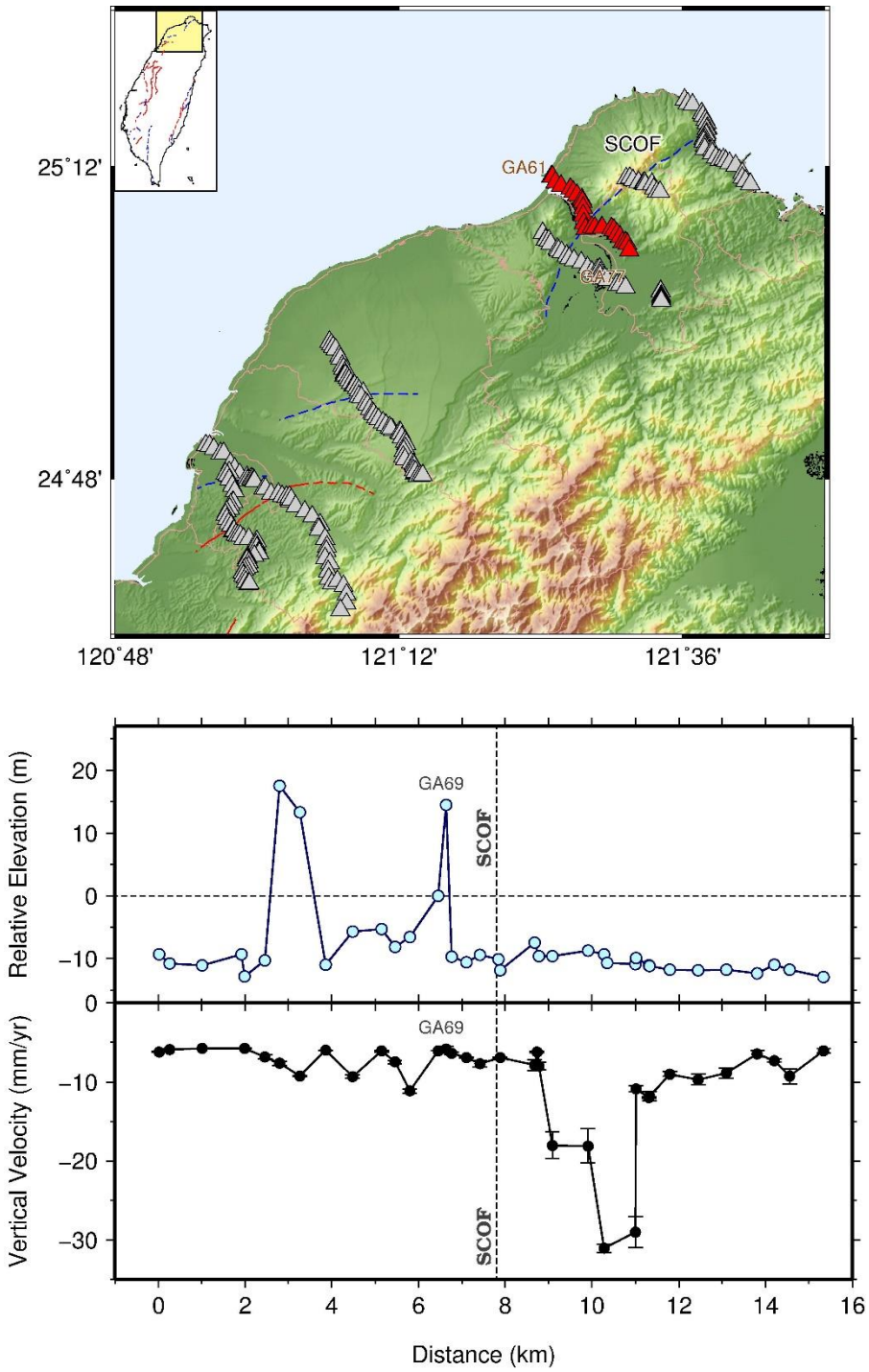


圖 8-3.70：淡水至士林測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.70: 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.

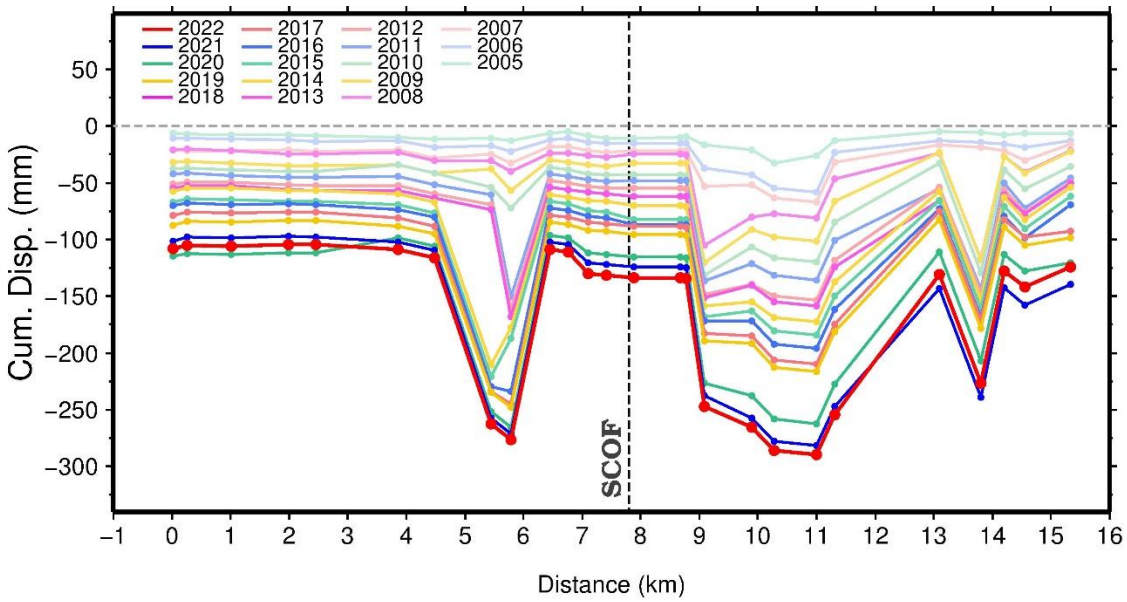


圖 8-3.71：淡水至士林測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.71: Cumulative elevation change of the Tamsui-Shihlin leveling route. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-8-4 五股至臺北測線

本測線橫跨山腳斷層（圖 8-3.73 a），測線長為 13.6 公里。此水準測線於 2004 至 2022 年間共進行 19 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 8-3.72）。

從歷年高程變化來看（圖 8-3.73 b），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 8-3.74），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）。

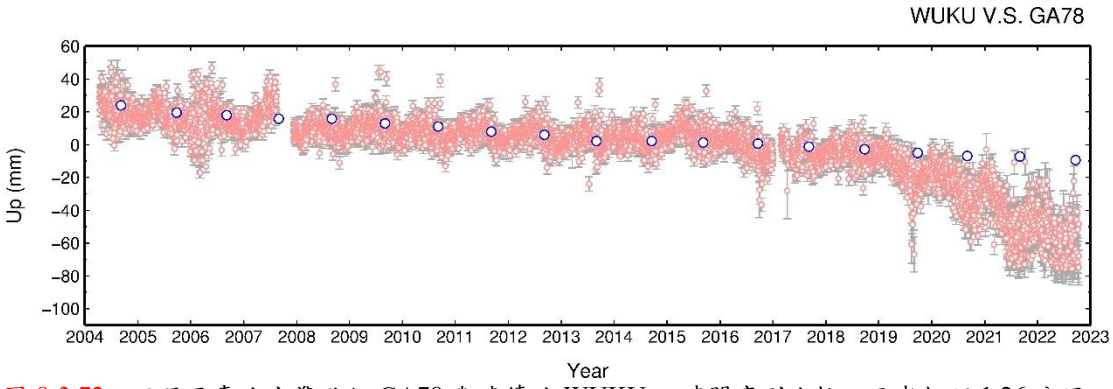


圖 8-3.72：五股至臺北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。
Figure 8-3.72: Time series comparison between Wugu-Taipei leveling bench mark GA78 and continuous GNSS station WUKU. The distance between two stations are 1.26 km.

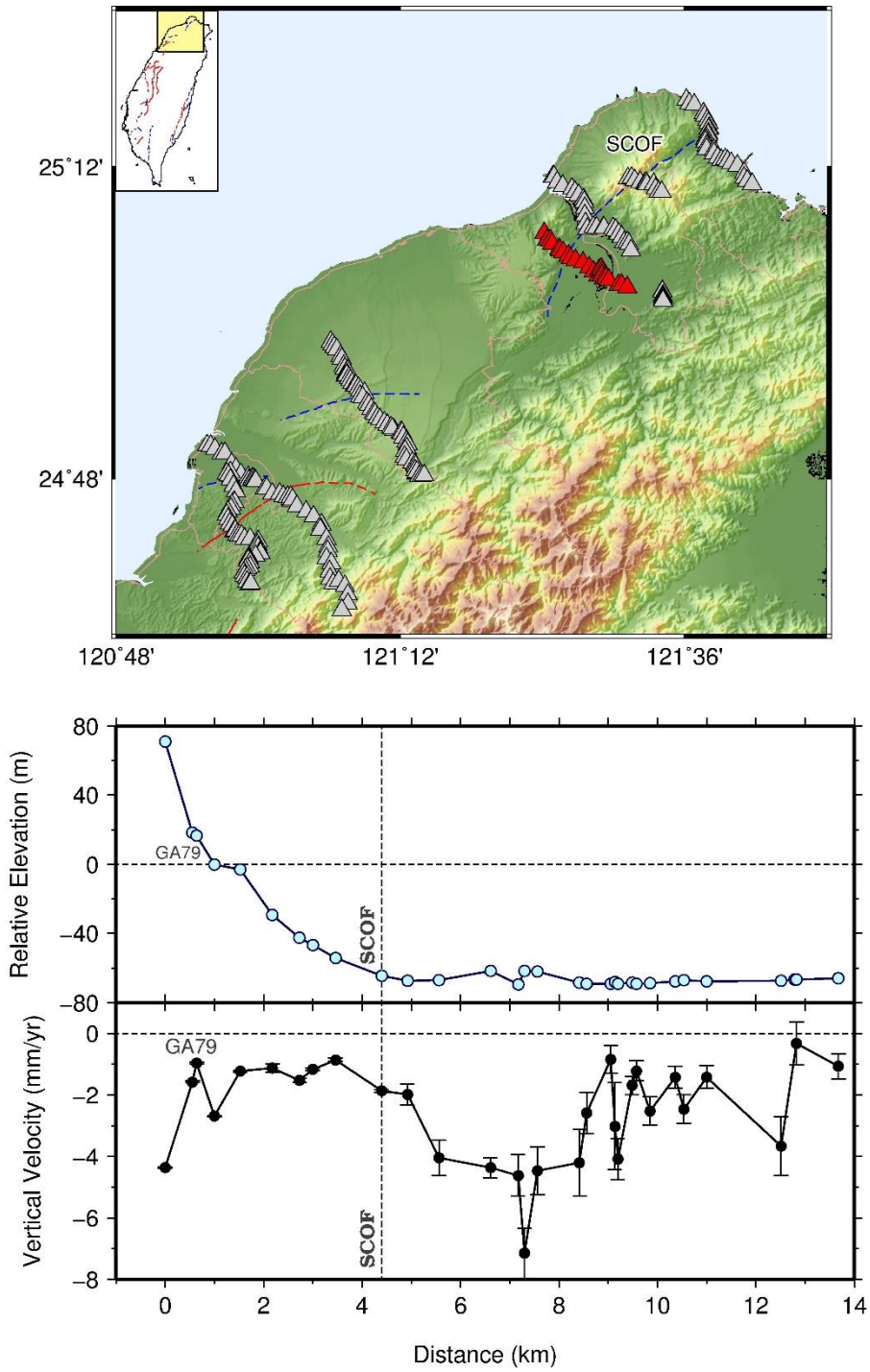


圖 8-3.73：五股至臺北測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)下欄為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.73: 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.

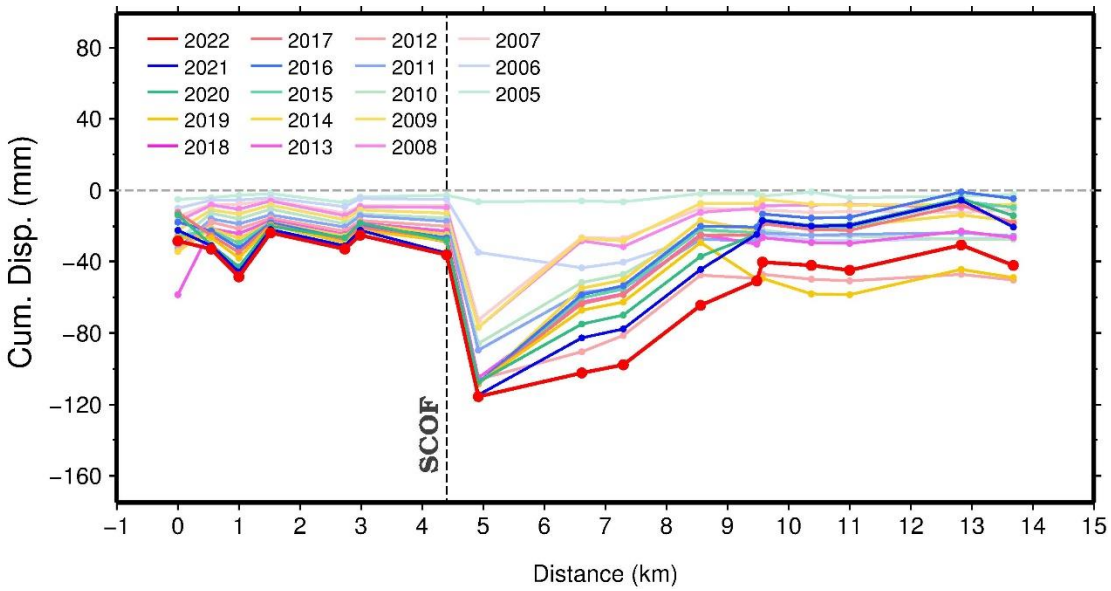


圖 8-3.74：五股至臺北測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 8-3.74: Cumulative elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-9 桃竹苗地區精密水準測線

8-3-9-1 新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層（圖 8-3.76 a），測線長為 22.4 公里，並於 2004 至 2022 年間共進行 18 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 8-3.75）。

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 8-3.76 b）。

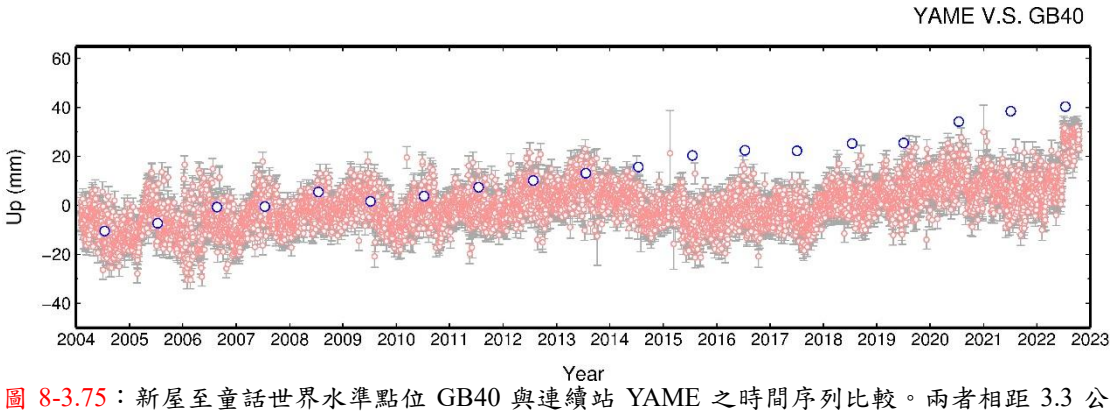


圖 8-3.75：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。兩者相距 3.3 公里。

Figure 8-3.75: Time series comparison between Xinwu-Guanxi leveling benchmark GB40 and continuous GNSS station YAME. The distance between two stations are 3.3 km.

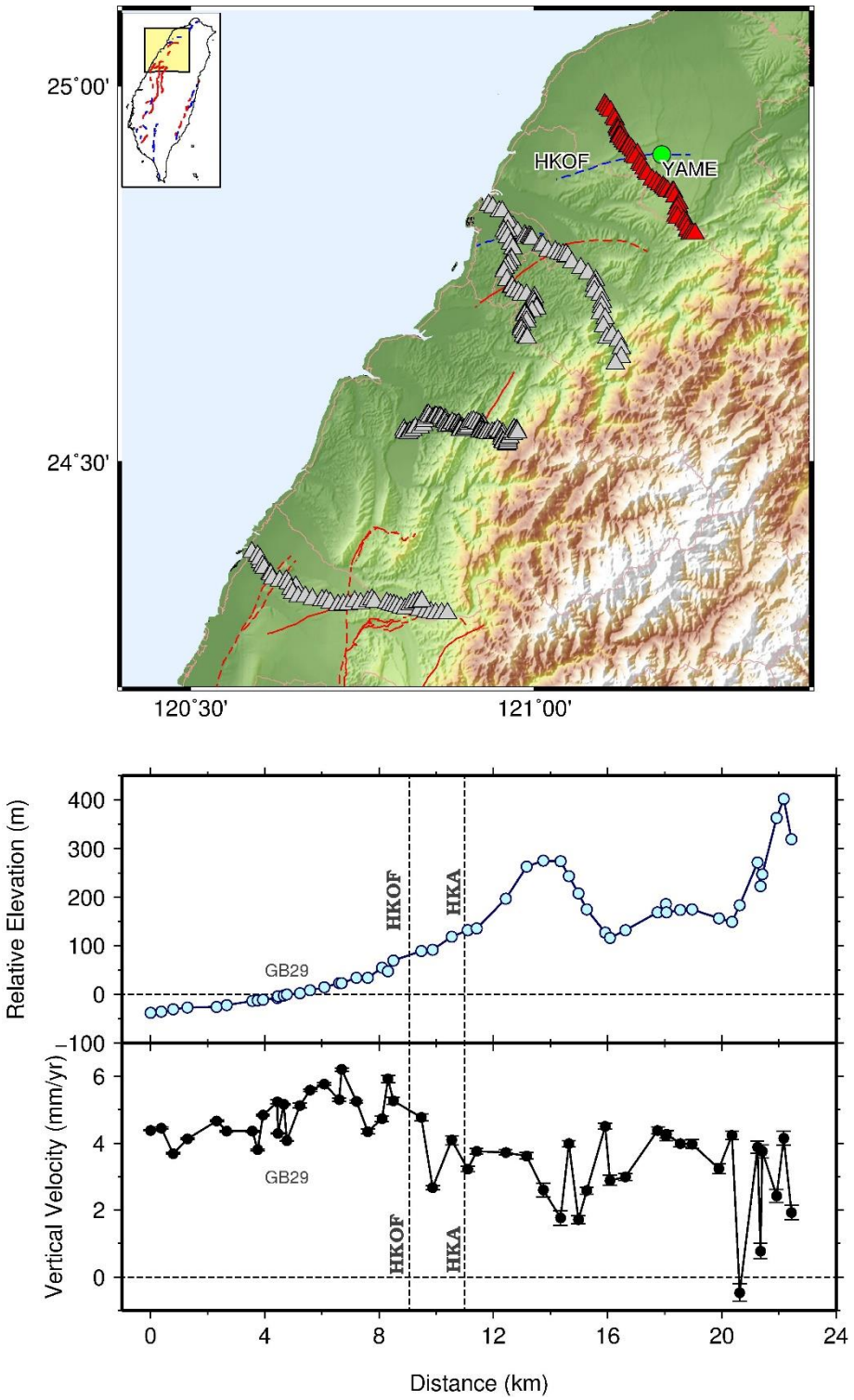


圖 8-3.76：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層。

Figure 8-3.76: 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.

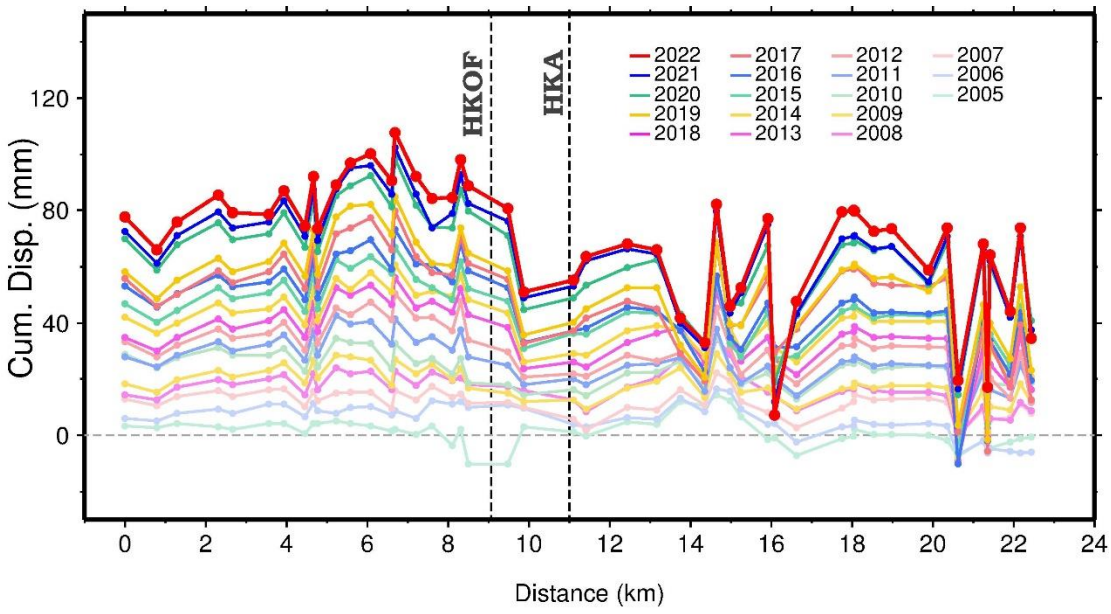


圖 8-3.77：新屋至童話世界測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層。

Figure 8-3.77: Cumulative elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. 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.

8-3-9-2 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 8-3.79 a），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 8-3.78）。

此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化（圖 8-3.79 b），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）。

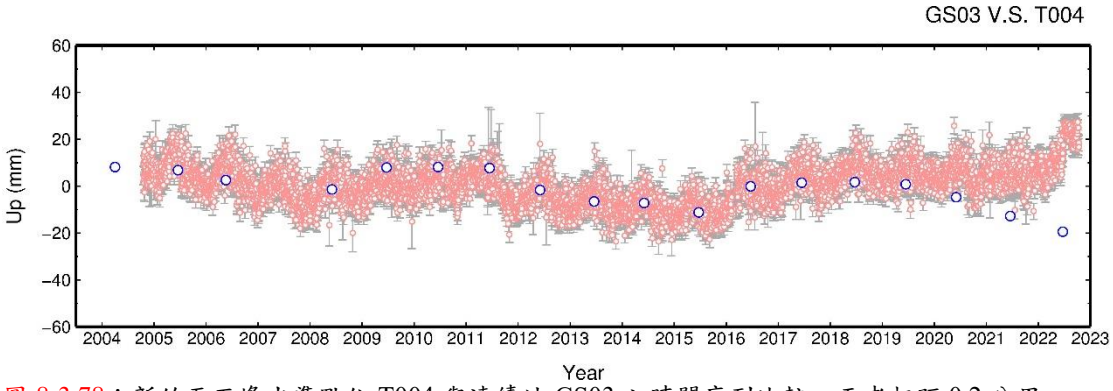


圖 8-3.78：新竹至五峰水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里
Figure 8-3.78: Time series comparison between Hsinchu-Wufeng leveling benchmark T004 and continuous GNSS station GS03. The distance between two stations are 0.2 km.

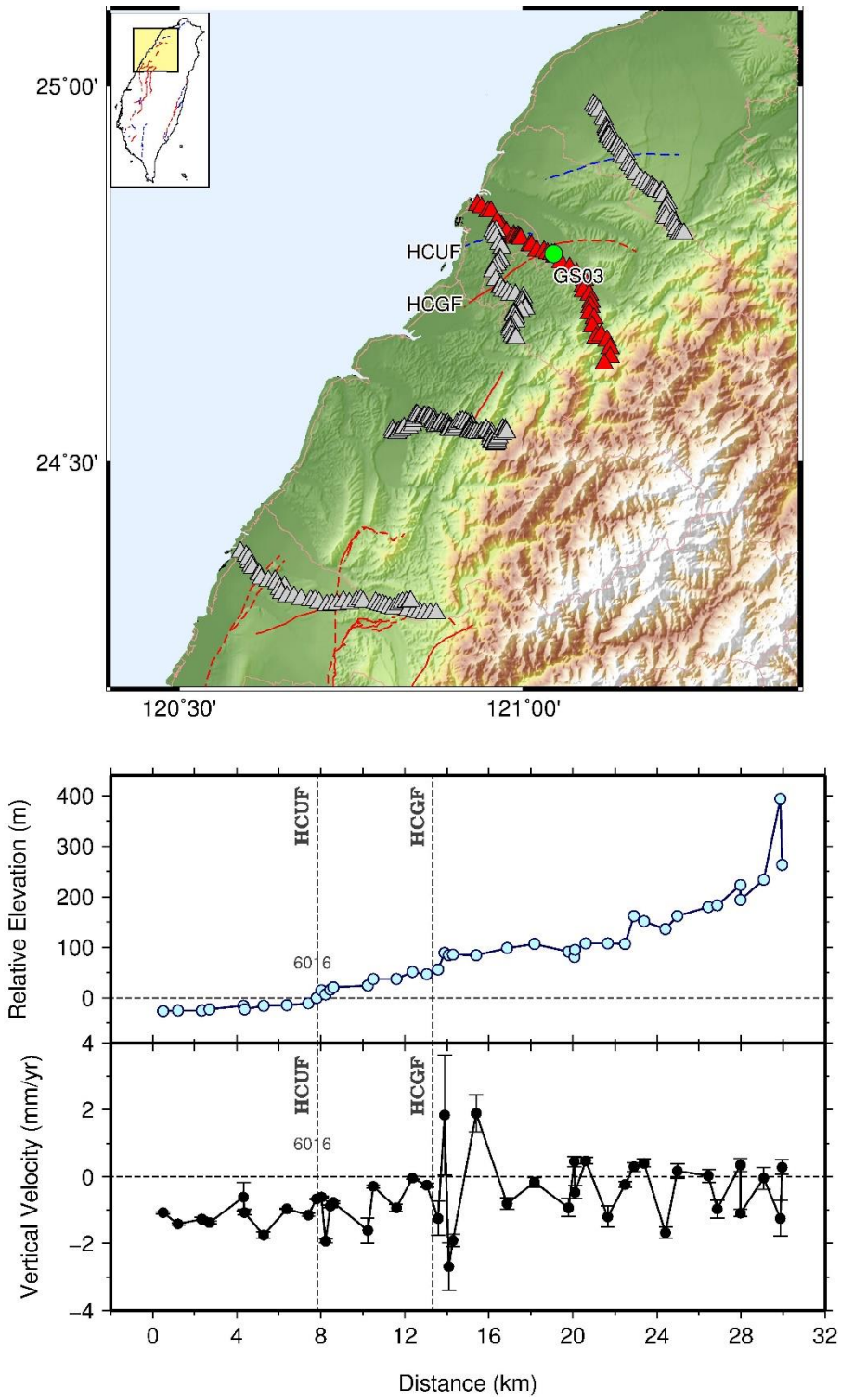


圖 8-3.79：新竹至五峰世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8-3.79: 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.

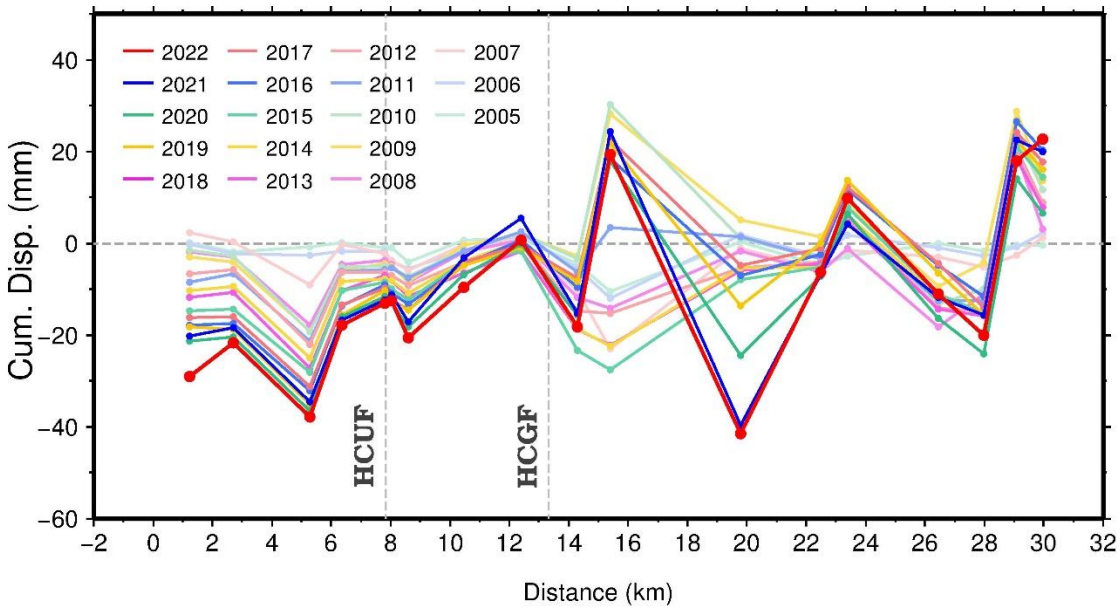


圖 8-3.80：新竹至五峰測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8-3.80: Cumulative elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. 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.

8-3-9-3 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 8-3.82 a），測線長為 16.0 公里（投影至剖面的長度），此測線於 2004 至 2022 年間共進行 17 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 8-3.81）。

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 8-3.82 b）。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。

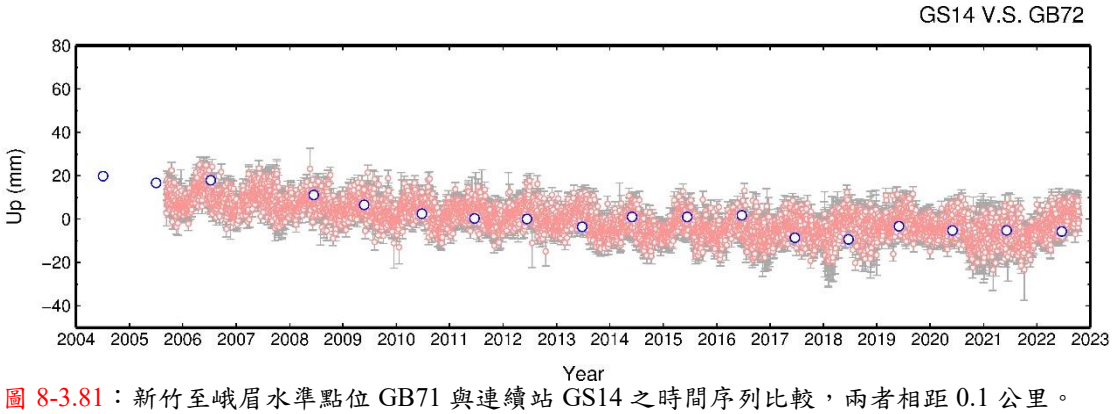


圖 8-3.81：新竹至峨眉水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。
Figure 8-3.81: Time series comparison between Hsinchu-Emei leveling benchmark GB71 and continuous GNSS station GS14. The distance between two stations are 0.1 km.

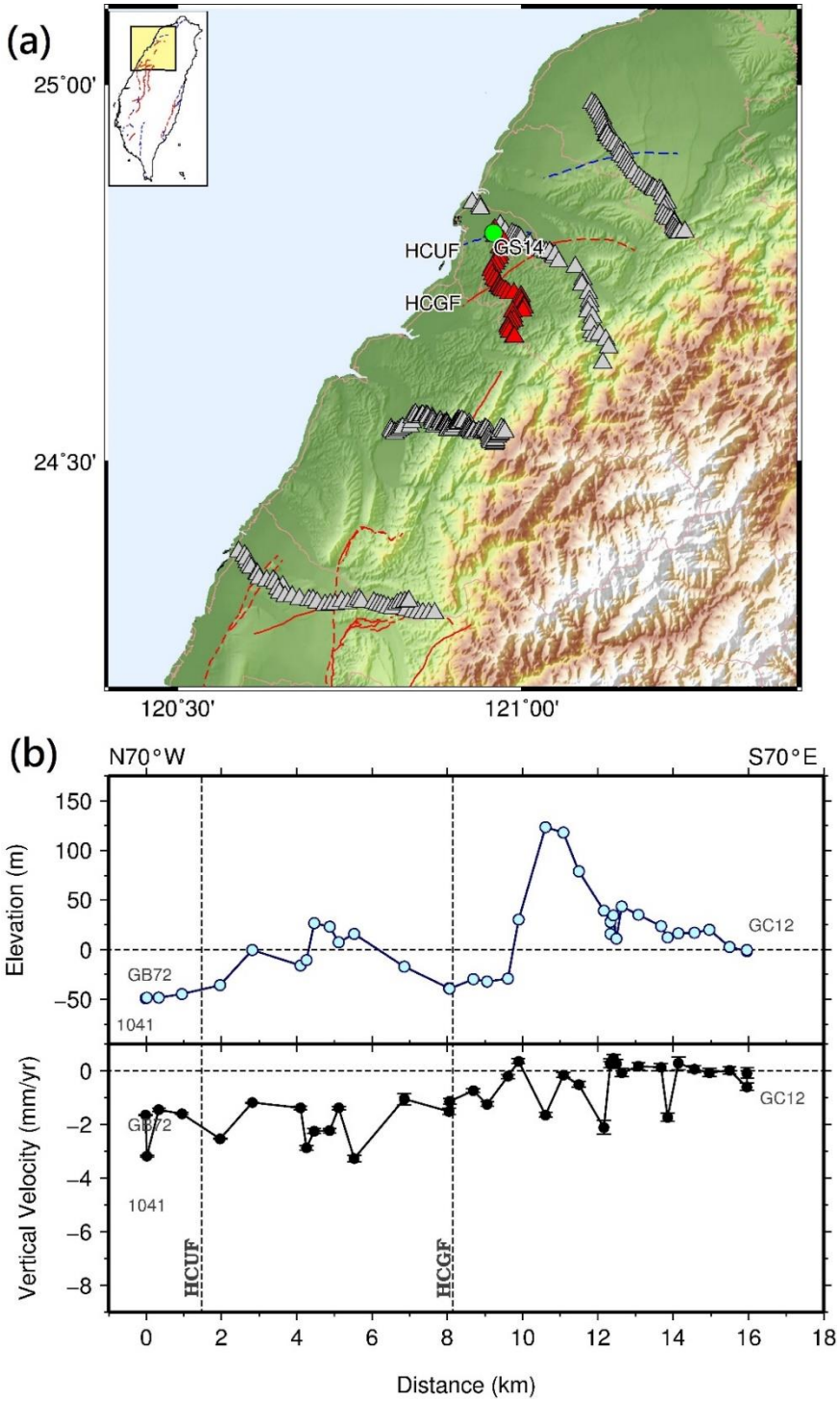


圖 8-3.82：新竹至峨眉世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8-3.82: 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.

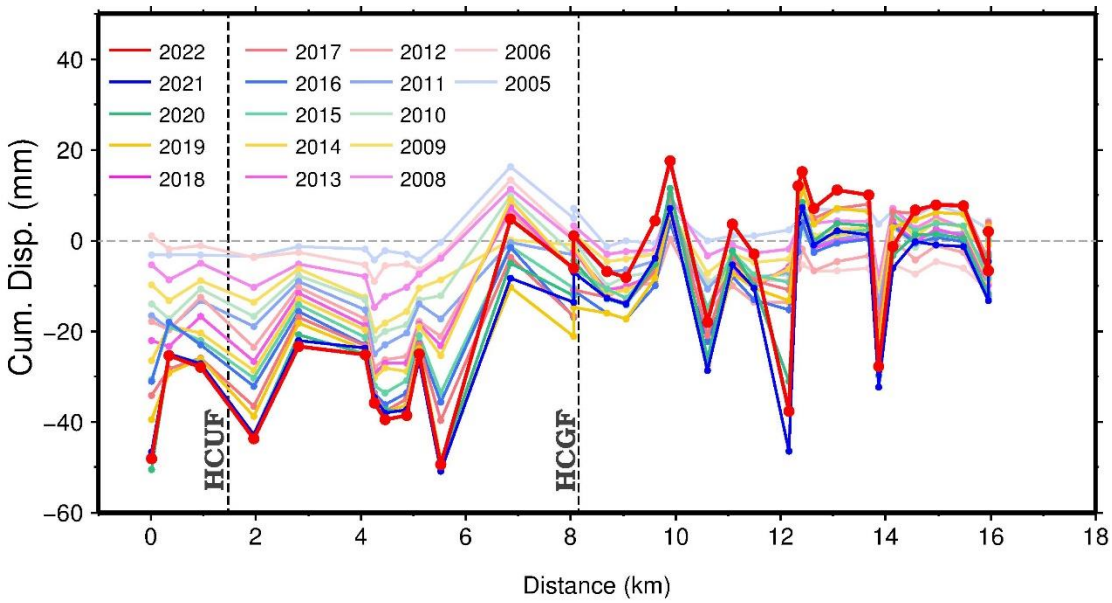


圖 8-3.83：新竹至峨眉測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8-3.83: Cumulative elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. 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.

8-3-9-4 苗栗至南庄測線

苗栗至南庄測線橫跨獅潭斷層（圖 8-3.85 a），測線長為 16.8 公里，此測線於 2005 至 2022 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 8-3.84）。

整條測線的水準沉陷速率大多在 2.0-4.0 mm/yr 之間（圖 8-3.85 b），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 8-3.86）。

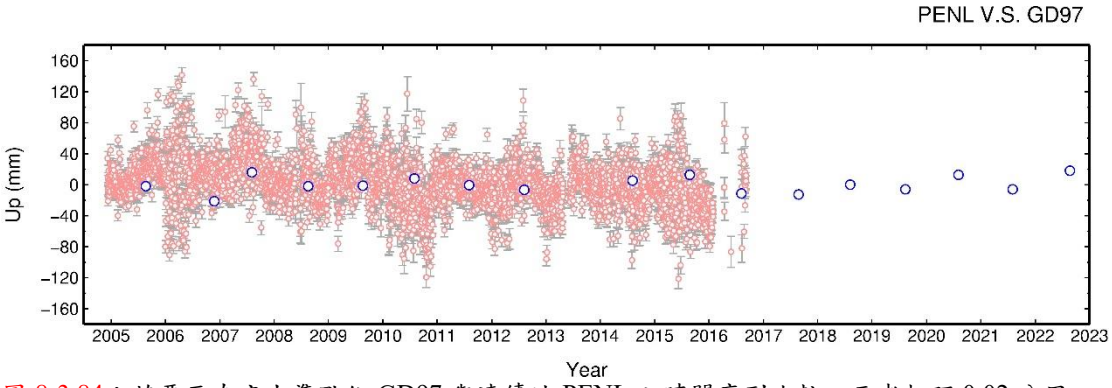


圖 8-3.84：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 8-3.84: Time series comparison between Miaoli-Nanzhuang leveling benchmark GD97 and continuous GNSS station PENL. The distance between two stations are 0.02 km.

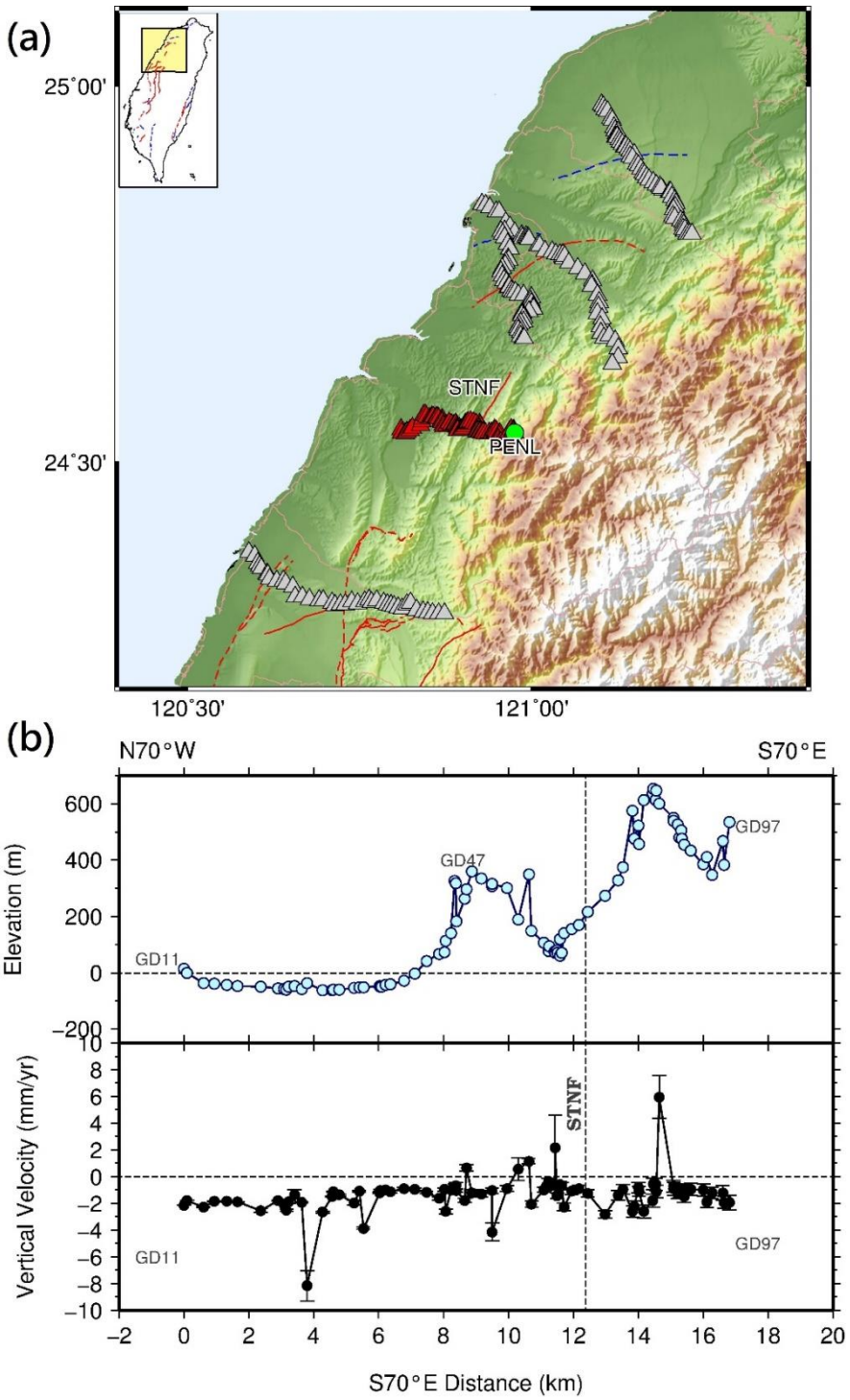


圖 8-3.85：苗栗至南庄世界測線水準高程變化圖。(a)測線位置分布圖。(b)高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 8-3.85: 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.

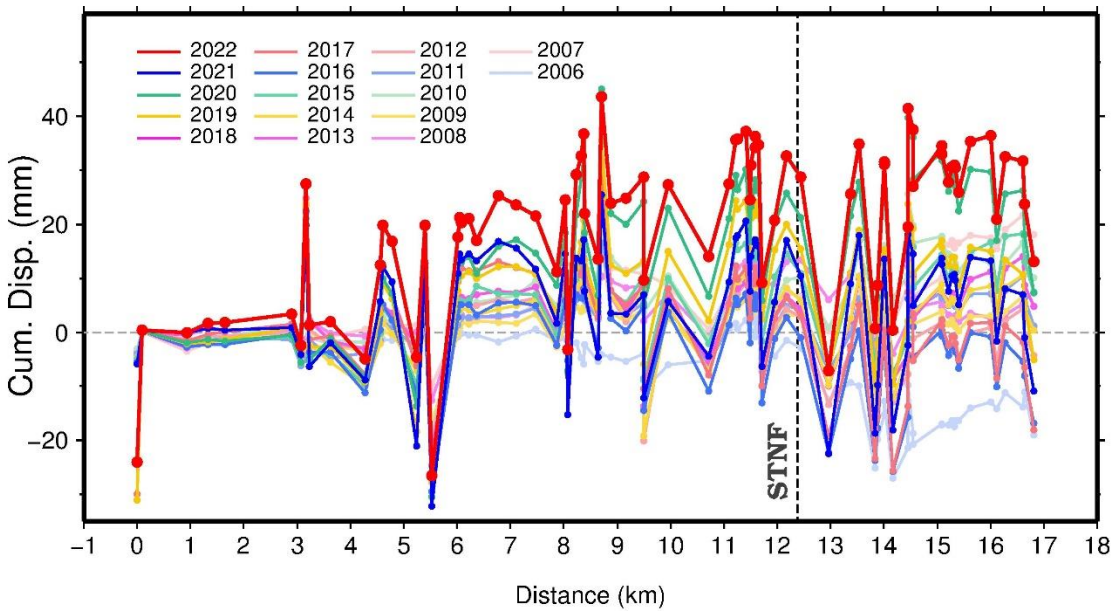


圖 8-3.86：苗栗至南庄測線水準累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 8-3.86: Cumulative elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. 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.

8-3-10 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。

臺北地區山腳斷層兩側主要以沉陷為主（圖 8-3.87）。桃竹苗地區慈顯著抬升或沉陷（圖 8-3.88）。

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 8-3.89），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 年至今於水準、GNSS 連續站與 GNSS 移動站速度場型態都相當類似（圖 8-3.90），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 8-3.91），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 8-3.92），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。

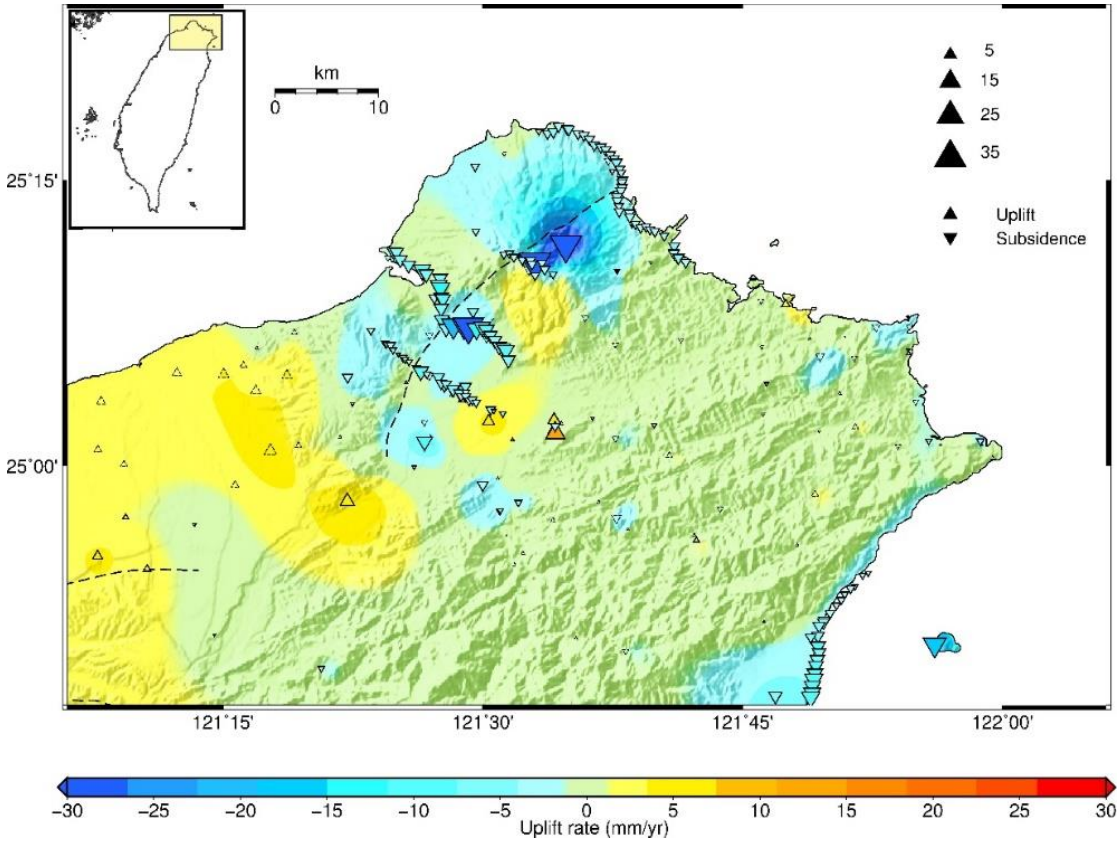


圖 8-3.87：臺北地區相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站、虛線邊框表示 GNSS 連續站，GNSS 觀測時間為 2004 – 2021 年，精密水準觀測時間為 2002 – 2021 年。

Figure 8-3.87: 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.

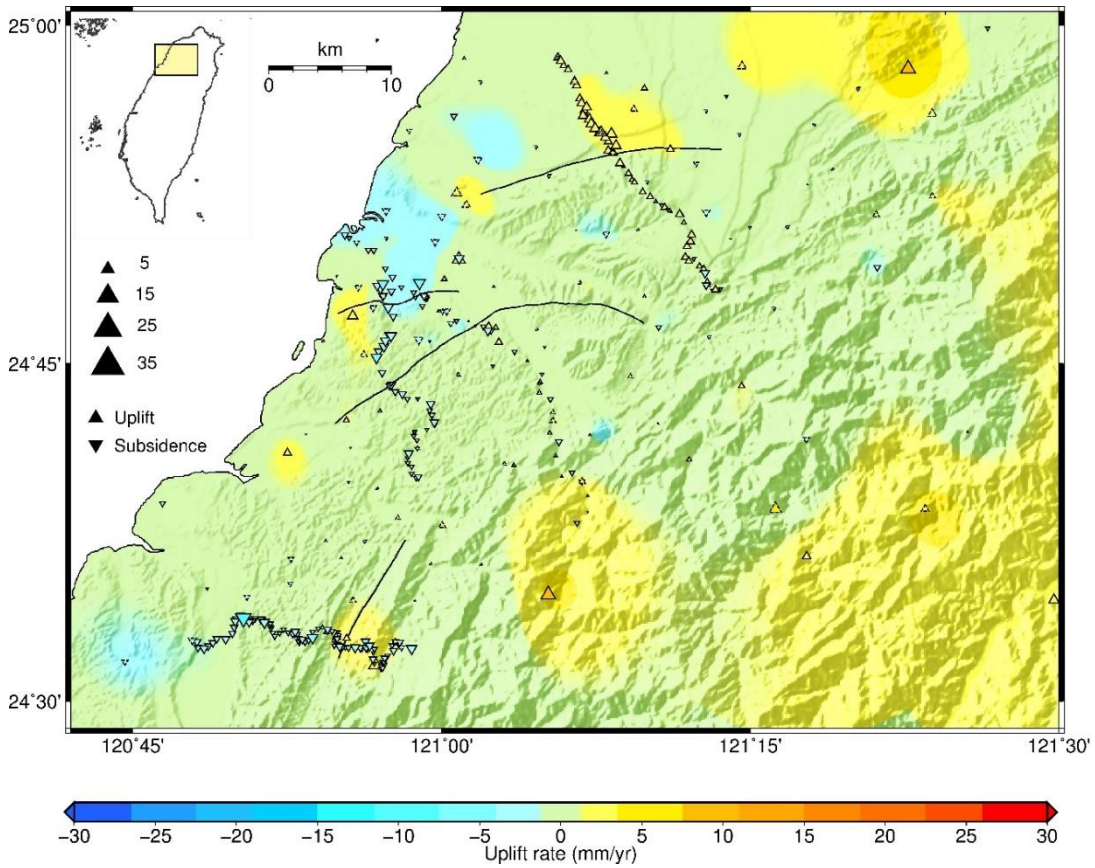
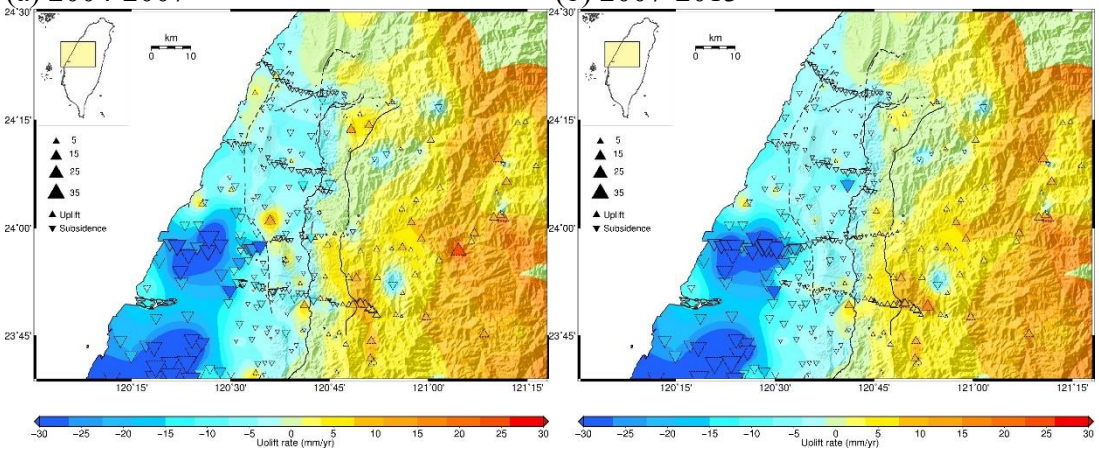


圖 8-3.88：桃竹苗地區 2002 – 2021 相對於澎湖白沙站 S01R 之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站、虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8-3.88: 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.

(a) 2004-2007 (b) 2007-2013



(c)2013-2022

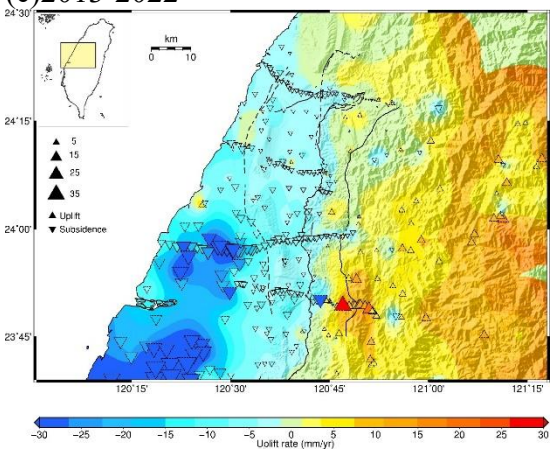


圖 8-3.89：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8-3.89: 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.

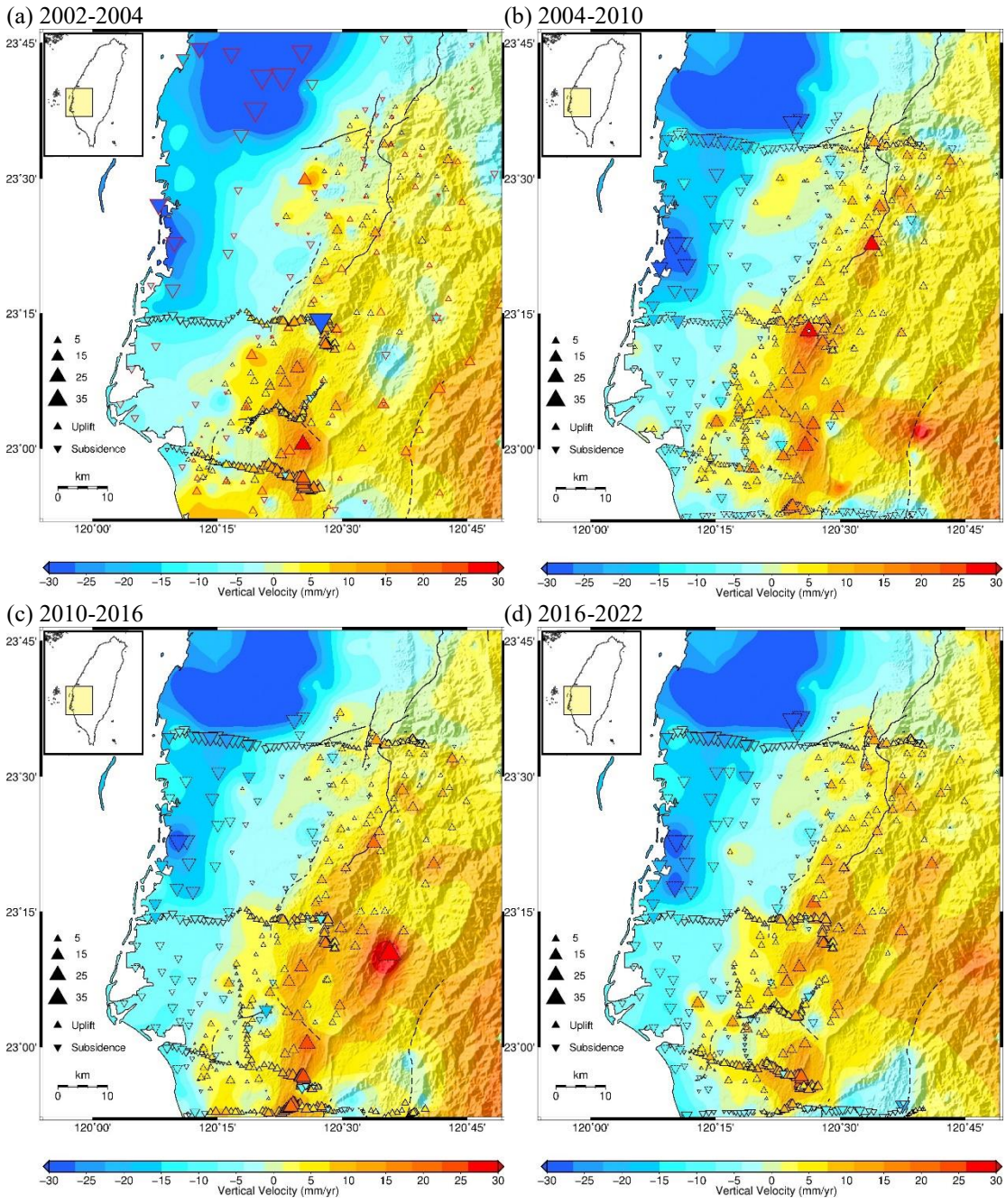


圖 8-3.90：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8-3.90: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station 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.

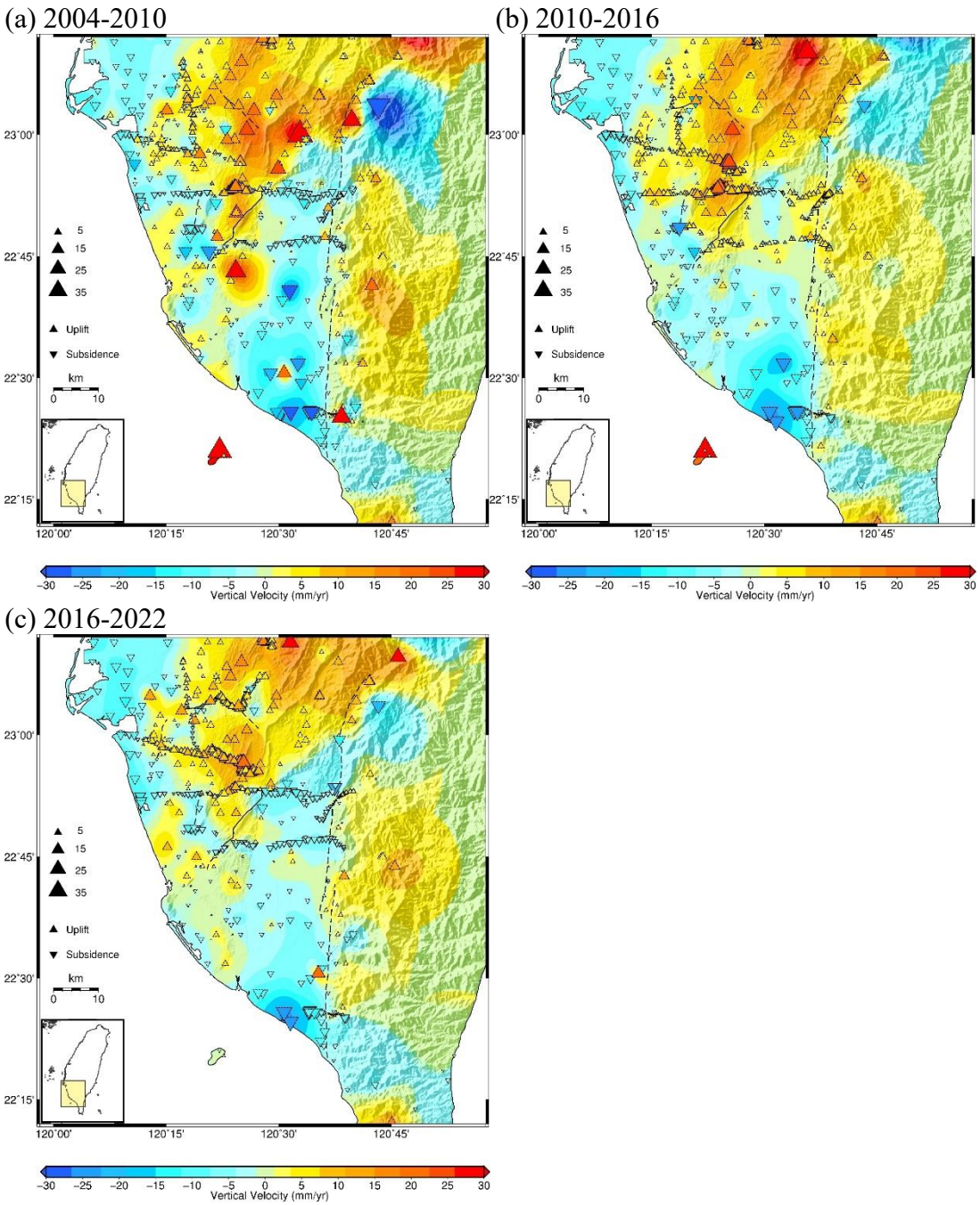


圖 8-3.91：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8-3.91: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station 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.

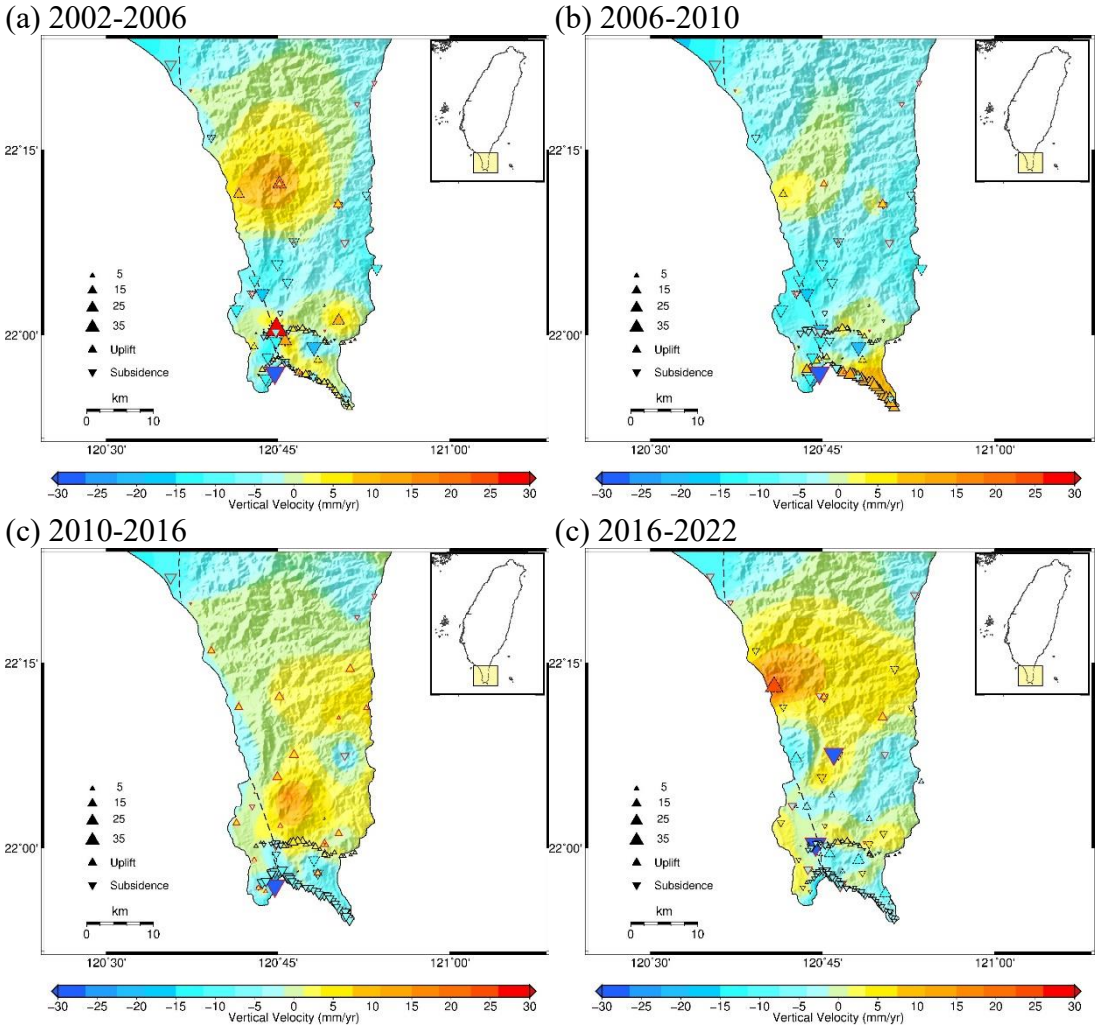


圖 8-3.92：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8-3.92: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station 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.

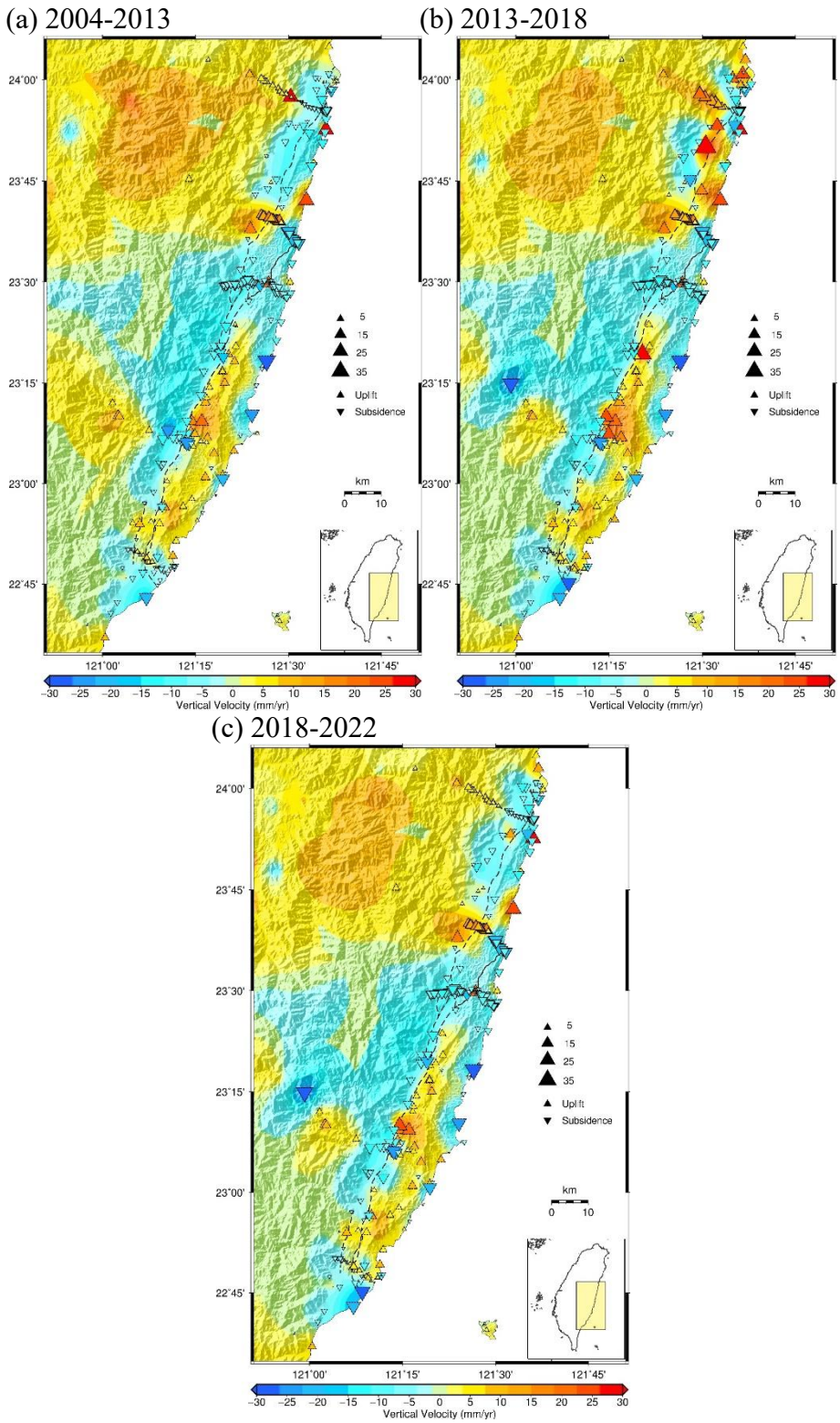


圖 8-3.93：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、黑色虛線邊框表示 GNSS 移動站；紅色邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8-3.93: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) statio 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.

第九章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果

今年度截至目前於臺灣東部發生 3 起規模大於 6 級的地震事件，一為 3 月 23 日地震事件，二為 6 月 20 日地震事件，三為 9 月 17 日、9 月 18 日地震事件。

9-1 2022 年 03 月 23 日地震事件分析報告

9-1-1 2022 年 03 月 23 日地震事件簡介

因為歐亞板塊及菲律賓海板塊不斷相互斜向擠壓的作用（Ho, 1986; Teng, 1990, 1996），使臺灣經歷多次的大規模災害性地震（Bonilla, 1975, 1977; Cheng and Yeh, 1989），其中最顯著的例子即是 1999 年發生在臺灣中部的集集地震（Chen et al., 2001）。臺灣東部的花東縱谷為菲律賓海板塊碰撞上歐亞板塊的縫合帶，縱谷斷層則是花東縱谷中的主要構造（Angelier et al., 1997; Shyu et al., 2005），因此縱谷斷層也發生多次的大規模地震，其中最重要的事件是 1951 年的花蓮-臺東地震序列（Hsu, 1962; Bonilla, 1975; Cheng et al., 1996）。1951 年的地震事件皆發生在臺灣地震活動最高的地區，指出縫合帶上的縱谷斷層有非常高的地震潛能（Yen et al., 2008）。

2022 年 3 月 23 日於臺東沿海發生規模 6.6 的地震（圖 9-1.1），震央位於臺東縣長濱鄉沿海（23.4337°N, 121.5150°E），震源深度約 30.6 km，此次地震於花東地區造成部分地表破裂，且餘震頻繁。中央氣象局即時震度資訊顯示，幾乎全島都能感受到這次地震所引起的振動，最大 6 弱級震度則分佈在臺東長濱；5 強級則在花蓮玉里。

由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-1.2），本次地震的主要斷層面可能有兩種型態，一為北北東–南南西走向向西傾之斷層面；一為北北東–南南西走向向東傾之斷層面。進一步根據主震後至 4 月 16 日之餘震分布圖（圖 9-1.3）所示，其餘震分布為北北東–南南西走向，依餘震分布走向擷取南北二剖面（AA’、BB’剖面）進行分析，AA’和 BB’剖面皆顯示餘震沿著約 62° 之東傾面上分布，深

度約 8 至 40 公里。因此根據野外調查、餘震分布及初步的大地測量資料顯示，此次地震為北北東–南南西走向向東傾之斷層面運動所致。

本報告首先整合 GNSS 連續站觀測結果與 DInSAR 的計算成果，解析本次 2022 年玉里地震造成之地表變形型態。最後再嘗試結合地質、地震等資訊，建立斷層模型來反演大地測量成果，初步釐清本次地震可能的發生機制。

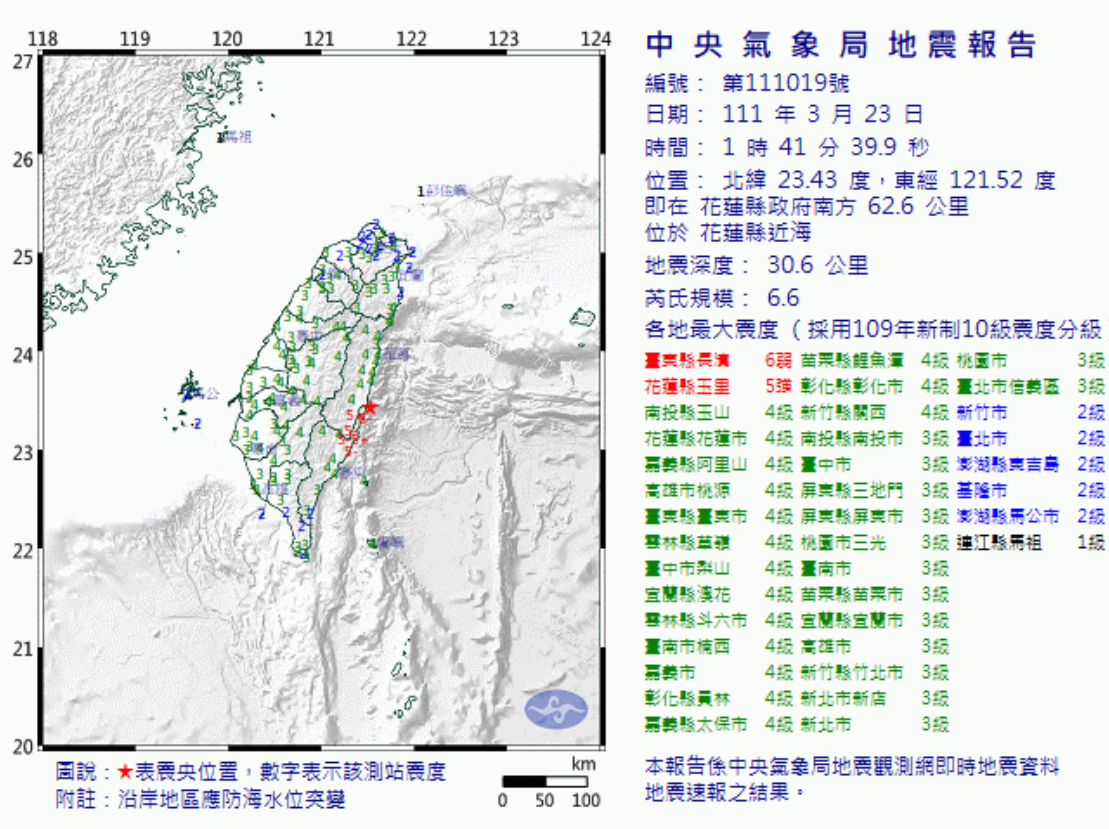


圖 9-1.1：中央氣象局 20220323 地震事件報告。
Figure 9-1.1: 23th March 2022 Earthquake event report from CWB（https://scweb.cwb.gov.tw/webdata/OLDEQ/202203/20220323014139660 19）。

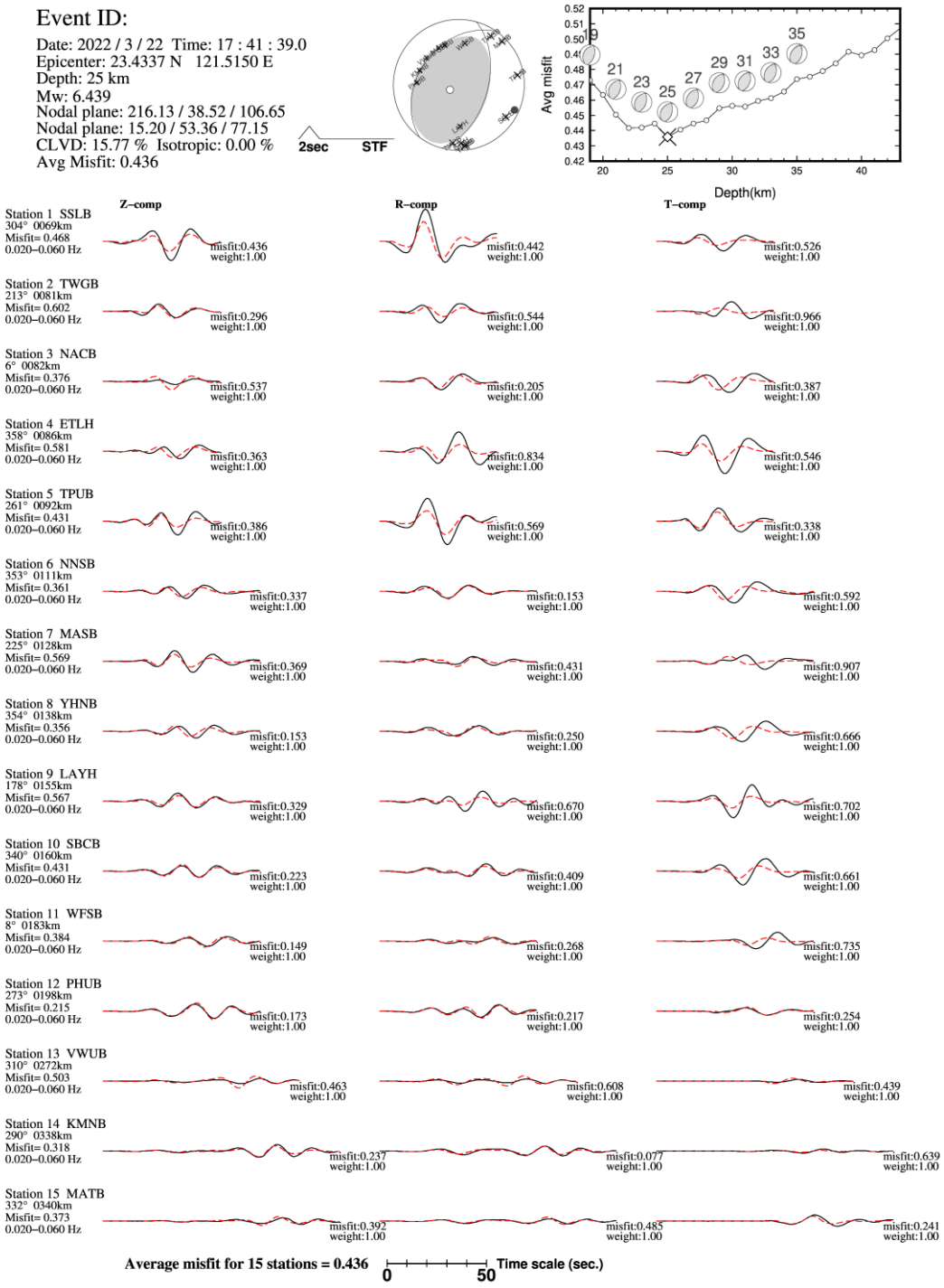


圖 9-1.2：中央氣象局 20220323 地震事件。震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果。
Figure 9-1.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 2022 Taitung earthquake event.
（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/cmt/2022032301413966019）。

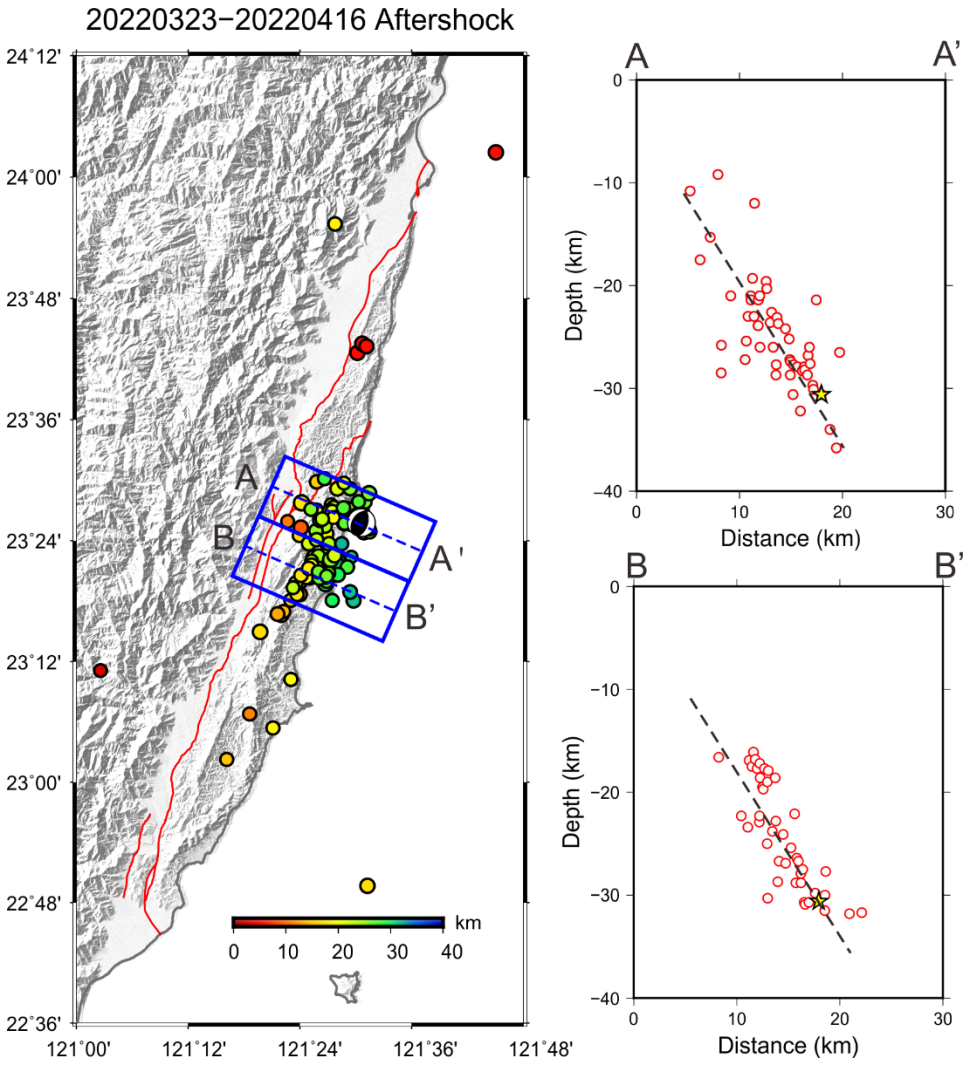


圖 9-1.3：中央氣象局 20220323 地震事件餘震分布及剖面圖。餘震時間自主震後至 2022 年 4 月 16 日；震源機制解表示為 2022 年 3 月 23 日之地震；剖面圖中黃色星號為震央位置。

Figure 9-1.3: The aftershocks distribution of 2022 Taitung earthquake.

9-1-2 2022 年 03 月 23 日地震事件震源區地質簡介

花東縱谷位於中央央山脈與海岸山脈兩大地質區之間（圖 9-1.4）。海岸山脈位於縱谷的東部，其特徵是由中新世到上新世早期的高度變形的弧前盆地和火山弧岩石物質所組成（Chang et al., 2001）。位於縱谷西部的中央山脈，主要由中生代到第三紀的低變質度板岩或片岩（Ho, 1988）。花東縱谷則由晚第四紀河流沉積物組成，這些沉積物源於鄰近的海岸山脈和中央山脈。

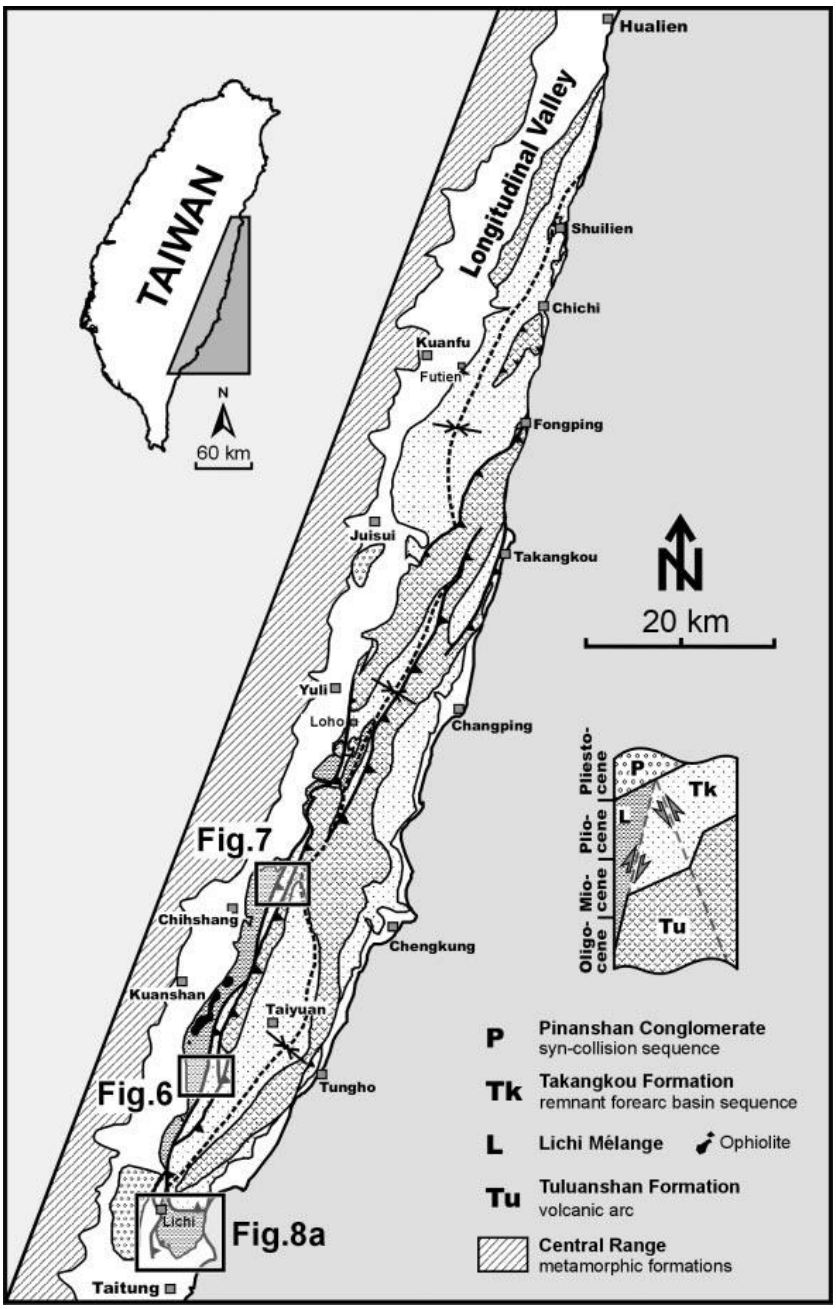


圖 9-1.4：臺灣東部地區地質圖（Chang et al., 2001）。
Figure 9-1.4: Geological map in eastern Taiwan (Chang et al., 2001).

縱谷中最顯著和活躍的構造即是北北東–南南西走向且向東傾的縱谷斷層。縱谷斷層特點是，南段以逆衝分量為主，但在北段則為左移之走向滑移分量為主（例如：Chemenda et al., 1997; Kao and Jian, 2001; Kim et al., 2006）。在地貌上，這個斷層沿線多在河谷中存在明顯的地表隆起或傾斜的河流階地，或以斷層崖，小背斜，山體滑坡等形式表現出來。近期的大地測量成果指出，縱谷正以每年約 40 mm/yr 的速度相互聚合（例如：Yu et al., 1997）。縱谷斷層南段之池上斷層表現出地表潛移的行為，池上地區之速度剖面顯示斷層以約 20-30 mm/yr 的速率在潛移（Angelier et al., 1997; Lee et al., 2001），然而縱谷斷層北段近地表跨斷層僅有較小的速度差異（Yu and Kuo, 2001），而深部仍有較高的斷層滑移速率（Hsu et al., 2003; Johnson et al., 2005; Rau et al., 2007）。

在地震活動方面，縱谷斷層一向被認為是非常活躍的，且有發生過災難性地震的紀錄，導致縱谷斷層地表破裂的發育。1951 年的花蓮臺東地震序列（圖 9-1.4）是發生在縱谷斷層上最著名的地震事件，該事件在花東縱谷造成嚴重的生命財產災損（Gutenberg and Richter, 1954; Lee et al., 1978; Abe, 1981; Hsu, 1985; Cheng et al., 1996）。該地震序列在花蓮東部外海地區先後發生 3 次規模 7 的地震，導致縱谷斷層最北端的米崙斷層與嶺頂斷層產生地表破裂；兩次規模大於 6 的地震事件，導致縱谷斷層中的池上斷層及玉里斷層發生地表破裂（Hsu, 1962; Yu, 1997; Shyu et al., 2007）。除了 1951 年花蓮臺東地震序列外，花東縱谷也發生其他重要的地震事件，如 2003 年 12 月 10 日規模 6.5 的成功地震（圖 9-1.5）導致池上斷層破裂，其為 1999 年集集地震以來，臺灣陸上規模最大的地震（Ching et al., 2007）；2013 年規模 6.4 的瑞穗地震，則是縱谷北段第一個主要逆衝型地震，根據主餘震序列及大地測量成果指出，北段縱谷斷層下盤為隆起。縱谷斷層南段的斷層滑移速率較穩定，且有重複地震（repeating earthquake）的發生（Chen et al., 2007）。

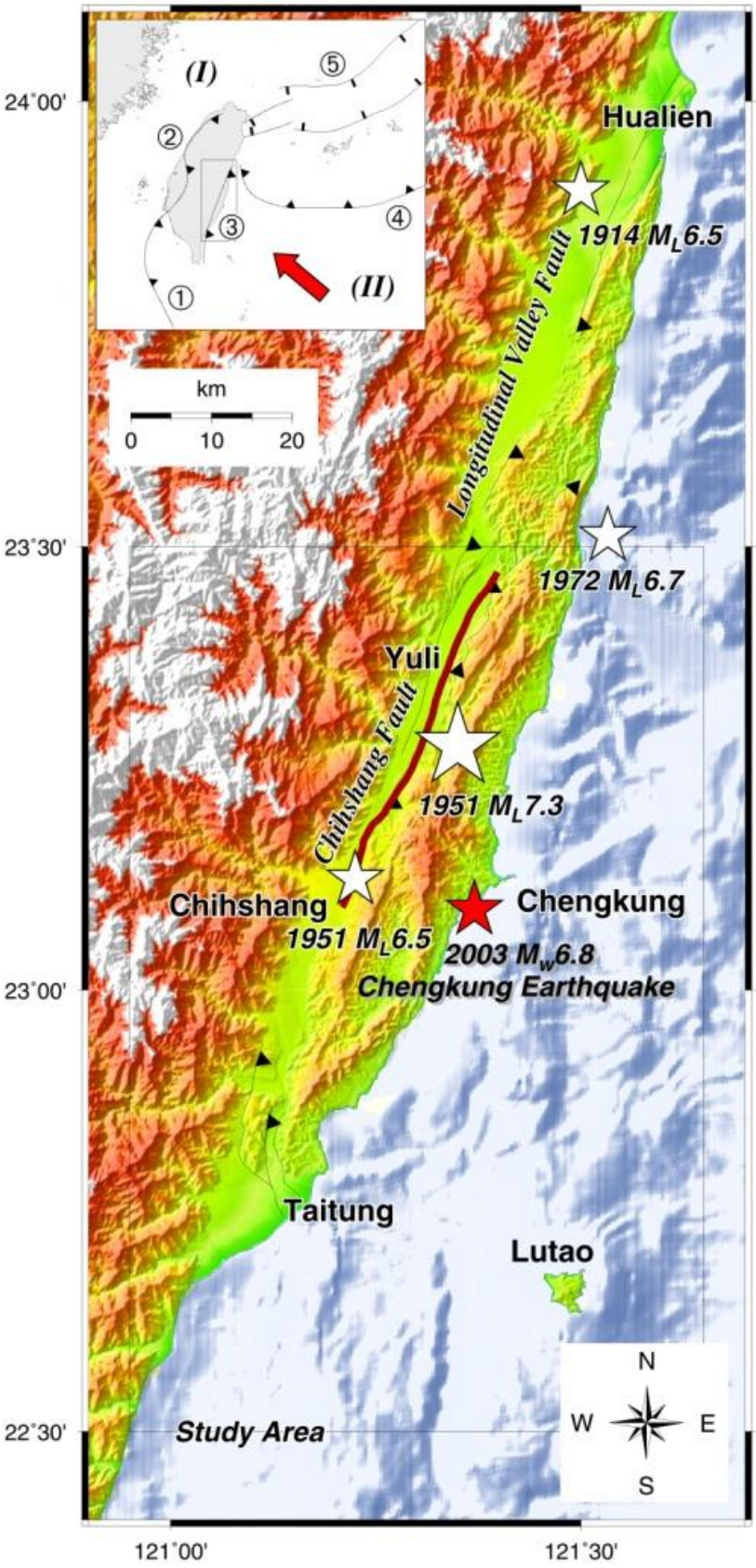


圖 9-1.5：1951 年花蓮臺東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖（Ching et al., 2007）。
Figure 9-1.5: 1951 Hualine-Taitung earthquake sequence and 2003 Chengkung earthquake (Ching et al., 2007).

9-1-3 2022 年 03 月 23 日地震事件同震位移場

中央地質調查所於 2022 年 3 月 23 日臺東沿海發生之規模 6.6 地震後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GNSS 連續站資料，進行地表同震位移場之解算。最後還蒐集雷達衛星影像進行同震地表位移場解算。

9-1-3-1 GNSS 連續站同震位移場

本研究團隊於地震發生後，藉由中央地質調查所與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集之全臺 GNSS 連續站資料，進行震央附近同震位移之計算，在地震發生時間前後各七天以 GIPSYX 進行解算，亦即 2022 年 3 月 15 日至 2022 年 3 月 29 日的資料；同震位移估算則是使用發震前後七天各自的坐標加權平均值相減而得。

由結果可知（圖 9-1.6），GNSS 連續追蹤站所測得的最大同震位移，為震央北邊中央研究院的大港口測站，(KNKO，東經 121.5057 度，北緯 23.4722 度)。同震抬升為 104.2 mm，同震位移水平分量向東為 53.0 mm；同震位移水平分量向北為 34.1 mm。而位於震央西南邊中央研究院的長濱站（PING，東經 121.4543 度，北緯 24.3195 度），其同震抬升為 71.0 mm，同震位移水平分量向東為 17.0 mm，同震位移水平分量向南為 36.3 mm。

由同震位移分布圖可見，此次地震造成之同震位移方向由北往南以順時針方向旋轉，震央北邊以往東北方向運動之向量為主，其中以大港口及豐濱測站有較大之量值，震央南邊則由長濱測站的東南方向運動往西南方逐漸轉為西南方向運動，垂直向位移則以抬升為主，震央 20 公里範圍內之測站有 30 mm 以上之同震抬升量值。

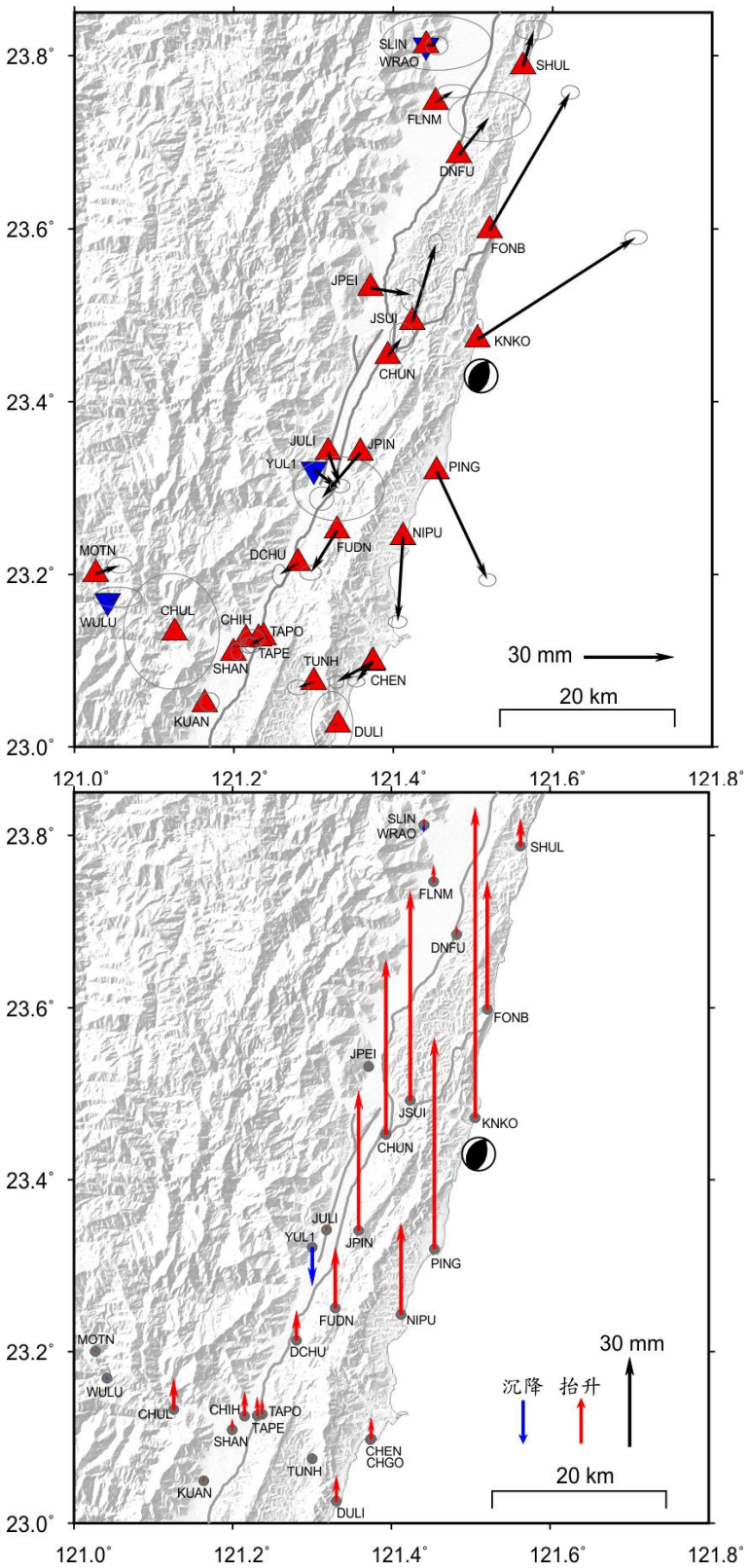


圖 9-1.6：20220323 地震事件 GNSS 同震位移。地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色三角形代表抬升，藍色三角形代表下陷。

Figure 9-1.6: Coseismic displacement of 20220323 earthquake event.

9-1-3-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場

為觀察 2022 年 3 月 23 日凌晨發生於臺東沿海，地震規模達 6.6 之地震同震地表變形，研究團隊嘗試利用合成孔徑雷達差分干涉技術（Differential Interferometric SAR，DInSAR），分析歐洲太空總署哨兵衛星（Sentinel-1A）分別在 2022 年 3 月 14 日和 3 月 26 日所拍攝的雷達影像（圖 9-1.7），協助本計畫了解地震發生時地表的活動情形。

本次地震的震央位於秀姑巒溪出海口外，距離震央最近的近岸區域，理論上應有較明顯之地表位移，然而礙於海岸山脈植被之影響，造成兩幅影像之間的同調性差異較大，僅約略可見數個模糊的差分干涉環分佈在花蓮豐濱和臺東長濱之間。此外，在花蓮瑞穗和玉里市中心也發現有局部的干涉環產生。

未來研究團隊將持續取得精密軌道資訊，並且進行相位解算，以能獲得詳細的同震地表變位移變化量。

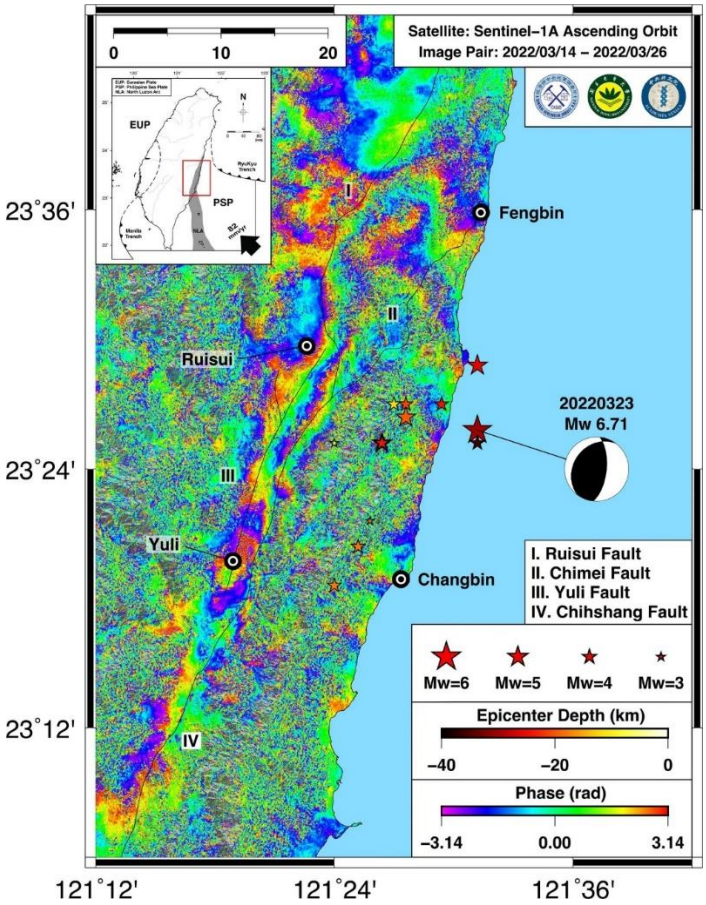


圖 9-1.7：歐洲哨兵衛星 1A 之合成孔徑雷達差分干涉同震地表變形影像。影像拍攝時間為 2022 年 3 月 14 日及 3 月 26 日。

Figure 9-1.7: The coseismic surface deformation field of LOS direction from Sentinel-1satellite of 20220323 earthquake.

9-1-4 2022 年 03 月 23 日地震事件震源模型

由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-1.2），本次地震的主要斷層面可能有兩種型態，一為北北東–南南西走向向西傾之斷層面；一為北北東–南南西走向向東傾之斷層面。根據野外調查、餘震分布及初步的大地測量資料顯示，此次地震可能為北北東–南南西走向向東傾之斷層面運動所致。為了解析這個問題，本團隊利用斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992），建立初步的斷層模型來嘗試提供一個可能的震源模型。

本計畫的斷層錯位模型是採用根據彈性錯動理論（Okada, 1985, 1992）所建立之斷層錯位模型，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(half space)，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體(Poisson solid)，即彈性模量(λ)等於剪切模量(μ)之彈性體。沿著斷層元素(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），其關係如下式所列。其中，δ_{jk}為克羅內克函數；v_k為正交於地表元素$d\sum$之餘弦函數方向；F 為施力點之力量大小。

$$u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]v_k d\sum$$

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：斷層平面位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。其中，斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層斷層面下緣的深度。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)。

由震源機制解與主餘震的空間分布指出（圖 9-1.3），本次地震主要的孕震構造極有可能是北北東–南南西走向，且向東傾之斷層面；因此本團隊根據 2022 年玉里地震的震源模型及主餘震的空間分布，擷取北北東–南南西走向且向東傾之斷層面，傾角設定為 62°，深度則為 8 – 40 公里，以建立本次地震的斷層幾何（圖 9-1.8）。

接著，本計畫將斷層面劃分成數十個小斷層面（patch）以求取同震斷層滑移量，及主要滑移分布。目前之最佳模型解（圖 9-1.8）指出，此斷層之斷層滑移量主要介於 500 mm – 600 mm，集中在深度約 14 – 28 km 的位置，投影至地表則位於主震震央與臺東長濱鄉之間，斷層滑移以逆移運動為主。該斷層之測地矩（M_0）為 9.41× 10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.62。

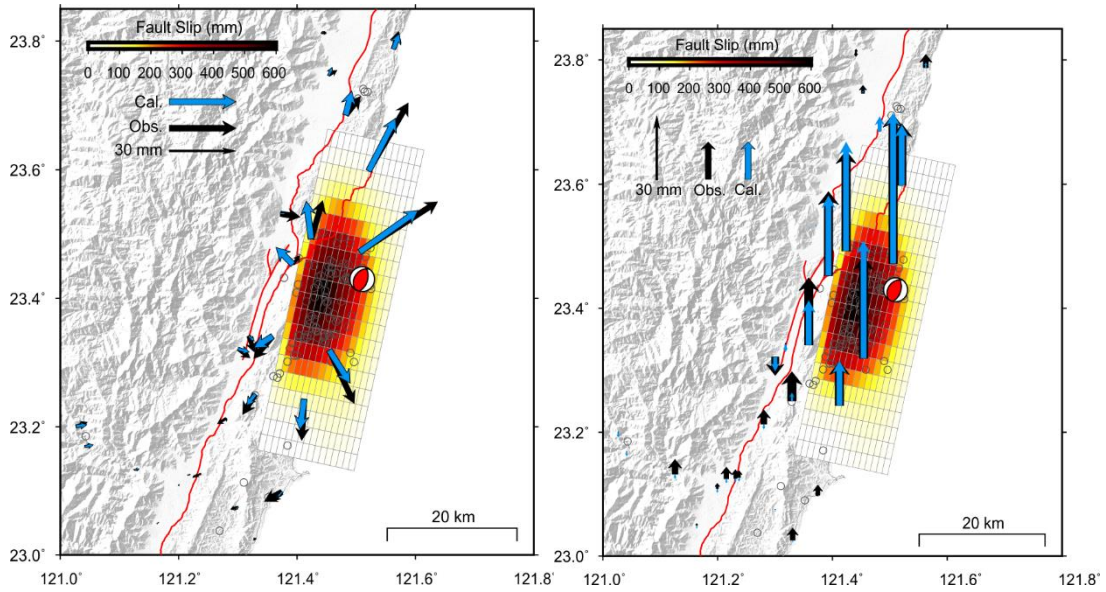


圖 9-1.8：2022 年 03 月 23 日地震斷層模型結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；震源機制解為主震震央位置；圓圈為餘震分布。
Figure 8-1.8: Coseismic source model of 20220323 earthquake event. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

9-1-5 2022 年 03 月 23 日地震事件討論與結論

2022 年 3 月 23 日於臺東沿海發生規模 6.6 的地震，震央位於臺東縣長濱鄉外海（23.4337°N, 121.5150°E），震源深度約 30.6 km。中央地質調查所於該地震發生後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GNSS 連續站資料來進行地表同震位移場之解算。

由 GNSS 連續站獲得之地表同震位移場指出，最大同震位移位於震北邊的

大港口測站，同震抬升為 104.2 mm，同震位移水平分量向東為 53.0 mm；同震位移水平分量向北為 34.1 mm。由同震位移分布圖可見，此次地震造成之同震位移方向由北往南以順時針方向旋轉，震央北邊以往東北方向運動之向量為主，其中以大港口及豐濱測站有較大之量值，震央南邊則由長濱測站的東南方向運動往西南方逐漸轉為西南方向運動，垂直向位移則以抬升為主，震央 20 公里範圍內之測站有 30 mm 以上之同震抬升量值。

在衛星影像處理方面，本團隊主要採用（European Space Agency；ESA）所屬衛星 Sentinel-1A 的雷達影像，使用差分合成孔徑雷達干涉技術（DInSAR），得到視衛星方向同震地表視衛變形圖，此次地震使用 2022 年 3 月 14 日和 3 月 26 日所拍攝的雷達影像。然而，本次地震的震央位於秀姑巒溪出海口外，距離震央最近的近岸區域，理論上應有較明顯之地表位移，然而礙於海岸山脈植被之影響，造成兩幅影像之間的同調性差異較大，僅約略可見數個模糊的差分干涉環分佈在花蓮豐濱和臺東長濱之間。此外，在花蓮瑞穗和玉里市中心也發現有局部的干涉環產生。

由震源機制解與主餘震的空間分布指出，本次地震主要的孕震構造極有可能是北北東–南南西走向且向東傾之斷層面，因此本團隊根據 2022 年臺東沿海地震之震源模型，擷取北北東–南南西走向且向東傾之斷層面，來建立本次地震的斷層幾何。本計畫僅反演 GNSS 同震位移場來估算斷層滑移分布。其最佳模型指出，斷層之滑移量主要分布在 500 mm ~ 600 mm，集中在深度約 14 – 28 km 的位置。此地震之測地矩（M_0）為 9.41×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.62。

9-2 2022 年 06 月 20 日地震事件分析報告

9-2-1 2022 年 06 月 20 日地震事件簡介

2022 年 6 月 20 日於花蓮陸上發生規模 6.0 的地震（圖 9-2.1），震央位於花蓮縣光復鄉（23.6818°N, 121.4660°E），震源深度約 6.8 km，此次地震於花東地區造成部分地表破裂，且餘震頻繁。中央氣象局即時震度資訊顯示，幾乎全島都能感受到這次地震所引起的振動，最大 5 弱級震度則分佈在花蓮光復。由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-2.2），本次地震為東北–西南走向之逆衝斷層所造成，其斷層面之傾角可能有東南傾斜或西北傾斜兩種型態。

本報告首先整合 GNSS 連續站觀測結果與 DInSAR 的計算成果，解析本次 2022 年光復地震造成之地表變形型態。最後再嘗試結合地質、地震等資訊，建立斷層模型來反演大地測量成果，初步釐清本次地震可能的發生機制。

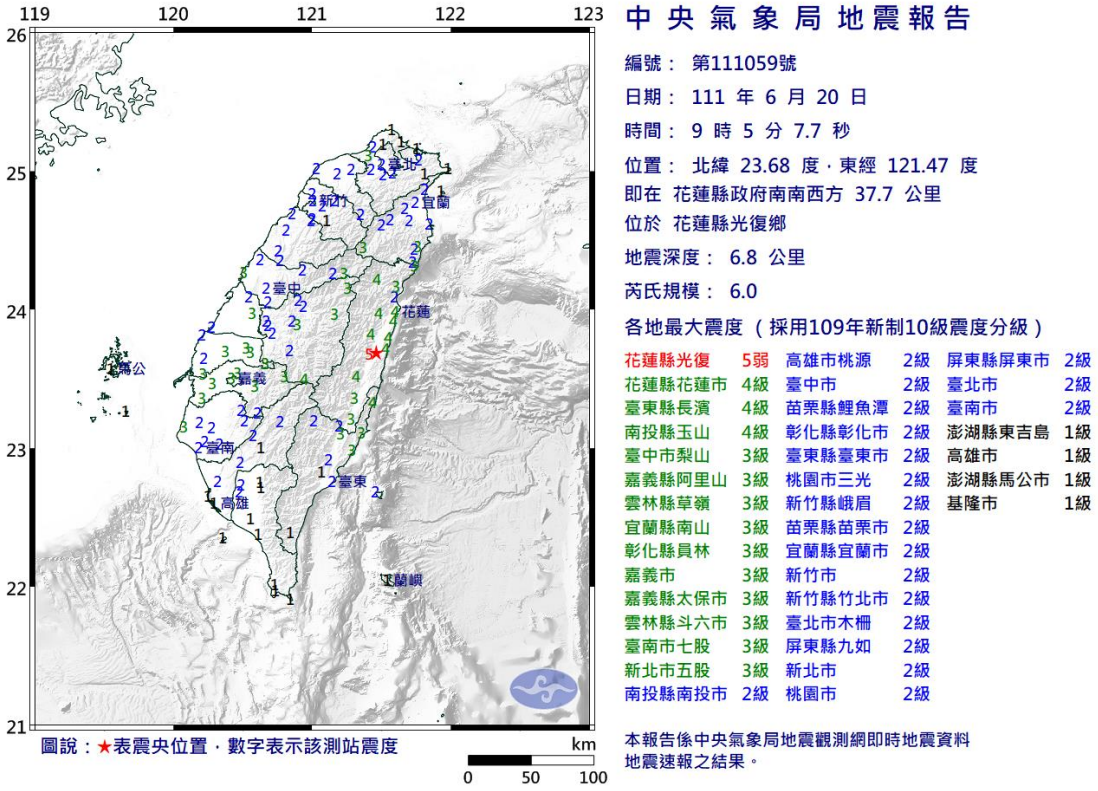


圖 9-2.1：中央氣象局 20220620 地震事件報告。
Figure 9-2.1: 20th June 2022 Earthquake event report from CWB（https://scweb.cwb.gov.tw/webdata/OLDEQ/202203/20220323014139660 19）。

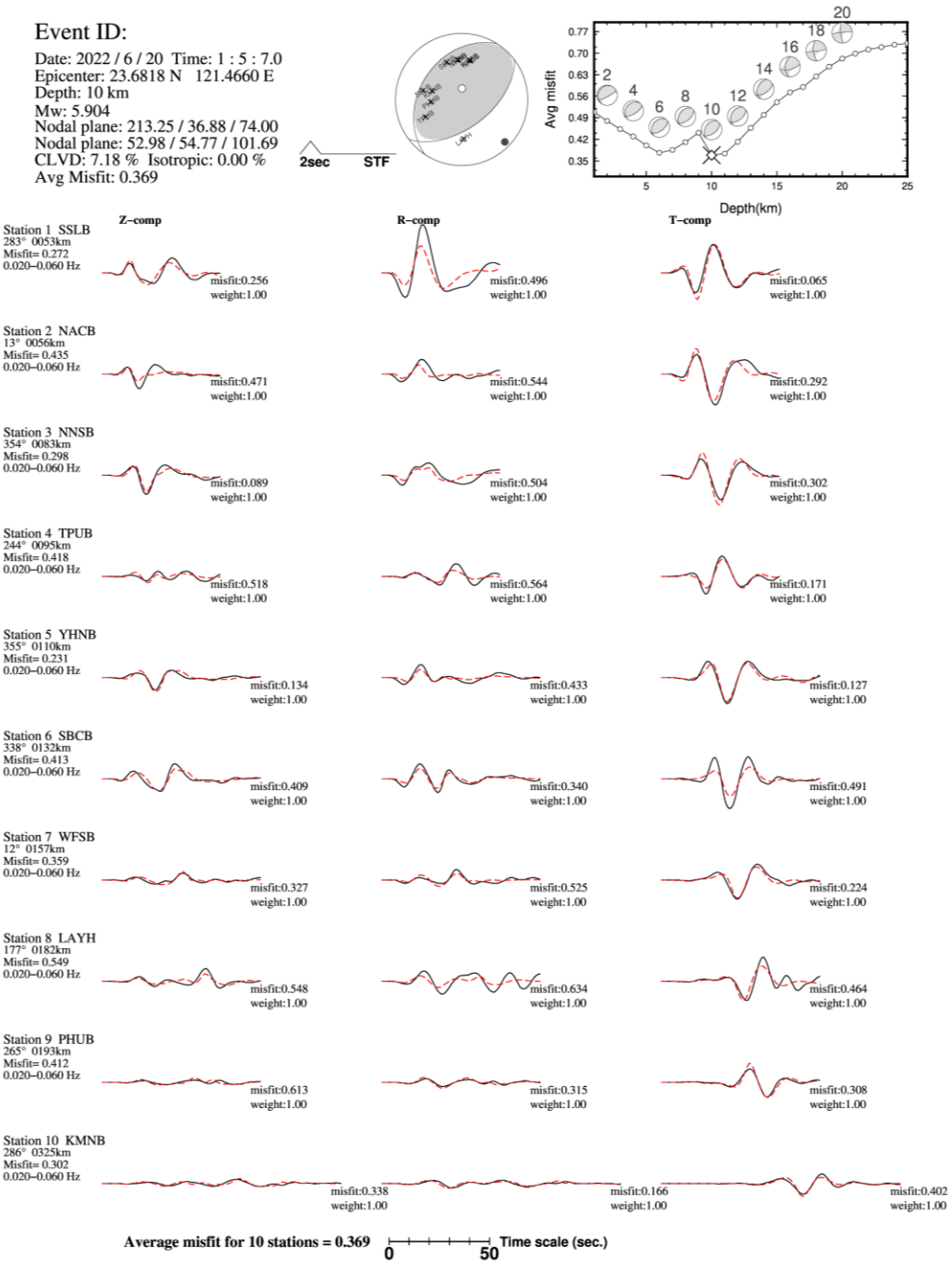


圖 9-2.2：中央氣象局 20220620 地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果。
Figure 9-2.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 2022 Hualian earthquake event.
（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/cmt/2022062009050760059）。

9-2-2 2022 年 06 月 20 日地震事件同震位移場

中央地質調查所於 2022 年 6 月 20 日花蓮光復發生之規模 6.0 地震後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GNSS 連續站資料，進行地表同震位移場之解算，並蒐集雷達衛星影像進行同震地表位移場解算。

9-2-2-1 GNSS 連續站同震位移場

本研究團隊於地震發生後，藉由所蒐集之全臺 GNSS 連續站資料，進行震央附近之同震位移場計算。本計畫首先以 GIPSYX 解算地震發生前七天與地震當天之每日坐標解，亦即 2022 年 6 月 13 日至 2022 年 6 月 20 日的資料。接著，計算發震時間前後各自的坐標加權平均值，同震位移量則是地震後之坐標平均值減去地震前之坐標平均值。

由同震位移場分布圖可見（圖 9-2.3），此次地震造成之同震位移除震央及震央西北方向二測站外，其他地區並無顯著之同震位移產生。GNSS 連續站所測得的最大同震位移量，發生在鄰近震央之氣象局東富測站（DNFU，東經 121.48229 度，北緯 23.68513 度），同震抬升為 134.59 mm，同震位移水平分量向東為 37.23 mm；同震位移水平分量向南為 5.32 mm。而位於震央西北方向的鳳林及萬榮測站（FLNM 及 WARO）亦有顯著往東南方向運動之水平同震位移量，分別為 24.27 mm 及 19.36 mm，然此二測站並無明顯之同震位移垂直量。

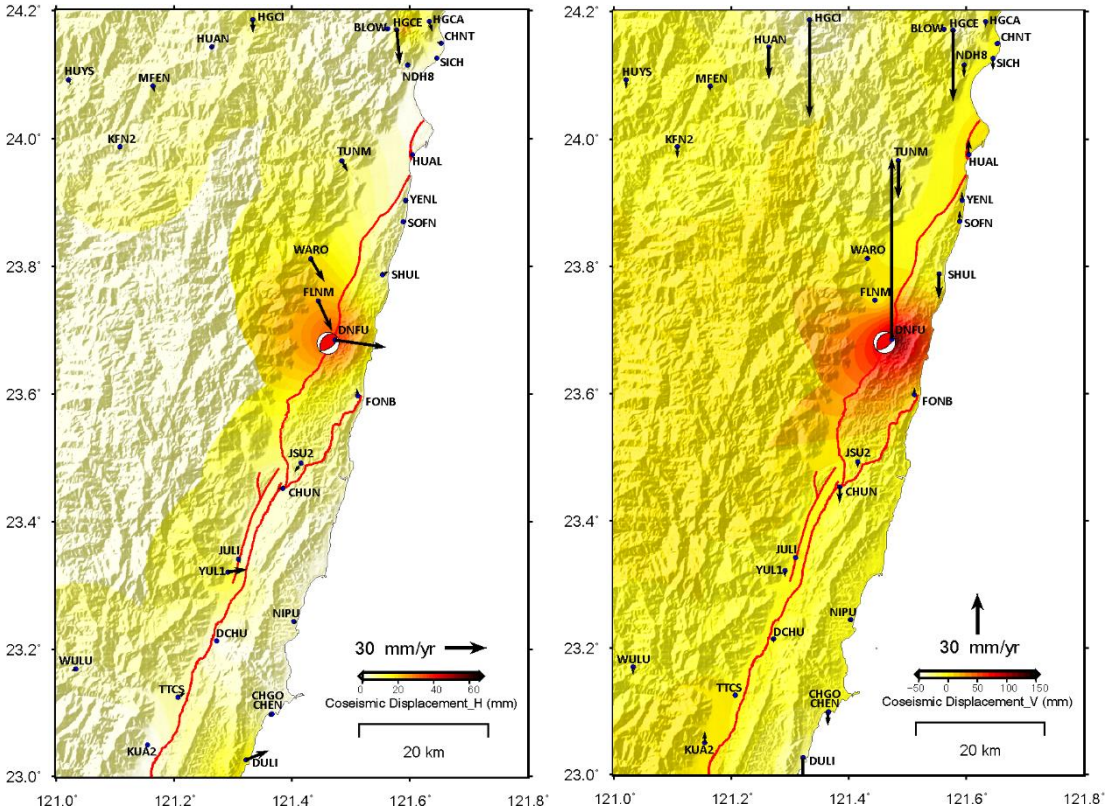


圖 9-2.3：2022 年花蓮光復地震 GNSS 同震位移場。地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色實線為地調所 2021 年公告之斷層線。

Figure 9-2.3: Coseismic displacement of 20220323 earthquake event.

9-2-2-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場

為觀察 2022 年 6 月 20 日發生於花蓮光復，地震規模 6.0 之地震同震地表變形，本研究團隊利用合成孔徑雷達差分干涉技術（Differential Interferometric SAR，DInSAR），分析歐洲太空總署哨兵衛星（Sentinel-1A）分別在 2022 年 6 月 18 日和 6 月 30 日所拍攝的雷達影像（圖 9-2.4），協助本計畫了解地震發生時地表的活動情形。

本次地震造成的地表變形在影像上約呈現 7-8 個彩虹干涉環，相當於在衛星視角的方向上有 20 公分左右的位移量。此外，值得注意的是，干涉環在空間上的分佈型態呈現同心圓狀，其圓心約位在震央南方 5 公里處。未來將持續取得衛星精密軌道資訊進行相位解算，以獲得詳細的同震地表位移變化量，同時配合地震重定位的資訊，確認這兩個中心點差異的成因，提供本次地震更為精準的地表位移資訊，以利後續相關研究。

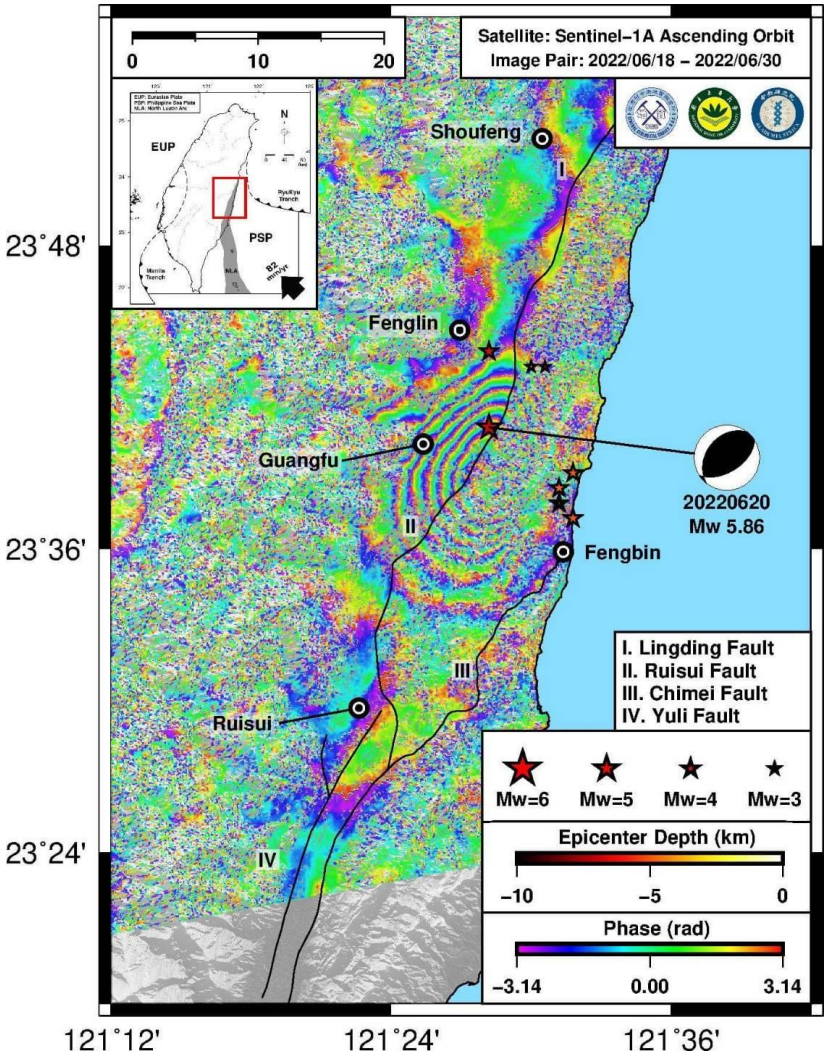


圖 9-2.4：歐洲哨兵衛星 1A 之合成孔徑雷達差分干涉同震地表變形影像。影像拍攝時間為 2022 年 6 月 18 日及 6 月 30 日。

Figure 9-2.4: The coseismic surface deformation field of LOS direction from Sentinel-1satellite of 20220620 earthquake.

9-2-3 2022 年 06 月 20 日地震事件震源模型

由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-2.2），本次地震的主要斷層面為東北–西南走向，並可能有向東南或西北方向傾斜的兩種型態。然而，根據地表同震位移場的型態指出，地表抬升主要發生在縱谷與中央山脈地區，東部沿海則為沉降，在考慮 2003 年瑞穗地震之斷層面型態，本團隊建議本次地震的斷層面應為西北方向傾斜的面。為解析產生此地震之斷層參數，本團隊利用 GNSS 連續站資料，以斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992）建立初步的斷層模型來嘗試提供一個可能的震源模型。

本團隊利用馬可夫鏈蒙地卡羅法（MCMC）進行斷層參數最佳解搜尋，獲得走向 211.9 度、傾角 31 度之東北–西南走向，且往西北傾之斷層面（圖 9-2.5）。

接著，本計畫將斷層面劃分成數十個小斷層面（patch）以求取同震斷層滑移量分布型態。目前本計畫獲得之最佳模型解（圖 9-2.5）指出，此斷層之斷層滑移量主要介於 400 mm – 450 mm，集中在深度約 4 – 8 km 的位置，斷層滑移以逆移運動為主。該斷層之測地矩（M_0）為 1.75×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.13。

因目前僅使用震央附近之 GNSS 連續站同震位移成果建立此初步的斷層模型，待其他更詳盡資料之匯入，得更詳盡之同震位移資料，以獲得模型成果。

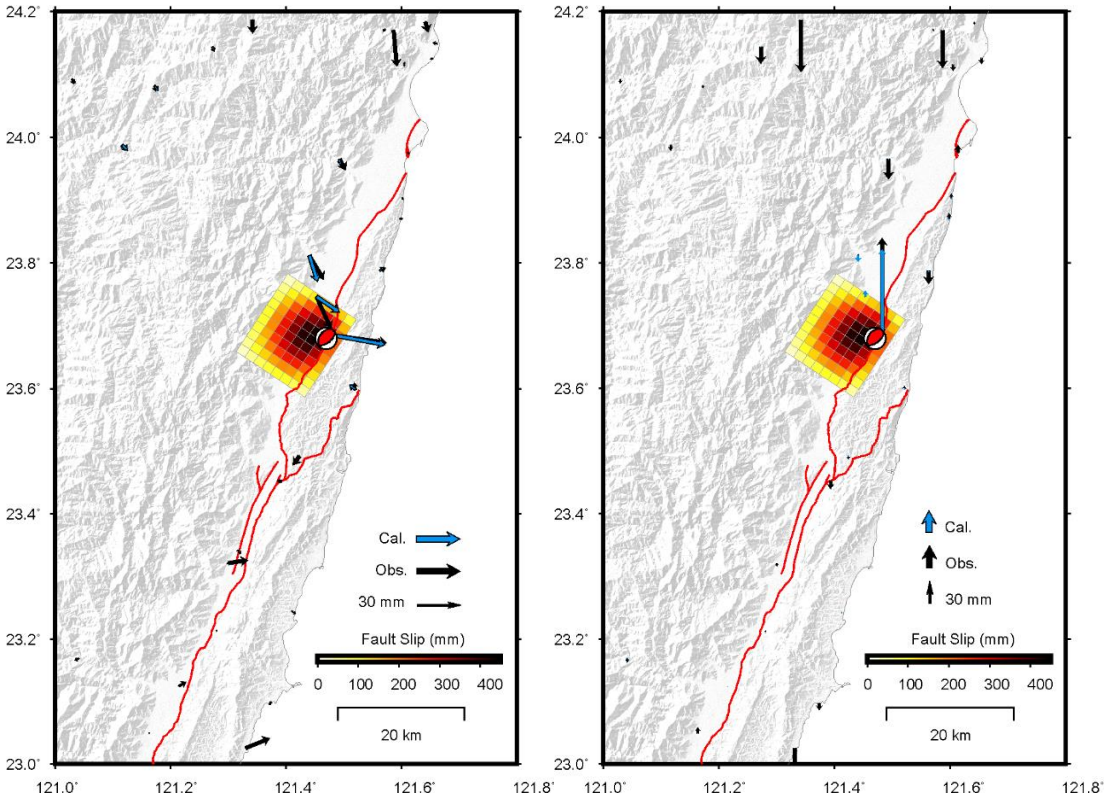


圖 9-2.5：2022 年花蓮光復地震斷層模型結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；震源機制解為主震震央位置。
Figure 9-2.5: Coseismic source model of 20220620 earthquake event. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

9-2-4 2022 年 06 月 20 日地震事件討論與結論

2022 年 6 月 20 日於花蓮發生規模 6.0 的地震，震央位於花蓮縣光復鄉（23.6818°N, 121.4660°E），震源深度約 6.8 km。中央地質調查所於該地震發生後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GNSS 連續站資料來進行地表同震位移場之解算。

由 GNSS 連續站獲得之地表同震位移場指出，最大同震位移量發生在震央所在之氣象局東富測站（DNFU，東經 121.48229 度，北緯 23.68513 度），同震抬

升為 134.59 mm，同震位移水平分量向東為 37.23 mm；同震位移水平分量向南為 5.32 mm。而位於震央西北方向的鳳林及萬榮測站（FLNM 及 WARO）亦有顯著往東南方向運動之同震位移水平分量，分別為 24.27 mm 及 19.36 mm，然此二測站並無明顯之同震位移垂直分量。

在衛星影像處理方面，本團隊主要採用歐洲太空總署所屬衛星 Sentinel-1A 的雷達影像，使用差分合成孔徑雷達干涉技術（DInSAR），得到視衛星方向同震地表變形圖，此次地震使用 2022 年 6 月 18 日和 6 月 30 日所拍攝的雷達影像。此淺層地震造成的地表變形在影像上約呈現 7-8 個彩虹干涉環，相當於在衛星視角的方向上有 20 公分左右的位移量。

本團隊進一步使用馬可夫鏈蒙地卡羅法進行斷層參數最佳解搜尋，獲得走向 211.9 度、傾角 31 度往西北傾之斷層面。目前之最佳模型解指出，此斷層之斷層滑移量主要介於 400 mm – 450 mm，集中在深度約 4 – 8 km 的位置，斷層滑移以逆移運動為主。該斷層之測地矩（M_0）為 1.75×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.13。因目前僅使用震央附近之 GNSS 連續站同震位移成果建立此初步的斷層模型，待其他更詳盡資料之匯入，得更詳盡之同震位移資料，以獲得模型成果。

9-3 2022 年 09 月 18 日地震事件分析報告

9-3-1 2022 年 09 月 18 日地震事件簡介

2022 年 9 月 17 日於臺東陸上發生規模 6.4 的地震，震央位於臺東縣關山鎮（23.08°N, 121.16°E），震源深度約 7.3 km，此次地震於花東地區造成地表破裂，且餘震頻繁。中央氣象局即時震度資訊顯示，全島都能感受到這次地震所引起的振動，最大 6 強級震度則分佈在臺東池上（圖 9-3.1）。由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-3.2），本次地震走滑兼逆衝斷層所造成，其可能為走向近南-北向之西傾斷層或近東-西向之南傾斷層型態。此次地震之餘震分布如圖 9-3.3 所示，主要沿著近南北向分布，而深度約在 10 公里範圍內，而根據現地野外調查之成果亦顯示此次地震以近南北向破裂為主（圖 9-3.7）。

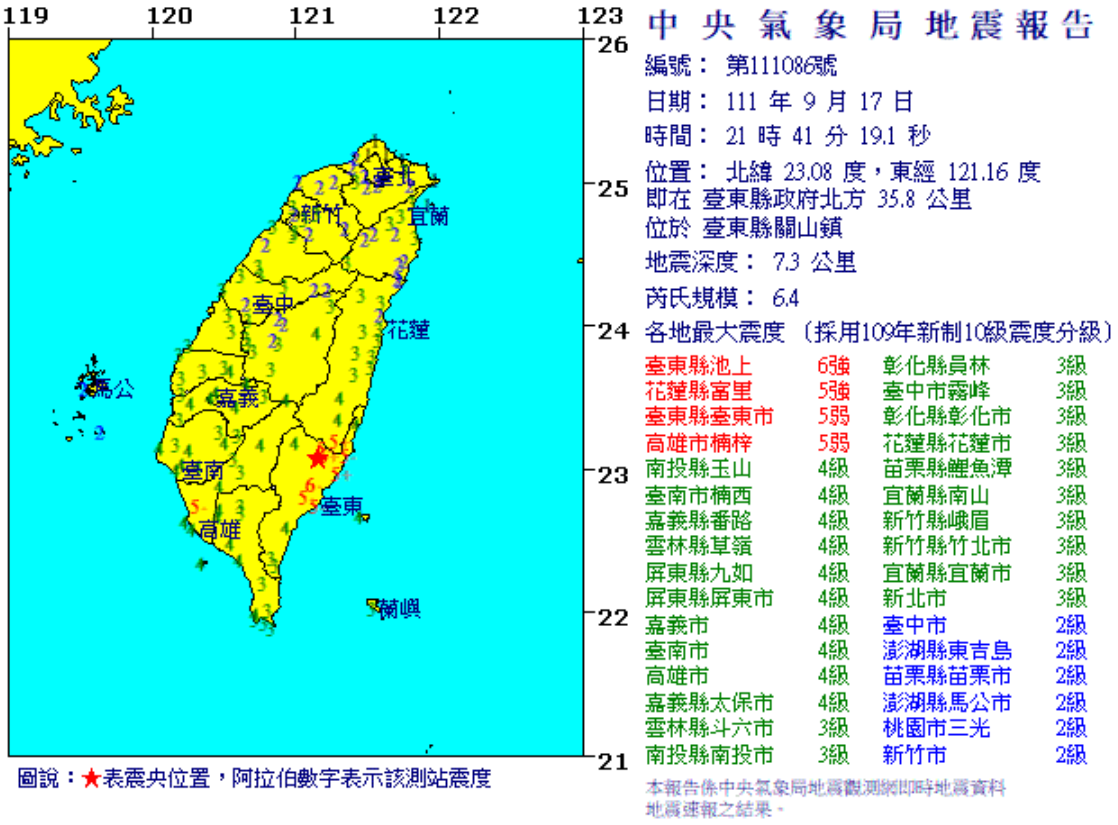


圖 9-3.1：中央氣象局 20220917 地震事件報告
Figure 9-3.1: 17th September 2022 Earthquake event report from CWB （https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/imgs/2022091721411964086）。

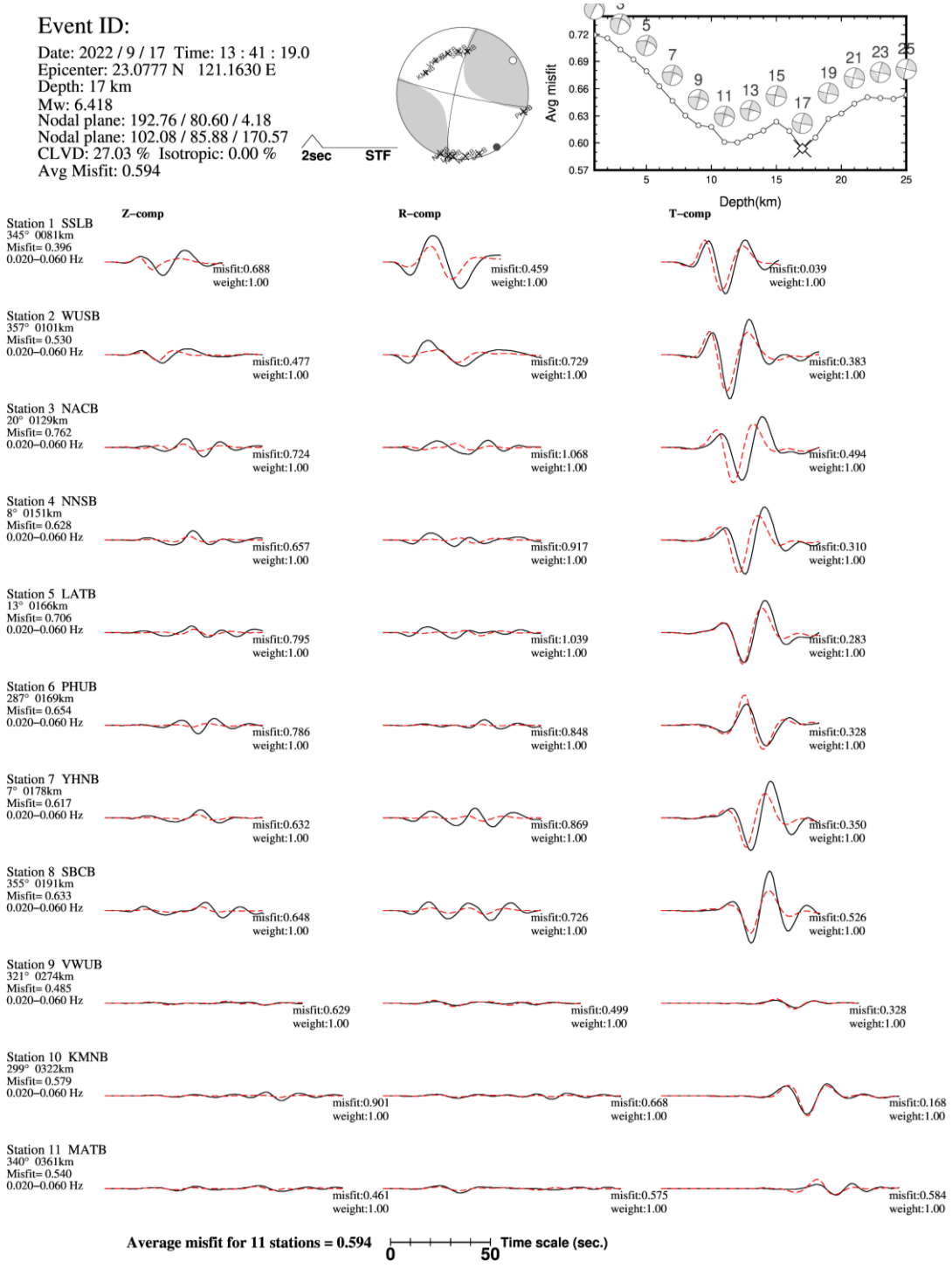


圖 9-3.2：中央氣象局 20220917 地震事件震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果

Figure 9-3.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 17th September 2022 earthquake event（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/cmt/2022091721411964086）。

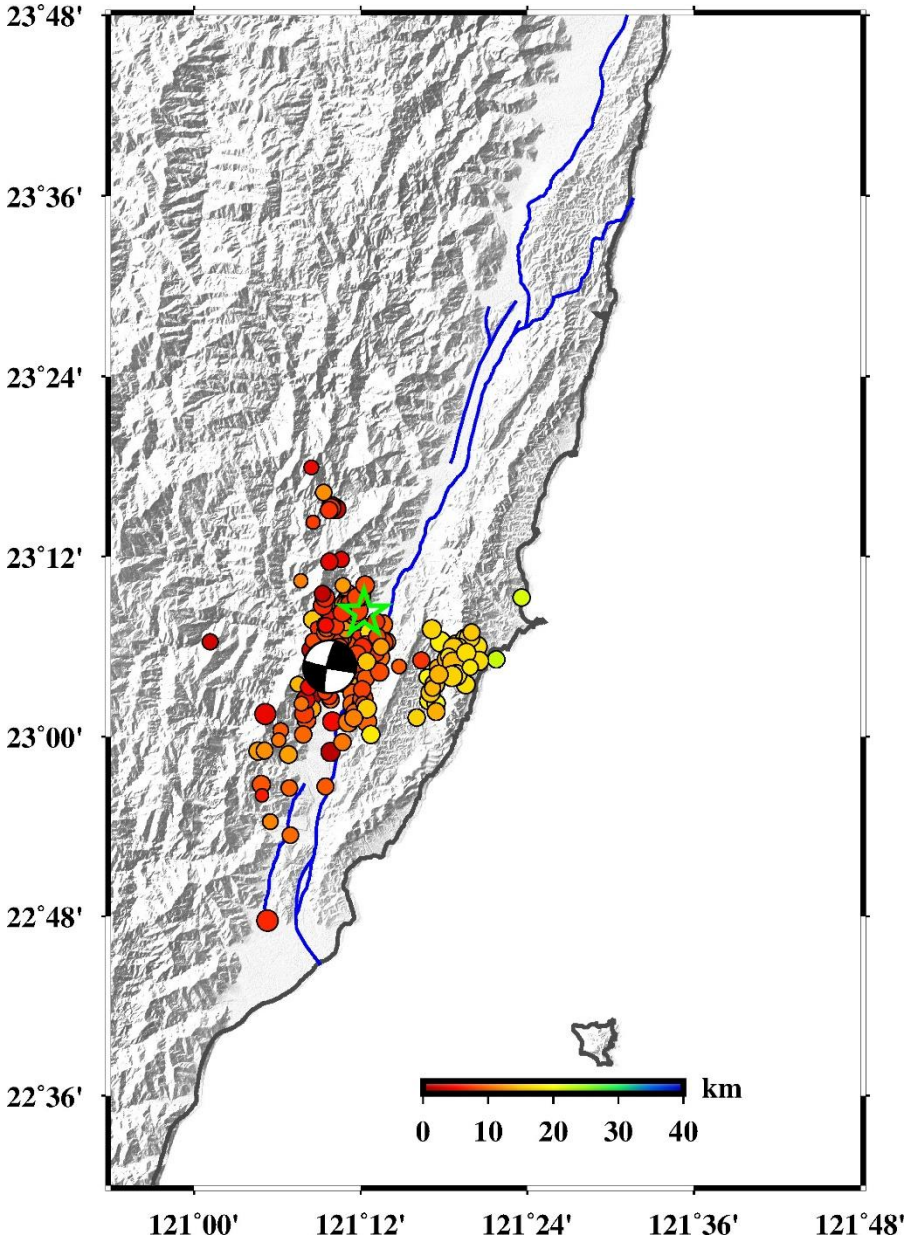


圖 9-3.3：0917 地震事件餘震分布。海灘球表示為此次地震之震源機制解；圓點表示為餘震分布；綠色星號為 0918 地震事件之震央位置；藍色實線為地調所 2021 年公告之斷層位置。（地震資料源自 GDMS，時間段為 0917 地震後至 0918 地震前）。

Figure 9-3.3: The aftershocks distribution of 17th September 2022 earthquake event.

2022 年 9 月 18 日於臺東陸上發生規模 6.8 的地震，震央位於臺東縣池上鄉（23.14°N, 121.2°E），震源深度約 7.0 km，此次地震於花東地區造成大規模地表破裂（圖 9-3.7），且餘震頻繁。中央氣象局即時震度資訊顯示，全島都能感受到這次地震所引起的振動，最大 6 強級震度則分佈在臺東池上（圖 9-3.4）。由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-3.5），本次地震走滑兼逆衝斷層所造成，其可能為走向北北東-南南西之西傾斷層或近東-西向之南傾斷層型態。此次地震之餘震分布如圖 9-3.6 所示，主要沿著北北東-南南西走向往南、往北分布，而深度約在 10 公里範圍內，而根據現地野外調查之成果亦顯示此次地震以北北東-南南西北向破裂為主（圖 9-3.7）。

本報告首先整合 GNSS 連續站觀測結果，解析 2022 年 9 月 17 日關山地震、2022 年 9 月 18 日池上地震事件造成之地表變形型態。再結合地質、地震等資訊，建立斷層模型來反演大地測量成果，初步釐清本次地震可能的發生機制。

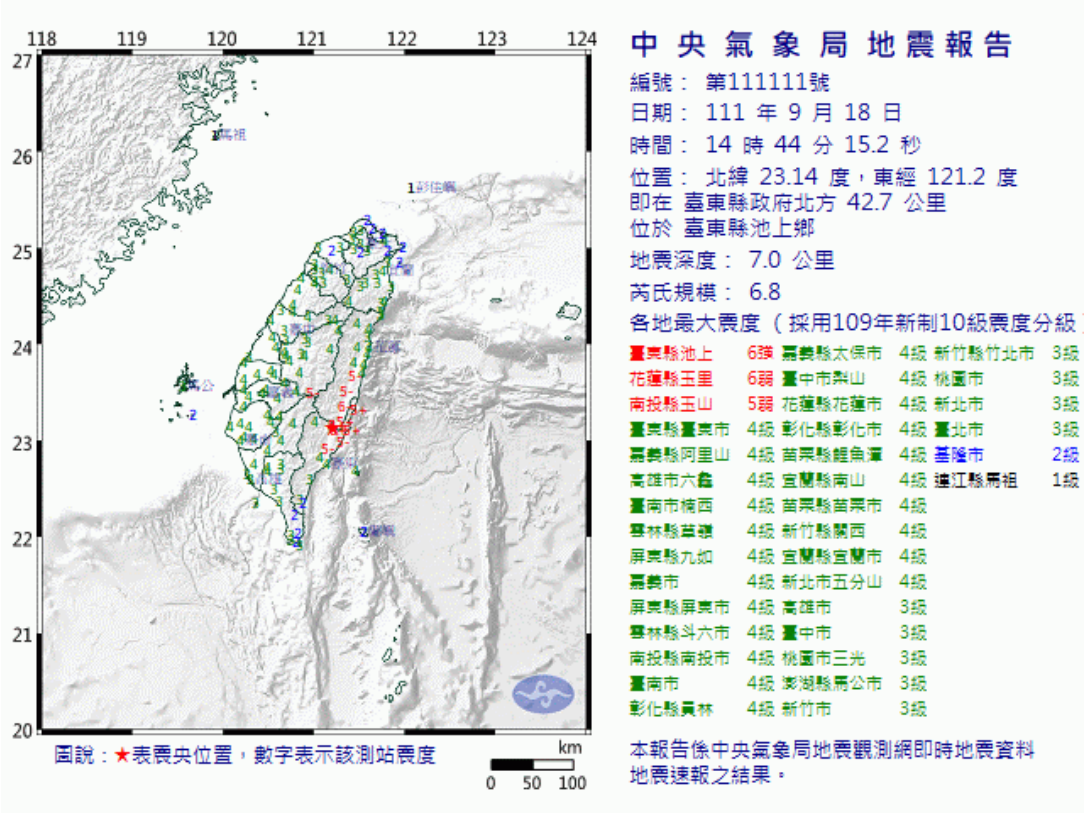


圖 9-3.4：中央氣象局 20220918 地震事件報告
Figure 9-3.4: 18th September 2022 Earthquake event report from CWB（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/imgs/2022091814441568111）。

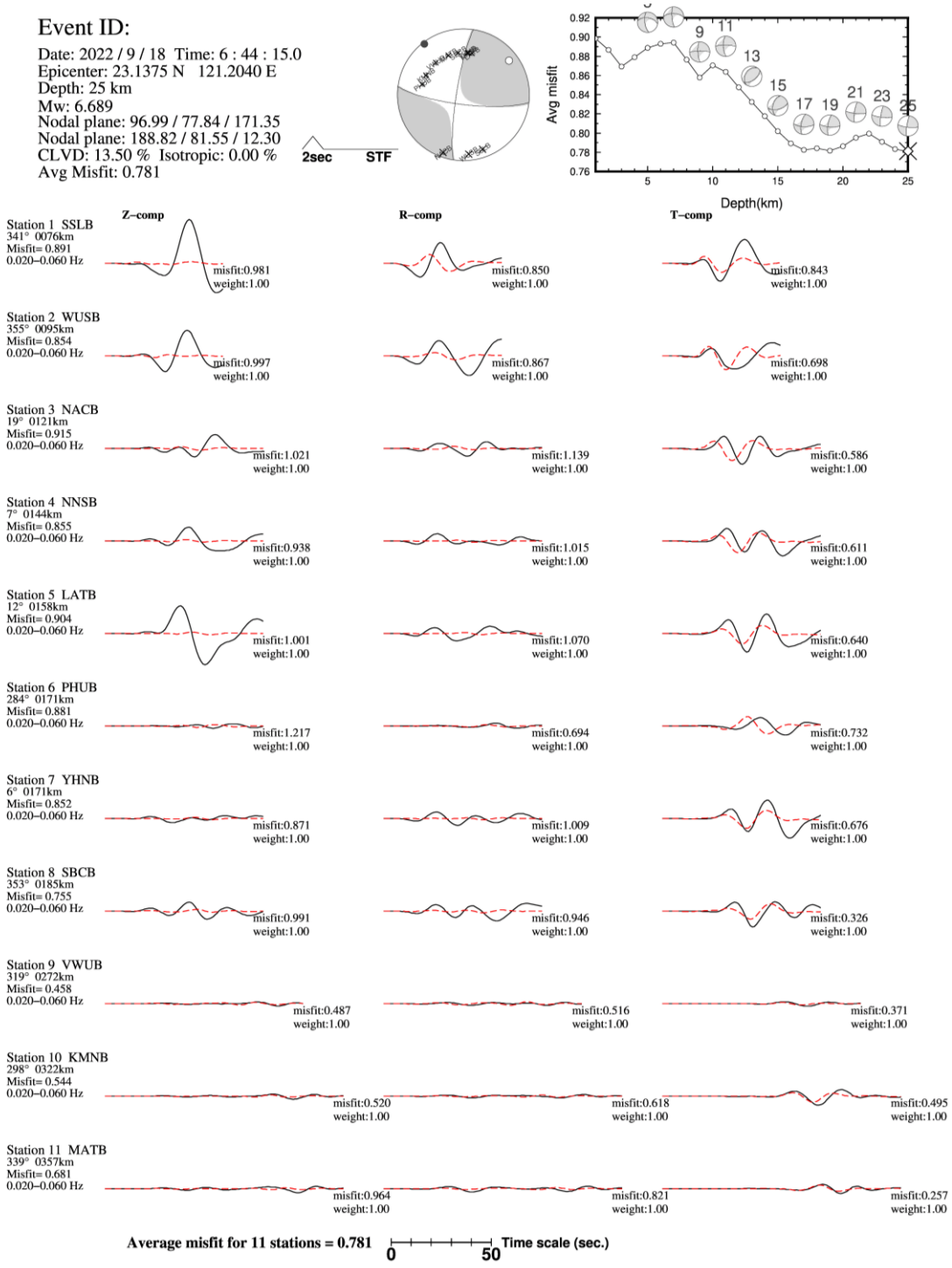


圖 9-3.5：中央氣象局 20220918 地震事件震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果

Figure 9-3.5: The focal mechanism and seismic wave inversion of 18th September 2022 earthquake event（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/cmt/2022091814441568111）。

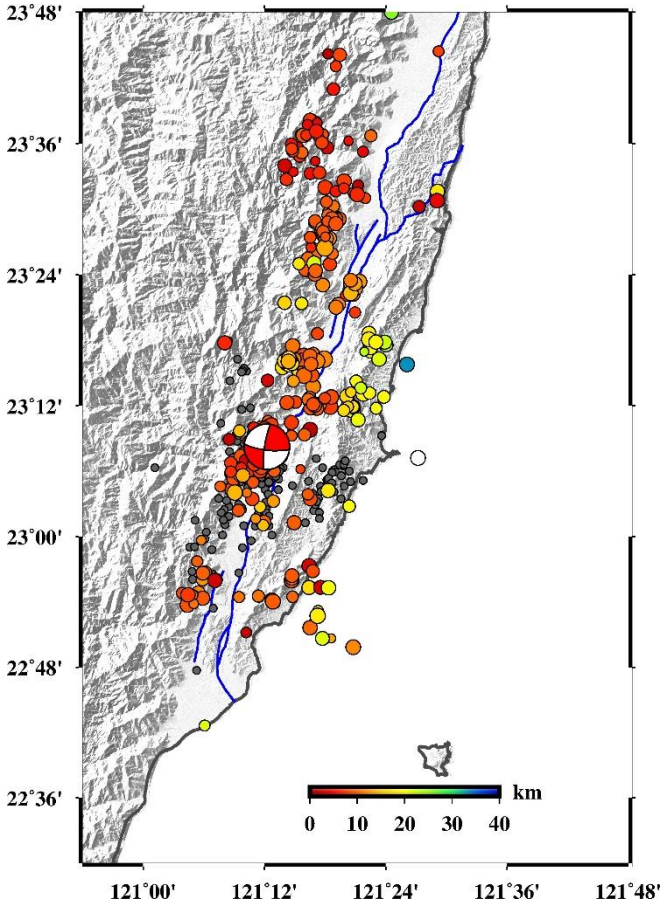


圖 9-3.6：0918 地震事件餘震分布。海灘球表示為此次地震之震源機制解；圓點表示為餘震分布，黑色圓點表示為 0917 地震之餘震分布，以色階表示深度變化之圓點為 0918 地震後的餘震；藍色實線為地調所 2021 年公告之斷層位置。（地震資料源自 GDMS，時間段為 0918 地震後至 9 月 30 日）。

Figure 9-3.6: The aftershocks distribution of 18th September 2022 earthquake event.



圖 9-3.7：0917 及 0918 地震地表破裂調查。（本團隊現場野外調查照片）

Figure 9-3.7: The field surveying of 17th 18th September 2022 earthquake event.

9-3-2 2022 年 09 月 17 及 18 日地震事件同震位移場

本研究團隊於地震發生後，藉由所蒐集之全臺 GNSS 連續站資料，進行震央附近之同震位移場計算。本計畫首先以 GIPSYX 解算地震發生前後七天之每日坐標解，亦即 2022 年 9 月 10 日至 2022 年 9 月 25 日的資料。接著，計算發震時間前後各自的坐標加權平均值，同震位移量則是地震後之坐標平均值減去地震前之坐標平均值。

9-3-2-1 0917 關山地震 GNSS 連續站同震位移場

關山地震後，一天內隨即發生 0918 池上地震，因此於 0917 關山地震之同震位移計算，震前時間段採用 9/10 至 9/17 關山地震發震前一刻，震後則以 9/17 關山地震發震後至 9/18 池上地震發震前一刻。此次地震之同震位移場如圖 9-3.8 所示。

由同震位移場分布圖可見（圖 9-3.8），此次地震造成之同震位移除震央及震央 10 公里範圍內有顯著之同震位移外，其他地區並無顯著之同震位移產生。GNSS 連續站所測得的最大同震位移量，發生在鄰近震央之 KUA2，垂直向抬升約 102.19 mm，水平向則往南南西方向運動約 171.03 mm，水平分量往西運動 70.32 mm，往南運動 155.90 mm。同震位移之水平分量於縱谷斷層以西沿著斷層走向往南運動，以東則無顯著水平向位移。

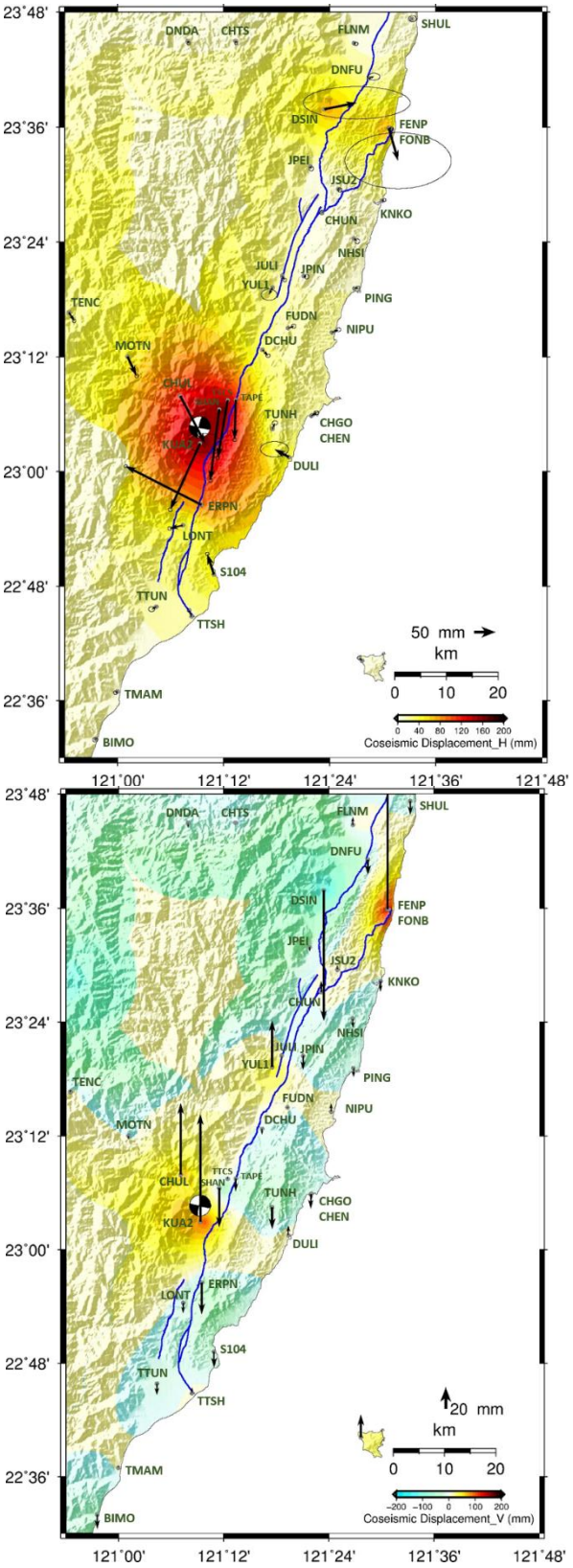


圖 9-3.8：2022 年 9 月 17 日臺東關山地震 GNSS 同震位移場。上圖表示為水平同震位移場；下圖表示為垂直同震位移場，暖色系為抬升，冷色系為沉陷；震源機制解為氣象局公布之地震斷層機制解；藍色實線為地調所 2021 年公告之斷層線；黑色箭頭表示為 GNSS 連續站。

Figure 9-3.8: Coseismic displacement of 0917 earthquake event.

9-3-2-2 0918 池上地震 GNSS 連續站同震位移場

池上地震發震前一天於臺東關山發生規模 6.4 之地震，因此於 0918 池上地震之同震位移計算，震前時間段採用 9/17 關山地震發震後一刻至 9/18 發震前一刻，震後則以 9/18 關山地震發震後至 9/25 日。

由同震位移場分布圖可見(圖 9-3.9)，此次地震造成大範圍之顯著同震位移，同震位移型態以縱谷斷層為界：以西沿著縱谷斷層走向往南南西方向運動、垂直位移則為抬升，以東則往西北方向運動、垂直位移為沉陷。於圖 9-3.9 之垂直同震位移場圖中可見，縱谷斷層以西又以震央北邊約 20 公里遠之玉里地區有較大之垂直同震位移產生，因此以下將分為三區域進行最大同震位移量值之描述：

1. 縱谷斷層以西-震央(池上地區，南段)：

   GNSS 連續站所測得的最大同震位移量，在鄰近震央之 TTCS，垂直向抬升約 250.96 mm，水平向往南南西方向運動約 944.43 mm（水平分量往西運動 287.34 mm，往南運動 899.66 mm）。

2. 縱谷斷層以西--震央北側(玉里地區，北段)：

   GNSS 連續站所測得的最大水平同震位移量，在 YUL1，往南南西方向運動約 908.46 mm（水平分量往西運動 325.87 mm，往南運動 848.00 mm)，垂直向抬升約 785.67 mm；最大垂直同震位移則在 JULI，抬升約 821.76 mm，水平向往南南西方向運動約 696.24 mm。

3. 縱谷斷層以東：

   GNSS 連續站所測得的最大水平同震位移量，在 DCHU，往西北方向運動約 708.49 mm(水平分量往西運動 343.39 mm，往北運動 619.71 mm)，垂直向沉陷約 233.80 mm；最大垂直同震位移則在 JPIN，沉陷約 432.60 mm，水平向往西北方向運動約 677.48 mm。

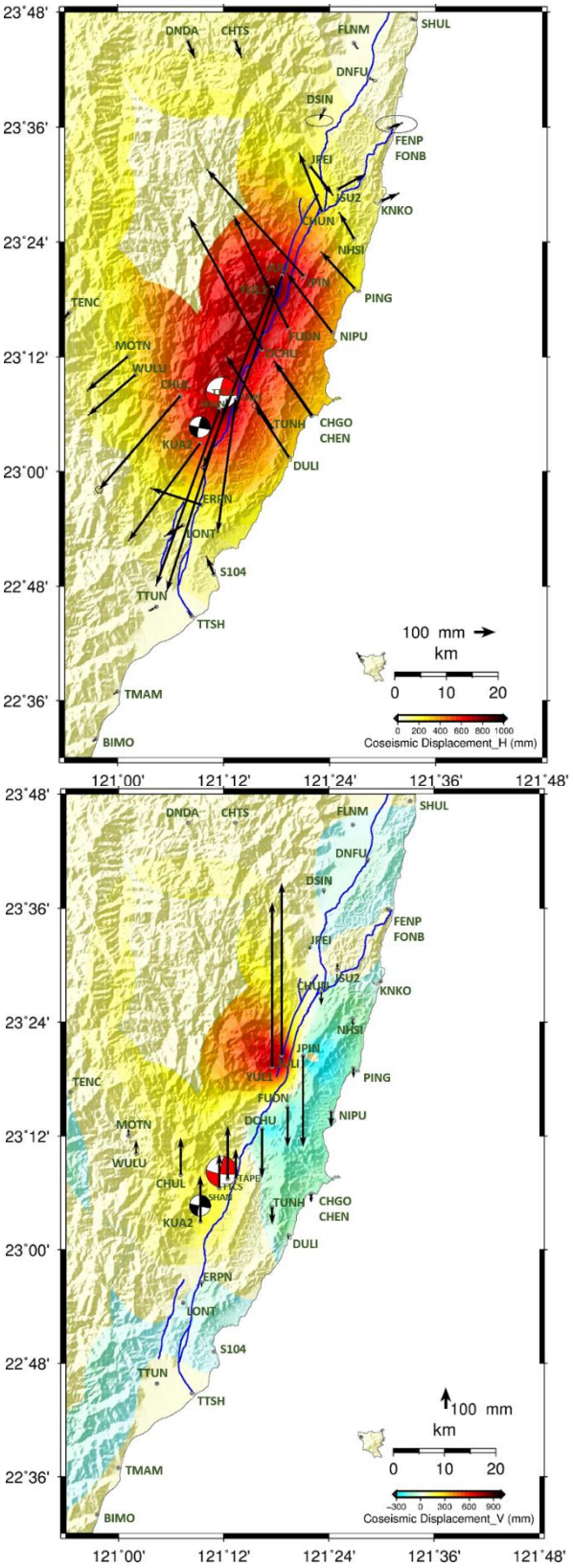


圖 9-3.9：2022 年 9 月 18 日臺東池上地震 GNSS 同震位移場。上圖表示為水平同震位移場；下圖表示為垂直同震位移場，暖色系為抬升，冷色系為沉陷；黑色震源機制解為 0917 關山地震，紅色為 0918 池上地震；藍色實線為地調所 2021 年公告之斷層線；黑色箭頭表示為 GNSS 連續站。

Figure 9-3.9: Coseismic displacement of 0918 earthquake event.

9-3-2-2 GNSS 移動站及水準同震位移場

東部 9 月 17 日及 18 日地震後，於 10 月 3 日至 10 月 9 日進行 GNSS 移動站、水準紅葉-靜浦測線及東成-富岡測線之測量，此同震位移量值包含兩次地震之同震位移量值（圖 9-3.10）。

GNSS 移動站之水平同震位移場趨勢與 GNSS 連續站之同震位移相似，皆顯示了位移型態以縱谷斷層為界：以西沿著縱谷斷層走向往南南西方向運動、垂直位移則為抬升，以東則往西北方向運動、垂直位移為沉陷。於圖 9-3.10 之垂直同震位移場圖中可見，縱谷斷層以西又以震央北邊約 20 公里遠之玉里地區亦有較大之垂直同震位移產生，以下同 GNSS 連續站之成果將 GNSS 移動站之同震位移趨勢分為三區域進行最大同震位移量值之描述：

1. 縱谷斷層以西-震央(池上地區，南段)：GNSS 移動站所測得的最大同震位移量，在鄰近震央之 GE53，垂直向抬升約 969.67 mm，水平向往南南西方向運動約 974.83 mm（水平分量往西運動 492.12 mm，往南運動 841.50 mm）。
2. 縱谷斷層以西--震央北側(玉里地區，北段)：GNSS 連續站所測得的最大水平同震位移量，在 E801，往南南西方向運動約 733.06 mm（水平分量往西運動 220.09 mm，往南運動 699.24 mm），垂直向抬升約 882.78mm。
3. 縱谷斷層以東：GNSS 移動站所測得的最大水平同震位移量，在 GE02，往西北方向運動約 955.93 mm（水平分量往西運動 391.78 mm，往北運動 871.96 mm），垂直向沉陷約 327.67 mm。

水準測量之同震位移指出，紅葉-靜浦測線之垂直位移形態以瑞穗斷層及奇美斷層為界而有不同之運動行為：瑞穗斷層以西，由西往東呈現抬升至沉陷；瑞穗斷層至奇美斷層之間以抬升為主，奇美斷層以東則轉為沉陷；橫跨瑞穗斷層有約 50 mm 之垂直差異量，橫跨奇美斷層則有約 30 mm 之垂直差異量。

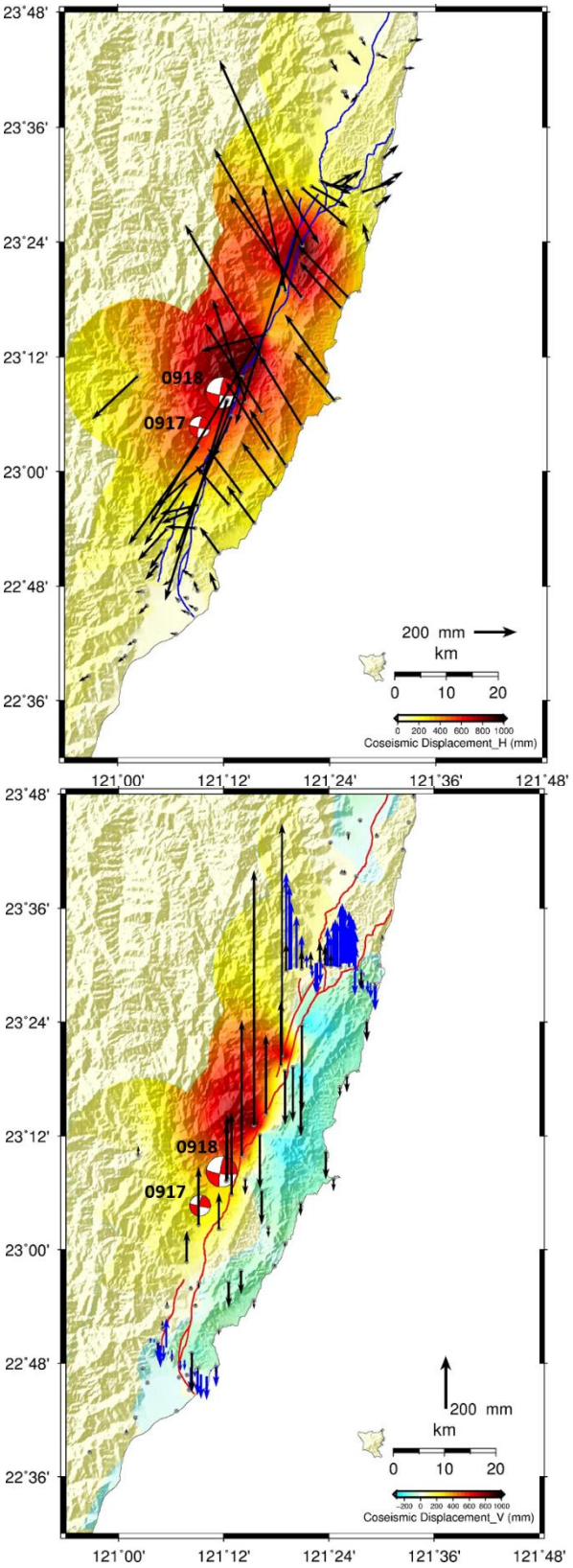


圖 9-3.10：2022 年 9 月 17、18 日臺東關山、池上地震 GNSS 移動站及水準同震位移場。上圖表示為水平同震位移場；下圖表示為垂直同震位移場，暖色系為抬升，冷色系為沉陷；震源機制解為 0917 關山地震及 0918 池上地震；藍色實線為地調所 2021 年公告之斷層線；黑色箭頭表示為 GNSS 移動站，藍色箭頭表示為水準測量。

Figure 9-3.10: RGNSS and leveling coseismic displacement of 0917 and 0918 earthquake event.

9-3-3 2022 年 09 月 17 及 18 日地震事件震源模型

由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 9-3.2、圖 9-3.5），0917 及 0918 地震為走滑兼逆衝斷層所造成，其可能為走向北北東-南南西之西傾斷層或近東西向之南傾斷層型態。由二地震之餘震分布如圖 9-3.3 及圖 9-3.6 所示，可見二地震之餘震分布主要以北北東–南南西走向往南、往北延伸，深度約在 10 公里範圍內，且根據現地野外調查之成果亦顯示此二地震以北北東–南南西北向破裂為主（圖 9-3.7）。本團隊建議此二地震的斷層面應為北北東–南南西之西傾斷層面。為解析產生此地震之斷層參數，本團隊利用 GNSS 連續站之資料，以斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992）建立初步的斷層模型來嘗試提供二地震可能的震源模型。

由震源機制解、主餘震序列分布及野外地質調查之成果指出，此二地震之孕震構造極有可能為北北東–南南西走向，且向西傾之左移兼逆衝分量斷層；因此本團隊根據 0917 關山地震及 0918 池上地震之震源模型及主餘震的空間分布，採北北東–南南西走向且西傾之斷層面，傾角設定為 80 度，因二地震皆破裂至地表，深度則設定為 0 至 15 公里，以建立此二地震之斷層幾何。

9-3-3-1 0917 關山地震斷層模型結果

本團隊將 0917 關山地震之斷層面劃分成 128 個小斷層面（patch）以求取同震斷層滑移量分布型態。目前本計畫獲得之最佳模型解（圖 9-3.11 至圖 9-3.13）指出，此斷層之斷層滑移量主要介於 800 mm - 1200 mm，集中在深度約 4-8 km 的位置，斷層滑移以左移運動為主，並有部分逆移分量。該斷層之測地矩（M_0）為 5.72×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.47。

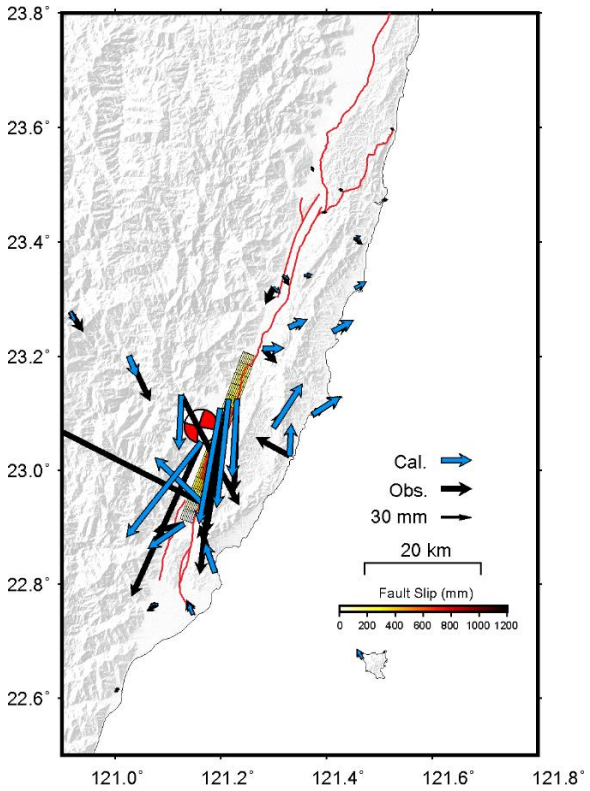


圖 9-3.11：2022 年臺東關山地震斷層模型水平向擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；震源機制解為主震震央位置；紅色實線為地調所 2021 年公告之斷層。
Figure 9-3.11: Coseismic source model of 20220917 earthquake event (Horizontal). Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

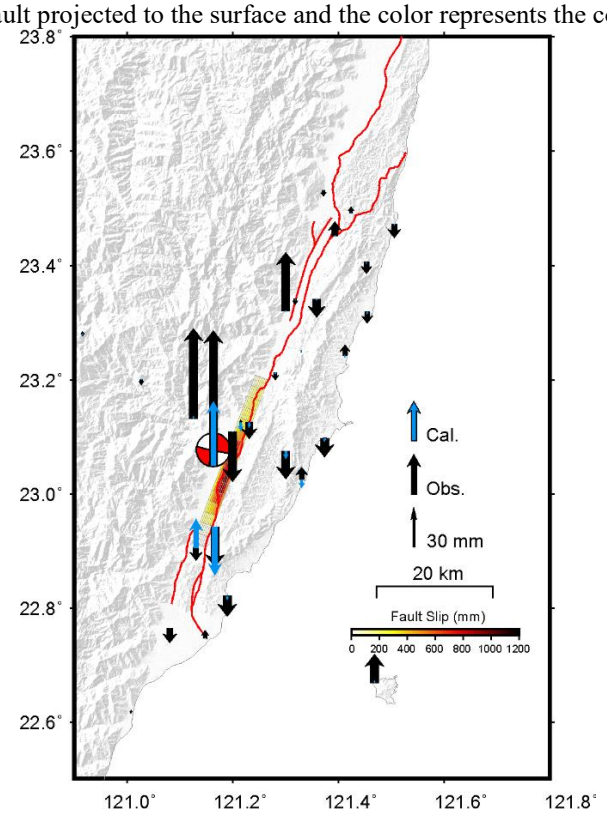


圖 9-3.12：2022 年臺東關山地震斷層模型垂直向擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；震源機制解為主震震央位置；紅色實線為地調所 2021 年公告之斷層。
Figure 9-3.12: Coseismic source model of 20220917 earthquake event (Vertical). Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

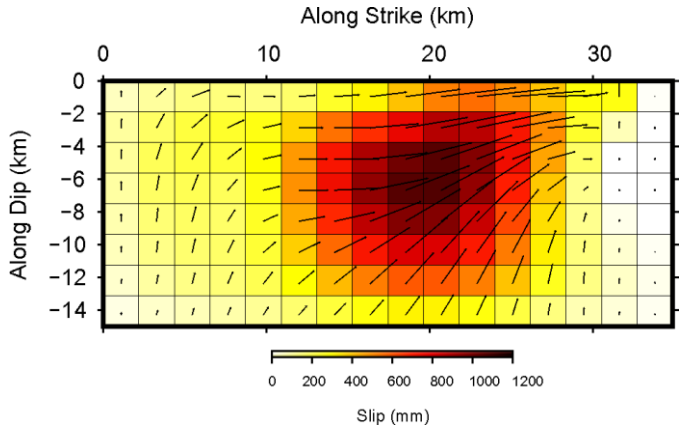


圖 9-3.13：2022 年臺東關山地震斷層模型斷層面滑移分布。

Figure 9-3.13: Fault slip distribution of 20220917 earthquake event. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

9-3-3-2 0918 池上地震斷層模型結果

本團隊將 0918 池上地震之斷層面劃分成 256 個小斷層面（patch）以求取同震斷層滑移量分布型態。目前本計畫獲得之最佳模型解（圖 9-3.14 至圖 9-3.16）指出，此斷層有二主要滑移分布：

1. 斷層北段，近玉里地區，以逆移為主具左移分量運動；滑移量主要介於 2250 mm – 2750 mm，集中在深度約 2 –10 km 的位置；
2. 斷層南段，近震央，以左移為主具逆移分量運動，滑移量主要介於 1750 mm – 2250 mm，集中在深度約 2 – 10 km 的位置。

該斷層之測地矩（M_0）為 4.32×10^{26} dyne-cm，相當於 M_w 7.06。

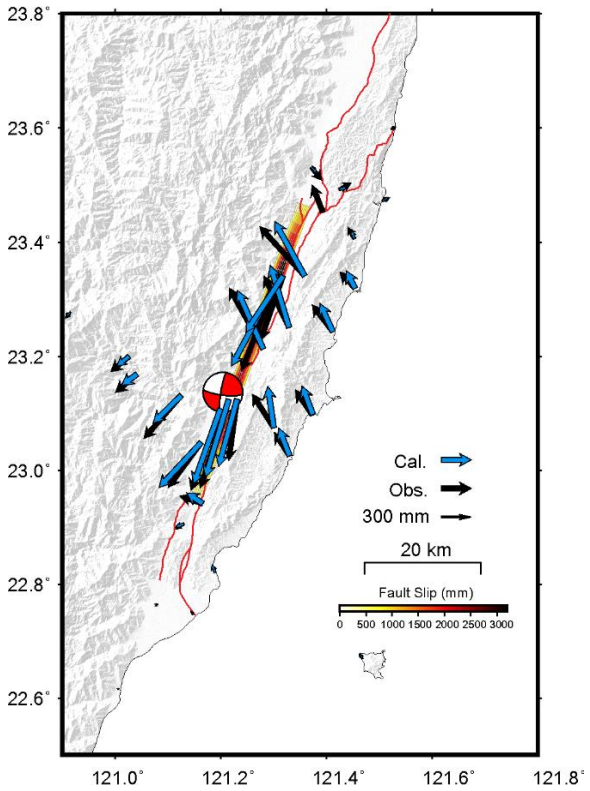


圖 9-3.14：2022 年臺東池上地震斷層模型水平向擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；震源機制解為主震震央位置；紅色實線為地調所 2021 年公告之斷層。
Figure 9-3.14: Coseismic source model of 20220918 earthquake event (Horizontal). Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

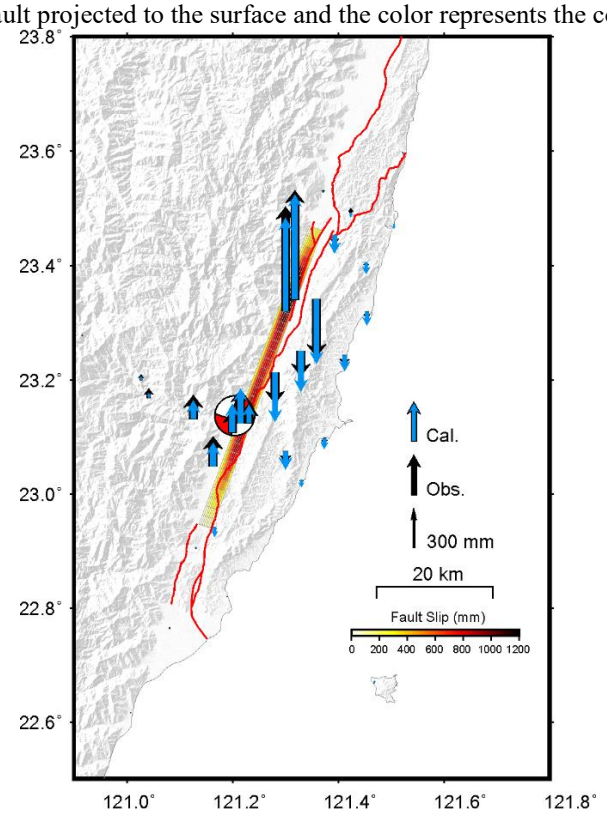


圖 9-3.15：2022 年臺東池上地震斷層模型垂直向擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；震源機制解為主震震央位置；紅色實線為地調所 2021 年公告之斷層。
Figure 9-3.15: Coseismic source model of 20220918 earthquake event (Vertical). Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

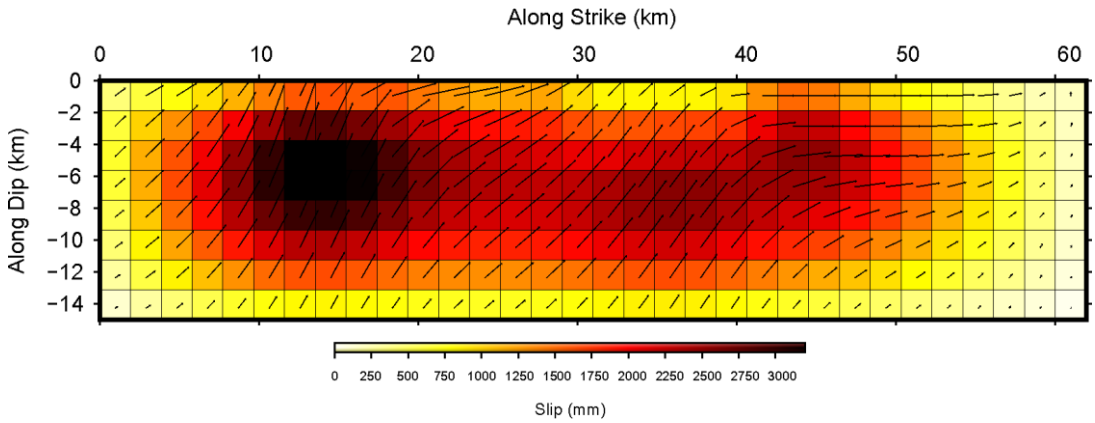


圖 9-3.16：2022 年臺東池上地震斷層模型斷層面滑移分布。

Figure 9-3.16: Fault slip distribution of 20220918 earthquake event. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip.

9-3-4 2022 年 09 月 17 及 18 日地震事件討論與結論

2022 年 9 月 17 日及 9 月 18 日於臺東發生兩起規模 6.4 及規模 6.8 的地震，震央分別位於臺東關山及臺東池上，二地震之震源深度約 7 km。中央地質調查所於該地震發生後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GNSS 連續站資料來進行地表同震位移場之解算。

由 GNSS 連續站獲得之 0917 關山地震地表同震位移場指出，最大同震位移量發生在震央所在 KUA2，垂直向抬升約 102.19 mm，水平向則往南南西方向運動約 171.03 mm，水平分量往西運動 70.32 mm，往南運動 155.90 mm。同震位移之水平分量於縱谷斷層以西沿著斷層走向往南運動，以東則無顯著水平向位移。目前本計畫獲得之最佳模型解指出，此斷層之斷層滑移量主要介於 800 mm 至 1200 mm，集中在深度約 4 至 8 km 的位置，斷層滑移以左移運動為主具逆移分量。該斷層之測地矩（M_0）為 5.72×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.47。

由 GNSS 連續站獲得之 0918 池上地震地表同震位移場指出，此次地震造成大範圍之顯著同震位移，同震位移型態以縱谷斷層為界：以西沿著縱谷斷層走向往南南西方向運動、垂直位移則為抬升，以東則往西北方向運動、垂直位移為沉陷。於垂直同震位移場分布中可見，縱谷斷層以西又以震央北邊約 20 公里遠之玉里地區有較大之垂直同震位移產生。縱谷斷層以西-震央(南段)有最大之水平同震位移產生，在鄰近震央之 TTCS，往南南西方向運動約 944.43 mm，垂直向抬升約 250.96 mm；縱谷斷層以西-玉里地區(北段)有最大垂直位移量在 JULI，，抬升約 821.76 mm，水平向往南南西方向運動約 696.24 mm；縱谷斷層以東之最大

水平同震位移量，在 DCHU，往西北方向運動約 708.49 mm，垂直向沉陷約 233.80 mm。本團隊將 0918 池上地震之斷層面劃分成 256 個小斷層面（patch）以求取同震斷層滑移量分布型態。目前本計畫獲得之最佳模型解指出，此斷層有二主要滑移分布：斷層北段，近玉里地區，以逆移為主具左移分量運動，滑移深度約 2 至 10 km；斷層南段，近震央，以左移為主具逆移分量運動，滑移深度約 2 至 10 km。該斷層之測地矩（M_0）為 4.32×10^{26} dyne-cm，相當於 M_w 7.06。

目前假設二地震為同一斷層面之運動導致，同震位移場及模型結果顯示，於斷層南段以左移運動為主，北段則以逆移運動為主。

第十章、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，推估景況地振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 2022 年 10 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 10 月底為止，GNSS 移動站部分已完成臺北、恆春、花東、桃竹苗、中部、嘉南及高屏共 776 點的施測，精密水準則完成共計 22 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，嘉南地區之地表運動主要由東往西偏南方向移動，整體速度場約 10.0-15.0 mm/yr。垂直速度場部分，臺南科學園區周遭僅有約 5.0 mm/yr 以內的沉陷速度，沙崙綠能科學城附近側站則僅約 0.0 至 5.0 mm/yr 的抬升，臺南都會區範圍內則由東往西由抬升轉為沉降，速率則僅-10 至 5.0 mm/yr。

獲得地表速度場後，為了解嘉南地區及全臺地表變形強度，本計畫隨後及速度反演之方法先計算連續性之網格化速度場，再藉由 Shen at al.（1996）計算應變速率場。根據計算結果指出，主應變速率、剪應變速率以及應變率強度主要皆沿著重要區域之東北–西南對角線區域分布於車瓜林至大尖山斷層之間，並以車瓜林斷層及九芎坑斷層附近最為顯著。約 2.5 μstrain/yr 之最大值分布於車瓜林北段，九芎坑斷層附近則約有 1.8 μstrain/yr。此外，本次報告中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，仍先將全臺第二不變量最大值 8.5 μstrain/yr 平均劃分為 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。

針對嘉南地區重要斷層活動潛勢分析，首先蒐集了後甲里斷層、新化斷層、口宵里斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層、木屐寮及六甲斷層、左鎮斷層之斷層幾何、滑移速率以及斷層活動性等相關文獻。在此僅就本年度最重要之三條斷層進行彙整：口宵里斷層總長約 21 公里，斷層傾角可能落於 30°–45°之間，深度部分各文獻有所差異，最小約 0.5 公里，最大可能達 3.0 公里，滑移速率部分目前仍無文獻可供參考；新化斷層部分，其長度可能為 6.0 公里，傾角可能範圍落於 80°–88°之間，深度則可能在 3.5–18.0 公里之間，滑移速率則為 0.8 – 4.5 mm/yr 之間。後甲里斷層部分，總長約 12.0 公里，斷層傾角範圍約為 30°–45°，深度則可能在 3.8–5.0 公里之間，抬升速率範圍 4.4 – 5.9 mm/yr。

接著，本計畫採用前述分析建議之斷層幾何作為初步設定，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，進行最佳斷層幾何參數之測試與搜尋。根據搜尋結果，口宵里斷層可能傾角為 32.2° 向西傾、斷層滑移深度約 0.1 至 4.8 km 深之背衝斷層，但該最深之滑移分布深度並不具解析力；新化斷層則為高傾角走滑斷層，為右移斷層，傾角約 84.0°向北傾，斷層滑移分布範圍約 0.3 至 18.0 km；後甲里斷層則為傾角約 42.3°之西傾背衝斷層，滑移分布範圍為 3.5 至 4.2 km。根據二維模型取得之最佳幾何參數，本計畫接著採用 BLOCKS、TDEFNODE 以及基線應變反演模型三種模型，進行嘉南地區 2016 年美濃地震後之地表速度場的斷層滑移虧損速率推估。根據本計畫彙整 BLOCKS、TDEFNODE 以及基線應變三種模型成果並透過加權平均，可計算得到以下三條重要斷層之斷層滑移虧損速率：口宵里斷層約為 9.0 mm/yr，新化斷層約為 25.8 mm/yr，而後甲里斷層則約 5.2 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。本計畫根據重要斷層之不同狀況，分別採 BPT 模式 Poisson 模式評估進行評估，由西元 2022 年起算，年度重要斷層之計算結果如下：口宵里斷層由於最後一次發生地震時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 31.2%、45.0%及 66.3%；新化斷層採用 BPT 模式進行評估，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 27.4%、32.9%及 36.4%；後甲里斷層採用 BPT 模式進行評估，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.8~6.5 之機

率為 56.9%、72.0%及 87.6%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.3%、0.6%及 1.3%。

除了斷層活動潛勢圖外，本計畫更加入重要區域之景況地振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，可能之地振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，由景況地振動分布圖可發現，各斷層地振動之分布以斷層線為中心往四周延伸，主要影響範圍約 15-40 公里遠，若加入測量場址條件進行考量，則地振動之範圍至少大於半徑 35 公里以上，其中又以口宵里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，口宵里斷層之同震位移量集中於斷層西側約達 123.0 cm；新化斷層之最大景況同震位移量位於斷層西北段約 345.4 cm，整體變形帶有顯著之右移分量；後甲里斷層部分，其同震位移分布範圍位於斷層北、中段，並主要集中於斷層北段西側，且速度場以該處為中心往南北遞減，並於中段部分轉由西南往東北，其最大量值位於西北側區域，約 22.1 cm。而本次臺南都會區、臺南科學園區及沙崙綠能科學園區之重要區域中，由於沙崙綠能科學園區與臺南都會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，本團隊已嘗試根據二維模型搜尋初步的最佳斷層參數解，採用三維模型估算斷層滑移虧損速率，並以科學方法建立景況地振動與景況同震位移圖。然而，在二維模型的建置中，本計畫還需要持續測試最佳之斷層幾何參數；在三維模型的計算中，有些不同模型估算出的斷層滑移虧損速率差異相當大，這是本計畫下半年度須釐清的部分，同時將會測試滑脫面對滑移虧損速率估算之影響；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振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。

參考文獻

中華民國交通部（2004）鐵路橋梁設計規範，交通部技術標準規範鐵路類工務部，https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=740&parentpath=0,2,738&mcustomize=divpubreg_view.jsp&dataserno=325&aplistdn=ou=data,ou=divpubreg,ou=ap_root,o=motc,c=tw&toolsflag=Y&imgfolder=img/standard，前次查詢：2021/ 02/ 04

中油公司臺探總處（1986）十萬分之一地質圖─嘉義圖幅，中國石油公司出版。

中油公司臺探總處（1989）十萬分之一地質圖─臺南圖幅，中國石油公司出版。

中興工程顧問社（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。

六角兵吉和牧山鶴彥（1934）臺南州玉井油田調查報告。臺灣總督府殖產局。

石瑞銓、王乾盈、謝昭輝（1998）雲嘉南地區活動斷層震測調查。經濟部中央地質調查所活動斷層地球物理探勘計畫 87 年度報告，共 130 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山 (2002) 地震地質與活動斷層資料庫建置：淺層地球物理探勘(1/5). 經濟部中央地質調查所 91 年度研究報告, 共 166 頁。

石智偉（2021）利用曾文溪沿岸階地及碳 14 定年法分析臺灣西南部崙後斷層及口宵里斷層之活動特性。國立中央大學應用地質研究所專題討論。

邱朝聰（1997）臺灣西南地區之震測研究－西南海域之大陸棚及新化斷層為例。國立臺灣海洋大學應用地球物理研究所碩士學位論文，共 47 頁。

何信昌（2005）新化圖幅及說明書，五萬分之一臺灣地質圖第 50 號。經濟部中央地質調查所，共 77 頁。

何信昌、謝凱旋、高銘健、陳華玟（2005）五萬分之一臺灣地質圖幅及說明書：新化。經濟部中央地質調查所，共 77 頁。

李錫堤、翁淑卿、廖啓雯、林柏伸、林彥享、林淑媛、王沛夫、呂玉莞（2002）那拔林新化斷層槽溝探查工作成果報告，委託單位經濟部地質調查所。

李錫堤、鄭錦桐、紀立民、廖啟雯、廖卿妃、林泉嘉（2000）新化斷層調查工作成果報告。委託單位行政院農業委員會臺南區農業改良場。

李宥葭 (2018) 臺灣 GPS 時間序列的雜訊分析，國立中央大學地球科學系碩士論文，共 144 頁。

杜冠穎（2013）以河道地形分析探討臺灣西南部六甲斷層的新構造特性。國立臺灣大學地質科學系碩士論文，共 109 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧（2007）臺灣西南部的活動斷層：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 17 號，共 141 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧（2007）臺灣西南部的活動斷層—六甲斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第 17 號，第 69-80 頁。

林啟文、劉彥求、周稟珊、林燕慧（2021）臺灣活動斷層調查的近期發展。經濟部中央地質調查所彙刊，第 34 號，第 1-40 頁。

林朝棨（1957）臺灣地形，臺灣省通志稿，第一卷，第一冊，臺灣文獻委員會，424 頁。

林朝棨（1963）臺灣之第四紀（上；下），臺灣文獻，第 14 卷，1 期，1-53 頁；2 期，13~51 頁。

林煌棋（1996）嘉南地區麓山帶地質構造之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 105 頁。

林慶偉（1999）嘉南地區區域地質構造及活斷層地表地質調查。NSC-88-2116-M-006-022，共 4 頁。

林慶偉、吳炫宗、蕭崇利（1999）嘉義地區活動斷層研究：梅山斷層與九芎坑斷層之初步研究。中國地質學會 88 年年會論文集，279–280 頁。

胡植慶、劉啟清、楊燦堯、景國恩、鄭錦桐（2016）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。經濟部中央地質調查所第三階段總結報告書(二)，共 468 頁。

翁子偉（2005）以反射震測法研究九芎坑斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 118 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。

張麗旭、周 敏、陳培源（1947）民國 35 年 12 月 5 日臺南之地震。臺灣省地質調查所彙刊，第 1 號，11~18 頁。

張國禎（2012）重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析（1/4）。經濟部中央地質調查所委辦計畫成果報告書，共 289 頁。

陳文山、李錫堤、陳于高（2002）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（1/5）（上冊）。經濟部中央地質調查所研究報告，共 107 頁。

陳文山、石瑞銓、楊小青、楊志成、葉明官、李龍昇、劉力豪、顏一勤、彭秋雯、張徽正、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁 (2003) 梅山斷層的構造特性與古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊第十四號，第 149-160 頁

陳文山、李錫堤、陳于高（2003a）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（2/5）。經濟部中央地質調查所研究報告 92-7 號。
陳文山、李錫堤、石瑞銓、楊小青、楊志成、顏一勤、劉力豪、張徽正、侯進雄（2004）新化斷層的構造特性與古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 111-119 頁。
陳文山、陳于高、楊小青(2006)地震地質調查及活動斷層資料庫建置—槽溝開挖與古地震研究計畫(5/5)。經濟部中央地質調查所研究報告 95-7 號。
陳文山、游能悌、楊小青（2010）地震地質與地變動潛勢分析計畫－斷層長期滑移速率與再現週期研究（總報告）。經濟部中央地質調查所研究報告 99-9 號，共 141 頁。
陳文山、游能悌、楊小青（2011）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（1/4）。經濟部中央地質調查所報告第 100-9 號，第 36-74 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 (2013) 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(3/4)。經濟部中央地質調查所報告第 102-9 號，第 50-65 頁。
陳郁文（2006）以反射震測法研究觸口斷層及其附近構造。國立中央大學碩士論文，共 109 頁。
鳥居敬造（1932）臺南州新化油田調查報告。臺灣總督府殖產局，609 號，共 29 頁。
彭秋紋、石瑞銓、張徽正、林啟文、陳文山、石同生、盧詩丁（2004）梅山斷層與其淺部剪切帶構造特徵，經濟部中央地質調查所特刊，15，85-98。
黃文正、陳建志、波玫琳、顏一勤（2020）活動斷層特性精細調查（2/4）。經濟部中央地質調查所委託成果報告書，共 107 頁。
黃旭燦（2003）臺灣中南部褶皺逆衝斷層帶地質構造特徵分析，共 141 頁，國立中央大學，中壢。
黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004） 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究 臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）–臺灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部中央地質調查所報告第 93–13 號，共 59 頁。
黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004）斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）臺灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部中央地質調查所報告第 93-13 號，共 59 頁。
黃勝群、陳彥宏、石瑞銓、張徽正、林啟文、陳文山（2004）新化斷層帶的淺部構造特徵。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 99-110 頁。
楊志成（2007）臺灣嘉南地區的發震構造分析及其前緣斷層的長期滑移速率研究。國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，共 116 頁。
楊志成、顏一勤、宋時驊、黃能偉、陳勇全、陳文山、陳于高、吳樂群、張徽正、侯進雄、林啟文（2005）六甲斷層近萬年來滑移速率之探討。經濟部中央地質調查所特刊，16 期，1-16。
楊耿明、洪日豪、吳榮章、黃旭燦（2001）斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究_臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(1/5)-西南地區(觸口斷層)，經濟部中央地質調查所報告第 89- 4 號，共 93 頁。
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、周稟珊（2021）口宵里斷層。經濟部中央地質調查所彙刊，第 34 號，第 1-40 頁。
劉彥求、許晉瑋、林啟文（2020）口宵里斷層之構造特性與活動調查。經濟部中央地質所特刊，第 35 號，第 29-46 頁。
鄭世楠、江嘉豪、陳燕玲。臺灣地區歷史地震資料的建置。427-448 頁。
鄭世楠、張建興、葉永田、徐明同（1999）1946 年 12 月 5 日新化地震與新化地震斷層的研究。1999 中國地球物理學會成果發表會論文集，第 93-97 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。
饒瑞鈞 (2003)臺灣南部地震活動性研究及潛能分析。行政院國家科學委員會專題研究計畫精簡版成果報告(p. 5)。
饒瑞鈞、胡植慶、洪日豪、余致義（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置－活動斷層監測系統計畫（4/5）。經濟部中央地質調查所研究報告 94-10 號，共 147 頁。
Abe, K. 1981. Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. Physics of the Earth and Planetary Interiors 27, 72-92
Angelier, J., Chu, H.T., and Lee, J.C. 1997. Shear concentration in a collision zone: kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan. Tectonophysics 274, 117-143
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 faults in Taiwan: U. S. Geological Survey Open-File Report 75-41, 58pp.
Bonilla, M.G. (1977) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan: Mem. Geol. Soc. China, no.2, 43-55.

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.
Chang, C.P., Angelier, J., Huang, C.Y., and Liu, C.S. 2001. Structural evolution and significance of a mélange in a collision belt: the Lichi mélange and the Taiwan arc-continent collision. Geological magazine 138, 633-651
Chang, W., Ching, K., Lee, C., Lee, Y., & Lee, C. (2016). Earthquake Potential of Active Faults in Taiwan from GPS Observations and Block Modeling. Seismological Research Letters, 87(6), 1274–1286. https://doi.org/10.1785/0220160094
Chen, Y.-G., Liu, T.-K. (2000) Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan. Quat. Sci. Rev. 19, 923–930.
Chen, Y.-G., Y.-T. Kuo, Y.-M. Wu, H.-L. Chen, C.-H. Chang, R.-Y. Chen, P.-W. Lo, K.-E. Ching, and J.-C. Lee (2008) New seismogenic source and deep structures revealed by the 1999 Chia-yi earthquake sequence in southwestern Taiwan, Geophysical Journal International, 172(3), 1049-1054.
Chen, Y.W., Chena, Y.G., Murray, A.S., Watanuki, T., Chena, W.S., Yanga, C.C.B., Liua, T.K., Lin, C.W. (2009) Long-term crustal movement caused by the Chiuchiungkeng Fault in southwestern Taiwan: Constraints from luminescence dating. Quatern. International, 199, 1-2, 15–24. doi.org/10.1016/j.quaint.2008.07.014.
Cheng, S.N., and Yeh, Y.T. 1989. Catalog of the earthquakes in Taiwan from 1604 to 1988. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, 255pp (in Chinese)
Cheng, S.N., Yeh, Y.T., and Yu, M.S. 1996. The 1951 Taitung earthquake in Taiwan. Journal of the Geological Society of China 39, 267-285
Ching, K.-E., Rau, R.-J., and Zeng, Y. 2007. Coseismic source model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements. Journal of Geophysics Research 112, B06422, doi:10.1029/2006JB004439
Ching, K.-E., Rau, R.-J., Johnson, K. M., Lee, J.-C., & Hu, J.-C. (2011). Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995–2005. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B9). https://doi.org/10.1029/2010JB008058
Chuang R.J., Johnson K.M., Kuo, Y.T., Wu, Y.M., Chang, C.H., and Kuo, L.C. 2014. Active back thrust in the eastern Taiwan suture revealed by the 2013 Rueisuei earthquake: Evidence for a doubly vergent orogenic wedge? Geophys. Res. Lett., 41, 3464–3470, doi:10.1002/2014GL060097
Desbrun, M., M. Meyer, P. Schroder, and A. H. Barr (1999), Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow, in Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '99, 317–324, ACM Press/Addison-Wesley, New York.
Didova, Olga, Brian Gunter, Riccardo Riva, Roland Klees, and Lutz Roese-Koerner. 2016. "An Approach for Estimating Time-Variable Rates from Geodetic Time Series." Journal of Geodesy 90 (11): 1207–21. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0918-5.
Dragert, H., Wang, K., and James, T.S. 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. Science 292, 1525-1528
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.
Gutenberg, B., and Richter, C.F. 1954. Seismicity of the Earth and Associated phenomena, second ed. Princeton University Press, Princeton, N.J. 310pp
Hamling, I.J., and Wallace, L.M. 2015. Silent triggering: Aseismic crustal faulting induced by a subduction slow slip event. Earth and planetary Science Letters 421, 13-19
Hamling et al., 2018. Complex multifault rupture during the 2016 Mw 7.8 Kaikoura earthquake New Zealand. Science 356 (6334), eaam7194
Herring, T. A., R. W. King, M. A Floyd, and S. C. McClusky. 2015. GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.6. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm
Hickman, J. B., Wiltschko, D. V., Hung, J. H., Fang, P., and Bock, Y. (2002) Structure and evolution of the active fold-and-thrust belt of southwestern Taiwan from Global Positioning System analysis. Geology and geophysics of an arc-continent collision, Taiwan, Timothy B. Byrne, Char-Shine Liu
Ho, C.S. 1988. An introduction to the Geology of Taiwan, explanatory text of the geologic map of Taiwan, second ed. Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Taipei, 192pp
Hsu, H.F. 1985. Analyzing the crustal movement and structure in eastern Taiwan from trilateration networks measurements. Geodetic Eng. 27(1), 1-10 (in Chinese)
Hsu, T.L. 1962. Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China 1, 95-102
Hsu, Y.J., Simons, M., Yu, S.B., Kuo, L.C., and Chen, H.Y. 2003. A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. Earth and Planetary Science Letters 211, 287-294

Hu, C.C., and Sheen, H.C. (1989) An evaluation on the hydrocarbon potential of the Niushan and Lungtien structures in the Tainan area. Petrol. Geol. Taiwan, 25, 11-34.
Huang, Shiuh-Tsann, Kenn-Ming Yang, Jih-Hao Hung, Jong-Chang Wu, Hsin-Hsiu Ting, Wen-Wei Mei, Shiang-Horng Hsu, and Min Lee. Deformation front development at the northeast margin of the Tainan basin, Tainan–Kaohsiung area, Taiwan. (2004) Marine Geophysical Researches, 25:139–156. DOI 10.1007/s11001-005-0739-z
Huang, M.H., Hu, J.C., Hsieh, C.S., Ching, K.E., Rau, R.J., Pathier, E., Fruneau, B. and Deffontaines, B. (2006) A growing structure near the deformation front in SW Taiwan as deduced from SAR interferometry and geodetic observation. Geophys. Res. Lett., 33, L12305, doi:10.1029/2005GL025613.
Hung, J.H., Wiltschko, D.V., Lin, H.C., Hickman, J.B., Fang, P., and Bock, Y. (1999) Structure and Motion of the Southwestern Taiwan Fold and Thrust Belt, TAO, 10(3), 543-568.
Huang, M.-H., & Huang, H.-H. (2018). The complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in east Taiwan. Geophysical Research Letters, 45, 13,249–13,257.
Johnson, K.M., Segal, P., and Yu, S.B. 2005. A viscoelastic earthquake cycle model for Taiwan. Journal of Geophysics Research 110, B10404, doi:10.1029/2004JB003516
Kao, H., and Jian, P.R. 2001. Seismogenic patterns in the Taiwan region: insights from source parameter inversion of BATS data. Tectonophysics 333, 179-198
Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S., and Hirata, N. 2012. Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. Science 335 (6069), 705-708
Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C., and Jeng, F.S. 2001. Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a Creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics 333, 219-240
Lee, W.H.K., Wu, F.T., and Wang, S.C. 1978. A catalog of instrumentally determined earthquakes in China (magnitude ≥ 6) compiled from various sources. Bulletin of the Seismological Society of America 68, 383-398
Le Béon, M., O. Marc, J. Suppe, M.-H. Huang, S.-T. Huang and W.-S. Chen (2019) Structure and deformation history of the rapidly growing Tainan anticline at the deformation front of the Taiwan mountain belt, Tectonics, Vol. 38, 9, pp. 3311-3334.
Lin, C.W., Hsu, C.Y., Yu, T.D. (2007) The Chiuhsiungken fault: a candidate to trigger a hazardous earthquake in western Taiwan. Journal of Asian Earth Science, 30, 390–402.
Matsu'ura M., Jackson, B. B., and A. Cheng (1986), Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California, J. Geophys. Res., 91, 12661-12674.
Mccaffrey, R. (2013). Crustal Block Rotations and Plate Coupling. In S. Stein & J. T. Freymueller (Eds.), Geodynamics Series (pp. 101–122). Washington, D. C.: American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/GD030p0101
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).
Melbourne, T.I., Szeliga, W.M., Miller, M.M., and Santillan, V.M. 2005. Extent and duration of the 2003 Cascadia slow earthquake. Geophysics Research Letters 32, L04301, doi:10.1029/2004GL021790
Miyazaki, S., Segall, P., McGuire, J.J., Kato, T., and Hatanaka, Y. 2006. Spatial and temporal evolution of stress and slip rate during the 2000 Tokai slow earthquake. Journal of Geophysics Research 111, B03409
Nikolaidis, R. (2002), Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, thesis, Univ. of Calif., San Diego.
Obara, K., and Kata, A. 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. Science 353, 253-257
Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 75, 1135-1154
Okada, Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 82, 1018-1040
Prescott, W.H., Savage, J.C., and Kinoshita, W.T. (1979) Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. J. Geophys. Res., 84, 5423-5435.
Radiguet et al. 2016. Triggering of the 2014 Mw 7.3 Papanoa earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. Nature Geoscience 9, 829-834, doi:10.1038/NGE02817
Rau, R.J., Chen, K.H., and Ching, K.E. 2007. Repeating earthquakes and seismic potential along the northern Longitudinal Valley fault of eastern Taiwan. Journal of Geophysical Research Letters 34, L24301, doi:10.1029/2007GL031622
Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T. (2000) Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan. PAGEOPH, 157, 2303-2322
Segall, P., and Bradley, A.M. 2012. Slow slip evolves into megathrust earthquakes in 2D numerical simulations. Geophys. Res. Lett. 39, L18308

Shen, Z.K., Jackson, D.D., and Ge, B.X. (1996) Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. J. Geophys. Res., 101, 27957-27980.
Showstack, R. (2012) ShakeOut drill emphasizes importance of earthquake preparedness, education. Eos, Vol. 93, No. 44, 30.
Shyu, J.B.H., Chung, L.H., Chen, Y.G., Lee, J.C., and Sieh, K. 2007. Re-evaluation of the surface ruptures of the November 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its Neotectonic implications. Journal of Asian Earth Science 31, 317-331, doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.018
Shyu, J. Bruce H. Shyu, Yi-Rung Chuang, Ya-Lin Chen, Yi-Rui Lee, and Chin-Tung Cheng (2020) A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 27, No. 3, 311–323.
Shyu, J. B. H., Yin, Y.-H., Chen, C.-H., Chuang, Y.-R., & Liu, S.-C. (2020). Updates to the on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 31(4), 469–478. https://doi.org/10.3319/TAO.2020.06.08.01
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).
Sun, S.-C. (1964) Photogeologic study of the Tainan-Kaohsiung coastal plain area, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 3, 39–51.
Suppe, J. (1980) Imbricated structure of western foothills belt, south central Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 30, 163-176.
Wang. C.Y., Chen, G. P. and Jong, D.T. (1994) The detection of active faults on Taiwan using shallow reflection seismics: TAO, Vol, 5,no. 2, p. 277-293.
Wang, H., and T. J. Wright (2012), Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet, Geophys. Res. Lett., 39, L07303, doi:10.1029/2012GL051222.
Walters, R. J., B. Parsons, and T. J. Wright (2014), Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 5215-5234. doi:10.1002/2013JB010909.
Wallace, L.M., and Beavan, J. 2010. Diverse slow slip behavior at the Hikurangi subduction margin, New Zealand. J. Geophyg. Res. 115, B12402
Wallace et al. 2017. Large-scale dynamic triggering of shallow slow slip enhanced by overlying sedimentary wedge. Nature Geoscience 10, 765-772, doi:10.1038/NGE03021
Ward, S.N. (1994) A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1293-1309.
Ward, S. N. （1998） On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135（3）, 1011-1018.
Worden, C. B., and Wald, D. J. (2016). ShakeMap manual online: Technical manual, user's guide, and software guide, US Geol. Surv. https://doi.org/10.5066/F7D21VPQ
Yang, Y.-H., Hu, J.-C., Tung, H., Tsai, M.-C., Chen, Q., Xu, Q., Zhang, Y.-J., Zhao, J.-J., Liu, G.-X., Xiong, J.-N., Wang, J.-Y., Yu, B., Chiu, C.-Y., & Su, Z. (2018). Co-seismic and postseismic fault models of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake occurred in the junction of collision and subduction boundaries offshore eastern Taiwan. Remote Sensing, 10, 1372; doi:10.3390/rs10091372.
Yen, J.-Y., Lu, C.-H., Dorsey, R. J., Kuo-Chen, H., Chang, C.-P., Wang, C.-C., Chuang, R. Y., Kuo, Y.-T., Chiu, C.-Y., Chang, Y.-H., Bovenga, F., & Chang, W.-Y. (2018). Insights into Seismogenic Deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake Sequence from InSAR, GPS, and Modeling. Seismological Research Letters, 90, doi: 10.1785/0220180228.
Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics 274, 41-59

期中委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一）委員及其他綜合意見	
1. 二維模型分析時，應以構造平衡剖面的斷層型態為主，之後再進行每個斷層區段的滑移速率作假設，再進行模擬。	二維模型之建置確實是根據包含構造平衡剖面等所有地質調查成果來架構。在架構完初步的斷層幾何後，再搜尋最佳斷層幾何，並反演地表速度場獲得斷層滑移速率。
2. 西部平原區域有許多因為構造作用產生下陷，在進行模擬時，如何思考下陷的作用？	構造作用確實會產生如前陸盆地等下陷型態，然而在今年的計畫工作中，暫時並不容易模擬這些下陷型態，僅能透過選取近斷層下盤的點位當作參考點來初步排除掉這些下陷型態。
3. 將地震分割成不同時期的”間震期速度場”，是否可以比較指出有何變化，變化形勢為何？	感謝委員的建議。於第八章GNSS移動站章節中分區域補充說明。
4. 有關同震位移的”總速度場”，是否可以指出包含幾個地震循環的數值？	感謝委員的建議。於第八章補充說明。
5. 在二維剖面用速度場來擬合評估是合理的，但是否也考慮將一系列多條斷層一起擬合，並考慮斷層走向兩側的橫移變化。	本計畫的二維模型已將一系列多條斷層一起擬合，同時在速度場空間解析度足夠的條件下，會透過多個二維模型來考慮斷層走向兩側的橫移變化。
6. 地震景況是很有意思的成果，也是很有實用價值的科學分析。在分析時除了顯示幾個主要斷層外，是否可以測試一下剛發生不久的幾個地震（甲仙、美濃）的景況模擬。	感謝委員的建議。期末報告中，已經採用以甲仙和美濃地震來測試。請參見景況地振動之章節內容。
7. 圖 1-1.5，所標示的活動斷層編號和名稱有誤，請修正。	已修正，感謝委員的建議。
8. 圖 4-1.26，上方第一個剖面標示的九芎坑斷層，應是該斷層北側未被定義為活動斷層的桐樹湖斷層，不該列為九芎坑斷層地下形貌參數的參考。	已刪除該剖面資料，見 4-1-4-1 節圖 4-1.31。

期末審查意見	處理情形
9. 表 4-1.8，使用黃旭燦等2004 的構造平衡剖面，應以Line18、19、20 做為九芎坑斷層地下形貌參數的參考。	已刪除 LINE17 剖面資料，僅保留 LINE18 及 LINE19 剖面資料。LINE20 中的九芎坑斷層未能提供底部深度資訊，無法提供本計畫判斷，因此本計畫不考慮。見 4-1-4-1 節表 4-1.7、表 4-1.8。
10. 圖 4-1.30，中間和下方兩側剖面標示紅色的斷層為崙後斷層，不應為觸口斷層地下形貌參數的參考。	已刪除該剖面資料，見 4-1-4-3 節。
11. 圖 5-1.1～5-1.4，為何將九芎坑、木屐寮、六甲斷層連成一線，視為同一塊體邊界，請說明。	回顧本計畫設計塊體邊界的源流（用於 BLOCKS 與 TDEFNODE），最早是參考 Ching et al.(2011)的塊體設計，該研究於西南部的塊體設計主要根據包括：顯著的 GNSS 速度場梯度變化，有地形或地質證據的斷層等。本計畫使用的 GNSS 速度場亦反應了這個特性，在這一系列斷層的東西兩側，GNSS 速度場有明顯的差異。 由地體構造的角度言之，地質調查所公佈的九芎坑（編號 14）、木屐寮（編號 17）、六甲（編號 18）等斷層，為西南部最西緣的一系列南北走且向東傾角的斷層，因為相似的斷層幾何特性，我們將其視為一塊體的連續邊界。 在前期計畫中，有一條承繼 Ching et al.(2011)塊體設計的東西向義竹斷層作為塊體邊界，原本為分開九芎坑與木屐寮斷層的邊界。該斷層非地調所公佈之活動斷層，並且經討論後判斷該斷層對建構模型沒有顯著之必要，因此於本年度移除義竹斷層邊界，為了避免塊體形狀過度扭曲，並且需要適當涵蓋斷層上下盤之測站，於是形成了目前的塊體設計。 Ching, K.-E., Rau, R.-J., Johnson, K. M., Lee,

期末審查意見	處理情形
	J.-C., & Hu, J.-C. (2011). Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995–2005. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B9), B09405. https://doi.org/10.1029/2010JB008058
12. 本計畫工作可分為四大部分，其中要完成初步之地表變形強度分級標準表，並繪製地表變形強度分布圖，另根據相關文獻，針對新社斷層、口宵里斷層及後甲斷層繪製斷層活動潛勢圖及其重要區域之景況地振動與同震位移分布圖。	感謝委員的建議，已補充說明於內文中。
13. 部分簡報之圖表資料請補入報告書。	已修正，感謝委員的建議。
14. 報告書中有關斷層參數之建議初始值或平均值的建立及斷層潛勢評估之權重設定，應再加強說明。	已補充說明，見 4-1 節。
15. 報告書中 GPS 請統一使用GNSS取代(包含圖檔)，避免讀者對二者名詞產生疑惑。	已修正，感謝委員的建議。
16. 圖 2-3.3 中HENC-G670 建議改為HENC vs.G670 表示，以免產生是HENC-G670 基線長度變化的誤解(相似圖請一併修正);水準測線名稱建議統一，例如由西向東、北向南命名。	已修正，感謝委員的建議。
17. 第 122 頁，2-4 重要區域三維速度場分析為本階段計畫執行主要訴求，也是計畫得以延續的主軸，應獨立為一章節，並藉此引述鄰近區域變形分析與活動斷層滑移速率及相關分析，建議以此為主幹論述，拋棄以往報告書的章節架構，也能避免每年報告書太過相似的問題。	感謝委員的建議，已於期末報告中進行章節調整，將重要區域之三維速度場分析獨立於第二章節。
18. 圖 3-1.6 圖3-3.1 圖例有壓縮及伸張應變，內容卻沒有，請再釐清。	已修正，感謝委員的建議。
19. 第 281 頁，臺灣嘉南重要區域斷層活動機率圖各斷層描述欄位內容重複出現，佔去太多版面且累贅，建議	感謝建議，會與所方討論後，以列表方式呈現各斷層的機率資訊

期末審查意見	處理情形
設計一組模板，再以數字填入表示即可。	
20. 圖 7-1.3～圖7-1.15 請加入海岸線範圍。	已修正，感謝委員的建議。
21. 第 282 頁，第七章標題與7-1 標題「景況地(震/振)動」用字不同，請釐清使用哪一個(震/振)字較適當。	已統一採用“振”，感謝委員的建議。
22. 第 302 頁，有關引用中央氣象局之地震震度分級表，建議改用2020 年新公布之版本。	已修正，感謝委員的建議。
23. 本計畫以斷層潛勢評估為名稱，產出之資料也以斷層潛勢評估命名較適當。	已修正，感謝委員的建議。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
1. P.15 GNSS移動站施測與檢核時間表應符合現況。	已修改 P.15 GNSS 移動站施測與檢核時間表，並修改對應之第 8-2-1 章節內文。
2. P.17-18 沒有描繪(45)車城-牡丹測線。	已新增描繪編號 45 車城-牡丹測線於圖 1-3.4 中；並修改表 1-3.2，表僅保留今年施測路線及實際施測時間
3. P.20 沙崙綠能科學城有新設簡易測點，應於報告中呈現說明。	已於 P.20 新增點位分佈圖（圖 2-2.2）。
4. P.244 GS22快官交流道及GS95八煙測站觀測品質評估與探討，應具體說明改善或處置之建議；位於山崩地滑及火山觀測地區觀測站具有其他目的性設置，不宜加入本計畫一起分析以免影響整體結果。	於本計畫藉由 GNSS 資料解算進行觀測品質評估與探討，提供各站接收狀況之警示供所內參考；具體之改善或處置建議，需透過其他工作（如現勘、維護等）確認問題，才能提供改善或處置建議。如所內派員檢視測站環境是否劣化，如環境正常，則建議以暫時更換接收儀方式測試是否為儀器問題(一段時間後觀察時間序列是否恢復正常)。 於本案重要區域內並無加入具有其他目的性設置之 GNSS 資料。另外「其他目的性設置」所指為何？目前沒有證據顯示火山區測站的資料品質一定不好。相反的，只要測站環境及儀器都是正常，時間序列的變化可反映許多火山暫態活動對地表的影響。因此建議並不需要特意將八煙站排除在分析之外(除非測站環境變化很難控制)。
5. P.292 缺編號45測線，編號44測線應有GNSS連續站KDNM與其共站。	已新增編號 45 之水準測線，並繪製個水準測線對應之 GNSS 連續站點位。
6. P.298 測線位置有誤	已修正圖 8-3.9 之測線位置。

期末審查意見	處理情形
（二）斷層參數更新與潛勢評估：	
7. P.164-165 新化斷層使用BLOCKS Model 方法評估結果與其他2種方法差異甚大，請再評估或檢討是否使用其結果。	已於報告內文中修正。於新化斷層滑移虧損率之平均值計算中，先不考慮 BLOCKS Model 之成果，如表 5-4.1 至表 5-4.3 及圖 5-4.1 至圖 5-4.3 所示。
8. P.208 「景況」一詞來源為何?是否有文獻可以參考?若本報告欲使用「景況」一詞，應有更多的共識。	「景況」一詞源於美國南加州地震中心（Southern California Earthquake Center, SCEC)所主導的 ShakeOut 計畫（Showstack, 2012），以及美國地質調查局（USGS）的 ShakeMap 計畫。兩者皆提出活動斷層的地動景況評估，其中 USGS 更建置了景況目錄（Scenario Catalogs）。在臺灣，本計畫則是沿用臺灣地震模型與國家地震研究中心所採行之翻譯。已補充相關敘述，請見 7-1。
9. 雖然2012霧臺地震的地表變形效應(GNSS/Leveling) 看起來不是很顯著，能否對其產生之效應進行評估?	由於 2012 年霧台地震的發震深度較深，因此不易產生足夠大的地表同震位移量，但是仍然值得於下個階段之測地資料解析中，嘗試評估該地震之同震位移場。
10. 是否說明GNSS資料為何從2002年開始?工作開始年(起始年)為何?及如何避免集集地震(1999)造成的效應?	2002 年為地調所 GNSS 監測網建立之起始年，因此於報告內之各項監測資料速度場皆以 2002 年為計算起始年。
11. 斷層參數分析中，將六甲-崙後-口宵里斷層系統一併考慮做反演逆推，是很有科學性的思考及作法；是否水準測線沒有兩側跨越六甲斷層的資料?若有資料應予以加入分析。	水準測線有跨越六甲斷層，已於平面圖加入垂直速度場資料，請見圖 4-2.1。然而由於六甲斷層西側平原區有地層下陷之現象，為避免該區域之資料影響活動斷層幾何參數之推求與後續斷層潛勢之評估，故本計畫在後續分析時移除了六甲斷層以西之垂直速度場。
12. 「地表變形強度」(Surface deformation sensitivity level)，字義(詞意)不明?請再考量是否有較佳的名稱。	感謝委員之建議，經本團隊研議後，目前修改為 ”Surface ground deformation intensity”。

期末審查意見	處理情形
13. 建議將「地表變形強度」改為「地表應變率振幅」，另3-3.1、3-3.2英文圖說不合適，請修正，其他英文圖說也請一併檢討修正。	感謝委員之建議，由於本工作之目的係為使一般民眾更易於理解，故經本團隊研議後，認為「地表變形強度」較為合適，英文圖說部分目前則修改為” Surface ground deformation intensity”。
14. P.43 若不採用第二不變量，改用面膨脹率來區分，二者分區是否有差異?並請說明分為6個等級的依據為何?	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。
15. P.154-P.156 基線應變反演模型結果的殘差皆過大，請再評估是否有更佳的結果。	於基線反演模型之成果中，其殘差數值分佈越隨機，表示模型成果越佳。
16. P.157-P.159 斷層邊界上有較大之滑移，請考量是否斷層的幾何需要調整?以避免邊界效應。	感謝委員建議。目前模型使用之斷層幾合參數以地調所公告為主，因此若欲避免模型邊界效應而修改斷層參數，尚需與所內進行討論。
17. P.176 地表地質調查看到的斷層，如果在間震期沒有活動，大地測量資料不一定能反應斷層的活動速率，此報告的斷層參數及滑移速度與「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形(2/2)」地表變形有顯著差異，請探討其原因。	利用地質調查得知間震期沒有活動的活動斷層，即是鎖定斷層。如果跨斷層之大地測量網形展距夠大，是可以推求該斷層的活動速率。本計畫與「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形(2/2)」分屬兩個不同的計畫，因此並不清楚另一個計畫的成果為何。但是由於該計畫是 LOS 速度場，並非垂直或水平速度場，有差異也是合理的。
18. 請說明P.208 Chap7. 景況地振動是由景況同震位移計算所得嗎?是否有考慮斷層破裂的方向?	景況地振動是由各活動斷層可能產生之最大地震規模及斷層鎖定區域進行估算，並非由景況同震位移算得。此計算並未考慮破裂方向性，且目前在地動預估式之相關研究中，破裂方向性尚無法納入考量，仍為此討論中之重要議題，而本團隊也持續與相關領域專家討論中。

期末審查意見	處理情形
19. 請說明Fig 7-2.5 新化斷層長度只有24km，為何可以產生近3m之滑移?	新化斷層海岸延伸段之證據雖然有不足且權重較低，但為確保防救災規劃能更為完善，本計畫以最大可能之規模進行評估，故其可能產生之同震位移量偏大，後續將針對相關問題持續進行精進與修正，以獲得更合理之景況同震位移分布。
20. 透過斷層模型之建立整合測量及地質資料，對於斷層參數之建議，初始值或平均值及權重設立之說明(如4-1節），惟此說明太過簡略，亦無權重之設定說明，建議再補充之，另是否有何方法可以驗證此參數設定之合理性？	權重的設定沿用前一階段計畫「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」的成果，該計畫以邏輯樹來處理地質資料的不確定性，原則上資料可信度越高則權重越高，該計畫也召開專家會議討論參數及權重的合理性，並將結果應用至斷層活動潛勢評估中。 本計畫為了提供大地測量二維模型建立的依據，使用蒙地卡羅法搜尋最佳解，為了使搜尋範圍符合地質的觀察結果，因此蒐集了前人調查的地質資料，用來約制二維模型的參數搜尋範圍。
21. Fig 5-3.1 斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖中，有關長度、寬度、深度之參數應為一段長度，建議應再詳細標註，或可引用Okada. 1985的圖。	感謝委員建議。Fig 5-3.1 已改引用Okada (1985)的圖做為圖示。
22. Table 4-1.6 之方法欄位中，數字代表意義為何，請加以說明。	該表列出各地區野外露頭量測得到的斷層位態，用以檢視傾角在不同地區是否有變化。方法欄位中不同地區的斷層傾角，是由該地區的斷層位態數據中的傾角平均而得，文獻中若僅列出傾角的範圍則取該範圍的中間值。此數據在期末報告定稿中另列欄位表示並詳細列出計算方式。
23. 請說明為何引用shyu et al.,(2020)滑移速率數據，都沒有說明原因，而其他的引用資料都有。	目前 TEM 網站有 Shyu et al. (2020) 各斷層滑移速率的評估完整說明，本計畫於期末報告定稿本中補充。

期末審查意見	處理情形
	其中木屐寮-六甲斷層的滑移速率是Shyu et al. (2020)引用杜冠穎(2013)之成果，因此定稿版中將 Shyu et al. (2020)的結果刪除。
24. 請說明P.79 根據shyu et al.,(2020)九芎坑斷層滑移速率為4.66 mm/yr，又範圍介於1.87-23.39 mm/yr之間，兩數據何者可用?	根據 TEM 網站資料，滑移速率使用大湖口階地，推估高差為 30~40 m，年代為 5~25 ka，傾角為 20~40 度， 滑移速率上界： 40,000(mm) /5,000(yr) /sin (20 度) =23.39 mm/yr。 滑移速率下界： 30,000(mm) /25,000(yr) /sin (40 度) =1.87 mm/yr。 滑移速率中值： 35,000(mm) /15,000(yr) /sin (30 度) =4.66 mm/yr。
25. P.117-P.118 Table 5-1.2，5-1.3的使用年代是否有誤?	感謝委員指正。已於報告中修改。
26. 請說明新化斷層、梅山斷層的長期水平滑移速率如何獲得?	根據 TEM 網站資料，新化斷層及梅山斷層僅根據前人鑽井之垂直滑移速率換算至斷層面上，長期水平滑移速率尚無法由地質特徵獲得。
27. 請說明P.170、P.178、P.183……中，發生機率評估用的特徵地震矩規模M，使用6.2≦M≦6.9，與M≧6.5，為何不用6.2≦M≦6.5，與M≧6.5。	以此斷層為例，6.2≦M≦6.9 為此條斷層所有可能的破裂事件及幾何會造成的規模，將所有事件的機率加權並加總後即為此斷層的發生機率。M≧6.5 則是製圖需呈現規模 6.5 以上的發生機率，因此將規模 6.5 以下的事件機率移除後即可得到 M≧6.5 以上的機率。
（三）其他綜合意見：	
28. P.33矩陣公式請靠左且整合於同一頁，避免讀者誤解。	感謝委員指正。已於報告中修改。
29. P.113 使用「成功大學團隊所提供…」之文字，不符合已統整之報告，請統一表達方式。	感謝委員指正。已於報告中修改。

期末審查意見	處理情形
30. P.173 6-2-2 標題不完全。	感謝委員指正。已於報告中修改。
31. P.229-234 各圖若影響範圍是重點，應在圖上標註地名資訊。	感謝委員之建議，已標註於圖 7-2.1 至圖 7-2.6。