經濟部
Ministry of Economic Affairs

計畫編號：B113011

經濟部地質調查及礦業管理中心

113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-第二階段（2/3）」

（第2年度）

全 程 計 畫：自 112 年 3 月至 114 年 12 月止
本年度計畫：自 113 年 3 月至 113 年 12 月止



委託機關：經濟部地質調查及礦業管理中心

執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 113 年 12 月

計畫編號：B113011

經濟部地質調查及礦業管理中心

113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-第二階段（2/3）」

（第2年度）

全 程 計 畫：自 112 年 3 月至 114 年 12 月止
本年度計畫：自 113 年 3 月至 113 年 12 月止

委託機關：經濟部地質調查及礦業管理中心
執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 113 年 12 月

重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估-第二階段（2/3）
（第2年度）

計畫主持人：莊昀叡

協同主持人：景國恩、張午龍、陳宏宇、李易叡

研　究　員：莊怡蓉、邵國士

委託機關：經濟部地質調查及礦業管理中心

執行單位：國立臺灣大學

中　華　民　國　113　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 VII
圖目錄 IX
摘要 XXI
Abstract XXII
第一章、緒　論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 研究目的 9
1-3 本年度工作概述 10
第二章、中部地區大地測量資料分析與重要區域三維速度場 17
2-1 中部地區 GNSS 觀測網 17
2-2 中部地區精密水準測線 22
2-2-1 大安至東勢測線 22
2-2-2 龍井至太平測線 25
2-2-3 五光至黃竹測線 28
2-2-4 王功至草屯至埔里測線 31
2-2-5 北斗至水里測線 35
2-2-6 中部地區精密水準測量資料可靠度分析 39
2-3 重要區域三維速度場分析 41
2-3-1 重要區域水平與垂直速度場 41
第三章、中部地區重要區域應變速率場及地表變形強度之計算與繪製 45
3-1 應變速率場計算 45
3-1-1 速度反演法與反演成果 45
3-1-2 應變速率場計算與分析 49
3-2 地表變形強度 55
3-2-1 地表變形相關規範彙整 55
3-2-2 地表變形強度分級標準表建置 59
3-3 地表變形強度分布圖 61
第四章、中部地區重要斷層參數分析 65
4-1 斷層資料蒐集 65
4-1-1 大甲斷層 66
4-1-1-1 斷層長度 66
4-1-1-2 斷層傾角 66
4-1-1-3 斷層深度 68
4-1-1-4 滑移速率 68
4-1-2 彰化斷層 74
4-1-2-1 斷層長度 74
4-1-2-2 斷層傾角 74
4-1-2-3 斷層深度 76

4-1-2-4 滑移速率 78
4-1-3 其他主要斷層 89
4-1-3-1 車籠埔斷層 89
4-1-3-2 大茅埔–雙冬斷層 95
4-1-3-3 初鄉斷層 99
4-1-3-4 鐵砧山斷層 108
第五章、中部地區斷層模型建置 111
5-1 TDEFNODE 斷層模型 111
5-1-1 塊體模型原理 111
5-1-2 斷層模擬結果 111
5-2 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model） 120
5-2-1 斷層模型原理與使用參數 120
5-2-2 斷層模擬結果 122
5-3 中部地區之斷層滑移虧損速率 126
第六章、中部地區斷層活動潛勢 129
6-1 大甲斷層 129
6-1-1 大甲斷層參數設定 129
6-1-2 大甲斷層規模與年發生率 132
6-1-3 大甲斷層機率評估 134
6-2 彰化斷層 135
6-2-1 彰化斷層參數設定 135
6-2-2 彰化斷層規模與年發生率 135
6-2-3 彰化斷層機率評估 135
6-3 車籠埔斷層 137
6-3-1 車籠埔斷層參數設定 137
6-3-2 車籠埔斷層規模與年發生率 140
6-3-3 車籠埔斷層機率評估 143
6-4 大茅埔–雙冬斷層 144
6-4-1 大茅埔–雙冬斷層參數設定 144
6-4-2 大茅埔–雙冬斷層規模與年發生率 146
6-4-3 大茅埔–雙冬斷層機率評估 148
6-5 初鄉斷層 149
6-5-1 初鄉斷層參數設定 149
6-5-2 初鄉斷層規模與年發生率 151
6-5-3 初鄉斷層機率評估 152
6-6 鐵砧山斷層 153
6-6-1 鐵砧山斷層參數設定 153
6-6-2 鐵砧山斷層規模與年發生率 155
6-6-3 鐵砧山斷層機率評估 156
6-7 中部地區斷層活動潛勢圖成果（初稿） 157
第七章、中部地區重要區域景況地振動與景況同震位移分布圖 159
7-1 景況地振動分布圖 159
7-1-1 斷層破裂三維網格與地面計算網格建立 159

7-1-2 地面網格與斷層面最短距離估算 161
7-1-3 地振動放大效應評估 162
7-1-4 地振動值評估與分布 164
7-1-5 景況地振動分布圖 166
7-2 景況同震位移分布圖 171
7-2-1 地表同震位移網格建立 171
7-2-2 潛在震源位置與各斷層同震滑移量推估 171
7-2-3 景況同震位移分布圖 172
第八章、大地測量資料分析（全臺） 179
8-1 GNSS 連續站資料解算與分析 179
8-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程 179
8-1-2 GNSS 連續站坐標時間序列擬合與坐標精度分析 180
8-1-3 GNSS 連續站資料處理與資（/雜）訊分析 184
8-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析 192
8-2-1 本年度（2024 年）GNSS 移動站抽樣檢核 192
8-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析 196
8-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析 198
8-2-3-1 臺北地區 GNSS 觀測網 198
8-2-3-2 桃竹苗地區 GNSS 觀測網 203
8-2-3-3 嘉南地區 GNSS 觀測網 208
8-2-3-4 高屏地區 GNSS 觀測網 213
8-2-3-5 恆春地區 GNSS 觀測網 218
8-2-3-6 花東地區 GNSS 觀測網 223
8-2-3-7 宜蘭地區 GNSS 觀測網 230
8-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析 234
8-3-1 精密水準測量資料檢核 234
8-3-2 精密水準測量資料解算與精度分析 235
8-3-3 北部地區精密水準測線 237
8-3-3-1 石門至萬里測線 237
8-3-3-2 士林至三芝測線 240
8-3-3-3 淡水至士林測線 243
8-3-3-4 五股至臺北測線 246
8-3-4 桃竹苗地區精密水準測線 249
8-3-4-1 新屋至童話世界測線 249
8-3-4-2 新竹至五峰測線 252
8-3-4-3 新竹至峨嵋測線 255
8-3-4-4 苗栗至南庄測線 258
8-3-5 嘉南地區精密水準測線 261
8-3-5-1 金湖至瑞峰測線 261
8-3-5-2 北門至楠西測線 264
8-3-5-3 善化至關廟測線 268
8-3-5-4 新化至玉井測線 271
8-3-5-5 安平至龍崎測線 274
8-3-6 高屏地區精密水準測線 278

8-3-6-1 路竹至茂林測線 278
8-3-6-2 岡山至安坡測線 282
8-3-6-3 佳冬至七佳測線 285
8-3-7 恆春地區精密水準測線 288
8-3-7-1 車城至牡丹測線 288
8-3-7-2 恆春西臺地至佳樂水測線 291
8-3-7-3 南樹林至鵝鑾鼻測線 294
8-3-8 東部地區精密水準測線 297
8-3-8-1 嶺頂至瀧澗測線 297
8-3-8-2 光復至豐濱測線 300
8-3-8-3 紅葉至靜浦測線 303
8-3-8-4 東成至富岡測線 306
8-3-9 宜蘭地區精密水準測線 309
8-3-9-1 梗枋至東澳測線 309
8-3-10 精密水準測量資料可靠度分析 312
8-4 全臺三維速度場分析 320
8-4-1 全臺水平與垂直速度場 320
第九章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果 323
9-1 2024 年 04 月 03 日地震事件分析報告 323
9-1-1 緒論 323
9-1-2 花東地區近十年來的地表變形情形 327
9-1-3 0403 花蓮地震同震位移結果 332
9-1-4 合成孔徑雷達影像差分干涉觀測結果 338
9-1-5 斷層模擬結果 342
9-1-6 地表變形觀測小結 346
第十章、結論 347
參考文獻 351
附錄 1、0403 花蓮地震同震位移表 357
附錄 1-1、0403 花蓮地震 GNSS 連續站同震位移表 357
附錄 1-2、0403 花蓮地震 GNSS 移動站同震位移表 367
附錄 1-3、0403 花蓮地震精密水準測量同震位移表 371
期中審查意見回覆 375
期末審查意見回覆 379

（圖檔附錄請參閱光碟）

[附錄 01] 113 年期末_GNSS 連續站時間序列
[附錄 02] 113 年期末_GNSS 連續站速度表
[附錄 03] 113 年期末_GNSS 移動站時間序列
[附錄 04] 113 年期末_GNSS 移動站速度表
[附錄 05] 113 年期末_精密水準時間序列
[附錄 06] 113 年期末_精密水準速度表
[附錄 07] 113 年期末_重要區域水平與垂直速度場分布圖
[附錄 08] 113 年期末_重要區域滑移虧損速率分布圖
[附錄 09] 113 年期末_重要區域地表變形強度圖
[附錄 10] 113 年期末_重要區域景況地振動與同震位移分布圖
[附錄 11] 113 年期末_重要區域斷層活動潛勢圖（初稿）

表目錄

表 1.1：經濟部地質調查及礦業管理中心（GSMMA）建置的 GNSS 連續觀測站列表 3
表 1.2：112 年至 114 年分年目標與重要區域.....6
表 1.3：GNSS 移動站預計施測與檢測時間表 12
表 1.4：精密水準測線預計施測時間表.....14

表 3.1：常時橋面之不連續變位限制.....56
表 3.2：常時橋面之不連續變位限制.....58
表 3.3：地表變形強度分級表.....61

表 4.1：斷層幾何參數資料蒐集重點.....65
表 4.2：大甲斷層傾角相關文獻彙整.....71
表 4.3：大甲斷層深度相關文獻.....71
表 4.4：大甲斷層長期滑移速率相關文獻彙整.....73
表 4.5：彰化斷層傾角相關文獻彙整.....87
表 4.6：彰化斷層深度相關文獻彙整.....88
表 4.7：彰化斷層長期滑移速率相關文獻彙整.....88
表 4.8：車籠埔斷層幾何相關文獻彙整.....93
表 4.9：車籠埔斷層長期滑移速率相關文獻彙整.....94
表 4.10：大茅埔–雙冬斷層傾角相關文獻彙整 98
表 4.11：大茅埔–雙冬斷層深度相關文獻彙整 98
表 4.12：初鄉斷層傾角相關文獻彙整.....106
表 4.13：初鄉斷層深度相關文獻彙整.....107
表 4.14：初鄉斷層長期滑移速率相關文獻彙整.....107
表 4.15：鐵砧山斷層幾何相關文獻彙整.....109

表 5.1：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.....119
表 5.2：斷層之地質滑移速率約束值及平均滑移速率.....119
表 5.3：斷層平均滑移速率.....123
表 5.4：本計畫之 2016 - 2023 年加權平均斷層滑移虧損速率 126

表 6.1：大甲–彰化斷層系統（case C）滑移虧損速率計算.....131
表 6.2：大甲–彰化斷層系統之各破裂事件面積與規模 132
表 6.3：大甲斷層發生機率評估.....134
表 6.4：彰化斷層發生機率評估.....136
表 6.5：大甲–彰化斷層系統發生機率評估 136
表 6.6：車籠埔斷層之各破裂事件面積與規模.....139
表 6.7：車籠埔斷層發生機率評估.....143
表 6.8：大茅埔–雙冬斷層之各破裂事件面積與規模 146
表 6.9：大茅埔–雙冬斷層發生機率評估 148
表 6.10：初鄉斷層之破裂事件面積與規模.....150
表 6.11：初鄉斷層發生機率評估.....152
表 6.12：鐵砧山斷層之破裂事件面積與規模.....154

表 6. 13：鐵砧山斷層發生機率評估.....156

表 8. 1：GNSS 移動站施測與檢核時間表 193

圖目錄

圖 1.1：經濟部地質調查及礦業管理中心（GSMMA）建立之活動斷層大地測量觀測網 5
圖 1.2：計畫執行架構圖.....7
圖 1.3：113 年度目標活動斷層與重要區域.....8
圖 1.4：GNSS 移動站觀測分區圖 13
圖 1.5：精密水準測線分布圖.....15

圖 2.1：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 18
圖 2.2：移動站 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較.....19
圖 2.3：移動站 G300 與連續站 VR03 之時間序列比較 19
圖 2.4：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 20
圖 2.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 21
圖 2.6：大安至東勢水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較.....22
圖 2.7：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖.....23
圖 2.8：縣 132_大安至東勢測線水準累積高程差.....24
圖 2.9：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較 25
圖 2.10：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖.....26
圖 2.11：縣 136_龍井至太平測線水準累積高程差.....27
圖 2.12：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較 28
圖 2.13：五光至黃竹測線水準高程變化圖.....29
圖 2.14：五光至黃竹測線水準累積高程差.....30
圖 2.15：王功至草屯至埔里測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較 32
圖 2.16：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里水準高程變化圖 33
圖 2.17：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里測線水準累積高程差 34
圖 2.18：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較.....36
圖 2.19：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖.....37
圖 2.20：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準累積高程差.....38
圖 2.21：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....39
圖 2.22：重要區域相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 42
圖 2.23：重要區域相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....43

圖 3.1：觀測點與網格三頂點示意圖.....47
圖 3.2：速度反演之重要區域網格化連續性速度場.....48
圖 3.3：重要區域最大主應變速率場.....52
圖 3.4：重要區域最大剪應變速率場.....53
圖 3.5：重要區域應變第二不變量分布圖.....54
圖 3.6：橋面平行移動之變位型態.....57
圖 3.7：橋面折角之變位型態.....57
圖 3.8：重要區域地表變形強度分布圖.....62
圖 3.9：全臺地表變形強度分布圖.....63

圖 4.1：大甲斷層震測剖面.....69
圖 4.2：大甲 1 號井及大甲 2 號井.....69

圖 4. 3：大甲斷層平衡剖面.....70
圖 4. 4：大甲斷層平衡剖面.....70
圖 4. 5：大甲斷層、車籠埔斷層、大茅埔—雙冬斷層以及滑脫面的地下幾何剖面圖.....71
圖 4. 6：擠壓環境中正斷層反轉為逆斷層的概念圖.....72
圖 4. 7：正斷層反轉的構造類型.....72
圖 4. 8：根據礫石裂縫方向與地層節理等微觀構造的觀察（左圖）推測八卦轉移斷層（Pakua Transfer fault zone）的存在（右圖）.....79
圖 4. 9：彰化斷層震測剖面與推測位置.....79
圖 4. 10：彰化斷層震測剖面解釋圖.....80
圖 4. 11：濁水溪震測剖面圖.....80
圖 4. 12：大肚溪地質剖面圖.....81
圖 4. 13：地質剖面圖.....81
圖 4. 14：地質剖面圖.....81
圖 4. 15：彰化斷層平衡剖面圖.....82
圖 4. 16：地質剖面圖.....83
圖 4. 17：平衡剖面圖.....84
圖 4. 18：震測資料重新解讀.....85
圖 4. 19：大甲−彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔−雙冬斷層以及滑脫面的地下幾何關係圖.....86
圖 4. 20：根據集集地震序列繪製的剖面圖.....86
圖 4. 21：斷層模型剖面圖.....87
圖 4. 22：車籠埔斷層槽溝位置圖（左）與同震垂直位移分布圖（右）.....91
圖 4. 23：車籠埔斷層面幾何以及 1999 年同震地表變位圖.....92
圖 4. 24：車籠埔斷層剖面圖.....92
圖 4. 25：利用褶皺崖高與階地高計算之滑移速率.....93
圖 4. 26：桂竹林層與頭嵙山層之間為斷層接觸關係.....96
圖 4. 27：雙冬斷層露頭.....96
圖 4. 28：集集地震時雙冬斷層沿線上發生噴沙與地表破裂.....97
圖 4. 29：通過 TSK-1 井之地質剖面圖.....97
圖 4. 30：通過雙冬斷層之地質剖面圖.....98
圖 4. 31：初鄉斷層條帶地質圖.....101
圖 4. 32：集集地震時鹿寮斷層沿線上的地表破裂.....102
圖 4. 33：東埔蚋溪初鄉斷層露頭.....102
圖 4. 34：濁水溪集集攔河堰下游初鄉斷層露頭.....103
圖 4. 35：濁水溪震測剖面之重新解釋以及同震變位之 GPS 向量投影.....103
圖 4. 36：濁水溪震測剖面之另一解釋.....104
圖 4. 37：地質剖面圖.....104
圖 4. 38：東埔蚋溪沿線地質調查及所推估的地質剖面.....104
圖 4. 39：初鄉斷層平衡剖面圖.....105
圖 4. 40：東埔蚋溪河階分析.....105
圖 4. 41：鐵砧山斷層野外露頭.....109
圖 4. 42：水美村跨鐵砧山斷層之地電阻剖面.....109

圖 5. 1：臺灣北部塊體模型及活動斷層分布.....113
圖 5. 2：最佳塊體旋轉模型中各塊體 Euler pole 所在的位置.....114

圖 5. 3：最佳塊體旋轉模型中各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度以及塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場.....114
圖 5. 4：TDEFNODE 斷層模型模擬結果.....115
圖 5. 5：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差.....116
圖 5. 6：塊體內部應變.....117
圖 5. 7：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差.....118
圖 5. 8：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖.....121
圖 5. 9：基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果.....124
圖 5. 10：中部地區斷層滑移虧損率分布圖.....125
圖 5. 11：本計畫重要區域之斷層滑移虧損速率分布圖.....127

圖 6. 1：大甲–彰化斷層系統之破裂模式及權重分配.....130
圖 6. 2：大甲斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積密度函數分布.....131
圖 6. 3：彰化斷層模型反演滑移虧損率之機率密度函數及累積密度函數分布.....131
圖 6. 4：大甲–彰化斷層系統邏輯樹.....132
圖 6. 5：大甲–彰化斷層系統各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....133
圖 6. 6：大甲–彰化斷層系統 3 種破裂事件之地震復發間隔時間–權重分布圖.....133
圖 6. 7：大甲–彰化斷層系統之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布.....134
圖 6. 8：車籠埔斷層之破裂模式及權重分配.....138
圖 6. 9：車籠埔斷層三維斷層幾何面及各分段面積.....138
圖 6. 10：車籠埔斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積密度函數分布.....139
圖 6. 11：車籠埔斷層邏輯樹.....140
圖 6. 12：車籠埔斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....141
圖 6. 13：車籠埔斷層三種分段破裂事件之邏輯樹規模–權重分布圖.....142
圖 6. 14：車籠埔斷層三種分段破裂事件之地震復發間隔時間–權重分布圖.....142
圖 6. 15：車籠埔斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布.....143
圖 6. 16：大茅埔–雙冬斷層之破裂模式及權重分配.....145
圖 6. 17：大茅埔–雙冬斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積密度函數分布.....145
圖 6. 18：大茅埔–雙冬斷層邏輯樹.....146
圖 6. 19：大茅埔–雙冬斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....147
圖 6. 20：大茅埔–雙冬斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間–權重分布圖.....147
圖 6. 21：大茅埔–雙冬斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間.....148
圖 6. 22：初鄉斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積分布函數.....150
圖 6. 23：初鄉斷層邏輯樹.....150
圖 6. 24：初鄉斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....151
圖 6. 25：初鄉斷層之全部邏輯樹分支規模–權重分布圖.....151
圖 6. 26：初鄉斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間–權重分布圖.....152
圖 6. 27：鐵砧山斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積分布函數.....154
圖 6. 28：鐵砧山斷層邏輯樹.....154
圖 6. 29：鐵砧山斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....155
圖 6. 30：鐵砧山斷層之全部邏輯樹分支規模–權重分布圖.....155
圖 6. 31：鐵砧山斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間–權重分布圖.....156
圖 6. 32：臺灣中部重要區域斷層活動機率圖.....158

圖 7.1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布 160
圖 7.2：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 161
圖 7.3：Vs30 及兩條評估活動斷層之分布圖 163
圖 7.4：由 GMPE Chao20 算得之大甲斷層景況地振動分布圖 167
圖 7.5：由 GMPE Chao20 算得之彰化斷層景況地振動分布圖 168
圖 7.6：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表 169
圖 7.7：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表 170
圖 7.8：大甲斷層之景況水平同震位移分布圖 174
圖 7.9：大甲斷層之景況垂直同震位移分布圖 175
圖 7.10：彰化斷層之景況水平同震位移分布圖 176
圖 7.11：彰化斷層之景況垂直同震位移分布圖 177

圖 8.1：GNSS 連續站 ANES 坐標時間序列擬合結果 181
圖 8.2：GNSS 連續站 ANES 時間序列之殘差結果 182
圖 8.3：1993 - 2024 年截至 10 月份 GNSS 連續站點位坐標殘差分布圖 183
圖 8.4：1993 - 2024 年 GNSS 連續站點位均方根誤差分布圖 183
圖 8.5：地礦中心連續站 GS22（彰化快官交流道站）垂直分量的卡曼濾波分析結果 186
圖 8.6：地礦中心連續站 GS22 垂直分量經卡曼濾波後所得之殘差時間序列、殘差與頻譜分析結果 187
圖 8.7：地礦中心連續站 GS22 之南北與東西分量之時間序列 188
圖 8.8：地礦中心全臺 101 個測站三分量時間序列之卡曼濾波雜訊分析 189
圖 8.9：地礦中心連續站 GS10（桃園竹圍國中）與 GS73（高雄新光國小）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析 190
圖 8.10：地礦中心連續站 GS95（大屯火山區八煙站）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析 191
圖 8.11：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖 194
圖 8.12：2002 至 2024 年 10 月 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖 196
圖 8.13：2002 至 2024 年 10 月 GNSS 移動站點位均方根誤差分布圖 197
圖 8.14：臺北地區 GNSS 連續及移動站分布情形 198
圖 8.15：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較 199
圖 8.16：移動站 N035 與連續站 GOLI 之時間序列比較 200
圖 8.17：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 201
圖 8.18：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 202
圖 8.19：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動站分布情形 204
圖 8.20：移動站 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較 205
圖 8.21：移動站 G170 與連續站 GS15 之時間序列比較 205
圖 8.22：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 206
圖 8.23：桃竹苗地區 2002 至 2024 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 207
圖 8.24：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 209
圖 8.25：移動站 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較 210
圖 8.26：移動站 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較 210
圖 8.27：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 211
圖 8.28：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 212
圖 8.29：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 214

圖 8. 30：移動站 GF99 與連續站 SGAN 之時間序列比較.....215
圖 8. 31：移動站 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較.....215
圖 8. 32：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 216
圖 8. 33：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 217
圖 8. 34：恆春地區 GNSS 連續及移動站分布情形 219
圖 8. 35：移動站 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較.....220
圖 8. 36：移動站 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較 220
圖 8. 37：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 221
圖 8. 38：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 222
圖 8. 39：花東地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 224
圖 8. 40：移動站 GE57 與連續站 FLNM 之時間序列比較 225
圖 8. 41：移動站 GA05 與連續站 KNKO 之時間序列比較 225
圖 8. 42：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 226
圖 8. 43：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....228
圖 8. 44：宜蘭地區 GNSS 連續及移動測站分布情形 231
圖 8. 45：移動站 G246 與連續站 SUA2 之時間序列比較.....232
圖 8. 46：移動站 GE58 與連續站 HAN2 之時間序列比較.....232
圖 8. 47：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 233
圖 8. 48：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場 233
圖 8. 49：精密水準測量結果分析圖.....234
圖 8. 50：精密水準測線與各測線約制之 GNSS 連續站分布圖 236
圖 8. 51：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較 237
圖 8. 52：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖.....238
圖 8. 53：台 2_石門至萬里測線水準累積高程差.....239
圖 8. 54：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較.....240
圖 8. 55：士林至三芝測線水準高程變化圖.....241
圖 8. 56：士林至三芝測線水準累積高程差.....242
圖 8. 57：淡水至士林水準點位 2007 與連續站 GS10 之時間序列比較 243
圖 8. 58：淡水至士林測線水準高程變化圖.....244
圖 8. 59：淡水至士林測線水準累積高程差.....245
圖 8. 60：五股至臺北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較 246
圖 8. 61：五股至臺北測線水準高程變化圖.....247
圖 8. 62：五股至臺北測線水準累積高程差.....248
圖 8. 63：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較.....249
圖 8. 64：新屋至童話世界測線水準高程變化圖.....250
圖 8. 65：新屋至童話世界測線水準累積高程差.....251
圖 8. 66：新竹至五峰水準點位 G429 與連續站 GS03 之時間序列比較.....252
圖 8. 67：新竹至五峰測線水準高程變化圖.....253
圖 8. 68：新竹至五峰測線水準累積高程差.....254
圖 8. 69：新竹至峨嵋水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較.....255
圖 8. 70：新竹至峨嵋測線水準高程變化圖.....256
圖 8. 71：新竹至峨嵋測線水準累積高程差.....257
圖 8. 72：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較.....258
圖 8. 73：苗栗至南庄測線水準高程變化圖.....259

圖 8. 74：苗栗至南庄測線水準累積高程差.....260
圖 8. 75：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較.....261
圖 8. 76：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖.....262
圖 8. 77：縣 164_金湖至瑞峰測線水準累積高程差.....263
圖 8. 78：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較.....265
圖 8. 79：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖.....266
圖 8. 80：縣 174_北門至楠西測線累積高程差.....267
圖 8. 81：善化至關廟水準點位 1157 與連續站 GS29 之時間序列比較.....268
圖 8. 82：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖.....269
圖 8. 83：台 19 甲_善化至關廟測線水準累積高程差.....270
圖 8. 84：新化至玉井水準點位 J006 與連續站 GS89 之時間序列比較.....271
圖 8. 85：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖.....272
圖 8. 86：台 20_新化至玉井測線累積高程差.....273
圖 8. 87：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較.....275
圖 8. 88：安平至龍崎測線水準高程變化圖.....276
圖 8. 89：安平至龍崎測線累積高程差.....277
圖 8. 90：路竹至茂林水準點位 NO12 與連續站 CISH 之時間序列比較.....279
圖 8. 91：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖.....280
圖 8. 92：台 28_路竹至茂林主、副線累積高程差.....281
圖 8. 93：岡山至安坡水準點位 G525 與連續站 AKND 之時間序列比較.....282
圖 8. 94：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖.....283
圖 8. 95：台 22_岡山至安坡測線累積高程差.....284
圖 8. 96：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較.....285
圖 8. 97：佳冬至七佳測線高程變化圖.....286
圖 8. 98：佳冬至七佳測線累積高程差.....287
圖 8. 99：車城至牡丹測線水準點位 CC19 與連續站 GS59 之時間序列比較.....288
圖 8. 100：車城至牡丹測線水準高程變化圖.....289
圖 8. 101：車城至牡丹測線累積高程差.....290
圖 8. 102：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.....291
圖 8. 103：恆春西臺地至佳樂水測線高程變化圖.....292
圖 8. 104：恆春西臺地至佳樂水測線累積高程差.....293
圖 8. 105：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.....294
圖 8. 106：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準高程變化圖.....295
圖 8. 107：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準累積高程差.....296
圖 8. 108：嶺頂至瀧澗水準點位 N670 與連續站 TUNM 之時間序列比較.....297
圖 8. 109：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖.....298
圖 8. 110：嶺頂至瀧澗測線累積高程差.....299
圖 8. 111：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較.....300
圖 8. 112：光復至豐濱測線高程變化圖.....301
圖 8. 113：光復至豐濱測線累積高程差.....302
圖 8. 114：紅葉至靜浦水準點位 GA05 與連續站 KNKO 之時間序列比較.....303
圖 8. 115：紅葉至靜浦測線高程變化圖.....304
圖 8. 116：紅葉至靜浦測線累積高程差.....305
圖 8. 117：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 S104 之時間序列比較.....306

圖 8. 118：東成至富岡測線高程變化圖.....307
圖 8. 119：東成至富岡測線累積高程差.....308
圖 8. 120：水準點位 G248 與連續站 GS72 之時間序列比較.....309
圖 8. 121：梗枋至東澳測線水準高程變化圖.....310
圖 8. 122：梗枋至東澳測線累積高程差.....311
圖 8. 123：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....313
圖 8. 124：桃竹苗地區 2002 - 2024 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場 314
圖 8. 125：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....315
圖 8. 126：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....316
圖 8. 127：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....317
圖 8. 128：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....318
圖 8. 129：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....319
圖 8. 130：GNSS 速度場時間序列擬合事件分段 320
圖 8. 131：臺灣地區 2002 至 2024 年 GNSS 水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間速度場圖.....321
圖 8. 132：臺灣地區 2002 至 2024 年垂直方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間速度場圖 322

圖 9. 1：中央氣象署 20240403 地震事件報告.....325
圖 9. 2：20240403 地震震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果.....326
圖 9. 3：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場 328
圖 9. 4：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....330
圖 9. 5：20240403 花蓮地震 GNSS 水平方向同震位移分布圖 333
圖 9. 6：20240403 花蓮地震 GNSS 垂直方向同震位移分布圖 334
圖 9. 7：20240403 花蓮地震水準測量垂直方向同震位移分布圖.....335
圖 9. 8：瀧澗–嶺頂測線同震位移分布圖 336
圖 9. 9：光復–豐濱測線同震位移分布圖 336
圖 9. 10：瑞穗–靜浦測線同震位移分布圖 337
圖 9. 11：東成–富岡測線同震位移分布圖 337
圖 9. 12：20240403 花蓮地震之 Sentinel-1 升軌雷達差分干涉同震地表變位圖 340
圖 9. 13：20240403 花蓮地震之 Sentinel-1 降軌雷達差分干涉同震地表變位圖 340
圖 9. 14：20240403 花蓮地震之 ALOS-2 升軌 stripmap 雷達差分干涉同震地表變位圖.....341
圖 9. 15：20240403 花蓮地震之 ALOS-2 降軌 ScanSAR 雷達差分干涉同震地表變位圖 341
圖 9. 16：斷層錯位模型於水平方向擬合結果.....344
圖 9. 17：斷層錯位模型於垂直方向擬合結果.....345

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-第二階段（2/3）													
月次 / 工作項目	第 月	第 月	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	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（由臺大工作團隊負責）													
GNSS 移動站資料平差解算與分析（由臺大工作團隊負責）													
精密水準測量資料處理、檢核、解算與分析（由臺大工作團隊負責）													
GNSS 連續觀測站資料處理、解算與分析（由臺大工作團隊負責）													
重要區域地表變形與斷層活動潛勢評估（由臺大與中興社工作團隊負責）													
預定進度（累積數）	%	%	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	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. 修正後之工作計畫書與契約書 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	工作計畫書與契約書修正
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 6. 重要區域地表水平與垂直速度場圖 7. 重要區域斷層滑移虧損速率分布圖	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 連續站計算及分析 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 2. 重要區域地表變形強度圖 3. 重要區域景況地振動分布圖 4. 重要區域景況同震位移分布圖 5. 重要區域斷層活動潛勢圖初稿 6. 期末報告書面資料初稿 7. 期末報告簡報資料	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

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
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	清點所有交付項目與教育訓練等契約承諾、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，推估臺灣中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中部地區，報告完成之主要工作為：(1) 解算本年度至 2024 年 10 月份，全臺共約 502 個 GNSS 連續站、764 個 GNSS 移動站，以及 30 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，獲得中部重要區域之地表水平與垂直速度場；(2) 整合過去計畫工作以及近期相關文獻與研究，特別針對大甲斷層與彰化斷層之斷層幾何參數進行探討與分析，並以三維斷層模型進行速度場反演，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 - 2023 年所觀測到的 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二條斷層之數值：大甲斷層與彰化斷層之加權平均滑移虧損速率分別為 7.1 mm/yr 與 6.2 mm/yr；(3) 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，劃分 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；(4) 本計畫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，並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，推估並繪製大甲斷層與彰化斷層於重要區域之景況地振動與同震位移分布圖。此外，也因應 0403 花蓮地震進行東部地區的 GNSS 與精密水準同震位移分析與斷層錯位模型模擬。

關鍵詞：大地測量、三維速度場、斷層滑移虧損速率、斷層活動機率、地表變形強度分布、景況地振動圖、景況同震位移圖

Abstract

In this project, we analyzed geodetic data to generate the velocity field and fault slip deficit rate near the protected objects in central Taiwan. The fault model was adopted to integrate the geodetic observations with geological materials. The working area in this year is the central Taiwan. We have completed the following missions: (1) The daily solutions from 502 continuous GNSS stations, 764 campaign-mode GNSS stations, and 31 leveling routes were calculated for the following time series analysis to get the velocity field of central Taiwan with respect to station S01R. (2) The fault parameters of the Tachia fault and Changhua fault were mainly evaluated based on previous studies. Then the slip deficit rates of each fault were derived through the 3D fault model. The geodetic data during 2016-2023 were adopted in this project. According to the modeling results, the average slip deficit rates of Tachia fault and Changhua fault are respectively 7.1 mm/yr and 6.2 mm/yr. (3) 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). 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. (4) 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. Finally, We collected the geodetic data from continuous GNSS stations (cGNSS), campaign-mode GNSS stations (rGNSS), and precise leveling to estimate the coseismic displacements of 20240403 Hualien earthquake event. The preliminary coseismic source model was estimated by inverting the coseismic displacements.

KEYWORDS: geodesy, velocity field, fault slip deficit rate, earthquake rupture probability, surface deformation level, 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依據。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。

經濟部地質調查及礦業管理中心（原為經濟部中央地質調查所，以下簡稱地礦中心）於 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）觀測網與精密水準測線。於 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 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 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 81 站 GNSS 連續站（表 1. 1）、782 站 GNSS 移動站及 43 條精密水準路線（含 30 條長測線及 13 條短測線）之設置（圖 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。經由過去近十年之大地測量監測資料，已觀測到包含花東縱谷、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 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 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，透過蒐集與分析地礦中心及國內既有之 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 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 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。

在 110–111 年「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估」計畫中，（1）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，並繪製斷層活動潛勢圖，提供活動斷層地質敏感劃設之參考；(2) 根據斷層幾何參數之探析與斷層滑移虧損速率分布，經由地動預估式與三維斷層錯位模型，推估並繪製旗山斷層、車瓜林斷層、小崗山斷層、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。

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。

表 1. 1：經濟部地質調查及礦業管理中心（GSMMA）建置的 GNSS 連續觀測站列表

Table 1. 1: Continuous GNSS stations installed by GSMMA.

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	地質調查及礦業管理中心	2002/06/17	GS52	新發國小（2019.12.20 廢站）	2009/12/18
GS02	新竹高工（2015.8.17 廢站）	2004/10/21	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS03	工研院	2004/10/19	GS54	大洲國中（2013.7.12 廢站）	2009/12/15
GS04	大埔美農場（2009.11.11 廢站）	2004/10/16	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS06	民和國中	2004/10/21	GS57	石門國小（2016.12.26 廢站）	2009/12/15
GS07	培英國小（2023.9.22 廢站）	2004/10/21	GS58	高士國小	2009/12/14
GS08	興華國小（2020.3.24 廢站）	2005/08/15	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS60	永港國小	2009/12/18
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS61	梅花國小（已廢站）	2010/10/06
GS11	北投國小	2005/08/15	GS62	新樂國小（2021.10.25 廢站）	2010/09/20
GS12	樂善國小（2018.3.8 廢站）	2005/09/06	GS63	太興國小	2010/09/24
GS13	國光國小	2005/08/16	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS14	西門國小	2005/09/13	GS65	茶山國小（2011.7.28 廢站）	2010/10/14
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS66	達邦（2023.11.13 廢站）	2010/09/28
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS67	新美國小	2010/09/28
GS17	太平國小	2005/09/14	GS68	三和國小	2010/12/17
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS69	樹林垃圾掩埋場(2023.8.6 廢站）	2011/09/22
GS19	保長國小（2012.5.25 廢站）	2006/07/12	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS20	龜山島	2006/08/04	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS73	新光國小	2012/11/02
GS23	五光國小	2006/05/30	GS74	內門國小	2012/11/02
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS76	新興國小	2012/11/02
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS77	深水國小	2012/11/14
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS79	中路國小	2013/10/16
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS82	卓蘭實中	2014/12/16
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS83	土城國小	2014/12/22
GS33	永華國小（2022.12.6 廢站）	2006/06/22	GS84	水里國中	2014/12/17
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS86	水美國小	2015/09/15
GS36	德化國小	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS37	泰安服務區（2019.12.6 廢站）	2006/10/25	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS89	新化國中	2015/09/14
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS90	新埔工作站（2019.7.1 廢站）	2016/09/02
GS40	龍峰國小（2016.11.6 廢站）	2006/10/21	GS91	香山高中	2016/09/02
GS41	竹門國小（2022.12.4 廢站）	2007/11/23	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS42	東原國中	2007/11/23	GS93	七星山	2017/01/03
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS94	中湖站	2017/12/20
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS95	八煙站	2017/12/20
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS96	二溪國小	2020/02/06
GS46	來義國小	2009/01/06	GS97	玉井國小	2020/02/06
GS47	台電南展館(2013.7.25 廢站）	2009/01/05	CG01	東華創研	2023/04/20
GS48	警光山莊	2009/04/01	CG02	海星中學	2023/04/18

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
GS49	馬赫坡民宿	2009/03/25	CG03	和平國中	2023/03/01
GS50	蔡宅	2009/04/01	CG04	月眉國小	2023/03/01
GS51	杉林國小	2009/12/18			

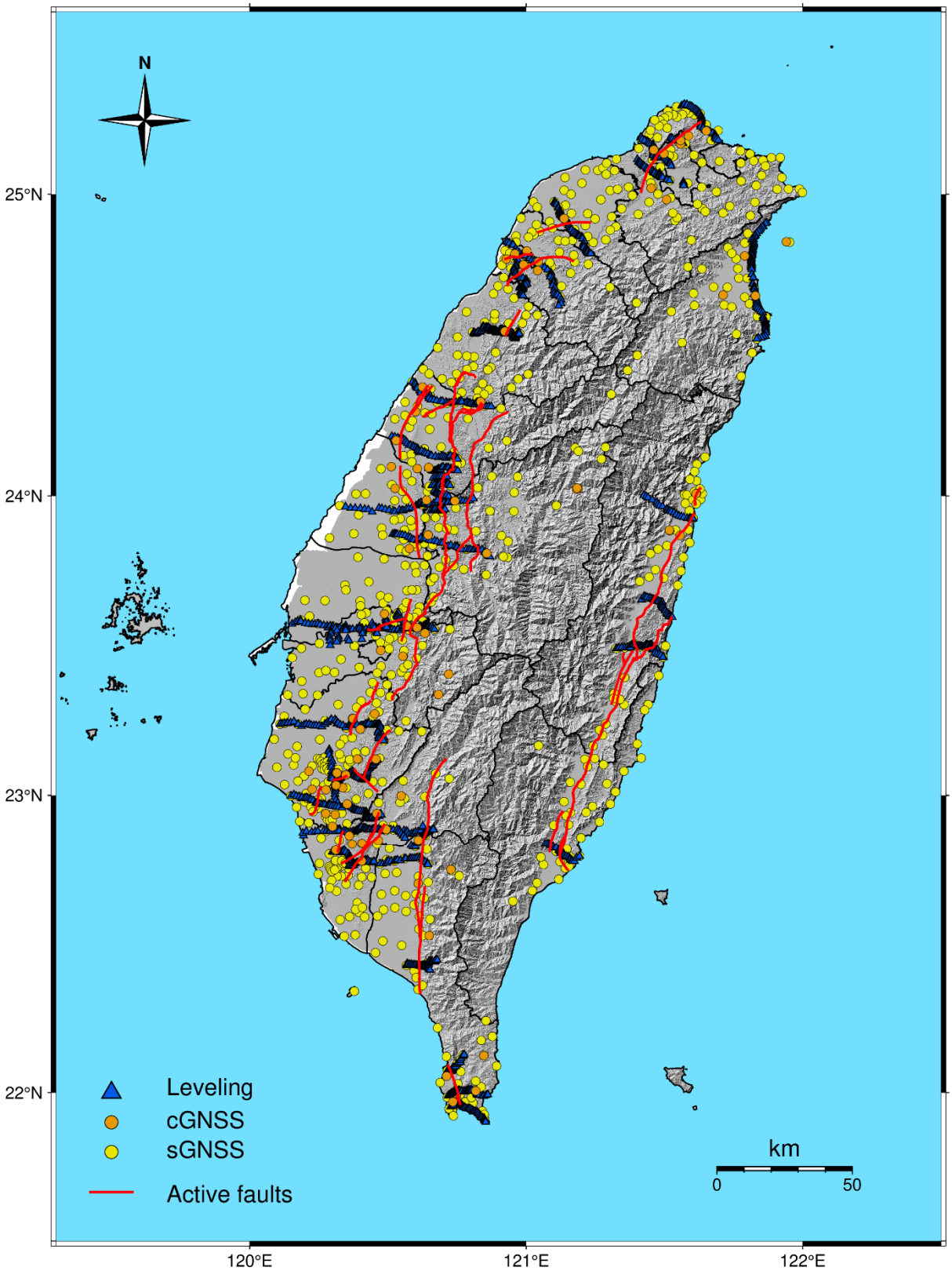


圖 1. 1：經濟部地質調查及礦業管理中心（GSMMA）建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 81 站 GNSS 連續站（橘色圓圈）、782 站 GNSS 移動站（黃色圓圈）以及 43 條精密水準測線（藍色三角形）。

Figure 1. 1: GSMMA geodetic network for active fault monitoring, including 81 continuous GNSS stations (orange circle), 782 campaign-mode GNSS stations (yellow circle) and 43 precise leveling routes (blue triangle).

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（圖 1.2）。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；同時透過文獻回顧，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與再現週期間的關係，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劃設之參考依據，並提供各重要區域之防災規劃參考。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 3 年（112 年至 114 年）為工作期程（本年度 113 年為第二年度，表 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（圖 1.2）。此外，針對前期計畫「斷層活動性觀測研究第四階段」中，重要之活動斷層與重要區域（表 1.2、圖 1.3），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，並搭配既已規劃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之標的。

表 1.2：112 年至 114 年分年目標與重要區域

Table 1.2: Objects in 2023 to 2025.

年度	目 標	重要區域
112	北部地區斷層潛勢分析 （包含山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、屯子腳斷層等區域）	新竹科學園區、臺北都會區
113	**中部地區斷層潛勢分析 （包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷層、初鄉斷層等區域）**	**中部科學園區（臺中園區）、臺中都會區、臺中市精密機械科技創新園區**
114	東部地區斷層潛勢分析 （包含米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層等區域）	板塊交界地震頻繁之人口密集區，包含花蓮與臺東 2 縣轄市，以及重要城鎮

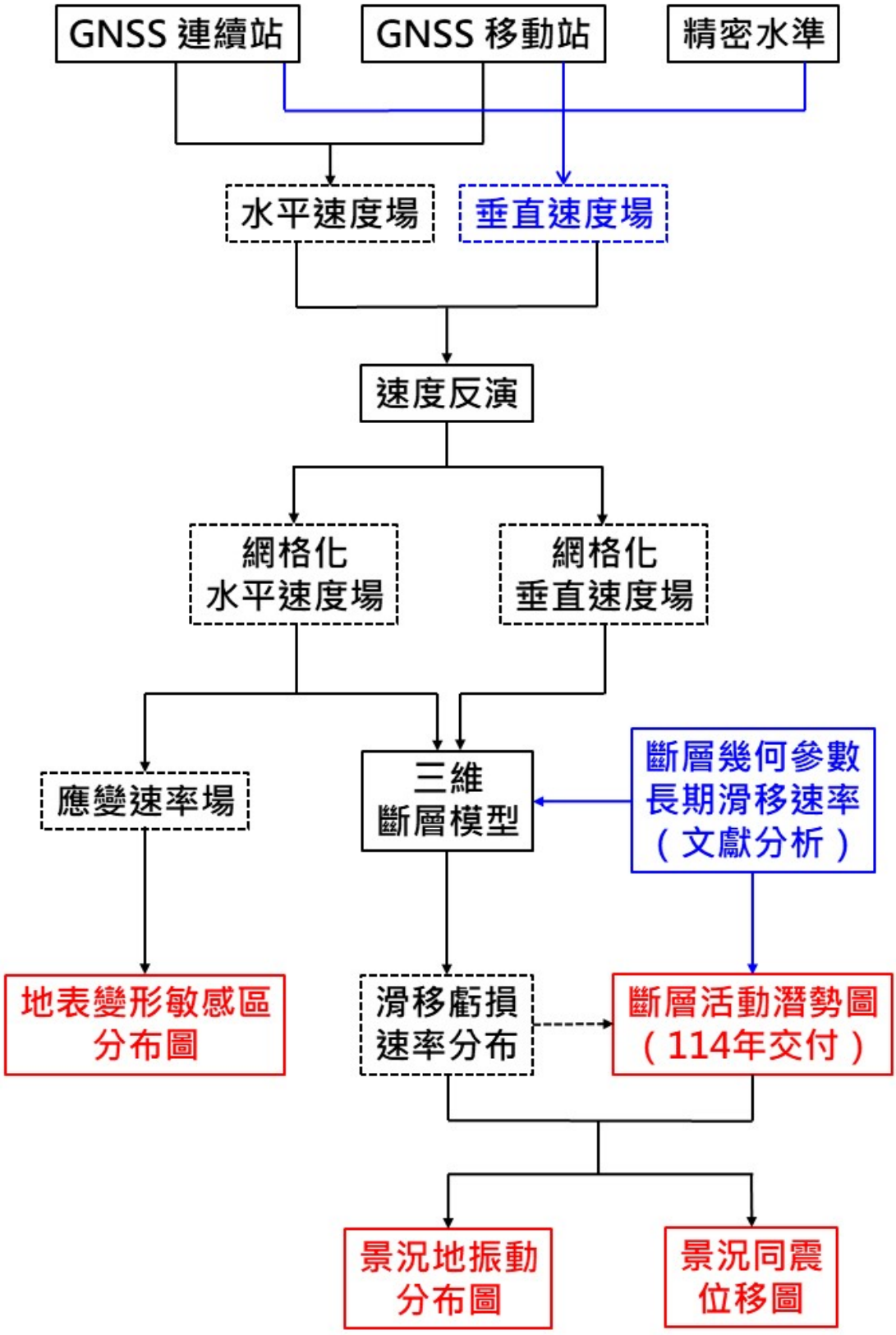


圖 1. 2：計畫執行架構圖

Figure 1. 2: Framework of the project.

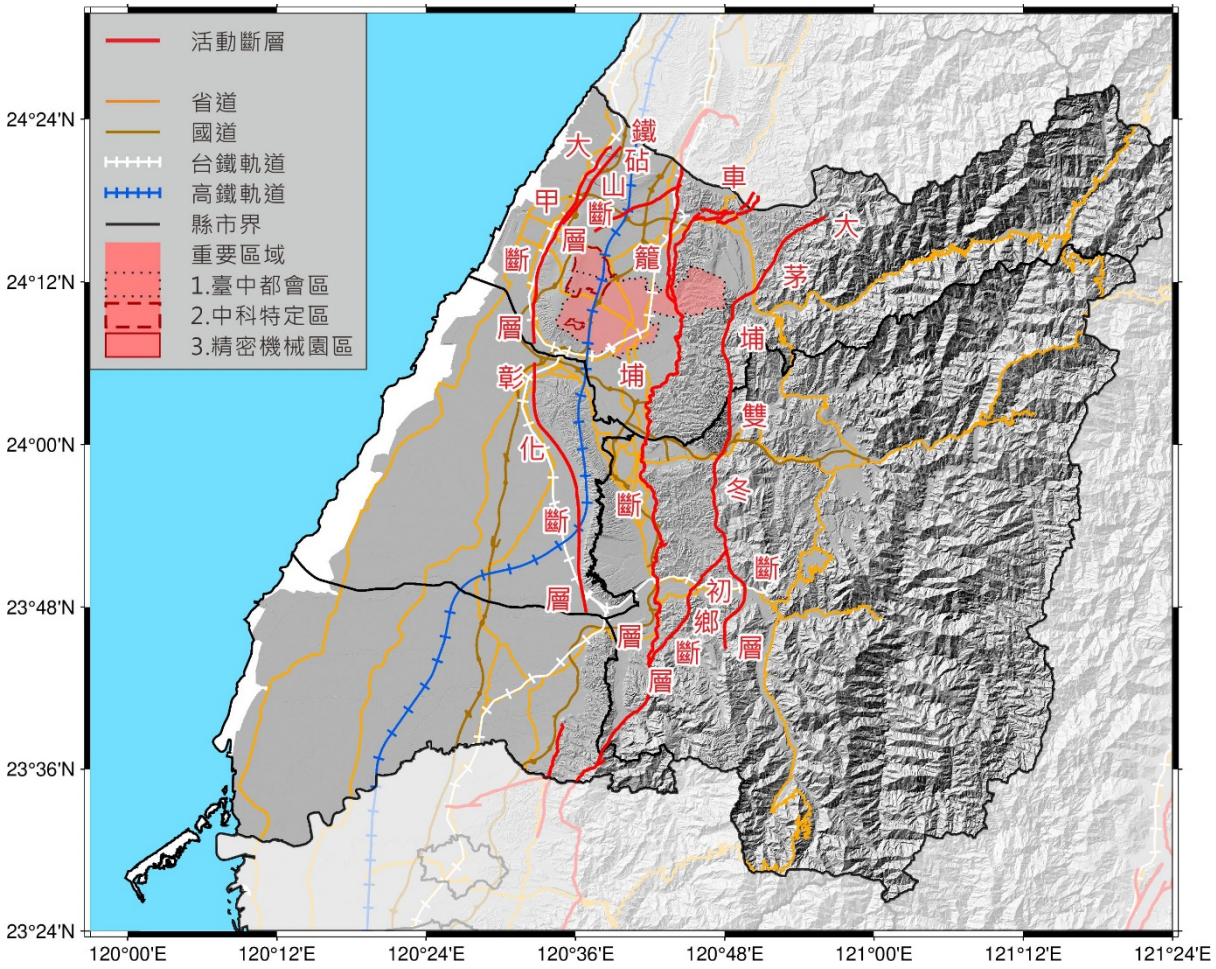


圖 1. 3：113 年度目標活動斷層與重要區域。其中臺中都會區範圍為舊臺中省轄市轄區；中部科學園區臺中基地附近特定區於圖例中簡稱為中科特定區，其範圍涵蓋中部科學園區臺中園區，以及中科臺中園區擴建一期與擴建二期；臺中市精密機械科技創新園區於圖例中則簡稱為精密機械園區。

Figure 1. 3: Active faults and object areas of 2024. The object areas include Taichung City, Central Taiwan Science Park and Taichung City Precision Machinery Innovation Technology Park.

執行策略上，除常規的大地測量資料檢核外，將於規劃的 3 年期程中，分別於北部、中部與東部 3 個目標區域中，根據重要區域挑選鄰近且重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（圖 1. 2），作為地質敏感區範圍劃設之重要參考依據。

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，平時即持續造成地表的不等量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）透過文獻回顧，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與再現週期間的關係，產製斷層活動潛勢圖；（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，重要區域及其相鄰地區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 112－114 年「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估－第二階段」之第二年，本年度之計畫分析目標，將著重於包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層與初鄉斷層共 6 條活動斷層之臺灣中部地區（圖 1.3），而本年度之重要區域包含臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）以及臺中市精密機械科技創新園區（表 1.2、圖 1.3），其中，「大甲斷層」與「彰化斷層」是 2 條鄰近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 條斷層及其周遭重要區域之景況地振動與景況同震位移分布情形。以下將概述這 2 條斷層之地質背景。

1. 大甲斷層

大甲斷層，北起臺中市大甲區大安溪南岸之鐵砧山西緣，沿途經甲南、清水、沙鹿、龍井等地，南迄臺中市大肚區崁子頂一帶。位於后里台地、大肚台地及其西側海岸平原之接壤地帶（圖 1.3）。大甲斷層過去曾以甲南為界，以北稱為大甲斷層，以南稱為清水斷層，地礦中心在 2008 年起合稱為大甲斷層。斷層總長約 30 公里，呈北北東走向，為一向東傾斜之逆移斷層，屬於中部逆衝斷層系統中最前緣之斷層（林啟文等，2008；經濟部中央地質調查所，2016）。在斷層沿線雖未發現斷層露頭，但在地形上具有明顯的線形崖特徵，且於斷層上盤有多期河階被斷層截切之現象（沈淑敏等，2005）。此外，斷層沿線多數鑽井可見岩心受斷層作用產生的剪切紋理，依據岩心中沉積層與剪裂紋理的截切關係與定年資料，研判大甲斷層約在距今 3 萬年內曾經活動過（顏一勤，2015）。結合野外地質調查與比對鑽探岩心成果，斷層於近地表淺處的垂直移距約為 50 - 70 公尺（林啟文等，2008；林啟文等，2012）。

大地觀測顯示斷層近期仍為壓縮作用的逆滑形式為主（林啟文等，2008），近一步透過斷層模型進行模擬獲取大甲斷層之短期平均滑移虧損速率約為 2.4 mm/yr（陳建良等，2021）。此外，由碳十四定年結果估算的長期抬升速率約為 3.6 ± 1.9 mm/yr（陳文山，2016）。

大甲斷層向南可能與彰化斷層相銜接（圖 1.3），兩者以烏溪為界。此外，在大甲斷層東側存在另一條活動斷層－鐵砧山斷層（圖 1.3），亦有學者稱之為大甲東斷層，該斷層被認為是大甲斷層之背衝斷層（李元希與石瑞銓，2008）。地礦中心目前將大甲斷層與鐵砧山斷層列為第一類活動斷層。

2. 彰化斷層

彰化斷層，北起彰化縣和美鎮的烏溪南岸，向南延伸到濁水溪北岸的田中附近（圖 1.3）。斷層長約 36 公里，呈北北東轉南北走向，為一向東傾斜之逆移斷層。彰化斷層向北可能連接大甲斷層（圖 1.3），向南則可能連接桐樹湖斷層，屬於麓山帶逆衝斷層系統中之最前緣斷層（林啟文等，2008；林啟文等，2012；陳文山，2016）。在地形上，彰化斷層位於八卦台地及其西側彰化平原的接壤處，斷層於台地北段西緣呈直線狀崖，中段與南段呈現的斷層地形主要為三角切面（石再添與楊貴三，1985；沈淑敏等，2005）。斷層沿線並未發現斷層露頭，根據斷層北段鑽探資料與岩層比對結果，台地之下的岩層層序可能因為逆滑作用而重複出現，研判斷層可能截切晚更新世的地層，且該重複的層序位於井深 25 公尺以內，因此彰化斷層北段可能已逆衝至地表附近，為沖積層或山麓沖積物所覆蓋（陳華玟等，2007；陳勉銘等，2008）。斷層中至南段，八卦台地與彰化平原的岩層比對相當連續，僅反映背斜構造之形態，地下淺部並未有斷層存在之跡象，代表斷層前端尚未延伸至地表附近（林啟文等，2008）。又根據鑽探岩心與年代估算彰化斷層的長期抬升速率，顯示斷層下盤愈遠離斷層的沉降速率愈大，約為 -8 ~ -2 mm/yr；上盤的抬升速率約為 2.3 mm/yr；斷層的長期抬升速率則約 4.3 mm/yr（陳文山等，2010）。地礦中心目前將彰化斷層列為第一類活動斷層。

大地觀測顯示斷層近期仍以壓縮形式為主（林啟文等，2008），截至 2017 年，跨彰化斷層兩側之速度場，水平速度由 6 ~ 15 mm/yr 下降至 5 mm/yr，垂直速度則無顯著變化（陳江鑫等，2018）。近一步透過斷層模型進行模擬獲取彰化斷層之短期平均滑移虧損速率約為 3.9 mm/yr（陳建良等，2021）。

本年度之主要工作重點內容為（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潛勢為基礎，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，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；（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（圖 1.2）。前述之工作重點可細分如下：

1. 測量外業檢測與檢核部分

(1) 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（含臺南）地區、高屏（含橋頭）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、圖 1.4），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。

(2) 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（表 1.3、圖 1.4），同時針對精密水準測量成果之閉合差進行檢核（表 1.4、圖 1.5）。

表 1.3：GNSS 移動站預計施測與檢測時間表

Table 1.3: Schedule of campaign-mode GNSS surveying and validation.

預計施測月份	預計檢核月份	地區	測站數量
3 月	3 月	臺北地區	96
4 月	4 月	恆春半島地區	31
5 月	5 月	桃竹苗地區	83
6 月	6 月	嘉南（含臺南）地區	176
7 月	7 月	高屏（含橋頭）地區	115
8 月	8 月	中部地區	148
9 月	9 月	花東地區	97
10 月	10 月	宜蘭地區	36

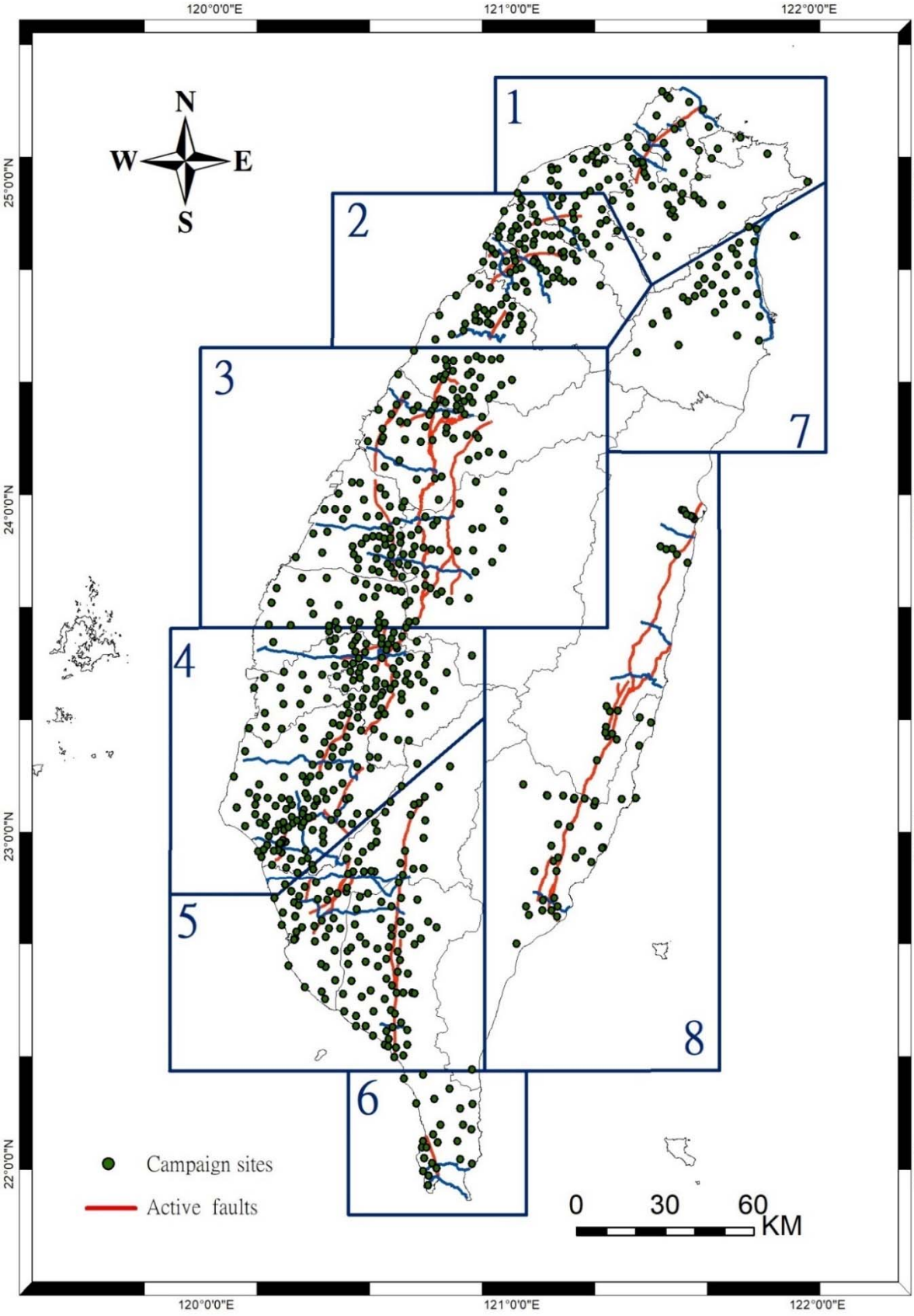


圖 1. 4：GNSS 移動站觀測分區圖。綠色圓圈為移動站，藍色框為移動站分區。

Figure 1. 4: Distribution and sections of campaign-mode GNSS stations. Green circles are campaign-mode GNSS stations and blue rectangles are sections.

表 1. 4：精密水準測線預計施測時間表

Table 1. 4: Schedule of leveling surveying.

測線編號	測線名稱	測線長度（km）		預計施測時間
		山區	平地	
1	石門–萬里測線	0	23	9 月
2	士林–三芝測線	8	2	9 月
3	淡水–士林測線	2	19	9 月
4	五股–臺北測線	1	17	9 月
5	信義測線	0	2	9 月*
6	新屋–童話世界測線	11	21	7 月
7	新竹–五峰測線	2	40	6 月
8	新竹–峨眉測線	5	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
12	五光–黃竹測線	1	15	8 月
13	曾厝–霧峰測線	0	6	8 月*
14	北勢–峰谷測線	0	9	8 月*
15	烏溪南岸測線	0	6	8 月*
16	草屯–埔里測線	0	16	3 月
17	王功–草屯測線	6	42	3 月
18	中興新村測線	0	7	8 月*
19	北斗–水里測線	6	40	3 月
20	金湖–瑞峰測線	39	53	9 月
21	B003－B092 測線	0	7	11 月*
22	B036－B086 測線	0	5	11 月*
23	B087－B080 測線	0	6	11 月*
24	B002－B059 測線	0	6	11 月*
25	B110－B101 測線	0	4	11 月*
26	B037－B095 測線	0	5	11 月*
27	G088－G330 測線	0	6	11 月*
28	北門–楠西測線	10	51	4 月
29	善化–關廟測線	0	26	10 月
30	安平–龍崎測線	6	46	5 月
31	路竹–茂林主線	8	47	4 月
32	路竹–茂林副線	2	19	4 月
33	岡山–安坡測線	3	51	5 月
34	佳冬–七佳測線	5	7	9 月
35	恆春西臺地–佳樂水	2	18	4 月
38	嶺頂–龍澗測線	0	15	10 月
39	光復–豐濱測線	9	13	10 月
40	紅葉–靜浦測線	16	17	10 月
41	東成–富岡測線	9	17	10 月
42	梗枋–東澳測線	9	50	10 月
43	玉井–新化測線	1	25	5 月
44	南樹林–鵝鑾鼻測線	2	17	4 月

測線編號	測線名稱	測線長度（km）		預計施測時間
		山區	平地	
45	車城–牡丹測線	0	13	4 月

註：精密水準測線預計施測時間表之「*」字號為四年施測一次之短測線。

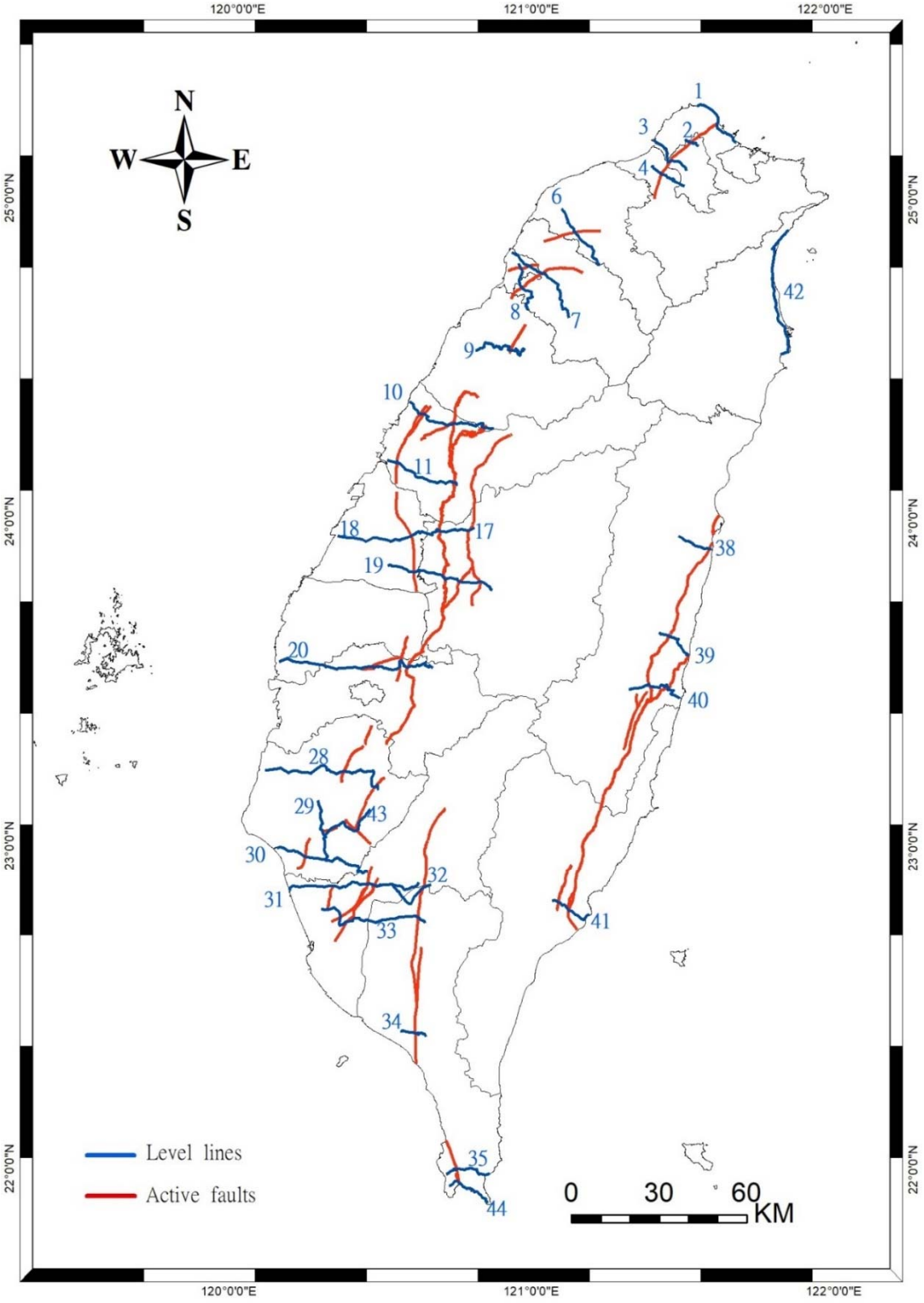


圖 1. 5：精密水準測線分布圖

Figure 1. 5: Distribution of leveling routes.

2. GNSS 連續站資料處理、解算與分析

處理地礦中心設置及與其它外單位交換之 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，進行中部地區主要斷層之幾何參數分析。

(2) 利用至少二種不同的斷層模型，結合斷層幾何，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. 重要區域及其鄰近地區之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進行分析，評估中部地區重要區域及其鄰近地區之斷層活動機率。

(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。

第二章、中部地區大地測量資料分析與重要區域三維速度場

2-1 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，已完成 GNSS 移動站共 147 個站點施測與分析（圖 2. 1）。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2. 2、圖 2. 3）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 AF24 及連續站 FNGU（圖 2. 2）與 GNSS 移動站 G300 及連續站 VR03（圖 2. 3），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

中部地區各觀測點位之速度場如圖 2. 4 和圖 2. 5，因 2007 年時間序列可看出有速度轉折，而 2013 年 6 月 M_L 6.5 之南投地震與 2022 年 9 月 M_L 6.8 的關山−池上地震，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、2013－2022 年以及 2022－2024 年 4 個時間段分別估算速度場。

中部地區各觀測點位之水平速度場如圖 2. 4 所示，由結果可知本區速度大致朝西北向運動，2002 - 2007 年速度約為 0.8 ~ 42.1 mm/yr，2007 - 2013 年速度約為 0.3 ~ 39.0 mm/yr，2013 - 2022 年速度約為 0.7 ~ 39.0 mm/yr，2022 - 2024 年速度約為 0.7 ~ 31.6 mm/yr。

垂直速度場如圖 2. 5，2002 - 2007 年速度約為 -45.1 ~ 12.4 mm/yr，2007 - 2013 年速度約為 -46.6 ~ 13.9 mm/yr，2013 - 2022 年速度約為 -56.2 ~ 12.9 mm/yr，2022 - 2024 年速度約為 -57.3 ~ 13.9 mm/yr。中部地區跨斷層之垂直速度大致以車籠埔斷層為界，以東顯著抬升，以西除局部地區為抬升外，均為沉降。此外，在彰化、雲林地區的平原地區至沿海一帶有相當大的沉陷量，沉降速度最大值約 -57.3 mm/yr；進入南投山區則呈抬升，最大速度可達到約 13.9 mm/yr。

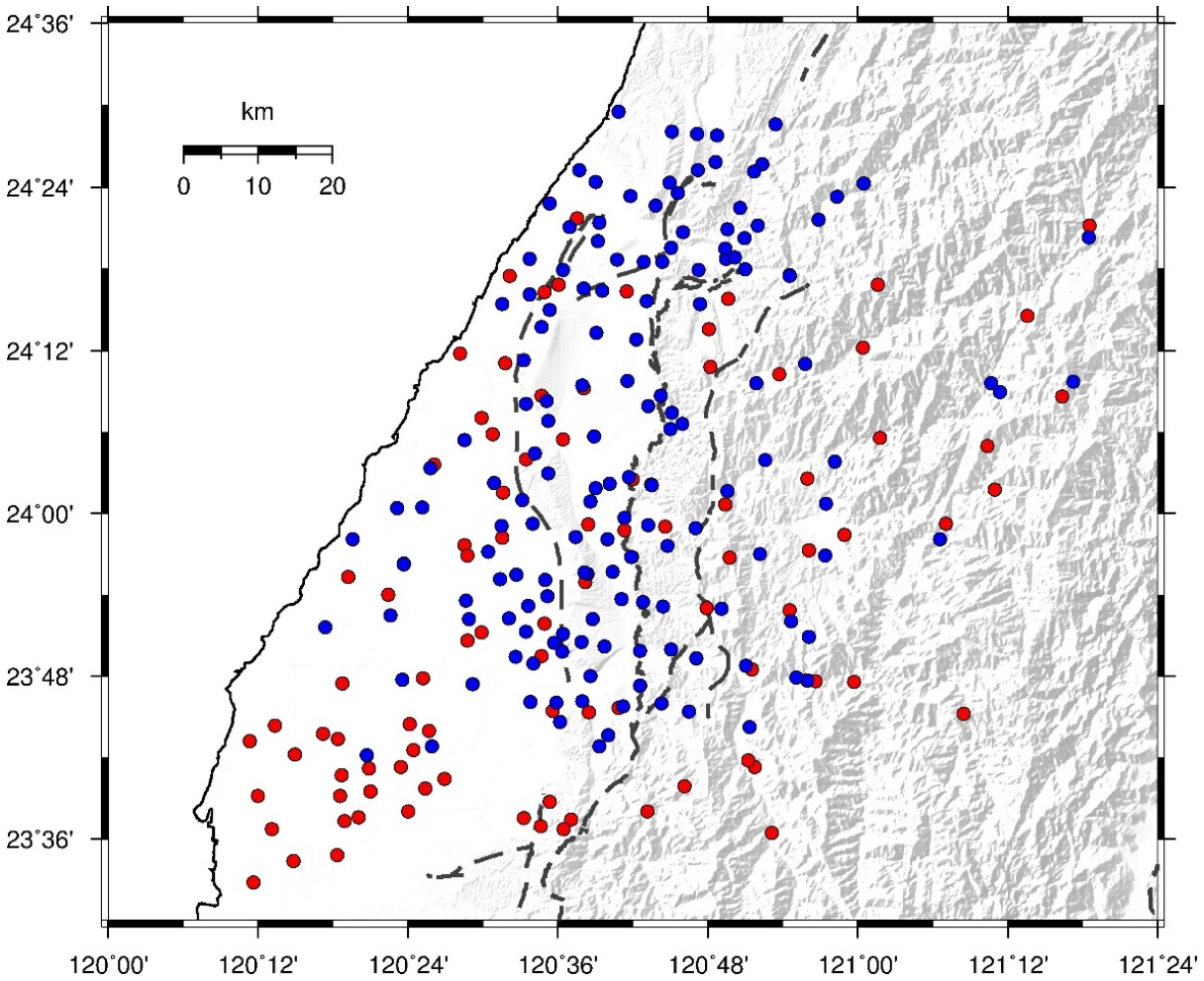


圖 2. 1：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 1: GNSS distribution in central Taiwan. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

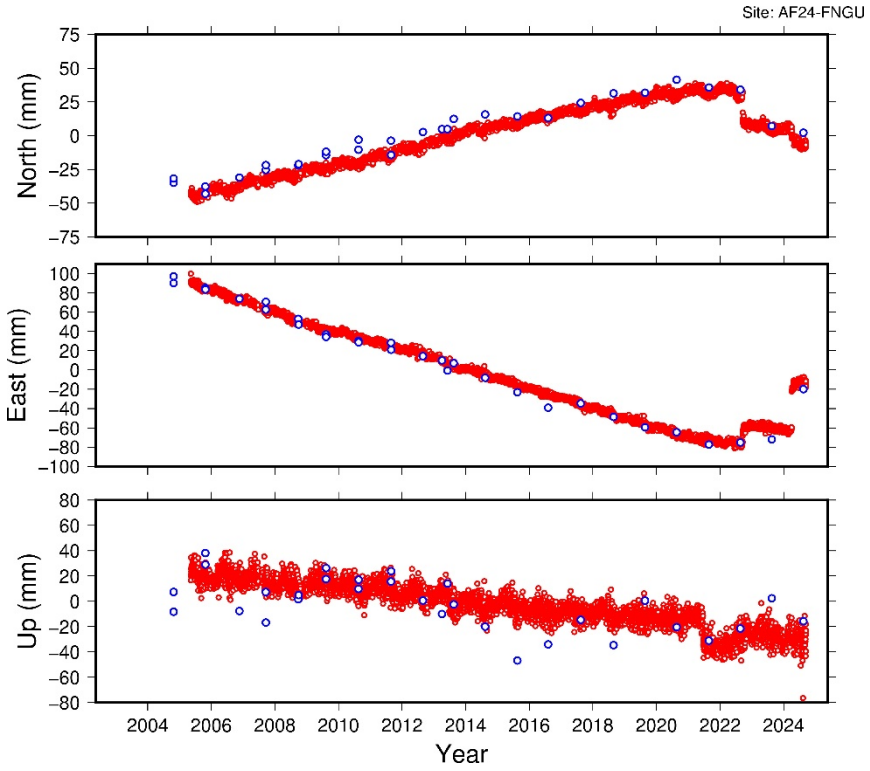


圖 2. 2：移動站 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

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

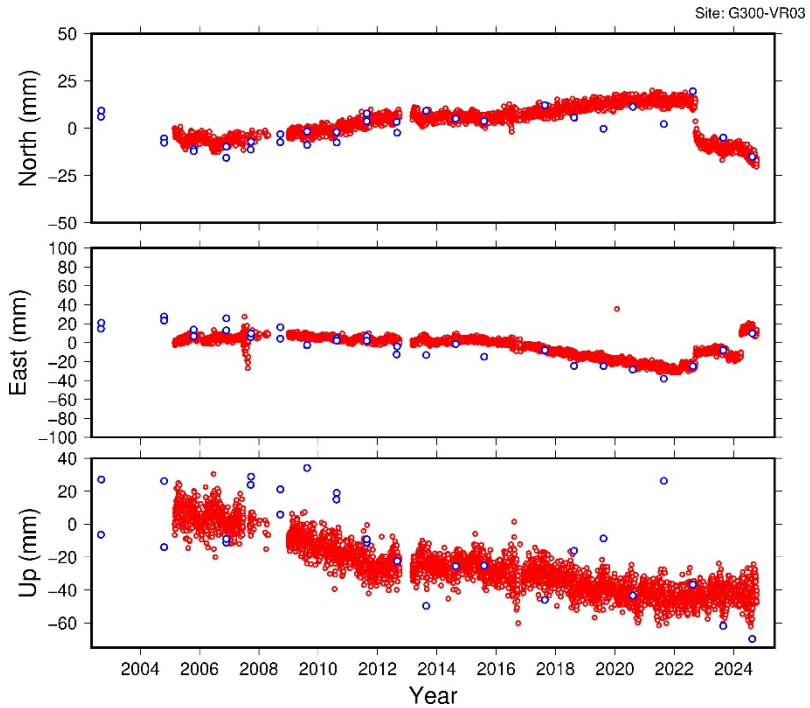


圖 2. 3：移動站 G300 與連續站 VR03 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 3: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G300 (blue circles) and continuous GNSS station VR03 (red circles).

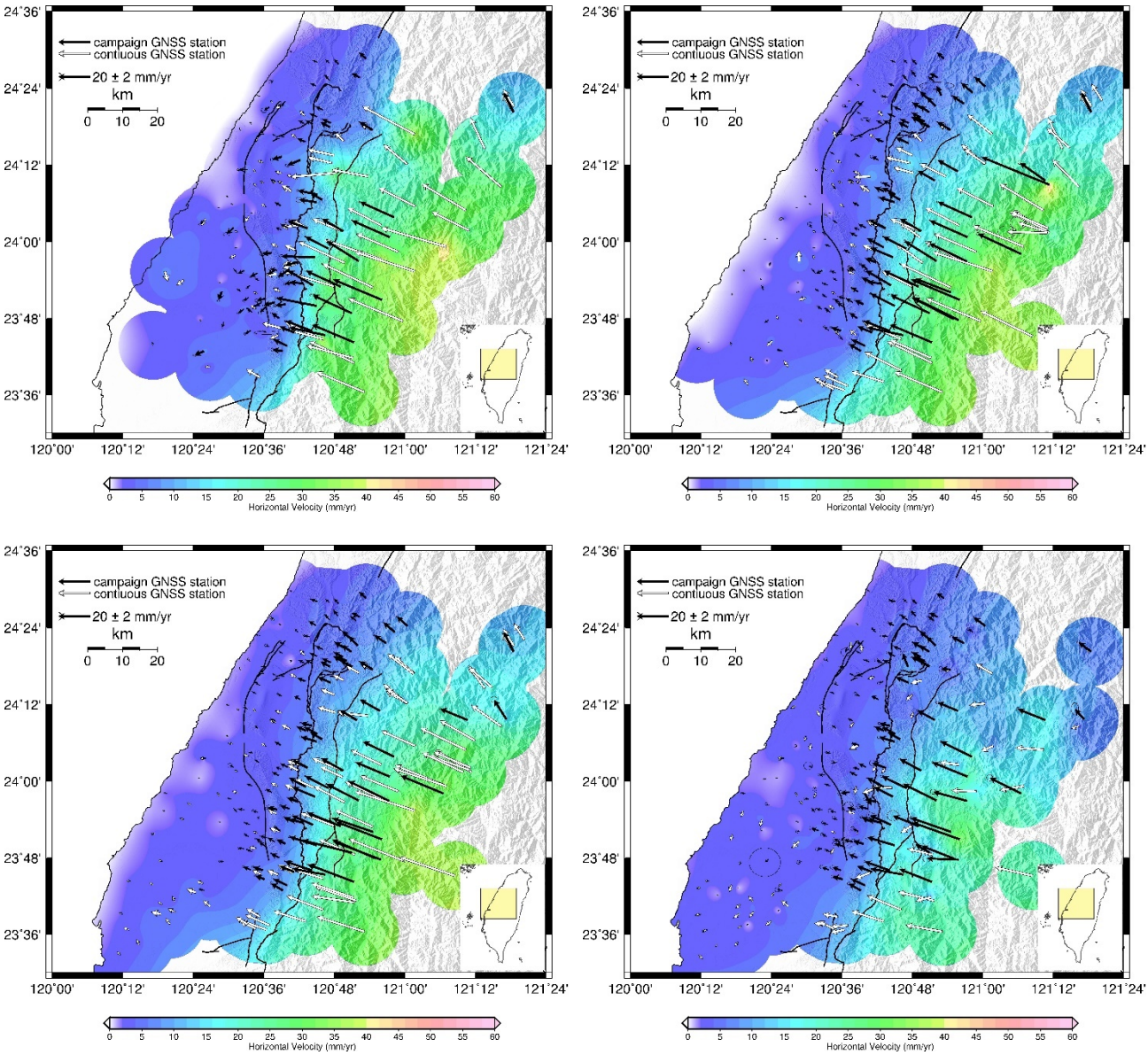


圖 2.4：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左上圖表示 2002 - 2007 年速度場；右上圖表示 2007 - 2013 年速度場；左下圖表示震後 2013 - 2022 年速度場；右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 4: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in central Taiwan. The top left figure is the velocity field from 2002-2007; the top right one is from 2007-2013; the bottom left is from 2013-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

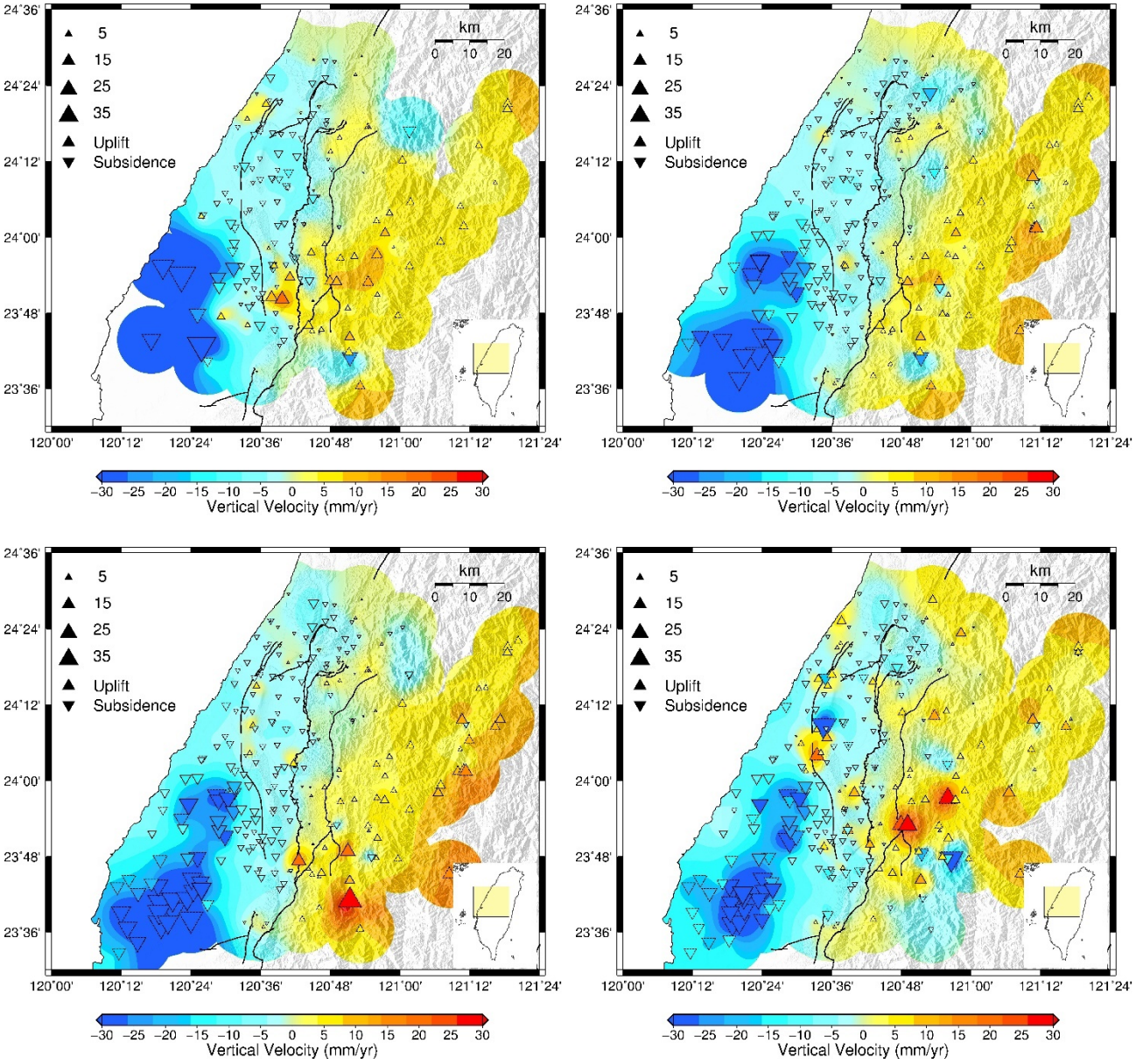


圖 2. 5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2007 年速度場，右上圖表示 2007 - 2013 年速度場，左下圖表示震後 2013 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 5: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in central Taiwan. The top left figure is the velocity field from 2002-2007; the top right one is from 2007-2013; the bottom left is from 2013-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2 中部地區精密水準測線

2-2-1 大安至東勢測線

大安至東勢測線（水準測線編號 10）橫跨大甲−彰化斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層（圖 2.7），測線長 30.2 公里（投影至剖面的長度）。2015 年後段陸續增設 15 個測站跨越車籠埔斷層，且由 GF44（卓蘭國小）延伸副測線（水準測線編號 10A）至 GF45（卓蘭中學）。從 2004 年至 2024 年止共計有 20 次施測，點位與 2023 年相比無增減，G920（明正國小）以東之水準點因測量次數過少建議持續監測。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 2.8，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

本測線使用 GNSS 連續站 GS36 之垂直速度（-1.627 mm/yr）作為約制，自 2008 年以來校正 G896 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 2.6），兩站點相距 1.58 公里。

大安−東勢測線各水準點之垂直速度多在 -4.0 mm/yr 至 2.0 mm/yr 間（圖 2.7），且自鐵砧山至屯子腳斷層間（G899 東陽國小至 G174 內埔國小）持續呈現下陷（約 -1.0～-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（G916 貓仔坑至 G920 明正國小）逐漸由 -4.0 mm/yr 增加至 -2.0 mm/yr 至測線末端的 2.0 mm/yr 間，反映三義斷層的上盤相對其下盤正持續抬升，且從三義斷層跨越車籠埔斷層後有約 3～4 mm/yr 的抬升量。

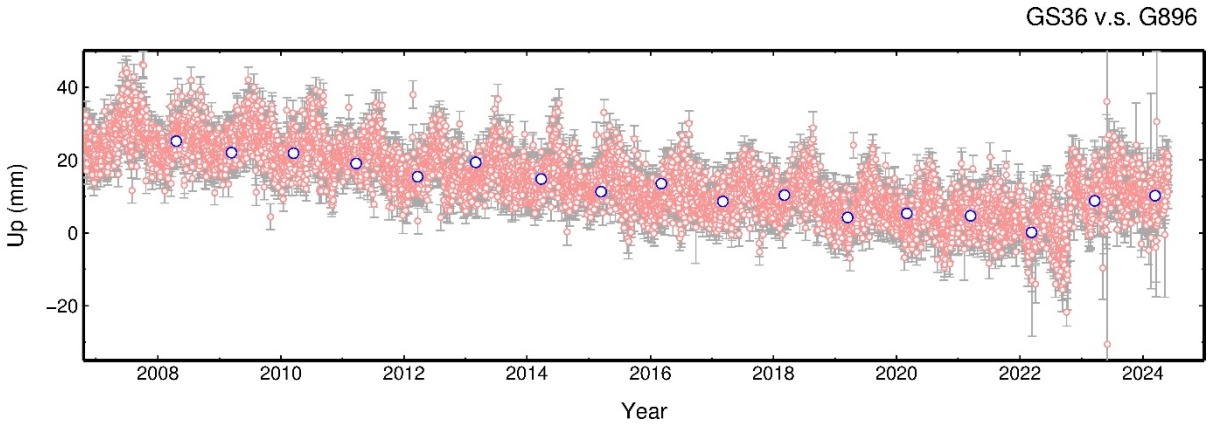


圖 2.6：大安至東勢水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較，兩者相距 1.58 公里。

Figure 2.6: Time series comparison between Da'an-Dongshi leveling bench mark G896 and continuous GNSS station GS36. The distance between two stations are 1.58 km.

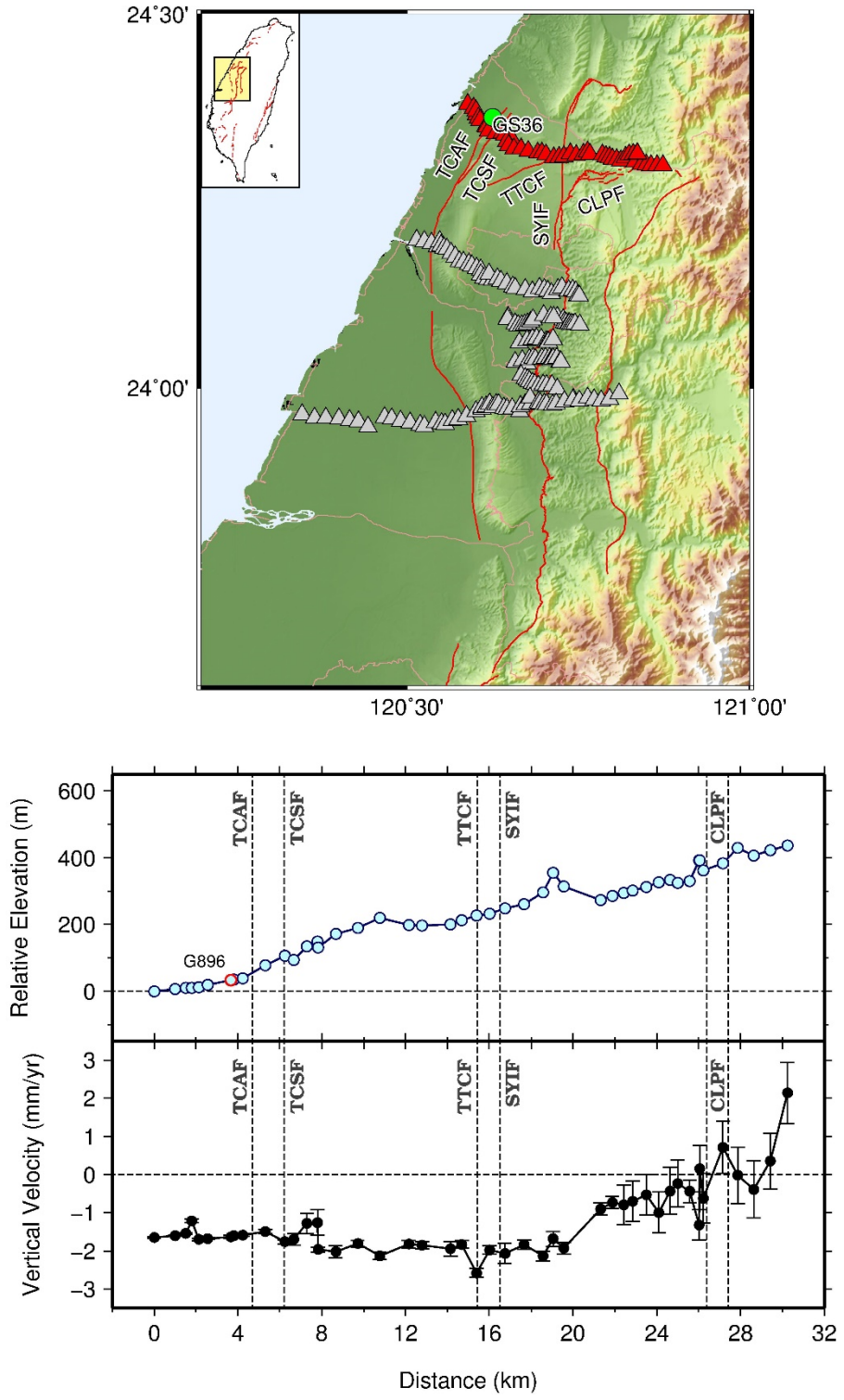


圖 2. 7：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 7: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, SYIF is Sanyi fault, and CLPF is Chelungpu fault.

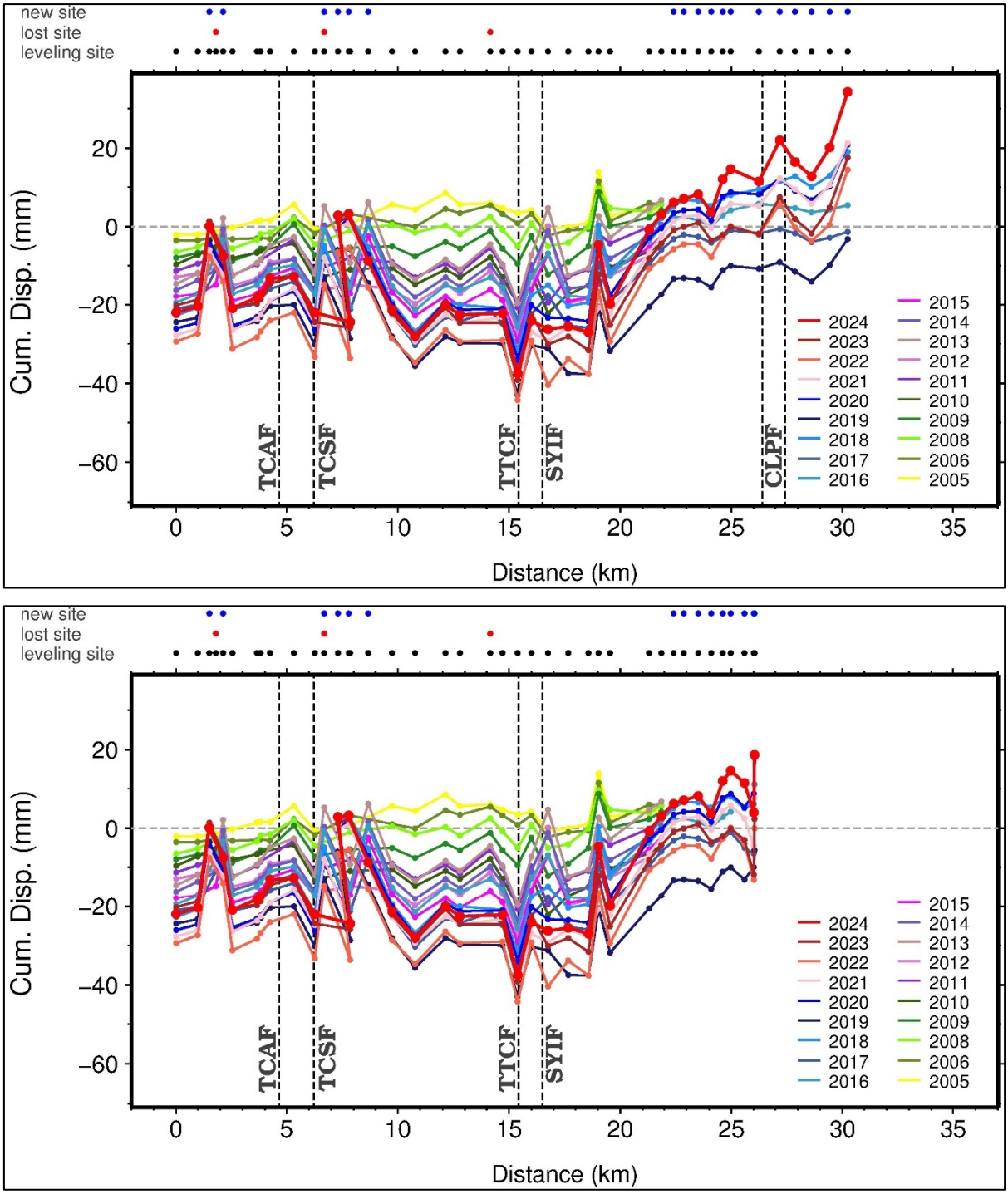


圖 2. 8：縣 132_大安至東勢測線水準累積高程差。上圖為主線 10，下圖為 10 及副線 10A。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 8: Cumulative elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. The top figure is leveling route 10, and the bottom one is leveling route 10 and 10A. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, SYIF is Sanyi fault, and CLPF is Chelungpu fault.

2-2-2 龍井至太平測線

龍井至太平測線（水準測線編號 11）橫跨大甲−彰化斷層以及車籠埔斷層（圖 2. 10），測線長約 25.5 公里（投影至剖面的長度）。於 2004 至 2024 年間共進行 21 次的施測，點位與 2023 年相比無增減。本測線以 GNSS 連續站 LSB0 之 2013 年地震前垂直速度（-4.109 mm/yr），及 2013 年震後至今之垂直速度（-1.879 mm/yr）作為約制，自 2007 年以來校正 G937 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 2. 9），兩站點相距 0.86 公里。

此測線之垂直速度在兩個斷層之間數值大多落在 -6～0 mm/yr 之間，可說明跨越此兩斷層之區域在 1999 年集集地震後有持續性的運動，因受 2013 年 6 月 2 日 M_L6.5 的南投地震影響，此測線 2013 年 6 月前之垂直速度在兩個斷層間之垂直速度在 -2.0～-6.0 mm/yr 之間，而 2013 年 6 月後之垂直速度減小，其值在 -0.5～-5.0 mm/yr 之間，（圖 2. 10），整體沉降速度趨緩。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 2. 11，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

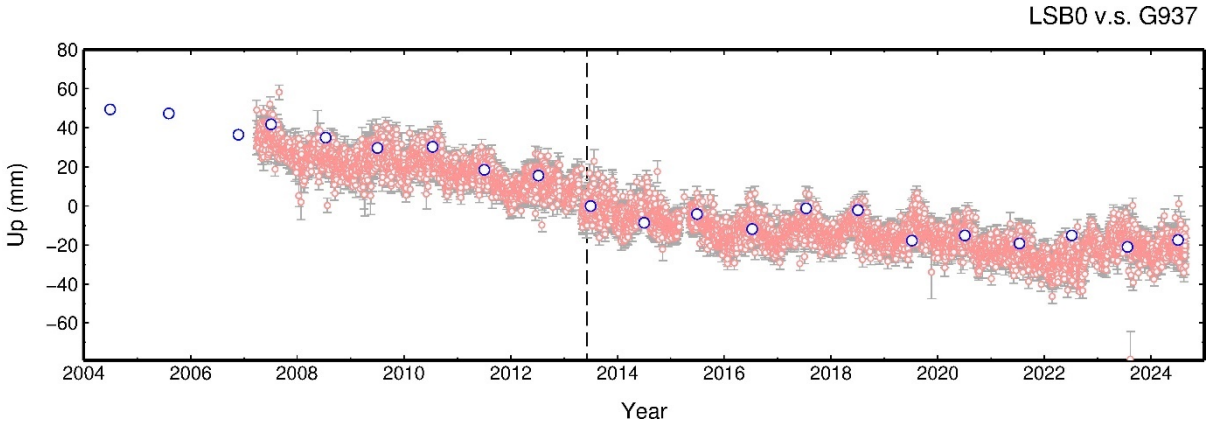


圖 2. 9：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.86 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 9: Time series comparison between Longjing-Taiping leveling bench mark G937 and continuous GNSS station LSB0. The distance between two stations are 0.86 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

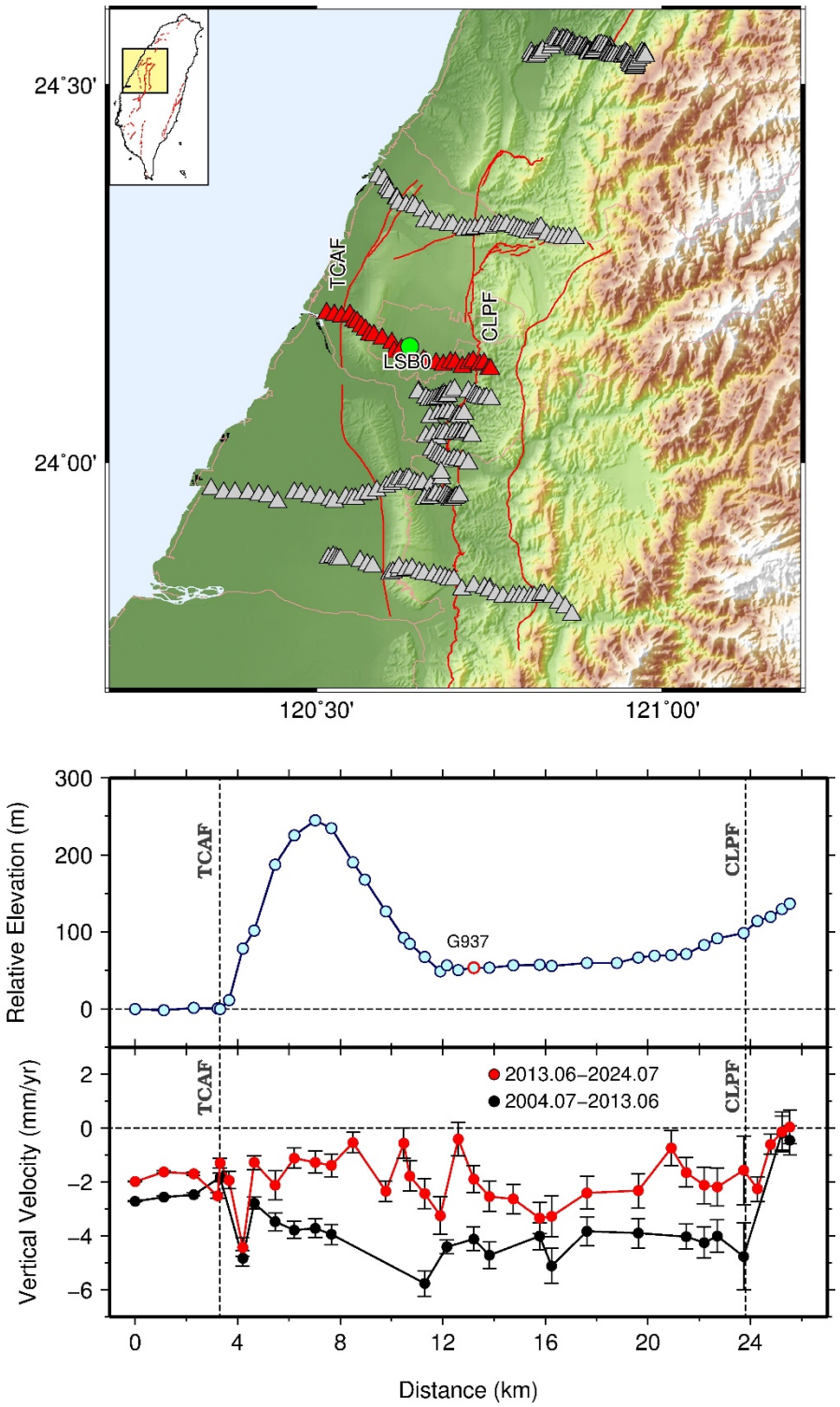


圖 2. 10：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度，黑色為 2004 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 至至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，TCAF 為大甲斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 10: 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. Black is the vertical velocity before the Nantou earthquake of 2004-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. TCAF is Tachia fault, CLPF is Chelungpu fault.

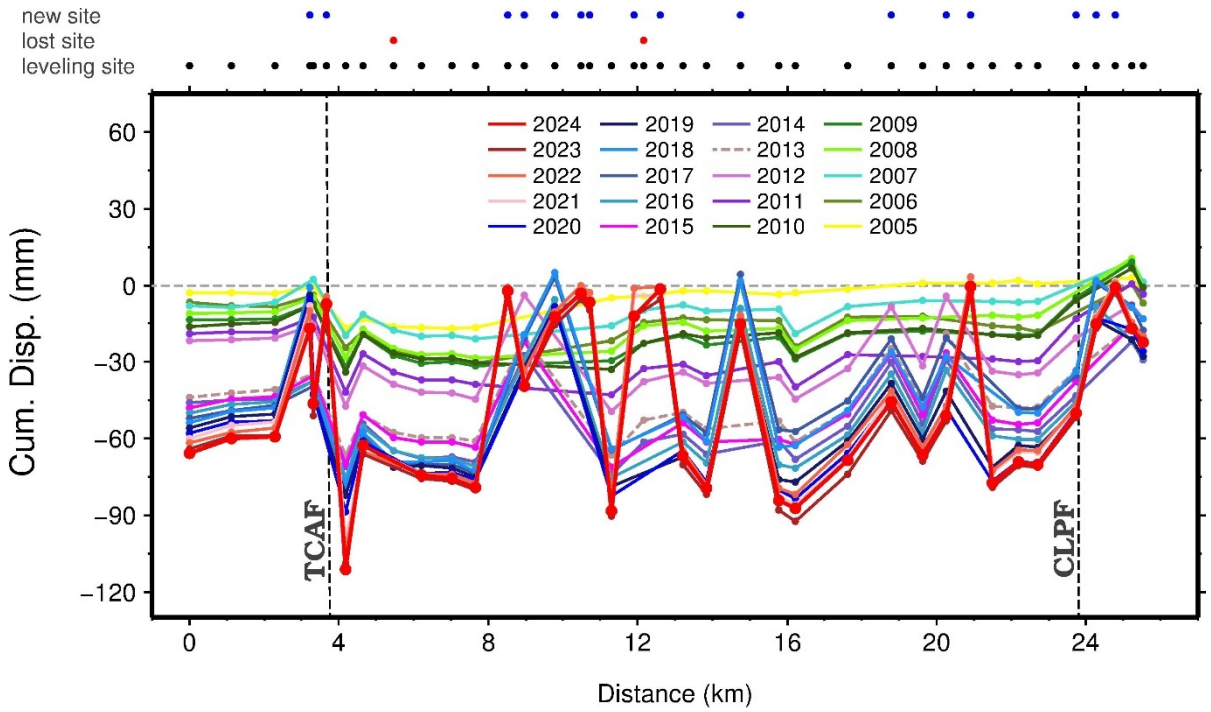


圖 2. 11：縣 136_龍井至太平測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，TCAF 為大甲斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 11: Cumulative elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. TCAF is Tachia fault, CLPF is Chelungpu fault.

2-2-3 五光至黃竹測線

五光至黃竹測線（水準測線編號 12）橫跨車籠埔斷層（圖 2. 13），總長為 11.0 公里（投影至剖面的長度）。自 2006 至 2024 年止共計施測 19 次，每年施測一次，點位與 2023 年相比無增減。本測線使用 GNSS 連續站 GS23 之垂直速度（-2.536 mm/yr）作為約制，自 2008 年以來校正 AF15 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 2. 12），兩站點相距 0.04 公里。

從垂直速度變化來看，此測線呈現穩定以 0 ~ -3 mm/yr 之速度下陷（圖 2. 13）。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 2. 14，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

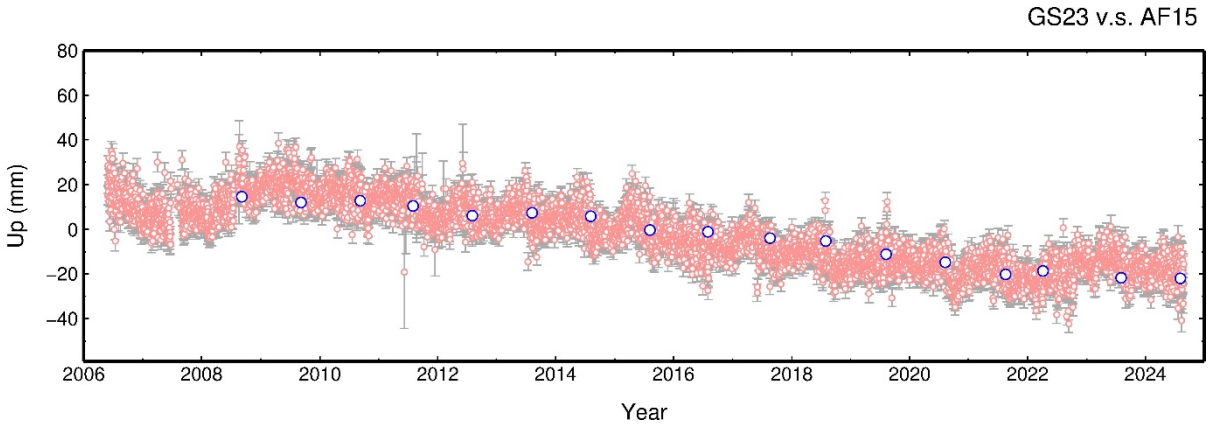


圖 2. 12：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.04 公里。

Figure 2. 12: Time series comparison between Wuguang-Huangzhu leveling bench mark AF15 and continuous GNSS station GS23. The distance between two stations are 0.04 km.

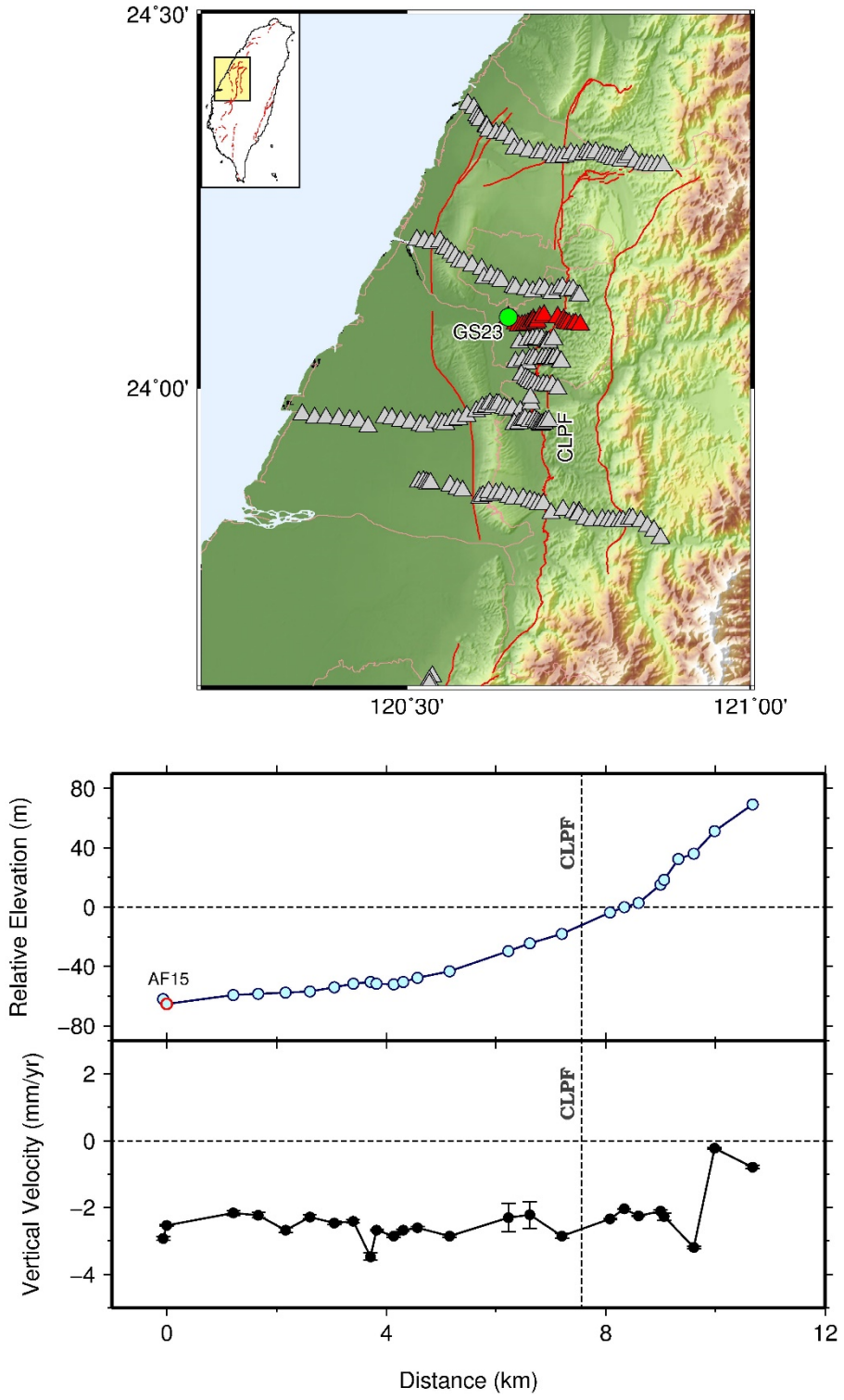


圖 2. 13：五光至黃竹測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 13: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CLPF is Chelungpu fault.

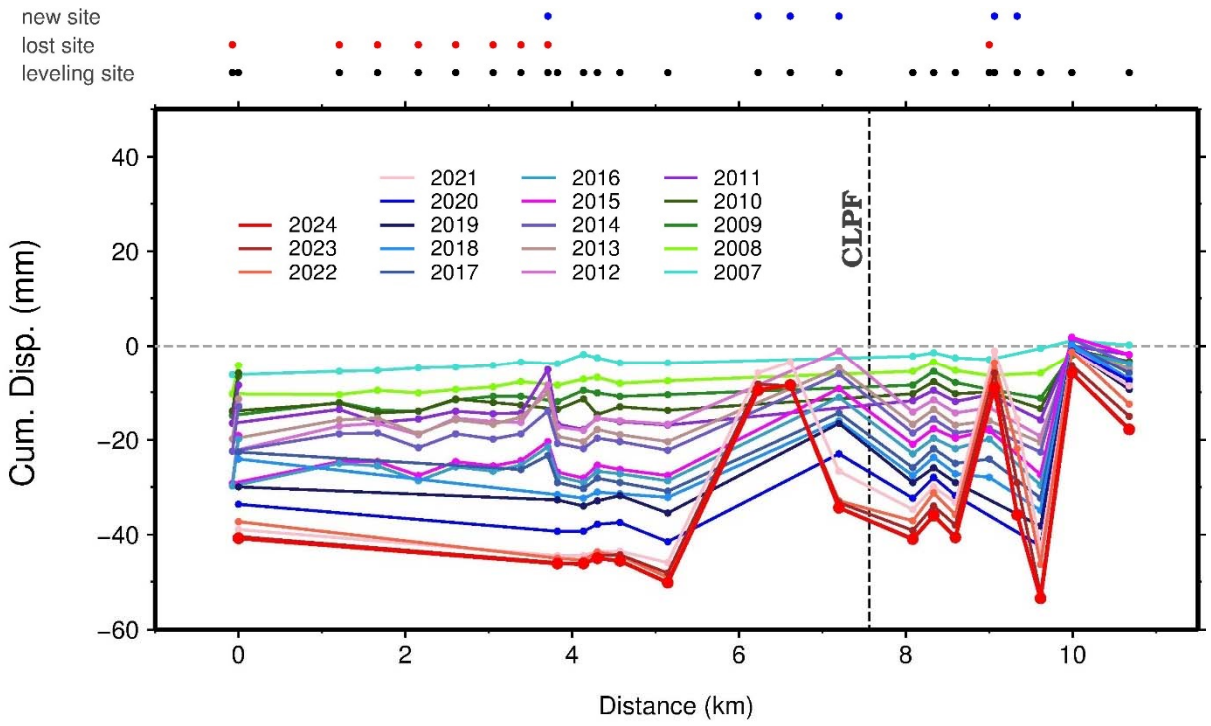


圖 2. 14：五光至黃竹測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 14: Cumulative elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CLPF is Chelungpu fault.

2-2-4 王功至草屯至埔里測線

王功至草屯至埔里測線（水準測線編號 16、17）橫跨大甲−彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔−雙冬斷層（圖 2. 16），總長為 47.0 公里（投影至剖面的長度）。從 2002 年至 2024 共計有 21 次施測，點位與 2023 年相比無增減。測線第一次觀測於 2002 年但僅測至草屯（X115），2004 年後延長至埔里（C015），因此測線 16 及 17 從 2004 年以後，可視為一條測線。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 2. 17，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

本測線受 2013 年 6 月 2 日 M_L6.5 的南投地震影響，因此以 GNSS 連續站 CAOT 之 2013 年地震前垂直速度（-2.328 mm/yr）及 2013 年震後至今之垂直速度（-5.302 mm/yr）作為約制，自 2005 年以來校正 T075 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 2. 15），兩站點相距 0.32 公里。

彰化斷層以西（王功至員東國小）可見明顯之地層下陷現象（圖 2. 17），其沉陷速度最大可達約 55.0 mm/yr，但高程地形卻沒有太大的變化（圖 2. 16）；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（圖 2. 16）。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（圖 2. 16）。

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，2002 至 2013 年間達 56 mm/yr，而 2014 至 2024 年間減緩至 29 mm/yr，而從彰化斷層至大茅埔−雙冬斷層間則顯示些微抬升達 5 ~ 7 mm/yr。

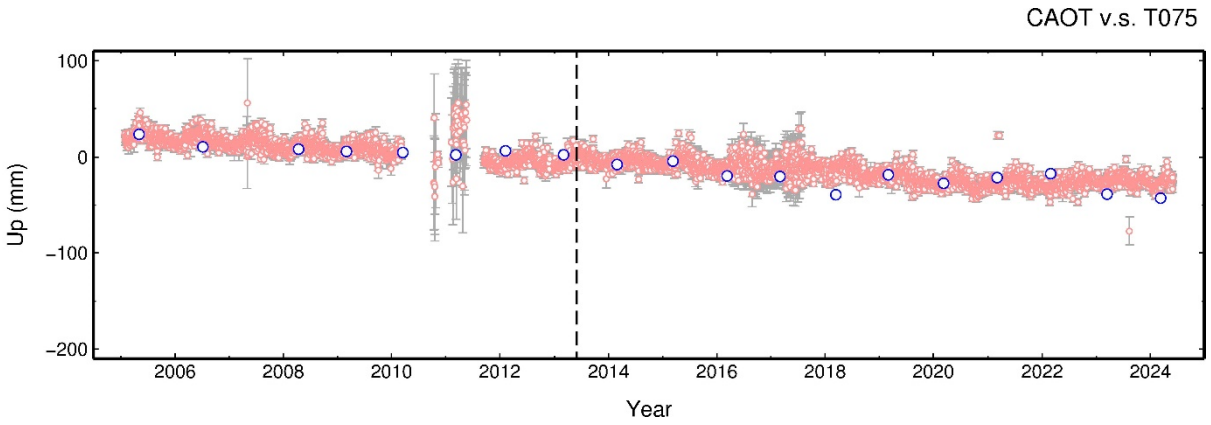


圖 2. 15：王功至草屯至埔里測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.32 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 15: Time series comparison between Wanggong-Caotun and Caotun-Puli leveling bench mark T075 and continuous GNSS station CAOT. The distance between two stations are 0.32 km. The dashed line is June 2nd 2013 Nantou earthquake.

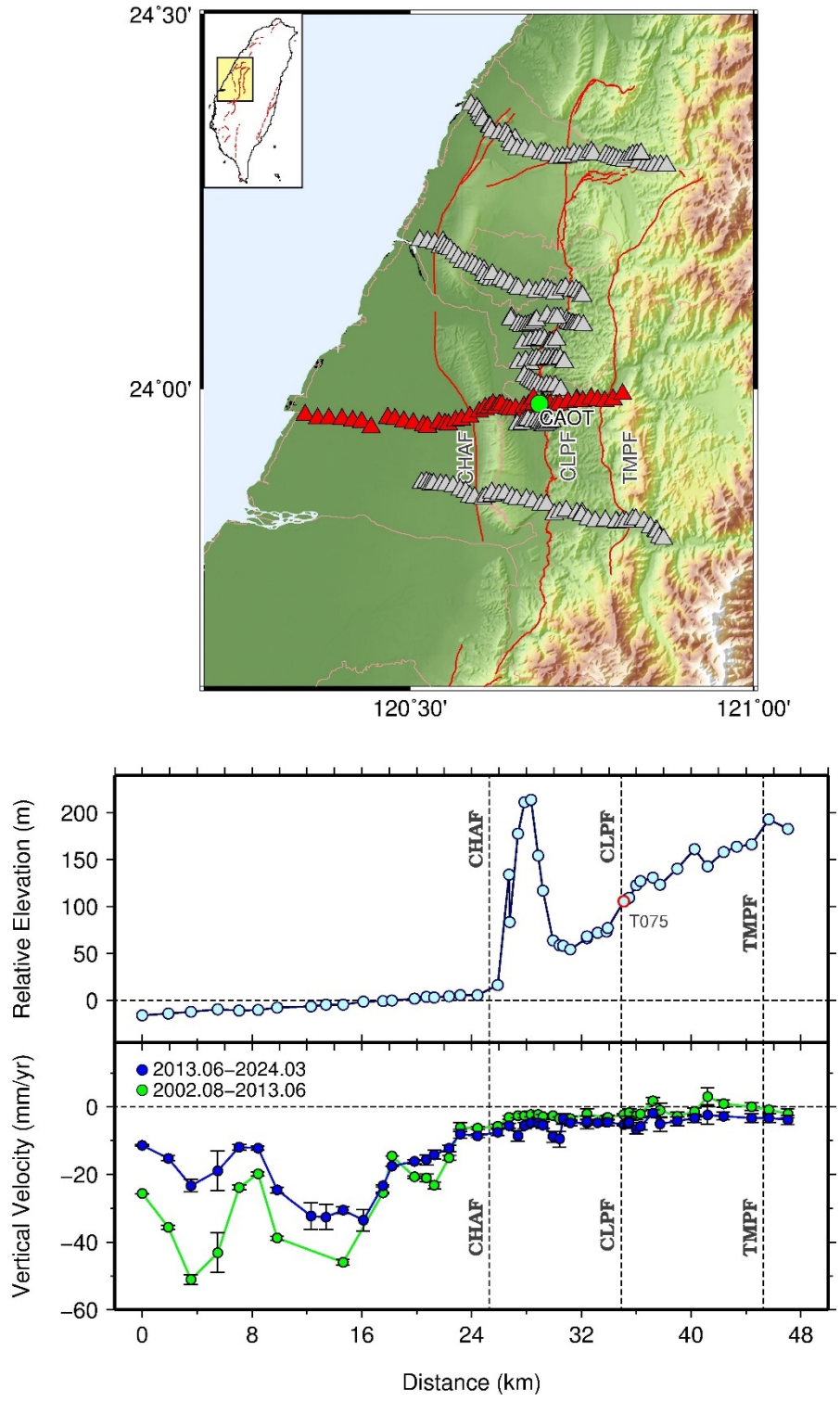


圖 2. 16：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度，綠色為 2002 - 2013 年南投地震震前垂直速度，藍色為 2013 年至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 16: Elevation change of the Wanggong-Caotun and Caotun-Puli 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 Nantou earthquake of 2002 - 2013, and blue is the vertical velocity from 2013 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

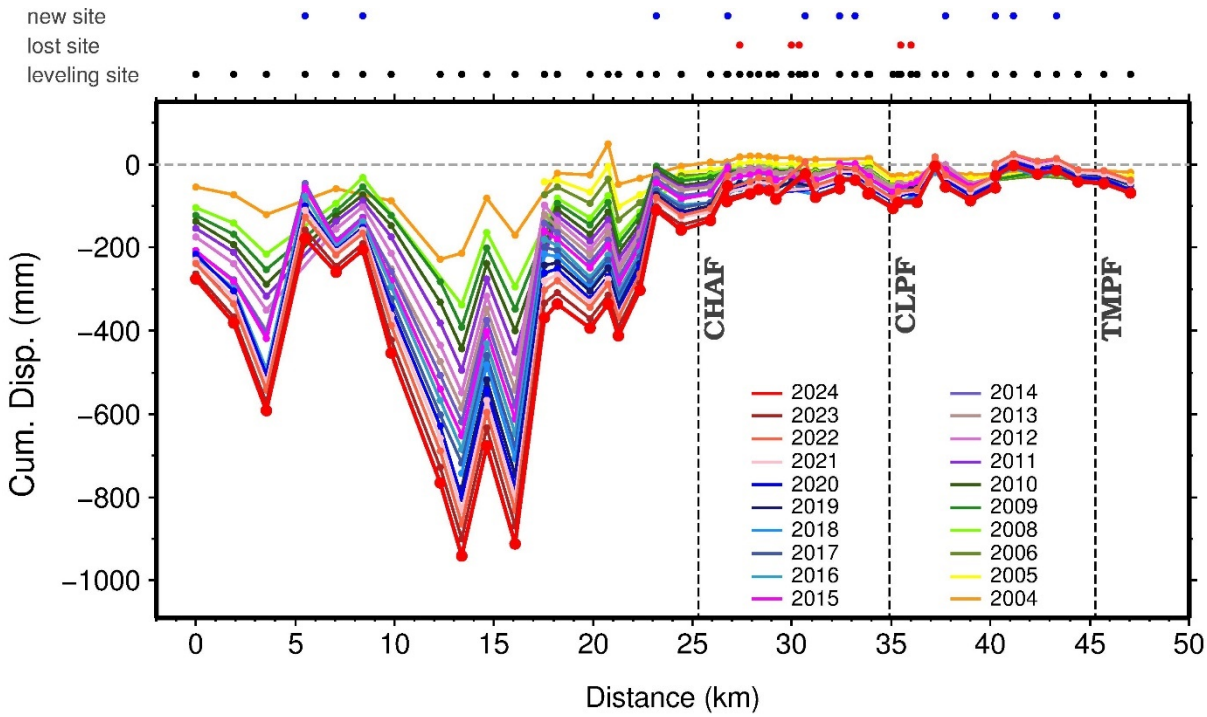


圖 2. 17：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 17: Cumulative elevation change of the Wanggong-Caotun and Caotun-Puli leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-2-5 北斗至水里測線

北斗至水里測線（水準測線編號 19）橫跨大甲−彰化斷層、車籠埔斷層、初鄉斷層以及大茅埔−雙冬斷層（圖 2. 19），測線長 36.8 公里（投影至剖面的長度）。從 2002 年至 2024 年共計有 21 次施測，本測線測量點位經查證後已確認測量椿點 G279（富山）已損毀，無法繼續觀測。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 2. 20，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

本測線受 2013 年 6 月 2 日 M_L6.5 的南投地震影響，因此以 GNSS 連續站 GS26 之 2013 年地震前垂直速度（-1.542 mm/yr）及 2013 年震後至今之垂直速度（-3.141 mm/yr）作為約制，自 2006 年以來校正 MX83 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 2. 18），兩站點相距 1.53 公里。

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 2. 19，2007 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，其抬升速度由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr。

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

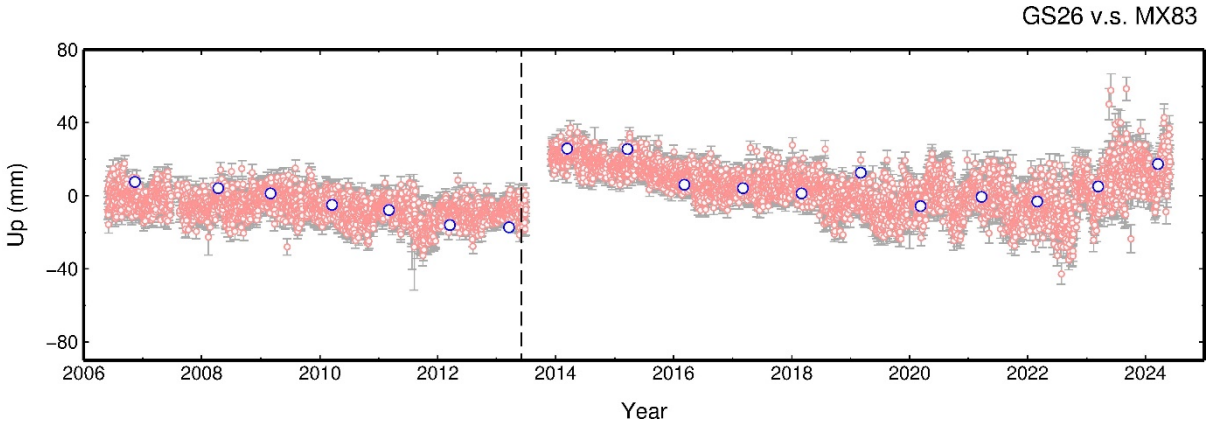


圖 2. 18：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.53 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 18: Time series comparison between Beidou-Shuili leveling bench mark MX83 and continuous GNSS station GS26. The distance between two stations are 1.53 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

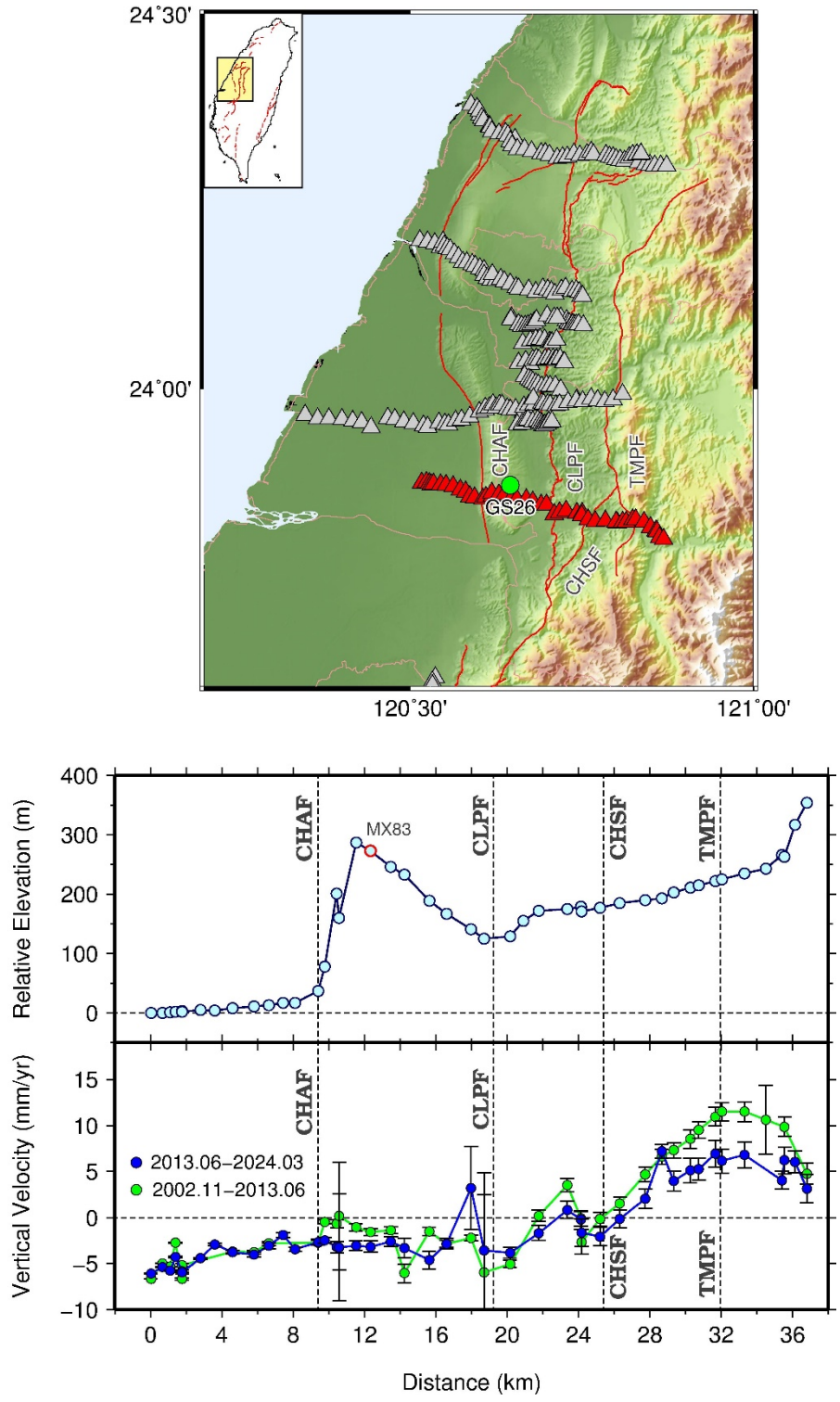


圖 2. 19：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度，綠色為 2002 - 2013 年南投地震震前垂直速度，藍色為 2013 年至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、CHSF 為初鄉斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 19: Elevation change of the Beidou-Shuili 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 Nantou earthquake of 2002-2013, and blue is the vertical velocity from 2013 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, CHSF is Chuhsiang fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

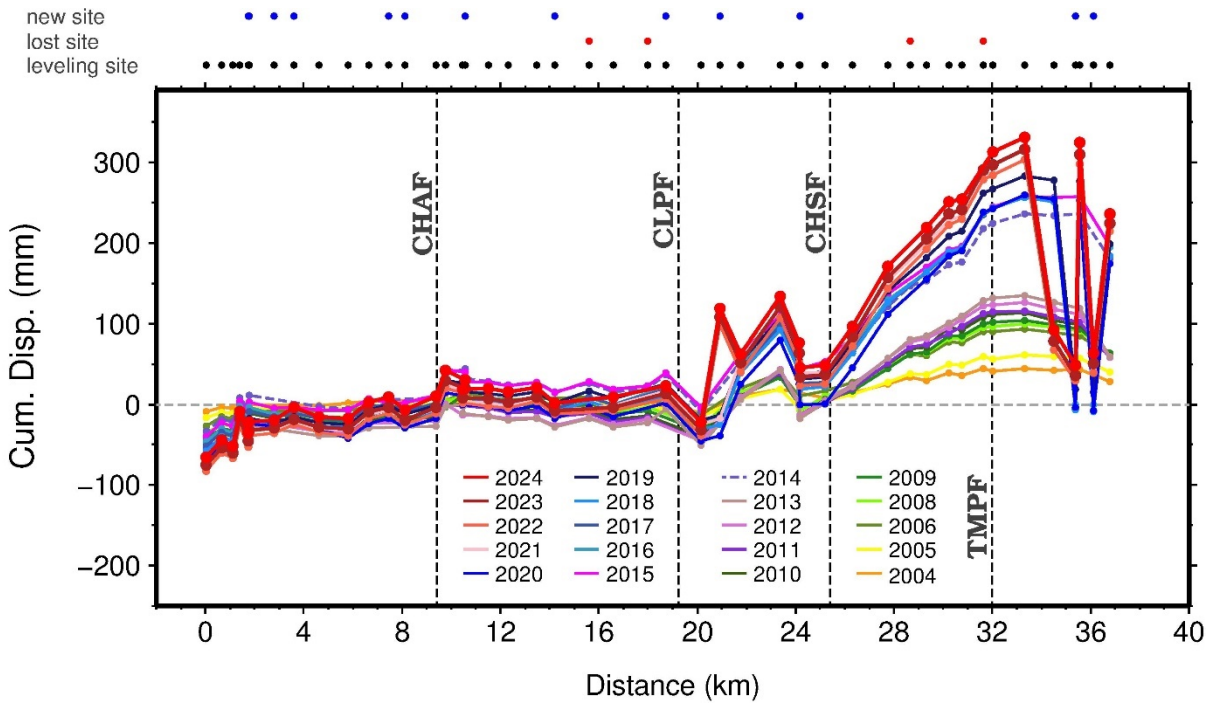


圖 2. 20：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、CHSF 為初鄉斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 20: Cumulative elevation change of the Beidou-Shuili leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, CHSF is Chuhsiang fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-2-6 中部地區精密水準測量資料可靠度分析

為了分析中部地區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。中部地區依據速度變化與同震事件可分為 4 期：2002－2007 年、2007－2013 年、2013－2022 年、2022－2024 年，無論是水準、GNSS 連續站與 GNSS 移動站速度場型態都有相當好的一致性（圖 2. 21），尤其在彰化沿海地區都有顯著的沉陷量，向東進入丘陵山區則呈現抬升。

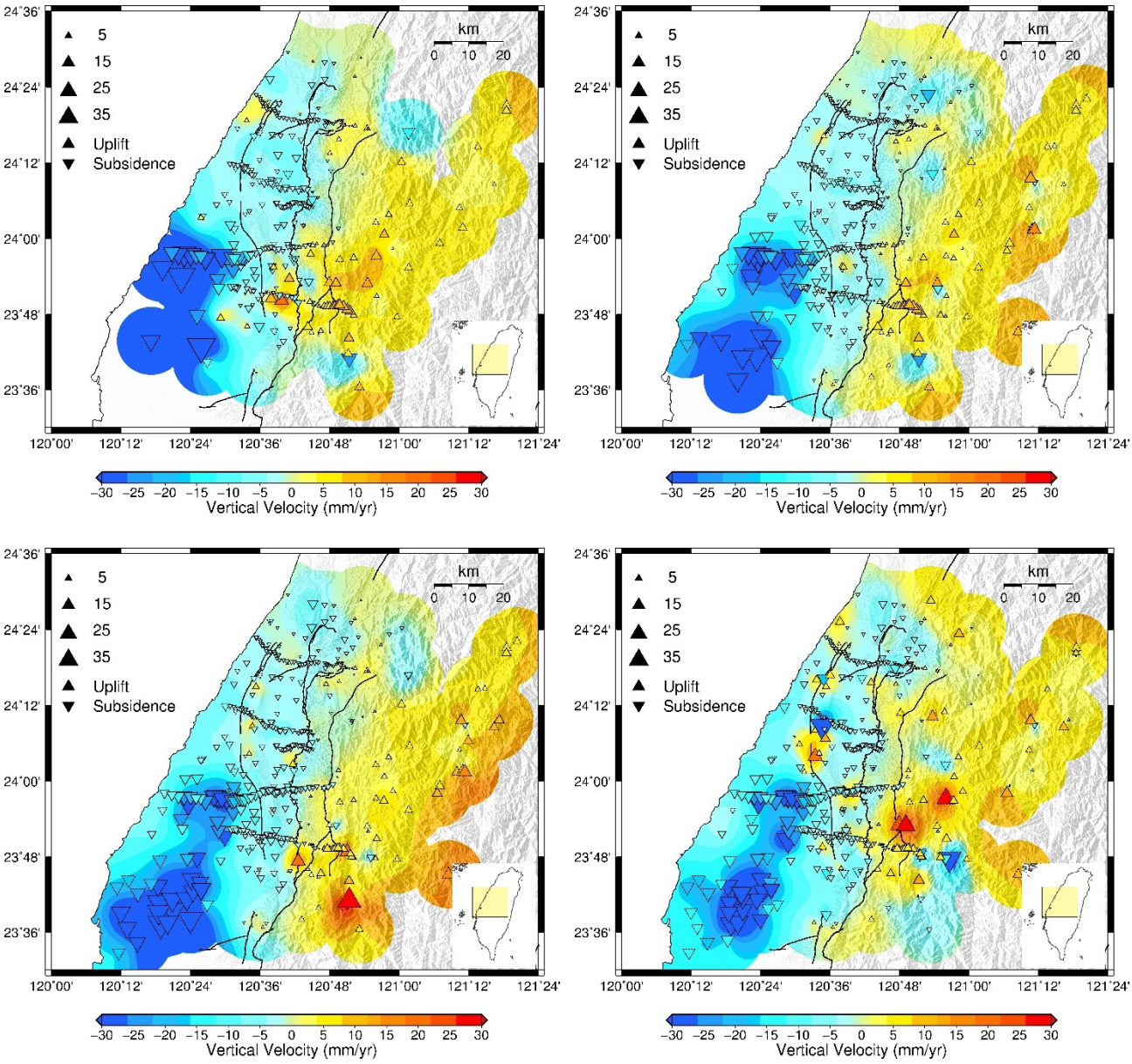


圖 2. 21：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2007 年速度場，右上圖表示 2007 - 2013 年速度場，左下圖表示震後 2013 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 21: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in central Taiwan. The top left figure is the velocity field from 2002-2007; the top right one is from 2007-2013; the bottom left is from 2013-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-3 重要區域三維速度場分析

2-3-1 重要區域水平與垂直速度場

本年度之重要區域範圍有臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）與臺中市精密機械科技創新園區，緊鄰重要區域的兩條斷層為大甲斷層及彰化斷層，另臺中都會區西側有車籠埔斷層通過。重要區域之水平速度場如圖 2. 22，垂直速度場如圖 2. 23。

本區依據速度變化與同震事件分為 4 期：2002 - 2007 年、2007 - 2013 年、2013 - 2022 年、2022 - 2024 年。水平速度大致朝西北向運動，並大致以三義斷層與車籠埔斷層為界，向東遞增、向西遞減，重要區域所在的區域速度值大約落在 2 ~ 15 mm/yr（圖 2. 22）。在垂直速度場部分，在跨斷層上、下盤兩側，除車籠埔斷層南段之外，基本上沒有垂直速度上的變化。臺中盆地呈沉陷，周遭的丘陵、台地則呈抬升，在彰化斷層以西的彰化、雲林地區存在最大的下陷量，沉降速度值最大約為 -57.3 mm/yr；進入南投山區則呈抬升，最大速度值達到約 13.9 mm/yr。重要區域主要坐落在臺中盆地北部，垂直速度大約落在 -2 ~ 2 mm/yr（圖 2. 23）。

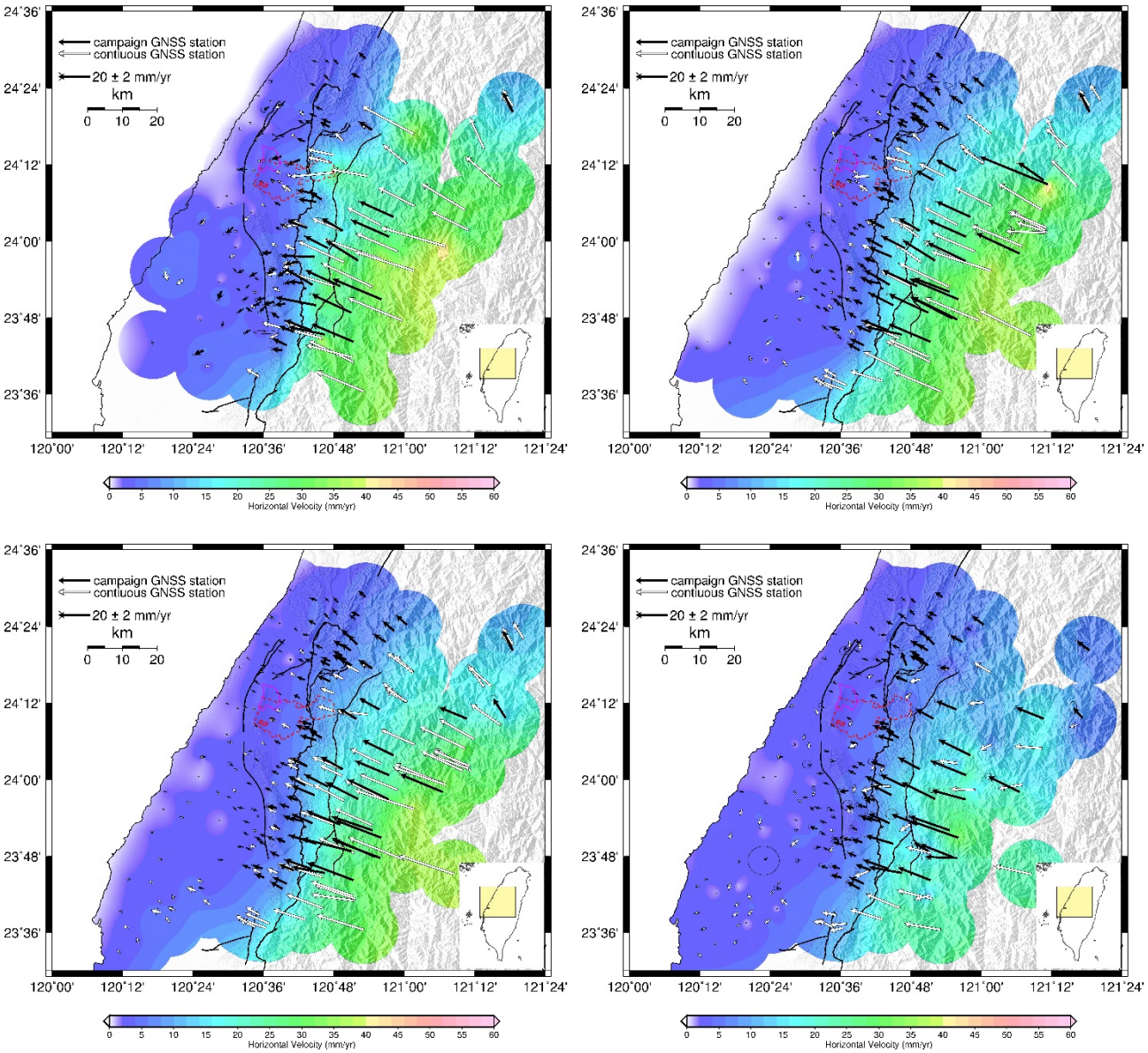


圖 2. 22：重要區域相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左上圖表示 2002 - 2007 年速度場；右上圖表示 2007 - 2013 年速度場；左下圖表示震後 2013 - 2022 年速度場；右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。紅線為重要區域–臺中都會區、中部科學園區臺中園區與臺中市精密機械科技創新園區。

Figure 2. 22: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the object areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2007; the top right one is from 2007-2013; the bottom left is from 2013-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities. Red line is the object areas of Taichung City, Central Taiwan Science Park and Taichung City Precision Machinery Innovation Technology Park.

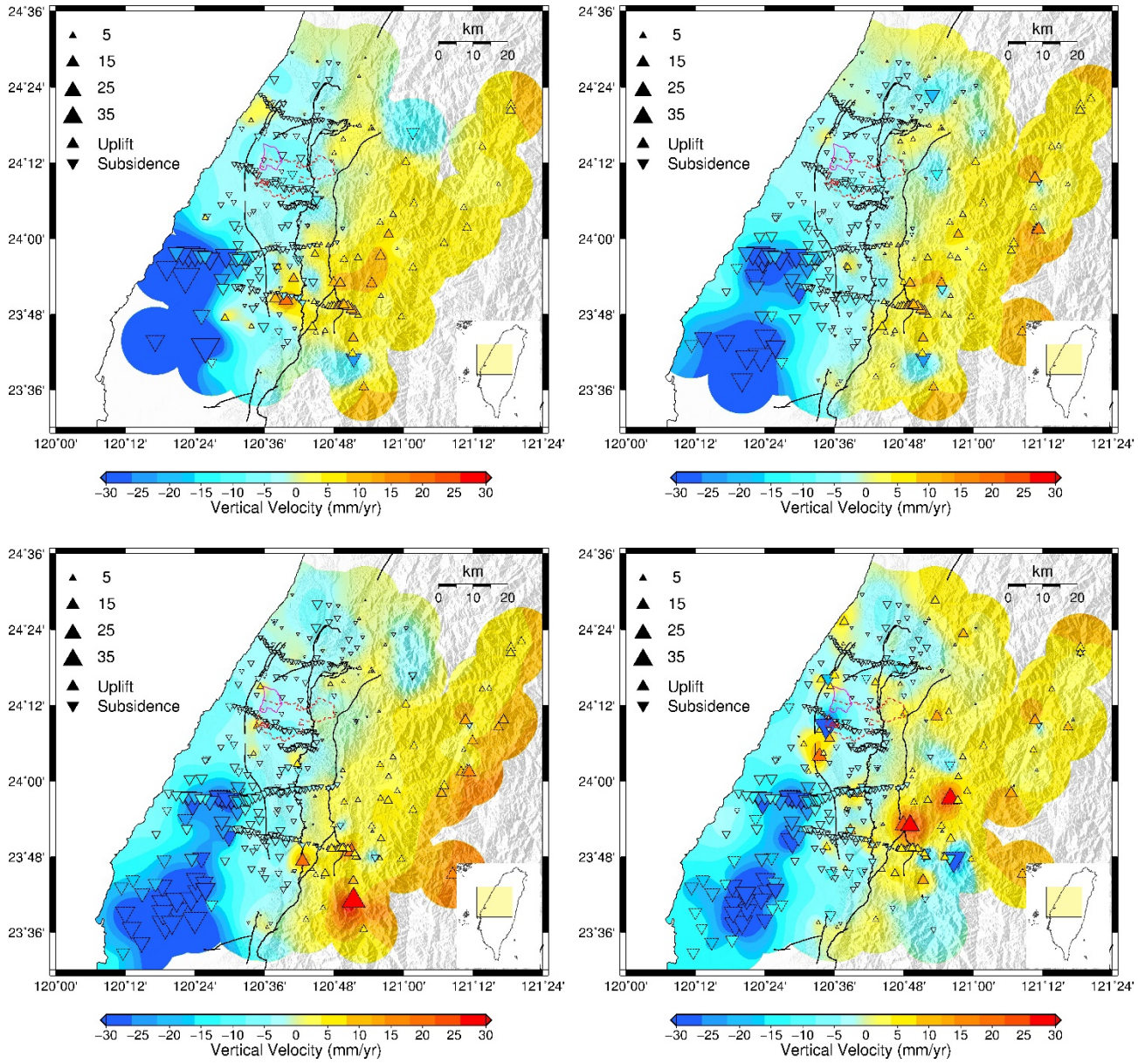


圖 2. 23：重要區域相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2007 年速度場，右上圖表示 2007 - 2013 年速度場，左下圖表示震後 2013 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。紅線為重要區域–臺中都會區、中部科學園區臺中園區與臺中市精密機械科技創新園區。

Figure 2. 23: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the object areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2007; the top right one is from 2007-2013; the bottom left is from 2013-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. Red line is the object areas of Taichung City, Central Taiwan Science Park and Taichung City Precision Machinery Innovation Technology Park.

第三章、中部地區重要區域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 InSAR 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），以節點 1 為例：

$$a_1 = \left(x_2y_3 - x_3y_3\right) / \Delta$$

$$b_1 = \left(y_2 - y_3\right) / \Delta$$

$$c_1 = \left(x_2 - x_3\right) / \Delta$$

$$\Delta = x_1\left(y_2 - y_3\right) + x_2\left(y_3 - y_1\right) + x_3\left(y_1 - y_2\right) \quad （式 3.1）$$

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

$$U(x,y) = \sum_{m=1}^{3} N_m u_m \quad （式 3.2）$$

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：

$$U\left(x,y\right) = [N_1\ N_2\ N_3] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad （式 3.3）$$

根據上式，Wang and Wright（2012）提出下式：

$$\begin{bmatrix} G_{sar} & G_{orb} & G_{atm} \\ G_{gps} & 0 & 0 \\ k^2\nabla^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vel} \\ m_{orb} \\ m_{atm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \quad （式 3.4）$$

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 3.4 修改如下：

$$\begin{bmatrix} G_{gnss} \\ G_{level} \\ k^2\nabla^2 \end{bmatrix} [m_{vel}] = \begin{bmatrix} d_{gnss} \\ d_{level} \\ 0 \end{bmatrix} \quad （式 3.5）$$

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）。

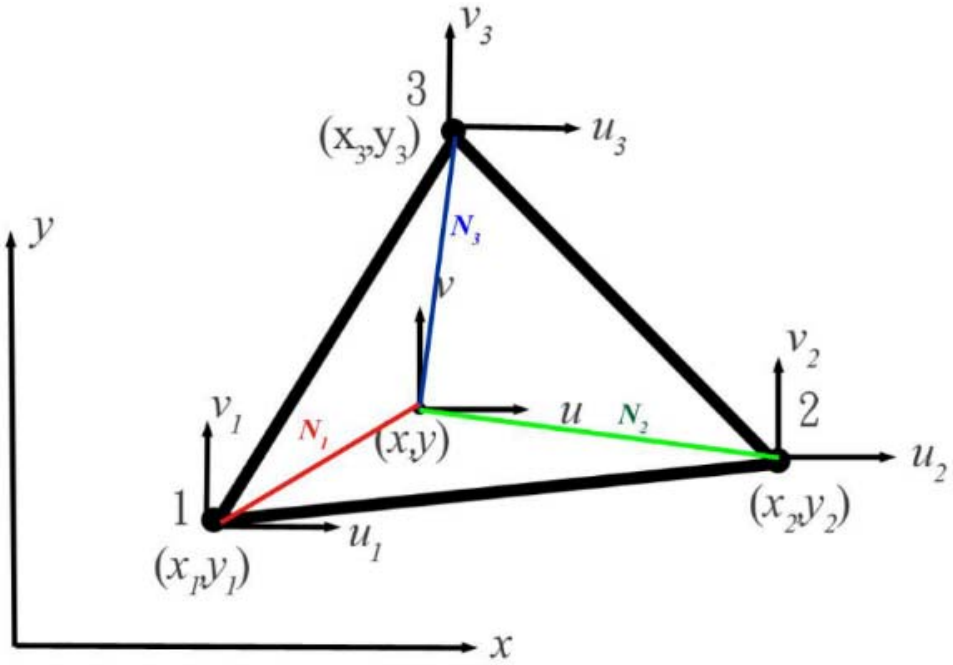


圖 3. 1：觀測點與網格三頂點示意圖

Figure 3. 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二維速度反演，首先，為使網格分布範圍涵蓋臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）與臺中市精密機械科技創新園區等重要區域，本團隊設定為邊界東經 120.05°至 121.15°及北緯 23.5°至 24.6°間，格點間距設定為 0.045°，根據速度反演成果可發現，原始速度場之空間分布疏密落差較大，速度反演之成果可以使資料之空間上分布更為平均，且該成果除了與原始速度場型態一致外，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，故此過程可降低偏差值較大之測站資料所帶來的影響（圖 3. 2），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。

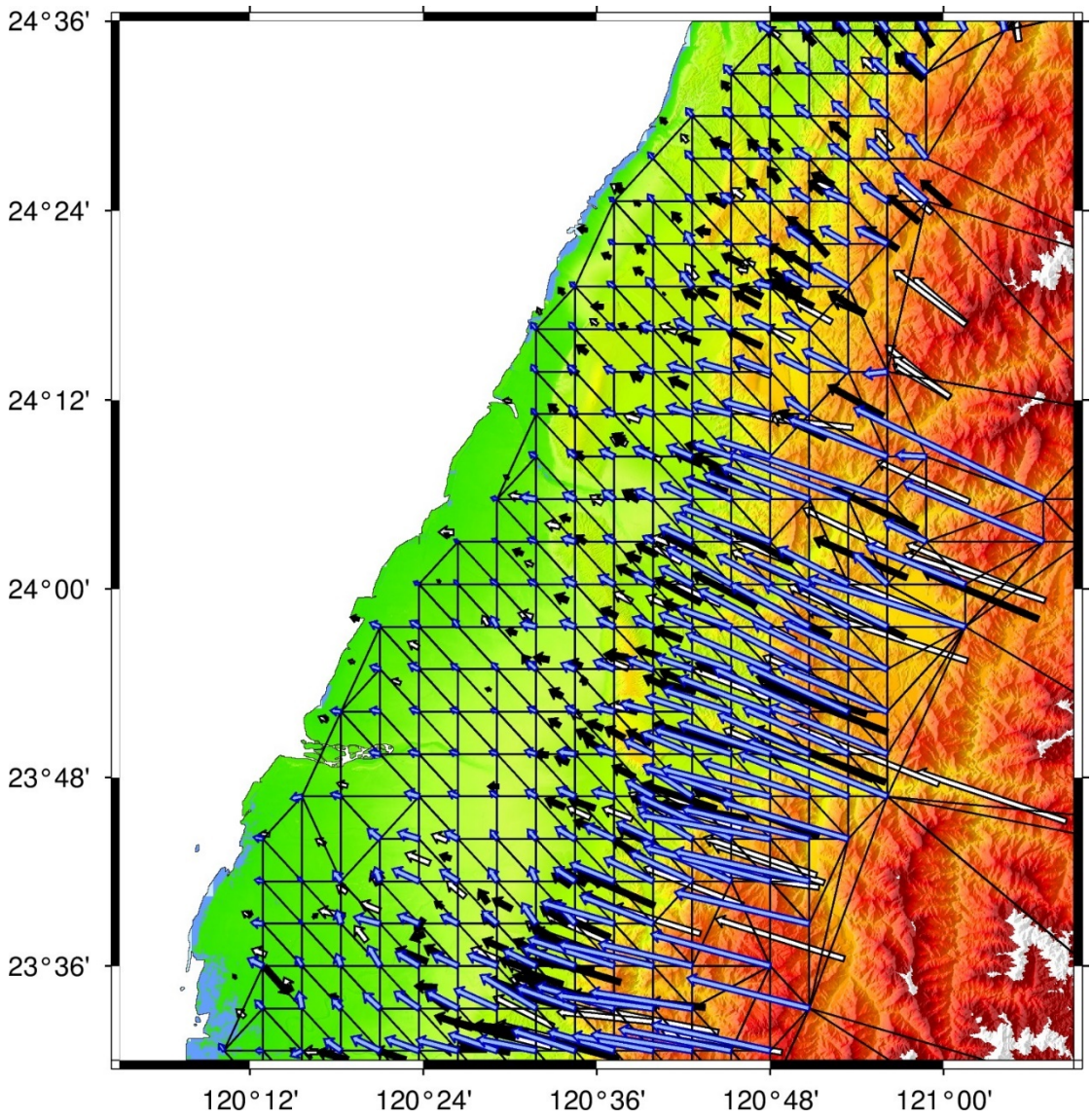


圖 3. 2：速度反演之重要區域網格化連續性速度場。黑色箭頭為 GNSS 移動站水平速度場，白色為 GNSS 連續站水平速度場，藍色為經速度反演所計算之網格速度場測試成果。

Figure 3. 2: 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：

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(dL/dt)}{L} \qquad (式\ 3.6)$$

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：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta + \dot{\varepsilon}_{en}\sin\theta\cos\theta + \dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta \qquad (式\ 3.7)$$

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二維網格速度場後，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$\dot{\omega}$：

$$\begin{bmatrix} V_e^1 \\ V_n^1 \\ V_e^2 \\ V_n^2 \\ \vdots \\ V_e^i \\ V_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \\ 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_e^j \\ V_n^j \\ \dot{\varepsilon}_{ee}^j \\ \dot{\varepsilon}_{en}^j \\ \dot{\varepsilon}_{nn}^j \\ \dot{\omega}^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_e^1 \\ e_n^1 \\ e_e^2 \\ e_n^2 \\ \vdots \\ e_e^i \\ e_n^i \end{bmatrix} \qquad (式\ 3.8)$$

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：

$$E_{ij} = C_{ij}\exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{\sigma_D^2}\right) \qquad (式\ 3.9)$$

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），以及第一與第二應變率不變量：

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) + \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad （式 3.10）$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) - \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad （式 3.11）$$

$$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[2\dot{\varepsilon}_{en} / \left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right)\right] \quad （式 3.12）$$

$$\Delta = \dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn} \quad （式 3.13）$$

$$\Sigma = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2 / 4} \quad （式 3.14）$$

$$\psi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right) / 2\dot{\varepsilon}_{en}\right] \quad （式 3.15）$$

$$I_1 = \dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn} \quad （式 3.16）$$

$$I_2 = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ee}^2 + \dot{\varepsilon}_{nn}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{en}^2} \quad （式 3.17）$$

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_1 為應變率張量第一不變量，I_2 為應變率張量第二不變量，又稱應變率強度。各項參數中，面膨脹率可用來反映和傾向滑移斷層（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）。第一不變量（I_1）又稱體積應變率（式 3.16），在此反映平面內的應變率分量，包含東向主應變率與北向主應變率，但不包含任何剪切變形分量，通常用於描述單純隆起或沉降等與體積改變相關的地表變形（e.g., Malvern, 1969；Timoshenko and Goodier, 1970）。應變率強度則為應變率張量之第二不變量（式 3.17），包含由二維應變中 3 個應變率張量計算而得，反映了區域總應變量（e.g., Kreemer et al., 2003；張午龍等，2016；Su et al., 2019；蘇小寧等，2022），雖然平面應變中的第二不變量確實深受剪切應變量的影響，但除了走向滑移斷層外，逆斷層實際活動所產生地表變形也具有顯著的剪切應變量，而非單純膨脹或壓縮應變，故相較於第一不變量而言，本團隊更建議採用第二不變量進行分析，以便獲得更完整的綜合性地表變形強度評估。

經由速度反演後，再由前述方法計算，便可以得到主應變速率場（圖 3.3）、剪應變速率場（圖 3.4）以及應變率強度分布（圖 3.5）。分析結果顯示：主應變速率場之最大壓縮量在中部區域主要分布於東側的西部麓山帶、活動斷層較密集分布之區域，整體較集中於臺中都會區以南，範圍涵蓋彰化斷層東側約 15 km 以西，並往山區延伸。其中，最大壓縮量約 2.3 μstrain/yr，分布於南投縣內，與臺中市及彰化縣交界區域，主要落在車籠埔斷層中南段、大茅埔–雙冬斷層間以及初鄉斷層，並往南延伸至南部區域之大尖山斷層與九芎坑斷層區域，這樣的壓縮量分布亦與區域內多為逆斷層的狀況相符；其餘區域則大多小於 0.5 μstrain/yr（圖 3.3）。此外，由圖中可發現大茅埔–雙冬斷層北段東側，靠近雪山山脈區域有非常顯著的伸張量，目前推斷可能原因為山脈區域之測站分布較少，此區域再往東可獲得的觀測多分布於中央山脈區域，而中央山脈至臺灣東部區域之地表運動速率原本便較西部區域高出許多，故而在此處獲得如此顯著的伸張量，本團隊將於後續研究中嘗試針對區域構造活動型態不同處進行分析並調整網格間距或分區計算。剪應變速率場部分，重要區域整體而言東側較西側區域大，以大茅埔–雙冬斷層北段東側，靠近雪山山脈區域之剪應變速率最高，然其可能原因如前段所述，故不納入重要區域之簡應變型態分析中。撇除前述歧異值區域後，整體之剪應變速率大約落在 0.0 至 2.0 μstrain/yr 間，以車籠埔斷層中段、南段及大茅埔–雙冬斷層間區域之剪應變較為顯著，皆大於 1.5 μstrain/yr（圖 3.4）。在應變率強度部分，雖然平面應變中的第二不變量確實受剪切應變量的影響較大，但由圖 3.5 可見，實際分布型態仍反映出主應變率與最大剪應變速率的綜合特徵（圖 3.3；圖 3.4），除了同樣以大茅埔斷層東南側區域之第二不變量值最大，並與車籠埔斷層中南段、大茅埔–雙冬斷層間以及初鄉斷層之高區連接外，也同時往南延伸至梅山斷層與大尖山斷層區域，量值約介於 1.5 ~ 2.5 μstrain/yr，車籠埔斷層與大甲斷層北段，以及彰化斷層中段西南側區域之第二不變量約 0.5 ~ 0.8 μstrain/yr，其餘多數區域則皆小於 0.5 μstrain/yr。

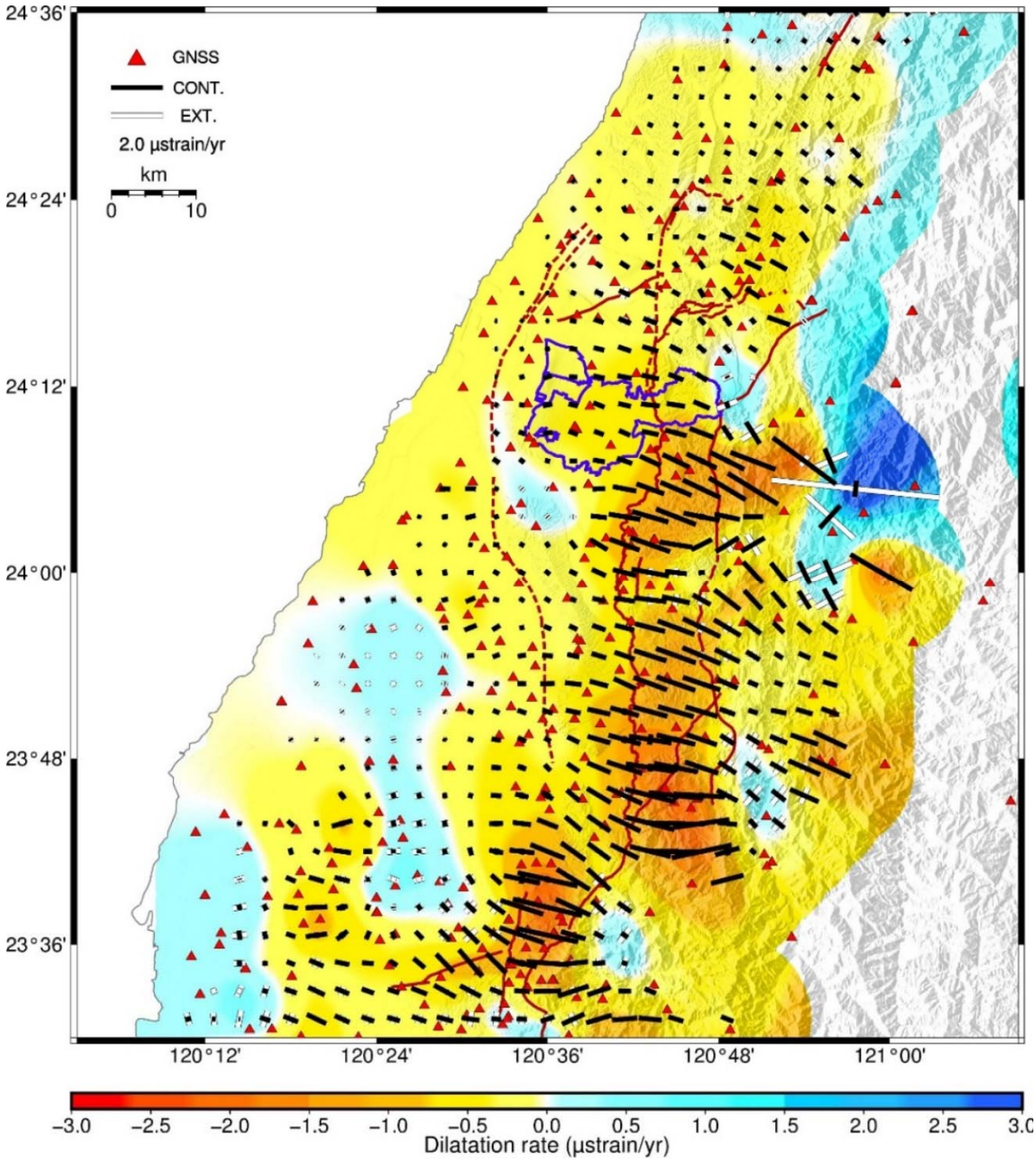


圖 3. 3：重要區域最大主應變速率場

Figure 3. 3: Distribution of principal strain rates.

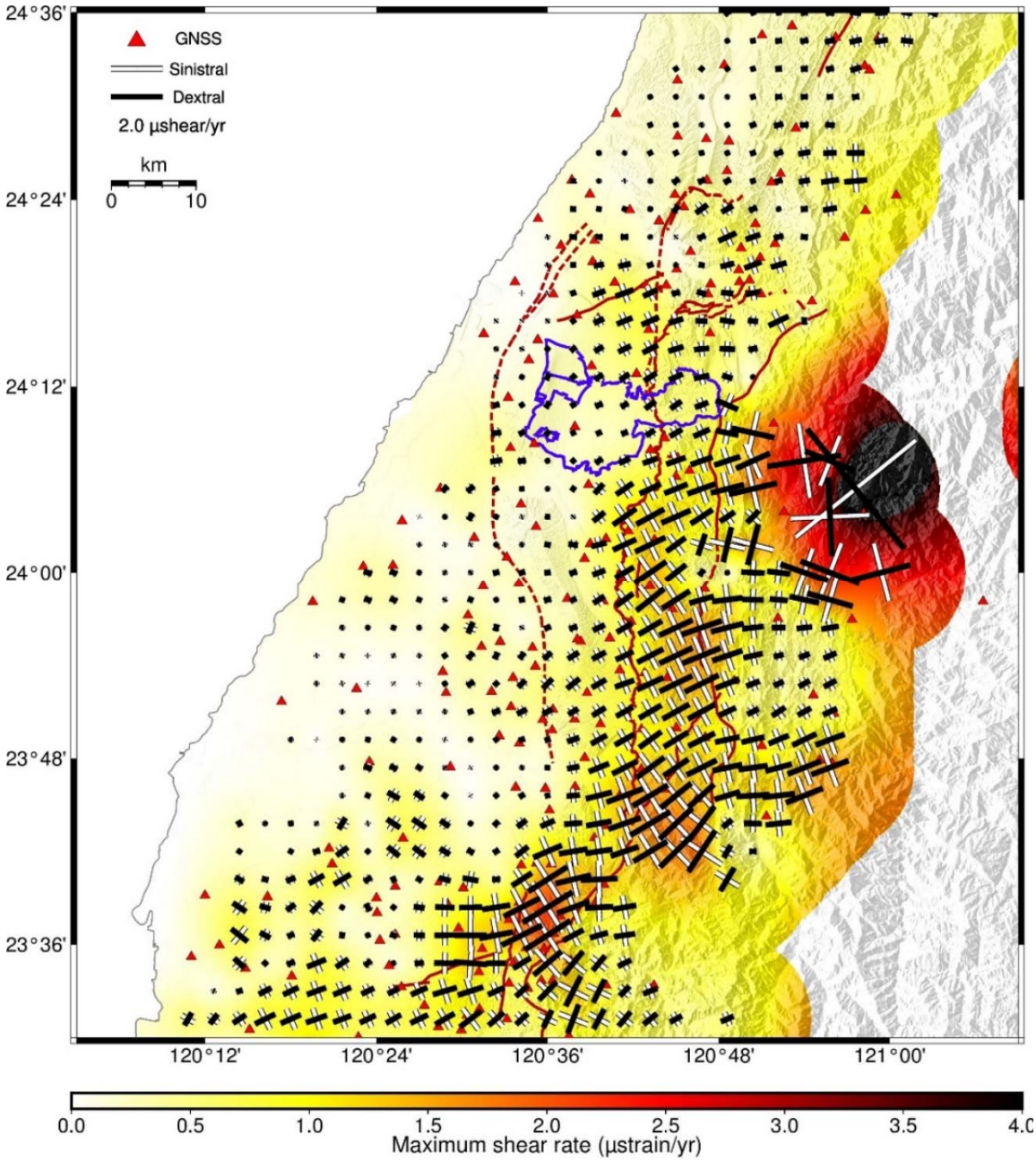


圖 3. 4：重要區域最大剪應變速率場

Figure 3. 4: Distribution of maximum shear strain rates.

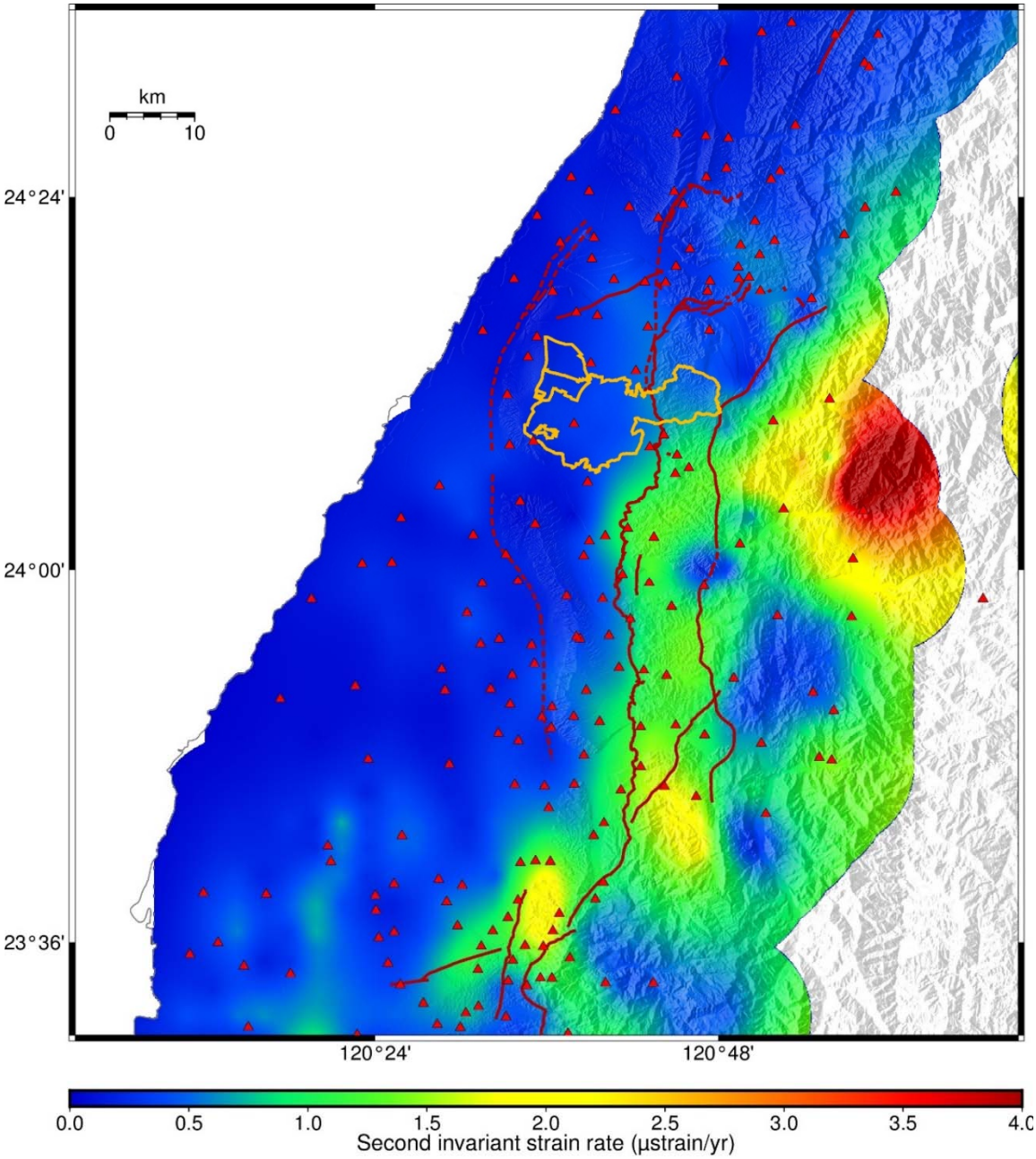


圖 3. 5：重要區域應變第二不變量分布圖

Figure 3. 5: 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步更新之版本，後續應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 3.1）外，亦針對高速鐵路之設施容許變形量進行規範（表 3.2）。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 3.1 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 3.6、圖 3.7），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）之規範，高速鐵路於高架橋段、隧道段及路堤路塹段等結構之水平最大容許變位值皆為 $\frac{0.65}{1000}$，台北隧道段結構則為 $\frac{1.3}{1000}$。而由前述規範彙整可知，相較於臺灣鐵路列車，高速鐵路列車之行駛速度較快，故而其變位量規範亦較為嚴謹。

表 3. 1：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004）

Table 3. 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

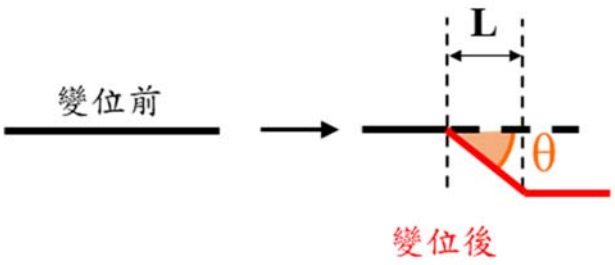


圖 3.6：橋面平行移動之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

Figure 3. 6: 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 ($\frac{1}{1000}$).

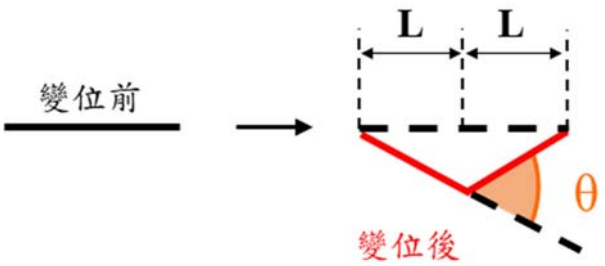
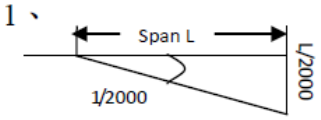
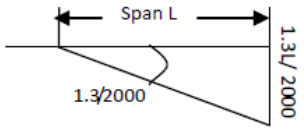
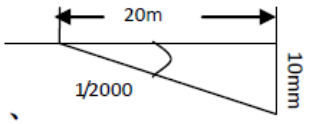
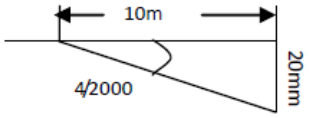
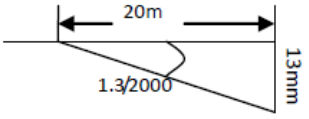
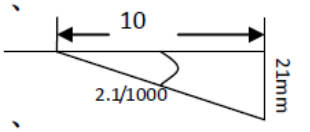
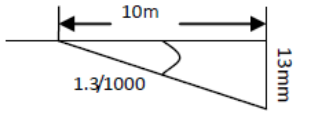


圖 3.7：橋面折角之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

Figure 3. 7: 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：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004）

Table 3. 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	1、  2、 
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)	1、  2、  3、 
高速鐵路台北隧道段結構	1. 垂直角變位=2.1/1000 2. 水平變位=1.3/1000	1、  2、 

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，本計畫參照地礦中心活動斷層分級以及中央氣象署震度分級表之概念，依據全臺應變速率分布現狀，制定全臺地表變形強度分級標準表。期望透過此分級標準表之建立，能有助於各領域使用者確認相關開發區域通過地表變形強度較高之區域與否，以便評估後續是否需要另外進行進一步的變位分析，來釐清此高變形強度區域對於開發物件安全性之影響。

如第 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，但如同早期中央氣象署設計震度分級表時，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。因此，本團隊建議採用反映區域總應變量之應變率張量第二不變量作為地表變形強度之依據。此外，由於地表變形強度的提出需要多方嘗試，並與不同領域的人員交換意見，因此本計畫目前先採用水平變形進行建置與初步更新，日後再階段性地納入垂直變形的影響。

而針對各等級之劃分，首先，根據第 3-2-1 節所彙整之相關規定，已知相較於臺灣鐵路列車，高速鐵路列車因行駛速度較快，其規範亦較嚴謹，故本團隊在此採用《高速鐵路設施容許變形值》（表 3. 3）所規範之水平最大容許變位值 $\frac{0.65}{1000}$ 作為參照標準來建立各分級。其中，由於高速鐵路之高架橋跨徑為 30 m，根據最大容許變位值 $\frac{0.65}{1000}$ 之規定，可知在跨徑為 30 m 之情況下，其水平最大容許變位值為 19.5 mm。一般而言，活動斷層於近地表處多為鎖定狀態，故應變速率相當小；因此本計畫現階段先根據池上潛移斷層及車瓜林潛移斷層之大地測量監測資料結果，歸納出潛移斷層所造成之地表變形帶寬度多為 500 m。接著，參考《高速鐵路設施容許變形值》規範之計算作法，依比例計算將可獲得跨徑 500 m 之水平最大容許變位值約為 325.0 mm。

接著，若以臺灣或日本等地震災害較頻繁地區之地震潛勢分析為例，通常以 30 年及 50 年為年限標準計算地震災害可能發生之機率，本計畫初步亦同樣以 30 年及 50 年為標準，進一步再加入 10 年及 100 年，以更完整的劃分全臺地表變形強度分級。根據前述幾個年限標準計算：假設以 10 年為年限，即某地區約 10 年左右，其地表變形量就有超過 325 mm 此最大容許變位

值之可能，則表示其地表變形速率可達約 32.5 mm/yr，相當於是縱谷斷層之滑移速率；若假設某地區 30 年左右有超過 325 mm 此最大容許變位值之可能，則表示其地表變形速率可達約 10.8 mm/yr，相當於是西南部活動斷層（如車瓜林斷層）之滑移速率；假設其 50 年左右才有超過容許值之可能，則表示其地表變形速率約 6.5 mm/yr；而若假設某地區 100 年左右有超過 325 mm 此最大容許變位值之可能，則表示其地表變形速率可達約 3.3 mm/yr，相當於臺灣多數活動斷層之滑移速率。

由於本計畫在此階段所使用之大地測量資料以 GNSS 連續站及移動站為主，資料密度較低，目前用於計算應變率之地表速度場網格間距為 0.045°，即基線長度約 5 km。如前所述，可知潛移斷層之地表變形帶寬度約 500 m，表示即使基線長度超過 500 m，其所能記錄到之變形量仍與 500 m 無異，亦即即使距離增加至 5 km，若其總變形量達到 325 mm，仍屬於超過容許值。因此，本計畫現階段將前述各標準年限分析所獲得之地表變形速率直接以 5 km 之基線長度進行應變速率之計算（表 3. 3）。

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，建議後續應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，以利此分級表可涵蓋全臺更完整之不均勻地表變形情形，並持續進行更新。此外，後續亦應慢慢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. 3：地表變形強度分級表

Table 3. 3: Table of surface deformation intensity level.

分級	應變率第二不變量 n (μstrain/yr)	高鐵
0	**0**	橋梁與軌道無水平變位
1	**0 < n ≤ 0.6**	超過 300 年以上達警戒值；超過 200 年以上達行動值；超過 100 年以上才達危險值。
2	**0.6 < n ≤ 1.0**	約 150 至 300 年達警戒值；約 100 至 200 年達行動值；約 50 至 100 年達危險值。
3	**1.0 < n ≤ 2.0**	約 90 至 150 年達警戒值；約 60 至 100 年達行動值；約 30 至 50 年達危險值。
4	**2.0 < n ≤ 6.0**	約 30 至 90 年達警戒值；約 20 至 60 年達行動值；約 10 至 30 年達危險值。
5	**6.0 < n**	約 30 年以內達警戒值；約 20 年以內達行動值；約 10 年以內達危險值。

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. 8 及圖 3. 9。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 6.0 μstrain/yr 以上。而由此地表變形強度分布圖中可發現，重要區域中地表變形強度最高處為東側的雪山山脈區域。

全臺地表變形強度最高之區域為西南部區域以及花東縱谷地區。臺灣西南部區域存在許多潛移斷層，根據本團隊於 2021 年前期計畫針對西南部區域地表變形之分析成果即可知，旗山斷層與車瓜林斷層具有高度潛移之特性，地表變形速度非常快，如車瓜林斷層兩側之垂直斷層速度場落差高達約 40 mm/yr；而景國恩（2023）亦提出許多西南部地區潛移斷層活動所造成的顯著結構物破壞或地形變化證據；而花東縱谷地區為歐亞板塊與菲律賓海板塊之聚合帶，由北起之米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層，至南段之池上斷層、利吉斷層與鹿野斷層，構成縱谷斷

層系統，根據觀測資料及以往許多學者針對此區域所進行的研究（e.g., Hsu and Burgmann, 2006；Hsu et al., 2009；Yu et al., 1997；Yu and Kuo, 2001；Yen et al., 2011；Champenois et al., 2012；劉亭妤，2016）可知，花東縱谷為臺灣地表變形速度極快、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。

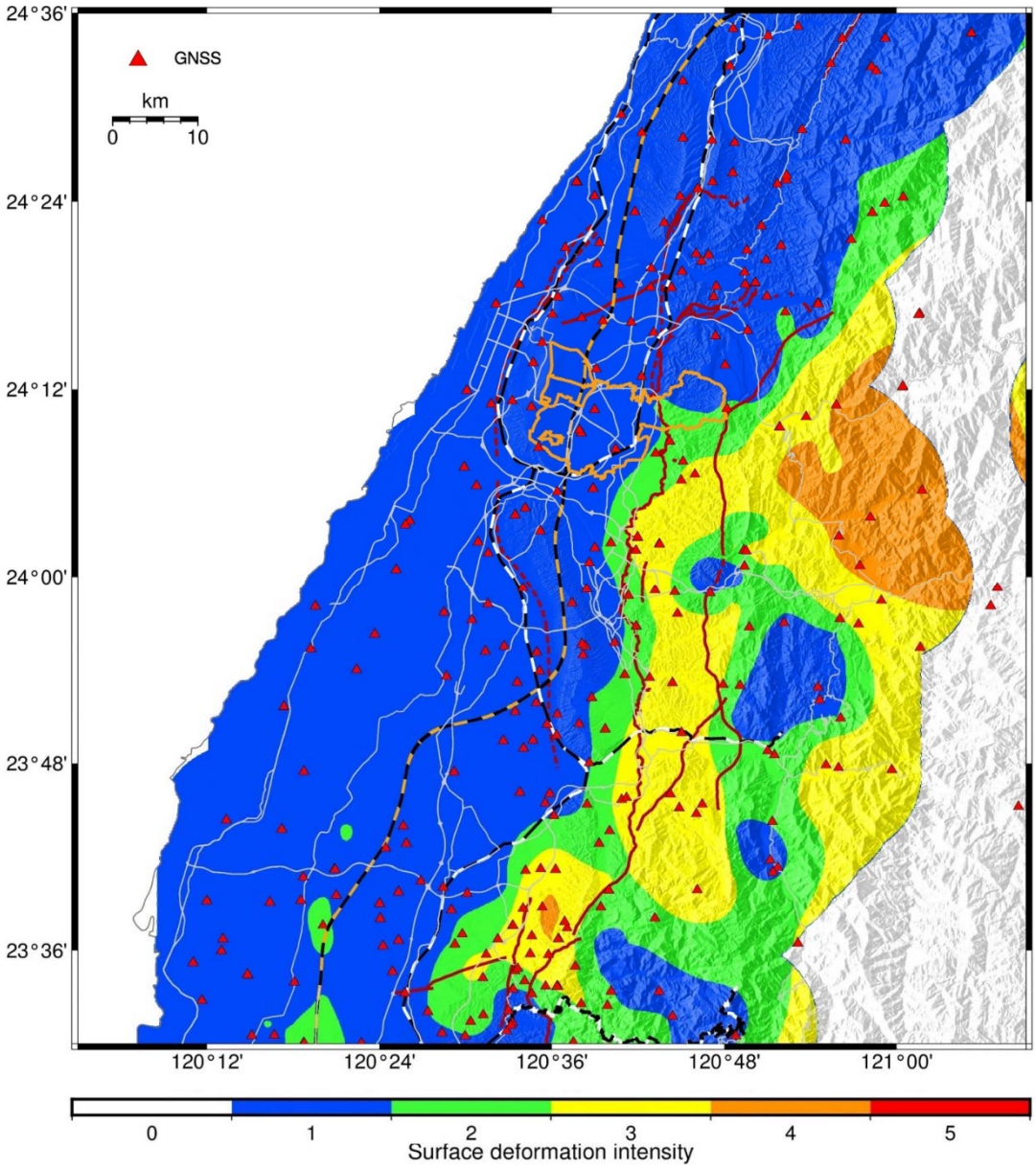


圖 3. 8：重要區域地表變形強度分布圖

Figure 3. 8: Surface deformation intensity map of object area.

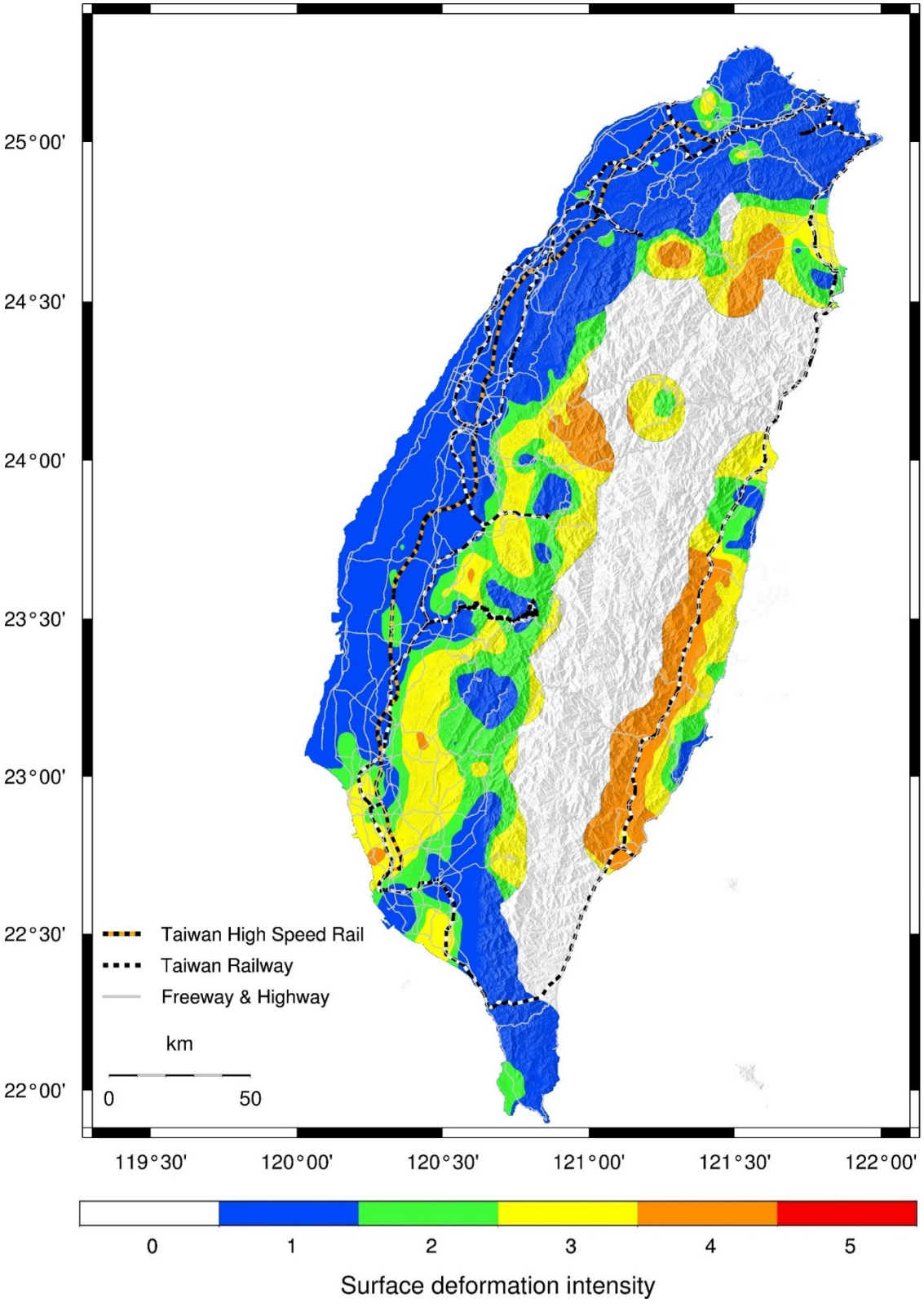


圖 3. 9：全臺地表變形強度分布圖

Figure 3. 9: Surface deformation intensity map.

第四章、中部地區重要斷層參數分析

4-1 斷層資料蒐集

本章節主要蒐集、彙整及分析斷層資料，針對斷層長度、傾角、深度、滑移速率四種參數擬定最佳解。蒐集的地質資料包含野外露頭、槽溝資料、震測剖面、平衡剖面、地球物理資料、地震深度分布，如表 4.1。前兩節探討本年度的重要斷層，大甲斷層及彰化斷層，第三節探討其他中部地區斷層，包含車籠埔斷層、大茅埔—雙冬斷層、初鄉斷層以及鐵砧山斷層。依照不同的地質調查方法描述，探討、比較前人文獻，最後提出本計畫綜合評估的參數最佳解。為了後續測地資料的解算，本計畫會將剖面中複雜的斷層幾何進行簡化，取大致上的趨勢面做為後續分析用的斷層面。

表 4.1：斷層幾何參數資料蒐集重點

Table 4.1: Key points of fault geometry parameter data collection.

調查方法	資料蒐集重點	傾角	深度
野外露頭	根據主要斷層跡的位置蒐集斷層位態資料。不考慮分支斷層。	V	X
鑽井資料	根據剪裂帶深度判斷斷層尖端是否出露地表或是屬於盲斷層。	X	V
槽溝開挖	槽溝中滑移量最大的斷層的位態資料。	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 大甲斷層

4-1-1-1 斷層長度

根據地礦中心發布之活動斷層分布圖（林啟文等，2021），大甲斷層長約 30 公里，為第一類活動斷層。根據航照地形判釋，大甲斷層在后里台地、大肚台地西緣有明顯東北走向的線性崖（Ku, 1963），在后里台地上也觀察到東北走向的內水尾山背斜通過數個階地（沈淑敏等，2005）。大甲斷層東側有鐵砧山斷層，南側有彰化斷層，大甲斷層及彰化斷層之間沒有明顯的構造分隔，應考慮兩斷層同時破裂的可能性，因此本計畫在後續分析時將大甲斷層、彰化斷層視為同一斷層系統。

4-1-1-2 斷層傾角

1. 野外露頭

目前未能發現大甲斷層的野外露頭，推測斷層可能被沖積層覆蓋。

2. 震測資料

根據董倫道等（2006）發表的震測資料，於鐵砧山北側大安溪南岸的測線（編號 06P-TCA-TC01）中顯示大甲斷層傾角約 45 度，斷層尖端延伸至約 500 公尺深處（500 - 600 ms）（圖 4. 1）。

3. 鑽井資料

大甲 1 號井及大甲 2 號井位在后里台地鐵砧山北側，大甲 1 號井在后里台地地形崖的西側，大甲 2 號井在地形崖的東側，根據鑽井資料，斷層上盤地層傾角約西傾 30 - 50 度，具許多剪切構造，下盤岩層呈水平未受變形的狀態，大甲二號井井深 92～94 公尺處鑽遇斷層帶（陳文山等，2014）（圖 4. 2）。

4. 平衡剖面

根據 Yang et al.（2007）繪製的平衡剖面，Line 7 剖面通過大安溪，位於大甲斷層的北側；Line 6 剖面通過大肚溪，位於大甲斷層的南側。Line 7 的大甲斷層（剖面中的彰化斷層）切過鐵砧山背斜的前翼破裂至地表，斷層傾角約 60 度，斷層底部延伸至五指層之下的滑脫面，深度約 5.5 公里。Line 6 中的大甲斷層（剖面中的彰化斷層）則沿著八卦山背斜的西側以高角度逆衝的方式破裂至地表，斷層傾角約 60 度（圖 4. 3）。

Yue et al.（2005）的平衡剖面中，在后里台地下存在一低角度逆衝斷層，稱為 Houli thrust，逆衝斷層約為 10°，在深度約 4 公里處轉為層間滑動，斷層無破裂至地表，Houli thrust 深部延伸至約 10 公里深的滑脫面（圖 4. 4），與 921 車籠埔地震序列相連。

5. 本計畫綜整評估（傾角）

根據震測資料（董倫道等，2006），斷層尖端已接近地表，且在大甲二號井井深 92～94 公尺處鑽遇斷層帶（陳文山等，2014），此外，大甲斷層的背衝斷層（鐵砧山斷層）已發育至地表，暗示大甲斷層應也已發育至地表。因此，本計畫參考 Yang et al.（2007）的 LINE7 平衡剖面，認為大甲斷層的幾何可簡化為淺部高角度（60 度東傾）延伸至地表，深部則為低角度（5 度）與車籠埔斷層相連的基底滑移面（圖 4. 5）。

我們認為大甲斷層可能是正斷層反轉的結果。正斷層反轉（inverted normal fault）的示意圖如圖 4. 6，假設過去存在一正斷層，其淺部為高角度，深部為低角度。當地層受到後期的擠壓應力時，低角度的斷層面較容易克服摩擦力而滑動，而淺部的高角度斷層面則不利於逆衝滑動，因此會鎖定（locked movement），導致斷層上盤的地層撓曲並形成褶皺。這或許能解釋為何大甲斷層上盤有明顯的背斜，而在地表卻沒有明顯的斷層露頭。隨著擠壓應力持續作用，斷層可能會沿著既有的斷層面破裂至地表，或形成新的低角度逆衝斷層，或形成背衝斷層（如鐵砧山斷層）（圖 4. 7）。正斷層重新活動的案例在新竹區域也能觀察到（Yang et al., 1996）。若此區域能蒐集到公里級深度的震測資料，將有助於了解深部的構造。

4-1-1-3 斷層深度

1. 平衡剖面

根據 Yang et al.（2007）繪製的 Line 7 平衡剖面通過大安溪。剖面中大甲斷層（對應圖中的 Changhua Thrust）延伸至地表，底部延伸至五指山層之下的滑脫面，深度約 6 公里（圖 4. 3）。

Yue et al.（2005）的平衡剖面 ω 通過后里台地，大甲斷層（對應圖中的 Houli thrust）未出露地表，深部延伸至約 10 公里深的滑脫面，與 921 車籠埔地震序列相連（圖 4. 4）。

2. 本計畫綜整評估（深度）

根據 Yang et al.（2007）繪製的平衡剖面 Line 6、Line 7，大甲斷層大約在 6 公里深接到滑脫面。滑脫面的幾何根據 Yue et al.（2005）的 ω 剖面，剖面中集集地震的餘震序列呈現低角度東傾的線性排列，深度延伸至 10 公里。本計畫假設滑脫面傾角約 5 度，深度延伸至 10 公里，由於大甲斷層與車籠埔斷層的底部接到同一滑脫面，我們利用剖面圖來檢視滑脫面、大甲斷層、車籠埔斷層，三者的幾何關聯性與合理性，見圖 4. 5。考慮滑脫面的幾何及大甲斷層的位置與幾何，大甲斷層大約在 5.5 公里深接到滑脫面。

4-1-1-4 滑移速率

根據陳文山等（2008）的鑽井資料，斷層上盤鑽井有大肚井（0.5～2.6 mm/yr）、沙鹿 5 號井（0.4 mm/yr），綜合抬升速率為 0.4～2.6 mm/yr；斷層下盤鑽井有忠和井，沉降速率約為 1.3～2.9 mm/yr，因此斷層兩側垂直滑移速率為 1.7～5.5 mm/yr。以上大甲斷層長期滑移速率整理於表 4. 4。

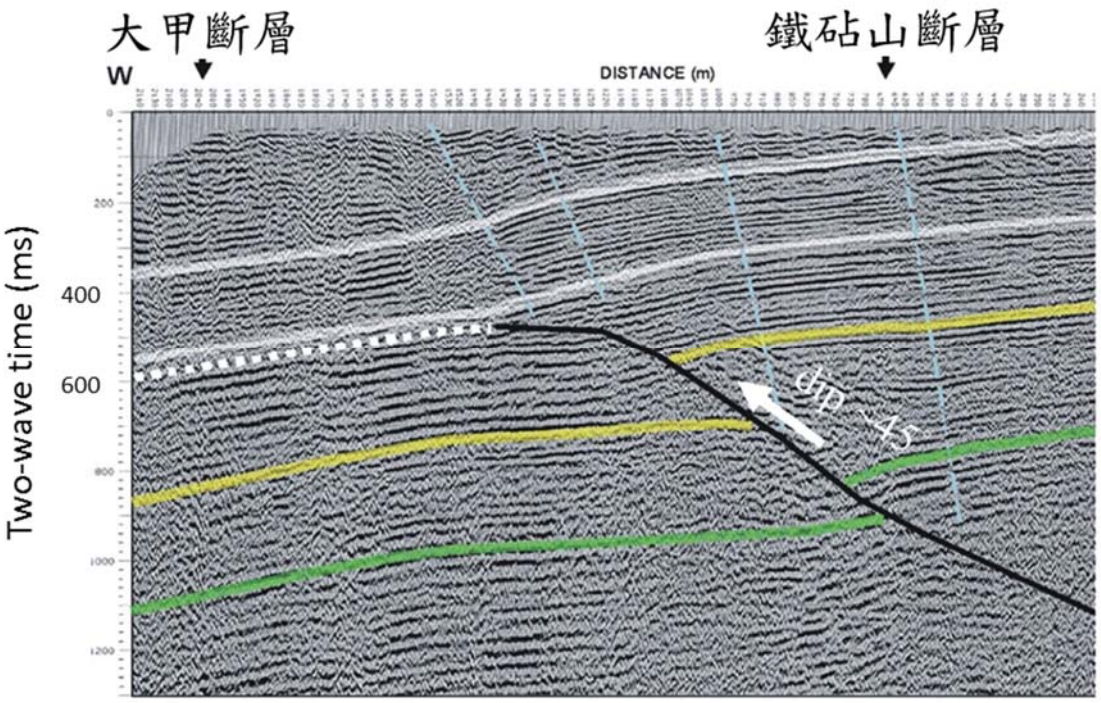


圖 4. 1：大甲斷層震測剖面（董倫道等，2006）

Figure 4. 1: The seismic profile of the Tachia fault (Dong et al., 2006).

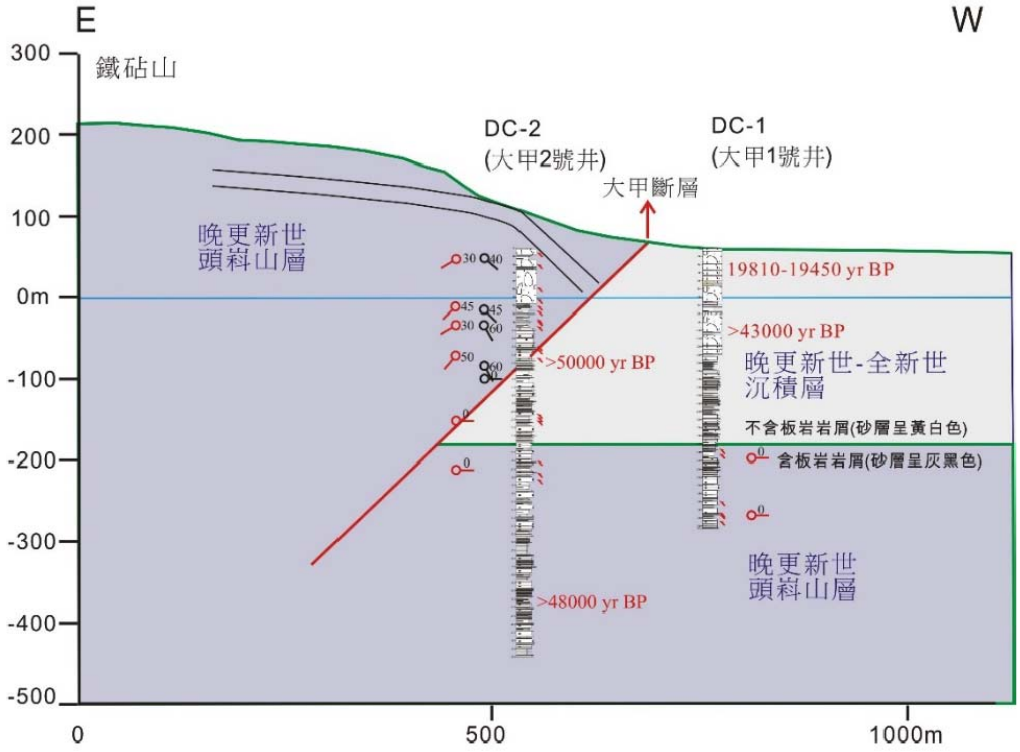


圖 4. 2：大甲 1 號井及大甲 2 號井（陳文山等，2014）

Figure 4. 2: Tachia well No. 1 and Tachia well No. 2 (Chen et al., 2014).

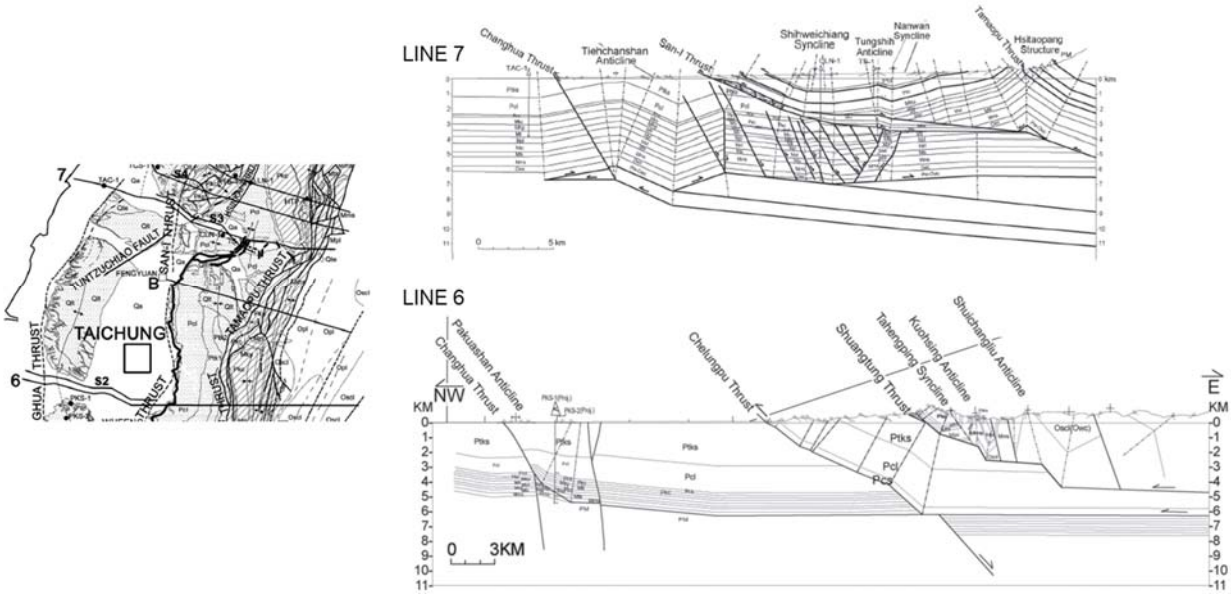


圖 4. 3：大甲斷層平衡剖面，Yang et al.（2007）繪製的平衡剖面 Line 6、Line 7。

Figure 4. 3: The balanced cross-sections Line 6 and Line 7 from Yang et al. (2007).

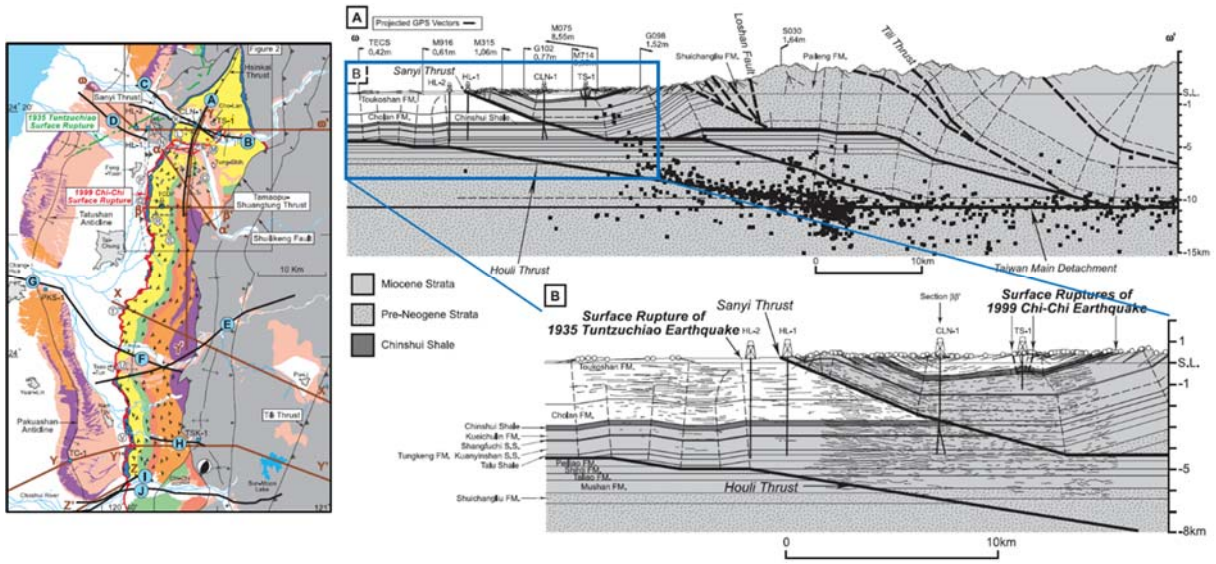


圖 4. 4：大甲斷層平衡剖面（Yue et al., 2005）。后里台地下約 4 公里深處有 Houli thrust，傾角約 10°，延伸至約 10 公里深，並與 921 車籠埔地震序列（黑色實心圓點）相連。

Figure 4. 4: The balanced cross-section of the Tachia fault (Yue et al., 2005). At approximately 4 km deep beneath Houli Terrace, there is a Houli thrust with a dip angle of about 10°, extending to approximately 10 km deep, and linked to the 921 Chi-Chi earthquake sequence (black solid circles).

表 4. 2：大甲斷層傾角相關文獻彙整

Table 4. 2: References related to the dip angle of the Tachia fault.

作者	方法	傾角
董倫道等（2006）	大安溪南岸震測資料	45 度
Yang et al.（2007）	平衡剖面 Line 6、Line 7	60 度
Yue et al.（2005）	平衡剖面	10 度
本計畫綜整評估	參考 Yang et al.（2007）的剖面 Line 6、Line 7	淺部斷層傾角 60 度，深部滑脫面傾角 10 度

表 4. 3：大甲斷層深度相關文獻

Table 4. 3: References related to the depth of the Tachia fault.

作者	方法	深度
Yang et al.（2007）	平衡剖面	大甲斷層底部滑移面在北寮層，約 6 公里深，車籠埔斷層滑移面在錦水頁岩層。
Yue et al.（2005）	平衡剖面、地震分布	滑脫面約 6 公里深，再延伸至地震深度約 10 公里，
本計畫綜整評估	參考震測資料，由大甲斷層、車籠埔斷層、大茅埔雙冬斷層的二維剖面推估。	大甲斷層發育至地表（深度 0 公里），深部約 5.5 公里接到滑脫面。

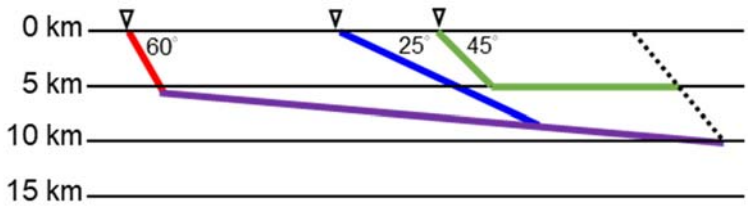


圖 4. 5：大甲斷層、車籠埔斷層、大茅埔—雙冬斷層以及滑脫面的地下幾何剖面圖，紅線為大甲斷層、藍線為車籠埔斷層、綠線為大茅埔—雙冬斷層，以及紫線為滑脫面。

Figure 4. 5: The profile shows the subsurface geometric relationships of the Tachia fault (red line), Chelungpu fault (blue line), Tamaopu—Shuangtung fault (green line), and the detachment (purple line).

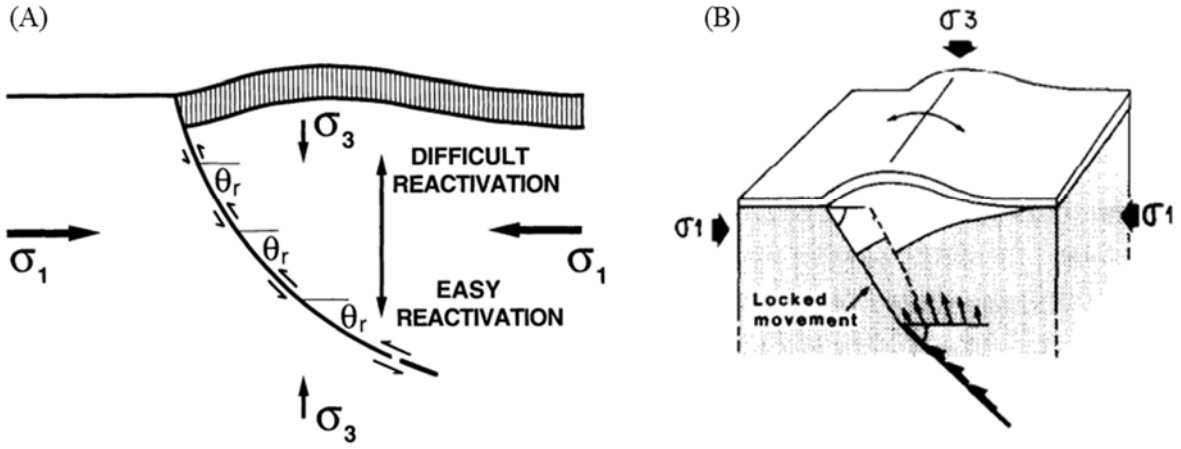


圖 4. 6：擠壓環境中正斷層反轉為逆斷層的概念圖。（A）假設先前存在一正斷層，淺部為高傾角，深部為低傾角。在垂直於斷層走向的水平壓縮應力環境中，深部斷層面由於角度較低較容易克服摩擦力而再活動，淺部斷層由於角度較高而難以再活動。（B）深部斷層逆衝而淺部斷層呈現鎖定（locked movement）導致上盤地層撓曲形成背斜。（圖摘自 Sibson（1995）以及 Letouzey（1990））

Figure 4. 6: Concept of normal fault inversion in a compression regime. (A) Assuming a pre-existing normal fault that has a high angle at shallow depths and a low angle at greater depths, under horizontal compression stress perpendicular to the fault strike, the deep fault plane is easy to reactivate because its lower angle makes it easier to overcome friction. In contrast, the shallow fault plane, with its higher angle, is difficult to reactivate. (B) The deep fault thrusts while the shallow fault is locked, leading to the folding of the hanging wall and the formation of an anticline. (From Sibson, 1995 and Letouzey, 1990)

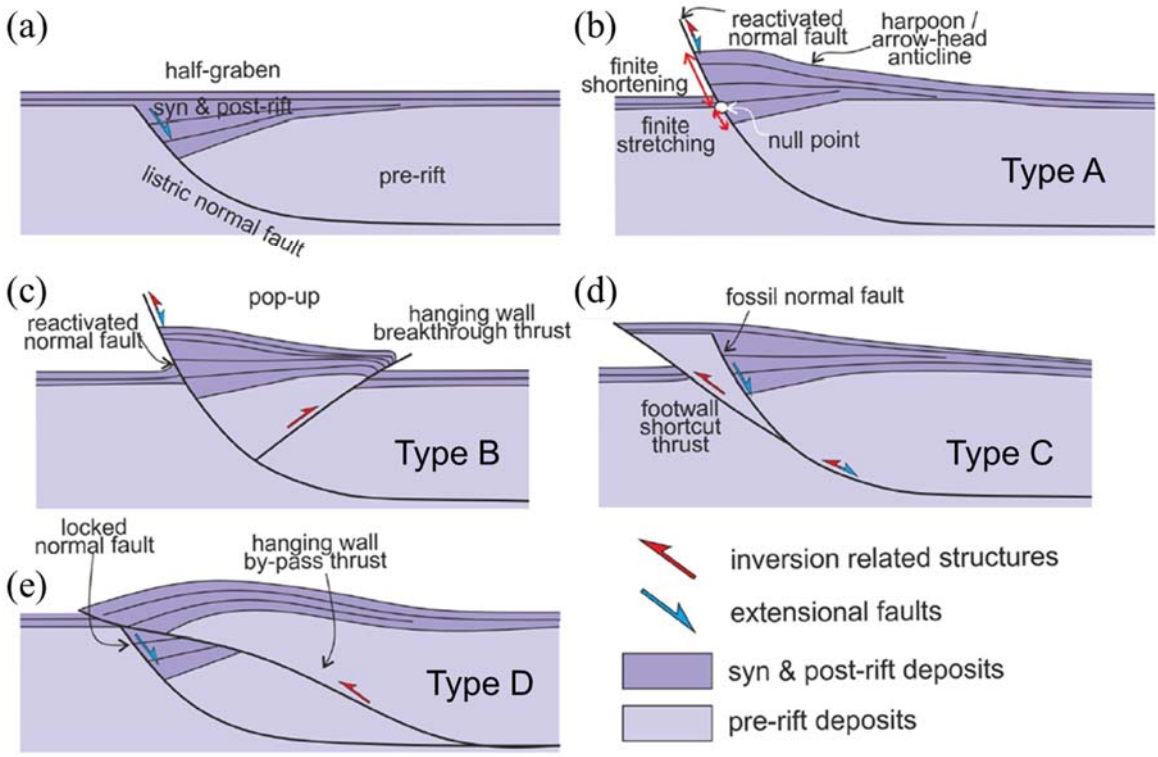


圖 4. 7：正斷層反轉的構造類型。（a）反轉前鏟型正斷層及斷層上盤滾動背斜。淺紫色代表拉張前的沉積物，深紫色代表拉張時期以及拉張後的沉積物。（b）鏟型正斷層反轉及箭型褶皺（harpoon/arrow-head anticline）（c）反轉後的斷層上盤發育出背衝斷層（d）古正斷層下盤發育逆衝斷層（e）後期發育的斷層逆衝至古正斷層之上。（圖出自 Héja et al.（2022））

Figure 4. 7: Types of structures related to normal fault inversion. (a) listric normal fault and roll-over anticline prior to inversion. Light purple represents pre-rift deposits, and dark purple represents syn- and post-rift deposits. (b) Inverted listric normal fault and harpoon/arrow-head anticline (c) Back thrust developed in the hanging wall of the reactivated normal fault (d) Thrust developed in the foot wall of the normal fault (e) Thrust developed in the hanging wall of normal fault. (From Héja et al., 2022)

表 4. 4：大甲斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 4. 4: References related to the slip rate of the Tachia fault.

文獻	方法	長期滑移速率
陳文山等（2008）	鑽井資料	1.7 ~ 5.5 mm/yr（垂直滑移速率）

4-1-2 彰化斷層

4-1-2-1 斷層長度

根據地礦中心最新發布之活動斷層分布圖（林啟文等，2021），彰化斷層長度約 36 公里，運動方式為逆滑，被列為第一類活動斷層。彰化斷層以北為大甲斷層，過去中油將大甲斷層及彰化斷層統稱為彰化斷層。彰化斷層以南為桐樹湖斷層，彰化斷層可能與桐樹湖斷層相連（林啟文等，2008）。大甲斷層及彰化斷層之間沒有明顯的構造分隔，本計畫認為應考慮兩斷層同時破裂的可能性，因此在後續分析中將大甲斷層、彰化斷層視為同一斷層系統。

4-1-2-2 斷層傾角

1. 野外露頭

目前未能發現彰化斷層的野外露頭，斷層可能整段隱伏於沖積層之下。

Mouthereau et al.（1999）在野外調查中觀察礫石層中的礫石裂縫（fractures）、地層中的節理（joints）、張力裂縫（tension gash）、斷層條紋（striated faults），推估最大主應力軸為西北向。基於微觀構造的分析，八卦山北部存在走向滑移的斷層作用以及橫移拉張的變形現象。此外，在數值地形模型中，觀察到八卦台地出現與背斜軸走向斜交的線性特徵，且八卦山前緣表現出局部彎曲的特徵，因此推測並提出八卦轉移斷層帶（Pakua Transfer Fault Zone）的存在（圖 4. 8）。

2. 震測資料

何信昌與陳勉銘（2000）根據震測資料對比推論，指出逆斷層（八卦山逆斷層）位在正斷層（彰化斷層）之上，前者截切淺部上新、更新世地層，斷層面向東傾斜 18～45 度，其上形成八卦山背斜；後者為轉樞線斷層（Hinge fault），高角度東傾 70 度。

Simoes et al.（2007）彙整前人的震測資料（Chang, 1971；Chen, 1978；Wang et al., 2002, 2003）（圖 4. 9）觀察到斷層尖端延伸至深度約 1.5 公里，傾角約 40 度，往下在 4 公里深之下接到平緩的滑脫面（錦水頁岩層），逆斷層下方存在一轉樞線斷層（Hinge fault）。轉樞線斷層呈高角度東傾，斷層上盤地層厚度大於下盤。

根據 Yang et al.（2007）的震測資料解釋（圖 4. 10），濁水溪 S1 的震測剖面中彰化斷層呈現匙狀幾何形貌，彰化斷層由淺至深傾角由 60 度漸漸轉為 15 度；大肚溪 S2 震測剖面中彰化

斷層呈高角度逆衝至地表，傾角約 60 度，斷層下方存在一古正斷層。

根據通過濁水溪的震測剖面圖（Yue et al., 2011）（圖 4. 11），彰化斷層為盲斷層，斷層在深度 1.5 - 4.3 公里深處傾角由淺至深從 28 度轉為 15 度，斷層在約 4.5 公里深處變緩接到滑脫面（錦水頁岩層），滑脫面傾角約 3 度。

3. 地質剖面

Chou（1971）繪製的地質剖面經過烏溪（俗稱大肚溪）以及 PKS-1 井，剖面中彰化斷層切過背斜前翼的頭嵙山層及卓蘭層，斷層底部推測延伸至五指山層，深度約 5 公里。彰化斷層兩側層位落差不大，斷層傾角約 65 度（圖 4. 12）。

Suppe（1985）提出薄皮理論（thin-skinned model）解釋西部地區的逆衝斷層系統，彰化斷層為八卦山背斜之下的一個盲斷層，彰化斷層底部接到一滑脫面，與車籠埔斷層的底部相連，滑脫面深度約 4.5 公里，彰化斷層傾角約 16 度（圖 4. 13）。

Wang et al.（2000）根據薄皮理論及 PKS-1 鑽井資料繪製地質剖面圖，彰化斷層為盲斷層，彰化斷層無通過 PKS-1 井（圖 4. 14），斷層傾角由淺至深自 50 度轉為 10 度，滑脫面在八卦台地下深度約 6 公里，往東延伸到深度 10 公里以上。

4. 平衡剖面

楊耿明等（Yang et al., 2007）的剖面 Line 6 主要參考 S2 震測剖面繪製，Line 2 及 Line 3 參考震測剖面 S1。彰化斷層傾角由北而南分別為 60 度（Line 6），17 度（Line 5），22 度（Line 4），43 度（Line 3），40 度（Line 2）（圖 4. 15）。

Yue et al.（2005）繪製通過彰化斷層的剖面 YY’，並提出兩種可能的解釋，其中一種為斷層發育止於錦水頁岩層之上，另一種替代模式為車籠埔斷層切穿錦水頁岩層延伸至集集地震震源深度。兩種模式中的彰化斷層無明顯差異，皆根據濁水溪的震測測線 I 所繪製，傾角由淺至深自 28 度轉為 15 度，在深度約 4.5 公里延伸到錦水頁岩層（圖 4. 16）。

張中威（2023）繪製剖面 A、B、C 通過彰化斷層南端、車籠埔斷層、初鄉斷層、大茅埔—雙冬斷層，剖面 A 通過 TC-1 井，剖面 C 通過濁水溪震測剖面。剖面 C 中，彰化斷層依據 Yue et al.（2011）的震測剖面解釋所繪製，斷層傾角由 26 度向下變緩為 15 度，彰化斷層沿著錦水頁岩層中的滑移面延伸到車籠埔斷層底部，車籠埔斷層以東存在一東傾的初鄉斷層，初鄉斷層及滑移面向下延伸到集集地震的震源深度（圖 4. 17）。

5. 本計畫綜整評估（傾角）

何信昌與陳勉銘（2000）指出八卦-大肚台地之下存在兩個斷層，一個為高角度轉樞線斷層，一個為低角度的逆衝斷層。我們重新解讀資料，將震測剖面中的斷層分為高角度斷層以及低角度斷層，分別對應圖 4. 18 中的藍線及紅線。在 LINE S2 剖面中，我們將高角度斷層與下方的正斷層相連，且高角度斷層的上盤地層出現陷落現象，推測其斷層面應形成於過去的拉張環境中，而低角度的逆衝斷層則是後期擠壓環境中新發育的斷層。低角度斷層尖端沿伸至正斷層的斷層面破裂，造成局部地層上抬，逆衝滑動可能未延伸至地表，而在淺層地層中擠壓形成對稱形貌的背斜（圖 4. 18 b）。在 AA'剖面中，高角度斷層上盤地層厚度較厚，應是過去拉張時正斷層上盤堆積的沉積物，在約 1.5 公里深處，高角度斷層的上盤地層呈現拱起上抬的現象，暗示高角度斷層在後期擠壓環境中反轉為逆斷層（圖 4. 18 c）。

Mouthereau et al.（1999）推論八卦山北部可能存在轉移斷層帶。此外，八卦台地北部的背斜形貌較為對稱，而南部的背斜則顯示出後翼較長的不對稱特徵，暗示南北部斷層幾何形貌的差異，因此，本計畫將彰化斷層分為南、北兩段，分段位置位於有應公坑，該河道呈現南北向，異於該區域其他東西向的河道（圖 4. 19），暗示過去北高南低的抬升作用以及八卦山北部抬升可能早於南部抬升。彰化斷層北段為高角度斷層，對應轉樞線斷層反轉後形成的對稱型態的背斜，參考 Yang et al.（2007）的 LINE6、LINE7 剖面，斷層東傾 60 度（與大甲斷層幾何一致）；相對地，南段為低角度逆衝斷層，參考 Yang et al.（2007）的 LINE4、LINE5 剖面，斷層東傾 25 度，斷層未延伸至地表，深度自 2 公里以下延伸至基底滑移面。

4-1-2-3 斷層深度

1. 震測資料

根據 Simoes et al.（2007）對於通過烏溪（俗稱大肚溪）的震測資料解釋（Chang, 1971；Chen, 1978；Wang et al., 2002, 2003），彰化斷層未出露地表，斷層尖端約 1.5 公里深，在 4 公里深接到平緩的滑脫面（錦水頁岩層），斷層下方存在一轉樞線斷層（Hinge fault）（圖 4. 9）。

根據 Yang et al.（2007）的震測剖面解釋，濁水溪震測剖面 S1 中，彰化斷層呈現匙狀幾何形貌，斷層延伸至深度 TWT 約 3 秒處，大致沿著中新世地層底部或先中新世地層的不整合面滑動；在烏溪震測剖面 S2，彰化斷層底部的滑脫面位在中新世地層底部（TWT 約 3 秒），下方存在古正斷層（圖 4. 10）。

根據 Yue et al.（2011）對於濁水溪震測剖面的解釋（圖 4. 11），八卦背斜前翼短而後翼長，

呈現不對稱的幾何形貌，屬於剪切型斷層彎曲褶皺（Shear fault-bend fold），滑脫面位於約 4.5 公里深的錦水頁岩層，剪切層之上的地層傾角略緩於斷層傾角。剖面中彰化斷層為盲斷層，斷層切過頭嵙山層。此外，彰化斷層下方存在一古正斷層（Hinge fault）。

2. 地質剖面

根據周瑞燉（Chou, 1971）繪製的沿著烏溪（大肚溪）的地質剖面，PKS-1 井無鑽到彰化斷層的剪切帶，推測彰化斷層沿著背斜的前翼發育，截切頭嵙山層以及卓蘭層，而深部推測可能延伸到五指山層之下的先中新世（Pre-Miocene）的地層（圖 4. 12）。

Suppe（1985）提出薄皮理論（Thin-skinned model），以一低角度的滑移面將彰化斷層以及車籠埔斷層連為一斷層系統，滑移面位於錦水頁岩層中，深度約 5～6 公里，彰化斷層在剖面中為盲斷層（圖 4. 13）。而後 Yue et al.（2005）以 Shear fault-bend fold 模式解釋濁水溪的震測剖面，彰化斷層下的滑移面約 4.5 ～ 5 公里深，往東連接到車籠埔斷層後分為兩種模型，一為繼續往東與雙冬斷層相連（圖 4. 16 b），二為轉折向下連到集集地震的地震深度（圖 4. 16 c）。

Wang et al.（2000）將車籠埔斷層的深度延伸到集集地震的地震深度，而彰化斷層底部沿著更深的滑移面延伸到比車籠埔斷層更深的滑移面，分為兩種不同深度的滑移面（圖 4. 14）。Mouthereau et al.（2001）以厚皮理論（Thick-skinned model）解釋斷層剖面，認為車籠埔斷層延伸到集集地震的深度（圖 4. 20）。

Dominguez et al.（2003）根據地殼等溫線推估在地溫超過 400°C時，岩石轉為塑性變形，滑脫面深度達 12 公里深，12 公里深以下為間震期的無震滑移為主（Interseismic aseismic slip），10 公里以上為同震滑移（Coseismic slip）為主（圖 4. 21）。

Johnson et al.（2004）根據地質剖面資料認為斷層在北端及南端的深度不同，北邊斷層深度及滑移面較淺，南邊斷層深度及滑移面較深，與錦水頁岩層北淺南深的深度變化一致。

3. 平衡剖面

根據楊耿明等（Yang et al., 2007）繪製的平衡剖面 Line 4 通過八卦臺地南端，彰化斷層向下切到北寮層（Peiliao Formation, PL），深度約 6.5 公里（圖 4. 15）。

Yue et al.（2005）繪製的平衡剖面 YY’也通過八卦臺地南端，剖面根據濁水溪的震測測線 I 所繪製，彰化斷層延伸到錦水頁岩層，深度約 4.5 公里（圖 4. 16）。

張中威（2023）繪製的剖面 C 類似 Yue et al.（2005）的 YY’剖面，彰化斷層向下延伸到錦

水頁岩層中的滑脫面，深度約 4.5 公里，滑移面延伸到車籠埔斷層底部並轉折向下延伸到集集地震的震源深度（圖 4. 17）。

4. 地震深度分布

彰化斷層之下無明顯的地震群集，根據 Yue et al.（2005）的剖面，滑脫面延伸到集集地震的發震位置，集集地震深度為 8~10 公里（Chang et al., 2000；Kao et al., 2000），集集地震的餘震分布也主要集中於 10 公里左右。

5. 本計畫綜整評估（深度）

本計畫將彰化斷層分為南、北兩段並利用剖面圖來檢視滑脫面、彰化斷層、車籠埔斷層，三者的幾何關聯性與合理性，見圖 4. 19。假設滑脫面傾角約 5 度，深度延伸至 10 公里，考慮滑脫面的幾何及彰化斷層的位置與幾何，彰化斷層北段大約在 5.5 公里深接到滑脫面，南段大約在 7.5 公里深接到滑脫面。

4-1-2-4 滑移速率

Simoes et al.（2007）針對八卦台地的階地群，利用光螢光定年法（OSL）得到階地年代為 62.2 ± 9.6 ka，由 fault-tip folding model 推估斷層滑移速率得到縮短速率為 16.3 ± 4.1 mm/yr。

Yue et al.（2011）針對濁水溪區域的階地群，利用碳十四定年（Ota et al., 2002）得到階地年代約為 31 ka，由 shear fault-bend fold model 推估斷層滑移速率為 21 ± 5.8 mm/yr。

Siame et al.（2012）針對八卦台地南端階地群（PK1-6），利用宇宙射線定年法（Cosmogenic dating）及剪力型斷層彎曲褶皺模式（shear fault-bend fold）推估縮短速率，得到 PK-1 年代 399 ± 50 ka，縮短量 1517 ± 393 公尺，縮短速率 3.8 ± 1.1 mm/yr；PK-2 年代 350 ± 40 ka，縮短量 1444 ± 374 公尺，縮短速率 4.1 ± 1.2 mm/yr；PK-3 年代 322 ± 25 ka，縮短量 1257 ± 325 公尺，縮短速率 3.9 ± 1.1 mm/yr；PK-4 年代 200 ± 20 ka，縮短量 821 ± 213 公尺，縮短速率 4.1 ± 1.1 mm/yr；PK-5 年代 105 ± 19 ka，縮短量 678 ± 176 公尺，縮短速率 6.5 ± 2.0 mm/yr；PK-6 年代 28 ± 4 ka，縮短量 627 ± 162 公尺，縮短速率 22.8 ± 6.6 mm/yr。

以上長期滑移速率相關文獻彙整於表 4. 7 中。

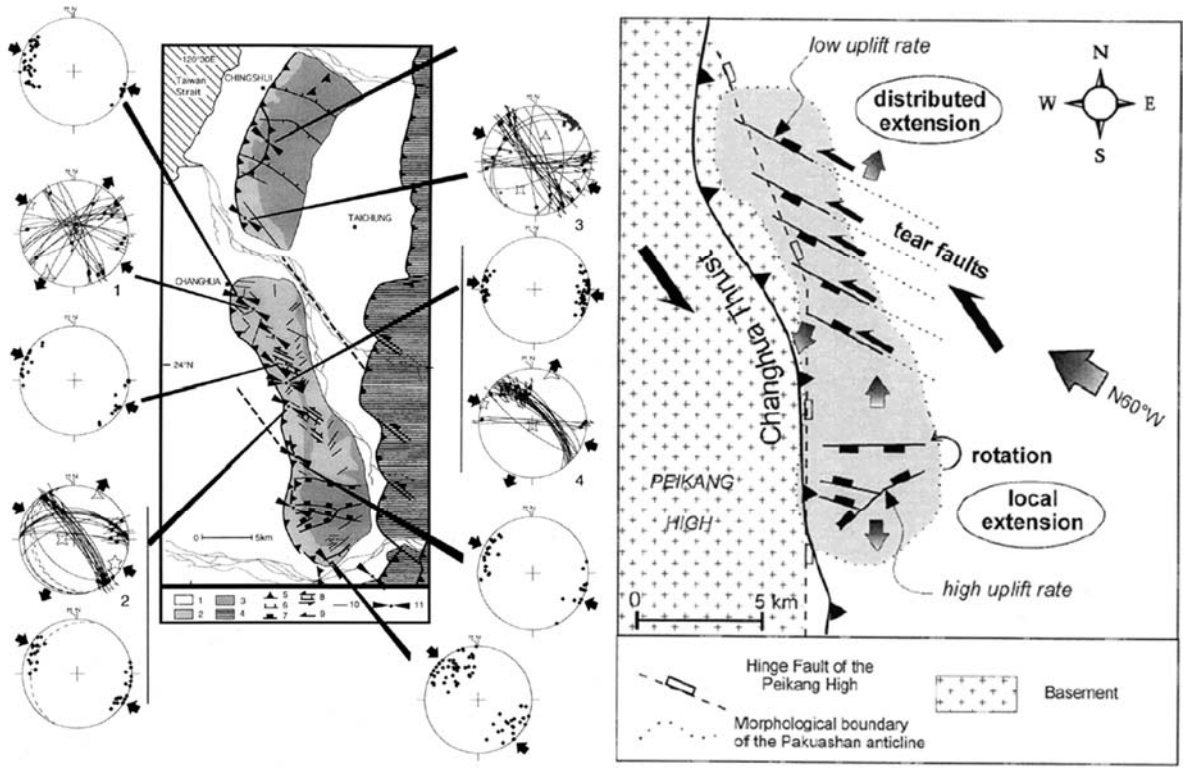


圖 4. 8：根據礫石裂縫方向與地層節理等微觀構造的觀察（左圖）推測八卦轉移斷層（Pakua Transfer fault zone）的存在（右圖）（Mouthereau et al., 1999）。

Figure 4. 8: Based on observations of microstructural features such as the gravel fracture directions and bedding joints (left image), the existence of the Pakua Transfer Fault Zone is proposed (right image) (Mouthereau et al., 1999).

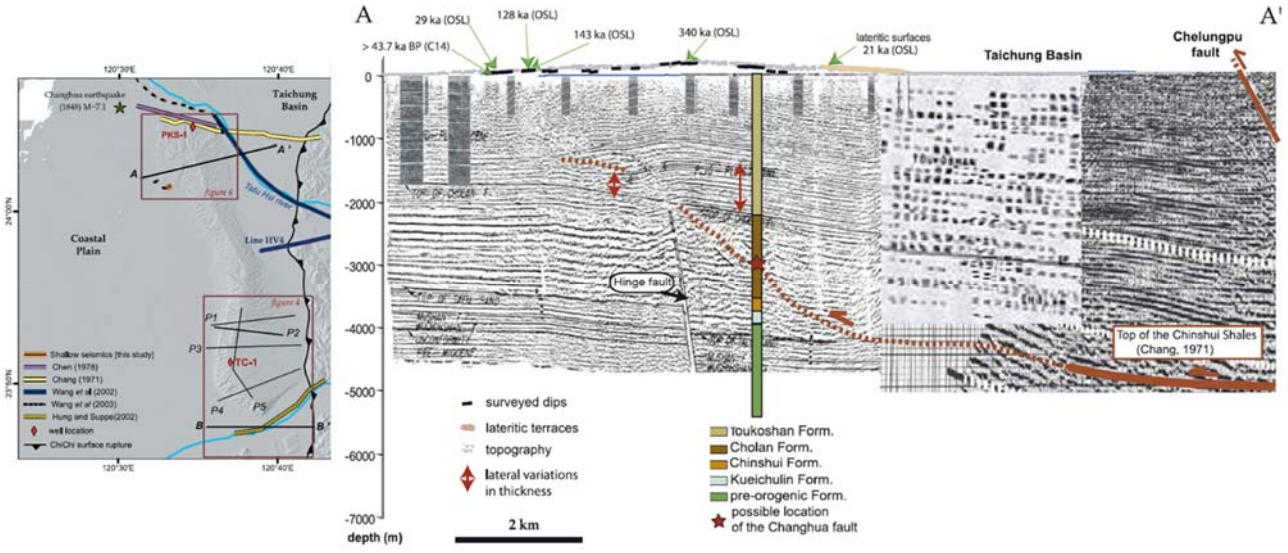


圖 4. 9：彰化斷層震測剖面與推測位置，Simoes et al.（2007）彙整前人震測資料、鑽井資料、以及階地定年資料，紅色虛線為推測的彰化斷層位置。

Figure 4. 9: Simoes et al. (2007) compiled previous seismic data, drilling data, and terrace dating information. The red dashed line indicates the inferred location of the Changhua Fault.

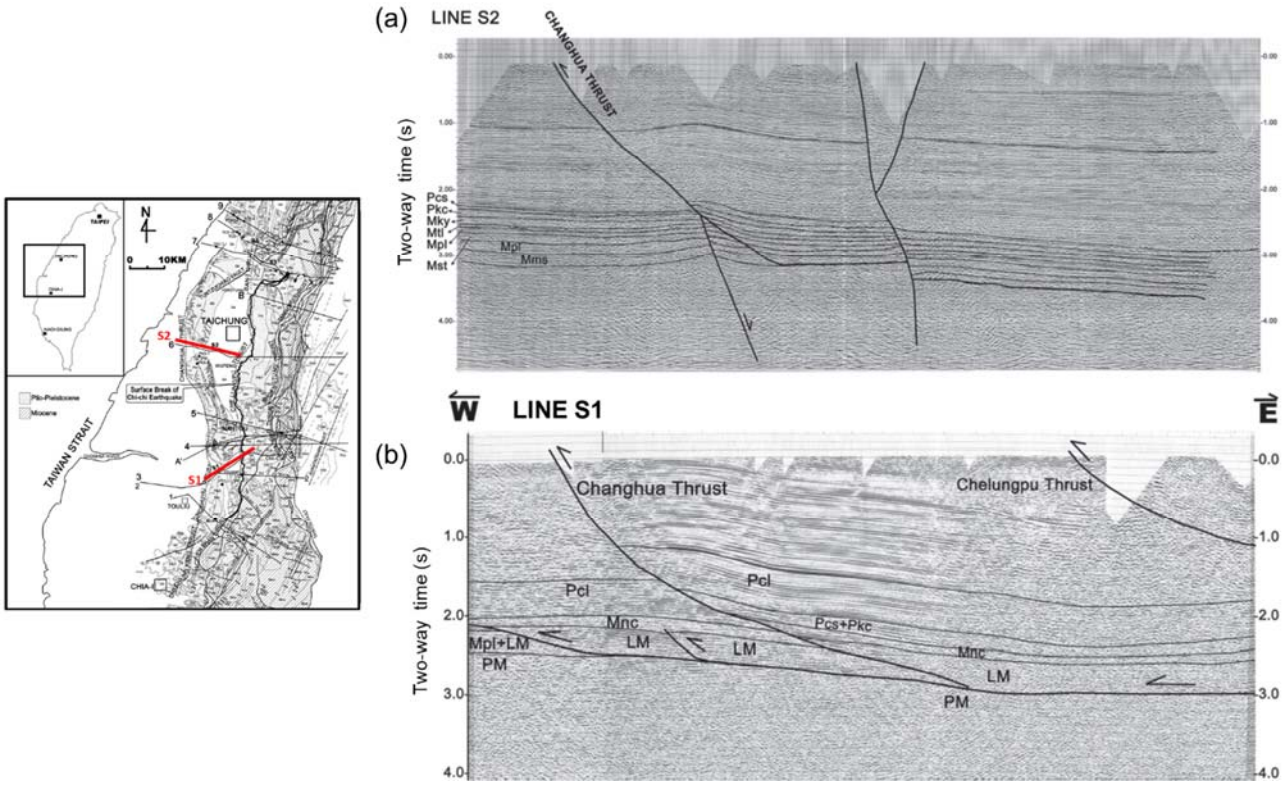


圖 4. 10：彰化斷層震測剖面解釋圖：(a)大肚溪測線 S2 以及(b)濁水溪測線 S1 的震測解釋圖(Yang et al., 2007)。

Figure 4. 10: The seismic profile interpretation of survey line S2 at Tatu River and survey line S1 at Choushui River from Yang et al. (2007).

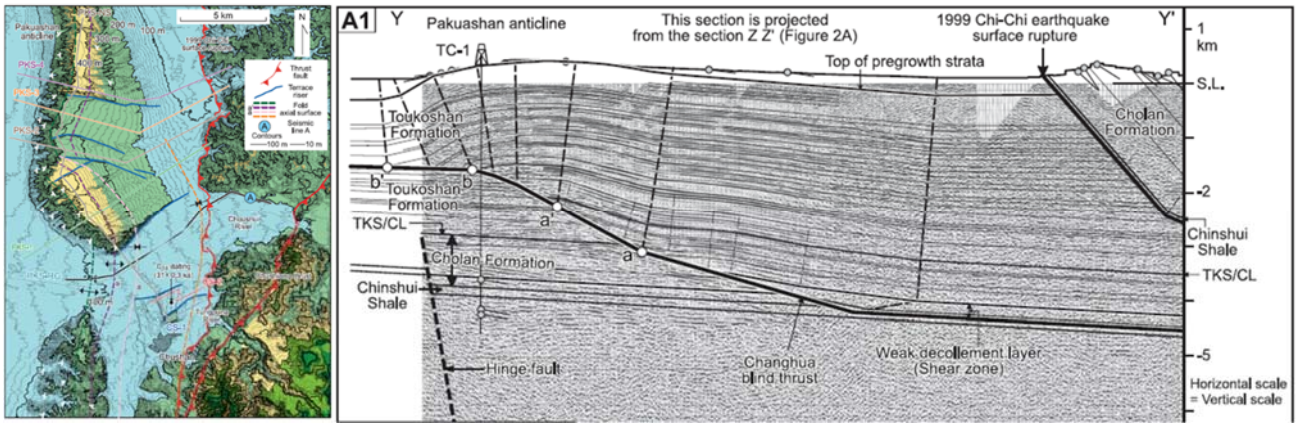


圖 4. 11：濁水溪震測剖面圖，Yue et al.（2011）利用剪切型斷層彎曲褶皺（Shear fault-bend fold）理論解釋濁水溪震測剖面圖，測線位於左圖的黑線（Seismic line A）。

Figure 4. 11: Yue et al. (2011) used shear fault-bend fold theory to interpret the seismic profile of the Choushui River. The location of seismic line A is shown in black line in the left figure.

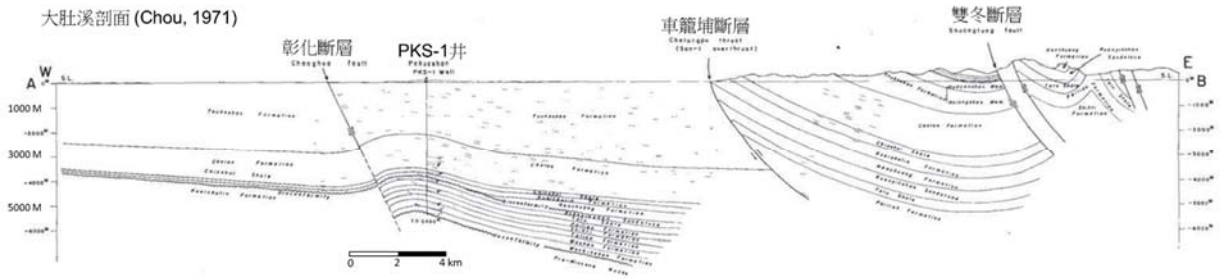


圖 4. 12：大肚溪地質剖面圖，Chou（1971）繪製之地質圖。

Figure 4. 12: The Geological profile from Chou (1971).

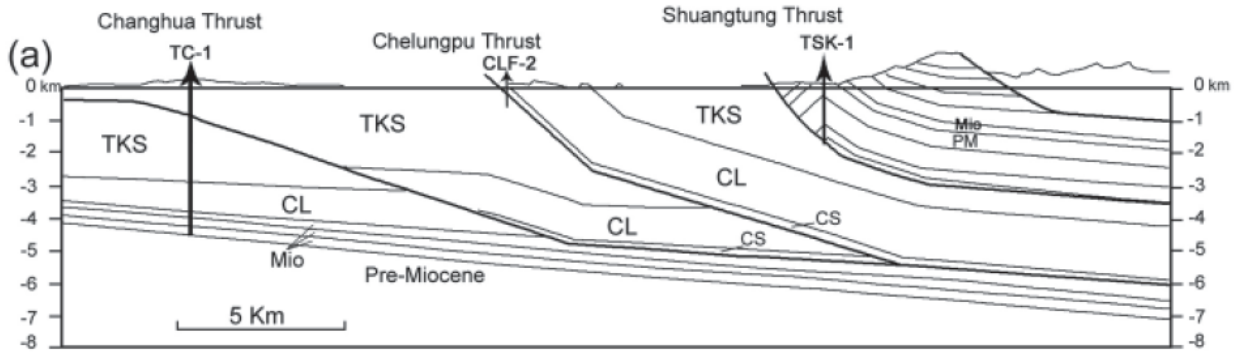


圖 4. 13：地質剖面圖，由 Suppe（1985）提出，地層由上而下分別是頭嵙山層（TKS）、卓蘭層（CL）、錦水頁岩層（CS），圖出自 Yang et al.（2007）。

Figure 4. 13: The cross-section proposed by Suppe (1985). The stratigraphic units from top to bottom are Toukoshan Formation (TKS), Chuolan Formation (CL), and Chinshui Shale Formation (CS). Compiled by Yang et al. (2007).

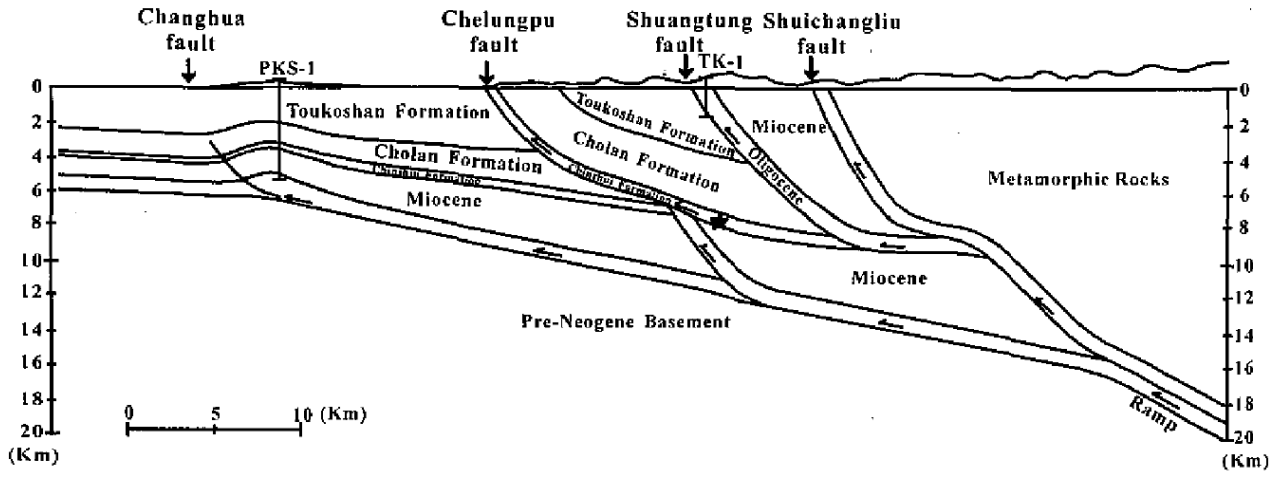


圖 4. 14：地質剖面圖，由 Wang et al.（2000）發表。

Figure 4. 14: Geological profile proposed by Wang et al. (2000).

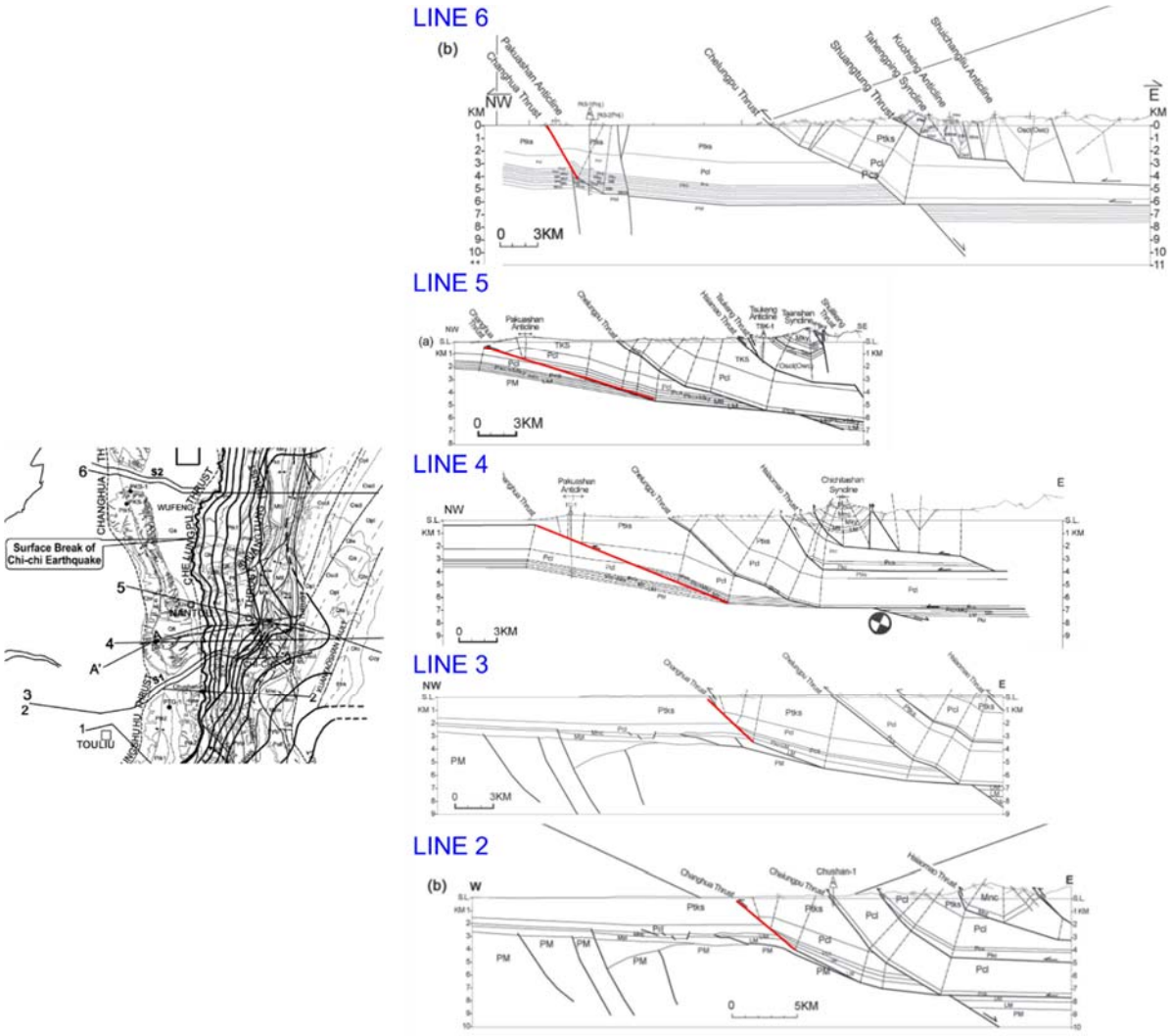


圖 4. 15：彰化斷層平衡剖面圖，由 Yang et al.（2007）發表，紅線為彰化斷層。

Figure 4. 15: The balanced cross-section published by Yang et al. (2007). The red line represents the Changhua Fault.

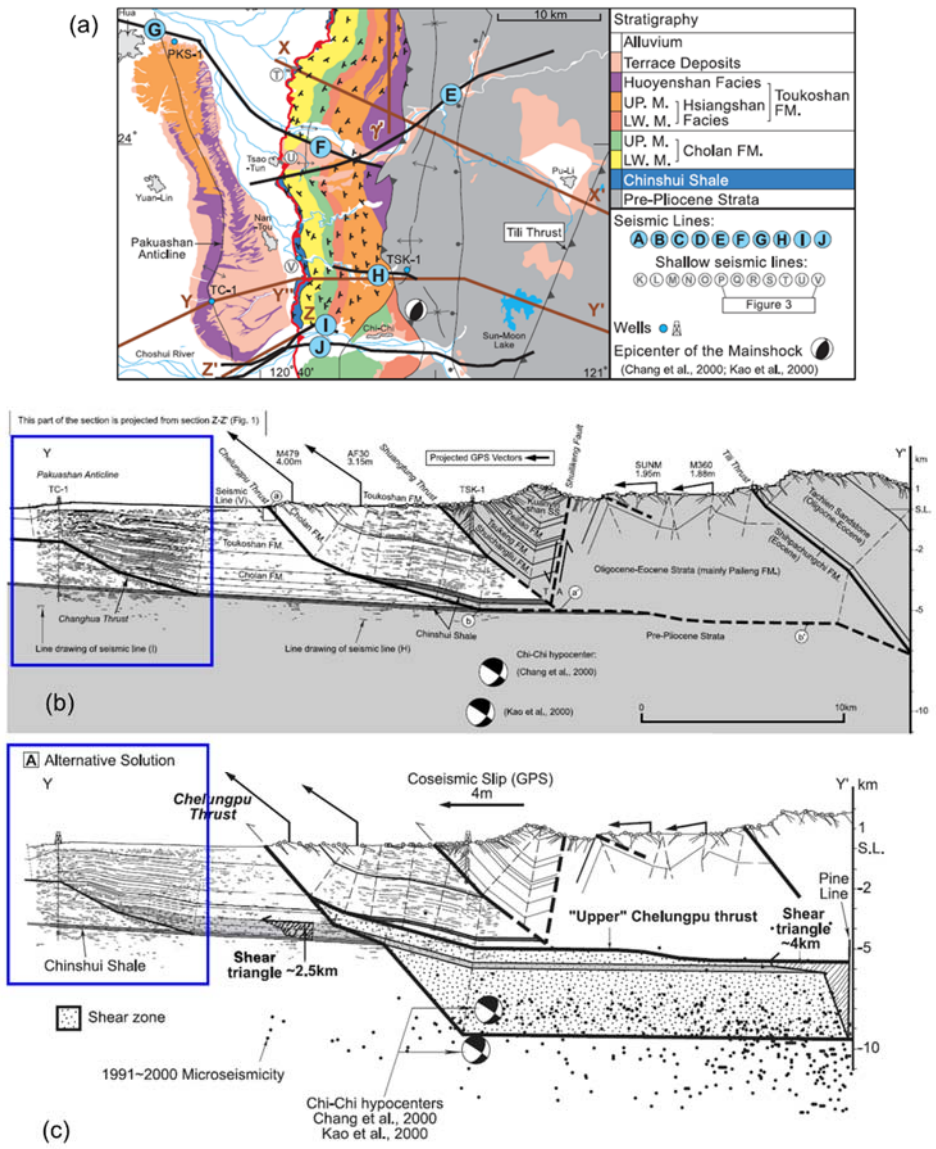


圖 4. 16：地質剖面圖，Yue et al.（2005）繪製剖面 YY'，剖面位置如圖（a）。彰化斷層位於（b）、（c）圖藍色方框區域，主要參考濁水溪的震測測線 I 繪製。

Figure 4. 16: Cross-section Y is from Yue et al. (2005), with its location shown in (a). The Changhua Fault is situated in the blue boxed areas in (b) and (c), sketched based on seismic profile I along the Choushui River.

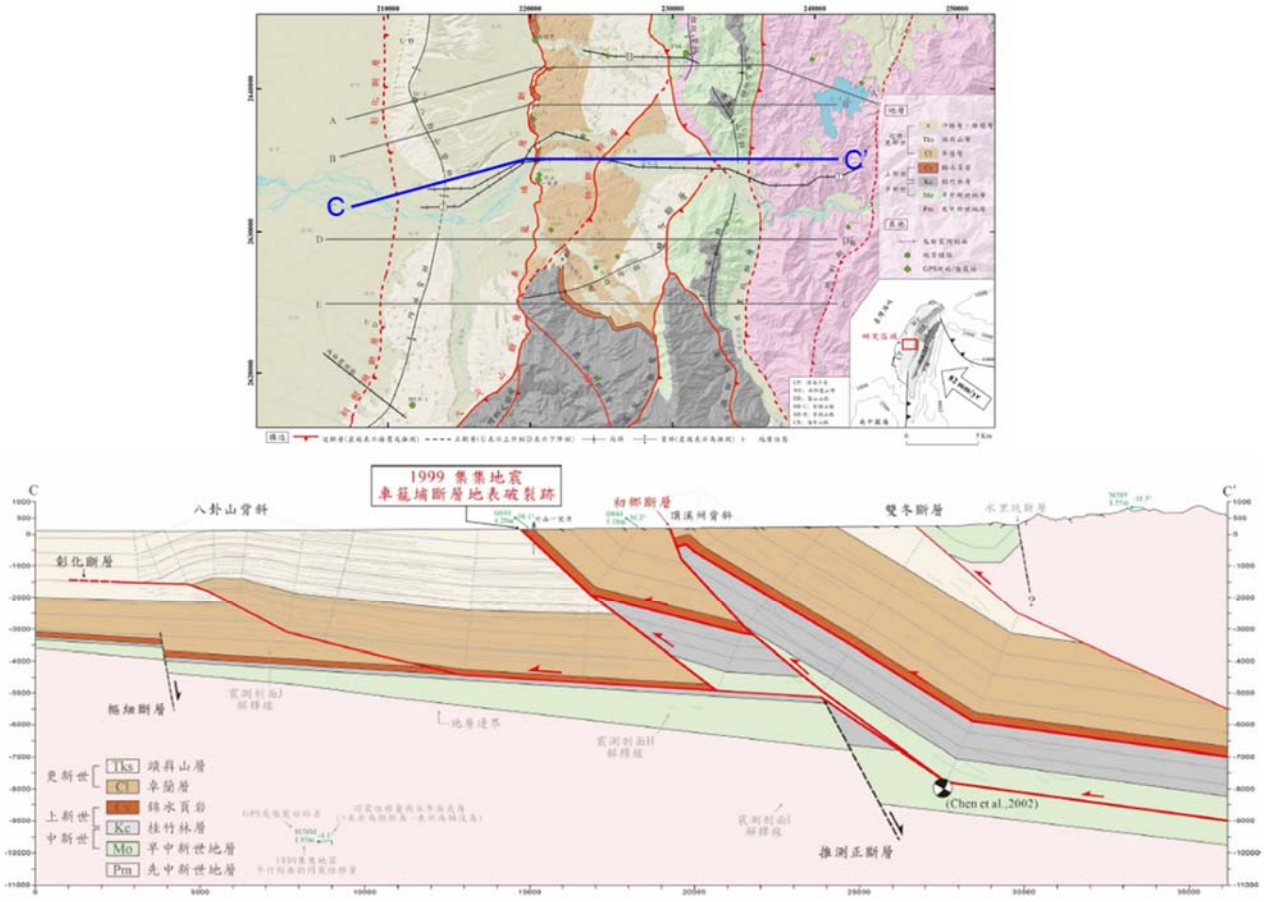


圖 4. 17：平衡剖面圖，張中威（2023）繪製的平衡剖面 CC’。

Figure 4. 17: Balanced cross section CC’ from Chang (2023).

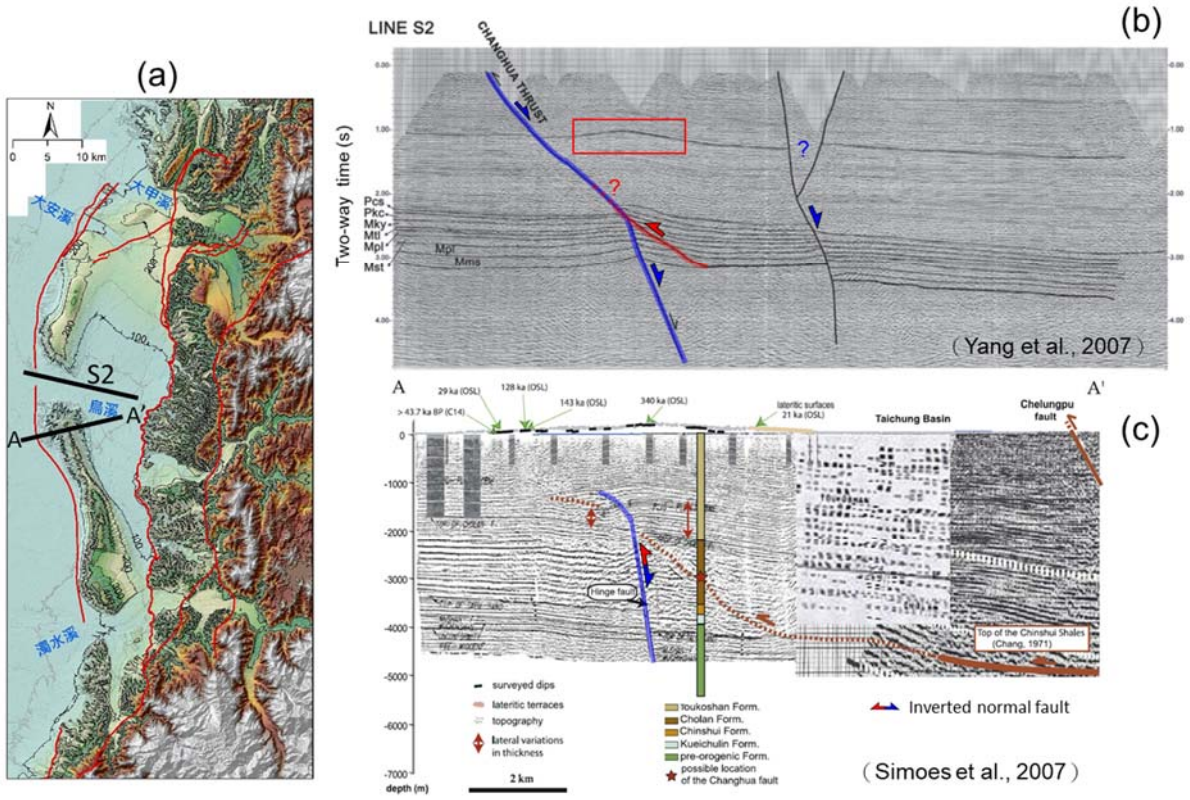


圖 4. 18：震測資料重新解讀。藍色線條為過去拉張時期形成的正斷層面，部分重新活動為逆斷層。紅色線條為後期擠壓環境中形成的低角度逆衝斷層。(b) 底部逆衝斷層滑動，而近地表的正斷層則保持鎖定不滑動，上盤地層因此拱起，形成對稱型態的背斜（紅色方框中）。(c) 轉樞線斷層（Hinge fault）及其向上延伸的地層不連續面（藍色線條）為正斷層重新活動為逆斷層的構造。對比斷層兩側的地層，東側上盤地層厚度較厚，深部上盤地層沉陷，淺部上盤地層抬升，此為正斷層重新活動為逆斷層的特徵。

Figure 4. 18: Reinterpretation of seismic data. The blue lines represent normal fault planes formed during past extensional periods, some of which have reactivated as reverse faults. The red lines indicate low-angle reverse faults formed in a later compressional environment. (b) The reverse fault slips, while the normal fault near the surface locked, causing the upper strata to deform and form a symmetrical fold (highlighted in the red box). (c) The hinge fault and its upward-extending fault (blue lines) are the interted normal fault proposed in this prodect. Comparing the layers on either side of the fault, the hanging wall strata are thicker, and the deeper layers subsidence on the hanging wall, and shallower layers uplifts on the hanging wall. This is the characteristics of inerted normal fault.

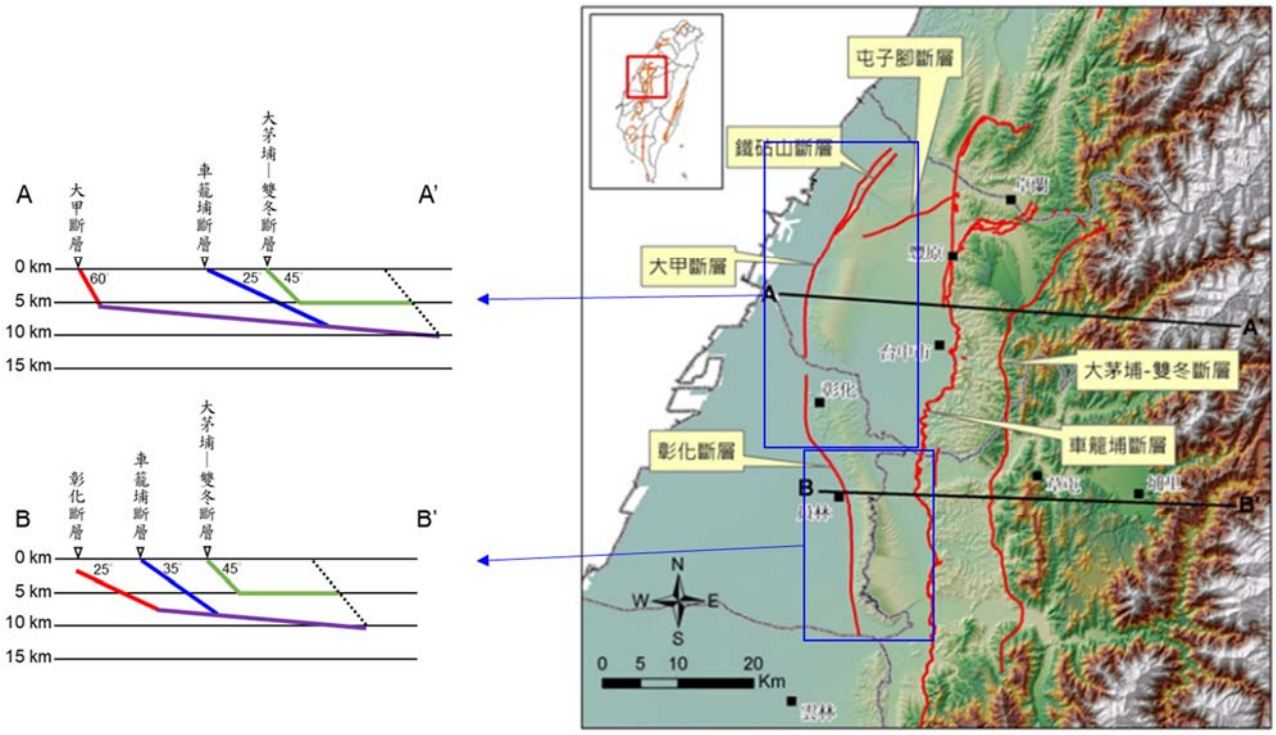


圖 4. 19：大甲−彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔−雙冬斷層以及滑脫面的地下幾何關係圖，紅線為大甲−彰化斷層、藍線為車籠埔斷層、綠線為大茅埔−雙冬斷層，以及紫線為滑脫面。

Figure 4. 19: The profile shows the subsurface geometric relationships of the Tachia-Changhua fault (red line), Chelungpu fault (blue line), Tamaopu-Shuangtung fault (green line), and the detachment fault (purple line).

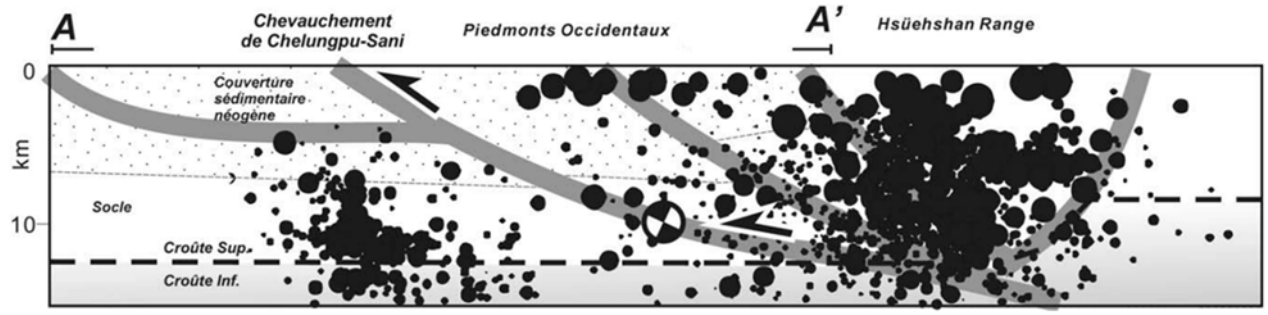


圖 4. 20：根據集集地震序列繪製的剖面圖（Mouthereau et al., 2001）。

Figure 4. 20: The subsurface profile based on the Chi-Chi earthquake sequence from Mouthereau et al. (2001).

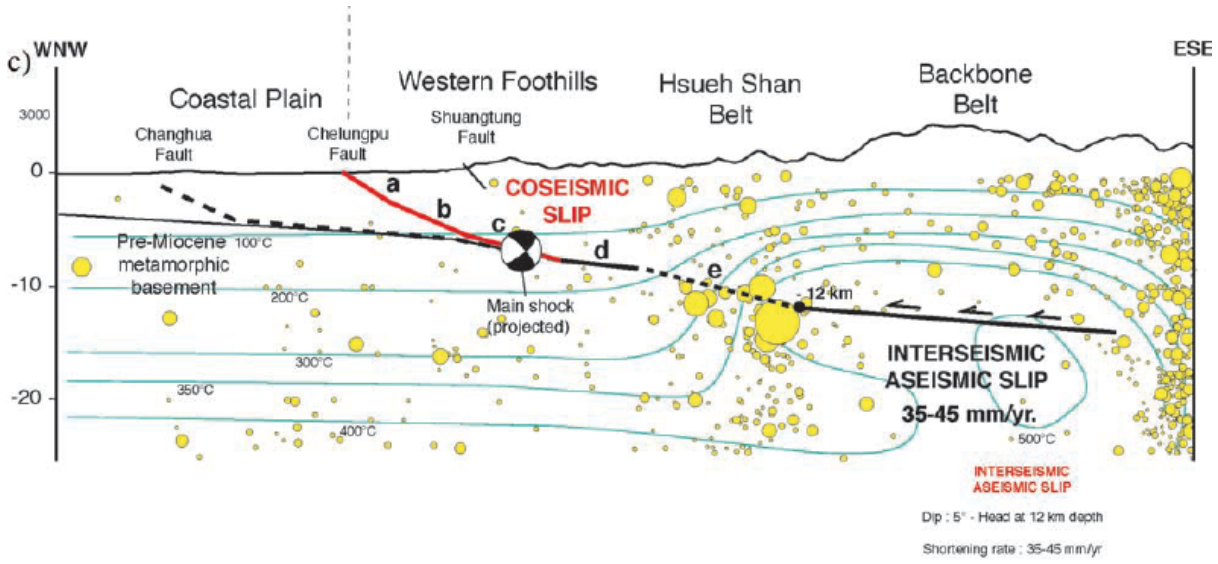


圖 4. 21：斷層模型剖面圖，Dominguez et al.（2003）的斷層模型剖面。淺綠色線為地殼等溫線，黃色圓圈為地震分布。

Figure 4. 21: The cross section of the fault model from Dominguez et al. (2003). The light green line represents isotherms, and yellow circles indicate seismic distribution.

表 4. 5：彰化斷層傾角相關文獻彙整

Table 4. 5: References related to the dip angle of the Changhua fault.

作者	方法	傾角
Chou（1971）	地質剖面	65 度
Suppe（1985）	地質剖面	16 度
Simoes et al.（2007）	震測剖面	40 度
Wang et al.（2000）	地質剖面	由淺至深自 50 度轉為 10 度
Yang et al.（2007）	震測剖面、平衡剖面	由北而南分別為 60 度（Line 6），17 度（Line 5），22 度（Line 4），43 度（Line 3），40 度（Line 2）
Yue et al.（2005；2011）	震測剖面、平衡剖面	由淺至深從 28 度轉為 15 度
張中威（2023）	參考 Yue et al.（2011）震測剖面解釋	傾角由 26 度向下變緩為 15 度
本計畫綜整評估	北：參考轉樞線斷層幾何 南：參考逆衝斷層幾何	北：60 度 南：25 度

表 4. 6：彰化斷層深度相關文獻彙整

Table 4. 6: References related to the depth of the Changhua fault.

文獻	方法	深度
Chou（1971）	地質剖面	延伸到先中新世地層，約 6 公里深。
Suppe（1985）	平衡剖面	提出薄皮理論（Thin-skinned model），滑脫面深度約 6 公里。
Wang et al.（2000）	地質、地震分布	斷層延伸至集集地震震央深度。淺部滑脫面深度延伸至約 9 公里。深部滑脫面延伸至約 16 公里。
Mouthereau et al.（2001）	地質、地震分布	以厚皮理論（Thick-skinned model）解釋斷層可能延伸至地震深度，約 12 公里深。
Dominguez et al.（2003）	測地資料、地溫分布、地震分布	<9 公里為 coseismic slip，約 12 公里以上轉為 interseismic aseismic slip。
Johnson et al.（2004）	測地資料	滑脫面深度在北邊較淺（6 公里），往南漸漸變深（10 公里），對應錦水頁岩地層深度變化。
Yang et al.（2007）	平衡剖面	滑脫面約 6 公里，彰化斷層滑移面在北寮層，車籠埔斷層滑移面在錦水頁岩層。
Yue et al.（2005）	平衡剖面、地震分布	滑脫面約 6 公里深，再延伸至地震深度約 9.5 公里，
張中威（2023）	平衡剖面	加入初鄉斷層，滑脫面在古正斷層處轉折往下，延伸到集集地震震源深度。
本計畫綜整評估	從彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔雙冬斷層的二維剖面推估。	北：5.5 公里 南：7.5 公里

表 4. 7：彰化斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 4. 7: References related to the slip rate of the Changhua fault.

參考文獻	方法	長期滑移速率（mm/yr）	年代
Simoes et al.（2007）	階地定年	16.3 ± 4.1（縮短速率）	62.2 ± 9.6 ka
Yue et al.（2011）	階地定年	21 ± 5.8（縮短速率）	31 ka
Siame et al.（2012）	階地定年	3.8 ± 1.1（PK-1）（縮短速率）	399 ± 50 ka
		4.1 ± 1.2（PK-2）（縮短速率）	350 ± 40 ka
		3.9 ± 1.1（PK-3）（縮短速率）	322 ± 25 ka
		4.1 ± 1.1（PK-4）（縮短速率）	200 ± 20 ka
		6.5 ± 2.0（PK-5）（縮短速率）	105 ± 19 ka
		22.8 ± 6.6（PK-6）（縮短速率）	28 ± 4 ka

4-1-3 其他主要斷層

4-1-3-1 車籠埔斷層

1. 前人文獻

根據地礦中心（林啟文，2021）公布之活動斷層線，車籠埔斷層長約 76 公里，屬第一類活動斷層，運動方式為逆滑。在集集地震的同震變形分布中可觀察到車籠埔斷層北段的位移相較於南段高，此差異大致以草湖溪為界（Chen et al., 2007；Yue et al., 2005）（圖 4. 22、圖 4. 23）。此外，集集地震地表破裂在埤豐橋以東位態有明顯變化，走向由南北向轉為東西向（李元希等，2000）。本計畫以石岡壩、草湖溪為界分為三種斷層面。除了車籠埔斷層以外，大尖山斷層北段、初鄉斷層、鹿寮斷層也被認為在集集地震中有活動的跡象（李元希等，2000；李元希等，2002）。初鄉斷層與鹿寮斷層相關文獻於 3-1-3-3 章節中探討。

車籠埔斷層幾何相關文獻蒐集如下：

Suppe（1985）以薄皮理論（thin-skinned model）繪製平衡剖面，車籠埔斷層沿著錦水頁岩層中的滑移面逆衝至地表，滑移面往西與彰化斷層相連。車籠埔斷層淺部傾角約 40 度，深部傾角約 17 度，深度 5.5 公里（圖 4. 13）。Mouthereaua et al.（2001）以厚皮理論（thick-skinned model）解釋車籠埔斷層往下延伸至集集地震序列深度，深度達 10 公里以上（圖 4. 20）。Dominguez et al.（2003）根據 SPOT 衛星影像集集地震的水平同震變形分布以及地殼 400℃等溫線推估斷層底部的滑移機制，認為車籠埔斷層深部（>12 公里）可能連接至中央山脈下的近乎水平向的剪切帶，12 公里深以下為間震期的無震滑移為主（Interseismic aseismic slip），10 公里以上為同震滑移（Coseismic slip）為主（圖 4. 21）。Johnson et al.（2004）參考 Hung and Suppe（2002）的剖面建立斷層面進行同震變形反演，北邊及南邊的斷層面深度不同，傾角也不同，北邊斷層面傾角約 25 度，滑脫面深度約 6 公里，南邊斷層面傾角約 35 度，滑脫面深度約 10 公里（圖 4. 24）。Yue et al.（2005）根據地表地質建立 47 條地質剖面，並建立車籠埔斷層三維幾何面，如圖 4. 23 所示。Yang et al.（2007）由震測、重力、鑽探及地面地質調查資料建構台灣中部之平衡剖面，斷層幾何由北而南分別為 Line 6：30 度（0-6 公里深）；Line 5：淺部 30 度（0-3.5 公里深）轉為深部 16 度（3.5-5.5 公里深）；Line 4：淺部 40 度（0-4.5 公里深）轉為深部 25 度（4.5-7 公里深）；Line 3：38 度（0-7 公里深）（圖 4. 15）。

車籠埔斷層長期滑移速率相關文獻蒐集如下：

陳于高等人（Chen et al., 2003）在石岡、新社、霧峰、草屯進行階地定年並估算階地垂直變動速率，利用碳十四定年（radiocarbon dating）以及螢光定年法（luminescence dating method）得到石岡地區的垂直變動速率約為 8.6 ~ 11.7 mm/yr，新社約為 5.6 ~ 9.9 mm/yr，霧峰約為 5.5 ~ 6.7 mm/yr，草屯約為 2.8 ~ 5.0 mm/yr。陳文山等人（Chen et al., 2007）在車籠埔斷層沿線進行槽溝研究，推估垂直變動速率由北而南分別為鳳梨園 3.2 ± 0.2 mm/yr，仙公廟 2.3 ± 0.1 mm/yr，霧峰 3.0 ± 0.3 mm/yr，釋迦園 3.4 ± 0.3 mm/yr，名間 4.7 ± 0.3 mm/yr，以及竹山 3.9 ± 0.2 mm/yr。Yue et al.（2011）根據新社以及草屯地區的褶皺崖高與階地高差發現新社地區滑移速率為草屯地區的兩倍，顯示車籠埔斷層北段相較南段滑移速率快兩倍（圖 4. 25）。Yue et al.（2011）利用褶皺崖估算新社地區及草屯地區滑移速率分別為 14.5（+4.3, -2.7）mm/yr 以及 7.8（+1.8, -1.2）mm/yr，利用階地高差估算新社地區滑移速率為 13.8（+4.1, -2.6），草屯地區為 6.8（+1.6, -1.0）mm/yr。長期滑移速率相關文獻整理於表 4. 9。

2. 本計畫綜整評估

綜合前人研究，車籠埔斷層的滑移面北淺南深，在埤豐橋以東斷層走向轉為近東西向，本研究認為車籠埔斷層的幾何可分為三段，一為埤豐橋以東近東西走向的斷層面，二為斷層面較淺較緩，集集地震中滑移量較大的北段，三為草湖溪以南斷層面較陡，深度較深，集集地震中滑移量較小的南段。

根據 Yue et al.（2005）的研究（圖 4. 23），車籠埔斷層的幾何特徵顯示出明顯的傾角變化。車籠埔斷層在石岡壩以東，斷層傾角 15 度南傾，而在埤豐橋以南，北段的傾角較為緩和，而南段則較為陡峭。北段斷層傾角約 25 度東傾，南段斷層傾角約 35 度。

我們利用剖面圖來檢視滑脫面、彰化斷層、車籠埔斷層，三者的幾何關聯性與合理性，見圖 4. 19。假設滑脫面傾角約 5 度，深度延伸至 10 公里，考慮滑脫面的幾何及車籠埔斷層的位置與幾何，車籠埔斷層北段大約在 8.5 公里深接到滑脫面，南段大約在 8 公里深接到滑脫面。

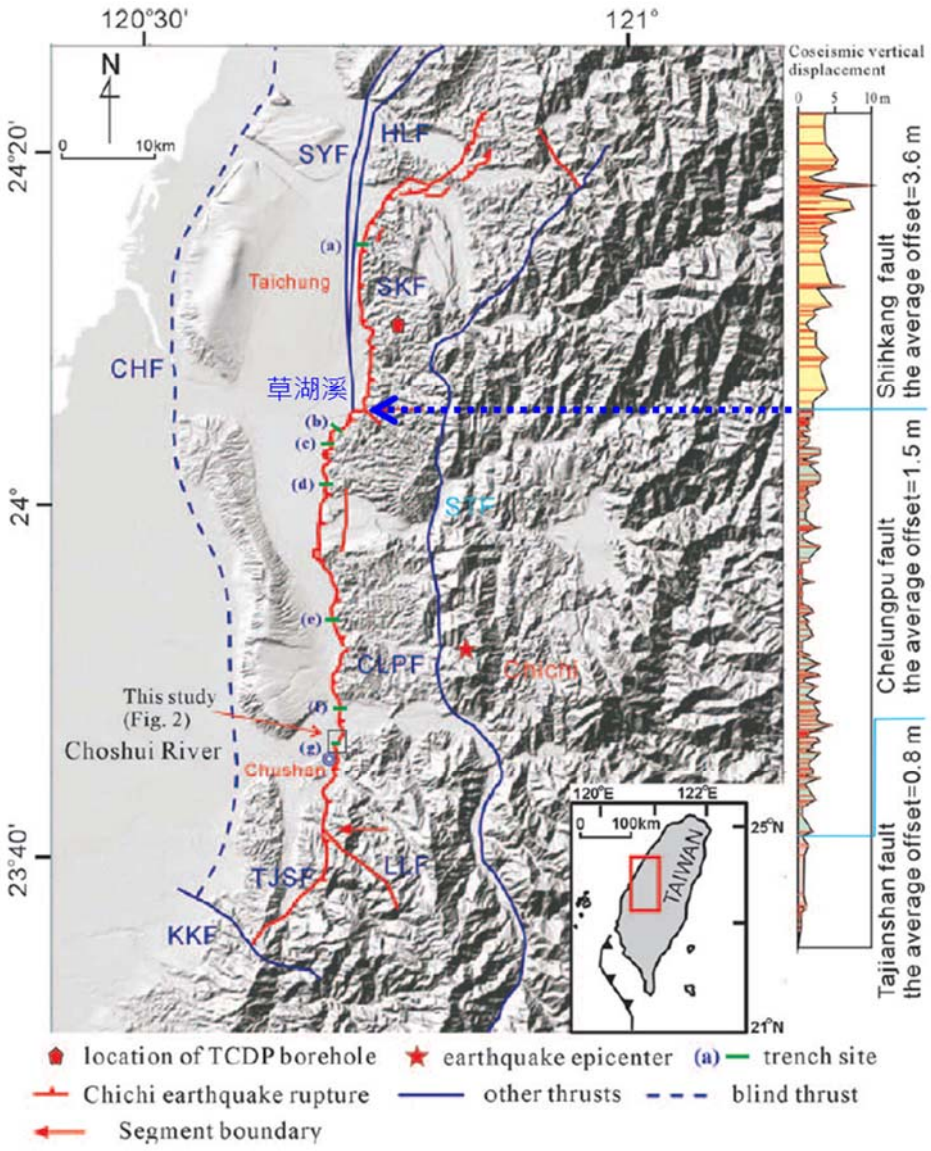


圖 4. 22：車籠埔斷層槽溝位置圖（左）與同震垂直位移分布圖（右）(Chen et al., 2007)。

Figure 4. 22: Map showing Chelungpu Fault trench location (left) and coseismic vertical displacement distribution (right)(Chen et al., 2007).

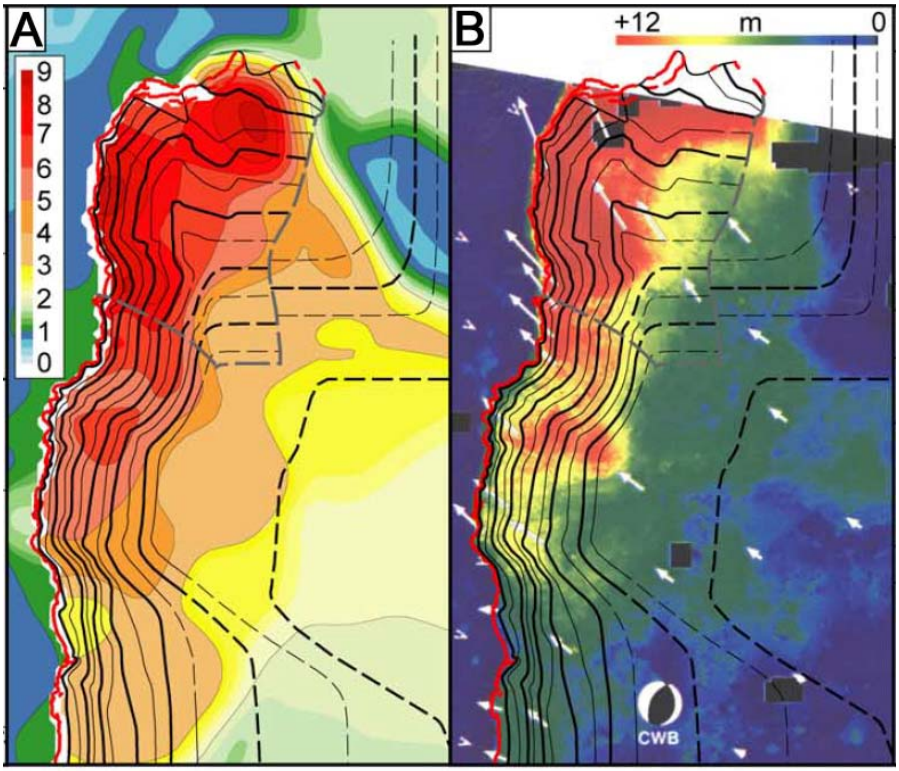


圖 4. 23：車籠埔斷層面幾何以及 1999 年同震地表變位圖。Yue et. al.（2005）建立之車籠埔斷層面幾何（黑色實線為斷層面等深線）以及 1999 年同震地表變位（A）GPS 及（B）Spot 影像之地圖。

Figure 4. 23: Yue et al. (2005) established the geometry of the Chelungpu Fault plane (solid black lines are fault plane contours) and maps of coseismic displacements in 1999 using (A) GPS and (B) SPOT imagery.

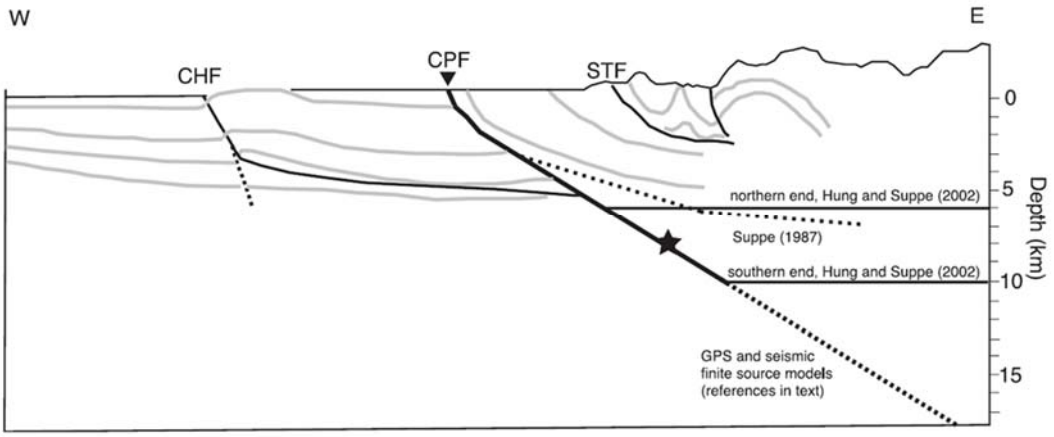


圖 4. 24：車籠埔斷層剖面圖，由 Johnson et al.（2004）繪製。上部虛線為 Suppe（1987）推測之斷坡-滑脫面，下部虛線為斷坡向下的延伸，水平實線為 Hung and Suppe（2002）建議之基底滑脫面，星號為 8 公里深度之集集地震。

Figure 4. 24: Cross-section of the Chelungpu fault from Johnson et al. (2004). The upper dashed line represents the ramp–décollement proposed by Suppe (1987), and the lower dashed line extends from the ramp. The horizontal solid line indicates the basal detachment proposed by Hung and Suppe (2002). Star represents the Chi-Chi earthquake at 8 km depth.

表 4. 8：車籠埔斷層幾何相關文獻彙整

Table 4. 8: References related to the geometry of the Chelungpu fault.

作者	方法	傾角	深度
Suppe（1985）	平衡剖面	淺部40度，深部17度	滑脫面位於錦水頁岩層，深度約6公里。
Mouthereaua et al.（2001）	地震分布	--	斷層延伸至地震深度，約12公里深。
Dominguez et al.（2003）	測地資料、地溫分布、地震分布	--	<9公里為coseismic slip，約12公里以上轉為interseismic aseismic slip。
Johnson et al.（2004）	測地資料	北：傾角約25度 南：傾角約35度	滑脫面深度在北邊較淺（6公里），往南漸漸變深（10公里），對應錦水頁岩地層深度變化。
Yang et al.（2007）	平衡剖面	傾角約30～40度	車籠埔斷層滑移面在錦水頁岩層，深度約6～8公里。
Yue et al.（2005）	平衡剖面、地震分布	三維斷層面傾角約15～35度	滑脫面約6公里深，再延伸至地震深度約9.5公里，
本計畫綜整評估	傾角參考 Yue et al.（2005）建立的車籠埔斷層幾何。深度從彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔雙冬斷層的二維剖面推估。	埤豐橋以東：15度 草湖溪以北：25度 草湖溪以南：35度	埤豐橋以東：8.5公里 草湖溪以北：8.5公里 草湖溪以南：8.0公里

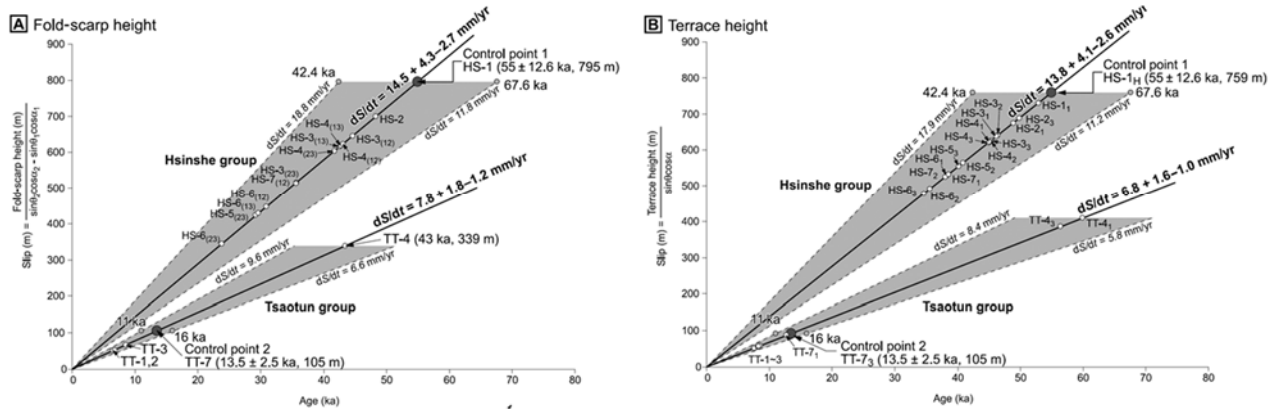


圖 4. 25：利用褶皺崖高與階地高計算之滑移速率，Yue et al.（2011）利用（左）褶皺崖高計算之滑移速率與（右）階地高計算之滑移速率。

Figure 4. 25: Slip rates calculated by using (left) fold-scarp heights and (right) terrace heights. (Yue et al., 2011)

表 4. 9：車籠埔斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 4. 9: References related to the slip rate of the Chelungpu fault.

文獻	方法	長期滑移速率
Chen et al.（2003）	階地定年	石岡：8.6 ~ 11.7 mm/yr（垂直） 新社：5.6 ~ 9.9 mm/y（垂直） 霧峰：5.5 ~ 6.7 mm/yr（垂直） 草屯：2.8 ~ 5.0 mm/yr（垂直）
Chen et al.（2007）	槽溝資料	鳳梨園：3.2 ± 0.2 mm/yr（垂直） 仙公廟：2.3 ± 0.1 mm/yr（垂直） 霧峰：3.0 ± 0.3 mm/yr（垂直） 釋迦園：3.4 ± 0.3 mm/yr（垂直） 名間：4.7 ± 0.3 mm/yr（垂直） 竹山：3.9 ± 0.2 mm/yr（垂直）
Yue et al.（2011）	褶皺崖高	新社：14.5（+4.3, -2.7）mm/yr 草屯：7.8（+1.8, -1.2）mm/yr
	階地高差	新社：13.8（+4.1, -2.6）mm/yr 草屯：6.8（+1.6, -1.0）mm/yr

4-1-3-2 大茅埔–雙冬斷層

根據地礦中心（林啟文，2021）公布之活動斷層線，大茅埔–雙冬斷層長約 69 公里，屬於第一類活動斷層，運動方式為逆滑。根據五萬分之一地質圖說明書的描述（羅偉等，1999），雙冬斷層最早由大江二郎（1938）國姓油田地質報告中提出，南起烏溪南岸的雙冬，北至大甲溪馬鞍寮與大茅埔斷層相連，雙冬斷層向南延伸即為集集大山煤田報告中所稱之哮貓斷層。大茅埔–雙冬斷層兩側地層不同，羅偉等（1999）在 136 號公路中埔十橋發現雙冬斷層露頭，上盤出露桂竹林層，下盤出露頭嵙山層（圖 4.26）。地質調查所在南投馬鄰坑發現雙冬斷層露頭，斷層上盤為深坑砂岩，下盤為頭嵙山層（林啟文等，2008）（圖 4.27）。斷層兩側地層落差至少 1 千公尺以上（羅偉等，1999）。集集地震時雙冬斷層沿線有噴沙現象（黃鑑水與陳勉銘，2000）（圖 4.28）。

大茅埔–雙冬斷層幾何相關文獻如下：

邱華燈（Chiu, 1972）於雙冬西南方的河床發現斷層露頭，斷層面東傾 55 度。黃鑑水等（2000）在雙冬西南方的斷層露頭觀察到斷層面東傾約 40 度，黃鑑水與陳勉銘（2000）在烏溪以南觀察到 3 個斷層露頭，斷層面東傾約 35 - 45 度。邱華燈（Chiu, 1975）根據鑽穿雙冬斷層之中油公司 TSK-1 井，估算斷層傾角約為 45 度（圖 4.29）。羅偉等（1999）根據地表地質調查認為雙冬斷層可能是一高角度逆衝斷層，傾角可能高達 60 度或 70 度，但往下可能轉為低角度的逆斷層，上盤地層東傾 30 至 70 度（圖 4.30）。Suppe（1985）繪製的剖面中（圖 4.13），雙冬斷層由淺至深漸漸變緩，傾角由 50 度漸漸變緩為 5 度，與車籠埔斷層不相連。根據 Yang et al.（2007）建立通過 TSK-1 井的平衡剖面 Line 5，大茅埔–雙冬斷層傾角約 40 度（剖面中的哮貓斷層，圖 4.15），斷層傾角在深部漸漸趨緩，在 3 公里深處繼續轉折向下；LINE 6 剖面中雙冬斷層呈現斷坡–斷坪–斷坡–斷坪的幾何形貌，斷層延伸至約 5 公里深的卓蘭層中，與車籠埔斷層的滑脫面（6 公里深的錦水頁岩層）不相連。Yue et al.（2005）繪製平衡剖面中，雙冬斷層傾角約 45 度，深度約 5 公里（Y 剖面，圖 4.16），斷層深部連接至車籠埔斷層。

本計畫參考 Yang et al.（2007）繪製的幾何簡化傾角為 45 度，深度約 5 公里，不與車籠埔斷層相連。（圖 4.19）。

大茅埔–雙冬斷層無長期滑移速率相關地質文獻。



圖 4. 26：桂竹林層與頭嵙山層之間為斷層接觸關係，位於 136 號公路中埔十號橋（出自五萬分之一地質圖說明書，羅偉等，1999）。

Figure 4. 26: An outcrop of the Shuangtung fault. The hanging wall is the sandstone of the Kueichulin Formation, and the foot wall is the conglomerate of the Toukoshan Formation. Photograph at No. 10 Bridge on Highway 136 in Zhongpu Township (from 1:50,000 geological map, Lo et al., 1999).



圖 4. 27：雙冬斷層露頭，位於南投馬鞍坑（林啟文等，2008）。

Figure 4. 27: An outcrop of the Shuangtung fault. Located at Malinkeng, Nantou. (Lin et al., 2008).



圖 4. 28：集集地震時雙冬斷層沿線上發生噴沙與地表破裂，（a）噴沙（位於馬鄰坑）與（b）地表破裂的現象（位於平林溪溪床）。出自黃鑑水與陳勉銘（2000）。

Figure 4. 28: (a) Soil liquefaction (located at Malinkeng) and (b) surface rupture occurred along the Shuangtung fault during the Chi-Chi earthquake (From Huang and Chen, 2000).

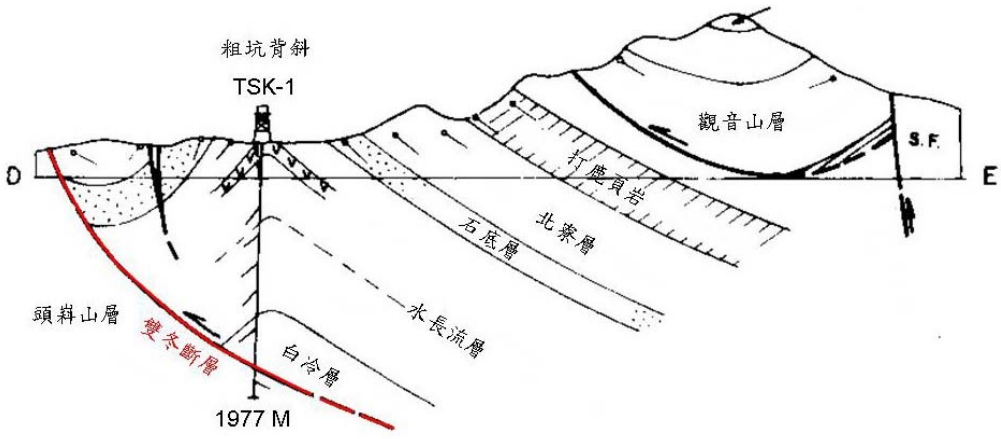


圖 4. 29：通過 TSK-1 井之地質剖面圖（Chiu, 1975）。

Figure 4. 29: Cross-section through well TSK-1 (Chiu, 1975).

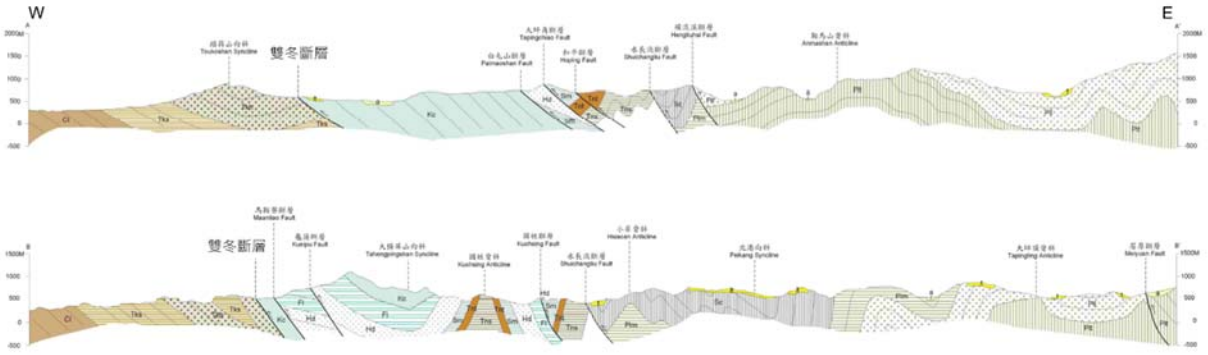


圖 4. 30：通過雙冬斷層之地質剖面圖（出自五萬分之一地質圖，羅偉等，1999）。

Figure 4. 30: Geological profile through the Shuangtung fault (from 1:50,000 geological map, Lo et al., 1999)

表 4. 10：大茅埔–雙冬斷層傾角相關文獻彙整

Table 4. 10: References related to the dip angle of the Tamaopu-Shuangtung fault.

參考文獻	調查方法	傾角
Chiu（1972）	野外斷層露頭（位於雙冬西南方 2 公里的河床）	斷層位態為 N50E / 55E
黃鑑水等（2000）	雙冬西南方的露頭	東傾 40 度
黃鑑水與陳勉銘（2000）	烏溪以南的地區發現三個雙冬斷層露頭	35～45 度
Chiu（1975）	中油 TSK-1 鑽井及地層對比	45 度
羅偉等（1999）	地表地質	淺部高角度，深部低角度
Suppe, 1985	平衡剖面	由淺至深由陡變緩，傾角由 50 度漸變為 5 度
Yang et al.（2007）	LINE 6 平衡剖面	斷坡 40°–斷坪 4°–斷坡 50°–斷坪 2°
Yue et al.（2005）	平衡剖面	淺部 50 度，深部 30 度

表 4. 11：大茅埔–雙冬斷層深度相關文獻彙整

Table 4. 11: References related to the depth of the Tamaopu-Shuangtung fault.

參考文獻	調查方法	深度
Suppe（1985）	平衡剖面	約 3.5 公里，與車籠埔斷層不同滑脫面。
Yang et al.（2007）	平衡剖面	約 4.5 公里，與車籠埔斷層不同滑脫面。
Yue et al.（2005）	平衡剖面	滑脫面約 6 公里，與車籠埔斷層相連。

4-1-3-3 初鄉斷層

根據地礦中心（林啟文，2021）公布之活動斷層線，初鄉斷層長約 20 公里（圖 4.31），屬於第二類活動斷層，運動方式為逆滑。初鄉斷層的斷層面向東傾，東北端連接雙冬斷層，西南端連接車籠埔斷層、大尖山斷層、鹿寮斷層。Lee et al.（2011）認為集集地震時初鄉斷層及鹿寮斷層也有輕微的地表變形（圖 4.32）。

初鄉斷層幾何相關文獻如下：

東埔蚋溪出露初鄉斷層的露頭，桂竹林層逆衝至階地礫石層之上（陳華玟等，2004；林啟文等，2021）（圖 4.33）。濁水溪集集攔河堰下游也出露初鄉斷層露頭（圖 4.34），斷層上盤為厚層泥岩以及薄至中層砂頁岩互層，斷層下盤（西側）為厚層青灰色至深灰色混濁砂岩、泥岩和砂頁岩互層，斷層帶含深黑色高度剪裂斷層泥，斷層位態為走向 N5°E，傾角 47°E（黃文正等，2019；林啟文等，2021）。

李元希等人（Lee et al., 2011）認為初鄉斷層是沿著中新世地層底部之滑移面出露地表的分支斷層（圖 4.35），基底滑移面深度約 9 公里，初鄉斷層傾角約 45 度。Brown et al.（2012）對於濁水溪震測剖面的解釋如圖 4.36，剖面中初鄉斷層傾角約 40 度，深度約 9 公里。Brown et al.（2012）繪製的地質剖面顯示初鄉斷層在約 7 公里深處與車籠埔斷層相連（圖 4.37）。

Simoes et al.（2007）根據東埔蚋溪沿岸地層位態推估初鄉斷層地下幾何，如圖 4.38，初鄉斷層於 0~1.2 公里深度的傾角約為 56 度，1.2 公里以下變緩為約 30 度，初鄉斷層與車籠埔斷層在 1.2 公里深處接到同一個滑脫面，而彰化斷層的滑脫面位於更深的深度。

張中威（2023）參考地質剖面及地層位態建立四條跨初鄉斷層的平衡剖面（圖 4.39），初鄉斷層底部的滑脫面主要沿著早中新世地層滑移，斷層切穿桂竹林層、卓蘭層逆衝至地表，在 B 剖面中，初鄉斷層由淺至深傾角為 64 度（地表至深度 2 公里），35 度（2～4.2 公里），40 度（4.2～6.5 公里），14 度（6.5～7.5 公里深）；在 C 剖面中，67 度（地表至深度 0.8 公里），47 度（0.8～3 公里），40 度（3～5 公里），36 度（5～7.7 公里），8 度（7.7～9 公里深）；在 D 剖面中，65 度（地表至深度 1 公里），34 度（1～1.7 公里），25 度（1.7～3.5 公里），10 度（3.5～3.7 公里），35 度（3.7～5.5 公里），8 度（5.5～6.公里），3 度（6～6.5 公里深）。在 E 剖面中，26 度（地表至深度 0.8 公里），13 度（0.8～2 公里），18 度（2～4.5 公里），27 度（4.5～5.5 公里），4 度（5.5～6 公里深）。

本計畫根據張中威（2023）繪製的平衡剖面擬定初鄉斷層幾何，張中威（2023）繪製的 C 剖面通過濁水溪，相較於 B、D、E 剖面有較多的地質資料制約，故本計畫參考 C 剖面簡化初鄉斷層的幾何為傾角 40 度（東傾），深度 8 公里。以上初鄉斷層幾何資料彙整如表 4. 12、表 4. 13。

初鄉斷層長期滑移速率相關文獻如下：

黃文正等（2019）利用東埔蚋溪兩岸位於初鄉斷層兩側的階地地表高差，以及階地年代 13,585 ± 265 yr BP 估算長期滑移速率為 2.5 ~ 7.5 mm/yr。Simoes et al.（2007）根據初鄉斷層上盤沖積層厚度變化，透過二次多項式擬合，外插至初鄉斷層的下盤，推估得到下盤沖積層厚度約 25 公尺。野外測量初鄉斷層下盤河階的河拔高至少 16.6 公尺。另外沖積層頂部高度為 61 公尺，扣除外插得到的沖積層厚度 25 公尺，推算河階的河拔高應為 36 公尺。綜合以上，下盤河階的河拔高約 26 ± 10 公尺，對比於上盤河階的高度推估垂直變位為 28 ± 11 公尺（圖 4. 40），採用淺部斷層傾角 56 度推算得到滑移量為 34 ± 18 公尺，除以碳同位素定年結果 11,540 ± 309 cal yr，得到初鄉斷層長期滑移速率為 2.9 ± 1.6 mm/yr。以上長期滑移速率資料彙整於表 4. 14。

補充：鹿寮斷層

五萬分之一地質圖（劉桓吉等，2004）中鹿寮斷層呈北西走向，斷層西北端終止於大尖山斷層，東南端終止於鳳凰山斷層。鹿寮斷層是斷層面傾向東北的逆斷層，具左移特性（林啟文等，2000）。李元希等（2002）認為車籠埔斷層、大尖山斷層、鹿寮斷層可用板塊三接點（Triple junction）的構造模式解釋。鹿寮斷層與初鄉斷層之間存在一向斜構造，鹿谷向斜。鹿寮斷層東北側近斷層的地層傾角約 25 ~ 35 度，西南側近斷層地層傾角約 30 ~ 40 度。鹿寮斷層缺乏傾角及深度的前人文獻資料，本計畫參考斷層上盤地層傾角推估鹿寮斷層傾角約為 40 度，深度與初鄉斷層的滑脫面深度相同，8 公里深。

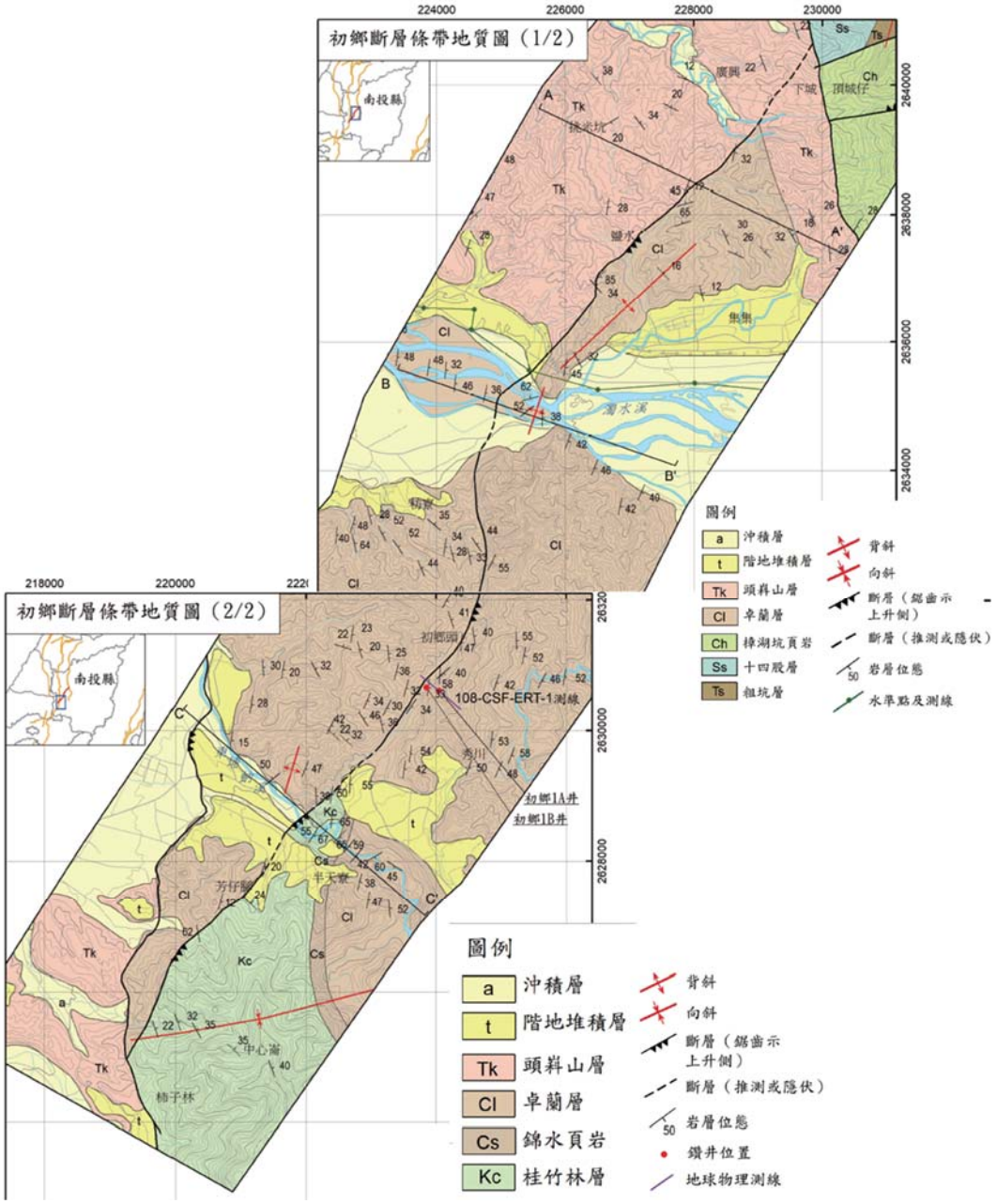


圖 4. 31：初鄉斷層條帶地質圖（林啟文等，2021）。

Figure 4. 31: Strip Map of Chuhsiang fault (Lin et al., 2021).

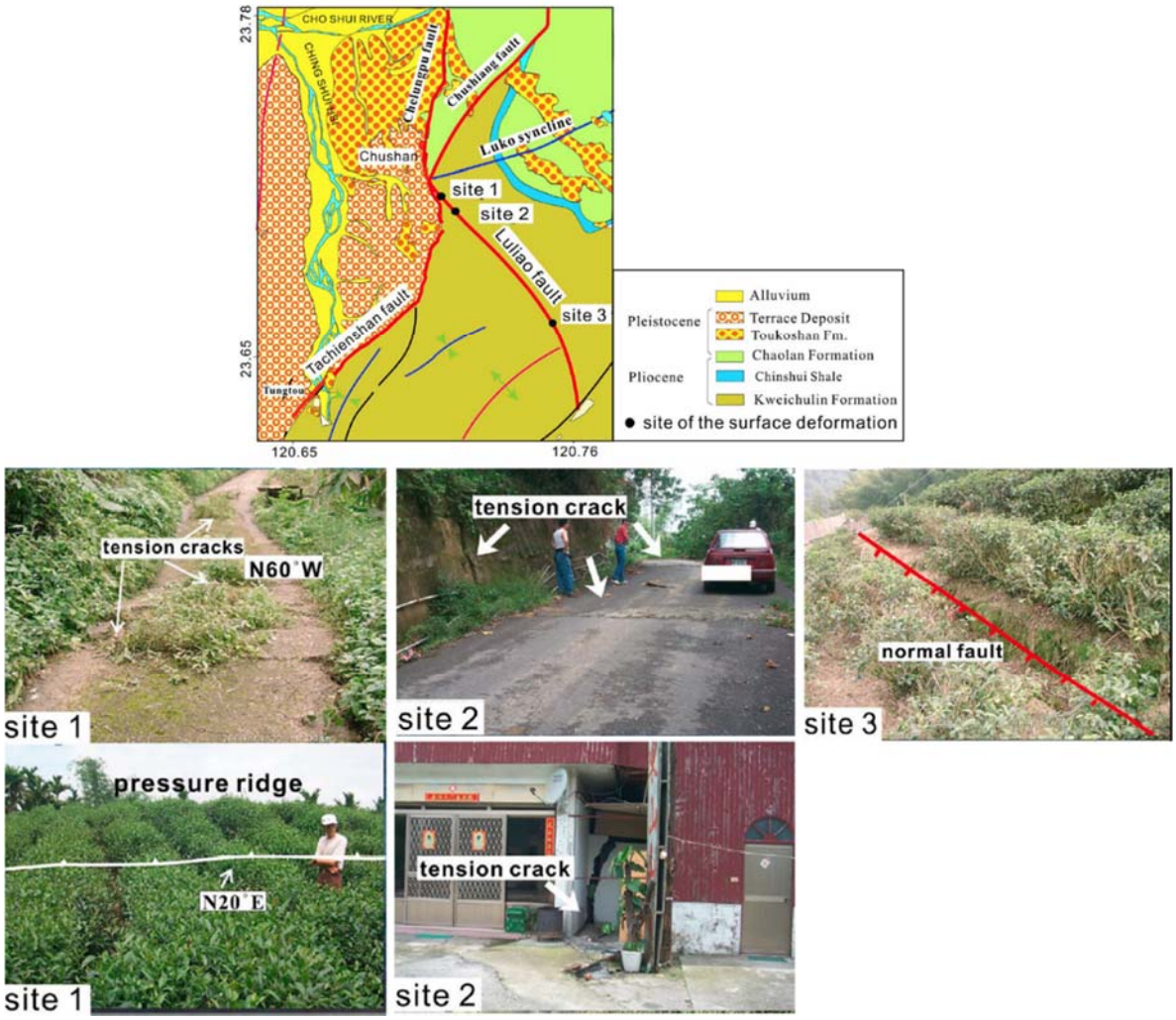


圖 4. 32：集集地震時鹿寮斷層沿線上的地表破裂（Lee et al., 2011）。

Figure 4. 32: Surface ruptures along the Luliao fault during the Chi-Chi earthquake (Lee et al., 2011).



圖 4. 33：東埔蚋溪初鄉斷層露頭，左側上盤為桂竹林層，下盤為階地礫石層。左圖出自陳華玟等（2004），右圖出自林啟文等（2021）。

Figure 4. 33: The outcrop of Chuhsiang fault at Dongpurui River. The hanging wall on left side is Kueichulin Formation, and the foot wall on right side is terrace gravel layer. Left photo is from Chen et al. (2004),and right photo is from Lin et al. (2021).

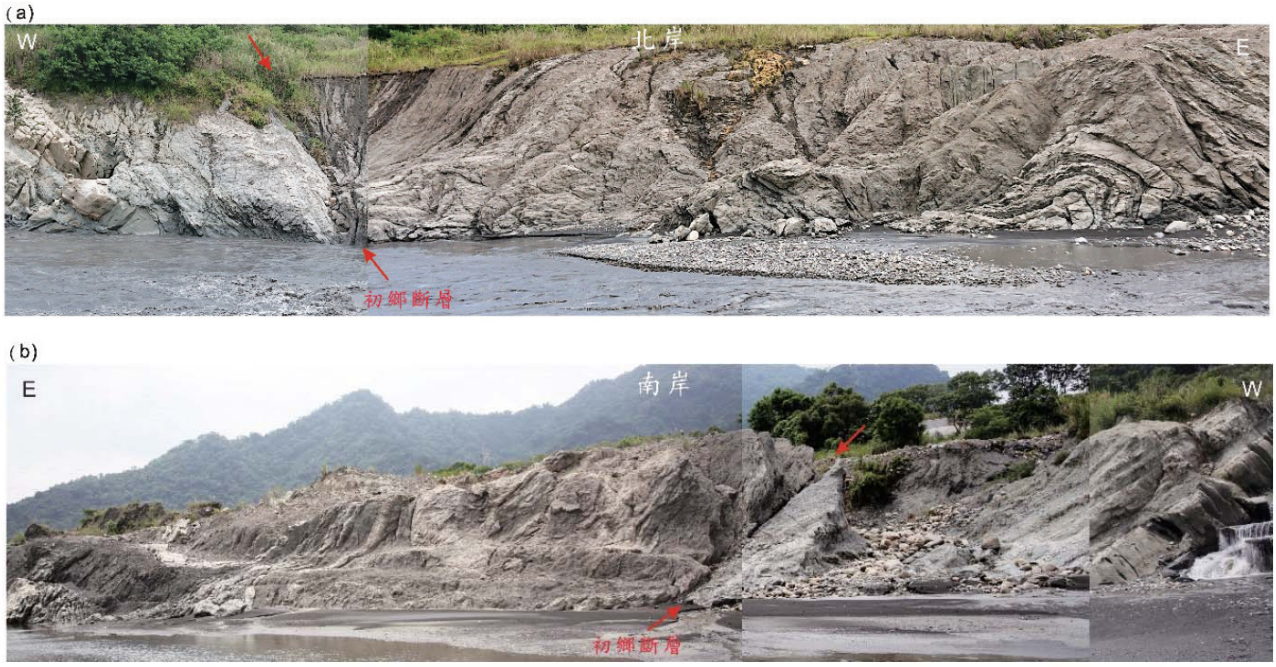


圖 4. 34：濁水溪集集攔河堰下游初鄉斷層露頭（黃文正等，2019）。

Figure 4. 34: The outcrop of Chuhsiang fault at downstream of Chi-Chi Weir of Choushui River (Huang et al., 2019).

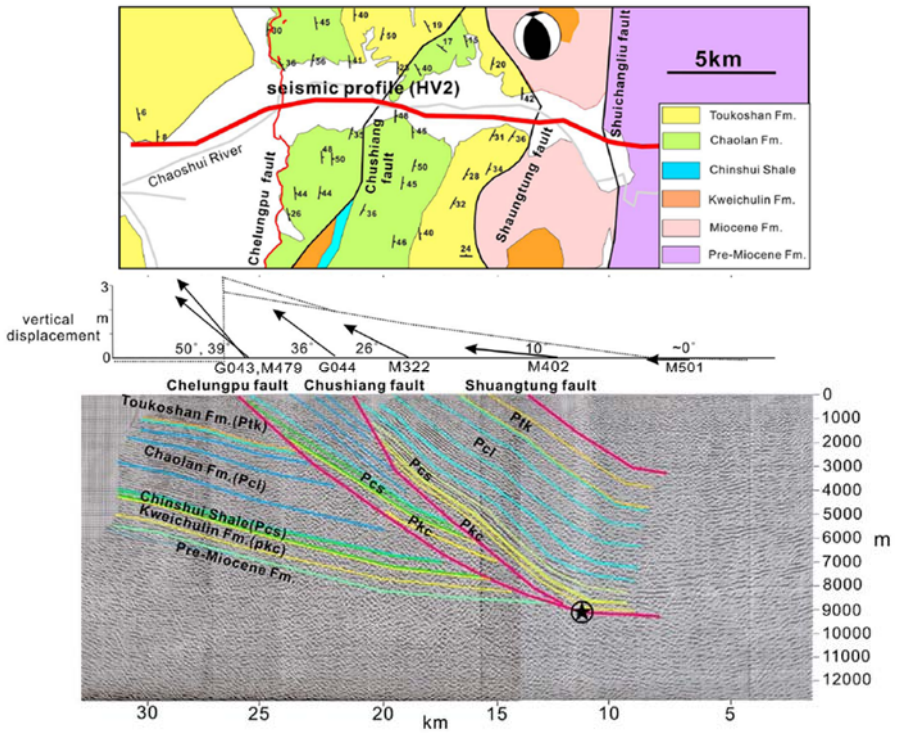


圖 4. 35：濁水溪震測剖面之重新解釋以及同震變位之 GPS 向量投影。圖中顯示車籠埔斷層及初鄉斷層的疊瓦狀構造，並切穿中新世地層（Lee et al., 2011）。

Figure 4. 35: Reinterpreted seismic profile along the Choushui River and the GPS vector projection of coseismic displacements. The seismic profile shows the imbricated structure of the Chelungpu fault and Chuhsiang fault, cutting through Miocene strata (Lee et al., 2011).

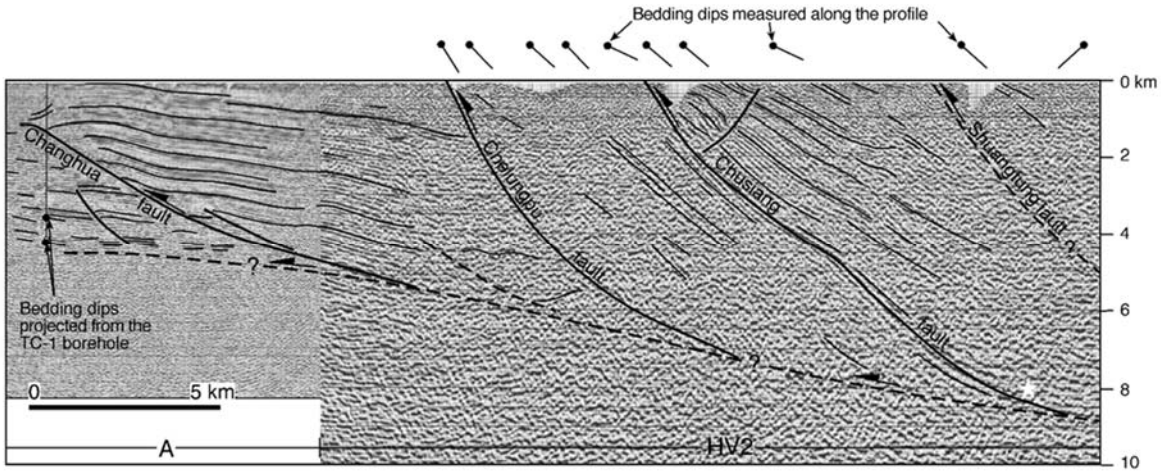


圖 4. 36：濁水溪震測剖面之另一解釋（Brown et al., 2012）。

Figure 4. 36: Another interpretation of seismic profile along the Choushui River (Brown et al., 2012).

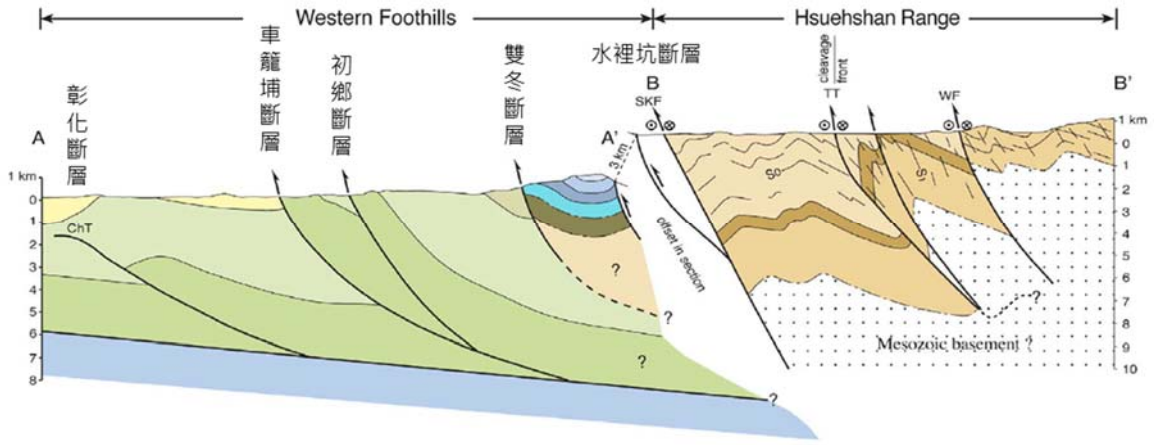


圖 4. 37：地質剖面圖，由 Brown et al.（2012）繪製。

Figure 4. 37: Geological Map from Brown et al. (2012).

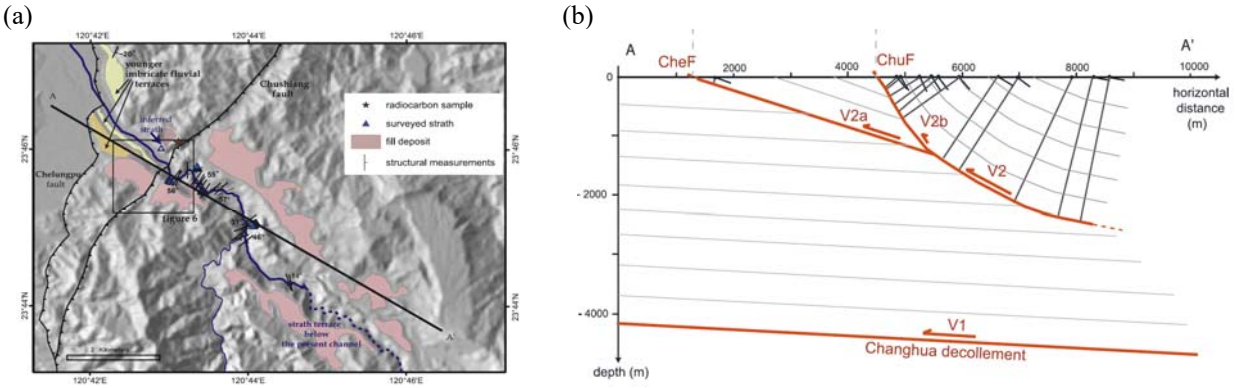


圖 4. 38：東埔蚋溪沿線地質調查及所推估的地質剖面。(a) 東埔蚋溪沿線地質調查位置及位態量測。(b) 根據研究區域構造量測所推估之 A-A'地質剖面，車籠埔斷層（CheF）和初鄉斷層（ChuF）為同一個滑脫面上所分支出的斷層（Simoes et al., 2007）。

Figure 4. 38: (a) Geological survey locations along the Dongpurui River (b) A-A' geological cross section based on field measurements. The Chelungpu fault (CheF) and Chuhsiang (ChuF) links to the same detachment (Simoes et al., 2007).

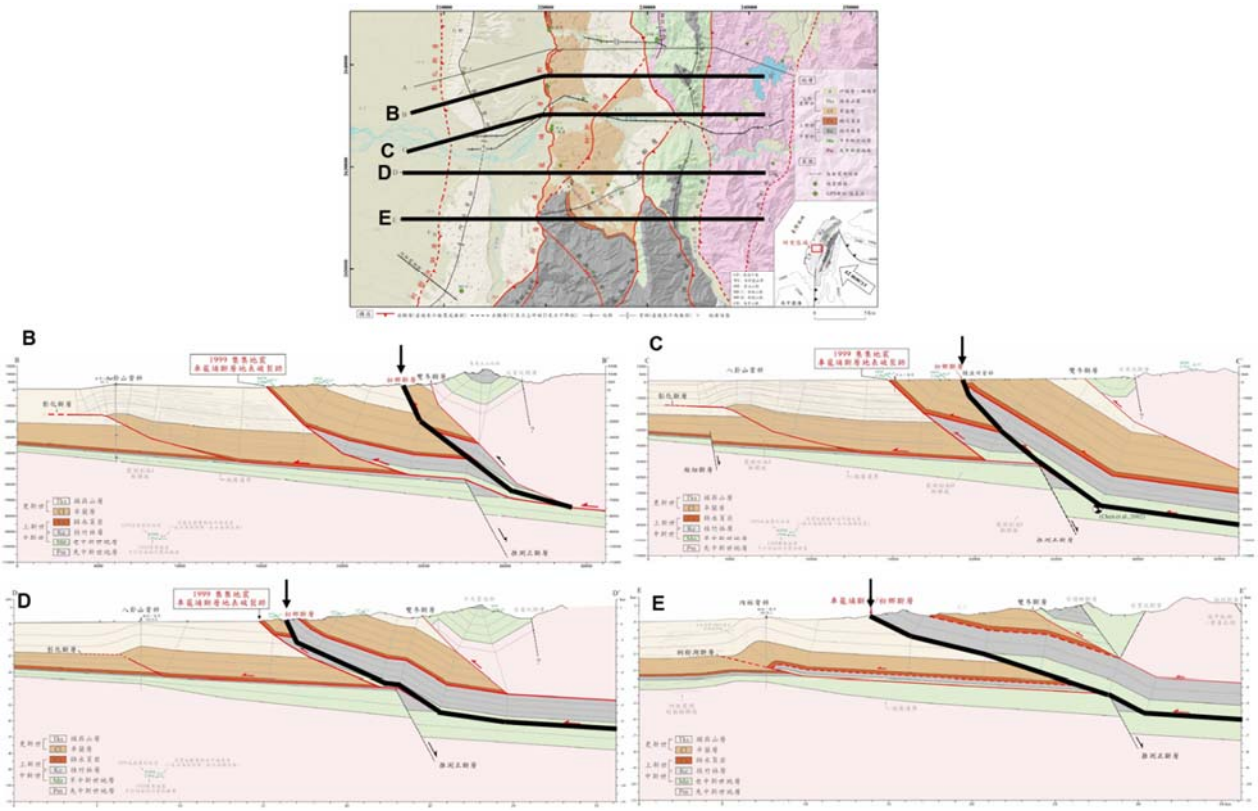


圖 4. 39：初鄉斷層平衡剖面圖（張中威，2023）

Figure 4. 39: Balanced cross setion of Chuhsiang fault from Chang (2023).

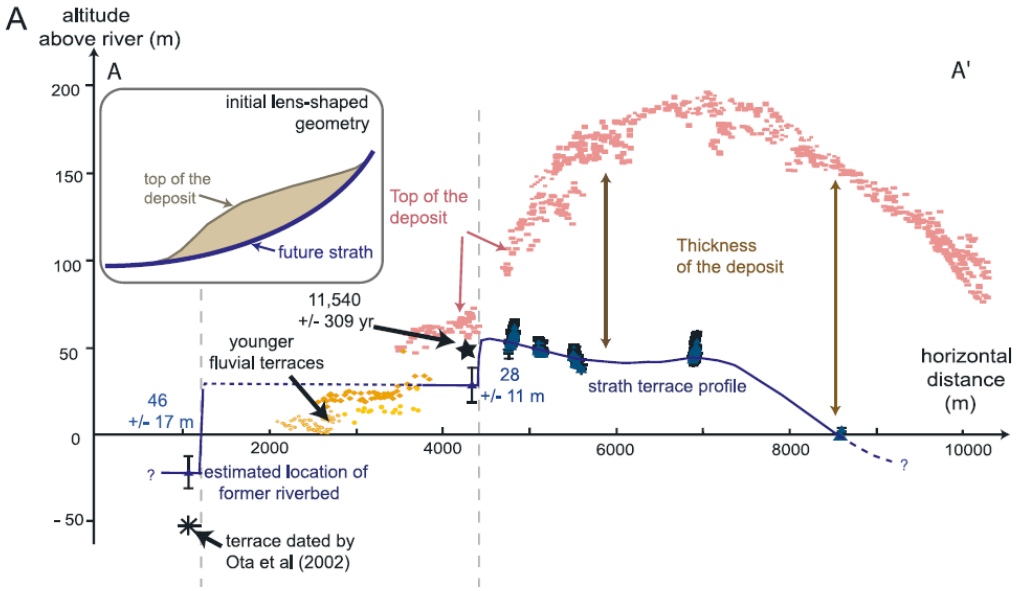


圖 4. 40：東埔蚋溪河階分析。階地高度投影（藍色三角形）及沖積層高度(粉紅色點位)皆相對於現生河道高度，初鄉斷層上盤沖積層厚度呈現側向透鏡狀幾何的變化，如左上方插圖所示，碳定年樣本位置以星號標示（Simoes et al., 2007）。

Figure 4. 40: Terrace analysis along Dongpurui River. The terrace heights (blue triangles) and deposit layer heights (pink dots) are relative to the present riverbed elevation. The thickness of the deposit layers on the hanging wall of the Chuhsiang Fault has lens-shaped geometry, as shown at the top left figure. Radiocarbon dating sample locations are marked with star symbo. (Simoes et al., 2007).

表 4. 12：初鄉斷層傾角相關文獻彙整

Table 4. 12: References related to the dip angle of the Chuhsiang fault.

參考文獻	方法		傾角(度)
黃文正等（2019）	濁水溪斷層露頭位態		47E
Lee et al.（2011）	濁水溪震測剖面		45E
Brown et al.（2012）	濁水溪震測剖面		40E
Simoes et al.（2007）	根據野外地層露頭量測推估地下地質剖面		56E（深度 0～1.2 公里） 30E（深度 1.2 公里以下）
張中威（2003）	根據地質剖面及地層建立平衡剖面	剖面 B	64 度（地表至深度 2 公里） 35 度（2～4.2 公里） 40 度（4.2～6.5 公里） 14 度（6.5～7.5 公里深）
		剖面 C	67 度（地表至深度 0.8 公里） 47 度（0.8～3 公里） 40 度（3～5 公里） 36 度（5～7.7 公里） 8 度（7.7～9 公里深）
		剖面 D	65 度（地表至深度 1 公里） 34 度（1～1.7 公里） 25 度（1.7～3.5 公里） 10 度（3.5～3.7 公里） 35 度（3.7～5.5 公里） 8 度（5.5～6 公里） 3 度（6～6.5 公里深）
		剖面 E	26 度（地表至深度 0.8 公里） 13 度（0.8～2 公里） 18 度（2～4.5 公里） 27 度（4.5～5.5 公里） 4 度（5.5～6 公里深）
本計畫綜整評估	參考張中威（2003）繪製的 C 剖面		40E

表 4. 13：初鄉斷層深度相關文獻彙整

Table 4. 13: References related to the depth of the Chuhsiang fault.

參考文獻	方法		深度(公里)
Lee et al.（2011）	濁水溪震測剖面		9 公里深接到滑脫面
Brown et al.（2012）	濁水溪震測剖面		9 公里深接到滑脫面
	地質剖面		7 公里深與車籠埔斷層相連
Simoes et al.（2007）	根據野外地層露頭量測推估地下地質剖面		1.2 公里深與車籠埔斷層相連
張中威（2003）	平衡剖面	剖面 B	深度 7.5 公里接到滑脫面
		剖面 C	深度 7.8 公里接到滑脫面
		剖面 D	深度 5.5 公里接到滑脫面
		剖面 E	深度 5.5 公里接到滑脫面
本計畫綜整評估	參考張中威（2003）繪製的 C 剖面		8 公里

表 4. 14：初鄉斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 4. 14: References related to the long-term slip rate of the Chuhsiang fault.

參考文獻	方法	長期滑移速率（mm/yr）
黃文正等（2019）	東埔蚋溪階地 （地表高差）	2.5 ~ 7.5
Simoes et al.（2007）	東埔蚋溪階地 （斷層上下盤階地高度對比）	2.9 ± 1.6

4-1-3-4 鐵砧山斷層

根據地礦中心（林啟文，2021）公布之活動斷層線，鐵砧山斷層長約 13 公里，屬第一類活動斷層，運動方式為逆滑。斷層自臺中市大甲區鐵砧山北緣往南延伸至沙鹿後併入大甲斷層，可能是大甲斷層背衝斷層（李元希與石瑞銓，2008）。鐵砧山斷層位於大甲斷層東側，又名大甲東斷層（林朝棨，1957），鐵砧山斷層具有明顯的反斜斷崖，在鐵砧山呈現直線狀谷（石再添等，1984）。

鐵砧山斷層幾何相關文獻蒐集如下：

李元希與石瑞銓（2008）於鐵砧山發現斷層露頭，露頭中可觀察到鐵砧山斷層西傾約 20-30 度（圖 4. 41）。陳平護（Chen, 1990）利用跨斷層的透地雷達及地電阻影像探測到一低電阻帶，低電阻帶向西傾斜約 35 度，研判為斷層錯動所形成的破裂帶所致（圖 4. 42）。董倫道等（2006）大安溪南岸的震測資料中未能看到鐵砧山斷層的跡象（圖 4. 1）。Yang et al.（2007）Line 6 剖面通過大安溪（圖 4. 3），剖面中無鐵砧山斷層。根據該剖面的大甲斷層（剖面中的彰化斷層）幾何，若鐵砧山斷層為西傾的斷層，則斷層深度在不到 3 公里深處與大甲斷層相連。

本計畫參考陳平護（Chen, 1990）的透地雷達結果推估鐵砧山斷層傾角約為 35 度，根據 Yang et al.（2007）Line 6 剖面以及鐵砧山斷層的位置，推測鐵砧山斷層深度約為 2 公里。以上鐵砧山斷層幾何資料整理於表 4. 15。

鐵砧山斷層無長期滑移速率相關地質文獻。

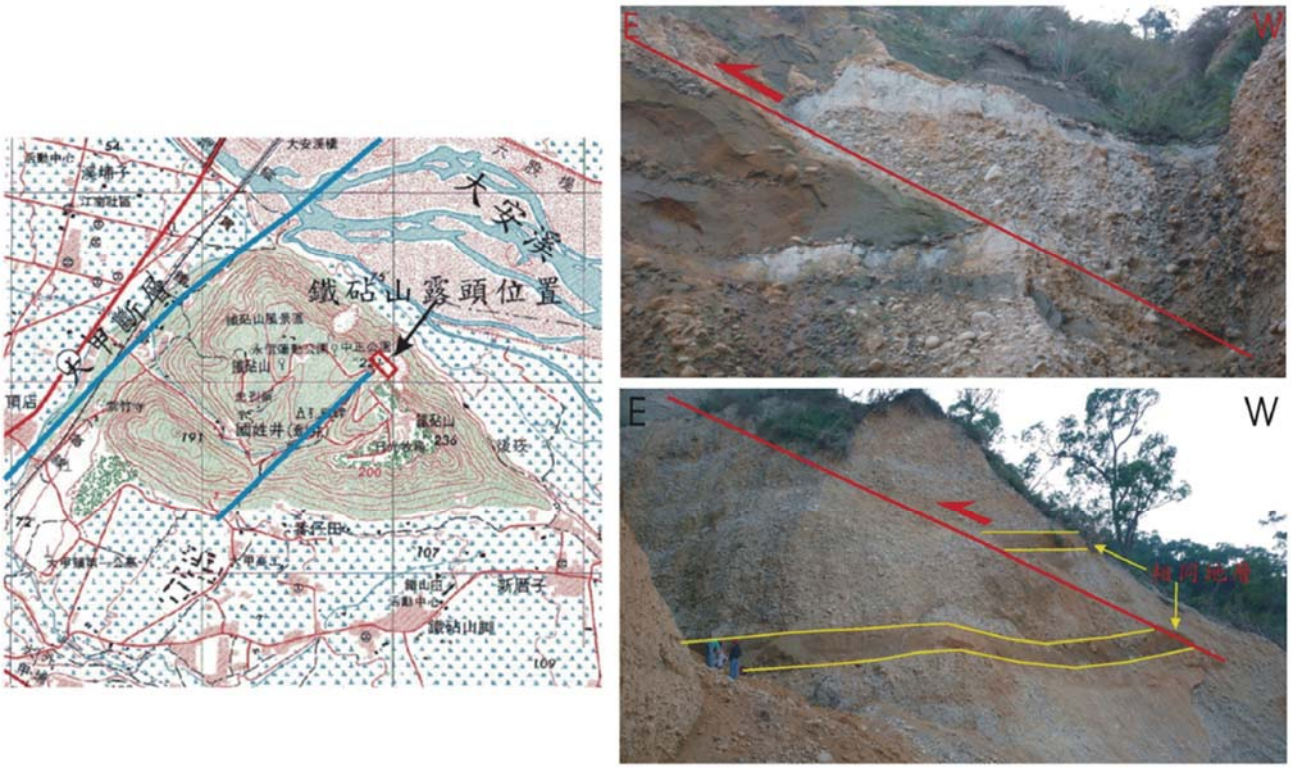


圖 4. 41：鐵砧山斷層野外露頭（李元希與石瑞銓，2008）

Figure 4. 41: Tiehchenshan Fault outcrop (Lee and Shih, 2008).

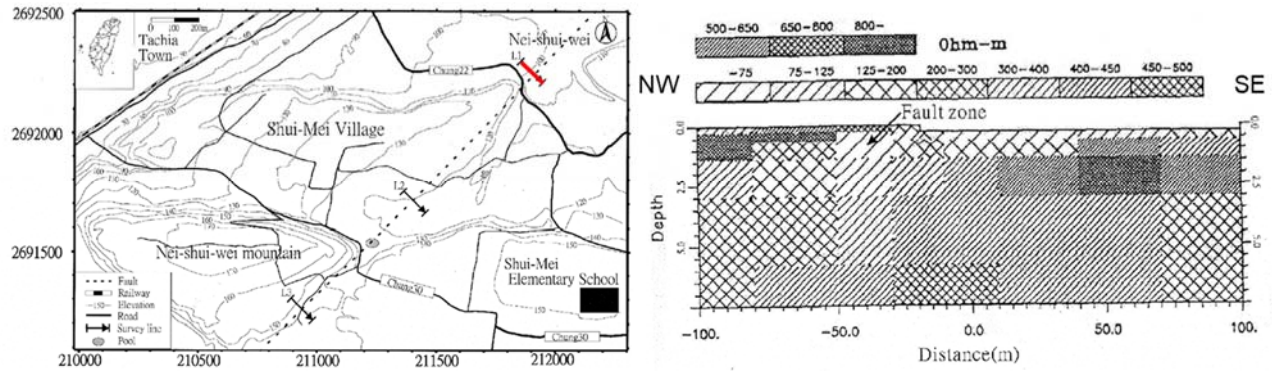


圖 4. 42：水美村跨鐵砧山斷層之地電阻剖面，剖面位置如左圖紅線（Chen, 1990）。

Figure 4. 42: Electrical resistivity profile across the Tiehchenshan fault in Shuimei village. Location of profile is shown as the red line in the left figure (Chen 1990).

表 4. 15：鐵砧山斷層幾何相關文獻彙整

Table 4. 15: References related to the geometry of the Tiehchenshan fault.

作者	方法	傾角	深度
李元希與石瑞銓（2008）	斷層露頭	20～30	
Chen（1990）	地電阻影像	35	
本計畫綜整評估	參考 Chen（1990）	35	
本計畫綜整評估	參考 Yang et al.（2007）Line 6 剖面推估		2公里

第五章、中部地區斷層模型建置

5-1 TDEFNODE 斷層模型

5-1-1 塊體模型原理

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 2016－2023 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。

5-1-2 斷層模擬結果

本期研究的重點斷層為車籠埔斷層與大甲彰化斷層等中台灣的主要斷層，斷層幾何為中興社團隊回顧文獻後重建的斷層傾角。其他參數則採用前期計畫整理的參數，用於約制模型的地質滑移速率則參考 Shyu et al.（2020）彙整的成果（表 5. 2）。

經過多次迭代，本模型在水平向資料的 WRMS 為 1.27，垂直向為 7.71，沿海地區受到抽取地下水導致的地層下陷影響(圖 5.7)，許多下陷訊號是塊體模型無法模擬的。中台灣的 GNSS 水平速度場在跨越三組近南北向的斷層處，都有較大的落差，在模擬成果中反映出大多數的斷層都有顯著的鎖定，尤其彰化斷層不分深度完全鎖定，大甲斷層接近彰化斷層處也有延伸至深部的鎖定現象，但大多為淺部鎖定(<1 km)。鐵砧山斷層是一較小的斷層，也顯示為鎖定狀態，只有其南段鎖定率較小。車籠埔斷層則是幾何最複雜的斷層，北段為大範圍鎖定，直至深部，中段與南段則是 3 公里深度以上為完全鎖定。大茅埔–雙冬斷層在北段有一區域呈現明顯的鎖定。初鄉斷層鎖定的範圍也在深度 1 公里以內。

間震滑移速率大多出現在車籠埔斷層的深部至斷坪處，大部分斷層沒有明顯的間震滑移。最大的滑移虧損率出現在鐵砧山斷層，由於鐵砧山斷層與大甲斷層非常靠近，兩者間組成的上盤塊體內僅有一個 GNSS 測站（CHIN）能約制，因此可信度較低。其餘較顯著的滑移虧損率分別出現在彰化斷層，平均 6.52 mm/yr，大甲斷層平均 4.97 mm/yr，車籠埔斷層與大茅埔–雙冬斷層則低於 4 mm/yr。初鄉斷層則小於 1 mm/yr。大多數塊體內部應變率呈現近東西向壓縮（圖 5.6），並且由東向西減少，除了鐵砧山斷層的上盤塊體出現東北–西南向伸張。

與地質滑移速率比較（表 5.2），除初鄉斷層的測地長期速率稍低於地質速率的最大值，其餘皆大於地質速率的最大值，差異約在 2～6 mm/yr；測地的滑移虧損速率則大多低於地質滑移速率最大值。

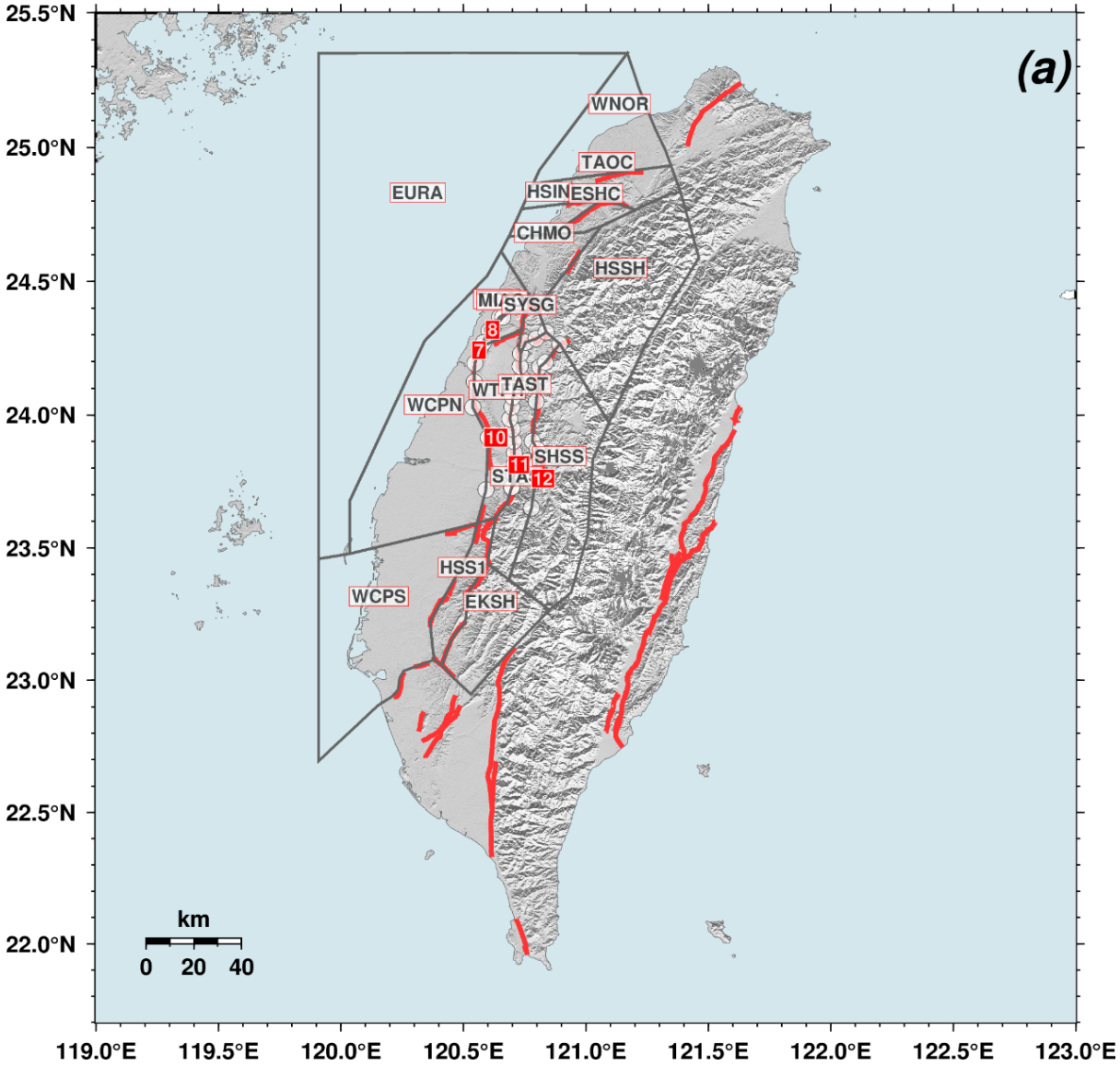


圖 5. 1：臺灣北部塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，圓圈代表斷層節點位置。紅色實線表示地礦中心公布之活斷層。紅色數字為 2021 年地礦中心公布之活動斷層編號，分別為： 7.大甲斷層；8.鐵砧山斷層；10 彰化斷層；11.車籠埔斷層；12.大茅埔-雙冬斷層。

Figure 5. 1: The digital terrain model of northern 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 nodes used in our model: 7.Tachia Fault；8.Tiehchenshan Fault；10.Changhua Fault；11.CHelungpu Fault；12.Tamaopu-Shuangtung Fault.

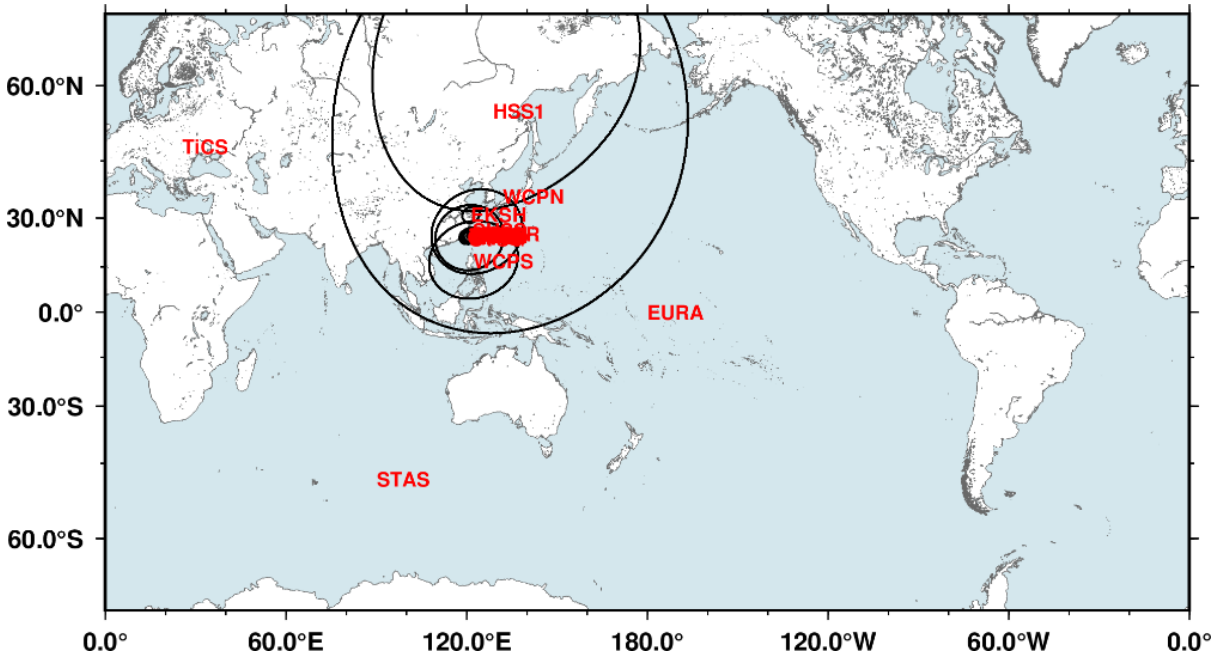


圖 5. 2：最佳塊體旋轉模型中各塊體 Euler pole 所在的位置，紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體。

Figure 5. 2: The location of the rotation poles for each block were marked with block names (red characters).

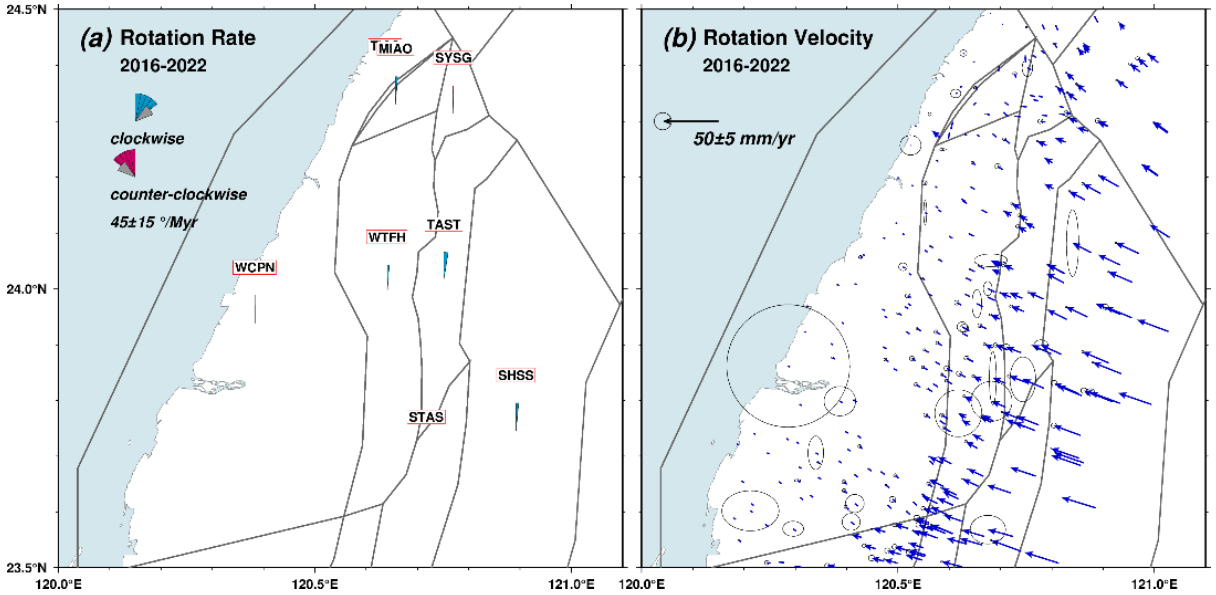


圖 5. 3：最佳塊體旋轉模型中各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度以及塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。（a）最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 45±15°/My 的角速度。（b）由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。

Figure 5. 3: (a)The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (b) The velocity filed predicted only by block rotation.

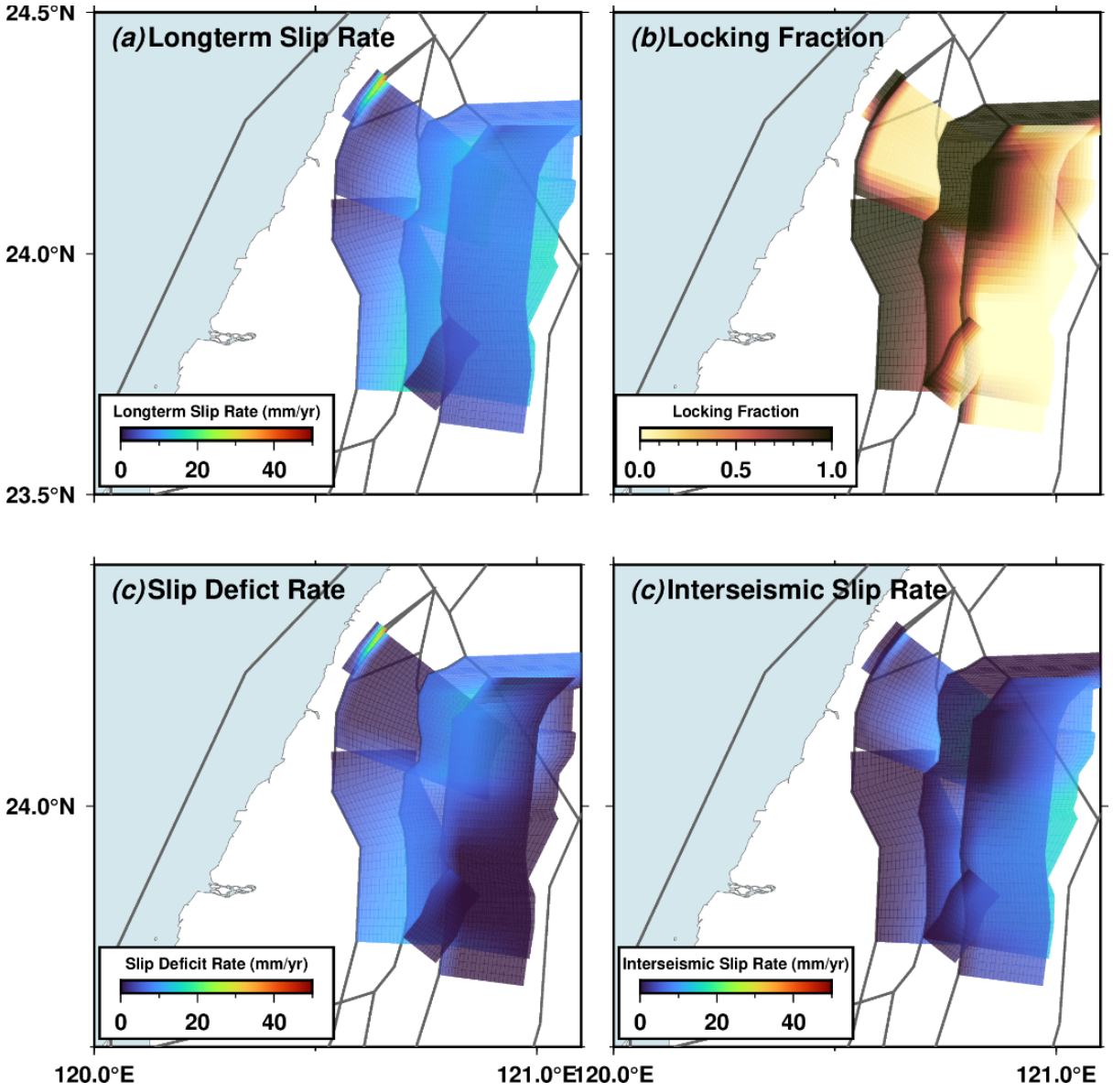


圖 5.4：TDEFNODE 斷層模型模擬結果：(a) 推求的斷層長期滑移速率。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。 (b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的震間期滑移速率。

Figure 5. 4: (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.

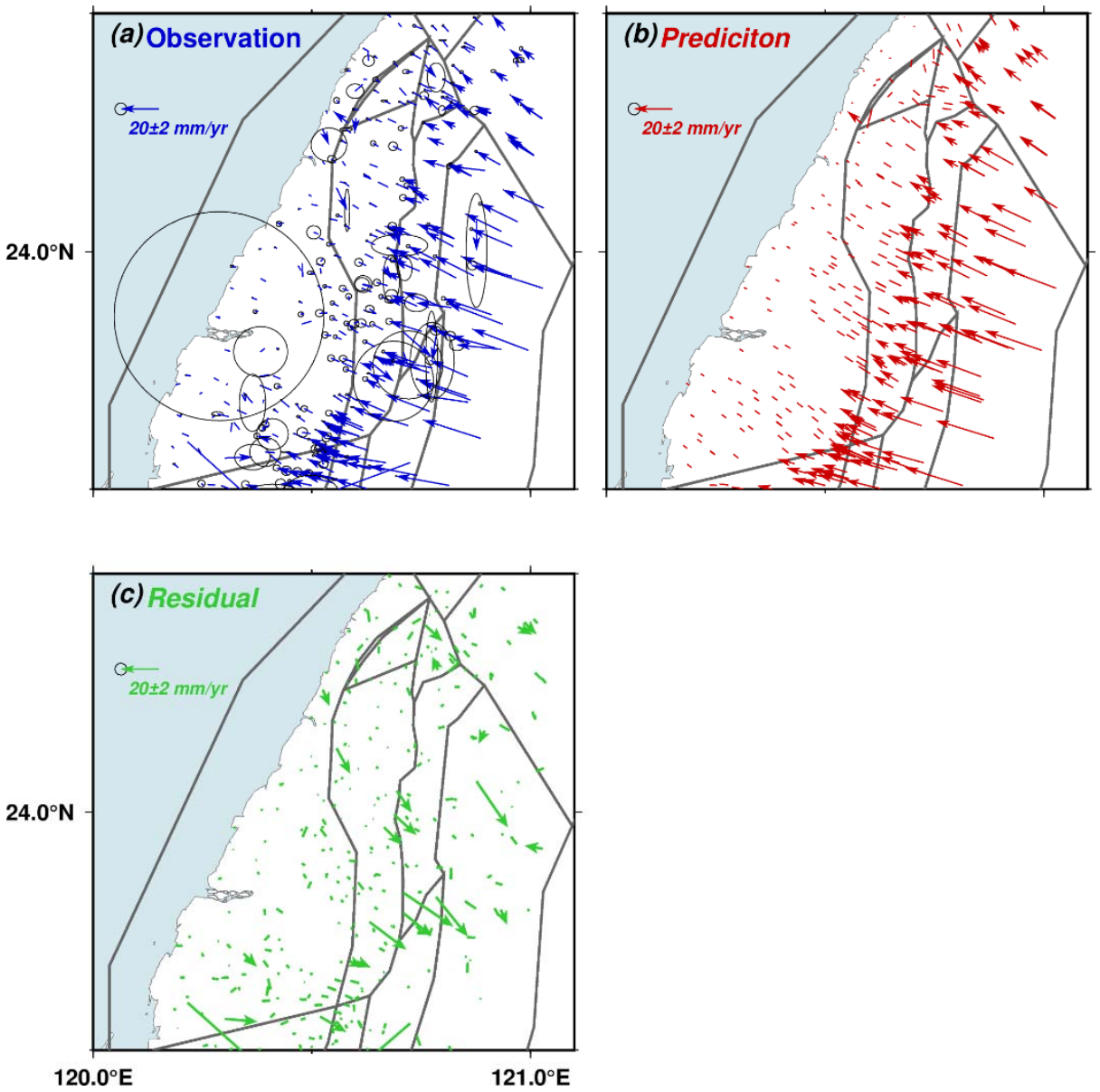


圖 5. 5：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差：(a) 模型使用的 2016 - 2023 年間，連續與移動站的 GNSS 水平速度場。(b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 水平速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5. 5: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS horizontal velocities from 2016 to 2021. (b) The predicted horizontal velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

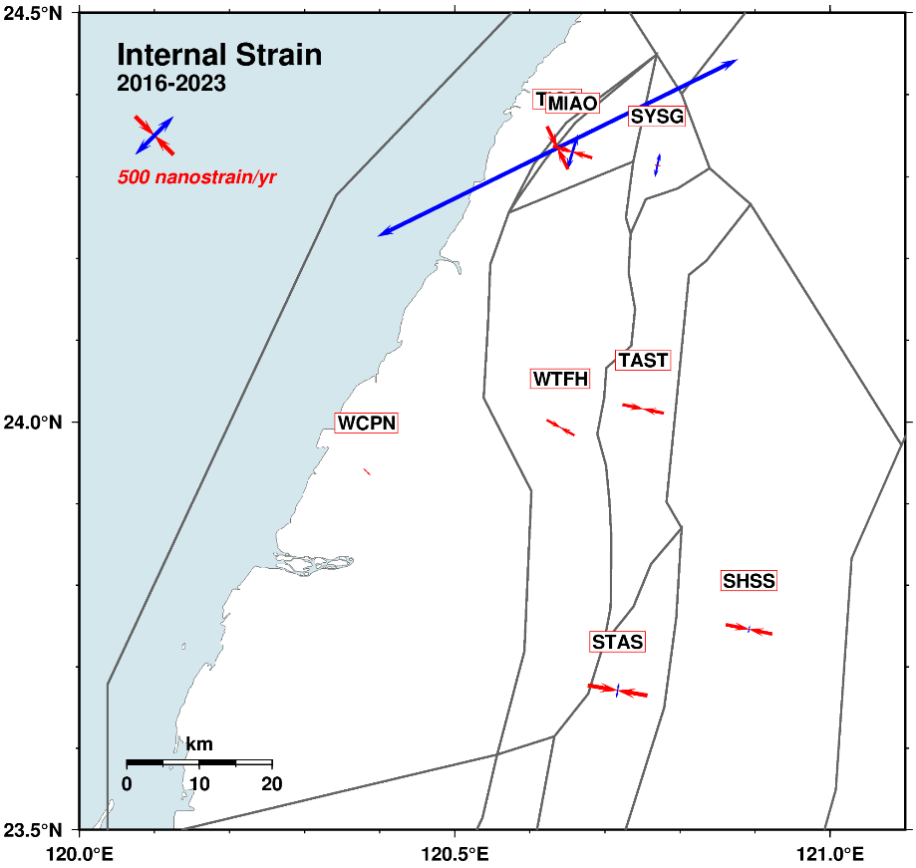


圖 5. 6：塊體內部應變，除塊體旋轉與斷層滑移虧損外，同步搜尋各塊體內部的均勻彈性應變速率，所得結果於各塊體內部以主應變率軸表示，紅色箭頭為壓縮應變率軸方向與大小，藍色箭頭為伸張應變率軸。

Figure 5. 6: Internal strain within each block. Red and blue arrows represent maximum and minimum principal strain rate.

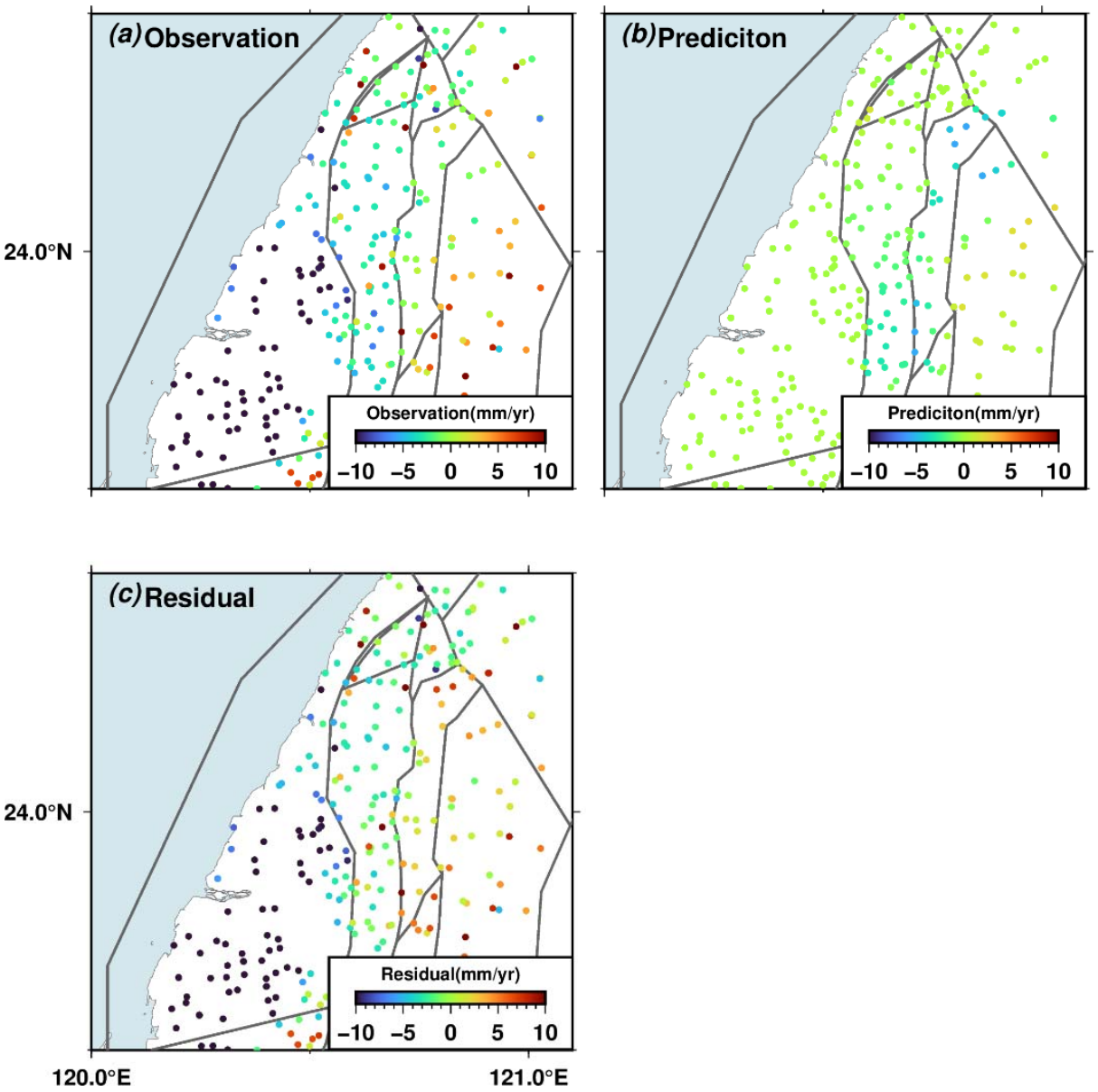


圖 5. 7：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差。(a) 模型使用的 2016-2023 年間，連續與移動站的 GNSS 垂直速度場。(b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 垂直速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 5. 7: Model prediction and residual from best-fitted block model. (a) The GNSS vertical velocities from 2016 to 2021. (b) The predicted vertical velocities including block rotation and fault slip deficit. (c) The residual between observation and model prediction.

表 5. 1：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. 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.

塊體名稱	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	0	0.00	0.00	180.00	0.00	0.00
WCPS	122.203	16.794	0.29	0.12	73.78	28.54	24.29
EKSH	121.441	30.885	-2.45	0.16	59.43	5.14	4.38
HSS1	128.778	55.584	-0.39	0.25	43.16	50.44	42.41
WCPN	131.998	35.985	-0.04	0.07	60.91	91.23	84.17
WTFH	121.226	24.79	-4.03	0.10	64.56	1.89	1.64
TiCS	25.591	48.193	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00
MIAO	120.816	24.135	-4.51	0.28	63.96	4.42	3.87
SHSS	122.02	26.311	-5.76	0.13	63.71	1.77	1.52
CHMO	120.243	24.398	2.99	0.20	62.65	4.89	4.28
HSSH	121.998	25.235	-6.28	0.09	64.49	1.12	0.98
STAS	90.09	-48.594	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00
TAST	121.212	24.82	-9.43	0.09	65.29	0.74	0.64
SYSG	120.941	23.775	1.72	0.73	68.54	21.02	19.60
TAOC	120.692	24.708	2.60	0.15	62.99	4.29	3.75
WNOR	123.279	25.318	-0.46	0.18	63.63	28.00	24.52
HSIN	121.13	24.716	-3.20	0.23	63.23	5.24	4.59
ESHC	121.752	24.99	-3.28	0.23	63.14	5.10	4.44

表 5. 2：斷層之地質滑移速率約束值及平均滑移速率

Table 5. 2: 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.

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）	長期速率標準差	平均滑移虧損率（mm/yr）	平均速率標準差
大甲	0.90	6.63	12.71	12.55	4.91	11.27
鐵砧山	-	-	13.35	16.07	12.74	16.58
彰化	0.90	6.63	10.90	7.09	6.52	3.16
車籠埔	6.94	6.94	10.78	3.31	4.64	4.91
大茅埔-雙冬	0.42	4.88	6.25	1.82	3.11	3.60
初鄉	1.30	4.50	3.10	1.72	0.93	1.50

註：斷層之地質滑移速率約束值引用自 Shyu et al.（2020）

5-2 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model）

5-2-1 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 5.1 所列。

$$\boldsymbol{u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\nu_k d\sum} \qquad （式 5.1）$$

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；ν_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 5.1，亦即每一個斷層面單位（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單位產生對應之地表位移量；而任一地表單位之位移量，會等於所有斷層單位上滑移量作用在該地表單位位移量的總和。

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。其中，斷層位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度（圖 5. 8）。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 5.2）（Johnson，2013）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad （式 5.2）$$

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。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\boldsymbol{Gs} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad （式 5.3）$$

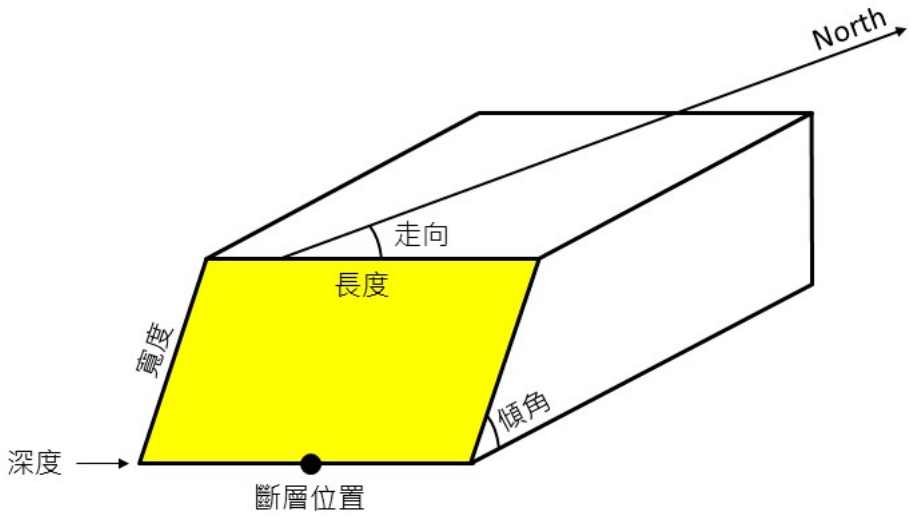


圖 5.8：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

Figure 5. 8: Perspective schematic view of fault dislocation model and its fault geometry parameters. Fault geometry parameters include fault location (km), depth (km), length (km), width (km), strike (°) and dip (°).

5-2-2 斷層模擬結果

本計畫目標在於臺灣中部地區，共有六條主要斷層，將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。為避免目標區域外之速度場變化導致斷層滑移虧損率之錯估，因此於此處並不僅採以中部區域的 GNSS 速度場及目標斷層進行模型計算，而以全台 GNSS 速度場及全台活動斷層進行模擬，以推求此地區主要活動斷層滑移虧損速率分布，計算臺灣中部地區各斷層滑移虧損率平均值（表 5. 3）。

本階段使用至 2023 年的 GNSS 速度場成果進行斷層模擬，模型結果顯示當平滑參數為 -1.0 時，所得到斷層滑移虧損速率分布為最佳模型，不符值為 1618 mm/yr（圖 5. 9）。最佳模型指出：

1. 大甲斷層平均斷層滑移虧損速率為 9.3 ± 6.1 mm/yr，主要集中於斷層深度約 6 - 7 公里範圍內，有最大滑移虧損率 20.5 mm/yr 於此處累積（圖 5. 10）。大甲斷層測地矩規模為 3.89×10^{24} dyne-cm/yr。
2. 彰化斷層平均斷層滑移虧損速率為 5.9 ± 4.9 mm/yr，主要集中於斷層深度約 2 - 4 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 20.4 mm/yr 於此處累積（圖 5. 10）。彰化斷層測地矩規模為 2.43×10^{24} dyne-cm/yr。
3. 鐵砧山斷層平均斷層滑移虧損速率為 0.8 ± 0.6 mm/yr，暫無顯著的滑移虧損率累積，有最大滑移虧損率約 2.1 mm/yr（圖 5. 10）。鐵砧山斷層測地矩規模為 1.13×10^{22} dyne-cm/yr。
4. 車籠埔斷層平均斷層滑移虧損速率為 9.5 ± 9.6 mm/yr，測地矩規模為 7.12×10^{24} dyne-cm/yr。北段東西向有最大滑移虧損率約 12.9 mm/yr 於斷層深度 3 - 5 公里範圍內累積；北段南北向有最大滑移虧損率約 43.4 mm/yr 於層深度約 8.5 - 9.0 公里範圍內累積；南段有最大滑移虧損率約 30.3 mm/yr 於斷層深度約 0 - 4 公里範圍內累積。
5. 大茅埔－雙冬斷層平均斷層滑移虧損速率為 17.2 ± 12.8 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0 - 3 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 61.3 mm/yr 於此處累積（圖 5. 10）。大茅埔－雙冬斷層測地矩規模為 2.52×10^{24} dyne-cm/yr。
6. 初鄉斷層平均斷層滑移虧損速率為 2.4 ± 1.4 mm/yr，主要集中於斷層深度約 4 - 6 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 5.5 mm/yr 於此處累積（圖 5. 10）。初鄉斷層測地矩規模為 1.76×10^{23} dyne-cm/yr。

表 5. 3：斷層平均滑移速率

Table 5. 3: 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）	測地矩規模 (dyne-cm/yr)
大甲斷層	2.7	7.6	9.3	6.1	3.89×10^{24}
彰化斷層	3.1	3.9	5.9	4.9	2.43×10^{24}
鐵砧山斷層	0.7	0.3	0.8	0.6	1.13×10^{22}
車籠埔斷層	5.6	6.2	9.5	9.6	7.12×10^{24}
大茅埔-雙冬斷層	4.9	14.9	17.2	12.8	2.62×10^{24}
初鄉斷層	1.2	1.6	2.4	1.4	1.76×10^{23}

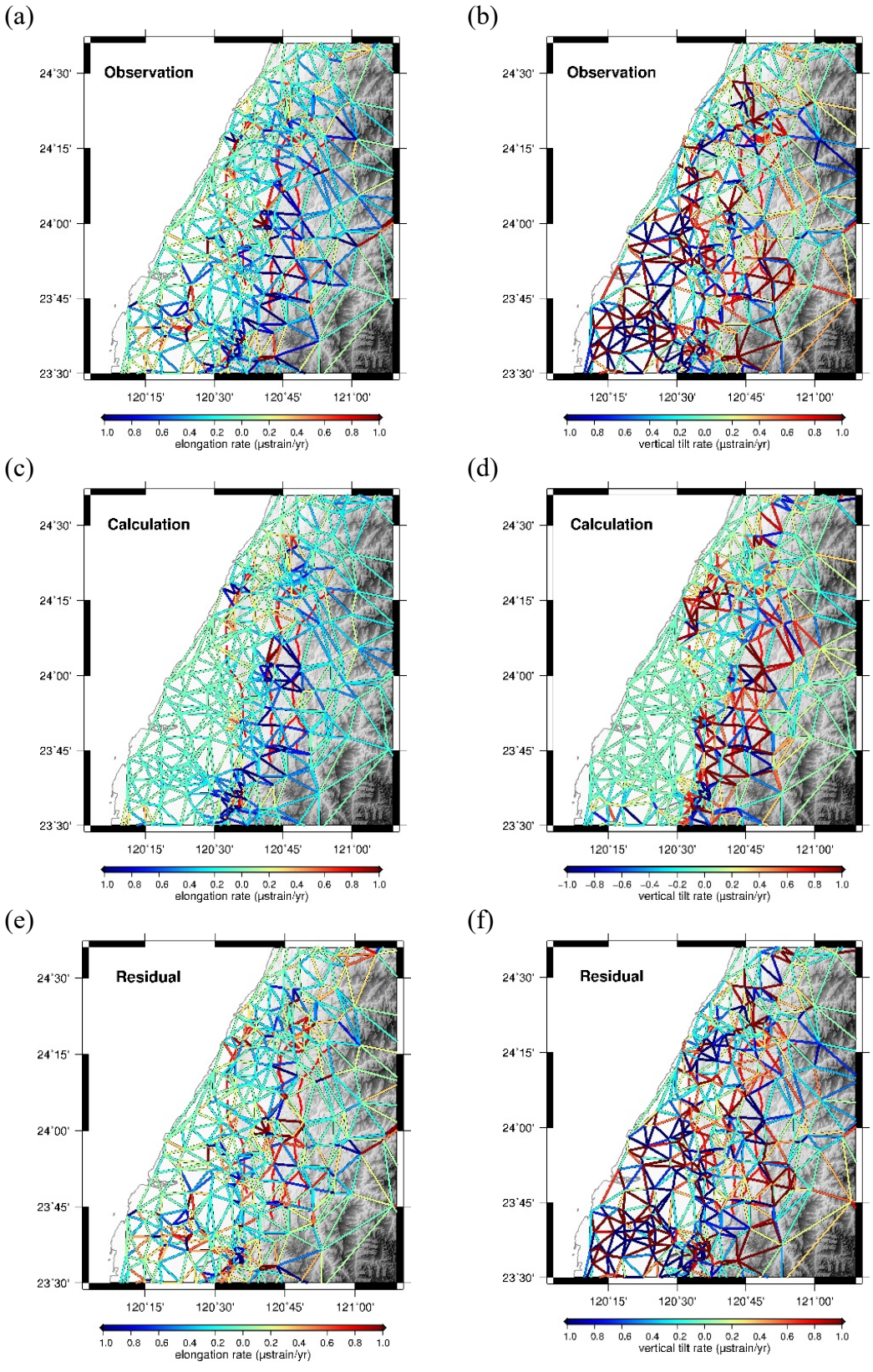


圖 5. 9：基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值，(b) 垂直速度場觀測值，(c) 水平速度場計算值，(d) 垂直速度場計算值，(e) 水平速度場殘差，(f) 垂直速度場殘差。

Figure 5. 9: The model applies the velocity from 2016 to 2023. (a) Horizontal velocity observation; (b) Vertical velocity observation; (c) Horizontal velocity calculation; (d) Vertical velocity calculation; (e) Horizontal velocity residuals; (f) Vertical velocity residuals.

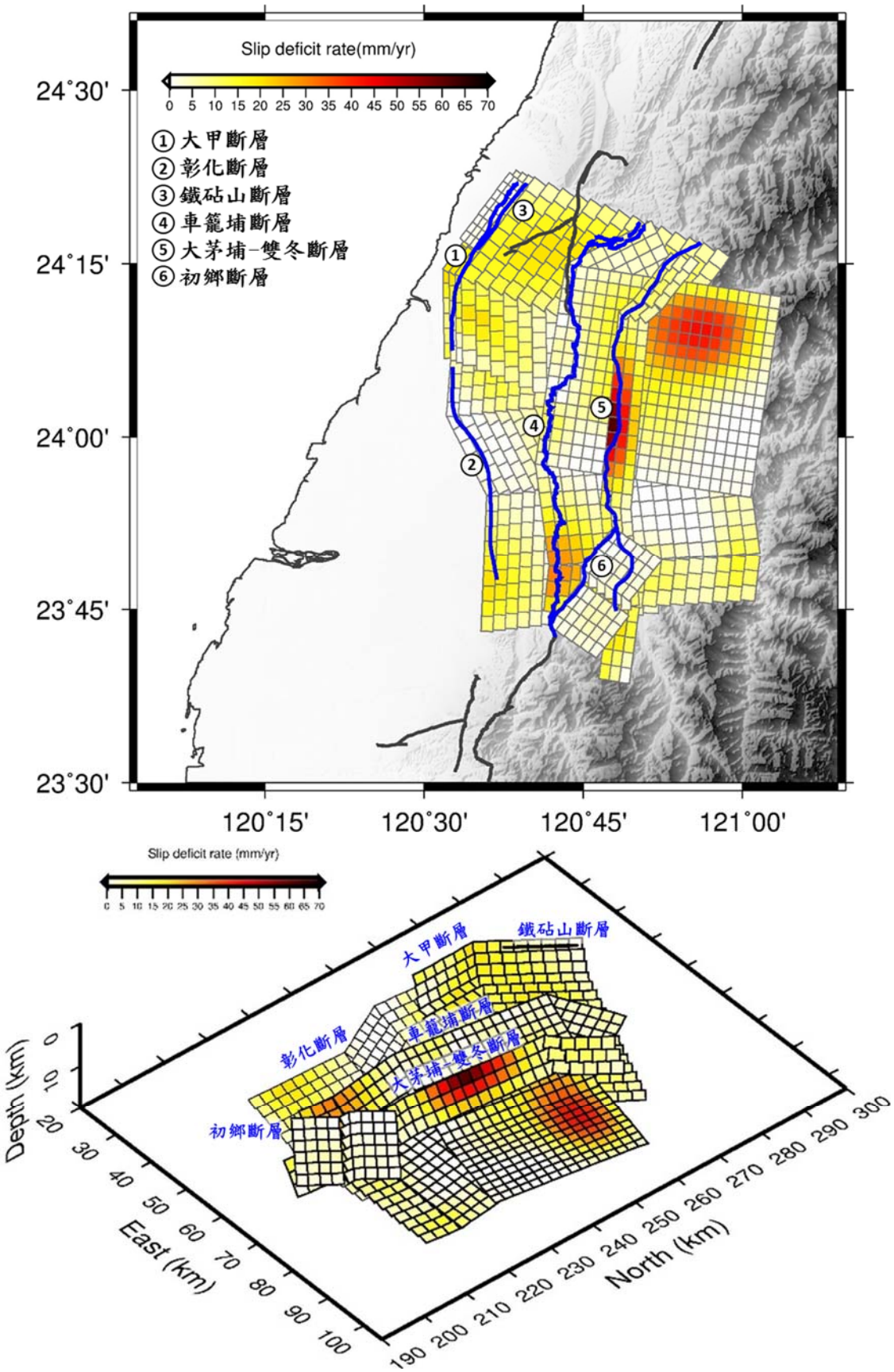


圖 5. 10：中部地區斷層滑移虧損率分布圖 Figure 5. 10: Fault slip deficit rate of central Taiwan.

5-3 中部地區之斷層滑移虧損速率

今年針對臺灣中部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析，包含 6 條活動斷層，分別為：大甲斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔–雙冬斷層、初鄉斷層與鐵砧山斷層。主要以 DEFNODE 與基線應變兩種模型計算各斷層的平均滑移虧損速率，中部地區參考 2016 至 2023 年所觀測到的 GNSS 速度場，進行斷層滑移模擬。今年中部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果如表 5. 4 所示。

然而兩種模型之滑移虧損速率平均值以大茅埔–雙冬斷層之成果差異最大，其次為鐵砧山斷層，此為二模型之計算原理差異所導致。基線模型中是以斷層上下盤之速度差為滑移虧損率之計算基礎，因此大茅埔–雙冬斷層可能係因於基線模型中斷層線的簡化，導致上下盤紀錄速率的點位位置偏差而導致有較高的滑移虧損率被計算；而 DEFNODE 模型則是藉由模擬塊體活動與偵測斷層鎖定造成的滑移虧損反演出間震期的斷層滑移速率，鐵鉆山斷層為背衝斷層，因此其所對應之塊體相對於其它塊體為小，因此有過高的滑移虧損率被計算。

為此，本研究在計算加權平均滑移虧損速率時，大茅埔–雙冬斷層將直接採用 DEFNODE 模型求得之平均滑移虧損速率；而鐵砧山斷層將直接採用基線應變模型求得之平均滑移虧損速率。

本計畫重要區域（臺中都會區、中部科學園區臺中園區與臺中市精密機械科技創新園區）之滑移虧損速率分布如圖 5. 11 所示。

表 5. 4：本計畫之 2016 - 2023 年加權平均斷層滑移虧損速率

Table 5. 4: Weighted average slip deficit rate in this project, 2016-2023.

		TDEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率（mm/yr）
斷層名稱		平均滑移虧損速率（mm/yr）	平均滑移虧損速率（mm/yr）	
大甲斷層	上界	27.5	21.5	24.5
	平均	4.9±11.3	9.3±6.1	7.1
	下界	0.0	0.0	0.0
彰化斷層	上界	12.8	15.7	14.3
	平均	6.5±3.2	5.9±4.9	6.2
	下界	0.2	0.0	0.1
車籠埔斷層	上界	14.5	28.7	21.6
	平均	4.6±4.9	9.5±9.6	7.1
	下界	0.0	0.0	0.0
大茅埔–雙冬斷層	上界	10.3	42.8	10.3
	平均	3.1±3.6	17.2±12.8	3.1
	下界	0.0	0.0	0.0

斷層名稱		TDEFNODE Model 平均滑移虧損速率（mm/yr）	Baseline Inversion Model 平均滑移虧損速率（mm/yr）	加權平均滑移虧損速率（mm/yr）
初鄉斷層	上界	3.9	5.2	4.6
	平均	0.9±1.5	2.4±1.4	1.7
	下界	0.0	0.0	0.0
鐵砧山斷層	上界	45.9	2.0	2.0
	平均	12.7±16.6	0.8±0.6	0.8
	下界	0.0	0.0	0.0

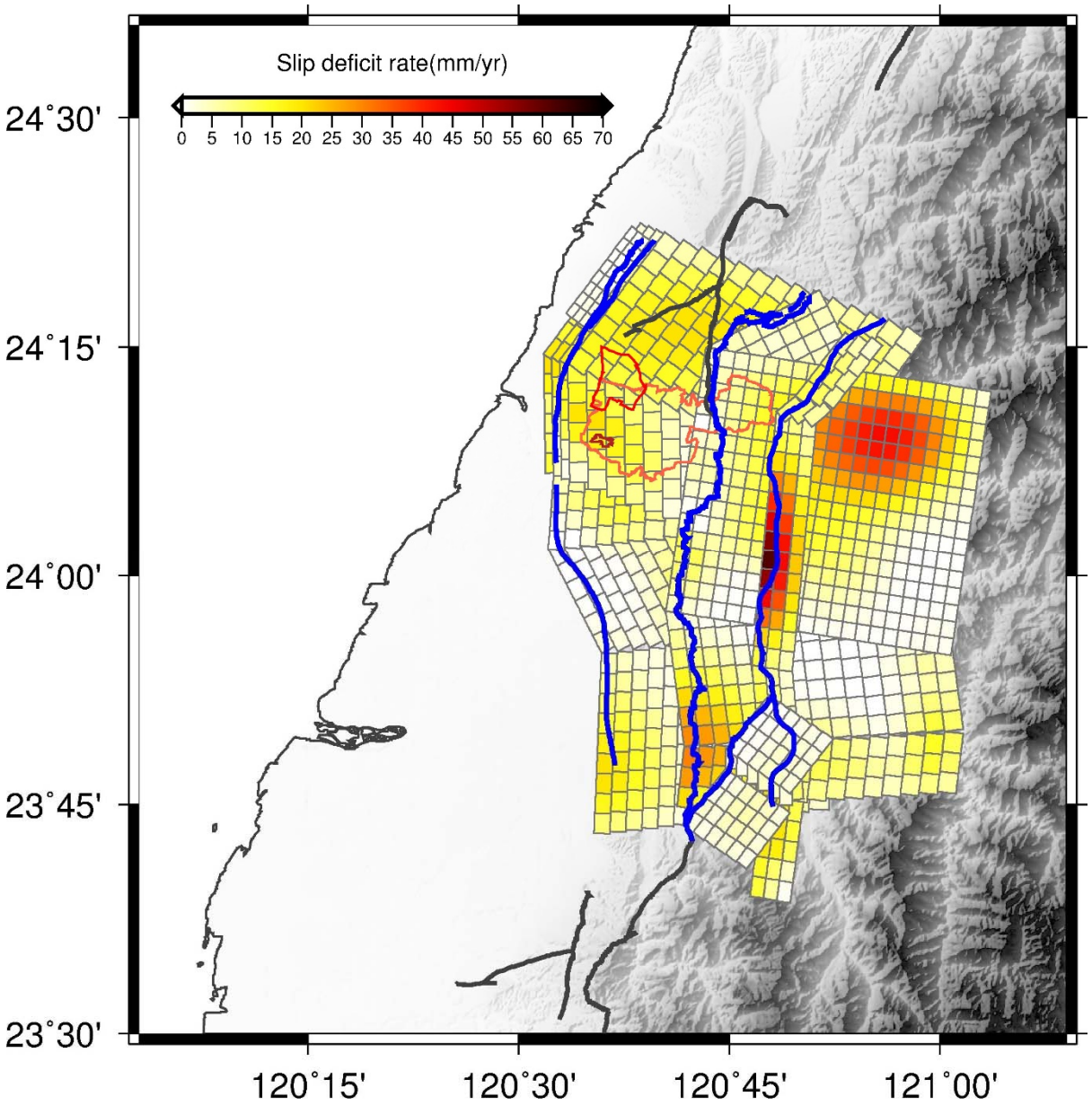


圖 5. 11：本計畫重要區域之斷層滑移虧損速率分布圖（臺中都會區、中部科學園區臺中園區與臺中市精密機械科技創新園區）

Figure 5. 11: Distribution of fault slip deficit rates with the object areas (Taichung City, Central Taiwan Science Park and Taichung City Precision Machinery Innovation Technology Park).

第六章、中部地區斷層活動潛勢

6-1 大甲斷層

6-1-1 大甲斷層參數設定

大甲斷層屬於大甲–彰化斷層系統，如圖 6.1，因大甲、彰化斷層有同時破裂的可能性，必須整體考慮為大甲–彰化斷層系統。大甲–彰化斷層系統分段破裂模式可分為大甲斷層（模式 A）、彰化斷層（模式 B）、系統破裂（模式 C），大甲斷層與彰化斷層破裂權重相等，各為 0.4；系統破裂可能性低於各斷層破裂，權重 0.2。

大甲斷層之傾角及破裂深度，本計畫是參考 Yang et al.（2007）斷層發育至地表的平衡剖面，並考慮滑脫面、大甲斷層、車籠埔斷層三者的幾何關聯性與合理性，設定深度 0～5.5 公里，傾角為東傾 60 度；深度 5.5～8.5 公里，傾角為東傾 5 度。

大甲斷層之滑移虧損速率，以本計畫 TDEFNODE 與基線應變兩種模型分別得到 4.9 ± 11.3 mm/yr 及 9.3 ± 6.1 mm/yr。圖 6.2 左圖為兩模型的滑移虧損速率常態分佈機率密度函數分布（Probability density function，簡寫 PDF），其中藍線為 TDEFNODE 的 PDF，綠線為基線應變的 PDF，紅線則為兩模型合併後的 PDF，圖 6.2 右圖為兩模型合併後的累積分布函數（cumulative distribution function，簡寫 CDF）。本計畫斷層潛勢評估根據 CDF 分布，設定大甲斷層之滑移虧損速率下界為 2.6 mm/yr（10%累積分位數），中值 9.7 mm/yr（50%累積分位數），上界 19.0 mm/yr（90%累積分位數）。權重分配為 2.6 mm/yr（0.2），9.7 mm/yr（0.6），19.0 mm/yr（0.2）。

彰化斷層之滑移虧損速率，以本計畫 TDEFNODE 與基線應變兩種模型分別得到 6.5 ± 3.2 mm/yr 及 5.9 ± 4.9 mm/yr。圖 6.3 左圖為兩模型的滑移虧損速率常態分佈 PDF 曲線，其中藍線為 TDEFNODE 的 PDF，綠線為基線應變的 PDF，紅線則為兩模型合併後的 PDF，圖 6.3 右圖為兩模型合併後的累積分布函數（CDF）。本計畫斷層潛勢評估根據 CDF 分布，設定彰化斷層之滑移虧損速率下界為 2.2 mm/yr（10%累積分位數），中值 6.6 mm/yr（50%累積分位數），上界 11.4 mm/yr（90%累積分位數）。權重分配為 2.2 mm/yr（0.2），6.6 mm/yr（0.6），11.4 mm/yr（0.2）。

破裂模式 C（大甲–彰化斷層系統）滑移虧損速率則根據能量累計公式計算，如下式：

$$\mu \cdot A_{(系統)} \cdot v_{(系統)} = \mu \cdot A_{大甲} \cdot v_{大甲} + \mu \cdot A_{彰化} \cdot v_{彰化}$$

上式中 A 為面積，移項得到

$$v_{(系統)} = \frac{A_{大甲} \cdot v_{大甲} + A_{彰化} \cdot v_{彰化}}{A_{(系統)}}$$

計算 v（系統）下界為 2.5 mm/yr；v（系統）上界為 16.3 mm/yr；v（系統）中值為 8.6 mm/yr，如表 6. 1 所示。邏輯樹權重為常態分布：2.5 mm/yr（0.2）、8.6 mm/yr（0.6）、16.3 mm/yr（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. 2 所示為計算之各破裂事件地震矩規模。

大甲–彰化斷層系統各節點權重的分配更新之邏輯樹詳如圖 6. 4 所示。

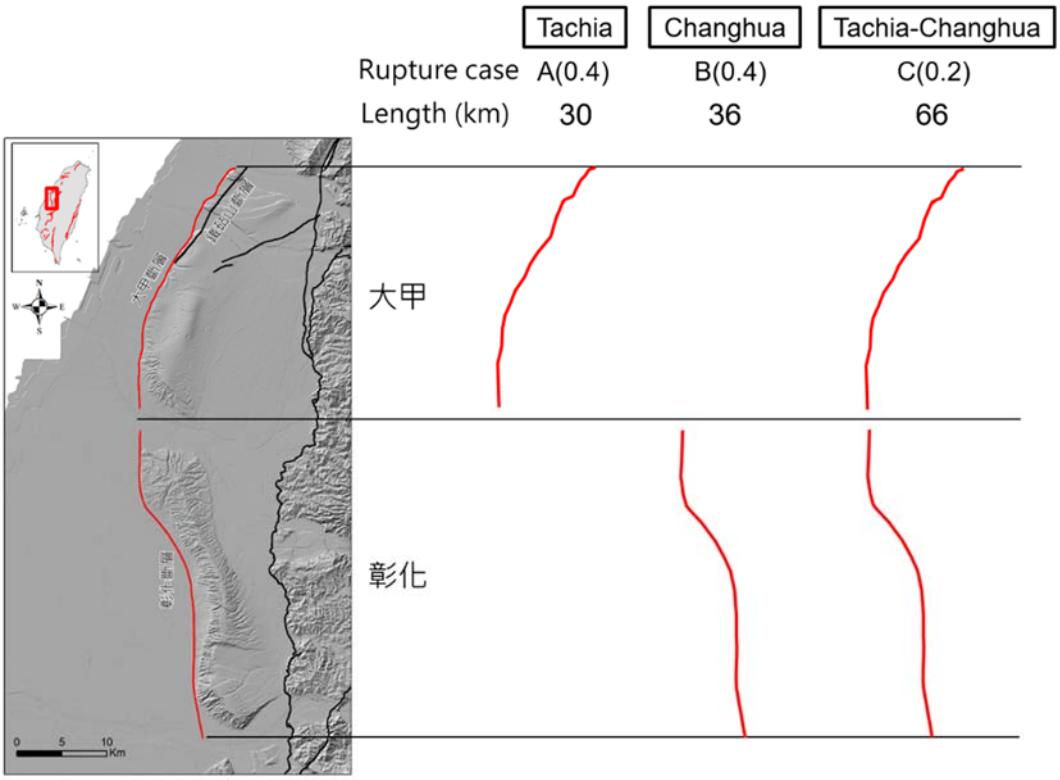


圖 6. 1：大甲–彰化斷層系統之破裂模式及權重分配

Figure 6. 1: Rupture cases and weights of the Tachia-Changhua fault system.

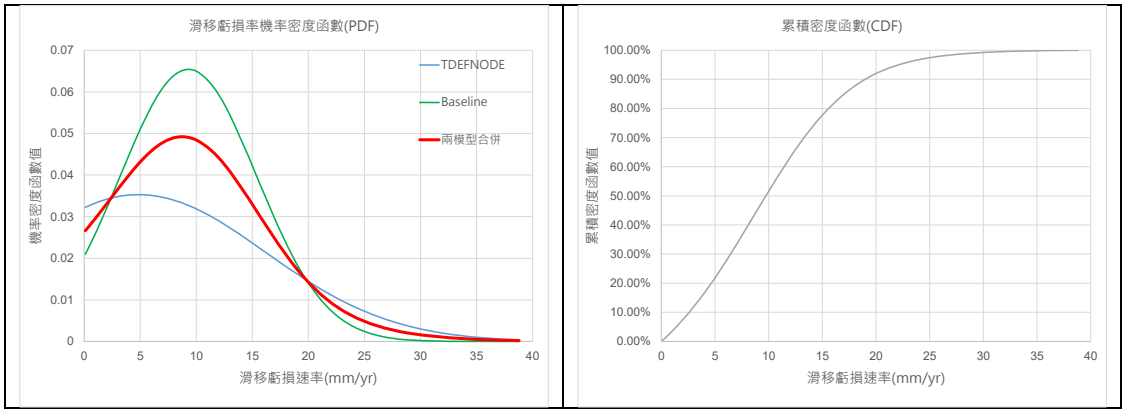


圖 6. 2：大甲斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積密度函數分布

Figure 6. 2: Probability density function curves and cumulative distribution function of the Tachia fault slip deficit rate.

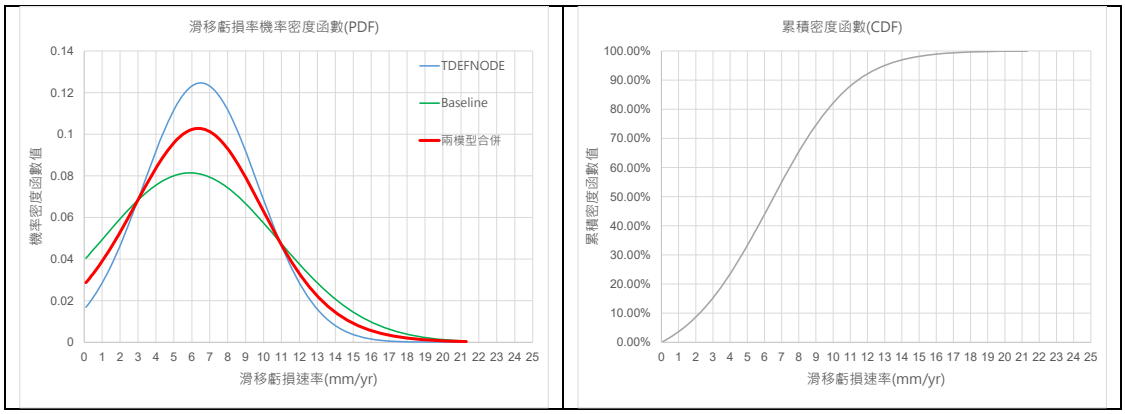


圖 6. 3：彰化斷層模型反演滑移虧損率之機率密度函數及累積密度函數分布

Figure 6. 3: Probability density function curves and cumulative distribution function of the Changhua fault slip deficit rate.

表 6. 1：大甲–彰化斷層系統（case C）滑移虧損速率計算

Table 6. 1: Slip deficit rate calculate for the Tachia-Changhua fault system (case C).

	大甲 V（mm/yr）	彰化 V（mm/yr）	大甲 A（km^2）	彰化 A（km^2）	系統 V（mm/yr）
下界	2.6	2.2	1223	677	2.5
中值	9.7	6.6			8.6
上界	19	11.4			16.3

表 6. 2：大甲–彰化斷層系統之各破裂事件面積與規模

Table 6. 2: Area and magnitude of each rupture case on the Tachia-Changhua fault system.

	破裂事件	長度（km）	斷層幾何	寬度（km）	面積（km^2）	Wells and Coopersmith, 1994（破裂面積–規模關係式）（Mw）			Yen and Ma, 2011（破裂面積–規模關係式）（Mw）
						-σ	中值	+σ	
大甲	A	30	深度 0 - 5.5 km，傾角 60° 深度 5.5 - 8.5 km，傾角 5°	40.8	1223	6.8	7.1	7.4	7.1
彰化	B	36	深度 2 - 7.5 km，傾角 25° 深度 7.5 - 8.0 km，傾角 5°	18.8	677	6.6	6.9	7.2	6.8
系統	C	66	A+B		1900	7.0	7.3	7.6	7.3

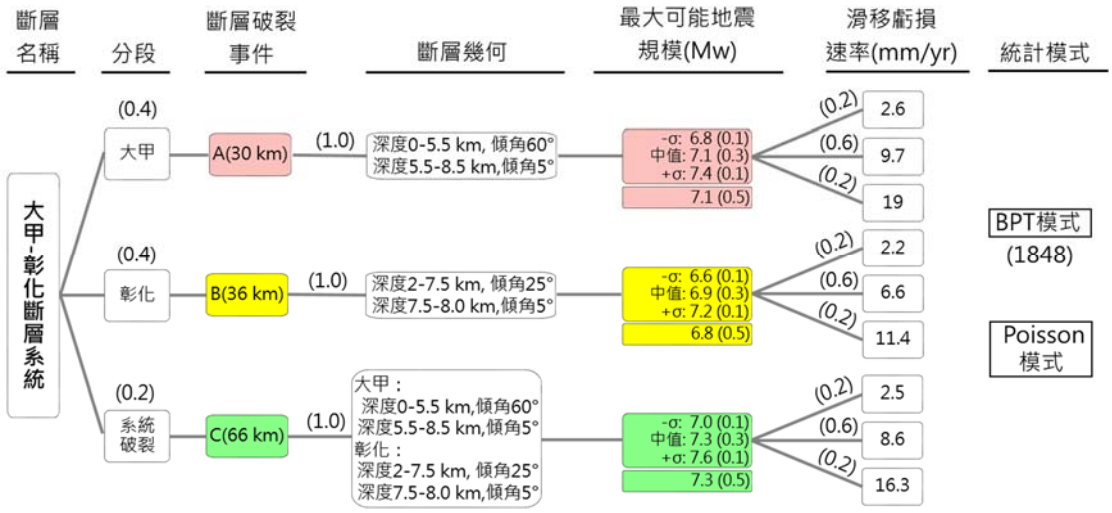


圖 6. 4：大甲–彰化斷層系統邏輯樹

Figure 6. 4: Logic tree of the Tachia-Changhua fault system.

6-1-2 大甲斷層規模與年發生率

大甲–彰化斷層系統各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 6. 5 為 3 個破裂事件取表 6. 2 中參數計算特徵地震模式分布情形。

圖 6. 4 之大甲–彰化斷層系統邏輯樹可得到 36 分支，每個分支皆有其權重，初步統計，經由特徵地震模式計算之後，圖 6. 6 為 3 種破裂事件之地震復發間隔時間–權重分布圖。

將三種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 6. 7（a）之大甲-彰化斷層系統規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 6. 7（b）之大甲-彰化斷層系統地震復發間隔時間-權重分布圖。

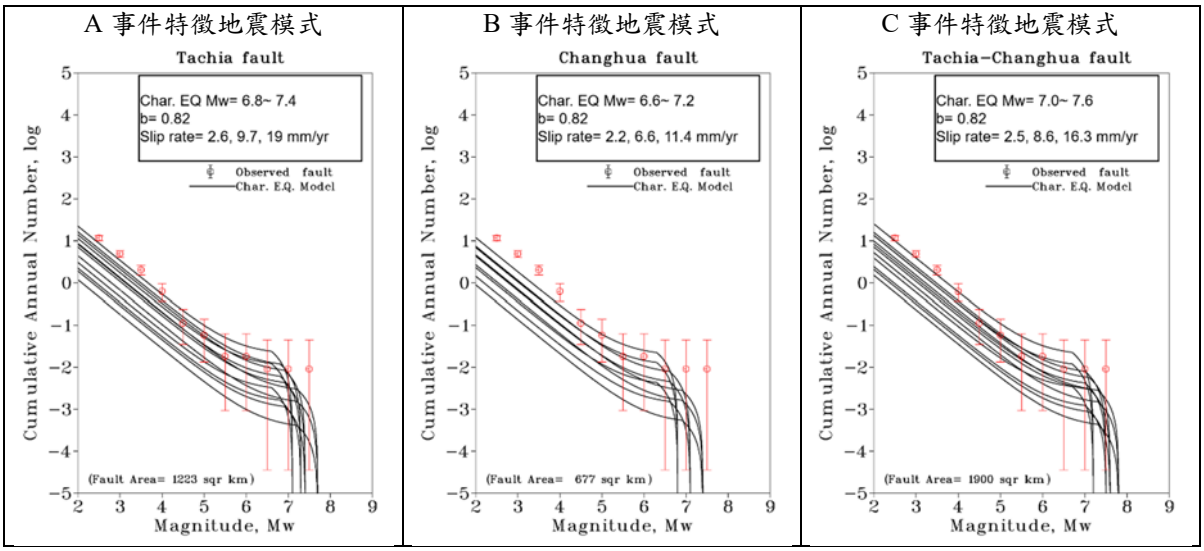


圖 6. 5：大甲-彰化斷層系統各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 6. 5: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Tachia-Changhua fault system.

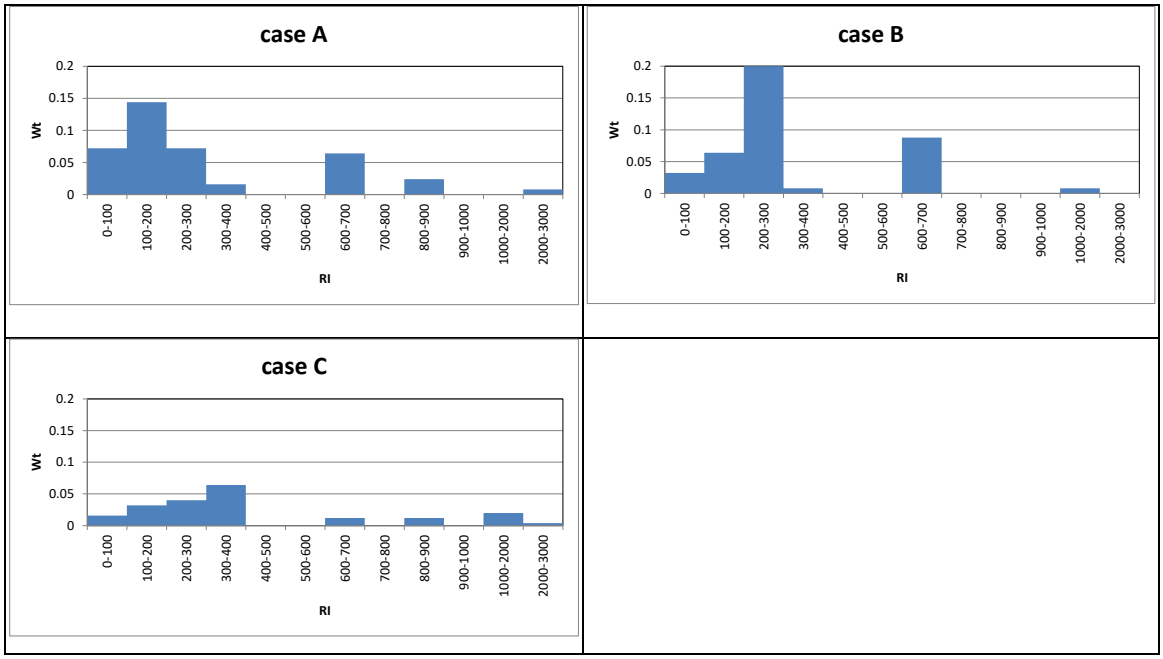


圖 6. 6：大甲-彰化斷層系統 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 6. 6: Recurrence interval - weighting relationships of the three rupture cases on the Tachia-Changhua fault system.

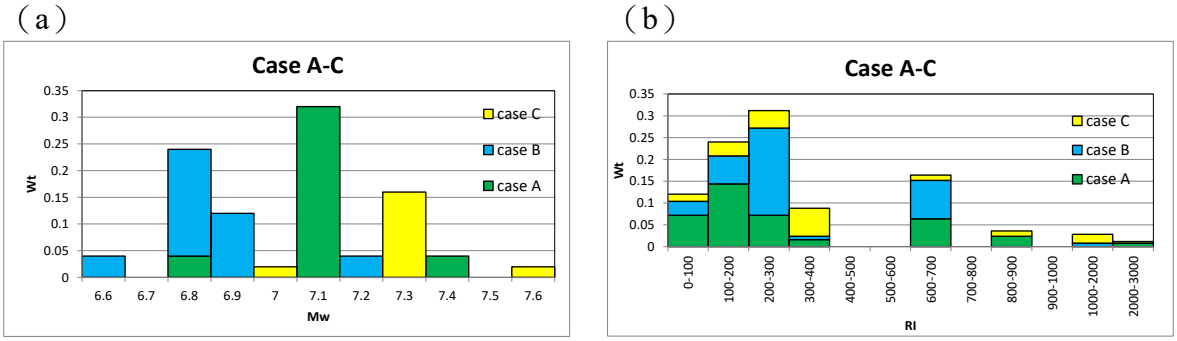


圖 6. 7：大甲−彰化斷層系統之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布（a）大甲−彰化斷層系統之全部邏輯樹分支規模−權重分布圖，(b)大甲−彰化斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間−權重分布圖。

Figure 6. 7: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Tachia-Changhua fault system. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Tachia-Changhua fault system.

6-1-3 大甲斷層機率評估

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 模式估算大甲-彰化斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，大甲−彰化斷層系統最後一次發生時間可能為 1848 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

本節主要評估大甲斷層發生機率，因此移除彰化斷層破裂模式之發生機率，表 6. 3 為大甲斷層 BPT 模式評估之結果，以西元 2024 年為基準，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 14.1%、20.5%及 31.1%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 12.1%、17.9%及 27.7%。另以 POISSON 模式計算之結果也列於表 6. 3 中以供比較。

表 6. 3：大甲斷層發生機率評估

Table 6. 3: Earthquake probabilities for the Tachia fault in this project.

特徵地震矩規模（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	POI	BPT	POI	BPT	POI
M ≧ 6.5	14.1%	8.7%	20.5%	13.5%	31.1%	22.7%
M ≧ 7.0	12.1%	7.5%	17.9%	11.7%	27.7%	20.1%

6-2 彰化斷層

6-2-1 彰化斷層參數設定

彰化斷層屬於大甲−彰化斷層系統，如圖 6.1，因大甲、彰化斷層有同時破裂的可能性，必須整體考慮為大甲−彰化斷層系統。大甲−彰化斷層系統分段破裂模式如前節所述。

彰化斷層之傾角及破裂深度，本計畫是參考 Yang et al.（2007）之 LINE 5 剖面，並考慮滑脫面、彰化斷層、車籠埔斷層三者的幾何關聯性與合理性，設定為深度 2～7.5 公里，傾角為東傾 25 度；深度 7.5～8.0 公里，傾角為東傾 5 度。

大甲斷層、彰化斷層、及破裂模式 C（大甲−彰化斷層系統）滑移虧損速率，如前節所述。

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 所示為計算之各破裂事件地震矩規模。

大甲−彰化斷層系統各節點權重的分配更新之邏輯樹如圖 6.4 所示。

6-2-2 彰化斷層規模與年發生率

大甲−彰化斷層系統各破裂事件規模與年發生率，如前節所述。

6-2-3 彰化斷層機率評估

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 模式估算大甲−彰化斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，大甲−彰化斷層系統最後一次發生時間可能為 1848 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

本節主要評估彰化斷層發生機率，因此移除大甲斷層破裂模式之發生機率，表 6.4 為彰化斷層 BPT 模式評估之結果，以西元 2024 年為基準，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 12.6%、18.7%及 29.4%；未來 30 年、50 年及 100

年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.6%、5.4%及 8.9%。另以 POISSON 模式計算之結果也列於表 6. 4 中以供比較。

另外，評估大甲−彰化斷層系統所有破裂事件未來 30、50 及 100 年的發生機率，列於表 6. 5 供參考。

表 6. 4：彰化斷層發生機率評估

Table 6. 4: Earthquake probabilities for the Changhua fault in this project

特徵地震矩規模（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	POI	BPT	POI	BPT	POI
M ≧ 6.5	12.6%	8.0%	18.7%	12.4%	29.4%	21.3%
M ≧ 7.0	3.6%	2.5%	5.4%	3.9%	8.9%	6.9%

表 6. 5：大甲−彰化斷層系統發生機率評估

Table 6. 5: Earthquake probabilities for the Tachia- Changhua fault system in this project

特徵地震矩規模（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	POI	BPT	POI	BPT	POI
M ≧ 6.5	23.3%	14.4%	34.1%	22.3%	52.1%	37.7%
M ≧ 7.0	12.2%	7.7%	18.1%	12.0%	28.2%	20.7%

6-3 車籠埔斷層

6-3-1 車籠埔斷層參數設定

車籠埔斷層分段破裂模式，主要分為整段、北段及南段，位於北段的豐原槽溝前一次古地震事件為 1710～1900 年前，且此破裂事件在車籠埔南段槽溝中都有觀察到，屬於整段破裂模式，也就是說從槽溝開挖中沒觀察到北段單獨破裂之情形，據此推測北段單獨破裂的機率，較南段和整段為小，權重設定為整段（0.4）、北段（0.2）、南段（0.4），而由於北段北端及南段南端的延伸與否又可分為 8 種破裂事件來探討，ABCD 為整段破裂；EF 為北段破裂；GH 為南段破裂，如圖 6. 8 所示。

車籠埔斷層之傾角及破裂深度，由於各段幾何參數不同，本計畫建議根據各段幾何參數建立合理的三維斷層面，再從 GIS 系統中得到三維斷層面各段之面積，如圖 6. 9 所示。

車籠埔斷層之滑移虧損速率，以本計畫 TDEFNODE 與基線應變兩種模型分別得到 4.6 ± 4.9 mm/yr 及 9.5 ± 9.6 mm/yr。圖 6. 10 左圖為兩模型的滑移虧損速率常態分佈機率密度函數分布（Probability density function，簡寫 PDF），其中藍線為 TDEFNODE 的 PDF，綠線為基線應變的 PDF，紅線則為兩模型合併後的 PDF，圖 6. 10 右圖為兩模型合併後的累積分布函數（cumulative distribution function，簡寫 CDF）。本計畫斷層潛勢評估根據 CDF 分布，設定車籠埔斷層之滑移虧損速率下界為 1.8 mm/yr（10%累積分位数），中值 7.7 mm/yr（50%累積分位数），上界 18.8 mm/yr（90%累積分位数）。權重分配為 1.8 mm/yr（0.2），7.7 mm/yr（0.6），18.8 mm/yr（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. 6 所示為計算之各破裂事件地震矩規模，各段面積可參考圖 6. 9。

車籠埔斷層各節點權重的分配更新之邏輯樹詳如圖 6. 11 所示。

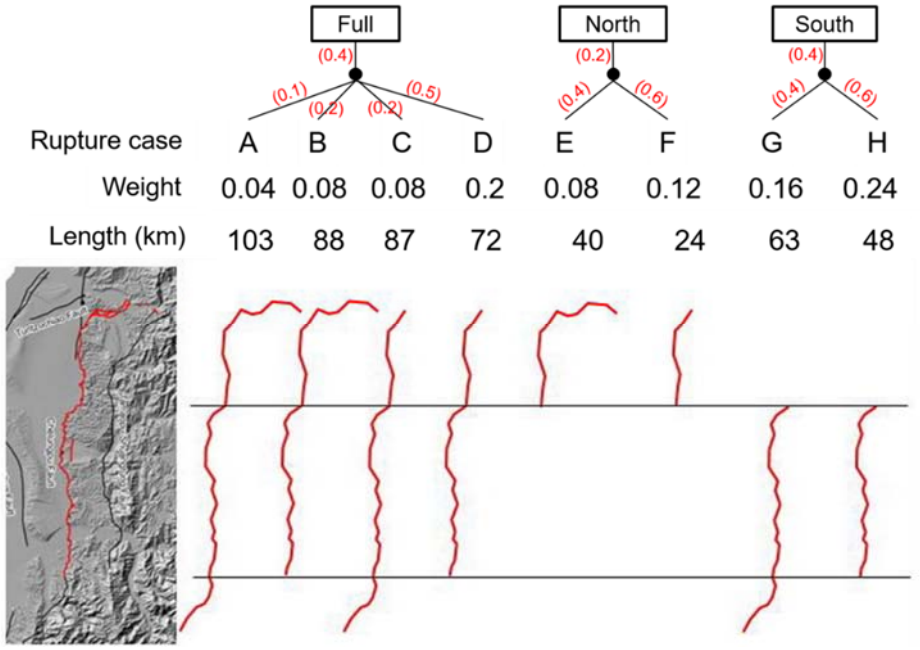


圖 6. 8：車籠埔斷層之破裂模式及權重分配

Figure 6. 8: Rupture cases and weights of the Chelungpu fault.

分段	幾何	面積(km²)
東北段	傾角15度S	90
北段	深度0-8.5 km，傾角25度E 深度8.5-10 km，傾角5度E	372
南段	深度0-8km，傾角35度E 深度8-10km，傾角5度E	1553
大尖山段	深度0-8km，傾角35度E 深度8-10km，傾角5度E	437

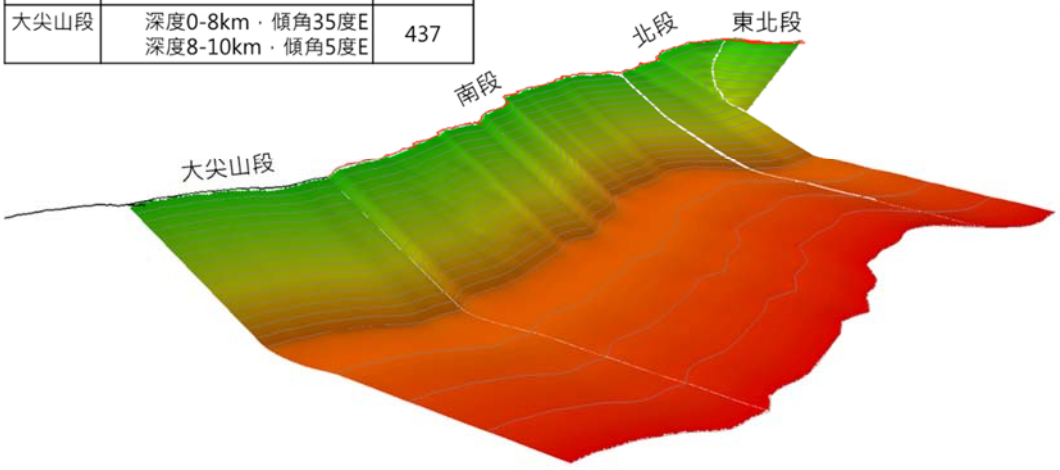


圖 6. 9：車籠埔斷層三維斷層幾何面及各分段面積

Figure 6. 9: Three-dimensional fault geometry and area of each segment of the Chelungpu Fault.

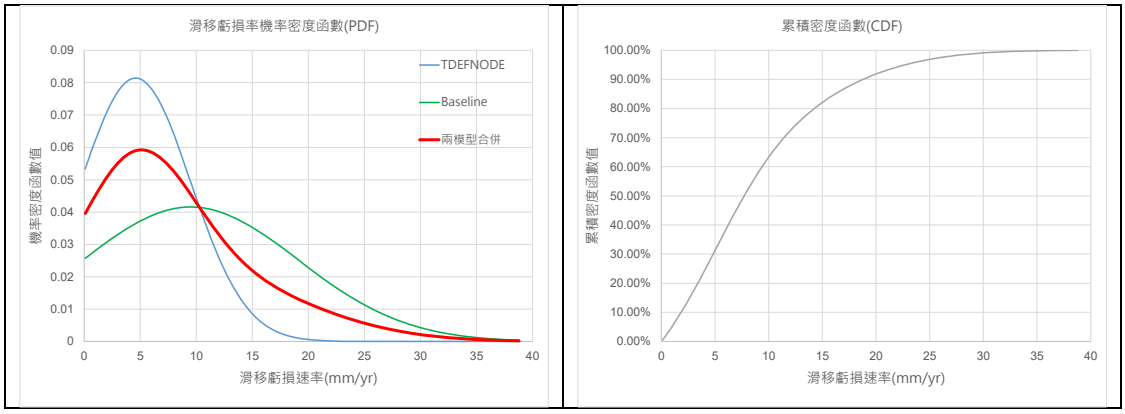


圖 6. 10：車籠埔斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積密度函數分布

Figure 6. 10: Probability density function curves and cumulative distribution function of the Chelungpu fault slip deficit rate.

表 6. 6：車籠埔斷層之各破裂事件面積與規模

Table 6. 6: Area and magnitude of each rupture case on the Chelungpu fault.

分段	破裂事件	長度（km）	面積（km^2）	Wells and Coopersmith, 1994（破裂面積−規模關係式）（Mw）			Yen and Ma, 2011（破裂面積−規模關係式）（Mw）
				-σ	中值	+σ	
整段	A	103	90+372+1553+437=2452	7.1	7.4	7.7	7.5
	B	88	90+372+1553=2015	7.0	7.3	7.6	7.4
	C	87	372+1553+437=2362	7.1	7.4	7.7	7.5
	D	72	372+1553=1925	7.0	7.3	7.6	7.3
北段	E	40	90+372=462	6.4	6.7	7.0	6.7
	F	24	372	6.3	6.6	6.9	6.6
南段	G	63	1553+437=1990	7.0	7.3	7.6	7.4
	H	48	1553	6.9	7.2	7.5	7.2



圖 6. 11：車籠埔斷層邏輯樹

Figure 6. 11: Logic tree of the Chelungpu fault.

6-3-2 車籠埔斷層規模與年發生率

車籠埔斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 6. 12 為 8 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

圖 6. 11 之車籠埔斷層邏輯樹可得到 96 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 6. 13 為各分段破裂事件之規模–權重分布圖，其中整段破裂以規模 7.3 之權重最高；北段以規模 6.6 之權重最高；南段以規模 7.2 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 6. 14 為三個分段破裂事件之地震復發間隔時間–權重分布圖。

將 8 種破裂模式之規模–權重加總即得到圖 6. 15（a）之車籠埔斷層規模–權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間–權重加總即得到圖 6. 15（b）之車籠埔斷層地震復發間隔時間–權重分布圖。

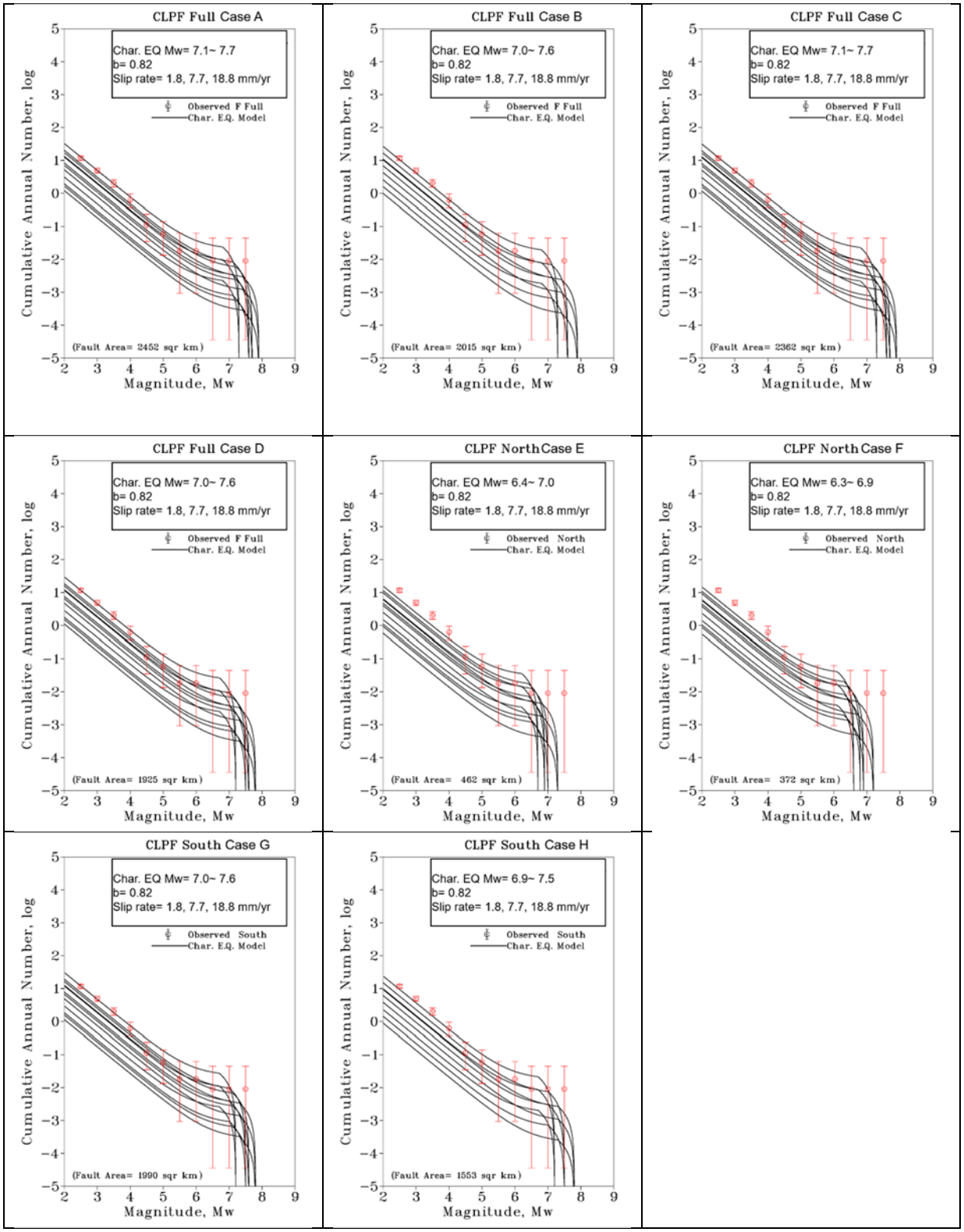


圖 6. 12：車籠埔斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 6. 12: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chelungpu fault.

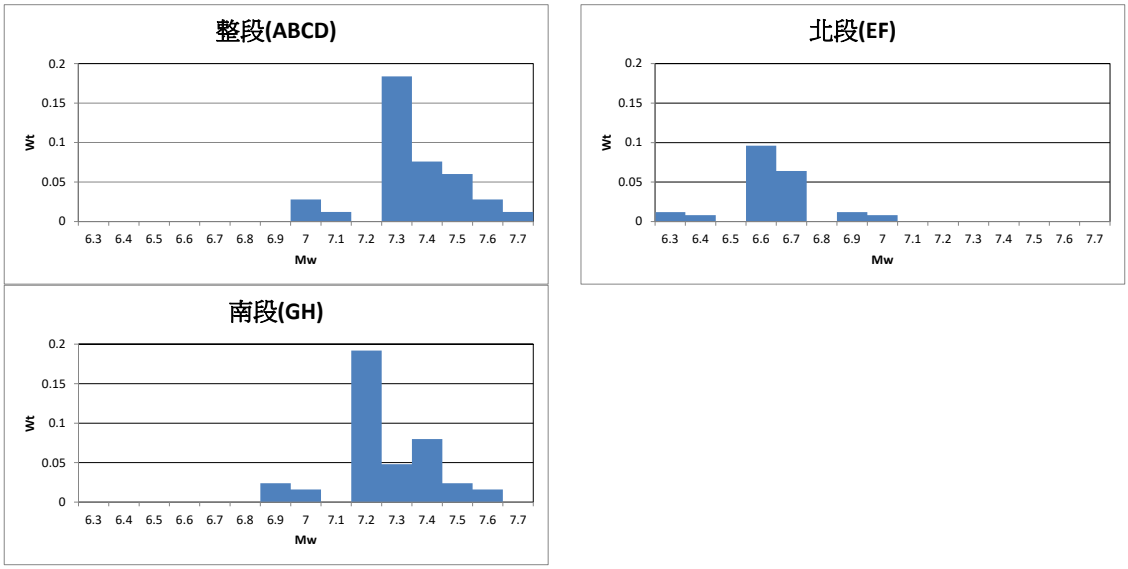


圖 6. 13：車籠埔斷層三種分段破裂事件之邏輯樹規模−權重分布圖。橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

Figure 6. 13: The magnitude- weighting relationships for the three segment cases of the Chelungpu fault.

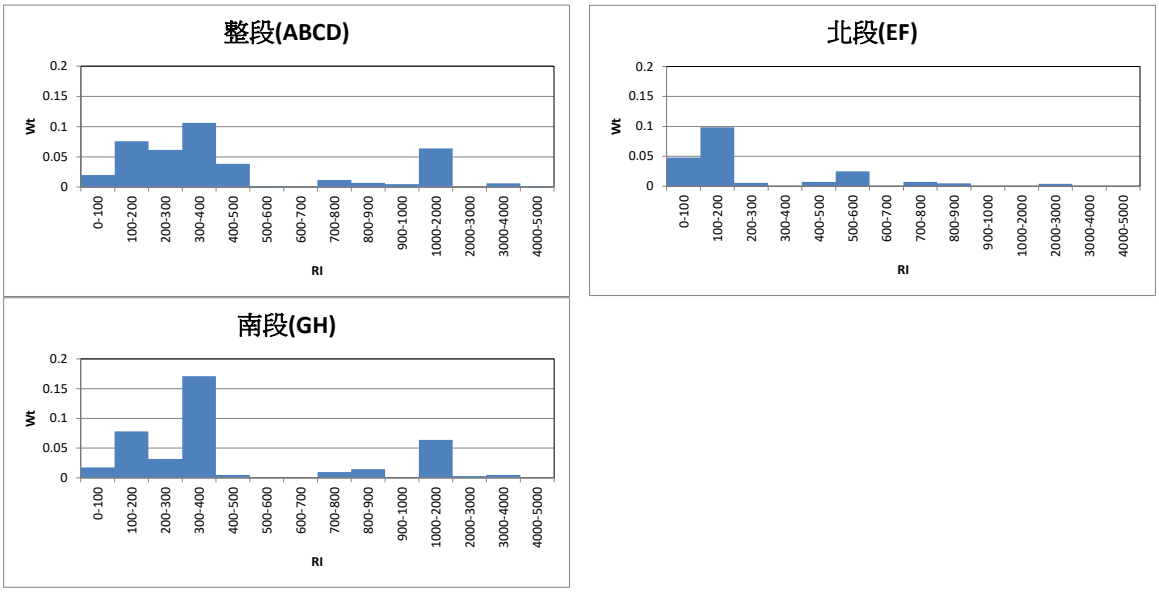


圖 6. 14：車籠埔斷層三種分段破裂事件之地震復發間隔時間−權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 6. 14: Recurrence interval- weighting relationships of the three segment cases on the Chelungpu fault.

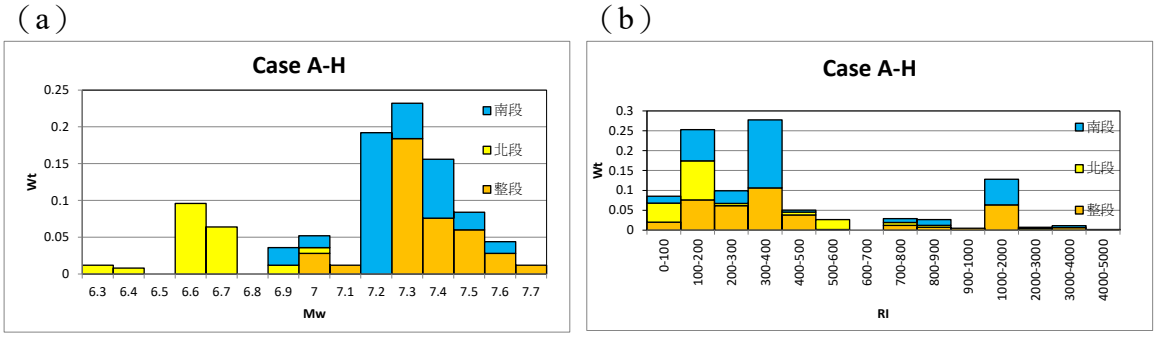


圖 6. 15：車籠埔斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布（a）車籠埔斷層之全部邏輯樹分支規模−權重分布圖，（b）車籠埔斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間−權重分布圖。

Figure 6. 15: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Chelungpu fault. (b) The summed recurrence interval- weighting relationship for the whole branches of the Chelungpu fault.

6-3-3 車籠埔斷層機率評估

在獲得各破裂事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算車籠埔斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，車籠埔斷層最後一次發生時間為西元 1999 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 6. 7 為車籠埔斷層 BPT 模式評估之結果，以西元 2024 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3 ~ 7.7 之機率為 5.9%、10.9%及 23.6%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 5.0%、9.7%及 22.0%。

表 6. 7：車籠埔斷層發生機率評估

Table 6. 7: Earthquake probabilities for the Chelungpu 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
6.3 ≦ M ≦7.7	5.9%	10.9%	23.6%
M ≧ 6.5	5.0%	9.7%	22.0%
M ≧ 7.0	2.3%	4.9%	12.7%

6-4 大茅埔–雙冬斷層

6-4-1 大茅埔–雙冬斷層參數設定

在評估大茅埔–雙冬斷層之破裂，主要分為 A 大茅埔+雙冬斷層、B 雙冬斷層，如圖 6. 16 所示。本計畫認為大茅埔斷層單獨破裂引發之地震規模太小，因此不考慮大茅埔斷層單獨破裂，只考慮整段破裂及雙冬斷層破裂之情形。

大茅埔–雙冬斷層之傾角及破裂深度，主要是參考 Yue et al.（2005）之 YY'剖面及 Yang et al.（2007）之 LINE 6 剖面，本計畫擬定大茅埔–雙冬斷層傾角為 45 度，深度約 5 公里。

大茅埔–雙冬斷層之滑移虧損速率，以本計畫 TDEFNODE 與基線應變兩種模型分別得到 3.1 ± 3.6 mm/yr 及 17.2 ± 12.8 mm/yr。圖 6. 17 左圖為兩模型的滑移虧損速率常態分佈機率密度函數分布（Probability density function，簡寫 PDF），其中藍線為 TDEFNODE 的 PDF，綠線為基線應變的 PDF。因基線應變模型中斷層簡化，導致上下盤速率的位置偏差，建議給予較低權重後再進行合併，權重分配為 TDEFNODE（0.9），基線應變（0.1）。紅線為兩模型結果加權後合併的 PDF，圖 6. 17 右圖為兩模型合併後的累積分布函數（cumulative distribution function，簡寫 CDF）。本計畫斷層潛勢評估根據 CDF 分布，設定大茅埔–雙冬斷層之滑移虧損速率下界為 1.0 mm/yr（10%累積分位數），中值 4.3 mm/yr（50%累積分位數），上界 10.8 mm/yr（90%累積分位數）。權重分配為 1.0 mm/yr（0.2），4.3 mm/yr（0.6），10.8 mm/yr（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 所示為計算之各破裂事件地震矩規模。

大茅埔–雙冬斷層各節點權重的分配更新之邏輯樹如圖 6. 18 所示。

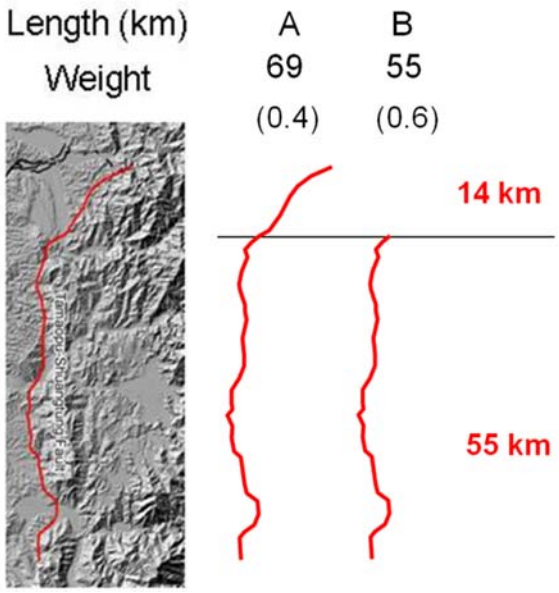


圖 6. 16：大茅埔–雙冬斷層之破裂模式及權重分配

Figure 6. 16: Rupture cases and weights of the Tamaopu- Shuangtung fault.

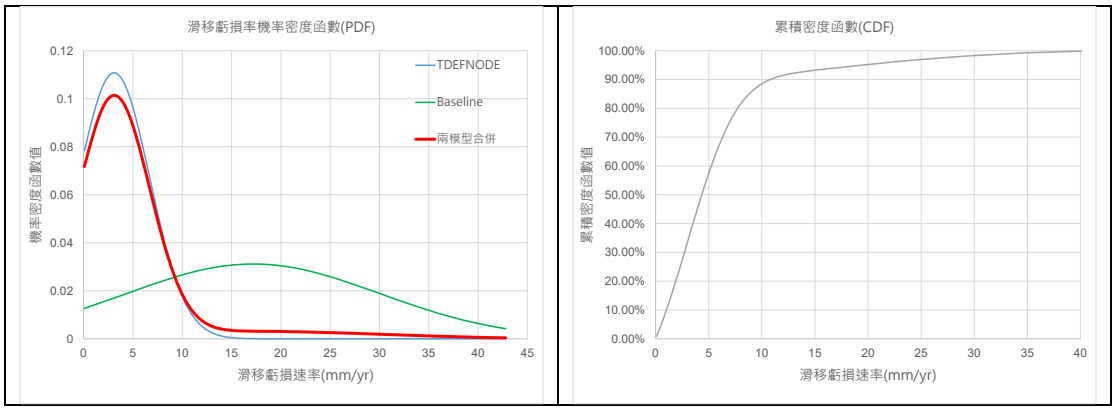


圖 6. 17：大茅埔–雙冬斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積密度函數分布

Figure 6. 17: Probability density function curves and cumulative distribution function of the Tamaopu- Shuangtung fault slip deficit rate.

表 6. 8：大茅埔–雙冬斷層之各破裂事件面積與規模

Table 6. 8: Area and magnitude of each rupture case on the Tamaopu- Shuangtung fault.

	破裂事件	長度（km）	斷層幾何	寬度（km）	面積（km^2）	Wells and Coopersmith, 1994（破裂面積–規模關係式）（Mw）			Yen and Ma, 2011（破裂面積–規模關係式）（Mw）
						-σ	中值	+σ	
大茅埔+雙冬	A	69	深度 0 - 5 km, 傾角 45°	7.1	488	6.5	6.8	7.1	6.7
雙冬	B	55		7.1	389	6.4	6.7	7.0	6.6

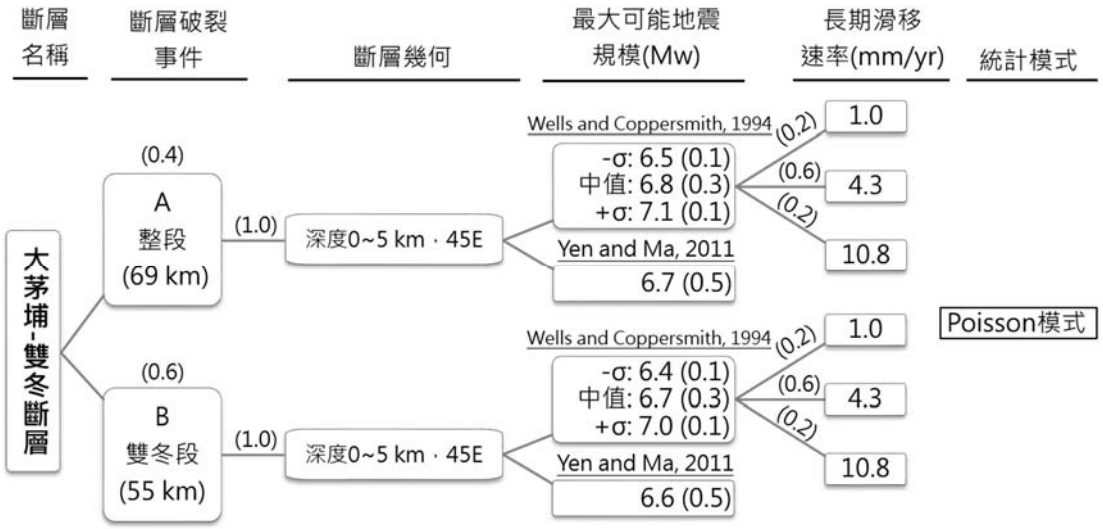


圖 6. 18：大茅埔–雙冬斷層邏輯樹

Figure 6. 18: Logic tree of the Tamaopu- Shuangtung fault.

6-4-2 大茅埔–雙冬斷層規模與年發生率

大茅埔–雙冬斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 6. 19 為 2 個破裂事件計算特徵地震模式分布情形。

圖 6. 18 之大茅埔–雙冬斷層邏輯樹可得到 24 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，經由特徵地震模式計算之後，圖 6. 20 為二種破裂事件之地震復發間隔時間–權重分布圖。

將二種破裂模式之規模–權重加總即得到圖 6. 21（a）之大茅埔–雙冬斷層規模–權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間–權重加總即得到圖 6. 21（b）之大茅埔-雙冬斷層地震復發間隔時間–權重分布圖。

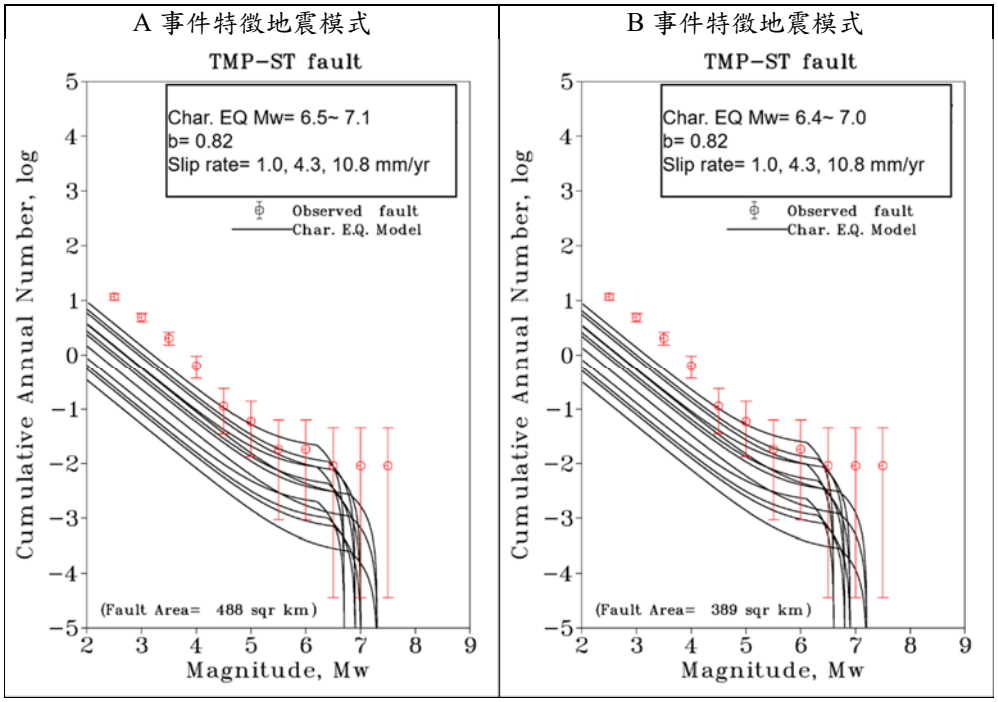


圖 6. 19：大茅埔−雙冬斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 6. 19: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Tamaopu- Shuangtung fault.

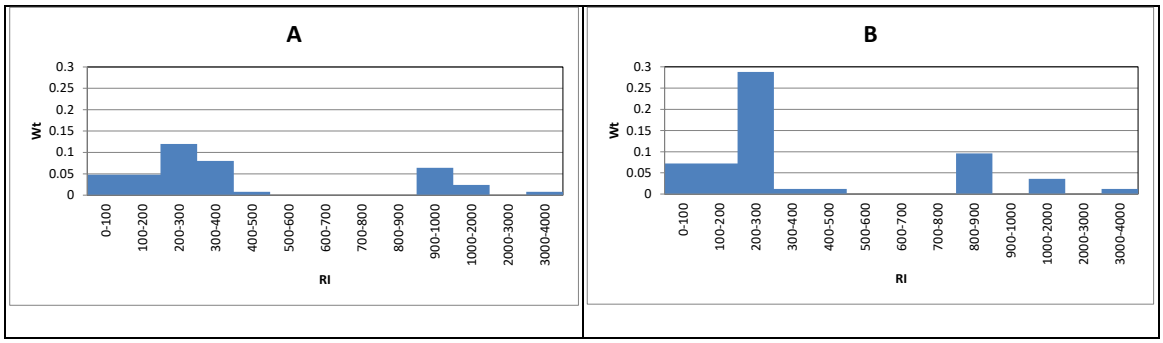


圖 6. 20：大茅埔−雙冬斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間−權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 6. 20: Recurrence interval- weighting relationships of the two rupture cases on the Tamaopu- Shuangtung fault.

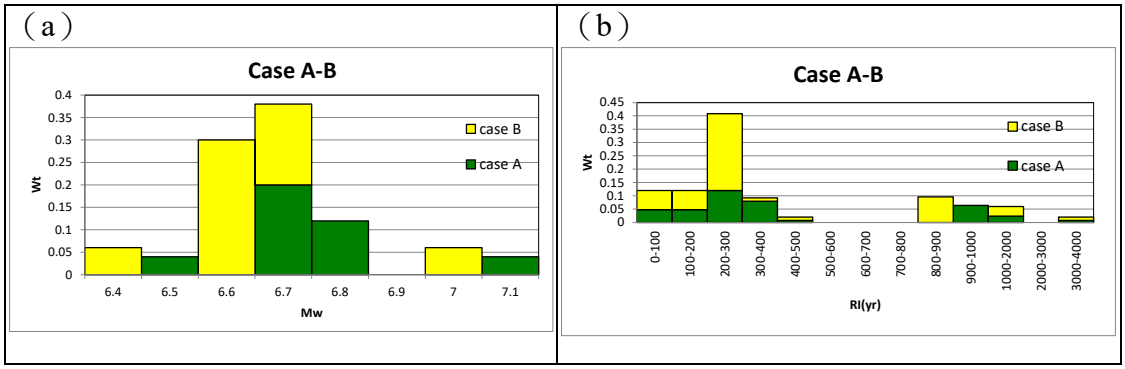


圖 6. 21：大茅埔–雙冬斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間（a）大茅埔–雙冬斷層之全部邏輯樹分支規模–權重分布圖，(b）大茅埔–雙冬斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間–權重分布圖。

Figure 6. 21: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Tamaopu- Shuangtung fault. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Tamaopu-Shuangtung fault.

6-4-3 大茅埔–雙冬斷層機率評估

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 模式估算大茅埔–雙冬斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，大茅埔–雙冬斷層最後一次發生時間為未知，因此採用 Poisson 模式進行評估。

表 6. 9 為大茅埔–雙冬斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2024 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.4～7.1 之機率為 13.4%、20.8%及 35.2%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 11.8%、18.4%及 31.6%。

表 6. 9：大茅埔–雙冬斷層發生機率評估

Table 6. 9: Earthquake probabilities for the Tamaopu- Shuangtung 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
6.4 ≦ M ≦ 7.1	13.4%	20.8%	35.2%
M ≧ 6.5	11.8%	18.4%	31.6%

6-5 初鄉斷層

6-5-1 初鄉斷層參數設定

根據地礦中心（林啟文，2021）公布之活動斷層線，初鄉斷層長約 20 公里，本計畫評估初鄉斷層之破裂模式，考慮整段破裂模式，長度為 20 公里。

初鄉斷層之幾何設定，參考張中威（2023）平衡剖面 C 剖面(有較多的地質資料約制)，本計畫簡化初鄉斷層的幾何為東傾 40 度，深度 8 公里。

初鄉斷層之滑移虧損速率，以本計畫 TDEFNODE 與基線應變兩種模型分別得到 0.9 ± 1.5 mm/yr 及 2.4 ± 1.4 mm/yr。圖 6. 22 左圖為兩模型的滑移虧損速率常態分佈機率密度函數分布（Probability density function，簡寫 PDF），其中藍線為 TDEFNODE 的 PDF，綠線為基線應變的 PDF，紅線則為兩模型合併後的 PDF，圖 6. 22 右圖為兩模型合併後的累積分布函數（cumulative distribution function，簡寫 CDF）。本計畫斷層潛勢評估根據 CDF 分布，設定初鄉斷層之滑移虧損速率下界為 0.5 mm/yr（10%累積分位数），中值 2.0 mm/yr(50%累積分位数)，上界 3.9 mm/yr(90%累積分位数)。權重分配為 0.5 mm/yr(0.2)，2.0 mm/yr（0.6），3.9 mm/yr（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. 10 所示為計算之各破裂事件地震矩規模。

初鄉斷層各節點權重的分配更新之邏輯樹詳如圖 6. 23 所示。

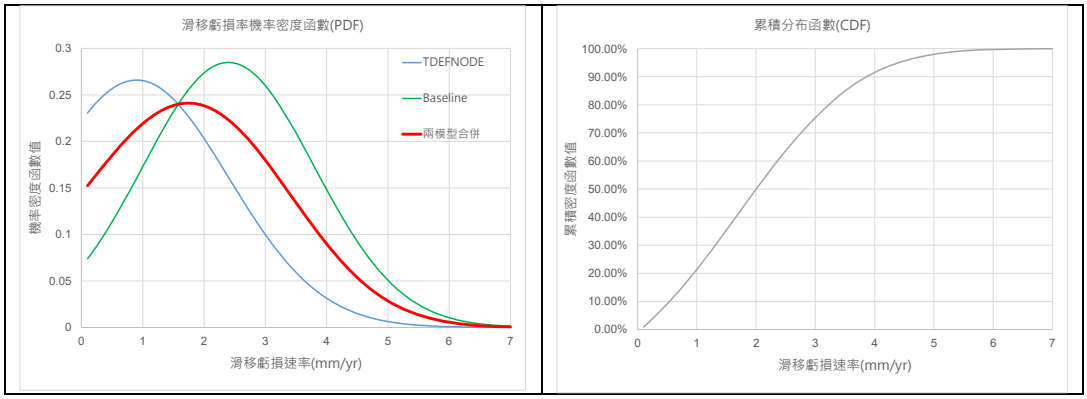


圖 6. 22：初鄉斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積分布函數

Figure 6. 22: Probability density function curves and cumulative distribution function of slip deficit rate of the Chuhsiang fault.

表 6. 10：初鄉斷層之破裂事件面積與規模

Table 6. 10: Area and magnitude of one rupture case on the Chuhsiang fault

斷層名稱	破裂事件	長度（km）	傾角（度）	破裂深度（km）	寬度（km）	面積（km^2）	Wells and Coopersmith, 1994（破裂面積–規模關係式）（Mw）			Yen and Ma, 2011（破裂面積–規模關係式）（Mw）
							-σ	中值	+σ	
初鄉	A	20	40E	8	12.4	249	6.2	6.5	6.8	6.4

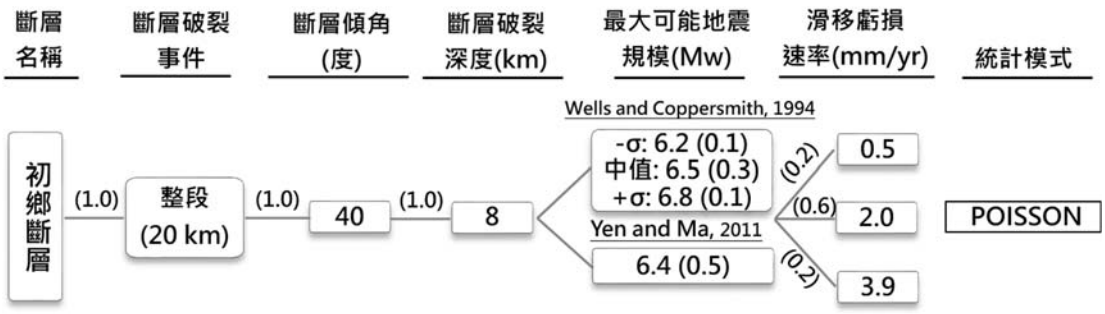


圖 6. 23：初鄉斷層邏輯樹

Figure 6. 23: Logic tree of the Chuhsiang fault.

6-5-2 初鄉斷層規模與年發生率

初鄉斷層破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 6. 24 為整段破裂計算得到的特徵地震模式分布情形。

圖 6. 23 之初鄉斷層邏輯樹可得到 12 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 6. 25 為 12 個分支之規模−權重分布圖，以規模 6.4 之權重最高。圖 6. 26 為 12 個分支之地震復發間隔時間−權重分布圖。

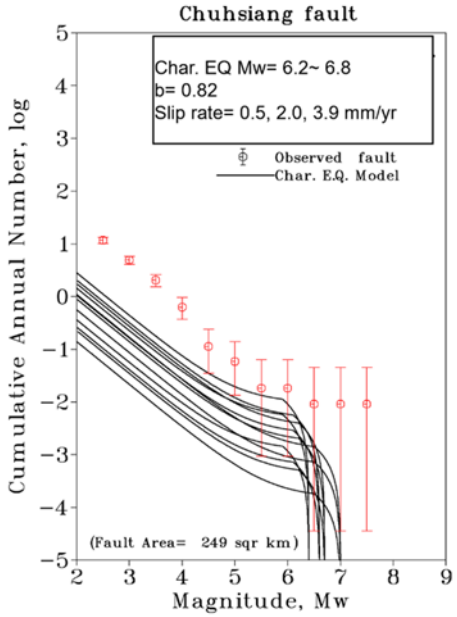


圖 6. 24：初鄉斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 6. 24: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Chuhsiang fault.

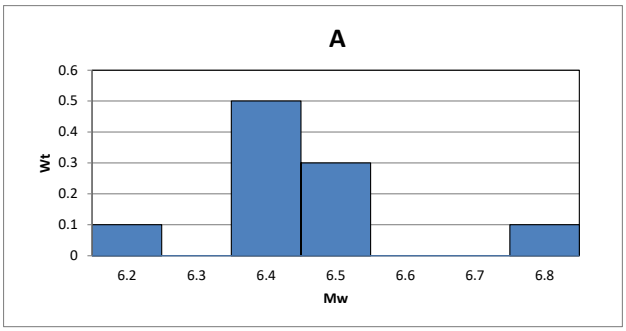


圖 6. 25：初鄉斷層之全部邏輯樹分支規模−權重分布圖

Figure 6. 25: The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Chuhsiang fault.

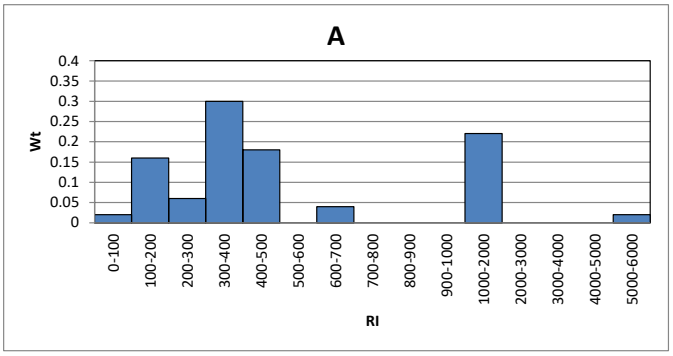


圖 6. 26：初鄉斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間−權重分布圖

Figure 6. 26: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Chuhsiang fault.

6-5-3 初鄉斷層機率評估

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 模式估算初鄉斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，初鄉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. 11 為初鄉斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2024 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2 ~ 6.8 之機率為 8.0%、12.8%及 23.3%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 2.1%、3.4%及 6.4%。

表 6. 11：初鄉斷層發生機率評估

Table 6. 11: Earthquake probabilities for the Chuhsiang 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 ≦ 6.8	8.0%	12.8%	23.3%
M ≧ 6.5	2.1%	3.4%	6.4%

6-6 鐵砧山斷層

6-6-1 鐵砧山斷層參數設定

鐵砧山斷層位於大甲斷層東側，長約 13 公里，可能是大甲斷層的背衝斷層（李元希與石瑞銓，2008），又名大甲東斷層（林朝棨，1957）。

鐵砧山斷層幾何，本計畫推估鐵砧山斷層傾角約為西傾 35 度，根據 Yang et al.（2007）Line 6 剖面以及鐵砧山斷層的位置，推測鐵砧山斷層深度約為 2 公里。

鐵砧山斷層之滑移虧損速率，以本計畫 TDEFNODE 與基線應變兩種模型分別得到 12.7 ± 16.6 mm/yr 及 0.8 ± 0.6 mm/yr。鐵砧山斷層於 TDEFNODE 模型結果中呈現異常大的數值，可能與斷層為背衝斷層，所屬之 block 區塊太小不好計算所致，建議不採用。圖 6. 27 左圖為基線應變模型的滑移虧損速率常態分佈機率密度函數分布（Probability density function，簡寫 PDF）。圖 6. 27 右圖為基線應變模型的累積分布函數（cumulative distribution function，簡寫 CDF）。本計畫斷層潛勢評估根據 CDF 分布，設定鐵砧山斷層之滑移虧損速率下界為 0.3 mm/yr（10%累積分位數），中值 0.9 mm/yr（50%累積分位數），上界 1.6 mm/yr（90%累積分位數）。權重分配為 0.3 mm/yr（0.2），0.9 mm/yr（0.6），1.6 mm/yr（0.2）。

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. 12 所示為計算之地震矩規模。

鐵砧山斷層各節點權重的分配更新之邏輯樹詳如圖 6. 28 所示。

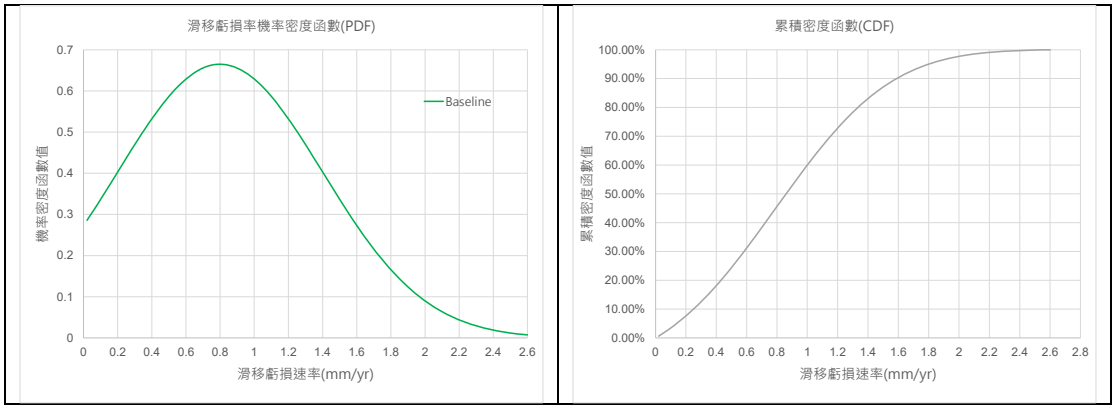


圖 6. 27：鐵砧山斷層滑移虧損率之機率密度函數曲線及累積分布函數

Figure 6. 27: Probability density function curves and cumulative distribution function of slip deficit rate of the Tiehchenshan fault.

表 6. 12：鐵砧山斷層之破裂事件面積與規模

Table 6. 12: Area and magnitude of one rupture case on the Tiehchenshan fault.

斷層名稱	破裂事件	長度（km）	傾角（度）	破裂深度（km）	寬度（km）	面積（km^2）	Wells and Coopersmith, 1994（破裂面積–規模關係式）（Mw）			Yen and Ma, 2011（破裂面積–規模關係式）（Mw）
							-σ	中值	+σ	
鐵砧山	A	13	35W	2	3.5	45	5.5	5.8	6.1	5.7

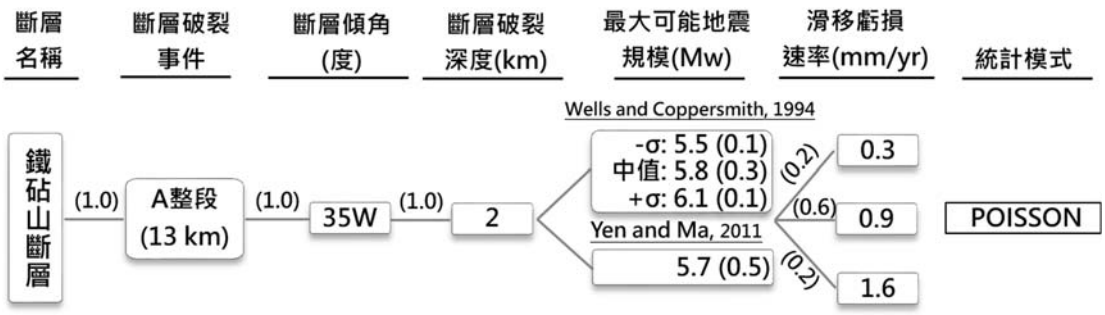


圖 6. 28：鐵砧山斷層邏輯樹

Figure 6. 28: Logic tree of the Tiehchenshan fault.

6-6-2 鐵砧山斷層規模與年發生率

鐵砧山斷層破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 6. 29 為整段破裂計算得到的特徵地震模式分布情形。

圖 6. 28 之鐵砧山斷層邏輯樹可得到 12 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 6. 30 為 12 個分支之規模−權重分布圖。圖 6. 31 為 12 個分支之地震復發間隔時間−權重分布圖。

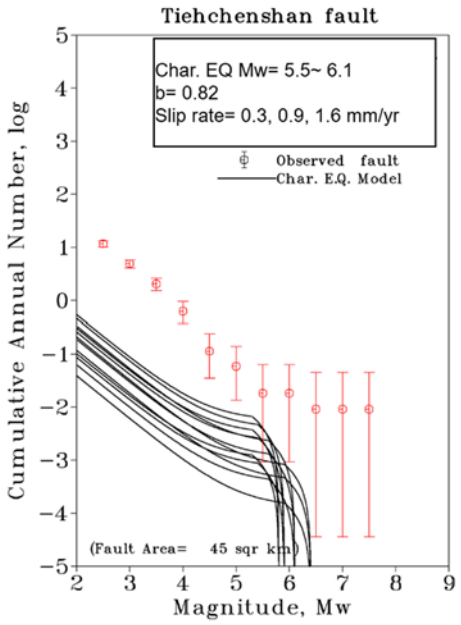


圖 6. 29：鐵砧山斷層破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 6. 29: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Tiehchenshan fault.

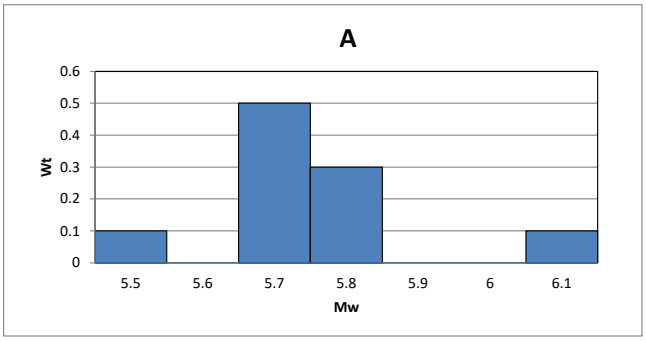


圖 6. 30：鐵砧山斷層之全部邏輯樹分支規模−權重分布圖

Figure 6. 30: The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Tiehchenshan fault.

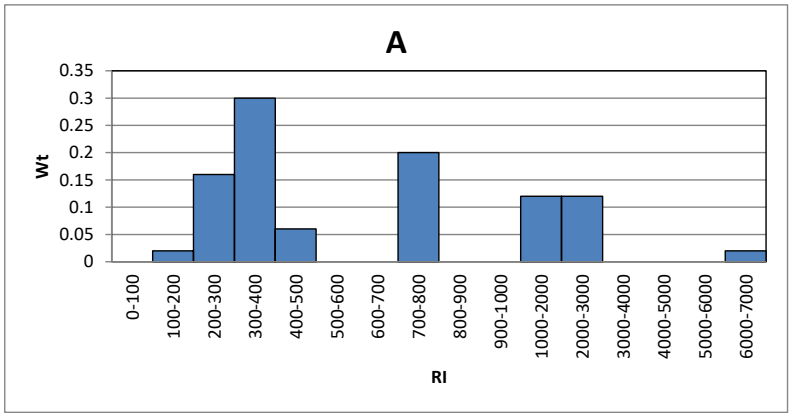


圖 6. 31：鐵砧山斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間−權重分布圖

Figure 6. 31: The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Tiehchenshan fault.

6-6-3 鐵砧山斷層機率評估

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 模式估算鐵砧山斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，鐵砧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. 13 為鐵砧山斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2024 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.5 ~ 6.1 之機率為 6.3%、10.2%及 19.0%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率均為 0.0%。

表 6. 13：鐵砧山斷層發生機率評估

Table 6. 13: Earthquake probabilities for the Tiehchenshan fault in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
5.5 ≦ M ≦ 6.1	6.3%	10.2%	19.0%
M ≧ 6.5	0.0%	0.0%	0.0%

6-7 中部地區斷層活動潛勢圖成果（初稿）

本年度斷層潛勢圖為中部重要區域活動斷層潛勢評估之成果，名為「臺灣中部重要區域斷層活動機率圖」（圖 6.32）。以地表變形強度分布圖為底圖，套疊大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔–雙冬斷層、初鄉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、台鐵路線、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。

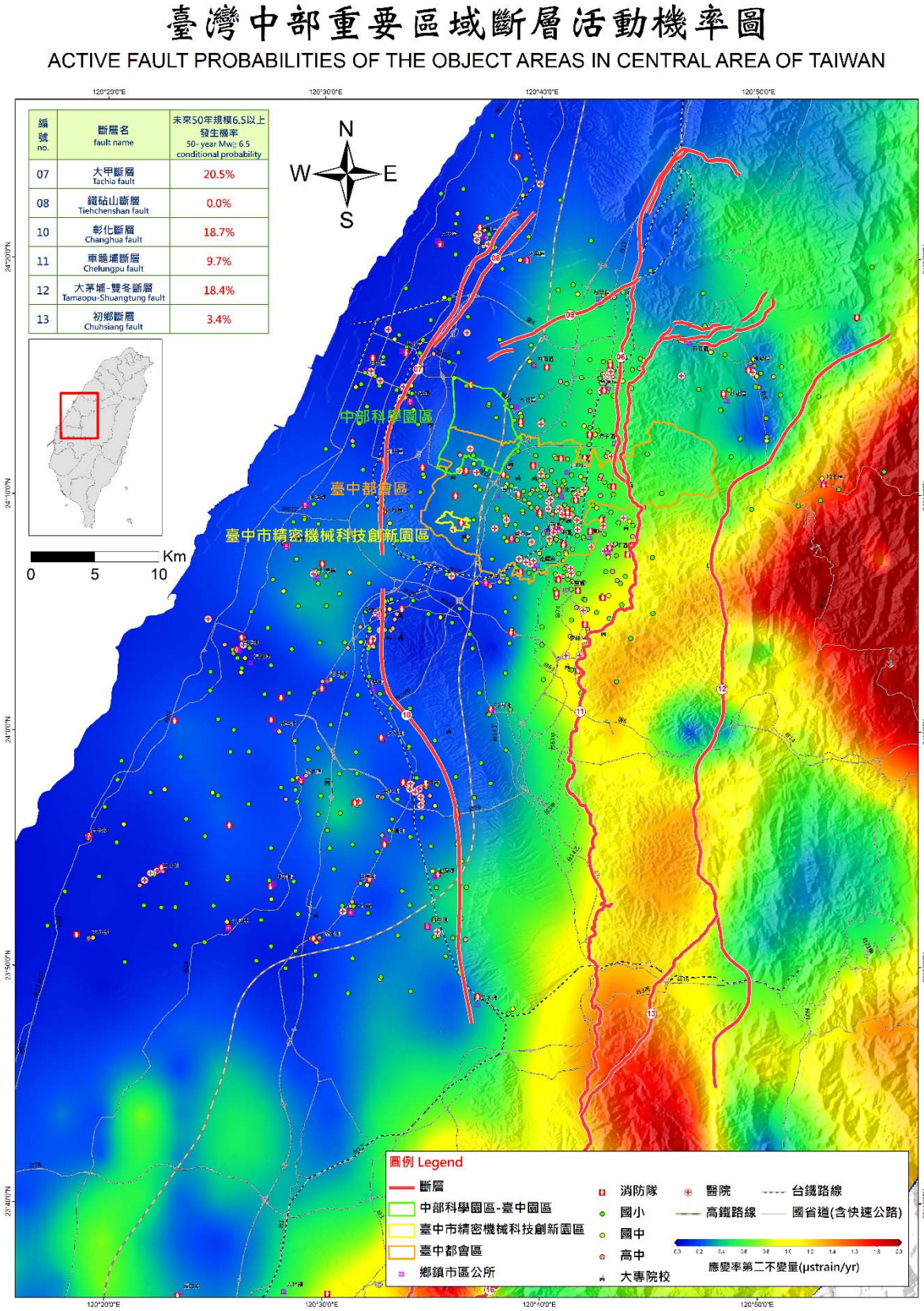


圖 6. 32：臺灣中部重要區域斷層活動機率圖

Figure 6. 32: Active fault probabilities of the object areas in central area of Taiwan.

第七章、中部地區重要區域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

依據前面章節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。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，更可提供地礦中心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大甲斷層及彰化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 120.05°至 121.15°及北緯 23.50°至 24.60°之間，範圍涵蓋臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）與臺中市精密機械科技創新園區。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內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 120.03°至 121.17°，北緯 23.48°至 24.62°之間，加大計算地動

預估值之範圍，以確保產製景況地振動圖數值正確。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 所示。

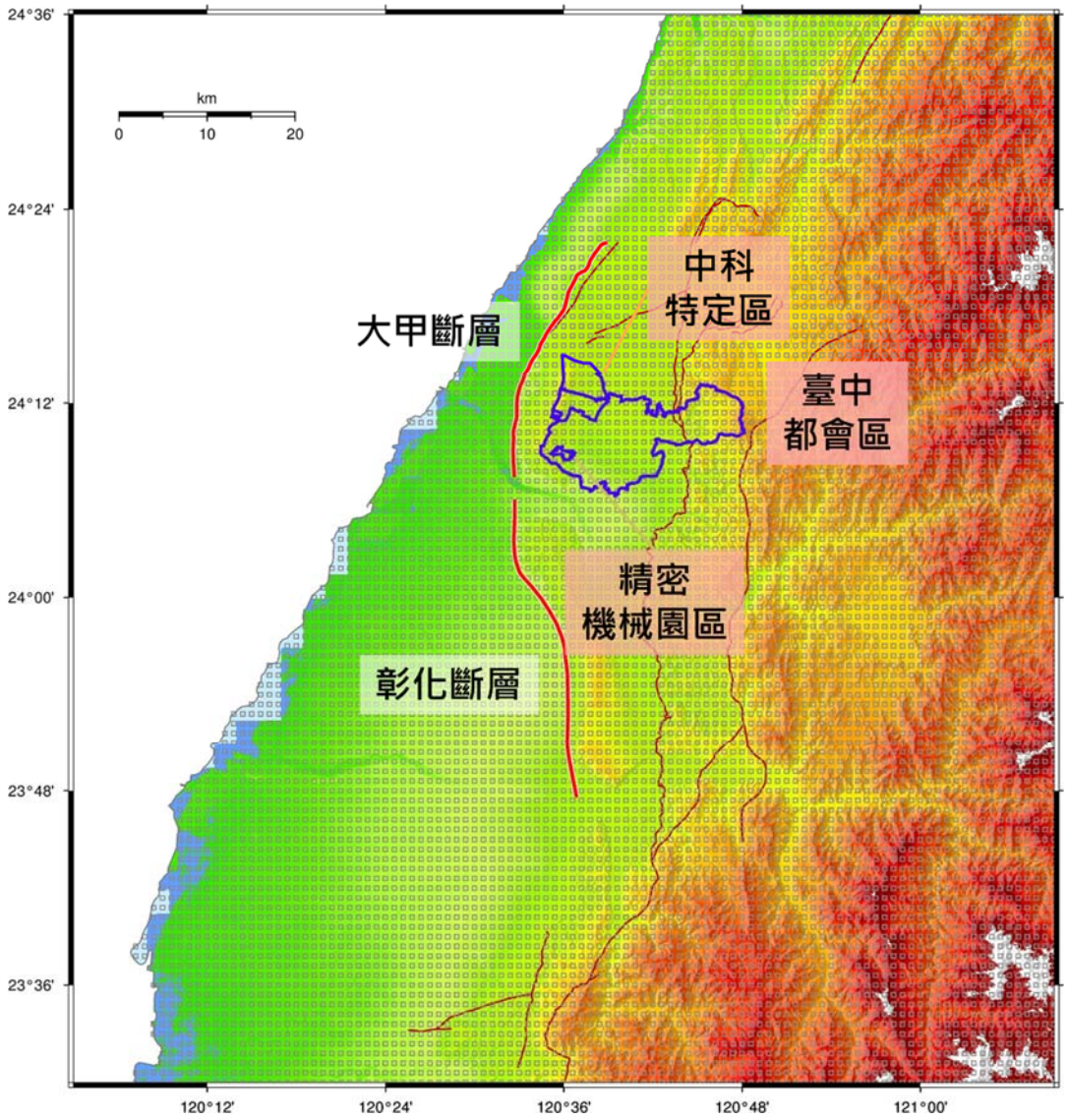


圖 7. 1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布

Figure 7. 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. 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大甲斷層及彰化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。

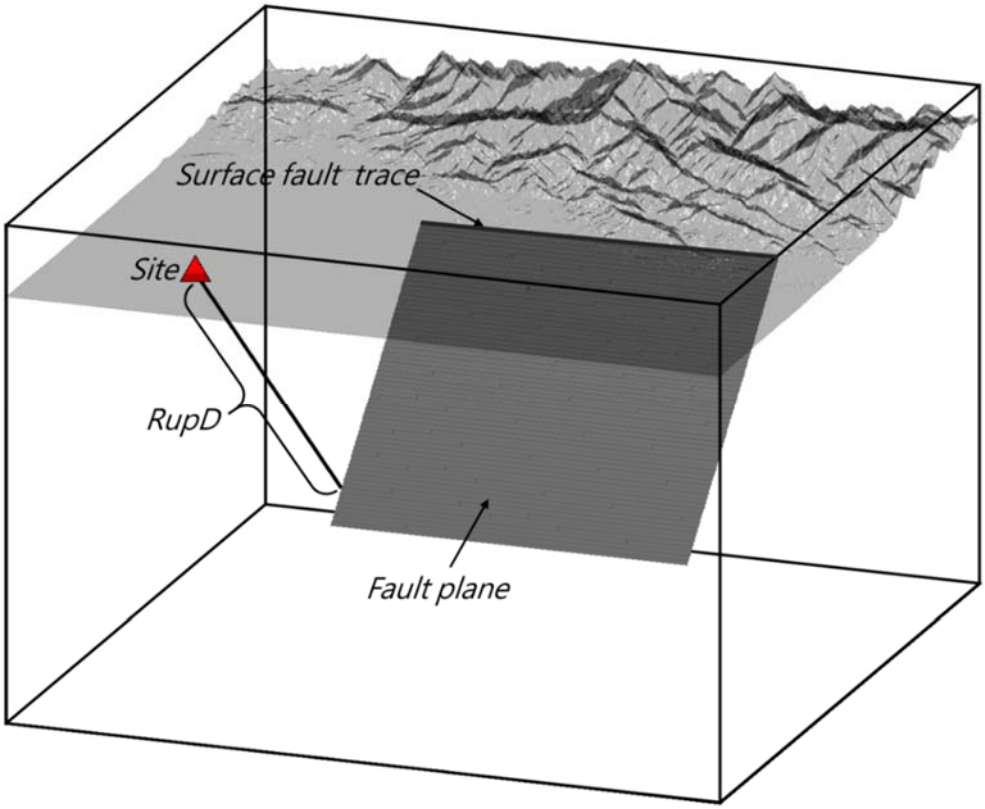


圖 7. 2：最短距離（RupD）、地面虛擬測站點及三維分布斷層面空間關係示意圖

Figure 7. 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。

交通部中央氣象署於 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地礦中心 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 分布區域及兩條評估斷層（大甲斷層及彰化斷層）之空間分布（圖 7. 3）。

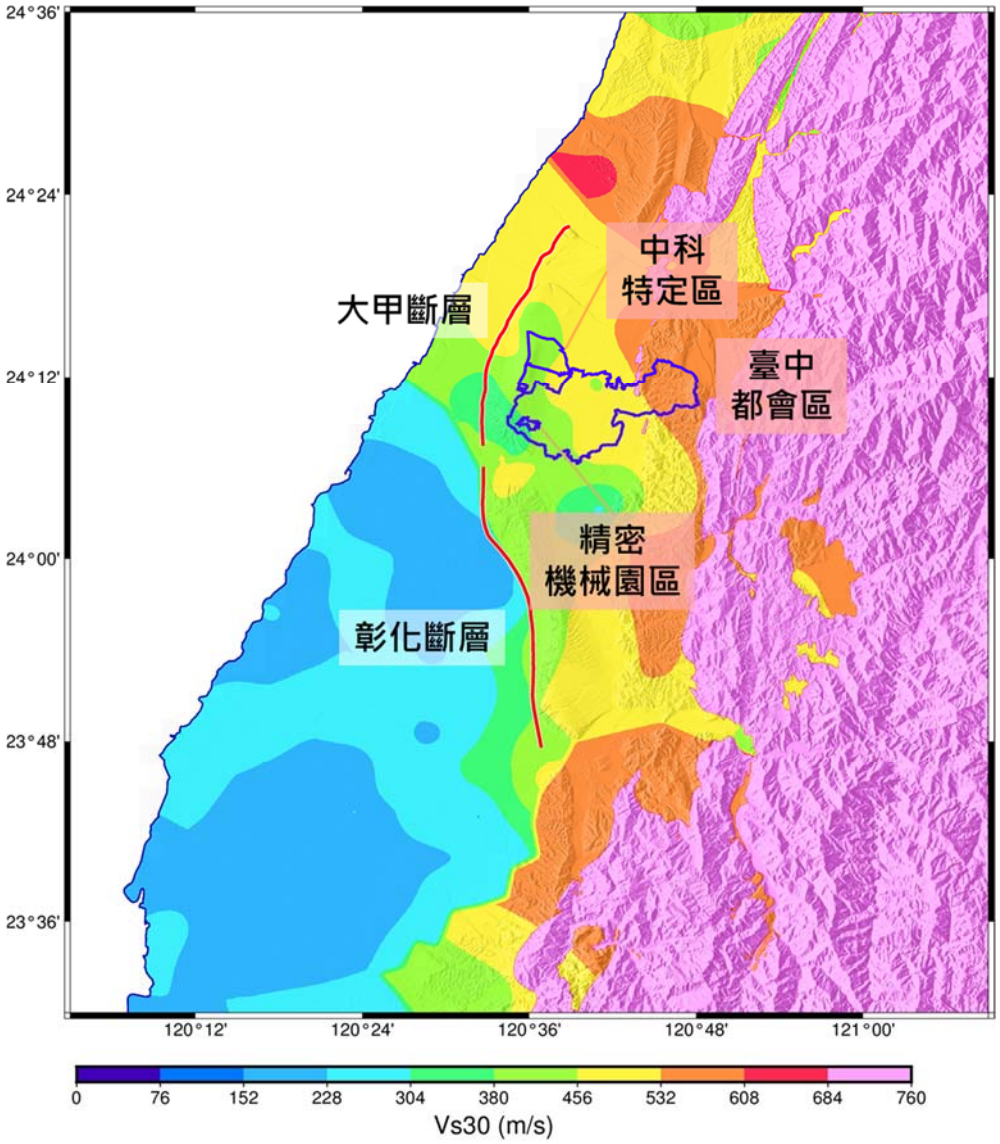


圖 7. 3：Vs30 及兩條評估活動斷層之分布圖

Figure 7. 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署在自由場強地動觀測網計畫（Taiwan Strong-Motion Instrument Program, TSMIP）中，布設在全台灣 700 多處測站所收錄之豐富強震資料，挑選了 60 個地殼尺度地震，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：

$$\ln PGA = 1.0109 + F_1 + (-1.1634 + 0.1722(M_w - 6.3)) \times \ln\left(\sqrt{R^2 + e(1.15184)^2}\right) - 0.1907F_{NM} + 0.1322F_{RV} - 0.4741\ln(V_{S30}/1130)$$

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

（式 7-1）

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 7-2：

$$\ln(Z_{1.0}) = \frac{-4.08}{2}\ln\left(\frac{V_{S30}{}^2 + 355.4^2}{1750^2 + 355.4^2}\right) \quad \text{（式 7-2）}$$

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 7-3：

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

（式 7-3）

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地震規模，而本計畫在此以最保險方式推估，故採大甲斷層及彰化斷層可能發生之所有破裂事件中最大之地震規模。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），進而分別計算大甲斷層及彰化斷層之地面地動值。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。

此外，GMPE Lin09 及 GMPE Chao20 兩套模式各有其參數與模式，根據本團隊於 2022 年之前期計畫中，透過西南部最重要之甲仙與美濃兩大地震事件所進行之測試結果，指出 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，故後續大甲斷層及彰化斷層之分析，將採用 GMPE Chao20 之方法進行推估。

7-1-5 景況地振動分布圖

根據地動預估式之評估推算結果，本計畫繪製了涵蓋臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）與臺中市精密機械科技創新園區三個重要區域，分別由大甲斷層及彰化斷層發震所引致位於岩盤場址條件（Vs30＝760 m/s）以及經評估各地表虛擬觀測點所額外考量現地之 Vs30 數值之景況地振動分布圖（圖 7.4 及圖 7.5）。

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。中央氣象署自 2020 年起實施之地震震度分級表（圖 7.6）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 PGV＜30 cm/ s 為震度 5 弱，PGV≥30 cm/s 且 PGV＜50 cm/ s^2 為震度 5 強，PGV≥50 cm/s 且 PGV ＜ 80 cm/s 為震度 6 弱，PGV ≥ 80 cm/s 且 PGV ＜ 140 cm/s 為震度 6 弱， PGV ＞ 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 PGV 值越高或震度越大，越可能對建物帶來損壞。而除了 PGA、PGV 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。

由於本計畫之地振動計算成果為 PGA，單位為 g（1g 等於 980 cm/s^2），故僅能與氣象署舊版之地震震度分級表進行比對（圖 7.7），即根據 PGA 值所定義之震度分級，其中 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，PGA≥80 cm/s^2 且 PGA＜250 cm/s^2 為震度 5 級，PGA≥250 cm/s^2 且 PGA＜400 cm/s^2 為震度 6 級， PGA＞400 cm/s^2 為震度 7 級。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舊版震度對照分析。

首先，大甲斷層景況地振動分布，根據 GMPE Chao20 之真實地表場址成果（圖 7.4 b），在大甲斷層若最大地震規模為 M_w 7.1，其鄰近區域可能產生 0.39g 左右之地振動值，約為 382 gal，相當於 6 級之震度，以重要區域之角度來看，臺中都會區西北側區域近大甲斷層所在處，震度可達 6 級，範圍往南北擴及至臺中市與彰化縣及苗栗縣邊界，往東擴及至臺中新社區及霧

峰區，中部區域其餘地區亦可達 5 級震度。

彰化斷層之景況地振動分布，根據 GMPE Chao20 之真實地表場址成果（圖 7. 5 b），若最大地震規模為 M_w6.9 則地振動值可達 0.36 g，約為 353 gal，相對應之舊版震度同樣可達 6 級，中部科學園區（臺中園區）以南，彰化斷層鄰近區域及其往東側延伸 25～30 km，並往南北延伸約 15 km 範圍內皆具有 6 級震度，其餘區域則約 5 級。就該兩條斷層對於各重要區域之影響來看，大甲斷層對於臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）及臺中市精密機械科技創新園區具有很大的影響，地振動範圍完全涵蓋所有重要區域，一旦發震對於園區內產業之影響不容小覷；彰化斷層位於該些區域之西南側，地振動範圍雖同樣完全涵蓋整個園區，但相較於大甲斷層之影響略小一些，如較北側之中部科學園區（臺中園區）所受之地振動值相對降低了約 200 gal。

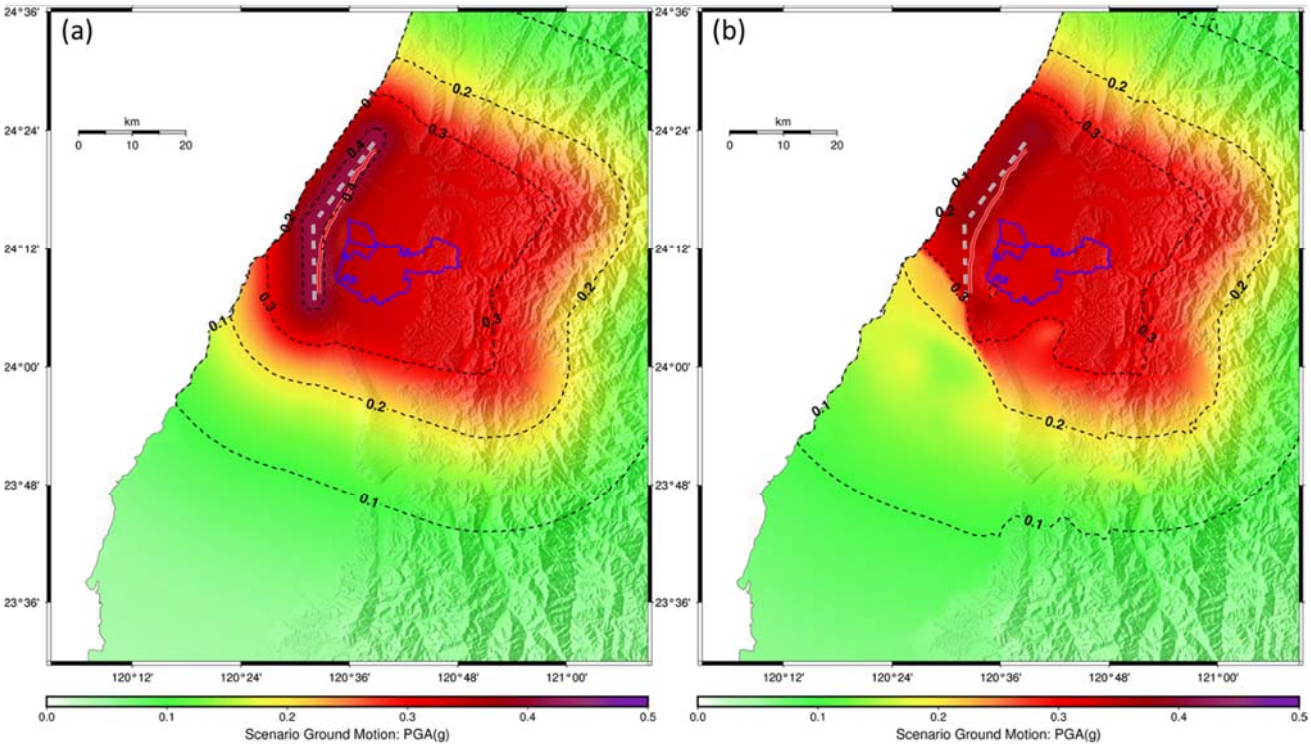


圖 7. 4：由 GMPE Chao20 算得之大甲斷層景況地振動分布圖。（a）岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之景況地振動分布圖。（b）考慮側向場址條件之之景況地振動分布圖。

Figure 7. 4: Scenario earthquake shaking map of the Tachia fault using GMPE Chao20. (a) With a site condition of 760 m/s (b) With a specific site condition correction.

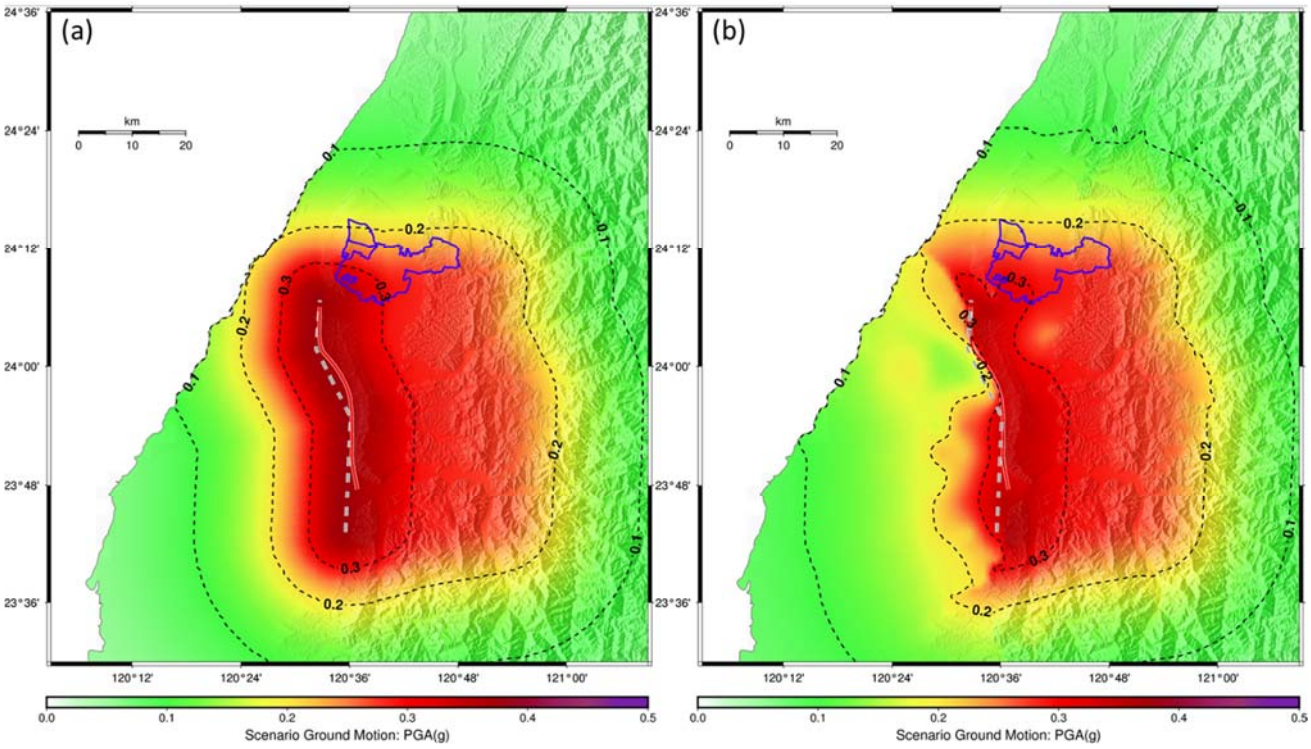


圖 7. 5：由 GMPE Chao20 算得之彰化斷層景況地振動分布圖。（a）岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之景況地振動分布圖。（b）考慮側向場址條件之之景況地振動分布圖。

Figure 7. 5: Scenario earthquake shaking map of the Changhua fault using GMPE Chao20. (a) With a site condition of 760 m/s (b) With a specific site condition correction.

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	 無感			人無感覺		
		0.8				
1級	 微震			人靜止或位於高樓層時可感覺微小搖晃		
		2.5				
2級	 輕震			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
		8.0				
3級	 弱震			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
		25				
4級	 中震			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
		80	15			
5弱	 強震			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
			30			
5強				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
			50			
6弱	 烈震			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
			80			
6強				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
			140			
7級	 劇震			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. 6：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表（修改自中華民國交通部中央氣象局，2020）。

Figure 7. 6: Comparison of ground acceleration PGA and the degree of damages.

交通部中央氣象局地震震度分級表(2000年8月1日公告)					
震度分級		地動加速度 (cm/s²,gal)	人的感受	屋內情形	屋外情形
0	 無感	0.8 以下	人無感覺		
1	 微震	0.8~2.5	人靜止時可感覺微小搖晃		
2	 輕震	2.5~8.0	大多數的人可感到搖晃，睡眠中的人有部分會醒來	電燈等懸掛物有小搖晃	靜止的汽車輕輕搖晃，類似卡車經過，但歷時很短
3	 弱震	8~25	幾乎所有的人都感覺搖晃，有的人會恐懼感	房屋震動，碗盤門窗發出聲音，懸掛物搖擺	靜止的汽車明顯搖動，電線略有搖晃
4	 中震	25~80	有相當程度的恐懼感，部分的人會尋求躲避的地方，睡眠中的人幾乎都會驚醒	房屋搖棟甚烈，底坐不穩物品傾倒，較重傢俱移動，可能有輕微災害	棄車駕駛人略微有感，電線明顯搖晃，步行中的人也感到搖晃
5	 強震	80~250	大多數人會感到驚嚇恐慌	部分牆壁產生裂痕，重家具可能翻倒	汽車駕駛人明顯感覺地震，有些牌坊煙囪傾倒
6	 烈震	250~400	搖晃劇烈以致站立困難	部分建築物受損，重傢俱翻倒，門窗扭曲變形	汽車駕駛人開車困難，出現噴沙噴泥現象
7	 劇震	400以上	搖晃劇烈以致無法依意志行動	部分建築物受損嚴重或倒塌，幾乎所有傢俱都大幅移位或掉落地面	山崩地裂，鐵軌彎曲，地下管線破壞

圖 7. 7：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表（中華民國交通部中央氣象局，2000）

Figure 7. 7: 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第 7-1 節之景況地振動分布圖，涵蓋臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）及臺中市精密機械科技創新園區等重要區域，因此邊界同樣設定為延伸後之範圍：東經 120.03°至 121.17°，北緯 23.48°至 24.62°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. 10），即潛在之震源位置。

獲得潛在震源位置後，根據本計畫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。故大甲斷層之 *Mw* 設定為 7.1，

彰化斷層之 *Mw* 為 6.9。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，本計畫可推求大甲斷層之地震重複週期（recurrence interval）約為 138 年；彰化斷層之地震重複週期約為 111 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，即可分別獲得未來大甲斷層及彰化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 景況同震位移分布圖

圖 7.8 為本計畫針對大甲斷層所繪製之景況水平同震位移分布圖，圖 7.9 為其景況垂直同震位移分布圖。圖中灰色虛線為三維模型所使用之簡化斷層線，紅色線為大甲斷層，綠色區塊為重要區域。大甲斷層為逆衝斷層，故由景況同震位移場分布型態可發現：其水平位移以大甲斷層為界分為東西兩側，向大甲斷層方向擠壓，整體而言主要分布於大甲斷層東側，由彰化斷層北段區域開始之位移方向為由南往北逐漸轉向西北，稍往東側區域則為西北向往北逐漸轉為北北西向，以順時針旋轉為主，影響範圍涵蓋整個臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）及臺中市精密機械科技創新園區。水平同震位移之最大量值落在斷層走向發生改變之轉折區域，高達 122.0 cm（圖 7.8）。垂直位移部分，由於大甲斷層屬東傾之逆斷層型態，使得斷層東側及北側區域抬升顯著，以斷層走向改變之轉折區域抬升量值最大，最高可達 220.2 cm，中部科學園區（臺中園區）位於抬升變形區域，其餘重要區域則以沉降為主，沉陷量約達 36.3 cm（圖 7.9）。

圖 7.10 為本計畫針對彰化斷層所繪製之景況水平同震位移分布圖，圖 7.11 為其景況垂直同震位移分布圖。圖中灰色虛線為三維模型所使用之簡化斷層線，紅色線為彰化斷層，綠色區塊為重要區域。雖然彰化斷層同為逆衝斷層，但結果與大甲斷層不同，西側往斷層擠壓之同震位移量較不顯著，主要為東側區域往西向彰化斷層擠壓與抬升。由水平同震位移場之分布型態可發現，其主要分布於斷層南北兩段東側區域，最遠並可擴及至大茅埔–雙冬斷層東側約 20 km 處。在最南段部分由雙冬斷層附近開始至彰化斷層，位移型態由西北向西偏轉，中北段則為西北轉向北北西至正北方向，以順時針旋轉為主。水平同震位移最大值落在南段之斷層周緣區域，約達 45.3 cm。另一高處則位於重要區域南側，約達 42.3 cm，範圍延伸到中部科學園區（臺中園區）以南之臺中都會區西半側區域及臺中市精密機械科技創新園區西南側及東段之南側區域，重要區域內之同震位移方向以正北向為主（圖 7.10）。垂直同震位移部分，由於彰化斷層同屬

逆衝斷層，整體來說斷層東側以抬升為主，在最南段之抬升量最大，約可達 86.7 cm。而彰化斷層之發震所帶來之沉陷量主要分布於以車籠埔斷層中段東側以及初鄉與雙冬斷層區域，最大沉陷量約達 -24.9 cm。整體來說，垂直同震位移對於重要區域的影響，以臺中都會區西半部及臺中市精密機械科技創新園區較為顯著，垂直位移量約可抬升 20 ~ 30 cm（圖 7. 11）。

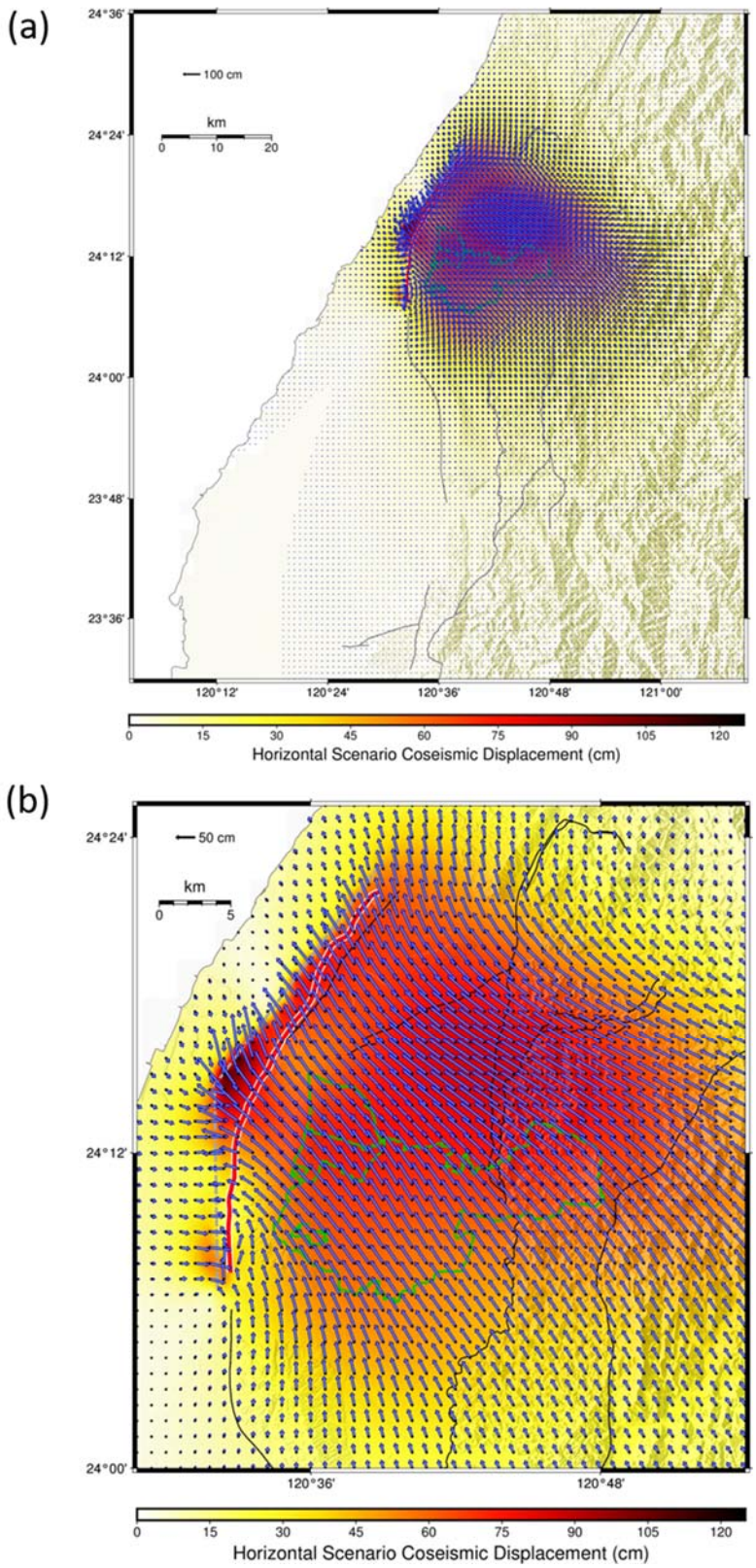


圖 7. 8：大甲斷層之景況水平同震位移分布圖。(a) 中部區域同震位移分布，(b) 重要區域同震位移分布近景。

Figure 7. 8: Horizontal Scenario coseismic displacement map of the Tachia fault. (a) Scenario coseismic displacement map of Central Taiwan. (b) Scenario coseismic displacement zooming view of object area.

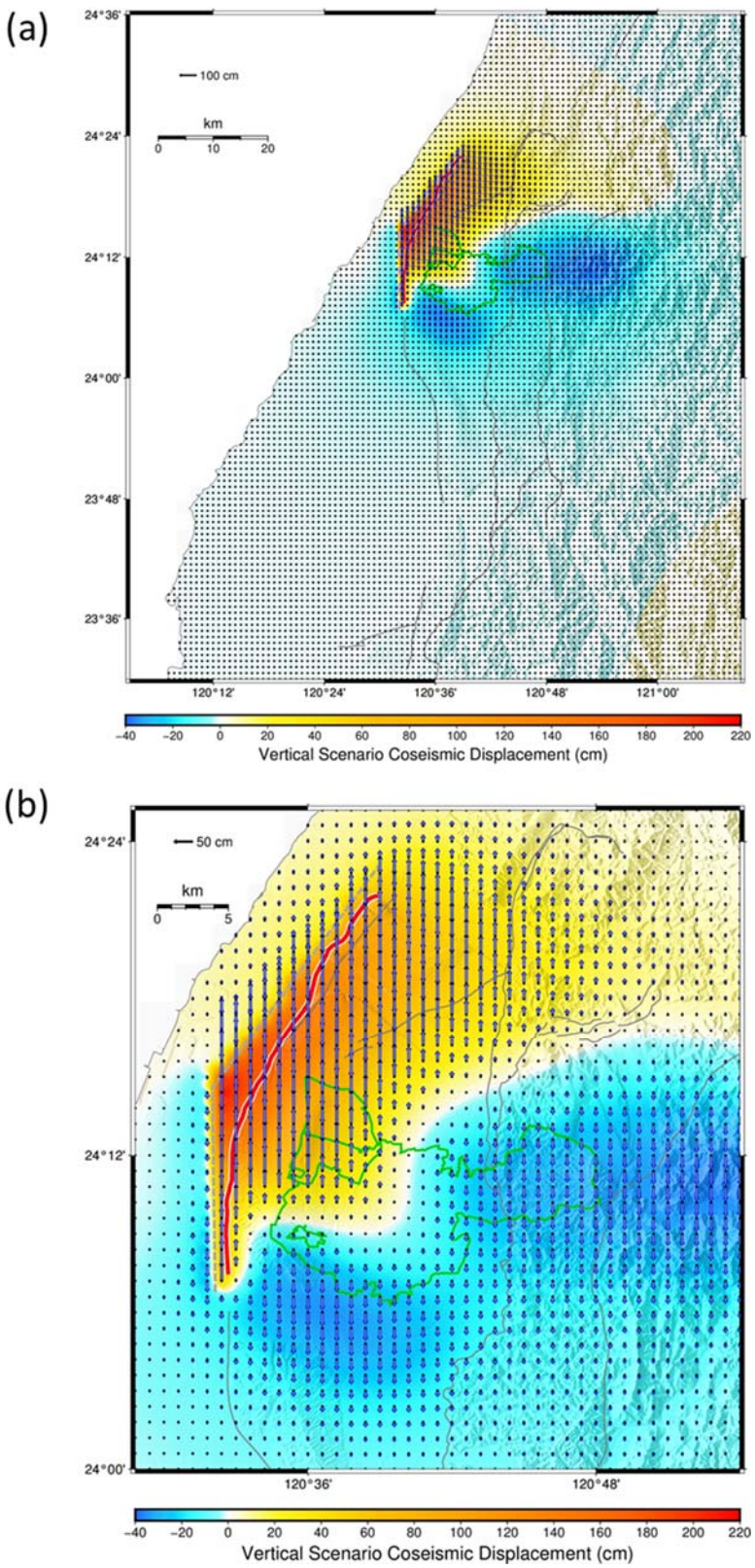


圖 7. 9：大甲斷層之景況垂直同震位移分布圖。(a) 中部區域同震位移分布，(b) 重要區域同震位移分布近景。

Figure 7. 9: Vertical Scenario coseismic displacement map of the Tachia fault. (a) Scenario coseismic displacement map of Central Taiwan. (b) Scenario coseismic displacement zooming view of object area.

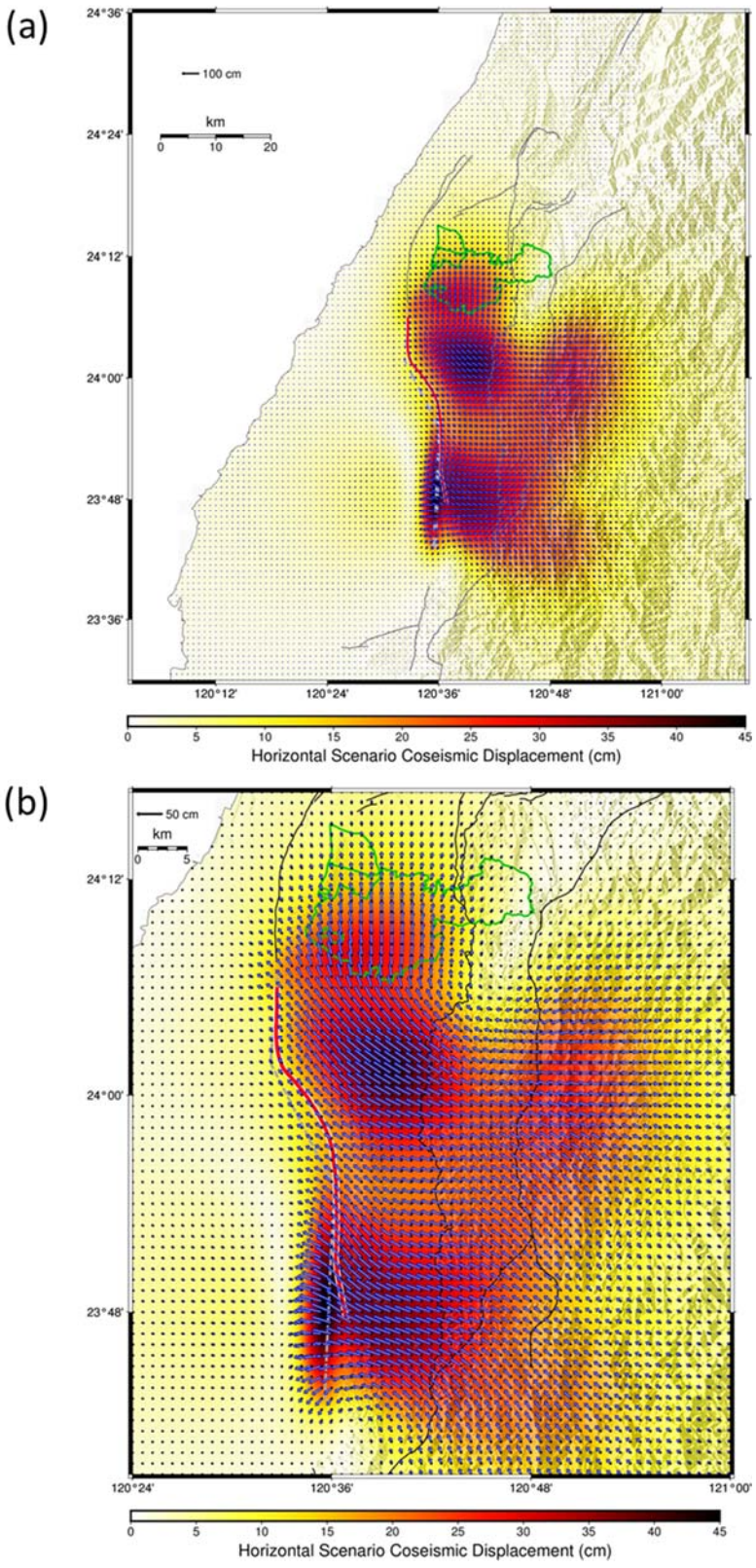


圖 7. 10：彰化斷層之景況水平同震位移分布圖。(a) 中部區域同震位移分布，(b) 重要區域同震位移分布近景。

Figure 7. 10: Horizontal Scenario coseismic displacement map of the Changhua fault. (a) Scenario coseismic displacement map of Central Taiwan. (b) Scenario coseismic displacement zooming view of object area.

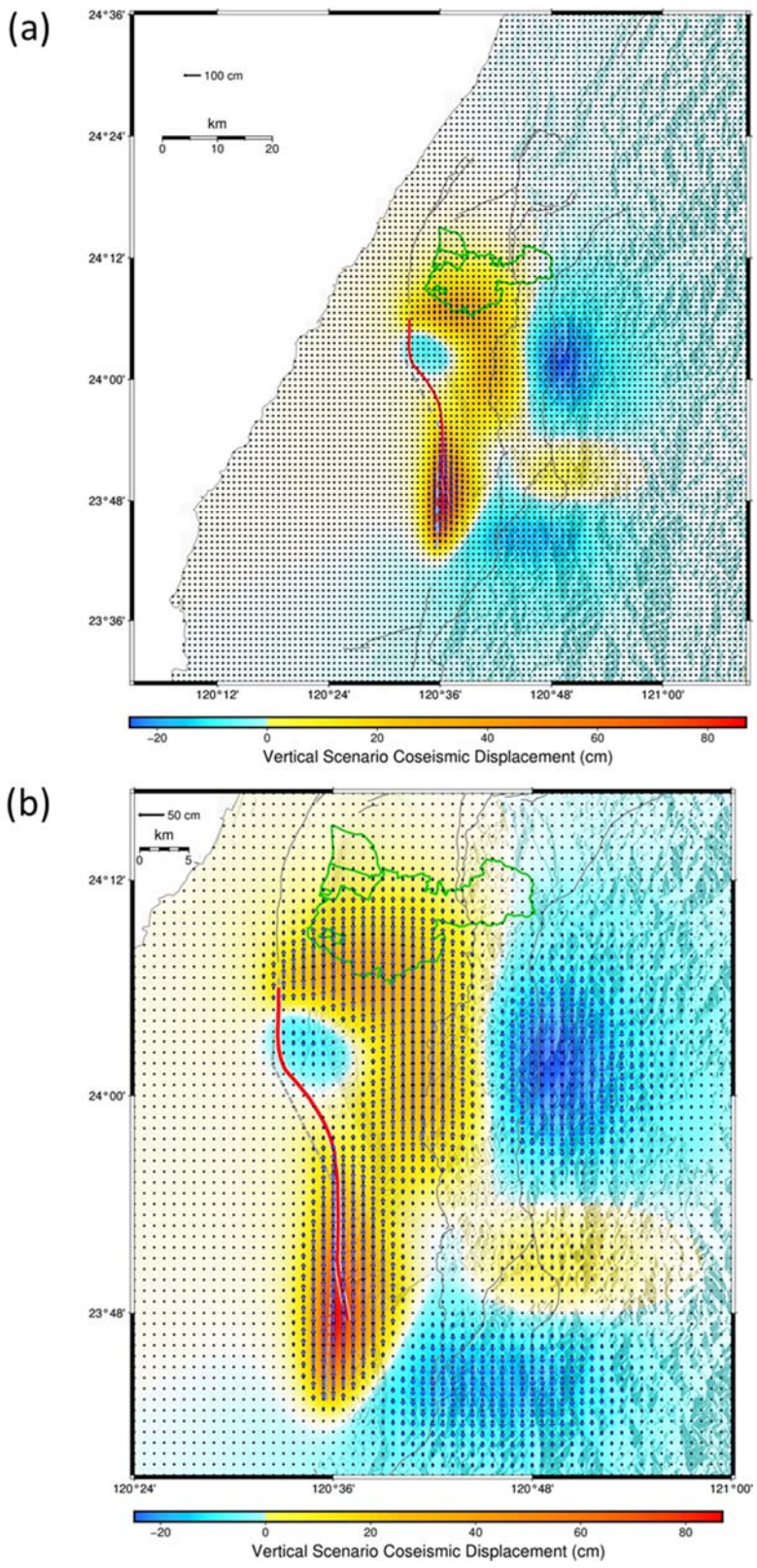


圖 7. 11：彰化斷層之景況垂直同震位移分布圖。(a) 中部區域同震位移分布，(b) 重要區域同震位移分布近景。

Figure 7. 11: Vertical Scenario coseismic displacement map of the Changhua fault. (a) Scenario coseismic displacement map of Central Taiwan. (b) Scenario coseismic displacement zooming view of object area.

第八章、大地測量資料分析（全臺）

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地質調查及礦業管理中心提供，連續站所屬機構包括經濟部地質調查及礦業管理中心、中央研究院、中央氣象署、內政部、國土測繪中心及經濟部水利署等單位，共 502 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，自 2024 年 8 月底後改為 IGS20。

(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 2024 年 10 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）：

$$y(t_i) = a + bt_i + c\cos(2\pi t_i) + d\sin(2\pi t_i) + e\cos(4\pi t_i) + f\sin(4\pi t_i)$$
$$+\sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_{eq}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot \exp^{-(t_i - T_{eq})/\tau_j} + v_i \quad \text{（式 8.1）}$$

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、2022 年關山−池上地震、2024 年 0403 花蓮地震、2024 年 0403 餘震等重大地震事件進行擬合。擬合成果範例如圖 8.1 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 8.2），此離散跳動即為坐標殘差，由此圖可知測站 ANES 之於 N 方向之精度約 7.5 mm，E 方向之精度約 9.0 mm，U 方向則約為 35.0 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成果已於第 2-3 節進行分析。

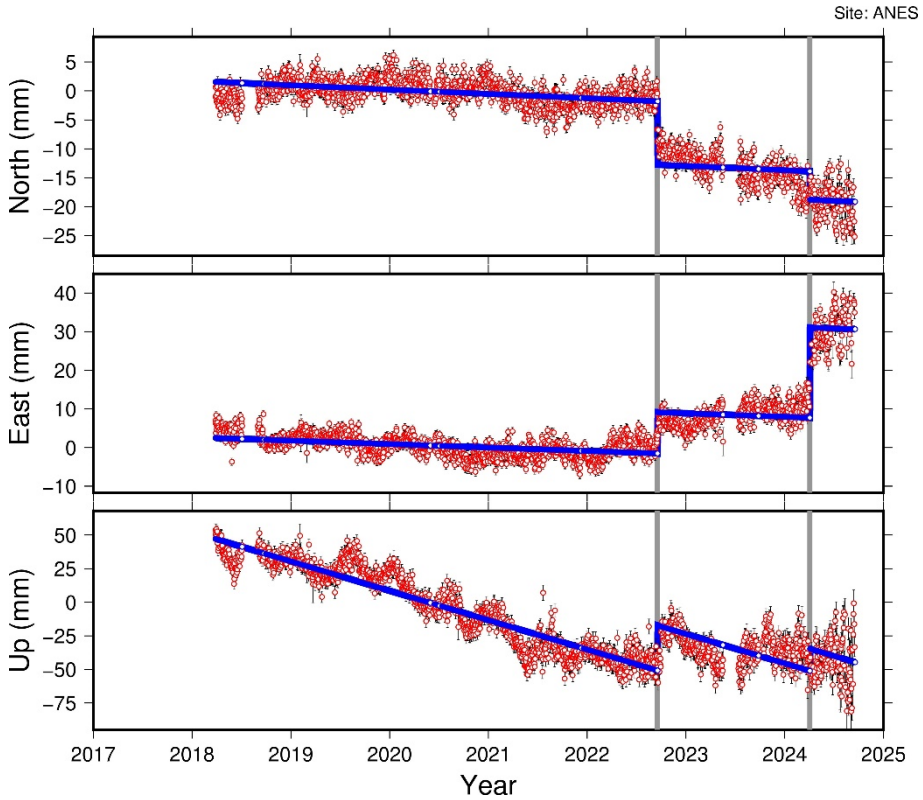


圖 8.1：GNSS 連續站 ANES 坐標時間序列擬合結果。紅色圓圈為原始坐標時間序列，藍色圓圈為坐標計算值。

Figure 8.1: Coordinate time series of GNSS station ANES. Red circles are observations; blue circles are calculation.

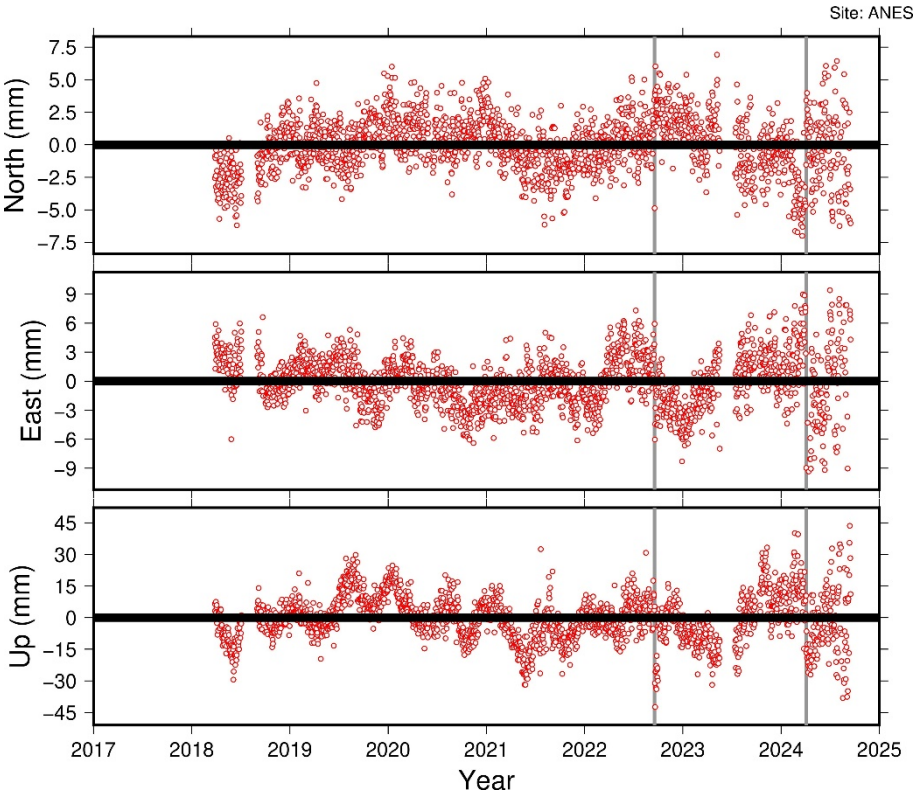


圖 8. 2：GNSS 連續站 ANES 時間序列之殘差結果。紅色圓圈為移除地表運動速率及地震瞬時位移等事件後之殘差值。

Figure 8. 2: Residual time series of GNSS station ANES. 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 2024 年 10 月之監測成果，其坐標殘差之分布情形指出（圖 8. 3，1993－2024 年 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.01 ± 7.40 mm；E 方向為 0.0 ± 8.65 mm；U 方向為 -0.15 ± 19.36 mm。而 2002－2024 年平面坐標之均方根誤差平均值為 1.57 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 4.79 mm（圖 8. 4）。

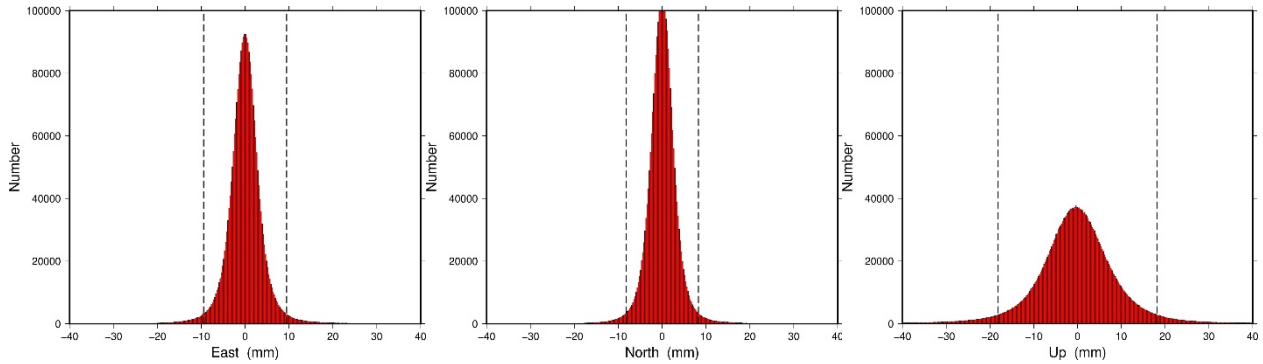


圖 8. 3：1993 - 2024 年截至 10 月份 GNSS 連續站點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 8. 3: GNSS coordinates residuals during 1993 - October 2024. The dashed lines indicate 95% confidence interval.

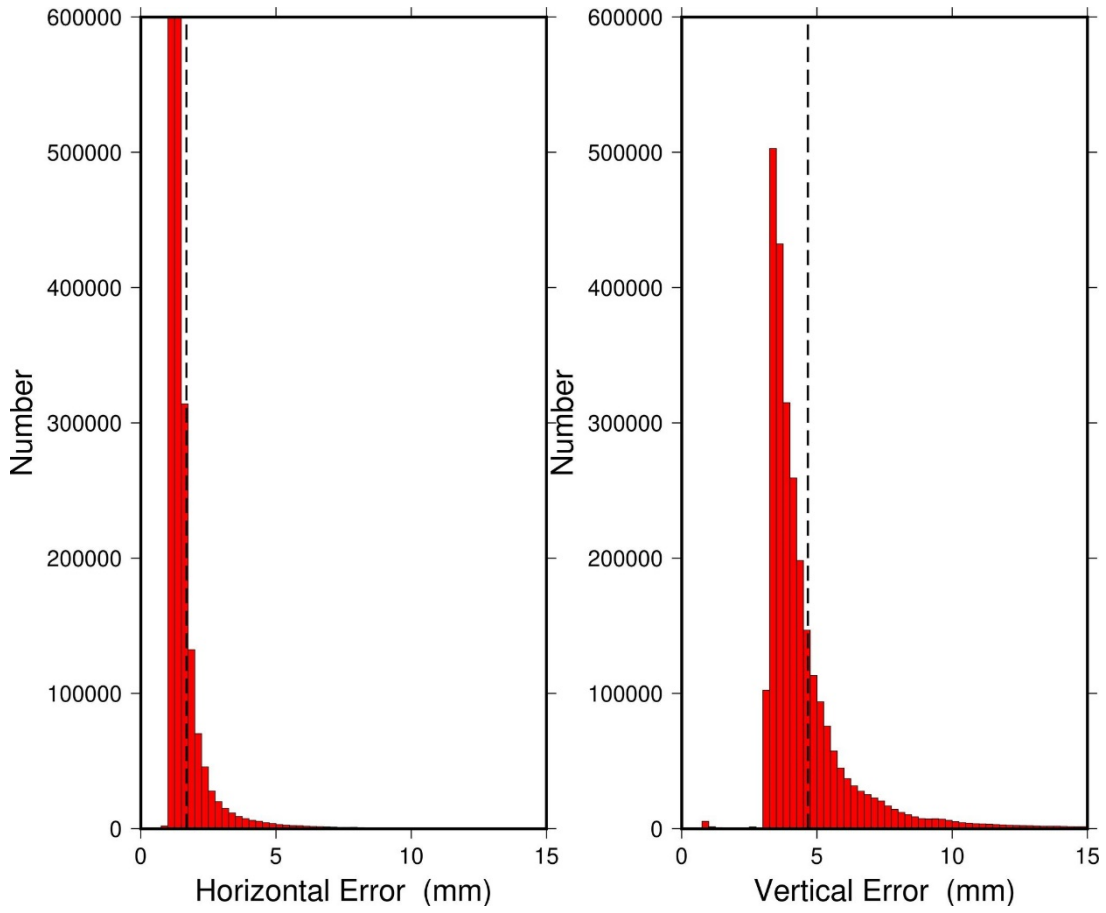


圖 8. 4：1993 - 2024 年 GNSS 連續站點位均方根誤差分布圖

Figure 8. 4: GNSS RMS error during 1993 - 2024.

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. 5 為地礦中心測站 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。而擬合後的殘差時間序列也接近白雜訊（圖 8. 6），代表原序列中大部分的時間相關訊號都已經被以上的卡曼濾波器所分離出來了。

值得注意的是，圖 8. 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，此現象於此站之水平分量時間序列中亦可清楚看出（圖 8. 7），因此雜訊振幅或可做為判斷測站資料品質或環境因素改變之參考。本文將地礦中心全臺 101 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. 8）。由圖可看出水平分量的雜訊多小於~2 mm，比較顯著的離群點（outliers）為 GS90 站的南北分量（color noise >5 mm）。而 GS90 為新埔工作站，已於 2019 年 7 月 1 日廢站。

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，明顯的離群點有 3 個站。圖 8. 9 顯示不論是色雜訊或殘差雜訊，GS10 及 GS73 分別於 2015 年與 2018 年後都具有振幅明顯增加的趨勢。根據地礦中心的測站維護紀錄，GS10 於 2015 年 11 月 27 日與 2017

年 1 月 25 日均有更換接收儀（換為 Trimble 5700），GS73 則在 2017 年 11 月 15 日更換天線為 TRM41249.00 SCIT 及更換接收儀為 Trimble 5700，並在 2018 年 10 月 24 日更換天線為 TRM59900.00 SCIT 及更換接收儀為 Trimble NetR9。因為沒有測站環境改變（如植被變化）的紀錄作為佐證，這些儀器更換是否為造成雜訊振幅改變之因素仍需加以驗證。

另一方面，圖 8.10 顯示 GS95 偏高的雜訊振幅只在於色雜訊，其殘差雜訊則均維持在 ±2 mm。時間序列則顯示幾乎在 2018 年初建站的一年內，其每日解的誤差值就顯著增加。由於此站並無儀器更換紀錄，故猜測其色雜訊的高振幅應與測站環境因素有關。

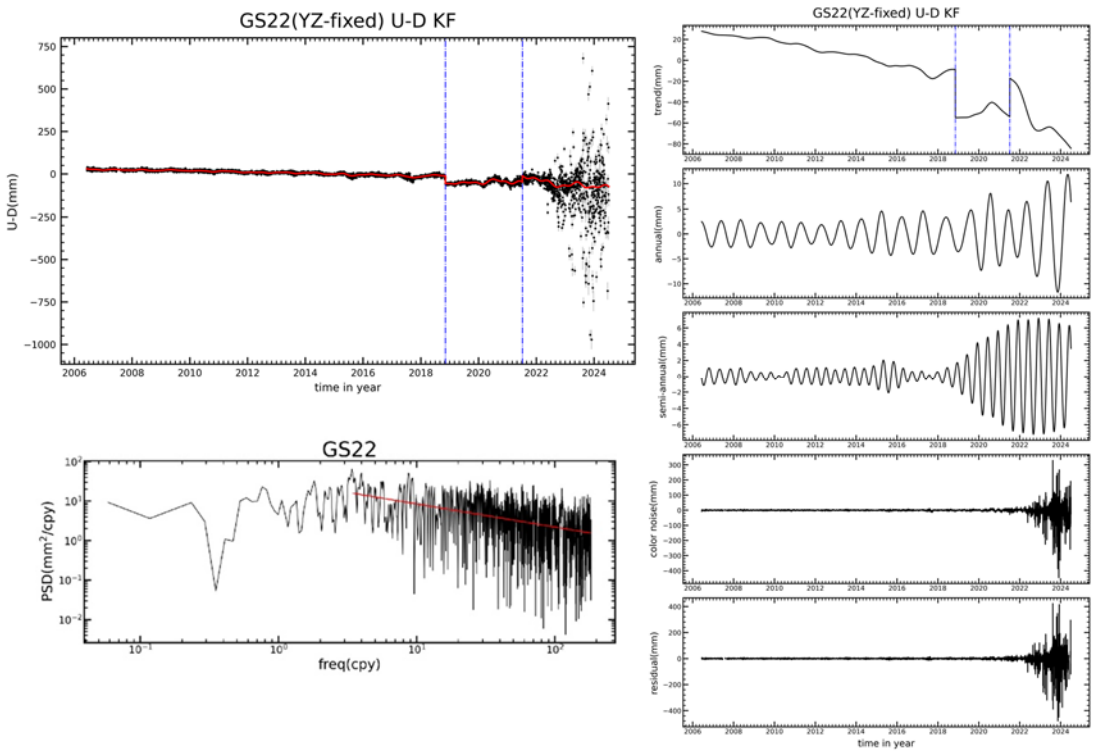


圖 8. 5：地磧中心連續站 GS22（彰化快官交流道站）垂直分量的卡曼濾波分析結果。左上子圖為原始時間序列（黑點）與卡曼濾波之擬合曲線（紅線）；左下子圖為擬合所得之色雜訊頻譜圖；右邊各子圖由上而下分別為擬合所得之斜率（或趨勢 trend）、年週期訊號、半年週期訊號、AR(3)色雜訊、殘差（residual）。斜率序列中藍色虛線所示之錯移（offset）為該站於 2018 年 11 月 8 日更換天線所造成。

Figure 8. 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 annual oscillation, 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.

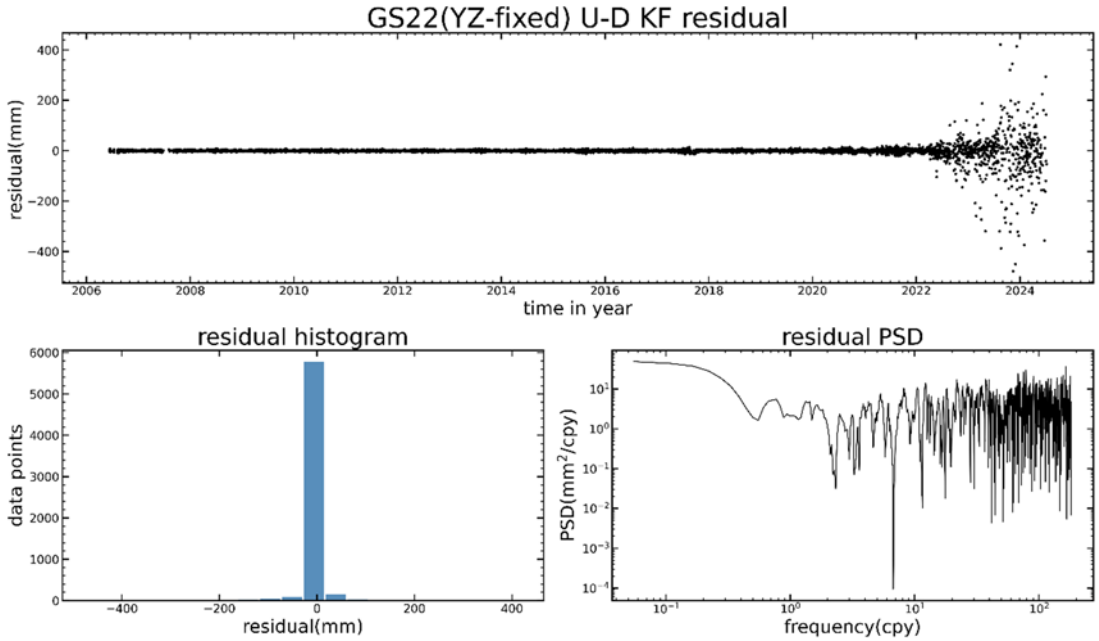


圖 8. 6：地礦中心連續站 GS22 垂直分量經卡曼濾波後所得之殘差時間序列、殘差與頻譜分析結果。上方子圖為殘差時間序列，下方左子圖為殘差，下方右子圖為頻譜。結果顯示此殘差序列較接近高斯分布之白雜訊。

Figure 8. 6: (Top) The time series of vertical residuals of GS22 from KF; (Bottom) The residual (left) and PSD (right) of the residual time series, which infer a possible Gaussian white noise.

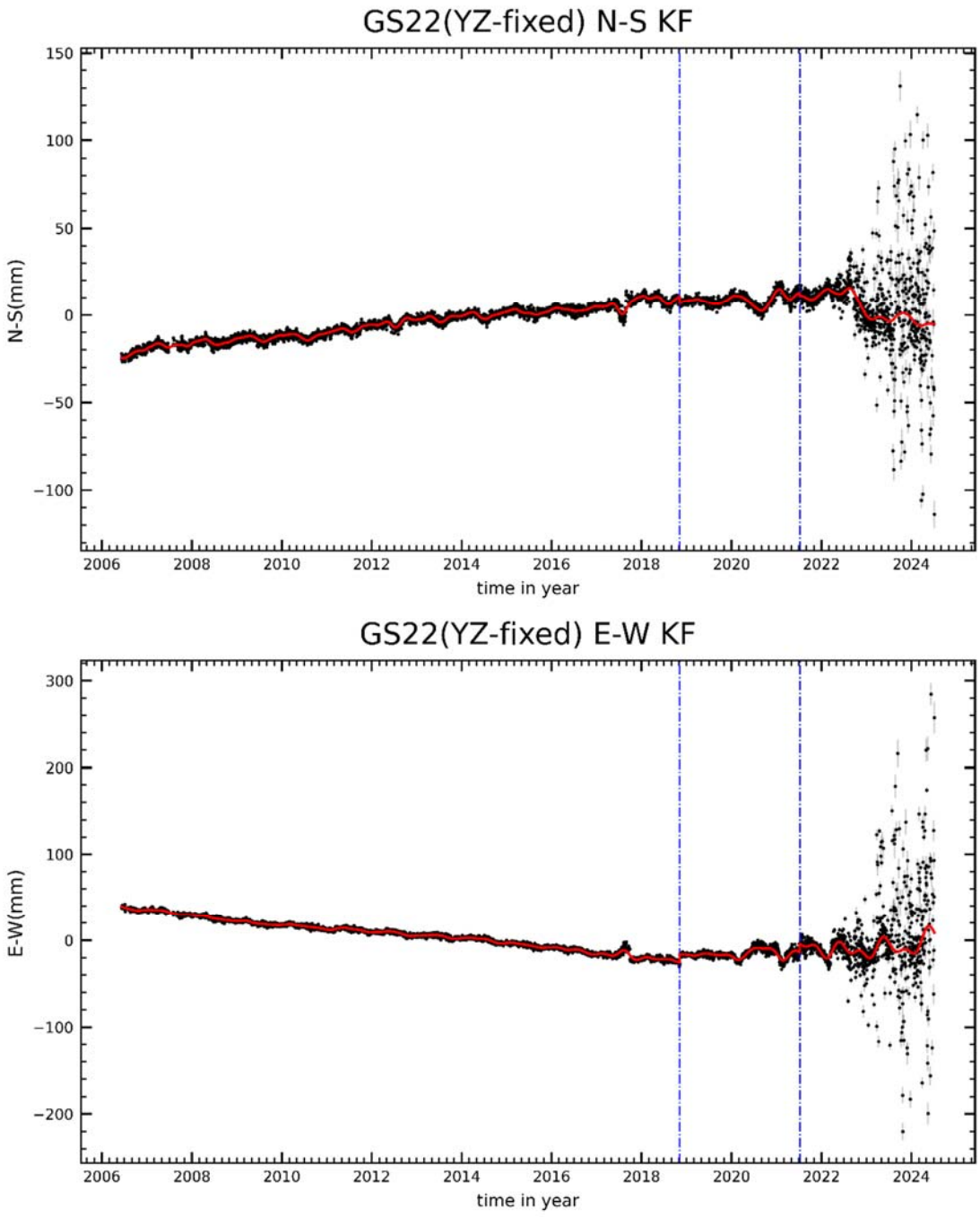


圖 8. 7：地礦中心連續站 GS22 之南北與東西分量之時間序列。上圖為南北分量之時間序列，下圖為東西分量之時間序列。紅色曲線為卡曼濾波之擬合結果，藍色虛線所示之錯移（offset）為該站於 2018 年 11 月 8 日更換天線所造成。

Figure 8. 7: 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.

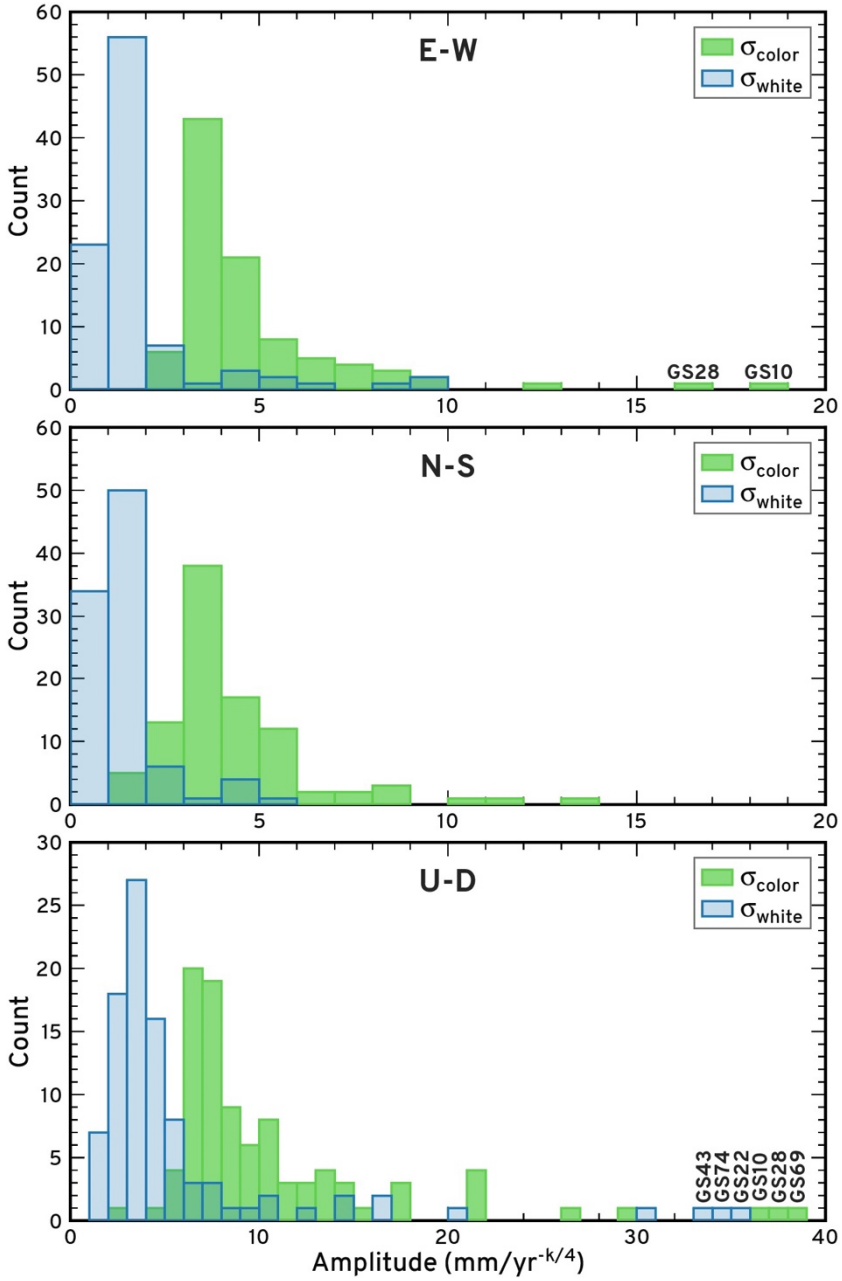


圖 8. 8：地礦中心全臺 101 個測站三分量時間序列之卡曼濾波雜訊分析。柱狀圖橫軸為振幅值，縱軸為該振幅值區間（± 0.1 mm）的測站數目。綠色代表 AR(3)色雜訊，藍色為殘差雜訊。

Figure 8. 8: Histograms show amplitude ranges of three-component noises of the 101 GNSS stations installed and maintained by the GSMMA. Green and blue 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.

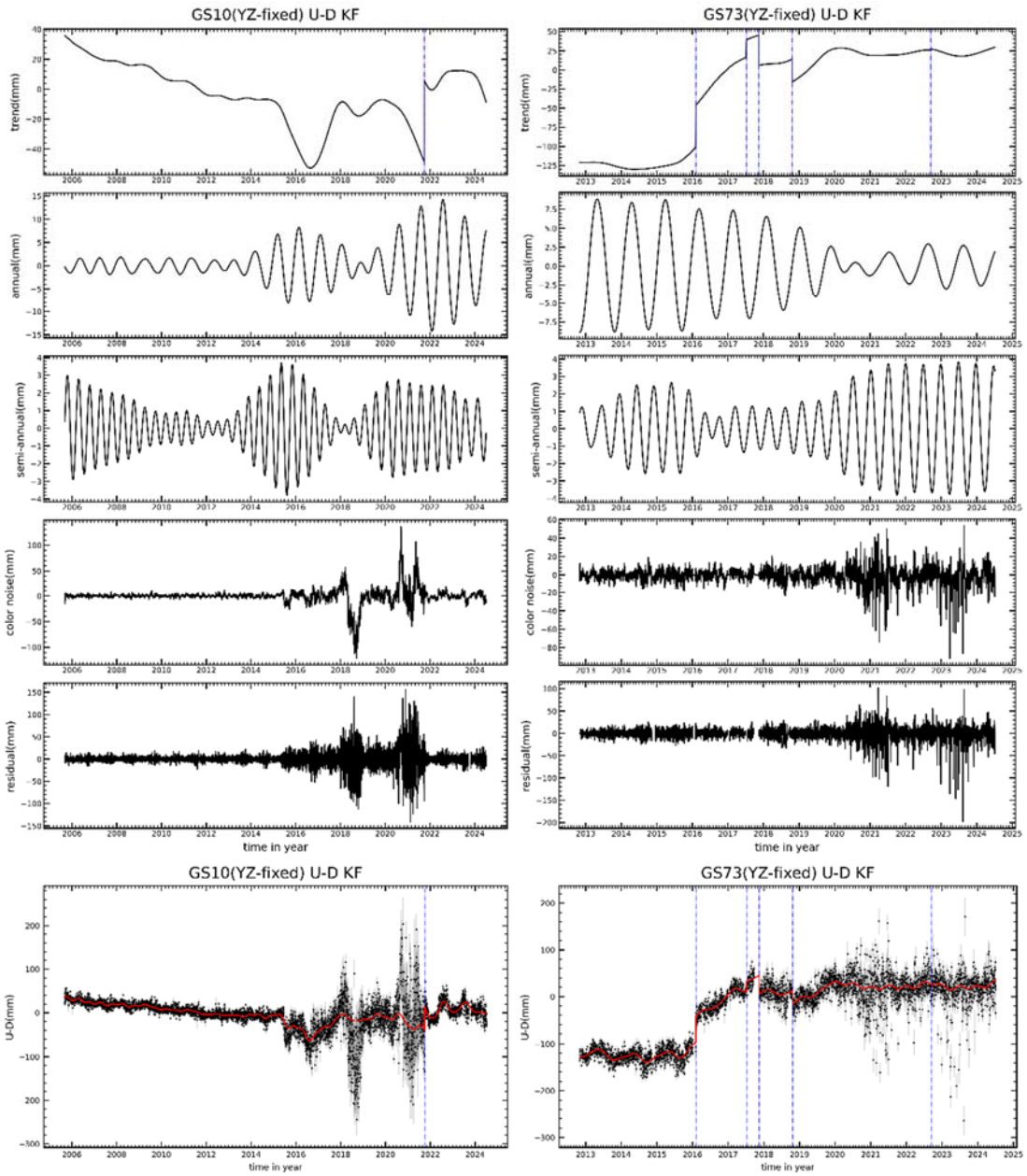


圖 8. 9：地礦中心連續站 GS10（桃園竹圍國中）與 GS73（高雄新光國小）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明請見圖 8. 5。GS73 中的藍色虛線對應的是 2016 年 2 月 6 日美濃地震之位移。

Figure 8. 9: Vertical time series and their KF analysis of the stations GS10 (left) and GS73 (right). See Figure 8. 5 for interpretations for all subplots. The blue-dash line indicates the 2016/2/6 MeiNong earthquake.

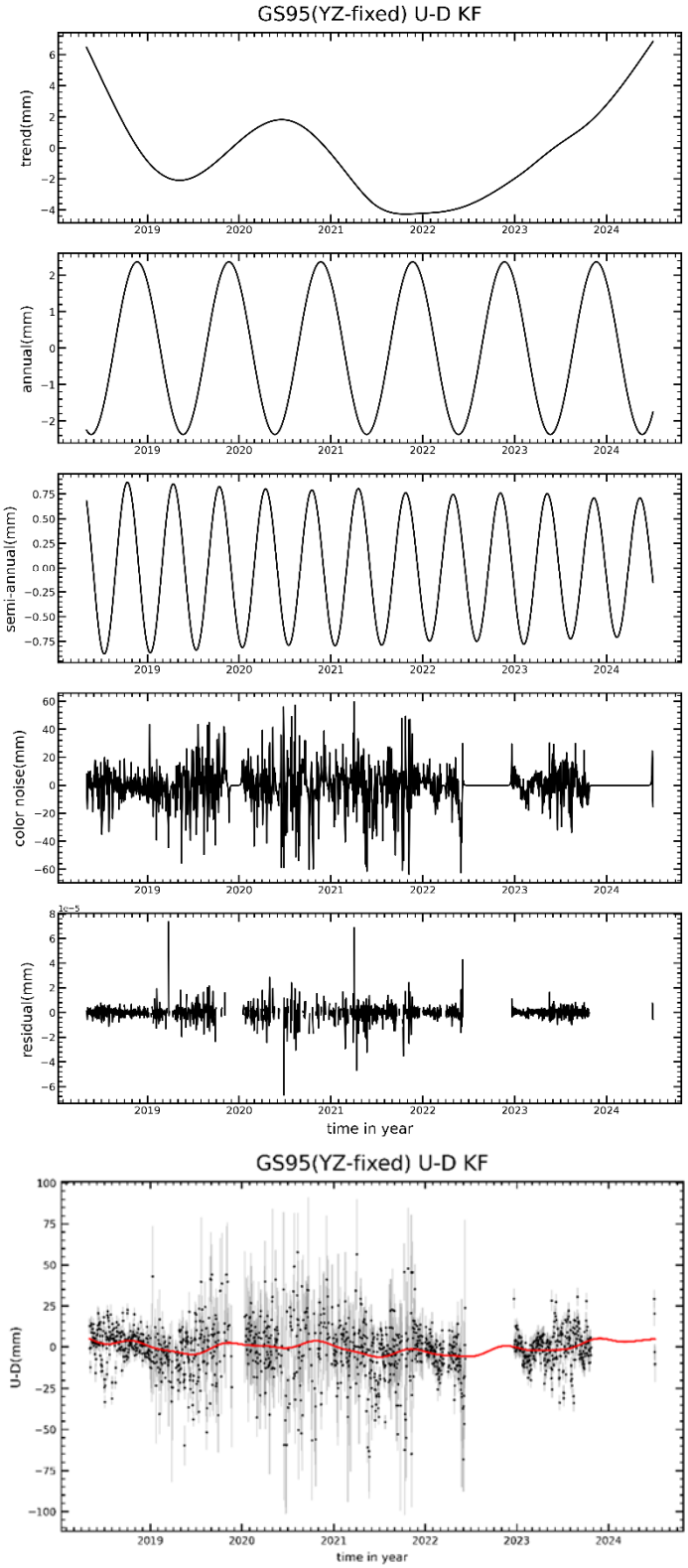


圖 8. 10：地礦中心連續站 GS95（大屯火山區八煙站）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明詳見圖 8. 5。

Figure 8. 10: Vertical time series and its KF analysis of the stations GS95. See Figure 8. 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（2024 年）GNSS 移動站抽樣檢核

本年度至 10 月為止，GNSS 移動站部分臺北地區於 3 月 18 至 27 日完成 92 個點位施測、花東地區（0403 花蓮地震）於 4 月 15 日至 23 日完成 97 點位施測、恆春地區於 4 月 29 日至 5 月 2 日完成 30 點位施測、桃竹苗地區於 5 月 20 日至 25 日完成 79 個點位施測，嘉南（含臺南）地區於 6 月 11 日至 30 日完成 170 個點位施測，高屏（含橋頭）地區於 7 月 3 日至 11 日完成 113 個點位施測，中部地區於 8 月 12 日至 29 日完成 147 個點位施測，宜蘭地區於 10 月 21 日至 27 日完成 36 個點位施測，共計完成 764 點 GNSS 移動站的施測（圖 8. 11）。

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

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

GNSS 移動站檢核截至 10 月為止已完成臺北、花東（0403 花蓮地震）、恆春、桃竹苗、嘉南（含臺南）、高屏（含橋頭）、中部、宜蘭地區測量外檢核，臺北地區於 3 月 25 至 26 日及 28 日完成 14 個點位施測檢核，花東（0403 花蓮地震）地區於 4 月 30 日及 5 月 1 日完成 12 個點位施測檢核，恆春地區於 5 月 9 日完成 5 個點位施測檢核，桃竹苗地區於 5 月 21 至 22 日完成 10 個點位施測檢核，嘉南（含臺南）地區於 6 月 24 日至 27 日完成 20 個點位施測檢核，高屏（含橋頭）地區於 7 月 22 日至 23 日以及 30 日完成 13 個點位施測檢核，中部地區於 8 月 19 日至 22 日完成 18 個點位施測檢核，宜蘭地區於 10 月 29 日完成 5 個點位施測檢核（表 8. 1）。

表 8. 1：GNSS 移動站施測與檢核時間表

Table 8. 1: Schedule of campaign-mode GNSS surveying, supervising and validation.

測量月份	點位數量	地區	檢核點數	中興測量	檢核結果細項說明
				施測日期	檢核日期
3	92	臺北	**14**	2024/3/18 ~ 2024/3/27	2024/3/25 ~ 2024/3/26、2024/3/28
4	97	花東（0403花蓮地震）	**12**	2024/4/15 ~ 2024/4/23	2024/4/30 ~ 2024/5/1
4-5	30	恆春	**5**	2024/4/29 ~ 2024/5/2	2024/5/9
5	79	桃竹苗	**10**	2024/5/20 ~ 2024/5/25	2024/5/21 ~ 2024/5/22
6	170	嘉南（含臺南）	**20**	2024/6/11 ~ 2024/6/30	2024/6/24 ~ 2024/6/27
7	113	高屏（含橋頭）	**13**	2024/7/3 ~ 2024/7/11	2024/7/22 ~ 2024/7/23、2024/7/30
8	147	中部	**18**	2024/8/12 ~ 2024/8/29	2024/8/19 ~ 2024/8/22
10	36	宜蘭	**5**	2024/10/21 ~ 2024/10/27	2024/10/29

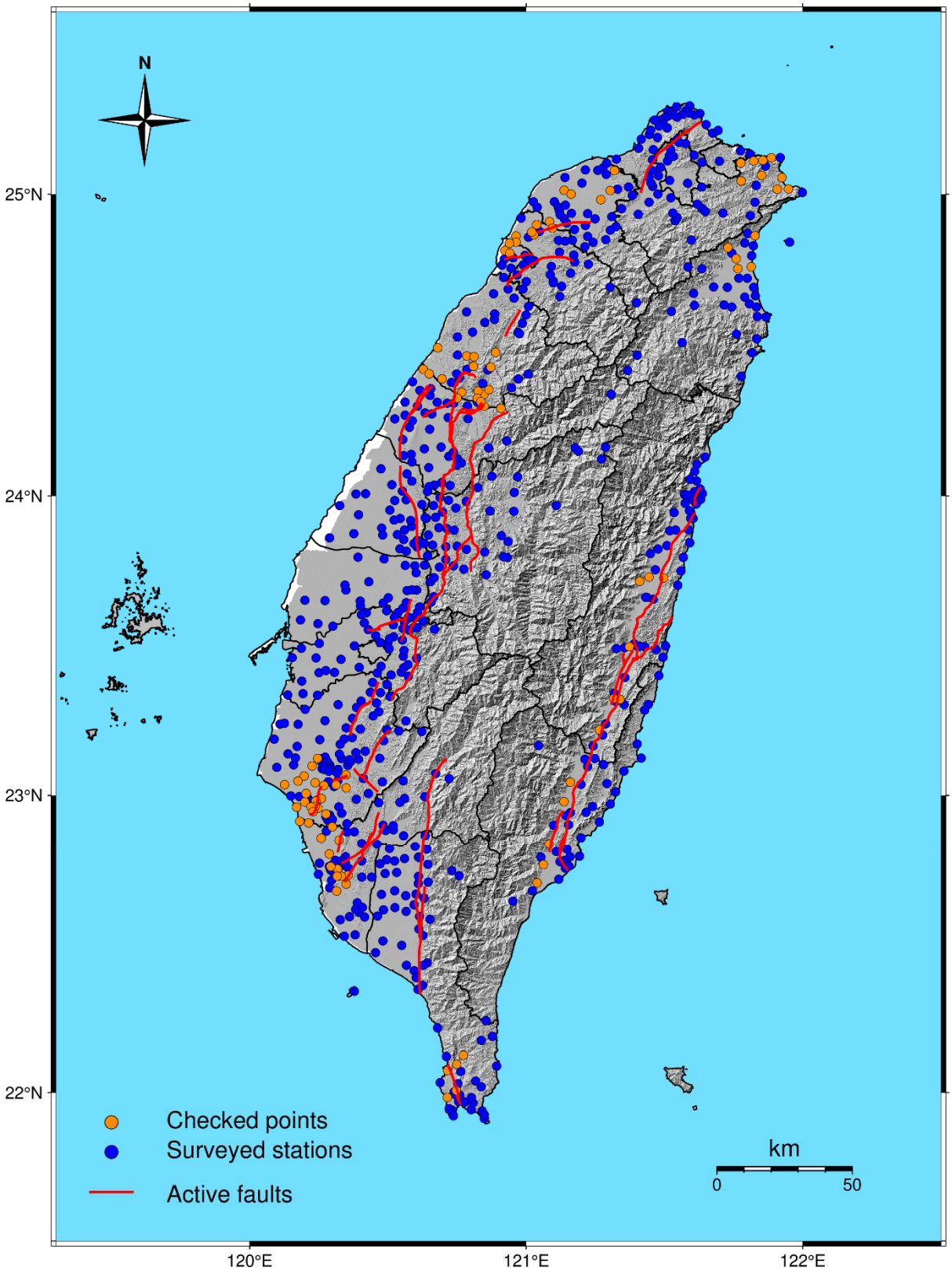


圖 8. 11：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖。藍色圓圈為施測站點，橘色圓圈為檢核站點。

Figure 8. 11: Distribution of surveyed campaign-mode GNSS stations and check points. Blue circles are surveyed stations. Orange circles are checked points.

臺北地區共有 92 個移動站點位數，故在此區選擇 14 個點位進行檢核，共有 91 條基線。本區 91 條基線之長度落在 2,900 m 至 81,890 m，基線差規範值在 5.6 mm 至 21.4 mm 之間，計算後的基線差在 0 mm 至 10.9 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

花東地區（0403 花蓮地震）共有 97 個移動站點位數，故在此區選擇 12 個點位進行檢核，共有 66 條基線。本區 66 條基線之長度落在 2,364 m 至 122,580 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 68.4 mm 之間，計算後的基線差在 0.2 mm 至 29.5 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

恆春地區共有 30 個移動站點位數，故在此區選擇 5 個點位進行檢核，共有 10 條基線。本區 10 條基線之長度落在 4,137 m 至 16,792 m，基線差規範值在 5.8 mm 至 10.4 mm 之間，計算後的基線差在 2.1 mm 至 7.7 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

桃竹苗地區共有 79 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 1,261 m 至 19,479 m，基線差規範值在 5.2 mm 至 14.1 mm 之間，計算後的基線差在 0 mm 至 8.7 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

嘉南（含臺南）地區共有 170 個移動站點位數，故在此區選擇 20 個點位進行檢核，共有 190 條基線。本區 190 條基線之長度落在 1,324 m 至 23,073 m，基線差規範值在 5.2 mm 至 27.8 mm 之間，計算後的基線差在 0 mm 至 9.6 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

高屏（含橋頭）地區共有 113 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 78 條基線之長度落在 1,558 m 至 29,553 m，基線差規範值在 5.5 mm 至 16.8 mm 之間，計算後的基線差在 0 mm 至 9.6 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

中部地區共有 147 個移動站點位數，故在此區選擇 18 個點位進行檢核，共有 153 條基線。本區 153 條基線之長度落在 1,782 m 至 32,194 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 45.3 mm 之間，計算後的基線差在 0 mm 至 10.2 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

宜蘭地區共有 36 個移動站點位數，故在此區選擇 5 個點位進行檢核，共有 10 條基線。本區 10 條基線之長度落在 3,707 m 至 13,617 m，基線差規範值在 5.7 mm 至 7.7 mm 之間，計算後的基線差在 0.6 mm 至 6.2 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

8-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析

在 GNSS 移動站資料解算中，與解算 GNSS 連續站資料時相同，本計畫同樣採用 GipsyX 軟體求解各測站之坐標。由於存在環境變化和隨機誤差，造成 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與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）分析在測量學中稱為外部誤差，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。在理想狀況下，若坐標計算成果為穩定的，殘差值會近乎為零；均方根誤差（RMS error）分析在測量學中稱為內部誤差，為針對各個測站每次坐標解算時產生的均方根誤差量進行統計。

根據臺北、桃竹苗、中部、嘉南（含臺南）、高屏（含橋頭）、恆春、花東和宜蘭地區之 GNSS 移動站監測成果，其坐標殘差之分布情形如圖 8. 12 所示，2002 至 2024 年 E 方向殘差值之 95%信賴區間約為 -0.1 ± 12.1 mm，N 方向為 -0.1 ± 9.6 mm，U 方向為 0.0 ± 27.9 mm。而 2002 至 2024 年平面坐標均方根誤差平均值為 5.4 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 15.8 mm（圖 8. 13）。

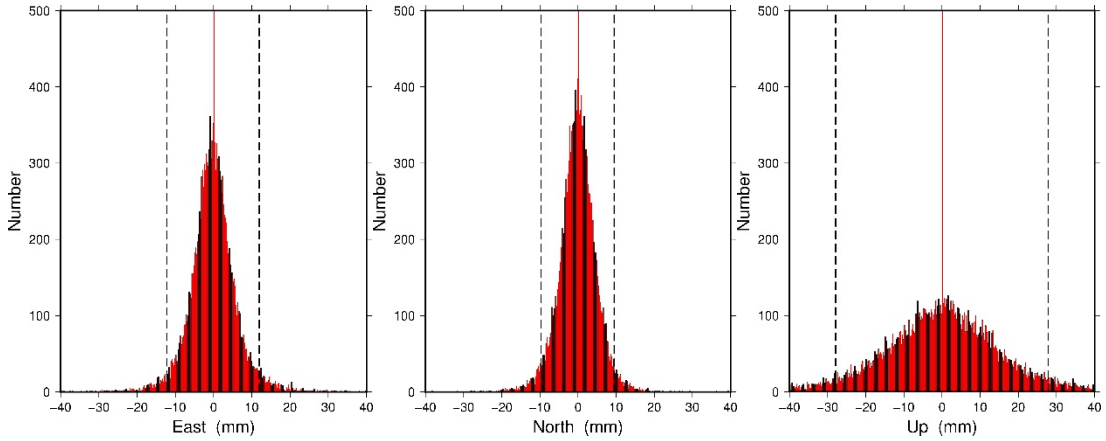


圖 8. 12：2002 至 2024 年 10 月 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 8. 12: GNSS coordinates residuals during 2002 to October 2024. The dash lines indicate 95% confidence interval.

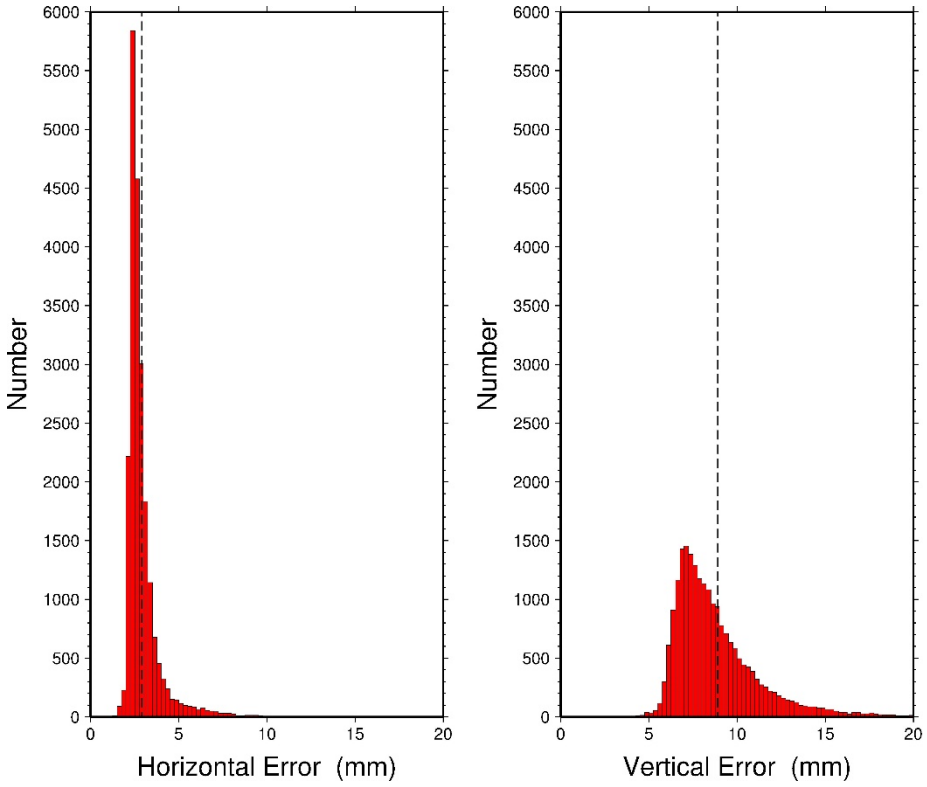


圖 8. 13：2002 至 2024 年 10 月 GNSS 移動站點位均方根誤差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 8. 13: GNSS RMS error during 2002 to October 2024. The dash lines indicate the average.

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 觀測網

本節針對今年已完成測量之臺北地區（圖 8. 14）觀測資料進行分析，目前已完成 GNSS 移動站 92 站點位之施測，其中包含於今年新設立觀測的 GJ01 至 GJ23 共 23 個站點，因資料僅有一年的緣故本年度並未納入計算分析。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

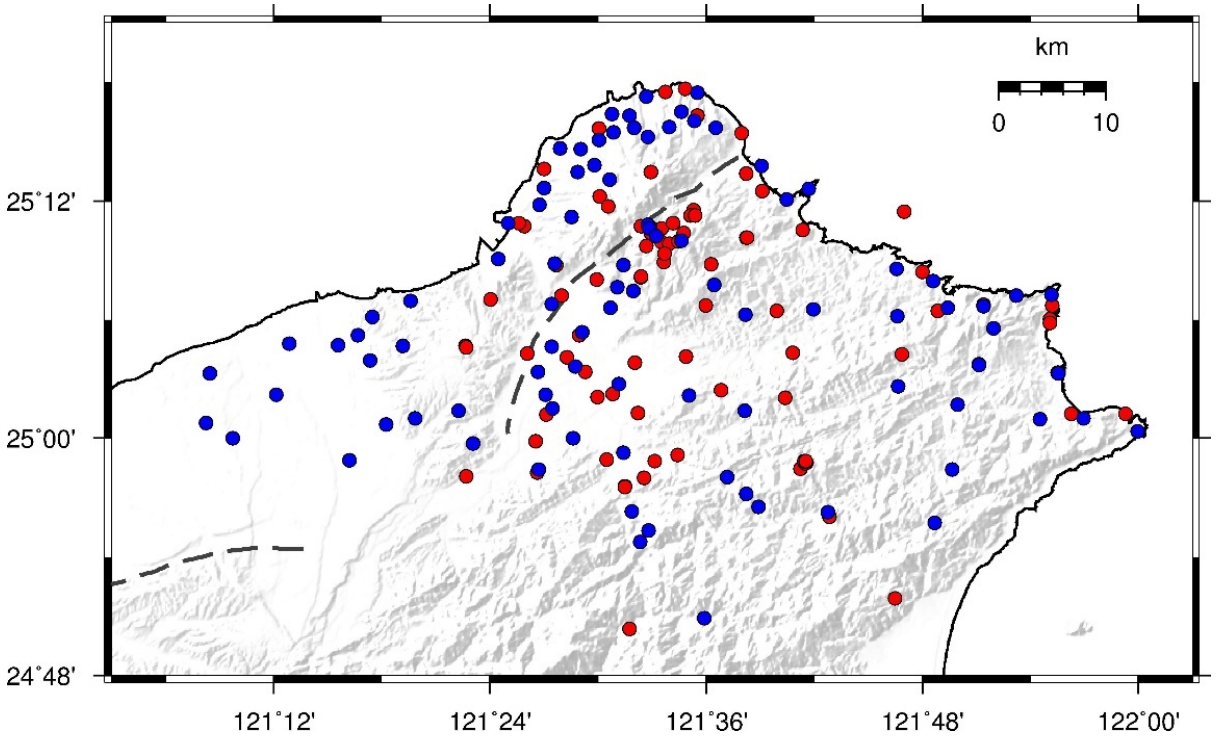


圖 8. 14：臺北地區 GNSS 連續及移動站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 14: GNSS distribution in Taipei area. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

在本區域 92 個移動站中，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. 14）來比較時間序列結果（圖 8. 15、圖 8. 16）。2 組測站分別為 GNSS 移動站 GB05 及連續站 YMSM（圖 8. 15）與 GNSS 移動站 N035 及連續站 GOLI（圖 8. 16）。其中 YMSM 為移動站解算中約制站之一，與 IGS 國際連續站資料進行聯合解算，確定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比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

臺北地區各觀測點位之水平速度場如圖 8. 17 所示，本區 2002 年至 2024 年速度場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 1.2～4.0 mm/yr。垂直速度場如圖 8. 18 所示，由結果可知本區多為沉降，沉降速度大約落在 -3.0～-0.1 mm/yr 之間。

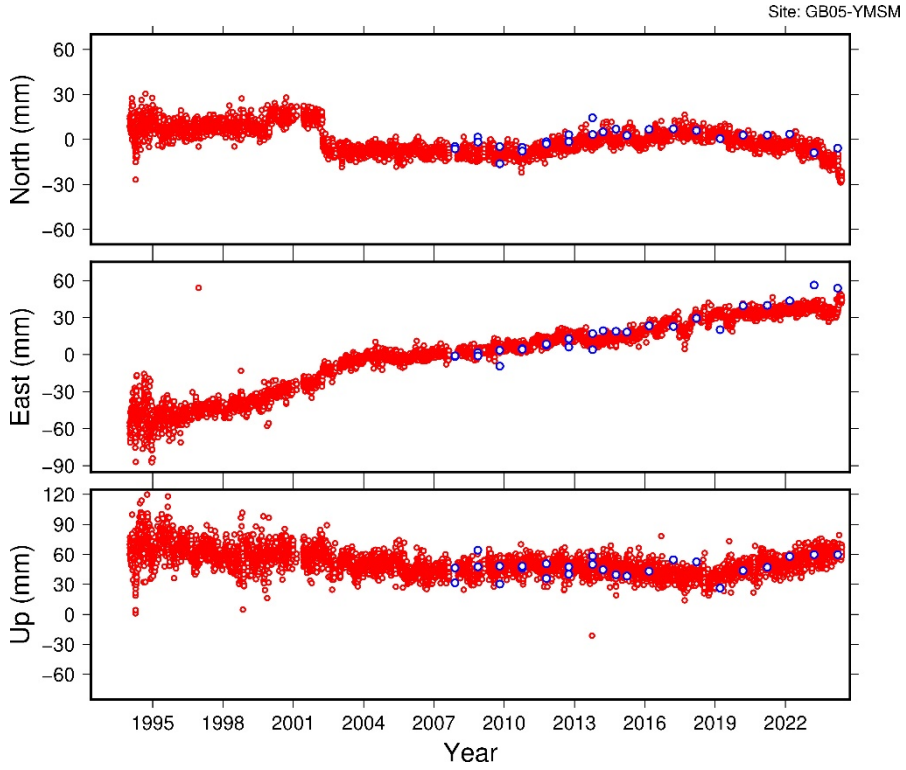


圖 8. 15：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 15: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GB05 (blue circles) and continuous GNSS station YMSM (red circles).

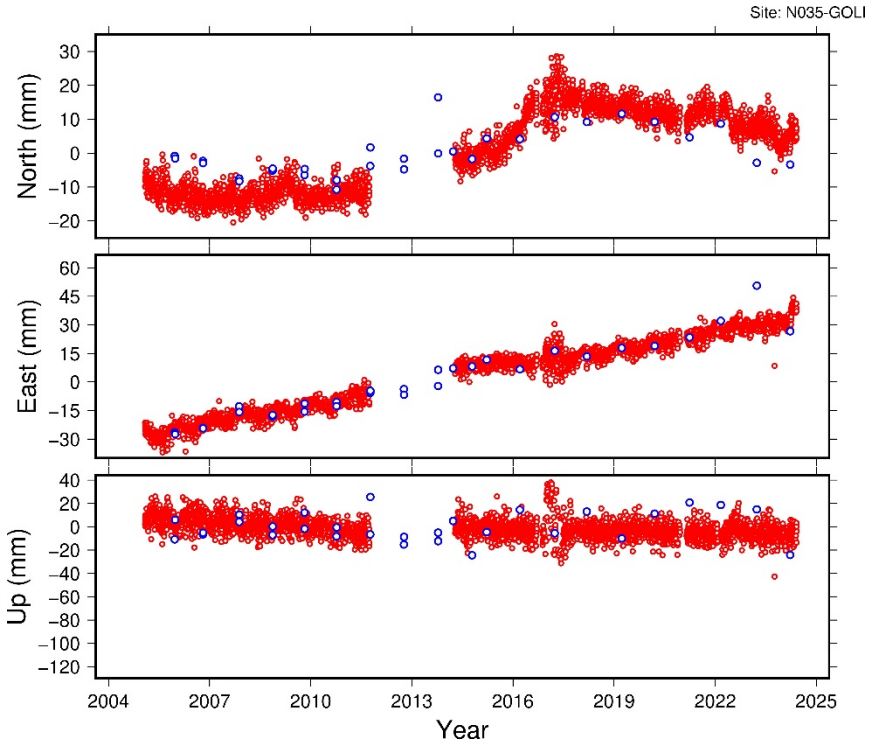


圖 8. 16：移動站 N035 與連續站 GOLI 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 16: Time series comparison between campaign-mode GNSS station N035 (blue circles) and continuous GNSS station GOLI (red circles).

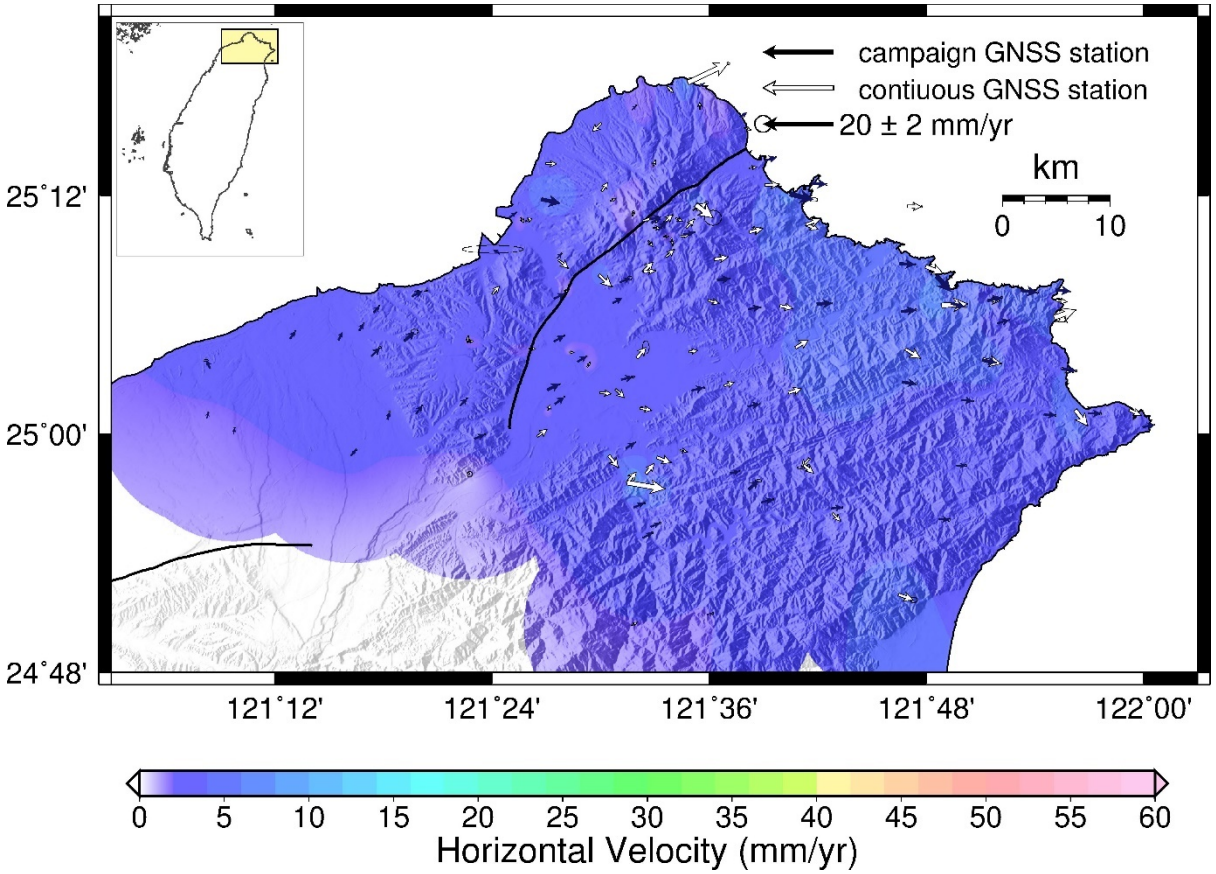


圖 8. 17：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。彩色色階為 2002 至 2024 年資料所解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 17: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taipei area. The colored map represents the horizontal velocities from 2002 to 2024. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

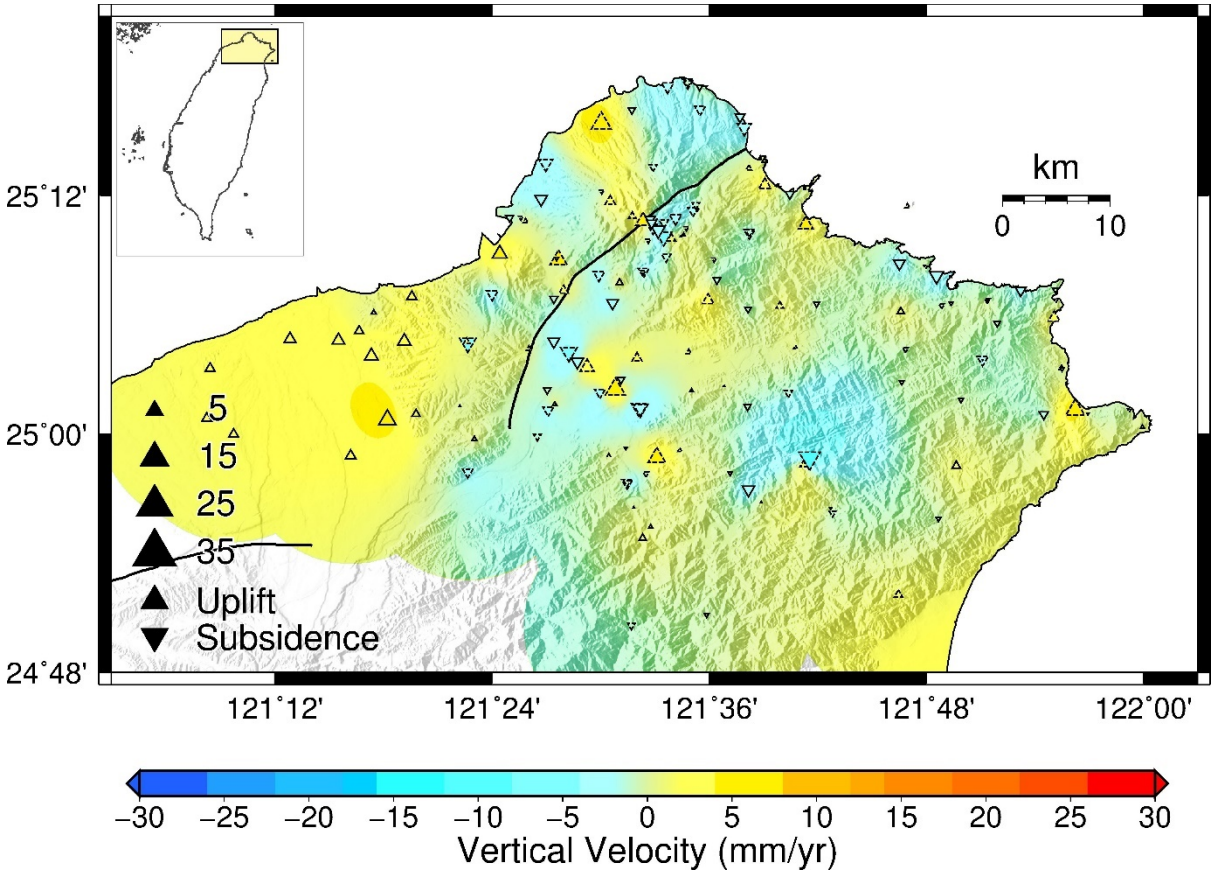


圖 8. 18：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 觀測時間為 2002 至 2024 年。

Figure 8. 18: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taipei area. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. The duration of GNSS observation is from 2002 to 2024.

8-2-3-2 桃竹苗地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之桃園、新竹與苗栗地區（圖 8. 19）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 79 個站點施測與分析。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

在本區域 79 個移動站中，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. 19）來比較時間序列結果（圖 8. 20、圖 8. 21）。2 組測站分別為 GNSS 移動站 G208 及連續站 GS86（圖 8. 20）與 GNSS 移動站 G170 及連續站 GS15（圖 8. 21）。藉由移動站與該地區連續站解算結果之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。

桃竹苗地區各觀測點位相對於 S01R 測站之水平速度場如圖 8. 22 所示，本區於 2002 至 2024 年間多為朝西北向運動，速度量值約為 1.2 ~ 6.8 mm/yr。垂直速度場如圖 8. 23 所示，本區近沿海多為沉陷，沉降速度大約落在 -3 mm/yr 以內，近山區處則多為抬升，速度量值約落在 4 mm/yr 內。

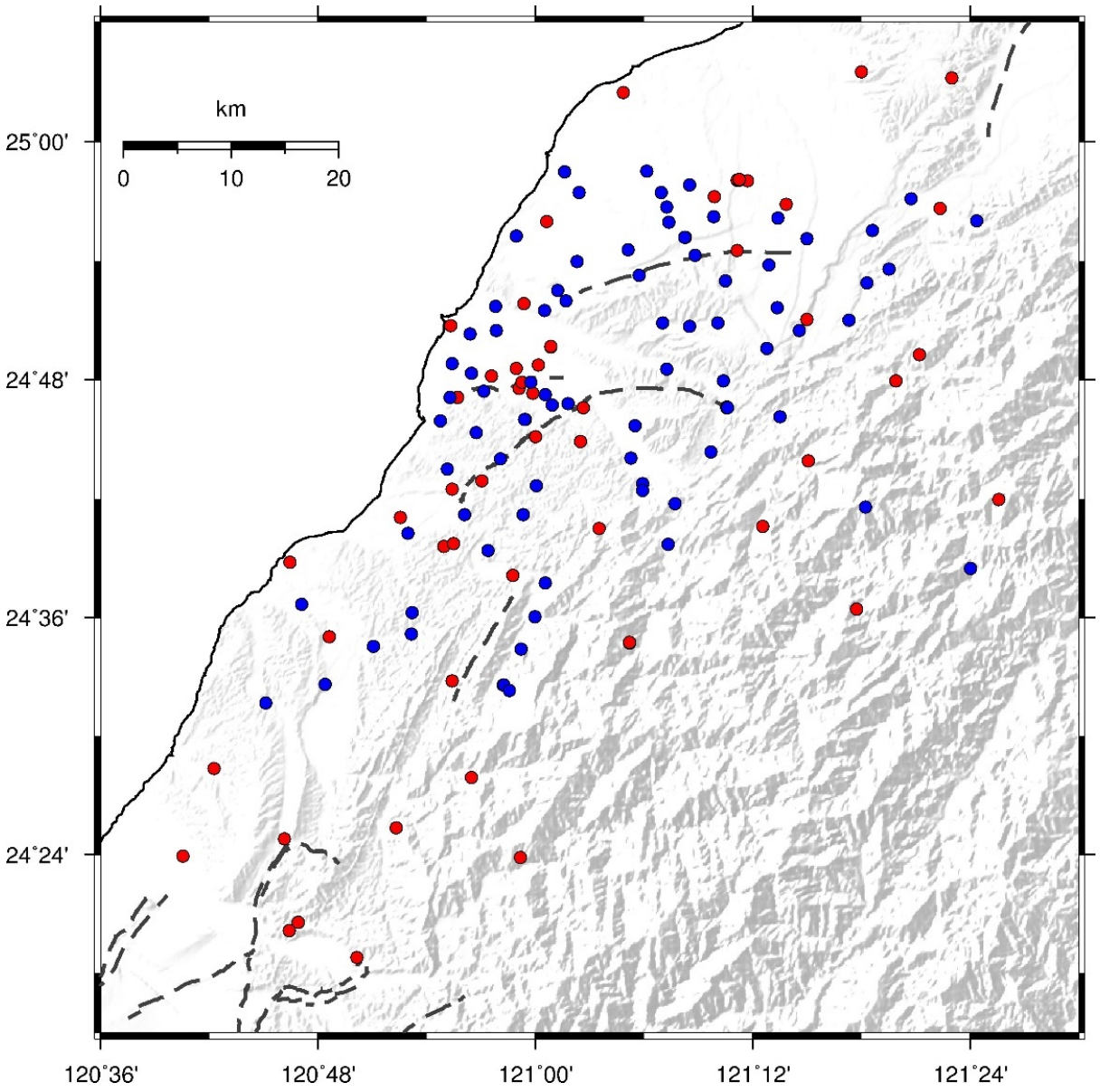


圖 8. 19：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 19: GNSS distribution in Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

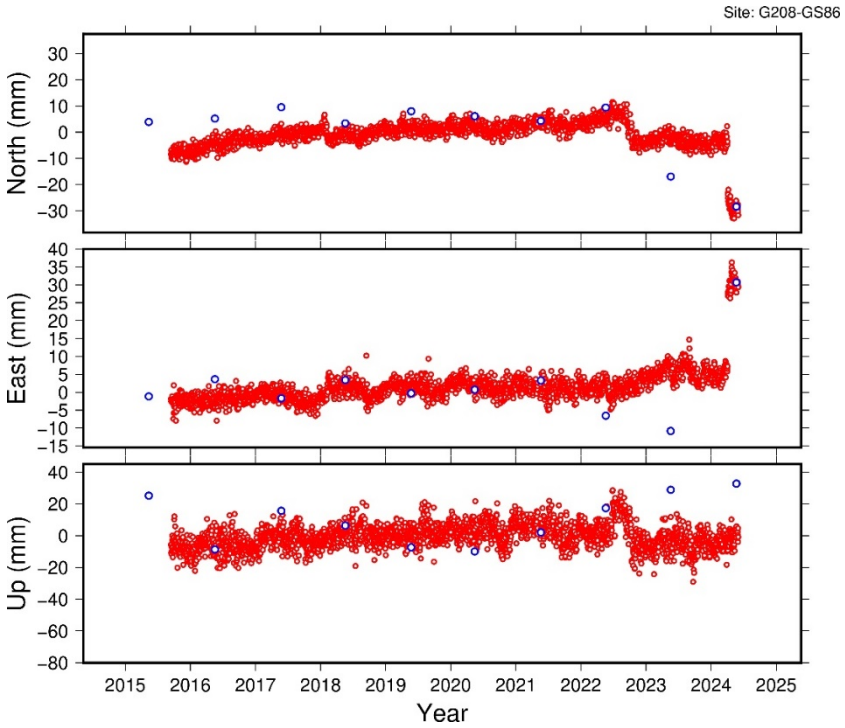


圖 8. 20：移動站 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 20: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G208 (blue circles) and continuous GNSS station GS86 (red circles).

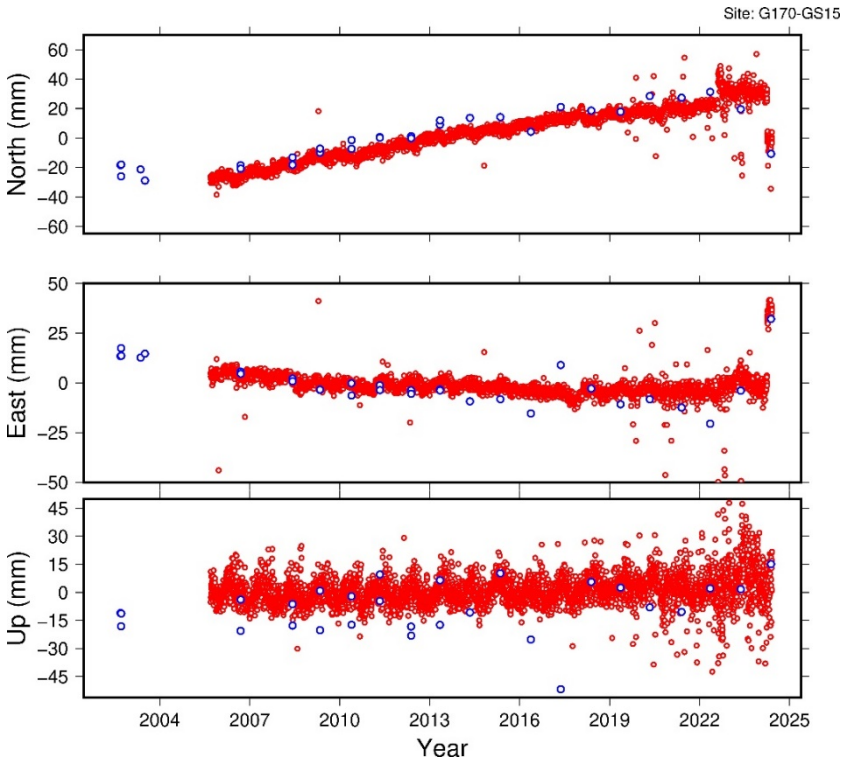


圖 8. 21：移動站 G170 與連續站 GS15 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 21: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G170 (blue circles) and continuous GNSS station GS15 (red circles).

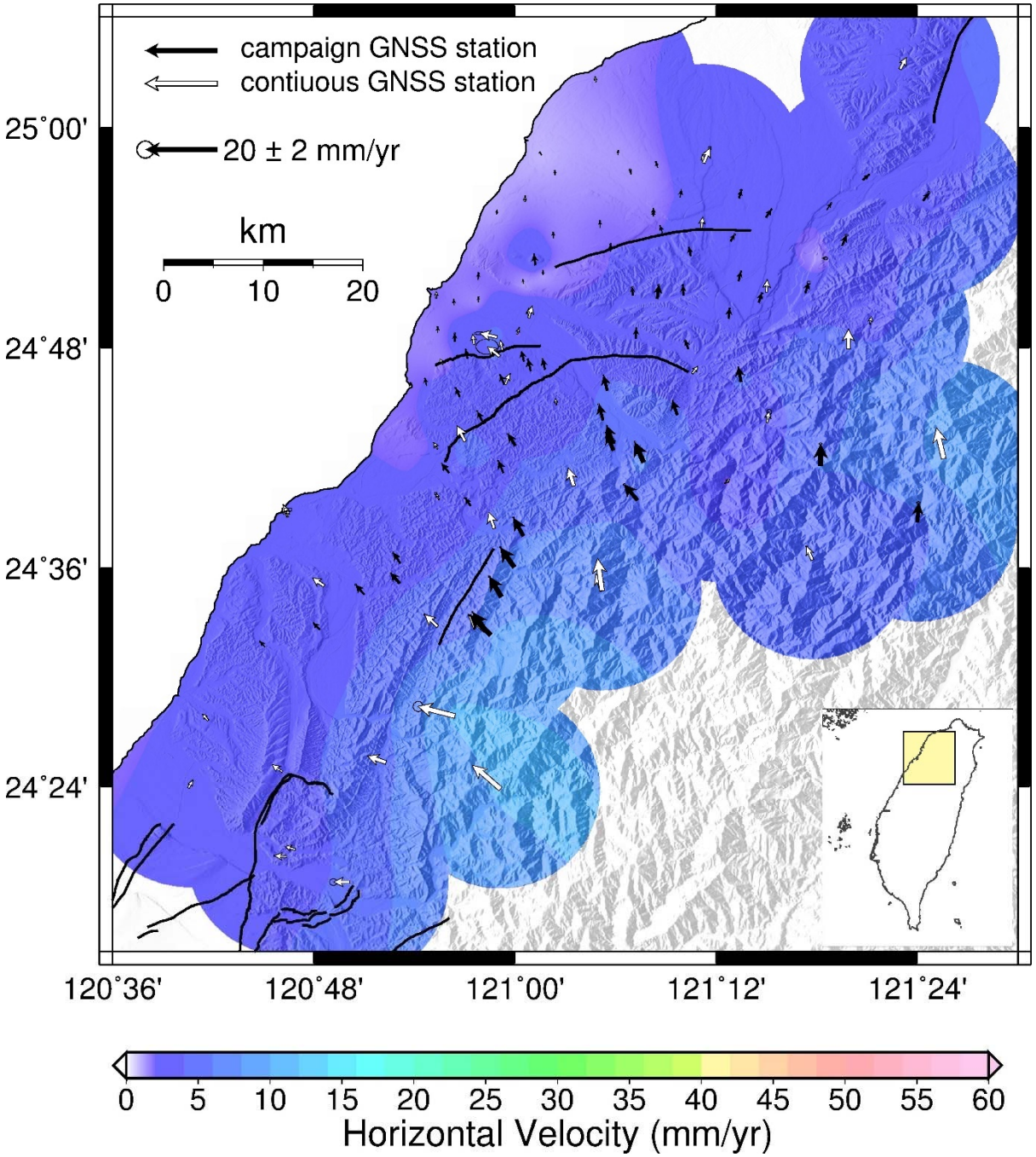


圖 8. 22：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。彩色色階為 2002 至 2024 年資料所解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 22: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. The colored map represents the horizontal velocities from 2002 to 2024. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

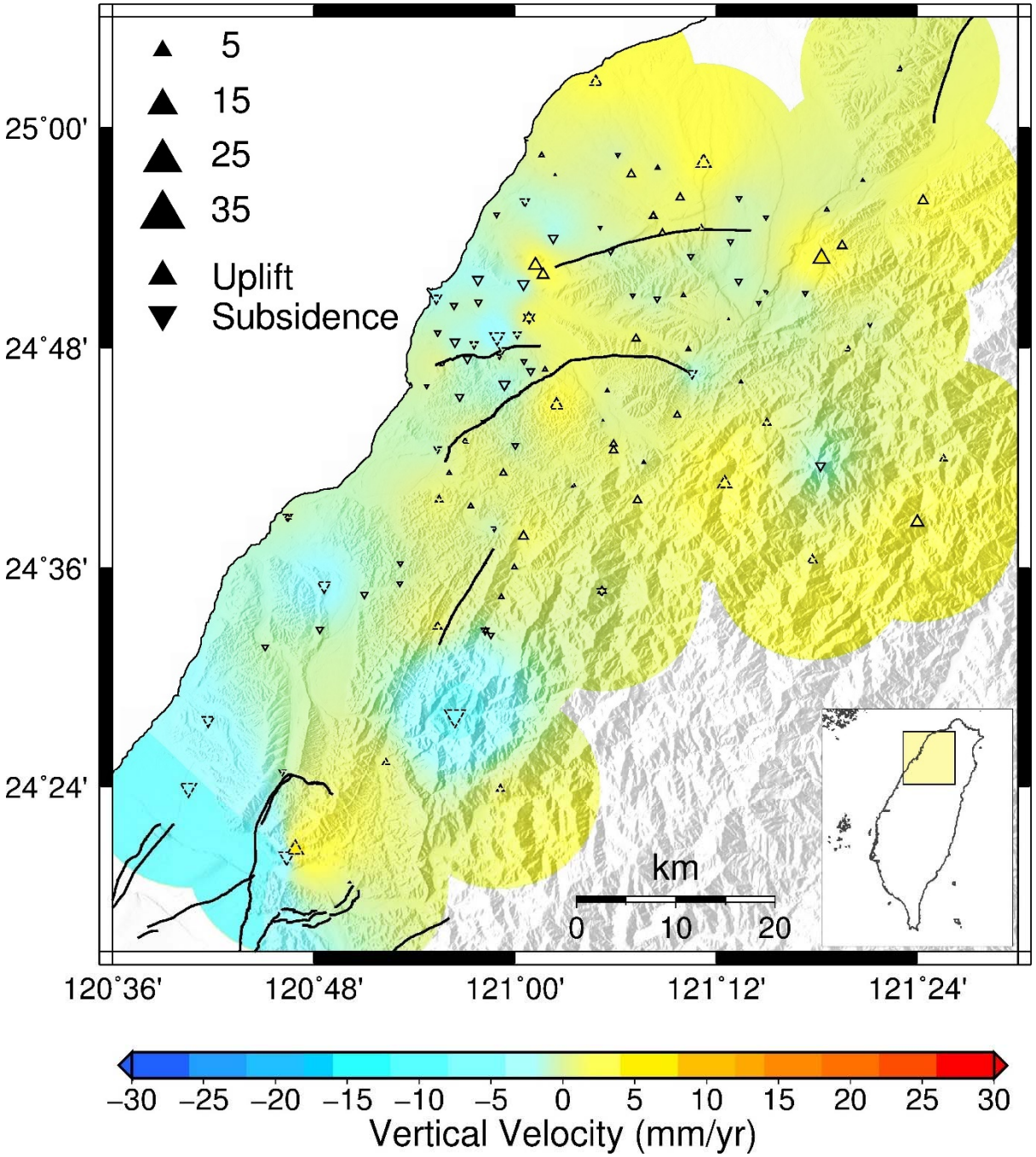


圖 8. 23：桃竹苗地區 2002 至 2024 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 23: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

8-2-3-3 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，已完成 GNSS 移動站共 170 個站點施測與分析（圖 8.24）。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

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 8.25、圖 8.26)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G390 及連續站 GS88（圖 8.25）與 GNSS 移動站 G392 及連續站 SHWA（圖 8.26），藉由移動站與該地區連續站解算結果之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。

受 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震以及 2022 年關山−池上地震的影響，本研究將速度場區分為：2002 – 2010 年、2010 – 2016 年、2016 – 2022 年以及 2022 – 2024 年 4 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 8.27 和圖 8.28，相對於 S01R 測站，嘉南地區的水平運動方向由南而北呈順時針旋轉，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 -25.0 mm/yr，進入嘉南地區的山區則有超過約 3.0 mm/yr 的抬升速度。臺南地區之沿海亦呈現約 -10.0 mm/yr 之平均沉陷速度，山區則有超過約 7.0 mm/yr 的抬升速度。

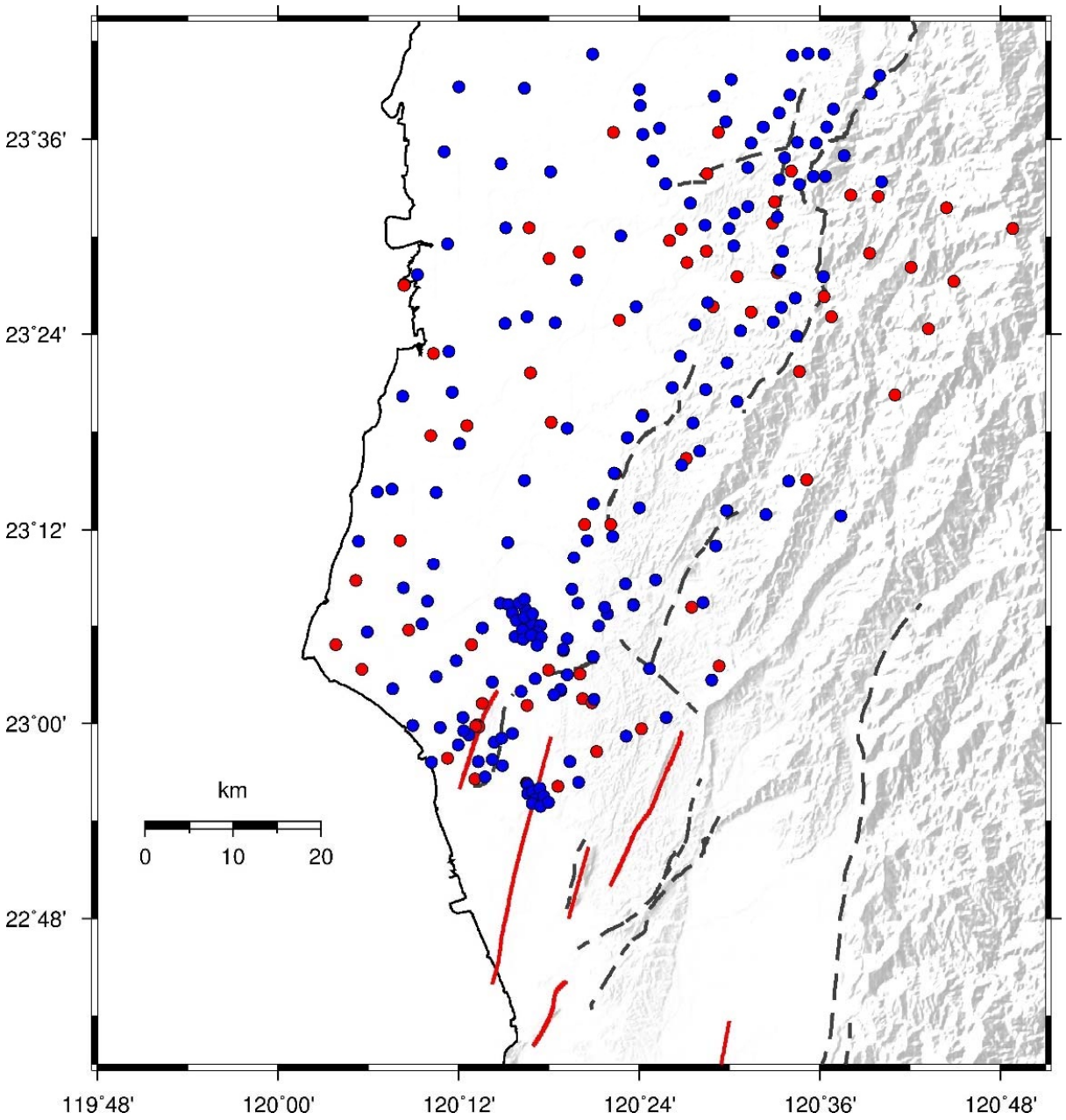


圖 8. 24：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 24: GNSS distribution in Chiayi and Tainan areas. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

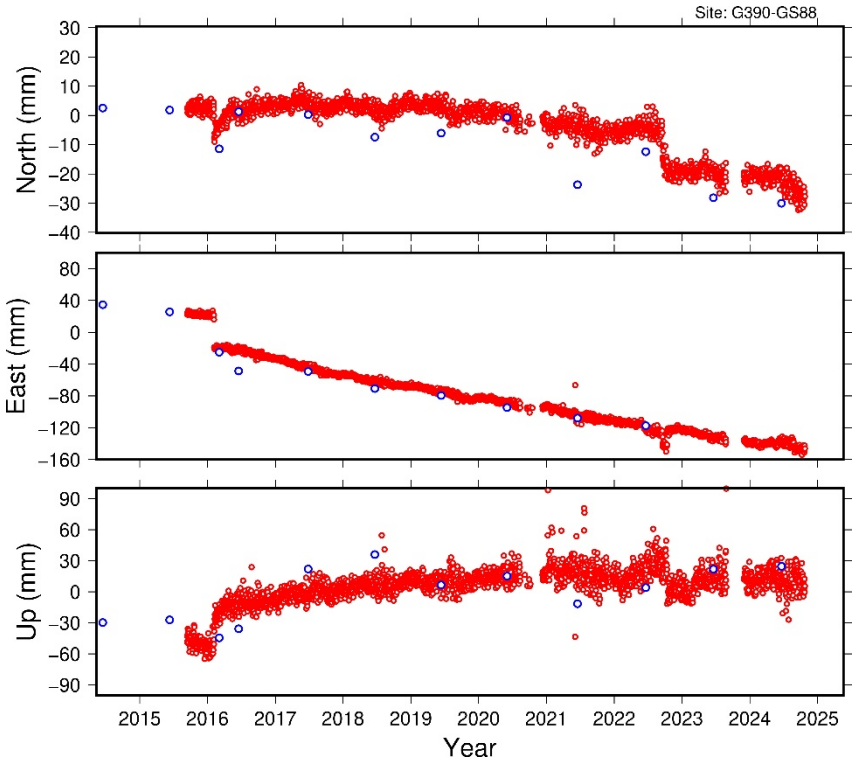


圖 8. 25：移動站 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 25: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G390 (blue circles) and continuous GNSS station GS88 (red circles).

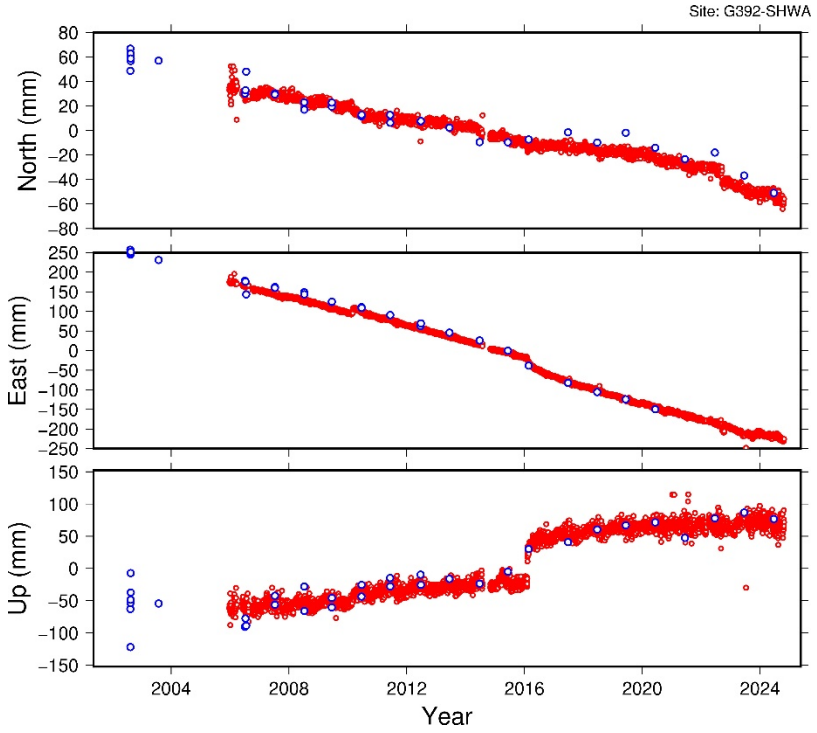


圖 8. 26：移動站 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 26: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G392 (blue circles) and continuous GNSS station SHWA (red circles).

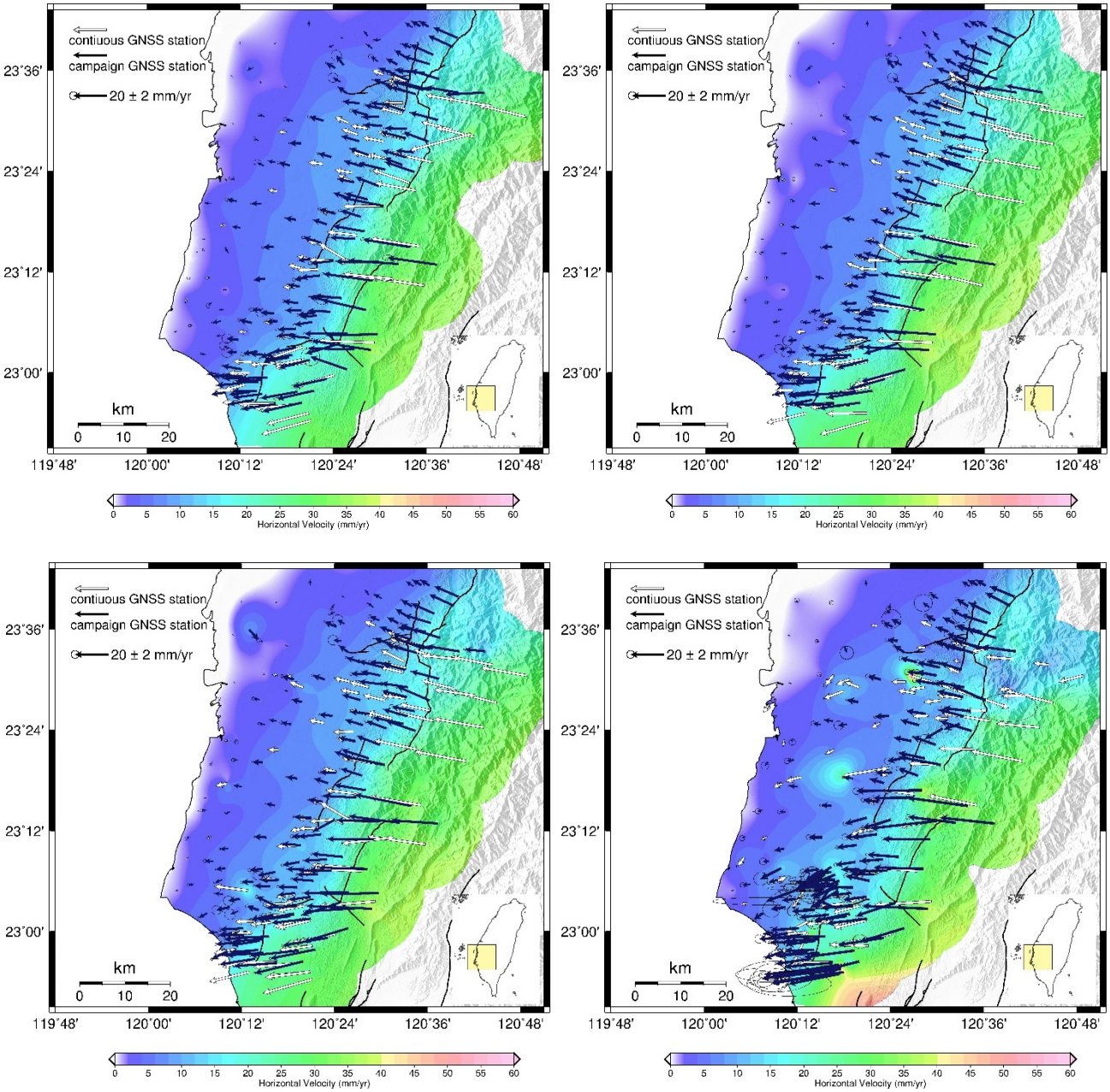


圖 8. 27：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左上圖表示 2002 - 2010 年速度場；右上圖表示震後 2010 - 2016 年速度場；左下圖表示震後 2016 - 2022 年速度場；右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 27: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Chiayi and Tainan areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2010; the top right one is from 2010-2016; the bottom left is from 2016-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

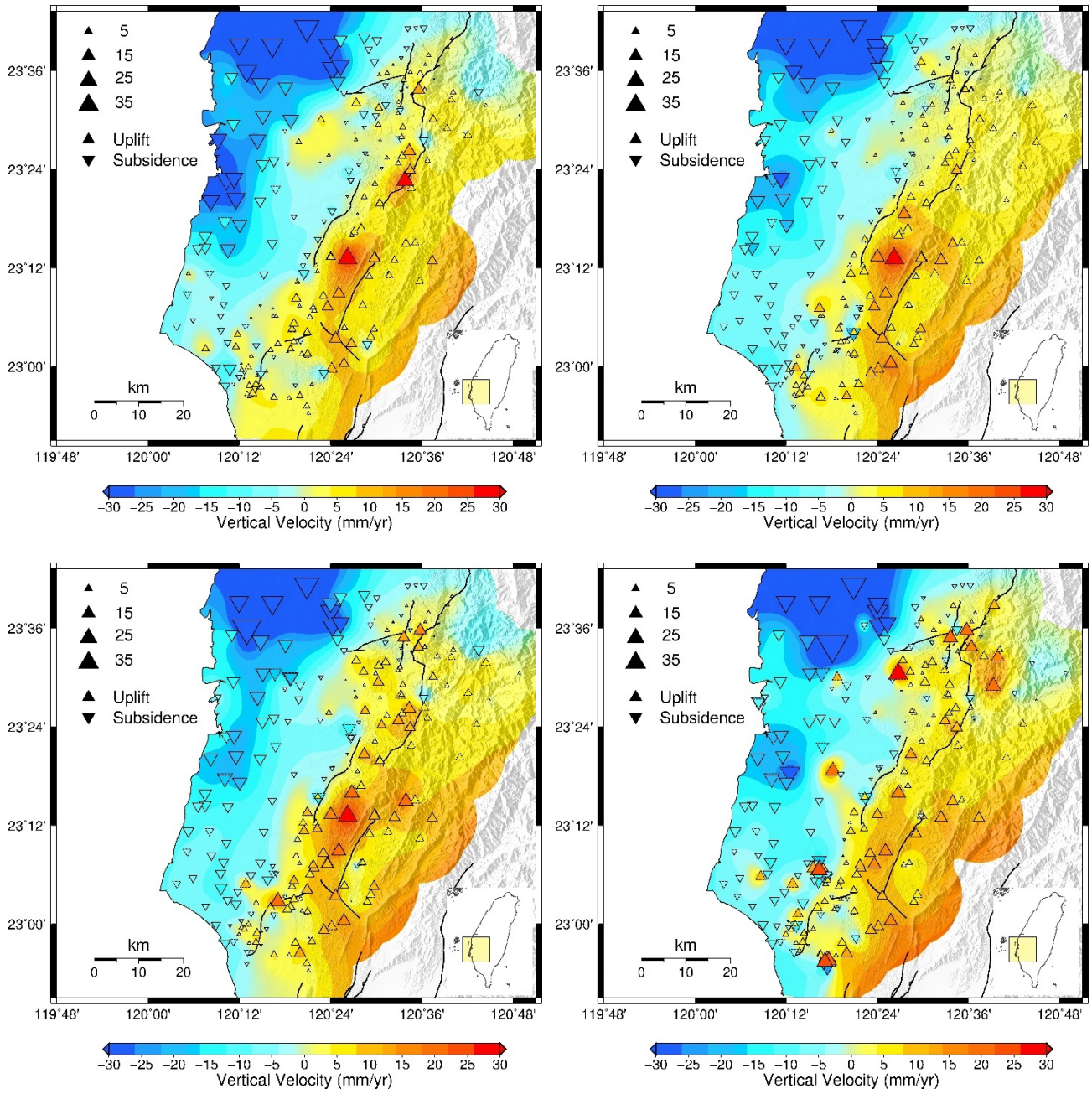


圖 8. 28：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2010 年速度場，右上圖表示震後 2010 - 2016 年速度場，左下圖表示震後 2016 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 28: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Chiayi and Tainan areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2010; the top right one is from 2010-2016; the bottom left is from 2016-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

8-2-3-4 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，已完成 GNSS 移動站共 113 個站點施測與分析（圖 8.29）。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

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 8.30、圖 8.31)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GF99 及連續站 SGAN（圖 8.30）與 GNSS 移動站 G003 及連續站 GS56（圖 8.31），藉由移動站與該地區連續站解算結果之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 8.32 和圖 8.33，受 2010 年甲仙地震、2016 年美濃地震以及 2022 年關山-池上地震的影響，本研究將速度場區分為：2002－2010 年、2010－2016 年、2016－2022 年以及 2016－2024 年 4 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 8.32）結果顯示自山區到海岸平原呈逆時鐘旋轉，速度量值於鳳山丘陵及屏東平原地區最大，平均達 40 mm/yr 以上。在垂直速度場部分（圖 8.33），高屏地區沿海地區以沉降速度為主，鳳山丘陵與潮州斷層以東之中央山脈地區則以抬升為主。

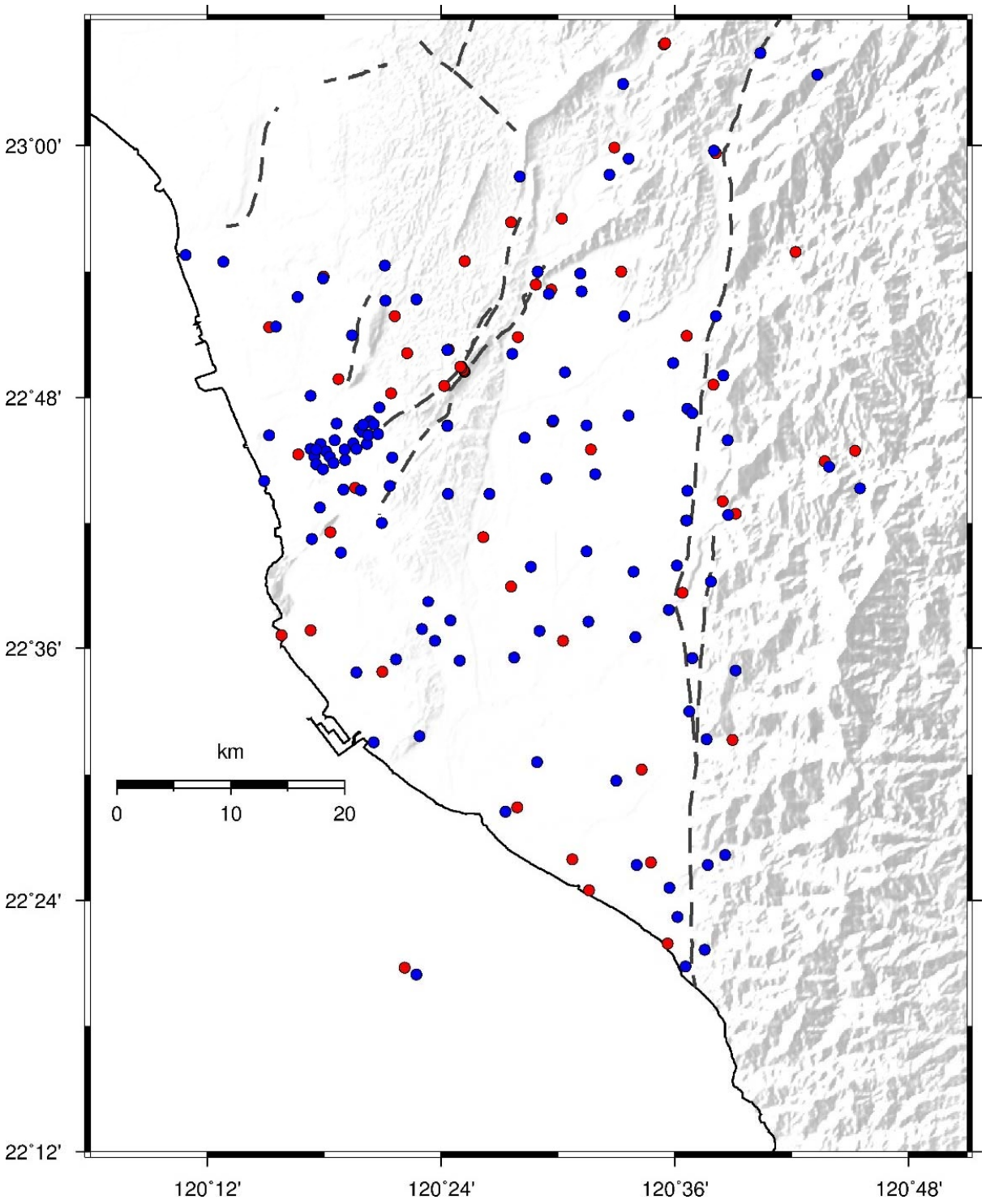


圖 8. 29：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 29: GNSS distribution in Kaohsiung and Pingtung areas. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

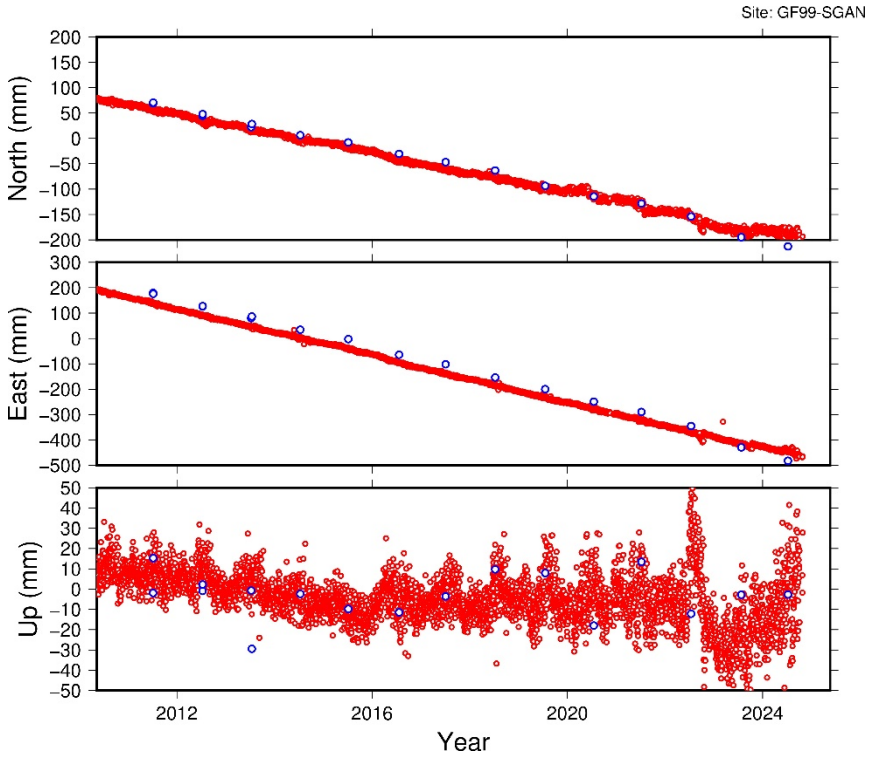


圖 8. 30：移動站 GF99 與連續站 SGAN 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 30: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GF99 (blue circles) and continuous GNSS station SGAN (red circles).

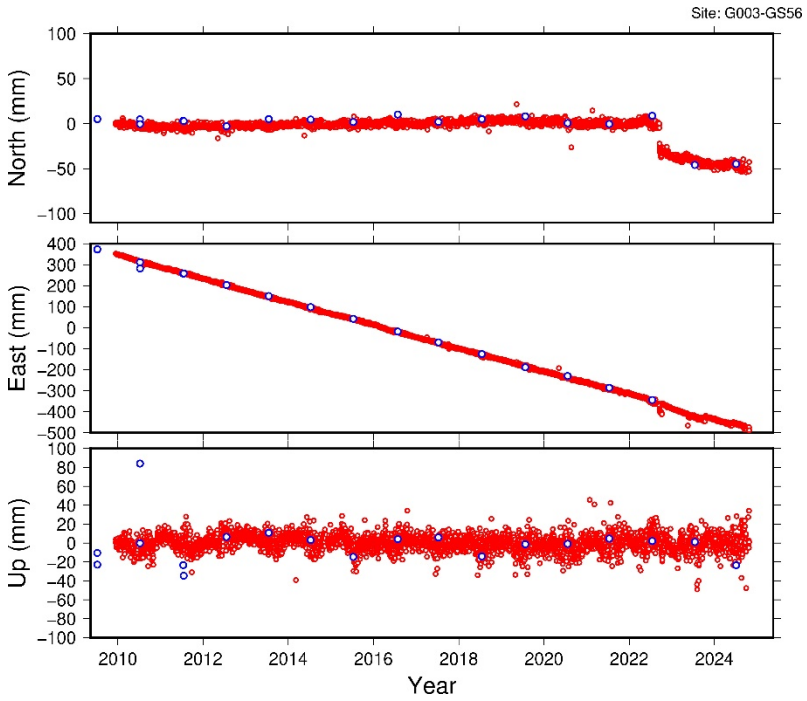


圖 8. 31：移動站 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 31: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G003 (blue circles) and continuous GNSS station GS56 (red circles).

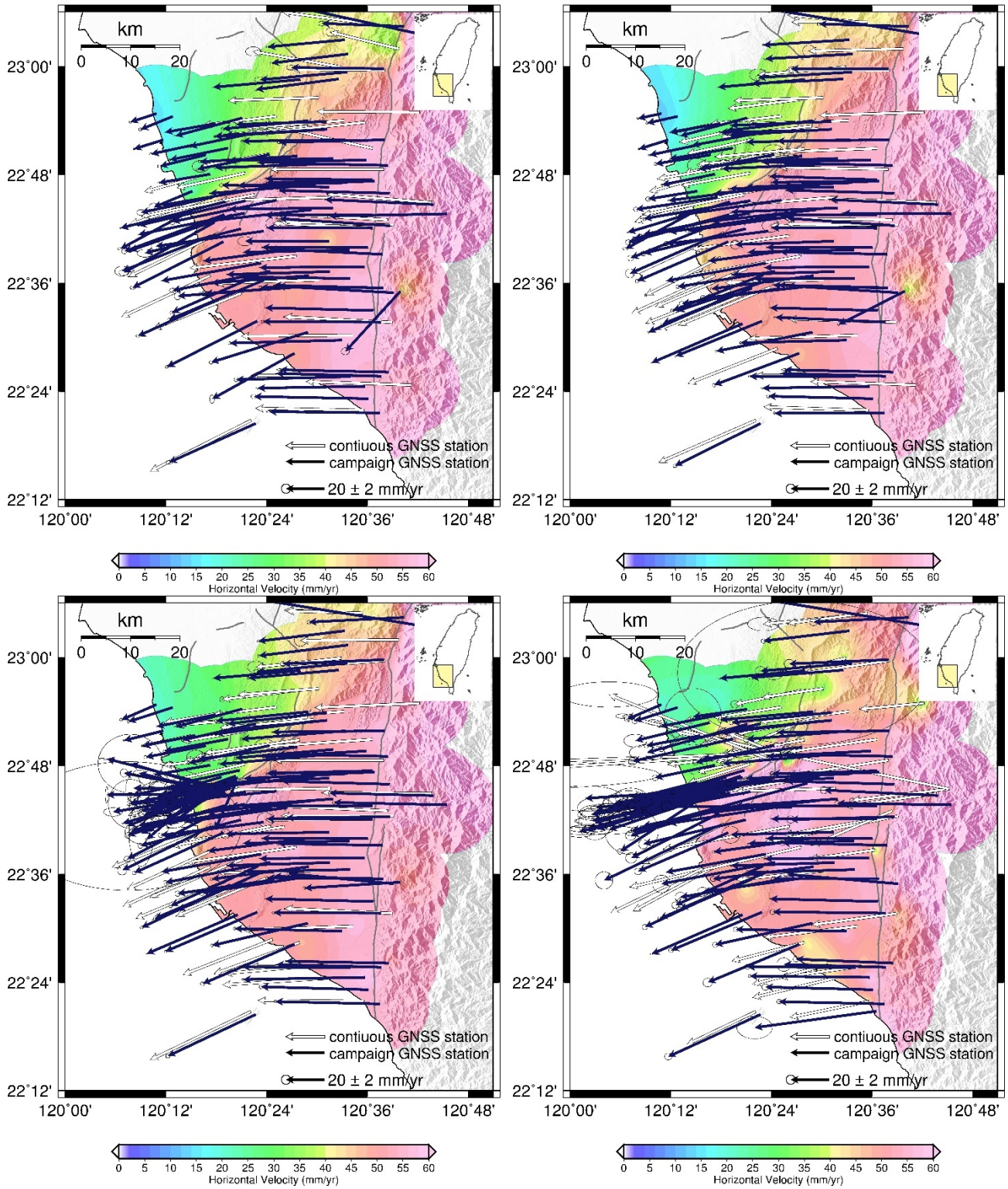


圖 8. 32：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左上圖表示 2002 - 2010 年速度場；右上圖表示震後 2010 - 2016 年速度場；左下圖表示震後 2016 - 2022 年速度場；右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 32: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung and Pingtung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2010; the top right one is from 2010-2016; the bottom left is from 2016-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

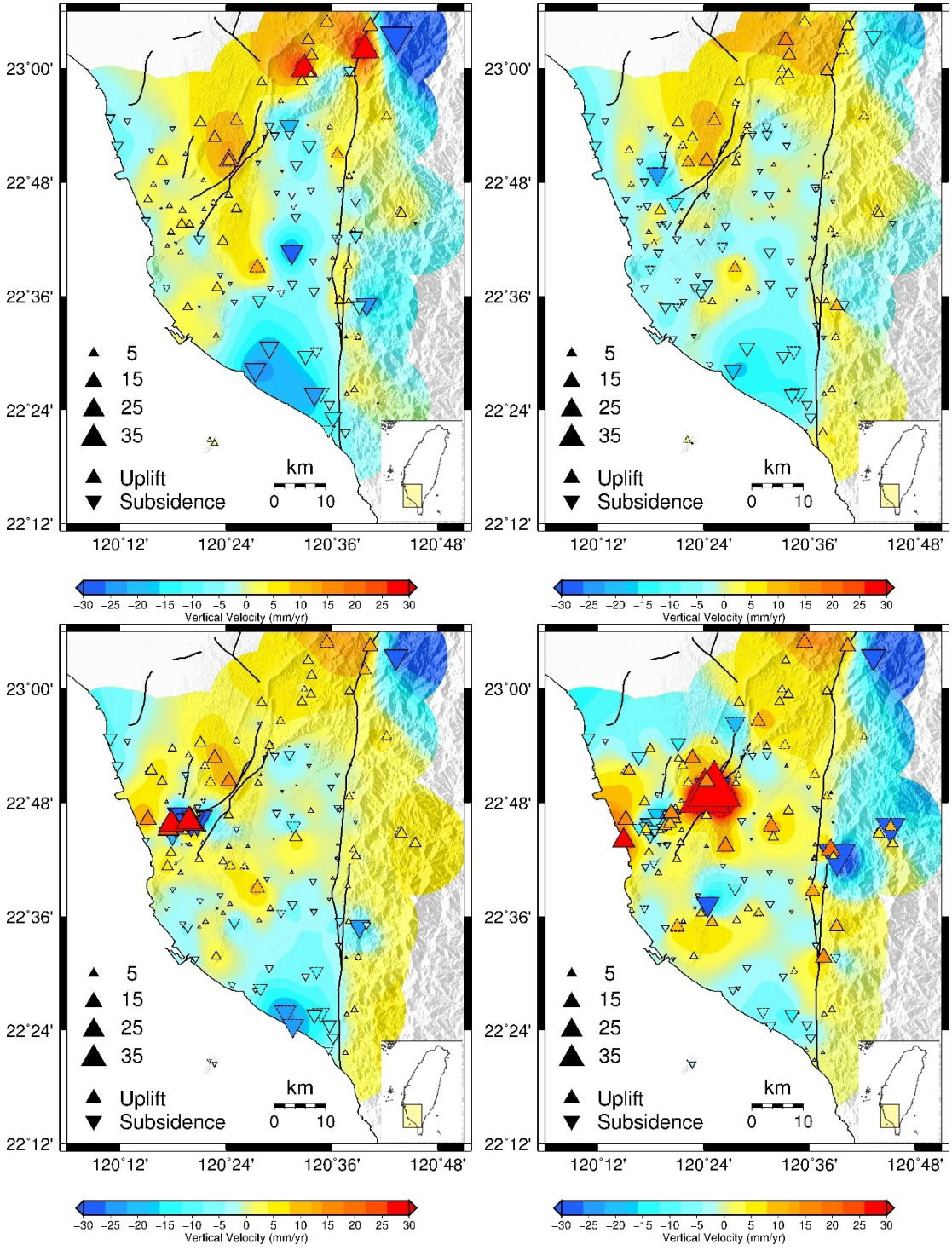


圖 8. 33：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2010 年速度場，右上圖表示震後 2010 - 2016 年速度場，左下圖表示震後 2016 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 33: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung and Pingtung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2010; the top right one is from 2010-2016; the bottom left is from 2016-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

8-2-3-5 恆春地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之恆春地區（圖 8. 34）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 30 個站點施測與分析。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

在本區域 30 個移動站中，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. 34）來比較時間序列結果（圖 8. 35、圖 8. 36）。2 組測站分別為 GNSS 移動站 G669 及連續站 HENC（圖 8. 35）與 GNSS 移動站 G643 及連續站 KDNM（圖 8. 36），藉由移動站與該地區連續站解算結果之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。

恆春地區受 2006 年屏東外海地震、2022 年關山−池上地震以及速度變化的影響，本研究將速度場區分為 2002－2006 年、2006－2010 年、2010－2016 年、2016－2022 年以及 2022－2024 年 5 個時間段分別估算速度場。

恆春地區各個觀測點位之水平速度場如圖 8. 37 所示，大抵朝西、西北位移，平均位移量達 40 mm/yr 以上。垂直速度場如圖 8. 38 所示，整體在 2010 年以前為沉降，僅零星地區呈現抬升，但在 2010 年以後，整體轉為抬升為主，尤以西側的恆春西臺地更為顯著。

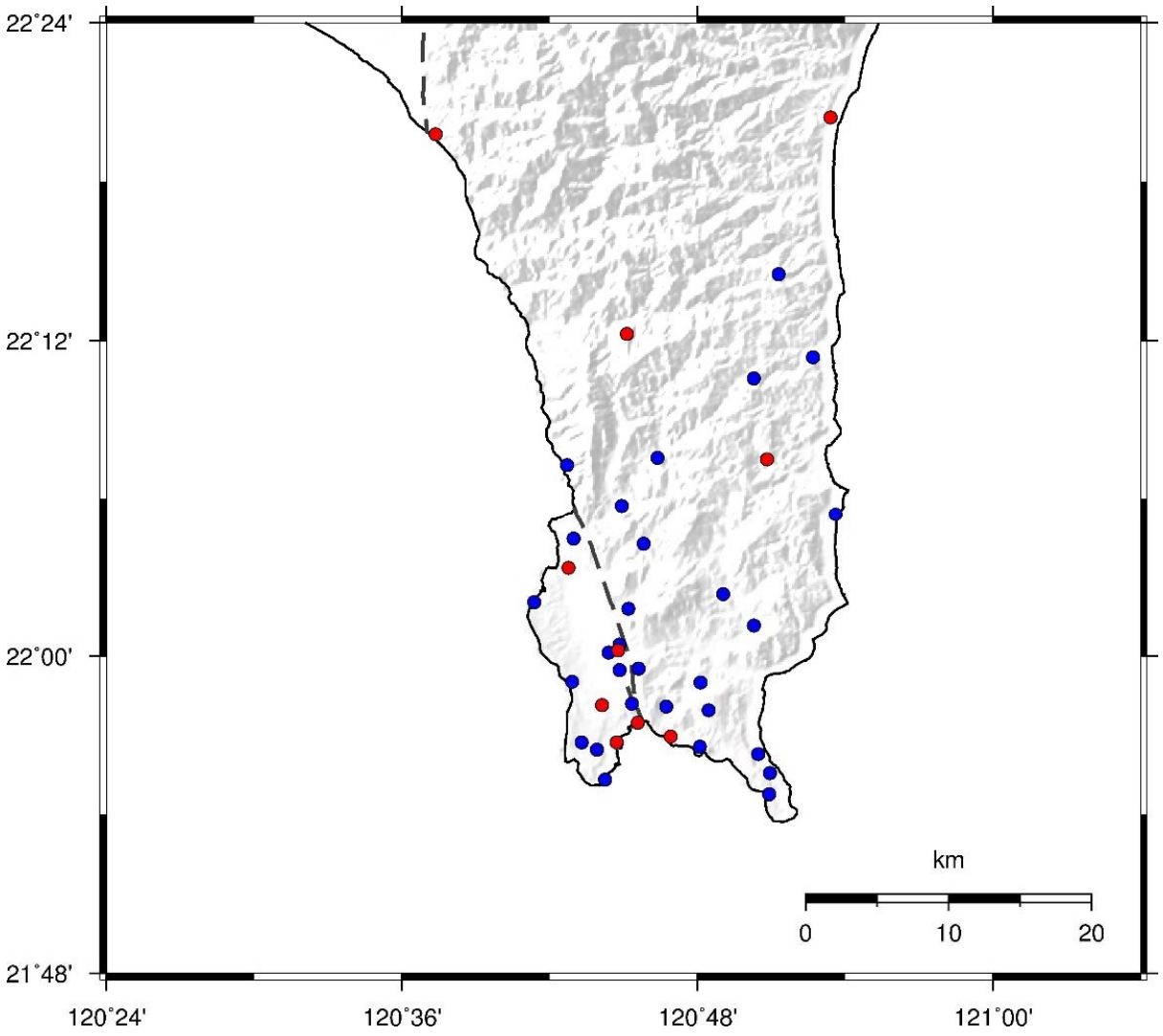


圖 8. 34：恆春地區 GNSS 連續及移動站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 34: GNSS distribution in Hengchun area. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

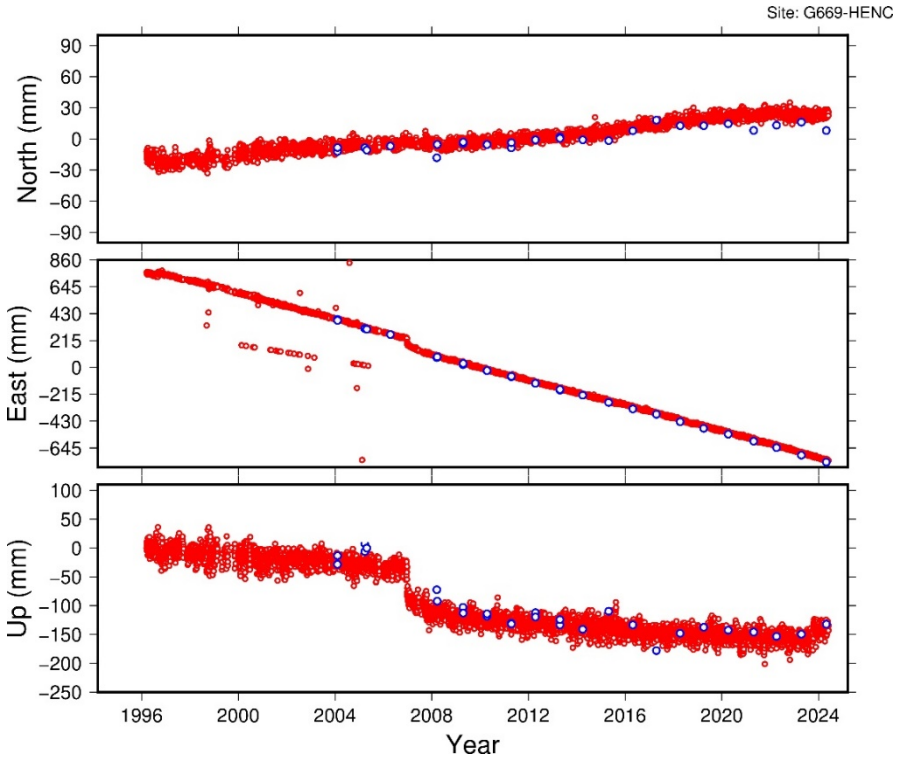


圖 8. 35：移動站 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 35: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G669 (blue circles) and continuous GNSS station HENC (red circles).

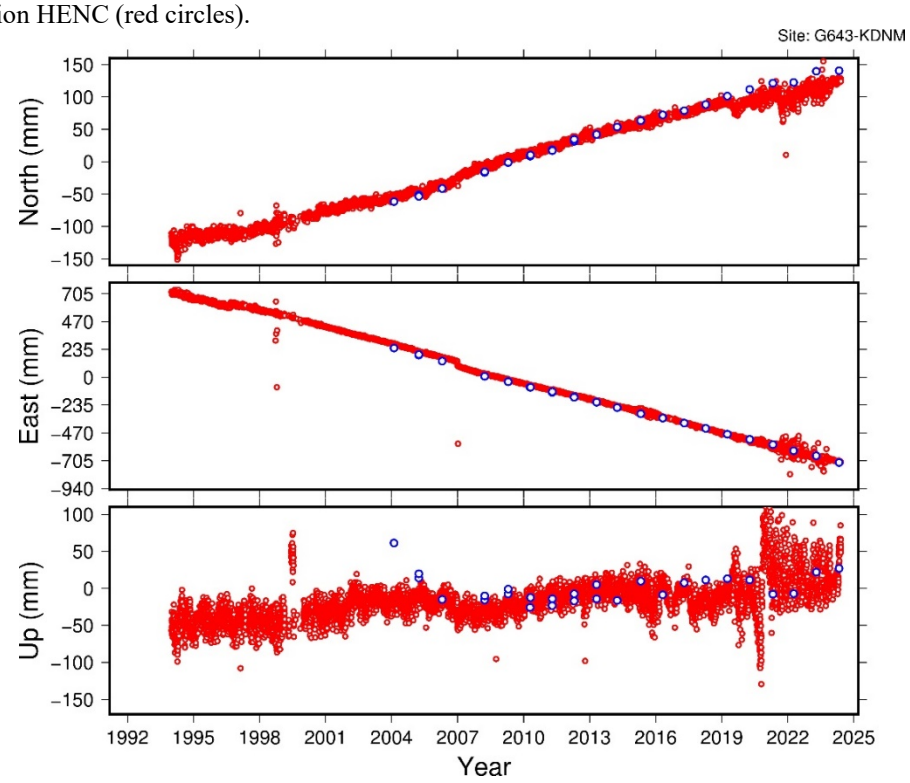


圖 8. 36：移動站 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 36: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G643 (blue circles) and continuous GNSS station KDNM (red circles).

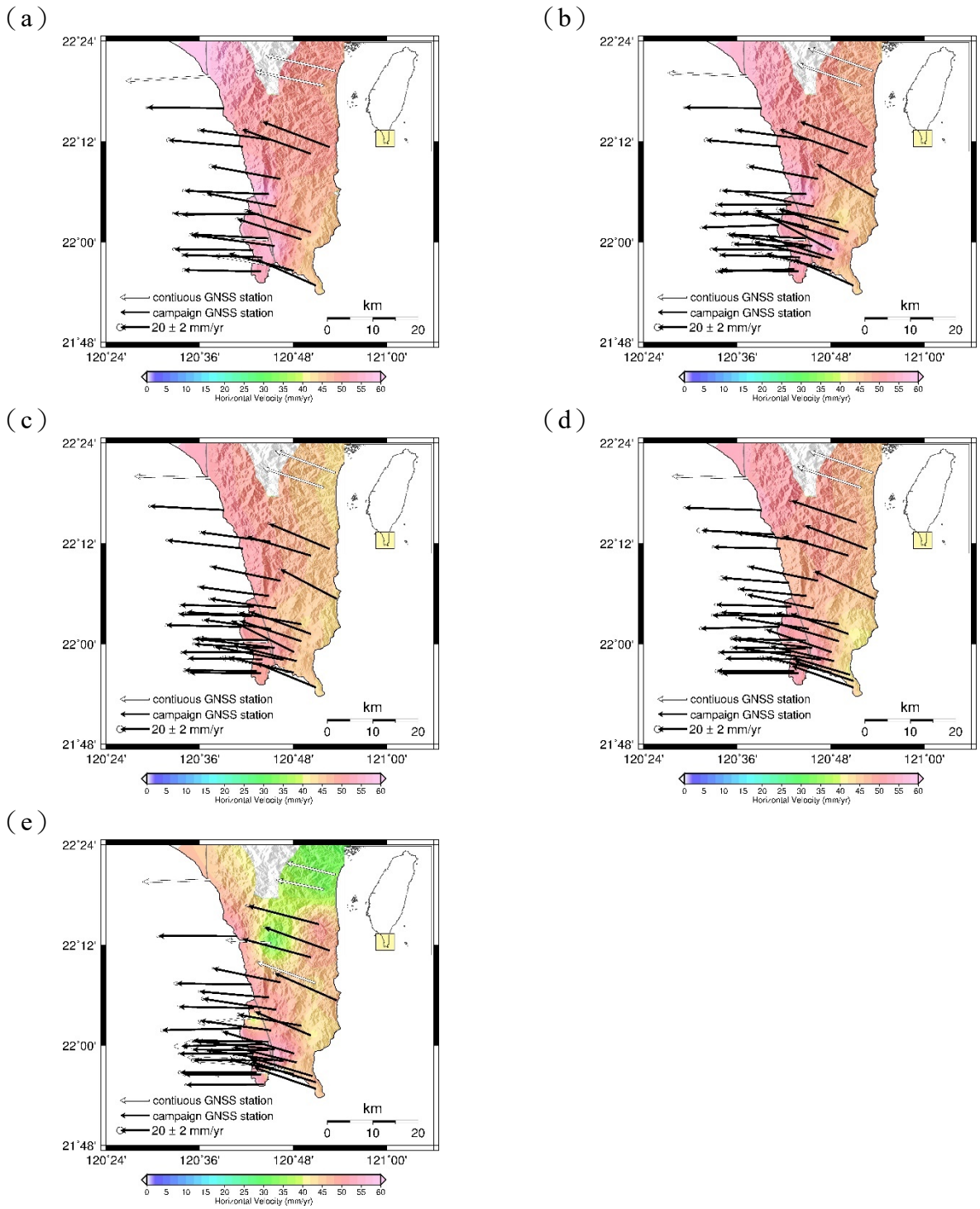


圖 8. 37：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。(a）為 2002 - 2006 年速度場；(b）為震後 2006 - 2010 年速度場；(c）為 2010 - 2016 年速度場；(d）為 2016 - 2022 年速度場；(e）為震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 37: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hengchun area. Figure (a) is the velocity field from 2002-2006, (b) 2006-2010, (c) 2010-2016, (d) 2016-2022, (e) 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

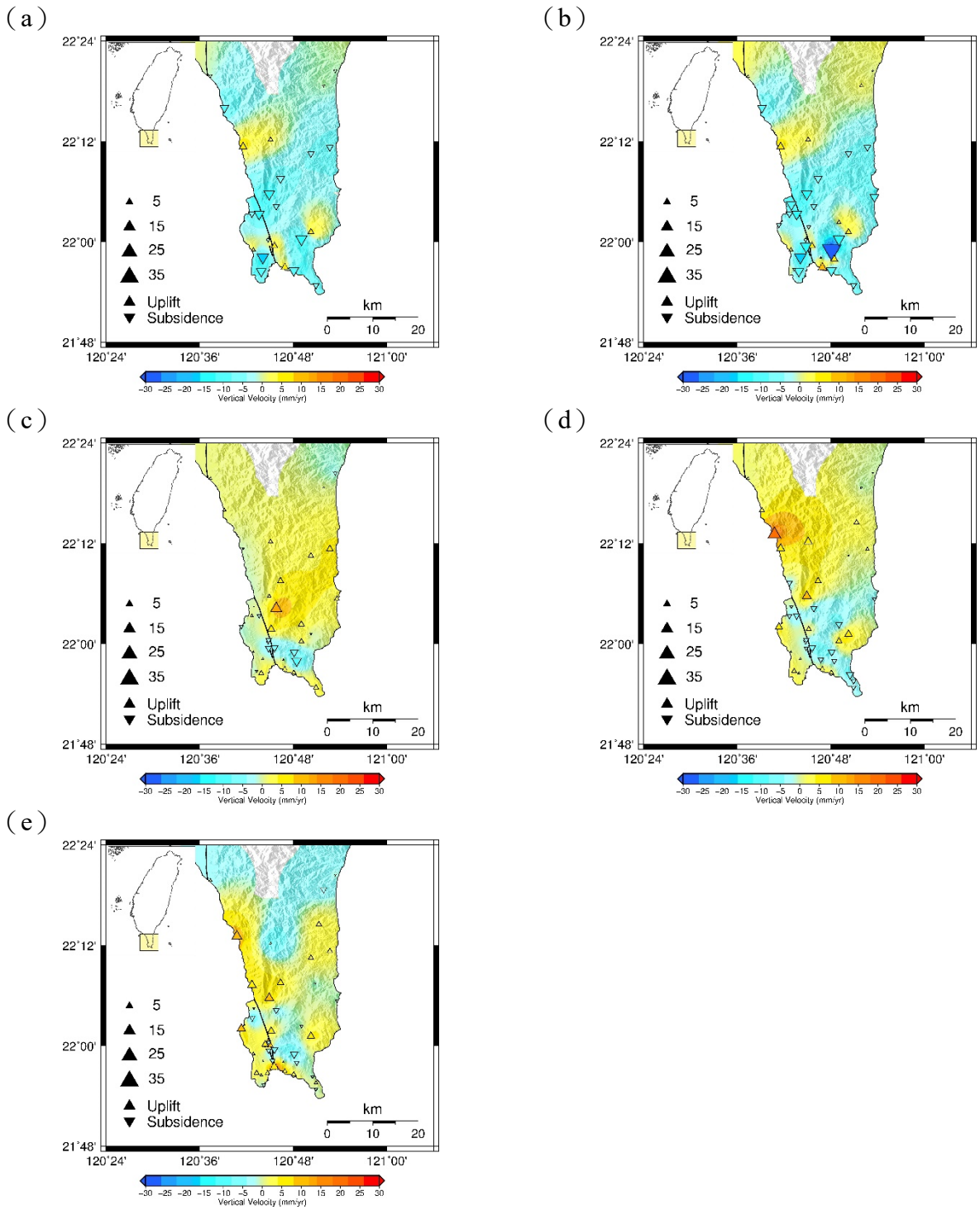


圖 8. 38：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。(a) 為 2002 - 2006 年速度場；(b) 為震後 2006 - 2010 年速度場；(c) 為 2010 - 2016 年速度場；(d) 為 2016 - 2022 年速度場；(e) 為震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 38: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hengchun area. Figure (a) is the velocity field from 2002-2006, (b) 2006-2010, (c) 2010-2016, (d) 2016-2022, (e) 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

8-2-3-6 花東地區 GNSS 觀測網

因應 0403 花蓮地震，本年度花東測區的觀測提早至 4 月份進行。本節針對今年已完成測量之花東地區（圖 8.39）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 97 個站點施測與分析。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

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 8.40、圖 8.41)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GE57 及連續站 FLNM（圖 8.40）與 GNSS 移動站 GA05 及連續站 KNKO（圖 8.41），藉由移動站與該地區連續站解算結果之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 8.42 和圖 8.43 所示，2013 年之瑞穗地震、2018 年之花連地震與 2022 年的關山−池上地震，改變了本地區速度場。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、2018－2022 年以及 2022－2024 年 4 個時間段來分別估算速度場。

本區水平速度場位移方向為北偏西，每年位移速度超過 3 公分（圖 8.42）。其中，2002 至 2013 年水平速度量值分布於 13.6 ~ 70.2 mm/yr、2013 至 2018 年速度量值 9.12 ~ 69.8 mm/yr、2018 至 2022 年速度量值 1.4 ~ 83.8 mm/yr、2022 至 2024 年速度量值 1.0 ~ 116.6 mm/yr。

垂直速度場方面(圖 8.43)，在花東縱谷東側的海岸山脈與西側的中央山脈變形機制在北、南段差異顯著（Chen,et al.,2021），海岸山脈南段沉陷較小，北段垂直變形則大致呈現下陷，跨池上斷層的兩側有不同的運動方向，東側約有 10 mm/yr 的抬升速度，而西側約有 10 mm/yr 的沉降速度。此外，2022 年池上地震震後，屬於中央山脈斷層系統其中一段的玉里斷層以東，具顯著的抬升速度。

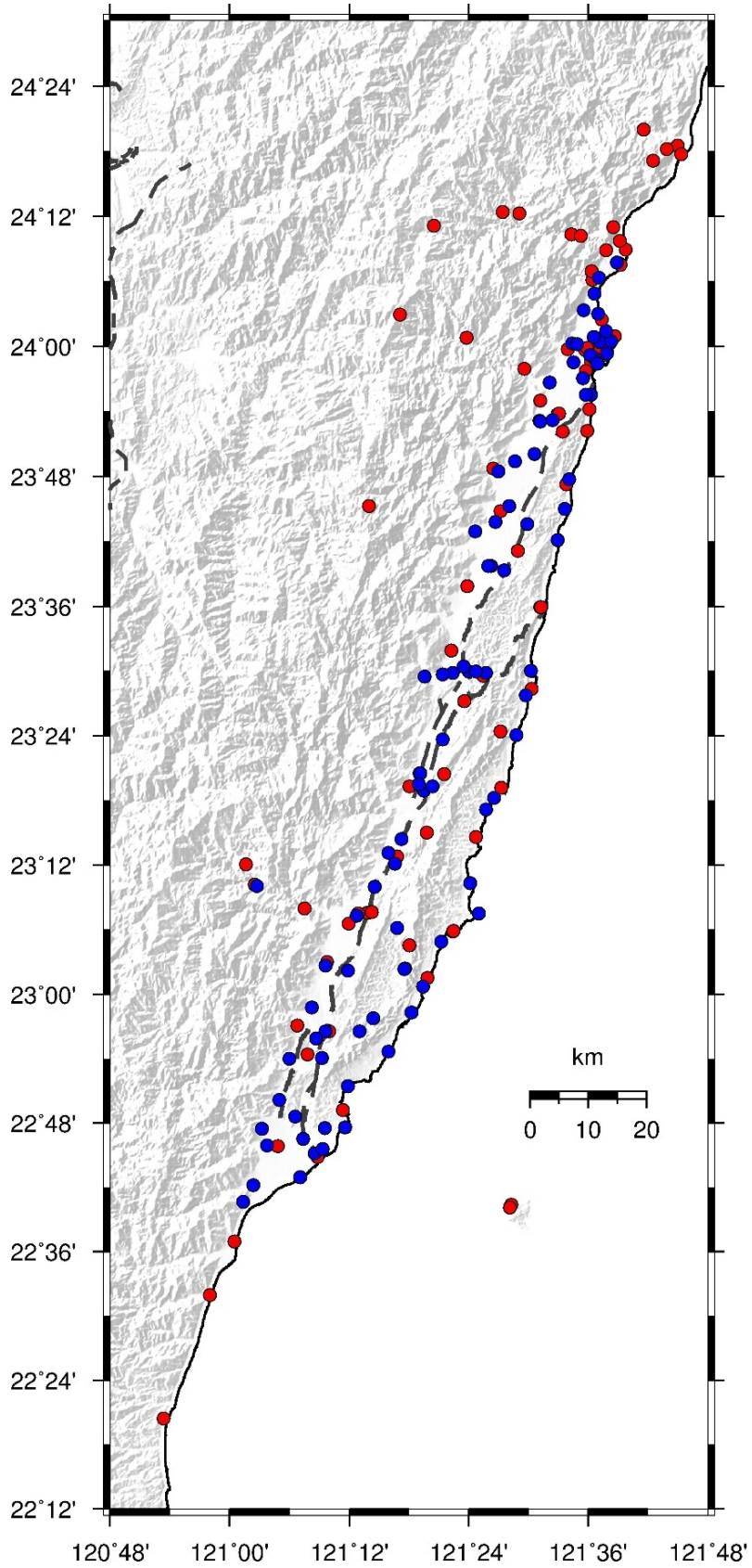


圖 8. 39：花東地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 39: GNSS distribution in Hualien and Taitung areas. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

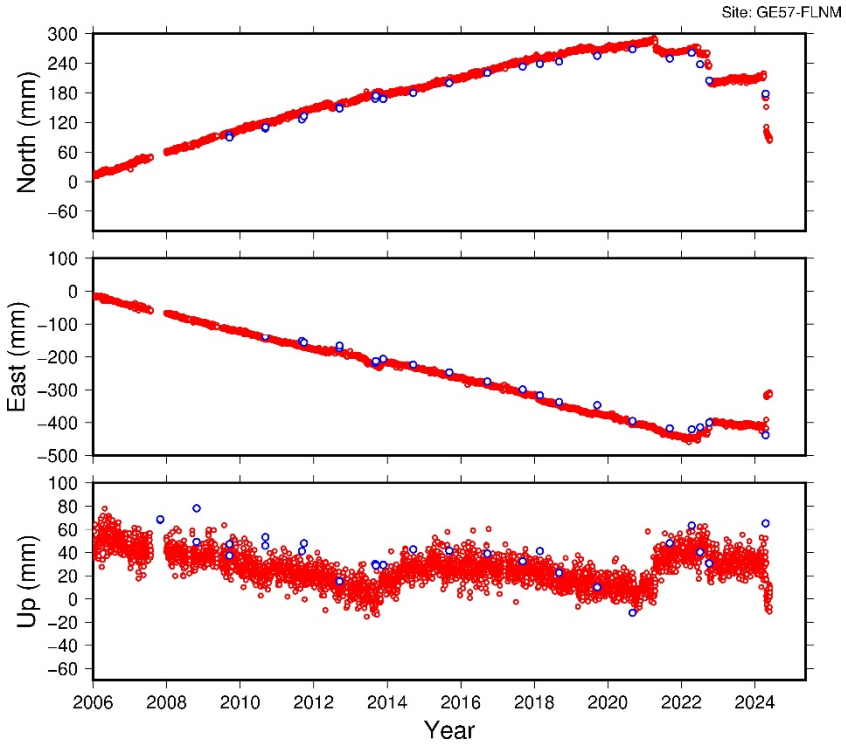


圖 8. 40：移動站 GE57 與連續站 FLNM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 40: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GE57 (blue circles) and continuous GNSS station FLNM (red circles).

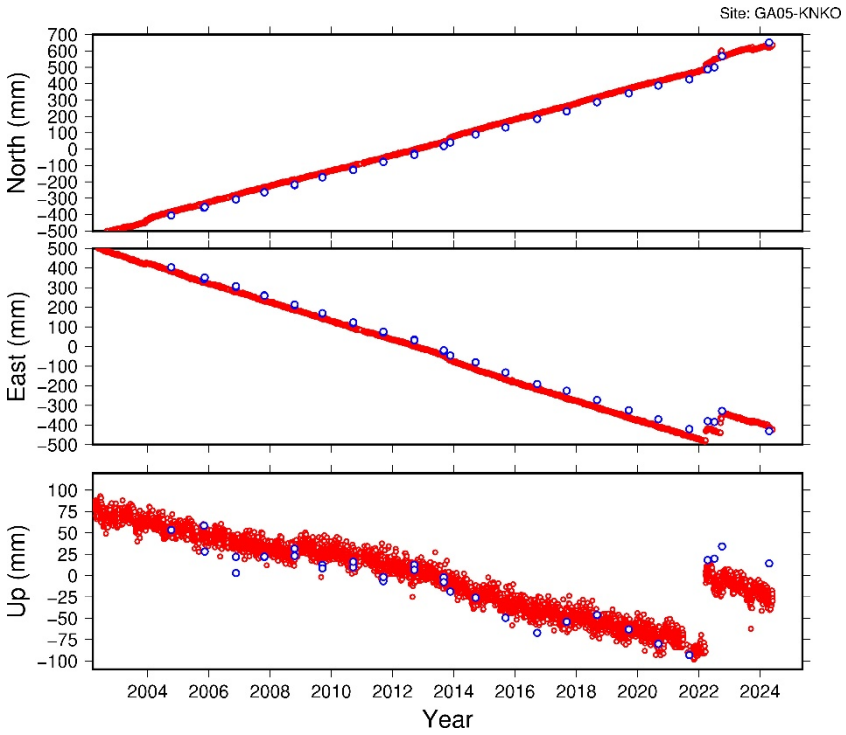


圖 8. 41：移動站 GA05 與連續站 KNKO 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 41: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GA05 (blue circles) and continuous GNSS station KNKO (red circles).

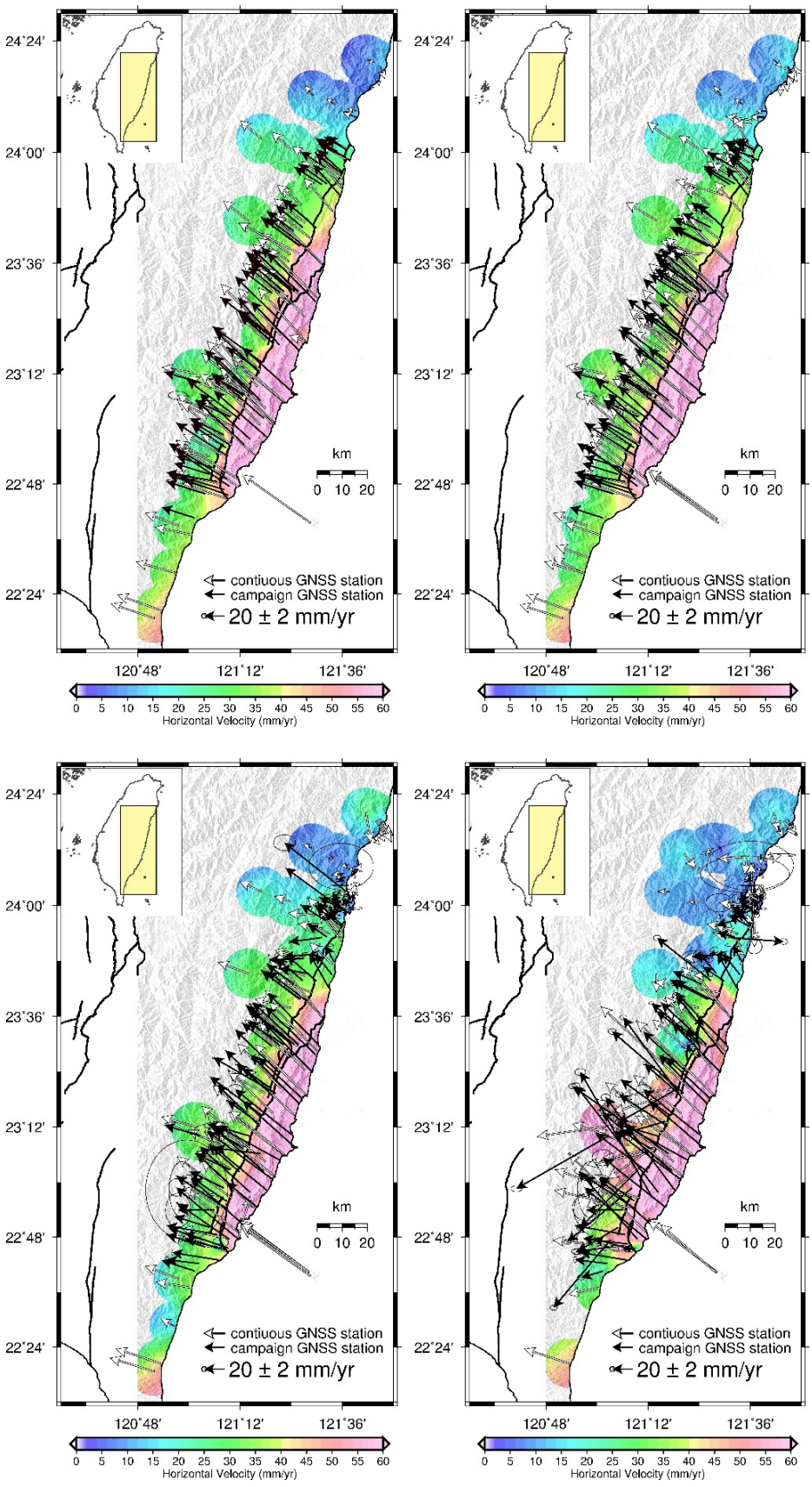


圖 8. 42：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左上圖表示 2002 - 2013 年速度場；右上圖表示震後 2013 - 2018 年速度場；左下圖表示震後 2018 - 2022 年速度場；右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 42: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hualien and Taitung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2013; the top right one is from 2013-2018; the bottom left is from 2018-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

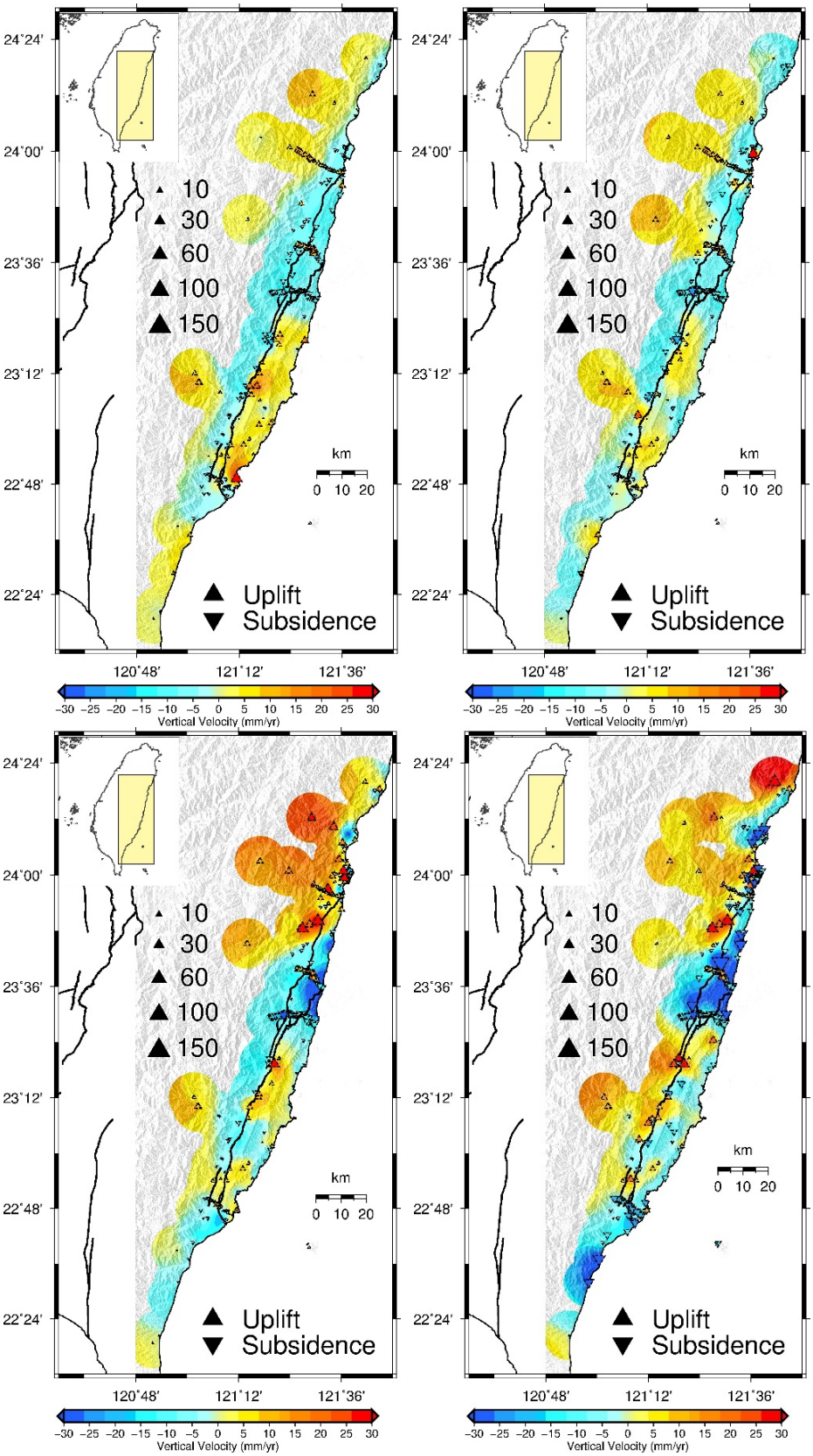


圖 8. 43：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2013 年速度場，右上圖表示震後 2013 - 2018 年速度場，左下圖表示震後 2018 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 43: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hualien and Taitung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2013; the top right one is from 2013-2018; the bottom left is from 2018-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

8-2-3-7 宜蘭地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之宜蘭地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 36 個站點施測與分析（圖 8.44）。透過高時間解析度之 GNSS 連續站每日解算成果資料，可以顯示出測站周圍區域地表運動型態，也就是透過分析 GNSS 連續站資料，取得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後、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，選定站點並比較移動站與該地區連續站解算結果的坐標時間序列。

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 8.45、圖 8.46）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G246 及連續站 SUA2（圖 8.45）與 GNSS 移動站 GE58 及連續站 HAN2（圖 8.46），藉由移動站與該地區連續站解算結果之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。

受 2022 年關山−池上地震的影響，本研究將速度場區分為 2004－2022 年以及 2022－2024 年 2 個時間段分別估算速度場。宜蘭地區各觀測點位之速度場如圖 8.47 和圖 8.48，水平速度場顯示大抵向東南方移動，並呈順時鐘方向旋轉（圖 8.47）；垂直速度場如圖 8.48 所示，2004 至 2024 年在蘭陽平原垂直方向大致為沉陷，其沉陷量由北至南先增加後再減少，往南至南澳亦呈現沉陷。

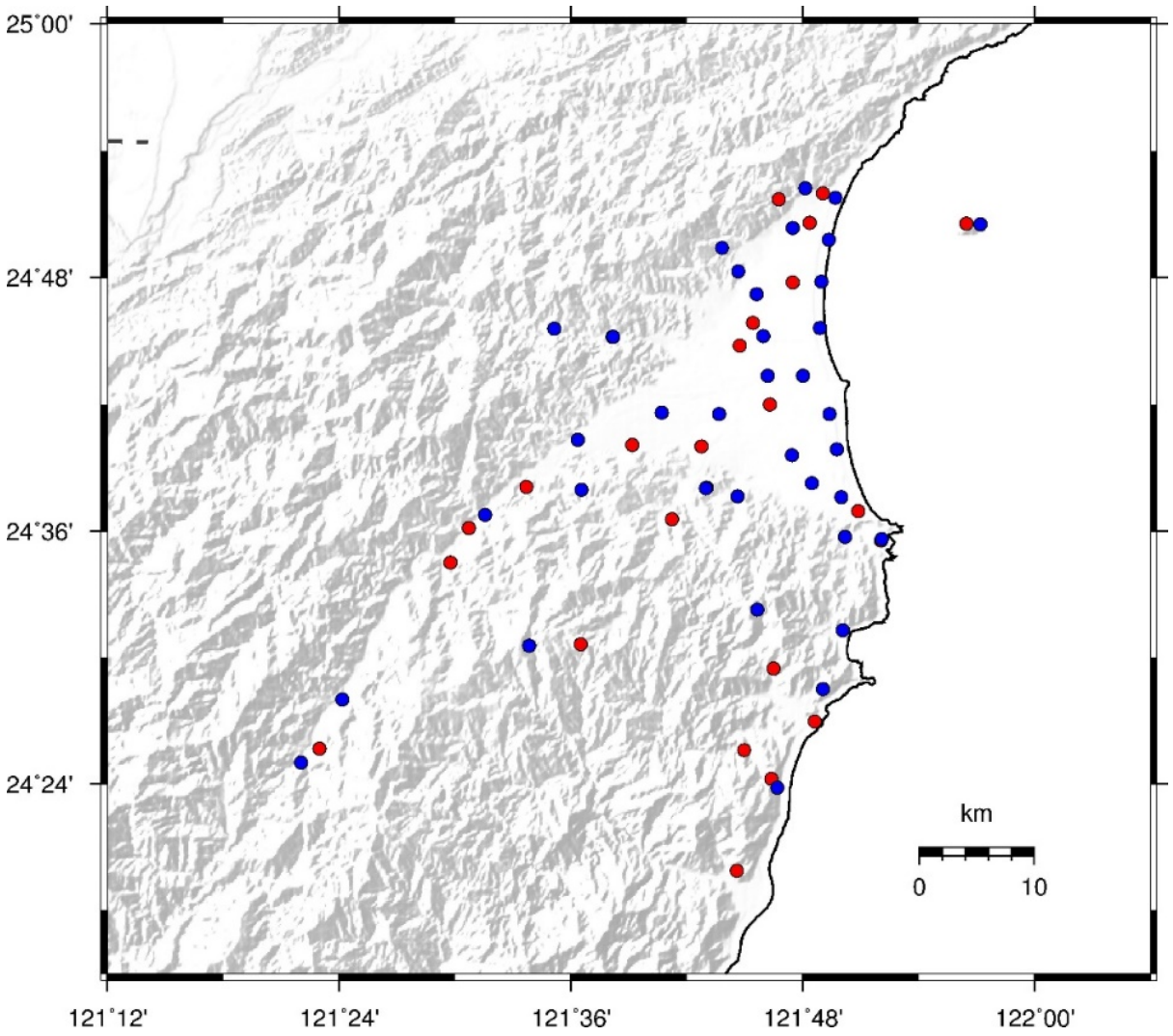


圖 8. 44：宜蘭地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 8. 44: GNSS distribution in Yilan area. Red circles are continuous GNSS stations and blue circles are campaign-mode GNSS stations.

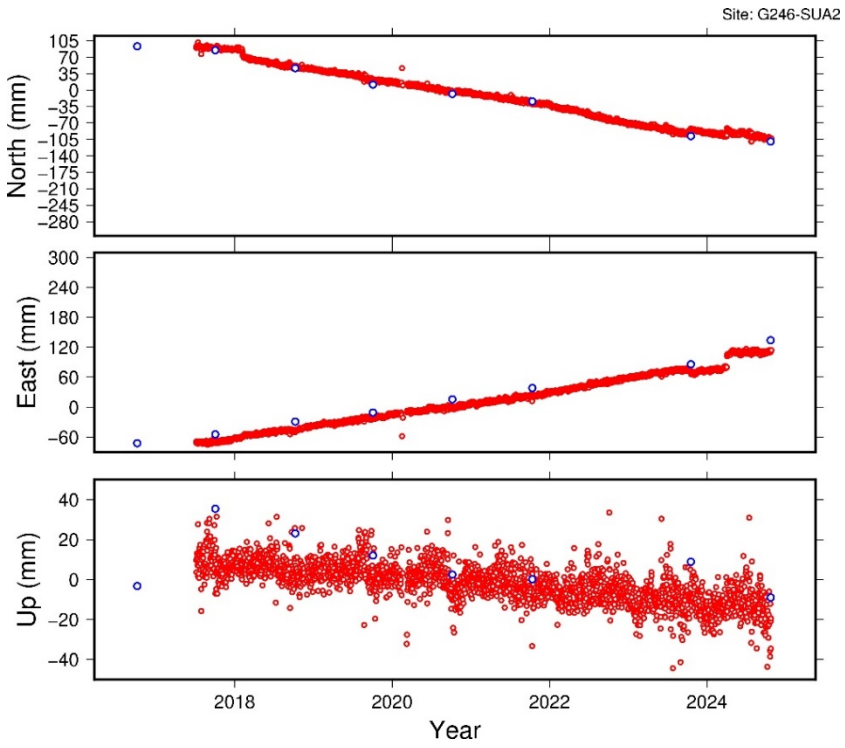


圖 8.45：移動站 G246 與連續站 SUA2 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 45: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G246 (blue circles) and continuous GNSS station SUA2 (red circles).

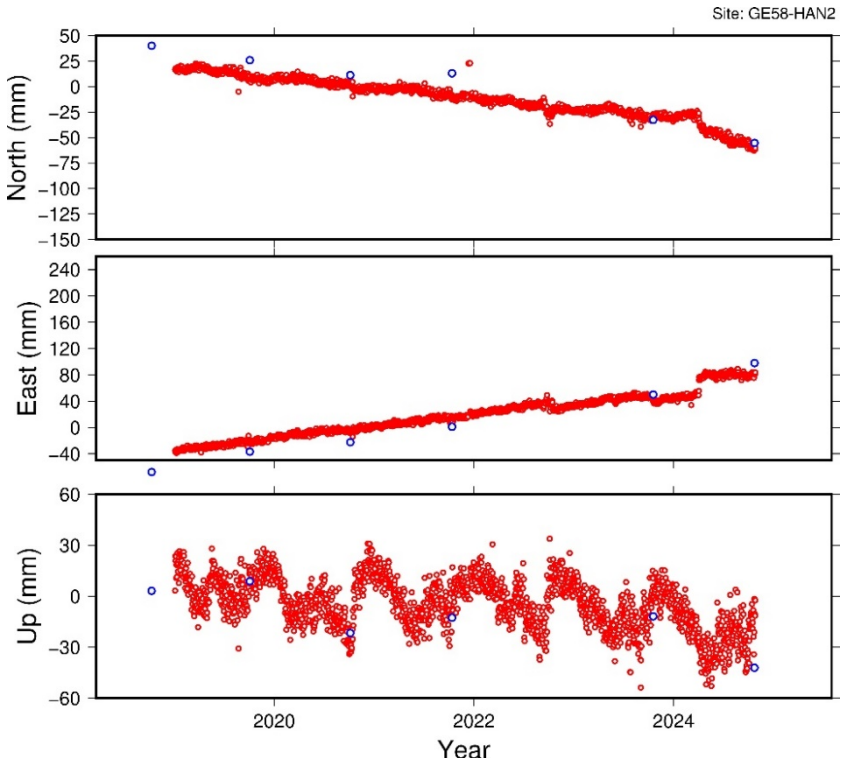


圖 8.46：移動站 GE58 與連續站 HAN2 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 8. 46: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GE58 (blue circles) and continuous GNSS station HAN2 (red circles).

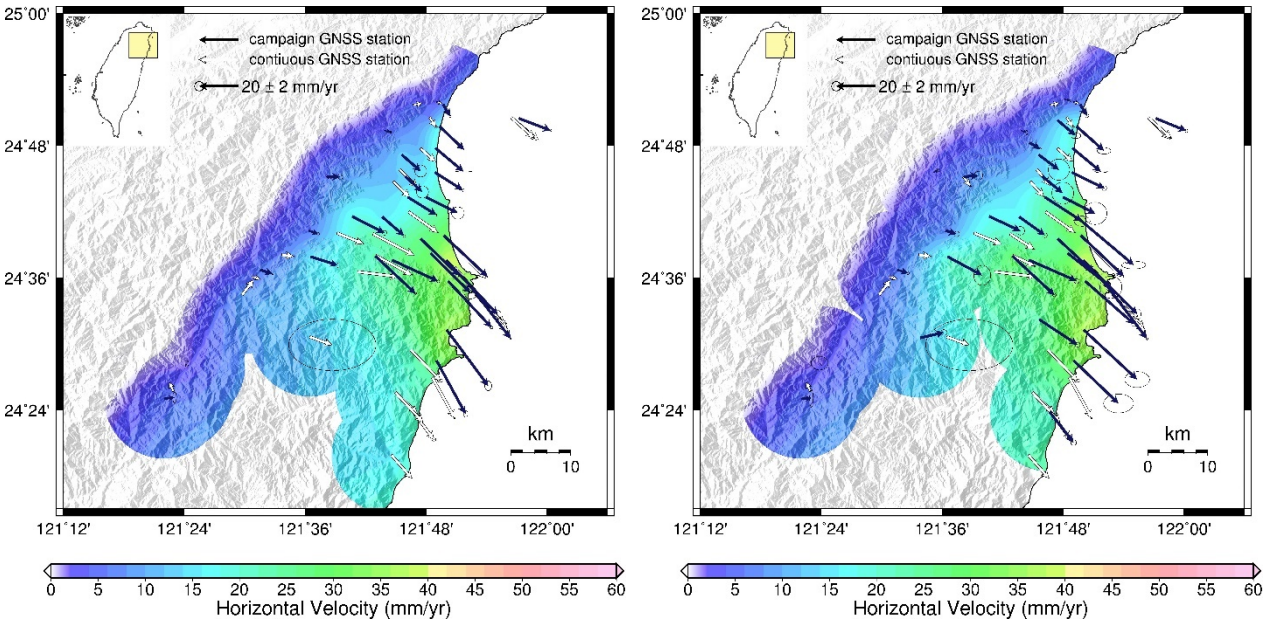


圖 8. 47：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左圖表示 2004 - 2022 年速度場；右圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 8. 47: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Yilan area. The left figure is the velocity field from 2004-2022, and the right one is from 2022-2024. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

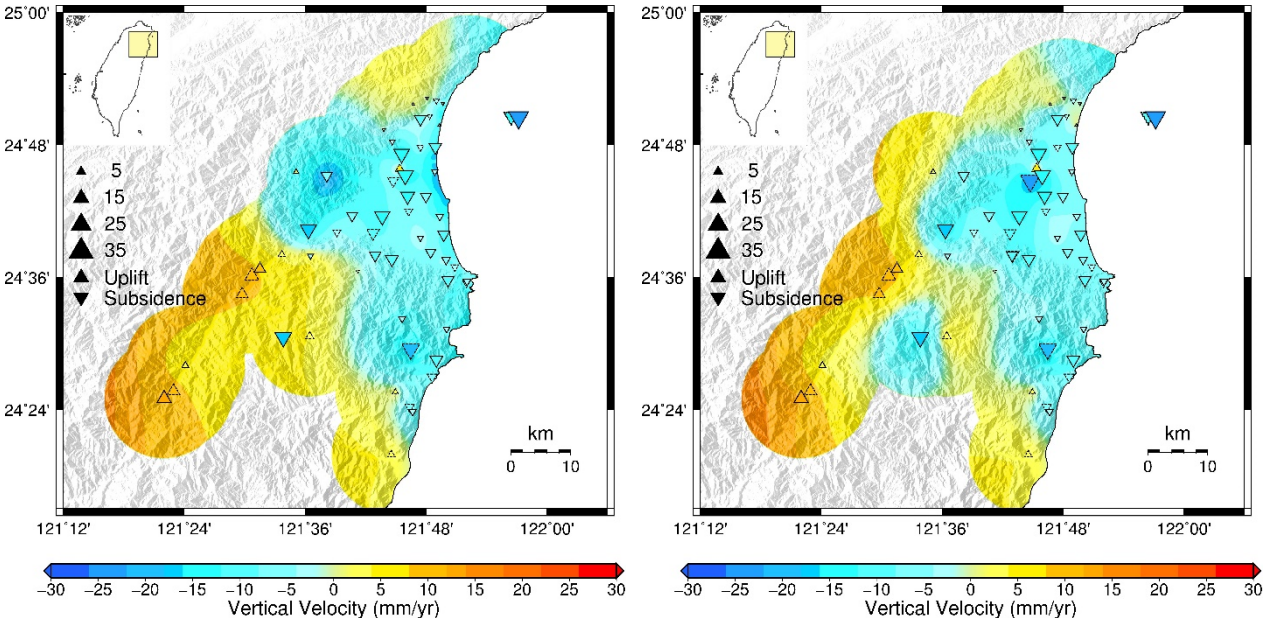


圖 8. 48：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。左圖表示 2004 - 2022 年速度場，右圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速度，冷色系表示沉降速度。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 48: GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Yilan area. The left figure is the velocity field from 2004-2022, and the right one is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

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

2024 年 10 月前所獲得共計 1,116 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 1,102 個測段（圖 8.49，左圖），佔所有測段比例之 98.7 %；考慮與測段距離的關係後（Bomford, 1985），每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 1,097 個測段，佔所有測段比例之 98.2 %（圖 8.49，右圖）。顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

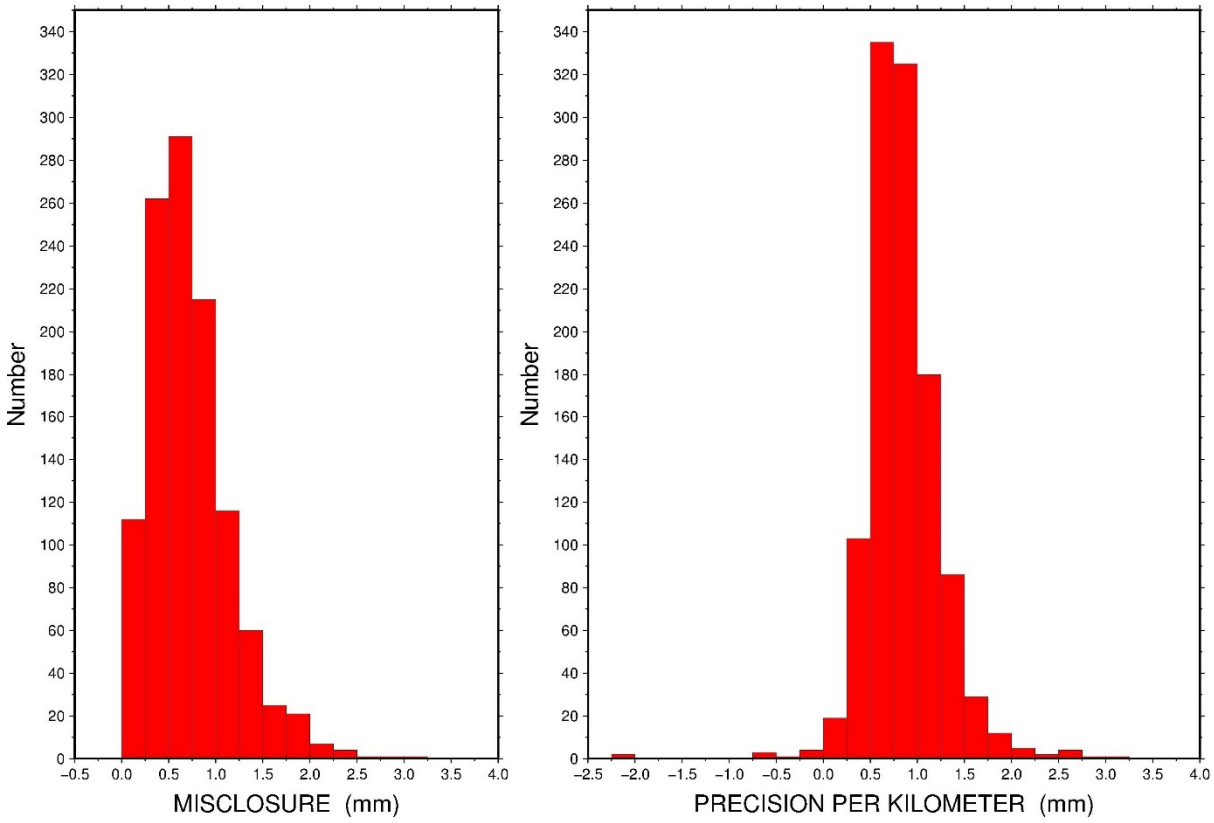


圖 8.49：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a) 左圖為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上；(b) 右圖為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

Figure 8. 49: Diagram of precise leveling data. Red column is the amount of 0.25 mm statistics value. (a) The error of closure, maximum is around 0.5~0.75 mm. (b) Observation accuracy of every kilometer, maximum is around 0.5~0.75 mm.

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 8.50)，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。

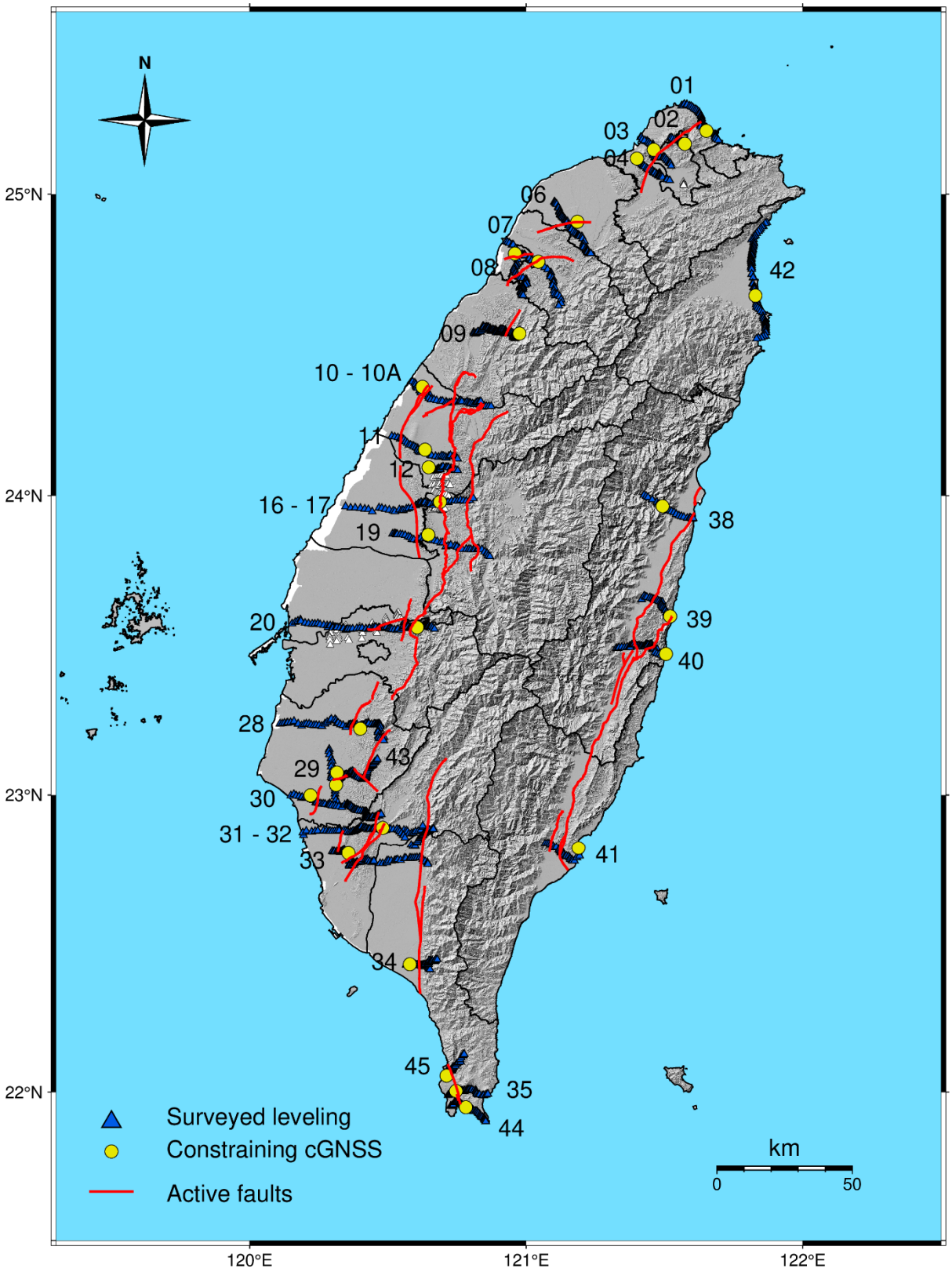


圖 8. 50：精密水準測線與各測線約制之 GNSS 連續站分布圖，黃色點位表示 GNSS 站點位置。

Figure 8. 50: Distribution map of the precise leveling and the GNSS continuous stations which were chose for constraining each surveying line. Yellow circles are the GNSS stations.

8-3-3 北部地區精密水準測線

8-3-3-1 石門至萬里測線

石門至萬里測線（水準測線編號 01）橫跨山腳斷層（圖 8. 52），測線剖面投影長度為 18.3 公里。2004 至 2024 年間共進行 21 次施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GA59（萬里國中）已損毀，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS09 之垂直速度（-0.015 mm/yr）作為約制，自 2005 年年以來校正 2027 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 8. 51），兩站點相距 0.01 公里。本測線垂直速度均落在 -3.0 至 0.5 mm/yr 之間（圖 8. 52），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。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 53，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

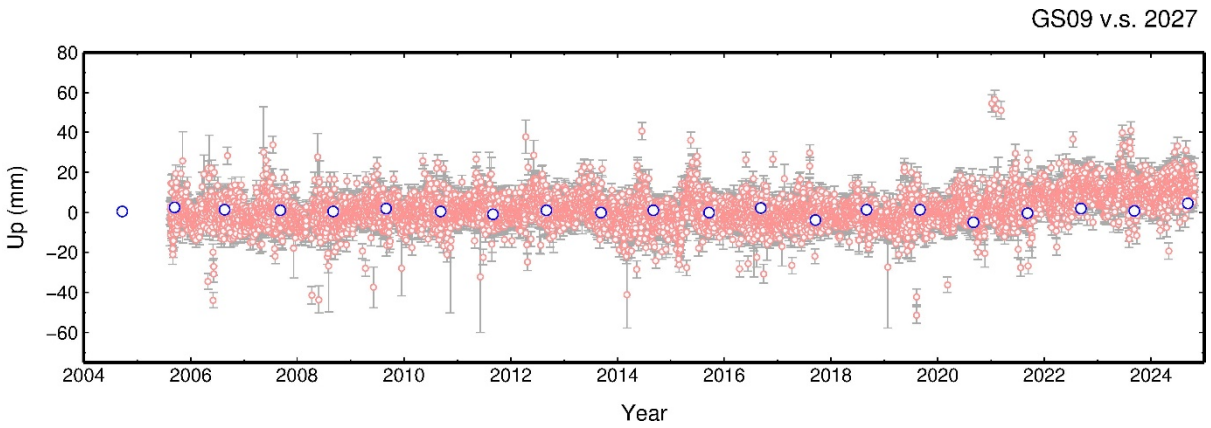


圖 8. 51：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

Figure 8. 51: Time series comparison between Shihmen-Wanli leveling bench mark 2027 and continuous GNSS station GS09. The distance between two stations are 0.01 km.

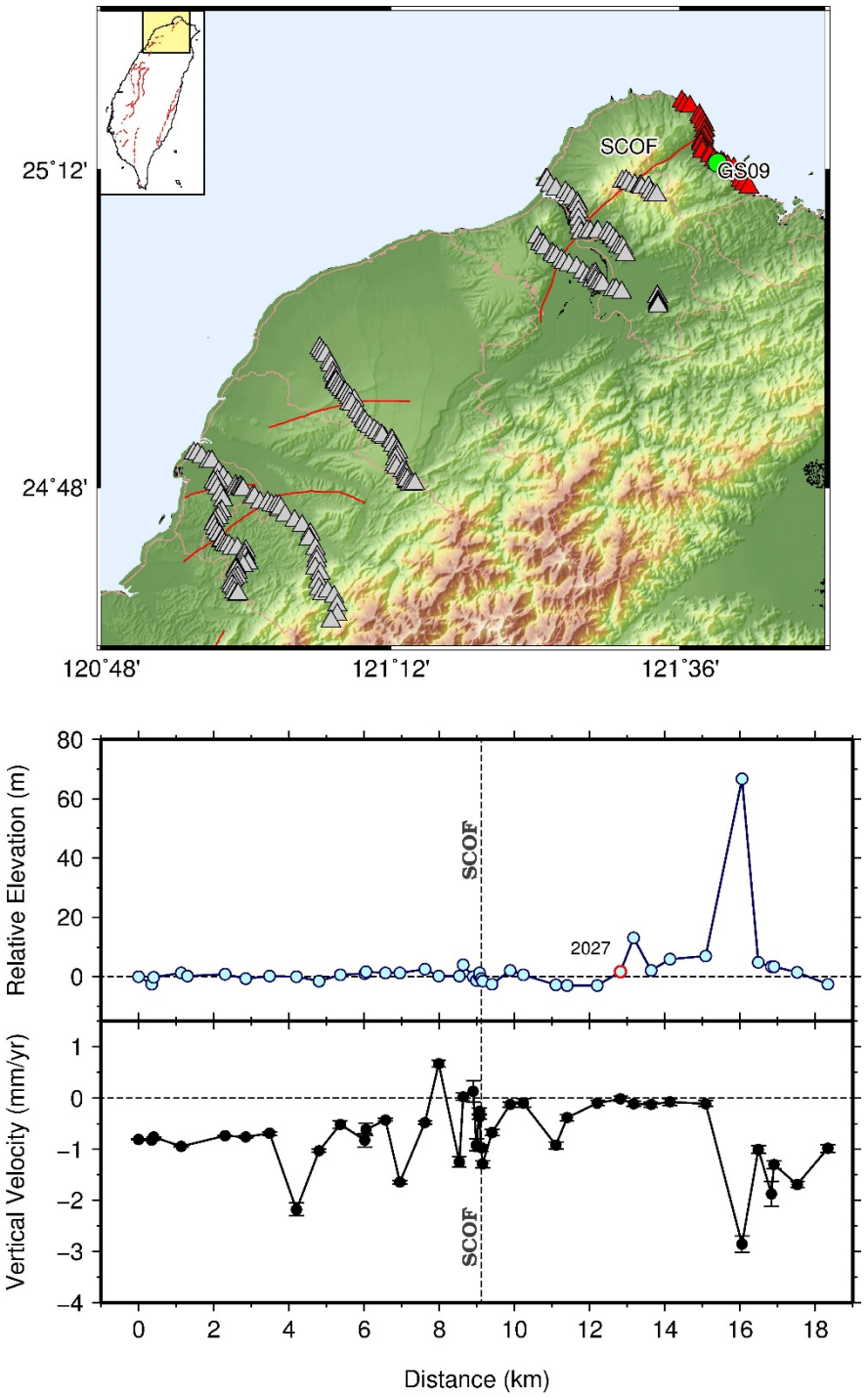


圖 8. 52：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 52: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

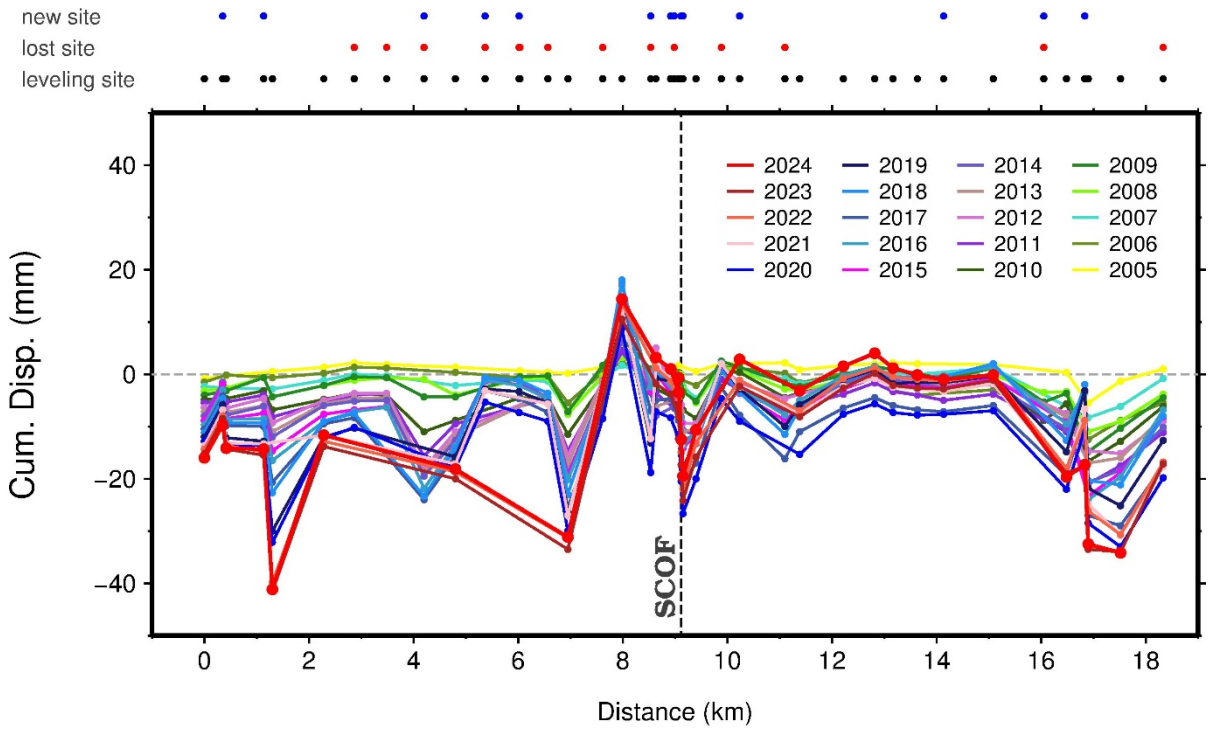


圖 8. 53：台 2_石門至萬里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 53: Cumulative elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-3-2 士林至三芝測線

士林至三芝測線（水準測線編號 02）跨越山腳斷層（圖 8. 55），測線剖面投影長度為 5.0 公里。該測線 2004 至 2024 年間共進行 21 次測量，點位與 2023 年相比無增減。本測線以 GNSS 連續站 YMSM 之垂直速度（-0.548 mm/yr）作為約制，自 2004 年以來校正 GB06 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 8. 54），兩站點相距 0.68 公里。

此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側，整條水準的垂直速度均介於 -4 至 -0.5 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度僅有約 1.0 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化（圖 8. 55），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，仍需要更長時間的監測以及與其他資料來佐證。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 56，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

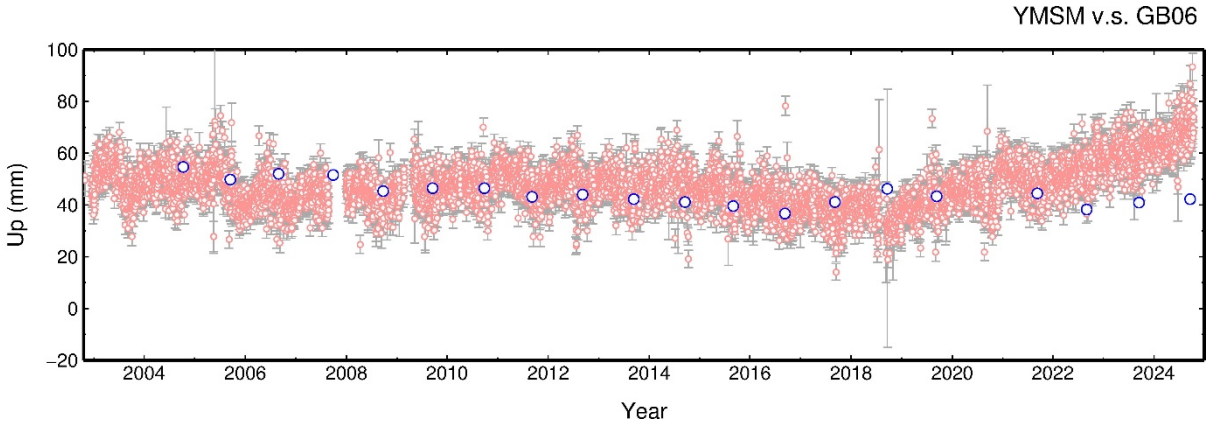


圖 8. 54：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.68 公里。

Figure 8. 54: Time series comparison between Shilin-Sanzhi leveling bench mark GB06 and continuous GNSS station YMSM. The distance between two stations are 0.68 km.

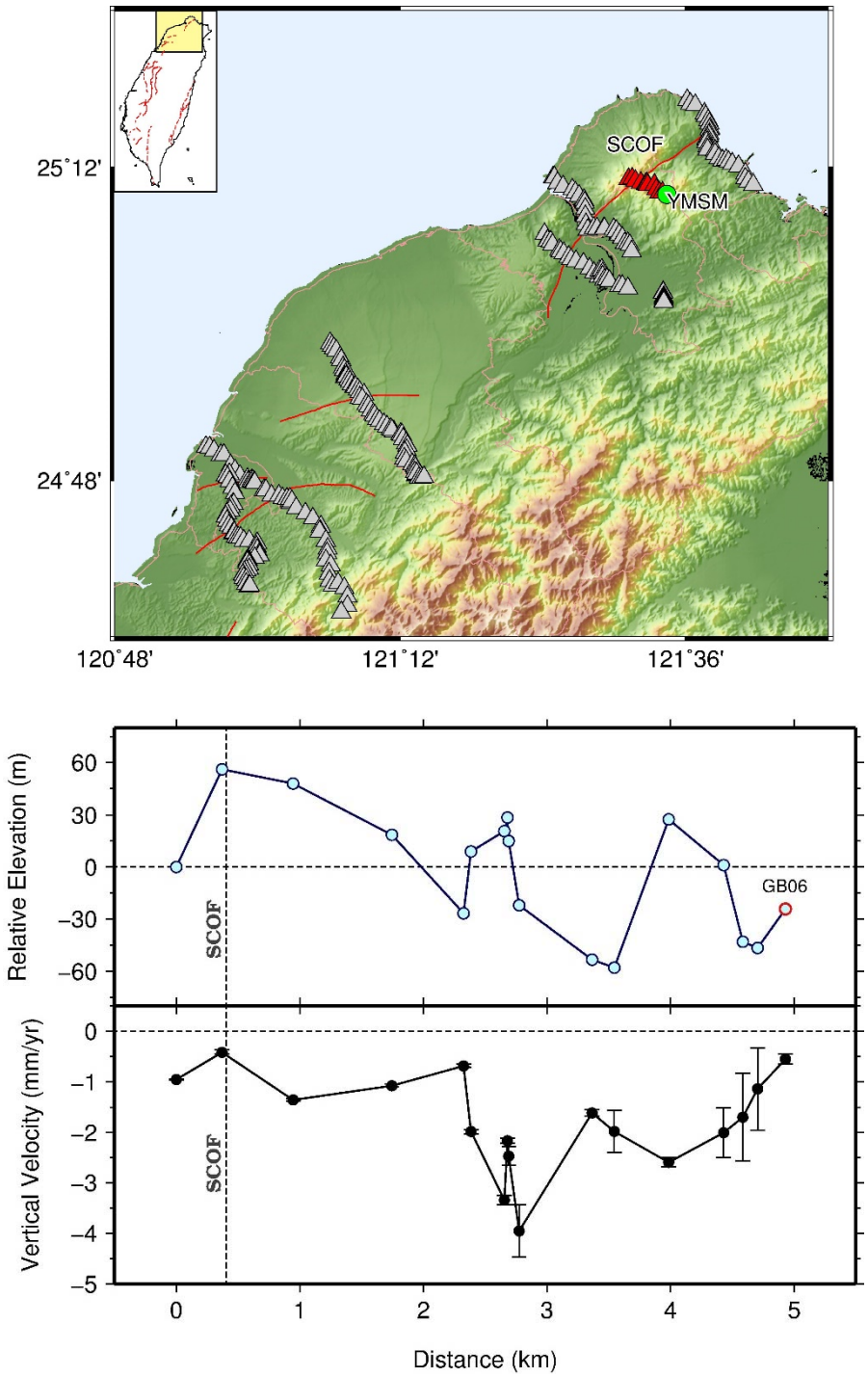


圖 8. 55：士林至三芝測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 55: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile.Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

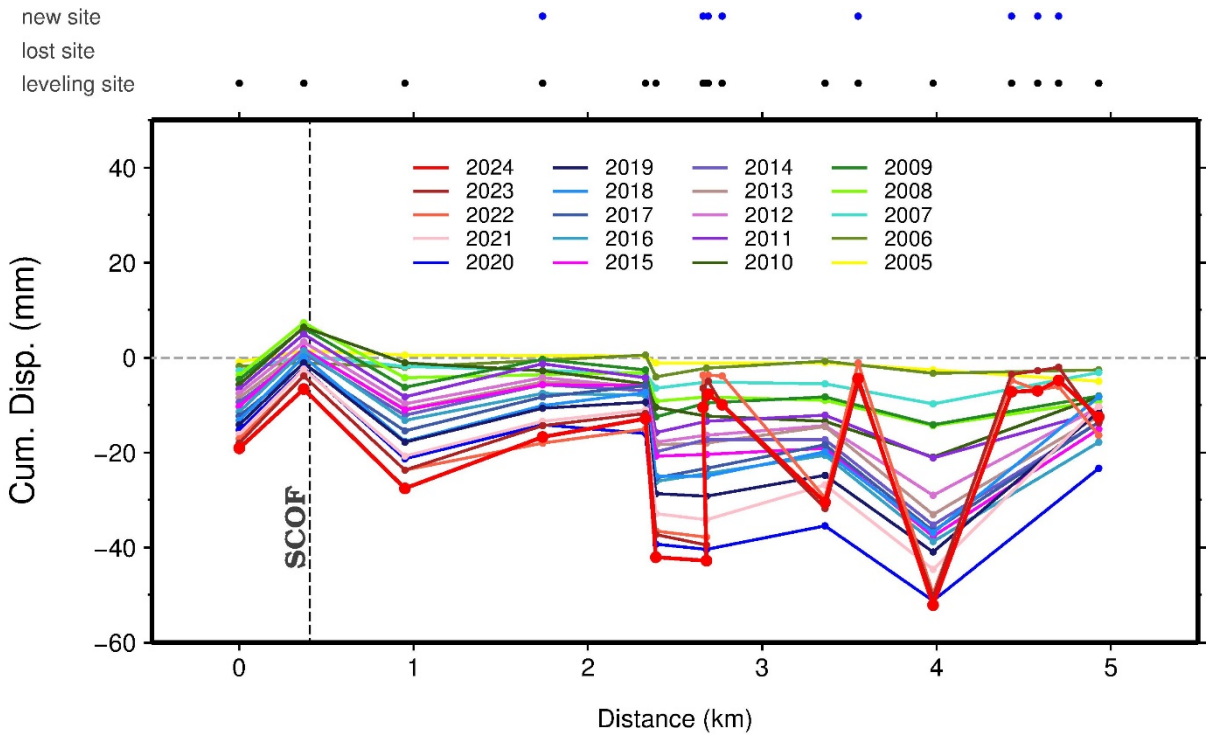


圖 8. 56：士林至三芝測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 56: Cumulative elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-3-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線（水準測線編號 03）橫跨山腳斷層（圖 8. 58），測線剖面投影長度為 15.3 公里。在 2004 至 2024 年間進行共 21 次的施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GA69（竹圍國小）已損毀，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS10 之垂直速度（-6.047 mm/yr）作為約制，自 2005 年以來校正 2007 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 8. 57），兩站點相距 0.93 公里。此測線之垂直速度在跨斷層有達 7.0 mm/yr 的沉降變化量（圖 8. 58）；在斷層東側的垂直速度呈現逐漸增加的趨勢。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 59，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

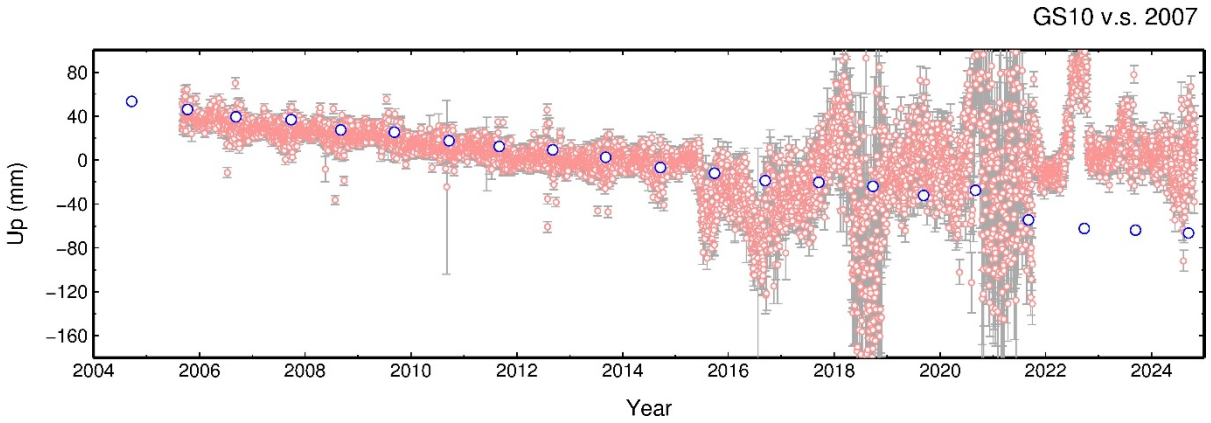


圖 8. 57：淡水至士林水準點位 2007 與連續站 GS10 之時間序列比較，兩者相距 0.93 公里。

Figure 8. 57: Time series comparison between Tamsui-Shihlin leveling bench mark 2007 and continuous GNSS station GS10. The distance between two stations are 0.93 km.

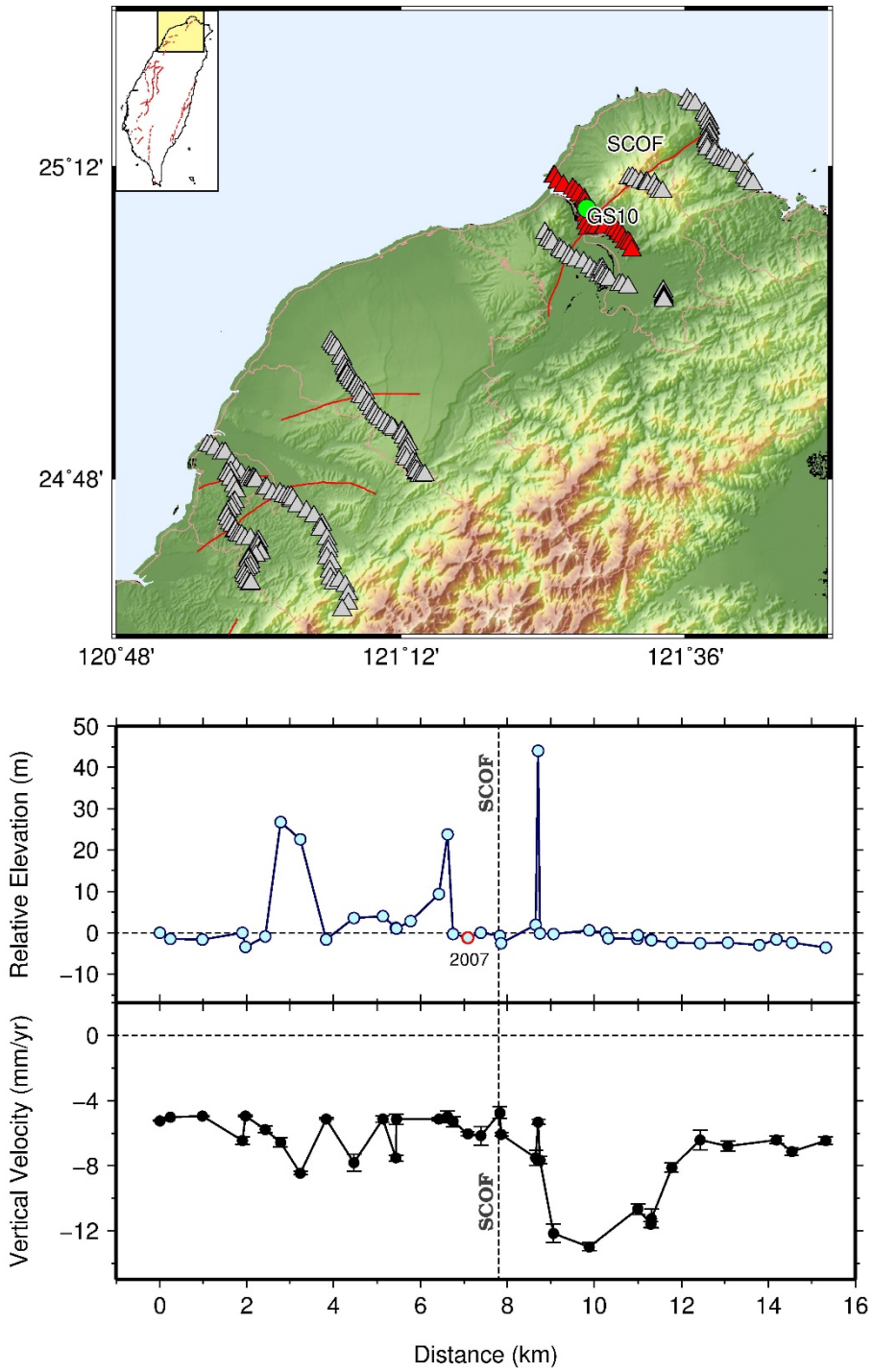


圖 8. 58：淡水至士林測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 58: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

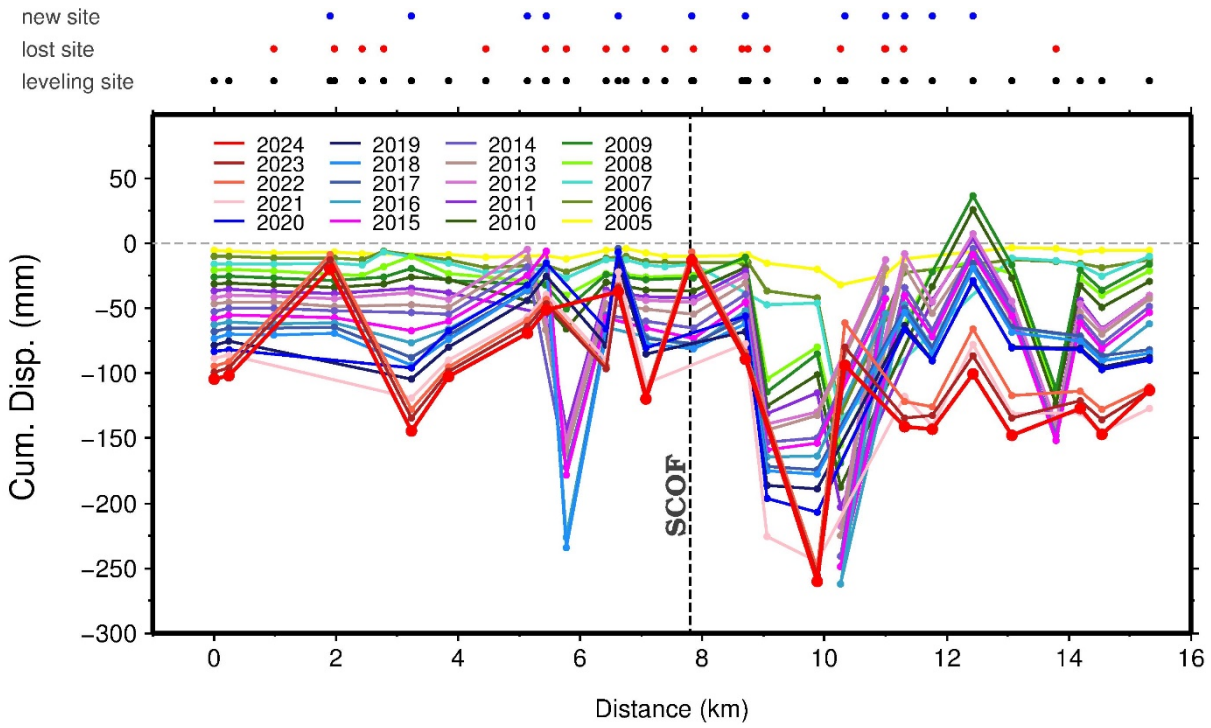


圖 8. 59：淡水至士林測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 59: Cumulative elevation change of the Tamsui-Shihlin leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-3-4 五股至臺北測線

五股至臺北測線（水準測線編號 04）橫跨山腳斷層（圖 8. 61），測線長為 13.6 公里。此水準測線於 2004 至 2024 年間共進行 21 次的施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 1003（興華公園）已損毀，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 WUKU 之垂直速度（-1.573 mm/yr）作為約制，自 2004 年以來校正 GA78 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 8. 60），兩站點相距 1.26 公里。此測線之垂直速度在跨斷層有達 6.0 mm/yr 的沉降變化量（圖 8. 61）；在斷層東側的垂直速度大抵呈現逐漸增加的趨勢。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 62，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

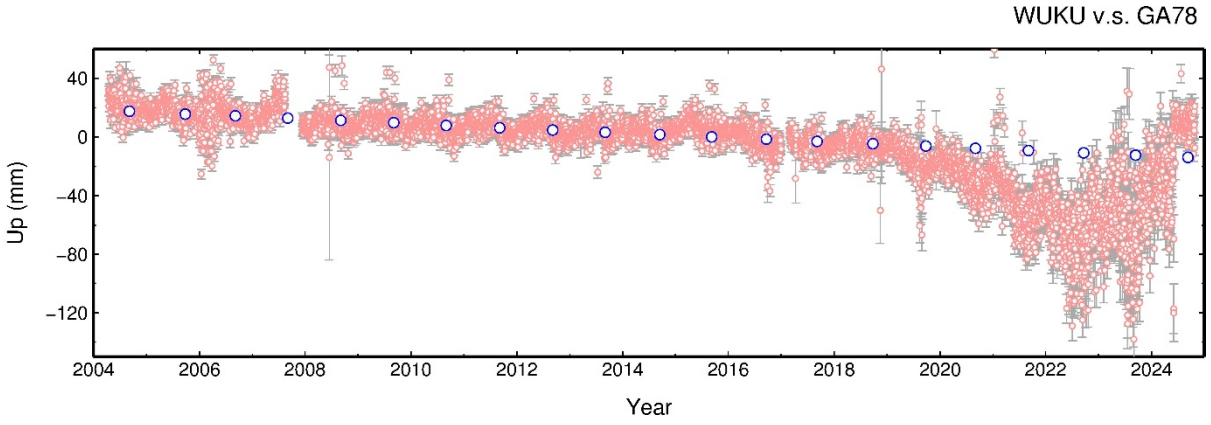


圖 8. 60：五股至臺北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。

Figure 8. 60: Time series comparison between Wugu-Taipei leveling bench mark GA78 and continuous GNSS station WUKU. The distance between two stations are 1.26 km.

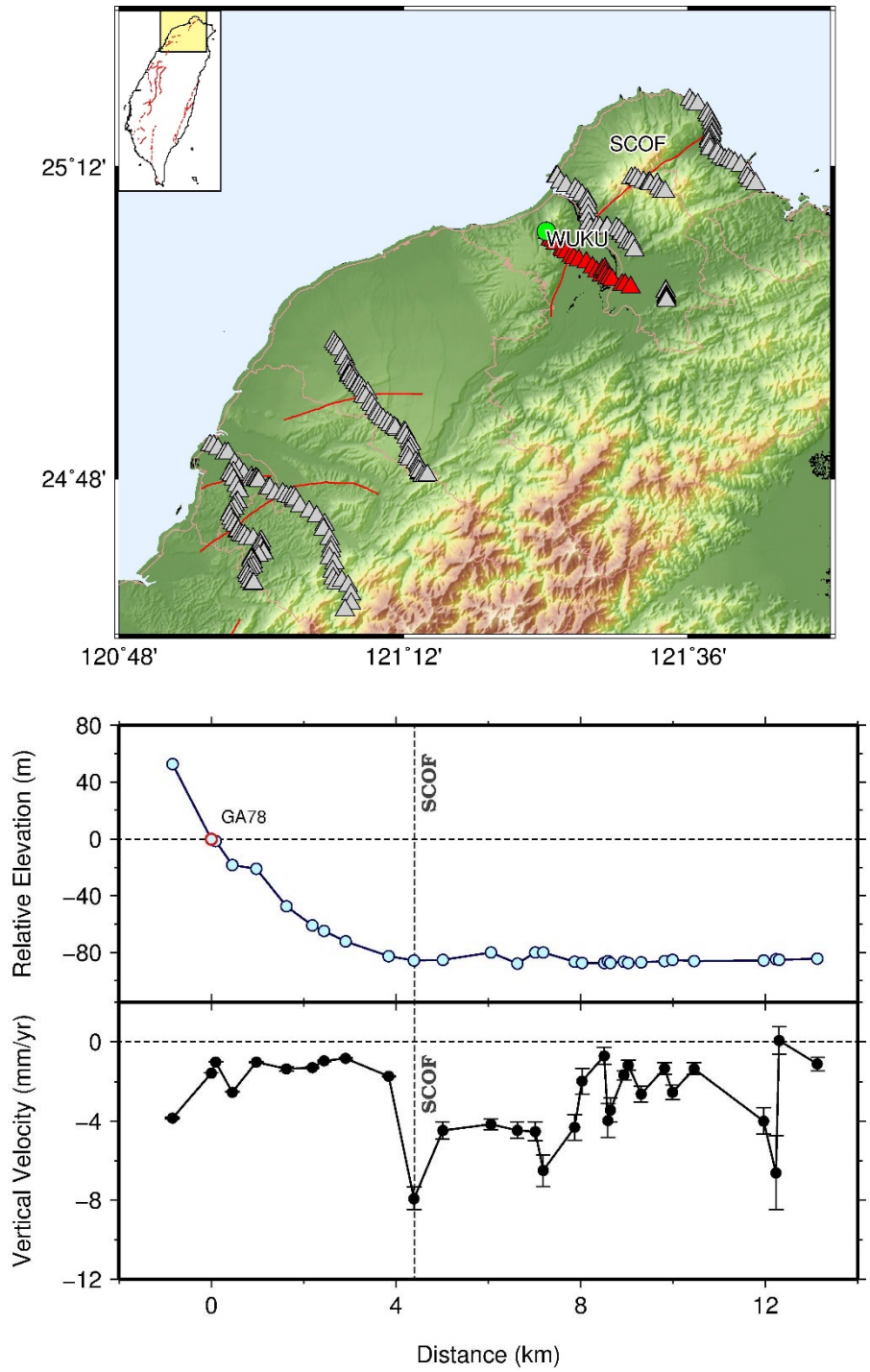


圖 8. 61：五股至臺北測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 61: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

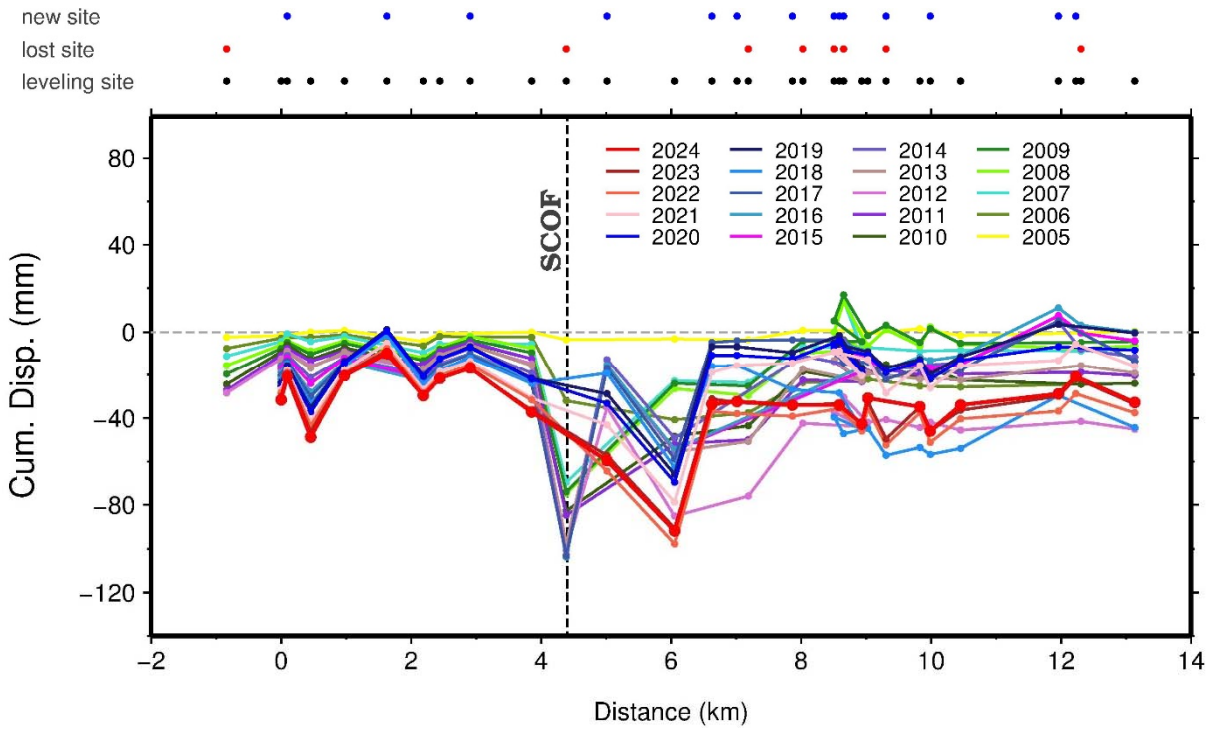


圖 8. 62：五股至臺北測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，SCOF 為山腳斷層。

Figure 8. 62: Cumulative elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. SCOF is Sanchiao fault.

8-3-4 桃竹苗地區精密水準測線

8-3-4-1 新屋至童話世界測線

新屋至童話世界測線（水準測線編號 06）橫跨湖口斷層（圖 8. 64），測線長為 22.4 公里。此水準測線 2004 至 2024 年間共進行 21 次的施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GB47（三洽水）滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 YAME 之垂直速度（2.672 mm/yr）作為約制，自 2004 年以來校正 GB40 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 8. 63），兩站點相距 3.36 公里。

此測線之垂直速度由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 3 ~ 6 mm/yr（圖 8. 64）。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 65，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。累積高程差結果顯示本測線自觀測以來呈現持續的抬升。

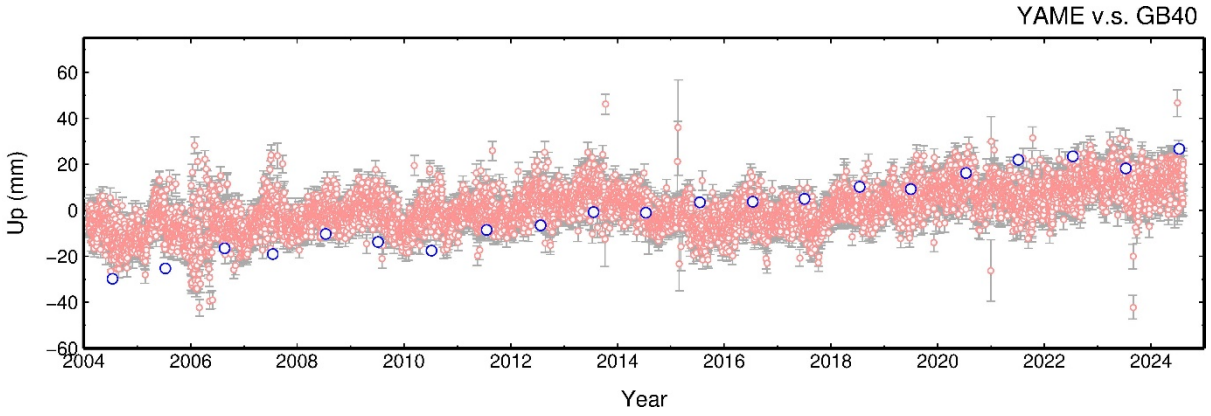


圖 8. 63：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。兩者相距 3.36 公里。

Figure 8. 63: Time series comparison between Xinwu-Guanxi leveling benchmark GB40 and continuous GNSS station YAME. The distance between two stations are 3.36 km.

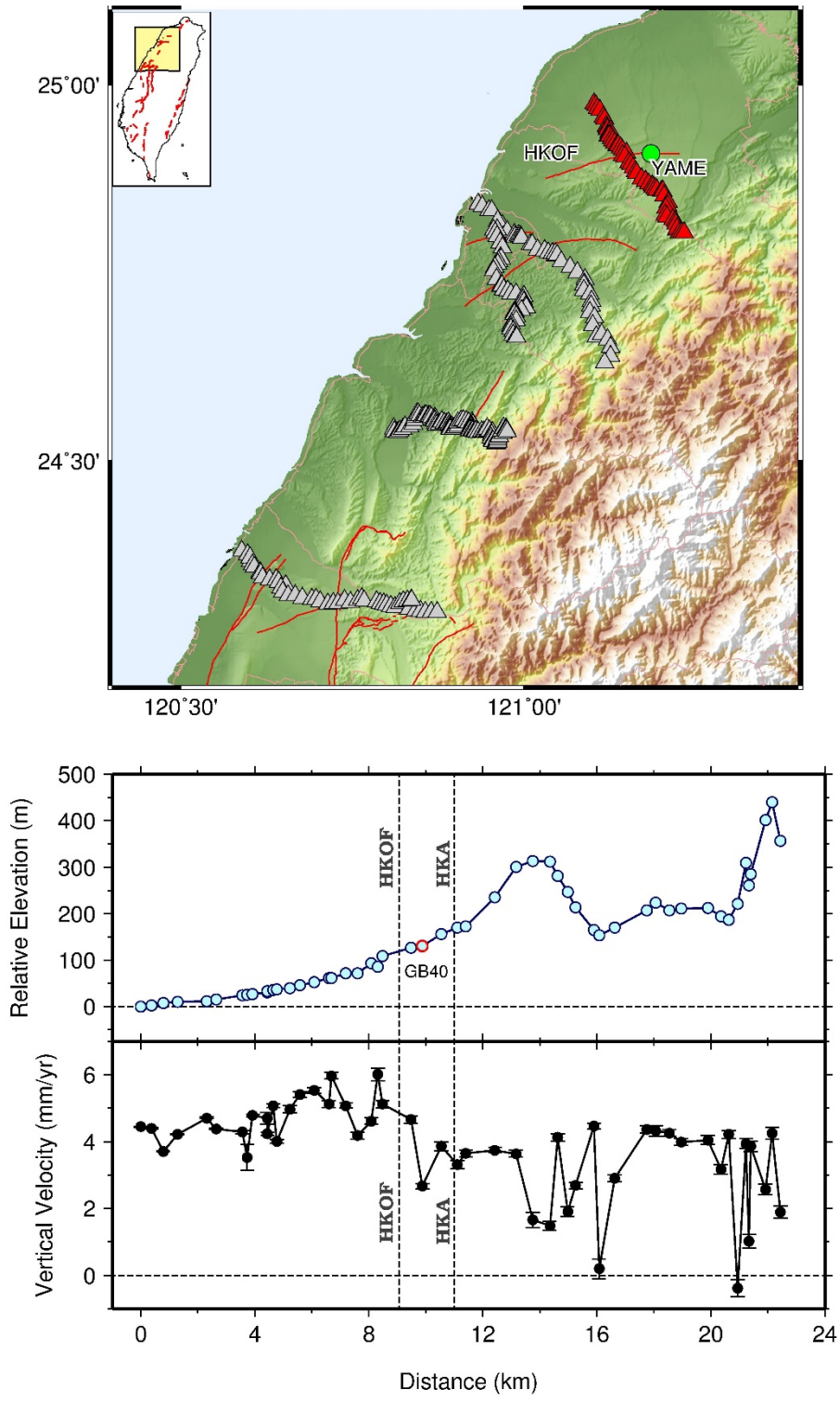


圖 8. 64：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，HKOF 為湖口斷層，HKA 為湖口背斜。

Figure 8. 64: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HKOF is the Hukou fault, and HKA is the Hukou anticline.

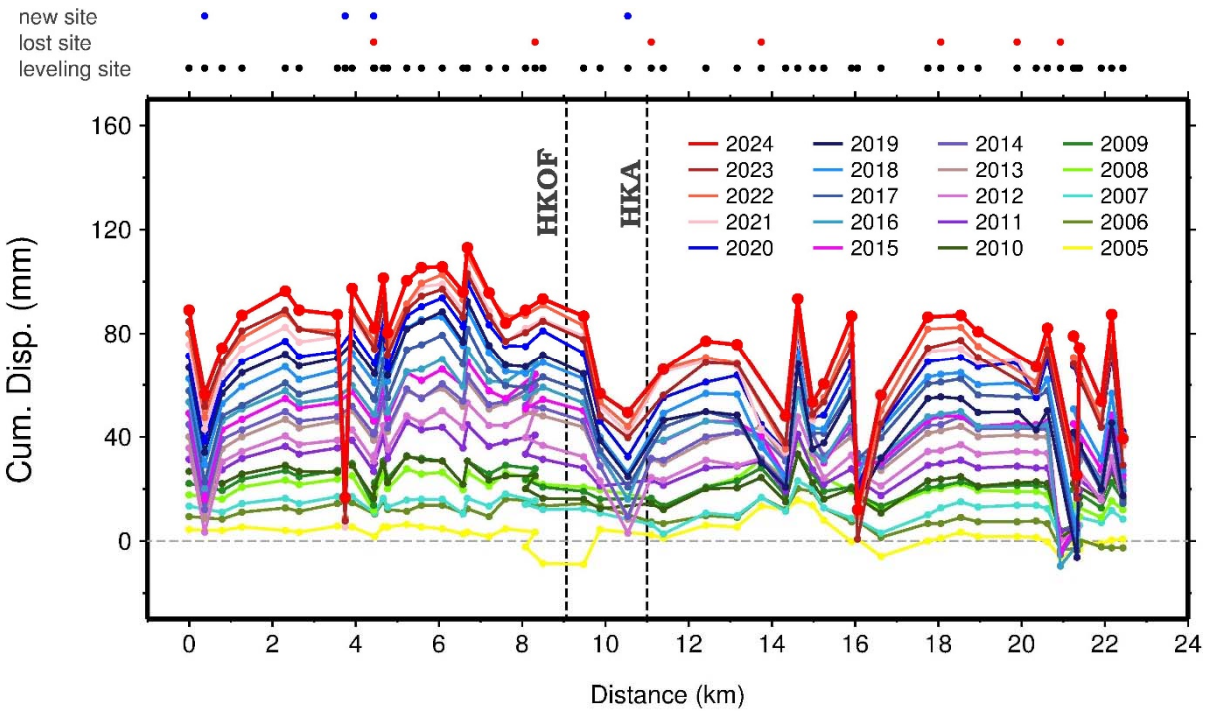


圖 8. 65：新屋至童話世界測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HKOF 為湖口斷層，HKA 為湖口背斜。

Figure 8. 65: Cumulative elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HKOF is the Hukou fault, and HKA is the Hukou anticline.

8-3-4-2 新竹至五峰測線

縣 122_新竹至五峰測線（水準測線編號 07）橫跨新竹斷層及新城斷層（圖 8. 67），測線長為 30.0 公里（投影至剖面的長度）。此測線於 2002 至 2024 年間共進行 21 次的施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 T001N（新竹女中）滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS03 之垂直速度（0.266 mm/yr）作為約制，自 2004 年以來校正 G429 相對於 GNSS 連續站 S01R 之垂直速度（圖 8. 66），兩站點相距 0.83 公里。此測線跨新竹斷層與新城斷層之垂直速度均無顯著變化（圖 8. 67），變化量僅 < 1.0 mm/yr。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 68，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

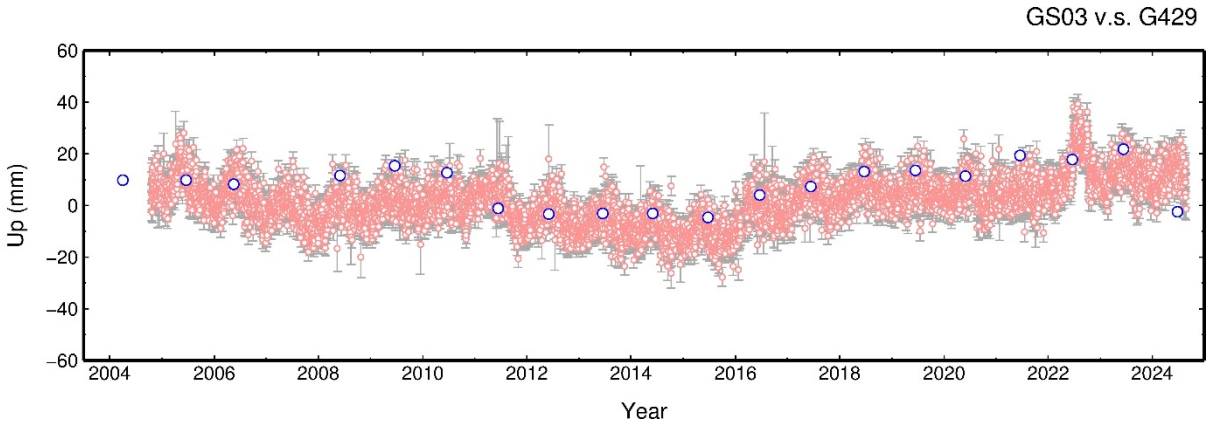


圖 8. 66：新竹至五峰水準點位 G429 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.83 公里。

Figure 8. 66: Time series comparison between Hsinchu-Wufeng leveling benchmark G429 and continuous GNSS station GS03. The distance between two stations are 0.83 km.

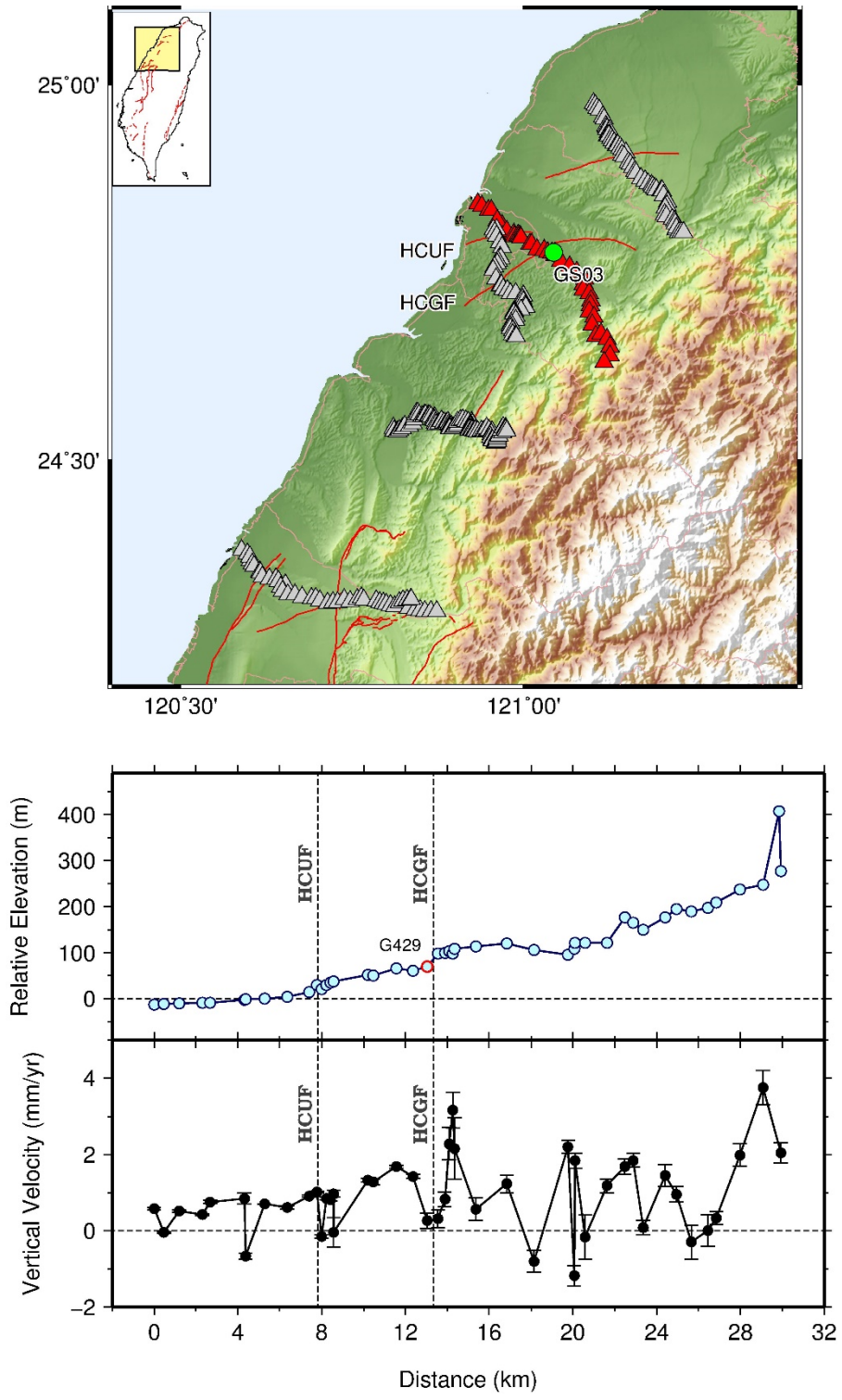


圖 8.67：新竹至五峰測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8. 67: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

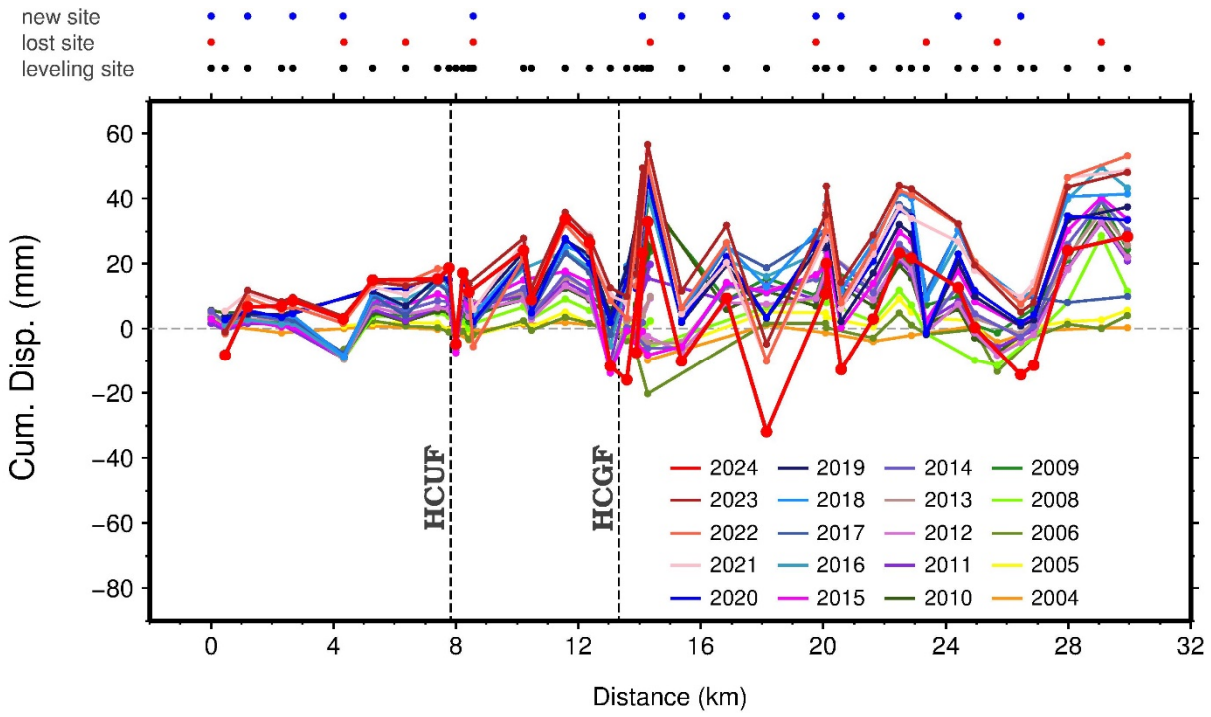


圖 8. 68：新竹至五峰測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8. 68: Cumulative elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

8-3-4-3 新竹至峨嵋測線

縣 117_新竹至峨眉測線（水準測線編號 08）跨新竹斷層及新城斷層（圖 8. 70），測線長為 16.0 公里（投影至剖面的長度）。此測線於 2004 至 2024 年間共進行 20 次的施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GB87（寶新路口）滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS14 之垂直速度（-0.946 mm/yr）作為約制，自 2005 年以來校正 GB72 相對於 GNSS 連續站 S01R 之垂直速度（圖 8. 69），兩站點相距 0.11 公里。此測線的垂直速度在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. 70）。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 71，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

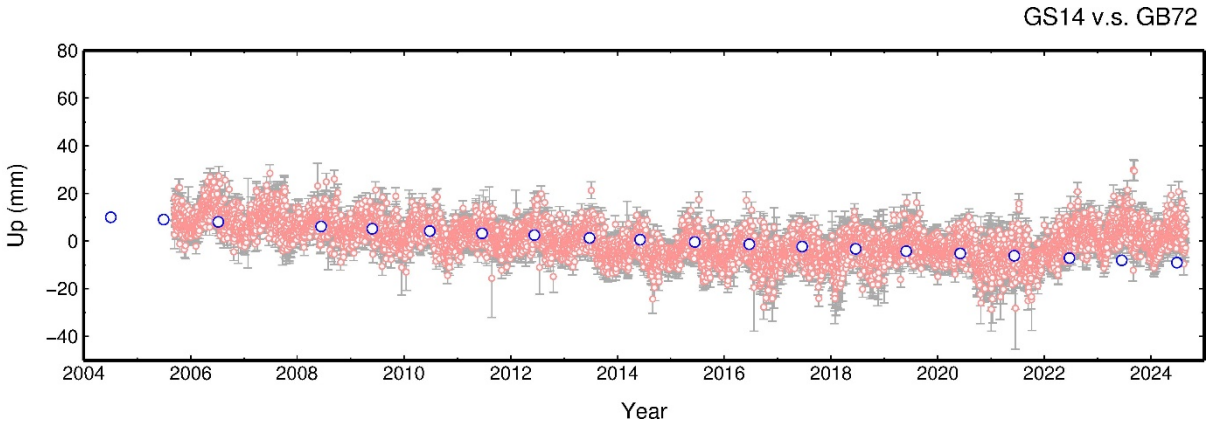


圖 8. 69：新竹至峨嵋水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.11 公里。

Figure 8. 69: Time series comparison between Hsinchu-Emei leveling benchmark GB72 and continuous GNSS station GS14. The distance between two stations are 0.11 km.

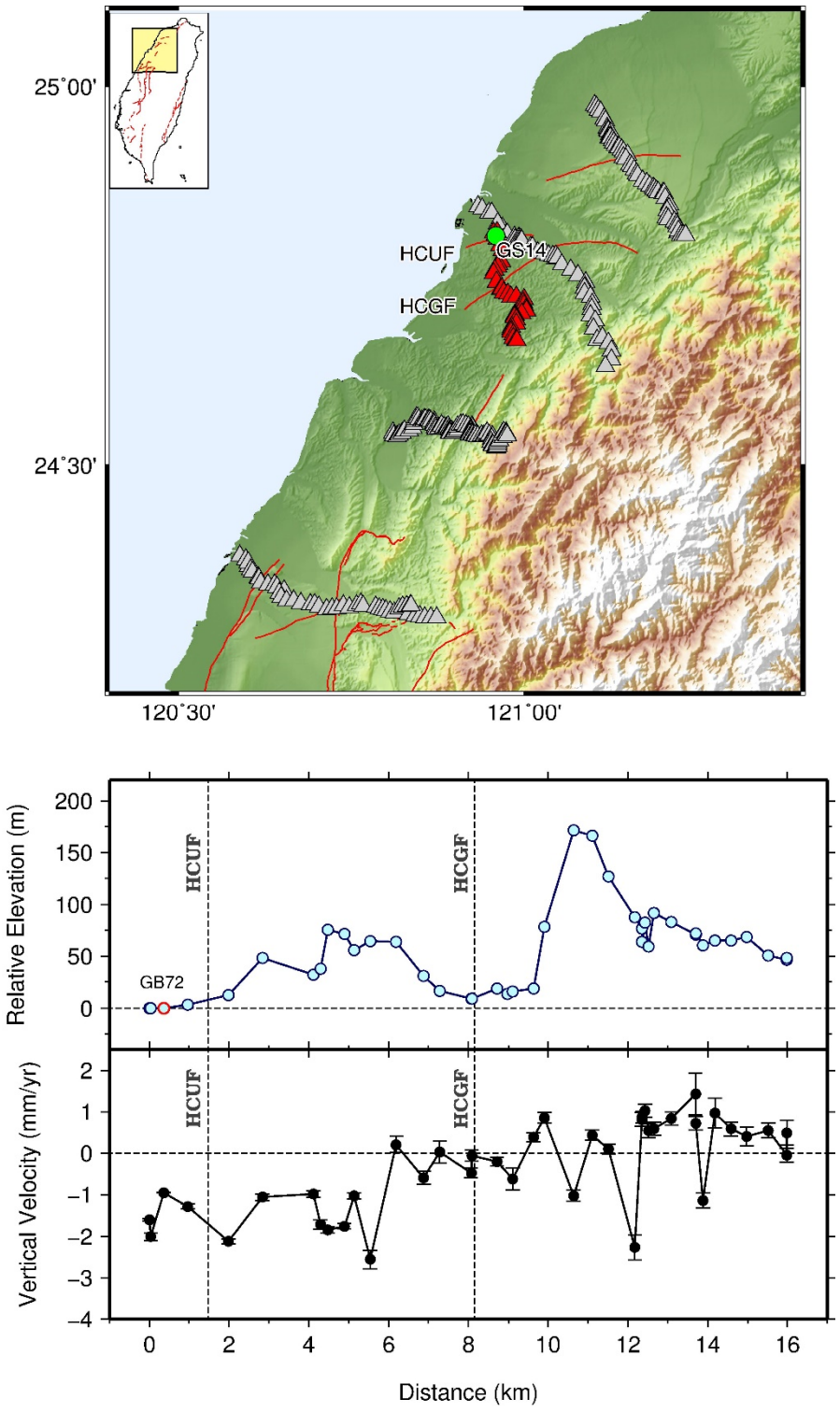


圖 8. 70：新竹至峨嵋測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8. 70: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

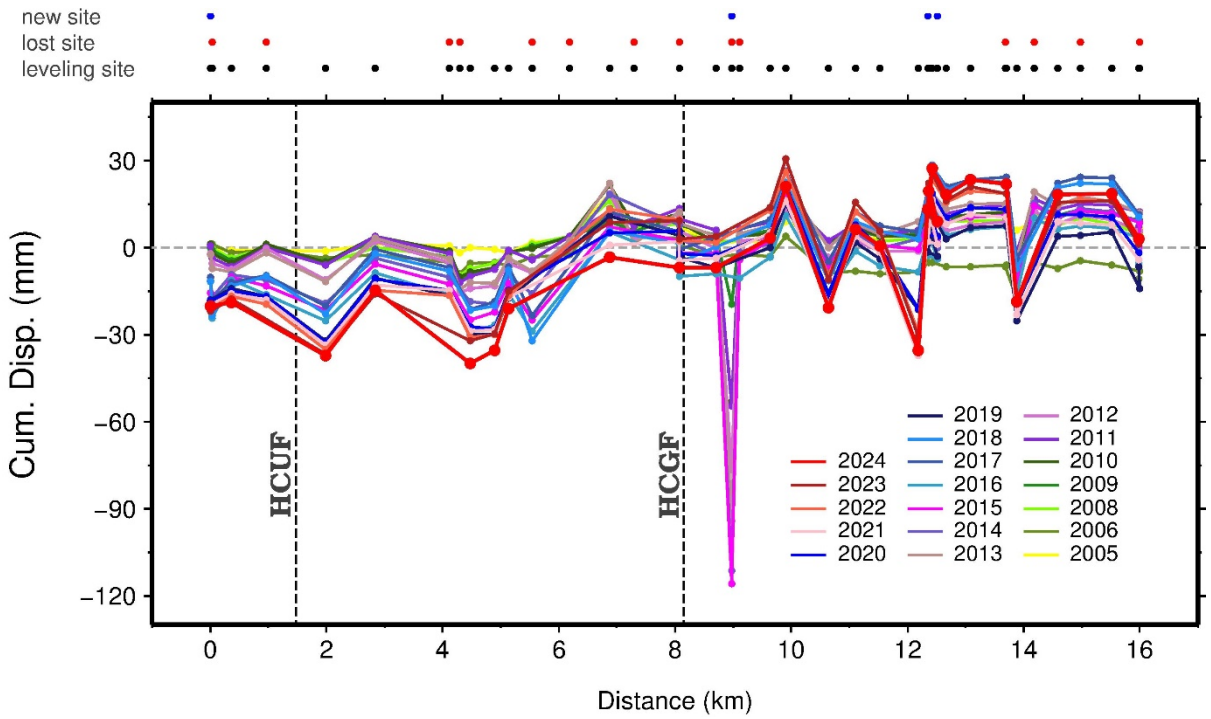


圖 8. 71：新竹至峨嵋測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 8. 71: Cumulative elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

8-3-4-4 苗栗至南庄測線

苗栗至南庄測線（水準測線編號 09）橫跨獅潭斷層（圖 8. 73），測線長為 16.8 公里。此測線於 2005 至 2024 年間共進行 20 次的施測，點位與 2023 年相比無增減。本測線以 GNSS 連續站 PENL 之垂直速度（-3.074 mm/yr）作為約制，自 2005 年以來校正 GD97 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速度（圖 8. 72），兩站點相距 0.02 公里。

整條測線的水準沉陷速度大多在-2.0～-4.0 mm/yr 之間（圖 8. 73），少數最大沉陷速度可達 -7.0 mm/yr。跨獅潭斷層區域之速度變化並不顯著（變化量< 1.0 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 74，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 - 2024 年之間的高程差值。

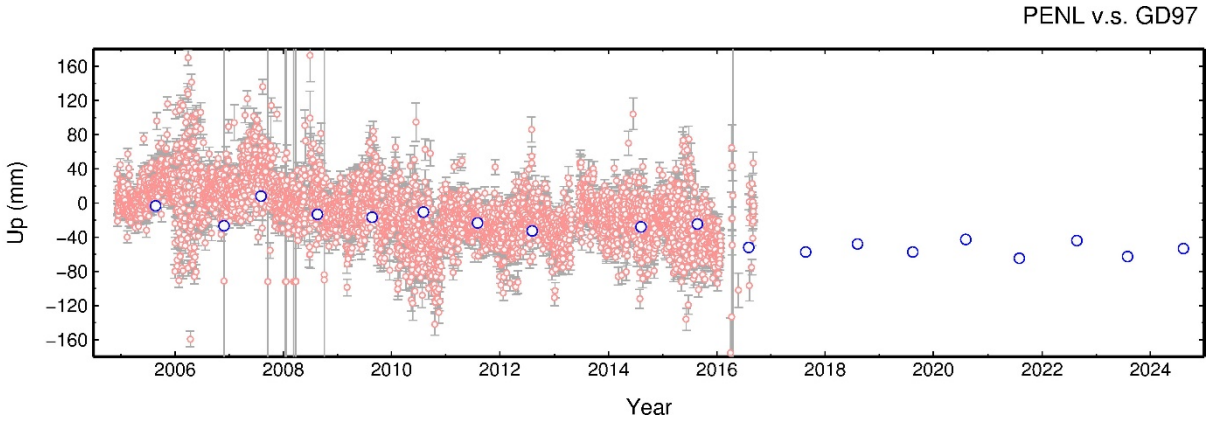


圖 8. 72：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

Figure 8. 72: Time series comparison between Miaoli-Nanzhuang leveling benchmark GD97 and continuous GNSS station PENL. The distance between two stations are 0.02 km.

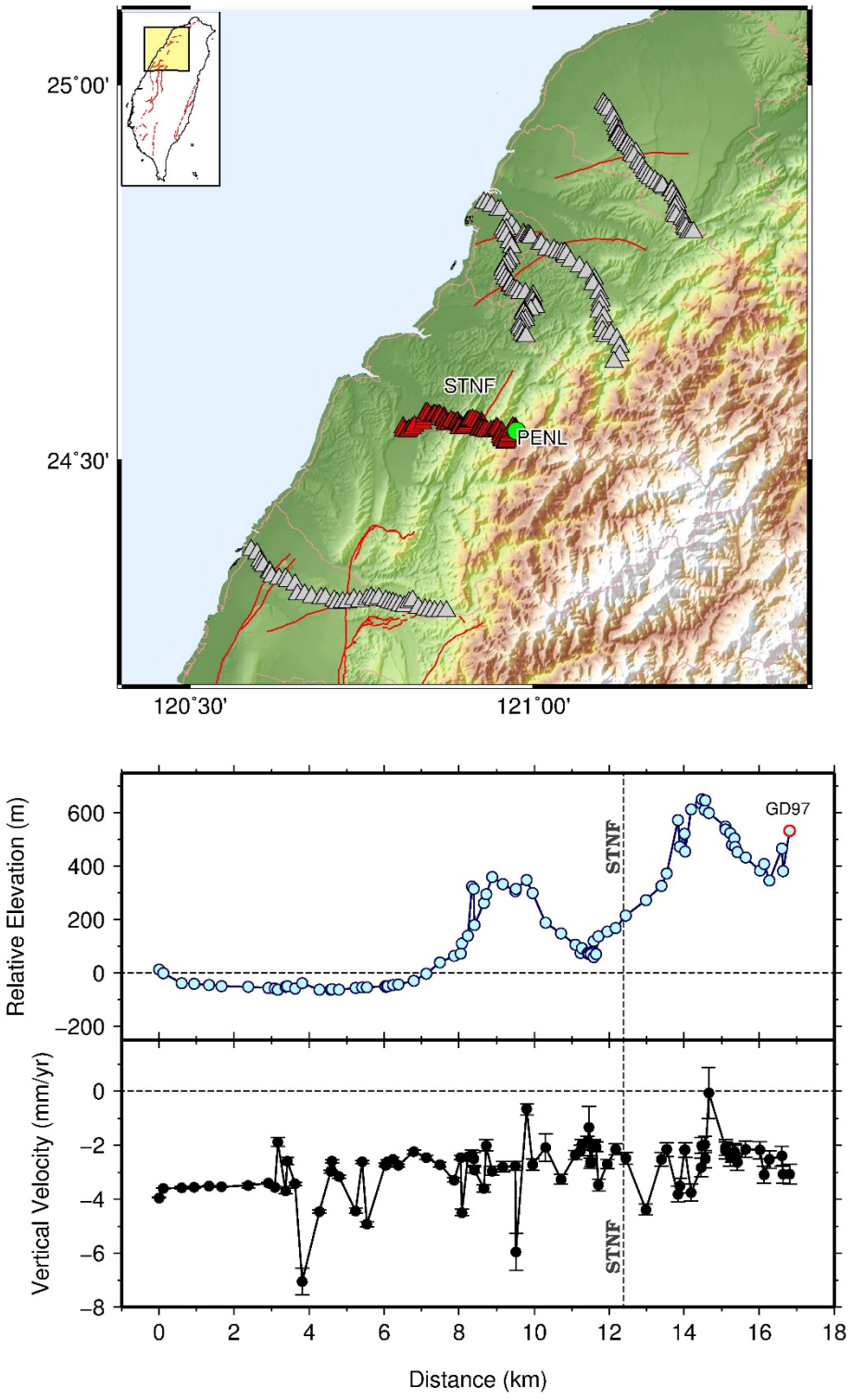


圖 8. 73：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，STNF 為獅潭斷層。

Figure 8. 73: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. STNF is the Shihtan fault.

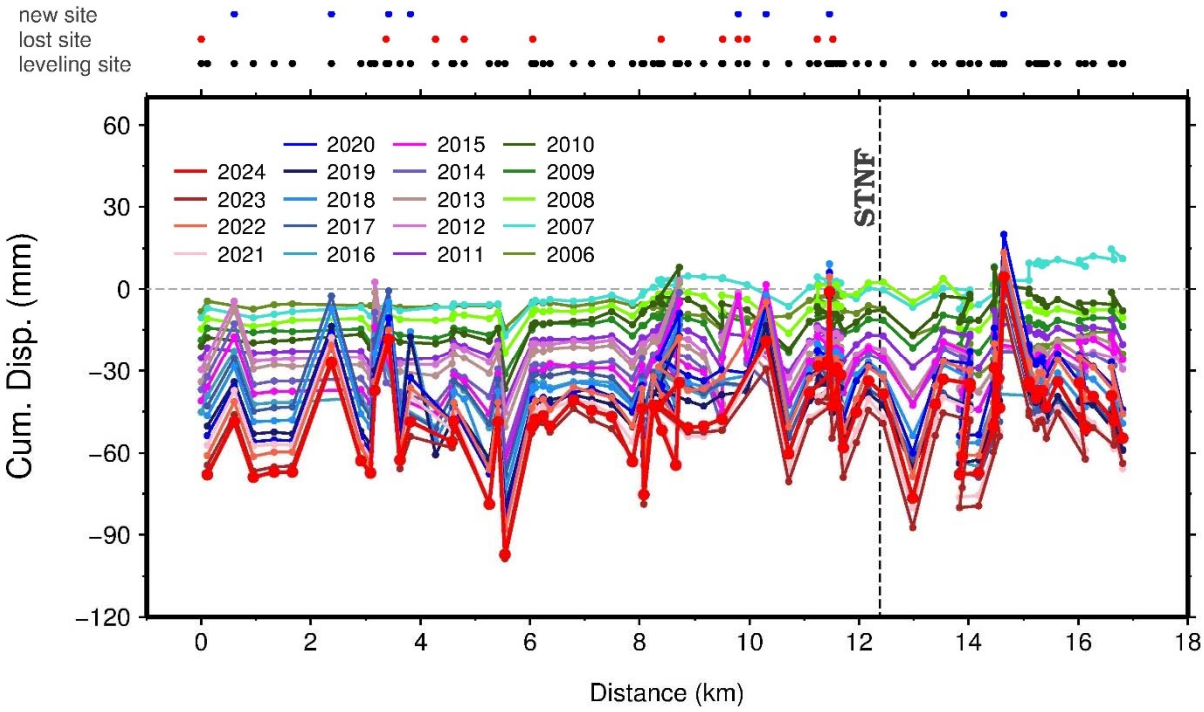


圖 8. 74：苗栗至南庄測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，STNF 為獅潭斷層。

Figure 8. 74: Cumulative elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. STNF is the Shihtan fault.

8-3-5 嘉南地區精密水準測線

8-3-5-1 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. 76），投影至剖面的長度為 52.6 公里，2003 年至 2024 年間共進行 22 次施測。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. 75）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G725（土厝派出所）、G727（第七號橋）、G735（水利工作站）、G736（菁埔國小）、G777（一號橋）、G782（禪雲寺）、GF70（大潭村口）滅失，無法繼續觀測。

此測線梅山斷層以西之垂直速度變化較大（圖 8. 76），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。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 77，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。而於圖 8. 77 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。

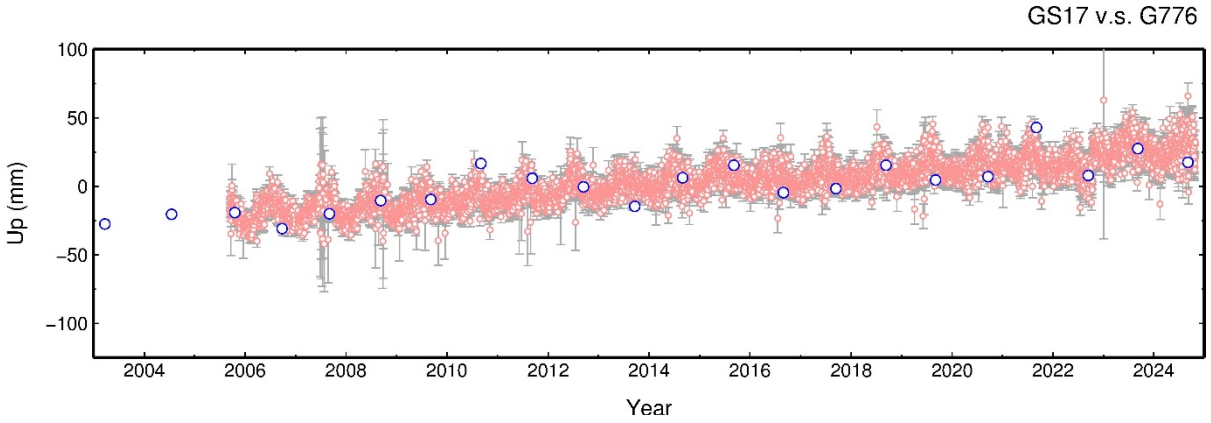


圖 8. 75：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

Figure 8. 75: Time series comparison between Jinhu-Ruifeng leveling bench mark G776 and continuous GNSS station GS17. The distance between two stations are 0.02 km.

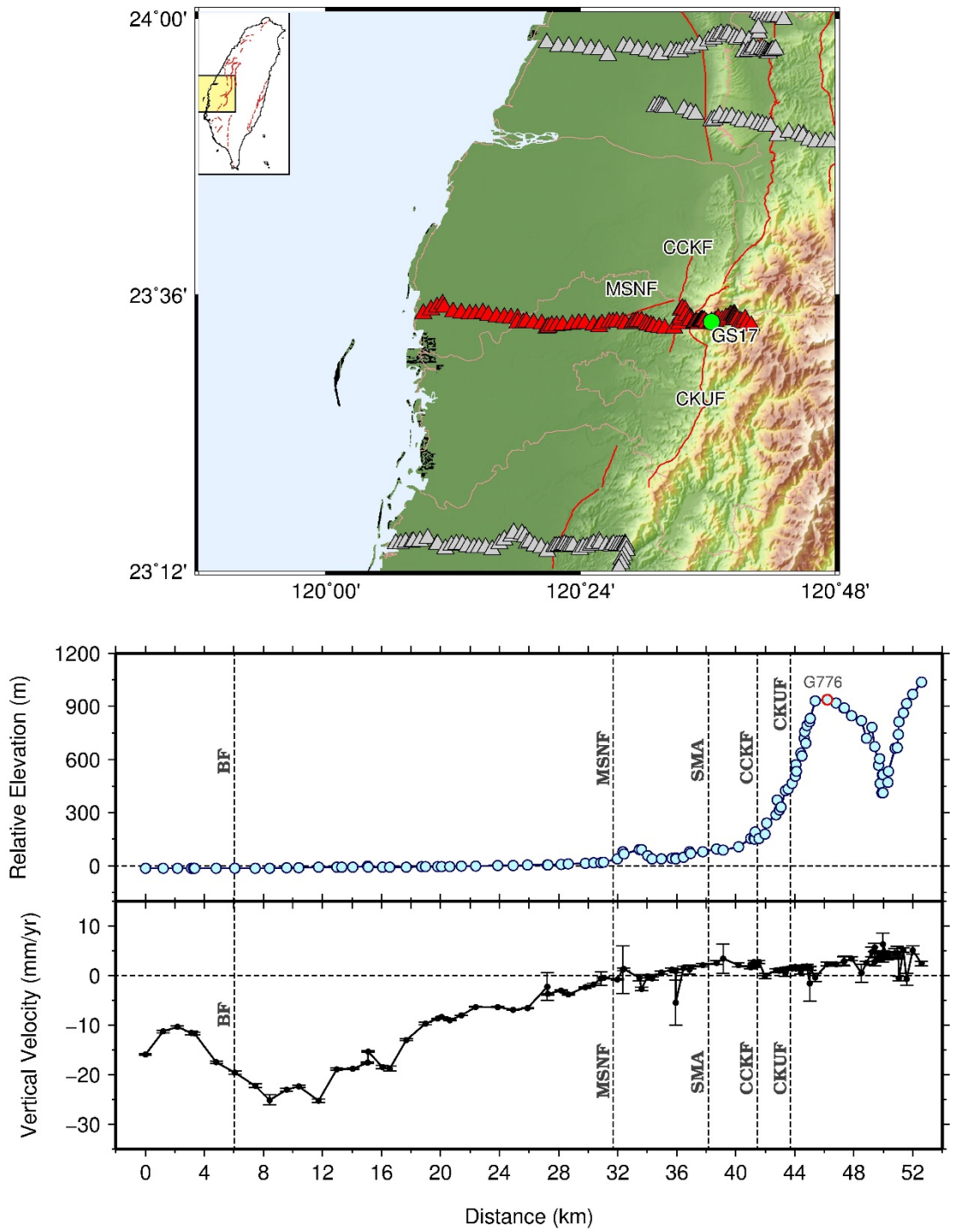


圖 8. 76：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 8. 76: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

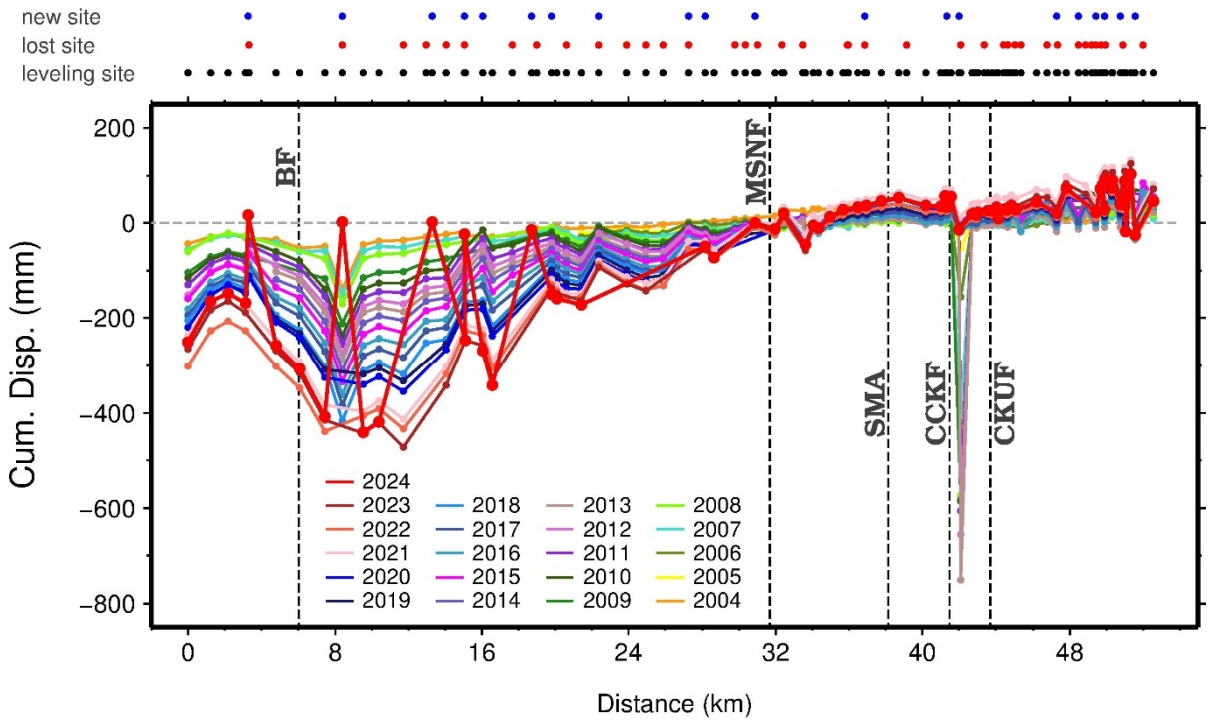


圖 8. 77：縣 164_金湖至瑞峰測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 8. 77: Cumulative elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

8-3-5-2 北門至楠西測線

北門至楠西測線橫跨六甲斷層、觸口（崙後）斷層與口宵里斷層（圖 8. 79），總長為 38.4 公里（投影至剖面的長度）。從 2003 年至 2024 年共計施測 21 次，點位與 2023 年相比無增減。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 80，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線同時受 2010 年 3 月 4 日 M_L6.4 的甲仙地震與 2016 年 2 月 6 日 M_L6.6 的美濃地震影響，因此分別以 GNSS 連續站 GS44 之 2010 年地震前垂直速率（8.670 mm/yr）、震後至 2016 年地震前垂直速率（6.681 mm/yr），以及 2016 年至今之垂直速率（7.992 mm/yr），自 2008 年以來作為約制點來校正 I088 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8. 78），兩站點相距 0.97 公里。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 8. 79）：綠色為 2003 年 10 月至 2010 年甲仙地震期間之垂直速度、藍色為 2010 年甲仙地震至 2016 年美濃地震間之垂直速度、紅色為 2016 年美濃地震至 2024 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. 80）。

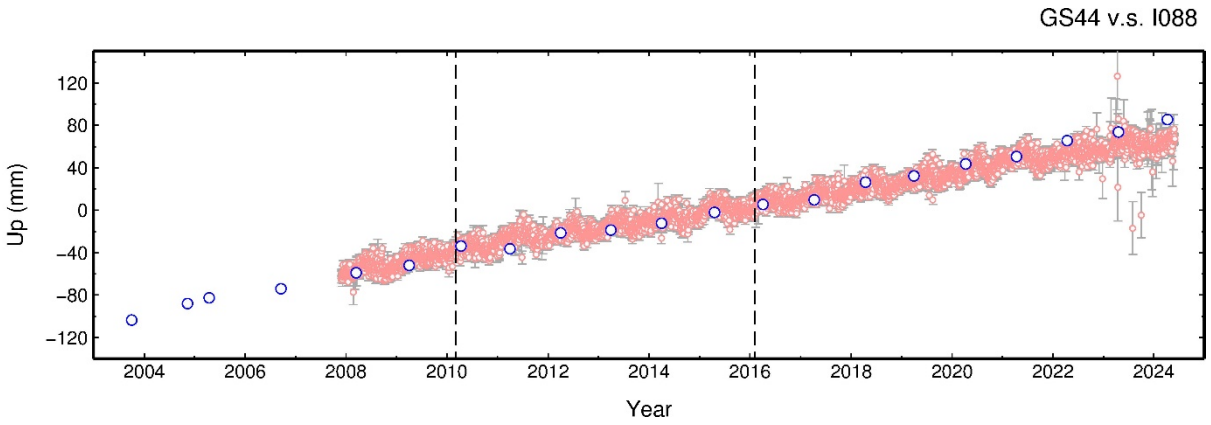


圖 8. 78：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.97 公里。左側虛線為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震，右側為 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 8. 78: Time series comparison between Beimen-Nanxi leveling bench mark I088 and continuous GNSS station GS44. The distance between two stations are 0.97 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

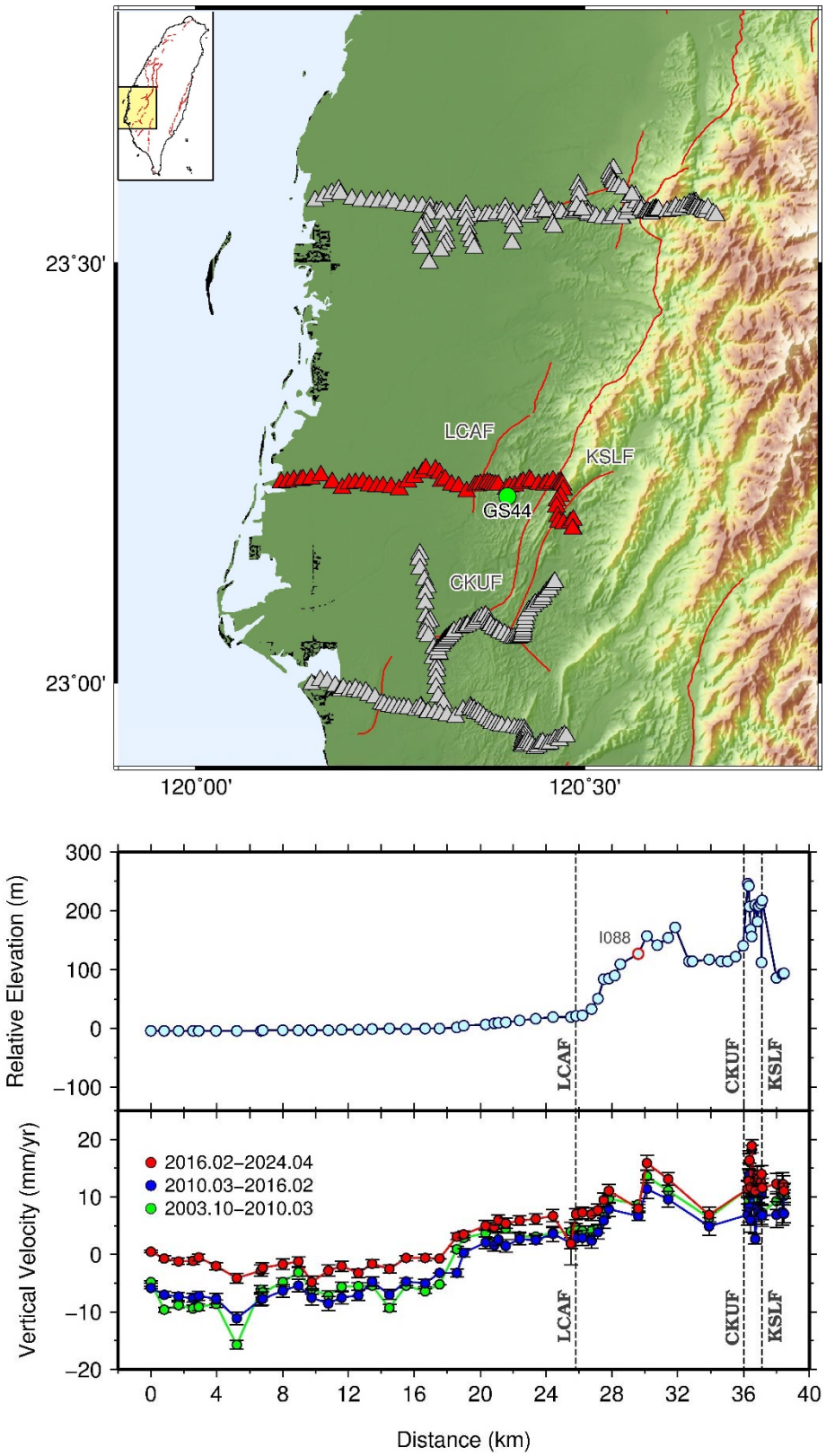


圖 8. 79：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，LCAF 為六甲斷層，CKUF 為觸口（崙後）斷層，KSLF 為口宵里斷層。

Figure 8. 79: 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. Green is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003 - 2010, blue is the vertical velocity from 2010 to 2016, and red is the vertical velocity from 2016 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. LCAF is Liuchia fault, CKUF is Chukou fault (Lunhou fault), and KSLF is Kouhsiaoli fault.

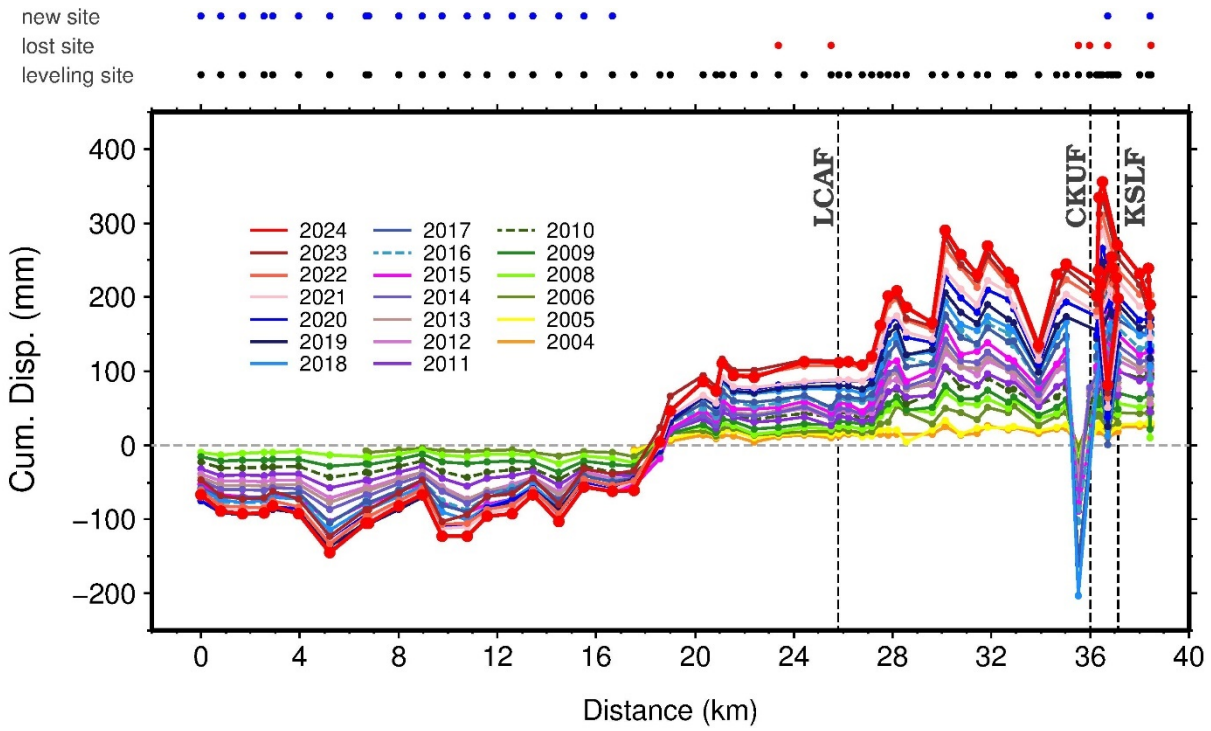


圖 8. 80：縣 174_北門至楠西測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，LCAF 為六甲斷層，CKUF 為觸口（崙後）斷層，KSLF 為口宵里斷層。

Figure 8. 80: Cumulative elevation change of the Beimen-Nanxi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. LCAF is Liuchia fault, CKUF is Chukou fault (Lunhou fault), and KSLF is Kouhsiaoli fault.

8-3-5-3 善化至關廟測線

善化至關廟測線由北往南走橫跨新化斷層，測線剖面投影長度為 21.3 公里（圖 8. 82），從 2003 年至 2024 年共計有 20 次施測，每年施測一次，點位與 2023 年相比無增減。

本測線以 GNSS 連續站 GS29 之垂直速率，自 2006 年以來作為約制站來校正 1157 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8. 81）。點位 GS29 於 2003 年至 2010 年甲仙地震間之垂直速率為 6.1mm/yr；2010 年甲仙地震震後至 2016 年美濃地震間之垂直速率為 1.5 mm/yr；2016 年美濃地震後至今之垂直速率為 1.7 mm/yr。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 83，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 ~ 2024 年之間的高程差值。

2016 年美濃地震造成此水準測線點位有 -7.0 - 39.0 mm 之同震位移量。由歷年高程變化圖可知（圖 8. 83），美濃地震在測線南段（約新化區至關廟區一帶）最大變化量達 39.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮地震之同震位移之影響。

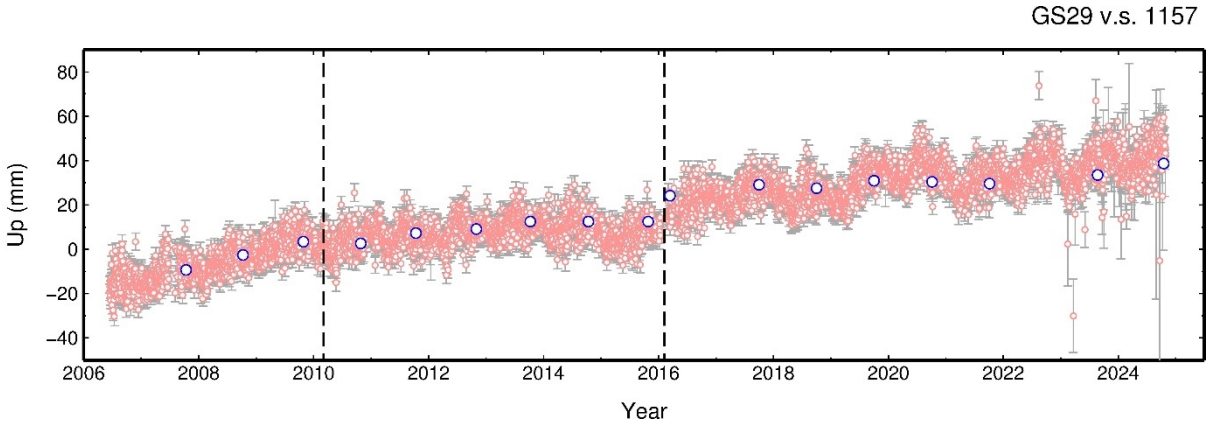


圖 8. 81：善化至關廟水準點位 1157 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。左側虛線為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震，右側為 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 8. 81: Time series comparison between Shanhua-Guanmiao leveling bench mark 1157 and continuous GNSS station GS29. The distance between two stations are 1.5 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

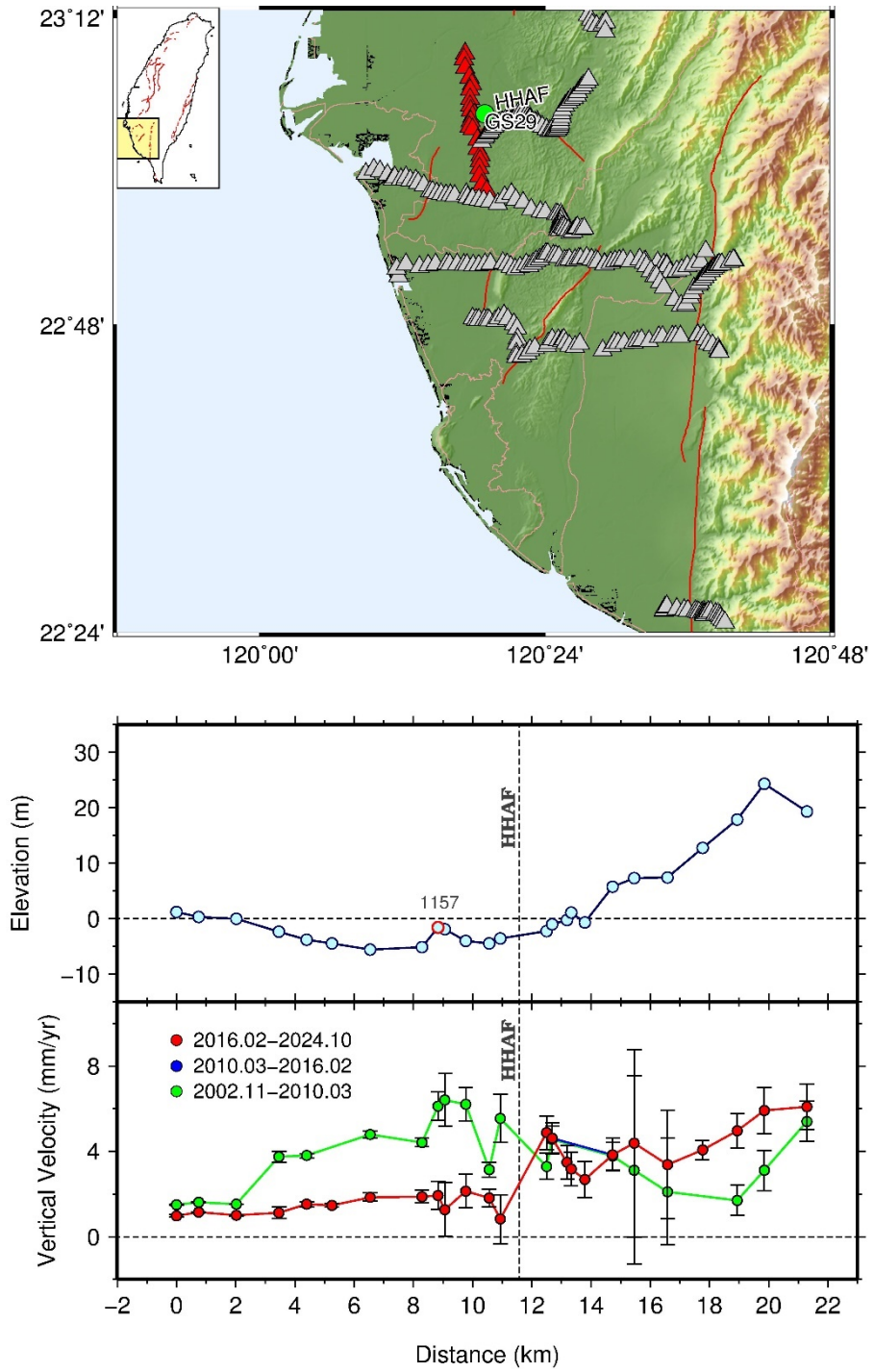


圖 8. 82：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HHAF 為新化斷層。

Figure 8. 82: Elevation change of the Shanhua-Guanmiao 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 Jiaxian earthquake of 2002-2010, blue is the vertical velocity from 2010 to 2016, and red is the vertical velocity from 2016 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HHAF is Hsinhua fault.

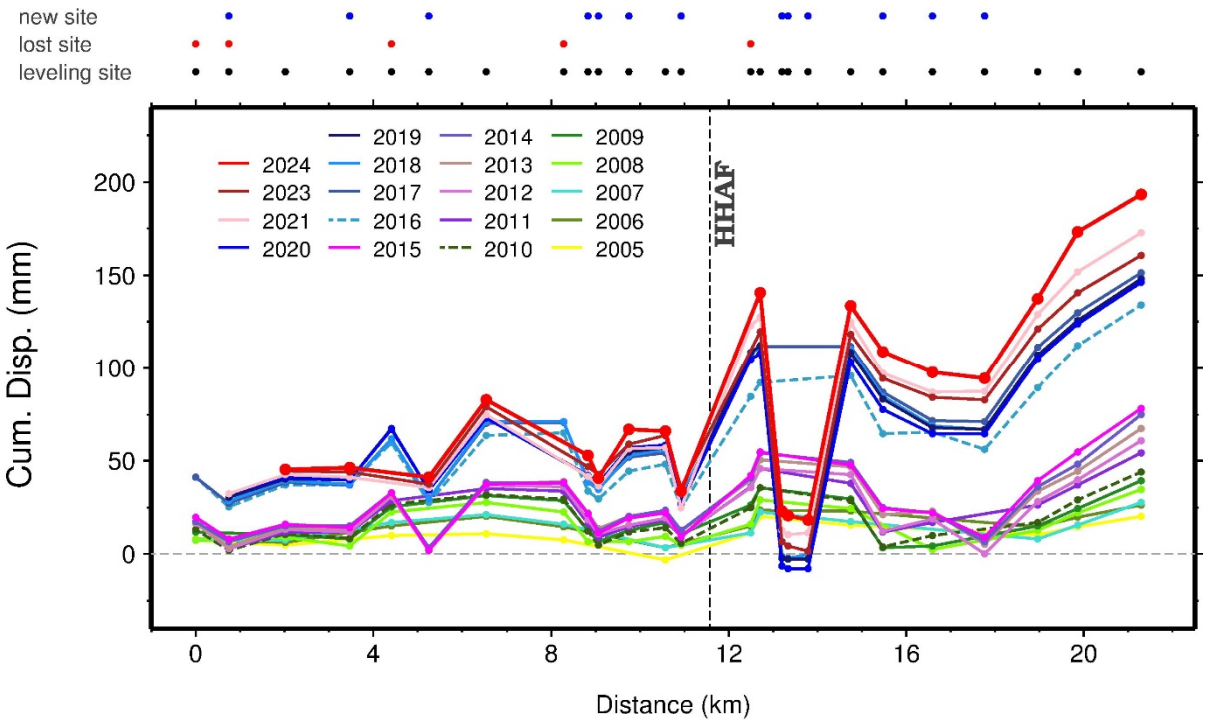


圖 8. 83：台 19 甲_善化至關廟測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HHAF 為新化斷層。

Figure 8. 83: Cumulative elevation change of the Shanhua-Guanmiao leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HHAF is Hsinhua fault.

8-3-5-4 新化至玉井測線

新化至玉井測線橫跨新化斷層與左鎮斷層（圖 8.85），總長為 17.2 公里（投影至剖面的長度）。從 2016 年至 2024 年共計有 9 次施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GH92（玉井橋）損毀，無法繼續觀測。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8.86，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線以 GNSS 連續站 GS89 之垂直速率（-1.388 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 8.84），兩站點相距 0.64 公里。

本測線於新化斷層兩側有明顯垂直速度的變化（圖 8.85），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觀測網。

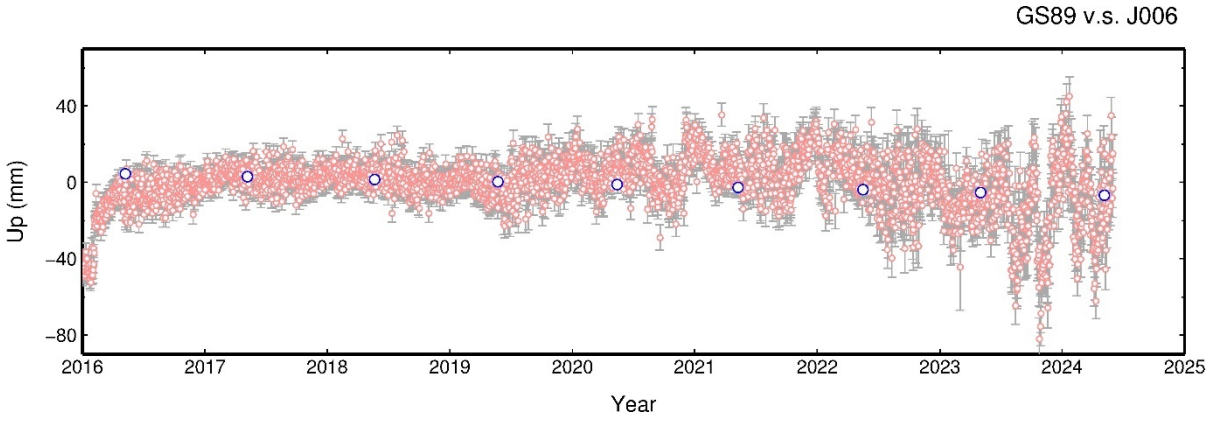


圖 8.84：新化至玉井水準點位 J006 與連續站 GS89 之時間序列比較，兩者相距 0.64 公里。

Figure 8.84: Time series comparison between Xinhua-Yujing leveling benchmark J006 and continuous GNSS station GS89. The distance between two stations are 0.64 km.

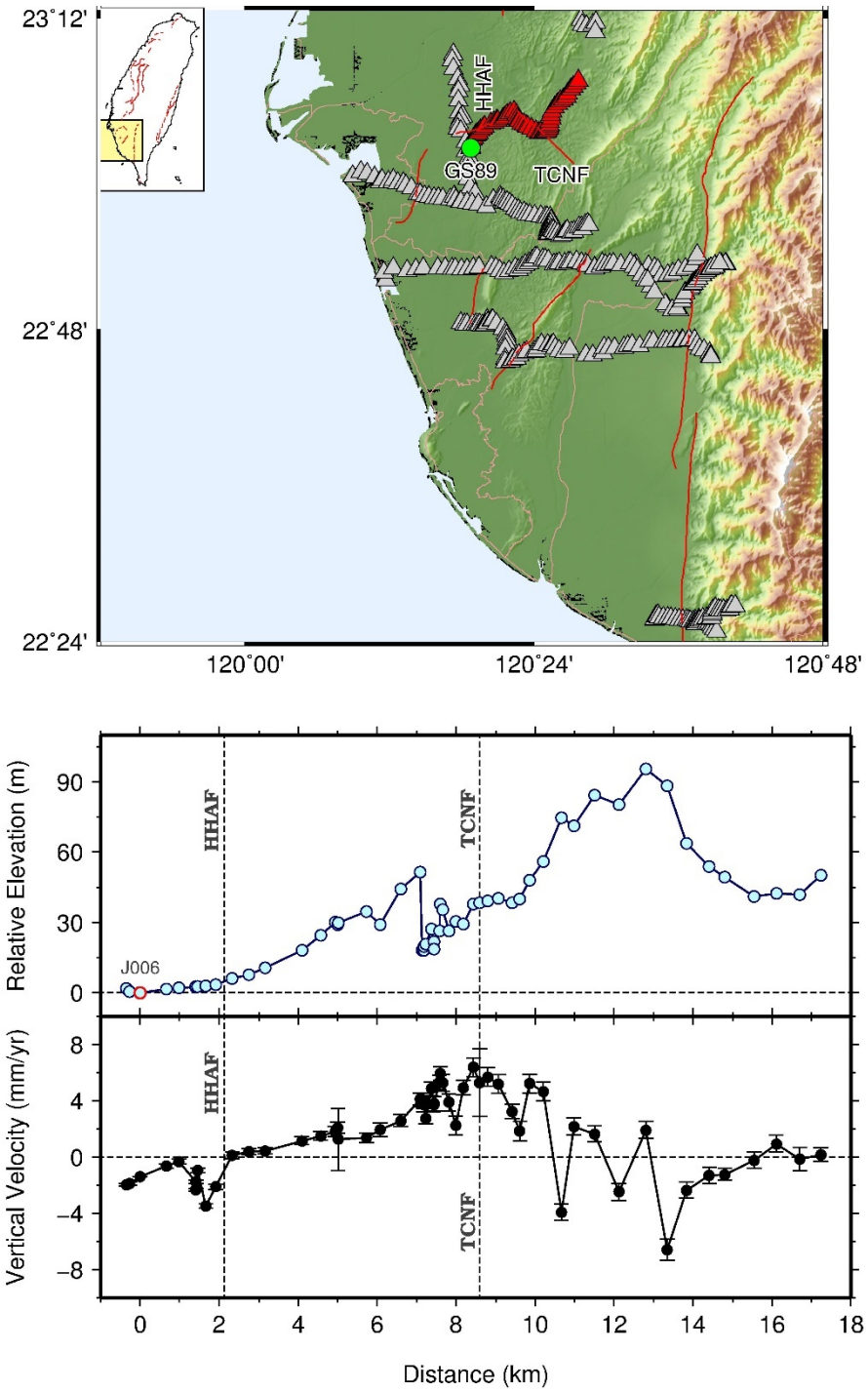


圖 8. 85：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 8. 85: Elevation change of the Xinhua-Yujing leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HHAF is Hsinhua fault and TCNF is Tsochen fault.

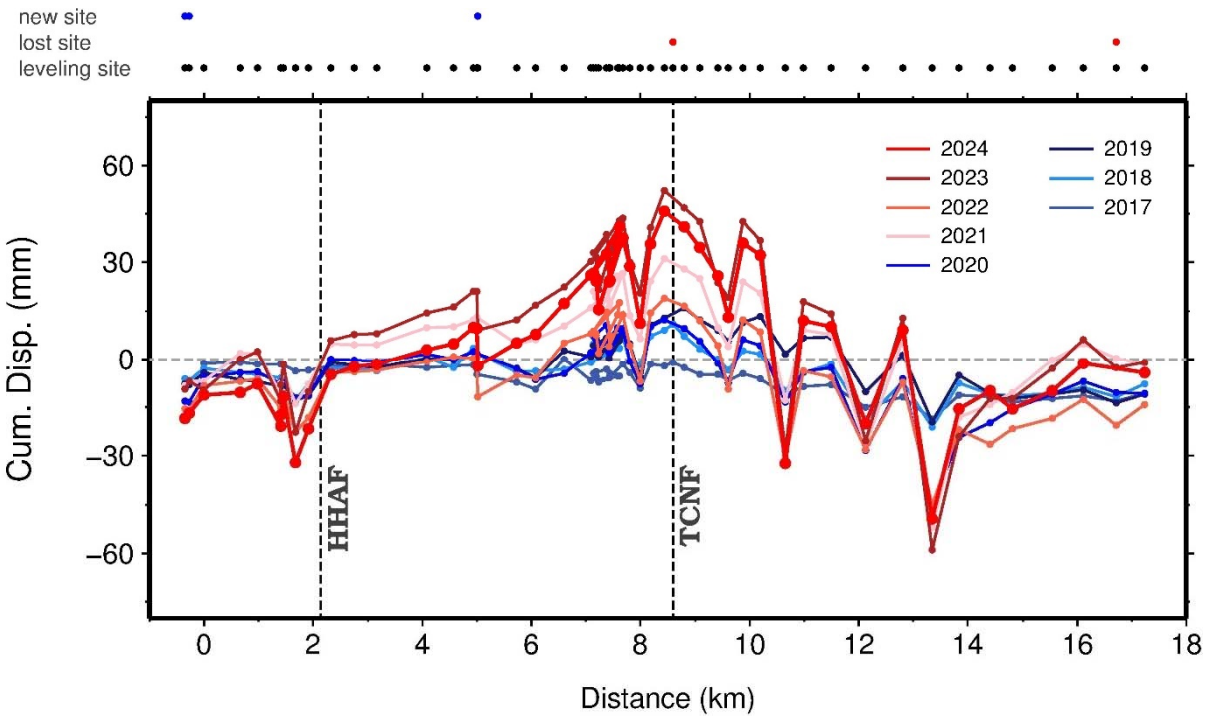


圖 8. 86：台 20_新化至玉井測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 8. 86: Cumulative elevation change of the Xinhua-Yujing leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HHAF is Hsinhua fault and TCNF is Tsochen fault.

8-3-5-5 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層與龍船斷層（圖 8.88），從臺南安平區至龍崎區，2012 年起延伸 4.1 公里至高雄市內門區，補設 18 樁點（GG94 龍湖宮至 3202 菜公坑）；2021 年起再向東延長 1.4 公里，補設 6 樁點（GI71 榛子腳至 GI76 東埔髮夾彎），總長為 34.2 公里（投影至剖面的長度）。從 2001 年至 2024 年共計有 25 次施測，本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 TN07（惠光俱樂部）損毀，無法繼續觀測。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8.89，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線同時受 2010 年 3 月 4 日 M_L6.4 的甲仙地震與 2016 年 2 月 6 日 M_L6.6 的美濃地震影響，因此分別以 GNSS 連續站 CKSV 之 2010 年地震前垂直速率（2.798 mm/yr）、震後至 2016 年地震前垂直速率（2.798 mm/yr），以及 2016 年至今之垂直速率（2.347 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 8.87），兩站點相距 1.42 公里。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 8.88）：綠色為 2001 年 7 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 2024 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 8.89），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。

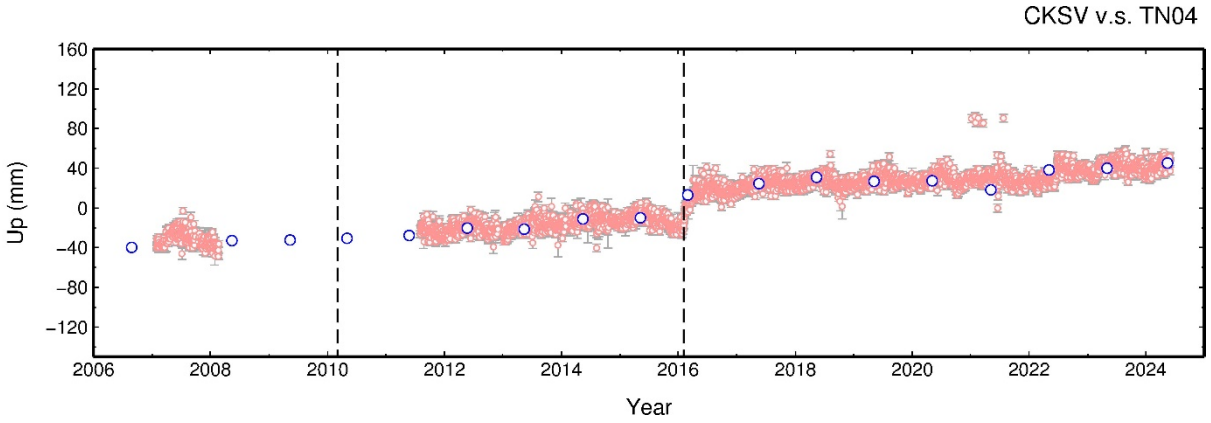


圖 8. 87：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 1.42 公里。左側虛線為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震，右側為 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 8. 87: Time series comparison between Anping-Longci leveling bench mark TN04 and continuous GNSS station CKSV. The distance between two stations are 1.42 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

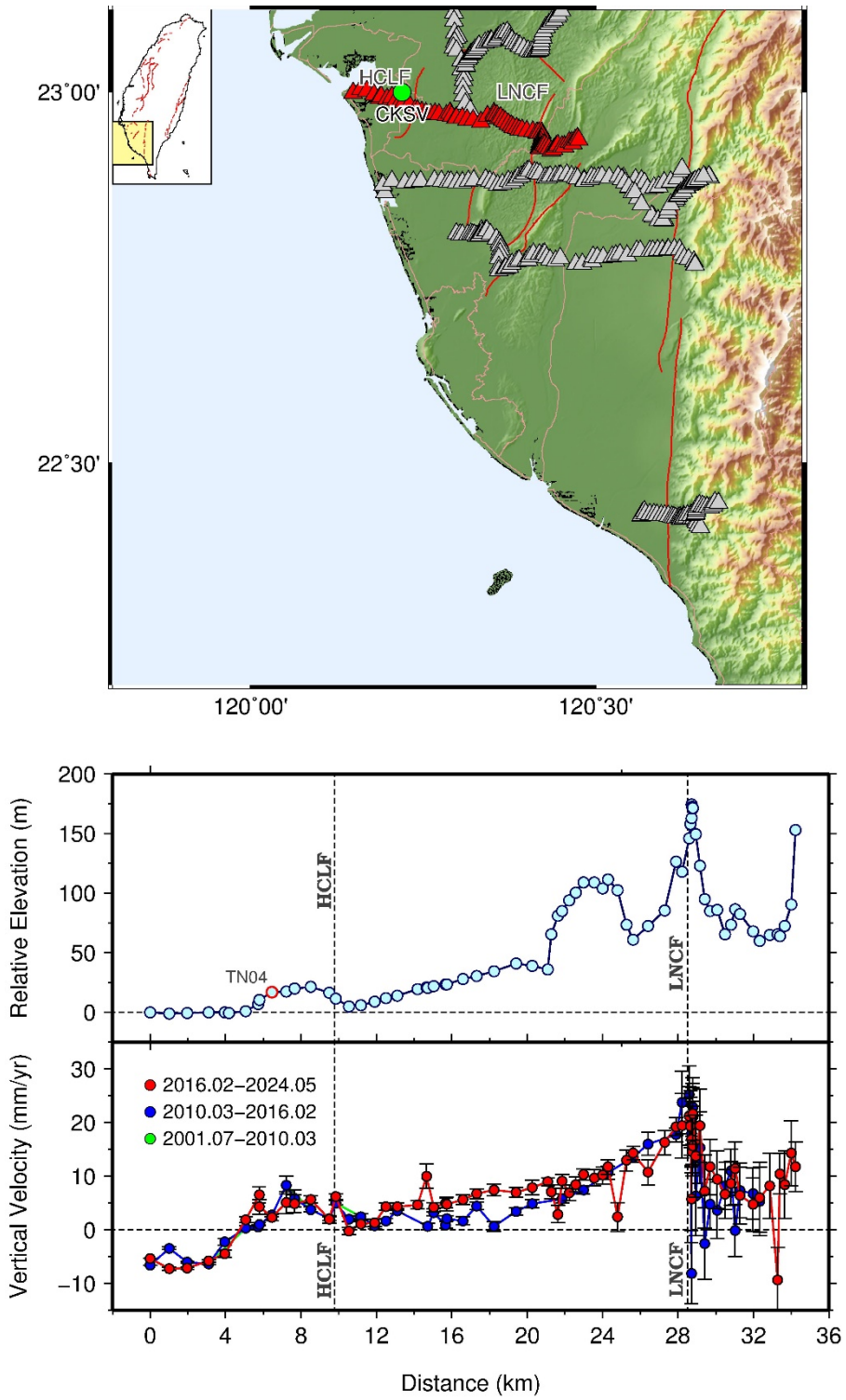


圖 8. 88：安平至龍崎測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 8. 88: 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. Green is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010, blue is the vertical velocity from 2010 to 2016, and red is the vertical velocity from 2016 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCLF is the Houchiali fault and LNCF is Lungchuan fault.

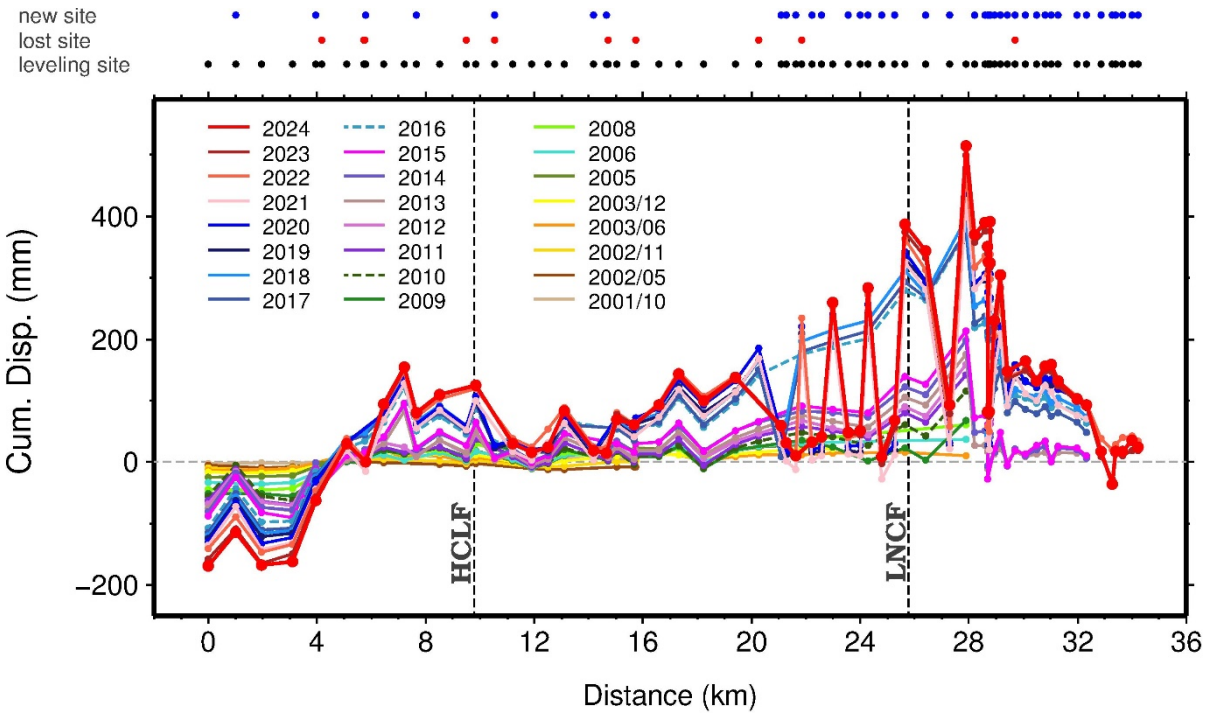


圖 8. 89：安平至龍崎測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 8. 89: Cumulative elevation change of the Anping-Longci leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCLF is the Houchiali fault and LNCF is Lungchuan fault.

8-3-6 高屏地區精密水準測線

8-3-6-1 路竹至茂林測線

路竹至茂林測線橫跨小岡山斷層、龍船斷層、旗山斷層及潮州斷層（圖 8.91）。本測線於中壇附近（B232 美濃金瓜寮）分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線，主線長 44.2 公里，副線長 13.7，總長 57.9 公里（投影至剖面的長度）。從 2002 年至 2024 年共計有 21 次施測。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G475（巧合土雞莊）、GH44（得樂日嘎大橋西）損毀，無法繼續觀測。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8.92，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線同時受 2010 年 3 月 4 日 M_L6.4 的甲仙地震與 2016 年 2 月 6 日 M_L6.6 的美濃地震影響，因此分別以 GNSS 連續站 CISH 之 2010 年地震前垂直速率（1.499 mm/yr）、震後至 2016 年地震前垂直速率（2.741 mm/yr），以及 2016 年至今之垂直速率（1.509 mm/yr），自 2005 年以來作為約制點來校正 NO12 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8.90），兩站點相距 1.12 公里。

圖 8.91 顯示各時間分段之水準平均抬升速率，圖中綠色為 2002 年 12 月至 2010 年 3 月、藍色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、紅色為 2016 年 2 月至今，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. 92），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。

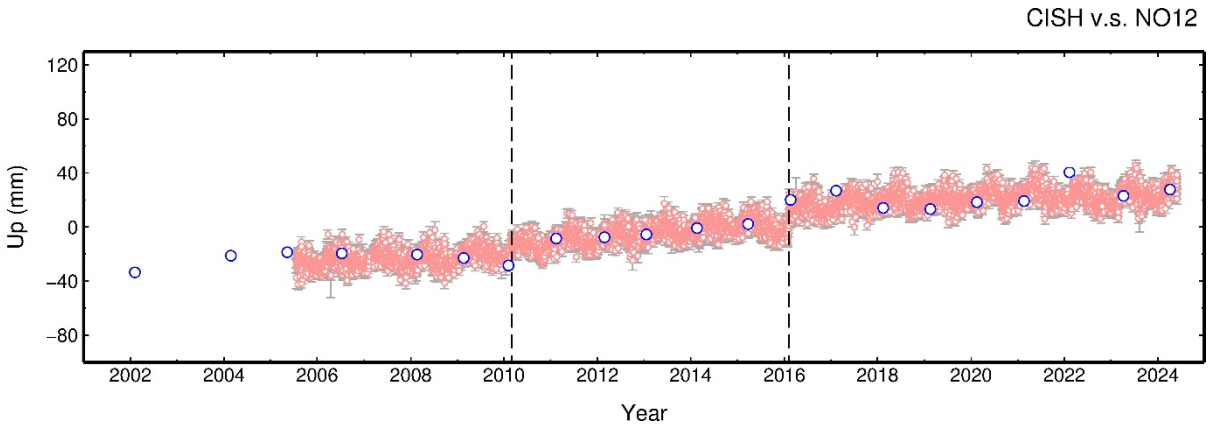


圖 8. 90：路竹至茂林水準點位 NO12 與連續站 CISH 之時間序列比較，兩者相距 1.12 公里。左側虛線為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震，右側為 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 8. 90: Time series comparison between Luzhu-Maolin leveling bench mark NO12 and continuous GNSS station CISH. The distance between two stations are 1.12 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

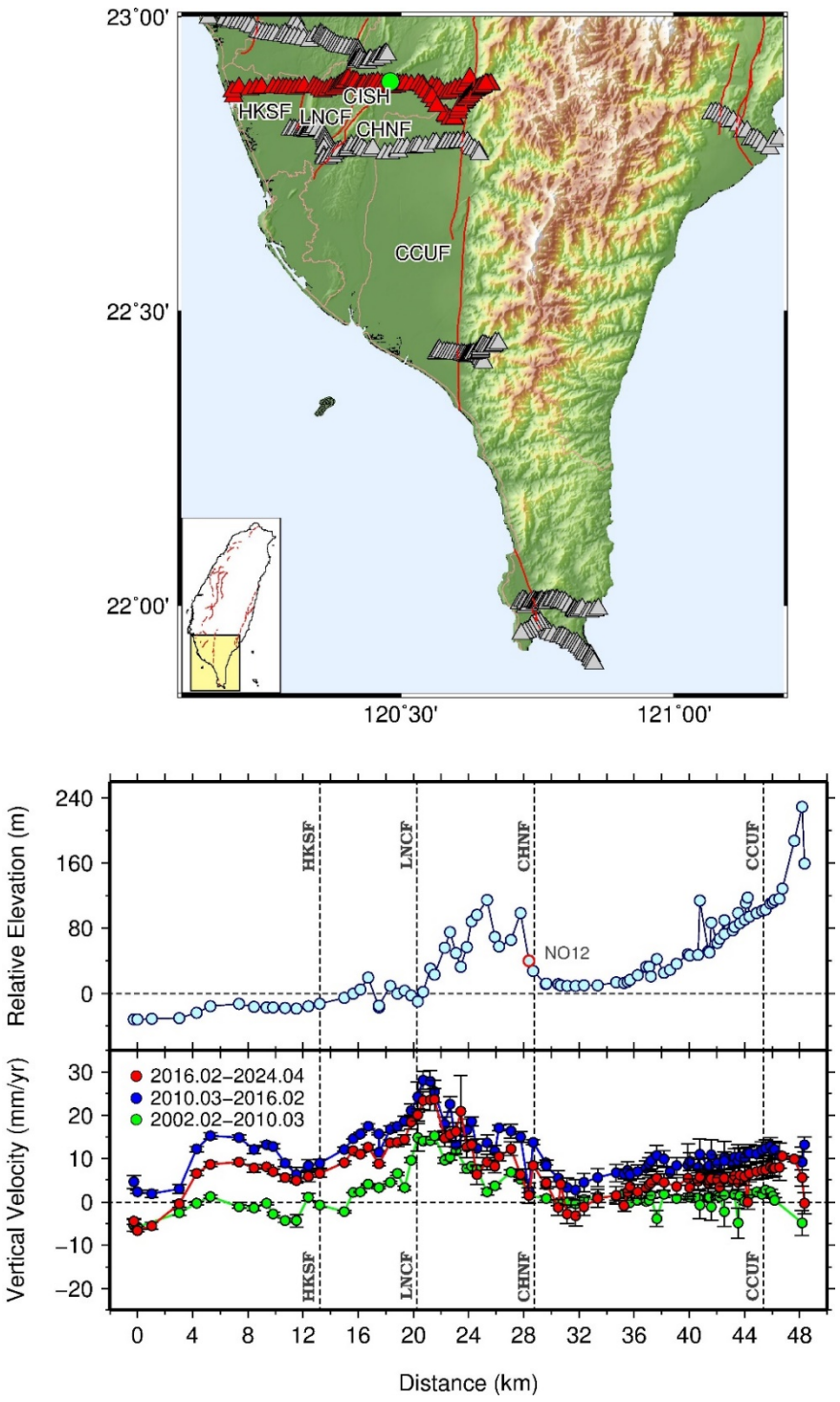


圖 8.91：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HKSF 為小崗山斷層、LNCF 為龍船斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 8. 91: 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. Green is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2002-2010, blue is the vertical velocity from 2010 to 2016, and red is the vertical velocity from 2016 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HKSF is Hsiaokangshan fault, LNCF is Lungchuan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

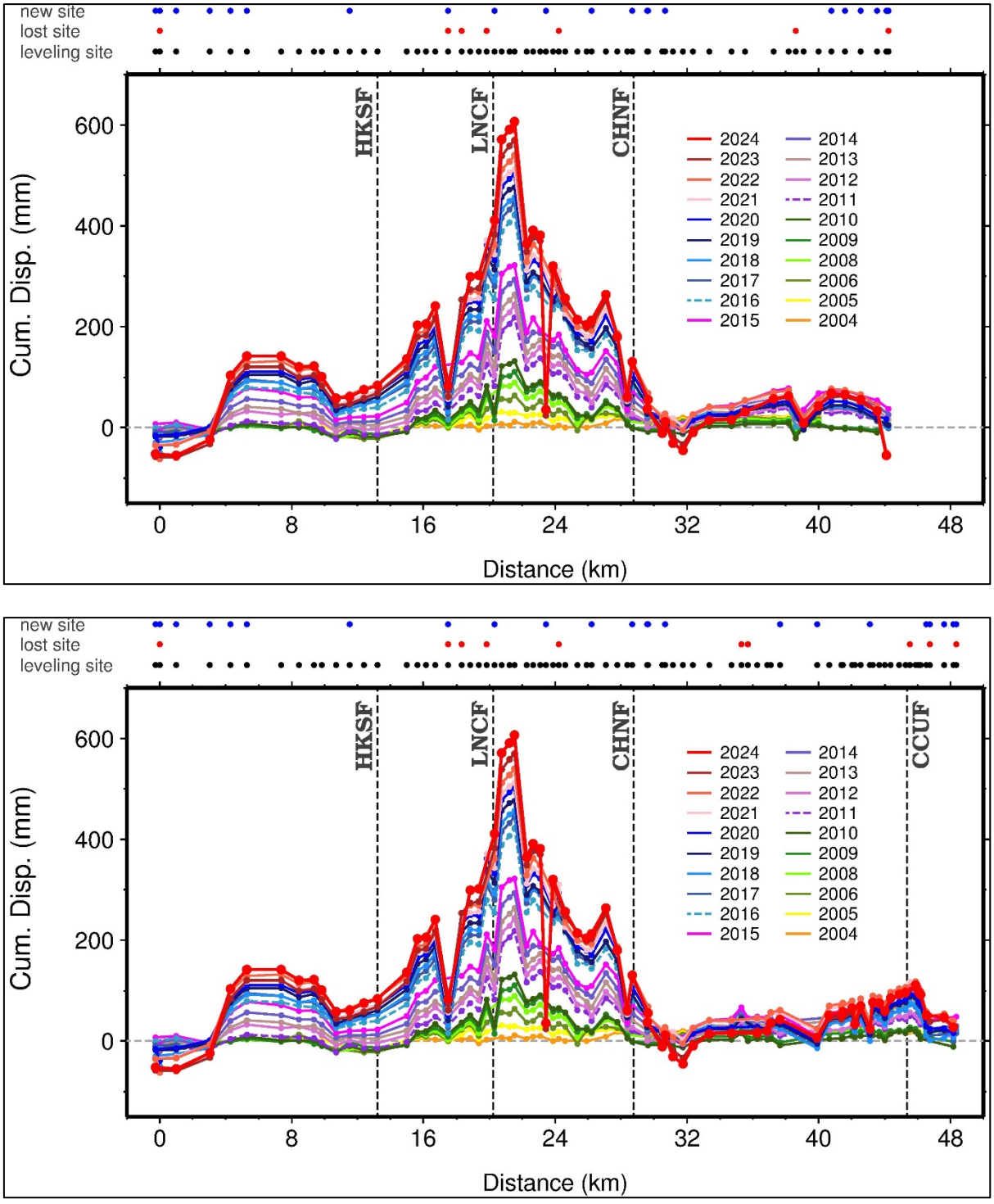


圖 8. 92：台 28_路竹至茂林主、副線累積高程差。上圖為主線 31，下圖為 31 及副線 32。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HKSF 為小崗山斷層、LNCF 為龍船斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 8. 92: Cumulative elevation change of the Luzhu-Maolin leveling route. The top figure is leveling route 31, and the bottom one is leveling route 31 and 32. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HKSF is Hsiaokangshan fault, LNCF is Lungchuan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

8-3-6-2 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 8.94），測線長 35.4 公里（投影至剖面的長度）。從 2004 年至 2024 年共計 20 次施測。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G531（燕巢交流道）損毀，無法繼續觀測。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8.95，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線同時受 2010 年 3 月 4 日 ML6.4 的甲仙地震與 2016 年 2 月 6 日 ML6.6 的美濃地震影響，因此分別以 GNSS 連續站 AKND 之 2010 年地震前垂直速率（1.358 mm/yr）、震後至 2016 年地震前垂直速率（1.903 mm/yr），以及 2016 年至今之垂直速率（-1.458 mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 G525 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8.93），兩站點相距 0.19 公里。

根據圖 8.94，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 2024 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，約於 2010 年由沉降改變成抬升運動，2016 年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 8.95）。

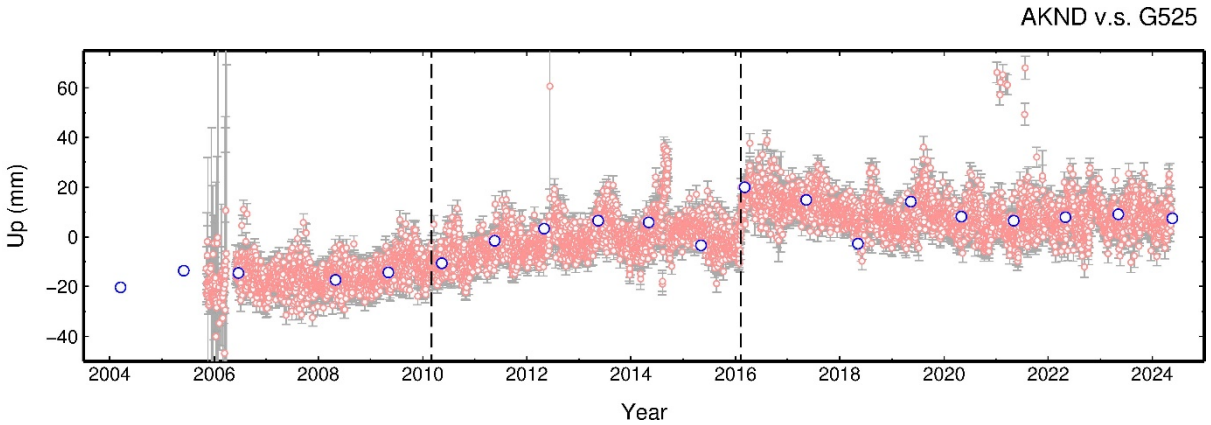


圖 8.93：岡山至安坡水準點位 G525 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.19 公里。左側虛線為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震，右側為 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 8.93: Time series comparison between Kangshan-Anpo leveling bench mark G525 and continuous GNSS station AKND. The distance between two stations are 0.19 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

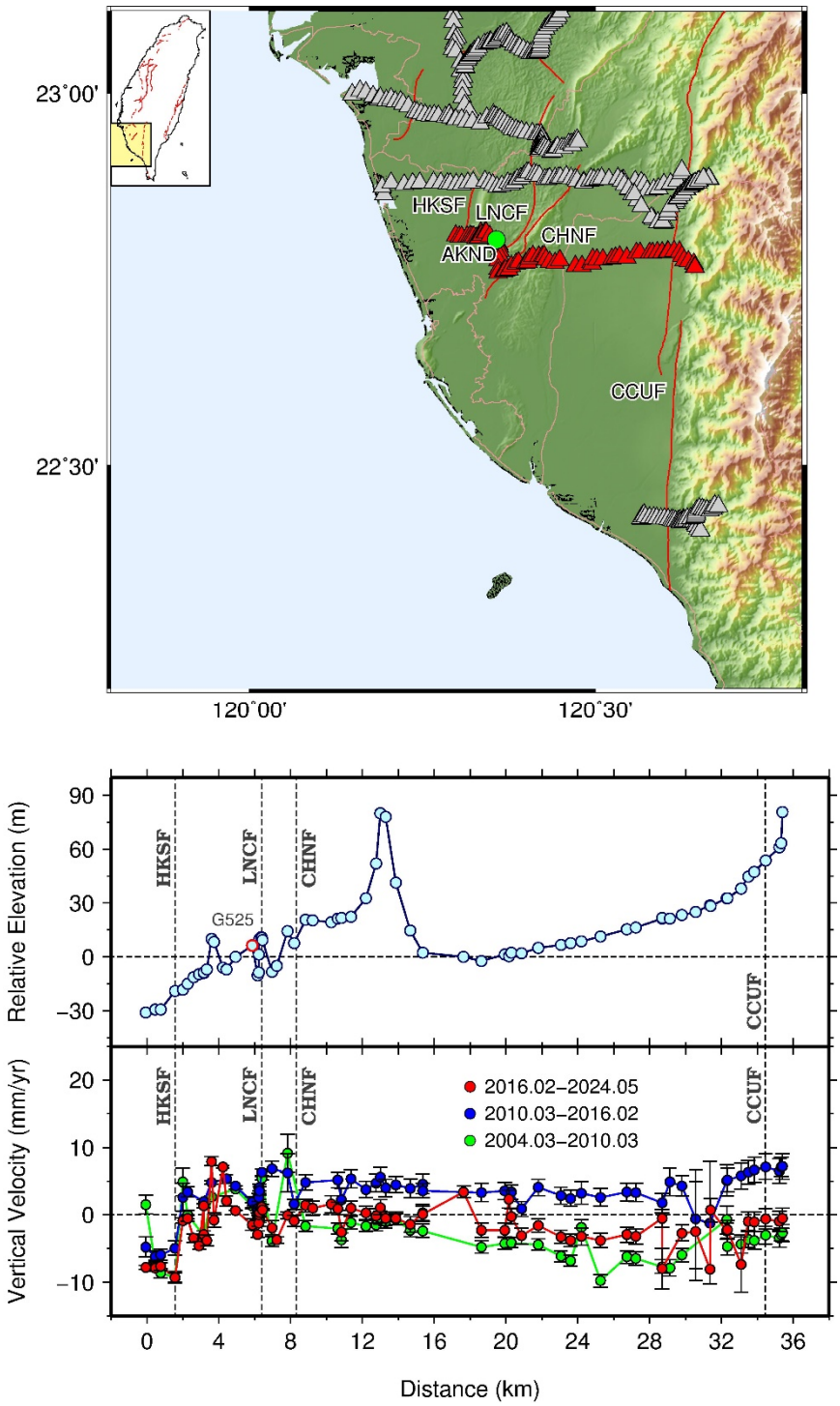


圖 8.94：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2004 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HKSF 為小崗山斷層、LNCF 為龍船斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 8. 94: 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. Green is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2004 - 2010, blue is the vertical velocity from 2010 to 2016, and red is the vertical velocity from 2016 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HKSF is Hsiaokangshan fault, LNCF is Lungchuan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

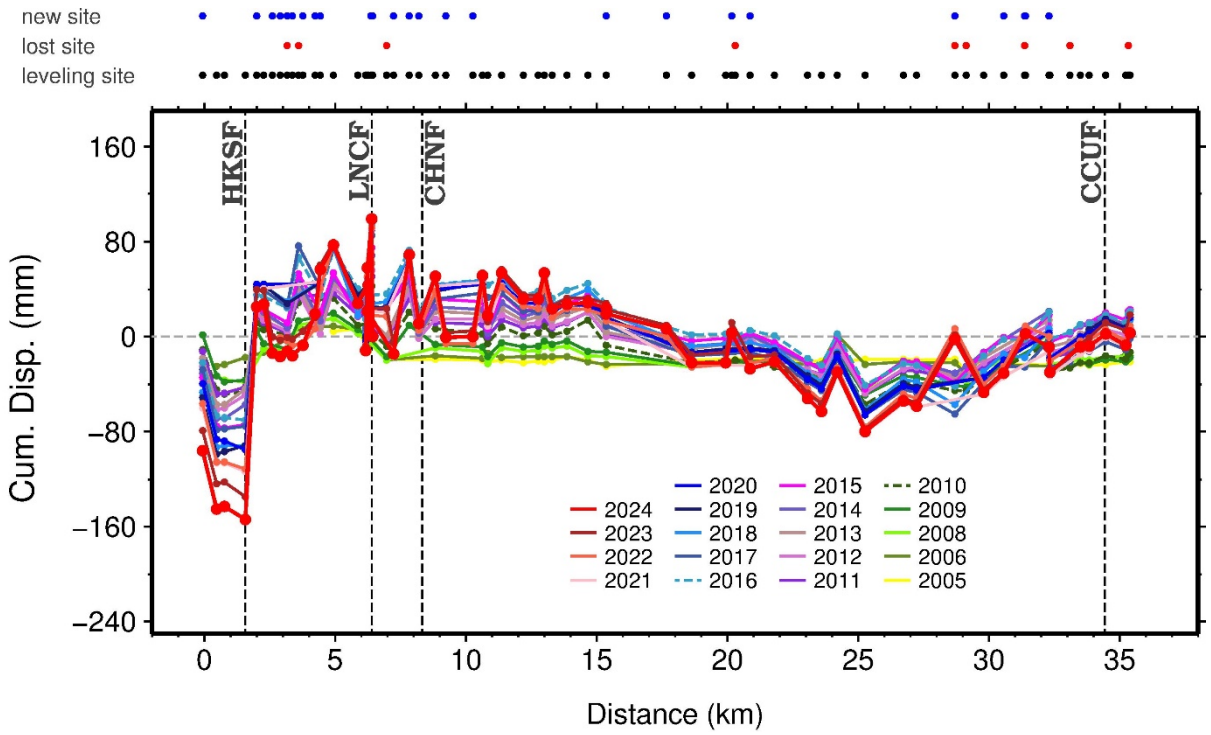


圖 8.95：台 22_岡山至安坡測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HKSF 為小崗山斷層、LNCF 為龍船斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 8. 95: Cumulative elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HKSF is Hsiaokangshan fault, LNCF is Lungchuan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

8-3-6-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層（圖 8. 97），測線長為 8.5 公里（投影至剖面的長度），於 2005 至 2024 年間共進行了 20 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。點位與 2023 年相比無增減。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. 96）。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 98，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。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. 98），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. 97）。

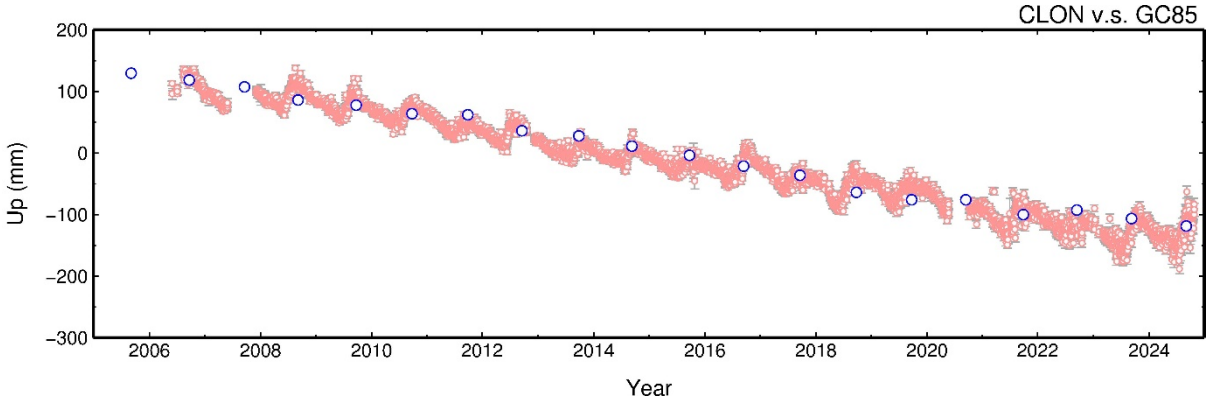


圖 8. 96：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較，兩者相距 0.55 公里。

Figure 8. 96: Time series comparison between Jiadong-Qijia leveling bench mark GC85 and continuous GNSS station CLON. The distance between two stations are 0.55 km.

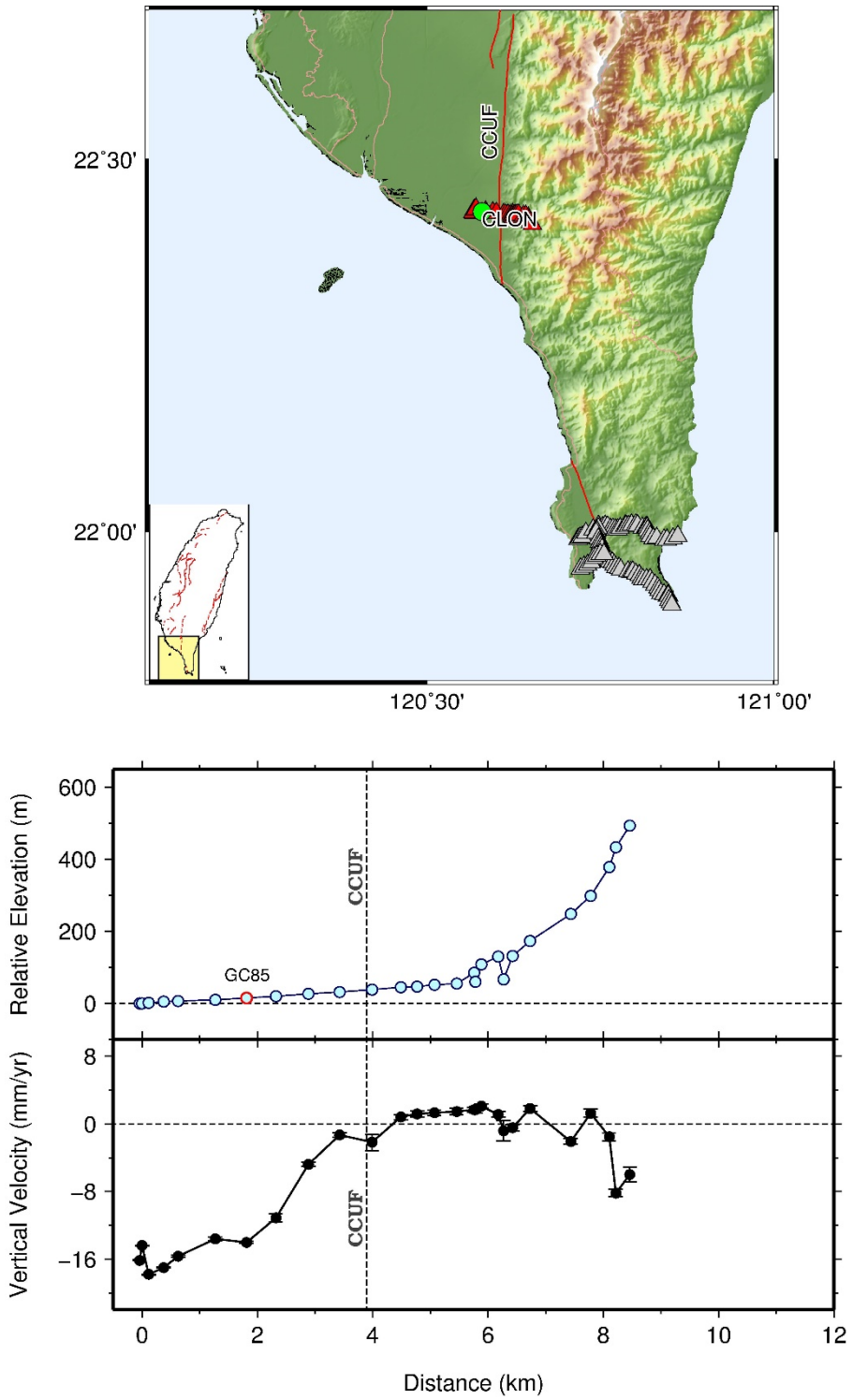


圖 8.97：佳冬至七佳測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，CCUF 為潮州斷層。

Figure 8. 97: 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. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CCUF is Chaochou fault.

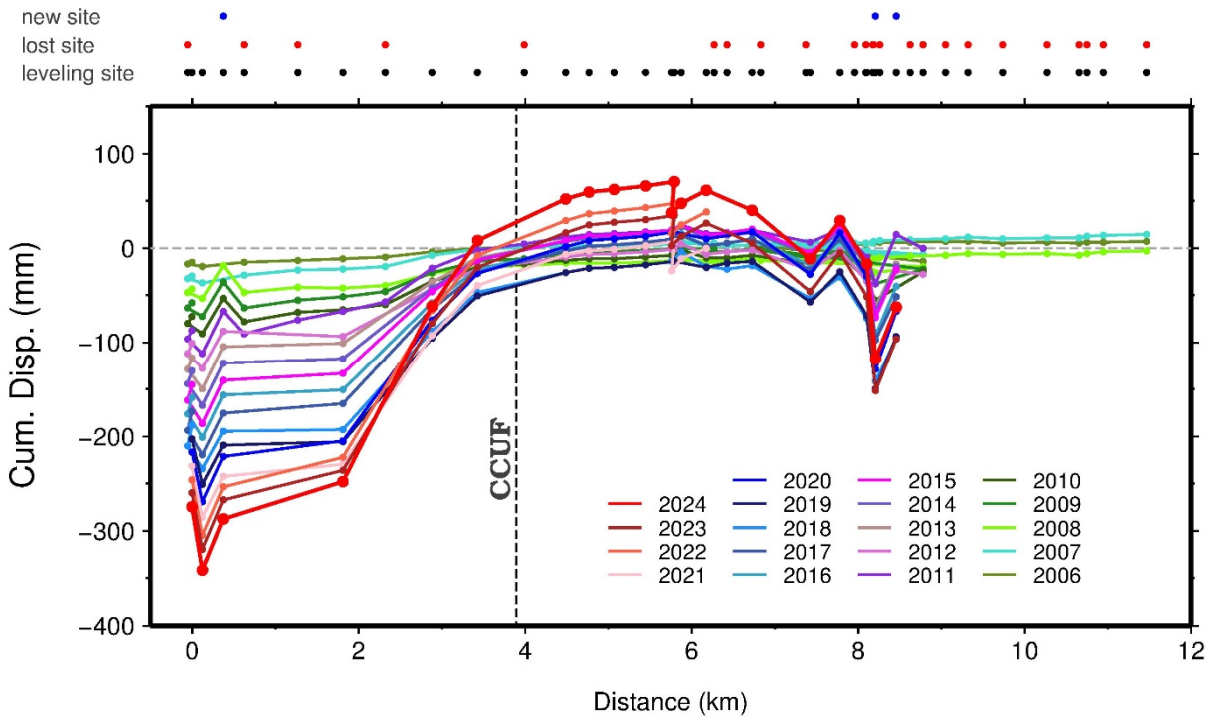


圖 8. 98：佳冬至七佳測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，CCUF 為潮州斷層。

Figure 8. 98: Cumulative elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. CCUF is Chaochou fault.

8-3-7 恆春地區精密水準測線

8-3-7-1 車城至牡丹測線

車城至牡丹測線橫跨恆春斷層（圖 8. 100），為 2020 年新建立的水準測線，測線長 7.8 公里（投影至剖面的長度）。從 2021 年至 2024 年止，共有 6 次的測量資料。本測線總共有 26 個點位，累計已有 7 個樁點（HC03、HC05、HC06、HC08、HC10、HC11、HC16）遺失，點位與 2023 年相比無增減。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 101，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線以 GNSS 連續站 GS59 之垂直速率（0.617 mm/yr），自 2021 年以來作為約制點來校正 CC19 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8. 99），兩站點相距 1.26 公里。

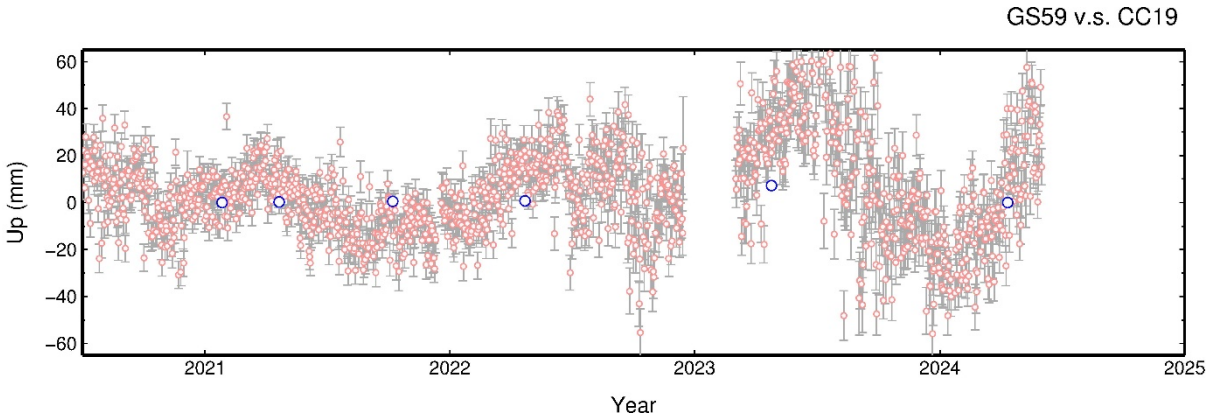


圖 8. 99：車城至牡丹測線水準點位 CC19 與連續站 GS59 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。

Figure 8. 99: Time series comparison between Checheng-Mudan leveling route bench mark CC19 and continuous GNSS station GS59. The distance between two stations are 1.26 km.

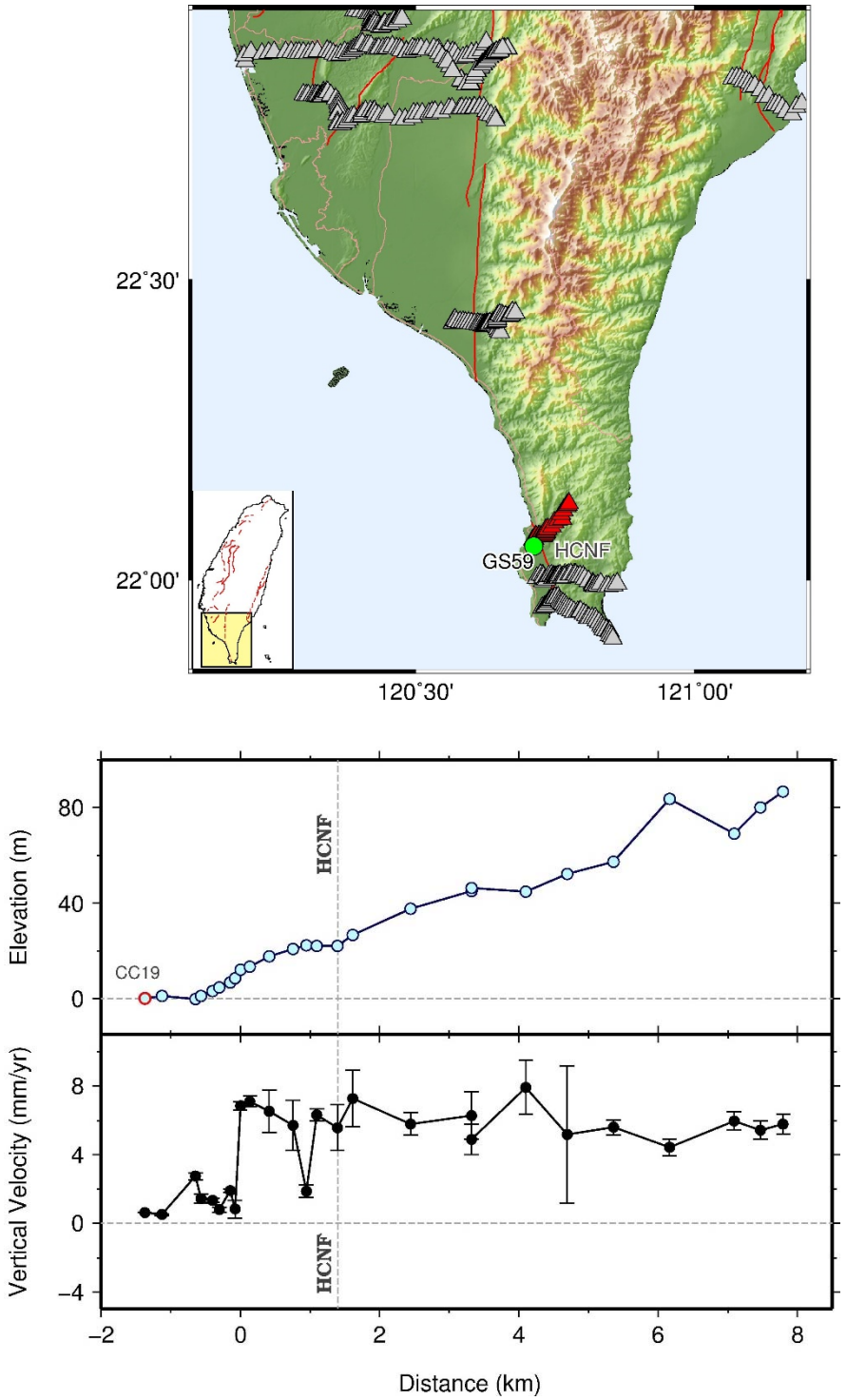


圖 8. 100：車城至牡丹測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，HCNF 為恆春斷層。

Figure 8. 100: Elevation change of the Checheng-Mudan leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCNF is Hengchun fault.

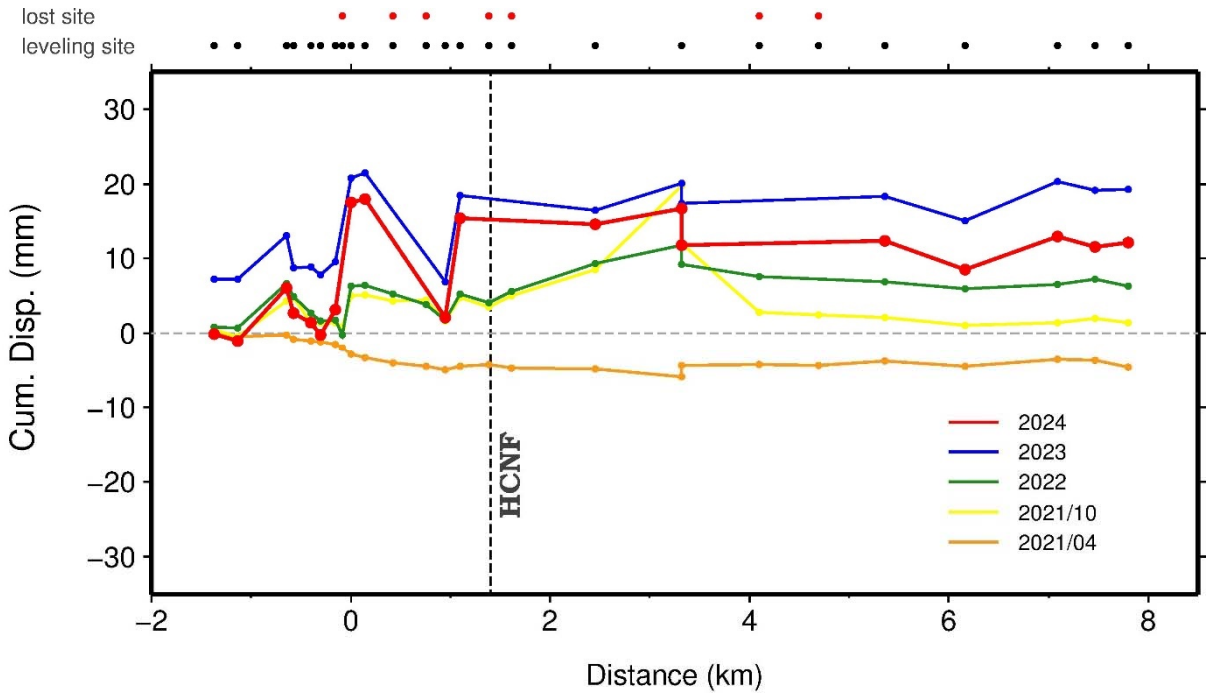


圖 8. 101：車城至牡丹測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCNF 為恆春斷層。

Figure 8. 101: Cumulative elevation change of the Checheng-Mudan leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCNF is Hengchun fault.

8-3-7-2 恆春西臺地至佳樂水測線

恆春西台地至佳樂水測線橫跨恆春斷層（圖 8. 103），測線長 14.5 公里（投影至剖面的長度）。從 2002 年至 2024 年共計 21 次施測，點位與 2023 年相比無增減。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 104，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 ~ 2024 年之間的高程差值。

本測線受 2006 年 12 月 26 日的恆春地震影響，以及 2016 年恆春地區發生速度變化，因此分別以 GNSS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-3.151 mm/yr）、震後至 2016 年速度變化前垂直速率（-4.134 mm/yr），以及 2016 年至今之垂直速率（-1.910 mm/yr），自 2002 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. 102），兩站點相距 0.1 公里。

因 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，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. 104）。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。

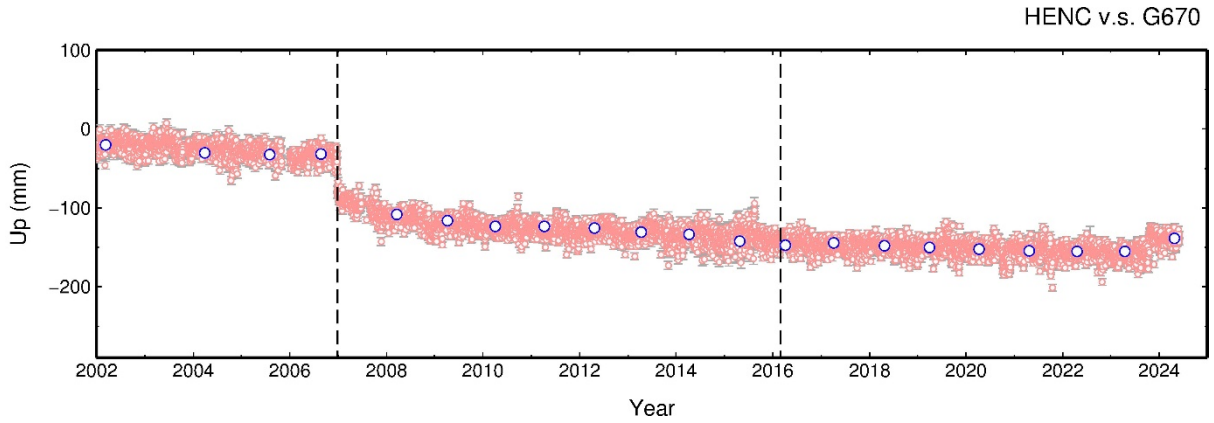


圖 8. 102：恆春西臺地至佳樂水測線水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。左側虛線為 2006 年 12 月 26 日恆春地震，右側為 2016 年 3 月速度發生變化。

Figure 8. 102: Time series of comparison between Hengchun-Jialeshuei leveling route bench mark G670 and continuous GNSS station HENC. The distance between two stations are 0.1 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake and the right one is the correction of March 2016 velocity change event.

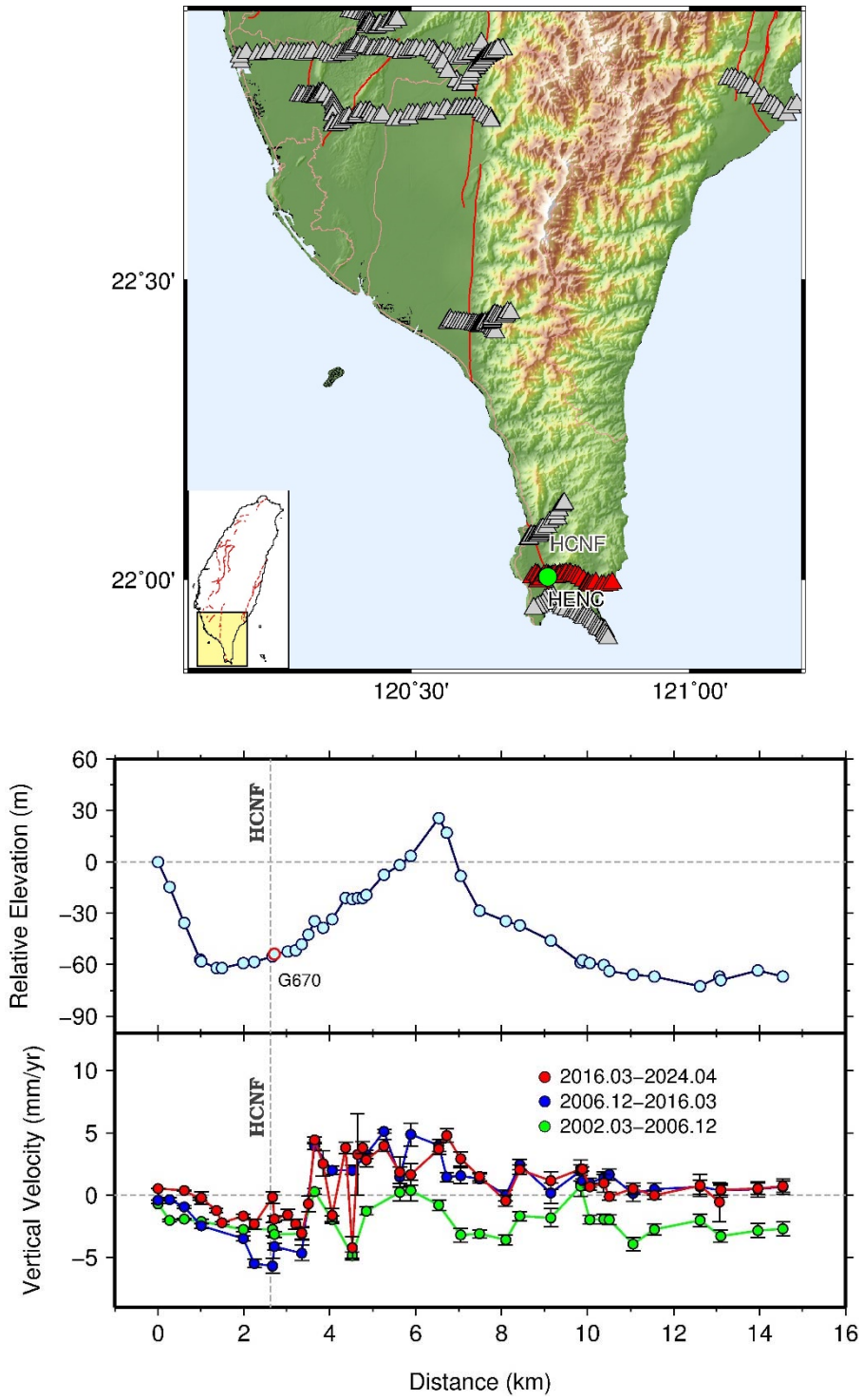


圖 8. 103：恆春西臺地至佳樂水測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度，藍色為 2006 - 2016 年恆春地震震後垂直速度，紅色為 2016 年 3 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，HCNF 為恆春斷層。

Figure 8. 103: 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. Green is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002 - 2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006 - 2016, red is the vertical velocity from March 2016 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCNF is Hengchun fault.

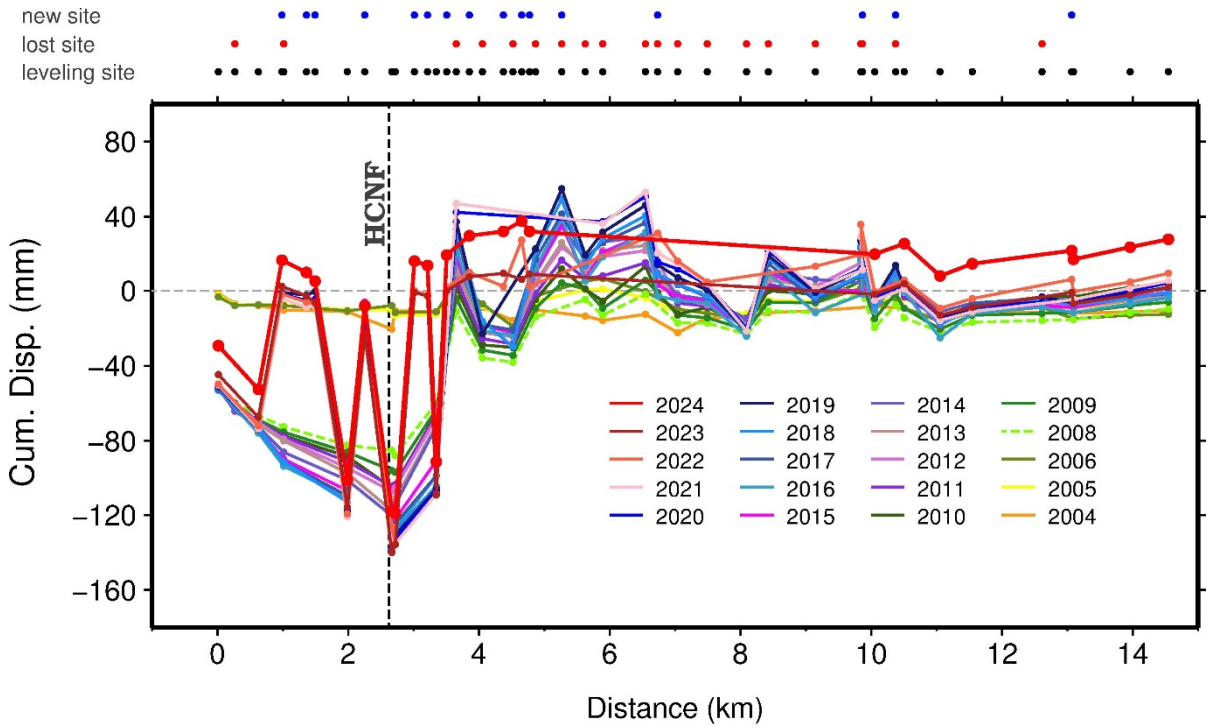


圖 8. 104：恆春西臺地至佳樂水測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCNF 為恆春斷層。

Figure 8. 104: Cumulative elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCNF is Hengchun fault.

8-3-7-3 南樹林至鵝鑾鼻測線

南樹林至鵝鑾鼻測線橫跨恆春斷層（圖 8. 106），測線長 12.7 公里（投影至剖面的長度）。從 2002 年至 2024 年共計 21 次施測，點位與 2023 年相比無增減。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 107，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線受 2006 年 12 月 26 日的恆春地震影響，以及 2010 年恆春地區發生速度變化，因此分別以 GNSS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（3.614 mm/yr）、震後至 2010 年速度變化前垂直速率（9.942 mm/yr），以及 2010 年至今之垂直速率（0.802 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. 105），兩站點相距 0.24 公里。

各時間分段之水準平均抬升速率（圖 8. 106），綠色為 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 4 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 4 月至 2024 年 4 月，跨斷層西側的抬升速度減緩至 1 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，造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化。南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震沉降量達 29.0 mm（圖 8. 107）。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。

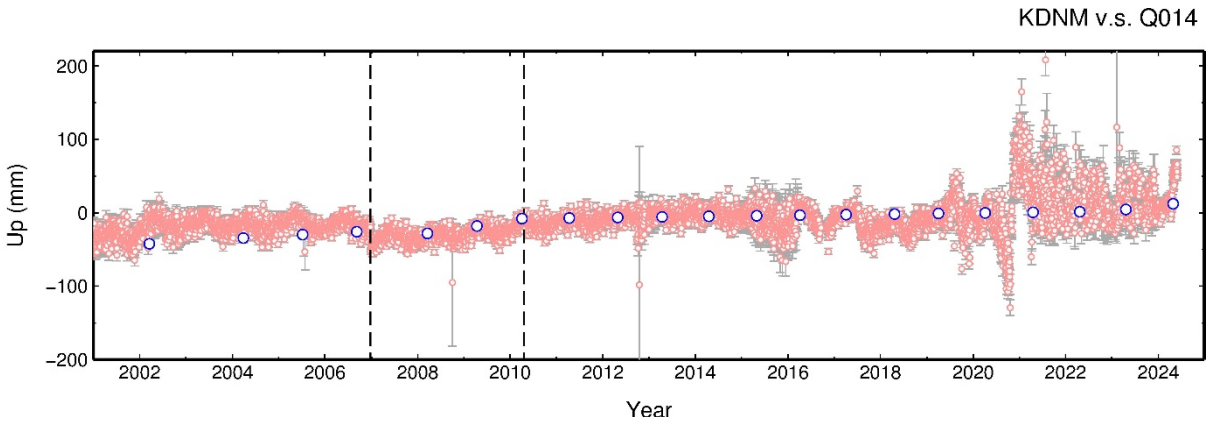


圖 8. 105：南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.24 公里。左側虛線為 2006 年 12 月 26 日恆春地震，右側為 2010 年 4 月速度發生變化。

Figure 8. 105: Time series comparison between Nanshulin-Eluanbi leveling route bench mark Q014 and continuous GNSS station KDNM. The distance between two stations are 0.24 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake and the right one is the correction of April 2010 velocity change event.

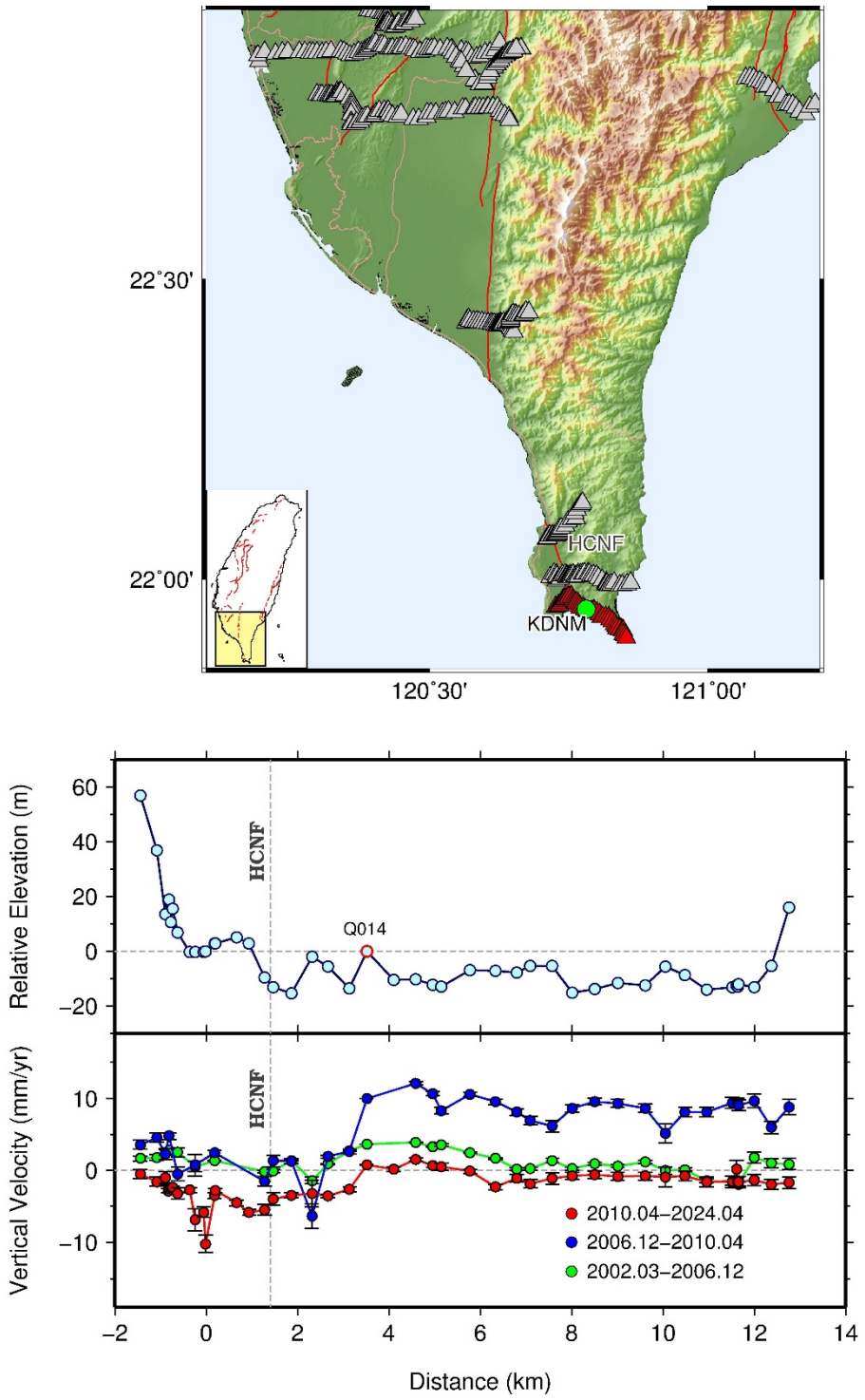


圖 8. 106：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度，藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度，紅色為 2010 年 4 月至今之垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，HCNF 為恆春斷層。

Figure 8. 106: 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. Green 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 from April 2010 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCNF is Hengchun fault.

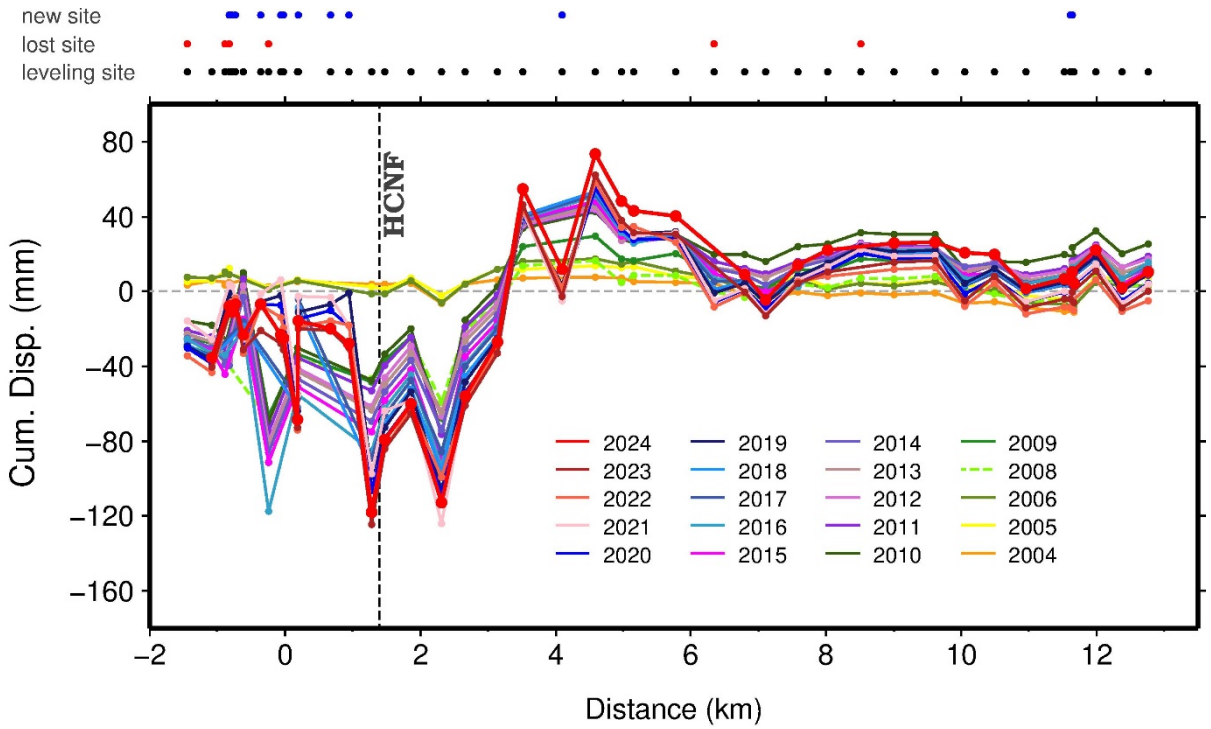


圖 8. 107：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，HCNF 為恆春斷層。

Figure 8. 107: Cumulative elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. HCNF is Hengchun fault.

8-3-8 東部地區精密水準測線

8-3-8-1 嶺頂至瀧澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層（圖 8. 109），測線長為 20.0 公里，從 2004 年至 2024 年共計有 22 次施測，其中 2018 年因為花蓮地震，故在該年 2、10 月進行施測。點位與 2023 年相比無增減。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 110，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

本測線以 GNSS 連續站 TUNM 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 N670 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8. 108）。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. 109），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. 110）。

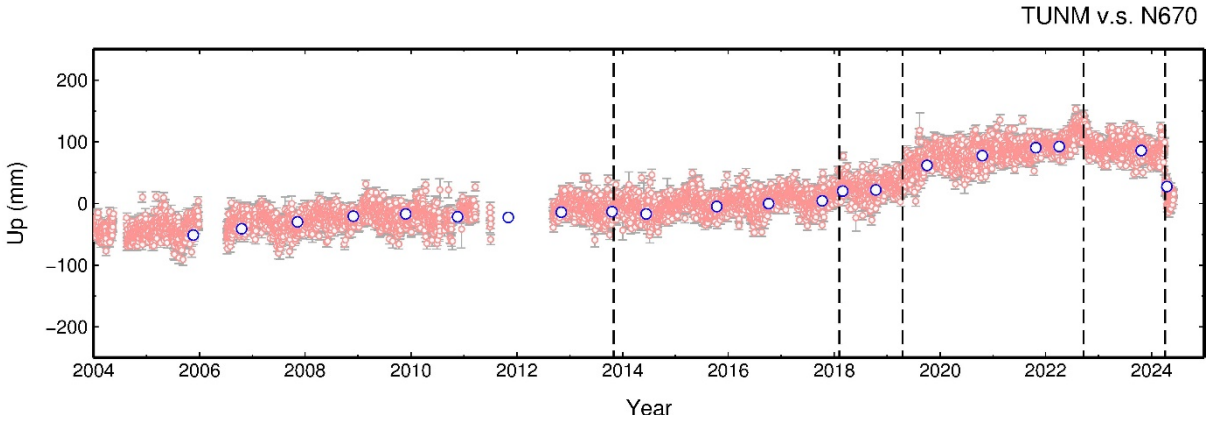


圖 8. 108：嶺頂至瀧澗水準點位 N670 與連續站 TUNM 之時間序列比較，兩者相距 2.73 公尺。

Figure 8. 108: Time series comparison between Lingding-Takigami leveling bench mark N670 and continuous GNSS station TUNM. The distance between two stations are 2.73 m.

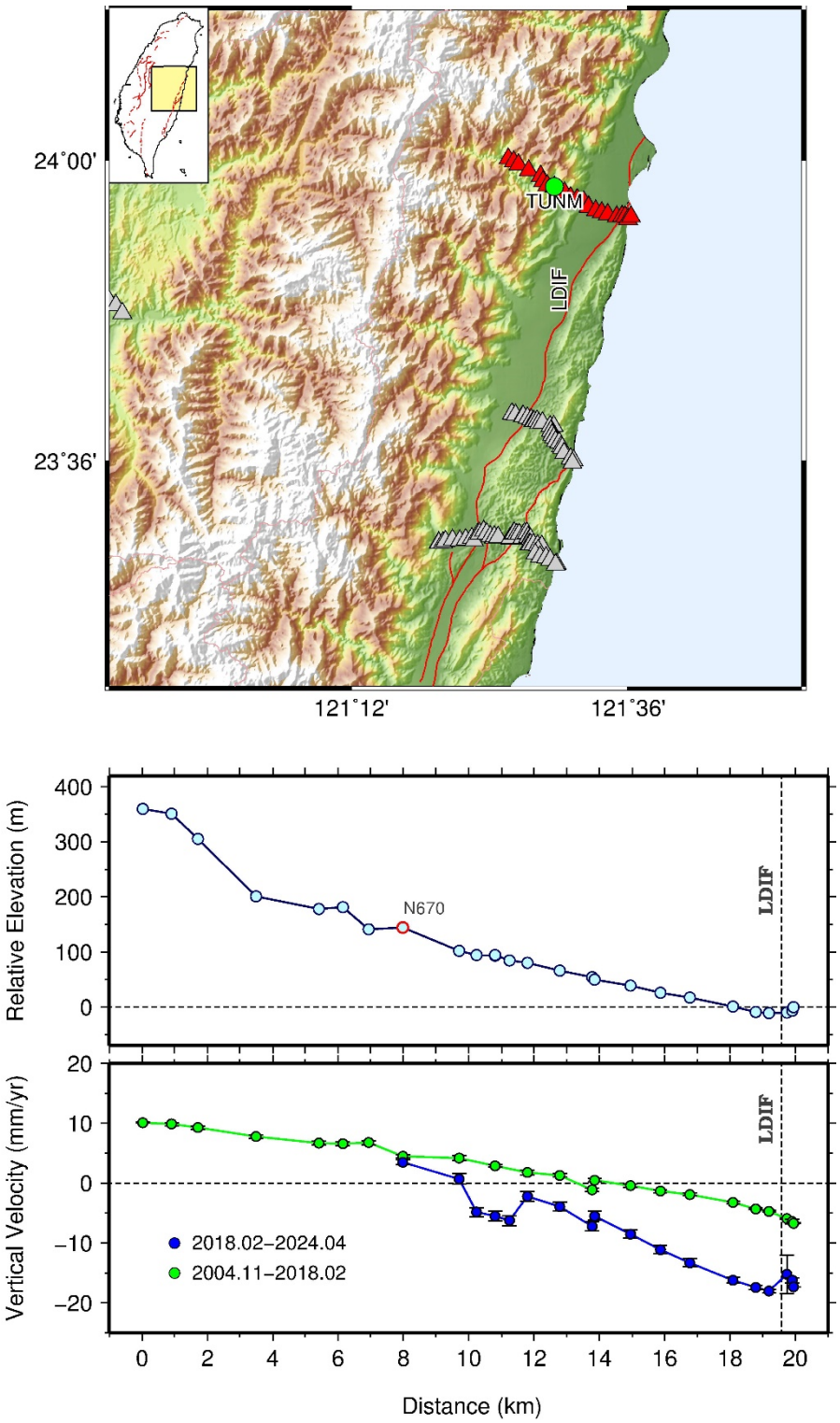


圖 8. 109：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。綠色為 2004 - 2018 年花蓮地震震前垂直速度，藍色為 2018 年 2 月至今的垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 8. 109: 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. Green is the vertical velocity before the 2018 Hualien earthquake of 2004-2018, and blue is the vertical velocity from 2018 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. LDIF is Lingding fault.

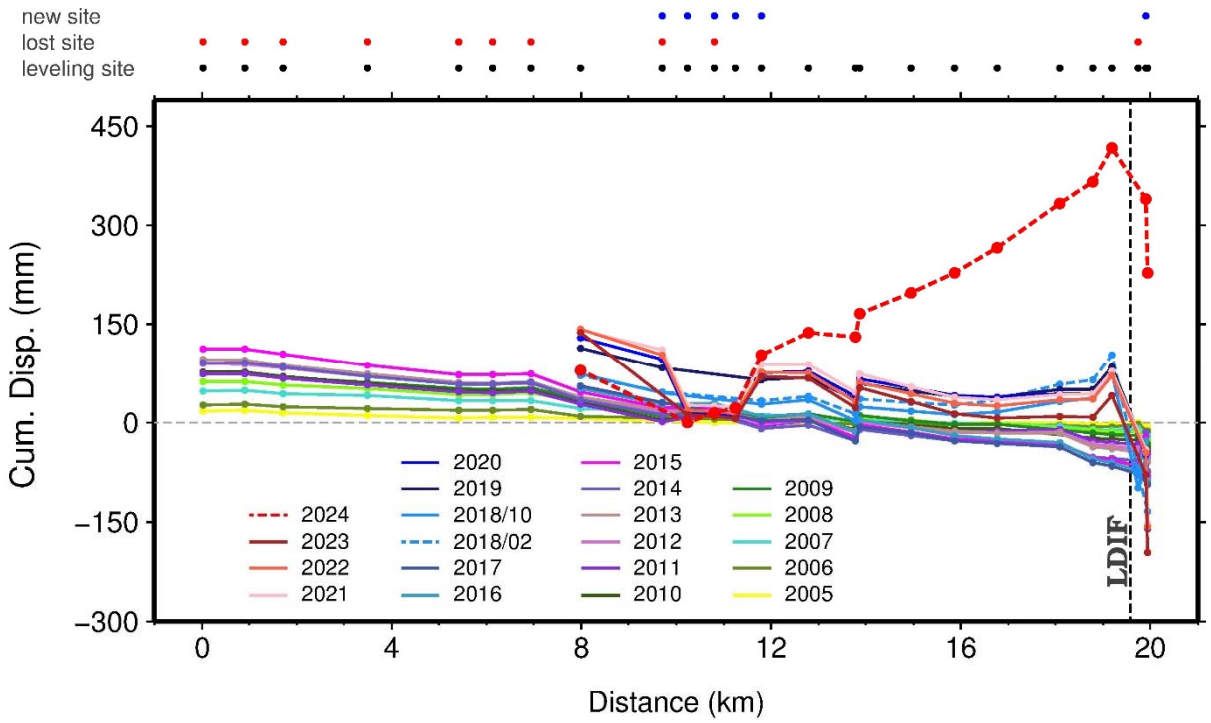


圖 8. 110：嶺頂至瀧澗測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 8. 110: Cumulative elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. LDIF is Lingding fault.

8-3-8-2 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. 112），測線長為 12.1 公里（投影至剖面的長度），從 2004 年至 2024 年共計有 23 次施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在當年 10、11 月連續進行施測；又 2022 年因為光復地震，故在當年 4、7 月連續進行施測。點位與 2023 年相比無增減。

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. 111）。

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. 112）。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（中央氣象署地震報告編號第 111019 號），造成臺東豐濱一帶有明顯位移。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 113，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

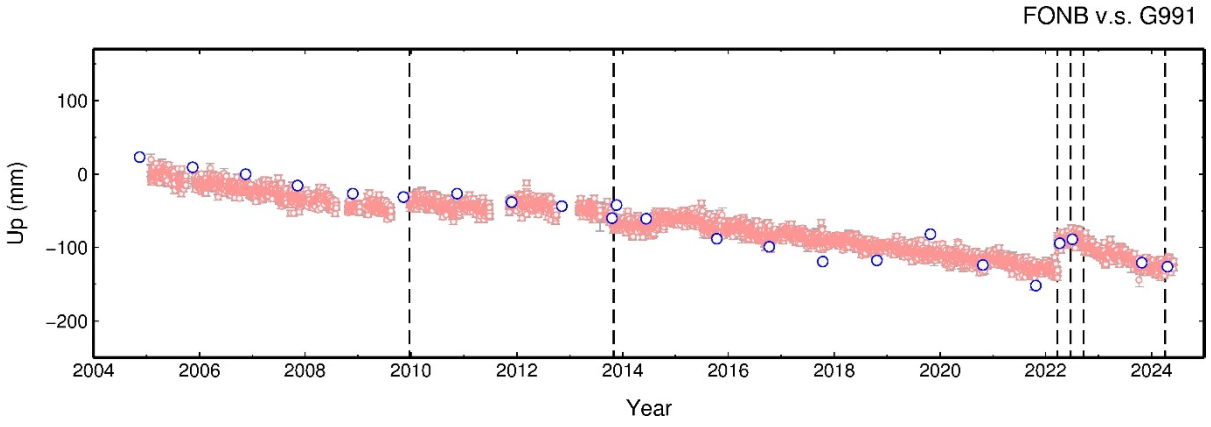


圖 8. 111：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較，兩者相距 0.15 公里。

Figure 8. 111: Time series comparison between Guangfu-Toyohama leveling bench mark G991 and continuous GNSS station FONB. The distance between two stations are 0.15 km.

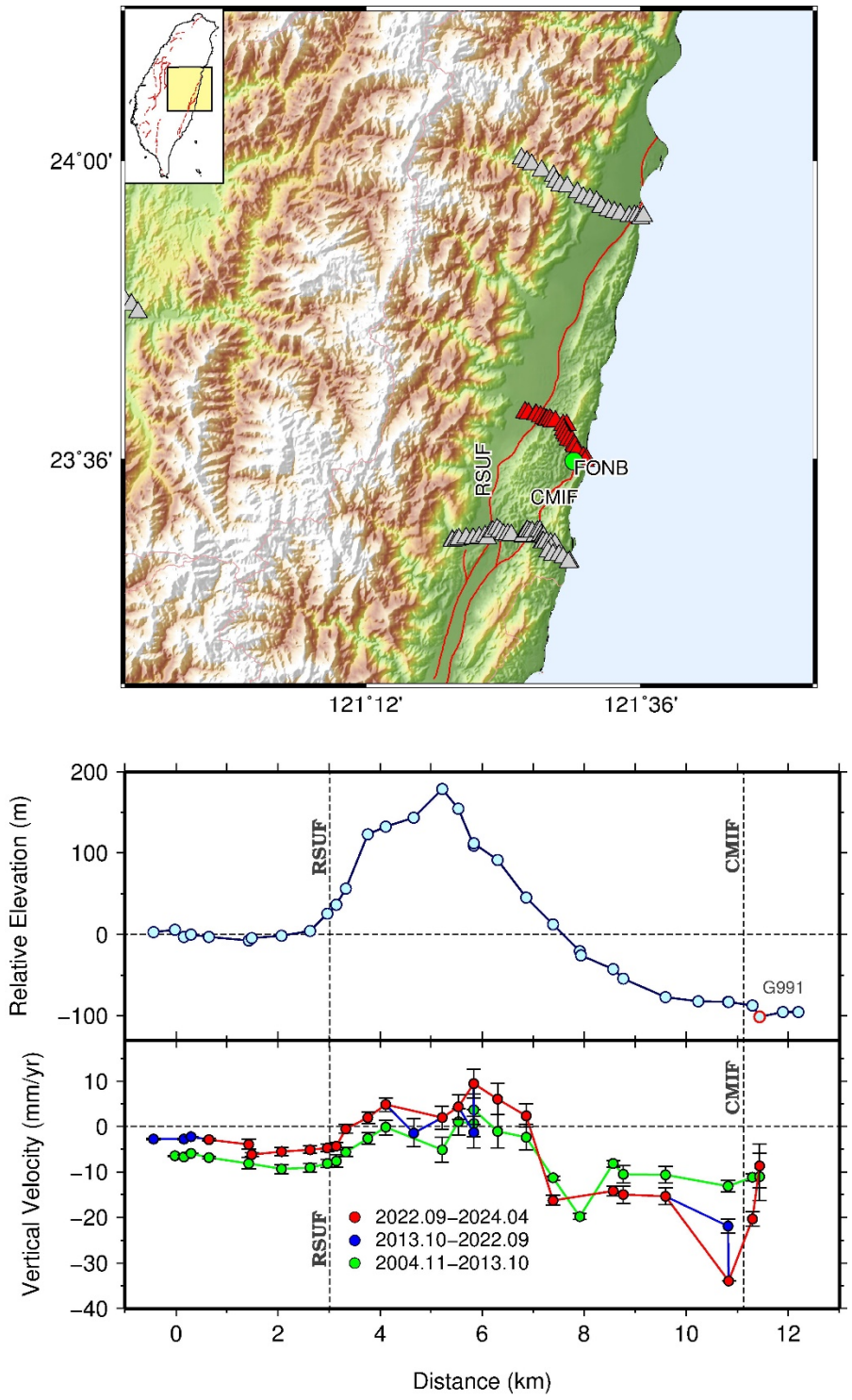


圖 8. 112：光復至豐濱測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。綠色為 2004 - 2013 年花蓮地震震前垂直速度，藍色為 2013 - 2022 年花蓮地震震後垂直速度，紅色為 2022 年至今的垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8. 112: 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 2013 Hualien earthquake of 2004-2013, blue is the vertical velocity after the 2013 Hualien earthquake of 2013-2022, red is the vertical velocity from 2022 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. RSUF is Rueyshui fault and CMIF is Chimei fault.

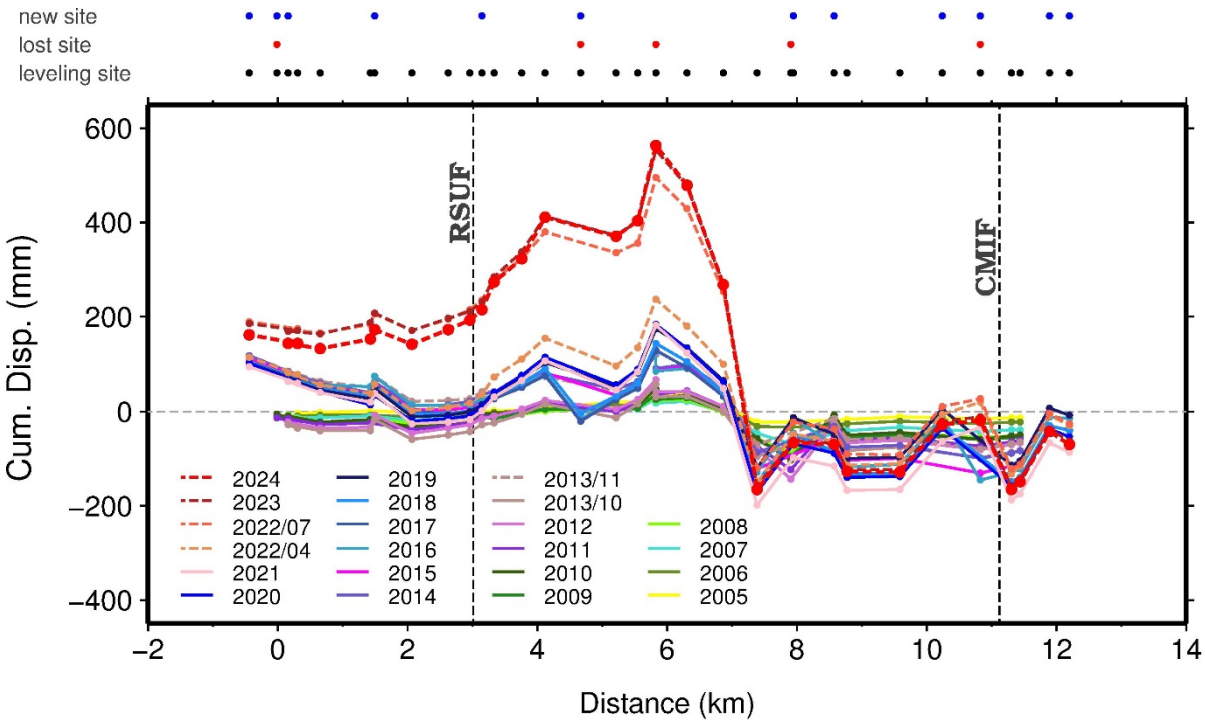


圖 8. 113：光復至豐濱測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8. 113: Cumulative elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. RSUF is Rueyshui fault and CMIF is Chimei fault.

8-3-8-3 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. 115），測線長為 18.0 公里，2004 年至 2024 年間進行共 23 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。又 2022 年因為關山−池上地震，故在當年 3、10 月連續進行施測。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GA25（拔子）損毀，無法繼續觀測。

本測線以 GPS 連續站 KNKO 之垂直速率（0.6 mm/yr），自 2004 年以來作為控制點來校正 GA05 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8. 114）。

根據圖 8. 115，此測線在跨玉里斷層兩側之垂直速度幾乎不變，在跨瑞穗斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-12 mm/yr 緩升至-2 mm/yr，可說明此測線跨過瑞穗與奇美二條斷層仍有地質活動。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 116，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 ~ 2024 年之間的高程差值。

此測線在 2013 年瑞穗地震自西向東抬升量由 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−豐濱測線自西向東抬升量由 100.0 mm 逐漸減少至 30.0 mm，然後驟減至幾乎無抬升（圖 8. 116）。

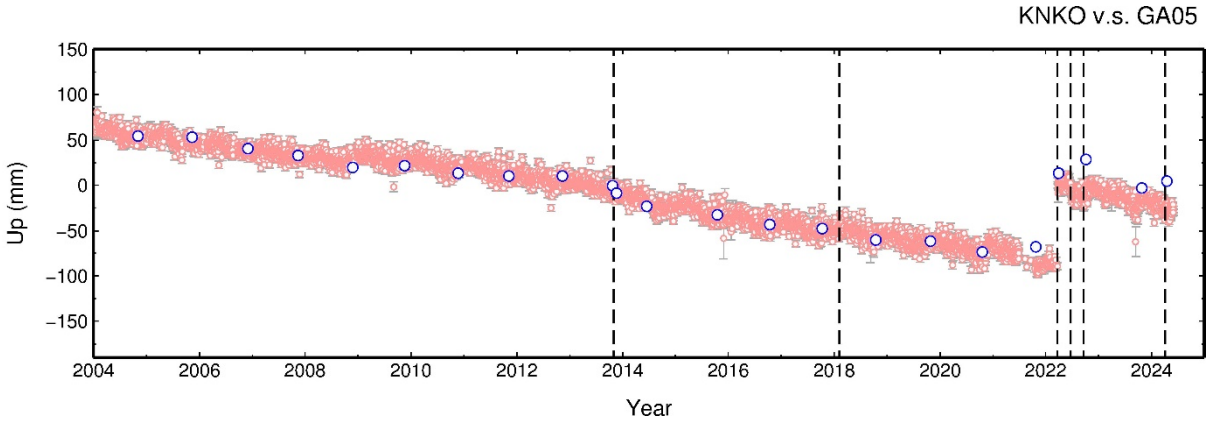


圖 8. 114：紅葉至靜浦水準點位 GA05 與連續站 KNKO 之時間序列比較，兩者相距 1.54 公里。

Figure 8. 114: Time series comparison between Hongye-Jingpu leveling bench mark GA05 and continuous GNSS station KNKO. The distance between two stations are 1.54 km.

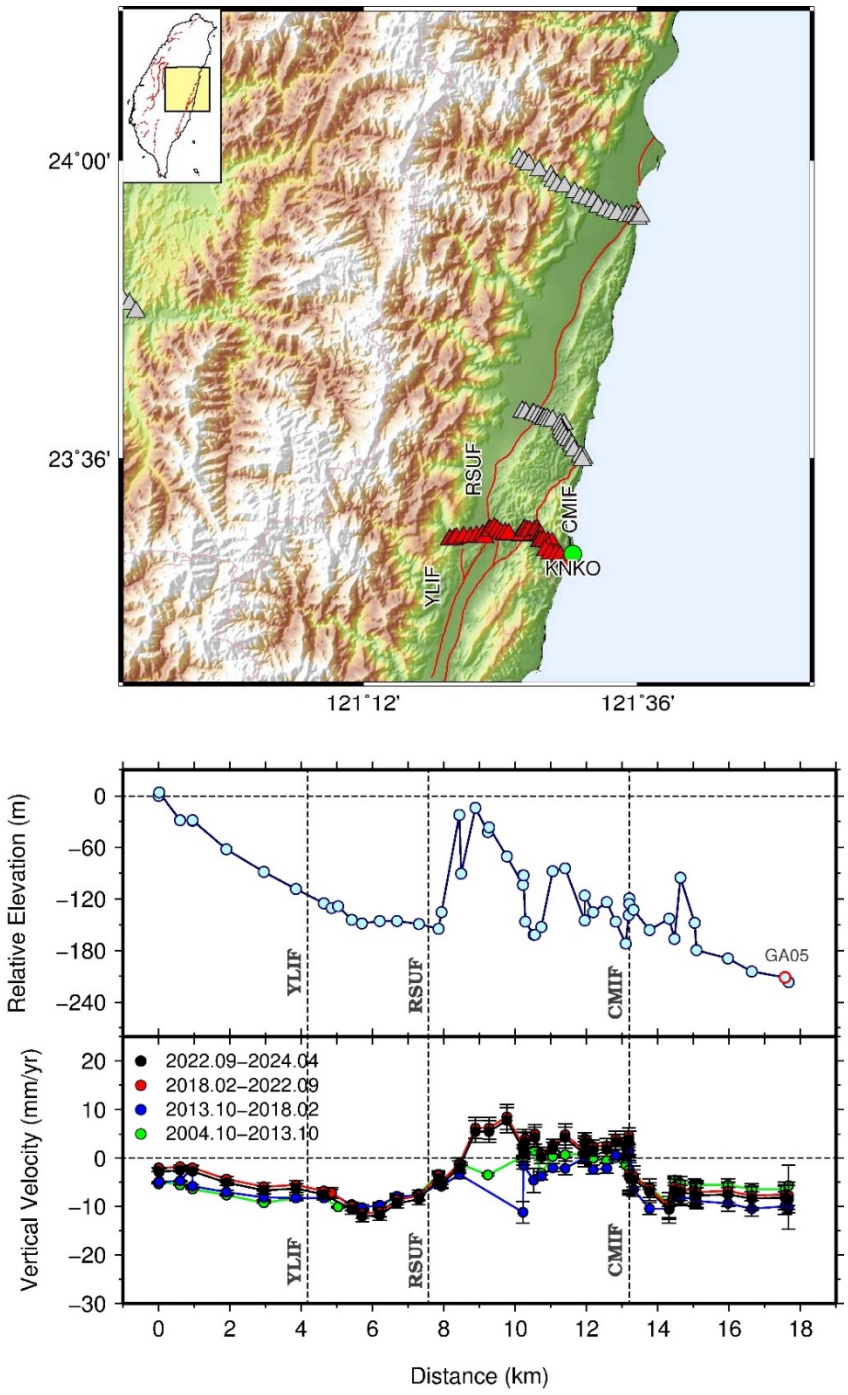


圖 8. 115：紅葉至靜浦測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。綠色為 2004 - 2013 年花蓮地震震前垂直速度，藍色為 2013 - 2018 年花蓮地震震後垂直速度，紅色為 2018 - 2022 年關山−池上地震震前垂直速度，黑色為 2022 年至今的垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8. 115: 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 2013 Hualien earthquake of 2004-2013, blue is the vertical velocity after the 2013 Hualien earthquake of 2013-2018, red is the vertical velocity before the 2022 Guanshan-Chishang earthquake of 2018-2022, black is the vertical velocity from 2022 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, and CMIF is Chimei fault.

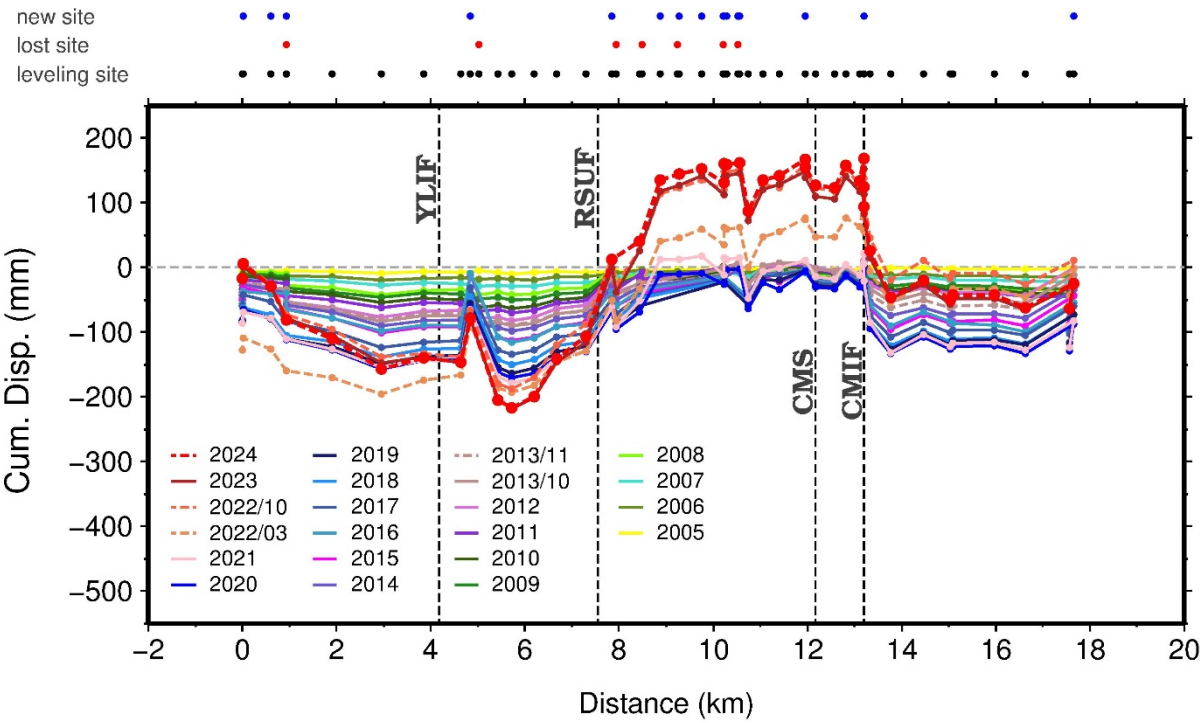


圖 8. 116：紅葉至靜浦測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

Figure 8. 116: Cumalative elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, CMS is Chimei syncline, and CMIF is Chimei fault.

8-3-8-4 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. 118），測線長約 14 公里，2009 年至 2024 年間共進行 17 次的施測。其中 2022 年因為關山−池上地震，故在當年 3、10 月連續進行施測。本測線測量點位經查證後已確認測量椿點 S265（岩灣國小）損毀，無法繼續觀測。

各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 119，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023 ~ 2024 年之間的高程差值。

本測線以 GNSS 連續站 S104 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. 117）。

此測線之垂直速度在利吉斷層兩側有不同的形態，西側從東成跨過鹿野斷層到岩灣國小一帶，垂直速度約由-8.0 mm/yr 上升至 1.0 mm/yr；東側（岩灣國小至富岡）則約由 0 mm/yr 下降至-4.8 mm/yr。此外，從歷年高程變化來看（圖 8. 119），2014 年至 2015 年間，鹿野斷層以東有顯著的抬升，最大變化量達 25 mm；2015 年至 2016 年間，在鹿野斷層以西約 2 公里處則約有 20 mm 的變化量；又，自 2021 年以來，跨鹿野斷層兩側及中央山脈側皆有顯著抬升，推測鹿野斷層近期仍有活動。

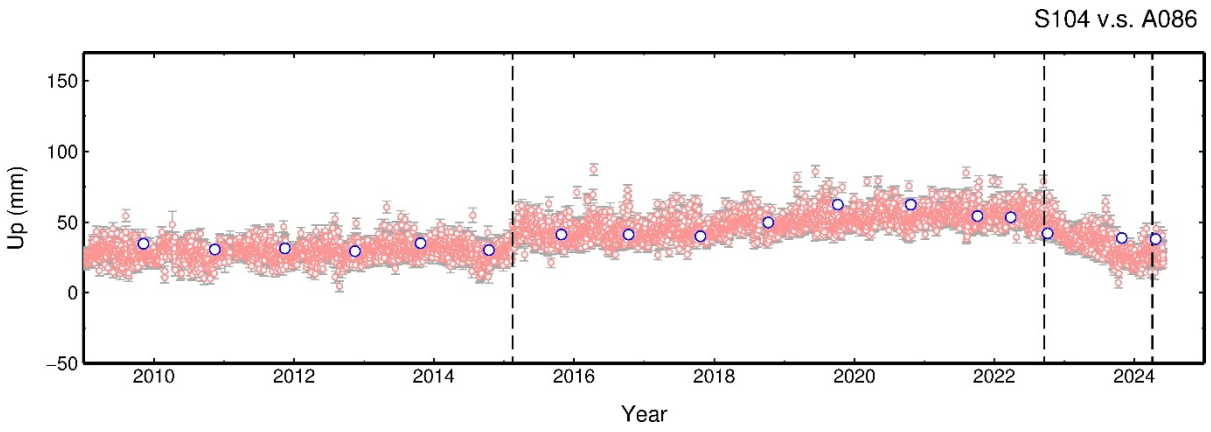


圖 8. 117：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 S104 之時間序列比較，兩者相距 3.02 公里。

Figure 8. 117: Time series comparison between Dongcheng-Fugang leveling bench mark A086 and continuous GNSS station S104. The distance between two stations are 3.02 km.

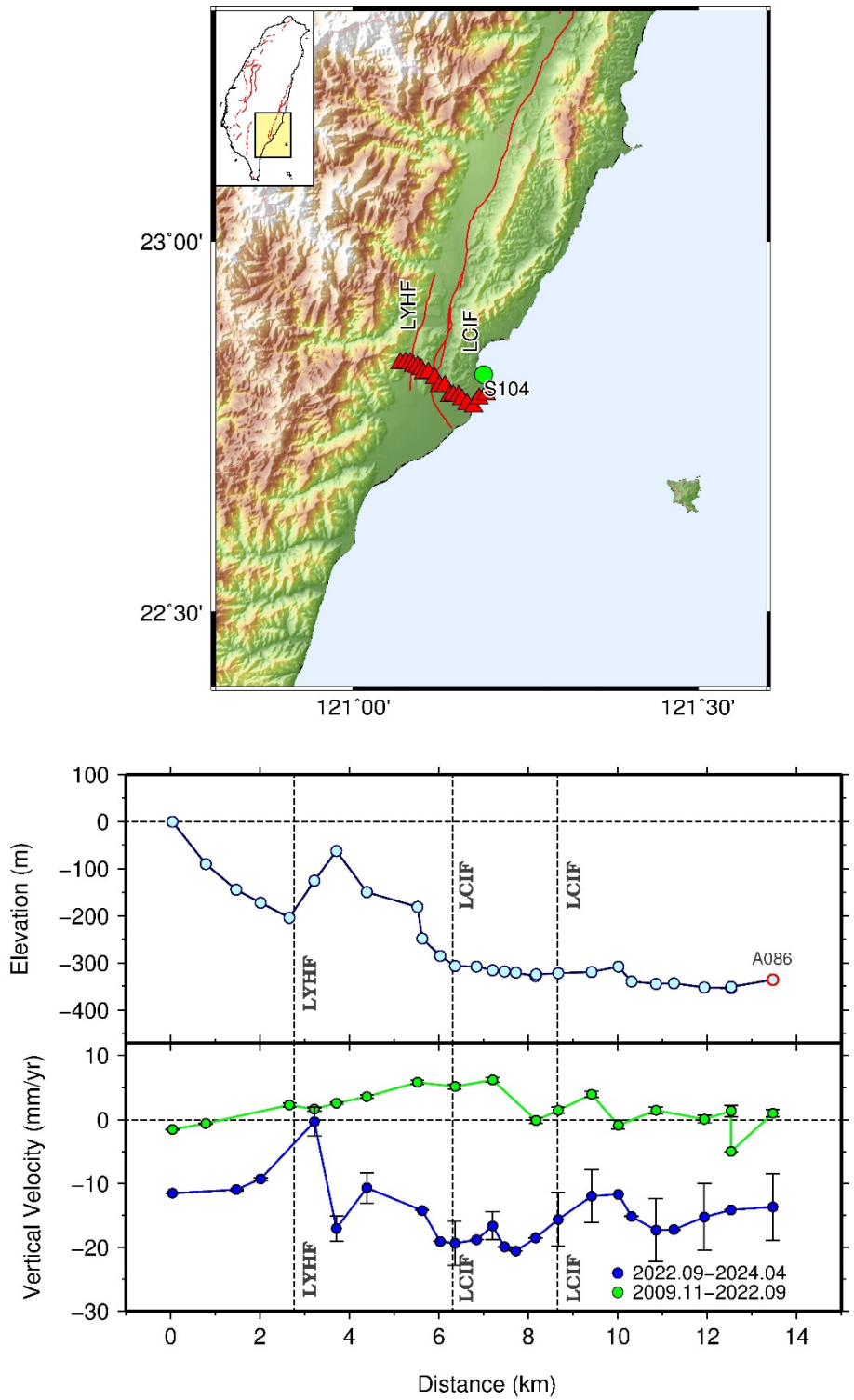


圖 8. 118：東成至富岡測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2009 - 2022 年關山−池上地震震前垂直速度，藍色為 2022 年至今的垂直速度。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 8. 118: 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. Green is the vertical velocity before the 2022 Guanshan-Chishang earthquake of 2009-2022, and blue is the vertical velocity from 2022 to the present. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. LYHF is Luyeh fault, LCIF is Lichi fault.

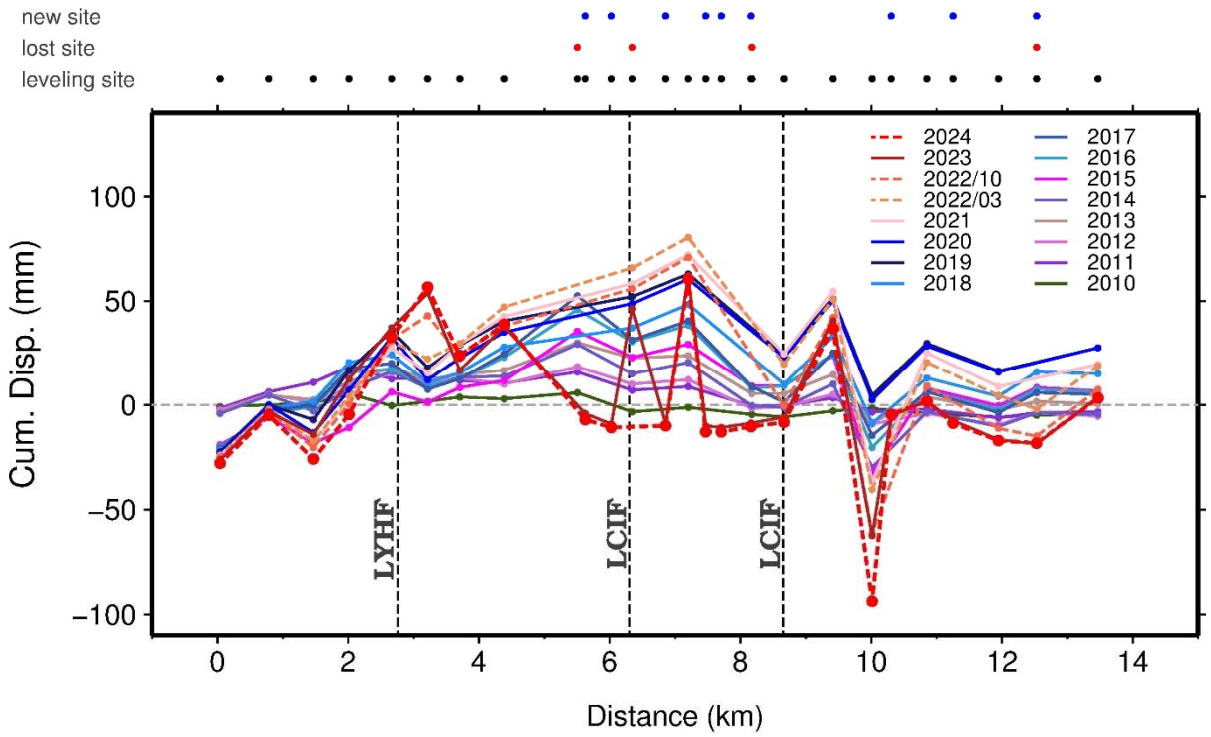


圖 8. 119：東成至富岡測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 8. 119: Cumulative elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. LYHF is Luyeh fault and LCIF is Lichi fault.

8-3-9 宜蘭地區精密水準測線

8-3-9-1 梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層（圖 8. 121），測線長約 44 公里，2011 年至 2024 年間共進行 12 次施測，點位與 2023 年相比無增減。

本測線以 GNSS 連續站 GS72 之垂直速率（-5.928 mm/yr），自 2011 年開始作為約制站來校正 G248 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 8. 120）。各年度之水準施測成果，以累積高程差展示於圖 8. 122，即從觀測期間的第 2 年開始，以相鄰兩年之高程差值進行累加，以圖中 2024 年的線段為例，代表自觀測起始開始累加至 2023～2024 年之間的高程差值。

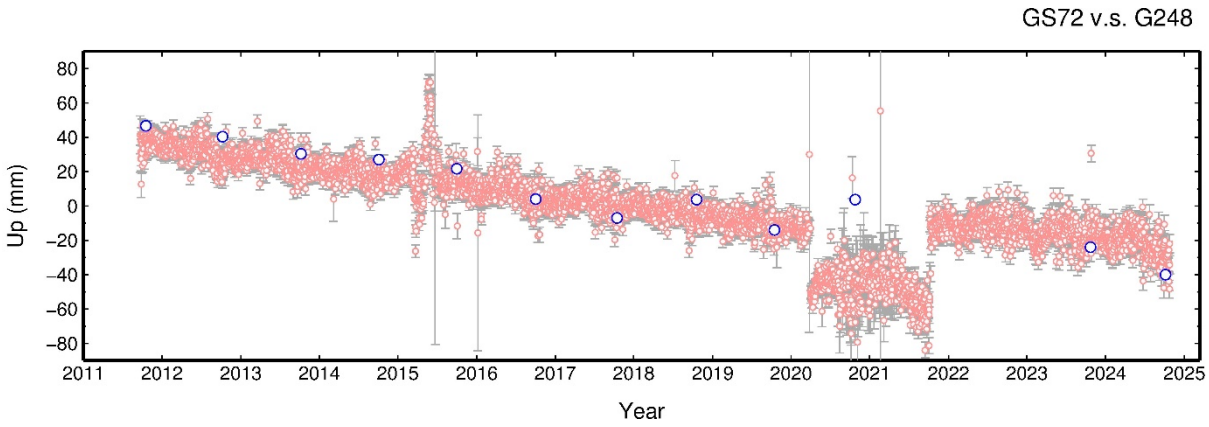


圖 8. 120：水準點位 G248 與連續站 GS72 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

Figure 8. 120: Time series comparison between leveling bench mark G248 and continuous GPS station GS72. The distance between two stations are 0.01 km.

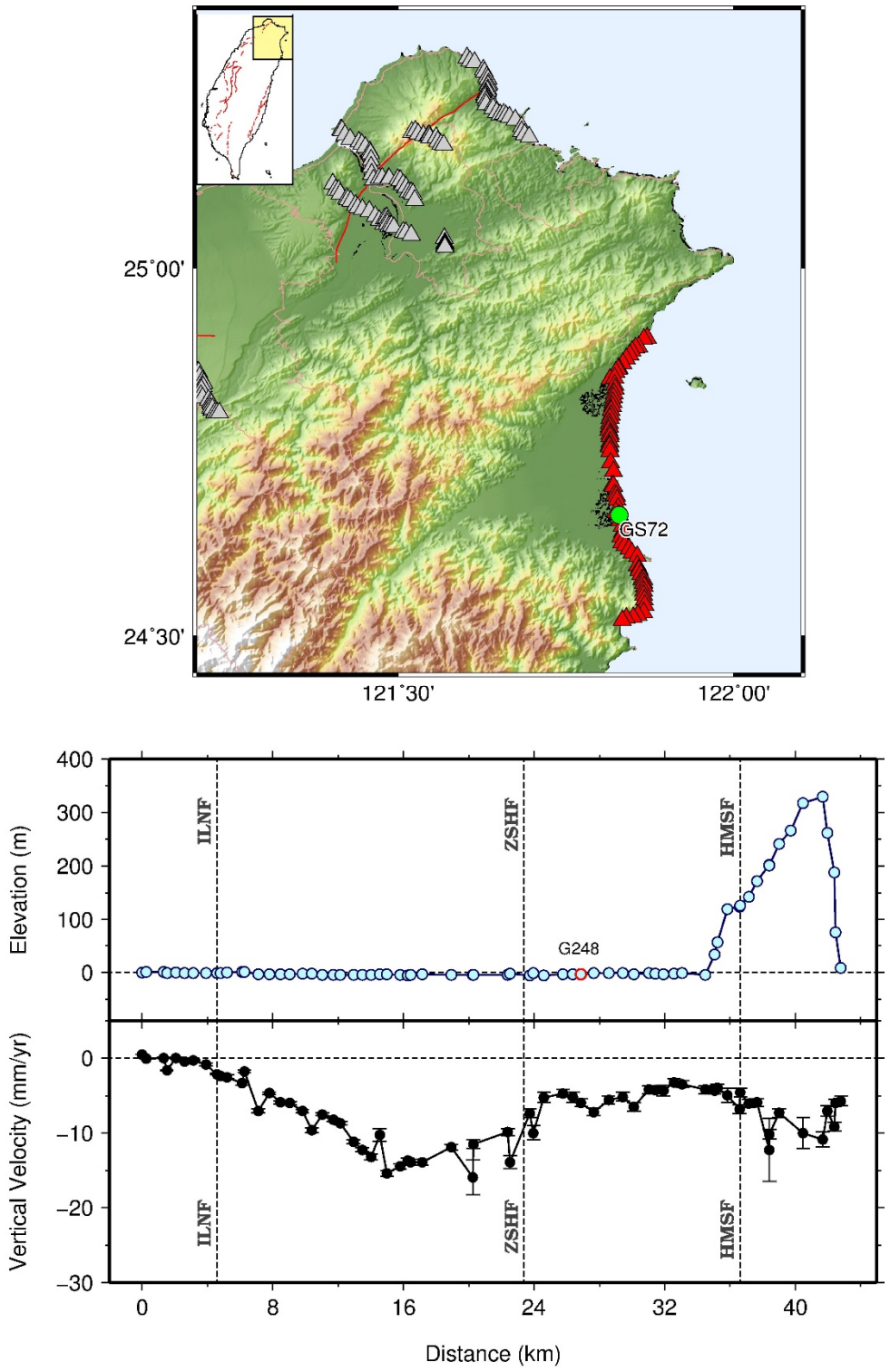


圖 8. 121：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置，ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水−梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

Figure 8. 121: Elevation change of the Gengfang-Dongao leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. ILNF is Yilan fault, ZSHF is Zhuoshui-Lishan fault, and HMSF is Hsiaomaoshan fault.

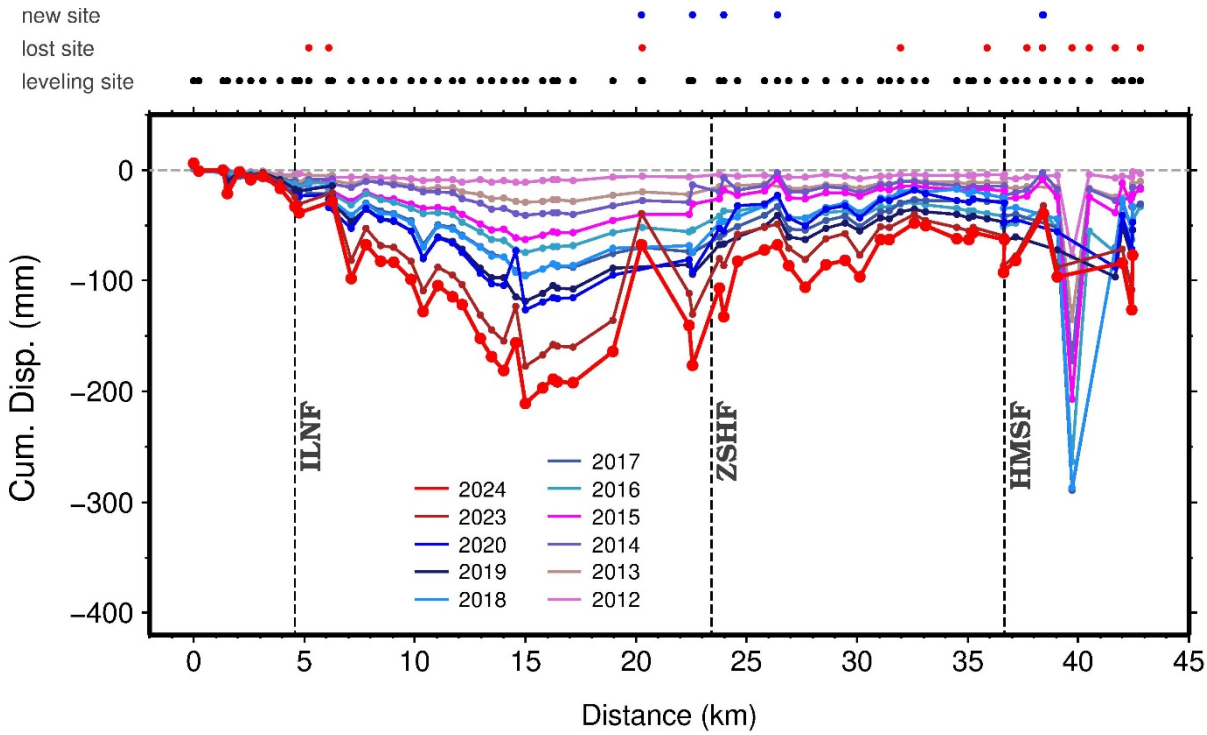


圖 8. 122：梗枋至東澳測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水−梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

Figure 8. 122: Cumulative elevation change of the Gengfang-Dongao leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. ILNF is Yilan fault, ZSHF is Zhuoshui-Lishan fault, and HMSF is Hsiaomaoshan 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。

臺北地區山腳斷層上盤主要以沉降為主，水準測線大抵為沉陷，桃園台地則呈現抬升（圖 8. 123）。桃竹苗地區呈現顯著抬升或沉陷（圖 8. 124）。

嘉南地區從 2002 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. 125），九芎坑斷層、六甲斷層與後甲里斷層以東為抬升，西側接近海岸線為沉降。

高屏地區從 2002 年至今，路竹至茂林測線跨鳳山丘陵呈抬升，屏東平原多為沉陷；岡山至安坡測線主要為沉陷，與周圍 GNSS 測站相似（圖 8. 126）。

恆春地區從 2002 年至今，車城至牡丹與恆春西臺地至佳樂水測線，跨恆春斷層東側區域顯著抬升，但在兩測線之間中央山脈南段區域，GNSS 移動站則顯示為沉降。此外，於恆春半島南端的谷地，大抵為沉降趨勢（圖 8. 127）。

花東地區自 2002 年至今，在花東縱谷以西之中央山脈區域，明顯可見南北兩區域呈現顯著的抬升，在紅葉至靜浦與光復至豐濱兩測線之間的區域則呈下陷。海岸山脈側除了中段局部小區域為抬升外，大抵為沉降（圖 8. 128）。

宜蘭地區自 2004 年至今，不論是水準、GNSS 連續站與 GNSS 移動站速度場型態都有相當好的一致性，蘭陽平原呈顯著下陷（圖 8. 129）。

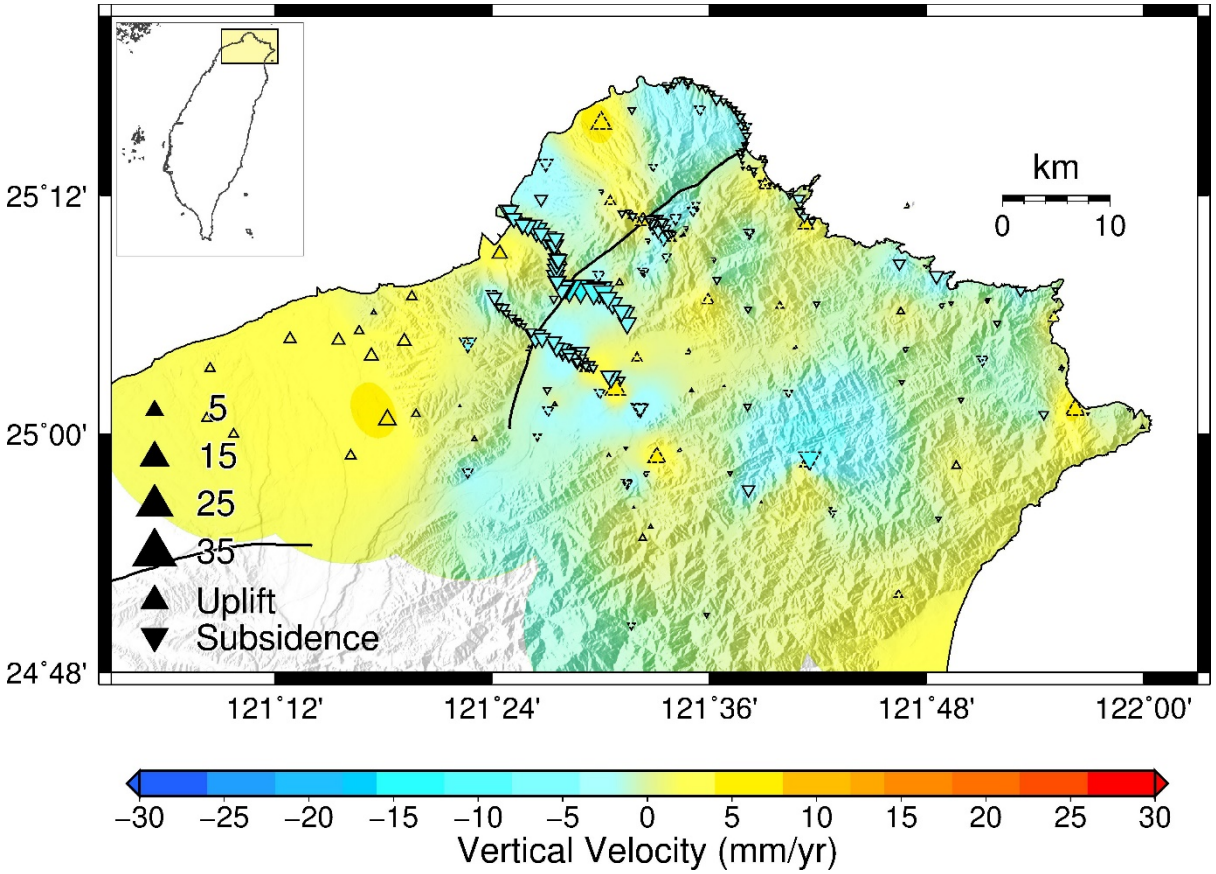


圖 8. 123：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 觀測時間為 2002 - 2024 年，精密水準觀測時間為 2004 - 2024 年。

Figure 8. 123: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taipei area. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. 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 2002 to 2024; while precise leveling is from 2004 to 2024.

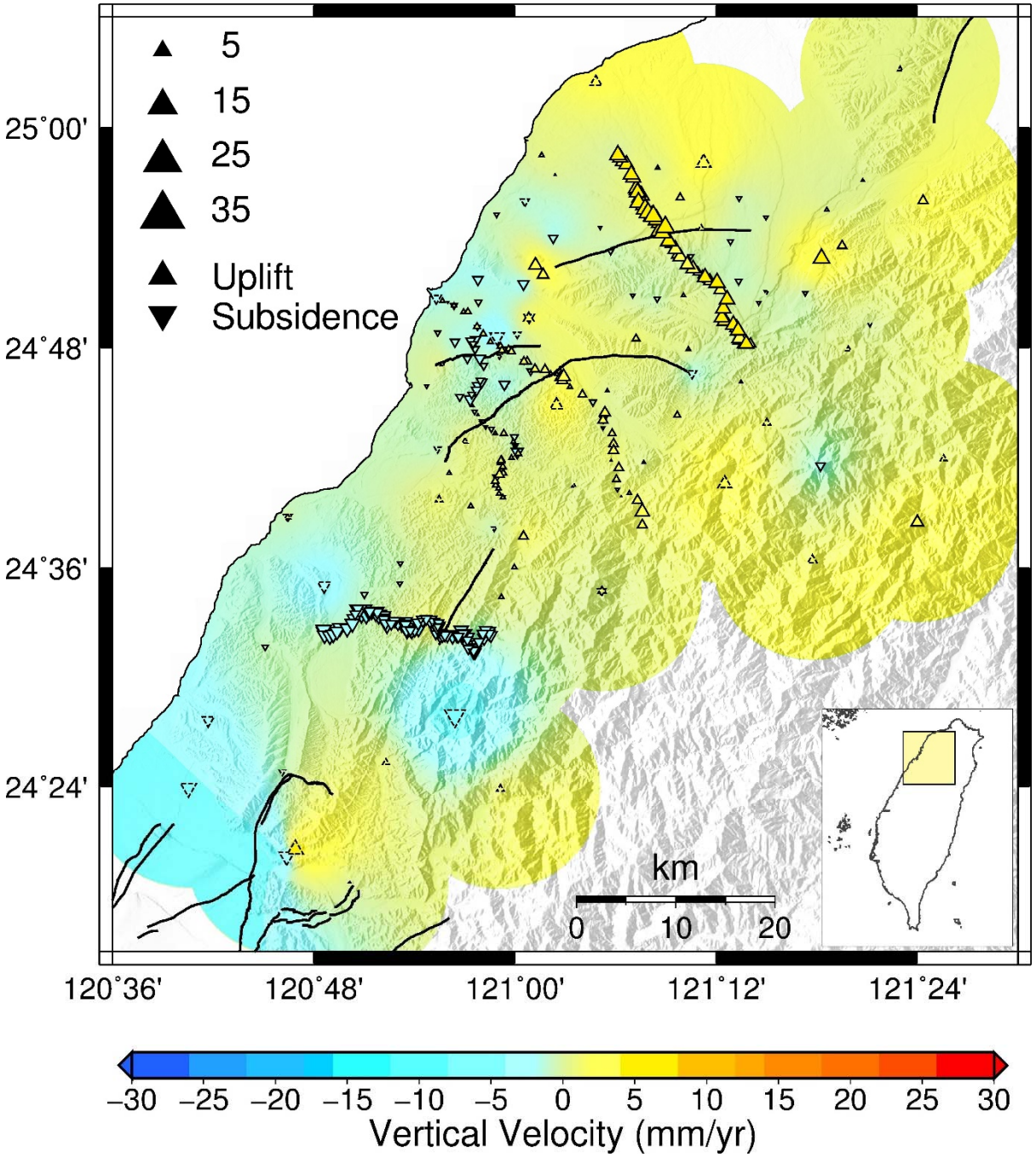


圖 8. 124：桃竹苗地區 2002 - 2024 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 124: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

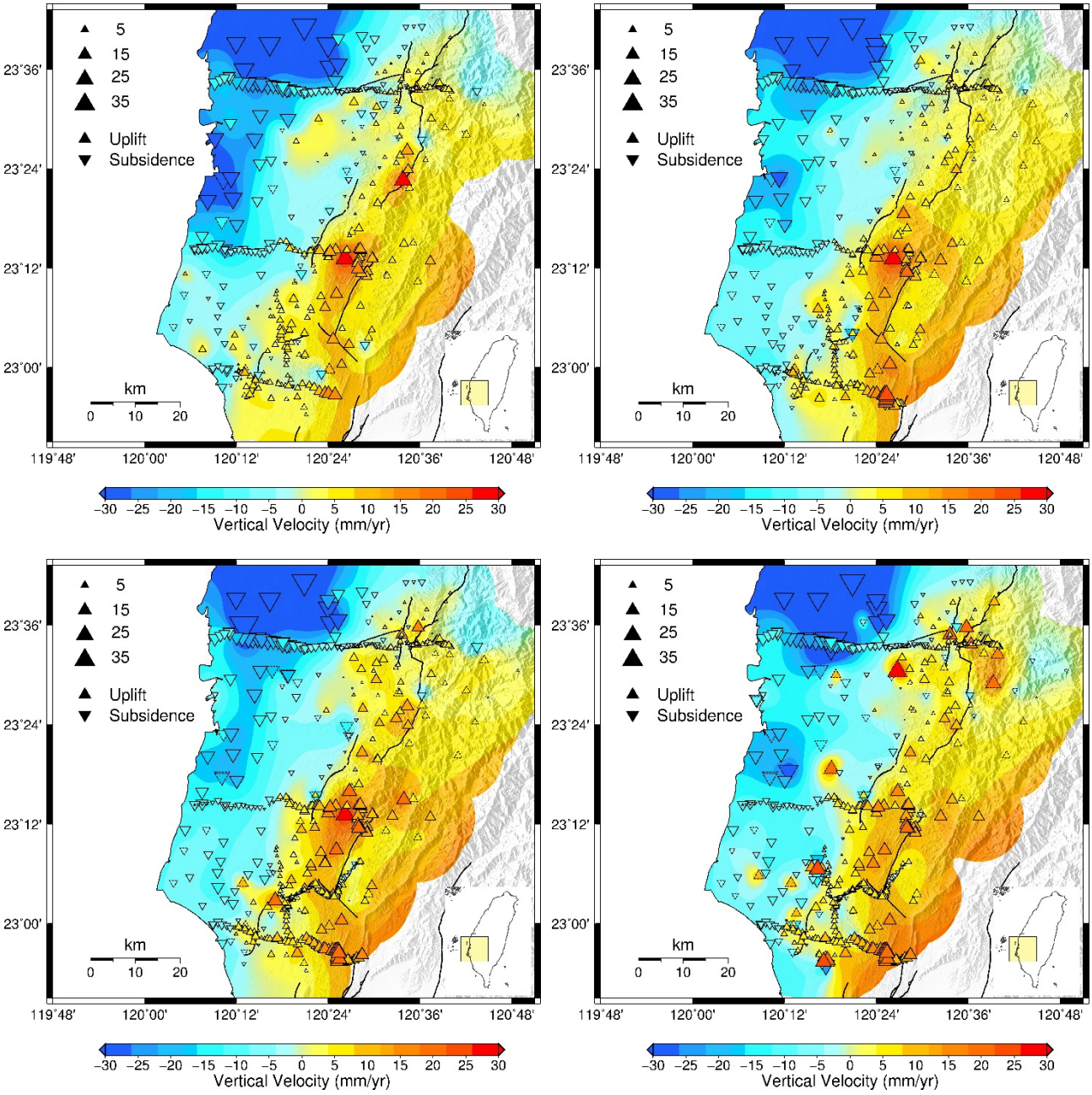


圖 8. 125：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2010 年速度場，右上圖表示震後 2010 - 2016 年速度場，左下圖表示震後 2016 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 125: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Chiayi and Tainan areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2010; the top right one is from 2010-2016; the bottom left is from 2016-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

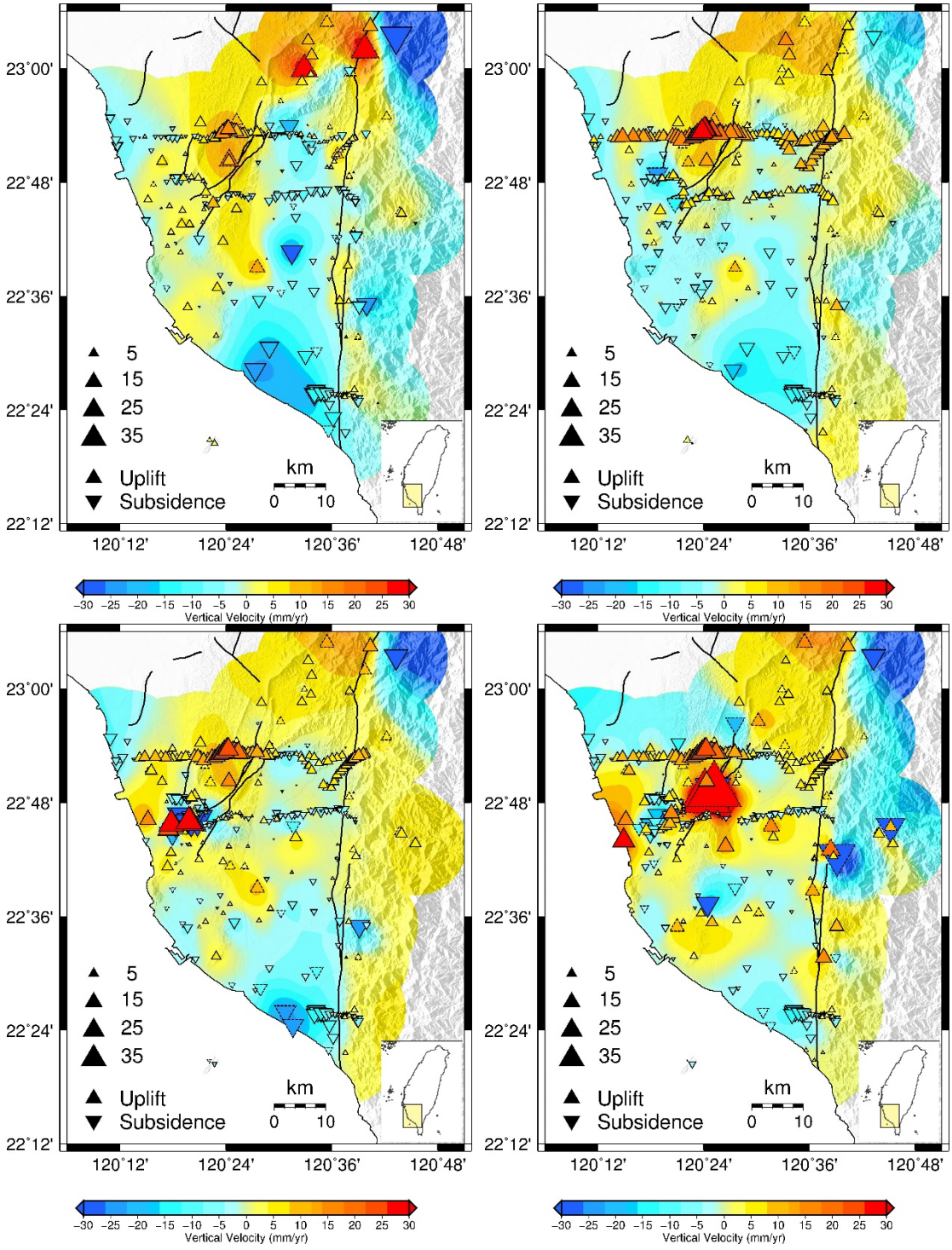


圖 8. 126：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2010 年速度場，右上圖表示震後 2010 - 2016 年速度場，左下圖表示震後 2016 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 126: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung and Pingtung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2010; the top right one is from 2010-2016; the bottom left is from 2016-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

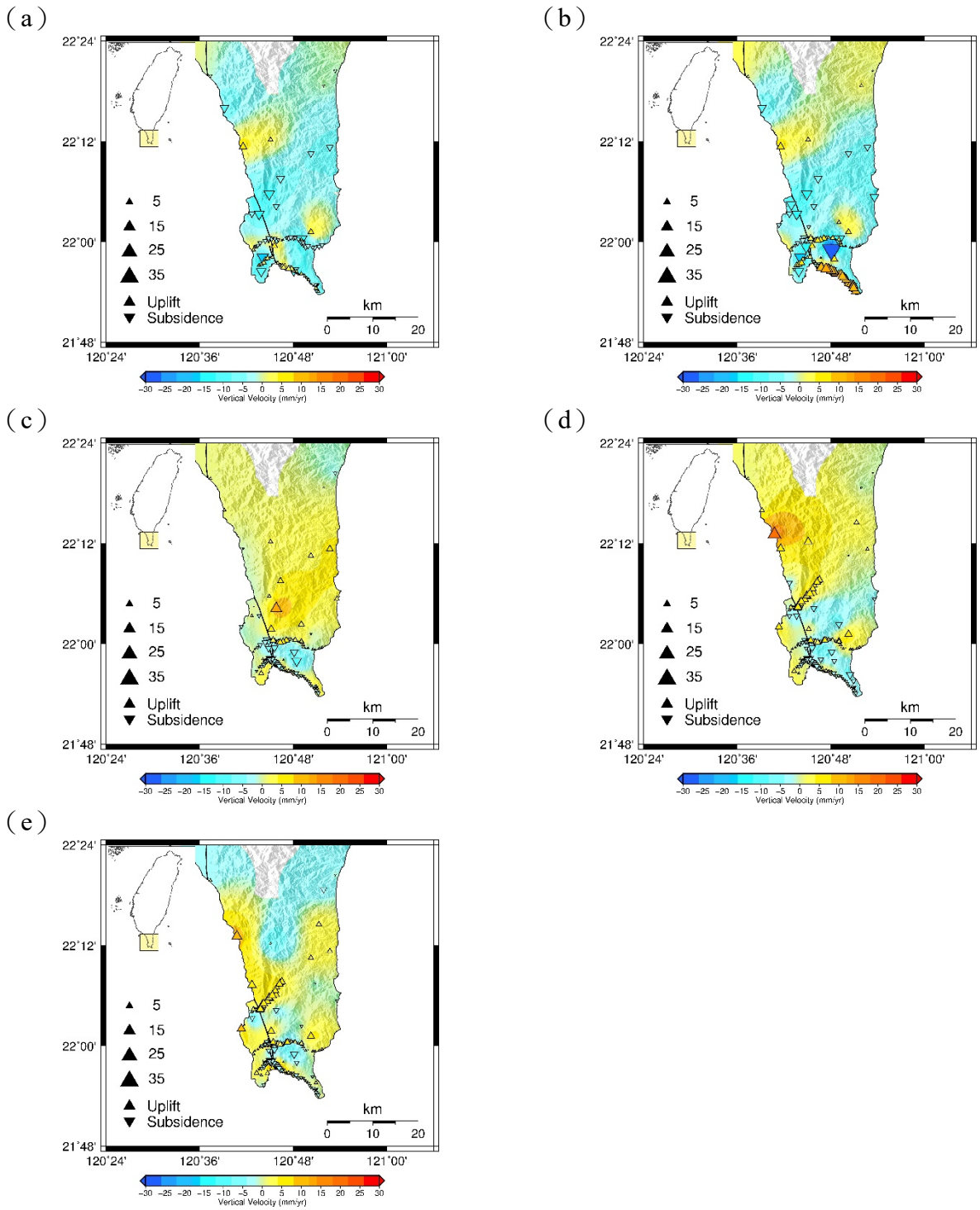


圖 8. 127：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。(a) 為 2002 - 2006 年速度場；(b) 為震後 2006 - 2010 年速度場；(c) 為 2010 - 2016 年速度場；(d) 為 2016 - 2022 年速度場；(e) 為震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 127: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hengchun area. Figure (a) is the velocity field from 2002-2006, (b) 2006-2010, (c) 2010-2016, (d) 2016-2022, (e) 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

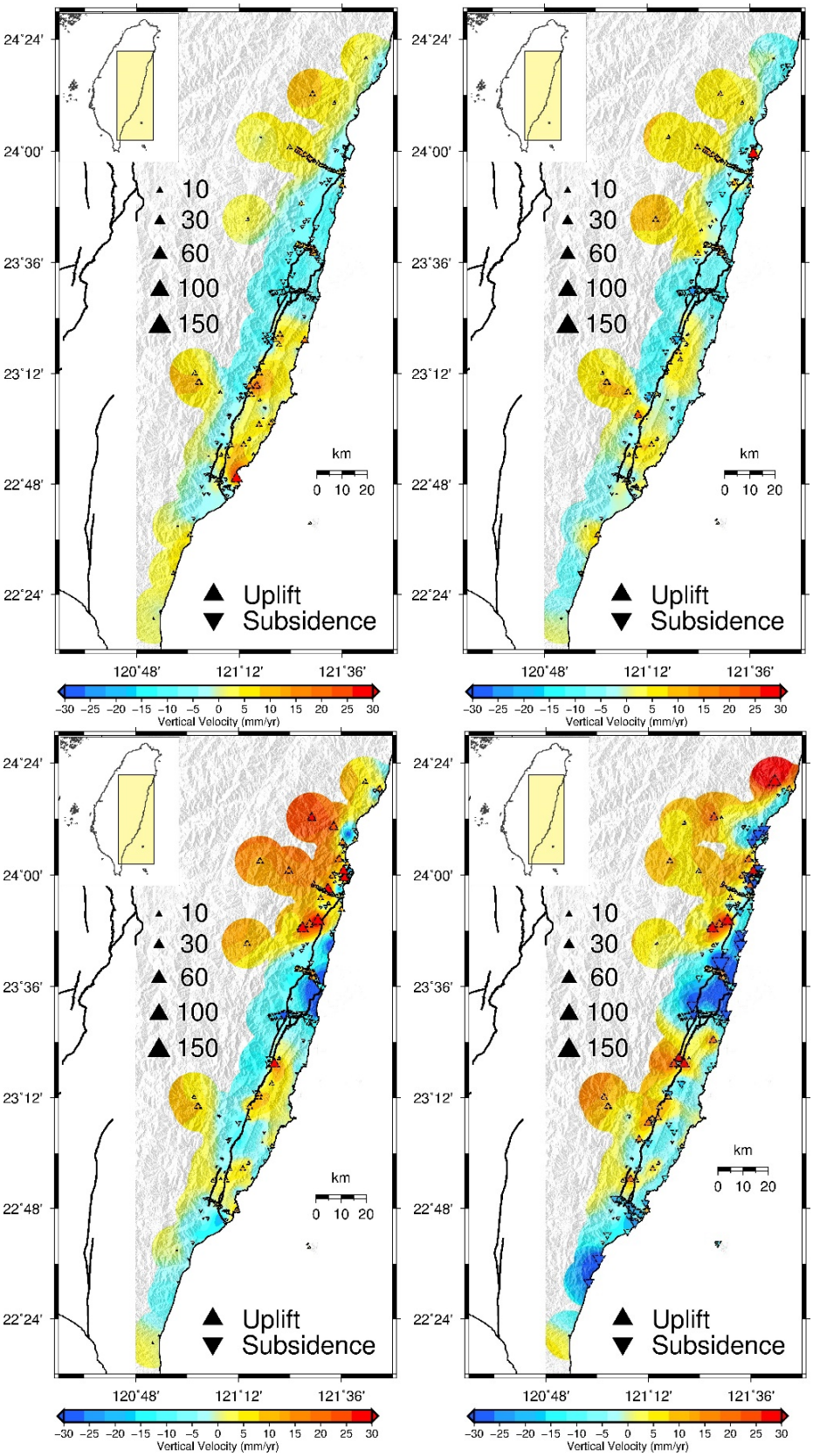


圖 8. 128：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2013 年速度場，右上圖表示震後 2013 - 2018 年速度場，左下圖表示震後 2018 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 128: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hualien and Taitung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2013; the top right one is from 2013-2018; the bottom left is from 2018-2022 and the bottom right is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

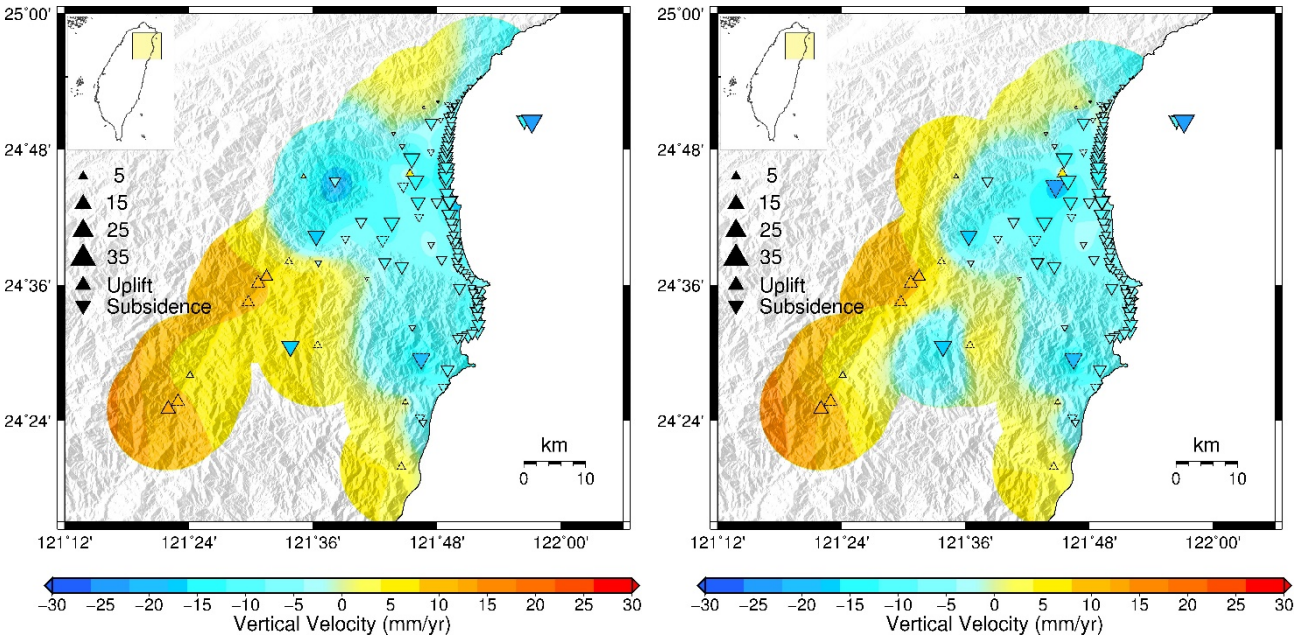


圖 8. 129：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左圖表示 2004 - 2022 年速度場，右圖表示震後 2022 - 2024 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 8. 129: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) statio in Yilan area. The left figure is the velocity field from 2004-2022, and the right one is from 2022-2024. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

8-4 全臺三維速度場分析

8-4-1 全臺水平與垂直速度場

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 年恆春地震與中部地區速度轉折、2010 年甲仙地震與恆春地區速度轉折、2013 年南投地震與瑞穗地震、2016 年美濃地震與恆春地區速度轉折、2018 年花連地震及 2022 年關山−池上地震等，分為 7 個時間段（圖 8. 130）分別解算水平（圖 8. 131）與垂直（圖 8. 132）速度場，各地區也會依地震之影響與否再區分出不同時期之速度場。此外，今年度 4 月份的 0403 花蓮地震對於速度的變化影響尚不明朗，仍需待後續累積較長時間的觀測資料後方能確認，因此本年度速度場的分析暫未以該地震事件作為新增分段點。

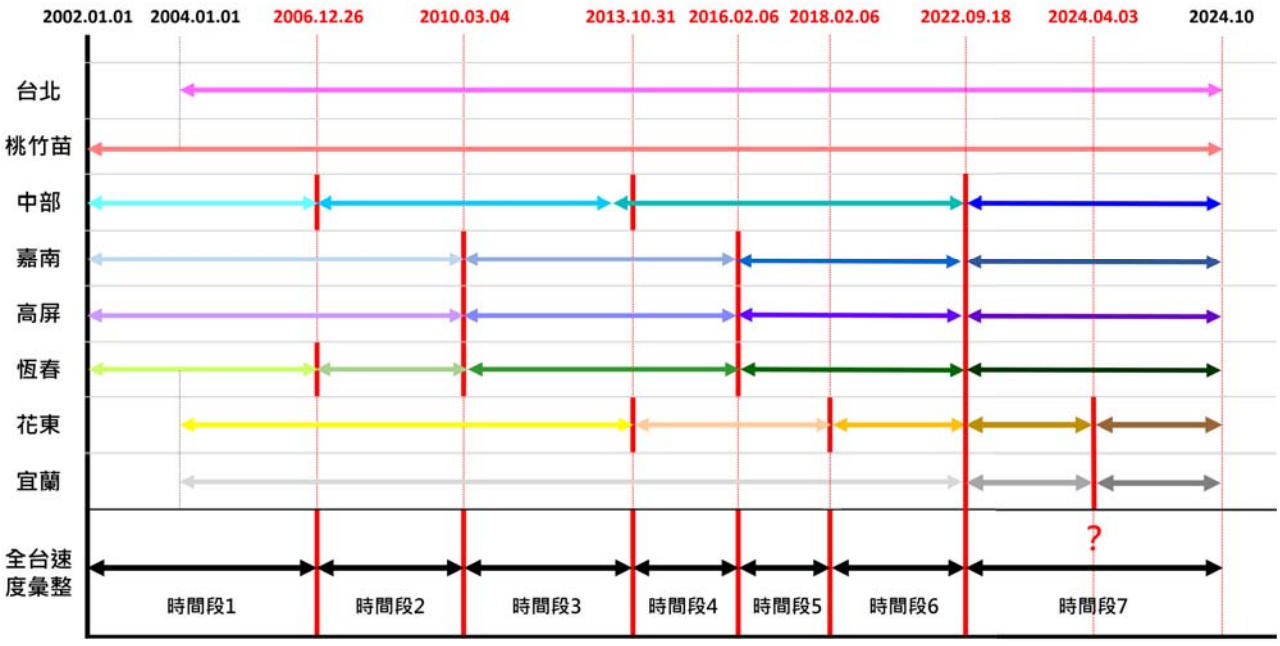


圖 8. 130：GNSS 速度場時間序列擬合事件分段

Figure 8. 130: 7 period of GNSS velocity field,Taiwan.

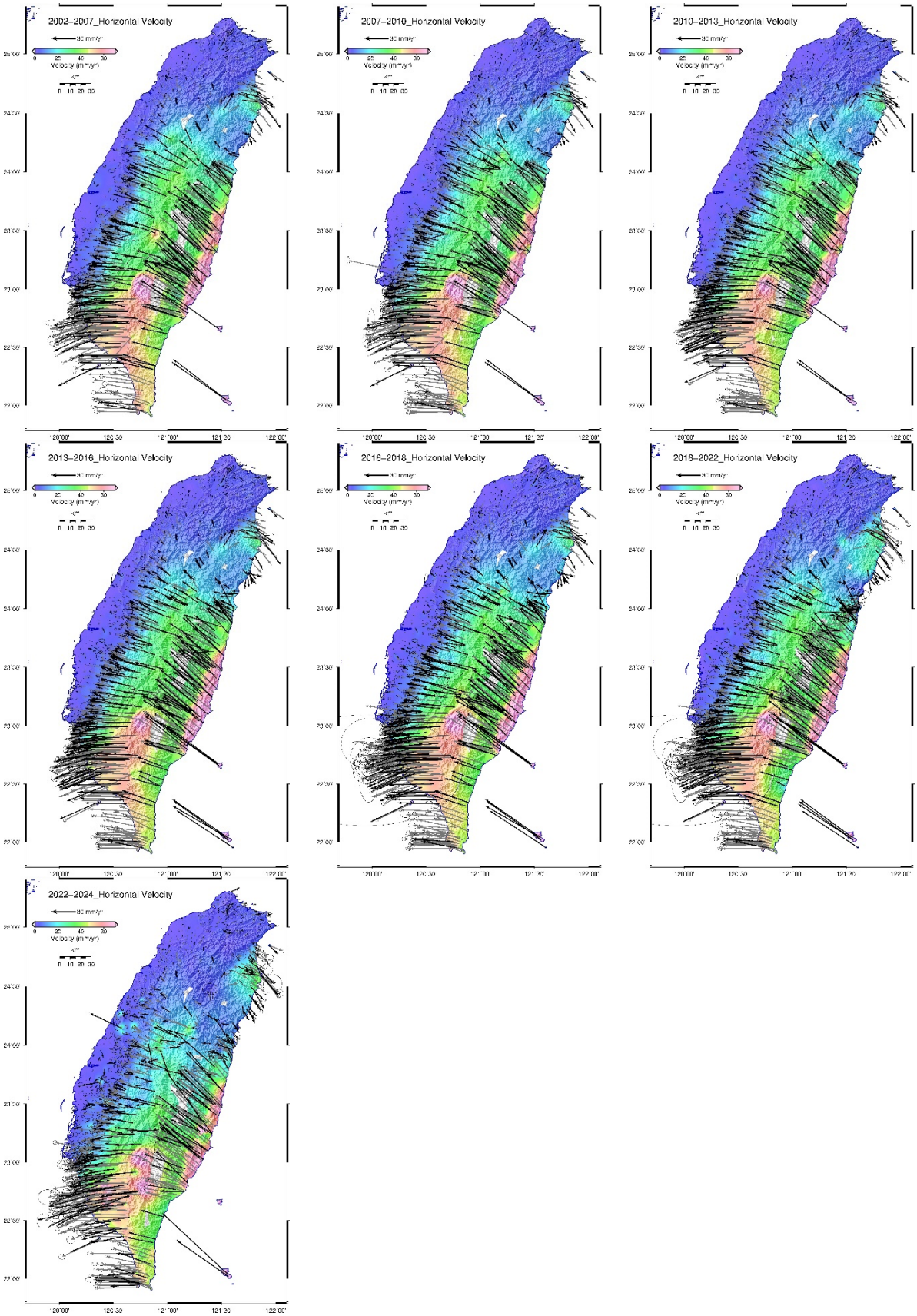


圖 8. 131：臺灣地區 2002 至 2024 年 GNSS 水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間速度場圖

Figure 8. 131: GNSS horizontal velocity field from 2002 to 2024, Taiwan.

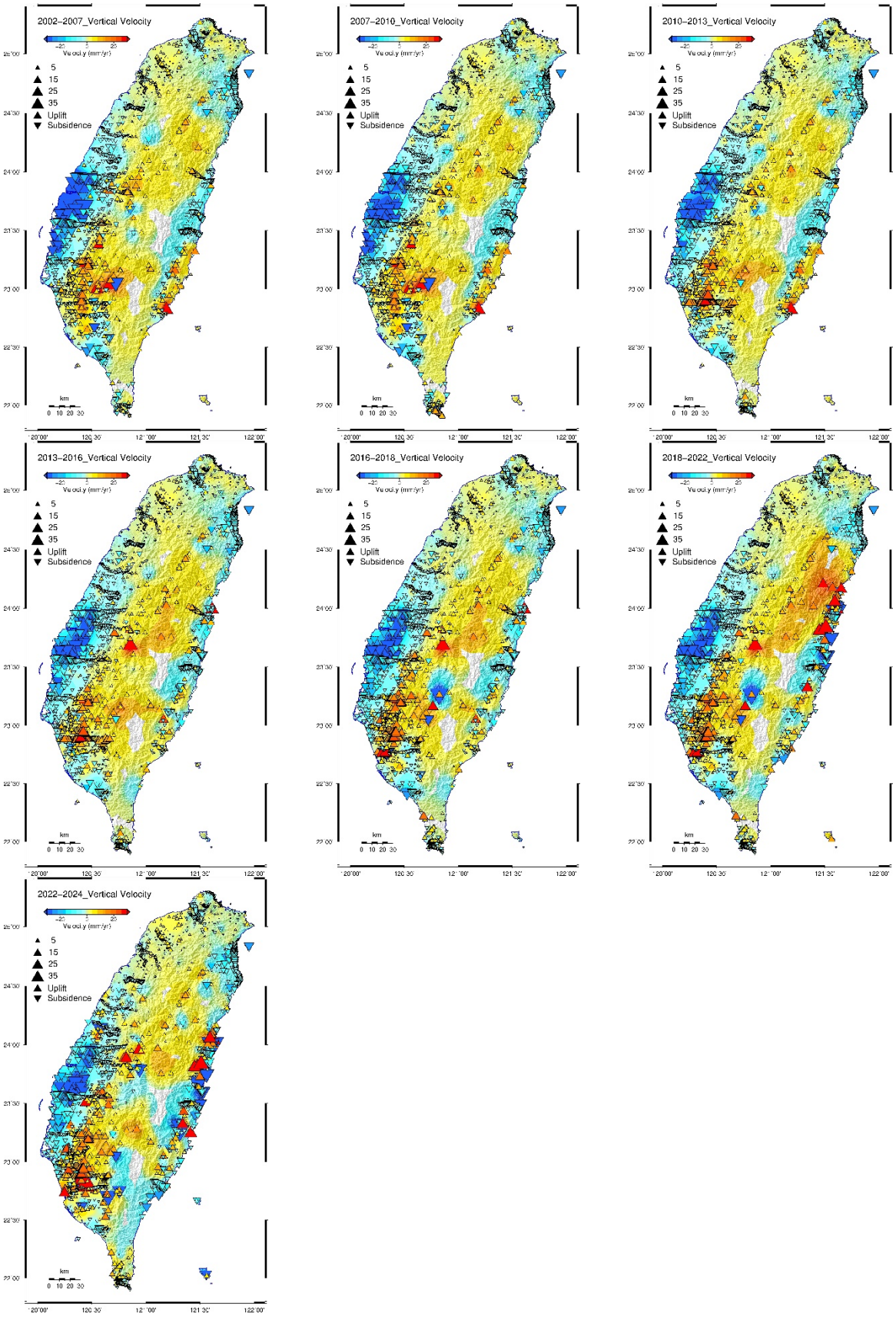


圖 8. 132：臺灣地區 2002 至 2024 年垂直方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間速度場圖

Figure 8. 132: Vertical velocity field from 2002 to 2024, Taiwan.

第九章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果

9-1 2024 年 04 月 03 日地震事件分析報告

9-1-1 緒論

地震災害是台灣主要的自然災害之一，如何監測活動斷層的地殼應變累積與地震發生時的災害狀況，是進行地震潛勢評估乃至於防減災很重要的一環，也是地質與地震相關研究的重點。在這些研究工作當中，利用測地資料進行觀測與分析活動斷層所造成的地表變形是相當重要的方法，也是近年來國際上有顯著發展的關鍵技術。透過高精度的測地資料可以監測斷層在累積能量時造成的緩慢地表變形，也可以觀測斷層在釋放能量時在短時間所造成的大規模地表位移，此橫跨不同觀測時間尺度與變形量級的能力，讓測地觀測成為地質調查與地震資料以外的監測利器。

為了因應活動斷層之監測與地震災害之評估，地礦中心於2001年起，於全台陸續建立測地觀測網，包含GPS連續站、GPS移動站與水準測量。這些長期觀測資料可以用以觀測在地震週期中，同震期、震後期、間震期等不同時期的地表變形。尤其當有地震發生時，此觀測網的測地資料能清楚掌握同震位移的分布與特性，特別是三維的同震位移場，對於評估地震災害與發震斷層至關重要。

2024 年 4 月 3 日於臺灣東部花蓮地區發生規模 7.2 之地震事件，為繼 921 集集大地震發生 20 餘年以來，陸地上規模大於 7 的地震事件。因歐亞板塊及菲律賓海板塊不斷相互斜向擠壓的作用（Ho, 1988, 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）。而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），有非常高的地震潛能（Yen et al., 2019），因此縱谷斷層也發生多次的大規模地震，歷史紀錄中最重要的事件是 1951 年的花蓮–臺東地震序列（Hsu, 1962；Bonilla, 1975；Cheng et al., 1996），該年內發生了數個規模六至七的地震，並造成花東地區多處的地表破裂與震災（Shyu et al., 2007）。

2024 年 4 月 3 日於花蓮陸地上發生規模 7.2 的地震（氣象署地震編號第 019 號），震央位於花蓮縣外海（23.77°N, 121.67°E）（氣象署重定位後已將震央修改至陸地上），震源深度約 15.5 km。中央氣象署即時震度資訊顯示，全島都能感受到這次地震所引起的震動，最大 6 強級震

度分佈在花蓮和平，花蓮市與太魯閣亦達 6 弱級震度（圖 9. 1）。由中研院 AutoBATS 公布的震源機制解指出（圖 9. 2），本次地震主要為逆衝斷層所造成，其可能為北北東−南南西走向之西傾斷層或東傾斷層型態。

本報告首先整合GNSS連續站、移動站與精密水準測量觀測結果，解析2024年4月3日花蓮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。

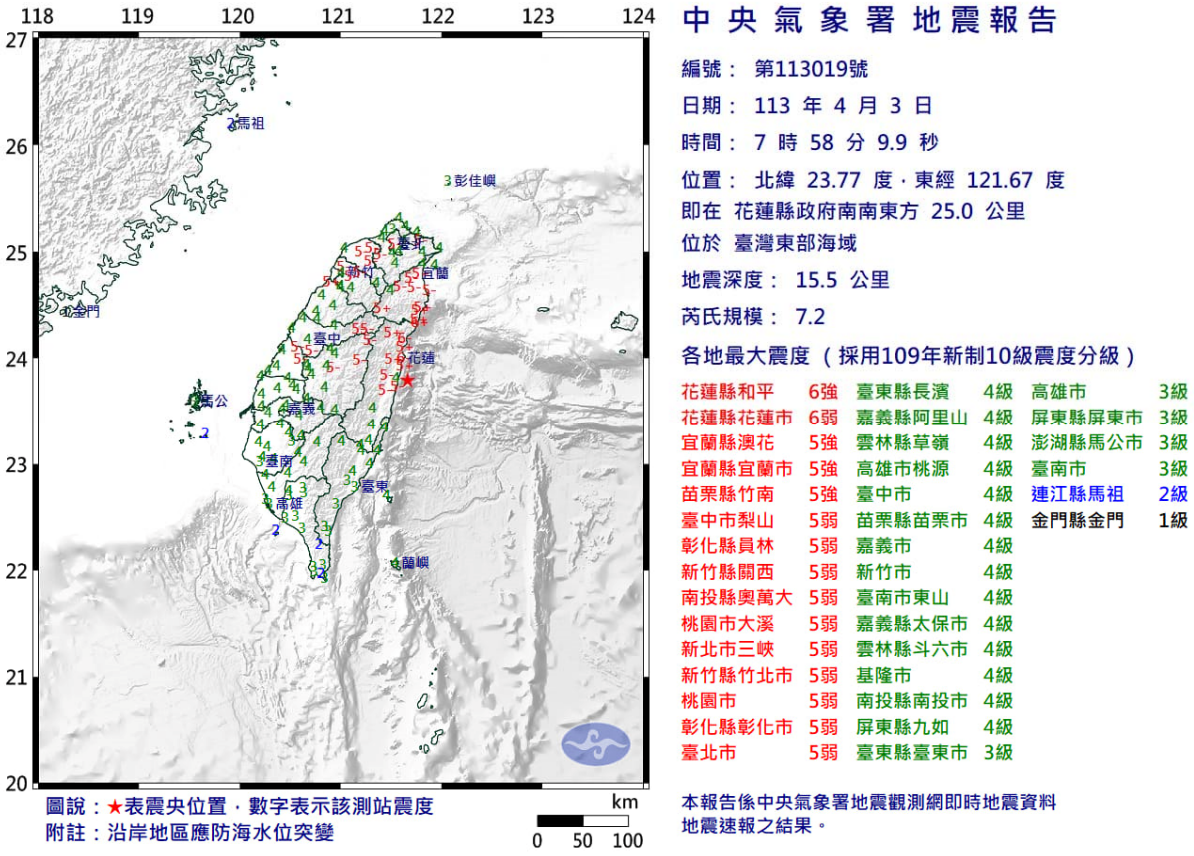


圖 9. 1：中央氣象署 20240403 地震事件報告

Figure 9. 1: 3rd April 2024 Earthquake event report from CWA.
（https://www.cwa.gov.tw/V8/C/E/EQ/EQ113019-0403-075809.html）。

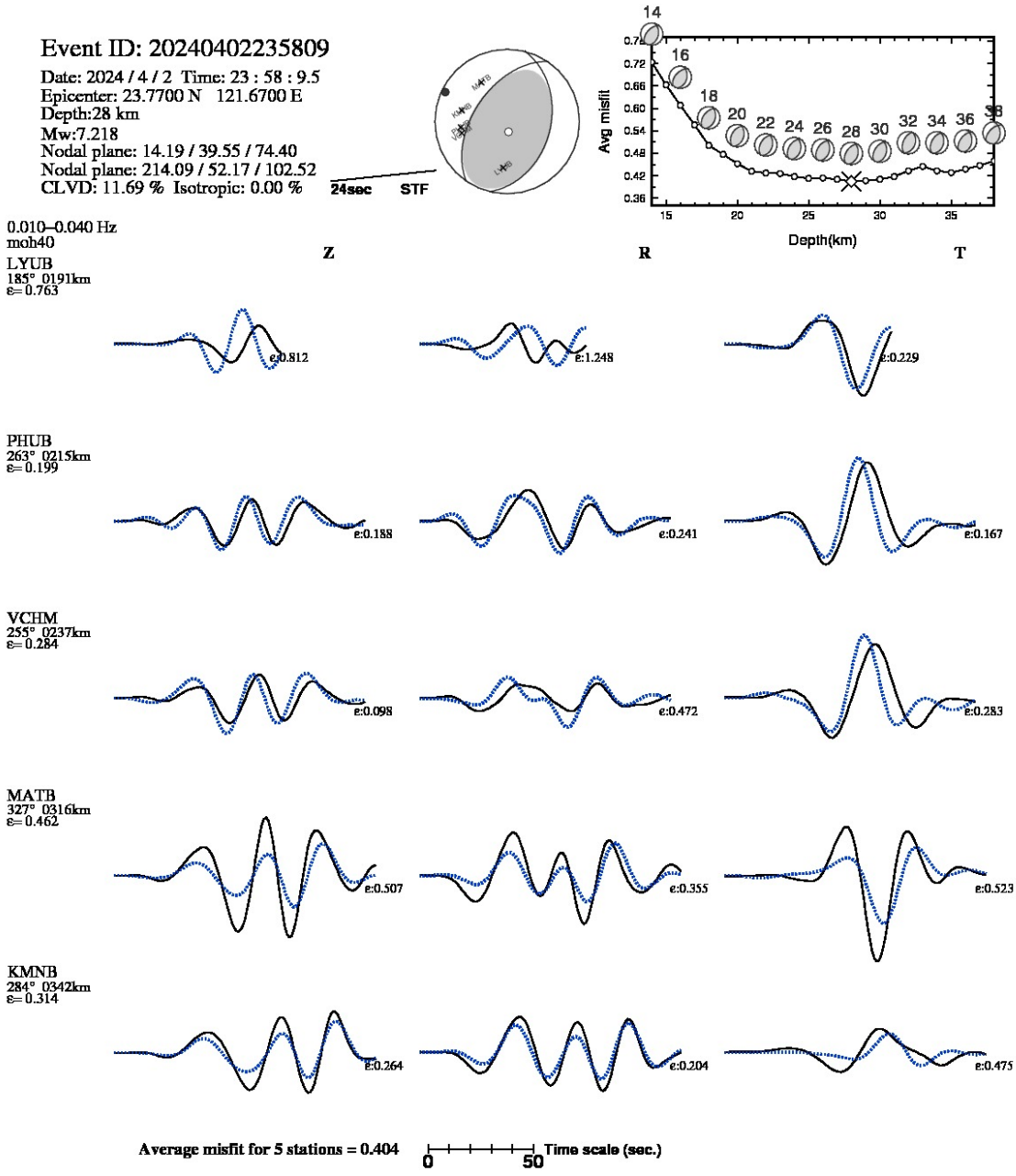


圖 9. 2：20240403 地震震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果

Figure 9. 2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 20240403 Hualien earthquake event.（https://tecdc.earth.sinica.edu.tw/FM/AutoBATS/eventInfo.php?date=2024-04-02&time=23:58:09&type=1）。

9-1-2 花東地區近十年來的地表變形情形

近期的大地測量成果指出，花東縱谷正以每年約40 mm/yr的速度相互聚合（例如：Yu et al., 1997）。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）。

透過地礦中心長期執行之精密水準測量與衛星導航系統觀測結果顯示，本區水平速度場位移方向為北偏西，每年位移速率超過 3 公分，於2013年之瑞穗地震、2018年之花蓮地震、2022年之池上地震，改變了較長時期穩定之速度場，因此我們在評估花東地區速度場時，考慮了地震的影響，將同震時期的顯著變形量扣除，將速度場區分四個時間段分別估算不同區間的速度場，得到2002至2013年水平速度量值分布於 13.6 – 70.2 mm/yr、2013至2018年速度量值 9.12 – 69.8 mm/yr、2018至2022年速度量值 1.4 – 83.8 mm/yr、2022至2023年速度量值 1.0 – 116.6 mm/yr（圖9. 3，莊昀叡等，2023）。

垂直速度場方面，在花東縱谷東側的海岸山脈與西側的中央山脈變形機制在北、南段差異顯著（Chen et al., 2021），海岸山脈南段沉陷較小，北段垂直變形則大致呈現下陷，跨池上斷層的兩側有不同的運動方向，東側約有 10 mm/yr 的抬升速度，而西側約有 10 mm/yr 的沉降速度。此外，2022 年池上地震震後，屬於中央山脈斷層系統其中一段的玉里斷層以東，具顯著的抬升速度。精密水準測量時間序列分析結果顯示，龍澗–嶺頂測線在 2018 年花蓮地震後顯著抬升，光復–豐濱與紅葉–靜浦測線則顯著沉降。（圖 9. 4）。整體而言，東部地區由於處於板塊聚合處，速度場相較臺灣其他地區快速許多。

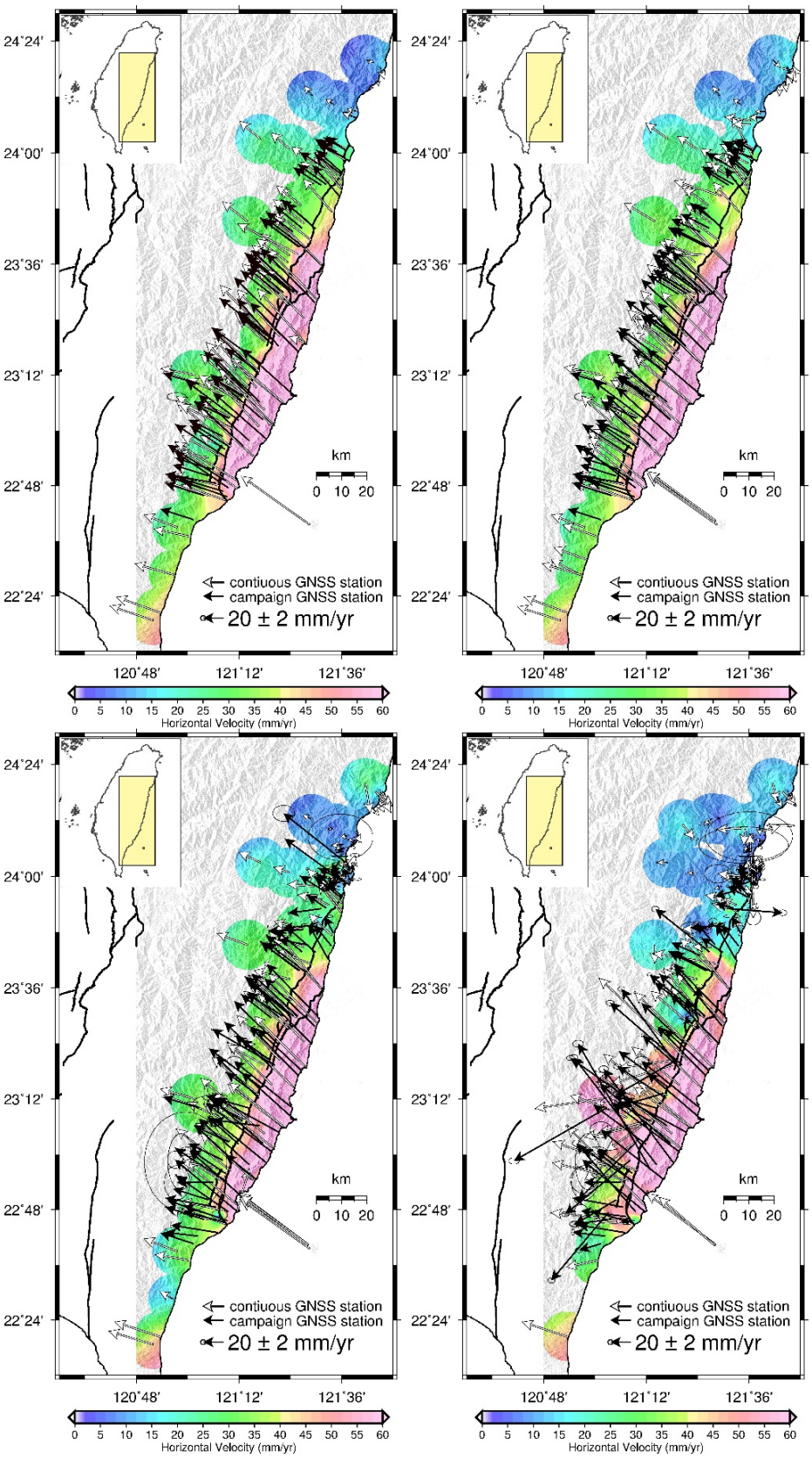


圖 9.3：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。左上圖表示 2002 - 2013 年速度場；右上圖表示震後 2013 - 2018 年速度場；左下圖表示震後 2018 - 2022 年速度場；右下圖表示震後 2022 - 2023 年速度場。彩色色階為資料解算之水平方向速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 9. 3: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hualien and Taitung areas. The top left figure is the velocity field from 2002-2013; the top right one is from 2013-2018; the bottom left is from 2018-2022 and the bottom right is from 2022-2023. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

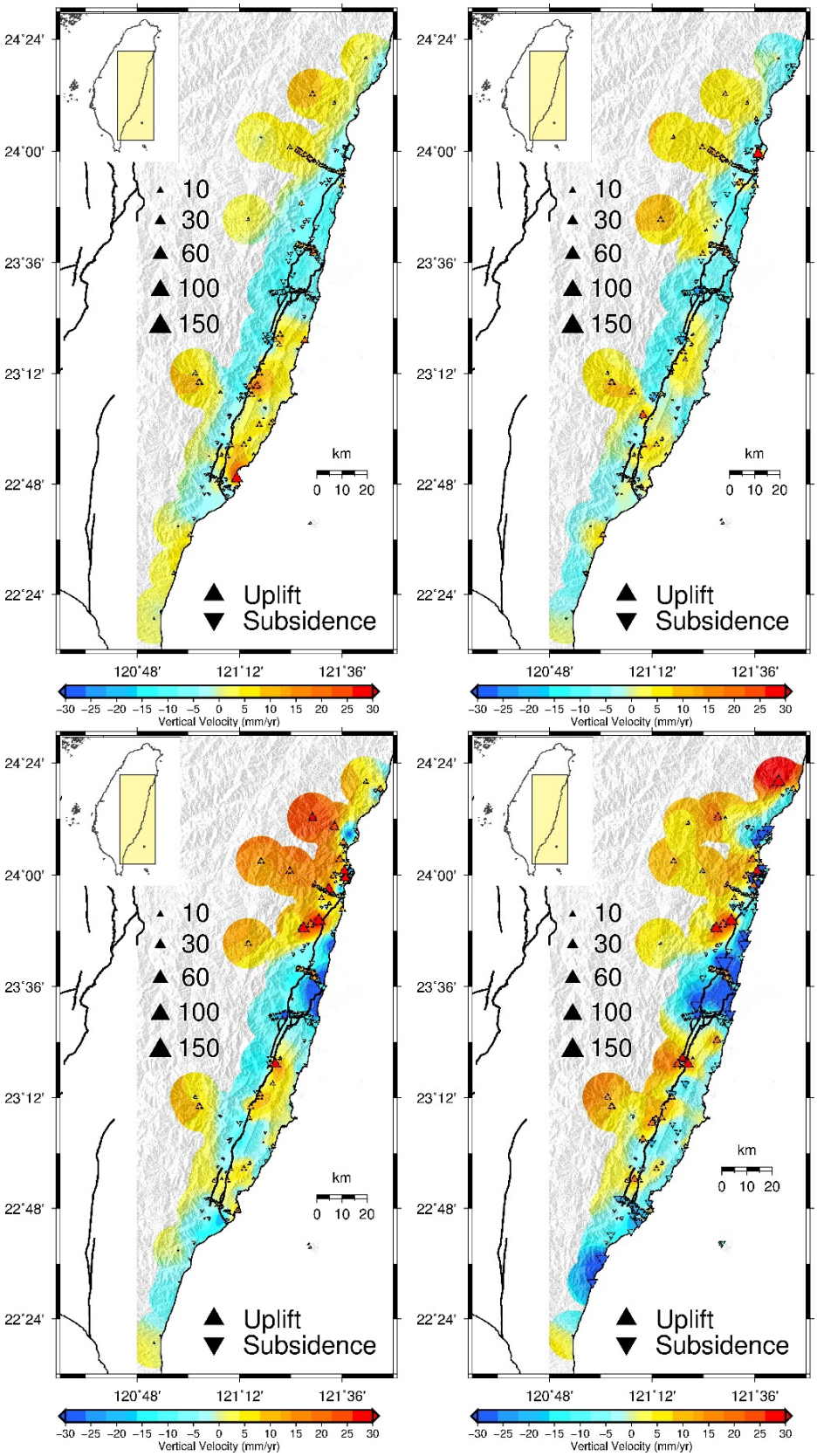


圖 9.4：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。左上圖表示 2002 - 2013 年速度場，右上圖表示震後 2013 - 2018 年速度場，左下圖表示震後 2018 - 2022 年速度場，右下圖表示震後 2022 - 2023 年速度場。彩色色階為資料解算之垂直方向速度場分布，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 9. 4: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hualien and Taitung areas.. The top left figure is the velocity field from 2002-2013; the top right one is from 2013-2018; the bottom left is from 2018-2022 and the bottom right is from 2022-2023. The color ramp represents the vertical velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

9-1-3 0403 花蓮地震同震位移結果

GNSS連續站選用的震前平均座標估算時間為2024年3月26日00:00:00至4月2日23:58:00，震後則為4月3日00:00:00至4月9日23:59:30，以進行解算；GNSS移動站及精密水準測量則考量GNSS連續站的解算結果，選擇測區範圍後，委請中興測量公司進行野外測量，GNSS移動站觀測時間由4月15日至24日；精密水準測量觀測時間則由4月15日至23日，各觀測站的同震位移量分布情形如附錄1與圖9. 5至圖9. 11。此外，受限於震後移動站的觀測時間，目前移動站僅能以快速星曆資料進行解算並取得初步的同震變形量值，待後續精密星曆資料出來後會再更新移動站的同震變形量值於期中報告。

同震位移結果顯示，此次地震造成大範圍之顯著位移，在水平位移方面，主要的位移量分布於太魯閣以西之中央山脈區域，以及花蓮溪口以南的海岸山脈北段區域（圖 9. 5），大抵朝東南、朝南方向位移；在垂直位移方面，主要的抬升量分布於米崙斷層以東之米崙台地區域，以及花蓮溪口以南的海岸山脈北段區域（圖 9. 6）。最大水平位移為 SPAO（西寶）測站，往東南方向位移 24.1 公分；最大垂直位移為花蓮縣花蓮市華東（U037 測站），垂直抬升 58.5 公分；精密水準測量在橫跨海岸山脈北段的瀧澗–嶺頂測線具顯著抬升，且越往東側抬升量越大，最大的垂直抬升量為東海岸風景區北口水準點（G970），抬升 481.5 mm（圖 9. 7、圖 9. 8、附錄 1-3）。

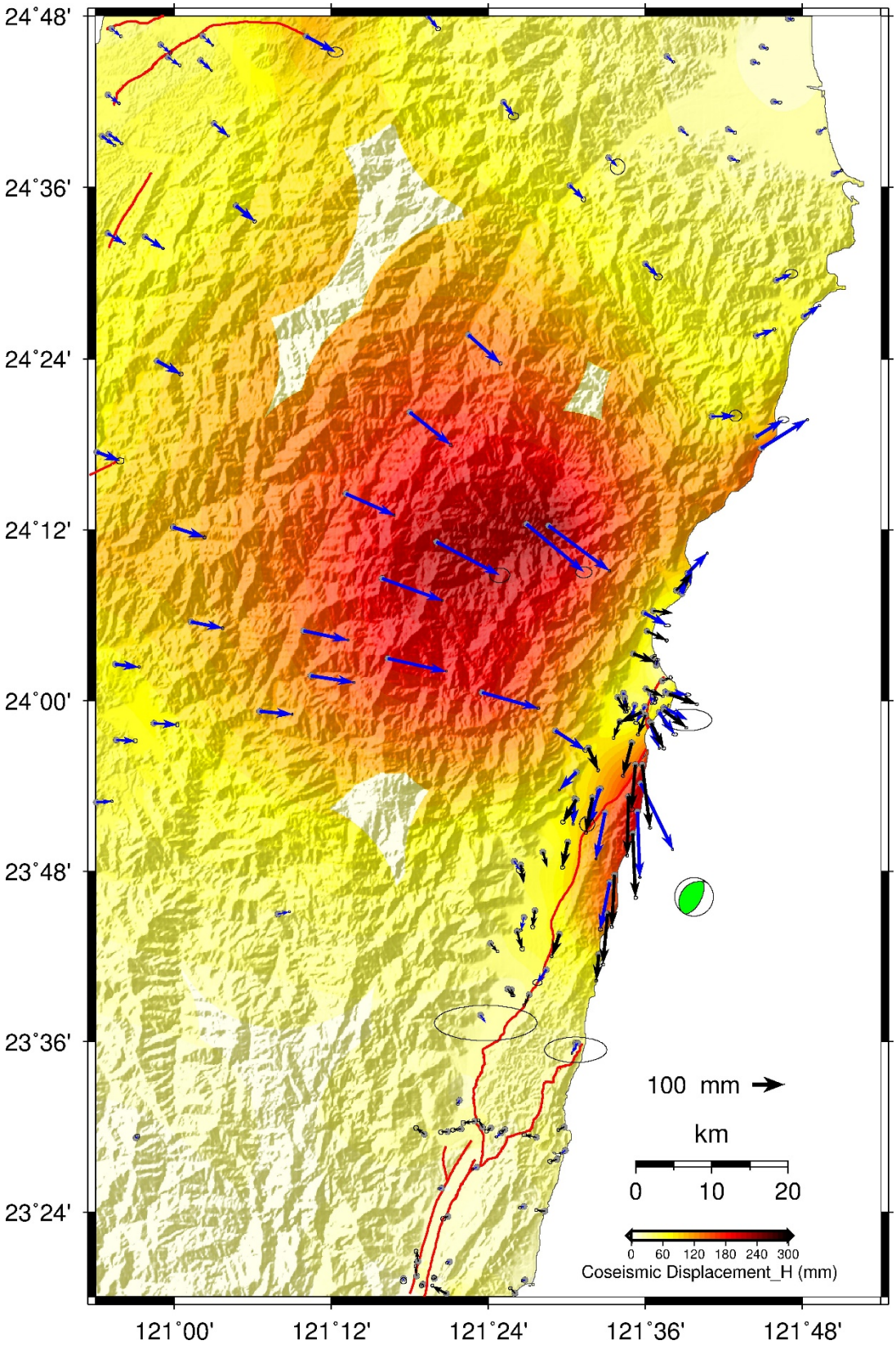


圖 9. 5：20240403 花蓮地震 GNSS 水平方向同震位移分布圖，箭頭代表水平位移方向、長度代表量值，彩色色階顯示等值化之成果。藍色箭頭為連續站，黑色箭頭為移動站。

Figure 9. 5: GNSS horizontal coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

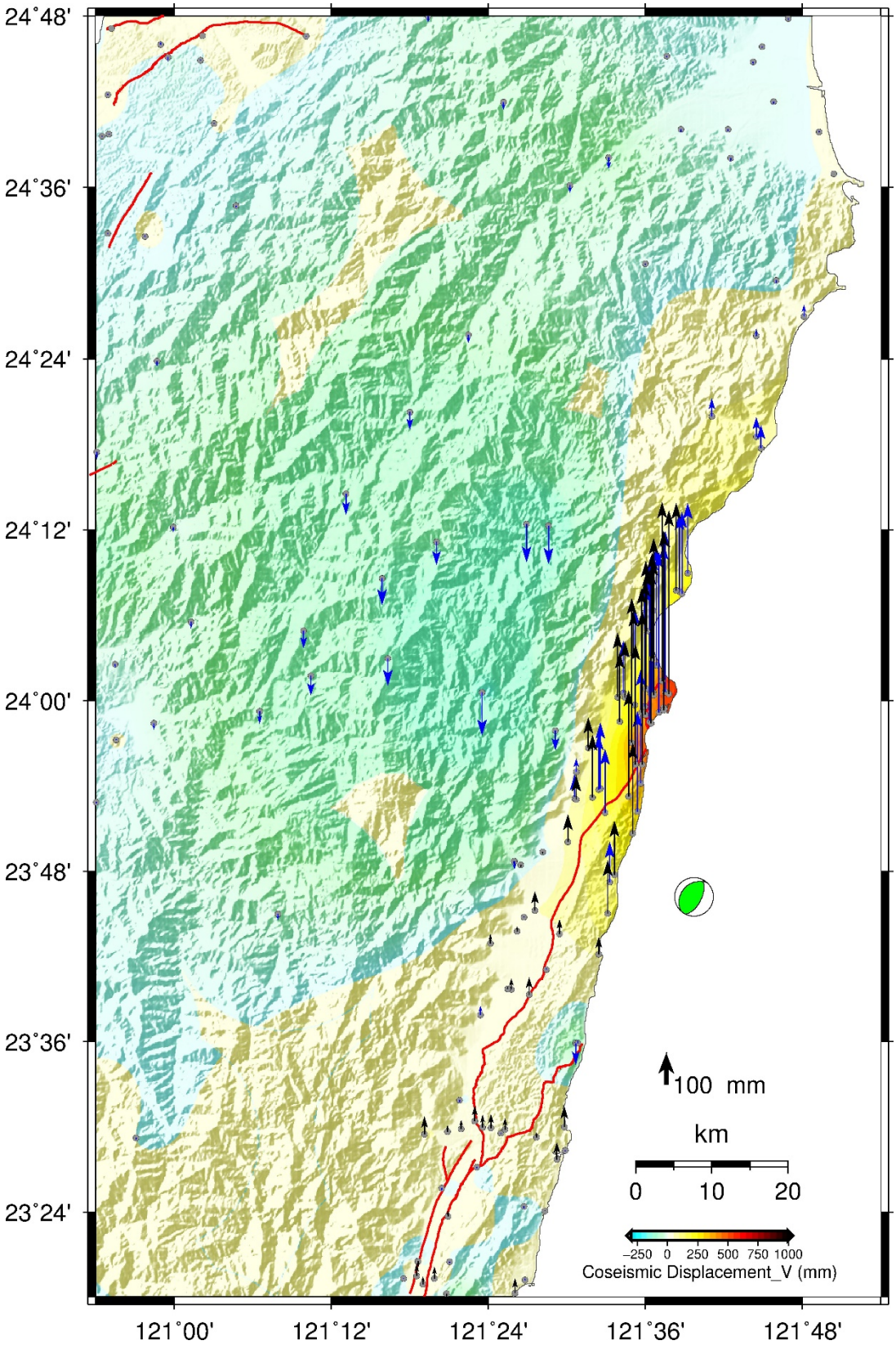


圖 9. 6：20240403 花蓮地震 GNSS 垂直方向同震位移分布圖，箭頭代表垂直位移方向、長度代表量值，彩色色階顯示等值化之成果。藍色箭頭為連續站，黑色箭頭為移動站。

Figure 9. 6: GNSS vertical coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

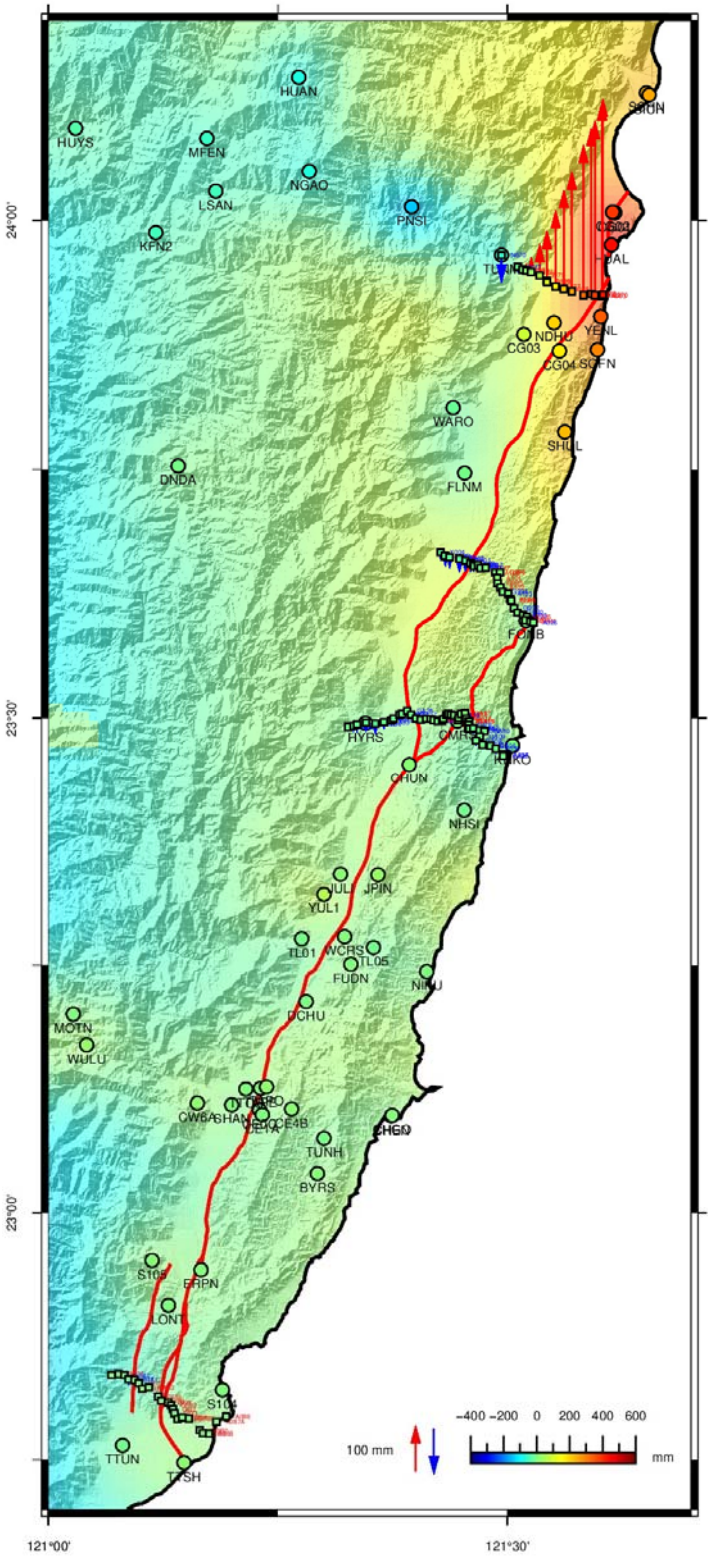


圖 9. 7：20240403 花蓮地震水準測量垂直方向同震位移分布圖，箭頭代表垂直位移方向、長度代表量值。利用 GNSS 連續站（大實心圓表示）計算地震前後的點位垂直變化，最大的變形量發生於美崙台地達 50 公分，而地礦中心也於 4 月 15 - 23 日量測橫跨花東縱谷 4 條精密水準測線，由北到南分別為瀧澗–嶺頂、光復–豐濱、紅葉–靜浦及東成–富岡測線，近即時量測其相對高程變化。

Figure 9. 7: Precise leveling vertical coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

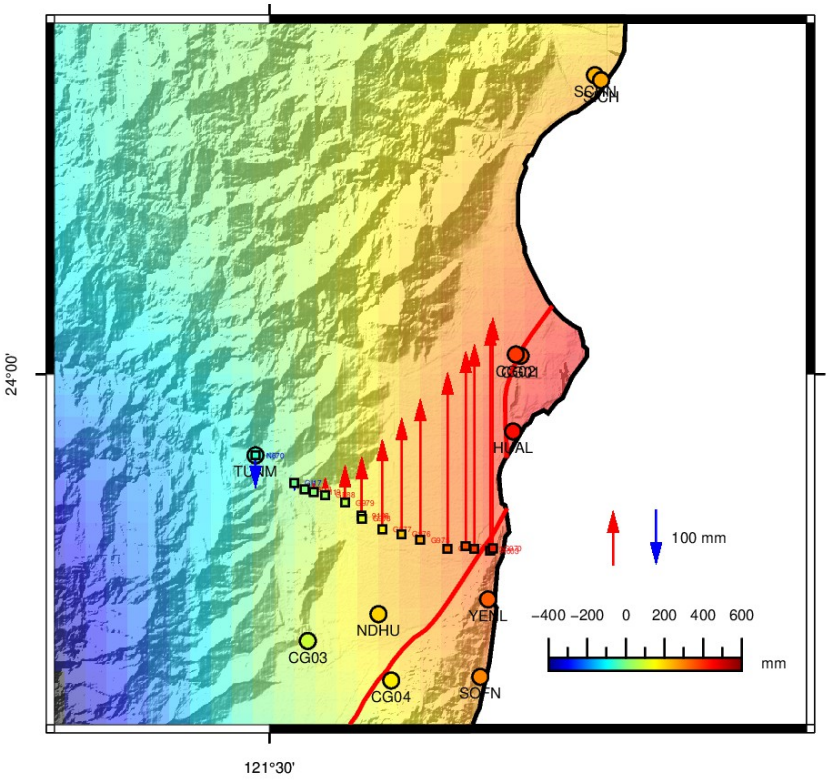


圖 9. 8：瀧澗−嶺頂測線同震位移分布圖（小實心方框表示），約制銅門（TUNM）連續站的垂直變形（-59.7 mm），整條水準線呈線性抬升，跨越嶺頂斷層後達 421.8 mm，因此相對變形量達 481.5 mm。

Figure 9. 8: Lingding-Takigami leveling route vertical coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

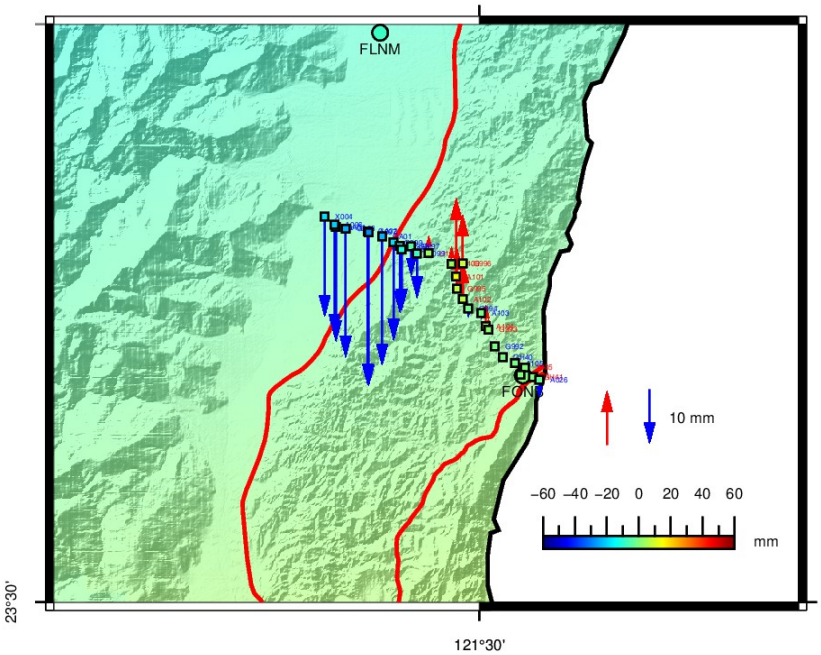


圖 9. 9：光復−豐濱測線同震位移分布圖（小實心方框表示），約制豐濱（FONB）連續站的垂直變形（0.5 mm），水準成果顯示海岸山脈西側呈下陷最大沉陷達 25.2 mm，而海岸山脈呈些微抬升其最大抬升量約 17.7 mm，因此相對變形量達 42.9 mm。

Figure 9. 9: Guangfu-Toyohama leveling route vertical coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

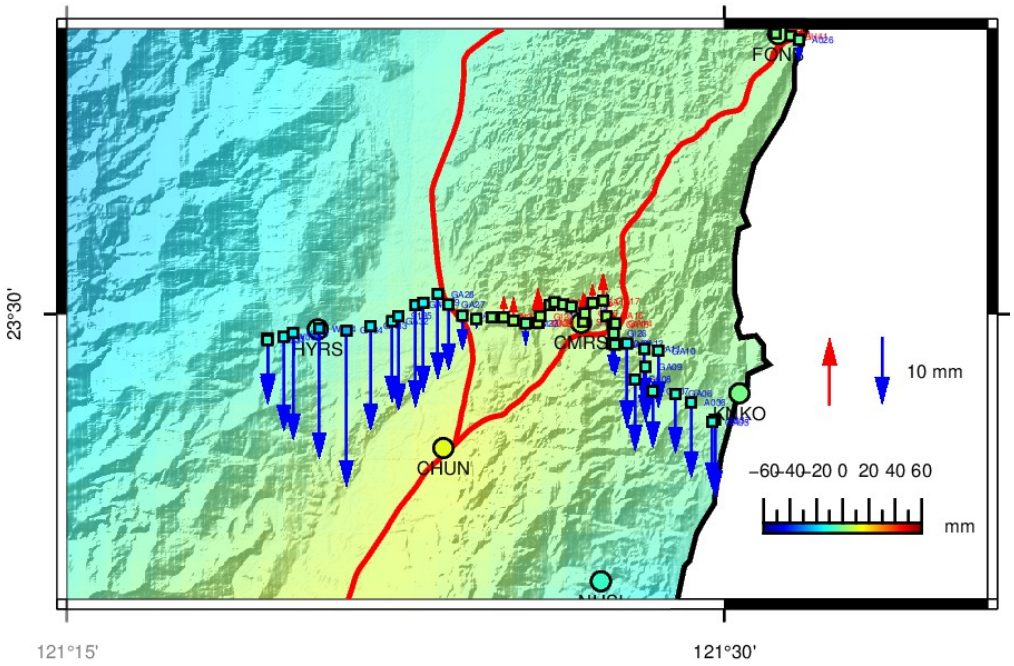


圖 9. 10：瑞穗−靜浦測線同震位移分布圖（小實心方框表示），約制奇美（CMRS）連續站的垂直變形（4.3 mm），水準成果顯示縱谷至海岸山脈西側（池上斷層）呈下陷最大沉陷 m 約 23.3 mm，而海岸山脈東側至奇美斷層呈些微抬升其最大抬升量約 4.5 mm，而跨過奇美斷層後呈下陷最大沉陷量約 12.8 mm，而整條測線的相對變形量達 28.4 mm。

Figure 9. 10: Hongye-Jingpu leveling route vertical coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

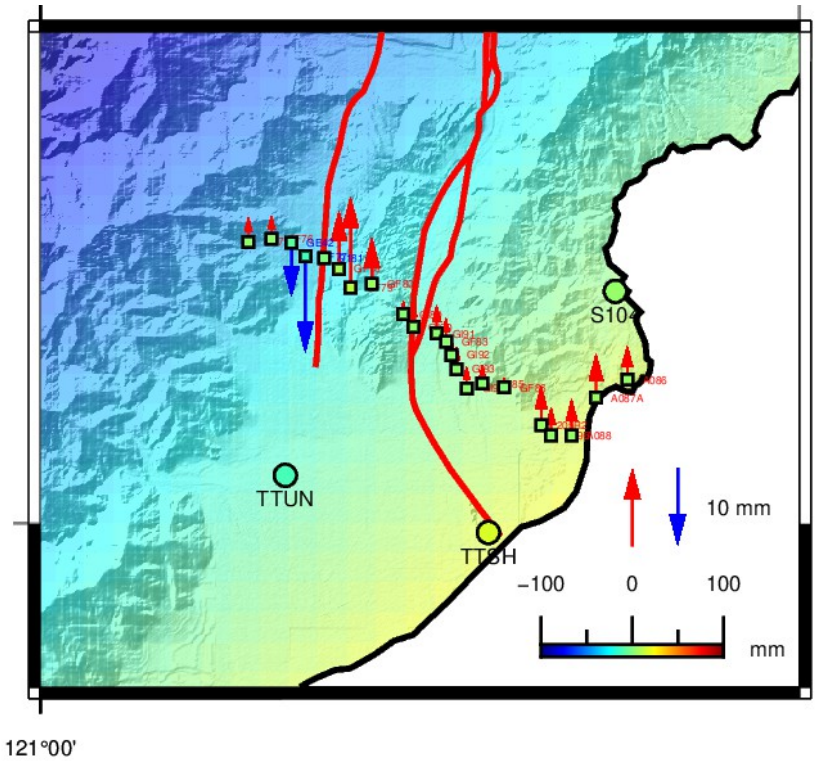


圖 9. 11：東成−富岡測線同震位移分布圖（小實心方框表示），約制富岡國小（S104）連續站的垂直變形（4.4 mm），水準成果顯示池上斷層左側呈現下陷，其最大下陷量約 13.6 mm，而卑南台地及海岸山脈呈現些微抬升最大僅達 14.9 mm，因此相對變形量達 28.5 mm。

Figure 9. 11: Dongcheng-Fugang leveling route vertical coseismic displacement of 20240403 earthquake event.

9-1-4 合成孔徑雷達影像差分干涉觀測結果

(一)原理說明

將地震前的合成孔徑雷達影像當作參考影像，地震後的影像作為主影像，進行干涉演算，成功量測到地震前、後雷達影像的相位差，這個方法稱為合成孔徑雷達差分干涉技術（Differential Interferometric SAR，DInSAR）。此方法假定航空器的飛行高度皆相同，待測物變成大地，如果某地點地表沒有變化，則相位差為0；如果產生相位差，表示是衛星與地表之間距離變化所造成（張中白，2005）。

將相位差的變化，賦予不同的顏色，如把相位從-π 到+π，設定為從紅色到紫色，形成環狀如同彩虹般的顏色，稱為干涉環（interference rings），現今此方法已經成功應用在地震、火山、地層下陷，以及山崩潛勢等地質事件引起的地表變形事件（張中白，2005；梁勝雄等，2016）。

(二)衛星影像干涉結果

藉由DInSAR這個技術，分析歐洲太空總署哨兵1號（Sentinel-1）衛星分別於震前和震後所拍攝的升軌（ascending）、降軌（descending）雷達影像，能協助判釋4月3日花蓮地震所產生之地表變形（圖9. 12、圖9. 13）。另外，也使用日本JAXA的ALOS-2衛星所拍攝的stripmap模式及ScanSAR模式，分別製作了兩組干涉圖，由於此影像為L波段波長較長，干涉環相較於Sentinel-1較少，較好判釋規模大的地表變形（圖9. 14、圖9. 15）。

觀察彩虹干涉環分佈能發現，此次地震造成陸地上花東縱谷北段南北長約 60 公里地表變形，且花蓮市區有較密集的干涉環，有顯著的地表變形位移量，越往南干涉環變得較疏地表變形相較逐漸變小。縱谷兩側山區因 Sentinel-1 衛星的 C 波段（波長為 5.6 公分）不易穿透植被的限制，且植被的擾動較大等因素影響，導致影像資訊斑駁而不易成相，無法確認地表變形的狀況。但 ALOS-2 衛星的 L 波段（波長 23.6 公分）較易穿透植被，可看到此次地震地表變形於海岸山脈仍是連續變化。

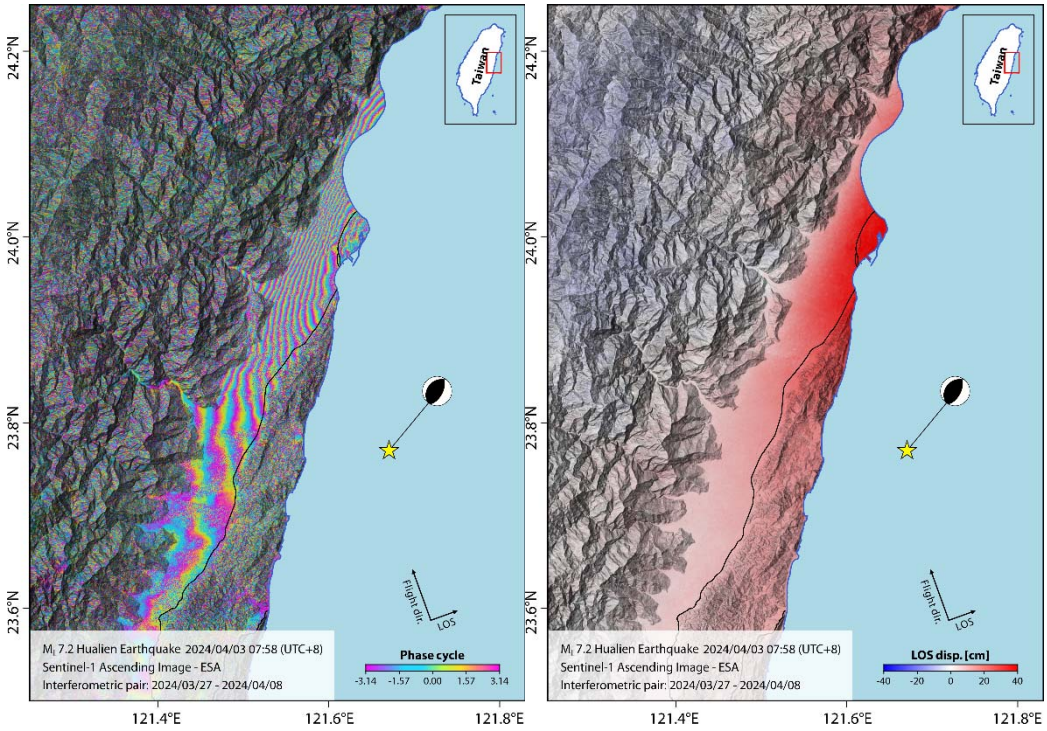


圖 9. 12：20240403 花蓮地震之 Sentinel-1 升軌雷達差分干涉同震地表變位圖。Sentinel 衛星拍攝，左圖為干涉圖、右圖為視衛星方向地表變形圖，黑白海灘球為震源機制解。

Figure 9. 12: The coseismic surface deformation field of LOS direction from Sentinel-1satellite of 20240403 earthquake.

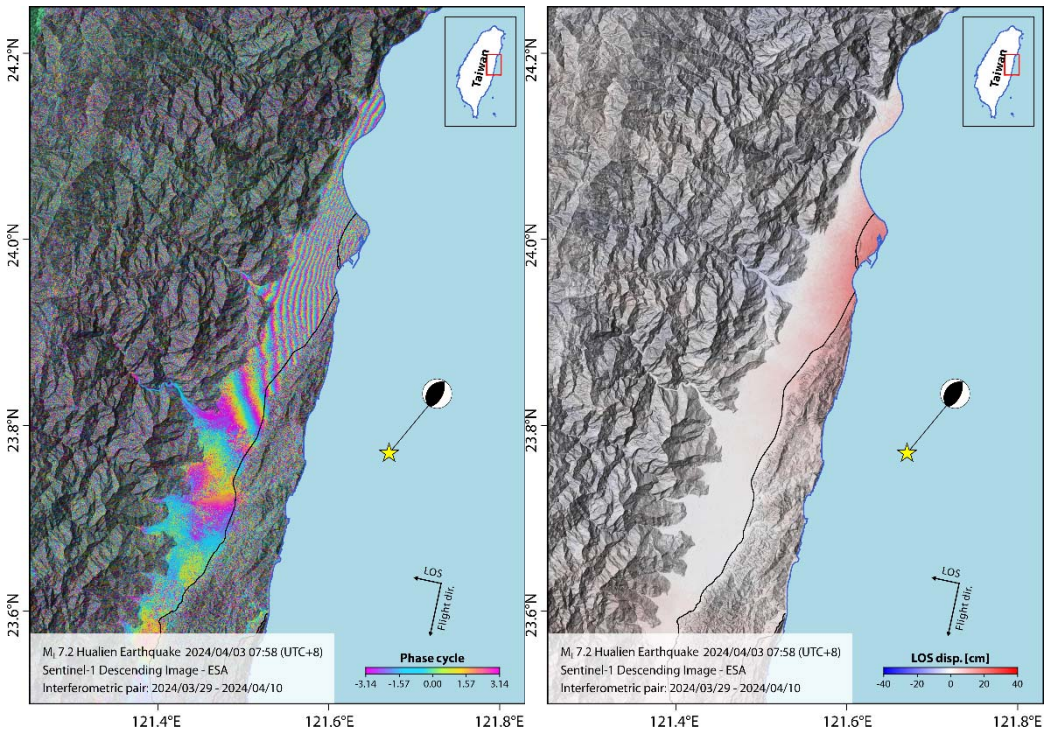


圖 9. 13：20240403 花蓮地震之 Sentinel-1 降軌雷達差分干涉同震地表變位圖。Sentinel 衛星拍攝，左圖為干涉圖、右圖為視衛星方向地表變形圖，黑白海灘球為震源機制解。

Figure 9. 13: The coseismic surface deformation field of LOS direction from Sentinel-1satellite of 20240403 earthquake.

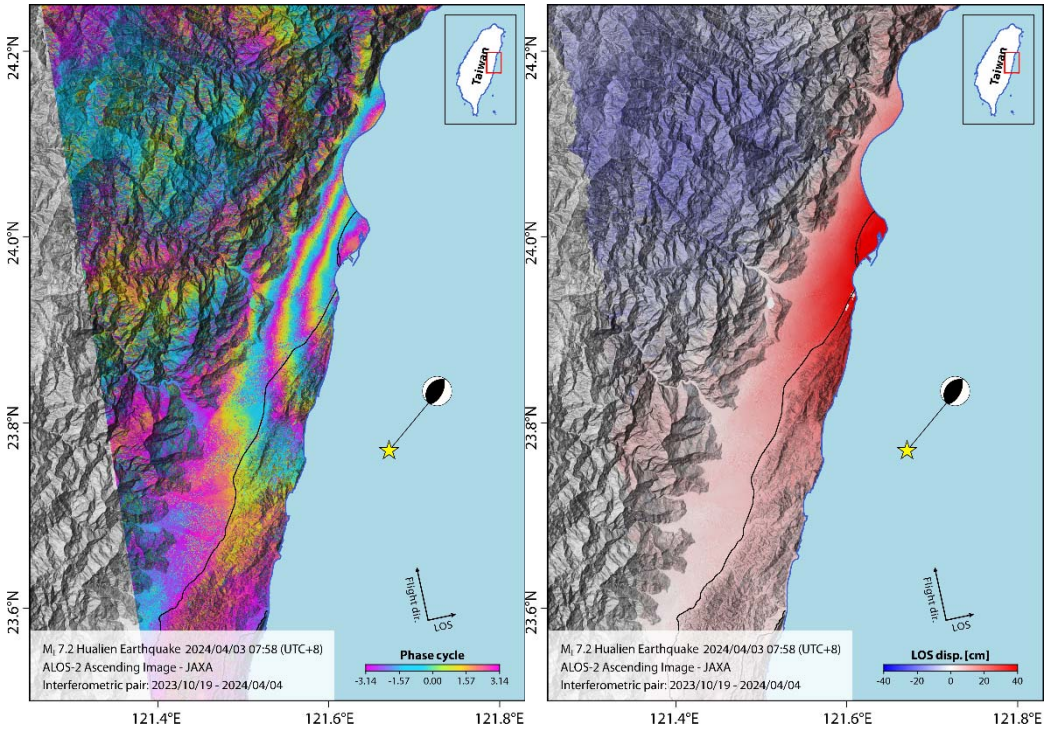


圖 9. 14：20240403 花蓮地震之 ALOS-2 升軌 stripmap 雷達差分干涉同震地表變位圖。ALOS-2 衛星拍攝，左圖為干涉圖、右圖為視衛星方向地表變形圖，黑白海灘球為震源機制解。

Figure 9. 14: The coseismic surface deformation field of LOS direction from ALOS-2 satellite of 20240403 earthquake.

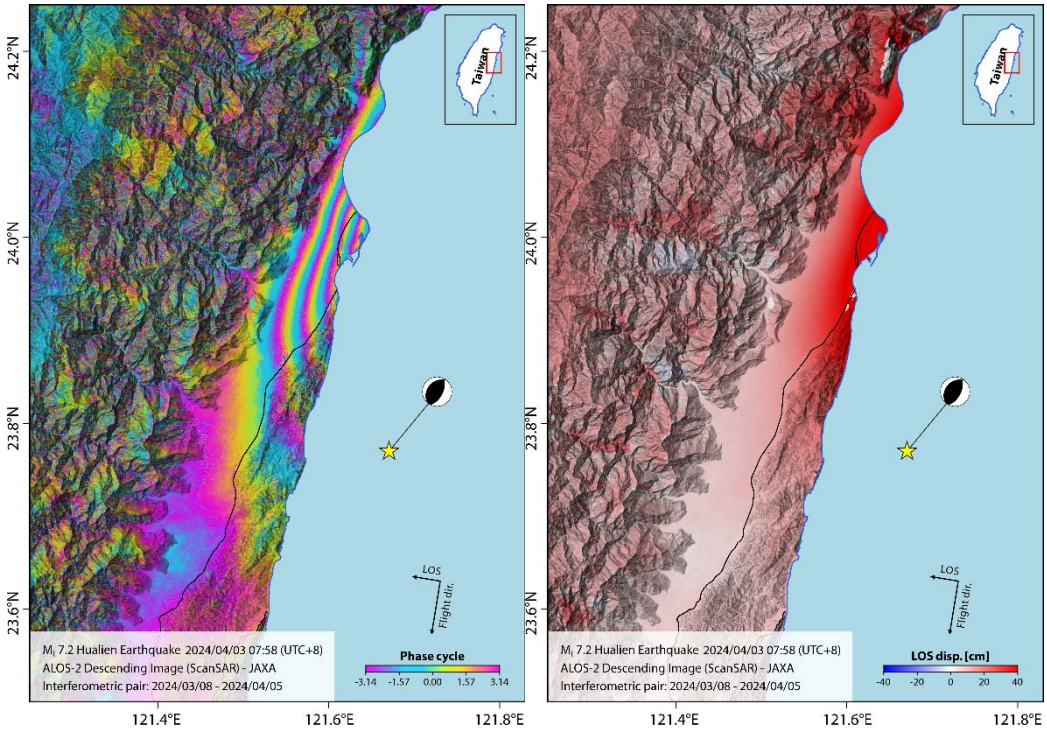


圖 9. 15：20240403 花蓮地震之 ALOS-2 降軌 ScanSAR 雷達差分干涉同震地表變位圖。ALOS-2 衛星拍攝，左圖為干涉圖、右圖為視衛星方向地表變形圖，黑白海灘球為震源機制解。

Figure 9. 15: The coseismic surface deformation field of LOS direction from ALOS-2 satellite of 20240403 earthquake.

9-1-5 斷層模擬結果

(一)原理說明

斷層錯位模型（Dislocation Model）是依據彈性錯動理論（Okada, 1985, 1992）所建立的斷層錯位模型，此理論是利用斷層滑移量去模擬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。沿著斷層面或斷層元素（fault patch / fault element）的斷層滑移量 $\Delta U_j(\xi_1,\xi_2,\xi_3)$會使均質均向的彈性體表面產生位移場$U_i(x_1,x_2,x_3)$，其關係如下式所列。

$$U_i = \frac{1}{F}\int\int_{\sum} \Delta U_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\vartheta u_i^n}{\vartheta \xi_n} + \mu(\frac{\vartheta u_i^j}{\vartheta \xi_k} + \frac{\vartheta u_i^k}{\vartheta \xi_j})]v_k\, d\sum$$

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。

為了了解斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義下列參數：

1. 斷層幾何（fault geometry）：斷層平面位置（km）、斷層深度（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；斷層深度是指斷層面下緣的深度。
2. 斷層滑移量（fault slip）：三個方向的分量[S1, S2, S3]，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（S1, strike slip）與傾向滑移量（S2, 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（S3）。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) = S2 / S1。
3. 地表位移量（displacement）：包含在地表上三個方向的位移分量[U1, U2, U3]，分別以東西分量（EW）、南北分量（NS）與上分量（Up）為正方向。水平位移量（horizontal displacement）則為 sqrt(U1^2+U2^2)。

(二)斷層模型模擬結果

本文應用地表 GNSS 測站解算之同震位移輸入斷層錯位模型進行斷層面滑移量模擬。假設 0403 花蓮地震屬於外海西側一向西傾的斷層面活動，將此斷層面劃分成 200 個小斷層面（patch）以求取同震斷層滑移量分布型態。獲得之最佳模型解（圖 9. 16 至圖 9. 17）指出，此斷層有一主要滑移分布，即位於斷層中段，並集中在震央以北的地區。此區域近嶺頂至崇德地區，以逆移分量為主的運動；斷層面的滑移量介於 818 – 2599 mm，並集中在深度約 10 - 20 km 的位置。此斷層計算之測地矩（M_0）為1.149×10^{27}dyne-cm，相當於 Mw7.34。

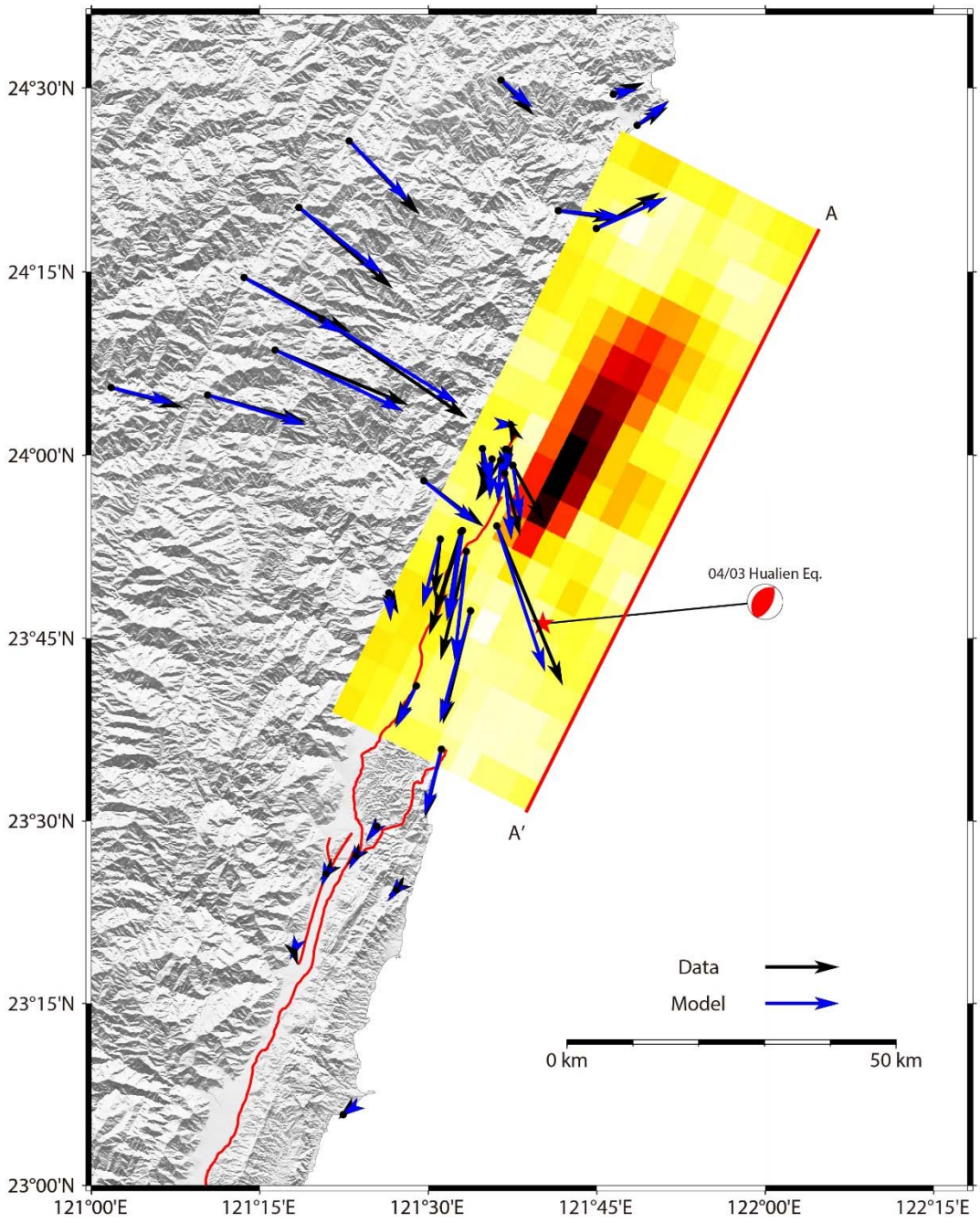


圖 9. 16：斷層錯位模型於水平方向擬合結果。黑色箭頭為 GNSS 同震位移資料，藍色箭頭為模擬結果。矩形為假設之斷層面，顏色為滑移量。陸上紅色實線為活動斷層。

Figure 9. 16: Coseismic source model of 20220323 earthquake event.

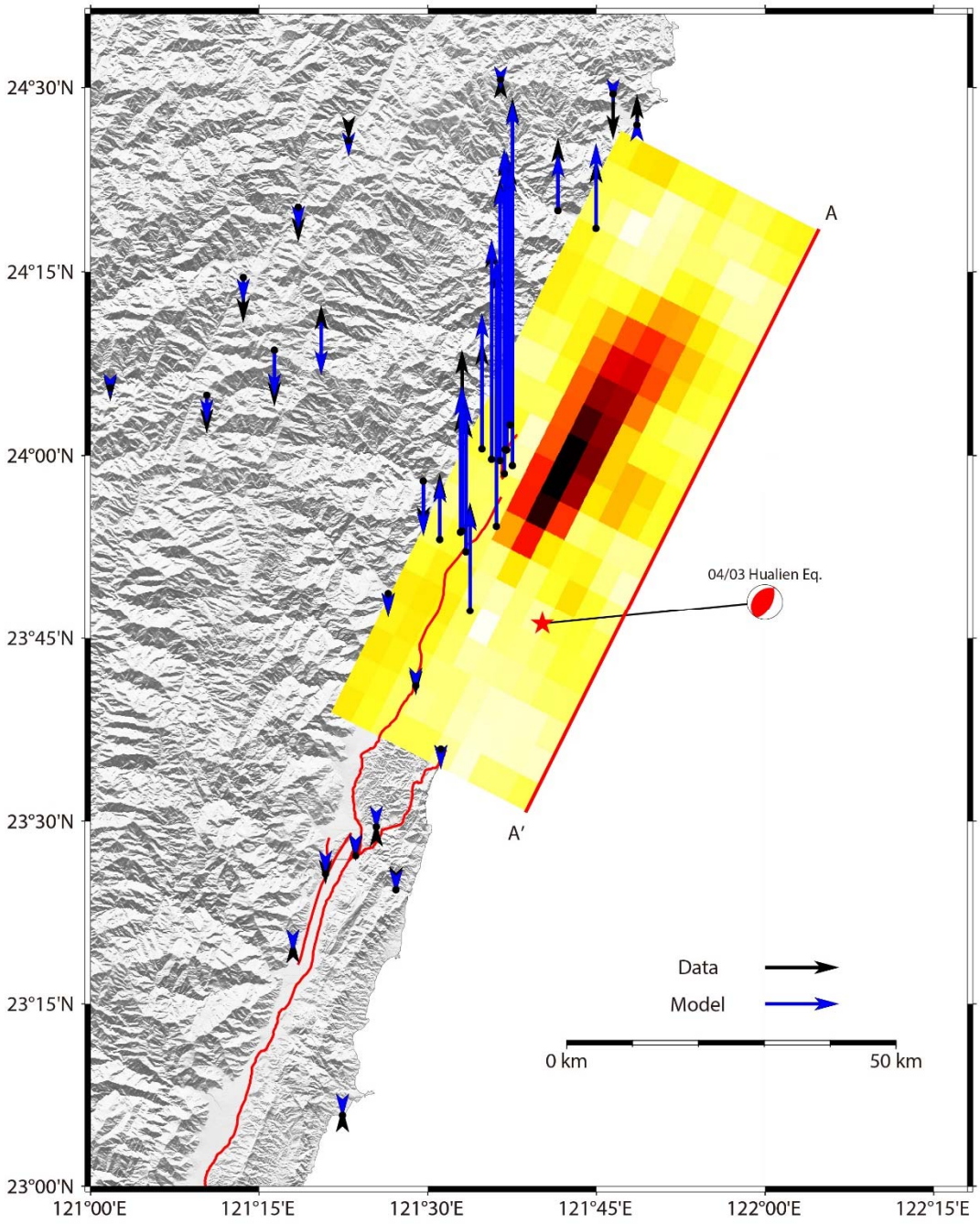


圖 9. 17：斷層錯位模型於垂直方向擬合結果。黑色箭頭為 GNSS 同震位移資料，藍色箭頭為模擬結果。矩形為假設之斷層面，顏色為滑移量。陸上紅色實線為活動斷層。

Figure 9. 17: Coseismic source model of 20220323 earthquake event.

9-1-6 地表變形觀測小結

2024 年 4 月 3 日於臺灣東部花蓮地區發生規模 7.2 之地震事件。本報告首先整合 GNSS 連續站、移動站與精密水準測量觀測結果，解析 2024 年 4 月 3 日花蓮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。

根據 GNSS 計算所得之同震位移成果，此次地震造成大範圍之顯著位移，在水平位移方面，主要的位移量分布於太魯閣以西之中央山脈區域，以及花蓮溪口以南的海岸山脈北段區域，大抵朝東南、朝南方向位移，最大位移量達 24.1 公分；在垂直位移方面，主要的抬升量分布於米崙斷層以東之米崙台地區域，以及花蓮溪口以南的海岸山脈北段區域，最大位移量達 58.5 公分。精密水準測量在橫跨海岸山脈北段的瀧澗−嶺頂測線具顯著抬升，且越往東側抬升量越大，最大位移量達 481.5 mm。此外，結合 DInSAR 技術分析 Sentinel-1 與 ALOS-2 衛星影像成果，可以發現地震造成陸地上花東縱谷北段南北長約 60 公里地表變形，且花蓮市區有較密集的干涉環，具顯著的地表變形位移量。最後，結合前述測地資料，透過斷層錯位模型（Dislocation Model）進行斷層面滑移量模擬。獲得之最佳模型解指出此斷層有一主要滑移分布，即位於斷層中段，並集中在震央以北的地區。此區域近嶺頂至崇德地區，以逆移分量為主的運動；斷層面的滑移量介於 818 – 2599 mm，並集中在深度約 10 - 20 km 的位置。此斷層計算之測地矩（M_0）為1.149×10^{27}dyne-cm，相當於 Mw7.34。

第十章、結論

本年度期末報告之主要工作重點在於：(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；(2) 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，並藉由三維斷層模型進行速度場反演，推估斷層滑移虧損速率，並分析斷層活動潛勢；(3) 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；(4) 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 2024 年 10 月全臺連續 GNSS 測站約 502 站之資料。在 GNSS 移動站與精密水準資料處理方面，本年度截至 10 月底為止，GNSS 移動站部分已完成全臺 8 個分區共 764 點的施測，精密水準則完成共計 30 條水準主測線及 1 條副測線之施測。本計畫重要區域相對於 S01R 測站之速度場顯示，臺中都會區、中部科學園區臺中園區與臺中市精密機械科技創新園區坐落於臺中盆地北部，附近之水平速度場主要由東南往西北方向移動，速度約為 2 - 15 mm/yr；在垂直速度方面，臺中盆地呈沉陷，周遭的丘陵、台地則呈抬升，速度約為 -2 ~ 2 mm/yr。

獲得地表速度場後，為了解中部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整體以東側的西部麓山帶、活動斷層較密集分布之區域為高，反映主應變率與最大剪應變速率的應變率強度最高可達約 2.5 μstrain/yr。此外，本次報告參考活動斷層分級與震度分級之概念修正地表變形強度分級表，將全臺第二不變量平均劃分為 0 至 5 級，5 級代表應變率強度大於 6.0 μstrain/yr，0 級表示該地區無不均勻地表變形之發生。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。

針對中部地區重要斷層活動潛勢分析，首先蒐集了大甲斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔–雙冬斷層、初鄉斷層及鐵砧山斷層之斷層幾何、滑移速率以及斷層活動性等相關文

獻。大甲斷層總長約 30 公里，斷層傾角淺部 0 - 5.5 公里約為 60°，深部 5.5 公里接到滑脫面，傾角約為 5°，最深可能達 8.5 公里，滑移速率則介於 1.7 - 5.5 mm/yr 之間。彰化斷層總長約 36 公里，分為南、北兩段，斷層傾角依序約為 25°與 60°；斷層深度依序約為 7.5 公里與 5.5 公里，深接到滑脫面，傾角約為 5°，最深依序可能達 8 與 8.5 公里，斷層尖端未出露地表，滑移速率則為 2.7 - 29.4 mm/yr 之間。

接著，根據文獻回顧取得之最佳幾何參數，本計畫接著採用 TDEFNODE 以及基線應變反演模型兩種模型，進行中部地區 2016 - 2023 年之地表速度場的斷層滑移虧損速率推估。根據本計畫彙整 TDEFNODE 以及基線應變兩種模型成果並透過加權平均，可計算得到以下二條重要斷層之斷層滑移虧損速率：大甲斷層約為 7.1 mm/yr，彰化斷層約為 6.2 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 2024 年起算，年度重要斷層之計算結果如下：大甲斷層採用 BPT 模式評估，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 14.1%、20.5%及 31.1%；彰化斷層採用 BPT 模式評估，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 12.6%、18.7%及 29.4%。

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。依據景況地振動分布圖，大甲斷層若最大地震規模為 M_w 7.1，其鄰近區域可能產生 0.39 g 左右之地振動值，相當於 6 級之震度；彰化斷層若最大地震規模為 M_w 6.9，則地振動值可達 0.36 g，也相當於 6 級之震度。其中，大甲斷層的地振動範圍完全涵蓋臺中都會區、中部科學園區（臺中園區）及臺中市精密機械科技創新園區等重要區域，一旦發震對於園區內產業之影響不容小覷；而彰化斷層位於重要區域之西南側，地振動範圍雖同樣完全涵蓋，但相較於大甲斷層之影響略小一些。在景況同震位移部分，大甲斷層之景況水平同震位移主要分布於斷層東側，並涵蓋重要區域，其中最大量值落在斷層走向發生改變之轉折區域，高達 122.0 cm；垂直位移於斷層東側及北側區域抬升顯著，同樣也以斷層走向改變之轉折區域抬升量值最大，最高可達 220.2 cm，重要區域之一的中部科學園區（臺中園區）即位於抬升變形區域。彰化斷層之景況水平同震位移主要分布於斷層南北兩段以東區域，也涵蓋部分重要區域，其中最大量值落在南段之斷層周緣區域，高達 45.3 cm；垂直位移於斷層東側以

抬升為主，在最南段之抬升量最大，約可達 86.7 cm，對於重要區域的影響以臺中都會區西半部及臺中市精密機械科技創新園區較為顯著。

參考文獻

大江二郎（1938）台中州國姓油田調查報告。台灣總督府殖產局，第 804 號。
中華民國交通部（2004）鐵路橋梁設計規範。中華民國交通部全球資訊網部頒規範，https://www.motc.gov.tw/ch/app/divpubreg_list/view?module=divpubreg&id=740&serno=437，查詢時間：2024/12/19。
中華民國交通部（2016）鐵路兩側禁建限建辦法。全國法規資料庫，https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=K0030022，查詢時間：2024/12/19。
中華民國交通部（2020）鐵路法。全國法規資料庫，https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawHistory.aspx?pcode=K0030001，查詢時間：2024/12/19。
中華民國交通部中央氣象局（2000）交通部中央氣象局地震震度分級表（舊版）。中央氣象局地震測報中心網站。
中華民國交通部中央氣象局（2020）交通部中央氣象局地震震度分級表（新版）。中央氣象局地震測報中心網站。
石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三、許民陽（1984）臺灣西部與南部活斷層的地形學研究。國立臺灣師範大學地理研究報告，第 10 期，第 49 - 94 頁。
石再添、楊貴三（1985）八卦台地的活斷層與地形面。國立臺灣師範大學地理研究報告，第 11 期，第 173 - 186 頁。
何信昌、陳勉銘（2000）五萬分之一台灣地質圖說明書，臺中地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 24 號。
李元希、石瑞銓（2008）地震地質與地變動潛勢分析計畫─斷層帶地下構造調查研究（1/4）。經濟部中央地質調查所報告，第 96 - 12 號，共 128 頁。
李元希、吳維毓、石同生、盧詩丁、謝孟龍、張徽正（2000）九二一集集地震地表變形特徵–埤豐橋以東。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 19 - 40 頁。
李元希、盧詩丁、石同生、饒瑞鈞（2002）集集地震南段地表破裂的變形機制—逆斷層-走向滑移斷層-走向滑移斷層板塊（TFF）三接點模式。經濟部中央地質調查所彙刊，第 15 號，第 87 - 101 頁。
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。
沈淑敏、張瑞津、楊貴三、林雪美、林宗儀（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫：活動構造地形判釋及資料庫建置分析（1/2）。經濟部中央地質調查所報告，第 94 - 13 號，共 127 頁。
林柏伸（2009）台灣地區強地動衰減式研究與路徑效應分析。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 157 頁。
林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生、張徽正（2000）臺灣中部濁水溪以南地區的集集地震斷層與構造分析。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 89 - 111 頁。
林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村（2008）台灣中部的活動斷層， 兩萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第 21 號，共 148 頁。
林啟文、盧詩丁、陳文山（2012）臺灣活動斷層分布圖 2012 年版說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，第 1 - 30 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。
陳文山（2016）臺灣地質概論。中華民國地質學會，共 250 頁。
陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2008）地震地質與地變動潛勢分析計畫─斷層長期滑移速率與再現週期研究（1/4）。經濟部中央地質調查所報告，第 96 - 10 號，共 86 頁。
陳文山、游能悌、松多信尚、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報告，第 99 - 09 號，共 141 頁。
陳文山、陳于高、楊小青（2014）斷層活動特性分析與評估總報告。經濟部中央地質調查所報告，共 189 頁。
陳江鑫、景國恩、饒瑞鈞、胡植慶、鄭凱謙、張午龍、莊昀叡、陳建良、陳鶴欽（2018）利用 GNSS 與精密水準資料解析臺灣地區 2002 年至 2017 年之地表變形型態。經濟部中央地質調查所特刊，第 33 號，第 157 - 178 頁。
陳勉銘、陳華玟、朱傚祖、謝凱旋（2008）從鑽探岩心探討彰化斷層的特性。經濟部中央地質調查所特刊，第 20 號，第 33 - 48 頁。

陳建良、景國恩、張午龍、莊昀叡、饒瑞鈞、胡植慶（2021）臺灣陸域 33 條活動斷層滑移速率之評估。臺灣地殼變形論文集，第 4 - 25 頁。
陳華玫、邵屏華、石同生（2004）五萬分之一台灣地質圖說明書，南投地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 31 號。
陳華玫、陳勉銘、邵屏華、張碩芳、謝凱旋（2007）彰化斷層與八卦丘陵的演化。地質環境與資源研討會論文集，第 63 - 70 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告，共 82 頁。
莊昀叡、景國恩、張午龍、陳宏宇、李易叡、莊怡蓉、邵國士（2023）重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估-第二階段（1/3）。經濟部地質調查及礦業管理中心 112 年度委託專業服務計畫期末報告書，共 393 頁。
張午龍、劉亭妤、張中白（2016）利用衛星測地資料分析花東縱谷北段之地殼變形。國土測繪與空間資訊，第 4 卷，第 2 期，第 117 - 138 頁。
張中白（2005）大地彩虹─合成孔徑雷達。科學發展月刊。第 390 期，第 18 - 23 頁。
張中威（2023）利用地質剖面探討初鄉活動斷層構造特性。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 140 頁。
梁勝雄、張中白、陳建良、盧詩丁（2016）從天空看 0206 美濃地震地表變形。科學研習，第 55 卷，第 6 期，第 42 - 52 頁。
黃文正、陳建志、波玫琳、顏一勤（2019）活動斷層特性精細調查(1/4)，經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告 B10834 號。
黃鑑水、陳勉銘（2000）台灣中部地區之雙冬斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 171 - 182 頁。
黃鑑水、謝凱旋、陳勉銘（2000）埔里圖幅及說明書，五萬分之一臺灣分幅地質圖及說明書第 32 號。經濟部中央地質調查所，共 75 頁。
景國恩（2023）112 年度特殊地質對基本控制點影響及因應機制委託研究。內政部國土測繪中心委託研究成果報告書，共 89 頁。
經濟部中央地質調查所（2016）活動斷層地質敏感區劃定計畫書：F0012 大甲斷層。經濟部中央地質調查所，共 24 頁。
董倫道、陳文山、李奕亨（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫：地球物理探勘計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所報告，第 95 - 09 號，共 221 頁。
劉亭妤（2016）利用測地資料分析花東縱谷北段之地殼變形。國立中央大學地球科學學系碩士論文，共 106 頁。
劉桓吉、李錦發、紀宗吉（2004）五萬分之一台灣地質圖說明書，雲林地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，第 38 號。
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。
顏一勤（2015）104 年度活動斷層補充地質調查報告。經濟部中央經濟部，共 80 頁。
羅偉、吳樂群、陳華玟（1999）五萬分之一臺灣地質圖說明書，國姓地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，共 52 頁。
蘇小寧、熊仁偉，孟國傑，郭楠，楊維芳，李毓照，吳偉偉，趙國強（2022）2021 年青海瑪多 Mw 7.3 地震地殼變形及區域孕震環境。地球物理學報，第 65 卷第 3 期，第 1032 - 1042 頁。
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.
Bomford, G. (1985) Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.
Bonilla, M.G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan. Open file report 75-41, U.S. Geological Survey, Menlo park, 58pp.
Bonilla, M.G. (1977) Summary of quaternary faulting and elevation changes in Taiwan. Memoir of the Geological Society of China 2, 43-55.
Borcherdt, R. D. (1994) Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification). Earthquake Spectra, 10(4). 617-653.
Brown, D., Alvarez-Marron, J., Schimmel, M., Wu, Y.M., and Camanni, G. (2012) The structure and kinematics of the central Taiwan mountain belt derived from geological and seismicity data. Tectonics, 31(5). doi:10.1029/2012TC003156
Champenois, J., Fruneau, B., Pathier, E., Deffontaines, B., Lin, K.-C. and Hu, J.-C. (2012) Monitoring of active tectonic deformations in the Longitudinal Valley (Eastern Taiwan) using Persistent Scatterer InSAR method with ALOS PALSAR data, Earth and Planetary Science Letters, 337–338, 144-155, doi: 10.1016/j.epsl.2012.05.025

Chang, C.H., Wu, Y.M., Shin, T.C., and Wang, C.Y. (2000) Relocation of the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 11, 581-590.
Chang, S.L. (1971) Subsurface geologic study of the Taichung Basin, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 8, 21-45.
Chao, S.H., and Chen, Y.H. (2019) A Novel Regression Analysis Method for Randomly Truncated Strong Motion Data, Earthquake Spectra. 35(2), 977-1001.
Chao, S.H., Chiou, B., Hsu, C.C. and Lin, P.S. (2020) A horizontal ground-motion model for crustal earthquakes and subduction earthquakes in Taiwan, Earthquake Spectra. 36(2), 463-506. doi:10.1177/8755293019891711
Chen, H. Y., Lee, J. C., Tung, H., Chen, C. L. and Lee, H. K. (2021) Variable vertical movements and their deformation behaviors at convergent plate suture: 14-year-long (2004-2018) repeated measurements of precise leveling around middle Longitudinal Valley in eastern Taiwan Journal of Asian Earth Sciences 218, doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104865
Chen, J.S. (1978) A comparative study of the refraction and reflection seismic data obtained on the Changhua plain to the Peikang shelf, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 15. 199-217.
Chen, P.H. (1990) Electrostratigraphic study of the Quaternary Formations in Houli Tableland. Proc. Geol. Soc. China, 33, 2, 127-142.
Chen, W.S., Yang, C.C., Yen, I.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C. Ota, Y., Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S., and Lu S.T. (2007) Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu Fault in central Taiwan: evidence from the Chushan excavation site. Bull. Seism. Soc. Am., 97(1B), 1-13. doi:10.1785/0120050161
Chen, Y.-G., Chen, W.-S., Lee, J.-C., Lee, Y.-H., Lee, C.-T., Chang, H.-C., and Lo, C.-H. (2001) Surface Rupture of 1999 Chi-Chi Earthquake Yields Insights on Active Tectonics of Central Taiwan. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 5, pp. 977–985.
Chen, Y.G., Chen, Y.W., Chen, W.S., Zhang, J.F., Zhao, H., Zhou, L.P. and Li, S.H. (2003) Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating. Quat. Sci. Rev., 22(10-13), 1213-1221. doi:10.1016/S0277-3791(03)00037-4
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.
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)
Ching, K.-E., Rau, R.-J., Johnson, K. M., Lee, J.-C., and 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
Chiu, H.T. (1972) Miocene stratigraphy of the Nantou area, central Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 10, 159-177.
Chiu, H.T. (1975) Miocene stratigraphy and its relation to the palaeogene rocks in west-central Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 12, 51-80.
Chou, J.T. (1971) A sedimentologic and Paleogeographic study of the Neogene formations in the Taichung region, western Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 9, 43-66.
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): 1207-1221. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0918-5
Dominguez, S., Avouac, J.P., and Michel, R. (2003) Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan. J. Geophys. Res.: Solid Earth, 108(B2).
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
Héja, G., Ortner, H., Fodor, L., Németh, A., and Kövér, S. (2022) Modes of oblique inversion: A case study from the Cretaceous fold and thrust belt of the western Transdanubian Range (TR), West Hungary. Tectonics, 41(3), e2021TC006728. doi:10.1029/2021TC006728
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 L. and Bürgmann R. (2006) Surface creep along the Longitudinal Valley fault, Taiwan from InSAR measurements. Geophys. Res. Lett., 33(6). doi: 10.1029/2005GL024624
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., Yu, S.-B., Simons, M., Kuo, L.-C. and Chen, H.-Y. (2009) Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealedby GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms. Tectonophysics, 479(1–2), 4–18. doi: 10.1016/j.tecto.2008.11.016
Hung, J.H. and Suppe, J. (2002) Subsurface geometry and kinematics of the Sani-Chelungpu thrust faults. Eos Trans.

AGU, 83, 22.
Johnson, K.M. (2013) Slip rates and off-fault deformation in Southern California inferred from GPS data and models. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118, 5643-5664.
Johnson, K.M. and Segall, P. (2004) Imaging the ramp–decollement geometry of the Chelungpu fault using coseismic GPS displacements from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. Tectonophysics, 378, 123-139.
Kao, H., Chen, R.Y., and Chang, C.H. (2000) Exactly where does the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan nucleate? Hypocenter relocation using the master station method. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 11, 567-580.
Kreemer C., Holt, W. E., A. and Haines, A. J. (2003) An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, Geophys. J. Int., 154(1), pp.8-34. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x
Ku, C.C. (1963) Photogeologic study of terraces in north-western Taiwan: Proc. Geol. Soc. China, 6, 51–560.
Lee, C. T. and Tsai, B. R. (2008) Mapping Vs30 in Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 19, 671-682. doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.671
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, Y.H., and Shih, Y.X. (2011) Coseismic displacement, bilateral rupture, and structural characteristics at the southern end of the 1999 Chi-Chi earthquake rupture, central Taiwan. J. Geophysical Res.: Solid Earth, 116(B7). doi:10.1029/2010JB007760
Letouzey, J. (1990) Fault reactivation, inversion and fold-thrust belt. In Petroleum and Tectonics in Mobile Belts: Proceedings of the 4th IFP Exploration and Production Research Conference, Held in Bordeaux, November 14-18, 1988 (No. 47, p. 101). Editions Technip.
Malvern, L. E. (1969) Introduction to the mechanics of a continuous medium, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
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
Mouthereau, F., Angelier, J., and Lee, J.C. (2001) Le séisme du 21 septembre 1999 : influence de l'héritage structural et implication du socle au front de la chaîne de Taiwan. Earth Planet. Sci. Lett., 333, 93-103.
Mouthereau, F., Lacombe, O., Deffontaines, B., Angelier, J., Chu, H. T., and Lee, C. T. (1999) Quaternary transfer faulting and belt front deformation at Pakuashan (western Taiwan). Tectonics, 18(2), 215-230.
Nikolaidis, R. (2002), Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, thesis, Univ. of Calif., San Diego.
Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismolog. Soc. Am., 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(2), 1018-1040.
Ota, Yoko, Shyu, J. Bruce H., Chen, Yue-Gau, Hsieh, Meng-Long (2002) Deformation and Age of Fluvial Terraces South of the Choushui River, Central Taiwan, and Their Tectonic Implications. Western Pacific Earth Sciences, Vol. 2, No. 3, 251-260.
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.
Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T. (2000) Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan. PAGEOPH, 157, 2303-2322.
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., Sieh, K., Chen, Y.-G., and Liu, C.-S. (2005), Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, J. Geophys. Res., 110, B08402. doi:10.1029/2004JB003251
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 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its neotectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 31, 317-331. doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.018
Shyu, J. B. H., Yin, Y.-H., Chen, C.-H., Chuang, Y.-R., and 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
Siame, L.L., Chen, R.F., Derrieux, F., Lee, J.C., Chang, K.J., Bourlès, D.L. Braucher, R., Léanni, L., Kang, C.C., Chang, C.P., and Chu, H.T. (2012) Pleistocene alluvial deposits dating along frontal thrust of Changhua Fault in western Taiwan: The cosmic ray exposure point of view. J. Asian Earth Sci., 51, 1-20.
Sibson, R. H. (1995) Selective fault reactivation during basin inversion: potential for fluid redistribution through fault-valve action. Geological Society, London, Special Publications, 88(1), 3-19.
Simoes, M., Avouac, J.P., Chen, Y.G., Singhvi, A.K., Wang, C.Y., Jaiswal, M., Chan, Y.C., and Bernard, S. (2007) Kinematic analysis of the Pakuashan fault tip fold, west central Taiwan: shortening rate and age of folding inception. J. Geophys. Res., 112, B03S14. doi:10.1029/2005JB004198

Steketee, J.A. (1958) Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations, Can. J. Phys., 36, 1168-1198.
Su X., Yao, L., Wu, W., Meng, G., Su, L., Xiong, R. and Hong, S. (2019) Crustal Deformation on the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau from Continuous GPS Observations. Remote Sensing, 11(1): 34. https://doi.org/10.3390/rs11010034
Suppe, J. (1985) Principles of Structural Geology. Prentice Hall, New York, 537 pp.
Suppe, J. (1987) The active Taiwan mountain belt. In: Schaer, J. P., Rodgers, J. (Eds.), Anatomy of Mountain Chains. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 277–293.
Teng, L. S. (1990) Geotectonic Evolution Of Late Cenozoic Arc-Continent Collision In Taiwan. Tectonophysics, 183(1-4), 57-76.
Teng, L. S. (1996) Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. Geology, 24(10), 949-952.
Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. (1970) Theory of Elasticity, 3rd Edition. London: McGrawHill Book Company.
van Rijsingen, E. M., Calais, E., Jolivet, R., de Chabalier, J. B., Jara, J., Symithe, S., Robertson, R., Ryan, G. A. (2021) Inferring interseismic coupling along the Lesser Antilles arc: A Bayesian approach. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB020677. https://doi.org/10.1029/2020JB020677
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
Wang, C.Y., Chang, C.H., and Yen, H.Y. (2000) An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the thin-skinned thrust model. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 11(3), 609-630.
Wang, C.Y., Kuo, S.Y., Shyu, W.L., and Hsiao, J.W. (2003) Investigating near-surface structures under the Changhua fault, west-central Taiwan by the reflection seismic method, Terr. Atmos. Ocean. Sci., 14, 343-367.
Wang, C.Y., Li, C.L., and Su, F.C. (2002) Structural mapping of the 1999 Chi-Chi earthquake fault, Taiwan by seismic reflection methods. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 13(3), 211-226.
Wang, H., and Wright, T. J. (2012), Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet, Geophys. Res. Lett., 39, L07303. doi:10.1029/2012GL051222
Ward, S.N. (1994) A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1293-1309.
Wells, D. L., and Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 974-1002.
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, K.M., Huang, S.T., Wu, J.C., Ting, H.H., Mei, W.W., Lee, M., Hsu, H.H., and Lee, C.J. (2007) 3D Geometry of the Chelungpu thrust system in central Taiwan: Its implications for active tectonics. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 18(2), 143-181.
Yang, K. M., Wu, J. C., Wickham, J. S., Ting, H. H., Wang, J. B., and Chi, W. R. (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural mode and evolution in foothills belt, northwestern Taiwan. Pet. Geol. Taiwan, 30, 111-150.
Yen, J. Y., Lu, C. H., Chang, C. P., Hooper, A. J., Chang, Y. H., Liang, W. T., Chang, T. Y., Lin, M. S. and Chen, K. S. (2011). Investigating active deformation in the northern Longitudinal Valley and City of Hualien in eastern Taiwan using persistent scatterer and small-baseline SAR interferometry. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 22, 291-304. https://doi.org/10.3319/TAO.2010.10.25.01(TT)
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. (2019). Insights into Seismogenic Deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake Sequence from InSAR, GPS, and Modeling. Seismological Research Letters, 90. doi: 10.1785/0220180228
Yen, Y. T., and Ma, K. F. (2011) Source-Scaling Relationship for M 4.6-8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan. Bull. Seismo. Soc. Am., 101(2), 464-481.
Yu, S.-B., and Kuo, L.-C. (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333(1-2), 199-217. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00275-4
Yu, S.B., Chen, H.Y. and Kuo, L.C. (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics, 274(1-3), 41-59. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00297-1
Yue, L.F., Suppe, J., and Hung, J.H. (2005) Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw=7.6). J. Struct. Geol., 27, 2058-2083.
Yue, L.F., Suppe, J., and Hung, J.H. (2011) Two contrasting kinematic styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan, in K. McClay, J. H. Shaw, and J. Suppe, eds., Thrust fault-related folding: AAPG Memoir, 94, 153-186.

附錄 1、0403 花蓮地震同震位移表

附錄 1-1、0403 花蓮地震 GNSS 連續站同震位移表

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
125.37380	24.75312	-1.05	1.27	1.65	1.27	-1.77	5.78	0498
123.79204	24.42627	-2.39	1.28	2.88	1.25	2.53	5.56	0500
125.17098	24.82796	-1.54	1.31	1.94	1.28	-0.84	5.88	0747
124.69244	24.64161	-1.22	1.34	2.37	1.29	-0.24	6.05	0748
124.30129	24.53662	-0.8	1.46	1.99	1.41	4.84	6.68	0749
124.17265	24.33888	-2.48	1.36	2.16	1.36	2.35	6.1	0750
123.79585	24.06150	-5.26	1.24	2.07	1.21	3.43	5.43	0751
122.93949	24.44739	-3.88	1.33	3.82	1.3	-1.05	5.81	1211
120.60413	24.04949	32.62	5.17	-4.25	3.74	-18.68	20.24	172K
120.35726	22.80331	-1.01	1.46	2.13	1.38	5.01	6.72	AKND
120.81329	23.50817	7.74	2.17	4.74	2.13	0.11	10.78	ALIS
121.52970	25.18260	7.8	1.71	-8.64	1.67	4.65	7.85	ANBU
120.24907	23.70389	8.48	2.35	1.9	1.69	-3.98	10.09	ANES
121.42716	24.69927	32.72	6.84	-44.35	4.57	-23.88	29.25	BAL2
120.17189	23.38057	5.19	1.35	1.56	1.29	1.96	5.99	BDES
119.97427	26.21553	3.47	1.34	-1.32	1.33	-2.25	6.41	BEG2
120.96739	22.53280	-1.63	1.94	0.43	1.58	-5.48	9.07	BIMO
121.29295	23.03944	-6.41	1.38	1.78	1.31	13.87	6.11	BYRS
120.61239	23.41794	4.61	1.69	5.92	1.63	3.27	7.76	C001
120.57719	23.36174	4.29	2.28	2.06	1.94	1.97	11.61	C002
120.68873	23.97938	36.68	1.27	-2.69	1.23	-5.04	5.52	CAOT
121.61697	24.00783	7.59	2.39	-27.31	1.94	430.64	10.66	CG01
121.61466	24.00837	3.28	1.37	-31.56	1.26	432.95	6.12	CG02
121.51791	23.88575	-5.08	1.54	-82.54	1.45	76.12	7.35	CG03
121.55669	23.86883	-28.92	1.29	-146.36	1.28	203.18	5.79	CG04
121.37358	23.09740	-7.54	1.51	3.9	1.36	-2.32	6.72	CHEN
121.60727	23.99324	-27.73	3.43	-51.86	1.7	391.89	7.89	CHES
121.37453	23.09833	-7.95	1.3	3.24	1.23	-2.03	5.78	CHGO
120.43320	23.49597	7.28	1.39	2.83	1.32	-3.42	6.29	CHIA
120.58215	24.27101	47.97	8.56	-21.25	9.03	82.35	39.2	CHIN
120.82890	23.94538	49.78	1.51	-0.65	1.34	-6.08	6.79	CHIU
120.09275	23.05584	2.8	1.29	1.93	1.24	2.01	5.68	CHKU
121.66189	24.14921	63.04	1.55	64.82	1.39	222.94	7.01	CHNT
120.55710	24.06594	35.71	11.42	-3.17	7.85	-1	37.36	CHU2
120.60472	23.43871	8.31	1.59	1.6	1.73	2.77	7.94	CHUK

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
121.12568	23.13236	-8.42	6.04	-0.86	5.68	-2.69	26.22	CHUL
121.39310	23.45285	-11.91	1.49	-6.74	1.66	-4.3	7.54	CHUN
120.14015	23.45076	6.82	2.11	1.47	1.91	2.92	11.85	CHYI
119.42997	23.20463	1.68	1.25	1.74	1.19	1.92	5.46	CIME
120.48123	22.88959	-1.68	1.29	1.81	1.24	2.23	5.79	CISH
120.22000	22.99885	1.28	1.39	1.67	1.32	5.34	6.26	CKSV
121.51200	24.60225	43.39	2.65	-44.12	3.36	-23.89	19.54	CLAN
120.57960	22.43005	-1.57	2.52	1.26	1.65	2.94	11	CLON
120.27784	22.75468	6.74	4.02	-4.76	2.66	6.94	14.8	CTOU
120.45276	23.47304	6.43	1.26	2.56	1.21	-0.83	5.52	CWEN
120.87183	24.42288	59.68	1.47	-31.13	1.36	0.87	6.42	DAHU
120.86497	22.31130	3.05	5.12	5.26	3.62	-1.31	19.68	DAJN
120.36139	23.11945	28.8	3.26	-5.53	2.76	-1.15	13.8	DANI
120.75191	22.20413	-1.02	2.69	2.37	2.35	1.34	13.57	DANL
120.89004	22.34059	-5.29	1.3	1.97	1.24	3.19	5.74	DAWU
121.28057	23.21318	-6.72	1.54	-0.07	1.4	-1.75	7.24	DCHU
120.52651	22.40795	-0.72	1.29	1.27	1.26	0.58	5.81	DLIO
120.44799	23.67380	12.3	1.83	1.42	1.49	-0.43	7.61	DNAN
121.14000	23.75000	36.4	1.16	7.71	1.16	-18.12	5.12	DNDA
121.48228	23.68512	-29.11	6.31	-42.12	3.74	5.1	18.77	DNFU
120.70351	22.91562	-1.67	1.35	1.11	1.36	5.3	6.11	DONA
120.48970	26.36769	3.18	1.21	-1.67	1.22	-0.44	5.42	DONY
120.13928	23.44999	5.99	1.35	1.92	1.26	2.84	5.91	DOSE
120.82688	24.26268	61.1	1.22	-20.83	1.2	-7.59	5.37	DOSH
120.93280	24.04308	76.55	1.51	-9.65	1.43	-10.51	6.78	DPIN
121.39803	23.63121	16.74	66.6	-24.69	23	28.04	90.47	DSIN
121.33059	23.02566	-11.54	8.29	-1.33	5.59	37.87	35.34	DULI
120.21840	22.99738	0.99	1.36	1.62	1.29	4.13	6.19	EQLD
120.41955	23.79759	-6.7	21.49	-5.33	12.08	-64.83	80.01	ERLN
121.16611	22.94217	-7.65	1.35	2.94	1.28	3.98	5.93	ERPN
120.59360	22.36525	-2.33	1.28	2.46	1.2	-1.69	5.63	FALI
121.51942	23.59845	-0.29	40.59	-21.16	16.48	-68.34	98.15	FENP
121.78107	25.07105	7.62	4.88	-2.43	3.66	0.2	19.4	FIVE
120.86197	23.68843	22.78	1.81	6.71	1.49	-3.11	7.98	FKD2
121.45335	23.74630	-8.93	1.3	-41.44	1.25	2	5.83	FLNM
121.93748	25.02037	7.62	2.34	2.46	1.69	-2.6	8.98	FLON
120.72445	24.03516	41.42	1.4	-5.56	1.32	-7.52	6.18	FNGU
121.52203	23.59816	-19.42	1.28	-30.77	1.24	9.77	5.71	FONB
120.31223	23.79113	13.02	1.76	1.79	1.63	-3.54	8.26	FRES
121.68715	24.97414	9.29	1.46	-9.15	1.37	0.86	6.79	FTPL

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
121.32929	23.25074	-5.1	1.53	0.41	1.62	1.08	7.4	FUDN
120.32017	23.92231	16.35	1.55	-0.65	1.43	2.35	7.1	FUNY
120.82331	24.01115	55.6	1.64	-4.47	1.49	-5.08	7.43	FUQE
121.35285	24.82120	23.75	1.22	-33.1	1.2	-4.35	5.31	FUSI
121.33146	24.79904	31.3	3.32	-38.34	2.75	-17.54	14.81	FUSN
120.59062	23.08029	-0.56	1.77	1.85	2.01	1.99	9.21	GAIS
120.40248	23.74141	14.21	2.21	0.83	1.68	0.25	10.77	GFES
121.58029	24.00914	10.27	4.09	-48.24	2.23	165.65	11.26	GFPS
120.60780	23.61210	12.48	1.42	3.01	1.37	1.57	6.4	GLES
121.98742	25.02039	6.47	1.27	3.85	1.23	1.94	5.6	GOLI
121.50816	24.98200	10.99	1.56	-16.14	1.51	2.38	7.16	GS01
121.04407	24.77660	31.66	1.22	-29.78	1.2	0.82	5.4	GS03
120.56840	23.56711	9.96	1.76	2.76	1.78	-1.94	8.54	GS05
120.55422	23.46561	7.49	1.52	2.41	1.46	-5.24	7.43	GS06
121.65193	25.20861	7.42	1.34	-5.78	1.39	1.77	6.22	GS09
121.49877	25.13357	8.14	1.36	-10.52	1.3	1.09	5.89	GS11
121.45224	25.02001	15.1	2.15	-18.42	2.88	4.9	16.61	GS13
120.95945	24.80322	29.03	1.33	-24.29	1.26	2.42	6.03	GS14
120.99050	24.76665	31.1	1.93	-27.62	2.86	8.43	11.23	GS15
121.04161	24.74787	35.02	1.36	-32.09	1.28	0.84	6.2	GS16
120.60584	23.56115	13.13	2.23	3.75	2.09	3.01	10.74	GS17
120.47378	23.48498	6.54	1.67	1.81	1.55	1.67	7.82	GS18
121.94321	24.84190	10.52	1.28	4.3	1.25	-5.01	5.61	GS20
120.51241	24.09648	26.69	1.76	-5.36	1.83	-0.54	8.39	GS21
120.60390	24.09133	23.46	16.16	37.93	9.59	-53.47	60.84	GS22
120.64816	24.09370	36.63	1.36	-7.18	1.3	-3.01	6.08	GS23
120.52644	24.02564	27.38	2.48	-3.25	1.82	-1.28	11.02	GS24
120.64059	23.98667	32.57	1.97	-1.07	2.29	-7.54	10.1	GS25
120.57870	23.82489	27.34	2.21	-0.25	2.54	0.29	10.71	GS26
120.21358	23.07986	3.97	3.25	5.83	2.99	5.12	17.52	GS28
120.31755	23.07537	1.89	1.5	1.91	1.37	1.64	6.58	GS29
120.22612	23.02032	0.87	1.37	1.97	1.29	5.17	6.06	GS30
120.27588	23.01875	1.36	1.36	1.32	1.28	4.52	5.99	GS31
120.33584	23.02714	0.48	1.38	1.24	1.3	0.79	6.15	GS32
120.27632	22.93612	0.33	1.51	1.09	1.53	7.01	7.07	GS34
120.30849	22.93581	1.32	2.02	1.4	2.06	0.41	10.65	GS35
120.62530	24.36200	35.84	1.34	-13.76	1.32	1.84	6.05	GS36
120.60060	24.27980	34.76	3.11	-7.18	3.65	-46.19	20.44	GS38
120.52960	24.18440	29.82	1.92	-7.58	1.64	2.27	9	GS39
120.45200	23.27320	3.04	1.29	1.73	1.24	1.14	5.72	GS42

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
120.37360	23.25720	5.89	7.04	2.97	5.75	17.91	38.02	GS43
120.40040	23.22220	2.48	1.51	1.62	1.4	0.44	7.22	GS44
120.72800	22.75250	-3.35	1.43	1.45	1.67	-2.81	7.33	GS45
120.63950	22.52970	-2.75	1.61	0.54	1.56	-1.53	8.45	GS46
120.54006	23.00022	0.27	2.08	1.83	1.94	3.06	9.01	GS51
120.39831	22.83998	-1.57	1.46	2.37	1.41	7.06	6.58	GS53
120.60224	22.85069	-2.5	1.44	0.89	1.34	-0.9	6.38	GS55
120.60173	22.70388	-1.45	1.82	0.79	1.5	-3.32	8.09	GS56
120.83892	22.12637	-1.98	1.53	3.04	1.38	2.29	6.73	GS58
120.70439	22.05740	-1.5	3.13	2.95	2.55	-2.35	14.39	GS59
120.80973	22.00754	-1.25	1.29	2.46	1.22	3.14	5.68	GS60
120.62683	23.54326	9.78	1.21	2.07	1.24	-1.48	5.34	GS63
120.71215	23.40764	5.05	1.62	3.18	1.68	-2.76	9.68	GS64
120.67515	23.33968	3.3	1.57	2.41	1.56	-3.11	7.15	GS67
120.48770	23.60710	10.17	2.06	2.67	1.61	-2.37	9.25	GS68
121.79004	24.79673	13.88	1.88	-3.19	1.79	-4.41	9	GS70
121.71310	24.66750	22.36	2.01	-9.8	1.82	-7.25	8.06	GS71
121.82915	24.66470	18.24	1.45	11.91	1.32	3.52	6.7	GS72
120.35303	22.97111	-3	4.14	0.62	4.17	3.99	21.26	GS73
120.45980	22.93916	1.99	5.26	1.73	5.55	6.61	32.67	GS74
120.49412	22.88556	-1.07	1.77	1.24	1.65	2.7	8.09	GS75
120.37070	22.83527	-2.38	3.3	0.71	3.19	-9.94	16.6	GS76
120.40526	22.77756	-1.95	1.98	1.77	1.62	-0.04	8.35	GS77
120.46561	22.84779	-1.56	1.43	0.91	1.35	7	6.33	GS78
120.29961	22.89573	1.23	3.28	0.8	2.22	0.46	15.7	GS79
120.36064	22.86419	-0.89	2.13	1.01	1.76	1.05	10.06	GS80
120.31207	22.81486	1.54	3.93	0.87	2.64	7.67	15.04	GS81
120.83282	24.31259	59.48	1.39	-26.49	1.34	-6.88	6.28	GS82
120.74323	23.98396	41.98	1.63	-2.33	1.32	-5.89	6.98	GS83
120.85674	23.80984	38.71	1.72	4.93	1.55	-6.09	8.5	GS84
120.73514	21.96949	-2.45	1.33	2.44	1.23	2.51	5.7	GS85
121.13770	24.91965	22.04	1.69	-23.19	1.78	2.01	8	GS86
121.00240	24.81240	29.64	1.31	-25.3	1.25	2.83	5.74	GS87
120.34801	23.06852	0.54	1.81	1.99	1.74	2.02	9.28	GS88
120.31271	23.03402	0.22	2.76	3.52	2.73	-13.94	14.29	GS89
120.92830	24.78519	28.98	1.73	-24.84	1.75	0.65	8.44	GS91
120.92320	24.54658	52.36	1.68	-32.8	1.45	-2.5	7.22	GS92
121.55855	25.16547	7.01	1.9	-9.17	1.61	0.48	9.27	GS93
121.55855	25.17709	5.24	157.09	-19.14	50.24	157.51	182.98	GS94
120.38952	23.12165	1.57	1.65	1.65	1.54	-2.51	7.36	GS96

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
120.45696	23.12156	-0.97	2.29	1.38	2.64	12.05	12.9	GS97
121.00695	24.20297	99.49	1.98	-31.86	2.14	-15.36	9.43	GUK2
120.58878	23.64586	13.75	1.37	2.5	1.42	0.36	6.36	GUKN
121.71678	24.63397	22.64	1.92	-8.96	1.58	-9.7	8.56	HAN2
121.00033	24.75191	37.08	1.77	-26.72	1.93	-12.72	8.5	HCBS
120.74645	22.00393	-1.34	1.58	2.63	1.45	1.02	7.39	HENC
121.58092	25.29444	7.01	1.42	-4.62	1.43	0.62	6.46	HERI
121.69295	24.98072	8.61	1.19	-10.61	1.19	1.43	5.26	HFAN
121.63314	24.01072	71.24	4.21	-9.33	2.08	511.64	10.33	HLCL
120.34777	23.68658	9.77	1.38	1.78	1.31	3.65	6.17	HLES
121.62552	23.98649	50.02	3.88	-69.95	1.93	509.55	8.6	HLHS
121.34856	23.42816	-8.41	1.4	-2.65	1.39	-8.04	6.94	HLSM
121.60660	24.10270	73	4.16	-39.01	2.09	90.23	11.33	HLSZ
120.47914	23.94836	20.89	1.44	-1.64	1.36	-3.95	6.59	HNES
121.30806	24.33770	130.86	1.95	-104.43	1.93	-54.93	9.79	HNSN
120.74523	21.94578	-1.63	2.2	-0.55	1.64	9.66	8.96	HOBE
120.13488	23.18838	3.76	1.37	0.35	1.33	0.79	6.11	HOKN
120.89488	24.17078	109.05	11.98	-12.06	9.21	-57.7	43.09	HOPN
121.01425	24.82775	28.84	1.66	-25.02	1.55	5.33	7.61	HSIN
121.61351	23.97538	30.94	1.58	-84.11	1.49	462.5	7.98	HUAL
121.27262	24.14347	192.33	1.35	-70.5	1.31	-85.37	5.98	HUAN
121.74944	24.30900	86.62	6.99	54.37	3.85	62.29	23.29	HUAP
119.66941	23.56640	5.02	1.24	1.66	1.19	-1.06	5.35	HUSI
120.28662	23.72940	11.38	1.28	1.34	1.26	0.96	5.71	HUWE
121.02941	24.09233	100.99	1.88	-20.17	1.63	-21.85	9.02	HUYS
120.27930	23.36066	4.55	1.45	1.16	1.33	1.5	6.5	ICHU
121.75662	24.76404	15.49	1.93	-6.46	1.7	-3.68	9.32	ILAN
120.54742	23.51372	8.33	1.27	2.23	1.23	1.23	5.67	JHCI
120.16888	23.29631	3.69	1.5	1.24	1.39	1.74	6.58	JHES
120.57670	23.61530	11.99	1.4	2.54	1.34	1.79	6.55	JHSN
119.61336	23.74142	5.61	1.26	1.78	1.2	-0.51	5.48	JIBE
120.40002	23.63393	9.8	1.45	0.71	1.32	3	6.28	JJES
120.62278	22.32996	-2.45	1.52	2.7	1.46	-2.56	6.99	JLUT
120.40723	23.70933	12.45	1.93	0.54	1.76	-2.89	8.99	JMES
118.44738	24.41708	4.98	1.36	1.96	1.28	1.03	6.06	JNHU
118.42175	24.50367	3.12	1.29	2.18	1.24	-2.35	5.65	JNSA
120.52400	23.42297	5.74	1.31	1.54	1.25	1.97	5.73	JONP
121.37139	23.53160	-5.9	2.03	-12.06	1.6	-6.08	9.15	JPEI
121.35889	23.34108	-8.58	1.94	-2.53	1.88	-4.5	9.58	JPIN
120.68086	23.76124	23.74	1.6	1.75	1.52	4.35	7.51	JSAN

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
120.31505	23.62199	9.59	1.47	0.6	1.46	2.05	6.82	JSES
121.42375	23.49236	-13.42	1.46	-11.38	1.46	-1.37	8.27	JSU2
121.31817	23.34166	-8.37	1.25	-2.33	1.21	-0.53	5.56	JULI
120.87537	24.68395	34.63	1.24	-25.01	1.21	2.65	5.43	JUNA
120.49734	23.21974	2.4	2.04	1.91	1.49	-0.87	8.53	JWEN
121.22634	24.24247	154.34	1.39	-68.36	1.51	-67.34	6.85	JYAN
119.97097	25.95971	5.49	1.23	-1.41	1.23	1.35	5.49	JYGU
120.63298	22.81019	-2.45	1.35	0.46	1.26	0.94	5.89	KASU
120.78202	21.94942	-1.71	1.96	2.46	1.5	-3.51	8.29	KDNM
121.11680	23.98773	103.97	1.27	-9.77	1.23	-40.51	5.55	KFN2
120.25295	22.85590	1.74	1.4	2.28	1.28	4.42	6.04	KHLZ
118.28919	24.40743	1.57	2.02	2.17	2.01	2	12.16	KIMN
120.50796	23.33109	4.37	1.79	2.21	1.69	8.74	8.19	KLN2
118.38857	24.46382	4.68	1.34	2.04	1.27	-3.19	5.96	KMNM
121.50574	23.47221	-12.44	1.28	-8.83	1.24	-2.66	5.74	KNKO
121.17606	24.77609	93.64	9.68	-50.81	6.38	2.11	30.57	KSH2
120.33428	23.62661	15.05	4.94	2.12	4.1	-2.88	25.68	KTES
121.08051	25.04096	16.84	1.78	-14.91	1.64	-6.21	9.21	KYI2
120.69798	23.94625	35.23	1.38	-1.66	1.28	-8.29	6.09	KZN1
120.73990	23.52940	9.33	2.47	4.11	1.81	9.28	10.56	LAIG
121.55810	22.03731	-2.78	2.44	4.72	1.9	-7.47	11.16	LANY
120.51218	22.43232	-1.28	1.33	1.96	1.27	-1.53	5.97	LBJS
118.23926	24.44067	3.03	1.33	2.53	1.27	0.64	5.89	LEYU
120.63497	22.99378	-0.56	1.4	0.62	1.3	0.32	6.19	LGU2
120.52790	22.75861	-2.14	2.53	1.48	2.5	1.07	12.4	LIKN
120.36866	22.34615	-2.54	1.35	1.19	1.27	1.28	6	LIU2
120.77348	24.33635	52.25	1.68	-20.89	1.64	0.03	8.2	LIY2
120.40261	22.99458	0.92	1.4	0.96	1.31	1.28	6.07	LNCH
121.91783	25.10035	6.43	6.13	1.12	4.25	-2.73	25.06	LND2
120.59215	23.75745	18.5	1.52	1.76	1.4	-0.51	7.07	LNJS
121.37715	25.07764	11.99	1.62	-15.55	1.44	5.84	7.67	LNK2
121.13056	22.90631	-4.48	1.38	3.52	1.28	-4.24	6.19	LONT
120.70120	23.46860	8.31	1.57	3.72	1.44	-0.43	7.53	LOYE
121.18216	24.02934	136.49	1.56	-21.58	1.53	-61.61	7.08	LSAN
120.63422	24.15337	39.05	1.28	-8.19	1.27	-2.84	5.69	LSB0
121.77162	24.70003	18.4	2.82	-2.88	2.03	-8.42	11.66	LTUN
120.44575	23.50774	1080.03	7.36	-990.76	6.05	24.49	27.15	LTZA
121.46837	22.66933	-4.72	1.28	6.2	1.22	-0.65	5.61	LUDO
120.43513	24.06001	24	2.44	-2.48	2.18	0.55	12.11	LUKN
120.30667	23.72271	11.48	1.5	0.93	1.4	0.37	6.86	LYES

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
121.62224	24.04168	2.91	2.87	17.72	1.4	375.12	6.25	MAAY
120.65205	22.70764	-2.77	1.37	2.33	1.43	3.62	6.51	MAJA
121.63123	23.99192	75.73	31.95	-38.9	14.15	521.22	73.03	MCES
120.19990	23.65260	8.62	1.35	1.04	1.28	0.36	5.89	MDES
121.17247	24.08216	141.61	1.37	-30.36	1.29	-55.17	6	MFEN
120.81026	24.58345	40.75	3.08	-23.5	2.42	-1.37	16.99	MIAO
120.71985	23.27703	2.05	1.67	2.61	1.47	-0.71	7.35	MIN2
121.59479	23.99504	-12.53	3.81	-44.72	1.91	306.14	9.15	MLES
120.55400	22.90000	-2.09	2.31	1.77	1.83	4.55	10.3	MLO1
121.02685	23.20054	2.34	1.31	1.57	1.27	6.71	5.89	MOTN
119.93318	26.15710	3.78	1.53	-3.17	1.45	-2.65	7.34	MZUM
121.81021	24.44934	49.26	1.58	35.06	1.48	36.49	7.21	NAAO
120.27581	22.93845	0.24	1.52	2.03	1.4	6.73	7.12	NCKU
121.51987	23.91679	-53.25	1.24	-57.4	1.22	41.88	5.45	NDH4
121.61812	24.01004	7.68	1.22	-26.72	1.2	439.95	5.38	NDH5
121.75516	24.29532	147.59	1.62	92.19	1.43	73.52	7.01	NDH7
121.74923	24.42681	57.08	2.32	20.6	1.99	20.99	11	NDHA
121.54870	23.89576	-30.2	1.29	-113.57	1.27	175.89	5.7	NDHB
121.55081	23.89724	-42.5	9.69	-113.44	9.65	210.7	38.7	NDHU
121.28000	24.05000	185.69	1.16	-41.86	1.15	-86.14	5.1	NGAO
120.21843	23.61197	8.31	1.5	0.58	1.36	0.41	6.6	NGES
121.45301	23.40621	-11.59	1.88	-2.96	1.71	-6.04	9.08	NHSI
121.41211	23.24332	-8.03	1.52	2.9	1.37	-6.88	7.25	NIPU
121.56158	24.63478	27.83	9.4	-29.21	10.14	-34.7	40.54	NIUT
120.57141	22.50389	-5639.51	2.23	-7404.52	2.52	-320.05	12.1	NJOU
121.38280	24.42820	101.33	2.37	-91.36	2.28	-24.18	12.32	NSAN
120.80090	24.22579	59.23	1.58	-17.88	1.44	-7.23	7.14	NSHE
121.54240	25.05913	15.43	1.32	-22.59	1.31	-0.66	6.02	NTPU
120.42764	23.73302	12.86	1.49	0.03	1.51	-0.34	7.07	NTUH
119.56374	23.56520	4.86	2.03	1	1.75	0.58	10.43	PANG
120.92308	24.70795	35.92	1.87	-27.33	1.47	2.77	8.46	PAO2
120.16900	23.29400	4.15	2.28	3.05	1.79	2.85	10.02	PEI1
121.45434	23.31946	-8.25	1.4	-0.79	1.3	4.58	6.23	PING
120.64056	23.75606	18.66	1.57	1.5	1.72	0	7.95	PINT
120.30550	23.57989	8.98	1.26	1	1.21	0.19	5.5	PKGM
121.08637	24.57883	60.41	2.14	-50.32	1.88	-6.96	9.52	PLA2
120.98200	23.97388	74.74	2.35	-4.94	2.76	-19.54	13.16	PLIM
121.71395	24.93362	20.8	5.39	-3.22	4.26	-11.33	22.83	PLIN
122.07944	25.62750	2.28	1.31	1.03	1.28	-1.44	5.87	PNCY
120.97050	24.54293	57.86	1.6	-38.82	1.57	2.81	7.22	PNLA

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
121.40000	24.01000	178.95	1.64	-50.89	1.55	-137.28	8.02	PNSI
120.46525	22.47386	-1.06	1.48	2.38	1.37	2.28	6.57	PTDG
120.52620	23.96972	23.99	1.24	-2.59	1.2	-2.71	5.45	PUS2
125.34891	24.72744	-1.62	1.31	1.58	1.33	-0.16	5.97	QMYP
120.50857	23.45894	6.33	5.72	0.41	4.39	-2.08	24.04	RENI
120.42273	23.66234	10.56	1.52	0.92	1.45	2.47	7.53	RHES
120.33945	23.20542	3.26	1.29	2	1.23	-1.09	5.64	S011
120.48826	23.05947	0.36	1.29	1.57	1.22	0.29	5.59	S012
120.80286	24.17955	59.84	1.76	-17.19	1.57	-5.9	7.98	S016
119.59237	23.65527	5.54	1.43	1.74	1.39	-2.89	6.33	S01R
121.61385	25.04045	6.9	1.43	-10.14	1.6	5.06	7.05	S101
120.47519	23.56437	8.7	1.24	1.44	1.2	2.34	5.38	S103
121.18938	22.82076	-2.71	1.49	4.12	1.42	2.32	6.73	S104
121.11289	22.95165	-0.62	1.45	3.67	1.39	-6.57	6.77	S105
120.33409	23.05079	1.69	1.43	0.88	1.34	5.88	6.53	S106
120.93410	23.95442	60.62	2.68	-3.41	2.77	2.89	13.76	S167
120.50331	22.94229	-0.81	1.44	1.45	1.37	2.96	6.55	S169
120.60617	22.64498	-1.19	2.02	1.03	1.72	-5.29	9.38	S23R
120.76918	24.41363	46.86	1.41	-21.07	1.3	1.48	6.31	SAN2
120.64064	22.71727	-3.3	2.33	1.23	1.89	4.59	10.2	SAND
121.50087	25.26079	7.23	1.79	-6.53	2.09	-5.06	9.77	SANJ
120.76855	23.66448	17.41	1.43	3.83	1.63	-2.31	7.46	SANL
121.65159	24.12779	35.71	1.4	65.53	1.32	246.01	6.21	SCHN
120.75387	22.75761	-2.8	1.46	0.68	1.62	3.74	7.52	SDW1
120.75386	22.75762	-3.65	1.73	1.46	1.87	0.47	9.38	SDW2
121.01016	24.93289	21.81	1.82	-20.11	2.03	-1.45	9.62	SFON
120.34965	22.58127	-1.09	2.44	1.7	3.62	4.66	13.22	SGAN
120.69188	24.27163	44.45	1.84	-14.19	1.66	-7.62	8.83	SGUN
121.19949	23.10886	-6.12	1.39	0.46	1.28	-5	6.2	SHAN
120.92195	24.84508	25.28	1.25	-20.88	1.21	0.96	5.46	SHJU
120.57830	24.14445	260.54	210.2	19.68	107.17	-179.8	500.71	SHLU
121.56215	25.29146	6.02	1.23	-5.55	1.21	0.16	5.46	SHMN
121.56273	23.78761	-30.5	2.92	-150.16	2.61	128.19	14.14	SHUL
120.34781	23.02143	-0.6	1.79	0.79	1.56	3.06	8.54	SHWA
121.65441	24.12572	32.37	1.26	78.09	1.22	260.15	5.62	SICH
120.85320	23.69649	24.06	1.52	7.17	1.36	-1.68	6.76	SINY
120.49815	23.85375	19.99	1.6	-1.02	1.5	-0.42	7.35	SJES
120.48126	23.42854	5.86	1.38	1.59	1.3	-0.48	6.13	SJPU
120.24716	23.57316	8.33	1.64	0.65	1.41	1.71	7.15	SLES
121.44140	23.81185	17.63	4.8	-28.28	3.9	-25.26	20.29	SLIN

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
121.63563	24.75311	20.06	1.62	-19.34	1.49	-3.03	7.67	SLNP
120.31149	23.67811	11.32	2.39	-0.28	2.42	-5.18	12.56	SNES
121.59816	23.87026	7.35	1.54	-210	1.33	320.11	6.95	SOFN
120.98584	24.39781	77.1	2.58	-42.63	2.85	-16.11	15.76	SONA
121.48486	24.20501	193.9	1.89	-143.71	1.54	-121.99	8.97	SPAO
120.39436	23.93789	18.94	1.63	-1.01	1.52	-2.13	7.56	SSES
120.37777	23.41415	5.64	1.44	1.66	1.3	2.94	6.36	SSUN
120.34979	23.65870	10.03	1.46	0.53	1.38	3.52	6.73	STES
121.84771	24.61575	24.99	1.65	11.1	1.48	-0.55	7.49	SUA2
120.29988	23.47757	6.62	1.41	1.18	1.32	-1.8	6.21	SUAN
120.90909	24.29149	74.87	5.24	-29.03	4.05	-23.09	19.12	SUC2
120.90835	23.88124	50.1	1.71	3.21	1.61	-4.66	9.25	SUN1
120.53513	24.29084	37.14	4.18	-9.9	2.15	-0.84	15.57	TACH
121.43131	25.17869	9.38	1.29	-10.64	1.25	3.18	5.69	TAN2
121.23087	23.12557	-6.03	1.36	0.35	1.3	-5.97	6.05	TAPE
121.23741	23.12706	-5.03	1.3	-0.03	1.26	1.17	5.76	TAPO
120.58541	23.25080	1.74	1.38	1.46	1.31	3.36	5.92	TAPU
120.18881	23.72027	9.7	1.23	0.76	1.2	4.12	5.38	TASI
120.69507	24.46126	38	1.57	-18.64	1.5	1.16	7.23	TASO
120.88705	23.48140	2.64	6.99	-0.67	6.92	37.6	34.61	TATA
120.76419	23.15934	-1.27	1.82	1.78	1.6	-1.24	7.7	TAYN
121.83017	24.85357	12.3	2.12	-0.38	1.79	-7.27	10.12	TCHN
120.65498	24.35621	38.47	1.4	-15.38	1.31	3.72	6.3	TEGS
120.91567	23.27779	-0.38	1.43	1.5	1.41	-2.67	6.56	TENC
121.29952	25.05861	12.73	5.99	-16.68	4.37	2.7	29.18	TK31
120.91583	24.65965	39.8	1.69	-29.06	1.62	-1.61	8.13	TK93
120.38982	23.68799	10.95	1.66	2.98	1.62	4.35	8.28	TKJS
121.27573	23.27656	-10.23	2.03	0.16	1.45	-17.87	9.15	TL01
121.35421	23.26772	-5.83	1.52	-0.97	1.39	-12.14	6.95	TL05
121.00748	22.61608	1.01	1.43	1.23	1.33	0.66	6.35	TMAM
120.14448	23.09619	1.31	3.51	2.42	1.73	3.05	8.04	TNCG
120.25286	23.17771	2.31	1.65	1.48	1.51	1.29	7.98	TNMD
120.30253	23.31025	4.16	1.27	1.51	1.27	-0.36	5.57	TNSY
120.92480	24.66204	40.49	1.43	-29.43	1.36	-1.16	6.38	TOFN
121.63276	25.25691	4.77	1.84	-6.3	1.95	-5.59	9.38	TSHI
120.70410	24.47279	39.36	1.74	-17.97	1.58	-1.24	8.41	TSIO
121.48273	25.08689	9.47	1.27	-12.72	1.26	4.58	5.62	TSLU
121.21513	23.12491	-6.76	1.41	-1.91	1.3	-1.72	6.21	TTCS
121.14762	22.74713	-2.56	1.39	1.62	1.29	-5.28	6.17	TTSH
121.08070	22.76455	-2.7	2.17	1.55	1.75	-4.07	8.92	TTUN

經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	sta
121.30022	23.07516	-4.22	1.89	2.32	1.57	-10.14	8.42	TUNH
121.49358	23.96521	94.52	2.66	-62.27	2.89	-62.31	13.31	TUNM
120.40404	23.31724	6.06	2.14	3.26	1.72	-0.63	8.97	TUNS
121.16450	24.95356	20.24	1.35	-22.42	1.4	3.66	6.35	TWTF
121.79981	25.14052	5.21	1.62	-1.5	1.6	4.36	7.74	TWVD
120.49824	24.11716	27.14	1.24	-4.68	1.21	-2.17	5.45	VR01
120.37348	23.89993	17.43	1.5	-0.04	1.44	-2.99	6.88	VR02
120.58151	23.86443	23.02	1.4	-0.65	1.28	-1.05	6.17	VR03
120.54951	23.53568	9.96	1.49	1.41	1.41	-1.64	6.66	W021
120.66425	23.54079	10.24	1.91	4.39	1.73	-6.91	8.77	W029
121.68938	25.17580	6.63	1.49	-3.85	1.47	-4.93	6.72	WALI
120.88519	23.60750	16.07	1.67	5.89	1.4	-3.58	7.13	WANS
121.44093	23.81202	23.52	1.4	-31	1.25	-12.26	6.12	WARO
121.32258	23.27870	-8.85	1.28	1.22	1.25	-17.61	5.71	WCRS
120.50431	22.60606	-1.72	1.34	1.06	1.25	3.09	5.86	WDAN
120.69947	24.04194	41.34	1.46	-5.36	1.41	-4.64	6.49	WFEN
119.48080	23.56753	3.95	1.25	1.58	1.22	-0.74	5.46	WIAN
121.05855	24.67463	45.19	1.45	-40.13	1.4	1.53	6.58	WIPN
120.63256	23.14829	0.06	1.61	1.56	1.58	-3.03	7.45	WLIP
120.31193	23.50083	6.27	1.36	1.23	1.3	2.73	6.06	WNES
121.40066	25.11728	9.18	3.71	-12.98	3.72	0.11	19.25	WUKU
121.04147	23.16926	-3.18	1.74	4.28	1.59	2.73	8.25	WULU
120.36817	23.20524	1.15	1.45	1.95	1.4	-3.33	6.34	WUST
120.33327	23.48427	6.48	1.57	0.86	1.65	0.6	7.73	XPES
121.18529	24.90845	23.19	1.75	-25.27	1.57	4.83	7.91	YAME
120.30889	23.65331	9.86	1.42	1.04	1.33	3.44	6.26	YCES
121.60184	23.90350	102.67	1.35	-210.74	1.25	360.88	6.18	YENL
121.74565	24.74607	15.86	1.26	-4.46	1.24	-5.88	5.61	YILN
121.65301	24.66792	20.56	1.32	-18.11	1.28	-11.16	5.85	YLSS
121.57405	25.16571	7.09	1.28	-10.13	1.25	-1.07	5.78	YMSM
120.55420	23.62610	12.09	1.45	1.9	1.32	4.84	6.2	YOKN
120.22233	23.73917	10.9	1.48	0.51	1.38	2.3	6.58	YSLL
121.30021	23.32138	-0.52	4.21	-6.63	3.72	1.05	19.19	YUL1
120.79857	23.88388	37.62	3.09	2.98	2.35	-4.4	12.15	YUNL
120.95914	23.48730	5.23	2.98	4.66	2.66	-5.46	12.8	YUSN
120.19399	23.54623	6.07	1.43	0.13	1.37	4.57	6.53	YWJS
120.21756	22.94327	0.82	2.86	1.18	2.34	7.19	13.11	ZEND
120.68779	23.95208	35.73	1.42	-2.61	1.32	-6.4	6	ZH01
121.54450	25.16210	8.33	1.99	-9.48	1.74	-4.25	10.45	ZUZH

附錄 1-2、0403 花蓮地震 GNSS 移動站同震位移表

no	經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	Sta
1	121.1608	22.9422	0.57	2.56	12.21	2.61	13.98	5.39	308
2	121.1383	22.7793	-30.16	1.38	-7.62	1.36	11.59	2.93	943
3	121.6474	24.1295	49.77	1.91	53.77	1.89	278.42	4.12	9094
4	121.6178	24.1052	62.26	2.02	-6.93	1.89	163.25	4.31	9096
5	121.4774	23.8232	15.18	2.08	-49.64	2.00	-6.25	4.51	9115
6	121.4495	23.8078	9.58	3.02	-59.68	2.94	-8.64	6.30	9117
7	121.2422	23.1658	-17.55	1.98	-19.84	1.89	31.09	4.18	9157
8	121.2128	23.1212	-12.47	1.94	-31.68	1.76	41.56	4.17	9160
9	121.1452	22.9318	-22.01	1.69	-32.64	1.63	2.21	3.56	9172
10	121.1000	22.8997	-21.53	2.17	-39.25	2.01	-13.44	4.62	9176
11	121.0397	22.7042	-9.96	2.03	-2.33	1.88	18.80	4.35	9194
12	121.5906	23.9510	-27.62	2.14	-105.96	1.96	460.55	4.70	A001
13	121.5686	23.7959	-8.13	2.14	-165.43	2.00	172.41	4.62	A011
14	121.5485	23.7026	-7.76	2.04	-83.54	2.00	55.79	4.36	A019
15	121.5045	23.4999	-18.25	2.12	-9.59	1.87	67.24	4.61	A032
16	121.4800	23.4011	-27.28	2.07	2.67	2.05	2.32	5.01	A041
17	121.4419	23.3043	-14.40	2.19	15.59	2.15	47.04	4.73	A047
18	121.4019	23.1722	-16.18	1.89	16.31	1.80	29.71	3.90	A056
19	121.3539	23.0815	-12.78	2.12	8.13	2.03	10.56	4.56	A063
20	121.3237	23.0117	-16.29	2.06	26.51	1.96	-40.51	4.43	A068
21	121.1985	22.8573	-27.10	2.10	25.47	1.96	1.18	4.43	A081
22	121.1934	22.7938	-22.85	1.89	22.61	1.87	-12.54	4.02	A086
23	121.4164	23.1251	-10.14	1.79	-0.37	1.78	41.66	4.02	E012
24	120.9525	22.6431	-20.32	2.04	-23.29	1.98	43.15	4.16	E062
25	121.1421	22.7534	-5.30	1.80	1.62	1.79	69.11	3.87	E084
26	121.1093	22.8099	-2.62	1.86	-1.94	1.90	-11.27	3.98	E306
27	121.5869	23.8877	-5.04	1.99	-188.17	1.92	338.76	4.13	E315
28	121.6164	24.0500	8.85	1.93	8.42	1.91	336.56	4.19	E319
29	121.2799	23.1030	12.40	2.76	-8.80	2.68	38.82	5.68	E333
30	121.3550	23.3040	-46.09	1.92	24.74	1.95	-59.46	4.05	E341
31	121.3248	23.3146	-5.22	2.71	-4.03	2.67	23.54	5.79	E349
32	121.1985	23.0369	-1.59	2.52	-17.59	2.58	-37.86	5.31	E356
33	121.2880	23.2397	3.89	1.62	-11.90	1.66	16.83	3.46	E373
34	121.1475	22.8178	-27.58	2.96	21.93	2.56	51.56	6.40	E407
35	121.5730	24.0045	24.52	2.65	-46.52	2.37	204.80	5.97	E415
36	121.2225	23.0968	8.61	2.09	5.57	2.00	115.15	4.24	E430
37	121.5406	23.8867	-20.90	2.25	-111.64	2.01	199.82	4.66	E549
38	121.3184	23.3416	-5.71	2.74	32.29	2.71	-18.07	6.12	E801
39	121.2654	22.9108	-22.44	1.93	22.95	1.90	-9.06	4.12	E906
40	121.6040	23.9254	24.72	2.00	-201.70	1.95	490.49	4.60	G970
41	121.5955	23.9252	-12.04	2.91	-142.29	2.84	383.07	6.57	G972
42	121.5353	23.9450	31.19	2.01	-71.25	1.92	96.68	4.57	G979
43	121.4597	23.6557	-15.29	1.86	-34.02	1.68	54.17	3.80	G999
44	121.4371	23.6616	7.88	1.80	-19.79	1.71	33.40	3.81	GA03
45	121.4326	23.6623	14.35	1.72	-20.96	1.69	5.93	3.89	GA04

no	經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	Sta
46	121.4954	23.4621	-21.79	2.84	-7.67	2.71	53.30	5.82	GA05
47	121.4695	23.4877	-38.86	3.10	8.07	2.76	15.33	6.39	GA11
48	121.4291	23.4969	-11.97	2.17	-7.71	2.13	35.19	5.36	GA22
49	121.4004	23.4995	-12.02	2.09	22.20	1.79	39.54	4.68	GA26
50	121.3910	23.5070	-37.19	3.12	-6.03	2.93	47.58	6.56	GA28
51	121.3736	23.4975	-26.41	3.03	-3.00	2.63	29.09	6.01	GA32
52	121.3562	23.4942	-21.51	2.97	-0.81	2.90	22.33	6.39	GA34
53	121.3264	23.4914	-25.91	3.38	19.51	3.10	57.32	7.07	GA35
54	121.6081	23.9836	-23.32	1.92	-62.84	1.89	427.83	4.21	GA37
55	121.5817	24.0036	7.16	1.84	-43.37	1.83	178.17	3.89	GA40
56	121.5921	23.8442	8.48	2.39	-203.49	2.13	287.61	5.16	GA41
57	121.5197	23.8843	-41.92	2.93	-71.34	2.80	77.00	6.28	GA43
58	121.3394	23.3213	-1.54	2.98	4.94	2.79	36.78	6.53	GC29
59	121.3166	23.3246	-3.62	2.01	30.94	1.87	38.96	4.16	GC30
60	121.2484	23.1235	-38.21	2.70	43.53	2.34	-38.08	5.44	GC31
61	121.4290	23.2855	-19.72	1.77	12.27	1.61	23.41	3.61	GC33
62	121.2927	23.0392	4.84	3.36	6.11	3.25	-23.45	6.93	GC34
63	121.3566	23.3947	-15.67	3.13	-7.56	2.93	18.99	6.64	GE02
64	121.4448	23.7300	16.25	2.86	-56.82	2.87	15.05	6.18	GE08
65	121.0828	22.8357	-18.58	3.39	4.72	3.11	51.48	7.38	GE42
66	121.6032	23.9867	-69.87	2.41	-31.99	2.36	395.45	5.29	GE46
67	121.2770	23.2019	-9.46	2.53	9.99	2.44	46.75	5.15	GE52
68	121.2653	23.2192	-2.17	2.79	17.67	2.68	40.54	5.69	GE53
69	121.4110	23.7157	21.46	1.73	-26.04	1.61	29.47	3.64	GE55
70	121.4984	23.7267	-24.22	2.00	-71.37	2.00	46.37	4.28	GE56
71	121.4676	23.7544	-7.74	2.63	-52.49	2.72	60.77	5.58	GE57
72	121.6188	24.0069	6.28	2.04	-12.95	1.93	500.47	4.41	GE63
73	121.6089	24.0144	53.91	1.73	-24.10	1.71	407.18	3.75	GE64
74	121.6313	23.9889	72.43	1.87	-55.09	1.85	572.10	4.10	H008
75	121.1588	22.7919	3.25	2.80	-13.49	2.82	85.72	6.29	I130
76	121.0224	22.6778	-15.91	2.54	16.68	2.62	9.11	5.54	S044
77	121.0452	23.1670	28.24	3.34	34.98	3.46	-12.87	7.36	S078
78	121.2405	22.9630	-0.28	2.90	-29.72	2.94	20.52	6.18	S214
79	121.3045	22.9712	-7.48	3.19	-24.53	3.10	54.09	6.80	S220
80	121.2171	22.9430	10.24	3.27	-27.01	3.42	348.44	7.11	S232
81	121.1599	23.0442	17.10	2.84	29.74	2.86	-273.39	5.99	S233
82	121.1552	22.7602	-22.54	3.79	9.99	3.41	98.12	7.28	S264
83	121.0628	22.7653	-4.24	2.85	-1.82	2.76	5.06	6.33	S273
84	121.0534	22.7907	16.70	2.53	37.48	2.59	57.66	5.41	S280
85	121.5603	23.7503	-15.28	1.99	-161.21	1.95	170.13	4.58	S291
86	121.6099	24.0814	63.04	2.30	-28.92	2.06	193.55	4.80	U027
87	121.5925	24.0552	71.59	2.24	-28.21	2.03	136.91	4.64	U028
88	121.6377	24.0080	89.53	2.04	-32.40	2.04	585.05	4.49	U037
89	121.6154	23.9737	40.29	2.28	-79.55	2.06	493.10	4.60	U048
90	121.5755	23.9754	-19.43	1.94	-51.52	1.89	219.94	4.19	U050
91	121.5096	23.8347	-17.88	2.80	-80.94	2.69	88.06	5.97	U086
92	121.6294	24.0236	26.67	2.33	10.12	2.19	570.24	5.18	U225

no	經度	緯度	dE	sE	dN	sN	dU	sU	Sta
93	121.1181	22.7162	-9.41	2.67	11.35	2.72	-36.01	5.70	V205
94	121.4116	23.4988	-14.13	2.46	-10.22	2.32	43.17	5.34	W036
95	121.1538	22.9013	-8.11	3.30	17.39	2.50	-8.15	5.70	W048

附錄 1-3、0403 花蓮地震精密水準測量同震位移表

no	經度	緯度	dU	sU	Sta
1	23.96521	121.49358	0.00	0.00	N670
2	23.95337	121.51165	46.29	0.65	GI17
3	23.95061	121.51639	63.60	0.73	GI18
4	23.94951	121.52070	74.69	0.81	GI19
5	23.94823	121.52605	91.79	0.88	GE88
6	23.94501	121.53531	127.60	0.90	G979
7	23.93935	121.54300	167.70	1.17	9108
8	23.93803	121.54304	171.79	1.18	G978
9	23.93357	121.55266	224.29	1.24	G977
10	23.93141	121.56159	272.59	1.28	G976
11	23.92901	121.57030	317.70	1.34	G975
12	23.92518	121.58300	382.69	1.40	G974
13	23.92625	121.59143	416.90	1.44	G973
14	23.92516	121.59549	434.49	1.45	G972
15	23.92434	121.60293	476.59	1.48	A003
16	23.92539	121.60402	481.50	1.49	G970
17	23.66684	121.42729	0.00	0.00	X004
18	23.66230	121.43260	-2.69	0.50	GA04
19	23.66337	121.43193	-2.09	0.54	A096
20	23.66164	121.43714	-5.30	0.64	GA03
21	23.66047	121.44751	-9.90	0.85	GA02
22	23.66011	121.44791	-9.90	0.85	A097
23	23.65818	121.45427	-5.30	0.95	GA01
24	23.65573	121.45966	0.39	1.03	G999
25	23.65412	121.46263	6.19	1.05	G998
26	23.65266	121.46349	7.30	1.07	A098
27	23.65390	121.46792	13.10	1.11	G997
28	23.65087	121.47066	10.30	1.28	A099
29	23.65104	121.47624	21.70	1.40	U147
30	23.64638	121.48692	21.59	1.60	A100
31	23.64662	121.49221	27.40	1.67	G996
32	23.64082	121.48914	33.00	1.84	A101
33	23.63559	121.48948	26.09	1.93	G995
34	23.63112	121.49229	25.39	2.02	A102
35	23.62699	121.49486	16.99	2.06	G994
36	23.62512	121.50085	17.39	2.18	A103
37	23.61937	121.50302	22.40	2.26	A104
38	23.61799	121.50425	20.40	2.27	G993
39	23.61070	121.50731	18.10	2.33	G992
40	23.60608	121.51114	17.89	2.36	GH40
41	23.60344	121.51680	17.89	2.39	A105
42	23.60153	121.52138	19.10	2.43	X305
43	23.59835	121.51941	18.99	2.46	G991
44	23.59751	121.52522	18.79	2.48	GH41
45	23.59628	121.52833	15.30	2.69	A026

no	經度	緯度	dU	sU	Sta
46	23.49141	121.32635	0.00	0.00	GA35
47	23.49089	121.32635	0.79	0.14	W031
48	23.49202	121.33241	-4.29	0.25	W032
49	23.49332	121.33609	-6.19	0.32	U028
50	23.49490	121.34592	-9.70	0.60	W034
51	23.49421	121.35622	-13.59	0.74	GA34
52	23.49583	121.36548	-5.79	0.86	GA33
53	23.49755	121.37361	-2.39	1.01	GA32
54	23.49930	121.37601	-4.30	1.08	9135
55	23.50324	121.38248	-5.50	1.20	GA30
56	23.50401	121.38550	-3.59	1.22	GA29
57	23.50705	121.39102	-2.89	1.26	GA28
58	23.50339	121.39511	0.00	1.29	GA27
59	23.49953	121.40041	4.59	1.35	GA26
60	23.49832	121.40565	8.39	1.52	W035
61	23.49879	121.41163	10.10	1.78	W036
62	23.49892	121.41608	12.90	1.88	GI20
63	23.49772	121.41977	13.20	2.02	GI21
64	23.49666	121.42443	6.60	2.16	GI22
65	23.49686	121.42909	14.49	2.25	GA22
66	23.49688	121.42907	14.89	2.27	P026
67	23.49916	121.43002	12.79	2.32	GI23
68	23.50313	121.43350	11.09	2.34	GI24
69	23.50419	121.43557	10.19	2.40	GA21
70	23.50331	121.43859	10.50	2.52	GA20
71	23.50259	121.44189	8.60	2.58	GA19
72	23.49723	121.44630	14.09	2.64	S121
73	23.50026	121.44684	12.59	2.65	GI25
74	23.50401	121.44987	12.50	2.67	GA18
75	23.50467	121.45385	13.89	2.69	GA17
76	23.49933	121.45526	13.29	2.70	GA16
77	23.49631	121.45753	11.60	2.72	GA15
78	23.49665	121.45853	10.70	2.74	GA14
79	23.49320	121.45789	6.49	2.76	GI26
80	23.48960	121.45722	5.70	2.09	W044
81	23.48921	121.45837	5.20	2.79	GA13
82	23.48978	121.46294	-2.80	2.80	GA12
83	23.48772	121.46946	1.50	2.87	GA11
84	23.48706	121.47493	1.29	2.94	GA10
85	23.48143	121.46998	1.60	2.99	GA09
86	23.47701	121.46598	-0.90	3.03	GA08
87	23.47298	121.47279	1.29	3.09	GA07
88	23.47199	121.48138	0.90	3.14	GA06
89	23.46897	121.48741	-1.49	3.16	A036
90	23.46291	121.49648	-1.79	3.17	A037
91	23.46207	121.49535	-0.20	3.18	GA05
92	22.83591	121.06858	0.00	0.00	GF75

no	經度	緯度	dU	sU	Sta
93	22.83677	121.07619	-0.20	0.65	GF76
94	22.83574	121.08275	-10.19	0.87	GE42
95	22.83147	121.08730	-15.60	0.90	GF77
96	22.83102	121.09359	-3.29	0.94	9181
97	22.82768	121.09844	4.29	1.37	GF78
98	22.82186	121.10227	8.50	1.47	GF79
99	22.82321	121.10926	2.70	1.59	GF80
100	22.81381	121.11963	-1.50	2.17	GI89
101	22.80997	121.12292	0.00	2.20	GI90
102	22.80801	121.13063	0.40	2.35	GI91
103	22.80546	121.13364	-0.20	2.36	GF83
104	22.80136	121.13551	-1.20	2.39	GI92
105	22.79713	121.13714	-0.40	2.40	GI93
106	22.79120	121.14045	-0.39	2.44	GI94
107	22.79262	121.14564	-0.79	2.51	GF85
108	22.79149	121.15286	-1.99	2.53	GF86
109	22.78707	121.15792	-29.30	2.58	GF87
110	22.78241	121.15997	2.00	2.63	GI95
111	22.78004	121.16494	1.80	2.67	205R2
112	22.77691	121.16824	0.40	2.69	GI96
113	22.77681	121.17503	1.50	2.72	A088
114	22.78834	121.18310	2.40	2.82	A087A
115	22.79382	121.19339	1.19	2.88	A086

期中審查意見回覆

期中審查意見	處理情形
（一）報告書內容相關建議	
1. 第18頁，請說明若測站僅有8年資料用以解算參數是否足夠？以及觀測成果如何分離地層下陷與斷層活動。另外，文中敘述GNSS坐標時間序列擬合之方法，「統計分析」是否為倒數第5行的式 2.1？	感謝委員建議，（1）GNSS 連續站含 2 年以上的觀測資料即可消除季節性誤差，因此足夠用以解算參數；（2）斷層模式評估所使用的測地資料未包含到地層下陷區；（3）是，式 2.1 為時間序列之擬合公式。
2. 第18頁倒數第8行，提到「資料時間至少兩年以上…」為何需要至少兩年以上？若近年或未來成立之連續站應如何分析？	感謝委員建議，（1）GNSS 連續站含 2 年以上的觀測資料即可消除季節性誤差；(2)近年新設立的觀測站，僅用以展現觀測的成果，暫不納入斷層模式中計算。
3. 第19頁，請說明測站分區是否有統一的標準可供機關參考？	感謝委員建議，測站分區係依據地礦中心訂定的分區，依序進行施測、解算與分析。
4. 第20頁，建議說明統計指標之計算方式（RMSE、STD、內/外部精度等），讓讀者了解其差異性。	感謝委員建議，計算方式於報告內文中已有詳細說明。
5. 第22頁，請問使用ARMA處理時間相關的雜訊是否為團隊之發想或為傳統之方式？AR(3)是否也有區域性差異？	感謝委員建議，ARMA 為近年來研究 GNSS 時間序列中常用的雜訊隨機模型之一。雖然因各站的設站方式及所用儀器不同，其資料色雜訊內容會存有差異，但根據前人研究及本計畫目前之計算結果，並未顯示使用 AR(3)模型會造成顯著的區域性差異。
6. 第129、137頁，統整彰化斷層滑移速率用的方法都是階地定年，但得到的縮短速率差異甚大（2.7～29.4 mm/yr），由於定年的方法	感謝委員建議，遵照委員意見，彰化斷層長期滑移速率彙整表於期末報告中會補充每個階地的定年年代。其中 PK-6 階地為年代

期中審查意見	處理情形
不同，得到的結果代表的時間尺度建議在表3.7說明清楚。如果要與大地測量得到的結果作比較，建議挑選時間尺度比較接近的結果。	最新的階地（28 ± 4 ka），與其他階地相比呈現了較為離群的縮短速率（22.8 ± 6.6 mm/yr），這部分會再與大地測量的反演結果比對，確認是否近期的滑移速率有偏高的情形。
7. 第165、177頁，TDEFNODE及基線應變反演模型之結果差異甚大，建議說明原因（e.g. 車籠埔斷層、鐵砧山斷層、表 4.4）	感謝委員建議，已於內文中補充相關說明。
8. 第194 - 195頁，有關合成孔徑雷達影像部分說明較為薄弱，建議加強原理說明，補充處理流程以及多敘述結果分析。	感謝委員建議，有關合成孔徑雷達影像部分主要係由另一研究團隊執行解算與分析，因此本研究團隊在撰寫 0403 花蓮地震報告時，主要著重分析與本計畫相關之 GNSS 移動站、連續站與精密水準測量之同震位移及斷層錯位模型模擬成果。
9. 圖 2.1的斷裂（跳階），用式 2.1可以自動偵測嗎？	感謝委員建議，目前均以肉眼辨別時間序列發生跳動與否，經比對地震報告確認後才會下地震事件，此外，初設立之觀測站點因不穩定、跳動大，或是更換天線盤等人為因素，亦會造成時間序列上的跳階。
10. 請說明表 3.5、3.6、3.8選擇斷層模型的依據為何？	感謝委員建議，目前大甲、彰化及車籠埔斷層均有好的震測、鑽井及地層位態資料，藉由以上資訊即可建立可信度高的地質剖面。基底滑脫面的深度則可從集集地震的餘震分布推估。此區大甲、彰化、及車籠埔斷層的幾何形貌及相互關係是參考 Yang et al.（2007），Yue et al.（2005；2011），及張中威（2023）的地質剖面建構而成。

期中審查意見	處理情形
11. 大甲斷層和彰化斷層的地下形貌差異乃是本計畫採用不同文獻的研究成果所致，建議說明兩條斷層之地下形貌採用不同文獻研究成果之理由。	感謝委員建議，大甲斷層主要參考 Yang et al.（2007）LINE7，有延伸至地表，推測是沿過去的正斷層面反轉為逆斷層，為高角度的斷層面；彰化斷層主要參考 Yang et al.（2007）LINE4、LINE5，未延伸至地表，為低角度的斷層面。
12. 大茅埔–雙冬斷層的底滑面深度建議根據前人文獻作圖方法調整。	感謝委員建議，Suppe（1985）的剖面，於雙冬斷層上盤的地層僅參考 TSK-1 井，過於簡化，而 Yang et al.（2007）的 Line 6 剖面是參考了內麓山帶多處地表地層位態而繪製，較為合理。然而其雙冬斷層的階梯狀形貌對於本計畫反演模型過於複雜，建議依其趨勢簡化為單一傾角 45 度，深度則同樣是 5 公里接上部滑脫面。
13. 建議說明部分GNSS於2022年後，雜訊過大的成因，以及是否仍具可信度（第18頁敘明每日解坐標誤差大於 1cm 即移除）	感謝委員建議，離散程度變大原因可能來自於測站週圍環境有遮蔽物干擾或儀器老化故障，若影響時間過長，會使速度場的計算產生偏差。若發生這種情形，我們會通知中心維護人員至測站站點檢查環境及相關設備，且在計算速度場時移除有問題的區段資料。
14. 請說明2021年乾旱事件是否對速率估算造成影響？	感謝委員建議，經比對時間序列，並未發現有顯著跳動。
15. 解算之速率是否與其他研究之GNSS進行解算比對？	感謝委員建議，目前尚無其他單位於分析時間段內提供速度場計算資料來進行比對。
16. 請說明GNSS觀測網為何與測區不同？	感謝委員建議，因期中報告前 GNSS 移動站僅完成臺北、花東（0403 花蓮地震）、

期中審查意見	處理情形
	恆春、及桃竹苗等 4 測區的施測，其餘尚未觀測，待後續完成觀測後，會再將相關成果撰寫於期末報告之中。
（二）報告書內容相關建議（若再度撰寫於期末報告書）	
17. 第138頁第二段，部分文字建議修正。	感謝委員建議，已修正。
18. 第188頁第一段，最後兩行部分文字建議修正。	感謝委員建議，已修正。
19. 圖 2.1、2.6、2.8的圖說內容建議重新檢視，圖 2.1的年份標示與間距建議 再調整為一閱讀方式。	感謝委員建議，(1)已調整圖說內容；(2)年份標示已調整為整數年份，以利閱讀。
20. 圖 2.15，0點是否為均值？	感謝委員建議，否，0 代表沒變動。
21. 圖 2.37以及 2.49的斷層位置與圖 2.38和2.50不符，建議修正。	感謝委員建議，已修正。
22. 表 3.8、3.9「本計畫推估」建議改為「本計畫綜整（合）評估」。	感謝委員建議，遵照辦理。
23. 請重新整理參考文獻。	感謝委員建議，已重新整理參考文獻。

期末審查意見回覆

期末審查意見	處理情形
1. 本案成果完整且豐富，報告書撰寫非常嚴謹，可見執行團隊很用心努力執行此計畫。	感謝委員肯定。
2. 臺灣中部斷層多半有逆衝分量，報告為何只考慮第二不變量？建議說明為何不考慮使用第一不變量。	感謝委員建議，除了走向滑移斷層外，逆斷層實際活動所產生地表變形也具有顯著的剪切應變量，而非單純膨脹或壓縮應變，故相較於第一不變量而言，本團隊更建議採用第二不變量進行分析，以便獲得更完整的綜合性地表變形強度評估。此外，根據本團隊於中部區域之應變速率場分析成果顯示，第二不變量雖然確實受剪切應變量的影響較大，但由圖 3.5 可見，實際分布型態仍反映出主應變率與最大剪應變速率的綜合特徵。相關描述已補充於第 3-1-2 節最後兩段。
3. 由於臺灣西部有許多人為活動造成的地表變形，如何區分這些人為和地體構造運動造成的變形以正確評估斷層活動潛勢？例如第156頁臺灣中部第二不變量最大的區域和雲林地區的超抽地下水顯然相關，另外鐵砧山斷層附近的高區是否為人為開發活動相關？	感謝委員建議，為了正確評估斷層活動潛勢，本團隊目前先將推測如地層下陷等因人為活動因素所造成的地表變形區域之速度場進行移除，並重新進行分析。鐵砧山斷層附近的高區於更新後亦已不復存在，更新後的成果詳見第 3-1-2 節。未來，本團隊將於後續研究中再更進一步分析，以詳細確認並區分人為活動與活動構造所造成的地表變形。
4. 請說明在大茅埔–雙冬斷層北段及初鄉斷層都有較大的第二不變量，原因為何？	目前本團隊推斷大茅埔–雙冬斷層北段東側顯著的第二不變量，可能是由於雪山山脈區域之測站分布較少，此區域再往東可

期末審查意見	處理情形
	獲得的觀測多分布於中央山脈區域，而中央山脈至臺灣東部區域之地表運動速率原本便較西部區域高出許多，故而在此處獲得顯著的應變率，本團隊將於後續研究中嘗試針對區域構造活動型態不同處進行分析並調整網格間距或分區計算，以消彌此歧異值。初鄉斷層區域附近經初步確認後，並無發現顯著的歧異值或人為活動因素影響，故本團隊認為此成果，即表示跨初鄉斷層與車籠埔斷層區域，在目前的活動中具有較高之地表變形梯度。
5. GNSS速度場若相鄰很近的測站有很大的差異，宜釐清原因，避免造成計算應變量時，產生很大的偏差。	感謝委員建議，已重新檢查速度場成果，並剔除區域異常值部分再重新計算與繪圖。
6. 本案與東華大學顏君毅教授執行之「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形」計畫，有密切之關聯性，建議二者可互相配合，以得到更好的結果。	感謝委員建議，今年以及歷年計畫均已有提供 GNSS 移動站、連續站以及精密水準測量之時間序列與速度場成果供顏君毅教授團隊進行成果比對。
7. 有關重要區域或重要活動斷層區域之觀測及測量資料，建議亦多繪製地質剖面，以和本案之資料互相對照，以利資料之解釋及延伸。	感謝委員建議，會考慮水準測線的位置繪製剖面，並加入地形剖面以利資料比對解釋。
8. 有關大甲斷層、彰化斷層、雙冬–大茅埔斷層及初鄉斷層等等之傾角，每一斷層之參考文獻結果差異極大，許多資料均參考各不同剖面，但由於各剖面之位置及方向的不同，由於視傾角的因素，可能造成不同之結果，應謹慎考量。	感謝委員建議，未來在解讀震測資料或剖面資料時會注意剖面方向與斷層走向。

期末審查意見	處理情形
9. 各斷層之平均斷層滑移虧損速率差異大，且斷層深度不同，是否有考慮各鄰近斷層之相互影響的可能性？	感謝委員建議，反演模型均會考慮納入區域內所有活動斷層進行滑移虧損率的評估。
10. 本案結果之一為「中部地區斷層活動潛勢圖」或為「斷層活動機率圖」，此圖之應用宜謹慎，慎防社會大眾或一般民眾誤導。	感謝委員建議，後續會與業主討論出圖版型，公布時標題可考慮不採用「機率圖」等較敏感的名詞，改使用「潛勢圖」。
11. 摘要提到以1.7 μstrain/yr為級距作為地表變形強度分級基礎（第18頁），此門檻值之決定似乎並未於文中第3-2-2節地表變形強度分級標準表建置一章內說明。	感謝委員建議，原摘要中所列以 1.7 μstrain/yr 為級距作為地表變形強度分級基礎為誤植，已修改，詳細的分級級距請參閱表 3. 3。
12. 第3-1-1節速度反演法與反演成果一章中，因原始速度場之空間分布不均造成之內差誤差是否有辦法估計？	感謝委員建議，後續研究終將嘗試針對測站空間分布不均的問題進行估計。
13. 第八章GNSS連續站與移動站資料之解算與時間序列擬合方法建議可繪製流程圖加以說明。	感謝委員建議，相關流程與操作步驟已於第 8-1-1、8-1-2 節中詳盡說明。
14. 報告書請全文檢視是否仍使用「中央地質調查所」之組改前名稱（例如第157頁）。	感謝委員建議，已檢查並修正。
15. 附錄內各點位之經緯度坐標有效數字之表達請考量其合理性。	感謝委員建議，依據臺灣地區的經緯坐標，每度的間距值約為 100 公里，以小數點後 5 位計算單位約為 1 公尺解析度，因此統一將經緯座標小數點後之有效數字保留至第 5 位數。
16. 明年為五年計畫最後一年，請及早預擬總報告書之呈現方式，如何將成果提供各界參考。	感謝委員建議，遵照辦理。