經濟部
Ministry of Economic Affairs

計畫編號：B11208

經濟部地質調查及礦業管理中心

112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（1/3）」

（第1年度）

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

計畫編號：B11208

經濟部地質調查及礦業管理中心

112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（1/3）」

（第1年度）

全 程 計 畫：自 112 年 3 月至 114 年 12 月止
本年度計畫：自 112 年 3 月至 112 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 112 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（1/3）
（第1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　112　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 8
1-3 本年度工作概述 9
第二章、大地測量資料分析 17
2-1 GNSS 連續站資料解算與分析 17
2-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程 17
2-1-2 GNSS 連續站坐標時間序列擬合與坐標精度分析 18
2-1-3 GNSS 連續站資料處理與資（/雜）訊分析 22
2-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析 30
2-2-1 本年度（2023 年）GNSS 移動站抽樣檢核 30
2-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析 34
2-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析 36
2-2-3-1 臺北地區 GNSS 觀測網 36
2-2-3-2 桃竹苗地區 GNSS 觀測網 41
2-2-3-3 中部地區 GNSS 觀測網 46
2-2-3-4 嘉南地區 GNSS 觀測網 50
2-2-3-5 高屏地區 GNSS 觀測網 54
2-2-3-6 恆春地區 GNSS 觀測網 58
2-2-3-7 花東地區 GNSS 觀測網 63
2-2-3-8 宜蘭地區 GNSS 觀測網 67
2-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析 70
2-3-1 精密水準測量資料檢核 70
2-3-2 精密水準測量資料解算與精度分析 71
2-3-3 北部地區精密水準測線 73
2-3-3-1 石門至萬里測線 73
2-3-3-2 士林至三芝測線 76
2-3-3-3 淡水至士林測線 79
2-3-3-4 五股至臺北測線 82
2-3-3-5 信義測線 85
2-3-4 桃竹苗地區精密水準測線 87
2-3-4-1 新屋至童話世界測線 87
2-3-4-2 新竹至五峰測線 90
2-3-4-3 新竹至峨嵋測線 93

2-3-4-4 苗栗至南庄測線 96
2-3-5 中部地區精密水準測線 99
2-3-5-1 大安至東勢測線 99
2-3-5-2 龍井至太平測線 102
2-3-5-3 五光至黃竹測線 105
2-3-5-4 王功至草屯至埔里測線 108
2-3-5-5 北斗至水里測線 111
2-3-5-6 跨車籠埔斷層短測線 114
2-3-6 嘉南地區精密水準測線 120
2-3-6-1 金湖至瑞峰測線 120
2-3-6-2 北門至楠西測線 123
2-3-6-3 善化至關廟測線 126
2-3-6-4 安平至龍崎測線 129
2-3-6-5 新化至玉井測線 132
2-3-6-6 跨梅山斷層短測線 135
2-3-7 高屏地區精密水準測線 142
2-3-7-1 路竹至茂林測線 142
2-3-7-2 岡山至安坡測線 145
2-3-7-3 佳冬至七佳測線 148
2-3-8 恆春地區精密水準測線 151
2-3-8-1 恆春西臺地至佳樂水測線 151
2-3-8-2 南樹林至鵝鑾鼻測線 154
2-3-8-3 車城至牡丹測線 157
2-3-9 東部地區精密水準測線 159
2-3-9-1 嶺頂至瀧澗測線 159
2-3-9-2 光復至豐濱測線 162
2-3-9-3 紅葉至靜浦測線 165
2-3-9-4 東成至富岡測線 168
2-3-10 宜蘭地區精密水準測線 171
2-3-10-1 梗枋至東澳測線 171
2-3-11 精密水準測量資料可靠度分析 174
2-4 重要區域三維速度場分析 183
2-4-1 重要區域水平與垂直速度場 183
第三章、北部地區重要斷層參數分析 189
3-1 斷層資料蒐集 189
3-1-1 山腳斷層 190
3-1-1-1 斷層長度 190
3-1-1-2 斷層傾角 193
3-1-1-3 斷層深度 205
3-1-1-4 滑移速率 207
3-1-2 新城斷層 209
3-1-2-1 斷層長度 209
3-1-2-2 斷層傾角 209
3-1-2-3 斷層深度 220

3-1-2-4 滑移速率 223
3-1-3 其他主要斷層 226
3-1-3-1 湖口斷層 226
3-1-3-2 新竹斷層 231
3-1-3-3 獅潭斷層 236
3-1-3-4 三義斷層 240
3-1-3-5 屯子腳斷層 247
第四章、北部地區斷層模型建置 251
4-1 BLOCKS 斷層模型 251
4-1-1 斷層模型原理 251
4-1-2 斷層幾何參數設定 251
4-1-3 斷層模擬結果 252
4-2 TDEFNODE 斷層模型 258
4-2-1 斷層模型原理 258
4-2-2 斷層模擬結果 258
4-3 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model） 266
4-3-1 斷層模型原理與使用參數 266
4-3-2 斷層模擬結果 268
4-4 北部地區之斷層滑移虧損速率 271
第五章、北部地區斷層活動潛勢 273
5-1 山腳斷層 273
5-1-1 山腳斷層參數設定 273
5-1-2 山腳斷層規模與年發生率 277
5-1-3 山腳斷層機率評估 279
5-2 新城斷層 280
5-2-1 新城斷層參數設定 280
5-2-2 新城斷層規模與年發生率 283
5-2-3 新城斷層機率評估 285
5-3 湖口斷層 286
5-3-1 湖口斷層參數設定 286
5-3-2 湖口斷層規模與年發生率 288
5-3-3 湖口斷層機率評估 290
5-4 新竹斷層 291
5-4-1 新竹斷層參數設定 291
5-4-2 新竹斷層規模與年發生率 293
5-4-3 新竹斷層機率評估 295
5-5 三義斷層 296
5-5-1 三義斷層參數設定 296
5-5-2 三義斷層規模與年發生率 298
5-5-3 三義斷層機率評估 301
5-6 獅潭－屯子腳斷層系統 302
5-6-1 獅潭－屯子腳斷層系統參數設定 302
5-6-2 獅潭－屯子腳斷層系統規模與年發生率 305
5-6-3 獅潭斷層機率評估 308

5-6-4 屯子腳斷層機率評估 309
5-7 斷層活動潛勢圖成果（初稿） 310
第六章、北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 313
6-1 應變速率場計算 313
6-1-1 速度反演法與反演成果 313
6-1-2 應變速率場計算與分析 317
6-2 地表變形強度 322
6-2-1 地表變形相關規範彙整 322
6-2-2 地表變形強度分級標準表建置 326
6-3 地表變形強度分布圖 329
第七章、北部地區重要區域景況地振動與景況同震位移分布圖 331
7-1 景況地振動分布圖 331
7-1-1 斷層破裂三維網格與地面計算網格建立 331
7-1-2 地面網格與斷層面最短距離估算 333
7-1-3 地振動放大效應評估 334
7-1-4 地振動值評估與分布 336
7-1-5 景況地振動分布圖 338
7-2 景況同震位移分布圖 342
7-2-1 地表同震位移網格建立 342
7-2-2 潛在震源位置與各斷層同震滑移量推估 342
7-2-3 景況同震位移分布圖 343
第八章、歷年成果比較 349
8-1 北部地區水準測線成果比較 349
8-1-1 石門至萬里測線 349
8-1-2 淡水至士林測線 350
8-1-3 士林至三芝測線 351
8-1-4 五股至臺北測線 352
8-1-5 新竹至五峰測線 353
8-1-6 新竹至峨嵋測線 353
8-2 北部地區斷層幾何參數比較 354
8-3 北部地區滑移虧損速率比較 355
第九章、結論 357
參考文獻 361
附錄 1 活動斷層地震潛勢評估方法論 367
期中審查意見回覆 387
期末審查意見回覆 391

（圖檔附錄請參閱光碟）

[附錄 01] 112 年期末_GNSS 連續站時間序列
[附錄 02] 112 年期末_GNSS 連續站速度表
[附錄 03] 112 年期末_GNSS 移動站時間序列
[附錄 04] 112 年期末_GNSS 移動站速度表
[附錄 05] 112 年期末_精密水準時間序列
[附錄 06] 112 年期末_精密水準速度表
[附錄 07] 112 年期末_重要區域水平與垂直速度場分布圖
[附錄 08] 112 年期末_重要區域滑移虧損速率分布圖
[附錄 09] 112 年期末_重要區域地表變形強度圖
[附錄 10] 112 年期末_重要區域景況地振動與同震位移分布圖
[附錄 11] 112 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建置的 GNSS 連續觀測站列表 3
表 1.2：112 年至 114 年分年目標表 5
表 1.3：GNSS 移動站預計施測與檢測時間表 11
表 1.4：精密水準測量預計施測時間表 14
表 2.1：GNSS 移動站施測與檢核時間表 33
表 3.1：斷層幾何參數資料蒐集重點 189
表 3.2：山腳斷層傾角相關文獻彙整 204
表 3.3：山腳斷層深度相關文獻彙整 207
表 3.4：山腳斷層滑移速率相關文獻彙整 208
表 3.5：新城斷層露頭照片彙整 212
表 3.6：新城斷層傾角相關文獻彙整 219
表 3.7：新城斷層深度相關文獻彙整 222
表 3.8：新城斷層長期滑移速率相關文獻彙整 225
表 3.9：湖口斷層幾何相關文獻彙整 230
表 3.10：新竹斷層幾何相關文獻彙整 234
表 3.11：新竹斷層長期滑移速率相關文獻彙整 235
表 3.12：獅潭斷層相關文獻彙整 239
表 3.13：三義斷層幾何相關文獻彙整 245
表 3.14：屯子腳斷層幾何相關文獻 249
表 4.1：使用全台 1269 站 GNSS 水平速度場模擬之北臺灣 7 條斷層滑移速率 253
表 4.2：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 265
表 4.3：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al., 2016）及平均滑移速率。 265
表 4.4：斷層平均滑移速率 268
表 4.5：本計畫之 2016-2022 年加權平均斷層滑移虧損速率 271
表 5.1：山腳斷層滑移速率相關文獻彙整 274
表 5.2：山腳斷層淨滑移速率換算 275
表 5.3：山腳斷層整段（case A）滑移速率計算 275
表 5.4：山腳斷層之各破裂事件面積與規模 275
表 5.5：山腳斷層發生機率評估 279
表 5.6：新城斷層長期滑移速率相關文獻 281
表 5.7：新城斷層各破裂事件面積與規模 282
表 5.8：新城斷層發生機率評估 285
表 5.9：湖口斷層上盤各井的垂直變動速率 287
表 5.10：湖口斷層之各破裂事件面積與規模 287
表 5.11：湖口斷層發生機率評估 290
表 5.12：新竹斷層各破裂事件面積與規模 292
表 5.13：新竹斷層發生機率評估 295
表 5.14：三義斷層各破裂事件面積與規模 297
表 5.15：三義斷層發生機率評估 301
表 5.16：獅潭、屯子腳斷層模型加權平均斷層滑移虧損率 304
表 5.17：獅潭−屯子腳斷層系統(case F)v 獅潭+屯子腳計算 304

表 5. 18：獅潭−屯子腳斷層系統各破裂事件規模及權重 304
表 5. 19：獅潭斷層發生機率評估.....308
表 5. 20：屯子腳斷層發生機率評估.....309
表 5. 21：獅潭−屯子腳斷層系統發生機率評估 309
表 6. 1：常時橋面之不連續變位限制.....323
表 6. 2：常時橋面之不連續變位限制.....325
表 6. 3：地表變形強度分級表.....327
表 8. 1：北部地區斷層幾何參數比較表.....355
表 8. 2：北部地區斷層滑移虧損速率比較表.....356
附表 1- 1：活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式 371
附表 1- 2：San Andreas Fault 及 San Gregorio Fault 各分段之參數 373
附表 1- 3：Wells and Coppersmith（1994）彙整之斷層參數及地震矩規模關係式.....376

圖目錄

圖 1.1：經濟部地質調查及礦業管理中心建立之活動斷層大地測量觀測網.....4
圖 1.2：計畫執行架構圖.....6
圖 1.3：112 年目標活動斷層與重要區域.....7
圖 1.4：GNSS 移動站觀測分區圖.....12
圖 1.5：精密水準測量測線分布圖.....13
圖 2.1：GNSS 連續站 ANES 坐標時間序列擬合結果.....19
圖 2.2：GNSS 連續站 ANES 時間序列之殘差結果.....20
圖 2.3：2002 – 2023 年截至 10 月底 GNSS 連續站點位坐標殘差分布圖.....21
圖 2.4：1993 – 2023 年 GNSS 連續站點位均方根誤差分布圖.....21
圖 2.5：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.....24
圖 2.6：連續站 GS22 垂直分量經卡曼濾波後所得之殘差時間序列、振幅與頻譜分析.....25
圖 2.7：連續站 GS22 之南北與東西分量之時間序列.....26
圖 2.8：地礦中心全臺 97 個測站三分量時間序列之卡曼濾波雜訊分析.....27
圖 2.9：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.....28
圖 2.10：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.....29
圖 2.11：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖.....31
圖 2.12：2002 至 2023 年 10 月底 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖.....34
圖 2.13：2002 至 2023 年 10 月底 GNSS 移動站點位均方根誤差分布圖.....35
圖 2.14：臺北地區 GNSS 連續及移動站分布情形.....36
圖 2.15：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較.....37
圖 2.16：移動站 GG44 與連續站 GOLI 之時間序列比較.....38
圖 2.17：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場.....39
圖 2.18：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場.....40
圖 2.19：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動站分布情形.....41
圖 2.20：移動站 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較.....42
圖 2.21：移動站 G198 與連續站 FCWS 之時間序列比較.....43
圖 2.22：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場.....44
圖 2.23：桃竹苗地區 2002 至 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場.....45
圖 2.24：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....46
圖 2.25：移動站 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較.....47
圖 2.26：移動站 G964 與連續站 YUNL 之時間序列比較.....47
圖 2.27：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場.....48
圖 2.28：中部地區相對於（S01R）測站之垂直方向速度場.....49
圖 2.29：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....50
圖 2.30：移動站 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較.....51
圖 2.31：移動站 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較.....51
圖 2.32：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場.....52
圖 2.33：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場.....53
圖 2.34：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....54
圖 2.35：移動站 GC48 與連續站 CHIE 之時間序列比較.....55

圖 2. 36：移動站 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較.....55
圖 2. 37：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場.....56
圖 2. 38：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場.....57
圖 2. 39：恆春地區 GNSS 連續及移動站分布情形.....58
圖 2. 40：移動站 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較.....59
圖 2. 41：移動站 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較.....60
圖 2. 42：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場.....61
圖 2. 43：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場.....62
圖 2. 44：花東地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....64
圖 2. 45：移動站 GE64 與連續站 PEPU 之時間序列比較.....65
圖 2. 46：移動站 E415 與連續站 NDH3 之時間序列比較.....65
圖 2. 47：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場.....66
圖 2. 48：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場.....66
圖 2. 49：宜蘭地區 GNSS 連續及移動測站分布情形.....67
圖 2. 50：移動站 G250 與連續站 YILN 之時間序列比較.....68
圖 2. 51：移動站 GE58 與連續站 LTUN 之時間序列比較.....68
圖 2. 52：宜蘭地區 2004-2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場.....69
圖 2. 53：宜蘭地區 2004-2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場.....69
圖 2. 54：精密水準測量結果分析圖.....70
圖 2. 55：精密水準測線與各測線約制之 GNSS 連續站分布圖.....72
圖 2. 56：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較.....73
圖 2. 57：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖.....74
圖 2. 58：台 2_石門至萬里測線水準累積高程差.....75
圖 2. 59：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較.....76
圖 2. 60：士林至三芝測線水準高程變化圖.....77
圖 2. 61：士林至三芝測線水準累積高程差.....78
圖 2. 62：淡水至士林水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較.....79
圖 2. 63：淡水至士林測線水準高程變化圖.....80
圖 2. 64：淡水至士林測線水準累積高程差.....81
圖 2. 65：五股至臺北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較.....82
圖 2. 66：五股至臺北測線水準高程變化圖.....83
圖 2. 67：五股至臺北測線水準累積高程差.....84
圖 2. 68：水準點位 5003 與連續站 S101 之間序列比較.....85
圖 2. 69：信義測線水準高程變化圖.....86
圖 2. 70：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較.....87
圖 2. 71：新屋至童話世界測線水準高程變化圖.....88
圖 2. 72：新屋至童話世界測線水準累積高程差.....89
圖 2. 73：新竹至五峰水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較.....90
圖 2. 74：新竹至五峰測線水準高程變化圖.....91
圖 2. 75：新竹至五峰測線水準累積高程差.....92
圖 2. 76：新竹至峨嵋水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較.....93
圖 2. 77：新竹至峨嵋測線水準高程變化圖.....94
圖 2. 78：新竹至峨嵋測線水準累積高程差.....95
圖 2. 79：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較.....96

圖 2. 80：苗栗至南庄測線水準高程變化圖 97
圖 2. 81：苗栗至南庄測線水準累積高程差 98
圖 2. 82：大安至東勢水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較 99
圖 2. 83：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖 100
圖 2. 84：縣 132_大安至東勢測線水準累積高程差 101
圖 2. 85：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較 102
圖 2. 86：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖 103
圖 2. 87：縣 136_龍井至太平測線水準累積高程差 104
圖 2. 88：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較 105
圖 2. 89：五光至黃竹測線水準高程變化圖 106
圖 2. 90：五光至黃竹測線水準累積高程差 107
圖 2. 91：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 108
圖 2. 92：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里水準高程變化圖 109
圖 2. 93：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里測線水準累積高程差 110
圖 2. 94：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較 111
圖 2. 95：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖 112
圖 2. 96：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準累積高程差 113
圖 2. 97：曾厝至霧峰水準點位 T074 與連續站 WUFN 之時間序列比較 114
圖 2. 98：北勢至峰谷水準點位 GE89 與連續站 WFEN 之時間序列比較 114
圖 2. 99：烏溪南岸水準點位 T005 與連續站 CAOT 之時間序列比較 115
圖 2. 100：中興新村水準點位 B238 與連續站 KZN1 之時間序列比較 115
圖 2. 101：曾厝至霧峰測線水準高程變化圖 116
圖 2. 102：北勢至峰谷測線水準高程變化圖 117
圖 2. 103：烏溪南岸測線水準高程變化圖 118
圖 2. 104：中興新村測線水準高程變化圖 119
圖 2. 105：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較 120
圖 2. 106：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖 121
圖 2. 107：縣 164_金湖至瑞峰測線水準累積高程差 122
圖 2. 108：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較 123
圖 2. 109：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖 124
圖 2. 110：縣 174_北門至楠西測線累積高程差 125
圖 2. 111：善化至關廟水準點位 G377 與連續站 GS29 之時間序列比較 126
圖 2. 112：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖 127
圖 2. 113：台 19 甲_善化至關廟測線水準累積高程差 128
圖 2. 114：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較 129
圖 2. 115：安平至龍崎測線水準高程變化圖 130
圖 2. 116：安平至龍崎測線累積高程差 131
圖 2. 117：新化至玉井水準點位 J006 與連續站 CKSV 之時間序列比較 132
圖 2. 118：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖 133
圖 2. 119：台 20_新化至玉井測線累積高程差 134
圖 2. 120：B003-B092 測線水準高程變化圖 136
圖 2. 121：B036-B086 測線水準高程變化圖 137
圖 2. 122：B087-B080 測線水準高程變化圖 138
圖 2. 123：B002-B059 測線水準高程變化圖 139

圖 2. 124：B110-B101 測線水準高程變化圖 140
圖 2. 125：G088-G330 測線水準高程變化圖 141
圖 2. 126：路竹至茂林水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較 142
圖 2. 127：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖 143
圖 2. 128：台 28_路竹至茂林主、副線累積高程差 144
圖 2. 129：岡山至安坡水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較 145
圖 2. 130：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖 146
圖 2. 131：台 22_岡山至安坡測線累積高程差 147
圖 2. 132：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較 148
圖 2. 133：佳冬至七佳測線高程變化圖 149
圖 2. 134：佳冬至七佳測線累積高程差 150
圖 2. 135：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 151
圖 2. 136：恆春西臺地至佳樂水測線高程變化圖 152
圖 2. 137：恆春西臺地至佳樂水測線累積高程差 153
圖 2. 138：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 154
圖 2. 139：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準高程變化圖 155
圖 2. 140：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準累積高程差 156
圖 2. 141：車城至牡丹測線水準高程變化圖 157
圖 2. 142：車城至牡丹測線累積高程差 158
圖 2. 143：嶺頂至瀧澗水準點位 G970 與連續站 YENL 之時間序列比較 159
圖 2. 144：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖 160
圖 2. 145：嶺頂至瀧澗測線累積高程差 161
圖 2. 146：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較 162
圖 2. 147：光復至豐濱測線高程變化圖 163
圖 2. 148：光復至豐濱測線累積高程差 164
圖 2. 149：紅葉至靜浦水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較 165
圖 2. 150：紅葉至靜浦測線高程變化圖 166
圖 2. 151：紅葉至靜浦測線累積高程差 167
圖 2. 152：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較 168
圖 2. 153：東成至富岡測線高程變化圖 169
圖 2. 154：東成至富岡測線累積高程差 170
圖 2. 155：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較 171
圖 2. 156：梗枋至東澳測線水準高程變化圖 172
圖 2. 157：梗枋至東澳測線累積高程差 173
圖 2. 158：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 175
圖 2. 159：桃竹苗地區 2002 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 176
圖 2. 160：中部地區 2013 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 177
圖 2. 161：嘉南地區 2016 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 178
圖 2. 162：高屏地區 2016 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 179
圖 2. 163：恆春地區 2016 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 180
圖 2. 164：東部地區 2018 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 181
圖 2. 165：宜蘭地區 2004 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場 182
圖 2. 166：新竹科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場 184
圖 2. 167：新竹科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場 185

圖 2. 168：臺北都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場 186
圖 2. 169：臺北都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場 187
圖 3. 1：大屯山地區之 LiDAR DTM.....190
圖 3. 2：臺灣東北部海域震測分布及震測剖面斷層延伸位置對比圖.....191
圖 3. 3：北部海域多音束水深調查-海底地形光影圖 192
圖 3. 4：海域山腳斷層（Offshore Shanchiao Fault, OSF）分布圖及海域震測剖面圖 193
圖 3. 5：臺灣北部海域及陸域構造分布圖與震測剖面.....196
圖 3. 6：北部海域構造分布圖及海域震測剖面.....196
圖 3. 7：北部海域底質剖面以及震測剖面圖.....197
圖 3. 8：五股、蘆洲的疏洪道震測結果圖.....198
圖 3. 9：關渡平原的淺層震測結果圖.....198
圖 3. 10：透過景美礫石層位移量模擬山腳斷層之幾何形貌.....199
圖 3. 11：跨山腳斷層地質剖面圖.....199
圖 3. 12：構造平衡剖面 P1 與 3D 地形圖 200
圖 3. 13：海域斷層分布圖與地質剖面圖.....200
圖 3. 14：2014 年 02 月 12 日發生於大屯火山區的地震及其餘震序列分布.....201
圖 3. 15：鏟型正斷層及上盤滾動背斜幾何示意圖.....202
圖 3. 16：雪佛龍建立法（Chevron construction method）示意圖 202
圖 3. 17：本計畫利用雪佛龍建立法（Chevron construction method）建立之山腳斷層幾何形貌
.....203
圖 3. 18：1973 年至 2006 年臺北地區的地震活動分布圖.....205
圖 3. 19：山腳斷層地震分布與深度剖面圖.....206
圖 3. 20：頭前溪南岸斷層露頭.....211
圖 3. 21：新城斷層露頭分布彙整.....211
圖 3. 22：新城斷層 1 號槽溝.....213
圖 3. 23：新城斷層 2 號槽溝.....214
圖 3. 24：新城斷層 3 號槽溝.....214
圖 3. 25：新城斷層震測剖面.....215
圖 3. 26：新城斷層淺層反射震測剖面.....215
圖 3. 27：新竹地區平衡剖面圖.....216
圖 3. 28：新城斷層剖面.....217
圖 3. 29：新竹地區平衡剖面圖.....217
圖 3. 30：新竹區域地震分布與平衡剖面圖.....218
圖 3. 31：新竹區域地震深度分布圖.....221
圖 3. 32：新城斷層破裂模式.....222
圖 3. 33：新竹地區震測剖面圖.....224
圖 3. 34：頭前溪階地對比與光螢光年代樣本位置圖.....224
圖 3. 35：頭前溪階地剖面與光螢光年代樣本.....225
圖 3. 36：湖口斷層震測資料解釋.....227
圖 3. 37：湖口斷層淺層震測.....227
圖 3. 38：湖口斷層鑽井井錄.....228
圖 3. 39：湖口背衝斷層野外露頭.....228
圖 3. 40：湖口斷層平衡剖面圖.....229
圖 3. 41：湖口斷層平衡剖面圖.....229

圖 3. 42：湖口斷層平衡剖面圖.....230
圖 3. 43：湖口斷層幾何模型及權重.....230
圖 3. 44：新竹斷層地質剖面.....232
圖 3. 45：新竹斷層平衡剖面.....232
圖 3. 46：新竹斷層震測剖面圖.....233
圖 3. 47：新竹地區地質與平衡剖面圖.....233
圖 3. 48：新竹斷層平衡剖面 S.....234
圖 3. 49：三種新竹斷層幾何.....235
圖 3. 50：紙湖斷層平衡剖面.....237
圖 3. 51：利用大地測量資料分析斷層模型結果.....238
圖 3. 52：新竹台中地震反演計算結果與觀測資料比較，及獅潭斷層模型.....238
圖 3. 53：中部地區地震平面與剖面分布.....239
圖 3. 54：大安背斜地質圖及震測剖面.....241
圖 3. 55：苗栗-台中地區中油十萬分之一地質圖與地質剖面.....242
圖 3. 56：跨三義斷層之地質平衡剖面圖。.....243
圖 3. 57：跨三義斷層之震測及地質平衡剖面圖.....244
圖 3. 58：三義一卓蘭地區微震震央分布及投影情況.....244
圖 3. 59：三義斷層北段（車籠埔斷層以北）之幾何形貌設定.....245
圖 3. 60：三義斷層南段（車籠埔斷層以南）之幾何形貌設定.....246
圖 3. 61：屯子腳斷層反射震測探勘.....248
圖 3. 62：屯子腳斷層震測剖面.....248
圖 3. 63：苗栗-台中地區活動斷層、地震剖面與地震與震源機制、Vp 速度層析影像.....249
圖 4. 1：臺灣北部 2 條重點斷層與鄰近 5 條斷層之 BLOCK model 模擬初始值與 2016-2022 年相應使用之 GNSS 測站.....252
圖 4. 2：2023 年北臺灣 7 條斷層傾向滑移速率模擬成果.....254
圖 4. 3：2023 年北臺灣 7 條斷層走向滑移速率模擬成果.....255
圖 4. 4：2023 年北臺灣 7 條斷層模擬成果之總滑移速率.....256
圖 4. 5：北臺灣 7 條斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果.....257
圖 4. 6：臺灣北部塊體模型及活動斷層分布.....259
圖 4. 7：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置.....260
圖 4. 8：最佳塊體旋轉模型的旋轉角速度與預測的速度場.....261
圖 4. 9：斷層長期滑移速率、鎖定係數、滑移虧損率與震間期滑移速率.....261
圖 4. 10：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差.....262
圖 4. 11：塊體內部應變.....263
圖 4. 12：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差.....264
圖 4. 13：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖.....267
圖 4. 14：基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果.....269
圖 4. 15：北部地區斷層滑移虧損率分布圖.....270
圖 4. 16：本計畫重要區域（新竹科學園區與臺北都會區）之斷層滑移虧損速率分布圖.....272
圖 5. 1：山腳斷層之破裂模式及權重分配.....274
圖 5. 2：山腳斷層邏輯樹.....276
圖 5. 3：山腳斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....277
圖 5. 4：山腳斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖.....278
圖 5. 5：山腳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.....278

圖 5.6：新城斷層之破裂模式及權重分配.....281
圖 5.7：新城斷層邏輯樹.....282
圖 5.8：新城斷層各破裂事件之特徵地震模式規模與年發生率之關係.....283
圖 5.9：新城斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖.....284
圖 5.10：新城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.....284
圖 5.11：本計畫湖口斷層破裂事件.....286
圖 5.12：湖口斷層邏輯樹.....287
圖 5.13：湖口斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....288
圖 5.14：湖口斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖.....289
圖 5.15：湖口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.....289
圖 5.16：新竹斷層之破裂模式及權重分配.....291
圖 5.17：新竹斷層邏輯樹.....292
圖 5.18：新竹斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....294
圖 5.19：新竹斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖.....294
圖 5.20：新竹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.....295
圖 5.21：三義斷層之分段及破裂模式.....297
圖 5.22：三義斷層邏輯樹.....298
圖 5.23：三義斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係.....299
圖 5.24：三義斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖.....300
圖 5.25：三義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.....300
圖 5.26：獅潭−屯子腳斷層系統破裂模式及權重分配.....303
圖 5.27：獅潭−屯子腳斷層系統邏輯樹.....305
圖 5.28：獅潭−屯子腳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.....306
圖 5.29：獅潭−屯子腳斷層系統 6 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖.....307
圖 5.30：獅潭−屯子腳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.....307
圖 5.31：臺灣北部重要區域斷層活動機率圖.....311
圖 6.1：觀測點與網格三頂點示意圖.....315
圖 6.2：速度反演之重要區域網格化連續性速度場.....316
圖 6.3：重要區域最大主應變速率場.....319
圖 6.4：重要區域最大剪應變速率場.....320
圖 6.5：重要區域應變第二不變量分布圖.....321
圖 6.6：橋面平行移動之變位型態.....324
圖 6.7：橋面折角之變位型態.....324
圖 6.8：重要區域地表變形強度分布圖.....329
圖 6.9：全臺地表變形強度分布圖.....330
圖 7.1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布.....332
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.....333
圖 7.3：Vs30 及兩條評估活動斷層之分布圖.....335
圖 7.4：由 GMPE Chao20 算得之山腳斷層景況地震動分布圖.....339
圖 7.5：由 GMPE Chao20 算得之新城斷層景況地震動分布圖.....339
圖 7.6：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表.....340
圖 7.7：地動加速度 PGA 與遭受破壞程度比對表.....341
圖 7.8：山腳斷層之景況水平同震位移分布圖.....344
圖 7.9：山腳斷層之景況垂直同震位移分布圖.....344

圖 7. 10：新城斷層之景況水平同震位移分布圖.....345
圖 7. 11：新城斷層之景況垂直同震位移分布圖.....345
圖 7. 12：山腳斷層於臺北都會區之景況水平同震位移分布圖.....346
圖 7. 13：山腳斷層於臺北都會區之景況垂直同震位移分布圖.....346
圖 7. 14：新城斷層於新竹科學園區之景況水平同震位移分布圖.....347
圖 7. 15：新城斷層於新竹科學園區之景況垂直同震位移分布圖.....347
圖 8. 1：石門至萬里測線各時間分段之水準平均抬升速率比較.....349
圖 8. 2：淡水至士林測線各時間分段之水準平均抬升速率比較.....350
圖 8. 3：士林至三芝測線各時間分段之水準平均抬升速率比較.....351
圖 8. 4：五股至臺北測線累積高程差與各時間分段之水準平均抬升速率比較.....352
圖 8. 5：新竹至五峰測線各時間分段之水準平均抬升速率比較.....353
圖 8. 6：新竹至峨嵋測線各時間分段之水準平均抬升速率比較.....353
圖 8. 7：斷層滑移虧損速率分布圖（2018 年）.....356
附圖 1- 1：計算活動斷層特徵規模地震發生率流程圖.....368
附圖 1- 2：本計畫斷層潛勢分析方法概念流程圖.....369
附圖 1- 3：本計畫活動斷層地震發生機率潛勢評估流程圖.....370
附圖 1- 4：斷層幾何參數示意圖.....372
附圖 1- 5：斷層面網格座標之建立.....373
附圖 1- 6：斷層分段分布圖.....373
附圖 1- 7：由斷層分區建立斷層破裂模式.....374
附圖 1- 8：地震矩規模與斷層長度.....377
附圖 1- 9：地震矩規模與斷層面積.....377
附圖 1- 10：地震矩規模與斷層平均.....377
附圖 1- 11：地震矩規模與斷層面積之關係圖.....377
附圖 1- 12：活動斷層（a）有效長度 Le（b）有效寬度 We（c）有效平均滑移量 De 與地震矩 M0 之尺度關係.....378
附圖 1- 13：斷層在穩定地累積應力時之三種預測地震的模式.....380
附圖 1- 14：San Andreas 斷層中南段之特徵地震模式.....382
附圖 1- 15：假定相同滑移速率情形下比較指數地震分佈模式與特徵地震模式的差異.....382
附圖 1- 16：機率密度函數分布圖.....384
附圖 1- 17：不同 α 值（紅線 0.3、紫線 0.5、藍線 0.9）對 BPT 模式之影響.....385
附圖 1- 18：日本 BPT 模式評估示意圖.....385
附圖 1- 19：各統計模型之條件機率比較.....386

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（1/3）													
月次 / 工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	備註
第一季查核點													
第二季查核點													
期中報告													
第三季查核點													
期末報告													
第四季查核點													
GNSS 移動站抽樣檢測與檢核（由臺大工作團隊負責）													
GNSS 移動站資料平差解算與分析（由臺大工作團隊負責）													
精密水準測量成果檢核與資料解算分析（由臺大工作團隊負責）													
GNSS 連續觀測站資料解算與分析（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）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

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

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 工作進度報告表 a. 水準資料檢測 2 月 b. GNSS 連續站計算及分析 11-1 月	四月三十日	契約書與工作計畫書修正
2	（第二季查核點） 1. 工作進度報告表 a. 水準資料檢測 3-5 月 b. GNSS 移動站檢測 3-5 月 c. GNSS 連續站計算及分析 2-4 月	六月三十日	第二季工作進度報告與繳交文件
3	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 會計報表 5. 第一期款請款收據 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. 水準資料檢測6-8 月 b. GNSS 移動站檢測 6-8 月 c. GNSS 連續站計算及時序分析至 5-7 月	九月三十日	第三季工作進度報告與繳交文件
5	（期末報告） 1. 工作進度報告表 a. 水準資料檢測9-10 月 b. GNSS 移動站檢測 9-10 月 c. GNSS 連續站計算及分析 8-9 月 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. 期末報告書面資料初稿 6. 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，推估臺灣北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北部地區，報告完成之主要工作為：(1) 解算本年度至 2023 年 10 月止，全臺共約 572 個 GNSS 連續站、761 個 GNSS 移動站，以及 42 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，獲得北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，特別針對山腳斷層與新城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 2016-2022 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：山腳斷層與新城斷層之加權平均滑移虧損速率分別為 2.0 mm/yr 與 2.9 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，初步以 1.7 μstrain/yr 為級距，劃分為 0 至 5 共 6 個等級。同時整合交通領域針對地表變形所訂定之相關規範與需求，完成初版之地表變形強度分級標準表，並根據此分級繪製地表變形強度分布圖；(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，推估並繪製山腳斷層與新城斷層於重要區域之景況地振動與同震位移分布圖。

關鍵詞：大地測量、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 northern Taiwan. The fault model was adopted to integrate the geodetic observations with geological materials. The working area in this year is the northern Taiwan. We have completed the following missions: (1) The daily solutions from 572 continuous GNSS stations, 761 campaign-mode GNSS stations, and 43 leveling routes were calculated for the following time series analysis to get the velocity field of northern Taiwan with respect to station S01R. (2) The fault parameters of the Shanchiao fault and Hsincheng 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 2016-2022 were adopted in this project. According to the modeling results, the average slip deficit rates of Shanchiao fault and Hsincheng fault are respectively 2.0 mm/yr and 2.9 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), 1.7 μstrain/yr was set as the second invariant interval. We also collected the surface deformation regulation related to conventional and high-speed railway simontaneously to propose the preliminary version of surface deformation level table. (4) Finally, the earthquake potential of each fault was derived through empirical functions and probabilistic model using the derived slip defiit rate. We also estimated the scenario ground motions and coseismic displacements by the GMPE and 3D fault model with optimized fault geometry and slip deficit rate.

KEYWORDS: geodesy, 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數據。此外，由於臺灣地區都市化程度的日益升高，未來因斷層潛移活動直接導致之建物破壞與經濟損失，以及斷層鎖定所引致的地震災損可能更會為嚴重。故對於活動斷層的加強調查與持續性觀測，與瞭解活動斷層的運動特性與危害度分析就顯得非常急迫與重要。

經濟部地質調查及礦業管理中心（原為中央地質調查所，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 86 站 GNSS 連續站（表 1.1）、798 站 GNSS 移動站及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線）之設置（圖 1.1），並藉由高精度的 GNSS 與水準觀測數據分析，瞭解各斷層於震間、同震以及震後的變形型態變化，進一步計算出震間期的斷層滑移速率與同震及震後的斷層面滑移特性。另外，PS-InSAR 衛星影像分析技術也在這一時期之計畫工作中被引進，可針對大範圍的地表地形變化進行觀測，快速的獲得大區域面狀的地殼變形資訊。故經由過去近十年之大地測量監測資料，已觀測到包含東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部等數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域。

另一方面，在 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，透過蒐集與分析地質調查及礦業管理中心及國內既有之 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，在一周內完成連續 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震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	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS02	新竹高工（2015.08.17 廢站）	2004/10/21	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS03	工研院	2004/10/19	GS52	新發國小（2020.9 廢站）	2009/12/18
GS04	大埔美農場（2009.11.11 廢站）	2004.10.16	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS54	大洲國中（2013.7.12 廢站）	2009/12/15
GS06	民和國中	2004/10/21	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS07	培英國小	2004/10/21	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS08	興華國小（2020.03.26 廢站）	2005/08/15	GS57	石門國小（2016.12.27 廢站）	2009/12/15
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS58	高士國小	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS11	北投國小	2005/08/15	GS60	永港國小	2009/12/18
GS12	樂善國小（2018.3.8 廢站）	2005/09/06	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS13	國光國小	2005/08/16	GS62	新樂國小(2021.10.25 廢站)	2010/09/20
GS14	西門國小	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS65	茶山國小（2011.7.28 廢站）	2010/10/14
GS17	太平國小	2005/09/14	GS66	達邦	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS67	新美國小	2010/09/28
GS19	保長國小（2012.5.25 廢站）	2006/07/12	GS68	三和國小	2010/12/17
GS20	龜山島	2006/08/04	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS73	新光國小	2012/11/03
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/03
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS75	旗美高中	2012/11/01
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS76	新興國小	2012/11/03
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS77	深水國小	2012/11/15
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS78	溪洲國小	2013/10/21
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS79	中路國小	2013/10/21
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS80	田寮國中	2013/10/21
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS81	嘉興國中	2013/10/21
GS33	永華國小	2006/06/22	GS82	卓蘭實中	2014/11
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS83	土城國小	2014/11
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS84	水里國中	2014/11
GS36	德化國小	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2014/11
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS86	水美國小	2015/09/15
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS40	龍峰國小（2016.11.7 廢站）	2006/10/21	GS89	新化國中	2015/09/14
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS90	新埔工作站（2019.07.01 廢站）	2016/09/02
GS42	東原國中	2007/11/23	GS91	香山高中	2016/09/02
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS93	七星山	2017/01/01
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS94	中湖	2017/12/20
GS46	來義國小	2009/01/06	GS95	八煙	2017/12/20
GS47	台電南展館(2013.7.25 廢站)	2009/01/05	GS96	二溪國小	2020/02/07
GS48	警光山莊	2009/04/01	GS97	玉井國小	2020/02/07

GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01			

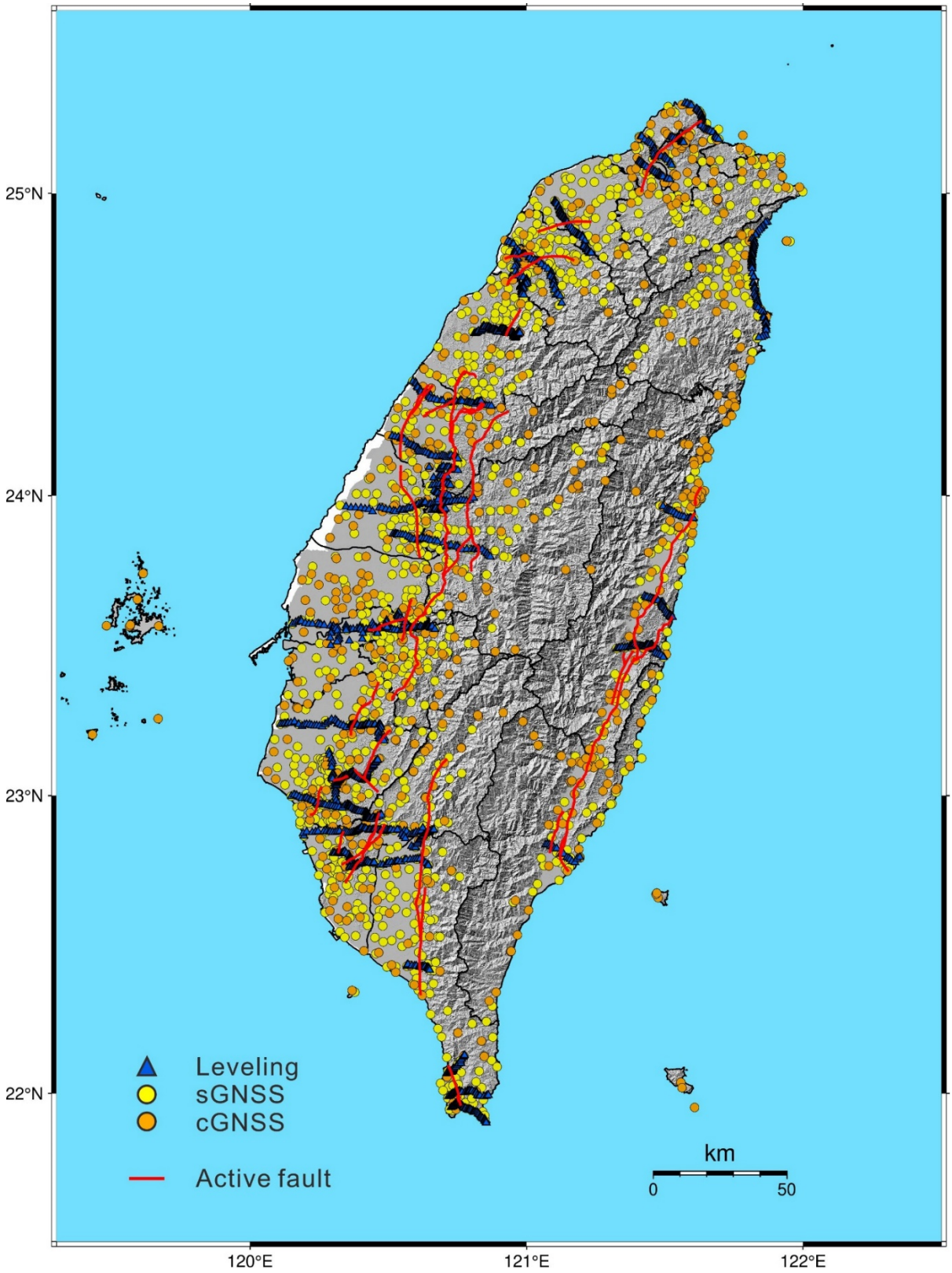


圖 1. 1：經濟部地質調查及礦業管理中心建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 85 站 GNSS 連續站、761 站 GNSS 移動站以及 43 條精密水準測線。

Figure 1. 1: GSMMA geodetic network for active fault monitoring, including 85 continuous GNSS stations, 761 campaign-mode GNSS stations and 43 pricise leveling routes.

本計畫之目標為，利用大地測量資料整合地質與地球物理測勘成果，解析並綜合判釋重要活動斷層地區之地表變形，並評估其活動潛勢。因此，本計畫將致力於處理與整合 GNSS 連續站、GNSS 移動站及精密水準測量所獲得之觀測資料，透過坐標時間序列分析，獲取全臺之水平速度場及垂直速度場等觀測成果。進一步，本計畫將利用水平速度場推算應變速率，解析現今之地殼變形型態並產製地表變形強度分布圖；同時配合地質與地球物理測勘、數值模擬等資料，綜合評估主要斷層之斷層幾何參數最佳值與可信區間，並解析不同地質時間尺度下斷層滑移速率的變化及再現週期間的關係，產製斷層活動潛勢圖；最終再計算各斷層在發生可能最大地震規模時，計畫工作區域與各區域重要區域之景況地振動分布圖與景況同震位移圖，以此作為地質敏感區範圍繪製之參考依據，並提供各區域重要區域之防災規劃參考（圖 1. 2）。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（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。此外，針對前期計畫「斷層活動性觀測研究第四階段」中，重要之活動斷層與具有重要之區域（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，並搭配既已規畫更新的臺灣活動斷層分布圖，滾動更新新增減的活動斷層，以納入斷層潛勢評估的標的。

表 1. 2：112 年至 114 年分年目標表

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、臺中都會區
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

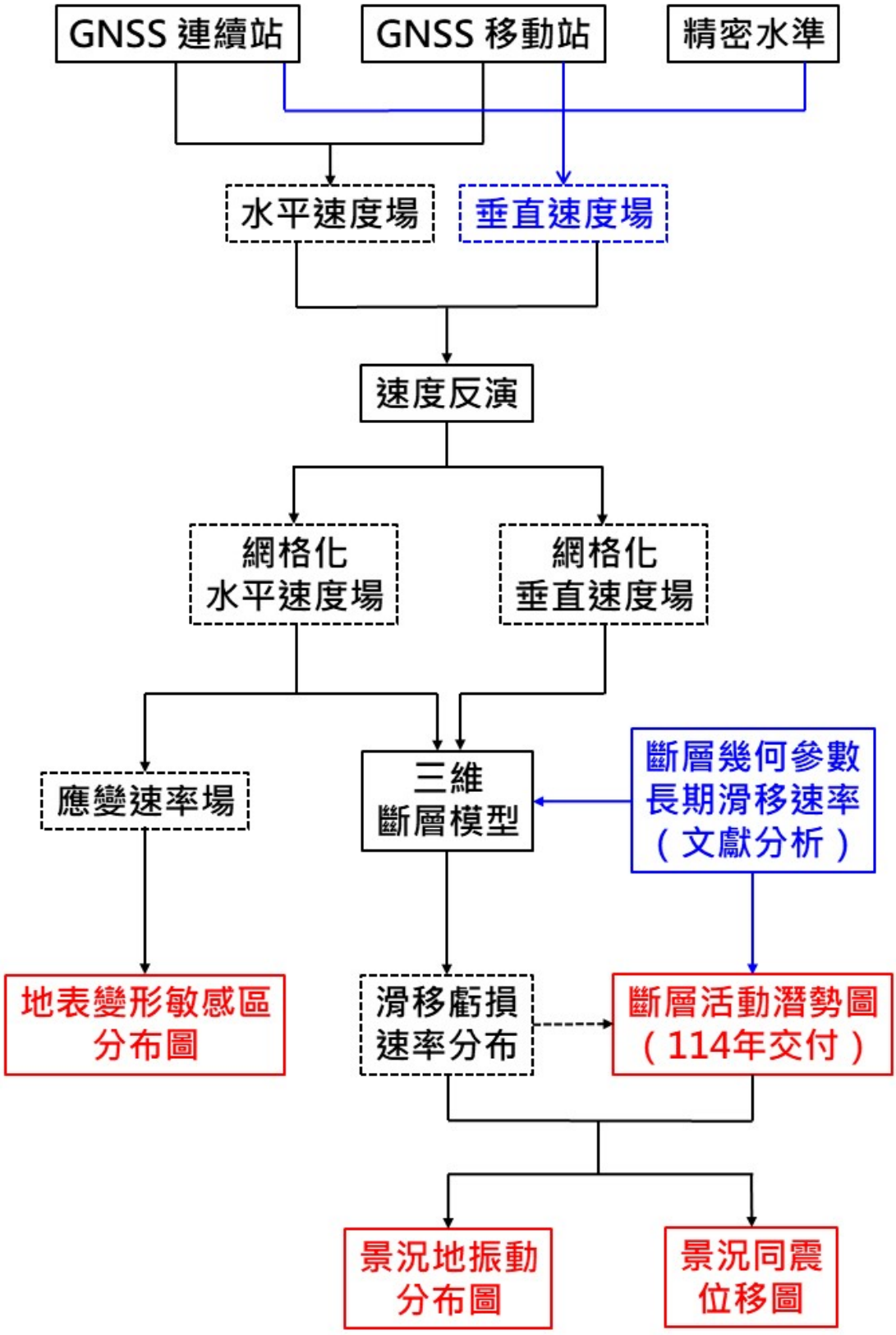


圖 1. 2：計畫執行架構圖

Figure 1. 2: Framework of the project.

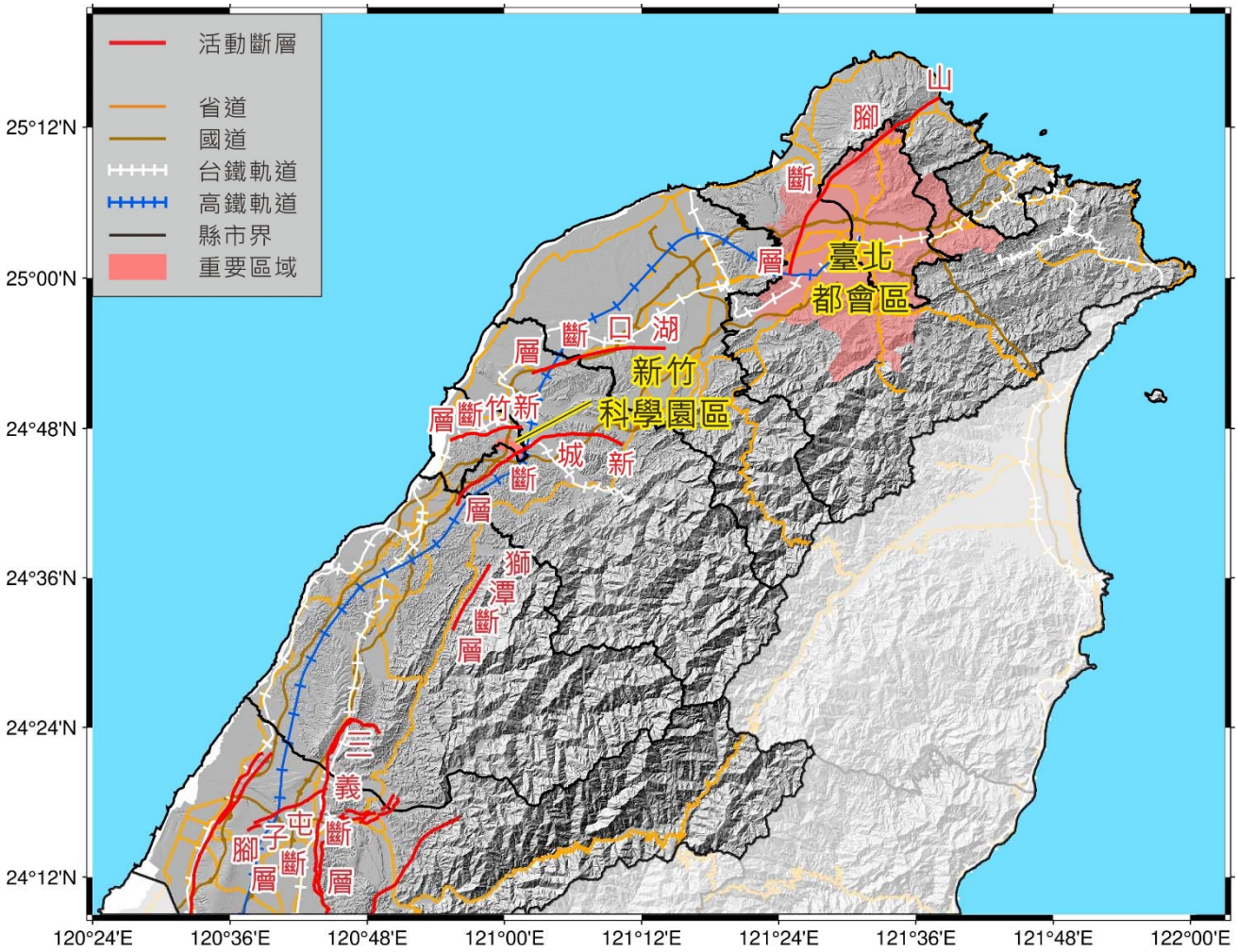


圖 1. 3：112 年目標活動斷層與重要區域

Figure 1. 3: Active faults and object area of 2023.

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，根據重要區域挑選主要的活動斷層或活動構造，整合最新之地質地物調查研究成果資料，利用大地測量成果與數值模擬方式來進行詳細之斷層活動性分析。並彙整此步驟之成果，以進一步推估地表變形強度分布、活動斷層潛勢、各斷層景況地振動分布圖與景況同震位移分布圖，作為地質敏感區範圍繪製之重要參考依據。

1-2 研究目的

本計畫之研究目的為：（1）相對於數百年週期地震活動所造成之短時間大規模破壞，平時即持續不斷地不等量地表變形，就會以緩慢且逐步地方式造成線性結構物、維生管線與大型結構物等基礎建設或重要設施的損毀。雖然地表應變速率圖為最直接反映不等量地表變形資訊的重要圖資，但是地表應變速率對於各領域之應用並不直觀，故本計畫將參考活動斷層分級之概念，制定一套符合社會各界需求之地表應變速率場分級標準，並據此繪製地表變形強度分布圖。（2）本階段計畫同時也嘗試藉由斷層滑移虧損速率分布，了解斷層面在震間期可能之能量累積處，在考慮主要斷層之可能最大地震規模後，依據地動預估式推求地震發生時，工作地區重要區域鄰近區域可能之景況地震動分布範圍，並利用三維斷層錯動模式推求地表上可能發生之景況同震位移分布圖。

1-3 本年度工作概述

本年度為 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」之第一年，本年度之計畫分析目標，將著重於包含山腳斷層、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，共 7 條活動斷層之臺灣北部地區，而本年度之重要區域則為新竹科學園區以及臺北都會區（北北基）（表 1.2），其中，「新城斷層」與「山腳斷層」是 2 條圍繞著本年度重要區域主要之活動斷層，因此本年度的計畫將著重於分析這 2 條斷層之斷層幾何參數與其活動性（表 1.2）。以下將概述這 2 條斷層之地質背景。

1. 新城斷層

新城斷層為以逆移為主兼具橫移分量之斜滑移斷層，由新竹縣芎林鄉向南延伸至苗栗縣頭份鎮，呈東北東轉東北走向，長約 29 公里，其中有 17.4 公里被劃設為活動斷層地質敏感區（經濟部中央地質調查所，2015）。新城斷層截切頭前溪南岸的紅土階地與河階，愈老的階面在橫跨斷層兩側的地形崖落差愈大，指示斷層曾有多次且重複活動之現象，古地震研究顯示斷層截切紅土階地（陳文山等，2003）。根據新城斷層在頭前溪南岸截切＜ 270 年前的全新世階地礫石層（陳文山等，2003），顯示此斷層近期曾經活動。頭份東南側紅土階地的鑽井岩芯，斷層截切 44,630-43,710 年前的紅土階地，且斷層朝東傾角約 25°，垂直斷距約 20 公尺。此斷層長期抬升速率為 0.46 mm / yr，斷層面滑移速率為 1.1 mm / yr（陳文山與游能悌，2011）。大地觀測資料分析結果顯示，新城斷層上盤向西北或西北西方向移動，下盤則向東南位移，即斷層兩側仍受到壓縮作用而維持逆滑形式（林啟文等，2005；饒瑞鈞等，2006）。

2. 山腳斷層

山腳斷層為正斷層，由新北市樹林區向北延伸至金山區，呈北北東走向，長約 35 公里。斷層南段由樹林至北投，沿著臺北盆地西緣的林口臺地線形崖之下，斷層跡被厚層的第四紀沖積層覆蓋；斷層北段由臺北市北投區至新北市金山區，斷層跡為大屯山的火山岩覆蓋。根據地質鑽探成果，山腳斷層使臺北盆地的第三紀基盤至少陷落 750 公尺（劉桓吉等，2000；2002），此陷落現象與正斷層作用也向北延伸至大屯山區與金山平原北側的階地崖下（盧詩丁等，2004），在金山平原區域至少陷落 551.6 公尺（林啟文等，2007）。至於山腳斷層是否更向東北延伸進入海域與臺灣北方外海的一系列正斷層相連接，目前並不清楚（林啟文等，2012）。山腳斷層的最近一次活動時間，可能在距今約 11,000 年以前。大地觀測資料顯示山

腳斷層兩側的短期變動量並不明顯；但經由盆地沉積層的碳十四定年資料估算，近斷層跡上盤的長期沉降速率約 -1.2 mm / yr，而遠離斷層上盤的東側區域無沉陷或略為抬升（陳文山等，2008）。金山平原的山腳斷層之長期沉降速率為 -0.4±0.6 mm / yr，全新世以來斷層活動呈現略為下陷或沒有變動（陳文山，2016）。

本年度之主要工作重點內容則為（1）大地測量資料之整合運用與分析：本計畫將彙整近十數年之 GNSS 連續站、GNSS 移動站以及精密水準測量等長期觀測資料，進行資料檢核、坐標解算及時間序列分析，提升觀測成果精度與解析力，以獲得包含地表水平與垂直分量之三維地表速度場，進而計算應變速率場；（2）地表變形強度分布圖：以應變速率場所反映之地表變形潛勢為基礎，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）景況地震動與同震位移分布推估：根據斷層幾何參數之探析與斷層滑移虧損速率分布，依地動預估式與三維斷層錯位模型，推估景況地震動與同震位移分布圖。前述之工作重點可細分如下：

1. 測量外業檢測與檢核部分

(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、嘉南地區、高屏地區、恆春半島地區、宜蘭地區、花東地區等 8 個地區來進行（表 1.3；表 1.4；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，同時針對精密水準測量成果之閉合差進行檢核（表 1.3；表 1.4；圖 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	74
4 月	4 月	恆春半島地區	34
5 月	5 月	桃竹苗地區	84
6 月	6 月	嘉南地區	179
7 月	7 月	高屏地區	121
8 月	8 月	中部地區	151
9 月	9 月	花東地區	88
10 月	10 月	宜蘭地區	30

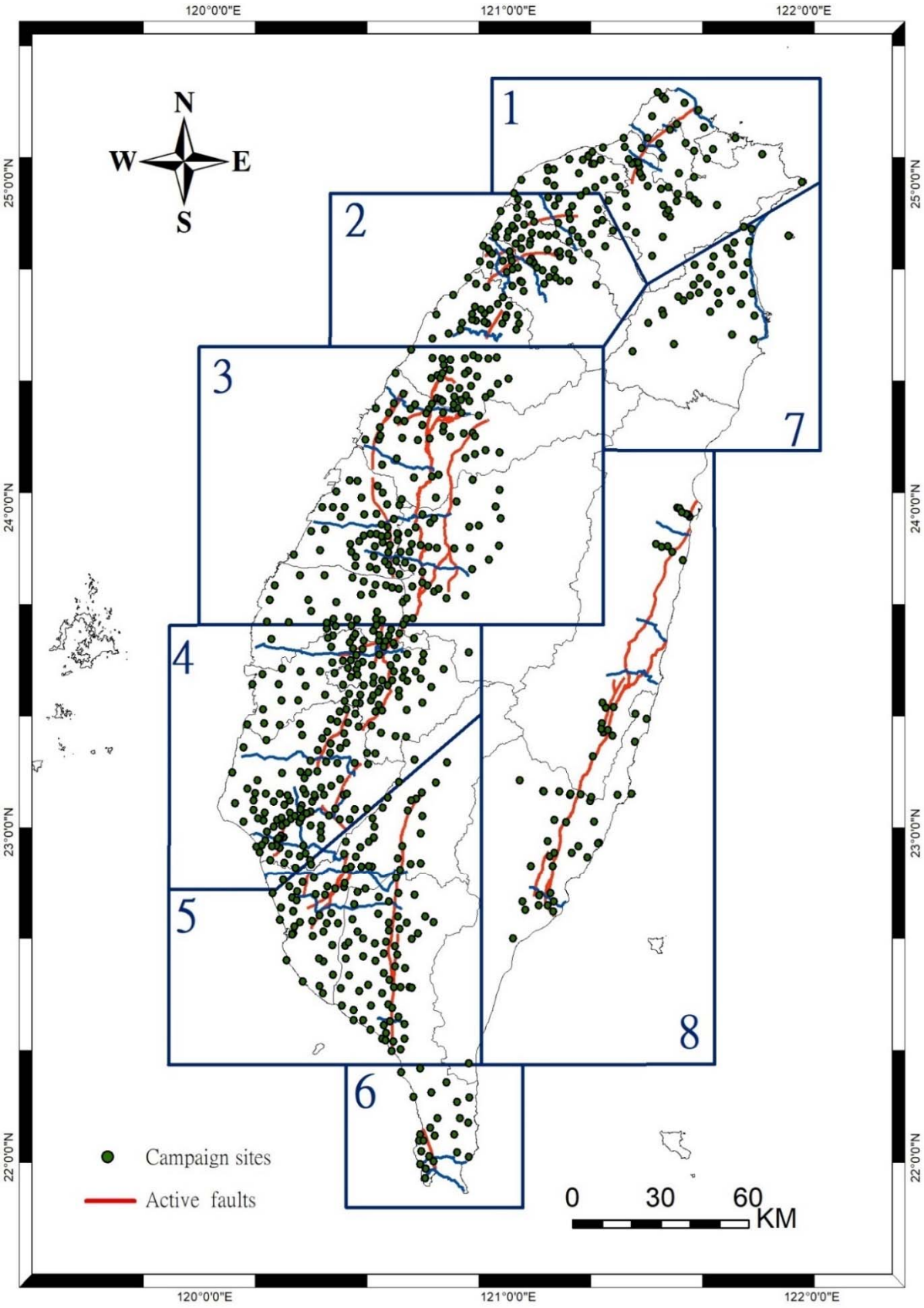


圖 1. 4：GNSS 移動站觀測分區圖。綠色圓圈為移動站，藍色框為移動站分區。

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

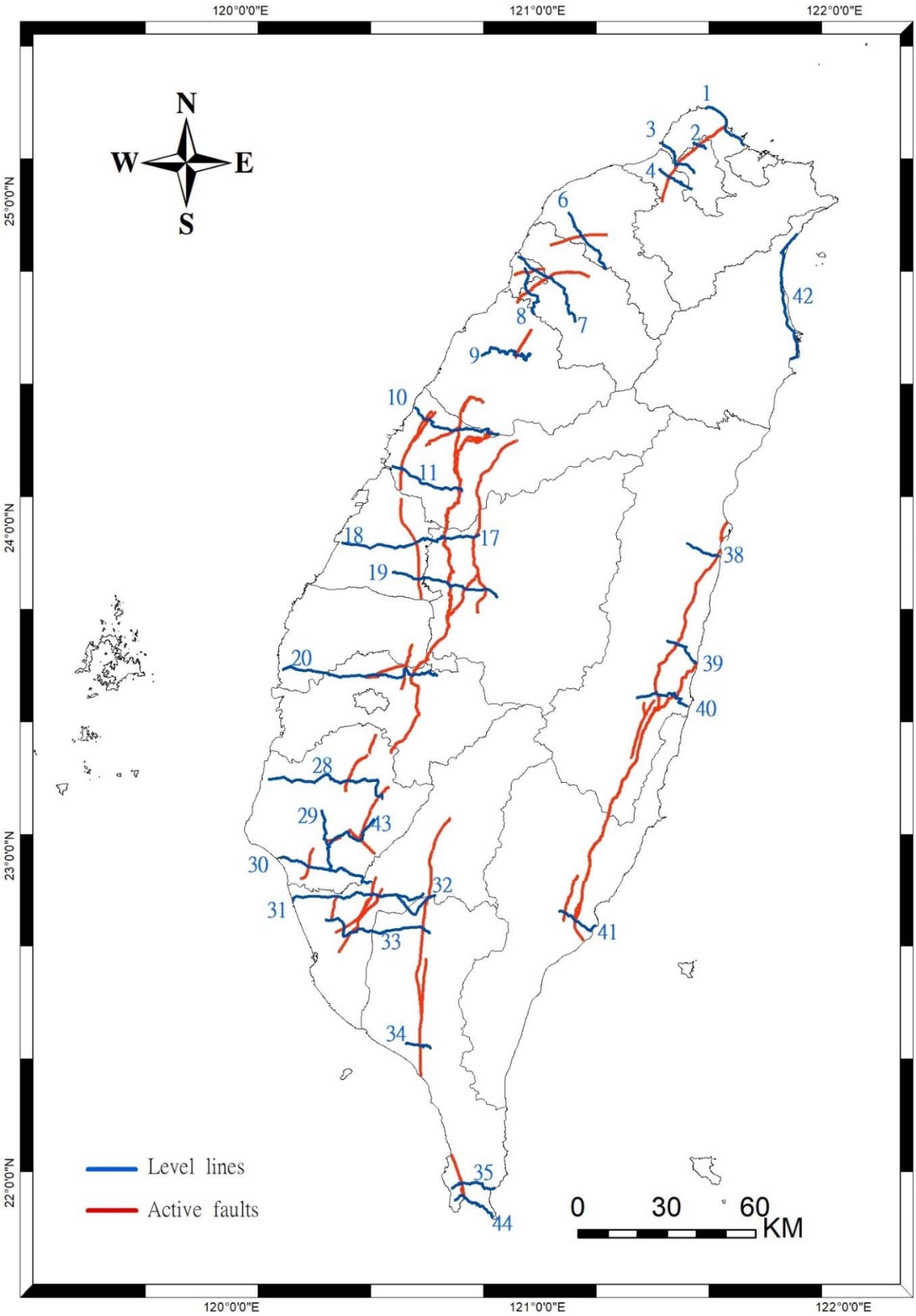


圖 1. 5：精密水準測量測線分布圖

Figure 1. 5: Distribution of leveling lines.

表 1. 4：精密水準測量預計施測時間表

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	25	9 月
2	士林-三芝測線	8	2	9 月
3	淡水-士林測線	3	18	9 月
4	五股-臺北測線	1	18	9 月
5	信義測線	0	2	9 月*
6	新屋-童話世界測線	10	22	7 月
7	新竹-五峰測線	5	40	6 月
8	新竹-峨眉測線	6	23	6 月
9	苗栗-南庄測線	24	18	8 月
10	大安-東勢測線	5	39	3 月
11	龍井-太平測線	6	27	7 月
12	五光-黃竹測線	0	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	7	40	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	38	54	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	9	52	4 月
29	善化-關廟測線	0	29	10 月
30	安平-龍崎測線	5	41	5 月
31	路竹-茂林主線	8	48	4 月
32	路竹-茂林副線	2	20	4 月
33	岡山-安坡測線	4	47	5 月
34	佳冬-七佳測線	5	7	9 月
35	恆春西臺地-佳樂水	3	17	4 月
38	嶺頂-龍澗測線	0	16	10 月
39	光復-豐濱測線	9	14	10 月
40	紅葉-靜浦測線	15	18	10 月
41	東成-富岡測線	14	14	10 月
42	梗枋-東澳測線	12	48	10 月
43	玉井-新化測線	1	25	5 月
44	南樹林-鵝鑾鼻測線	2	18	4 月

45	車城-牡丹測線	0	13	4 月

註：精密水準測量預計施測時間表之「*」字號為四年施測一次之水準副線

2. GNSS 連續站資料處理、解算與分析

處理地質調查及礦業管理中心設置及與其它單位交換之 GNSS 連續站資料(視實際交換所得資料而定)，進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場。

3. GNSS 移動站及精密水準測量成果解算分析

完成全臺 GNSS 移動站與精密水準資料之檢核、解算與時序分析，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，進行北部地區主要斷層之幾何參數分析。

(2) 利用至少三種不同的斷層模型，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、景況地震動分布與景況同震位移場推求工作所需。

6. 重要區域鄰近區域地表變形與斷層活動潛勢評估

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

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

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

第二章、大地測量資料分析

2-1 GNSS 連續站資料解算與分析

本次報告所使用之 GNSS 連續站資料由經濟部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 572 站。以下為計算每日坐標解之方法與流程。

2-1-1 GNSS 連續站資料解算軟體與流程

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

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

(2) 參考框架：IGb14。

(3) 截切角度（cutoff angle）：10°。

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

(5) 對流層估計：初始氣象參數模式採 GPT50；乾、濕映射函數（mapping function）則採用 VMF1 模式（Vienna Mapping Function 1; Böhm et al., 2008），估計間隔為 300 秒。

(6) 固體潮模式：IERS 2010。

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

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

(9) 天線相位中心修正：igs14.atx。

而 GipsyX 數據處理流程主要分為數據預處理（gde）、軌道計算和參數解算（rtgx）三個階

段，最終從相位或偽距觀測數據中計算得出測站坐標及精度估計。而這裡的數據處理採取了以下步驟：

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

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

2-1-2 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 2023 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）：

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

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 年台東地震等重大地震事件進行擬合。擬合成果範例如圖 2. 1 所示（其餘測站之時間序列請見附錄）。此外，由於環境變化與隨機誤差的存在，即使已完成同震位移與速度變化等事件之擬合，GNSS 坐標時間序列仍會呈現離散跳動的型態（圖 2. 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 6 mm，E 方向之精度約 6 mm，U 方向則約為 25 mm。而本計畫之重要區域經坐標時間序列分析所獲得之速度場將於 2-4 節進行分析。

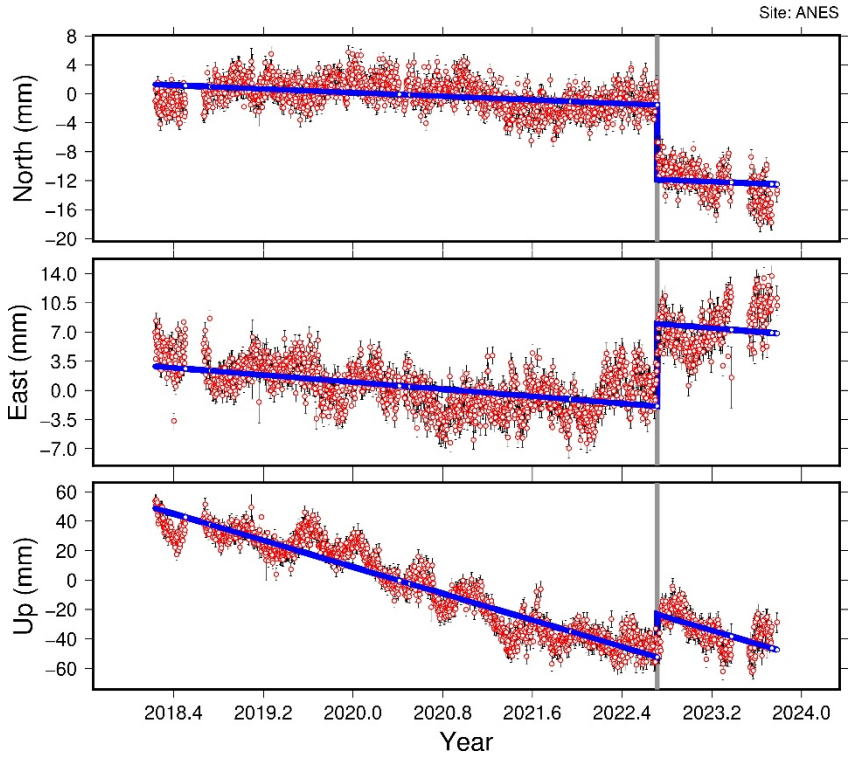


圖 2. 1：GNSS 連續站 ANES 坐標時間序列擬合結果。紅色圓圈為原始坐標時間序列，藍色圓圈為坐標計算值。

Figure 2. 1: Coordinate time series of GNSS station ANES. Red circles are observations; blue circles are calculation.

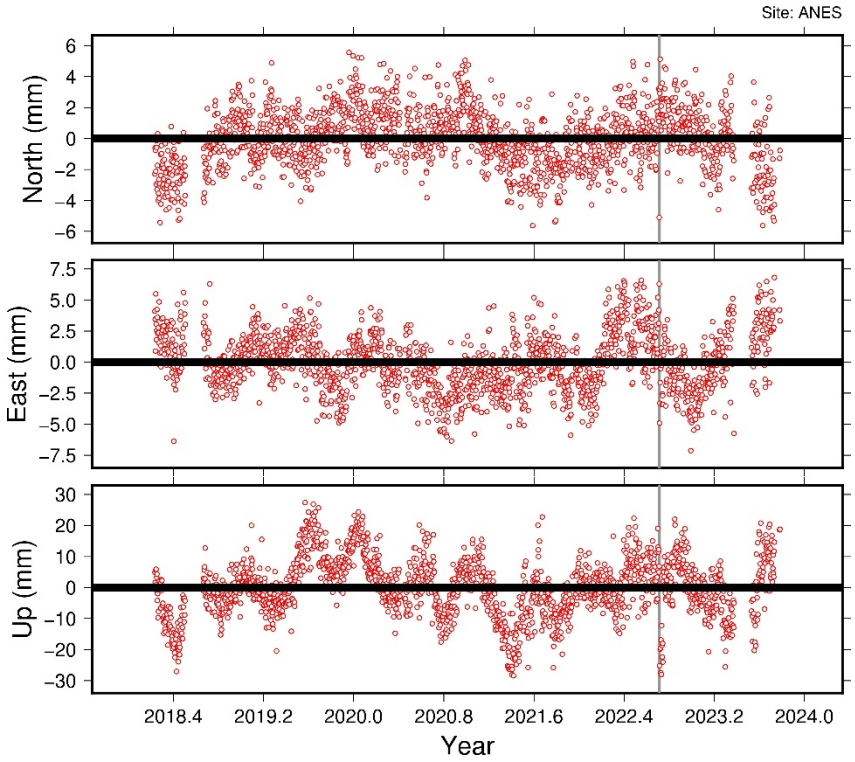


圖 2. 2：GNSS 連續站 ANES 時間序列之殘差結果。紅色圓圈為移除地表運動速率及地震瞬時位移等事件後之殘差值。

Figure 2. 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 2023 年 10 月之監測成果，其坐標殘差之分布情形指出（圖 2. 3），1993–2023 年 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.02 ±7.74 mm；E 方向為-0.01 ± 8.8 mm；U 方向為-0.18 ±18.43 mm。而 2002–2023 年平面坐標之均方根誤差平均值為 1.6 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 4.7 mm（圖 2. 4）。

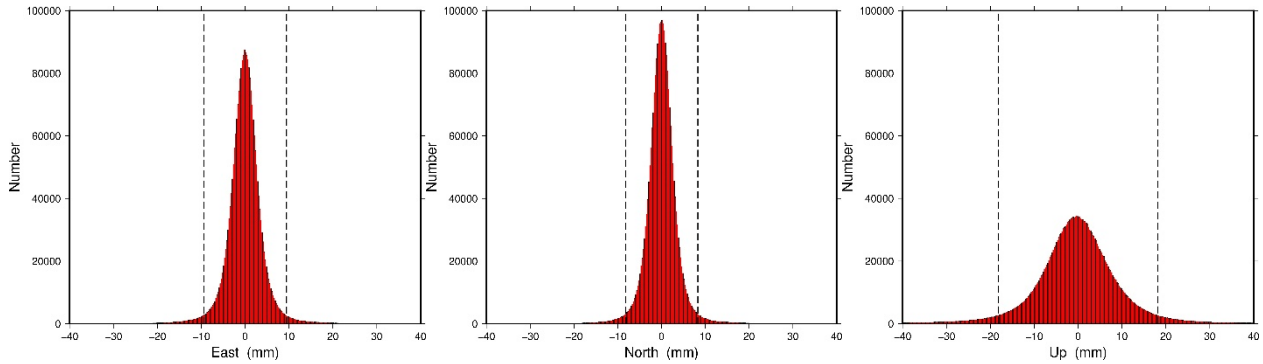


圖 2. 3：2002 – 2023 年截至 10 月底 GNSS 連續站點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 2. 3: GNSS coordinates residuals during 2002 – October 2023. The dashed lines indicate 95% confidence interval.

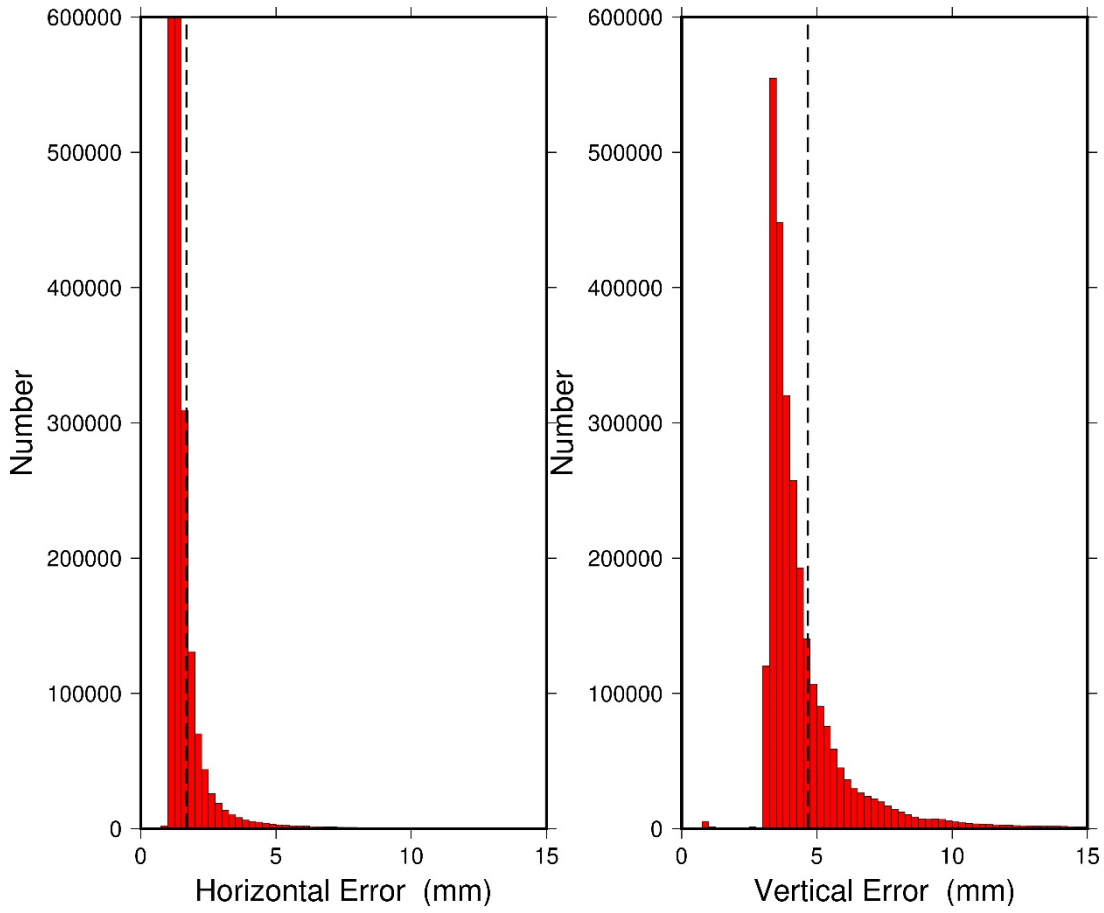


圖 2. 4：1993 – 2023 年 GNSS 連續站點位均方根誤差分布圖

Figure 2. 4: GNSS RMS error during 1993 – 2023.

2-1-3 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 2. 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 2. 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 2. 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 2. 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 97 個測站之三分量時間序列均以卡曼濾波分析其 AR(3)色雜訊與殘差雜訊之振幅，並將結果以統計柱狀圖呈現（圖 2. 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布較為離散：大部分都小於 8 mm，明顯的離群點有 3 個站。圖 2. 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。根據地礦中心得測站維護紀錄，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 2. 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。

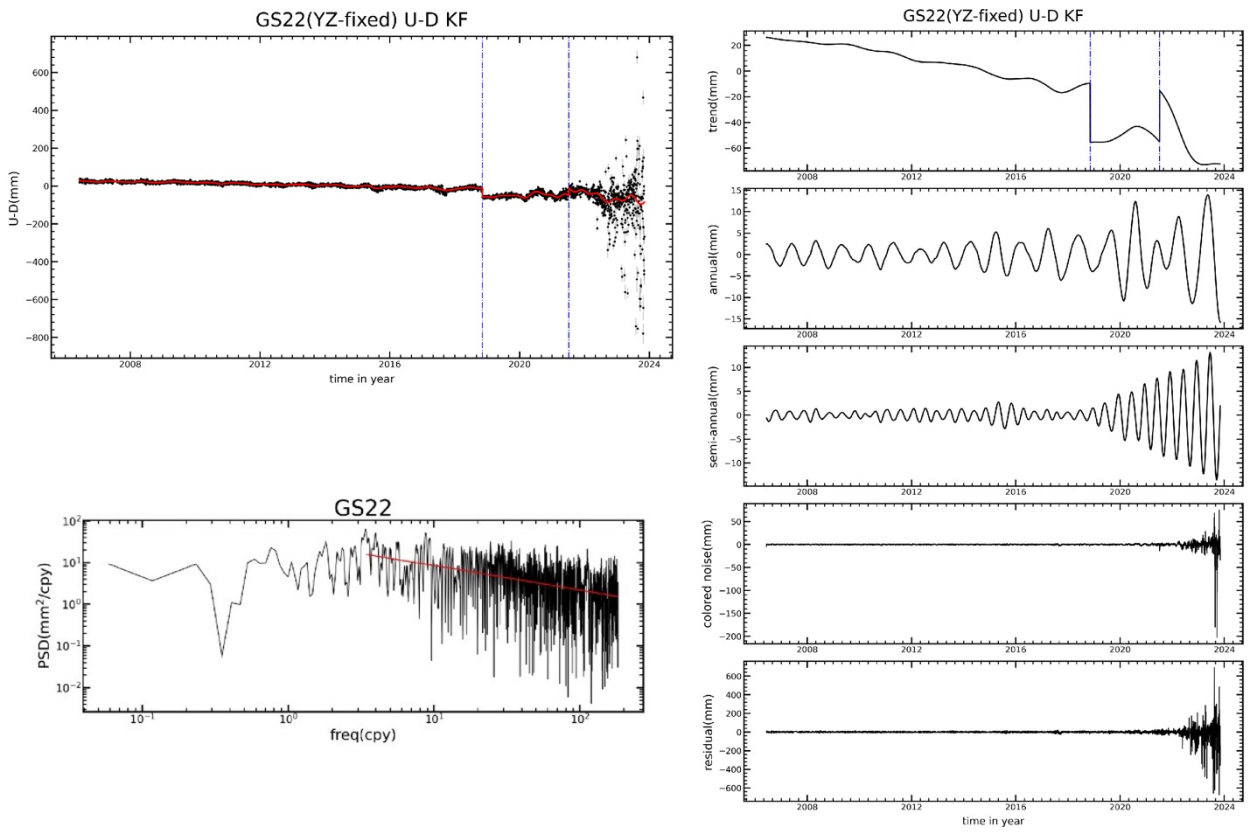


圖 2. 5：連續站 GS22（彰化快官交流道站）垂直分量的卡曼濾波分析結果。左上子圖為原始時間序列（黑點）與卡曼濾波之擬合曲線（紅線）；左下子圖為擬合所得之色雜訊頻譜圖；右邊各子圖由上而下分別為擬合所得之斜率（或趨勢 trend）、年週期訊號、半年週期訊號、AR(3)色雜訊、殘差（residual）。斜率序列中藍色虛線所示之錯移（offset）為該站於 2018 年 11 月 8 日更換天線所造成。

Figure 2. 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): 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.

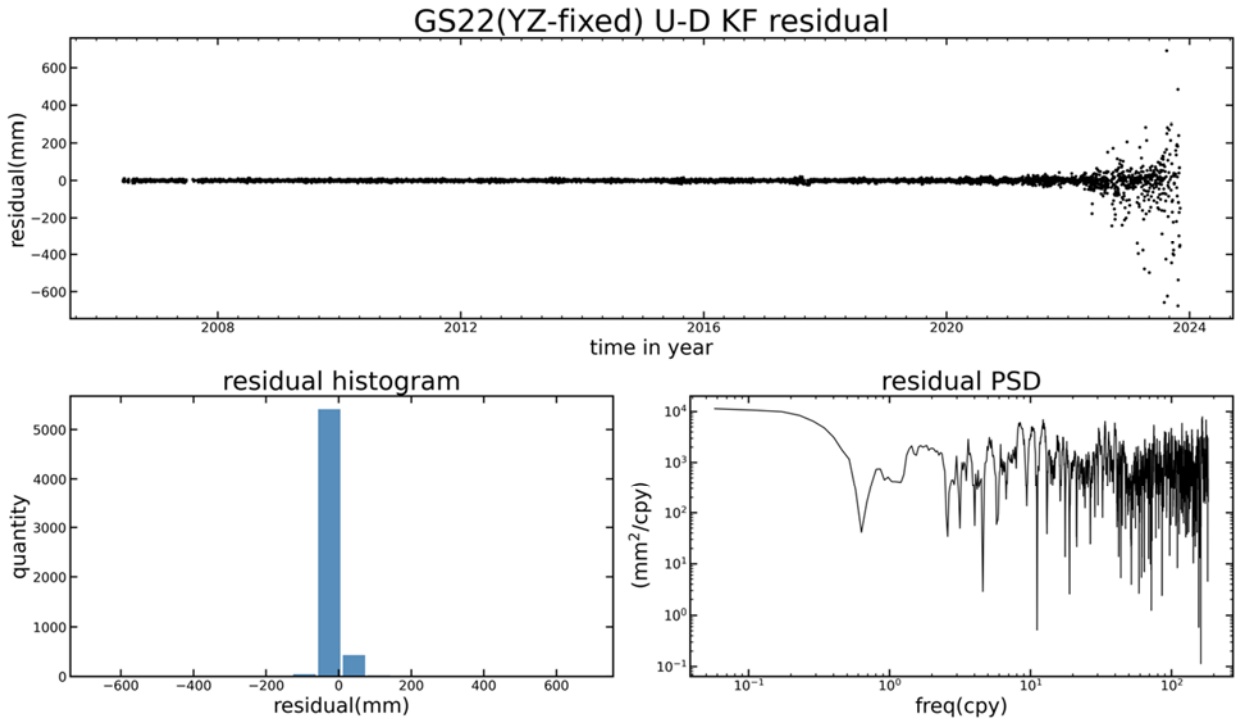


圖 2. 6：連續站 GS22 垂直分量經卡曼濾波後所得之殘差時間序列、振幅與頻譜分析。上方子圖為殘差時間序列，下方左子圖為振幅，下方右子圖為頻譜分析成果。結果顯示此殘差序列較接近高斯分布之白雜訊。

Figure 2. 6: (Top) The time series of vertical residuals of GS22 from KF. (Bottom) The amplitude distribution (left) and PSD (right) of the residual time series, which infer a possible Gaussian white noise.

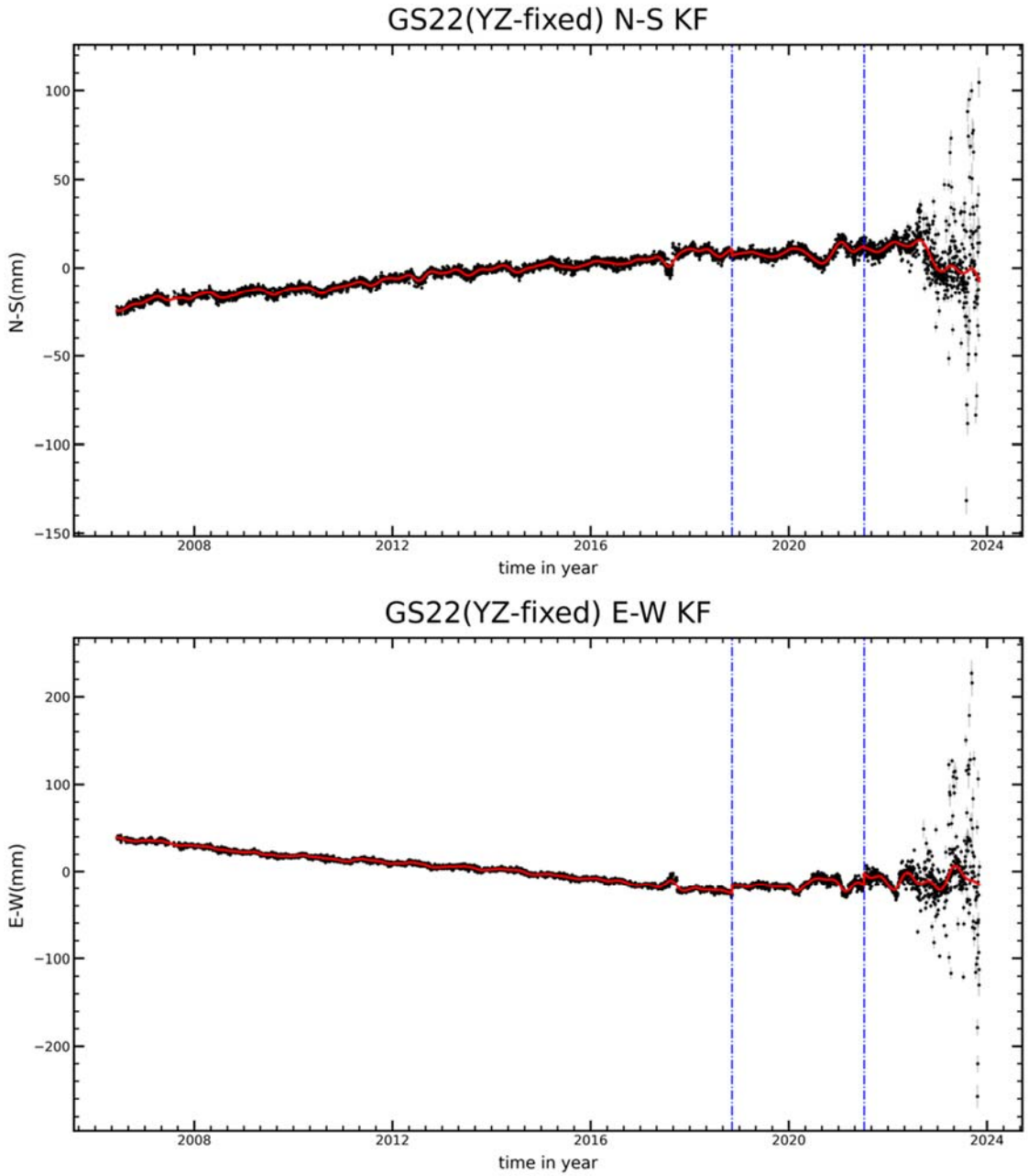


圖 2. 7：連續站 GS22 之南北與東西分量之時間序列。上圖為南北分量之時間序列，下圖為東西分量之時間序列。紅色曲線為卡曼濾波之擬合結果，藍色虛線所示之錯移（offset）為該站於 2018 年 11 月 8 日更換天線所造成。

Figure 2. 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.

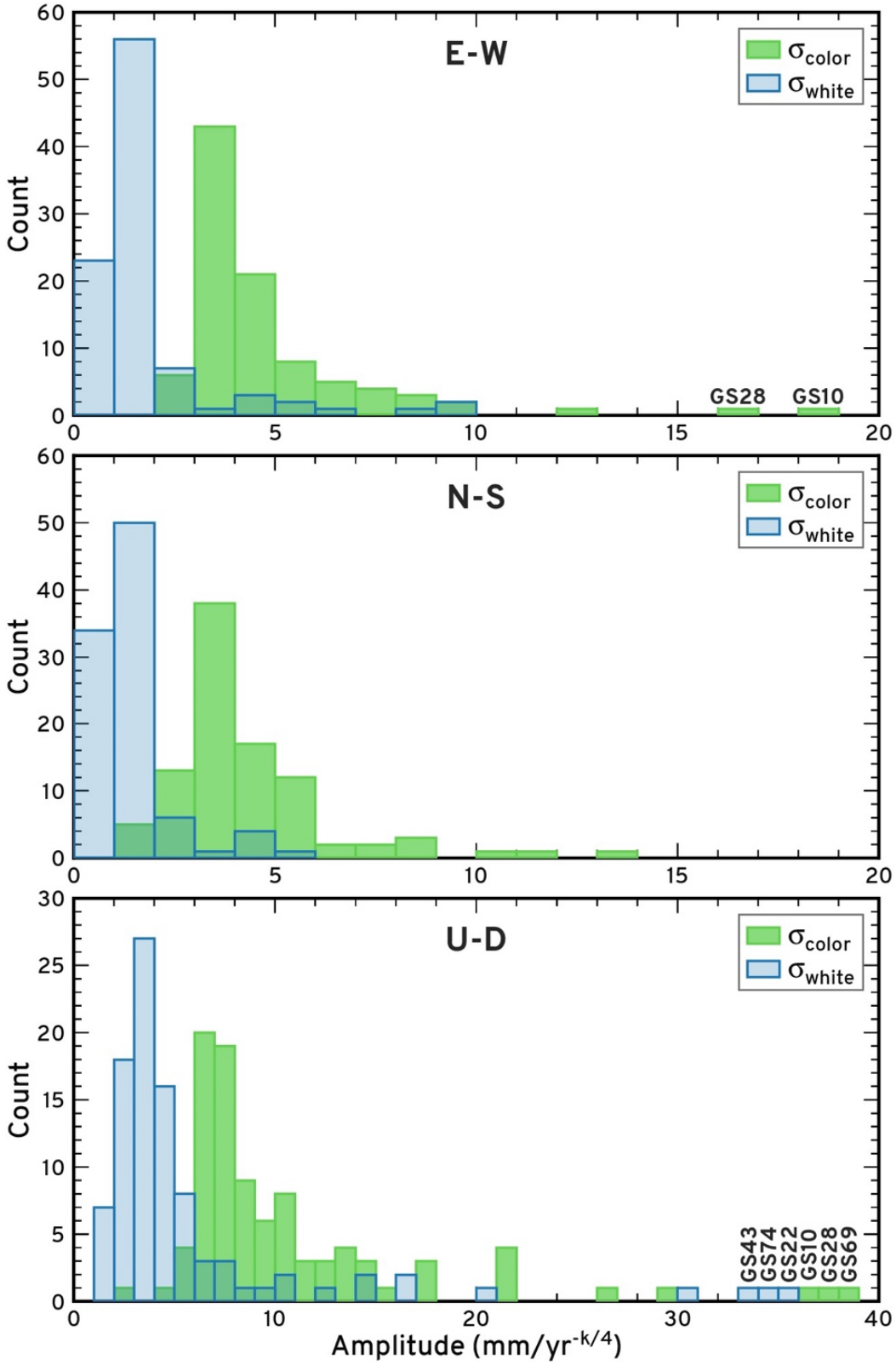


圖 2. 8：地礦中心全臺 97 個測站三分量時間序列之卡曼濾波雜訊分析。柱狀圖橫軸為振幅值，縱軸為該振幅值區間（±0.1 mm）的測站數目。綠色代表 AR(3)色雜訊，藍色為殘差雜訊。

Figure 2. 8: Histograms show amplitude ranges of three-component noises of the 97 GNSS stations installed and maintained by the Central Geological Survey. 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.

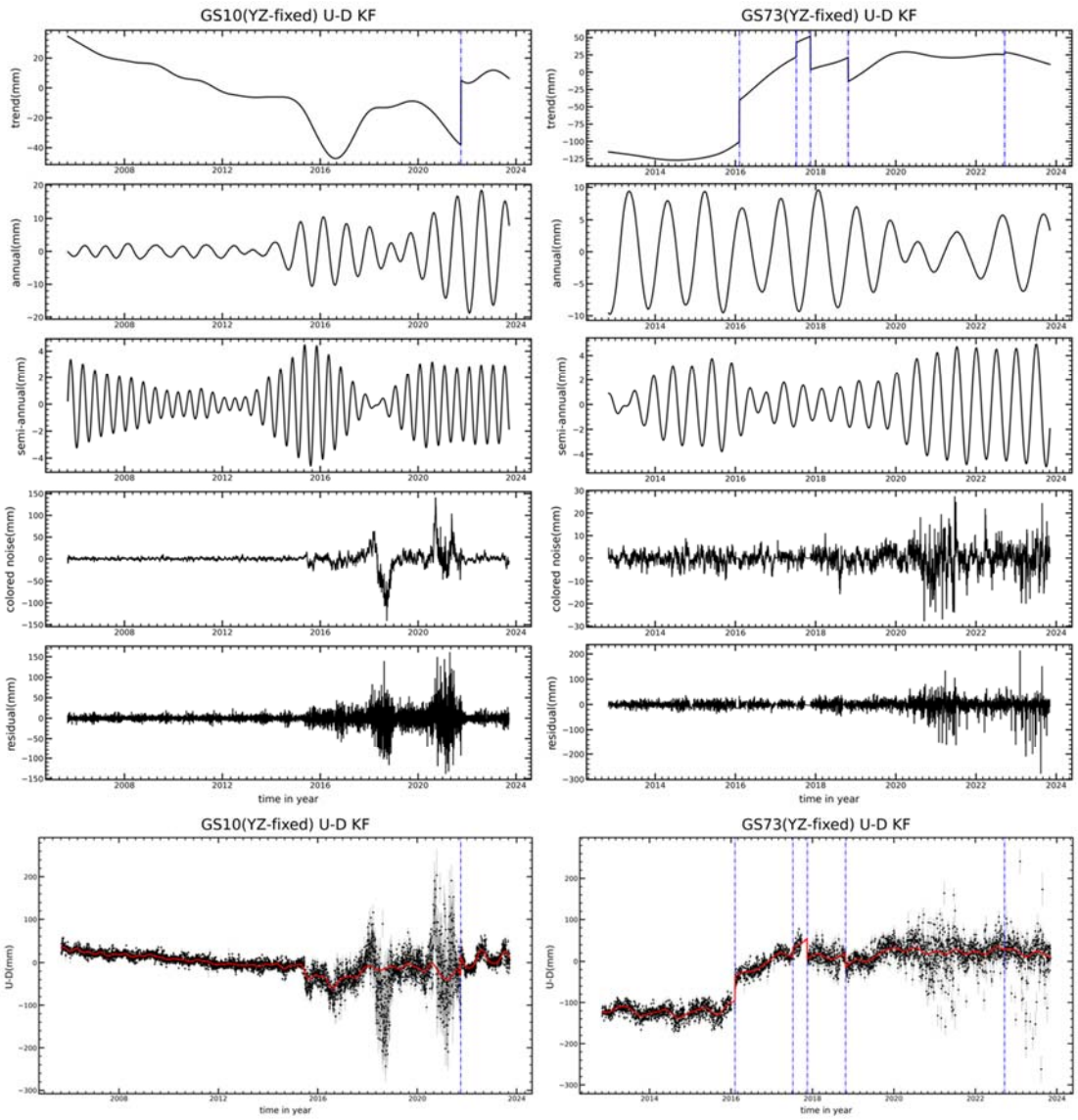


圖 2. 9：連續站 GS10（桃園竹圍國中）與 GS73（高雄新光國小）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明請見圖 2. 5。GS73 中的藍色虛線對應的是 2016 年 2 月 6 日美濃地震之位移。

Figure 2. 9: Vertical time series and their KF analysis of the stations GS10 (left) and GS73 (right). See Figure 2.5 for interpretations for all subplots. The blue-dash line indicates the 2016/2/6 MeiNong earthquake.0

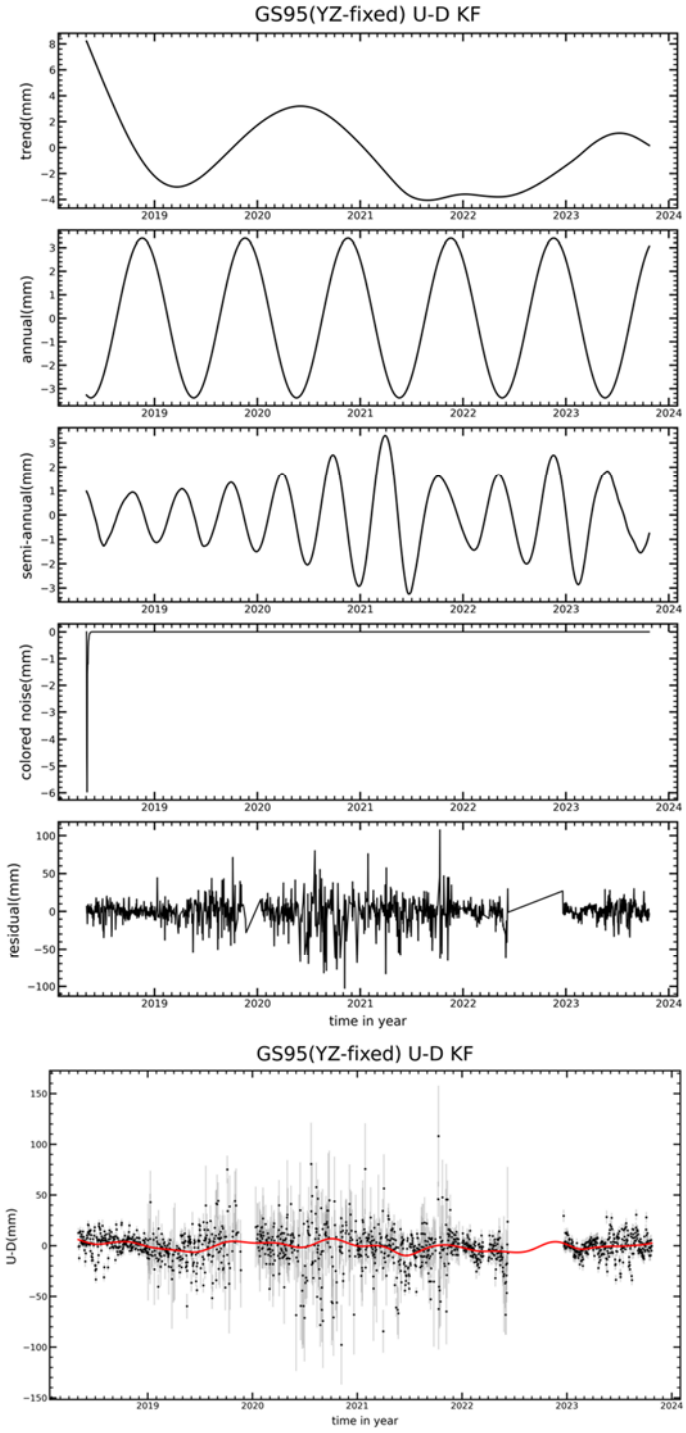


圖 2. 10：連續站 GS95（大屯火山區八煙站）之垂直時間序列與其卡曼濾波分析。各分項子圖說明請見圖 2. 5。

Figure 2. 10: Vertical time series and its KF analysis of the stations GS95. See Figure 2. 5 for interpretations for all subplots.

2-2 GNSS 移動站資料檢核、解算與分析

2-2-1 本年度（2023 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 20 日至 29 日完成 74 個點位施測、恆春地區於 4 月 16 日至 19 日完成 34 點位施測、桃竹苗地區於 5 月 15 日至 24 日完成 84 個點位施測、嘉南（含南科）地區於 6 月 12 日至 30 日完成 179 點位施測、高屏（含橋頭）地區於 7 月 12 日至 25 日完成 121 點位施測、中部地區於 8 月 14 日至 31 日完成 151 點位施測、花東地區於 9 月 18 日至 28 日完成 88 點位施測、宜蘭地區於 9 月 9 日及 10 月 16 日至 19 日完成 30 點位施測，共計完成 761 點 GNSS 移動站的施測（圖 2. 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、恆春、桃竹苗、嘉南（含南科）、高屏（含橋頭）、中部、花東、宜蘭地區測量外檢核，臺北地區於 3 月 30 日及 4 月 6 日完成 9 個點位施測檢核，恆春地區於 4 月 18 日完成 5 個點位施測檢核，桃竹苗地區於 5 月 15、24、25、30 日完成 16 個點位施測檢核，嘉南（含南科）地區於 7 月 3 至 6 日完成 20 個點位施測檢核，高屏（含橋頭）地區於 7 月 31 日至 8 月 2 日完成 15 個點位施測檢核，中部地區於 8 月 21 日至 23 日及 8 月 28 日完成 20 個點位施測檢核，花東地區於 9 月 25 日至 27 日完成 14 個點位施測檢核，宜蘭地區於 10 月 23 日至 24 日完成 8 個點位施測檢核（表 2. 1）。

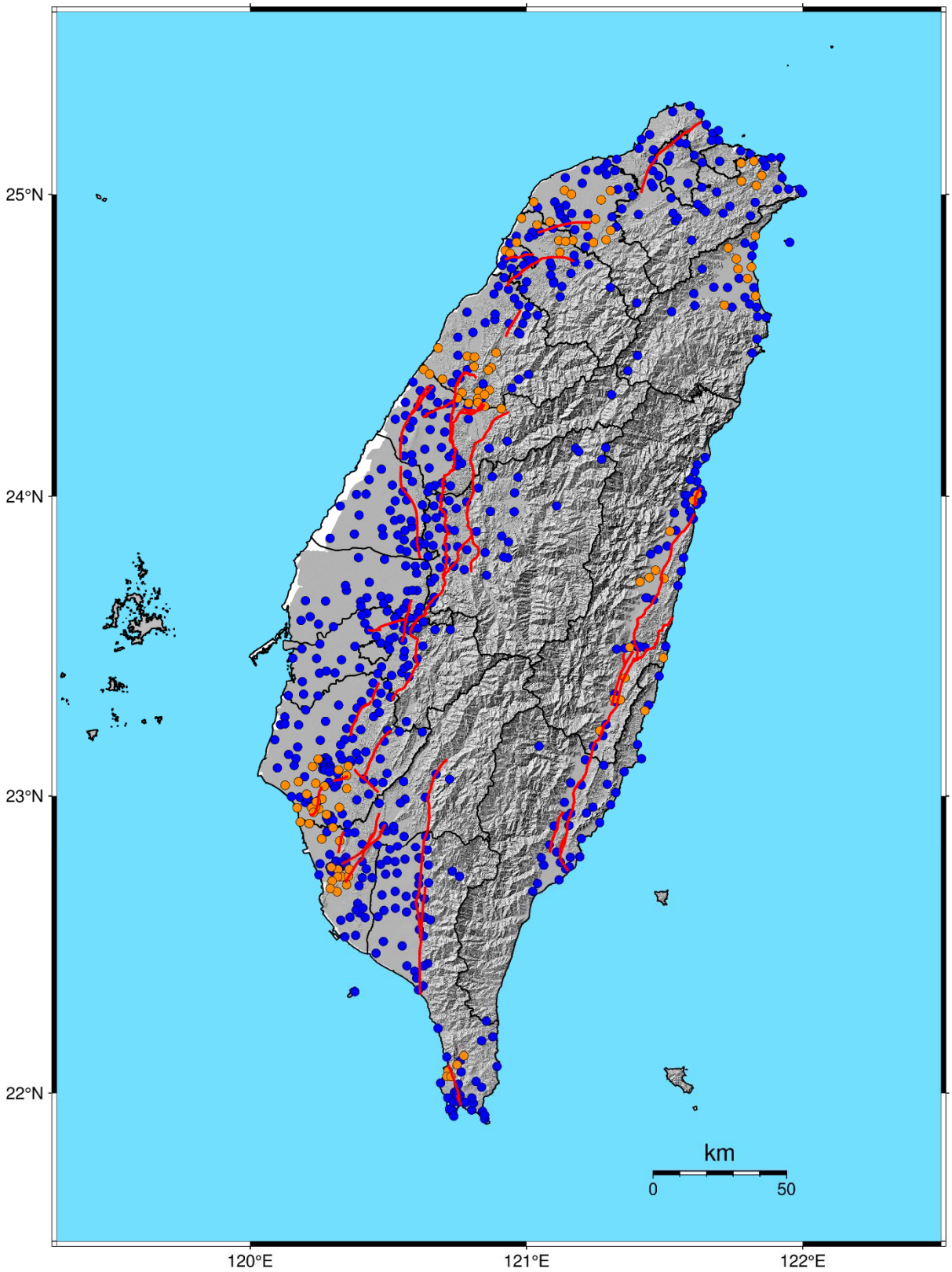


圖 2. 11：已完成施測的 GNSS 移動站與檢核點位分布圖。藍色圓圈為施測站點，橘色圓圈為檢核站點。

Figure 2. 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 74 個移動站點位數，故在此區選擇 9 個點位進行檢核，共有 36 條基線。本區 36 條基線之長度落在 2,900 m 至 72,293 m，基線差規範值在 5.6 mm 至 24.2 mm 之間，計算後的基線差在 1.1 mm 至 17.9 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

恆春地區共有 34 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 1,574 m 至 9,976 m，基線差規範值在 6.0 mm 至 32.5 mm 之間，計算後的基線差在 0.7 mm 至 7.0 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

桃竹苗地區共有 84 個移動站點位數，故在此區選擇 16 個點位進行檢核，共有 120 條基線。本區 120 條基線之長度落在 2,010 m 至 39,279 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 14.9 mm 之間，計算後的基線差在 0.2 mm 至 11.5 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

嘉南（含南科）地區共有 179 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 24,537 m，基線差規範值在 5.3 mm 至 26.3 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 9.4 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

高屏（含橋頭）地區共有 121 個移動站點位數，故在此區選擇 15 個點位進行檢核，共有 105 條基線。本區 105 條基線之長度落在 1,558 m 至 29,553 m，基線差規範值在 5.3 mm 至 20.0 mm 之間，計算後的基線差在 0.0 mm 至 10.7 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

中部地區共有 151 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 1,434 m 至 32,194 m，基線差規範值在 5.5 mm 至 30.5 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 10.4 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

花東地區共有 88 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 2,364 m 至 94,405 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 29.6 mm 之間，計算後的基線差在 0.2 mm 至 21.2 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

宜蘭地區共有 30 個移動站點位數，故在此區選擇 8 個點位進行檢核，共有 28 條基線。本區 28 條基線之長度落在 3,707 m 至 27,786 m，基線差規範值在 5.7 mm 至 14.1 mm 之間，計算後的基線差在 0.3 mm 至 6.5 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

表 2. 1：GNSS 移動站施測與檢核時間表

Table 2. 1: Schedule of campaign-mode GNSS surveying, supervising and validation.

測量月份	點位數量	地區	檢核點數	中興測量	檢核結果細項說明
				施測日期	檢核日期
3	74	臺北	**9**	2023/03/20 ~ 2023/03/29	2023/03/30、2023/04/06
4	34	恆春	**5**	2023/04/16 ~ 2023/04/19	2023/04/18
5	84	桃竹苗	**16**	2023/05/15 ~ 2023/05/24	2023/05/15、2023/5/24 ~ 2023/5/25、2023/5/30
6	179	嘉南（含南科）	**20**	2023/06/12 ~ 2023/06/30	2023/7/3-6
7	121	高屏（含橋頭）	**15**	2023/07/12 ~ 2023/7/25	2023/7/31 ~ 2023/8/2
8	151	中部	**20**	2023/8/14 ~ 2023/8/31	2023/8/21 ~ 2023/8/23、2023/8/28
9	88	花東	**14**	2023/9/18 ~ 2023/9/28	2023/9/25 ~2023/9/27
10	30	宜蘭	**8**	2023/9/9、2023/10/16 ~ 2023/10/19	2023/10/23 ~ 2023/10/24

2-2-2 GNSS 移動站資料解算流程與坐標精度分析

如同 GNSS 連續站資料，在 GNSS 移動站資料解算部分，本計畫同樣採用 GipsyX 軟體求解各測站之坐標。由於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、恆春、嘉南、高屏、中部、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指出（圖 2. 12），2002 至 2023 年 E 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.0 ± 10.4 mm；N 方向為-0.0± 8.4 mm；U 方向為 0.1 ± 26.5 mm。而 2002 至 2023 年平面坐標之均方根誤差平均值為 2.9 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 8.7 mm（圖 2. 13）。

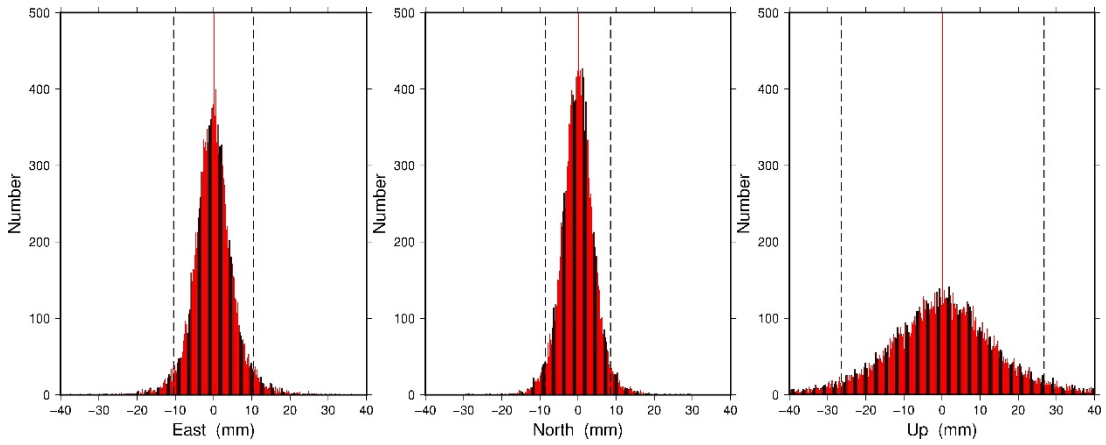


圖 2. 12：2002 至 2023 年 10 月底 GNSS 移動站點位坐標殘差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 2. 12: GNSS coordinates residuals during 2002 to October 2023. The dash lines indicate 95% confidence interval.

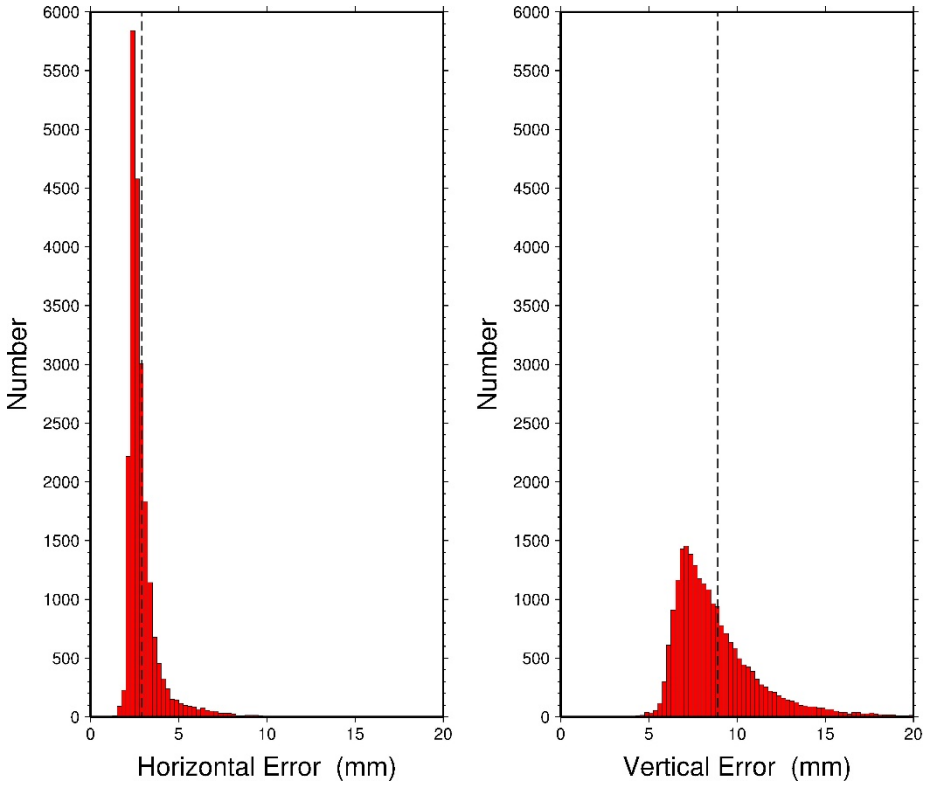


圖 2. 13：2002 至 2023 年 10 月底 GNSS 移動站點位均方根誤差分布圖，虛線表示 95%信賴區間範圍。

Figure 2. 13: GNSS RMS error during 2002 to October 2023. The dash lines indicate the average.

2-2-3 GNSS 移動站坐標時間序列擬合與可靠度分析

2-2-3-1 臺北地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之臺北地區（圖 2. 14）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 74 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。移動站觀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。

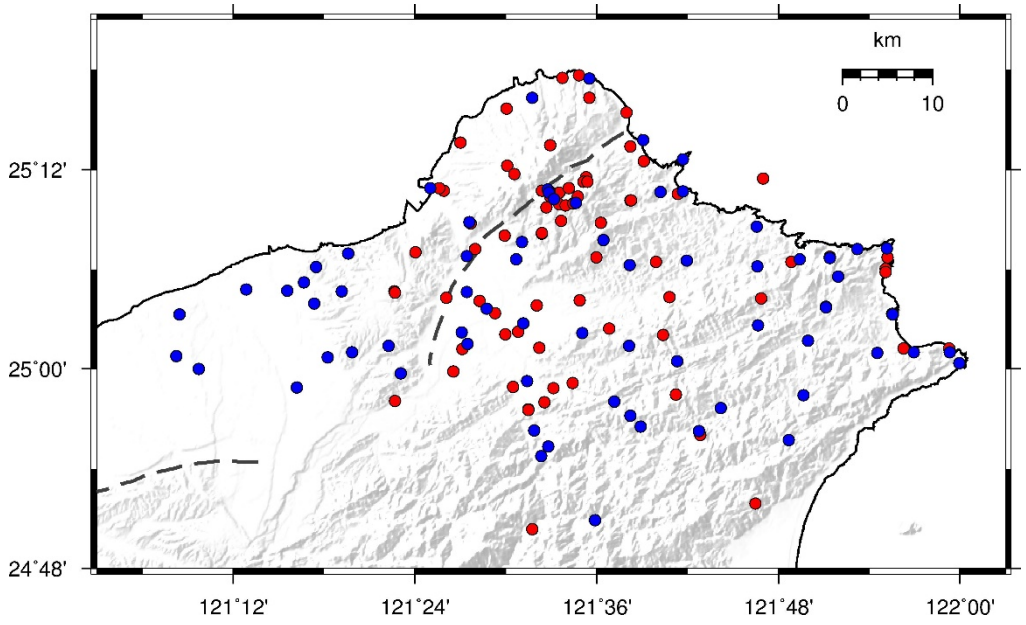


圖 2. 14：臺北地區 GNSS 連續及移動站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 14: GNSS distribution in Taipei area. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign mode GNSS stations.

在本區域 74 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 2. 14）來比較時間序列結果（圖 2. 15、圖 2. 16）。2 組測站分別為 GNSS 移動站 GB05 及連續站 YMSM（圖 2. 15）與 GNSS 移動站 GG44 及連續站 GOLI（圖 2. 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時間序列可知，臺北地區移動站與連續站坐標時間序列型態皆相符。

臺北地區個觀測點位之水平速度場如圖 2. 17 所示，黑色箭頭表示觀測時間為 2002 年至 2023 年之 GNSS 移動站速度場，由結果可知本區 2002 年至 2023 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 2.2 ~ 3.9 mm/yr。

垂直速度場如圖 2. 18 所示，由結果可知本區多為沉降，沉降速度大約落在 10 mm/yr 內。從山腳斷層兩側之水平速度場來看，斷層東側平行斷層走向分量約為朝北北東 3.0 ~ 4.0 mm/yr，斷層西側平行斷層走向分量約為朝北北東 2.0 ~ 3.0 mm/yr，顯示此斷層具有左移分量。

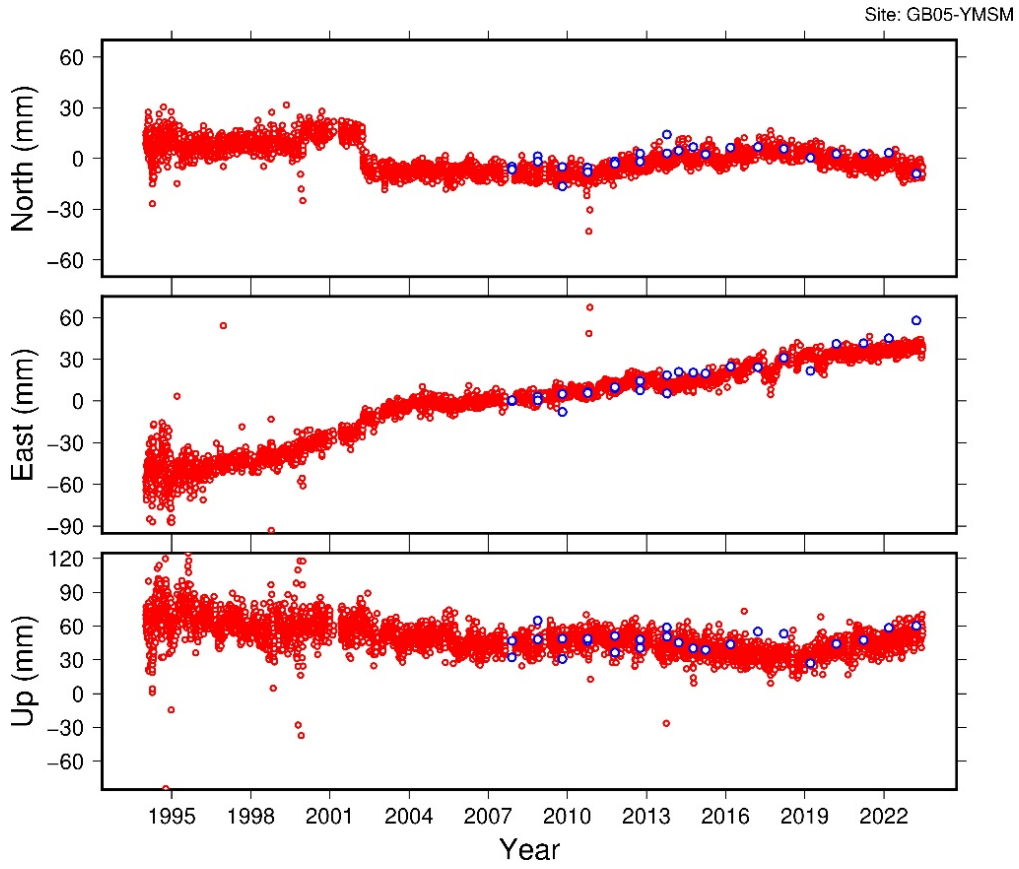


圖 2. 15：移動站 GB05 與連續站 YMSM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 15: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GB05 (blue circles) and continuous GNSS station YMSM (red circles).

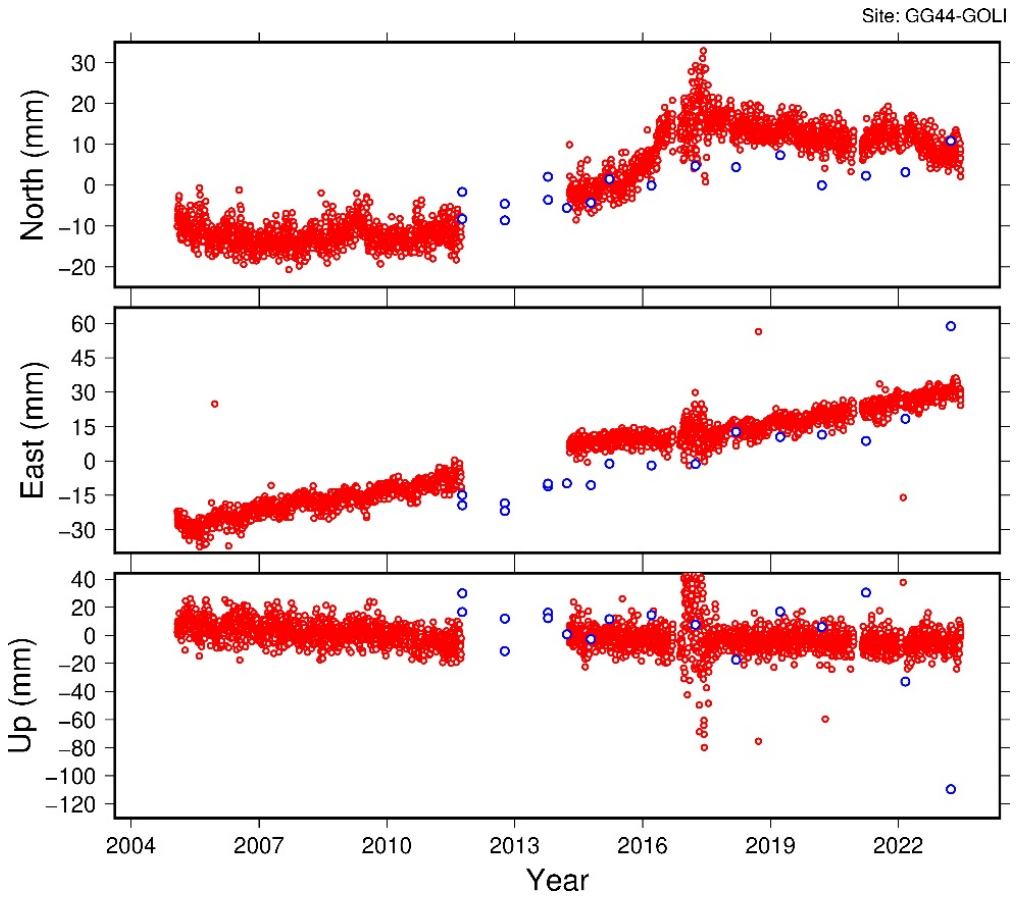


圖 2. 16：移動站 GG44 與連續站 GOLI 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 16: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GG44 (blue circles) and continuous GNSS station GOLI (red circles).

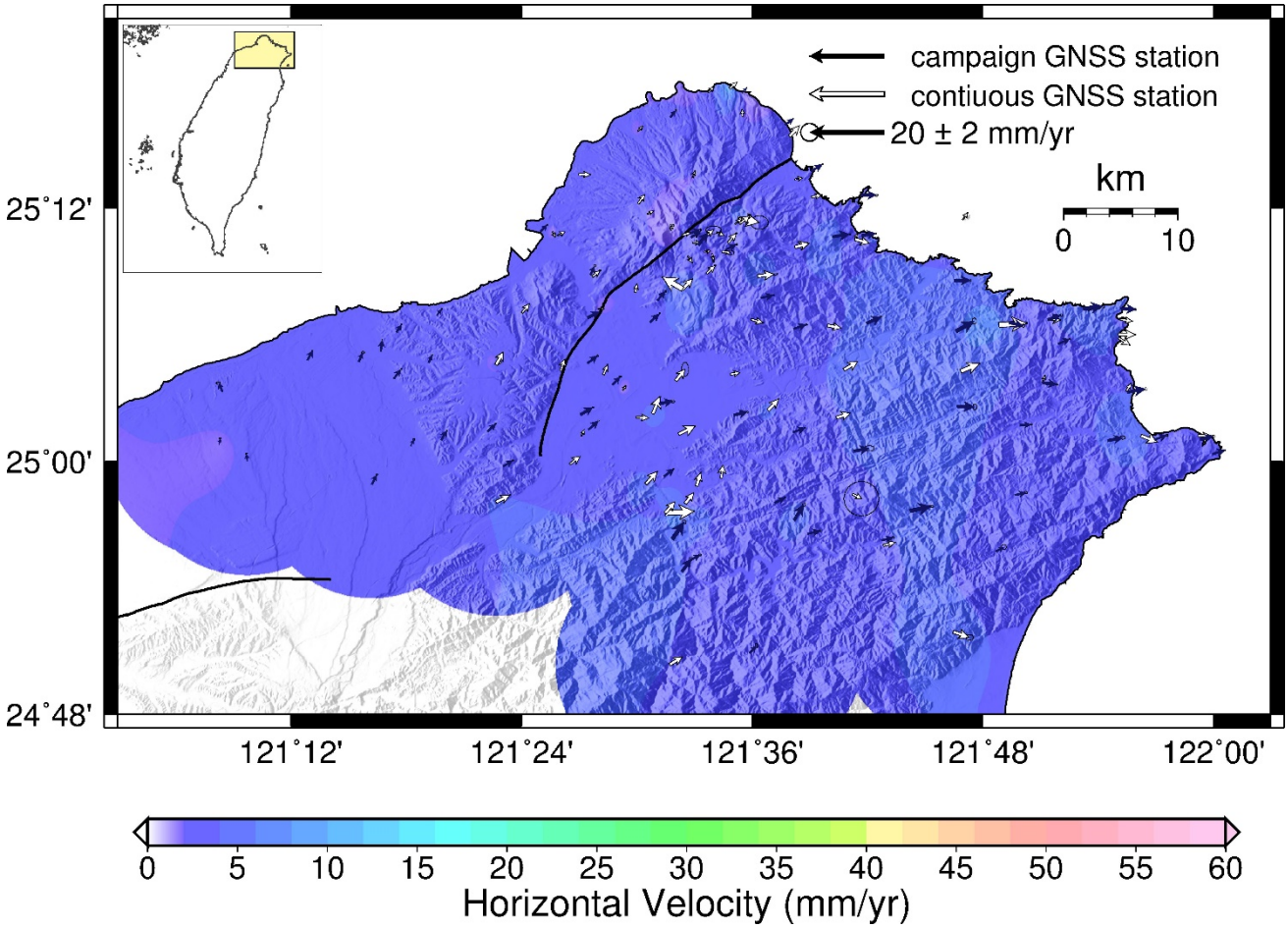


圖 2. 17：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。彩色色階為 2002 至 2023 年資料所解算之速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 17: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taipei area. The colored map represents the horizontal velocities from 2002 to 2023. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

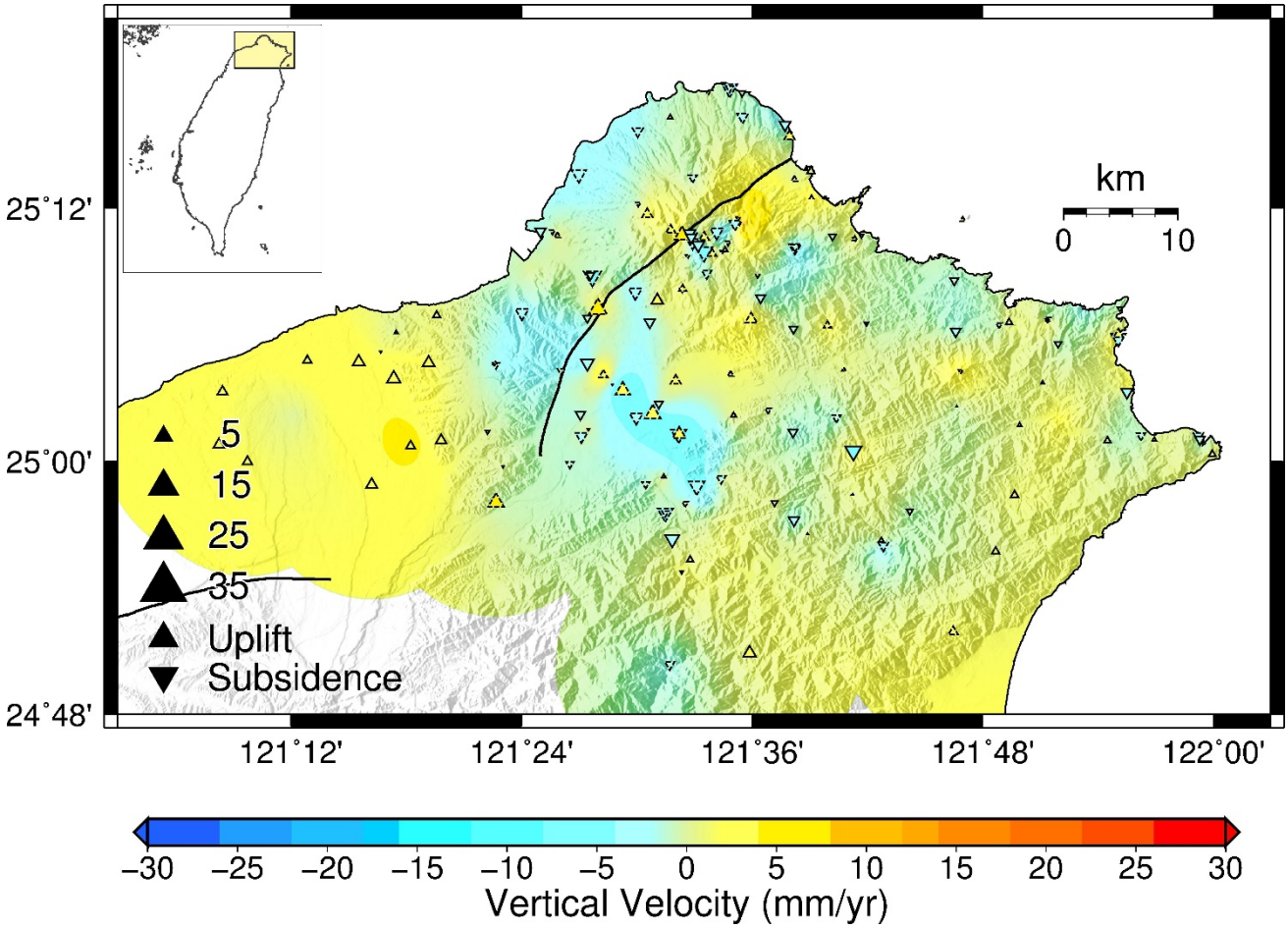


圖 2. 18：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 觀測時間為 2002 至 2023 年。

Figure 2. 18: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. 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 2023.

2-2-3-2 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 2. 19）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 84 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。移動站觀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。

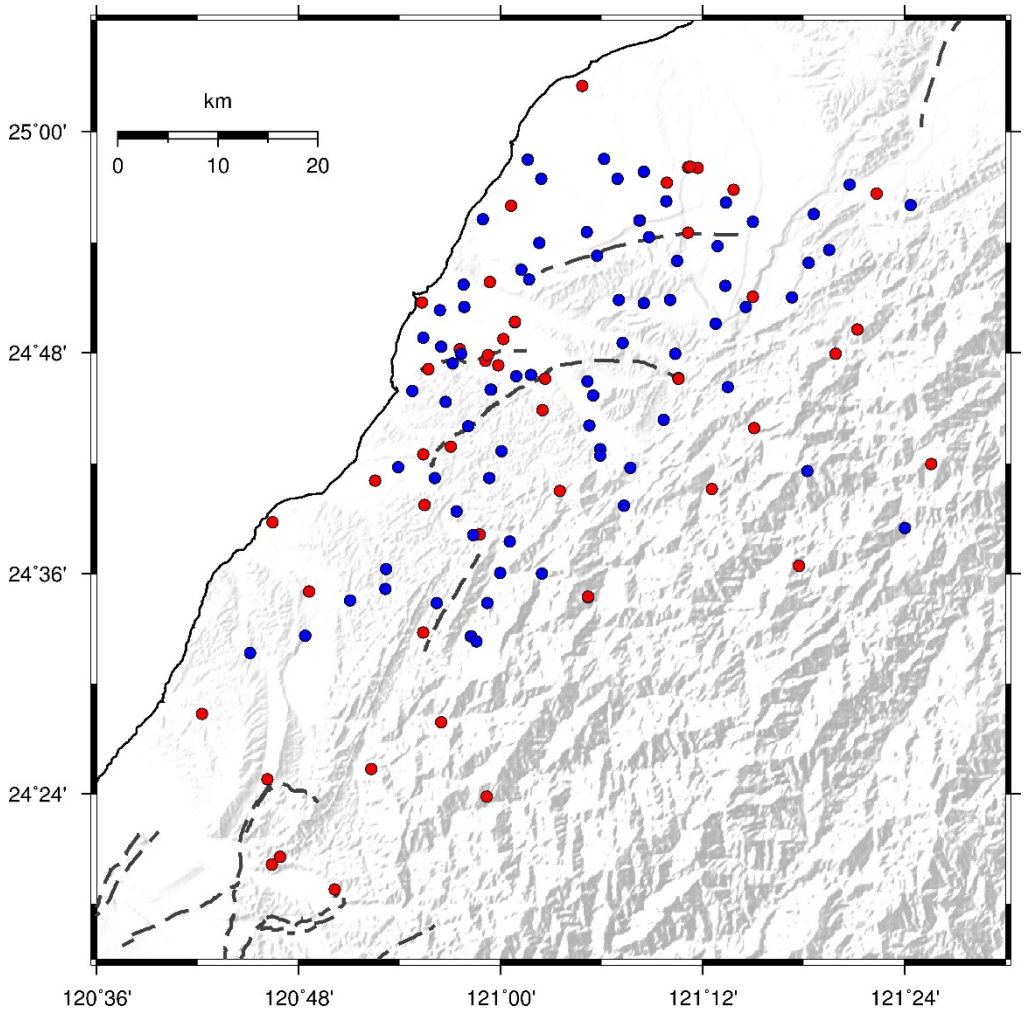


圖 2. 19：桃竹苗地區 GNSS 連續及移動站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 19: GNSS distribution in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign mode GNSS stations.

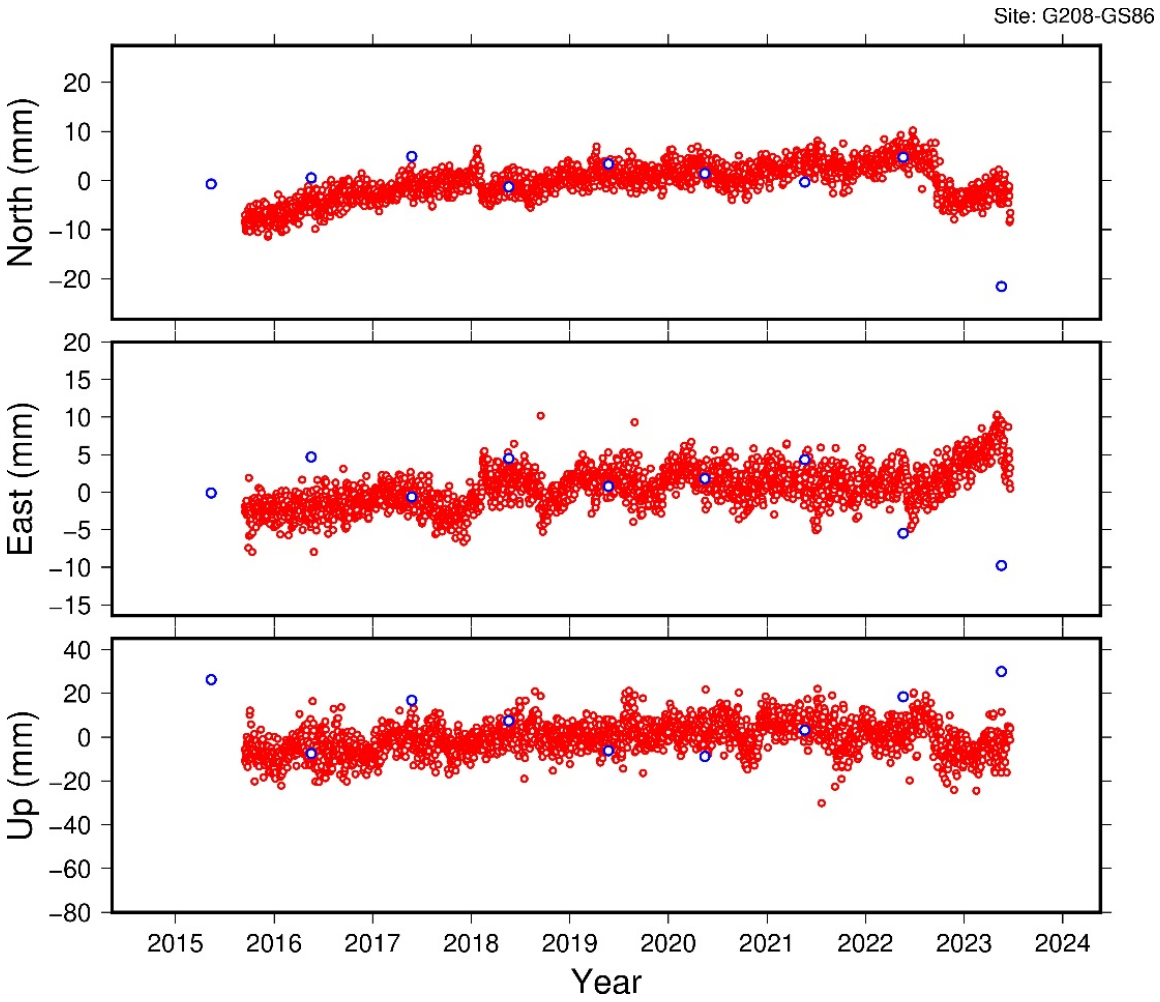


圖 2. 20：移動站 G208 與連續站 GS86 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 20: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G208 (blue circles) and continuous GNSS station GS86 (red circles).

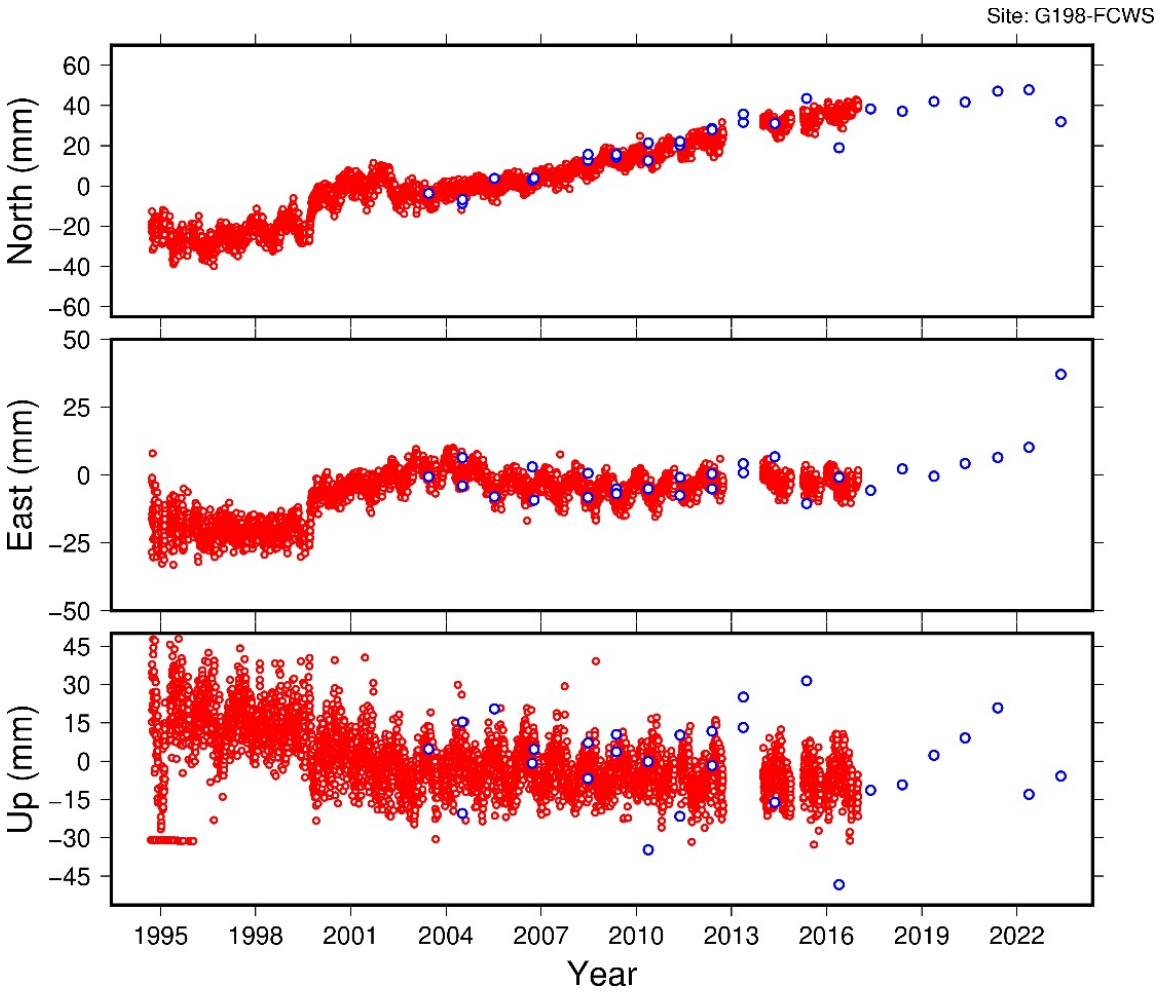


圖 2. 21：移動站 G198 與連續站 FCWS 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 21: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G198 (blue circles) and continuous GNSS station FCWS (red circles).

在本區域 84 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 2. 19）來比較時間序列結果（圖 2. 20、圖 2. 21）。2 組測站分別為 GNSS 移動站 G208 及連續站 GS86（圖 2. 20）與 GNSS 移動站 G198 及連續站 FCWS（圖 2. 21）。藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，桃竹苗地區移動站與連續站坐標時間序列型態大致相符。

桃竹苗地區各觀測點位相對於 S01R 測站之水平速度場（圖 2. 22）指出，本區於 2002 至 2023 年間多為朝西北向運動，速度量值約為 2.1 ~ 4.67 mm/yr。

相對於 S01R 測站之垂直速度場（圖 2. 23）指出，本區近沿海多為沉陷，沉降速度大約落在 3 mm/yr 內，近山區處則多為抬升，速度量值約落在 4 mm/yr 內。

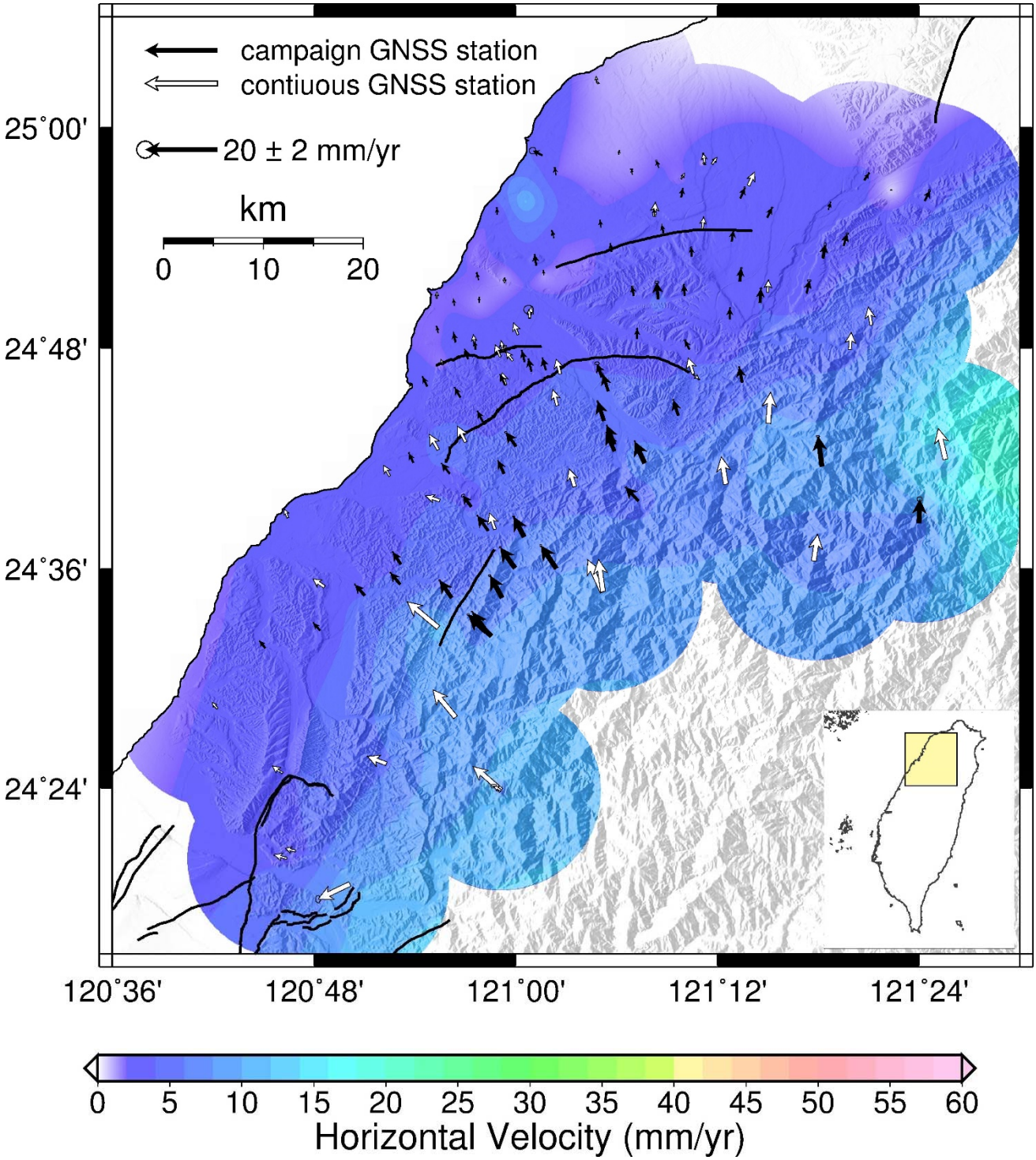


圖 2. 22：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。彩色色階為 2002 至 2023 年資料所解算之速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 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 2023. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

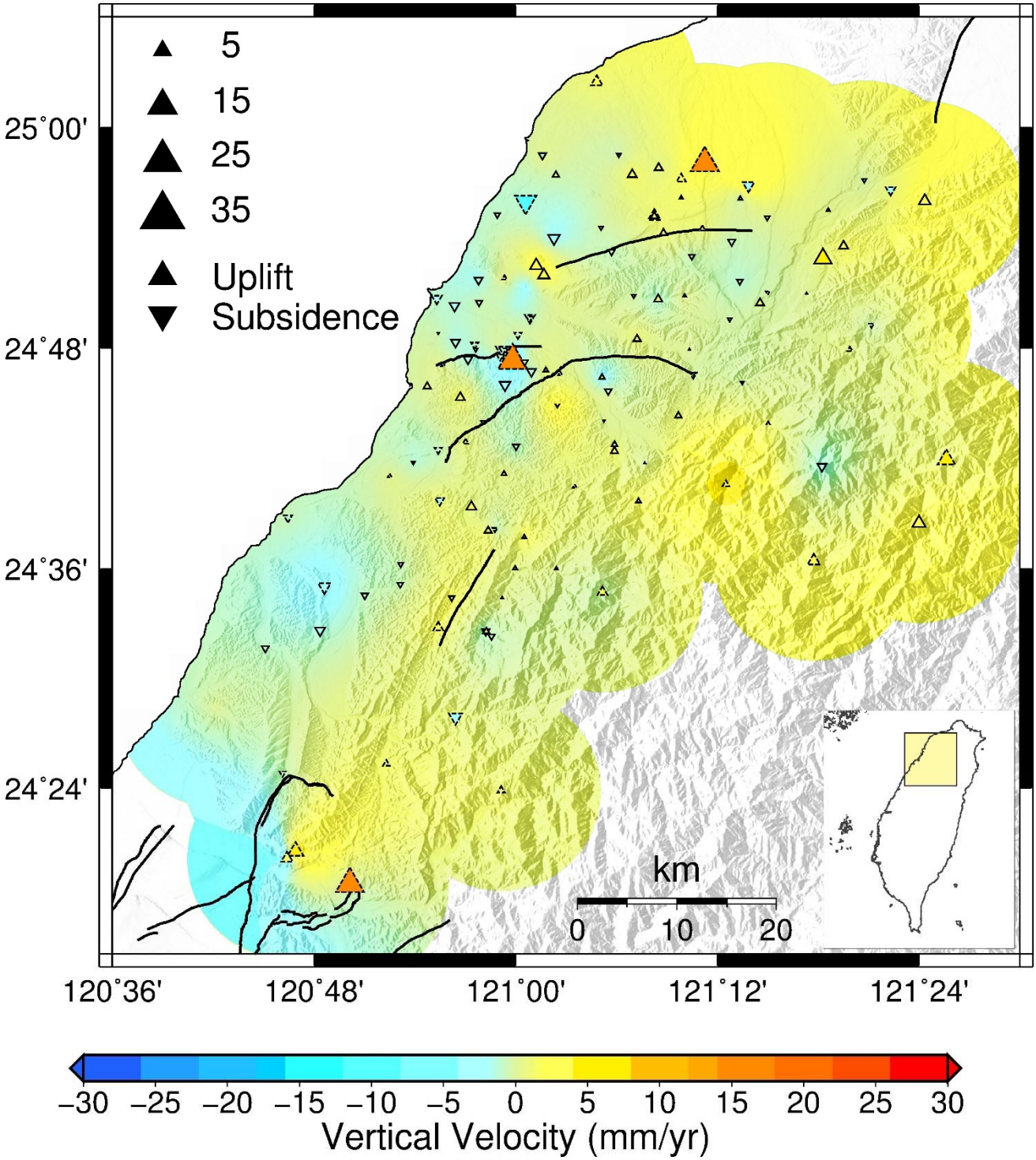


圖 2. 23：桃竹苗地區 2002 至 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 23: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-3 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 151 個站點施測與分析（圖 2. 24）。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較(圖 2. 25、圖 2. 26)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 AF24 及連續站 FNGU（圖 2. 25）與 GNSS 移動站 G964 及連續站 YUNL（圖 2. 26），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，中部地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

中部地區各觀測點位之速度場如圖 2. 27 和圖 2. 28，因 2007 年時間序列可看出有速度轉折，而 2013 年 6 月 ML 6.5 之南投地震，改變了本地區之速度場。因此在估算臺灣中部地區速度場時，本研究將速度場區分為 2002–2007 年、2007–2013 年以及 2013–2023 年三個時間段分別估算速度場。

中部地區各觀測點位之水平速度場如圖 2. 27 所示，由結果可知本區速度大致朝西北向運動，2002-2013 年速度約為 3.8 ~ 10.9 mm/yr，2013-2023 年速度約為 3.4 ~ 10.7 mm/yr。

垂直速度場如圖 2. 28，臺中地區跨斷層之垂直速度並無明顯變化。彰化、雲林地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，沉降速度值約為最大 35.0 mm/yr，進入南投山區則呈抬升，最大速度值達到約 10.0 mm/yr。

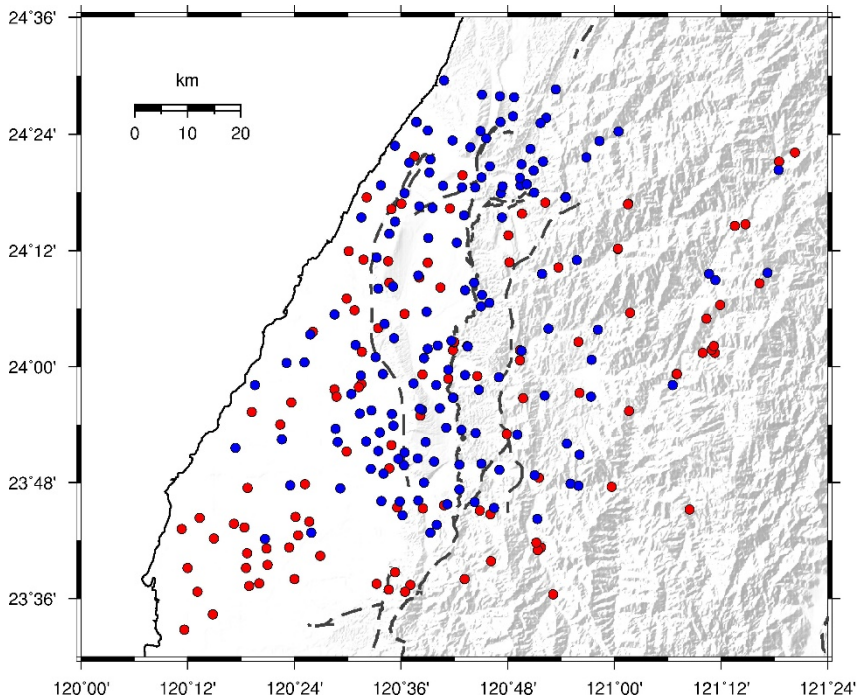


圖 2. 24：中部地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 24: GNSS distribution in the Central Taiwan areas. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign-mode GNSS stations.

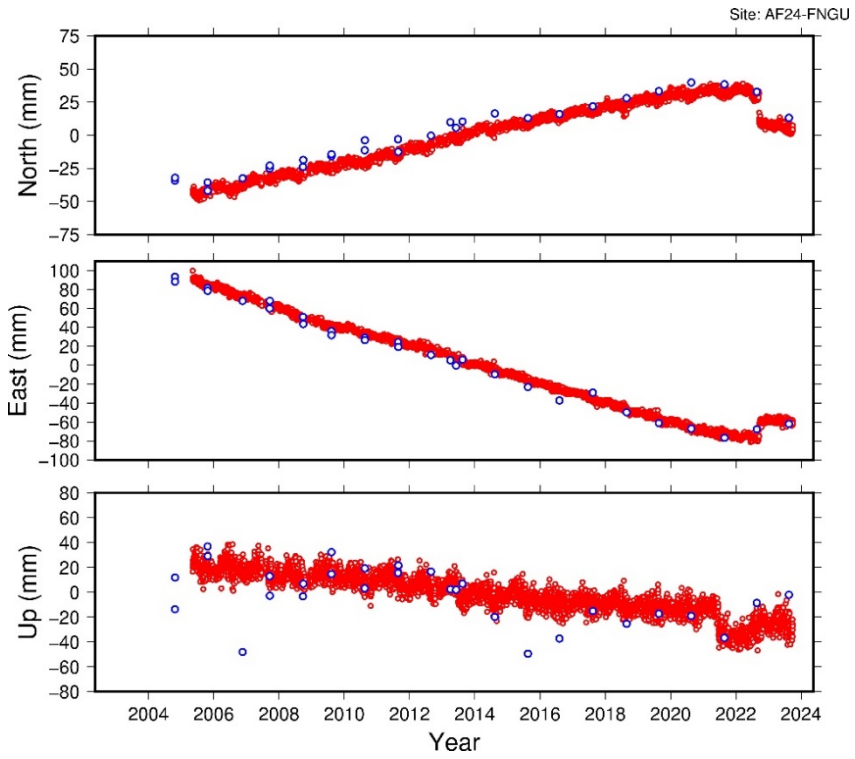


圖 2. 25：移動站 AF24 與連續站 FNGU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 25: Time series comparison between campaign-mode GNSS station AF24 (blue circles) and continuous GNSS station FNGU (red circles).

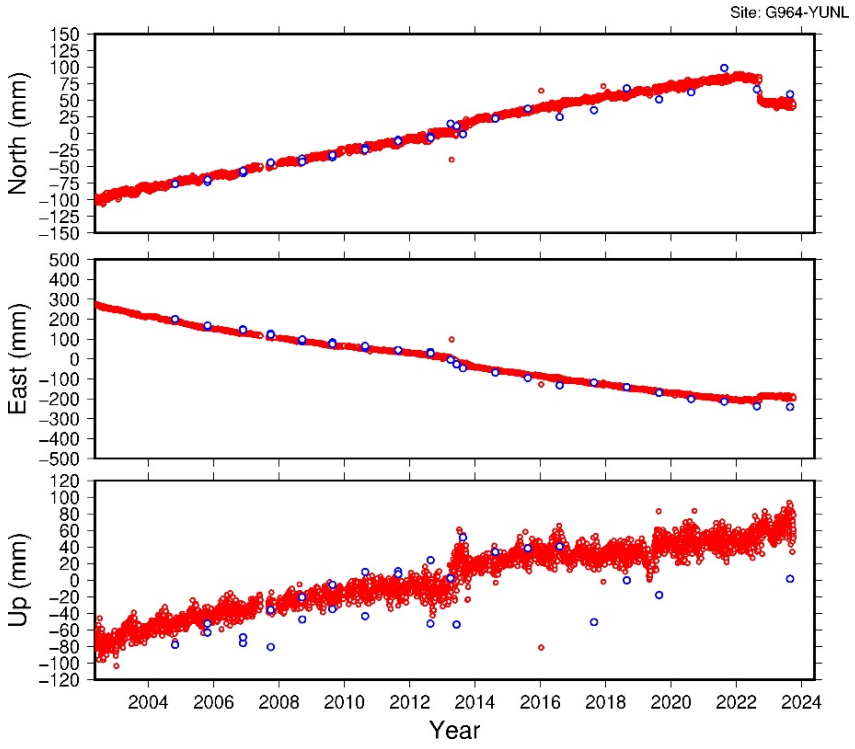


圖 2. 26：移動站 G964 與連續站 YUNL 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 26: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G964 (blue circles) and continuous GNSS station YUNL (red circles).

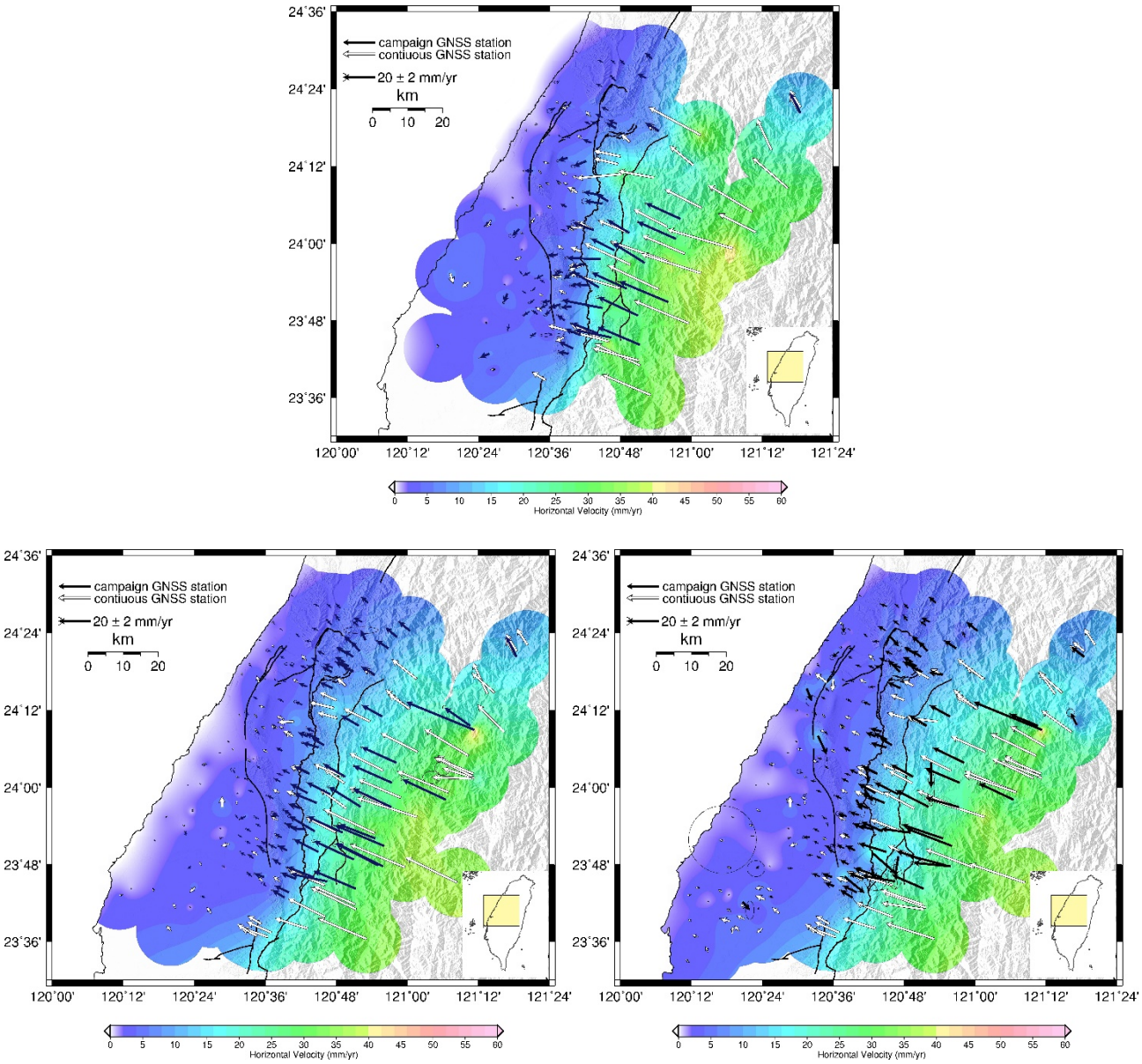


圖 2. 27：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。上圖表示 2002-2007 年速度場，左圖表示 2007-2013 年速度場，右圖表示震後 2013-2023 年速度場。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 27: Central Taiwan areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figure is the velocity field from 2002-2007; the left one is from 2007-2013; while the right one is from 2013-2023. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

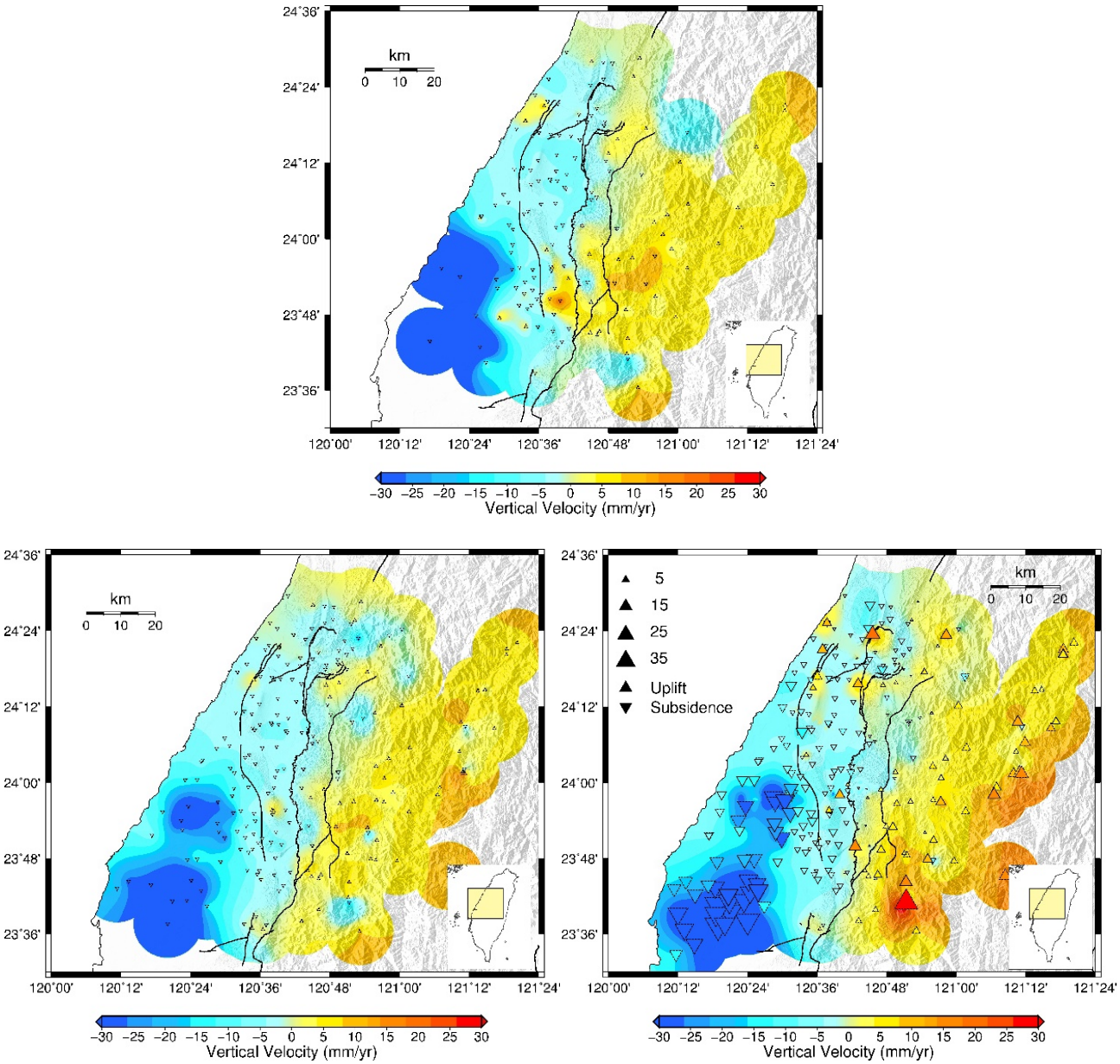


圖 2. 28：中部地區相對於（S01R）測站之垂直方向速度場。上圖表示 2002-2007 年速度場，左圖表示 2007-2013 年速度場，右圖表示震後 2013-2023 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 28: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Central Taiwan. The top figure is the velocity field from 2002-2007; the left one is from 2007-2013; while the right one is from 2013-2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-4 嘉南地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 179 個站點施測與分析（圖 2. 29）。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較(圖 2. 30、圖 2. 31)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G390 及連續站 GS88（圖 2. 30）與 GNSS 移動站 G392 及連續站 SHWA（圖 2. 31），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，高屏地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，嘉南地區移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002–2010 年、2010–2016 年以及 2016–2023 年三個時間段分別估算速度場。嘉南地區各觀測點位之速度場如圖 2. 32 和圖 2. 33，相對於 S01R 測站，嘉南地區的水平運動方向呈順時針旋轉，而越往嘉南平原其水平速度量值則越小。雲林沿海一帶沉降速度最大達到 30.0 mm/yr，推測與超抽地下水導致地層下陷有關，而嘉義地區在沿海一帶的垂直沉降速度也達到 15.0 至 20.0 mm/yr，進入嘉南地區的山區則有約 3.0 mm/yr 的抬升速度。臺南地區之沿海亦呈現約 10.0 mm/yr 之平均沉陷速率，山區則有約 7.0 mm/yr 的平均抬升速率。善化-關廟地區之垂直速度約在 0.0 至 4.0 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20.0 mm/yr 的抬升速度。

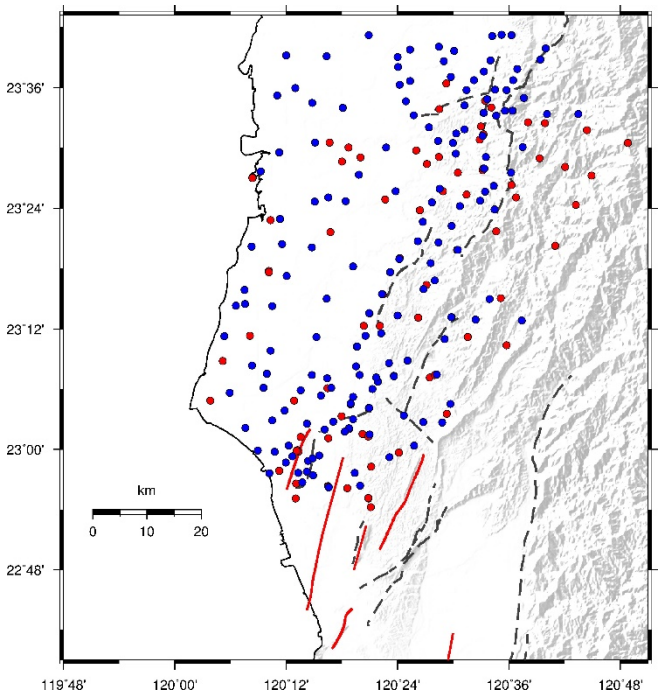


圖 2. 29：嘉南地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 29: GNSS distribution in the Chiayi and Tainan areas. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign-mode GNSS stations.

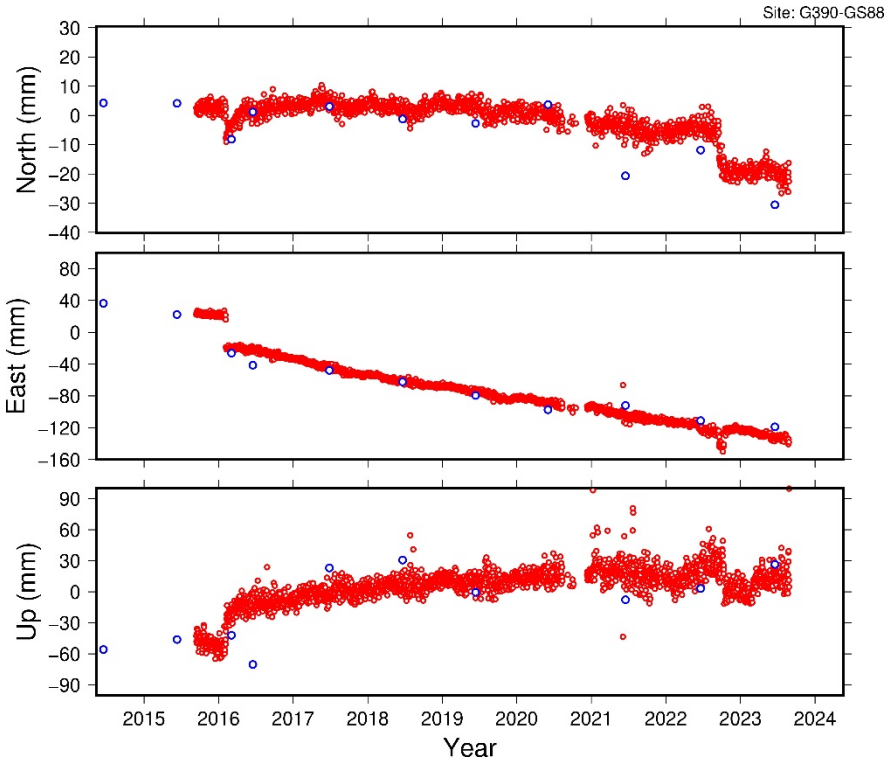


圖 2. 30：移動站 G390 與連續站 GS88 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 30: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G390(blue circles) and continuous GNSS station GS88 (red circles).

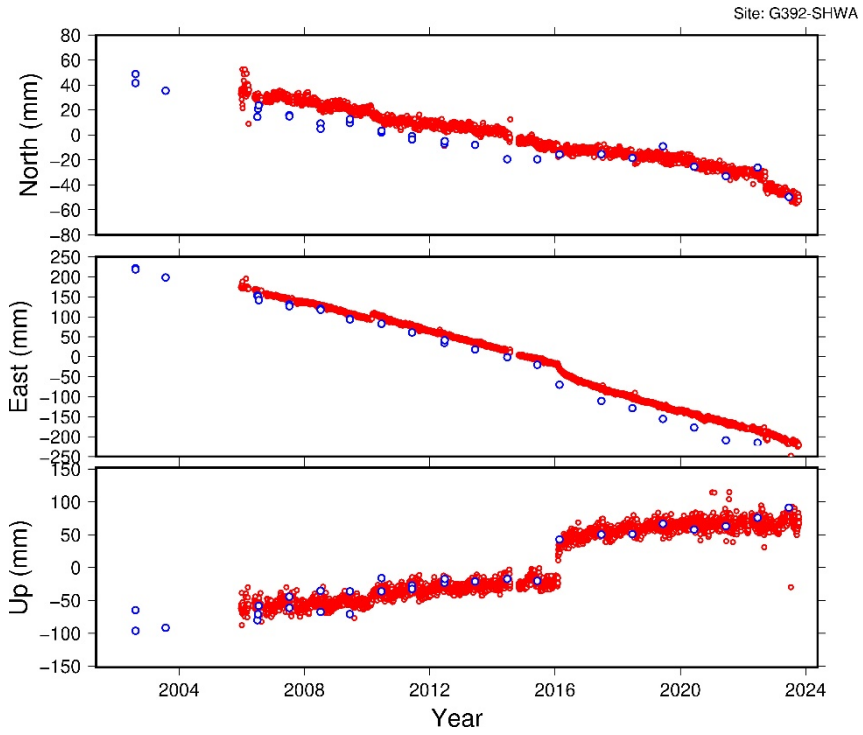


圖 2. 31：移動站 G392 與連續站 SHWA 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 31: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G392 (blue circles) and continuous GNSS station SHWA (red circles).

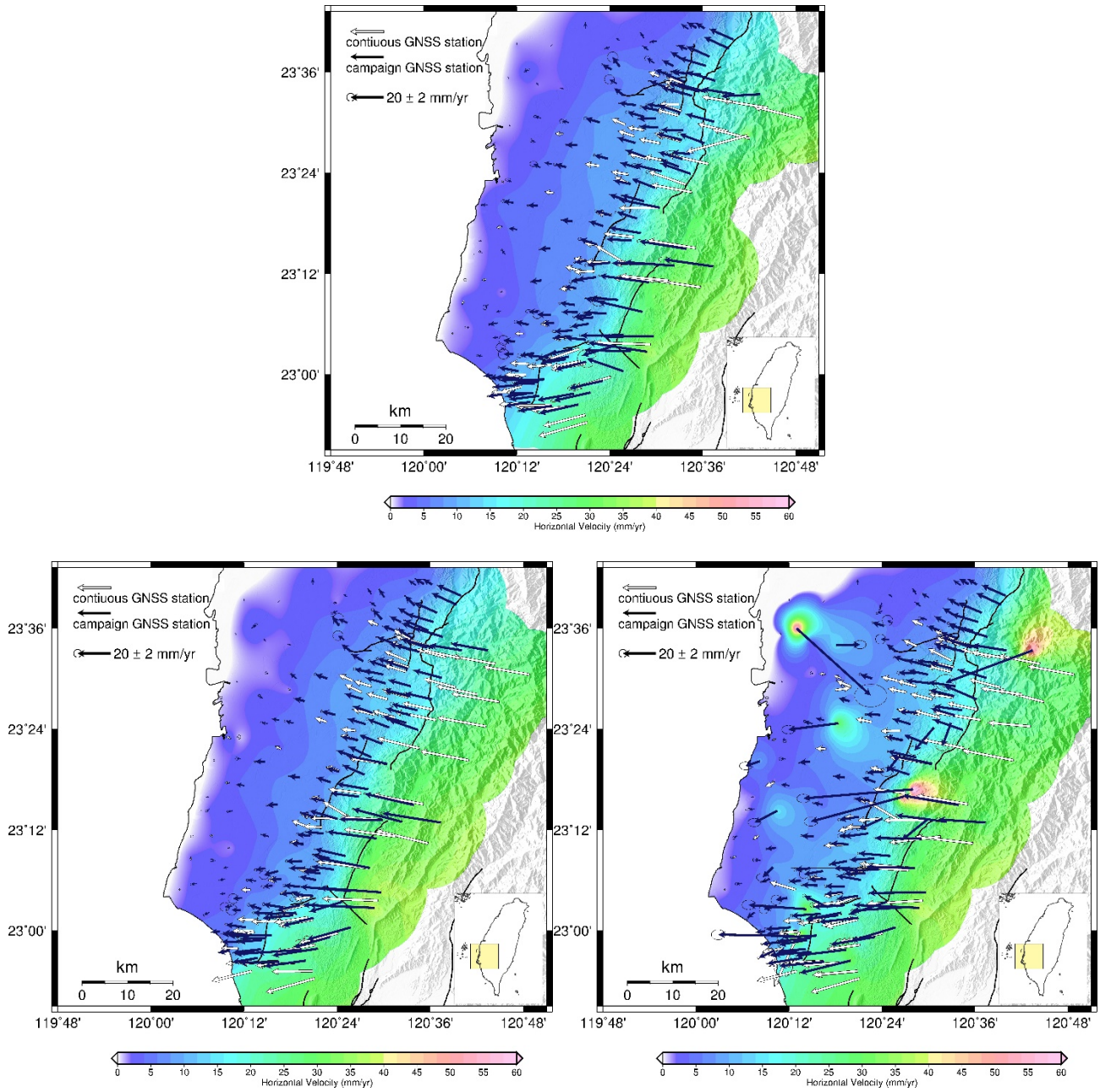


圖 2. 32：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。彩色色階為速度場分布。上圖表示 2002-2010 年速度場，左圖表示 2010-2016 年速度場，右圖表示 2016-2023 年速度場。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 32: Chiayi and Tainan areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The colored map represents the horizontal velocity. The top figure is the velocity field from 2002-2010; the left one is from 2010-2016; while the right one is from 2016-2023. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

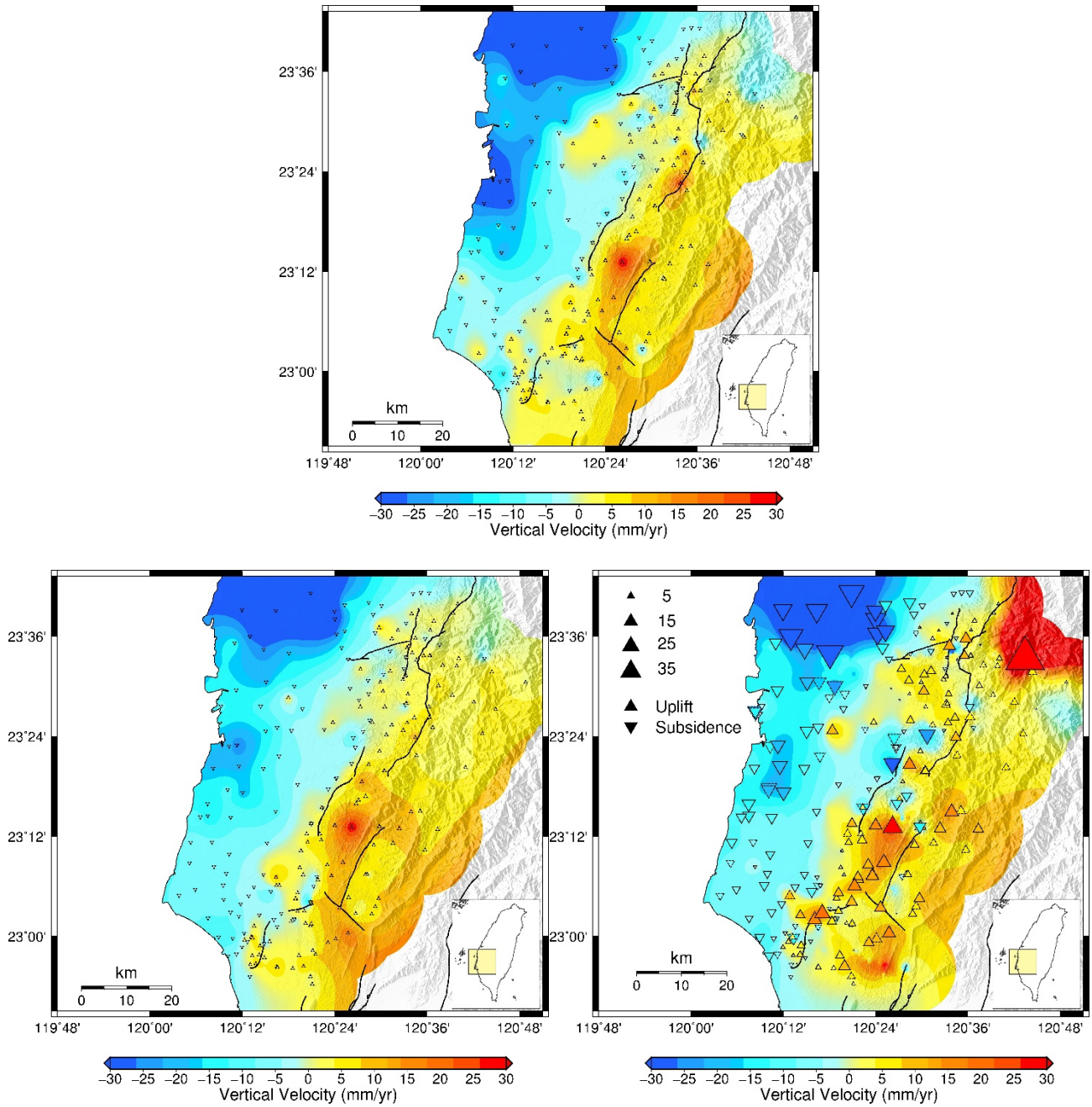


圖 2. 33：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。上圖表示 2002-2010 年速度場，左圖表示 2010-2016 年速度場，右圖表示 2016-2023 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 33: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (top figure) and 2010-2016 (left figure) and 2016-2023 (right figure) in Chiayi and Tainan areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-5 高屏地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 121 個站點施測與分析（圖 2. 34）。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較(圖 2. 35、圖 2. 36)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GC48 及連續站 CHIE（圖 2. 35）與 GNSS 移動站 G003 及連續站 GS56（圖 2. 36），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，高屏地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

高屏地區各觀測點位之速度場如圖 2. 37 和圖 2. 38，因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002–2010 年、2010–2016 年以及 2016–2023 年三個時間段分別估算速度場。高屏地區的各觀測點位相對於 S01R 測站之水平速度場（圖 2. 37）指出由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度近乎無差異。在垂直速度場部分（圖 2. 38），高屏地區沿海地區以沉降速率為主，而旗山斷層周遭有 5 至 15 mm/yr 的抬升速度，小崗山斷層於 2010 甲仙地震後周遭型態有約 0 至 5 mm/yr 的沉降速率。屏東地區在潮州斷層以西約有約 10 至 20 mm/yr 的沉陷速度，東側周遭則有約 5 至 10 mm/yr 的抬升速度。

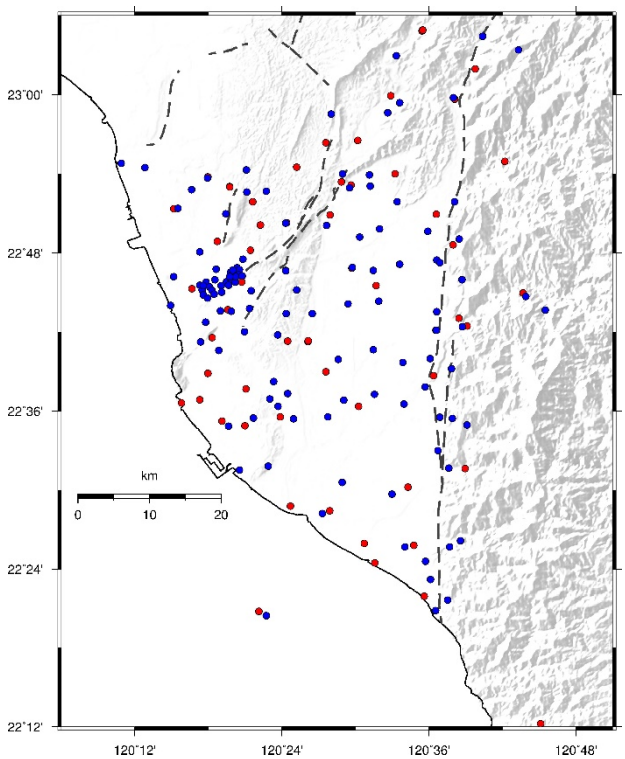


圖 2. 34：高屏地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 34: GNSS distribution in the Kaohsiung and Pingtung areas. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign-mode GNSS stations.

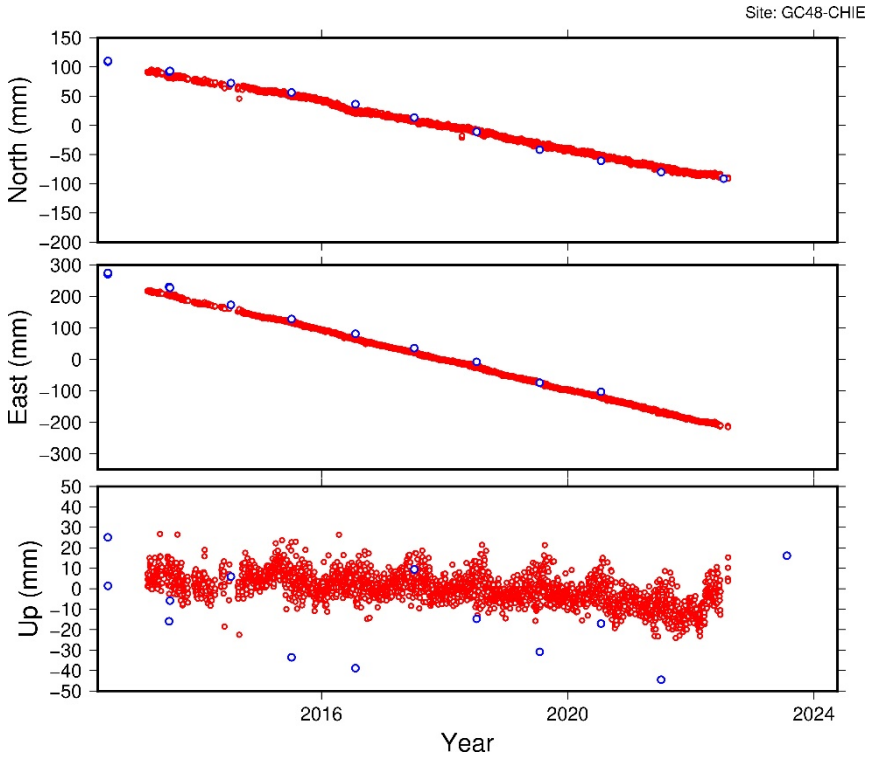


圖 2. 35：移動站 GC48 與連續站 CHIE 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 35: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GC48 (blue circles) and continuous GNSS station CHIE (red circles).

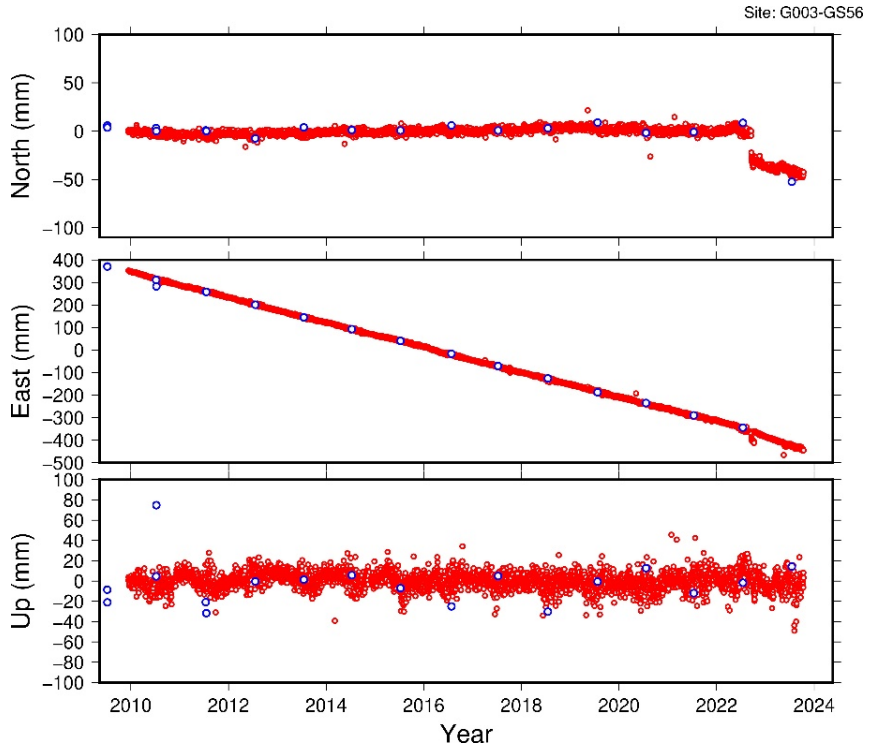


圖 2. 36：移動站 G003 與連續站 GS56 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 36: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G003 (blue circles) and continuous GNSS station GS56 (red circles).

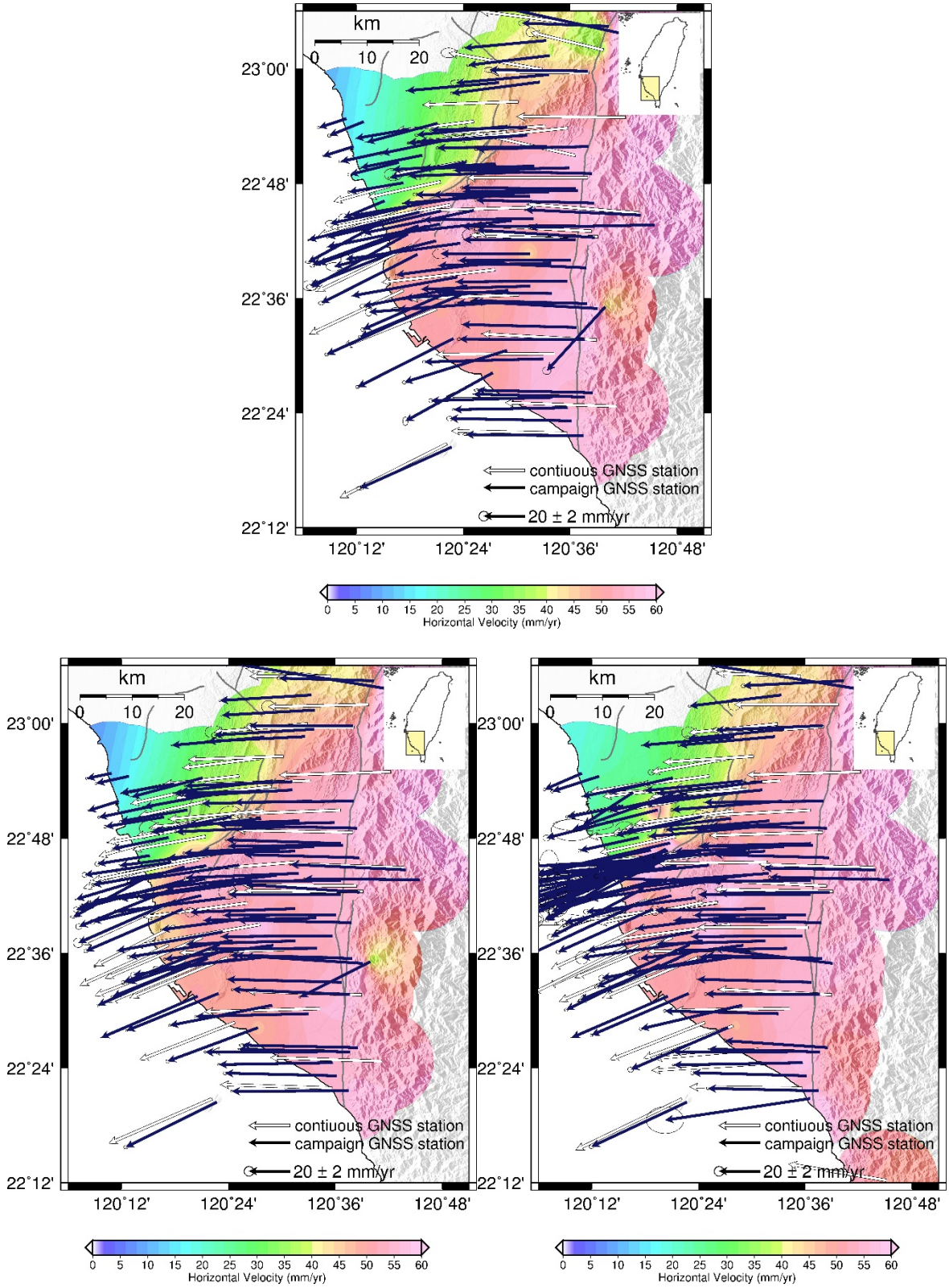


圖 2. 37：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。上圖表示 2002-2010 年速度場，左圖表示 2010-2016 年速度場，右圖表示 2016-2023 年速度場。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 37: Kaohsiung and Pingtung areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top figure is the velocity field from 2002-2010; the left one is from 2010-2016; while the right one is from 2016-2023. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

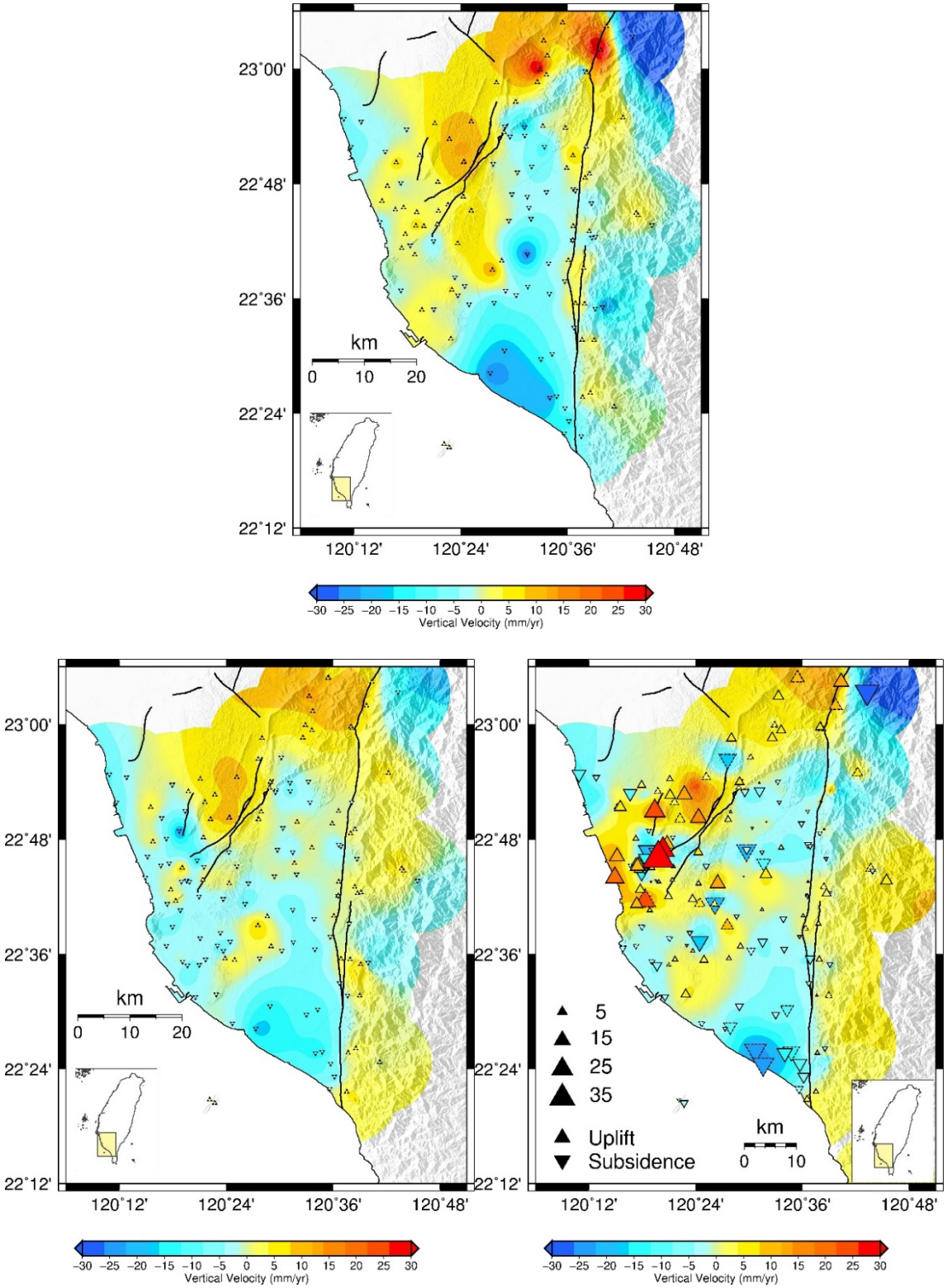


圖 2. 38：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直方向速度場。上圖表示 2002-2010 年速度場，左圖表示 2010-2016 年速度場，右圖表示 2016-2023 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 38: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (top figure) and 2010-2016 (left figure) and 2016-2023 (right figure) in Kaohsiung and Pingtung areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-6 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 2. 39）觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 34 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。移動站觀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。

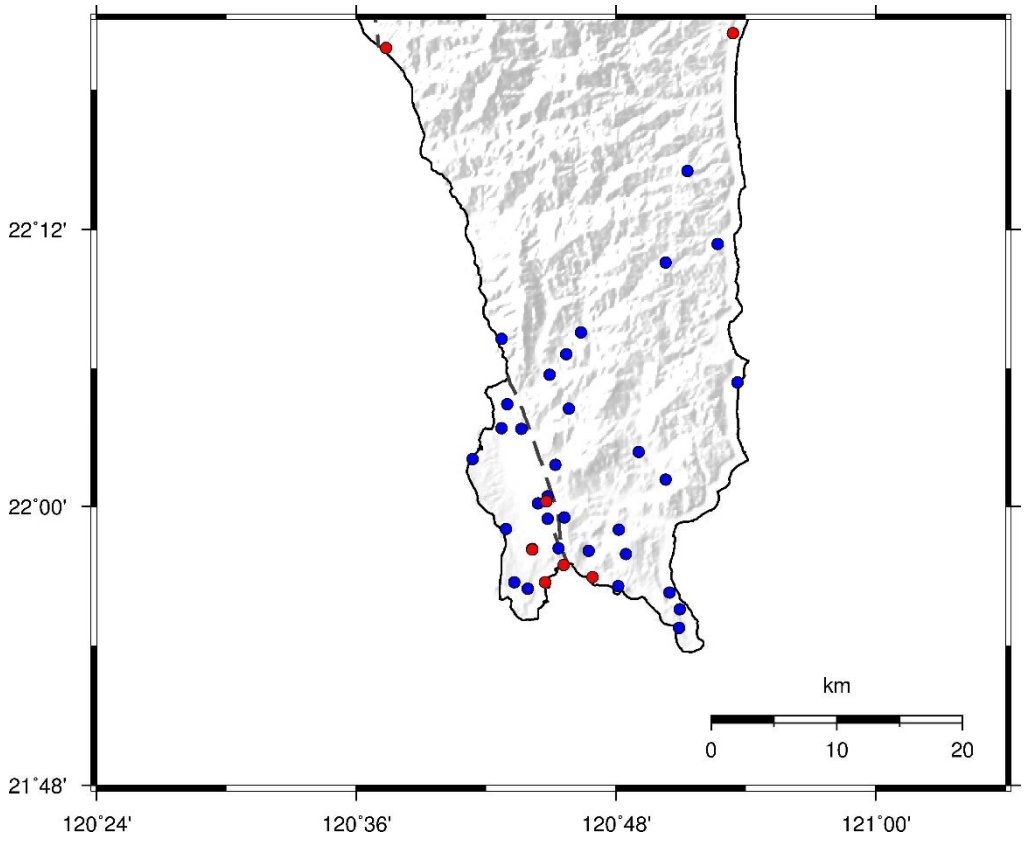


圖 2. 39：恆春地區 GNSS 連續及移動站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 39: GNSS distribution in Hengchun area. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign-mode GNSS stations.

在本區域 34 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 2. 39）來比較時間序列結果（圖 2. 40、圖 2. 41）。2 組測站分別為 GNSS 移動站 G669 及連續站 HENC（圖 2. 40）與 GNSS 移動站 G643 及連續站 KDNM（圖 2. 41），藉由移動站與該地區連續站解算結果之時間序列可知，恆春地區的移動站在水平分量和垂直分量上皆與連續站趨勢相近。

恆春地區各個觀測點位之水平速度場如圖 2. 42 所示，2002 年至 2016 年屏東外海地震前之速度場量值為 50.5 ~ 55.6 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年的速度場量值為 48.6 ~ 54.3 mm/yr，2010 年至 2016 年速度場量值為 46.7 ~ 50.9 mm/yr，2016 年至今速度場量值為 41.9 ~ 56.7 mm/yr。

恆春地區各個觀測點位之垂直速度場如圖 2. 43 所示，以斷層東邊約兩公里為分界，於 2010 年以後，西側為沉陷、東側為抬升。此現象或許可說明在 2006 年震後至 2023 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

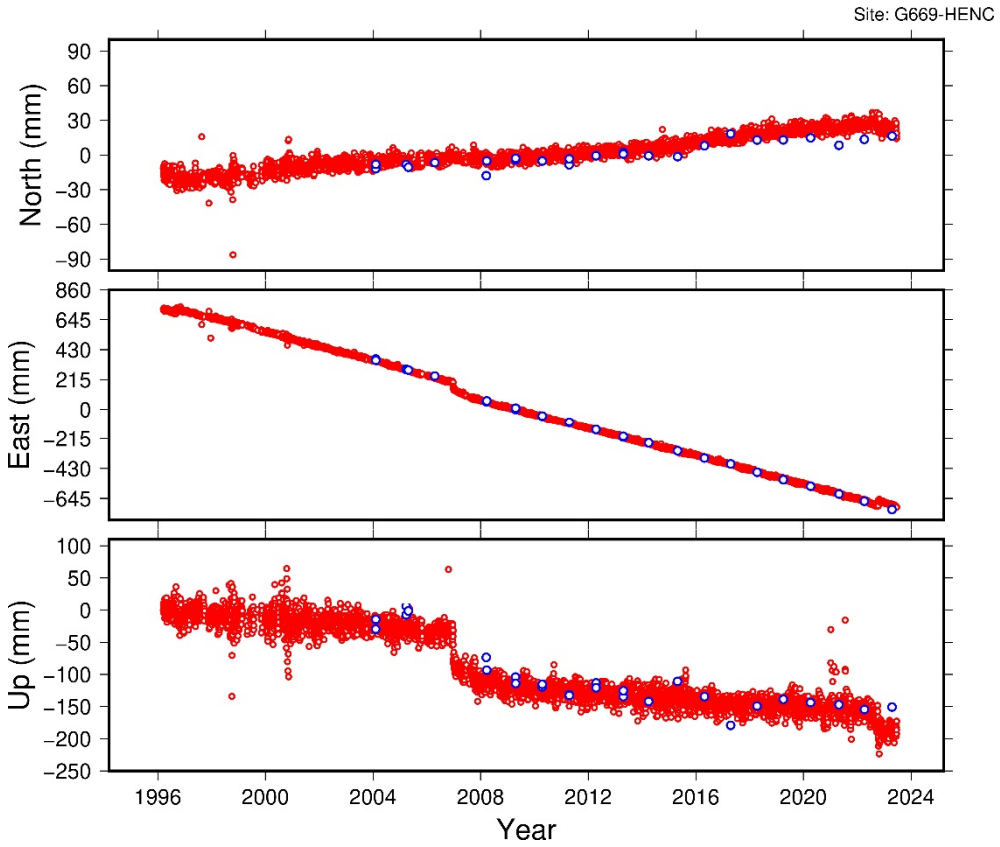


圖 2. 40：移動站 G669 與連續站 HENC 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 40: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G669 (blue circles) and continuous GNSS station HENC (red circles).

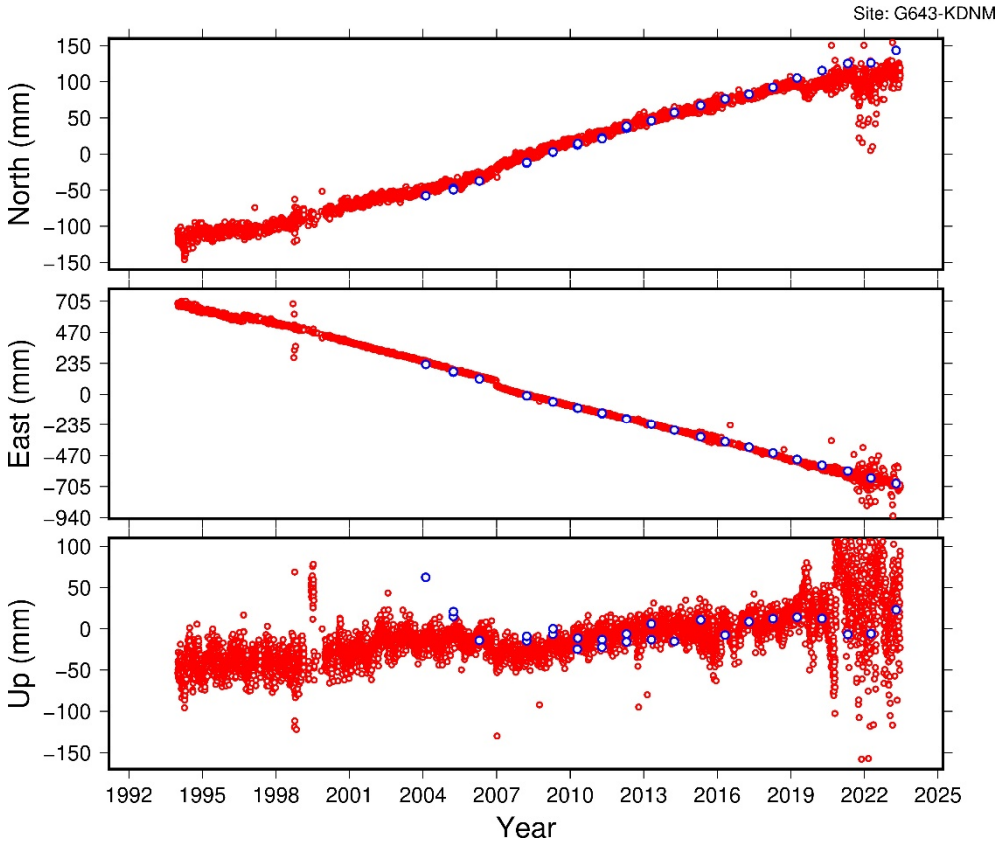


圖 2. 41：移動站 G643 與連續站 KDNM 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 41: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G643 (blue circles) and continuous GNSS station KDNM (red circles).

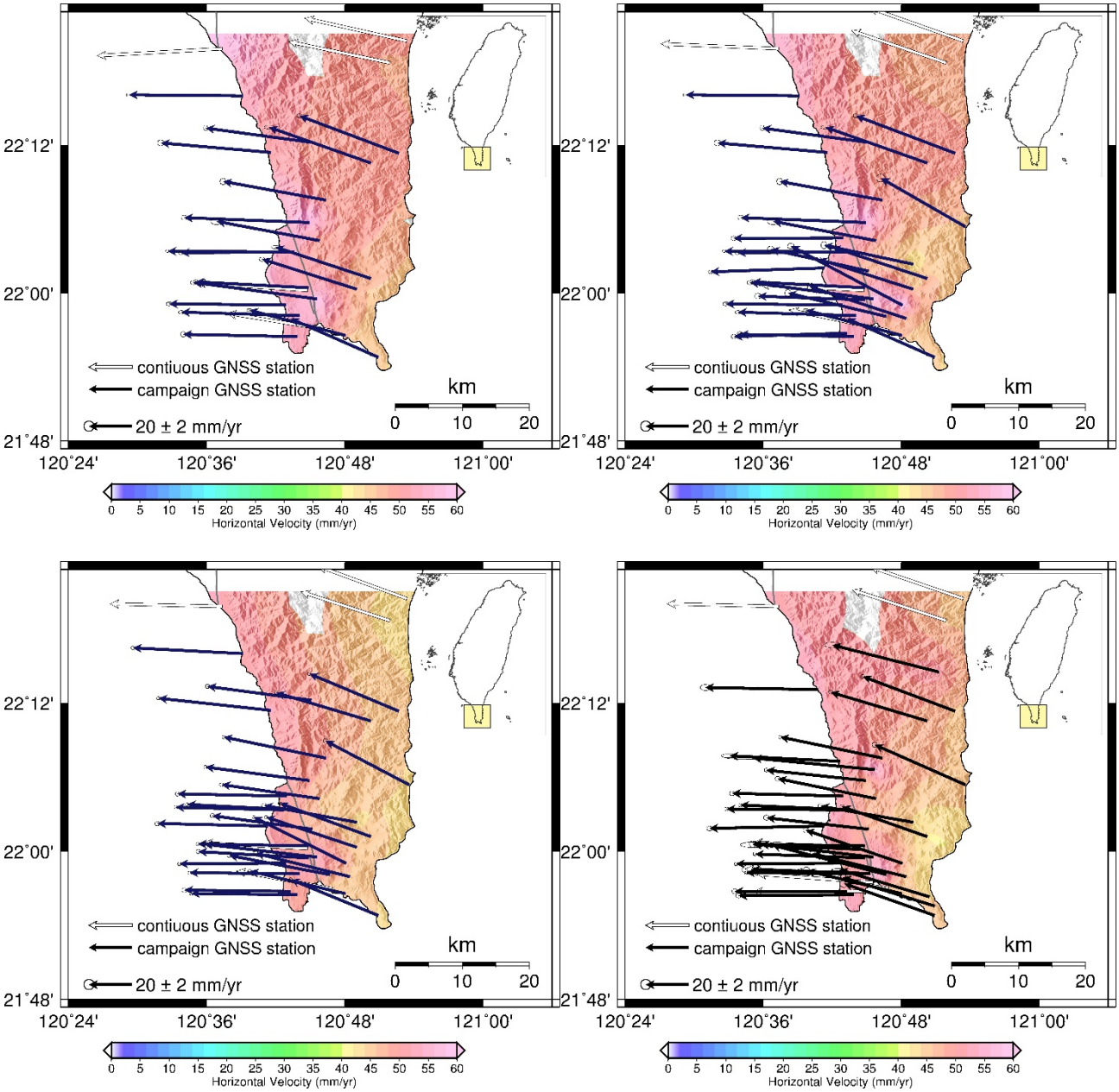


圖 2. 42：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。左上表示 2002 至 2006 年屏東外海地震前速度場，右上表示 2006 年震後至 2010 年速度場，左下表示 2010 年至 2016 年速度場，右下為 2016 年至 2023 年速度場。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 42: GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hengchun area. The top left figure is the velocity field from 2002 to 2006 Pingtung offshore earthquake; the top right one is the velocity field from 2006 event to 2010; the bottom left is the 2010 to 2016 velocity field; the bottom right is the 2016 to 2023 velocity field. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

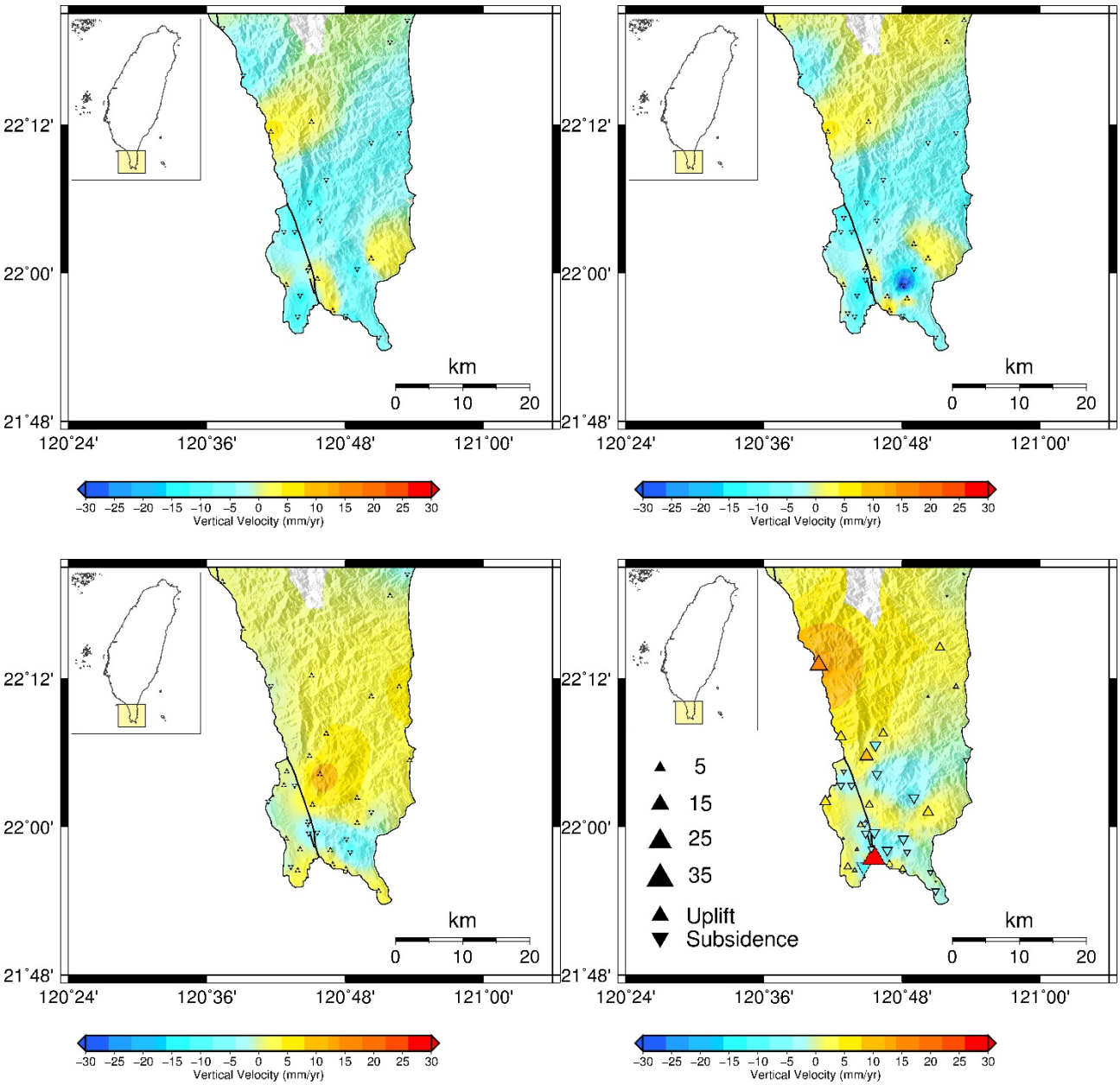


圖 2. 43：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。左上表示 2002 至 2006 年屏東外海地震前速度場，右上表示 2006 年震後至 2010 年速度場，左下表示 2010 年至 2016 年速度場，右下為 2016 年至 2023 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 43: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hengchun area. The top left figure is the velocity field from 2002 to 2006 Pingtung offshore earthquake; the top right one is velocity field between 2006 event and 2010; the bottom left is the 2010 to 2016 velocity field; the bottom right is the 2016 to 2023 velocity field. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-7 花東地區 GNSS 觀測網

今年度對已完成測量之花東地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 88 個站點施測與分析（圖 2.44）。藉由高時間解析之 GNSS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GNSS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站觀測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較(圖 2.45、圖 2.46)。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 GE64 及連續站 PEPU（圖 2.45）與 GNSS 移動站 E415 及連續站 NDH3（圖 2.46），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，花東地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

花東地區各觀測點位之速度場如圖 2.47 和圖 2.48，2013 年之瑞穗地震與 2018 年之花連地震，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 年以及 2018–2023 年三個時間段來分別估算速度場，2018 年花蓮地震後，於花蓮地區之水平速度場由西北運動轉為向西或西偏南運動，量值也較地震前小，震前約 20～30 mm/yr，地震後則為 10～15 mm/yr。

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

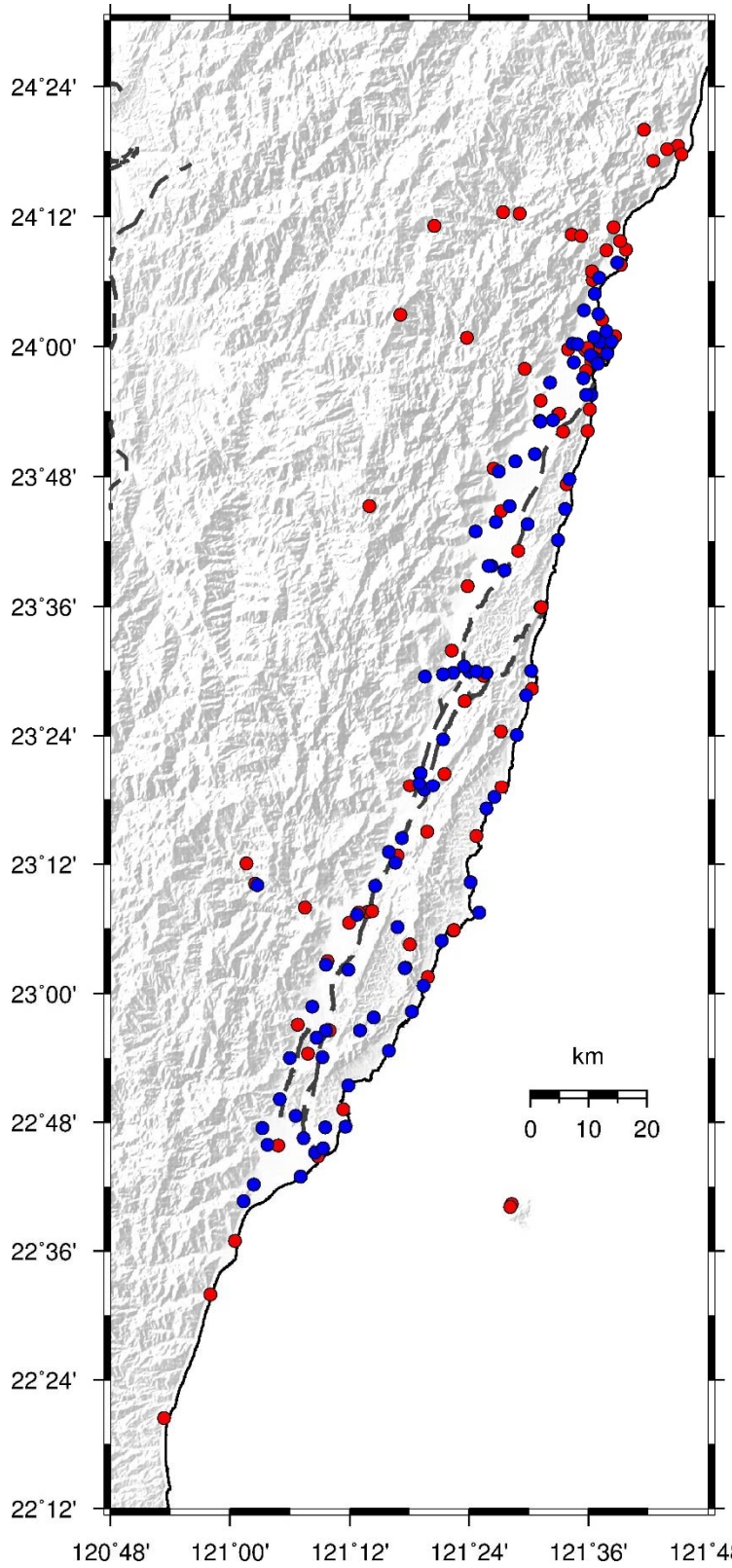


圖 2. 44：花東地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，紅色圓形為連續站，藍色圓形則為移動站。

Figure 2. 44: GNSS distribution in the Eastern areas. Red circles are continuous GNSS stations; blue circles are campaign-mode GNSS stations.

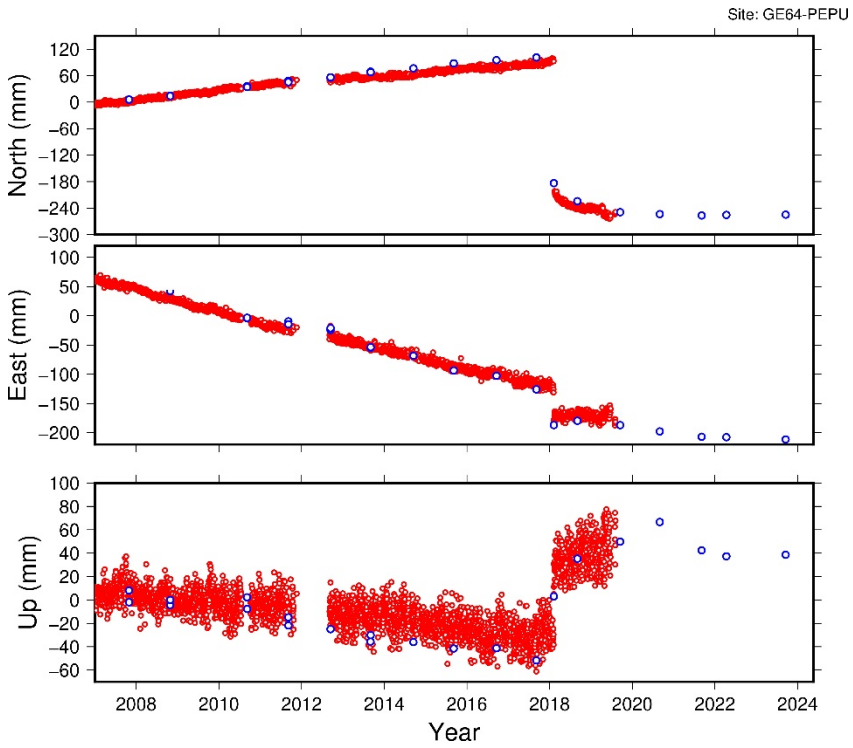


圖 2. 45：移動站 GE64 與連續站 PEPU 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 45: Time series comparison between campaign-mode GNSS station GE64 (blue circles) and continuous GNSS station PEPU (red circles).

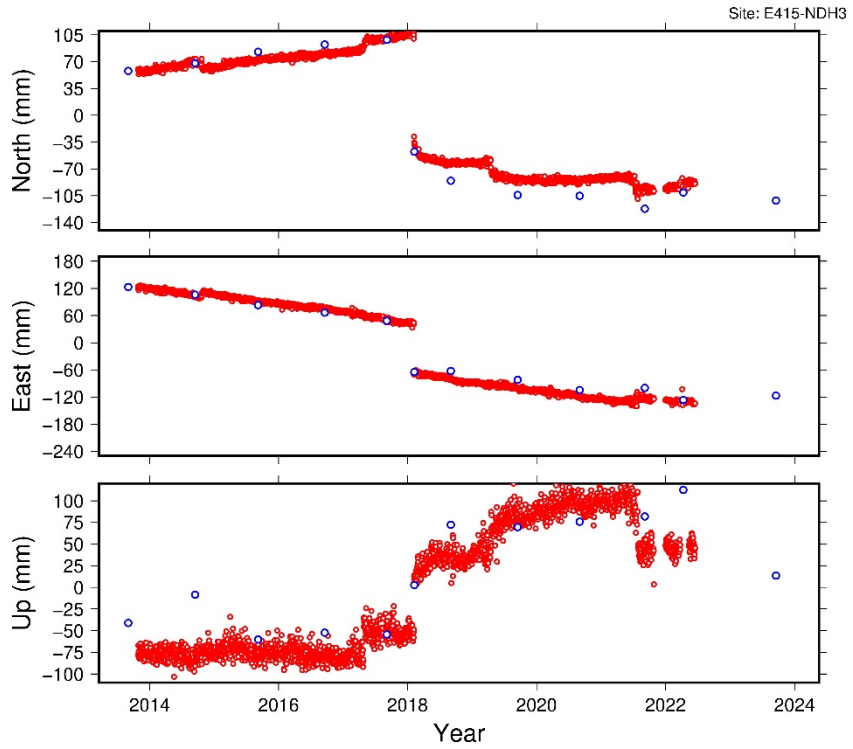


圖 2. 46：移動站 E415 與連續站 NDH3 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列，紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 46: Time series comparison between campaign-mode GNSS station E415 (blue circles) and continuous GNSS station NDH3 (red circles).

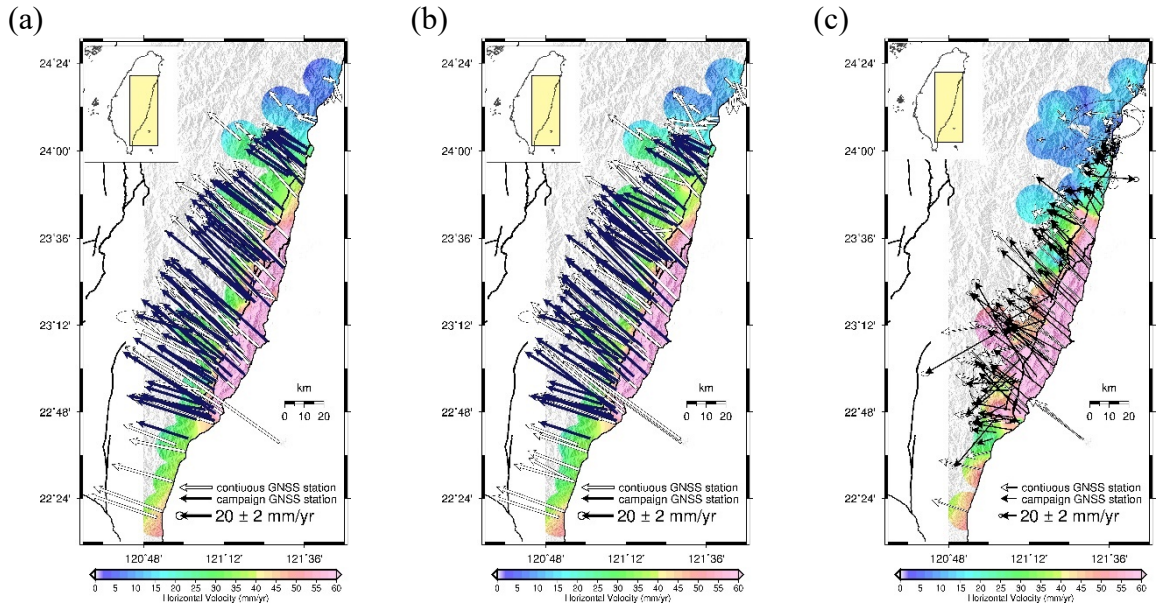


圖 2. 47：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。彩色色階為資料解算之速度場分布。（a）表示 2002-2013 年速度場，（b）表示震後 2013-2018 年速度場，（c）表示震後 2018-2023 年速度場。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 47: Eastern areas GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity. Figure (a) is the velocity field from 2002-2013; figure (b) is from 2013-2018 and figure (c) is from 2018-2023. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

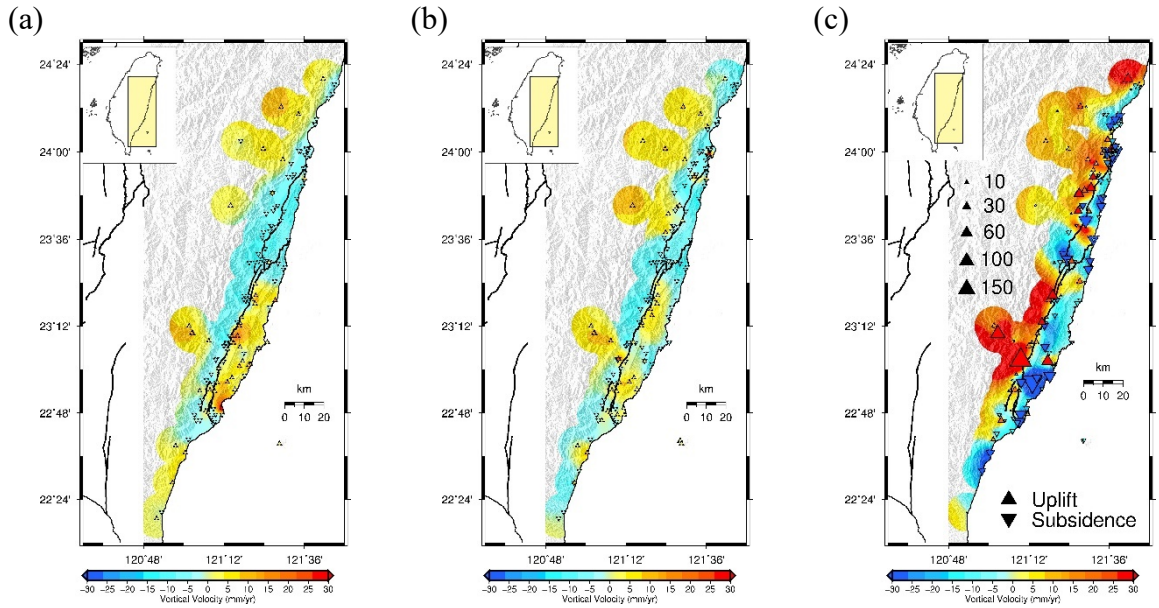


圖 2. 48：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。（a）表示 2002-2013 年速度場，（b）表示震後 2013-2018 年速度場，（c）表示震後 2018-2023 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 48: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Eastern areas. Figure (a) is the velocity field from 2002-2013; Figure (b) is from 2013-2018 and figure (c) is from 2018-2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

2-2-3-8 宜蘭地區 GNSS 觀測網

本節針對今年已完成測量之宜蘭地區觀測資料進行分析，已完成 GNSS 移動站共 30 個站點施測與分析（圖 2. 49），宜蘭地區移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

本計畫挑出 2 組 GNSS 移動站與連續站位置相近的測站進行時間序列結果比較（圖 2. 50、圖 2. 51）。這 2 組測站對分別為 GNSS 移動站 G250 及連續站 YILN（圖 2. 50）與 GNSS 移動站 GE58 及連續站 LTUN（圖 2. 51），藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，東部地區由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

宜蘭地區各觀測點位之速度場如圖 2. 52 和圖 2. 53，宜蘭地區各觀測點位之水平速度場如圖 2. 52，2004 至 2023 年速度量值 4.5 ~ 33.5 mm/yr。

垂直速度場如圖 2. 53，2004 至 2023 年在蘭陽平原垂直方向大致為沉陷，其沉陷量由北至南先增加後再減少，往南至南澳亦呈現沉陷，整體值約 0.5 ~ 26.8 mm/yr。

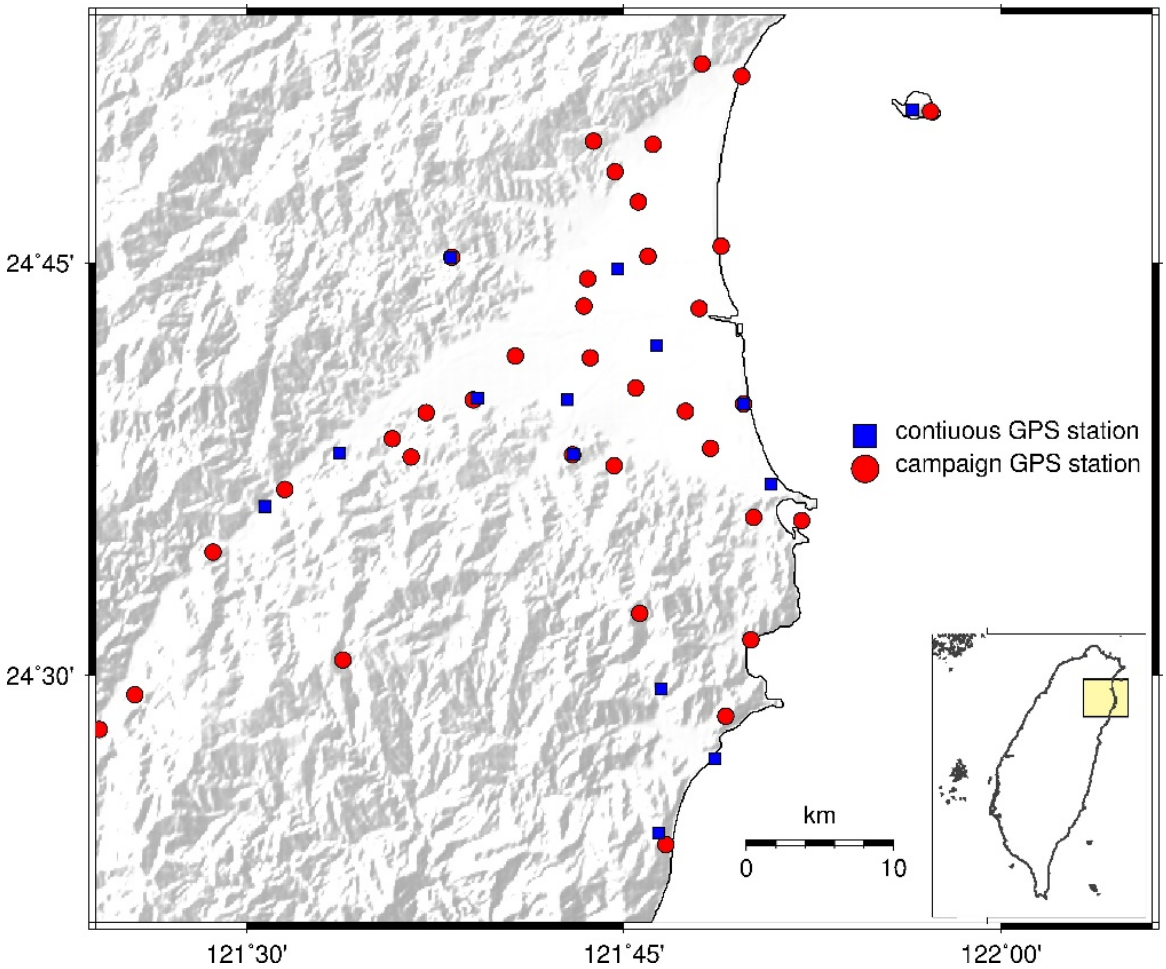


圖 2. 49：宜蘭地區 GNSS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2. 49: GNSS distribution in the Yilan areas. Blue squares are continuous GNSS stations; red circles are campaign-mode GNSS stations.

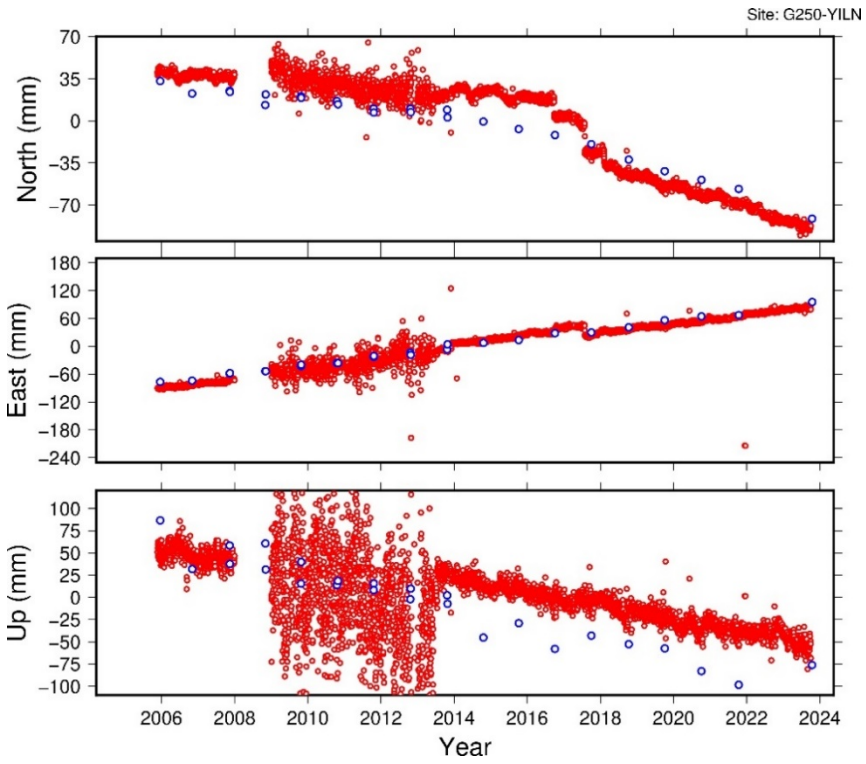


圖 2. 50：移動站 G250 與連續站 YILN 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 50: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G250 (blue circles) and continuous GNSS station YILN (red circles).

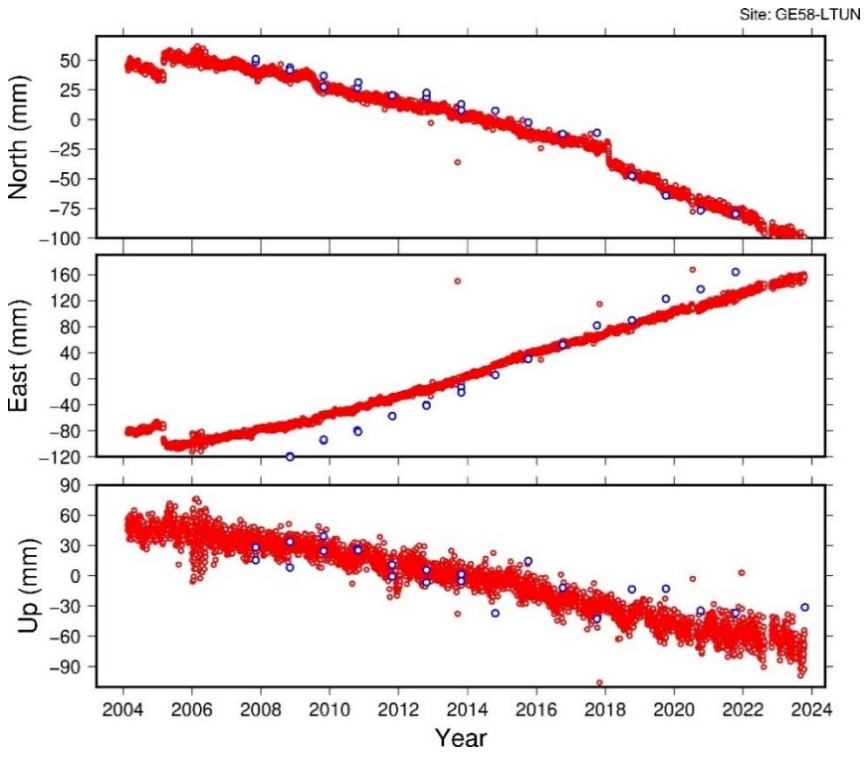


圖 2. 51：移動站 GE58 與連續站 LTUN 之時間序列比較。藍色圓圈為移動站之時間序列；紅色圓圈為連續站之時間序列。

Figure 2. 51: Time series comparison between campaign-mode GNSS station G244 (blue circles) and continuous GNSS station LTUN (red circles).

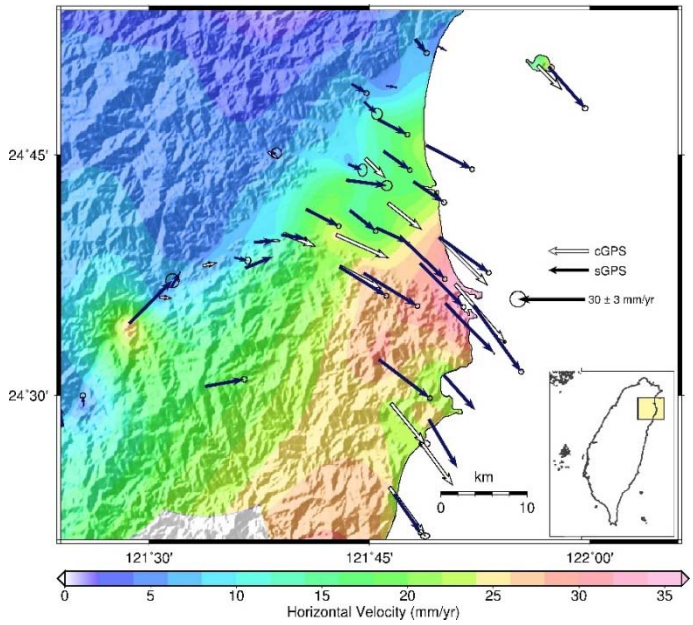


圖 2. 52：宜蘭地區 2004-2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平方向速度場。彩色色階為資料解算之速度場分布。黑色箭號為 GNSS 移動站速度場，白色箭號為 GNSS 連續站速度場。

Figure 2. 52: Yilan area GNSS horizontal velocity field from 2004 to 2023 relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities.

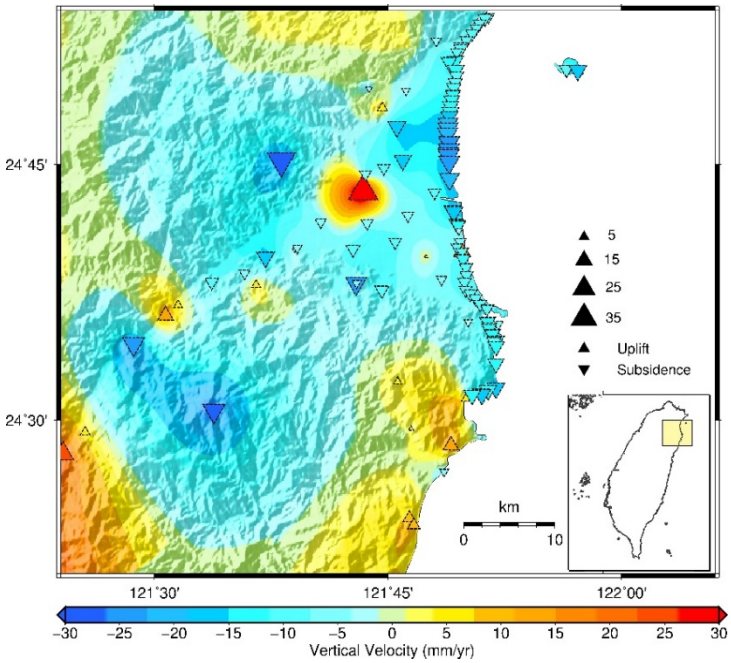


圖 2. 53：宜蘭地區 2004-2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直方向速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 2. 53: Vertical velocity field from 2004-2023 relative to Penghu Paisha (S01R) station in Yilan area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence.

2-3 精密水準測量資料檢核、解算與分析

2-3-1 精密水準測量資料檢核

2023 年 11 月底前所獲得共計 1,198 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 1,172 個測段（圖 2. 54，左圖），佔所有測段比例之 97.8 %；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 1,098 個測段，佔所有測段比例之 98.3 %（圖 2. 54，右圖）。顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

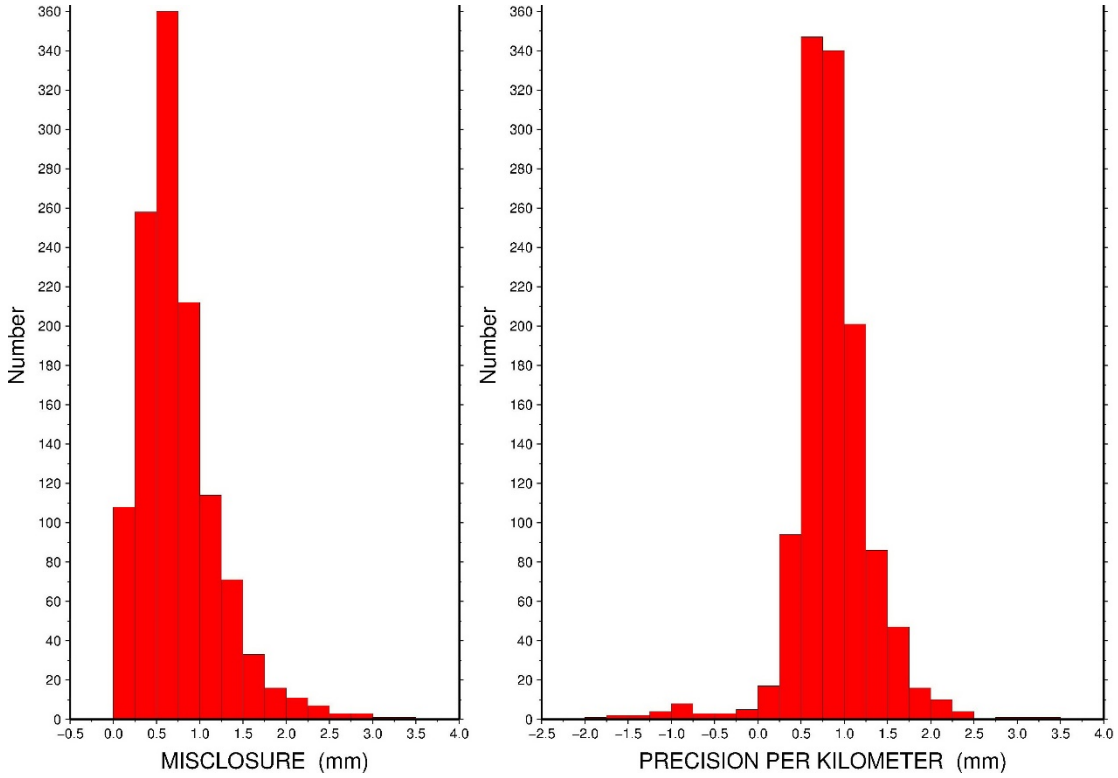


圖 2. 54：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a) 左圖為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上；(b) 右圖為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

Figure 2. 54: Diagram of precise leveling data. Red column is the amount of 0.25 mm statistics value. (a) The error of closure, maximum is around 0.5~0.75 mm. (b) Observation accuracy of every kilometer, maximum is around 0.5~0.75 mm.

2-3-2 精密水準測量資料解算與精度分析

水準測量是獲得高精度相對高程的測量方法。水準測量誤差來源分為儀器誤差、觀測誤差及受外界因素影響的自然誤差。按其影響的性質則分為偶然誤差(隨機誤差)和系統誤差兩類。對系統誤差而言，有些可通過選線或觀測的安排加以消除或減弱 （許榮欣和高書屏，1996)。在精密水準測量中，最常注意的系統誤差包括有：(1) 視準軸誤差、(2) 折射誤差、(3) 地球曲率改正、(4) 水準尺溫度改正、(5) 水準尺刻劃改正與 (6) 正高改正。這些系統誤差在嚴格的精密測量程序中，如：規定往返測必須在不同的環境中進行、相鄰兩測站採用不同之觀測次序、每測段的總測站為偶數等方法，均可消除一些系統性誤差的影響。然而，縱使依照如此嚴格的觀測程序，最後仍會存有部分的系統誤差必須依靠儀器之校準與修正模式來消除或降低（劉啟清，1986)。這些系統誤差的修正方法，主要參照 Ching et al. (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 2.55)，惟部分 GNSS 連續站因架設時間較晚且該地區發生速度變化，因此僅在較穩定之區域約制該共點站速度。

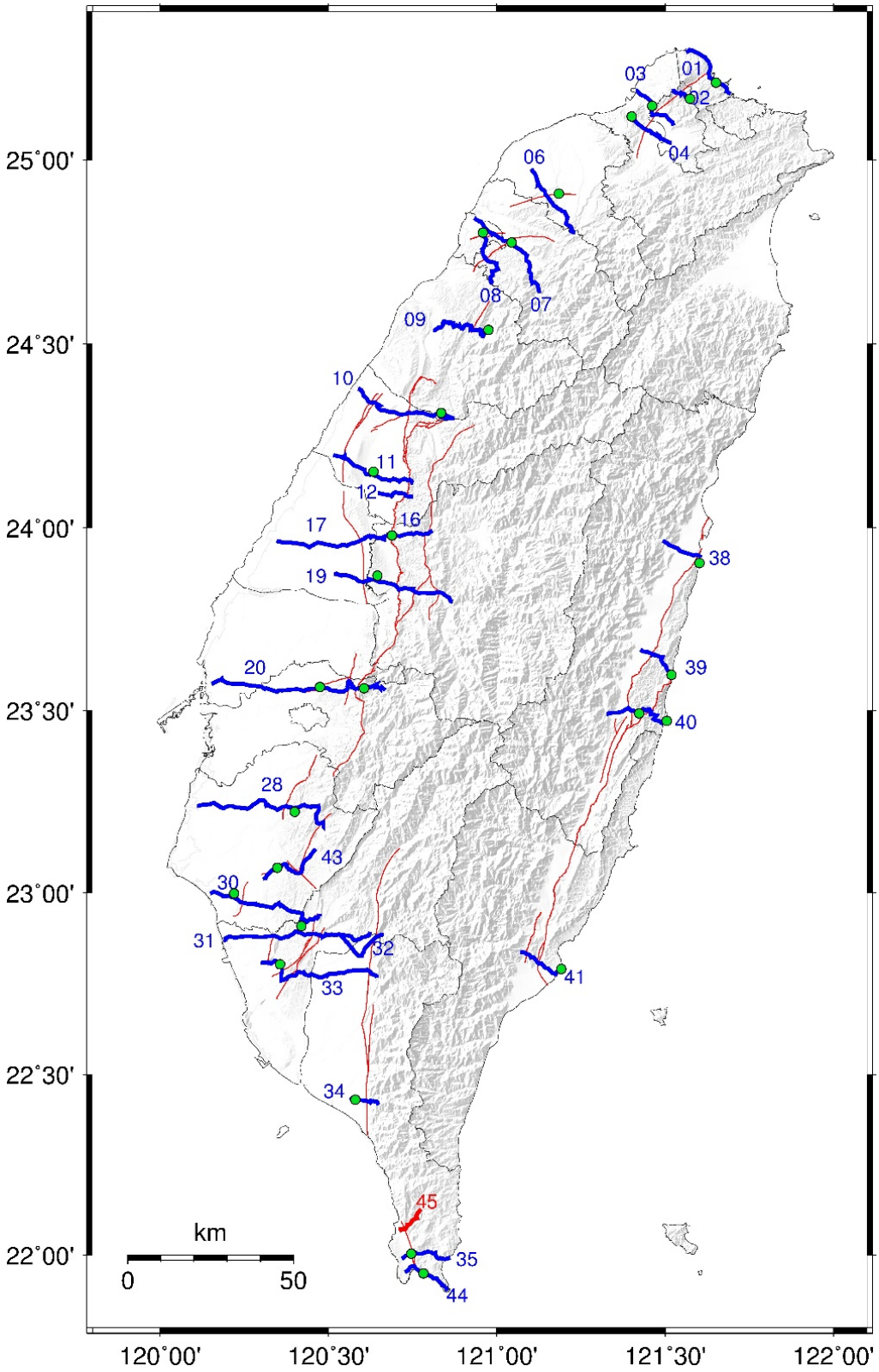


圖 2. 55：精密水準測線與各測線約制之 GNSS 連續站分布圖，藍色表示有 GNSS 約制之測線，紅色表示尚未新增 GNSS 約制之測線，綠色點位表示 GNSS 點位位置。

Figure 2. 55: Distribution map of the precise leveling and the GNSS continuous stations which were chose for constraining each surveying line. Green circles are the GNSS stations.

2-3-3 北部地區精密水準測線

2-3-3-1 石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層（圖 2. 57），測線剖面投影長度為 18.3 公里，2004 至 2023 年間共進行 20 次施測。本測線以 GNSS 連續站 GS09 之垂直速率（0.0 mm/yr），自 2005 年開始作為約制站來校正 2027 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 56）。

本測線垂直速度均落在 -3.0 至 0 mm/yr 之間（圖 2. 57），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。累積高程差如圖 2. 58。

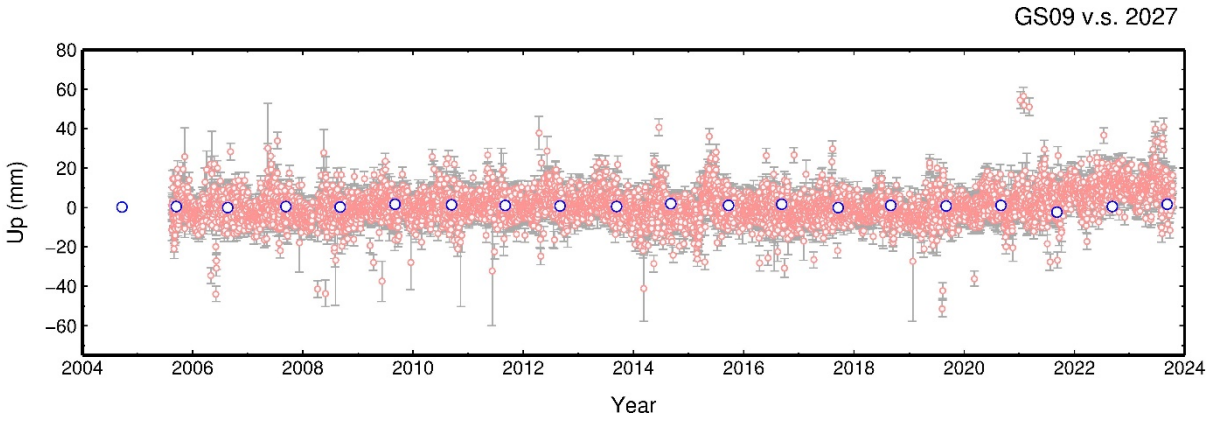


圖 2. 56：石門至萬里測線水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

Figure 2. 56: Time series comparison between Shihmen-Wanli leveling bench mark 2027 and continuous GNSS station GS09. The distance between two stations are 0.01 km.

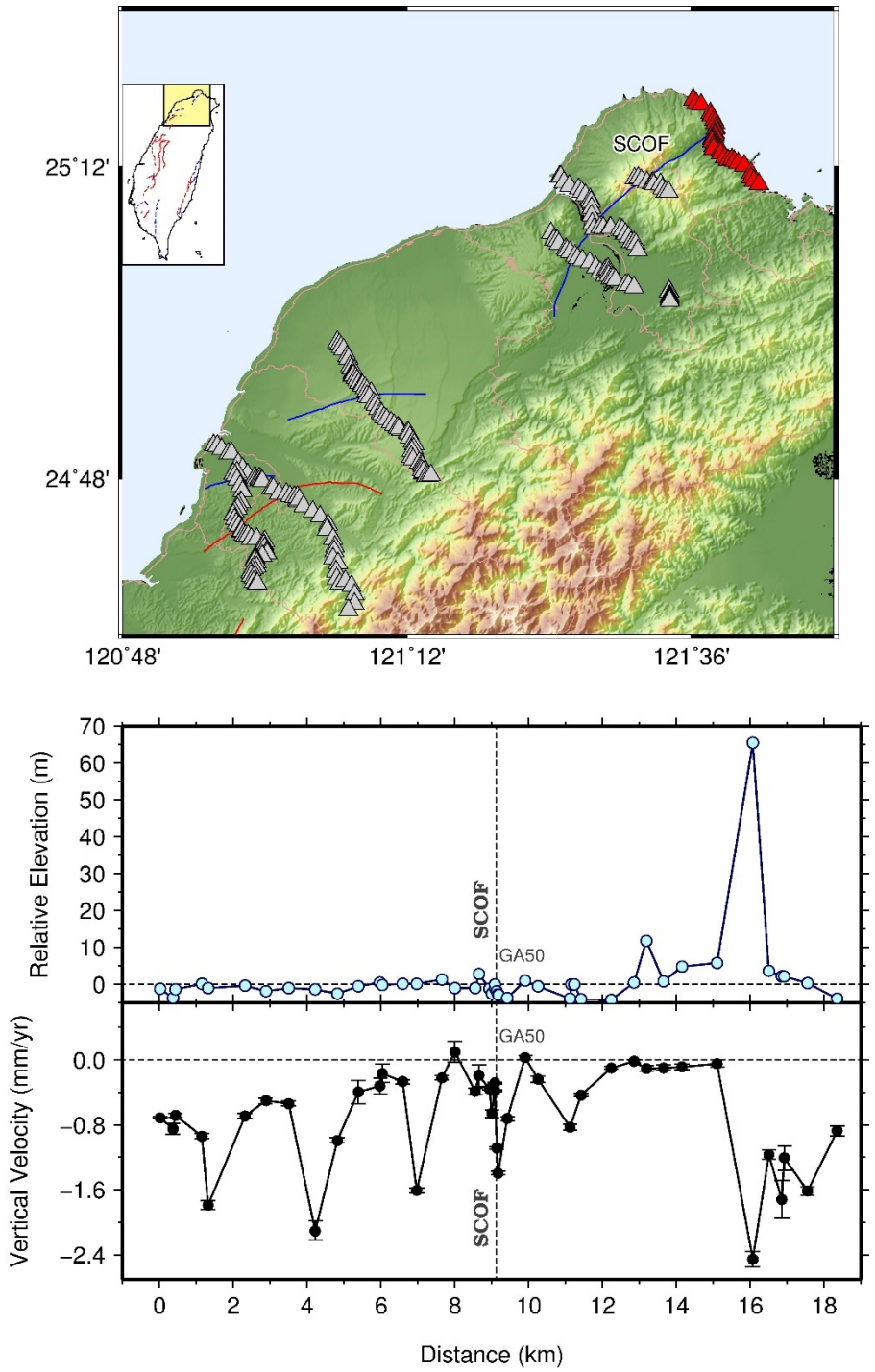


圖 2. 57：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 57: Elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. (a) Tthe distribution of leveling route. (b) Elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

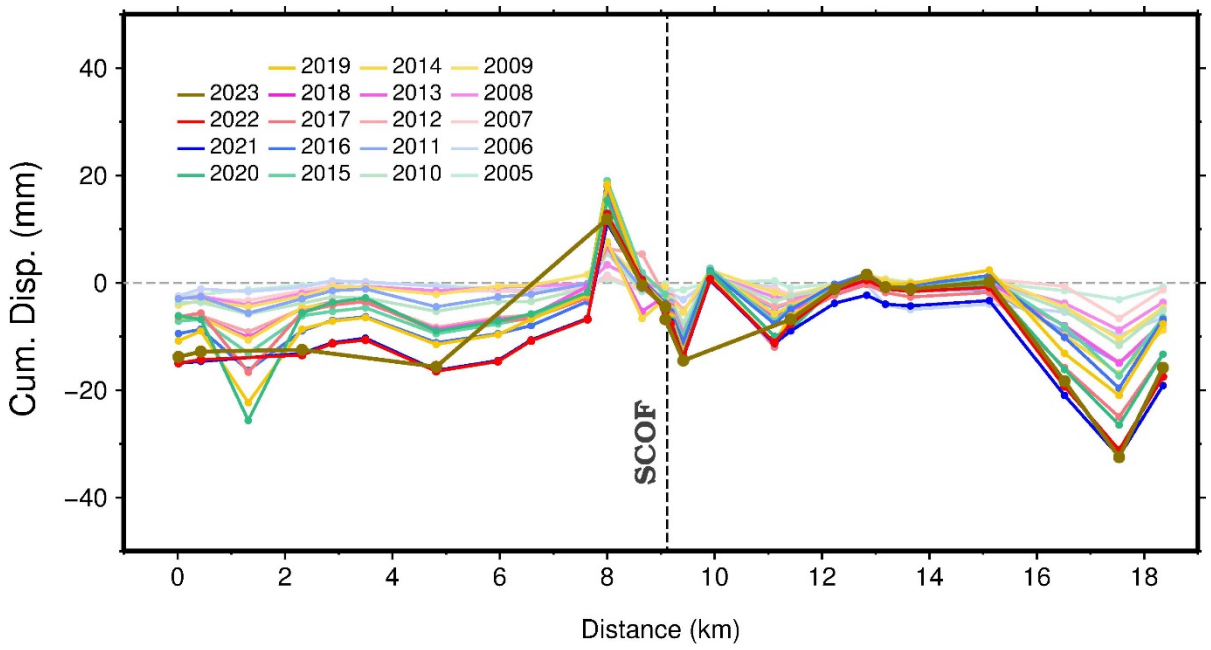


圖 2. 58：台 2_石門至萬里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 58: Cumulative elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-2 士林至三芝測線

士林至三芝測線跨越山腳斷層（圖 2. 60），測線剖面投影長度為 5.0 公里。該測線 2004 至 2023 年間共進行 20 次測量。本測線以 GNSS 連續站 YMSM 之垂直速率（-0.5 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 GB06 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 59）。

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 -2.1 至 0.0 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度非常不明顯（約 0 至 1 公里之測段），僅有約 0.3 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化（圖 2. 60）。據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能略為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要更長時間的監測以及與其他資料來佐證。累積高程差如圖 2. 61。

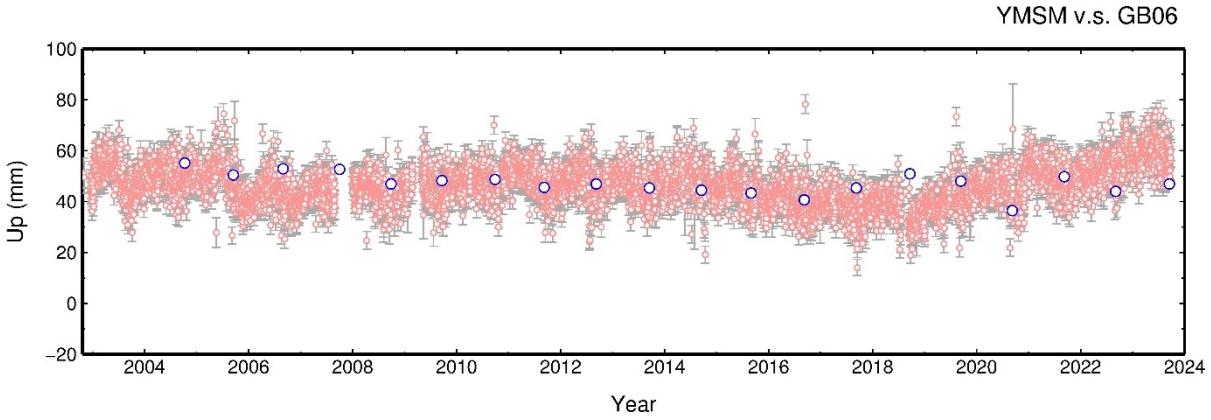


圖 2. 59：士林至三芝水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.67 公里。

Figure 2. 59: Time series comparison between Shilin-Sanzhi leveling bench mark GB06 and continuous GNSS station YMSM. The distance between two stations are 0.67 km.

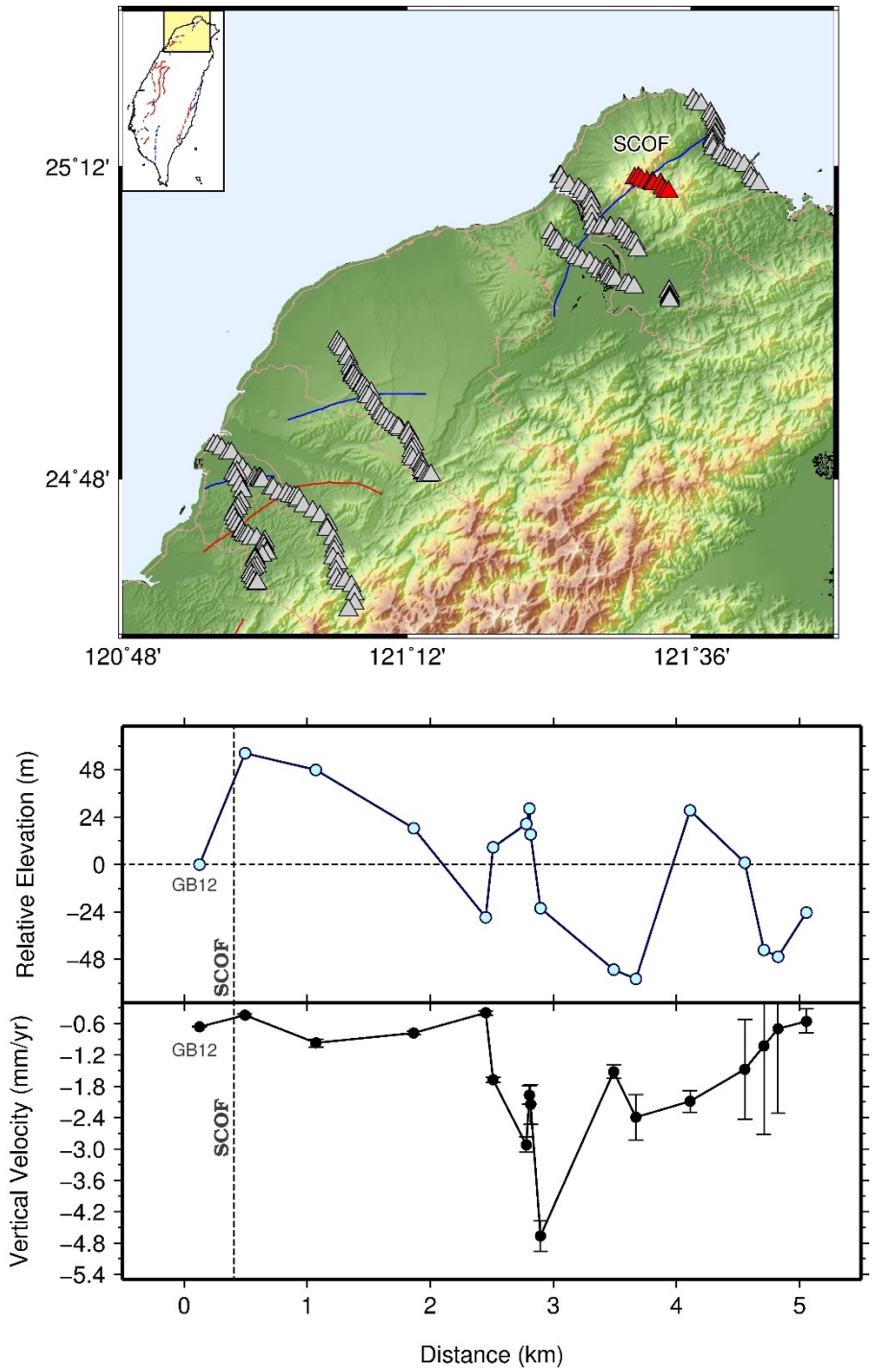


圖 2. 60：士林至三芝測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 60: Elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

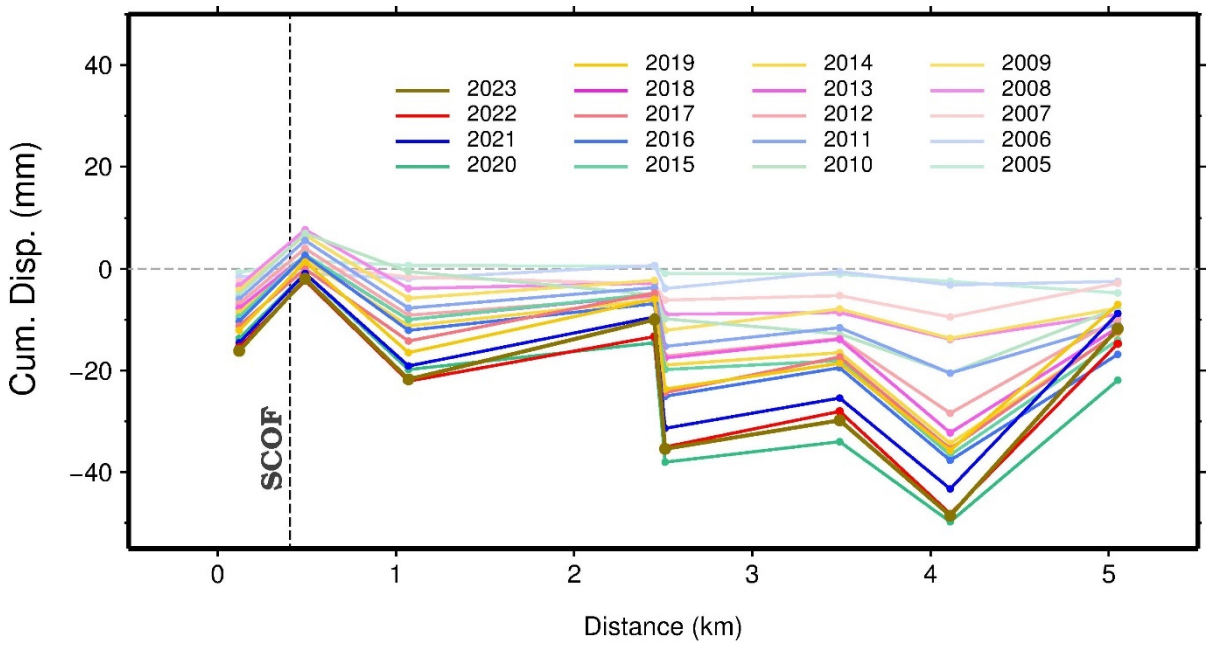


圖 2. 61：士林至三芝測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 61: Cumulative elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層（圖 2. 63），測線剖面投影長度為 15.3 公里，在 2004 至 2023 年間進行共 20 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 GS10 之垂直速率（-6.0 mm/yr），作為約制點來校正 GA69 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 62）。

此測線之垂直速度在跨斷層有達 20.0 mm/yr 的沉降變化量（圖 2. 63）；在斷層東側的垂直速率呈現逐漸增加的趨勢，觀察歷年之高程變化數值（圖 2. 64），山腳斷層東側的沉陷值為 10.0-35.0 mm。

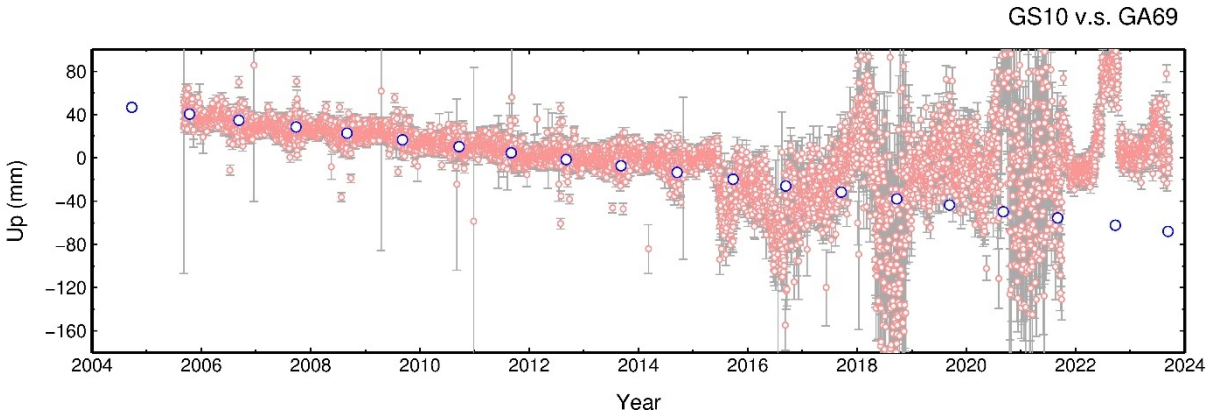


圖 2. 62：淡水至士林水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較，兩者相距 0.19 公里。

Figure 2. 62: Time series comparison between Tamsui-Shihlin leveling bench mark GA69 and continuous GNSS station GS10. The distance between two stations are 0.19 km.

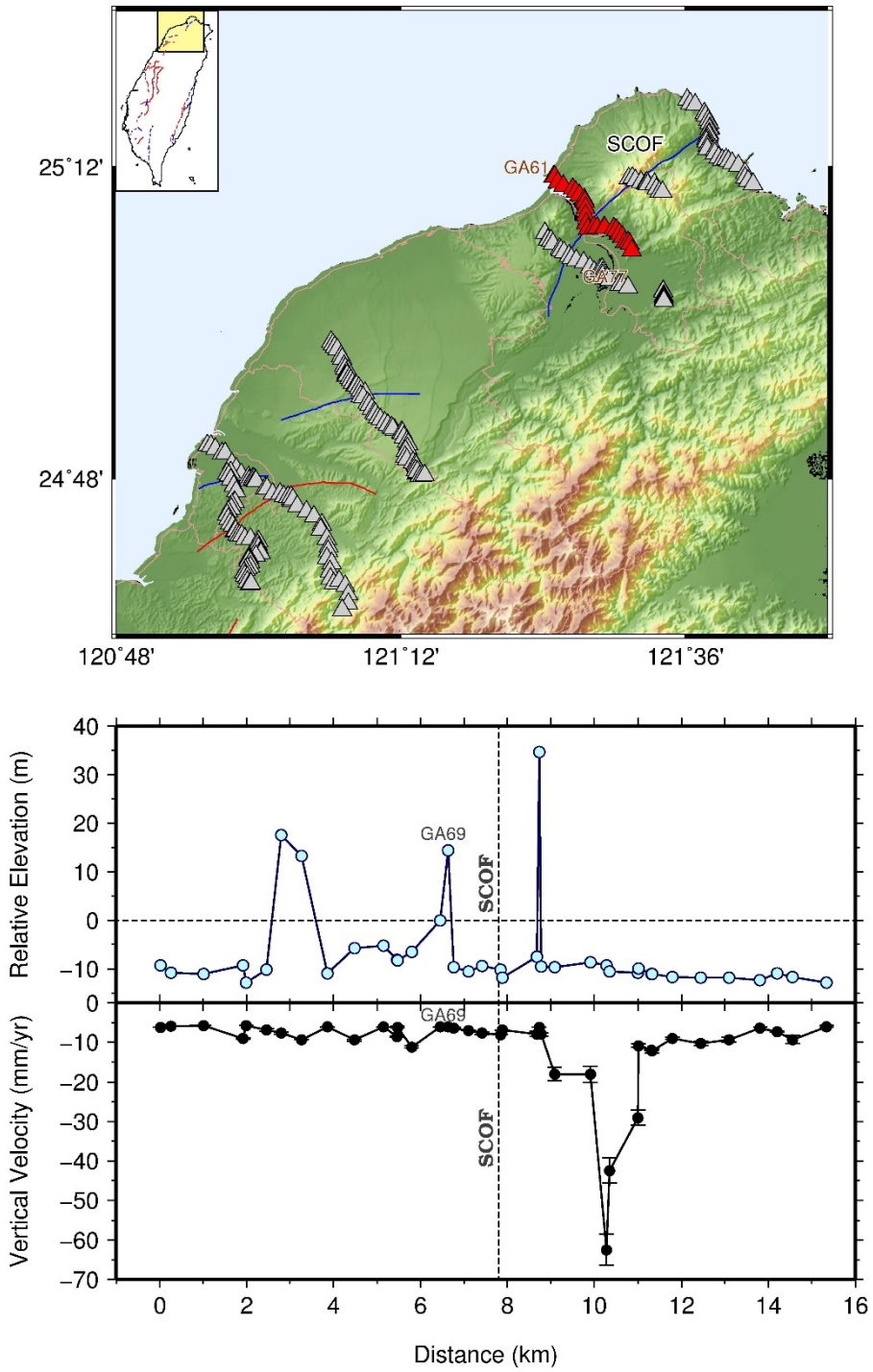


圖 2. 63：淡水至士林測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 63: Difference of the Tamsui-Shihlin leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

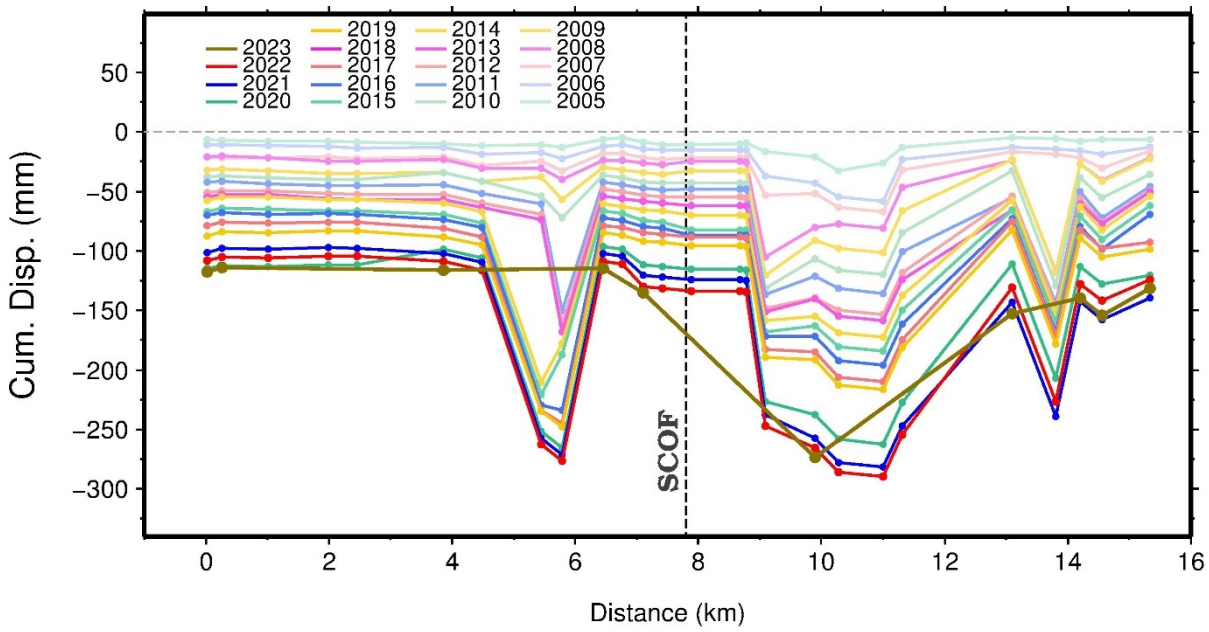


圖 2. 64：淡水至士林測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 64: Cumulative elevation change of the Tamsui-Shihlin leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-4 五股至臺北測線

本測線橫跨山腳斷層（圖 2. 66），測線長為 13.6 公里。此水準測線於 2004 至 2023 年間共進行 20 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 WUKU 之垂直速率（-3.9 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 GA78 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 65）。

從歷年高程變化來看（圖 2. 67），2008 年至 2013 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象，2014 年起至今變化則較不明顯。

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

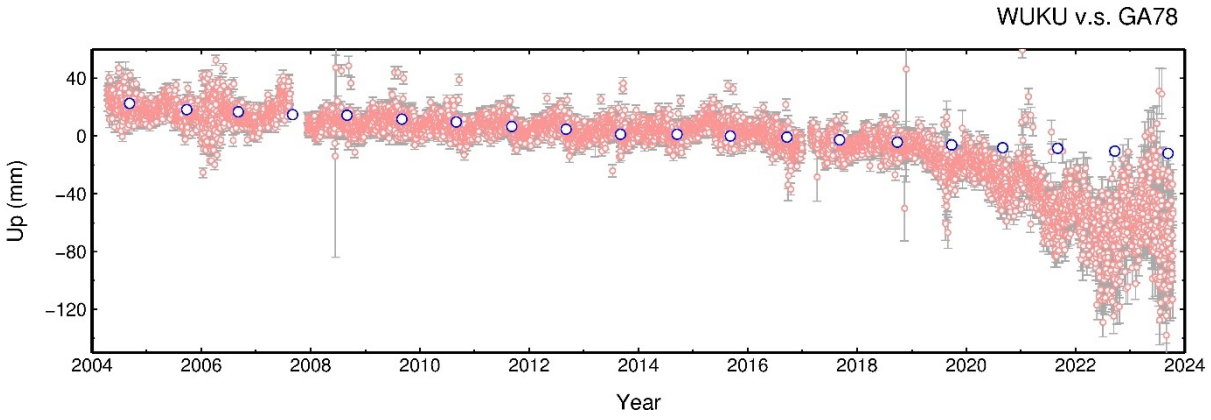


圖 2. 65：五股至臺北水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。

Figure 2. 65: Time series comparison between Wugu-Taipei leveling bench mark GA78 and continuous GNSS station WUKU. The distance between two stations are 1.26 km.

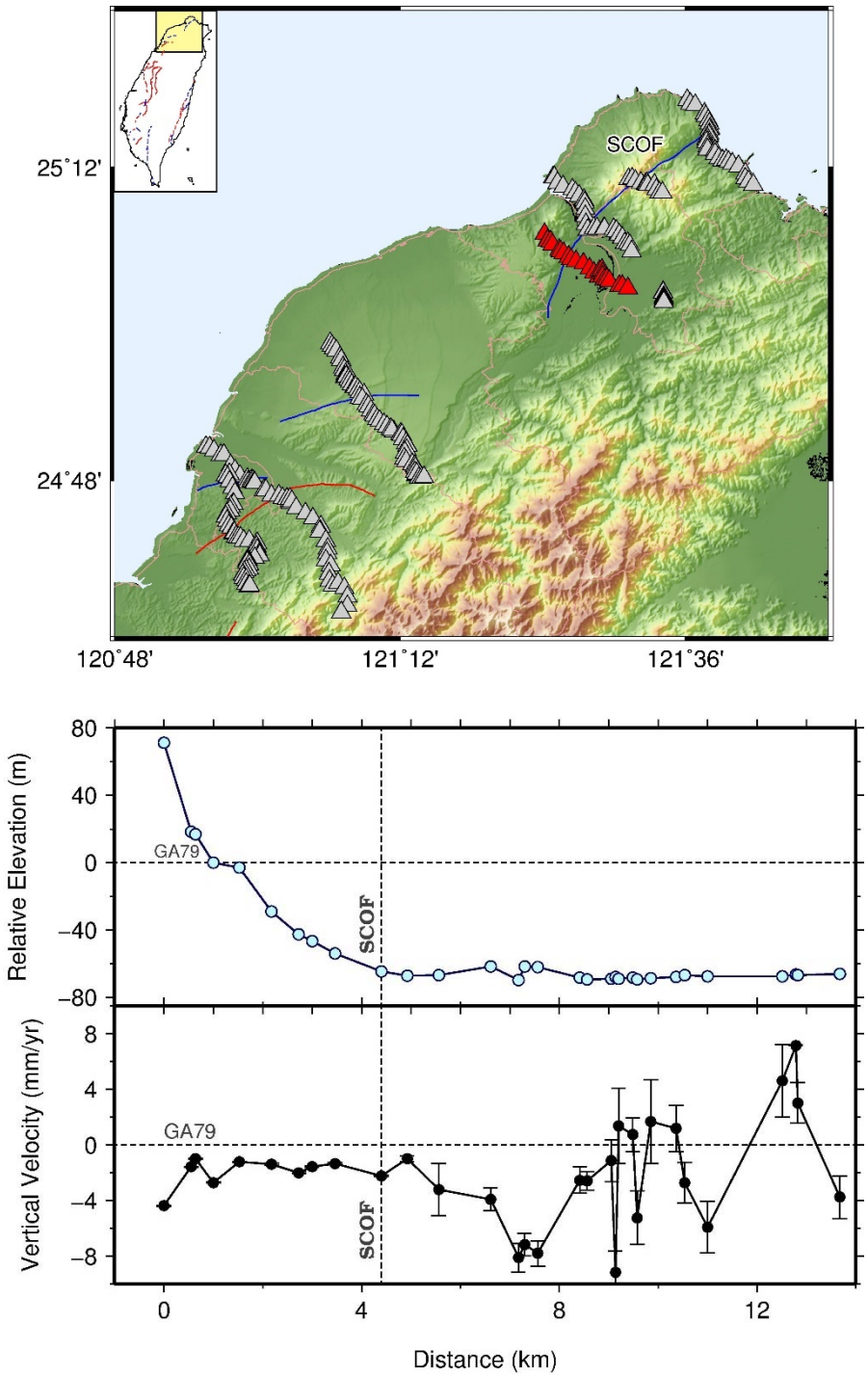


圖 2. 66：五股至臺北測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 66: Elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

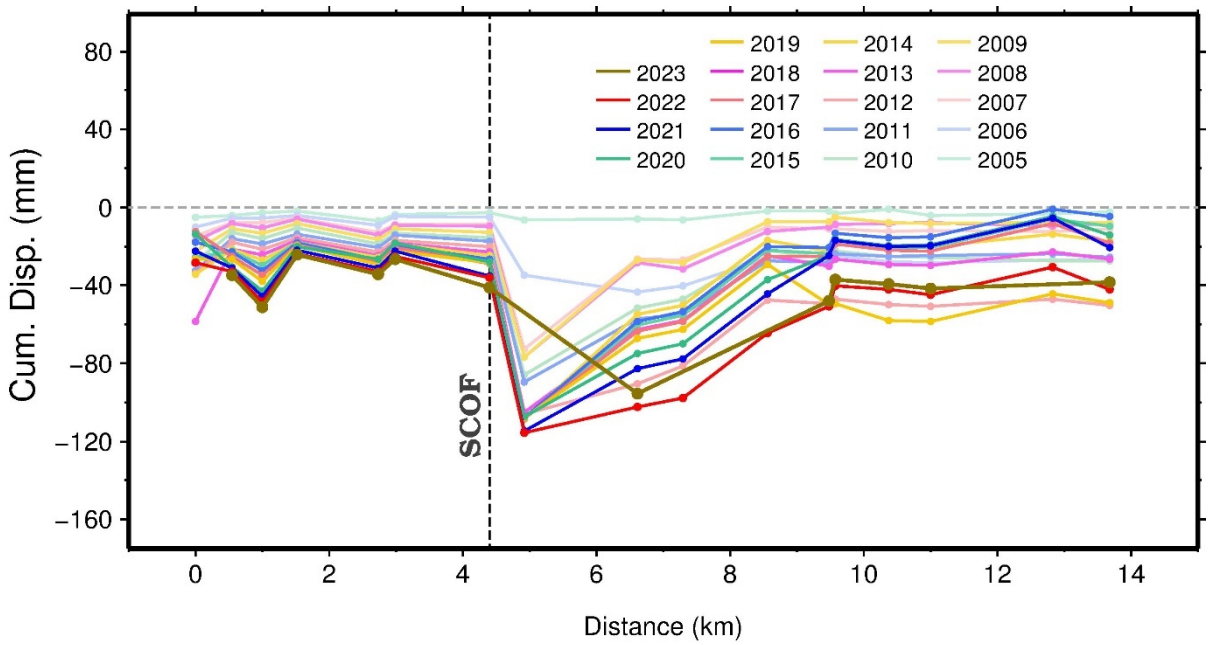


圖 2. 67：五股至臺北測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2. 67: Cumulative elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-3-5 信義測線

信義測線測線長約 1.3 公里（圖 2. 69）。此水準測線於 2009 至 2023 年間共進行 7 次的施測。本測線以 GPS 連續站 S101 之垂直速率（-2.8 mm/yr），作為約制點來校正 5003 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 68）。

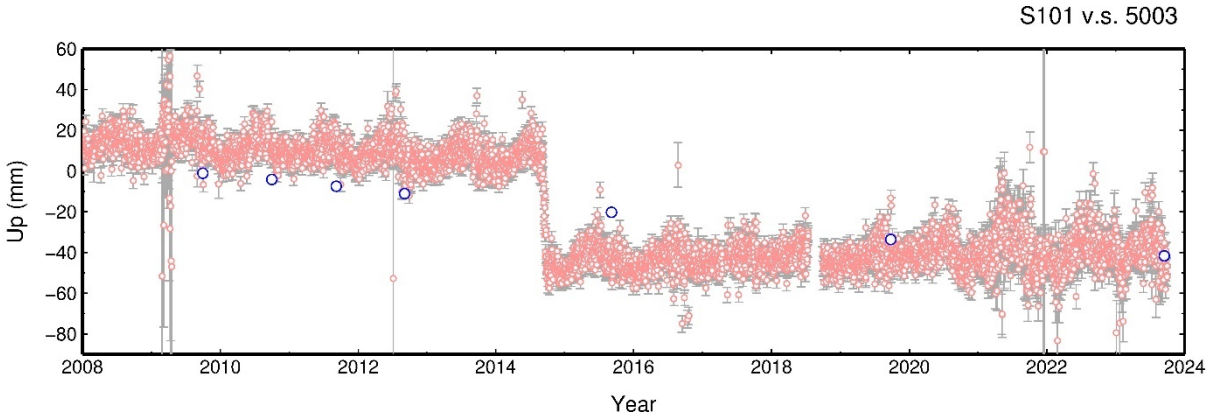


圖 2. 68：水準點位 5003 與連續站 S101 之間序列比較，兩者相距 4.6 公里。

Figure 2. 68: Time series comparison between leveling bench mark 5003 and continuous GPS station S101. The distance between the two is 4.6 km.

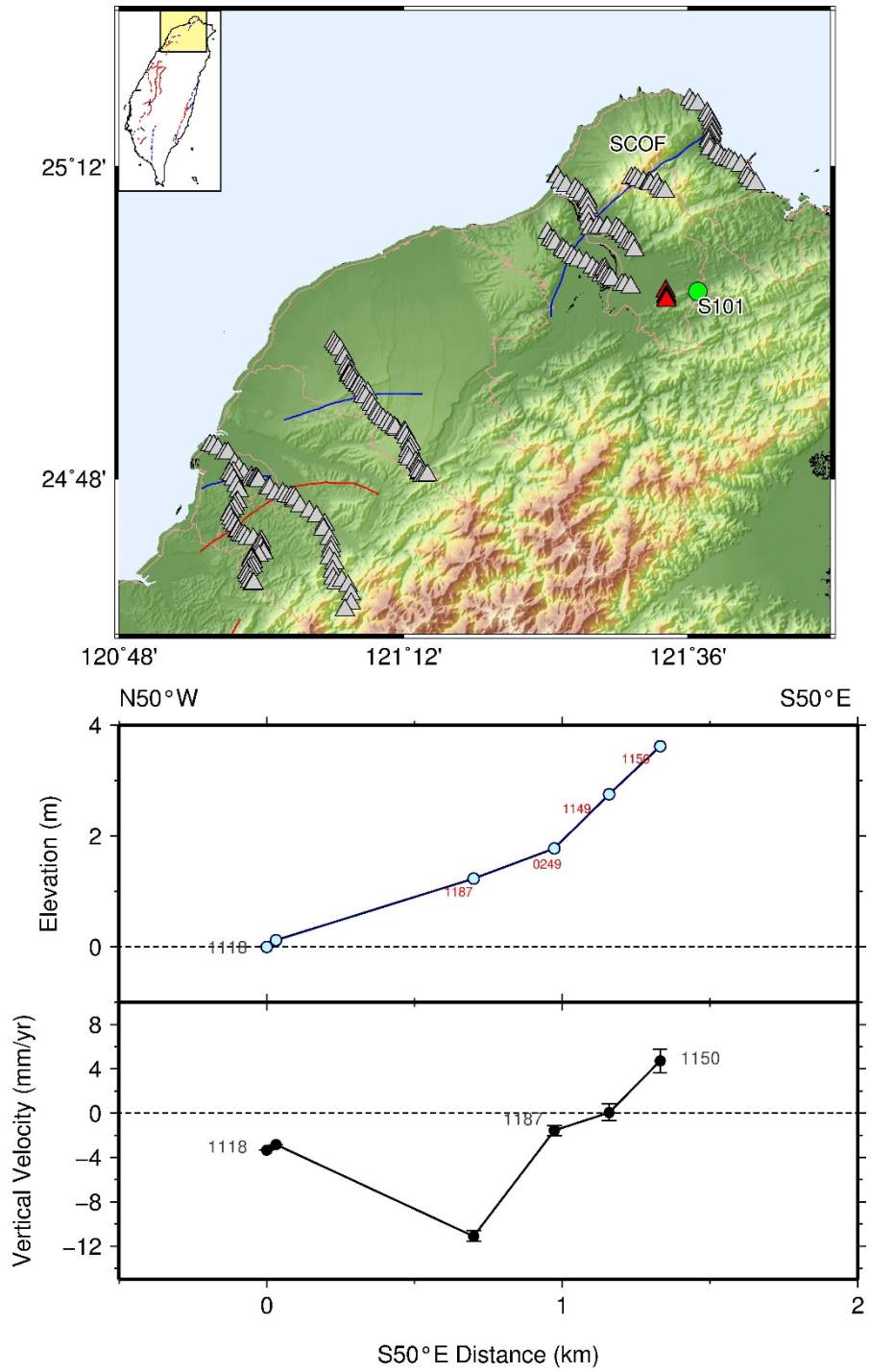


圖 2. 69：信義測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 69: Elevation change of the Xinyi 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.

2-3-4 桃竹苗地區精密水準測線

2-3-4-1 新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層（圖 2. 71），測線長為 22.4 公里，並於 2004 至 2023 年間共進行 20 次的施測。該測線以 GNSS 連續站 YAME 之垂直速率（2.7 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 GB40 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 70）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GB47 滅失，無法繼續觀測。

此測線之垂直速度在南往北跨越湖口斷層有較顯著抬升，斷層以北抬升速度約為 1-4 mm/yr（圖 2. 71）。累積高程差如圖 2. 72。

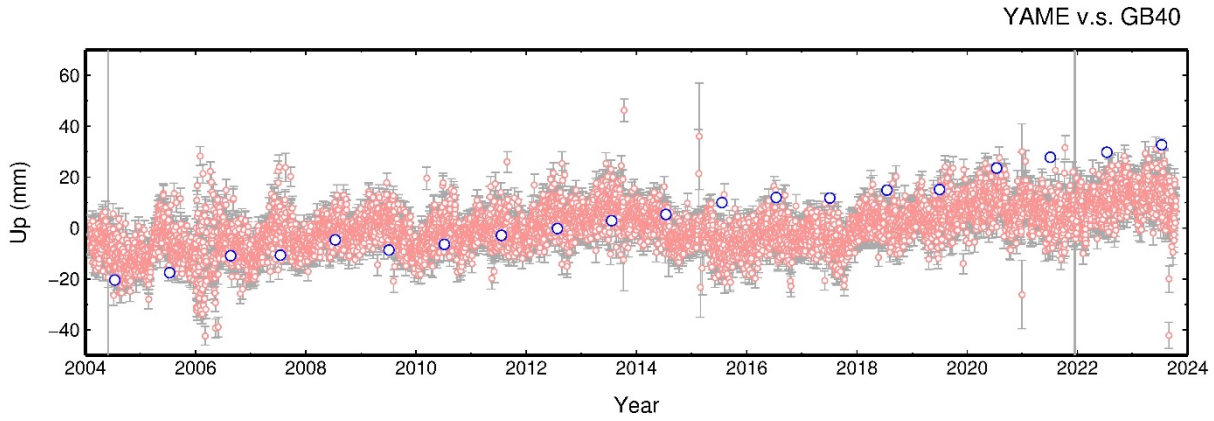


圖 2. 70：新屋至童話世界水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。兩者相距 3.3 公里。

Figure 2. 70: Time series comparison between Xinwu-Guanxi leveling benchmark GB40 and continuous GNSS station YAME. The distance between two stations are 3.3 km.

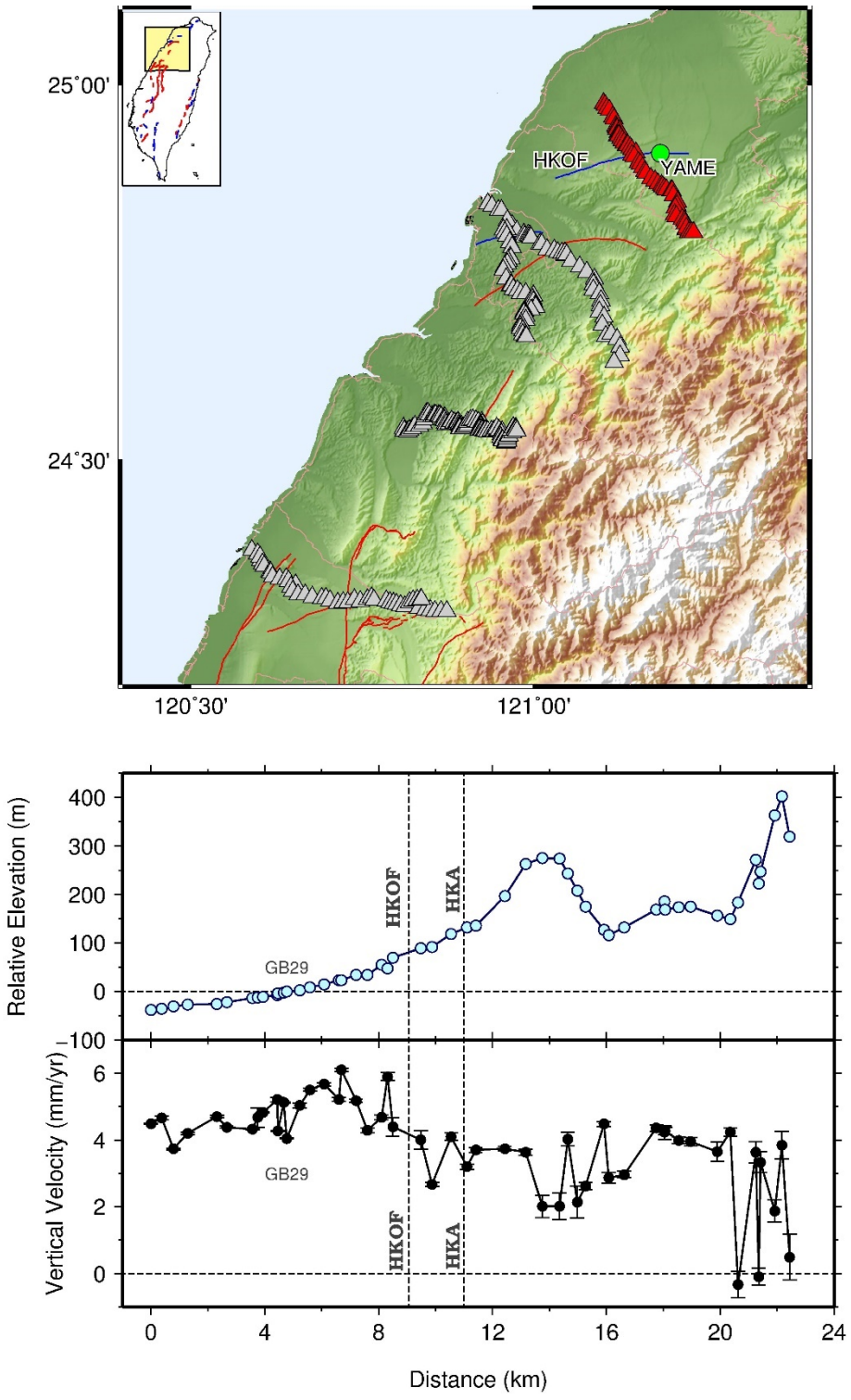


圖 2. 71：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層，HKA 為湖口背斜。

Figure 2. 71: Elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKOF is the Hukou fault, and HKA is the Hukou anticline.

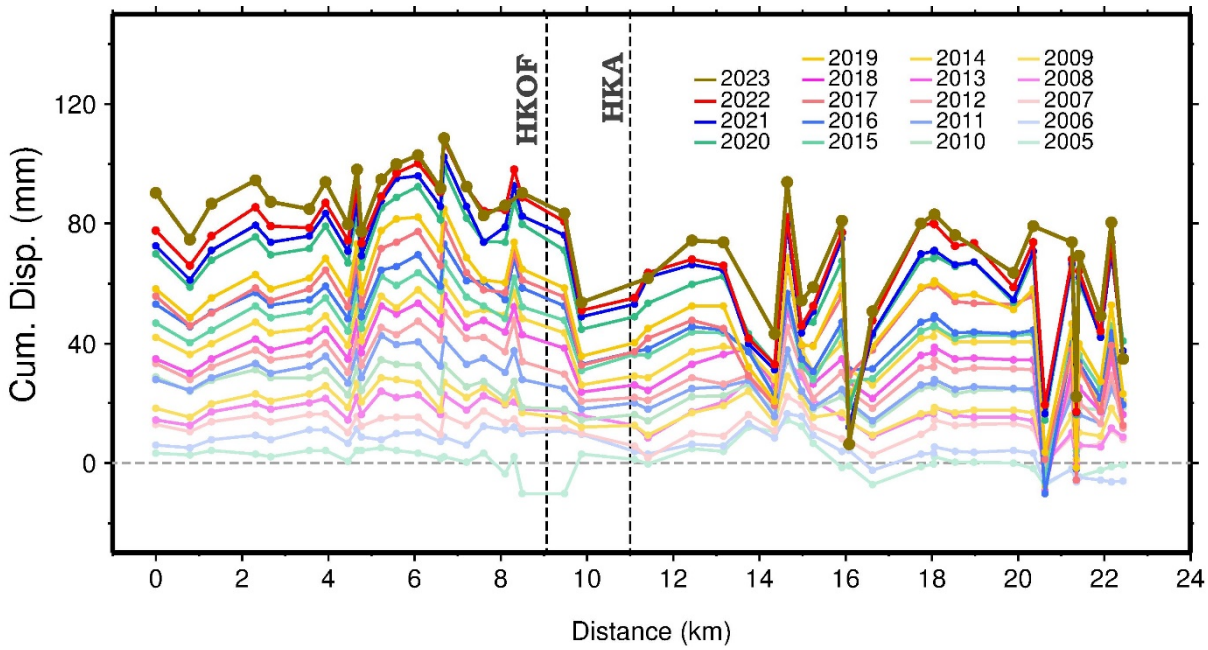


圖 2. 72：新屋至童話世界測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層，HKA 為湖口背斜。

Figure 2. 72: Cumulative elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKOF is the Hukou fault, and HKA is the Hukou anticline.

2-3-4-2 新竹至五峰測線

縣 122_新竹至五峰測線橫跨新竹斷層及新城斷層（圖 2. 74），測線長為 30.0 公里（投影至剖面的長度），此測線於 2002 至 2023 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 BM03 滅失，無法繼續觀測。

本測線分別以 GNSS 連續站 GS03 之垂直速率（-0.6 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 T004 相對於 GNSS 連續站 S01R 之垂直速率之垂直速率（圖 2. 73）。此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化（圖 2. 74），變化量皆＜2.0 mm/yr，但在跨新城斷層有約 4.0 mm/yr 的垂直速度變化量（約-2.0 ~ 2.0 mm/yr）。累積高程差如圖 2. 75。

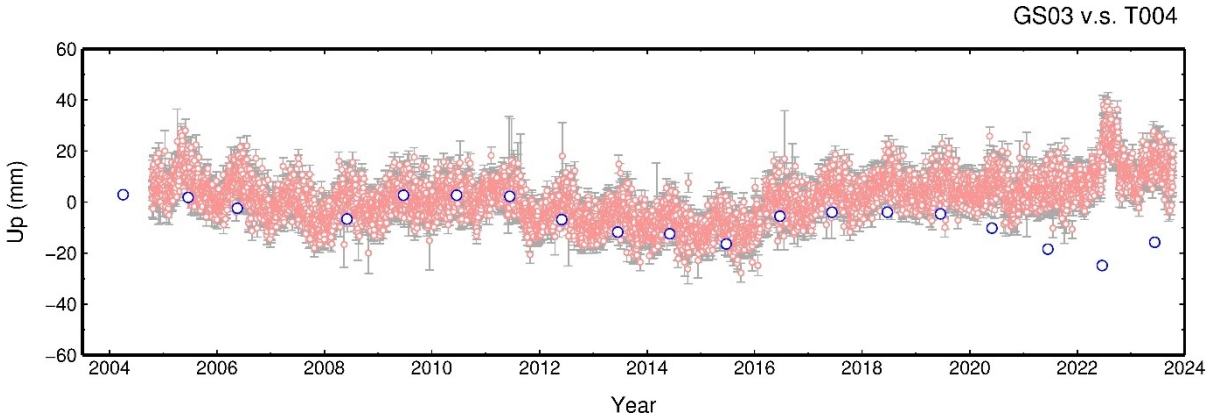


圖 2. 73：新竹至五峰水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。

Figure 2. 73: Time series comparison between Hsinchu-Wufeng leveling benchmark T004 and continuous GNSS station GS03. The distance between two stations are 0.2 km.

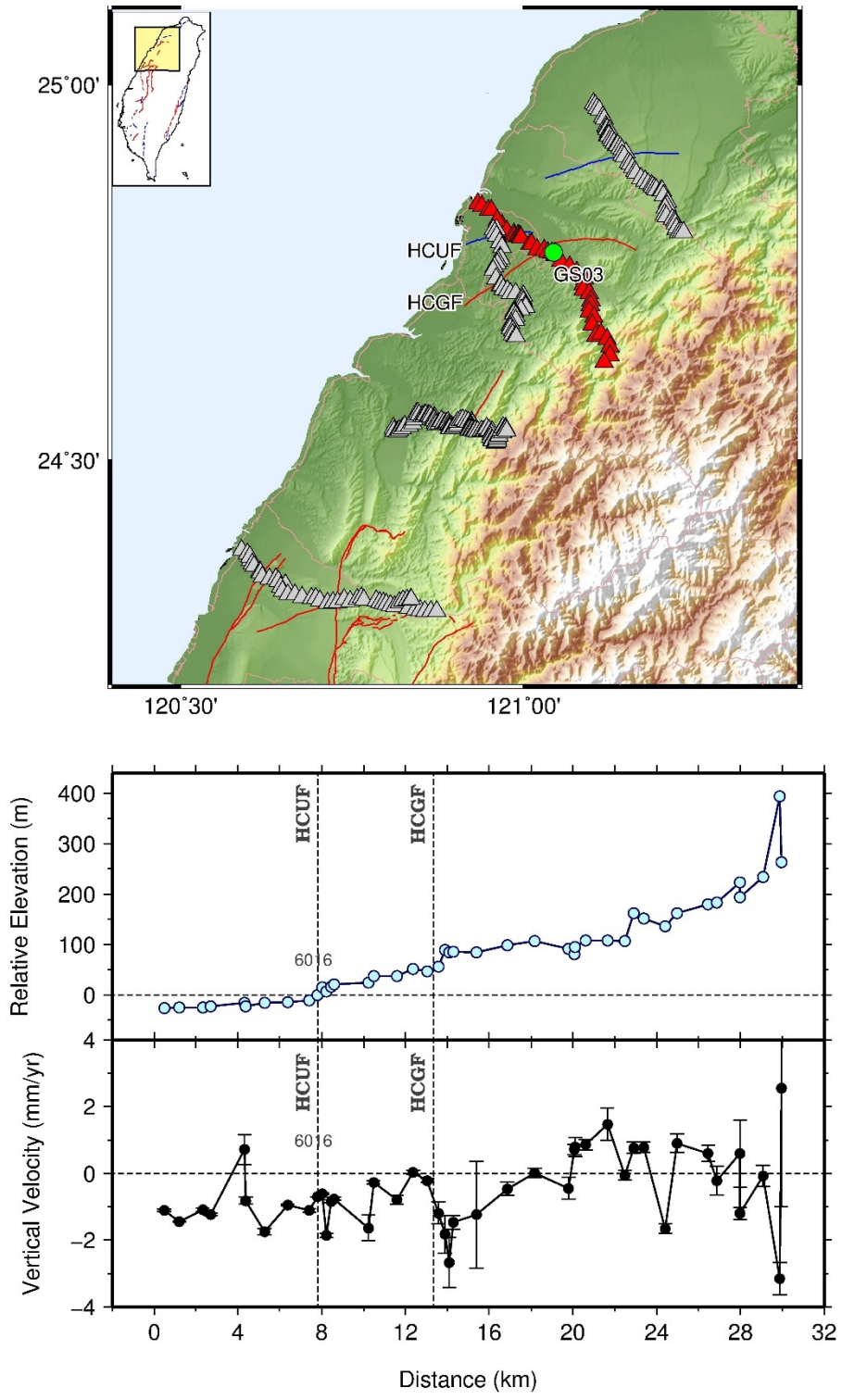


圖 2. 74：新竹至五峰測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2. 74: Elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

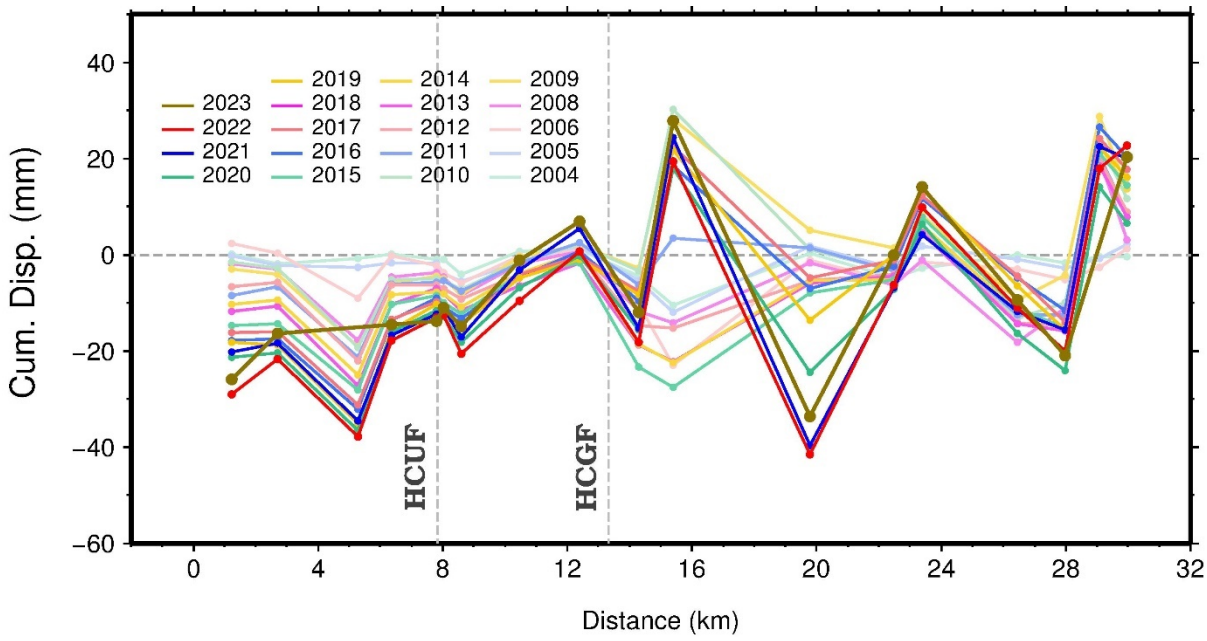


圖 2. 75：新竹至五峰測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2. 75: Cumulative elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

2-3-4-3 新竹至峨嵋測線

縣 117_新竹至峨眉測線跨新竹斷層及新城斷層（圖 2. 77），測線長為 16.0 公里（投影至剖面的長度），此測線於 2004 至 2023 年間共進行 19 次的施測。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GB73、GB78、GC09 滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS14 之垂直速率（-4.0 mm/yr），自 2005 年開始作為約制 GB72 相對於 GNSS 連續站 S01R 之垂直速率（圖 2. 76）。

此測線的垂直速度由南往北逐漸由 0.0 mm/yr 增加至 3.2 mm/yr 沉陷（圖 2. 77）。然而，跨越新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的速度變化，變化量皆< 1.0 mm/yr。累積高程差如圖 2. 78。

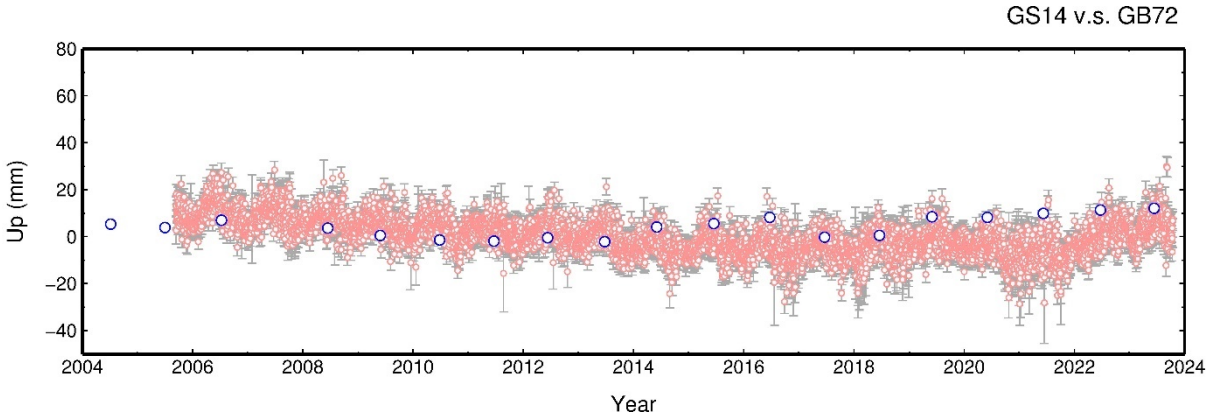


圖 2. 76：新竹至峨嵋水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。

Figure 2. 76: Time series comparison between Hsinchu-Emei leveling benchmark GB72 and continuous GNSS station GS14. The distance between two stations are 0.1 km.

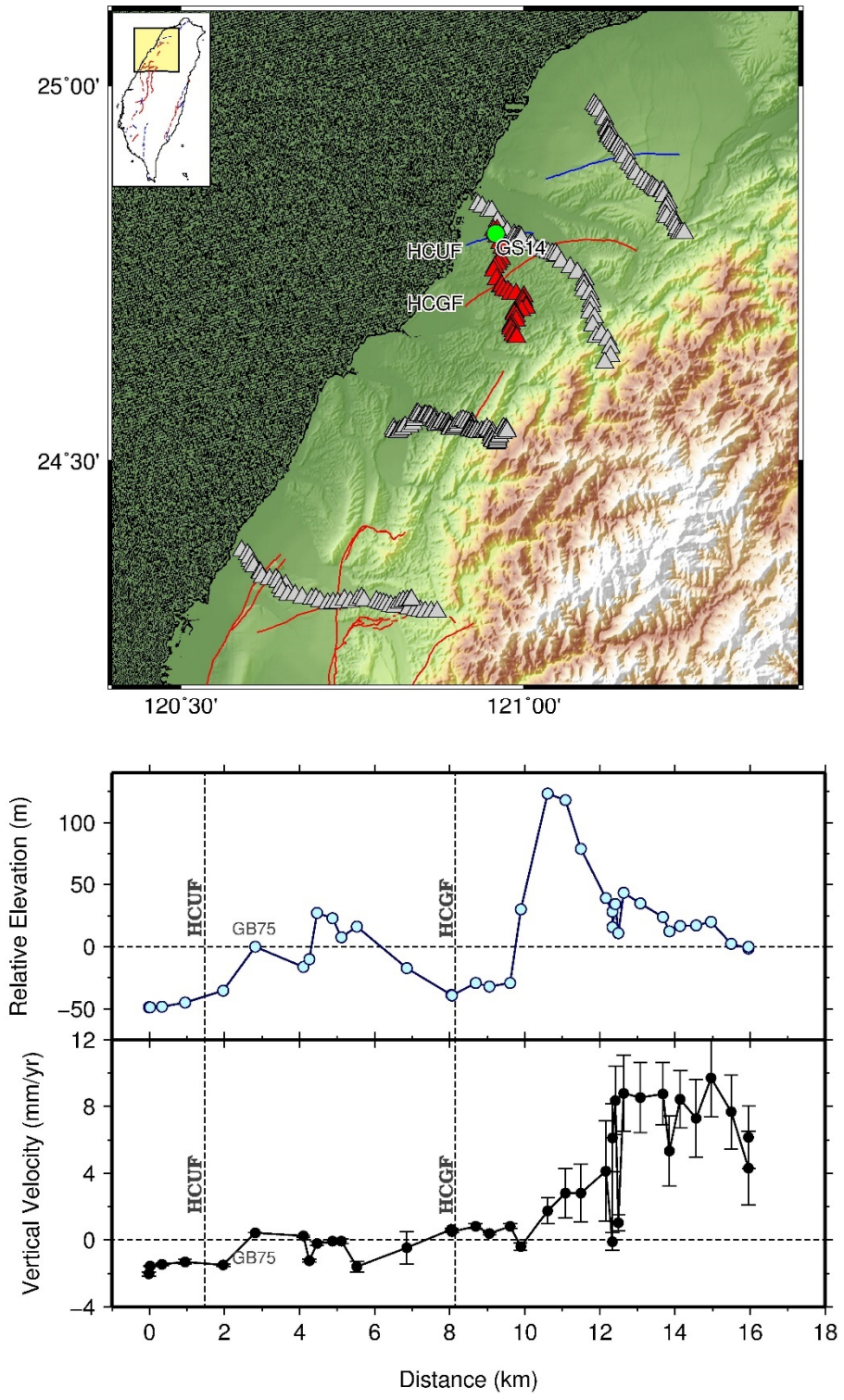


圖 2. 77：新竹至峨嵋測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2. 77: Elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

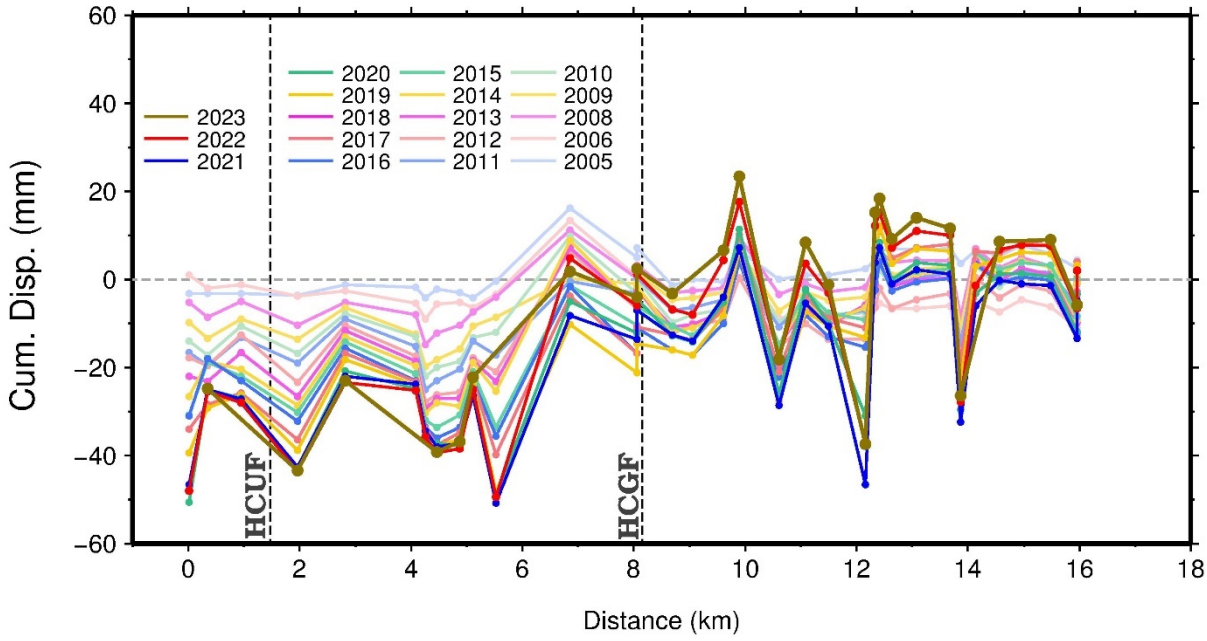


圖 2. 78：新竹至峨嵋測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2. 78: Cumulative elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

2-3-4-4 苗栗至南庄測線

苗栗至南庄測線橫跨獅潭斷層（圖 2. 80），測線長為 16.8 公里，此測線於 2005 至 2023 年間共進行 19 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 PENL 之垂直速率（-3.1 mm/yr），2005 年至 2016 年作為約制點 GD97 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 79）。

整條測線的水準沉陷速率大多在 2.0-4.0 mm/yr 之間（圖 2. 80），少數最大沉陷速率可達 7.0 mm/yr。跨獅潭斷層區域之速率變化並不顯著（變化量< 1.0 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，在 2005~2009 年、2010~2016 年及 2017~2021 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化（圖 2. 81）。

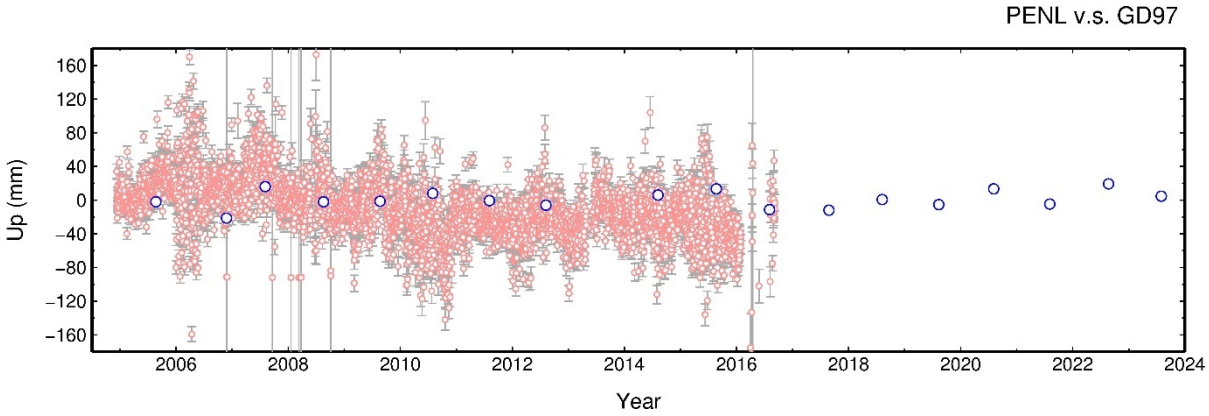


圖 2. 79：苗栗至南庄水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

Figure 2. 79: Time series comparison between Miaoli-Nanzhuang leveling benchmark GD97 and continuous GNSS station PENL. The distance between two stations are 0.02 km.

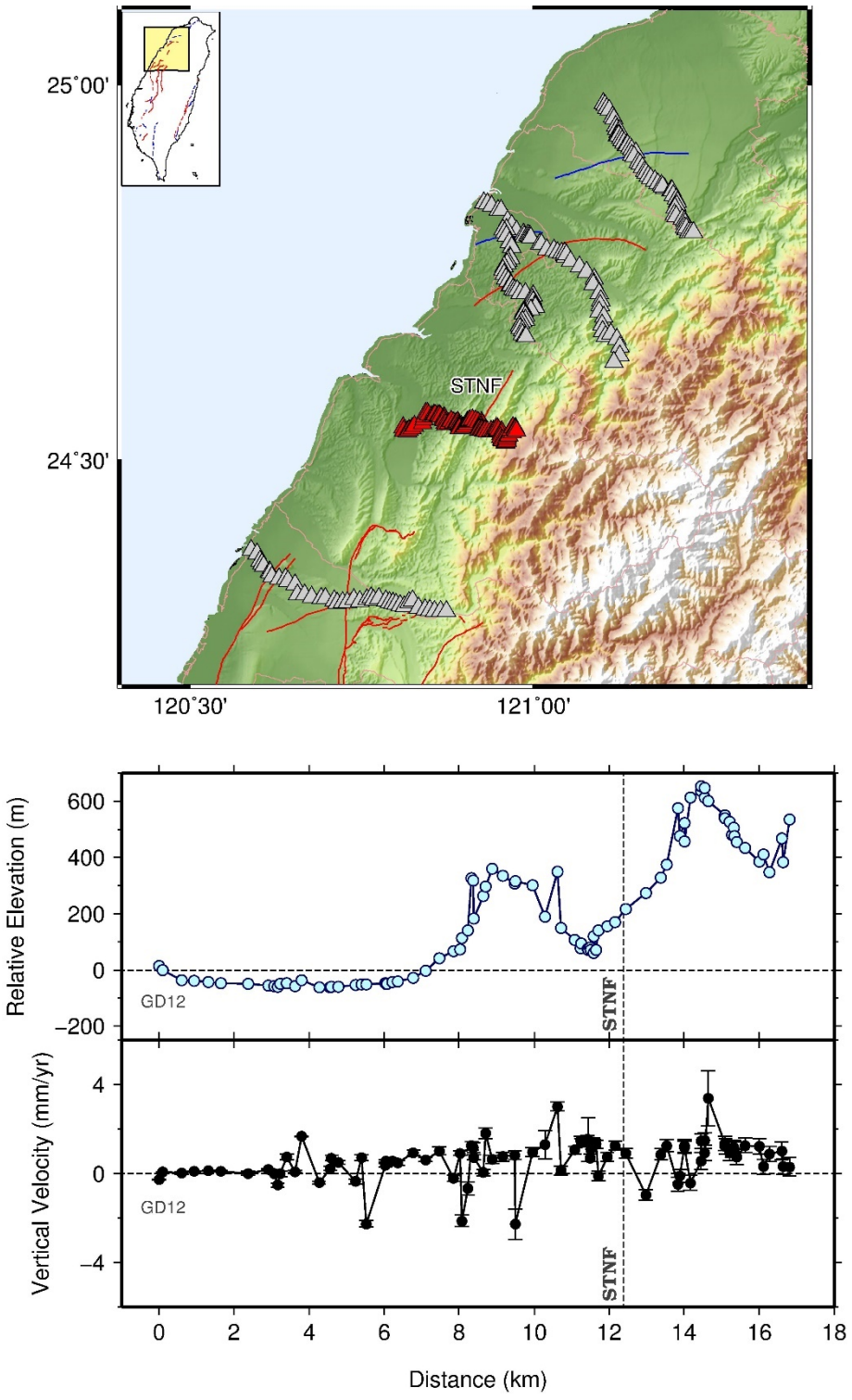


圖 2. 80：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 2. 80: Elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. STNF is the Shihtan fault.

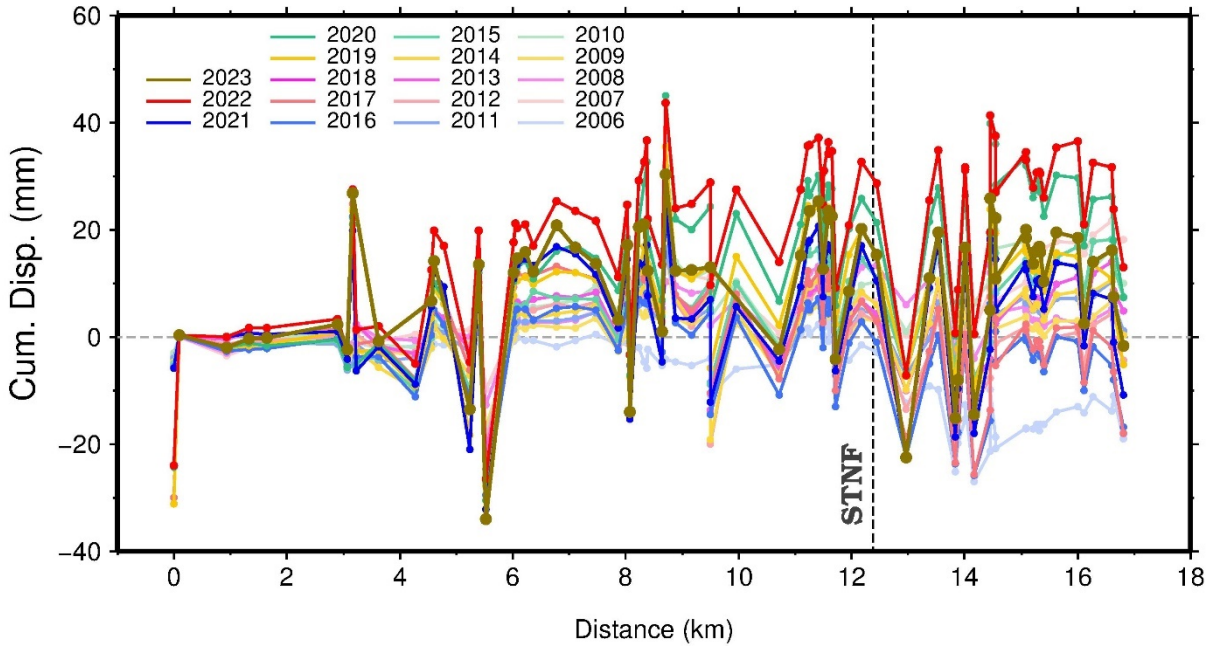


圖 2. 81：苗栗至南庄測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 2. 81: Cumulative elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. STNF is the Shihtan fault.

2-3-5 中部地區精密水準測線

2-3-5-1 大安至東勢測線

大安-東勢測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層（圖 2. 83），測線長 30.2 公里（投影至剖面的長度），並於 2015 年後段新設 14 個測站，從 2004 年至 2023 年止共計有 19 次施測。各年度之水準施測成果，以累積高程展示於圖 2. 84。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GG11 滅失，無法繼續觀測。

2015 年起由 GF44(卓蘭國小)延伸測線至 B283(卓蘭實驗高中)，該點位位於連續站 GS82 天線盤支架結構體上，因此使用 GNSS 連續站 GS82 之垂直速率（-0.5 mm/yr）作為約制站，自 2016 年以來校正 B283 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 82）。

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

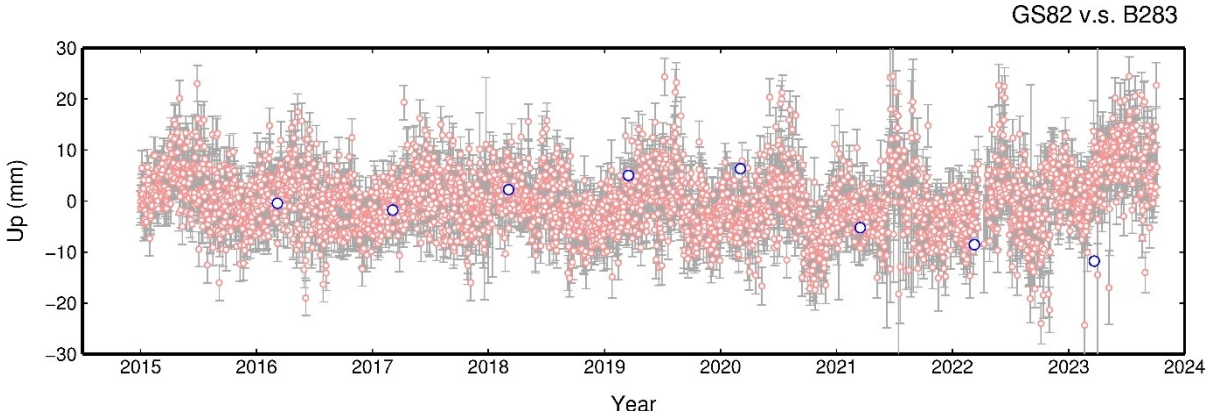


圖 2. 82：大安至東勢水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。

Figure 2. 82: Time series comparison between Da'an-Dongshi leveling bench mark B283 and continuous GNSS station GS82. The distance between two stations are 1.5 km.

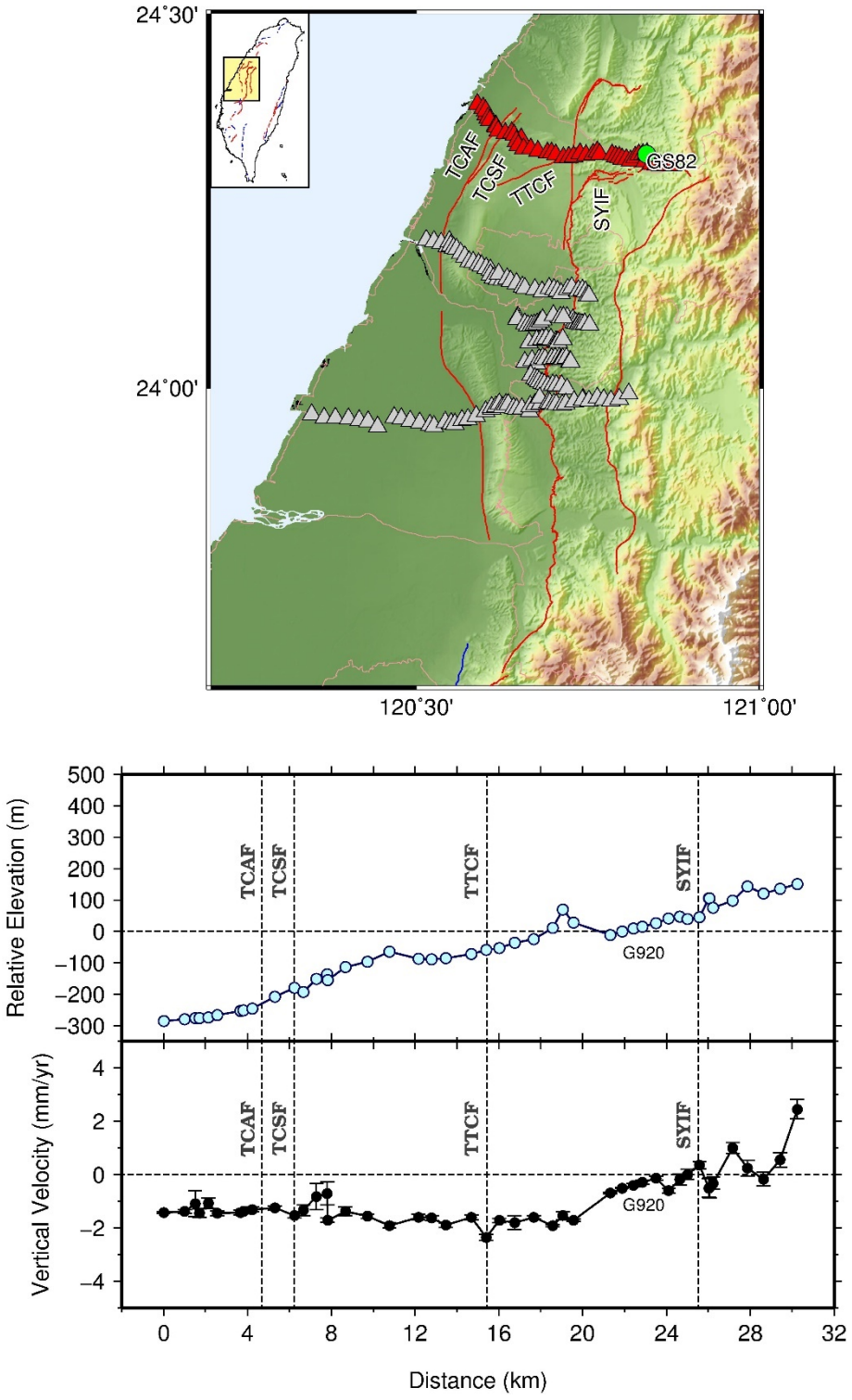


圖 2. 83：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

Figure 2. 83: Elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, and SYIF is Sanyi fault.

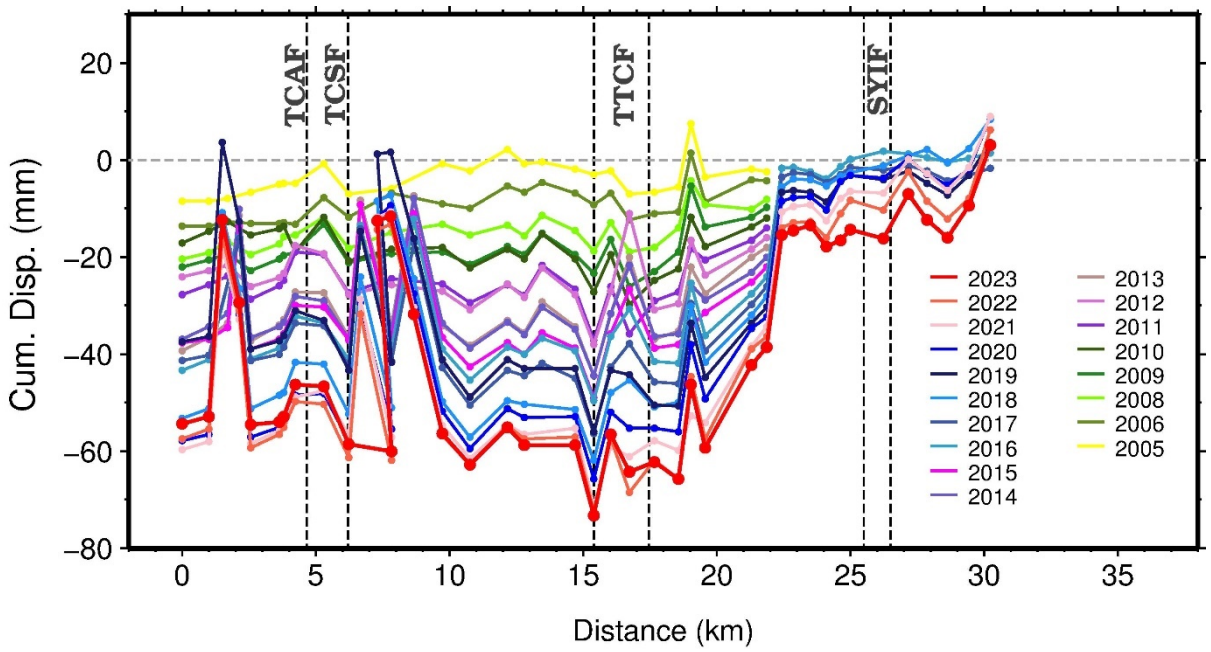


圖 2. 84：縣 132_大安至東勢測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

Figure 2. 84: Cumulative elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, and SYIF is Sanyi fault.

2-3-5-2 龍井至太平測線

龍井至太平測線橫跨車籠埔斷層以及彰化斷層（圖 2. 86），測線長約 25.5 公里（投影至剖面的長度），於 2004 至 2023 年間，共進行 20 次的施測。本測線以 GNSS 連續站 LSB0 之 2013 年地震前垂直速率（-4.0 mm/yr），及 2013 年至今之垂直速率（-1.8 mm/yr），自 2007 年以來作為約制點 G937 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 85）。

此測線 2013 年 6 月前之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率在 0.0-7.0 mm/yr 之間，而 2013 年 6 月後之垂直速度減小，其值在 0.0-4.0 mm/yr 之間（圖 2. 86），彰化斷層西側轉為抬升。

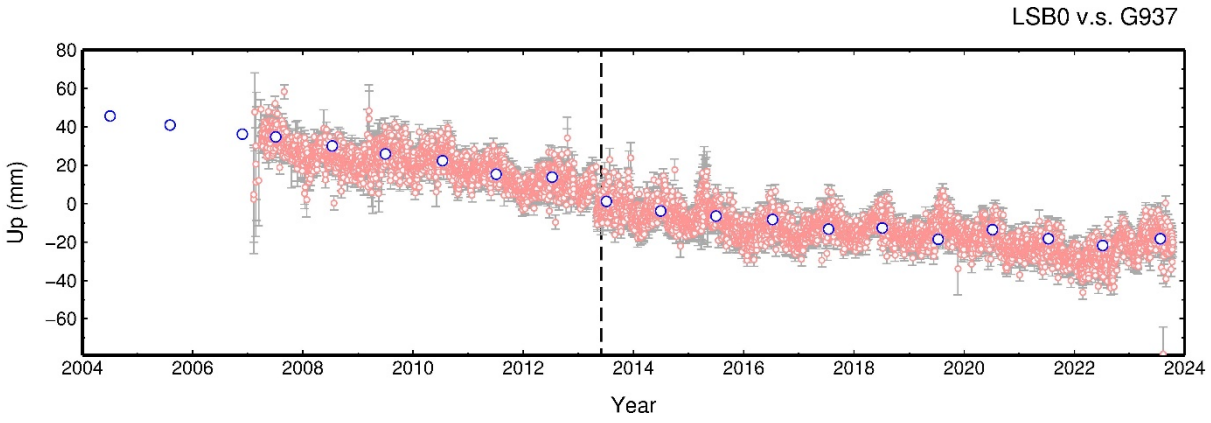


圖 2. 85：龍井至太平水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 85: Time series comparison between Longjing-Taiping leveling bench mark G937 and continuous GNSS station LSB0. The distance between two stations are 0.8 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

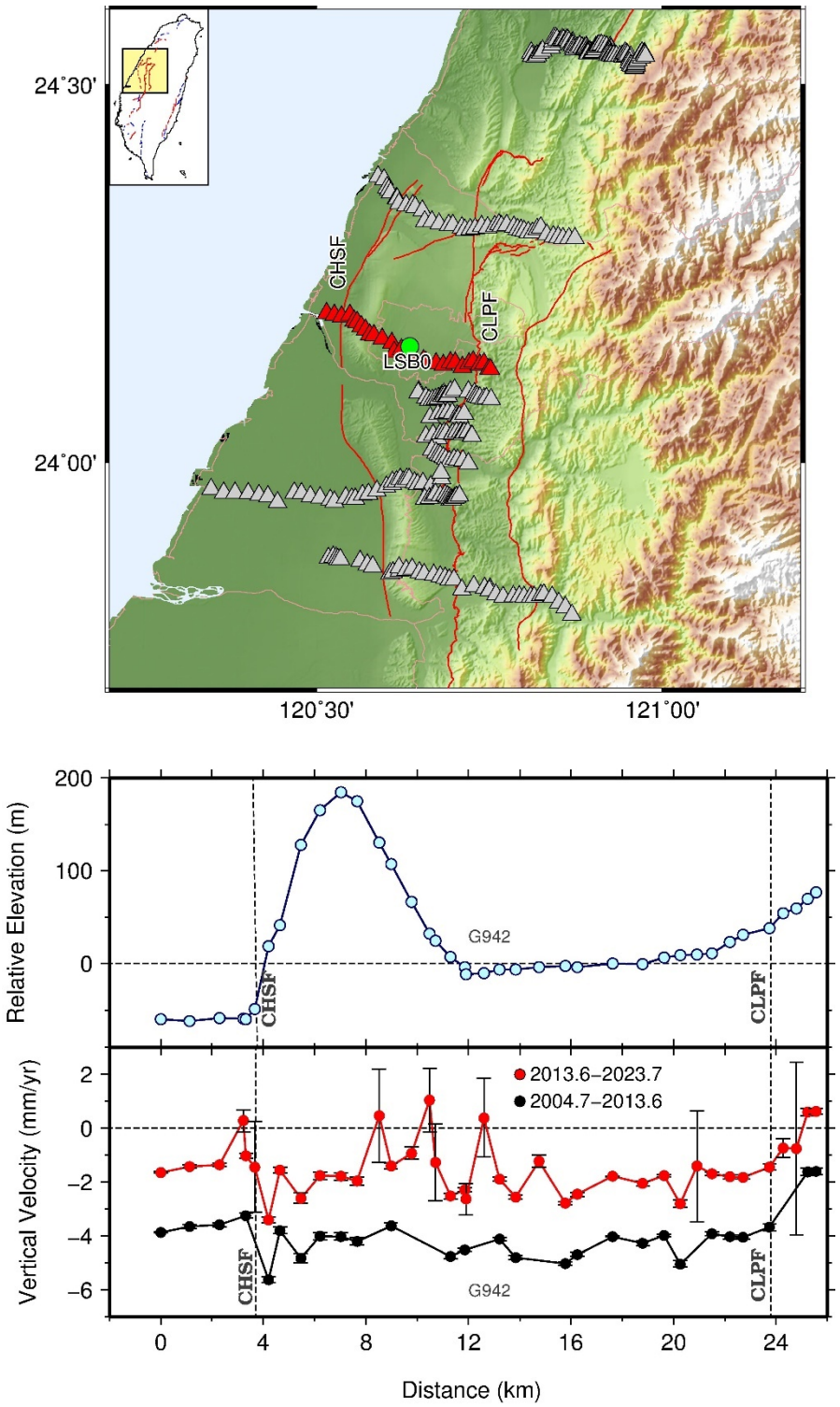


圖 2. 86：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2004 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 至至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為大甲（清水）斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 86: 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. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHSF is Tachia fault (Chinshui fault), CLPF is Chelungpu fault.

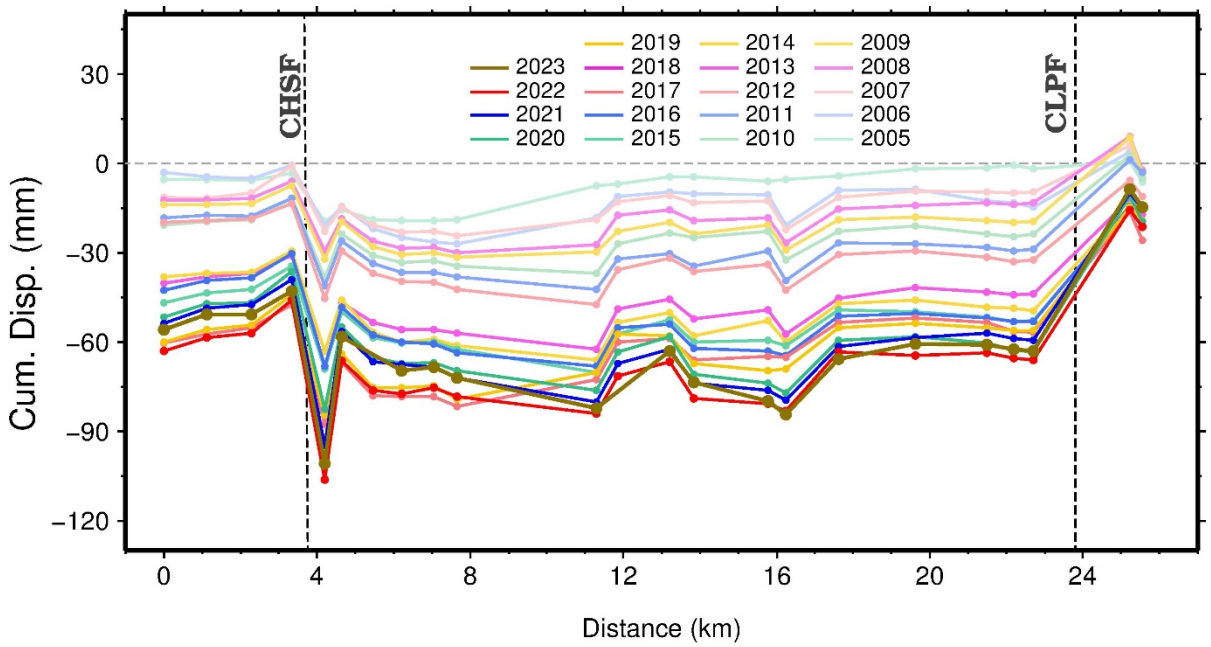


圖 2. 87：縣 136_龍井至太平測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為大甲（清水）斷層、CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 87: Cumulative elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHSF is Tachia fault (Chinshui fault), CLPF is Chelungpu fault.

2-3-5-3 五光至黃竹測線

五光-黃竹測線橫跨車籠埔斷層（圖 2. 89），總長為 11.0 公里（投影至剖面的長度），自 2006 至 2023 年止共計施測 18 次，每年施測一次。本測線以 GNSS 連續站 GS23 之 2013 年地震前垂直速率（-4.7 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.6 mm/yr），自 2006 年開始作為約制點來校正 AF15 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 88）。

從垂直速度及歷年高程變化來看，此測線 2013 年 6 月前與後的垂直速度並無太多變化亦無顯著抬升變化，近幾年並無明顯之變化呈現穩定以-2～-3 mm/yr 之速率下陷（圖 2. 89），累積變化如圖 2. 90。

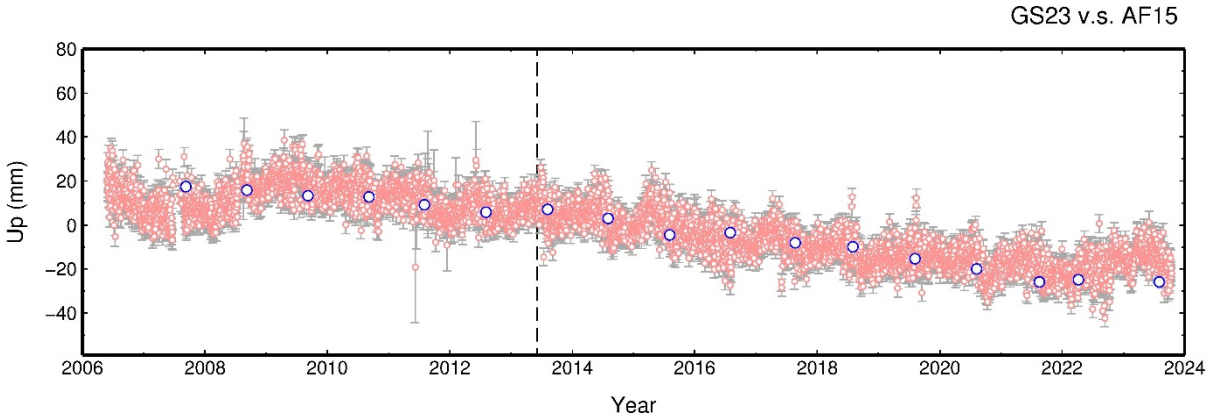


圖 2. 88：五光至黃竹水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 88: Time series comparison between Wuguang-Huangzhu leveling bench mark AF15 and continuous GNSS station GS23. The distance between two stations are 0.03 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

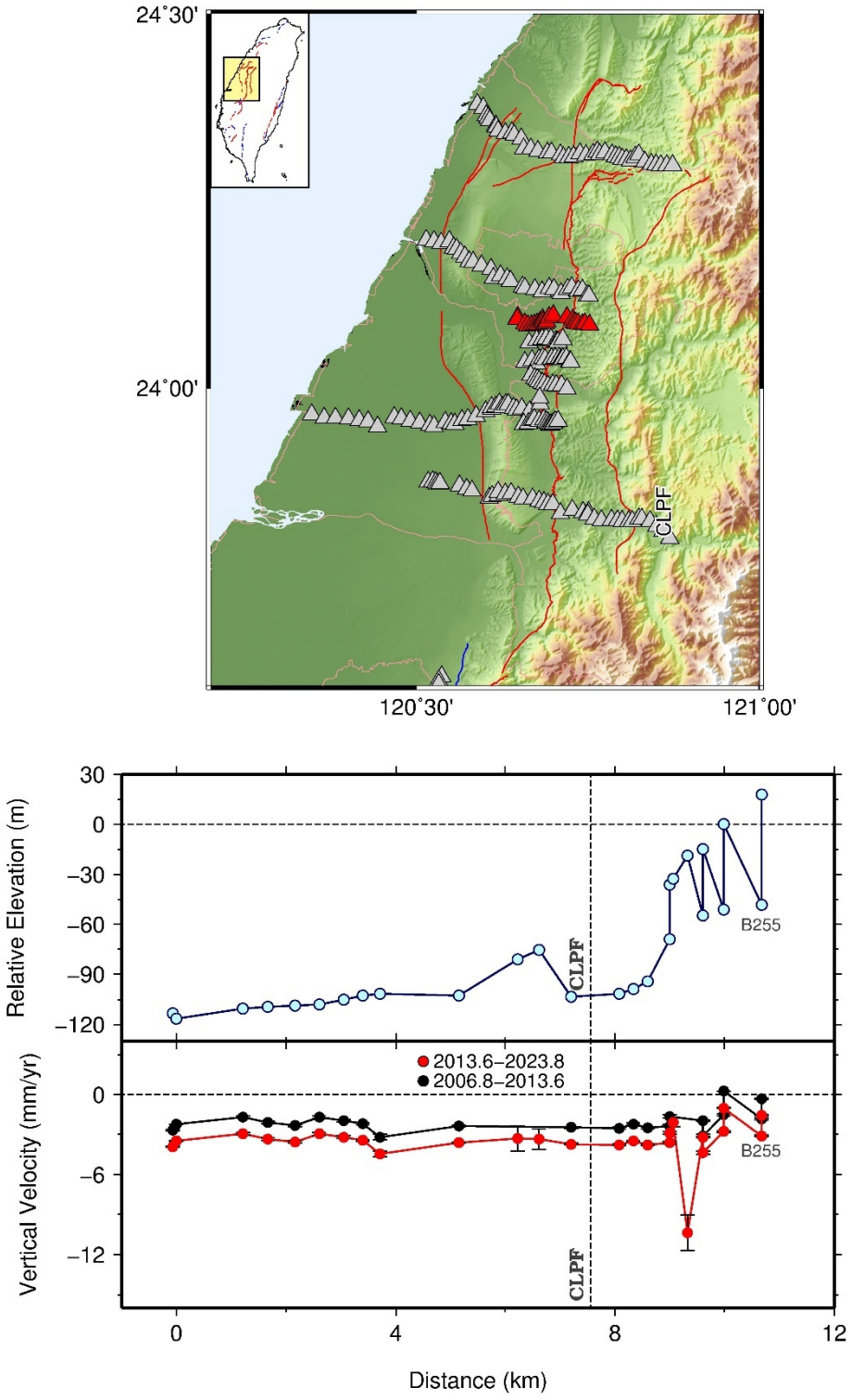


圖 2. 89：五光至黃竹測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2006 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 至至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 89: 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. Black is the vertical velocity before the Nantou earthquake of 2006-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

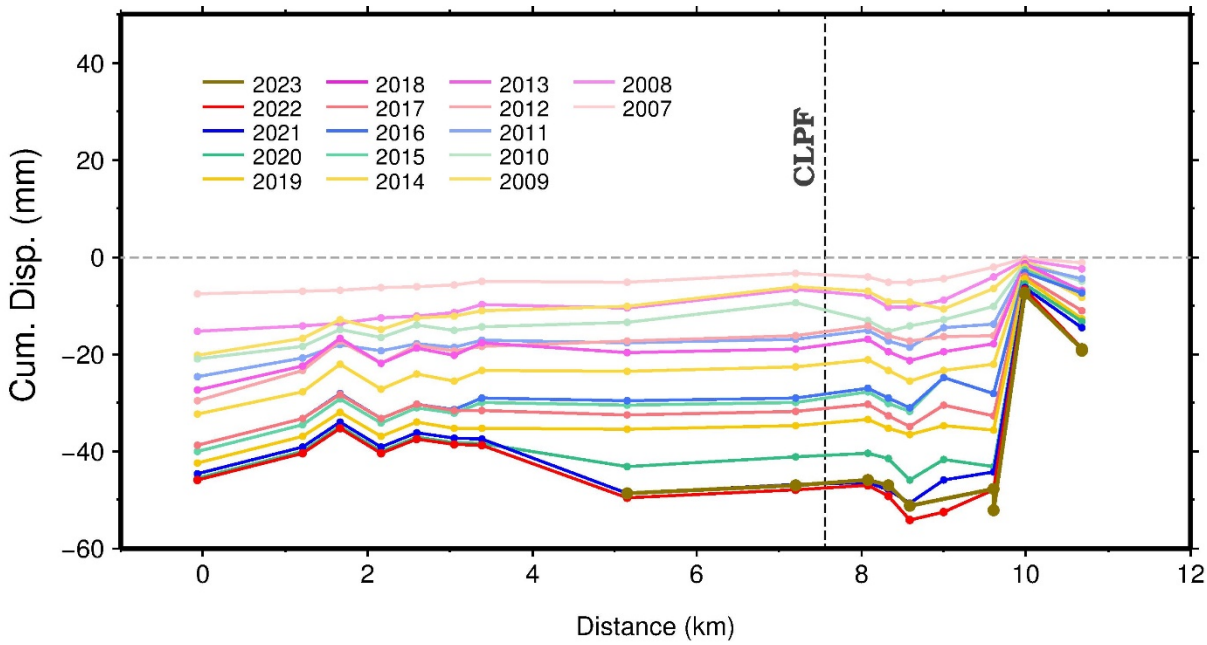


圖 2. 90：五光至黃竹測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 90: Cumulative elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

2-3-5-4 王功至草屯至埔里測線

王功-草屯-埔里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層（圖 2.92），總長為 47.0 公里（投影至剖面的長度）從 2002 年至 2023 共計有 20 次施測。本測線以 GNSS 連續站 CAOT 之 2013 年地震前垂直速率（-2.3 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.3 mm/yr），自 2005 年以來作為約制站來校正 T075 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2.91）。

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

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

在 2013 年南投地震中，跨越大茅埔-雙冬斷層和車籠埔斷層區域，同震位移場主要為抬升，其值在 0.0-10.0 mm 之間。接近彰化斷層前轉為沉陷，跨過斷層後的沉陷量有越來越大的趨勢，其值在 0.0-22 .0mm 之間（圖 2.93）。

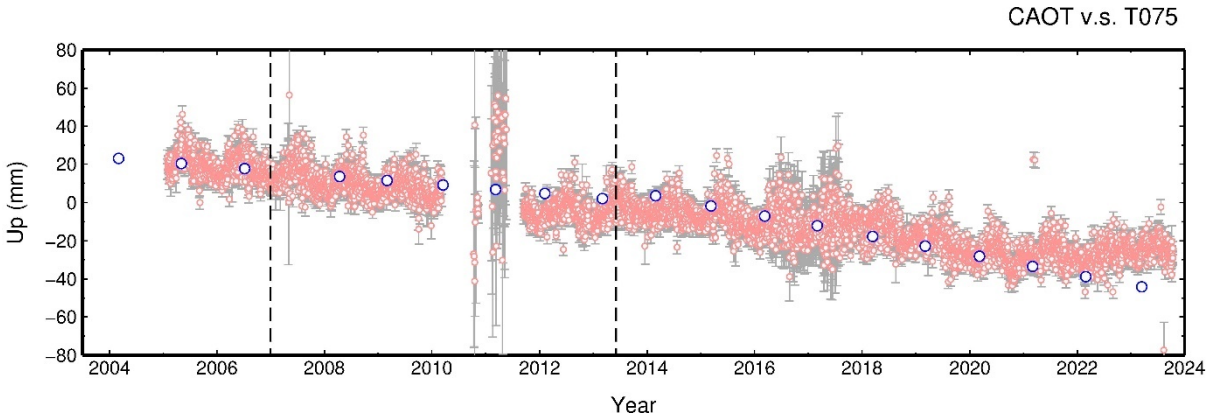


圖 2.91：王功至草屯至埔里測線水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。右側虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 91: Time series comparison between Wanggong-Caotun and Caotun-Puli leveling bench mark T075 and continuous GNSS station CAOT. The distance between two stations are 0.3 km. The right dashed line is June 2nd 2013 Nantou earthquake.

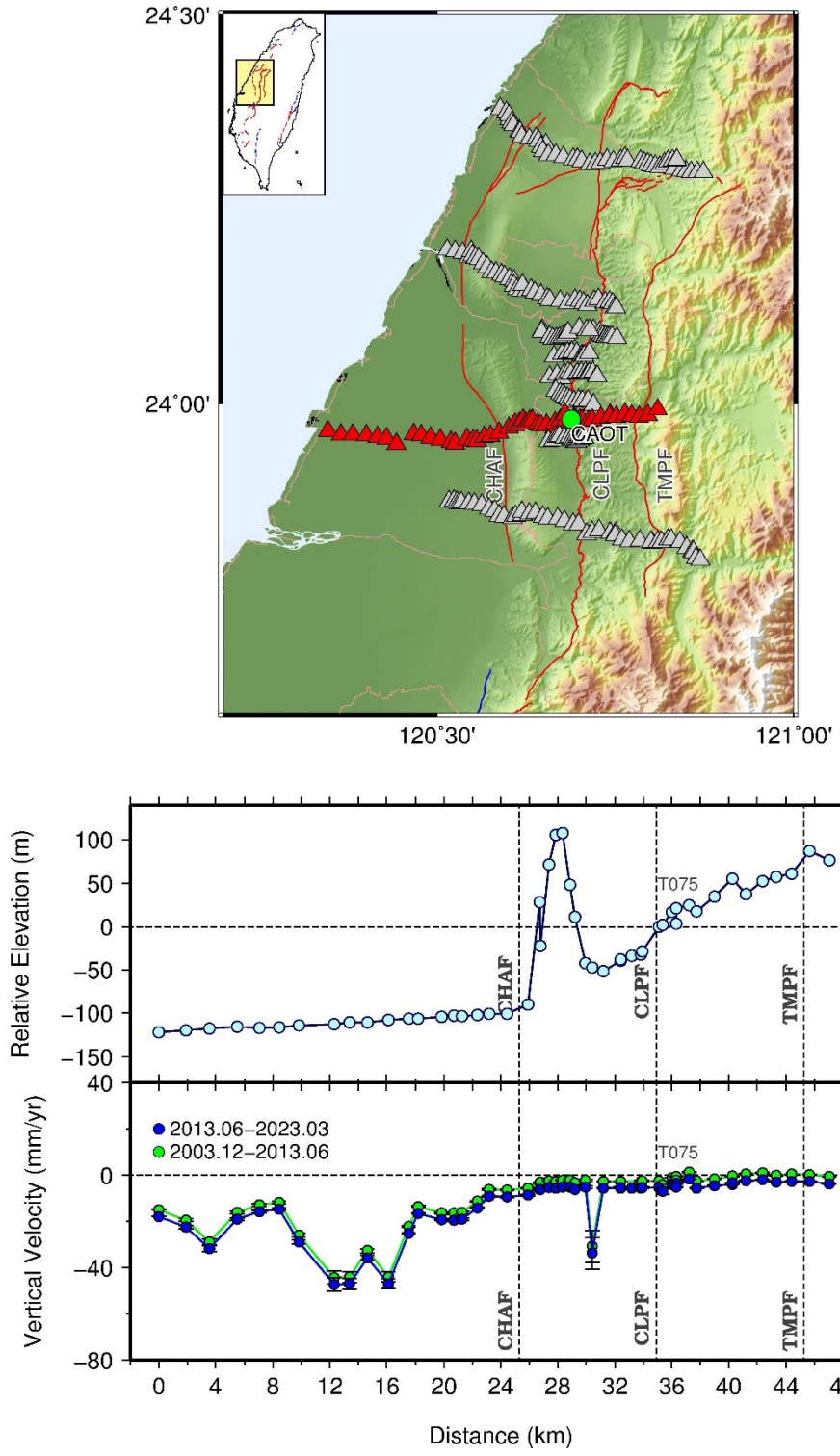


圖 2. 92：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003 - 2013 年南投地震震前垂直速度，藍色為 2013 年至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 92: 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 2003-2013, and blue is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

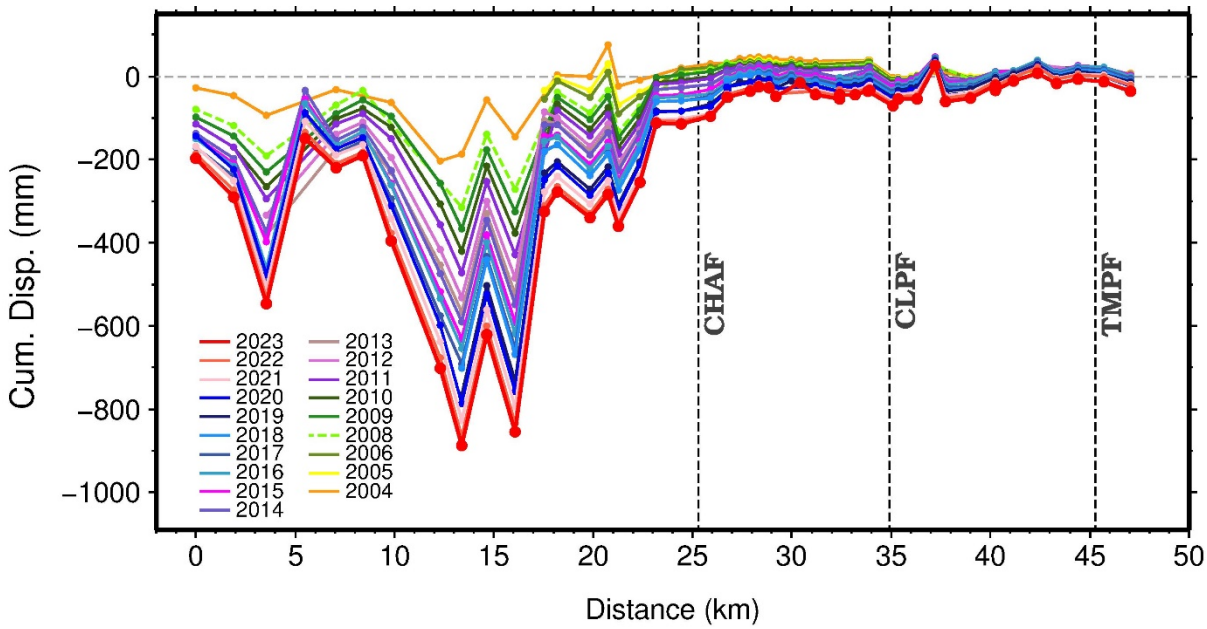


圖 2. 93：縣 148-台 14_王功至草屯至埔里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 93: Cumulative elevation change of the Wanggong-Caotun and Caotun-Puli leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-3-5-5 北斗至水里測線

北斗-水里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層（圖 2. 95），測線長為 36.8 公里（投影至剖面的長度），從 2002 年至 2023 年共計有 20 次施測。本測線以 GNSS 連續站 GS26 之 2013 年地震前垂直速率（-2.9 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-2.9 mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 MX83 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 94），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. 95，2007 年前之垂直速度大致呈現抬升現象，除彰化斷層以西沉降速度約為 10 mm/yr，越往東之抬升速度逐步上升至約 12 mm/yr，2007 年至 2013 年間彰化斷層以西之垂直速度雖沉陷（最大值約-6.0 mm/yr），但不似王功至埔里測線可見明顯的地層下陷現象（最大值約-80.0 mm/yr）。而彰化斷層以東至赤水派出所一帶，高程地形有顯著抬升，但垂直速度變化不大。2013 年後之垂直運動在通過彰化斷層後亦逐步抬升，且最大值約為 12 mm/yr，較往年數值更為增加。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間國小至水里隧道），高程地形與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由-7.0～10.0 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr。

在 2013 年南投地震中，此測線由西向東跨過大茅埔-雙冬斷層前，以同震抬升為主，量值在 6.0-79.0 mm 之間。接著在跨越車籠埔斷層前，抬升量大幅減少，其值落在 6.0-26.0 mm 之間（圖 2. 96）。

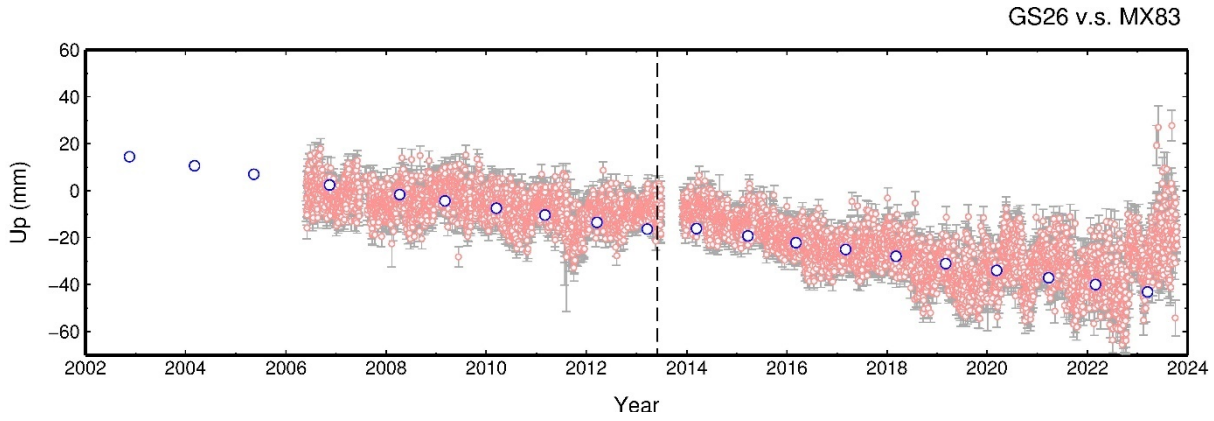


圖 2. 94：北斗至水里水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 94: Time series comparison between Beidou-Shuili leveling bench mark MX83 and continuous GNSS station GS26. The distance between two stations are 1.5 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

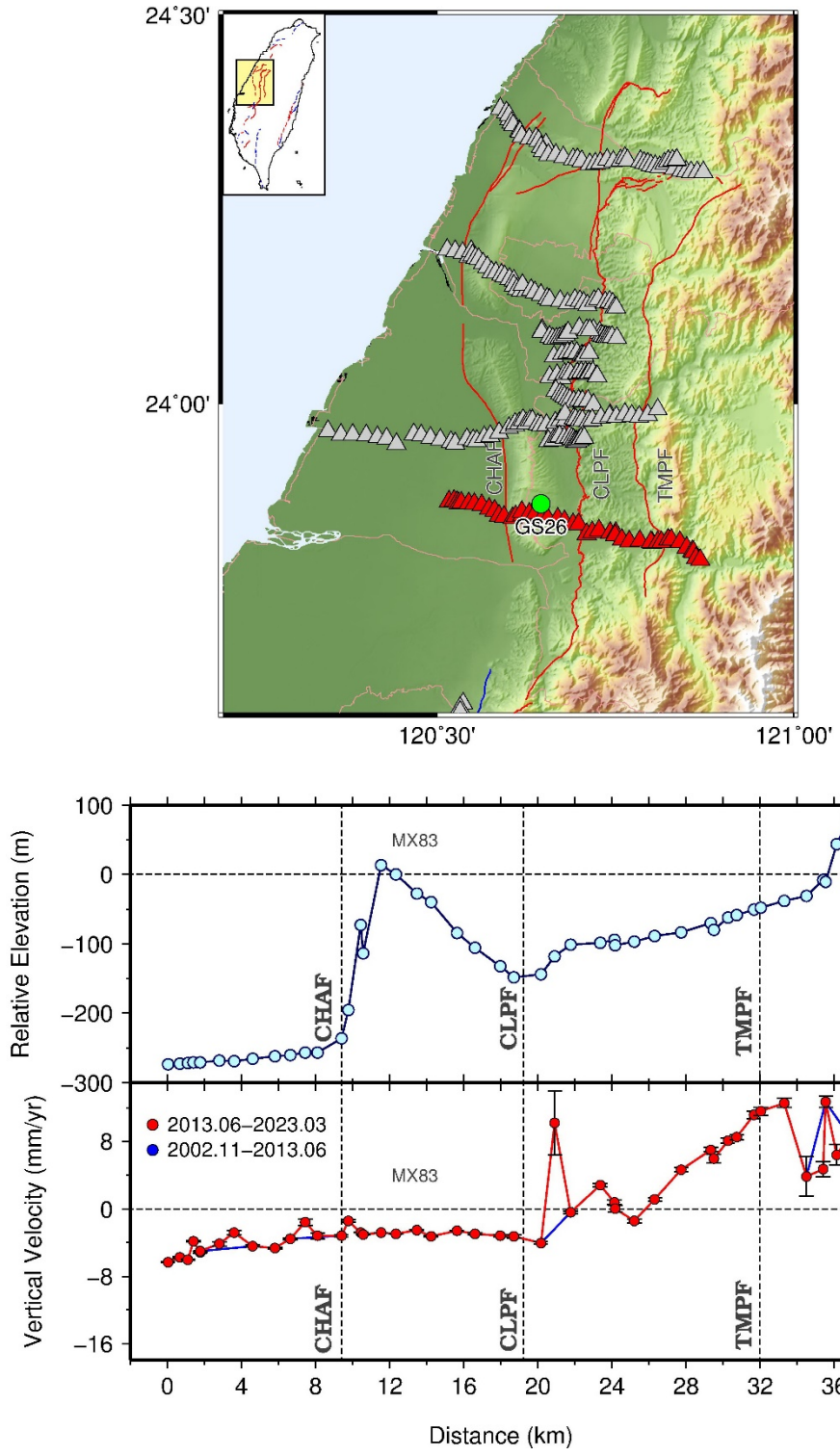


圖 2. 95：縣 150 台 16_北斗至水里水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，藍色為 2002 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 年至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 95: 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. Blue is the vertical velocity before the Nantou earthquake of 2002-2013, and red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

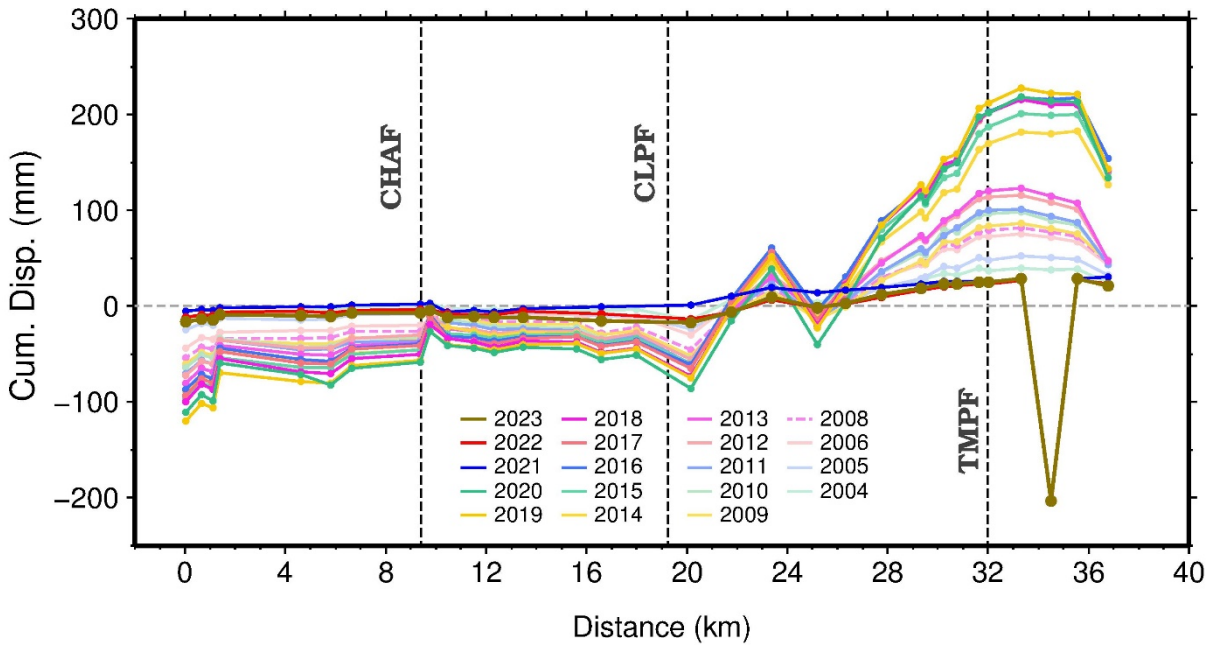


圖 2. 96：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2. 96: Cumulative elevation change of the Beidou-Shuili leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPF is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-3-5-6 跨車籠埔斷層短測線

經濟部地質調查及礦業管理中心從 2007 年起在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，由北至南分別為五光至黃竹、曾厝至霧峰（圖 2. 101）、北勢至峰谷（圖 2. 102）、烏溪南岸（圖 2. 103）及中興新村（圖 2. 104），其中五光至黃竹測線已於前面章節說明。其餘 4 條短測線自 2015 年開始改為 4 年施測一次，自 2007 至 2023 年止共計施測 10 次。烏溪南岸測線測量點位經查證後已確認測量樁點 T060 遭掩埋，無法繼續觀測。

4 條短測線分別以 GPS 連續站 WUFN、WFEN、CAOT、KZN1 之 2013 年地震前垂直速率（-4.7 mm/yr、-2.4 mm/yr、-3.1 mm/yr、-2.5 mm/yr、-4.1 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.6 mm/yr、-3.1 mm/yr、-1.7 mm/yr、-0.4 mm/yr、-3.5 mm/yr），作為約制點 T074、GE89、T005、B238 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 97、圖 2. 98、圖 2. 99、圖 2. 100）。

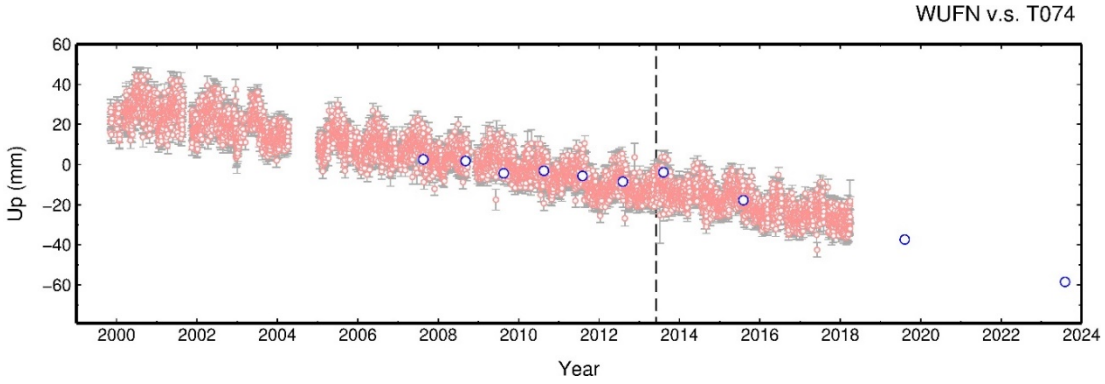


圖 2. 97：曾厝至霧峰水準點位 T074 與連續站 WUFN 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 97: Time series comparison between Zengcuo-Wufeng leveling bench mark T074 and continuous GPS station WUFN. The distance between two stations are 2.1 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

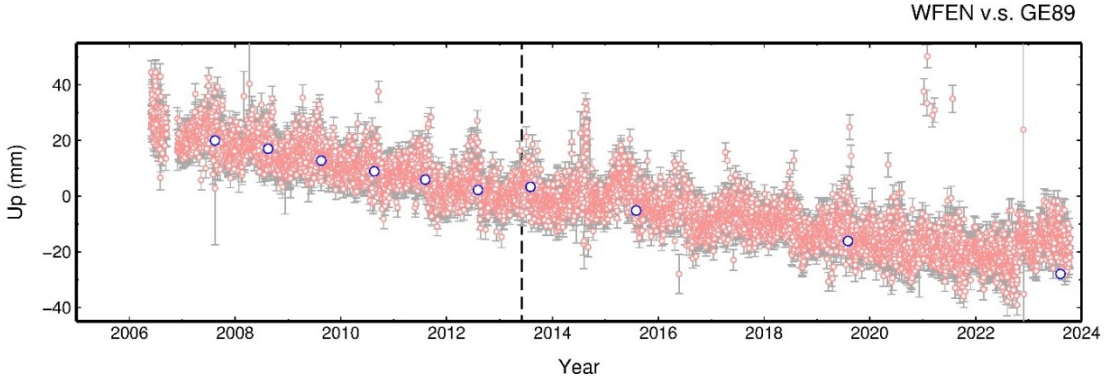


圖 2. 98：北勢至峰谷水準點位 GE89 與連續站 WFEN 之時間序列比較，兩者相距 0.4 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 98: Time series comparison between Beishi-Fenggu leveling bench mark GE89 and continuous GPS station WFEN. The distance between two stations are 0.4 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

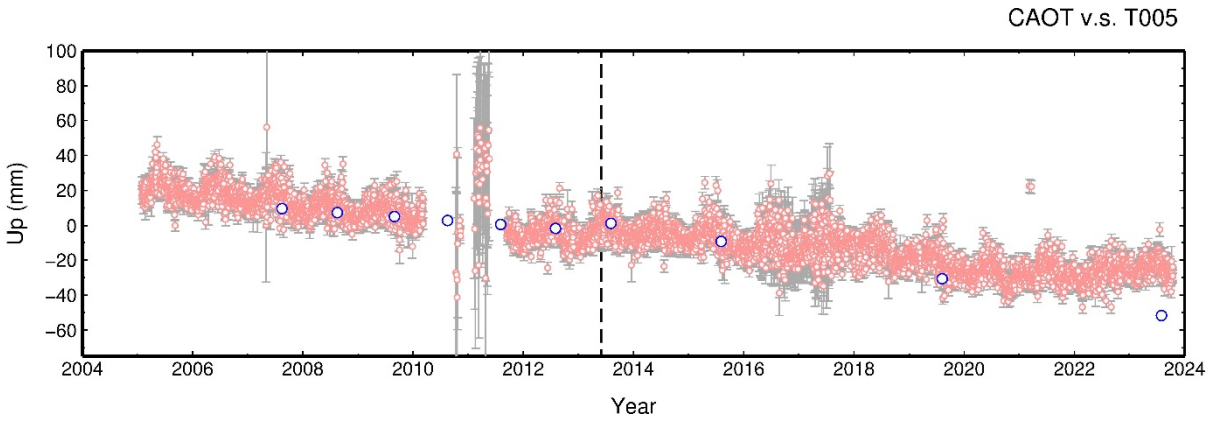


圖 2. 99：烏溪南岸水準點位 T005 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 2.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 99: Time series comparison between South Bank of Wuxi leveling bench mark T005 and continuous GPS station CAOT. The distance between two stations are 2.5 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

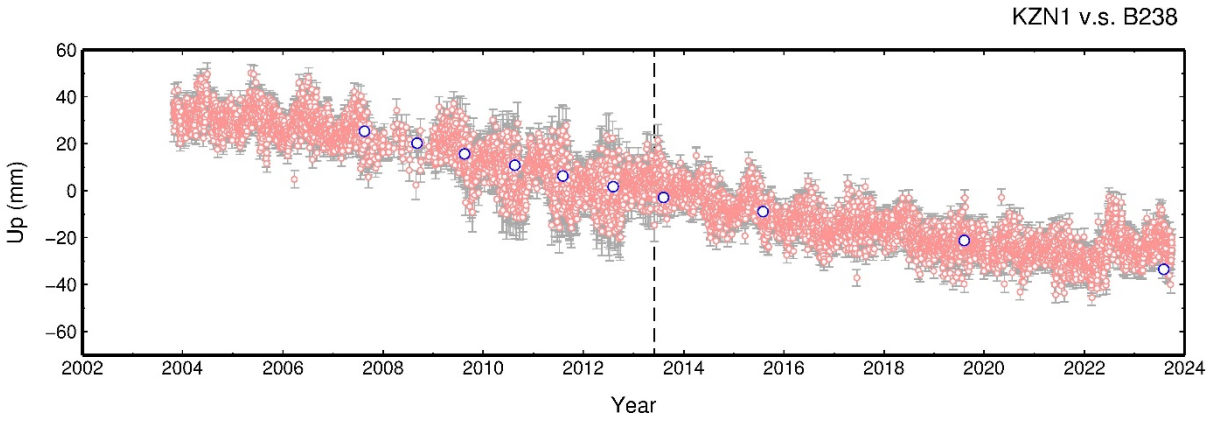


圖 2. 100：中興新村水準點位 B238 與連續站 KZN1 之時間序列比較，兩者相距 0.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2. 100: Time series comparison between Zhongxing New Village leveling bench mark B238 and continuous GPS station KZN1. The distance between two stations are 0.5 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

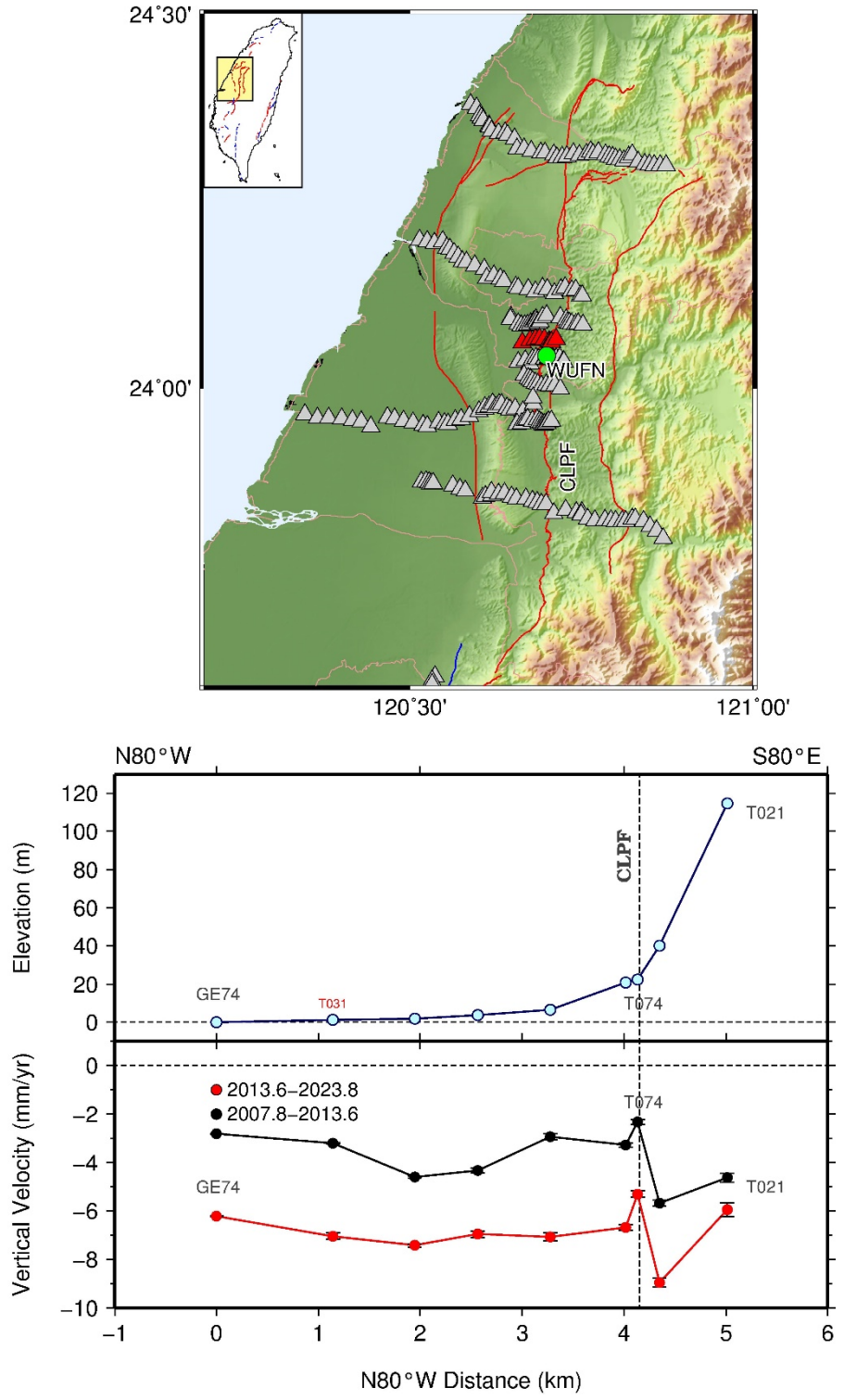


圖 2. 101：曾厝至霧峰測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2007 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 年至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 101: Elevation change of the Zengcuo-Wufeng 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 2007-2013, and red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

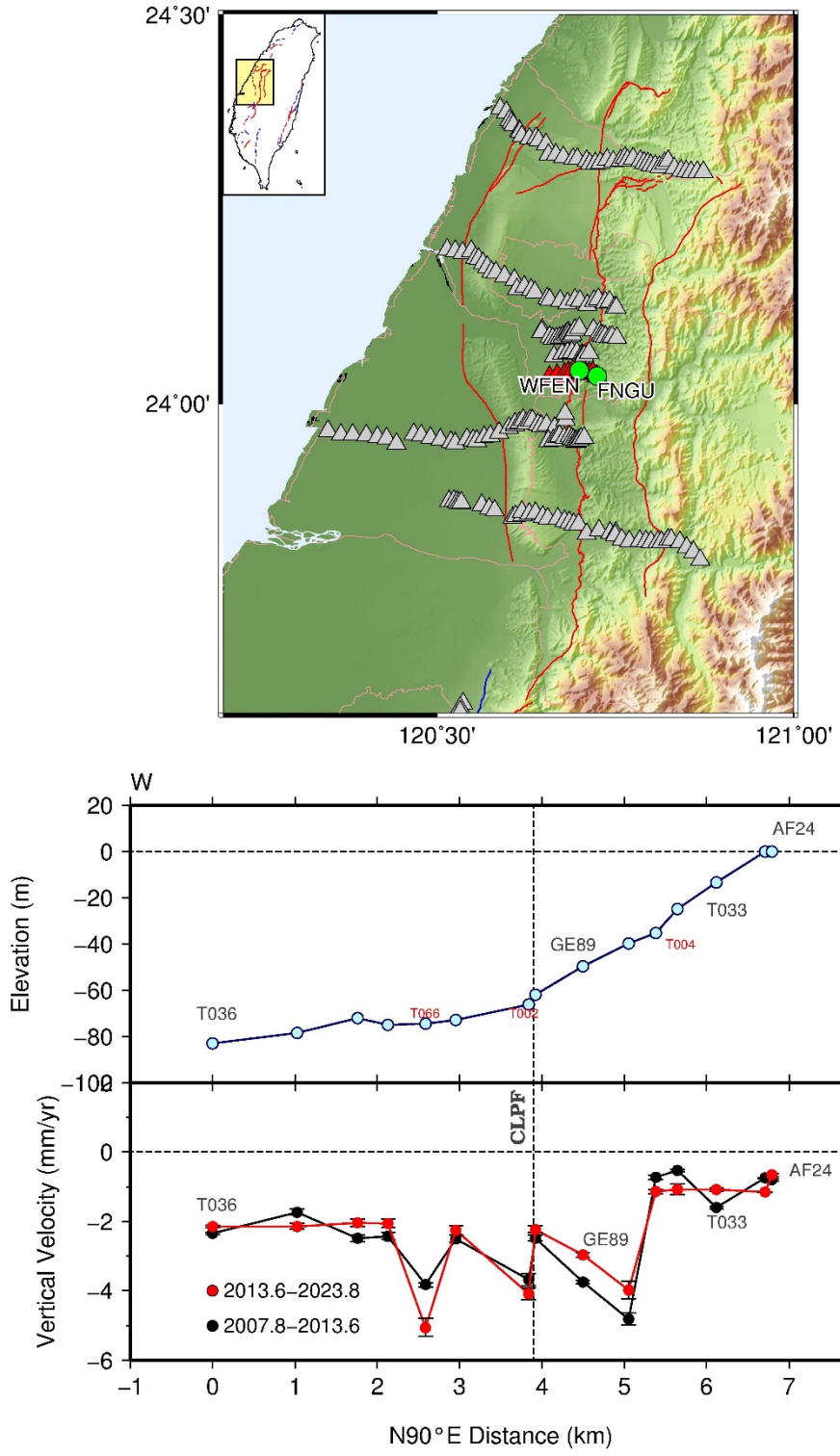


圖 2. 102：北勢至峰谷測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2007 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 年至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 102: Elevation change of the Beishi-Fenggu 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 2007-2013, and red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

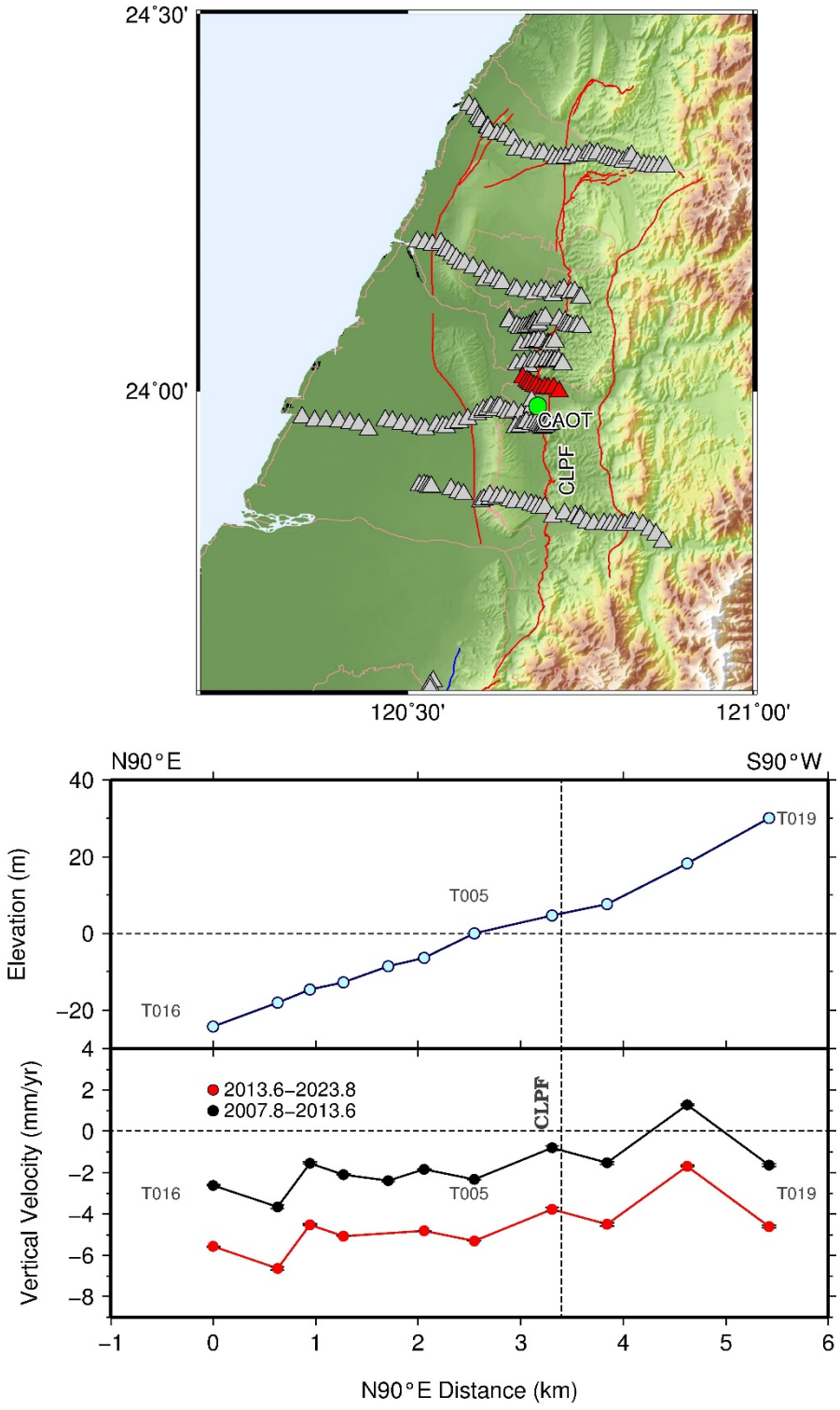


圖 2. 103：烏溪南岸測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2007 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 年至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 103: Elevation change of the South Bank of Wuxi 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 2007-2013, and red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

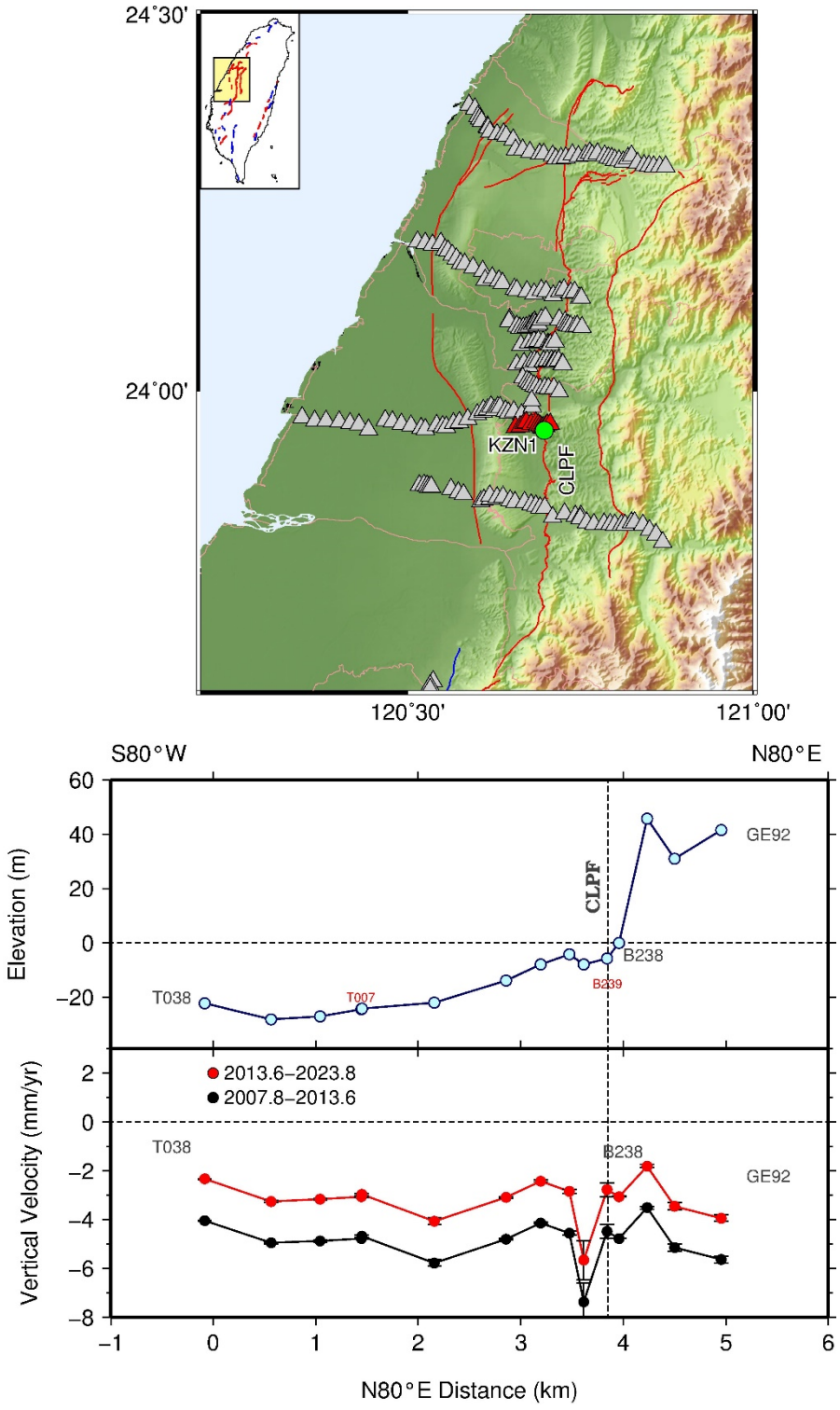


圖 2. 104：中興新村測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2007 - 2013 年南投地震震前垂直速度，紅色為 2013 年至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2. 104: Elevation change of the Zhongxing New Village 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 2007-2013, and red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

2-3-6 嘉南地區精密水準測線

2-3-6-1 金湖至瑞峰測線

金湖至瑞峰測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層（圖 2. 106），投影至剖面的長度為 52.6 公里，2003 年至 2023 年間共進行 21 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 2. 105）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G732、G737、GF65 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 2. 106），最大沉陷值達 24.6 mm/yr，九芎坑斷層以東則大多介在-2.0 至 9.0 mm/yr 之間，往東有抬升越顯著的趨勢。而於圖 2. 107 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。

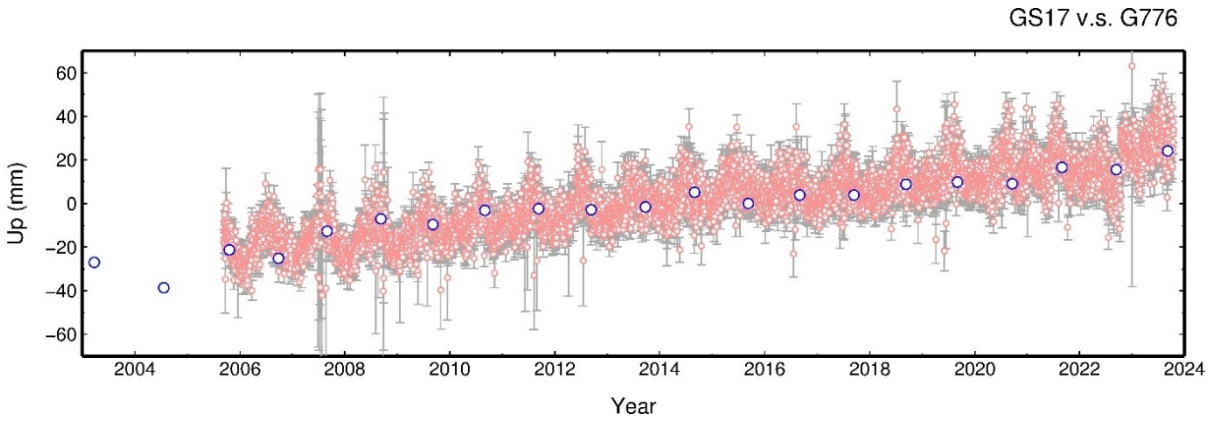


圖 2. 105：金湖至瑞峰水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

Figure 2. 105: Time series comparison between Jinhu-Ruifeng leveling bench mark G776 and continuous GNSS station GS17. The distance between two stations are 0.02 km.

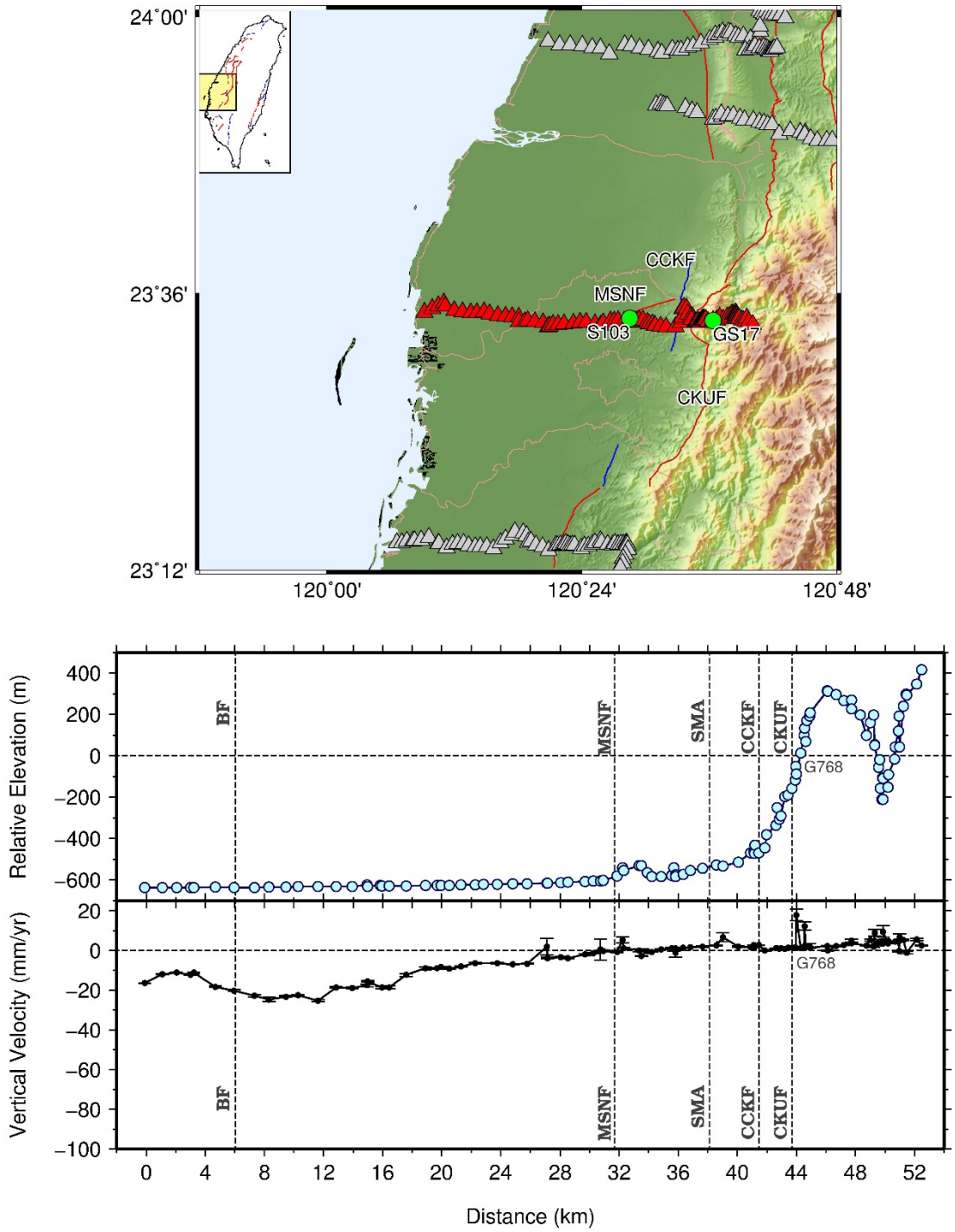


圖 2. 106：縣 164_金湖至瑞峰水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2. 106: Elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

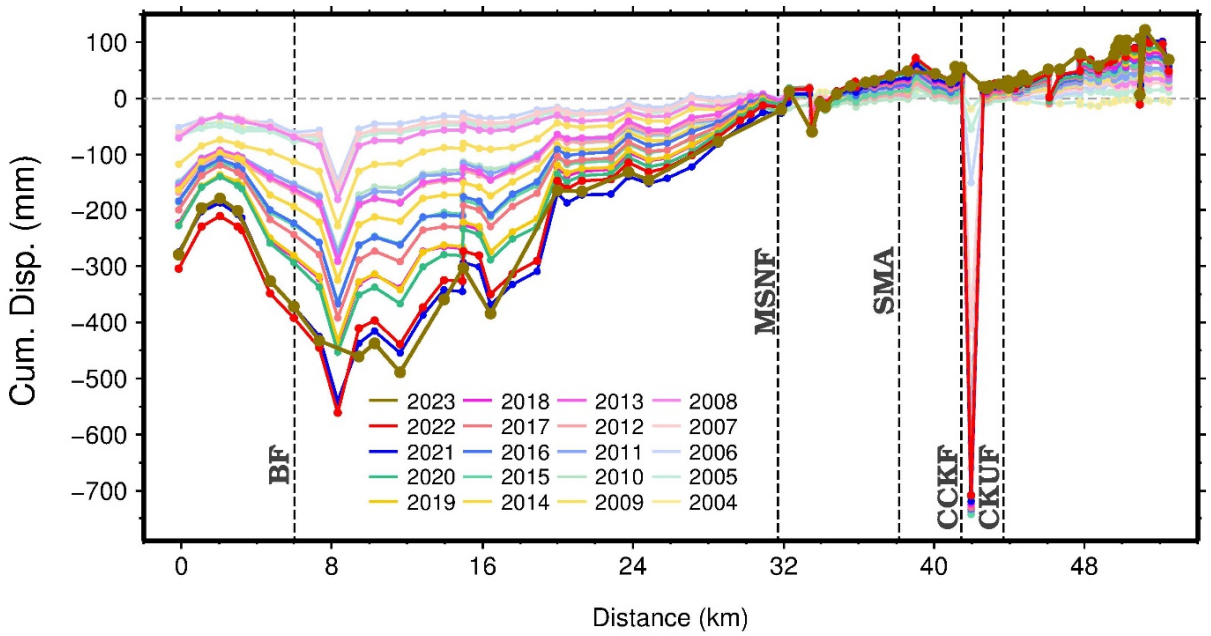


圖 2. 107：縣 164_金湖至瑞峰測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2. 107: Cumulative elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

2-3-6-2 北門至楠西測線

嘉南地區完成的精密水準測線為北門-楠西測線（圖 2. 109），該測線橫跨六甲斷層與口宵里斷層。測線剖面投影長度為 40.0 公里（圖 2. 109），從 2003 年至 2023 年共計施測 20 次，每年施測一次。各年度之水準施測成果，以累積高程展示於圖 2. 110。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 I099 已滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS44 作為約制點，自 2008 年以來校正水準點 I088 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 108）。GS44 與 I088 間之點位距離為 0.9 公里。點位 GS44 於 2003 年至 2010 年甲仙地震間之垂直速率為 8.6 mm/yr；2010 年甲仙地震震後至 2016 年美濃地震間之垂直速率為 8.6 mm/yr；2016 年美濃地震後至今之垂直速率為 6.7 mm/yr。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 2. 109）：黑色為 2003 年 10 月至 2010 年甲仙地震期間之垂直速度、紅色為 2010 年甲仙地震至 2016 年美濃地震間之垂直速度、綠色為 2016 年美濃地震至 2023 年 4 月之垂直速度。六甲斷層以西為西部海岸平原，地形高程變化和緩，在六甲斷層以西 18 公里至六甲斷層間呈 0.0-4.0 mm/yr 之抬升，然而在六甲斷層以西 18 公里以西之區域，有約 0-11.0 mm/yr 之沉陷量。在接近六甲斷層逐步轉為為抬升，斷層以東有達到 16.0 mm/yr 以上的垂直抬升速度。由於本測線自六甲斷層以東點位的地形變化趨勢變得較顯著，顯示自進入山區地段，地表垂直運動活動性增加，其中 G824 在美濃地震以後更有高達 51.7 mm/yr 的沉陷。在 2016 年美濃地震中，北門-楠西水準測線跨同震位移場主要為抬升，其值在 0-20 mm 之間（圖 2. 110）。

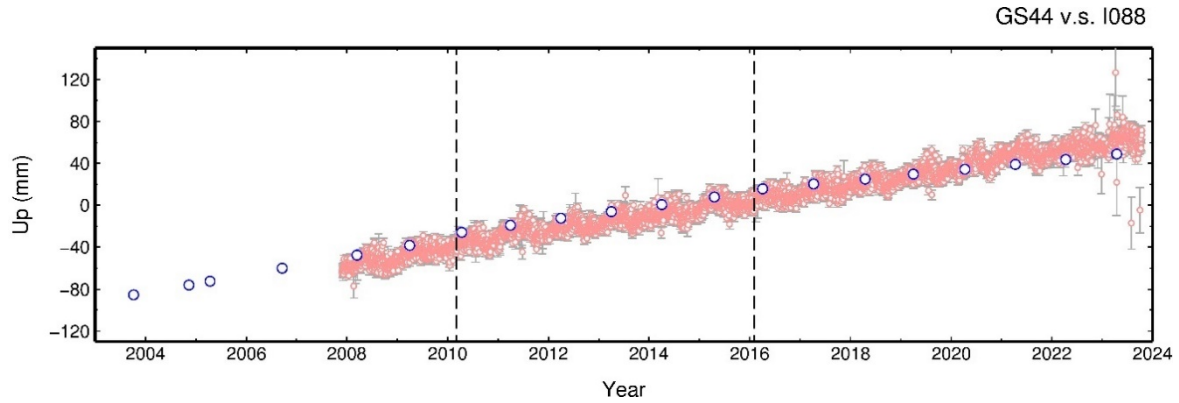


圖 2. 108：北門至楠西測線水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2. 108: Time series comparison between Beimen-Nanxi leveling bench mark I088 and continuous GNSS station GS44. The distance between two stations are 0.9 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

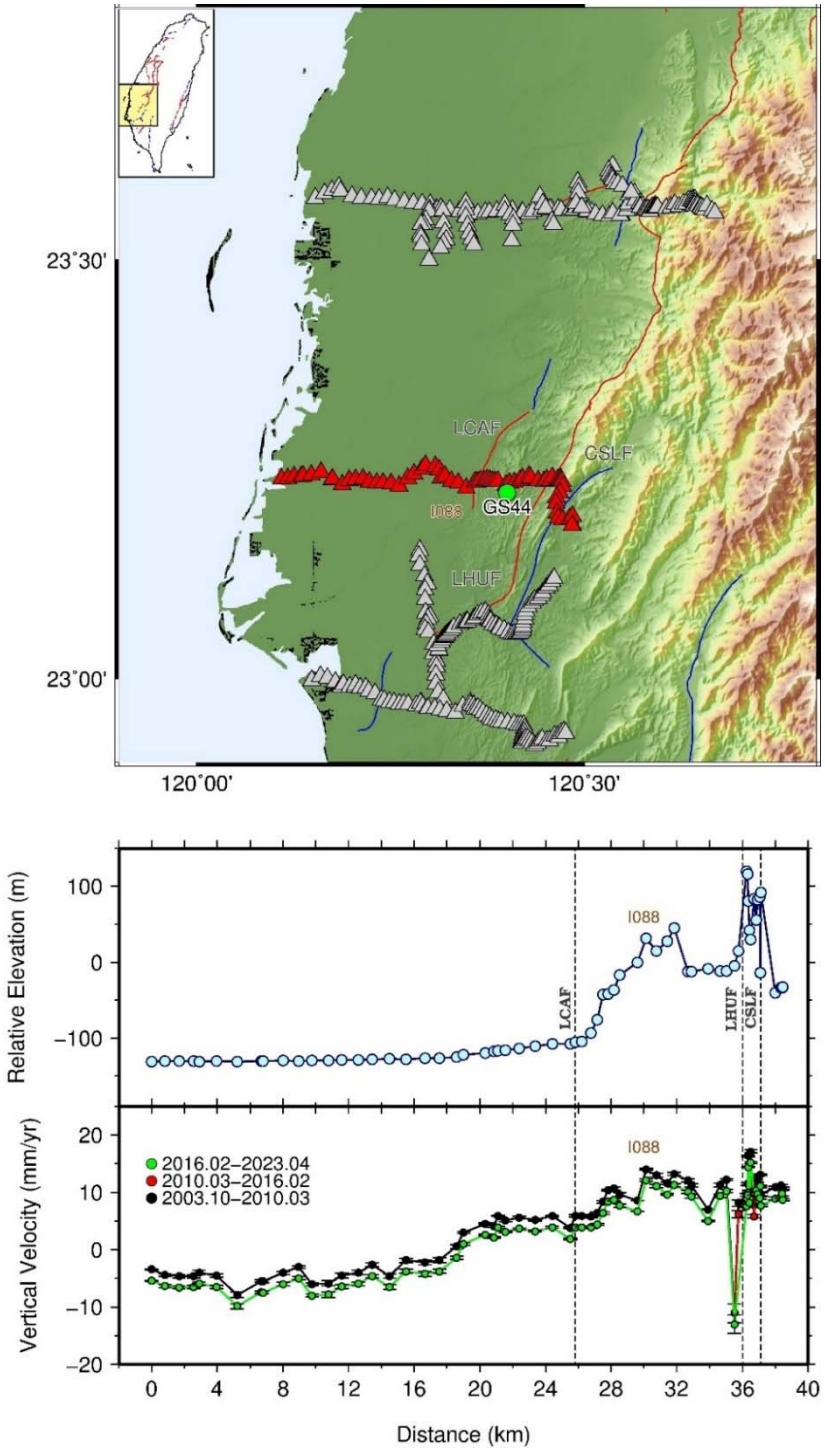


圖 2. 109：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口（崙後）斷層，CSLF 為口宵里斷層。

Figure 2. 109: Elevation change of the Beimen-Nanxi leveling route. (a)The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010, red is the vertical velocity from 2010 to 2016, and green is the vertical velocity from 2016 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LCAF is Liuchia fault, LHUF is Chukou fault (Lunhou fault), and CSLF is Kouhsiaoli fault.

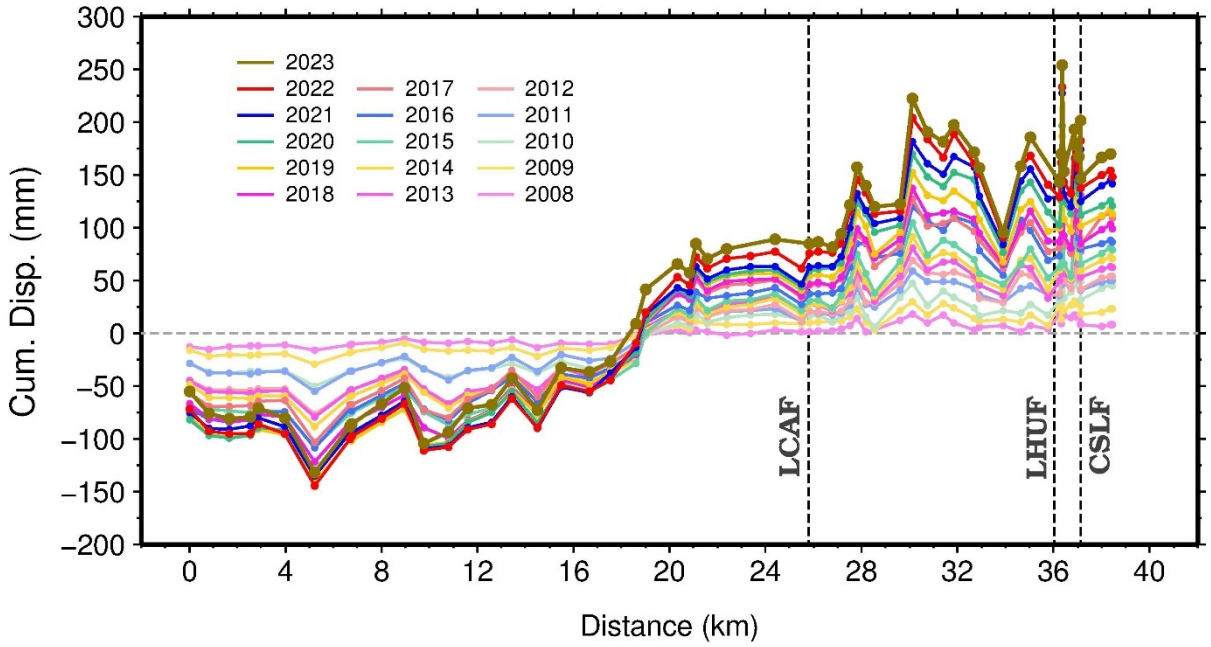


圖 2. 110：縣 174_北門至楠西測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層，LHUF 為觸口（崙後）斷層，CSLF 為口宵里斷層。

Figure 2. 110: Cumulative elevation change of the Beimen-Nanxi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LCAF is Liuchia fault, LHUF is Chukou fault (Lunhou fault), and CSLF is Kouhsiaoli fault.

2-3-6-3 善化至關廟測線

善化至關廟測線由北往南走橫跨新化斷層，測線剖面投影長度為 21.3 公里（圖 2. 112），從 2003 年至 2023 年共計有 19 次施測，每年施測一次。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G370、GF93 已滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS29 之垂直速率，自 2017 年以來作為約制站來校正 G377 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 111）。點位 GS29 於 2003 年至 2010 年甲仙地震間之垂直速率為 6.1mm/yr；2010 年甲仙地震震後至 2016 年美濃地震間之垂直速率為 1.5 mm/yr；2016 年美濃地震後至今之垂直速率為 1.7 mm/yr。

2016 年美濃地震造成此水準測線點位有-7.0-39.0 mm 之同震位移量（圖 2. 113）。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在測線南段（約新化區至關廟區一帶）最大變化量達 39.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮地震之同震位移之影響。

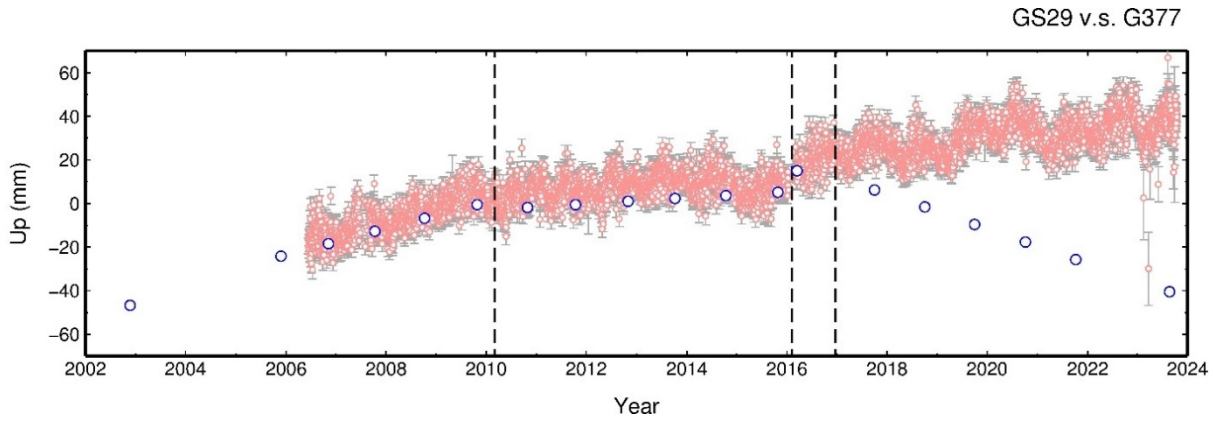


圖 2. 111：善化至關廟水準點位 G377 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震、2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正震後位移影響。

Figure 2. 111: Time series comparison between Shanhua-Guanmiao leveling bench mark G377 and continuous GNSS station GS29. The distance between two stations are 2.1 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake, and the right one is the correction of coseismic slip event.

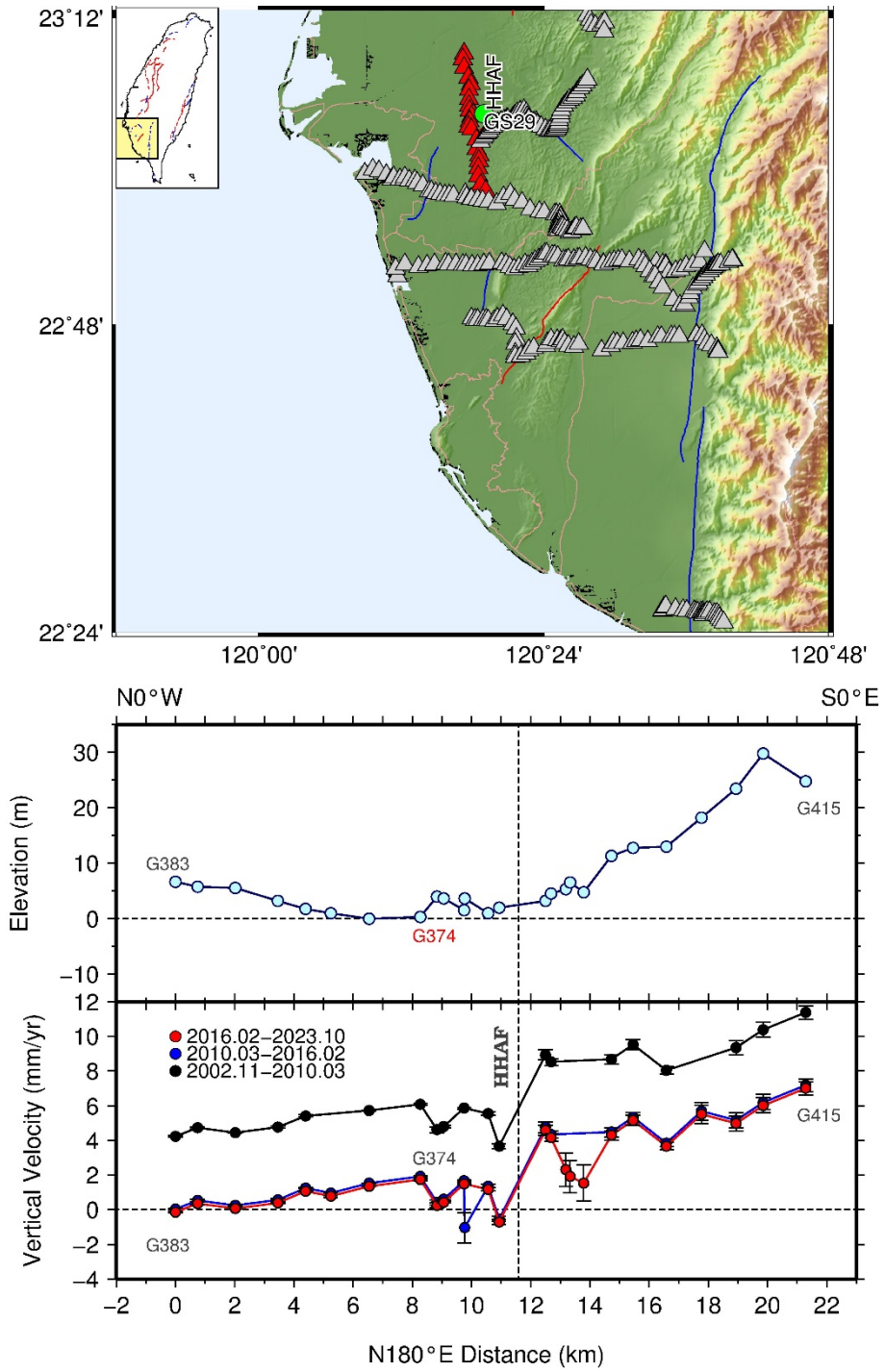


圖 2. 112：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2002 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

Figure 2. 112: 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. Black 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. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault.

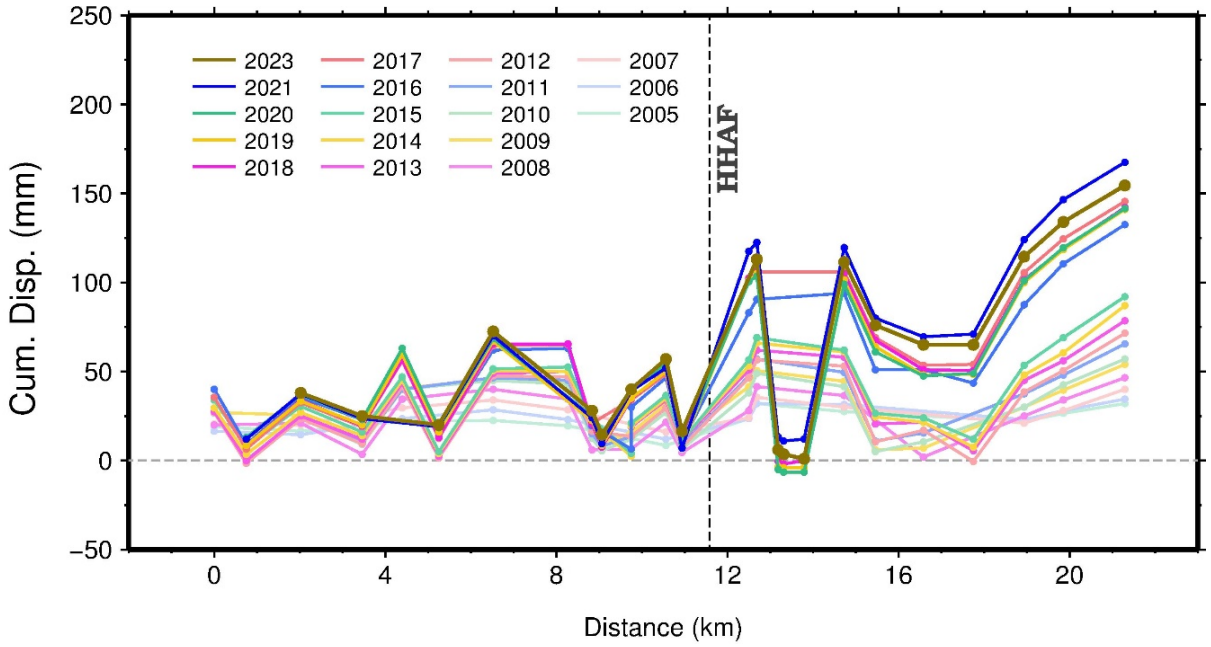


圖 2. 113：台 19 甲_善化至關廟測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

Figure 2. 113: Cumulative elevation change of the Shanhua-Guanmiao leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault.

2-3-6-4 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層（圖 2. 115），從臺南安平區至龍崎區，2013 年起延伸至高雄市內門區，測線剖面投影長度為 32.3 公里，從 2001 年至 2023 年共計有 24 次施測。本測線以 GNSS 連續站 CKSV 之 2001 年 7 月至 2003 年 12 月成功地震垂直速率（0.4 mm/yr）、成功地震至 2010 年 3 月甲仙地震垂直速率（0.4 mm/yr）、震後至 2016 年 2 月美濃地震垂直速率（1.4mm/yr）以及美濃地震至今之垂直速率（1.7 mm/yr），自 2007 年以來作為約制點來校正 TN04 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 114），本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G359 滅失，無法繼續觀測；測量樁點 TN07 有遮蔽，無法進行觀測。

各時期之水準分段垂直速率呈現分為（圖 2. 115）：黑色為 2001 年 7 月至 2003 年 12 月之垂直速度，在跨越後甲里斷層前後皆為沉降，其值在 5.0-10.0 mm/yr 之間，越靠近龍船斷層時逐步抬升；綠色為 2003 年 12 月至 2010 年 3 月之垂直速度，跨越後甲里斷層前為 5.0-10.0 mm/yr 沉降，但跨越斷層後沉降速度有明顯減緩之情況，靠近龍船斷層前逐步轉為抬升；藍色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月之垂直速度，在後甲里斷層以西為 5.1-9.4 mm/yr 沉降，通過後甲里斷層後速度無顯著變化，往東接近龍船斷層逐轉為抬升；紅色為 2016 年 2 月至 2021 年 5 月之垂直速度，後甲里斷層以西呈現 0.0 -5.4 mm/yr 沉降，而往東通過斷層後呈現抬升，以 0-20.0 mm/yr 的數值往東遞增。

由歷年高程變化圖可知（圖 2. 116），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。

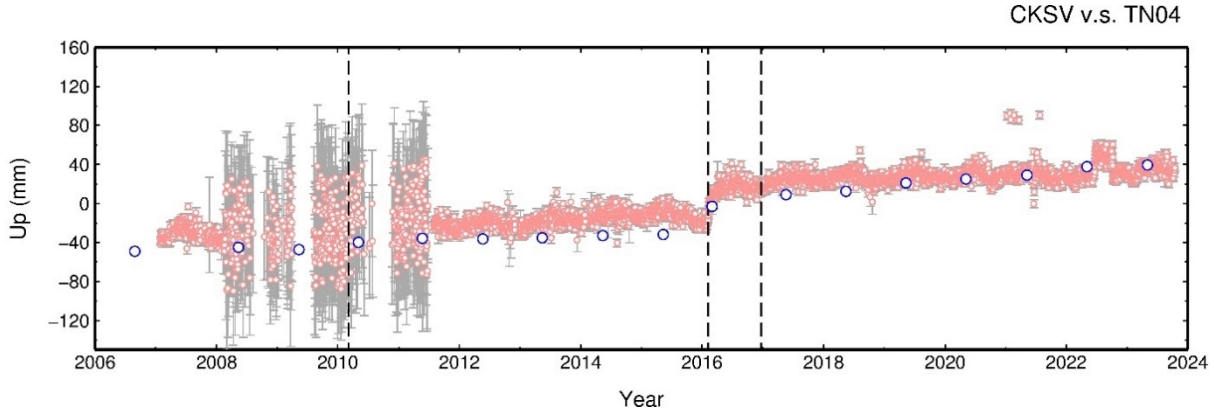


圖 2. 114：安平至龍崎水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2. 114: Time series comparison between Anping-Longci leveling bench mark TN04 and continuous GNSS station CKSV. The distance between two stations are 0.9 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake, and the right one is the correction of postseismic slip event.

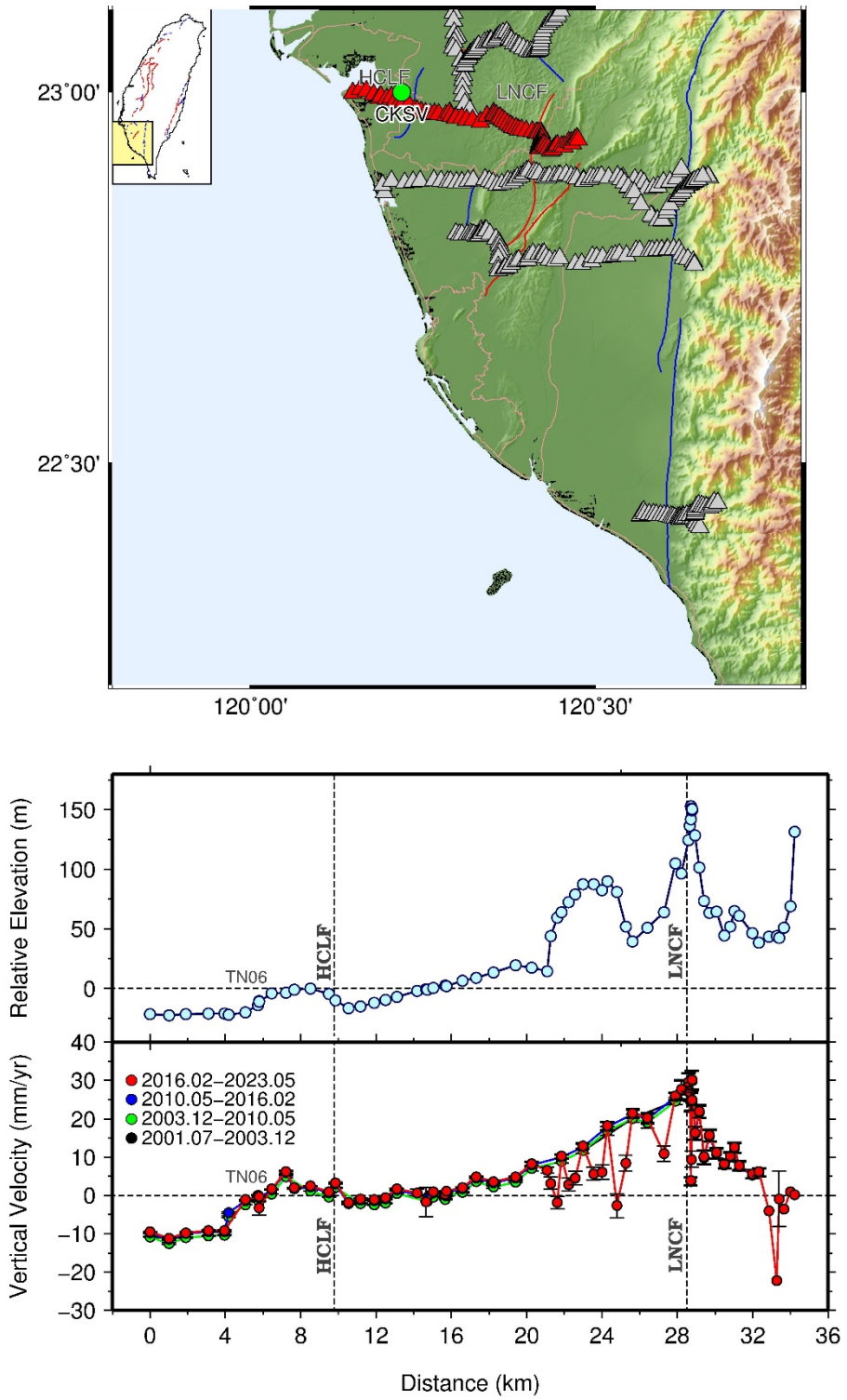


圖 2. 115：安平至龍崎測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 2. 115: 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. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCLF is the Houchiali fault and LNCF is Lungchuan fault.

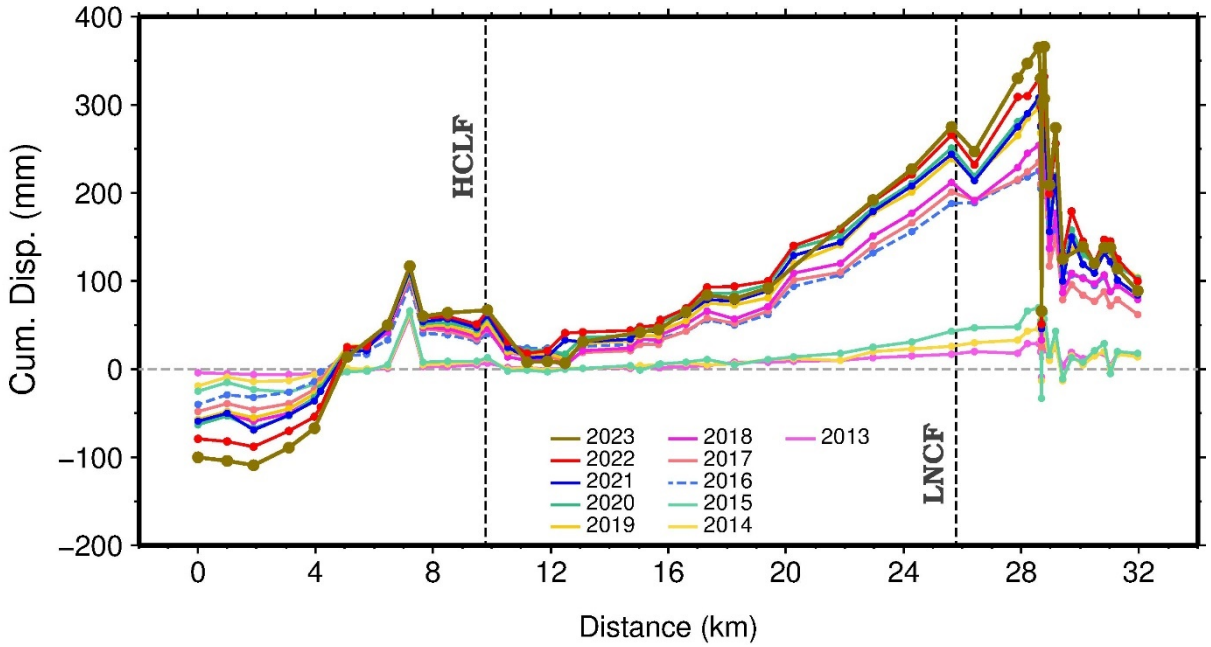


圖 2. 116：安平至龍崎測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、LNCF 為龍船斷層。

Figure 2. 116: Cumulative elevation change of the Anping-Longci leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCLF is the Houchiali fault and LNCF is Lungchuan fault.

2-3-6-5 新化至玉井測線

新化至玉井精密水準測線橫跨左鎮斷層（圖 2. 118），測線剖面投影長度為 17.2 公里，從 2016 年至 2023 年共計有 8 次施測。各年度之水準施測成果，以累積高程展示於圖 2. 119。

本測線以 GNSS 連續站 CKSV 之垂直速率（-0.4 mm/yr），自 2016 年以來作為約制點來校正 J006 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 117）。

此測線新化斷層兩側有明顯垂直速度的變化（圖 2. 118），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。

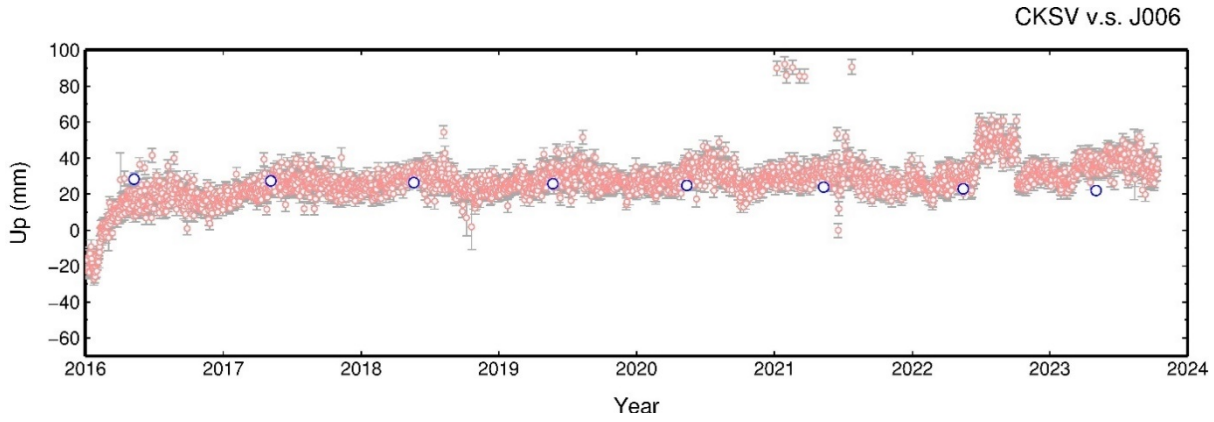


圖 2. 117：新化至玉井水準點位 J006 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。

Figure 2. 117: Time series comparison between Xinhua-Yujing leveling benchmark J006 and continuous GNSS station CKSV. The distance between two stations are 0.05 km.

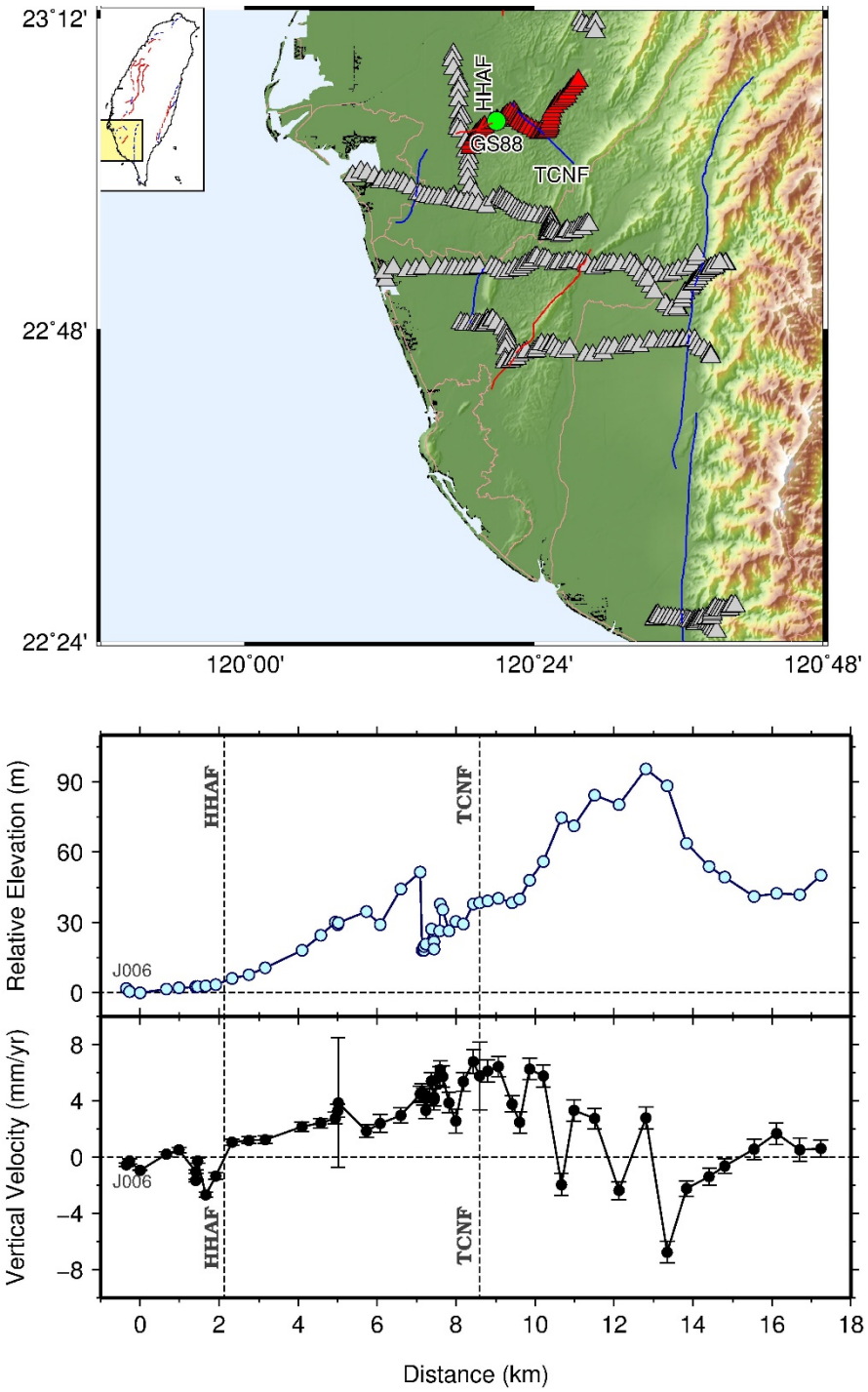


圖 2. 118：台 20_新化至玉井測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 2. 118: 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. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault and TCNF is Tsochen fault.

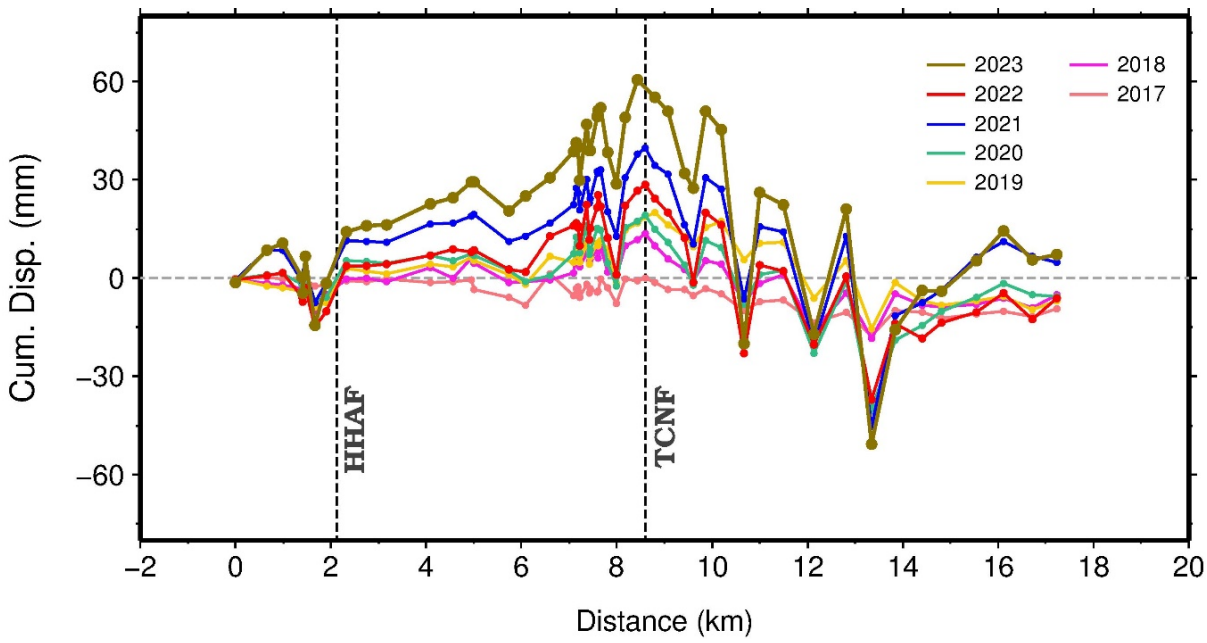


圖 2. 119：台 20_新化至玉井測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 2. 119: Cumulative elevation change of the Xinhua-Yujing leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault and TCNF is Tsochen fault.

2-3-6-6 跨梅山斷層短測線

經濟部地質調查及礦業管理中心從 2007 年起在梅山斷層沿線，設置了 7 條橫跨斷層之水準測線，由西至東分別為「B003-B092」(圖 2. 120)、「B036-B086」(圖 2. 121)、「B087-B080」(圖 2. 122)、「B002-B059」(圖 2. 123)、「B110-B101」(圖 2. 124)、「B037-B095」、「G088-G330」(圖 2. 125)。自 2007 至 2023 年止，共計有 9 次施測。此七條短測線並非由鄰近連續站作速度約制，而是約制和金湖—瑞峰測線共點之水準點位的垂直速度。依序分別為 I033（-18.28 mm/yr)、GF07(-15.84 mm/yr)、SNGN(-8.12 mm/yr)、G736(-6.86 mm/yr)、B033(-2.17 mm/yr)、G747（-1.00 mm/yr)、G088（1.08 mm/yr)。

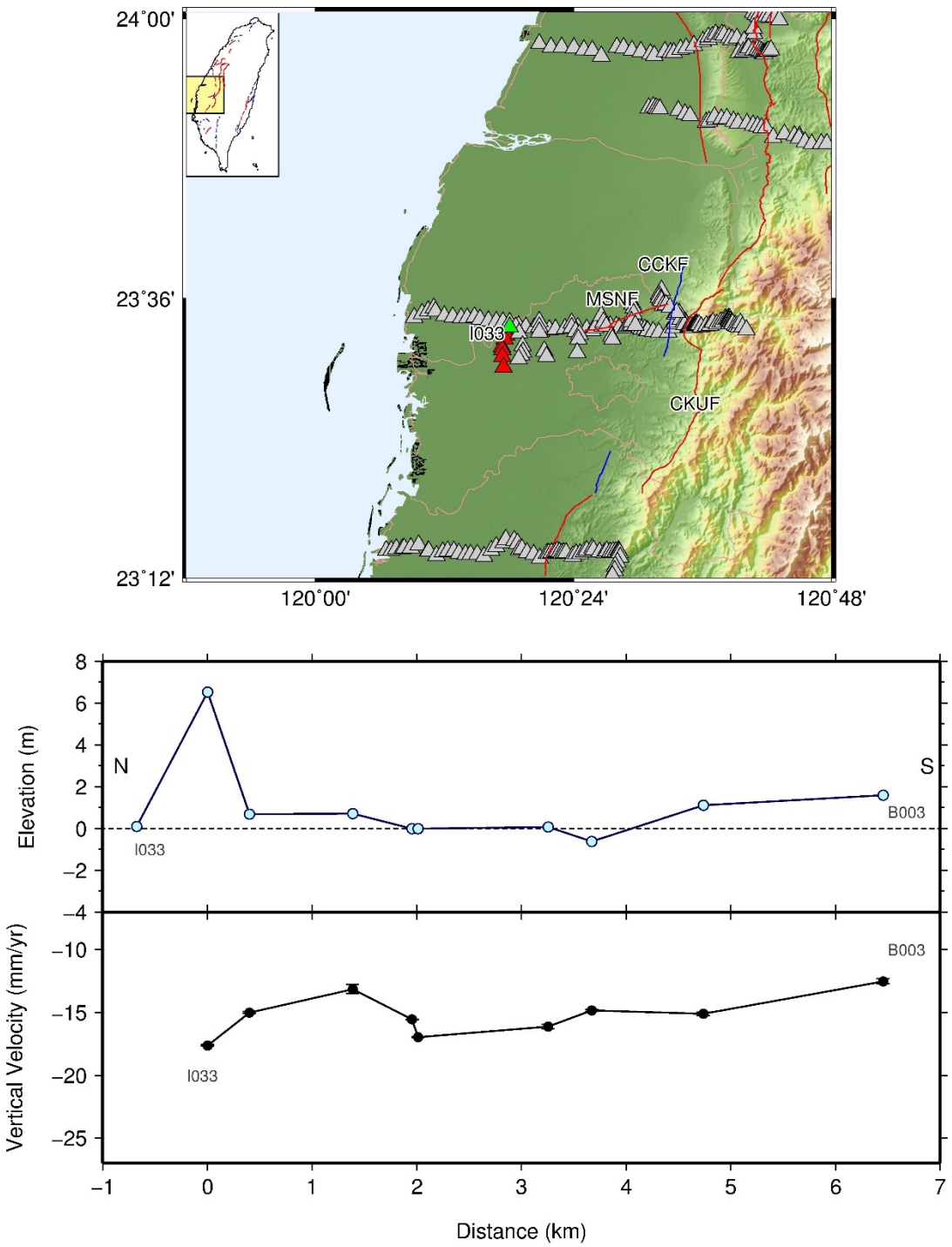


圖 2. 120：B003-B092 測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 120: Elevation change of the B003-B092 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.

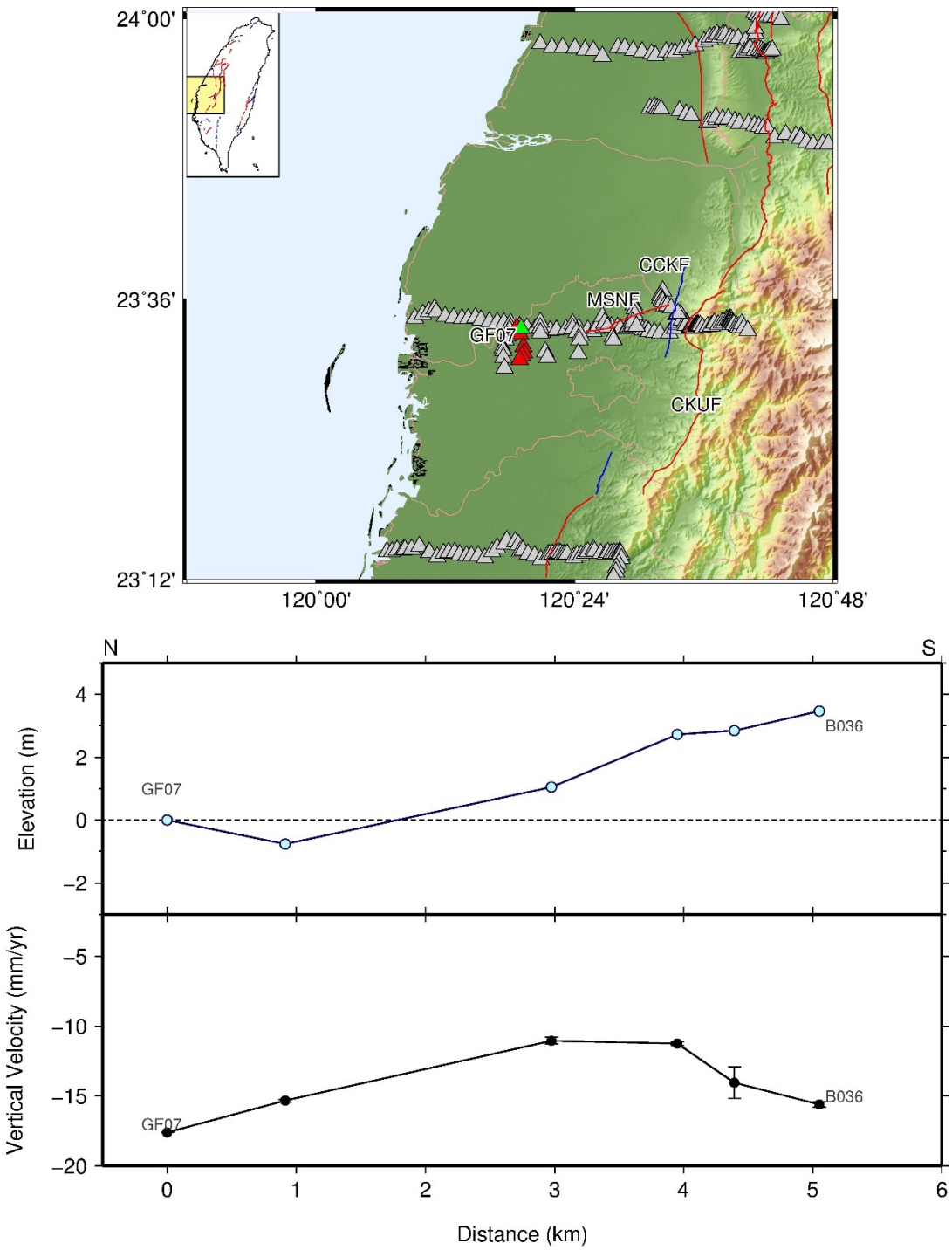


圖 2. 121：B036-B086 測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 121: Elevation change of the B036-B086 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.

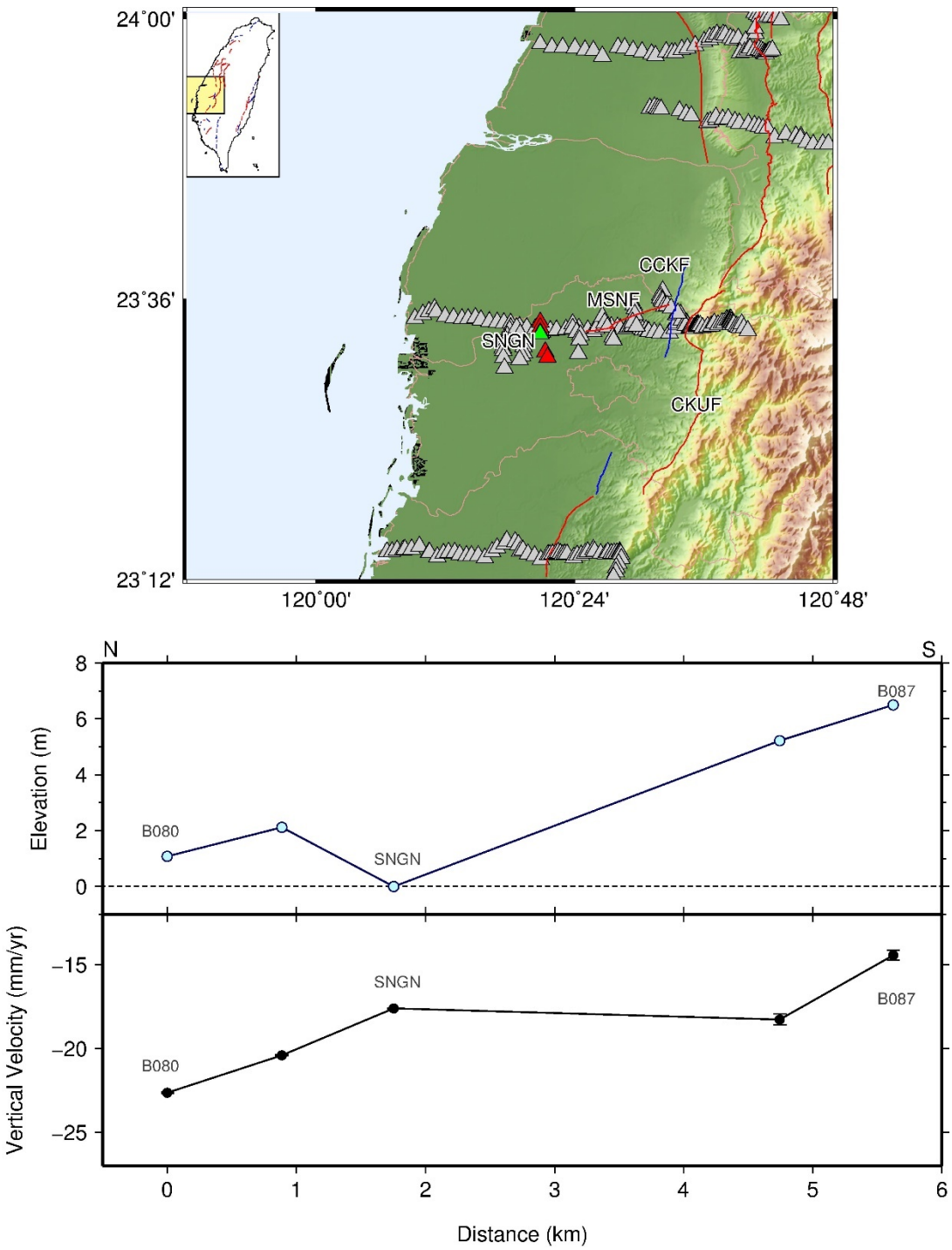


圖 2. 122：B087-B080 測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 122: Elevation change of the B087-B080 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.

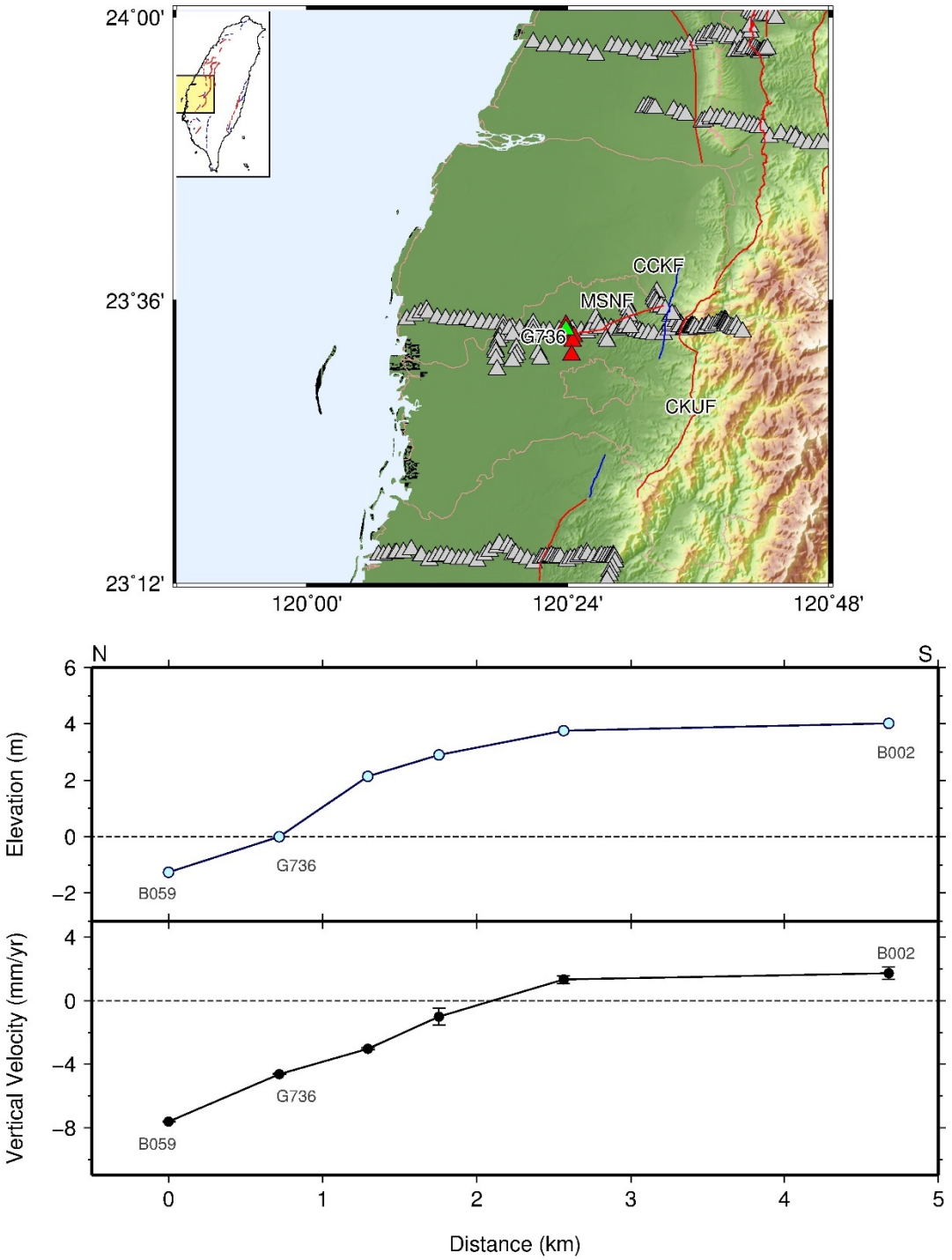


圖 2. 123：B002-B059 測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 123: Elevation change of the B002-B059 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.

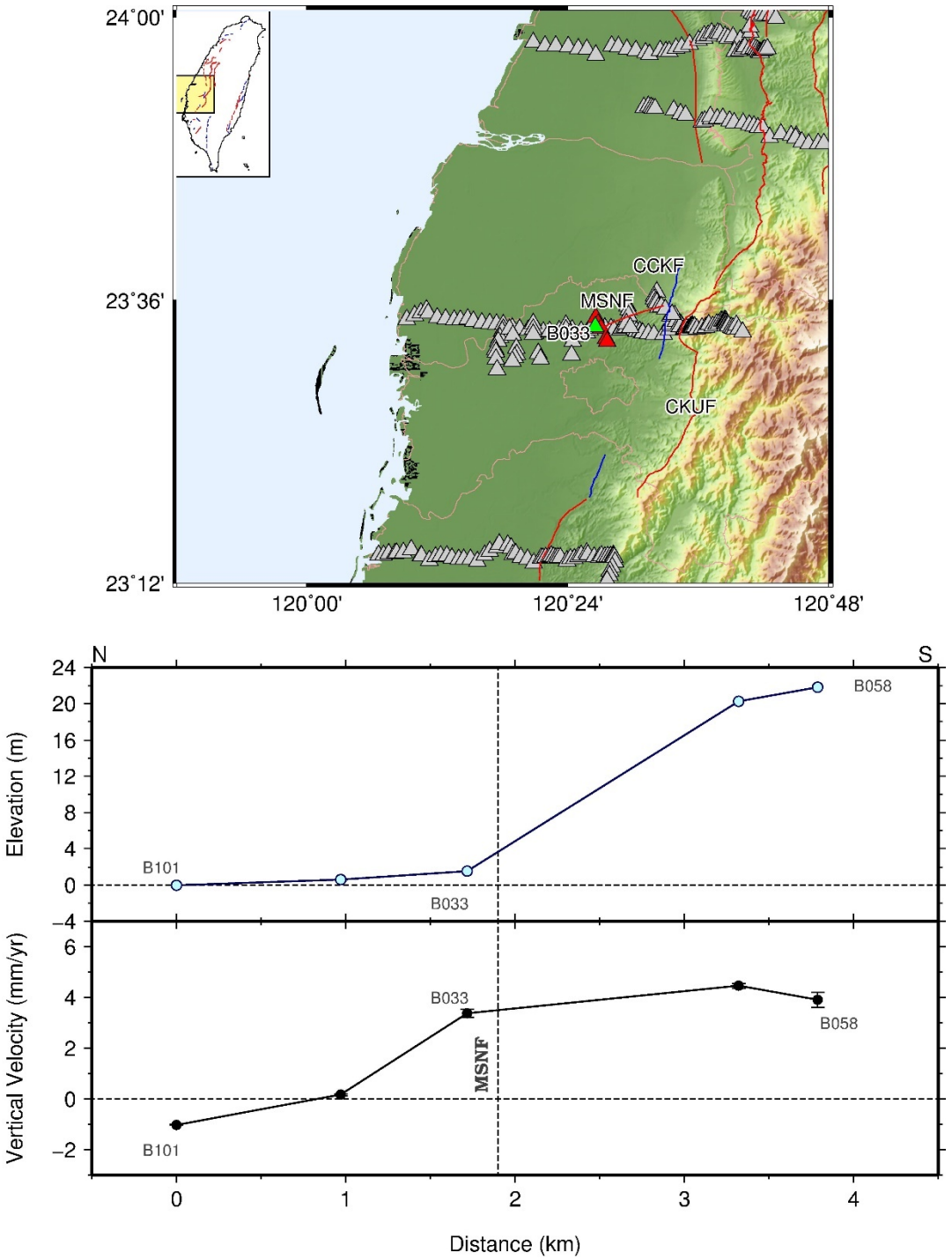


圖 2. 124：B110-B101 測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 124: Elevation change of the B110-B101 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.

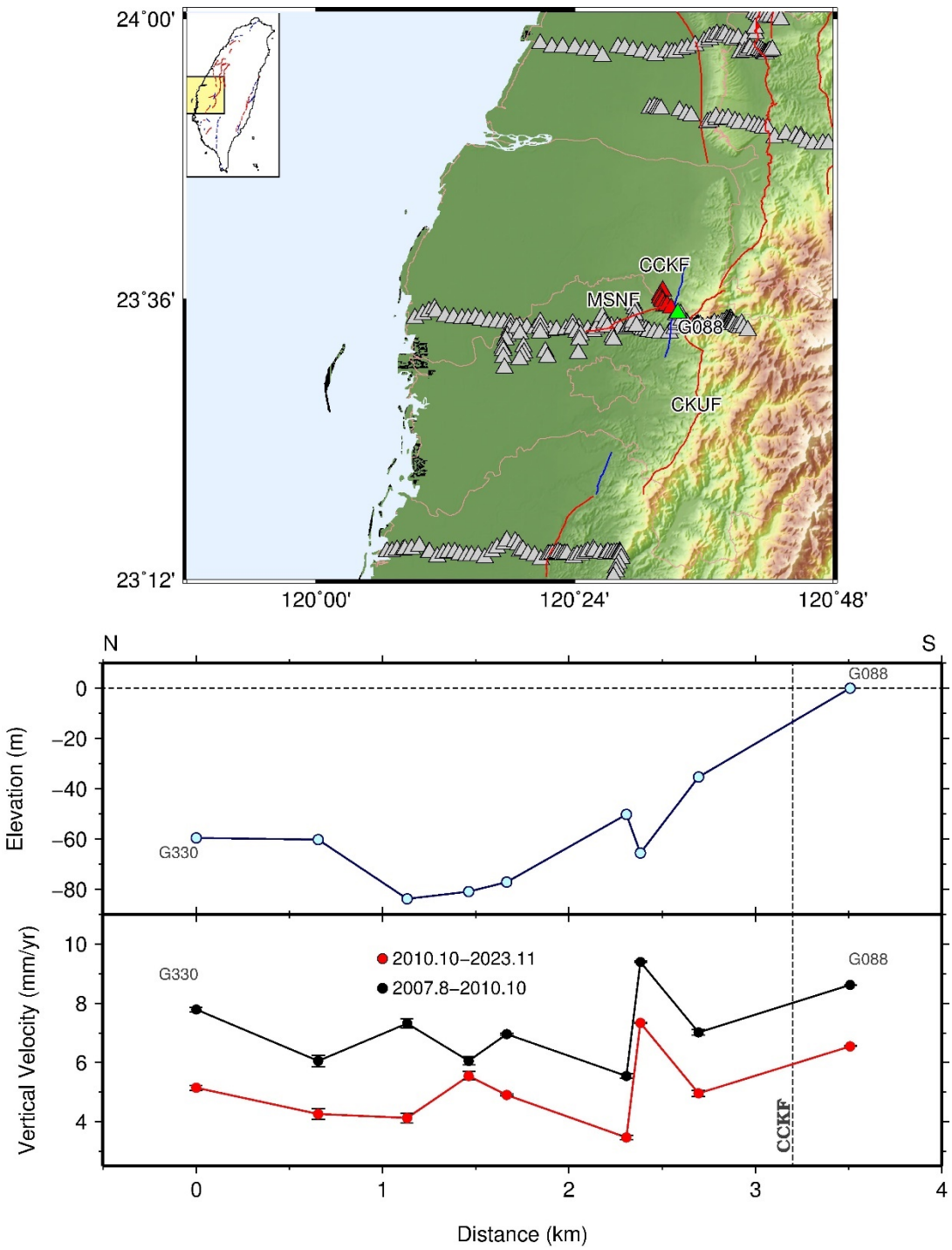


圖 2. 125：G088-G330 測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

Figure 2. 125: Elevation change of the G088- G330 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.

2-3-7 高屏地區精密水準測線

2-3-7-1 路竹至茂林測線

高屏地區完成的精密水準測線為路竹-茂林測線（圖 2. 127），其橫跨小岡山、旗山及潮州斷層，測線長為 48.3 公里（投影至剖面的長度），從 2002 年至 2023 年共計有 20 次施測。本測線測量點位經查證後已確認測量椿點 G151 滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 GS55 至 2010 年 3 月甲仙地震垂直速率（10.2 mm/yr）、震後至 2016 年 2 月美濃地震垂直速率（2.5mm/yr）以及美濃地震至今之垂直速率（-1.6mm/yr），作為約制點來校正 R016 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 126）。

台 28_路竹至茂林測線於中壇附近分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線。圖 2. 127 顯示各時間分段之水準平均抬升速率，圖中藍色為 2002 年 12 月至 2010 年 3 月、紅色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、黑色為 2016 年 2 月至 2023 年 4 月，主線於小崗山斷層的垂直速率持續增加（約 0.0～20.0 mm/yr），與地形剖面比較，此區域（月世界一帶）垂直速率增加之處與地形高程變化並不吻合，目前對於此結果的解釋仍然沒有定論，可能與小崗山斷層的運動、活動背斜的活躍或是泥貫入體的發育有關。

在 2016 年美濃地震中，潮州斷層與旗山斷層區之間同震位移場主要為沉陷（圖 2. 128），其值在 0.0-29.0 mm 之間。該水準測線在接近旗山斷層到海岸線一帶為抬升，其值在 3.0-91.0 mm 之間。

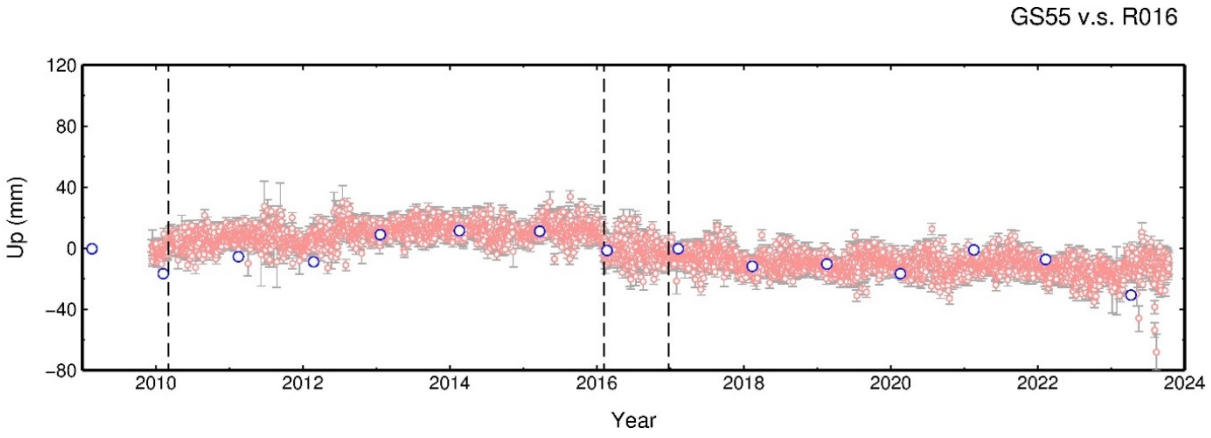


圖 2. 126：路竹至茂林水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2. 126: Time series comparison between Luzhu-Maolin leveling bench mark R016 and continuous GNSS station GS55. The distance between two stations are 0.05 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake, and the right one is the correction of postseismic slip event.

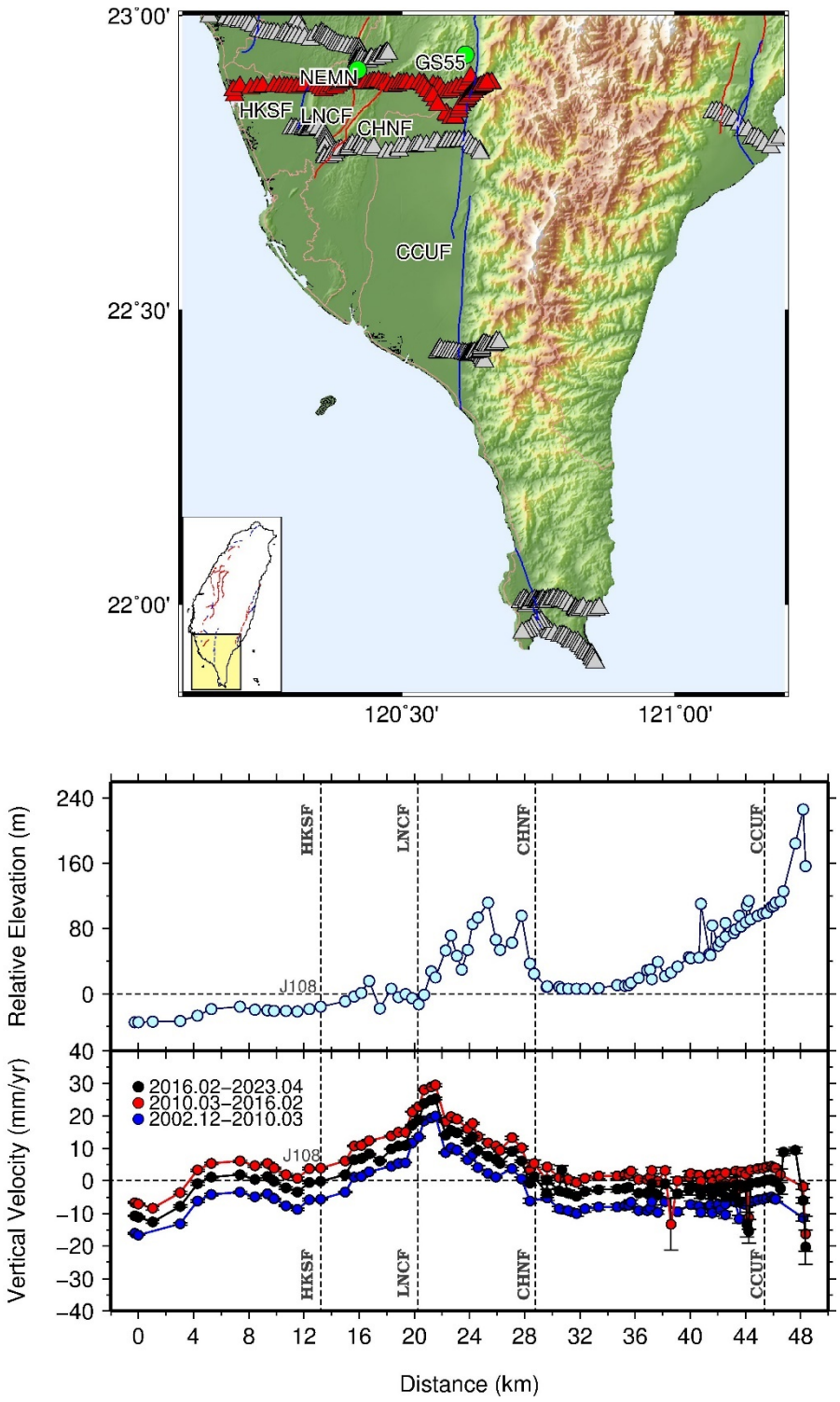


圖 2. 127：台 28_路竹至茂林主、副線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，藍色為 2002 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，紅色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，黑色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、LNCF 為龍船斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2. 127: 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. Blue is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2002-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to 2016, and black is the vertical velocity from 2016 to the present. HKSF is Hsiaokangshan fault, LNCF is Lungchuan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

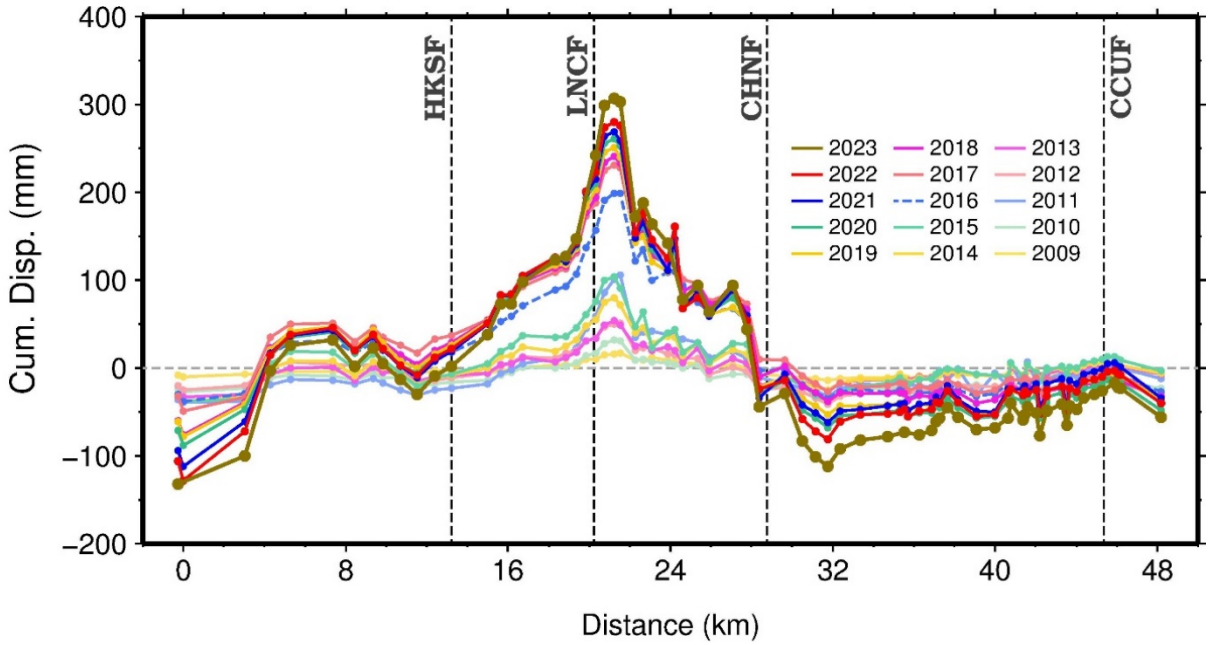


圖 2. 128：台 28_路竹至茂林主、副線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、LNCF 為龍船斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2. 128: Cumulative elevation change of the Luzhu-Maolin leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, LNCF is Lungchuan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

2-3-7-2 岡山至安坡測線

岡山至安坡測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層（圖 2. 130），測線長為 35.4 公里（投影至剖面的長度），從 2004 年至 2023 年共計 19 次施測。本測線以 GNSS 連續站 AKND 至 2010 年 3 月甲仙地震垂直速率（6.0 mm/yr）、震後至 2016 年 2 月美濃地震垂直速率（10.4mm/yr）以及美濃地震震後至今之垂直速率（-4mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 G526 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 129）。

根據圖 2. 130，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 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 2023 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 2. 131）。

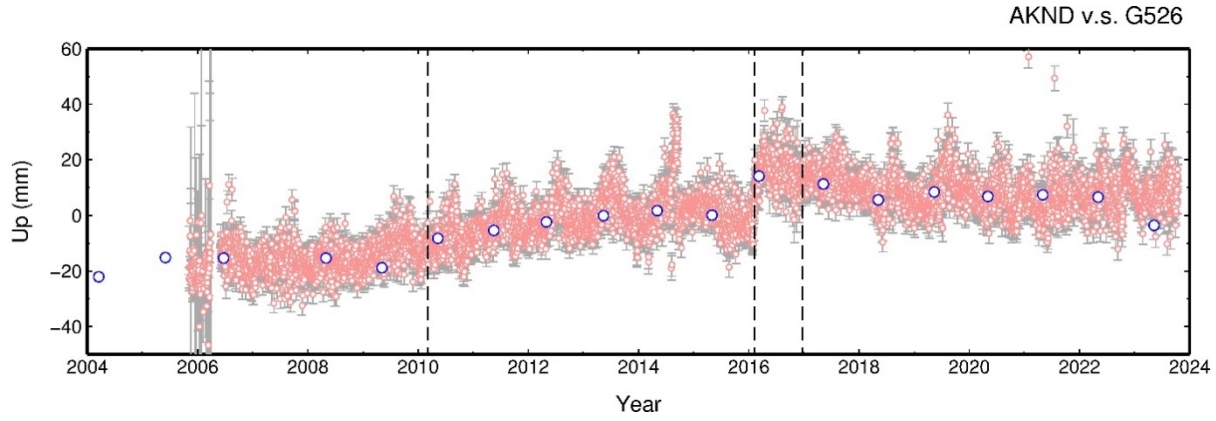


圖 2. 129：岡山至安坡水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2. 129: Time series comparison between Kangshan-Anpo leveling bench mark G526 and continuous GNSS station AKND. The distance between two stations are 0.8 km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake, and the right one is the correction of postseismic slip event.

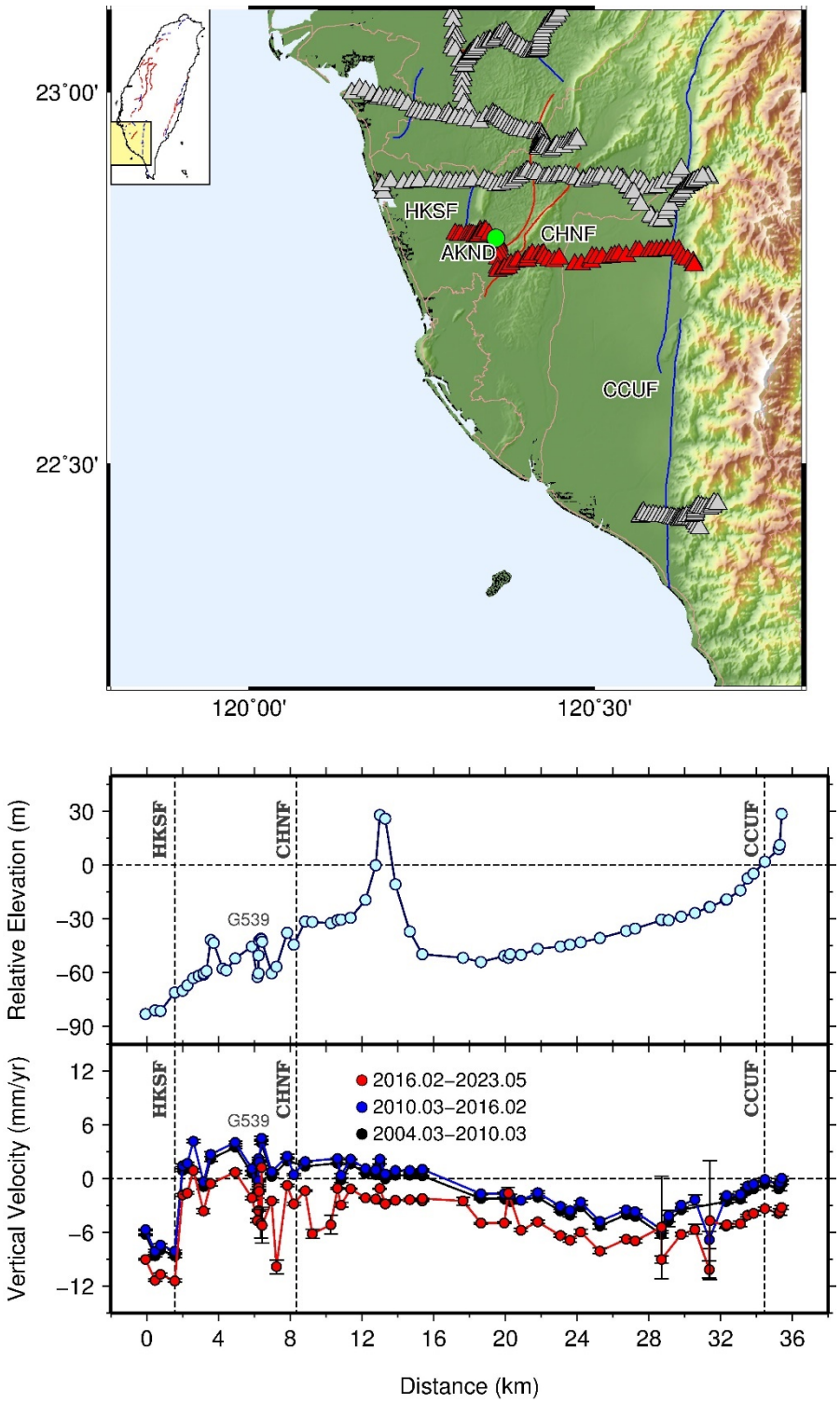


圖 2. 130：台 22_岡山至安坡測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2004 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2016 年 2 月之垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2. 130: Elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2004-2010, blue is the vertical velocity from 2010 to 2016, and red is the vertical velocity from 2016 to the present. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

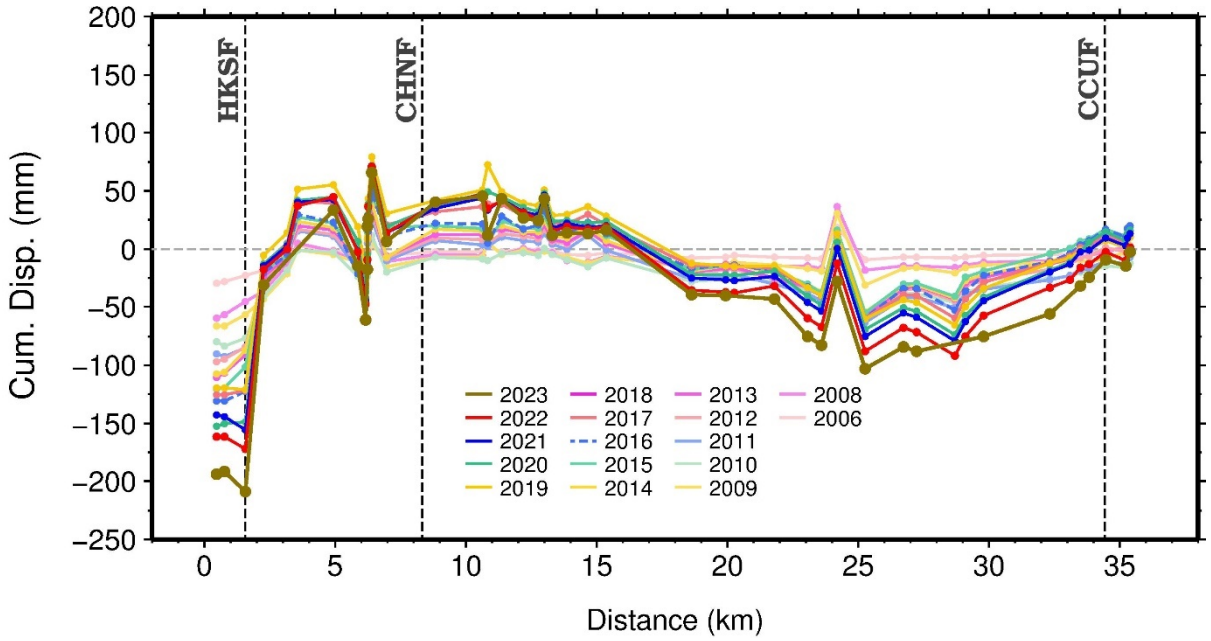


圖 2. 131：台 22_岡山至安坡測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2. 131: Cumulative elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

2-3-7-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層（圖 2. 133），測線長為 8.5 公里（投影至剖面的長度），於 2005 至 2023 年間共進行了 19 次的施測，主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GNSS 連續站 CLON 之垂直速率（-14.0 mm/yr），自 2006 年以來作為約制點來校正 GC85 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 132）。

該測線於 2007~2008 年間之高程變化與其他時段（2005~2007 年、2008~2010 年）不同（圖 2. 134），疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19~8/21；水準測量期間：9/04~9/09）。潮州斷層西側之垂直速度變化較明顯，最大值達-17.2 mm/yr；而斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在-0.2-1.0 mm/yr 之間（圖 2. 133）。

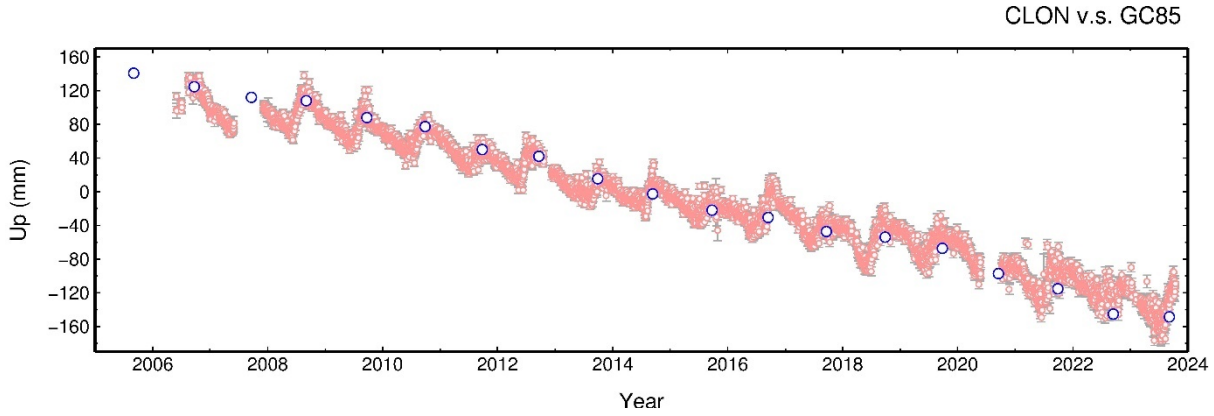


圖 2. 132：佳冬至七佳水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較，兩者相距 0.54 公里。

Figure 2. 132: Time series comparison between Jiadong-Qijia leveling bench mark GC85 and continuous GNSS station CLON. The distance between two stations are 0.54 km.

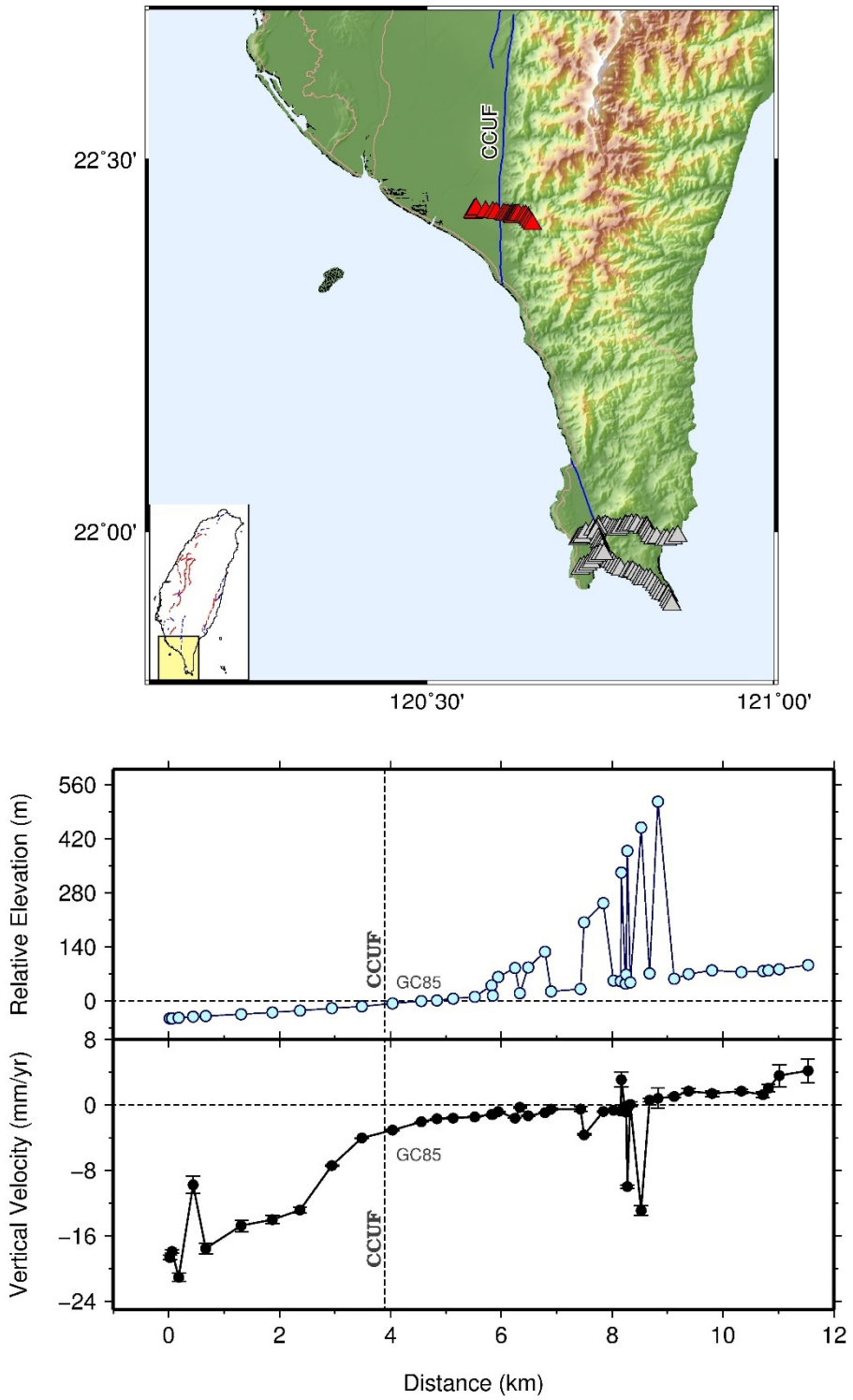


圖 2. 133：佳冬至七佳測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 2. 133: Elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

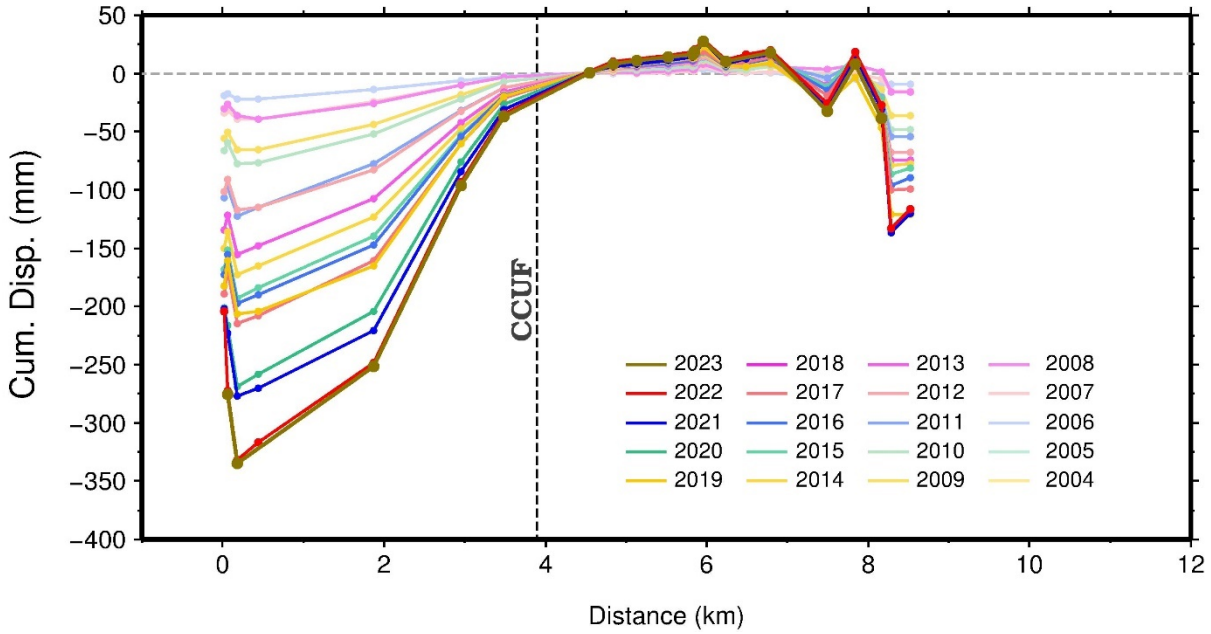


圖 2. 134：佳冬至七佳測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 2. 134: Cumulative elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

2-3-8 恆春地區精密水準測線

2-3-8-1 恆春西臺地至佳樂水測線

恆春西台地至佳樂水測線投影至剖面的長度為 14.5 公里（圖 2. 136），至 2023 年止有 20 次的測量資料。精密水準資料處理時，以 GNSS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-2.0 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（-9.0 mm/yr）、2010 至 2016 年垂直速率（-2.5 mm/yr）及 2016 年至今之垂直速率(-2.8 mm/yr)，自 2000 年以來作為約制點來校正 G670 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 135）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 Q054、G680、G681、G683、X215、G710 已滅失，無法繼續觀測。

2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震(中央氣象署地震報告編號第 95106 號及第 95107 號)，造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯位移。恆春西台地至佳樂水測線之點位，最大同震沉降量達 61.4 mm（圖 2. 137）。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

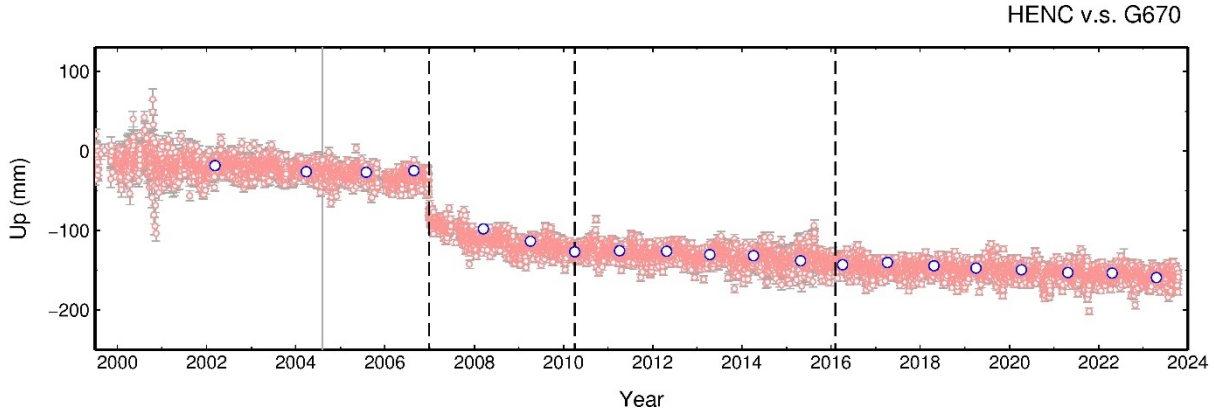


圖 2. 135：恆春西臺地至佳樂水測線水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震，及 2010 年 2 月速度發生變化及 2016 年 2 月速度發生變化。

Figure 2. 135: 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, the middle is the correction of February 2010 and the right one is the correction of February 2016 velocity change event.

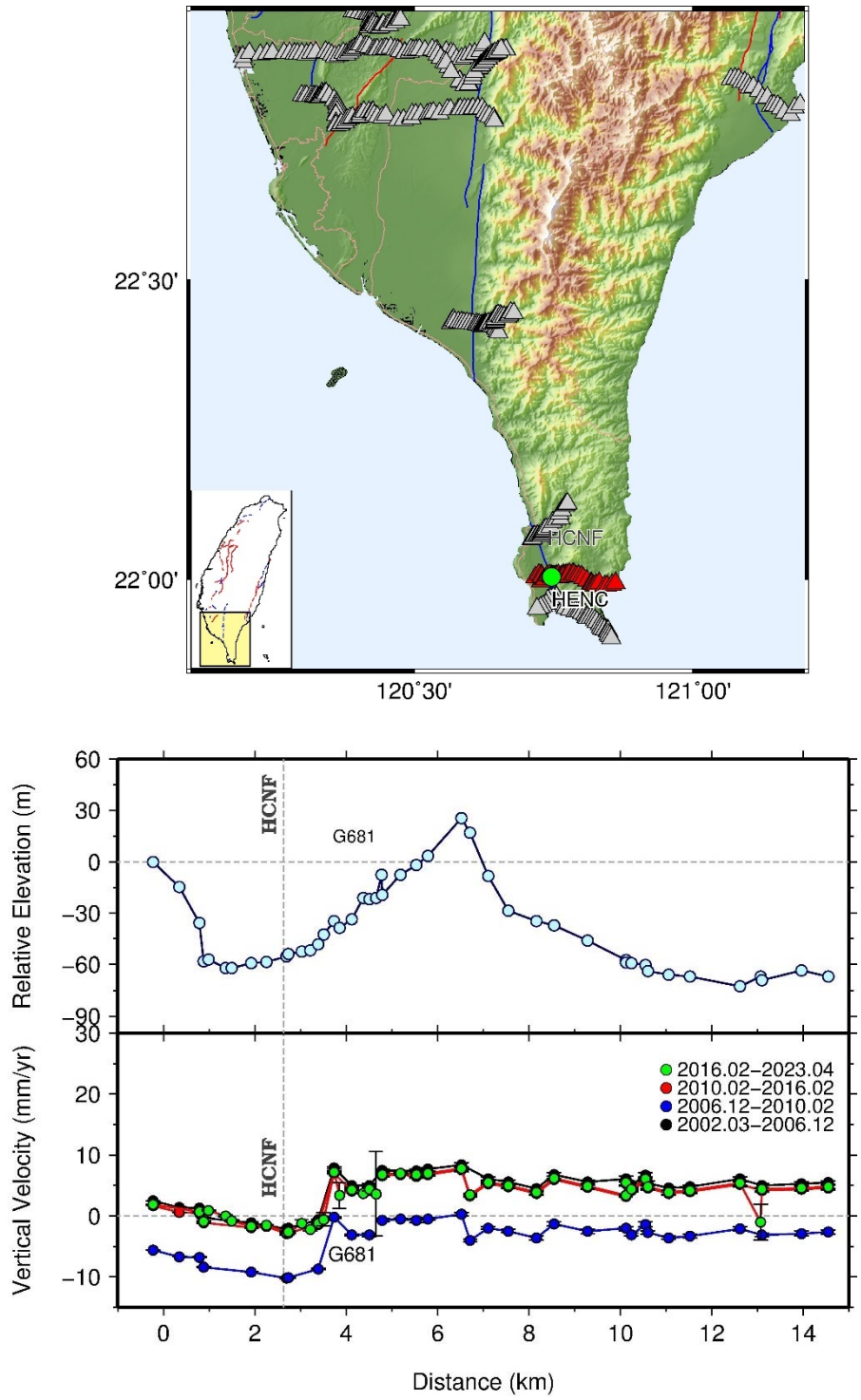


圖 2. 136：恆春西臺地至佳樂水測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度，藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度，紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月之垂直速度，綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2. 136: Elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2010, red is the vertical velocity of 2010-2016, and green is the vertical velocity from 2016 to the present.Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

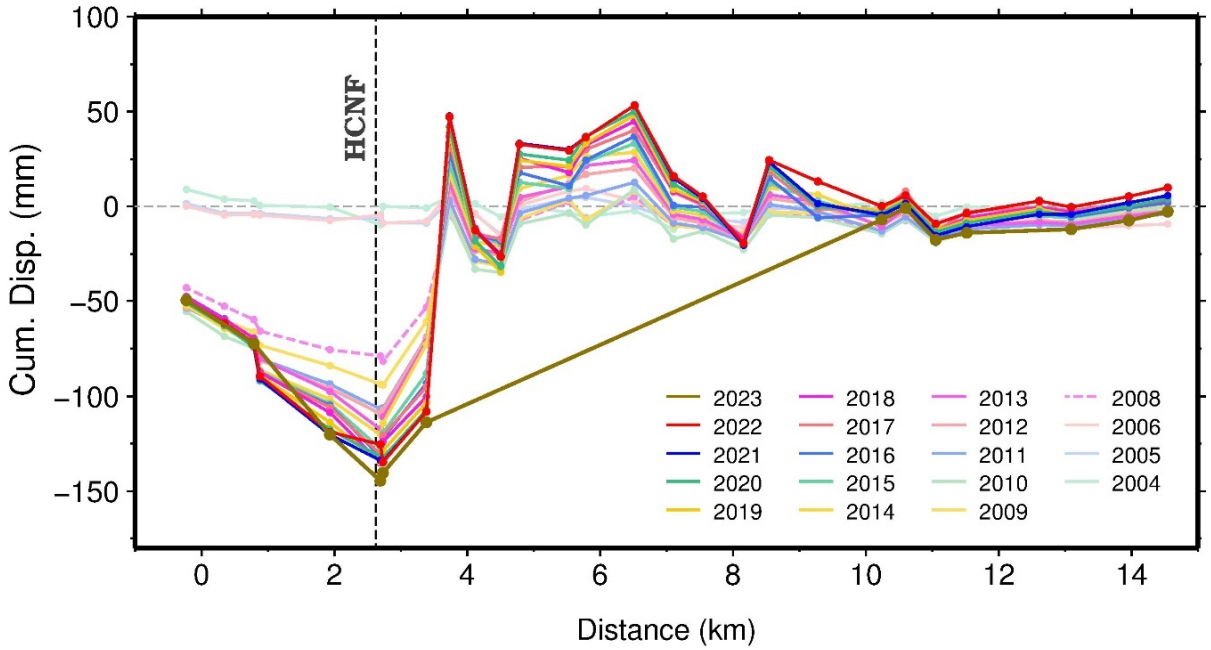


圖 2. 137：恆春西臺地至佳樂水測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2. 137: Cumulative elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-8-2 南樹林至鵝鑾鼻測線

恆春西台地至佳樂水測線投影至剖面的長度為 12.7 公里（圖 2. 139），至 2023 年止有 20 次的測量資料。台 26_南樹林至鵝鑾鼻則以 GNSS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（3.1 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（10.7 mm/yr）與 2010 年至 2016 年（-3.9mm/yr）、2016 年今之垂直速率(-0.4 mm/yr)，自 2002 年以來作為約制點來校正 Q014 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 138）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 G660、HC25、G644 已滅失，無法繼續觀測。

各時間分段之水準平均抬升速率（圖 2. 139），黑色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月，大致呈現沉降速度約 5 mm/yr；藍色為 2006 年 12 月至 2010 年 2 月，跨斷層兩側出現明顯垂直運動的不同，斷層西側逐漸抬升至約 6 mm/yr；紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月，跨斷層西側的抬升速度減緩至 1 mm/yr；綠色為 2016 年 2 月至 2023 年 4 月，跨斷層兩側亦出現明顯垂直運動的不同，斷層西側抬升速度至約 3 mm/yr。

2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震(中央氣象署地震報告編號第 95106 號及第 95107 號)，造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化（圖 2. 140）。南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震沉降量達 29.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

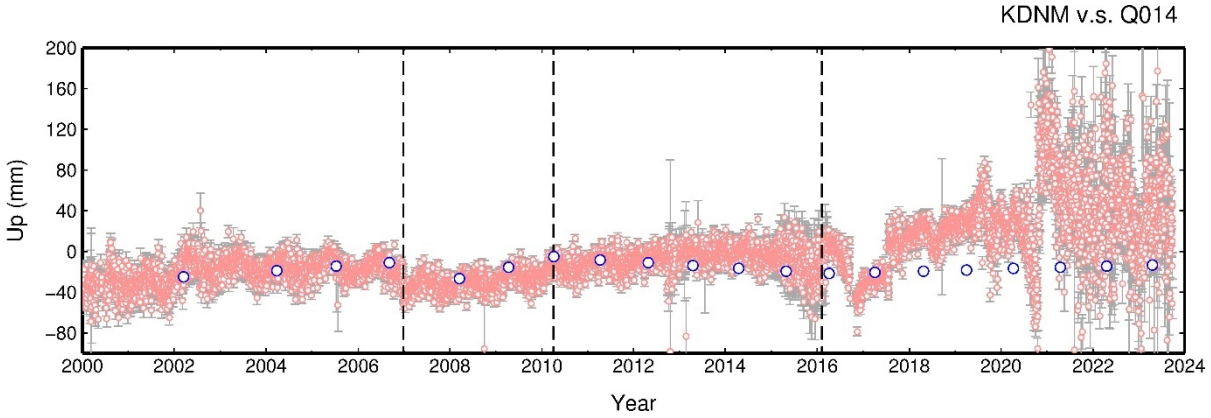


圖 2. 138：南樹林至鵝鑾鼻測線水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.6 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年及 2016 年速度發生變化。

Figure 2. 138: Time series comparison between Nanshulin-Eluanbi leveling route bench mark Q014 and continuous GNSS station KDNM. The distance between two stations are 0.6 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle is the correction of February 2010 and the right one is the correction of February 2016 velocity change event.

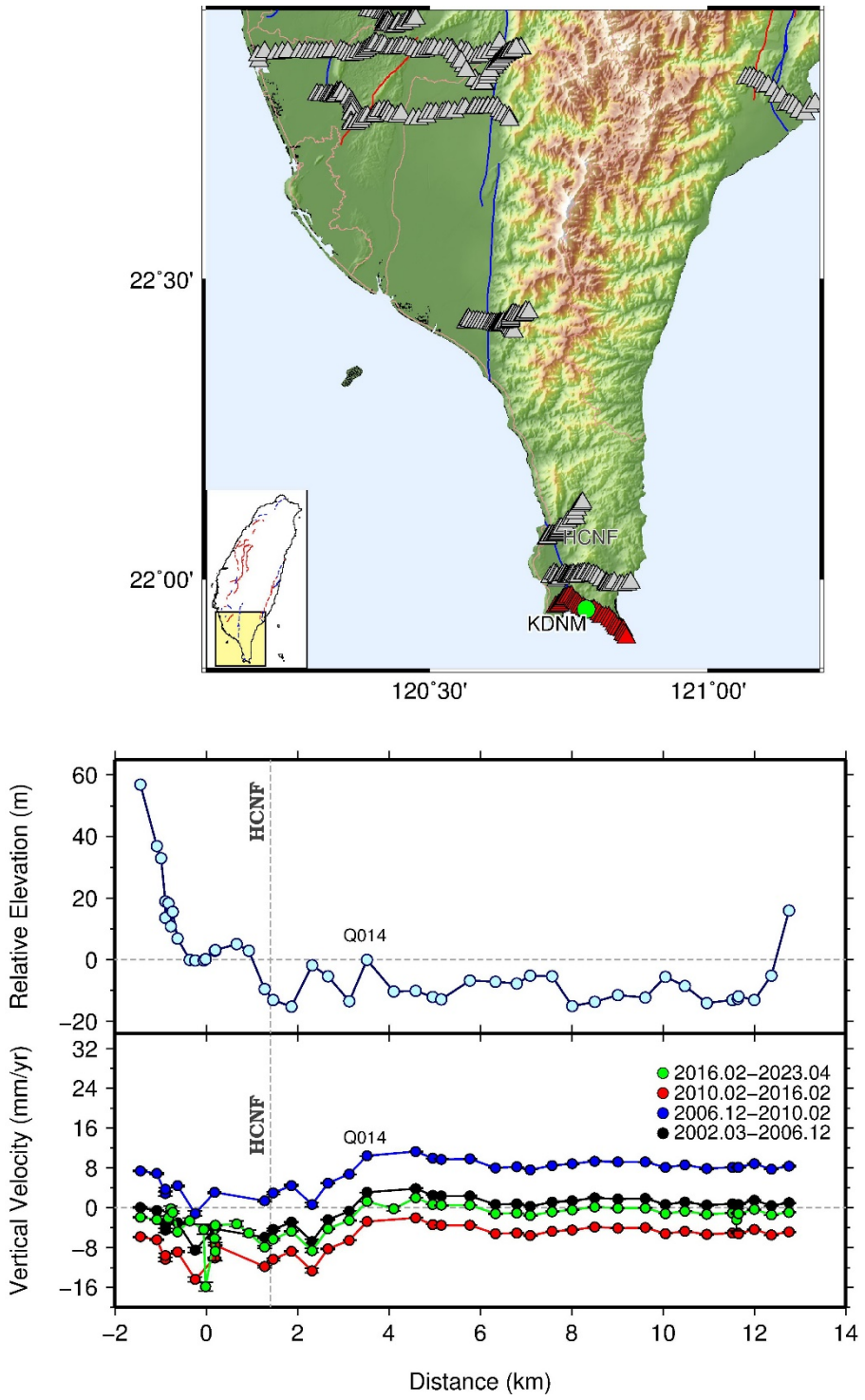


圖 2. 139：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。黑色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度，藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度，紅色為 2010 年 2 月至 2016 年 2 月之垂直速度，綠色為 2016 年 2 月至今之垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2. 139: Elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2010, red is the vertical velocity of 2010-2016, and green is the vertical velocity from 2016 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

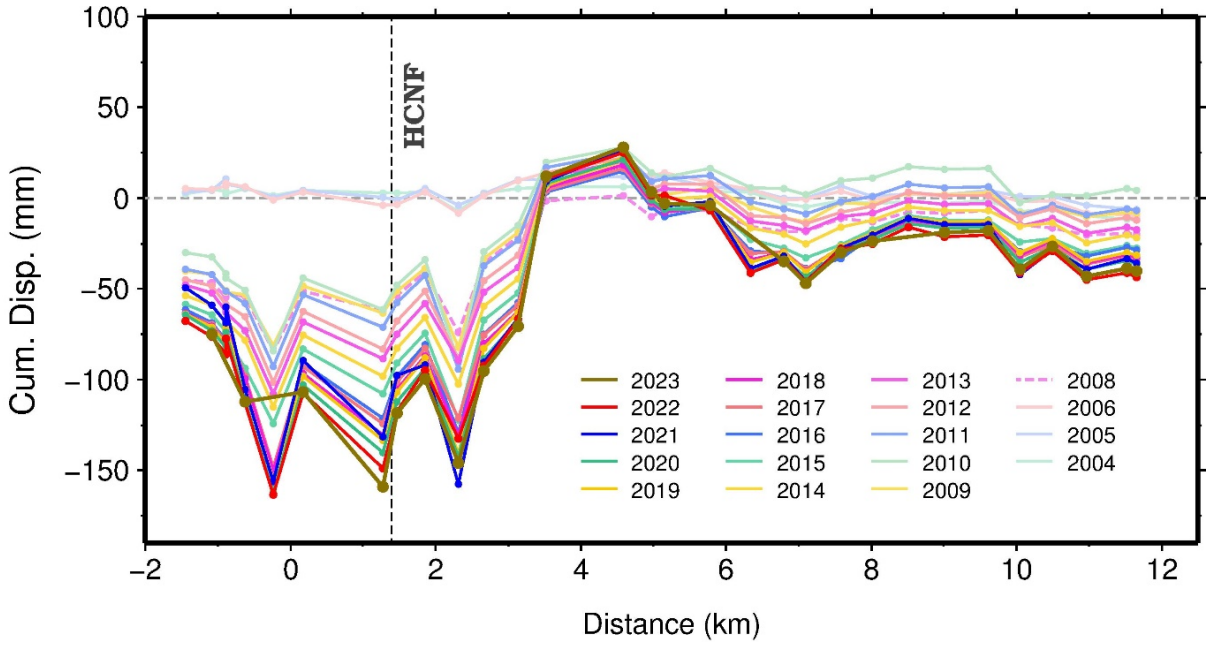


圖 2. 140：台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線水準累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2. 140: Cumulative elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-8-3 車城至牡丹測線

車城至牡丹為 2020 年新建立的水準測線，測線長為 8.0 公里（投影至剖面的長度），橫跨恆春斷層，總共有 26 個點位（圖 2. 141）。從 2020 年至 2023 年止，共有 4 次的測量資料，每年施測一次，各年度之水準施測成果，以累積高程展示於圖 2. 142。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 HC03、HC05、HC06、HC16、HC08、HC10 已滅失，無法繼續觀測。

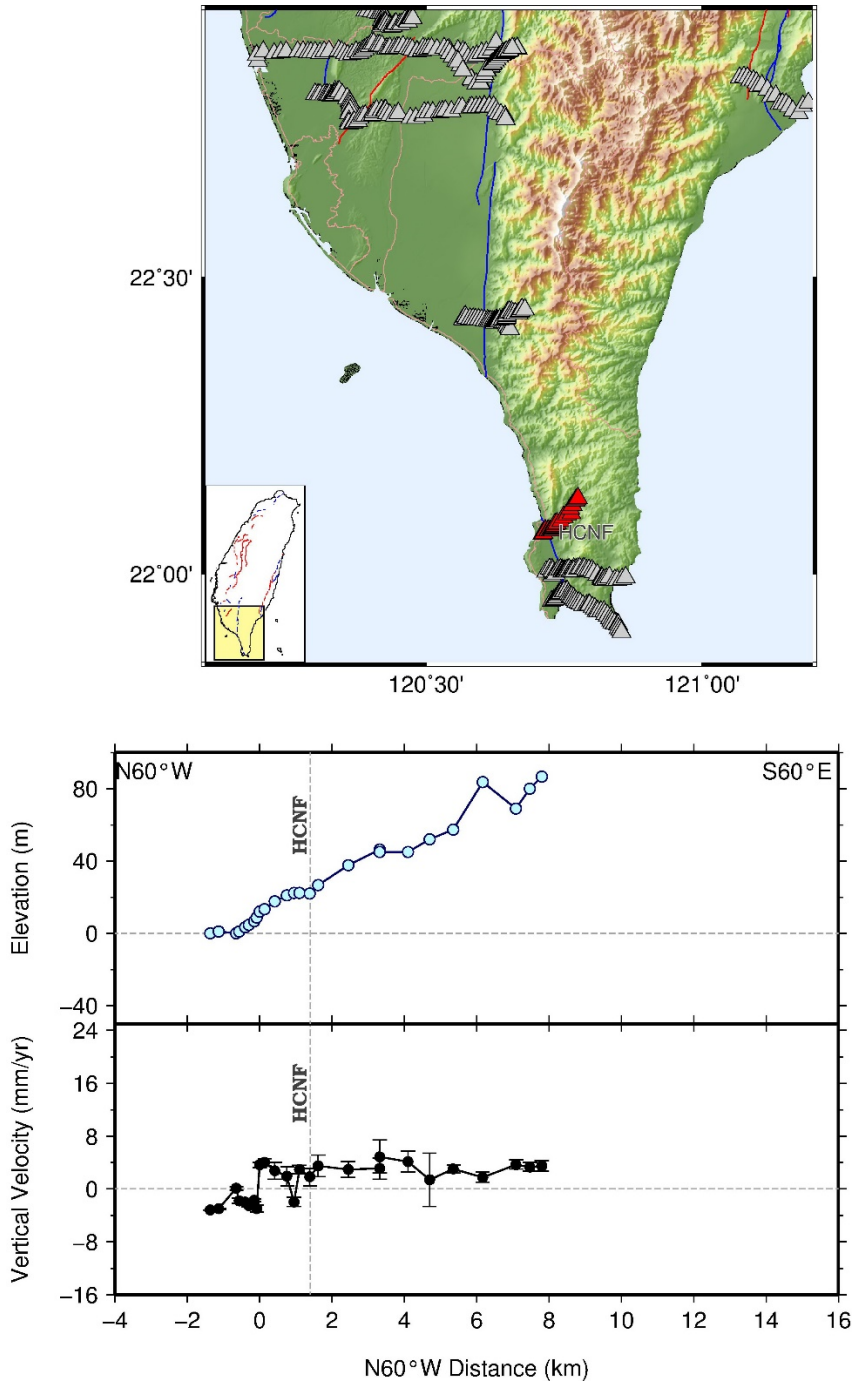


圖 2. 141：車城至牡丹測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2. 141: 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. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

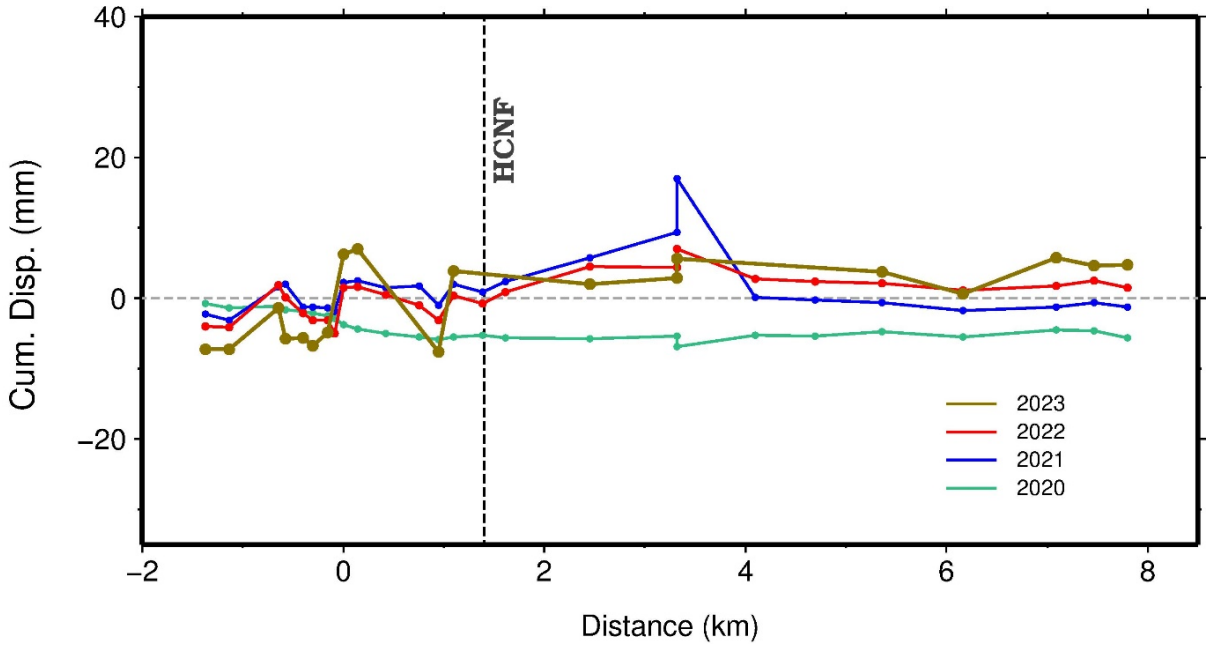


圖 2. 142：車城至牡丹測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2. 142: Cumulative elevation change of the Checheng-Mudan leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-9 東部地區精密水準測線

2-3-9-1 嶺頂至瀧澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層（圖 2. 144），測線長為 20.0 公里，從 2004 年至 2023 年共計有 21 次施測，其中 2018 年因為花蓮地震，故在該年 2、10 月進行施測。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 GE81 滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GNSS 連續站 YENL 之 2018 年震前垂直速率（-9.2 mm/yr）及 2018 年至今之垂直速率（-1.3 mm/yr），自 2004 年以來作為約制點來校正 G970 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 143）。由於道路坍方故自 2016 年後僅有 N670 以東之垂直速度資料。2018 年以後此測線在嶺頂斷層西側之垂直速度約由 20.8 mm/yr 降至-10.3 mm/yr（圖 2. 144），以靠山區之測站較以往增加最大差約 13.9 mm/yr 之抬升速率，而嶺頂斷層東側與以往相似皆呈沉陷之趨勢約 10.1mm/yr。在 2018 花蓮地震中，抬升量在 8.0-214.0 mm 之間（圖 2. 145）。

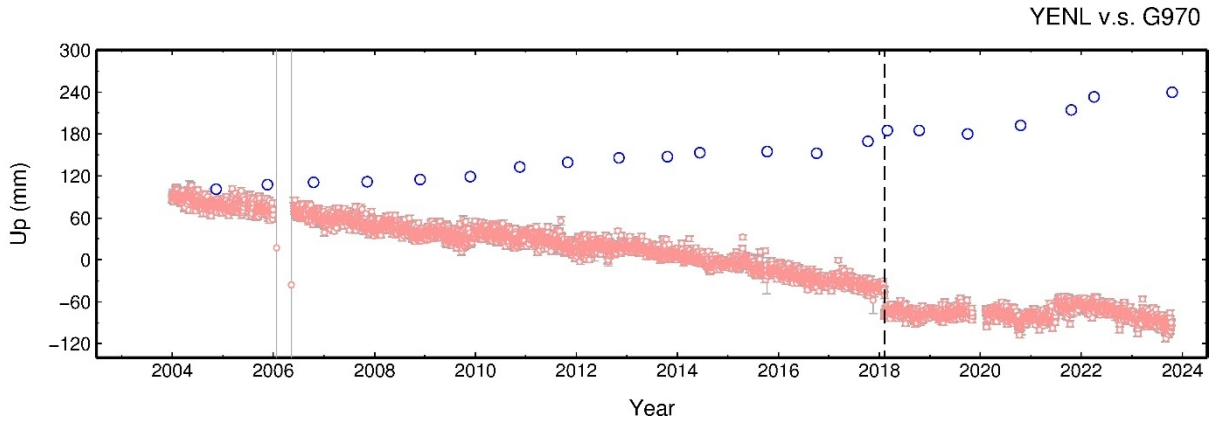


圖 2. 143：嶺頂至瀧澗水準點位 G970 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2. 143: Time series comparison between Lingding-Takigami leveling bench mark G970 and continuous GNSS station YENL. The distance between two stations are 2.1 km. The dashed line is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

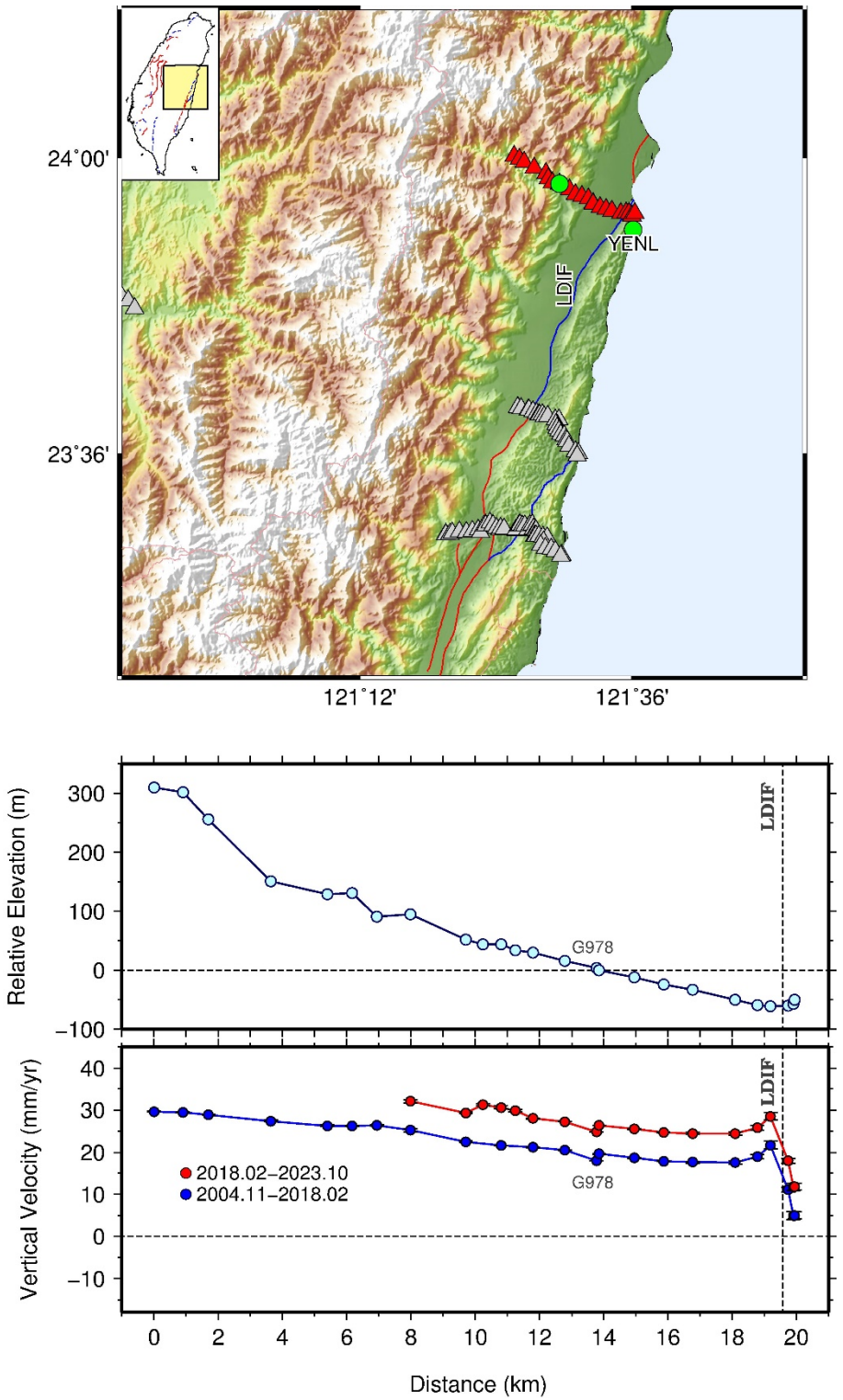


圖 2. 144：嶺頂至瀧澗測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。藍色為 2004 - 2018 年花蓮地震震前垂直速度，紅色為 2018 年 2 月至今的垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 2. 144: Elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Blue is the vertical velocity before the 2018 Hualien earthquake of 2004-2018, and red is the vertical velocity from 2018 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

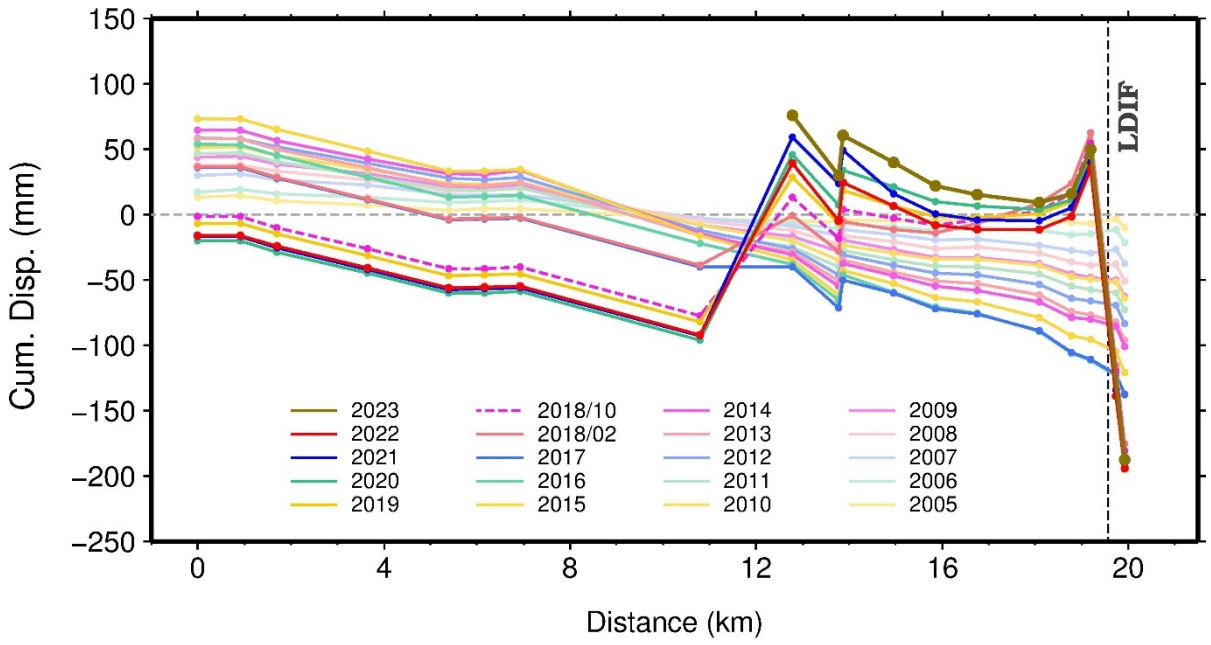


圖 2. 145：嶺頂至瀧澗測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 2. 145: Cumulative elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

2-3-9-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層（圖 2. 147），測線長為 12.1 公里(投影至剖面的長度)，從 2004 年至 2023 年共計有 22 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。本測線以 GNSS 連續站 FONB 之 2009 年地震前垂直速率（-9.3 mm/yr）、2009 年震後至 2013 年垂直速率（-9.3 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-9.9 mm/yr），自 2010 年作為約制點來校正 G991 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 146）。

此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致（圖 2. 147）。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。累積高程差如圖 2. 148。

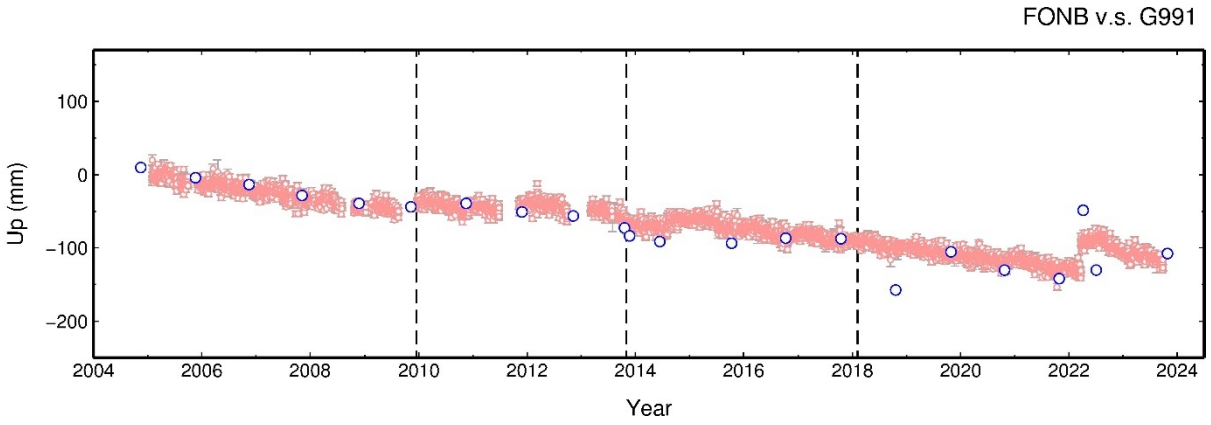


圖 2. 146：光復至豐濱水準點位 G991 與連續站 FONB 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震，中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震，右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2. 146: Time series comparison between Guangfu-Toyohama leveling bench mark G991 and continuous GNSS station FONB. The distance between two stations are 0.01 km. The left dashed line is the December 19th 2009 Hualien earthquake, the middle is the October 31th 2013 Ruisui earthquake, and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

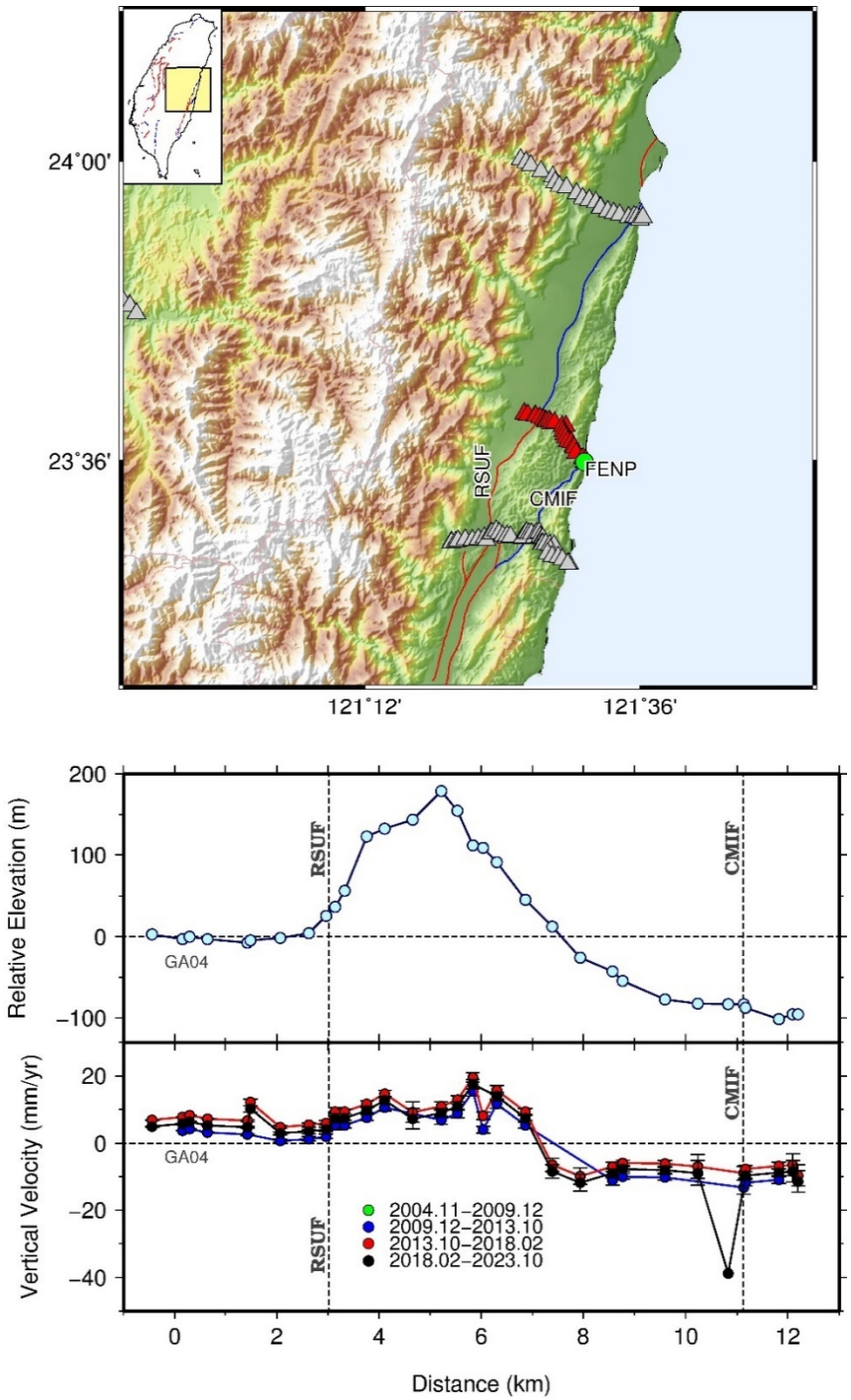


圖 2. 147：光復至豐濱測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。綠色為 2004 - 2009 年花蓮地震震前垂直速度，藍色為 2009 - 2013 年花蓮地震震後垂直速度，紅色為 2013 - 2018 年瑞穗地震震後垂直速度，黑色為 2018 年至今的垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2. 147: Elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity after the 2013 Ruisui earthquake of 2013-2018, black is the vertical velocity from 2018 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. RSUF is Rueyshui fault and CMIF is Chimei fault.

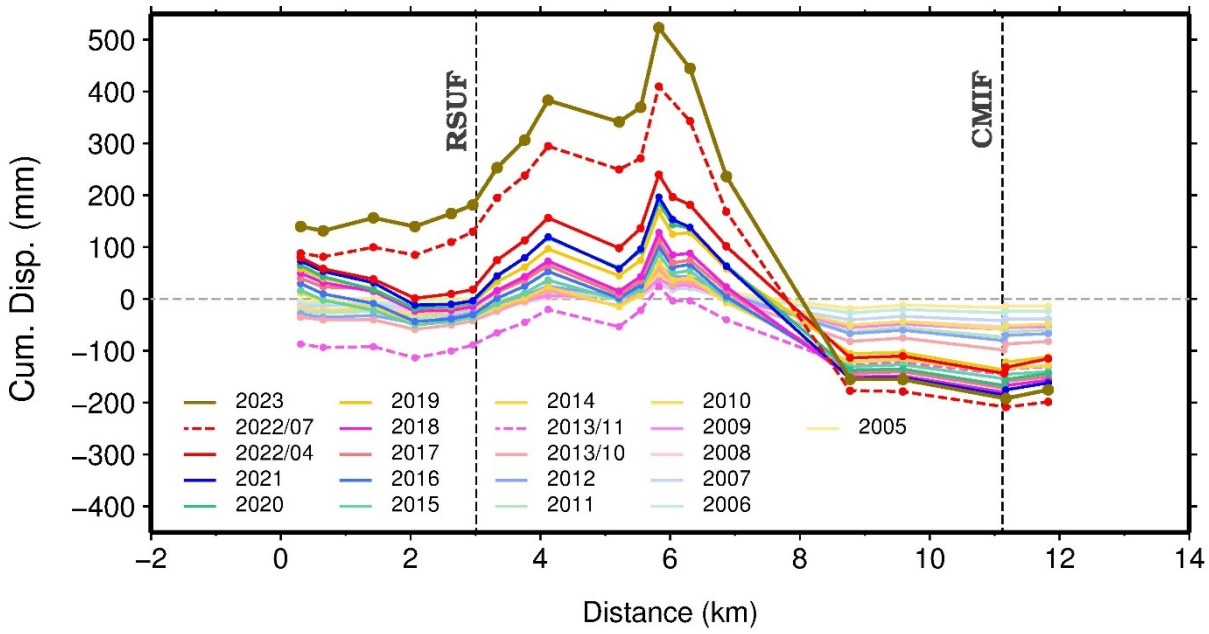


圖 2. 148：光復至豐濱測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2. 148: Cumulative elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. RSUF is Rueyshui fault and CMIF is Chimei fault.

2-3-9-3 紅葉至靜浦測線

紅葉至靜浦測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層（圖 2. 150），測線長為 18.0 公里，2004 年至 2023 年間進行共 22 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。

本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（0.6 mm/yr），自 2004 年以來作為控制點來校正 GA22 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 149）。

根據圖 2. 150，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。

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 2. 151）。

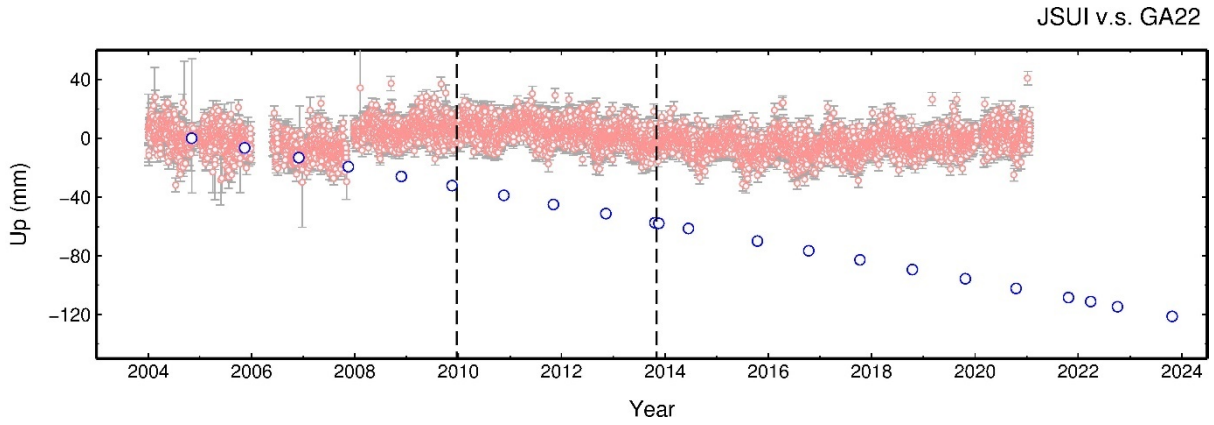


圖 2. 149：紅葉至靜浦水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震，右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

Figure 2. 149: Time series comparison between Hongye-Jingpu leveling bench mark GA22 and continuous GNSS station JSUI. The distance between two stations are 0.7 km. The left dashed line is the December 19th 2009 Hualien earthquake, and the right one is the October 31th 2013 Ruisui earthquake.

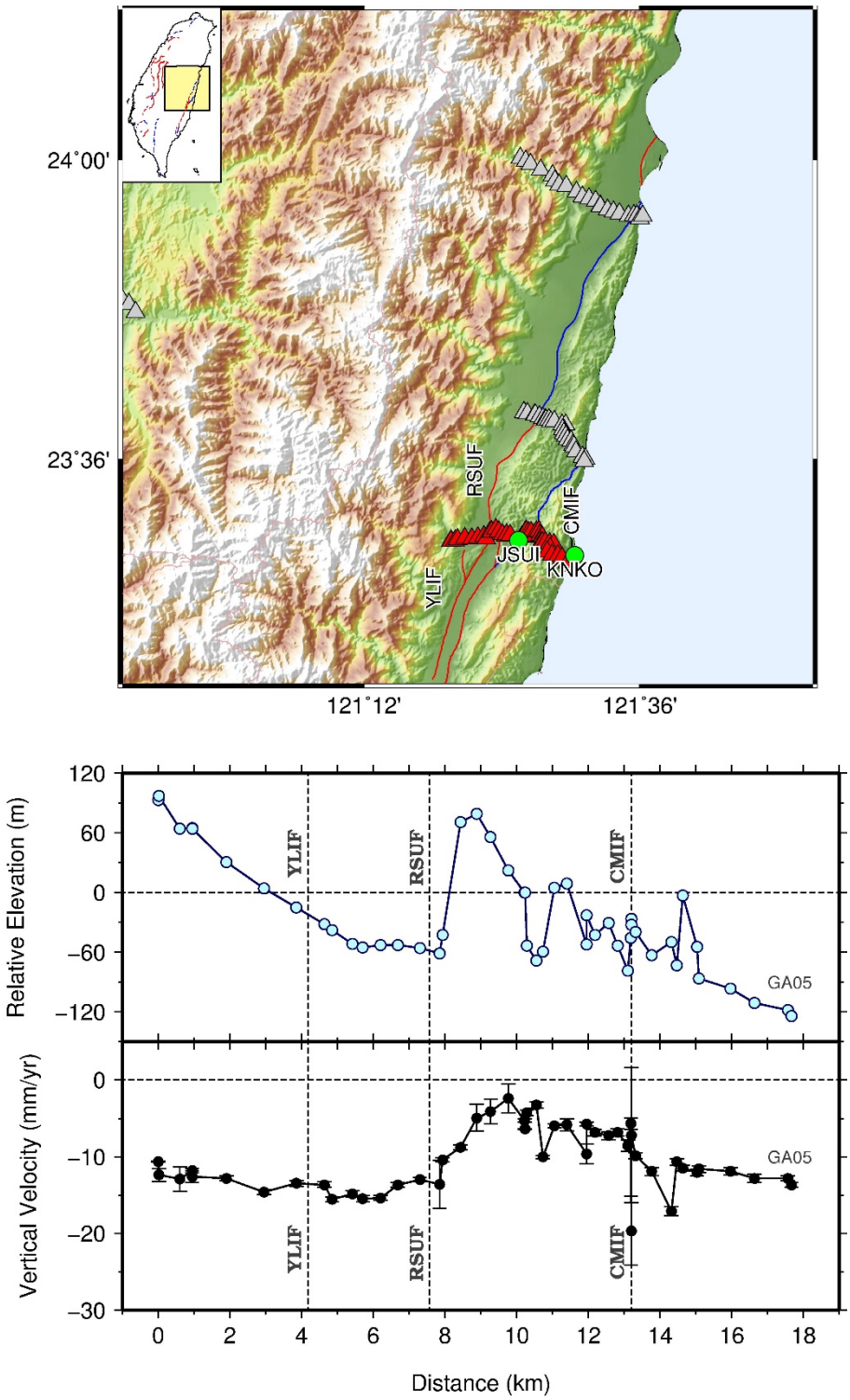


圖 2. 150：紅葉至靜浦測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2. 150: 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. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, and CMIF is Chimei fault.

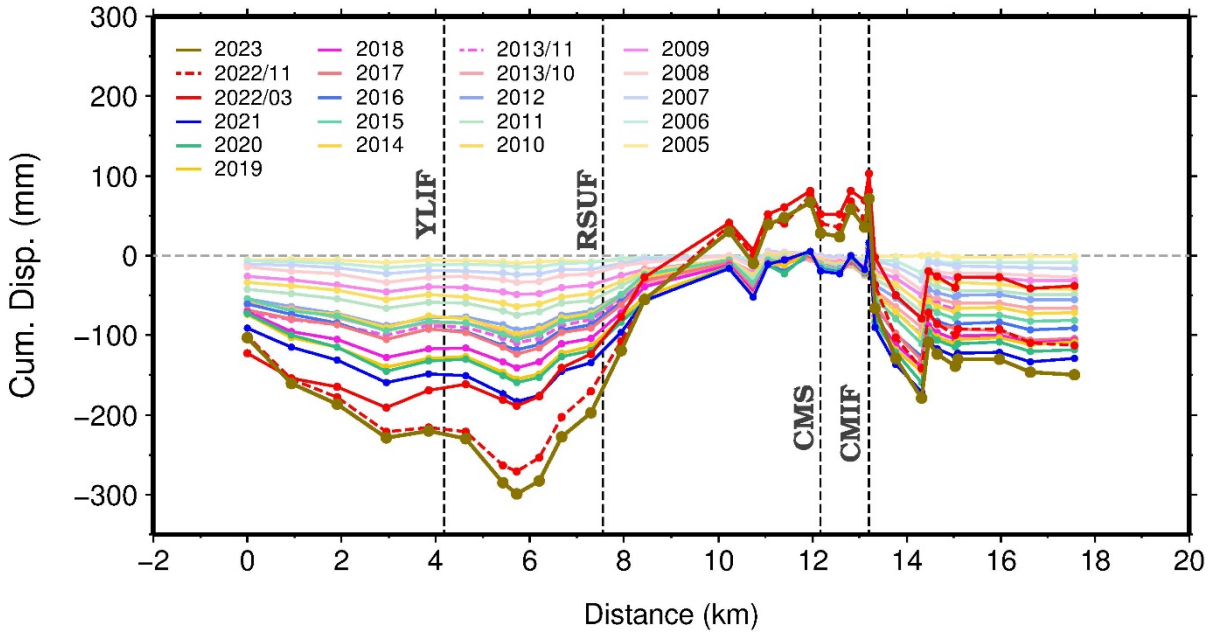


圖 2. 151：紅葉至靜浦測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2. 151: Cumalative elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, CMS is Chimei syncline, and CMIF is Chimei fault.

2-3-9-4 東成至富岡測線

東成至富岡測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層（圖 2. 153），測線長約 14 公里，2009 年至 2023 年間共進行 16 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。

本測線以 GNSS 連續站 FUGN 之 2013 震前垂直速率（-2.3 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（0.6 mm/yr），自 2009 年以來作為控制點來校正 A086 相對於 GNSS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 152）。

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 2. 154），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。

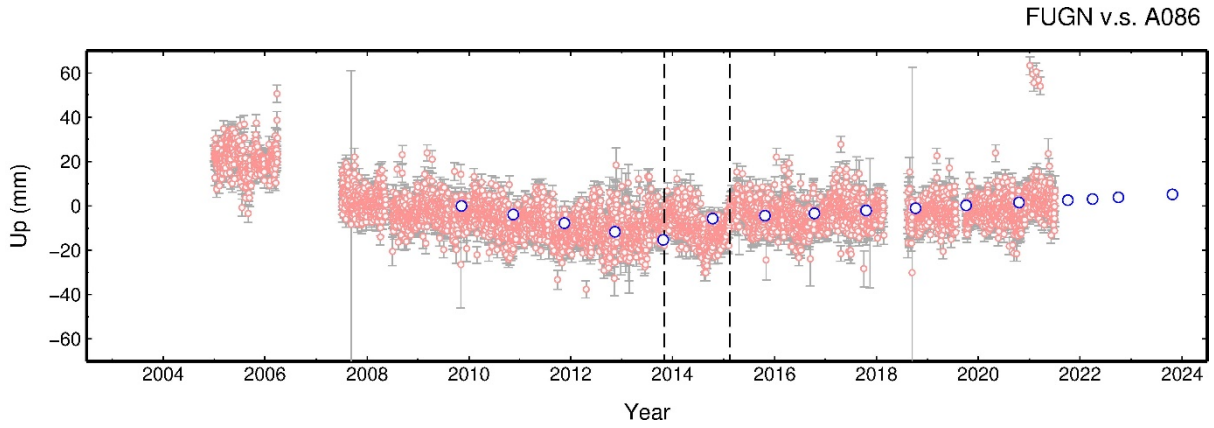


圖 2. 152：東成至富岡水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震，右邊虛線為 2015 年 2 月 14 日臺東外海地震。

Figure 2. 152: Time series comparison between Dongcheng-Fugang leveling bench mark A086 and continuous GNSS station FUGN. The distance between two stations are 0.3 km. The left dashed line is the October 31th 2013 Ruisui earthquake, and the right one is the Feburary 14th 2015 Taitung offshore earthquake.

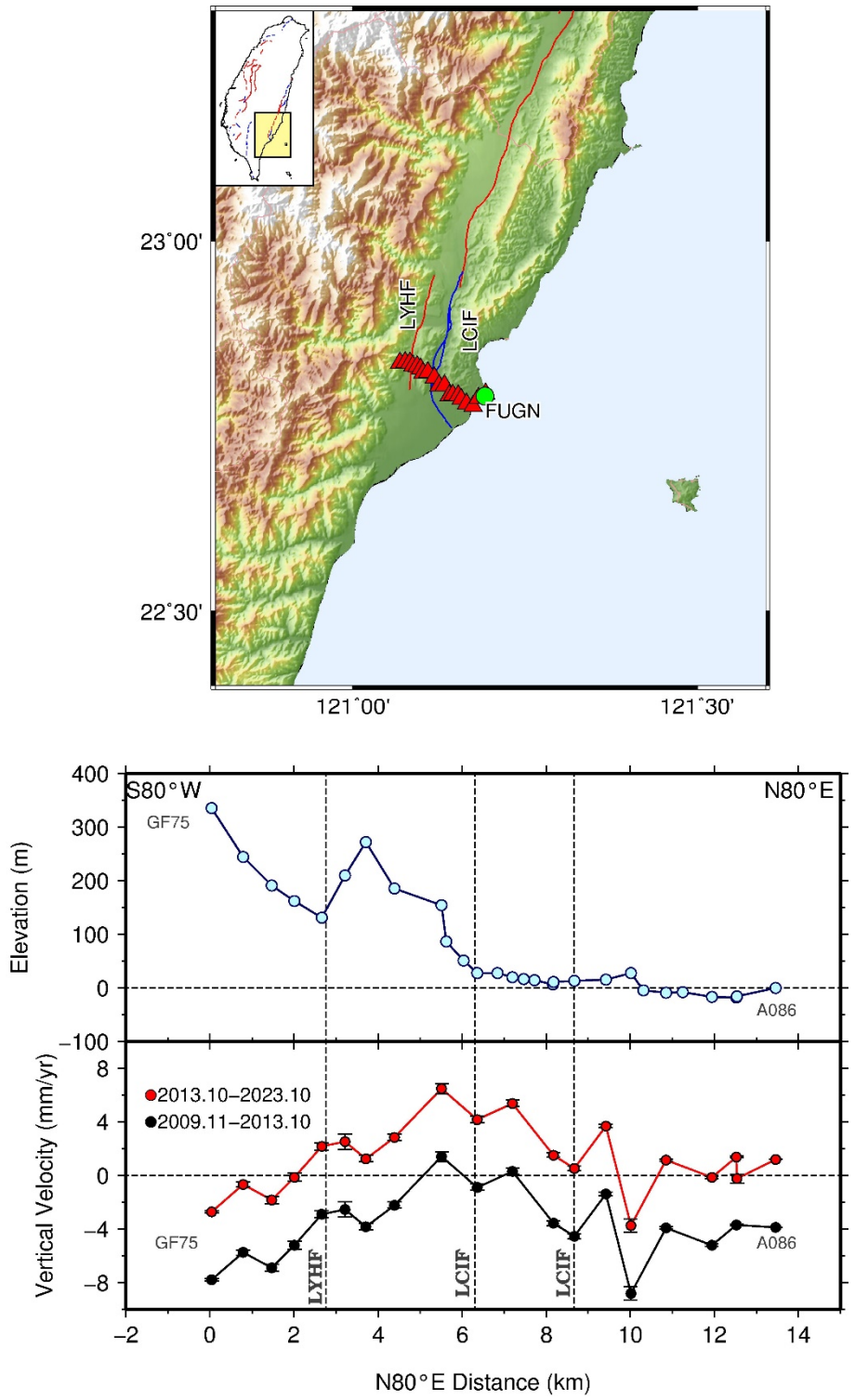


圖 2. 153：東成至富岡測線高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2009 - 2013 年瑞穗地震震前垂直速度，紅色為 2013 年至今的垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 2. 153: Elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. (a) The distribution of leveling route. (b) The elevation change and the average vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the 2013 Ruisui earthquake of 2009-2013, and red is the vertical velocity from 2013 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular. LYHF is Luyeh fault, LCIF is Lichi fault.

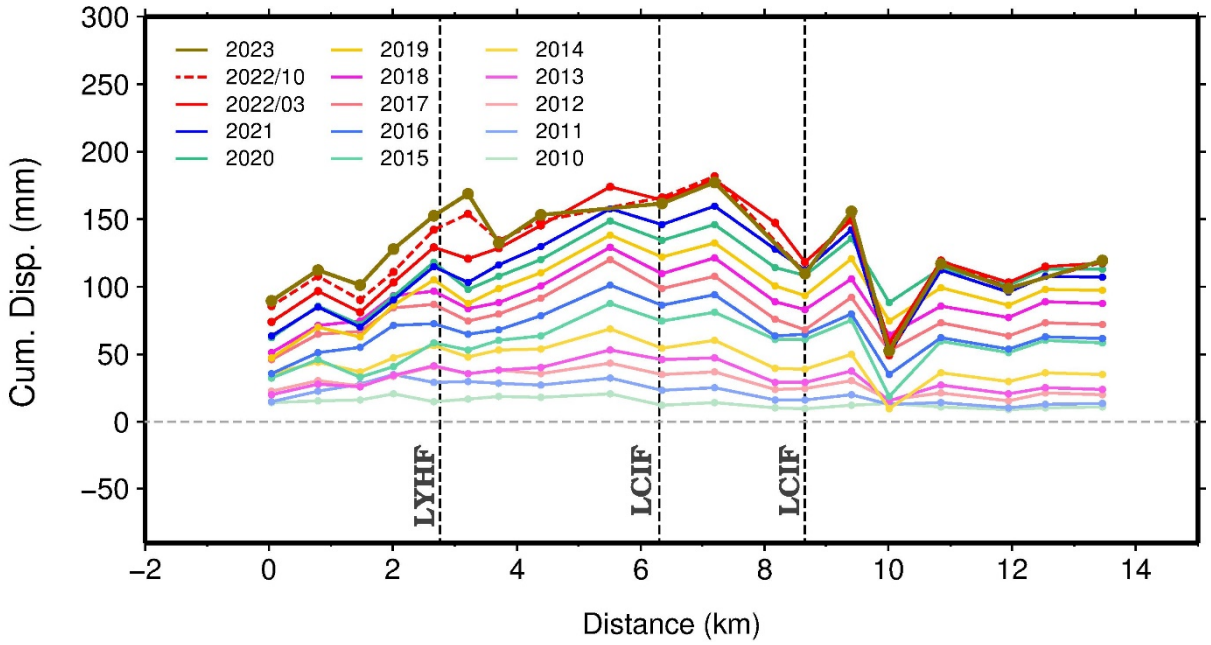


圖 2. 154：東成至富岡測線累積高程差。以虛線表示之累積高程差線段表示為地震後之量測。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 2. 154: Cumulative elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. The dashed cummulative elevation change line show the measurement after earthquake. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LYHF is Luyeh fault and LCIF is Lichi fault.

2-3-10 宜蘭地區精密水準測線

2-3-10-1 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 2. 156），測線長約 44 公里，2011 年至 2023 年間共進行 11 次施測。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點 9053、9054、BM10 滅失，無法繼續觀測。

本測線以 GPS 連續站 GS72 之 2018 年地震前垂直速率（-7.9 mm/yr）與 2018 年至今垂直速率（-7.1 mm/yr），作為控制點來校正 GG78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2. 155）。累積高程差如圖 2. 157。

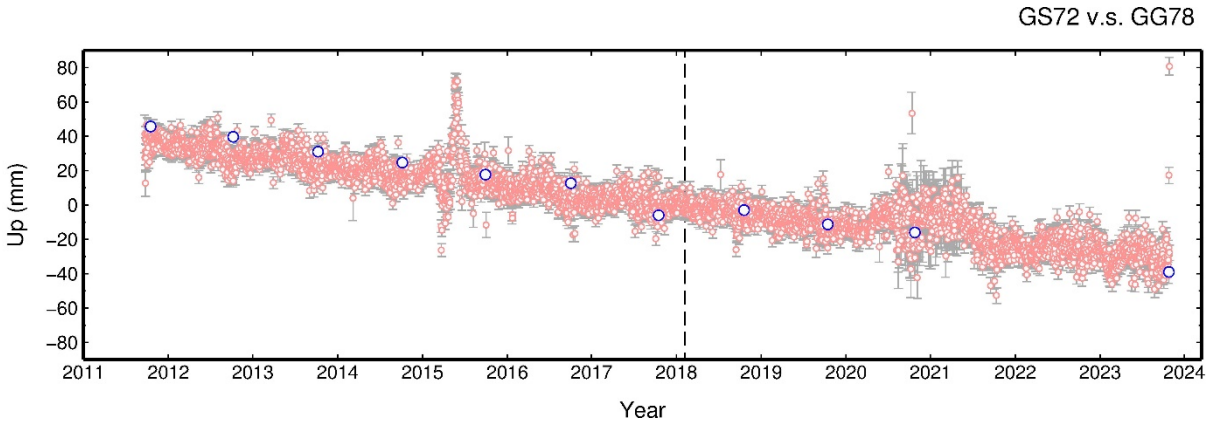


圖 2. 155：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較，兩者相距 1.1 公里。虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2. 155: Time series comparison between leveling bench mark GG78 and continuous GPS station GS72. The distance between two stations are 1.1 km. The dashed line is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

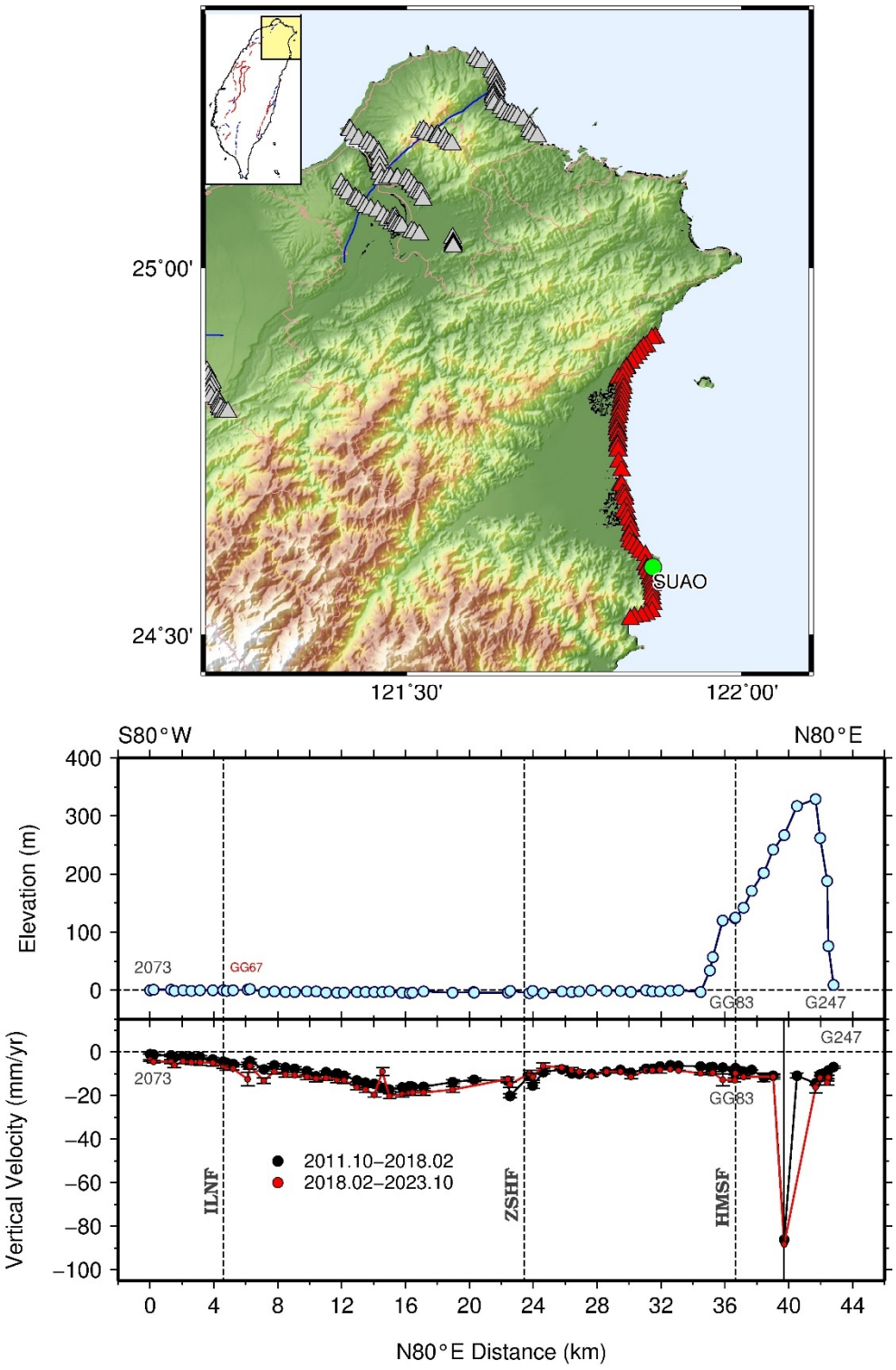


圖 2. 156：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。(a) 上圖為測線位置分布圖。(b) 下圖為高程地形變化和各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2011 - 2018 年的垂直速度，紅色為 2018 年至今的垂直速度。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水－梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

Figure 2. 156: 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. Black is the vertical velocity of 2011-2018, and red is the vertical velocity from 2018 to the present. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. ILNF is Yilan fault, ZSHF is Zhuoshui-Lishan fault, and HMSF is Hsiaomaoshan fault.

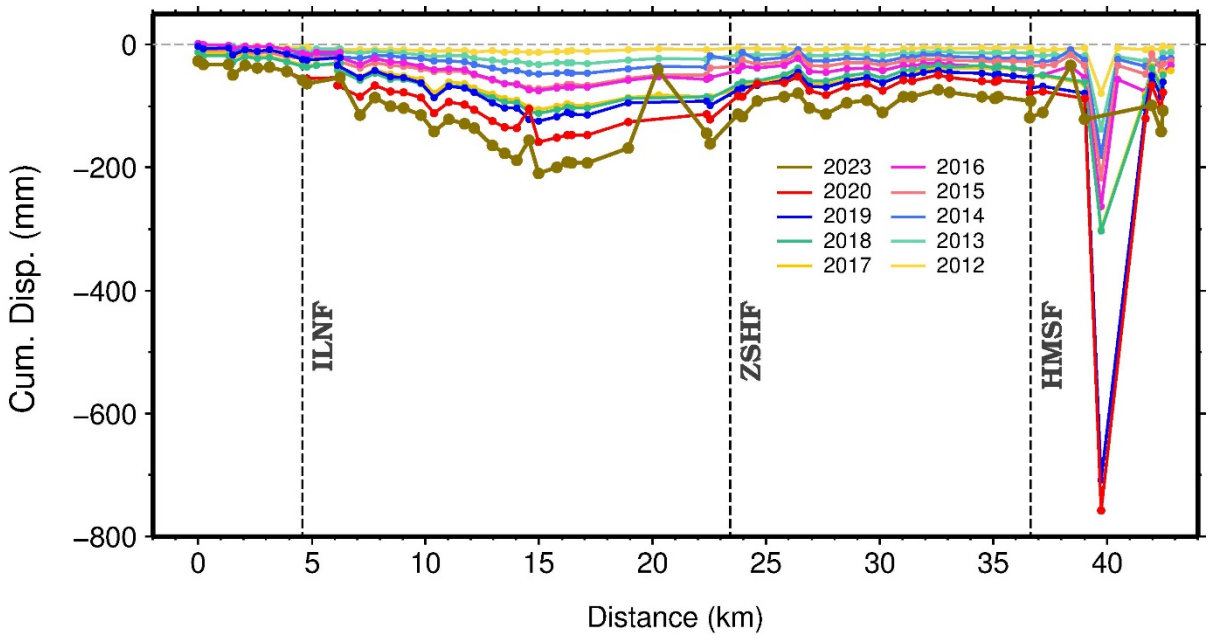


圖 2. 157：梗枋至東澳測線累積高程差。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水−梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

Figure 2. 157: Cumulative elevation change of the Gengfang-Dongao leveling route. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. ILNF is Yilan fault, ZSHF is Zhuoshui-Lishan fault, and HMSF is Hsiaomaoshan fault.

2-3-11 精密水準測量資料可靠度分析

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

臺北地區山腳斷層兩側主要以沉陷為主（圖 2. 158）。桃竹苗地區顯著抬升或沉陷（圖 2. 159）。

中部地區自 2013 年至今，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. 160），尤其在彰化沿海地區都有顯著的沉陷量。

嘉南地區從 2016 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 2. 161），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 2016 年至今，路竹至茂林測線跨鳳山丘陵呈抬升，屏東平原呈下陷；岡山至安坡測線主要為沉陷，與周圍 GNSS 測站相似（圖 2. 162）。

恆春地區從 2016 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，但在兩側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 2. 163）。

花東地區自 2018 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 2. 164）。

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 2. 165）。

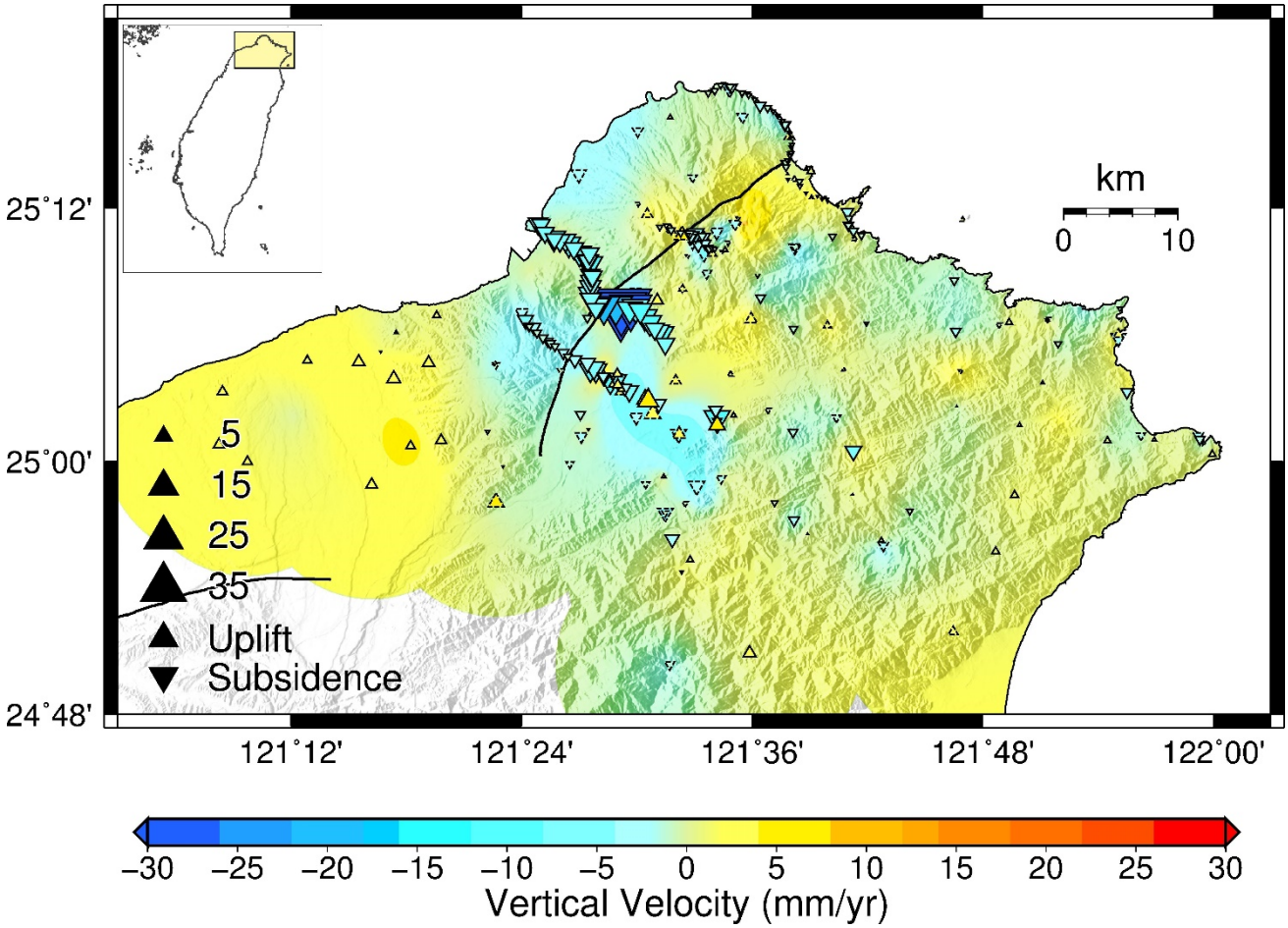


圖 2. 158：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。GNSS 觀測時間為 2002 – 2023 年，精密水準觀測時間為 2004 – 2023 年。

Figure 2. 158: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. The duration of GNSS observation is from 2002 to 2023; while pricise leveling is from 2004 to 2023.

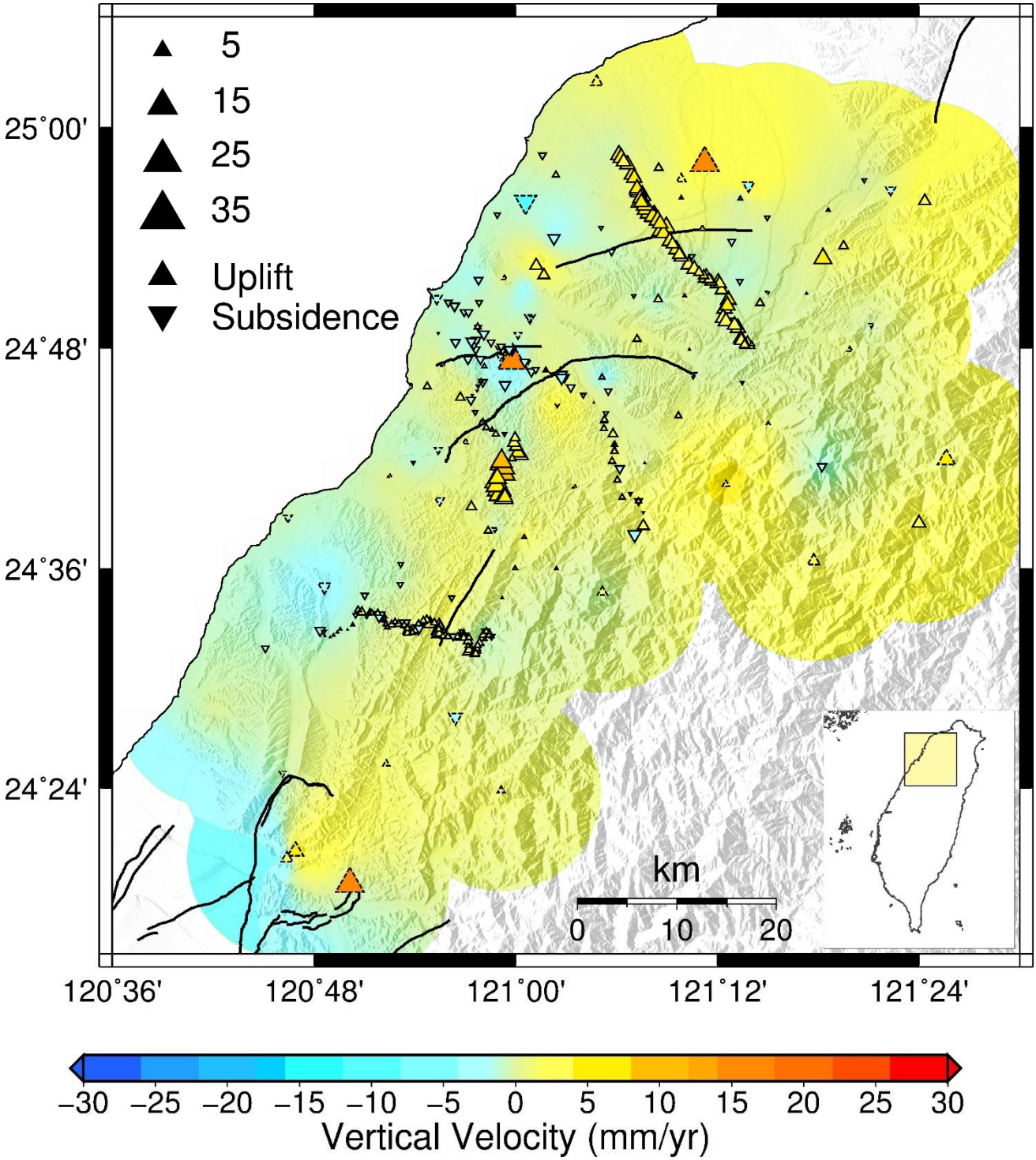


圖 2. 159：桃竹苗地區 2002 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 159: Vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station in the Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas from 2002 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

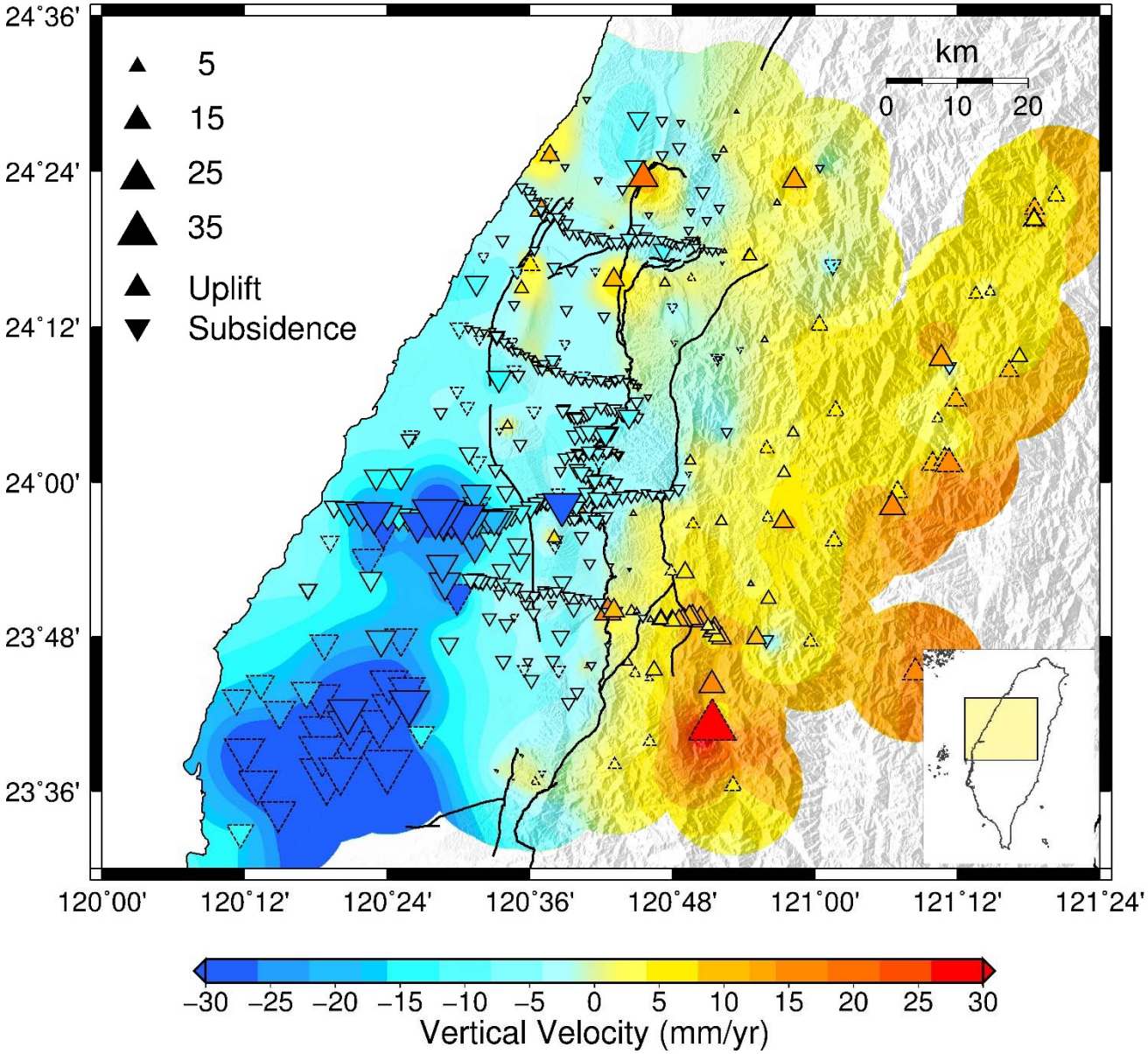


圖 2. 160：中部地區 2013 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 160: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Central Taiwan from 2013 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

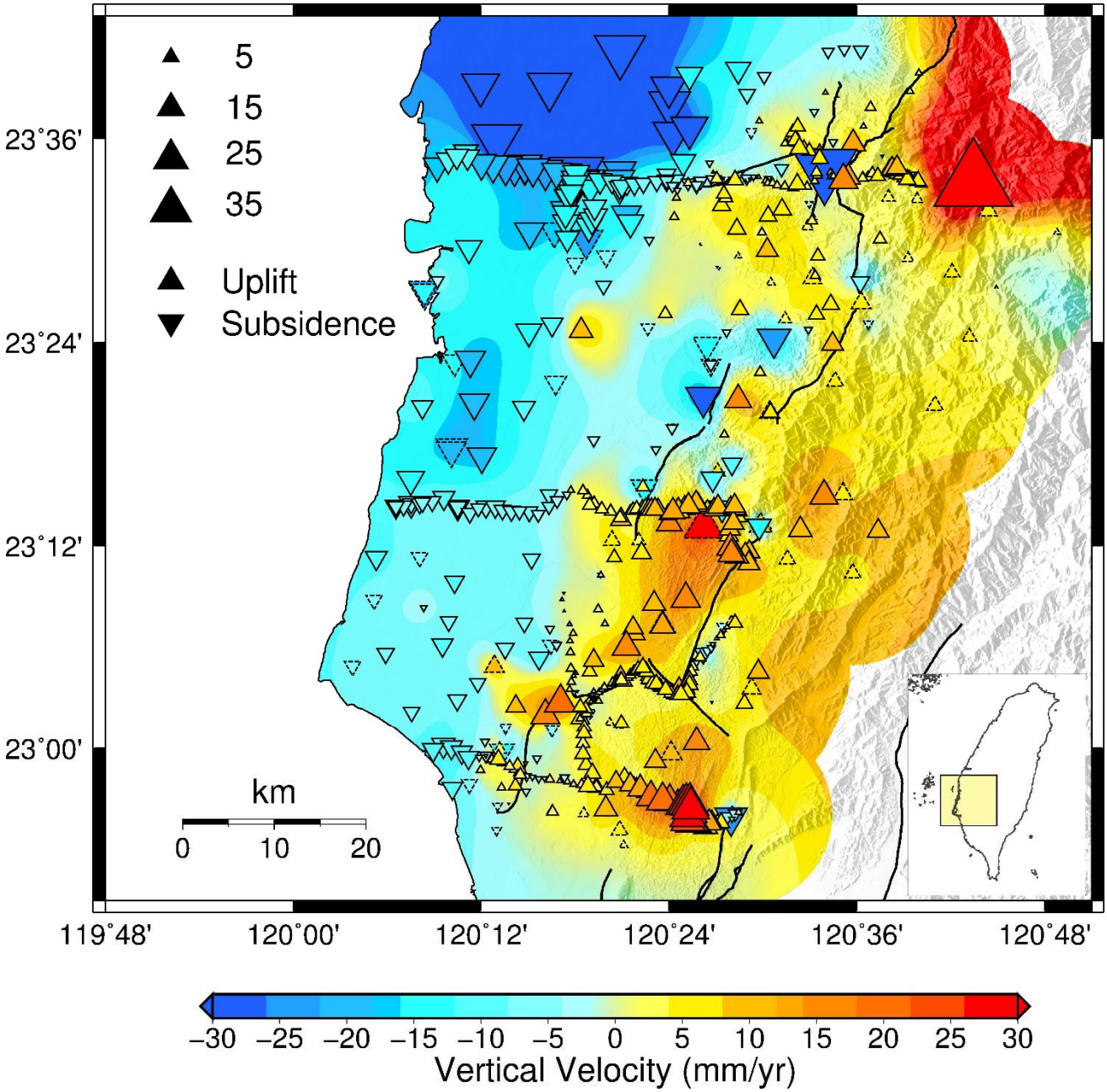


圖 2. 161：嘉南地區 2016 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 161: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Chiayi and Tainan areas from 2016 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

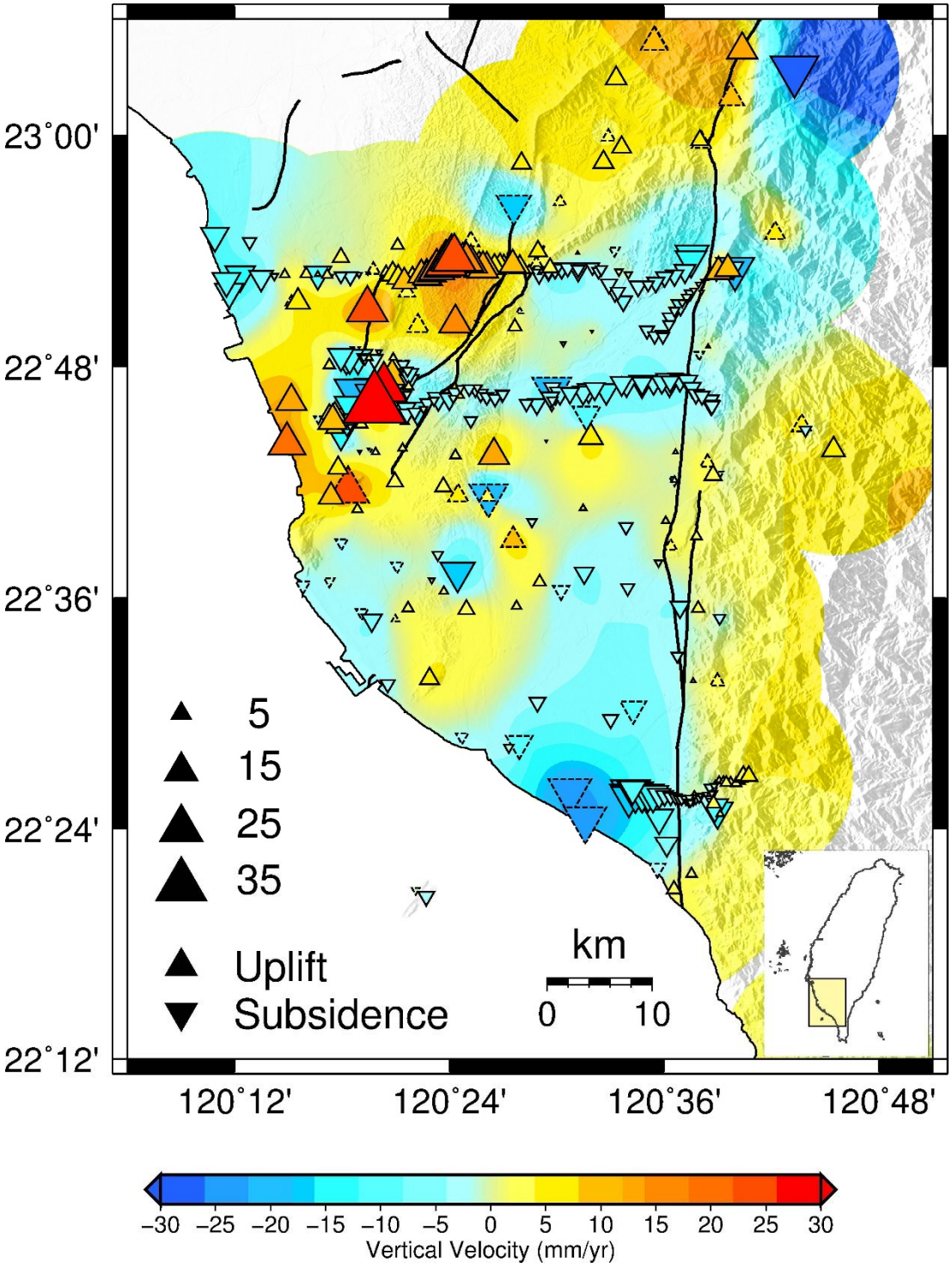


圖 2. 162：高屏地區 2016 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 162: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Kaohsiung and Pingtung areas from 2016 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

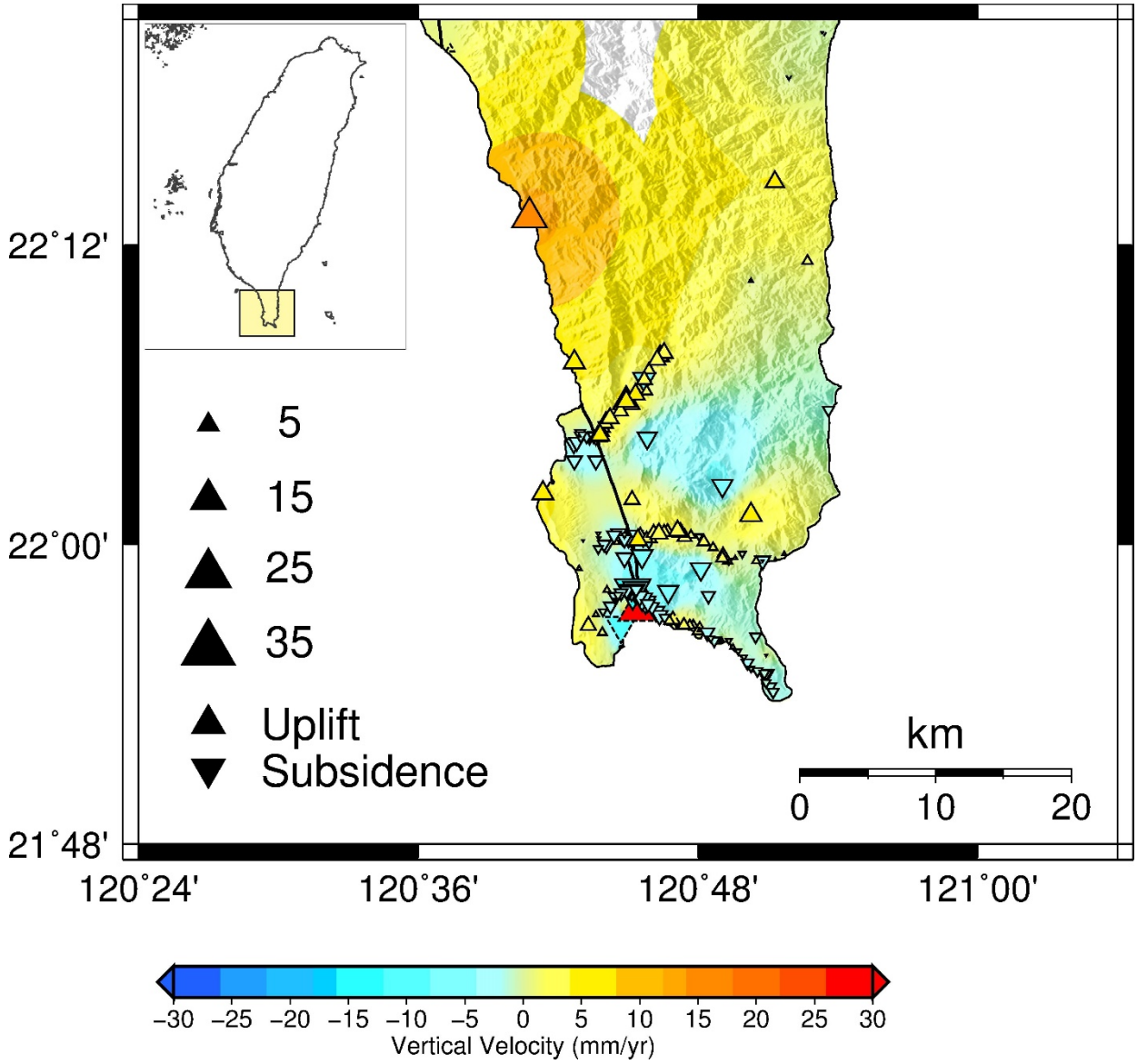


圖 2. 163：恆春地區 2016 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 163: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Hengchun area from 2016 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

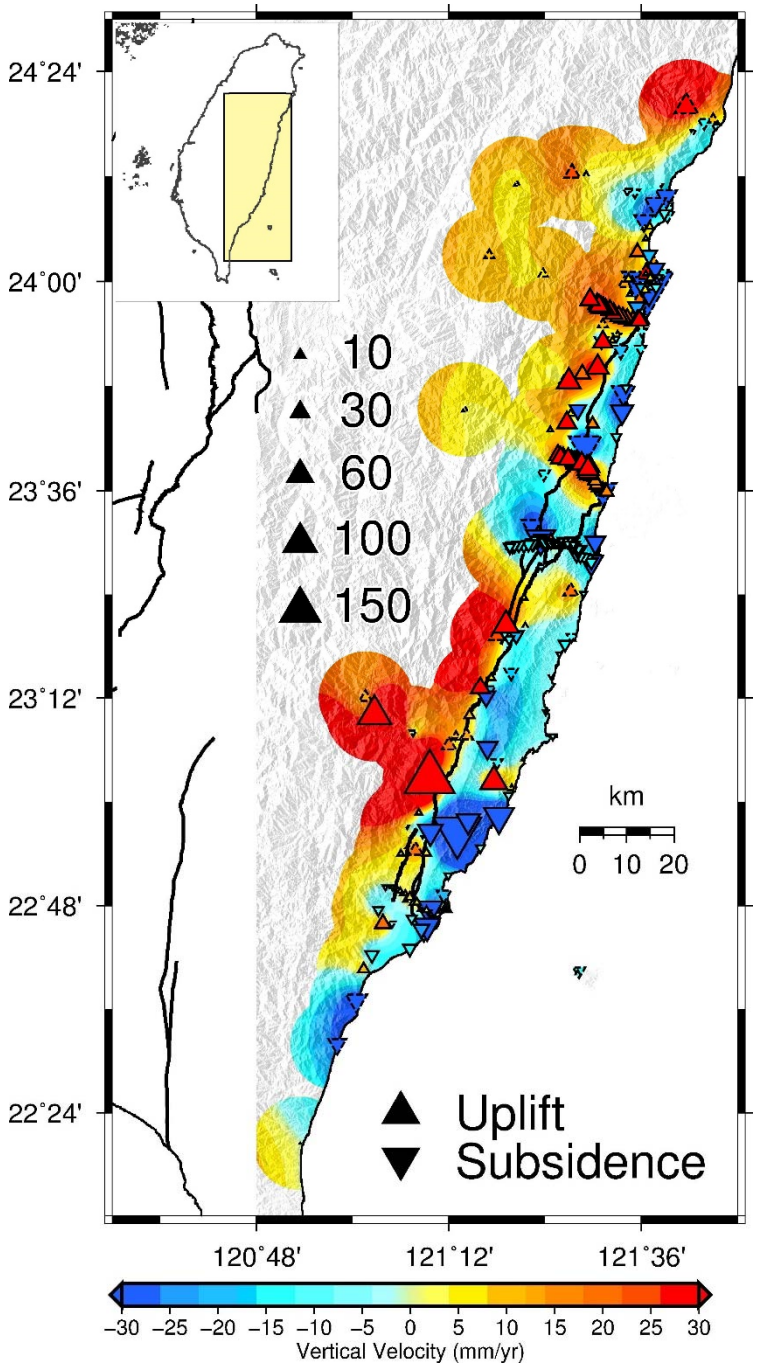


圖 2. 164：東部地區 2018 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。

Figure 2. 164: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) statio in Eastern areas from 2018 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GNSS are shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame.

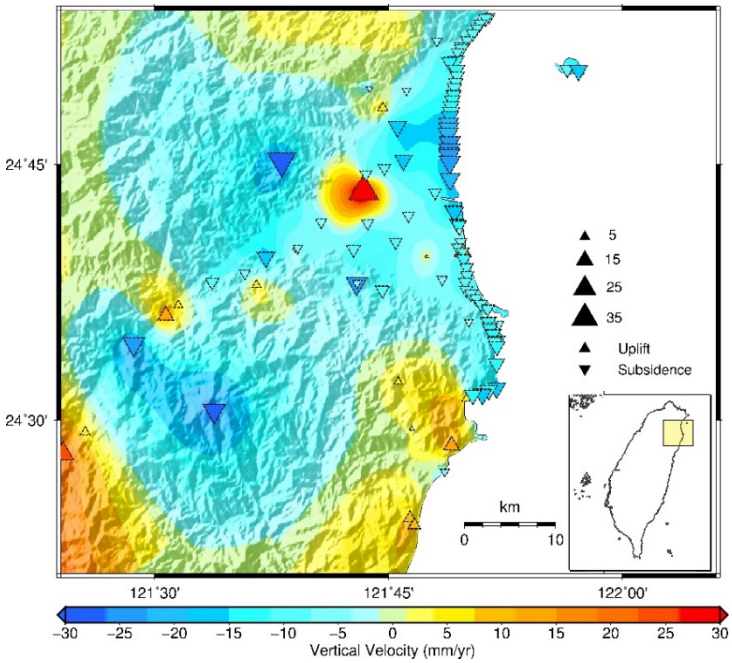


圖 2. 165：宜蘭地區 2004 – 2023 年相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

Figure 2. 165: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) statio in Yilan area from 2004 to 2023. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence.

2-4 重要區域三維速度場分析

2-4-1 重要區域水平與垂直速度場

本年度之重要區域範圍有新竹科學園區與臺北都會區，其中新城斷層通過新竹科學園區，山腳斷層通過臺北都會區。重要區域之水平速度場如圖 2.166 與圖 2.168，垂直速度場如圖 2.167 與圖 2.169。以下針對重要區域之水平與垂直速度場進行描述：

1. 新竹科學園區附近的水平速度場自 2002 年迄今大致朝西北向運動，且跨新城斷層上下盤並無顯著的速度差異。在垂直速度場方面，新竹科學園區南北各有一條水準測線，北為新竹-五峰測線、南為新竹-峨嵋測線，整體而言，除了在園區西側局部區域有約 5 mm/yr 的垂直抬升外，其餘則變動不大。在跨新城斷層上下盤並無顯著的垂直速度差異。
2. 臺北都會區附近的水平速度場自 2002 年迄今大致朝東北向運動為主，並由南向北略呈順時鐘旋轉，且跨山腳斷層上下盤並無顯著的速度差異。在垂直速度場方面，臺北都會區內由北而南依序有石門-萬里、士林-三芝、淡水-士林、五股-臺北 4 條水準側線，整體而言本區主要為沉陷，尤以臺北盆地內具較顯著的沉陷量，在跨山腳斷層上下盤之垂直速度場並無顯著變化。

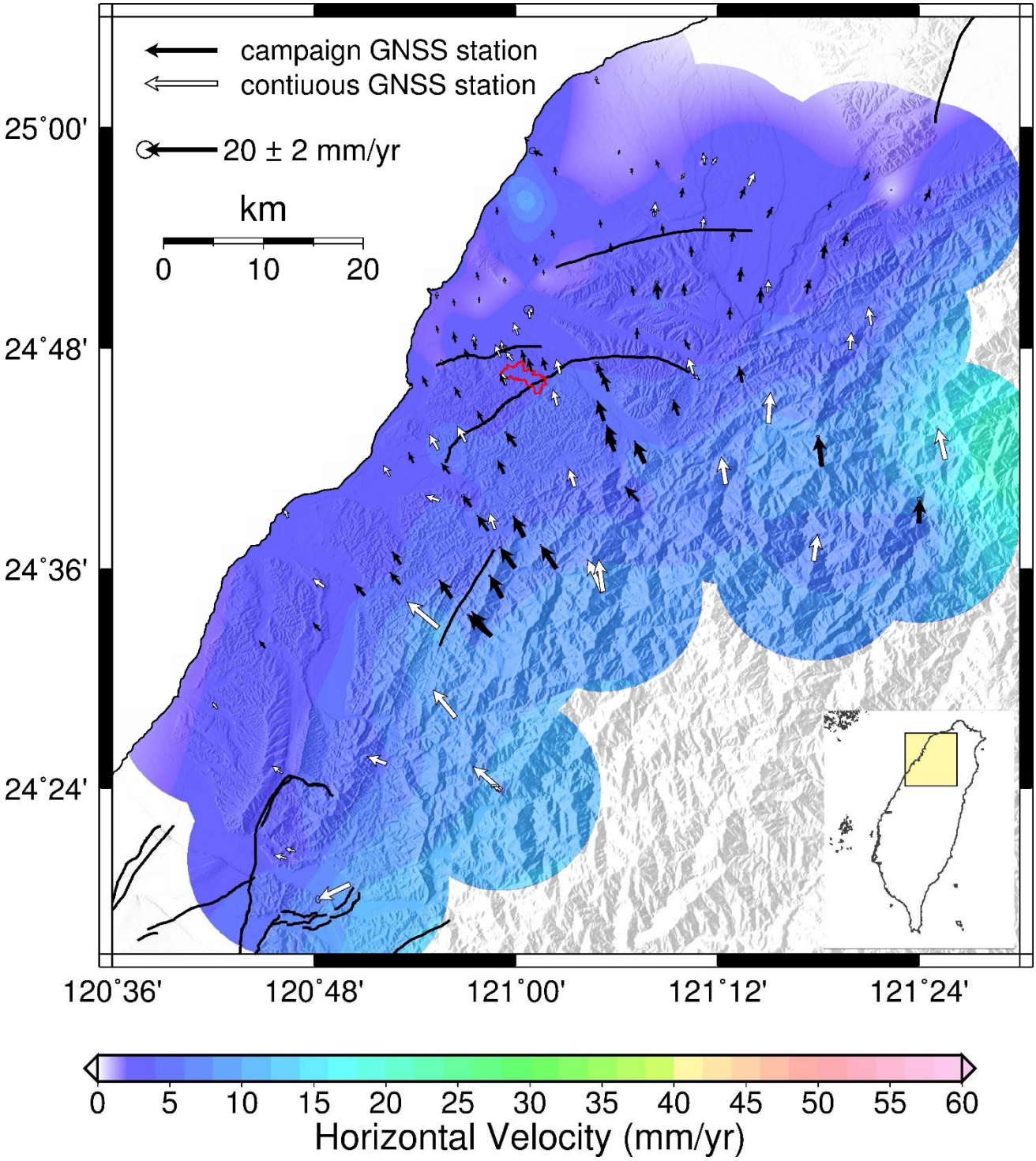


圖 2. 166：新竹科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。黑色箭頭為移動站，白色箭頭為連續站。紅線區域為重要區域–新竹科學園區。

Figure 2. 166: Hsinchu Science Park GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities. Red line is the object area of Hsinchu Science Park.

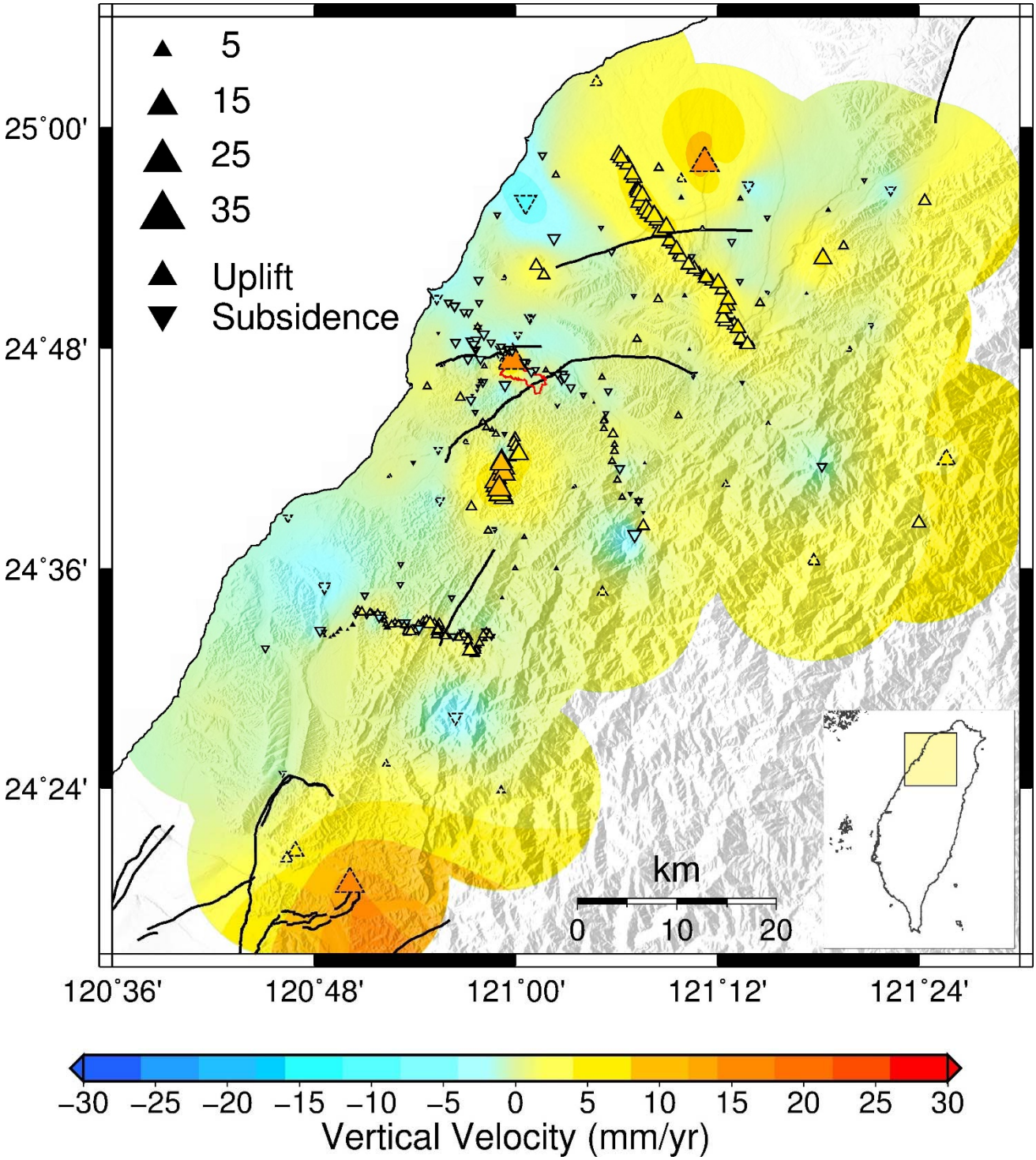


圖 2. 167：新竹科學園區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。紅線區域為重要區域−新竹科學園區。

Figure 2. 167: Hsinchu Science Park GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. Red line is the object area of Hsinchu Science Park.

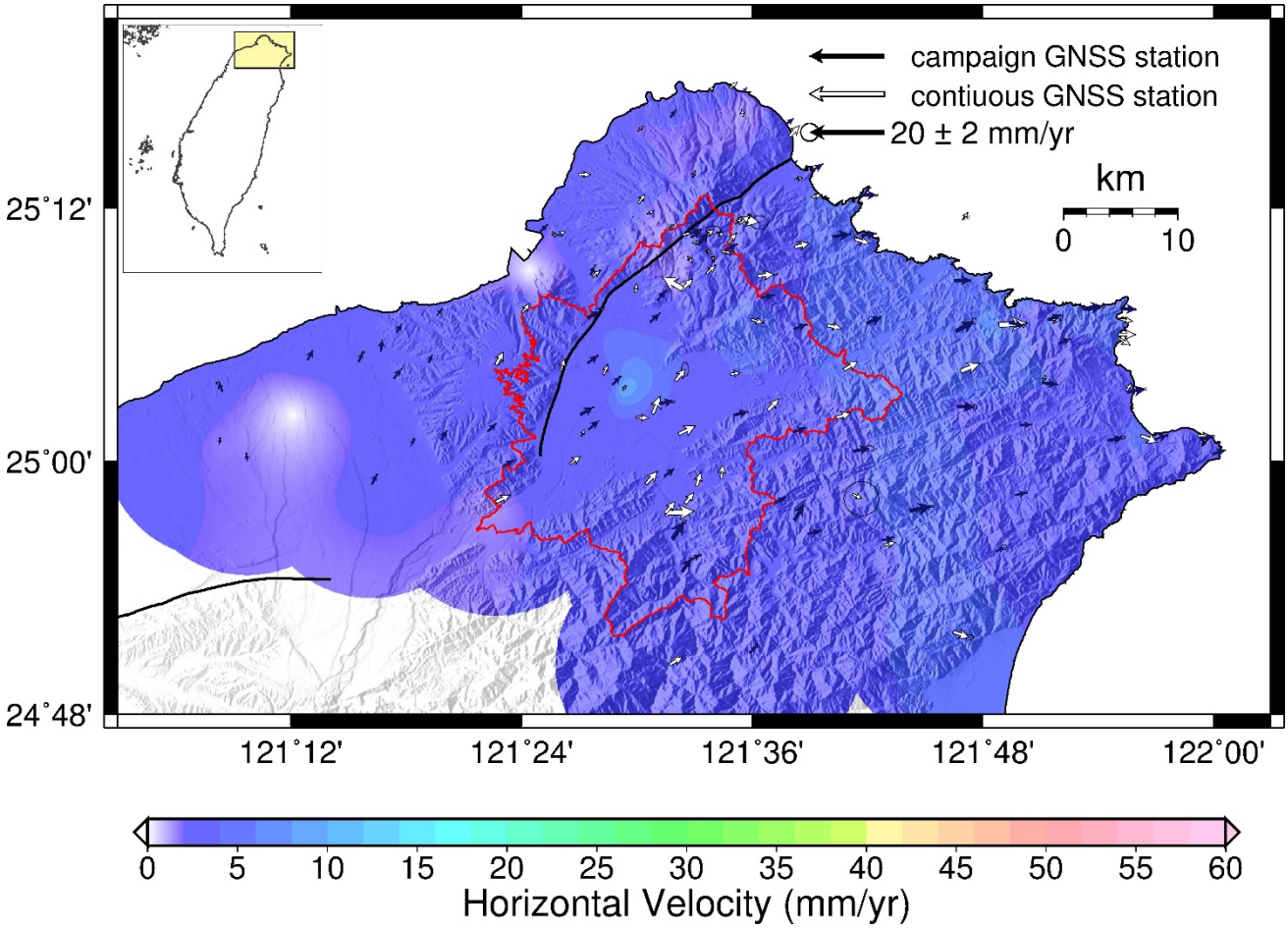


圖 2. 168：臺北都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 水平速度場。黑色箭頭為移動站，白色箭頭為連續站。紅線區域為重要區域–臺北都會區。

Figure 2. 168: Taipei City GNSS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. Black arrows denote the campaign-mode GNSS velocities and the white arrows are continuous GNSS velocities. Red line is the object area of Taipei City.

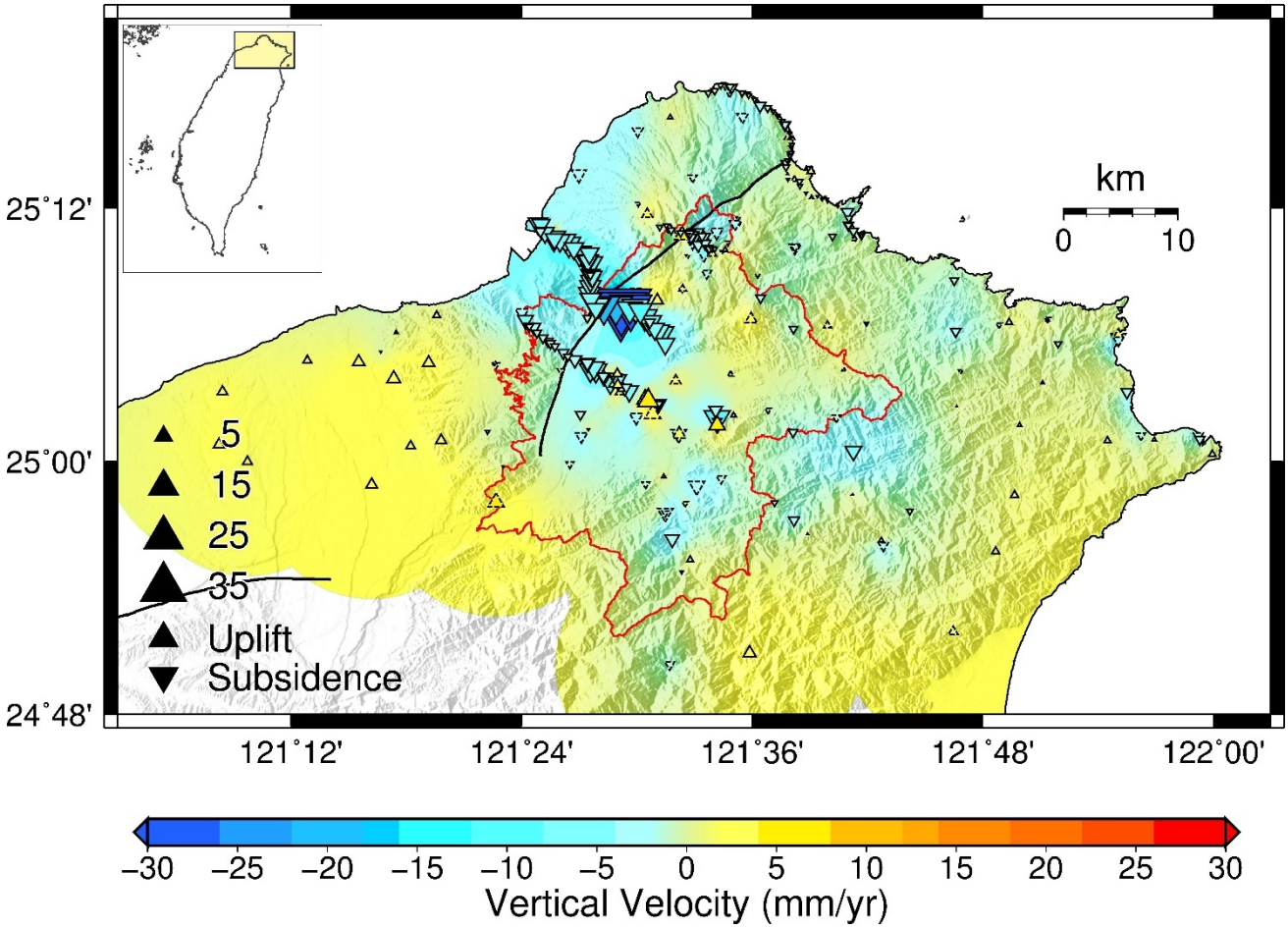


圖 2. 169：臺北都會區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GNSS 垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示 GNSS 移動站，虛線邊框表示 GNSS 連續站。紅線區域為重要區域─臺北都會區。

Figure 2. 169: Taipei City GNSS vertical velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the velocity. Warm colors represent uplift while cool colors represent subsidence. Campaign-mode GNSS is shown in dark frames, and continuous GNSS is shown in dotted frame. Red line is the object area of Taipei City.

第三章、北部地區重要斷層參數分析

3-1 斷層資料蒐集

為了量化斷層特性參數以提供後續大地測量資料擬合及斷層潛勢評估中，本計畫蒐集斷層幾何傾角、斷層深度、滑移速率地質調查資料，例如野外露頭中靠近主斷層線跡之斷層位態，槽溝資料中地層錯位量最大之主斷層位態，平衡剖面中數學幾何推估之斷層幾何，也參考地震深度分布資料推估孕震深度，參考地球物理資料推估基盤深度（表 3. 1）。

本計畫今年度蒐集臺灣北部地區活動斷層，根據經濟部地質調查及礦業管理中心最新公布之活動斷層分布（林啟文等，2021），臺灣北部地區活動斷層包含山腳斷層、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；其中，山腳斷層及新城斷層為本計畫之重要斷層。

表 3. 1：斷層幾何參數資料蒐集重點

Table 3. 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	根據主斷層之斷層跡位置蒐集斷層位態資料。	V	X
槽溝開挖	假設累積滑移量最大的斷層為主斷層，蒐集主斷層位態資料。	V	X
震測剖面	將測線距離單位與深度單位調整至 1:1 後，量測剖面中的斷層傾角及深度。	V	依測線長度而定
平衡剖面	剖面中的斷層傾角及滑脫面深度	V	V
地球物理資料	透過速度構造剖面推估基盤深度	依解析度而定	V
地震深度分布	根據地震密集帶推估孕震深度。若地震事件與斷層地表破裂相關，可用來推估斷層深部的傾角與深度。	視地震事件分布情形而定	V

3-1-1 山腳斷層

3-1-1-1 斷層長度

根據經濟部地質調查及礦業管理中心 2021 年發布之臺灣活動斷層分布圖（林啟文等，2021），山腳斷層長度約 35 公里，屬於第二類活動斷層。山腳斷層為正斷層，而位於上盤的臺北盆地為陷落盆地，臺北盆地的基盤深度在五股一帶最深（Wei et al., 1998；許邵禎，2013）；在林口台地東緣可見斷層線崖、三角斷面的地形特徵，往北進入大屯火山區可見斷斷續續呈雁行排列的線性特徵（詹瑜璋等，2005）（圖 3.1），本計畫認為竹子湖可做為山腳斷層的分段位置。外海區域王天楷等（2007）進行密集的震測施測，並認為山腳斷層有往外海延伸的可能性（圖 3.2）；中興公司（2012）於東北海域進行多音束水深調查測繪海底地形，認為山腳斷層往外海可能延伸 40 公里長（圖 3.3）。Nguyen et al.（2022）於臺灣北部海域蒐集震測資料及鑽井資料繪製構造分布，海域山腳斷層長度約 128 公里（圖 3.4）。

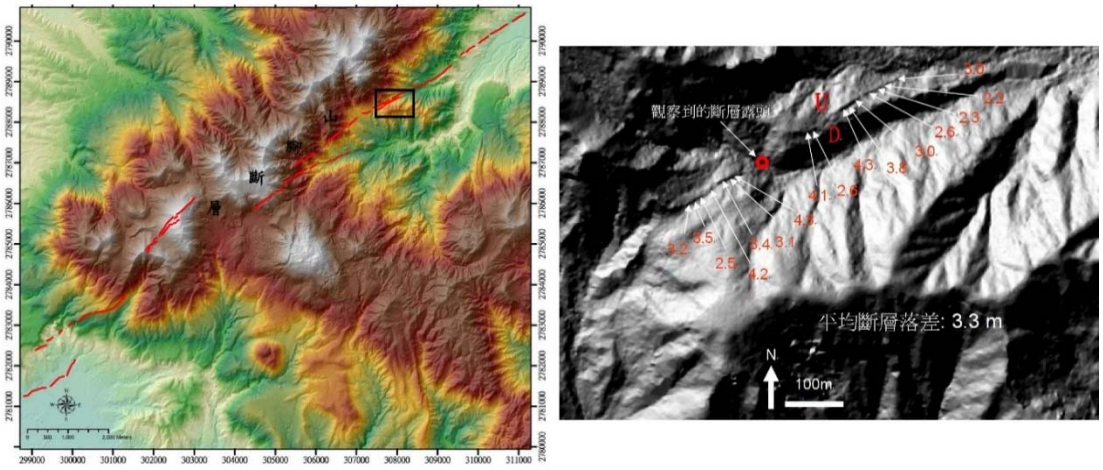


圖 3.1：大屯山地區之 LiDAR DTM，觀察之線形呈現雁行排列，北段觀察到之斷層線形，平均落差為 3.3 m（詹瑜璋等，2005）。

Figure 3. 1: The LiDAR DTM in the Tatunshan area shows en echelon arrangement, and the fault line observed in the northern section has an average height differences of 3.3 m.

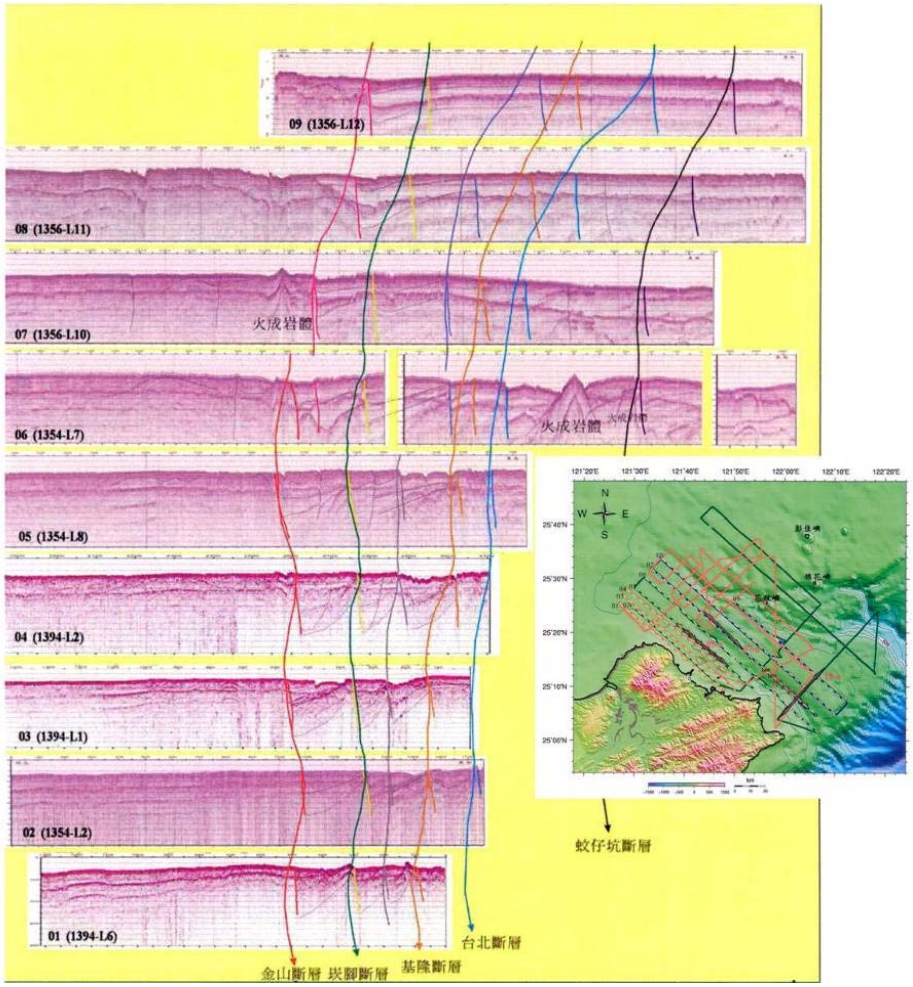


圖 3. 2：臺灣東北部海域震測分布及震測剖面斷層延伸位置對比圖（王天楷等，2007）。

Figure 3. 2: Seismic profile distribution in the northeastern sea area of Taiwan and the comparison map of the fault location in the seismic section.

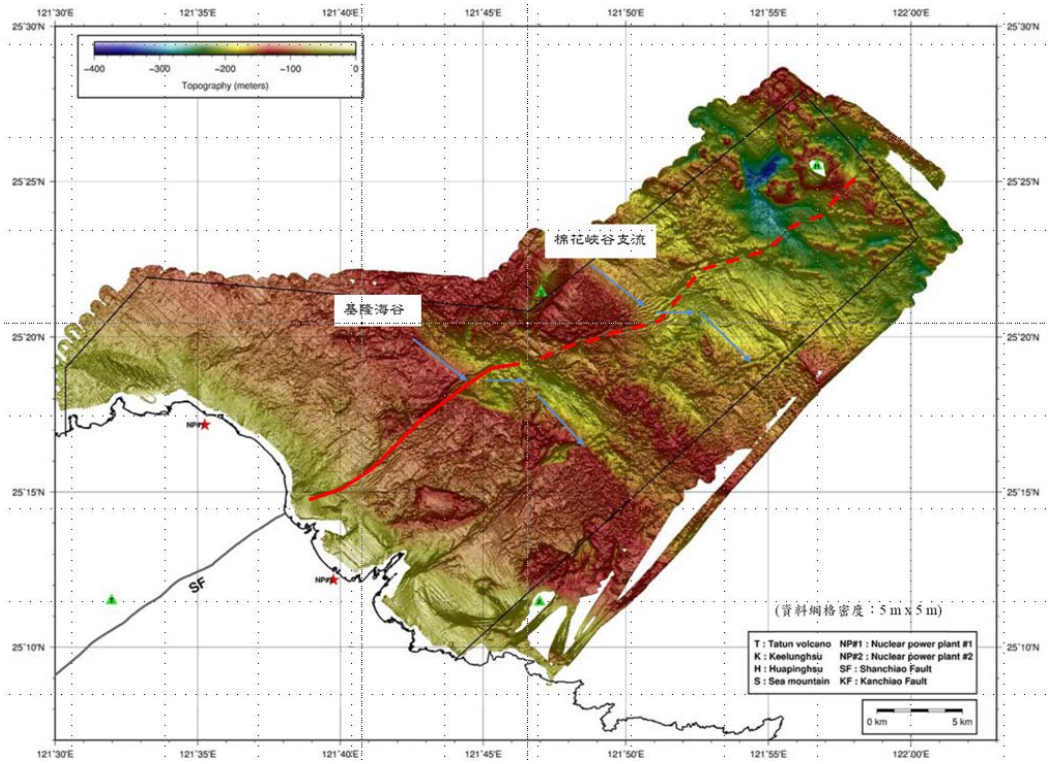


圖 3. 3：北部海域多音束水深調查-海底地形光影圖（中興公司，2012）。

Figure 3. 3: Multi-beam Echo Sounder bathymetry survey in northern sea - light and shadow map of seabed topography.

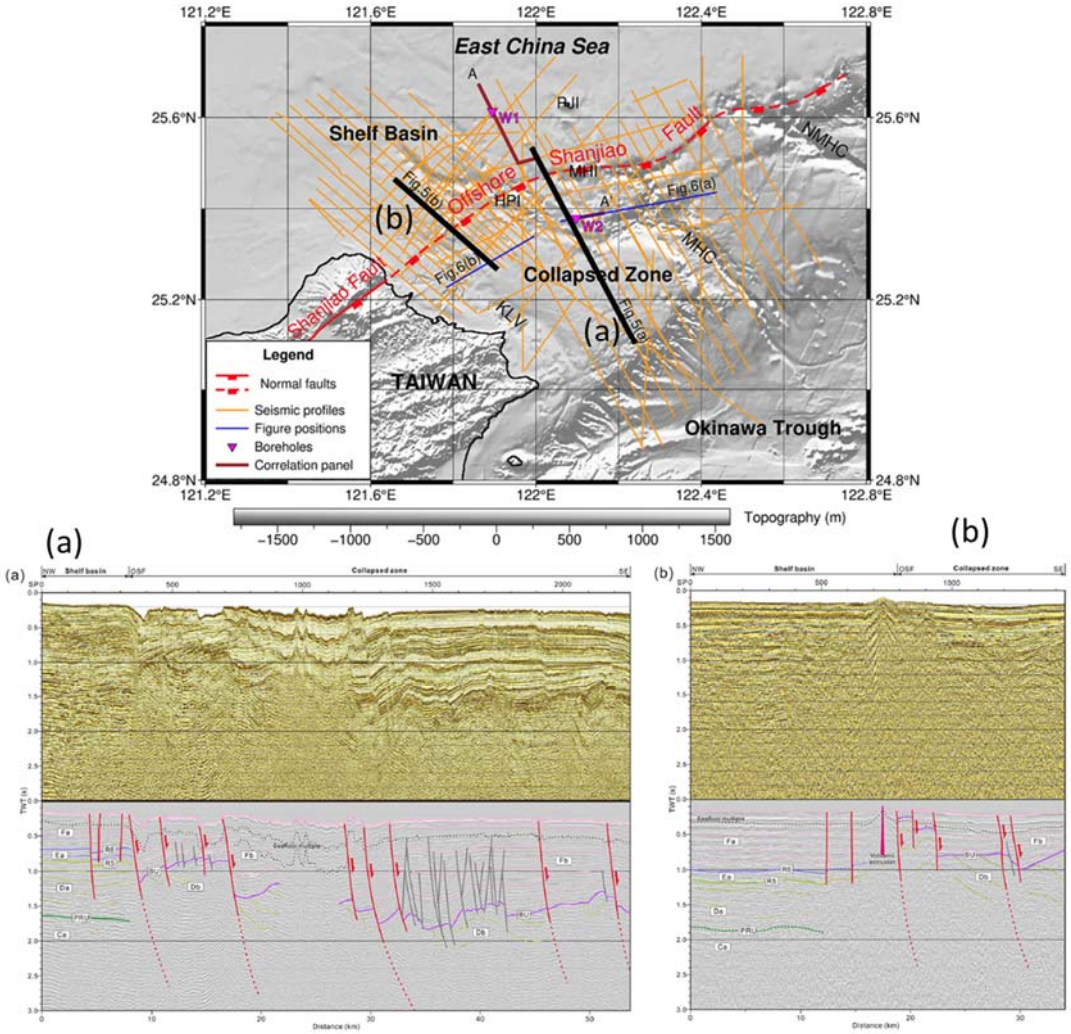


圖 3. 4：海域山腳斷層（Offshore Shanchiao Fault, OSF）分布圖及海域震測剖面圖（Nguyen et al., 2022）。

Figure 3. 4: The distribution map of Offshore Shanchiao Fault (OSF) and the seismic sections in the marine area.

3-1-1-2 斷層傾角

1. 震測資料

海域震測資料：根據蕭力元等（1998）繪製的臺灣外海與島內構造分布及外海 LL'震測剖面，金山斷層延伸至海域的幾何形貌為高角度斷層（圖 3. 5）。Song et al.（2000）的海域震測剖面 LINE 8 顯示在金山斷層外海延伸方向存在高角度斷層 F（圖 3. 6）。王天楷等（2007）於臺灣東北海域施測密集的震測線，震測剖面顯示山腳斷層有往外海延伸之可能性（圖 3. 2）。中興公司（2015）於台灣東北外海進行調查，其中 ST-I 與 ST-II 底質剖面資料可觀察到兩線型之上盤反射訊號有擾動變形現象（圖 3. 7），顯示山腳斷層外海屬同張裂時期之半地塹盆地。

陸域資料震測：簡志宇（2008）於五股、蘆洲的疏洪道的震測結果顯示，山腳斷層為正斷層，斷層上盤可看到明顯的盆地陷落所造成的地層拖曳，斷層傾角約 55 度（圖 3. 8）。石瑞銓

（2003）於關渡平原之震測結果顯示，山腳斷層為高角度斷層，斷層面傾向東南（圖 3. 9）。

2. 地質剖面

陳致同等（2012）根據景美礫石層頂部深度變化模擬解析山腳斷層於上部地殼之幾何形貌。模擬結果顯示山腳斷層在淺部傾角約 70 至 85 度接近垂直，而在 3 至 5 公里深處急遽轉折至近水平約 15 度，呈現鏟型幾何（listric geometry）。然而，考量山腳斷層為一可能發震的斷層，而全球至今尚未紀錄到低角度正斷層所產生的中大型地震，低角度正斷層的發震機制亦缺乏適當的力學解釋，陳致同等（2012）在上述幾何組合下又在深部加上一高角度斷面（圖 3. 10）。模擬結果顯示：若在地下 9 公里深處斷層面由近水平角度轉折為 60 度東傾，可獲得較前述相當甚至更好一些的擬合結果。因此認為山腳斷層可能不僅重新活化了造山時期的逆衝斷層，也同時活化了前造山時期正斷層系統。

林啟文等（2021）根據古近紀—新近紀地層探討台北盆地的地質構造演育史，並繪製跨山腳斷層地質剖面由北而南 A 剖面至 H 剖面（圖 3. 11）。A 剖面通過金山平原，山腳斷層高角度東傾約 78 度，其北側南莊層中存在另一正斷層，內坑斷層，傾角約 61 度東傾。剖面 B 至剖面 G 通過台北盆地，剖面 B、C 位於關渡以北，山腳斷層位於新莊斷層的上盤，B 剖面山腳斷層高角度東傾 70 度，C 剖面山腳斷層東傾 60 度；D 剖面通過關渡，關渡以南山腳斷層位於新莊斷層下盤，D、E、F 剖面中山腳斷層約 60 度，G 剖面山腳斷層約 66 度。H 剖面位於山子腳地區，剖面中無山腳斷層，新莊斷層上盤地層呈背斜形貌。

陳冠宇（2014）認為在 0.8 Ma~0.4 Ma 時期有較劇烈的火山活動，在北部外海形成一系列地塹盆地及火成島嶼（基隆嶼、花瓶嶼、棉花嶼及彭佳嶼等），金山逆斷層在此時逆轉為磺溪正斷層，新莊斷層逆轉為山腳斷層。0.4 Ma 至今，台灣北部持續張裂，山腳斷層活動形成臺北盆地，磺溪斷層活動形成金山盆地，大屯火山噴發趨緩。陳冠宇（2014）建立通過金山平原的平衡剖面中，磺溪正斷層為高角度斷層，角度約為 75 度東傾，深度延伸至 10 公里左右（圖 3. 12）。

Nguyen et al.（2022）於臺灣北部海域利用震測資料及鑽井資料建立地質剖面及年代地層表，海域山腳斷層（Offshore Shanchiao Fault, OSF）區分了兩個明顯的區域，海域山腳斷層的西北側為陸架盆地，斷層的東南側為塌陷帶，具有一系列正斷層及地塹。在剖面 X 及剖面 Y 中，海域山腳斷層東傾約 70 度（圖 3. 13）。

3. 地震分布

Pu et al.（2017）利用大屯火山觀測站的地震網資料針對 2014 年 02 月 12 日發生於大屯火山區的地震及其餘震進行定位，地震序列集中於 2~7 公里深，並呈現線性排列。Pu et al.（2017）認為 0212 地震可能與紗帽山下的岩漿庫崩塌有關，而餘震序列呈現線性排列可能與山腳斷層有關，地震線性排列呈現東傾 50 度（圖 3. 14）。

4. 本計畫推估

根據以上文獻，山腳斷層為鏟型的正斷層，臺北盆地位於山腳斷層的上盤，盆地中更新世沉積物在靠近地表斷層跡的區域厚度較厚、深度較深，遠離地表斷層跡的沉積物厚度較薄，深度較淺，本計畫認為地層分布特徵呈現滾動背斜（rollover anticline）的型貌，可利用美國油公司發展的雪佛龍建立法（Chevron construction method）（Williams and Vann, 1987）嘗試建立山腳斷層的地下幾何形貌。雪佛龍建立法為根據滾動背斜的剖面建立鏟型斷層形貌（圖 3. 15）。此方法主要考量斷層發育的過程中，斷層上盤的水平拉張量（heave）是固定的，而垂直位移量（throw）則隨著斷層角度的變化而改變，水平拉張量可以透過量測指準層的水平位移量來獲得（圖 3. 16）。垂直位移量（throw, t）、水平拉張量（heave, h）、斷層傾角（fault angle,α）三者的關係式可表示為：

$$t = h \tan \alpha$$

假設更新世沉積物開始沉積的時間與山腳斷層活動造成盆地陷落有關，則更新世沉積物與第三紀基盤間的不整合面應可視為盆地開始陷落的指準層。許邵禎（2013）根據臺北盆地鑽井資料建立第三紀基盤深度剖面圖，剖面中可看到不整合面呈現滾動背斜的形貌。若以不整合面為指準層，不整合面基於線平衡假設恢復為變形前的地層長度如圖 3. 17 中藍線所示，紅色箭頭為推估之拉張距離，約 210 公尺。假設拉張距離為固定，利用 Chevron construction method 建立的斷層幾何如紫色箭頭所示，斷層淺部約為 68 度傾角，深部約為 33 度傾角；斷層轉折深度約為 11 公里，斷層底部達 15 公里左右（圖 3. 17）。

本計畫利用雪佛龍建立法推估斷層幾何形貌，並以此作為山腳斷層後續分析計算的依據，0~8 公里深斷層傾角為 63 度，8~11 公里深斷層傾角約 25 度。

傾角相關文獻以及本計畫推估結果彙整於表 3. 2。

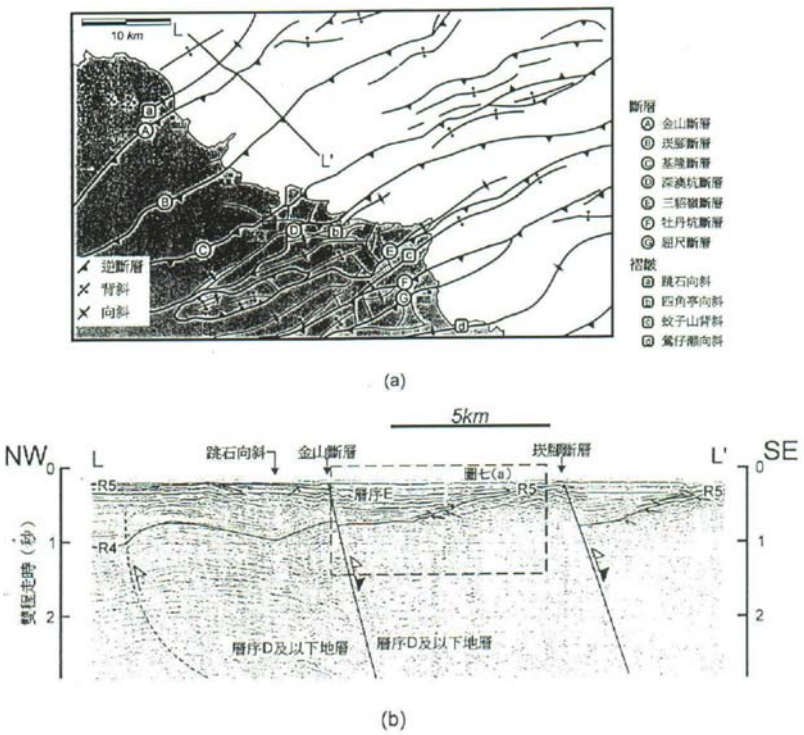


圖 3. 5：臺灣北部海域及陸域構造分布圖與震測剖面，（a）為構造分布圖，（b）為 LL'震測剖面解釋（蕭力元等，1998）。

Figure 3. 5: (a) The structural distribution map of the northern marine area and the onland area of northern Taiwan and (b) the interpretation of the LL' seismic profile.

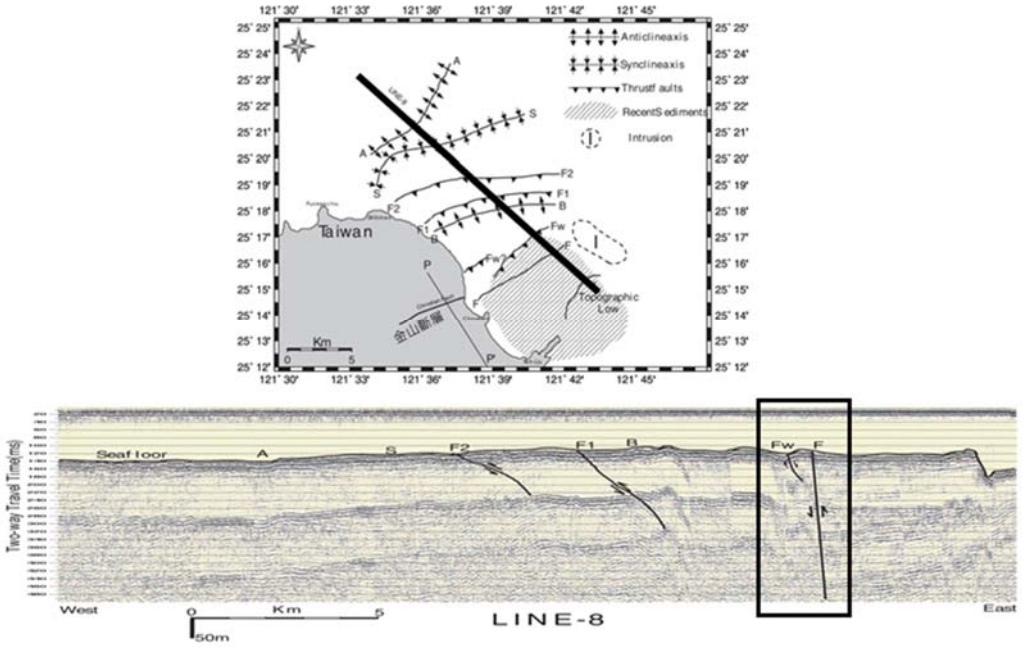


圖 3. 6：北部海域構造分布圖及海域震測剖面。黑色實線為剖面位置，黑框範圍為金山斷層往外海延伸區域（Song et al., 2000）。

Figure 3. 6: The structural distribution map of the northern sea area and the seismic section. The black solid line is the profile location, and the black frame is the extended area to the sea from the Chinshan fault.

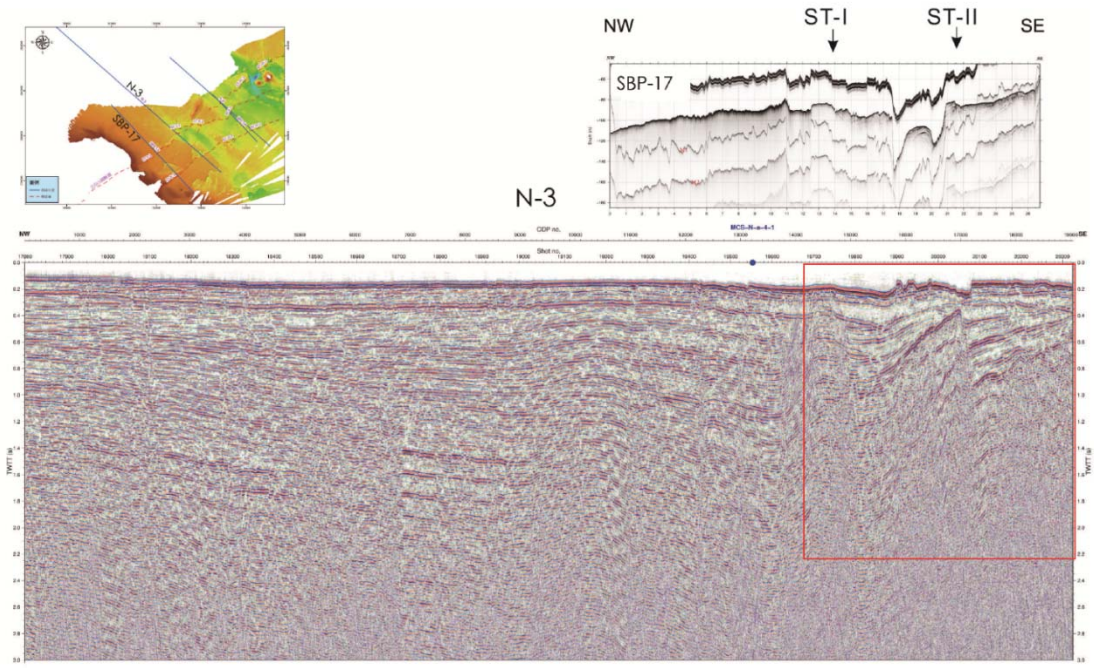


圖 3. 7：北部海域底質剖面以及震測剖面圖顯示 ST-I 及 ST-II 斷層具有擾動現象。ST-I 為山腳斷層往海域延伸之線性，ST-II 為崁腳斷層往海域延伸之線性（中興公司，2015）。

Figure 3. 7: Substrate profile and seismic profile show that ST-I and ST-II faults have disturbance phenomenon. ST-I is the linearity of the extension of the Shanchiao fault to the sea, and ST-II is the linearity of the extension of the Kanchiao fault to the sea.

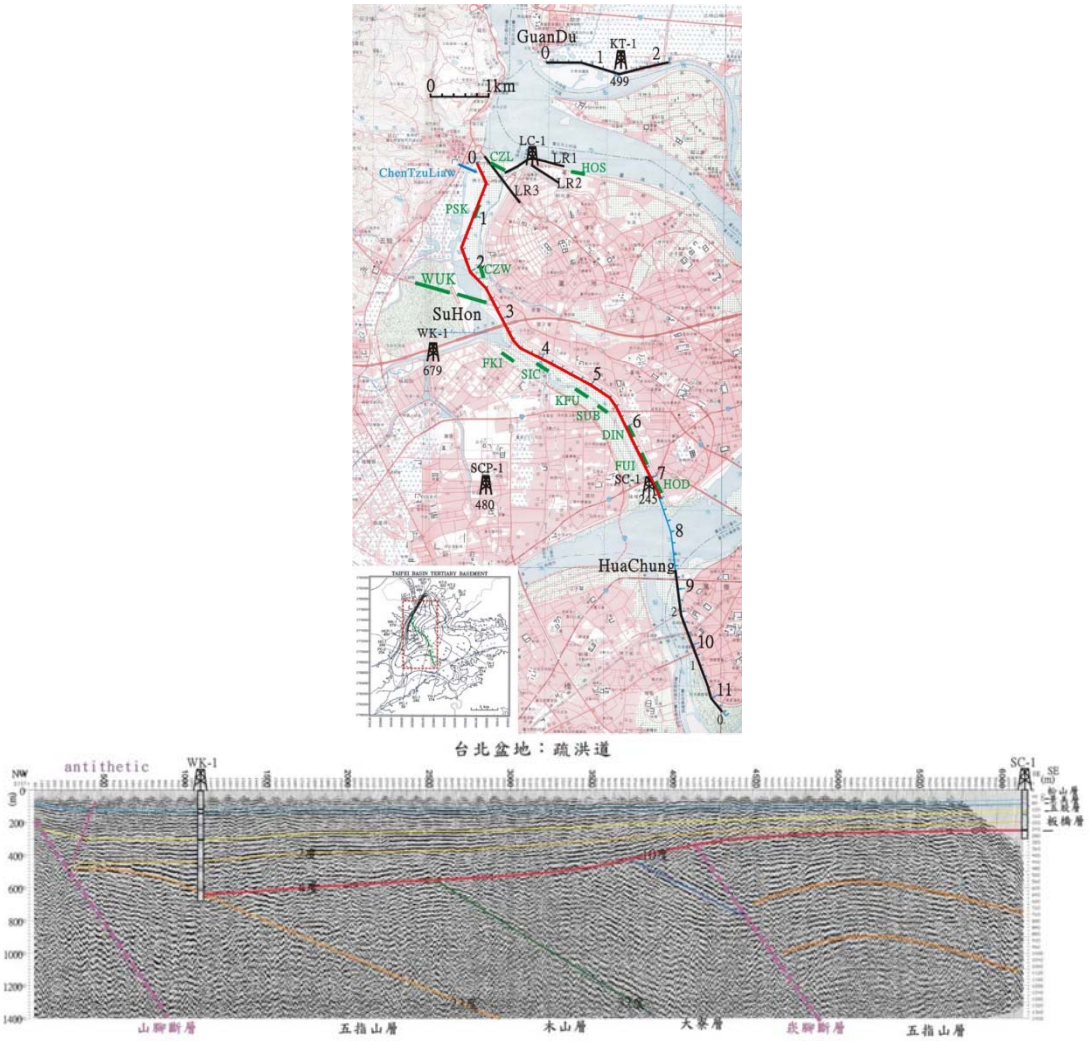


圖 3. 8：五股、蘆洲的疏洪道震測結果圖，震測線位置位於上圖紅線處，震測圖左側為山腳斷層（簡志宇，2008）。

Figure 3. 8: Seismic profiles at the flood channel in Wuku and Luzhou, and the seismic survey line is located at the red line in the map above, and Shanchiao fault is at the left side of the seismic profile.

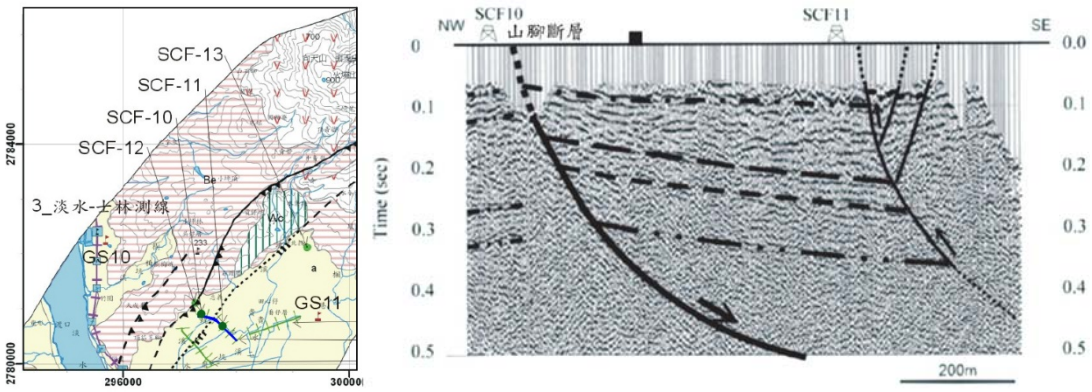


圖 3. 9：關渡平原的淺層震測結果圖。剖面位置位於左圖藍線處（石瑞銓等，2003）。

Figure 3. 9: Shallow seismic section of the Guandu Plain. The location is shown in blue line on the left map.

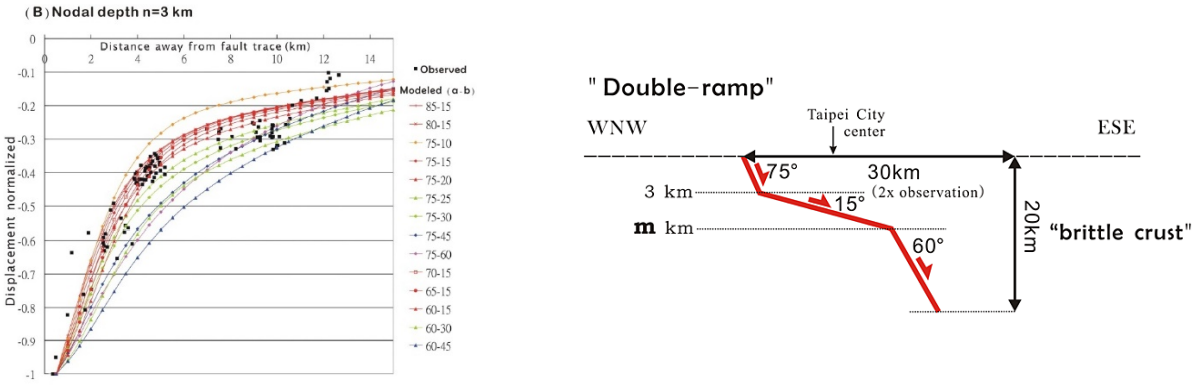


圖 3. 10：透過景美礫石層位移量模擬山腳斷層之幾何形貌。左圖中橫軸為樣本與斷層間距離，縱軸為錯移量，黑點為觀測值，各線段代表以不同的幾何面回歸觀測值之結果（陳致同等，2012）。

Figure 3. 10: Chen et al. (2012) used the displacement of the Jingmei gravel layer to simulate the geometry of the Shanchiao fault. In the left figure, the horizontal axis is the distance from the sample to the fault, the vertical axis is the displacement, the black dots are the observed data, and each line segment represents the result of regressing result of different geometric planes.

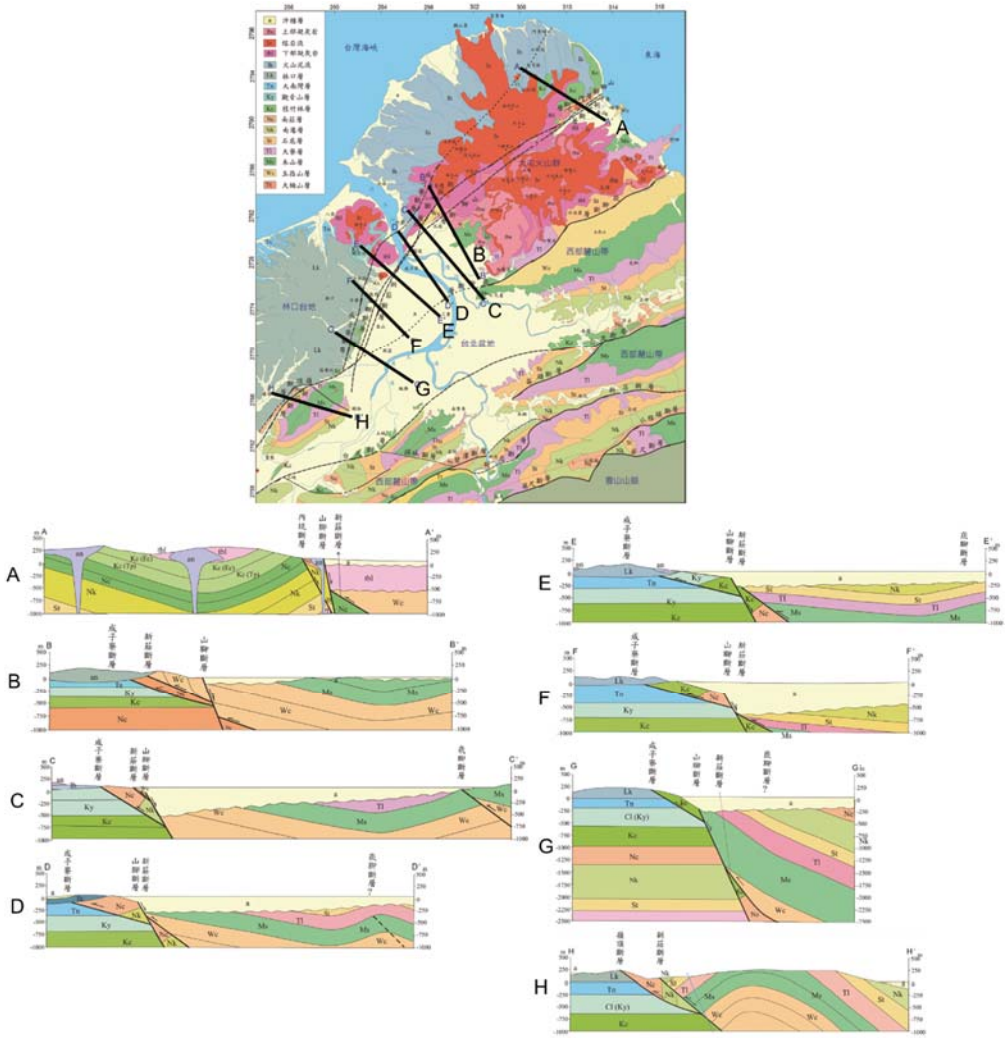


圖 3. 11：跨山腳斷層地質剖面圖（林啟文等，2021）

Figure 3. 11: Geological sections across Shanchiao fault.

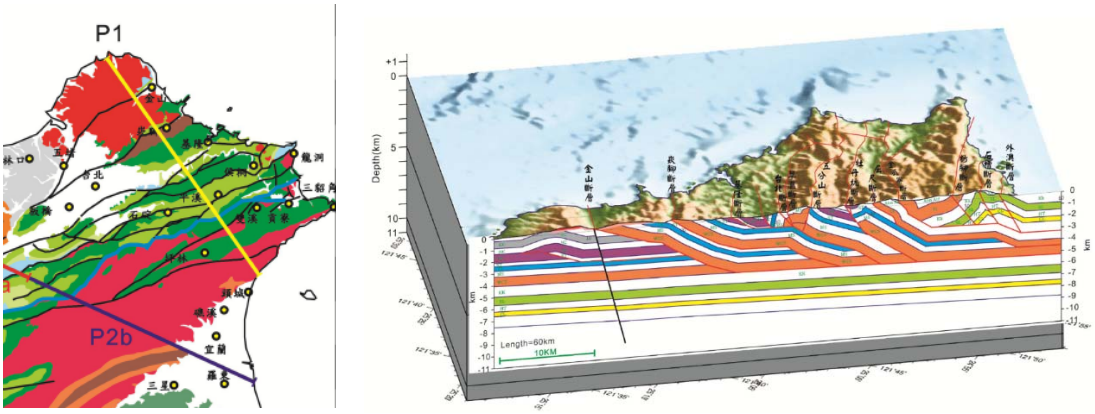


圖 3. 12：構造平衡剖面 P1 與 3D 地形圖。左圖為構造平衡剖面位置圖，右圖為構造平衡剖面 P1 與 3D 地形圖（陳冠宇，2014）。

Figure 3. 12: Balanced profile P1 with 3D topographic map. The left picture shows the location the structural balanced section, and the picture on the right is the structural balanced section P1 and the 3D topographic map

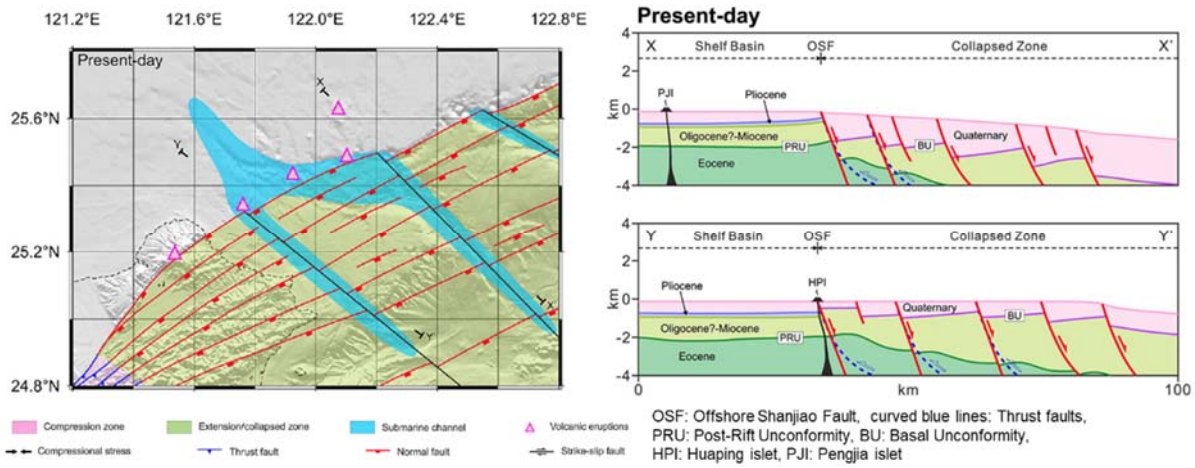


圖 3. 13：海域斷層分布圖與地質剖面圖。剖面 XX'（右上圖）及剖面 YY'（右下圖）位置如左圖標記所示（Nguyen et al., 2022）。

Figure 3. 13: Fault distribution map of marine area and geological sections. The location of section XX' (top right picture) and section YY' (bottom right picture) are shown on the left map.

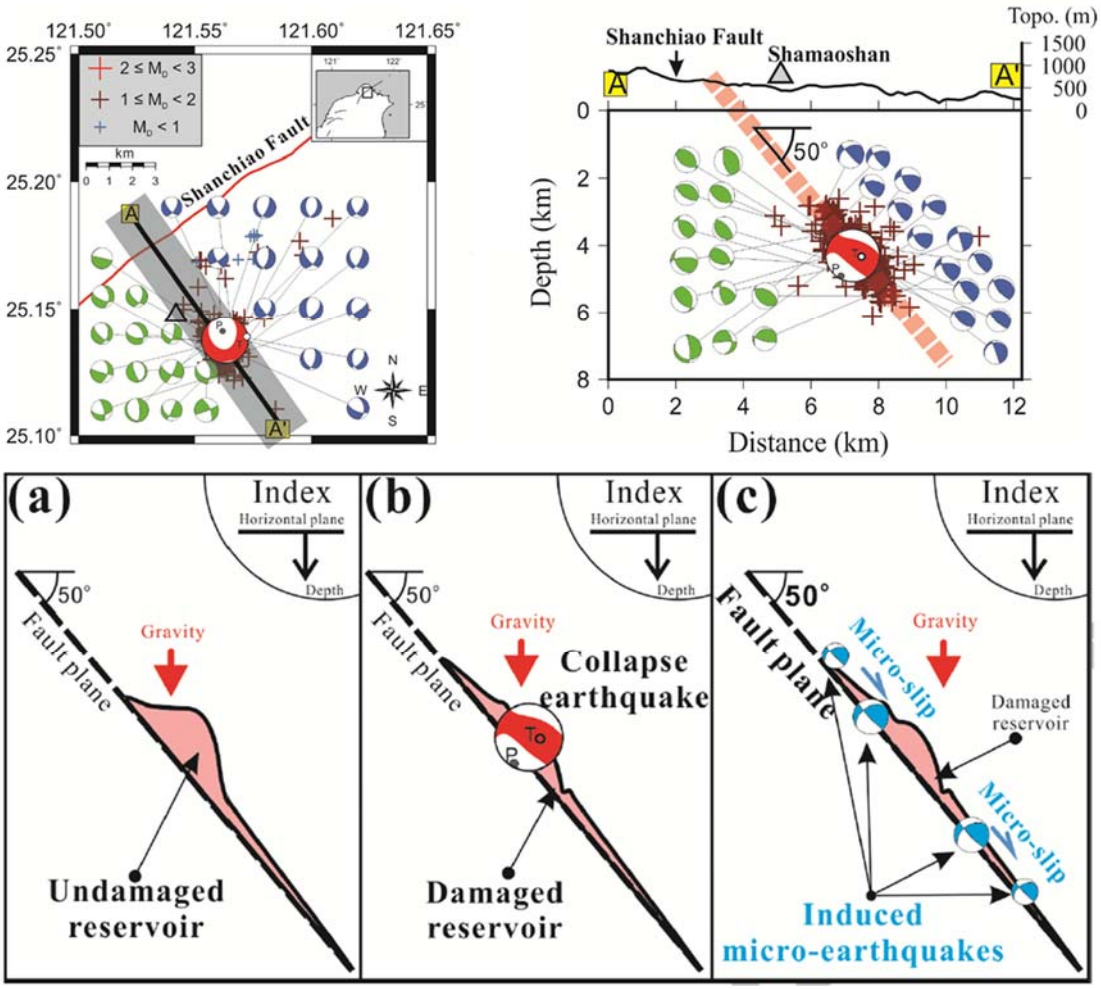


圖 3. 14：2014 年 02 月 12 日發生於大屯火山區的地震及其餘震序列分布。右上圖為地震分布剖面圖，剖面位於左上圖的 AA'位置，下圖（a）為岩漿庫的初始狀態，（b）為岩漿庫因重力塌陷引致 0212 地震，（c）為岩漿沿著斷層面產生小型位移產生餘震序列（Pu et al., 2017）。

Figure 3. 14: Distribution of the earthquake and aftershocks that occurred in the Tatun Volcano area on February 12, 2014. The upper right picture is the seismic distribution profile, and the section is located at the AA' position in the upper left picture. The lower picture is (a) the initial state of the magma reservoir, (b) is the 0212 earthquake caused by the gravity collapse of the magma reservoir, and (c) is the sequence of aftershocks caused by the micro-slip of the magma along the fault plane.

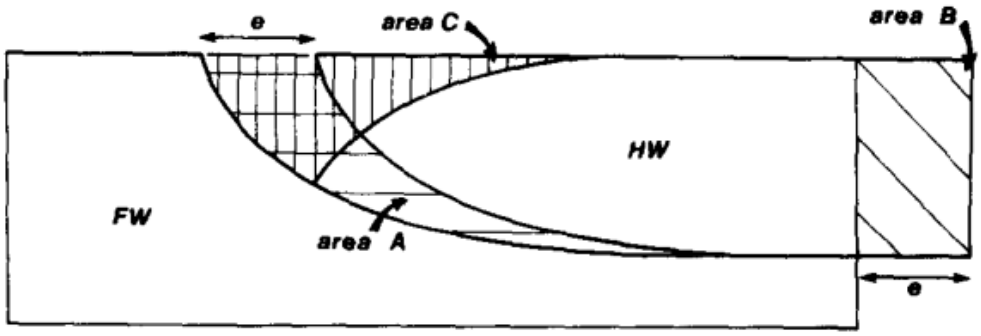


圖 3. 15：鏟型正斷層及上盤滾動背斜幾何示意圖（Williams and Vann，1987）。斷層上盤（Hanging wall, HW）移動一固定距離(e)後，上盤地層因重力沉陷形成滾動背斜的形貌（rollover anticline）。

Figure 3. 15: Schematic diagram of the listric normal fault and the rollover anticline on the hanging wall. The Hanging wall subsides due to gravity to form a rollover anticline when the hanging wall block move with a distance (e).

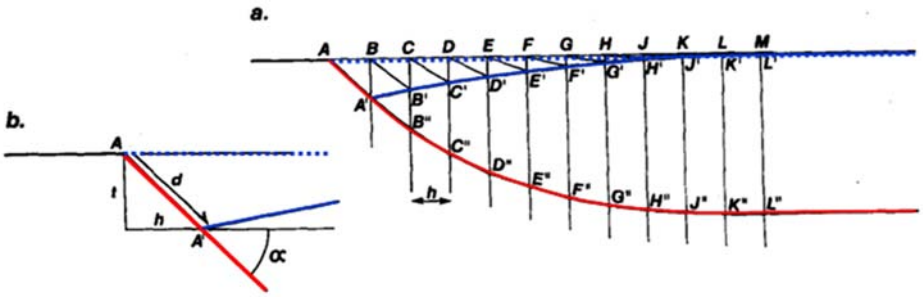


圖 3. 16：雪佛龍建立法（Chevron construction method）示意圖（修改自 Williams and Vann，1987）。右圖顯示滾動背斜與鏟型正斷層間（紅色實線）的幾何關係。藍色虛線為未變形的指準層，藍色實線為變形後的指準層，A, B, C,…,M 為未變形的點位，變形後分別對應至 A’, B’, C’,…,M’點位，線段 AA’、BB’、CC’具有一致的水平拉張量(h)。左圖以 AA’為例，當 A 點沿著斷層面陷落至 A’位置時，水平拉張量為 h（heave），垂直位移量為 t（throw），線段 AA’與斷層面 AA’一致而平行，斷層角度為 α。同理，BB’與 A’B”平行，CC’與 B”C”平行。

Figure 3. 16: Schematic of the Chevron construction method (modified from Williams et al., 1987). The figure on the right shows the geometric relationship between the rollover anticline and the listric normal fault (solid red line). The blue dotted line is the undeformed key bed, the blue solid line is the deformed key bed. A, B, C,..., M are the undeformed points, which correspond to A', B', C',..., M' after deformation, and the line segments AA', BB', CC' have the same heave (h). The left figure takes AA' as an example. When point A moves to A' along the fault plane, the horizontal displacement is heave (h), and the vertical displacement is throw (t), the line segment AA' is consistent to the fault plane, and the fault angle is α. BB' is parallel to the fault plane A'B", and CC' is parallel to the fault plane B"C".

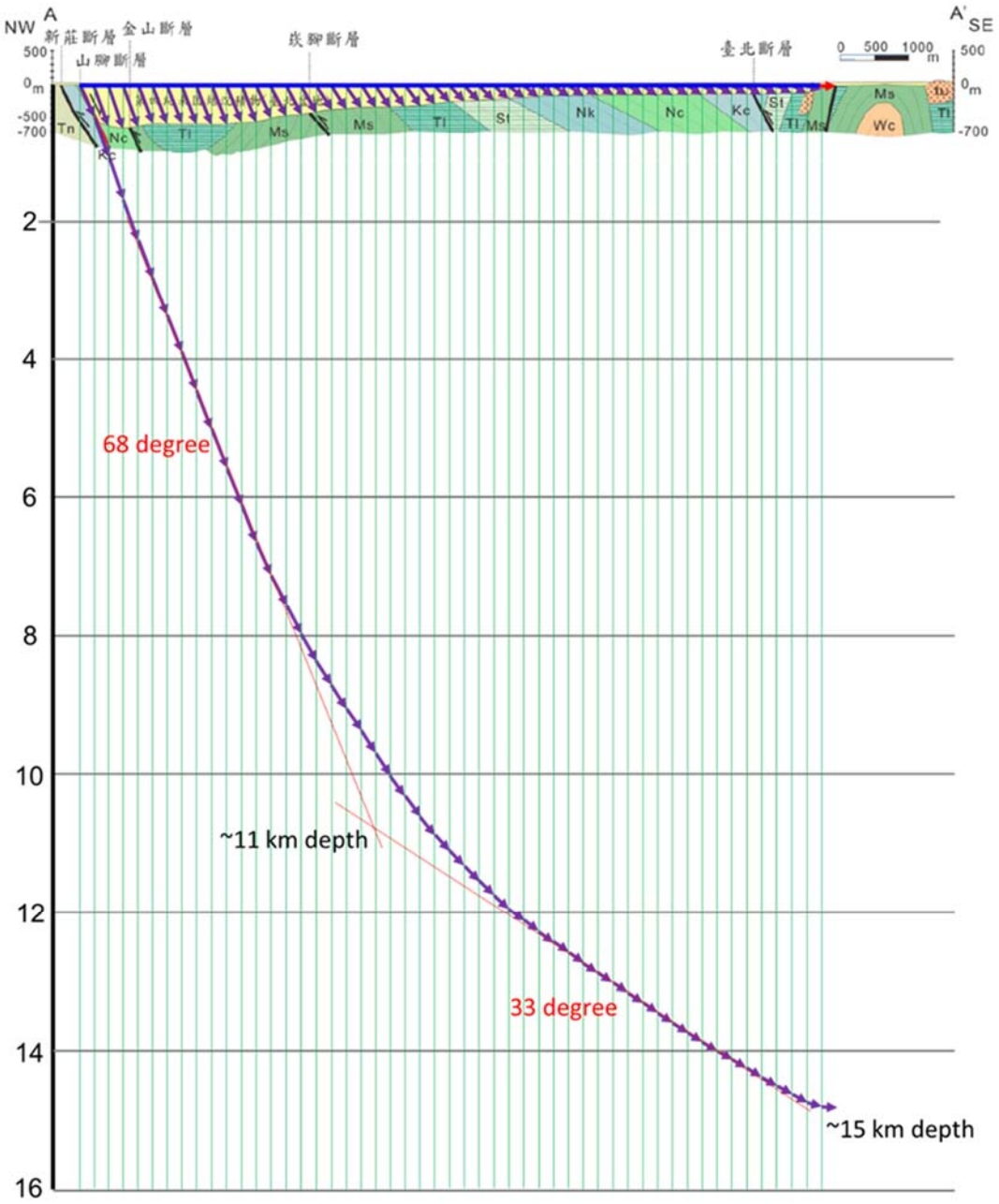


圖 3. 17：本計畫利用雪佛龍建立法（Chevron construction method）建立之山腳斷層幾何形貌。基盤深度分布圖參考自許邵禎（2013），本計畫以第三紀基盤與更新世沉積物間的不整合面作為指準層，藍色虛線為指準層未變形的原始水平線，綠色線段間距為水平拉張量（heave），每個位置的水平拉張量固定約 300 公尺，紫色箭頭為根據水平拉張量推估得到的斷層角度，連結紫色箭頭即可得到斷層地下幾何形貌。

Figure 3. 17: We used the Chevron construction method to establish the Shanchiao fault geometry. The Tertiary basement profile is from Hsu (2013). The unconformity between the Tertiary basement and Pleistocene sediments is the key bed. The blue dotted line is the original undeformed surface of the key bed, and the interval of the green lines is equal to the heave, and the heave is consistent at each location at about 300 meters. The purple arrows are the fault angles estimated based on the heave.

表 3. 2：山腳斷層傾角相關文獻彙整 Table 3. 2: References related to the dip angle of the Shanchiao fault.

文獻	方法	傾角
蕭力元等（1998）	海域震測剖面	0-3 km：高角度
Song et al.（2000）	海域震測剖面	0-4 km：高角度
王天楷等（2007）	海域震測剖面	0-600 m：約 65 度
中興公司（2015）	海域震測剖面	0-3 km： 高角度
簡志宇（2008）	五股蘆洲地區震測剖面	0-1.4 km：約 55 度
石瑞銓（2003）	關渡平原的淺層震測	0-0.5 km：高角度
陳致同等（2012）	根據景美礫石層頂部深度變化模擬解析山腳斷層之幾何形貌	0-3 km：70~85 度 3-8 km：15 度 >9 km：60 度
陳冠宇（2014）	台灣東北地區 P1 構造平衡剖面	0-10 km：約 75 度
Nguyen et al.（2022）	利用海域震測資料建立構造剖面及構造演育史	0-4 km：約 70 度
Pu et al.（2017）	地震線性分布	2-7 km：約 50 度
本計畫	利用 Chevron construction 建立斷層幾何	0-8 km：63 度 8-11 km：25 度

3-1-1-3 斷層深度

根據黃柏壽等人（2007）蒐集 1973 年至 2006 年臺北地區的地震活動分布圖，臺北地區的地震主要發生在台北盆地的北側和東南側，台北盆地內的地震較少，近年來的有感地震主要有 2004 年 10 月 23 日（地震規模 3.7）、2005 年 3 月 23 日（地震規模 3.2）以及 2005 年 12 月 5 日（地震規模 3.7）。由震源深度剖面可觀察到淺層的地震主要集中於 15 公里以內（圖 3. 18）。

根據 LCI（2015）蒐集之地震分布，北台灣陸域小地震主要與大屯火山群相關，而大屯火山群以外的地震深度剖面 Cross Section 1 中地震深度主要集中於 15 公里內（D90），Cross Section 2 中的地震深度主要集中於 16.5 公里內（D90）（圖 3. 19）。

本計畫認為斷層深度應不超過淺層地震深度，最深不超過 15 公里。深度相關文獻如表 3. 3。

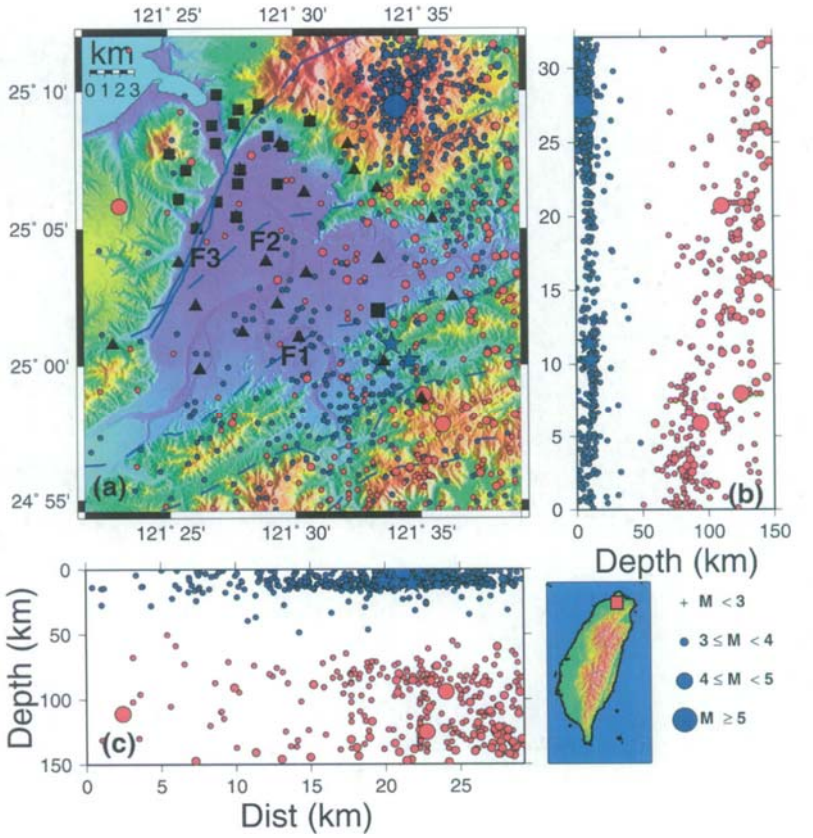


圖 3. 18：1973 年至 2006 年臺北地區的地震活動分布圖，(a)1973 年至 2006 年臺北地區的地震活動分布，圖中藍色星號代表 2004 年和 2005 年發生在台北 101 大樓南側 3 公里處之三次有感地震(b)震源深度沿著南北方向和(c)東西方向的剖面圖（黃柏壽等，2007）。

Figure 3. 18: (a) Seismicity map in Taipei area from 1973 to 2006, blue stars in the figure represent three felt earthquakes that occurred 3 kilometers south of Taipei 101 in 2004 and 2005. (b) Focal depth profile along the north-south direction and (c) east-west direction.

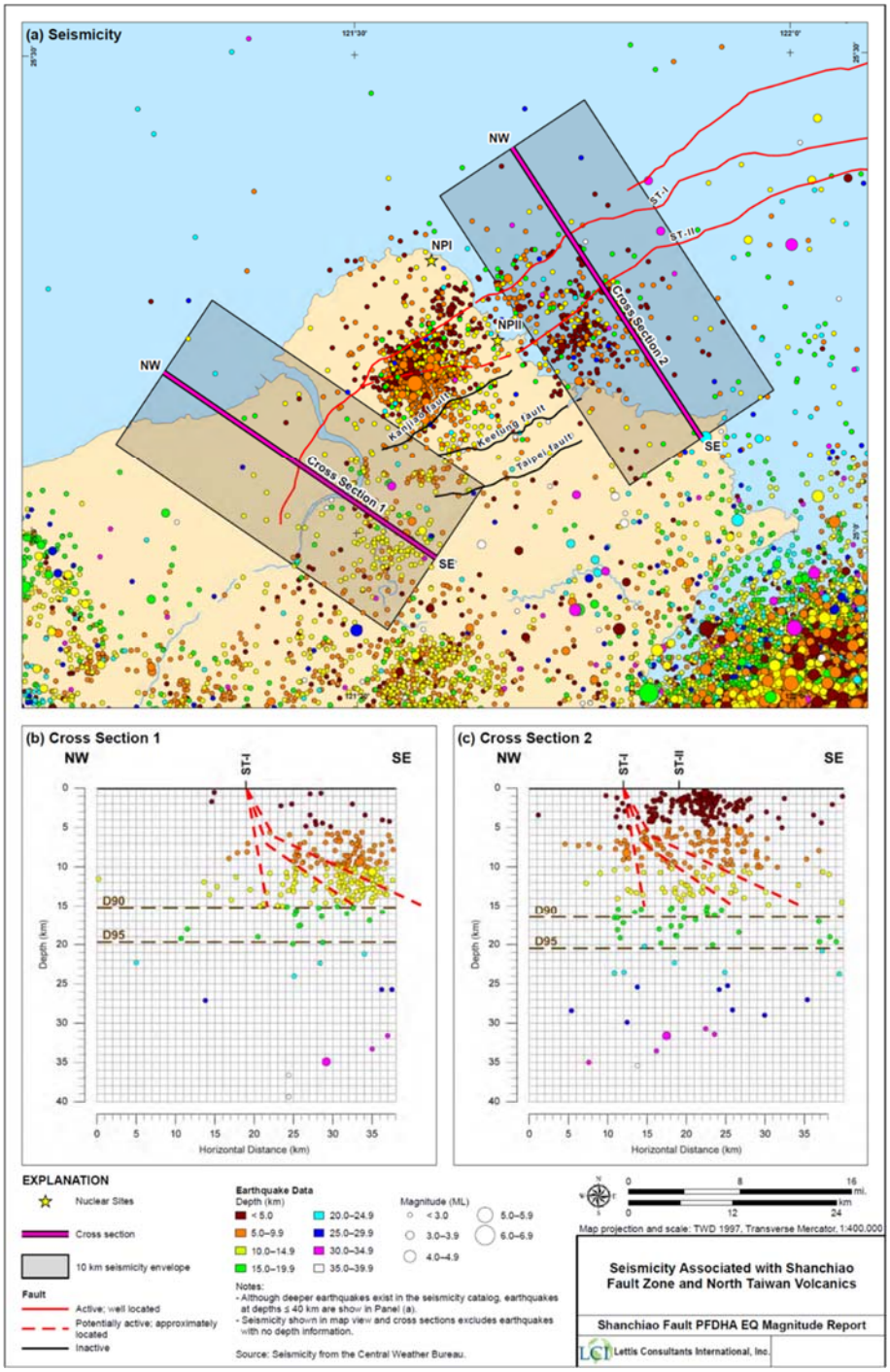


圖 3. 19：山腳斷層地震分布與深度剖面圖。地震深度剖面中紅色虛線為山腳斷層三種可能的幾何形貌(LCI, 2015)。

Figure 3. 19: Seismicity distribution and profiles of the Shanchiao fault. The red dotted lines in the profile are three possible geometries of the Shanchiao fault.

表 3. 3：山腳斷層深度相關文獻彙整 Table 3. 3: References related to the depth of the Shanchiao fault.

文獻	方法	深度	
陳致同等（2012）	依據景美礫石層頂部深度變化模擬山腳斷層之幾何形貌	9 公里	
本計畫	Chevron construction method	約 11 公里	
黃柏壽等（2007）	微震深度分布	15 公里以內	
LCI（2015）	微震深度分布	Cross Section 1	15 公里 (D90) 20 公里 (D95)
		Cross Section 2	約 16.5 公里 (D90) 約 20.5 公里 (D95)

3-1-1-4 滑移速率

魏谷等（Wei et al., 1998）利用五股 1 號井熱螢光定年及古海水面推估台北盆地沉降速率，過去 22 萬年左右沉降速率約 1.2~2.1 mm/yr，而過去 9 萬年左右約 1.1~2.4 mm/yr。

黃韶怡（Huang et.al., 2007）根據成子寮、五股、樹林的鑽井資料推估山腳斷層上盤的下陷速率，結果顯示過去 1 萬年內下陷速率約為 0.7~1.8 mm/yr。

陳文山等（2008）根據鑽井資料及樣本碳十四年代估算台北盆地各地構造沉降速率。結果顯示臺北盆地西北區（蘆洲 1 號、五股 1 號）的下陷速率約 1.2~1.5 mm/yr，往南（板橋 2 號）與往東（松山 1 號、松山 2 號、臺大 1 號）的下陷速率越小，低於 1.0 mm/yr。

宋聖榮（Song et al., 2007）根據關渡、成子寮、獅子頭等地鑽井岩心中火山泥流（Lahars）的分布推估山腳斷層滑移量（dip slip）約為 500~680 公尺，假設山腳斷層開始活動的時間晚於 0.4 Ma，則山腳斷層的長期滑移速率約 1.3~1.7 mm/yr。

陳致同等（Chen et al., 2010）分析五股剖面之三口井，研判在五股地區山腳斷層有主斷層及分支斷層，自 2.3 萬年以來主斷層的垂直滑移速率約 2.3 mm/yr，分支斷層的垂直滑移滑移速率約 1.0 mm/yr，整個斷層帶的垂直滑移速率約 3.3 mm/yr。

以上滑移速率文獻彙整於表 3. 4。

表 3. 4：山腳斷層滑移速率相關文獻彙整

Table 3. 4: References related to the slip rate of the Shanchiao fault.

文獻	方法	沉陷速率（mm/yr）
Wei et al.（1998）	分析五股 1 號井板橋層定年及古海水面推估	1.2~2.1（過去 22 萬年） 1.1~2.4（過去 9 萬年）
Huang et.al.（2007）	分析山腳斷層兩側的鑽井岩芯紀錄(SCF-1, 2, 5, 6, 14, 15, 16, 17)與定年資料	0.7（過去 1.5 萬年） 1.8（過去 1 萬年）
Song et al.（2007）	火山泥流沉積層 500-680 公尺落差/形成年代 0.4 Ma	1.3~1.7（過去 40 萬年）
陳文山等（2008）	分析臺北盆地內鑽井岩芯紀錄(蘆洲 1 號，五股 1 號)與定年資料	1.2~1.5
Chen et al.（2010）	分析五股剖面的鑽井岩芯紀錄(SCF-1、SCF-2、WK-1)與定年資料	3.3（過去 2.3 萬年）

3-1-2 新城斷層

3-1-2-1 斷層長度

新城斷層最早在竹東油田地質圖中（鳥居敬造與吉田要，1931）為頭前溪以南的一條斷層，石再添等（1985）依據地形分析結果認為新城斷層截切頭前溪南岸的階地，且越老的階面其地形崖的高差越大，推測是新城斷層多次活動累積而成的結果。頭前溪以北的新城斷層過去屬於新竹斷層往東的延伸（中油，1978），斷層通過飛鳳山丘陵，林啟文等（2005）在飛鳳山丘陵中發現新城斷層露頭，斷層面下盤出露楊梅層上段，而斷層面上盤出露楊梅層下段；此外，該區域地形中顯現的斷層線形，其兩側岩層的傾向及岩性均不同。根據經濟部地質調查及礦業管理中心 2021 年發布之臺灣活動斷層分布圖（林啟文等，2021），新城斷層長度約 29 公里，屬於第一類活動斷層。

3-1-2-2 斷層傾角

1. 野外露頭

陳文山等（2003）於頭前溪南岸發現新城斷層露頭，斷層逆衝至河階礫石層之上，礫石層中碳同位素定年樣本年代為 270±35 yr BP，斷層傾角約 32 度，垂直抬升約 3.4 公尺（圖 3. 20）。中興社（2018）彙整新城斷層露頭分布如圖 3. 21 及表 3. 5。整體而言，新城斷層露頭較不明顯，無法提供明確主斷層位態的資訊。

2. 槽溝開挖

根據陳文山等（2003）的槽溝開挖，1 號槽溝中斷層傾角約 30 度，斷層垂直抬升量為 1.8 公尺（斷層滑移量為 4 公尺）（圖 3. 22）；2 號槽溝中斷層傾角約 25 度，斷層垂直抬升量為 1.3 公尺（斷層滑移量為 3 公尺）（圖 3. 23）；3 號槽溝中斷層傾角約 20 度，斷層垂直抬升量約為 1.85 公尺（斷層滑移量為 5.4 公尺）（圖 3. 24）。

3. 淺層震測

郭泰融（1990）根據大崎村震測剖面資料推測新城斷層通過 SC1 測線之 CDP205 測點及 SC2 測線之 CDP111 測點附近（圖 3. 25）。王乾盈等（Wang et al., 1991）根據該區的淺層反射震測資料研判新城斷層傾角約為 60 度（圖 3. 26）。

4. 平衡剖面

Namson（1984）在苗栗地區所繪的 11-11’、12-12’、14-14’剖圖中（圖 3.27），新城斷層傾角約 30~40 度，斷層沿著錦水頁岩層滑動，向下延伸至打鹿頁岩層，最深可至 6 公里深左右。

Yang et al.（1994；1996）根據震測剖面認為新城斷層在寶山背斜下分為兩個分支，其中一個斷層分支延伸至河排層，深度約 3 公里；另一分支延伸至北寮層，深度接近 4 公里，斷層傾角大約呈 40~50 度，向東南傾（圖 3.28）。

黃旭燦等人（2004）根據中油之震測剖面及鑽探資料建立之地下構造平衡剖面，有四條剖面通過地礦中心劃設的新城斷層（圖 3.29），由北而南分別為 LINE4、LINE5、LINE6、LINE7。其中 LINE4 位於頭前溪以北，剖面中標示為新竹斷層，斷層傾角約 65 度東傾，深度延伸至約 9 公里深的五指層。LINE5~7 位於頭前溪以南，LINE5 中新城斷層分為兩個分支，淺部的分支傾角約 45 度東傾，深部的分支傾角約 65 度東傾，兩分支在桂竹林層合而為一沿著層面滑動，深度約 3~4 公里，新城斷層下方存在正斷層系統。新城斷層在 LINE6 中傾角約 30 度，在約 1 公里深處分為兩分支，各自沿著桂竹林層底部及河排層滑動，最後於深度約 3 公里處與軟橋斷層相連後沿著五指層滑動，最深延伸至約 6 公里。新城斷層在 LINE7 中傾角約 30 度東傾，於卓蘭層約 1 公里深處打平延伸約 2 公里後，繼續往下接到鹿廚坑斷層，在約 3 公里深處與斗煥坪斷層相截切。

黃宣維（2012）建立的平衡剖面中，新城斷層的幾何型態類似黃旭燦等人（2004）的 LINE6，而不同的是新城斷層下部為逆斷層而非正斷層系統。剖面中新城斷層約呈 30 度東傾，於深度 1 公里分為兩分支，沿著桂竹林層底部及河排層滑動，最後在 3~4 公里深處與北埔斷層相接。黃宣維（2012）根據中央氣象署 1991~2009 年地震重定位的資料，發現軟橋斷層南端有一小團地震，認為此處可能有應力累積，而此區域的基底滑脫面可能延伸至 10~14 公里（圖 3.30）。

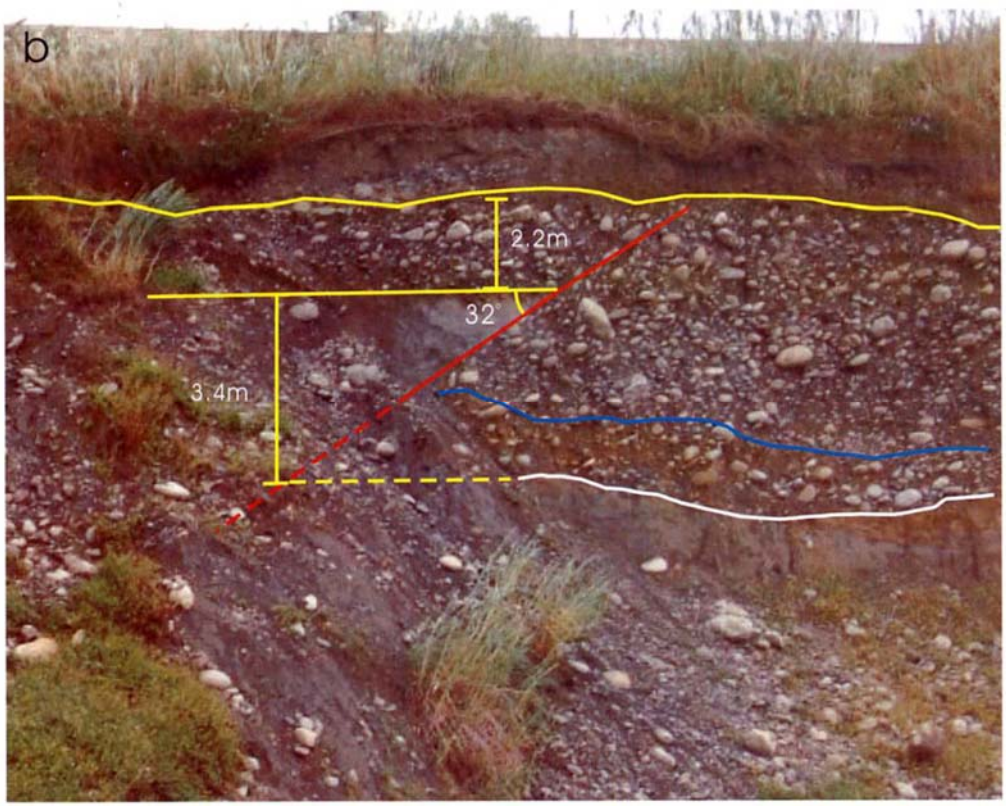


圖 3. 20：頭前溪南岸斷層露頭（陳文山等，2003）。

Figure 3. 20: Fault Outcrop on southern bank of Touchien River.

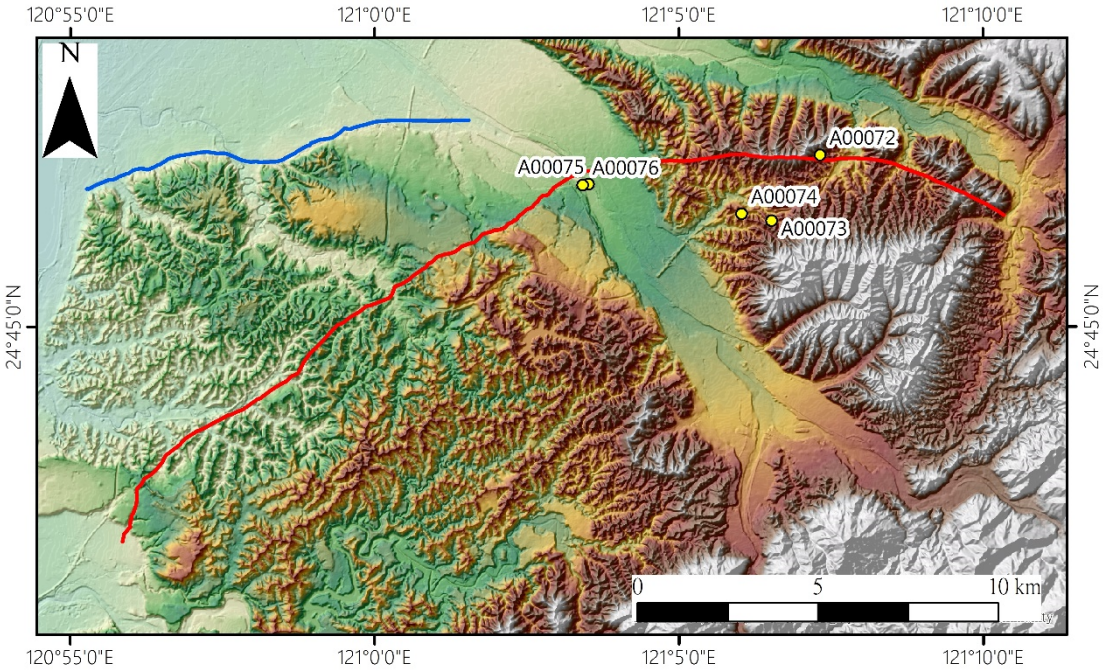


圖 3. 21：新城斷層露頭分布彙整（中興社，2018）。露頭照片及說明見表 3. 5。

Figure 3. 21: Sinotech (2018) compiled the distribution of Hsincheng fault outcrops. Outcrop photos and descriptions are in Table 3. 5.

表 3. 5：新城斷層露頭照片彙整（中興社，2018）。位置標示於圖 3. 21。

Table 3. 5: Sinotech (2018) compiled photos of Hsincheng fault outcrops. The location is shown in Figure 3. 21.

<table>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td>A00072 飛鳳山丘陵上的新城斷層露頭。下盤為厚層砂岩夾礫岩層，岩層向北緩傾斜並構成向斜。上盤厚層砂岩夾薄頁岩的擾動帶，岩層向北呈高角度傾斜。
（新竹縣芎林鄉飛鳳山）（林啟文等，2005）</td><td>A00073 位於斷層上盤的次生斷層，於江寮山附近的斷層露頭，位態為 N16°E, 24°S。
（新竹縣寶山鄉江寮山）（劉力豪，2004）</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>A00074 出露於飛鳳山丘陵區中坑附近的斷層擾動帶，近擾動帶的地層高角度傾斜，位態為 N71° E，73° S
（新竹縣芎林鄉飛鳳山）（劉力豪，2004）</td><td>A00075 頭前溪北岸新城斷層露頭，形成一寬約 5 公尺斷層帶。上盤卓蘭層逆衝至層面近乎水平的香山相砂岩之上。
（新竹縣竹東鎮頭前溪）（胡玉燕，2005）</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">A00076 頭前溪河床內中正大橋西側新城斷層露頭。本相片攝於 2010，受中正大橋防洪工程的影響使下游加速差異侵蝕，現在露頭已不復見。
（新竹縣竹東鎮頭前溪）（丁權，2012）</td></tr>
</table>

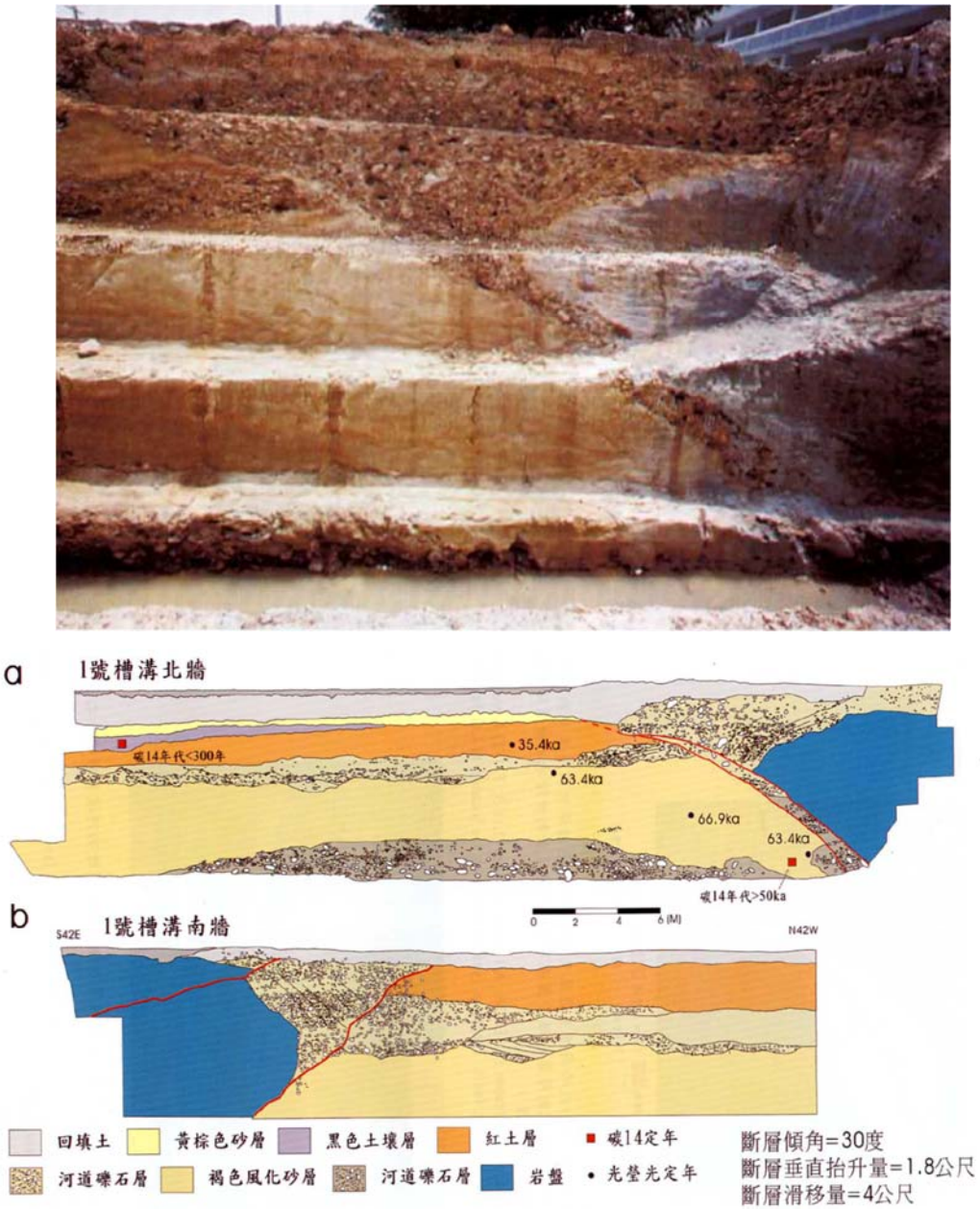


圖 3. 22：新城斷層 1 號槽溝（陳文山等，2003）。

Figure 3. 22: Hsincheng fault trench No. 1.

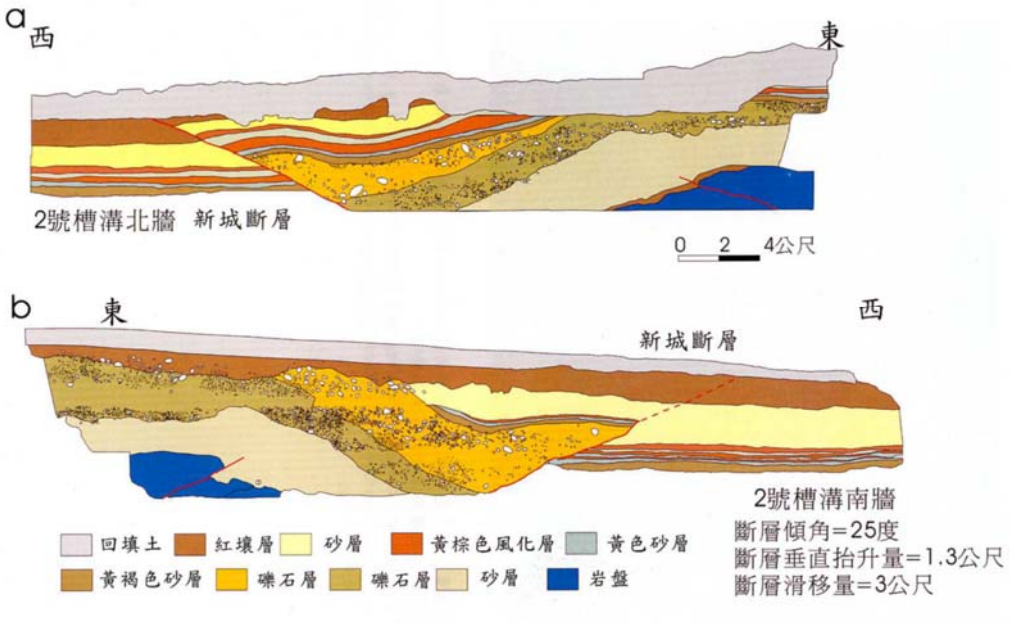


圖 3. 23：新城斷層 2 號槽溝（陳文山等，2003）。

Figure 3. 23: Hsincheng fault trench No. 2.

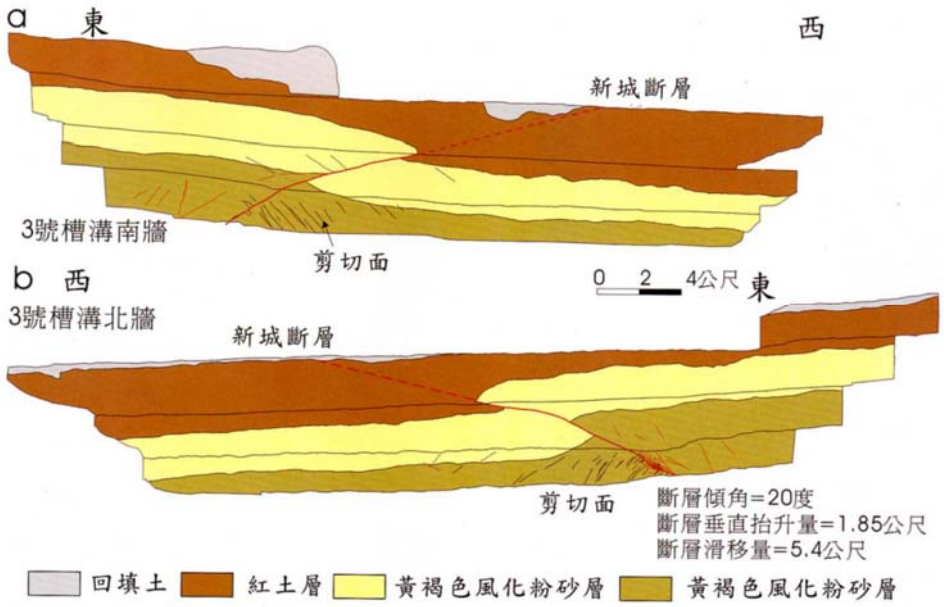


圖 3. 24：新城斷層 3 號槽溝（陳文山等，2003）。

Figure 3. 24: Hsincheng fault trench No. 3.

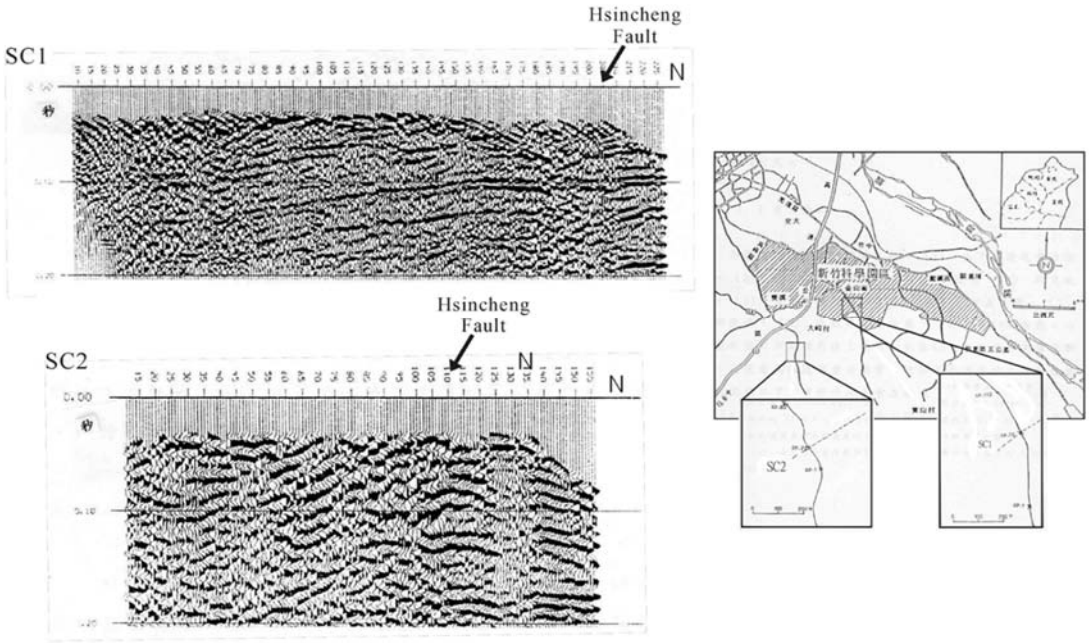


圖 3. 25：新城斷層震測剖面，左上圖為 SC1 震測剖面，左下圖為 SC2 震測剖面，剖面位置如右圖（郭泰融，1990）。

Figure 3. 25: The upper left picture is the SC1 seismic profile, the lower left picture is the SC2 seismic profile. Profile location is shown in the right map.

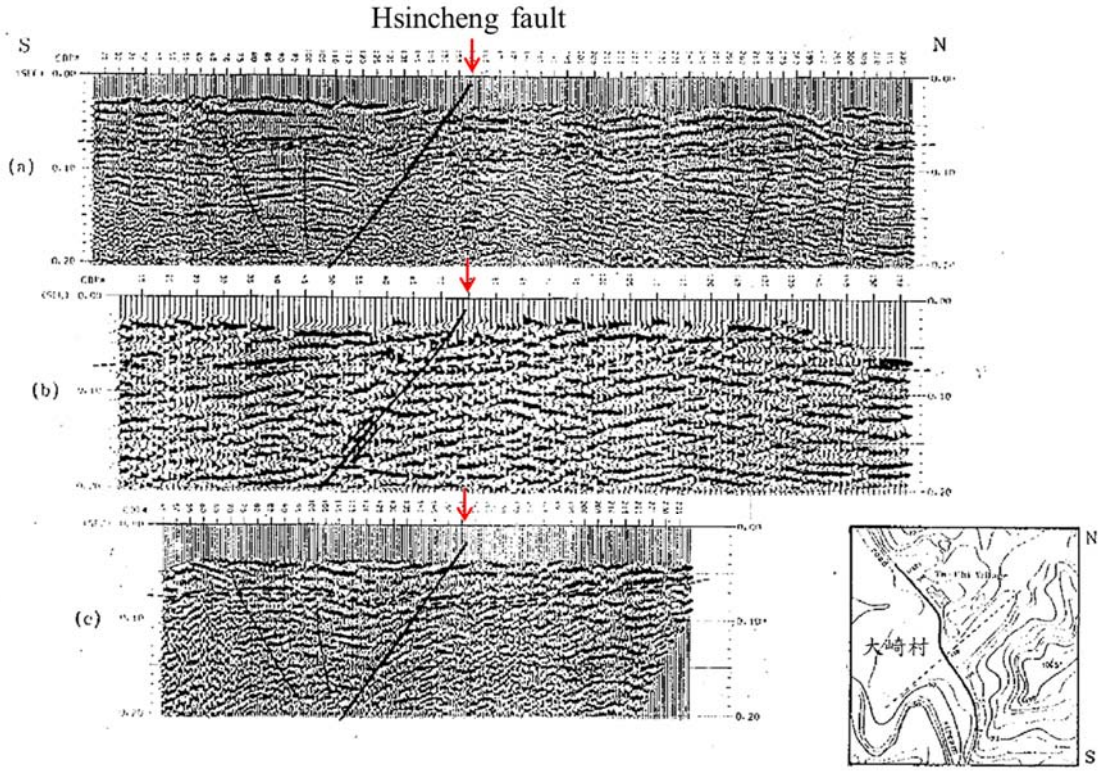


圖 3. 26：新城斷層淺層反射震測剖面，新城斷層位置如紅色箭頭所指（Wang et al., 1991）。

Figure 3. 26: The shallow reflection seismic profile of the Hsincheng fault, and the location of the Hsincheng fault is indicated by the red arrow.

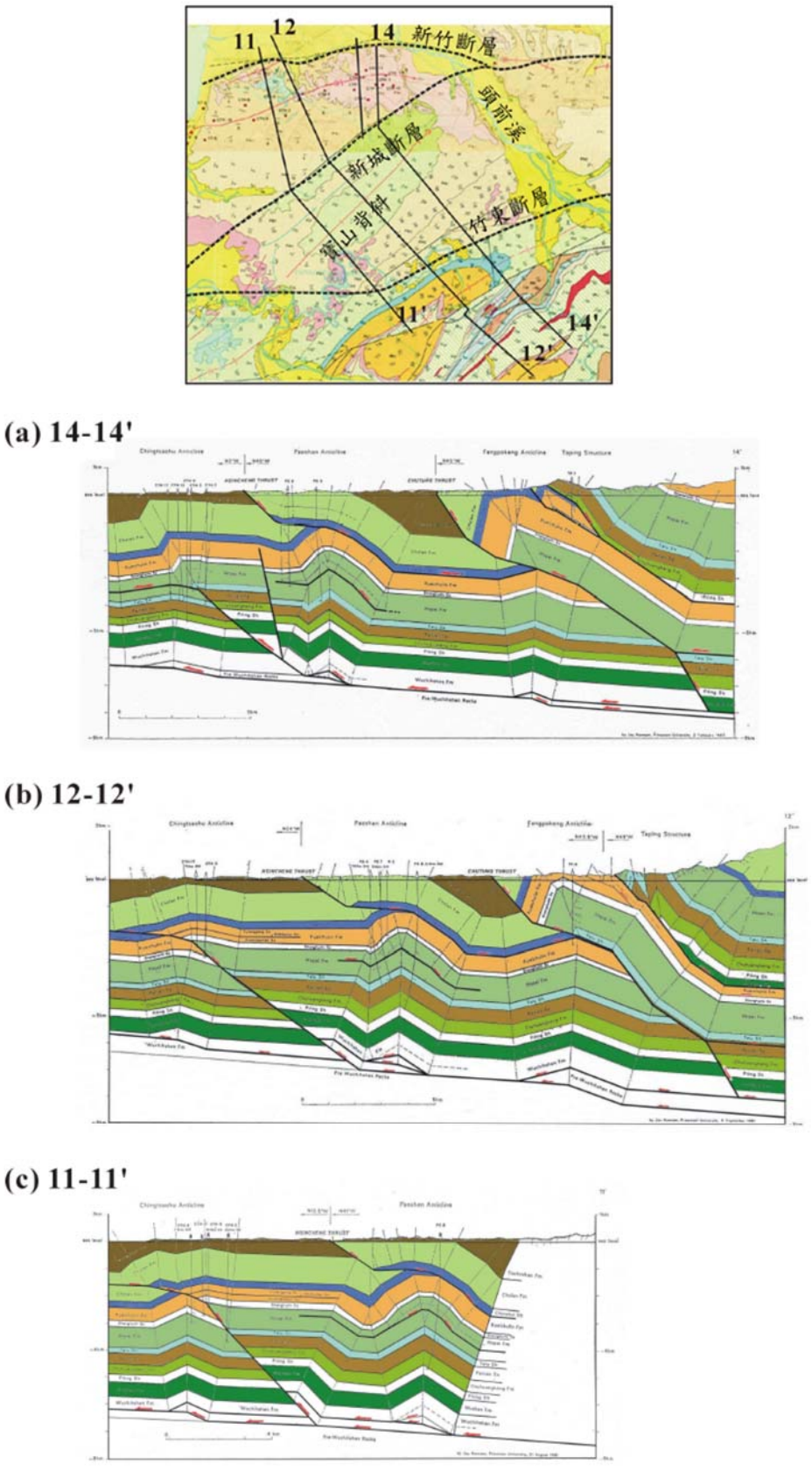


圖 3. 27：新竹地區平衡剖面圖（Namson, 1984）。上圖為新竹地區地質圖及剖面線分布位置，下圖分別為平衡剖面 14-14’、12-12’以及 11-11’。

Figure 3. 27: balanced profile from Namson (1984). The above figure shows the geological map of Hsinchu area and the location of the profiles, and the bottom figures show the balanced cross sections 14-14’, 12-12’ and 11-11’.

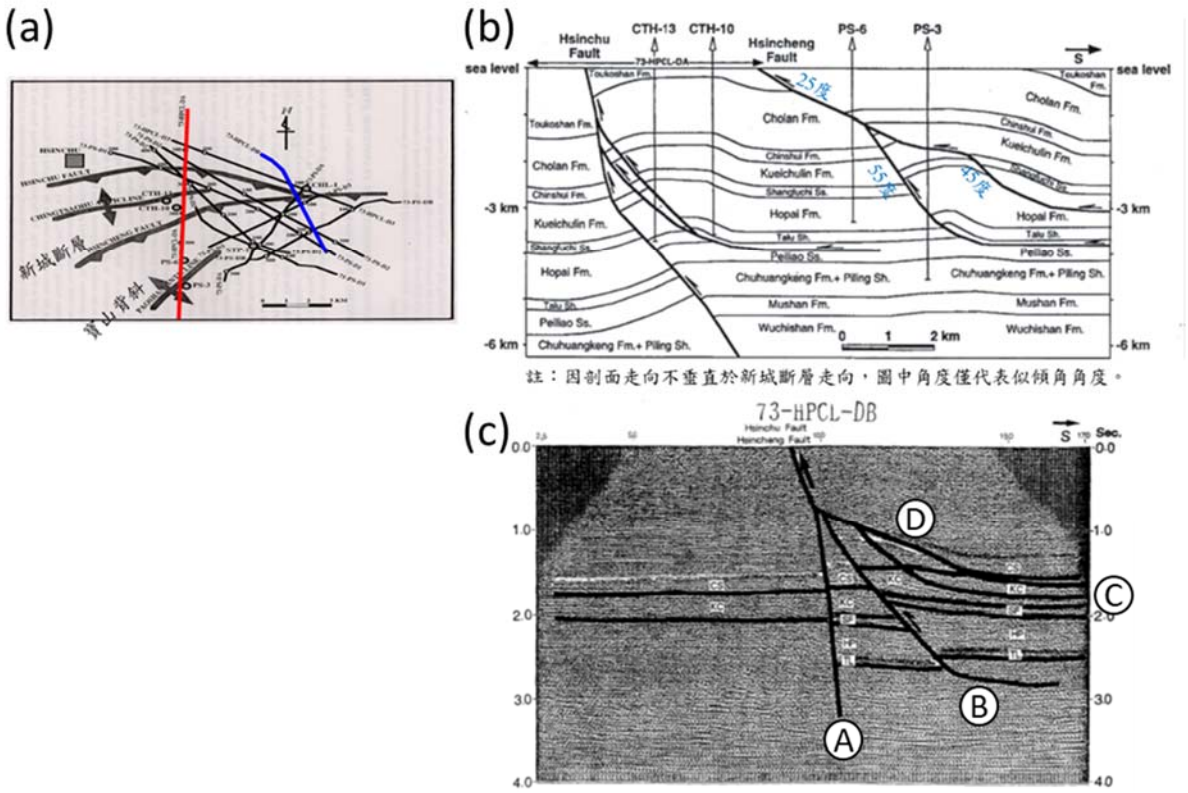


圖 3. 28：新城斷層剖面（摘自 Yang et al., 1994；1996）。（b）圖剖面位置如紅線所示，（c）圖剖面位置如藍線所示。

Figure 3. 28: Balanced cross section of Hsincheng fault. The red line is the profile location of (b), and the blue line is the prolfile location of (c).

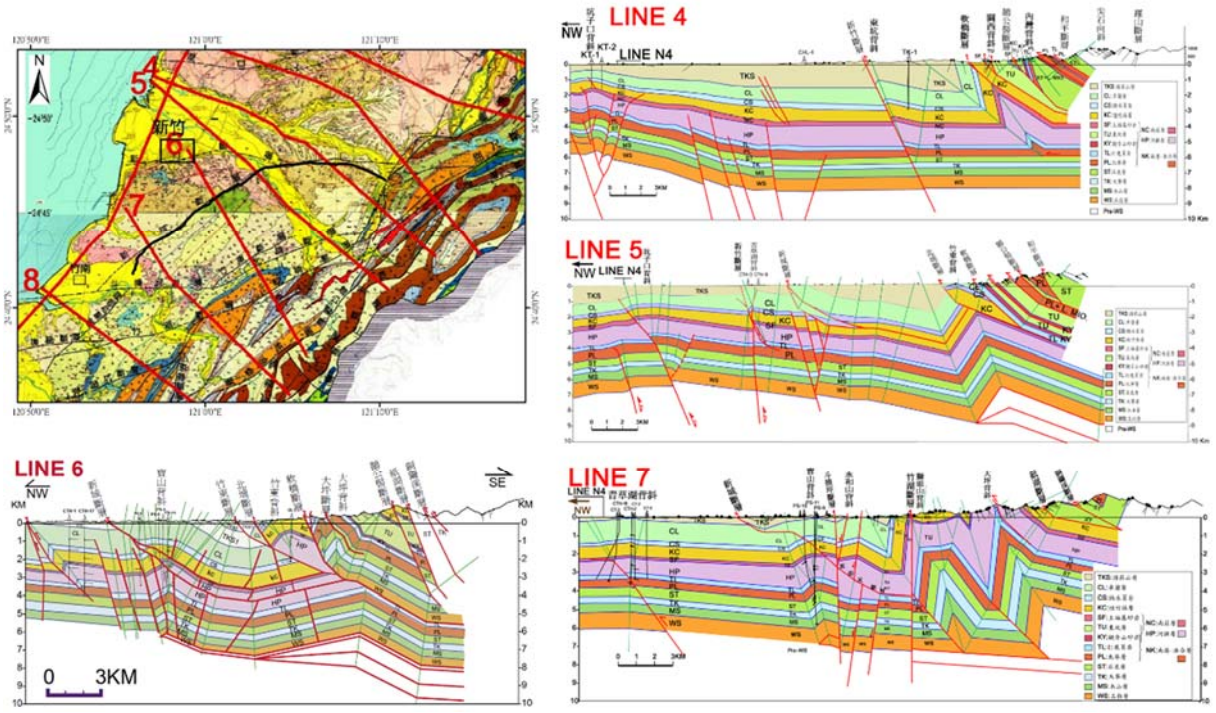


圖 3. 29：新竹地區平衡剖面圖（黃旭燦等，2004）。左上圖紅線標示 LINE4~5 位置，黑線為新城斷層。

Figure 3. 29: The balance profile from Huang et al. (2004). The red lines in the upper left figure are the location of LINE4~5, and the black line is the Hsincheng fault.

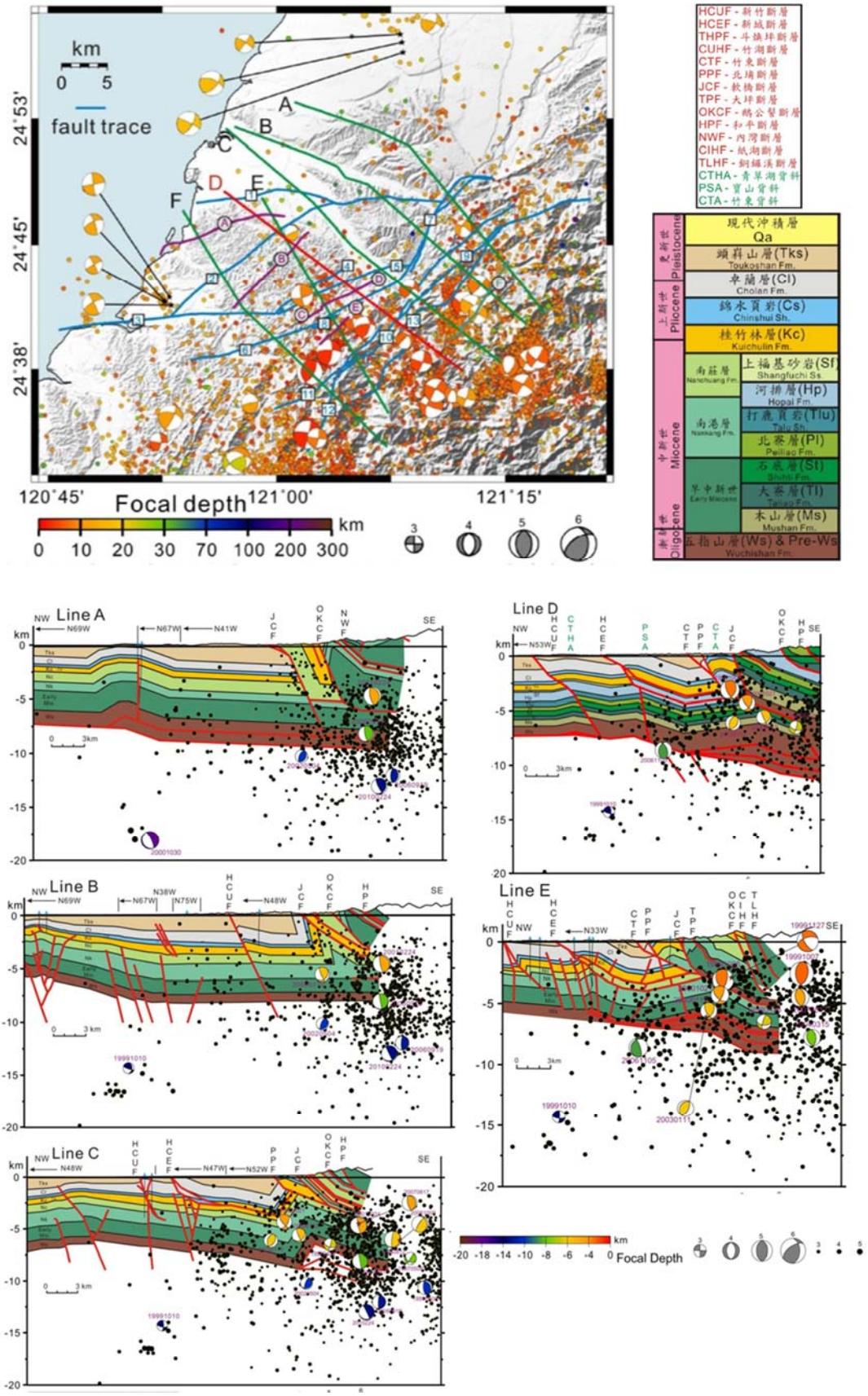


圖 3. 30：新竹區域地震分布與平衡剖面圖（黃宣維，2012）。

Figure 3. 30: Seismicity distribution and balanced profiles in Hsinchu area.

表 3. 6：新城斷層傾角相關文獻彙整

Table 3. 6: References related to the dip angle of the Hsincheng fault.

作者	方法	傾角
陳文山等（2003）	頭前溪露頭	32 度
陳文山等（2003）	槽溝開挖資料	1 號槽溝：30 度 2 號槽溝：25 度 3 號槽溝：20 度
Wang et al.（1991）	淺層反射震測資料	60 度
Namson（1984）	平衡剖面	30~40 度
Yang et al.（1994；1996）	平衡剖面	40~50 度
黃旭燦等（2004）	平衡剖面 （頭前溪以北）	LINE 4：65 度（剖面中新竹斷層）
	平衡剖面 （頭前溪以南）	LINE 5：45 度（淺部分支）、65 度（深部分支） LINE 6：30 度 LINE 7：30 度
黃宣維（2012）	平衡剖面 （頭前溪以北）	LINE B: 64 度（剖面中新竹斷層）
	平衡剖面 （頭前溪以南）	LINE C: 45 度 LINE D: 30~45 度 LINE E: 30~40 度

3-1-2-3 斷層深度

1. 平衡剖面

Namson（1984）所繪的 11-11’、12-12’、14-14’剖圖中（圖 3.27），新城斷層深部沿著錦水頁岩層滑動，錦水頁岩層深度約為 3 公里。

Yang et al.（1994；1996）繪製的剖面中（圖 3.28），新城斷層在深部分為兩個分支，一個分支沿著河排層滑動，深度約 3 公里，另一個分支沿著北寮層滑動，深度接近 4 公里。

黃旭燦等人（2004）建立的平衡剖面中（圖 3.29），LINE 4 剖面中的新竹斷層延伸至深度約 9 公里的五指層。LINE 5 剖面中新城斷層的兩個分支斷層合而為一，沿著深度約 3~4 公里的桂竹林層滑動。LINE6 剖面中的新城斷層兩個分支分別沿著深度約 3.5 公里的桂竹林層滑動以及約 4.5 公里的河排層滑動。LINE 7 剖面中新城斷層在約 3 公里深處的河排層中與斗煥坪斷層相交並繼續向下延伸。

黃宣維（2012）的平衡剖面套疊地震分布圖中可觀察到軟橋斷層南端有一群地震，認為此處可能有應力累積，並將基底滑移面延伸至 10~14 公里（圖 3.30）。

2. 地震深度分布

蒲新杰（2010）於新竹區域佈置微震網，由微震次數隨深度變化圖顯示，新竹區域地震深度主要分布於約 12 公里左右（圖 3.31）。

以上深度相關文獻彙整於表 3.7。

中興社（2020）綜合前人文獻建立三種斷層幾何模式（圖 3.32），三種模式中的新竹斷層相較新城斷層傾角陡。第一種模式參考 Tang and Hsu（1970）地質剖面，該模式中新城斷層傾角為 40 度；第二種模式參考黃宣維（2014）建立的平衡剖面，該模式中新城斷層傾角在 0~4 公里深處為 35 度，水平延伸 7 公里，在 4~9 公里深處為 35 度；第三種模式參考黃旭燦等（2004）建立的平衡剖面，該模式中新城斷層傾角在 0~3.5 公里深處為 30 度，水平延伸 7 公里，3.5~9 公里深處為 30 度。

3. 本計畫推估

綜合以上文獻，新城斷層與新竹斷層在頭前溪位置相當接近，根據 73-HPCL-DB (Yang et al., 1996)震測剖面資料，斷層在深部 1~3 秒(twt)處分為數個分支（圖 3.28 c 中 A~D），而淺部為一高傾角斷層延伸至近地表，本計畫認為新竹斷層及新城斷層在此處可能匯集成一斷層系

統，此外，新城斷層的走向在頭前溪以北為東西向，與頭前溪以南東北—西南走向不同，因此新城斷層應可以以頭前溪為斷層幾何的分段點，並考慮新城斷層幾何的側向變化。

頭前溪的震測剖面（73-HPCL-DB）中，層位落差最大的為分支斷層 B，本計畫認為此分支應為主斷層，然而此震測剖面為時間剖面而非深度剖面，因此無法推估主斷層幾何。

頭前溪以北的新城斷層過去為中油地質圖中的新竹斷層，該區域的野外露頭中觀察到的斷層傾角為高傾角，然而野外露頭多偏離主斷層跡，因而無法採納其位態資料。平衡剖面資料顯示高角度（約 65 度）的斷層（黃旭燦等，2004；黃宣維，2012）。此區域缺乏震測資料、槽溝等其他地質資料，是值得未來持續調查的區域。

頭前溪以南，新城斷層通過一系列南岸階地，槽溝（1 號至 3 號）資料中斷層傾角為 20~30 度（陳文山等，2003）。平衡剖面資料中顯示頭前溪以南的新城斷層約為 30~40 度（黃旭燦等，2004；黃宣維，2012）。根據中興社（2020）建立的三種模式中，第二種模式為權重最高之幾何模式，該模式參考黃宣維（2014）建立的平衡剖面，簡化新城斷層幾何為深度 0~4 公里深，傾角 35 度東傾；水平延伸 7 公里；深度 4~9 公里深，傾角為 35 度東傾。

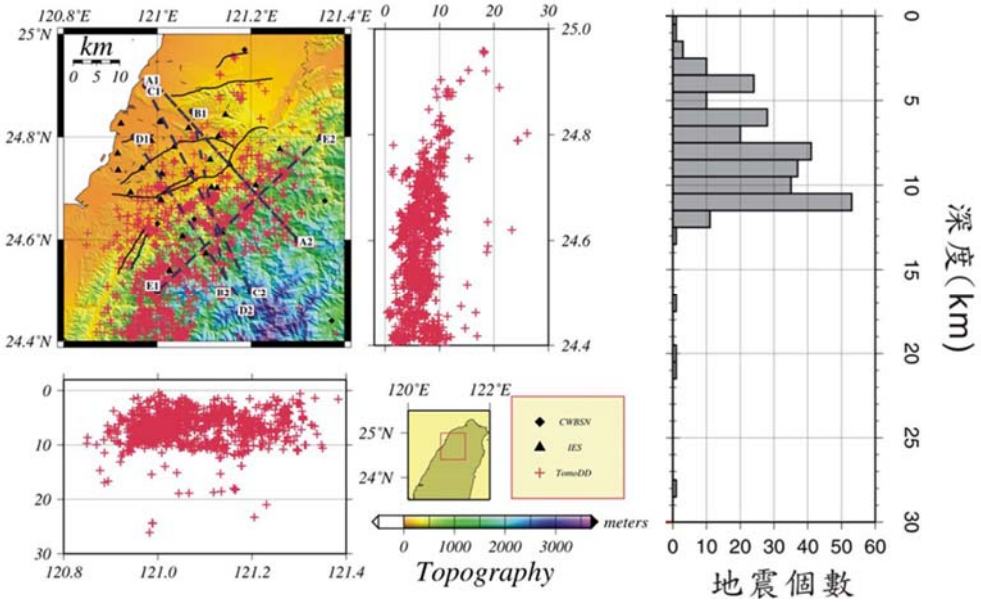


圖 3. 31：新竹區域地震深度分布圖（蒲新杰，2010）。

Figure 3. 31: Seismicity distribution and profiles in Hsinchu area.

表 3. 7：新城斷層深度相關文獻彙整

Table 3. 7: References related to the depth of the Hsincheng fault.

文獻	方法	深度
Namson（1984）	平衡剖面	約 3 公里
Yang et al.（1994；1996）	平衡剖面	約 3~4 公里
黃旭燦等（2004）	平衡剖面	LINE4：約 9 公里 LINE5：3~4 公里 LINE6：3.5~4.5 公里 LINE7：約 3 公里
黃宣維（2012）	地震分布	10~14 公里
蒲新杰（2010）	微震分布	約 12 公里

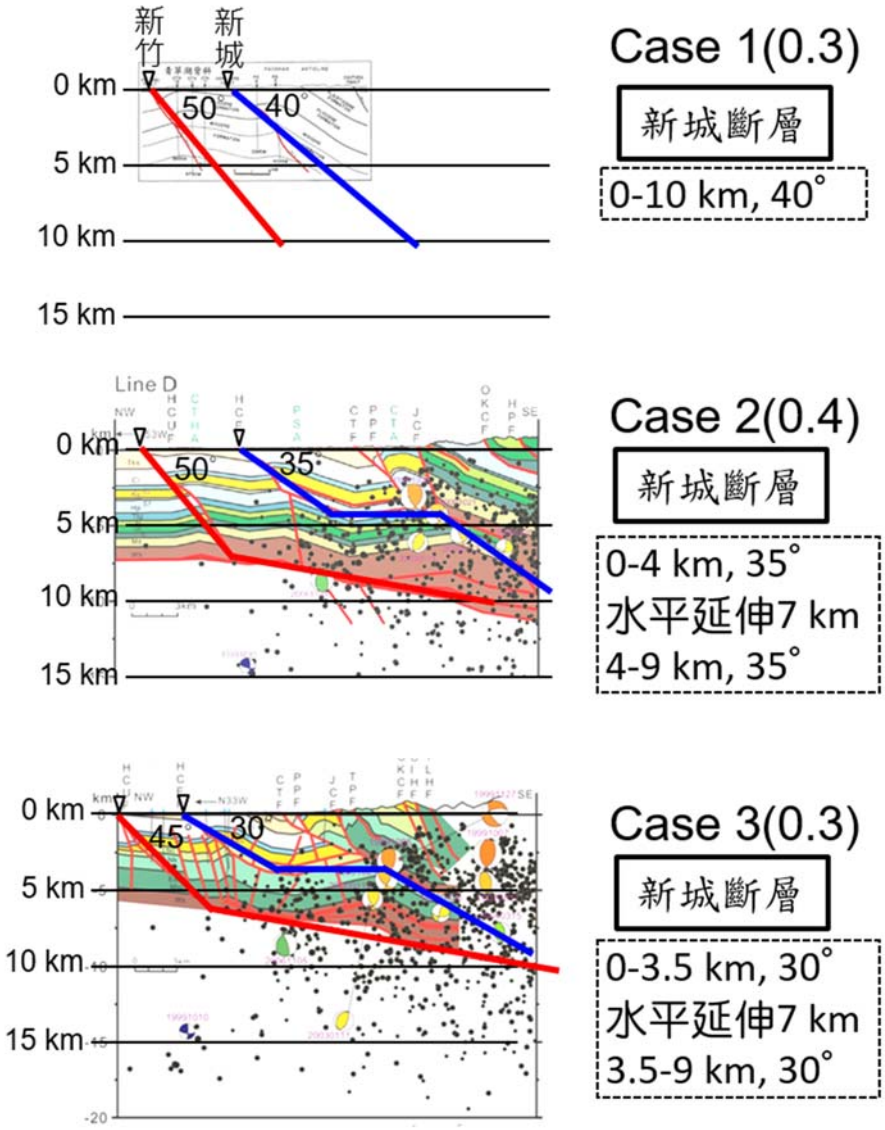


圖 3. 32：新城斷層破裂模式（中興社，2020）。

Figure 3. 32:Rupture models of Hsincheng fault.

3-1-2-4 滑移速率

石同生（2003）利用階地資料推估斷層滑移速率，階地 LT4 之斷層崖高為 35 公尺，假設 LT4 階面年代為 4 萬年，則垂直抬升速率約為 0.9 mm/yr，以斷層角度 34 度計算淨滑移速率約為 1.6 mm/yr；若假設 LT4 階面年代為 40 萬年，則淨滑移速率約為 0.2 mm/yr。另利用震測剖面（Tang and Hsu, 1970）及地層年代推估斷層滑移速率，從震測剖面中推估斷層兩側層位落差約為 700 公尺，若由頭嵙山礫石沉積底部年代 0.8 Ma 計算滑移速率為 1.6 mm/yr，若以香山砂岩海相岩層中段 NN19b 年代約 1.24 Ma 計算滑移速率為 1.0 mm/yr。新城五號井井深 13.5-17.2 公尺鑽遇斷層帶，於井深 15.3 公尺處採到碳十四定年樣本，年代為老於 48,100 yr，井深 20.8 公尺處採到碳十四定年樣本 28,540±260 yr，假設斷層在 B 點沉積後的垂直位移至少 20.8 公尺，則垂直抬升速率大於 0.7 mm/yr，淨滑移速率為大於 1.3 mm/yr；另此井 7.5 公尺（上盤）及 17.9 公尺（下盤）處可發現風化礫石層和基盤的交界，假設兩交界面可對比相同的地表面，則斷層垂直抬升量為 10.4 公尺，垂直抬升速率為 0.4 mm/yr，淨滑移速率 0.7 mm/yr，若考慮侵蝕風化的影響，則淨滑移速率應大於 0.7 mm/yr。石同生（2003）綜合以上資料推估斷層滑移速率為 0.7~1.6 mm/yr。

Chen et al.（2004）根據震測剖面圖（圖 3. 33）判釋錦水頁岩與其上覆卓蘭層的交界面，其交界面在斷層兩側錯距 1400 公尺，卓蘭層無年代資料，而頭嵙山層年代約 2 Ma，假設 2 Ma 為卓蘭層沉積間斷的年代，推估新城斷層最小滑移速率 0.7 mm/yr。

丁權（2012）分析頭前溪南岸階地錯動量並搭配陳于高等（2006）階地光螢光定年結果，得知階地 FT2 抬升量為 22 公尺，年代 23±2.6 ka，因此垂直滑移速率為 1.0±0.1 mm/yr；階地 Lt1 抬升量為 36 公尺，年代 33.3±1.6 ka，因此垂直滑移速率為 1.1±0.1 mm/yr；階地 Lt3 抬升量為 91 公尺，年代 66.9±2.4 ka，因此垂直滑移速率為 1.4±0.1 mm/yr。以上 Lt3、Lt1、Ft2 階地垂直滑移速率取平均值為 1.1±0.3。階地分布如圖 3. 34 所示，各階地剖面高差及定年如圖 3. 35 所示。本計畫以頭前溪露頭斷層傾角 34 度計算長期滑移速率，Lt3、Lt1、Ft2 階地之長期滑移速率分別為 1.8±0.2 mm/yr、2.0±0.2 mm/yr、2.5±0.2 mm/yr。

黃宣維（2014）建立新竹地區平衡剖面，根據剖面回復結果，新城斷層的滑移量為 887 m，野外露頭顯示卓蘭層逆衝於頭嵙山層之上，假設新城斷層最早開始活動時間為頭嵙山層香山相的沉積結束後，年代為 1.24 Ma（Tang and Hsu, 1970），則新城斷層長期滑移速率為 0.7 mm/yr。

新城斷層長期滑移速率相關研究資料彙整於表 3. 8。

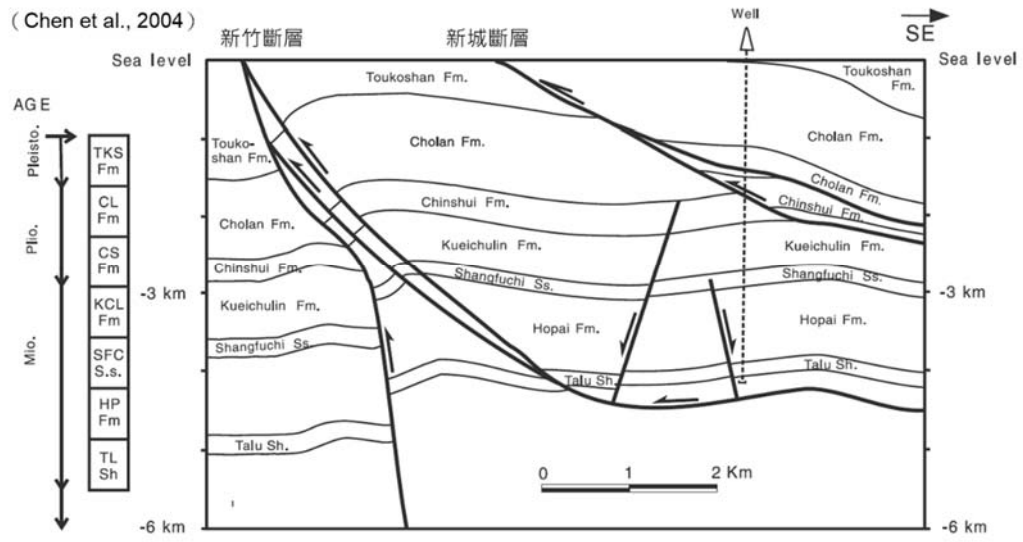


圖 3. 33：新竹地區震測剖面圖（Chen et al., 2004）。

Figure 3. 33: Seismic profile of Hsinchu area.

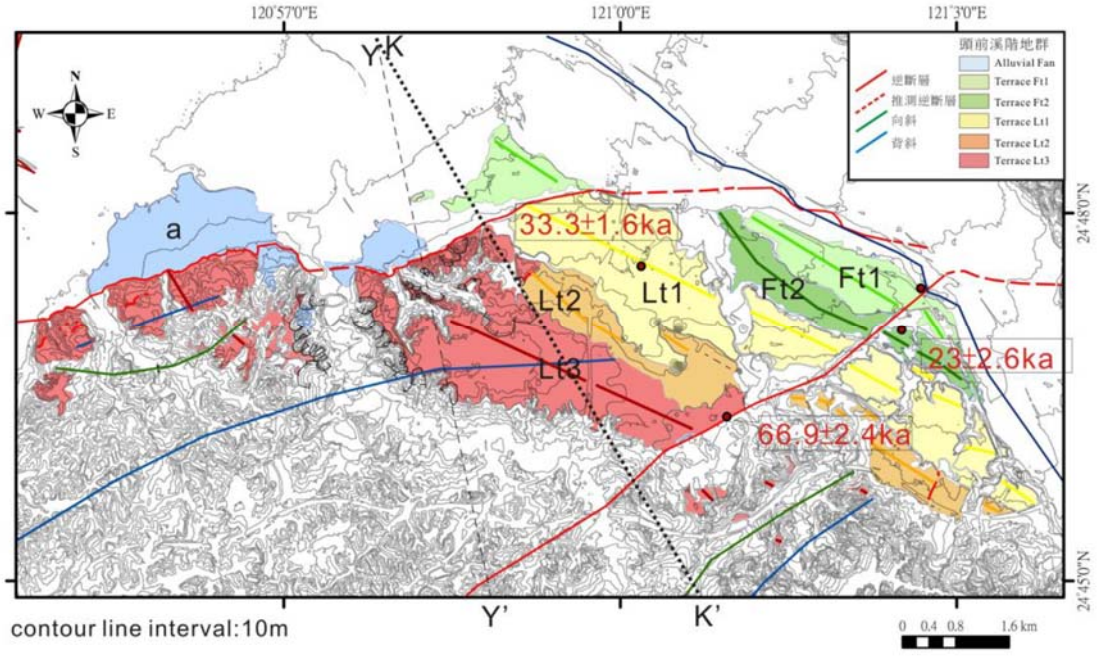


圖 3. 34：頭前溪階地對比與光螢光年代樣本位置圖（摘自丁權，2012）。

Figure 3. 34: Comparison of terraces of Touchien River and the sample location of luminescence dating.

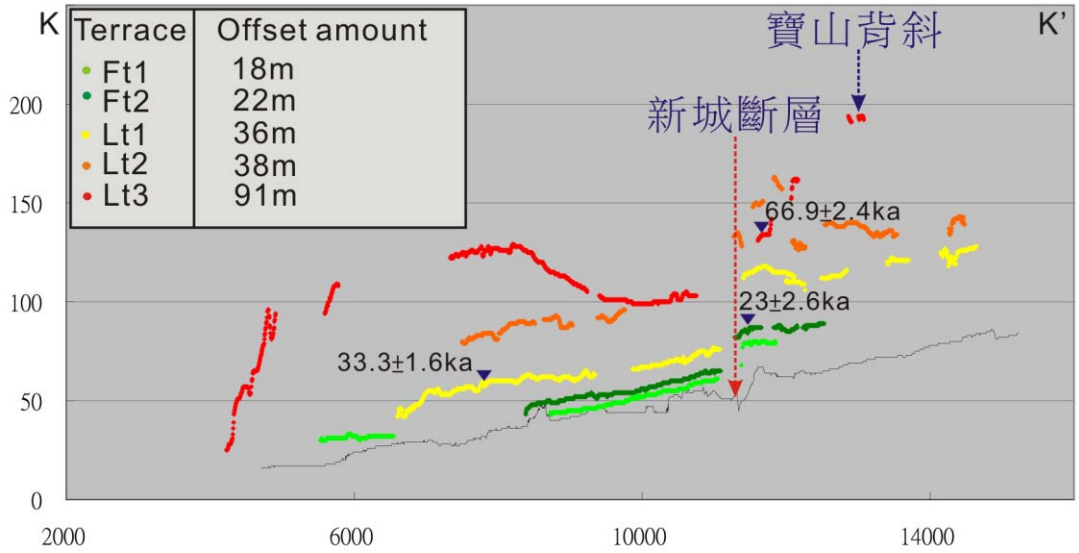


圖 3. 35：頭前溪階地剖面與光螢光年代樣本（摘自丁權，2012）。

Figure 3. 35: Profile of Touchien River Terraces and the sample location of luminescence dating.

表 3. 8：新城斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 3. 8: References related to the slip rate of the Hsincheng fault.

參考文獻	方法	長期滑移速率 (mm/yr)
石同生等（2003）	階地推估、震測剖面、鑽井資料	0.7-1.6
Chen et al.（2004）	震測資料	0.7
丁權（2012）	階地定年	1.8±0.2
	階地定年	2.0±0.2
	階地定年	2.5±0.2
黃宣維（2014）	平衡剖面	0.7

3-1-3 其他主要斷層

3-1-3-1 湖口斷層

湖口斷層早期稱為楊梅南斷層（石再添等，1983；張徽正等，1998），後改名為湖口斷層。根據經濟部地質調查及礦業管理中心（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，湖口斷層長度為20公里，為逆滑斷層，屬第二類活動斷層。Pan（1965）依據重力及震測資料結果認為湖口斷層延伸至坑子口海岸附近。

湖口斷層幾何相關文獻彙整如下：

Tang（1963）根據震測資料研判湖口斷層截切湖口背斜北翼，斷層面南傾約60度（圖3.36）。林良安（1999）根據淺層反射震測認為斷層未出露地表（圖3.37）。

林啟文等（2007）根據野外露頭及鑽井資料（大金山1號井、大金山2號井、羊喜窩1號井）認為湖口斷層未切穿地表，地表的線性崖為撓曲崖而非斷層線崖（圖3.38）。然而，朱傚祖等（2012）根據鑽井資料，觀察到在大金山下1號井井深80~102公尺處楊梅層砂頁岩互層中，具有13組以上密集的剪裂帶，認為湖口斷層延伸至地表。此外，朱傚祖等（2012）在野外於湖口背斜處發現楊梅層逆衝至紅壤礫石層之上的斷層露頭，認為此為湖口斷層的背衝斷層，而紅壤礫石層年代可能為全新世或晚更新世，指示湖口斷層為活動斷層（圖3.39）。

Suppe and Namson（1979）利用斷層彎曲褶皺理論（fault-bend fold）解釋湖口—楊梅背斜，背斜之下的石底層中存在楊梅斷層（Yangmei thrust），斷層深度位於4~5公里深，傾角約28-29°，並由鑽井HK4資料驗證得知斷層角度為25-38°（圖3.40）。王昱（2003）認為此區域主要以基底滑移面的變形為主，基底滑移面位於石底層，深度約5公里，而湖口斷層在剖面中以一背斜前翼的軸面取代，軸面東傾約60度（圖3.41）。黃旭燦等（2004）建立的平衡剖面LINE 2中，基底滑移面位於石底層中，深度約6至7.5公里，湖口—楊梅背斜為一前翼陡後翼緩的背斜構造，湖口斷層在剖面中為向斜的軸面，軸面東傾約55度。平衡剖面LINE 3中在湖口—楊梅背斜深部出現一位於五指山層底部的楔狀體構造，湖口斷層在剖面中並不存在（圖3.42）。

前人文獻彙整於表3.9。中興社（2020）根據前人文獻考慮基底滑脫面單獨破裂之可能性，建立三種破裂幾何模式（圖3.43），第一種模式為0~7公里深處傾角60度，權重0.4；第二種模式為0~7公里深處傾角60度，7~11公里深處10度，權重0.2；第三種模式為7~11公里深處10度，權重0.4。

本計畫依據中興社（2020）第一種模式進行後續分析與計算，斷層傾角為 60 度東傾，斷層深度延伸至 7 公里深的基底滑移面。

湖口斷層長期滑移速率相關文獻彙整如下：

根據臺灣地震模型資料（Shyu et al., 2020），湖口斷層崖之崖高約 115~125 公尺，上盤階地年代推估介於 10~50 萬年，垂直滑移速率約為 0.2~1.3 mm/yr，假設斷層傾角 20~40 度，則長期滑移速率為 0.4~3.7 mm/yr。

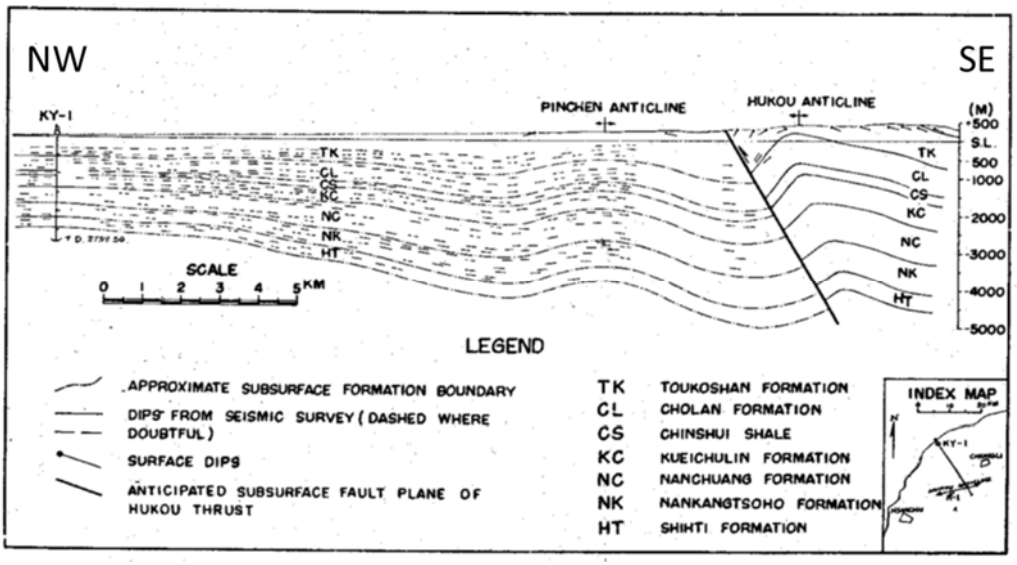


圖 3. 36：湖口斷層震測資料解釋（Tang, 1963）。

Figure 3. 36: Seismic profile interpretation of Hukou Fault from Tang (1963).

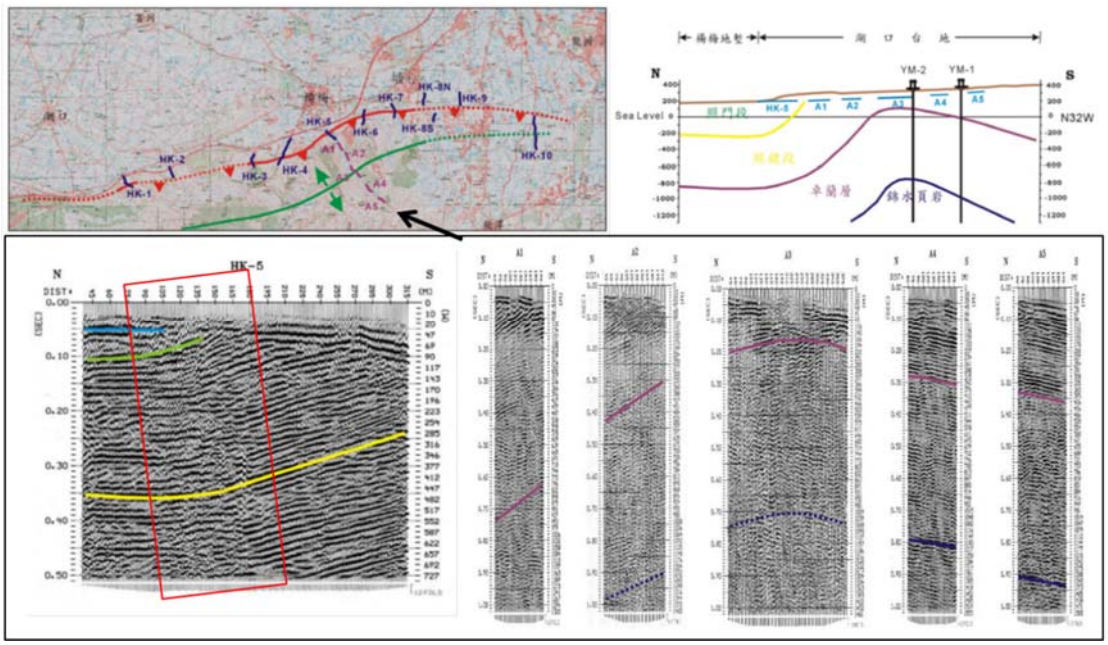


圖 3. 37：湖口斷層淺層震測（林良安，1999）。

Figure 3. 37: Seismic profiles of Hukou Fault from Lin (1999)

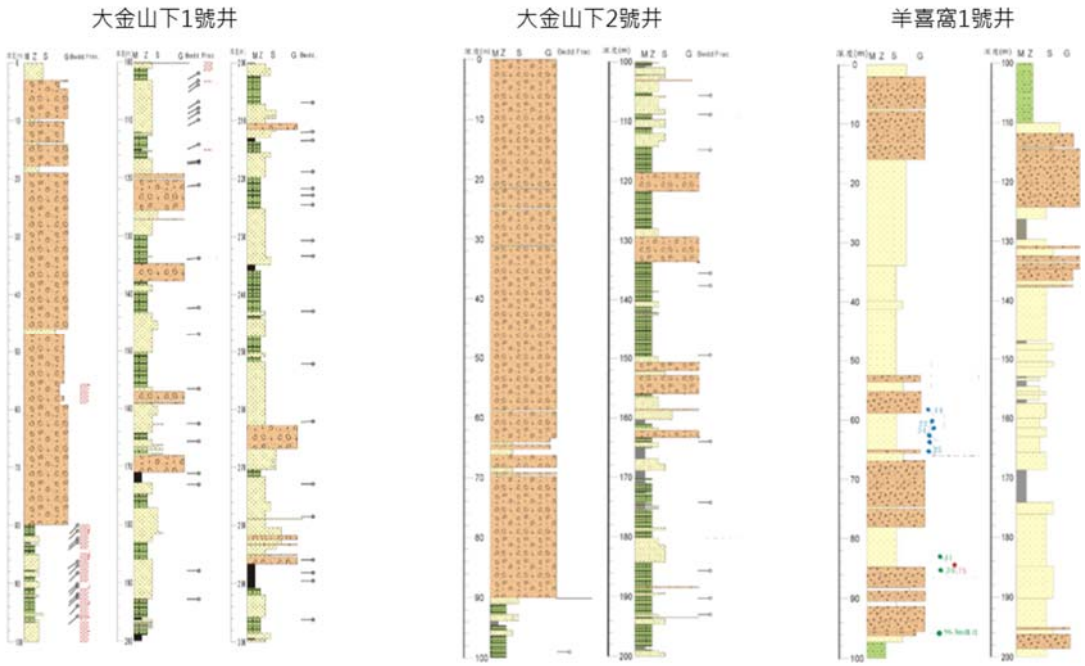


圖 3. 38：湖口斷層鑽井井錄（描述詳見林啟文等，2007）。

Figure 3. 38: Hukou Fault drilling loggings.

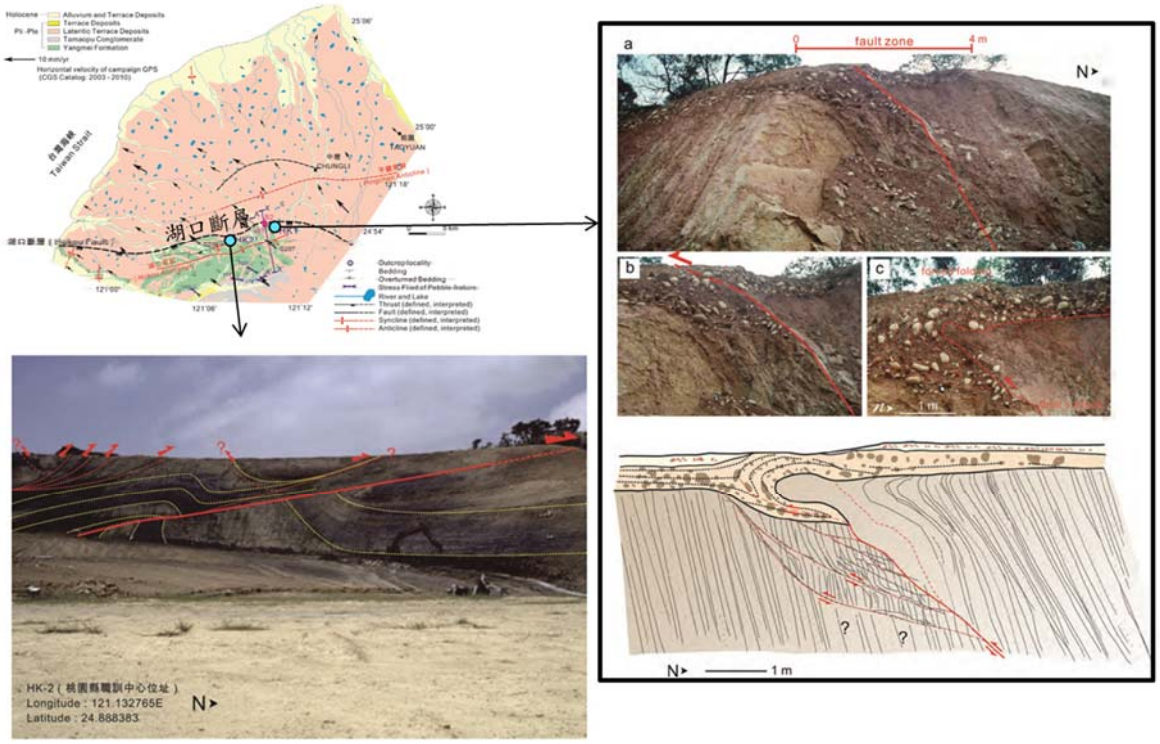


圖 3. 39：湖口背衝斷層野外露頭（朱傚祖等，2012）。

Figure 3. 39: Outcrops of backthrust of Hukou fault.

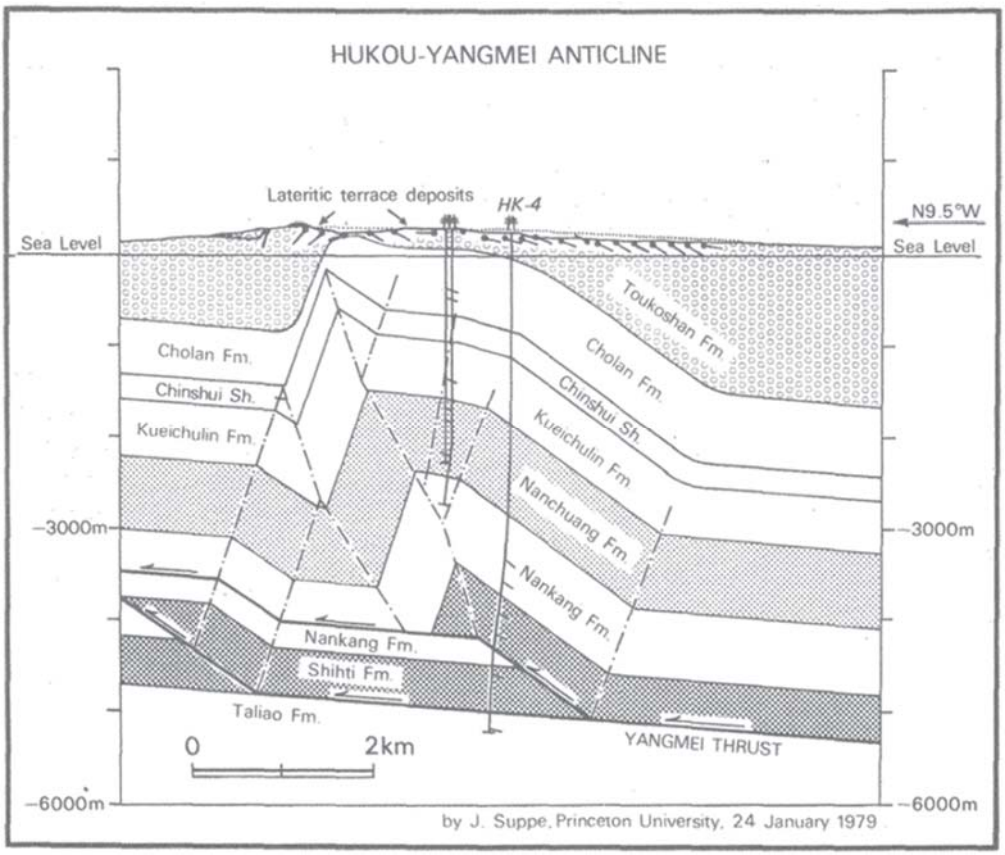


圖 3. 40：湖口斷層平衡剖面圖（Suppe and Namson, 1979）。

Figure 3. 40: Balanced cross section from Suppe and Namson（1979）

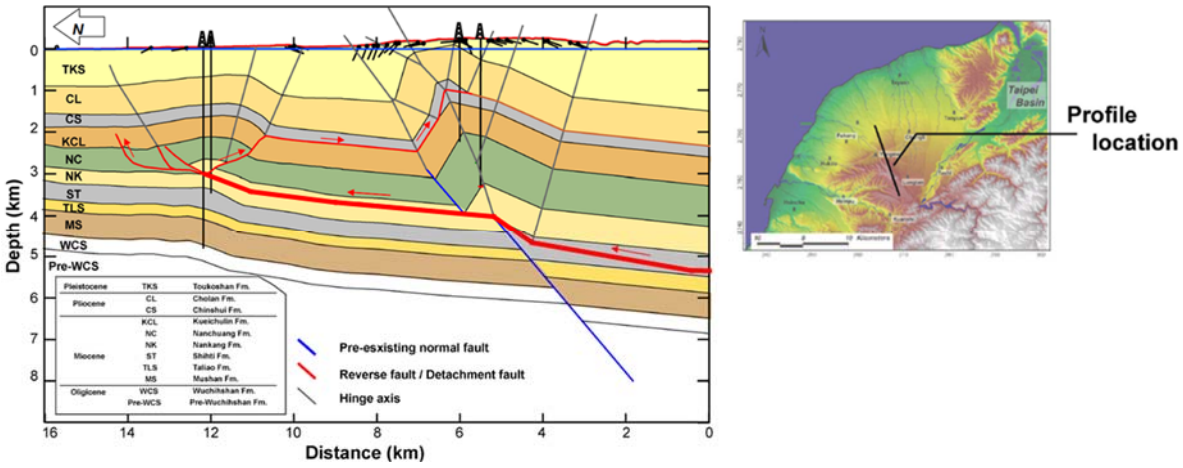


圖 3. 41：湖口斷層平衡剖面圖（王昱，2003）。

Figure 3. 41: Balanced cross section of Hukou fault from Wang (2003)

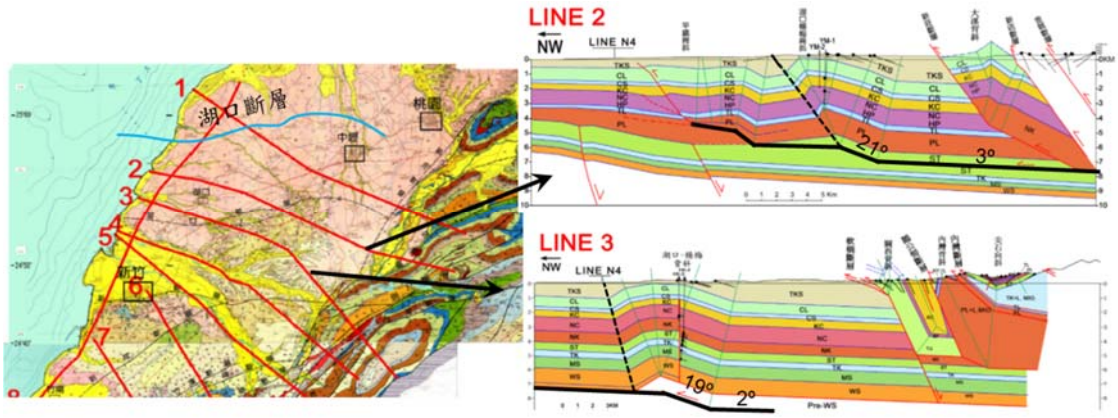


圖 3. 42：湖口斷層平衡剖面圖（黃旭燦等，2004）。

Figure 3. 42: Balanced cross section of Hukou fault from Huang et al. (2004)

表 3. 9：湖口斷層幾何相關文獻彙整

Table 3. 9: References related to the geometry of the Hukou fault.

作者	方法	傾角(度)	深度(公里)
Tang（1963）	震測剖面	60 度（0~5 公里深）	
Suppe and Namson（1979）	平衡剖面	約 30 度（4~5 公里深）	滑移面約 4 公里深
王昱（2003）	平衡剖面	32 度（4~5 公里深）	滑移面約 5 公里深
黃旭燦等（2004）	平衡剖面 LINE 2	21 度（6~7 公里深） 3 度（7 公里深以下）	滑移面約 7 公里深
	平衡剖面 LINE 3	19 度（7.5~8.5 公里深） 2 度（8.5 公里深以下）	滑移面約 8.5 公里深

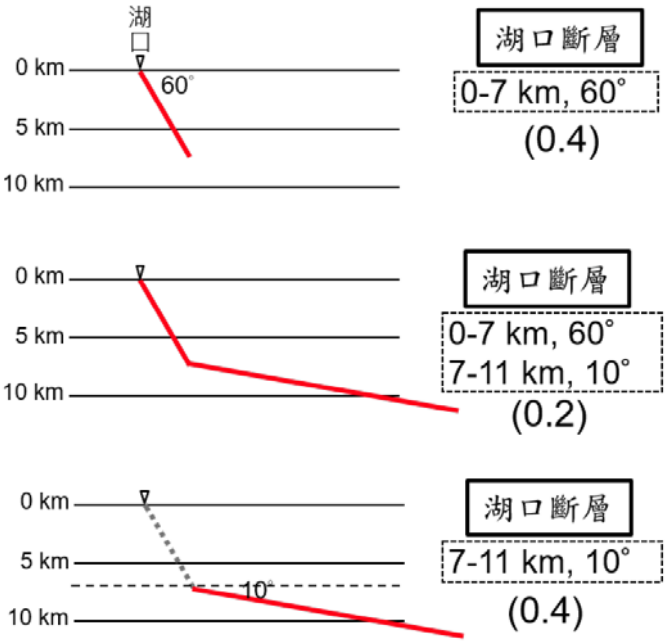


圖 3. 43：湖口斷層幾何模型及權重（中興社，2020）。

Figure 3. 43: Geometry models and weightings of Hukou fault (Sinotech, 2020).

3-1-3-2 新竹斷層

根據經濟部地質調查及礦業管理中心（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，新竹斷層長約 11 公里，屬第二類活動斷層，運動方式為逆滑兼右滑。

新竹斷層幾何相關文獻蒐集如下：

新竹斷層無出露地表的斷層露頭，僅看到斷層線崖的地形特徵。Tang and Hsu（1970）根據中油的地質圖及鑽井資料繪製新竹地區地質剖面（圖 3. 44），Namson（1984）以斷層彎曲褶皺模式解釋青草湖背斜，新竹斷層未出露地表（圖 3. 45）。楊耿明等（Yang et al., 1994; 1996）根據震測剖面資料以斷層擴展褶皺模式解釋新竹斷層及青草湖背斜，新竹斷層面是由 2~3 個穿插的剪切面，沿著一先前存在的正斷層發育，斷層傾角約為 40~50 度向南傾，深度至少 5 公里，而新城斷層發育於新竹斷層之上（圖 3. 46）。黃旭燦等人（2004）建立的 LINE 5 及 LINE 6 的平衡剖面中，新竹斷層在 LINE 5 剖面的傾角約為 65 度，深度延伸至北寮層，在 LINE 6 剖面的傾角約 50 度，深度延伸至石底層，以上兩個平衡剖面中新竹斷層的深度皆不超過 5 公里，新竹地區的基底滑移面位於約 6~10 公里深的五指層（圖 3. 47）。黃宣維（2014）建立的平衡剖面中新竹斷層傾角約 50 度，深度延伸至約 7.5 公里深的五指山層，與基底滑移面相接，基底滑移面的深度根據中央氣象署 1991~2009 年地震重定位的資料推測可能延伸至 10~14 公里（圖 3. 48）。根據蒲新杰（2010）統計新竹地區（東經 120.8~121.4 度，北緯 24.4~25 度）2004 年 4 月 29 日至 2006 年 12 月 11 日，地震規模<4 的地震深度分布，該區域之地震主要集中於深度約 12 公里以內（圖 3. 31）。

中興社（2020）綜合前人文獻建立三種斷層幾何模式（圖 3. 49），三種模式中的新竹斷層相較新城斷層傾角陡。第一種模式參考 Tang and Hsu（1970）地質剖面，該模式中新竹斷層傾角為 50 度；第二種模式參考黃宣維（2014）建立的平衡剖面，該模式中新竹斷層傾角在 0~7 公里深處為 50 度，7~10 公里深處轉為 10 度（基底滑移面）；第三種模式參考黃旭燦等（2004）建立的平衡剖面，該模式中新竹斷層傾角在 0~6 公里深處為 45 度，6~10 公里深處轉為 10 度（基底滑移面）。

中興社（2020）建立的三種模式中，第二種模式為權重最高之幾何模式，且黃宣維（2014）的平衡剖面為最新之剖面資料，因而本計劃之新竹斷層傾角設定在 0~7 公里深為 50 度，7~10 公里深處為 10 度。

新竹斷層長期滑移速率相關文獻蒐集如下：

黃宣維（2014）根據平衡剖面推估新竹斷層滑移量為 1318 公尺，並假設新竹斷層最早開

始活動時間為頭嵙山層香山相的沉積結束後，年代為 1.24 Ma（Tang and Hsu, 1970），則新竹斷層長期滑移速率為 1.1 mm/yr。Chen et al.（2004）根據震測剖面中錦水頁岩及卓蘭層間的地層界線推估斷層滑移量約為 900 公尺，由於缺乏年輕地層定年資料，因而以頭嵙山層年代估算最小滑移速率，最小滑移速率為 0.5 mm/yr。丁權（2012）利用鑽井資料推估垂直錯移速率約為 1.2 mm/yr，斷層傾角為 20~40 度，因此長期滑移速率為 1.9~3.5 mm/yr。

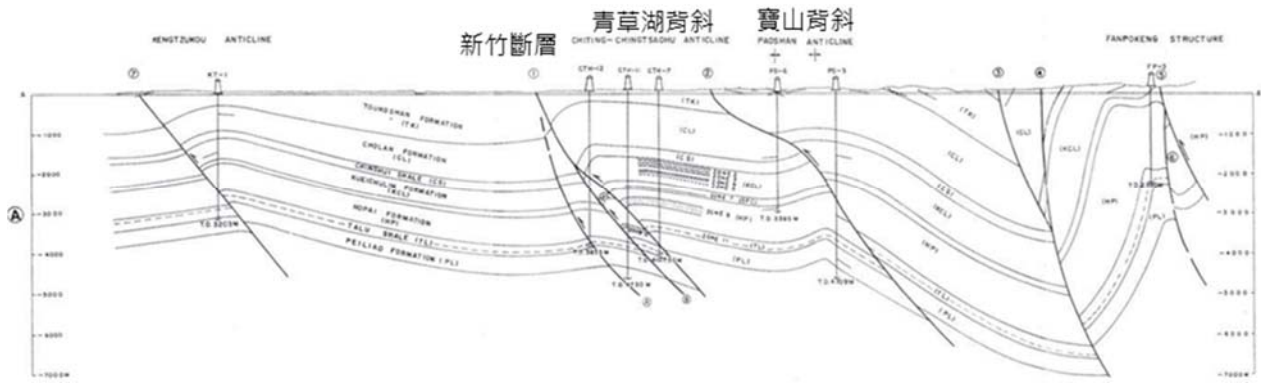


圖 3. 44：新竹斷層地質剖面（Tang and Hsu, 1970）。

Figure 3. 44: Geological profile from Tang and Hsu (1970).

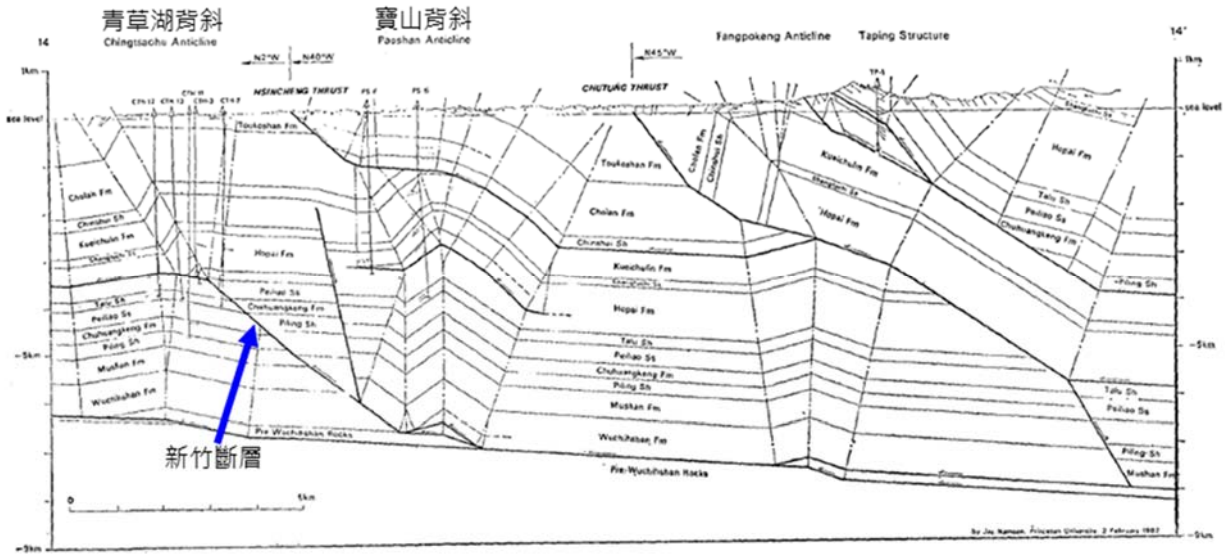


圖 3. 45：新竹斷層平衡剖面（Namson, 1984）。

Figure 3. 45: Balanced cross section from Namson (1984).

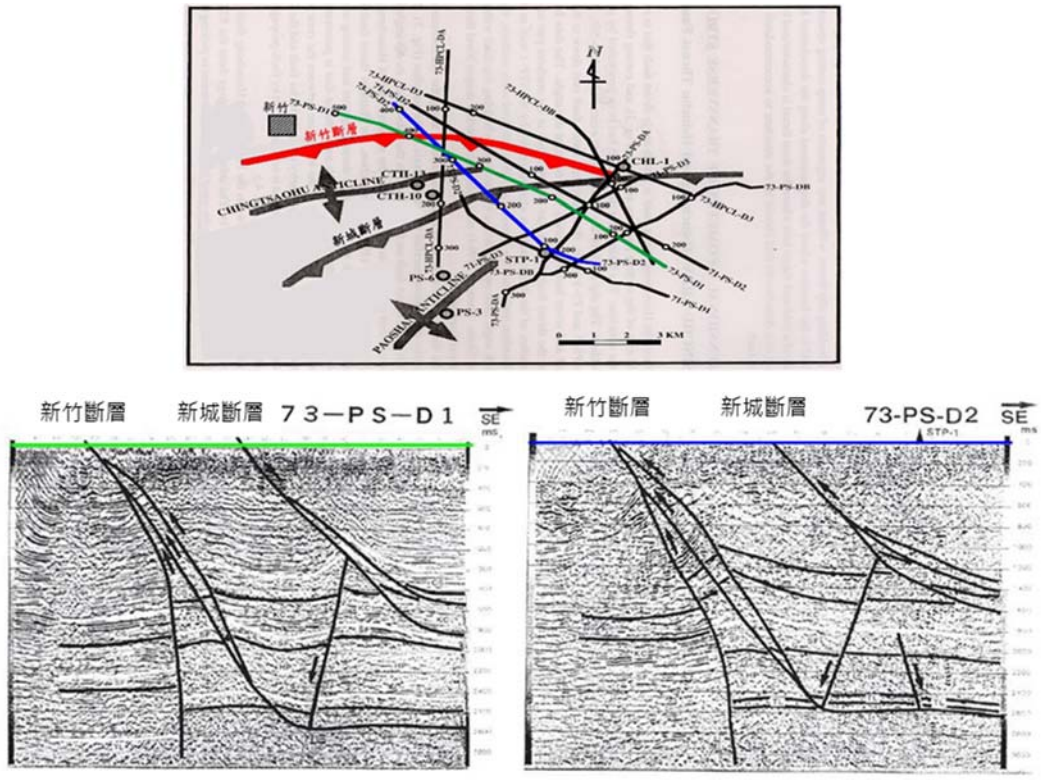


圖 3. 46：新竹斷層震測剖面圖。上圖為新竹斷層（紅線）及震測剖面位置圖，左下圖為 73-PS-D1 震測剖面（位置見上圖綠線），左下圖為 73-PS-D2 震測剖面（位置見上圖藍線）震測剖面（Yang et al., 1994; 1996）。

Figure 3. 46: The figure above shows the Hsinchu fault (red line) and the location of the seismic profiles. The bottom left figure shows the 73-PS-D1 seismic profile (green line in the map), and the bottom left figure shows the 73-PS-D2 seismic profile (blue line in the map).

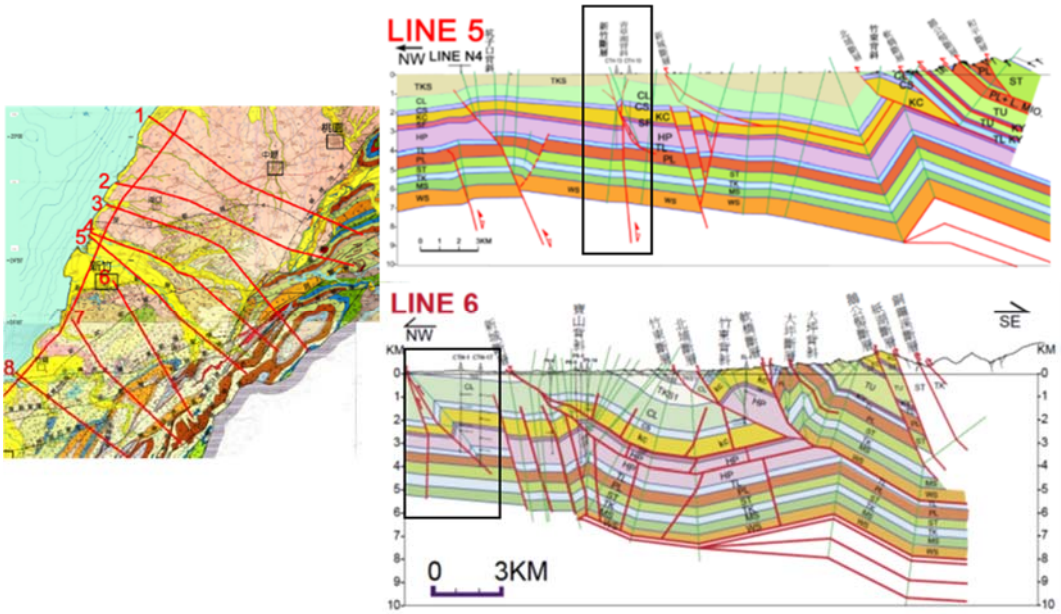


圖 3. 47：新竹地區地質與平衡剖面圖。左圖為地質圖及平衡剖面位置圖，右圖則為 LINE 5 及 LINE 6 兩條平衡剖面，新竹斷層位於剖面圖中黑框位置（黃旭燦等，2004）。

Figure 3. 47: The left figure is the geological map and the location of the balanced section, and the right figure shows balanced sections of LINE 5 and LINE 6, and the Hsinchu fault is located in the black frame of the section.

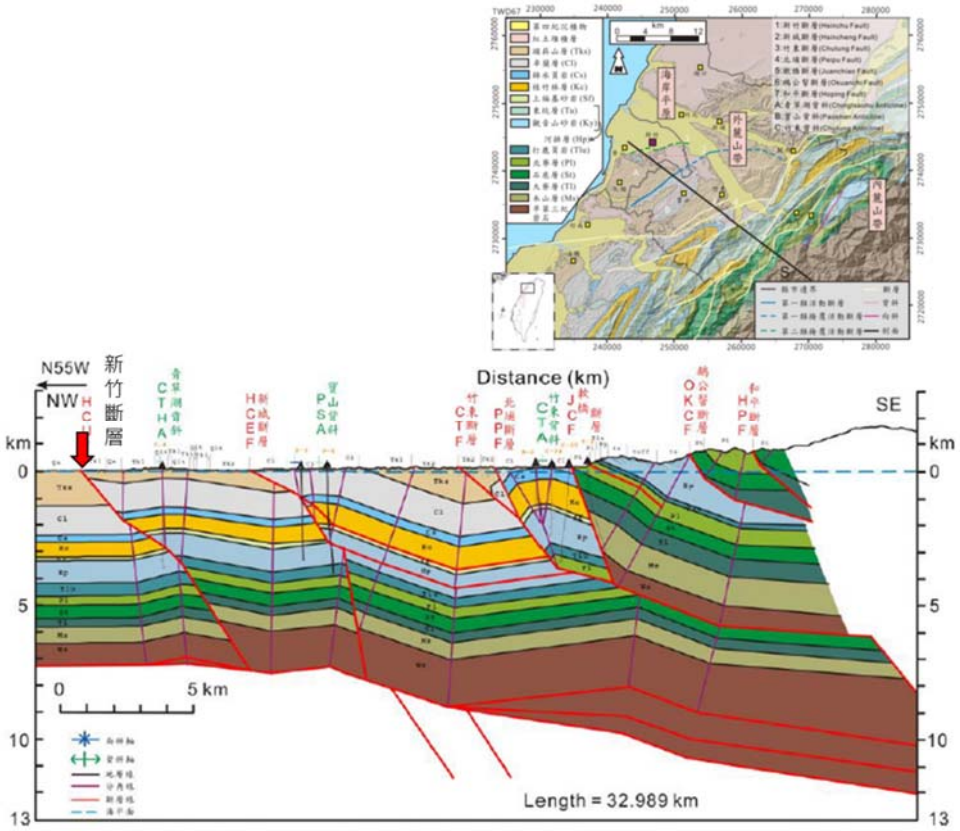


圖 3. 48：新竹斷層平衡剖面 S（黃宣維，2004）。

Figure 3. 48: Balanced cross section S from Huang (2004).

表 3. 10：新竹斷層幾何相關文獻彙整

Table 3. 10: References related to the geometry of the Hsinchu fault.

作者	方法	傾角	深度
Yang et al.（1994；1996）	震測剖面	40~50度	5公里
黃旭燦等（2004）	平衡剖面	Line 5：65度 Line 6：50度	5公里 （新竹斷層深度） 6~10公里 （基底滑移面）
黃宣維（2014）	平衡剖面	約50度	7~12公里 （基底滑移面）
蒲新杰（2010）	微震分布		~12 km

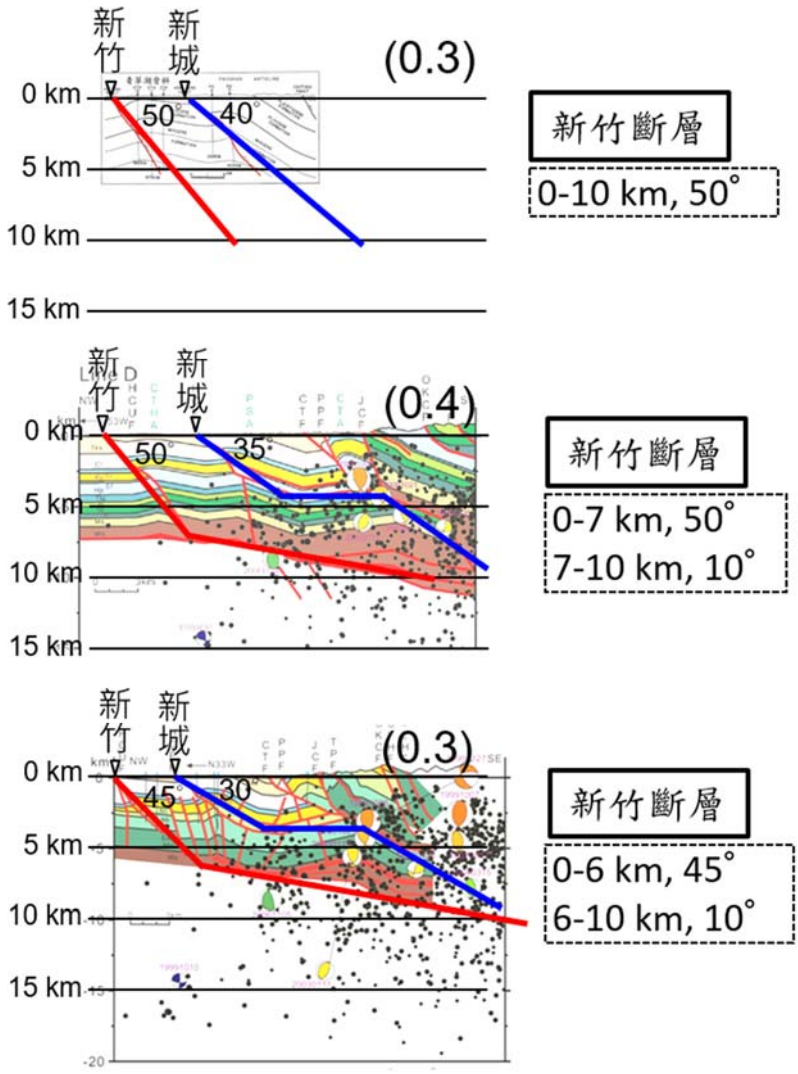


圖 3. 49：三種新竹斷層幾何，括弧中數字為權重（中興社，2020）。

Figure 3. 49: Rupture models and weightings (in brackets) of Hsinchu fault from Sinotech (2020)

表 3. 11：新竹斷層長期滑移速率相關文獻彙整

Table 3. 11: References related to the slip rate of the Hukou fault.

文獻	方法	長期滑移速率
黃宣維（2014）	平衡剖面	1.1 mm/yr
Chen et al.（2004）	震測資料	0.5 mm/yr
丁權（2012）	鑽井資料	1.9~3.5 mm/yr

3-1-3-3 獅潭斷層

根據經濟部地質調查及礦業管理中心（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，獅潭斷層長度 11 公里，為逆移斷層。獅潭斷層於 1935 年新竹-台中烈震中產生地表破裂，過去名為紙湖地震斷層（大塚彌之助，1936）。

獅潭斷層傾角相關文獻蒐集如下：

根據大塚彌之助（1936）的野外調查，他認為紙湖地震斷層長度約為 15 公里，斷層走向 N30°-40°E，斷層面高角度向西傾斜，約為 72°-82°-85°，越往北傾角越陡。此外，垂直方向的位移為西側抬升，水平方向的位移不固定，因而紙湖地震斷層應為高角度的逆移斷層。黃旭燦等（2004）建立 LINE 8 平衡剖面通過紙湖斷層，剖面中紙湖斷層位於東坑層及打鹿頁岩間的岩性邊界，傾角約 65 度，朝東傾斜，東側為抬升側（圖 3. 50）。Sheu et al.（1982）利用 1917-1937 的三角測量及水準測量資料（Military Land Survey, 1937）解算獅潭斷層、屯子腳斷層幾何，獅潭斷層傾角為西傾 50 度，屯子腳斷層為東傾 80 度（圖 3. 51）。Huang and Yeh（1992）使用有限元素模型，斷層面朝西傾，斷層傾角於地表為 55 度，至斷層底部變為 30 度，呈鏟型形貌（圖 3. 52）。

獅潭斷層深度相關文獻蒐集如下：

Lin（2005）蒐集獅潭斷層附近區域 1973-2003 之地震目錄資料，進行重定位後與 1935 年新竹-台中烈震之主餘震進行比較，並以 BB’剖面呈現區域地震深度分布，結果顯示雖然獅潭斷層西側之地震相當稀疏及分散，然而 BB’剖面中地震分布在斷層東側與西側有一清楚的界線，向下延伸可達 10 公里的深度（圖 3. 53）。

根據中興社（2020）專家討論及邏輯樹設定，獅潭斷層傾角為 40~60 度（西傾），40 度權重 0.3，50 度權重 0.4，60 度權重 0.3；獅潭斷層深度為 6~10 公里，6 公里權重 0.3，8 公里權重 0.4，10 公里權重 0.3。

綜合以上文獻，因黃旭燦等（2004）紙湖斷層屬於東傾之地質斷層，與獅潭地震斷層之西傾特性不一致，本計畫獅潭斷層幾何不採用黃旭燦等（2004）的平衡剖面結果，採用朝西傾的斷層幾何，並依據中興社（2020）權重最高之斷層幾何，傾角西傾 50 度及深度 8 公里進行後續分析與計算。

獅潭斷層長期滑移速率相關文獻蒐集如下：

Shyu et al.（2020）利用上大窩階地推估斷層抬升速率約為 0.6~5.0 mm/yr，並假設斷層角度為 70~80 度，換算沿斷層面滑移速率約為 0.6~5.3 mm/yr。

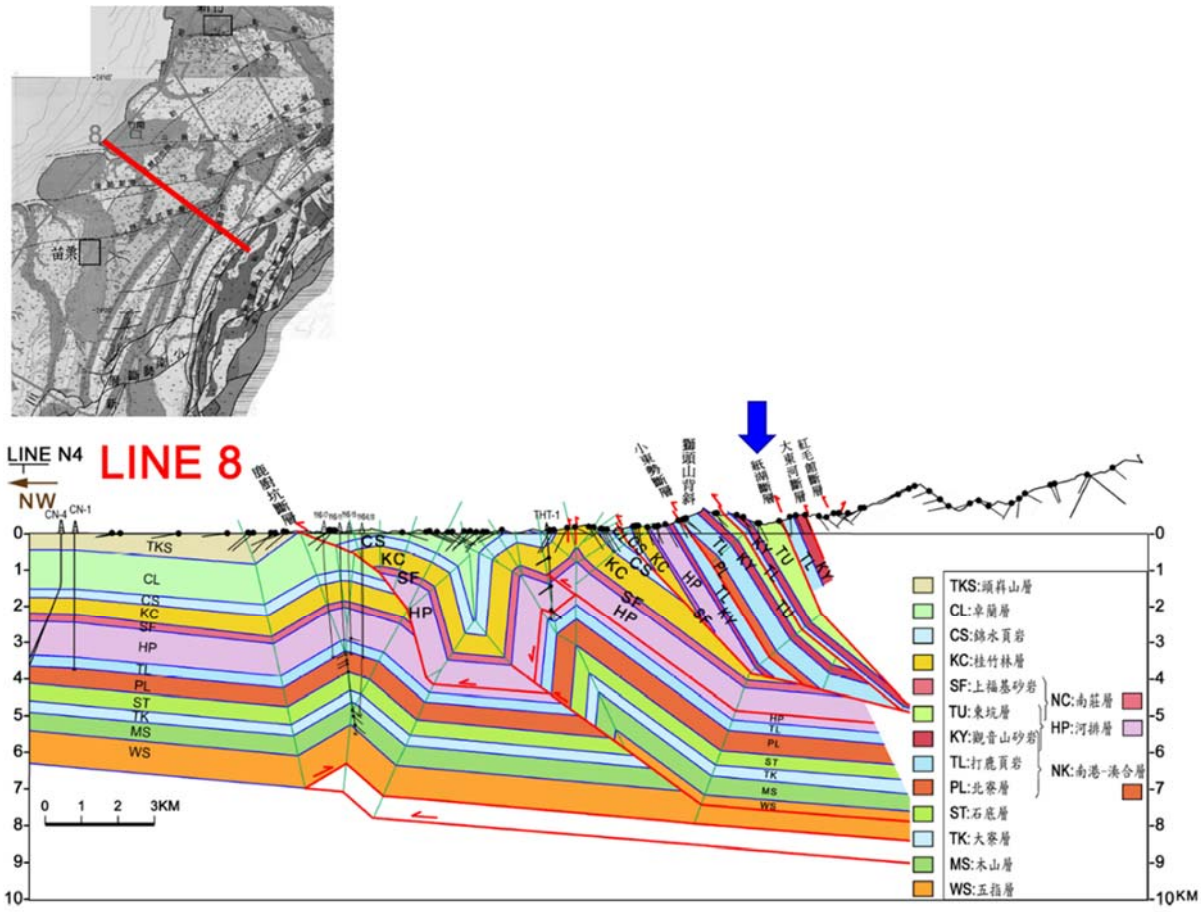
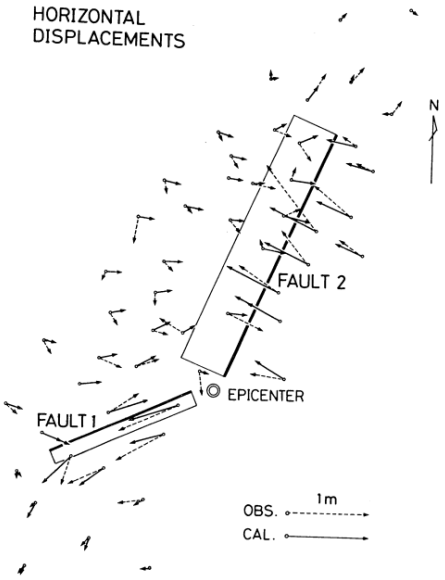


圖 3. 50：紙湖斷層平衡剖面（黃旭燦等，2004）。剖面位置位於左上圖紅線處，紙湖斷層位於下圖剖面藍色箭頭所指處。

Figure 3. 50: Balanced profile through the Zhihu fault established by Huang et al. (2004). Porfile is located at the red line in the upper figure, and the Zhihu fault is located at the blue arrow in the profile below.



	ϕ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	D (m)	M_0 (dyne·cm)
Fault 1	157	80	0	20	10	1.5	9×10^{25}
Fault 2	293	50	90	35	10	2.0	2.1×10^{26}

ϕ: dip direction, δ: dip angle, λ: slip angle, L: fault length, W: fault width, D: amount of slip, M_0: seismic moment.

圖 3. 51：利用大地測量資料分析斷層模型結果（Sheu et al., 1982）。Fault 2 為紙湖斷層(獅潭斷層)，Fault 1 為屯子腳斷層。

Figure 3. 51: Fault models by analyzing geodetic data from (Sheu et al., 1982). Fault 2 is the Zhihu fault (Shihtan fault), and Fault 1 is the Tuntzuchiao fault.

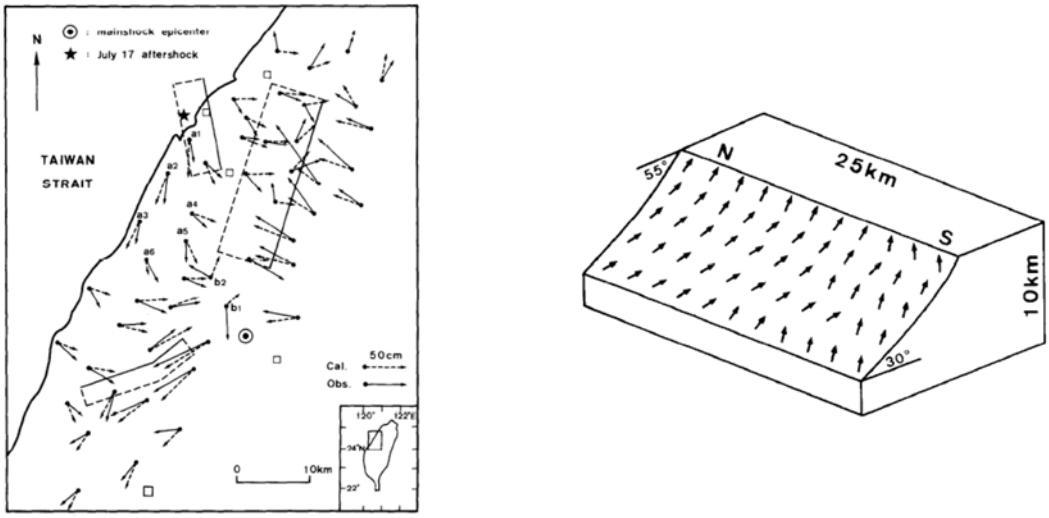


圖 3. 52：新竹台中地震反演計算結果與觀測資料比較，及獅潭斷層模型。左圖為新竹台中地震反演計算結果與觀測資料之比較，圖中之長方形區域為投影至地表之斷層面。右圖為計算使用的獅潭斷層模型，箭頭指示為斷層面上之滑動方向（Huang and Yeh, 1992）。

Figure 3. 52: The left figure is the inversion calculation results and the observation data of the Hsinchu-Taichung Earthquake. The rectangular area in the picture is the fault plane projected to the surface. The right figure is the Shihtan fault model, and the arrows indicate the sliding direction on the fault plane (Huang and Yeh, 1992).

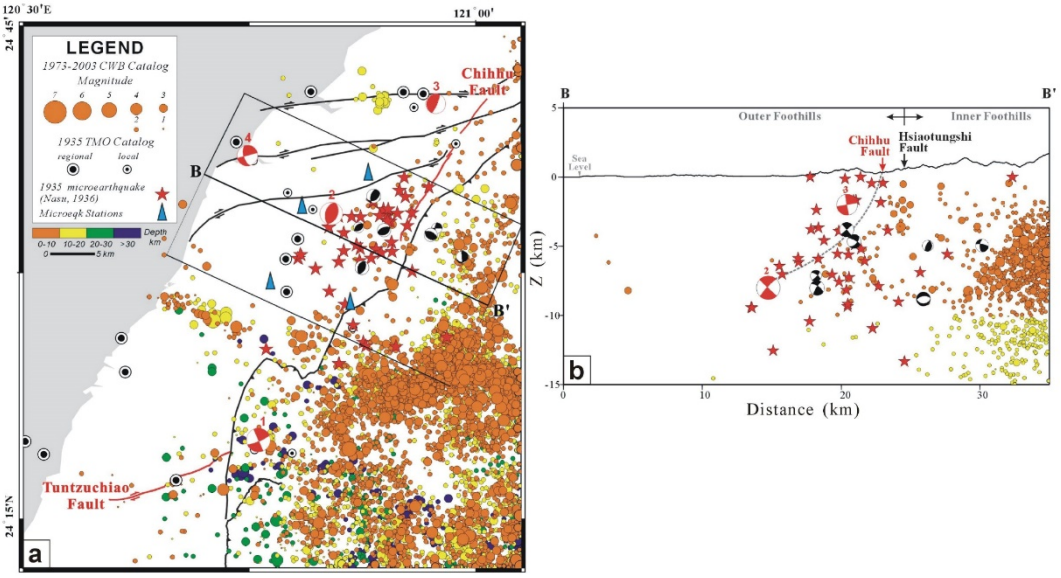


圖 3. 53：中部地區地震平面與剖面分布。左圖為地震分布地圖，圖中圓圈符號為 1973-2003 中央氣象署地震目錄分布，白-黑之圓圈符號為 1935 台北天氣觀測所（TMO）地震目錄，紅色星號為 1935 年餘震紀錄 Nasu（1938），黑色震源機制為 TMO 規模大於 4 之地震震源機制解，紅色震源機制為 1935 年主震及餘震（鄭世楠，1995；林燈河，1987）。右圖為沿著 BB'剖面之地震分布，BB'剖面位置及投影之寬度如左圖（Lin, 2005）。

Figure 3. 53: The left figure is seismicity distribution map. The circles are the data from Central Weather Bureau from 1973 to 2003. The white-black circles are the data from Taipei Meteorological Observatory (TMO) in 1935. The red stars are aftershocks from Nasu (1938). The focal mechanism with earthquake magnitude larger than 4 from TMO is shown in black-white color. The focal mechanism of main shock in 1935 and aftershocks are shown in red-white color (Cheng, 1995; Lin 1987). The right figure shows the seismicity profile along BB', and the location as well as the projection width of BB' profile is shown in the left figure (Lin, 2005).

表 3. 12：獅潭斷層相關文獻彙整

Table 3. 12: References related to the geometry of the Shihtan fault.

參考文獻	方法	傾角	深度
大塚彌之助（1936）	1935 年地震野外調查	72-85 度西傾	
黃旭燦等（2004）	平衡剖面	約 65 度東傾	
Sheu et al.（1982）	大地測量	約 50 度西傾	
Huang and Yeh（1992）	大地測量	約 30-55 度西傾	
Lin（2005）	地震重定位		10 km

3-1-3-4 三義斷層

根據經濟部地質調查及礦業管理中心（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，三義斷層長度約 34 公里。根據條帶地質圖（林啟文等，2008），三義斷層於后里台地與屯子腳斷層交會，於大甲溪以南與車籠埔斷層相鄰。

三義斷層傾角及深度相關文獻描述如下：

邱華燈（1962）的震測剖面通過后里台地，剖面中觀察到約 20 度東傾的逆衝斷層（圖 3. 54）。

Hung and Wiltschko（1993）利用中油鑽井及震測資料建立地質構造剖面（圖 3. 55），剖面 C 經過西湖地區，三義斷層呈現不平滑的斷層面，其下部為出磺坑背斜，三義斷層向東延伸至 9 公里深；剖面 D 經后里台地，三義斷層呈現低角度逆衝形貌，並沿著東坑層底部逆衝。根據 Yue et al.（2005）建立的剖面，三義斷層之幾何與車籠埔斷層近乎平行的往地下延伸（圖 3. 56）。根據 Yang et al.（2007）之震測剖面及地質平衡剖面，三義斷層為低角度逆衝斷層，傾角約為 15 度（圖 3. 57）。

根據 Lin et al.（1989）三義、卓蘭地區微震分布推測，基底滑脫面位於深度約 9-10 公里處（圖 3. 58）。

以上文獻彙整於表 3. 13。

根據中興社（2020）斷層幾何設定，三義斷層分為車籠埔斷層以北（北段）及車籠埔斷層以南（南段）。三義斷層北段幾何參考 Yang et al.（2007）及 Hung and Wiltschko（1993）的剖面分為兩種模式（圖 3. 59）。第一種模式為依據 Yang et al.（2007）的平衡剖面設定傾角為 15 度，深度 10 公里，權重為 0.6。第二種模式為依據 Hung and Wiltschko（1993）的剖面設定傾角為 25 度，深度 10 公里，權重為 0.4。三義斷層南段與車籠埔斷層相鄰且幾乎平行，需考慮與車籠埔斷層互相平行且不互相穿插之情形，因此參考車籠埔斷層的幾何分為三種模式如圖 3. 60，第一種模式為傾角 25 度，深度 8 公里，權重 0.2；第二種模式為傾角 35 度，深度 8 公里，權重 0.5；第三種模式為傾角 40 度，深度 8.5 公里，權重 0.3。

本計畫重新定義三義斷層的分段位置，頂埔斷層是過去 921 地震地表破裂時切過大甲溪河床的東西向斷層（李錦發，2000），當時的地震地表破裂在此區域由南北走向轉為東西走向，應可作為斷層幾何的分段點，頂埔斷層以北的三義斷層為北段，頂埔斷層以南的三義斷層為南段。北段幾何參考上述中興社（2020）權重較高的第二種幾何模式，簡化 Yang et al.（2007）平衡剖面中三義斷層的幾何，傾角設定為 15 度，深度 10 公里；南段幾何參考上述中興社（2020）權重較高的第二種模式，傾角為 35 度，深度 8 公里。而三義斷層北端走向由南北向轉為東西

向的部分，其幾何形態可能隨著走向變化而跟著改變，然而東西走向部分目前無斷層幾何相關的地質文獻，因此無法針對此段另外擬定斷層幾何形貌。

Shyu et al.（2020）根據階地崖高及年代推估得到抬升速率約為 0.1~0.8 mm/yr，並以傾角 10~20 度推算得到長期滑移速率為 0.4~4.6 mm/yr。

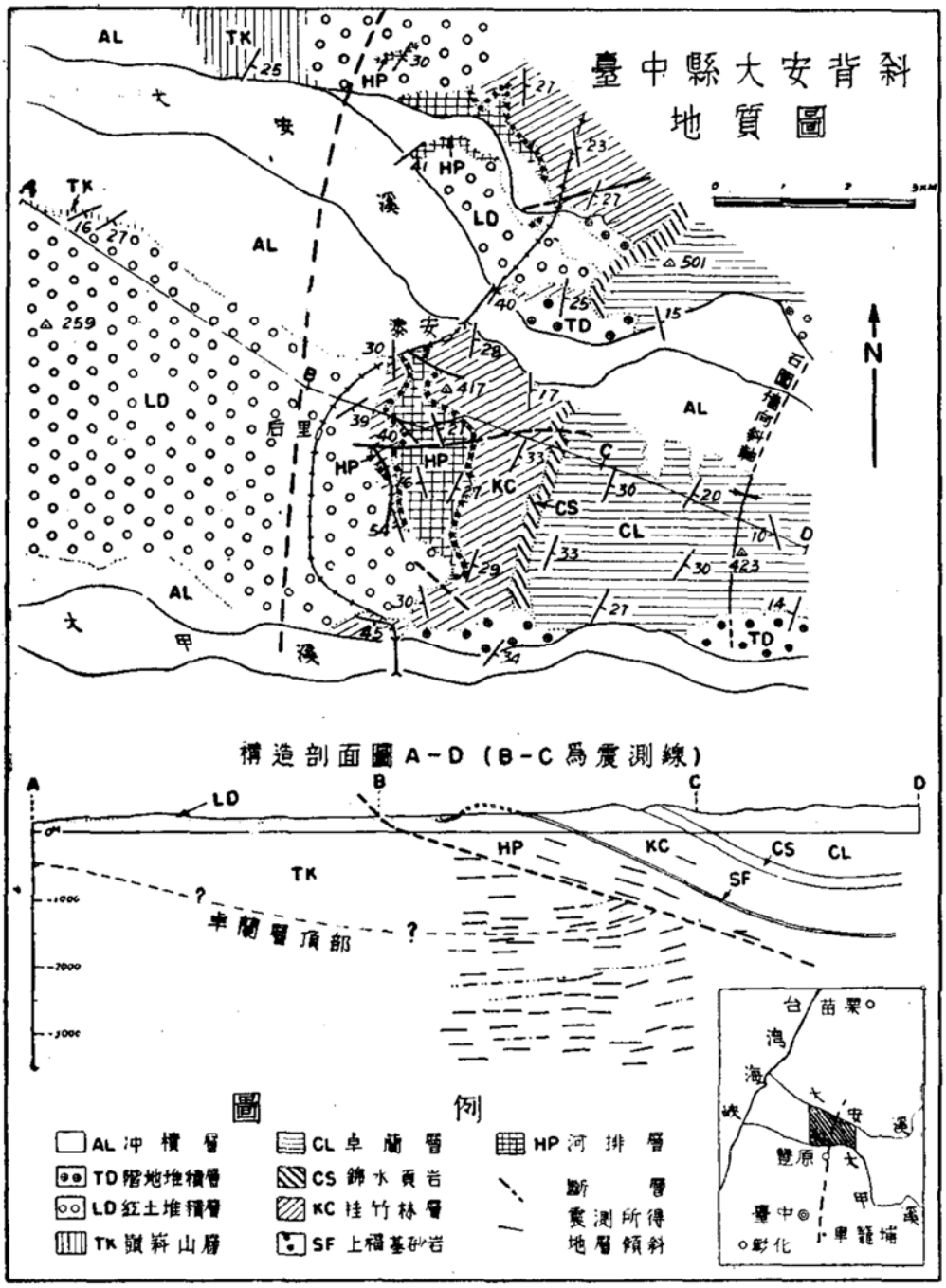


圖 3. 54：大安背斜地質圖及震測剖面（邱華燈，1962）。

Figure 3. 54: Geological map and seismic profile of Daan anticline.

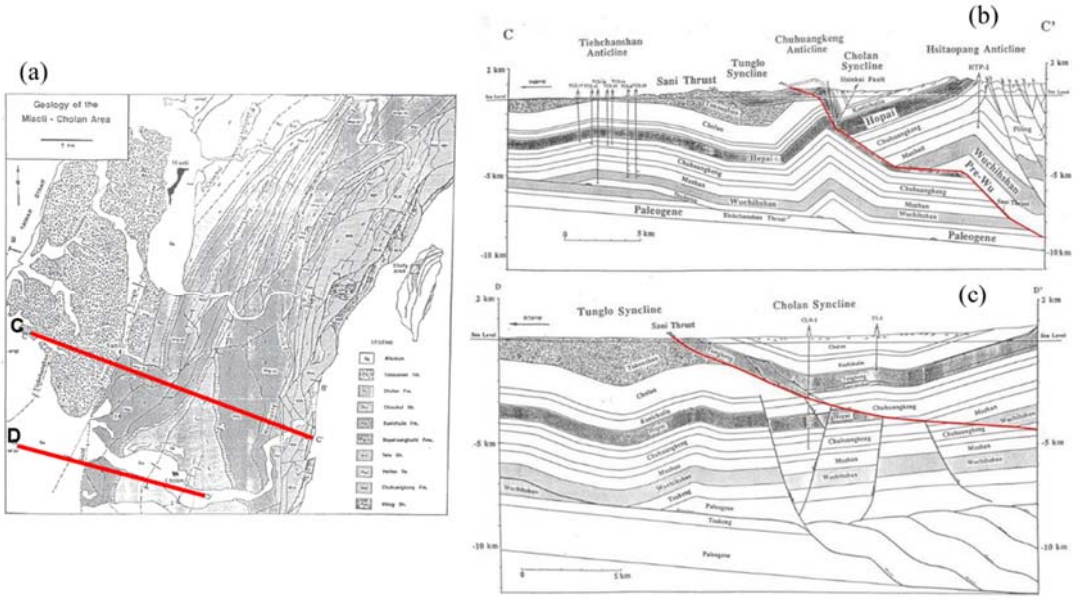


圖 3. 55：苗栗-台中地區中油十萬分之一地質圖與地質剖面。(a) 地質圖；(b) 地質構造 C 剖面；(c) 地質構造 D 剖面（Hung and Wiltschko, 1993）。

Figure 3. 55: (a) 1:100,000 geological map of Miaoli-Taichung area from Taiwan Petroleum Exploration Division, CPC. (b) Geologial profile C and (c) profile D.

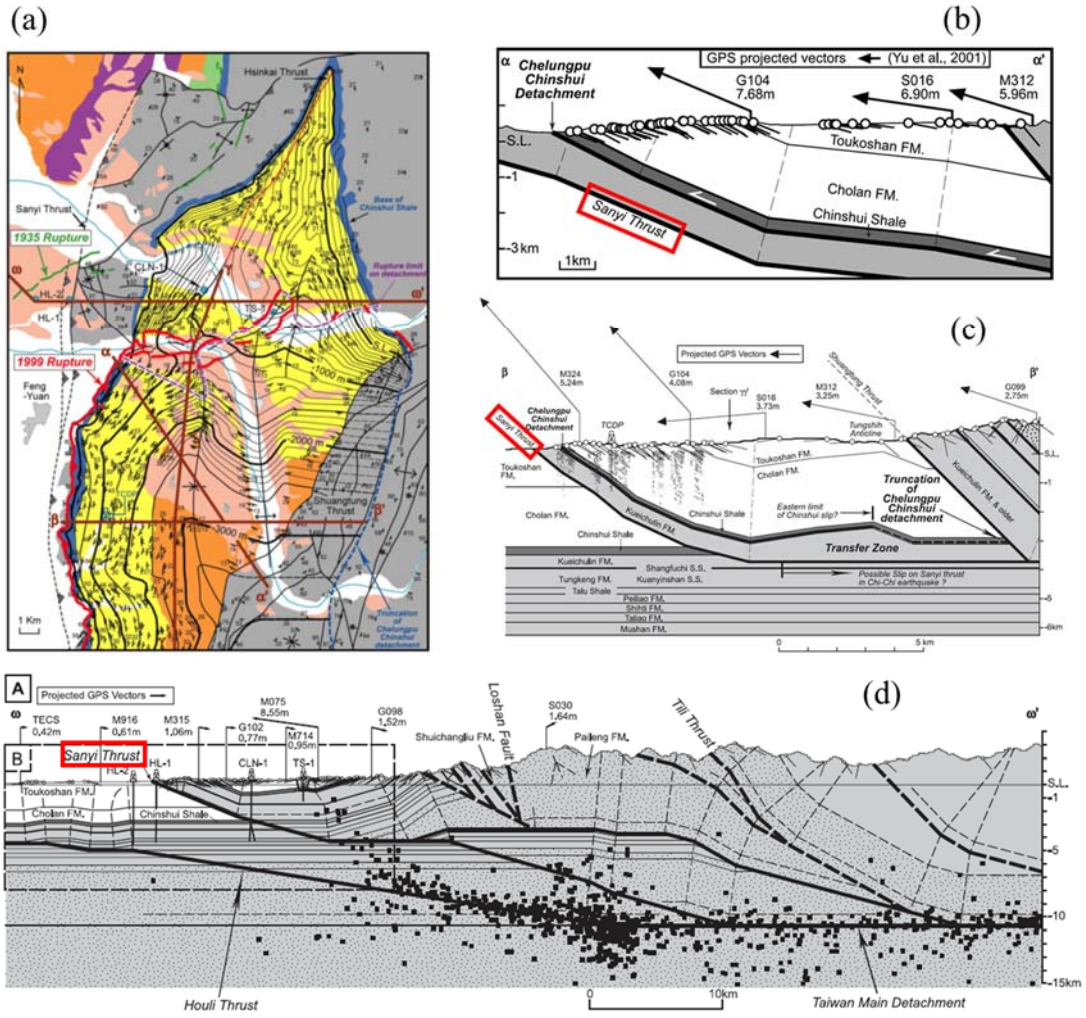


圖 3. 56：跨三義斷層之地質平衡剖面圖。(a)為車籠埔斷層北段附近區域地質圖，紅色線段為車籠埔斷層位置，褐色線段為地質構造剖面線位置。(b)為構造剖面 αα’，(c)為構造剖面 ββ’，(d)為構造剖面 ωω’與微震投影。

Figure 3. 56: Balanced cross sections through the Sanyi fault. (a) Geological map around the northern area of the Chelungpu fault. The red line is the location of the Chelungpu fault, and the brown line is the location of the cross sections. (b) Balanced cross section αα'. (c) Balanced cross section ββ'. (d) Balanced cross section ωω' and seismicity.

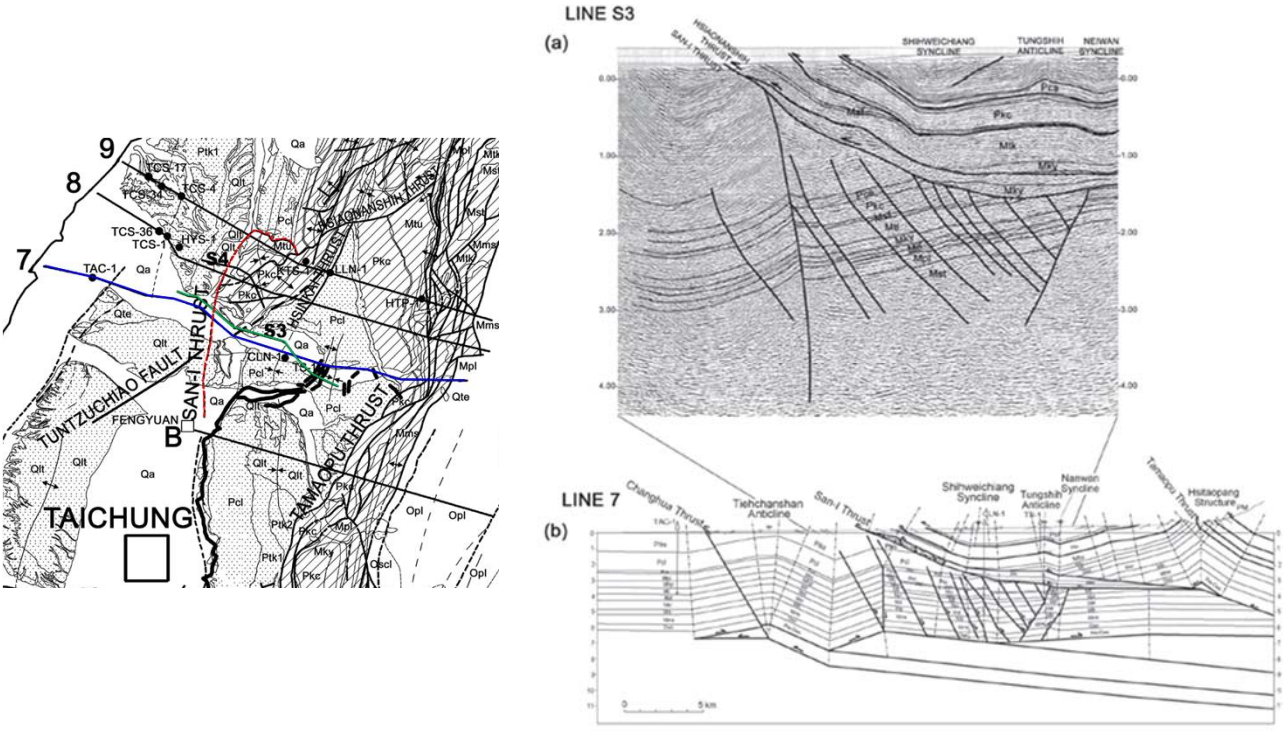


圖 3. 57：跨三義斷層之震測及地質平衡剖面圖。左圖為三義斷層附近區域地質圖，紅色線段為三義斷層位置，綠色線段為震測線 S3 位置，藍色線段為平衡剖面線 Line 7 位置。右圖上為震測剖面 S3，右圖下為平衡剖面 Line 7（Yang et al., 2007）。

Figure 3. 57: Seismic profile and geological balanced profile across the Sanyi fault. The left figure is the geological map around the Sanyi fault. The red line is the Sanyi fault, and the green line is the location of the seismic profile S3, and the blue line is the location of the balanced profile line 7. The top right figure is the seismic section S3, and the bottom right figure is the balanced profile line 7.

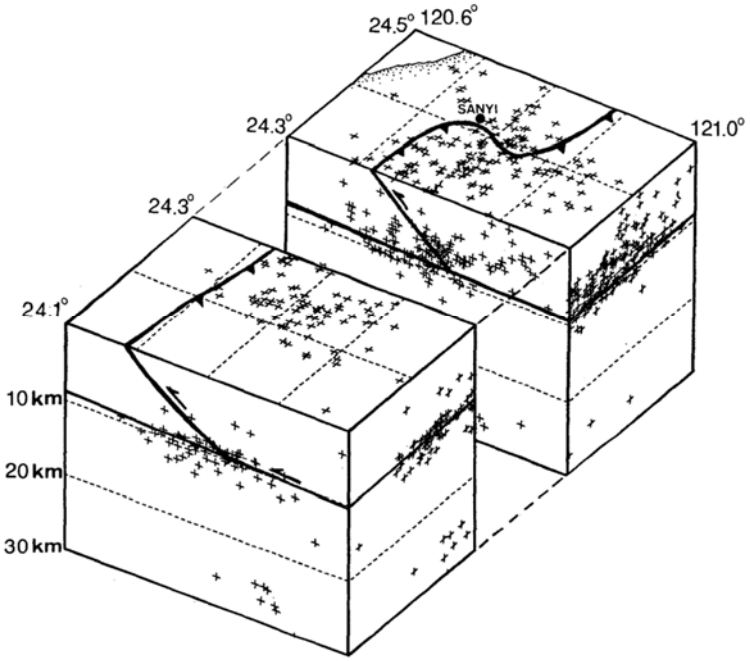


圖 3. 58：三義—卓蘭地區微震震央分布及投影情況（Lin et al., 1989）。

Figure 3. 58: Seismicity distribution and projection around the Sanyi- Cholan area.

表 3. 13：三義斷層幾何相關文獻彙整

Table 3. 13: References related to the geometry of the Sanyi fault.

作者	方法	傾角	深度
邱華燈（1962）	震測剖面	約 20 度	
Lin et al.（1989）	震波資料逆推地下速度構造		9 公里
Hung and Wiltschko（1993）	中油鑽井、大範圍反射震測資料、平衡剖面	約 20 度，沿東坑層底部逆衝	4.5~9 公里
Yu et al.（2005）	地質剖面及微震投影	αα'剖面約 25 度 ββ'剖面約 30 度 ωω'剖面約 15 度	滑脫面約 10 公里
Yang et al.（2007）	震測及平衡剖面	約為 15 度	5 公里以上

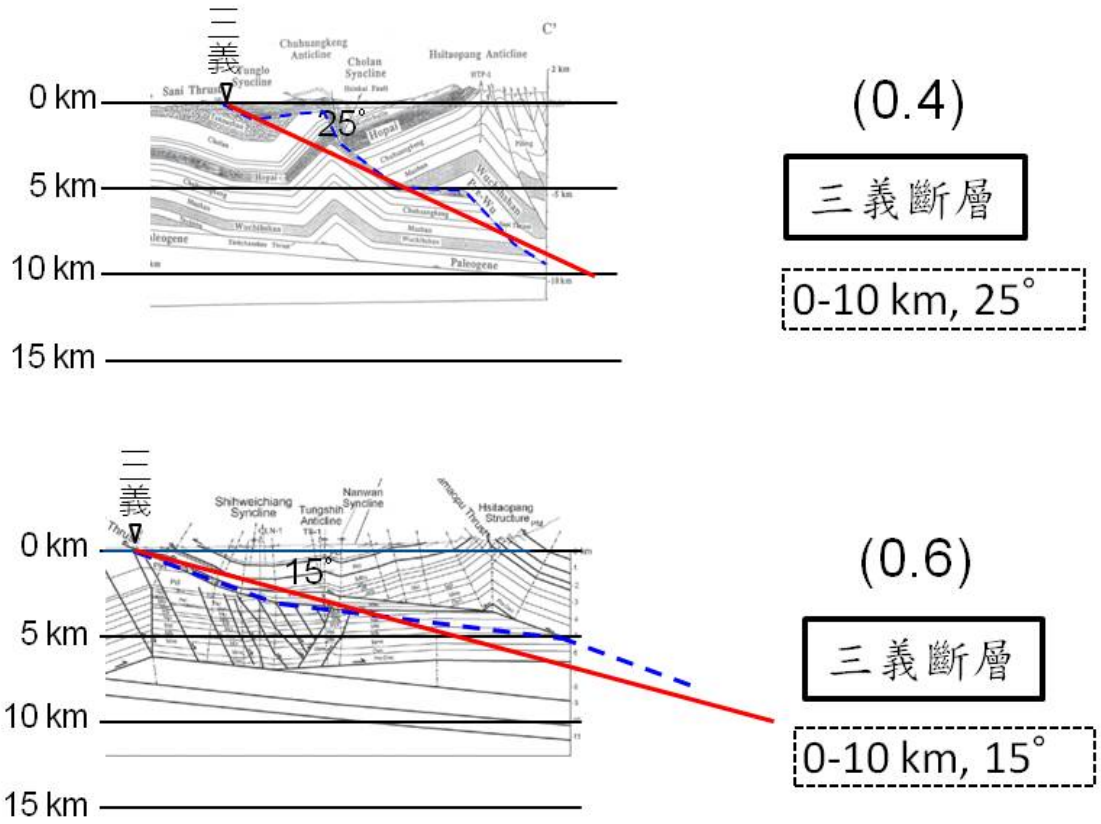


圖 3. 59：三義斷層北段（車籠埔斷層以北）之幾何形貌設定中興社（2020）。藍線為三義斷層於地質剖面中之幾何形貌，紅線為中興社（2020）設定之幾何形貌。

Figure 3. 59: Sinotech (2020) Geometry models of the northern segment (north of the Chelungpu fault) of the Sanyi fault. The blue dashed line is the geometry of Sanyi fault in the balanced cross section, and the red line is the simplified geometry of Sanyi fault from Sinotech (2020).

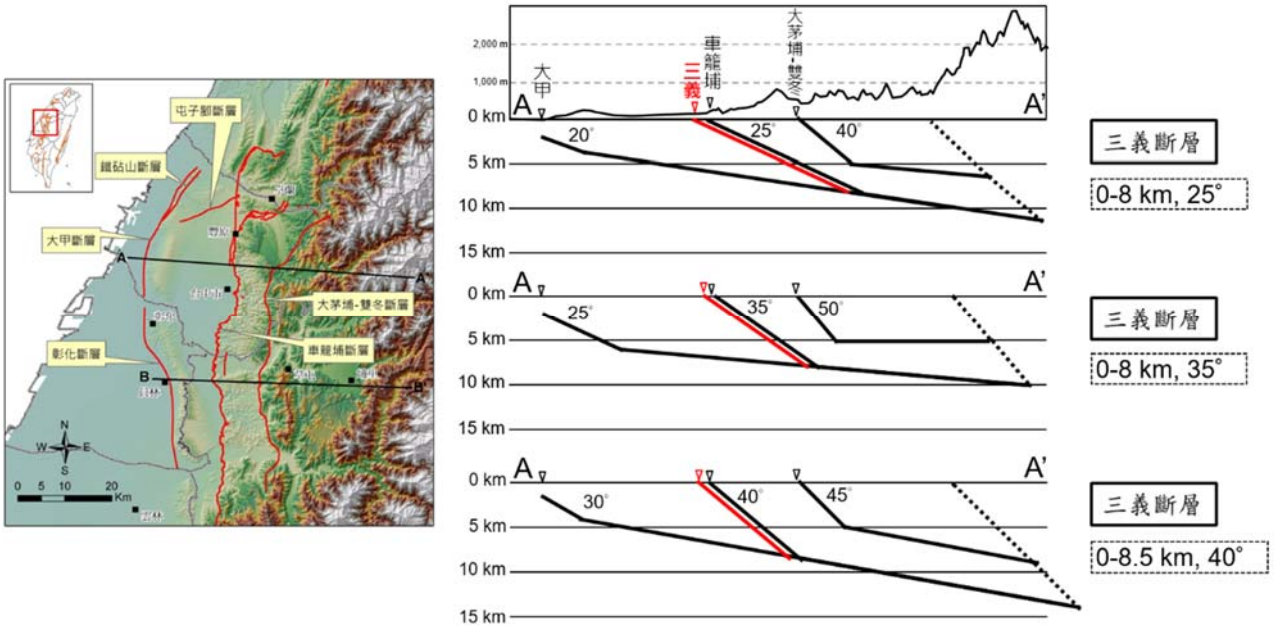


圖 3. 60：三義斷層南段（車籠埔斷層以南）之幾何形貌設定（中興社，2020）。

Figure 3. 60: Geometry models of the southern segment (south of the Chelungpu fault) of the Sanyi fault from Sinotech (2020).

3-1-3-5 屯子腳斷層

根據經濟部地質調查及礦業管理中心（林啟文，2021）最新發布之斷層線性，屯子腳斷層長度約 14 公里，為右移斷層，上次活動時間為 1935 年。

屯子腳斷層幾何相關文獻蒐集如下：

董倫道等（2005）的淺層震測結果顯示在測線 05P-TTC-HL02、05P-TTC-HL04、05P-TTC-HL05 中斷層面呈高角度南傾，具有開花狀構造的特徵（圖 3.61）。李奕亨（2009）跨屯子腳斷層的震測剖面 Line A_tz 及 Line D_tz 中顯示為花狀構造，花狀構造附近明顯受到大地應力向上拱起，形成變形中心（圖 3.62）。吳逸民等（2007）蒐集 1991 年至 2005 年中央氣象署地震資料，進行重定位，解算 Vp 速度層析影像。屯子腳斷層於 1991-2005 年間雖無地震活動，但 Vp 速度及 Vp/Vs 比值之變化帶與斷層位態相符，顯示此處可能是岩性變化的交界帶。根據地震及 Vp/Vs 比值分布之分析結果推測苗栗-台中地區之下存在基底滑脫構造，深度約在 8-10 公里（圖 3.63）。以上文獻彙整於表 3.14。

綜合以上文獻，屯子腳斷層為高角度斷層，淺部具有花狀構造。根據中興社（2020）專家討論及邏輯樹設定，屯子腳斷層傾角為 65~85 度，65 度權重 0.3，75 度權重 0.4，85 度權重 0.3，本計畫取權重最高之傾角（75 度）進行後續分析與計算。屯子腳斷層為走向滑移斷層，深度應不受基底滑脫面影響，根據中興社（2020）邏輯樹設定，屯子腳斷層深度為 11~15 公里，11 公里權重 0.3，13 公里權重 0.4，15 公里權重 0.3。本計畫取權重最高之深度（13 公里）進行後續分析與計算。

屯子腳斷層長期滑移速率相關文獻如下：

Shyu et al.（2020）由階地崖高推估斷層垂直滑移量及年代，並假設垂直滑移分量僅佔走向滑移分量的五分之一，估算走向滑移速率約為 0.2~1.7 mm/yr。

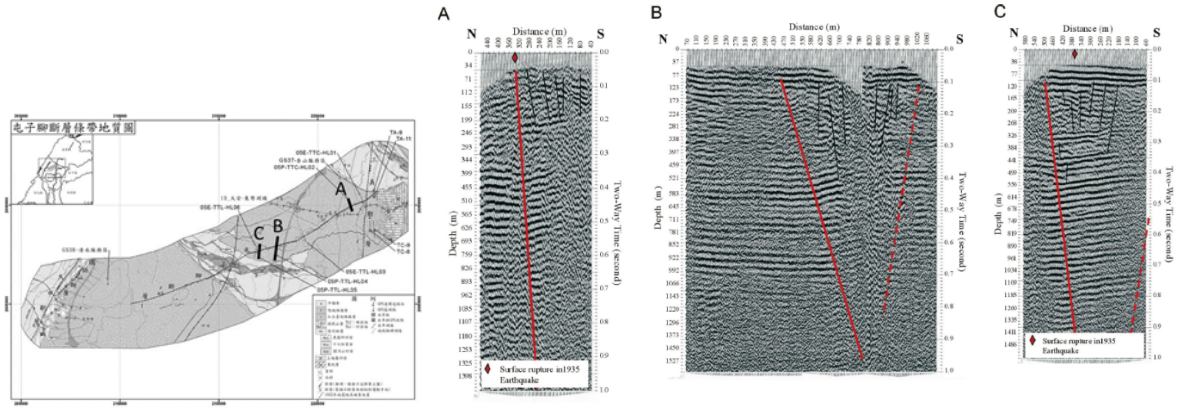


圖 3. 61：屯子腳斷層反射震測探勘。A：測線 05P-TTC-HL02 震測剖面，B：測線 05P-TTC-HL04 震測剖面，C：測線 05P-TTC-HL05 震測剖面，剖面位置如左圖所示（董倫道等，2005）。

Figure 3. 61: Seismic profile of Tuntzuchiao Fault. A: Seismic profile of survey line 05P-TTC-HL02, B: Seismic profile of survey line 05P-TTC-HL04, C: Seismic profile of survey line 05P-TTC-HL05, the location of the profile is shown in the left figure.

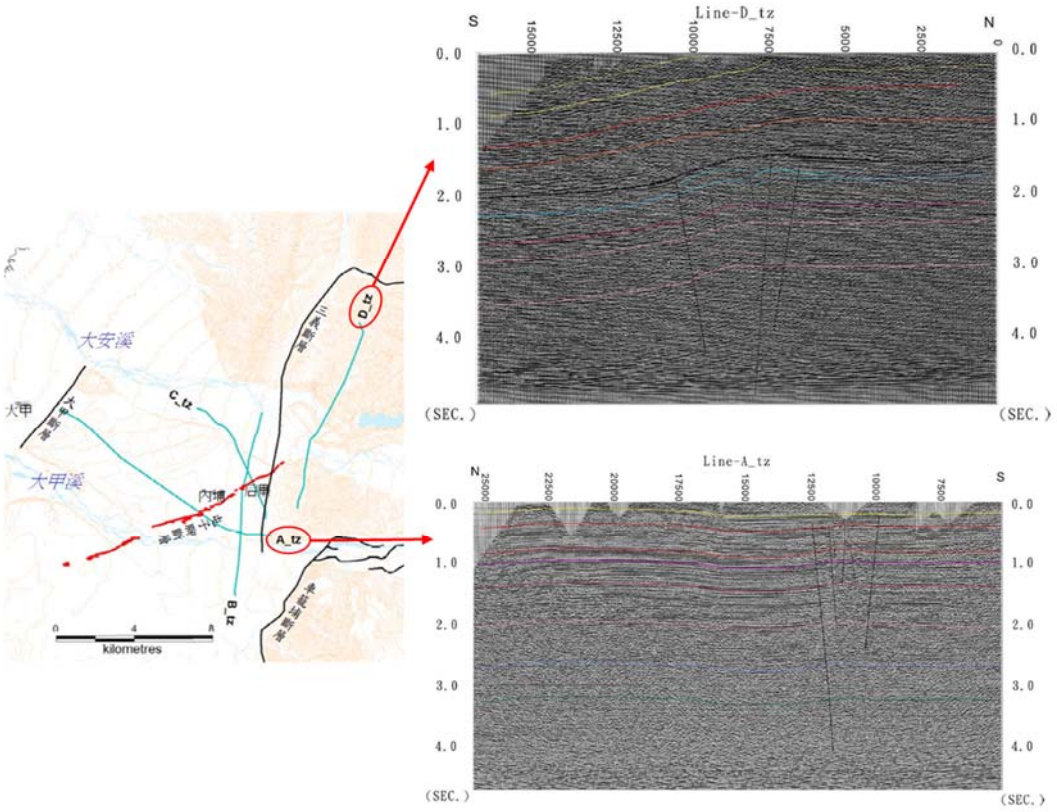


圖 3. 62：屯子腳斷層震測剖面。（a）跨越屯子腳斷層相關震測線位置圖（b）測線 A_tz 震測剖面構造解釋圖（c）測線 D_tz 震測剖面構造解釋圖，黑色虛線解釋為三義斷層（李奕亨，2009）。

Figure 3. 62: (a) Map showing the location of seismic profiles across the Tuntzuchiao fault (b) seismic profile A_tz with interpretation (c) seismic profile D_tz with interpretation, the black dotted line is interpreted as the Sanyi fault.

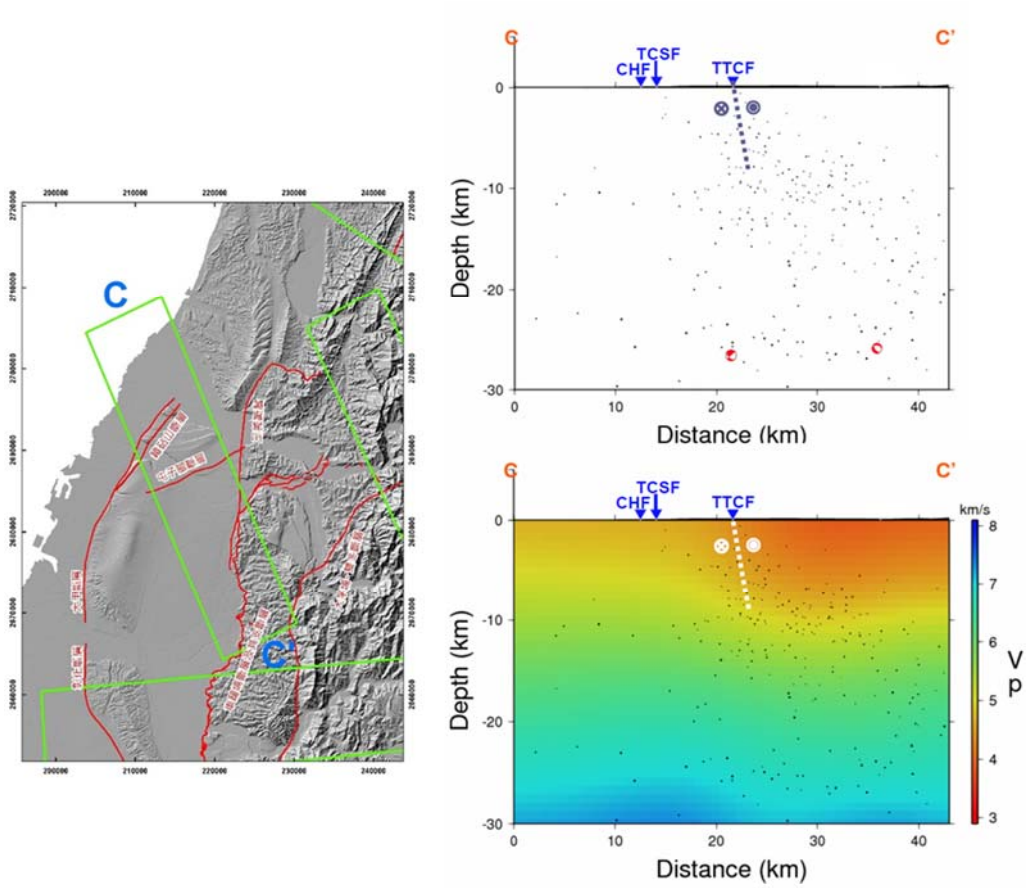


圖 3. 63：苗栗-台中地區活動斷層、地震剖面與地震與震源機制、Vp 速度層析影像。左圖為苗栗-台中地區活動斷層及地震剖面分布，右圖為 C-C'剖面（上）地震與震源機制分布圖，右圖（下）Vp 速度層析影像，左圖紅色為此區之活動斷層位置、綠色則為各剖面投影範圍（吳逸民等，2007）。

Figure 3. 63: The left figure shows the distribution of active faults and the location of seismicity profile in the Miaoli-Taichung area. The top right figure shows the seismicity profile and focal mechanisms of C-C', and the bottom right figure shows the Vp tomography.

表 3. 14：屯子腳斷層幾何相關文獻

Table 3. 14: References related to the geometry of the Tuntzuchiao fault.

參考文獻	方法	傾角	深度
董倫道等（2005）	震測剖面、地電剖面	淺部呈壓縮型花狀構造	
李奕亨（2009）	震測剖面	淺部呈開花狀構造	
吳逸民等（2007）	地震及 Vp/Vs 比值分布		基底滑脫構造深度約 8-10 公里

第四章、北部地區斷層模型建置

4-1 BLOCKS 斷層模型

4-1-1 斷層模型原理

本章節使用之斷層模型為 Meade 與 Loveless 所開發的 Block Model（Meade and Hager，2009），其主要計算原理為將區域視為各斷層作為邊界所劃分而成的塊體，並以地表速度反推斷層面滑移速度，再以求得之斷層滑移速度推求地表變動速度，則可與真實地表變動速度相互比較驗證模型，又 Block Motion 只考慮塊體水平旋轉，故模擬中並不考慮傾向滑移資料。相對於同以塊體為基礎的錯位模型（Dislocation Model），Block Model 因使用較簡易之三維斷層幾何資料，故解算較為快速；本章節以下簡稱此一斷層模擬為 BLOCKS。

4-1-2 斷層幾何參數設定

本期計畫重點斷層為山腳斷層與新城斷層，本區中另計有湖口斷層、新竹斷層、獅潭斷層、三義斷層與屯子腳斷層。而依照團隊成員共同整理與分析後，設定重點斷層幾何型態為-山腳斷層為正斷層，東傾 63˚鎖定深度 8 km，新城斷層為東傾 35˚鎖定深度 4 km 逆斷層滑移型態，而各斷層滑移型態與初始滑移速率如圖 4. 1。因斷層以塊體邊界描述，故本次模擬將北台灣分為十個塊體，重點兩斷層與另五條斷層皆位於其中塊體邊界。而為表現穩定的地表震間運動，本次使用 2016-2022 年全台共 1269 站 GNSS 連續站與移動站速度場水平速度場。同時因前期計畫經驗顯示，提供斷層滑移速率能有效約制斷層模擬，故引用徐浩德教授（Shyu et al., 2016）發表之地質速率作為約制之初始滑移速率，初步依等腰三角形之基礎幾何分配至傾向滑移速率與走向滑移速率（圖 4. 1）。

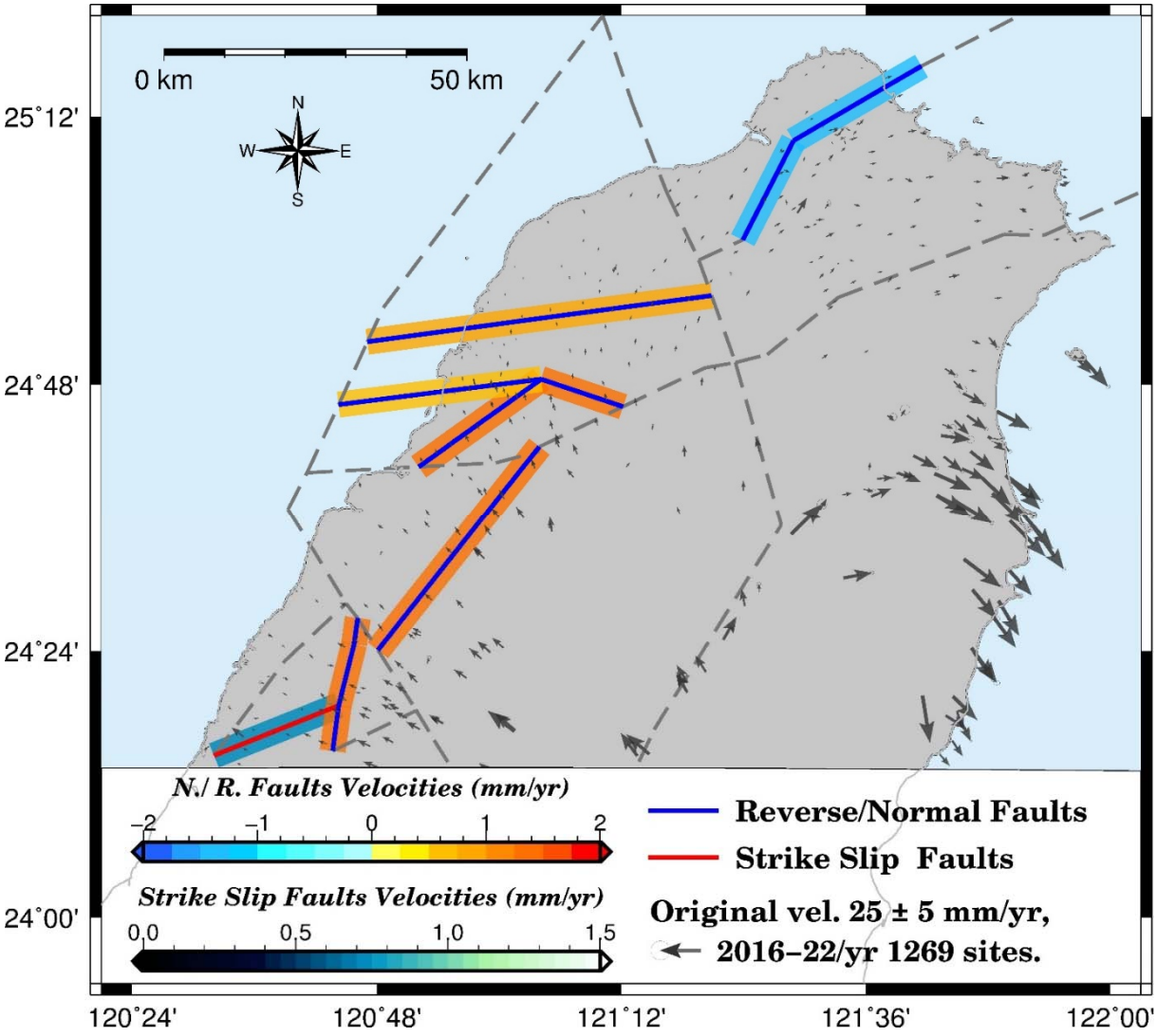


圖 4. 1：臺灣北部 2 條重點斷層與鄰近 5 條斷層之 BLOCK model 模擬初始值與 2016-2022 年相應使用之 GNSS 測站。紅色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階，灰色箭頭速度場為台灣鄰近 1269 站 GNSS 測站水平速度場。

Figure 4. 1: The input values of the BLOCK model with the 1269 GNSS velocity field (the deep gray arrows) from 2016-2022. The red lines indicate strike-slip faults and blue lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars down to the figure.

4-1-3 斷層模擬結果

本期斷層模擬結果中，兩重點斷層-山腳斷層、新城斷層與北部另五斷層由其各分小分段之平均滑移速率成果如表4. 1。走向滑移速率中，正值顯示為左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表示為逆斷層，負值表正斷層。

山腳斷層鎖定深度為8.0km 東傾63.0˚，地質滑移速率約制初始值為-1.85±0.76 mm/yr，分為南北兩段進行模擬。兩分段之傾向滑移分量皆呈-1.3 mm/yr（圖4. 2）；走向滑移分量上，北段表現左移量值約1.1 mm/yr，南段表現左移量值約1.4 mm/yr（圖4. 3），顯示其運動模式為左移

帶伸張分量。而斷層總滑動量值為1.81±0.15 mm/yr（圖4. 4、表4. 1）。

新城斷層鎖定深度為4.0km 東傾25.0˚，地質滑移速率約制初始值為1.8±1.2 mm/yr（表4. 1），分為東西兩段進行模擬。東段傾向滑移分量為1.3 mm/yr，西段傾向滑移分量為1.6 mm/yr（圖4. 2）；走向滑移分量上，東段滑移分量為1.4 mm/yr，西段滑移分量為0.9 mm/yr（圖4. 3）。各段落運動模式皆呈逆衝帶左移分量，總滑移運動量為1.87±0.05 mm/yr（圖4. 4、表4. 1）。

另湖口斷層、新竹斷層、獅潭斷層與屯子腳斷層在 BLOCKS 的描述中分別用獨立線段表示，故而初始解算成果並無多次誤差能統計。又其中屯子腳斷層為右移運動斷層，模擬成果同顯示為右移運動，然與約制所設定之逆斷層運動不同處為，傾向滑移運動分量模擬成果為略帶正斷層運動的-0.2 mm/yr。而其他斷層與分為三小段落的三義斷層皆屬逆斷層運動分量為主(Shyu et al., 2016)，然模擬成果中，湖口與三義斷層左移運動量值略大於逆衝分量，但兩方向運動量差值皆小於1.0 mm/yr（表4. 1）。

表 4. 1：使用全台 1269 站 GNSS 水平速度場模擬之北臺灣 7 條斷層滑移速率。走向滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值代表逆斷層，負值代表正斷層。

Table 4. 1: The result values of the 7 faults in northern Taiwan modeled with 1269 sites GNSS horizontal velocity field. The positive strike-slip rates indicate left-lateral moving and the negative values indicate right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數 / 斷層名稱	2023 BLOCKS 臺灣北部 7 條斷層滑移速率模擬成果		
	平均走滑速率 (s.s. mm/yr)	平均傾向滑移速率 (d.s. mm/yr)	總滑移速率 (mm/yr)
山腳斷層	1.3±0.2	-1.3±0.0	1.8±0.2
新城斷層	1.2±0.4	1.5±0.21	1.9±0.1
湖口斷層	1.0±0.0	0.5±0.0	1.1±0.0
新竹斷層	0.5±0.0	0.5±0.0	0.7±0.0
獅潭斷層	1.4±0.0	2.5±0.0	2.9±0.0
三義斷層	1.5±0.1	1.1±0.25	1.9±0.1
屯子腳斷層	-0.5±0.0	-0.2±0.0	0.5±0.0

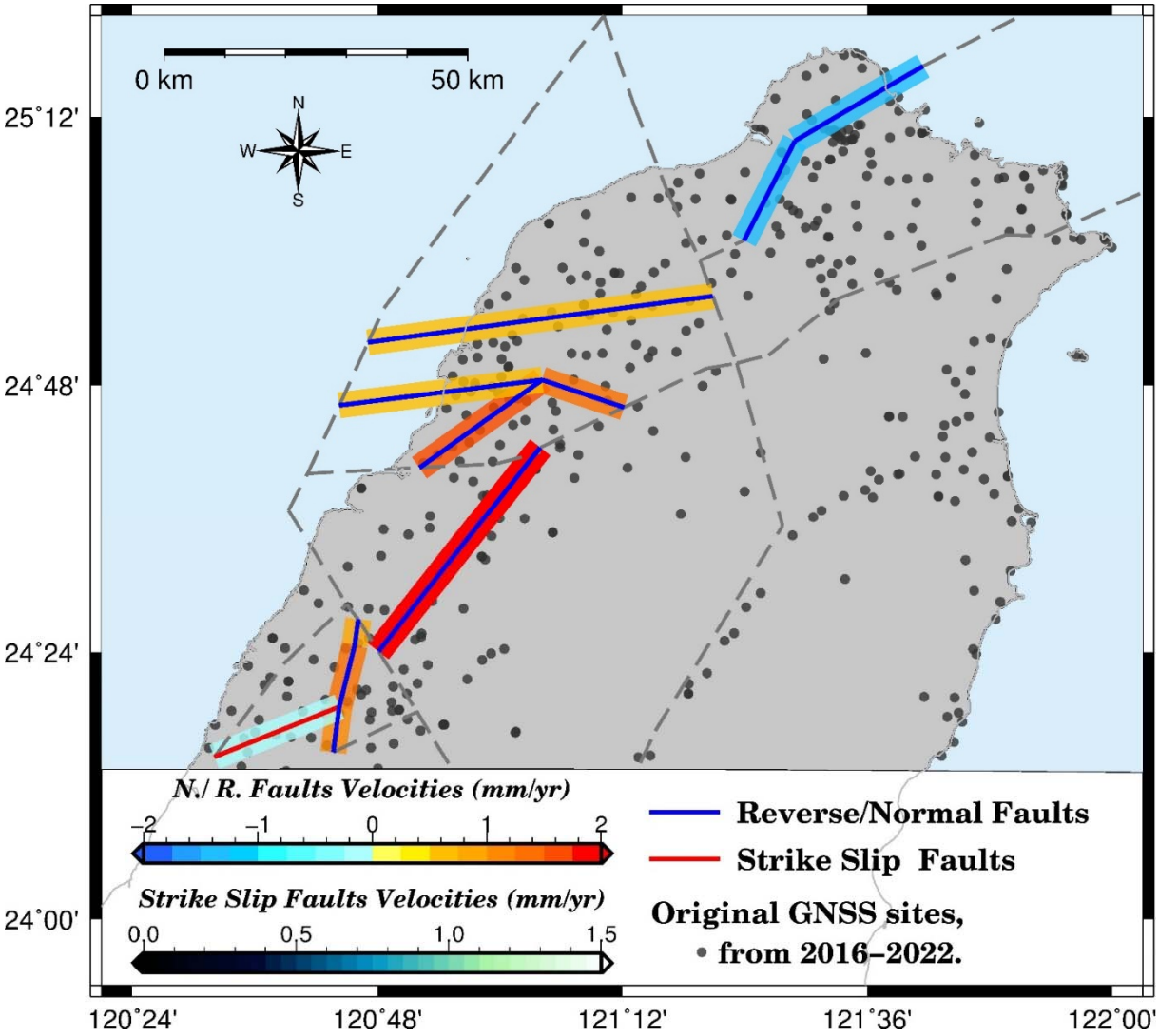


圖 4. 2：2023 年北臺灣 7 條斷層傾向滑移速率模擬成果

Figure 4. 2: The modeled dip-slip rates of each segment modeled with 1269 GNSS sites.

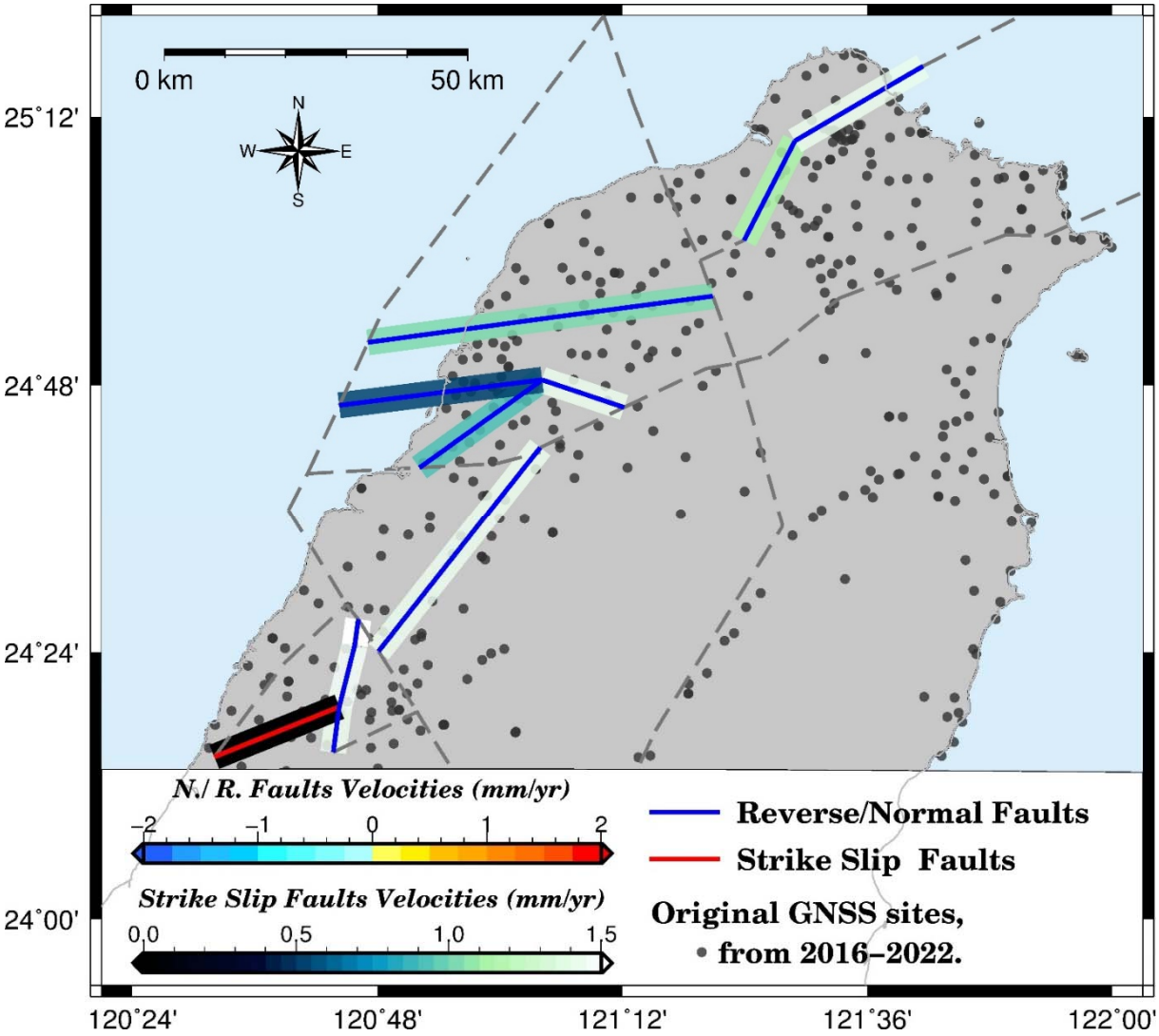


圖 4. 3：2023 年北臺灣 7 條斷層走向滑移速率模擬成果

Figure 4. 3: The modeled strike-slip rates of each segment modeled with 1269 GNSS sites.

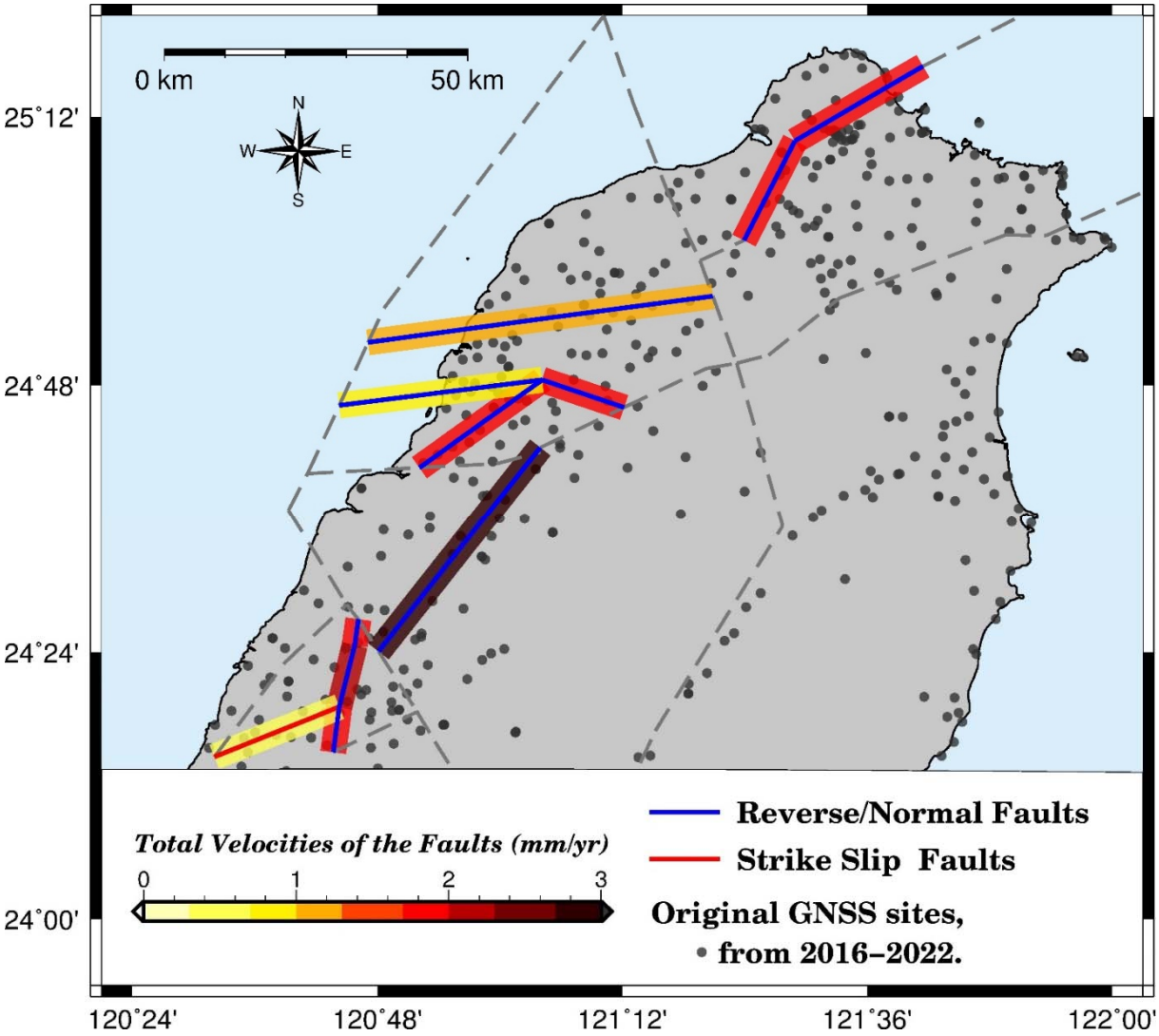


圖 4. 4：2023 年北臺灣 7 條斷層模擬成果之總滑移速率

Figure 4. 4: The total slip rates derived from vector value of each segment.

我們可以藉由地表 GNSS 測站正演之水平速度場來探討模型所模擬之斷層滑移是否合理。圖 4. 5 為此次北台灣二條重點斷層範圍，地表速度場模擬成果，整體模擬之速度場相較原始速度場之 RMS 值為 20.685。整體而言，於塊體涵蓋範圍中，水平速度場正演結果與原始速度場相近，明顯可見較大之速度與方向落差位於圖中東部宜蘭區域，是位於塊體未涵蓋範圍。

以趨勢而言，鄰近塊體邊界與斷層處，整體量值可見相較於原始量測值較小，顯示模擬的成果較為保守，而位移場移動方向與實際量測值相符，亦代表目前斷層的設置與幾何提供了合理的推估基礎。

此次北部兩重點斷層模擬成果中，山腳斷層南段較北段量值略大（圖 4. 4），新城斷層之東段量值略大於西段，而各段落與初始地質滑移速率約制皆小於 0.5 mm/yr。綜觀可見滑移速率初始值提供了約制效果；而距塊體邊界較遠處有較差的模擬成果，顯見塊體設置、斷層幾何對

於斷層滑移速率模擬有明顯的影響。

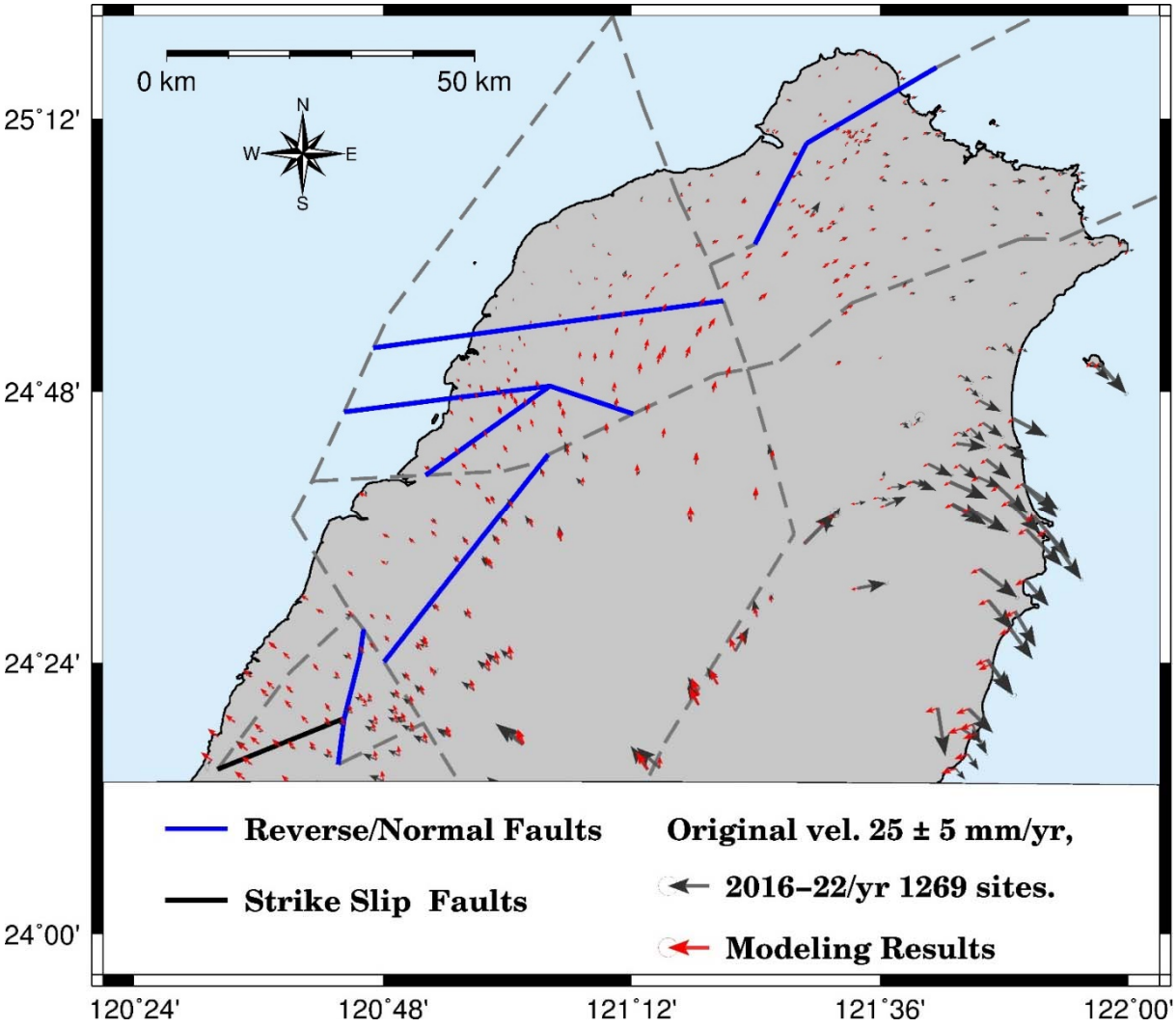


圖 4. 5：北臺灣 7 條斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值為 20.685。紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，黑色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 4. 5: The results of GNSS velocity field modeled with 1269 GNSS sites velocity field which the standard deviation is 20.685. The red arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

4-2 TDEFNODE 斷層模型

4-2-1 斷層模型原理

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

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

4-2-2 斷層模擬結果

本期研究的重點斷層為山腳斷層（0-8 km：63°；8-11 km：25°）與新城斷層（35°），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 4. 3）。

由於北台灣 2016-2022 間的 GNSS 速度場速率較小，經多次迭代後，求得各塊體轉動軸多位於塊體內或是鄰近處，且轉動速率亦小（表 4. 2），較大的轉動速率出現在東側的宜蘭塊體（ILAN）與靠近台灣中部的 SYSG 塊體，這也與速度場的趨勢一致。塊體內部應變率也有相似的趨勢，但是在本研著重的山腳與新城斷層處，則以新城斷層上盤的 ESHC 塊體有較大的伸

張應變率，下盤 TAOC 與 HSIN 塊體則為壓縮應變。 由速度場的擬合程度言之，水平向速度場除宜蘭塊體（ILAN）外，本研究的模型均成功模擬，WRMS 為 1.09（圖 4. 10）；但垂直向速度場（圖 4. 12）則是塊體模型的弱項，是塊體模型難以模擬的類型，WRMS 為 5.95。

斷層面的鎖定與滑移虧損速率（圖 4. 9），則以三義斷層有最大滑移虧損率（7.33 mm/yr；表 4. 2），在山腳與新城斷層，則是 0.57 與 3.03 mm/yr，且大多斷層都是淺部鎖定，但新城斷層則由淺至深幾乎完全鎖定。

與地質滑移速率比較（表 4. 3），除三義斷層的測地長期速率遠高於地質速率的最大值，其餘皆相當接近，差異約在 2 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，山腳斷層甚至低於地質速率最小值。這意謂北部斷層都以很緩慢的速率在累積地震潛勢，也隱含地震週期較長的意義。

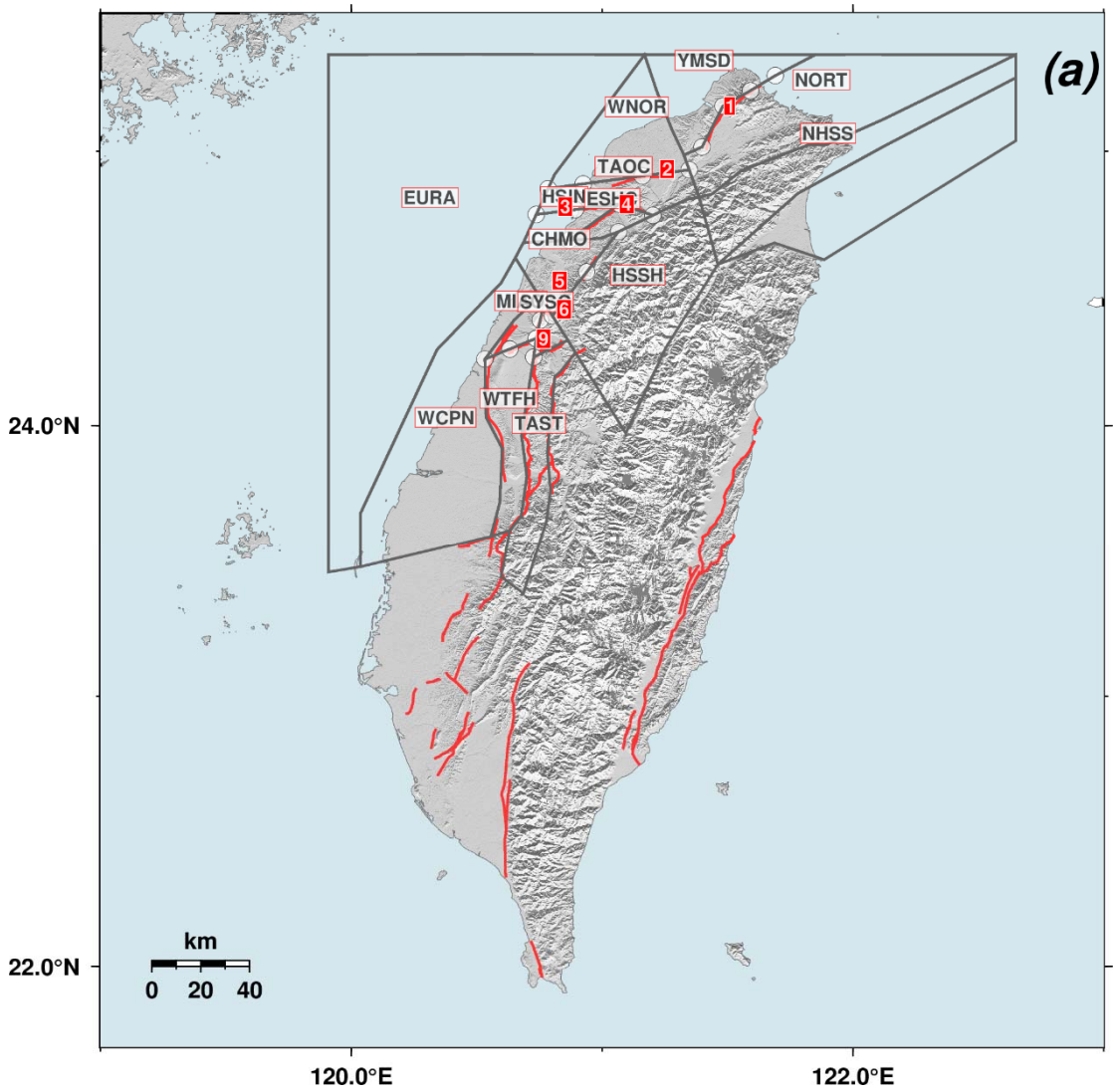


圖 4. 6：臺灣北部塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，圓圈代表斷層節點位置。紅色實線表示地礦中心公布之活斷層。紅色數字為 2021 年地礦中心公布之活動斷層編號，分別為： 1.山腳斷層；2.湖口斷層；3.新竹斷層；4.新城斷層；5.獅潭斷層；6.三義斷層；9.屯子腳斷層。

Figure 4. 6: 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: 1.Sanchiao Fault；2.Hukou Fault；3.Hsinchu Fault；4.Hsincheng Fault；5.Shihtan Fault；6.Sanyi Fault；9.Tuntzuchiao Fault.

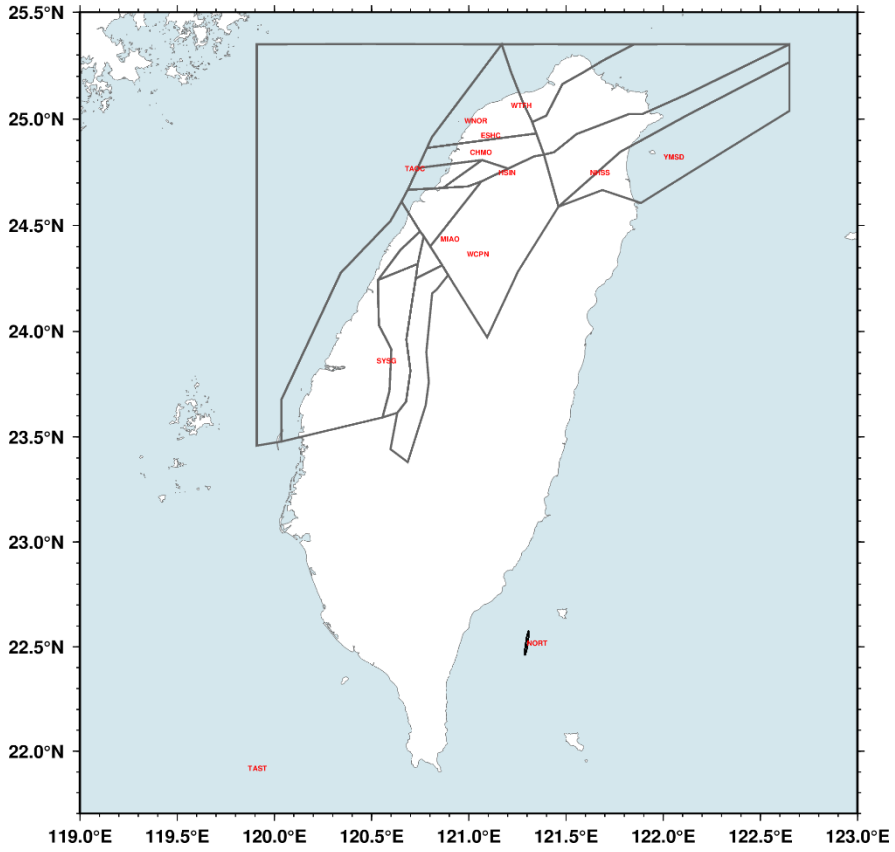


圖 4. 7：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置，紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 4. 6）。

Figure 4. 7: The location of the rotation poles for each block were marked with block names (red characters).

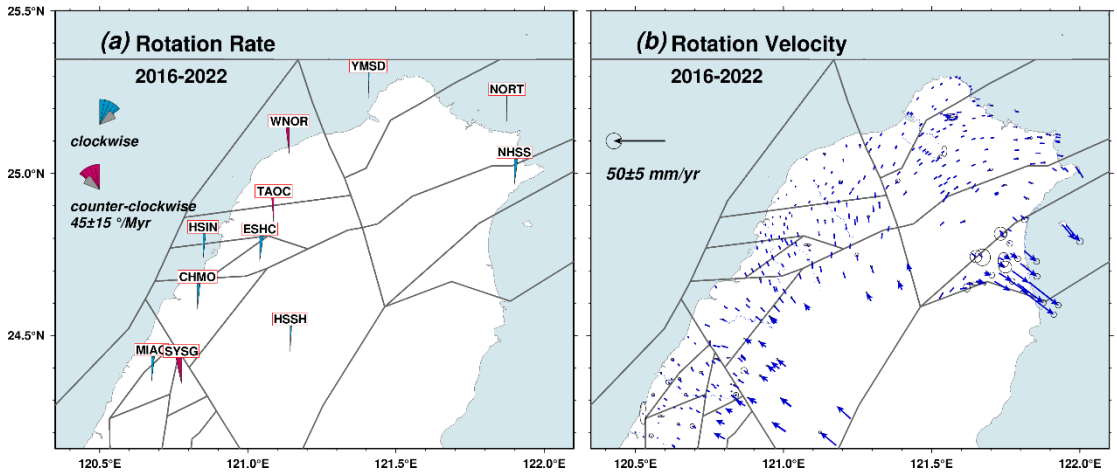


圖 4. 8：最佳塊體旋轉模型的旋轉角速度與預測的速度場：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體之 Euler pole 為軸的旋轉角速度，由於各軸位置多分散於該塊體外，此處將表示角速度之扇形繪製於各塊體中心。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 45±15°/My 的角速度。(b) 由塊體旋轉預測得到的地表各測站速度場。

Figure 4. 8: (a)The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (b) The velocity filed predicted only by block rotation.

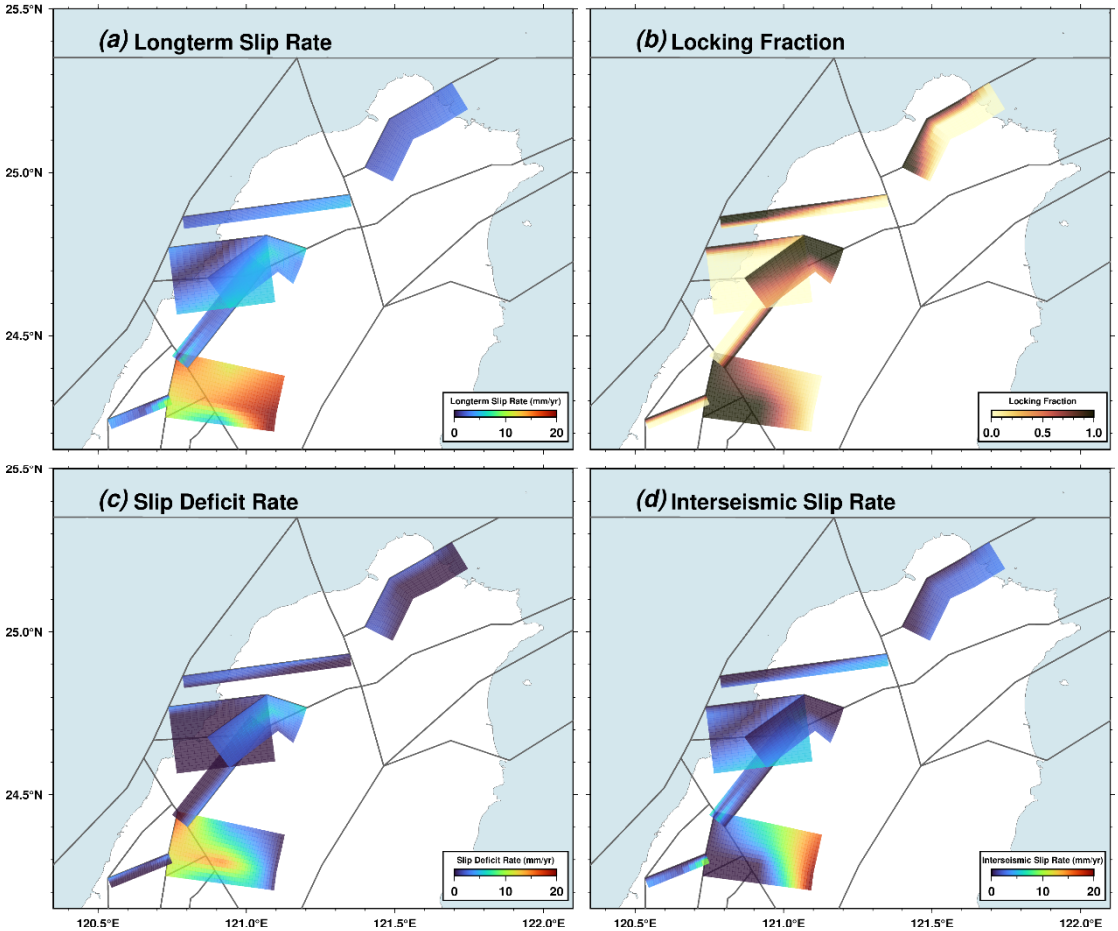


圖 4. 9：斷層長期滑移速率、鎖定係數、滑移虧損率與震間期滑移速率：(a) 推求的斷層長期滑移速率。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b) 各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的震間期滑移速率。

Figure 4. 9: (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.

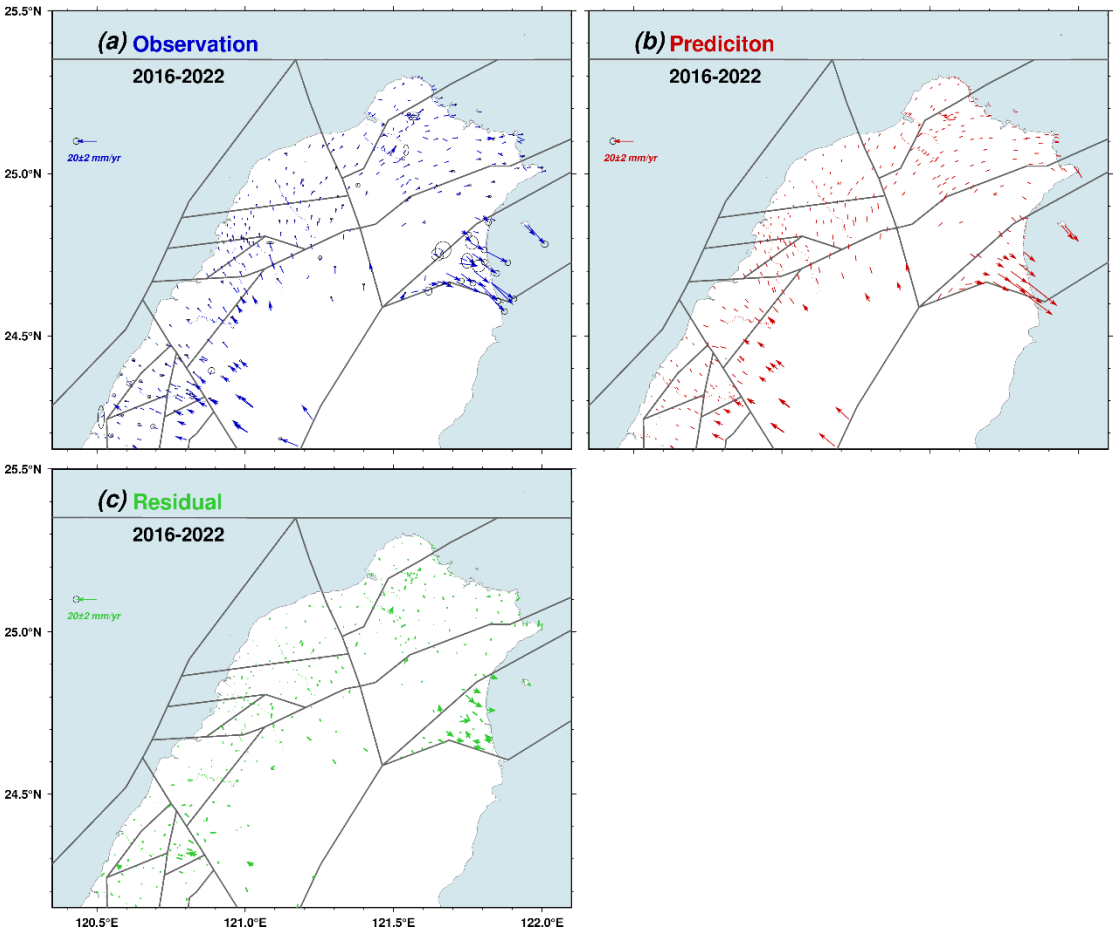


圖 4. 10：最佳塊體模型的預測水平速度場與殘差。(a) 模型使用的 2016-2022 年間，連續與移動站的 GNSS 水平速度場。(b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 水平速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 4. 10: 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.

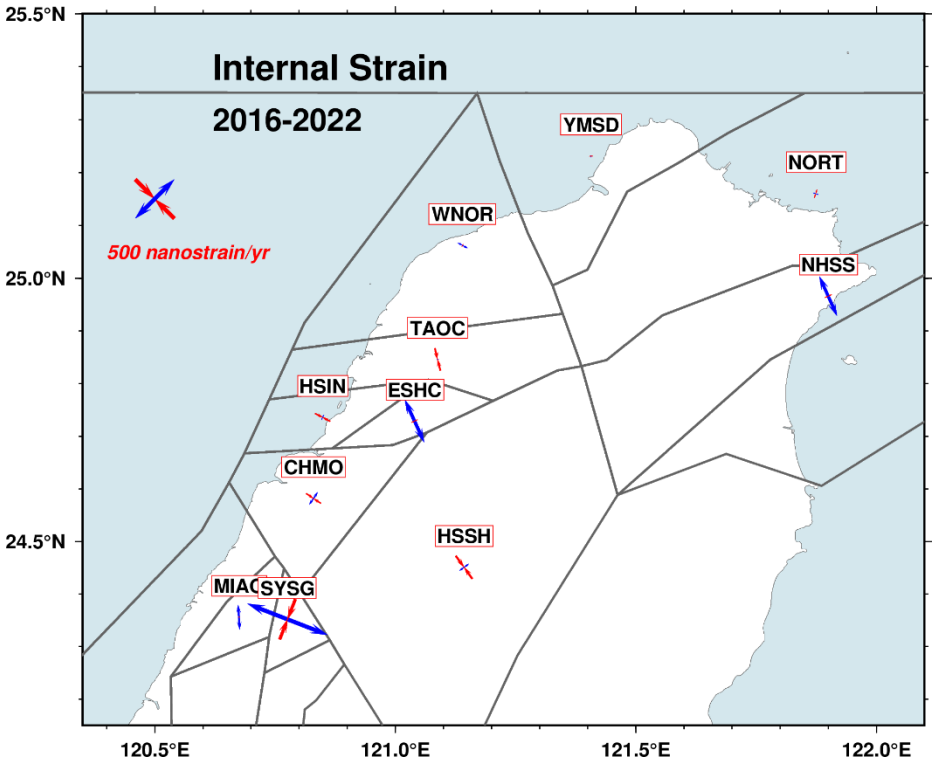


圖 4. 11：塊體內部應變，除塊體旋轉與斷層滑移虧損外，同步搜尋各塊體內部的均勻彈性應變速率，所得結果於各塊體內部以主應變率軸表示，紅色箭頭為壓縮應變率軸方向與大小，藍色箭頭為伸張應變率軸。

Figure 4. 11: Internal strain within each block. Red and blue arrows represent maximum and minimum principal strain rate.

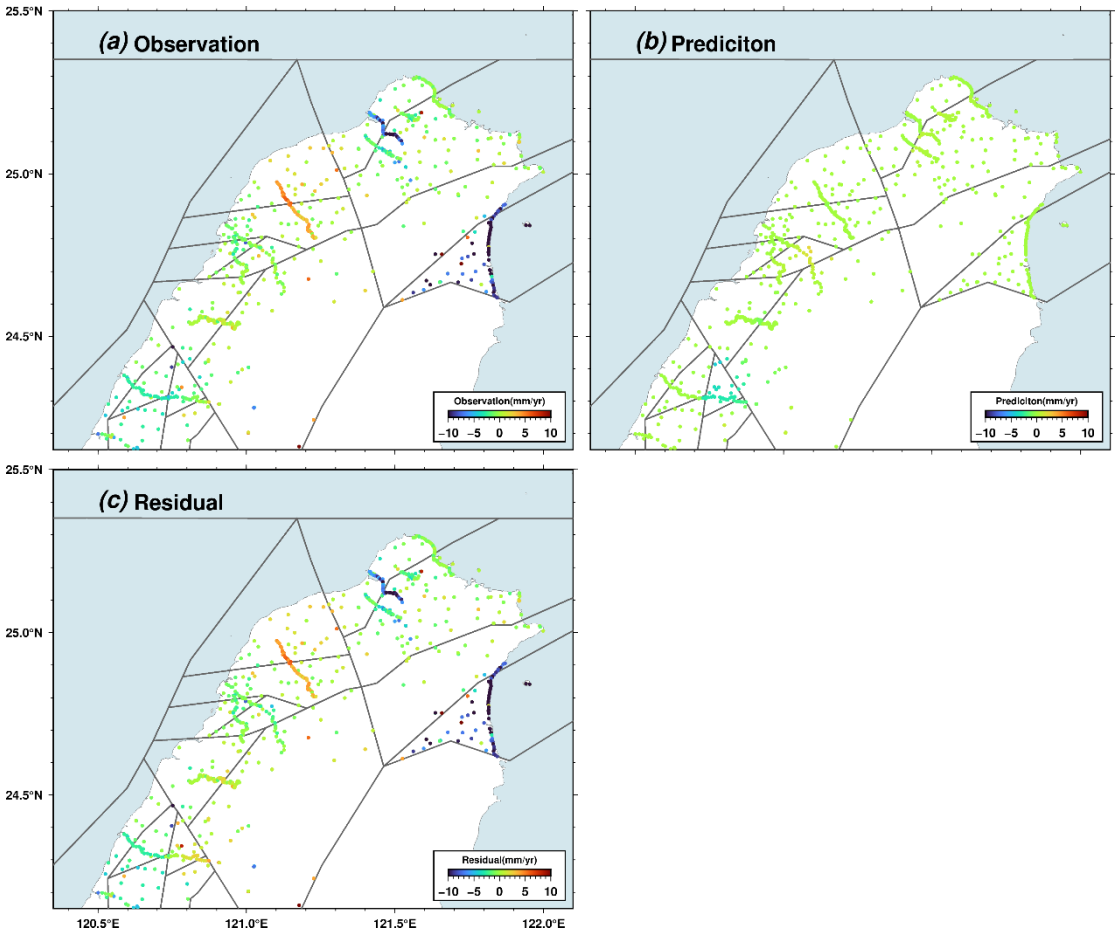


圖 4. 12：最佳塊體模型的預測垂直速度場與殘差。(a) 模型使用的 2016-2022 年間，連續與移動站的 GNSS 垂直速度場。(b) 塊體模型結合塊體旋轉與斷層滑移虧損預測的 GNSS 垂直速度場。(c) 兩者相減剩餘之殘差。

Figure 4. 12: 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 4. 2：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 4. 2: The location of rotation poles, the angular velocities, and the standard error of angular velocities of each block. Along with the maximum, minimum axis, and the azimuth of error ellipse for each pole.

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
WCPN	120.99	24.365	-1.38	0.01	35.69	0.00	0.00
WTFH	121.217	25.063	-2.51	0.02	26.86	0.01	0.00
MIAO	120.856	24.437	-7.01	0.14	45.35	0.01	0.00
CHMO	121.007	24.845	-6.40	0.11	30.71	0.01	0.00
HSSH	122.473	25.63	-3.64	0.02	44.52	0.01	0.00
TAST	119.865	21.919	3.85	0.02	19.64	0.02	0.00
SYSG	120.526	23.861	11.99	0.42	29.16	0.03	0.00
TAOC	120.671	24.767	4.71	0.15	96.56	0.02	0.00
WNOR	120.977	24.992	7.28	0.04	70.97	0.00	0.00
HSIN	121.154	24.75	-6.12	0.23	58.64	0.02	0.00
ESHC	121.062	24.924	-8.26	0.38	5.39	0.01	0.00
YMSD	122.001	24.822	-2.16	0.05	126.95	0.02	0.00
NORT	121.299	22.518	-0.75	0.03	8.48	0.12	0.01
NHSS	121.624	24.75	-7.81	0.05	35.01	0.00	0.00
ILAN	124.091	26.317	9.38	0.08	50.62	0.03	0.00

表 4. 3：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al., 2016）及平均滑移速率。

Table 4. 3: 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
山腳	1.1	2.94	2.22	0.53	0.57	0.86
湖口	0.36	3.65	3.10	1.27	0.93	1.14
新竹	0.18	1.57	3.46	1.95	0.57	1.18
新城	0.39	4.09	4.18	1.77	3.03	1.99
獅潭	0.61	5.32	4.22	2.37	1.38	2.20
三義	0.41	4.61	14.95	4.80	7.33	6.87
屯子腳	0.23	1.67	4.51	3.81	0.97	1.52

4-3 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model）

4-3-1 斷層模型原理與使用參數

本計畫使用 Johnson（2013）基於 Okada（1985，1992）彈性半無限空間斷層錯位模型所開發的基線應變模型。基本原理和塊體模型近乎一致，在塊體模型中假設震間速度場是由於塊體旋轉和斷層鎖定造成之地表速度梯度所組成。斷層錯位模型是基線應變模型的基礎是採用根據彈性錯動理論（Steketee, 1958）所建立之斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992），其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體（Poisson solid），即彈性模量（elastic modulus）（λ）等於剪切模量（shear modulus）（μ）之彈性體。沿著斷層（fault patch/fault element）的斷層滑移量Δu_j（ξ_1, ξ_2, ξ_3）會使均質均向的彈性體表面產生位移場Δu_i（x_1, x_2, x_3），其關係如式 4.1 所列。

$$\boldsymbol{u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\nu_k d\sum} \qquad \text{（式 4.1）}$$

其中，F 為施力點之作用力；δ_{jk}為克羅內克函數（Kronecker delta），當 j＝k 時，δjk＝1，否則為 0；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 4.1，亦即每一個斷層面單位（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單位產生對應之地表位移量；而任一地表單位之位移量，會等於所有斷層單位上滑移量作用在該地表單位位移量的總和。

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。其中，斷層位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度（圖 4. 13）。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 4.2）（Johnson，2013）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad （式 4.2）$$

其中 e 為伸長率；ΔL 為每年基線長度之變化量，亦即基線兩端測站速度差異向量在基線上之投影量；L_0 為基線原始長度。

就基線應變反演模型，本計畫給定斷層幾何參數，地表基線伸長率與斷層滑移虧損率間之格林函數 G 由 Okada（1985，1992）所提供之方程式求得，斷層滑移虧損速率矩陣為 s，地表基線伸長率矩陣為 d，則地表速度及斷層滑移虧損率間之關係式以 Gs＝d 來表示。本研究以地表速度場誤差之倒數為權重，利用最小二乘法計算式 3 之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

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

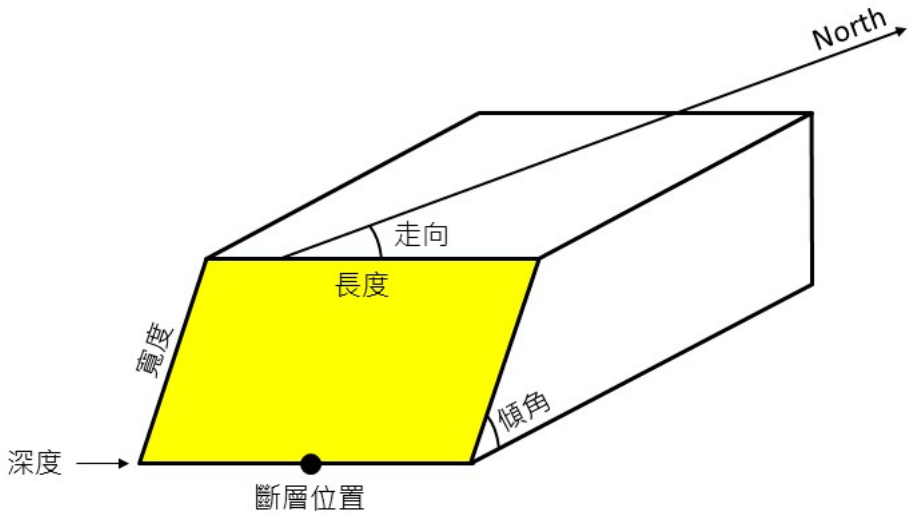


圖 4. 13：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

Figure 4. 13: 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 (°).

4-3-2 斷層模擬結果

本研究主要為臺灣北部地區，共有七條主要斷層，使用臺灣北部地區地礦中心觀測到的GNSS 及精密水準資料，進行該地區活動斷層及其潛在活動構造斷層模擬，推求此地區主要活動斷層滑移虧損速率分布。利用基線應變模型反演此水平速度分量，計算臺灣北部地區各斷層滑移虧損率平均值（表 4. 4）。本研究藉由基線應變反演模型之建立，避開傳統塊體模型難以估算塊體運動量的困難，直接求取可以用來評估地震潛勢之斷層滑移虧損速率。

本階段使用 2016-2022 時間段之的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 656.2 mm/yr（圖 4. 14）。最佳模型指出：

山腳斷層平均斷層滑移虧損速率為 3.9 ± 2.6 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–6 公里範圍內，有最大滑移虧損率 11.8 mm/yr 於此處累積（圖 4. 15）。山腳斷層測地矩虧損速率為 7.84 × 10^{23} dyne-cm/yr。

新城斷層平均斷層滑移虧損速率為 3.9 ± 1.9 mm/yr，主要集中於斷層深度約 0–4 公里範圍內，有最大滑移虧損率約 7.5 mm/yr 於此處累積（圖 4. 15）。新城斷層測地矩虧損速率為 7.18 × 10^{23} dyne-cm/yr。

表 4. 4：斷層平均滑移速率

Table 4. 4: 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）
山腳斷層	-2.2	2.7	3.9	2.6
湖口斷層	1.1	-0.7	1.5	1.0
新竹斷層	-3.9	-2.5	4.9	2.9
新城斷層	3.0	-2.3	3.9	1.9
獅潭斷層	-0.3	-0.6	0.9	0.5
三義斷層	7.0	-13.2	15.8	6.9
屯子腳斷層	2.6	1.3	4.2	1.6

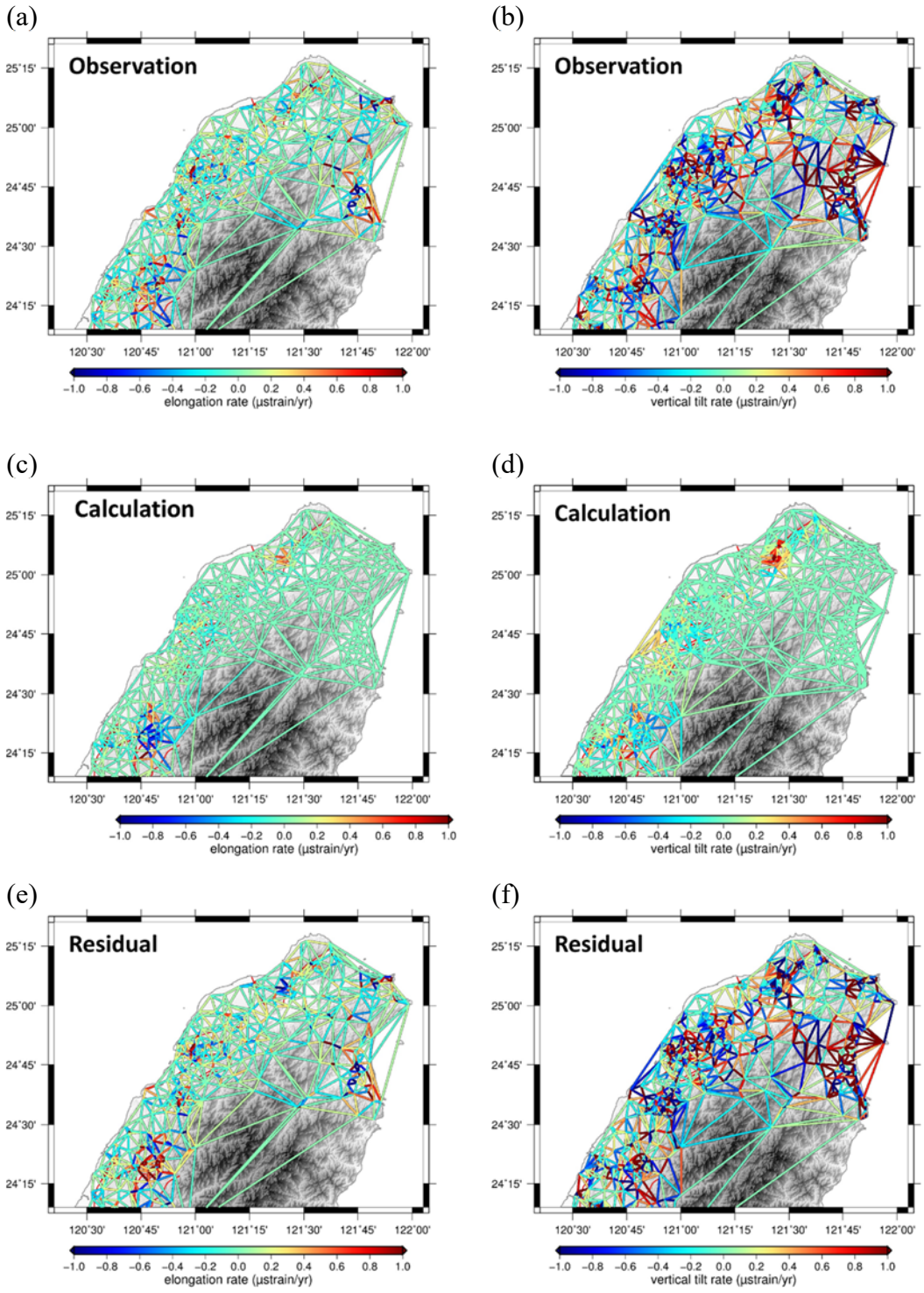


圖 4. 14：基線應變反演模型之觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值、(b) 垂直速度場觀測值、(c) 水平速度場計算值；(d) 垂直速度場計算值、(e) 水平速度場殘差、(f) 垂直速度場殘差。

Figure 4. 14: The model applies the velocity from 2016 to 2021. (a) Horizontal velocity observation; (b) Vertical velocity observation; (c) Horizontal velocity calculation; (d) Vertical velocity calculation; (e) Horizontal velocity residuals; (f) Vertical velocity residuals.

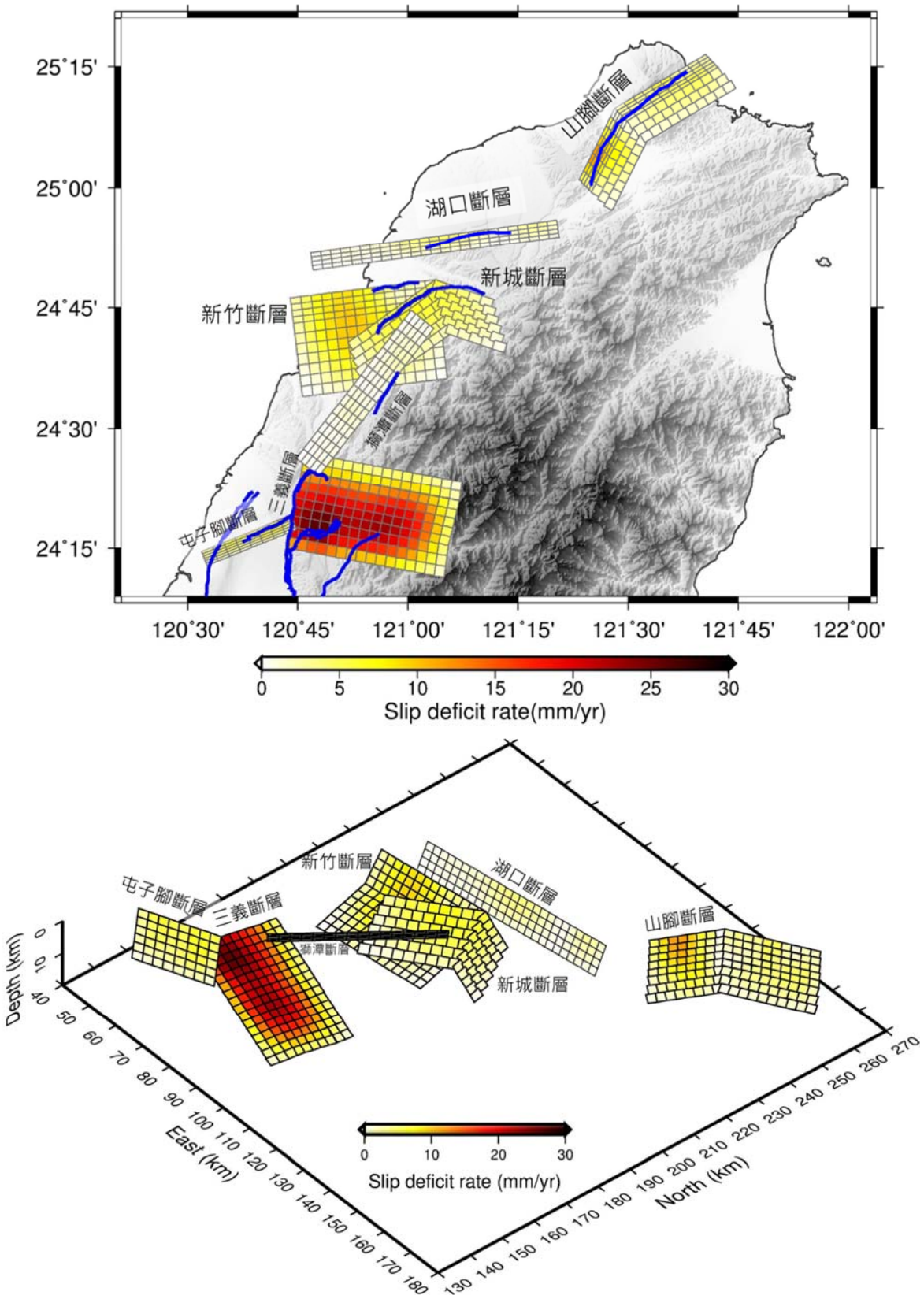


圖 4. 15：北部地區斷層滑移虧損率分布圖 Figure 4. 15: Fault slip deficit rate of northern Taiwan.

4-4 北部地區之斷層滑移虧損速率

今年針對臺灣北部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析，包含 7 條活動斷層，分別為：山腳斷層、新城斷層、湖口斷層、新竹斷層、獅潭斷層、三義斷層與屯子腳斷層。接著以 BLOCKS 模型、DEFNODE 模型與基線應變模型計算各斷層的平均滑移虧損速率，北部地區參考 2016 至 2022 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。今年北部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果如表 4. 5 所示，顯示各模型之滑移虧損率平均值以三義斷層之三模型成果差異最大，其次為山腳斷層。本計畫重要區域（新竹科學園區與臺北都會區）滑移虧損速率分布如圖 4. 16 所示。

表 4. 5：本計畫之 2016-2022 年加權平均斷層滑移虧損速率

Table 4. 5: Weighted average slip deficit rate in this project, 2016-2022.

		BLOCKS Model	TDEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率（mm/yr）
斷層名稱		斷層平均滑移速率（mm/yr）	平均滑移虧損速率（mm/yr）	平均滑移虧損速率（mm/yr）	
山腳斷層	上界	2.2	2.1	9.1	4.4
	平均	1.8±0.2	0.5±0.8	3.9±2.6	2.0
	下界	1.4	0.0	0.0	0.4
新城斷層	上界	2.1	6.8	7.7	5.5
	平均	1.9±0.1	3.0±1.9	3.9±1.9	2.9
	下界	1.7	0.0	0.1	0.6
湖口斷層	上界	1.1	3.1	3.5	2.5
	平均	1.1±0.0	0.9±1.1	1.5±1.0	1.1
	下界	1.1	0.0	0.0	0.3
新竹斷層	上界	0.7	2.7	10.7	4.7
	平均	0.7±0.0	0.5±1.1	4.9±2.9	2.0
	下界	0.7	0.0	0.0	0.2
獅潭斷層	上界	2.9	5.7	1.9	3.5
	平均	2.9±0.0	1.3±2.2	0.9±0.5	1.7
	下界	2.9	0.0	0.0	0.9
三義斷層	上界	2.1	20.9	29.6	17.5
	平均	1.9±0.1	7.3±6.8	15.8±6.9	8.3
	下界	1.7	0.0	2.0	1.2
屯子腳斷層	上界	0.5	3.9	7.4	3.9
	平均	0.5±0.0	0.9±1.5	4.2±1.6	1.8
	下界	0.5	0.0	1.0	0.5

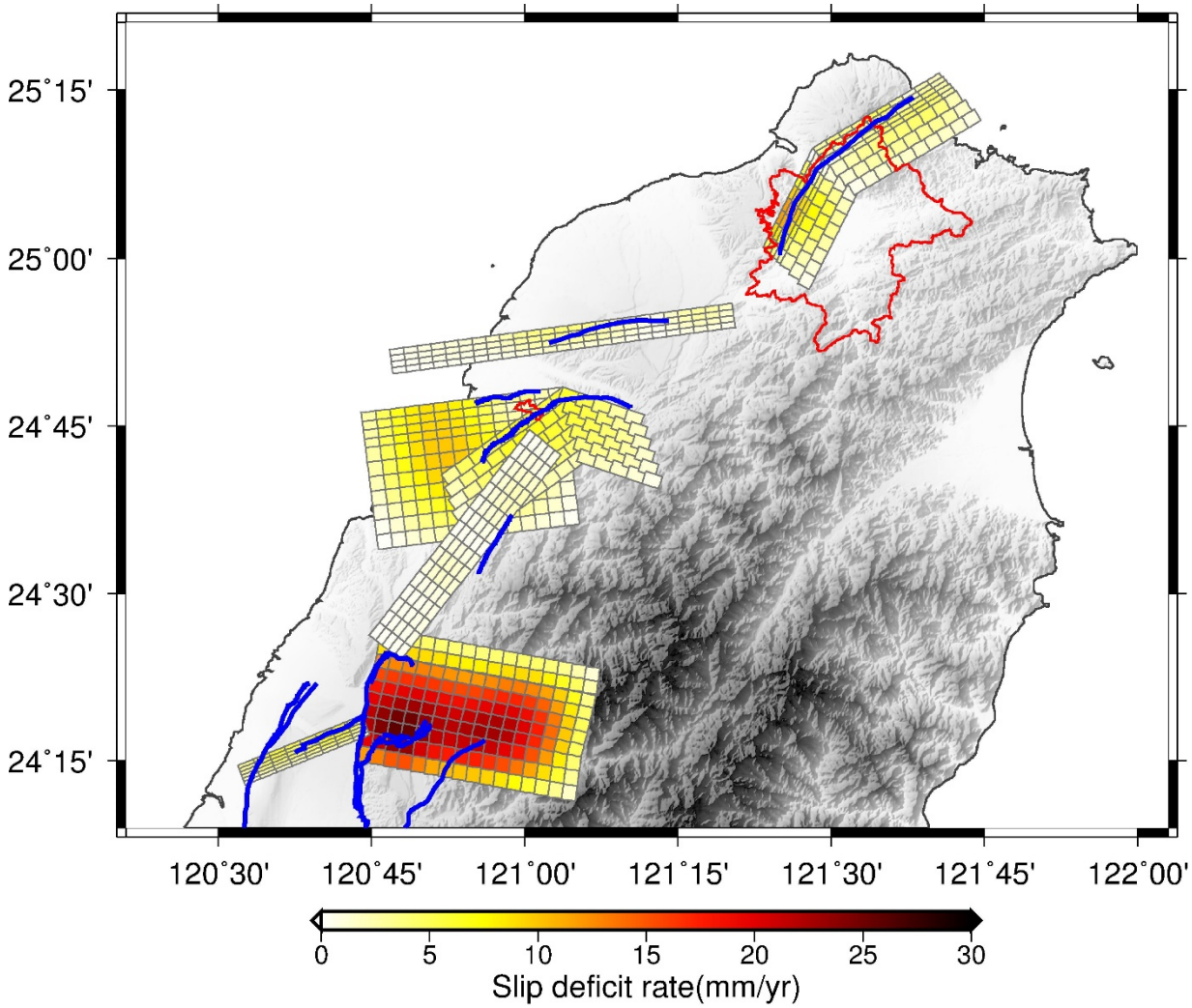


圖 4. 16：本計畫重要區域（新竹科學園區與臺北都會區）之斷層滑移虧損速率分布圖

Figure 4. 16: Distribution of fault slip deficit rates with the object areas (Hsinchu Science Park and Taipei City).

第五章、北部地區斷層活動潛勢

5-1 山腳斷層

5-1-1 山腳斷層參數設定

山腳斷層分段破裂模式，如圖 5. 1，分段點位於竹子湖。在評估山腳斷層之破裂，分為 3 種破裂事件來探討，A 為整段破裂，B 為北段破裂，C 為南段破裂。整段之破裂，比北段及南段之破裂可能性低，因此給予較低之權重，權重分配為 A（0.2）、B（0.4）、C（0.4）。

山腳斷層之傾角及破裂深度，本計畫利用雪佛龍建立法推估斷層幾何形貌，並以此作為山腳斷層後續分析計算的依據，深度 0~8 公里，斷層傾角為 63 度；深度 8~11 公里，斷層傾角約 25 度。

山腳斷層之長期滑移速率，根據表 5. 1，北段範圍為 0.8~1.9 mm/yr，南段範圍為 0.7~3.3 mm/yr。將垂直速率換算至斷層面(dip＝63˚)上，可得到長期滑移速率範圍，如表 5. 2 所示，南段介於 0.8~3.7 mm/yr，平均值為(0.8+3.7)/2 =2.3 mm/yr，計畫設定南段參數及權重為 0.8 mm/yr（0.2）、2.3 mm/yr（0.6）、3.7 mm/yr（0.2）；北段介於 0.9~2.2 mm/yr，平均值為(0.8+2.2)/2 =1.6 mm/yr，計畫設定北段參數及權重設為 0.9 mm/yr（0.2）、1.6 mm/yr（0.6）、2.2 mm/yr（0.2）。

破裂模式 A (整段)長期滑移速率則根據能量累計公式計算，如下式：

$$\mu \cdot A_{(整段)} \cdot v_{(整段)} = \mu \cdot A_{北段} \cdot v_{北段} + \mu \cdot A_{南段} \cdot v_{南段}$$

上式中 A 為面積，移項得到

$$v_{(整段)} = \frac{\mu \cdot A_{北段} \cdot v_{北段} + \mu \cdot A_{南段} \cdot v_{南段}}{\mu \cdot A_{(整段)}}$$

因山腳斷層北段及南段幾何一致，因此可得到：

$$v_{(整段)} = \frac{L_{北段} \cdot v_{北段} + L_{南段} \cdot v_{南段}}{L_{(整段)}}$$

上式中 L 為斷層長度，則計算 v(整段)下界為 0.9 mm/yr；v(整段)上界為 2.7 mm/yr；v(整段)中值為 1.9 mm/yr，如表 5. 3 所示。邏輯樹權重為常態分布：0.9 mm/yr (0.2)、1.9 mm/yr (0.6)、2.7 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 5. 4 所示為計算之各破裂事件地震矩規模。

山腳斷層系統各節點權重的分配更新之邏輯樹詳如圖 5. 2 所示。

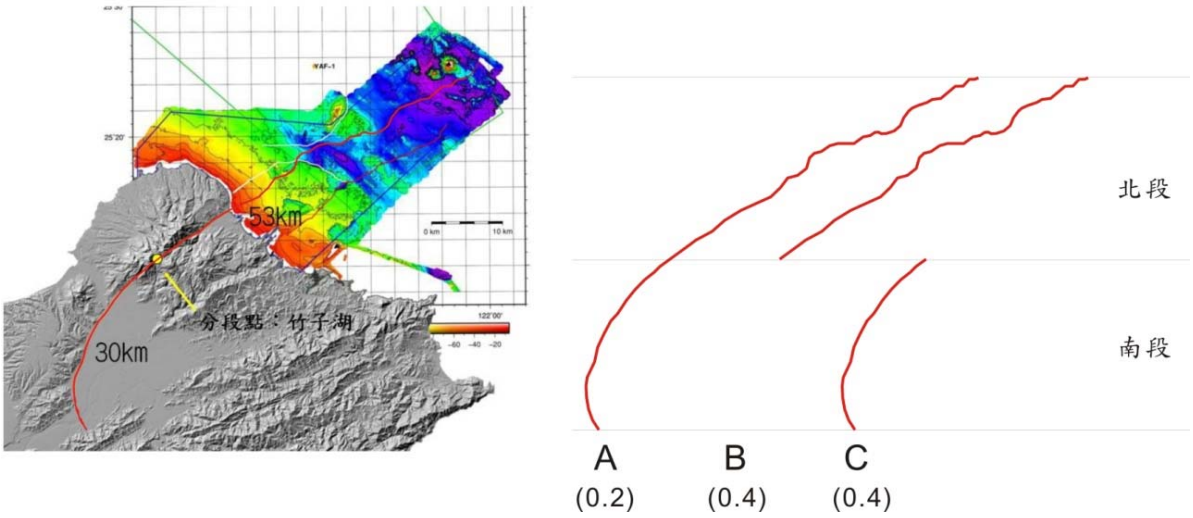


圖 5. 1：山腳斷層之破裂模式及權重分配

Figure 5. 1: Rupture cases and weights of the Shanchiao fault.

表 5. 1：山腳斷層滑移速率相關文獻彙整

Table 5. 1: References of the long term slip rate on the Shanchiao fault.

區域	垂直滑移速率(公厘/年)	資料		參考文獻
南段	1.1~2.4	五股 1 號井(9 萬年)		Wei et al.（1998）
	1.2~2.1	五股 1 號井板橋層(22 萬年)		
	1.8	盆地基盤落差 700 公尺 /山腳斷層開始活動年代 0.4Ma		Teng et al.（2001）
	0.7~1.8	SCF-1, 2, 5, 6, 14, 15, 16, 17 鑽井地層對比		Huang et al.（2007）
	1.3~1.7	火山泥流沉積層 500-680 公尺落差/形成年代 0.4 Ma		Song et al.（2007）
	1.2~1.5	蘆洲 1 號，五股 1 號		陳文山等（2008）
	3.3	SCF-1，SCF-2，五股 1 號		Chen et al.（2010）
北段（海域）	0.8~1.5	ST-I-1	● 震測訊號垂直離距/山腳斷層形成年代 ● 震測訊號垂直離距/台北盆地形成年代	中興公司（2015）
	1.0~1.9	ST-I-2		

表 5. 2：山腳斷層淨滑移速率換算，淨滑移速率=[垂直滑移速率/sin(傾角)]

Table 5. 2: Net slip rate calculate on the Shanchiao fault.

斷層名稱	位置	垂直滑移速率 (mm/yr)	傾角(度)	淨滑移速率 (mm/yr)
山腳斷層	北段	0.8	63	0.9
		1.9		2.2
	南段	0.7		0.8
		3.3		3.7

表 5. 3：山腳斷層整段（case A）滑移速率計算

Table 5. 3: Slip rate calculate for the whole Shanchiao fault (case A).

	山腳北 V(mm/yr)	山腳南 V(mm/yr)	山腳北 L(km)	山腳南 L(km)	山腳整段 V(mm/yr)
下界	0.9	0.8	53	30	0.9
中值	1.6	2.3			1.9
上界	2.2	3.7			2.7

表 5. 4：山腳斷層之各破裂事件面積與規模

Table 5. 4: Area and magnitude of each rupture case on the Shanchiao fault.

	破裂事件	長度 (km)	斷層幾何	寬度 (km)	面積 (km2)	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	83	深度 0-8 km, 傾角 63° 深度 8-11 km, 傾角 25°	16.1	1334	6.8	7.1	7.4	7.1
北段	B	53			852	6.6	6.9	7.2	6.9
南段	C	30			482	6.4	6.7	7.0	6.7

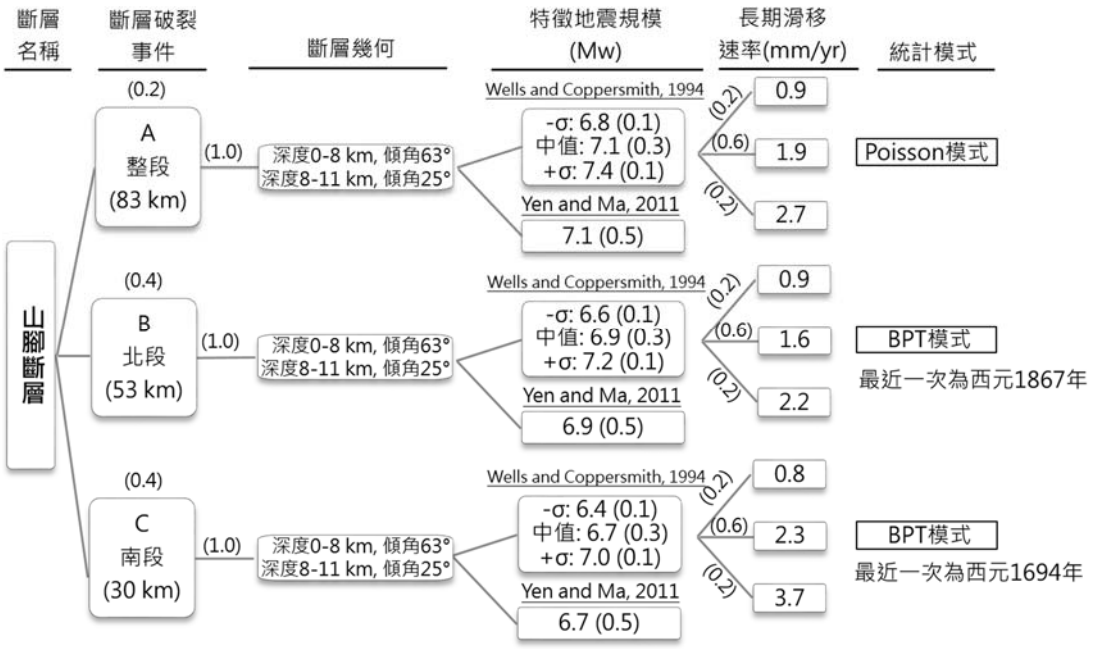


圖 5. 2：山腳斷層邏輯樹

Figure 5. 2: Logic tree of the Shanchiao fault.

5-1-2 山腳斷層規模與年發生率

山腳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 5. 3 為 3 個破裂事件取表 5. 4 中參數計算特徵地震模式分布情形。

圖 5. 2 之山腳斷層邏輯樹可得到 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 5. 4 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 5. 5（a）之山腳斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 5. 5（b）之山腳斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

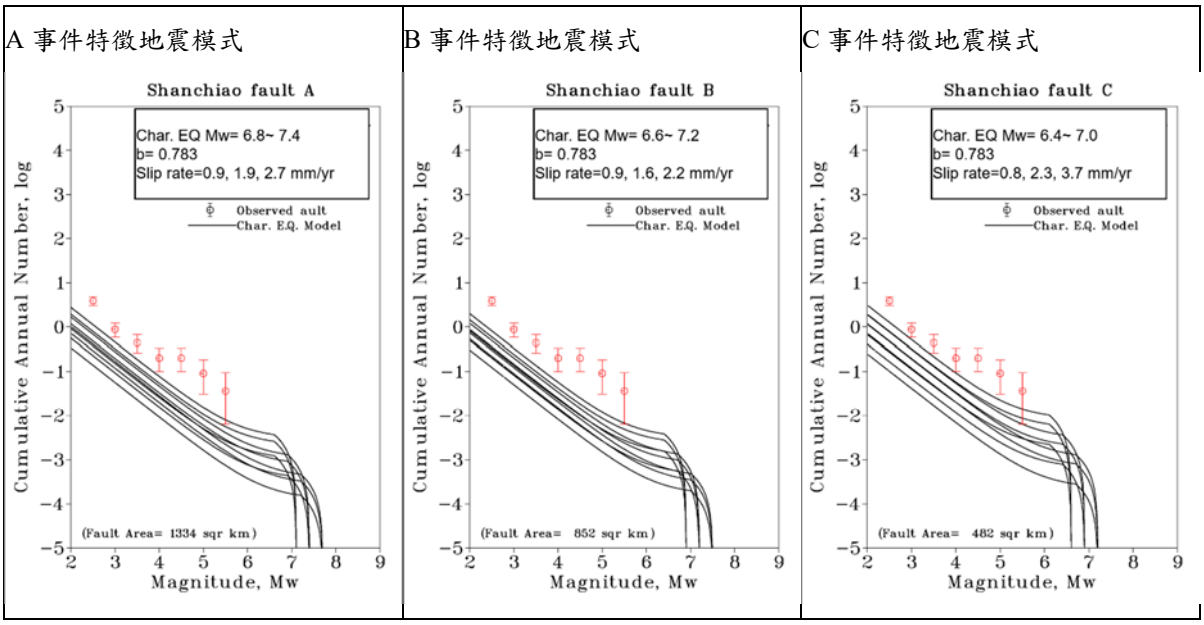


圖 5. 3：山腳斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 5. 3: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Shanchiao fault.

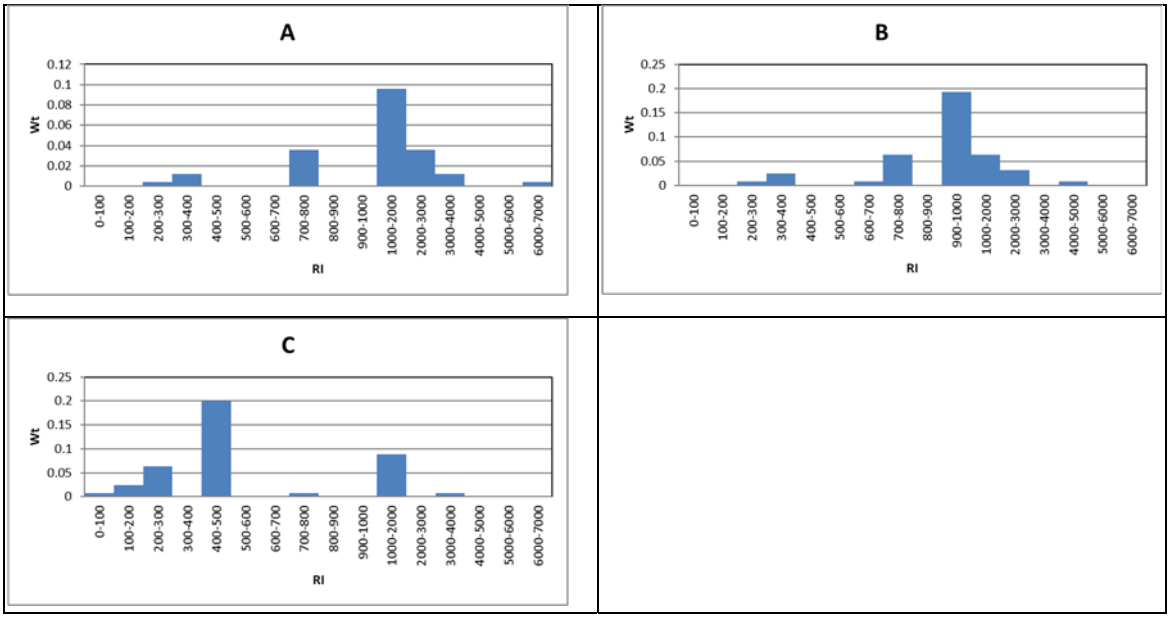


圖 5.4：山腳斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 5. 4: Recurrence interval - weighting relationships of the three rupture cases on the Shanchiao fault.

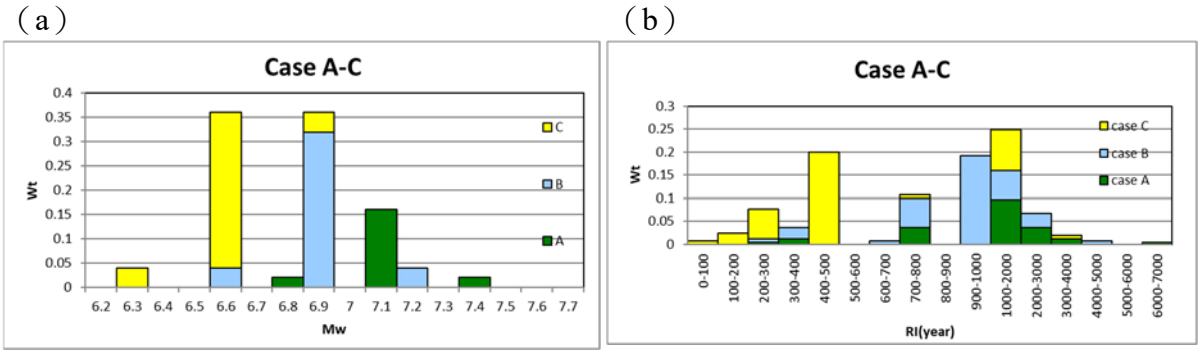


圖 5.5：山腳斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布。(a) 山腳斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，(b) 山腳斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 5. 5: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Shanchiao fault. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Shanchiao fault.

5-1-3 山腳斷層機率評估

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 模式估算山腳斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，根據歷史文獻，假設山腳斷層北段最後一次發生時間為西元 1867 年，南段為 1694 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估，而整段破裂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 5. 5 為山腳斷層 BPT 模式評估之結果，起算時間為西元 2023，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3~7.4 之機率為 5.7%、9.1%及 16.2%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 4.4%、7.2%及 13.5%。另若假設最後一次發生時間未知，以 POISSON 模式計算之結果也列於表 5. 5 中以供比較。

表 5. 5：山腳斷層發生機率評估

Table 5. 5: Earthquake probabilities for the Shanchiao 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	
	A：POI B：BPT C：BPT	POI	A：POI B：BPT C：BPT	POI	A：POI B：BPT C：BPT	POI
6.3≦ M ≦7.4	5.7%	4.8%	9.1%	7.8%	16.2%	14.6%
M ≧ 6.5	4.4%	4.1%	7.2%	6.7%	13.5%	12.8%

5-2 新城斷層

5-2-1 新城斷層參數設定

新城斷層分段破裂模式，如圖 5.6。本計畫評估新城斷層破裂模式，共分為 2 種事件來探討，A 為整段破裂，長度 28 公里（權重為 0.4），B 為南段破裂，長度 16 公里（權重為 0.6）。

新城斷之傾角及破裂深度，主要參考黃宣維（2014）建立的平衡剖面，該模式中新城斷層傾角在 0~4 公里深處為 35 度，水平延伸 7 公里，在 4~9 公里深處為 35 度。

新城斷層之滑移速率，是彙整前人研究利用階地定年、鑽井資料、層位落差等方法計算所得（表 5.6），其中部分年代老於 10 萬年的資料（石同生等，2003；Chen et al., 2004），不足以代表活動斷層現今的活動速率，因此不納入邏輯樹參數設定中；另外，位於斷層末端之滑移速率值（丁權，2012）明顯低於斷層其他位置，不足以代表整段斷層之滑移速率，因此也不納入邏輯樹參數設定中；而石同生等（2003）由鑽井資料推估滑移速率，僅得到保守估計之下限值，僅作參考對照用。因此，本計畫依據丁權（2012）、劉力豪（2004）、陳文山等（2003）利用頭前溪階地定年所得之滑移速率設定邏輯樹之參數值，其速率為 1.8~2.5 mm/yr，取 1.8 mm/yr 為邏輯樹下界，權重 0.2，2.5 mm/yr 為邏輯樹上界，權重佔 0.2，邏輯樹中值為(1.8+2.5)/2=2.2 mm/yr，權重 0.6。

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 5.7 所示為新城斷層各破裂事件地震矩規模。

新城斷層各節點權重的分配詳如圖 5.7 所示。

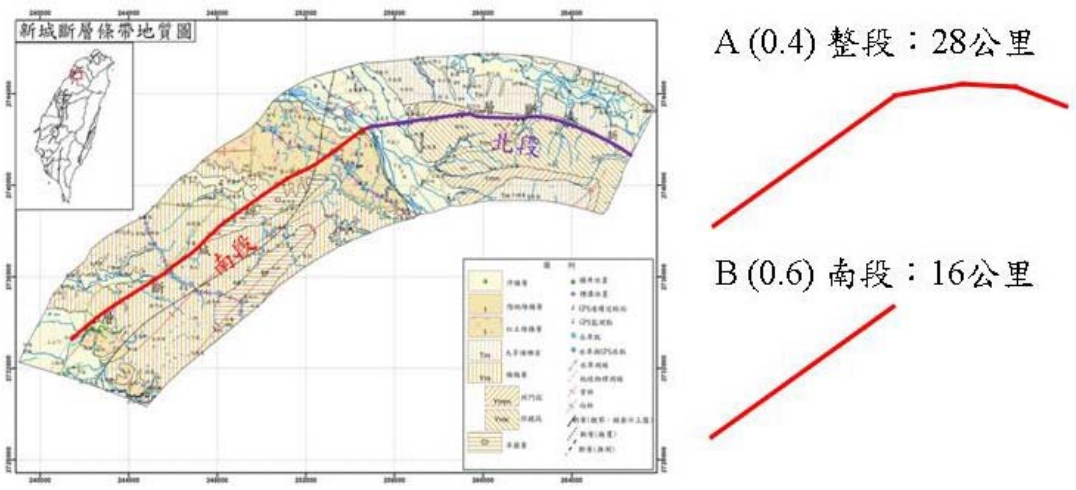


圖 5. 6：新城斷層之破裂模式及權重分配

Figure 5. 6: Rupture cases and weights of the Hsincheng fault.

表 5. 6：新城斷層長期滑移速率相關文獻（橘色表格表示年代老於 10 萬年）

Table 5. 6: References of the long term slip rate on the Hsincheng fault.

文獻	方法	位置	年代	垂直滑移速率 (mm/yr)	淨滑移速率 (mm/yr)
劉力豪（2004）；陳文山等（2003）	階地槽溝定年	頭前溪 Lt3	66.9 ka	1.27	2.3[1]
丁權（2012）	階地定年	頭前溪 Ft2	23 ka	1.0	1.8[1]
丁權（2012）	階地定年	頭前溪 Lt1	33.3 ka	1.1	2.0[1]
丁權（2012）	階地定年	頭前溪 Lt3	66.9 ka	1.4	2.5[1]
石同生等（2003）	階地定年	頭前溪 Lt2	400 ka	0.088-0.88	0.16-1.6[1]
石同生等（2003）	鑽井資料	科學園區	28.5 ka	0.73	>1.3[1]
石同生等（2003）	鑽井資料	科學園區	28.5 ka	0.37	>0.65[1]
石同生等（2003）	震測資料		1.24 Ma	0.88	1.0[1]
石同生等（2003）	震測資料		0.8 Ma	0.56	1.6[1]
丁權（2012）	鑽井資料	中港溪 Lt1	43.7 ka	0.32	0.76[2,3]
Chen et al.（2004）	震測資料		2 Ma		0.7

註 1：淨滑移速率以頭前溪露頭斷層傾角 34 度換算。

註 2：淨滑移速率以鑽井資料斷層傾角 25 度換算。

註 3：調查位置為新城斷層線南端，滑移速率相較頭前溪階地區域低，推測因位在斷層末端而速率減低，不足以代表斷層整段之滑移速率，固不採入邏輯樹參數設定中。

表 5. 7：新城斷層各破裂事件面積與規模

Table 5. 7: Area and magnitude of each rupture case on the Hsincheng fault.

破裂事件	長度 (km)	斷層幾何	寬度 (km)	面積 (km2)	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	
A	28	深度 0-4 km，傾角 35° 水平延伸 7 km 深度 4-9 km，傾角 35°	22.7	635	6.6	6.9	7.2	6.8
B	16	深度 0-4 km，傾角 35° 水平延伸 7 km 深度 4-9 km，傾角 35°	22.7	363	6.3	6.6	6.9	6.6

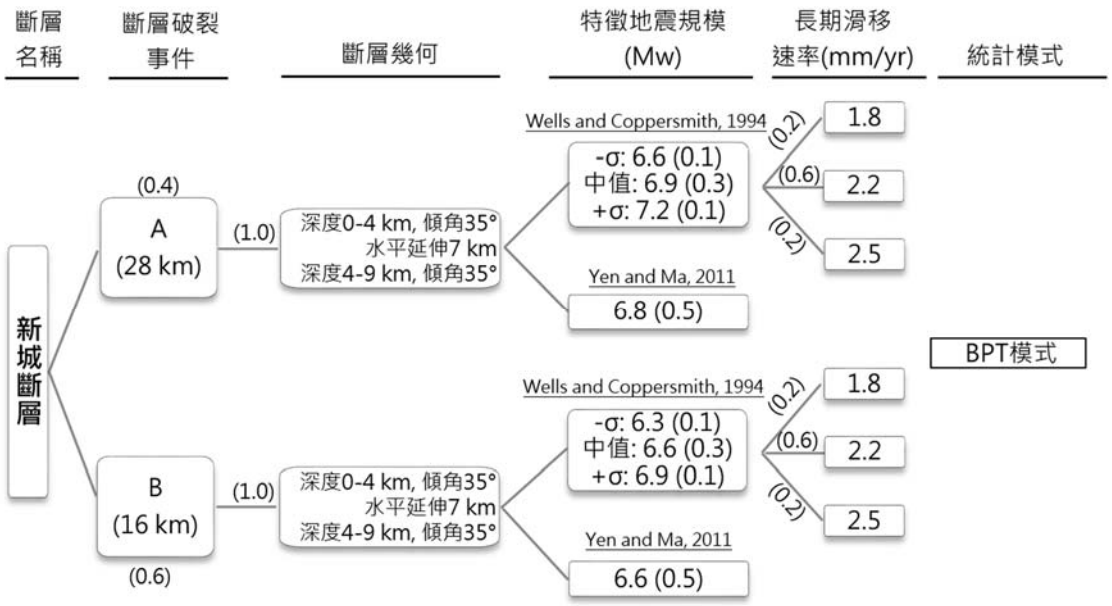


圖 5. 7：新城斷層邏輯樹

Figure 5. 7: Logic tree of the Hsincheng fault.

5-2-2 新城斷層規模與年發生率

新城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 5. 8 為 2 個破裂事件取表 5. 7 之參數值計算之特徵地震模式分布情形。

圖 5. 7 之新城斷層邏輯樹可得到 24 個分支，每個分支皆有其權重。經由特徵地震模式計算之後，圖 5. 9 為 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，破裂模式 A 在地震復發間隔時間 600 年~700 年間有較高之權重，破裂模式 B 在地震復發間隔時間 500~600 年間有較高之權重。

將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 5. 10（a）之新城斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 5. 10（b）之新城斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

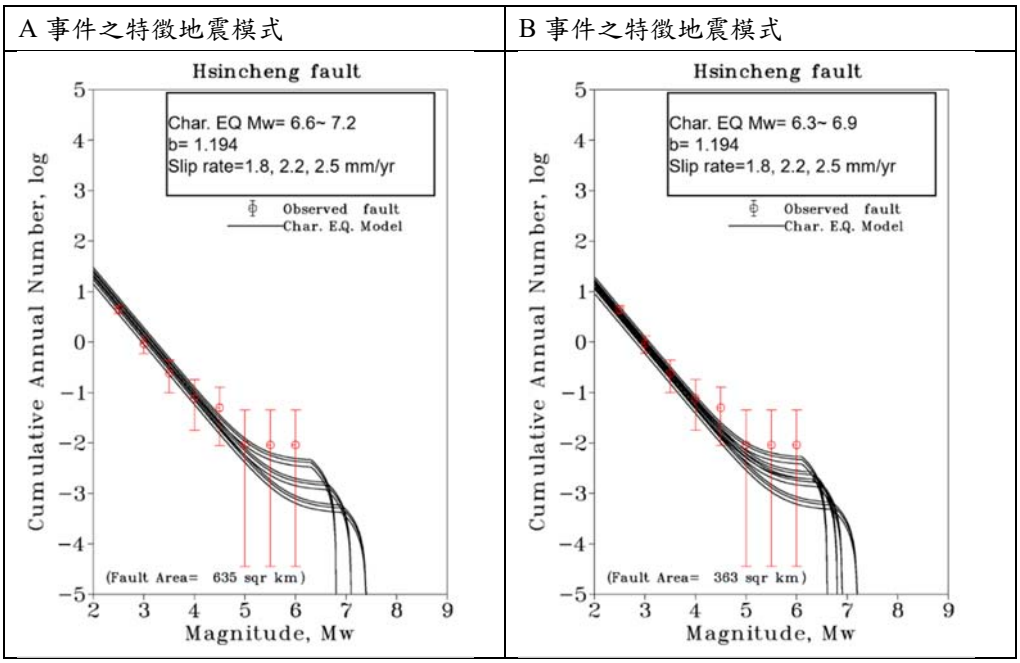


圖 5. 8：新城斷層各破裂事件之特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 5. 8: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Hsincheng fault.

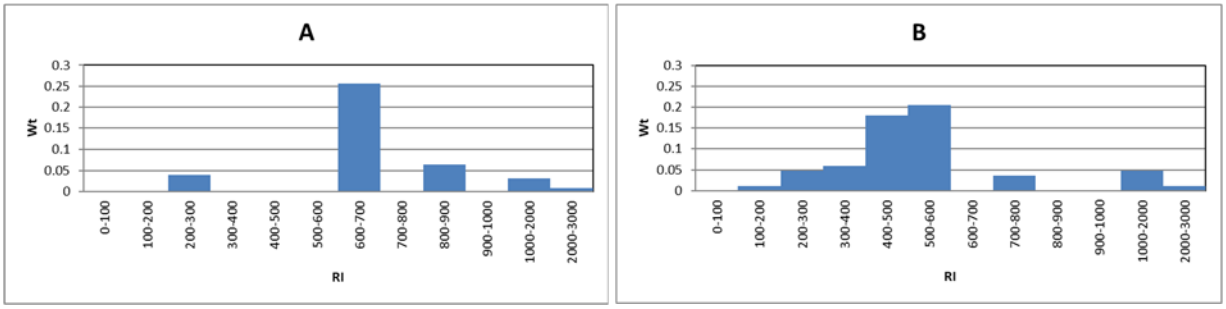


圖 5. 9：新城斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 5. 9: Recurrence interval - weighting relationships of the two rupture cases on the Hsincheng fault.

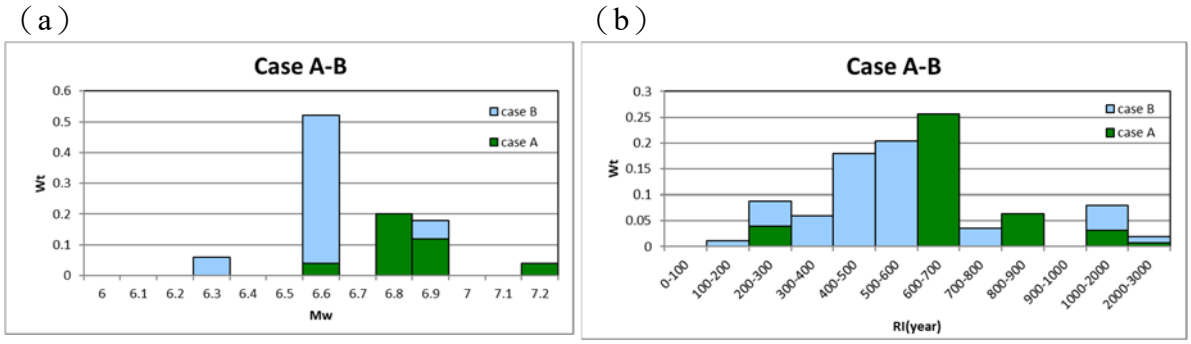


圖 5. 10：新城斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布。(a) 新城斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，(b) 新城斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 5. 10: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Hsincheng fault. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Hsincheng fault.

5-2-3 新城斷層機率評估

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 模式估算新城斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，新城斷層最後一次發生時間為 300 年前左右，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 5. 8 為新城斷層評估之結果，以西元 2023 年為基準，採用 BPT 模式計算得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3~7.2 之機率為 7.7%、12.5%及 23.6%，發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 6.1%、10.2%及 19.8%。另以 POISSON 模式計算之結果也列於表 5. 8 中以供比較。

表 5. 8：新城斷層發生機率評估

Table 5. 8: Earthquake probabilities for the Hsincheng fault in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
6.3≦ M ≦7.2	7.7%	5.7%	12.5%	9.2%	23.6%	17.4%
M ≧ 6.5	6.1%	4.9%	10.2%	8.0%	19.8%	15.2%

5-3 湖口斷層

5-3-1 湖口斷層參數設定

湖口斷層破裂事件，分別為 A. 湖口斷層（東段）單獨破裂，B. 湖口斷層+西部延伸段，C. 湖口斷層+西部延伸段+海域延伸段。權重設定上，本計畫認為延伸長度越長破裂可能性越低，得到 A(0.5)、B(0.3)、C(0.2)，如圖 5. 11 所示。

湖口斷層之傾角及破裂深度，根據震測及平衡剖面，湖口斷層斷坡幾何約為 60˚，深度約為 7 公里。

湖口斷層之滑移速率，根據表 5. 9 丁權（2012）鑽井定年資料，抬升速率範圍為 0.2~2.5 mm/yr，以傾角 60 度換算至斷層面上之滑移速率為 0.2~2.9 mm/yr。本計畫據此設定邏輯樹權重為常態分布：下界 0.2 mm/yr (0.2)、平均 1.6 mm/yr (0.6)、上界 2.9 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 5. 10 所示為各破裂事件地震矩規模。

湖口斷層各節點權重的分配更新之邏輯樹詳如圖 5. 12 所示。

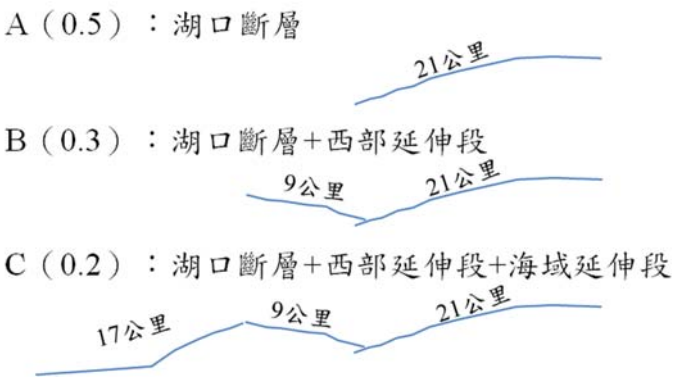


圖 5. 11：本計畫湖口斷層破裂事件

Figure 5. 11: Rupture cases and weights of the Hukou fault.

表 5. 9：湖口斷層上盤各井的垂直變動速率

Table 5. 9: Vertical rates of borehole layers at the hanging wall of the Hukou Fault.

參考文獻	位置	資料	地層	定年方法	錯移量 (m)	年代 (cal. yr BP)	垂直錯移率 (mm/yr)
丁權（2012）	南寮	NL_16.5 碳屑	砂頁互層	放射性碳定年	8~23.5	9528~9303	0.8~2.5
	新竹縣竹北市田心子 HK3	HK3_25.4m 碳屑	晚更新世陸相沉積層		2.6~20.6	11190~10760	0.2~1.9

表 5. 10：湖口斷層之各破裂事件面積與規模

Table 5. 10: Area and magnitude of each rupture case on the Hukou fault.

破裂事件	長度 (km)	斷層幾何	寬度 (km)	面積 (km2)	Wells and Coppersmith（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	
A	21	深度 0-7 km, 傾角 60°	8.1	170	6.0	6.3	6.6	6.2
B	30			242	6.2	6.5	6.8	6.4
C	47			380	6.4	6.7	7.0	6.6

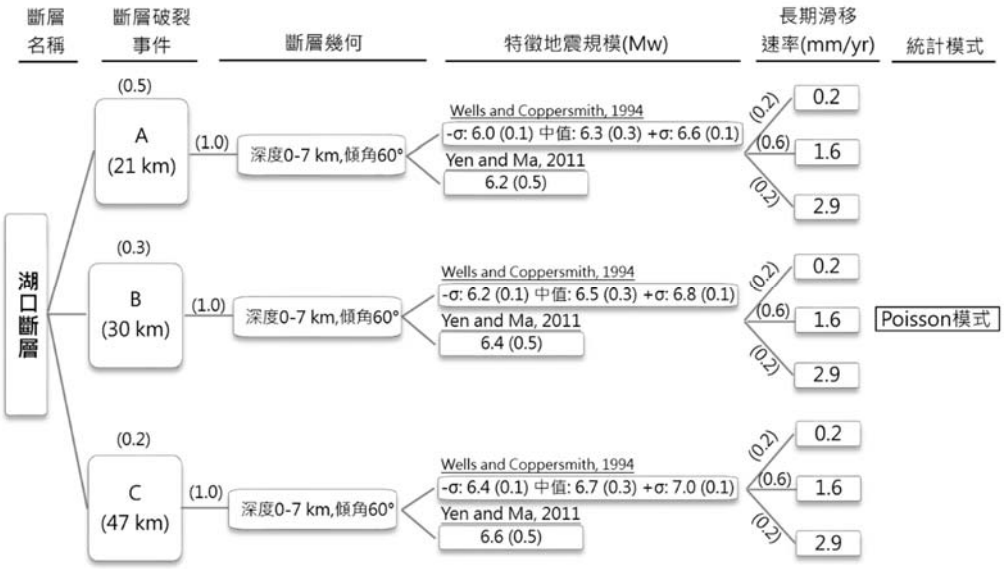


圖 5. 12：湖口斷層邏輯樹

Figure 5. 12: Logic tree of the Hukou fault.

5-3-2 湖口斷層規模與年發生率

湖口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 5. 13 為 3 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

圖 5. 12 之湖口斷層邏輯樹可得到 36 個分支，每個分支皆有其權重，經由特徵地震模式計算之後，圖 5. 14 為 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布。

將 3 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 5. 15（a）之湖口斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 5. 15（b）之湖口斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

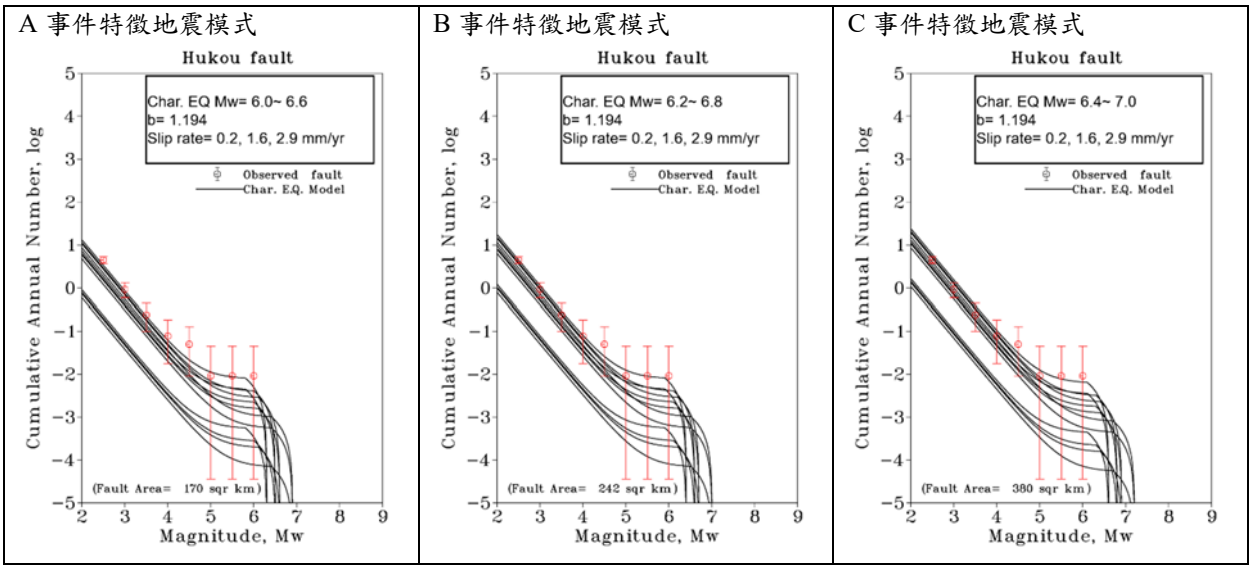


圖 5. 13：湖口斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 5. 13: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Hukou fault.

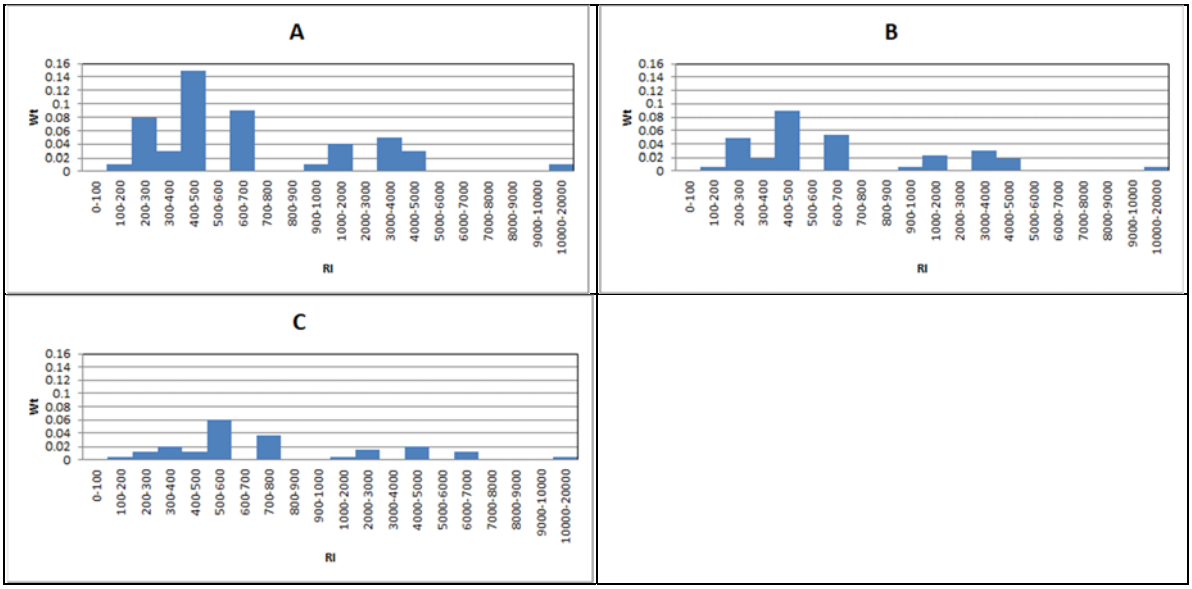


圖 5. 14：湖口斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 5. 14: Recurrence interval - weighting relationships of the three rupture cases on the Hukou fault.

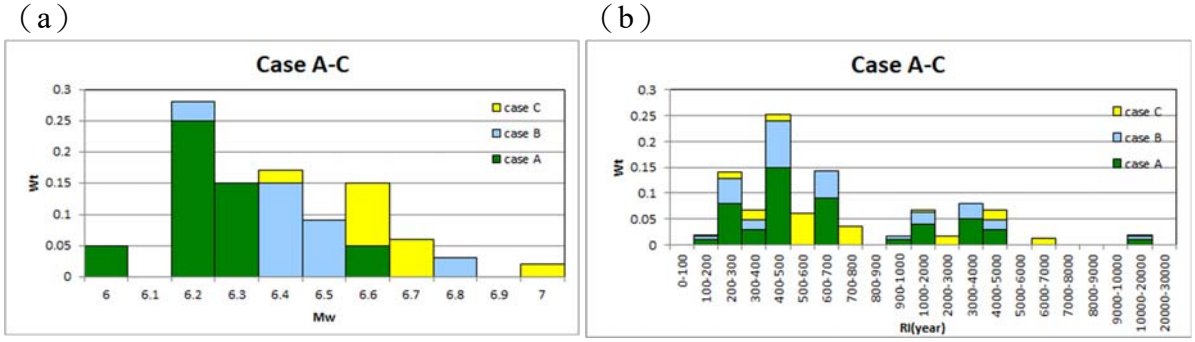


圖 5. 15：湖口斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布。(a) 湖口斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，(b) 湖口斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 5. 15: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Hukou fault. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Hukou fault.

5-3-3 湖口斷層機率評估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算湖口斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，湖口斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 5. 11 為湖口斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2023 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.0~7.0 之機率為 5.8%、9.3%及 17.4%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 1.3%、2.2%及 4.1%。

表 5. 11：湖口斷層發生機率評估

Table 5. 11: Earthquake probabilities for the Hukou fault in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.0≦ M ≦7.0	5.8%	9.3%	17.4%
M ≧ 6.5	1.3%	2.2%	4.1%

5-4 新竹斷層

5-4-1 新竹斷層參數設定

新竹斷層分段破裂模式，同圖 5. 16。由於東側延伸及西側海域的延伸與否可分為 4 種破裂事件來探討，A 為中段破裂，B 為中段破裂+東側延伸，C 為海域延伸+中段破裂，D 為海域延伸+中段破裂+東側延伸破裂，權重分配為 A（0.5）、B（0.2）、C（0.2）、D（0.1）。

新竹斷之傾角及破裂深度，主要參考黃宣維（2014）建立的平衡剖面，該模式中新竹斷層傾角在 0~7 公里深處為 50 度，在 7~10 公里深處為 10 度。

新竹斷層之滑移速率無發現新事證，丁權（2012）利用上下盤鑽井定年之結果，換算至淺部斷層面上為 1.9~3.5 mm/yr。據此設定邏輯樹權重為下界 1.9 mm/yr (0.2)、平均 2.7 mm/yr (0.6)、上界 3.5 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 5. 12 所示為新竹斷層各破裂事件地震矩規模。

新竹斷層各節點權重的分配詳如圖 5. 17 所示。

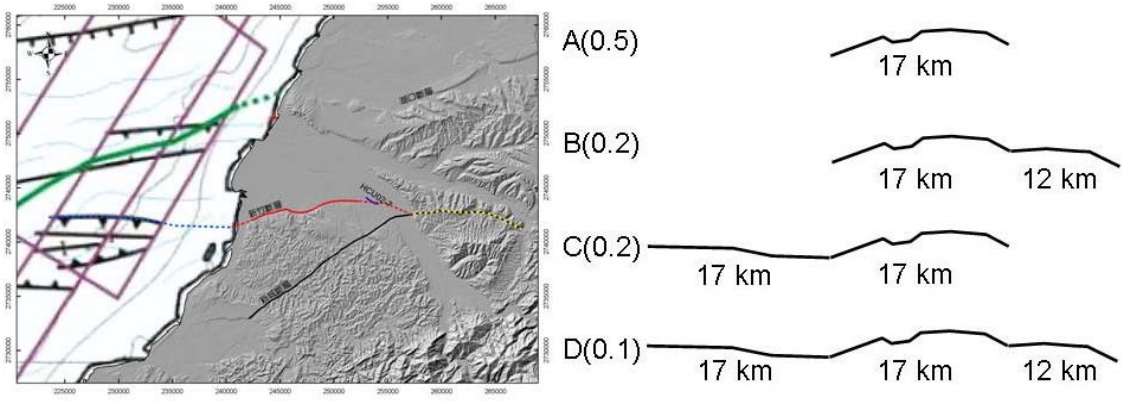


圖 5. 16：新竹斷層之破裂模式及權重分配

Figure 5. 16: Rupture cases and weights of the Hsinchu fault.

表 5. 12：新竹斷層各破裂事件面積與規模

Table 5. 12: Area and magnitude of each rupture case on the Hsinchu fault.

破裂事件	長度(km)	斷層幾何	寬度(km)	面積(km2)	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	
A	17	深度 0-7 km, 傾角 50° 深度 7-10 km, 傾角 10°	26.4	449	6.4	6.7	7.0	6.7
B	29			766	6.6	6.9	7.2	6.9
C	34			898	6.7	7.0	7.3	7.0
D	46			1215	6.8	7.1	7.4	7.1

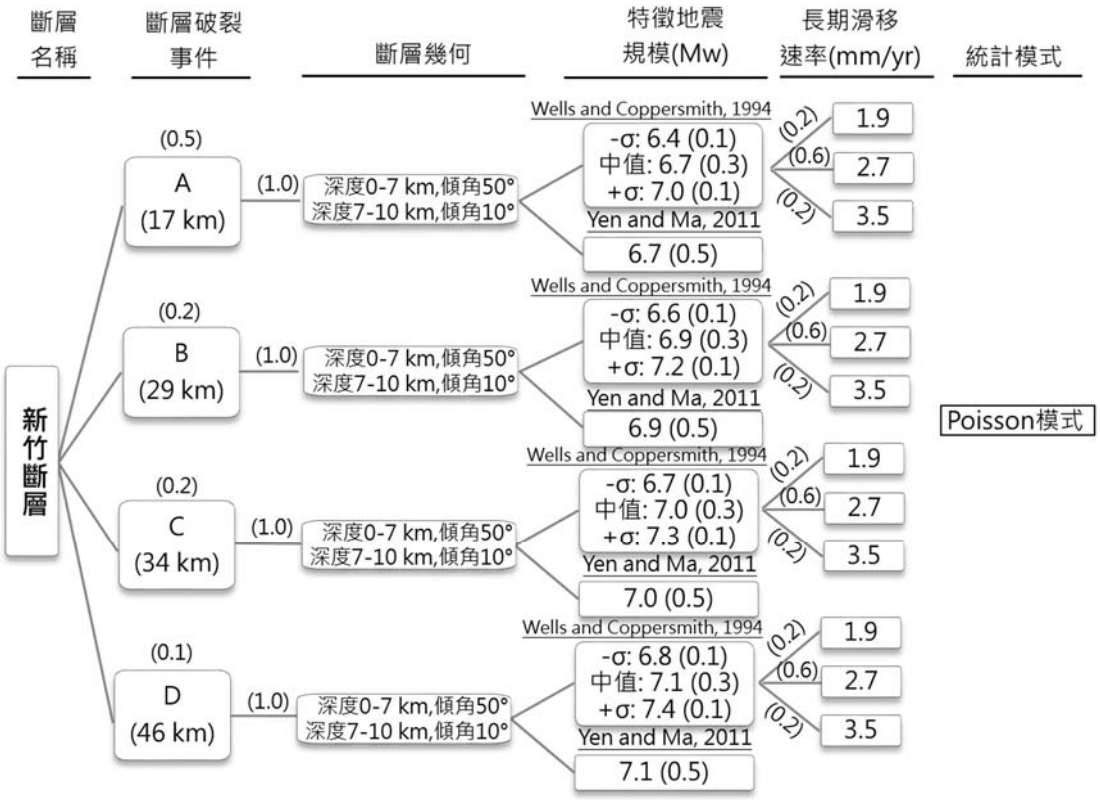


圖 5. 17：新竹斷層邏輯樹

Figure 5. 17: Logic tree of the Hsinchu fault.

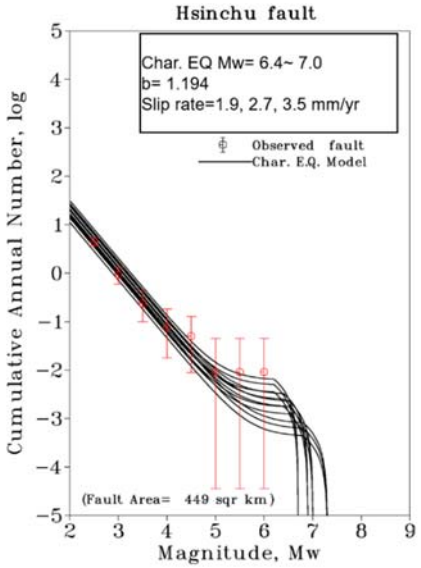
5-4-2 新竹斷層規模與年發生率

新竹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 5. 18 為 4 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

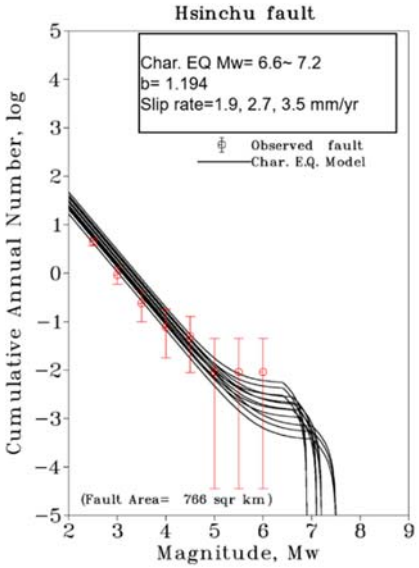
圖 5. 17 之新竹斷層邏輯樹可得到 48 個分支，每個分支皆有其權重，經由特徵地震模式計算之後，圖 5. 19 為 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將四種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 5. 20（a）之新竹斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 5. 20（b）之新竹斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

A 事件特徵地震模式



B 事件特徵地震模式



C 事件特徵地震模式　　D 事件特徵地震模式

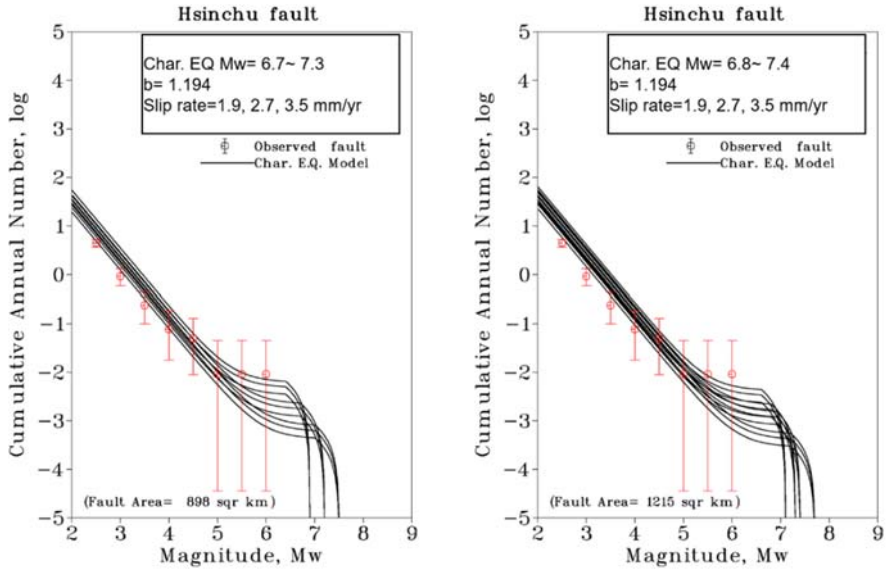


圖 5. 18：新竹斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 5. 18: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Hsinchu fault.

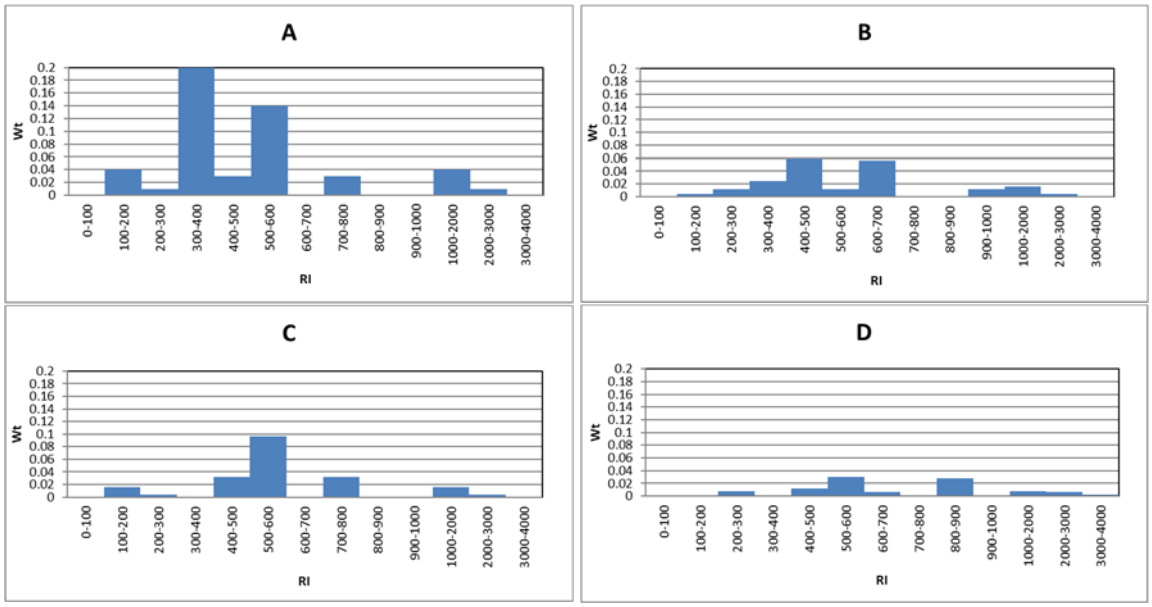


圖 5. 19：新竹斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 5. 19: Recurrence interval - weighting relationships of the four rupture cases on the Hsinchu fault.

（a）　　（b）

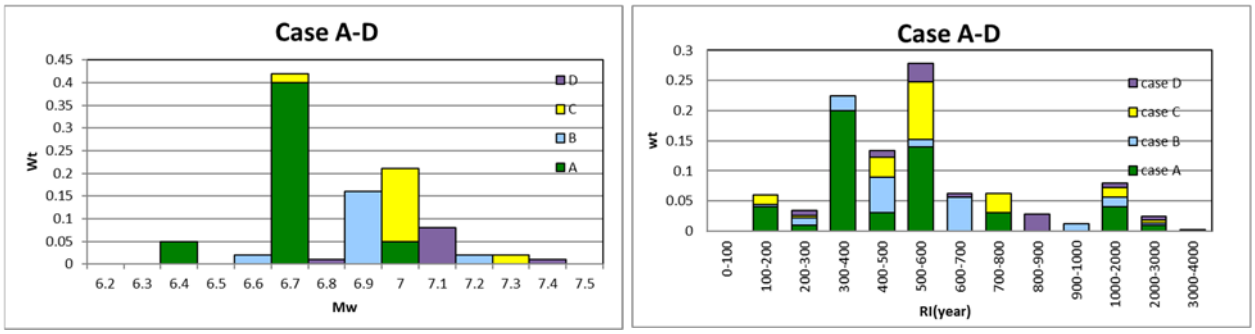


圖 5. 20：新竹斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布。（a）新竹斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）新竹斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 5. 20: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Hsinchu fault. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Hsinchu fault.

5-4-3 新竹斷層機率評估

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 模式估算新竹斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，新竹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 5. 13 為新竹斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2023 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.4~7.4 之機率為 6.2%、10.1%及 18.9%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 5.5%、9.0%及 17.0%。

表 5. 13：新竹斷層發生機率評估

Table 5. 13: Earthquake probabilities for the Hsinchu 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 ≦7.4	6.2%	10.1%	18.9%
M ≧ 6.5	5.5%	9.0%	17.0%

5-5 三義斷層

5-5-1 三義斷層參數設定

三義斷層分段破裂模式如圖 5.21，共分為四種破裂模式。A：三義斷層於大安溪以北，斷層下方因出磺坑背斜通過，斷層幾何上形成階梯狀，使得其獨立破裂不易，此處也是三義斷層與屯子腳斷層交會之處，建議分段點設於此，權重較低，設為 0.2；B：三義斷層與車籠埔斷層不重疊之處(大甲溪以北)，較易獨自累積能量並傳導至北段，權重較高，設為 0.5；C：三義斷層與車籠埔斷層重疊部分(大甲溪以南)，其能量易被車籠埔斷層瓜分，因此降低其權重，設為 0.2；D：三義斷層整段破裂，可能性低於以上三種模式，權重設為 0.1。

三義斷層之傾角及破裂深度，三義斷層北段部分(與車籠埔斷層不重疊之處)，本計畫參考 Yang et al.（2007）平衡剖面，北段傾角設定為 15 度，深度 10 公里。南段(與車籠埔斷層重疊之處)考慮三義斷層的幾何面平行於車籠埔斷層，傾角為 35 度，深度 8 公里。

三義斷層長期滑移速率，Shyu et al.（2020）根據階地崖高及年代推估得到抬升速率約為 0.1~0.8 mm/yr，並以傾角 10~20 度推算得到長期滑移速率為 0.4~4.6 mm/yr。取 0.4 mm/yr 為邏輯樹下界，權重(0.2)，4.6 mm/yr 為邏輯樹上界，權重(0.2)，邏輯樹中值為(0.4+4.6)/2=2.5 mm/yr，權重(0.6)

各破裂事件之最大可能地震規模則代入 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 5.14 所示為三義斷層各破裂事件地震矩規模。

三義斷層各節點權重的分配詳如圖 5.22 所示。

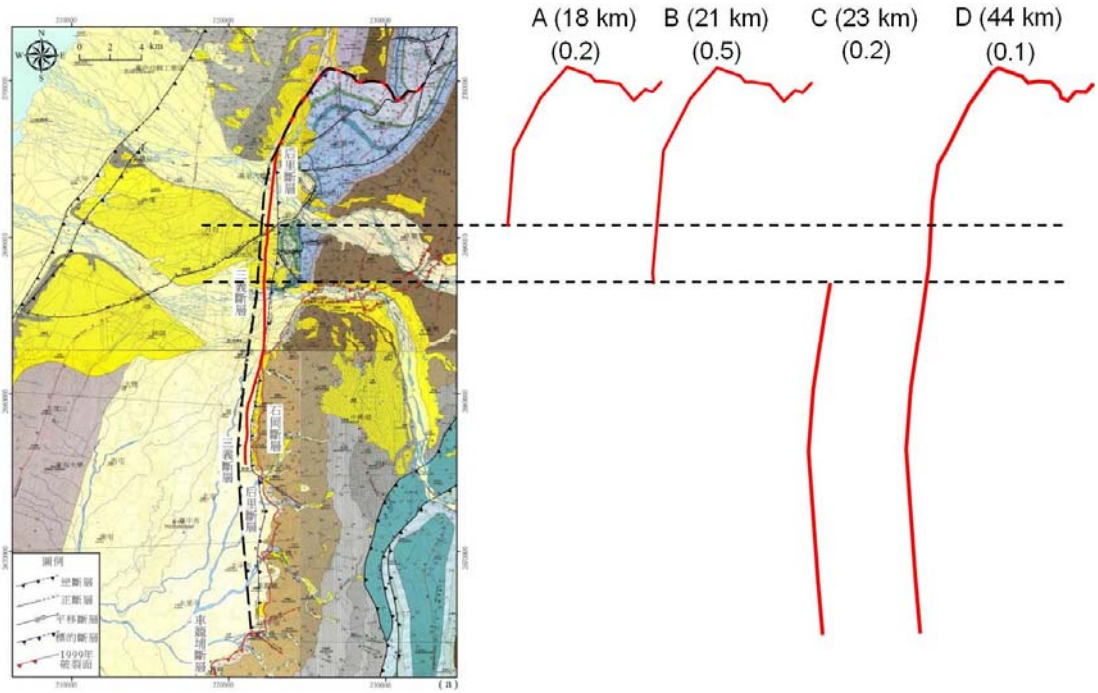


圖 5. 21：三義斷層之分段及破裂模式

Figure 5. 21: Rupture cases and weights of the Sanyi fault.

表 5. 14：三義斷層各破裂事件面積與規模

Table 5. 14: Area and magnitude of each rupture case on the Sanyi fault.

破裂事件	長度 (km)	斷層幾何		寬度 (km)	面積 (km2)	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)
		大甲溪以北	大甲溪以南			-σ	中值	+σ	
A	18	深度 0-10 km, 傾角 15°	-	38.6	695	6.6	6.9	7.2	6.8
B	21	深度 0-10 km, 傾角 15°	-	38.6	811	6.6	6.9	7.2	6.9
C	23	-	深度 0-8 km, 傾角 35°	13.9	321	6.3	6.6	6.9	6.5
D	44	深度 0-10 km, 傾角 15°	深度 0-8 km, 傾角 35°	-	1132	6.8	7.1	7.4	7.1

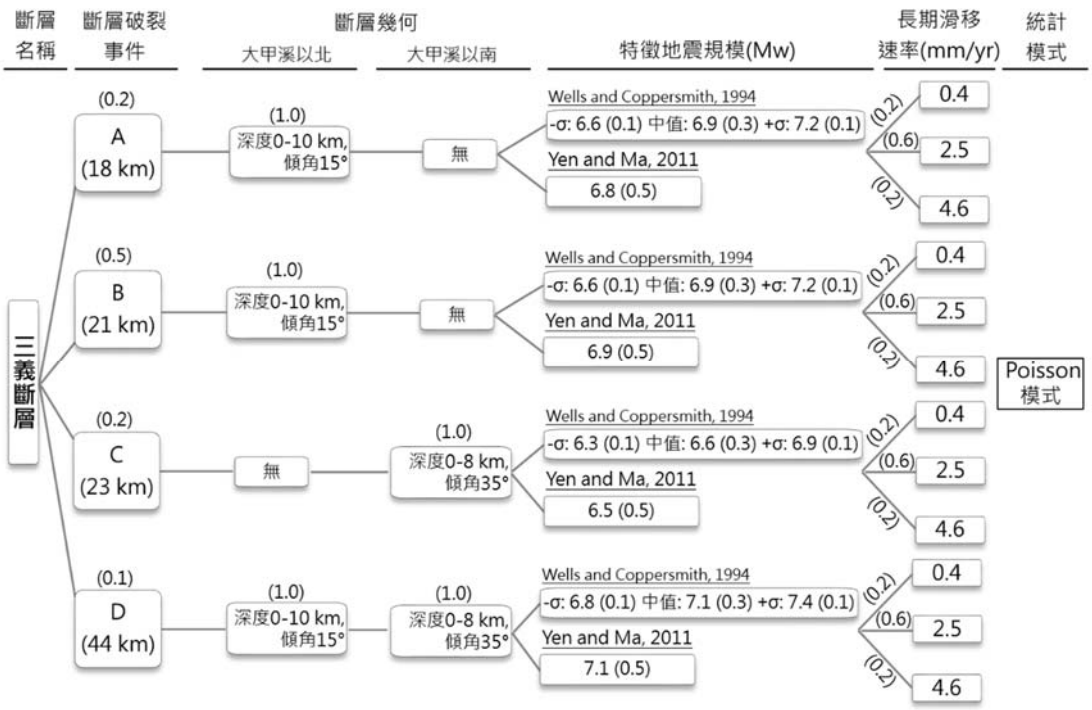


圖 5. 22：三義斷層邏輯樹

Figure 5. 22: Logic tree of the Sanyi fault.

5-5-2 三義斷層規模與年發生率

三義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 5. 23 為 4 個破裂事件取表 5. 14 值之特徵地震模式分布情形。

圖 5. 22 之三義斷層邏輯樹可得到 48 個分支，每個分支皆有其權重，經由特徵地震模式計算之後，圖 5. 24 為 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將四種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 5. 25（a）之三義斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 5. 25（b）之三義斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

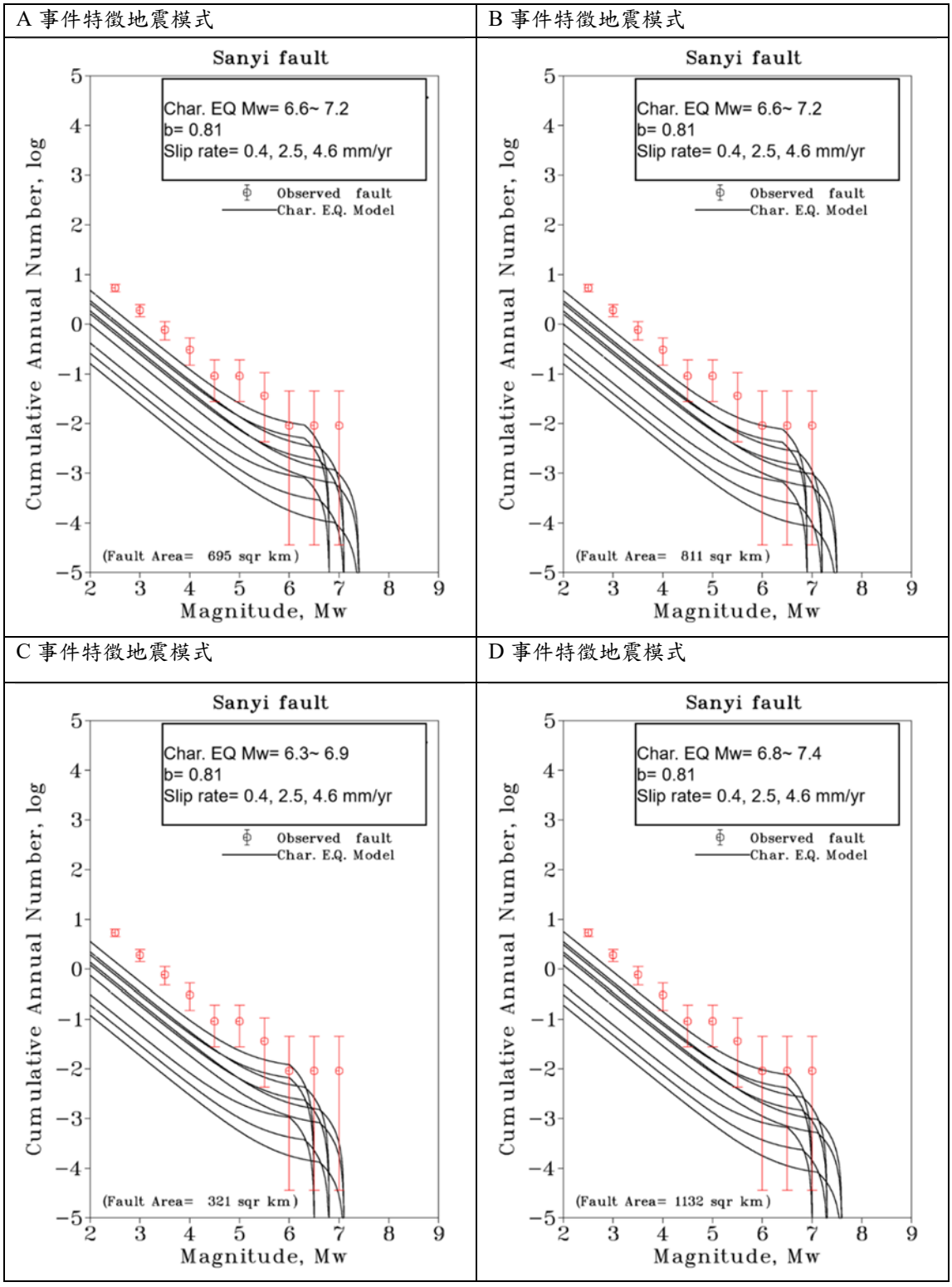


圖 5. 23：三義斷層各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 5. 23: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Sanyi fault.

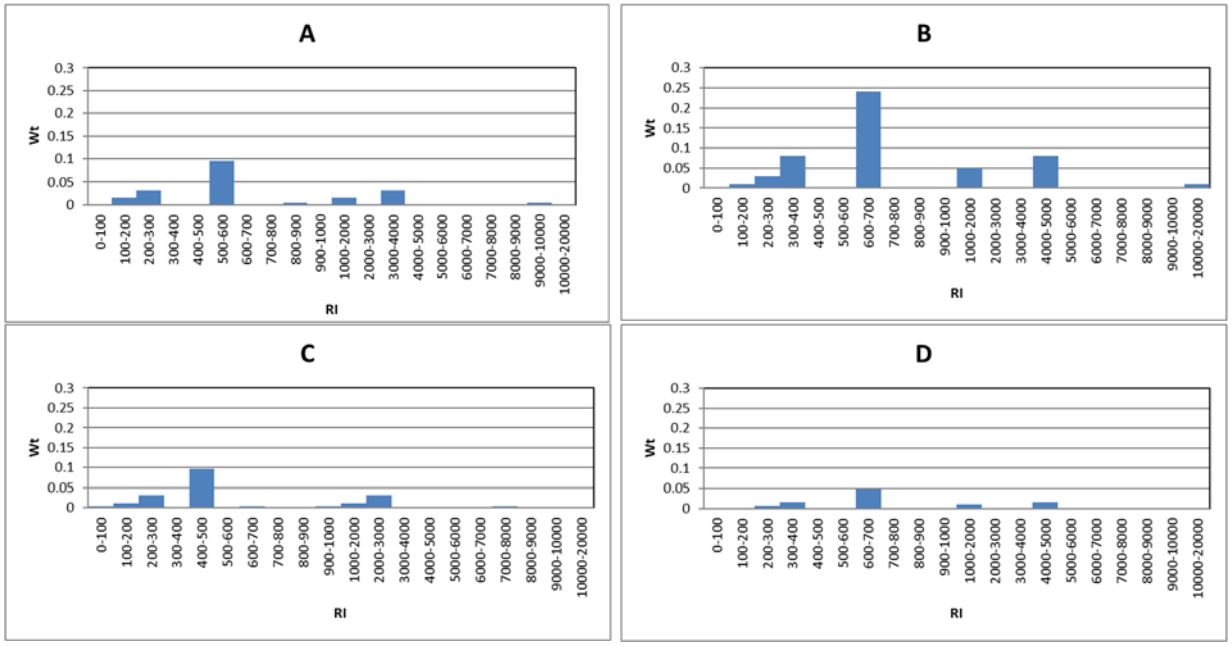


圖 5. 24：三義斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

Figure 5. 24: Recurrence interval - weighting relationships of the four rupture cases on the Sanyi fault.

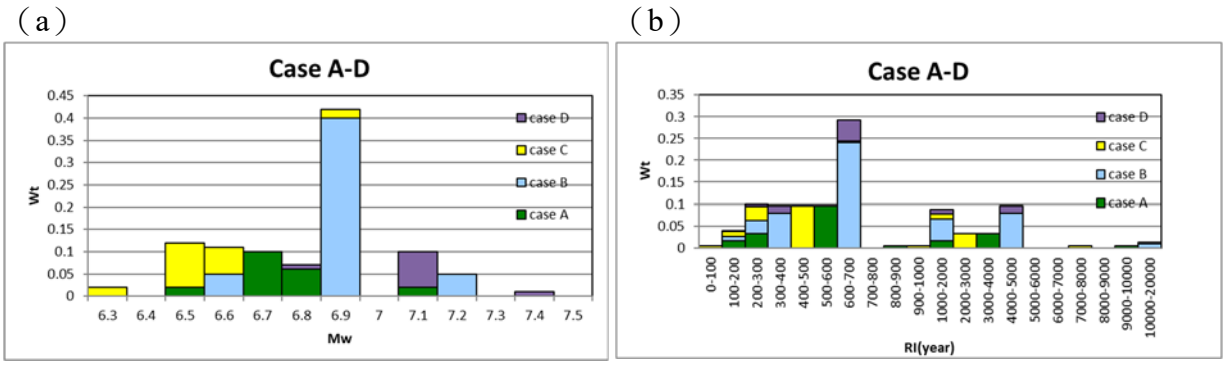


圖 5. 25：三義斷層之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布。(a) 三義斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，(b) 三義斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 5. 25: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Sanyi fault. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Sanyi fault.

5-5-3 三義斷層機率評估

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 模式估算三義斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，三義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 5. 15 為三義斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2023 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3~7.4 之機率為 5.5%、8.9%及 16.6%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 5.2%、8.4%及 15.7%。

表 5. 15：三義斷層發生機率評估

Table 5. 15: Earthquake probabilities for the Sanyi fault in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.3 ≦ M ≦7.4	5.5%	8.9%	16.6%
M ≧ 6.5	5.2%	8.4%	15.7%

5-6 獅潭−屯子腳斷層系統

5-6-1 獅潭−屯子腳斷層系統參數設定

獅潭−屯子腳斷層系統之分段破裂模式，如圖 5. 26 所示，由於 1935 年之主震是走向滑移機制，且位於屯子腳斷層東側延伸處，本計畫認為屯子腳斷層單獨破裂之可能性最高，因此屯子腳斷層單獨破裂的權重 0.5；圖 5. 26 左圖可看到 2 號規模 6.8 之地震位於獅潭斷層之上盤，為逆斷層機制，推測為獅潭斷層破裂引發之第二個主震，即獅潭斷層獨立破裂也有可能發生，因此提高獅潭斷層單獨破裂權重 0.3；然而，1935 年之儀器尚不足以解析雙主震，也不排除是單一主震所引起，且 1935 年之地震顯示了獅潭及屯子腳斷層均有地表破裂，應考慮提高系統破裂之可能性，因此獅潭+屯子腳系統破裂權重 0.2。

在評估屯子腳斷層之破裂，是以長度不確定性來區分破裂事件，分別為 A 主斷層段破裂（長度 17 公里），以及 B 主斷層段+延伸段破裂（長度 40 公里），權重設定為 A（0.6）、B（0.4）。獅潭斷層之破裂模式可簡化為三種斷層模型之長度，分別為（C）西元 1935 年地表破裂 15 公里、（D）Huang and Yeh（1992）模擬之 25 公里及（E）往南延伸至屯子腳斷層之 35 公里，權重比為 C（0.6）、D（0.2）、E（0.2）。獅潭−屯子腳系統則是獅潭斷層往南延伸達 35 公里及屯子腳斷層往東延伸達 40 公里。

獅潭斷層及屯子腳斷層傾角及破裂深度，屯子腳斷層為一高角度斷層，近地表處呈開花構造，本計畫模型中設定傾角為 75 度，另屯子腳斷層為走向滑移斷層，深度應不受基底滑脫面深度影響，本計畫模型中設定其破裂深度為 13 公里。獅潭斷層之幾何，參考中興社（2020）計畫中之結論，本計畫模型中設定傾角為向西傾 50 度，破裂深度為 8 公里。

獅潭斷層及屯子腳斷層滑移速率，參考本計畫三種模型反演得到之結果，屯子腳斷層平均滑移虧損速率下界為 0.5 mm/yr，上界為 3.9 mm/yr，平均值為 1.8 mm/yr（表 5. 16）；獅潭斷層平均滑移虧損速率下界 0.9 mm/yr，上界為 3.5 mm/yr，平均值為 1.7 mm/yr（表 5. 16）。本計畫據此設定屯子腳斷層邏輯樹權重為下界 0.5 mm/yr（0.3）、平均 1.8 mm/yr（0.4）、上界 3.9 mm/yr（0.3）；獅潭斷層邏輯樹權重為下界 0.9 mm/yr（0.3）、平均 1.7 mm/yr（0.4）、上界 3.5 mm/yr（0.3）。

獅潭+屯子腳系統之斷層長期滑移速率則根據能量累計公式計算，如下式：

$$v_{獅潭+屯子腳} = \frac{\mu \cdot A_{屯子腳} \cdot v_{屯子腳} + \mu \cdot A_{獅潭} \cdot v_{獅潭}}{\mu(A_{屯子腳} + A_{獅潭})}$$

可得到 v 獅潭+屯子腳下界為 0.7 mm/yr，上界為 3.7 mm/yr，中值為 1.8 mm/yr，如表 5. 17 所示。邏輯樹權重為常態分布：0.7 mm/yr（0.2）、1.8 mm/yr（0.6）、3.7 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 5. 18 所示為獅潭–屯子腳斷層系統各破裂事件地震矩規模。

獅潭–屯子腳斷層系統各節點權重的分配詳如圖 5. 27 所示。

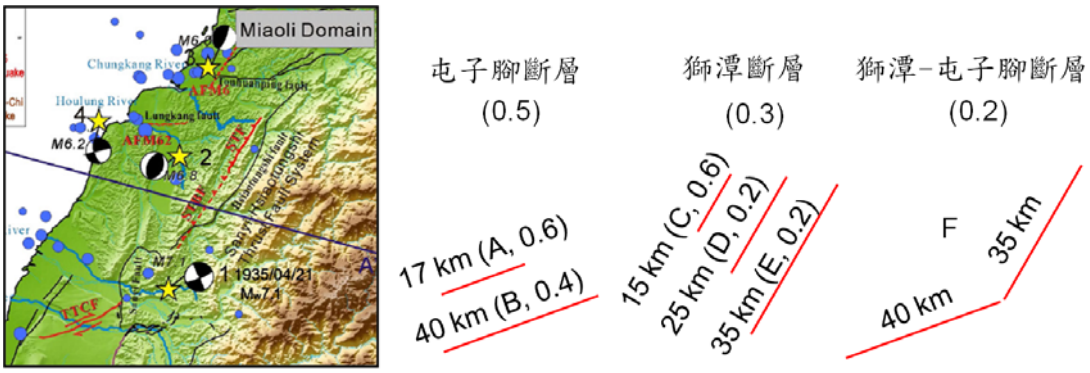


圖 5. 26：獅潭–屯子腳斷層系統破裂模式及權重分配

Figure 5. 26: Rupture cases and weights of the Shihtan -Tuntzuchiao fault system.

表 5. 16：獅潭、屯子腳斷層模型加權平均斷層滑移虧損率

Table 5. 16: Weighted average slip deficit rate in this project.

斷層名稱		BLOCKS Model 斷層平均滑移速率（mm/yr）	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）
獅潭斷層	上界	2.9	5.7	1.9	3.5
	平均	2.9±0.0	1.3±2.2	0.9±0.5	1.7
	下界	2.9	0.0	0.0	0.9
屯子腳斷層	上界	0.5	3.9	7.4	3.9
	平均	0.5±0.0	0.9±1.5	4.2±1.6	1.8
	下界	0.5	0.0	1.0	0.5

表 5. 17：獅潭−屯子腳斷層系統(case F)v 獅潭+屯子腳計算

Table 5. 17: Slip rate calculate for the Shihtan -Tuntzuchiao fault system (case F).

	獅潭 A (km2)	獅潭 V (mm/yr)	屯子腳 A (km2)	屯子腳 V (mm/yr)	系統破裂 V (mm/yr)
V 上界	366	3.5	538	3.9	3.7
V 中值		1.7		1.8	1.8
V 下界		0.9		0.5	0.7

表 5. 18：獅潭−屯子腳斷層系統各破裂事件規模及權重

Table 5. 18: Area and magnitude of each rupture case on the Shihtan -Tuntzuchiao fault system.

斷層名稱	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km2)	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	
屯子腳	A	17	13	13.5	75	229	6.2	6.4	6.6	6.4
	B	40	13	13.5	75	538	6.6	6.8	7.0	6.7
獅潭	C	15	8	10.4	50	157	6.0	6.3	6.6	6.2
	D	25	8	10.4	50	261	6.2	6.5	6.8	6.4
	E	35	8	10.4	50	366	6.3	6.6	6.9	6.6
獅潭+屯子腳	F	TTCF: 40 km STF: 35 km	TTCF: 傾角 75°,深度 13 km STF: 傾角 50°,深度 08 km			904	6.7	7.0	7.3	7.0

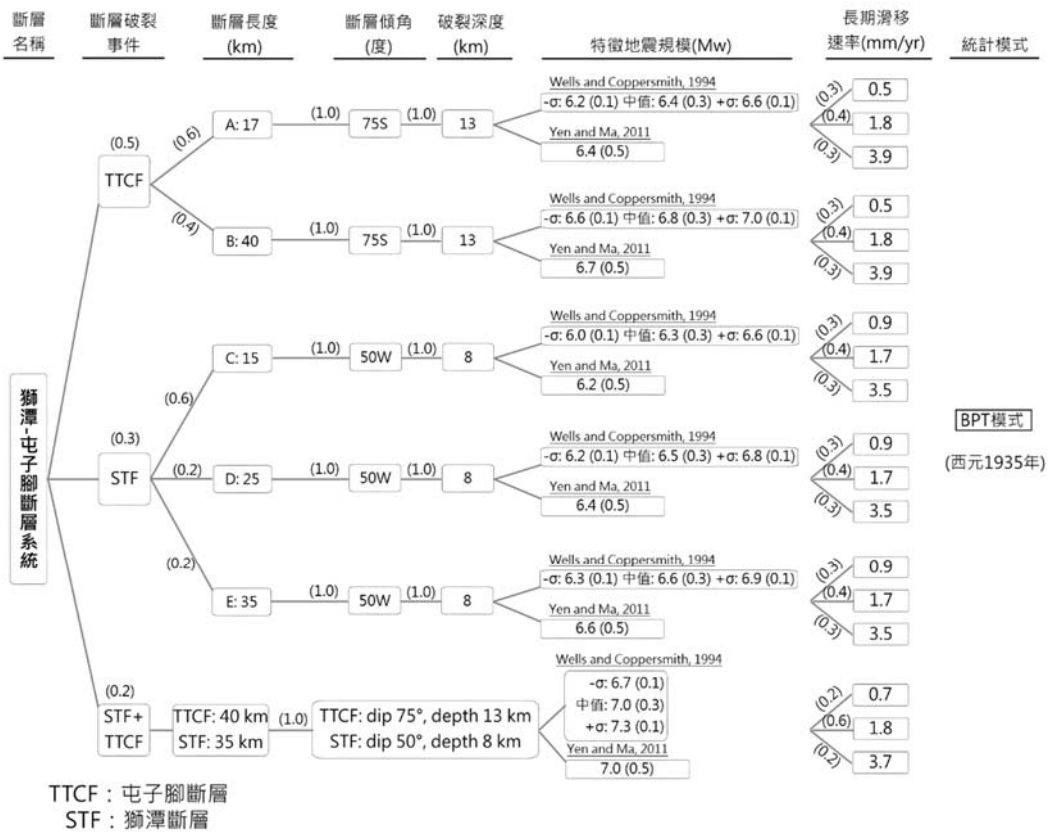


圖 5. 27：獅潭−屯子腳斷層系統邏輯樹

Figure 5. 27: Logic tree of the Shihtan -Tuntzuchiao fault sysem.

5-6-2 獅潭−屯子腳斷層系統規模與年發生率

獅潭−屯子腳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 5. 28 為 6 個破裂事件取表 5. 18 的參數值之特徵地震模式分布情形。

圖 5. 27 之獅潭−屯子腳斷層邏輯樹可得到 72 個分支，每個分支皆有其權重，經由特徵地震模式計算之後，圖 5. 29 為 6 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將 6 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 5. 30（a）之獅潭−屯子腳斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 5. 30（b）之獅潭−屯子腳斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

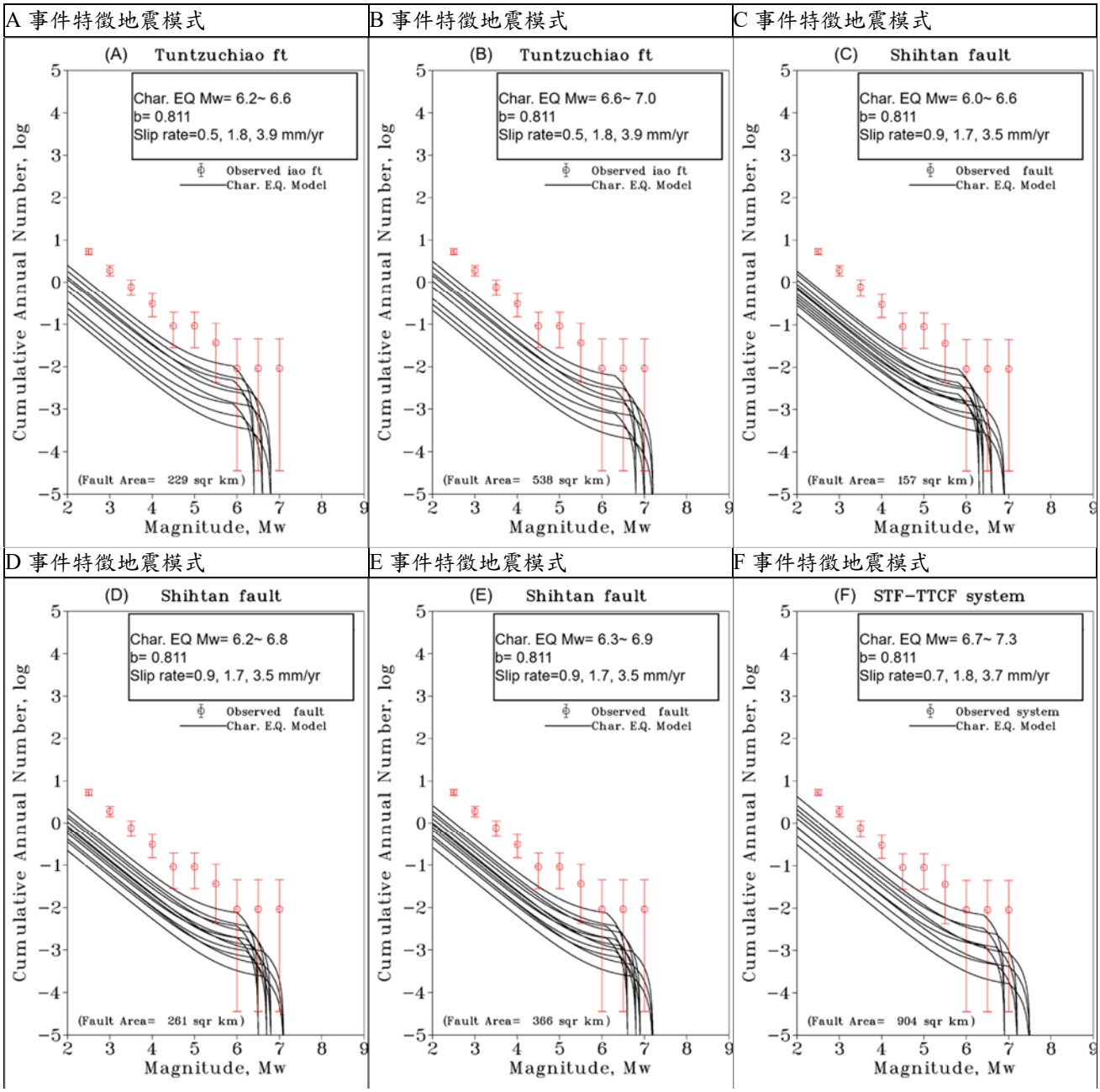


圖 5. 28：獅潭-屯子腳斷層系統各破裂事件特徵地震模式規模與年發生率之關係

Figure 5. 28: The recurrence relationships based on characteristic earthquake distribution for each rupture case of the Shihtan -Tuntzuchiao fault sysem.

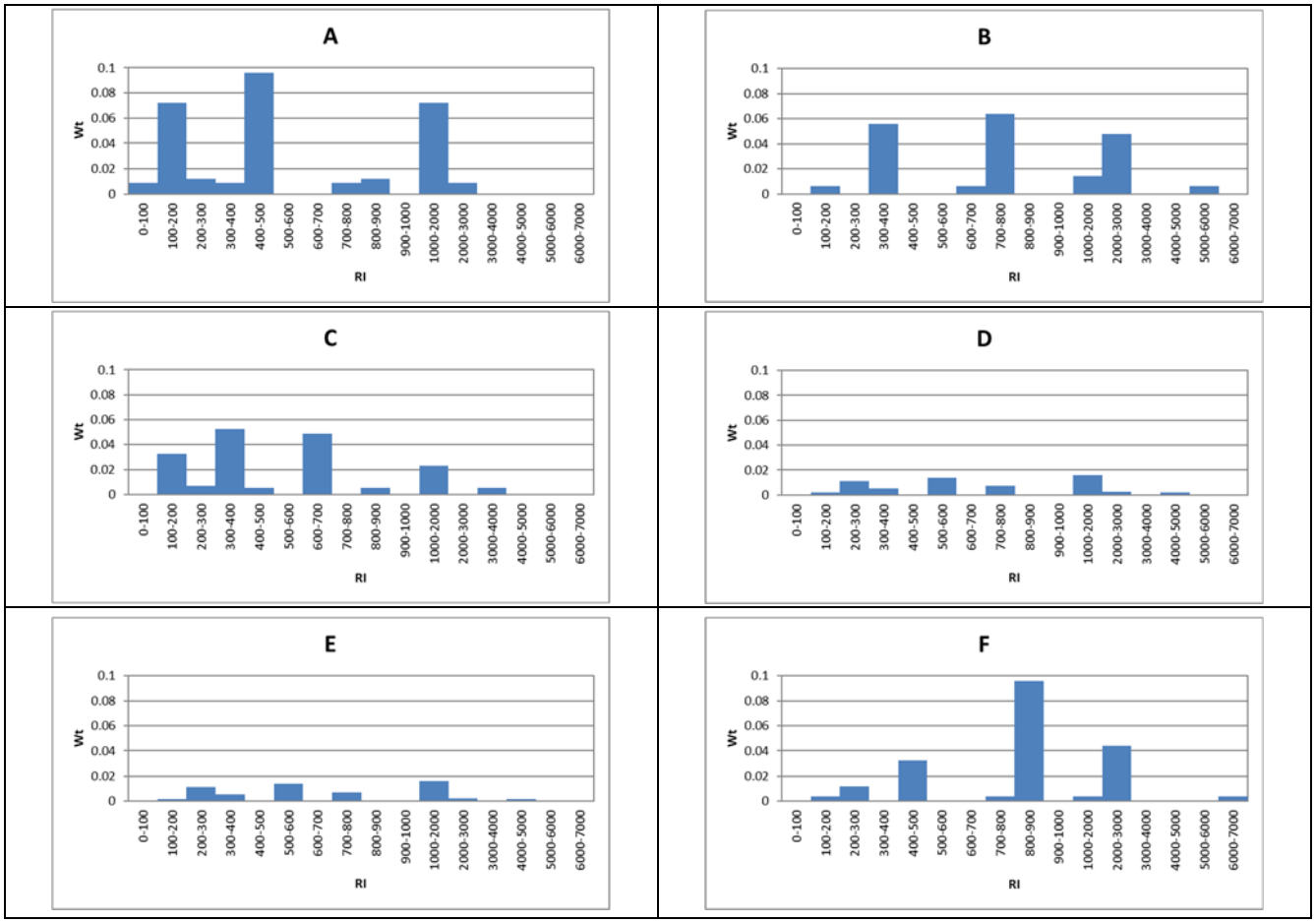


圖 5. 29：獅潭–屯子腳斷層系統 6 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

Figure 5. 29: Recurrence interval - weighting relationships of the six rupture cases on the Shihtan -Tuntzuchiao fault system.

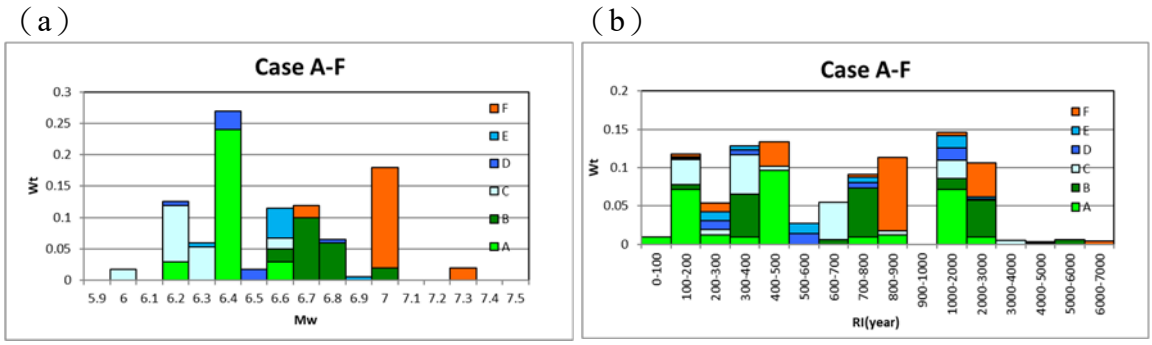


圖 5. 30：獅潭–屯子腳斷層系統之全部邏輯樹分支規模與地震復發間隔時間權重分布。(a) 獅潭–屯子腳斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，(b) 獅潭–屯子腳斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

Figure 5. 30: (a) The summed magnitude- weighting relationship for the whole branches of the Shihtan - Tuntzuchiao fault system. (b) The summed recurrence interval - weighting relationship for the whole branches of the Shihtan - Tuntzuchiao fault system.

5-6-3 獅潭斷層機率評估

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 模式估算獅潭-屯子腳斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，獅潭-屯子腳斷層系統最後一次發生時間為西元 1935 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

本節主要評估獅潭斷層發生機率，因此移除屯子腳斷層破裂模式之發生機率，表 5. 19 為獅潭評估之結果，以西元 2023 年為基準，採用 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.0~7.3 之機率為 1.6%、2.7%及 5.9%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.3%、0.5%及 1.4%。另以 POISSON 模式計算之結果也列於表 5. 19 中以供比較。

表 5. 19：獅潭斷層發生機率評估

Table 5. 19: Earthquake probabilities for the Shistan fault in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
6.0~7.3	1.6%	3.1%	2.7%	4.9%	5.9%	9.1%
M ≧6.5	0.3%	1.3%	0.5%	2.0%	1.4%	3.9%

5-6-4 屯子腳斷層機率評估

本節主要評估屯子腳斷層發生機率，因此移除獅潭斷層破裂模式之發生機率，表 5. 20 為屯子腳斷層評估之結果，以西元 2023 年為基準，採用 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.3 之機率為 2.3%、4.0%及 8.6%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 0.5%、0.9%及 2.5%。另以 POISSON 模式計算之結果也列於表 5. 20 中以供比較。

另外，評估獅潭−屯子腳斷層系統整體未來 30、50 及 100 年的發生機率，列於表 5. 21 供參考。

表 5. 20：屯子腳斷層發生機率評估

Table 5. 20: Earthquake probabilities for the Tuntzuchiao fault in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
6.2~7.3	2.3%	4.3%	4.0%	6.8%	8.6%	12.6%
M ≧6.5	0.5%	1.9%	0.9%	3.2%	2.5%	6.0%

表 5. 21：獅潭−屯子腳斷層系統發生機率評估

Table 5. 21: Earthquake probabilities for the Shihtan - Tuntzuchiao fault system in this project.

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
6.0~7.3	3.6%	6.5%	6.4%	10.4%	13.6%	19.1%
M ≧6.5	0.5%	2.4%	1.1%	3.8%	3.0%	7.2%

5-7 斷層活動潛勢圖成果（初稿）

本年度斷層潛勢圖為北部重要區域活動斷層潛勢評估之成果，名為「臺灣北部重要區域斷層活動機率圖」（圖 5.31）。以地表變形強度分布圖為底圖，套疊山腳斷層、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。

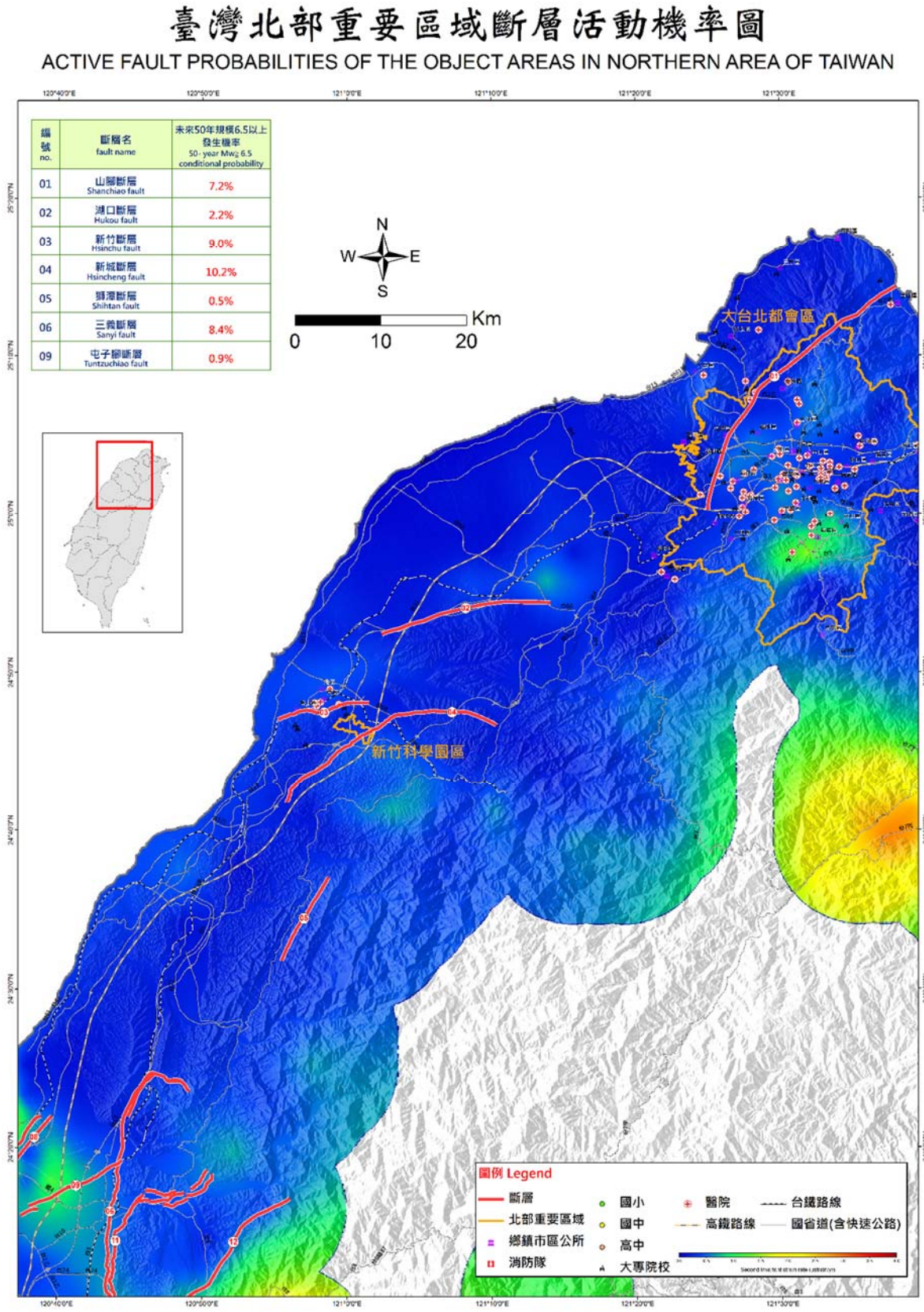


圖 5. 31：臺灣北部重要區域斷層活動機率圖

Figure 5. 31: Active fault probabilities of the object areas in northern area of Taiwan.

第六章、北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

6-1 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。

6-1-1 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 6. 1），以節點 1 為例：

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

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

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

$$\Delta = x_1\left(y_2 - y_3\right) + x_2\left(y_3 - y_1\right) + x_3\left(y_1 - y_2\right) \quad （式 6.1）$$

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：

$$U(x,y) = \sum_{m=1}^{3} N_m u_m \quad （式 6.2）$$

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：

$$U\left(x,y\right) = [N_1\ N_2\ N_3] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad （式 6.3）$$

根據上式，Wang and Wright（2012）提出下式：

$$\begin{bmatrix} G_{sar} & G_{orb} & G_{atm} \\ G_{gps} & 0 & 0 \\ k^2\nabla^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vel} \\ m_{orb} \\ m_{atm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \quad （式 6.4）$$

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 6.4 修改如下：

$$\begin{bmatrix} G_{gnss} \\ G_{level} \\ k^2\nabla^2 \end{bmatrix} [m_{vel}] = \begin{bmatrix} d_{gnss} \\ d_{level} \\ 0 \end{bmatrix} \quad （式 6.5）$$

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）。

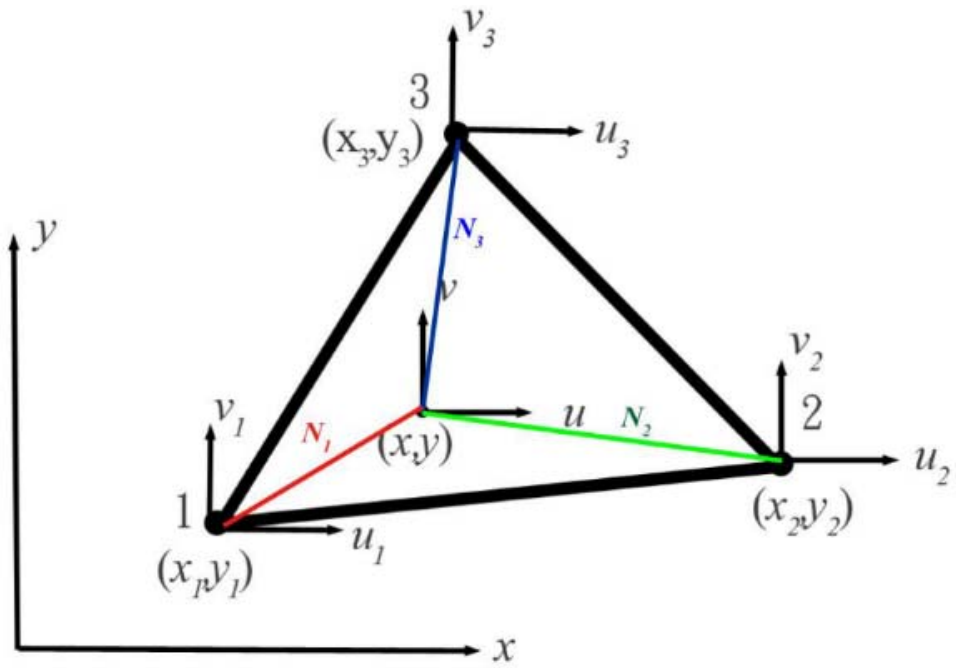


圖 6. 1：觀測點與網格三頂點示意圖

Figure 6. 1: Relationship between observations and the interpolation points of triangle.

本次報告中，先採用 GNSS 連續站及移動站進行速度反演，首先，為使網格分布範圍涵蓋臺北都會區、新竹科學園區等重要區域，本團隊設定為邊界東經 120.4°至 122.05°及北緯 24.15°至 25.35°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 6. 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。

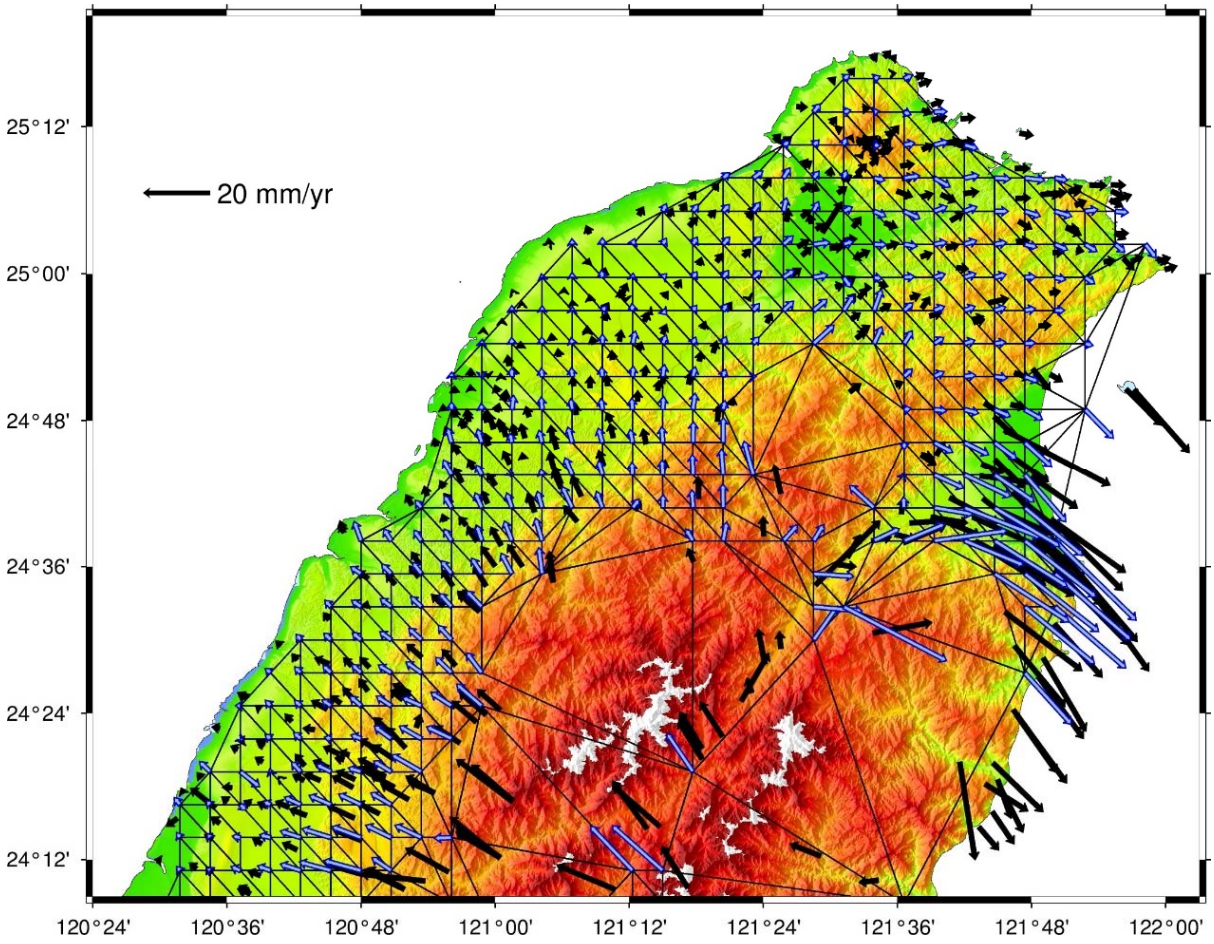


圖 6. 2：速度反演之重要區域網格化連續性速度場。黑色箭頭為 GNSS 移動站水平速度場，白色為 GNSS 連續站水平速度場，藍色為經速度反演所計算之網格速度場測試成果。

Figure 6. 2: Grid velocities derived using velocity inversion.

6-1-2 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：

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(dL/dt)}{L} \qquad (式\ 6.6)$$

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：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta + \dot{\varepsilon}_{en}\sin\theta\cos\theta + \dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta \qquad (式\ 6.7)$$

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$\dot{\omega}$：

$$\begin{bmatrix} V_e^1 \\ V_n^1 \\ V_e^2 \\ V_n^2 \\ \vdots \\ V_e^i \\ V_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \\ 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_e^j \\ V_n^j \\ \dot{\varepsilon}_{ee}^j \\ \dot{\varepsilon}_{en}^j \\ \dot{\varepsilon}_{nn}^j \\ \dot{\omega}^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_e^1 \\ e_n^1 \\ e_e^2 \\ e_n^2 \\ \vdots \\ e_e^i \\ e_n^i \end{bmatrix} \qquad (式\ 6.8)$$

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：

$$E_{ij} = C_{ij}\exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{\sigma_D^2}\right) \qquad (式\ 6.9)$$

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），以及應變率強度：

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) + \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad （式 6.10）$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) - \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad （式 6.11）$$

$$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[2\dot{\varepsilon}_{en} / \left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right)\right] \quad （式 6.12）$$

$$\Delta = \dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn} \quad （式 6.13）$$

$$\Sigma = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2 / 4} \quad （式 6.14）$$

$$\psi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right) / 2\dot{\varepsilon}_{en}\right] \quad （式 6.15）$$

$$I_2 = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ee}^2 + \dot{\varepsilon}_{nn}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{en}^2} \quad （式 6.16）$$

其中 $\dot{\varepsilon}_1$ 為最大主應變率，$\dot{\varepsilon}_2$ 為最小主應變率，ϕ 為 $\dot{\varepsilon}_1$ 之方位角，Δ 為面膨脹率，Σ 為最大剪應變率，ψ 為 Σ 之方位角，I_2 為應變率強度。各項參數中，面膨脹率可用來反映和傾向滑移斷層（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），應變率強度則為應變率張量之第二不變量（式 6.16），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，逆斷層產生地表變形也具有剪切應變量，故本團隊建議可採用第二不變量來進行綜合性之地表變形強度評估。

根據速度反演後，再由前述之方法所計算而得之主應變速率場（圖 6. 3）、剪應變速率場（圖 6. 4）以及應變率強度分布（圖 6. 5）可發現，主應變速率場之壓縮量在臺北都會區內主要分布於西北側沿海、新店區及烏來區交界區域往西北延伸至基隆區及雙溪區，西部區域則以內陸近斷層處較為顯著，整體沿東北西南走向延伸。其中，最大壓縮量約 1.5 μstrain/yr，主要分布於新店區及烏來區交界區域以及屯子腳斷層附近，而其餘區域則小於 0.5 μstrain/yr。

剪應變速率場部分，北部整體而言約 0.0 至 0.8 μstrain/yr，雖整體變化極小但仍可看出新店區及烏來區交界區域及屯子腳斷層附近剪應變率較大，且有往山區漸大之趨勢，近斷層處則無顯著剪應變發生。而應變率強度因反映的是主應變率與最大剪應變速率之總和，故其分布型態約等同於前兩者之綜合型態，同樣以新店區及烏來區交界區域及屯子腳斷層附近之應變率強度較高，約 1.0 μstrain/yr，其餘多數區域皆小於 0.5 μstrain/yr。

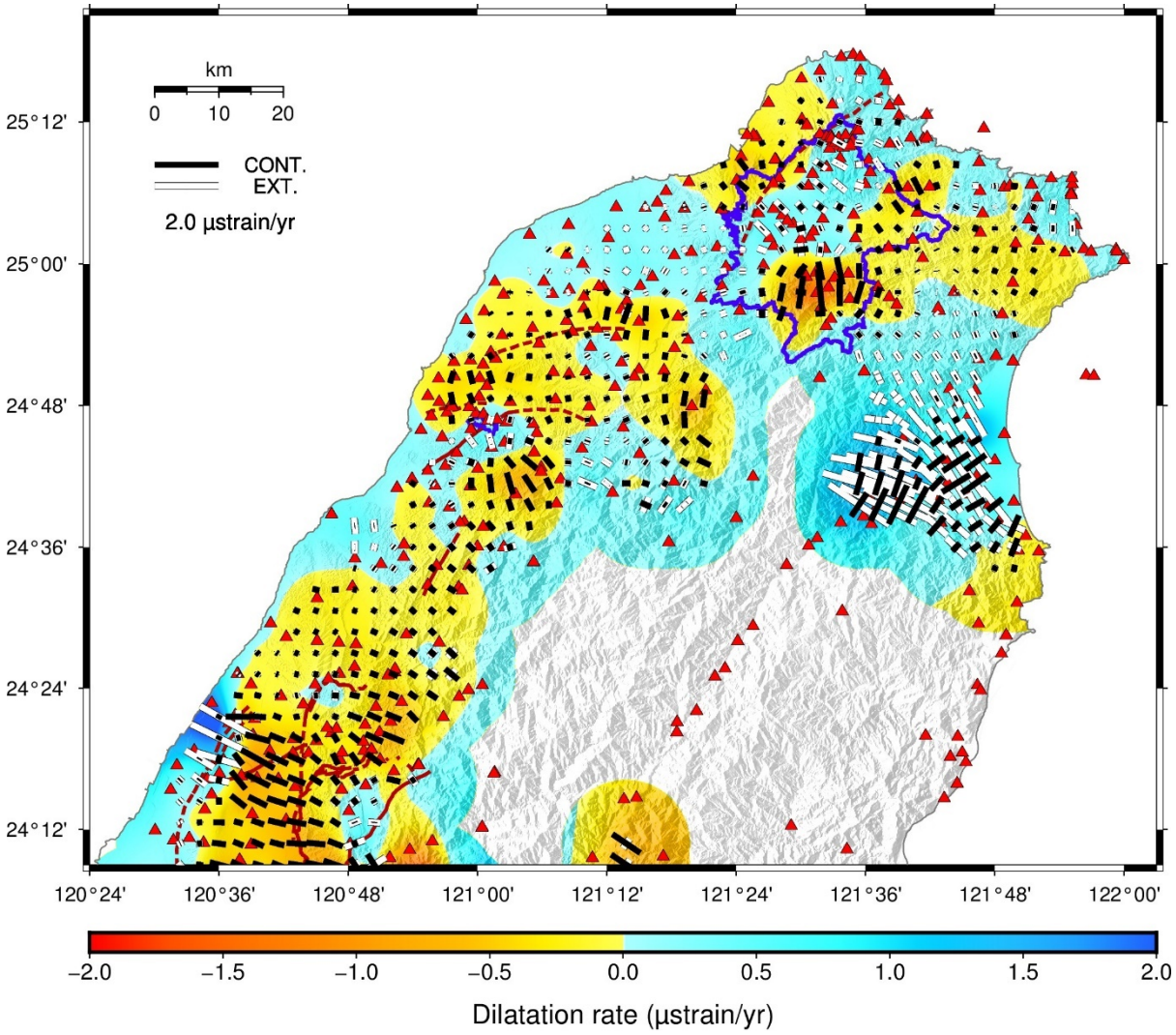


圖 6. 3：重要區域最大主應變速率場

Figure 6. 3: Distribution of principal strain rates.

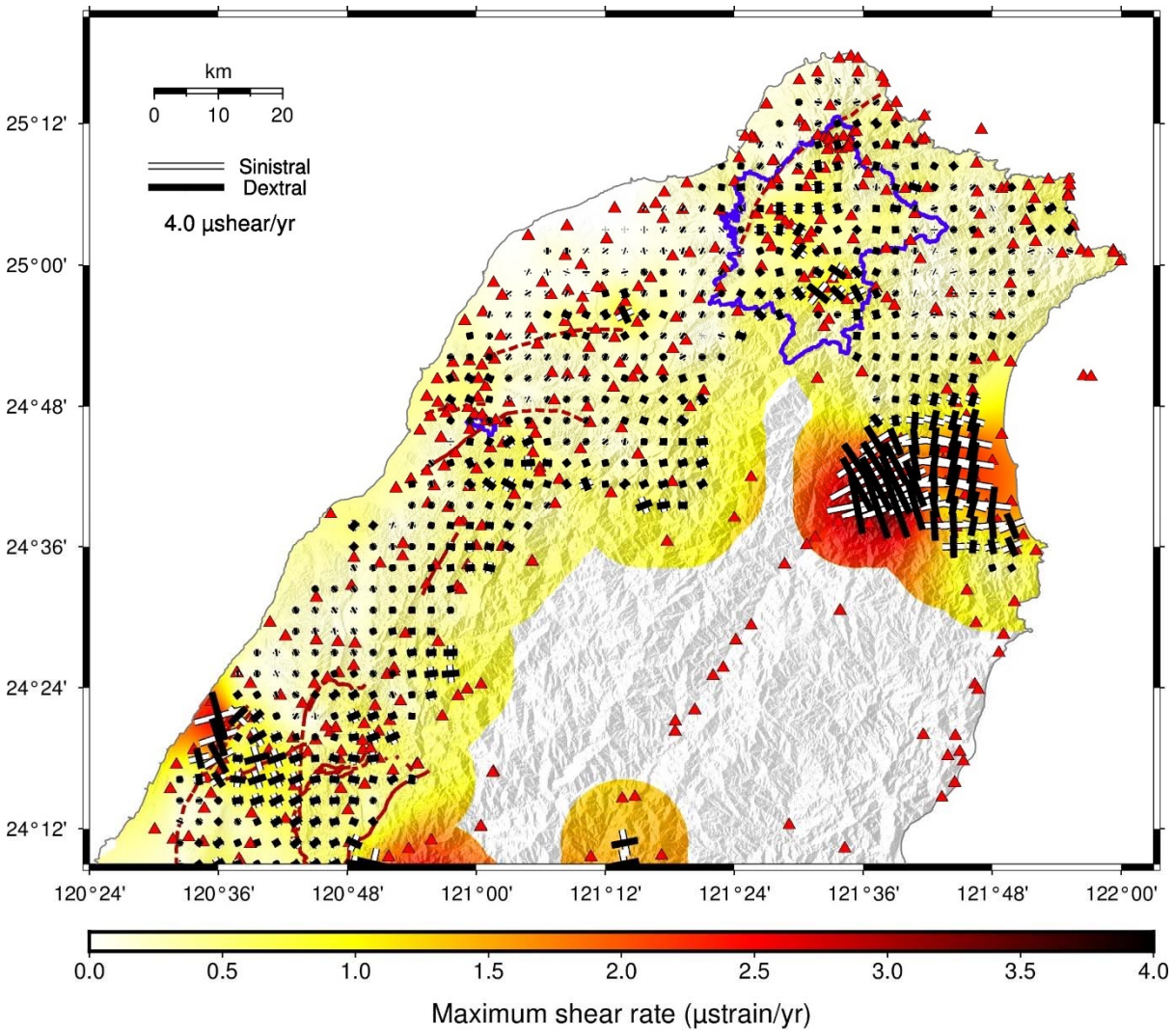


圖 6. 4：重要區域最大剪應變速率場

Figure 6. 4: Distribution of maximum shear strain rates.

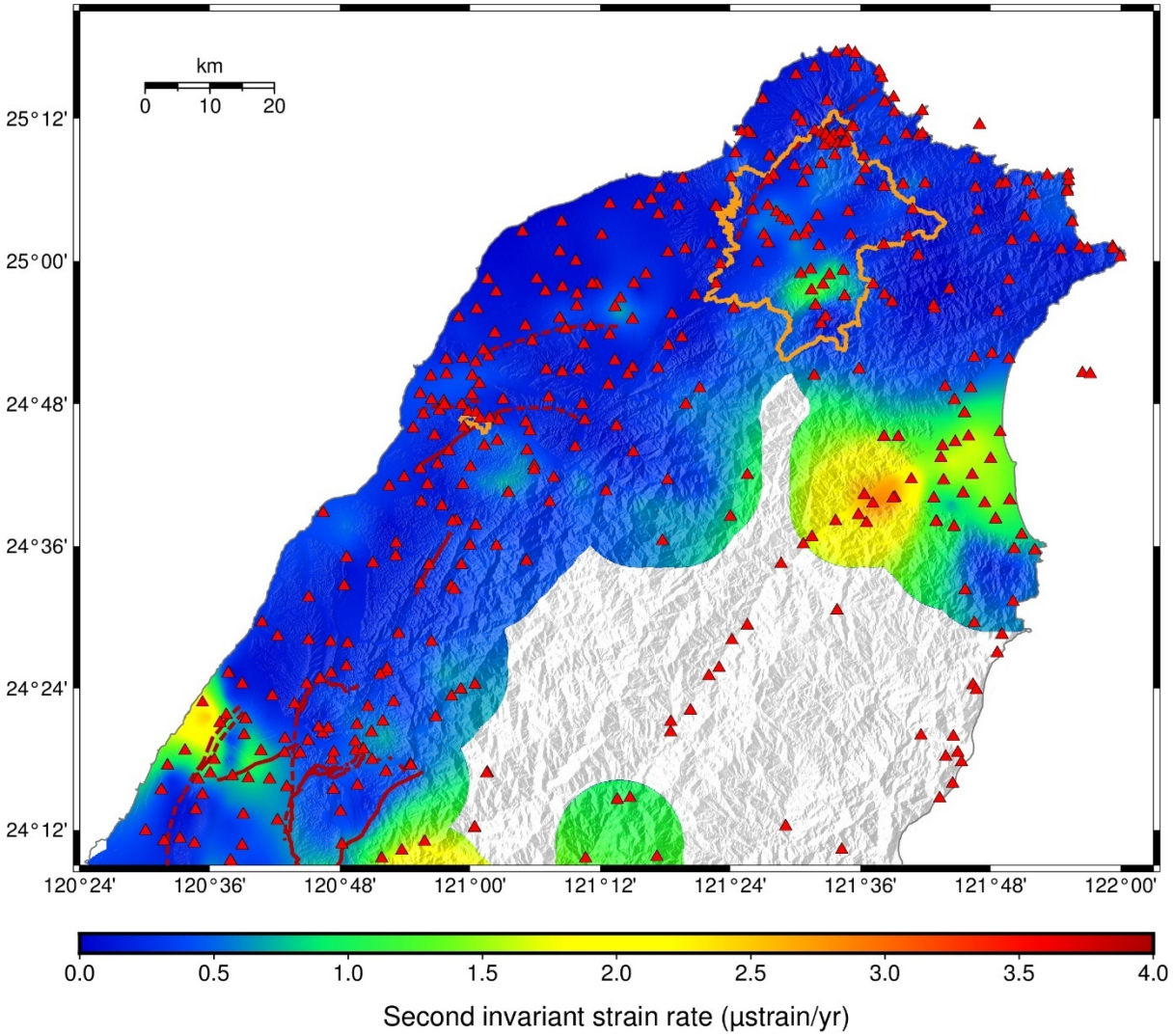


圖 6. 5：重要區域應變第二不變量分布圖

Figure 6. 5: Distribution of second invariant strain rates.

6-2 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。

6-2-1 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 6.1）外，亦針對高速鐵路之設施容許變形量進行規範（表 6.2）。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 6.1 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 6.6、圖 6.7），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 6. 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 6. 1：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004）

Table 6. 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

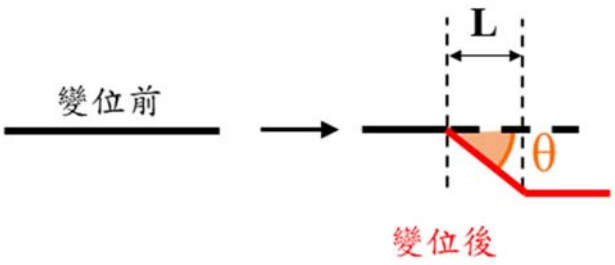


圖 6. 6：橋面平行移動之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

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

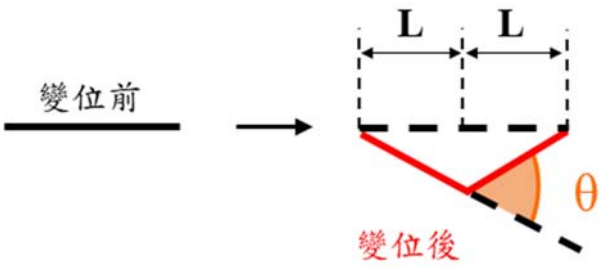
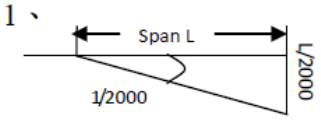
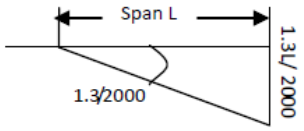
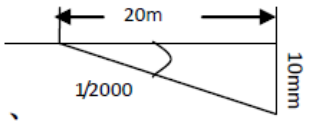
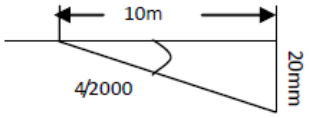
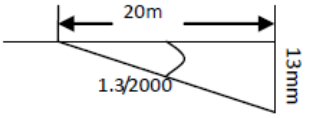
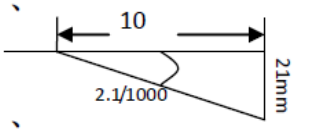
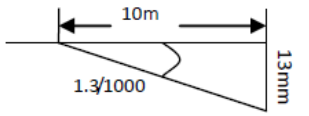


圖 6. 7：橋面折角之變位型態（修改自《鐵路橋梁設計規範》(中華民國交通部，2004))。紅色實線為變位後之橋面位置；L 為跨徑長度，單位為 m；θ 為變位夾角，單位為 $\frac{1}{1000}$。

Figure 6. 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 6. 2：常時橋面之不連續變位限制（中華民國交通部，2004）

Table 6. 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、 

6-2-2 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，本計畫參照地質調查及礦業管理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 6-1 章節所述，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 6-2-1 章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 6. 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 6. 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 6. 3：地表變形強度分級表

Table 6. 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。

分級	應變率第二不變量 n (μstrain/yr)	高鐵
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。

6-3 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 6. 8 及圖 6. 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，全臺地表變形強度最高之區域為花東縱谷地區，該處為歐亞板塊與菲律賓海板塊之聚合帶，由北起米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層等，至南段之池上斷層、利吉斷層與鹿野斷層，形成了縱谷斷層系統，根據觀測資料及以往許多學者針對此區域所進行之研究（e.g., Hsu & Burgmann, 2006；Hsu et al., 2009；Yu et al., 1994；Yu & Kuo, 2001；Yen et al., 2010；Champenois et al., 2012；劉亭妤，2016）可知，花東縱谷為臺灣地表變形速度最快、地震最為頻仍之區域，且縱谷斷層南段之地表潛移速度極快，顯示本計畫之計算結果與前人之研究成果相符。

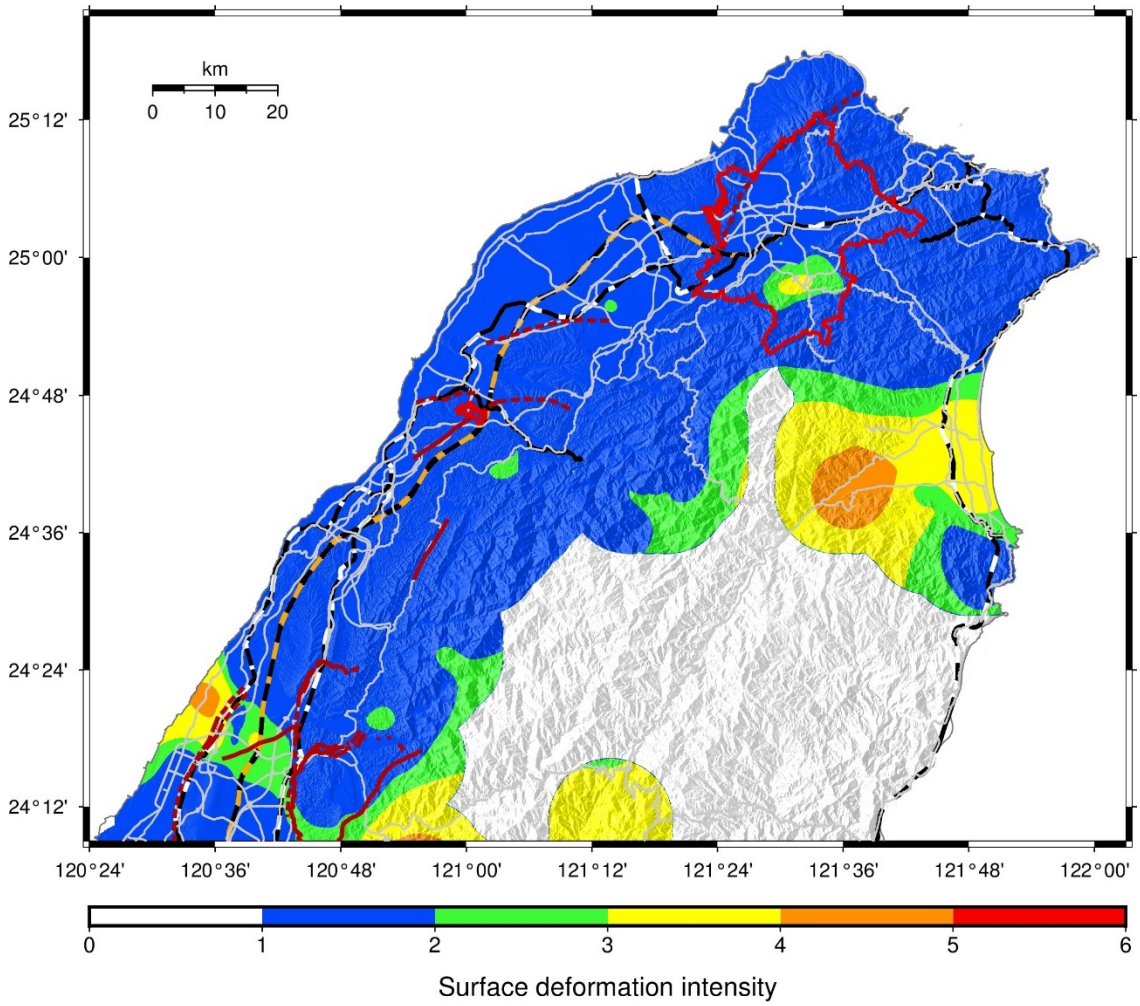


圖 6. 8：重要區域地表變形強度分布圖

Figure 6. 8: Surface deformation intensity map of object area.

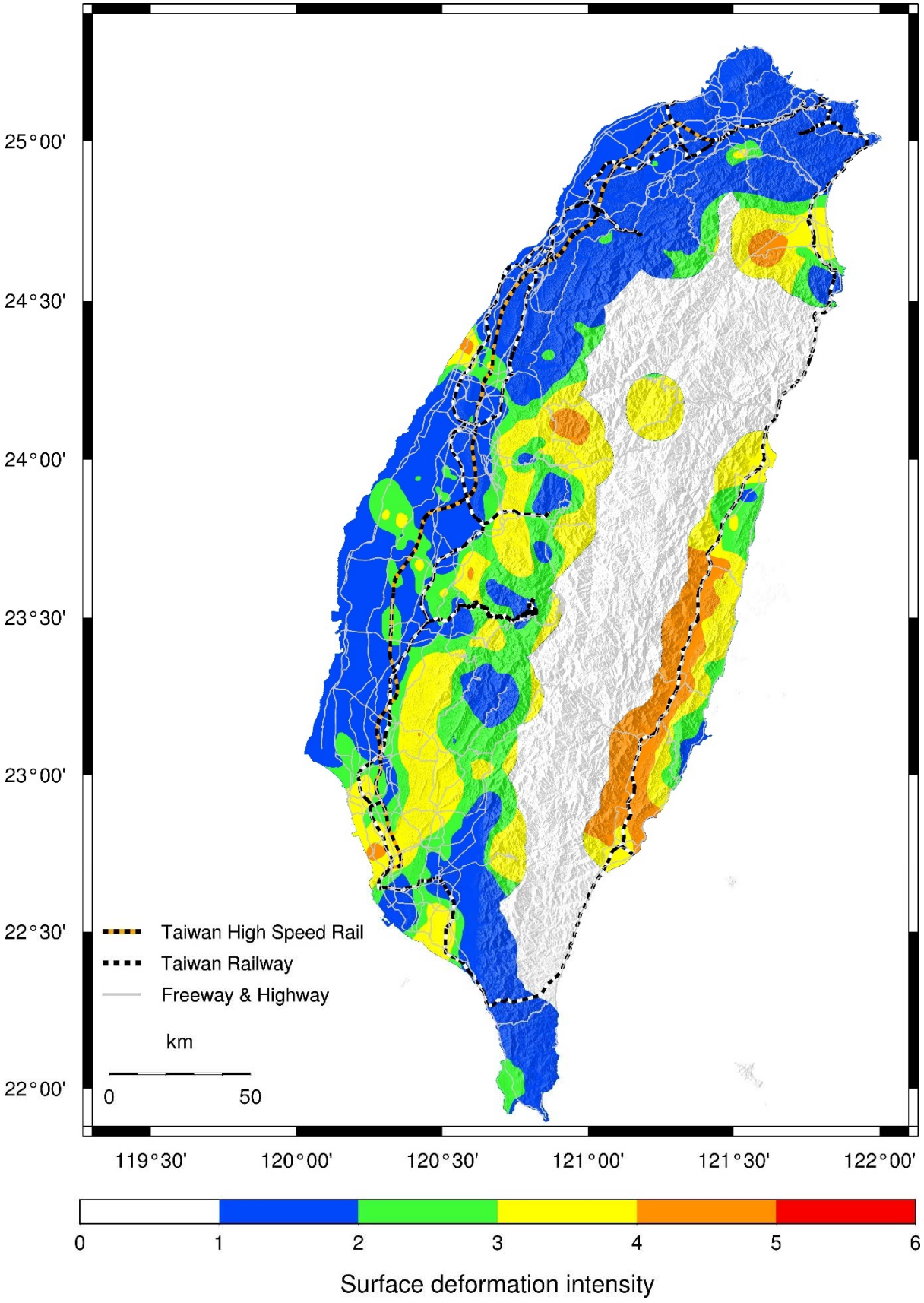


圖 6. 9：全臺地表變形強度分布圖

Figure 6. 9: Surface deformation intensity map.

第七章、北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，鄰近區域之景況地震動分布圖。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，更可提供經濟部地質調查及礦業管理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，產出計算景況地震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山腳斷層及新城斷層之斷層最佳幾何參數，接著則產製景況地震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°。景況地震動圖分布範圍則涵蓋重要區域，設定為邊界東經 120.040°至 122.05°及北緯 24.15°至 25.35°之間，範圍涵蓋臺北都會區及新竹科學園區。同時，為避免產製景況地動圖於邊界範圍可能產生數值計算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 120.3°至

122.10°，北緯 24.10°至 25.40°之間，加大計算地動預估值之範圍，以確保產製景況地震動圖數值正確。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。

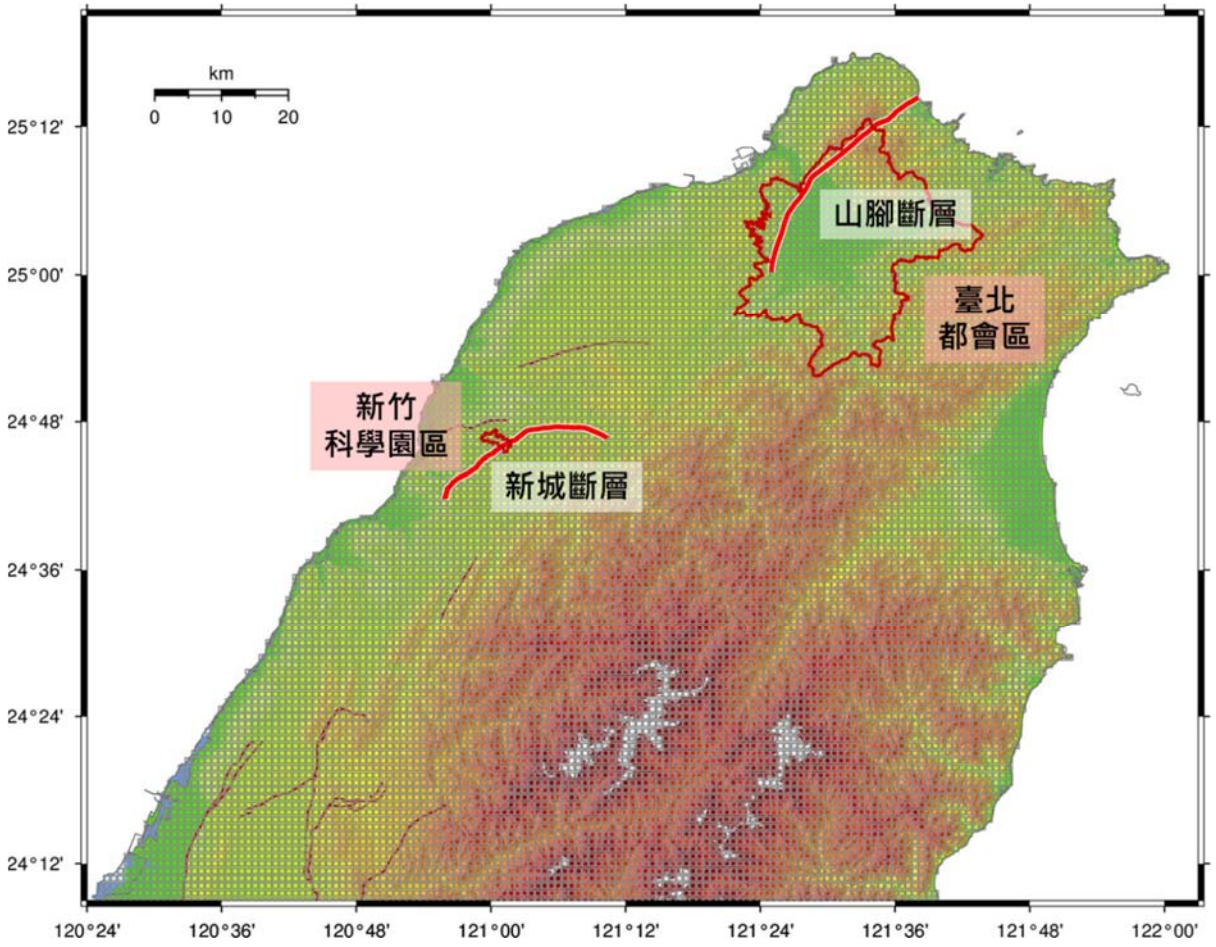


圖 7. 1：景況地動分布計算範圍之地面網格點分布

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

評估計算景況地震動分布圖，係由地動預估式推求活動斷層錯動時所引致之地表地震動值。其中，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）。

為提供後續景況地震動評估計算步驟所需，本分項工作分別計算山腳斷層及新城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。

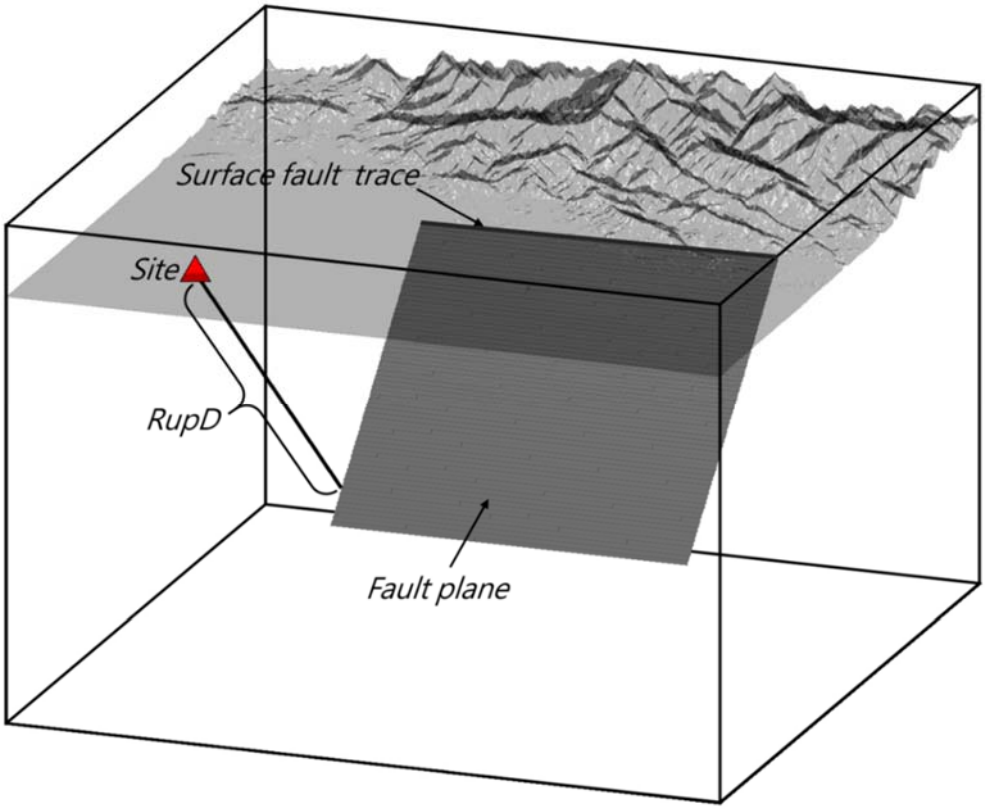


圖 7. 2：最短距離（RupD）、地面虛擬測站點及三維分布斷層面空間關係示意圖

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經濟部地質調查及礦業管理中心 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（山腳斷層及新城斷層）之空間分布（圖 7. 3）。

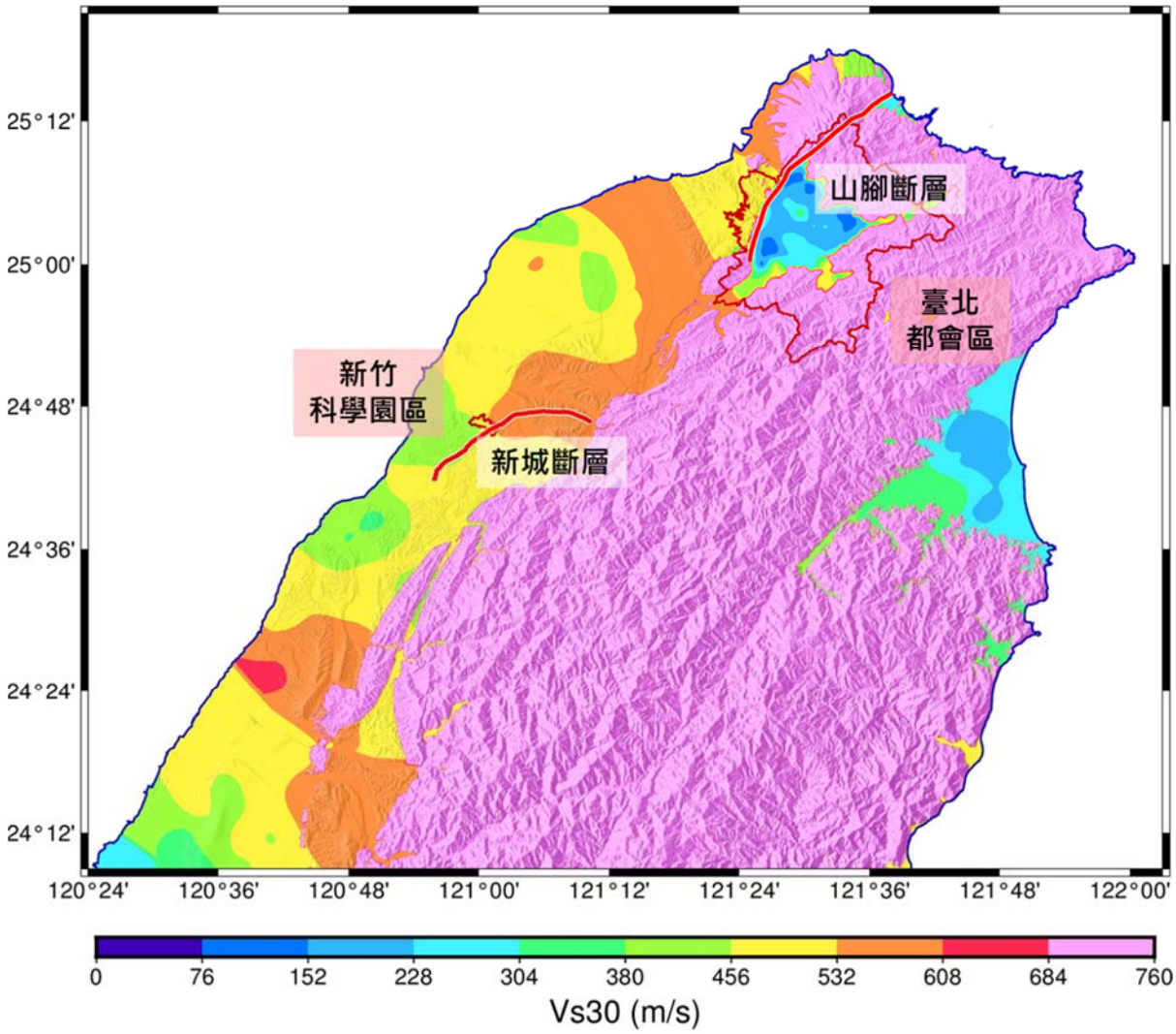


圖 7. 3：Vs30 及兩條評估活動斷層之分布圖

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震動值，採用兩套地動預估式，包含林柏伸（2009）所建立之地動預估式（Ground Motion Prediction Equation, GMPE），以下簡稱 GMPE Lin09，以及 Chao et al.（2020）發展之地動預估式，以下簡稱 GMPE Chao20。

GMPE Lin09 使用交通部中央氣象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

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

（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震動強度之影響。

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，故採山腳斷層及新城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），進而分別計算山腳斷層及新城斷層之地面地動值。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，根據本團隊於前一階段計畫中，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，故後續山腳斷層及新城斷層之分析，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北都會區及新竹科學園區兩個重要區域，分別由山腳斷層及新城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 數值之景況地震動分布圖（圖 7.4 及圖 7.5）。

地震動值大小（即最大地動加速度值，PGA）反應地表搖晃程度，地震動值越高，即代表地表搖晃程度越大。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震動的週期相關，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震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。

由於本計畫之地震動計算成果為 PGA，單位為 g（1g 等於 980 cm/s^2），故僅能與氣象署舊版之震度圖進行比對（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，山腳斷層景況地震動分布，根據 GMPE Chao20 之真實地表場址成果（圖 7.4 b），在山腳斷層若最大地震規模為 M_w 6.7，其鄰近區域可能產生 0.36 g 左右之地震動值，約 6 級之震度，以重要區域之角度來看，臺北都會區西北側區域及山腳斷層所在處，震度可達 6 級，而在此可發現臺北盆地之場址效應有非常顯著之減弱，形成該結果之原因可能是因為此模型進行了土壤非線性因素之考量，一般而言土壤在高震度的情況下，施予多少力便會產生相應之應變，但若超過該土壤可承受的應變，則會轉變為非線性，故而獲得此成果。

新城斷層之景況地震動分布，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_w 6.9 則地震動直可達 0.38 g，相對應之舊版震度同樣可達 6 級，新竹科學園區級其西南側與東側區域延伸 30 km 及南北延伸約 10 km 範圍內皆具有 6 級震度，臺北都會區則低於 4 級震度。就該兩條斷層對於各重要區域之影響來看，山腳斷層對於臺北都會區西北側具有較大之影響，新城斷層由於完全跨過新竹科學園區，地震動範圍完全涵蓋整個園區，對於臺北都會區西南側區域也可能產生 4 級左右之地震動，一旦發震對於園區內產業之影響不容小覷。

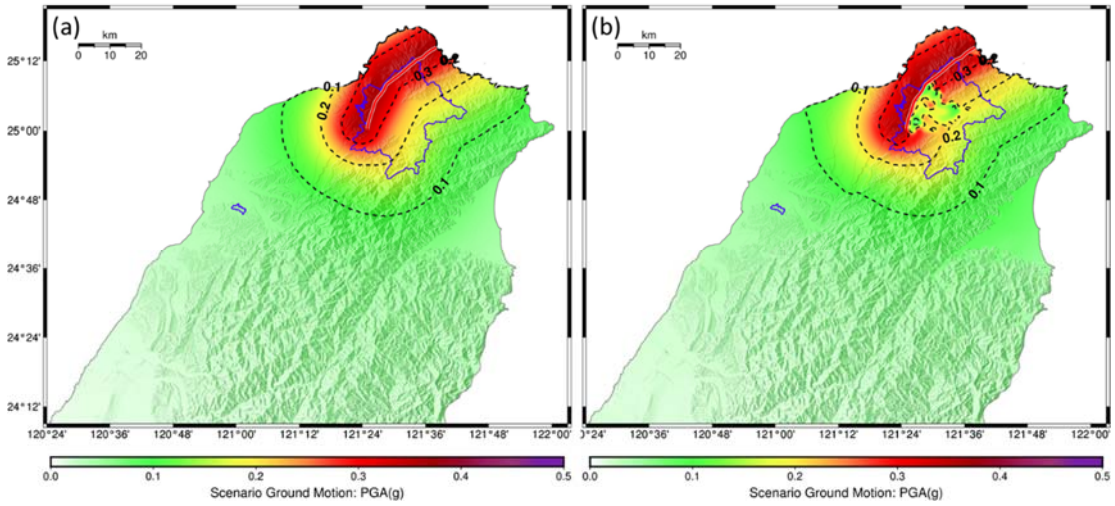


圖 7. 4：由 GMPE Chao20 算得之山腳斷層景況地震動分布圖。（a）岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之景況地震動分布圖。（b）考慮側向場址條件之之景況地震動分布圖。

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

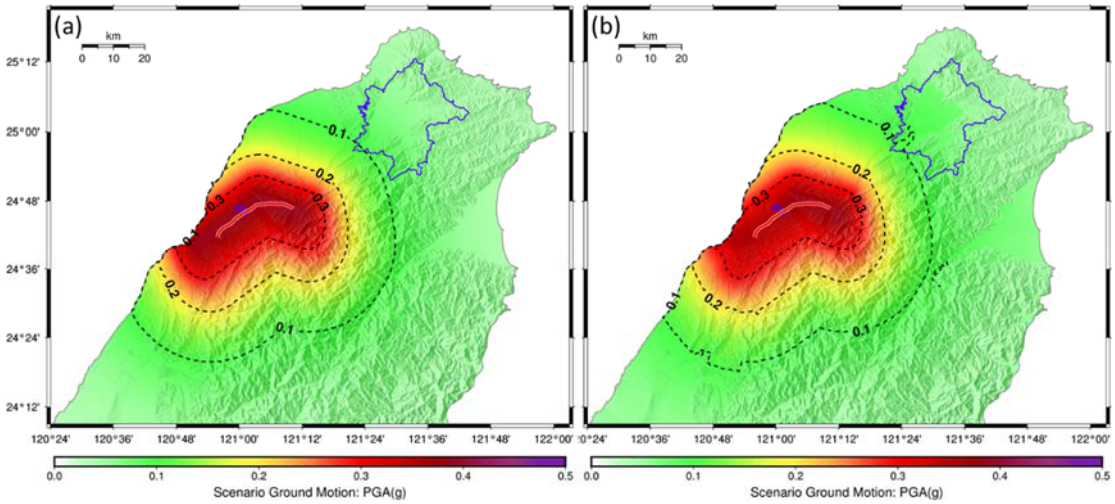


圖 7. 5：由 GMPE Chao20 算得之新城斷層景況地震動分布圖。（a）岩盤條件 Vs30 為 760 m/s 之景況地震動分布圖。（b）考慮側向場址條件之之景況地震動分布圖。

Figure 7. 5: Scenario earthquake shaking map of the Hsincheng 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（修改自交通部中央氣象局，2021）。

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

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 7-1 節之景況地振動分布圖，涵蓋臺北都會區及新竹科學園區等重要區域，因此邊界同樣設定為延伸後之範圍：東經 120.30°至 122.10°，北緯 24.15°至 25.35°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 4. 16），即潛在之震源位置。

獲得潛在震源位置後，根據本計畫第 6-1 章節依經驗式所進行之推估，各斷層依破裂事件不同，其最大可能規模亦有所不同，而在本次報告之景況同震位移推估中，為確保災害發生時，可更快速有效的應變，採所有可能最大地震規模中之最大值來進行估算。故山腳斷層之 *Mw* 設

定為 6.7，新城斷層之 *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，本計畫可推求山腳斷層之地震重複週期（recurrence interval）約為 172 年；新城斷層之地震重複週期約為 375 年。隨後再將各斷層之地震重複週期乘上斷層滑移虧損速率，即可分別獲得未來口宵里斷層、新化斷層及後甲里斷層於未來發生地震時，可能的同震斷層滑移分布量。最後，根據各斷層之斷層滑移分布，本計畫變可藉由三維斷層錯位模型進行正演，計算地表所有網格點之同震位移場，此即為景況同震位移分布圖。

7-2-3 景況同震位移分布圖

圖 7. 8 及圖 7. 12 為本計畫針對山腳斷層所繪製之景況水平同震位移分布圖，圖 7. 9 及圖 7. 13 為其景況垂直同震位移分布圖。圖 7. 12 及圖 7. 13 中灰色虛線為三維模型所使用之簡化斷層線，綠色線及區塊為山腳斷層及重要區域。由景況同震位移場分布型態可發現，其水平位移主要分布於山腳斷層南、北兩段，南段西側之位移方向為由東往西並逐漸向北偏轉，斷層東側由南往北之位移方向則以由南往東北逆時針偏轉為主，整體影響範圍可達新竹科學園區。水平同震位移之最大量值落於斷層南段西側，約達 80.1 cm。垂直位移部分，山腳斷層西南段之同震位移量最大，斷層西北側為抬升最高可達 39.7 cm，東傾正斷層之型態使得東南側沉降顯著，且沉陷量最高可達 126.1 cm，而垂直同震位移之整體影響範圍以臺北都會區中西側區域為主。

圖 7. 10 及圖 7. 14 為本計畫針對新城斷層所繪製之景況同震位移分布圖，圖 7. 11 及圖 7. 15 為其景況垂直同震位移分布圖。圖 7. 14 及圖 7. 15 中灰色虛線為三維模型所使用之簡化斷層線，綠色線及區塊為新城斷層及重要區域。由景況同震位移場分布型態可發現，其水平同震位移主要分布於斷層西南段新竹科學園區以南西南側及東段之南側區域，位移方向於斷層東南側部分以由東南轉往西北，至新竹科學園區東北側區域再轉為往西，接著沿著新城斷層往西南延伸逐漸轉為西南西向，整體影響範圍以新竹市為主，遠至台灣中部及東部區域，對於臺北都會區南半側區域也有影響。水平同震位移之最大量值落於斷層之東北段，約達 125.8 cm。垂直位移部分，新城斷層為逆衝斷層，故整體來說斷層東南側以抬升為主，在其走向改變、鄰近新竹科學園區處之抬升量達到最大可達 129.9 cm，而新城斷層之發震所帶來之沉陷量較低，主要分布於以斷層東北側，約-11.2 cm，而垂直同震位移之整體影響範圍以臺灣西北部為主，南至台灣中部區域，北至臺北都會區西南側區域，且除了近斷層區域有顯著抬升外，其餘區域皆以沉降為主，且數值不大，故其可能產生之影響與破壞較小。

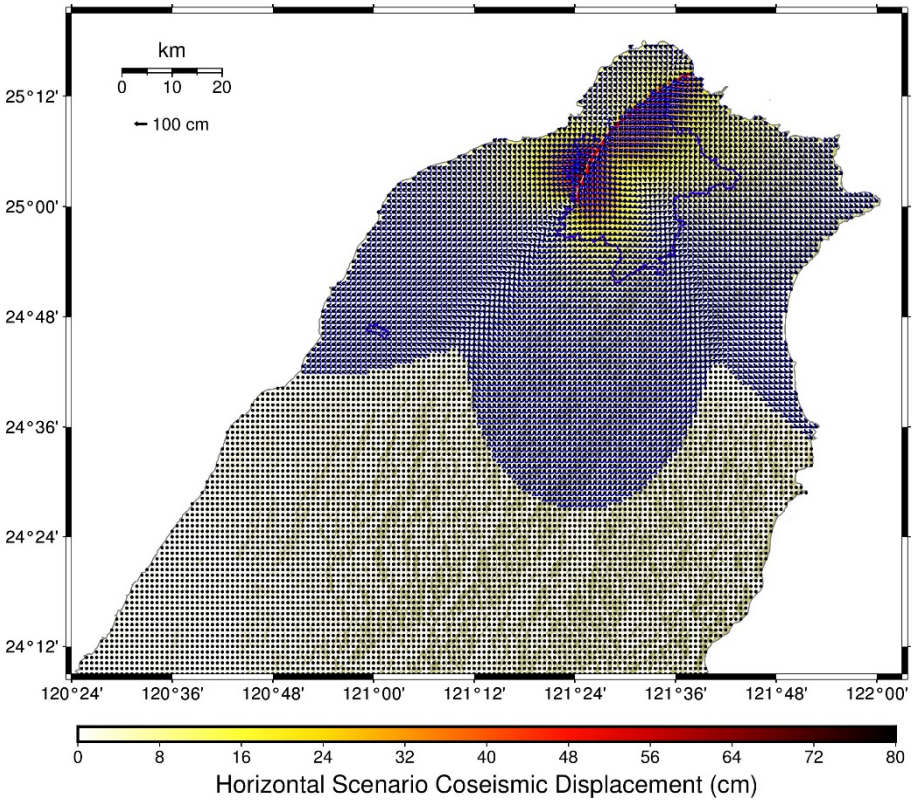


圖 7. 8：山腳斷層之景況水平同震位移分布圖

Figure 7. 8: Scenario coseismic displacement map of the Shanchiao fault.

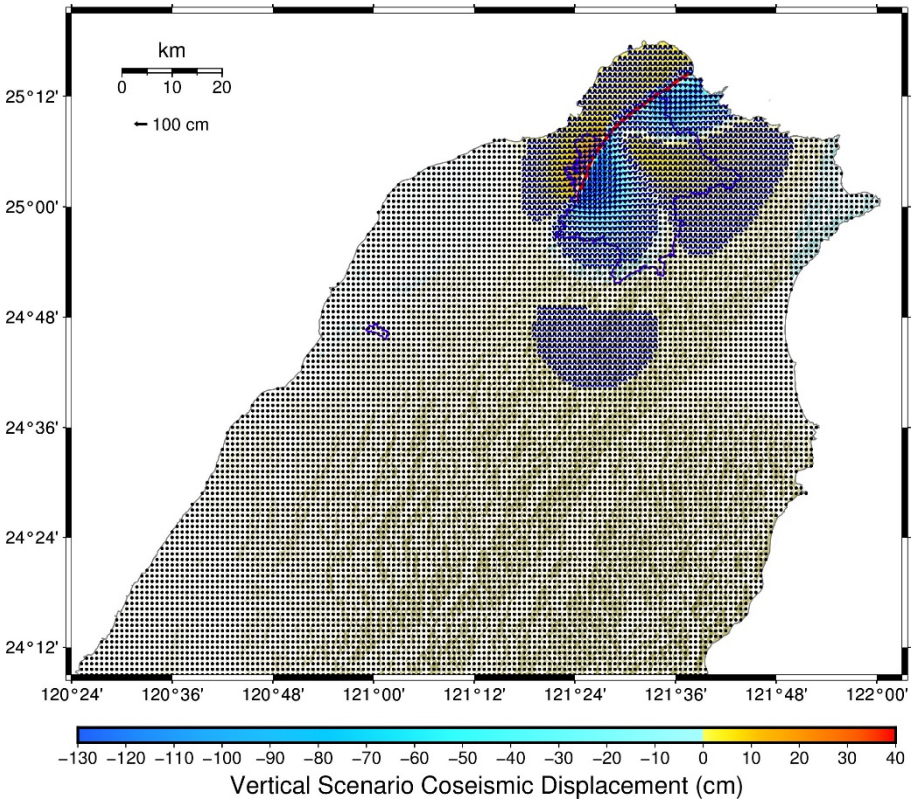


圖 7. 9：山腳斷層之景況垂直同震位移分布圖

Figure 7. 9: Scenario coseismic displacement map of the Shanchiao fault.

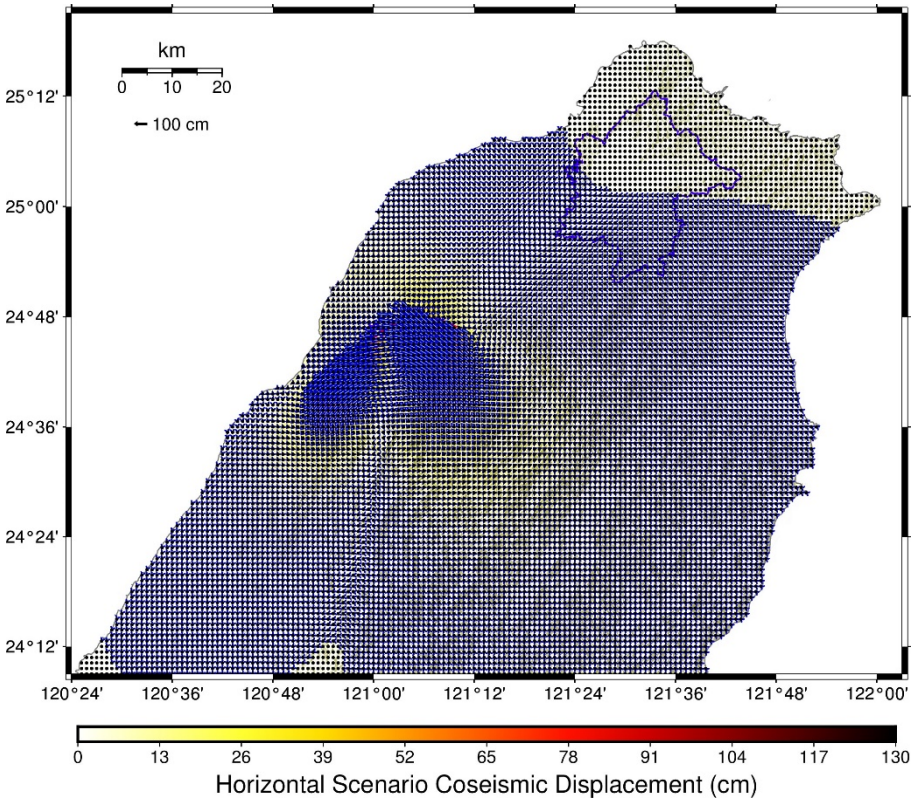


圖 7. 10：新城斷層之景況水平同震位移分布圖

Figure 7. 10: Scenario coseismic displacement map of the Hsincheng fault.

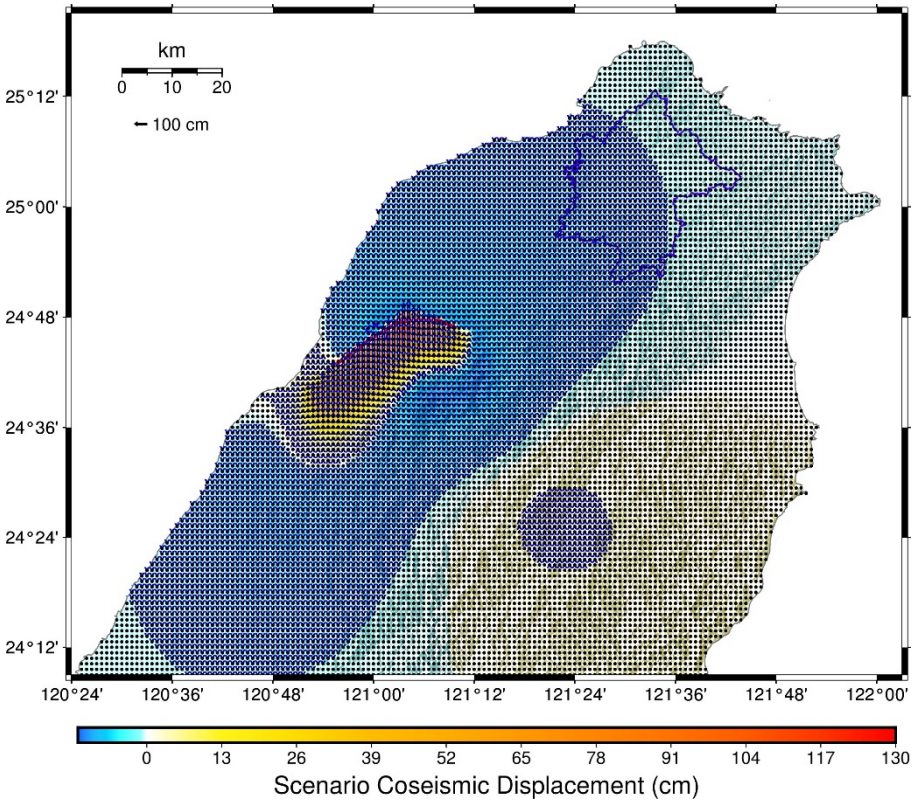


圖 7. 11：新城斷層之景況垂直同震位移分布圖

Figure 7. 11: Scenario coseismic displacement map of the Hsincheng fault.

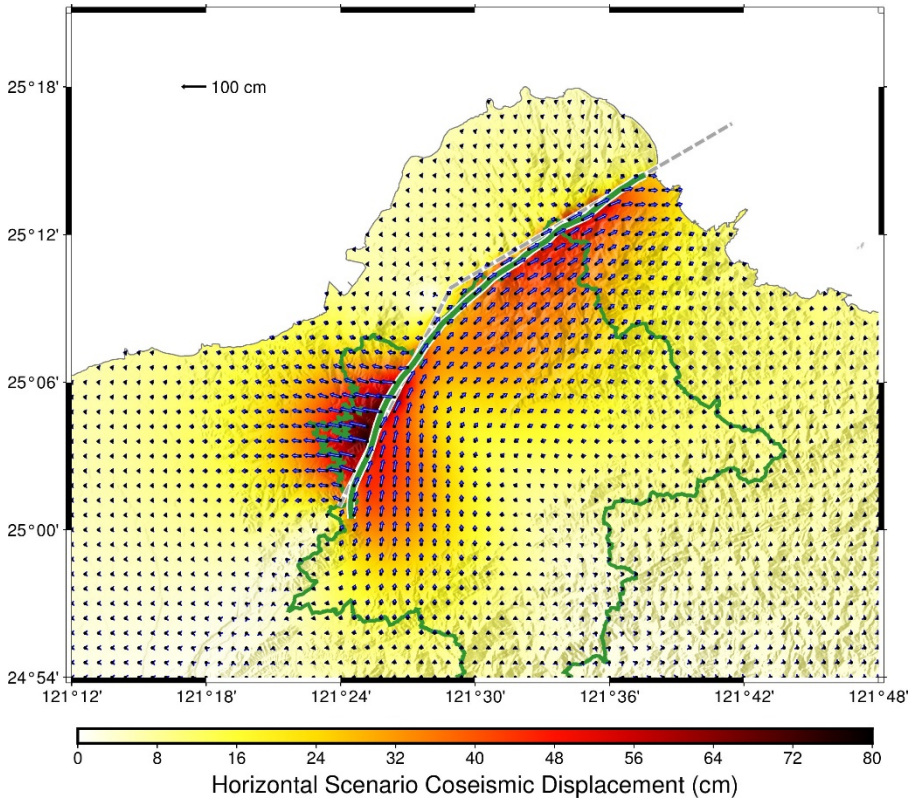


圖 7. 12：山腳斷層於臺北都會區之景況水平同震位移分布圖

Figure 7. 12: Scenario coseismic displacement map of the Shanchiao fault in Taipei City.

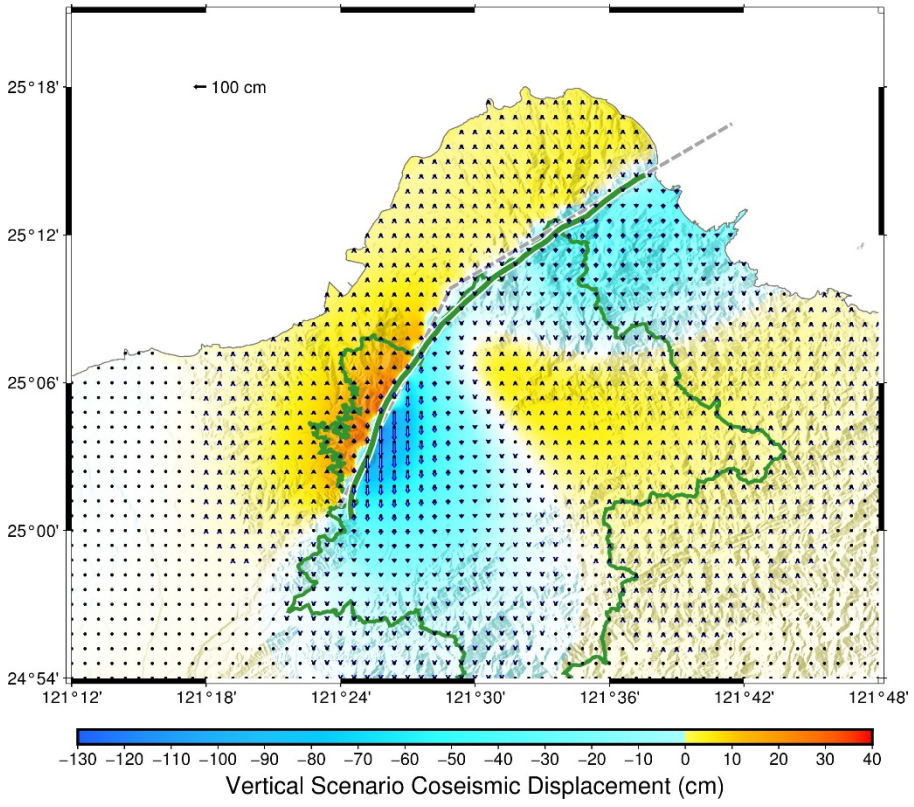


圖 7. 13：山腳斷層於臺北都會區之景況垂直同震位移分布圖

Figure 7. 13: Scenario coseismic displacement map of the Shanchiao fault in Taipei City.

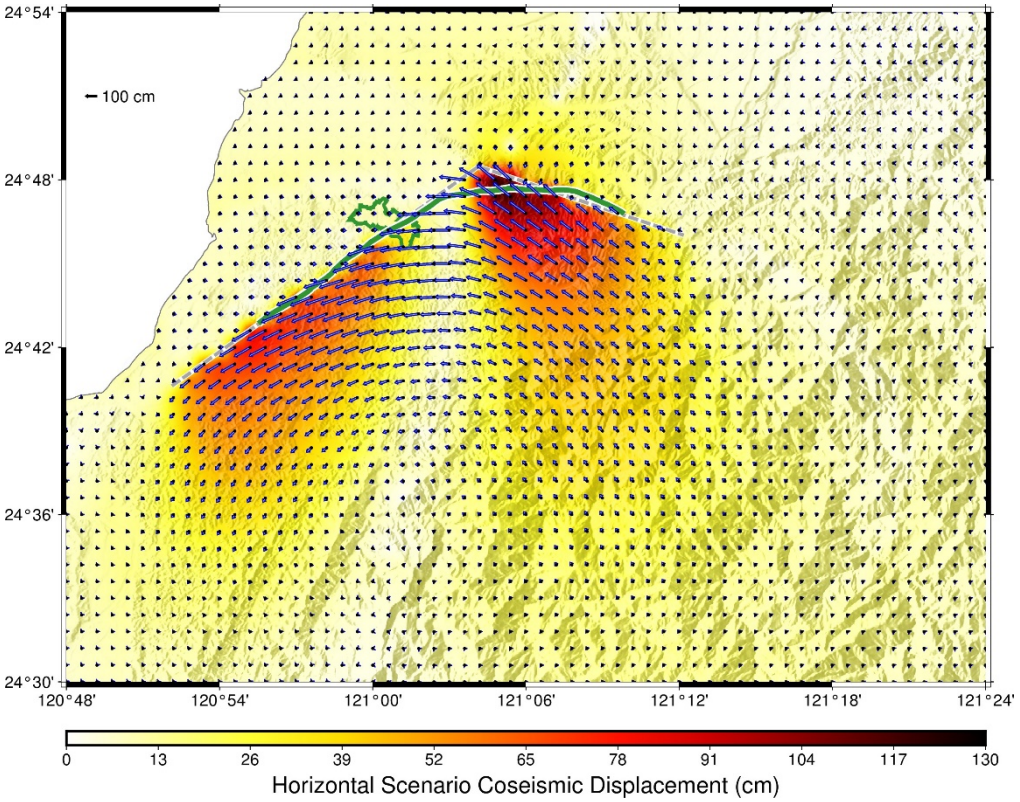


圖 7. 14：新城斷層於新竹科學園區之景況水平同震位移分布圖

Figure 7. 14: Scenario coseismic displacement map of the Hsincheng fault in Hsinchu Science Park.

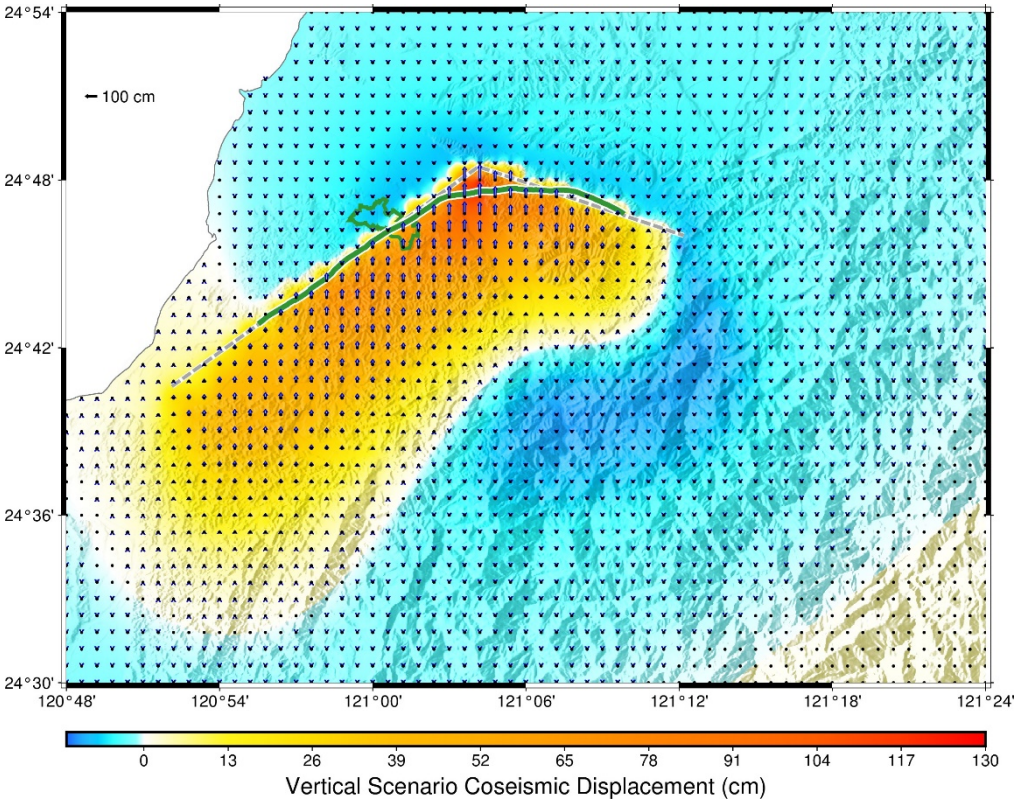


圖 7. 15：新城斷層於新竹科學園區之景況垂直同震位移分布圖

Figure 7. 15: Scenario coseismic displacement map of the Hsincheng fault in Hsinchu Science Park.

第八章、歷年成果比較

本年度的研究區為北部地區，本章將與過去北部地區的研究成果進行比較。

8-1 北部地區水準測線成果比較

本計畫的水準觀測大都於每年同時期（月份）觀測，以消除週期性的影響，該測線附近如發生較大地震則會進行加測。以下針對橫跨北部重要區域（大臺北都會區及新竹科學園區）周遭，2023 年新增的觀測資料對比過去之觀測結果變化進行探討。

8-1-1 石門至萬里測線

石門至萬里測線橫跨山腳斷層，2022 年遺失 GH14、2024、2025 及 0813 測量椿點，2023 年與 2022 年相同。經分析自 2004 年至 2023 年的資料 發現跨越山腳斷層無明顯變動（＜1mm/yr），反而在測段端點（2031-GA59）觀測達較大沉陷量約達 2 mm/yr。

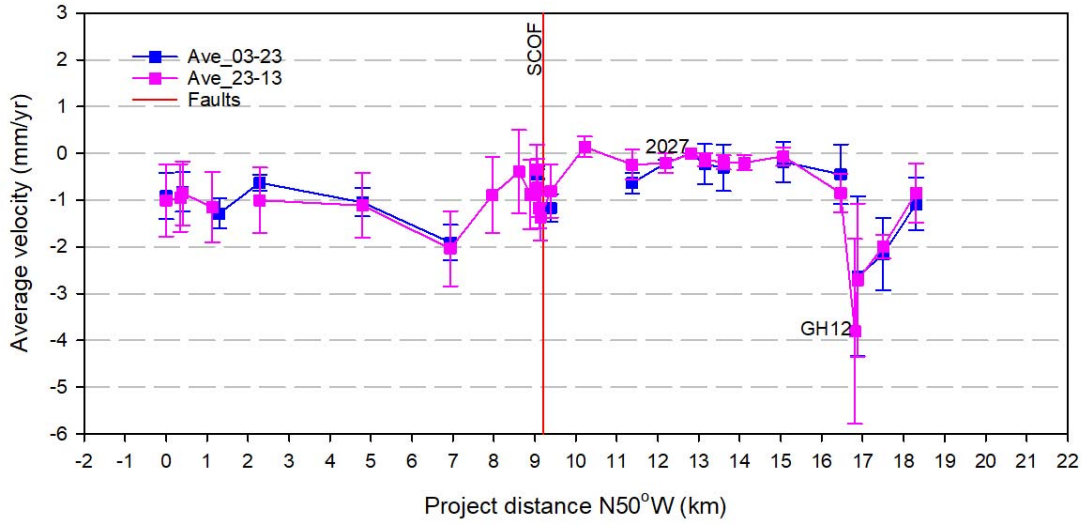


圖 8. 1：石門至萬里測線各時間分段之水準平均抬升速率比較

Figure 8. 1: Average vertical velocity comparison in different time periods of the Shihmen-Wanli leveling route.

8-1-2 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層，於 2021 年補設並測量樁位 GI39、GI38、GI59、GI70、GI49、GI50 及 GI51 七個點，經分析自 2016 年至 2023 年的資料，發現 2018 年在跨越山腳斷層後呈現明顯下陷達 40 mm（兩年），相對於 2023 年的成果發現 2022 年的觀測沉陷量也較大。

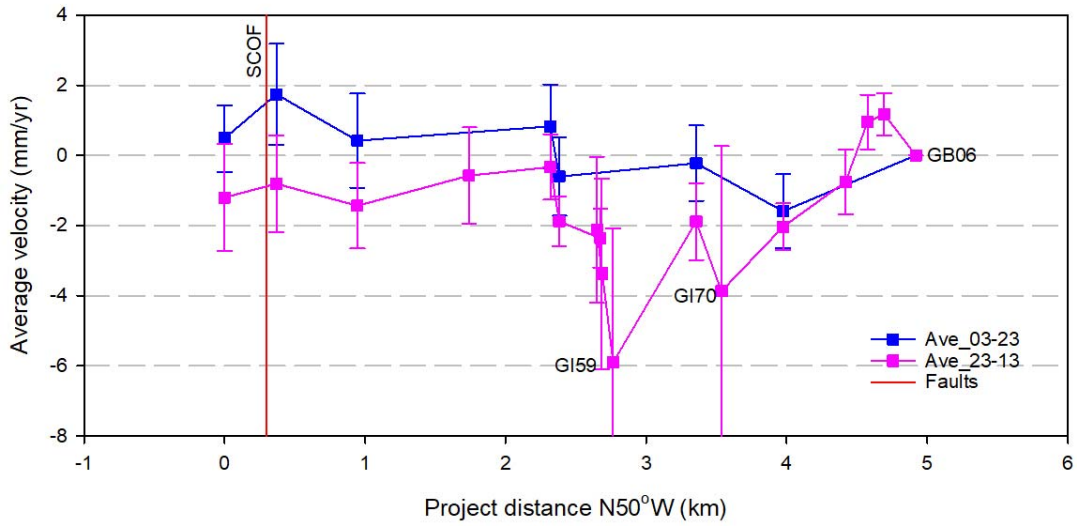


圖 8. 2：淡水至士林測線各時間分段之水準平均抬升速率比較

Figure 8. 2: Average vertical velocity comparison in different time periods of the Tamsui-Shihlin leveling route.

8-1-3 士林至三芝測線

士林至三芝測線橫跨山腳斷層。整理近年點位狀況，2019 年觀測時遺失點位 GA63、GA64、GA68 及 X016 四個點位，於 2020 年補設點號 2114、X116（新）及 2006 三個點位，並於 2022 年遺失點號 1158，2023 年與 2022 年觀測點位相同，經分析自 2016 年至 2023 年的資料，發現 2018 年在跨越山腳斷層後呈現明顯下陷達 40 mm（兩年），相對於 2023 年的成果發現 2022 年的觀測沉陷量也較大。

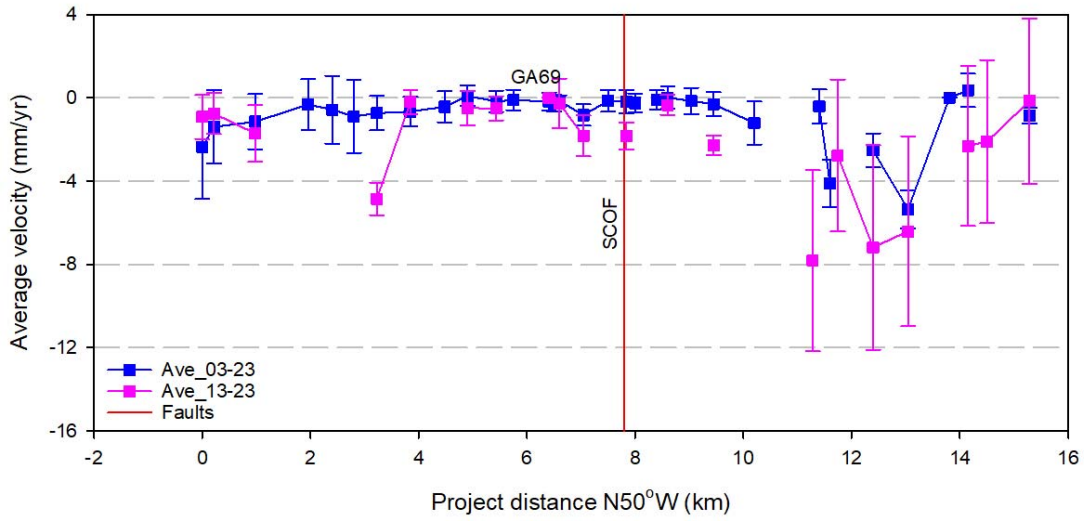


圖 8. 3：士林至三芝測線各時間分段之水準平均抬升速率比較

Figure 8. 3: Average vertical velocity comparison in different time periods of the Shilin-Sanzhi leveling route.

8-1-4 五股至臺北測線

五股至臺北測線橫跨山腳斷層，於 2022 年遺失 GA87 及 B227 兩個測點但 2020 年於盆地補設樁位 3001，經分析自 2016 年至 2023 年的資料，發現 2018 年在跨越山腳斷層後呈現明顯下陷達 40 mm（兩年），相對於 2023 年的成果發現 2022 年的觀測沉陷也較大。

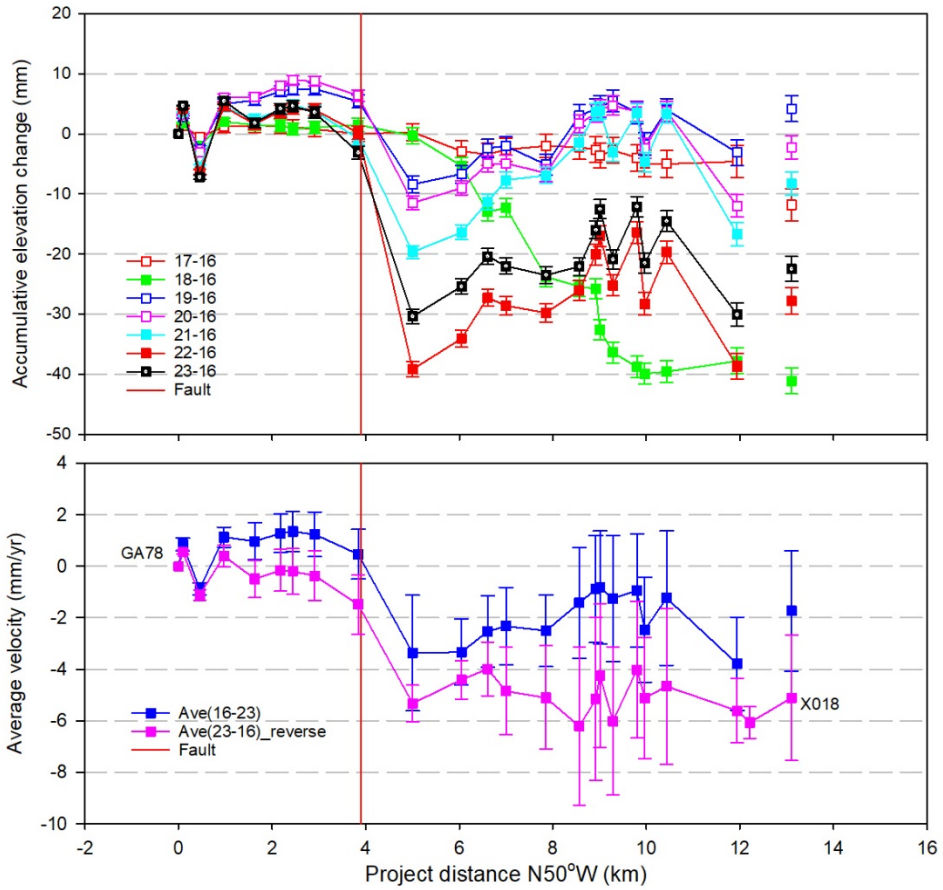


圖 8. 4：五股至臺北測線累積高程差與各時間分段之水準平均抬升速率比較

Figure 8. 4: Accumulation elevation change and the average vertical velocity comparison in different time periods of the Wugu-Taipei leveling route.

8-1-5 新竹至五峰測線

新竹至五峰測線橫跨新竹與新城斷層，與 2022 年的觀測點位比較，遺失點號 BM03，分析年平均速度（由 2002 年至 2023 年），整條測線的相對變形量介於 0 - 4 mm/yr 之間，接近於觀測誤差，最大變形量發生於新城斷層約 2 - 3 mm/yr 的抬升。

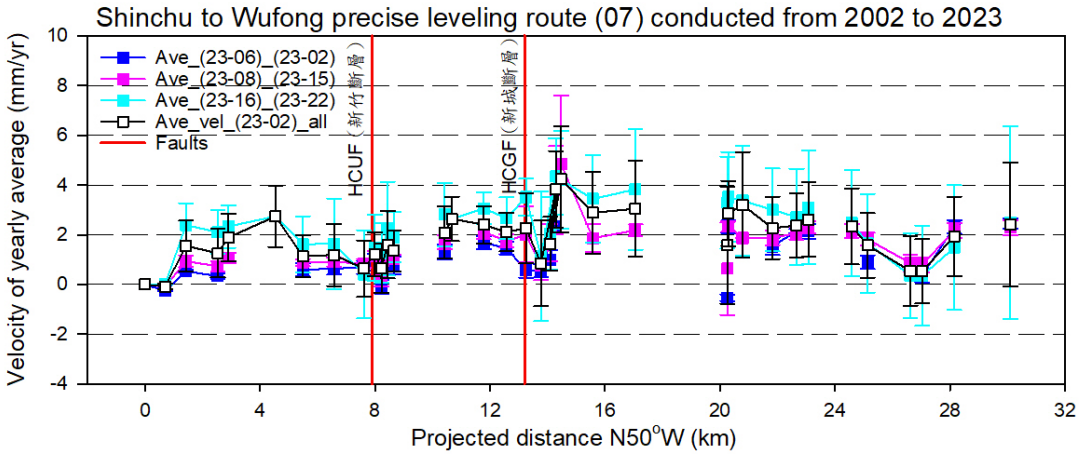


圖 8. 5：新竹至五峰測線各時間分段之水準平均抬升速率比較

Figure 8. 5: Vertical velocity of yearly average comparison in different time periods of the Hsinchu-Wufeng leveling route.

8-1-6 新竹至峨嵋測線

新竹至峨嵋測線橫跨新竹與新城斷層，與 2022 年的觀測點位比較，遺失點號 GB73、GB78、GC09 等三個點位，分析年平均速度（由 2004 年至 2023 年），整條測線的相對變形量介於 0 – 4 mm/yr 之間，接近於觀測誤差，最大變形量發生於新城斷層約 2 - 4mm/yr 的抬升。

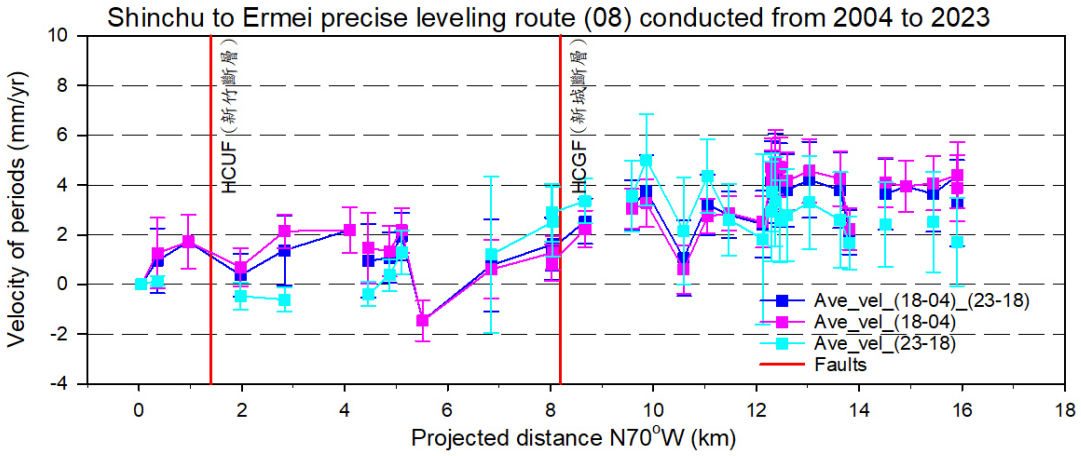


圖 8. 6：新竹至峨嵋測線各時間分段之水準平均抬升速率比較

Figure 8. 6: Average vertical velocity comparison in different time periods of the Hsinchu-Emei leveling route.

8-2 北部地區斷層幾何參數比較

相較於前一期計畫成果（中興社，2020），本計畫更新山腳斷層、新城斷層、新竹斷層、三義斷層之斷層幾何（表 8. 1）。山腳斷層在前期計畫中參考 SSHAC Level 3 資料，將幾何分為三種模型，其中權重最高的幾何模型為淺部傾角 70 度（0~9 公里深），深部傾角 35 度（9~12.5 公里深）。本期計畫中則利用 Chevron construction method 建立山腳斷層可能的鏟型幾何形貌，並簡化為深、淺兩種不同深度不同傾角的斷層幾何，山腳斷層淺部（0~8 公里深）斷層傾角為 63 度，深部（8~11 公里深）傾角為 25 度。新城斷層及新竹斷層在前期計畫參考了 Tang and Hsu（1970），黃宣維（2014），以及黃旭燦等（2004）三種不同的斷層幾何模式，三種模式中權重最高的是黃宣維（2014）的剖面，該剖面依據黃旭燦等（2004）的剖面建立，基底滑移面的深度相對於黃旭燦等（2004）的剖面更深，本期計畫參考黃宣維（2014）的剖面，簡化新城斷層幾何為 0~4 公里深 35 度，水平延伸 7 公里，4~9 公里深 35 度；新竹斷層在淺部傾角相較新城斷層陡，傾角在 0~7 公里深處為 50 度，7~10 公里深處為基底滑移面，傾角約 10 度。三義斷層在前期計畫中分為車籠埔斷層以北（北段）及車籠埔斷層以南（南段），北段幾何參考 Hung and Wiltschko（1993）及 Yang et al.,（2007）的 LINE 7 平衡剖面，有兩種幾何模式，權重分別為 0.4 及 0.6；南段三義斷層與與車籠埔斷層相鄰且幾乎平行，參考車籠埔斷層的幾何，分為三種模式，傾角分別為 25 度（權重 0.2），35 度（權重 0.5），以及 40 度（權重 0.3）。本期計畫將三義斷層分為頂埔斷層以北及頂埔斷層以南，北段幾何前期計畫權重最高的模式，根據 Yang et al.,（2007）的剖面簡化斷層幾何為 0-10 公里深傾角 15 度；南段幾何採用前期計畫權重最高的幾何模式，0-8 公里深傾角 35 度，三義斷層具有南、北側向變化的幾何模式。

表 8. 1：北部地區斷層幾何參數比較表

Table 8. 1: Fault geometry parameter data comparison in northern Taiwan.

	前期計畫（2018 年）		本年度計畫（2023 年）		備註
	傾角	深度（km）	傾角	深度（km）	
山腳斷層	70.0	0.0-9.0	63.0	0.0-8.0	
	35.0	9.0-15.0	25.0	8.0-11.0	
新城斷層	40.0	10.0	35.0	0.0-4.0	
			水平延伸 7 公里		
			35	4.0-9.0	
湖口斷層	60.0	0.0-7.0	60.0	0.0-7.0	
新竹斷層	50.0	10.0	50.0	0.0-7.0	
			10.0	7.0-10.0	
獅潭斷層	50.0	8.0	50.0	0.0-8.0	
三義斷層	25.0	9.0	15.0	0.0-10.0	頂埔斷層以北
			35.0	0.0-8.0	頂埔斷層以南
屯子腳斷層	75.0	13.0	75.0	0.0-13.0	

8-3 北部地區滑移虧損速率比較

本計畫以 BLOCKS、DEFNODE 與基線應變三種模型，針對臺灣北部地區的活動斷層進行斷層滑移模擬，以獲得斷層滑移虧損速率。主要包含 7 條活動斷層，分別為：山腳斷層、新城斷層、湖口斷層、新竹斷層、獅潭斷層、三義斷層與屯子腳斷層。由於三種模型模擬出來的滑移速率略有差異，因此會採用三種模型所得到的速率進行加權平均，以獲取各斷層的平均滑移虧損速率。

相較於前一期計畫成果（2018 年，圖 8. 7），本年度（2023 年，表 4. 5、圖 4. 16）獲取的各斷層平均滑移虧損速率略有差異（表 8. 2），造成差異之原因可能與使用不同的速度場與斷層幾何參數有關（表 8. 1）。尤其是在前一期計畫中的分析，除了北部地區的 7 條斷層之外，亦納入中部地區的斷層系統一起進行約制，如此則可能造成模擬出來的滑移速率不同。

表 8. 2：北部地區斷層滑移虧損速率比較表

Table 8. 2: Fault slip deficit rate comparison in northern Taiwan.

	BLOCK Model		DEFNODE Model		Baseline Inversion Model		加權平均滑移虧損速率	
	前期計畫（2018年）	本年度計畫（2023年）	前期計畫（2018年）	本年度計畫（2023年）	前期計畫（2018年）	本年度計畫（2023年）	前期計畫（2018年）	本年度計畫（2023年）
山腳斷層	2.3 ± 0.1	1.8±0.2	0.8 ± 1.4	0.5±0.8	3.4 ± 2.1	3.9±2.6	1.9	2.0
新城斷層	2.2 ± 0.3	1.9±0.1	0.3 ± 2.0	3.0±1.9	1.4 ± 1.3	3.9±1.9	1.3	2.9
湖口斷層	4.2 ± 0.1	1.1±0.0	0.6 ± 1.6	0.9±1.1	1.9 ± 0.9	1.5±1.0	1.8	1.1
新竹斷層	0.8 ± 0.2	0.7±0.0	1.0 ± 1.8	0.5±1.1	1.5 ± 0.5	4.9±2.9	1.1	2.0
獅潭斷層	3.1 ± 0.1	2.9±0.0	4.9 ± 7.4	1.3±2.2	9.8 ± 2.4	0.9±0.5	5.2	1.7
三義斷層	2.2 ± 0.1	1.9±0.1	5.8 ± 4.8	7.3±6.8	7.8 ± 3.3	15.8±6.9	5.9	8.3
屯子腳斷層	1.2 ± 0.1	0.5±0.0	1.1 ± 3.5	0.9±1.5	2.9 ± 1.3	4.2±1.6	1.7	1.8

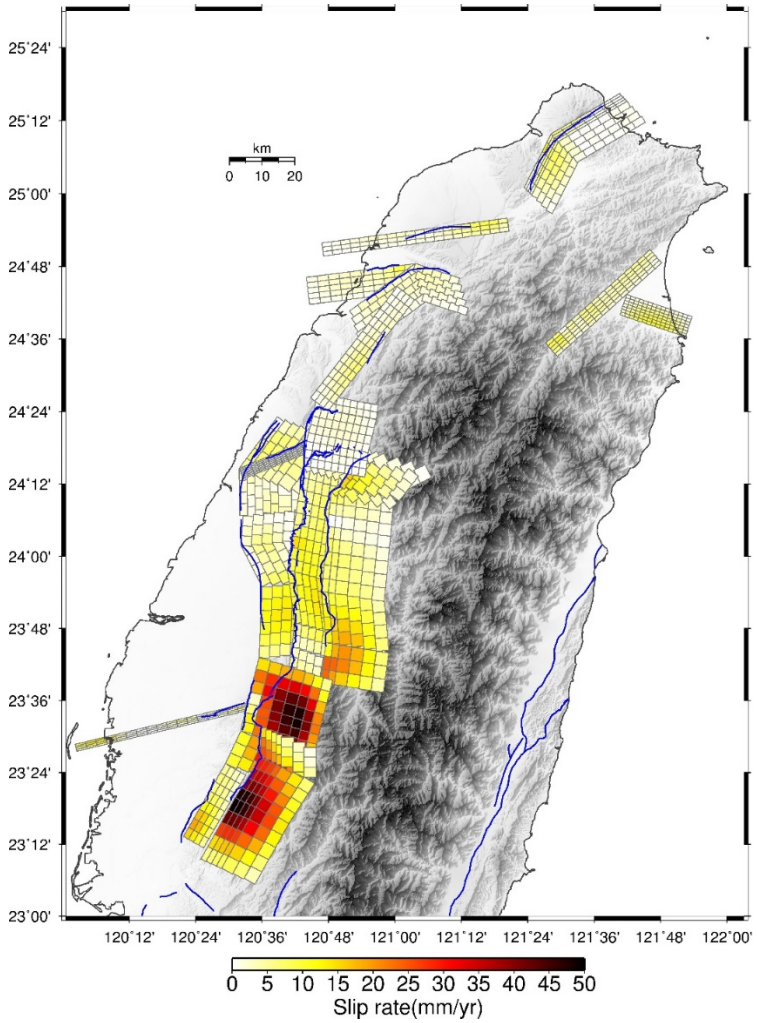


圖 8. 7：斷層滑移虧損速率分布圖（2018 年）

Figure 8. 7: Distribution of fault slip deficit rates in 2018.

第九章、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 2023 年 10 月全臺連續 GNSS 測站約 572 站之資料。在 GNSS 移動站與精密水準資料處理方面，本年度截至 10 月底為止，GNSS 移動站部分已完成全臺 8 個分區共 761 點的施測，精密水準則完成共計 42 條主線測線及 1 條水準副線測線之施測。本計畫重要區域相對於 S01R 測站之速度場顯示，新竹科學園區附近之水平速度場主要由東南往西北方向移動，垂直速度方面僅在園區西側局部區域有約 5 mm/yr 的抬升，其餘變動不大，跨新城斷層上下盤均無顯著的三維速度變化。臺北都會區附近之水平速度場主要由西南往東北方向移動，並由南向北略呈順時鐘旋轉，垂直速度方面主要為沉陷，跨山腳斷層上下盤均無顯著的三維速度變化。

獲得地表速度場後，為了解北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主要以新店區及烏來區交界區域及屯子腳斷層附近較高，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 1.0 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。

針對北部地區重要斷層活動潛勢分析，首先蒐集了山腳斷層、新城斷層、湖口斷層、新

竹斷層、獅潭斷層、三義斷層及屯子腳斷層之斷層幾何、滑移速率以及斷層活動性等相關文獻。在此僅就本年度最重要之二條斷層進行彙整：山腳斷層總長約 35 公里，斷層傾角，於 0 – 8 公里約為 63°，8 – 11 公里約為 25°，深度部分各文獻有所差異，最小約 9 公里，最大可能達 20.5 公里，滑移速率則介於 0.7 – 3.3 mm/yr 之間。新城斷層部分，其長度可能為 29 公里，斷層傾角約為 35°，深度部分各文獻有所差異，最小約 3 公里，最大可能達 14 公里，滑移速率則為 0.7 – 2.5 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 BLOCKS、TDEFNODE 以及基線應變反演模型三種模型，進行北部地區 2016-2022 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 BLOCKS、TDEFNODE 以及基線應變三種模型成果並透過加權平均，可計算得到以下二條重要斷層之斷層滑移虧損速率：山腳斷層約為 2.0 mm/yr，新城斷層約為 2.9 mm/yr。

隨後，本計畫採用前述所獲得之斷層幾何參數與斷層滑移速率，藉由經驗式推估最大地震規模，並利用特徵地震模式計算各斷層之年發生率，再以機率密度函數模式探討各斷層之活動潛勢。本計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 2023 年起算，年度重要斷層之計算結果如下：山腳斷層採用 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 4.4%、7.2%及 13.5%；新城斷層採用 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 6.1%、10.2%及 19.8%。

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。由景況地振動分布圖可發現，山腳斷層若最大地震規模為 M_w 6.7，其鄰近區域可能產生 0.36 g 左右之地震動值，約 6 級之震度；新城斷層若最大地震規模為 M_w 6.9，則地震動值可達 0.38 g，相對應之舊版震度同樣可達 6 級，新竹科學園區及其西南側與東側區域延伸 30 km 及南北延伸約 10 km 範圍內皆具有 6 級震度。在景況同震位移部分，山腳斷層水平同震位移之最大量值落於斷層南段西側，約達 80.1 cm。垂直位移部分，山腳斷層西南段之同震位移量最大，斷層西北側為抬升最高可達 39.7 cm，東傾正斷層之型態使得東南側沉降顯著，且沉陷量最高可達 126.1 cm，而垂直同震位移之整體影響範圍以臺北都會區中西側區域為主；新城斷層整體影響範圍以新竹市為主，水平同震位移之最大量值落於斷層之東北段，約達 125.8 cm。垂直位移部分，新城斷層為逆衝斷層，故整體來說斷層東南側以抬

升為主，在其走向改變、鄰近新竹科學園區處之抬升量達到最大可達 129.9 cm。

參考文獻

丁權（2012）新竹地區活動斷層特性研究。國立臺灣大學地質科學系碩士論文，共 182 頁。

大塚彌之助（1936）昭和十年四月二一日臺灣中部地方發生之地震所伴生之地震斷層，附地震斷層之諸特徵。東京大學地震研究所彙報別冊，第三號，第 22-74 頁。（日文）

中興公司（2012）營運中核能電廠補充地質調查工作地質調查成果總結報告，台灣電力公司報告。

中興公司（2015）營運中核能電廠擴大地質調查工作-成果總結報告，臺灣電力公司報告，共 293 頁。

中興社（2018）臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估(2/4)。經濟部中央地質調查所期末報告書，共 117 頁。

中華民國交通部（2004）鐵路橋梁設計規範，交通部技術標準規範鐵路類工務部，https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=740&parentpath=0,2,738&mcustomize=divpubreg_view.jsp&dataserno=325&aplistdn=ou=data,ou=divpubreg,ou=ap_root,o=motc,c=tw&toolsflag=Y&imgfolder=img/standard，前次查詢：2021/ 02/ 04

中華民國交通部（2007）鐵路橋梁耐震設計規範，交通部技術標準規範鐵路類工務部，https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=740&parentpath=0,2,738&mcustomize=divpubreg_view.jsp&dataserno=324&aplistdn=ou=data,ou=divpubreg,ou=ap_root,o=motc,c=tw&toolsflag=Y&imgfolder=img/standard，前次查詢：2021/ 02/ 04

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

王昱（2003）桃園–新竹臺地區構造活動與地形特徵。國立台灣大學地質科學系碩士論文，共 105 頁。

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

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

石再添、張瑞津、黃朝恩、石慶得、楊貴三、孫林耀明（1983）台灣北部與東部活斷層的地形學研究。台灣師範大學地理研究所地理研究報告，第 9 期，20–72 頁。

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

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

台灣高鐵公司（2011）高鐵設施容許變形值，全國法規資料庫，https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=K0030022，前次查詢：2021/ 02/ 04

朱傚祖、梁勝雄、李建成、陳建良（2012）湖口斷層新釋：上盤活動背衝斷層之新發現及露頭構造分析。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，第 31-51 頁。

江婉綺、陳柏村（2012）新竹斷層構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，53-74 頁。

吳逸民、張建興、黃信樺、林秉延、林郁梅（2007）苗栗台中都會區地震災害潛勢分析--子計畫：苗栗台中都會區地震震源潛勢分析(II)。行政院國家科學委員會專題研究計畫，計畫編號 NSC 95-2625-Z-002-028-。

李奕亨（2009）以中尺度反射震測法研究屯子腳斷層活動機制及構造上的意義，國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 125 頁。

李錦發（2000）五萬分之一臺灣地質圖說明書 圖幅第一十八號 東勢。經濟部中央地質調查所出版，共 117 頁。

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

松田時彥（1990）最大地震規模による日本列島の地震分帶図。地震研彙報，第 65 期，第 289-319 頁。

林良安（1999）湖口斷層淺層反射震測之研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 109 頁。

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

林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧（2007）臺灣北部的活動斷層─二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 19 號，共 130 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村（2008）臺灣中部的活動斷層 二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊第廿一號，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。
林啟文、劉桓吉、周稟珊、蘇泰維（2021）臺北盆地西緣的斷層探討。經濟部中央地質調查所彙刊，第 34 號，第 73-112 頁。
林燈河（1987）1935 年新竹、台中烈震之震源機制。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
邱華燈（1962）台中縣大安背斜震波測勘之結果及解釋。中國地質學會專刊，第 1 號，187–188。
胡玉燕（2005）以淺層反射震測探測新城斷層地下構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文
張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）台灣活動斷層概論─五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 10 號，共 103 頁。
洪智賢（2001）三義斷層之逆衝構造研究。中央大學地球物理研究所碩士論文，共 101 頁。
陳于高、陳文山、陳雅雯（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫－槽溝開挖與古地震研究計畫（總報告）－熱螢光與光螢光定年。中央地質調查所，共 56 頁。
陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁（2003）新城斷層的古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，第 11-23 頁。
陳文山、林朝宗、楊志成、費立沅、謝凱旋、龔慧敏、林佩儀、楊小青（2008）晚期更新世以來台北盆地沉積環境與構造演化的時空演變。經濟部中央地質調查所彙刊，第 21 號，第 61-106 頁。
陳文山、游能悌（2011）重要活動斷層帶構造特性調查研究計畫－斷層活動特性分析與評估（1/4）。經濟部中央地質調查所研究報告 100-11 號，共 118 頁。
陳文山（2016）臺灣地質概論。中華民國地質學會，共 250 頁。
陳致同、李建成、詹瑜璋、盧佳遇、鄧屬予（2012）台北都會區山腳斷層之地下形貌建構與分析：先存構造之再活化？101 年地質學會及地球物理學會年會暨學術研討會論文集，第 84 頁。
陳冠宇（2014）台灣北部由造山帶至弧後張裂之陸域及海域構造研究。國立中央大學地球科學系，博士論文，共 183 頁。
郭泰融（1990）新城斷層之地球物理探勘。國立中央大學碩士論文，共 81 頁。
許劭禎（2013）利用鑽井資料建構臺北盆地第三紀之地層與構造。國立中央大學地球科學學系碩士論文，共 149 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。
鳥居敬造、吉田要（1931）新竹苗栗及竹東油田調查報告。臺北：台灣總督府殖產局。
黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004）斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）–台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部中央地質調查所報告 93-13 號，共 59 頁。
黃柏壽、陳國誠、劉忠智、溫國樑、黃文紀、林正洪（2007）大台北地區特殊地質災害調查與監測：地球物理微震調查與監測（4/4）期末總結報告書，經濟部中央地質調查所報告 96-04 號，共 177 頁。
黃宣維（2012） 以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部新竹地區之新期構造活動。國立台灣大學地質科學系碩士論文，共 139 頁。
黃宣維、胡植慶、黃旭燦、陳建良、黃鐘、饒瑞鈞、謝凱旋、賴慈華（2014）經濟部中央地質調查所特刊，第 28 號，第 185-205 頁。
經濟部中央地質調查所（2015）活斷斷層地質敏感區劃定計畫書：F0004 新城斷層。經濟部中央地質調查所，共 25 頁。
董倫道（2005），地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫－地球物理探勘計劃（4/5）。經濟部中央地質調查所報告第 94-09 號，共 187 頁。
詹瑜璋、李建成、鄭鼎耀、劉進金、陳文山、胡植慶、陳柔妃、徐偉城（2005）大台北地區特殊地質災害調查與監測－高精度空載雷射掃描（LIDAR）地形測製與構造地形分析（1/3）。經濟部中央地質調查所報告 94–06 號，共 143 頁。
蒲新杰（2010） 藉由高密度地震網之監測資料探討新竹地區地殼構造的特性。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 159 頁。
蒲新杰（2010）藉由高密度地震網之監測資料探討新竹地區地殼構造的特性。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 159 頁。
劉力豪（2004）竹東丘陵的活動斷層古地震及相關活動性研究。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 90 頁。
劉桓吉、蘇泰維、李錦發、紀宗吉、林朝宗（2000）山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響。經濟部 89 年度研究發展專題，共 30 頁。
劉桓吉、蘇泰維、邱禎龍、曾俊傑、紀宗吉、林文哲、李錦發、費立沅、賴典章、林朝宗、黃健政（2002）臺

北盆地地下地質與工程地質研究。經濟部中央地質調查所 90 年年報，第 59-64 頁。
劉啟清（1986）水準測量的系統誤差。第五屆測量學術及應用研討會論文集，國科會工程研究中心及成功大學，F1-F25。
鄭世楠（1995）台灣及鄰近地區大地應力分布的研究，國立中央大學地球物理研究所博士論文，196–207。
蕭力元、黃旭燦、鄧屬予、林國安（1998）台灣新畿褶皺帶南段的構造特徵。台灣石油地質，第 32 期，第 133-153 頁。
蕭詩涵（2019）臺灣半動態基準地表變形模式之同震位移格點模型新增時機。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，共 96 頁。
盧詩丁、劉彥求、衣德成、鍾令和、劉桓吉（2004）山腳斷層調查報告。經濟部中央地質調查所，未出版報告。
簡志宇（2008）台北盆地西北深部構造之研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 60 頁。
饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫–活動斷層監測系統。經濟部中央地質調查所委託研究計劃總報告，共 234 頁。
蘇小寧、熊仁偉、孟國杰、郭楠、楊維芳、李毓照、吳偉偉、趙國強（2022）2021 年青海瑪多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 1032-1043 頁。
Chang, W., Ching, K., Lee, C., Lee, Y., & Lee, C. (2016). Earthquake Potential of Active Faults in Taiwan from GPS Observations and Block Modeling. Seismological Research Letters, 87(6), 1274–1286. https://doi.org/10.1785/0220160094
Chen, C.T., Lee, J.C., Chan, Y. C., and Lu, C.Y. (2010) Growth normal faulting at the western edge of the Metropolitan Taipei Basin since the last glacial maximum, northern Taiwan. Terr. Atmos. Ocean., 21(3), p.409–428.
Chen, Y.G., Shyu, J.B.H., Ota, Y., Chen, W.S., Hu, J.C., Tsai, B.W., and Wang, Y.(2004) Active structures as deduced from geomorphic features: a case in Hsinchu Area, northwestern Taiwan. Quat. Int., pp.189–199.
Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Hu, and J.-C. Lee (2011) Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, J. Geophys. Res., 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.
Chiu, H.-T. (1971) Folds in the northern half of western Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 8, 7-19.
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, doi:10.1145/311535.311576.
Ellsworth, W. L., Mattews, M. V., Nadeau, R. M., Nishenko, S. P., Reasenberg, P. A., and Simpson, R. W. (1999) A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities, U. S. Geological Survey, OFR 99-522.
Hanks, T.C., and Bakun, W.H. (2008) M-log A observations of recent large earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 1, p. 490–494.
Huang, B.S., Yeh, Y.T. (1992) Source geometry and slip distribution of the April 21, 1935 Hsinchu–Taichung, Taiwan earthquake. Tectonophysics, 210, 77–90.
Huang, S.Y., Rubin, C.M., Chen, Y.G., and Liu, H.C. (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, 31, p265–276.
Hung, J.H., and Wiltschko, D.V. (1993) Structure and kinematics of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, 28, 59–96.
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.
Kagan, Y.Y., and Knopoff, L. (1987) Random stress and earthquake statistics; time dependence. Geophys. J. R. Astr. Soc., 88, 723-731.
Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C., Jeng, F.S., and Rau, R.J. (2003) Active Fault Creep Variations at Chihshang, Taiwan, Revealed by Creepmeter Monitoring, 1998-2001. Journal of Geophysical Research, 108, B11, 2528, doi:10.10129/2003JB002394. (SCI)
Lettis Consultants International, Inc. (LCI) (2015) Preliminary Seismic Source Characterization and Earthquake Magnitude Approach (Phase 1) to Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis of the Shanchiao Fault for the Jinshan and Kuosheng Nuclear Power Plants Northern Taiwan, Taiwan (Revision 1), August 5, 2015, 110 p.
Lin, C.H., Yeh, Y.H., and Roecker, S.W. (1989) Seismic velocity structures in the Sanyi-Fengyuan area, central Taiwan: Proc.Geol. Soc. China, 32, 101–120.
Lin, Y.N., (2005) Surface Deformation and Seismogenic Structure Model of the 1935 Hsinchu–Taichung Earthquake (MGR = 7.1), in Miaoli, Northwestern Taiwan. Master Thesis National Taiwan University, 77 pp.
McCaffrey, R. (2002) Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones. Geodyn. Ser., vol. 30, edited by S. Stein and J. Freymueller, pp. 101– 122, AGU, Washington, D. C.
McCalpin, J.P. (1996) Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research. McCalpin ed., Paleoseismology, Academic Press, 439-493.

Mccaffrey, R. (2013). Crustal Block Rotations and Plate Coupling. In S. Stein & J. T. Freymueller (Eds.), Geodynamics Series (pp. 101–122). Washington, D. C.: American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/GD030p0101
Meade, B. J., and B. H. Hager (2005). Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements, J. Geophys. Res. 110, B03403.
Military Land Survey (1937). Report of revision surveys of 1st, 2nd and 3rd order triangulations and 1st order precise levelling in the Taiwan earthquake zone (in Japanese), 1-8.
Namson, J. (1984) Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan (III): central part. Petrol. Geol. Taiwan, no.20, 35–52.
Nasu, N. (1938) The after-shocks of the Formosa Earthquake of 1935. (in Japanese) Bulletin of the Earhtuqke Researtch Institute. Suppl. Vol. 3, 75-86.
Nguyen, Q. M., Hsu, S. K., Lin, A. T. S., and Yang, C. C. (2022). Sedimentary sequences offshore northeastern Taiwan and the offshore projection of the Shanjiao Fault zone. Tectonophysics, 826, 229254.
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.
Otsuka, Y. (1936) The earthquake of central Taiwan (Formasa), April 21, 1935, and earthquake faults. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo (Suppl. 3), 22-74 (in Japanese with English abstract)
Pan, Y.S. (1965) Interpretation and seismic coordination of the Bouguer gravity anomalies obtained in northwestern Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 4, 287–301.
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.
Pu, H. C., Lin, C. H., Chang, L. C., Kan, C. W., Lin, C. M., Li, Y. H., Lai Y. C., and Shih, M. H. (2017). Geological implications of the 0212 earthquake in 2014 at the Tatun Volcano Group of Taiwan: Synergistic effects of volcanic and faulting activities. Journal of Asian Earth Sciences, 149, 93-102.
Shaw, B. E. (2009) Constant Stress Drop from Small to Great Earthquakes in Magnitude Area Scaling. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 99, Issue 2A, p. 871-875.
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.
Sheu, H.C., Kosuga, M., and Sato, H. (1982) Mechanism and fault model of the Hsinchu–Taichung (Taiwan) earthquake of 1935. Zisin, 2 (35), 567–574 (in Japanese).
Showstack, R. (2012) ShakeOut drill emphasizes importance of earthquake preparedness, education. Eos, Vol. 93, No. 44, 30.
Shyu, J. B. H., Y. R. Chuang, Y. L. Chen, Y. R. Lee, and C. T. Cheng (2016) A new on-land seismogenic structure source database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 27, 311-323, doi: 10.3319/TAO.2015.11.27.02(TEM)
Shyu, J. B. H., Yin, Y.-H., Chen, C.-H., Chuang, Y.-R., & Liu, S.-C. (2020). Updates to the on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 31(4), 469–478. https://doi.org/10.3319/TAO.2020.06.08.01
Song, S.R., Tsao, S. and Lo, H.J. (2000) Characteristics of the Tatun Volcanic eruptions, north Taiwan: implications for a cauldron formation and volcanic evolution: J. Geol. Soc. China, 43, 361-378.
Song, S. R., Chen, T. M., Tsao, S., Chen, H. F., & Liu, H. C. (2007) Lahars in and around the Taipei basin: Implications for the activity of the Shanchiao fault.Journal of Asian Earth Sciences, 31(3), 277-286.
Steketee, J.A. (1958) Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations, Can. J. Phys., 36, 1168-1198.
Su, X. N., Yao, L. B., Wu, W. W. Meng, G. J., Su, L., Xiong, R. W. & Hong, S. Y. (2019) Crustal deformation on the Northeastern margin of the Tibetan Plateau from continuous GPS observations.
Suppe, J., and Namson, J. (1979) Fault-bend origin of frontal folds of the Western Taiwan Fold-and-Thrust belt. Proceedings of the Geological Society of China, No. 16, 1–18.
Tang, C.H. (1963) Geology and oil potentialities of the Hukou anticline, Hsinchu. Petroleum Geology of Taiwan, No. 2, 241–252.
Tang, C. H. and Hsu, C. H. (1970) Subsurface geology and petroleum deposits in the Hsinchu area. Petrol. Geol. Taiwan, no.7, 89-101.
Teng, L. S., Lee, C. T., Peng, C. H., Chen, W. F., & Chu, C. J. (2001) Origin and geological evolution of the Taipei basin, northern Taiwan. Western Pacific Earth Sciences, 1(2), 115-142.
van Rijsingen, E., Calais, E., Jolivet, R., de Chabalier, J. B., Jara, J., Symithe, S., et al. (2020). Inferring Interseismic Coupling along the Lesser Antilles Arc: a Bayesian Approach. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125, e2020JB020677
Wang, H., and T. J. Wright (2012), Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet, Geophys.

Res. Lett., 39, L07303, doi:10.1029/2012GL051222.
Wang, C.Y., Yang, R.K., and Tsai, D.T.（1991） Shallow reflection seismics using firecrackers as the source II: field experiments. TAO, 2（3）, 163–185.
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.
Ward, S.N. (1994) A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1293-1309.
Wei, K., Chen, Y.G., and Liu, T.K. (1998) Sedimentary history of the Taipei basin with constraints from thermoluminescence dates. Jour. Geol. Soc. China, 41, 109–125.
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.
Williams, G., and Vann, I. (1987). The geometry of listric normal faults and deformation in their hangingwalls. Journal of Structural Geology, 9(7), 789-795.
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., Ting, H.H., Wang, J.B., and Chi, W.R. (1994) Sequential deformation in foothills belt, Hsinchu and Miaoli areas: Implications in hydrocarbon accumulation: Petrol. Geol. Taiwan, no.29, 47–74.
Yang, K.M., Wu, J.C., Wickham, J.S., Ting, H.H., Wang, J.B., and Chi, W.R. (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structure mode and evolution in the foothills belt, northwestern Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, no.30, 111–150.
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.
Youngs, R.R.; Coppersmith, K.J. (1985) Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 939–964.
Yu, S.-B., H.-Y. Chen, and L.-C. Kuo (1997), Velocity field of GPS Stations in the Taiwan area, Tectonophysics, 274, 41-59.
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.

附錄 1 活動斷層地震潛勢評估方法論

1-1 活動斷層地震潛勢評估流程

在斷層力學與運動學分析中，將斷層的滑移速率、三維構造形貌、分支及能量分配等參數整合並模擬，獲得最接近的斷層參數模型，再搭配斷層震源地震目錄，方能藉此推算特徵地震之平均重複間隔及標準差，其流程如附圖 1- 1 所示。

根據斷層的性質以及對歷史地震的了解程度選取機率密度函數（模式），計算活動斷層特徵地震在未來時距中之發生機率。活動斷層地震潛勢評估方法依調查之結果分為三種情形，如附圖 1- 2 所示，分述如下：

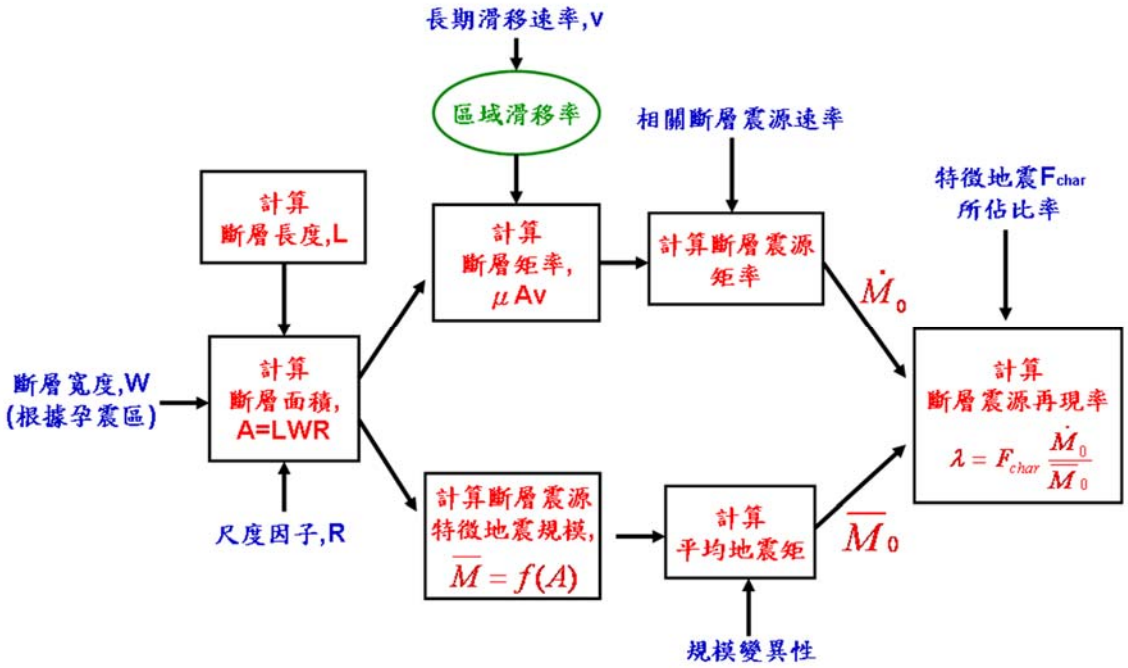
1. 第一種是已知古地震發生次數有 2 次以上：例如車籠埔斷層，藉由槽溝開挖可找到 5 次之古地震事件，將這些古地震事件的發生間隔相加平均後，即可得到其平均活動間隔，並計算標準差及變異係數，以特徵地震模式進行驗證，並選取合適之機率密度函數，代入週期及變異係數，即可獲得函數分布之圖形，本計畫考慮斷層之活動特性符合彈性回彈理論，建議採用 BPT 機率密度函數來進行評估。
2. 第二種是僅知道古地震最後一次發生的時間：需藉由斷層古地震之錯動量及定年推算斷層之長期滑移速率。在描述斷層的地震年發生率上，本計畫建議採用特徵地震模式，特徵地震模式需要長期滑移速率、斷層面面積及特徵地震規模等參數，所得特徵地震規模之年發生率倒數即為再現週期，以 BPT 模式進行評估，變異係數則參考美、日兩國之經驗予以假定，例如美國 BPT 模式的變異係數為 0.7（0.3），0.5（0.5），0.3（0.2）[WG02, 2003]；日本則採用 0.24 為變異係數（地震調查研究推進本部，2001）。
3. 第三種為古地震最後一次事件未知的情形：斷層之特徵地震規模及斷層一次事件錯動量 U 是以經驗公式帶入求得，則斷層之活動間隔即為 U/V，其中 V 為活動斷層之長期滑移速率，由於不清楚最後一次地震發生時間，因此機率密度函數選擇 Poisson 模式進行評估。

活動斷層地震潛勢評估之詳細流程如附圖 1- 3 所示，主要可分為四個部分：

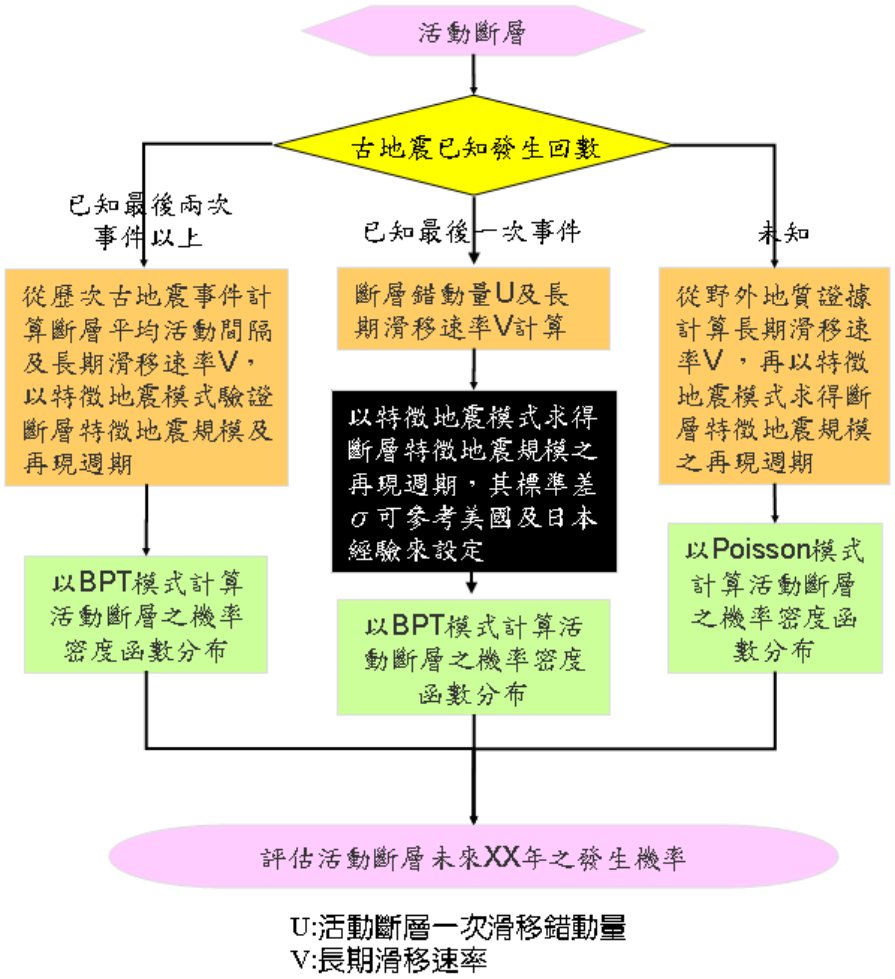
1. 建立斷層參數表：針對活動斷層進行參數之蒐集，包含斷層之幾何特性、分段特性及斷層活動度。斷層之幾何特性可藉由經驗公式獲得斷層之特徵地震規模，斷層分段則用來劃分斷層破裂事件，斷層活動度之研究則可以得到斷層之長期滑移速率及古地震事件之年代及次數。

2. 專家諮詢會議決定邏輯樹權重分配：由於活動斷層調查之參數均有其不確定性，考慮這些不確定性的影響，本計畫採用邏輯樹之概念，將各參數之不確定性分別給予權重，並建構專家意見交換與討論機制，邀請各專家進行最新研究現況（state of the art）模式之討論，將各種斷層參數及專家模式給予合理的邏輯樹（logic tree）權重以進行評估。
3. 特徵地震模式：以特徵地震模式來推估特徵地震的回復週期，並利用各參數的可能分布範圍計算出特徵地震的可能回復週期分布，最後可供統計模式計算未來地震發生機率。
4. 使用機率密度函數之模式評估發生機率。

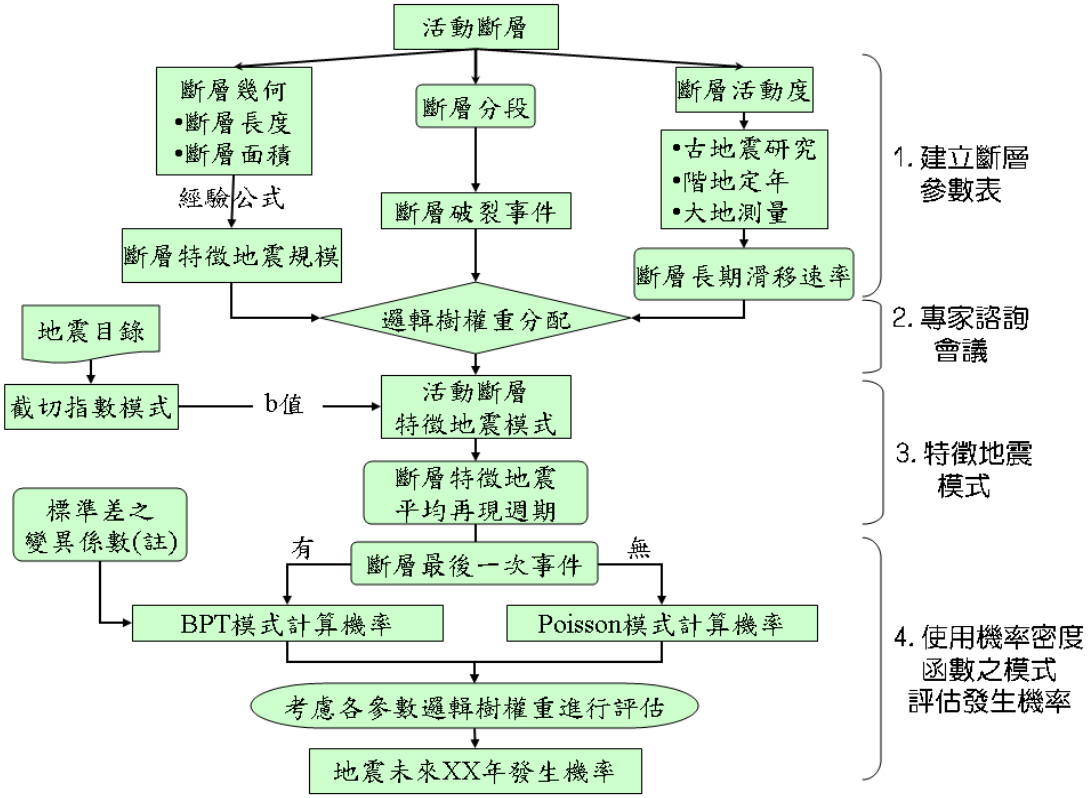
活動斷層所需的基本參數、調查方法及分析模式如附表 1- 1 所示，以下幾節將就活動斷層各參數的取得及調查方法分別描述之。



附圖 1- 1：計算活動斷層特徵規模地震發生率流程圖（摘錄自美國 USGS WG02 報告書，2003）。



附圖 1-2：本計畫斷層潛勢分析方法概念流程圖，針對古地震或歷史地震的了解程度，可分為三種方式進行評估（修改自日本地震調查研究推進本部，2001）。



附圖 1- 3：本計畫活動斷層地震發生機率潛勢評估流程圖。本研究評估採用標準差之變異係數則參考美國 WG02 之經驗為 0.7（0.3）、0.5（0.5）、0.3（0.2），括號為權重。

附表 1-1：活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式

斷層參數		調查方法與分析模式
斷層位置與特性	斷層位置與長度	● 遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 ● 地表地質調查與河階地形研究。 ● 地物探勘瞭解地下地層錯動情形。 ● 既有鑽探瞭解跨斷層之地層差異。 ● 根據既有地質鑽探建構地質剖面。
	斷層分段與分支	● 遙測地形判釋，各分段地形抬升量有所差異。 ● 地表地質調查，以位態改變分辨之。 ● 跨斷層河階地形，各分段河階發育不一致。 ● 主斷層錯動量與地震規模皆大，分支斷層則次之。 ● 主斷層與分支斷層可以透過運動學分析反演來綜合解釋。
	斷層位態與 3D 幾何形貌	● 淺層與深層鑽探，斷層走向、傾角、震源機制提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 淺部與深部震測，提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 採用軟體進行運動學分析與模擬地下三維構造。
	斷層機制	● 地表斷層露頭與斷層擦痕。 ● 斷層鄰近地震機制。 ● 以 GPS 速度場推估地殼應變量探討機制。
	最大可能規模	● 依據斷層破裂之尺度，由經驗公式推估最大可能可能地震規模。
斷層活動性與變形	活動歷程	● 歷史文獻資料有關地震記載。 ● 古地震研究(既有槽溝開挖、跨斷層河階定年) 。
	平均滑移速率	● 短期斷層滑移速率，以 GPS 速度場與精密水準資料推估。 ● 長期斷層滑移速率由其他子計畫成果提供。
	滑移虧損	● 利用地表之地殼變形測量資料及已知斷層面，以塊體模型模擬活動斷層之滑移速率及滑移虧損率。
	活動間隔	● 利用長期斷層滑移速率資訊，採用特徵地震模式及適當的統計模式進行推估。
	地表變形量	● 根據斷層機制、GPS 與精密水準資料、透過運動學分析推測地表可能之變形量與變形模式。

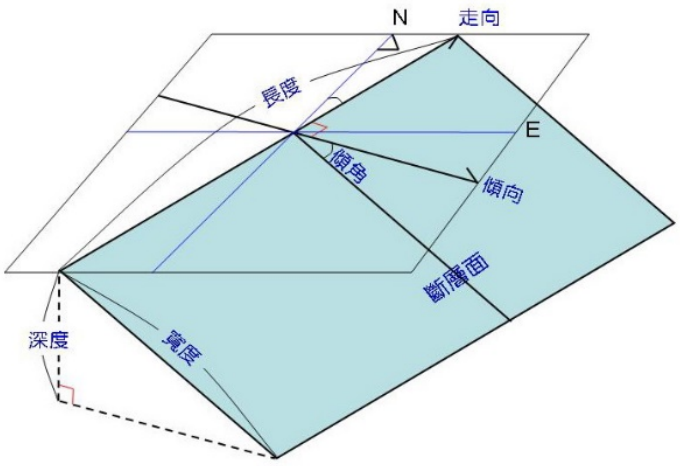
1-2 斷層模型

為了獲得活動斷層之幾何面相關參數，並嘗試建立斷層面幾何模型，需蒐集包括斷層線跡、寬度、傾角等幾何面相關資訊，斷層之幾何關係可用附圖 1- 4 來表示。

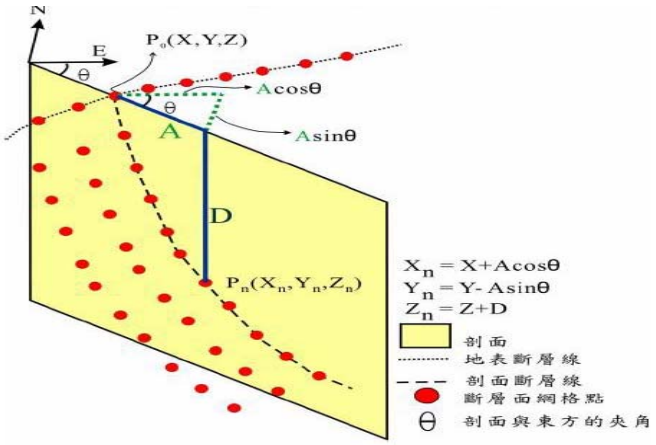
斷層三維幾何面建置原理為已知地表斷層線、剖面斷層線與剖面走向後，利用幾何關係建立斷層面網格座標（附圖 1- 5），圖中 P_0（x, y, z）為地表斷層線格點之座標，P_n（X_n, Y_n, Z_n）為與正東方夾 θ 之剖面上斷層格點之座標，A 與 D 分別為剖面中斷層格點 P_n 與 P_0 在水平方向距離與垂直方向距離；P_n 與 P_0 在 X 方向的差為 Acosθ、在 Y 方向的差為-Asinθ、在 Z 方向的差為 D，因此得以推算斷層面上任意點 P_n 的三維座標（X_n,Y_n,Z_n）。數值化的斷層面是由三維空間的點（vertex）所組成。

斷層活動往往不是整段一起動，而常是其中一小分段在動，因此會造成不同規模、不同滑移量的地震。至於每一分段中，會重複的發生大致相同規模的最大地震，稱為特徵地震。

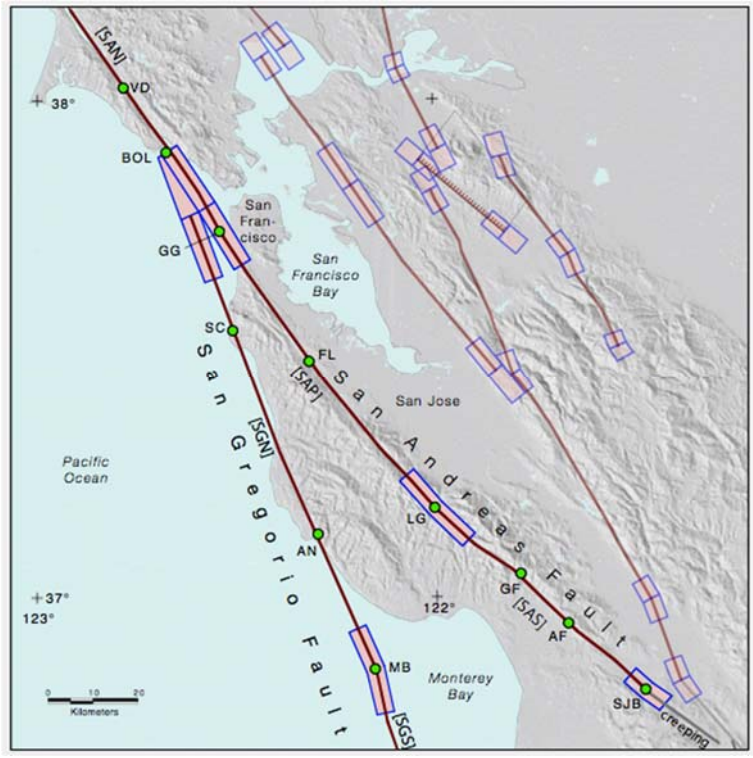
以美國為例，附圖 1- 6 為美國 WG02 針對舊金山灣區中之斷層所做之分段分布圖，San Andreas Fault 分為 SAN、SAP、SAS 三段；San Gregorio Fault 分為 SGN、SGS 兩段，各分段都有其對應之參數表，如附表 1- 2 所示，包括各分段之長度、寬度及滑移速率。斷層經過分段後，其破裂模式就會有各種破裂模式的排列組合，附圖 1- 7 為針對 Hayward -Rodgers Creek fault 分段，並進行破裂模式排列組合，區分出 4+1 個破裂事件後，由專家評估各事件之可能性，最後分配四個破裂模式之權重並提出斷層之破裂模式。



附圖 1- 4：斷層幾何參數示意圖



附圖 1- 5：斷層面網格座標之建立

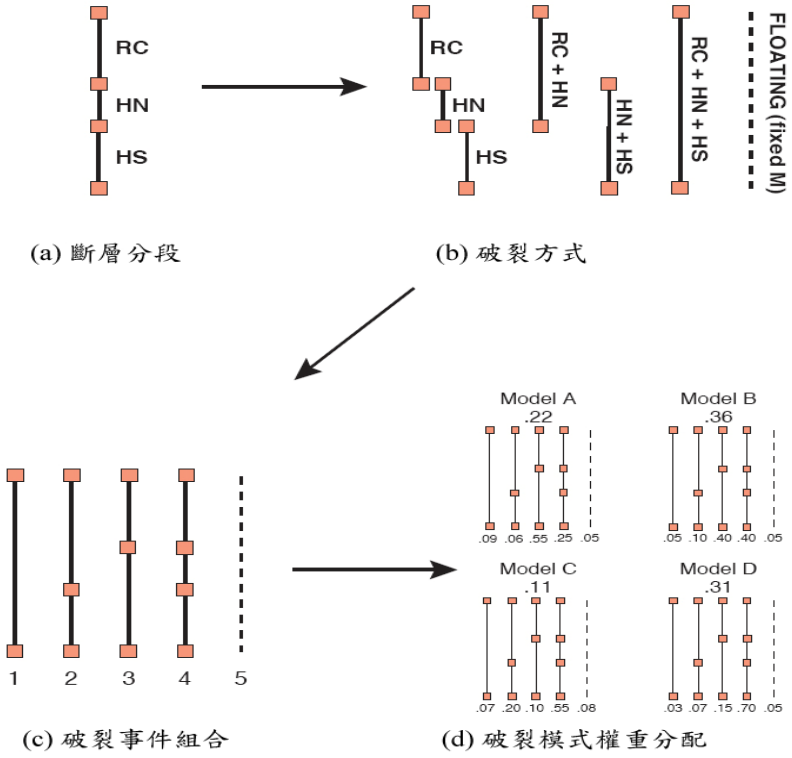


附圖 1- 6：斷層分段分布圖，San Andreas Fault 之分段：SAN、SAP、SAS； San Gregorio Fault 之分段：SGN、SGS（摘錄自美國 USGS WG02 報告書，2003）。

附表 1- 2：San Andreas Fault 及 San Gregorio Fault 各分段之參數（摘錄自美國 USGS WG02 報告書，2003）

		Length, km			Width, km		R (seis. scaling factor)		Slip rate, mm/yr	
Fault	Seg.	Preferred	Min	Max	Preferred	90% bounds	Values	Weights*	Preferred	95% bounds
San Andreas	SAS	62	47	77	15	13-17	0.8/0.9/1.0	(a)	17	13-21
	SAP	85	60	110	13	11-15	0.9/1.0	(b)	17	13-21
	SAN	191	171	211	11	9-13	0.9/1.0	(b)	24	21-27
	SAO	135	115	155	11	9-13	0.9/1.0	(b)	24	21-27
San Gregorio	SGS	66	46	86	12	10-14	0.8/0.9/1.0	(a)	3	1-5
	SGN	110	85	134	13	11-15	0.8/0.9/1.0	(a)	7	4-10

* Weights: (a) Mean and 90% bounds: 0.185/0.63/0.185. (b) Only lower 90% bound set: 0.185/0.815.
(c) Weights determined by WG02: 0.4/0.5/0.1 (see text). (d) Equal weighting of 1/3 on each branch.



附圖 1- 7：由斷層分區建立斷層破裂模式（a）圖中橘色方框為分區之邊界，以 Hayward -Rodgers Creek fault 為例，先劃分三個斷層分區；(b)分區中可產生六種破裂組合(加上不明破裂方式 floating earthquake)；(c)建立 5 種破裂事件；(d)將各破裂模式及事件進行權重分配(摘錄自美國 USGS WG02 報告書，2003)。

1-3 尺度規模經驗公式

藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式，可求得斷層之特徵地震規模，目前已知可用於台灣地區活動斷層之經驗公式有下：

Wells and Coppersmith（1994）彙整並建置包含 244 個地震的資料庫，利用此資料庫中的資料，可以回歸分析出各型態的斷層性質（如走向、正、逆斷層）對地震規模、斷層長、斷層寬、斷層面積、地表位移之間的關係式（附表 1- 3）。

吳相儀（2000）研究台灣地區 1993 年至 1998 年，規模大於 5，震央位於島內，震源深度在 20 公里以上的 6 個地震，以及 99 年的集集地震、嘉義地震及嘉義地震之最大餘震（規模 6.0）。求得之地震矩規模與震源參數斷層長（L）、斷層面積（A）、斷層平均滑移距（D）間的關係，如附圖 1- 8 至附圖 1- 10 所示，其經驗公式為：

$$Mw = (1.32\pm0.122)\log(L)+(4.817\pm0.132) \quad （式 1-1）$$

$$Mw = (0.82\pm0.071)\log(A)+(4.61\pm0.141) \quad （式 1-2）$$

$$Mw = (1.83\pm0.39)\log(D)+(6.85\pm0.23) \quad （式 1-3）$$

Hanks and Bakun（2008）提出孕震源之深度與 scaling law 有關，並以斷層面面積 537 平方公里為界建立雙線性之關係式。其關係式為：

$$\begin{aligned} M &= \log A + 3.98 \pm 0.03, \ A \le 537 \text{ km}^2 \\ M &= 4/3 \log A + 3.07 \pm 0.04, \ A > 537 \text{ km}^2 \end{aligned} \quad （式 1-4）$$

Shaw（2009）以孕震源深度作為控制，建立 M-A 之關係式.

$$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max\left(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}}\right)}{\left[1+\max\left(1,\frac{A}{H^2\beta}\right)\right]/2} + \text{const.} \quad （式 1-5）$$

該式對於 Hanks and Bakun（2008）及 Wells and Coppersmith（1994）之觀察提供了一好的解釋，並且在深度 H=15.6 及 β=6.9 時為最佳解，這是因為多數資料來自於加州的走向滑移斷層。Shaw（2009）定義 β 值為和斷層有效寬度相關之參數，由於台灣地區多屬於逆衝斷層，要探討此關係式，台灣地區可考慮孕震源深度為 35 公里，β=6.9，另外式 1-5 中還有一個常數（const.），此常數代表靜態應力降的值。附圖 1- 11 中，Yen and Ma（2011）考慮常數對於應力降為 10、100 及 1000 巴，在 Mw-A 的圖上可以看到各事件之應力降變異性，然而假使只考慮應力降 10-100 巴的事件可以獲得好的迴歸關係式。

Yen and Ma（2011）調查了台灣造山帶之地震尺度，並彙整為震源參數來檢驗尺度自我相似性，並決定了有效長度及寬度對地震矩之尺度關係，如附圖 1- 12 所示，（$M_0 \leq 1020$ Nm）其經驗公式為：

$$\log Le = (1/2)\log M_0 - 8.08 \quad （式 1-6）$$

$$\log We = (1/2)\log M_0 - 8.08 \quad （式 1-7）$$

$$\log De = 1.68 \pm 8.08 \quad （式 1-8）$$

（$M_0 \geqq 1020$ Nm）其經驗公式為：

$$\log Le = (1/3)\log M_0 - 4.84 \quad （式 1-9）$$

$$\log We = (1/3)\log M_0 - 5.27 \quad （式 1-10）$$

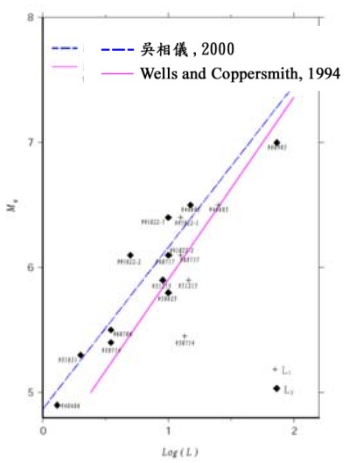
$$\log De = (1/3)\log M_0 - 4.37 \quad （式 1-11）$$

本計畫在評估活動斷層之特徵地震規模時，主要會以臺灣本土化最新的經驗公式來計算，如 Yen and Ma（2011）之經驗公式，地震矩則以 Kanamori（1977）之震矩與規模之轉換式進行轉換。

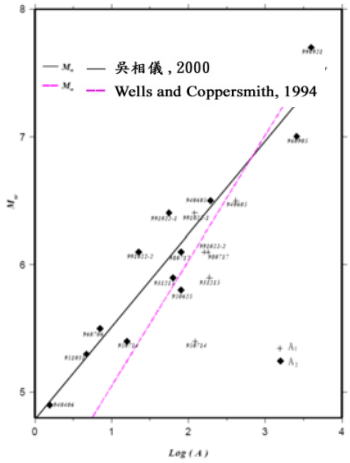
另外也會參考 Wells and Coppersmith（1994）的經驗公式，主要原因是其彙整了全球的地震資料進行回歸，可以普遍應用於世界上活動斷層之規模推估，沒有地域之區別，而且針對不同型態之活動斷層有其特定之經驗公式，因此可作為計算特徵地震規模之一來考慮。

附表 1- 3：Wells and Coppersmith（1994）彙整之斷層參數及地震矩規模關係式

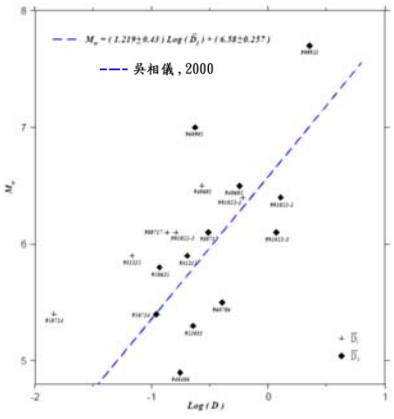
斷層類型	參數	次數	經驗公式	S (Mw)	經驗公式	S*log*(L,A, or D)
平移斷層	破裂長度 L（km）	43	M_w =5.16+1.12 log L	0.28	log L=0.74 M_w -3.55	0.23
逆斷層		19	M_w=5.00+1.22 log L	0.28	log L = 0.63 M_w -2.86	0.20
正斷層		15	M_w =4.86+1.32 log L	0.34	log L = 0.50 M_w -2.01	0.21
全部		77	M_w = 5.08+1.16 log L	0.28	log L = 0.69 M_w -3.22	0.22
平移斷層	破裂面積 A（km^2）	83	M_w=3.98+ 1.02 log A	0.23	log A = 0.90 M_w -3.42	0.22
逆斷層		43	M_w =4.33+0.90 log A	0.25	Log A = 0.98 M_w -3.99	0.26
正斷層		22	M_w =3.93+1.02 log A	0.25	Log A = 0.82 M_w -2.87	0.22
全部		148	M_w =4.07+0.98 log A	0.24	Log A = 0.91 M_w -3.49	0.24
平移斷層	地表錯動量 D（m）	43	M_w =6.81+0.78 log D	0.29	Log D= 1.03 M_w -7.03	0.34
逆斷層		21	M_w = 6.52+0.44 log D	0.52	1og D=0.29 M_w - 1.84	0.42
正斷層		16	M_w =6.61+0.71 log D	0.34	Log D = 0.89 M_w -5.90	0.38
全部		80	M_w =6.69+0.74 log D	0.40	Log D = 0.82 M_w -5.46	0.42



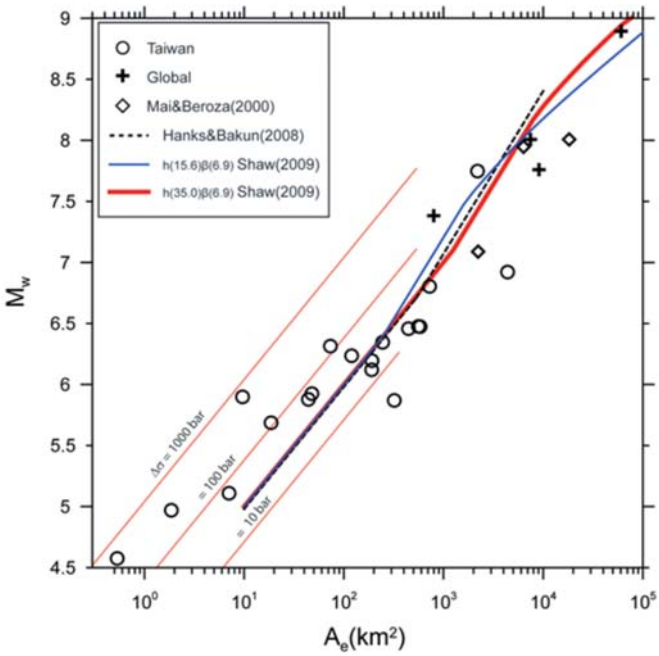
附圖 1- 8：地震矩規模與斷層長度之關係



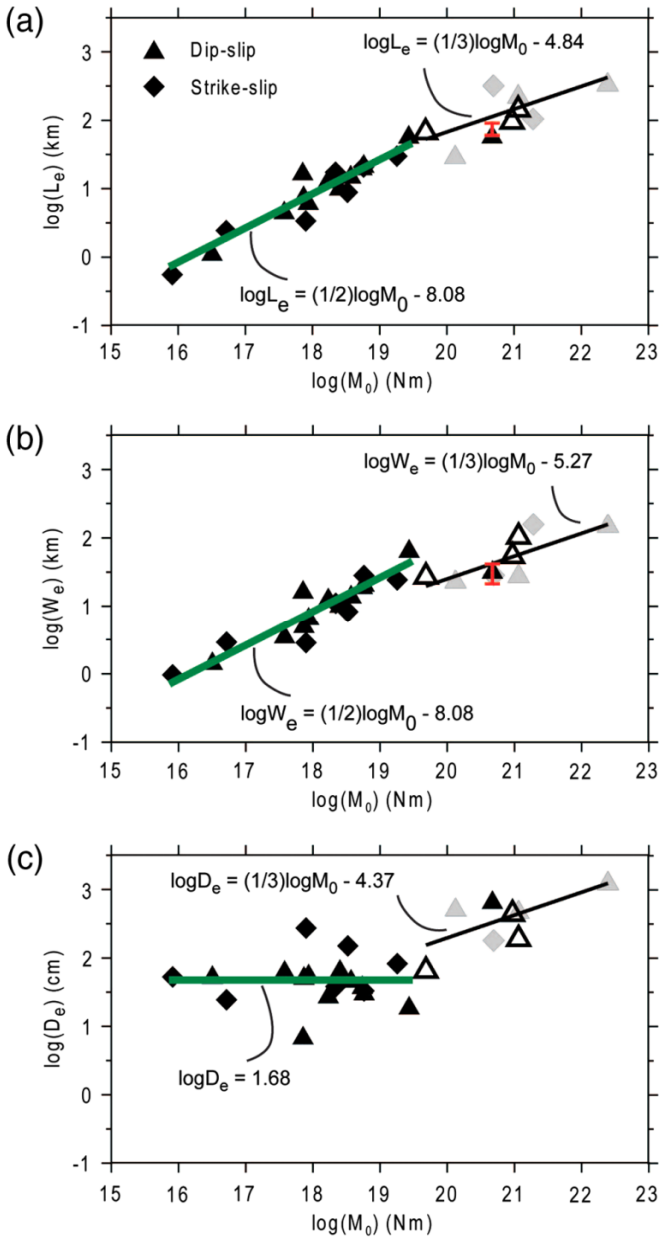
附圖 1- 9：地震矩規模與斷層面積之關係



附圖 1- 10：地震矩規模與斷層平均錯動量之關係



附圖 1- 11：地震矩規模與斷層面積之關係圖（摘錄自 Yen and Ma，2011）。



附圖 1-12：活動斷層（a）有效長度 Le（b）有效寬度 We（c）有效平均滑移量 De 與地震矩 M0 之尺度關係（摘錄自 Yen and Ma，2011）。

1-4 地震發生率模型及特徵地震模式

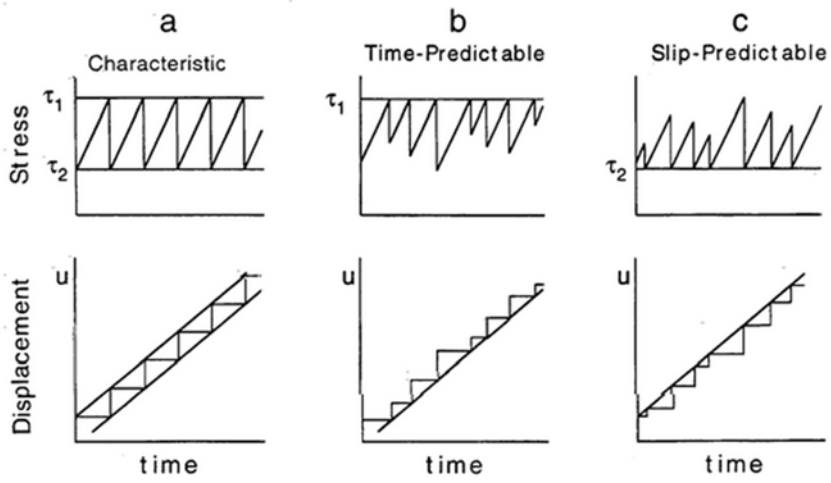
地震發生率模型

理論上，如果板塊的運動速度穩定，應變積累將穩定緩慢增加，斷層滑移會在固定的時間間隔發生，此時間間隔被稱為地震再現週期。

地震預測目前分為三種基本模式（Lay and Wallace，1995），如附圖1- 13，敘述如下：

1. 特徵地震模式（the characteristic earthquake）：特徵地震模式表示在在兩剪切應力τ1、τ2之間。每次地震斷層的滑動量都是一樣的，並隨著時間的推移，再現週期是一樣的。但特徵地震的行為在自然界中是不常見的，因為該模型假設板塊運動是穩定且斷層摩擦力和斷層強度是定值。即使如此，還是存在可能符合該模型的斷層：加州鄰近Parkfield的San Andreas fault即為一個例子。此斷層自1857年以來，已經在大致相同的時間間隔下發生至少5起M> 6地震。
2. 時間可預測模式（the time-predictable earthquake）：時間可預測模式是假設斷層強度是恆定的，斷層總是會在剪應力達到τ1時破裂。然而每次破裂的長度都不盡相同，故釋放的應力也有所差異，故再現周期期之間不會相同。該模型假定一個大的滑動量可以釋放的剪切應力大於小的滑動量。因此，在一個大型破裂面發生時，將需要更長的時間來達到τ1水平的剪應力來再次發生地震。假設穩定的板塊運動條件下，知道過去前幾次地震時的滑移量，時間可預測模式可以預測下一個地震的發生時間。如加州鄰近舊金山灣區的Calaveras斷層在1962-1977當中，每次地震滑移量的累積時間與其滑移量變化是呈線性關係。
3. 滑移可預測模式（the slip-predictable earthquake）：斷層並不會每次都在相同的剪切應力τ1時發生破裂。但他假設每次斷層破裂時都會使剪應力降低至τ2。此模型不能用來預測破裂何時會發生，但卻可以預測在給定的時間範圍內會發生多少規模的地震，每次地震後，應力累積的速率都是相同的（從τ2開始累積），故得知最近一次破裂的時間後，可以推測在多久時間後可能會有多少規模的地震，但不一定會真有斷層錯動發生（無法預測下次地震發生時間），因為本模型沒有τ1的概念。

每個模式都是基於應力累積和釋放的週期來設計。



附圖 1- 13：斷層在穩定地累積應力時之三種預測地震的模式，上圖中 τ_1 為斷層滑動之初始應力，反映斷層之強度；τ_2 為滑移之靜止應力，反映斷層之摩擦力，下圖中 u 為斷層之累積滑移量，其中(a)特徵模式，每個地震之應力累積歷史、再現週期及滑移量都是均一的，（b）時間可預測模式，假設斷層強度為定值，而當斷層上之應力達到 τ_1 時，就會產生地震滑移，假設滑移與應力降是呈比例的，且板塊運動為穩定的狀態，我們即可藉由前次地震之滑移量預測下次地震發生之時間，(c)滑移可預測模式，此模式是假設斷層上的應力每次發生地震後都會降到 τ2，如果知道最近一次地震發生之時間，我們即可預測斷層在特定時間會發生多大規模之地震（修改自 Shimazaki and Nakata，1980）。

特徵地震模式方法

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

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

特定斷層震源如果採用指數分佈模式，以中、小規模地震的發生率趨勢來外插推估大規模地震發生次數時，常會有低估的情形，而且活斷層通常會以適當的間隔重複發生特定規模大小的地震。為避免低估大規模地震的發生率，許多學者建議採用特徵地震模式來描述斷層的地震發生率（Schwartz and Coppersmith，1984；Coppersmith，1991；Davison and Scholz，1985；Wesnousky，1994）。大規模地震的發生率必須藉由地質資料來推估，如古地震及斷層長期滑移

速率的研究成果，Schwartz and Coppersmith（1984）進行Wasatch斷層及San Andreas斷層的中南段調查時，驗證了此兩斷層屬特徵地震模式，附圖1-14為San Andreas斷層的中南段，驗證此斷層屬特徵地震模式。

特徵地震模式的地震規模發生率是由Youngs and Coppersmith（1985）提出，假設大規模的特徵地震規模分佈於m_u-1/2至m_u之間，且大規模的特徵地震有固定的發生率。

特徵地震的累積地震發生率公式如下所示：

$$\dot{N}(m)=\dot{N}^e\frac{\exp(-\beta(m-m_0))-\exp(-\beta(m_u-1/2-m_0))}{1.0-\exp(-\beta(m_u-1/2-m_0))}+\dot{N}^c \quad for \quad m_0\le m<m_u-\frac{1}{2}$$

$$\dot{N}(m)=\dot{N}^c\frac{m_u-m}{1/2} \qquad for \quad m_u-\frac{1}{2}\le m<m_u \qquad （式 1-12）$$

上式$\dot{N}^e$及$\dot{N}^c$分別代表由指數分佈模式及特徵地震模式的總累積的地震年發生率，m_0及m_u分別是地震規模的上限及下限值，m為欲計算之地震矩規模。$\dot{N}^c=N(m_u-1/2)$是特徵地震規模大於m_u-1/2的總累積年發生率，而規模m_0以上的地震年發生率的總和是$\dot{N}(m_0)=\dot{N}^e+\dot{N}^c$。式1-12中$\dot{N}^e$與$\dot{N}^c$改以斷層滑移速率（fault slip-rate）表示。

$$\dot{N}^c=\frac{1}{2}\dot{N}^e\frac{b\ln 10\cdot\exp(-\beta(m_u-3/2-m_0))}{(1-\exp(m_u-1/2-m_0))} \qquad （式 1-13）$$

$$\dot{N}^e=\frac{\mu A_f S\cdot(1-\exp(-\beta(m_u-m_0-1/2)))}{\exp(-\beta(m_u-m_0-1/2))\cdot M_0(m_u)\cdot[\frac{b\cdot 10^{-c/2}}{(c-b)}+\frac{b\exp(\beta)(1-10^{-c/2})}{c}]} \qquad （式 1-14）$$

式1-13與式1-14中，A_f是總斷層面積，S是斷層滑移速率，μ是剛性或是剪力模數（rigidity shear modulus），一般為 3×10^{11}dyne/cm^2，最大特徵地震地震矩為M_0（m_u），而c與d是式1-14的常數。

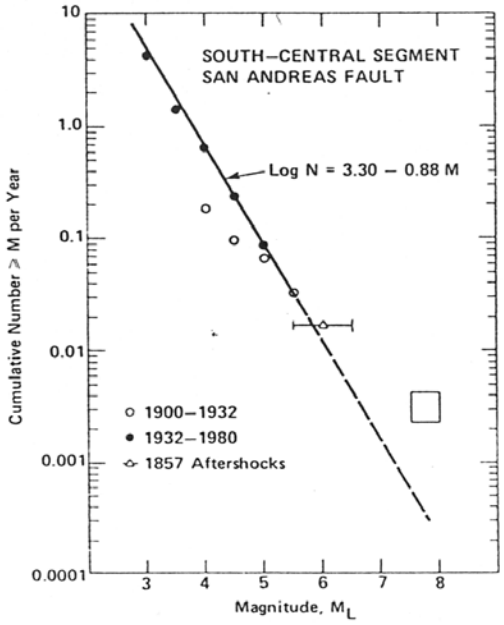
附圖1-15為相同地震矩率或斷層滑移速率狀況下，截切指數模式與特徵地震模式的差異，可以知道特徵地震模式在中小規模的地震活動度較低，主要的地震矩率是由大規模地震貢獻。

實際進行PSHA時採用式1-14，但需要將累積地震發生率換算為各規模區間m_i±dm/2的地震發生率，即

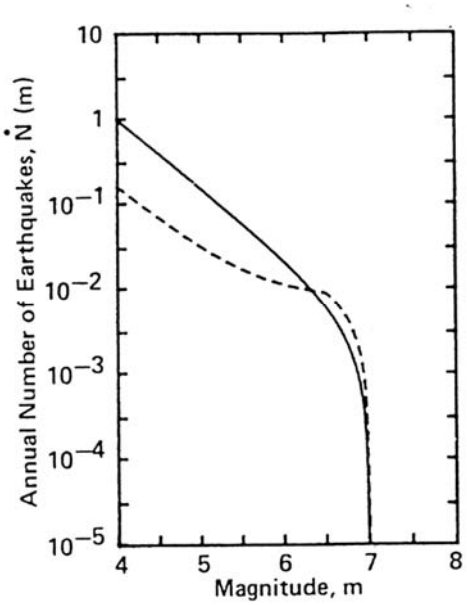
$$v(z)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m_i=m_0}^{m_i=m_u}\lambda_n(m_i)\cdot\left[\sum_{r_j=0}^{r_j=r_{\max}}P_n(R=r_j|m_i)\cdot P(Z>z|m_i,r_j)\right] \qquad （式 1-15）$$

$$\lambda(m_i)=N(m_i-dm/2)-N(m_i+dm/2) \qquad （式 1-16）$$

上式的dm是PSHA分析時採用的地震規模間距。



附圖 1- 14：San Andreas 斷層中南段之特徵地震模式，圖中實心黑圓點、空心圓點、空心三角形皆為地震目錄資料，而空心方塊為活斷層槽溝探挖與地質調查所獲得的資料誤差範圍，實線為截切指數模式，而虛線部分為外差結果（摘錄自 Schwartz and Coppersmith，1984）。



附圖 1- 15:假定相同滑移速率情形下比較指數地震分佈模式與特徵地震模式的差異，實線為截切指數模式分佈，虛線為特徵地震模式分布。（摘錄自 Youngs and Coppersmith，1985）。

1-5 機率評估

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

計算地震未來之發生機率，尚需要該斷層特徵地震最近一次發生之時間，有些統計模式會將不確定性帶入計算，例如再現週期之標準差。機率密度函數的計算方式如附圖1- 16所示，假設曲線為地震發生之機率密度函數f（t），則從地震發生後經過時間T到ΔT之發震條件機率為斜線之面積/所有藍色區的面積，條件機率的公式為：

$$P(T \le t \le T+\Delta T \,|\, t > T) = \frac{F(T) - F(T+\Delta T)}{F(T)} \qquad \text{（式 1-17）}$$

其中

$$F(T) = \int_{T}^{\infty} f(t)dt \qquad \text{（式 1-18）}$$

機率密度函數的選擇跟孕震之區域性、時間性、資料完整性有關，

（1）Poisson model

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

$$f_{Exp}(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad \text{（式1-19）}$$

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

$$1 - e^{-\lambda \Delta t} \qquad \text{（式1-20）}$$

用於區域性震源統計及活動斷層活動性不明確之情形，例如背景地震發生率。

（2）Brownian Passage Time（BPT）model

當一地震在一斷層區發生地震後，除非這個區域再度累積一定時間之能量，不然不大可能發生另一地震（Ellsworth et al., 1999；Kagan and Knopoff，1987）。要敘述這種模式至少需要兩個參數以及最後之地震記錄，其中一個參數為活動間隔μ，另外一個是標準差σ，公式如式1-21。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (式\ 1\text{-}21)$$

BPT 分布機率密度函數如下，其中 α=σ/μ：

$$f_{BPT}(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu t\alpha^2}} \qquad (式\ 1\text{-}22)$$

$$h_{BPT}(t) = 1/(2\mu\alpha^2) \qquad (式\ 1\text{-}23)$$

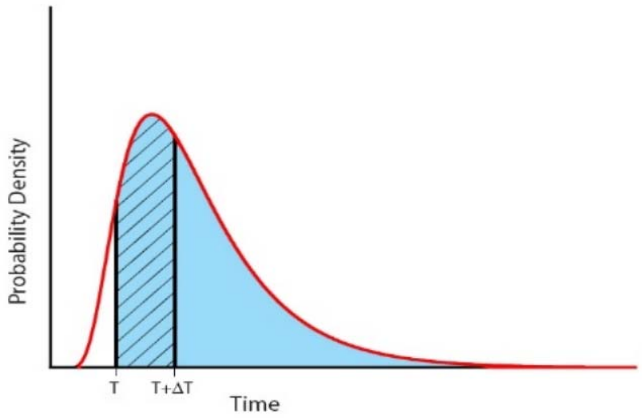
危險函數（hazard function）h_{BPT}（t）在t=0時為零，並會隨時間漸漸趨於一最大值。BPT的行為模式取決於α，當α越小f_{BPT}（t）將呈現較高之峰值；當α值越大，延遲時間和結束時間變短，f_{BPT}（t）函數更近似於Poisson（附圖1- 17）。

在獲得每一條斷層分支之再現時間之機率後，若要計算位於兩條以上斷層區域之破裂機率，或是多個斷層分支集合成之條件機率機率，可以使用下列計算方式：

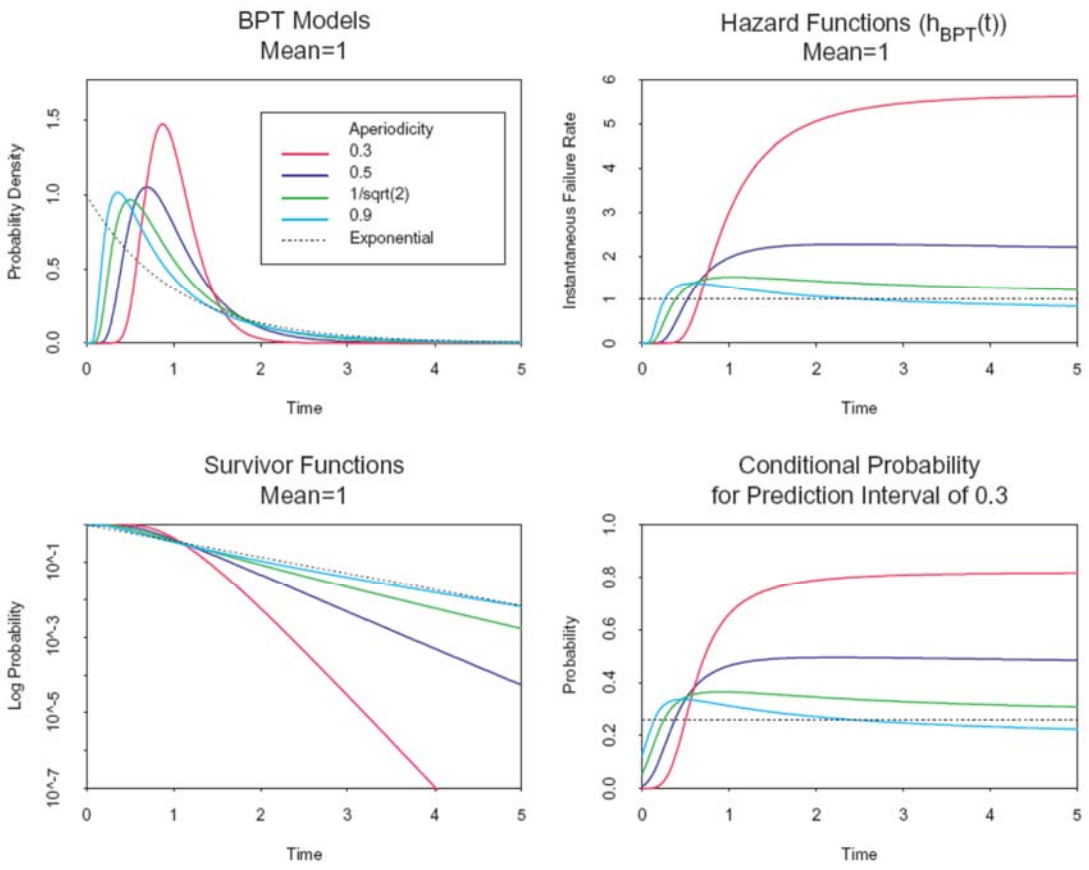
$$P_{total}=1-(1-P_1)(1-P_2)\ldots(1-P_n) \qquad (式1\text{-}24)$$

其中P_{total}為將所有斷層之發生率交集後之發生率，P_1至P_n則為各斷層發生率。

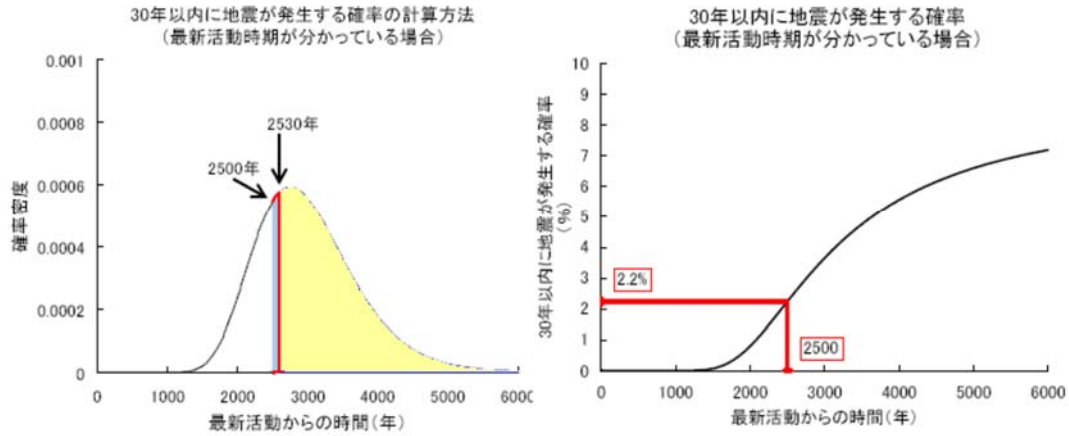
日本地區在評估陸域活動斷層發震之條件機率，採用BPT模式（附圖1- 18）。BPT模式符合彈性回彈理論，函數近似於對數常態分布，且在時間無限延伸時，其條件機率不會有顯著降低（附圖1- 19），函數較具穩定性。



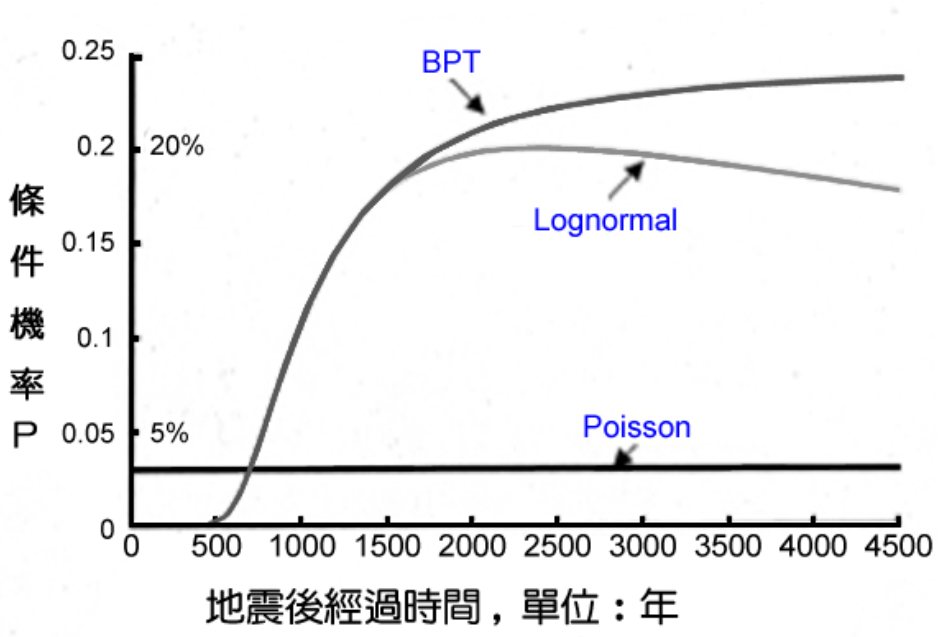
附圖 1- 16：機率密度函數分布圖，圖中紅色線段表示機率密度函數曲線，Time 為 0 代表最近一次地震發生之時間，Time 為 T 代表發生地震後經過了 T 時間，ΔT 為時間間隔。



附圖 1- 17：不同 α 值（紅線 0.3、紫線 0.5、藍線 0.9）對 BPT 模式之影響，四張圖分別為機率密度、危險、存活及條件機率函數（摘錄自 Ellsworth et al., 1999）。



附圖 1- 18：日本 BPT 模式評估示意圖（摘自日本全國地震動預測地圖，2008）。



附圖 1- 19：各統計模型之條件機率比較，X 軸為地震後經過時間，Y 軸為發生率。

期中審查意見回覆

期中審查意見	處理情形
1. 有關山腳斷層地下幾何形貌的建立，可以考慮採用變形前後各地層單位的長度皆相同的假設，建立另一種斷層地下幾何形貌。	感謝委員建議，變形前後各地層單位的長度皆相同（constant bed length）的假設常應用在地層厚度不變的逆衝斷層的剖面中，然而山腳斷層為正斷層，且上盤為成長型的地層（Growth strata），本計畫認為地層長度不變的假設可能不適用於此。
2. 有關山腳斷層，請說明分段位置為何以竹子湖為準。另山腳斷層海域延伸有48km 或128km 等不同說法，本案採用為何？	感謝委員建議，本計畫認為大屯火山是好的分段點，從歷史文獻記載中，1693 年的地震似乎未從臺北破裂到金山地區，1867 年的地震也未從金山外海及金山地區破裂到臺北，也顯示了分段破裂的行為。本計畫將大屯火山區中斷層線形呈現雁形排列及明顯跳階處作為分段點，即竹子湖地區。 中興公司(2015)於東海陸棚區的海域線形與山腳斷層金山海域延伸處之跳階達 5 公里，本計畫認為和山腳斷層連接破裂的可能性極低，因此不考慮此情形。
3. 有關山腳斷層深度，各文獻及本案模型結果各有不同，請說明差異為何及本案採用深度之理由。	感謝委員建議，過去文獻中地質推估的斷層深度約 9 公里（陳致同等，2012），地震分布深度卻多集中於 15~20 公里。地震定位的深度主要反應的是該區域地殼的孕震深度，不一定代表斷層的深度。陳致同等（2012）建立的地質剖面為基於 Displacement constant 的條件下所推估，該幾何無法很好的解釋斷層滑動的機制。 而本計畫利用 Chevron construction method 建立的模型為基於水平拉張量固定（Heave constant）的假設，其形貌符合鏟形正斷層的形貌，斷層深度也可對應至孕震深度，因此採用本計畫的模型成果。
4. 請考慮新城斷層和三義斷層地下幾何形貌側向的變化。	感謝委員建議，目前新城斷層幾何較為確定的部分位於頭前溪以南，如黃旭燦等（2004）建立的平衡剖面。頭前溪以北因缺少震測，並沒有明確的幾何形貌，然而，根

期中審查意見	處理情形
	據地礦中心條帶地質圖，新城斷層整段都屬於逆衝型式，因此幾何上應不會有大的變化，本計畫認為可沿用南段剖面的幾何作為新城斷層整段的幾何面。 三義斷層於大甲溪以南和車籠埔斷層重疊，幾何會和北段有所差別，可分為大甲溪以北、大甲溪以南兩段。
5. 請於期末報告中討論今年研究成果和前期研究成果比較上有何進展之處。	感謝委員建議，已將內容增補於報告書第八章。
6. 請於期末報告書說明不同斷層系統在地表變形觀測會有何不同狀況。	感謝委員建議，已於報告書第二章中針對各觀測分區及斷層系統內文中作說明。
7. 請於期末報告書討論不同斷層模型之差異。	感謝委員建議，於報告書第四章中已有模型原理之詳細說明。
8. 建議書面報告依科學報告格式，將斷層幾何模型方法移到前面章節，以利閱讀。	感謝委員建議，由於各章節使用的分析方法原理均不相同，因此報告書仍維持將方法撰寫於各章節內容中，以利閱讀對照。
9. 建議資料解算分析加入大屯火山系統之 GNSS 測站。	感謝委員建議，大屯火山系統之 GNSS 測站屬跨單位業務，已請中心承辦人員協助詢問，待取得觀測資料後再將其納入分析。
10. 斷層滑移速率文獻彙整後，請說明本案各斷層參數設定依據為何？	感謝委員建議，本研究的滑移速率參數是透過大地測量資料模擬所得，並對照地質文獻蒐集結果所決定。
11. 建議本報告中使用之圖片，其中與斷層相關之部分，應將斷層名稱標示於圖上。	感謝委員建議，已重新檢視報告書內相關的成果圖，並將斷層名稱標示於圖上。
12. GNSS 連續站之解算與分析請加入花蓮新設 4 個新站資訊。	感謝委員建議，會將花蓮新設 4 個新站觀測資料納入期末成果。
13. 由於監測需有後續警報作為，建議報告書文內提及監測網應改用觀測網稱之。	感謝委員建議，已統一改為觀測網稱之。
14. 變形速度場的圖顯示，區間色階應取各變形的區間值展繪，避免呈現單一色調，無法表達正確資訊。	感謝委員建議，因變形速度場圖為採用全臺資料分析的成果，區間色階係考量全島的變形量進行區間值填色，當用於展示局部分區（重要區域）時，因區域內部的變形量相對較小，故會有單一色調呈現之情形發生。

期中審查意見	處理情形
15. GNSS 移動站解算及水準測線歷年分析的測線位置索引圖,斷層線請將虛線改為實線表示，並與整本報告書一致。	感謝委員建議，已統一將報告書內成果圖的斷層線改為實線標示。

期末審查意見回覆

期末審查意見	處理情形
一、 文件格式	
1. 報告內文中央地質調查所請更名為地質調查及礦業管理中心(包含內文、圖說及附錄等)。	感謝委員建議，已修改。
2. 北部都會區的範圍已包含山區，建議參考人口及住宅分布資料重新圈繪，較符合都會區的定義。	感謝委員建議，已修改調整。
3. 第二章水準測線分析，高程變化圖與累計高程差圖，不易判讀與比對。	感謝委員建議，惟高程變化圖與累計高程差圖兩者的原理不同，高程變化圖為當年度測量的原始資料，反映水準測線沿途的地形起伏情形；累計高程差圖則為相鄰兩年水準高程值相減後再累加而得，可反映水準點位於歷年的變化趨勢。
二、 測量資料分析	
4. 金湖至瑞峰測線高程剖面有許多點位忽然跳高起來，請再確認其正確性。	感謝委員建議，已修改。
5. 第二章的水準測線分析，部分有跨斷層之測線，請補充斷層兩側之速度變化說明。	感謝委員建議，已補充。
6. 第八章之歷年成果比較請加強說明剖面括號內的意義？水準測線時間段相減時期時間段取捨考量的因素為何？	感謝委員建議，剖面括號內為年份，例如 04 代表 2004 年，23 代表 2023 年。又在臺北盆地區域，因累積測量時間跨距達 20 年，因此以 10 年為間距進行比較。
三、 斷層潛勢評估	
7. 資料中如果有離群點，例如：2-17頁、2-53頁、6-4頁、6-5頁等，是否先移除，在做後續的分析較佳？	感謝委員建議，已修改。
8. 地表變形強度不能直接對應震度，也不等同地質危害度，而且目前只考慮水平變形量，沒有考慮垂直向變化。	感謝委員建議，說明如下： 1. 如同報告書第 6-2-2 章節第一段內文強調的，本計畫提出地表變形強度之目的，是為了便於一般民眾、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，並非對應震度，也不是對應地質危害度。

期末審查意見	處理情形
	2. 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，因此本計畫規劃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。相關說明同時補充於報告書第 6-2-2 章節中。
9. 第316頁，I_2第二不變量，應該是代表剪切應變量的量質大小，和面應變應該沒關係。	感謝委員建議，根據第二不變量之定義以及 Kreemer et al.（2003）、張午龍等（2016）、Su et al.（2019）之說明，平面應變中的第二不變量確實深受剪切應變量的影響。不過除了走向滑移斷層外，逆斷層產生地表變形也具有剪切應變量，故本團隊可以採用第二不變量來進行綜合性之地表變形強度評估。相關說明及文獻已補充於報告書第 6-1-2 章節中。
10. 有關第五章斷層規模與年發生率、第六章應變速率場及地表變形強度，如何讓讀者了解評估的邏輯，需要更精準的敘述。	感謝委員建議，說明如下： 1. 第五章斷層規模與年發生率補充於報告書附錄 1 中，斷層規模評估可參考尺度規模經驗公式之章節，年發生率可參考地震發生率模型及特徵地震模式之章節。 2. 如同報告書第 6-2-2 章節第一段內文強調的，本計畫提出地表變形強度之目的，是為了便於一般民眾、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，本計畫參照地質調查及礦業管理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。換言之，當相關開發區域經過地表變形強度較高之區域，將需要另外進行更進一步的變位分析，釐清此高變形強度區域是否會影響到開發物件之安全性。

期末審查意見	處理情形
11. 請補充說明斷層發生地震機率的評估方法。	感謝委員建議，斷層發生地震機率的評估方法補充於報告書附錄 1 中。
12. 比對斷層幾何結果的可信度，請再補充一些討論。	感謝委員建議，各斷層幾何採用依據已於報告書第 3-1 章節中補充說明。
13. 山腳斷層上盤的生長斷層只佔上盤地層最淺的沖積層，基本上上盤絕大部分地層為中新統中下部高壓密的地層，因此重建山腳斷層地下幾何宜用地層等長度的方法。	感謝委員建議，已利用線平衡原理推估拉張量，並重新建立斷層幾何於報告書第 3-1-1-2 章節中。相較於期中成果，拉張量由 300 公尺變為 210 公尺，斷層淺部傾角由 63 度變為 68 度，斷層深部傾角由 25 度變為 33 度，斷層深度由 11 公里變為 15 公里。
14. 建立獅潭斷層的斷層參數，不宜採用根據地質圖所建立的地質斷層幾何，如黃旭燦等（2004）。	感謝委員建議，已補充於報告書第 3-1-3-3 章節中。
15. 新城斷層的幾何參數，引用不同文獻，而得到不同傾角，事實上是代表斷層兩段不同走向斷層的幾何形貌，文內宜釐清。	感謝委員建議，已補充於報告書第 3-1-2-3 章節中。
16. 三義斷層也是有類似側向幾何形貌變化的情形，宜需要加以說明。	感謝委員建議，已補充於報告書第 3-1-3-4 章節中。