

台南台地的地表變形與地震潛能

Surface Deformation and Earthquake Potential of Tainan Tableland,
Southwestern Taiwan

饒瑞鈞¹ 景國恩¹ 謝宗訓² 余致義³ 侯進雄⁴ 李元希⁴ 胡植慶⁵
詹瑜璋⁶ 李建成⁶ 洪日豪⁷

Ruey-Juin Rau¹, Kuo-En Ching¹, Tsung-Hsun Hsieh², Chih-I Yu³,
Chih-Shyong Hou⁴, Yuan-His Lee⁴, Jyr-Ching Hu⁵, Yu-Chang Chan⁶,
Jian-Cheng Lee⁶, Jih-Hao Hung⁷

ABSTRACT

We use repeated GPS and precise leveling measurements on the Tainan Tableland, southwestern Taiwan to characterize the behavior of the faults at depth and thus contribute to a better understanding of earthquake potential in this region. Analyses of GPS campaign data set from 1999 to 2003, together with data recorded at eight continuous GPS sites in the surrounding regions indicate a horizontal movement of 12 ± 4 mm/yr in the direction of $N44^\circ W$ for the Tainan Tableland with respect to TN01 on the west coast. Comparison of five precise leveling surveys across the Tainan Tableland over a period of 2 years indicates an uplift rate of about 11 mm/yr for benchmarks on the Tableland. Using an elastic dislocation model, we obtained a rapid slip rate of 23 mm/yr on the east-dipping Tainan fault and a relatively slow slip rate of 7 mm/yr on the west-dipping Houchiali fault. Using an empirical relation between rupture area and earthquake magnitude, we estimate a single segment Mw 5.9 and Mw 5.6 earthquakes could take place on the Tainan fault and

¹ 國立成功大學地球科學系(Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University)

² 國立成功大學衛星資訊研究中心(SGRC, National Cheng Kung University)

³ 國立成功大學測量工程學系(Department of Surveying Engineering, NCKU)

⁴ 經濟部中央地質調查所(Central Geological Survey, MOEA)

⁵ 國立台灣大學地質科學系(Department of Geological Sciences, National Taiwan University)

⁶ 中央研究院地球科學研究所(Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

⁷ 國立中央大學地球科學系(Department of Earth Sciences, National Central University)

the Houchiali fault, respectively.

前言

自從1980年阿爾及利亞的M 7.3愛爾亞司南地震 (El Asnam, Algeria) 和1983年美國加州的M 6.5柯林葛地震 (Coalinga, California, USA) 發生之後, 地球科學家開始理解到大地震可發生在位於地表褶皺構造下方尚未出露地表之盲斷層 (blind fault) 上 (Stein and Yeats, 1989), 而確認地表活動褶皺構造的重要性並不亞於活動斷層。透過大地測量之重覆觀測, 褶皺構造的地表變形可能隱含之地震潛能更加為人們所重視 (例如 Bilham and England, 2001; Sylvester, 2000)。本研究即在利用精密的大地測量來瞭解台南台地及其附近褶皺構造的構造活動與變形模式, 進而預估其地震潛能。

過去的研究調查認為台南台地東緣的後甲里斷層為一存疑性活動斷層 (林啟文等, 2000) (圖一)。根據全新世以來的海水面變化的研究, 台南台地東側在最近5800年間以約4 mm/yr的速率抬升 (Chen and Liu, 2000), 構造活動速率並不是特別快速。另一方面, 近年來利用衛星遙測觀測資料之合成孔徑干涉雷達 (Inter-ferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 研究結果顯示, 台南台地在1996-1998年間(630天內)垂直最大抬升量為3.2 cm (~18.5 mm/yr) (Fruneau et al., 2001), 此短期上升速率為上述過去六千年平均抬升量的4倍。另外於1996-1998年間, 此地區並無規模大於4的地震發生 (圖一)。結合InSAR結果推論, 近期台南台地是一構造活動相當活躍, 然並無規模較大地震伴隨發生的地區。

本研究於2001年3-12月間佈設一條長20公里, 安平至歸仁, 橫跨台南台地, 東西向之水準測線 (圖一); 期間並完成兩次精密水準測量。2002年更將水準路線向東延續17公里至龍崎, 建立一長37公里之水準測線 (圖一), 並實施兩次水準測量。2003年6月再度實施此測線之精密水準測量一次。水平變形方面, 本研究除了利用部分橫跨台南台地之水準點位實施GPS觀測, 並結合中央地質調查所自1999年起於台南地區佈設之GPS監測網 (圖一) 觀測資料。本研究即利用此地區之水平和垂直地表變形資料, 來進行相關研究。

GPS 測量

本研究使用一般通用之GPS解算軟體 (Bernese 4.2, Hugentobler et al., 2001) 進行資料計算與網形平差。台南台地地區水平速度場推求所利用的GPS資料包含 (1)東西向跨越台南台地,共14點GPS觀測站資料(點位間隔1-3公里,2001-2003年,間隔0.7-1.5年), (2)中央地質調查所於台南台地14點GPS觀測站資料(點位間隔約10公里,1999-2002年,間隔3.8年),及(3)成功大學的1個連續監測固定站(CK01)資料(圖一)。

圖二a為台南地區計算所得之GPS水平速度場。每一點之位移向量為相對於海岸邊TN01之速度變化量。後甲里斷層以西,台南台地南北緣內相對於台地西側沿海地區的平均水平位移速率為 12 ± 4 mm/yr,方向 316° 。後甲里斷層以東至龍崎(G359),在台地南北緣內平均的水平位移速率為 17 ± 3 mm/yr,方向 271° ;台地南北緣外之水平位移量則由西向東逐漸遞增,約 $17-40$ mm/yr,方向為 260° 。整體而言,台南地區由西向東位移量漸增,而在跨越後甲里斷層及龍崎(G359)兩處則有明顯的速度躍升;台地南北緣外之位移方向向量($250-260^\circ$)和整個嘉南地區的速度場大體一致(Yu et al., 1997),台地南北緣內部之速度向量方向(約 290°)則和台地的長軸方向(20°)近乎垂直。

精密水準測量

本研究之精密水準測量使用DiNi12電子水準儀。測量作業規範及資料處理乃依據現行「一等水準測量作業規範」(內政部,2001)實施。從台南安平至歸仁,長20公里水準測線之五次水準測量分別於2001/06/30-07/03、2001/10/17-10/22、2002/05/06-05/14、2002/10/29-11/22與2003/06/16-06/23完成。其測量時間間隔分別為約3.5、6.5、6.5及7.5個月。各點相對位置及高程如圖二b,點位位置投影至近東西向AB剖面。各點相對於台南西部沿海(TN01)的抬升速率(uplift rate)乃將各點五次水準測量所獲得之高程值,利用最小二乘法所求得(圖三)。至於往東側延伸之17公里水準測線,目前只有兩次測量,還需要累積更多資料,本文暫不討論。

自2001至2003年（時間間距1.97年）的5次水準測量（圖二c），得知海岸地區近乎無垂直抬升變化，往東至台地西緣（2-6公里處）台地垂直抬升速率增加至11-12 mm/yr，在6-11公里間其抬升速率維持在11 mm/yr。至台地東緣（TN08）以東（11-12.5公里處），則由11 mm/yr減至大灣低地近乎無位移。繼續向東，抬升量再次逐漸增加至約12 mm/yr（12.5-17公里）。

斷層模型之建立

為了進一步瞭解影響台南台地發育的地下構造幾何面貌及斷層滑移速率，我們以彈性半空間錯位模型（elastic half-space dislocation model）的構造力學性質（Okada, 1985；1992），在斷層錯動前後體積不變的條件下來進行斷層幾何及運動模型之建立。台南台地東西兩側於1公里範圍內，水平及垂直方向顯著的位移變化顯示，台地兩側下方需個別存在一活動之逆衝斷層（台南斷層及後甲里斷層）。將地表水平及垂直測量值套入模型中，經正演模擬，所得最佳模型之計算值及觀測值的比較如圖四a、b。我們所推論之斷層幾何及運動模型如下（圖四c）：台南斷層為一盲斷層，在近地表處斷層角度非常平緩（傾角向東 10° ），滑移速率為13 mm/yr，此斷坪（flat）向東連接之斷坡（ramp）傾角約 34° ，滑移速率為23 mm/yr。後甲里斷層則為台南斷層之背衝斷層（back-thrust），傾角向西 75° ，滑移速率為7 mm/yr，與台南斷層連接之深度約4公里。後甲里背衝斷層之形成位置及成因極可能是台南斷層深部斷層傾角的改變，此深部斷層即前述台南斷層 34° 之斷坡連接至另一斷坪（傾角向東 0.9° ，滑移速率為22 mm/yr）。根據過去台灣西南部的研究（Suppe, 1976），此深部之斷坪可能可視為區域性的滑脫面（decollement）。整體而言，台南台地地下斷層模型形成一上衝構造（pop-up structure）。此上衝構造的架構雖然與過去的研究相近（Deffontaines et al., 1997；Lacombe et al., 1999；Fruneau et al., 2001），但是本研究顯示後甲里背衝斷層並不是具有特別顯著位移量的主要斷層構造，此與過去的研究論點有明顯的不同。後甲里斷層以東逐漸增加的速度場亦顯示在中洲河階台地的西緣，指出有另一條傾向朝東傾角 28° ，滑移速率為28 mm/yr的逆衝斷層。各斷層之幾何及運動學參數詳列於表一。

討論與結論

(1) 從近兩年多次精密水準測量的資料來看, 台南台地近期的抬升速率(~11 mm/yr) 介於InSAR短期抬升96-98年的18.5 mm/yr與過去六千年平均抬升的4 mm/yr之間。精密水準測量之精度為數公釐(mm) , 較InSAR為高, 結果也應較為可靠。

(2) 短時間精密水準測量所獲得台南台地抬升速率的分布型態與台地地形高程起伏變化不一致。此現象可能因為長時期地形起伏的發育, 包含有瞬間同震變形所造成的位移量及地表風化、侵蝕作用的影響, 使得短時期大地測量的地表位移量時常無法與地形高程起伏變化一致(Burbank and Anderson, 2001)。

(3) 根據斷層模型模擬之結果及地震規模與斷層破裂面積相關之經驗公式(Wells and Coppersmith, 1994) ,

$$M = 4.07 + 0.98 * \log (RA)$$

RA為斷層破裂面積。以台南斷層面積72 km²及後甲里斷層面積40 km², 推算台南台地之台南斷層可產生規模M_w 5.9的地震而後甲里斷層可產生規模M_w 5.6的地震。

(4) 水準測線及GPS網的持續觀測可以作為分析台南台地變形模式之主要依據。如能對此地區進行長期之GPS、精密水準及微震觀測, 將有助於對此地區發震構造之更進一步瞭解。

誌謝

作者感謝一未具名審稿人及陳于高教授對本文之指正與建議。感謝經濟部中央地質調查所對本研究之經費提供。

參考文獻

- 內政部(2000)一等水準測量作業規範。內政部, 台北。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正(2000)台灣活動斷層概論, 第二版, 經濟部中央地質調查所特刊第十三號, 共122頁。

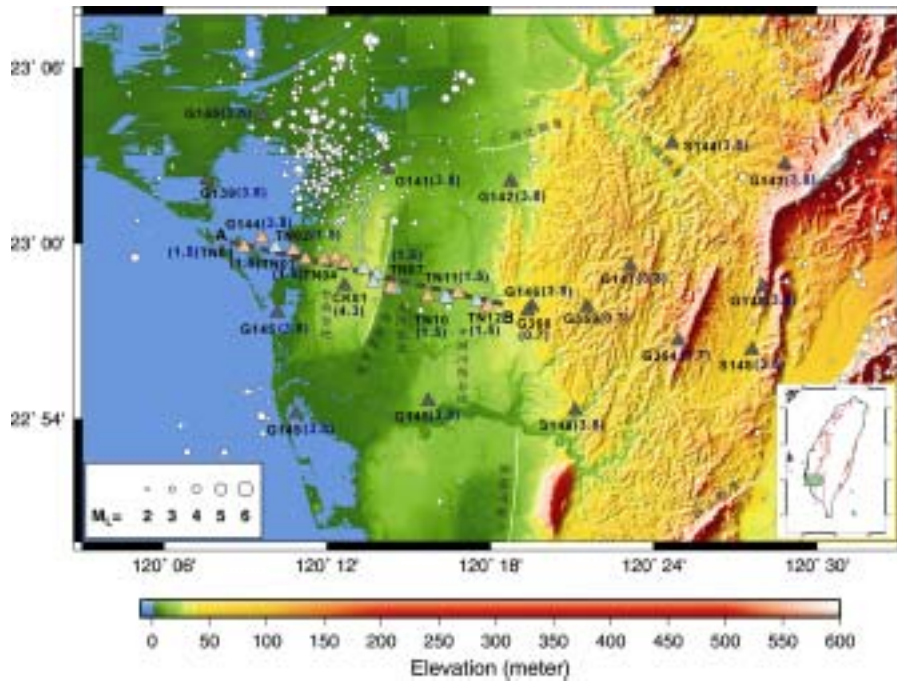
- Bilham, R., and P. England (2001) Plateau 'pop-up' in the great 1897 Assam earthquake: *Nature*, 410, 806-809.
- Burbank, D. W. and R. S. Anderson (2001) *Tectonic geomorphology*: Blackwell Science, 274pp.
- Chen, Y.G., and T.K. Liu (2000) Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan: *Quaternary Science Reviews*, 19, 923-930.
- Deffontaines, B., O. Lacombe, J. Angelier, H.-T. Chu, F. Mouthereau, C.-T. Lee, J. Deramond, J.-F. Lee, M.-S. Yu, and P.-M. Liew (1997) Quaternary transfer faulting in Taiwan foothills: evidence from a multi-source approach: *Tectonophysics*, 274, 1-3, 61-82.
- Fruneau, B., E. Pathier, D. Raymond, B. Deffontaines, C.T. Lee, H.T. Wang, J. Angelier, J.P. Rudant and C.P. Chang (2001) Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry: *Geophysical Research Letters*, 28, 3071-3074.
- Hugentobler, U., S. Schaer, and P. Fridez (2001) *Bernese GPS Software Version 4.2*: Astronomical Institute, University of Berne, 515 pp.
- Lacombe, O., F. Mouthereau, B. Deffontaines, J. Angelier, H.-T. Chu, C.-T. Lee (1999) Geometry and quaternary kinematics of fold-and-thrust units of southwestern Taiwan: *Tectonics*, 18, 1198-1223.
- Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- Stein, R. and R.S. Yeats (1989) Hidden earthquakes: *Scientific American*, 260, 48-57.
- Suppe, J. (1976) Decollement folding in southwestern Taiwan: *Pet. Geol. Taiwan*, 13, 25-35.
- Sylvester, A.G. (2000) Aseismic growth of Ventura Avenue anticline, southern California, 1978-1997: Evidence from precise leveling: *Surveying and Land Information Systems*, 60, 95-108.
- Wells, D.L., and K.J. Coppersmith (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Yu, S.-B., H.Y. Chen, and L.C. Kuo (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area: *Tectonophysics*, 274, 41-59.

表一 各斷層模型參數一覽表

Table 1 Parameters for each fault appeared in the dislocation model

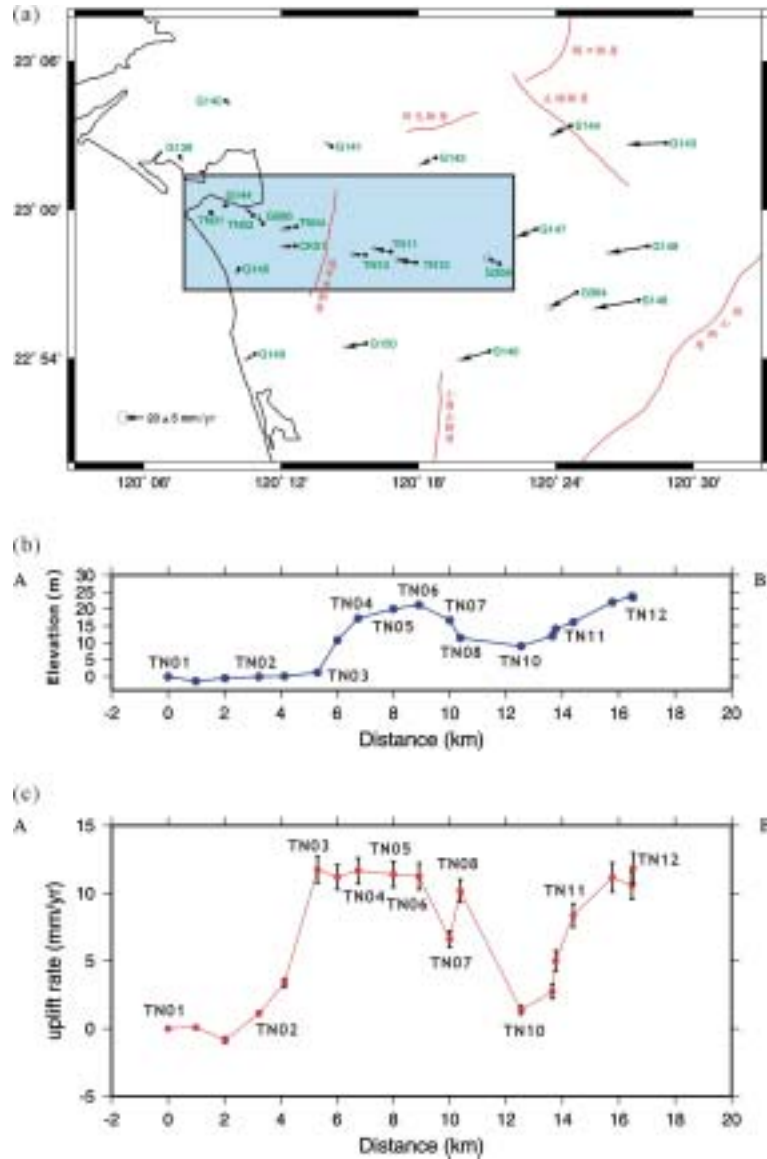
| Name | Length (km) | Depth (km) | Strike (deg) | Dip (deg) | Right-lateral (mm/yr) | Reverse (mm/yr) |
|------|-------------|------------|--------------|-----------|-----------------------|-----------------|
| TF1 | 6.58 | 0.026 | 20 | 1.0 | -4 | 13 |
| TF2 | 10.77 | 3.535 | 20 | 32.0 | 11 | 22.5 |
| TF3 | 10.77 | 0.270 | 20 | 0.9 | 1 | 22 |
| HF | 10.77 | 3.600 | 20 | 75.0 | 0 | 5 |
| CF1 | 10.77 | 2.600 | 20 | 32.0 | 0 | 19 |
| CF2 | 10.94 | 0.370 | 20 | 8.0 | 0 | 21 |

* Shown in figure 4c



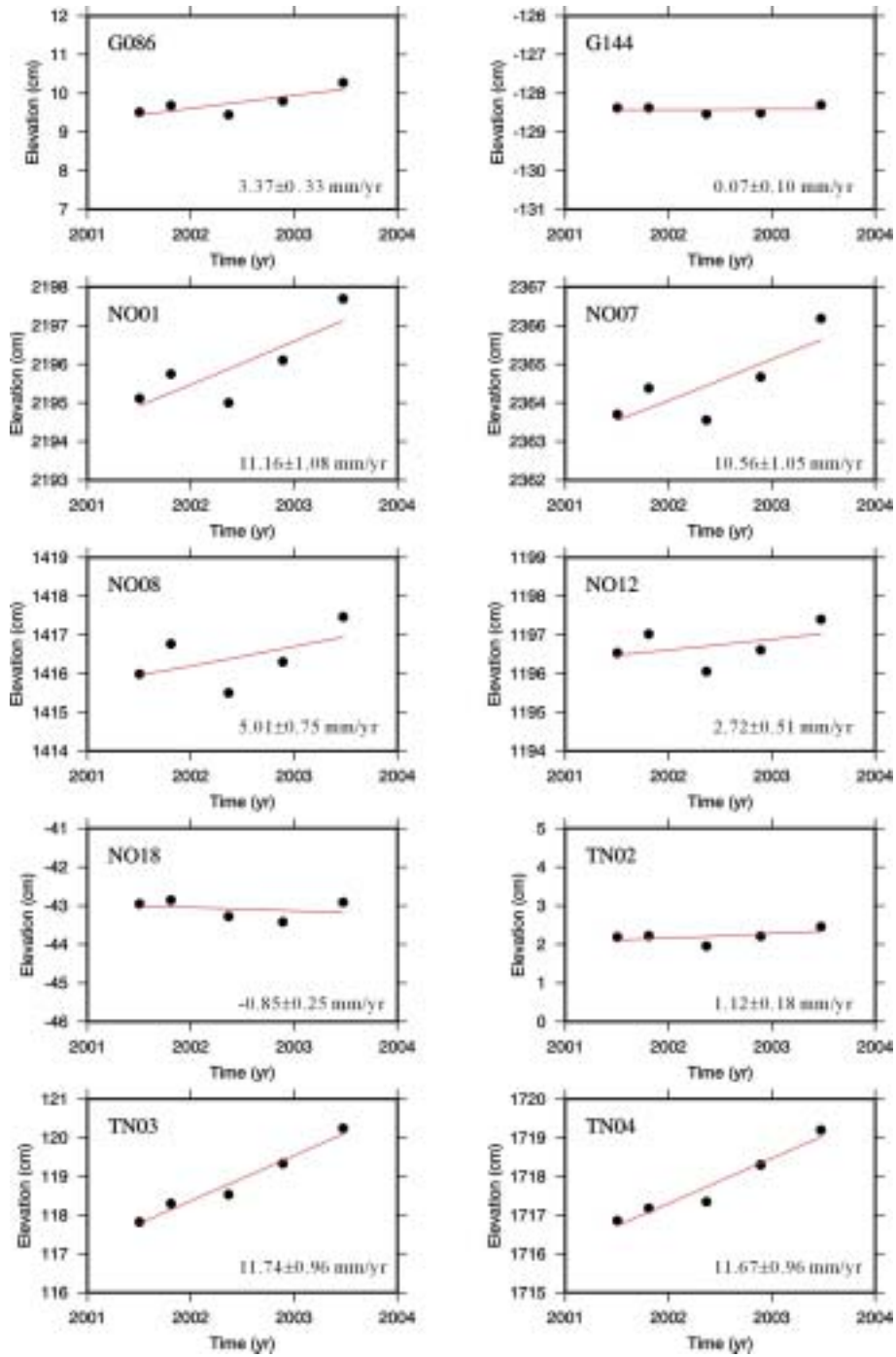
圖一 台南地區 GPS 及水準點位分布圖。黑色三角形為 GPS 測點，藍色三角形為水準點，紅色三角形為 GPS 測點及水準點共點。點號後括弧中的數字代表該點 GPS 測量的時間間距（年）。白色圓圈為地震（1991-2003）震央分布位置。白色粗線為斷層位置。黑色虛線為水準剖面。

Fig.1 Map of GPS and leveling networks in Tainan area. Black triangles: GPS campaign sites; Blue triangles: leveling sites; Red triangles: GPS and leveling co-sites; White circles: epicentral locations (1991-2003) in Tainan area; White thick lines: fault lines; Black dash line: leveling transect analyzed in the paper.



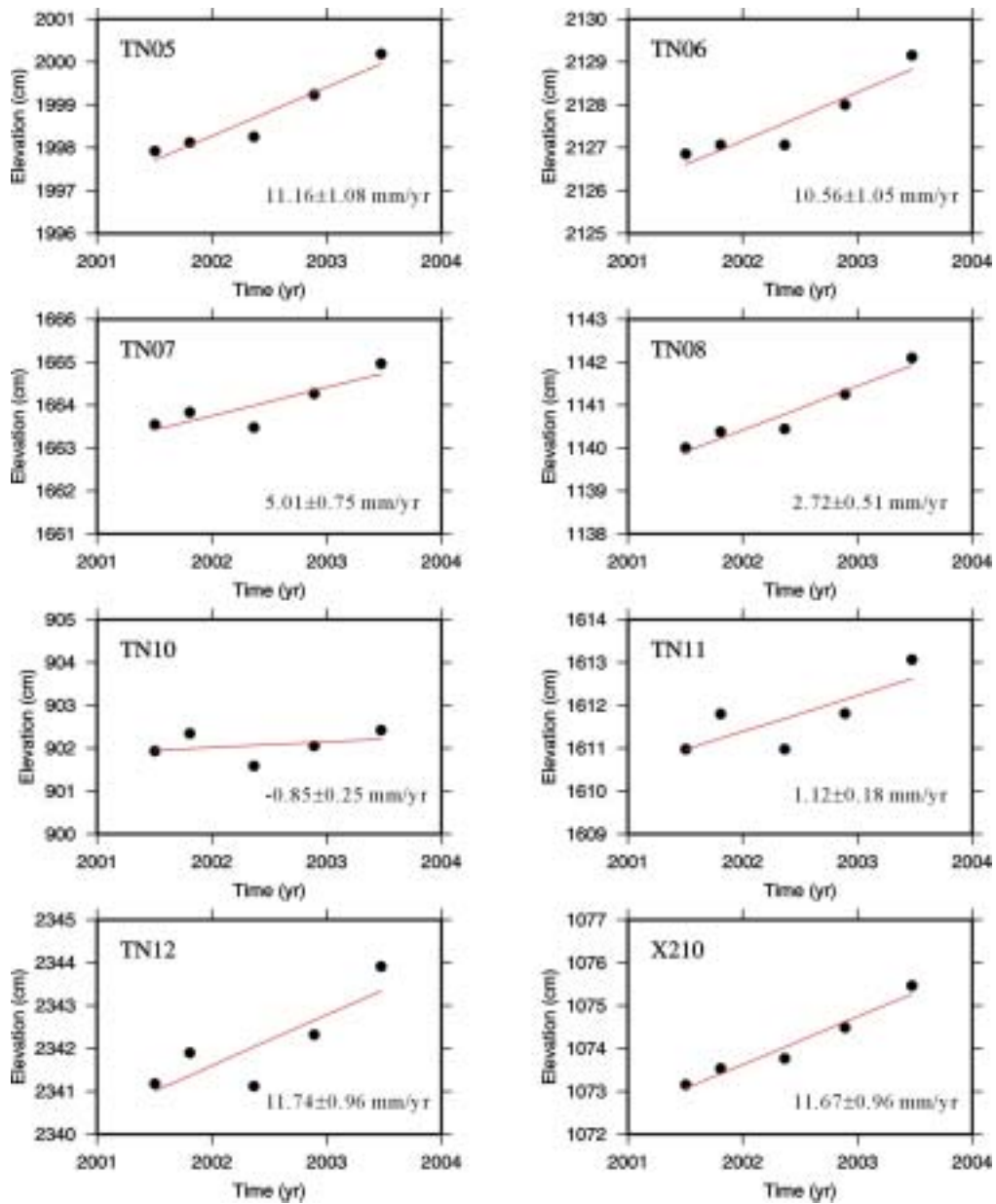
圖二 (a) 台南地區相對台南沿海 TN01 之 GPS 水平速度分布圖。紅色粗線為斷層位置。藍色方框為斷層模型之模擬範圍。(b) 水準測量點(投影至圖一之 AB 剖面)之相對高程位置(相對於 TN01)。(c) 台南台地水準測量相對 TN01 的抬升速率變化圖。

Fig.2 (a) GPS horizontal velocity relative to the coastal site TN01 in Tainan area. Red lines represent fault lines. Blue rectangle indicates modeling region. (b) Elevation change for the leveling sites relative to TN01 projected to profile AB shown in figure 1. (c) Uplift rate relative to TN01 in Tainan Tableland.



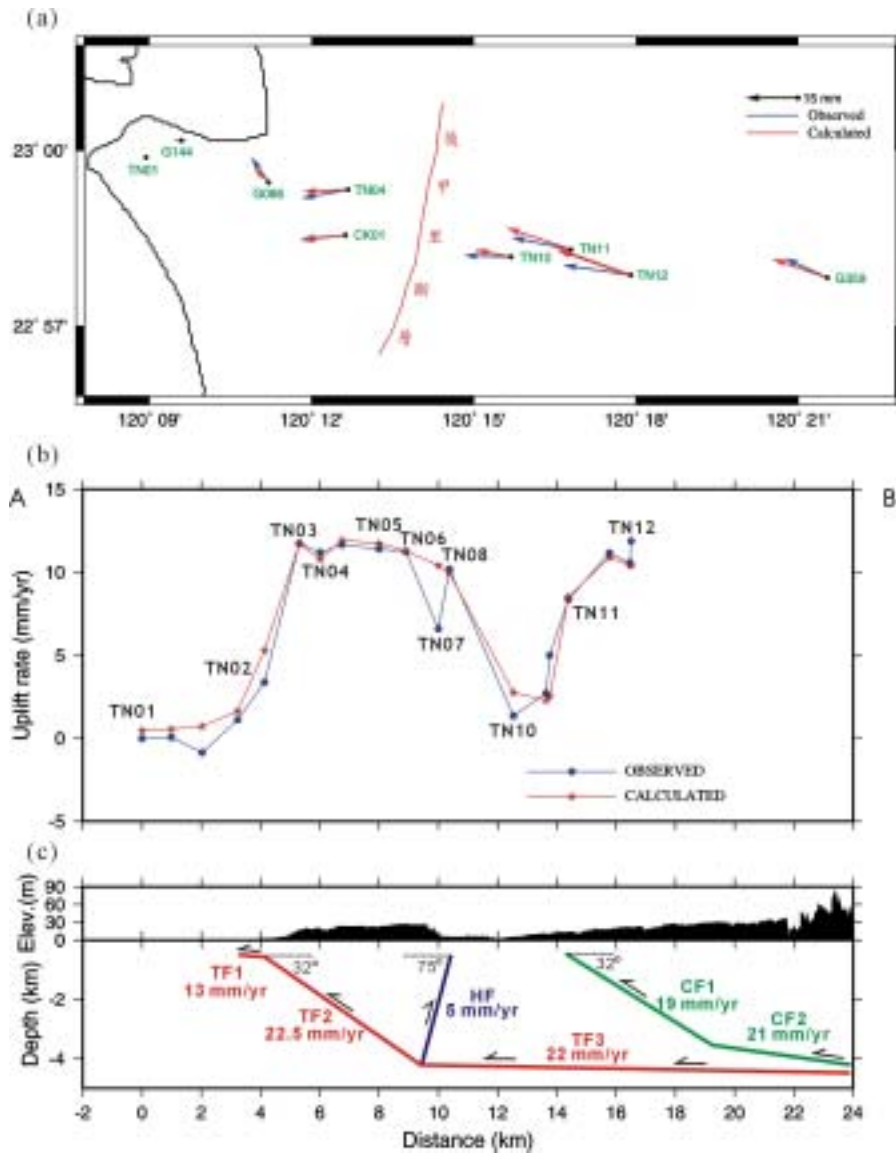
圖三 水準觀測各測站最小二乘法求解所得之抬升速率及其標準偏差。

Fig.3 Uplift rates and their standard errors calculated by least-square method for each leveling site.



圖三 (續) 水準觀測各測站最小二乘法求解所得之抬升速率及其標準偏差。

Fig.3 (continued) Uplift rates and their standard errors calculated by least-square method for each leveling site.



圖四 (a) 彈性模型推估之水平速度計算及實際觀測結果比較圖。紅色粗線為斷層位置。(b) 模型推估垂直抬升量計算值及實際觀測結果比較圖。(c) 台南地區地下構造模型剖面圖，各斷層之滑移速率標示如圖。

Fig.4 (a) Comparison between observed GPS-derived and dislocation-model-calculated horizontal velocity. (b) Comparison between observed leveling-derived and dislocation-model-calculated uplift rates. (c) Profile of subsurface structure model in Tainan Tableland. Slip rate of each fault is shown in the profile.