

2003 M_w 6.5 台東成功地震 GPS 變位監測

陳鶴欽¹、饒瑞鈞²、曾清涼³、劉至忠⁴、吳萬順⁵

摘要

本研究利用 GPS 重覆觀測，評估 2003 年 M_w 6.5 台東成功地震對台東花蓮地區之同震位移。內政部土地測量局為辦理台灣地區三等控制點新建補建作業，2003 年 6-11 月間於台東及屏東地區辦理外業 GPS 控制測量作業。依據三等控制點作業規範，GPS 控制點間距於平地約 2-3 km、高山地區約 3-8km。每一控制點均使用雙頻全波長 GPS 接收儀，同步接收 GPS 衛星資料至少 1.5 小時。2003 年 12 月 10 日台東成功地震發生之後 2 個多月內，土地測量局於震央附近選擇性重新觀測 86 個控制點。因地震所產生之位移則由兩次 GPS 觀測點位計算所得之坐標值相差求得。計算成果顯示，水平方向最大位移量在 E669，約向東北 171mm，最大抬昇量在 V088 約 355mm，此一位移方向與位移量均遠大於花東縱谷區歷年觀測成果。

此外，在研究區選擇四條東西剖面位移情形成果顯示，在經濟部地調所公佈的池上斷層南方約 5-8 km 處所呈現結果與橫跨斷層剖面顯示相同，推論池上斷層長度應有向南延伸的可能。

關鍵字：GPS、同震位移、斷層

一、背景介紹

GPS 具備有快速、成本低及高精度等優點，近年來已漸被應用於各項測量作業上，內政部土地測量局從 1995 年迄今，已大規模應用 GPS 測量技術辦理台灣地區三等控制點新建補建作業，成效良好。此外 GPS 測量技術也被應用於地殼變形監測，以了解斷層活動情形，作為研究地震造成地殼變形的參考資料。

台灣位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交界的縫合帶，其中池上斷層位於台灣花東縱谷南段，每年約以 2-3 cm 的水平縮短量持續潛移。依據 1991-1997 年 GPS 測量資料顯示，菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊現今以每年約 8 cm 速率聚合，其中除了池上斷層吸收約 2 cm 外，其餘 6 cm 則分布於台灣造山帶中 (Yu, 1997)。在地質的組成上，池上斷層所代表意義為海岸山脈向西逆衝至縱谷及中央山脈之上；池上斷層上盤為海岸山脈之利吉混同層，下盤為縱谷之第四紀及現代

¹ 內政部土地測量局測量員/成功大學地球科學系博士生，lsb23012@mail.lsb.gov.tw

² 成功大學地球科學系助理教授

³ 成功大學地球科學系教授/衛星資訊研究中心主任

⁴ 內政部土地測量局課長

⁵ 內政部土地測量局局長

沖積層，從各項野外觀測資料綜合分析，海岸山脈與縱谷邊界之池上斷層為一走向約北 20 度東、向東傾斜約 50 度、存有 30%左移分量之逆衝斷層 (Lee et al., 2001)。

台東成功地震發生於 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分，地震芮氏規模 6.5，震央在中央氣象局台東成功地震站西方 3.0 公里，東經 121.34°、北緯 23.10°，震源深度約 10 公里，由於本次地震規模為歷年罕見之陸地淺層大地震，造成地表部分道路橋樑有產生位移錯動之情形，對地表控制點勢必造成相當程度之影響。該區域本就屬地質脆弱的縱谷斷層，地殼本身是否聚集相當的能量而造成本次的地震，由於該地區自 1951 年以來便未曾發生過災害性的大地震，雖然地表的潛移作用及局部性的小地震可以釋放，該區域每年縮短距離佔全島區域縮短距離的 25%~37%而言，本就屬地殼能量變化頻繁的區域，故發生此次地震應是合理的情況。

二、 資料蒐集及處理

本次檢測點位資料分為地震前及地震後二類，各類資料來源分述如下：

(一) 地震前移動站：

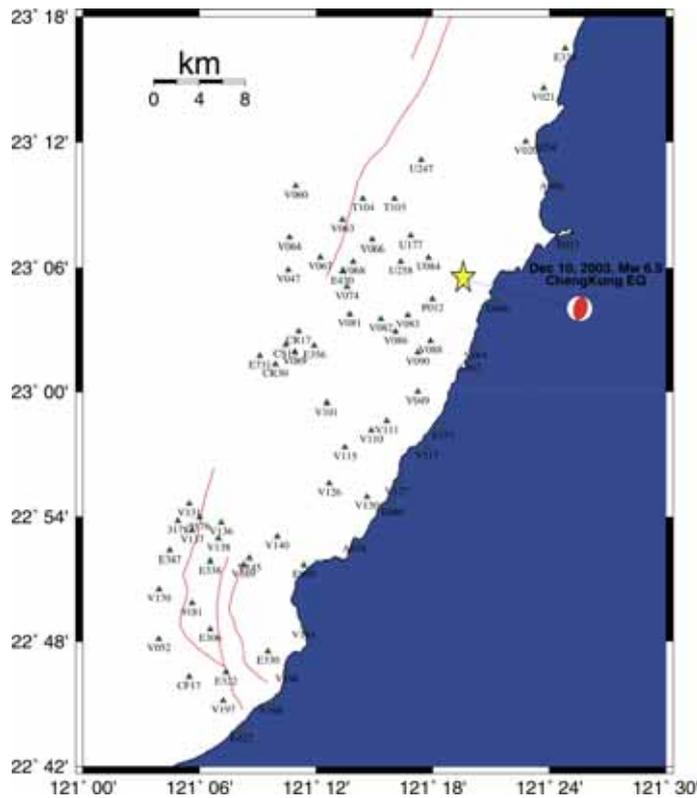
1. 土地測量局 91 年度宜蘭花蓮三等控制點補建新建觀測資料，觀測日期為 92 年 6 月。
2. 土地測量局 92 年度臺東縣、高雄縣東半部及屏東縣東半部三等控制點補建新建觀測資料，觀測日期為 92 年 10 月。

(二) 地震後：

1. 92 年 12 月 17-19 日自行辦理檢測資料。
2. 93 年 02 月 03-06 日辦理 92 年度臺東縣、高雄縣東半部及屏東縣東半部三等控制點補建新建實際外業驗收觀測資料。

(三) 固定站資料：包含中央研究院地球科學研究所於臺東縣及花蓮縣設置之連續監測站 8 站、內政部 7 站、成功大學 2 站及工研院 1 站等震前後觀測資料。

(四) 本次測量作業採用三等控制測量作業規範，每點使用雙頻全波長 GPS 衛星接收儀接收衛星訊號。紀錄速率每 10 秒一筆，擷取水平角 15 度以上觀測量，以避免多路徑效應之產生，率除雜訊，增加成果可靠度。其中辦理絕對位移量時將成果約制在工研院 TNML 上，因已納入 IGS 全球連測網，成果架構在 ITRF2000 下，另共計觀測一、二等衛星控制點 17 點，一等水準點 8 點，宜蘭花蓮三等控制點 9 點及台東三等控制點 52 點：總計檢測 86 點移動測點，本次作業檢測範圍北至花蓮富里，南至卑南，西至池上斷層西側，東至台東海岸 (圖一)。



圖一、點位分佈示意圖

在資料蒐集過程中，除固定站追蹤站型儀器外，儀器高為固定值外，移動站共計使用到 TRIMBLE 4000SSE/SSI、5700 及 LEICA 300 及 SR530 等廠牌型號儀器，故對於高程值必須加以改算，依據 BERNESE 作業模式需要，對於 RINEX 檔頭中儀器高部分是以計算至天線盤底部（ARP，Antenna Reference Point）的位置為主，至每種型號由 ARP 至相位中心的改正值部分，則採用美國大地測量局（NGS）對改款天線盤所作率定相位中心（phase center）數據為準，包含 L1、L2 平均相位中心及以水平角零度至九十度，每五度間隔之瞬時相位中心改正值。

GPS 觀測資料處理係使用 Bernese4.2 軟體，可概略分為二個步驟，預處理部份：(1) 首先將原始資料轉換成 RINEX 格式，再轉成 Bernese 格式。(2) 自精密星曆中擷取各衛星時錶修正量以供後續處理之用，並將其轉換成表列型式及組成 BERNESE 軌道。(3) 使用電碼資料進行資料檢查，剔除錯誤觀測量，並進行單點坐標及接收儀時錶誤差計算，且將時間誤差修正相位資料中，以求接收儀時錶差能準確至 10^{-6} — 10^{-7} 秒。(4) 依據最多觀測量原則，組獨立的基線網一次差觀測量。(5) 利用精密星曆與衛星時錶資料進行資料編修、跳周補正（cycle slip editing）及觀測量標示（mark）等作業。對於 cycle slip 採自動偵測與補償。

後處理部分作業流程及使用模式如下：(1) 軌道部分：採用 IGS 精密星曆，精度約 5 公分（IGS 網頁），所有軌道參數視為已知，加以固定而不求解。(2) 極運動改正：採用 IERS（International Earth Rotation Service）Bulletin B 公佈值，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正，並將坐標值由瞬時極之坐標系修正至 2000 平均極

(CIO) 坐標系上。(3) 引力位模式：採用 GEM-T 3 (8×8)，其中 $C_{21}=-0.17\times 10^{-9}$ ， $S_{21}=1.19\times 10^{-9}$ ， $GM=398600.4415\text{ km}^3/\text{s}^2$ ，日月引力籍地球固體潮 (solid earth tide) 也加以考慮。(4) 坐標系以工研院國家度量衡標準實驗室佈設之 TNML，其在 2003 年 ITRF1997 坐標值為參考依據，TNML 已於 2002 年 6 月納入 IGS 國際 GPS 聯測網中，且為便於往後將每天每時段計算結果透過 ADDNEQ 連結處理，對於 TNML 坐標以加權約制平差方式處理，每一向量坐標值給於極大之等量權值作為約制 ($\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z=0.001\text{m}$)，遠大於其餘點位設定之 9.9999m，便於將來使用 ADDNEQ 作為調整或轉算(郭隆晨, 1997)。(5) 對流層折射修正：採用 HOPFILED 模式，並利用附加參數方式，以各測站每二小時增加一個參數方式，加以吸收殘留的對流層折射誤差。(6) 本次野外蒐集資料時間較短，為增加觀測資料數量，本次選定仰角 (cut off) 10 度以上部份均用於計算。(7) 在相位未定值求解之過程，乃先利用實數解求得一精確坐標 (或利用以前計算過之坐標值，本次使用 TNML 及追蹤站成果為起始值)，然後採用 QIF (Quasi Ionosphere-Free) 方法，求得 L1 及 L2 的整數週波未定值，然後再組成無電離層效應 (ionosphere free) 之 L3，並將解得 L1、L2 帶入無電離層效應之觀測方程式中 (L3)，開始求解其餘各位之參數。在資料處理過程中，是以每一觀測時段計算一組坐標，再將坐標成果彙整、堆疊，最後分析各個方向上之時間序列。

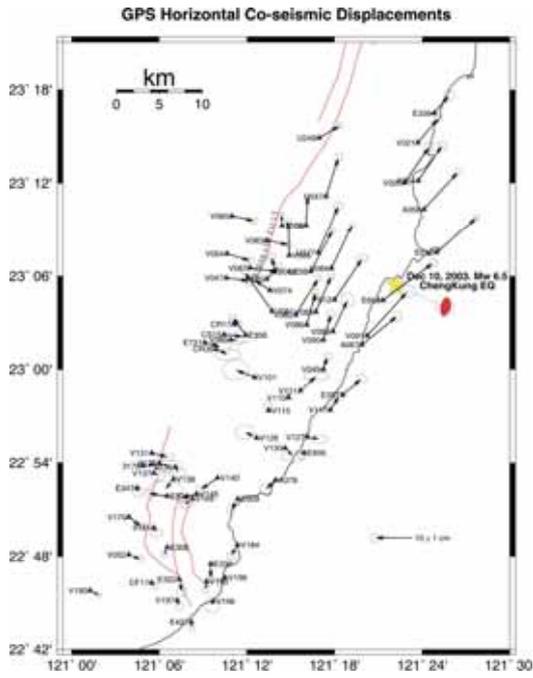
三、 成果分析

將上述 12 月 10 日地震前後最小約制整體平差結果，依點位之縱坐標、橫坐標及幾何高程加以比較分析(地震後減地震前)，除外，因部分觀測時間間隔較久，如震前約 1-6 個月，震後約 3.5 月，依據余水倍博士 (Yu & Kou, 2001) 研究所得縱谷地區位移速度場作震間修正，以求得較正確的同震位移情形。經使用 bernese 計算結果，得到在池上斷層上盤(東側，近海岸山脈)與下盤(西側，近中央山脈)所呈現位移情形並為相同，斷層下盤位移方向由大體均約向東南位移，而上盤部分，期位移方向卻呈現不規則的現象產生，而測區中段向西位移到測區北方呈向北，最後並向東北方向位移。其中點位最大位移量在二等衛星控制點 E699 位移 171 mm，南北方向最大位移量在 E669 約 137 mm，東西方向最大位移量在 U177 mm，最大抬昇量在 V088 約 355 mm，最大下陷量在 E330 約下陷 45 mm，個點資料詳如下表一，而水平位移情形及高程方向位移情形詳如圖二、三。

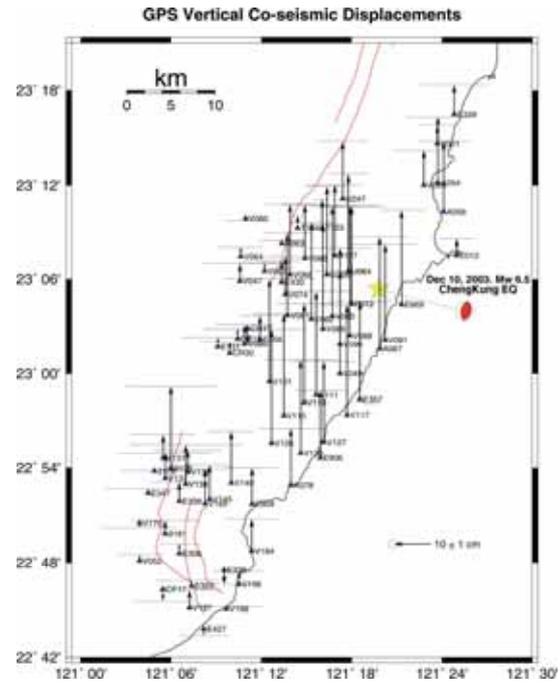
由於土地測量局所布設之三等控制點主要為提供基層機關單位及民間使用，重點在於點位之相對關係，而由圖二水平位移圖及利用 SURFER 軟體及其提供之 Kriging 公式以一次線性計算 100 公尺見方之格點位移量繪出之縱坐標)、橫坐標及平面位移距離 (圖四) 等值圖 (contour map) 中，可發現部分地區之位移量具有一致性，其相對關係不致差異太大，經相對關係分析結果發現全數基線均能四等控制測量最低要求精度 1/20000 (50ppm) 作業要求，仍可繼續作為後續工程測量使用。

表一、衛星控制點沉陷資料(單位:mm)

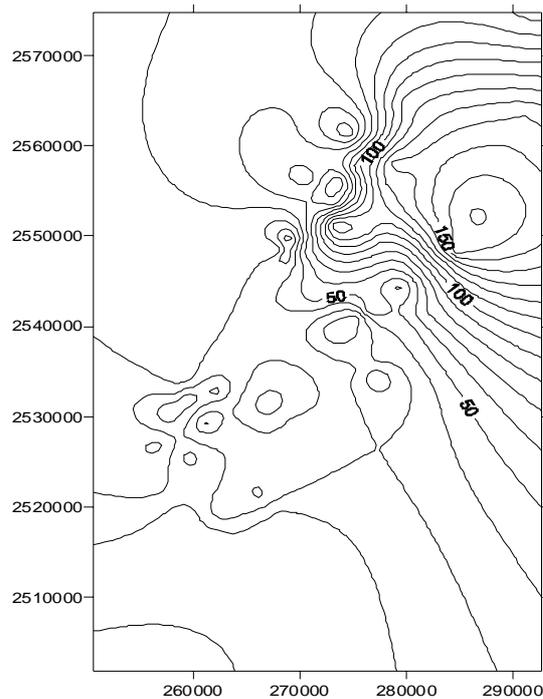
點名	De	dn	sigma_e	sigma_n	ds	dh
E669	137.3	102.5	9.2	9.2	171	259
U177	55.7	131.7	9.7	9.7	143	197
V088	40.4	87.3	15.8	15.8	96	355
E330	-0.4	-41.7	8.1	8.1	42	-45



圖二、GPS 同震之水平位移圖



圖三、GPS 同震之垂直位移圖



圖四、平面位移距離等值圖

四、問題討論

而對於本次地震造成地表點位變形情形，是否存在何種位移現象？對池上斷層長度是否如經濟部地調所經由露頭調查所公佈一致？針對上述問題，無人取東西方向四條剖面及概略平行斷層三個剖面作進一步討論，剖面位置詳如圖五、六。

(一) 東西方向剖面

剖面 A: 位移量在下盤約 50 mm，經過斷層後逐漸增加至 150 mm，位移方向在斷層西側約向東南約 100 度（以北方為 0 度，東向為正，向西為負，以下相同），經過斷層後（上盤）迅速變化至 0 度，並逐漸改變增加至約 50 度東北方向，本剖面通過經濟部所公佈池上斷層線。

剖面 B: 位移量在下盤約 50 mm，經過斷層區後逐漸增加至 100 mm，位移方向在斷層西側約向東南約 100 度，經過斷層後（上盤）迅速變化至 -60 度，並逐漸改變增加至約 50 度東北方向，本剖面並未在經濟部所公佈斷層線上。

剖面 C: 位移量在斷層西側約 20-50 mm，呈現不規則，經過斷層後逐漸減少至 10 mm，位移方向在斷層西側約向東南約 120 度，經過斷層後迅速變化至 -120 度約西南方向。

剖面 D: 位移量在斷層西側約 15-40 mm，呈現不規則，經過斷層後逐漸減少至 10 mm 後再逐漸增加 35 mm，位移方向在斷層西側約向南約 170 度，經過斷層後迅速變化至 -160 度，位本局因 N、E 位移量較小，方造成角度變化情形劇烈。

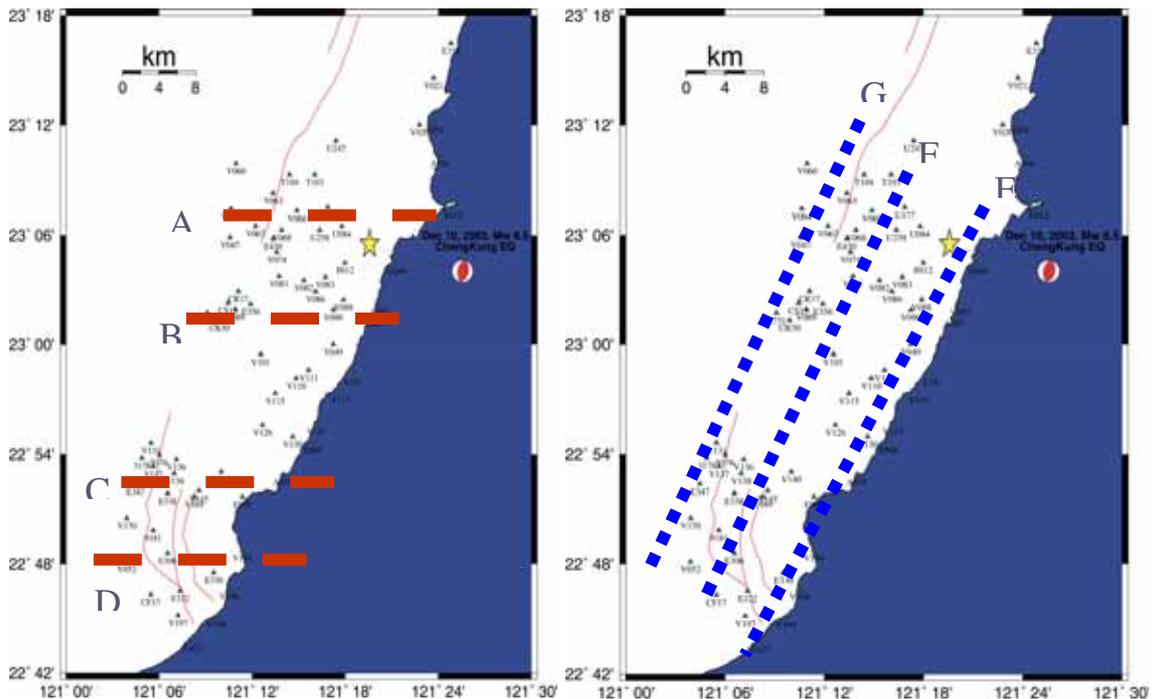
(二) 南北方向剖面

剖面 E（位於上盤近海岸線）: 位移量由北向南約 50 mm 增加至 170 mm（約震央附近），經過震央後逐漸減少 50 mm，至 E906 附近又逐漸減少至約 10mm。位移方向由北向南約 50 度，過 E906 后迅速改變至約 -160 度。

剖面 F（位於上盤近斷層）: 位移量由北向南約為 100 增加至 130 mm（約震央附近），經過震央後逐漸減少 50 mm，至 V101 附近又逐漸減少至約 10mm。位移方向由北向南約 0 度，過 V101 后迅速改變至約 -100 度。

剖面 G（位於下盤近斷層）: 因本剖面北邊為池上斷層，南方鹿野斷層區，所以位移量呈現在北邊約 60-80 mm，至南方約 20-40 mm，而位移方向均呈現在 100-150 度朝東南方向，並未有明顯變化。

上述討論及點位位移方向、位移量的型態可略為推斷，池上斷層的長度可繼續向南延伸，與地調所公佈型態約長 5-8 km，而地震造成地表位移情形在 V101 及 E906 附近造成位移方向的改變，應與當地為都巒山層的地質因素有關。



圖五、東西剖面示意圖

圖六、南北剖面示意圖

五、 結論與建議

- (一) 本次作業發現成功地震造成最大水平位移量約 171 mm，高程方向最大抬昇量約 355 mm，與 921 集集地震後所公佈的坐標絕對成果之產生不符情形，並與一等水準點所公佈高程值也有所不同，對後續高精度要求使用者該如何因應，或長期位移累積量整程絕對坐標成果的不一致性，內政部及相關單位應儘速研擬一套完善解決方案。
- (二) 有關台東地區三等控制點雖於地震前完成外業測量作業，但其相對精度多數仍符合 1/20000 之四等控制點精度要求，仍可繼續提供後續工程測量使用。
- (三) 池上斷層的長度應較地調所公佈成果較為長，可作為後續辦理斷層野外調查之參考。
- (四) 建議內政部應除定期辦理基本控制點檢測外，在地震頻繁地區如花東更應所短檢測間距，以維護 TWD97 坐標系統高精度及一致性，同時亦能供後續細部測量使用，並符合精度要求。

六、 致謝

本研究承內政部土地測量局、中央研究院地球科學研究所及成功大學衛星研究中心提供相關 GPS 資料，特此申謝。

七、參考文獻

- 李建成、朱傲祖、安朔葉、胡植慶、余水倍、陳宏宇、鄭富書、林正洪、饒瑞鈞、周錦德、張勝雄、姜國彰，2002，從地殼變形與斷層活動討論地震災害潛在性：花東縱谷池上斷層活斷層的研究，地質，第 21 卷第二期，31-52，pp. 207-215。
- 郭隆晨、余水倍、陳春盛，1997，法方程式堆疊應用於 GPS 測站坐標及速度之計算，第十六屆測量學術及應用研討會論文集，中壢，pp. 99-107。
- Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, 2001, Continuous Monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of Chihshang Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, **333**, 219-240.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo, 1997, Velocity field of GPS station in the Taiwan area, *Tectonophysics*, **274**, 41-59.
- Hugentobler, U., S. Schaer, and P. Fridez, 2001, Bernese GPS Software, Version 4.2, Astronomical Institute University of Berne.