

利用TWVD2001水準資料推估臺灣地區 高程變動速度場之研究

黃玉婷¹ 陳國華² 楊名³

論文收件日期：98年2月27日

論文接受日期：98年6月5日

摘 要

臺灣最精確的垂直基準—臺灣高程基準（Taiwan Vertical Datum 2001, TWVD2001）於2000年至2003年間以精密水準測量技術建置完成，包含一等一級與一等二級水準網，總計2065個一等水準點。然而，TWVD2001建置至今已接近十年，其間實施了數次精密水準重測工作。本文的目的即為結合2000年至2008年間所蒐集的一等水準測量資料，以帶有速度量參數之最小二乘估計法（Least-Squares Estimation, LSE）求解各一等水準點的平均高程變動速度量，並利用各點位的變動速度值以最小曲率法內插獲得高程變動速度場。本文共獲得3項結論：（1）水準點高程變動速度的平均精度為 ± 0.164 cm/yr；（2）在99.9%信心區間之統計測試下，有785個點位的高程變動速度是顯著的；（3）由臺灣地區的高程變動速度場顯示：彰化、雲林、嘉義、屏東、宜蘭地區為地勢沉陷區，並以雲林縣的沉陷最顯著，最大-9.83 cm/yr，平均-3.65 cm/yr，而中央山脈、海岸山脈為抬升區，抬升速度最大者位於花蓮縣，達2.94 cm/yr。本文的結果與中央地質調查所之全島GPS估計結果大致吻合。由於精密水準測量為獲取正高最精確的測量方法，故本研究的成果對於臺灣高程變動之進一步探討扮演重要的角色。

關鍵詞：地層下陷、垂直速度場、精密水準測量

¹ 碩士，成功大學測量及空間資訊學系。

² 副教授，臺北大學不動產與城鄉環境學系，通訊作者，TEL：（02）26748189 # 67421
E-mail：khchen@mail.ntpu.edu.tw。

³ 教授，成功大學測量及空間資訊學系。

Estimation of Taiwan Vertical Velocity Field Using TWVD2001 Leveling Data

Yu-Ting Huang¹, Kwo-Hwa Chen², and Ming Yang³

Abstract

Taiwan Vertical Datum 2001 (TWVD2001), the most precise vertical datum in Taiwan, was established by precise geodetic leveling technique from 2000 to 2003, consisting of 2065 benchmarks sited on the first-order first-class and the first-order second-class leveling networks. To date, however, the TWVD2001 has been set up for almost ten years ago. During this period, several precise geodetic leveling surveys along the first-order leveling lines were finished. The aim of this paper is to combine those first-order leveling data collected from 2000 to 2008 to estimate the average vertical rate of each benchmark by least-squares estimation (LSE) with the additions of vertical rate parameter. Furthermore, the velocity field is interpolated by the minimum curvature method using the estimated vertical rates of each first-order benchmark. Three conclusions of this study has obtained as follows : (1) The average accuracy of the all vertical rates is ± 0.164 cm/yr. (2) Based on the statistic tests of 99.9% confidence interval, 785 vertical rates of benchmark are significant. (3) From the estimations of Taiwan vertical velocity field, Zhanghua, Yunlin, Jiayi, Bingdong and Yilan are land subsidence areas. Especially, Yunlin appears to be the most severe land subsidence area which average sinking rate is -3.65 cm/yr and the largest one is -9.83 cm/yr. The Central Range and Coastal Range are the rising area. The largest uplifting rate is in Hualien with 2.94 cm/yr. The results of this study are consonant with the island-wide GPS results obtained from the Central Geological Survey. Because the leveling technique is the most precise technique for determining the orthometric height, the results of this study will play an important role in the further research of land vertical displacement in Taiwan.

Keywords: Land Subsidence, Vertical Velocity Field, Precise Geodetic Leveling

¹ Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University, TEL:+886-2-26748189#67421, E-mail : khchen@mail.ntpu.edu.tw.

³ Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

一、前 言

臺灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，受到兩板塊相對運動的影響使得區域內之地殼位移活動頻繁，加上近年臺灣經濟發展，水資源需求大幅增加，地下水取用方便，平原地區超抽地下水的情形非常普遍，其使得西南沿海以及臺北、宜蘭等地區產生嚴重的地層下陷情況（工研院能資所，2001）。因此，掌握臺灣地區高程變動之趨勢儼然成為一項重要課題。

一般而言，由於全球定位系統（Global Positioning System, GPS）施測容易、具有效率且所需費用較低，現今臺灣地區的地殼變動監測研究大多採用GPS方式進行（Yu et al., 1997; Ching et al., 2007; Rau et al., 2008），藉由GPS獲得的結果分析各地區的地殼變動情況。然而，GPS在高程測量方面的精度約僅能達cm之等級，若需獲得更高精度等級的高程監測成果，則須倚靠可以獲得mm精度等級的水準測量技術，其為目前精度最高的高程測量方式。但是，近數十年來，台灣地區鮮少有利用精密水準測量方式進行地殼變動之相關研究，僅零星針對某特定地區實施小區域的水準監測工作（Yu and Liu, 1989; Liu and Yu, 1990），實乃因為精密水準測量為一耗時、耗費人力，且需大量施測經費的高成本高程測量方式。本研究之優勢即為利用TWVD2001建置以來陸續蒐集的精密水準測量資料，建立臺灣地區高精度的高程變動速度場，以提供各項後續分析研究使用。

臺灣地區自1997年擬定「國家基本測量控制點建立及應用計畫」以來，先後完成了「一等一級水準網測量工作」以及「一等二級水準網測量工作」，並於2003年公告採用正高（Orthometric Height）系統的臺灣高程基準（Taiwan Vertical Datum 2001, TWVD2001）提供各界應用。接續幾年，有鑑於臺灣西南沿海地區地下水過量超抽，造成嚴重的地層下陷情況，2005年12月至2006年9月期間，臺灣辦理了「94年度一等水準網檢測工作」，針對西南沿海高程變動較大的區域進行全面檢測，此乃TWVD2001建立以來，第一次較大規模的精密水準測量重測作業。除此之外，2007年4月至2008年5月，臺灣地區再次全面重新檢測全臺的一等水準點高程。據此，全臺的一等水準點皆有兩次以上的精密水準測量重測資料。本研究的目的是為結合這些一等水準測量觀測資料，以帶有速度量未知數之最小二乘估計法（Least-Squares Estimation, LSE）解算自2000年至2008年間的水準點平均高程變動速度，並以最小曲率法獲得臺灣地區的高程變動速度場資訊。

二、一等水準測量資料

臺灣地區原預定於1999年至2000年中完成的1010個一等一級水準點精密水準測量、GPS衛星定位測量以及重力測量等工作，因受到1999年921集集大地震的影響，遲至2000年12月至2001年8月始完成（以下稱第1期），歷時9個月，全長約2052.47公里，共計1357個水準測段，一等一級水準測量路線涵蓋臺灣主要省道以及中橫、南橫等橫貫公路（如圖1之點線）。另於2002年6月至12月施測完成的一等二級水準測量路線（以下稱第2期），歷時7個月，全長約2200.80公里，共有1154個水準測段（陳國華，2004），其分別閉合或附合至一等一級水準點，主要分布於臺灣西部以及北部地區，共有1055個水準點，水準測量路線如圖1實線所示。而為維持高精度的高程控制系統，臺灣地區辦理了「94年度一等水準網檢測工作」，針對臺灣西南沿海高程變動較大的區域進行檢測，測區範圍涵蓋了臺中縣市、南投縣、

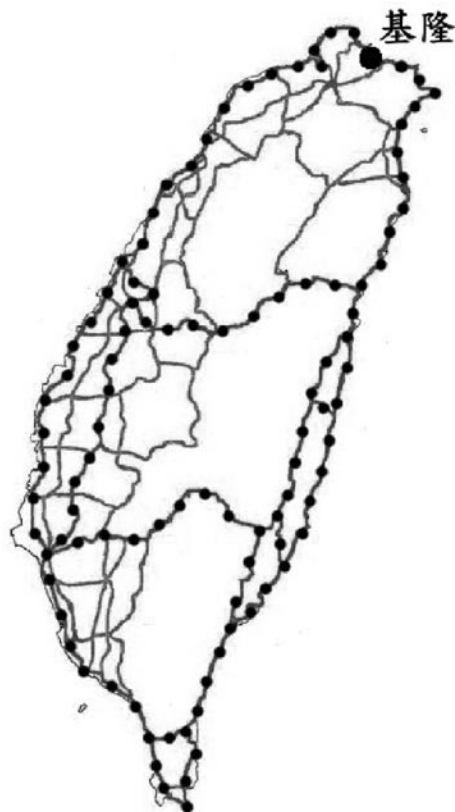


圖1 第1期（點線）、第2期（實線）、第4期（點線+實線）一等水準網路線圖

彰化縣、雲林縣、嘉義縣市、臺南縣市、高雄縣市以及屏東縣等，施測時間自2005年12月至2006年8月（以下稱第3期），歷時9個月，全長約1504.36 公里，共有774個水準測段（吳東軒，2006），水準測量路線如圖2所示。近年，臺灣地區再次於2007年4月至2008年5月期間（以下稱第4期），歷時13個月，完成全長約4287.29公里，共有2502個水準測段之全島水準檢測工作，如圖1的點線+實線，整合這4個時期TWVD2001的精密水準測量資料，將可以有效提供臺灣地區高精度高程變動速度場之估計。

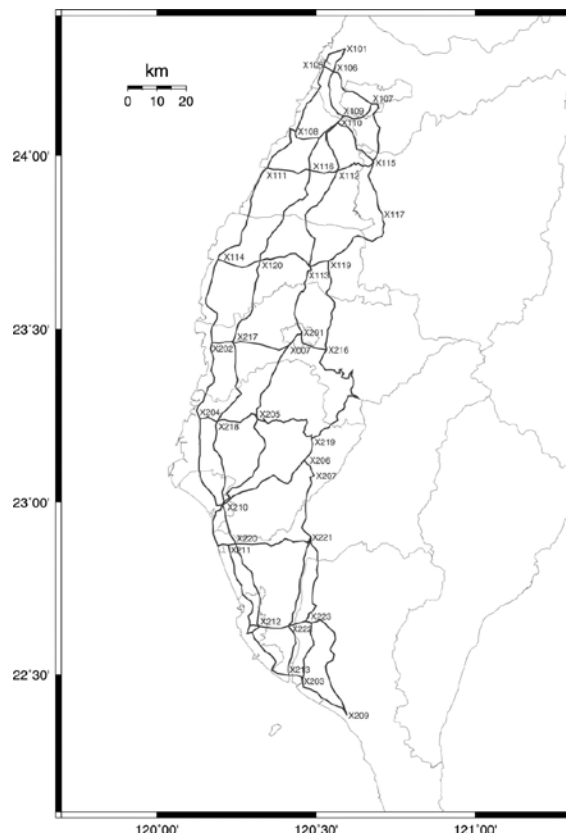


圖2 第3期西南沿海一等水準網路線圖

三、水準點高程變動量分析

4個時期的一等精密水準測量資料均是使用Zeiss DiNi11以及DiNi12精密水準儀配合Nedo LD12（2 m尺）與Nedo LD13（3 m尺）鈹鋼條碼水準尺蒐集完成。其施

測程序均符合「一等水準測量作業規範」（內政部，2001）之要求，並經過資料的檢核以及各項主要系統誤差之修正，以確保觀測資料品質。4個時期的水準資料均先各自進行LSE（未帶有速度量參數）之估計，其中，第1期一等一級水準網、第2期一等二級水準網以及第4期全島一等水準網等資料，由於水準路線有經過基隆水準原點K999，故LSE估計時，均以K999的正高值為起算依據。而第3期之西南沿海一等水準網因其施測路線未經過K999，故另選定一較為穩固的水準點作為高程起算點。經比較第1期一等一級與第2期一等二級水準資料的LSE估計成果後，發現在第3期的21個水準節點中，以水上節點（X007）的高程變動量為最小，故本文以X007為第3期西南沿海一等水準資料LSE計算時的高程起算點。

將4個時期的一等水準資料分別進行LSE估計後的正高成果進行比較，可得到各時期之間的水準點高程變動量，並於排除新埋設水準點位後，整理得共同水準點如表1所示，其高程變動量整理如表2所列。

以上共計6次一等水準點高程變動量之比較結果，除了第1、2期共同水準點之分布較稀疏之外，其他時期共同水準點的數目均較多、且較為密集，已能形成線狀或網狀分布，因此本文利用最小曲率法內插得共同水準點半徑15公里區域內的高程變動場，如圖3至圖8所示，黑點為共同水準點的位置，色階變化顯示高程變動量的大小，未著色區域代表距離共同水準點15公里以上，所以沒有內插值，黑色虛線為中央地質調查所公告的活動斷層位置。

由圖3（第1、2期的高程變動場，時間間隔1年）與圖8（第3、4期的高程變動場，時間間隔1年）可以發現，雖然各自的時間間隔約只有一年，在西南沿海地區卻已有顯著的高程變動量，且為沉陷之情況，顯示西南沿海確實為地層下陷嚴重的

表1 4個時期一等水準測量資料共同水準點統計表

比較時期	共同水準點	個數
第1、2期	以X開頭的水準節點為主	35個
第1、3期	西南沿海地區之一等一級水準點	262個
第1、4期	全島的一等一級水準點	864個
第2、3期	西南沿海地區的一等二級水準點	401個
第2、4期	全臺的一等二級水準點	1014個
第3、4期	西南沿海地區的全部一等水準點	940個

表2 4個時期一等水準測量資料共同水準點高程變動量分析表

比較時期	高程變動量範圍 (cm)	最大抬升點所在縣市	最大沉陷點所在縣市
第1、2期	-4.395 ~ 2.544	高雄縣	臺南縣
第1、3期	-42.672 ~ 5.959	臺南縣	彰化縣
第1、4期	-51.129 ~ 40.014	臺東縣	雲林縣
第2、3期	-47.920 ~ 8.502	高雄縣	彰化縣
第2、4期	-60.014 ~ 12.307	南投縣	彰化縣
第3、4期	-12.966 ~ 4.179	嘉義縣	彰化縣

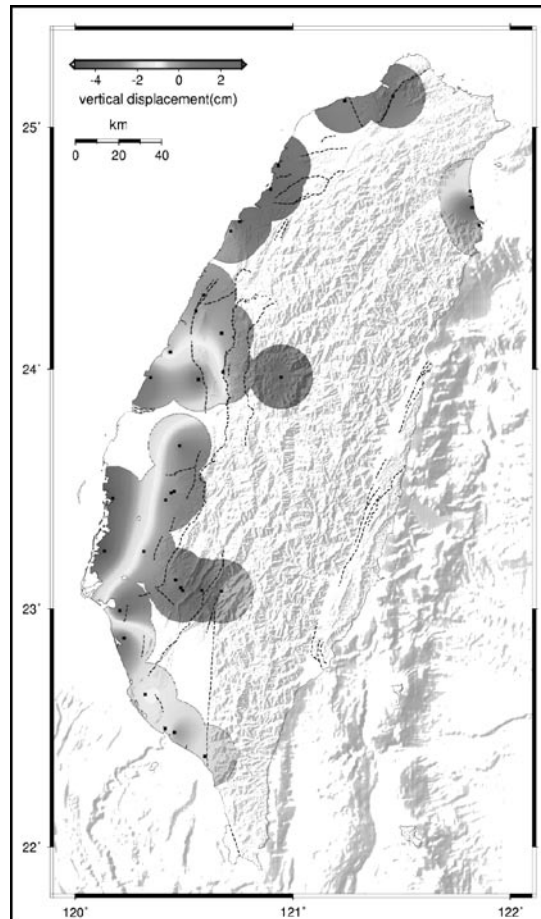


圖3 第1、2期共同水準點區域性高程變動場（內插半徑15公里）

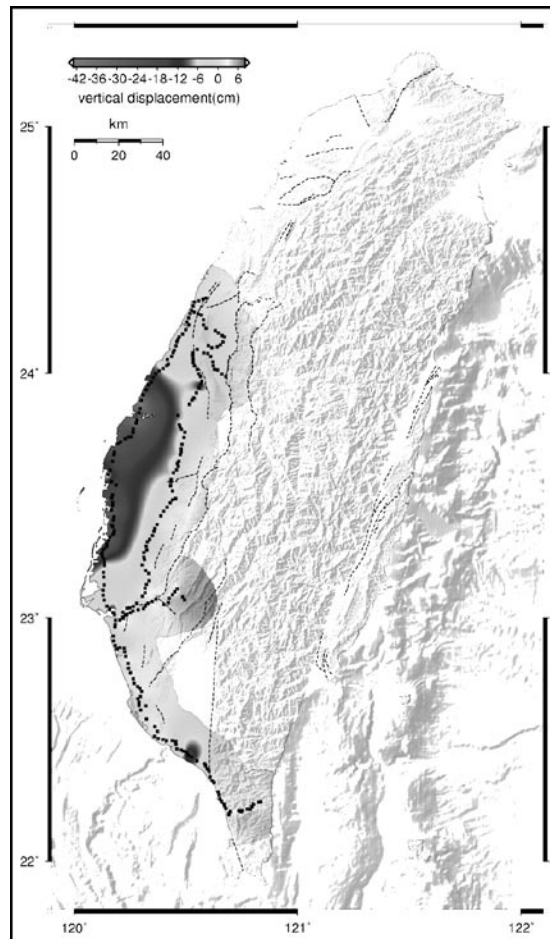


圖4 第1、3期共同水準點區域性高程變程變動場（內插半徑15公里）

地區。若比較圖4（第1、3期的高程變動場，時間間隔5年）與圖5（第1、4期的高程變動場，時間間隔6年）的共同區域，亦仍是西南沿海地區，可以發現當時間間隔由5年延長至6年時，其高程變動量隨之增加。再比較圖6（第2、3期的高程變動場，時間間隔4年）與圖7（第2、4期的高程變動場，時間間隔5年）的共同區域，同樣亦在西南沿海地區，仍可以發現高程的變動量亦隨著時間間隔之增長而累積。由這些分析可以得知，近年臺灣地區的高程確實已有變化，且時間間隔愈長，高程的變動量愈大。

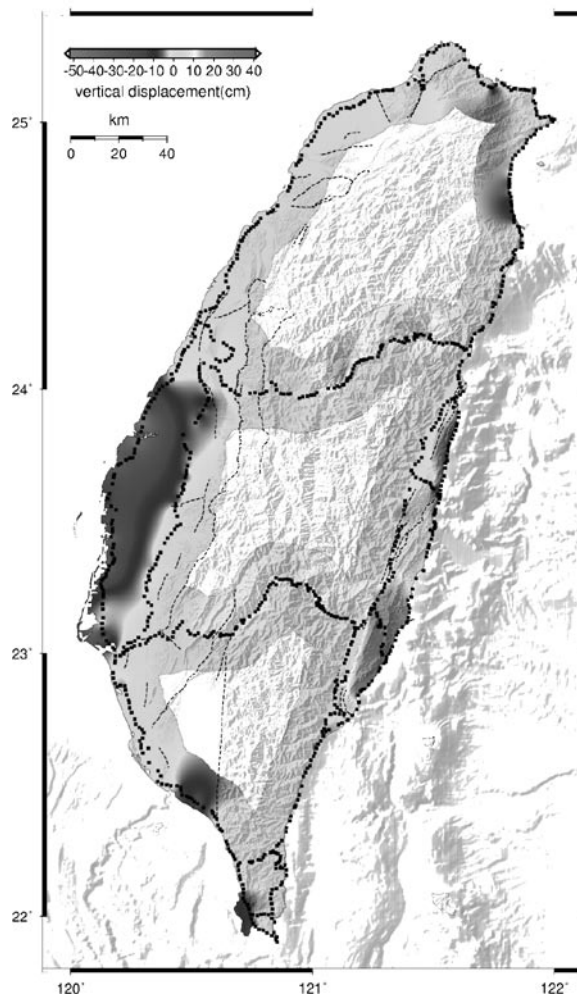


圖5 第1、4期共同水準點區域性高程變動場（內插半徑15公里）

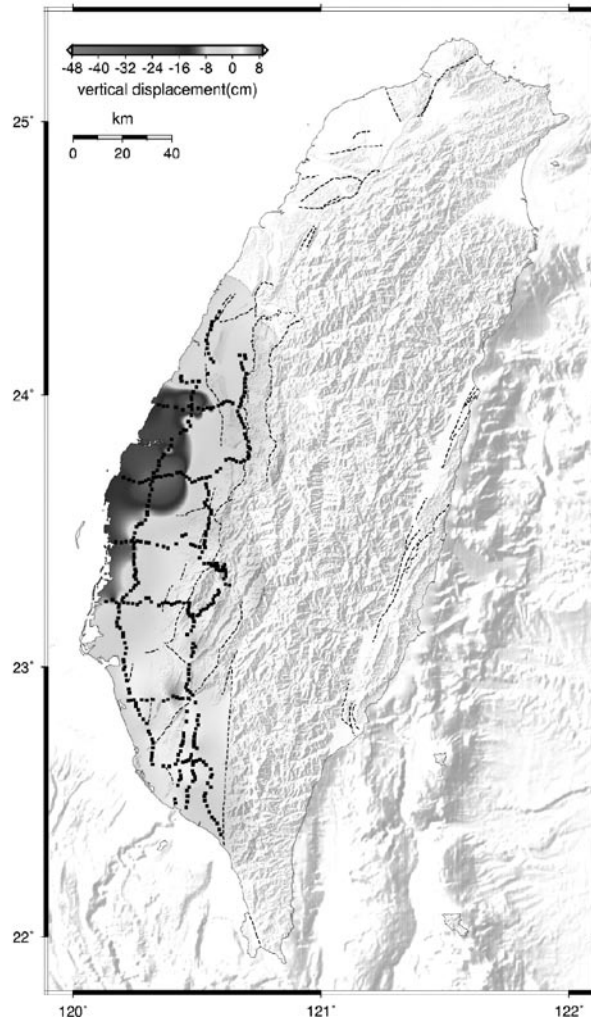


圖6 第2、3期共同水準點區域性高程變程變動場（內插半徑15公里）

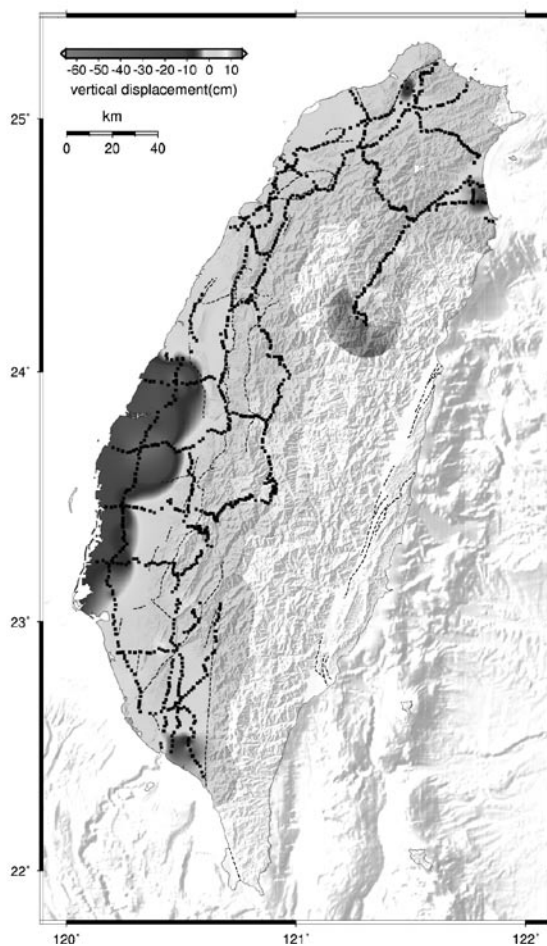


圖7 第2、4期共同水準點區域性高變動場（內插半徑15公里）

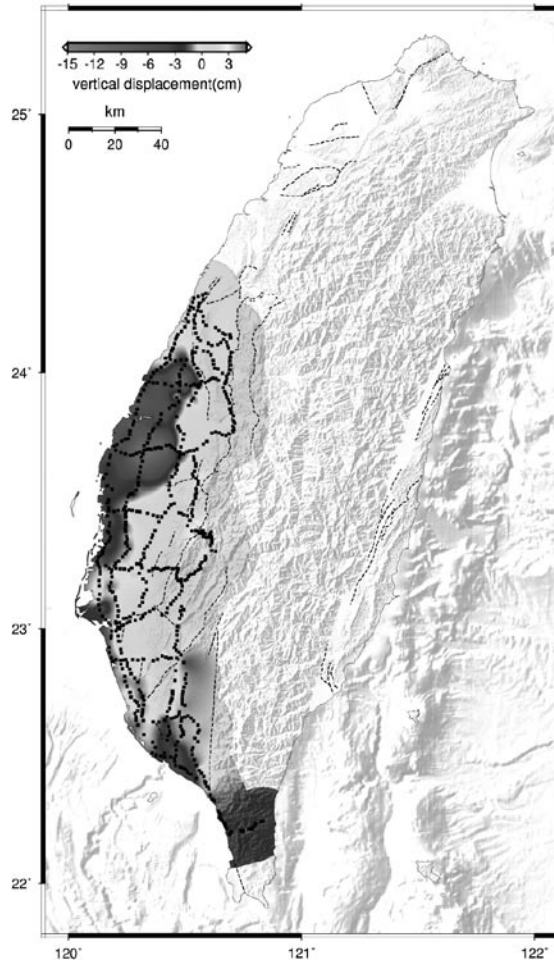


圖8 第3、4期共同水準點區域性高程變動場（內插半徑15公里）

四、LSE平差估計模式

（一）傳統之 LSE 水準平差模式

傳統LSE水準平差模式以Gauss-Markoff Model (Koch, 1999) 求解各水準點的高程，並以各測段的高程差為LSE估計之觀測量，其方程式可以表示為：

$$V_{\Delta H_{ij}} + \Delta H_{ij} = H_j - H_i \dots\dots\dots (1)$$

其中，i為水準測段起點，j為水準測段終點， ΔH_{ij} 為i、j測段的高程差（單位：公尺），

H_i 、 H_j 為*i*、*j*水準點的高程（單位：公尺）， $V_{\Delta H_{ij}}$ 為 ΔH_{ij} 的改正數（單位：公尺）。

每一水準測段的高程差皆可依（1）式列出觀測方程式，假設有*n*筆測段高程差，則可以組成*n*個觀測方程式，依矩陣之形式表示如下：

$$\begin{bmatrix} V_{\Delta H_{ij}} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & \dots \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_i \\ H_j \\ \vdots \end{bmatrix}_{u \times 1} - \begin{bmatrix} \Delta H_{ij} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times 1} \dots\dots\dots (2)$$

即

$$V = AX - L$$

其中，*X*為未知數向量矩陣，即各水準點的高程，若有*u*個水準點，則未知數個數為*u*，*X*為*u*×1階矩陣。*L*為觀測量向量矩陣，即測段高程差，若有*n*筆測段高程差，則*L*為*n*×1階。*V*為誤差向量矩陣，即測段高程差的改正數，為*n*×1階。*A*為*X*的係數矩陣，為*n*×*u*階。假設各測段觀測量之間獨立不相關，其權值依照各測段相應距離之倒數賦予，則權矩陣可以表示為：

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_{ij}} & & & & 0 \\ & \ddots & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & \ddots \end{bmatrix}_{n \times n} \dots\dots\dots (3)$$

其中 d_{ij} 為測段的距離（單位：公里），*P*為*n*×*n*階。在無秩虧的情況下，可依（4）式估計各水準點的高程值，並依（5）式至（9）式可以得到觀測量的後驗單位權變方以及水準點高程的後驗變方-協變方矩陣。

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \dots\dots\dots (4)$$

$$\hat{L} = A \hat{X}, \hat{V} = \hat{L} - L \dots\dots\dots (5)$$

$$\Omega = \hat{V}^T P \hat{V} = (L - A \hat{X})^T P (L - A \hat{X}) = L^T P L - L^T P A \hat{X} \dots\dots\dots (6)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \Omega / (n - u) \dots\dots\dots (7)$$

$$f = n - u \dots\dots\dots (8)$$

$$\hat{D}(\hat{X}) = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \dots\dots\dots (9)$$

傳統LSE水準平差模式中，各水準點的高程值均為待求的未知數，這些未知數雖然均為函數獨立，但若在法方程式，即（4）式中，無任一高程起算值，則其將為非滿秩矩陣，將造成矩陣無法求逆。為了改變法方程式矩陣的奇異性，通常在水準網中，均會假設一個待定點為已知（起算）點，並賦予其高程值，此舉亦使得LSE平差估計後的各水準點高程值，均是相對於此已知點的成果（曾清涼等，2003）。

（二）帶有速度量未知數之 LSE 水準平差模式

TWVD2001的4個時期一等水準資料，其施測間隔均超過1年以上，若各水準點的高程值均沒有變動，則可依第（一）節之傳統LSE水準平差模式進行各點位高程的估計。然而，臺灣地區地殼變動頻繁且地層下陷情況嚴重，同一水準測段於不同時期所測得的高程差會因時間間隔之不同而有所差異，因此須考慮高程變動速度之影響。本文於整合各時期水準資料進行LSE估計時，採用帶有速度量未知數之LSE水準平差模式，並訂定一共同起算的參考時刻，在傳統LSE水準平差模式中加入各測段施測時間相對於參考時刻的時間間隔以及水準點的高程變動速度參數，利用 Gauss-Markoff Model同時求解各水準點在參考時刻的高程值與高程變動速度，其估計模式如下：

$$V_{\Delta H_{ij}^t} + \Delta H_{ij}^t = H_j - H_i + \dot{H}_j \Delta t - \dot{H}_i \Delta t \dots\dots\dots (10)$$

其中，i為水準測段起點，j為水準測段終點， ΔH_{ij}^t 為t時刻，i、j測段的高程差（單位：公尺）， H_i 、 H_j 為i、j水準點在參考時刻的高程（單位：公尺）， \dot{H}_i 、 \dot{H}_j 為i、j水準點的高程變動速度（單位：公尺/年）， Δt 為i、j測段施測時間相對於參考時刻的時間間隔（單位：年）， $V_{\Delta H_{ij}^t}$ 為 ΔH_{ij}^t 的改正數（單位：公尺）。

整合4個時期的一等水準資料，每一時期的每一水準測段高程差皆可依（10）式列出一觀測方程式，若總計有n筆高程差資料，則可以組成n個觀測方程式，以矩陣形式表示如下：

$$\begin{bmatrix} V_{\Delta H_{ij}^t} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} -1 & -\Delta t & 1 & \Delta t & \dots \\ \vdots & & \ddots & & \\ \vdots & & & \ddots & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_i \\ \dot{H}_i \\ H_j \\ \dot{H}_j \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times u} - \begin{bmatrix} \Delta H_{ij}^t \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times 1} \dots\dots\dots (11)$$

原TWVD2001埋設的舊點，但因為道路施工，使得點位遭受移動。綜合整理這兩種情況的水準點，雖然其點號與原TWVD2001基準所使用的點號相同，但該點已不在原先之位置，以致無法聯合其先前的觀測資料以估計其高程變動速度值，因此，這兩類點位均將視為新設點，在LSE平差估計之前，先將其相關距離以及高程差進行合併，使得代入LSE中的觀測資料均未包含這類新設點資料，亦即LSE平差計算時，並不會估計這些新設點的高程變動速度值。

(二) 相對於參考時刻之時間間隔計算

本文將(10)式的參考時刻訂為2001年1月1日，乃因其為TWVD2001公告之時刻。LSE平差計算時，所有水準測段的時間間隔均是相對於該參考時刻。一般而言，同一水準測段起點與終點的施測時間應為同一天，因此，其相對於參考時刻的時間間隔亦應相同，以第1期一等一級水準網中的C3200130測段為例，該水準測段的施測時間相對於參考時刻之時間間隔的計算方法如下：

第1期一等水準測量當中，往測C3200130（即C3200130A）的日期為2001年8月18日，將其化算為DOY（Day of Year）形式可知為2001年的第230天，而返測C3200130（即C3200130B）的日期為2001年8月19日，化算為DOY形式可知為2001年的第231天，將往、返測日期取平均得到C3200130水準測段的施測日期為2001年的第230.5天。參考時刻（2001年1月1日）乃為2001年的第1天，因此可知C3200130的施測日期相對於參考時刻之時間間隔為 $(230.5-1)/365$ 年。

若為經過新點合併之水準測段，則該合併後測段的施測時間為合併前各測段施測時間的平均。以第1期一等一級水準網中，起點為C009、終點為C011的水準測段為例，該測段是由起點C009，終點C010以及起點C010、終點為C011的這兩個測段合併而成，前者往、返測的平均時間為2001年6月20.5日，後者往、返測的平均時間為2001年6月21日，因此合併後的測段施測時間為2001年6月20.75日。

(三) 地震位移量之改正

本文利用2000至2008年4個時期的一等精密水準資料推估臺灣地區的高程變動速度場，在這8年期間，總計有4次芮氏規模6.0以上之大地震發生。2002年3月31日花蓮外海發生 M_L 6.8大地震，對臺灣東北部的高程造成影響，最大的高程位移量為-25.45 mm，平均為-1.6 mm。2003年12月10日臺東成功地區發生 M_w 6.6的大地震，對全臺的水準點造成了平均3.55 mm的高程位移量，尤其對臺東成功、東河等地區的影響更鉅，最大的高程位移量可達260.13 mm。另在2006年4月1日臺東卑南亦發

生芮氏規模6.2之強震，造成最大之高程位移量為-17.09 mm，平均為-0.03 mm。接續在2006年12月26日，屏東近海地區曾先後發生兩次芮氏規模7.0的地震，亦造成最大之高程位移量為-38.78 mm，平均為-0.81 mm。

圖9至圖12分別為此4次強震對於一等水準點造成的高程位移量，由圖可知，其所造成的高程位移值甚大，若不加以修正，將會影響本文估算高程變動速度場之正確性，尤其在臺東縣、屏東縣與東北部地區的地震位移量更是不可忽視。因此，本文於LSE估計之前，均先對各測段的高程差進行同震位移的修正，以排除強震對於

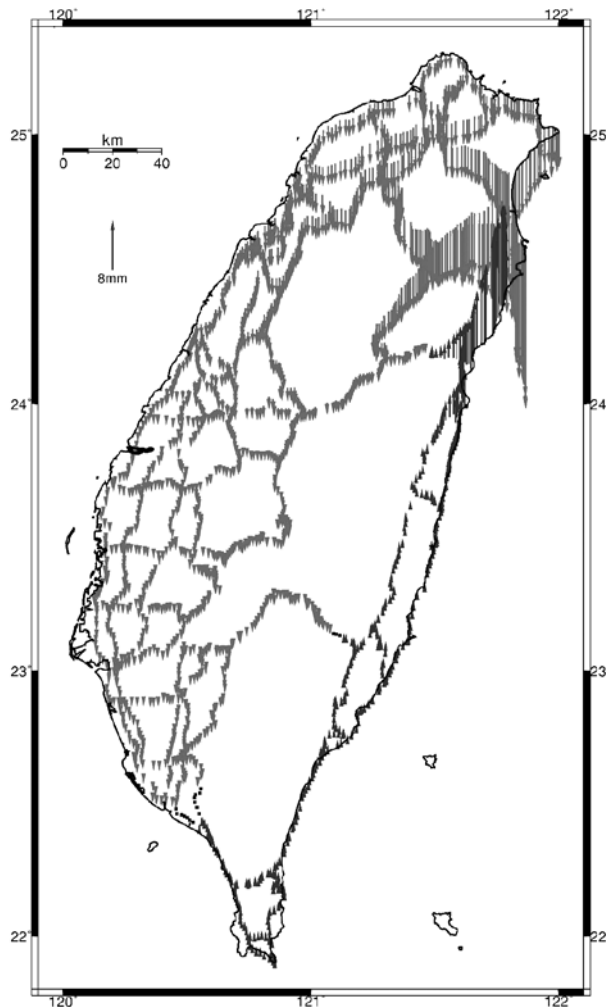


圖9 花蓮331大地震對一等水準點造成的高程位移量

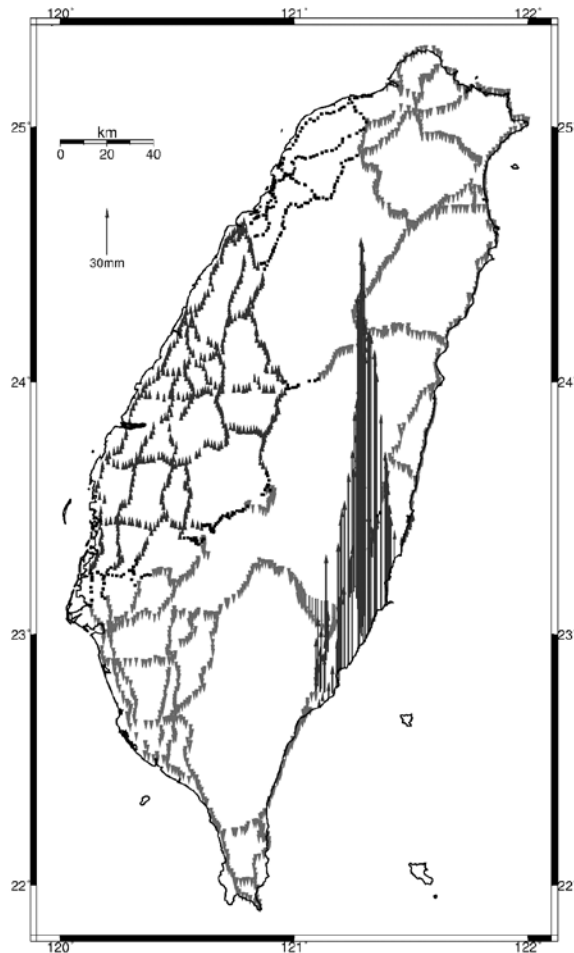


圖10 臺東成功大地震對一等水準點造成的高程位移量

水準點高程的影響。

本文直接使用 (Chen et al., 2004; Wu et al., 2006; Ching et al., 2007) 等研究產生的同震位移模型進行同震位移之修正，其方式主要為藉由各地區長期觀測的GPS衛星追蹤站資料，應用地質構造模型，建立影響該地區的區域性同震位移量進行改正。

由於花蓮331大地震（2002年3月31日），並未對第1期的一等一級水準點造成高程位移影響，其僅作用於第2期的一等二級水準點、第3期西南沿海一等水準點以及第4期一等水準點之中，故僅需在此3個時期的觀測資料中，進行331花蓮大地震的同震位移改正。同理，成功大地震發生於2003年12月10日，其僅造成第3期西南沿海一等水準點與第4期一等水準點之高程位移，所以，僅須將成功大地震的同震

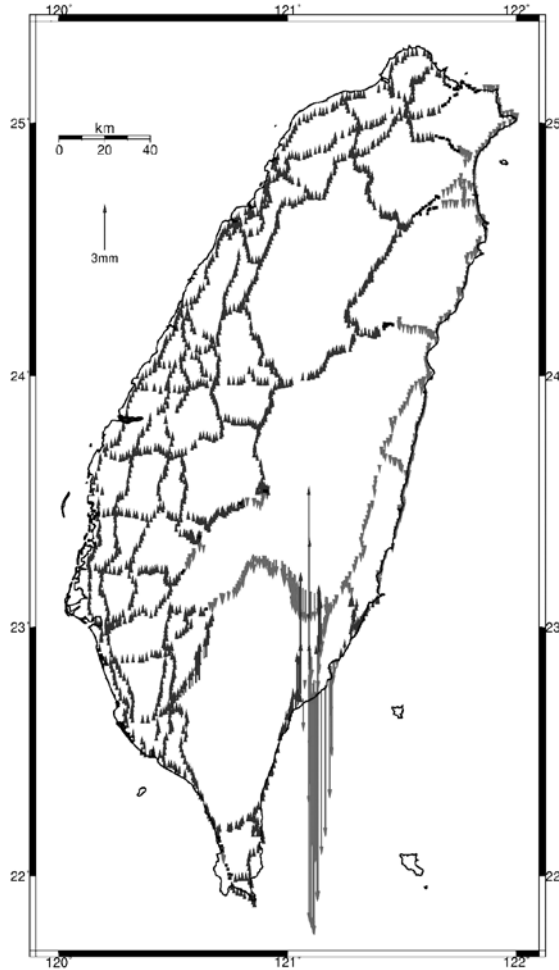


圖11 臺東卑南大地震對一等水準點造成的高程位移量

位移修正於第3、4期水準資料中。卑南大地震（2006年4月1日）發生於第3期西南沿海水準資料的施測期間，因此，在第3期的西南沿海一等水準資料中，2006年4月1日之後所施測的水準資料以及第4期的一等水準資料，均須對卑南大地震進行同震位移修正。最後，發生於2006年12月26日的屏東大地震，因為僅對第4期的一等水準資料產生影響，故僅對該期的觀測資料進行改正。同震位移之改正如下：

$$\Delta \tilde{H}_{ij}^t = \Delta H_{ij}^t - (D_j^{HL} - D_i^{HL}) - (D_j^{CK} - D_i^{CK}) - (D_j^{BN} - D_i^{BN}) - (D_j^{PT} - D_i^{PT}) \dots\dots\dots (13)$$

其中，i為測段起點，j為測段終點， D_i^{HL} 、 D_j^{HL} 、 D_i^{CK} 、 D_j^{CK} 、 D_i^{BN} 、 D_j^{BN} 、 D_i^{PT} 、 D_j^{PT} ：分別為花蓮、成功、卑南以及屏東等4次大地震對於水準點i、j造成的高程

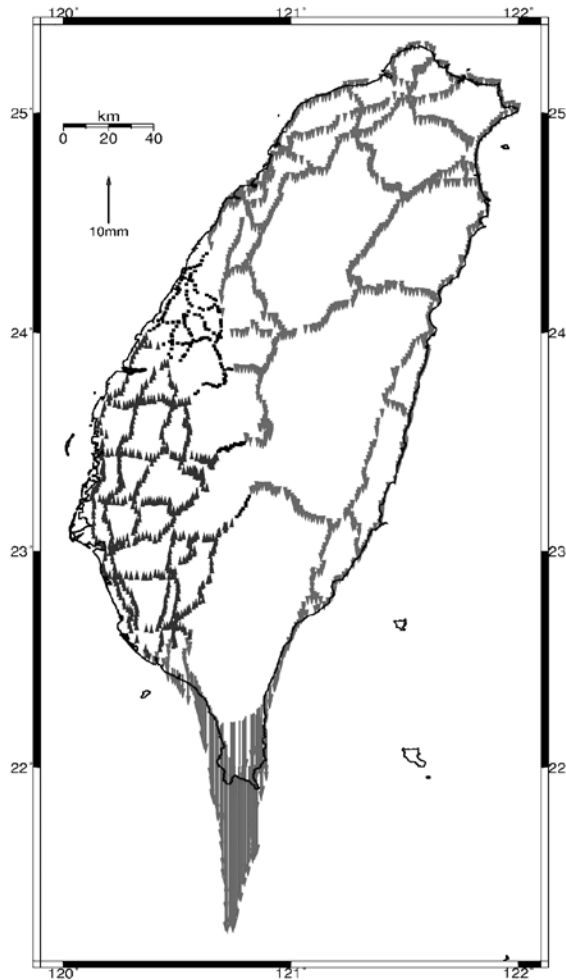


圖12 屏東大地震對一等水準點造成的高程位移量

位移量，不同時期的水準觀測資料，均分別加入不同地震的同震位移量，例如第1期的水準資料，即不需加入任何同震位移修正，第2期水準資料，僅需進行花蓮同震位移 ($D_j^{HL} - D_i^{HL}$) 的修正，第3期水準資料，其施測日期在卑南地震之前者，需做 ($D_j^{HL} - D_i^{HL}$)、($D_j^{CK} - D_i^{CK}$) 改正，而在卑南地震之後則須再加入 ($D_j^{BN} - D_i^{BN}$) 的修正，至於第4期的水準觀測資料，則均需進行全部4個地震的同震位移修正。 ΔH_{ij}^t 為 t 時刻，i、j 水準測段的高程差（尚未經過同震位移修正）， $\tilde{\Delta H}_{ij}^t$ 為 t 時刻，經過同震位移修正後之 i、j 水準測段的高程差；

(四) 最小二乘估計 LSE 平差計算成果

4個時期的一等水準測量資料，經過（一）至（三）節等步驟處理後，共合併了224個新埋設水準點與13個已遭移位的舊點，總計有4481個水準觀測量，亦即4481個水準測段的高程差，其未知數共有3686個，分別是一等水準點參考時刻的高程值（1843個）以及1843個高程變動速度值。本文以帶有速度量未知數之LSE水準平差模式，即（10）式，以基隆水準原點K999的高程值與速度量為起算值進行估計，得自由度為795，後驗單位權中誤差為 $\pm 0.128 \text{ m} \sqrt{K}$ ，高程變動速度標準差的平均值為 $\pm 0.164 \text{ cm/yr}$ ，最大值為 $\pm 0.0247 \text{ cm/yr}$ ，位於嘉義縣之「雪峰」水準點上，最小值為 $\pm 0.041 \text{ cm/yr}$ ，位於K999附近之「公車處」水準點上。在西南沿海地區與一等一級、一等二級共同節點位置上，均有較好的高程變動速度標準差，原因在於這些位置有較多的水準觀測次數，且西南沿海地區的網形結構較密。臺灣的北部、東部地區，由於觀測次數較少且網形結構較疏，故這些區域水準點的高程變動速度標準差則較差。

經LSE平差估計後，本文利用得到的1843個一等水準點高程變動速度值，以最小曲率法內插求得相對於基隆水準原點K999的高程變動速度場，如圖13所示，其中，黑色方塊為水準點位置，色階變化表示高程變動速度量的大小，高程變動速度的內插半徑為15公里，未著色區域代表距離水準點超過15公里故沒有內插值，黑色虛線為中央地質調查所公告的活動斷層位置。由圖13可以得知，中央山脈與海岸山脈為地層抬升區，其中以南投、臺中、花蓮交界處和臺東成功鎮、東河鄉抬升速度較大。而彰化、雲林、嘉義為大範圍且嚴重沉陷的地層下陷區，宜蘭、屏東、花蓮海岸也有部分地區沉陷，但沉陷速度較小。

中央地質調查所利用2002至2007年觀測的GPS資料估計臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）的高程速度場，如圖14所示，高程變動速度的內插半徑亦為15公里，黑色三角形為GPS測站位置。其結果顯示中南部山麓地區有較明顯的抬升值約2至4 cm/yr，中部沿海地區出現較明顯的沉陷值約-4至-11 cm/yr（中央地質調查所，2008）。

比較圖13與圖14，其皆是以最小曲率法獲得的高程變化速度場，內插網格皆為4"×4"，由比較結果可以獲知，本文的成果與中央地質調查所之GPS成果大致吻合，兩者皆顯示中央山脈與海岸山脈為抬升區，西南沿海是沉陷嚴重區域，屏東、花蓮沿海、宜蘭有部份地區沉陷。但在部分區域，兩者有些微的差異，如恆春地區在圖13顯示的高程變動速度約為-1 cm/yr，而在圖14中卻是抬升與沉陷交錯，花蓮內陸在圖13中顯示為微幅抬升，但在圖14中卻是微幅沉陷。

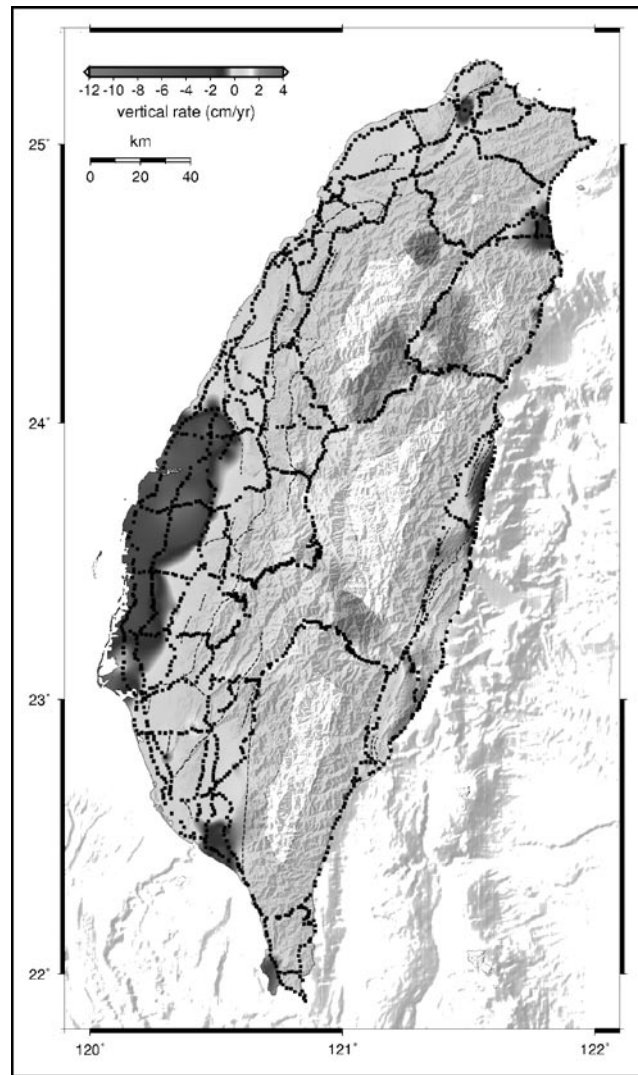


圖13 由TWVD2001資料估計得之高程變動速度場

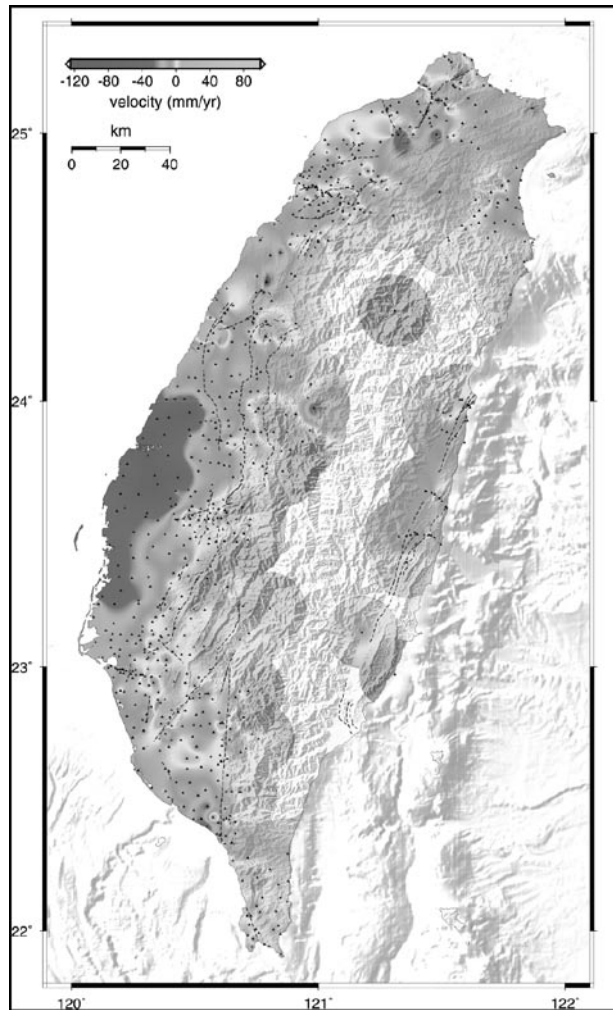


圖14 臺灣地區相對於澎湖白沙站 (S01R) 之GPS高程速度場 (2002-2007)
摘自 (中央地質調查所, 2008)

(五) 高程變動速度估值之顯著性測試

為瞭解1843個一等水準點的高程變動速度值是否顯著，本文採用t測試進行顯著性之測試，設定假說測試如下 (Lapin, 1990)：

$$\begin{cases} H_0 : \hat{V}_t = 0 \\ H_1 : \hat{V}_t \neq 0 \end{cases}, \text{ 測試值 } t = \frac{\hat{V}_i - 0}{\hat{\sigma}_{\hat{V}_i}} \dots\dots\dots (14)$$

其中， \hat{V}_i 為水準點的高程變動速度估值， $\hat{\sigma}_{\hat{V}_i}$ 為水準點高程變動速度的標準差。

利用 \hat{V}_i 及 $\hat{\sigma}_{\hat{V}_i}$ 可計算各水準點高程變動速度的t測試值，再依選定的信心水平值 α ，查t分布表可以獲得統計測試的臨界值，即能判斷是否接受或拋棄零假說 H_0 。若是拋棄 H_0 ，表示 \hat{V}_i 的期望值不等於零，該水準點的高程變動速度估值顯著，反之，若接受 H_0 ，則表示 \hat{V}_i 的期望值為零，該水準點之高程變動速度估值不顯著。本文選定信心水平值 $\alpha=0.001$ ，利用雙尾測試，亦即兩側的信心水平值各為0.0005，t測試值介於-3.291與3.291之間者接受 H_0 ，反之則拋棄 H_0 。

由統計測試之結果顯示，1843個一等水準點中，共有785個水準點的高程變動速度估值為顯著，本節以此785點的高程變動速度估值，亦利用最小曲率法內插得到區域性的高程變動速度場，其內插半徑仍為15公里，如圖15所示，黑色方塊為水準點位置，未著色區域代表距離超過15公里的區域，其並沒有內插值。

比較圖13與圖15，圖13為利用全部1843個水準點內插得到的高程變動速度場，而圖15則為利用785個高程變動速度顯著之速度量內插獲得的速度場，其內插半徑皆為15公里。由比較結果可以發現有些微不同之處：由於基隆、臺北、桃園地區只有少數水準點的高程變動速度是顯著的，因此圖15的結果顯示這些區域的沉陷速度較圖13為大，而中南部山麓在剔除高程變動不顯著的水準點之後，該地區的抬升狀況看起來更為明顯。另外，由於彰化、雲林地區大多數水準點高程變動之速度皆為顯著，所以，圖13與圖15在該區域的變動速度場較為一致。

弧陸碰撞為板塊邊界的一個主要造山機制，臺灣位於兩個隱沒系統的交接處，為西太平洋地區一個典型且正在進行的弧陸碰撞範例（中央地質調查所，2008）。由圖15可以看見中央山脈以及海岸山脈地區明顯抬升，其中，臺東縣成功鎮、東河鄉的平均抬升速度約為1.93 cm/yr，最大為2.55 cm/yr。中央山脈的抬升速度約1至3 cm/yr，抬升原因為其位於臺灣的碰撞造山帶，板塊碰撞使得地勢隆起。塔塔加節點（X121）為最接近玉山主峰的一等水準點，沿登山步道登至山頂僅14.5公里，2003年臺灣進行玉山之正高測量，其結果指出玉山主峰三角點的高程為3951.798 m（國土測繪中心，2004），若以本文的結果，塔塔加節點（X121）的高程變動速度為1.74 cm/yr，造山運動若依此抬升速度穩定地持續進行，則玉山主峰預期約在2765年後達到4000公尺的高度。

圖15亦顯示出彰化、雲林、嘉義、宜蘭五結鄉、屏東東港鎮、潮州鎮、林邊鄉、花蓮海岸等地區為地層沉陷區，沉陷速度最大者位於彰化縣，為-10.94 cm/yr，雲林縣沉陷範圍最廣且最顯著，最大-9.8 cm/yr，平均-3.65 cm/yr。根據工研院能資

所的報告，1998年與2001年間，屏東地區下陷速度皆低於-3 cm/yr，主要沉陷區域分布在林邊溪出海口附近（工研院能資所，2001）。而由分析中央地質調查所2002年至2006年共32個GPS觀測站的資料顯示，整個宜蘭平原皆在下陷中，最大值可達-2 cm/yr（邱詠恬等，2008）。又依近年來臺灣地區地層下陷之調查結果顯示，彰化縣大城鄉有-10cm/yr以上的沉陷速率，雲林縣的沉陷中心逐漸移往內陸的土庫、元長地區，其地層下陷情況日趨嚴重，由2003年的檢測結果得知，最大沉陷速率約

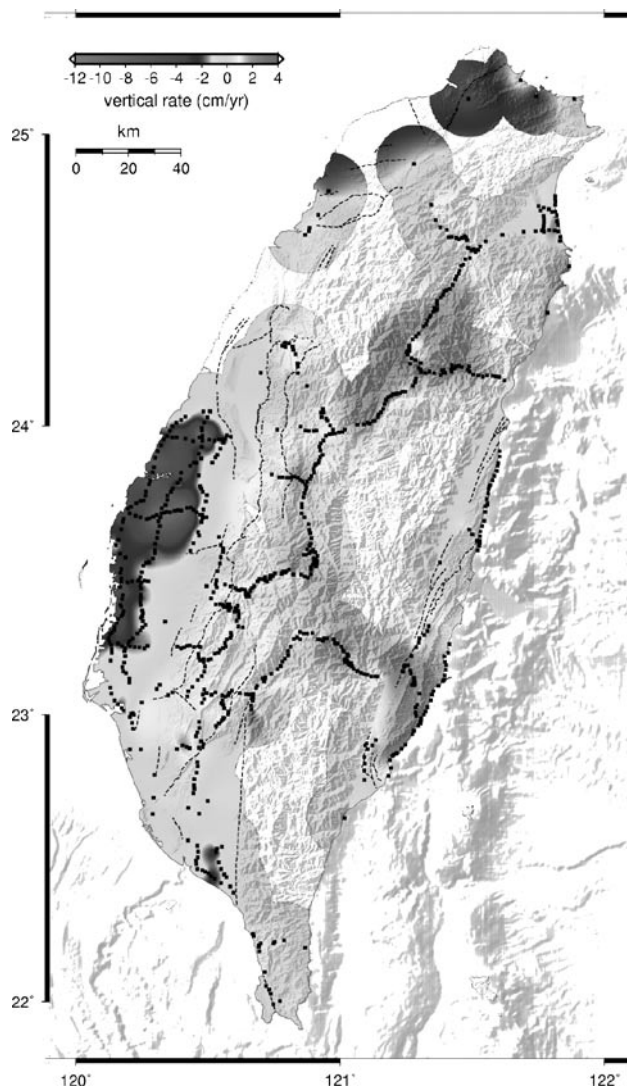


圖15 785個高程變動顯著水準點之高程變動速度場（內插半徑15公里）

-12.2 cm/yr，就2003的檢測數據來說，雲林地區持續沉陷的面積以及年平均沉陷速率均為全臺之冠，已為地層下陷最嚴重的地區，此乃因為其為臺灣農業的大縣，大量抽取地下水提供農作、魚塭使用之結果（經濟部、行政院農林委員會、內政部，2005）。

六、結論與建議

本文利用2000年至2008年間所蒐集的4個時期一等精密水準測量資料，以帶有速度量未知數之LSE水準平差模式，求解各一等水準點於2001年1月1日之高程值以及2000至2008年間各一等水準點的平均高程變動速度。在LSE估計之前，均先合併包含新點的測段資料，並對各測段高程差進行4次大地震的同震位移量修正，排除大地震對於水準點高程位移的影響，其包含了花蓮331、成功、卑南以及屏東等4次地震。

由平差結果顯示，各一等水準點高程變動速度標準差的平均值為 ± 0.164 cm/yr，在99.9%信心區間之統計測試下，有785個水準點的平均高程變動速度為顯著。利用各一等水準點的高程變動速度值，以最小曲率法內插得臺灣地區的高程變動速度場，其成果顯示中央山脈以及海岸山脈為地層抬升區，中央山脈之抬升速度約為1至3cm/yr，抬升原因為板塊碰撞造成地勢隆起。臺東縣成功鎮、東河鄉的平均抬升速度為1.93cm/yr，最大為2.55cm/yr，其抬升應是受到縱谷斷層錯動之影響。

彰化、雲林、嘉義、宜蘭五結鄉、屏東東港鎮、潮州鎮、林邊鄉、花蓮海岸等地區為地層下陷區域，沉陷速度最大者位於彰化縣，為-10.94 cm/yr，雲林縣的沉陷範圍最廣且最顯著，最大者為-9.83cm/yr，其平均值約為-3.65 cm/yr，乃因其為臺灣農業的大縣，大量抽取地下水提供農作、魚塭使用之結果。

雖然本文使用了4個時期的一等精密水準測量資料，但是，除了西南沿海地區之水準點以及一等一級、一等二級的共同節點外，北部、東部地區的水準點均僅有兩次的水準測量資料，未來若可以整合更多次的水準觀測資料，將可以提升高程變動速度值的估計精度。本文的成果與中央地質調查所GPS觀測之成果大致吻合，雖然以GPS方式蒐集臺灣高程的變動資訊較為快速方便，然而，精密水準測量仍為精度等級最高的高程測量方式，故本文的成果對於臺灣高程變動趨勢之探討具有重要參考意義。

致 謝

作者（們）非常感謝兩位匿名評審提供之寶貴審查意見，使本文內容更盡完善，謹此致謝。同時，本研究承蒙內政部地政司提供相關研究資料，使本研究得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

- 工研院能資所，2001，《臺灣地區地層下陷之監測、調查及分析》報告書：工研院。
- 內政部，2001，《一等水準測量作業規範》，內政部。
- 中央地質調查所，2008，《地震地質與地變動潛勢分析—地變動監測分析(1/4)》報告書。
- 吳東軒，2006，《精密水準測量誤差分析：轉點沉陷效應之探討》，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 邱詠恬、景國恩、侯進雄、胡植慶、饒瑞鈞，2008，由2002-2006年之GPS觀測資料探討宜蘭平原之地殼變形，收錄於經濟部中央地質調查所《第20號特刊》，台北：經濟部中央地質調查所，頁111-124。
- 陳國華，2004，《整合TWVD2001水準及GPS資料改進臺灣區域性大地水準面模式以應用於GPS高程測量》，國立成功大學測量及空間資訊學系博士論文。
- 國土測繪中心，2004，《玉山正高測量作業》報告書，內政部。
- 曾清涼、楊名、劉啟清、余致義、林宏麟，2003，《一等二級水準網測量督導查核工作》報告書，國立成功大學。
- 經濟部、行政院農林委員會、內政部，2005，《彰化雲林地區地層下陷防治計畫》報告書，經濟部。
- Chen, H. Y., L. C. Kuo, and S. B. Yu, 2004, Coseismic Movement and Seismic Ground Motion Associated with the 31 March 2002 off Hualien, Taiwan, *Earthquake, Terr. Atmos. Ocean Sci.*, 15(4), pp. 683-695.
- Ching, K. E., R. J. Rau, and Y. Zeng, 2007, Ching, K. E., R. J. Rau, and Y. Zeng, 2007, Coseismic Source Model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung Earthquake, Taiwan, Determined from GPS Measurements, *J. Geophys. Res.*, 112: B06422, doi:10.1029/2006 JB004439.
- Ching, K. E., R. J. Rau, J. C. Lee, and J. C. Hu, 2007, Contemporary Deformation of

- Tectonic Escape in SW Taiwan from GPS Observations, 1995-2005, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 262, pp. 601-619.
- Koch, K. R., 1999, *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*, 2nd ed., Edition, Germany: Springer-Verlag.
- Lapin, L. L., 1990, *Probability and Statistics for Modern Engineering*, 2nd ed., Boston: PWS-KENT Publishing Company.
- Liu, C. C. and S. B. Yu, 1990, Vertical Crustal Movement in Eastern Taiwan and its Tectonic Implications, *Tectonophysics*, 183, pp. 111-119.
- Rau, R. J., K. E. Ching, J. C. Hu, and J. C. Lee, 2008, Crustal Deformation and Block Kinematics in Transition from Collision to Subduction: GPS Measurements in Northern Taiwan, 1995-2005, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2007JB005414.
- Wu, Y. M., Y. G. Chen, T. C. Shin, H. Kuochen, C. S. Hou, J. C. Hu, C. H. Chang, C. F. Wu, and T. L. Teng, 2006, Coseismic Versus Interseismic Ground Deformations, fault Rupture Inversion and Segmentation Revealed by 2003 Mw 6.8 Chengkung Earthquake in Eastern Taiwan, *Geophys. Res. Lett.*, 33: L02312, doi:10.1029/2005GL024711.
- Yu, S. B. and C. C. Liu, 1989, Fault Creep on the Central Segment of the Longitudinal Valley Fault, Eastern Taiwan, *Proc. Geol. Soc. China*, 32, pp. 209-231.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo, 1997, Velocity Field of GPS Stations in the Taiwan Area, *Tectonophysics*, 274, pp. 41-59.