

運用 GPS 衛星定位監測彰化沿海地區地層下陷之研究 The Study of Using GPS Measuring Height to Survey Subsidence in Changhua Area

陳鶴欽¹ 饒瑞鈞² 黃偉城³ 曾耀賢⁴
He-Chin Chen Ruy-Juin Rau Wei-Cheng Huang Yao-Hsien Tseng

摘要

彰化沿海地區位於濁水溪沖積扇平原之北部,依據經濟部近年地層下陷監測井及地表水準點研究結果顯示 2001、2002、2003 年間,最大年下陷速度分別為 17.6cm/yr、11.7cm/yr 及 10.4cm/yr,顯示地層下陷問題嚴重,政府部門需再投入研究,避免各項民生及重大工程(如高速鐵路、濱海工業區及東西向快速道路)遭受衝擊,並及早提出因應之道。

本次研究主要目的為對於地層嚴重下陷地區,使用長期觀測監測方式配合數學線性迴歸原理,希望能夠得到與連續站方式類似成果及趨勢,但所需經費較為節省且作業更為便利。由監測成果分析,彰化沿海地區屬嚴重地層下陷地區,除 VR02 每年下陷約 80mm 最為嚴重外,本次監測其餘一等水準點每年下陷也約在 17-56mm 間。另研究成果顯示,採 GPS 監測與一等水準檢測方法,所分析點位下陷速度趨勢一致。

關鍵字:地層下陷、GPS、水準測量

Abstract

The Changhua coastal area is located on the north Jhuoshuei River alluvial plain. The velocities of land subsidence during 2001, 2002, 2003 respectively were 17.6 cm/yr, 11.7 cm/yr and 10.4 cm/yr, based on the studies of the Ministry of Economic Affairs. Realizing this dire problem, we need to study the land subsidence in this area in order to prevent or mitigate the possible impact on local infrastructure.

The goal of this research is to obtain the similar achievement and the tendency comparing with the results of the permanent sites, using long-term monitoring observations and linear

¹ 國立成功大學地球科學系博士生/內政部國土測繪中心專員
電話:04-22522966-203 email address:23012@mail.nlsc.gov.tw
² 國立成功大學地球科學系副教授
³ 中興測量股份有限公司經理
⁴ 內政部國土測繪中心課長

regression method. And the method proposed in this study is more cost-effective. The achievement demonstrated that the Changhua coastal area has been still the serious land subsidence area. VR02 is the most serious land subsidence point which the displacement is nearly 80mm per year. The displacement of 1st order benchmarks were nearly 17~56mm per year during the monitoring period. The velocities of land subsidence of all most points were the same between Global Positioning System (GPS) and leveling survey results.

Keyword : Land subsidence、Global Positioning System (GPS)、Leveling

一、前言

隨著人類對環境的過度開發與利用，近年來自然環境變遷速度加遽，地層下陷問題也愈受重視。美國地質調查所(USGS)Galloway 等人曾在加州聖喬昆谷(San Joaquin Valley)進行調查，成果顯示 1925-1977 年間當地約下陷 9 公尺 (Galloway et al., 2000)，據聯合國跨政府氣候變遷小組在曼谷開會所提出的警告(美聯社, 2007)，隨著海平面在未來數十年內上升，全球二十座大城中有十三座城有滅頂之虞。曼谷相對於泰國灣水平面以每年 0.254 公分的速度上升。中國天津位於半乾旱的華北平原北部和渤海灣西部，是環渤海地區的經濟中心，海拔高度約 3-5 公尺，因過量開採地下水造成人為災害，李陶等人(李陶等, 2007)利用合成孔徑雷達影像於 2004-2005 年在天津地區辦理地面沉降研究，結果顯示研究期間該地區下降量約 3-6 公分。趙超英等人亦利用差分合成孔徑雷達干涉技術(D-InSAR)，對大陸西安地區的地面沉降進行監測，可得到合理的變形結果，並與水準及 GPS 測量監測結果比較，最大沉降速度大於 20cm/yr，其餘沉降中心速度也達 12cm/yr，與西安在 1996 年限採地下水及黑河引水工程實施的結果吻合(趙超英等, 2007)。

臺灣地區近年來因經濟快速發展，對於水資源需求甚為龐大，特別是在沿海地區常因養殖業及農業用水量，又地下水取得方便且成本便宜，有上述情形地區常有地層下陷現象發生。經濟部與農委會已於民國 84 年起陸續推動「地層下陷防治執行方案」及 2005 年啟動之「易淹水地區水患治理計畫」，期能更有效結合減緩台灣地區地層下陷之嚴重性並結合國土規劃，流域整體規劃，促進水土永續使用。彰化沿海地區位於濁水溪沖積扇平原之北部，依據經濟部水利署近年地層下陷監測井及地表水準點研究結果顯示 2001、2002、2003 年，每年最大下陷速度分別為 17.6cm/yr、11.7cm/yr 及 10.4cm/yr (經濟部, 2007)，顯示地層下陷問題嚴重，政府部門需再投入研究，避免各項民生及重大工程(如高速鐵路、濱海工業區及東西向快速道路)遭受衝擊，並及早提出因應之道。對於國土保安而言，測繪機關首要就是提供快速且正確各項測繪成果，以利其他部門做出正確的施政決策，在地層下陷的課題上，精確地表高程

資訊為最重要的一環。

依據經濟部調查發現，彰化以南，雲林、嘉義沿海地區地層下陷嚴重，每年約有 1-3 公分的下陷量（經濟部水利署，2004），其中彰化縣大城鄉被列為「嚴重地層下陷區」，吳善薇（2004）研究顯示，利用衛星雷達干涉法量測彰化縣員林地地區的地表變形行為，員林地區自 1995 年以來就持續有地層下陷發生，平均下陷速率約為每年 1 公分，且在 921 地震前後，下陷速率則發生明顯的變化。

內政部國土測繪中心（以下簡稱本中心）依據 2004-2005 年度 e-GPS 連續觀測站計算成果顯示，彰化二林站（VR02）年下陷速度約為 $93.3 \pm 1.6 \text{mm/yr}$ （內政部土地測量局，2006a），為了解彰化沿海地區地層下陷狀況，由彰化縣政府地籍測量隊，選擇內政部於彰化沿海地區佈設之 5 個一等水準點，每 2-3 週實施一次 7 小時之 GPS 高精度靜態觀測作業，並搭配國土測繪中心中部地區之 8 個連續追蹤站資料一併觀測，相對於澎湖、金門等地區之 GPS 連續站一併解算，以求解相對於穩定大陸邊緣之參考站白沙（S01R）及金門（KMMN），配合數學回歸方式求解下陷情形，整體研究流程如圖 1。

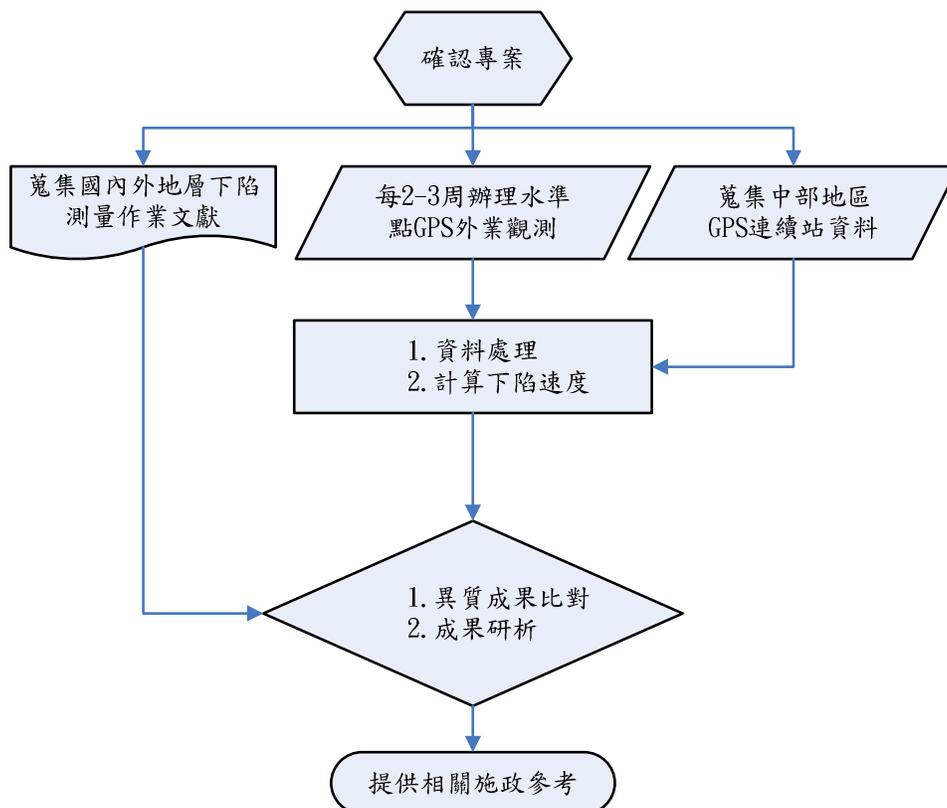


圖 1：本次研究流程圖

台灣地區自 1992 年開始採用全球定位系統(Global Positioning System, GPS)技術進行國家基本測量，據以定義新的台灣大地基準(Taiwan Geodetic Datum 1997, TWD97)，計 8 個衛星追蹤站及 726 個 1、2 等衛星控制點，並在 2003 年建置完成並公告臺灣地區高程基準 TWVD2001，共計埋設 2065 個一等水準點，以相對於基隆潮位站(BM07)之 K999 為水準原點，成果並已廣為社會各界運用（[內政部地政司衛星中心網頁](#)）。

水準測量所求得高程系統為正高系統（以 H 表示），為一物理量，符合一般生活環境需求如前述 TWVD2001，而一般衛星測量所測量高程為橢球高，為使用數學定義所求得，如 GPS 測量之 WGS84 之幾何高程，通常以 h 表示之。而橢球高與正高系統在定義與物理意義上均不相同，其間差異為大地起伏（ N ），定義如下：

$$h=H+N \quad (1)$$

一般而言，我們使用 GPS 辦理幾何高觀測所需時間較短且經費便宜，本中心委外施測三等控制點觀測精規範為 $30\text{mm}+6\text{ppm}$ ，利用雙頻 GPS 儀器觀測 3 小時可達成，所需經費約 10,000 元，觀測所得為絕對位移量，而使用水準測量，以一等精密水準精度施測規範為 $2.5\text{mm}\sqrt{K}$ （系統改正前， K 表示水準點間相距公里數），精度高但施測不易、費時且成本高，每公里約為 10,000 元，每天觀測量約為 3-4 公里，觀測所得為相對位移量，且受天候影響工作較為辛苦，另依目前本中心經驗，一等水準外業應以夜間觀測較佳。另目前國內各縣市政府均尚無精密水準儀，可親自辦理水準業務。本次研究除使用 GPS 辦理外業觀測外，推算地層下陷量外，也將搜集內政部近年所辦理一等水準點觀測成果作一比對，以比對觀測成果差異。

二、資料蒐集及處理

2.1 GPS 外業蒐集

為持續了解彰化沿海地區地層下陷狀況，我們首先蒐集 e-GPS 網內台灣中部地區連續站，共計選擇台中港站（TACH）、台中東勢站（DOSH）、南投草屯站（CAOT）、嘉義東石站（CHYI）、嘉義竹崎站（JHCI）、彰化和美站（VR01）、彰化二林站（VR02）、彰化田中站（VR03）等 8 個連續追蹤站從 2005 年 1 月 1 日至 2007 年 5 月 30 日間約 2.5 年的觀測資料，並搭配內政部金門（KMNM）、墾丁（KDNM）、鳳林（FLNM）追蹤站、中央研究院澎湖白沙地殼變動監測站（S01R）及 IGS 在臺灣的工研院站（TNML）共同解算每日解。另外選擇內政部一等水準點 C077（中興國小）、I017（自強大強北）、G027（新街橋）、G031（台西社區）、X111（王功）等 5 個點位辦理外業觀測（此 5 點環繞二林地政事務所），使用 Trimble 5800 儀器，分別在 2006 年 5 月 4 日至 2007 年 4 月 26 日間由彰化縣政府測量隊自行派員辦理外業觀測蒐集資料，約每 2-3 周辦理一次共計 26 次，每日觀測 7 小時，期間也一併蒐集上開 13 個連續站的資

料。

另外於外業觀測期間，本中心於 2006 年 12 月舉行台灣西南部地區一等水準點檢測作業審查會議，審查會結論認為該次水準測量作業中，認為甲南節點 (X101)、嘉義節點 (X201) 等可視為不動點，該成果將約制在上開點位，與 2002 年度公佈 TWVD2001 成果作一比對。為了解整體水準下陷量變化與 GPS 測高下陷量之絕對差異，自 2006 年 12 月起由本中心加派 2 組人力，使用 TOPCON GB1000 型 GPS 衛星接收儀，對 X101 及 X201 一併辦理外業觀測作業，作業時間與原本觀測之 I017 等 5 個一等水準點相同。

2.2 GPS 資料預處理

外業獲得點位觀測資料檔為 Binary 格式，須轉換為 GPS 標準交換檔 (RINEX, The Receiver Independent Exchange Format) 格式之檔案 (簡稱為 O 檔) 以便利後續資料處理，並將儀器高化算至 ARP 位置 (天線盤鎖螺絲處平面, Antenna Reference Plane)。GPS 資料的處理是採用 Bernese 4.2 版 (Hugentobler et al., 2001)，此軟體是由瑞士伯恩大學天文研究所所開發的。除一般性 GPS 處理功能外，另有計算軌道參數、極運動 (Polar motion) 參數、電離層模式推求、對流層折射附加參數與模擬 GPS 資料之功能。

在本研究中，對 GPS 資料之處理可分為前處理 (Pre-Processing) 與後處理 (Post-Processing)。前處理之概略流程如下：

- 1、將原始資料轉成 RINEX 格式，再轉成 Bernese 格式。
- 2、自精密星曆中萃取出各衛星之時錶修正量以供後續處理之用。
- 3、將精密星曆轉成表列型式，再組成 Bernese 格式之軌道。其中組軌道之原則：利用每天之精密星曆，組成 24 小時之軌道，包括 6 個克卜勒軌道元素與 2 個 ROCK4/42 模式之太陽輻射參數。作為資料修編與後處理之用。
- 4、進行電碼資料之檢查，剔除錯誤觀測量。
- 5、利用電碼資料進行單點定位，計算測點坐標及接收儀時間誤差量，並將時間修正於相位資料中，以便接收儀之時間能準確至 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 秒左右。
- 6、組成獨立的基線網一次差觀測量，即將所有測站依最短基線與最多觀測量之原則，組成線性獨立的一次差觀測量。
- 7、利用精密星曆與衛星時錶資料進行資料之修編、跳週之補正 (Cycle slip editing)、時錶差修正、錯誤觀測量或觀測量不能使用之標示 (Mark)。對於跳週之處理，採自動偵測與補償。

而後處理之流程與採用的模式敘述如下：

- 1、軌道部份：採用 IGS 精密星曆。所有軌道參數視為已知，固定之而不加以求解。

- 2、極運動改正：採用 IERS (International Earth Rotation Service) Bulitine B 公佈值，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正之，並將坐標值由瞬間極之坐標系修正至 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、月引力及地球固體潮(Solid earth tide)也加以考慮。
- 4、坐標系以蔡旻穎等(2007)所發展出固定站方式求解模式，從 IGS 固定站推算台灣地區 S01R (澎湖，中研院建置)、TNML (新竹，工研院建置)、CK01 (台南，成功大學建置)、KDNM (墾丁，內政部建置)、KMNM (金門，內政部建置)等 5 站坐標及速度場，本研究資料解算均約制在上開點位成果。
- 5、對流層折射修正：採用 Saastamoinan 模式 (Saastamoinen, 1973) 以該月份海平面平均氣象值推算至測點，再加以修正；並利用附加參數，以各測每 2 小時增加 1 個參數之方式，加以吸收殘留的對流層折射誤差。
- 6、觀測資料選定仰角 15 度以上部份才用之於計算，此乃為避免在低仰角度觀測時伴隨的較大雜訊(Noise and multipath)所造成之影響。
- 7、相位未定值求解之過程，乃先利用實數解求得一精確之坐標 (或利用以前計算過之坐標值)，然後採用 QIF (Quasi Ionosphere-Free) 方法，求得 L1 和 L2 的整數週波未定值，再組成 "ionosphere free" L3，並將解得 L1 和 L2 的整數週波未定值代入無電離層效應之觀測方程式中(L3)，開始求解其餘各未知參數。

2.3 速度場及時間序列

為了解本次研究區各固定站及水準測點的下陷速度及變形行為，我們利用每次 GPS 觀測坐標的成果，進行各個測站速度之評估。因為這段時間內並無明顯地震發生，在不考慮地震對地表位移所造成之影響下，根據時間序列的型態，利用下列方程式，針對第 n 個測站的第 i 個坐標分量之時間序列進行擬合。

$$X_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + v_n^i \quad (2)$$

其中 a_n^i 為截距， b_n^i 為測站速率， v_n^i 為殘差值，t 為時間點。利用最小二乘法原理 ($\sum v v = \min$)，我們將上述方法應用到各個測站的各個坐標分量，評估各測站的速度場。

三、成果計算與分析

3.1 固定站資料計算分析

為確認台灣中部地區的絕對下陷情形，我們蒐集本中心所設置之「eGPS 即時動態定位系統」中部分 GPS 連續站資料，來分析其變化情形，參考蔡旻穎等（2007）利用 1995-2005 年間，選擇 IRKT（俄羅斯）、PERT（西澳）、TSKB（日本）、IISC（印度）及 GUAM（關島）等國際 IGS 站資料作為國際約制站，求解出國內約制站的速度場及坐標，共計求解出 CK01（成大）、KDNM（墾丁）、KMNM（金門）、TNML（新竹工研院）及 S01R（澎湖白沙）國內約制站，其所考量係指較穩定且連續觀測資料。後續國內站追蹤站成果則使用上述 5 站成果資料約制計算。其中因為 TNML 雖然 2001 年才有資料，但其為目前台灣在 IGS 國際追蹤站網之連續站（國內目前僅 2 站加入，另一站為國家標準時間實驗室 TWTF，位於中壢），仍納入計算。成果顯示在外島的金門(KMNM)在高程方向每年約抬升 2.43mm，墾丁(KDNM)每年約抬升 3.88mm，台南成大(CK01)每年約下降 0.56mm，新竹工研院(TNML)每年約下降 8.32mm。

根據前述所提蒐集之本中心布設之 eGPS 即時動態定位系統之固定站資料，由 2005 年 1 月 1 日到 2007 年 5 月 30 日約 2 年半的時間計算所得，約制在前述推算之 CK01、KMNM、KDNM、S01R 及 TNML 坐標及速度場，求解中部地區連續站測站之每日坐標解，再經由（2）式所述方程式，利用最小二乘法原理（ $\sum v v = \min$ ），我們將上述方法應用到各個測站的各個坐標分量，評估各測站的速度場，經求解成果如下表 1 及圖 2。

成果顯示台灣中部地區以彰化縣境內之二林地政事務所（VR02）下限量達 77.65mm/yr 最大（表 1），其餘點位變化量多在 10mm/yr 以下。另位於山區點位如 DOSH（東勢所）、KAFN（南投高峰）、PLIM（埔里）、SINY（南投信義）及 WULI（武陵農場）等點位均處車籠埔斷層上盤者，高程方向均為抬升，此結果與陳鶴欽等（2005）之研究相符。另外我們參考中央研究院地球科學研究所郭隆晨博士架設網站結果顯示（如表 2），除埔里（PLIM）趨勢不一致（惟差值僅 4.4mm），其餘趨勢均一致且最大差值不超過 5mm，顯示本研究使用連續觀測計算出之水平速度場及高程方向變化量與其相符，成果可靠。

表 1 本研究計算所得各追蹤站速度場成果

單位：mm

點號	點名	Ve	Vn	Vh	σ_e	σ_n	σ_h
CAOT	草屯所	23.8	-9.16	-0.99	0.01	0.01	0.02
DOSH	東勢所	24.15	-6.45	2.56	0.01	0.01	0.02
FCU1	逢甲大學	17.29	-10.33	-2.02	0.05	0.04	0.13
FLNM	鳳林所	2.09	10.7	-5.17	0.01	0.01	0.01
KAFN	南投高峰	-9.36	2.9	8.67	0.01	0.01	0.02
KDNM	壟管處	-14.81	-3.29	-0.04	0.01	0.01	0.01
KMNM	金門	31.32	-10.43	-1.63	0.01	0.01	0.01
MZUM	馬祖	30.14	-11.07	-3.87	0.01	0.02	0.02
PLIM	埔里	-5.26	-3.61	0.45	0.03	0.03	0.06
S01R	澎湖	30.68	-13.44	2.67	0	0	0.01
SINY	南投信義	1.6	-1.14	8.42	0.01	0.01	0.03
TIAN	苗栗泰安	-17.03	-43.6	-8.46	5.51	6.89	18.37
TNML	新竹工研院	30.42	-7.05	-1.11	0	0.01	0.01
VR01	和美所	27.98	-12.19	-4.98	0.01	0.01	0.02
VR02	二林所	26.94	-12.34	-77.65	0.01	0.01	0.02
VR03	田中所	29.14	-11.44	-1.17	0.01	0.01	0.02
WULI	武陵農場	25.9	0.19	11.64	0.01	0.01	0.03

表 2 本研究中部地區連續站與中研院 (SINICA) 與比值 單位: mm

點號	Vh_NLSC	Vh_SINICA	較差值	比值
CAOT	-3.7	-6.2	2.54	0.59
DOSH	-0.1	-1.8	1.69	0.06
FCU1	-4.7	-7.1	2.41	0.66
FLNM	-7.8	-9.7	1.86	0.81
KAFN	6.0	4	2.00	1.50
PLIM	-2.2	2.2	-4.42	-1.01
SINY	5.8	5.1	0.65	1.13
TNML	-3.8	-2.4	-1.38	1.58
VR01	-7.7	-7.1	-0.55	1.08
VR02	-80.3	-79.3	-1.02	1.01
VR03	-3.8	-6.8	2.96	0.56
WULI	9.0	3.9	5.07	2.30

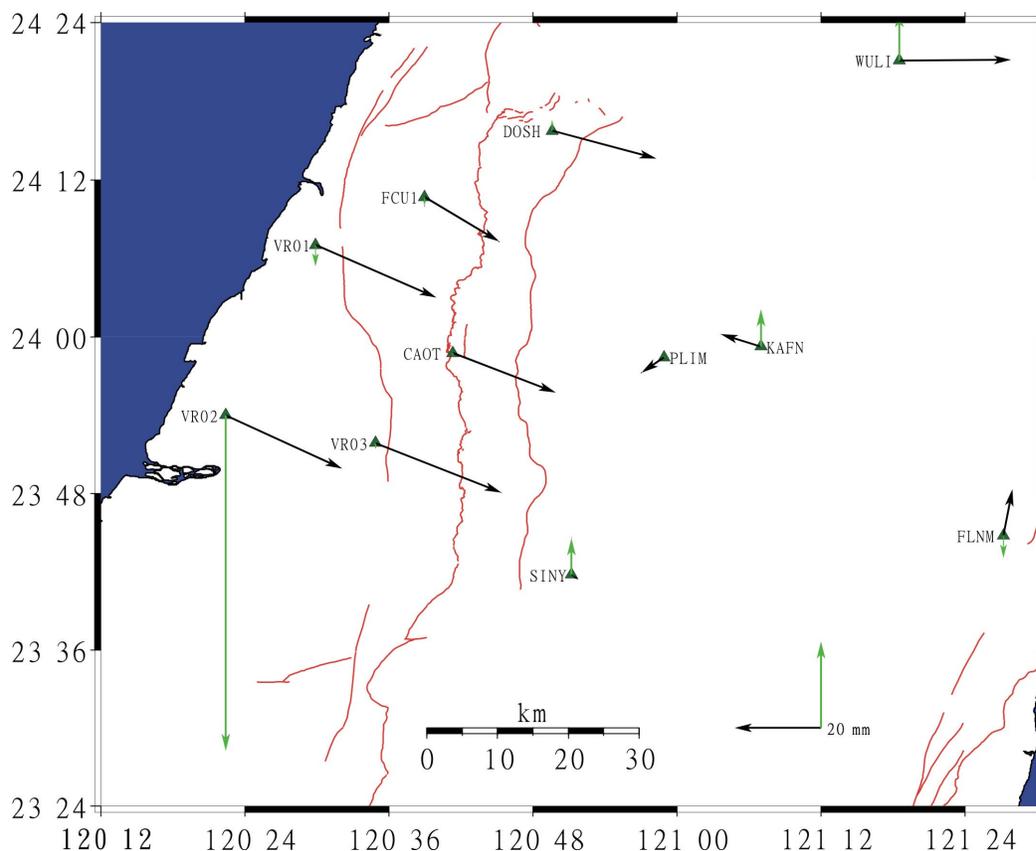


圖 2: 研究使用中部地區部分連續站速度場，其中黑色線代表水平速度場及方向，綠色線代表高程方向速度場，往上表抬升。

3.2 監測站成果分析

本研究所安排觀測之一等水準點均環繞二林所 (VR02)，起因乃中央研究院於 2003-2004 年之連續站資料發現 VR02 之下陷速率甚快，促使彰化縣政府測量隊在抽調現有儀器設備及人力，以期了解轄區內之土地變化情形。實際上，本次研究所監測之一等水準點，因為相關點位尚須配合內政部一等水準點測量檢測作業、平面視為三等衛星控制點及提供水準測量已知點引測作業，無法架設 GPS 連續固定站供使用及計算，僅能依據前述作業，定期辦理監測作業，希望能夠利用長時間觀測及數學線性迴歸的原理，能取得與連續站一致或達同等級的監測成果。另外在我們本次監測過程中，恰逢內政部國土測繪中心辦理台灣西南部地區一等水準點檢測作業進行中，在 95 年 12 月的審查會中認定「以甲南 (X101) 及嘉義 (X201) 可當作約制點 (不動點)」(內政部土地測量局，2006b)，所以本次研究之外業於 95 年 12 月起增加觀測 X101 (甲

南) 及 X201 (嘉義)，經過初步計算嘉義節點(X201)因點位附近有栽植闊葉木且被放置一廢棄大型花燈，肇致在高程方向精度不佳，經考量後不納入後續計算討論。

經過計算發現，僅使用 26 次外業觀測時間約 1 年期的監測點計算成果，其結果顯示與連續站約 880 天(約 2 年 5 個月)所求的成果在趨勢方面是正確的，但在量值上稍嫌不足，以 VR02 為例(如圖 3)，固定站相對於澎湖 S01R 的年下陷率約為 80.32mm/yr (S01R 的絕對下陷量為 2.67mm/yr)，而以 26 次定期外業監測為例，其下陷速率約 70.60mm/yr，約為 87.9%，但是所節省成本及後續點位應用更為靈活，詳如表 3，圖 4。

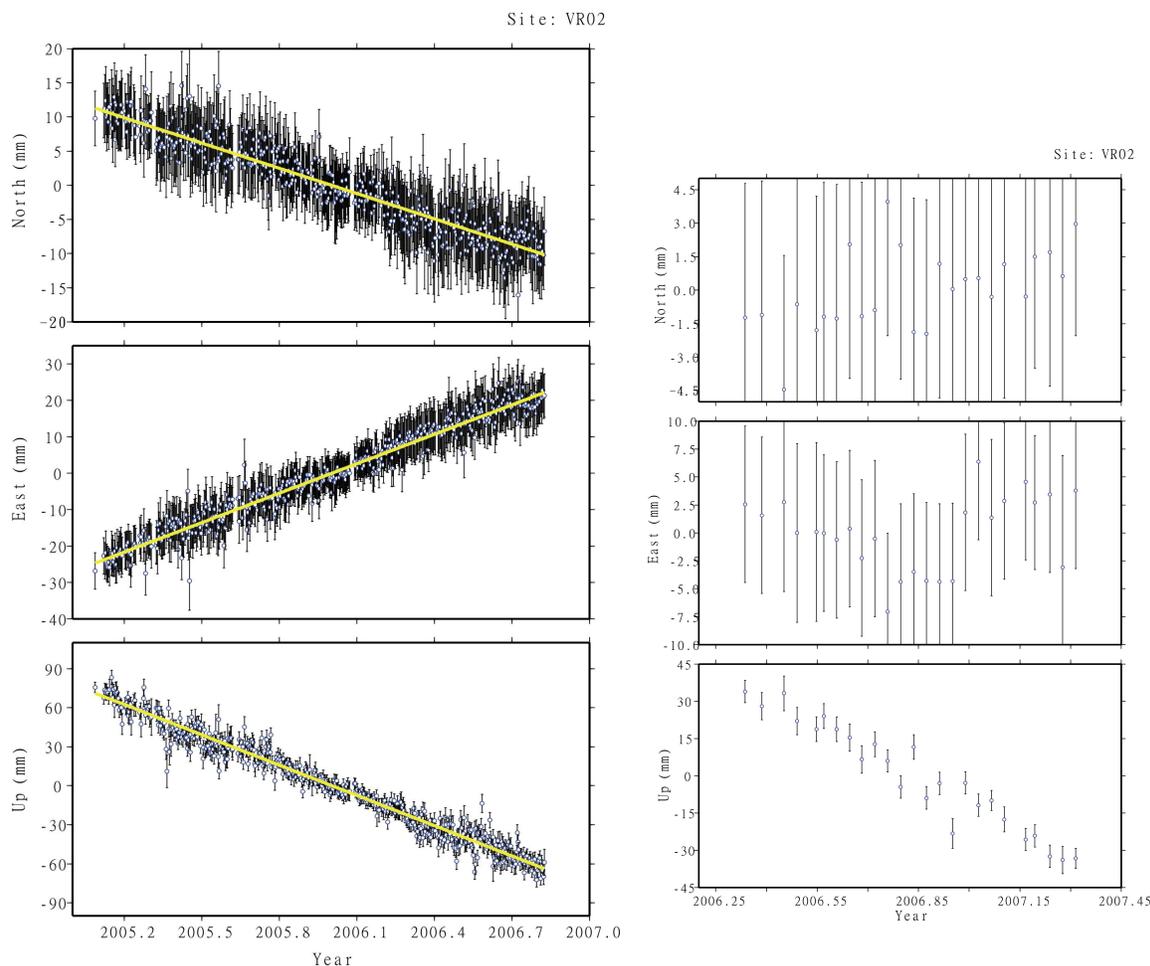


圖 3:二林所 (VR02) 2005-2007 年間之時間序列圖，左圖表示使用約 880 天之觀測解算所得之速度場 $V_n=-12.34\text{mm/yr}$ ， $V_e=26.94\text{mm/yr}$ $V_h=-77.65\text{mm/yr}$ 。右圖表示使用 26 次觀測量回歸所得，下陷量為 70mm/yr。

表 3 本研究使用中部地區 GPS 監測點成果 單位:mm

sta	Ve	Nn	Vh	σ_e	σ_n	σ_h
S01R	0	0	0	0	0	0
TNML	8.83	5.56	-2.39	2.06	1.19	1.72
KDNM	-97.98	19.74	-20.70	6.20	1.85	2.98
KMNM	10.09	0.59	-2.86	2.96	1.59	2.63
PKGM	6.03	10.66	-14.05	2.27	1.32	6.33
CK01	-8.54	-0.60	-1.91	2.30	1.19	6.86
C077	8.69	6.10	-56.11	3.42	1.41	9.26
CAOT	1.74	3.82	-7.26	2.66	1.32	4.26
CHYI	9.60	1.45	-25.22	2.25	1.06	5.68
DOSH	5.66	9.28	-1.16	2.88	1.39	3.77
G027	9.12	-1.55	-47.37	3.02	1.58	8.01
G031	7.89	2.18	-38.87	2.37	1.64	7.47
I017	7.15	10.48	-17.20	3.36	1.30	5.43
JHCI	-5.38	8.11	3.95	2.60	1.39	4.10
LSBA	7.50	8.39	-3.44	2.76	1.19	5.24
SINY	-19.06	16.71	10.19	3.14	1.48	5.95
TACH	4.44	4.73	-0.29	2.24	1.34	3.97
VR01	3.88	4.88	-5.43	5.75	3.58	7.70
VR02	2.82	3.64	-70.60	2.41	1.10	3.98
VR03	4.88	5.98	-5.71	2.64	1.01	4.40
X111	6.75	1.39	-30.87	2.58	1.36	10.83
X101	2.83	6.08	-85.28	9.82	6.72	32.31

※ 將澎湖白沙 (S01R) 視為不動點，作為參考

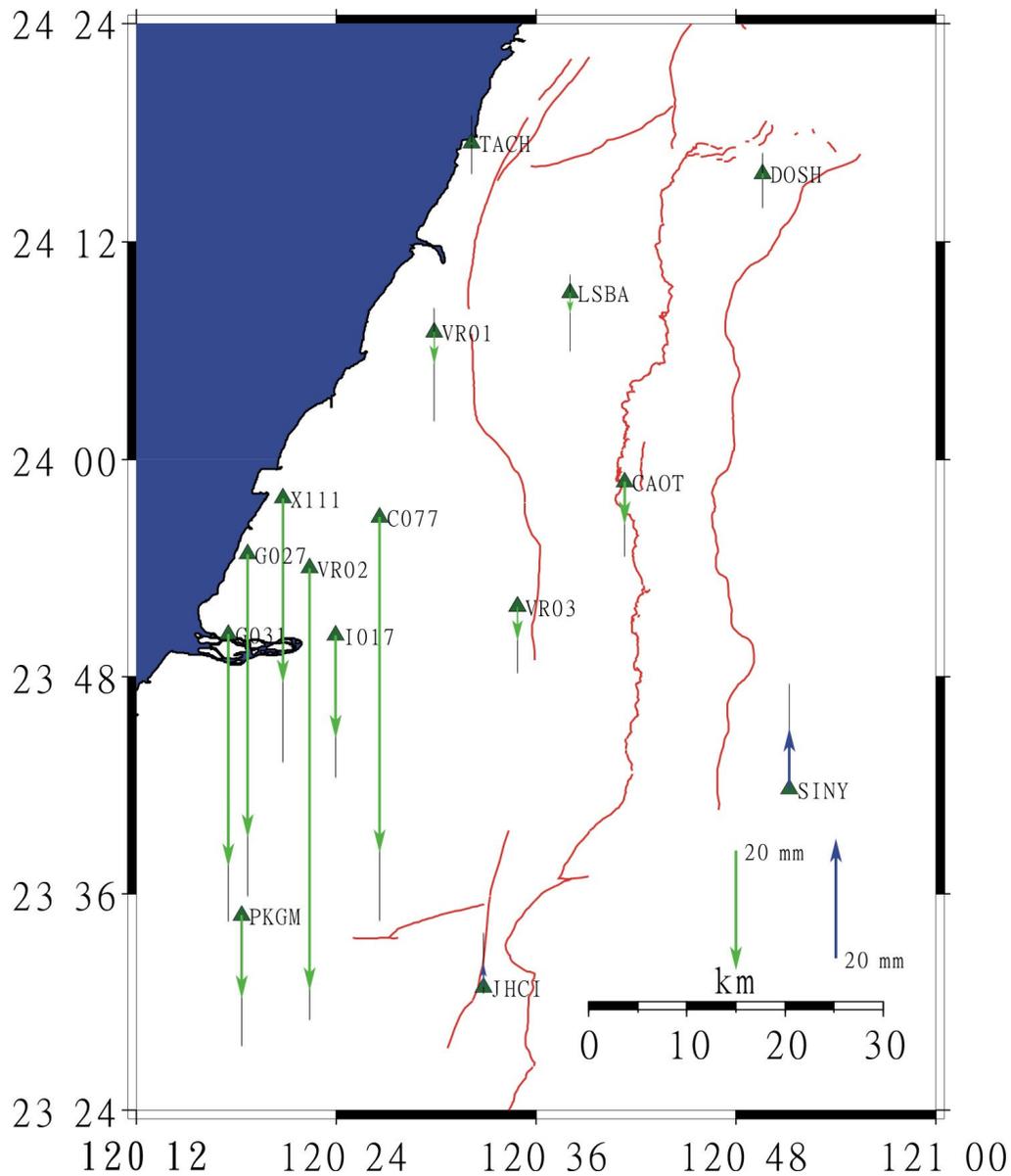


圖 4: 本研究監測點年下陷量，綠色表示下陷量，藍色表示上升。紅色代表斷層線，由左而右分別為彰化斷層（鄰近 VR01）、車籠埔斷層（鄰近 CATO）及雙冬斷層（鄰近 DOSH）

3.3 水準測量成果分析比較

在本次作業中，同步蒐集本中心使用一等精密水準方式辦理「台灣西南地區一等水準點檢測作業」所測得成果以作為比較，其作業過程簡述如下（詳細算式請參見「94年度一等水準點檢測報告」，[內政部土地測量局 2006b](#)）：

1. 使用 Zeiss Dini 11/12 電子式精密水準儀及鋼鋼尺。
2. 使用精度達 0.2 度（最小讀數 0.1 度）之溫度計，並量測水準尺 0.5m 及 2.5m 處之氣溫。
3. 依照一等水準測量要求方式辦理外業觀測，並定期檢校儀器。
4. 測段往返測之閉合差 $< 2.5\text{mm}\sqrt{K}$ （ K ：單一測段之公里數）。
5. 辦理包含視準軸誤差、折射誤差、地球曲率、水準尺溫度、水準尺刻畫及正高改正之各項系統誤差改正。
6. 測段往返閉合差分析，檢核均值期望值是否為零且趨於常態分布。
7. 環線閉合差分析，在完成系統誤差及人為誤差檢測分析後，環線閉合差應符合 $2.0\text{mm}\sqrt{F}$ （ F ：水準環線之總公里數）。
8. 水準網最小約制平差計算。
9. 水準點沉陷分析。

經過成果分析後，在本次作業中所得之後驗權單位中誤差為 $\pm 1.398\text{mm}\sqrt{K}$ ，顯示給予的先驗精度 $\pm 0.63\text{mm}\sqrt{K}$ 過於樂觀估計，經過調整後，可求得本次水準網每公里觀測精度約為 $\pm 0.88\text{mm}\sqrt{K}$ ，而點位高程標準偏差最大值位於水準點 X304，其值為 $\pm 9.06\text{mm}$ ；最小值位於水準點 T9798，其值為 $\pm 0.79\text{mm}$ 。水準網約制平差計算中，經高程變動量分析後，37 個已知節點中共有 17 個節點，其高程變動量不顯著作為約制平差之約制點位，總觀測量為 773，水準點數為 745，多餘觀測數為 45，後驗單位權中誤差為 $3.216\text{mm}\sqrt{K}$ 。

另外我們將本次觀測所使用到一等水準點點位之 GPS 觀測結果（2006.4—2007.5）與水準測量（2003—2006）結果做比較如表 4，X111、C077 及 G027 等三點的下陷速度差都在 10% 以內，惟依據內政部報告之水準成果約制在 X101（甲南）及 X201（嘉義）等節點，而 GPS 是源自 IGS 等站，可視為高程方向絕對變化，倘以此觀點，水準點 X101 在 GPS 觀測中為下陷 85.28mm/yr ，若將其他一等水準點依此值平移則將全數轉為抬升，此與現況不符，推論 X101 因觀測時間僅約 5 個月（2006.12—2007.4），所回歸時間仍不足完全表現其真實狀況，應再延長觀測時間週期（例如其他點位至少為 1 年）。表 4 中 G031（台西社區）一等水準與 GPS 監測下陷速度差約 14.5mm/yr 約 30%，及 I017（自強大強北）一等水準與 GPS 監測下陷速度差約 40mm/yr 約 337%，上開 2 點均位於彰化縣西南濱海地區，且鄰近濁水溪，是否受其他地下水

層或水系影響，需再蒐集其他資訊並配合地下水及地質等專業領域知識，再作進一步分析與討論。

表 4 本研究 GPS 與一等水準觀測地層下陷之差值 $V(\text{mm/yr})$

	一等水準	GPS 監測	比 Level/GPS 值
X111	-30.14	-30.87	0.98
C077	-54.40	-56.11	0.97
I017	-57.97	-17.20	3.37
G027	-51.71	-47.37	1.09
G031	-50.39	-38.87	1.30

四、結論與建議

本次研究主要目的在於使用長期觀測監測方式配合數學線性迴歸原理，希望能夠得以較經濟及便利的作業方法，得到與連續站方式類似成果及趨勢。另外利用 GPS 成果可以和水準觀測上作一比較，並能夠快速得知國土變化情形，以利國土保安之政策規劃與預防措施，所得結論與建議分析如下：

1. 彰化地區之連續站相對於澎湖之高程方向變化量約為 VR01(和美地政事務所) -7.65mm/yr (下陷)、VR02 (二林地政事務所) -80.32 mm/yr (下陷)、VR03 (田中地政事務所) -3.84mm/yr (下陷)。
2. 使用 GPS 長期監測作業方式 (一年 26 次) 與連續站每日 24 小時連續觀測方式 (約 2 年 5 個月) 所得成果相當且趨勢一致，如上述 VR01 及 VR03 差值約為 2mm、VR02 差值約為 10mm，可節省大量設置連續站所需成本，且不影響點位作有效率且多目標之運用，如提供 TWD97 三維成果及 TWVD2001 正高成果。
3. 成果顯示彰化沿海地區確屬嚴重地層下陷地區，除 VR02 每年下陷約 80mm 最為嚴重外，本次監測之其餘一等水準點每年下陷也約在 17-56mm 間。
4. 分析 GPS 監測與一等水準點檢測成果比較顯示，多數點位年下陷速度趨勢一致，下陷量略為相當。如 X111、C077 及 G027 等三點的下陷速度差值都在 5mm 以內，比值約在 10%以內，顯示 GPS 監測地層下陷應為可行之技術。
5. 由 X101、X201 高程精度不佳，可見以 GPS 測量方式辦理高程監測作業，在點位透空度及長時間監測周期均較高，後續辦理各項 GPS 測量作業時，對於點位透空度應確實遵行作業規範要求。
6. 國家測繪單位除對高程系統定期維護外，對於如本研究地區這樣快速變化地區應縮短更新週期，以適時提供正確空間資訊予施政決策支援應用。
7. 高速鐵路為國家重大交通建設，VR03 (田中地政事務所) 位於台灣高速鐵路

彰化站附近，每年高程變化量約 1-2mm 雖不致立即影響高速鐵路營運，但應可納入長期監控，以確保臺灣高鐵安全營運及週遭民眾生命財產安全。

五、誌謝

本文感謝中央研究院地球科學研究所、彰化縣政府及內政部國土測繪中心提供 GPS 連續站資料及辦理外業觀測作業，以利資料求解分析，另中興測量公司提供一等水準部分觀測結果。

參考文獻

- 內政部地政司衛星中心網頁, <http://www.gps.moi.gov.tw/>。
- 內政部土地測量局, 2006a, eGPS 衛星基準站即時動態定位系統 VBS-RTK 定位測試成果報告, 共 135 頁。
- 內政部土地測量局, 2006b, 94 年度一等水準點檢測報告, 中興測量公司。
- 美聯社, 2007, 曼谷, 自由時報 96 年 10 月 22 日 A6 版轉載。
- 李陶、劉經南、張詩玉、周春霞、夏耶, 2007, 合成孔徑雷達干涉測量監測天津地區地面沉降對比研究, 第五屆海峽兩岸測繪發展研討會, 國立交通大學, 台灣新竹, 光碟 C09, 18 pages。
- 吳善薇, 2004, 應用雷達干涉法在彰化縣員林地地區地層下陷研究, 碩士論文, 國立中央大學, 共 78 頁。
- 陳鶴欽、曾耀賢、劉正倫, 2005, 台灣中部地區基本控制點變位監測之研究, 內政部土地測量局, 共 80 頁。
- 經濟部水利署, 2004, 台灣地區地層下陷之監測調查分析 (4/4), 工業技術研究院, 共 428 頁。
- 經濟部水利署, 2007, 96 年度地層下陷水準測量檢測及其相關分析期中報告。
- 趙超英、丁曉利、張勤、李志傳、陳永奇、路中, 2007, 採用 InSAR 技術研究西安地區地面沉降和地裂縫, 第五屆海峽兩岸測繪發展研討會, 國立交通大學, 台灣新竹, 光碟 H03, 8 pages。
- 蔡旻穎、景國恩、陳鶴欽、饒瑞鈞, 2007, 台灣 GPS 連續觀測站坐標時間序列分析方法研究, 地籍測量, 第二十六卷, 第 4 期, p1-24。
- D.L. Galloway, D.R. Jones, S.E. Ingebritsen, December 2000, Land Subsidence in the United States, Ground-Water Resources for the Future, USGS Fact Sheet-165-00。
- J. Saastamoinen, 1972, Contribution to the theory of atmospheric refraction, Journal of Geodesy, Volume 46, Number 3, pp279-298, DOI: 10.1007/BF02521844。
- U. Hugentobler, S. Schaer, and P. Fridez, (Eds.), 2001, Bernese GPS Software Version 4.2, Astronomical Institute, University of Berne, 515 pp.