

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※ 整合 GPS、精密水準及三角三邊測量 ※

※ 於大型儲槽沈陷變形監測之研究 ※

※ A study on monitoring subsidences and deformations of the large storage tank ※

※ using GPS , Triangulation , Trilateration and Precise leveling ※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC90-2211-E-009-048-

執行期間： 90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

計畫主持人： 陳春盛 國立交通大學土木工程學系

共同主持人：

計畫參與人員： 林思源 國立交通大學土木工程學系
 曾子青 國立交通大學土木工程學系
 蔡豐吉 國立交通大學土木工程學系

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中 華 民 國 91 年 7 月 31 日

一、中文摘要

大型儲油槽因地層變位或地震所造成之破壞常導致重大災害，為精確掌握地層變位及儲油槽變形之情形，建立安全警示系統，定期進行大型儲油槽之地層變位及變形監測實有其必要性。本計畫將整合高精度 GPS 測量方法、精密水準測量及三角三邊測量等先進測量技術，監測儲油槽變形及變位結果，並經由統計測試方法，瞭解儲油槽油量及變形間之關聯，建立油槽變形與儲油量間之數學模式，提供相關單位作為儲油槽安全評估，並防止儲油槽因變形破壞而造成意外之參考。

關鍵詞：全球定位系統、油槽變形模式

Abstract

Because of the deformations of the earth stratum and the influence of the earthquake, the large storage tank may be destroyed. Consequently, the damage is often occurrence. To establish a safety and warning system with regular monitoring subsidence and deformation data of the storage tank is necessary.

In this project, the high precision GPS surveying, precise leveling, triangulation and trilateration are integrated to monitor the deformations of the storage tank. Statistical test is applied to obtain the mathematical model between the deformations of the tank and the quantity of the oil stored for reference.

Keywords : GPS

二、緣由與目的

台灣地處環太平洋地震帶，且地質條件不良，間或超抽地下水，常導致地層產生大小不一之變動，若變動狀況發生於人口聚集的地方，則易危及人民生命財產安全，若能事前採取適當之監測，精確掌握其變化情形，當可從容採取各項應變措施，降低災害風險，因此地層變動之監測

為一刻不容緩的事，尤其對於重要之結構物（如大型儲油槽、水庫等）更應加強執行，確保安全。儲油槽為石油公司儲存油、氣之主要設施，大型儲油槽因地層變位及地震所造成之災害易導致重大公安事件，如能定期進行監測，精確掌握地層變位及儲油槽變形之情形，並建立儲油槽之變形與儲油量間之數學模式，提供管理單位防災及應變參考，必能將公安事故減至最低。

八十八年九月二十一日大地震前後，適逢中油公司位於大園鄉沙崙編號 S611 之大型儲油槽進行定期維修進水測試階段，油槽沉陷經監測結果，發現地震前後確實產生沉陷不均現象，並且槽壁外凸現象明顯可見，槽壁外之鐵箍亦有斷裂情形，唯當時研究計畫並未對儲油槽本體作變形監測，無法了解地震對儲油槽本體變形之影響，殊為可惜。為避免儲油槽傾斜、變形、滲漏或斷裂導致引發公安事件，對儲油槽利用儀器加以監測並作安全評估，實有其必要性。

近年來全球定位系統 (Global Positioning System) 定位技術發展快速，且定位精度不斷提昇，已實際應用在各種不同的領域中，如高精度之變形監測、板塊運動、國家級三角點之測設等；鑑於傳統監測方法所需觀測時間長、人力多、經費高、不易通視等，往往造成監測上之諸多困難，若能整合高精度 GPS 量測方法、精密水準測量及三角三邊測量等先進測量技術於監測作業上，截長補短，當可節省時間及人力需求、提高觀測精度，並達到定期監控的目的。

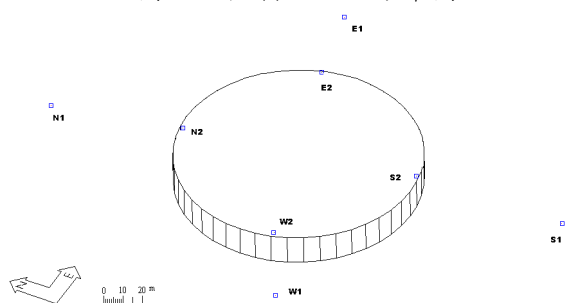
應用 GPS 監測大型結構物如高塔 (Loves et al. 1995)、橋樑 (Watson C. 1998) 等建築物、坡地滑動監測 (Corbeau et al. 2000, Ding et al. 2000)、地殼變動監測 (Larsen et al. 1993, Bock et al. 1997, Dixon et al. 1997) 以及 GPS 監測預警系統 (Kalber et al. 2000) 等在國外已有相關之研究。而國內之相關研究，除了本計畫主持人陳春盛教授主持國科會整合計畫“台灣地區高程系統及其變遷之研究總計畫”中之子計畫五，尚有中山大學薛憲文教授之沿海地區地層下陷預警系統之先期研

究、中央研究院地球科學研究所余水倍先生於近年來長期以 GPS 研究台灣現今之地殼運動及劉啟清先生以 GPS 監測海岸地區地層下陷之研究、中央大學吳究教授”精密 GPS 衛星相對定位於地陷量測之研究”、陸軍官校徐博賢副教授之“GPS 從事台灣地區地殼形變監控之研究”等。本計畫整合高精度 GPS 測量方法、精密水準測量及三角三邊測量等測量技術，監測儲油槽變形及變位情形，並經由統計測試方法，建立油槽變形與儲油量間之數學模式，提供儲油槽管理單位作為安全評估之用，同時將此一監測模式與經驗提供產業界參考，藉以評估安全狀況，並於事前採取必要之各項應變措施，防止危險與災害之發生，進而提高工安品質，降低生產成本。

三、結果與討論

為配合油槽維修作業及油槽油量進出之時程，本研究中監測作業區位於桃園縣大園鄉中油沙崙儲油站，選定編號 S611 之大型儲油槽為實驗對象。油槽直徑為 109.920 公尺，高度約為 15 公尺，容量為 125,544 公秉。選取實驗區之儲油槽東南西北方向，距離儲油槽約 50 公尺之透空度良好處，佈設四個控制點 E1、S1、W1 以及 N1 作為固定參考站，見圖一。

圖一：控制點點位分布圖



為了解儲油量與儲油槽高程變化之間的關係，於實驗區中油槽頂部東南西北四個方向分別設置強制定心基座。沿油槽壁與基座連接處佈設一共 39 個監測點，油槽周圍水準監測點之間距約為 8.85 公尺，目的在獲取油槽變形與扭曲的資訊，並了解儲油量對儲油槽沉陷量之影響。對上述作業區，本研究進行三次實驗，每次間隔兩個月。為了計算儲油槽之沉陷量及其槽壁

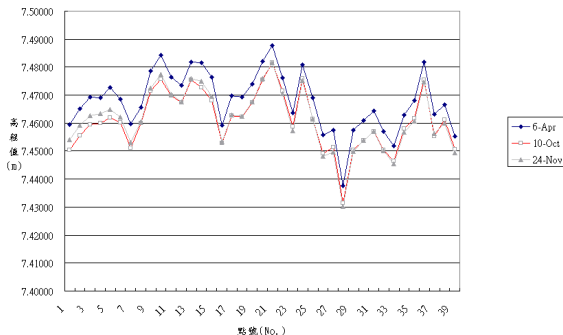
與基座相鄰邊緣之變形，吾人所採用美國石油協會 (API) 規範中對於油槽監測明確規定油槽壁邊緣實施測量之作業方式，監測點位間距不得超過 32 英尺。實驗儀器部分包括兩台瑞士 Leica SR9500 雙頻接收儀、兩台 Ashtech Z-Surveyor 雙頻接收儀及一台 Ashtech Z-XII 雙頻接收儀共計五台，以及其他附屬設備等等；精密水準測量觀測部分，主要作業設備以瑞士 Leica NA3003 型電子水準儀搭配兩公尺長鈷鋼水準尺 GKNL4 和尺墊；而三角三邊測量部分以 N1 與 S1 點的大地座標反算方位角，並固定 N1 推算各導線點 W1、S1、E1 三維座標。

本實驗中 GPS 靜態基線測量部分，控制點與監測點之觀測區分為三個階段，分別選擇這些時段的原因主要是考量儲槽內儲油量的差異變化，分別有全滿（油高為 13.162 公尺）、半滿（油高為 7.246 公尺），以及 1/4 滿槽（油高為 3.132 公尺）之不同。衛星觀測資料以每日規劃區分為上午與下午兩個時段。進行聯測點位包括有油槽附近之四個控制點 E1、S1、W1、N1，以及油槽頂部之監測點 E2、S2、W2、N2，作業時觀測衛星之最低仰角設定為 15° 、取樣間隔為 15 秒、最少衛星精密水準測量部分，則區分為油槽近空（油高為 0 公尺）、油槽半滿（油高為 8.609 公尺）及全滿（油高為 13.205 公尺）三次。實驗之高程基準點以位於作業區中油槽北方約 50 公尺處 S1 為準，其他點位高程皆相對於此點。衛星資料求解部分採用研究軟體 Bernese 4.2 版定位解算研究軟體，由瑞士柏恩大學天文研究所 (AIUB) 所研發。目前該軟體普遍應用於板塊運動、極運動、地殼變形、大地測量等方面之計算，其精度及穩定度更超過一般商用軟體。

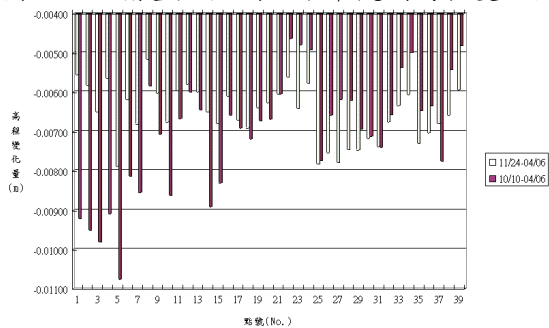
精密水準測量之成果的主要目的在於，檢核經過 Bernese 軟體解算後之 GPS 測量觀測資料所建立之變形模式，並進一步討論該模式是否合乎需求。精密水準資料觀測日期為九十年四月六日、十月十日與十一月二十四日，共計三次，而當日儲油量分別為 0 m、13.205 m 與 8.609 m，由地面控制點 S1 引測至各監測點。由施測結果得知，前後三次水準測線之往返閉合

差各為 $0.08 \text{ mm}\sqrt{L}$ 、 $0.16 \text{ mm}\sqrt{L}$ 以及 $0.07 \text{ mm}\sqrt{L}$ ，顯示以滿足小於 $2 \text{ mm}\sqrt{L}$ 之一等精度要求，故當可以作為 GPS 高程成果精度檢核之標準。為了求取數據之一致性，吾人將所有的 GPS 靜態測量資料都切為 3 小時進行計算；並且為了方便將來的說明起見，吾人將這三次外業重新進行編號，茲分為『時段 A』、『時段 B』及『時段 C』

圖二：基座監測點各時段高程值

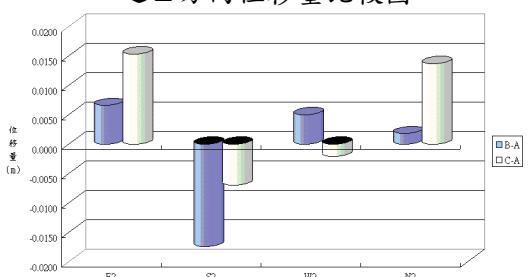


圖三：油槽基座監測點水準觀測高程變化圖



三組。時段 A、B 與 C 皆以時段 A（儲油高近全滿時）上午時段所解算出來之 N1 站坐標為基準。利用 Bernese 計算軟體處理資料以比較不同時段的觀測資料時，其成果之差異性為何。時段 A 之觀測時段對應之儲油高為近全滿狀態（13.162 m）；而時段 B 與 C 之對應儲油高狀態則分別為半滿（7.246 m）與 1/4 滿（3.132 m）。根據

圖四：時段 B、C 相對於 A 中各監測點點位之 Z 方向位移量比較圖



解算成果得知（見圖四），以時段 B 與時段 A 作比較時，四個監測點在 Z 方向上的

位移量約在 1.8 到 0.3 cm；將時段 C 與時段 A 作比較時，各點在 Z 方向上的位移量約在 1.4 到 0.2 cm 之間。

點位整體測試的目的，就是要對於網形在不同時段之差異量進行測試，以瞭解此差異量是否已可稱為變形沈陷，或只是觀測量的偶然誤差所致。此時必須先找出不同時段點位的變動量 $u_0 = \hat{x}_1 - \hat{x}_2$ ；而為了檢驗出兩次觀測時間是否有點位變動發生，建立零假說 H_0

$$H_0 : x_2 - x_1 = 0$$

得到 u_0 與 $\hat{\sigma}_{1,2}^2$ 之後，因此可組成測試值 T_H

$$T_H = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - u_0}{\sqrt{\frac{S_1^2(n_1-1) + S_2^2(n_2-1)}{n_1 + n_2 - 2}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = \frac{\hat{d}}{\hat{\sigma}_{1,2}^2}$$

上式可以說是利用假說測試導入作為平差條件，而得到未知數的變異量，來決定 T_H 值。接著選擇一自由度 $(n_1 + n_2 - 2)$ 之 t 分佈（顯著水平 r_0 選擇 0.05）

$$t = t_{r/2}(n_1 + n_2 - 2)$$

若 $T_H = \frac{\hat{d}}{\hat{\sigma}_{1,2}^2} > t_{r/2}(n_1 + n_2 - 2)$ 則我們可以說變

動量在測試水平 $(1 - r_0)\%$ 下呈現顯著狀態，並非是由觀測量的偶然誤差所引起。若是滿足此零假說。

吾人從上述整體觀測之點位變化量大小比較與期望值之顯著性測試，來判定各監測點位之變動與否，並從中解得油槽變形測量之非偶然性誤差估值，進而建立該儲槽之變形模式。就時段 B 相對於時段 A 之變形模式而言，依前述微量應變理論所推算出變形參數，對變形參數函數矩陣作位移量之反算，可以發現兩者較差在 0.1 到 3.09 cm 之間；就時段 C 相對於時段 A 之變形模式而言，兩者較差則在 0.4 到 5.65 cm 之間，這樣的結果其實並不令人滿意，可見模式本身存在相當的改進空間。

由上述整合出之變形模式，以時段 B 對 A 所組成變形模式反算觀測量，差異在 0.001 到 0.03 m 不等；以時段 C 對 A 所組成變形模式反算觀測量，差異在 0.001 到 0.01 m 不等；以時段 C 對 B 所組成變形模式反算觀測量，差異在 0.002 到 0.05 m 不等。因此以時段 C 對 A 所組成變形模式表

現較佳，較能反映點位變異量，故得到變形模式如下：

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 & -y_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 & x_1 & -x_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3.5990988924526 \\ 4.78073941421509 \\ -0.00000032880412 \\ -0.00000067273687 \\ 0.00000050741102 \\ -0.00000002147723 \end{bmatrix}$$

另外以此變形模式反算時段 C 對 B 的位移量，以檢驗是否有較接近觀測量之成果，其成果如表一。

表一：以回歸所推算之模式反算位移量之較差

| | 原位移量(m) | 推算位移量(m) | 較差(m) |
|------------|---------|----------|----------|
| dXe | -0.0100 | -0.02527 | -0.01527 |
| dYe | 0.0277 | 0.01208 | -0.01561 |
| dXs | -0.0041 | -0.00759 | -0.00349 |
| dYs | 0.0093 | -0.00880 | -0.01810 |
| dXw | 0.0032 | -0.01817 | -0.02137 |
| dYw | -0.0109 | 0.00874 | 0.01964 |
| dXn | -0.0316 | -0.03629 | -0.00469 |
| dYn | 0.0337 | 0.03036 | -0.00333 |

四、計畫成果自評

1. 吾人利用不同時段不同儲油量狀態下進行 GPS 監測與精密水準聯測，由兩者數據結果顯示，儲油槽除了會因其本身載重程度呈現整體沈陷之情形。當油槽達到半滿載重(7.246 m)時，其與滿載重狀態(13.162 m)沈陷量比對差異量約在 5 mm 至 7 mm 之間，達到 1/4 滿載重則有 4 mm 至 10 mm 之差異量。平面位置數據並不容易表示油槽是否偏移，因此無法做出合理解釋。本研究成果顯示，精密水準高程的測量精度達 1 cm 以內；以儲油量區別不同重複觀測的 GPS 網與精密水準網比較，內部精度高程達 4 mm、平面精度達 3 mm、基線精度達 1 mm。水準測量的沈陷量與 GPS 成果差異量在 1 mm 內，顯示對於平差結果之影響程度。由實驗數據顯示，油槽南邊似乎有呈現較大沉陷量之傾向，非但不能指出油槽因儲油量減少而整體高程上升，反而有偏向沉陷之可能，至於是否造成工安危險之可能，則必須長期觀測加以確認狀態與趨勢是否明顯。
2. 由兩者實驗結果來看，油槽本體因自身載重而引起了一緩度傾斜之狀態，其點位差異量隨著載重增加而增加。此狀態

的發生可能是因為本身結構因素所導致油槽在面對載重變化時有不正常的變異，實驗中監測點 X、Y、Z 方向差異量同時呈現餘弦函數，是否符合儲油槽沉陷分析的理論，必須加以確認，因為變異量之差值與變異量畢竟是不同，而餘弦函數差值是否等於餘弦函數中間有角度與平移量之取捨問題。因此探究真正的原因還有待往後的監測作業或更精密之儀器方能做出較合理且正確的結論。研發高精度 GPS 應用於變形測量之整體技術，並定出其應用於大型結構物監測之作業方式，有助於重要結構物災害之防範。

3. 建立儲油槽變形與儲油量間之初步數學模式，有助於對儲油槽變形之預測及監控，對於學術發展及產業防災均有助益。
4. 建立一套整合高精度 GPS 測量、精密水準測量、三角三邊測量對大型儲油槽之監測模式，期能作為未來重大工程或油槽、電廠等重要結構物變形監測作業之應用。

五、參考文獻

- 曾清涼、余致義、林宏麟、尤瑞哲，1988，“以大地測量偵測水平變形通用模式的研究”，國立成功大學航空測量研究所/測量工程學系，行政院國家科學委員會 76 年度專題研究計畫。
- 林宏麟，1986，“用重複測量進行變形之應變分析”，國立成功大學航測所碩士論文。
- API, 1997, Appendix B - Evaluation of tank bottom settlement, API Standard 653 Interpretation - Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction.
- Chrzanowski, A., Chen Y. Q., Secord, J. M., 1983, On the Strain Analysis of Tectonic Movements Using Fault Crossing Micro-Geodetic Surveys; Tectonophics 97, pp. 297-315.
- Brunner, F. K., 1979. On the analysis of geodetic networks for the deformation of the incremental strain values near Palmdale, California, Aust. J. Geod. Photo. Sur., No.33, pp.57-74.