

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

台灣板塊邊界觀測研究 (II)--台灣西部三分量井下應變儀 觀測研究(II) 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 96-2116-M-041-004-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所

計畫主持人：李民

計畫參與人員：此計畫無其他參與人員：

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年10月30日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

台灣板塊邊界觀測研究(II)一

台灣西部三分量井下應變儀觀測研究(II)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2116-M-041-004-

執行期間：96年08月01日至97年07月31日

計畫主持人：李 民

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所

中華民國 97 年 10 月 30 日

摘要

由於井下型地殼應變儀之直徑約僅十公分，可能對地下水文之變化會比較敏感；文獻也顯示觀測冰島火山活動的井下型應變儀，有受地下水文變化之干擾。因此可藉由應變儀與地下水位聯合觀測，以釐清含水層水文變化引發地殼應變之可能性。經由清晰的地潮訊號顯示台灣西部麓山帶安裝的十二具井下地殼應變儀確實可量測微小至 10^{-9} 的地殼應變量，理論上應變儀應是理想的地震前兆觀測儀器，但是儀器的長期穩定性則是另一項關鍵因素。在實驗台上儀器的長期穩定性證實每年小於 10^{-9} ；在地殼活動性相對低且雨量不高的澳洲大陸，井下實測值則為每年約 10^{-7} 。這個數值不致影響觀測板塊邊界地殼累積應變與時間之關係；應可充分觀察累積的地殼應變與地震觸發之時空相關性。然而台灣每年夏、秋兩季是暴雨及颱風季節，自 2004 年初至 2008 年中共有 29 個颱風侵襲或掠過台灣。颱風影響期間，地殼應變儀觀測資料明顯受氣象因素影響，但是因為雨量最大時與氣壓最低時往往同時發生，故不易釐清何者才是主要的干擾因素。由泰興(TAIS)與中興(TSUN)兩觀測站共站的地下水位資料顯示，地殼應變明顯受地下水位變動之影響，而地下水又受地表水(包括降雨)之影響，這些氣象波動皆非線性的。本研究正積極釐清地殼應變觀測資料中之地潮、氣壓、雨量等影響成分，俾便排除這些非地殼變動因素成分，以獲得台灣西部麓山帶單純與板塊運動有關之地殼應變。

關鍵詞：井下型地殼應變儀、地潮、地震前兆、長期穩定性、氣象因素影響

Abstract

GTSM strainmeters have been deployed at 12 sites in western Taiwan since the end of 2003. The earth tidal signals useful for in-situ calibration of the instrument response are clearly seen in all channels at each site. This fulfills the first requirement concerning instrument performance, i.e., with high sensitivity to the crustal strain, when strainmeter was selected as one of the major components in the integrated project. The long-term stability of the instrument is the second requirement concerned. In the laboratory, the GTSM strainmeter has long-term stability of better than one nanostrain per year if the distressing is properly performed. In the field, one example of installation of a standard instrument in a relatively arid and stable tectonic region in Australia has demonstrated that a long-term stability of much better than 100 nanostrain per year, so that observation of long-term strain rates in tectonic regions larger than this will be robust. However, there is evident that dilatometers in Iceland have been strongly influenced by aquifer pore pressure change. Another meteorological effect to be considered is the influence of atmospheric pressure on measured strain. Effects from change of either pore pressure or atmospheric pressure must be understood if the tectonic strain is to be understood. There have been 29 recorded typhoons attacked or swept this island since the first GTSM strainmeter was deployed in the end of 2003. Typhoons were usually accompanied by heavy rainfall and significant atmospheric depression which had left their effects on the continuously recorded strain data at each site. Groundwater level change initiated by rainfall seems to be the major cause that is responsible for the observed strain anomalies. This crustal strain measurement project has deployed a piezometer at tens of meters above the co-site strainmeter at nine sites, this will be able to use the pore pressure measurements to define repeatable strain responses to pore pressure change that can be used to correct the strain data.

Keywords: borehole type strainmeter, earth tide, precursor, long term stability, meteorological effect

一、前言

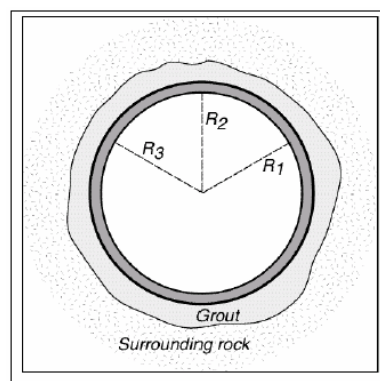
地殼應變儀有極精密之解析能力(可感測 10^{-9} ~ 10^{-12} 之微細應變)，頻寬涵蓋 DC~200Hz，恰可填補地震儀與 CGPS 觀測之死角。若能將其埋入地下深處，既可有效降低干擾雜訊，又可緊密接觸地下厚實且未經風化之堅硬岩盤，確實為進行地震前兆觀測之理想工具。井下型應變儀可分為「體應變儀(volumetric strainmeter 或 dilatometer)」及「三分量應變儀(three components 或 tensor strainmeter)」。後者藉由互相間隔 120 度之三具感測元件，除了可感測相當於體應變之面應變(areal strain)外，尚可感測到地殼剪應變。再者因為剪應變具有方向性，將有助於判斷此應變異常較有可能是因哪一條斷層之活動所引起的。地震與地殼應變關係密不可分，地殼應變已知分布於板塊邊界及其附近，故 PBO-T 計畫之核心即是以慎密規劃的 GPS 觀測網搭配井下應變儀觀測網及原已佈建完整之地震網來觀測板塊邊界之變形。地質調查所自九十二年起至九十六年底於台灣西部麓山帶共完成十二處 GTSM 三分量井下應變儀觀測站設置。由儀器記錄之資料明顯可見地潮及膨脹性水泥熱應力訊號，表示應變儀皆已正常運作。應變儀一般於安裝成功開始運轉後需時三年才能達穩定狀態。第一年前半年觀測資料會明顯呈現指數衰減之水泥漿固熱應變訊號。此外，地層因鑽井擾動的應力狀態亦須要兩、三年才能恢復。

二、研究目的

- 1) 於台灣西部麓山帶連續觀測地殼應變，涵蓋從 100Hz 至週期為數月之變化，特別是針對地震前兆及安靜地震(quiet or slow earthquake)。
- 2) 利用面應變(areal strain)及兩個具方向性的剪應變可連續監測觀測站附近已知或尚未確定之地質構造的活動性。
- 3) 釐清應變場與氣壓與水文等氣象因素之關係；探討應變場及應變型態於時空上之分佈與變化。

三、研究方法

GTSM(Gladwin Tensor Strain Meter)經由垂直疊置的三個應變感測元件，感測軸 R_1 ， R_2 及 R_3 分別旋轉相隔 120 度(或 60 度)如圖一。



圖一：井下型應變儀三個感測元件以互相旋轉 120° 疊置

在地表或接近地表，垂直應力可視為零，故可用 plane stress 來描述水平面上發生的 strain。在直角座標系，令 u 為 x 方向上之位移， v 為 y 方向上之位移，則應變張量由 6 個元素減少為 3 個，即

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

依慣例，應變收縮 (contraction) 為負號，伸張 (extension) 為正號。

在一固體內以 x 方向反時針旋轉 θ 角度上之伸長量 (elongation), e ,

$$e(\theta) = \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta + 2\varepsilon_{xy} \cos \theta \sin \theta \quad \text{或}$$

$$e(\theta) = \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})\cos 2\theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

即吾人可以 ε_{xx} , ε_{yy} 及 ε_{xy} 線性組合成任意 θ 角度之伸張量。此即 GTSM 可利用平面上 θ 量得之任意三個互相獨立的伸張量，即可決定該點之應變張量。若應變張量已知，則與 x 軸交角為 θ (反時針) 之任意垂直面上之剪應變為

$$\gamma(\theta) = (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})\sin 2\theta + 2\varepsilon_{xy} \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

工程分析上習慣定義下列三量：

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$$

$$\gamma_1 = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\gamma_2 = 2\varepsilon_{xy}$$

式 (2) 可改寫成：

$$e(\theta) = \frac{1}{2}\varepsilon_a + \frac{1}{2}\gamma_1 \cos 2\theta + \frac{1}{2}\gamma_2 \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(5)$$

或以矩陣方式表示為：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_1 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_2 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_3 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

上式說明了應變儀內某一個特定方向之變形量可由 ε_a , γ_1 及 γ_2 線性組合而成。反之，吾人只要將上式逆推，即可由應變儀三個互成 60° 之感測軸應變量求得 ε_a , γ_1 及 γ_2 。

若要 u_1 , u_2 及 u_3 分別為應變儀三個感測器量得的位移量，則下式為完整的關係式，其中包括各項必須之修正量：

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{g_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{g_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{g_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_1 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_2 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_3 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$$

$$\dots\dots\dots(7a)$$

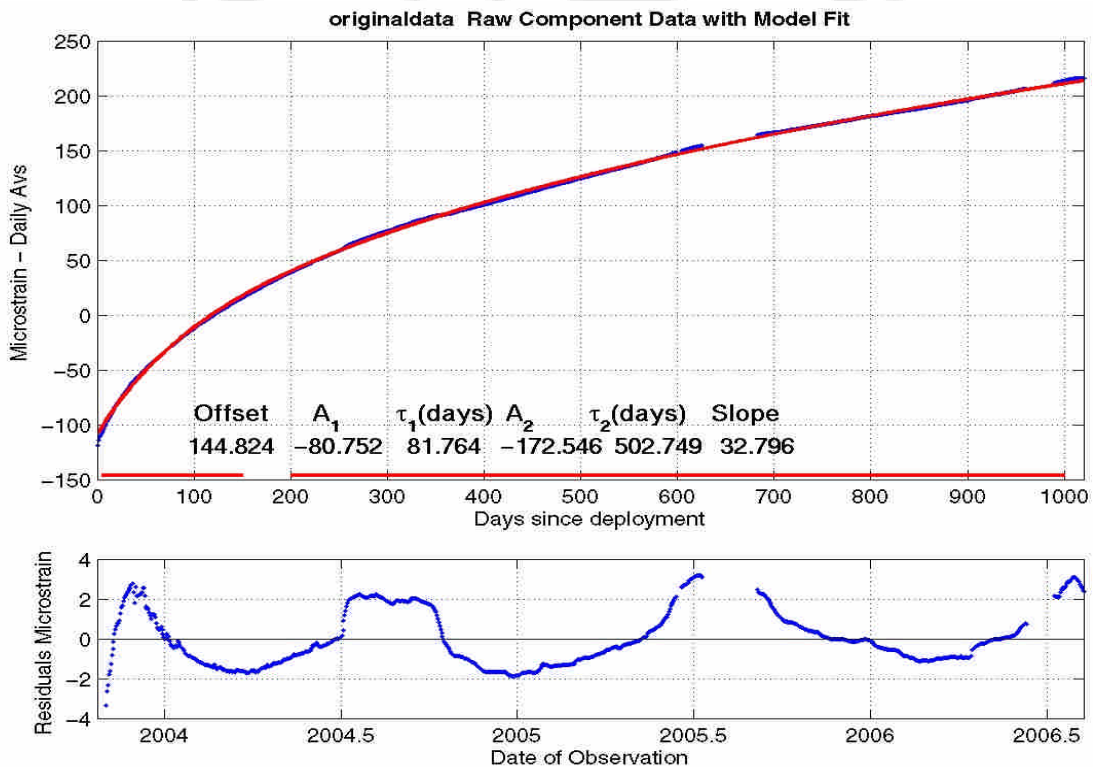
或表示為 $U = M \times G \times H \times T \times S \dots\dots\dots(7b)$

- 其中，U 為應變儀變形向量，
- M 為三個感應器之機械差異性矩陣，
- G 為三個感應器安置之方向性矩陣，
- H 為面應變與剪應變耦合因子矩陣，
- T 為地形與地質影響矩陣，
- S 為觀測井所在位置之應變狀態，正是吾人觀測之主要目標。

由於井下應變儀觀測會受地潮、氣壓及雨量等影響。若觀測站非深處內陸則又必須考慮海潮之影響。BAYTAP-G 是進行觀測資料分析的一種常用軟體，它可將觀測資料分解成地潮分量、氣壓分量、趨勢項及不規則雜訊。雨量因為屬非線性影響，必須單獨分析。GOTIC2 則是另一項分析軟體，它可處理海潮之影響，但必須搭配有觀測站地區之海底地形與陸上地形資料。目前 GTSM 應變儀資料處理與分析之完整程式必須於 SUN Solaris 平台下執行。此外，GTSM Technologies 公司又發展了一套用於 Wintel (Windows + Intel) 平台之套裝軟體 Winxqp，但功能尚未完備。

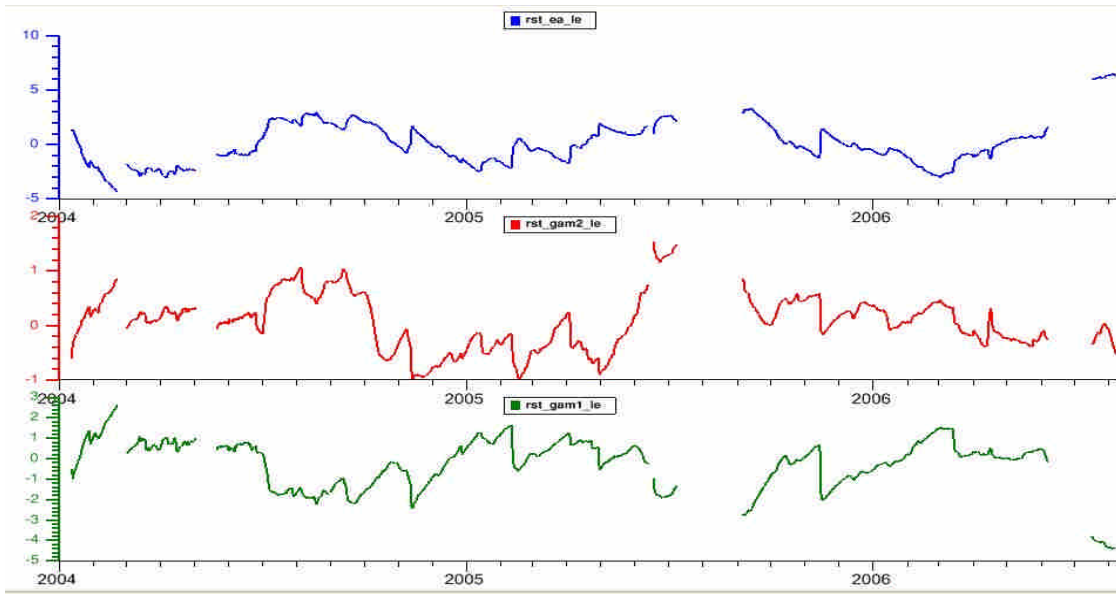
四、結論與討論

至九十六年底曾文水庫地區三站之連續觀測資料已進行編輯處理與分析，顯示每站四個應變感應器皆能依其擺置方位正確記錄應變橢圓之伸縮變形。大多數感應器觀測資料顯示影響趨勢有兩個指數函數及一個線性函數，少數則僅受一個指數函數及一個線性函數之影響；然而每年雨季開始(五月)至颱風季結束(十月)，地殼應變明顯受水文變化影響(圖二)。



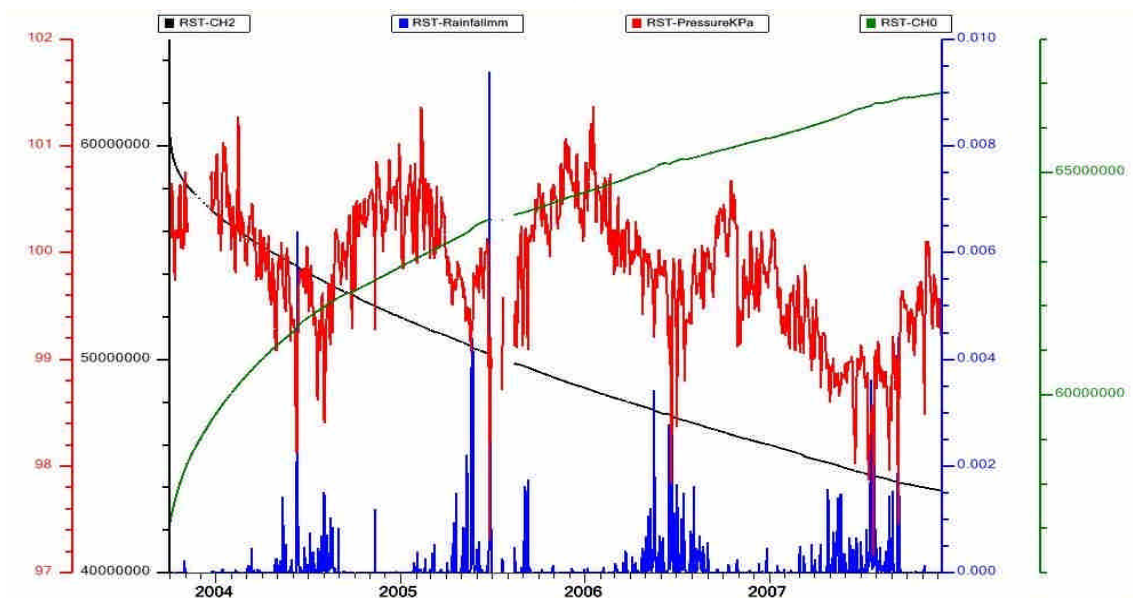
圖二：曾文水庫南站(RST)channel_1 應變(藍色)，紅色為模式。

將原始資料與長期趨勢預測模式相減即得殘餘值，並據此合成面應變與兩個剪應變(圖三)。然而在資料完全穩定之前，無論是趨勢預測或是應變張量計算皆可能出現相當誤差，必須謹慎比對。

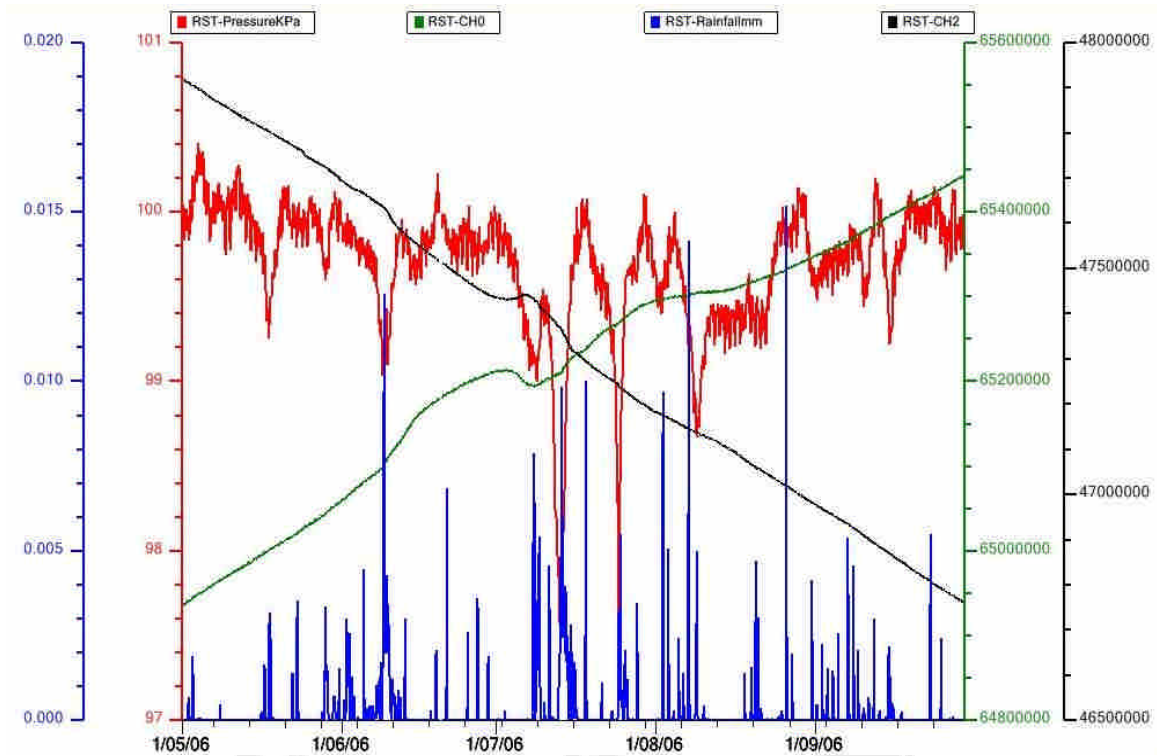


圖三：曾文水庫南站(RST)合成之面應變(上)與兩個剪應變(中&下)。

本研究顯示地殼應變儀短期訊號易受地下地質因素干擾，長期訊號則易受水文等氣象因素影響(圖四)，觀測品質之長期穩定性(long-term stability)仍有待去除此等干擾後才能評估。自2004年初至2007年底共有29個颱風侵襲或掠過台灣。颱風影響期間，地殼應變儀觀測資料特別明顯受氣象因素影響，但是因為雨量最大時與氣壓最低時往往同時發生，故不易釐清何者才是主要的干擾因素(圖五)。

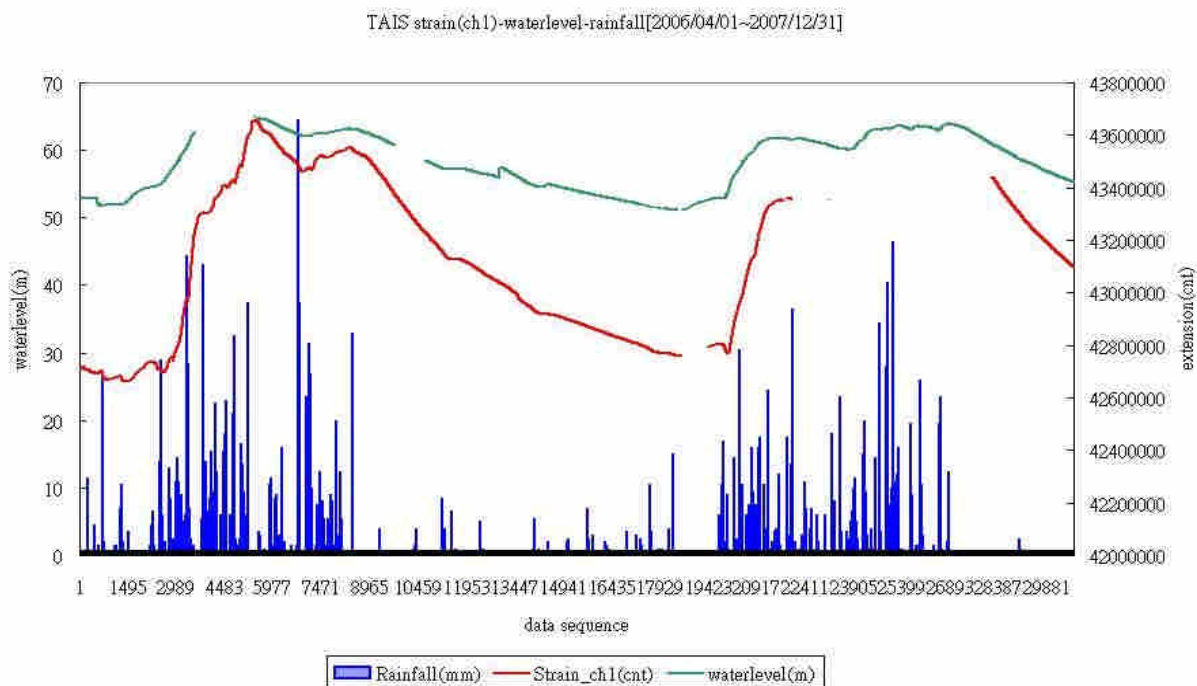


圖四：曾文水庫(南)連續四年應變觀測值受降雨(藍色)與氣壓(紅色)之影響。

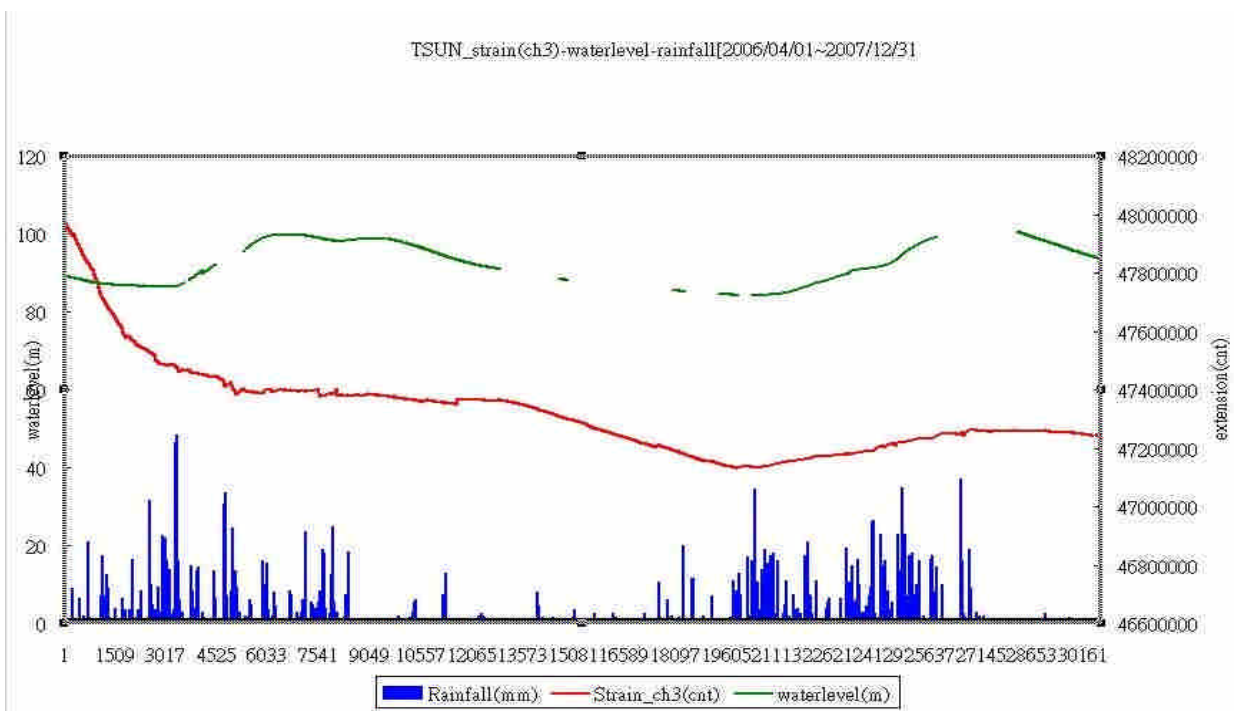


圖五：曾文南(RST)2006-05-01~09-30 颱風季節地殼應變受氣壓與降雨之影響。

由泰興(TAIS)與中興(TSUN)兩觀測站共站的地下水位資料顯示，地殼應變明顯受地下水位變動之影響，而地下水又受降雨之影響(圖六&圖七)，這些氣象波動皆非線性的。本研究正積極釐清地殼應變觀測資料中之地潮、氣壓、雨量等影響成分，俾便排除這些非地殼變動因素成分，以獲得台灣西部麓山帶單純與板塊運動有關之地殼應變。



圖六：泰興站(TAIS)channel-1 應變(紅色)與地下水位(綠色)及降雨(深藍)同步變化。



圖七：除了安裝初期水泥固化之熱效應外，中興站(TSUN)channel-3 應變(紅色)與地下水位(綠色)及降雨(深藍)同步變化。

參考文獻

1. 李民、高銘健、陳致言、王健志、Gladwin M. (2004)：「三分量井下應變儀於斷層活動性監測之應用」，2004 海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會論文集。
2. Gladwin M.T. (1977)：Simultaneous Monitoring of Stress and Strain in Massive Rock. Pageoph, V115, 267-274.
3. Gladwin, M. T. and Hart, R. (1985)：Design Parameters for Borehole Strain Instrumentation. Pageoph.,123, 59-88.
4. Gladwin, M. T., (1984)：High Precision multicomponent borehole deformation monitoring. Rev.Sci.Instrum., 55 , 2011-2016.
5. Gladwin,M. T., Gwyther,R.L., & Hart,R.H.G., (2000)：Addition of Strain to Targeted GPS Clusters-New Issues for Large Scale Borehole Strainmeter Arrays, Proc. 2nd Plate Boundary Observatory Workshop,1.17a-1.17e.
6. Gladwin,M. T., & Lee, M. (2004)：Three Component Borehole Strain Measurement in South Western Taiwan, International Conference in Commemoration of 5th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan.
7. Hart R.H.G., M. T. Gladwin, R.L. Gwyther, D.C. Agnew and F.K. Wyatt, (1996)：Tidal Calibration of Borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity J. Geophys. Res., V101(B11), p25553-25571.
8. Lee, M., Gladwin, T. M. and Liu, T.K (2007) Three component borehole strain measurement in

western Taiwan. Abstract for the European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, April 15-20.

9. Linde, A. T., Gladwin, M.T. and Johnston, M.J.S.(1993) : Borehole Strain Measurements of Solid-Earth-Tidal Amplitudes. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1550-C, 81-85.

10. Takemoto, S., Lee, M., Chen, C. Y., Kao, M. C., Mukai, A., Ikawa, T., and Kuroda, T. (2006) : Tidal Strain Observation in Chu-Chie, Taiwan. Journal of Geodynamics Vol.41, 198-204.

11. Yeh, Y.T., Liu, T.K., Lee, M., and Gladwin, T. M. (2008) Meteorological Effects on the GTSM Borehole Strain Measurement in Western Foothill, Taiwan. Abstract for the European Geosciences Union General Assembly 2008, Vienna, Austria, April 13-18.



計畫成果自評

本計畫研究成果與原計畫預期相近。由 2003 年十一月至 2007 年十一月陸續完成的十二站 GTSM 應變儀觀測站已獲得極佳之成果。所有感測器皆記錄了清晰可見的地潮訊號及膨脹性水泥凝固之指數衰減型熱應變。此表示感測器與岩盤藕合極佳，可反映微細之地殼變動，理論上有機會偵測到地震前兆。原先除了因山區連續陰天太陽能板無法供電，致使流失小部份資料之問題外，又因暴雨期雷擊頻繁，導致儀器設備時有損壞甚至少數感測器永久損壞，則是對本計畫長期觀測維護的不利因素。本研究顯示地殼應變儀短期訊號易受地下地質因素干擾，長期訊號則易受氣象因素(包括水文及氣壓)影響，但是因為在時間上雨量最大與氣壓最低往往同時發生，故不易釐清何者才是主要的干擾因素。整體而言似以水文干擾較為嚴重，正利用應變儀、地下水位計、及氣壓計三者共站之資料釐清之間相關性。本研究之成果具重要學術及應用價值，故除了已將部份成果在國際會議中發表外，各觀測站資料因資料處理費時(需有經驗者逐一編輯)，正積極撰文發表中。



出席國際會議心得報告

計畫編號	NSC 96-2116-M-041-004
計畫名稱	台灣板塊邊界觀測研究(II)-台灣西部三分量井下應變儀觀測研究(II)
出國人員服務機關 姓名及職稱	嘉南藥理科技大學 產業安全衛生與防災研究所 李 民 副教授
會議名稱	2008 歐洲地球科學聯合會
會議期間及地點	民國 97 年 4 月 13 日至 18 日於奧地利維也納
發表論文題目	Meteorological effects on the GTSM borehole strain measurement in western foothill, Taiwan

一、參加會議經過

本次會議參與口頭報告組別為「地科儀器與資料系統(Geosciences instrumentation & data systems)」領域下之「井下儀器安裝：技術與應用(Down hold instrumentation : technology and applications)」議題。報告題目為「台灣西部麓山帶三分量井下應變儀觀測之氣象因素影響(Meteorological effects on the GTSM borehole strain measurement in western foothill, Taiwan)」(附件一)。台灣西部麓山帶安裝的十二具井下地殼應變儀已證實可量測微小至 10^{-9} 的應變量，理論上應變儀是理想的地震前兆觀測儀器，但是儀器的長期穩定性則是另一項關鍵因素。在實驗台上儀器的長期穩定性證實每年小於 10^{-9} ；在地殼活動性相對低且雨量不高的澳洲大陸，井下實測值則為每年約 10^{-7} 。這個數值不致影響觀測板塊邊界地殼累積應變與時間之關係；應可充分觀察累積的地殼應變與地震觸發之時空相關性。然而台灣每年夏、秋兩季是暴雨及颱風季節，自 2004 年迄今共有 29 個颱風侵襲或掠過台灣。颱風影響期間，地殼應變儀觀測資料明顯受氣象因素影響，但是因為雨量最大時與氣壓最低時往往同時發生，故不易釐清何者才是主要的干擾因素。由泰興(TAIS)與中興(TSUN)兩觀測站共站的地下水位資料顯示，地殼應變明顯受地下水位變動之影響，而地下水又受地表水(包括降雨)之影響，這些氣象波動皆非線性的。本研究正積極釐清地殼應變觀測資料中之地潮、氣壓、雨量等影響成分，俾便排除這些非地殼變動因素成分，以獲得單純與板塊運動有關之地殼應變。

由於「地科儀器與資料系統」領域日益獲得重視，故本屆大會特別為這項領域新設立 Christiaan Huygens Medal，今年的 Medal Lecture 是由德國普朗克研究所的 Horst Keller 獲得這項殊榮，演講題目是有關獲取慧核標本以瞭解太陽系形成的環境。

二、與會心得

歐洲地科聯合會研究的議題中防災佔有很重要的份量。其中有關地震前兆發表的議題包括有地下水位變動、井水中 CO₂ 遽減、岩石應力變化及電離層干擾現象(ionospheric plasma disturbances)等。於中歐捷克波西米亞陸塊之地下水觀測顯示水井的應變敏感度(strain sensitivity)與含水層的構造特性有關且會隨時間而改變。於義大利 Umbria 地區進行的一項長達 10 年(1997~2007)之地化觀測結論：觀測到的地化異常雖然不易與地震事件一一對應，但的確是與地殼變形造成的岩石滲透性與微裂縫變化有關。在冰島一項以岩石應力場與地下水孔隙水壓為依據的地震預測模式，利用 1991-2000 間發生的將近 100,000 個微震做測試，獲得令人滿意的結果，將有助於預測大地震發生的地點可準確至數公里的精度，時間則可縮短至數天至數星期。

有些研究證實像地震、火山爆發、颱風等天災往往會導致電離層出現一些電磁效應。其理論基礎為 Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling(LAIC)模式，此模式解釋上述天災發展過程中，會造成大氣層下部空氣膠粒子帶電並往上升，導致大氣層-電離層之間的直流電場被改變。DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions)即為一套建構於空間的天然災害多儀器觀測系統(multi-sensor system)，可用於連續監測高危害風險地區。

