

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 台灣西部麓山帶 GTSM 地殼應變儀觀測之氣象與地潮因子校正研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2116-M-041-003-  
執行期間：98年08月01日至99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

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 10 月 31 日

## 一、前言

自從井下體應變儀( dilatometer )於 1970 年代及三分量應變儀( GTSM 與 SES3 )於 1980 年代開始於加州、冰島及日本等地理設觀測地殼變形及火山活動以來，應變儀觀測資料之分析一直受制於僅有少數儀器設計者及使用者懂得相關技術與方法。他們為自己研究所發展的分析方法與軟體，對其他使用者不具親和性，故也限制了應變儀地殼變形觀測研究不似地震儀與衛星定位( GPS )在學界之廣泛研究與快速發展。直到美國 PBO 計畫於 2003 至 2008 年間陸續又於加州、奧勒崗州及華盛頓州等北美西岸埋設約 75 具 GTSM 井下應變儀，投入大批研究人力發展並完善井下應變儀之分析方法與軟體( Roeloffs, 2010; Langbein, 2010 )，這個類似獨門研究的領域才逐漸獲得改善。

台灣緊隨美日等國也陸續建置了15站井下應變儀(SES3\*1及GTSM\*14)。連續觀測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，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。尤其台灣位居西太平洋颱風號發地區，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。雨量在地面時為地表水，造成地表重荷；入滲後又成地下水，導致孔隙水壓及地下水流變化。

井下應變儀埋設於地表下 200 米深度左右，地下水不論是孔隙介質流或是裂隙流，都可能影響應變儀之監測值。當孔隙水壓增加時延體會膨脹；當孔隙水壓下降(相當於孔隙排水)，就引起空隙介質(岩體)體積收縮(遠端應變為零且岩體邊界固定不變)，因而應變儀體積必須擴張( Segall et al., 2003 )。只要是在非排水狀態下，應變儀對於快速地殼變形之感測(如同震應變)不至於受地下流體之干擾；但是對於週期較長的地殼變形(如緩慢地震)，則必須考慮孔隙彈性反應( Poroelastic response )之影響。若在排水狀況下，則應變儀之反應又會更複雜。

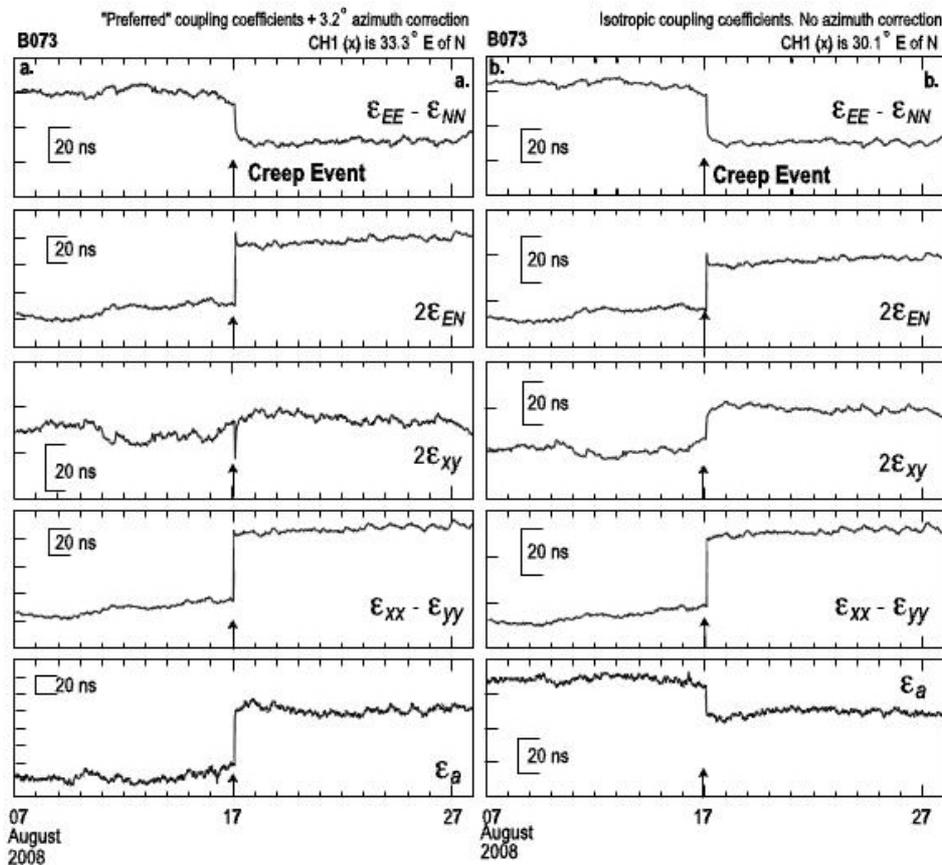
## 二、研究目的

- (1)建立完整GTSM井下型應變儀觀測資料處理、分析、解釋之技術與能力。
- (2)釐清地潮、氣壓(包括颱風)、地形(包括地質)、水文(降雨及地下水位變動)等線性與非線性影響效應並濾除之。
- (3)研究井孔內應變儀、水泥、與圍岩之間之藕合(coupling)關係，並歸納出應變儀效率與地質(岩性)之相關性。
- (4)配合 GPS 速度場及應變率長期觀測結果，提供連續且高頻之應變觀測資料，共同觀測地震前、同震、及震後變形，期能逐步釐清地震發生機制。

## 三、文獻探討

由美國加州長期地震觀測顯示確實有些斷層蠕動僅造成剪應變，在此情況下水位計與體應變儀均無法感測，僅可經由 GTSM 紀錄到(Gladwin et al., 1993；Gwyther et al.,1996)。利用 creepmeter之長期(1966~1999)觀測資料顯示，於加州 Parkfield 地區，蠕變會受降雨影響，而且蠕變速率於濕季明顯大於乾季(Roeloffs, 2001)。近年來美國與日本研究團隊都發現於隱沒帶有帶狀分佈的低頻微動(tremor)出現，大多頻率為0.5~5Hz且不發出明顯的P-波或S-波。這些微動群(tremor cluster)之再現週期約數月至半年，每次活動約延續一星期。微動群活動事件會沿著隱沒板塊之走向遷移，速率約每天10公里。這些微動群的活動與slow slip事件在空間上及時間上相關性極高。這種現象在日本四國西部及美國西北部之 Cascadia地區都一再觀測到。也有研究指出微動群由地殼深處往淺處遷移，最終導致地震斷層的啟動(Obara and Hirose, 2006; Rogers and Dragert, 2003; Ito et al., 2007; Shelly et al., 2007)。

為正確判識這些微細的應變訊號，原始應變儀觀測資料就必須先用正確的當地氣壓與地潮加以校正。Roeloffs(2010)分析美國 PBO 計畫位於加州的 B073 應變資料，發現若忽略垂向應變對面應變之影響，則直接用一般假設等向且均質的模式合成應變，可能會把地震事件解釋錯誤(圖一)。



圖一：面應變可因資料校正不足由伸張誤判為收縮(Roeloffs, 2010)

#### 四、研究方法

Langbein ( 2010 )發展之分析軟體主程式為 cleanstrain+，使用在 Unix/Linux 平台。雖然長久以來，Baytap-g ( Tamura et al., 1991 )是研究應變儀時間序列資料之常用軟體，但是他嚴格要求原始觀測資料格式，而且不可有怪異之資料存在，這就必須在分析前經由人工方式予以剔除，因此也引發了學界對於應變儀原始資料是否因人工修改而可能喪失正確性之爭議。這種人為主觀性之判斷在 cleanstrain+中可以降低，所有資料中被修改的地方都有完整的紀錄。

除了應變儀原始觀測資料，cleanstrain+還需要伴隨之氣壓與溫度資料，另外最多可附上 4 個文字檔，分別標明可疑資料之時間點、資料位移之時間點、模擬時間序列隨時間變化之函數的時間與種類。cleanstrain+可使用的資料檔格式有 ASC II 文字檔及 USGS/PBO 使用的 " bottles " 二進位格式檔。

cleanstrain+產生的檔案包括：被調整或刪除的問題原始資料及已除去地潮、氣壓及其他環境影響訊號的應變資料。這些結果都經 GMT 繪圖軟體繪出。如果電腦已安裝有 Baytap-g，cleanstrain+也可以將資料送入 Baytap-g 執行。一般來說要獲得精確的地潮分量，資料長度必須涵蓋 2 至 3 個月；但若只為粗估 M2 和 O1 分量，則一個月長度的資料即已足夠。

相對於 Langbein 僅討論應變資料之分析處理，Roeloffs(2010)則發展一整套分析三分量應變之方法。Roeloffs 先建立 PBO 之 " 參考應變儀(reference strainmeter)"，其必須位於理論地潮正確性可獲驗證之處，由 " 參考應變儀" 之觀測值與理論地潮之分析可得較可信賴之耦合系數 ( coupling coefficients )。這個過程可移植到其他理論地潮較不確定處的應變儀。

資料挑選處理與分析：

1. 至少六個月期間會有數段 60~90 天可用來決定氣壓影響係數 ( atmospheric pressure response coefficient ) 和地潮成分 ( tidal constituents )；
2. 距海岸直線距離遠大於應變儀埋深，以避免複雜海岸地形及洋流引起的垂向剪切應變 ( vertical shear strain )。
3. GTSM 原始資料為 10min 一筆，篩選至 30 min 一筆已配合氣壓之 30 min 資料。原始資料(必要時須先 edited)減去一個指數衰減向和一個二次多項式擬合 60 天資料窗。
4. gauge data 以 60 天為一段，可能的話，重疊 30 天。先將 gauge data & atomos. data 用 band-pass-filter 排除頻率在 4 - 6 day band 以外的。若在這 60 天段資料中發現兩者相同性好的資料拿來除去 gauge data 中之 atomos. pressure response(band-pass-filtered 得到的 coefficient )。正確的資料才拿來做地潮分析。

5. 用可靠的理論地潮估計四個 sensor 分別對三個 horizontal strain tensor 及 vertical strain 之 coupling coefficients，必要時，方向校正也有必要。
6. Gladwin 指出每具 GTSM 製造出來四個 sensor 之 gain 可能有多至 20% 之差異(原則上希望都一樣，才能得到” isotropic calibration matrix”) 所以也將其併入 coupling coefficient 計算過程。

PBO GTSM 資料分析顯示：

1. 有些 GTSM 受氣壓影響很大。
2. 做 isotropic calibration 時，觀測值 M1 與 O2 之 phase 會與理論地潮差約數十度。
3. 許多 GTSM 之 areal strain 比預期小很多。
4. 更有甚者，有些共站的 GTSM 之 areal strain 的 phase 也會彼此差異數十度。

## 五、結果與討論

PBO 於奧勒崗州埋設的兩組共站應變儀(B027 和 B028 及 B035 和 B036)，前兩者相距 400m，後兩者相距 450m。由於兩地離海岸線約有 100 公里，且海岸地形並不複雜，故可合理假設理論地潮受洋流之影響不大，且共站的兩應變儀感測的地潮應完全一樣。然而 B027 之面應變，其相角與理論值相差約 180 度，共站的 B028 觀測值與理論值卻完全相符。B027 也比 B028 明顯受氣壓之垂直向影響。B035 和 B036 也類似上述的情況，其中 B036 受氣壓的垂向影響比 B035 明顯大很多。B027 與 B036 之面應變與氣壓之關係大約是  $4 \text{ nstrain/hPa}$ 。由這兩組共站應變儀資料顯示，兩共站應變儀之面應變會因不同的氣壓響應而產生相位差；同時剪應變也會有相差，可藉由方位角修正調整之。

Roeloffs(2010)根據 12 具 GTSM 應變儀，利用理論地潮求出觀測值有關面應變與剪應變之耦合系數。結論如下：

- (1) 4 個感測元件之剪應變之耦合系數變化幅度約在 20 ~ 30% 之間，且 D 值介於 0.8 ~ 2.5，符合 Gladwin 和 Hart(1985)之計算值範圍。
- (2) 有些應變儀易受氣壓變化影響，其垂向耦合系數大，會減低應變儀之面應變耦合系數，甚至導致極性反向。在合成面應變時，應排除受垂向應變影響大之感測器資料。
- (3) GTSM 應變儀多出來備用的第 4 個感測元件，可提供應變儀資料一致性的自我檢測。
- (4) 剪應變之耦合系數在協調觀測值與理論值之符合度上很有幫助。

GTSM 原設計規格指標是對垂向應變不敏感，但 Roeloffs 發現至少在 12 個應變儀中有三個其氣壓響應係數達到 3.4 ~ 4.1 nstrain/ hPa，比一般值高約十倍( Beavan et al, 1991 )。垂向應變對井下應變儀器影響大之缺點為：(1) 應變儀對地體構造運動產生的面應變感測能力降低。(2) 對地表負荷變化(如車輛、降水)之影響敏感而提高背景干擾。(3) 觀測值與理論值校正模式又必須多考慮地表干擾，而後者又多是非線性的。由其他 GTSM 應變儀之垂向應變影響很小，甚至有共站的兩具應變儀，一具敏感，另一具不敏感，可排除原因是埋深、水泥漿、或是當地地質影響，比較可能是其它尚未確知的原因。

Agnew(2007)認為要維護應變儀觀測網在未來將是一項挑戰，主要是它的研究團體很小，成果也相對較少，故不易吸引學生從事這項研究；學生加入的少又導致未來成果不易增加的循環。故建議國內地科學術圈參考美國 PBO，盡速開放應變資料公開取得管道，結合國內各界研究能量共同努力。

#### 參考文獻

Agnew, D. C. (1996), SPOTL: Some programs for ocean-tide loading, SIO Ref. Ser. 96-8, 35 pp., Scripps Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif.

Agnew, D. C. (2007), Before PBO: An Overview of Continuous Strain and Tilt Measurements in the United States, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 53 : 157 – 182.

Gladwin, M. T., and R. Hart (1985), Design parameters for borehole strain instrumentation, *Pure Appl. Geophys.*, 123, 59–80, doi:10.1007/BF00877049.

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 heterogeneity, *J. Geophys. Res.*, 101, 25,553–25,571, doi:10.1029/96JB02273.

Ito, Y., Obara, K., Shiomi, K., Sekine, S., and Hirose, H. (2007) slow Earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events. *Science*, Vol. 315, no.5811, PP.503-506, doi :10.1126/science. 1134454.

Langbein, J (2010), Computer algorithm for analyzing and processing borehole strainmeter data, *Computers & Geosciences* Volume 36, Issue 5, May 2010, Pages 611-619

Obara, K. and Hirose, H. (2006) Non-Volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone, *Tectonophysics*, Vol. 417, Issues 1-2, P.33-51, doi:10.106/j.tecto. 2005.04.013

Roeloffs, E. (2001). Creep rate changes at Parkfield, California 1966-1999: seasonal, precipitation induced, and tectonic. *J. Geophys. Res.*, 106, 16525-16547.

Roeloffs, E. (2010), Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters: Roles of vertical and shear coupling, *J. Geophys. Res.*, 115, B06405, doi:10.1029/2009JB006407.

Segall, P., S. Jónsson, and K. Ágústsson (2003), When is the strain in the meter the same as the strain in the rock?, *Geophys. Res. Lett.*, 30(19), 1990, doi:10.1029/2003GL017995.

Shelly, D.R., Beroza, G.C., and Ide, S. (2007) Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, 446, 305-307, doi:10.1038/nature 05666.

Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, M. Ishiguro (1991), A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophysical Journal International*, Volume 104, Issue 3, pages 507–516.

無衍生研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：李民		計畫編號：98-2116-M-041-003-					
計畫名稱：台灣西部麓山帶 GISM 地殼應變儀觀測之氣象與地潮因子校正研究							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 （本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 （外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>協助澳洲 Mike Gladwin 教授於台灣安裝第 13 及 14 站 GTSM 觀測站，並持續與其通信討論台灣應變資料分析之細節。</p>
--	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

## 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

參考美國 PBO 計畫顯示地殼應變儀資料分析過程複雜，有些基本資料如安裝角度 (azimuth) 與機械增益 (gain) 仍須再校正甚至不易獲得，做為唯一校正依據的理論地潮本身又受海岸地形、洋流、及地形起伏之影響很大。

## 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：(以 100 字為限)

## 3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

有一些地震前兆可能存在 (Roeloffs, 1988)，但其相對於同震變化而言則是太微弱而不易被察覺。地殼應變儀有極精密之解析能力 (可感測  $10^{-9}$ ~ $10^{-12}$ )，為進行地震前兆觀測之良好工具 (Ishii et al., 1997)。GTSM 井下應變儀可同時量測相當於體應變之面應變 (areal strain) 及兩種剪應變  $\gamma_1$  與  $\gamma_2$  (Gladwin, 1984)。由美國加州長期地震觀測顯示確實有些斷層蠕動僅造成剪應變，在此情況下水位計與體應變儀均無法感測，僅可經由 GTSM 紀錄到 (Gladwin et al., 1993; Gwyther et al., 1996)。台灣與美國及日本都受地震威脅極大，如能參考美日相同之研究並有所突破，則對地狹人稠的台灣社會與經濟產業皆有極大之助益。欲釐清所有與應變相關之耦合係數包括理論地潮、安裝角度、地形、地質、氣壓、雨量等仍須本研究持續努力。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。