

井下應變儀資料處理模式之建立

Borehole Strainmeter Data Processing

主管單位：交通部 中央氣象局(地震測報中心)

劉 啟 清

Chi Ching Liu

中國地球物理學會·中央研究院

摘要

井下應變儀在東部地區的設置，已証實可觀測到微小的”慢地震”，也跟地表 GPS 的觀測結果有高度的相關性，因此，為達到例行觀測的目的，必須像地震儀記錄或 GPS 連續觀測站一般，要可以做方便的時間序列觀測。現有地震儀記錄是隨時進來即可展示，不須經過特別的處理，而 GPS 則是在每天資料處理後，可展示長期的時間序列，然而井下應變儀的資料與前兩者有所不同，它在裝置以後，因挖井破壞地底下的結構，須要相當長的時間才能恢復與四周環境相同的狀況，所觀測的結果才是真正的地底下的應變，再加上裝儀器時所用的水泥，會產生溫度與膨脹效應，前者要數天才能平衡，後者則可能長達數年才能平衡，本計劃及要用現有的資料，估計出上述的各種效應，以使傳回來的結果馬上就可做為真實的井下應變觀測之用。

關鍵詞：地體構造、井下應變儀、斷層活動、地殼變動

Abstract

Borehole strainmeter has been deployed in eastern Taiwan, and some “slow earthquakes” were observed. Observed GPS displacements near the same sites are also verified to be close related to the strain changes. In order to use borehole strainmeter observation as a handy tool for earthquake research, we must make its data observable as a time series. Just like the velocity or acceleration time series from seismometer and daily displacement or baseline component changes from GPS sites, borehole strainmeter data must be demonstrated as a pure strain variation time series with or without solid earth’s tide. In order to do so, we must remove the effects of grout decaying and hole settlement, these can last for months to years. Thermal effect due to heat of hydration from can only last for several days, but temperature changes due to groundwater variation can do some effects. In this project, different effects that are nothing to do with tectonic forces and make changes of strainmeter output will be evaluated with some empirical model and removed if possible. The residuals from non-tectonic strain model can be regard mainly as tectonic strain and can be used directly for interpretations.

一、前言

為了瞭解台灣板塊邊界的各種活動，加強地殼變動監測的完整性與對未來地殼變動監測解釋的正確性，中研院在 2002 年設置了奇美井下應變儀站，並在 2003 年設置了井下應變儀站、GPS 固定站與井下地震儀共站之猴子山綜合觀測站，這個測站特地選在岩石較軟弱的岩層中，以測試未來在台灣西部各地可能碰到軟弱岩層特性的測區，此儀器仍然適用。為加強此測網的完整性，並在瑞穗附近設置了紅葉經瑞穗到大港口的精密水準測線，形成了一個整合性的觀測網，現在再配合一些新的井下應變儀，應能更細緻的掌握整個情況。井下應變儀的觀測精度，可達到地殼應變 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量級的精度，在極短或略小區域($<10^1$ km)的地殼變動監測中，較 GPS 觀測網精度為高，在短時間內($10^{-2} \sim 10^3$ 秒)的穩定度也較 GPS 觀測網來的好，因此結合 GPS 連續觀測網與井下應變儀的聯合觀測，成為近年來最理想的壹種地形變觀測方法，井下應變儀以一地區三至五站為原則，每個網至少有一個三向的井下應變儀，以量測該地區的剪斜應變(Shear Strain)，每站相距 5-15 公里，盡量在斷層上盤，形成多邊形分佈，不可太靠近斷層(1 公里之內)，岩石儘量選堅硬岩磐為原則，若無法得到岩磐，則須修改應變儀感應器，以使應變儀能感應到岩石的變動。

二、井下應變儀網之建立

為了發展井下應變儀的觀測活動，地球所於 2002 年與卡內基研究院地磁部簽訂國際合作協定，並支持 PBO-T 的科學互訪及技術轉移，為了進行可行性的先導實驗，中研院也於 2002 年購置 2 台、2003 年一台及 2004 年 2 台井下應變儀及相關的周邊儀器等(如通訊器材、記錄器等)，並特地選擇奇美(2002 年)、猴子山(2003 年)、樟原(2004 年)及春日、九曲洞(2005 年)五個地方，其中前四個站相距約 5~15 公里(但岩石軟硬各不同)(表一)形成一個完整的觀測網，而九曲洞則是太魯閣地區的另一觀測網。在實驗室岩層單壓強度測試中，奇美岩石強度為猴子山岩石強度的 13 倍，樟原站則居中，猴子山的儀器還特別經過修正。奇美站裝設較早，對地潮反應較清楚，奇美與猴子山兩站在 2003 年六月大港口的一次近地地震中，有相同的表現(圖三)，這表示修正過的應變儀在軟岩石中表現的跟較硬岩石中一樣好，也表示井下應變儀也能用在西部較軟的地層中，以使本計畫能順利進行，且成為 PBO-T 的一有力武器。

站名	岩層單壓強度	破壞應變	深度(公尺)	地點	岩性
奇美	391.1 kg/cm ²	1.1 %	200	奇美東邊約 2.4 公里 N23°29'18.7" E121°27'46.4"	都蘭山層硬岩層
猴子山	29.9 kg/cm ²	1.6 %	266	奇美西邊約 2.5 公里 N23°29'31.1" E121°25'25.4"	都蘭山層軟岩層 儀器修改適應軟岩層
樟原	198.4 kg/cm ²	1.4 %	218	奇美南邊約 11 公里 N23°23'58.8" E121°26'54.5"	都蘭山層硬岩層

春日	342.5 kg/cm ²	0.8%	190	花東縱谷瑞穗以南 N23°26'31.1" E121°23'51.1"	都蘭山層角礫岩 三向應變儀
太魯閣	541.9 kg/cm ²	0.9 %	200	砂卡礑河谷口 N 24°09'22.8"E121°26'13.5"	大理岩層硬岩層
九曲洞	954.7 kg/cm ²	1.3%	200	中橫公路九曲洞口西 N 24°09'41.5"E121°32'21.7"	大理岩 擬改為三向應變儀
清水	960.6 kg/cm ²	1.4%	200	蘇花公路清水斷崖 N 24°13'25.3"E121°41'12.9"	大理岩

表一：井下應變儀裝置的地點與其岩石

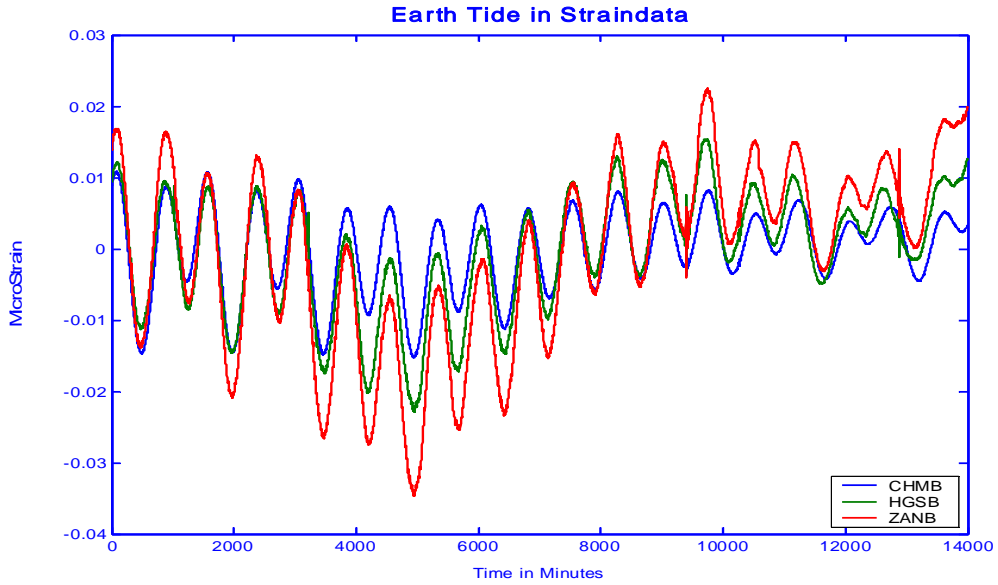
在上表中的前面四站（奇美、猴子山、樟原、春日）已開始記錄，其中猴子山及春日已有ADSL連線及時傳輸，樟原站正在安排中，九曲洞站、太魯閣已安裝完成，正等待牽電中，其餘各站均已鑽好洞，等待安裝儀器。

在井下應變儀方面，台灣仍是新進的階段，甚至在全世界，對於其資料分析處理、解釋與資料庫格式訂定、資料庫建立等問題，都還在改進的階段，尤其地球所選用的改良的二階段式 Sacks-Evertson Dilatometer 型態的膨脹儀(SED-2)以及三分量的 Sacks-Evertson-Sakata 型態的井下應變儀(SES-3)，其精度約在 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 之間，相較於 Gladwin 型態張量應變儀(GTSM Tensor Strainmeter)型態的解析度在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 之間為佳，但為了提高精度，必須犧牲其連續偵測的範圍，在其應變達到某一限值時，儀器內部須有歸零的動作，這使得觀測資料不連續，必須在事後加以修補。

基本上，井下應變儀的記錄中，它忠實的記錄下儀器所在位置的岩層體積變化，但因儀器設計尺寸主要在垂直方向約 3 米長，而水平方向僅約十公分，內部設計以感應水平應變為主，垂直向亦有些微的影響，在三向的井下應變儀(SES-3)中，取任意三水平向做獨立的分割，利用這三向變化的差異，可估計出水平的剪斜應變，而估計出主應變軸與方向，無方向性的井下應變儀(SED-2)，則僅能求得岩石的體應變。

在應變儀的記錄中，應包括地體構造力所加諸於岩石的應變，安裝儀器所鑽孔及破壞岩石穩定的後續影響，天文潮汐所產生的固體地潮，海潮所造成附近岩層的二次效應，地下水及大氣壓力所加諸於岩層的應變等，因我們所真正有興趣的是地體動力所加諸於岩石的應變，其餘的應變效應都應該儘量的清除，然而在即時的顯示系統，不可能完整的清除所有的其它因素，有些僅能用過去的資料做推估，此即本計畫所欲建立的模式。

應變儀資料分析與校準，應包括應變儀本身對地潮的反應、應變儀受四周岩層的殘餘應變量，儀器的雜訊等。用潮汐來看應變儀記錄的特性可由圖一顯示。三個應變儀所記得的潮汐在振幅、週期與相位都非常相似。這表示這些應變儀站的儀器不管在高頻(1Hz~100Hz)的地震儀範圍，或在低頻(0.1Hz~0.0001Hz)都有相當合理的記錄，這也表示該站與周遭岩石的吻合度相當良好。所記得的潮汐約是 2.7×10^{-8} (Areal strain)。



圖一：三個應變儀所記得的潮汐，其在振幅、週期與相位都非常相似。

三、資料分析方法

在過去兩三年中，奇美、猴子山與樟原三個站提供了相當多的資料，地球所也自己在建立資料處理軟體、資料格式與資料庫，基本上，為了顧及井下應變儀與地震儀的相似性，前者為地下岩層位移對空間的微分，而後者為對時間的微分，未來應有相輔相成的應用空間，我們將資料格式與資料庫建的與地球所的地震資料相同，甚至在記錄器也是用相同的 Q330。在資料處理上，因井下應變儀在埋設初期受到鑽孔破壞岩層的穩定度，加上利用不縮收水泥的乾涸作用，在前兩年都受到水泥乾涸(Grout Curing)跟孔的回復(Hole Relaxation)，其隨時間的應變變化如下式：

$$S(t) = A_0 + B_1 * e^{-t/\lambda_1} + B_2 * e^{-t/\lambda_2} + C_1 * t \dots \dots \dots (1)$$

其中 S(t) 代表應變資料

A₀ 為任意常數，決定在起始時的應變值，通常為未知且無法量測；

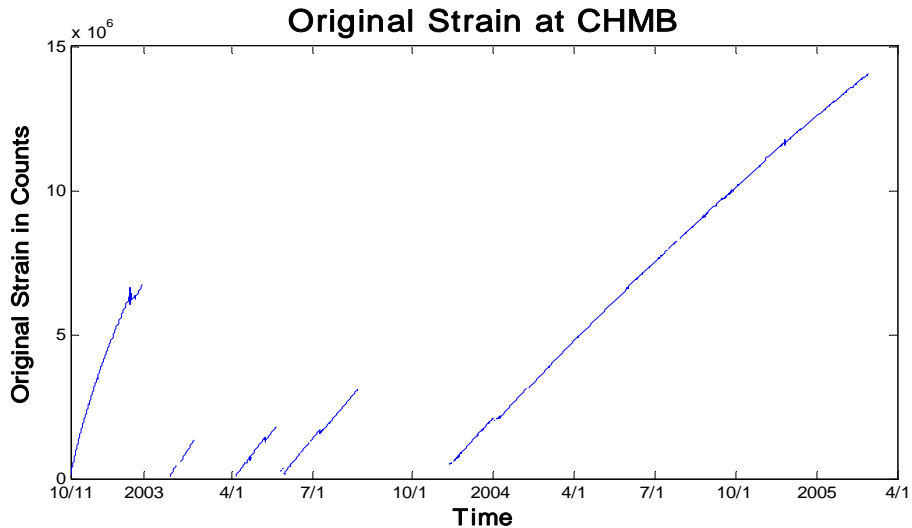
B₁*e^{-t/λ₁} 為水泥乾涸的變化影響量，其中 λ₁ 約為 50~100 天，與岩層強度有關；

B₂*e^{-t/λ₂} 為孔回復的變化影響量，其中 λ₂ 約為 100~500 天，與岩層強度有關；

C₁*t 為長期的應變趨勢，一般認為是構造活動所造成的穩定變化。

在上式中，對 Sacks-Evertson (SED-2)或 Sacks-Evertson-Sakata (SES-3)而言會有困難，因每次儀器歸零時，會改變 A₀ 的值(如圖二所示)，使得這些外來影響應變的因素無法估計，也影響到其應變長期變化的解釋。因此，我們採用了一個特殊的方法，即利用自然對數的指數特性，將上式做時間的微分，形成下式：

$$\frac{dS(t)}{dt} = -B_1/\lambda_1 * e^{-t/\lambda_1} - B_2/\lambda_2 * e^{-t/\lambda_2} + C_1 \dots \dots \dots (2)$$



圖二：奇美井下應變儀站 2002~2005 年的原始資料顯示，每當儀器內部歸零時，資料會有不連續的現象，影響資料的分析。

上式中解決了 A_0 的問題，微分去掉了這個常數項，但仍維持原式以歐拉數 e 為底的指數函數的形態(式 2)，如此可利用非線性的曲線套合的方法來求得各未知的係數與指數。

四、資料分析結果

根據上述之方法，我們在各井下應變儀測站之資料，以每天為一單位，求其斜率做為其一次微分值，即為式(2)中等號左邊之值，而其右邊最後一項係數 C_1 為地殼長期的應變率，在瑞穗、大港口間的擠壓區大約在每年 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 間，由於其雙歐拉數 e 為底的指數函數的套合相當的複雜，因此最後一項 C_1 必須先預估，我們設定在 $2.5 \times 10^{-9}/\text{day}$ ，亦即約在 $0.92 \times 10^{-6}/\text{year}$ ，然後再用 matlab 中的 curve fit 程序估計其係數。縱使在這樣的情況下， λ_1 與 λ_2 仍然要先給一個範圍，在過去的例子， λ_1 約在 10~100 天之間， λ_2 約在 100~1500 天之間，我們根據這些設定，得到表一之結果：

表一：奇美井下應變儀站 CHMB 之訊號穩定模式

$$\text{Strain (in count)} - \text{tectonic strain} = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$$

```

=====
=
MODEL using corrected x = t - 2002/09/04 4pm (installation time; DOY: 247)
using y=y-1000;(tectonic strain 1000 count/day from previous analysis)
***** 1 count ~ 2.5 x 10-12 strain
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
General model of Experiment:

```

$$f(x) = a * \exp(b * x) + c * \exp(d * x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.8905e+005 \quad (2.825e+005, 2.956e+005)$$

$$b = -0.02083 \quad (-0.02237, -0.01929)$$

$$c = 4.350e+004 \quad (4.216e+004, 4.568e+004)$$

$$d = -0.0006077 \quad (-0.0006752, -0.0005403)$$

Goodness of fit:

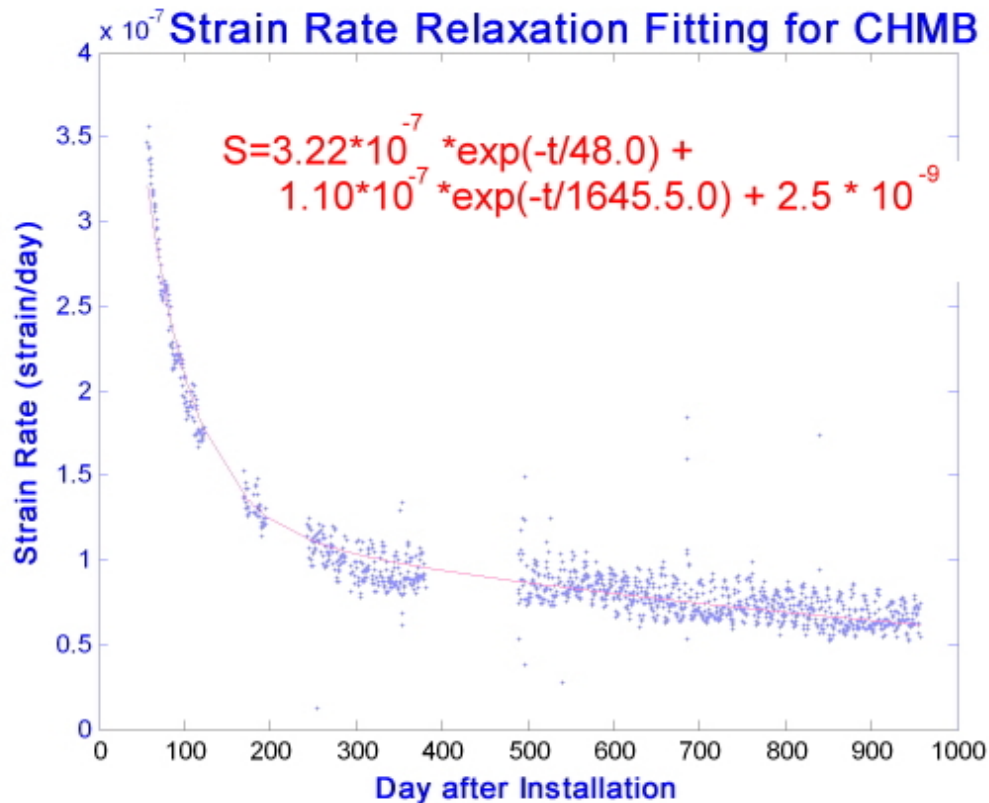
$$\text{SSE: } 7.363e+010$$

$$\text{R-square: } 0.879$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.8787$$

$$\text{RMSE: } 7364$$

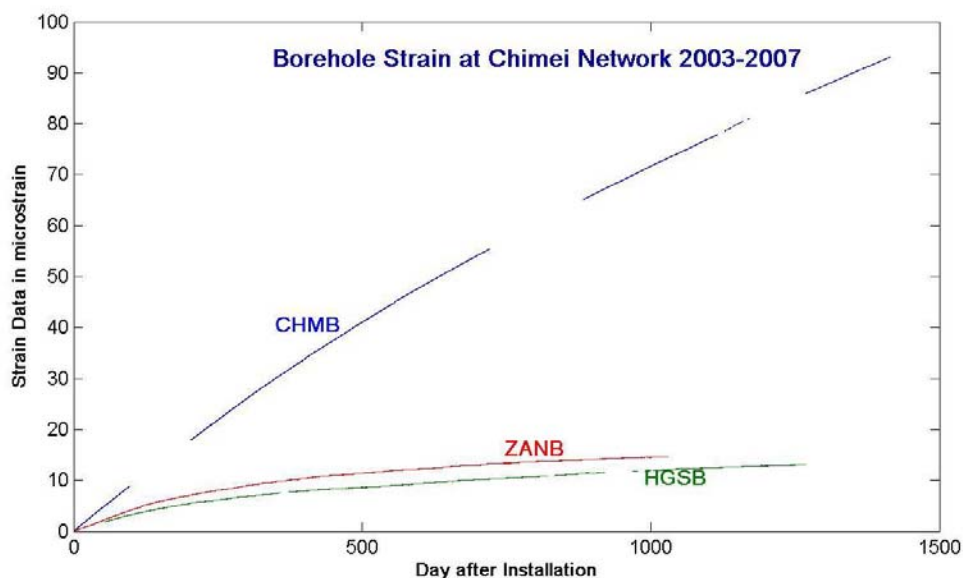
表一所得的參數可以換算為 $\lambda_1=48.1$ 天， $\lambda_2=1645.5$ 天，原來資料與所得的模式如圖三所示。根據此模式，可由公式(2) 恢復至公式(1)，並估計每次中斷時該有的 A_0 加以恢復，則原來該有的應變就如圖四所示。



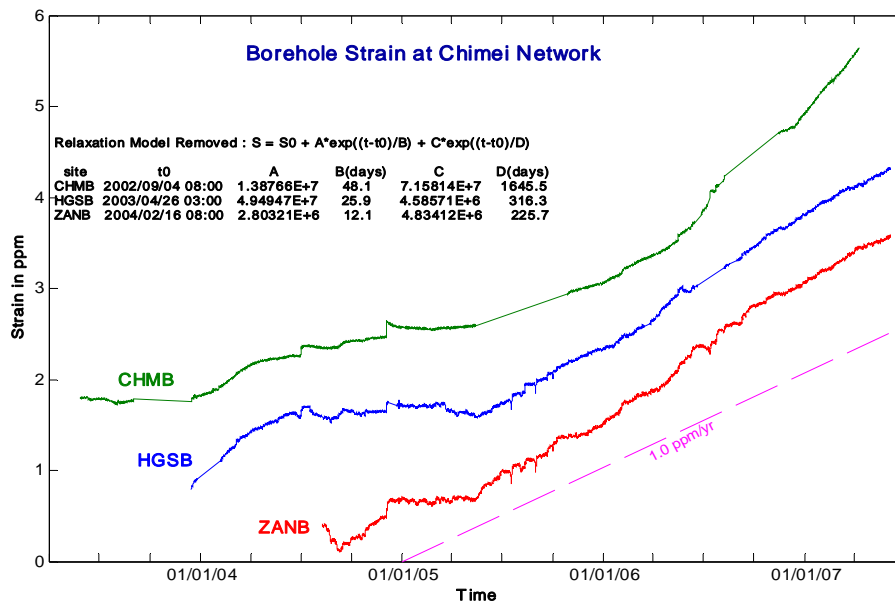
圖三：應變資料做時間的微分後，資料歸零或中斷時所造成的常數變化已被移除，資料變的連續，可用以估計各係數數值。

利用圖四之資料扣除上述所得的各井位水泥及井位鬆弛作用之衰減模式，所剩的則主要為地體構造活動加諸於岩石的應變量。圖五所示為各測站在移除上述非地體構造活動所造成應變的時間序列，即為各井下應變儀在移除水泥及井位鬆弛作用

之衰減模式後，所顯示的地體構造活動相關的應變時間序列，其變化即為地殼受地體構造活動及斷層活動所產生的應變量。



圖四：奇美(CHMB)、猴子山(HGSB)與漳原(ZANB)在資料恢復後，可看出其因水泥乾涸及孔洞復原所造成的變化。



圖五：井下應變儀在移除水泥及井位鬆弛作用之衰減模式後，所顯示的地體構造活動相關的應變時間序列，其變化即為地殼受地體構造活動及斷層活動所產生的應變量，正應變代表擠壓作用。。

根據以上之模式，當資料傳進來時，可根據公式(1)直接減掉水泥及井位鬆弛作用之衰減量，其中A₀可承續前一時刻之值，若資料中斷或儀器閥重新開關設定，則大略

估計即可繼續使用，其精確值待一段時間後在加以細沽。在此階段的資料，即可即時展示出來，做為與地震資料或GPS每日解的測站位移時間做比對與共同解釋。

表二： 猴子山井下應變儀站 HGSB 之訊號穩定模式

HGSB model

$$a*\exp(b*x) + c*\exp(d*x)$$

MODEL using correct x = x - 2003/04/26 3pm (installation time; DOY: 116)

using y=y-1000;(tectonic strain 1000 count/day from previous analysis)

***** 1 count ~ 2.5 x 10⁻¹² strain

=====

General model of Experiment:

$$f(x) = a*\exp(b*x) + c*\exp(d*x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.9100e+006 \quad (-9.802e+005, 4.801e+006)$$

$$b = -0.03859 \quad (-0.06009, -0.01708)$$

$$c = 1.4500e+004 \quad (1.017e+004, 1.884e+004)$$

$$d = -0.003162 \quad (-0.00357, -0.002754)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.166e+010

R-square: 0.9235

Adjusted R-square: 0.9232

RMSE: 3641

+++++

+

表三： 樟原井下應變儀站 ZANB 之訊號穩定模式

ZANB Model

$$a*\exp(b*x) + c*\exp(d*x)$$

MODEL using correct x = x - 2004/02/16 4pm (installation time; DOY: 47)

using y=y-1000;(tectonic strain 1000 count/day from previous analysis)

***** 1 count ~ 2.5 x 10⁻¹² strain

=====

General model of Experiment:

$$f(x) = a*\exp(b*x) + c*\exp(d*x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.309e+005 \quad (2.227e+005, 2.392e+005)$$

$$b = -0.08237 \quad (-0.08657, -0.07817)$$

$$c = 2.142e+004 \quad (1.846e+004, 2.438e+004)$$

$$d = -0.004431 \quad (-0.004937, -0.003925)$$

Goodness of fit:

SSE: 5.835e+009

R-square: 0.9768

Adjusted R-square: 0.9767

RMSE: 2879

根據上述所求得各站水泥及井位鬆弛作用之衰減模式之係數 a, b, c, d 相對於公式(2)中之各係數如下：

$$a = -B_1/\lambda_1; \quad b = 1/\lambda_1; \quad c = -B_2/\lambda_2; \quad d = 1/\lambda_2$$

由此可換算公式(1)中之係數如下：

$$B_1 = a/b; \quad \lambda_1 = 1/b; \quad B_2 = c/d; \quad \lambda_2 = 1/d$$

如此由公式(1)將各站水泥及井位鬆弛作用之衰減模式消除，所剩得之資料應該主要為地殼應力加諸於岩石所產生的應變，即：

$$TectonicStrain = S(t) - A_0 - B_1 * e^{-(t-t_0)/\lambda_1} + B_2 * e^{-(t-t_0)/\lambda_2}$$

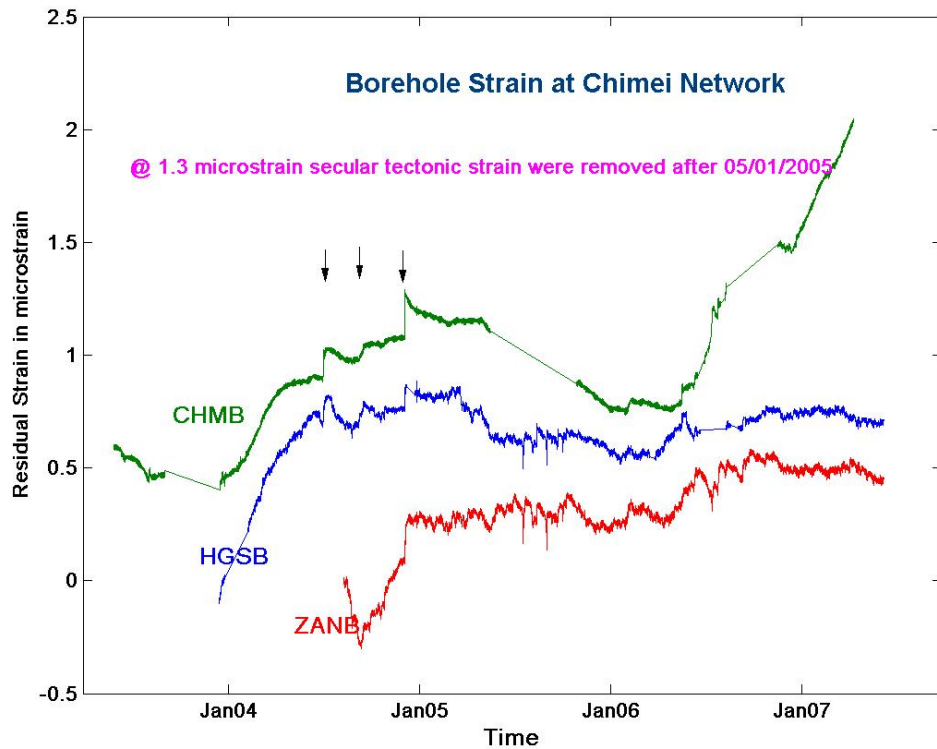
各站的係數如下表。

Site	t ₀	B ₁	λ ₁ (days)	B ₂	λ ₂ (days)
CHMB	2002/04/09 08:00	1.38766*10 ⁷	48.1	7.15814*10 ⁷	1645.5
HGSB	2003/04/26 03:00	4.94947*10 ⁷	25.9	4.58571*10 ⁶	316.3
ZANB	2004/02/16 08:00	2.80321*10 ⁶	12.1	4.83412*10 ⁶	225.7

五、討論

根據以上之分析，可以看出岩石強度不同，其所需要的岩層鬆弛作用之衰減時間也不同，奇美站岩石最硬，樟原次之，猴子山原就選定最軟岩層來做實驗的，因此在圖四中可看出其孔洞鬆弛作用之衰減曲線之差異。

另外在圖五的曲線中，我們可以明顯的看出，奇美地區在2005年5月1日以後，所有該地區的三个測站都顯示有快速的應變累積，約在每年1.3microstrain左右，若將這段時間的曲線都扣除這區域性的長期應變累積速率，則如圖六所示。



圖六：井下應變儀在移除水泥及井位鬆弛作用之衰減模式後，再扣除 2005 年 5 月 1 日以後長期區域性的應變累積量 $1.3\mu\text{strain}$ ，所顯示的地體構造活動相關的應變時間序列，其變化即為地殼受地體構造活動及斷層活動較短期的應變量。(正應變代表擠壓作用)

由圖六的曲線中，我們可以較清楚的看到在在段期間奇美地區地殼應變的累積狀況，其中 2004 年間有 2~3 次因颱風低氣壓造成的慢地震所產生變化(如箭頭所示)，而 2005 年及 2006 年的幾次颱風，正常的因氣壓變低而地殼應變為膨脹反應。

六、結論

本計畫在一年中順利建立了井下體應變儀的資料處理模式，其中由於鑽孔埋設儀器本身就會受到水泥乾涸(Grout Curing)跟孔的回復(Borehole Relaxation)作用，其對岩石應變的影響都是歐拉數 e 為底的指數函數，在求取其指數常數時就有其困難度，再加上所用的應變儀為提高其精度，每當應變累積到一定程度時，就須要打開其中的壓力閥，使壓力降低，此時會多了一個待估的常數，這更增加了回復模式估計的難度，本計畫突破傳統，利用應變的一次微分來估計這些模式之係數，成功的建立了每一站的井孔回復模式，也讓應變儀資料的長期穩定性大為增加，更能清楚的看到異常的變化。在 2003 年到 2007.5 年的資料中，我們可以看到 2004 年中有 2~3 次因颱風所造成的慢地震，以及 2005 年 5 月以後，此地區地殼擠壓速率

遠高於前兩年的速率，何者為正常，何者為非正常，因觀測時間有限，還不足以來做判斷，但三個站的一致性變化，代表所建立的資料處理模式相當正確，也說明未來這些站的資料在一蒐集到中心後，立即可除去井孔回復模式，馬上與前兩三個月，甚至前一兩年的資料一起判斷，來觀察是否有異常的徵兆，希望井下應變儀的資料也可因此成為整體地震觀測網中的重要一環。

參考文獻

1. 劉啟清、簡文峰、陳榮裕, 2007: 井下應變儀與GPS地表應變觀測之比較研究。交通部中央氣象局技術報告彙編第45卷PP307-314.
 2. 劉啟清, 2004; Borehole Strainmeters in the Integrated Geodetic Network of Taiwan。93兩岸強地動觀測暨地震測報研討會，台北，November 15~16, 2004
 3. 劉啟清, 2006; 地殼應變率的變化與慢地震的引發。95兩岸都會區防震與地震前兆研討會，萬里，台北
 4. Gao, S. S., P. G. Silver, and A. T. Linde, Analysis of deformation data at Parkfield, California: detection of a long-term strain transient, *J. Geophys. Res.* 105, 2955-2967, 2000
- Linde, A. T., M. T. Gladwin, M. J. S. Johnston, R. L. Gwyther, and R. G. Bilham, A slow earthquake sequence on the San Andreas fault, *Nature* 383, 65-68, 1996