

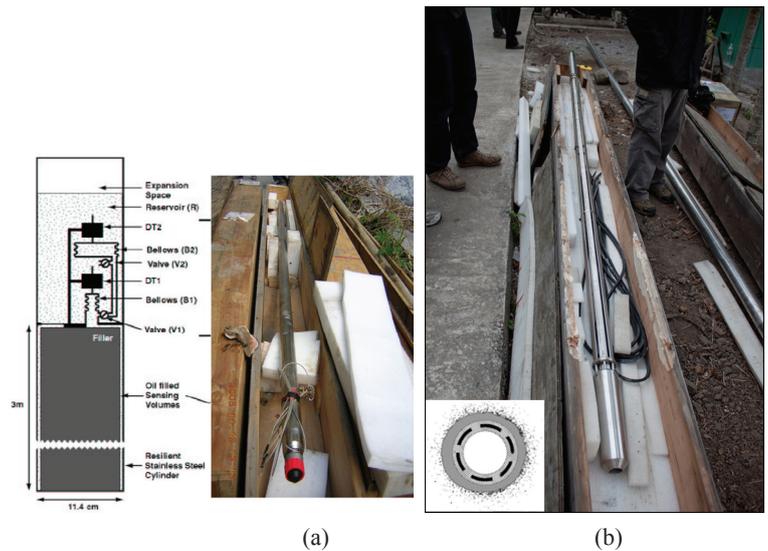
# 知識天地

## 井下應變儀在地殼變形研究之應用

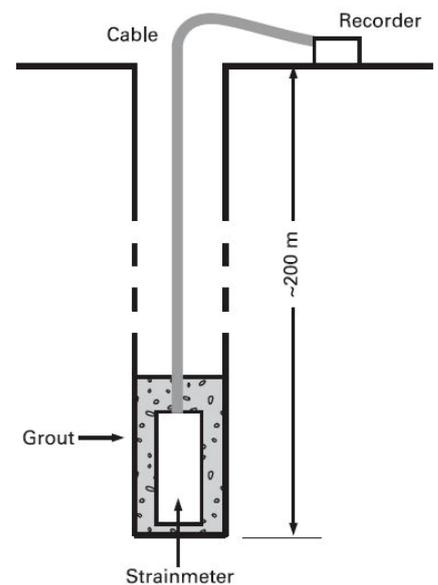
許雅儒副研究員(地球科學研究所)

地球科學是以觀測為基礎之科學，若想要對地震產生的機制及地底下的斷層活動有更進一步了解，就必須借助不同觀測方法量測斷層的活動。其中，觀測慢地震與斷層滑移之間的關係將有助於了解地震如何被觸發，及慢地震在間震期釋放地殼累積應力所扮演之角色。因此，在眾多觀測方法中，利用井下應變儀偵測慢地震與斷層滑移便是了解斷層活動和地震孕震特性的其中一種方式。井下應變儀最早的概念由Benioff提出(Benioff, 1935)。Benioff認為：在一任意形狀容器內部注滿離子溶液，並以隔板(diaphragm)阻隔。容器邊上的管子則設計用以平衡因氣壓、溫度或其他因素造成的緩慢壓力變化。將此儀器設置在近地表處，並與圍岩接觸。當圍岩受大地應力產生變形，就可藉由設置在儀器上方的電磁轉換器(electromagnetic transducer)或電流檢流器(galvanometer)偵測容器產生體積改變時離子溶液變化的濃度，進而推算此容器的體應變量，以推估地殼受大地應力產生的變形量。井下應變儀(圖一)為避免地表人類活動所造成之雜訊，通常埋設於地下約200公尺處(圖二)，主要用於觀測頻率由數秒至數月之間的地殼運動，其解析度介於地震儀和全球衛星定位系統(GPS)之間，尤其適合觀測慢地震(slow earthquake)或斷層暫態滑移(transient slip)。其觀測精度可達到 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量級。在監測小區域(<10<sup>1</sup> km)之地殼變動，較GPS觀測精度高；在短時間內(10<sup>-2</sup> ~ 10<sup>3</sup>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，將可截長補短，獲得不同時空尺度下的斷層活動訊號。

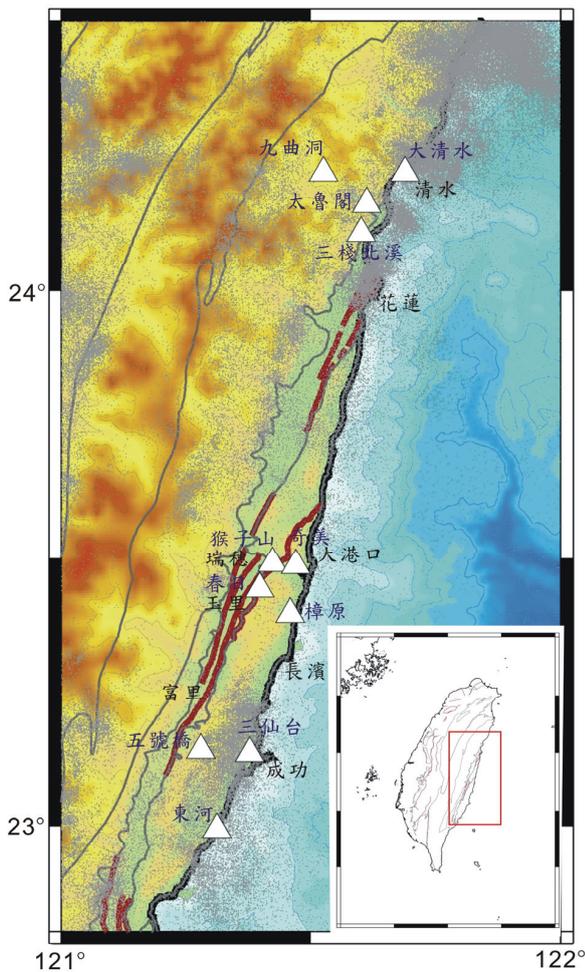
高精度之井下應變儀可用來偵測震前、同震及震後可能產生的微小應變(Langbein *et al.*, 1999; Johnston *et al.*, 1994; Roeloffs, 2000)。前人研究顯示斷層帶液壓的作用和地震的發生有密切之關係(Roeloffs *et al.*, 2003)，若能以井下應變儀量測地下應變，同時監測水位改變、地震數目、與地震發生時間之間的關係，將可進一步的了解孕震之過程及地震預警之可能性。此外，地球科學家研究發現地震所釋放之能量通常小於地殼累積之應變，二者之差異可能是因為部份地殼應力以無震滑移之形式釋放：例如地震後斷層緩慢的持續滑移或斷層近地表之潛移；或是在間震期發生規律的慢地震或斷層暫態滑移：例如在加拿大Cascadia及日本Nankai隱沒帶觀測到數月至數月的重複慢地震及斷層暫態滑移(Obara *et al.*, 2004, Rogers and Dragert,



圖一 Sacks-Evertson類型單分量及三分量井下應變儀；(a)單分量井下應變儀，主要量測體應變，儀器全長約4公尺，呈圓柱狀，其中儀器感應應變變化的鋼製圓柱形空腔位於儀器下部，長約3公尺，內部盛滿液體，盛裝的液體通常為聚矽氧油(silicone oil)。當外壁承受應力時，圓柱形空腔體積產生改變，使聚矽氧油流出或流入此一空腔，藉以量測體應變量；(b)三分量應變儀將應變感應空腔由體應變儀的一個改為六個，空腔的形狀為新月形，空腔各個中心點與兩側空腔中心點之距離角度為60度，相鄰180度之二個感應空腔為一組，量測該方向之應變。



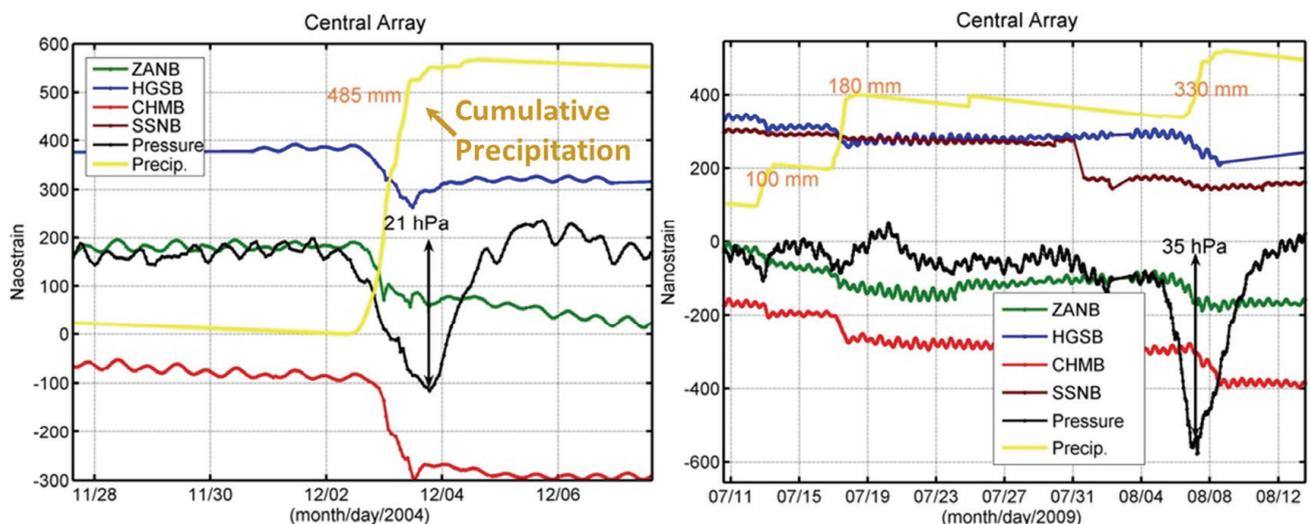
圖二 井下應變儀安裝示意圖(Linde and Roeloffs, 2006)。井下應變儀通常埋設於地表下方約兩百公尺處，儀器周圍會灌入不收縮水泥以增加儀器與井壁的耦合度(coupling)。



圖三 本院地球所設置之井下應變儀測站分布圖。右下角小圖紅框為本井下應變儀設置區域，白色三角形為井下應變儀站，紅色粗線為縱谷斷層，灰色圓點為1990-2010年深度小於30 km之所有地震。本院在臺灣東部的北段、中段與南段共設置三個陣列，目前共有11個測站。

2003)。由於慢地震多發生在孕震帶的最底部，除非破裂的範圍或規模較大，否則不易由連續GPS觀測站及地震儀記錄判讀。而井下應變儀所使用之頻率恰巧可以補足GPS和地震儀之空缺，因此，特別適合用來偵測慢地震或斷層暫態滑移。如果能更精準的計算各種型式之地震所造成之地震矩，將可較準確的評估地震的重複周期。另外，有關慢地震和斷層暫態滑移是否由同一物理機制造成、二者是否總是伴隨發生也是值得研究的課題，但由於這些事件所造成的訊號非常微小，利用地震儀和GPS連續站無法清楚辨別，也必須藉由井下應變儀資料協助判識。

目前本院地球所與美國卡內基研究院合作，在臺灣東部太魯閣、瑞穗-奇美、及池上-成功地區設置11組井下應變儀(圖三)，這些儀器埋設於地下200到270公尺處，連續的監測地殼岩石之應變量。初步研究中發現從2003年8月到2007年8月之間，共偵測到數十個可能和斷層活動有關之事件，這些事件和颱風同時發生(圖四)，而每次的變形持續數小時至數十小時(Liu *et al.*, Nature 2009)。臺灣東部的井下應變儀具有高靈敏度及穩定度，尤其適合觀測慢地震或斷層暫態滑移。本研究去除井孔內水泥收縮、地潮、氣壓、降雨、地下水位變動之效應，並比較井下應變儀記錄之岩石應變量及地表GPS觀測資料推求之應變，計算不同時空尺度之應變率及其與地震及斷層活動之間的關係。另外，結合地表GPS及地震測站之資料，將可對東部縱谷斷層之潛移特性及其與地面降雨和地下水位之關係有更深入之了解。除此之外，井下應變儀將有助於評估無震滑移在釋放地殼間震期累積之能量所占有之比重，進而對東部縱谷斷層之地震破裂行為及重複週期提供額外資訊。



圖四 井下應變儀體應變記錄、累計雨量(黃線)、及氣壓變化(黑線)之時間序列。綠色、藍色、紅色及棕色線分別為樟原、猴子山、奇美及春日站之體應變時間續列。圖中可發現體應變對氣壓及雨量之變化十分敏感。

## 參考文獻

1. Benioff, H., 1935, A linear strain seismograph. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 25(4), 283-309.
2. Johnston, M.J.S., Linde, A.T. and Agnew, D.C., 1994, Continuous borehole strain in the San-Andreas fault zone before, during, and after the June 1992, Mw 7.3 Landers, California earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 799-805.
3. Langbein, J., Gwyther, R.L. , Hart, R.H.G. and Gladwin, M.T., 1999, Slip-rate increase at Parkfield in 1993 detected by high-precision EDM and borehole tensor strainmeters, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2529-2532.
4. Linde, A. T., & Roeloffs, E. A., 2006, Borehole observations of continuous strain and fluid pressure. In D. Dzurisin (Ed.), *Volcano Deformation*, Springer, pp. 305-322.
5. Liu, C.C., Linde, A.T. and Sacks, I.S., 2009, Slow earthquakes triggered by typhoons, *Nature*, 459, 833-836.
6. Obara, K., Hirose, H., Yamamizu, F. and Kasahara, K., 2004, Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31. doi:10.1029/2004GL020848.
7. Roeloffs, E., 2000, The Parkfield, California earthquake experiment: An update in 2000, *Current Science*, 79, 1226-1236.
8. Roeloffs, E., Sneed, M. , Galloway, D.L. , Sorey, M.L. , Farrar, C.D. , Howle, J.F. and Hughes, J., 2003, Water-level changes induced by local and distant earthquakes at Long Valley caldera, California, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 127, 269-303.
9. Rogers, G. and Dragert, H., 2003, Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, *Science*, 300, 1942-1943.