

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：研習)

地震預測技術與地震潛勢評估

服務機關：經濟部中央地質調查所

出國人職稱：科長

姓名：李民

出國地區：澳洲

出國期間：2003/09/22~2003/10/21

報告日期：中華民國九十三年一月二十日

I3/
09300411

公 務 出 國 報 告 提 要

頁數: 63 含附件: 否

報告名稱: 地震預測技術與地震潛勢評估

主辦機關:

經濟部中央地質調查所

聯絡人/電話:

陳政恒/29462793-275

出國人員:

李民 經濟部中央地質調查所 構造與地震地質組 科長

出國類別: 研究

出國地區: 澳大利亞

出國期間: 民國 92 年 09 月 22 日 -民國 92 年 10 月 21 日

報告日期: 民國 93 年 01 月 20 日

分類號/目: I3/地質學 I3/地質學

關鍵詞: 斷層段,地殼變形,應變儀,地震前兆

內容摘要: 地震災害至今仍是吾人無法確實預測並防止其造成重大危害之最重要天然災害。雖然國際地震研究學者普遍認為地震是不可預測的,應當將研究經費轉至其它更值得研究之領域。但是也有學者認為地震發生過程是很複雜的,其中有可預測的、可能可預測的,及不可預測的部分。我們在做預測研究時必須於時間及空間上先將其劃分出來。例如臨震預報(數分鐘)及短期預報(數小時~數星期)因牽涉有太多非線性因子,故基本上是不可能達到的。但是對於調查非常清楚且非常活躍的斷層段(segment),則中期(數月~10年)及長期預報(10年~30年)是可行的。最重要的是,我們必須對活動性大的斷層進行觀測,以更進一步瞭解地震發生之過程及機制。就像當初大陸漂移及板塊運動之理論確定也是在足夠支持它存在的資料長期累積之後才完成的。所以,吾人也不能排除在地震發生之物理及化學機制充份瞭解後,至少某些型式的地震是有可能可以預測的。目前於世界各國之地殼變形觀測研究所使用之儀器,一般僅為超短期之地震儀與長期之GPS監測,由於應變儀對於斷層之蠕動(creep)及周期由數小時到數月的所謂「緩慢(slow)或安靜(quiet)」地震具有靈敏的感測與記錄能力,在地殼變形之觀測上恰可彌補地震儀與GPS觀測系統的不足。目前應變儀除澳洲CSIRO之GTSM為三分量應變儀之設計外,美國卡內基實驗室應變儀則為單分量應變儀,另日本AKASHI亦生產SACKS改良SACKS-EVERTSON液體單一分量之為三分量應變儀。本次赴澳洲考察之

目的除了解 GTSM 應變儀之設計原理外且利用本所福建坪觀測站 AKASHI 應變儀資料實際操作資料之處理與分析方法。

本文電子檔已上傳至出國報告資訊網

「地震預測技術與地震潛勢評估」

赴澳洲出國研修報告

摘要：

地震災害至今仍是吾人無法確實預測並防止其造成重大危害之最重要天然災害。自從 1975 年中國大陸成功地對規模達 7.3 級的海城地震提出先期預警，並因而大幅減低居民生命及財產之損失，地震預測研究的可行性即受到地震學者的重視(Deng et al., 1981)。不僅在前蘇聯及中國大陸持續進行廣泛的研究，並因而促使日本(Oki and Hiraga, 1988)及美國(Bakun and Lindh, 1985)開始有計畫地於特定地區進行地震預測研究。其中堪稱史上最有系統、最多樣儀器佈設、也最密集觀測的為美國加州 Parkfield 地震預測研究計畫。

雖然國際地震研究學者普遍認為地震是不可預測的(Main, 1997; Geller, 1997; Snieder and van Eck, 1997)，應當將研究經費轉至其它更值得研究之領域。但是也有學者如 Sykes 等 (1999)，認為地震發生過程是很複雜的，其中有可預測的、可能可預測的，及不可預測的部分。我們在做預測研究時必須於時間及空間上先將其劃分出來。例如臨震預報（數分鐘）及短期預報（數小時～數星期）因牽涉有太多非線性因子，故基本上是不可能達到的。但是對於調查非常清楚且非常活躍的斷層段(segment)，則中期（數月～10 年）及長期預報（10 年～30 年）是可行的。最重要的是，我們必須對活動性大的斷層進行觀測，以更進一步瞭解地震發生之過程及機制。就像當初大陸漂移及板塊運動之理論確定也是在足夠支持它存在的資料長期累積之後才完成的。所以，吾人也不能排除在地震發生之物理及化學機制充份瞭解後，至少某些型式的地震是有可能可以預測的。

考量台灣地處地震頻繁的「環太平洋地震帶」上，為落實「災害防救方案」，減少地震災害導致的生命財產損失，除了繼續有系統地推動台灣地區活動斷層調查研究外，更要進一步針對已確定與發震有關之活動斷層，進行活動性觀測及地震潛勢評估調查研究，即使中、短程之地震預報能力短期內無法落實，但逐漸累積之活動斷層觀測資料，必定是我國日後預報地震能力突破不可或缺之第一手資料。

根據澳洲 CSIRO 首席研究員 Gladwin 教授之研究顯示，井下型地殼應變儀應至少一組三口，每口各相距 10~20 公里彼此成一網站，若僅單單一、兩口則資料透露之地殼變動意義將不易解釋。本所 2000 年十二月底於台灣西南部觸口—大尖山斷層，完成「福建坪觸口斷層活動性觀測站」之建置，又於 2003 年十一月中於曾文水庫及甲仙地區共建置三站 GTSM 規格應變儀之斷層活動性觀測站。福建坪觀測站於井下 73~76 公尺處埋設一組井下型地震觀測儀器組，包括三分量速度計（微震儀）、三分量加速度計（強地動儀）、三分量應變儀（tensor strainmeter）；地表則裝設雨量計、氣壓計、及 GPS 天線等。由於應變儀之觀測資料會受雨量、氣壓及地潮（沿岸地區還會受海潮）之影響(Roeloffs, 2001)，故需要有實際的氣象觀測資料做為修正。埋設之儀器組中以應變儀之精度最高，可達 10^{-9} ~ 10^{-12} 。它對於斷層之蠕動（creep）及周期由數小時到數月的所謂「緩慢（slow）或安靜（quiet）」地震具有靈敏的感測與記錄能力（Linde et al., 1994），這是應變儀可與地震儀相輔相成之處。應變儀陣列又可搭配「連續全球衛星定位系統（CGPS）」，瞭解地殼應力在大地震後到下一次大地震發震前的應力時空轉移過程（PBO-T, 2001）。雖然有如此重要的優點，但是價格非常昂貴是其缺點，而且後續的維護成本與人力也是很重的

共64頁

負擔。

目前於世界各國之地殼變形觀測研究所使用之儀器，一般僅為超短期之地震儀與長期之 GPS 監測，而井下型應變儀在地殼變形之觀測上恰可彌補地震儀與 GPS 觀測系統的不足。目前應變儀除澳洲 CSIRO 之 GTSM 為三分量應變儀之設計外，日本 AKASHI 亦生產由 SACKS 教授改良自美國卡內基實驗室之 SACKS-EVERTSON 單分量應變儀而成三分量應變儀。本次赴澳洲考察之目的除了解 GTSM 應變儀之設計原理外且利用本所福建坪觀測站（採用日本 AKASHI 應變儀）資料實際操作資料之處理與分析方法。

目次

壹、前言.....	1
貳、目的.....	4
參、過程	
一、參訪並拜會澳洲聯邦科學與工業研究院 CSIRO.....	6
二、觀測站系統架構.....	8
三、井下型應變儀埋設.....	8
四、應變儀沿革.....	9
五、澳洲 GTSM 應變儀基本原理.....	11
六、應變儀資料處理、分析與實作.....	14
肆、心得.....	17
伍、建議.....	19
陸、附錄	
一、附錄 A (CSIRO 簡介)	44
二、附錄 B (MIKE GLADWIN 教授有關地殼應變觀測與地震預測之 相關著作).....	48
三、附錄 C (GTSM 應變儀簡介)	55

壹、前言：

身處地震帶上，受地震災害之驚擾是國人無法逃避之宿命。與其坐等災難性地震發生，導致國人生命財產之重大損失，甚至引發社會動亂，國人應有共識，抱著「毋俟敵之不來，俟吾有以待也」決心，參考美、日等同樣受地震威脅之先進國家經驗，應儘速推動斷層活動性觀測與地震潛勢評估相關研究，這些研究成果將可成為我國地震災害防救方案之重要依據。

雖然國際地震研究學者普遍認為地震是不可預測的(Main, 1997; Geller, 1997; Snieder and van Eck, 1997)，應當將研究經費轉至其它更值得研究之領域。但是也有學者如 Sykes 等（1999），認為地震發生過程是很複雜的，其中有可預測的、可能可預測的，及不可預測的部分。我們在做預測研究時必須於時間及空間上先將其劃分出來。例如臨震預報（數分鐘）及短期預報（數小時～數星期）因牽涉有太多非線性因子，故基本上是不可能達到的。但是對於調查非常清楚且非常活躍的斷層段(segment)，則中期（數月～10 年）及長期預報（10 年～30 年）是可行的。最重要的是，我們必須對活動性大的斷層進行觀測，以更進一步瞭解地震發生之過程及機制。就像當初大陸漂移及板塊運動之理論確定也是在足夠支持它存在的資料長期累積之後才完成的。所以，吾人也不能排除在地震發生之物理及化學機制充份瞭解後，至少某些型式的地震是有可能可以預測的。

考量台灣地處地震頻繁的「環太平洋地震帶」上，為落實「災害防救方案」，減少地震災害導致的生命財產損失，除了繼續有系統地推動台灣地區活動斷層調查研究外，更要進一步針對已確定與發震有關之活動斷層，進行活動性觀測及地震潛勢評估調查研究，即使中、

短程之地震預報能力短期內無法落實，但逐漸累積之活動斷層觀測資料，必定是我國日後預報地震能力突破不可或缺之第一手資料。

根據澳洲 CSIRO 首席研究員 Gladwin 教授之研究顯示，井下型地殼應變儀應至少一組三口，每口各相距 10~20 公里彼此成一網站，若僅單單一、兩口則資料透露之地殼變動意義將不易解釋。本所 2000 年十二月底於台灣西南部觸口—大尖山斷層，完成「福建坪觸口斷層活動性觀測站」之建置，又於 2003 年十一月中於曾文水庫及甲仙地區共建置三站 GTSM 規格應變儀之斷層活動性觀測站。福建坪觀測站於井下 73~76 公尺處埋設一組井下型地震觀測儀器組，包括三分量速度計（微震儀）、三分量加速度計（強地動儀）、三分量應變儀（tensor strainmeter）；地表則裝設雨量計、氣壓計、及 GPS 天線等。由於應變儀之觀測資料會受雨量、氣壓及地潮（沿岸地區還會受海潮）之影響(Roeloffs, 2001)，故需要有實際的氣象觀測資料做為修正。埋設之儀器組中以應變儀之精度最高，可達 10^{-9} ~ 10^{-12} 。它對於斷層之蠕動（creep）及周期由數小時到數月的所謂「緩慢（slow）或安靜（quiet）」地震具有靈敏的感測與記錄能力（Linde et al., 1994），這是應變儀可與地震儀相輔相成之處。應變儀陣列又可搭配「連續全球衛星定位系統（CGPS）」，瞭解地殼應力在大地震後到下一次大地震發震前的應力時空轉移過程（PBO-T, 2001）。

目前於世界各國之地殼變形觀測研究所使用之儀器，一般僅為超短期之地震儀與長期之 GPS 監測，而井下型應變儀在地殼變形之觀測上恰可彌補地震儀與 GPS 觀測系統的不足。目前應變儀除澳洲 CSIRO 之 GTSM 為三分量應變儀之設計外，日本 AKASHI 亦生產由 SACKS 教授改良自美國卡內基實驗室之 SACKS-EVERTSON 單分量應變儀而成三分

量應變儀。本次赴澳洲考察之目的除了解 GTSM 應變儀之設計原理外
且利用本所福建坪觀測站（採用日本 AKASHI 應變儀）資料實際操作
資料之處理與分析方法。

貳、目的：

地震是因斷層活動或火山噴發而引發之現象，而前者更是主要之原因。欲了解地震發生之機制，地震觀測資料不僅不可或缺，若是能觀測到數項震前異兆同時發生，則更表示預測地震之可行性大為提高。台灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊之碰撞帶上，山高地狹，活斷層密度極大。考量我國所受地震威脅之程度，再加上我國斷層活動主要是逆衝斷層發生在沉積岩中，不同於美、日等國之橫移斷層發生於結晶岩中，我國實有必要早日完成全島連線之「斷層活動性觀測站網」，除提供地震研究之直接觀測資料及各項開發工程之應用，並分擔國際間逆衝型活斷層研究重任，亦可進一步研發地震預測之可行性。

由於地震發生與該地區的地質環境及地體構造特性息息相關，隨著人們對全球地體構造及區域地質環境之了解日增，對地震長程潛勢較能掌握。雖然對於地震中程及短程預報尚有一段漫長的路要走，但由於世界經濟長期繁榮之經建成果，與都市化人口集中之生命財產均受地震災害嚴重威脅，故受地震威脅之先進國家莫不全力進行活動斷層調查與地震前兆觀測。我國已於公元兩千年邁入已開發國家，經建成果在亞洲僅次於日本，人口密度在全世界又僅次於孟加拉。考量台灣地處地震頻仍的「環太平洋地震帶」上，為落實「災害防救方案」，減少地震災害導致的生命財產損失，除了繼續有系統地推動台灣地區活動斷層調查研究外，更要進一步針對已確定與發震有關之活動斷層，進行活動性觀測及地震潛勢評估調查研究。以現今先進各國之研究成果顯示，有關中、短程之地震前兆研究亦不乏成效顯著之個案。況且，即使中、短程之地震預報能力短期內無法落實，但逐漸累積之

活動斷層觀測資料，必定是我國日後預報地震能力突破不可或缺之第一手資料。

由於目前世界各國對於地殼變形觀測研究上所使用之儀器，一般僅為超短期之地震儀與長期之 GPS 監測，而井下型應變儀在地殼變形之觀測上恰可彌補地震儀與 GPS 觀測系統的不足。目前應變儀除澳洲 CSIRO 之 GTSM 為三分量應變儀之設計外，日本 AKASHI 亦生產由 SACKS 教授改良自美國卡內基實驗室之 SACKS-EVERTSON 單分量應變儀而成三分量應變儀。鑑於本所已於 2000 年 12 月底在台灣西南部觸口—大尖山斷層完成「福建坪觸口斷層活動性觀測站」之建置。並於 2003 年十一月中於曾文水庫及甲仙地區共建置三站 GTSM 規格應變儀之斷層活動性觀測站，對於未來如何有效利用該等觀測站網所接收資料進行分析處理與干擾效應濾除以進行地震潛兆觀測並進而評估地震潛勢，即是本所建置斷層活動性觀測站網的主要目標。本次赴澳洲考察之目的除了解 GTSM 應變儀之設計原理外且利用本所福建坪觀測站（採用日本 AKASHI 應變儀）資料實際操作資料之處理與分析方法，俾便將來能應用於地震前兆觀測與地震潛勢之評估之研究，以期能將防災科技研究果落實於防災體系應用上，以減少國家人民生命財產之損失。

參、過程：

本所已於 2000 年 12 月底在台灣西南部觸口—大尖山斷層建置一站日規「福建坪觸口斷層活動性觀測站」。並於預計於 2003 十一月中於曾文水庫地區建置三站 GTSM 規格應變儀之斷層活動性觀測站，本次赴澳洲考察之目的為拜訪 Gladwin 教授（GTSM 應變儀設計者）並由該教授講授 GTSM 應變儀之設計原理外且藉由吾等二人攜帶地調所福建坪觀測站（日規 AKASHI 應變儀）部分資料實際教導觀測資料之處理與分析方法，俾便將來能應用於地震潛兆觀測與地震潛勢之評估之研究，以期能將防災科技研究果落實於防災體系應用上，以減少國家人民生命財產之損失。茲將本次赴澳洲之行程（如表一）及研習內容分數如後：

一、參訪並拜會澳洲聯邦科學與工業研究院 CSIRO：

澳大利亞聯邦"科學與工業研究組織(CSIRO)是世界上最大也最具多樣化的科研機構之一。其科研能力和業務範圍囊括了許多國家的經濟，環境和社會價值等領域，包括農業，礦物和能源，製造，通訊，信息技術，建築，衛生和環境等方面。有關澳洲聯邦科學與工業研究院 CSIRO 之沿革及其組織部門分述如後：

（一）澳洲聯邦科學與工業研究院 CSIRO 之沿革：

- 成立於 1926 年。
- 在澳大利亞有 65 個工作場所，6500 名職員，另有 3 座海外實驗室和 6 個國際駐地。
- 在 70 個國家有 700 多個正在進行或新近完成項目。
- 在發展中國家，特別是在亞洲有著長期的經驗，與歐美和日本的科研機構有著廣泛而緊密的聯系。

預定起訖日期	九二年九月二十二日	九二年九月二十三日至十月二十日	九二年十月二十一日	合計
天數	一	二十八	一	三十
住宿地點	布理斯班	布理斯班	台北	
詳細工作內容	啟程赴澳洲	一、參訪並拜會澳洲聯邦科學與工業研究院 CSIRO 二、觀測站系統架構 三、井下型應變儀埋設 四、應變儀原理 五、澳洲 GTSM 應變儀基本原理 六、應變儀資料處理 七、應變儀資料分析與實作	飛返台北。	

表一 澳洲研習行程

- 與澳大利亞公司，外國公司和跨國公司積極建立商業合作關

係。

- 始終如一地為澳大利亞和外國機構承包提供研究和發展。

(二) 澳洲聯邦科學與工業研究院 CSIRO 所屬部門：

物種多樣性 建築遠境 化學和塑料 氣候和大氣 能源

農田作物 食品加工 林業、木材和造紙業園藝學

信息技術和通訊 綜合製造產品 土地和水 海洋

測量標準 肉類、奶製品和水產養殖 探礦和採礦

礦物處理和金屬生產 石油 藥品和人體健康 射電天文學

服務 紡織品胡踐支和鞋類

二、觀測站系統架構：

本所預計於九十二年底於曾文水庫親水公園（曾文南站）、曾文水庫北端烏埔地區（曾文北站）及甲仙十八灣地區（十八灣站）完成三站斷層活動性觀測站設置。由於曾文北站並無電話線且亦無電力供應，故曾文水庫北站之觀測資料傳送需藉由無線傳輸，由曾文水庫北站發射無線電波將資料借由中繼站發射至曾文南站。曾文南站為 ADSL 固定 IP，可由本所監控站電腦上網接收曾文水庫南站及北站資料，另十八灣站之資料接收則以本所監控站電腦利用數據機撥號連線進行資料擷取，詳細架構圖如圖一。

三、井下型應變儀埋設：

歷經多年之研究與觀測，地震研究相關學界已了解是有一些地震前兆可能存在(Roeloffs, 1988)，但相對於同震變化來講則是太微細而不易查覺。又尤其吾人之觀測多於噪音影響不易排除的地表進行，如何濾除雜訊而突顯有意義的訊息，的確不是一件易事。由於地殼應變儀有著極精密之解析能力(可感測 10^{-11} ~ 10^{-12})，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風化之塊狀岩體，實為進行地震預測之良好工具(Ishii et al., 1997)。再者，長期紀錄地殼應變有兩點很重要的原因。一者，它可以觀察地震造成的應變階(strain step)，這可能是了解地震發生的一條線索；再者，地震發生前，地殼應變場是否有明顯之變化？為要了解這些，在地震活性高的地區(如臺灣)埋設應變儀觀測網，在觀測隨著距離而迅速衰減的應變場時，吾人是佔有地利之便(Sacks et al., 1971)。1987年的五、六月間，一次火山活動引發之主震，其同震體應變正巧被佈於其四周的五個井下型應變儀完整紀錄到。無論是定性或是定量比較，觀測值完全符合理論值。與主震相關的前震(foreshock)及餘震(aftershock)也都被紀錄整個過程，其間應變緩慢變化代表岩漿逐漸侵入的過程，並觸發了主震的發生(Ágústsson et al, 1999)。

有關井下型應變儀之埋設安裝須極為小心，因該儀器非常昂貴精密。首先以孔底灌漿器將不收縮水泥灌到孔底，之後馬上以捲揚機將地殼應變儀徐徐放入井中，訊號電纜線亦連應變儀放入井中。應變儀放置孔底定位後，完全沉入水泥之中。待不收縮水泥隔天硬化後，再以灌漿管伸至孔底，計算好數量之水泥漿灌入，將剩餘之空間填滿至井口，即告完成(如圖二)。

另在於地表裝設雨量計，並將所有儀器之訊號線與觀測屋(FRP)中之資料擷取器連接，將所有資料作一系統整合，井下建置示意如圖三。

四、應變儀沿革：

Benioff(1935)首先提出使用一埋設於地下並裝滿液體的大筒，筒身僅具一很小的開口，經由量測通過此開口的流量，則可量測地殼

體應變之微細變化。這項觀念一直到六十年代才由 Sacks 和 Evertson 拿來應用(Sacks et al., 1971; Evertson, 1977; Suyehiro, 1982), 設計成可置於井下的圓柱筒，此圓柱筒再分成兩部分：感應腔(sensing volume) 和回流腔(backing volume)。前者充滿了液體如 Silicon oil；後者則部分充滿惰性氣體。兩者之間有兩條狹小通道相連，其中一條接一風箱(bellow)，另一條接一安全筏，風箱用來感受應變之微細變化，安全筏則提供突然大量的應變(例如於應變計附近發生大地震)，在此突發情況下被擠壓之液體是由安全筏進入回流腔，並重新歸零應變計(Agnew, 1986)。這套水力放大(hydraulic amplification)原理之應用關鍵在於量筒體積的大小，液體的壓縮性及風箱的強度(stiffness)。

若風箱之體積相對於感應腔非常小，則吾人可假設在風箱內之液體是不可壓縮的。

感應腔之體積 V_s

$$V_s = V_s^0(1+D) \dots\dots\dots (A)$$

其中， D 是儀器的變形，

風箱的體積 V_b

$$V_b = V_b^0 + A_b q \dots\dots\dots (B)$$

其中， A_b 是風箱的有效面積， q 是它末端的位移量，

若是風箱製作品質精良，則上式之線性關係將非常正確。

經由質量不減原理，

$$\left[\frac{\rho}{1+P_s/K_s} \right] V_s^0(1+D) + \rho(V_b^0 + A_b q) = \rho(V_s^0 + V_b^0) \dots\dots\dots (C)$$

其中， ρ 是液體之密度； K_s 是液體的體積模數(bulk modulus)； P_s 則是感應腔內的壓力，可由下式定義：

$$P_s = \frac{k_b q}{A_b} + \frac{128\eta 2_l A_b}{\pi b_l^4} q \dots\dots\dots (D)$$

其中, K_b 是風箱的彈性係數, L_t 是連通道之長度, b_t 則為其直徑, η 是液體的動態黏滯性(dynamic viscosity)。

假設 $P_s \ll K_s$, 則 (C) 與 (D) 兩式可合併為

$$q \left[1 + \frac{K_b V_s^0}{A_b^2 K_s} \right] + \dot{q} \left[\frac{128\eta 2_l V_s^0}{\pi b_l^4 K_s} \right] = \frac{-V_s^0}{A_b} D \dots\dots\dots (E)$$

以日本一埋設實例為例, 其感應腔之 V_s^0 為 0.033m^3 , $A_b = 2\text{cm}^2$, 則 $q=170D$, 相當於一長達 170 公尺的伸縮計(extensometer)。

應變儀的埋設能否成功仍有許多細節應注意, 如感應腔內有氣泡, 則會大大減低液體的體積模數 K_s , 因而減低靈敏度。更重要的是一個功能正常的高精度應變計, 也會因為埋設時沒有處理好其與外覆水泥與圍岩之接觸耦合關係, 而無法正確測量地殼應變。

五、澳洲 GTSM 應變儀基本原理：

井下型應變儀靈敏度極高, 可偵測地殼應變範圍涵蓋 10^{-9} 至 10^{-12} 之間。單獨使用時, 井下應變儀可用來偵測地震前兆及同震變形。當其搭配 GPS 觀測網及地震儀觀測網, 又可完整紀錄板塊邊界地殼應力與應變之時空分布變化(圖四)。

GTSM(Gladwin Tensor Strain Meter)井下型應變儀最早於 1960 年代後期用於觀測礦坑變形, 當時用來量測低頻(30 分鐘)之應變資料。到 1980 年代初期, 這項儀器開始應用於地震研究(主要是在美國加州及澳洲)。1985 年 GTSM 已可提供高頻(達 100Hz)之應變資料。

GTSM 採模組化設計與製造(圖五)。它含有三個測量應變之模組, 另有一個模組測量方位, 一個模組為不變形參考單元(non-deforming reference cell)。這些模組均彼此獨立, 直徑長 100mm, 高度各為

170mm，分別疊置於圓柱形框架內。安裝時必須垂直置於直徑 150mm 之裸孔中心，在孔壁與應變儀外殼之間之環狀空間充填以特殊配方調製之膨脹性水泥(expansive grout)。應變量測模組內含一個三元件電容器(three element capacitance)，其中 d_1 之間距固定不動(圖六)做為參考位置，另一方之側板則可隨應變而移動，可精確量測細微小達 3×10^{-9} cm 之位移。三個應變量測模組分別以感應軸相差 120° 之方位擺置(圖七)。因為整支 GTSM 上下皆包覆以膨脹性水泥，故吾人可假設三個應變模組所在的約 0.6m 範圍內，應變橢圓(strain ellipse)是不變的。應變量測模組一般設計強度為“適當硬度(moderately hard)”，亦即其有效模數(effective modulus)應不小於圍岩之 0.6 ~ 0.8 倍，據此決定其外殼(不鏽鋼材質)之厚度。大多數的情況下有效模數是在 1 至 3GPa，應變儀量測到的變形量主要決定於應變儀外殼之有效模數及外覆之膨脹性水泥的強度與厚度，但若是上述參數不太匹配圍岩之強度參數，則會在此外來植入的水泥包覆體外產生應力集中現象。

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)如圖七。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

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

依慣例，應變收縮為負號，伸張為正號。

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

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

$$\text{或 } e(\theta) = \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) \cos 2\theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta \cdots \cdots (b)$$

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

$$\gamma(\theta) = (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}) \sin 2\theta + 2\varepsilon_{xy} \cos 2\theta \cdots \cdots (c)$$

工程分析上習慣定義下列三量:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} \\ \gamma_1 &= \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \cdots \cdots (d) \\ \gamma_2 &= 2\varepsilon_{xy} \end{aligned}$$

式 (b) 可改寫成:

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

或以矩陣方式表示為:

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

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 。

若設 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包括各項必須之修正量:

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

$$\text{或表示為 } U = M \times G \times H \times T \times S \dots\dots\dots(h)$$

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，也是吾人觀測之主要目的。

應變儀於實驗室組裝好即先進行 a prior calibration，直接對應變量測模組加壓測試並校正。校正無誤後運抵埋設現地安裝後可再利用現地地潮資料之 O_1 與 M_2 分量進行“等向性校正(isotropic calibration)”。但本項校正須待水泥固結，並累積至少一個月之地潮觀測資料才可正確分離 O_1 與 M_2 並據以校正。校正之目的是要得到面應變(areal strain)校正參數 c 、剪應變(shear strain)校正參數 d 、及三個應變量測模組之校正乘數 g_1 、 g_2 、及 g_3 。

既經校正，吾人即可經由上式逆推求得此應變儀埋設計畫之目的，即得知當地地殼應變張量(strain tensor)： ϵ_d 、 γ_1 、及 γ_2 。

六、應變儀資料處理、分析與實作：

由於 CSIRO 有關應變儀之觀測資料分析處理系統乃架構於 Solaris 作業系統，且由 Gladwin 教授於 MATLAB 軟體上撰寫程式運算，故吾等二人僅先就九十年四月一日至十月三十一日期間共二百餘日以每分鐘一筆之資料自本所監控中心透過電話數據機擷取自福建坪觀測站之觀測資料攜帶赴澳，並以此觀測資料實際操作資料分析技術。首先將此每筆資料存成 Excel 格式，然後再將此兩百餘日之資料整合於單一之 X1 檔，圖八至圖十分別為三分量應變儀(Channel A、

Channel B 及 Channel C)自四月一日至十月三十一日之原始資料以時間序展現，由圖八至圖十可顯示應變儀所紀錄之資料明顯受到許多垂直振幅縮尺及儀器 reset 之影響。隨後透過冗長之手動修正將每一個頻道非構造因素造成之垂直錯移並濾除部分不正確之資料後，其資料展現如圖十一至圖十三，由上述圖中可見肇因於膨脹性水泥漿固所形成之預期指數蛻變曲線。

透過圖十一至圖十三之資料曲線，可推測並回推應變儀周圍水泥漿固在各頻道所造成之指數與線性曲線如圖十四至十六綠色曲線所示，並作為濾除非構造機制造成之雜訊。圖十七至圖十九為濾除水泥漿固效應後所各頻道所量測到之剩餘之應變，調整圖十七至圖十九 Y 軸（應變）縮尺單位至 3000 個單位如圖二十至圖二十二，其中圖二十及圖二十二可見資料軌跡受到垂直錯移及其他雜訊的干擾甚大，反觀圖二十一之資料軌跡則可顯示軌跡增厚之情形，其原因乃是由於 Channel B 記錄了良好的地潮資料。

圖二十三至圖二十五為隨機取樣選取九十年九月一日至九月十日共十日之應變儀三頻道之資料並將 Y 軸（應變）縮尺單位均設定為 1200 個單位，其中只有圖二十四 Channel B 具有良好之地潮反應，而圖二十三 Channel A 及圖二十五 Channel C 均只顯示熱效應而無地潮效應，顯示此兩個感應元件與圍岩之耦合（coupling）不佳。綜合言之，福建坪觀測站三分量之應變儀由於資料記錄之垂直錯移就時間及振幅上而言均不規律，在資料的處理上需要極為冗長的時間作手動修正，至於資料的良窳則除了 Channel B 之資料因有明顯的地潮效應紀錄，並可進一步分析構造機制引發之訊號外，Channel A 及 Channel C 則因受熱效應或其他不明因素干擾過大導致地潮效應無法顯現，故

無法進一步產生張量資料以分析構造機制引發之訊號。本觀測站三分量應變儀因其中兩個分量之資料不佳故無法計算剪應變，然仍可利用應變儀僅剩之單一向度紀錄資料視為膨脹計作面應變（areal strain）之量測。

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(Tamura et al., 1991)。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(Matsumoto et al., 2001)。

肆、心得：

首先感謝經濟部國合處、本所及澳洲 CSIRO 提供本次「地震預測技術與地震潛勢評估」之研修機會並分享 Gladwin 教授在斷層活動性觀測站與井下型應變儀設置之等多項先進技術與經驗。台灣在一九九九年九月二十一日發生規模 7.3 之集集地震，造成二千多人死亡，財產損失更是無以計數。對於如此災難性地震，要如何防災、減災吾人期望未來能將本次所學地震預測與地震潛勢評估之技術與經驗應用於台灣觀測站之設置與地震潛兆偵測研究上，或許將來之研究能降低國人受災難性大地震之威脅。

世界各國經歷多年之研究與觀測，地震研究相關學界已了解是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})，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，實為進行地震前兆觀測之良好工具(Ishii et al., 1997)。

Benioff(1935)首先提出利用水力放大(hydraulic amplification)原理來量測地殼應變之觀念。這項觀念直到六十年代才由 Sacks 和 Evertson 拿來應用(Sacks et al, 1971; Evertson, 1977; Suyehiro, 1982)。此項設計在火山地區觀測尤其成功。1987 年五、六月間發生於冰島的一次由火山活動引發之主震，其同震體應變被其四周的五個井下型體應變儀完整紀錄，無論是定性或是定量比較，觀測值均完全符合理論值。與主震相關的前震與餘震也都被完整紀錄，可說明岩漿體逐漸侵入的過程，並觸發了主震(Ágústsson et al., 1999)。應變儀也是監測 slow earthquake 或 quiet earthquake 之利器(Linde et al., 1994)。

然而體應變儀無法感測到地殼剪應變。針對此項需求，澳洲聯邦科學暨技術研究院(CSIRO)之 Mike Gladwin 即提出新的設計，同時可量測相當於體應變之面應變(areal strain)及兩種剪應變 γ_1 與 γ_2 (Gladwin, 1984)。此種應變儀現今稱為 GTSM(Gladwin Tensor Strain Meter)。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)。

針對台灣於井下型應變儀設置所得到的經驗有三點：(1)埋設地點於逆衝斷層帶須遠離斷層；(2)站址必須在地表下至少 200 公尺以下有厚層堅硬之岩層(如膠結良好之塊狀砂岩或結晶岩)；(3)欲得到好的觀測資料，則好的儀器與好的地質井缺一不可。地調所於九十二年度底設置之三座觀測站即依此原則建置。

五、建議：

首先，由於台灣西南部地區逆衝斷層系統其特性為越西側斷層越年輕、地層也越年輕、岩層膠結程度與固化程度皆越差，顯示鬆軟地層極不利於埋設井下型應變儀。故本所九十二年度底設置的三站：曾文水庫(北)、曾文水庫(南)、及甲仙十八灣均選擇於遠離斷層帶之富含塊狀砂岩的糖恩山砂岩地區建站。此項經驗應有助於 PBO-T 之建站規劃上。

其次，井下型應變儀可分為體應變儀(Volumetric strainmeter 或 dilatometer)及三分量應變儀(tensor strainmeter)，後者除了可感測地殼體應變外，尚可感測到地殼剪應變。由美國加州長期之地震觀測資料顯示，有些斷層蠕動(creeping)不會引發體應變儀及水位計之反應，卻會在三分量應變儀留下明確訊號(圖二十六)。

再者，台灣地區年降雨量高，且明顯有乾、濕季之分，除了地表降雨量本身之影響外，地下水位面因而變動也會造成地層內體應變與剪應變之變化。要保存井下型應變儀訊號中單純屬於來自地體構造運動之訊號(tectonic strain)，除了要濾除地潮、氣壓等影響外，仍有必要釐清水文變化對應變儀之影響並濾除之。後兩項經驗若發展成熟應可對 PBO-T 之應變儀資料分析有相輔相成之效果。

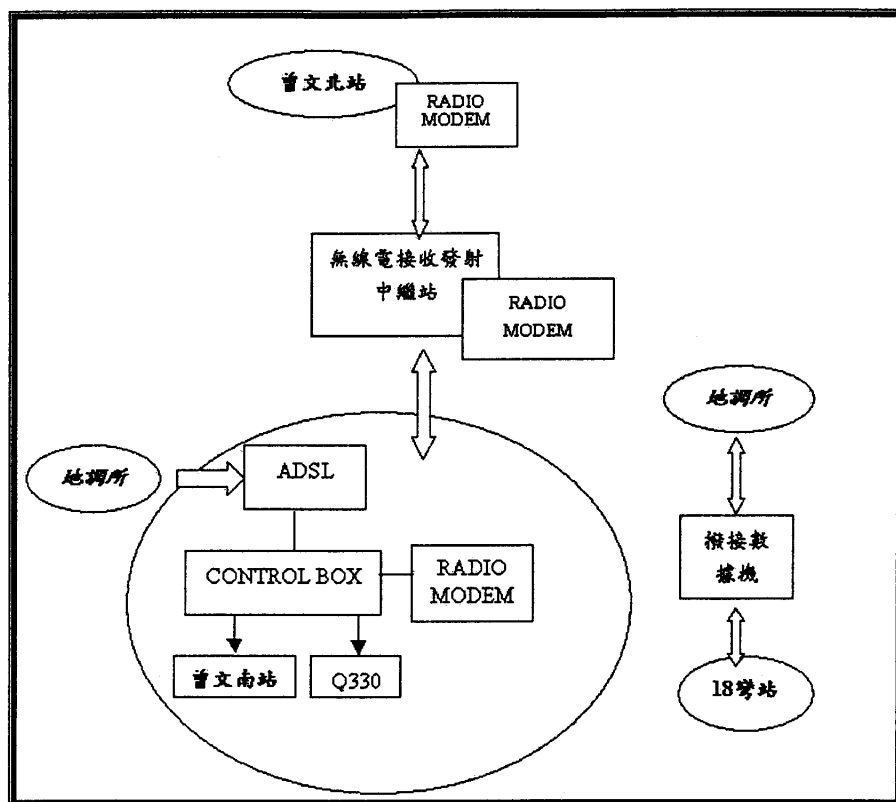
鑑於地震所造成之災害常超乎想像，吾人亦應有憂患意識，政府除了須加強從事斷層活動性與地震潛兆偵測研究並架設井下監測井以擷取相關資訊，以為後續研究之基礎。然在上述研究進行過程中亦有下述各點事項值得考量：

(一) 由於地下地質之構造環境無法完全預知，深井鑽探與井下儀器

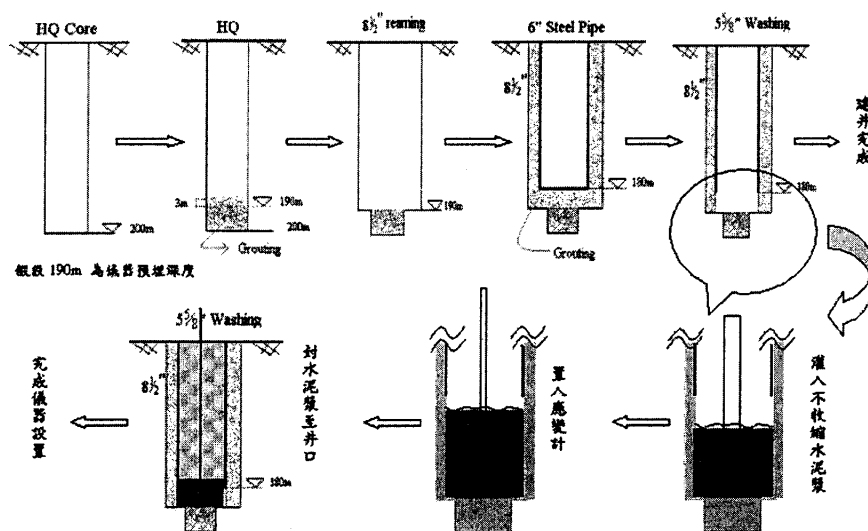
裝設均需有經驗之廠商配合。為適應國內地質狀況，有些觀測

相關儀器設備可能亦需要國內產、學、研界共同研究開發。

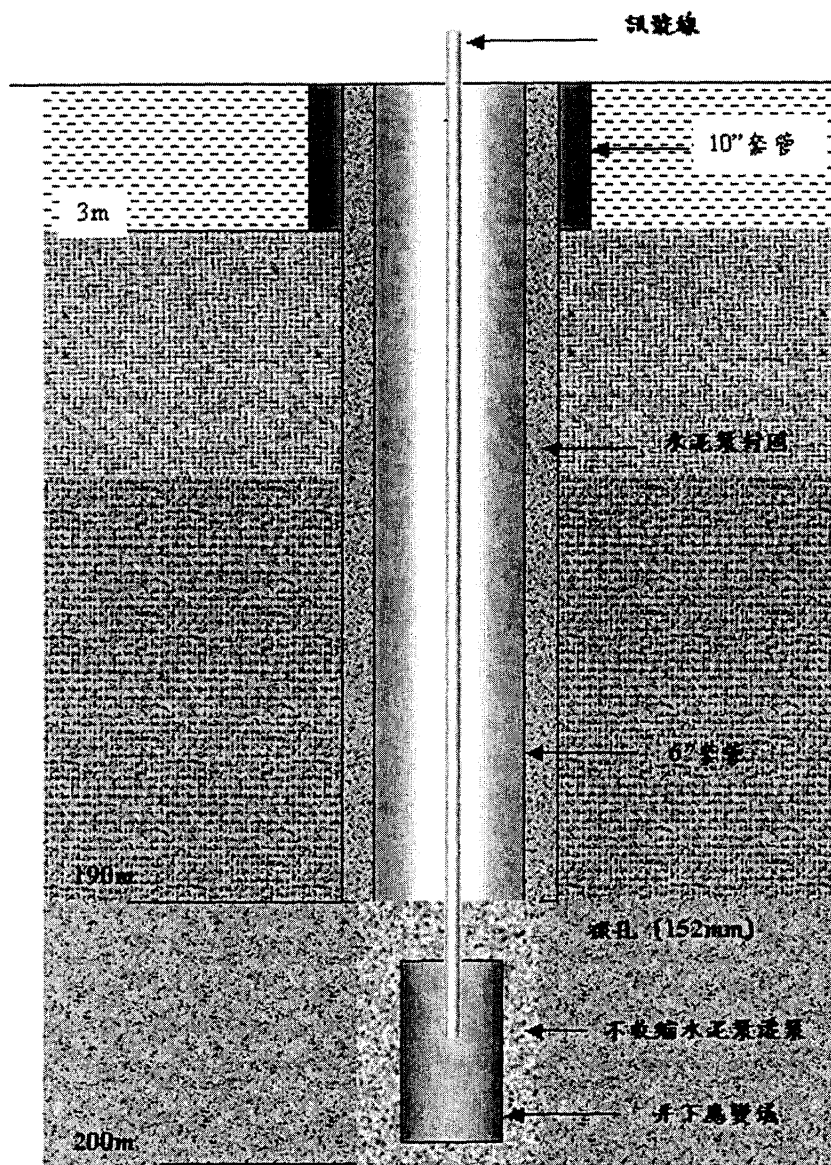
- (二) 井下型應變儀於地殼變形之觀測上確實可彌補地震儀與 GPS 觀測系統之不足。
- (三) 井下型應變儀之規格必須考量台灣地質構造之背景，除可量測面應變外亦需可量測剪應變，故於台灣埋設之應變儀必須為三分量應變儀。
- (四) 井下型應變儀必須有防雷擊及不受觀測站現址停電之保護措施。
- (五) 由於應變儀埋設位置之井下圍岩地質條件必須符合岩性均一、硬度夠大及遠離斷層擾動帶外，井內亦需慎防湧水以避免干擾儀器資料接收品質。
- (六) 如果預算許可應儘可能於觀測站設置前先規劃打試井，俟地質條件均符合應變儀埋設要求後再進行擴孔、造井及安裝儀器。
- (七) 觀測站現址除需考量用地取得、交通便利、電力供應及電信傳輸品質外亦需考量觀測站之安全維護。



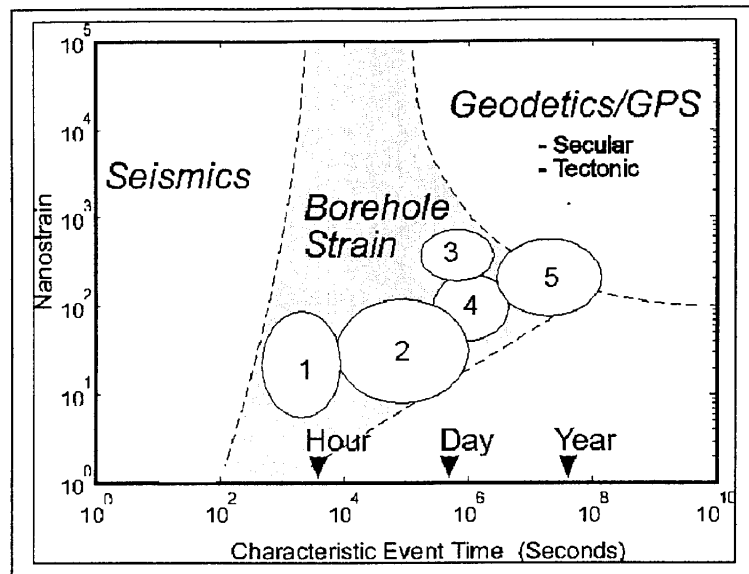
圖一 地調所九十二年度 GTSM 井下應變儀觀測系統架構圖



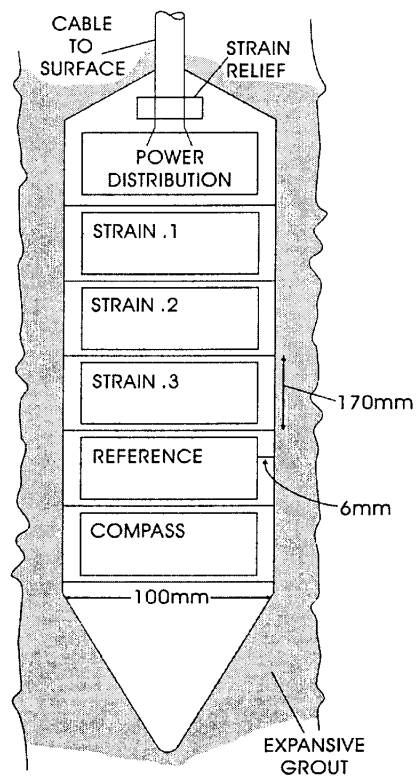
圖三 施工流程圖



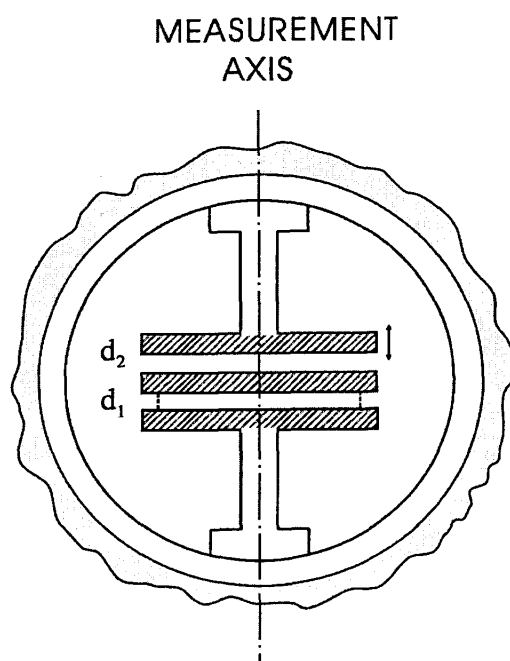
圖三 應變儀井下建置示意圖



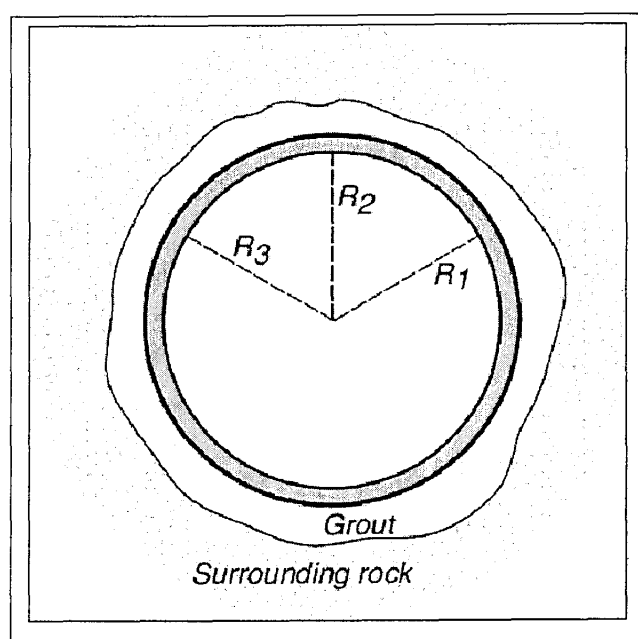
圖四地殼應變範圍，應變儀量測頻帶填補地震儀及 GPS 間之空白區域



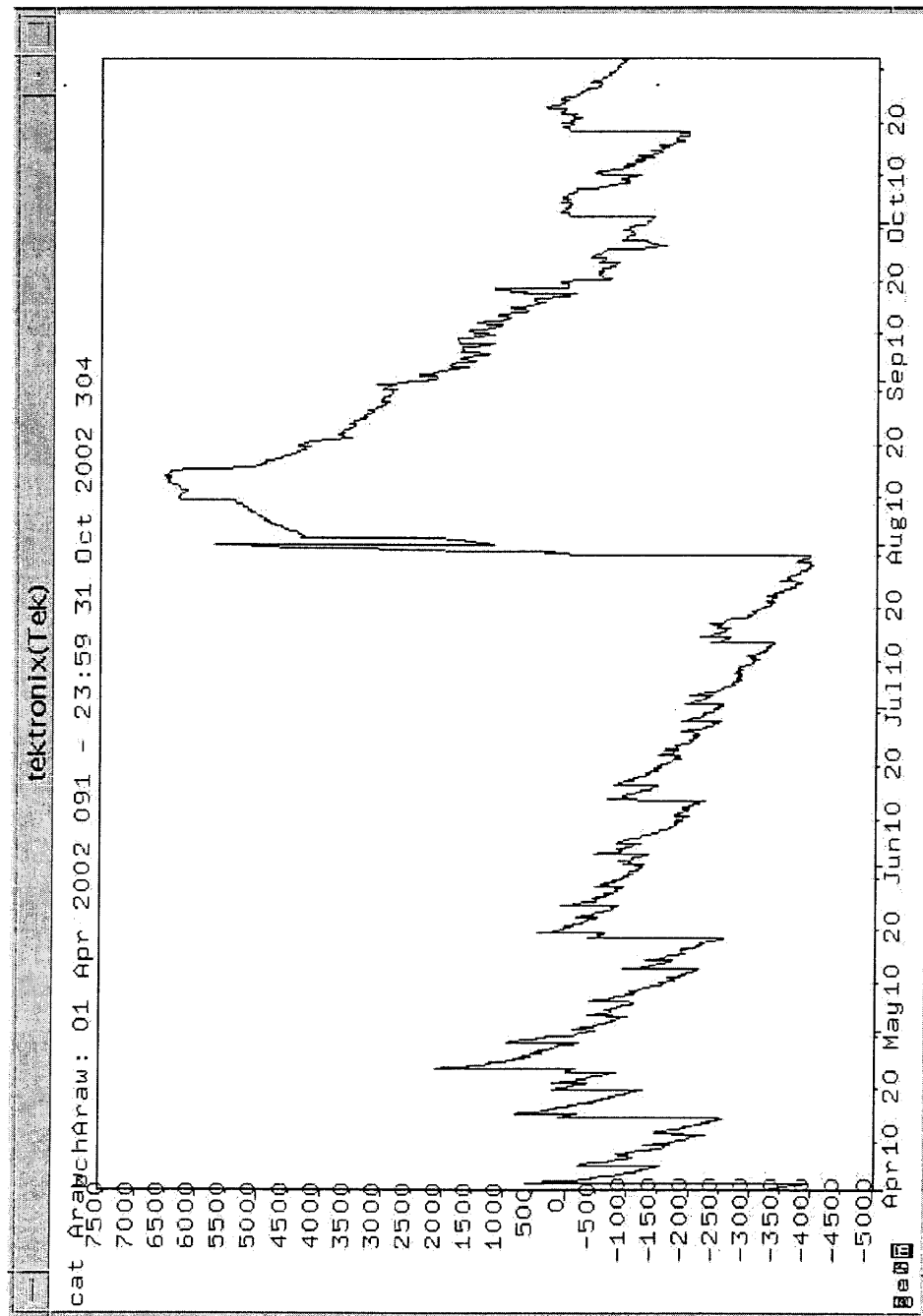
圖五 GTSM 模組化示意圖



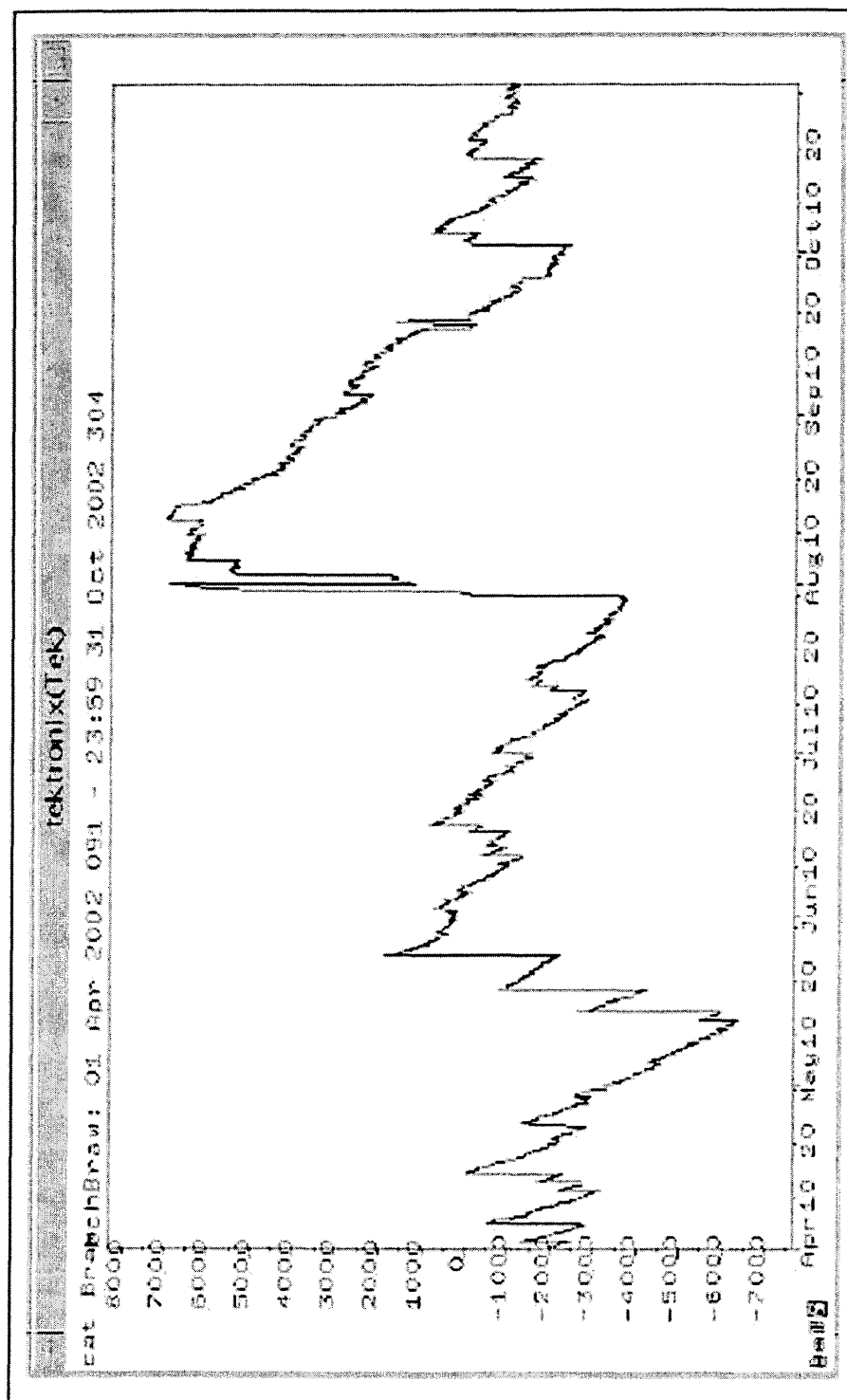
圖六 三元件電容器示意圖



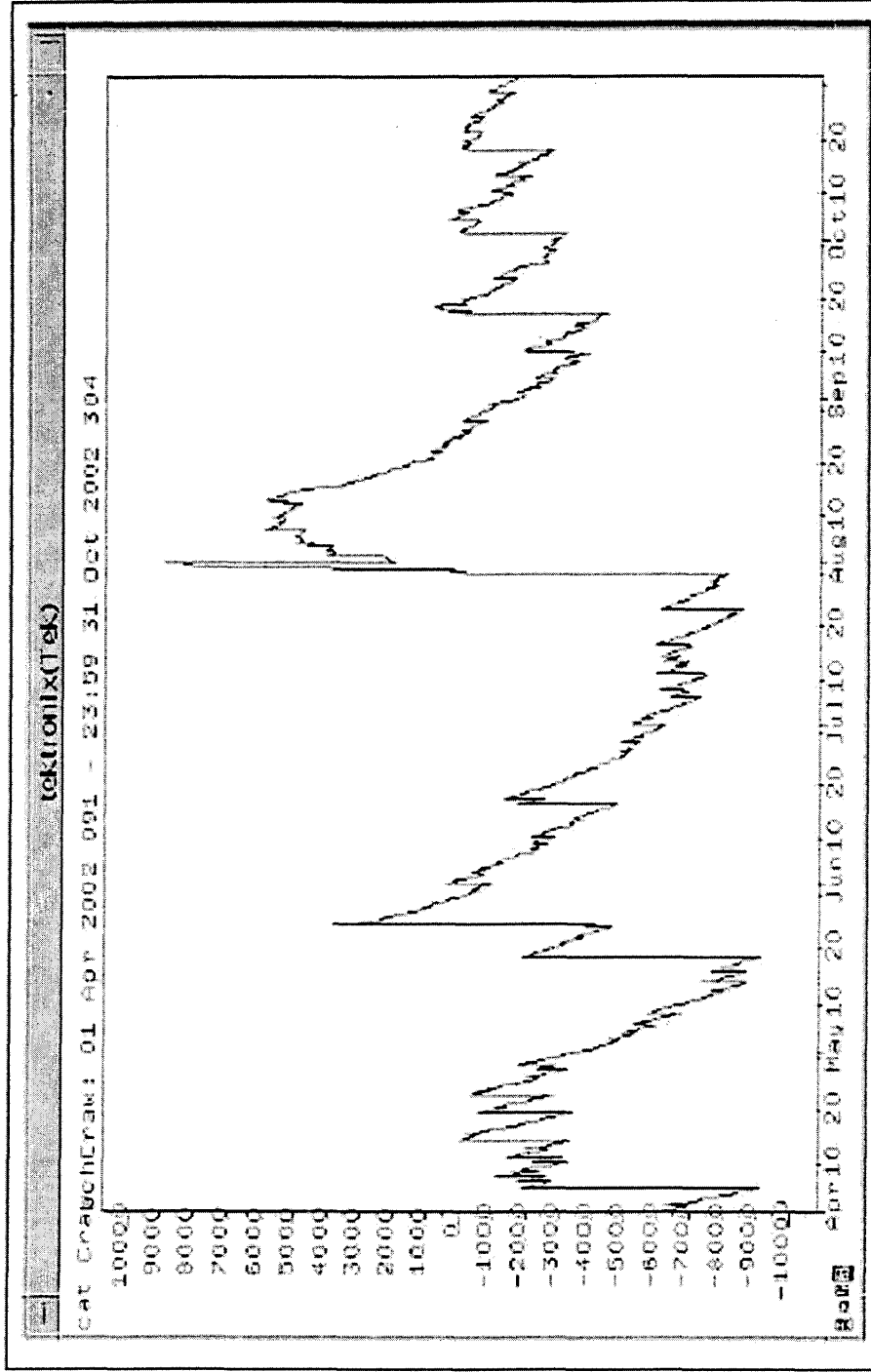
圖七 GTSM 應變量測模組橫切面示意圖，三軸分別
相隔 120° ，應變儀與圍岩間充填以膨脹性水泥



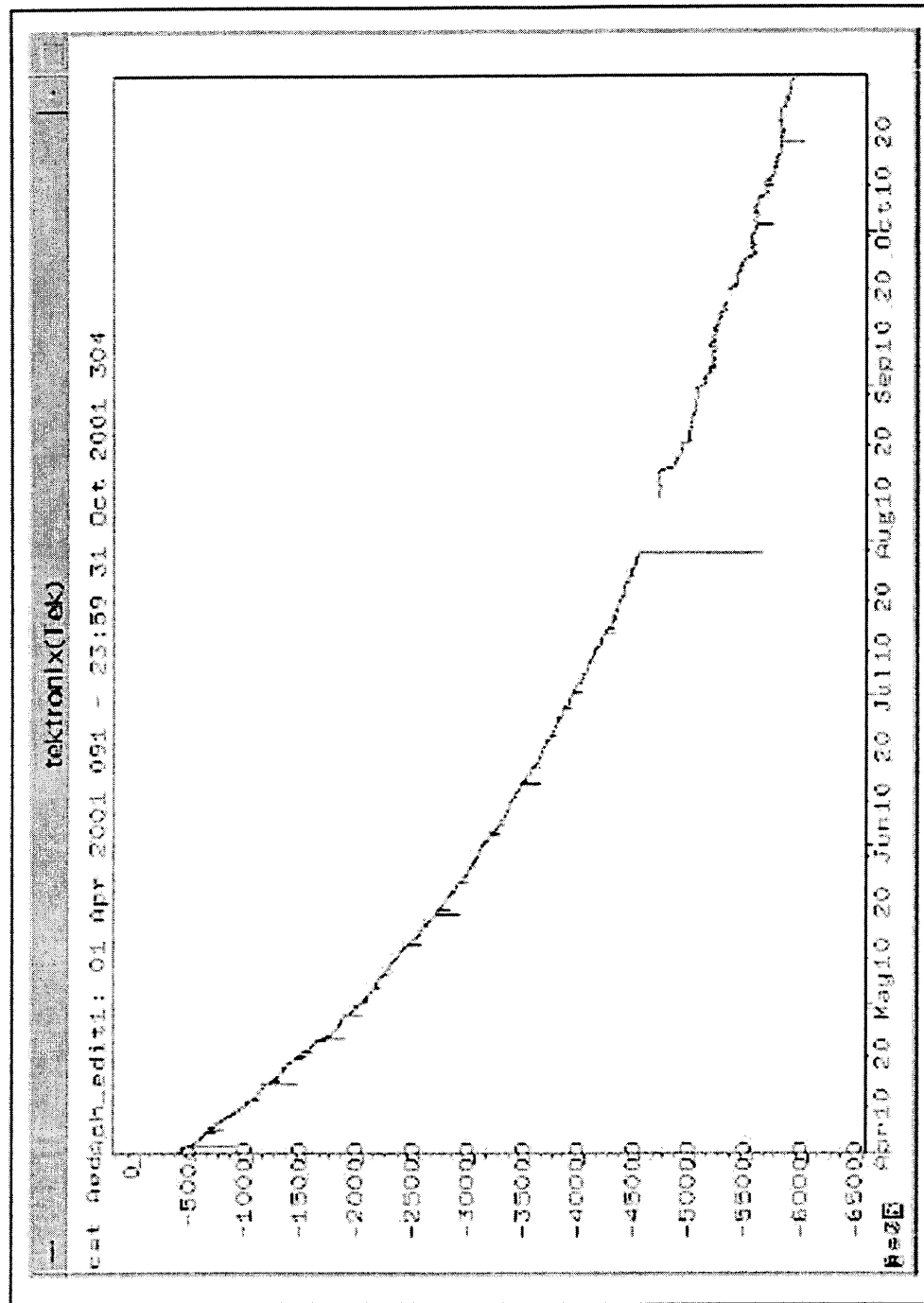
圖八 三成分應變儀 ChannelA (20010401~20011031) xl 檔資料疊合結果。



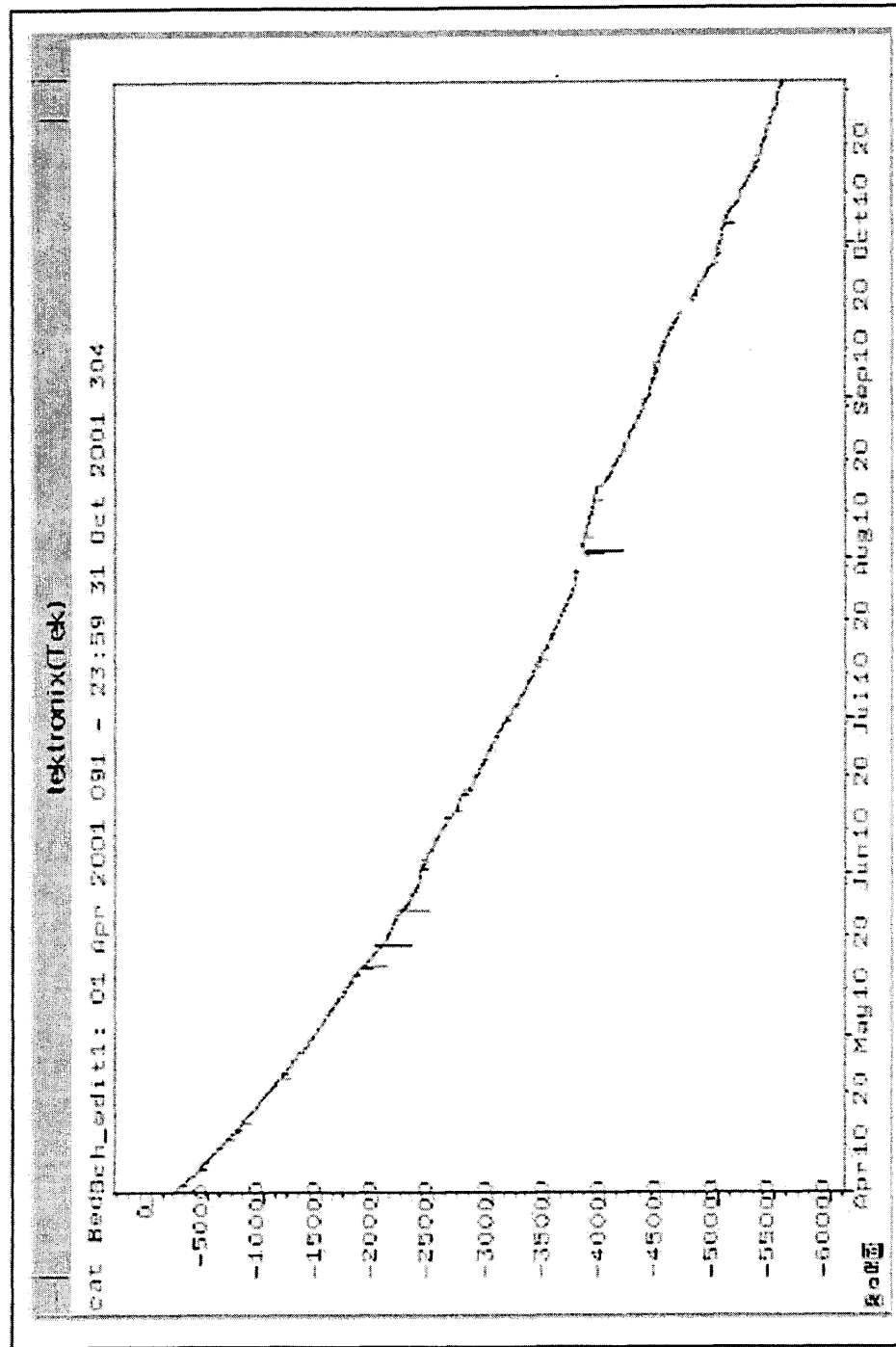
圖九 三成分應變儀 Channel B (20010401~20011031) xl 檔資料疊合結果。



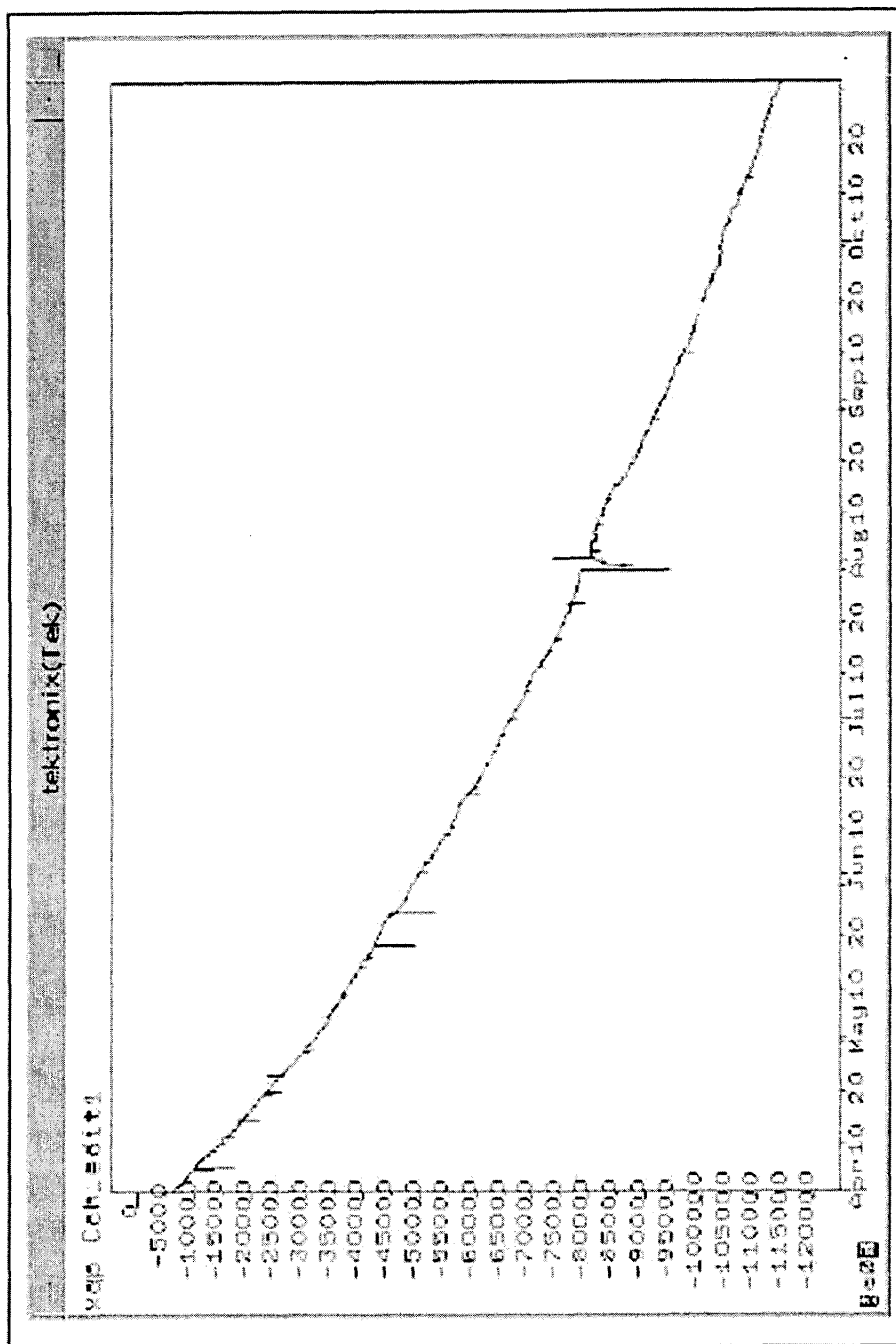
圖十 三成分應變儀 Channel C (20010401~20011031) xl 檔資料疊合結果。



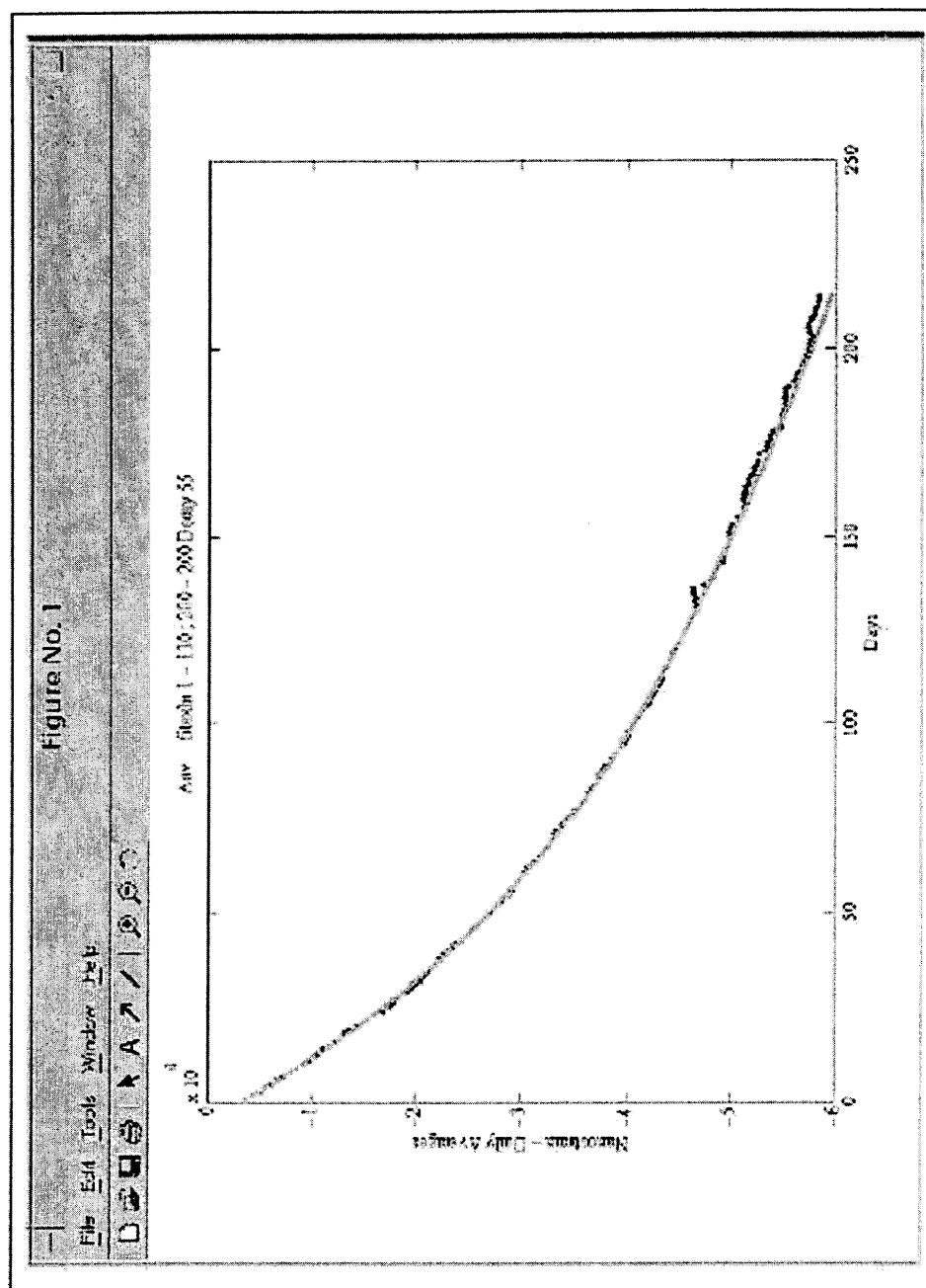
圖十一 三成分應變儀 Channel A (20010401~20011031) 濾除垂直錯移及部分偏差資料之疊合結果。



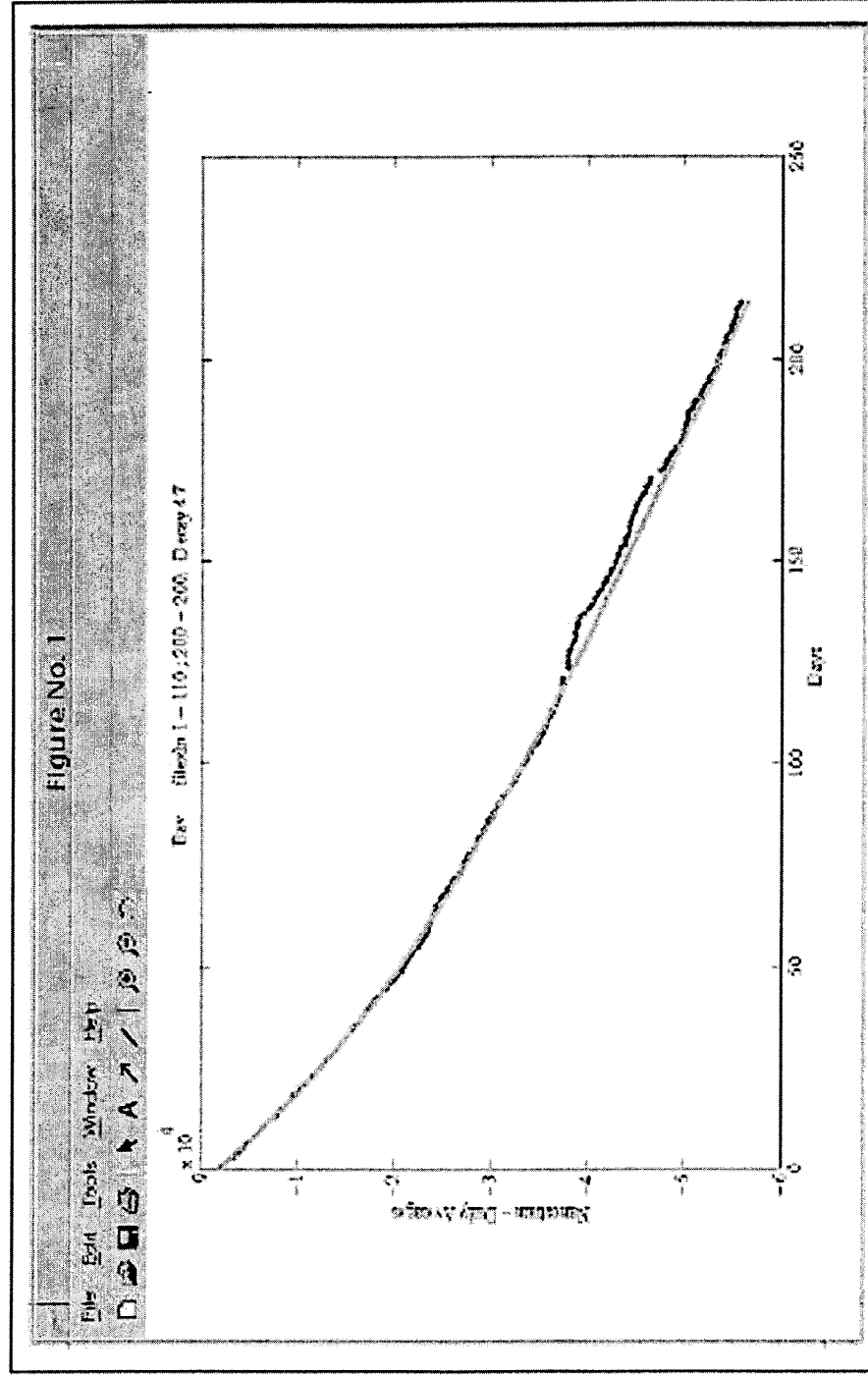
圖十二 三成分應變儀 Channel B (20010401~20011031) 濾除垂直錯移及部分偏差資料之疊合結果。



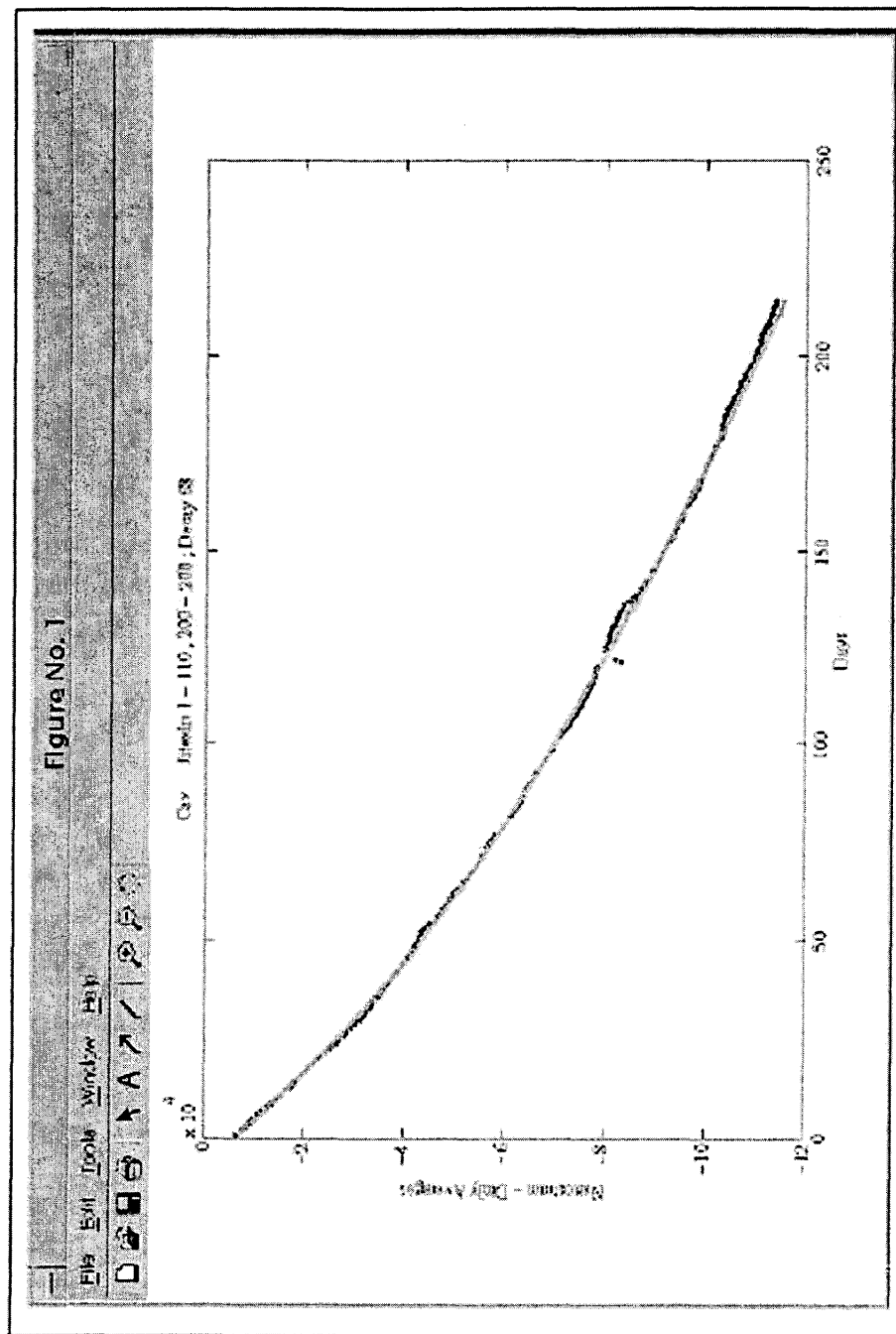
圖十三 三成分應變儀 Channel C (20010401~20011031) 濾除垂直錯移及部分偏差資料之疊合結果。



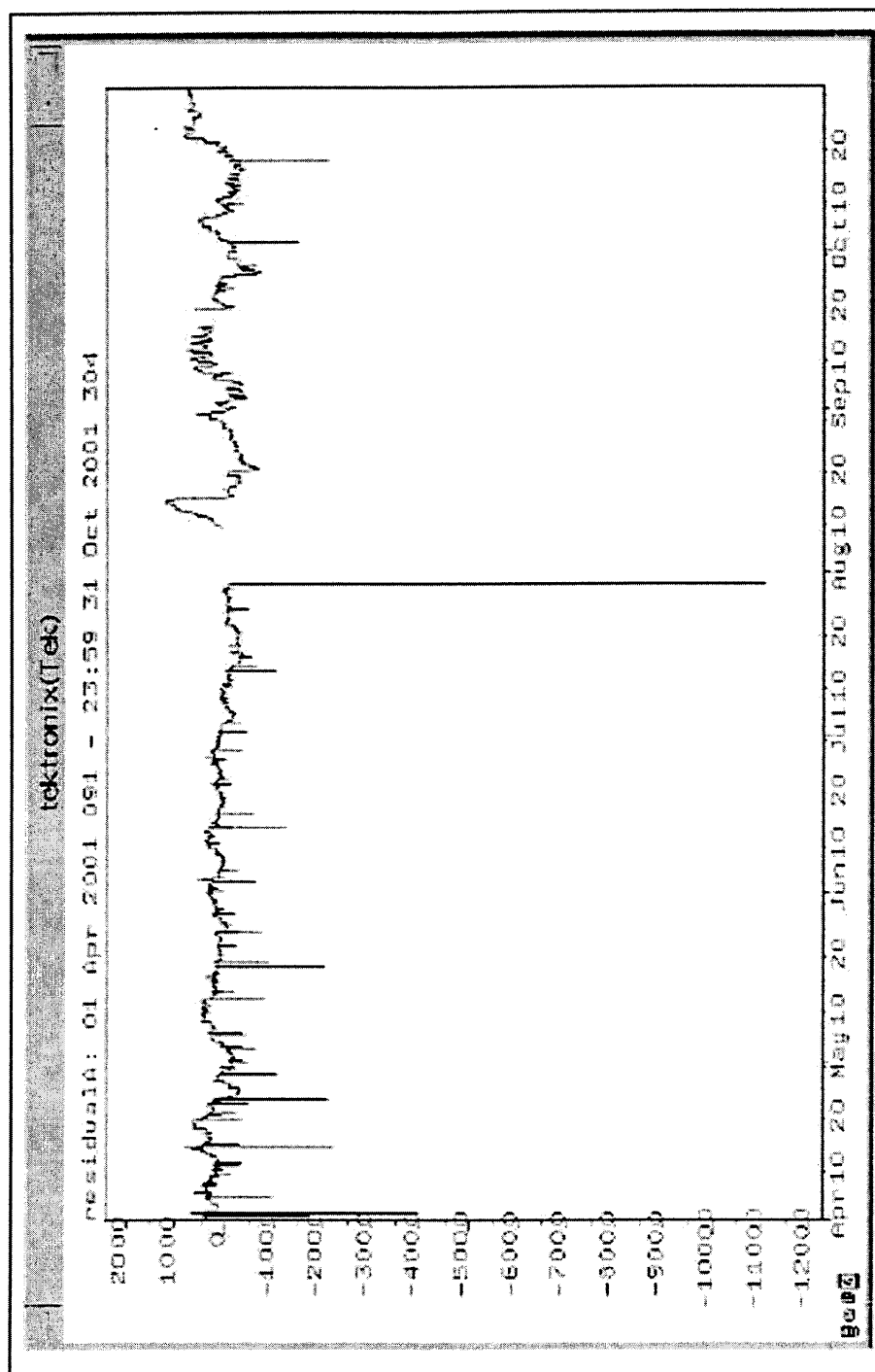
圖十四 三成分應變儀 Channel A (20010401~20011031) 水泥癒合效應回推曲線 (綠色部分)。



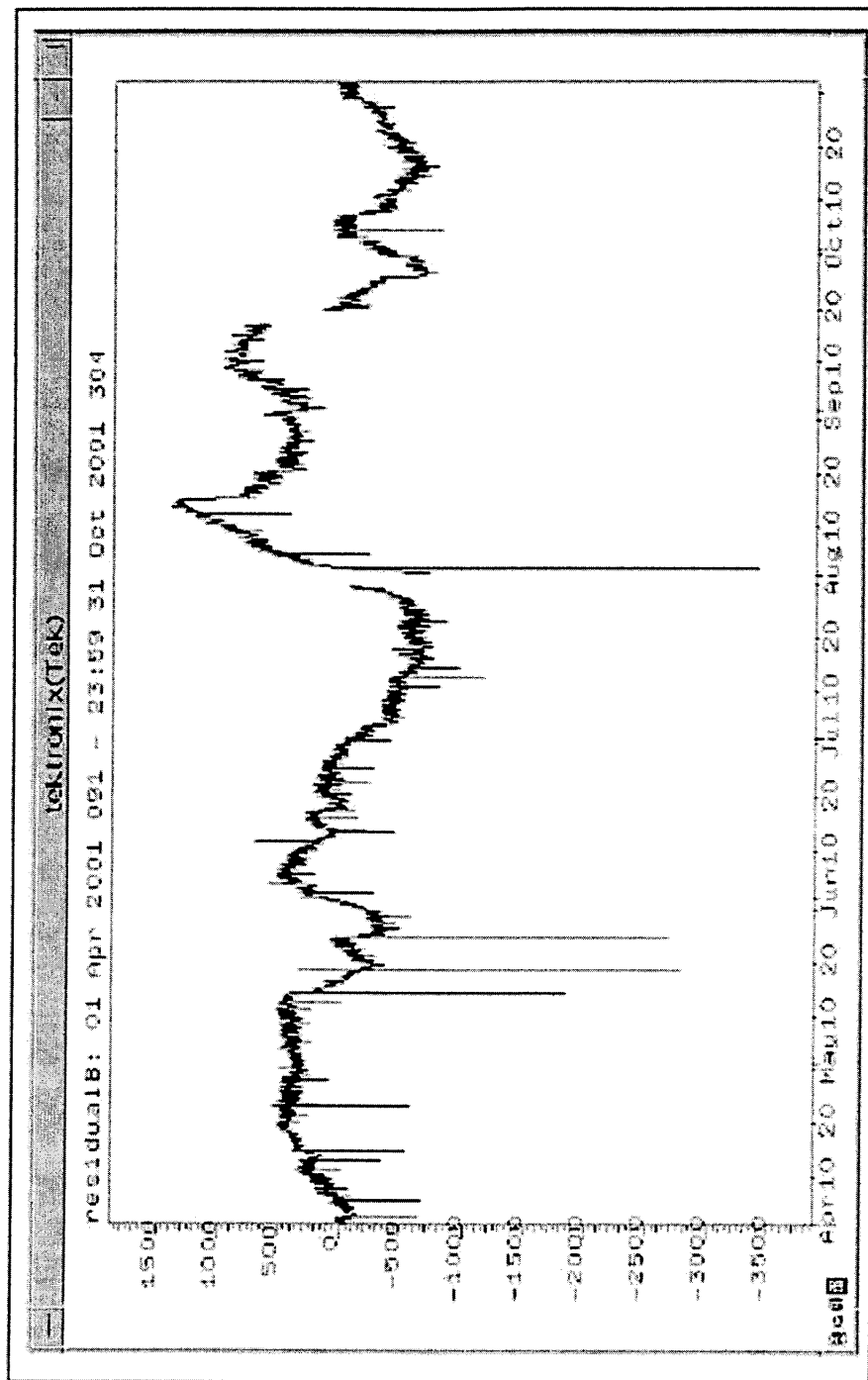
圖十五 三成分應變儀 Channel B (20010401~20011031) 水泥癒合效應回推曲線 (綠色部分)。



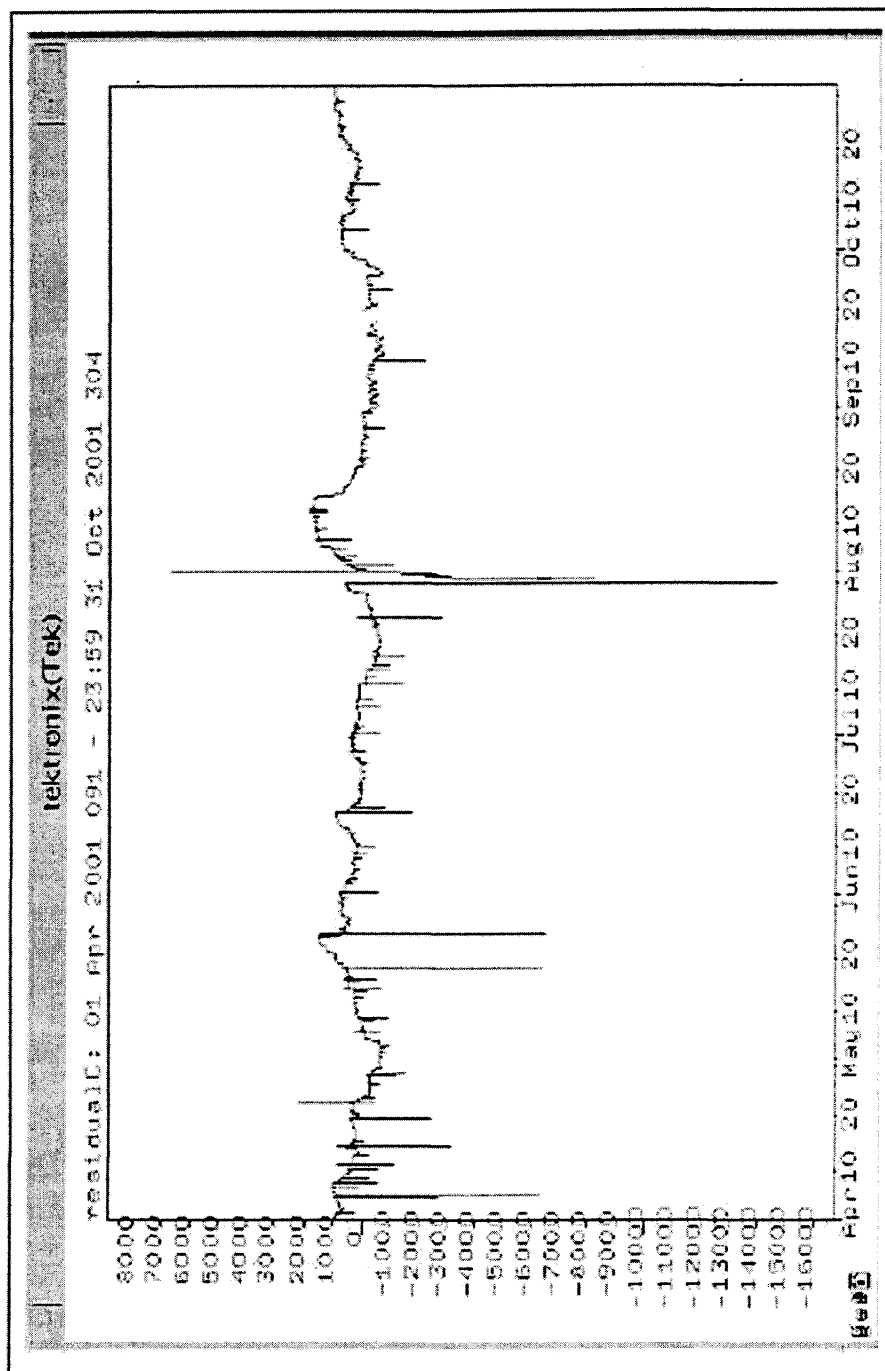
圖十六 三成分應變儀 Channel C (20010401~20011031) 水泥癒合效應回推曲線 (綠色部分)。



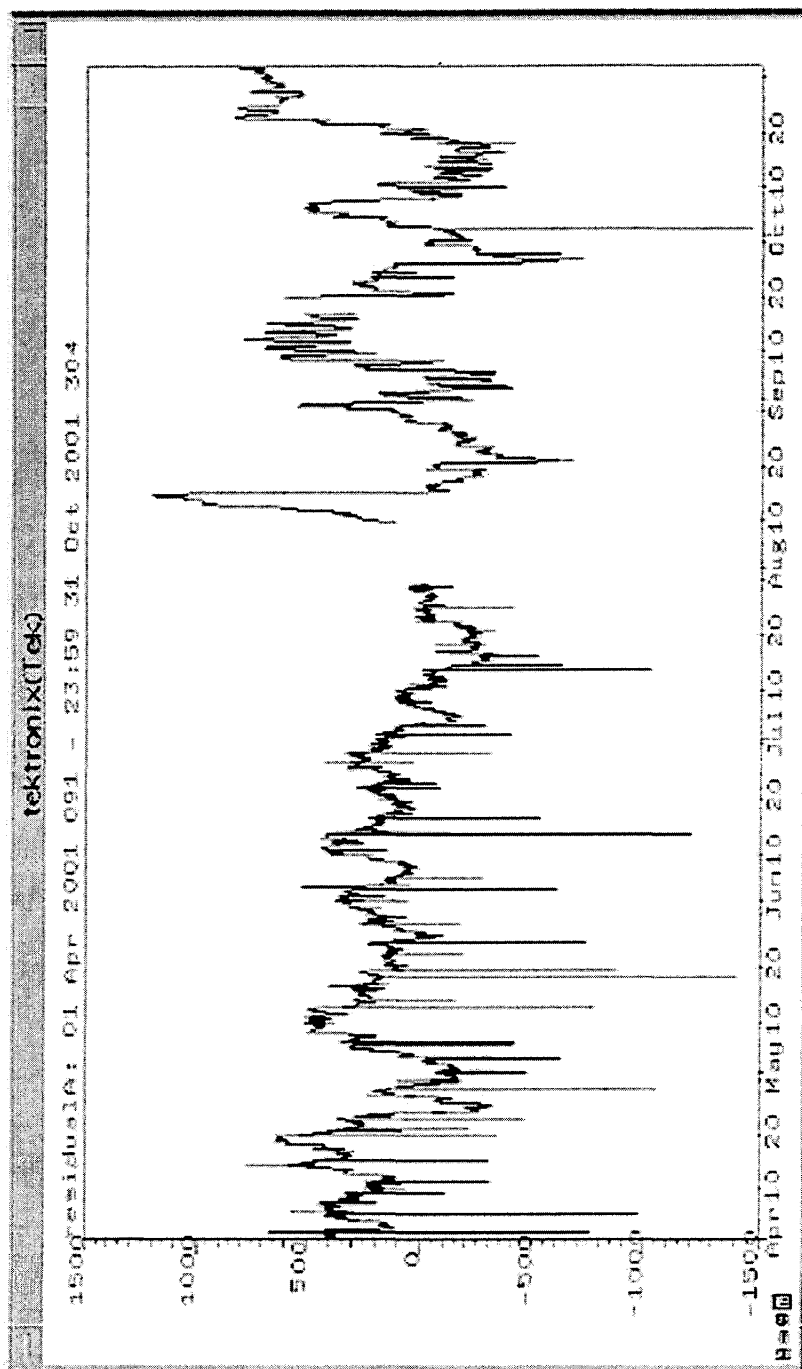
圖十七 Channel A (20010401~20011031) 濾除水泥癒合效應所紀錄之剩餘應變。



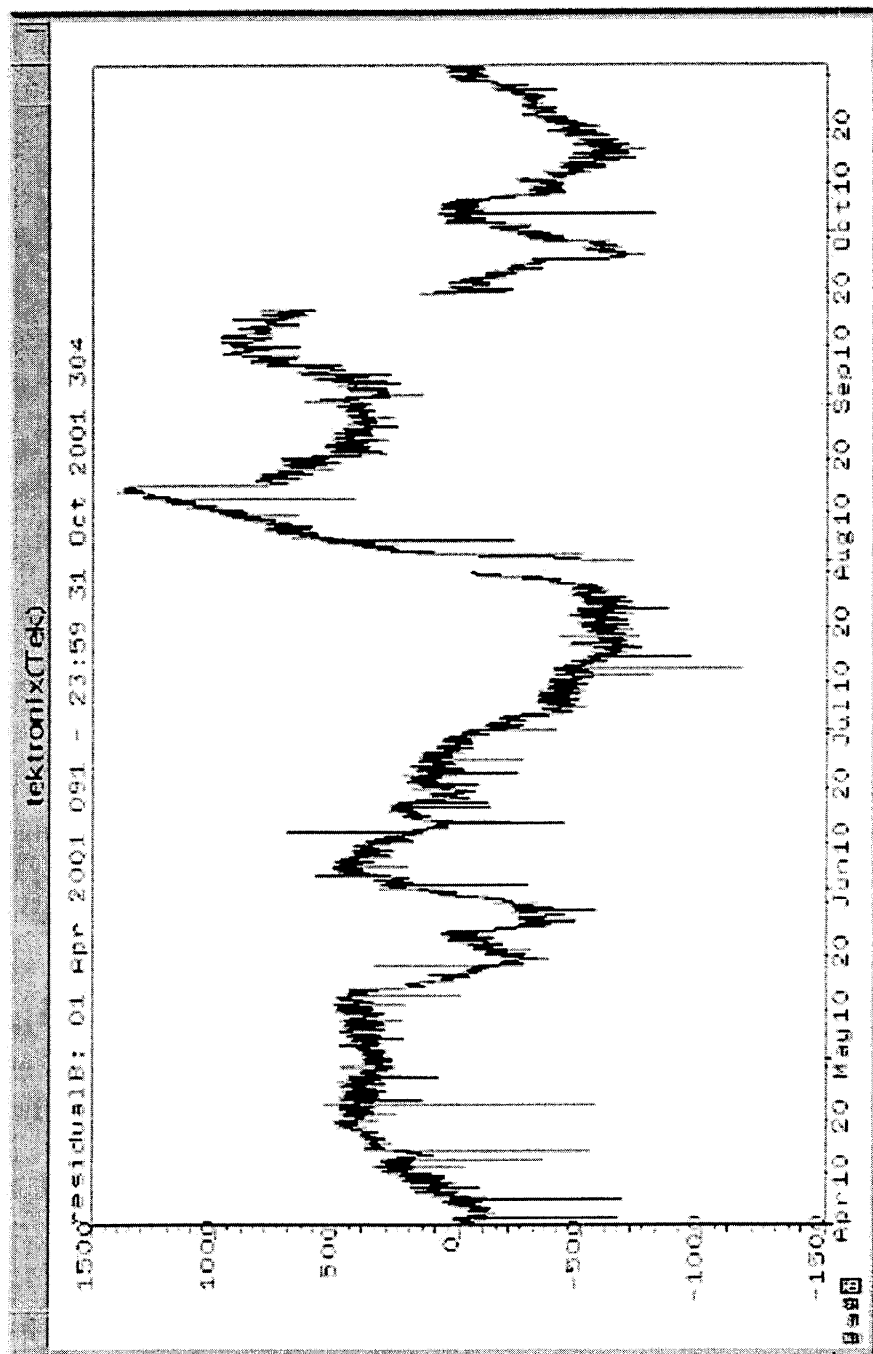
圖十八 Channel B (20010401~20011031) 濾除水泥癒合效應所紀錄之剩餘應變。



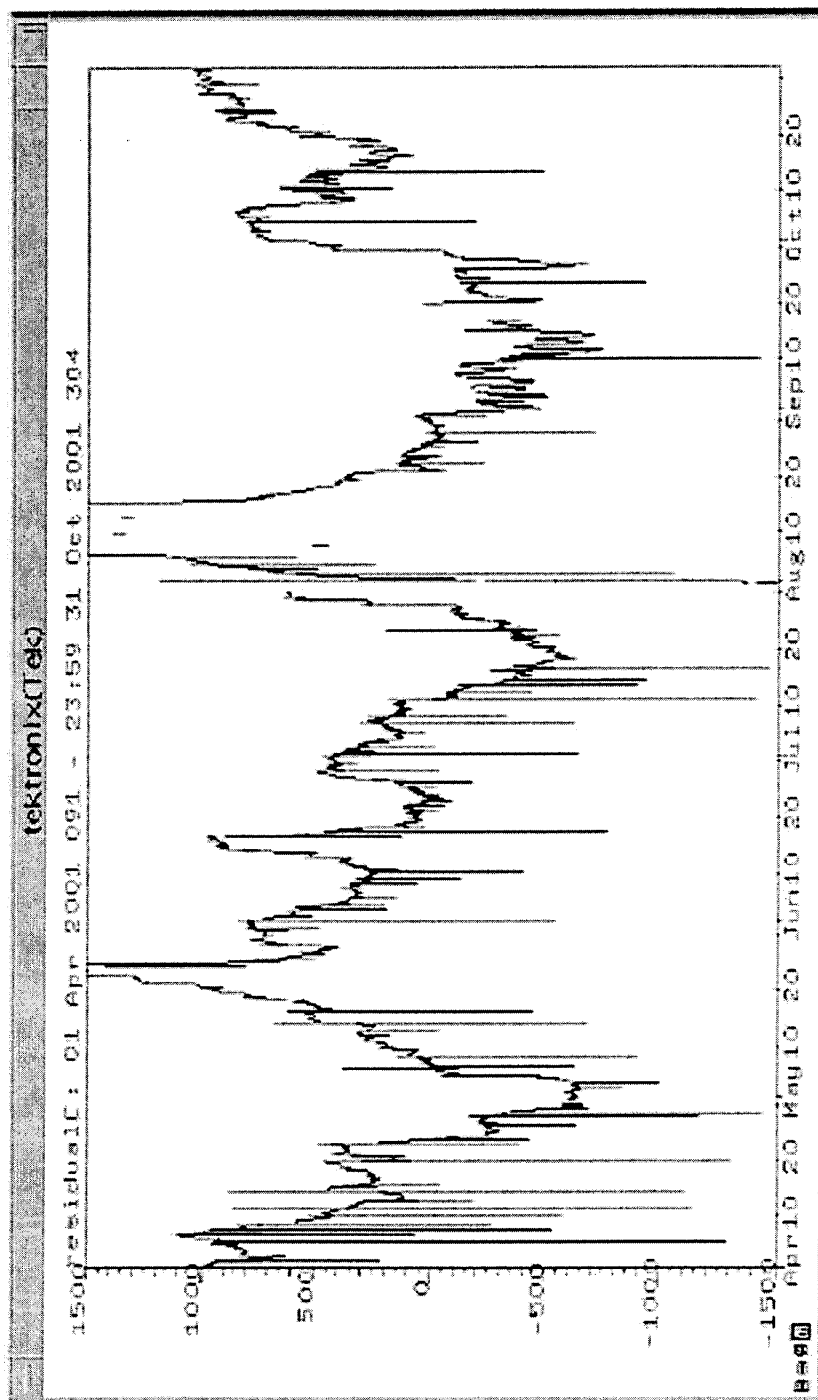
圖十九 Channel C (20010401~20011031) 濾除水泥癒合效應所紀錄之剩餘應變。



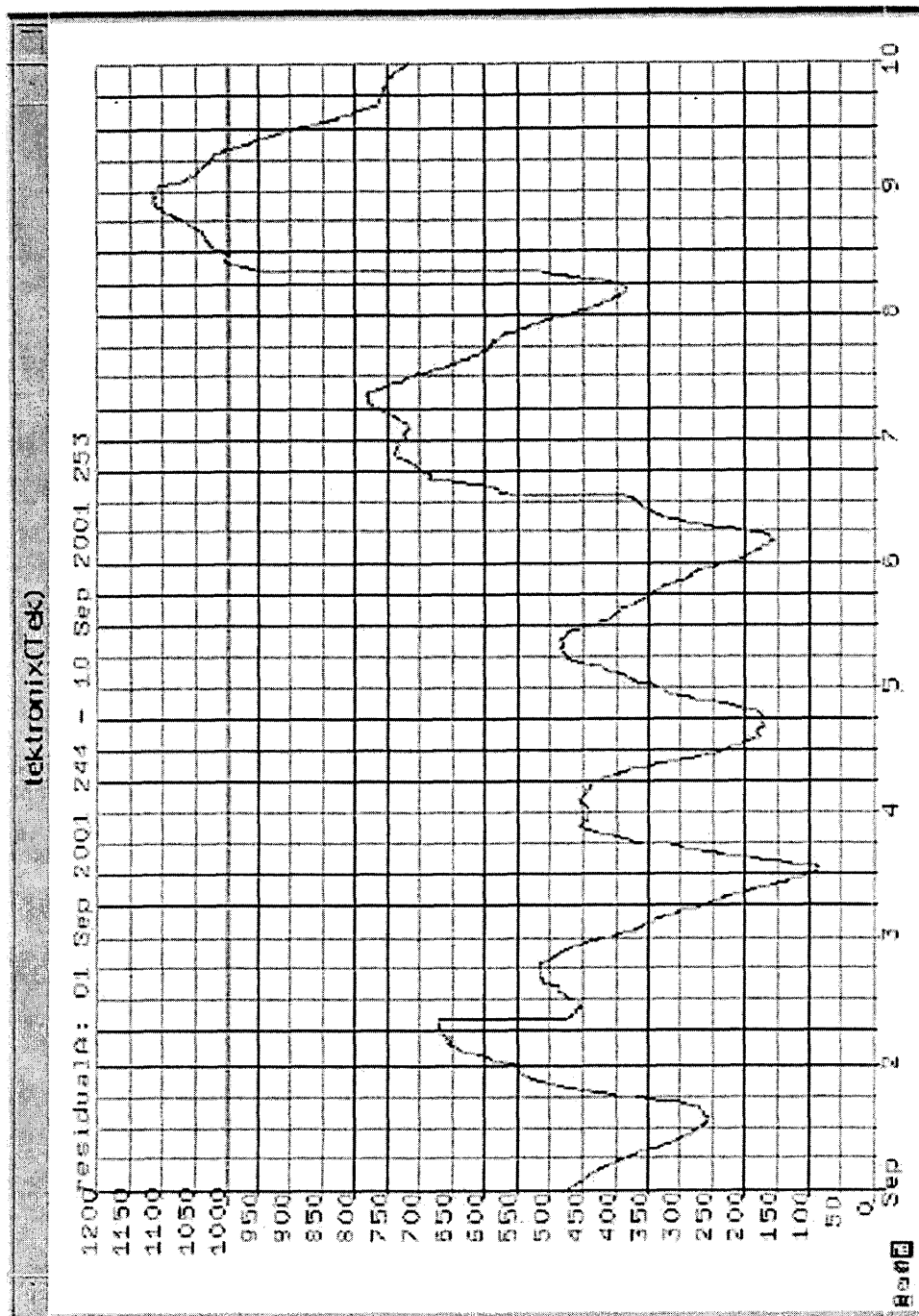
圖二十 Channel A (20010401~20011031) Y 軸縮尺設定為 3000 個單位，訊號仍甚為凌亂。



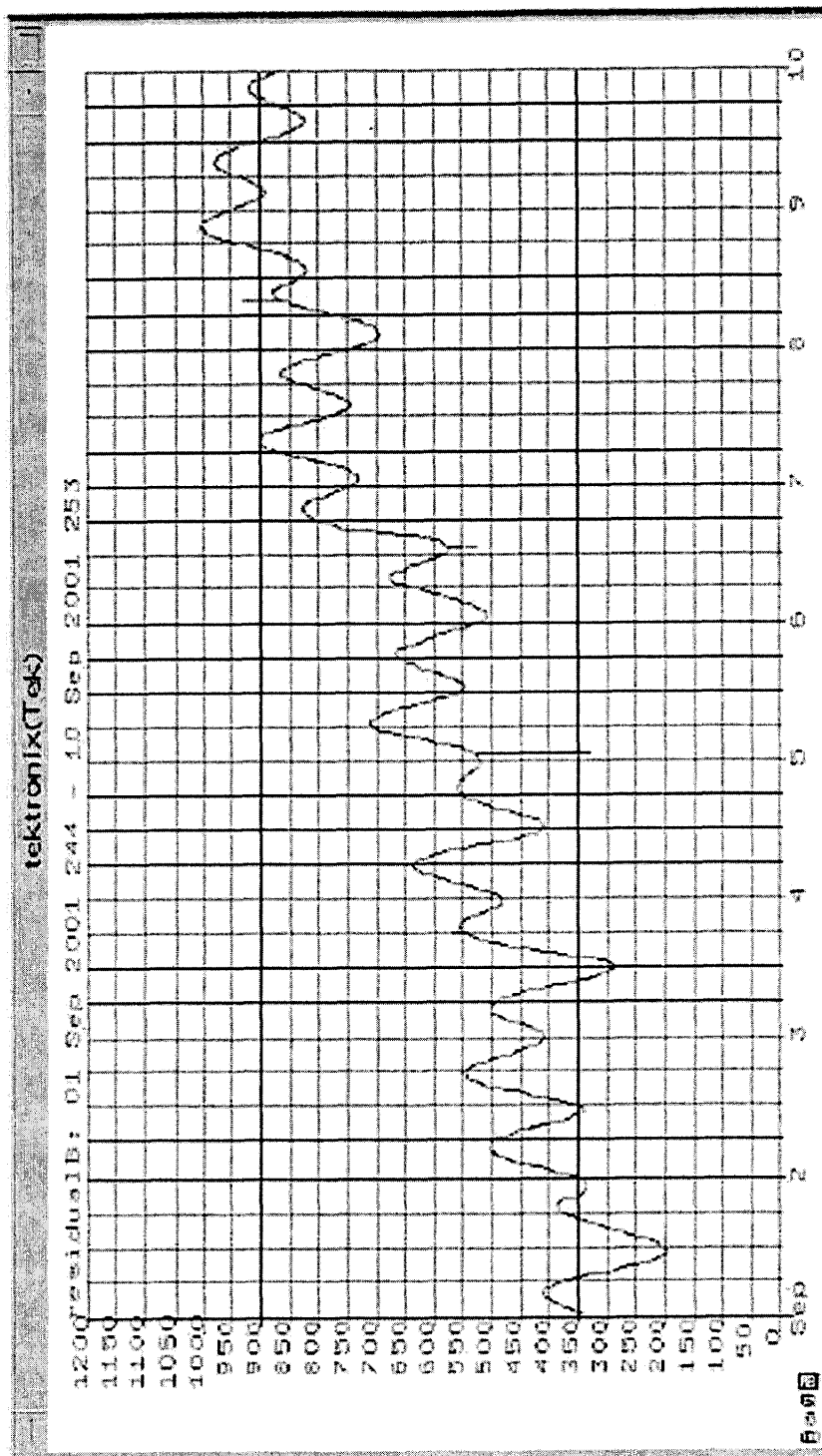
圖二十一 Channel B (20010401~20011031) Y 軸縮尺設定為 3000 個單位，訊號軌跡可見增厚，與地潮效應有關。



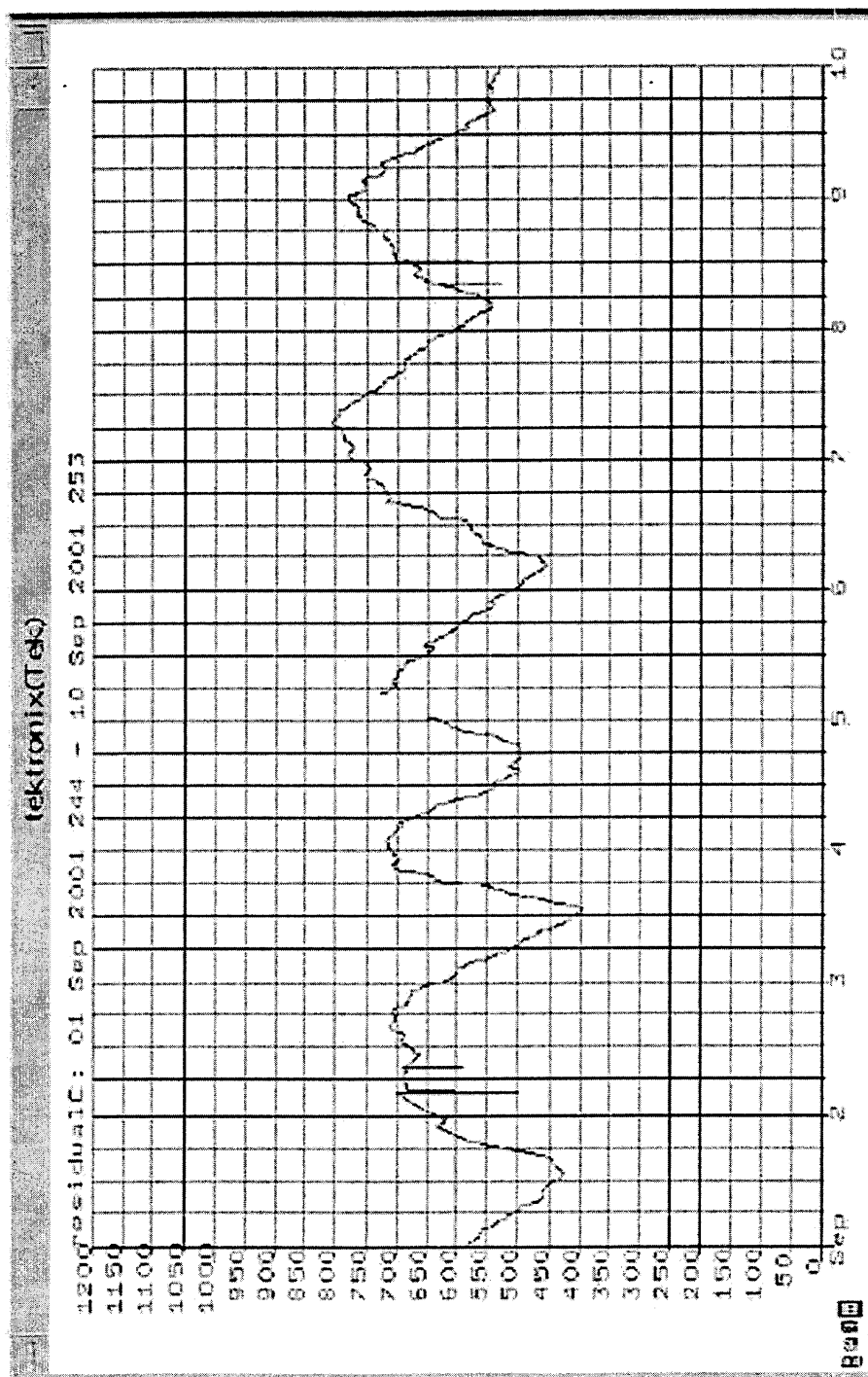
圖二十二 Channel C (20010401~20011031) Y 軸縮尺設定為 3000 個單位，訊號仍甚為凌亂。



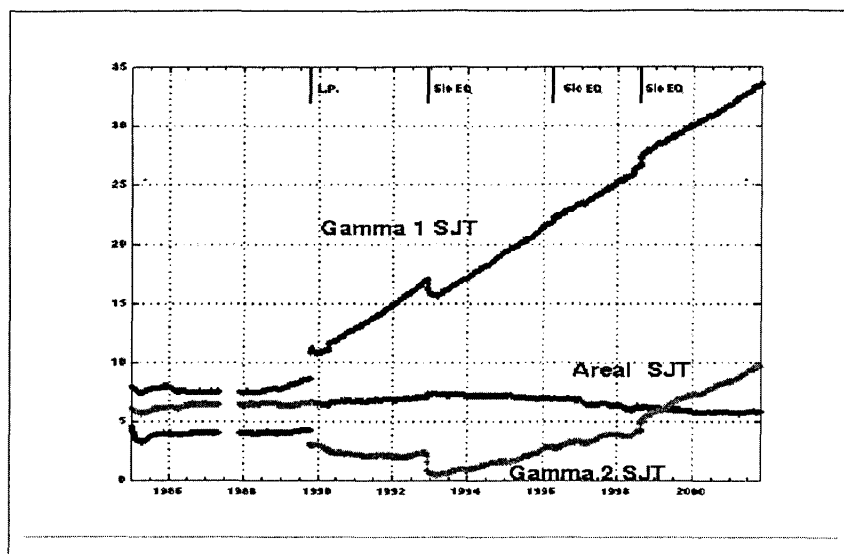
圖二十三 Channel A (20010901~20010910) Y 軸縮尺設定為 1200 個單位，訊號受熱效應影響無法顯現地潮效應。



圖二十四 Channel B (20010901~20010910) Y 軸縮尺設定為 1200 個單位，訊號明確顯示地潮效應。



圖二十五 Channel C (20010901~20010910) Y 軸縮尺設定為 1200 個單位，訊號受熱效應影響無法顯現地潮效應。



圖二十七 美國加州 SJT 站紀錄之同震剪應變

關於 CSIRO

澳大利亞聯邦"科學與工業研究組織(CSIRO)是世界上最大也最具多樣化的科研機構之一。其科研能力和業務範圍囊括了許多國家的經濟、環境和社會價值等領域，包括農業、礦物和能源、製造、通訊、信息技術、建築、衛生和環境等方面。

CSIRO 過去的科技成果包括全球性重大技術的開發，如原子吸收分光儀，自卷式紡紗(使機械化紡紗量增加十倍)，並使電阻的國際精度標準發生巨大飛躍。早在二十世紀四十年代，CSIRO 就製造了世界上最早的電腦之一並且解答了由於痕量元素缺乏而造成綿羊疾病的謎團。

今天，CSIRO 在諸多科技領域發揮著全球先導作用。農業方面的發展包括先進的棉花育種，節水葡萄生產，以及生物技術在植物和動物產品中的運用。CSIRO對礦產業和能源業的支持包括礦物(如鎂)加工技術和系統，礦物分析，遙感探礦技術和新的發電技術(如陶瓷燃料箱)。

藥物學方面的創新(如抗流感藥)為新興工業奠定了基礎。由CSIRO新研製的聚合物已在十二個國家採用，以更堅固耐用的塑料材料取代了紙幣。信息技術方面，CSIRO在圖案識別上所取得的進展已投入商業使用，如保安系統(面孔識別)和更為有效的乳線癌掃描。

在2000年，CSIRO活躍在七十多個國家，有正在進行或新興完成的項目七百多個。項目內容包括法國和南非永久實驗室的野草生物控制，鑒定馬來西亞能從性豬傳至人身的致命尼帕病毒並通過對夏威夷和冰島火山的研究來確定鐳沉積物的由來。

在CSIRO的支持下，澳大利亞各公司正在亞太地區全面建立地面接收站天線，採用 "活性包裝"向亞洲出口新鮮食品並採用地理信息系統建設更美好的城市。

CSIRO 幾乎有三分之一的國際活動是與美國主導科研機構進行合作，眾多地位確立約合作關係使 CSIRO 在多項研究領域保持領先地位。同樣，CSIRO 還有三分之一的國際合作是與歐洲和日本的科技水平領先組織及公司結成強大的紐帶。

CSIRO最後三分之一的國際活動在發展中國家，特別是亞洲開展。同時，CSIRO還援助太平洋地區和非洲的發展中國家。這項工作主要由澳大利亞援外計劃資助，重點放在農業發展方面，其中包括動植物生產，林業，海洋資源和水產養殖，水資源和相關的環境管理。其他關鍵領域是標準和測量，城市和農村基礎設施，採礦和研究管理。

*"聯邦"此處指澳大利亞聯邦，如澳大利亞政府。

CSIRO 一覽

- 成立於 1926 年
- 在澳大利亞有 65 個工作場所，6500 名職員，另有 3 座海外實驗室和 6 個國際駐地
- 在 70 個國家有 700 多個正在進行或新近完成項目
 - 在發展中國家，特別是在亞洲有著長期的經驗，與歐美和日本的科研機構有著廣泛而緊密的聯系
- 與澳大利亞公司，外國公司和跨國公司積極建立商業合作關係
- 始終如一地為澳大利亞和外國機構承包提供研究和發展

CSIRO 所屬部門

物種多樣性	土地和水	
建築邊境	海洋	
化學和塑料	測量標準	
氣候和大氣	肉類，奶製品和水產養殖	
能源	探礦和採礦	
農田作物	礦物處理和金屬生產	
食品加工	石油	
林業，木材和造紙業園藝學	藥品和人體健康	
信息技術和通訊	射電天文學	
綜合製造產品	服務	CSIRO 如何在澳大利亞開展工作
	紡織品胡踐支和鞋類	作

CSIRO 的科研規劃和資源分配是根據經濟部門的設置來進行的，有明確的 22 個部門，包括農業企業，環境與自然資源，信息技術，基礎設施和公共設施，礦物和能源，以及製造業。

研究工作由企業單位進行，統稱研究所 (Divisions)。它們主要按學科劃分，大部分都為不止一個部門工作。它們遍布全澳 65 個工作點，僱用了 6500 多名科技和輔助人員，提供世界一流的專業技能，設施，諮詢和服務。

Divisions 和各部門之間形成的這種矩陣關係直接導致 CSIRO 優先解決澳大利亞最迫切的工業和環境問題。例如，在環境科學方面，研究包括雨林生態學，物種多樣性，野兔控制，以及為澳大利亞"環境現狀"報告系統蒐集和處理基本數據。

這樣的部門設置也鼓勵了多學科的研究方法，促使 CSIRO 這個組織中的所有隊伍團結一致，集中攻克具體項目。同時，CSIRO 還與其他組織合作。近如墨爾本菲利普港灣的一項重大生態學研究項目就是這方面的一個例子。

與工業界和政府簽訂合同為 CSIRO 的研究活動起到了關鍵的推動作用，如為澳大利亞海軍研製出一種能夠計算每艘船艦所有零件的全面存貨系統，便有關職

員的訓練從六個月減至二周。

為保證對每個部門提供有效研究和發展並繼續發揮作用，CSIRO 任命了部門諮詢委員會，會員代表其持股人和顧客。委員會協助規劃各部門研究計劃，就工業和社會的研究需要提供寶貴的信息和諮詢。委員會還幫助工業界採用研究成果。

CSIRO 如何在國際上開展工作

1. 通過科技合作加強 CSIRO 的戰略研究基礎。這些活動主要是與高度發達的經濟大國如美國，日本和歐洲國家科技領先的對口科研單位進行，如設在法國的 CSIRO 歐洲實驗室和南非的 CSIRO 生物控制單位。
2. 在重大研究項目上，以風險分擔，費用分擔和效益分擔方式進行商業合作。研究項目的例子有汽車應用，航空材料，車輛電池，生物技術，食品保鮮包裝，以及石油勘探和鑽探。
根據這項策略，CSIRO 在日本的 Itochu 公司也在美國，英國的公司和南美的採礦業公司派駐了研究人員。
3. 利用合同式研究/諮詢方式，以知識產權形式把技術轉讓給客戶。
CSIRO 一般在發展中國家開展這類活動，幫助發展對口機構的科研能力。這方面有很多例子，如與澳大利亞外援局(AusAID)和澳大利亞國際農業研究中心(ACIAR)合作，其中包括越南的森林研究和淡水蝦研究，中國的自然資源管理和非洲的肉牛研究。
4. CSIRO 頒發使用其開發技術的許可證。
這方面的例子有南非採礦業購買的 CSIRO 的 QEM*SEM 礦物分析系統，還有與大型跨國化學公司杜邦公司合作生產的更耐用，更便宜，溶劑用量更小，因此"更乾淨也更綠"的新式汽車油漆。

國際協議

在某些情況下，與其他國家機構的合作通過某種正式的協議來促進。CSIRO 跟廣大的澳大利亞科研機構一樣，也是在政府規定的雙邊科技協議框架內開展工作，並且能夠申請政府援外資金和國際商務支持計劃。

在 CSIRO 中，具體的合作可在企業單位一級或研究所(Divisions)一級安排磋商並加以簽署。其他協議則屬法人級別，目前參與協議約有來自法國，意大利，荷蘭，南非，中國，印尼，越南，泰國和馬來西亞等國的科研機構。

有關 CSIRO 的進一步資料

由於機構詳情不斷改變，有關 CSIRO 及其研究的最新資料的最佳來源是其網頁，網址是：<http://www.csiro.au>

在 CSIRO 的主頁上，公眾可通過鏈接進入很多領域，如：

- CSIRO 國際活動概況和實例
- 23 個企業單位或研究所(Divisions)及其計劃

- 22 個工業部門和相關研究的情況
- 最新消息
- 特色網址
- 重大服務和信息網址，包括公眾問詢連通點，教育計劃和如何與 CSIRO 開展合作的網頁。

在 CSIRO 國際業務的公共網頁上，有按國別劃分的 CSIRO 海外活動概述。請從目錄頁開始：<http://www.csiro.au/international/index.html> 還可通過這些網頁查詢 CSIRO 海外活動實例的一系列詳情。

如何與 CSIRO 取得聯系

CSIRO 國際事務局是進行國際問詢的良好起點。請聯系：

The manager

CSIRO International

電話：+61 2 6276 6444

傳真：+61 2 6276 6292

電子郵件：Ta-Yan.Leong@gbi.csiro.au

CSIRO 各研究所(Divisions)主要按學科組成，研究所負責官是"所長"，也是海外問詢時在所一級進行接觸的第一位官員。有關 CSIRO 各研究所的最新聯系詳情，請參見網址：<http://www.csiro.au>

一般公共信息：

CSIRO Enquiries

Bag 10, Clayton South, VIC

Australia 3169

電話：+61 3 9545 2176

傳真：+61 3 9545 2175

電子郵件：enquiries@csiro.au

網址：請參見 CSIRO 主頁 CSIRO 問詢欄

Publications

附錄 B

A Fully Refereed Publications

1. **Gladwin**, M. T. and Wolfe, J. Linearity of Capacitance Displacement Transducers. *J.Sc.Instr.* 46, 1099-1100, 1975. .
2. **Gladwin M.T.** Simultaneous Monitoring of Stress and Strain in Massive Rock. *Pageoph*, V115, 267-274, 1977.
3. **Gladwin**, M. T., High Precision multi component borehole deformation monitoring. *Rev.Sci.Instrum.*, 55 , 2011-2016, 1984. .
4. **Gladwin**, M. T. and Hart, R. Design Parameters for Borehole Strain Instrumentation. *Pageoph*, 123, 59-88, 1985. .
5. **Gladwin**, M. T., Hart, R., and Gwyther, R. L. Tidal Calibration of Borehole Vector Strain Instruments. *EOS, (Trans. Am. G. Un.)* 66, 1057, 1985. .
6. Johnston, M.J.S., **Gladwin**, M.T., and Linde, A.T. Preseismic Failure and Moderate Earthquakes. *I.A.S.P.E.I.* , Tokyo, August 19-30, S7-65, 35 , 1985. .
7. **Gladwin**, M.T., and Johnston, M.J.S. Coseismic moment and total moment of the April 24, 1984, Morgan Hill and the January 26, 1986, Quiensabe earthquakes. *EOS, (Trans. Am. G. Un.)*, 67, 308, 1986. .
8. Johnston, M.J.S., Borchardt, R.D., Glassmoyer, G., **Gladwin**, M.T., and Linde, A.T. Static and Dynamic Strain during and following January 26, 1986, Quiensabe, California, Earthquake. *EOS, (Trans., Am. G. Un.)*, 67, 16, 308, 1986. .
9. **Gladwin**, M.T., Gwyther, R., Hart, R., Francis, M., and Johnston, M.J.S., Borehole Tensor Strain Measurements in California. *J. Geophys. Res.* 92. B8 pp7981-7988, 1987. .
10. Johnston, M. J. S., Linde, A.T., **Gladwin**, M.T., and Borchardt, R.D. Fault Failure with Moderate Earthquakes. *Tectonophysics.* 144, 189-206, 1987. .
11. Johnston, M.J.S., Borchardt, R.D., **Gladwin**, M.T., Glassmoyer, G., and Linde, A.T. Static and Dynamic Strain during the M_L 5.9 Banning, California Earthquake on July 8, 1986. *EOS, (Trans. Am. G. Union)*, 68 , 44, 1244 (1987). .
12. Myren, G.D., Johnston, M.J.S., Linde, A.T., **Gladwin**, M.T. and Borchardt, R.D. Borehole Strain Array near Parkfield, California. *EOS (Trans. Am. G. Union)*, 68, 44, 1358 (1987). .
13. **Gladwin**, M. T., Hart, R., and Gwyther, R. L. Continuous Regional Deformation

Measurements Related to the North Palm Springs Earthquake of July 8, 1986.
EOS, (Trans. Am. G. Un.) 69 1432, 1988.

14. **Gladwin**, M.T., Hart, R., and Gwyther, R.L. (1989) Deformation Monitoring Clusters - Why wait? *Crustal Deformation Measurement and Earthquake Mechanics Conference*, Morro Bay. (Invited Paper) .
15. Johnston, M.J.S., Linde A.T. and **Gladwin** M.T. (1989) Did Preseismic Slip Occur During the Months to Minutes Before the October 18, 1989 Loma Prieta M_L 7.1 Earthquake? *A.G.U. Fall Meeting, Special Session on Loma Prieta (Central California) Earthquake of October 17, 1989*
16. **Gladwin**, M.T., Hart, R., and Gwyther, R.L. (1990) Continuous Deformation Measurements Prior to the Loma Prieta Earthquake. *EOS. Trans. Am. Geo. Un.* , Vol 71, No 43 , p 1461.
17. Johnston, M.J.S., Linde, A.T. and **Gladwin**, M.T. (1990) Near-Field High Resolution Strain Measurements Prior to the October 18, 1989, Loma Prieta M_L 7.1 Earthquake. *Geophysical Res. Let.* Vol 17 No.10 pp 1777-1780.
18. **Gladwin**, M.T., Gwyther R.L., Hight J.W. and Hart R.G. (1991) A Medium Term Precursor to the Loma Prieta Earthquake? *Geophys. Res. Let.* Vol 18 No.8 pp 1377-1380.
19. Gwyther, R.L., **Gladwin**, M.T., and Hart, R.H.G. (1991) Interpretation of Continued Shear Strain Anomalies of the Loma Prieta Earthquake. *EOS. Trans. Am. Geo. Un.* , Vol 72, No 44 , p 310.
20. **Gladwin**, M.T., Breckenridge, K. S., Hart, R. H. G., and Gwyther, R. L. (1991) Recent Acceleration of Fault Creep-Strain Events at San Juan Bautista. *EOS. Trans. Am. Geo. Un.* , Vol 72, No 44 , p 484.
21. Linde A.T., **Gladwin** M.T. and Johnston M.J.S. (1992) The Loma Prieta Earthquake, 1989 and Earth Strain Tidal Amplitudes: An Unsuccessful Search for Associated Changes. *Geophysical Res. Let.* Vol 19 No.3 pp 317-320.
22. Gwyther R.L., **Gladwin** M.T. and Hart R.H.G. (1992) A Shear Strain Anomaly Following the Loma Prieta Earthquake. *Nature* Vol 356 No.6365 pp 142-144.
23. Lindh, A.G., Breckenridge K, Johnston, M.J.S. and **Gladwin**, M.T. (1993) Seismicity and Creep at Parkfield: Building a Better Relationship. *Seis. Res. Lett.* Vol. 64, No.1., p32.
24. **Gladwin**, M.T., Gwyther, R.L. and Hart, R.H.G. (1993) A Shear Strain Precursor. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1550-C, 59-66.
25. 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.
26. **Gladwin**, M.T., Gwyther, R.L., Hart, R.H.G. and Breckenridge K.(1993) Measurements of the strain field associated with episodic creep events on the San Andreas fault at San Juan Bautista, California (1994). *J. Geophys. Res.* Vol 99 (B3), 4559-4565.
 27. Lindh, A.G., Breckenridge K, Johnston, M.J.S. and **Gladwin**, M.T. Seismicity and Creep at Parkfield: Building a Better Relationship. *Seis. Res. Lett.* Vol. 64, No.1., p32, 1993.
 28. **Gladwin**, M.T., Gwyther, R.L. and Hart, R.H.G.(1993) A Shear Strain Precursor. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1550-C, 59-66.
 29. 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.
 30. **Gladwin**, M.T., Gwyther, R.L. and Hart, R.H.G.(1993) A Shear Strain Anomaly Following the Loma Prieta Earthquake.*U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* (1550-C, 94-110).
 31. Johnston, M.J.S., Myren G.D., Mueller R.J., Linde A.T and **Gladwin** M.T.(1993) A Focussed Earthquake Experiment on the Southern Hayward Fault: Detection Array and Expected Strains and Displacements During Fault Rupture. *Proc. 2nd Conf. Earthquake Haz. in E. San Francisco Bay Region.* U.S. Div. Mines & Geol. Spec. Pub.113, 197-206.
 32. **Gladwin**, M.T., Gwyther, R.L., Hart, R.H.G. and Breckenridge K.(1994) Measurements of the strain field associated with episodic creep events on the San Andreas fault at San Juan Bautista, California . *J. Geophys. Res.* Vol 99 (B3), 4559-4565.
 33. Wyatt, F.K, Agnew, D.C. and **Gladwin** M.T. Continuous Measurements of Crustal Deformation for the 1992 Landers Earthquake Sequence. *Bull. Seis. Soc. Am*, Vol 84, No 3, 768-779, 1994.
 34. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin** and R.H.G. Hart Anomalous Shear Strain at Parkfield During 1993-94 *Geophys. Res. Lett.* V 23 (18) p 2425-2428 1996
 35. Hart R.H.G., **M.T. Gladwin**, R.L. Gwyther, D.C. Agnew and F.K. Wyatt Tidal Calibration of Borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity *J. Geophys. Res.*, V101(B11), p25553-25571, 1996
 36. Linde A. T., **M.T.Gladwin**, M.J.S.Johnston, R.L.Gwyther & R.G.Bilham A Slow Earthquake Sequence near San Juan Bautista, California in December 1992.

Nature V. 383 p. 65-69 1996

37. Langbein, J., R.L. Gwyther and **M.T. Gladwin** Possible increase in fault slip rate at Parkfield in 1993 as inferred from deformation measurements from 1986 to 1997 *Seis. Res. Lett.* v69(2), p 151, 1998
38. Langbein, J., R.L. Gwyther, R.H.G.Hart and **M.T. Gladwin** Slip-rate increase at Parkfield in 1993 detected by high-precision EDM and borehole tensor strainmeters *Geophys. Res. Lett.* 26(16) pp 2529-2532, 1999
39. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin** and M.Mee Precise, Continuous and Remote Deformation Monitoring of Rock Mass During Mining 33rd Newcastle Symposium on Advances in the Study of the Sydney Basin., Uni. of Newcastle, pp 95-102, 1999
40. Langbein, J., R.L. Gwyther, R.H.G.Hart and **M.T. Gladwin** Slip-rate increase at Parkfield in 1993 detected by high-precision EDM and borehole tensor strainmeters *Geophys. Res. Lett.* 26(16) pp 2529-2532, 1999
41. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin** and M.Mee Precise, Continuous and Remote Deformation Monitoring of Rock Mass During Mining 33rd Newcastle Symposium on Advances in the Study of the Sydney Basin., Uni. of Newcastle, pp 95-102, 1999
42. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin**, R.H. Hart & M.Mee Sharpening our Image of Fault Processes: what Borehole Tensor Strain Observations can add to Seismic and Geodetic Studies. *Seis. Res. Lett.* 70(1), 255, 2000.
43. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin**, R.H. Hart & M.Mee Sharpening our Image of Fault Processes: what Borehole Tensor Strain Observations can add to Seismic and Geodetic Studies. *Seis. Res. Lett.* 70(1), 255, 2000.
44. Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., & Mee, M., Remote Monitoring of Rock Mass Deformation During Mining, *Proc. Massmin 2000, Brisbane Australia*, 209-216, 2000.

B. Conference Presentations

1. Johnston, M.J.S., Myren G.D., Mueller R.J., Linde A.T and **Gladwin M.T.**(1993) A Focussed Earthquake Experiment on the Southern Hayward Fault: Detection Array and Expected Strains and Displacements During Fault Rupture. *Proc. 2nd Conf. Earthquake Haz. in E. San Francisco Bay Region*. U.S. Div. Mines & Geol. Spec. Pub.113, 197-206.

2. **Gladwin**, M.T., Linde, A.T., Gwyther R.L. and Hart R.H.(1993) Triggering of Slow Strain Events at San Juan Bautista. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 74 No 43 ,p 182.
3. Johnston M.J.S., Linde A.T., Myren D., **Gladwin** M.T. and Breckenridge K.(1993) A Slow Earthquake on the San Andreas Fault near San Juan Bautista, California, December 1992. *EOS, (Trans. Am. G. Un.)* 74(43) 1,p 182.
4. Wyatt F.K., Agnew D.H., Johnson H. and **Gladwin** M.T.(1993) Postseismic Strains and Tilts from the Landers Earthquakes: Fault Afterslip, Crustal Anelasticity, or Local Hydrology? *EOS. (Trans. Am. Geo. U.)* 74(43) , p 183.
5. Lindh, A.G, Breckenridge K. and **Gladwin** M.T.(1993) Seismicity and Creep at Parkfield *Proc. 8th Joint Meeting of US-Japan Conf. Natural Res., Panel Earthquake Pred.Tech.*, p 214.
6. **Gladwin**, M.T. Strain Anomalies of the 1989 Loma Prieta , California Earthquake. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 75, supp , June 21 , p 56, 1994.
7. Gwyther R.L., **Gladwin** M.T. and Mee M.W. A Continuing Strain Anomaly Observed on Parkfield Borehole Tensor Strain Array. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 75(44) , p 438, 1994.
8. Hart R., **Gladwin**, M.T., Gwyther R.L., Wyatt F.K. And Agnew D.C. Improved Interpretation of borehole strain data from recent Californian events by inclusion of cross-coupling between strain components. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 75(44), p 438, 1994.
9. Linde, A.T., Johnston M.J.S., **Gladwin**, M.T., and Breckenridge K.S. Modelling of a Slow Earthquake Sequence near San Juan Bautista, California, in December 1992 *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 75 No 16 ,p 113, 1994.
10. Linde, A.T., Johnston M.J.S., **Gladwin**, M.T., and Breckenridge K.S. A Sequence of Three Slow Earthquakes Near San Juan Bautista and Related Seismicity *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 75(44) , p 447, 1994.
11. **Gladwin** M.T., A.L. Linde, R.L.Gwyther, R.H.G.Hart and Mee M.W. Borehole Strain Observations of Aseismic Stress Transfer Processes *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 76(46) , p 544, 1995.
12. Hart R., **Gladwin**, M.T., Improved Strain Constraint of Slip Parameters using Crustal Layering: Borehole Tensor Observations of the Landers Earthquake. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 76(46), p 406, 1995.
13. **Gladwin** M.T., R.L. Gwyther, R.H.G. Hart and A.T. Linde Aseismic Slip Episodes - Significant and Pervasive Components of the Earthquake Cycle? *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* v77(46), p F516, 1996

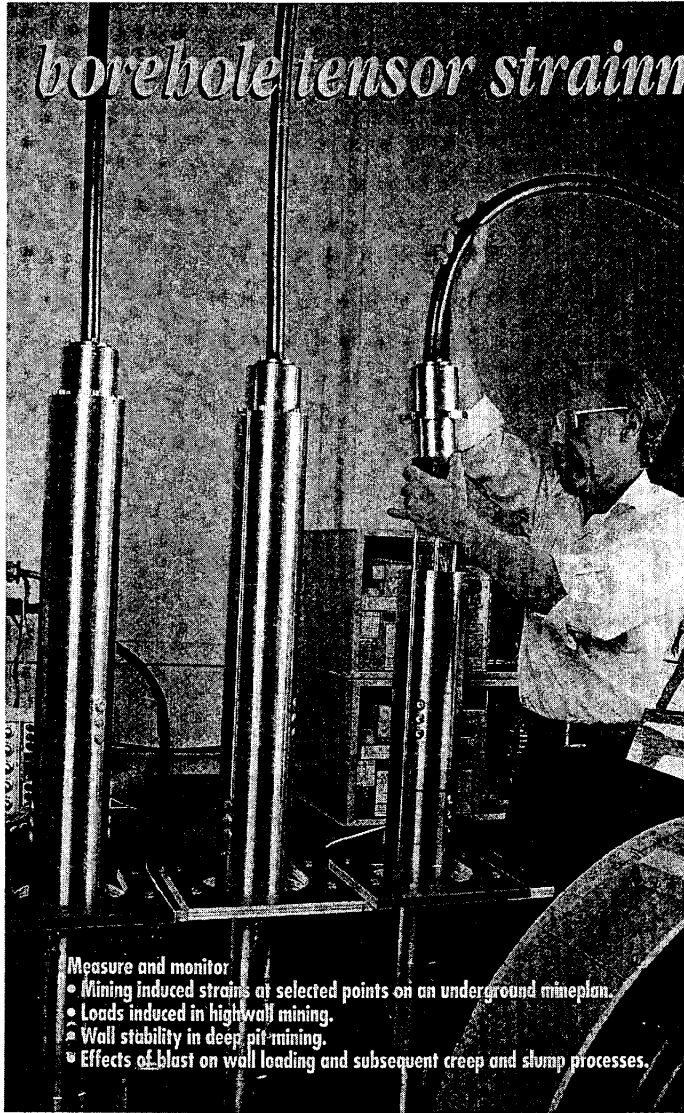
14. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin** and R.H.G. Hart The Significance of Aseismic Slip in Earthquake Processes: Evidence from Borehole Strainmeters. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 77(22) , p W88, 1996.
15. Johnston M.J.S., **M.T. Gladwin**, R.L. Gwyther, A.T. Linde, G.D. Myren and R.J. Mueller Another Slow Earthquake on the San Andreas Fault Triggered by a M4.7 Earthquake on April 19, 1996 *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* v77(46), p F515, 1996
16. **Gladwin M.T.**, R.L. Gwyther and R.H.G. Hart. Long-term borehole tensor strain data at Parkfield,CA: Issues of Interpretation *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* v78(17), p S219, 1997
17. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin** and R.H.G. Hart Aseismic strain transients with scales of 2km to 6km measured with borehole instruments *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 78(17) , p S213, 1997.
18. Johnston M.J.S., R.Gwyther, R.J. Mueller, A.T. Linde, **M.T. Gladwin** and G.D. Myren A triggered Slow Earthquake on the San Andreas Fault in April 1996 *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* v78(17), p S209, 1997
19. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin**, R.H.G. Hart, M.J.S. Johnston and A.T. Linde Long Term regional aseismic strain changes following a slow earthquake near San Juan Bautista, California *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 78(46) , p F157, 1997
20. **Gladwin M.T.**, R.L. Gwyther and R. Hart Persistence of Parkfield Shear strain anomaly commencing in 1993-94 *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 78(46) , p F157, 1997
21. **Gladwin M.T.**, R.L. Gwyther and M.Mee Precise Deformation Monitoring for Stability of Mine Structures *Proc. Int. Conf. Geomech. & Ground Control in Mining and Underground Construction*, 1998
22. **Gladwin M.T.**, R.L. Gwyther and M.Mee High-Precision Continuous Deformation Monitoring of Mine Structures *Proc. 13th Int. Geophys. Conf.*, A.S.E.G., 1998
23. **Gladwin, M.T.**, R.H. Hart, R.L. Gwyther, & M.Mee A new strain anomaly commencing in 1997 at Parkfield observed on the borehole tensor strain array *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)* 80(46), F691, 1999
24. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin**, R.H. Hart & M.Mee Borehole Tensor Strain Observations at 100km distance from the M7.1 Hector Mine, California Earthquake of 16 October, 1999 *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)*, 80(46), F691,

1999.

25. Gwyther R.L., **M.T. Gladwin**, C. Thurber and R.H. Hart Aseismic Slip in the San Andreas Fault Transition Zone near San Juan Bautista, California. *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)*, 80(46), F691, 1999.
26. Gladwin, M.T., R.L. Gwyther, R.H. Hart, & M.Mee Borehole Tensor Strainmeter Arrays to Enhance our Imaging of Crustal Processes *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)*, 81(17), 2000
27. Gwyther, R.L., C.H. Thurber, M.T.Gladwin & M. Mee Seismic and Aseismic Observations of the 12th August 1998 San Juan Bautista, California M 5.3 earthquake, *Proc. 3rd Conf. on Tectonic Problems of the San Andreas Fault*, 2000
28. Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., & Hart, R.H.G., 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, 2000
29. Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., Hart, R.H.G., & Mee, M., Are linear strain rates between major events characteristic of transition zone regions of the San Andreas Fault?, *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)*, , 2000
30. Gwyther, R.L., Gladwin, M.T., , Hart, R.H.G., & Mee, M., Propagating Aseismic Fault Slip Events at Parkfield: what they tell us about fault processes at depths of 1 m to 5 km, *EOS. (Trans. Am. Geo. Un.)*, , 2000
31. Langbein, J., Gladwin, M.T., & Gwyther, R.L., Extension of the Parkfield deformation array, *Proc. 2nd Plate Boundary Observatory Workshop*, 2.45-2.49, 2000
32. Thurber, C., Gladwin, M.T., Rubin, A., & DeMets, D.C., Focussed Observation of the San Andreas/Calaveras Fault intersection in the region of San Juan Bautista, California, *Proc. 2nd Plate Boundary Observatory Workshop*, 2.75-2.79, 2000
33. Roeloffs, E., Gladwin, M.T., & Hart, R.H.G., Strain monitoring at the bend in the Cascadia Subduction Zone, *Proc. 2nd Plate Boundary Observatory Workshop*, 4.36-4.40 2000
34. Steidl, J., Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., & Vernon, F., Fault Processes on the Anza section of the San Jacinto Fault, *Proc. 2nd Plate Boundary Observatory Workshop*, 2.70-2.74, 2000
35. Agnew, D., Wyatt, F., & Gladwin, M.T., Strainmeter Calibration, *Proc. 2nd Plate Boundary Observatory Workshop*, 11-15, 2000
36. Langbein, J., Roeloffs, E., Gladwin, M.T., & Gwyther R.L., Creepmeters on the San Andreas Fault System between San Francisco Bay and Parkfield, *Proc. 2nd Plate*

GTSM 井下型應變儀簡介（一）

附錄 C



borehole tensor strainmeter

Field installation of GTSM monitoring system

Measure and monitor

- Mining induced strains at selected points on an underground mineplan.
- Loads induced in high wall mining.
- Wall stability in deep pit mining.
- Effects of blast on wall loading and subsequent creep and slump processes.

The Borehole Tensor Strainmeter provides precise measurement of engineering-induced strain response to mining operations. Loads induced by both elastic failure processes, and slow creep over large areas, can now be monitored with high reliability.



CSIRO
AUSTRALIA

GTSM 井下型應變儀簡介 (二)

PRINCIPLE OF OPERATION:

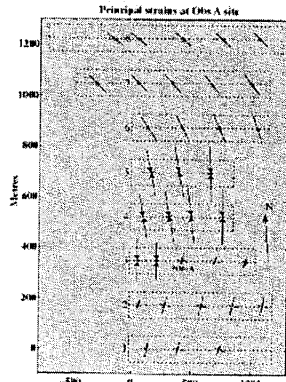
The borehole tensor instrument is installed in a vertical borehole, and measures three components of the horizontal plane strain field. The measurement is based on a simple yet extremely sensitive mechanism: a three plate capacitance bridge. The metal tube housing is squeezed by strain in the surrounding rock, it deforms, causing minute changes in the gaps between the fixed and movable plates. These movements cause discernable changes in the

electrical capacitance across the plates. The unchanging capacitance across the fixed plates provides a reference for comparison. A complete sensor package includes three capacitance bridges, which are angled to sense strain from three different directions. The technology was originally developed and deployed in earthquake strain monitoring applications requiring extremely high sensitivity, stability and wide dynamic range, but is now also used in monitoring mine environments.

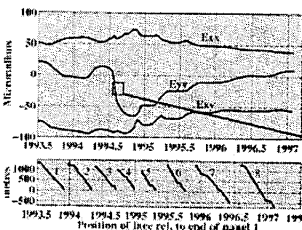
DYNAMIC LOAD MAPPING

AT ALL SCALES:

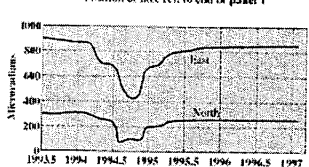
Application of the instrument in monitoring a longwall coal mining sequence allows mine planners to compare predicted and actual stress loads during extraction.



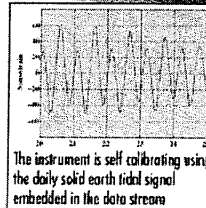
At left is a plan view of a panel layout for which mining proceeded from panels 1 to 8, and from east to west. A strainmeter 350m above the coal seam at point A in panel 3 measured the strain over a four year period. Strain axes monitored are shown.



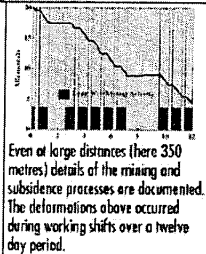
Strains measured are shown on the left, with the position of the face in each panel shown below



Tilts measured over the same period



The instrument is self-calibrating using the daily solid earth tidal signal embedded in the data stream



Even at large distances (here 350 metres) details of the mining and subsidence processes are documented. The deformations above occurred during working shifts over a twelve day period.

SPECIFICATIONS:

- Continuous tensor plane strain sensitivity to 10^{-6}
- Dynamic range 10^{-3} to 10^{-2} strain
- Continuous tilt to nanoradian sensitivity
- Long term stability better than 10^{-4} /year
- Bandwidth DC to 30Hz
- Instrument diameter 75mm (mining applications) 125mm (tectonic monitoring)



CSIRO

AUSTRALIA

Exploration and Mining
2643 Moggill Road
Pinjarra Hills, Brisbane
PO Box 883, Kenmore,
Queensland, Australia 4069

Contact: Dr. Mike T. Gladwin

Ph: +61 7 3212 4586 Fax: +61 7 3212 4455

email: m.gladwin@dem.csiro.au