



MOEAWRA0970063

## 水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(3/3)

Development of monitoring, non-destructive testing, and diagnosis techniques for dam safety (3/3)



委託機關：經濟部水利署  
受託單位：國立交通大學  
執行單位：國立交通大學防災工程研究中心

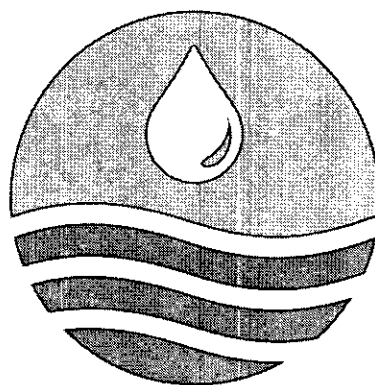
中華民國 97 年 12 月



MOEAWRA0970063

## 水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(3/3)

Development of monitoring, non-destructive testing, and diagnosis  
techniques for dam safety (3/3)



委託機關：經濟部水利署

受託單位：國立交通大學

執行單位：國立交通大學防災工程研究中心

中華民國九十七年十二月

## 摘要

台灣所處區域颱風與地震頻繁，加上近年來氣候異常，水庫安全有賴於定期與不定期辦理安全檢查及評估，其中檢測及監測為水庫安全檢查與評估極重要之一環；國內水庫常有監測儀器故障或監測數據缺乏有系統的回饋分析，使得監測系統未能發揮應有功能；另一方面，壩體內部之監測點僅涵蓋整個壩體的極小部分，監測儀器又常有損壞情形，因此，有必要進一步研發提升監測與檢測技術，以強化水庫安全評估及安全檢查之落實。本計畫之目的在於研究改善水庫安全監測與檢測技術，以利壩體安全診斷系統之建立。

光纖光柵與 TDR 感應器分別利用光及電磁波做感應與訊號傳輸，為被動式感測技術，儀器主機置於地表。這些技術具有耐久性、一機多工及多點監測之優點，適合水庫長期安全監測需求。本年度的工作重點除了持續改良過去所研發的光纖與 TDR 感測技術外，也將這些技術實際應用於新山水庫壩體與邊坡上進行位移與水位量測。在光纖感測技術方面，今年改良了光纖光柵水壓計設計，其解析度提高了一倍。另外在新山水庫壩體上安裝光纖光柵水壓計與在水庫右山脊邊坡同一鑽孔內安裝光纖光柵測傾儀與光纖光柵水壓計，並完成全自動化讀取系統的架設，進行長時間的數據收集。在 TDR 錯動變形監測技術方面，根據新山水庫現場狀況改良大型 TDR 受剪物理模型與進行靈敏度提升，此外將 TDR 錯動變形系統安裝於新山水庫右山脊進行地層位移量測並提出標準安裝與分析程序。非破壞性檢測技術本年度的工作重點在於提出水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊，以二個階段三步驟的適用性評估流程，完成包含有總論、折射震測法、表

面波震測法、電阻探測法、自然電位法以及透地雷達探測法共六章之導引手冊。

在壩體安全診斷系統研究上，今年度主要在建立土石壩之受震系統識別分析方法，針對牡丹水庫及鯉魚潭水庫兩座土石壩之地震儀加速度訊號進行歷時分析、頻譜分析及系統識別分析，探討系統識別分析應用於壩體安全診斷之可行性。此外，本計畫提供 MATLAB 及 EXCEL 簡易頻譜分析軟體及使用操作方法，俾便水庫管理單位參考使用。另開發簡易系統識別分析程式及使用方法，可針對地震發生後之強震儀資料進行識別分析，以初步掌握壩體之振動特性，可作為相關壩體安全檢查措施之輔助參考決策依據。

## **Abstract**

Taiwan is located in an area that is prone to earthquakes and typhoons. Recently, there are additional concerns of unusual weather conditions. The safety of reservoirs relies on scheduled and unscheduled evaluations and analyses. Field testing and monitoring are important aspects of these safety measures. Malfunctions of monitoring system and lack of systematic feedback analysis from monitoring data are common problems for dam safety management in Taiwan. Even without breakdowns, the points of instrumentation represent extremely small portions of the areas involved. There is a great demand to enhance our capabilities to monitor and evaluate the integrity of reservoirs. The objectives of this study are to develop improved monitoring techniques and establish a more effective dam safety diagnosis system.

Fiber Bragg Grating (FBG) and Time Domain Reflectometry (TDR) sensors transmit their signals via light and electromagnetic pulses, respectively. These sensing techniques are passive in nature, with their electronic interrogation systems placed on the ground surface. The FBG and TDR sensors are durable and capable of distributive installation, very suitable for long term reservoir safety monitoring purposes. The main tasks for this research work include the continued improvement of the previously developed FBG and TDR sensors, and field applications of FBG and TDR sensors at the Shin Shan reservoir.

For the FBG sensors, the research team modified the mechanical design and doubled the resolution of the FBG piezometer. Two of the electronic piezometers originally installed on the down-stream slope of the Shin Shan earth dam were replaced with the FBG piezometers. An

array of FBG inclinometers along with an FBG piezometer were inserted in an existing inclinometer casing situated in the right bank of the Shin Shan reservoir. All FBG sensors have been connected with fiber optic cables to a centralized interrogation/transmission system for long term automated and on-line monitoring.

For the TDR sensors, large scale model shear box tests were carried out to simulate the ground and TDR conditions in Shin Shan reservoir. A TDR ground shearing monitoring system has been installed in the right bank of the Shin Shan reservoir. A Standard Operation Procedure has been prepared for the installation and data analysis of TDR sensors. A manual on non-destructive testing has been prepared to cover the applications of seismic refraction, surface wave, resistivity imaging, and natural electro -potential and ground probing radar methods. The manual guides the user through the selection of non-destructive testing methods in a two-tier, three step procedure.

As for the dam safety diagnosis research, the main objective was to establish a system identification scheme for earth dams. The seismic records taken from Li Yu Tan and Mu Dan earth dams were analyzed using time domain, spectral analysis and system identification techniques. The applicability of these techniques for the safety evaluation of earth dams was reviewed. Numerical schemes based on MATLAB and EXCEL for simplified spectral analysis developed for reservoir operators have been developed. A simplified system identification scheme for immediate safety evaluation of the earth dam based on post earthquake seismic records has been proposed

## 結論與建議

### 一、結論

本工作團隊今年於規定時間內完成合約內預定工作項目與目標，將結論分項說明如下：

#### 光纖光柵感測器安裝與自動化量測

1. 本工作團隊已成功將光纖光柵水壓計與光纖光柵測傾儀安裝於新山水庫，並佈設光纜與架設 FBG 自動化監測儀器，進行自動化量測，完成本年度預定工作項目與目標。
2. 本工作團隊使用光纖光柵水壓計量測壩體上 LL1 孔與 LL3 孔水位變化，並與手動電子式水位計量測結果進行比較，證明兩者長期的水位變化趨勢具有一致性。
3. 本工作團隊已成功將光纖光柵水壓計與光纖光柵測傾儀串連在一起放入 W3 傾斜孔內，可同時量測水位變化與地層位移。
4. 使用單組光纖光柵測傾儀與傳統測傾儀量測同一孔位，並以重力方向為初始值來進行分析與比較，發現兩者所量測 W3 孔傾斜管具有相同之變形趨勢。

#### 剪力帶寬度對於 TDR 反應之探討及 TDR 錯動變形安裝與資料分析程序修訂

1. 本研究改良前期已建立之符合現地狀況的物理模型-大型直剪儀，根據現場情形改良對纜線之束制，增加試驗之重覆性並較符合現

場情形；此外，加裝剪力帶環片用以進行一系列試驗探討不同纜線與土壤互制因子對於具有剪力帶寬度之剪動情形對變形量化分析的影響；最後進行靈敏度提升之改良。

2. 由束制改良後之重覆性試驗結果可知，就行為上，靈敏度與無束制改良之結果相符，P3-500 纜線之靈敏度較 RG-8 為佳，但需要較大的初始啟動門檻。然而在此中，P3-500 之靈敏度與初始啟動值與前期相近，但 RG-8 纜線之靈敏度較前期為低，而初始啟動量變大，於量化之計算需有所變更。
3. 在加入 5 公分內的剪力弱帶後，模擬結果顯示，RG-8 有無加入剪力帶寬度，其靈敏度及初始門檻值差異不大；而 P3-500 纜線加入剪力帶寬度後使得初始門檻值變大，亦即較晚反應變形發生，但靈敏度接近。
4. 為提升纜線之靈敏度，設計圓球型及圓柱型節點加裝於纜線上，實驗結果顯示，RG-8 纜線加入節點可有效提升靈敏度，且對於初始門檻值有幫助；而 P3-500 纜線置入節點後，靈敏度改善不大，但初始門檻值則有顯著的改善。使用上，以圓柱型節點之改善程度較佳。
5. 根據重覆性試驗以及剪力帶寬度影響之試驗結果，修訂訊號分析之程序以及在不同地層情形時之量化分析計算；此外，綜合過去 TDR 現場安裝之經驗，以及於本次計畫中根據前期所建議之標準安裝程序於過程中可再補充改良之處，提出修訂後之現地標準安裝程序，於此標準安裝程序中包含纜線之選擇與處理、安裝用之孔徑以及現場安裝程序與注意事項，並完成本年度預定工作目標。



## TDR 錯動變形標準安裝與分析程序現地試驗

1. TDR 錯動變形監測系統於新山水庫右山脊處進行現地安裝測試，深度 27 公尺，使用前期建議之標準安裝程序進行安裝事宜，以做回饋修訂之用。為可驗證 TDR 錯動變形之成果，以安裝處周邊之 IS-6 既有測傾管之資料做為比對。
2. 經 7 月至 10 月之監測，TDR 錯動變形量測與測傾管量測於 10 月份之資料皆顯示在同一界面位置(夾岩塊黃棕色黏土層與夾砂岩頁岩層之界面)有錯動變形產生，然而，TDR 經本研究所修訂之分析程序採用近礫石模式進行計算，約為 15 公釐，接近測傾管所測得之 13 公釐錯動變形量，完成本年度工作目標。
3. 依修訂後之 TDR 分析程序，可有效提早偵測錯動面形成，TDR 錯動變形所監測得之錯動位置與測傾管相符，錯動量之估計亦合理。現地測試結果驗證 TDR 錯動變形監測之坡地安全預警功能，雖然錯動變形量之估計有其不確定性，但可以在明顯產生破壞跡象前發現滑動面，提供管理預警，由後續的變化速率應可監測邊坡之穩定性。

## 水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊初稿研訂

1. 根據前期所提出之「非破壞性檢測技術之適用性評估方法之手冊架構雛型與大綱內容」，以二個階段三步驟的適用性評估流程，搭配流程需求製作出可能破壞機制-可用之非破壞檢測法-適用環境的關係表格，完成包含有總論、折射震測法、表面波震測法、電阻探測法、自然電位法以及透地雷達探測法共六章之導引手冊初稿，完成本年度工作目標。

## 壩體安全診斷系統

1. 歷時分析結果顯示，牡丹水庫及鯉魚潭水庫地震儀之振動反應訊號有隨地震波動的趨勢，地震儀及擷取系統之功能應屬正常，平時應定期維護保養及校正，以延長地震儀之使用壽命與確保量測結果之精確性。此外，平時亦應檢視資料儲存的容量是否已超過容許的空間，可即早進行資料複製備份，以避免後續記錄之地震資料將先前之記錄覆蓋，進而造成資料的流失。
2. 本研究分別介紹以 MATLAB 軟體及 Excel 文書處理系統進行頻譜分析(傅立葉轉換)之過程，除了提供 MATLAB 傅立葉轉換之程式碼外，並說明其簡要之操作流程(詳附錄七)。Excel 頻譜分析部份則介紹 Excel 傅立葉轉換工具箱之設定方式並詳細說明其使用流程及步驟(詳 6.2.2.2 節)。根據分析與比對結果顯示，Excel 分析所得之頻譜與 MATLAB 程式分析所得之結果一致，說明以目前習用之 Excel 文書處理系統亦可達成頻譜分析之目的，可針對地震儀之加速度訊號進行傅立葉轉換(或其它具有動態記錄功能之監測儀器歷時訊號)，水庫管理單位人員可充分利用既有之分析工具針對地震儀訊號進行震後之初步評析工作，完成本年度工作目標。
3. 頻譜分析結果顯示，牡丹水庫壩頂上下游方向之顯著頻率內涵普遍集中在 1~4Hz 之頻寬範圍，且最大峰值主要出現在 1.6Hz 至 2.7Hz 附近；鯉魚潭水庫壩體上下游方向之顯著頻率內涵主要集中在 6Hz 之頻寬範圍內，且最大峰值主要出現在 1Hz~3Hz 附近，顯示歷次地震事件之壩體的頻譜特性尚呈現穩定的狀態。
4. 本研究之系統識別分析除了提供 MATLAB 系統識別之程式碼外，並說明其簡要之操作流程(詳附錄八)，僅須載入壩底及壩體(頂)之地震儀資料即可進行識別分析，完成本年度工作目標。
5. 系統識別分析結果顯示，識別預測之加速度歷時與地震儀實測之

加速度歷時十分接近，說明系統識別分析可初步掌握土石壩之振動頻率特性。牡丹水庫於恆春地震(95.12.26)識別所得之振動頻率為 2.24Hz，於 96.02.14 地震事件識別所得之振動頻率則為 2.63Hz (垂直壩軸方向)；鯉魚潭水庫於 921 地震(88.09.21)至 2002 年地震事件識別所得之振動頻率則介於 1.03Hz~2.61Hz 之間(垂直壩軸方向)，此與中央大學王升錦分析所得之結果相較(頻率介於 1.64Hz~2.78Hz 之間)，本案識別所得之下界頻率較低，上界頻率則較為接近。

## 二、建議

1. 本年度計畫已經初步驗證了光纖水壓計與光纖測傾儀於壩體監測自動化的可行性，可應用於現有水壩或新建水壩監測，但目前只是進行少量孔位與感測器測試，並無法發揮光纖感測器之多點傳輸與只需一套擷取系統之優點，建議日後可以尋找一興建水庫與一現有水庫進行多點孔位與光纖感測器安裝測試，相關光纖光柵感測器與 TDR 單價分析與規劃可參考附錄十至附錄十二說明。
2. 水壓計是壩體監測主要的觀測儀器，為數眾多，但損壞率也很高，水壓計失敗的原因與現有安裝方式有很大的關連性。傳統安裝水位管或水壓計在感測器周圍使用高透水性之砂土包圍，周圍再以白皂土隔離，最近許多國外地工監測的專家對此一方法提出挑戰，指出使用透水性不超過現地土壤兩個或三個級數之灌漿應該可以使用全灌漿的方法達到量取地下水壓的目的。故建議可對壩體內採全灌漿水壓觀測技術進行研究，相關說明可參考附錄九。
3. 傳統壩體監測系統僅涵蓋壩體極少部分，大範圍的檢查僅能仰賴

人工目視的表面檢查，若能有如人體醫學工程電腦斷層掃瞄之壩體內部大範圍監測技術，將可大為提昇壩體監測的效能。近幾年二維地電阻影像探測技術在壩體檢測之應用快速發展，許多實測案例顯示地電阻影像探測法可有效偵測滲漏或淘空異常區，若能進一步建立資料判釋方法並將二維檢測技術監測化，可以大幅提昇壩體內部檢測之效能。

4. 由於本案進行系統識別分析之地震事件樣本數量尚屬有限(牡丹水庫之壩體加速度 $>25\text{gal}$ 者-7次地震事件，鯉魚潭水庫之BASE加速度 $>20\text{gal}$ 者-七次地震事件)，且壩體之振動頻率仍與水位高程(或淤積高程)有關，加上壩體組成材料為非均質及材料承受抗拉的能力較低等特性，將使得土石壩之振動特性有較大之變異性(尤其較大之地震擾動)。因此將來可持續搜集各界有關係統識別分析所得之頻率特性資料(作為資料庫)，以瞭解壩體處於安全狀態下，其振動頻率可能之變動範圍。未來若某次地震事件經系統識別分析所得之頻率有較大的差異時(例如小於頻率可能變動範圍之下界頻率時)，則可能為壩體有結構性的損傷發生，識別的結果除了具有預警的功用外，亦可作為相關壩體安全檢查措施之輔助參考決策依據。

## 目錄

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 摘要 .....                       | I     |
| Abstract.....                  | III   |
| 結論與建議 .....                    | V     |
| 目錄 .....                       | i     |
| 圖目錄 .....                      | vi    |
| 表目錄 .....                      | xviii |
| 一、計畫緣起與目的 .....                | 1     |
| 二、計畫工作項目 .....                 | 2     |
| 三、前期研究成果回顧 .....               | 4     |
| 3.1 第一年度（95年）成果回顧.....         | 4     |
| 3.2 第二年度（96年）成果回顧.....         | 11    |
| 3.3 95、96年研發過程中所遭遇困難與解決辦法..... | 18    |
| 四、先進傳輸線式監測技術之現地應用與測試.....      | 24    |
| 4.1 研發儀器與傳統儀器的比較.....          | 24    |
| 4.2 光纖光柵監測系統.....              | 30    |
| 4.2.1 光纖簡介.....                | 30    |

|       |                                  |    |
|-------|----------------------------------|----|
| 4.2.2 | 光纖光柵感測原理 .....                   | 32 |
| 4.2.3 | 光纖光柵節理式偏斜儀 .....                 | 34 |
| 4.2.4 | 光纖光柵水壓計 .....                    | 40 |
| 4.2.5 | 光纖光柵水壓計之改良 .....                 | 44 |
| 4.2.6 | 光纖光柵測傾儀 .....                    | 50 |
| 4.3   | TDR 錯動變形安裝與資料分析程序修訂 .....        | 53 |
| 4.3.1 | TDR 錯動變形監測原理介紹 .....             | 53 |
| 4.3.2 | 大型剪力帶寬度物理模型之建立 .....             | 55 |
| 4.3.3 | 剪力帶寬度對 TDR 錯動變形影響之試驗規劃 ..        | 60 |
| 4.3.4 | 試體準備與試驗方法 .....                  | 62 |
| 4.3.5 | 剪力帶寬度對 TDR 錯動變形影響之試驗成果 ..        | 66 |
| 4.3.6 | TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析改善<br>..... | 77 |
| 4.4   | 新山水庫現地應用與測試 .....                | 86 |
| 4.4.1 | 新山水庫簡介 .....                     | 86 |
| 4.4.2 | 現地安裝位置與數量 .....                  | 89 |
| 4.4.3 | 新山水庫壩體 FBG 水壓計安裝 .....           | 91 |
| 4.4.4 | 新山水庫右山脊光纖光柵測傾儀與水壓計安裝             |    |

|  |     |
|--|-----|
| .....                                    | 100 |
| 4.4.5 新山水庫 FBG 自動化監測系統.....              | 108 |
| 4.4.6 新山水庫右山脊 TDR 錯動變形監測安裝.....          | 114 |
| 4.4.7 新山水庫右山脊 TDR 錯動變形監測成果.....          | 119 |
| 五、研訂水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊（初稿）.....            | 123 |
| 5.1 相關非破壞性檢測技術導引手冊之比較.....               | 123 |
| 5.1.1 美國聯邦高速公路部門手冊.....                  | 123 |
| 5.1.2 美國 ASTM 標準試驗手冊.....                | 124 |
| 5.1.3 日本地球探勘物理學家協會手冊.....                | 124 |
| 5.2 水庫非破壞性檢測技術之適用性評估方法.....              | 125 |
| 5.3 水庫非破壞性檢測技術導引手冊（初稿）內容結構與綱<br>要.....   | 127 |
| 六、壩體震後安全診斷系統研究.....                      | 129 |
| 6.1 土石壩結構受震之系統識別分析.....                  | 130 |
| 6.1.1 分析流程步驟.....                        | 133 |
| 6.1.2 系統識別之理論介紹.....                     | 137 |
| 6.1.3 含噪音系統模型與預測誤差.....                  | 139 |
| 6.1.4 遞迴預測誤差法（Recursive Prediction Error |     |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Method)                | 141 |
| 6.2 牡丹水庫之系統識別分析        | 143 |
| 6.2.1 時域分析             | 144 |
| 6.2.2 頻域分析             | 147 |
| 6.2.2.1 MATLAB 之頻譜分析   | 148 |
| 6.2.2.2 Excel 之頻譜分析    | 151 |
| 6.2.3 系統識別分析           | 162 |
| 6.3 鯉魚潭水庫之系統識別分析       | 166 |
| 6.3.1 時域分析             | 167 |
| 6.3.2 頻域分析             | 175 |
| 6.3.3 系統識別分析           | 183 |
| 七、水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練   | 198 |
| 八、參考文獻                 | 206 |
| 附錄一 委託服務計畫建議書審查意見及辦理情形 | A-1 |
| 附錄二 期中報告委員審查意見及辦理情形    | B-1 |
| 附錄三 期末報告委員審查意見及辦理情形    | C-1 |
| 附錄四 右山脊 T-1 鑽孔柱狀圖與岩心照片 | D-1 |



|  |     |
|--|-----|
| 附錄五 右山脊 T-1 孔內攝影影像.....                  | E-1 |
| 附錄六 水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊.....                | F-1 |
| 附錄七 MATLAB 傅立葉轉換分析程式及使用說明.....           | G-1 |
| 附錄八 MATLAB 系統識別分析程式及使用說明(單一輸入-單一輸出)..... | H-1 |
| 附錄九 後續研究說明.....                          | I-1 |
| 附錄十 光纖光柵監測系統單價分析與新建水庫安裝分析 (湖山水庫).....    | J-1 |
| 附錄十一 光纖光柵監測系統於新山水庫安裝分析.....              | K-1 |
| 附錄十二 TDR 監測系統單價分析.....                   | L-1 |

## 圖目錄

|   |    |
|---|----|
| 圖 4.1 壩體水位及水壓觀測管安裝示意圖 .....                 | 24 |
| 圖 4.2 氣壓式水壓計感測示意圖 .....                     | 27 |
| 圖 4.3 光纖構造示意圖(簡旭君，2003) .....               | 31 |
| 圖 4.4 光纖光柵量測原理示意圖 (Ho et al., 2005) .....   | 33 |
| 圖 4.5 光纖測彎計示意圖(向亨台，2004) .....              | 35 |
| 圖 4.6 FBG 偏斜儀設計示意圖 .....                    | 37 |
| 圖 4.7 節理式設計之訊號放大效應 .....                    | 38 |
| 圖 4.8 鋁擠型偏斜儀支架設計示意圖 .....                   | 38 |
| 圖 4.9 改良後鋁擠型偏斜儀 .....                       | 39 |
| 圖 4.10 光纖節理式偏斜儀標準製作、組裝與現地安裝流程<br>圖 .....    | 39 |
| 圖 4.11 光纖光柵內連續遞增之漸變應變 .....                 | 40 |
| 圖 4.12 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改<br>變 ..... | 41 |
| 圖 4.13 FBG 波長飄移分析示意圖 .....                  | 41 |
| 圖 4.14 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖 .....             | 42 |
| 圖 4.15 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖 .....            | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 4.16 等週期式光纖光柵水壓計標定結果.....                                    | 44 |
| 圖 4.17 單薄膜等週期式光纖光柵水壓計實體圖.....                                  | 46 |
| 圖 4.18 雙薄膜等週期式光纖光柵水壓計受力圖.....                                  | 47 |
| 圖 4.19 雙薄模式等週期光纖光柵水壓計實體圖.....                                  | 48 |
| 圖 4.20 雙剛模片等週期光纖光柵水壓計率定與理論分析比較圖.....                           | 48 |
| 圖 4.21 光纖光柵溫度棒.....  | 49 |
| 圖 4.22 光柵水壓計及溫度光柵率定圖.....                                      | 49 |
| 圖 4.23 光纖光柵測傾儀示意圖.....   | 50 |
| 圖 4.24 光纖光柵測傾儀實體圖.....   | 51 |
| 圖 4.25 FBG 測傾儀標定結果圖.....                                       | 52 |
| 圖 4.26 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006).....                | 54 |
| 圖 4.27 TDR 變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇, 2003).                            | 55 |
| 圖 4.28 前期(96 年度)大型直剪儀.....                                     | 57 |
| 圖 4.29 (a) 圍壓傳遞板 (b) 圍壓傳遞板及檔板 (c) 檔板及螺絲 (d) 裝有水平導輪之剪力盒及螺絲..... | 58 |
| 圖 4.30 (a) 剪力帶環片側視圖 (b) 剪力帶環片上視圖.....                          | 59 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 4.31 改良後新建立之大型直剪儀.....                           | 60 |
| 圖 4.32 RG-8 纜線加入 (a) 球形節點 (b) 圓柱形節點.....           | 62 |
| 圖 4.33 (a) 水泥-纜線複合材料製作過程 (b) 水泥養護過程<br>.....       | 63 |
| 圖 4.34 土壤種類粒徑分佈曲線.....                             | 64 |
| 圖 4.35 試驗流程圖 .....                                 | 66 |
| 圖 4.36 軟、硬性纜線重複性試驗之 $\rho_{peak}-\delta$ 關係曲線..... | 68 |
| 圖 4.37 RG-8 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度.....                 | 71 |
| 圖 4.38 P3-500 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度 .                  | 72 |
| 圖 4.39 RG-8 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線.                 | 75 |
| 圖 4.40 P3-500 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線<br>.....       | 75 |
| 圖 4.41 TDR 安裝示意圖 .....                             | 78 |
| 圖 4.42 TDR 錯動變形監測之標準程序 .....                       | 79 |
| 圖 4.43 TDR 錯動變形監測自動化系統.....                        | 80 |
| 圖 4.44 RG-8 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度....                  | 83 |
| 圖 4.45 P3-500 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度.                   | 84 |
| 圖 4.46 TDR 錯動變形監測資料分析流程圖 .....                     | 85 |

|   |    |
|---|----|
| 圖 4.47 W3 傾斜觀測管歷年變形資料(台灣自來水公司第一區管理處，民國 96 年)..... | 88 |
| 圖 4.48 右山脊 w3 傾斜管裝設位置 .....                       | 89 |
| 圖 4.49 壩體光纖光柵水壓計安裝位置平面示意圖 .....                   | 90 |
| 圖 4.50 壩體光纖光柵水壓計安裝位置橫剖面示意圖 .....                  | 90 |
| 圖 4.51 右山脊 TDR 及光纖光柵測傾儀安裝位置平面示意圖 .....            | 91 |
| 圖 4.52 光纖光柵水壓計標準製作、現地安裝與檢核流程圖 .....               | 94 |
| 圖 4.53 新山水庫現場清洗水位孔 .....                          | 95 |
| 圖 4.54 新山水庫水位孔 LL1 清洗工程 .....                     | 95 |
| 圖 4.55 新山水庫水位孔 LL3 清洗工程 .....                     | 96 |
| 圖 4.56 LL1 水位孔 FBG 水壓計與手動式水位量測比較圖 .....           | 96 |
| 圖 4.57 LL3 水位孔 FBG 水壓計與手動式水位量測比較圖 .....           | 97 |
| 圖 4.58 LL1 二十四小時水頭變化(10月9日至10月12日) .....          | 97 |
| 圖 4.59 LL1 二十四小時水頭變化(10月13日至10月16日) .....         | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| 圖 4.60 LL1 二十四小時水頭變化(10 月 17 日至 10 月 20 日) | 98  |
| 圖 4.61 LL3 二十四小時水頭變化(10 月 09 日至 10 月 12 日) | 99  |
| 圖 4.62 LL3 二十四小時水頭變化(10 月 13 日至 10 月 16 日) | 99  |
| 圖 4.63 LL3 二十四小時水頭變化(10 月 17 日至 10 月 20 日) | 100 |
| 圖 4.64 傳統測傾儀與光纖光柵測傾儀量測結果之角度比較<br>圖         | 101 |
| 圖 4.65 傳統測傾儀與光纖光柵測傾儀量測相對孔底位置比<br>較圖        | 102 |
| 圖 4.66 光纖光柵測傾儀組裝完成實體圖                      | 105 |
| 圖 4.67 光纖光柵測傾儀現地安裝圖                        | 105 |
| 圖 4.68 光纖光柵水壓計現地安裝圖                        | 106 |
| 圖 4.69 FBG 水壓計於 W3 孔水位量測結果                 | 106 |
| 圖 4.70 FBG 測傾儀於 10 月 23 至 11 月 08 號位移讀數    | 107 |
| 圖 4.71 壩體光纜佈設施工圖                           | 109 |
| 圖 4.72 右山脊光纜佈設施工圖                          | 109 |

|   |     |
|---|-----|
| 圖 4.73 管理中心光纜佈設施工圖 .....                        | 110 |
| 圖 4.74 FBG 自動化量測儀器安裝完成圖 .....                   | 110 |
| 圖 4.75 FBG 水壓計自動化監測系統監測畫面 .....                 | 111 |
| 圖 4.76 FBG 水壓計自動化監測系統設定畫面 .....                 | 112 |
| 圖 4.77 FBG 測傾儀自動化監測系統監測畫面 .....                 | 113 |
| 圖 4.78 新山水庫右山脊鑽孔作業 .....                        | 114 |
| 圖 4.79 T-1 孔內攝影施作 .....                         | 115 |
| 圖 4.80 安裝用 RG-8 型纜線（尾端紅色膠帶處為加掛重物<br>後防水用） ..... | 116 |
| 圖 4.81 纜線置入孔內並置入排水兼固定纜線用之 PVC 管<br>.....        | 116 |
| 圖 4.82 採用 1:1 水灰比之水泥漿液灌漿回填 .....                | 116 |
| 圖 4.83 自 PVC 管中灌入水泥漿 .....                      | 117 |
| 圖 4.84 持續灌漿至流出水泥漿液 .....                        | 117 |
| 圖 4.85 起出套管 .....                               | 118 |
| 圖 4.86 將纜線固定於 PVC 管上 .....                      | 118 |
| 圖 4.87 二次灌漿並安裝保護盒 .....                         | 118 |
| 圖 4.88 孔內攝影影像（部份） .....                         | 119 |

|  |     |
|--|-----|
| 圖 4.89 孔內攝影節理統計 .....                    | 119 |
| 圖 4.90 新山水庫 TDR 監測資料 .....               | 121 |
| 圖 4.91 IS-6 傾斜管觀測結果 .....                | 122 |
| 圖 5.1 非破壞性檢測技術之適用性評估方法流程圖 .....          | 125 |
| 圖 6.1 系統參數之歷時圖 .....                     | 131 |
| 圖 6.2 傳遞函數圖 .....                        | 132 |
| 圖 6.3(a) 牡丹水庫 .....                      | 133 |
| 圖 6.3(b) 鯉魚潭水庫 .....                     | 133 |
| 圖 6.4 地震儀之三軸向加速度歷時(翡翠水庫) .....           | 135 |
| 圖 6.5 地震儀之三軸向加速度傅氏頻譜(翡翠水庫) .....         | 136 |
| 圖 6.6 地震儀之三軸向傳遞函數(翡翠水庫) .....            | 137 |
| 圖 6.7 牡丹水庫之地震儀配置圖 .....                  | 143 |
| 圖 6.8 上下游方向之加速度歷時(95.12.26-20:26) .....  | 145 |
| 圖 6.9 上下游方向之加速度歷時(95.12.26-20:34) .....  | 145 |
| 圖 6.10 上下游方向之加速度歷時(95.12.26-20:40) ..... | 145 |
| 圖 6.11 上下游方向之加速度歷時(96.02.14-11:26) ..... | 146 |
| 圖 6.12 上下游方向之加速度歷時(96.02.14-11:30) ..... | 146 |



|   |     |
|---|-----|
| 圖 6.13 上下游方向之加速度歷時(97.05.07-09:54)-校正引致<br>之訊號..... | 146 |
| 圖 6.14 上下游方向之加速度歷時(97.05.07-10:37)-校正引致<br>之訊號..... | 147 |
| 圖 6.15 MATLAB 程式分析所得之傅氏頻譜(95.12.26-20:26)<br>.....  | 149 |
| 圖 6.16 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.26-20:26)...             | 150 |
| 圖 6.17 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.26-20:34)...             | 150 |
| 圖 6.18 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.26-20:40)...             | 150 |
| 圖 6.19 上下游方向之加速度傅氏頻譜(96.02.14-11:26)...             | 151 |
| 圖 6.20 上下游方向之加速度傅氏頻譜(96.02.14-11:30)...             | 151 |
| 圖 6.21 傅立葉分析之功能設定: 點選工具內之增益集...                     | 152 |
| 圖 6.22 傅立葉分析之功能設定: 勾選分析工具箱.....                     | 153 |
| 圖 6.23 傅立葉分析之功能設定: 檢視工具內是否已出現資<br>料分析選項.....        | 153 |
| 圖 6.24 傅立葉分析之功能設定: 點選資料分析檢視有無傅<br>立葉分析功能.....       | 154 |
| 圖 6.25 載入加速度歷時資料(A 行為時間, B 行為加速度)<br>.....          | 156 |

|   |     |
|---|-----|
| 圖 6.26 點選傅立葉分析選項 .....                                  | 157 |
| 圖 6.27 設定傅立葉分析之輸入範圍及輸出範圍 .....                          | 157 |
| 圖 6.28 傅立葉分析運算完成之數據資料 .....                             | 158 |
| 圖 6.29 傅立葉分析所得之複數取絕對值計算其頻譜振幅<br>.....                   | 159 |
| 圖 6.30(a) Excel 傅立葉分析所得之加速度頻譜<br>(95.12.26-20:26) ..... | 160 |
| 圖 6.30(b) Excel 傅立葉分析所得之加速度頻譜<br>(96.02.14-11:26) ..... | 161 |
| 圖 6.31(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(90.02.14-11:26)<br>.....        | 163 |
| 圖 6.31(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(95.12.26-20:26) .....   | 163 |
| 圖 6.31(c) 上下游方向之加速度傳遞函數(95.12.26-20:26)<br>.....        | 164 |
| 圖 6.32(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(90.02.14-11:26)<br>.....        | 164 |
| 圖 6.32(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(96.02.14-11:26) .....   | 164 |
| 圖 6.33(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(90.02.14-11:30)<br>.....        | 165 |

|  |     |
|--|-----|
| 圖 6.33(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(96.02.14-11:30)..... | 165 |
| 圖 6.34 鯉魚潭水庫之地震儀配置圖(王升錦).....                        | 166 |
| 圖 6.35 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-01:47:20).....           | 168 |
| 圖 6.36 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-01:51:33).....           | 169 |
| 圖 6.37 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-02:05:54).....           | 170 |
| 圖 6.38 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-02:11:34).....           | 171 |
| 圖 6.39 上下游方向之加速度歷時(89.06/11-02:23:32).....           | 172 |
| 圖 6.40 上下游方向之加速度歷時(91.01.08-17:00:39).....           | 173 |
| 圖 6.41 上下游方向之加速度歷時(92.03.31-06:52:49).....           | 174 |
| 圖 6.42 上下游方向之加速度傅氏頻譜(89.09.21-01:47:20)<br>.....     | 176 |
| 圖 6.43 上下游方向之加速度傅氏頻譜(88.09.21-01:51:33)<br>.....     | 177 |
| 圖 6.44 上下游方向之加速度傅氏頻譜(88.09.21-02:05:54)<br>.....     | 178 |
| 圖 6.45 上下游方向之加速度傅氏頻譜(88.09.21-02:11:34)<br>.....     | 179 |
| 圖 6.46 上下游方向之加速度傅氏頻譜(89.06.11-02:23:32)<br>.....     | 180 |

|  |     |
|--|-----|
| 圖 6.47 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.01.08-17:00:39)            | 181 |
| 圖 6.48 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.03.31-06:52:39)            | 182 |
| 圖 6.49(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(89.09.21-01:47:20)         | 184 |
| 圖 6.49(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(89.09.21-01:47:20) | 185 |
| 圖 6.50(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(88.09.21-01:51:33)         | 186 |
| 圖 6.50(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(88.09.21-01:53:33) | 187 |
| 圖 6.51(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(88.09.21-02:05:54)         | 188 |
| 圖 6.51(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(88.09.21-02:05:54) | 189 |
| 圖 6.52(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(88.09.21-02:11:34)         | 190 |
| 圖 6.52(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(88.09.21-02:11:34) | 191 |
| 圖 6.53(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(89.06.11-02:23:32)         | 192 |

|   |     |
|---|-----|
| 圖 6.53(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(89.06.11-02:23:32)..... | 193 |
| 圖 6.54(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(91.01.08-17:00:39)<br>.....     | 194 |
| 圖 6.54(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(91.01.08-17:00:39)..... | 195 |
| 圖 6.55(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(91.03.31-06:52:39)<br>.....     | 196 |
| 圖 6.55(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較<br>(91.03.31-06:52:39)..... | 197 |
| 圖 7.1 教育訓練會場 .....                                      | 203 |
| 圖 7.2 教育訓練學員上課情形 .....                                  | 203 |
| 圖 7.3 光纖光柵感測器授課情形 .....                                 | 204 |
| 圖 7.4 TDR 感測器授課情形 .....                                 | 204 |
| 圖 7.5 光纖感測實驗室參觀情形 .....                                 | 205 |
| 圖 7.6 非破壞性檢測實驗室參觀情形 .....                               | 205 |

## 表目錄

|   |     |
|---|-----|
| 表 3.1 95 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法 .....                         | 18  |
| 表 3.2 96 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法 .....                         | 20  |
| 表 4.1 傳統電子式水壓計與光纖光柵水壓計之初步比較..                           | 26  |
| 表 4.2 傳統氣壓式水壓計與光纖光柵水壓計之比較.....                          | 27  |
| 表 4.3 傳統測傾管監測技術與 TDR 錯動變形監測技術初步<br>比較 .....             | 29  |
| 表 4.4 試驗規劃 .....  | 61  |
| 表 4.5 外填材料基本物理性質 .....                                  | 64  |
| 表 4.6 固定纜線，相同配置下之反應特性比較.....                            | 69  |
| 表 4.7 試驗相同配置條件下，加入剪力帶寬度之反應特性比<br>較 .....                | 73  |
| 表 4.8 相同配置條件下，纜線置入節點之反應特性比較..                           | 76  |
| 表 4.9 10 月 9 日至 10 月 20 日雨量、水庫水位與 LL1、LL3<br>水位高程 ..... | 93  |
| 表 4.10 W3 孔光纖光柵測傾儀安裝波長表 .....                           | 104 |
| 表 5.1 非破壞檢測方法特性表 .....                                  | 126 |
| 表 5.2 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表.....                            | 127 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 表 6.1 | 牡丹水庫之地震事件記錄資料(12月26-27日)... | 144 |
| 表 6.2 | 鯉魚潭水庫之地震事件記錄資料.....         | 167 |
| 表 7.1 | 教育訓練課程時間表(第一天).....         | 199 |
| 表 7.2 | 教育訓練課程時間表(第二天).....         | 200 |
| 表 7.3 | 教育訓練講員基本簡歷.....             | 201 |

## 一、計畫緣起與目的

台灣地區由於豐枯水期分配不均，因此有賴各大小水庫及水工結構物之調蓄水源，以滿足農業、民生及工業等用水需求，目前台灣地區現有水庫設施達近百座，由於台灣地區颱風與地震頻繁，加上近年來氣候異常頻率增高，水庫之安全有賴於定期與不定期辦理安全檢查及評估，其中檢測及監測為水庫安全檢查與評估極重要之一環；台灣地區水庫常有許多監測儀器故障或監測數據缺乏有系統的回饋分析，使得監測系統未能發揮應有的角色；另一方面，壩體內部之監測點僅涵蓋整個壩體的極小部分，監測儀器又常有損壞情形，因此，有必要進一步研發提升監測與檢測技術，以強化水庫安全評估及平常安全檢查之落實。

水利署於 94 年度已完成「水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究」計畫，針對水庫潛在破壞模式之分類與案例收集、各項監測問題評析及非破壞性檢測技術應用於壩體之可行性評估等均有良好成果，該報告結論與建議中針對先進被動式監測技術之研發、非破壞性檢測技術與精度之改良及壩體安全診斷之專家系統之建立等，為後續持續研究發展之方向。因此，針對前期研究成果研提本計畫，針對監測部分，研發光纖及電磁波 TDR 被動式監測技術；在檢測部分，擬改良非破壞性檢測技術及提昇分析精度；另針對監測與檢測結果回饋分析方面，透過數值模擬，研擬建立異常現象診斷系統；此外，亦辦理監測及檢測與安全診斷相關教育訓練，以提升水庫管理單位及顧問公司分析人員相關專業素質。



## 二、計畫工作項目

本計畫分三年(95至97年度)辦理,97年度工作項目分述如下:

### (一) 先進傳輸線式監測技術之現地應用與測試

1.光纖光柵水壓計現地測試:擇一土石壩場址,依照壩體監測之需求決定鑽孔深度與光纖光柵水壓計安裝之數量,監測規劃需考慮監測效能與安裝方式之評估。

2.剪力帶寬度對於TDR反應之探討及TDR錯動變形安裝與資料分析程序修訂。

3.TDR錯動變形標準安裝與分析程序現地測試:選擇一適當場址,實地測試評估模型試驗研究所擬定之標準安裝與資料分析程序。

### (二) 研訂水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊

導引手冊研訂按不同類型之潛在安全問題與適用條件選用適當檢測技術之評估方法,並針對各方法提出施測規範及施測結果分析與判釋方法。

### (三) 壩體震後安全診斷系統研究

1.土石壩(兩座)地震儀資料之系統識別分析研究。

2.簡易頻譜分析軟體及使用手冊之開發(MATLAB版及EXCEL版)。

3.簡易系統識別分析應用軟體及使用手冊之開發(MATLAB版)。

#### (四) 水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關教育訓練

辦理水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關教育訓練 15 小時以上，提升水庫管理單位管理人員、顧問公司分析人員專業素質。

### 三、前期研究成果回顧

#### 3.1 第一年度（95 年）成果回顧

##### （一）先進傳輸線式監測技術之研發

監測技術改善研發於 95 年度的工作重點是研發光纖光柵 (FBG) 水壓計及改良時域反射 (TDR) 錯動變形監測技術，FBG 與 TDR 分別利用光及電磁波對於傳輸線式傳感器進行感應，儀器主機在地面上，傳輸線式監測技術具有耐久性、抗雷擊且可以一機多工及多點監測，較適合水庫長期安全監測。相關研究成果摘要如下：

##### 光纖光柵水壓計之研發

1. FBG 水壓計以 FBG 作為應變感應器量測水壓計內部金屬膜因外在水壓所產生之應變，所研發的水壓傳感器有兩種：差異/漸變感應式壓力計及等週期式 FBG 壓力計。
2. 差異/漸變感應式具有不受溫度影響的優點，但其直徑在 30mm 以上，無法放入常用之開口式立管，較適用於新設立的封層式水壓計，具有與測傾管整合安裝的優點。
3. 等週期式 FBG 水壓計直徑小，且線性度與靈敏性較差異/漸變感應式設計更為理想，但需要利用 dummy FBG 進行溫度補償。
4. 現有 FBG 解讀儀可以辨解 1pm 波長之變化，本計畫所研發之設計標定結果顯示，量測範圍在 250 至 300kPa 之 FBG 壓力感測器其對應之波長變化在 1600 至 2000pm 之間，因此其解析度約在 0.015 至 0.020kPa 之間，已可充分滿足現場水壓量測

之需求。

5. 建議後續進行光纖水壓計的封裝與安裝設計及耐久性評估。

### 時域反射 (TDR) 錯動變形監測技術之改良

1. TDR 錯動變形監測技術的改良主要在探討影響以 TDR 反射訊號量化錯動變形量的因子，包括纜線電阻、材料互制及剪力帶寬度。
2. 完成可考慮纜線電阻影響之 TDR 模型，能有效且適當地描述纜線電阻的影響，然而求取外在變形量  $\delta$  與特徵阻抗關係所需反算模擬相對複雜，利用上述電磁波傳模型衍生的簡易纜線電阻修正法，可提供更快速便利的纜線電阻修正，應用於工程實務。
3. 本研究另設計製作一較可模擬現地實際情境的剪力盒，利用剪力試驗掌握材料互制及剪力帶寬度如何影響 TDR 反射訊號。試驗結果顯示隨著土壤材料相對軟弱或剪力弱帶寬度增加，對應啟動位移量  $\delta_0$  增加，但纜線的靈敏度  $S$  仍約略為常數，事實上，若靈敏度不受現地條件影響，將有助於簡化現地應用難度，此一結果提供了 TDR 錯動變形監測新發現與新思維。
4. 試驗結果顯示灌漿比周圍土壤堅硬並不會減弱 TDR 反應。受剪時，在剪力面附近的張力裂縫可以產生灌漿圓柱的弱帶，傳遞外在滑動變形至纜線。因此，在纜線周圍具有灌漿保護實際上使纜線變容易受滑動變形。確認灌漿比纜線足夠堅硬應該是比較實務的考量。
5. 本試驗採用較硬的固狀(solid)外導體纜線，較不易造成纜線變

形，但仍可獲得良好成果。雖然如此，對於過軟的土壤，可能需要使用網狀外導體纜線配合堅硬的灌漿才可達到較小的初始啟動量。

6. 本研究所設計之手動剪力盒尺寸較小，有邊界效應的疑慮，建議未來製作一大型剪力盒，進一步確認上述結論，並研究可提早偵測滑動面發生的訊號分析方法。

## (二) 非破壞性檢測技術之應用與改良研究

非破壞性檢測技術與精度之改良 95 年度工作重點是地電阻影像探測技術之施測與分析方法及不同問題與壩體條件選用適當檢測技術的評估方法。相關研究成果摘要如下：

### 非破壞性監測技術改良研究

1. 完成地電阻影像探測技術之施測與分析方法改良及不同問題與壩體條件選用適當檢測技術的評估方法，95 年度的實測案例包括新山、寶二及仁義潭 3 座土石壩及石門水庫廊道、大觀電廠及石岡壩 3 座混凝土結構。
2. 在施測上，以注入導電液的方式改進貫入式電極及非貫入式電極的施測品質，結果顯示以硫酸銅導電液的效果最佳，但僅對於淺層資料有所幫助。另外進行各種電極排列施測方式的重複性試驗，結果發現現場進行資料收錄時，第一次收錄的資料可能受到介電極化的影響，資料品質較差，為了確保得到較佳的量測資料，建議每次收錄資料時先施測一組測試組。
3. 在各種電極排列方式的重複性方面，試驗結果顯示 Wenner 與

Pole-Pole 的重複性較佳，因此在淺層的監測時建議使用 Wenner，深層的監測建議使用 Pole-Pole 排列方式。

4. 在資料分析上，可利用正算模式及靈敏度運算子探討地電阻探測的不確定性，利用靈敏度剖面可以掌握反算分析不確定高的區域，避免資料的過度解讀，而正算模擬可以建構較符合物理現象的模型，與現地施測資料比較進行綜合評估。
5. 由於地層電阻率的絕對值同時受到地下水及地層種類的影響，本研究以新山水庫為例，展示利用定期監測的方式，以地電阻率的改變探討滲漏情形。
6. 非破壞性檢測方法的選用準則可參考本研究及國際使用經驗及已建立之 ASTM 準則，擬以建立不同破壞模式可選用之非破壞性檢測對應表，繼由非破壞性檢測方法的特性考量壩體條件後進行檢測方法之選定。透過兩階段式的考量過程，便利管理者進行決策並有效掌握所需之技術。

### (三) 壩體安全診斷系統研究

壩體安全診斷 95 年度工作重點是進行土石壩滲漏問題之境數值模擬及混凝土拱壩受震後之系統識別分析，以充分利用如水壓與地震觀測等較無法直接判讀的監測資料；相關研究成果摘要如下：

#### 土石壩滲漏問題之數值模擬

1. 對稱良好之分區型土石壩與非常不對稱之土石壩，具內部缺陷下所出現異常滲流行為可能迥異。
2. 本研究先以鯉魚潭壩為對稱良好分區型土石壩範例，藉數值

分析模擬不同缺陷下可能出現之滲漏相關問題，模擬結果顯示：

- (1) 若壩體存在橫向水平裂縫，即使已發展至心層中央，滲流增加仍有限，實務監測上恐難以判斷。局部區域孔隙水壓監測值則會異常升高，若監測儀器布置合宜，應有機會察覺異狀。
  - (2) 垂直裂縫對於壩體滲流量影響較小，但對於滲流路徑之影響較大，導致垂直裂縫後方心層因垂直裂縫失去阻水效果。
  - (3) 基礎交界面處理極端不良下，交界面之滲流襲奪大部分原來流經壩體之滲流量。孔隙水壓分佈則無明顯差異。
  - (4) 當濾層阻塞，可能造成壩心滲出水路必須繞出濾層，使部分下游殼層濕潤。壩心於近濾層阻塞處孔隙水壓局部範圍顯著升高，近濾層阻塞段之孔隙水壓計應可反應其異常。
  - (5) 當隔幕灌漿局部失效時，原先必須繞過隔幕灌漿的滲流路徑，密集流線集中穿過灌漿局部失效處，使得滲流量上升接近沒有隔幕灌漿時情形。一旦隔幕灌漿失效（破裂）時孔隙水壓有明顯變化，附近有水壓計應可測出此明顯變化。
3. 本研究復以新山壩加高後之壩體為例，探討典型極不對稱型土石壩體可能出現之特殊滲漏相關問題，模擬結果顯示：
- (1) 新山壩濾層形式特殊，當水位高過加高前壩高度，在新心層下方產生濕潤區，當水位逐漸提高，此濕潤區逐漸擴大。
  - (2) 假若新舊心層交界面水密性極不足，在「 $\angle$ 」形濾層條件下，浸潤面可能進入下游殼層，有不利影響

- (3) 假設濾層堵塞，由心牆滲出之滲流水將繞過堵塞區域進入下游殼層，隨後再進入下方濾層，可能造成局部區域濕潤。
4. 根據上述模擬結果，歸納幾點監測與壩體安全評估相關建議：
- (1) 對稱良好之分區型土石壩與非常不對稱之土石壩，滲流之行為迥異，安全評估應該注意。
  - (2) 布置監測儀器位置可參考容易出現異常水壓或異常現象處。
  - (3) 壩體安全評估宜善用監測結果，不妨比照數值模擬分析結果研判異常水壓的特徵，據以研判可能異常原因。
  - (4) 極不對稱之土石壩若在壩心與濾層具有過大的轉折角，壩體阻水能力可能較難完善，宜盡量避免。
5. 土石壩體破壞扣除溢頂與附屬結構之破壞模式，其餘幾乎絕多屬滲流相關者，零星剩下之邊坡破壞案例則十分有限。而壩體出現邊坡破壞通常較有跡可尋，譬如會出現裂面（可能為滑動面頭部）、下陷、隆起（可能為滑動面趾部），也甚易於經由壩面變形或壩體埋置的測傾管數據直接發現，破壞模式之研判較為單純較不需藉由情境模擬的手段推測可能出現之問題。

### 混凝土拱壩地震行為之系統識別分析

1. 本研究進行翡翠水庫及德基水庫混凝土拱壩結構之系統識別分析，首先建立系統識別分析程式，隨後利用強震儀實測之地表輸入資料及壩體輸出資料識別拱壩結構之振動頻率，俾便瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情況及歷次地震分析結果之差異程度，以評估系統識別模式應用於壩體安全診



斷之可行性。

2. 翡翠水庫之識別結果顯示，拱壩之振動頻率有隨著水位愈高而降低的趨勢，分析結果之趨勢合理，且拱壩之振動頻率與相關文獻所得之結果差異不大(小於 10%)，顯示壩體之振動特性於歷次地震事件後並無顯著的變化，拱壩應無結構性的損傷。
3. 德基水庫之分析結果顯示，強震儀記錄之資料檔案並非習用之文字資料格式(為擷取系統儲存之原始碼格式)，因此無法取得歷時資料並進一步進行系統識別分析。本案建議管理單位可嘗試將原始檔案轉成加速度歷時資料(ASCII 格式)，或請設備廠商提供轉檔的協助。若係因擷取系統較為老舊所致，則可視情況逐步更新強震儀及其資料擷取系統，以記錄拱壩於地震下之加速度歷時反應，將有助於掌握拱壩之動力特性與相關安全評估及診斷作業之進行。

### 3.2 第二年度（96年）成果回顧

#### （一）先進傳輸線式監測技術之研發

##### 光纖光柵水壓計之研發

1. 本年度計畫中，使用三種環氧樹脂類黏貼膠進行光纖黏貼之測試。經測試結果顯示，三種膠皆有足夠的黏貼強度，然而在使其於持續加溫至 80 度 C 的環境下，僅 JA643 一型的膠的黏貼力無明顯降低的情形，因此在光纖的黏貼上將採用 JA643 型的環氧樹脂。
2. 在光纖光柵水壓計之改良上，為增加於去年度所研發之單鋼模片光纖光柵水壓計之靈敏度，更改其設計而改為使用雙鋼模片。原推測其靈敏度將能有兩倍的提升，然而經試驗後結果顯示，在目前的設計下其並無明顯的提升。此原因推測是在於雙鋼模片的距離過大，使得相同的變形轉換為應變時會無法有效的轉至光纖上，因此估計將雙鋼片距離減半便可得到預期效果。
3. 在光纖光柵水壓計之封裝與安裝上，本計畫將等週期 FBG 水壓計固定於長 0.5m、直徑約為 2.5mm 的 PVC 管內，而 PVC 管外將打孔後包裹不織布並在孔內上下處予以隔絕，最後灌注固體膠增加其阻絕效果。至於連接部分，以相同直徑大小之 PVC 管作銜接以保護光纖傳輸線。在現場安裝前，已加工完畢之光纖光柵水壓計皆需進行壓力測試，以確保封裝無漏水之

虞。初步成果顯示，此種封裝方法能有效地達到封裝的需求。

4. 在耐久性試驗中，根據中華民國國家標準 CNS3556 進行耐久性試驗。將光纖光柵水壓計依標準之要求置於攝氏 70 度環境下，分階段紀錄至 336 小時，結果顯示光纖黏貼膠無脫落現象，光纖光柵水壓計波長變動約 70pm；另再將光纖光柵水壓計置於約  $3\text{kg}/\text{cm}^2$  的高壓環境下進行潛變試驗 5000 分鐘，試驗結果顯示光纖光柵水壓計波長變動約 20pm，亦即其潛變效應為  $20\ \mu\ \varepsilon$ 。
5. 在光纖光柵自動化擷取系統整合上，使用 National Instruments 所開發之 CompactRIO 作為光纖光柵感測系統硬體平台，搭配 NI9215 模組擷取光纖光柵訊號，另以 NI9403 模組控制光纖切換，再經由 Real-time 系統架構下，即時進行訊號分析處理運算。此一系統充分利用 CompactRIO 能在極端惡劣環境下獨立運作以及低耗能之優點。本團隊使用 Labview 撰寫使用 CompactRIO 做光路控制與光訊號分析之程式，透過 VHDL 語言方式編譯至 FPGA 內，成功整合此自動化擷取系統，擬將此系統與交通大學光纖感測試驗室所研發之光纖光柵感測系統結合，進行土木工程現地長期自動化監測之用。

### TDR 錯動變形監測資料分析改良

1. 本研究研發建立一能符合現地狀況的物理模型-大型直剪儀，並用以進行一系列試驗探討不同纜線-灌漿材料-土壤互制因

子對於變形量化分析的影響。

2. 在土壤中的率定試驗結果顯示，傳輸纜線之初始反應門檻值 ( $\delta_D$ )與迴歸初始反應門檻值( $\delta_0$ )皆以硬殼式纜線 (P3-500 型) 為最大，軟性纜線 (RG-8 型) 為最小(即最早偵得滑動)；同一種纜線中，外導體無披覆 (unshielded) 者較有橡膠披覆 (shielded) 者靈敏。
3. 灌漿材料與纜線及地層互制的試驗探討結果顯示，匹配灌漿材與現地材料之勁度，未必能提高 TDR 的反應，不同的纜線會影響地層滑動如何破壞灌漿材及進一步剪動纜線，重點在於灌漿材之剪力勁度需大於感測纜線。堅硬但不具抗張強度的灌漿材有助於固定纜線的受剪模式，一旦灌漿材破壞後，纜線受剪時之  $\Delta \rho - \Delta \delta$  雷同，與周圍地層勁度無關。
4. 由本研究的試驗結果可以建議較合理的纜線與灌漿材的選擇，在纜線的選擇上，硬性纜線適合堅硬地層，有較佳的  $\rho - \delta$  靈敏度，但較不適合軟弱地層 ( $\delta_D$  太大)，軟性纜線較適合軟弱地層，可較早偵測位移 ( $\delta_D$  小)，但  $\rho - \delta$  靈敏度較低。在回填灌漿的選擇上，灌漿材最重要的是要具有大於纜線的剪力勁度，灌漿材與地層的順應性並不重要 (雖然對於當採用軟性纜線時有些微幫助)
5. 利用小波方法對 TDR 訊號作雜訊處理，以 P3-500 與 RG-8 兩種纜線之試驗結果進行分析，結果顯示至少可提早約 2 mm 感

測到滑動。透過實驗室已知滑動量訂出門檻值為  $0.001\rho$ ，並顯示門檻值與可目視滑動量相符合。上述結果有助於 TDR 波形之自動化判釋。

6. 利用 JAVA 程式之跨平台特性建立 TDR 監測系統整合之應用程式，並建立自動化的訊號擷取與分析排程，在網頁的單一互動界面下獲得各監測系統的結果，達到整合的效果。

## (二) 非破壞性檢測技術之應用與改良研究

### 非破壞性檢測技術之應用與改良研究

1. 本年度計畫以改良表面波震測檢測技術以及非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形初擬。
2. 為提升表面波震測的探測深度以及側向解析度以更加適用於壩體應用上，改良現有的施測方法與分析過程提出高側向解析法。經由利用 MatLab 引擎自行撰寫之速度-應力有限差分程式進行數值模擬驗證此施測法之可行性，數值結果顯示其可行性，並確實達到其提升探測深度與側向解析度的目的。
3. 透過數值模擬的方式探討在具有坡度的地形上施作表面波震測的影響，結果顯示在此地形上施作所獲得之表面波頻散曲線波速有偏低的情形，此外整體的能量較散佈在各個頻率振態上，有使非基態振態能量集中的情形，但在測試用的地層模型中，高次振態並無明顯的主控頻寬。以目前的程式進行地形效應探討尚僅能以定性描述，無法定量評估其影響程度。

4. 在高次振態對表面波震測的影響上，在此將其分做「振態分離可辨識」與「振態無明顯分離」兩種情形探討。結果顯示，在基於基態反算的現有技術下，「振態分離可辨識」的情形中只要能有足夠的基態頻散曲線頻寬便可掌握地層特性，影響有限；但在「振態無明顯分離」情形下，其對結果的影響極大，在要求有較好的反算誤差值下，常會使得反算結果有人造的假性地層特性產生。因此，目前應以考量得以獲得「振態分離可辨識」資料為重點。實際做法包括採用高側向解析法或是採用較小的近站支距或是使用非線性接收器間距。
5. 在非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形初擬上，提出二個階段三步驟的適用性評估流程，並搭配流程需求製作出可能破壞機制-可用之非破壞檢測法-適用環境的關係表格。於此概念下，初擬出非破壞性檢測技術之適用性評估方法之手冊架構雛型與大綱內容。

### (三) 壩體安全診斷系統研究

#### 混凝土重力壩結構受震之系統識別分析

1. 本年度計畫針對谷關壩及天輪壩進行歷時分析、頻譜分析及利用 AR 模式(無輸入擾動)進行結構系統識別分析。
2. 谷關壩及天輪壩之歷時分析結果顯示，強震儀訊號有隨地震波動的趨勢，其功能應屬正常，惟當壩體振動反應較小時，歷時訊號之解析度較差(天輪壩強震儀之解析度較低)，該資料

將影響後續之分析結果。當地震震度不大時，強震儀所記錄之訊號解析度降低誠屬合理，惟強震儀仍須加以維護及校正，俾便確認該資料之精確性。

3. 頻譜分析結果顯示，強震儀振動訊號之頻率內涵普遍集中在 20Hz 以內之頻寬範圍，由於谷關壩為一拱壩，其頻譜有較顯著(或單一)之峰值出現，而天輪壩為一重力壩，不同塊體間可能有近似各自獨立振動之行為且各塊體間亦可能有互制效應存在，因此振動頻率較為多元，使得頻譜峰值出現的位置有呈現分佈於某一頻寬之現象(5Hz~20Hz)。此外，當強震儀振動反應較小導致解析度降低時，其頻譜將無顯著的峰值存在(平緩)或頻譜曲線將較為密集(粗黑)，波動的趨勢較不清晰。
4. 無輸入擾動之系統識別分析(AR 模式)結果顯示，傳遞函數之趨勢與傅氏頻譜之趨勢極為相近，谷關壩有較顯著之峰值出現，而天輪壩峰值出現的位置有呈現分佈於某一頻寬之現象，與頻譜分析之結果契合。其峰值的頻寬大致穩定分佈於 5~20Hz 之間。此外，90 年至 95 年地震儀所記錄之加速度峰值多數小於 20gal，兩壩體應無結構性的損傷發生。
5. 谷關壩之振動頻率與水位高程間似無一顯著之線性關係，由於谷關壩加速度振動反應大於 20gal 者僅有 3 次地震事件(有效樣本數量較少)，振動反應較小可能影響系統識別分析的結果，且谷關壩僅壩體有反應輸出資料而無壩底輸入資料，AR

識別模式所得之壩體振動頻率將包含地表擾動頻率之影響(干擾)，實際壩體之振動頻率隨水位高程變化之趨勢較不顯著。日後水庫管理單位若有需要設置或更新強震儀，可考慮於壩底及壩體同時設置，地震發生時可同步記錄壩體之輸入及輸出振動反應，除了可提供相關水庫安全評估作業之參考資訊外，對於吾人精確掌握壩體之動力特性亦有所助益。



### 3.3 95、96 年研發過程中所遭遇困難與解決辦法

本計畫自民國 95 年開始執行，將過去 2 年(95 年、96 年)研發過程所遭遇的困難與解決辦法整理如表 3.1 與表 3.2 所示。

表 3.1 95 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法

| 95 年度計畫                                       |   |                  |
|---|---|------------------|
| 研發過程所遭遇之問題                                    | 預期之解決方法                                   | 完成與否             |
| 差異/漸變週期式光纖光柵水壓計，為全新研發之壓力感測器，故在理論分析與實際製作需多方嘗試。 | 參考國內外文獻來設計水壓計，並依據過去的經驗來製作差異/漸變週期式光纖光柵水壓計。 | 完成雛型設計，並進行水壓計標定。 |
| 等週期式光纖光柵水壓計，為全新研發之壓力感測器，故在理論分析與實際製作需多方嘗試。     | 參考國內外文獻來設計水壓計，並依據過去的經驗來製作等週期式光纖光柵水壓力計。    | 完成雛型設計，並進行水壓計標定。 |
| TDR 錯動變形監測之波型受到纜線電阻影響，將影響量化之計算。               | 透過建立含電阻影響之理論模型，期冀透過反算方法將電阻影響去除。           | 完成               |

表 3.1 95 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法(續)

| 95 年度計畫   |   |      |
|---|---|------|
| 研發過程所遭遇之問題  | 預期之解決方法   | 完成與否 |
| 採用含電阻影響之理論模型可透過反算方式將電阻影響去除，但過於複雜，不易為工程師使用。          | 在理論模型之基礎上，容許一定的誤差發展簡易纜線電阻修正法，便利使用。                      | 完成   |
| TDR 錯動變形監測之量化牽涉到土壤、灌漿材、纜線以及剪力帶寬度的影響，該如何考量以達到監測最佳效果。 | 透過建立物理模型，先於實驗室進行室內實驗釐清其相互間之影響關係。                        | 完成   |
| 翡翠水庫之壩體強震儀數量達 11 座，若全數進行系統識別分析，其運算量過大，時效性降低。        | 選用壩底五座強震儀資料作為輸入，靠近壩頂附近之三座強震儀資料作為輸出進行系統識別分析，俾便求得壩體之振動特性。 | 完成   |

表 3.2 96 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法

| 96 年度計畫                            |   |                        |
|------------------------------------|---|------------------------|
| 研發過程所遭遇之問題                         | 預期之解決方法   | 完成與否                   |
| 95 年發展之光纖光柵水壓計需對其進行感測元件的黏著力測試。     | 首先經過評估選出較有可能使用的 3 種膠材進行黏貼測試，將製作完成後的感測器進行 80 度高溫測試與在 -20 度至 70 度間來回 8 次，進行黏著力測試，選出適當之膠材。 | 完成                     |
| 在薄膜厚度與尺寸大小限制的狀況下，提升等週期式光纖光柵水壓計的精度。 | 設計出雙薄模等週期式光纖光柵水壓計，提升水壓計精度。  | 水壓計精度提升至可量測 3 公分的水位變化。 |
| 水壓計於孔內安裝時需要封層，故需要對感測器與傳輸線進行保護。     | 於實驗室內進行感測器外殼封裝與模擬測試。  | 完成                     |

表 3.2 96 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法(續)

| 96 年度計畫  |  |                   |
|--|--|-------------------|
| 研發過程所遭遇之問題   | 預期之解決方法                                      | 完成與否              |
| 為確保光纖光柵感測器於現地使用的耐久性，故需對其進行耐久性測試。                     | 將感測器放置於裝滿水的容器內並加溫到 70 度觀測 336 小時，確認是否有脫膠之狀況。 | 確認光纖光柵感測器並無脫膠之現象。 |
| 進行光纖光柵讀取系統的整合與設計，使其適用於工地現場。                          | 於實驗室內進行光纖光柵讀取系統整合與測試。                        | 完成                |
| 95 年計畫為探討土壤、灌漿材、纜線以及剪力帶寬度影響所建立之物理模型較小，使所得結果有邊界效應之疑慮。 | 考量邊界效應，設計大型剪力盒物理模型。                          | 完成                |
| 為使 TDR 錯動變形監測技術得以推廣並獲得有效成果，需建立標準安裝程序。                | 利用建立起之大型剪力盒物理模型，考量土壤、灌漿材、纜線之互制行為，進行現場最佳安裝測試。 | 完成，並據以建立現場標準安裝程序。 |

表 3.2 96 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法(續)

| 96 年度計畫   |  |           |
|---|--|-----------|
| 研發過程所遭遇之問題  | 預期之解決方法  | 完成與否      |
| <p>為進一步提升 TDR 錯動變形監測技術之應用性，自動化之系統有發展之需要。</p>                          | <p>現場利用嵌入式系統控制 TDR 之波形擷取，而後透過傳輸模組(有線/無線)傳送資料進遠端伺服器，最終透過跨平台之 JAVA 進行排程分析。</p>               | <p>完成</p> |
| <p>已完成之自動化 TDR 錯動變形監測系統，若能具有即時處理以及預警通知，可更有效達到監測之目的，但有管理值訂定之問題需解決。</p> | <p>採用訊號處理技術，降低監測雜訊，由室內實驗結果訂定辨識管理值。由於現地雜訊大小不同，後續改利用訊號分析結果與 3-sigma rule，訂定錯動發生之自動化辨識方法。</p> | <p>完成</p> |

表 3.2 96 年本計畫研發所遭遇困難與解決辦法(續)

| 96 年度計畫  |                                   |                                      |
|--|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 研發過程所遭遇之問題   | 預期之解決方法                           | 完成與否                                 |
| <p>96 度主要進行混凝土重力壩之系統識別分析，由於天輪壩及谷關壩僅壩頂有安裝強震儀，壩底則無強震儀，因此無輸入擾動資料可供識別分析。</p> | <p>本研究採用無輸入資料之 AR 模式進行系統識別分析。</p> | <p>完成(無輸入系統識別之分析結果與傅氏轉換之頻譜趨勢一致)。</p> |

## 四、先進傳輸線式監測技術之現地應用與測試

### 4.1 研發儀器與傳統儀器的比較

孔隙水壓與地層錯動監測是水庫安全監測最為重要與常見的觀測項目，本研究主要針對傳統水壓與地層錯動觀測儀器在水庫安全監測中的缺點，提出改良式的替代方法，所研發之儀器可以輔助或替代目前常用的監測方法，提高水庫安全監測之效能。

目前水壓監測以電子式水壓計為主，單一鑽孔難以安裝多點水壓觀測，且電子感應器容易受電磁波干擾，長期在潮濕環境中易使電子感應器受損無法使用。本團隊所研發之光纖光柵水壓計，因是將精密之主機部份置於地面採取保護，而做為感測器部份是為光纖，因此無上述易受潮溼損壞以及無法一孔多點的缺點。

壩體水位與水壓監測之傳統儀器安裝方法如圖 4.1 所示。

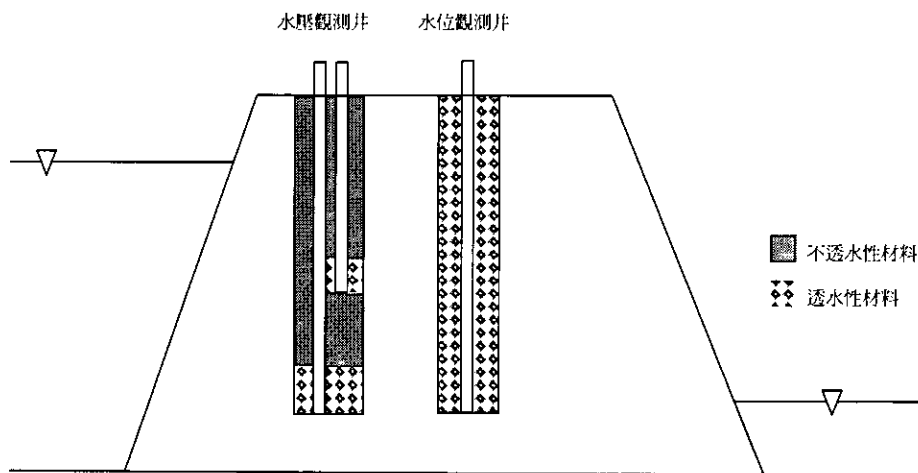


圖 4.1 壩體水位及水壓觀測管安裝示意圖

水位觀測井部分，一般水位管外圍會予以打孔且不須做封層的動作，以量測該範圍的水位變化，在使用本團隊所新研發之光纖光柵水

壓計只需直接替換現有之傳統式水位計即可。其量測方法為將光纖光柵水壓計安裝置現有之水位觀測管內，初期先放置一定深度下量取初始讀數，並記錄所安裝之深度，當水位變化時，則光纖光柵水壓計之壓力會產生變化，由壓力變化換算其所須之壓力水頭，即求出該水位觀測管內之水位高度。

而水壓計監測部分，通常根據所須監測的範圍將 PVC 管外圍予以打孔，該範圍外上下區間封層，以量測該範圍的水壓變化，但由於傳統電子儀器無法達到多工的特性，也就是說一條傳輸線只能有一個感測器，所以若要達到多點水壓的量測時，需要較大的鑽孔，才可埋設多個電子水壓計，但一般至多也僅埋設兩組電子式水壓計。因水壓計是量測某深度水壓的變化且採取封層，若須在現有水壓監測孔位安裝光纖光柵水壓計時，可將現有光纖光柵水壓計安裝至水壓觀測管內，並量測該監測管內之水壓變化。但若採取重新鑽孔之方式，因光纖光柵水壓計其可一機多工之優點，便可在一孔內進行多點水壓觀測。傳統電子式水壓計與光纖光柵水壓計優缺點之比較如表 4.1 所示。

氣壓式水壓計係一個裝設並密封於鑽孔內或插入在軟土中之透水頭，經由兩條塑膠氣導管連接至測讀器。水壓計頭部之感應器基本上由一個被柔性隔膜分成兩區(感應區及量測區)之剛性框架所構成。在感應區，水壓計外部之孔隙水壓透過濾石並作用至隔膜上。隔膜另一側緊貼在含有兩個小孔(進氣及回氣孔)之平坦防水壁上以構成儀器之氣壓區(量測區)，並以兩氣導管分別連接進氣孔及回氣孔至測讀器。氣壓式水壓計之測讀係採用氣壓式測讀器。測讀時，高壓氣體經由進氣管送至儀器之量測室並作用於隔膜上，當供氣壓力足夠平衡作用在隔膜上之液壓時，隔膜即產生彎曲變形使進氣管與回氣管形成通



路，使多餘之氣體經由回氣管排至測讀器上之回氣偵測器，此平衡壓力即可由測讀器上之壓力錶或數位顯示器測得。氣壓式水壓計與 FBG 水壓計比較如表 4.2 與構造示意如圖 4.2 所示。

表 4.1 傳統電子式水壓計與光纖光柵水壓計之初步比較

| 監測技術     | 傳統測水壓計                                       | FBG 水壓計  |
|----------|--|--|
| 功能與特性    | 使用應變片感應壓力所導致一薄膜之變形，以電壓或電流傳遞訊號，非分佈式設計         | 使用 FBG 感應壓力所導致一薄膜之變形，以光傳遞訊號，部分分佈式設計                          |
| 應用限制     | 受潮濕環境影響容易產生短路，壽命有限，非分佈式設計不易大量使用              | 體積小，材料穩定，適於大量而分佈式之佈設。  |
| 儀器放置方式   | 下孔式(downhole)：<br>精密的水壓計本身需置入存在地層內。          | 上孔式(uphole)：<br>精密的儀器放置於地面，僅需將 FBG 置入地層。                     |
| 電子元件型式   | 電子感應器：<br>電子感應器需要外部電源供應以維持或激發電子元件功能。         | 傳輸線式傳感器：<br>傳感器不需供應電源，僅在量測時發送光源進行檢測即可。                       |
| 耐久性與使用壽齡 | 內部為複雜昂貴電子元件，容易受水、濕氣、雷擊影響而喪失功能或降低耐久性，平均使用壽齡短。 | 傳感器無複雜電子元件，因其傳輸線式特性而不易受水、濕氣、雷擊影響功能性。但傳感器之封裝設計與耐久性評估還有待進一步評估。 |
| 管理維護便利性  | 雖可自動化，仍會因為主動式與下孔式特性而不易管理維護。                  | FBG 技術易於自動化，提供遠端管理便利性，透過光譜變化可自我檢測光纖狀態，便於維護。                  |
| 安裝成本     | 少量時，成本適中但大量使用時成本過高。                          | 少量時，成本高但大量使用時其單價適中。  |
| 成本效益     | 傳統水壓計單位造價昂貴，成本隨數量而增加，但效益則因其不易管理維護而降低。        | FBG 技術透過分工器可進行一機不同監測功能與多點監測，有效降低整體監測系統成本，並可獲得良好的效益。          |

表 4.2 傳統氣壓式水壓計與光纖光柵水壓計之比較

| 監測技術    | 氣壓式水壓計                              | FBG 水壓計   |
|---------|-------------------------------------|---|
| 功能與特性   | 使用加氣壓的方式使得薄膜兩側壓力平衡之原理來量測水壓力，非分佈式設計。 | 使用 FBG 感應壓力所導致一薄膜之變形，以光傳遞訊號，部分分佈式設計。                |
| 應用限制    | 加氣壓非分佈式設計，不易大量使用。                   | 體積小，材料穩定，適於大量而分佈式之佈設。                               |
| 耐久性與自動化 | 內部構造簡單，原理容易，但是自動化不易。                | 光纖不受水、電磁波與雷擊影響，耐久性佳，可自動化。                           |
| 管理維護便利性 | 維護簡單，無複雜之電子構造，但無法自我檢測，只能定時人工量測與檢測。  | FBG 技術易於自動化，提供遠端管理便利性，透過光譜變化可自我檢測光纖狀態，便於維護。         |
| 安裝成本    | 少量時，成本適中但大量使用時成本過高。                 | 少量時，成本高但大量使用時其單價適中。                                 |
| 成本效益    | 現地施工安裝與量測麻煩，自動化成本高。                 | FBG 技術透過分工器可進行一機不同監測功能與多點監測，有效降低整體監測系統成本，並可獲得良好的效益。 |

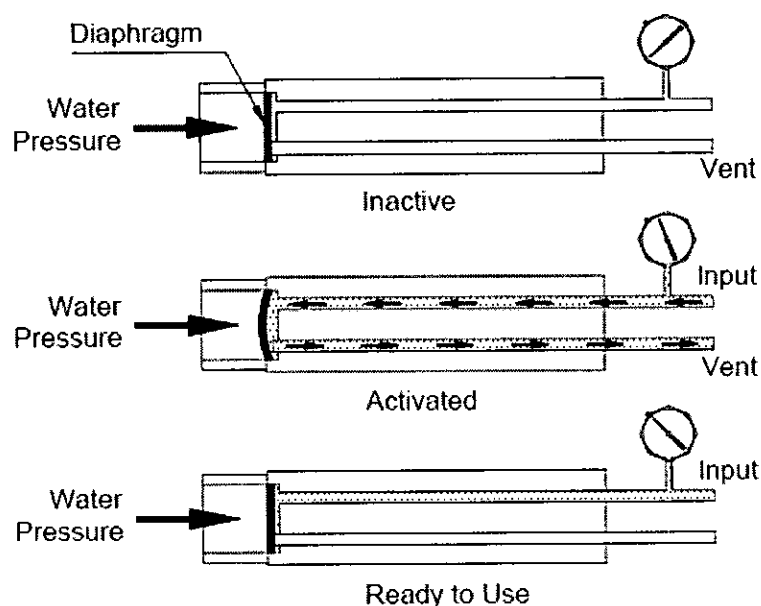


圖 4.2 氣壓式水壓計感測示意圖

傳統之錯動變形監測主要採用測傾管，一般而言，TDR 錯動變形感測器難以有效偵測應變梯度較小的撓曲變形；相對地，由於一般測傾儀長度為 50cm，對於局部相對錯動變形量測所得為整體平均效果，若薄剪動帶持續變形，則測傾儀將無法置入。在資料的獲取方面，測傾管量測需耗費人力與時間，監測頻率低，對於偏遠不易到達的區域，常受氣候影響而無法觀測，因此常在最需要預警觀測的地震、暴雨發生時缺少觀測資料。孔內自動化測傾儀（In-place inclinometer, IPI）雖可進行自動化觀測，但其間距受到電纜線安裝與經費限制，間距常大於 2m 而無法正確解釋薄剪動帶滑動變形現象，IPI 電子元件長期穩定性也有待評估。相較於人工測讀之測傾管或 IPI，TDR 錯動變形感測器具有空間上連續監測的獨特優點，可以量測薄剪動帶，適合地層不穩定之預警及可能滑動面位置之監測。表 4.3 為傳統測傾管監測技術與 TDR 監測技術在功能、效益、維護等不同層面上的優缺點與限制的比較。

表 4.3 傳統測傾管監測技術與 TDR 錯動變形監測技術初步比較

| 監測技術     | 傳統測傾管監測技術   | TDR 錯動變形監測技術  |
|----------|---|---|
| 功能與特性    | 利用測傾儀與重力夾角，線性內插換算成水平變位剖面，並可判釋滑動方向。                    | 局部剪力變形導致同軸纜線變形，由 TDR 波形變化反推變形位置與錯動變形量。              |
| 應用限制     | 因其量測原理，對於局部剪力變形反應較不靈敏。                                | 因其量測原理，無法檢測得柔性撓曲的變形，且無法判釋滑動方向。精確的變形量化分析仍持續研究中。      |
| 儀器放置方式   | 下孔式(downhole)：<br>精密的測傾儀本身需置入存在地下水位的測傾管內。             | 上孔式(uphole)：<br>精密的儀器放置於地面，僅需將堅固耐用的同軸纜線置入壩體。        |
| 電子元件型式   | 電子感應器：<br>電子感應器需要外部供應電源以維持或激發電子元件功能。                  | 傳輸線式傳感器：<br>傳感器不需供應電源，僅在量測時發送電磁脈衝進行檢測即可。            |
| 耐久性與使用壽齡 | 內部為複雜昂貴電子元件，其主動式特性容易受水、濕氣、雷擊影響而喪失功能或降低耐久性，平均使用壽齡短。    | 內部無複雜昂貴電子元件，因其傳輸線式特性而不易受水、濕氣、雷擊影響功能性。可使用到纜線完全被剪斷為止。 |
| 管理維護便利性  | 測傾儀需人工操作，若改採可自動化的現地測傾儀，則空間解析度不佳，且因電子感應器與下孔式特性而不易管理維護。 | TDR 技術易於自動化，提供遠端管理便利性，透過反射波形變化可自我檢測同軸纜線狀態，便於維護。     |
| 安裝成本     | 需安裝具有特殊槽溝，成本高的 ABS 管。                                 | 安裝相對便宜的同軸纜線後進行灌漿即可。                                 |
| 成本效益     | 測傾儀或現地測傾儀皆造價昂貴，成本隨數量而增加，但效益則因其不易管理維護而降低。              | TDR 技術可透過分工器進行一機不同監測功能與多點監測，有效降低整體監測系統成本，並具良好效益。    |

## 4.2 光纖光柵監測系統

本工作團隊在使用光纖感測技術於大地工程監測方面之研發已有多數之研發經驗，本節將針對光纖感測技術原理、本團隊所研發之光纖感測器與新山水庫現地應用做一敘述。

### 4.2.1 光纖簡介

本計畫使用單模 (single mode) 玻璃光纖，其外觀類似一釣魚線的透明細桿。光纖直徑約在 100 至 125 $\mu\text{m}$  之間。單模光纖具有低訊號損耗、傳輸效果佳之優點，但容易受外力破壞。

光纖組成包含有中心折射率較高之核心 (Core) 與外面折射率較低之披覆層 (Cladding) (圖 4.3)，當一束光進入光纖時，光束會藉由全反射在光纖核心中傳播，其最大的優點就是能將光能量的損失降到最低。

光在光纖內之傳輸是根據史涅爾定律 (Snell's law)，當光線由折射率較大之介質進入折射率較低之介質時，會有部分光線被反射回到原來介質中，另一部分光線則以另一角度折射進入折射率較低介質中，其公式如下：

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (4.1)$$

其中  $n_1$ 、 $n_2$  = 入射界質與折射介質折射率

$\phi_1$ 、 $\phi_2$  = 入射角及折射角

依照上述公式，當入射角逐漸變大時，折射角也隨之增大，當折射角等於 90 度時，光線便沿該折射平面傳播，此時入射角度即稱為

臨界入射角  $\alpha_c$ ，其公式如下：

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \alpha_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (4.2)$$

當入射角持續變大，光線將不再產生折射，所有的入射光線將全部反射回原來介質當中，此稱為內全反射 (Internal total reflection)，而光在光纖中主要就是靠此原理來傳輸。

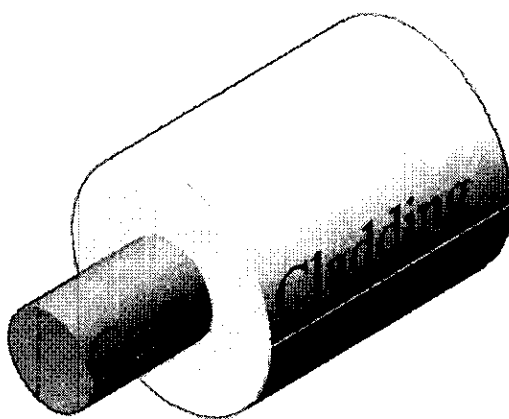


圖 4.3 光纖構造示意圖(簡旭君，2003)

近十年來光纖感測技術蓬勃發展，所以在土木工程領域已經有大量使用光纖對於應變、流量、磁場、溫度、壓力等變化進行量測的研究。因為光纖相對於傳統的應變片或半導體感測器而言，具有高靈敏度、多點量測與不受電磁波干擾等優點，所以受到土木工程從業人員的青睞，而光纖感測器可以依照感測器分佈方式來加以分類，一般區分為非分佈式、部分分佈式與分佈式三種分佈型態，說明如下：

#### 1. 非分佈式:

非分佈式的光纖感測器是指一根光纖上只能有一個感測器，例如菲里尼-浦洛(Fabry-Perot)干涉式感測器，其好處精度

高，但是無法在一條光纖上作多點感測。

## 2.部分分佈式:

一條光纖上部分線段經過特殊處理，形成感測元件，可以量測待測物的變化，這就是部分分佈式感測式光纖的特性，其主要代表為 FBG，具有高精度與多點量測的優點。

## 3.分佈式:

光纖本身就是感測器與訊號傳輸媒介，具有大範圍分佈式的感測優點，其代表性感測器為布理淵光時域反射器(Borillouin Optic Time Domain Reflectometer, BOTDR)。

本工作團隊所研發出來的感測器，因需具有能現地自動化、即時監測、監測範圍大與多點式量測的要求，故選擇 FBG 做為感測元件系統。

### 4.2.2 光纖光柵感測原理

本工作團隊使用 FBG 作為感測元件來製作光纖感測器，FBG 是利用雷射在光纖曝光時造成一系列折射率週期性永久的改變，對應折射率週期性改變的間距為  $d$ ，當一寬頻光源進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件(Bragg condition)的特定波長 $\lambda_B$ ，其餘波長都會因為相位差而相消；而當 FBG 受到外力產生應變時，造成原本間距 $\delta$ 的改變增加量為 $\Delta\delta$ ，使得該特定波長 $\lambda_B$ 反射回來一增加量 $\Delta\lambda_B$ ，利用兩者，可以求得應力施加後所引致的應變量大小(Hill, 2005 ; Kersey, 1992 ; Meltz, 1989 ; Measures, 2001 ; Othons, 1999 ; Rao, 1998)，圖 4.4 為其量測原理示意圖。

由於 FBG 特性，在實務的應用上，應力施加產生應變以後，不只是反射回來的 $\Delta\lambda_B$ 會改變，光纖的有效折射率  $n$  也會同時改變；而且也會受溫度影響而改變其反射波長，但是藉由本計畫團隊在長達六年的研究，相關的修正技術已經有效掌握，並在實際的應用中獲得良好的成效。目前 FBG 技術已經可以作為傳統應變計的良好替代方案，且具有被動式感測器的相關優點。FBG 與傳統電阻量測器最大的不同點，在於光纖的多工特性，並不受限於傳統電子迴路一對一訊號傳輸的要求，只要在光柵製作時安排不同的波長的光柵製作於同一條光纖上，利用足夠強度的寬頻光源，就可以同時量測數點至數百點的應變訊號。若以傳統的電路排列需要安置數百條的電線，且電線之間彼此因為電磁效應會相互的干擾，產生雜訊，影響量測結果的準確性；光纖感測器不但只需要一至兩條的光纖即可，不佔空間，另外沒有電磁干擾的問題，只要光源足夠就可以大量使用，準確性不減。

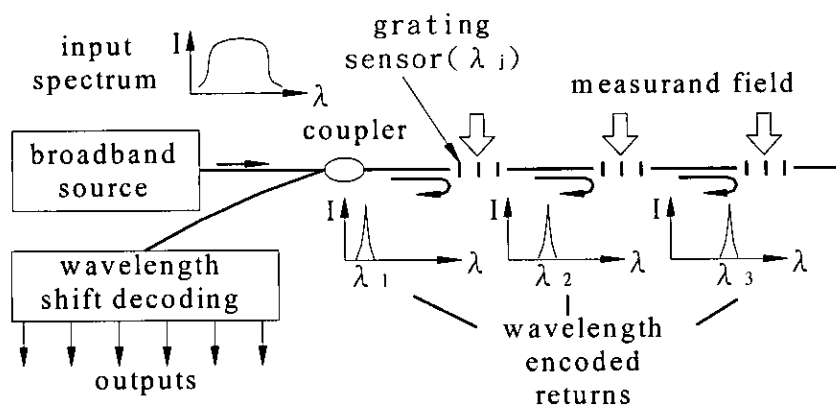


圖 4.4 光纖光柵量測原理示意圖 (Ho et al., 2005)



### 4.2.3 光纖光柵節理式偏斜儀

一般傳統上量測傾斜管之側向位移是使用測傾儀，它是由 Green and Mickelsen (1988)在 1952 年研發出來的地層側向位移感測器，到今天它已經是最普遍使用在地層位移量測上的監測工具，其量測原理是將陀螺儀裝設在感測元件中心，並藉由電纜線連接感測元件到地表，當地層發生位移時，陀螺儀便會與重力方向產生一偏斜角，然後再經由簡單計算得到位移量，一般而言傳統測傾儀之精度約為 1:10000 (Mickelsen, 1996)。但是測傾儀為電子式感測器，在現地使用上皆具有受潮易損壞、易受電磁波干擾與不容易做成多點式量測的缺點。有鑒於此，本工作團隊乃使用光纖光柵作為感測元件，發展出能感測地層局部變形的光纖感測器。

偏斜儀(Deflectometer)是一種使用在地層移動量測上的監測儀器，它的組成主要有兩部分，一部分是剛性的支架，另一為柔性感測元件，其量測原理是將剛性支架與柔性感測元件連接在一起放進測傾管內，用電纜線連接將量測數據傳到地表電腦後，再以懸臂樑的原理來計算與分析(Dutro, 1977；Dunnicliff, 1988；Kumbhojkar, 1991)。它的優點是單一偏斜儀可使用在水平、垂直或任何角度的傾斜量測上，不像傳統測傾儀不能一體適用，必須針對主要量測角度來更改感測元件，例如水平量測要是用水平測傾儀、垂直量測要使用垂直測傾儀。傾斜儀以往的一個缺點就是它的重覆性不高，其相關係數( $R^2$ )約為 0.999(Kumbhojkar, 1991)。

FBG 應用在地層感測上的主要方法類似偏斜儀，它是由 Yoshida et al.(2002)所發展出來的，稱之為 FBG 測彎計，其結構示意如圖 4.5 所示(向亨台等人，2004)。FBG 測彎計是將兩條 FBG 固定於感測關

節上，感測關節下方為一軸承，將每一組感測關節以鋼性支架相互連結放入測傾管中，當測傾管彎曲時，軸承就會轉動對 FBG 進行壓縮或拉長，如此一來就可以對量得地層位移量。但由於 FBG 光纖為撓性不能感應壓縮，因此 FBG 測彎計在製作時必須先做預拉，因為上述特性，該光纖測彎計所能感應之彎曲量有限。另一方面測傾管之製作與現場安裝時難免會有誤差，而其溝槽之接點經常會有不密合或沿軸向扭轉的現象，此一扭轉、測彎計自重以及測彎計支架與傾斜管溝槽間之摩擦力都會影響測彎計之讀數，這也是現有光纖測彎計技術之另一缺點，而本工作團隊所研發出來的 FBG 偏斜儀已經可以大幅降低這些缺點所造成的誤差。

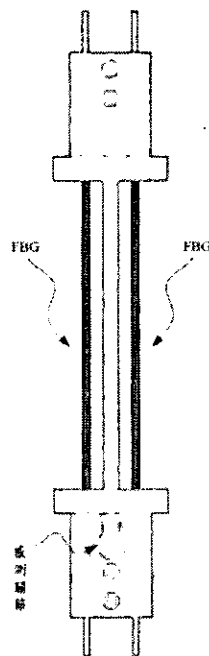


圖 4.5 光纖測彎計示意圖(向亭台，2004)

本工作團隊目前所發展出之 FBG 地層監測技術稱之為光纖光柵節理式偏斜儀(FBG segmented deflectometer, FBG-SD)，能夠與傳統測傾管配合使用。FBG-SD 是將一長約 215mm，直徑約 10mm，使用塑

鋼製成之柔性軟管(flexible tube)外，相隔 180 度黏貼成對的光纖光柵。在此應變感測元件兩端加裝鋁片剛性材料如圖 4.6 所示，將兩端剛性材料所受到的應力傳到中間柔性材料上，此時對柔性材料會有應變集中的現象，也就會有將應變放大的效果。在應變感測元件兩端加裝鋁片剛性材料構成節理 (segment) 之部分。節理又分量測節理 (measurement segment) 與延伸節理(extension segment)兩部分。量測節理上裝有支架(stud)，其大小與形狀與傳統測傾管(inclinometer casing)及其內部之凹槽相匹配，藉由彈簧(spring)之拉力來保持支架與測傾管凹槽之密合。延伸節理為一硬體，沒有任何自由度，其唯一目的為根據量測需要來改變或延長量測節理間之距離。量測節理內安裝兩個軸承，其中一個軸承與監測管方向同軸 (軸向軸承，longitudinal bearing)，其目的在於解除感測器受監測管軸向力 (包括重力與摩擦力) 與扭力對感測器之影響，另一個軸承與監測管方向垂直 (橫向軸承，lateral bearing)，安裝在量測節理之中心點，其目的在於限制量測節理只能以橫向軸承為中心旋轉而增加結果分析之可靠度。柔性軟管之一端以雙螺絲固定於量測節理內，另一端插入軸向軸承中，可以延軸向滑動或轉動，柔性軟管之中心與橫向軸承在同一位置。偏斜儀在現場組裝，以量測節理與延伸節理交互連接而形成，連結完成之偏斜儀隨即放入測傾管中 (圖 4.7)。傾斜管因為地層滑動或被監測結構體變形而發生扭曲的時候，變形監測管經由光纖或其他應變感應器量測柔性軟管彎曲變化量，計算並累積變形監測管因地層移動而造成之彎曲角度，再根據此角度之變化來計算地層移動量。

在實驗室中可標定出光柵波長改變量與角度變化量的關係，根據標定結果計算，光柵波長改變 1 pm (解析儀所能讀取之最小 FBG 波長改變量) 所對應之，剛性段間之夾角改變量在 0.0010 與 0.0012 度

之間。在監測地層滑動時我們可以將多個 FBG 偏斜儀串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，偏斜儀能夠容許的彎曲角度可達 3.0 度上下。

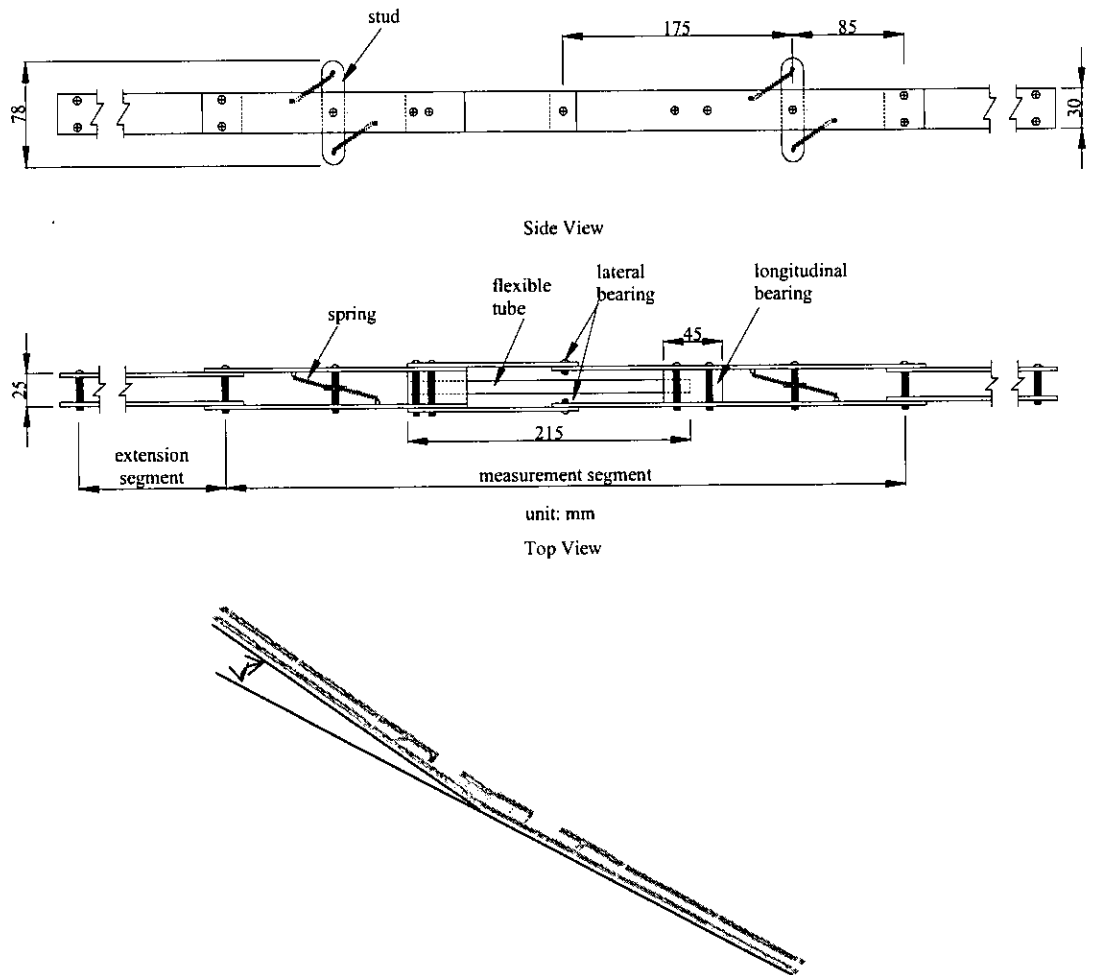


圖 4.6 FBG 偏斜儀設計示意圖

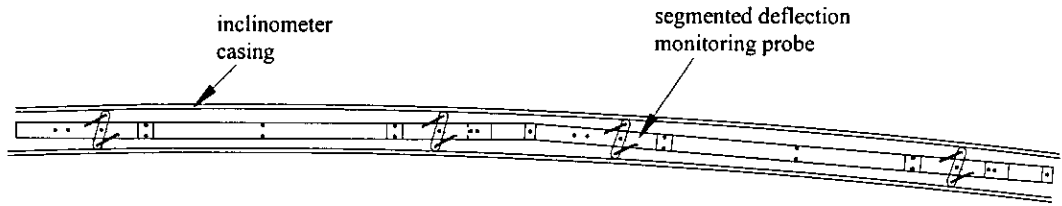


圖 4.7 節理式設計之訊號放大效應

本研究團隊為便於將來大量安裝使用，將原設計加以改良。偏斜儀支架改用鋁擠型，支架間之連接使用鋁粉壓鑄成形。改良設計之概念圖如圖 4.8 所示。

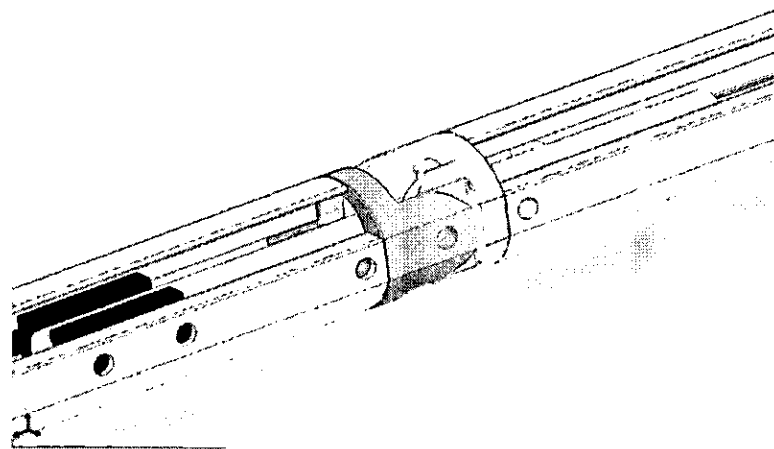


圖 4.8 鋁擠型偏斜儀支架設計示意圖

圖 4.9 展示製作完成之鋁擠型偏斜儀支架，新型設計之偏斜儀支架表面經過陽極硬化處理，耐用性更高，同時便於現場安裝。光纖光柵偏斜儀製作、組裝與現地安裝流程如圖 4.10 所示。

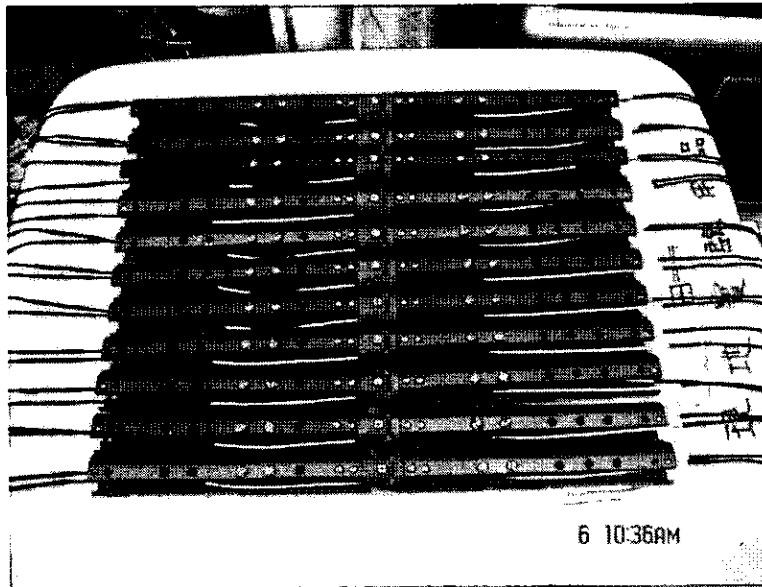


圖 4.9 改良後鋁擠型偏斜儀

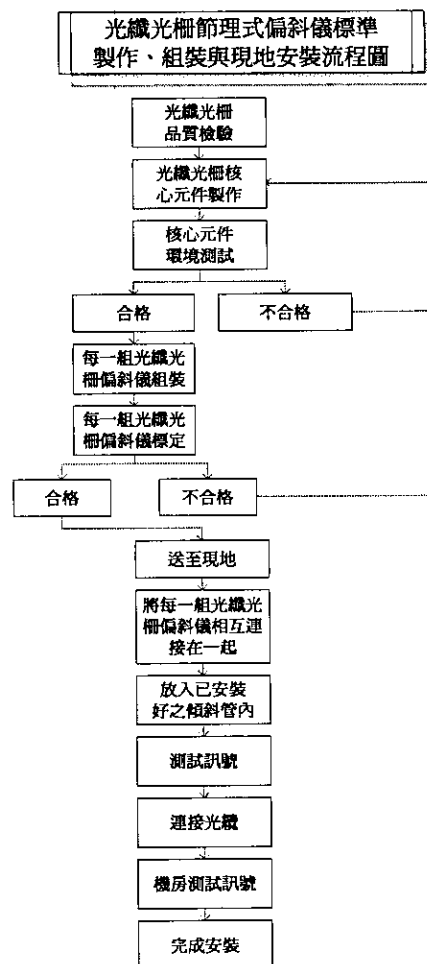


圖 4.10 光纖節理式偏斜儀標準製作、組裝與現地安裝流程圖

#### 4.2.4 光纖光柵水壓計

孔隙水壓是水庫安全監測重要與常見的觀測項目，本計畫主要針對傳統水壓計在水庫安全監測中的缺點，提出改良式的替代方法，所研發之水壓計可以輔助或替代目前常用的監測方法，提高水庫安全監測之效能。

本團隊所研發之水壓計使用光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)做水壓計之解析方法使用 FBG 波峰漂移以及波峰寬度改變兩種方法來調解 (modulate)，這兩種方法分別敘述如下：

1.漸變週期式 FBG 波峰寬度分析:漸變週期式 FBG 是指 FBG 內的光柵應變之分布是漸變的(如圖 4.11)，假設一原週期均勻分佈之 FBG 當受到外力而產生漸變式應變時其 FBG 波峰寬度會變寬，如圖 4.12 所示。

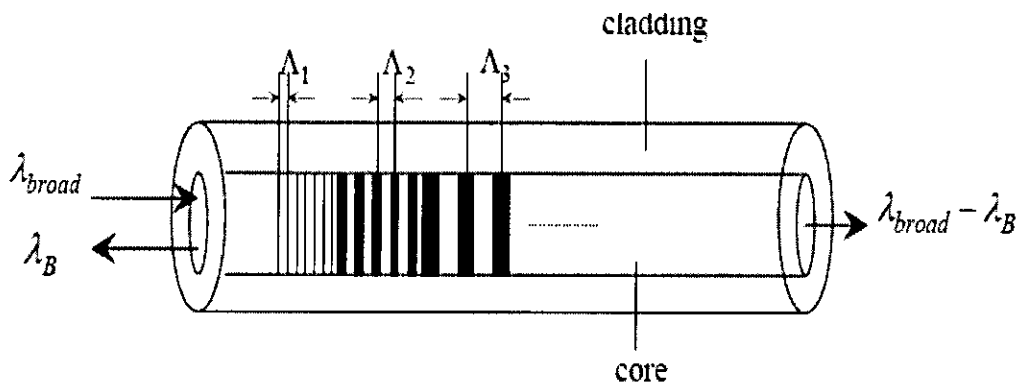


圖 4.11 光纖光柵內連續遞增之漸變應變

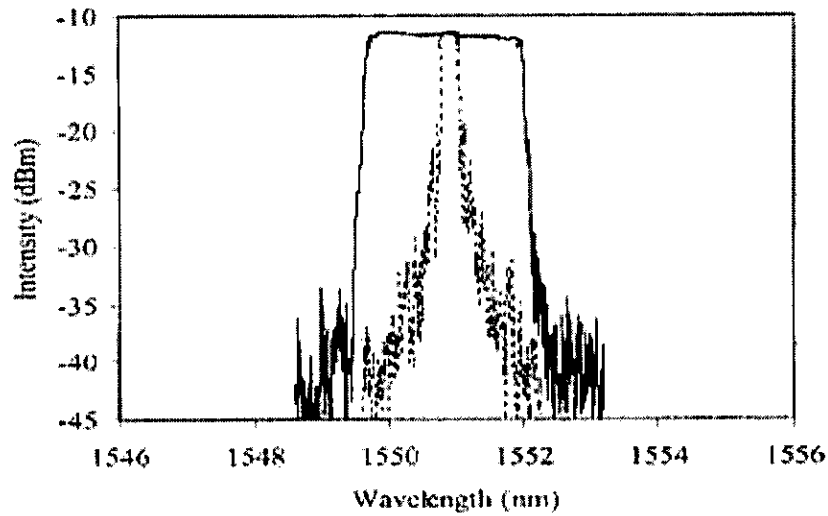


圖 4.12 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變

2. 週期式 FBG 波峰飄移分析：FBG 受應變或溫度影響，易產生波長飄移（圖 4.13），假設一個 FBG 初始波長為  $\lambda_1$ ，當 FBG 受到外力或溫度之影響時，會使得 FBG 波峰往長波長飄移為  $\lambda_2$ ，而此波峰變寬量會正比於 FBG 應變量。

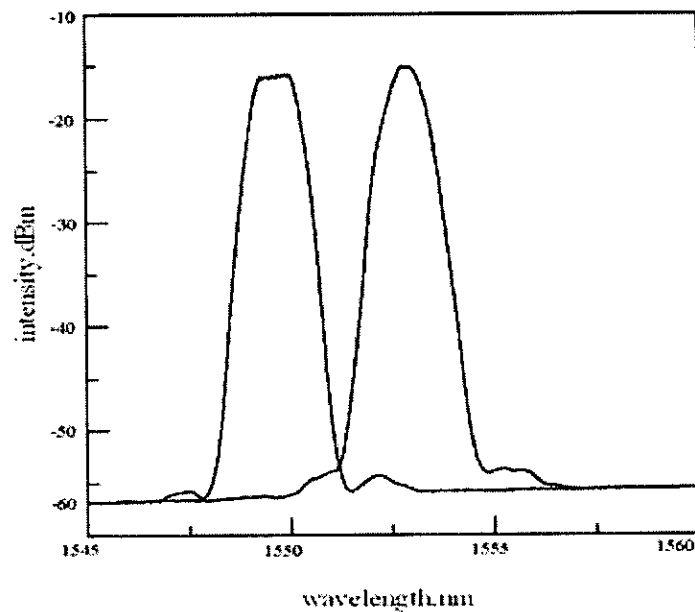


圖 4.13 FBG 波長飄移分析示意圖



採用漸變週期式 FBG 來製作水壓計如圖 4.14 所示。將 FBG 貼於圓形薄片上，可隨著所需要量測的範圍調整薄片的厚度，根據彈性力學分析，當此圓形薄片受到垂直於平面的壓力時，從圓心到邊界的應變會呈現先受伸張再受壓縮分布，因此貼於圓板上的 FBG 會發生漸變的型式，光柵所反射的頻譜會以較寬的形勢顯示，其波形反應會產生如圖 4.12 之現象，而其波峰寬度與壓力成正比。此設計之優點是 FBG 反應不受溫度變化之影響而結構簡單。

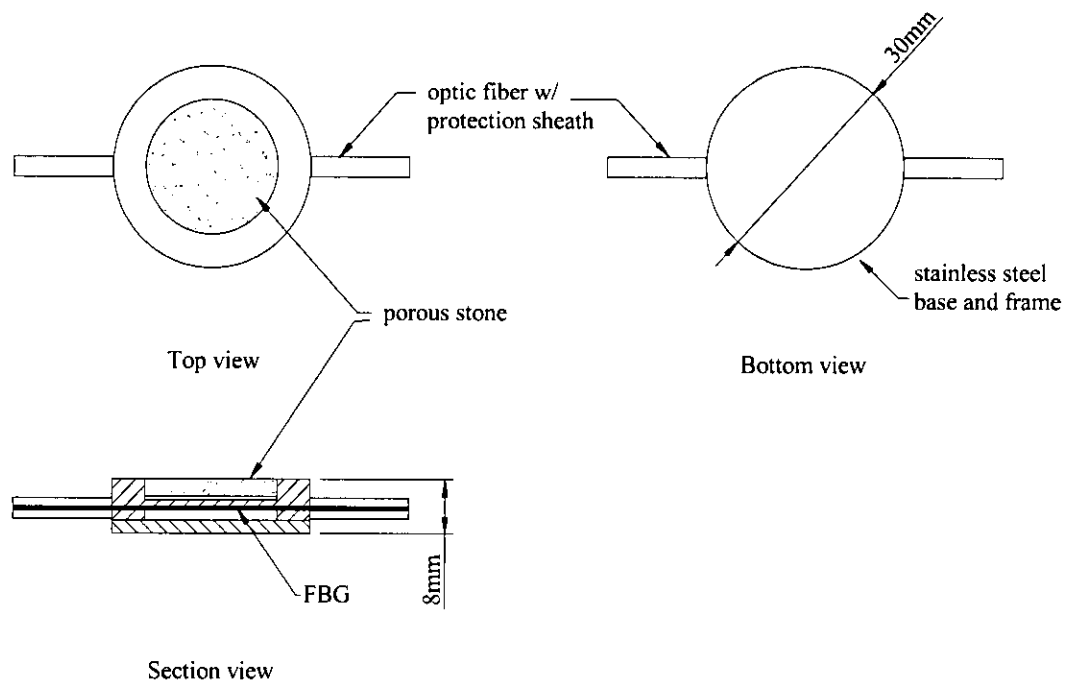


圖 4.14 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖

圖 4.15 展示使用等週期式 FBG 波峰飄移與壓力間之關係來設計之光纖水壓計。將 FBG 光纖之一端固定於水壓計底部使其不產生位移，另一端則黏著於一彈性金屬薄膜上，當水壓計內部受壓力作用改變時金屬膜隨之變形，因此 FBG 所感受之應變也隨之變化。當金屬膜仍在彈性限度內，FBG 即呈現等週期式之變化，FBG 波峰值與壓力有一線性關係。但此一設計無法隔離溫度改變對 FBG 波峰值之影

響，因此必須加入另一呆 (dummy) FBG 做為感應溫度變化之用。

圖 4.16 展示等週期式 FBG 水壓計之標定結果。結果顯示，在 0 至 400kPa 範圍內讀數與壓力間有高度之線性關係，其相關係數 ( $R^2$ ) 在 0.999 以上，效果非常良好。等週期式 FBG 水壓計體積小直徑小於 4cm，適合於現階段安裝於現有之開孔式水位計內。

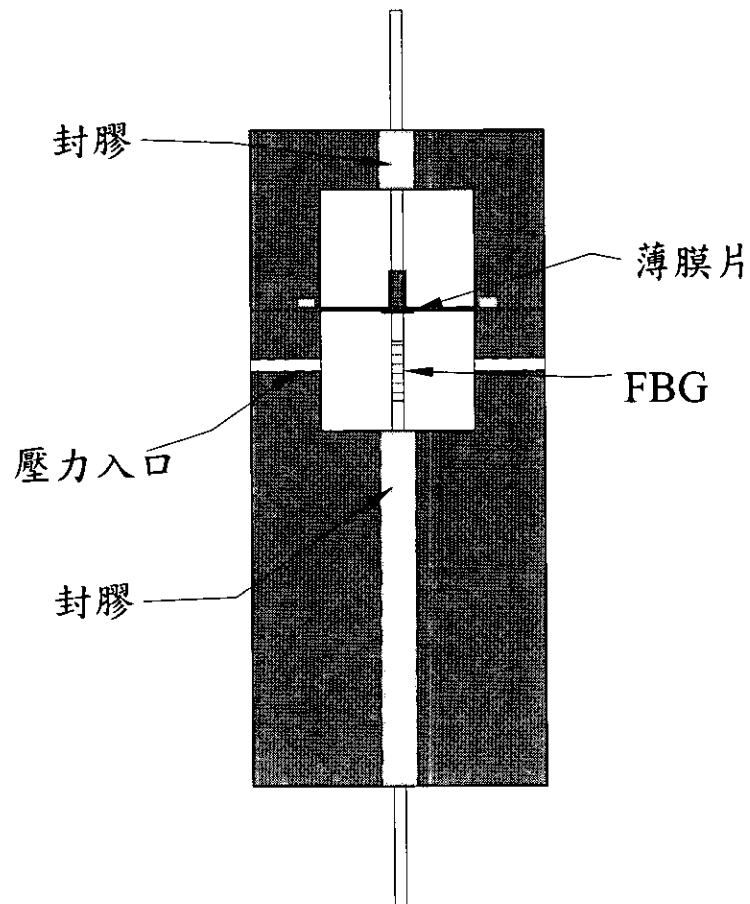


圖 4.15 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

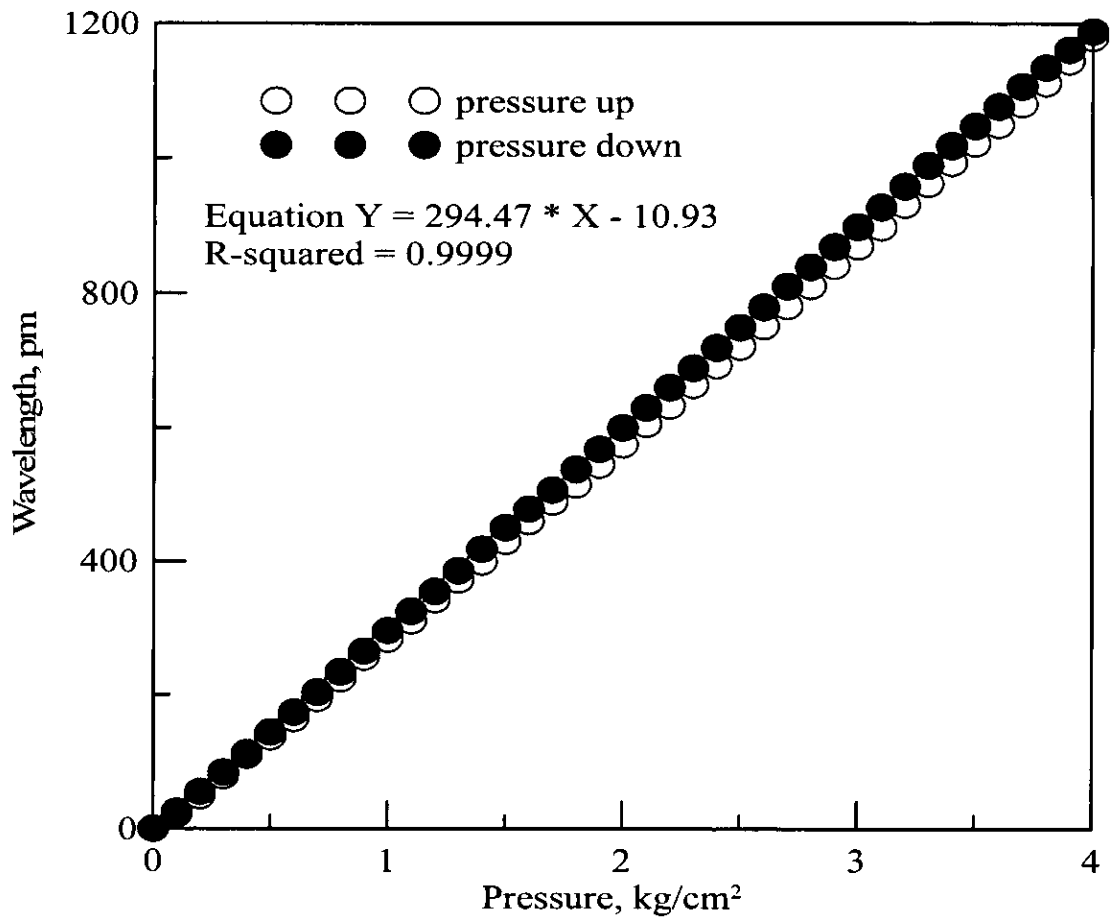


圖 4.16 等週期式光纖光柵水壓計標定結果

#### 4.2.5 光纖光柵水壓計之改良

本次安裝於新山水庫的改良後等週期式光纖光柵水壓計有三個改良重點，說明如下：

##### 1. 提高光纖水壓計量測的精度

單薄模等週期式光纖光柵水壓計如圖 4.17 所示，使用單一金屬薄模作為拉伸點，當水壓發生變化時其薄模片會產生一位移量，單薄模等週期式光纖光柵水壓計之精度為 0.28kPa，相當於可量測到 2.8cm 的水位變化。等週期光纖光柵水壓計的精度取決

於薄模片之位移量，在相同水壓力狀況下，薄模片位移量越大則精度越高。圖 4.17 為單薄模等週期式光纖光柵水壓計實體圖。

本次單薄模等週期式光纖光柵水壓計改良方法是增加一片金屬薄模使得光纖光柵兩端都具有金屬薄模，其示意與實體如圖 4.18 及圖 4.19 所示。根據理論計算雙薄膜片式光纖水壓計其精度可以較單薄模片式光纖水壓計增加一倍，可用以量測水位變化較小的區域。圖 4.20 為本團隊所製作出的雙薄模式光纖柵水壓計之標定與理論分析比較圖，其精度為 0.14kPa，相當於可量測 1.4cm 的水位變化，較使用薄膜理論分析的 2.02cm 為高。

## 2.溫度補償的 (dummy) FBG 設置方式的改良

單薄模等週期式光纖光柵水壓計在使用時會配合一「光纖光柵溫度感測器」來感應溫度變化與修正溫度對水壓計所造成的誤差。本團隊所製作出的光纖光柵溫度感測器是利用材質與光纖光柵水壓計相同之不銹鋼管製作而成，如圖 4.21 所示。其製作方式是將光纖光柵安裝於不銹鋼管內，兩端利用熱固膠固定於不銹鋼管上，當有溫度變化時不銹鋼管體積產生變化使得光纖光柵讀數發生改變，且因為其為兩端密閉之堅硬鋼棒，所以外部壓力對其所造成之影響非常微弱，將此光纖光柵溫度感測器與光纖光柵水壓計放在一起，則可間接用來進行溫度之修正。但是因為溫度感測器與水壓計並非在安裝在同一構件上，所以對於熱膨脹效應的反應會有些微之不同。本團隊在不改變水壓計體積的前提下，改良將溫度感測器放置在水壓計的本體上，如此可直接的量測水壓計本身對於溫度變化的反應，設計示意圖及實體圖如圖 4.18 及圖 4.19 所示。一般地下水溫度大約在 5 度到 15 度之間，故標

定的範圍設定為 0 到 40 度之間，圖 4.22 為光纖光柵水壓計及溫度光柵的標定曲線，由標定結果可得到每  $1^{\circ}\text{C}$  的變化造成約 30pm 的波長漂移量。

### 3. 以大氣壓力當作參考壓力的改良

現今絕大部分水壓計設計是以一端當作水壓力入口，另一端為密閉參考氣室來量測水壓之變化，此密閉參考氣室內之氣體體積會受壓力與溫度影響而收縮與膨脹，在壓力與溫度變化較快或變化較大時，會有反應延遲與誤差較大之情況發生，且無法滿足高精度量測之需求。有鑑於此，本團隊使用一金屬套管連結密閉參考氣室與外部空氣，如此一來，光纖水壓計就是以外部大氣壓力為標準參考值，將可以有效提高反應速度與降低誤差。圖 4.18 為改良後以大氣為參考壓力之設計示意圖。

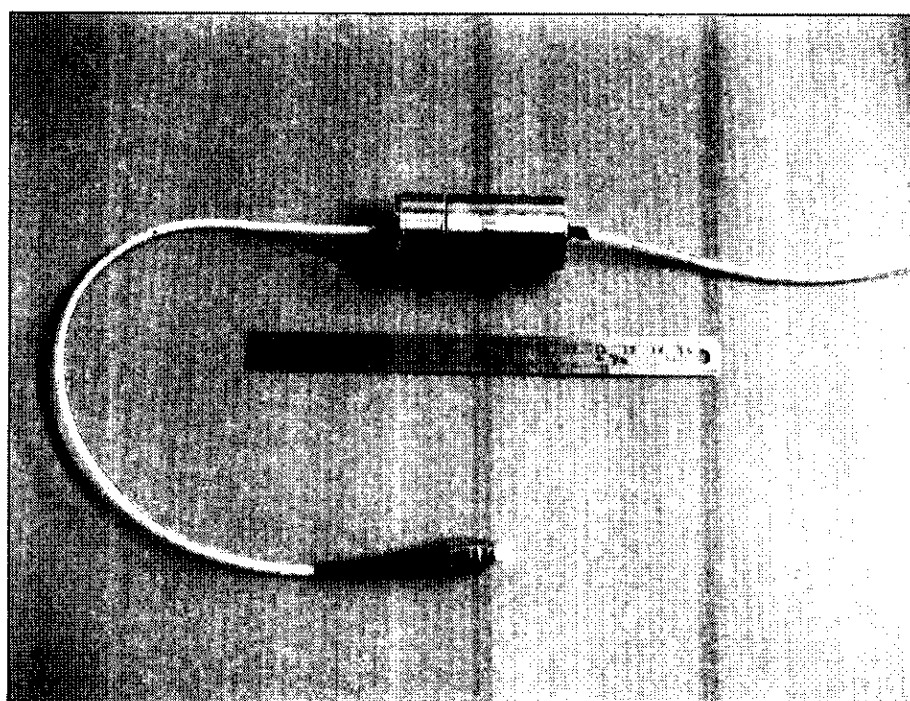


圖 4.17 單薄膜等週期式光纖光柵水壓計實體圖

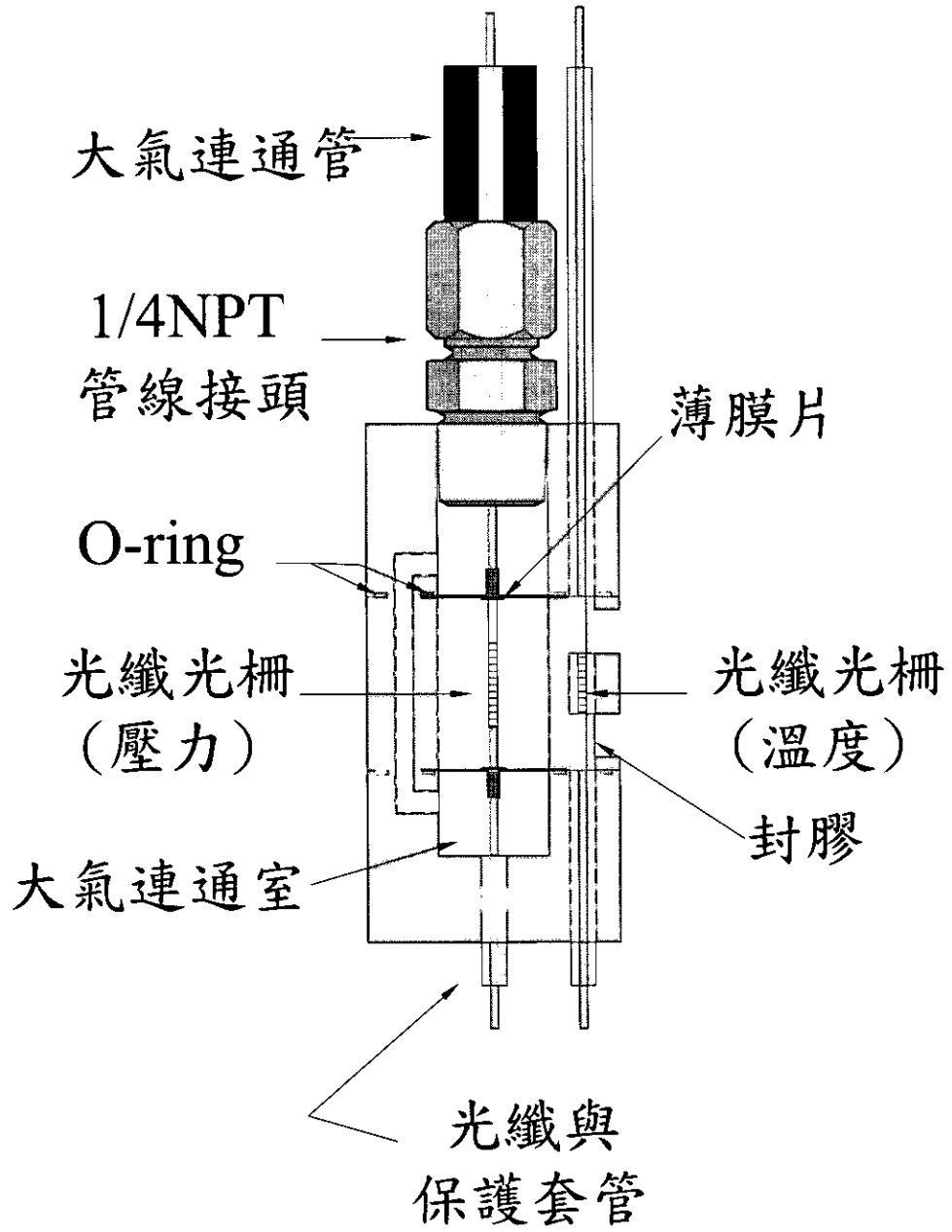


圖 4.18 雙薄模等週期式光纖光柵水壓計受力圖

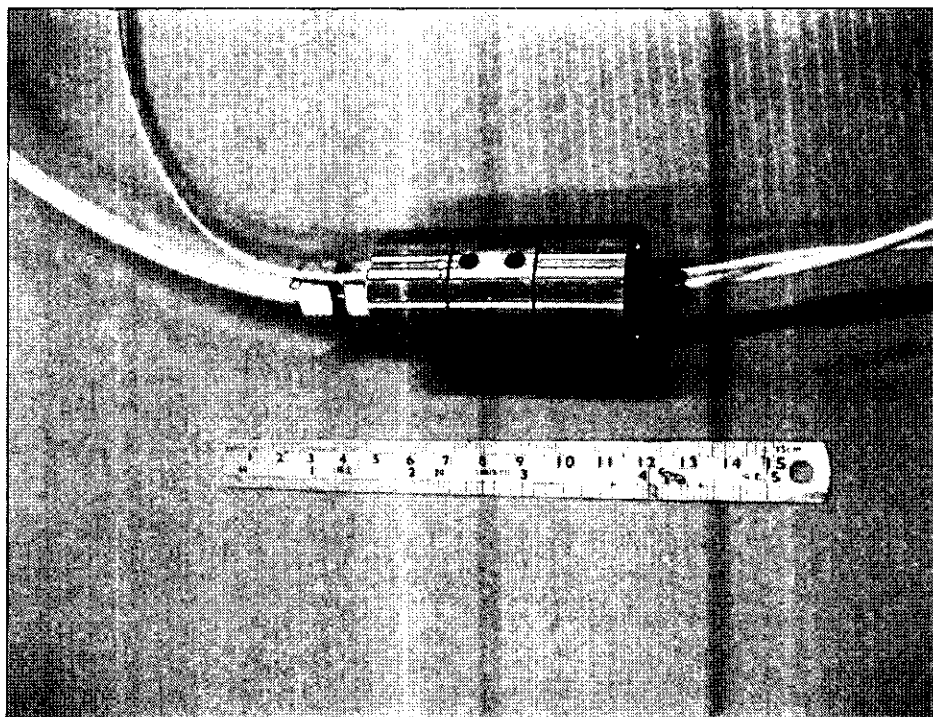


圖 4.19 雙薄模式等週期光纖光柵水壓計實體圖

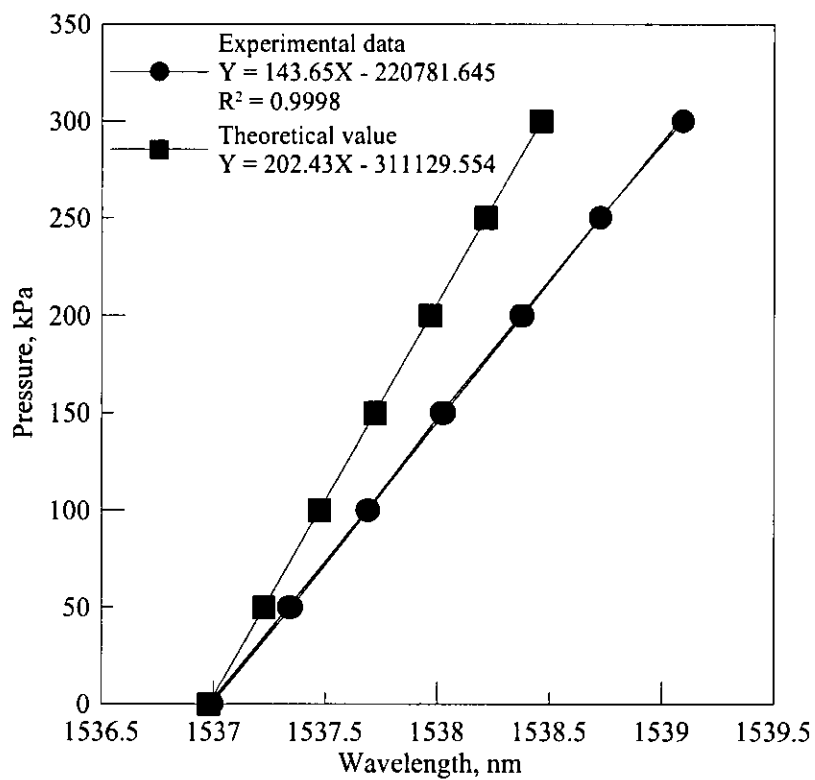


圖 4.20 雙剛模片等週期光纖光柵水壓計率定與理論分析比較圖

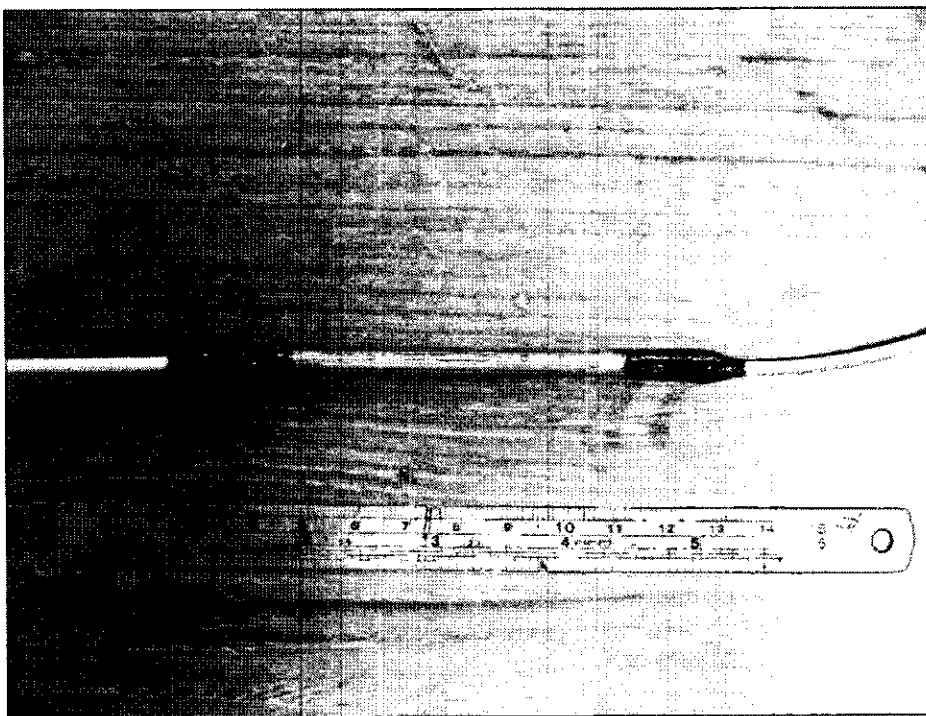


圖 4.21 光纖光柵溫度棒

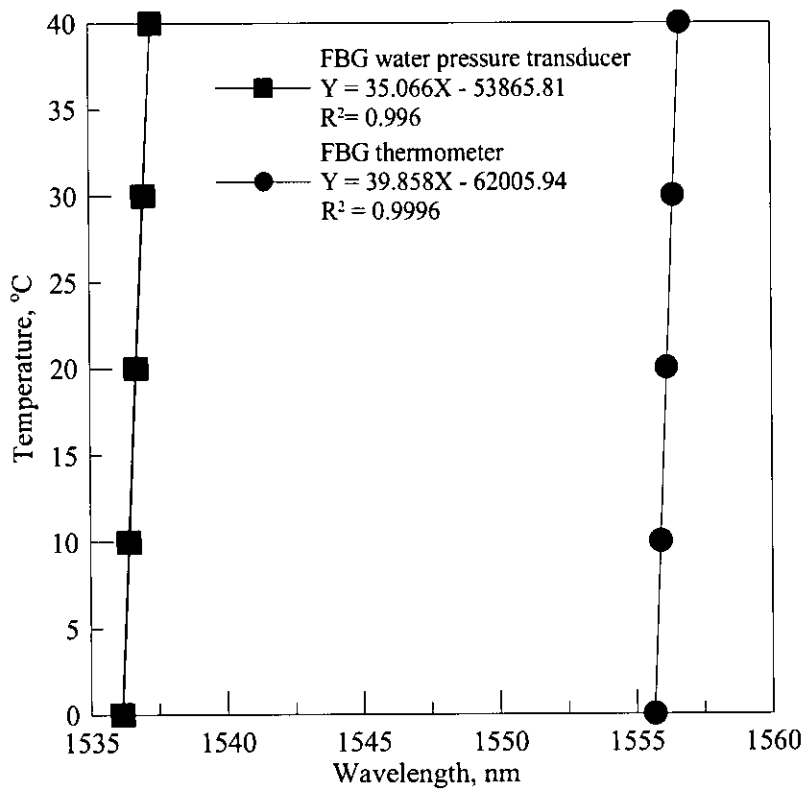


圖 4.22 光柵水壓計及溫度光柵率定圖



#### 4.2.6 光纖光柵測傾儀

本工作團隊新發展出之地層監測技術稱為光纖光柵測傾儀(FBG inclinometer)(圖 4.23)，所發展出之光纖光柵測傾儀能夠與傳統測傾管配合使用。光纖光柵測傾儀是將一條光纖光柵以頭尾固定黏貼與中間懸空的方式，黏貼於兩塊金屬塊的兩側，並以剛性金屬片連接上、下兩金屬塊，其中該剛性金屬片上方為一軸承連接上方金屬塊，剛性金屬片下方則以固定連接下方金屬塊，圖 4.24 展示製作完成之光纖光柵測傾儀支架。

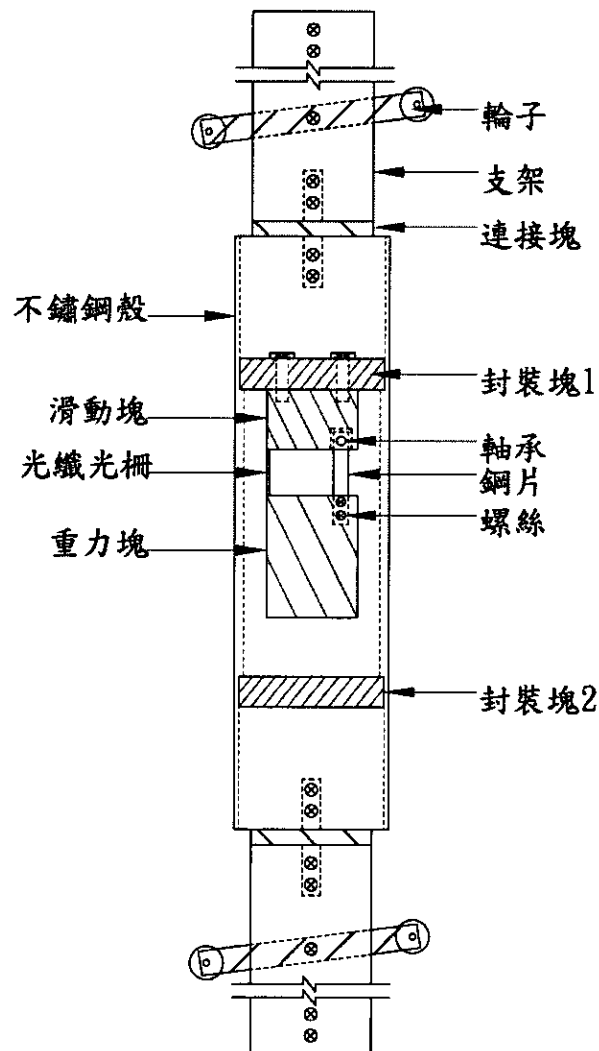


圖 4.23 光纖光柵測傾儀示意圖

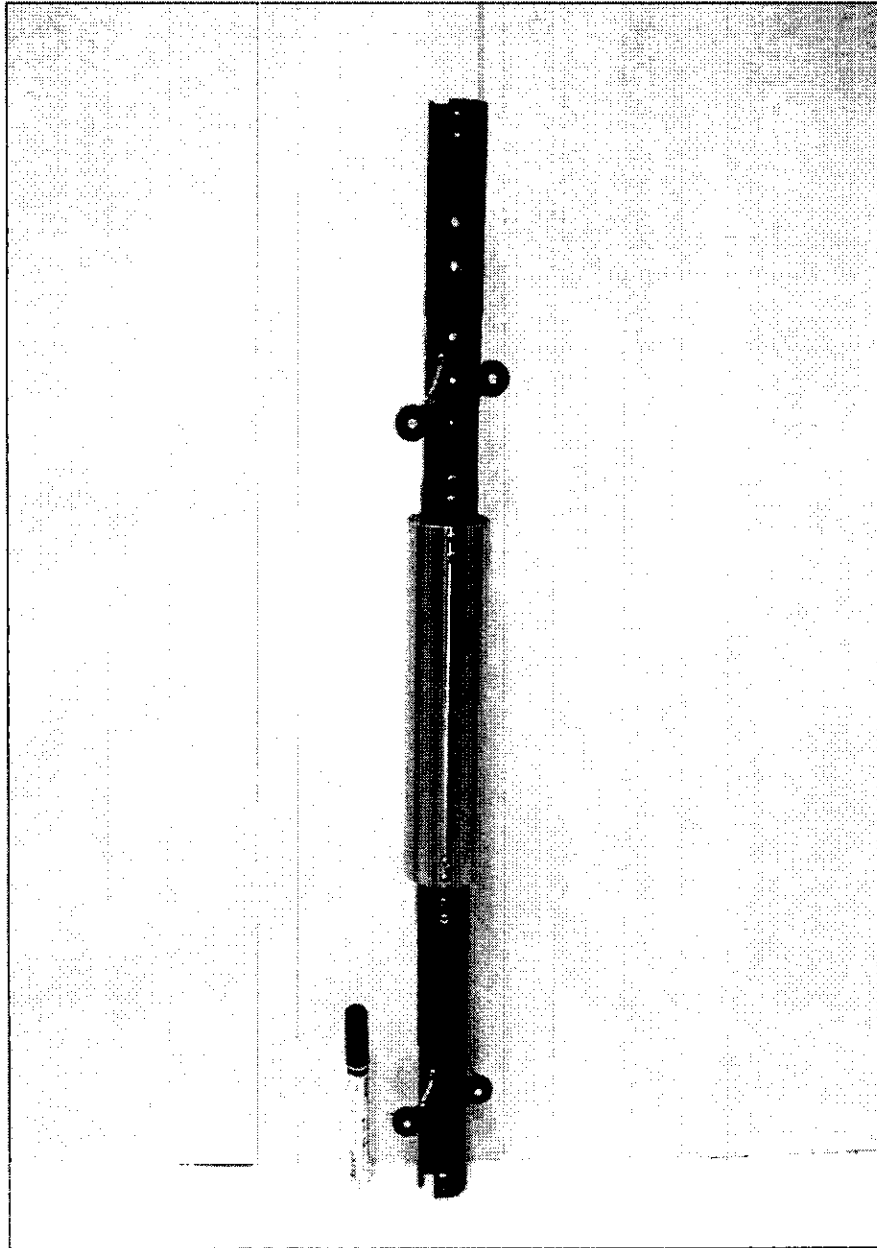


圖 4.24 光纖光柵測傾儀實體圖

光纖光柵測傾儀的量測原理是在初始上方軸承無轉動狀況下，兩金屬塊是互相平行且各自與剛性金屬片成 90 度垂直，當地層發生位移時，上方金屬塊會隨著傾斜管之彎曲而轉動，下方金屬塊會因重力與上方軸承之影響而產生偏移，此時剛性金屬片與上方金屬塊間會產生一傾斜角度，且該傾斜角度與光纖光柵波長改變量成一線性關係，然後該可經由簡單計算得到側向位移量。

光纖光柵測傾儀可以配合放入傳統傾斜管中，當地層滑動時 FBG 測傾儀可經由光纖量測到傾斜角度變化量，再根據此角度之變化來計算單組 FBG 測傾儀側向移動量，最後累積計算出變形監測管因地層移動而造成之側向位移量。在實驗室中可標定出光柵波長改變量與角度變化量的關係(圖 4.25)，根據標定結果計算，FBG 波長改變 1 pm (解析儀所能讀取之最小 FBG 波長改變量) 所對應之角度變化量，傾斜角度精度在 0.002 與 0.004 度之間。在監測地層滑動時我們可以將多個 FBG 測傾儀串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，單組 FBG 測傾儀能夠容許的傾斜角度可達 10.0 度上下。

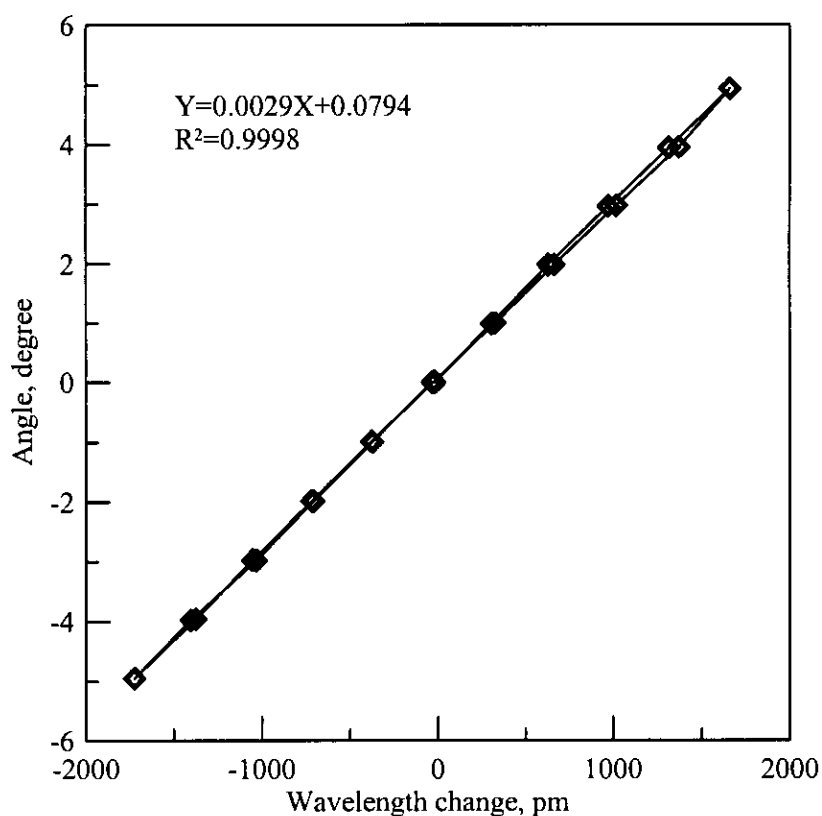


圖 4.25 FBG 測傾儀標定結果圖

### 4.3 TDR 錯動變形安裝與資料分析程序修訂

時域反射 (Time Domain Reflectometry, TDR) 錯動變形監測系統具連續性監測、空間解析度佳且可遠端自動化監測。TDR 階躍脈衝產生器與資料擷取器(Datalogger)及多工器(Multiplexer)結合，進行多點且不同功能之監測，並可透過天線或電話線等下載量測訊號。其解決傳統儀器需人工量測、設置成本高、維護性與耐久性低等問題。以常見之傾斜儀而言，可能因過大之變位而無法進行量測，且受限於傾斜儀長度影響，空間解析度較差。當邊坡發生滑動，地層間相對位移對於灌注於現地坡體的同軸纜線造成剪切或拉張等改變纜線幾何形狀的情形時，TDR 於波形上會在該處產生一個反射尖峰，經由走時分析可以明確定位出發生錯動的位置，而透過自動化監測，更可以協助應變中心專業人員判斷邊坡是否發生滑動以及發生滑動的深度，對於邊坡滑動監測方面極具發展潛力。

#### 4.3.1 TDR 錯動變形監測原理介紹

由 TDR 製波器發出之脈衝訊號在遇到斷面材質不同(即纜線阻抗不連續)或幾何形狀不同時會產生反射訊號，因此可利用此原理來監測岩體變形。首先必須在所要量測變形的岩石上鑽孔，放入同軸纜線，然後用水泥漿填塞，使纜線、灌漿材料與岩塊形成一體。隨著岩體變形將應力傳至灌漿材料再傳給同軸纜線，使之發生破壞，TDR 反射之波形亦會隨變形之增加而增加，而目前許多研究指出，變形的大小不僅可量化，且在某些例子中，我們亦能分辨其為剪力或張力變形，甚至可經由室內標定方法，找出量化剪動量的經驗公式，如圖 4.26 及式(4.3)、式(4.4)(Su, 1987；Dowding et al., 1988 & 1989)。

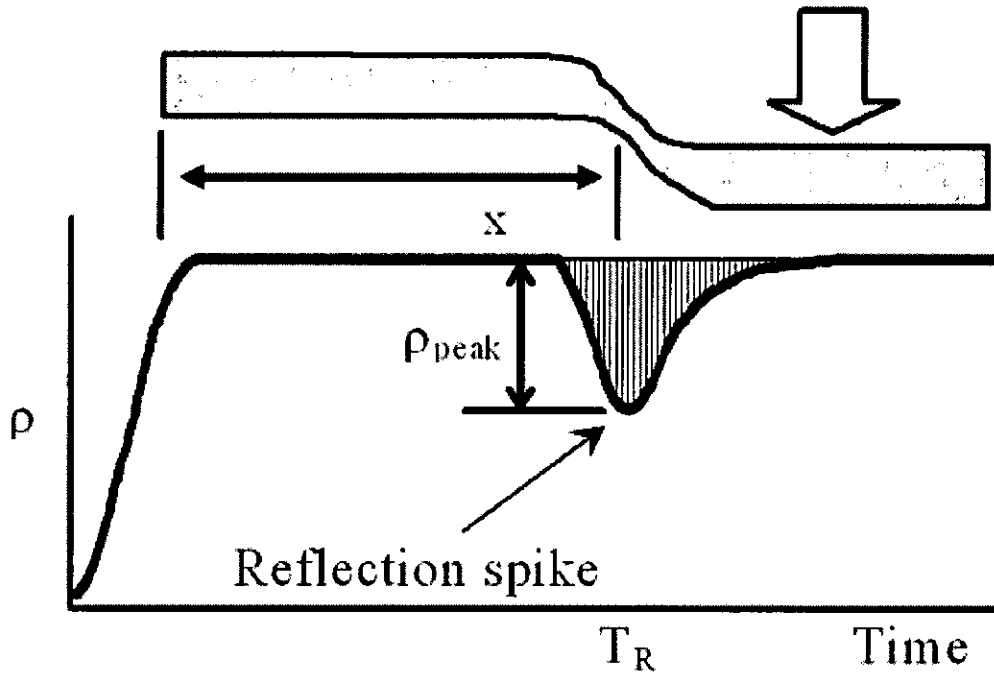


圖 4.26 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006)

$$x = V_p \frac{T_R}{2} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\delta = (\rho_{\text{peak}}/S) + \delta_0 \dots\dots\dots(4.4)$$

其中  $x$  為剪動位置， $V_p$  為電磁波於纜線中之傳遞速度， $T_R$  為接收到反射尖峰所需走時； $\delta$  為外部位移量， $\rho_{\text{peak}}$  為反射係數峰值， $S$  為纜線本身的靈敏度； $\delta_0$  為使 TDR 波形產生初始反應所需之啟動位移量，經由一次線性迴歸求得，定義為迴歸門檻值(Regression Threshold Value)。

將同軸纜線安裝於鑽孔後，利用 TDR 發射一電壓脈衝送至纜線下方，至纜線底部反射回來，而其間所遭遇受剪、受張等情況使同軸纜線產生缺陷(幾何形狀之改變)，便輸出於示波器上。如圖 4.27 所示，由 TDR 產生電磁波經同軸纜線至變形感測纜線時，即於接頭位置產生一起點反射，而於 TDR 之波形上顯現一凸起之反射波形；電磁波

繼續前進當遇到凹痕時，又產生一反射訊號，而於 TDR 之波形上顯示一向下凹之反射波形；當電磁波至纜線之末端時，即產生一終點反射，於 TDR 之波形上顯示上揚之反射波形。

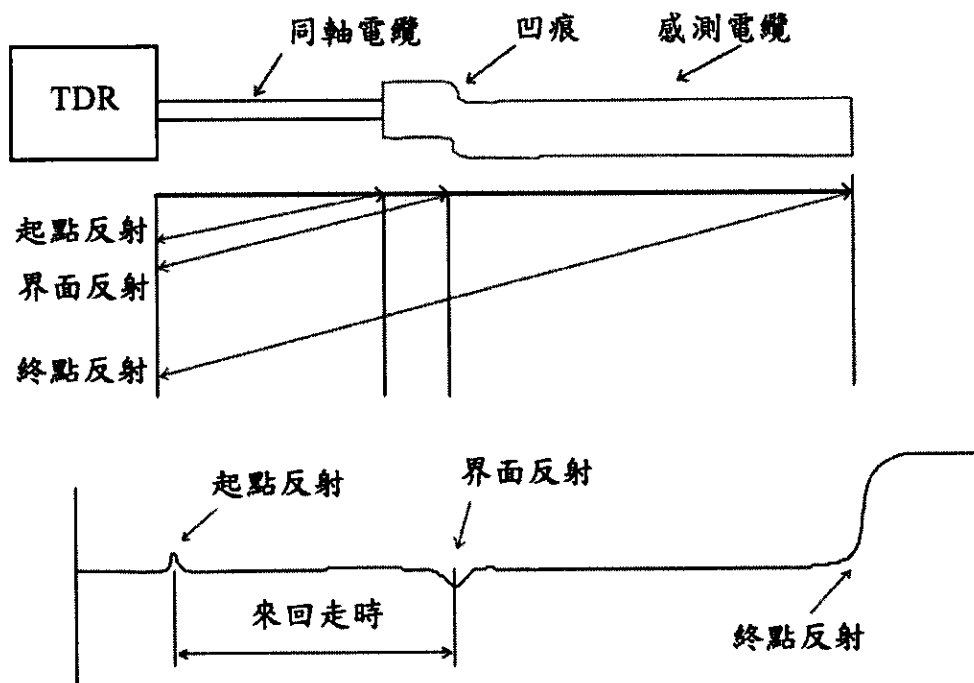


圖 4.27 TDR 變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇，2003)

局部應變或薄剪動常發生於支撐開挖邊緣、土堤下與不穩定邊坡內，在這些大應力梯度的環境，土壤應變變得相當大且集中在薄的剪動帶，而導致土壤之漸進式破壞。若能安裝一組同軸纜線/薄水泥漿系統，使其可隨著土壤受剪變形而變形，如同前面之電纜線隨岩石節理面剪動，則此系統便可直接反應土壤之局部剪動行為，並且透過自動監測的程式來求得廣泛風化岩石、軟岩及土壤之薄剪動帶所引致的邊坡不穩定情況。

#### 4.3.2 大型剪力帶寬度物理模型之建立

本研究團隊於前期研究設計一大型物理模型：大型直剪儀(如圖 4.28 所示)，已經成功的改善邊界效應以及上、下剪力盒扭曲或翹曲

的問題，同時也考慮了邊界效應的影響，並且於材料互制(纜線-灌漿材料-土壤)方面得到許多成果，將此些成果歸納後提出現場安裝要點，概述如下：

### 一、纜線選擇方面：

(a)硬性纜線(P3-500)適合堅硬地層，有較佳的靈敏度，但較不適合軟弱地層(初始啟動門檻值(trigger threshold value)  $\delta_D$  太大)。

(b)軟性纜線較適合軟弱地層，可較早偵測到位移( $\delta_D$  小)，但靈敏度較低。

### 二、灌漿方面

灌漿最重要的是要具有大於纜線的 shear stiffness。灌漿材料與地層的順應性並不重要(雖然對於採用軟性纜線時有所幫助)。

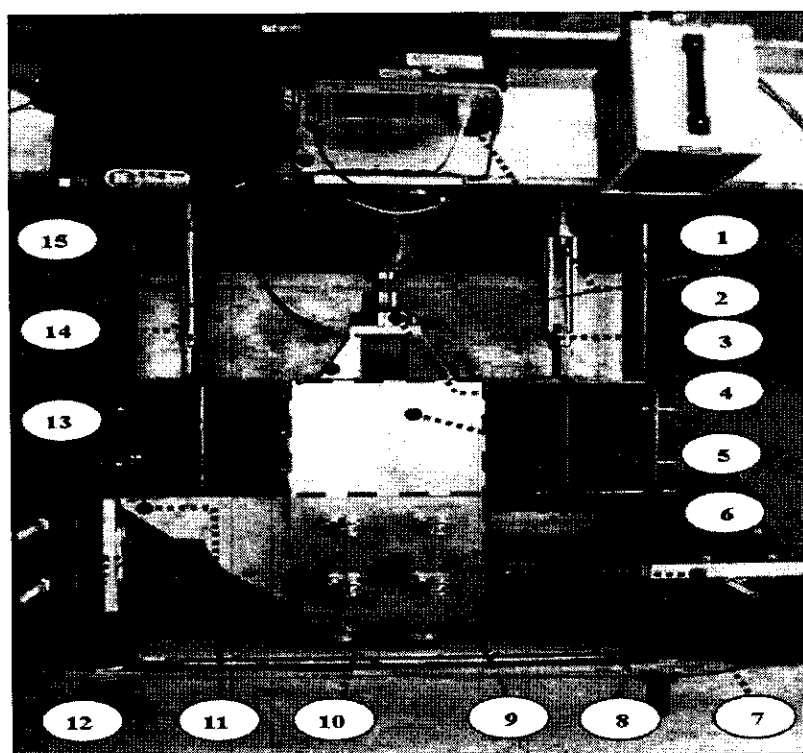
### 三、資料判釋方面

(a)堅硬但不具張力強度的灌漿有助於固定纜線的受剪模式，一旦灌漿材料破壞後，纜線受剪時之  $\Delta \rho$  (反射係數變量) -  $\Delta \delta$  (剪動變量) 雷同，即灌漿後纜線受剪模式將不受地質材料的影響。

(b)利用濾波有助於提早偵測剪力變形及監測的自動化。

過去文獻 TDR 室內標定試驗往往只針對纜線進行直剪試驗，所得結果只是纜線本身的靈敏度(sensitivity)，並非纜線與複合材料受剪

動之情形。事實上，現地剪動機制複雜，纜線除了受剪外，還可能受拉及彎矩，若現地存在有剪力弱帶時，更可能隨著軟弱土壤產生柔性 (flexible) 變形，即剪力弱帶內為非均佈應變。為能將此軟弱帶之影響納入考量，以便進行安裝與訊號分析程序修訂，本年度研究將聚焦於剪力帶寬度上，在試驗具重複性的條件下，設計更符合現地條件之 TDR 錯動變形物理模型，並參考前期材料互制的結果，進一步探討硬、軟性纜線於剪力帶寬度下受剪時 TDR 反射訊號之變化。



- |                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| ① Display                   | ⑨ Horizontal wheels     |
| ② TDR step generator        | ⑩ Vertical wheels       |
| ③ Confining pressure device | ⑪ leaking Prevent plate |
| ④ Load cell                 | ⑫ Shear force device    |
| ⑤ Upper shear box           | ⑬ Confining plate       |
| ⑥ Lower shear box           | ⑭ Reaction frames       |
| ⑦ Reaction frames           | ⑮ Computer              |
| ⑧ LVDT                      |                         |

圖 4.28 前期(96 年度)大型直剪儀

### 試驗重複性改良



前期所建立之大型直剪儀已成功改善邊界效應以及上、下剪力盒扭曲或翹曲的問題，同時也考慮了邊界效應的影響，但是每次試驗剪動過程中，可能因水泥試體及纜線還是會產生拉扯的現象，造成試驗之重複性不佳，致使量化變形量的過程或有所影響，因此將予改良以提升重覆性。在改良上主要針對水泥試體及纜線拉扯而使得纜線有內縮之現象來進行。

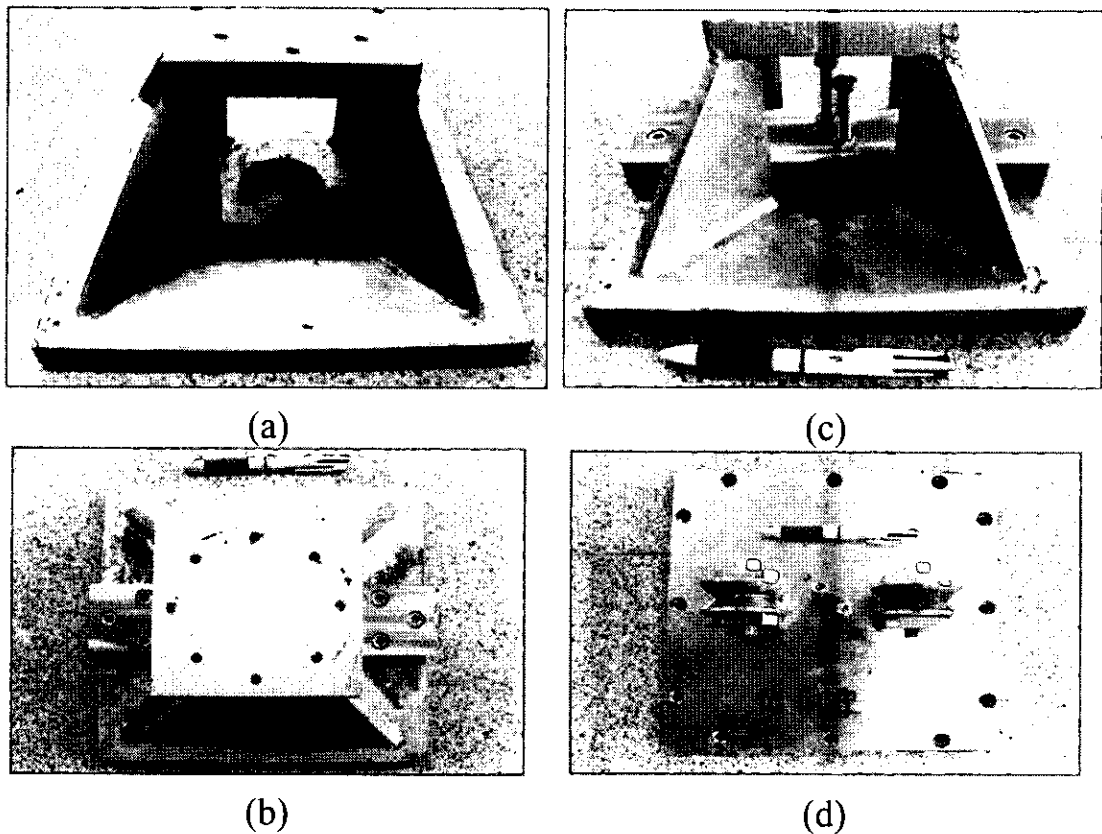


圖 4.29 (a) 圍壓傳遞板 (b) 圍壓傳遞板及檔板 (c) 檔板及螺絲 (d) 裝有水平導輪之剪力盒及螺絲

經測試後，於圍壓傳遞板（圖 4.29(a)、(b)）加入一檔板（圖 4.29(c)），防止水泥試體因剪動而移動，並於檔板及裝有水平向導輪之剪力盒上設計一可以束制纜線之螺絲（圖 4.29(d)）。試驗前將纜線固定於螺絲上，在儘量減少壓痕的條件下，進行試驗，以確保水泥試體及纜線不會因剪動而產生位移。

## 剪力弱帶模擬

過去於剪力弱帶的模擬，往往採用空氣間距(Air gap)，與現地實際情況不符合；而且邊坡滑動的過程，其剪動模式並不一定會像前期試驗中單純的直剪行為，可能為一非應力集中的模式。本研究考慮上述不合理的情形，於上、下剪力盒中夾模擬剪力帶寬度之剪力帶環片。如圖 4.30(a)(b)所示，剪力帶的寬度由環片的數量決定，每個環片與環片之間裝有滾輪用以降低在剪動過程中環片與環片間的摩擦力，在剪動時剪力帶寬度環片由固定於其上之兩條支架推動，此兩條支架之末端將分別固定於剪力盒之上，可使得各剪力環片之剪動量在兩側剪力盒之間以線性傳遞。

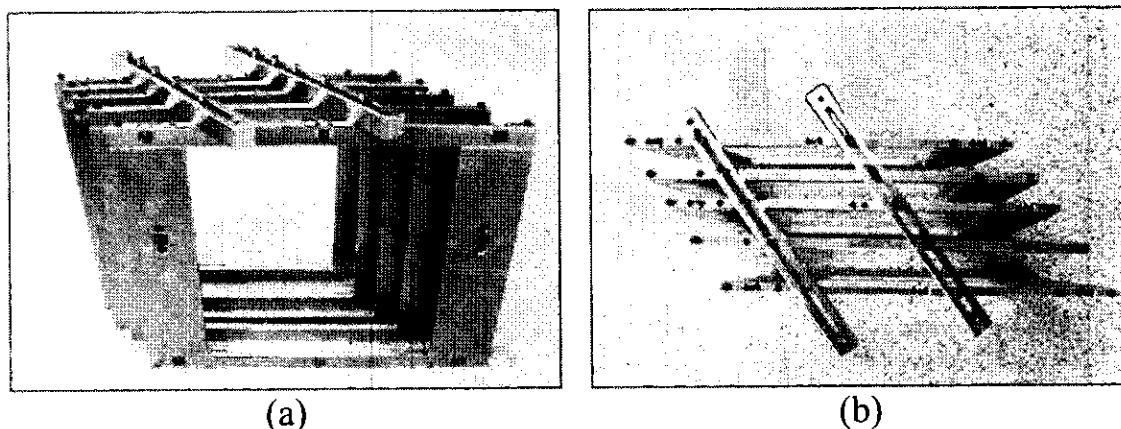
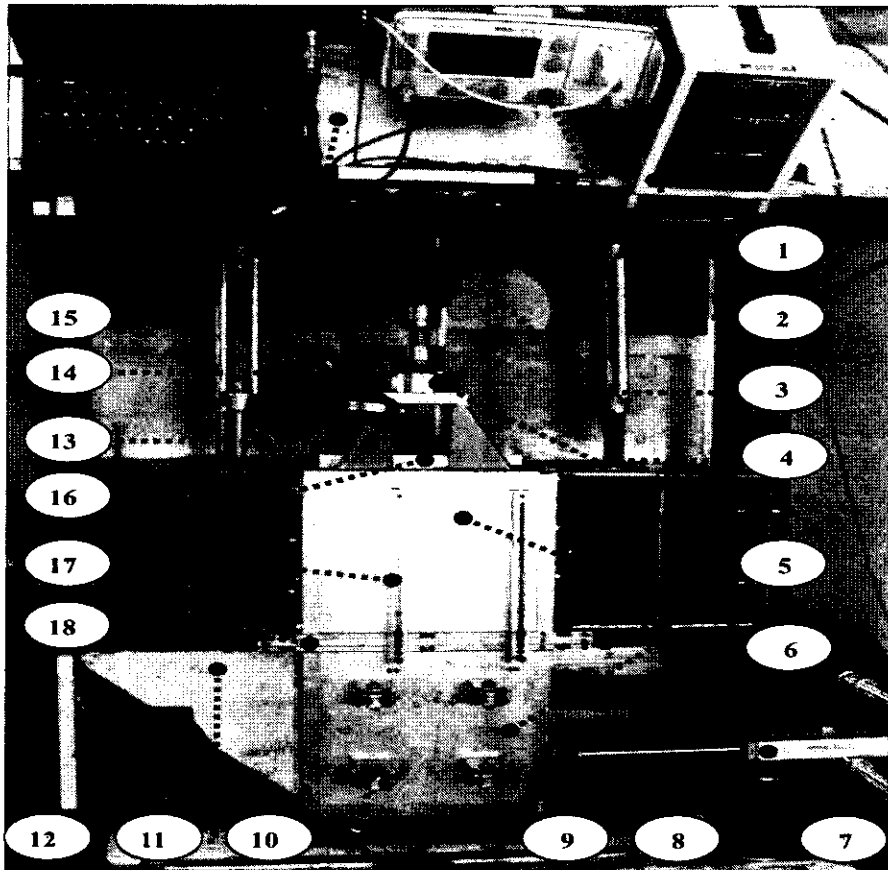


圖 4.30 (a) 剪力帶環片側視圖 (b) 剪力帶環片上視圖

綜合上述兩點之改良，新建立之大型直剪儀加入剪力帶環片及改良結果如圖 4.31 所示。



- |              |         |         |
|--------------|---------|---------|
| ① 顯示器        | ⑨ 水平向導輪 | ⑰ 剪力環導軌 |
| ② TDR 1502 C | ⑩ 垂直向導輪 | ⑱ 剪力環片  |
| ③ 圍壓千斤頂      | ⑪ 防漏砂擋板 |         |
| ④ Load cell  | ⑫ 剪力推進器 |         |
| ⑤ 上盒         | ⑬ 圍壓傳遞板 |         |
| ⑥ 下盒         | ⑭ 反力架   |         |
| ⑦ 反力架        | ⑮ 筆記型電腦 |         |
| ⑧ 位移計        | ⑯ 試體擋版  |         |

圖 4.31 改良後新建立之大型直剪儀

#### 4.3.3 剪力帶寬度對 TDR 錯動變形影響之試驗規劃

前期所建立之大型直剪儀，經過多次試驗結果顯示，其存在有在相同配置下，每次試驗結果卻會有些許差異的問題，本研究在改良原先之大型直剪儀後，將先對可用之纜線進行試驗重複性的測試，以便增加剪動量化的準確性；另外於軟弱帶中，過去文獻採用空氣間距(Air

gap)來模擬，與現地狀況明顯差異過大，將造成量化的誤差，因此在試驗中將加入剪力帶寬度的模擬，期能了解剪力弱帶對 TDR 錯動變形之影響。茲將試驗規劃整理如表 4.4，並說明如下：

表 4.4 試驗規劃

|         | 纜線               | 剪力帶寬度(cm) | 剪力環內填       | 剪力盒內填       | 圍壓(KN/m <sup>2</sup> ) | 灌漿配比  |
|---------|------------------|-----------|-------------|-------------|------------------------|-------|
| 重複性試驗   | RG-8             | N/A       | N/A         | Ottawa sand | 285.21                 | W/C=1 |
|         | RG-8             |           |             | Fine Gravel |                        |       |
|         | P3-500(unshield) |           |             |             |                        |       |
|         | P3-500(unshield) |           |             |             |                        |       |
| 模擬剪應變梯度 | RG-8             | 3         | Ottawa sand | Ottawa sand | 285.21                 | W/C=1 |
|         | RG-8             | 5         |             |             |                        |       |
|         | P3-500(unshield) | 0         |             |             |                        |       |
|         | P3-500(unshield) | 3         |             |             |                        |       |
|         | P3-500(unshield) | 5         |             |             |                        |       |

#### (a)大型直剪儀-試驗重複性

為探討試驗重複性，根據前期的研究，建議於軟弱土層時，採用軟性(RG-8 型)纜線；於堅硬土層時，採用剝皮硬性(P3-500 型)纜線，故在試驗規劃上針對軟、硬性纜線，剪力盒內分別填入渥太華砂及細礫石以模擬軟弱與堅硬土層，在四組試驗中採用相同圍壓以及灌漿配比(水灰比 1:1)進行試驗，測試在此種配置下之試驗重複性。

#### (b)模擬於軟弱土層中真實的剪動行為-模擬剪應變梯度

以大型直剪儀模擬於軟弱土層所進行的試驗比較類似單剪的行為，但於真實情況中，其剪動應較接近一非應力集中的行為，因此在原本的上、下剪力盒間，加入能模擬剪力帶寬度之剪力帶環片。在試驗規劃上，於剪力盒及剪力帶環片中皆填入渥太華砂，並採用相同的圍壓及灌漿配比(水灰比 1:1)，僅改變剪力帶寬度，使其分別為 0、3、5 公分，希望藉此探討於軟弱土壤中，

不同剪力帶寬度對 TDR 錯動變形監測有何影響。

### (c)改善 TDR 錯動變形訊號之靈敏度

歸納相關探討剪力帶寬度之文獻，可以發現加入剪力帶寬度後，對於 TDR 錯動變形反應之靈敏度影響甚鉅，對此將參考美國專利編號 6,696,974，於纜線加入不同形狀的節點，並探討節點與節點間的間距，從中獲得最佳的方式，希望能藉此改善錯動變形監測的靈敏度及初始啟動門檻值( $\delta_D$ )。因此，本研究將於 RG-8 纜線上置入球形節點，並在球內灌入 AB 膠，球的直徑為 2 公分，球與球間距也為 2 公分，詳細纜線配置如圖 4.32(a)；以及於 RG-8、P3-500 纜線置入圓柱狀節點，內部也是灌入 AB 膠，圓柱長 7 公分，間距約 4 公分，配置如圖 4.32(b) (以 RG-8 為例)，測試結果是否如預期能改善靈敏度及啟動門檻值，並互相比較，結果將於下一節探討。

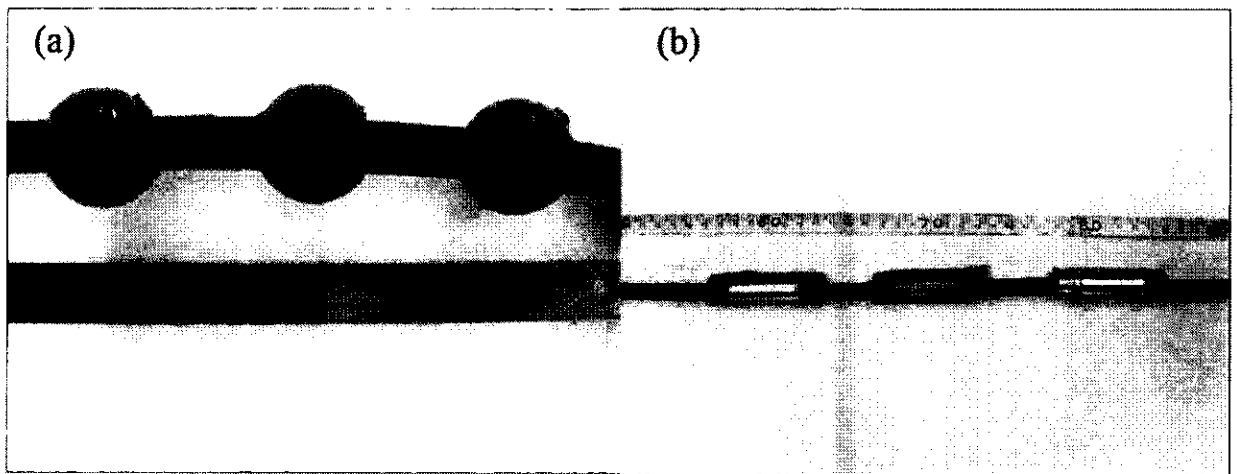


圖 4.32 RG-8 纜線加入 (a) 球形節點 (b) 圓柱形節點

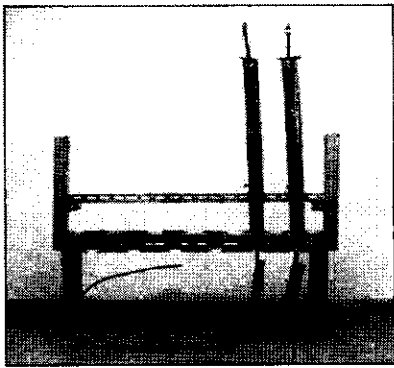
#### 4.3.4 試體準備與試驗方法

##### 試體準備

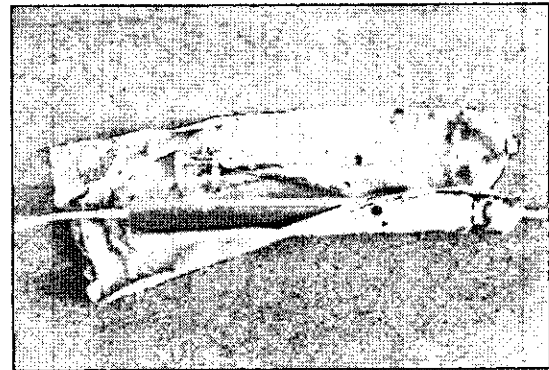
試體製作分為兩部分：一為製作水泥灌漿圓柱體包覆同軸纜線；二為水泥灌漿圓柱體外側外填材料之準備與裝填，製作過程如下所

述：

(a) 試體係以內徑 5 cm PVC 管為外模，將試驗用同軸纜線外部以工業酒精擦拭後，固定於 PVC 管正中央，攪拌均勻水灰比(water /cement ratio, W/C)灌入 PVC 模內(圖 4.33(a))，待水泥乾凝後進行拆模，並依不同之剪力帶寬度修剪為長度約 49 cm、52cm、54cm 的試體，爾後以濕毛巾裹住水泥試體進行養護(圖 4.33(b))，從灌模至養護期共三天，灌漿材料使用市面上常見波特蘭水泥(Portland cement)第一型，考慮現地灌漿工作性，本試驗使用水灰比為 1:1。



(a)



(b)

圖 4.33 (a) 水泥-纜線複合材料製作過程 (b) 水泥養護過程

(b)外填材料分別為細礫石(Fine Gravel)、渥太華砂(Ottawa sand)，其基本物理性質與粒徑分析如表 4.5 與圖 4.34 所示，其中粗砂有 77.6%累積停留於 4 號篩，依 AASHTO 對粒徑大小分類屬細礫石(Fine Gravel)。試驗時將養護完成水泥灌漿圓柱(含同軸纜線)置於剪力盒及剪力帶環片中間，控制每次外填材料密度約略一致。外填材料約分三層夯實，夯實完畢後再以上蓋鎖緊，再利用側向千斤頂施加所規劃圍壓應力。

表 4.5 外填材料基本物理性質

|                          |                    |                  |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| 土壤種類                     | 渥太華砂 (Ottawa sand) | 細礫 (Fine Gravel) |
| 內摩擦角 (degree)            | 30.7               | 42.68            |
| 乾單位重 ( $\text{kN/m}^3$ ) | 15.5               | 16.26            |
| 比重 $G_s$                 | 2.65               | 2.64             |
| $D_{60}$ , mm            | 0.39               | 6.63             |
| $D_{50}$ , mm            | 0.36               | 6.03             |
| $D_{10}$ , mm            | 0.26               | 2.45             |
| $C_u$                    | 1.5                | 2.70             |

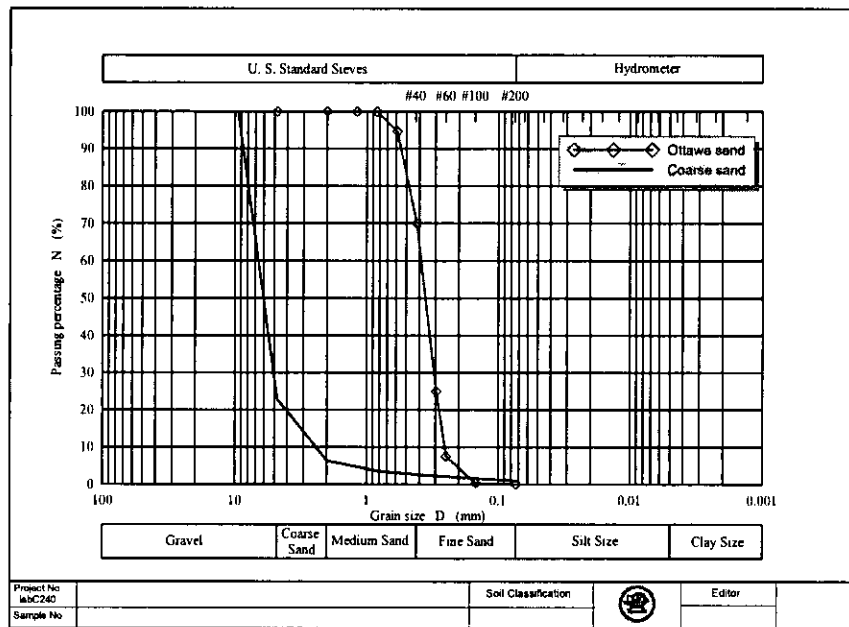


圖 4.34 土壤種類粒徑分佈曲線

試驗步驟

新型大型直剪儀試驗流程如圖 4.35，並敘述如下：

1. 剪力盒及剪力帶環片裝填：如前所述，將養護好的水泥

- 纜線圓柱置入剪力盒與剪力帶環片中央，於不同剪力帶寬度時，以相同土壤密度將外填材料分次夯實；另外將上、下盒與剪力帶環片接觸處塗抹黃油，以減少擋版、剪力盒、剪力帶環片相互之間的摩擦力。

2. 擷取器與顯示器架設：將已經固定在適當位置的位移計與量測剪力、圍壓應力之 Load cell 連接顯示器，並將量測值歸零。
3. 圍壓應力：待剪力盒裝填試體重模完成，以側向千斤頂施以一固定應力並予以記錄。
4. TDR 初始波形量測：連接纜線與 TDR 1502C，利用本研究團隊自行研發之擷取程式記錄 TDR 初始反射訊號。
5. 施加剪力：利用千斤頂以每次約 1 mm 位移量剪動，每剪動一次即記錄位移量、剪動力與 TDR 反射訊號。從目前累積的試驗經驗，當剪動位移至 70mm 左右，剪力盒及剪力帶環片皆已相當靠近試體，可能有邊界效應的產生，因此重複至剪力盒相對位移達 70 mm，即停止試驗。
6. 拆模：完成一剪動試驗後，拆解剪力盒以了解盒內水泥圓柱與纜線受剪時變形模式。



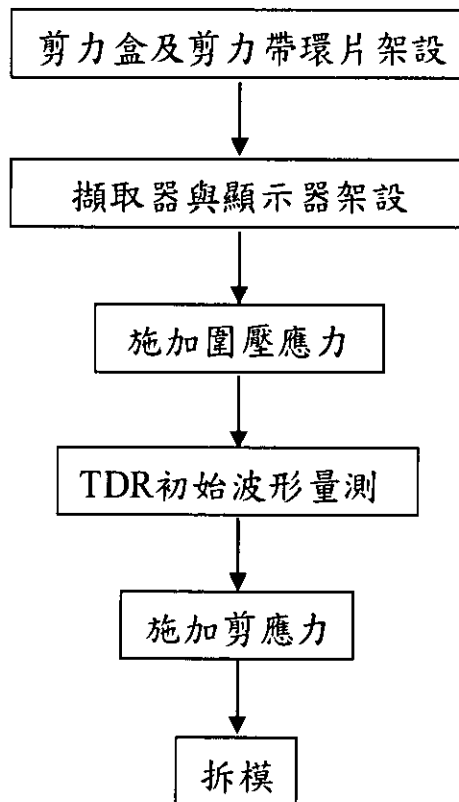


圖 4.35 試驗流程圖

#### 4.3.5 剪力帶寬度對 TDR 錯動變形影響之試驗成果

本研究主要分為三個部份來說明，第一、大型直剪儀試驗重複性改良：有鑑於重複性會影響試驗的品質及後續的量化處理，先行探討前期試驗的可靠性，再進行後續的試驗；第二、模擬於軟弱土壤中，剪動方式為一非應力集中的行為；第三、在纜線上加入節點，評估是否有助於增強 TDR 反射訊號。最後綜合以上結果，改善前期於現場所建議的安裝標準程序及資料分析程序，使其更完整。

##### 大型直剪儀改善：試驗重複性

試驗若沒有重複性，將很難有可靠的數據進行量化變形量，因此首先針對前期計畫室內大型物理模型進行改良，逐步釐清造成試驗重複性不佳的原因。

參考前期的研究建議，軟性(RG-8 型)纜線適用於較軟弱地層，試驗外填材料採用渥太華砂；而剝皮硬性(P3-500 型)纜線適用於較堅硬地層，試驗外填材料則使用細礫石，控制灌漿配比(W/C = 1 : 1)，並於每次試驗施以固定之圍壓應力(285.21 kN/m<sup>2</sup>)以確保每次邊界條件為相近，探討纜線於固定配置靈敏度(sensitivity, S)及初始啟動門檻值(trigger threshold value,  $\delta_D$ )之結果。試驗結果將分為外填材料-灌漿-纜線複合勁度、TDR 反射波形與各纜線之靈敏度(S)與初始啟動門檻值( $\delta_D$ )、回歸啟動門檻值( $\delta_0$ )四個部份。

圖 4.36 為不同纜線靈敏度(S,  $\rho$ /mm)，將其取線性段作一次線性迴歸所得結果整理於表 4.6。其中，啟動門檻值之定義分為初始啟動門檻值( $\delta_D$ )與迴歸門檻值( $\delta_0$ )，前者為經由目視可辨識之反射波形改變所對應初始值，後者則為迴歸  $\rho - \delta_{peak}$  所得量化方程式與橫軸( $\delta$ )之截距。

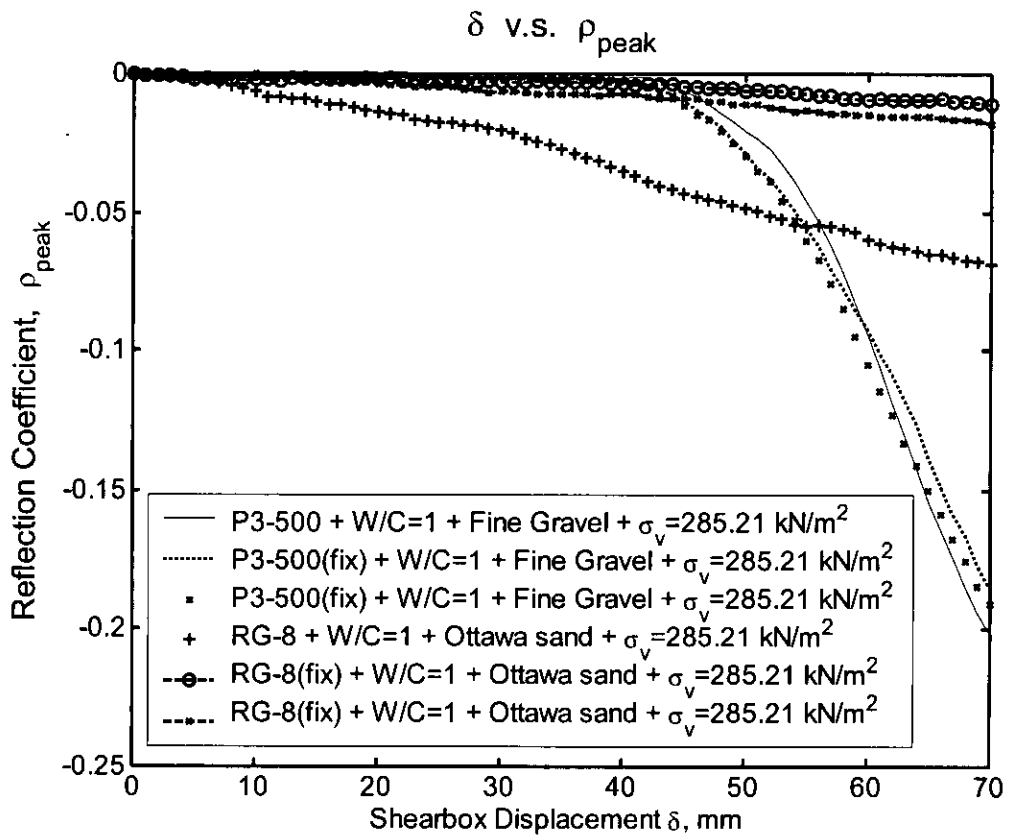


圖 4.36 軟、硬性纜線重複性試驗之  $\rho_{\text{peak}}-\delta$  關係曲線

表 4.6 固定纜線，相同配置下之反應特性比較

| Cable Type  | Diameter(m<br>m) | Proportion of<br>Water/Cement(<br>W/C) | Backfill<br>Soil<br>type | Backfill<br>Soil<br>Stiffness(slope<br>of $\tau$ - $\delta$ ) | Linear Regression                                  |   |                                 |                            | Confining<br>Stress(kN/<br>m <sup>2</sup> ) | Curing(da<br>y) |
|-------------|------------------|--|--------------------------|---|--|---|---------------------------------|----------------------------|---|-----------------|
|             |                  |  |                          |   | Trigger<br>Threshold<br>Value, $\delta_D$ (m<br>m) | Regression<br>Threshold<br>Value, $\delta_0$ (m<br>m) | Sensitivity, S( $\rho$ /<br>mm) | Rsquare,<br>R <sup>2</sup> |   |                 |
| RG-8        | 10.3             | W/C=1:1                                | Ottawa<br>sand           | 51  | 5 <sup>(A)</sup>                                   | 5.863 <sup>(B)</sup>                                  | 0.001071 <sup>(F)</sup>         | 0.9905                     | 285.21                                      | 3               |
| RG-8(fix)   | 10.3             | W/C=1:1                                | Ottawa<br>sand           | 37  | 22 <sup>(C)</sup>                                  | 11.846 <sup>(C)</sup>                                 | 0.000225 <sup>(E)</sup>         | 0.8913                     | 285.21                                      | 3               |
| RG-8(fix)   | 10.3             | W/C=1:1                                | Ottawa<br>sand           | 39  | 21 <sup>(B)</sup>                                  | 5.284 <sup>(A)</sup>                                  | 0.000275 <sup>(D)</sup>         | 0.9882                     | 285.21                                      | 3               |
| P3-500      | 12.4             | W/C=1:1                                | Coarse<br>sand           | 117   | 43 <sup>(F)</sup>                                  | 43.266 <sup>(E)</sup>                                 | 0.006290 <sup>(C)</sup>         | 0.9393                     | 285.21                                      | 3               |
| P3-500(fix) | 12.4             | W/C=1:1                                | Coarse<br>sand           | 94  | 42 <sup>(E)</sup>                                  | 44.890 <sup>(F)</sup>                                 | 0.006861 <sup>(A)</sup>         | 0.9853                     | 285.21                                      | 3               |
| P3-500(fix) | 12.4             | W/C=1:1                                | Coarse<br>sand           | 97  | 39 <sup>(D)</sup>                                  | 42.670 <sup>(D)</sup>                                 | 0.006317 <sup>(B)</sup>         | 0.9791                     | 285.21                                      | 3               |

Performance : (A) > (B) > (C) > (D) > (E) > (F)

從表 4.6 可看出軟性(RG-8 型)纜線初始門檻值( $\delta_D$ )由先前的 5mm 降為 20mm 左右，靈敏度( $S, \rho/\text{mm}$ )從 0.001071 降為 0.000225、0.000275；而剝皮硬性(P3-500 型)纜線其初始門檻值( $\delta_D$ )、迴歸門檻值( $\delta_0$ )及靈敏度( $S, \rho/\text{mm}$ )皆為一致( $\delta_D = 43、42、39\text{mm}$ ， $\delta_D = 43.266、44.890、42.670$ ， $S=0.006290、0.006861、0.006317$ )。對照前期的研究，顯示加入束制(束制水泥試體及纜線)的動作會造成適用於軟弱地層中的 RG-8 型纜線反應變慢，但是適用於堅硬地層中的 P3-500 型纜線則無改變；而由水泥試體的破壞情形來看，束制後的試驗，雖然水泥試體破裂面皆較為破碎，但是 P3-500 纜線反應並無明顯變化，因此破裂面破碎應該單純為試驗中加圍壓時水泥試體檔板所造成，影響纜線初始門檻值及靈敏度有限。推測造成初始門檻值及靈敏度不佳的原因，應該為前一小節所述，故推測只要是採用細礫石的試驗，結果應該和前期試驗結果一致，而用渥太華砂則使得纜線反應下降。

本研究為模擬於現地取一塊體出來做試驗，其塊體外(即剪力盒外)之水泥試體及纜線可視為被束制住，因此本試驗所採用的機制是較符合現地的，且鑑於本試驗結果重複性良好，後續試驗將都束制水泥試體及纜線，以確保試驗的可靠度，並進一步量化變形量。

### 剪力帶寬度對於 TDR 反應之探討

圖 4.37 為 RG-8 纜線  $\rho_{\text{peak}}-\delta$  關係曲線，取  $\rho_{\text{peak}}-\delta$  線性段作一次線性迴歸，結果整理於表 4.7。比較圖 4.37 與表 4.7，顯示 RG-8 有無加入剪力帶寬度，其靈敏度及初始門檻值差異不大(靈敏度為 0.000225、0.000275、0.000356、0.000235  $\rho/\text{mm}$ ，初始門檻值為 22、21、16、18mm)；另外，由表 4.7 及 P3-500 纜線  $\rho_{\text{peak}}-\delta$  關係曲線(圖 4.38)可知，加入剪力帶寬度後將

使得初始門檻值( $\delta_D$ )變大，亦即較晚反應變形發生(由原本 41mm 變成 55mm)，但其靈敏度則接近(0.000412、0.000381、0.000504)。值得一提的是，P3-500 於前期渥太華砂的試驗(無束制水泥試體及纜線，圖 4.38 中 P3-500 無 fix 括號)，與束制後的結果相比，雖然初始門檻值差不多( $\delta_D = 39$ 、41mm)，但是靈敏度大幅的下降(由原先的 0.005665 變為 0.000412)，證明了先前的結論，束制水泥試體及纜線，使大型直剪試驗更為貼近現地狀況，試驗也具有重複性，但於渥太華砂中軟、硬性纜線靈敏度皆會下降。

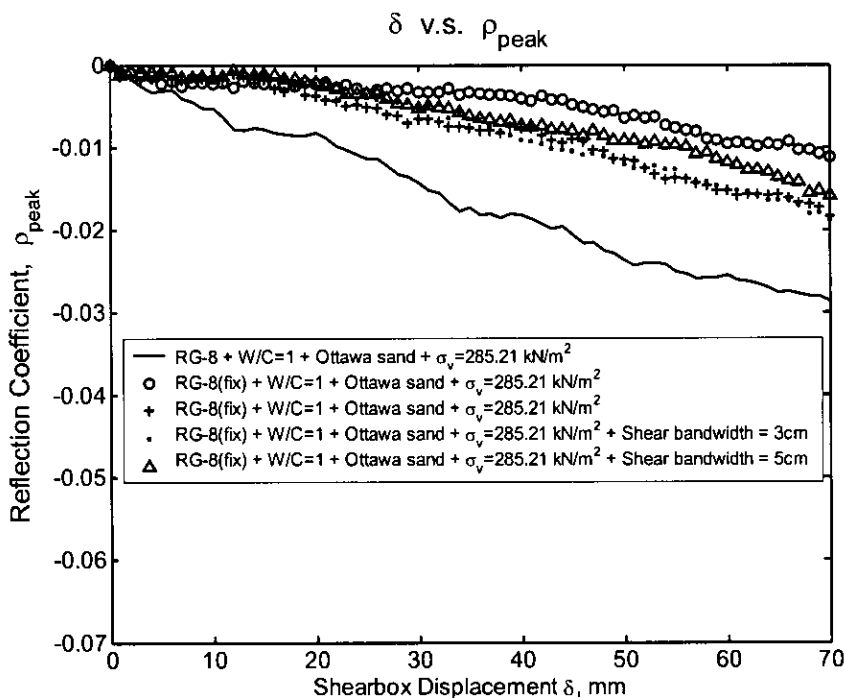


圖 4.37 RG-8 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度

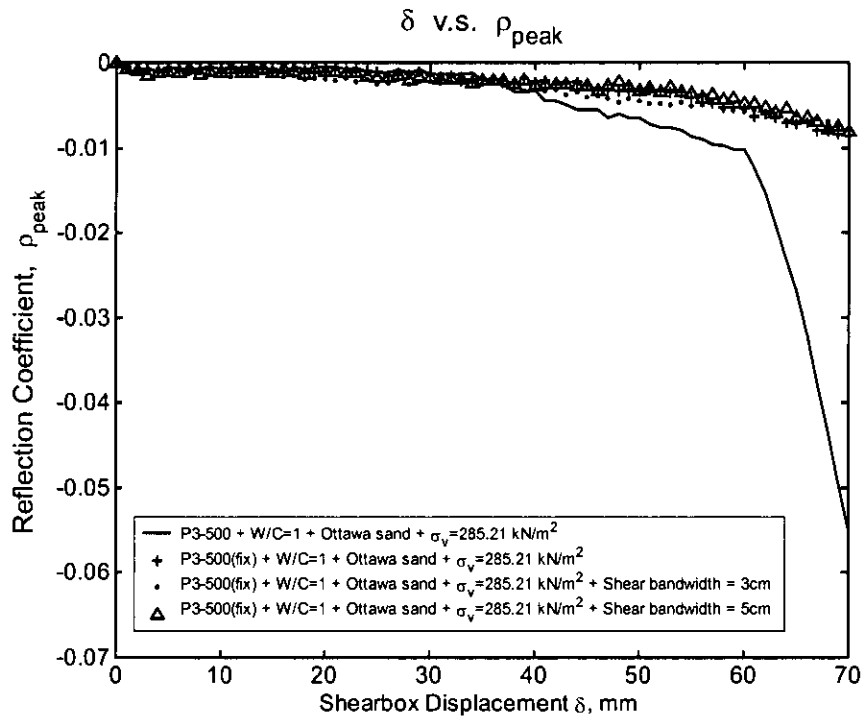


圖 4.38 P3-500 纜線模擬不同剪力帶寬度試驗之靈敏度

表 4.7 試驗相同配置條件下，加入剪力帶寬度之反應特性比較

| Cable Type   | Diameter (mm) | Proportion of Water/Cement (W/C) | Backfill Soil type | shear band width (cm) | Shear band backfill soil type | Backfill Soil Stiffness (slope of $\tau$ - $\delta$ ) | Linear Regression                        |   |                              |                         | Confining Stress (kN/m <sup>2</sup> ) | Curin g(day) |
|--------------|---------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|---|--|---|------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------|
|              |               |                                  |                    |                       |                               |   | Trigger Threshold Value, $\delta_0$ (mm) | Regression Threshold Value, $\delta_0$ (mm) | Sensitivity, S ( $\rho$ /mm) | Rsquare, R <sup>2</sup> |                                       |              |
| RG-8 (fix)   | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | N/A                   | N/A                           | 37  | 22 <sup>(D)</sup>                        | 11.846 <sup>(C)</sup>                       | 0.000225 <sup>(H)</sup>      | 0.8913                  | 285.21                                | 3            |
| RG-8 (fix)   | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | N/A                   | N/A                           | 39  | 21 <sup>(C)</sup>                        | 5.284 <sup>(A)</sup>                        | 0.000275 <sup>(F)</sup>      | 0.9882                  | 285.21                                | 3            |
| RG-8 (fix)   | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 3                     | Ottawa sand                   | 30  | 16 <sup>(A)</sup>                        | 12.243 <sup>(D)</sup>                       | 0.000356 <sup>(E)</sup>      | 0.9121                  | 285.21                                | 3            |
| RG-8 (fix)   | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 5                     | Ottawa sand                   | 41  | 18 <sup>(B)</sup>                        | 7.2664 <sup>(B)</sup>                       | 0.000235 <sup>(G)</sup>      | 0.9759                  | 285.21                                | 3            |
| P3-500       | 12.4          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | N/A                   | N/A                           | 83  | 39 <sup>(E)</sup>                        | 60.000 <sup>(H)</sup>                       | 0.005665 <sup>(A)</sup>      | 0.9949                  | 285.21                                | 3            |
| P3-500 (fix) | 12.4          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | N/A                   | N/A                           | 31  | 41 <sup>(F)</sup>                        | 43.587 <sup>(E)</sup>                       | 0.000412 <sup>(C)</sup>      | 0.9553                  | 285.21                                | 3            |
| P3-500 (fix) | 12.4          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 3                     | Ottawa sand                   | 28  | 55 <sup>(G)</sup>                        | 47.338 <sup>(F)</sup>                       | 0.000381 <sup>(D)</sup>      | 0.9661                  | 285.21                                | 3            |
| P3-500 (fix) | 12.4          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 5                     | Ottawa sand                   | 30  | 55 <sup>(G)</sup>                        | 51.358 <sup>(G)</sup>                       | 0.000504 <sup>(B)</sup>      | 0.9404                  | 285.21                                | 3            |

Performance : (A) > (B) > (C) > (D) > (E) > (F) > (G)



## 提高 TDR 訊號靈敏度之成效

本試驗主要目的為針對前述的試驗，由於束制纜線及水泥試體而造成靈敏度不佳，將使得後續量化分析上不夠精確。因此，本研究參考前面所提到的專利，試著提升 TDR 訊號的靈敏度。

圖 4.39 說明 RG-8 纜線放入圓形節點，其靈敏度有增加，但效果不是十分明顯，但如果採用圓柱狀的節點，則效果明顯增大許多；而圖 4.40 則顯示 P3-500 纜線採用圓柱狀的節點，效果不佳，茲將結果整理於表 4.8。

表 4.8 可得知，RG-8 纜線加入節點可以改善靈敏度(S)的問題，且對於初始門檻值( $\delta_D$ )有幫助，靈敏度從 0.000225、0.000275 增加為 0.000578、0.000926  $\rho/\text{mm}$ ，而初始門檻值則些微增加(22、21、20、15mm)；而 P3-500 纜線置入節點後，靈敏度改善不大(由 0.000412 變為 0.000415  $\rho/\text{mm}$ )，但初始門檻值則有顯著的改善(由 41 變為 32mm)。RG-8 纜線置入圓柱狀的靈敏度之所以比圓形好很多，推測應該是因為球狀的設計太小(直徑為 2 公分)，無法使得應力完全集中(纜線曲率半徑還是很大)，而反觀圓柱形長為 7 公分，使得間距內的曲率半徑變小，因此能明顯的改善靈敏度；P3-500 纜線同樣也採用圓柱狀節點來進行測試，但僅初始門檻值改善較為顯著，推測可能因為節點剛好位於力量集中的地方所造成。

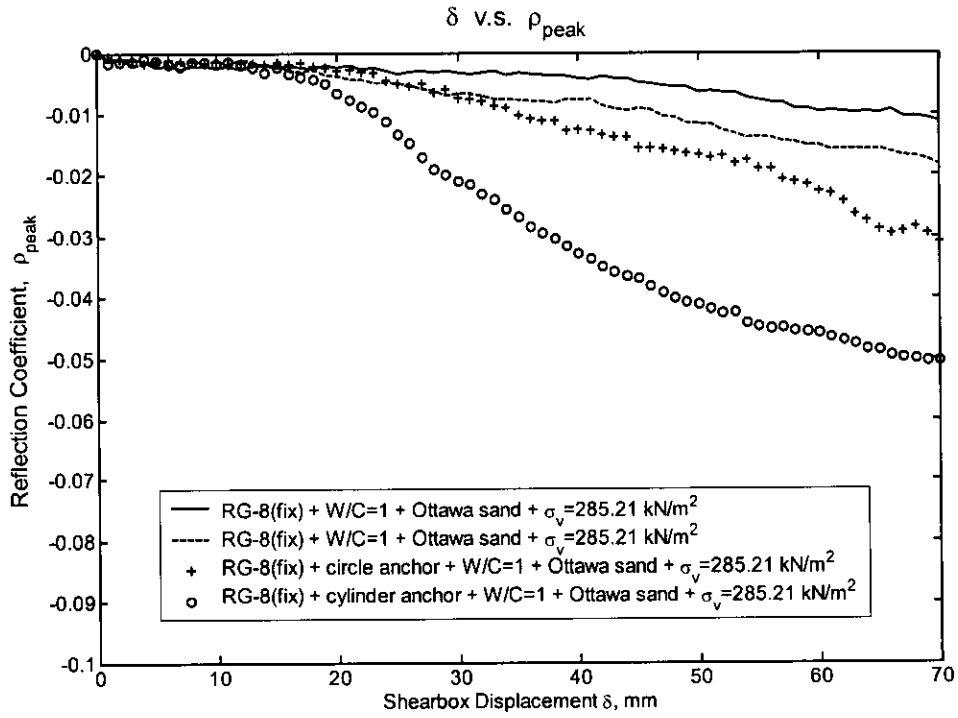


圖 4.39 RG-8 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線

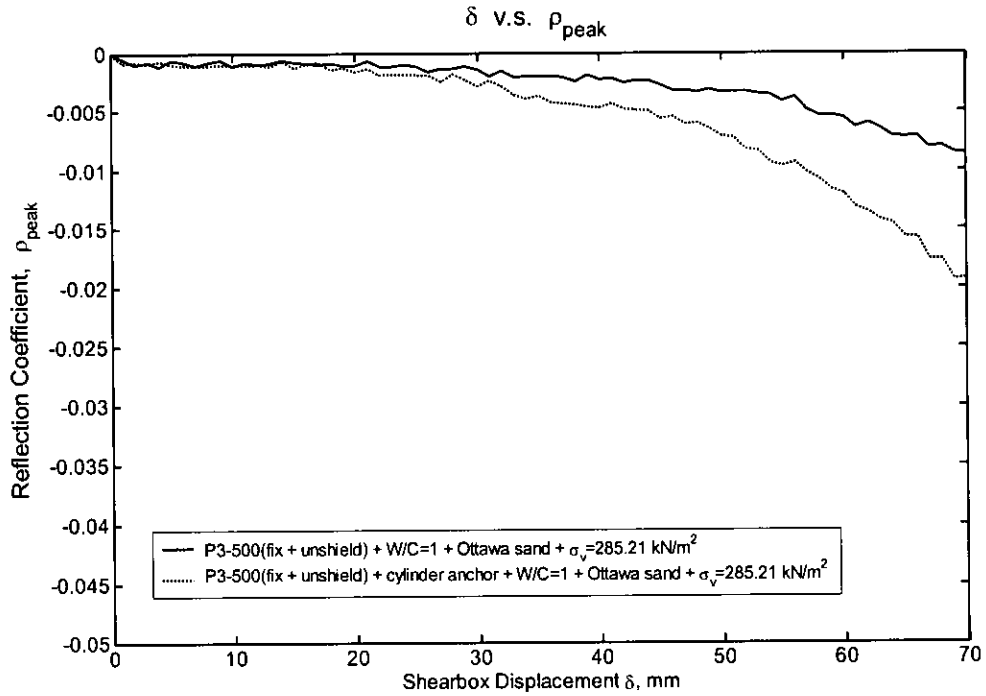


圖 4.40 P3-500 纜線提高 TDR 訊號靈敏度試驗之關係曲線

表 4.8 相同配置條件下，纜線置入節點之反應特性比較

| Cable Type                              | Diameter (mm) | Proportion of Water/Cement (W/C) | Backfill Soil type | Backfill Soil Stiffness (slope of $\tau$ - $\delta$ ) | Linear Regression                        |   |                                |                         | Confining Stress (kN/m <sup>2</sup> ) | Curing (day) |
|---|---------------|----------------------------------|--------------------|---|--|---|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------|
|   |               |                                  |                    |   | Trigger Threshold Value, $\delta_D$ (mm) | Regression Threshold Value, $\delta_0$ (mm) | Sensitivity, $S$ ( $\rho$ /mm) | Rsquare, R <sup>2</sup> |                                       |              |
| RG-8 (fix)                              | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 37  | 22 <sup>(D)</sup>                        | 11.846 <sup>(C)</sup>                       | 0.000225 <sup>(F)</sup>        | 0.8913                  | 285.21                                | 3            |
| RG-8 (fix)                              | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 39  | 21 <sup>(C)</sup>                        | 5.284 <sup>(A)</sup>                        | 0.000275 <sup>(E)</sup>        | 0.9882                  | 285.21                                | 3            |
| RG-8 (fix) circle anchor                | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 30  | 20 <sup>(B)</sup>                        | 18.647 <sup>(D)</sup>                       | 0.000587 <sup>(B)</sup>        | 0.9918                  | 285.21                                | 3            |
| RG-8 (fix) cylinder anchor              | 10.3          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 41  | 15 <sup>(A)</sup>                        | 8.684 <sup>(B)</sup>                        | 0.000926 <sup>(A)</sup>        | 0.9582                  | 285.21                                | 3            |
| P3-500 (unsheilded) fix                 | 12.4          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 31  | 41 <sup>(F)</sup>                        | 43.587 <sup>(F)</sup>                       | 0.000412 <sup>(D)</sup>        | 0.9553                  | 285.21                                | 3            |
| P3-500 (unsheilded) fix cylinder anchor | 12.4          | W/C=1:1                          | Ottawa sand        | 26  | 32 <sup>(E)</sup>                        | 29.445 <sup>(E)</sup>                       | 0.000415 <sup>(C)</sup>        | 0.9243                  | 285.21                                | 3            |

Performance : (A) > (B) > (C) > (D) > (E) > (F) > (G)

#### 4.3.6 TDR 錯動變形監測安裝標準程序及量化分析改善

##### TDR 錯動變形監測安裝標準程序

透過本研究之試驗與分析結果，以及相關研究計畫所累積現場安裝經驗，針對灌漿與纜線安裝提出一套參考標準程序(如圖 4.42)。主要提供：纜線選擇依據、現場安裝不同階段所需合理的考量與準備(如灌漿配比)，使得 TDR 錯動變形監測應用更具實務性與便利性，茲將各流程應注意事項說明如下：

**纜線選擇：**束制水泥試體及纜線後，雖然使得 RG-8 型纜線反應下降，但其於軟弱地層初始靈敏度還是優於 P3-500 型纜線，因此，軟弱地層還是沿用前期的建議使用 RG-8 型纜線；而於堅硬地層，P3-500 型纜線束制水泥試體及纜線後，TDR 訊號反應影響不大，所以於堅硬地層同樣沿用前期所提出的建議採用 P3-500 型纜線。

**前置作業：**了解現場鑽孔直徑(建議採用 NX 標準管徑)與深度，以及當地地質概況與水位，於試驗室需先確定纜線訊號是否有異常，並保護纜線直到安裝。

**現場安裝：**為了避免纜線置入鑽孔時，因水的關係而上浮，纜線末端綁重物(25 米深約需 2 公斤重物)，以直徑約 3 公分 PVC 管置入孔中(如圖 4.41 所示)，供灌漿與固定軟性纜線之用，接著調配水灰比(重量比)約為 1：1 之水泥漿，分次從 PVC 管(或特密管)灌入水泥漿，直到孔口流出水泥漿為止，拔除 PVC 管後，再拔除鑽孔內套管(此時視地層狀況決定拔除外套管，通常地層狀況佳，可等灌漿完成後再拔除外套管)，補水泥漿至孔口，纜線製作接頭

並檢查訊號。

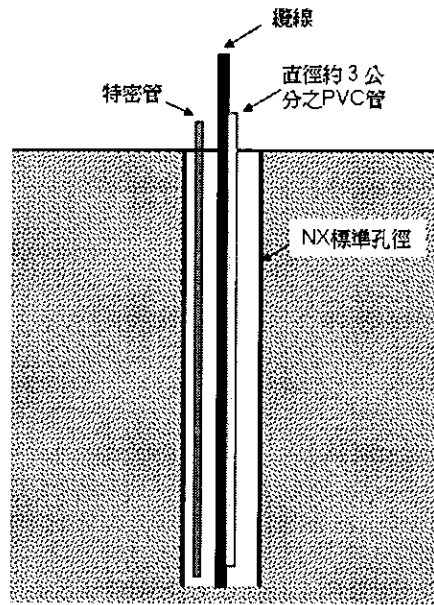


圖 4.41 TDR 安裝示意圖

**二次灌漿：**對縮漿段進行灌漿，水泥將配比依舊為水灰比(重量比)1：1，量測 TDR 訊號，建立初始值。

**儀器保護：**製作保護蓋保護預留的纜線及接頭，量測完畢後，保護蓋上鎖。

**完工：**保護蓋應盡量與地面平整。

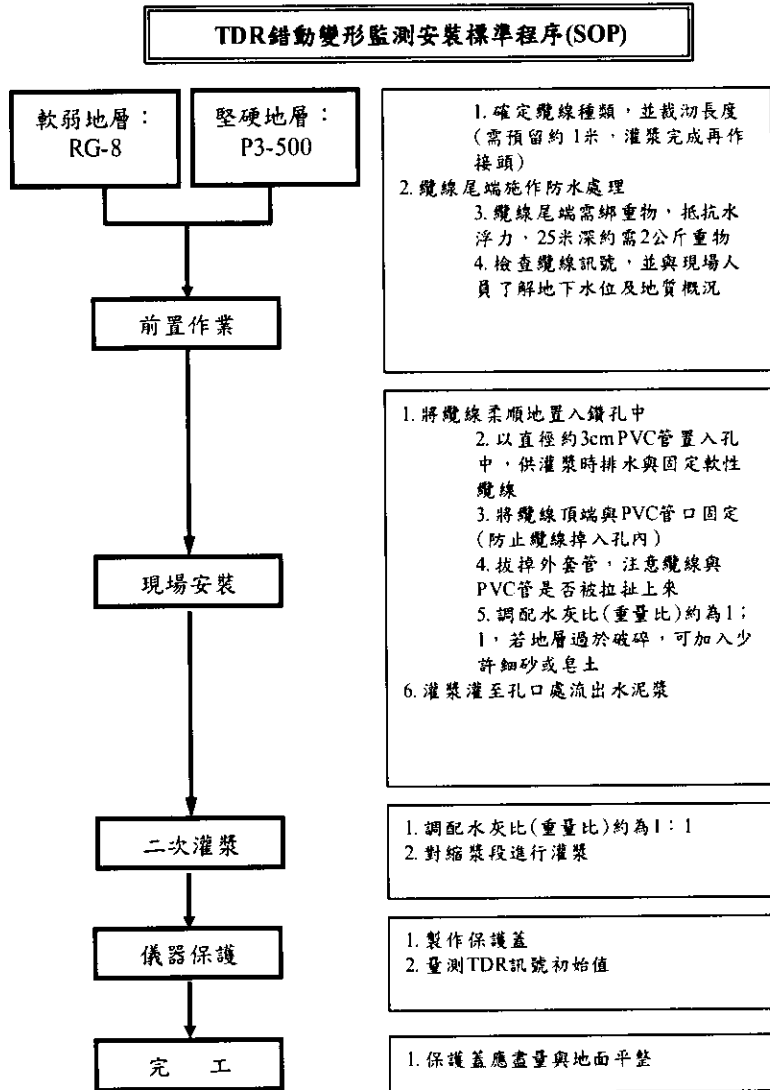


圖 4.42 TDR 錯動變形監測之標準程序

### TDR 錯動變形監測自動化系統儀器

自動化系統之現地資料擷取設備如圖 4.43 所示，自傳輸纜線 (Lead Cable) 連接多工器 (Multiplexer) 開始，至觀測資料由無線方式傳回到遠端伺服器止，儀器元件之需求與功能詳述如下：

1. 多工器 (Multiplexer)：在 TDR 感測器裝設完畢後，傳輸纜線即可連接多工器，而多工器主要的功能在於擴充同時觀測的感測器數量，以達最大的經濟效益。

2.時域反射儀(TDR)：TDR 為一脈衝電壓產生器，產生之脈衝電壓傳至同軸電纜線，由訊號採樣器擷取 TDR 波形。在 TDR 裝設方面，需與多工器同時外接 12V 電壓，也需串接傳輸線至資料擷取器，以提供訊號資料傳輸與接受量測指令的管道；另有 RS232 接孔，可外接電腦透過控制軟體直接操作。

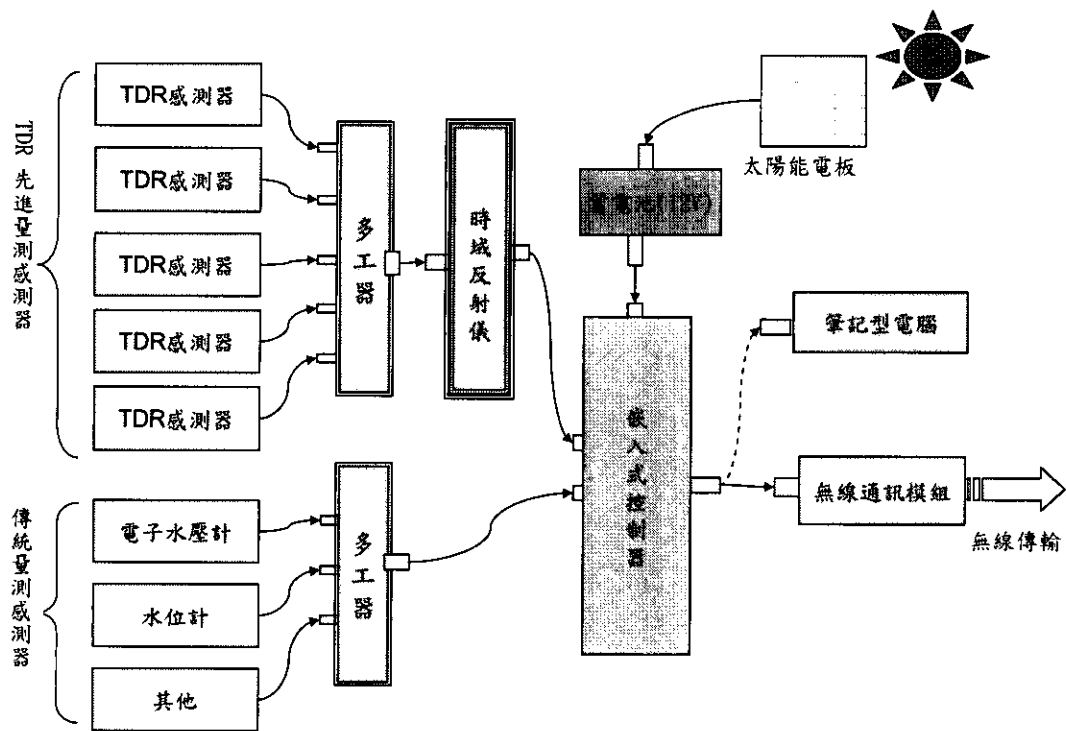


圖 4.43 TDR 錯動變形監測自動化系統

3.資料擷取器(Datalogger)或嵌入式系統：資料擷取器為一小型的電腦，可透過擷取器商業控制程式軟體進行資料擷取器的操控與上傳下載資料。依據擷取資料形態的不同（如 TDR 或是傳統類比設備），可設定不同的量測參數與時間排程的設定，其目的在於以自動化的方式，啟動感測器探測並將量測資料收集儲存。

4.電源供應器(Power Supply)：現場資料擷取設備均使用 12V 直流電源，各觀測站資料擷取系統將使用 12V 蓄電池提供電力。蓄電池可接 110V 交流電蓄電，在野外環境無一般市用 110V 電源時，可

外接太陽能電板獨立供電。

5.資料儲存器(Storage)：資料儲存器目的為擴充資料擷取器之內建暫存記憶體，將擷取資料另外備份。利用資料擷取器控制程式，可定期將所擷取的觀測資料儲存備份於資料儲存器中。另可透過收錄與控制系統程式軟體設定，直接或遠端下載觀測資料。

6.傳輸系統：其功能主要是透過無線傳輸將資料擷取器或資料儲存器內資料傳送至伺服器端。

### **TDR 錯動變形監測量化分析改善**

由本研究及前期的試驗結果，另外再與 Lin et. al. (2007)以 RG-8 與 P3-500 型纜線外覆石膏之直剪試驗結果(典型直剪破壞模式)進行比較，其中典型直剪破壞模式可以視為於岩層中的剪動行為，綜合上述試驗結果，若固定水灰比及圍壓，只改變不同勁度的外填材料，可得  $\rho_{\text{peak}}-\delta$  的關係曲線，茲將軟、硬性纜線分別表示為圖 4.44 和圖 4.45，並說明如下：

#### **軟性纜線(RG-8 型)**

圖 4.44 可說明，地質材料會影響 RG-8 纜線的靈敏度及啟動門檻值(表 4.7 可知 RG-8 於渥太華砂靈敏度為 0.000225、0.000275  $\rho/\text{mm}$ ， $\delta_D$  為 22、21mm；於細礫石中靈敏度為 0.004254  $\rho/\text{mm}$ ， $\delta_D$  為 7mm)，所以應用於所有類型土層上量化仍有困難，但可以考慮模擬試驗不同材料與現地材料的比較，推估可能的變形範圍，圖中的 Reference line 即代表典型直剪破壞模式。現地若屬岩層，RG-8 纜線以式(4.5)進行量化分析；若現地地質材料較接近細礫石，則採用式(4.6)進行量化分



析；若現地地質材料較接近渥太華砂則用式(4.7)來進行量化分析，該式是在試驗具有重複性的前提下，加入不同剪力帶寬度(0、3、5 公分)的  $\rho_{peak}-\delta$  關係曲線，利用非線性三次式迴歸得到。

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.016203} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.001277} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots(4.6)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.000253} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots(4.7)$$

式(4.5)、(4.6)與(4.7)中  $\delta$  為地層滑動量， $\rho_{peak}$  為反射係數(與初始量測值之差值)， $\delta_0$  為迴歸門檻值。參考前期研究及本研究的結果，其中  $\delta_0$  受地質材料勁度影響頗大，若地層為堅硬岩層時，則  $\delta_0 \approx 0mm$ ；若地質材料接近細礫石時， $\delta_0 \approx 12mm$ ；若地層為軟弱土壤或存在剪力帶寬度時，以本研究所使用之軟弱外填材料而言  $\delta_0 \approx 5mm \sim 12mm$ (表 4.7 RG-8 型纜線試驗結果)。

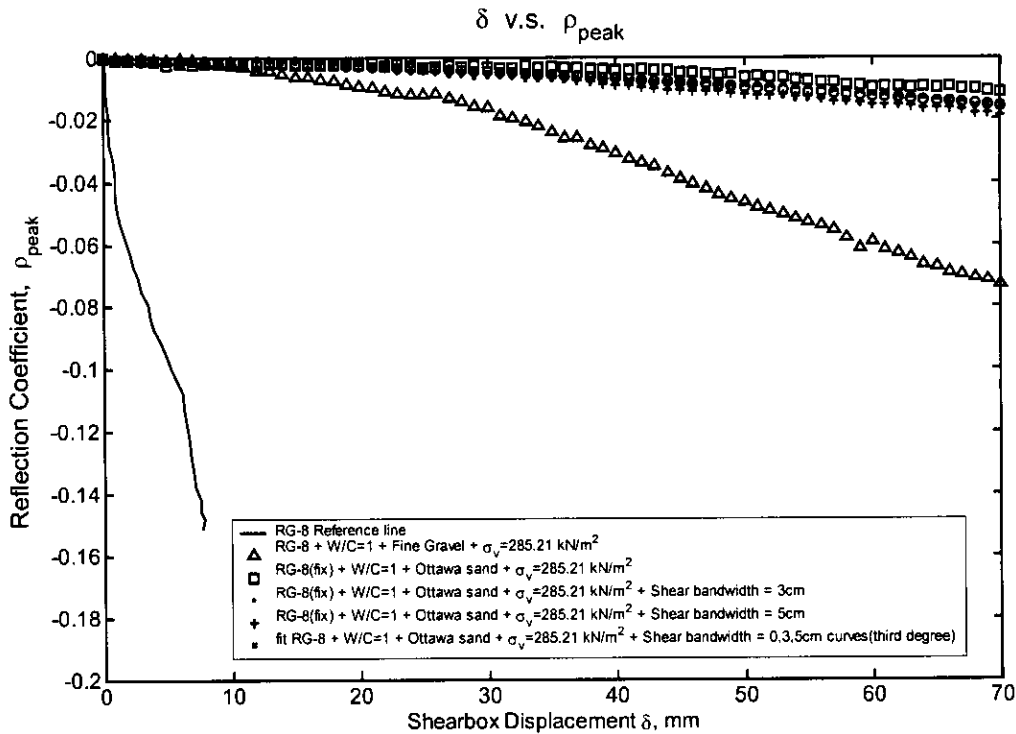


圖 4.44 RG-8 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度

### 硬性纜線(P3-500 型)

圖 4.45 為 P3-500 於不同外填材料勁度之  $\rho_{peak}-\delta$  關係曲線，圖中顯示該種纜線也是受地質材料影響很大(靈敏度分別為 0.010783、0.006861、0.006317、0.000412、0.000381、0.000504)，量化變形量也和 RG-8 型纜線相同，僅能與試驗用的材料與現地地質材料比較，推估可能的變形範圍，現地若屬岩層，纜線以式(4.8)進行量化分析；若現地地質材料較接近細礫石，則採用式(4.9)進行量化分析，該式為非線性三次式迴歸 P3-500 於細礫石中的重複性試驗而得；若現地地質材料較接近渥太華砂則用式(4.10)來進行量化分析，採用非線性三次式迴歸 P3-500 加入剪力帶寬度(0、3、5 公分)的試驗。

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.010783} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.0072833} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.0002115} + \delta_0(mm) \dots\dots\dots (4.10)$$

若地層為堅硬岩層時，則  $\delta_0 \approx 0mm$ ；若地質材料接近細礫石， $\delta_0 \approx 42mm \sim 44mm$ (表 4.6 P3-500 型纜線重複性試驗結果)；若地質材料接近渥太華砂，以本研究所使用之軟弱外填材料而言， $\delta_0 \approx 43mm \sim 51mm$ (表 4.7 P3-500 型纜線試驗結果)。

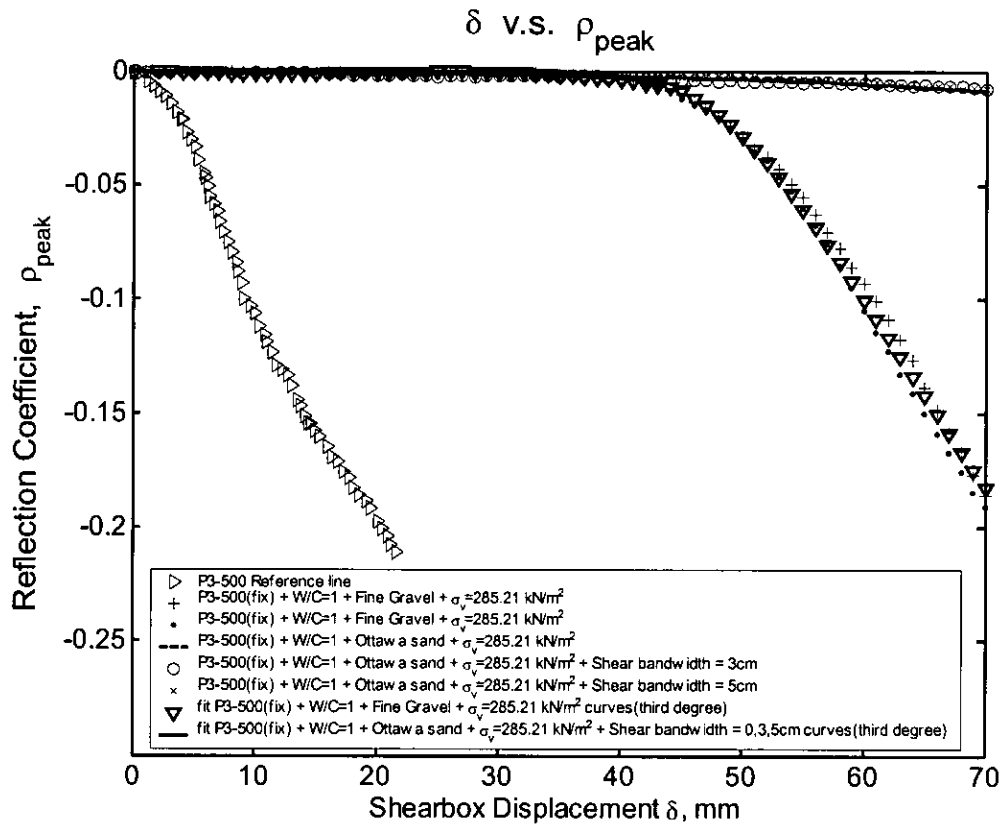


圖 4.45 P3-500 型纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度

綜合上述結論，茲將 TDR 錯動變形監測資料分析程序整理如圖

4.46。

## TDR錯動變形資料分析程序

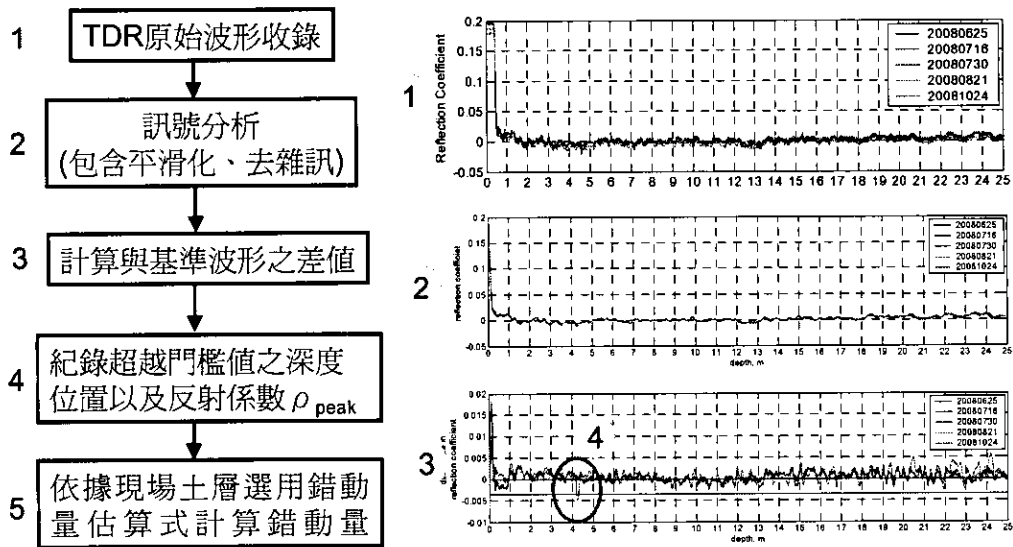


圖 4.46 TDR 錯動變形監測資料分析流程圖

#### 4.4 新山水庫現地應用與測試

本年度計畫將對前兩年度所發展之先進傳輸線式監測技術進行現地應用與測試，以便更進一步確認所發展之新技術的實用性。在現地測試的場址上，考量為選擇一較有充份資訊且有新安裝監測儀器（水壓計以及錯動變形監測儀器）需求之壩體為優先，現場測試之新研發儀器有光纖光柵水壓計以及 TDR 錯動變形監測技術。經過與主辦單位討論結果，選定新山水庫做為測試場址。

##### 4.4.1 新山水庫簡介

新山水庫建於基隆河大武崙溪支流上游，位於基隆市安樂區外寮里附近，距基隆港約三公哩，水庫集水區標高介於 100 公尺至 215 公尺間，水系呈樹枝狀，植生覆被極為良好，供應基隆、汐止地區之用水。新山水庫於民國六十九年完成第一期工程，壩頂標高 EL.75 公尺，蓄水容量 400 萬噸，民國八十七年完成第二期壩體加高填築工程，壩頂標高 EL.90 公尺，蓄水容量增至 1000 萬噸。

新山水庫之管理機關為台灣自來水股份有限公司，民國 77 年曾辦理第一次安全評估，且水庫加高後增加部分蓄水，曾於民國 87 年進行『部分蓄水前安全複核報告』；民國 88 年由中華工程顧問公司辦理蓄水前安全複核。該評估報告指出，大壩主要問題在於下游左半坡面之滲流水現象；民國 90 年由和新工程顧問公司辦理第二次安全評估工作，發現水庫右山脊蓄水位以上之坡面有局部地滑之情況；民國 96 年由中興工程顧問公司辦理第三次安全評估工作，報告初稿指出左山脊滲水問題以及自動化監測系統有故障之虞。參考歷次安全評估及相關的工作報告指出，新山水庫主要有左側山脊滲流水的問題，右

側山脊餘蓄水位上存有局部地滑的情況。

根據中興工程顧問公司對於新山水庫第三次安全評估之報告初稿(台灣自來水公司第一區管理處，民國 96 年)統計指出，目前壩體及壩體周圍監測儀器約八成已無法發揮其監測功能，尤其是安裝於壩體中之電子式水壓計有損壞之虞，造成無法監測壩體中是否有滲流情況發生，有更新壩體水壓計之需求，故將在此進行新研發之光纖光柵水壓計的現地測試。

圖 4.47 所示為新山水庫右壩脊邊坡傾斜觀測管歷年變形資料，可發現 92 年 7 月過後 W3 孔位(如圖 4.48 所示)有發生明顯滑動，且滑動量達 8 公分以上，此區域可能之滑動深度大致分為 2 處，第一處為自傾斜管孔口高程向下深度約 2 米處，另一處為向下深度約為 16 米處(摘自新山水庫第三次安全評估報告，9-11 頁)，因並無進一步進行整治，實有再次滑動的可能。根據現有報告指出目前安裝於壩體右壩脊邊坡處之自動化傾斜觀測管監測儀器有故障之虞而無法有效繼續量測，有改為人工量測或新安裝錯動變形監測儀器的需求。故本研究單位預計將於右壩脊邊坡區域安裝一孔 TDR 進行錯動變形監測，此外，為展現光纖監測技術之多工性性能，在本計畫所研發內容之外，預計將搭配 TDR 錯動變形監測安裝節理式光纖光柵偏斜儀進行邊坡滑動監測。

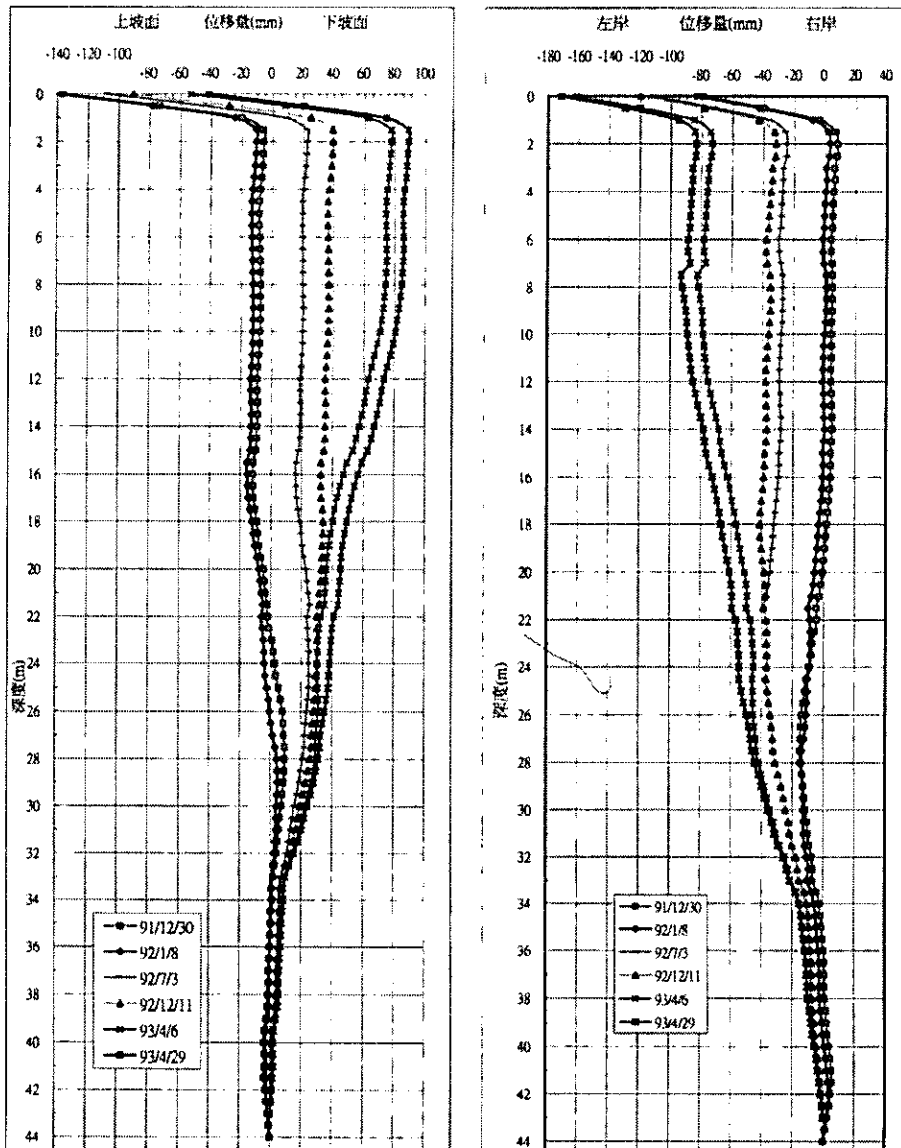


圖 4.47 W3 傾斜觀測管歷年變形資料(台灣自來水公司第一區管理處，民國 96 年)

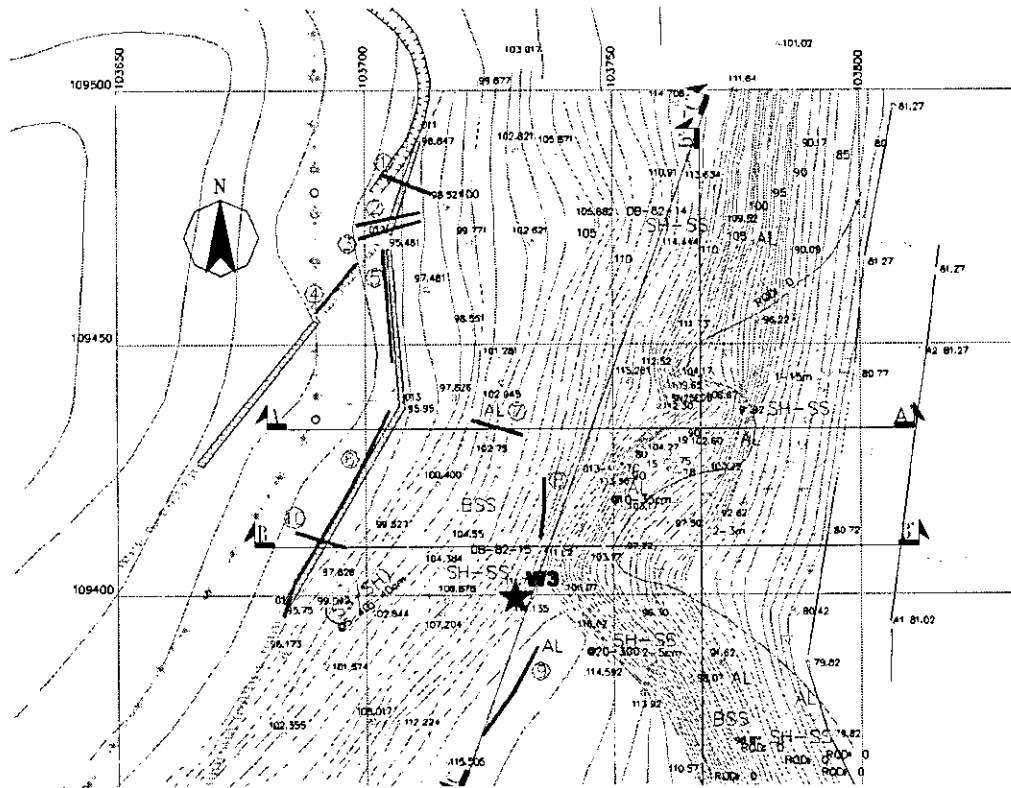


圖 4.48 右山脊 w3 傾斜管裝設位置

#### 4.4.2 現地安裝位置與數量

為進一步確定現地安裝測試位置與數量，本研究中心於 97 年 5 月 20 日假國立交通大學防災中心會議室舉行『研商「水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(3/3)」新山水庫現地測試執行事宜』會議，經各方學者專家討論結果，對於新山水庫現地測試執行事宜獲得結論如下：

1. 壩體光纖光柵水壓計安裝位置與鑽孔數量如圖 4.49 及圖 4.50 所示，於 LL1 及 LL3 位置安裝光纖光柵水壓計：其中，LL1 及 LL3 為原有之自動化水壓計孔位，施作時將此孔原有之自動化水壓計以鑽探技術洗出後，再行安裝。



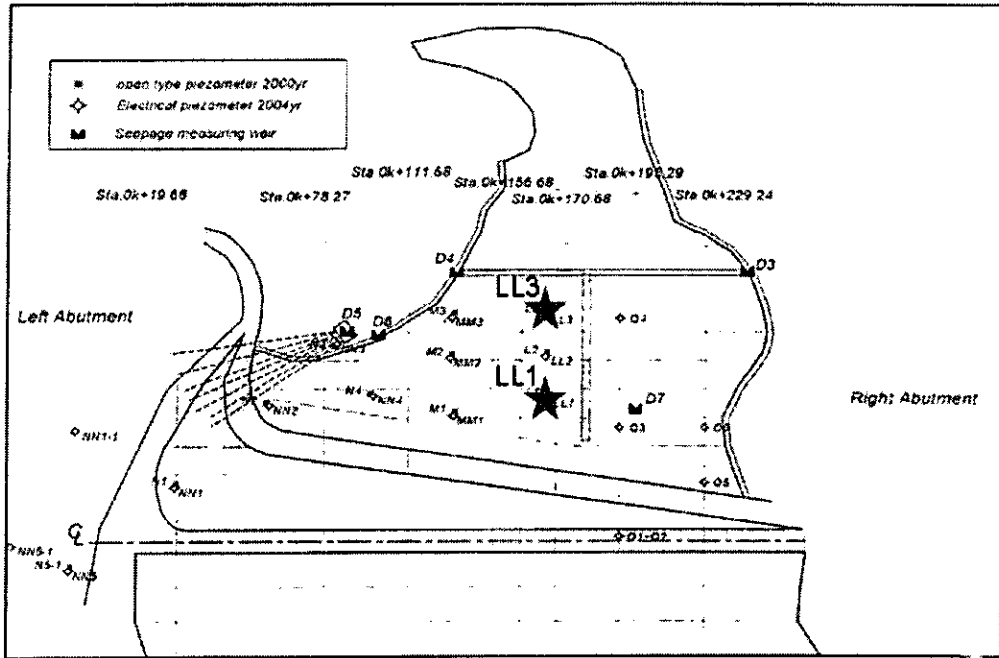


圖 4.49 壩體光纖光柵水壓計安裝位置平面示意圖

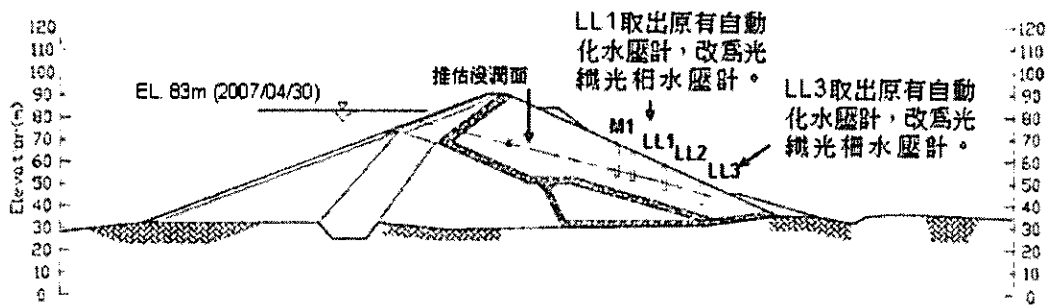


圖 4.50 壩體光纖光柵水壓計安裝位置橫剖面示意圖

## 2. 右山脊 TDR 變形監測及光纖光柵測傾儀安裝位置與鑽孔數量

如圖 4.51 示，TDR 變形監測安裝於 IS-6 周邊，光纖光柵測傾儀安裝於 W3 位置；其中，TDR 安裝位置為新鑽孔 T-1，孔深 27 公尺；W3 為原有之 IPI 孔位，施作時將原有之 IPI 取出改換置入光纖光柵測傾儀。

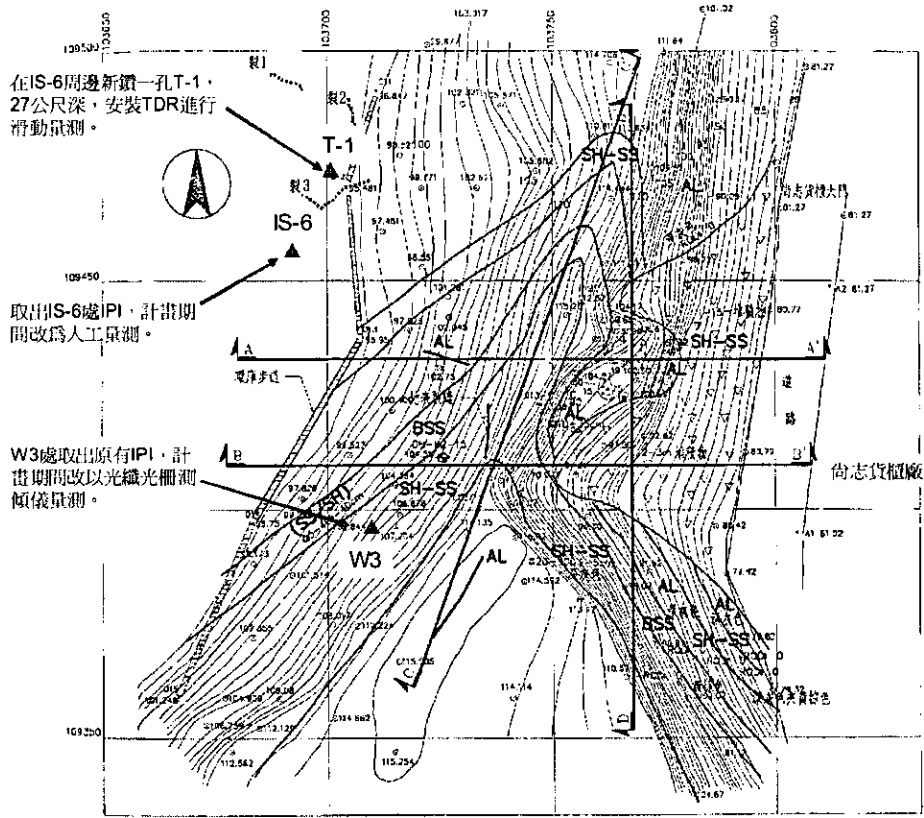


圖 4.51 右山脊 TDR 及光纖光柵測傾儀安裝位置平面示意圖

#### 4.4.3 新山水水庫壩體 FBG 水壓計安裝

本團隊於 5 月至新山水水庫進行現地探勘，選定現有編號 LL1 與 LL3 之水位孔安裝 FBG 水壓計，FBG 水壓計製作、安裝標準與檢核流程如圖 4.52 所示，其每一步驟。於 6 月 19 日進行原有水位孔清洗作業(圖 4.53-圖 4.55)，並於 6 月 23 日量測 LL1 孔深度為 15.6 米，LL3 孔深度為 16.2 米，且將 FBG 水壓計放入 LL1 與 LL3 孔內。並於 7 月 1 日與 7 月 8 日至新山水水庫讀取 FBG 水壓計讀數，初步測試得到 7 月 1 日 LL1 水位高程為 52.93 米，7 月 8 日 LL1 水位高程為 52.16 米；7 月 1 日 LL3 水位高程為 46.65 米，7 月 8 日 LL3 水位高程為 45.45 米。而手動式水位計量測得到 7 月 1 日 LL1 水位高程為 52.69 米，7 月 8 日 LL1 水位高程為 52.36 米；7 月 1 日 LL3 水位高程為 47.22 米，7 月 8 日 LL3 水位高程為 46.22 米，量測誤差之主要原因在於兩者於

同一天不同時間點量測與洗孔後進行孔洞水消散測試所導致。

然後本團隊於 9 月 21 至 30 日其間陸續於新山水庫編號 LL1 與 LL3 之水位孔至機房間鋪設光纜與安裝 FBG 自動化監測系統。本團隊設定監測頻率為每五分鐘讀取一次訊號，圖 4.56 與圖 4.57 所示為 10 月 09 日零時至 10 月 20 日 24 時止每小時 LL1 與 LL3 的水頭變化與手動電子式水位計量測的結果比較圖。在 10 月 9 號與 10 月 10 日，因為測試自動化監測儀器與調整光纜佈設，所以導致 LL3 水位孔的 FBG 感測器讀數有些微跳動，調整後已經於 10 月 11 日恢復正常，可看出整個長期的水位變化趨勢具有一致性。而圖 4.58、圖 4.59、圖 4.60 為 LL1 在 10 月 09 日零時至 10 月 21 日零時之間每一個小時變化的讀數，圖 4.61、圖 4.62、圖 4.63 為 LL3 在 10 月 09 日零時至 10 月 21 日零時之間每一個小時變化的讀數。表 4.9 為 10 月 9 日至 10 月 20 日的雨量、水庫水位與手動式量水位計量測結果。

表 4.9 10 月 9 日至 10 月 20 日雨量、水庫水位與 LL1、LL3 水位高程

| 日期    | 雨量(mm) | 水庫水位<br>高程(m) | 手動電子式水位計    |             |
|-------|--------|---------------|-------------|-------------|
|       |        |               | LL1 水位高程(m) | LL3 水位高程(m) |
| 10.09 | 2      | 81.7          | 52.588      | 44.767      |
| 10.10 | 113.5  | 81.82         | 52.608      | 44.483      |
| 10.11 | 0.5    | 82.15         | 52.660      | 44.410      |
| 10.12 | 0      | 82.27         | 52.670      | 44.180      |
| 10.13 | 0      | 82.37         | 52.660      | 43.810      |
| 10.14 | 12.5   | 82.46         | 52.650      | 43.650      |
| 10.15 | 16     | 82.52         | 52.630      | 43.220      |
| 10.16 | 7      | 82.57         | 52.650      | 43.100      |
| 10.17 | 2.5    | 82.79         | 52.650      | 42.912      |
| 10.18 | 1.5    | 82.79         | 52.650      | 42.912      |
| 10.19 | 1.5    | 82.88         | 52.670      | 42.440      |
| 10.20 | 0      | 82.96         | 52.630      | 42.290      |

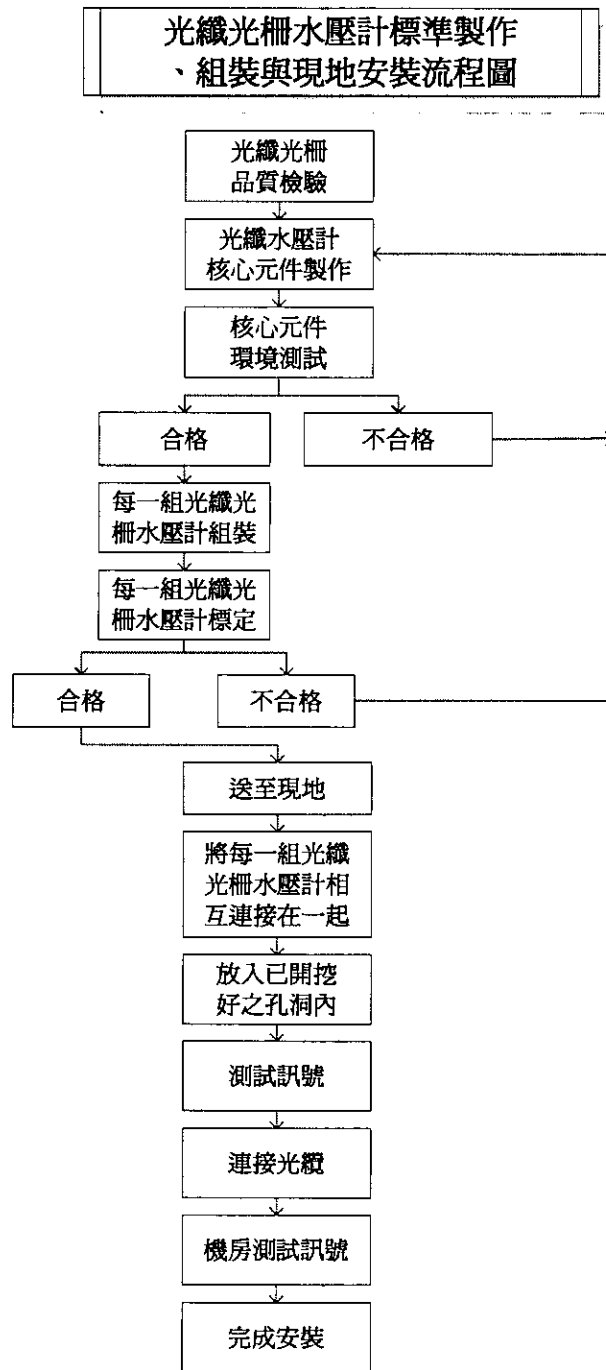


圖 4.52 光纖光柵水壓計標準製作、現地安裝與檢核流程圖



圖 4.53 新山水庫現場清洗水位孔

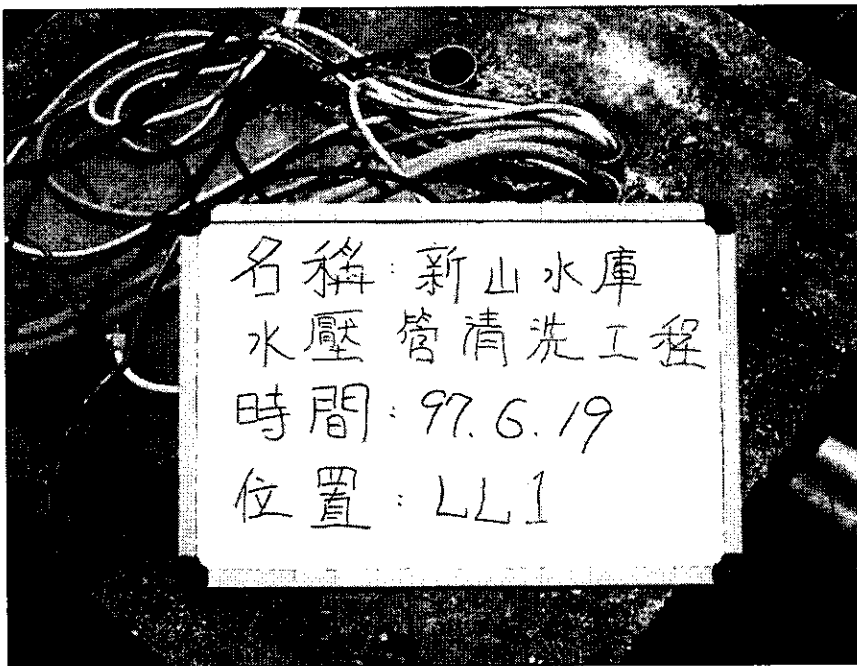


圖 4.54 新山水庫水位孔 LL1 清洗工程

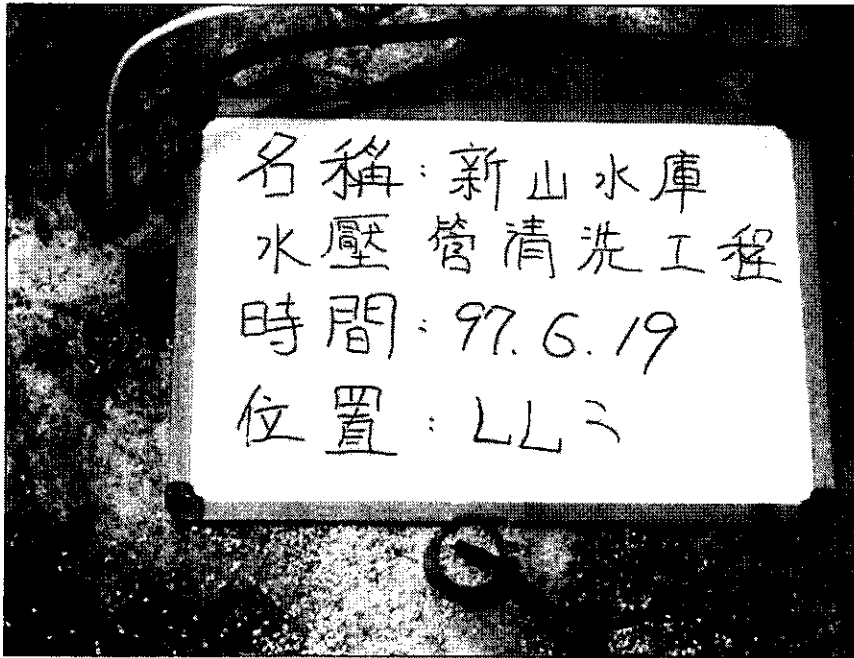


圖 4.55 新山水庫水位孔 LL3 清洗工程

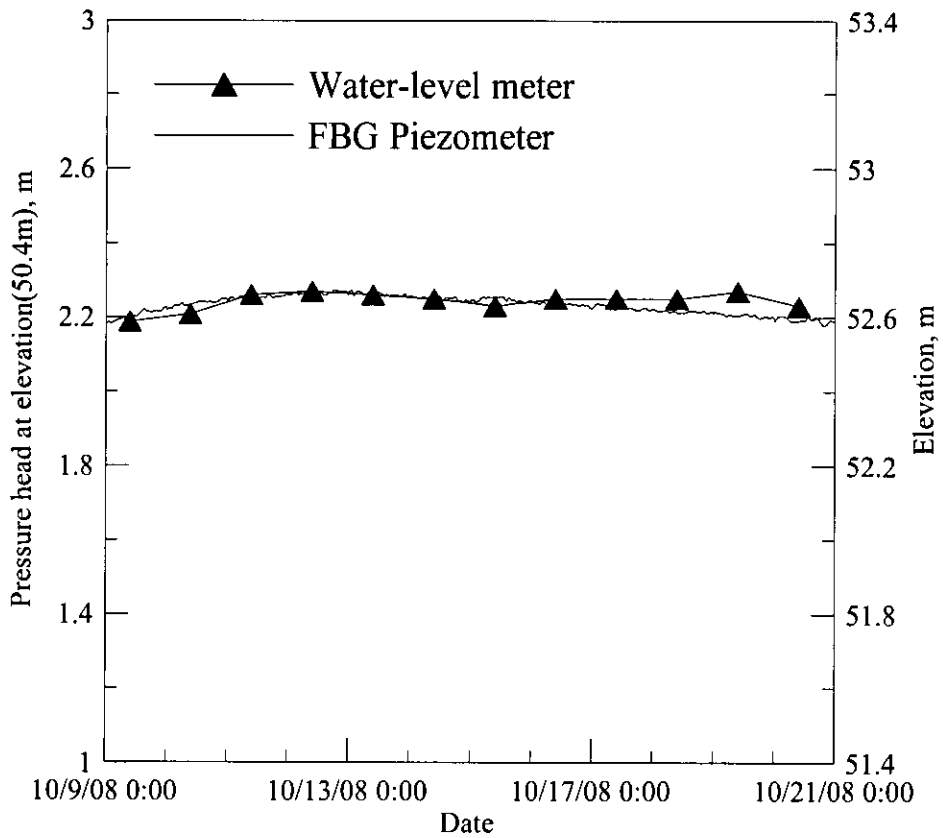


圖 4.56 LL1 水位孔 FBG 水壓計與手動式水位量測比較圖

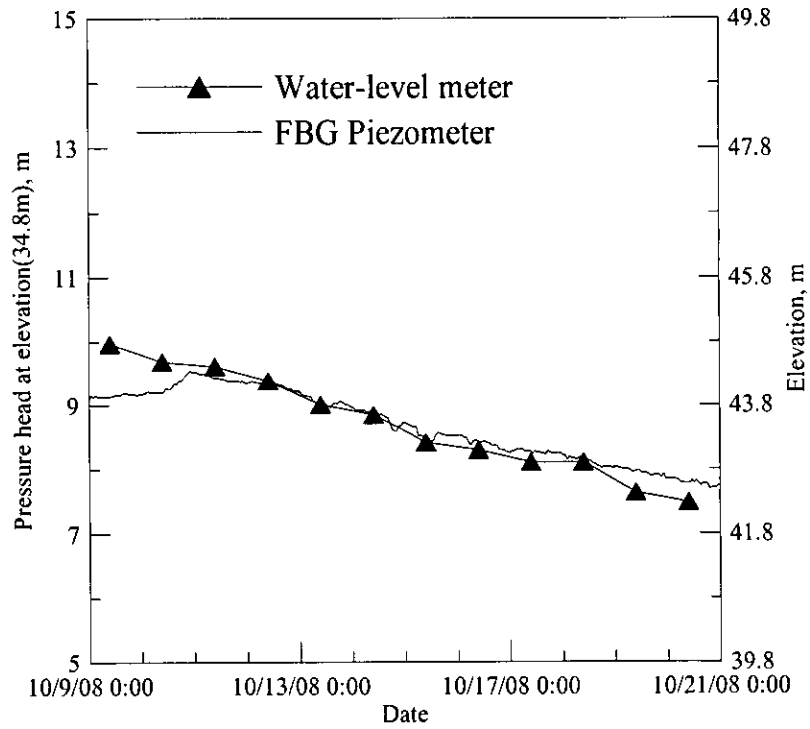


圖 4.57 LL3 水位孔 FBG 水壓計與手動式水位量測比較圖

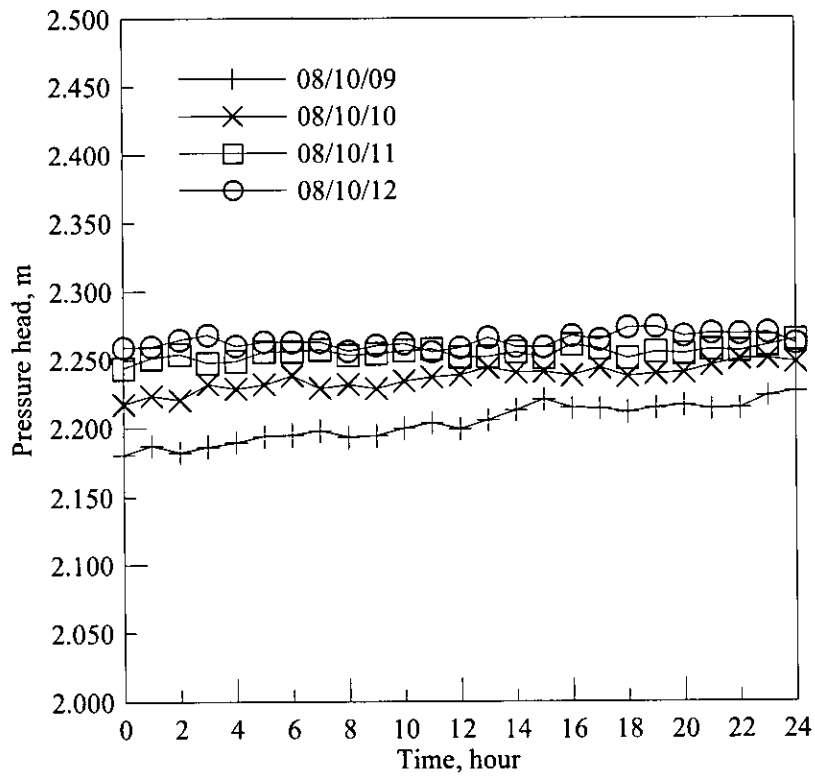


圖 4.58 LL1 二十四小時水頭變化 (10月9日至10月12日)



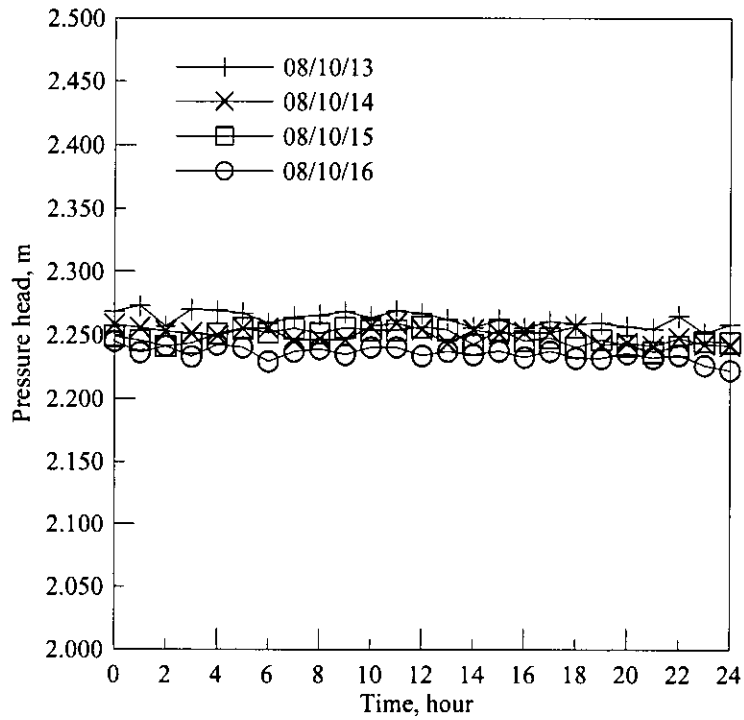


圖 4.59 LL1 二十四小時水頭變化 (10 月 13 日至 10 月 16 日)

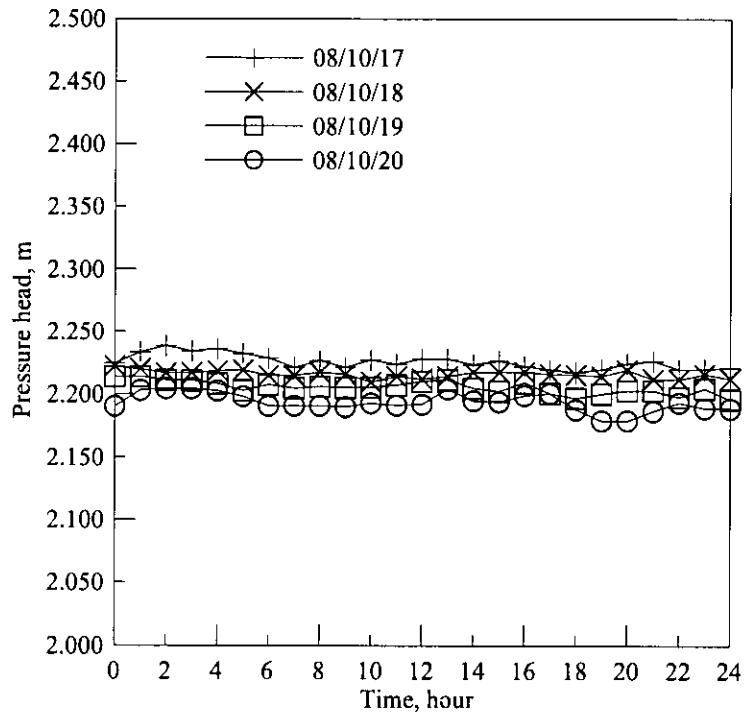


圖 4.60 LL1 二十四小時水頭變化 (10 月 17 日至 10 月 20 日)

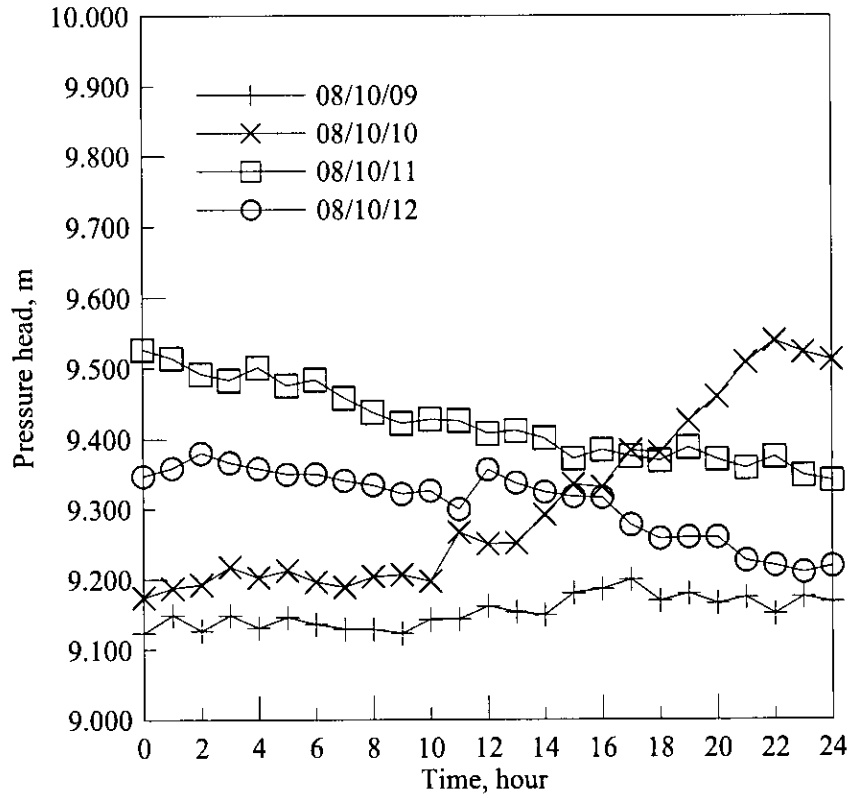


圖 4.61 LL3 二十四小時水頭變化 (10月09日至10月12日)

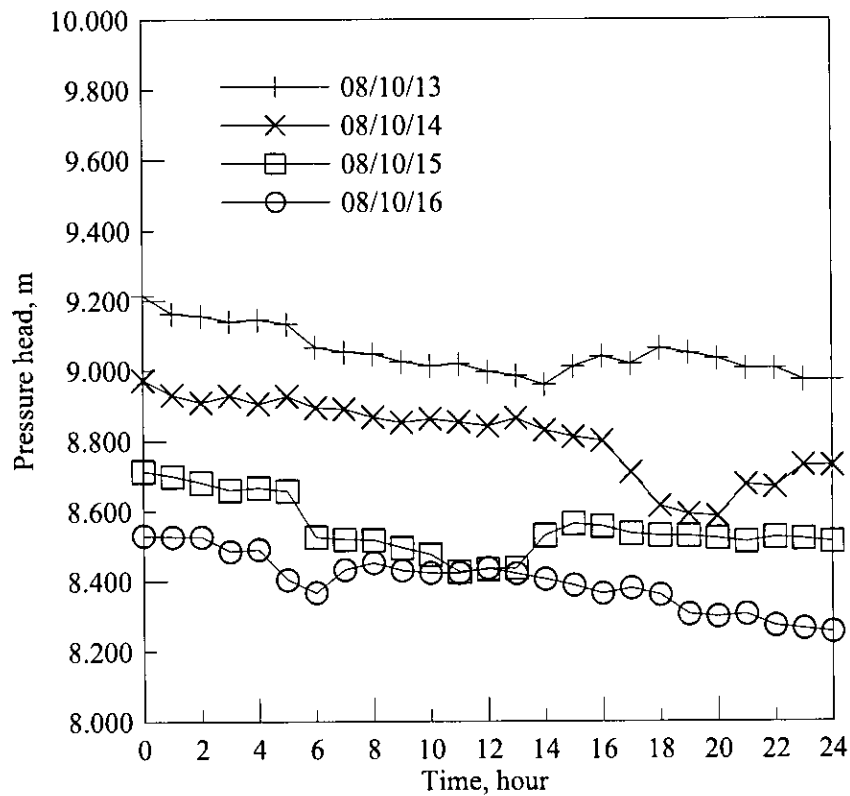


圖 4.62 LL3 二十四小時水頭變化 (10月13日至10月16日)

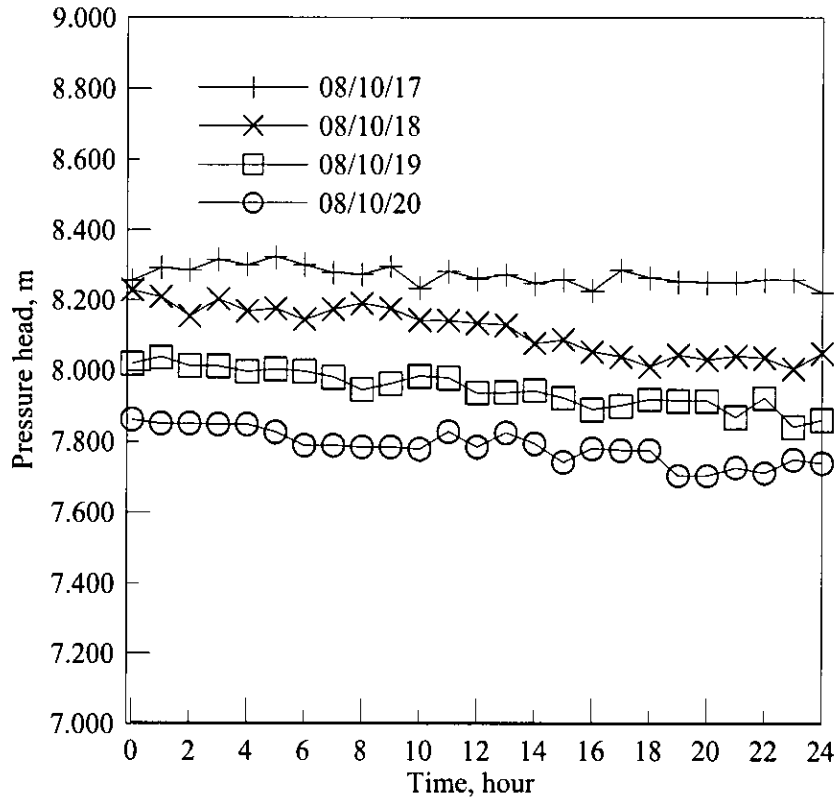


圖 4.63 LL3 二十四小時水頭變化 (10 月 17 日至 10 月 20 日)

#### 4.4.4 新山水庫右山脊光纖光柵測傾儀與水壓計安裝

本團隊於 9 月 21 日至新山水庫編號 W3 之孔位，分別使用傳統式測傾儀與光纖光柵測傾儀進行測試，並以重力方向為初始值來進行分析與比較，發現兩者所量測 W3 孔傾斜管具有相同之變形趨勢(圖 4.64、圖 4.65)。

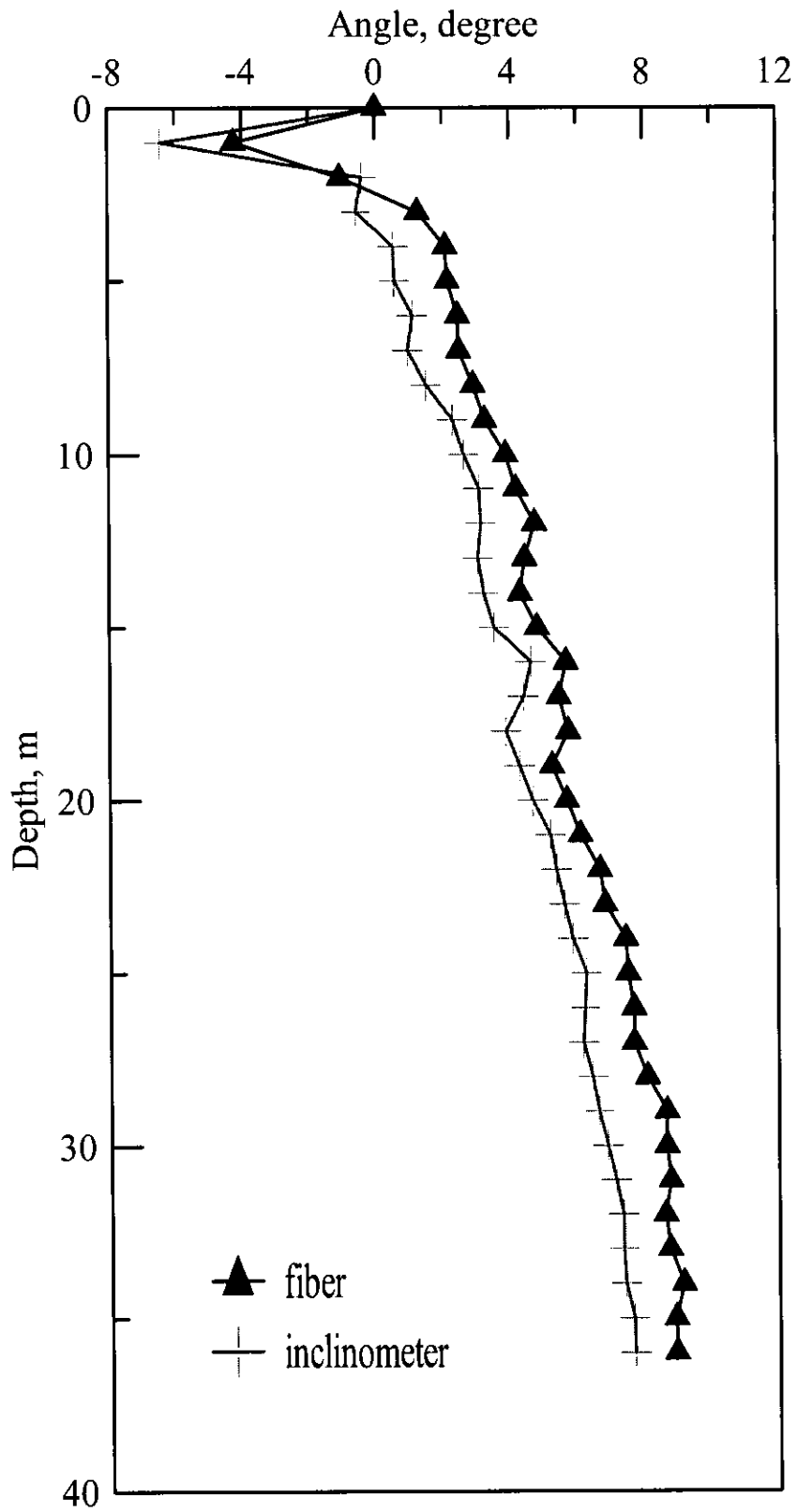


圖 4.64 傳統測傾儀與光纖光柵測傾儀量測結果之角度比較圖

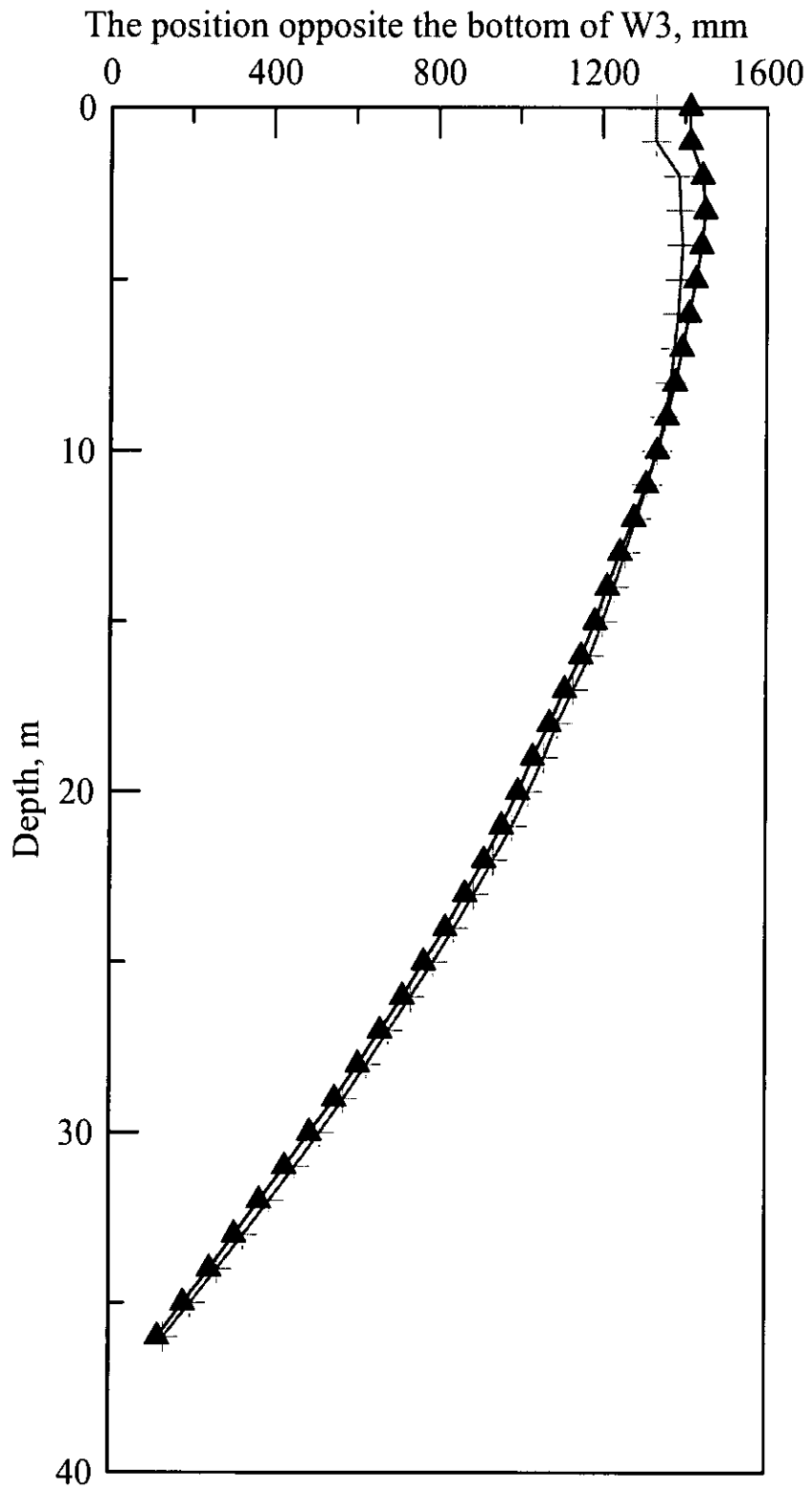


圖 4.65 傳統測傾儀與光纖光柵測傾儀量測相對孔底位置比較圖

本團隊於 10 月 16 日安裝 18 組(表 4.10)光纖光柵測傾儀至 W3 孔內(圖 4.66、圖 4.67)，並安裝一組光纖光柵水壓計於光纖光柵測傾儀底部量測水位高程(圖 4.68)。圖 4.69 為光纖光柵水壓計於 10 月 23 日進行自動化量測結果圖。圖 4.70 為光纖測傾儀自動化量測結果。

表 4.10 W3 孔光纖光柵測傾儀安裝波長表

| 深度(m) | 長度(m) | 斜率     | 原始波長(nm) |
|-------|-------|--------|----------|
| 12.5  | 1     | 0.0039 | 1536     |
| 13.5  | 1     | 0.0037 | 1554     |
| 14.5  | 1     | 0.0038 | 1530     |
| 15.5  | 1     | 0.0040 | 1524     |
| 16.5  | 1     | 0.0037 | 1554     |
| 17.5  | 1     | 0.0038 | 1554     |
| 18.5  | 1     | 0.0037 | 1536     |
| 19.5  | 1     | 0.0037 | 1548     |
| 20.5  | 1     | 0.0037 | 1536     |
| 21.5  | 1     | 0.0038 | 1524     |
| 22.5  | 1     | 0.0038 | 1536     |
| 23.5  | 1     | 0.0037 | 1548     |
| 24.5  | 1     | 0.0037 | 1542     |
| 25.5  | 1     | 0.0037 | 1548     |
| 26.5  | 1     | 0.0037 | 1530     |
| 27.5  | 1     | 0.0037 | 1524     |
| 28.5  | 1     | 0.0037 | 1530     |
| 29.5  | 1     | 0.0037 | 1548     |

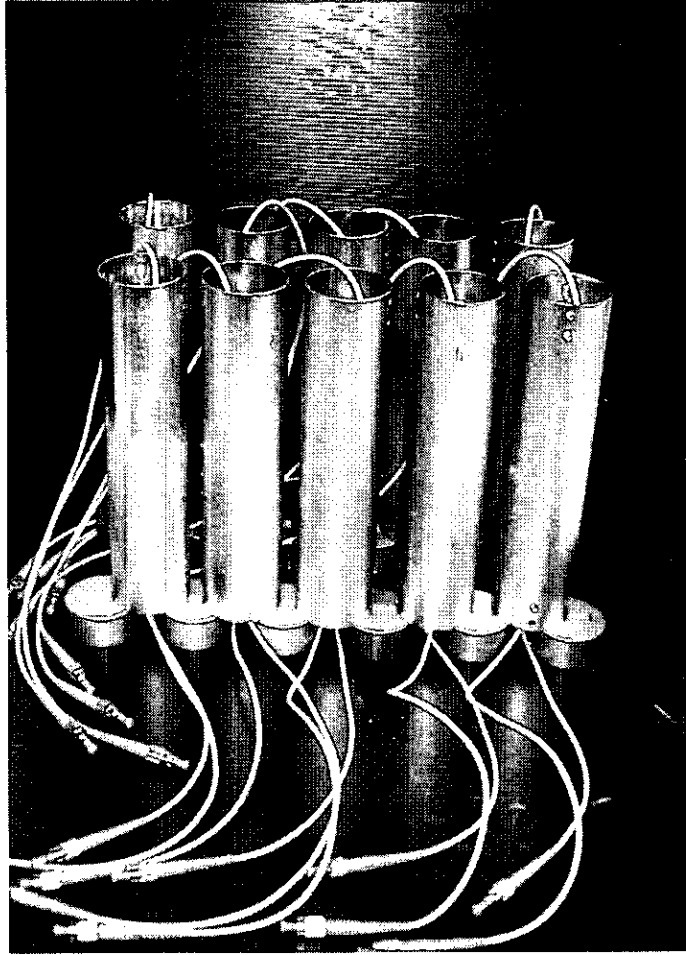


圖 4.66 光纖光柵測傾儀組裝完成實體圖



圖 4.67 光纖光柵測傾儀現地安裝圖





圖 4.68 光纖光柵水壓計現地安裝圖

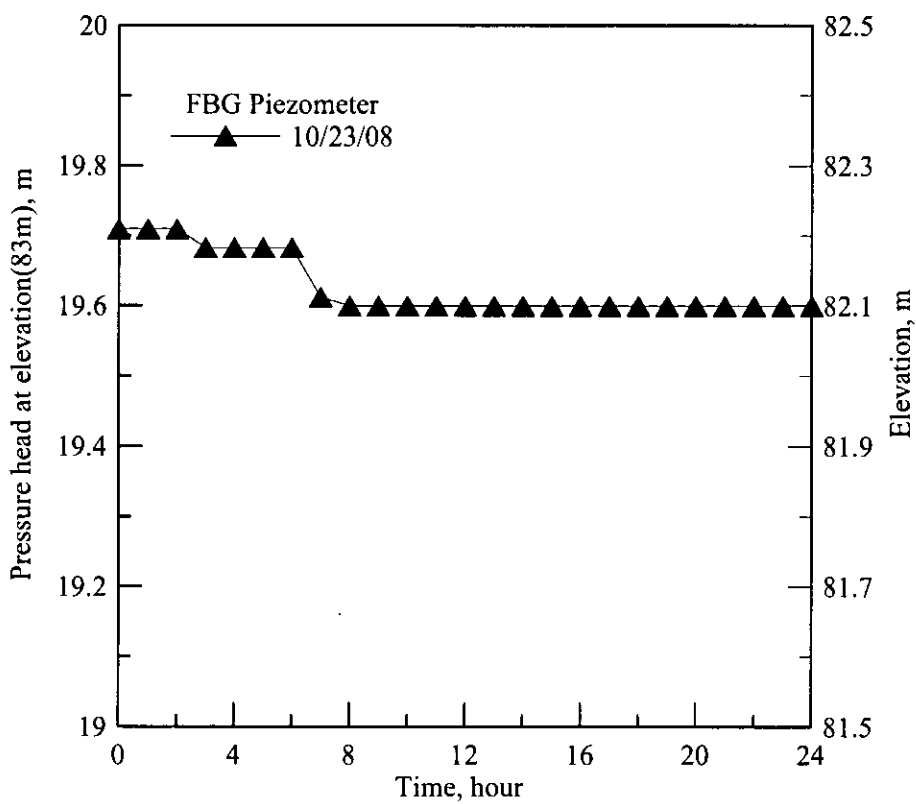


圖 4.69 FBG 水壓計於 W3 孔水位量測結果

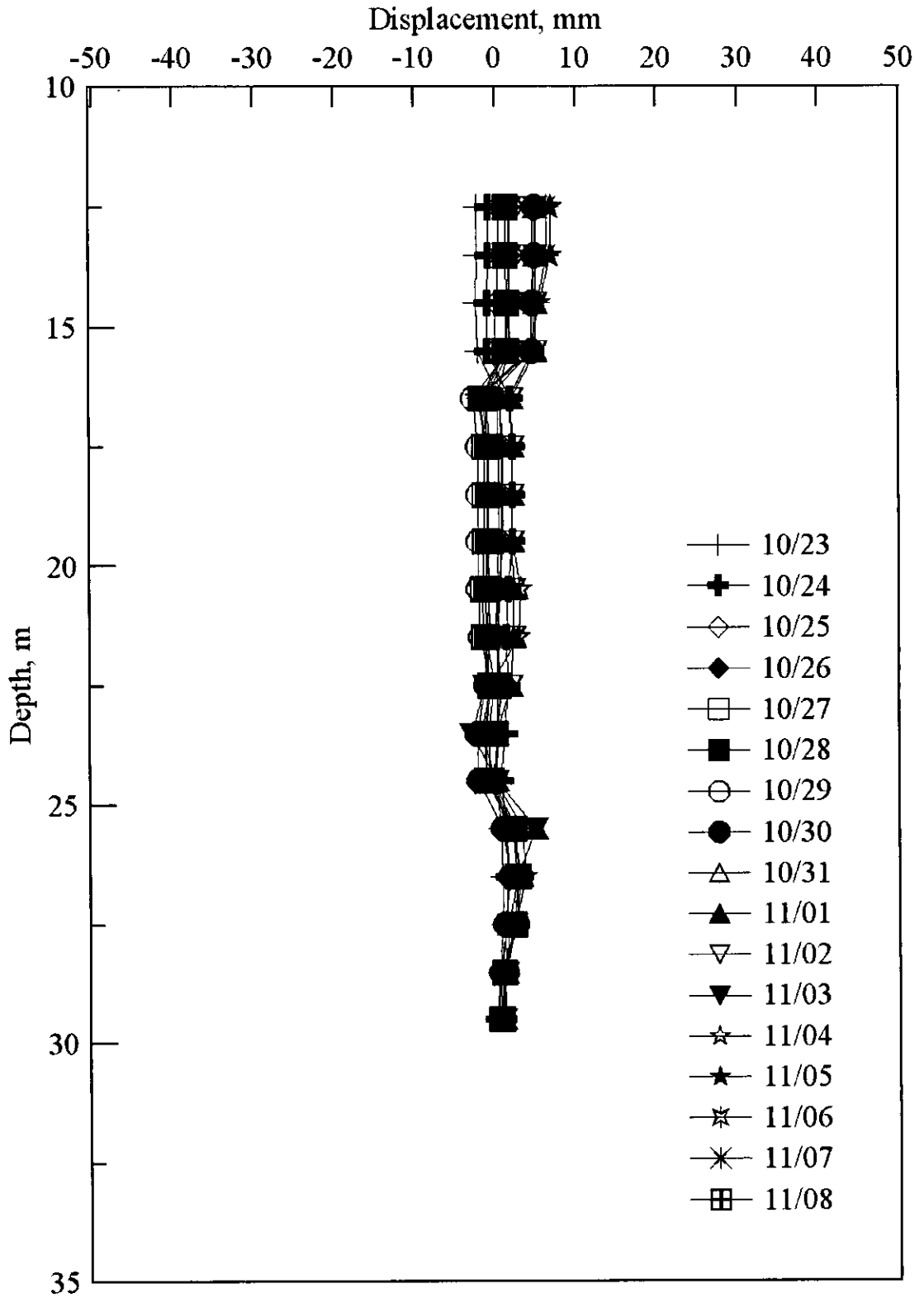


圖 4.70 FBG 測傾儀於 10 月 23 至 11 月 08 號位移讀數

#### 4.4.5 新山水庫 FBG 自動化監測系統

本團隊所發展之光纖光柵感測器為被動式感測器，具有部分分佈式感測、不受雷擊、水與電磁波影響等優點，本團隊已經於新山水庫安裝 FBG 自動化監測儀器，使用 labview 程式語言來編寫自動擷取與控制軟體，自動化監測儀器具有 16 頻道，設定每五分鐘記錄一筆數據，並可透過網路連線即時知道水位與位移的變化。

圖 4.71 為本團隊於壩體上佈設連結 LL1 孔、LL3 孔與機房光纜施工圖，圖 4.72 為本團隊於右山脊邊坡佈設 W3 孔與機房光纜施工圖，圖 4.73 為佈設光纜由既有之管道間進入水庫管理局施工圖，圖 4.74 為機房現場自動化儀器安裝完成後之實體圖。圖 4.75 為 FBG 水壓計自動化監測系統之監測畫面，可顯示即時水位高程、八小時的水位歷時曲線與水位孔鑽位置與高程示意圖，圖 4.76 為 FBG 水壓計自動化監測系統之設定畫面，其中包含可監測用之 16 頻道、存取頻率設定、FBG 波形顯示與 FBG 讀取數據。圖 4.77 為 FBG 測傾儀自動化監測畫面。



圖 4.71 壩體光纜佈設施工圖

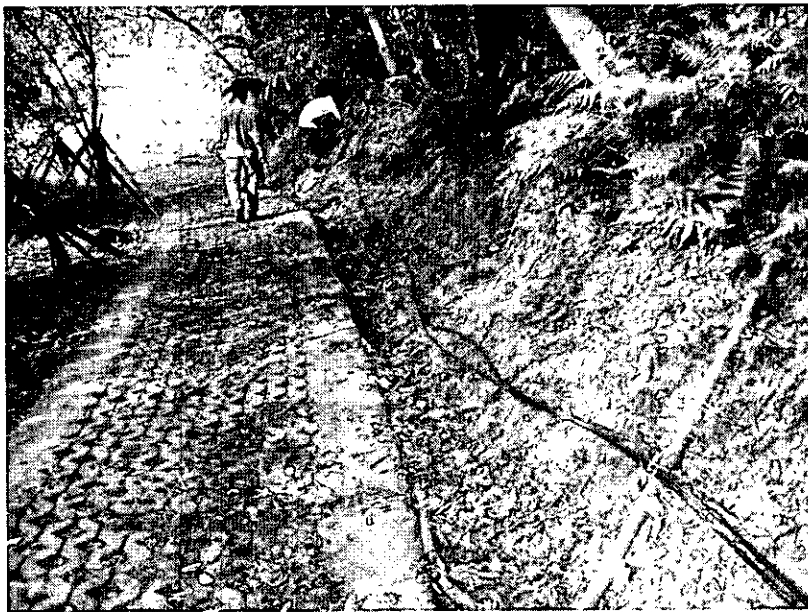


圖 4.72 右山脊光纜佈設施工圖

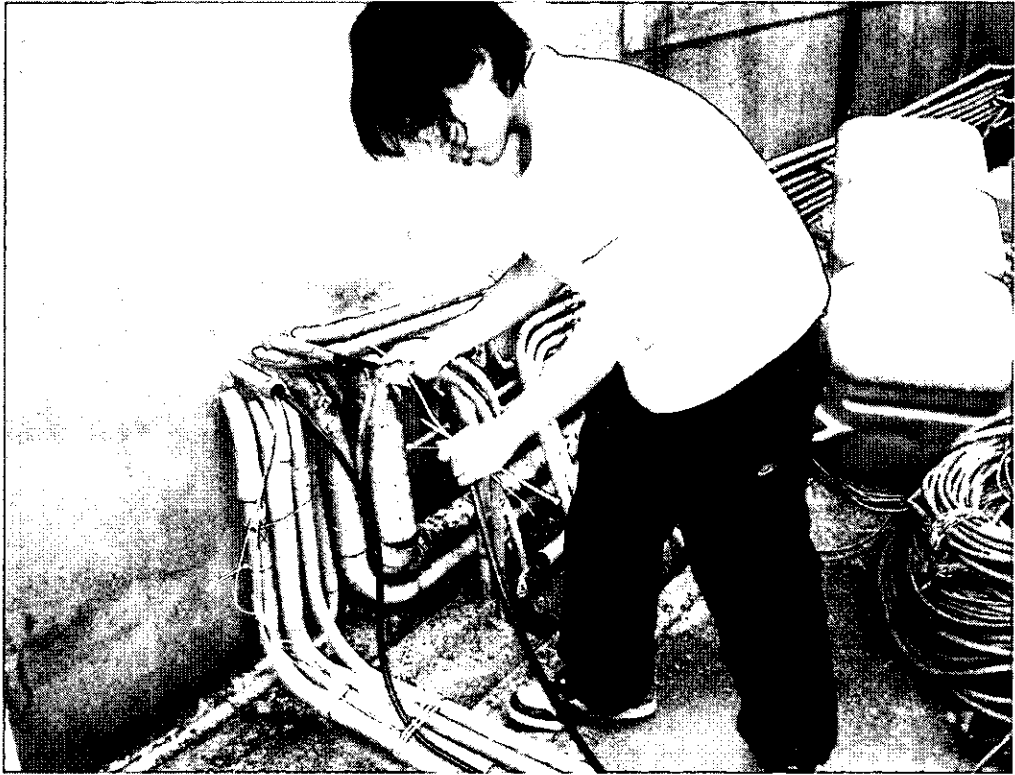


圖 4.73 管理中心光纜佈設施工圖

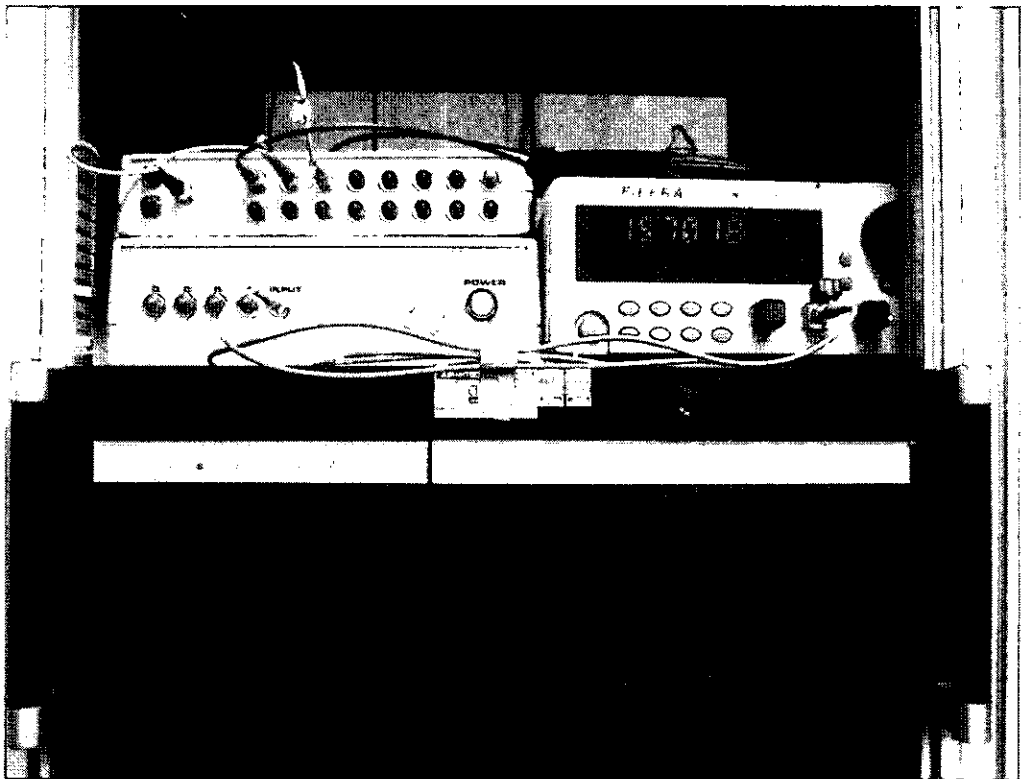
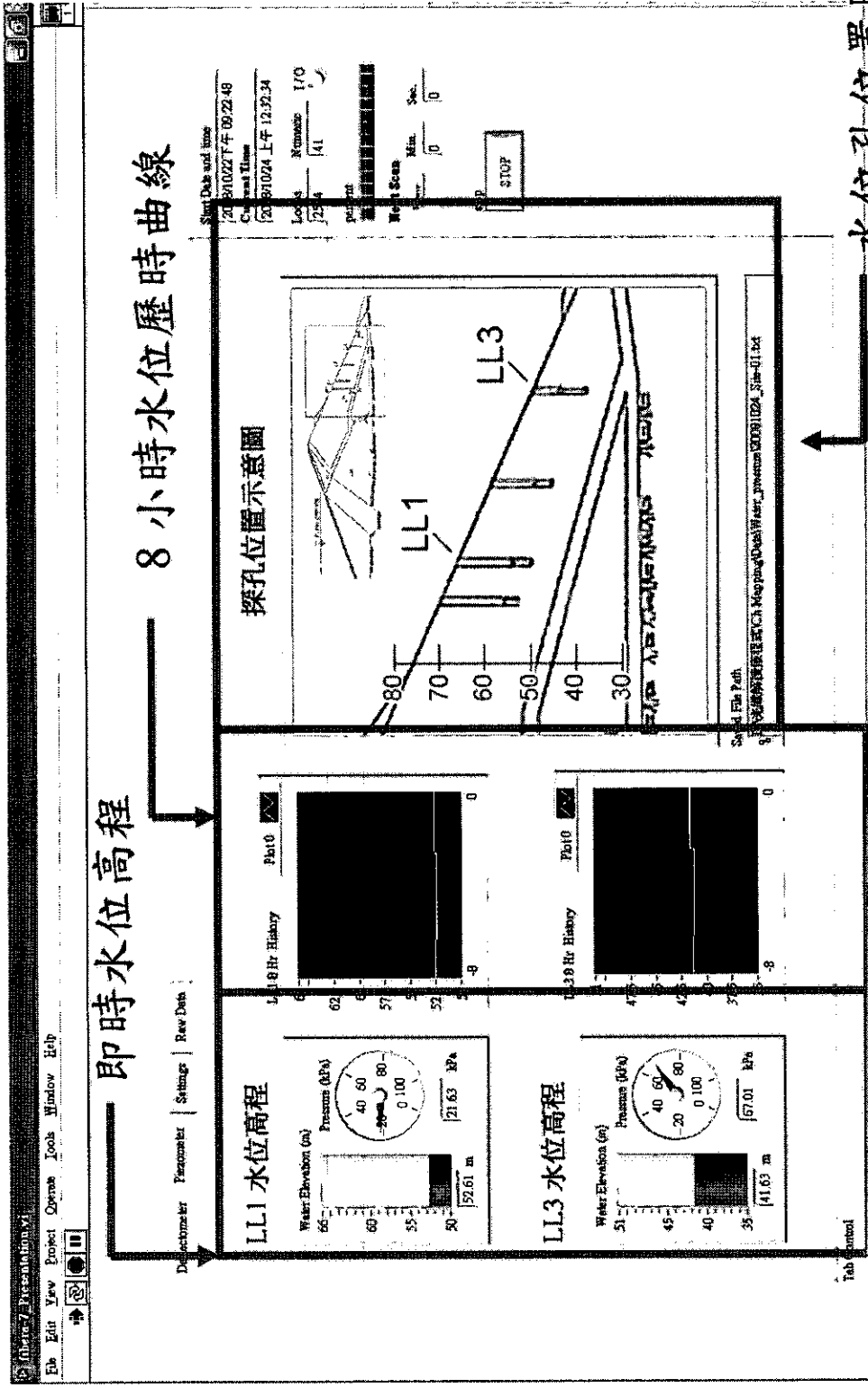


圖 4.74 FBG 自動化量測儀器安裝完成圖



水位孔位置圖

圖 4.75 FBG 水壓計自動化監測系統監測畫面

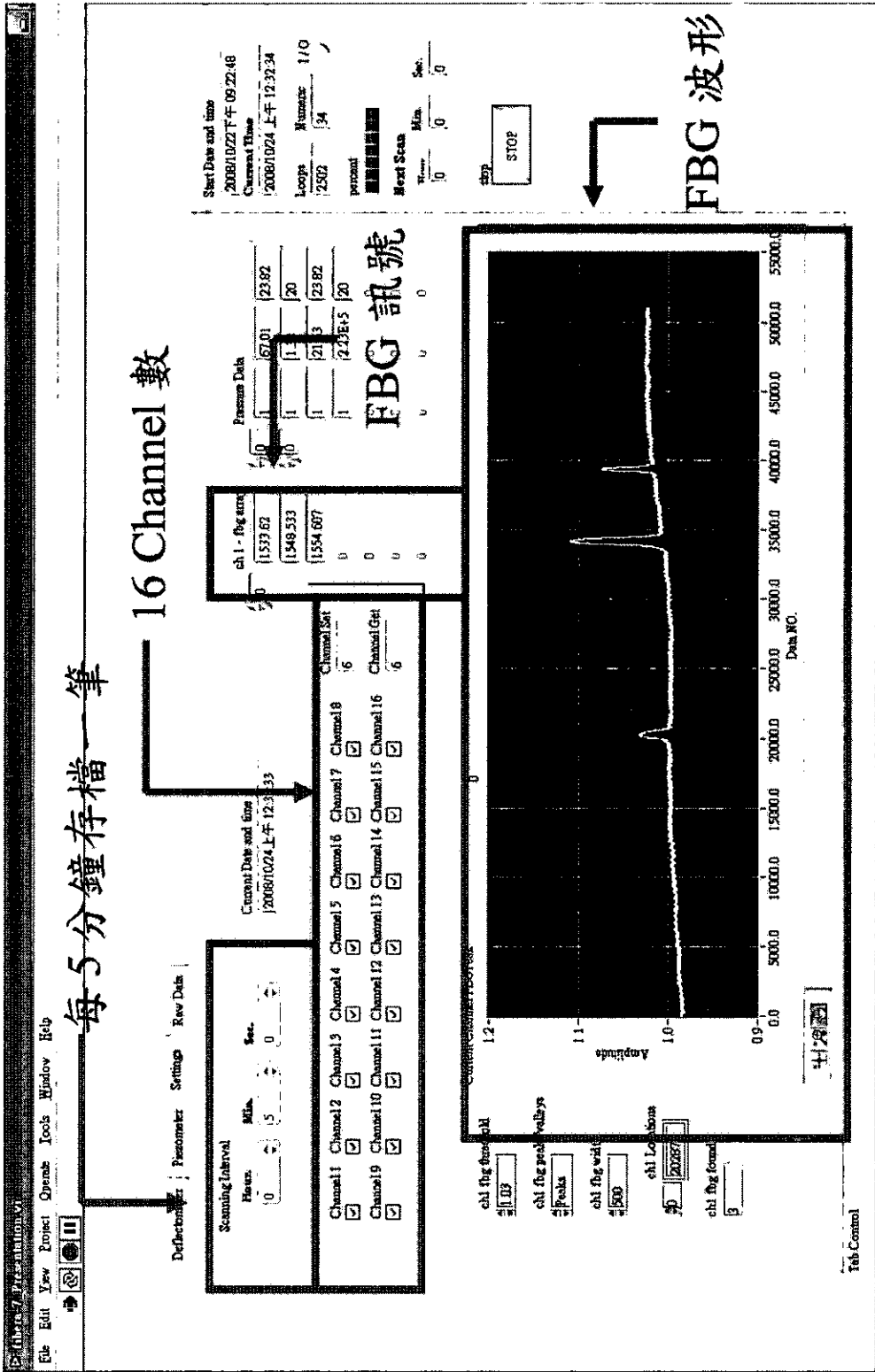


圖 4.76 FBG 水壓計自動化監測系統設定畫面

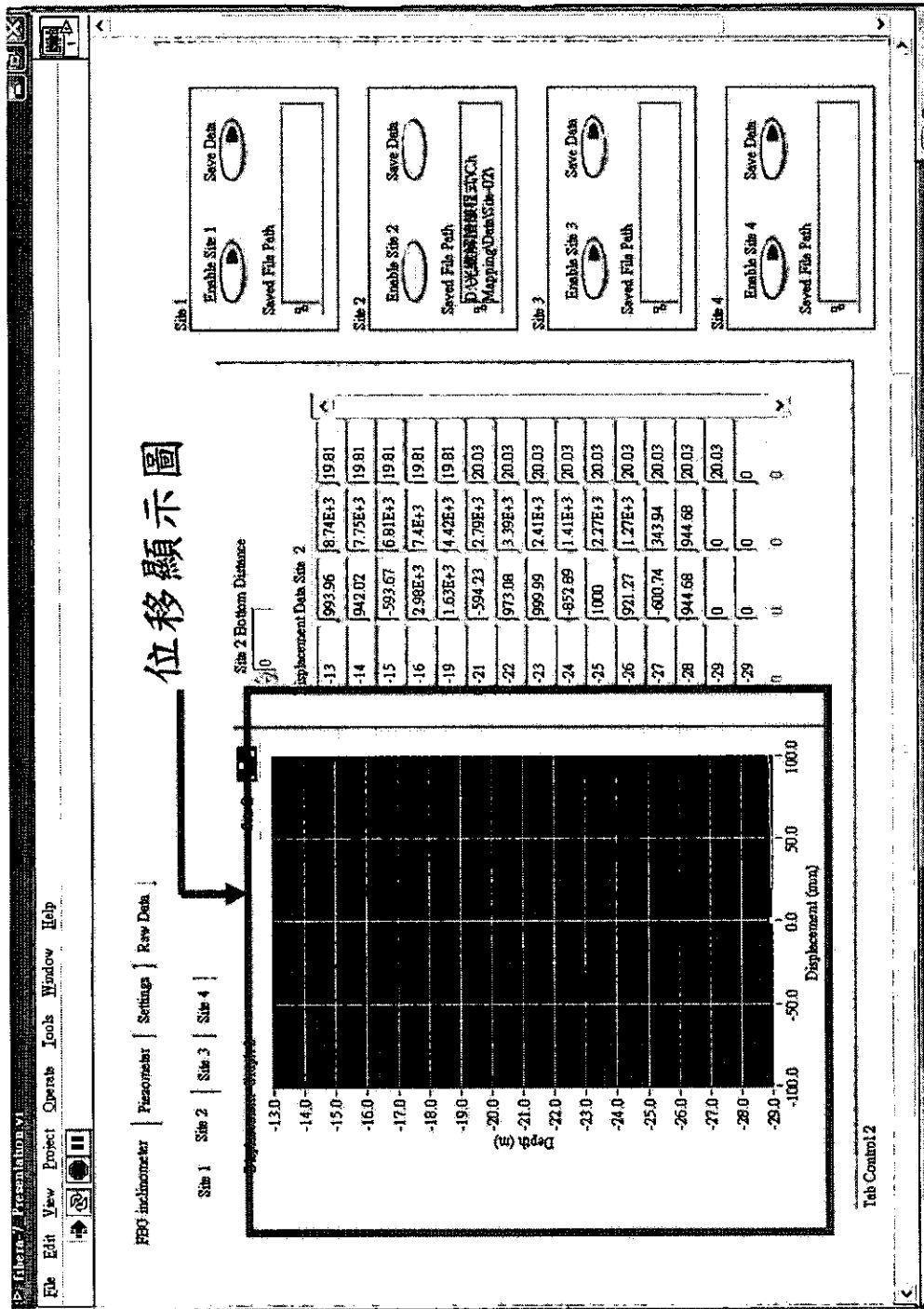


圖 4.77 FBG 測傾儀自動化監測系統監測畫面



#### 4.4.6 新山水庫右山脊 TDR 錯動變形監測安裝

本團隊於 97 年 6 月 20 日開始進行鑽孔(圖 4.78)，共進行 5 個工作天完成安裝作業。新鑽孔 T-1 深 27 公尺，鑽孔過程中全程取樣，待鑽孔完成後，於 TDR 安裝前進行孔內攝影(圖 4.79)施作，獲得地層之層面資料以充份發揮此孔之用處。

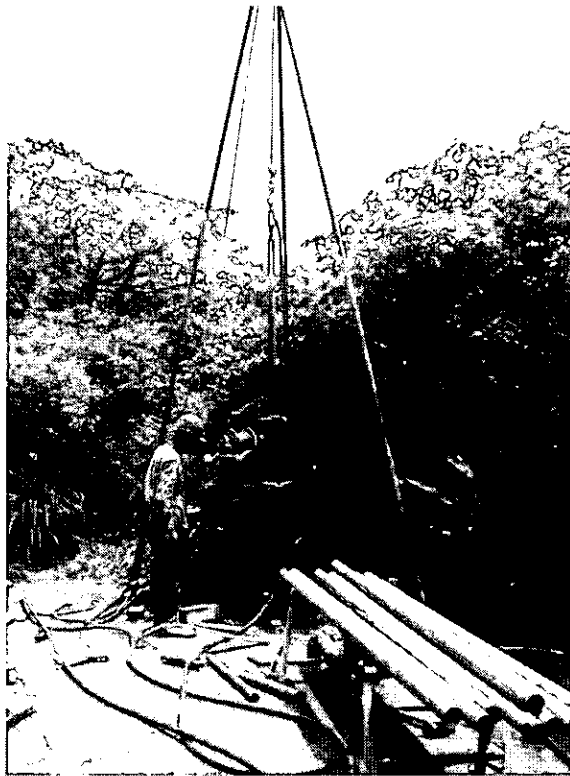


圖 4.78 新山水庫右山脊鑽孔作業

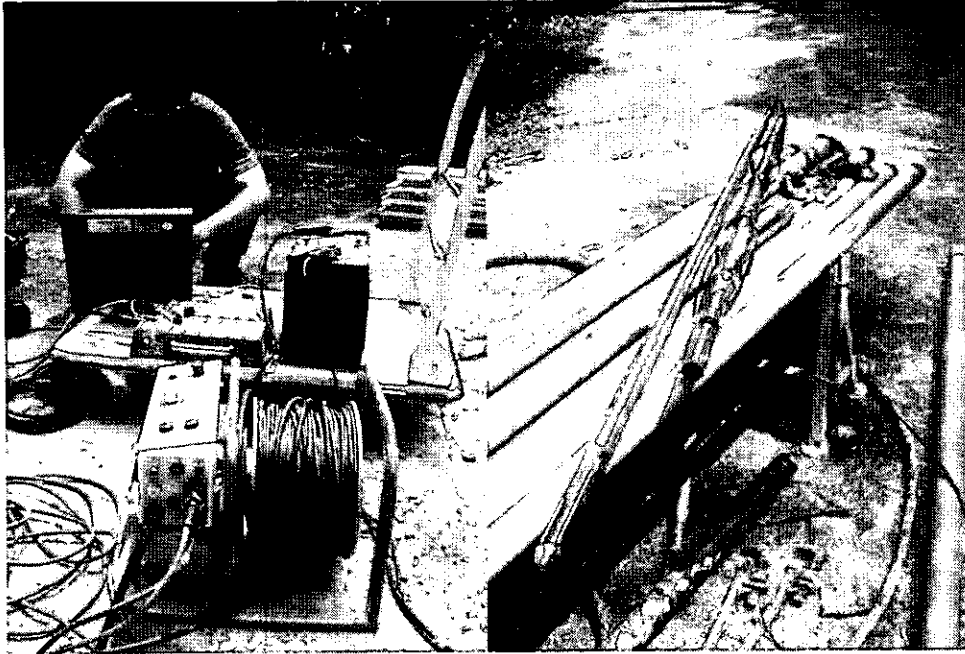


圖 4.79 T-1 孔內攝影施作

在 TDR 錯動變形監測安裝上，綜合前期之研究成果，考量現場土層狀態，為能更早偵測得地層滑動，採用 RG-8 型纜線，並於纜線最末端進行防水的處理，以免纜線內部進水影響資料分析。預計在此使用之監測儀器為 TDR100，其深度量測解析度可達 3.91 公分。於現場進行 TDR 錯動變形監測系統安裝之流程說明如下：

首先於試驗室準備 RG-8 型纜線，並於纜線末端防水處理並掛一約 5 公斤重物(圖 4.80)，待現場鑽孔完畢後，將纜線放置於孔內，並置入灌漿兼固定纜線用之 PVC 管(圖 4.81)。準備完成後開始調配水泥漿，採用水灰比為 1:1(圖 4.82)，將拌勻後之水泥漿自 PVC 管灌入孔內(圖 4.83)，以確保孔內水完全被水泥漿擠出(為方便灌漿可在 PVC 管口加裝一漏斗)，持續灌漿直至流出之液體為水泥漿液(圖 4.84)，完成第一次灌漿；第一次灌漿完畢後，便可將套管拔起(圖 4.85)，但在拔起前，為防止纜線會在拔起過程中掉入孔內，因此需將其與孔內之 PVC 管固定(圖 4.86)，待起出套管後再將 PVC 管拆除。靜候漿液初凝完成後，進行二次灌漿並安裝纜線保護蓋(圖 4.87)，

待二次灌漿完成後，便可進行第一次資料量測，建立 TDR 錯動變形資料初始值。

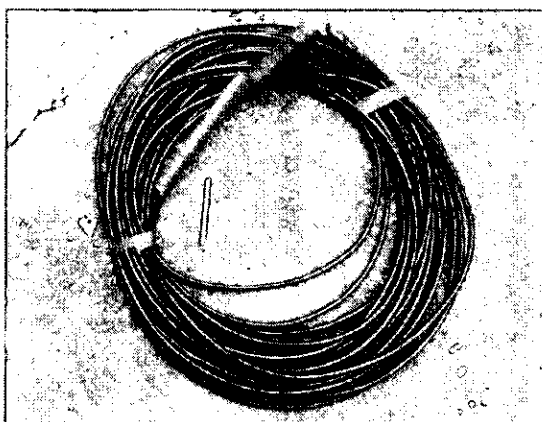


圖 4.80 安裝用 RG-8 型纜線（尾端紅色膠帶處為加掛重物後防水用）

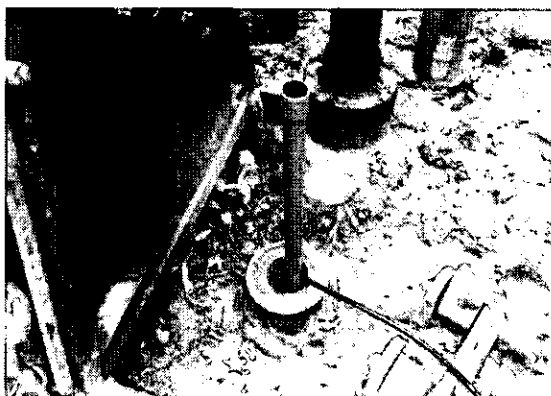


圖 4.81 纜線置入孔內並置入排水兼固定纜線用之 PVC 管

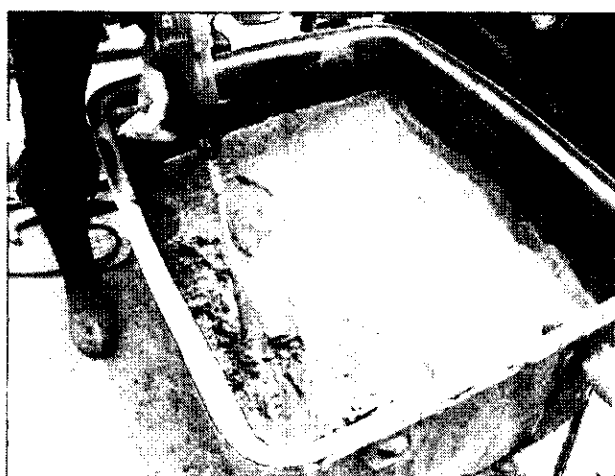


圖 4.82 採用 1:1 水灰比之水泥漿液灌漿回填



圖 4.83 自 PVC 管中灌入水泥漿

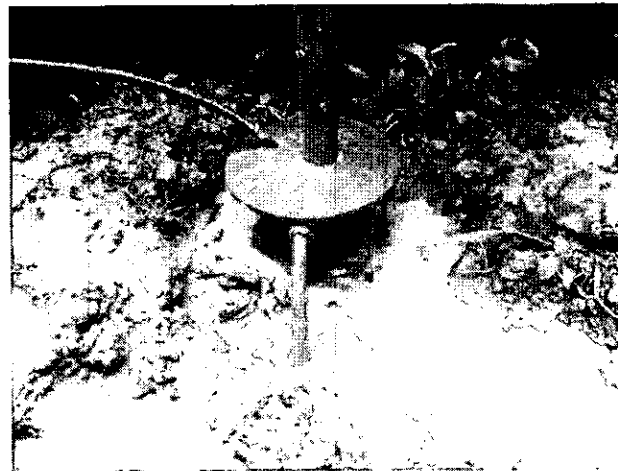


圖 4.84 持續灌漿至流出水泥漿液



圖 4.85 起出套管

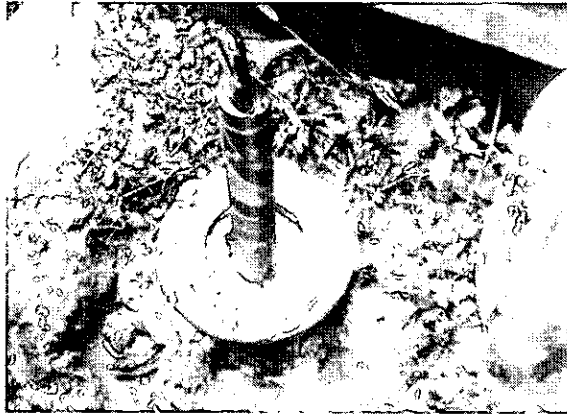


圖 4.86 將纜線固定於 PVC 管上

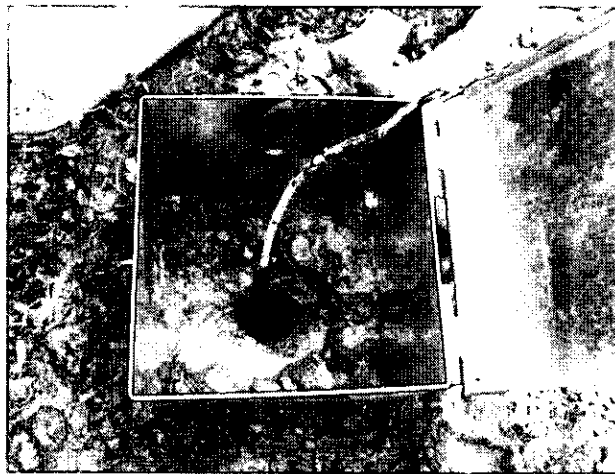


圖 4.87 二次灌漿並安裝保護盒

#### 4.4.7 新山水庫右山脊 TDR 錯動變形監測成果

鑽探結果（詳見附錄四）顯示，地表下 0-1.3 公尺為回填砂土，1.3-5.6 公尺為黃棕色黏土夾岩塊，5.6-17 公尺為灰色頁岩夾砂岩，17-27 公尺為白灰色砂岩。孔內攝影（如圖 4.88，詳見附錄五）自地表下 6.3 公尺施作至 24.7 公尺，共計 18.4 公尺。初步節理統計結果（未區分層面，如圖 4.89 所示）顯示，該處節理傾向/傾角可以以 N166/12 以及 N210/63 做代表。

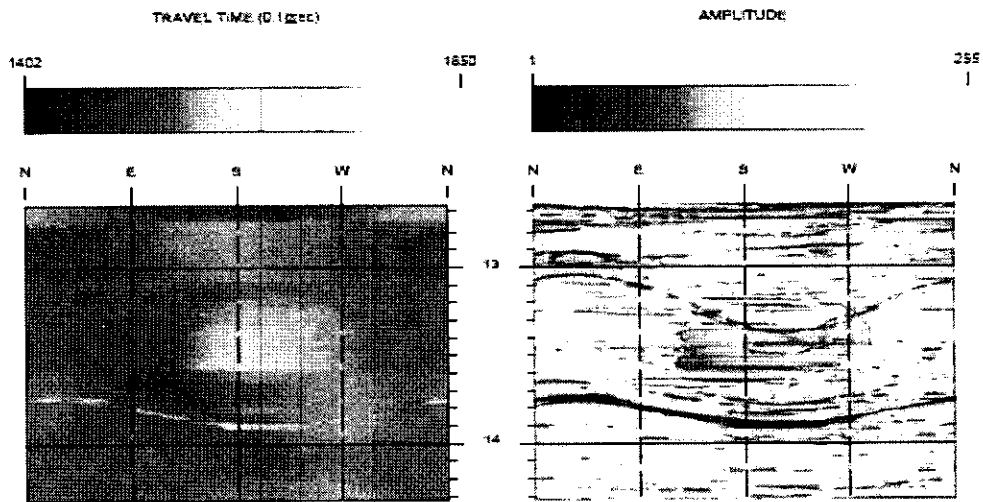


圖 4.88 孔內攝影影像（部份）

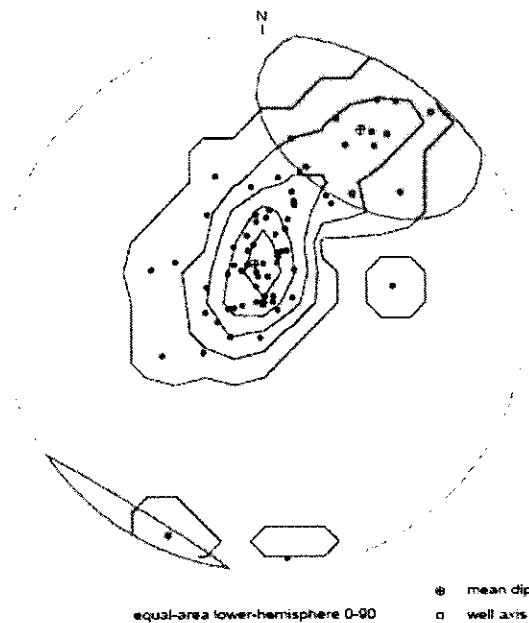


圖 4.89 孔內攝影節理統計

TDR 監測之結果如圖 4.90，自 6 月 25 日至 10 月 24 日共有 5 筆觀測資

料，圖 4.90 上圖為原始波型，第二次灌漿後於 6 月 25 日所量得的初始值整體訊號顯示監測段於安裝過程中並無受損且訊號良好。原始波形中，因有雜訊伴隨出現，在整個監測段中，並沒有觀查到明顯之剪動訊號(圖 4.26、圖 4.27 所示)產生，然而，如圖 4.90 下圖所示，在將原始資料進行移動平均(10 點)後，計算其與初始資料之差值，以 10 月 24 日之差值的三個標準差為雜訊等級，可發現在約 4.2 公尺深的位置有錯動變形發生，該深度約是為夾岩塊之黃棕色黏土與夾砂岩之灰色頁岩的層面位置，所得之反射係數差值為 0.005。根據本期計畫所得之結果採用式(4.4)，可估計該處之剪動量約為 15.9 公釐。

為驗證 TDR 之結果，採用人工量測 TDR 附近之 IS-6 傾斜管進行比對。IS-6 傾斜管之觀測量測結果如圖 4.91 所示，該處地表高程較 TDR 低約 2 公尺，量測之 A 方向為下邊坡方向，向西。由觀測結果來看，自 7 月 17 日開始，至 10 月 24 日止，此處在 A 方向地表發生有約 15 公釐之位移，主要滑動面在地表下約 3 公尺處。將其與 T-1 所得之岩心進行比對，該深度約是為夾岩塊之黃棕色黏土與夾砂岩之灰色頁岩的層面位置。

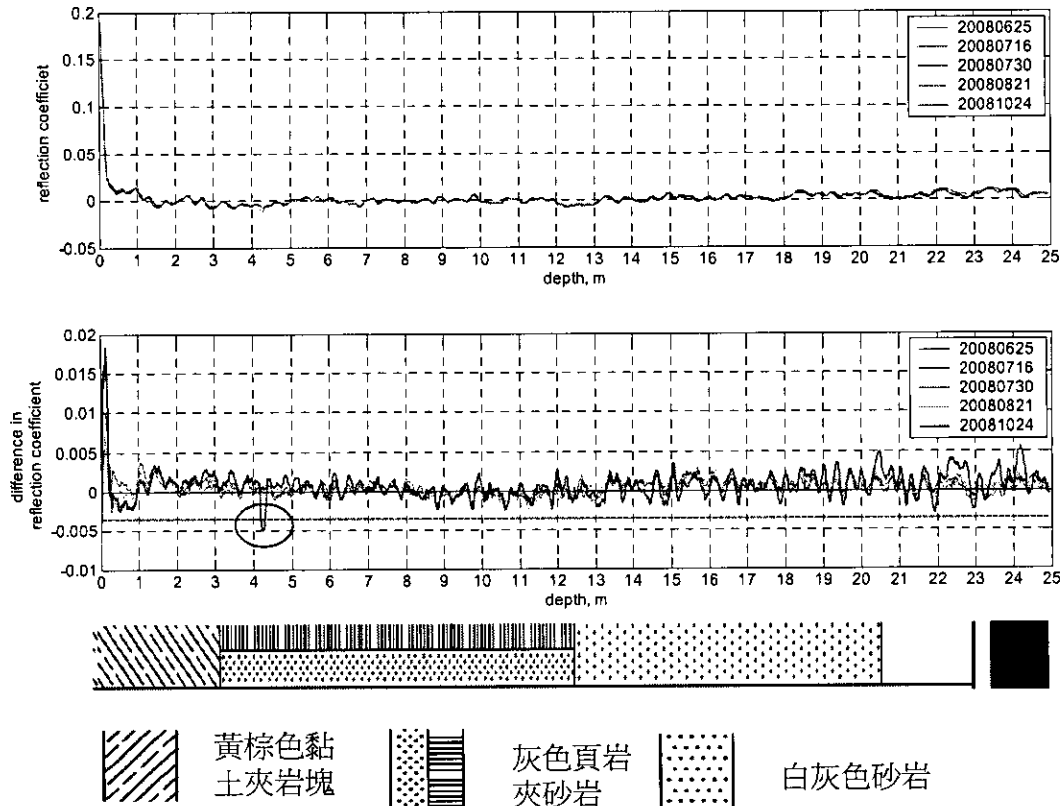


圖 4.90 新山水庫 TDR 監測資料

將此傾斜管觀測結果與 TDR 錯動變形監測結果比對可由兩方面進行，一是剪動之位置，另一是剪動量。就剪動之位置而言，兩者所反應出之剪動位置皆接近在夾岩塊黃棕色黏土與夾砂岩灰色頁岩之界面處，相去不大。而在剪動量上，由於 TDR 錯動變型僅量測剪動面附近之錯動變形量，因此，在比對上，需比對傾斜管在地下 3 公尺位置之局部錯動量，由 10 月 24 日之測傾管結果可知，該深度所發生之錯動位移量約 13 公釐，較 TDR 所估計之值(15.9 公釐)為小。傾斜管之量測基礎在於土體對傾斜管所造成之變形，由於傾斜管本身具有勁度，因此，其所得位移勢必較實際位移為小，有所低估，但其低估之量在此無法估計。另一方面於 TDR 之結果，目前是採用室內試驗標定之結果進行比對，由於現場周圍束制與土壤材料和室內標定所採用者不同，會有一定的誤差產生，目前尚無法估計此誤差之可能大小，如何將室內標定結果適當調整以提供現場資料使用，將是另一課題。



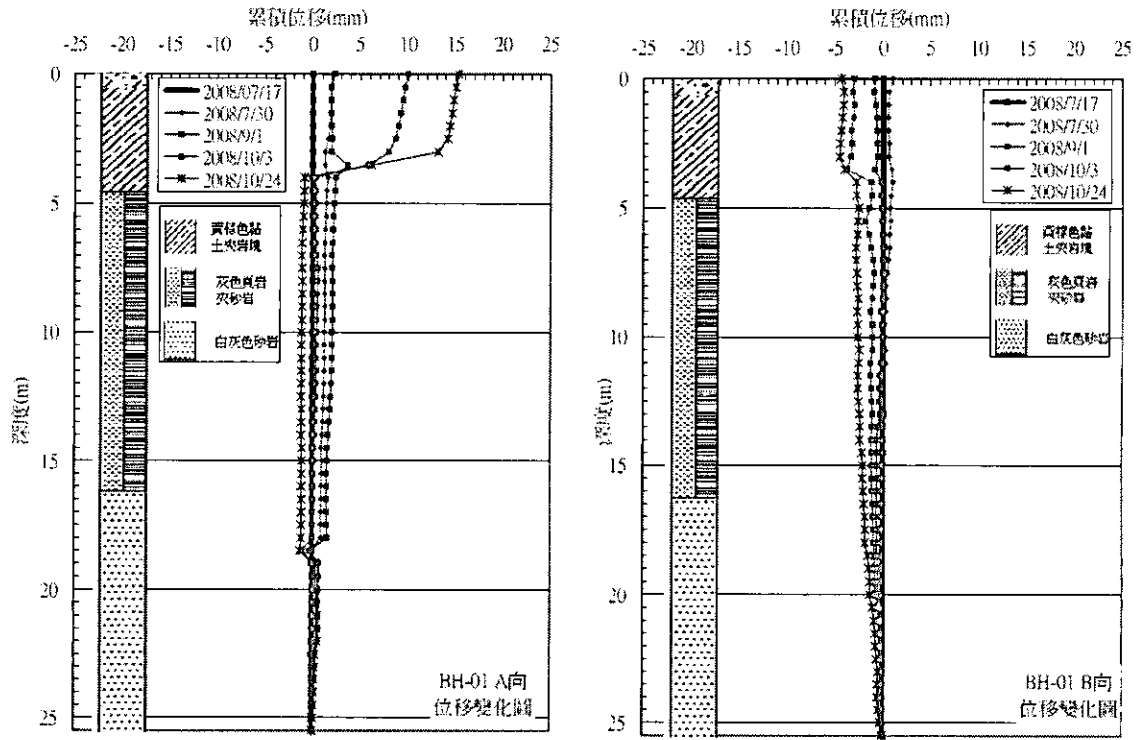


圖 4.91 IS-6 傾斜管觀測結果

## 五、研訂水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊（初稿）

### 5.1 相關非破壞性檢測技術導引手冊之比較

非破壞性檢測技術已廣泛應用於工程問題之解決上，大量的學術教學用書籍（Telford et al., 1990; Reynolds, 1997; Sharma, 1997 等）問世，藉以培養更多非破壞性檢測技術人員以因應工程界之需求。然而，對於管理人員而言，了解各非破壞性檢測技術之特性以及如何為欲解決之工程問題選用適當非破壞性檢測技術遠較了解其分析過程更為重要。

各國在此一議題上，針對不同工程領域已開始投入建立導引手冊的工作，本團隊收集到三本手冊，一為美國聯邦高速公路部門（Federal Highway Administration, 2003）針對非破壞性檢測法於高速公路相關問題之應用所做之手冊；一為美國 ASTM 在其標準試驗手冊 D6429-99 一篇中對選用各非破壞性檢測法所提出的導引；另一為日本地球探勘物理學家協會（The Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2004）針對非破壞性檢測法於工程以及環工問題之應用所做之手冊。本小節將對已收集到的手冊進行內容規劃比較。

#### 5.1.1 美國聯邦高速公路部門手冊

在美國聯邦高速公路部門所撰寫之手冊(2003)中，其將手冊內容分做三部份，第一部份僅有一章是為總論，簡單說明此手冊之用途與內容規劃；第二部份是以問題為導向，將高速公路相關之問題分為橋梁地下結構問題、橋樑主結構問題、鋪面問題、道路沉陷問題、地質調查問題以及振動問題等六種，而後針對各種問題提出適用之非破壞性檢測方法，在所提之方法之下有簡單的方法介紹；而第三部份是以非破壞性檢測方法為導向，介紹非破壞性檢測方法所獲得之物理量，而後依其為地表施測或孔內施測

再分別進行各非破壞性方法的介紹，介紹中包括有方法的概念與原理、施測法以及優缺點。

### 5.1.2 美國 ASTM 標準試驗手冊

在制訂標準方法或建議準則手冊，以美國 ASTM 最具代表性，其在 D6429-99 一篇中提供選擇非破壞性檢測法的導引。此導引可分做兩大部份，一部份是做為總論，在此總論中論述整個非破壞性檢測法的特性，包括其使用時機、試驗特性以及應用領域，並依不同的方法與不同問題建立應用的評分建議表，以做為選用之用。而第二部份是簡單介紹各個非破壞性檢測方法，包括有簡介、應用、探測深度、試驗特性、解析能力、限制以及進階閱讀參考。

### 5.1.3 日本地球探勘物理學家協會手冊

由日本地球探勘物理學家協會所編撰的手冊(2004)是以非破壞性檢測方法為導向，分章對每種方法進行介紹，並無一總提非破壞性檢測法應用選擇之總論章節。但值得一提的是，其在各章對於各非破壞性檢測方法的介紹中，包含了有概念、應用、測線規劃、現場施測、資料分析、結果判釋以及報告內容。

上述三種手冊之內容規劃各有其優缺點，在本研究欲研訂水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊，以便利水庫管理者使用之前提下，美國聯邦高速公路部門以問題為導向的章節安排是不錯的概念，但在各問題下分列可用之非破壞性檢測法則過於冗長，無法快速應用。在此點上，ASTM 以表評分的方式將問題與可用之非破壞性檢測法結合之概念，可提供快速的選用之用。但 ASTM 在各破壞性檢測法的介紹上用太過於簡短，並且無法讓管理者了解該如何與技術人員進行測線佈設之討論，並要求其提供所須之

報告內容，在此點上，日本地球探勘物理學家協會對各非破壞性檢測方法的內容介紹可以補足。參考上述三本手冊之內容規劃，將於下兩節中提出本團隊所規劃之非破壞性檢測技術的適用性評估方法與手冊內容。

## 5.2 水庫非破壞性檢測技術之適用性評估方法

在 96 年度計畫中，本團隊已完成依不同問題與壩體條件選用適當檢測技術的評估方法。本適用性評估方法的建立是以當水庫管理者發現特定潛在破壞模式之某些徵兆時，依水壩本身條件參照所提之方法即可選定檢驗方法進行檢測。如圖 5.1 所示，本適用性評估法以三個步驟兩階段的方式進行非破壞性方法選用。所謂三個步驟兩階段是說，1.當水庫管理單位對於壩體有發生某一破壞模式之疑慮，且認為需進行非破壞性檢測協助判斷與確認時，透過 2.查表方式將破壞模式與可相對應使用之檢測法挑選出，完成第一階段；而後將第一階段中所得到的各個適用檢測法，3.考量檢測法之特性與壩體條件採用一至多個符合之方法進行，完成第二階段之選用。

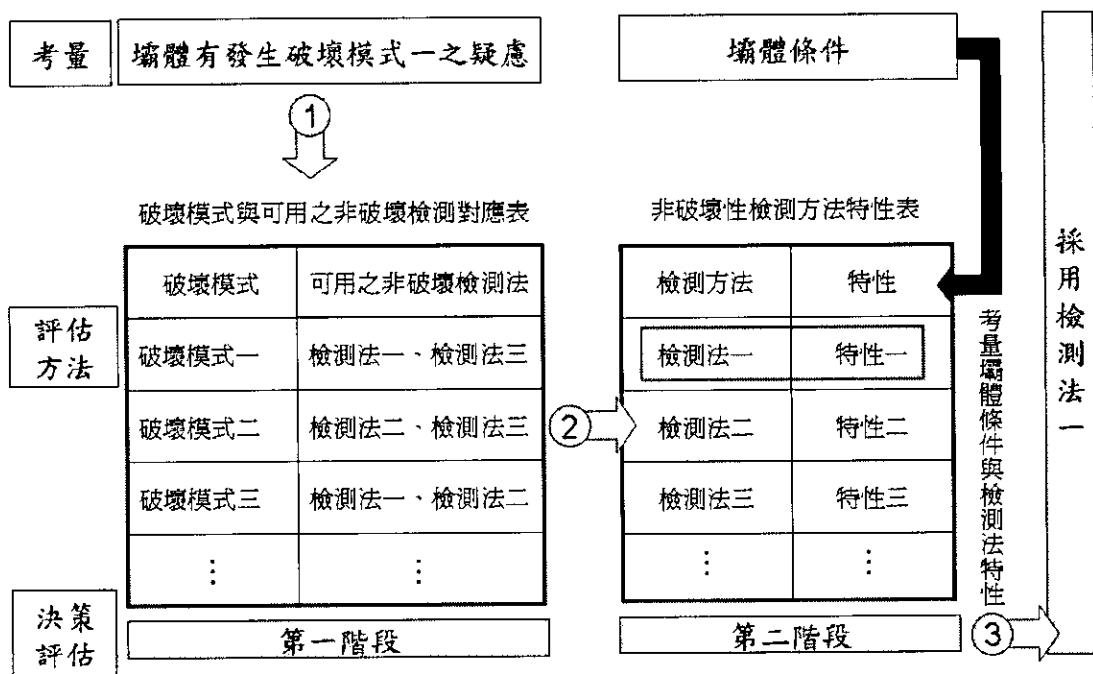


圖 5.1 非破壞性檢測技術之適用性評估方法流程圖

採用本評估法如於圖 5.1 所示之流程時，需要有破壞模式與可用之非破壞檢測方法對應表以及非破壞檢測方法特性表，已於 95 及 96 年度完成表格之建立，整理如下：

於 95 年計畫中，以壩體非破壞性檢測可行方法應具有之六項重點特性：1.實驗方法為非破壞性、2.檢測深度具穿透性、3.檢測體積具代表性、4.所測的物理量具應用性、5.檢測點具可重複性、6.施作過程具簡易性，做為考量，在考量壩體尺度與檢測效益後，擇選出五種非破壞性檢測方法：折射震測、表面波震測、透地雷達、電阻探測以及自然電位法。各方法皆有其較適合之應用情況，綜合整理如表 5.1 所示。

表 5.1 非破壞檢測方法特性表

| 檢測方法  | 較佳適用條件                                      | 較不適用條件   |
|-------|---|--|
| 折射震測  | 對飽和土壤及土壤與岩盤介面探測甚佳，可估計材料波速。                  | 無法探測軟弱夾層及厚層中央帶薄層材料；可偵測孔洞存在，但無法直接測繪。                  |
| 表面波震測 | 適合較無側向變化的地層剪力波速度量測。                         | 深層解析度差；無法探測地下水位；可探測孔洞，但無法直接測繪。                       |
| 透地雷達  | 施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，適用於複雜構造，如混凝土、鋪面、及地下孔洞探測。 | 探測深度受導電環境（如黏土礦物）影響甚鉅，一般探測深度不足 10 公尺；不易估計電磁波速以得到構造深度。 |
| 電阻探測  | 於高電阻環境中亦能有效量測，可探測較大孔洞。                      | 於高導電性環境下效果不佳（尤其是表面），電極與地表需有良好的耦合；深層解析度差。             |
| 自然電位法 | 其施測作業迅速便利且利於調查地下水滲流狀況。                      | 其空間解析及辨識能力較差。  |

本研究於 96 年度使用 USCOLD 與 ASCE(1975, 1988)以及 ICOLD(1984)所收集之眾多破壞案例為資料庫，參照 ICOLD(1984)以混凝土壩及土石壩兩種壩體型態分別整理，在分類中以造成破壞之原因以及破壞模式為分類依據，歸納所得之混凝土壩主要潛在破壞模式有五種，而土石壩之主要潛在破壞模式有八種，並考量各破壞模式所能反應之特徵物理量與可量測該

特徵物理量之非破壞檢測法，整理得破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表，如表 5.2 所示。

表 5.2 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表

|      | 潛在破壞模式  | 可用之非破壞檢測法                 |
|------|---|---------------------------|
| 混凝土壩 | 1.因結構接縫型式配置不良、應力集中或壩體形狀及設置位置不當等因素造成混凝土結構行為不良所導致之壩體破壞。 | (監測)                      |
|      | 2.因混凝土材料衰壞、工程性質不足、澆置作業不當及結構接縫與防水作業處理不當造成之壩體本身滲漏或管湧。   | 折射震測、表面波震測、電阻法、自然電位法、透地雷達 |
|      | 3.因溢洪道上障礙或設計容量不當所導致之溢流造成之壩趾基礎侵蝕或壩座沖刷掏空。               | 表面波震測、電阻法、透地雷達            |
|      | 4.因透水層、可溶性夾層或岩層的不連續面所造成之基礎管湧或滲漏。                      | 電阻法、透地雷達、自然電位法            |
|      | 5.沿基礎軟弱不連續面之滑動。                                       | (監測)                      |
| 土石壩  | 1.因溢洪道上障礙、設計容量不當或沉陷所導致之溢流造成之土石壩體侵蝕。                   | (監測)                      |
|      | 2.因溢洪道破壞、輸水管線破壞變形造成之管湧或滲漏及基礎破壞造成之土石壩體侵蝕。              | 電阻法、自然電位法、透地雷達            |
|      | 3.沿出水導管、壩座界面、混凝土接觸面滲漏或管湧；壩體本身集中式管湧。                   | 電阻法、自然電位法、透地雷達            |
|      | 4.因透水層、可溶性夾層或岩層的不連續面所造成之基礎管湧或滲漏。                      | 電阻法、自然電位法、透地雷達            |
|      | 5.因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動。                              | (監測)                      |
|      | 6.沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動。                                   | 無                         |
|      | 7.差異沉陷造成之裂縫。  | 表面波震測                     |
|      | 8.土壤液化。   | 表面波震測                     |

### 5.3 水庫非破壞性檢測技術導引手冊（初稿）內容結構與綱要

在制訂標準方法或建議準則手冊，以 ASTM 最具代表性，在此，本計畫參考國際使用經驗及已建立之 ASTM 準則（詳見 5.1 節），提出非破壞性檢測技術之適用性評估方法手冊（初稿），盼以能便利管理者進行決策並有效掌握所需之技術資訊。

## 架構

在非破壞性檢測技術方法手冊雛形的架構上，規劃共有六章，第一章做為總論，另五章做為對五種非破壞性檢測技術的詳細介紹與說明。三個步驟二個階段的選用流程將在第一章中進行，由此所選用得到的一種或多種非破壞性檢測法將可由後續的五章中得到進一步詳細的說明與資訊。為能更加便利使用，將會製作一快速選用表，僅提供如圖 5.1 的圖表。

## 大綱與內容

在大綱與內容上，於上述之架構之下，第一章將分為三節，首先介紹非破壞性檢測法的整體情形與整體的使用概念與限制。次而提供做為選用流程用的表格，最後分別概要介紹五種非破壞性檢測技術，在此僅提供此些技術的簡介、應用、探測深度、試驗特性、解析能力、限制以及可進階閱讀參考等七種基本資料。

另外的五章將分別介紹折射震測法、表面波震測法、電阻探測法、自然電位法以及透地雷達五種方法。每章將會詳細說明各非破壞性檢測技術的應用範圍、原理、施測方法、分析方法、資料分析判釋需知、報告書內容、可能的誤差以及限制。又考量本手冊主要是提供給管理者管理決策使用，因此在原理與分析的部份將主要以概念的方式陳述，而實際的細節將以提供文獻的方式予以另外找尋參考。

在此架構與大綱內容下所規劃的非破壞性檢測技術之導引手冊實體請參考附錄六，其為手冊初稿，目前已全數完成。本計畫所涵蓋的五種非破壞性檢測技術目前都還在持續發展，因此所提供的資訊是以目前國際上以及業界中普遍使用的方法為陳述內容，此些資料是以做為準則為目標而非標準程序，特在此說明。

## 六、壩體震後安全診斷系統研究

本研究主要利用地震儀所記錄之壩體振動反應進行系統識別分析，俾便瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情況。本研究於 95 年度已針對翡翠水庫拱壩利用 ARX(auto-regression with exogenous inputs)單一輸入(壩底)單一輸出(壩頂)或單一輸入多重輸出模式識別混凝土拱壩於過去幾年地震發生時之主要振動頻率(或阻尼比)，其分析結果初步驗證系統識別模式可應用於拱壩結構之安全診斷。96 年度則探討系統識別應用於台電大甲溪發電廠谷關壩及天輪壩重力壩安全診斷之可行性。由於兩壩體僅於壩頂安裝地震儀，其壩底並無安裝地震儀，因此本研究採用無輸入擾動之 AR 模式進行系統識別分析。根據分析結果顯示，由於谷關壩為一拱壩，其頻譜有較顯著(或單一)之峰值出現，而天輪壩為一重力壩，不同塊體間可能有近似各自獨立振動之行為且各塊體間亦可能有互制效應存在，因此振動頻率較為多元，使得頻譜峰值呈現分佈於某一頻寬之現象(5Hz~20Hz)，無顯著單一峰值出現。本年度將根據牡丹水庫及鯉魚潭水庫管理單位所提供之地震儀加速度訊號進行系統識別分析，以探討系統識別分析應用於土石壩安全診斷之可行性。



## 6.1 土石壩結構受震之系統識別分析

由於數位記錄與電子科技之迅速發展，在建築結構上裝設感應器監測其動態反應已非難事。利用系統識別(System Identification)的技術可由量測到的結構反應推算結構的動力特性(頻率、阻尼比及振態)或其數學模式之結構參數(質量、阻尼及勁度矩陣)。其實，地震發生的過程已提供吾人最佳之結構動力試驗，若能由蒐集到之監測訊號進行識別，其結果將最為直接、真實，且毋須於事後進行額外之試驗，可減少人力、資源的浪費。

土石壩相對於均質的混凝土壩而言，可謂一複合材料結構，其組成包括土壤、礫石及混凝土等材料，因此其動態行為亦較混凝土壩體結構複雜。由於土石壩材料承受拉力的能力較差，因此壩體內部易產生拉力裂縫，且隨著時間的增長，滲漏將造成壩體內部的損傷。此外，當水位快速反覆變化時(如地震引致之液面波動)，壩體中之細料亦容易被侵蝕。另，在壩體建造過程及建造完成後，土壤壓密的過程仍持續進行，一方面雖增加了壩體的強度，然而另一方面若壓密造成壩體的變形不均勻，亦可能產生局部的變形或裂縫。上述的缺陷若存在，則地震發生時壩體將更容易產生無法預期的破壞。土石壩於大地震時常見的損壞包括開裂、不均勻沉陷、坡面滑動及滲漏等。

本研究將選擇壩底及壩體同時有安裝地震儀之土石壩進行系統識別分析，利用 ARX 單一輸入(壩底)單一輸出(壩頂)模式或多重輸入-多重輸出模式識別土石壩之主要振動頻率，同時確立 ARX 模型之階數及系統參數，可用來預測土石壩於某一地震加速度擾動下之動態反應。ARX 系統識別主要是建立輸入與輸出之數學模型，其中，輸入可視為地表擾動(即地震)加速度量測資料，而輸出則為壩體結構之動態反應加速度量測記錄，若壩體結構之地震儀數量夠多，則可採用多重輸入-多重輸出之識別模式，藉由豐富的動態反應記錄，可提高識別的精確性。離散時間系統的輸入-輸出模型可以線性差分方程表示如下：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) + e(k)$$

其中， $y(\cdot)$  代表系統之輸出(壩體之動態反應)， $a_i$ 's 為輸出訊號係數， $n_a$  為其維度； $u(\cdot)$  代表系統之輸入(地表擾動)， $b_i$ 's 為輸入訊號係數， $n_b$  為其維度， $e(k)$  為誤差值。

系統識別的過程即根據已知的地震記錄( $u$ )及壩體之動態反應記錄( $y$ )反求上述之系統參數  $a$  及  $b$ 。由於系統之動態特性(振動頻率與阻尼比)僅與系統參數  $a$  有關，因此吾人只要識別出系統參數便可知壩體之振動頻率等動力特性參數。本研究採用之識別方法為遞迴預測誤差法(Recursive Prediction Error Method, RPEM)，即根據每一瞬所更新之記錄資料，搜尋每一時刻之系統參數  $a$  及  $b$ ，直到地震結束。於初始識別時系統參數之變異性較大，惟隨著搜尋步幅的增加，系統參數亦逐漸趨於收斂(定值)，如圖 6.1 所示。

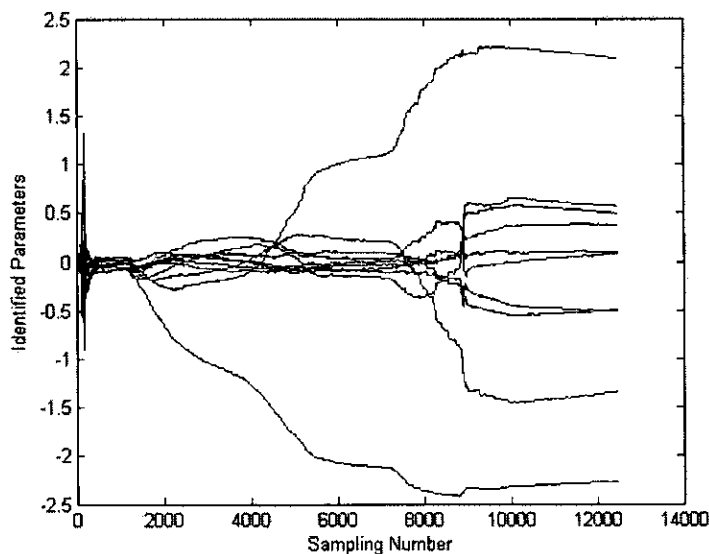


圖 6.1 系統參數之歷時圖

此外，若完成識別吾人亦可根據系統參數繪出傳遞函數圖(Transfer Function)，其峰值所對應之頻率即為系統(壩體)之振動頻率，如圖 6.2 所示。

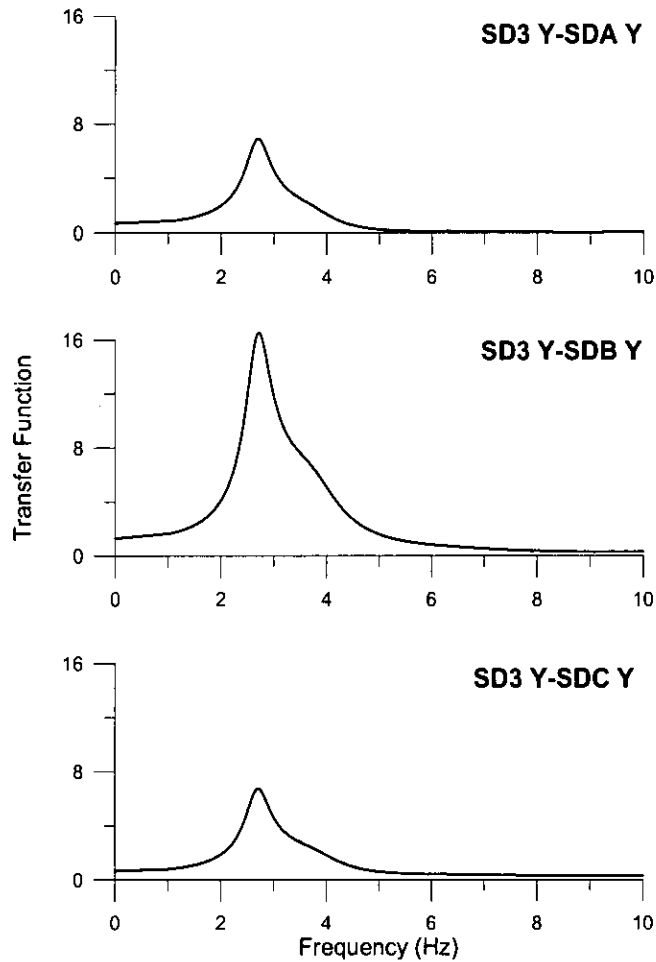


圖 6.2 傳遞函數圖

本研究將根據上述之分析模型識別土石壩過去幾年地震發生時之振動頻率，俾便瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情況及歷次地震分析結果之差異程度，以評估系統識別模式應用於土石壩安全診斷之可行性。本報告所分析之牡丹水庫(圖 6.3(a))其壩高為 65 公尺，壩長為 445.6 公尺，於壩底及壩頂分別設置一部地震儀；鯉魚潭水庫(圖 6.3(b))之壩高為 96 公尺，壩長為 235 公尺，於壩底及壩體共設置七部地震儀。

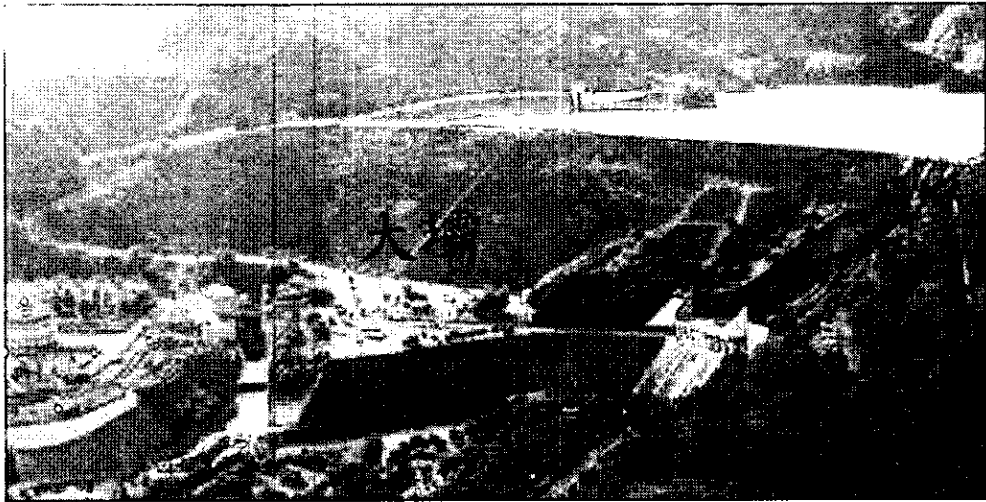


圖 6.3(a) 牡丹水庫

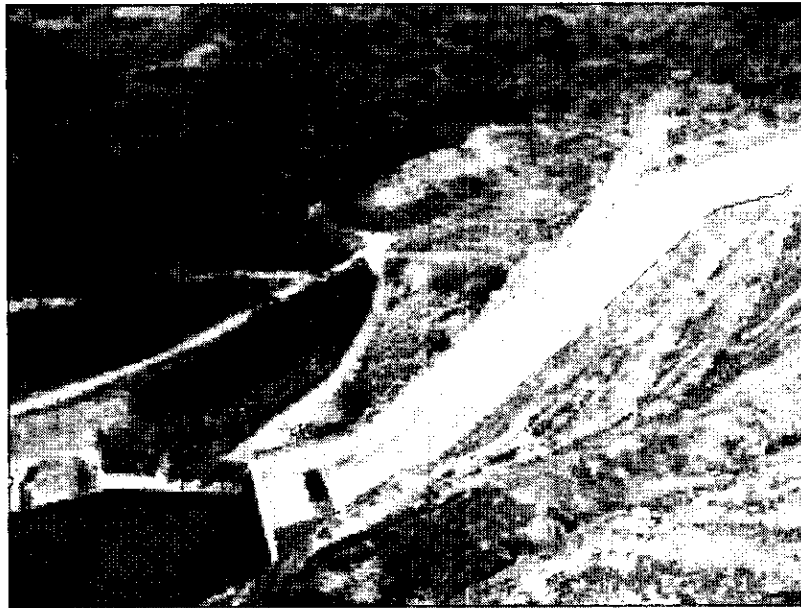


圖 6.3(b) 鯉魚潭水庫

### 6.1.1 分析流程步驟

本研究首先進行時域分析(time domain analysis)，其目的主要是瞭解地震強度的大小並繪製其加速度振動反應歷時圖，俾清楚呈現地震儀所記錄之振動訊號，將有助於初步檢視地震儀是否正常運作。圖 6.4 為地震儀之三軸向加速度反應歷時圖。

隨後進行頻域分析(frequency domain analysis)，其目的主要是瞭解時域振動訊號之頻率內涵(frequency content)，包括地表及結構(壩體)之振動頻率等特性。頻域分析主要是進行傅立葉轉換(Fourier Transform)，地震儀之三軸向加速度反應傅氏頻譜如圖 6.5 所示，其峰值所對應之頻率即為地表或壩體之主要振動頻率。本案將分別說明利用 MATLAB 及 Excel 進行頻譜分析之過程。

由於壩體振動加速度頻譜之峰值可能同時包含地表之振動頻率，因此最後可藉由系統識別之方法求得壩體之傳遞函數(圖 6.6)，以確認壩體實際之振動頻率。本年度將建立土石壩之系統識別分析模式，並識別土石壩過去幾年於地震發生時之振動頻率，俾便瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情況及歷次地震分析結果之差異程度，以評估系統識別模式應用於壩體安全診斷之可行性。

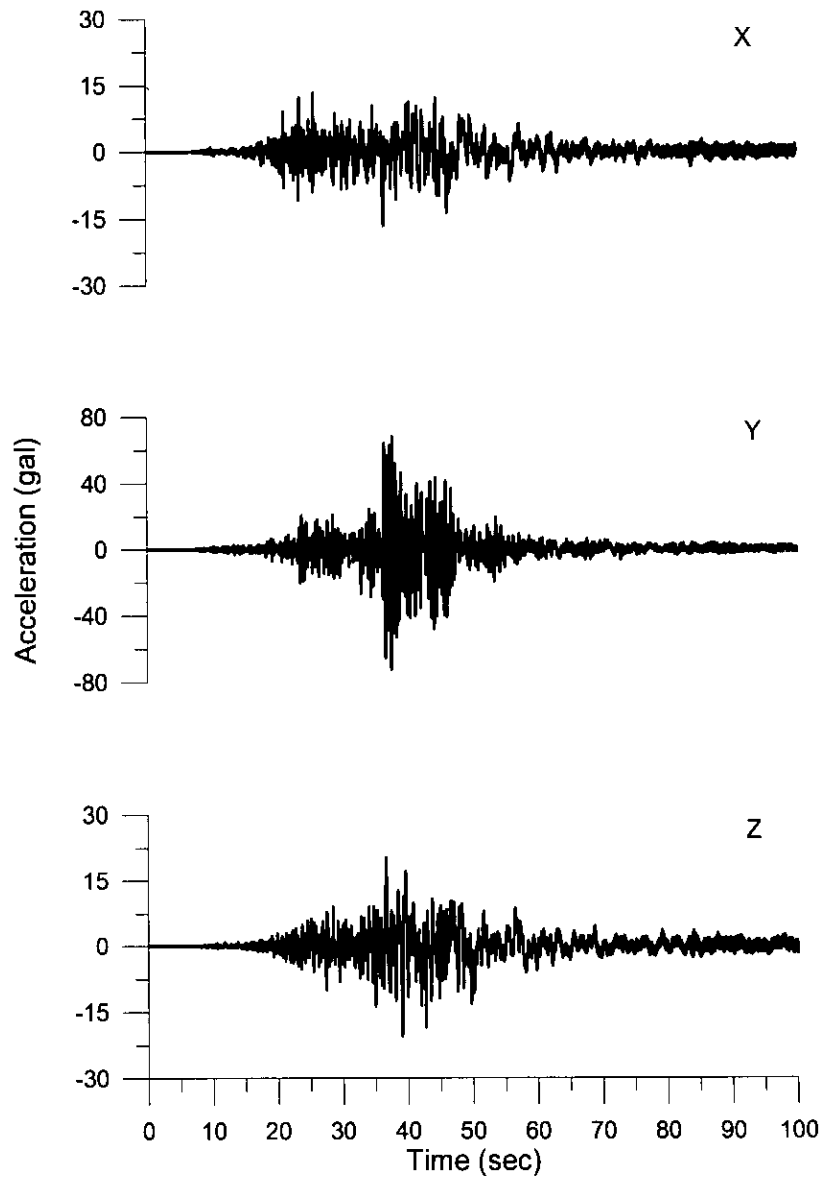


圖 6.4 地震儀之三軸向加速度歷時(翡翠水庫)

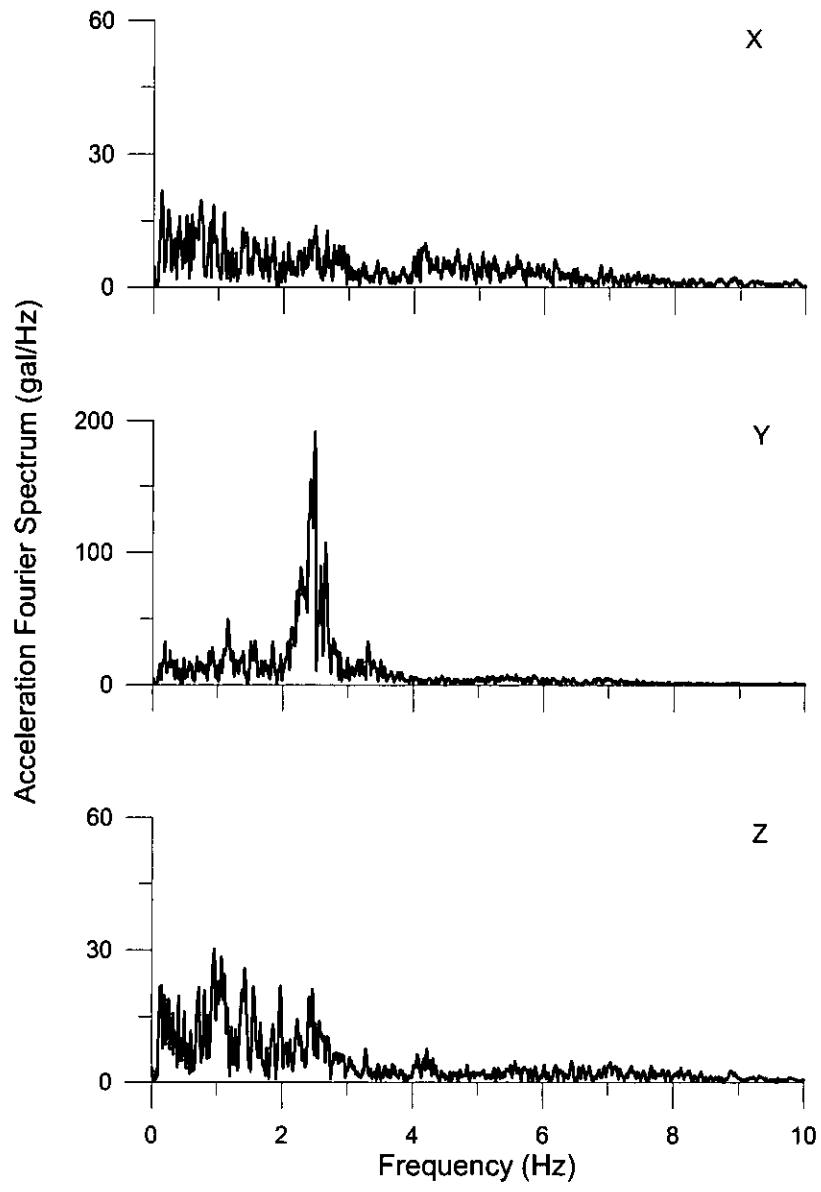


圖 6.5 地震儀之三軸向加速度傅氏頻譜(翡翠水庫)

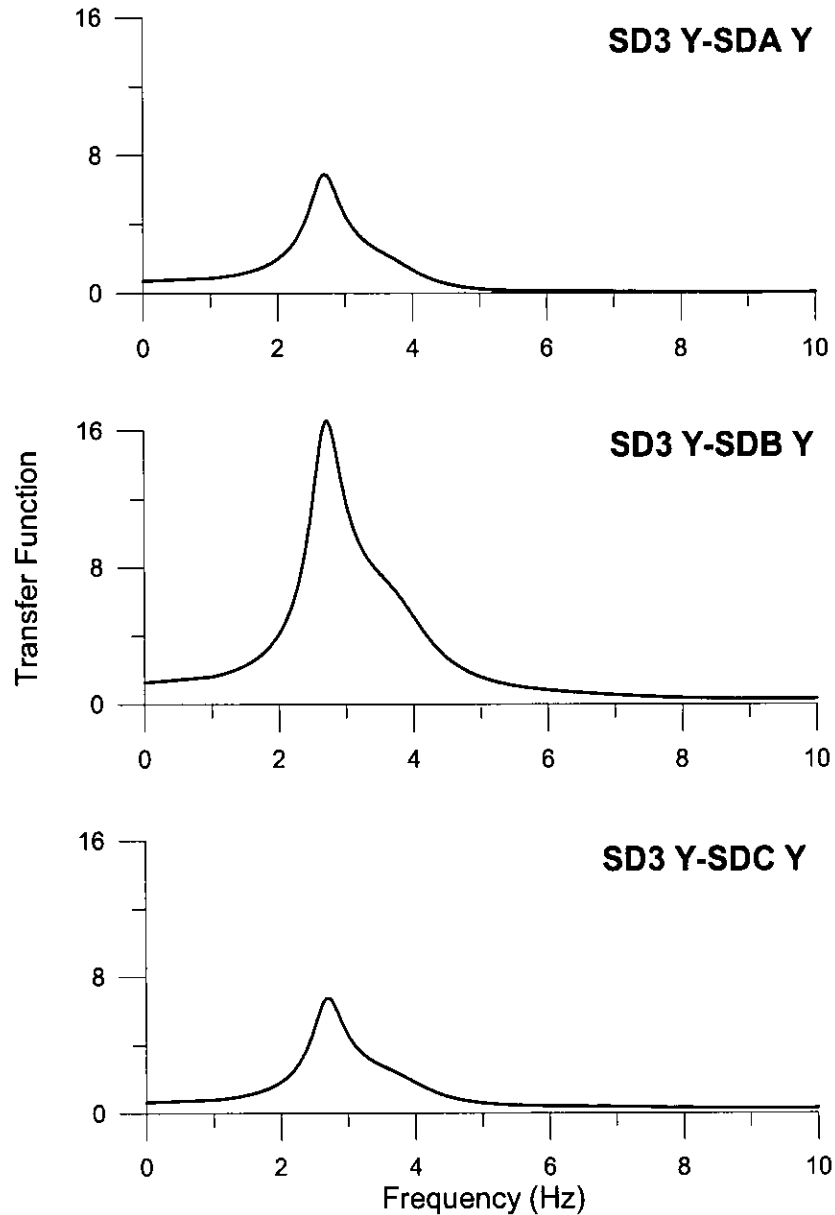


圖 6.6 地震儀之三軸向傳遞函數(翡翠水庫)

### 6.1.2 系統識別之理論介紹

線性動力系統之等效離散時間模式，以單一輸入與單一輸出(SISO)的情況為例，可以線性差分方程表示為：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (6.1)$$

其中， $y(\cdot)$  代表系統之輸出， $a_i$ 's 為輸出訊號係數， $n_a$  為其維度； $u(\cdot)$  代表系統之輸入， $b_i$ 's 為輸入訊號係數， $n_b$  為其維度。



應用後移運算子(backward shift operator)，則可將(5.1)式表示為

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) = H(q)u(k) \quad (6.2)$$

其中，

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \cdots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (6.3)$$

$$B(q) = b_0 + b_1q^{-1} + \cdots + b_{n_b}q^{-n_b} \quad (6.4)$$

若對式(6.2)取z轉換，得

$$y(z) = H(z)u(z) \quad (6.5)$$

其中，頻率響應函數  $H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}$

$y(z)$  與  $u(z)$  分別為  $y(k)$  與  $u(k)$  之 z-轉換， $A(z)$ 、 $B(z)$  的定義類似於式(6.3)及式(6.4)，只是將  $q$  改為  $z$ 。頻率響應函數的分子多項式  $B(z)=0$  之根稱為其零點(zeros)，而頻率響應函數的分母多項式  $A(z)=0$  之根稱為其極點(poles)。系統的自然頻率與阻尼比僅與傳遞函數的極點有關，而零點則決定振態反應的大小。當  $n_a \leq n_b$  時，假設頻率響應函數  $H(z)$  的極點無重根且均為共軛複數根，根據部份分式展開可將式(6.5)改成

$$H(z) = \sum_{j=1}^{n_a/2} H_j(z) \quad (6.7)$$

其中，

$$H_j(z) = \frac{2R(q_j) - 2R(q_j \bar{p}_j)z^{-1}}{1 - 2R(p_j)z^{-1} + |p_j|^2 z^{-2}} \quad (6.8)$$

$p_j$  為分母多項式  $A(z)=0$  的第  $j$  個複數根；

$$q_j = \lim_{z=p_j} (1 - p_j z^{-1}) H(z) = \frac{b_1 p_j^{-1} + \dots + b_{n_b} p_j^{-n_b}}{\prod_{k=1, k \neq j}^{n_a} (1 - p_k p_j^{-1})} \quad (6.9)$$

系統的自然頻率  $f_j$  及阻尼比  $\xi_j$  可計算如下：

$$f_j = \frac{1}{2\pi T} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (6.10)$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (6.11)$$

其中，

$$r_j^2 = p_j \bar{p}_j, \phi_j = \tan^{-1} \left[ \frac{I(p_j)}{R(p_j)} \right] \quad (6.12)$$

$T$  為取樣週期。只要將式(6.1)中之係數  $a_j$ 's,  $b_j$ 's 識別出來，即可得知結構之自然頻率、阻尼比以及頻率響應函數。

### 6.1.3 含噪音系統模型與預測誤差

式(6.1)所示為理想化之動力系統。實際量測之訊號中多少會有雜訊存在，因此我們可將系統模式修正為

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (6.13)$$

其中， $e(k)$  代表雜訊，通常假設其為零均值(zero mean)之白雜訊(white noise)。多項式  $C(q)$  之定義為

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (6.14)$$

其中， $c_i$ 's 為雜訊係數， $n_c$  為其維度。實際應用時，並不一定須要利用到每一多項式，可視情況予以簡化。例如

$$\text{AR 模型：} A(q)y(k) = e(k) \quad (6.15)$$

$$\text{ARX 模型： } A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k) \quad (6.16)$$

$$\text{ARMAX 模型： } A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (6.17)$$

$$\text{ARMA 模型： } A(q)y(k) = B(q)u(k) \quad (6.18)$$

根據式(6.13)，ARX 模型可進一步表示成

$$y(k) = \psi^T(k)\theta + e(k) \quad (6.19)$$

其中，

$$\psi^T(k) = [-y(k-1) \cdots -y(k-n_a), u(k) \wedge u(k-n_b)] \quad (6.20)$$

$$\theta = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_0 \wedge b_{n_b}]^T \quad (6.21)$$

若為單一輸入多重輸出(SIMO)模式時，

$$\psi^T(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(k) & \mathbf{u}(k) & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_2(k) & \mathbf{0} & \mathbf{u}(k) & \Lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ \mathbf{y}_m(k) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

其中，

$$\mathbf{y}_m = [-y_m(k-1) \wedge \cdots -y_m(k-n_a)] \quad (6.23a)$$

$$\mathbf{u}(k) = [u(k) \wedge \cdots u(k-n_b)] \quad (6.23b)$$

$$\theta = [a_1 \wedge \cdots a_{n_a}, b_{10} \wedge \cdots b_{1n_b}, b_{20} \wedge \cdots b_{2n_b}, \Lambda, b_{m0} \wedge \cdots b_{mn_b}] \quad (6.23c)$$

對式(6.19)取期望值，並利用白雜訊之零均值性質，可得

$$\bar{y}(k, \theta) = \psi^T(k)\theta \quad (6.24)$$

輸出訊號期望值 $\bar{y}(k, \theta)$ 代表已知之系統參數 $\theta$ 下預測之輸出值。將其估測誤差定義為

$$\varepsilon(k, \theta) = y(k) - \bar{y}(k, \theta) \quad (6.25)$$

若識別出來之系統參數 $\theta$ 完全正確，則 $\varepsilon(k, \theta) = e(k)$ 。

#### 6.1.4 遞迴預測誤差法 (Recursive Prediction Error Method)

今根據加權最小平方法之原理，定義系統之整體預測誤差為

$$V(k, \theta) = \frac{1}{2} \gamma(k) \sum_{s=1}^k \beta(k, s) \varepsilon^2(s, \theta) \quad (6.26)$$

其中， $\beta(k, s)$  為加權因子， $\gamma(k)$  則為 $\beta(k, s)$  之正規化因子(normalization factor)，其定義為

$$\gamma(k) \sum_{s=1}^k \beta(k, s) = 1 \quad (6.27)$$

若系統為非時變性時可令加權因子為1，此時即相當於最小平方法。對於時變性系統而言，加權因子可以追蹤系統參數隨時間變化的特性，愈接近瞬時 $k$ 的資料所給予的權重愈大。選擇指數視窗

$$\beta(k, s) = \lambda(k) \beta(k-1, s) \quad (6.28)$$

其中，

$$\beta(k, k) = 1 \quad (6.29)$$

$$\lambda(k) = \lambda_0 \lambda(k-1) + 1 - \lambda_0 \quad (6.30)$$

$\lambda$  稱為遺忘因子(forgetting factor)，通常採用 $\lambda_0 = 0.99$ ， $\lambda(0) = 0.95$ 。為避免識別結果因雜訊影響而隨時間改變，我們將極小化的標準以期望值表示為

$$E[V(k, \theta)] = 0 \quad (6.31)$$

或(6.31)可根據牛頓-瑞福森之迭代法，解出系統模型參數

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \alpha_i [V''[k, \theta(k-1)]]^{-1} V[k, \theta(k-1)] \quad (6.32)$$

上式中令  $\alpha_i = 1$ ，並經運算整理後可得到遞迴形式解

$$\theta(k) = \theta(k-1) + L(k) [y(k) - \psi^T(k)\theta(k-1)] \quad (6.33)$$

其中，

$$L(k) = \frac{P(k-1)\psi(k)}{\lambda(k) + \psi^T(k)P(k-1)\psi(k)} \quad (6.34)$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)}{\lambda(k) + \psi^T(k)P(k-1)\psi(k)} \quad (6.35)$$

通常選擇初始條件  $P(0) = 10^8 \sim 10^{10}$  以加速其收斂速度。

利用(6.33)式至(6.35)式之遞迴預測誤差法即可求得未知數  $\theta$ ，進而求得壩體之自然振動頻率((6.10)與(6.11)式)。

## 6.2 牡丹水庫之系統識別分析

牡丹水庫之地震儀配置如圖 6.7 所示，其壩底及壩頂各安裝一部地震儀，95 年 12 月 26 日於恆春發生規模 6.7 之強震，並陸續發生規模 5.2 至 6.4 之餘震，水庫管理單位所記錄之壩體各方向加速峰值如表 6.1 所示(部份資料)。此外，由初步檢視水庫管理單位所提供之地震儀歷時資料可知，從 2006 年至 2008 年地震儀有儲存各地震事件之記錄資料，本案將從該資料中挑選壩體振動反應較大且壩底與壩頂記錄之訊號有同步者進行分析。

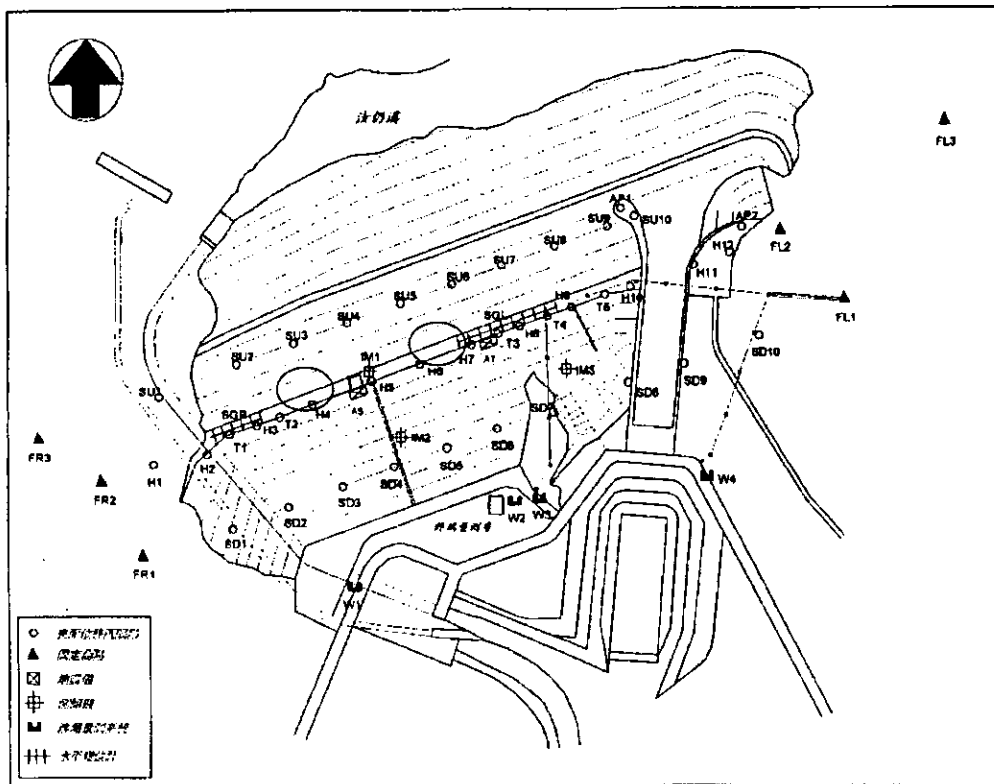


圖 6.7 牡丹水庫之地震儀配置圖

表 6.1 牡丹水庫之地震事件記錄資料(12 月 26-27 日)

| 時間             | 規模  | 壩底(gal) |        |        | 壩頂(gal) |         |         |
|----------------|-----|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                |     | 平行壩軸    | 垂直壩軸   | 垂直向    | 平行壩軸    | 垂直壩軸    | 垂直向     |
| 12/26<br>20:26 | 6.7 | 87.524  | 65.369 | 34.729 | 209.351 | 255.798 | 105.713 |
| 12/26<br>20:34 | 6.4 | 115.173 | 72.205 | 42.358 | 281.128 | 237.854 | 156.616 |
| 12/26<br>20:40 | 5.2 | 7.69    | 5.859  | 2.075  | 25.146  | 25.818  | 12.756  |
| 12/26<br>23:41 | 5.5 | 1.831   | 1.221  | 1.892  | 9.46    | 8.423   | 5.798   |
| 12/27<br>01:35 | 5.8 | 0.854   | 1.282  | 1.404  | 4.272   | 3.784   | 3.845   |
| 12/27<br>10:30 | 5.9 | 4.456   | 2.93   | 4.395  | 15.564  | 11.841  | 14.954  |

### 6.2.1 時域分析

時域分析之目的主要是瞭解地震強度的大小並繪製其加速度振動反應歷時，俾清楚呈現地震儀所記錄之振動訊號，同時可檢視地震儀是否正常運作。圖 6.8 至圖 6.12 為部份地震事件之壩體上下游加速度歷時(取壩體加速度峰值>25gal 者)，由圖可知，地震儀之訊號有隨地震波動的趨勢，顯示地震儀及資料擷取系統於上述地震下之功能應為正常狀態。圖 6.13 及圖 6.14 為 97 年 5 月 7 日地震儀所擷取之加速度歷時訊號，圖 6.13 之波形為近似單頻之簡諧波動，圖 6.14 則有訊號偏移的現象，經查證，當日因地震儀進行維修校正，因此存在此人為擾動的訊號記錄，地震儀的運作並無異常的狀況發生。

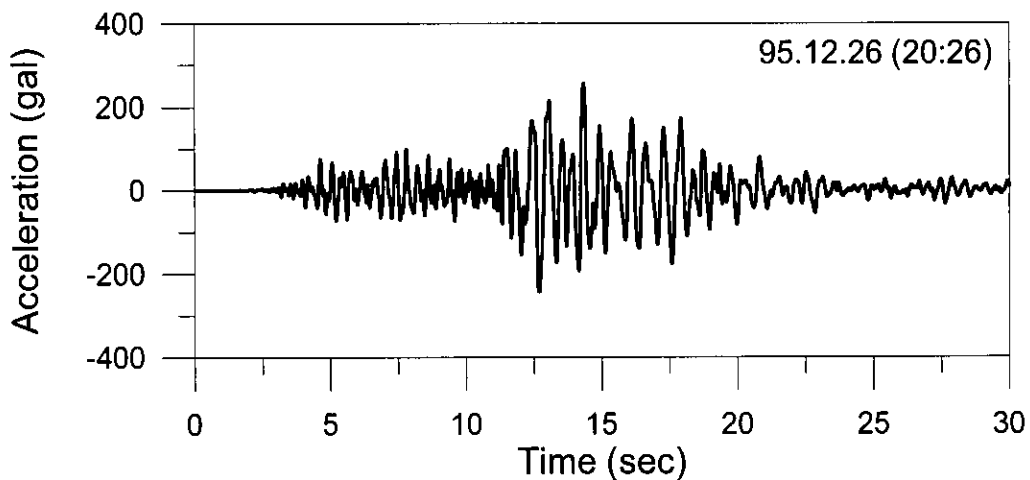


圖 6.8 上下游方向之加速度歷時(95.12.26-20:26)

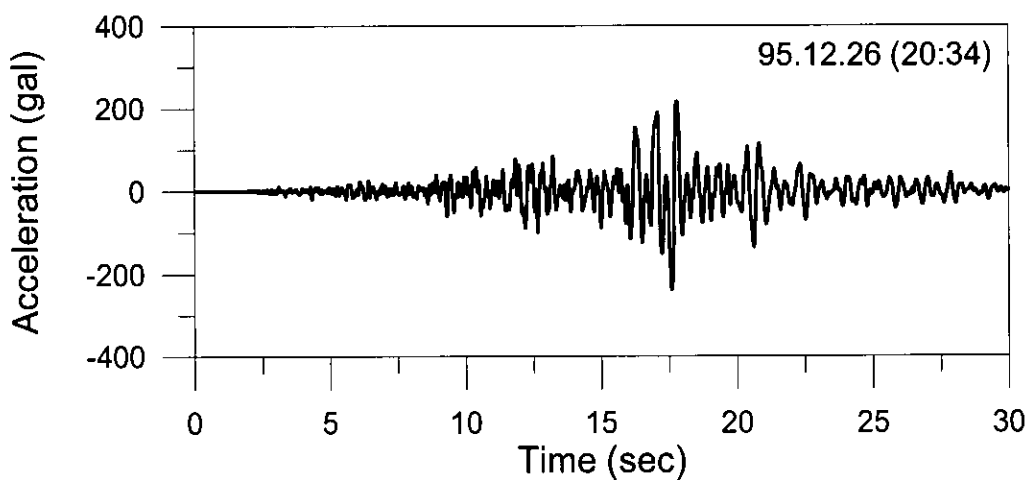


圖 6.9 上下游方向之加速度歷時(95.12.26-20:34)

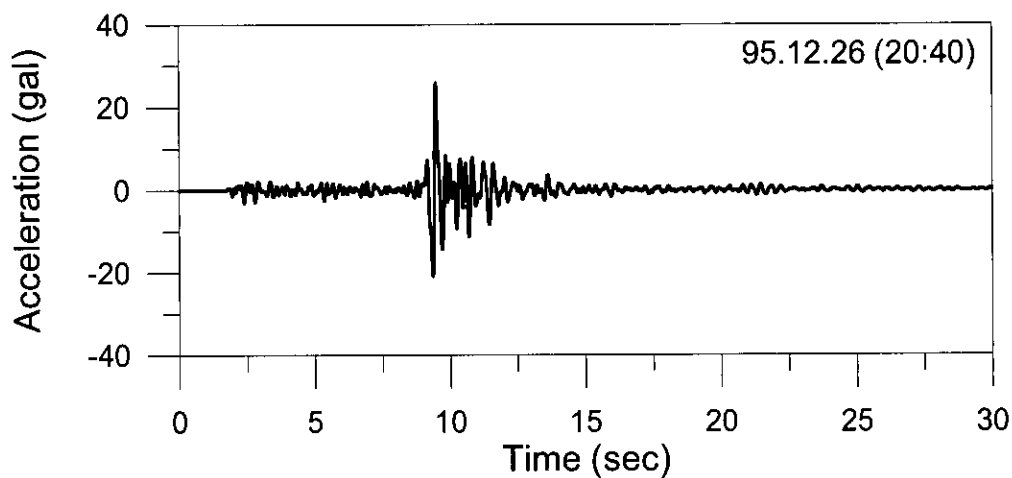


圖 6.10 上下游方向之加速度歷時(95.12.26-20:40)



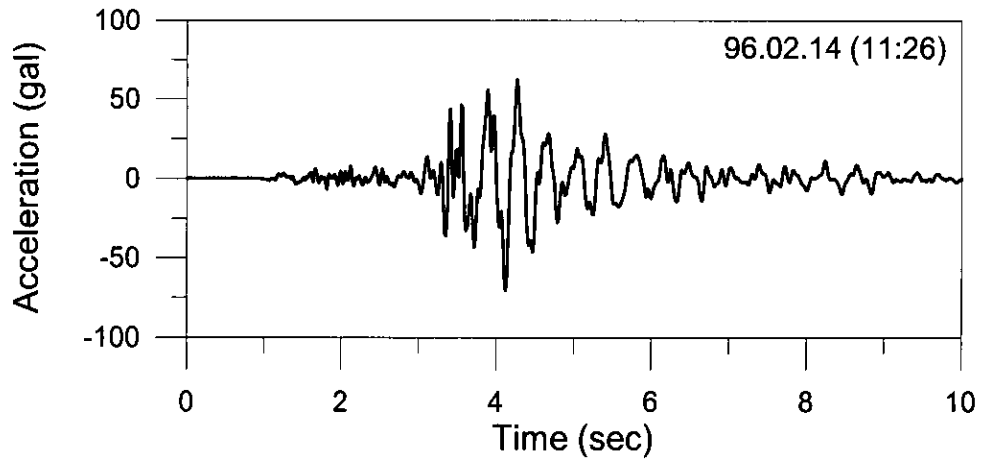


圖 6.11 上下游方向之加速度歷時(96.02.14-11:26)

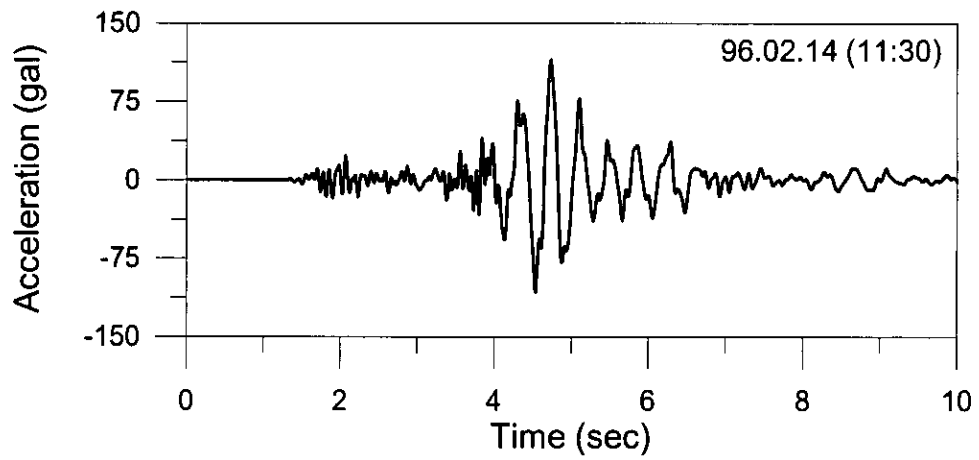


圖 6.12 上下游方向之加速度歷時(96.02.14-11:30)

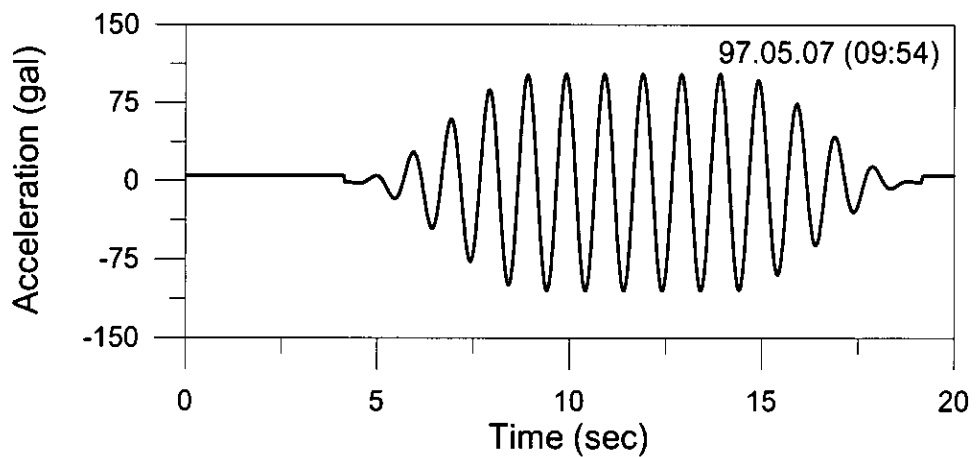


圖 6.13 上下游方向之加速度歷時(97.05.07-09:54)-校正引致之訊號

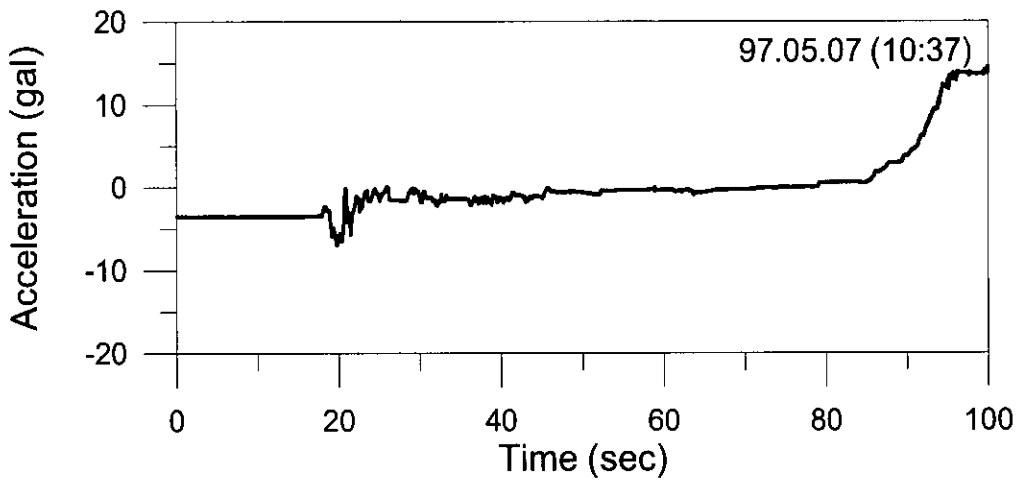


圖 6.14 上下游方向之加速度歷時(97.05.07-10:37)-校正引致之訊號

### 6.2.2 頻域分析

頻域分析之主要目的是瞭解時域振動訊號之頻率內涵(frequency content)，可初步掌握壩體之振動頻率及其分佈等特性。頻域分析主要是進行快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，FFT 是目前廣泛應用於數位訊號分析之技術，當儀器量測所得之數位訊號為時間-振幅之數據時(即歷時訊號)，利用傅立葉轉換可將歷時訊號轉換為頻率-振幅頻譜，俾便瞭解歷時訊號之各頻率成分於頻譜圖上之分佈情形。

振動歷時訊號若以  $x(t)$  表示，則  $x(t)$  在時間  $-T$  至  $T$  間之連續時間傅立葉轉換可表示如下：

$$X(f) = \int_{-T}^T x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.36)$$

其中， $f$  為頻率(Hz)， $j = \sqrt{-1}$  為一虛(複)數。

振動訊號的本質為一連續時間訊號，縱然取其中一小段，即為無限多數據，無論是訊號之儲存、傳送及處理，均甚為不便。近年來隨著數位科技的進步，透過資料擷取系統可對振動訊號進行時間取樣，僅保留取樣瞬

間之資訊，而取樣以外之資訊則不復保存，讓無限的資訊縮減為有限的資訊。經取樣後，連續時間振動訊號  $x(t)$  所對應之離散時間振動訊號可表示為  $x[n]$ 。假設取樣周期為  $T_s$  (取樣頻率為  $f_s = 1/T_s$ )，則振動訊號於取樣前後之關係為：

$$x[n] = x(nT_s), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (6.37)$$

其中， $N$  為總取樣點數(振動訊號之筆數)。

離散時間振動訊號之離散傅立葉級數  $X[k]$  可將積分型式改寫成累加之型式如下：

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{k2\pi n}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (6.38)$$

其單位與振動訊號  $x[n]$  相同。此外，連續時間傅立葉轉換  $X(f)$  與離散時間傅立葉級數  $X[k]$  之關係可近似為：

$$X(f) \Big|_{f=\frac{k}{NT_s}} = T_s X[k], \quad 0 \leq f \leq 0.5 f_s \quad (6.39)$$

其中， $f_s = 1/T_s$  為取樣頻率(取樣周期之倒數)；頻率解析度為  $\Delta f = 1/(NT_s)$ ； $f_c = 0.5 f_s = 1/(2T_s)$  為傅立葉轉換之截止頻率(即頻譜圖上之最大頻率)。傅立葉轉換  $X(f)$  之單位為位移/Hz、加速度/Hz 等(視分析之物理量的單位而定)。舉例而言，若取樣周期為  $T_s = 0.01$  秒，則取樣頻率為  $f_s = 100$  Hz，截止頻率為  $f_c = 1/(2 \times 0.01) = 50$  Hz，若取樣總數為  $N = 1000$  筆，則總訊號時間為  $T = NT_s = 1000 \times 0.01 = 10$  秒，頻率解析度為  $\Delta f = 1/(NT_s) = 1/10 = 0.1$  Hz。

### 6.2.2.1 MATLAB 之頻譜分析

目前市面上有許多軟體具有傅立葉轉換之功能選項可供運算分析，例如 MATLAB 之“fft”指令及 Excel 增益集之分析工具箱內有傅立葉轉換的功

能，惟使用 Excel 之傅立葉轉換則有最大筆數的限制(MATLAB 則無筆數限制)，筆數資料不得大於 4096 筆。附錄七為本計畫進行傅立葉轉換所撰寫之 MATLAB 分析程式及其使用說明，主要利用”fft”指令計算加速度訊號之離散時間傅立葉轉換，僅須 18 列程式即可完成頻譜分析並繪製頻譜圖。根據該程式分析 95 年 12 月 26 日(20:26)壩體加速度歷時訊號所得之頻譜圖如圖 6.15 所示，由圖可知，主要振動頻率分佈於 1~3Hz 間，且以 1.6Hz 附近之峰值最高，此一顯著頻率可能為壩體或地表之自然振動頻率。

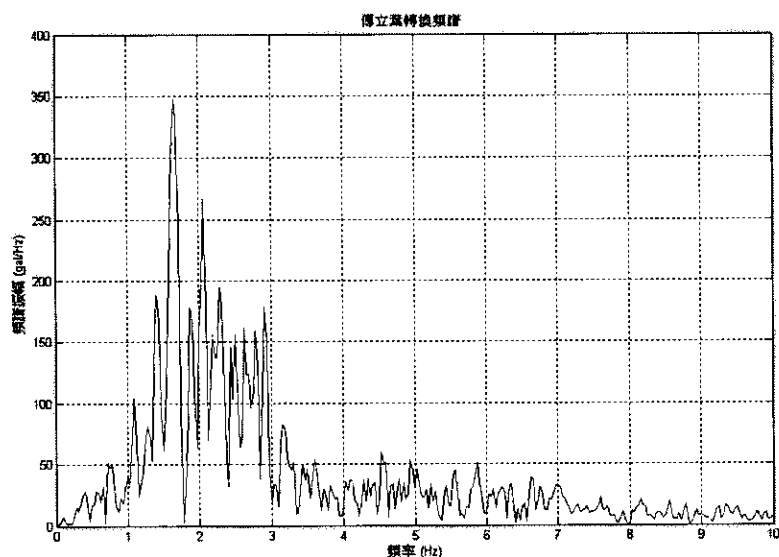


圖 6.15 MATLAB 程式分析所得之傅氏頻譜(95.12.26-20:26)

圖 6.16 至圖 6.20 為歷次地震事件之壩頂上下游方向加速度傅氏頻譜。由圖可知，顯著之頻率內涵普遍集中在 1~4Hz 之頻寬範圍，且最大峰值主要出現在 1.6Hz、2.7Hz、2.47Hz、及 2.6Hz 附近，上述峰值出現所對應之頻率即為地表或壩體之主要振動頻率，可透過系統識別分析加以確認。

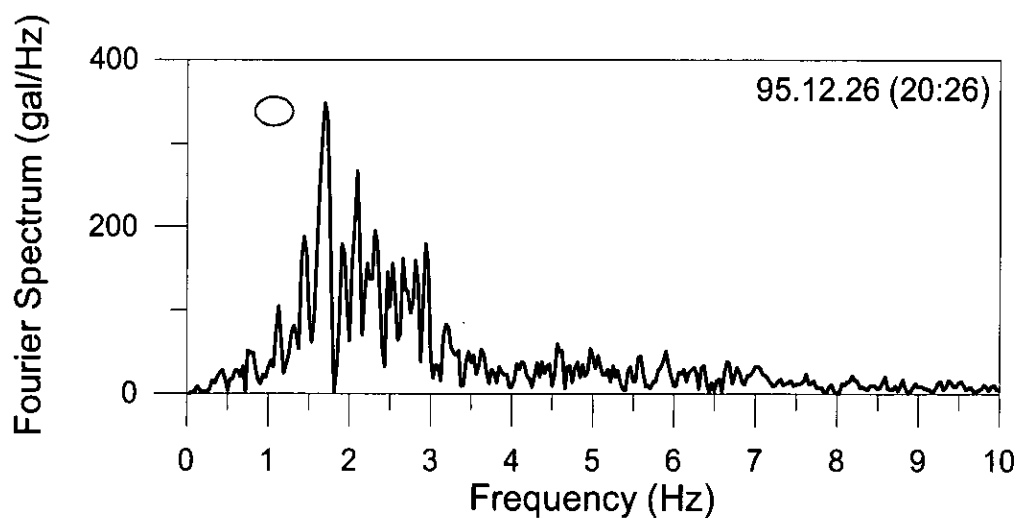


圖 6.16 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.26-20:26)

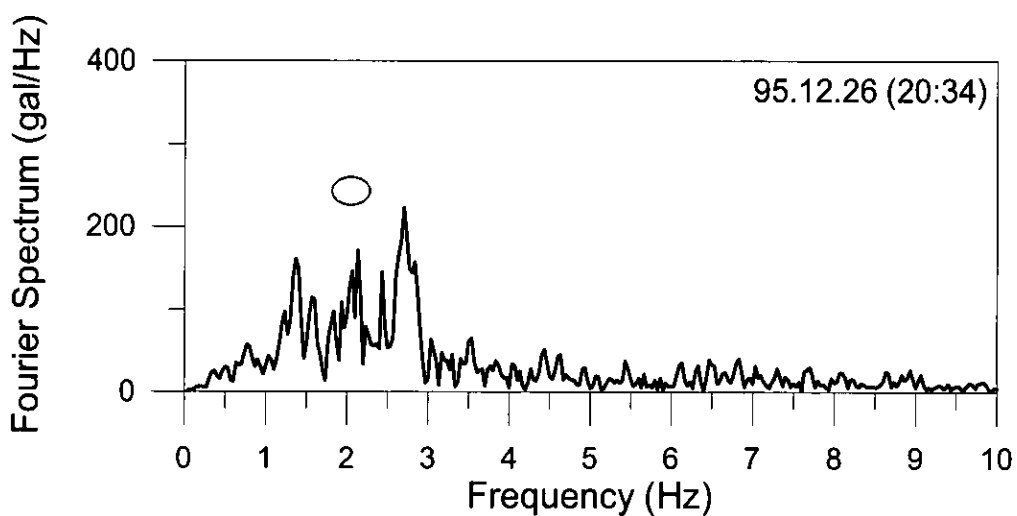


圖 6.17 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.26-20:34)

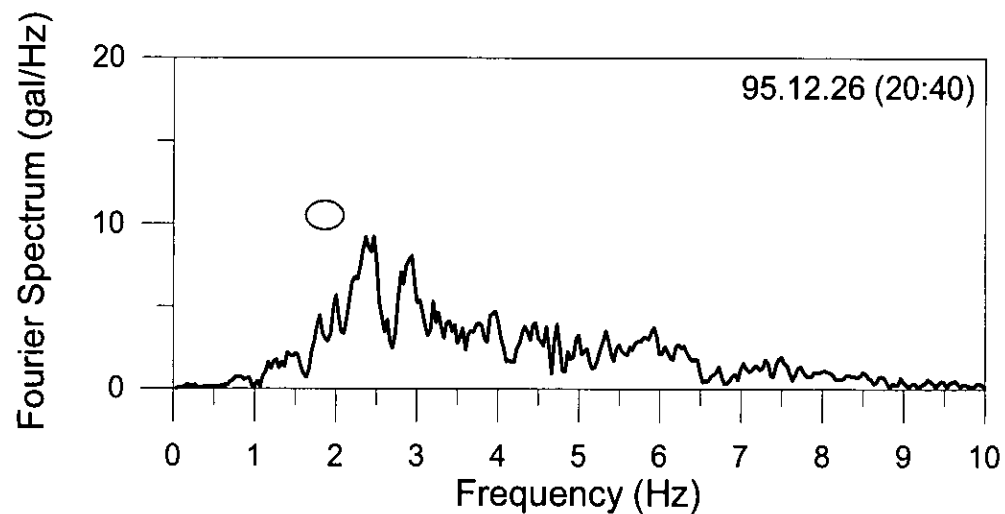


圖 6.18 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.26-20:40)

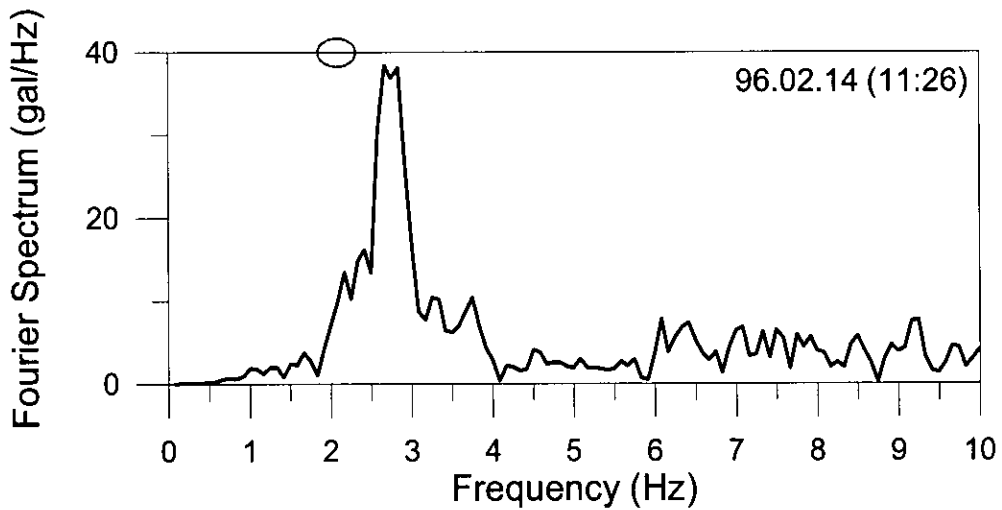


圖 6.19 上下游方向之加速度傅氏頻譜(96.02.14-11:26)

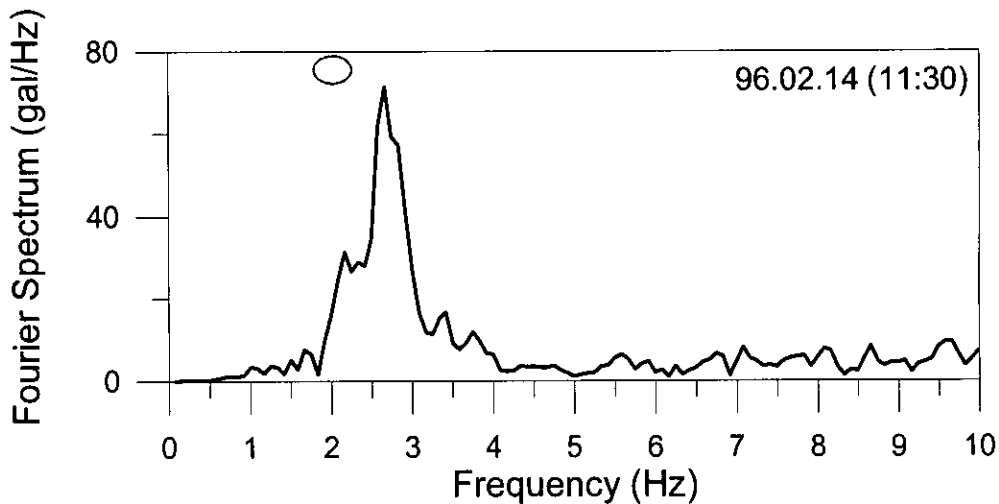


圖 6.20 上下游方向之加速度傅氏頻譜(96.02.14-11:30)

### 6.2.2.2 Excel 之頻譜分析

Excel 為世人所熟知的文書處理系統，該系統亦提供傅立葉轉換之工具箱，將有助於頻譜分析之進行。以下將說明傅立葉轉換工具箱之設定及使用步驟。

#### (a) 傅立葉分析工具箱設定

欲利用 Excel 進行傅立葉轉換時，首先須設定分析工具箱，可於下拉式

功能表之工具內點選增益集(圖 6.21)，進入後即可看到增益集內有一『分析工具箱』選項並將該選項打勾，如圖 6.22 所示。重新點選下拉式功能表之工具選項後，吾人發現此時已有『資料分析』選項出現(圖 6.23)，點選『資料分析』後將出現各種分析工具，其中包括『傅立葉分析』(圖 6.24)，至此表示分析工具箱已設定完成，將可利用 Excel 進行後續之傅立葉分析。

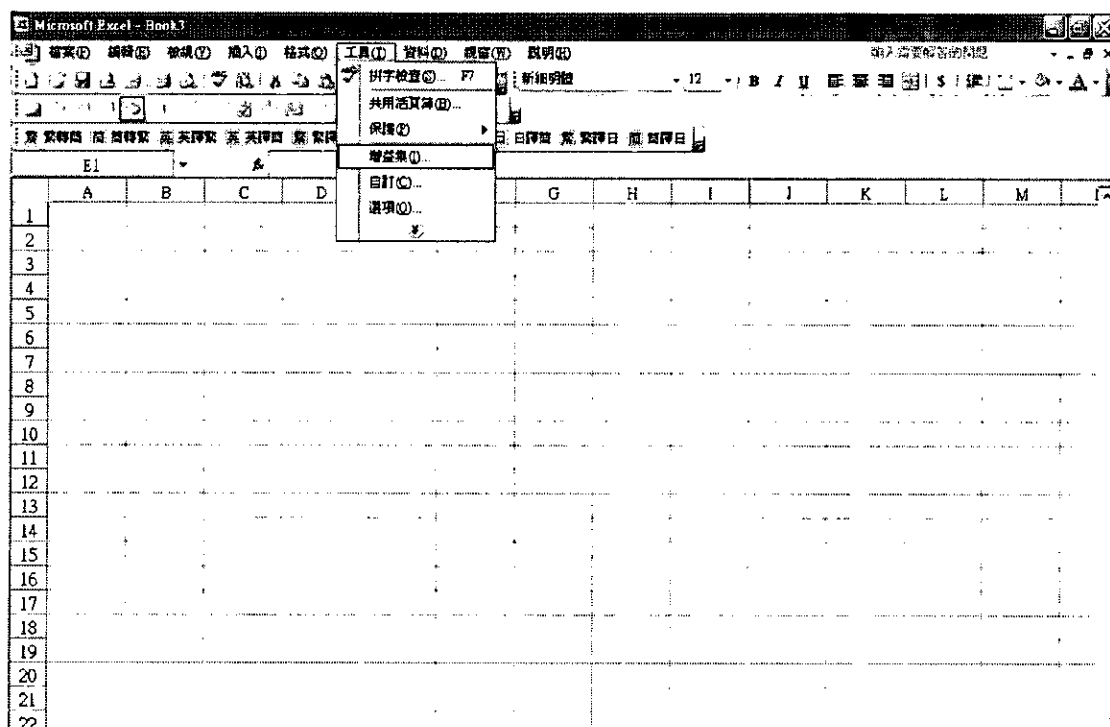


圖 6.21 傅立葉分析之功能設定：點選工具內之增益集

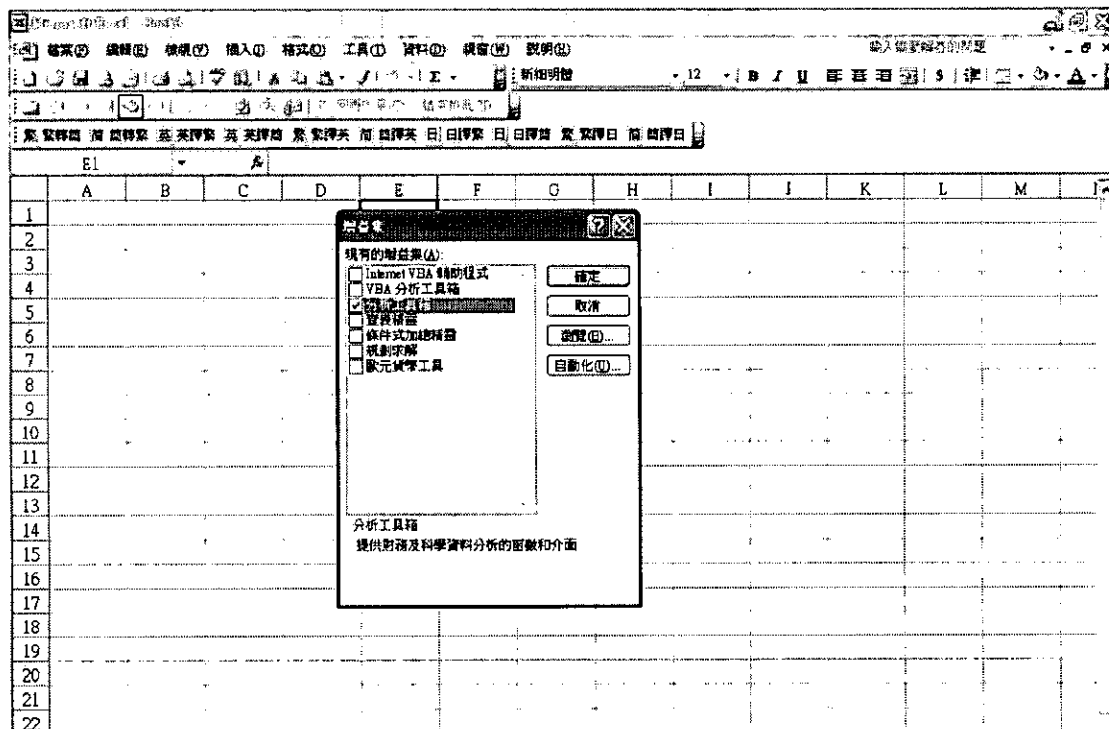


圖 6.22 傅立葉分析之功能設定：勾選分析工具箱

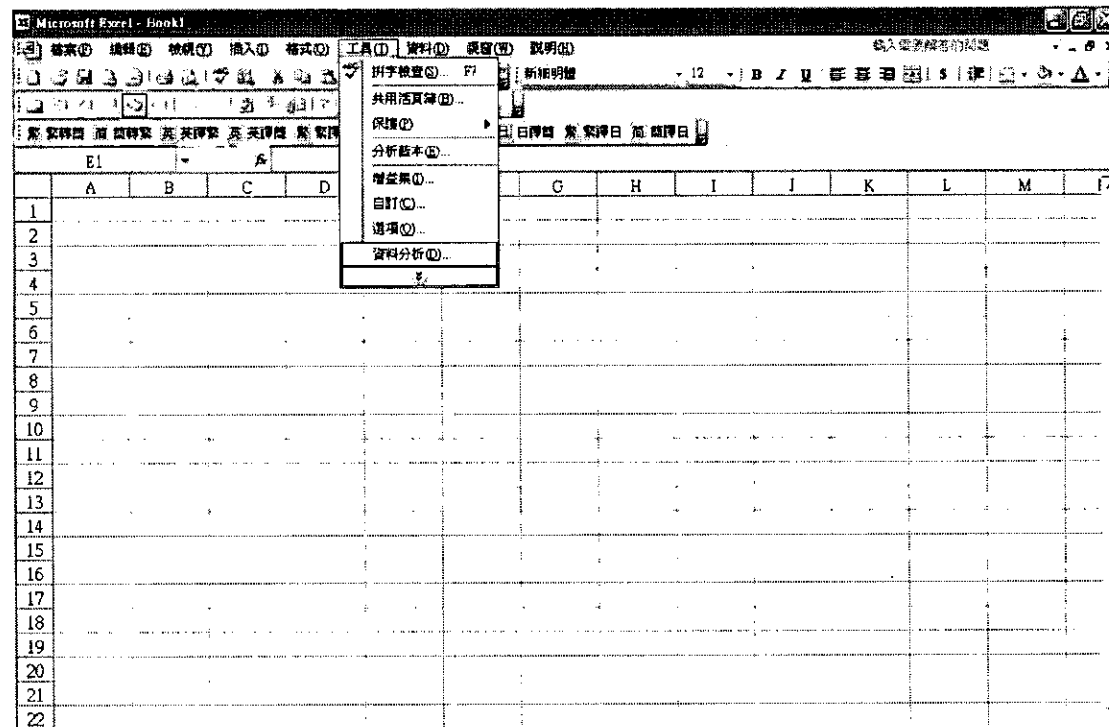


圖 6.23 傅立葉分析之功能設定：檢視工具內是否已出現資料分析選項



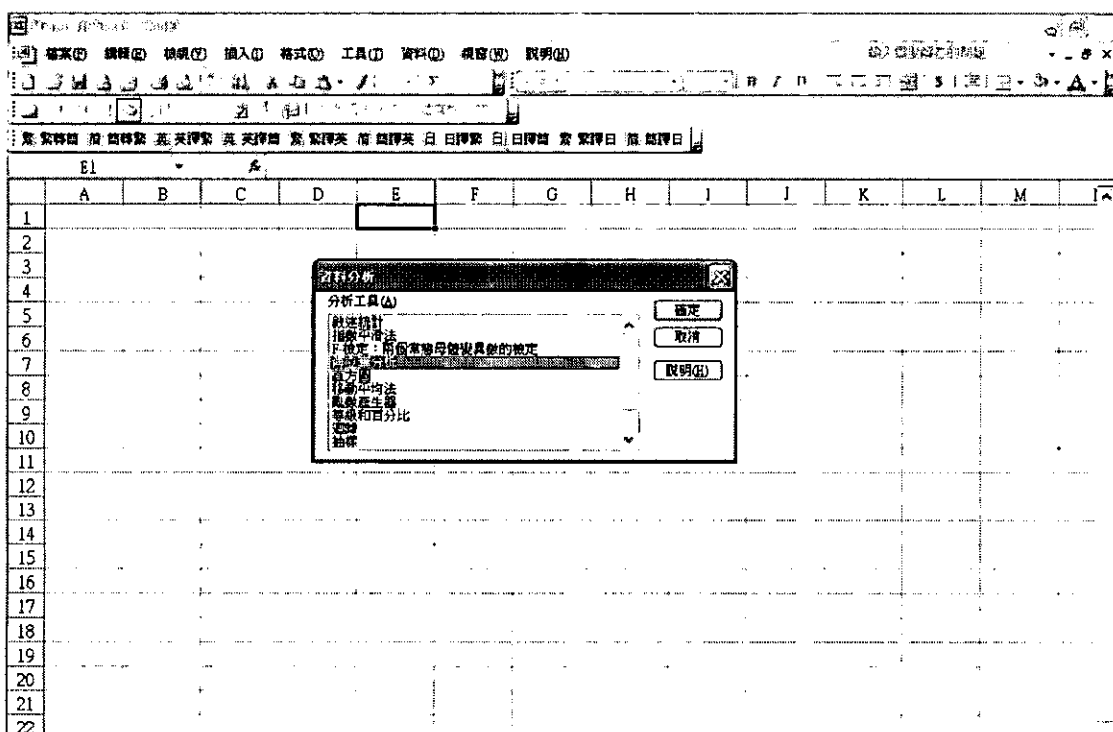


圖 6.24 傅立葉分析之功能設定：點選資料分析檢視有無傅立葉分析功能

## (b) 傅立葉分析步驟

### (1) 載入地震儀資料

假設地震儀所記錄及儲存的數據資料包括時間及加速度兩行資料，吾人可進一步將兩行資料分別載入 Excel 之 A 行及 B 行(圖 6.25)。

### (2) 設定相關基本參數

可於 D 行輸入或設定相關基本參數，例如於 D2 儲存格輸入欲進行傅立葉轉換之筆數，本案例取 2048 筆進行分析，Excel 規定進行傅立葉轉換的資料筆數必須為 2 的幕次方(例如  $2^{10}=1024$ ,  $2^{11}=2048$ ,  $2^{12}=4096$ )；於 D3 儲存格設定“=IMLOG(D2)”，則 Excel 會自動計算振動訊號的筆數為 2 的 11 次方；D4 儲存格為取樣周期(時間間隔)，可設定為“=A3-A2”自動計算取樣

周期(0.01 秒)；總時間長度 D5 可由總分析筆數乘上取樣周期而得，即設定為" $=D2*D4$ "可自動計算總取樣時間(20.48 秒)；頻率間隔 D6 可由總取樣時間之倒數求得，即設定為" $=1/D5$ "自動計算頻率間隔(0.0488Hz)；截止頻率 D7 可設定為時間間隔 D4 之倒數(即取樣頻率)再乘上 1/2 求得(50Hz)。隨後可於 E 行自行建立一頻率向量，由 0Hz 開始，增量為頻率間隔  $df=0.0488\text{Hz}$ ，直到 50Hz 之截止頻率為止(圖 6.25)。

### (3)傅立葉分析操作

進行傅立葉分析時，可進入工具→資料分析→點選傅立葉分析，如圖 6.26 所示，點選完成後將出現傅立葉分析之輸入設定圖框，如圖 6.27 所示，本案例欲進行傅立葉分析之加速度振動訊號放置於 B 行，欲分析之筆數為 2048 筆(可取 B 行之前 2048 筆資料或加速度振動反應訊號較顯著之連續 2048 筆資料)，因此，於輸入範圍之空格內可鍵入" $\$B\$2:\$B\$2049$ "(圖 6.27)，即 B2 到 B2049 儲存格間的數據資料，Excel 計算完成之傅立葉數據資料若欲儲存在 F 行，則於輸出選項之輸出範圍空格內鍵入" $\$F\$2:\$F\$2049$ "，即儲存至 F2 到 F2049 儲存格間，如圖 6.28 所示。由於傅立葉轉換後之數據資料包含複數(虛數)，因此須取絕對值方可得知頻譜振幅的大小，此時可利用 Excel 求取複數絕對值之功能函數"IMABS"計算。若取絕對值後之頻譜振幅欲儲存於 G 行，則於 G2 儲存格內設定" $=\text{IMABS}(F2)*\$D\$4$ "，即將 F2 儲存格之傅立葉複數振幅取絕對值，隨後再乘上 D4 儲存格之取樣周期，即可求得傅氏轉換之頻譜振幅(6.39 式)，如圖 6.29 所示。

### (4)繪圖

最後由插入→圖表→XY 散佈圖選項，即可繪製傅立葉轉換之頻率(E 行)與頻譜振幅(G 行)之頻譜圖，如圖 6.30 所示。由圖示結果可知，頻譜圖之振幅與主要頻率之峰值與利用 MATLAB 程式分析所得之結果一致，說明

習用之 Excel 文書處理系統亦可達成頻譜分析之目的，可針對地震儀之加速度訊號進行傅立葉轉換(或其它同樣具有動態記錄功能之監測儀器訊號)，將有助於水庫管理單位人員充分運用既有之分析工具，針對動態監測訊號進行初步評析之工作，瞭解振動反應之頻率內涵。

|    | A        | B        | C            | D                | E         | F |
|----|----------|----------|--------------|------------------|-----------|---|
| 1  | 時間(秒)    | 加速度(gal) | 參數           | 數值               | 傅立葉轉換(頻率) |   |
| 2  | 1.00E-02 | 4.61E-02 | N(參數)        | 2048.0000        | 0.0000    |   |
| 3  | 2.00E-02 | 4.61E-02 | 參數須為2的冪次方倍   | 11.0000000008466 | 0.0488    |   |
| 4  | 3.00E-02 | 4.61E-02 | dt(時間間隔, 秒)  | 0.0100           | 0.0977    |   |
| 5  | 4.00E-02 | 4.61E-02 | T(總時間長度, 秒)  | 20.4800          | 0.1465    |   |
| 6  | 5.00E-02 | 4.61E-02 | df(頻域間隔, Hz) | 0.0488           | 0.1953    |   |
| 7  | 6.00E-02 | 4.61E-02 | fc(截止頻率, Hz) | 50.0000          | 0.2441    |   |
| 8  | 7.00E-02 | 4.61E-02 |              |                  | 0.2930    |   |
| 9  | 8.00E-02 | 4.61E-02 |              |                  | 0.3418    |   |
| 10 | 9.00E-02 | 4.61E-02 |              |                  | 0.3906    |   |
| 11 | 1.00E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.4395    |   |
| 12 | 1.10E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.4883    |   |
| 13 | 1.20E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.5371    |   |
| 14 | 1.30E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.5859    |   |
| 15 | 1.40E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.6348    |   |
| 16 | 1.50E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.6836    |   |
| 17 | 1.60E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.7324    |   |
| 18 | 1.70E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.7813    |   |
| 19 | 1.80E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.8301    |   |
| 20 | 1.90E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.8789    |   |
| 21 | 2.00E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.9277    |   |
| 22 | 2.10E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 0.9766    |   |
| 23 | 2.20E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 1.0254    |   |
| 24 | 2.30E-01 | 4.61E-02 |              |                  | 1.0742    |   |

圖 6.25 載入加速度歷時資料(A 行為時間, B 行為加速度)

|    | B         | C  | D  | E         | F            |
|----|-----------|----|----|-----------|--------------|
| 1  | 加速度 (gal) | 參數 | 數值 | 傅立葉轉換(頻率) | 傅立葉轉換振幅(絕對值) |
| 2  | 4.61      |    |    | 0.0000    |              |
| 3  | 4.61      |    |    | 0.0488    |              |
| 4  | 4.61      |    |    | 0.0977    |              |
| 5  | 4.61      |    |    | 0.1465    |              |
| 6  | 4.61      |    |    | 0.1953    |              |
| 7  | 4.61      |    |    | 0.2441    |              |
| 8  | 4.61      |    |    | 0.2930    |              |
| 9  | 4.61      |    |    | 0.3418    |              |
| 10 | 4.61E-02  |    |    | 0.3906    |              |
| 11 | 4.61E-02  |    |    | 0.4395    |              |
| 12 | 4.61E-02  |    |    | 0.4883    |              |
| 13 | 4.61E-02  |    |    | 0.5371    |              |
| 14 | 4.61E-02  |    |    | 0.5859    |              |
| 15 | 4.61E-02  |    |    | 0.6348    |              |
| 16 | 4.61E-02  |    |    | 0.6836    |              |
| 17 | 4.61E-02  |    |    | 0.7324    |              |
| 18 | 4.61E-02  |    |    | 0.7813    |              |
| 19 | 4.61E-02  |    |    | 0.8301    |              |
| 20 | 4.61E-02  |    |    | 0.8789    |              |
| 21 | 4.61E-02  |    |    | 0.9277    |              |
| 22 | 4.61E-02  |    |    | 0.9766    |              |

圖 6.26 點選傅立葉分析選項

|    | B        | C                                  | D         | E      | F |
|----|----------|------------------------------------|-----------|--------|---|
| 2  | 4.61E-02 | N(參數)                              | 2048.0000 | 0.0000 |   |
| 3  | 4.61E-02 | 參數須為 2 的冪次方值: 11,000,000,000,08466 |           | 0.0488 |   |
| 4  | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 5  | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 6  | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 7  | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 8  | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 9  | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 10 | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 11 | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 12 | 4.61E-02 |                                    |           |        |   |
| 13 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.5371 |   |
| 14 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.5859 |   |
| 15 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.6348 |   |
| 16 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.6836 |   |
| 17 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.7324 |   |
| 18 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.7813 |   |
| 19 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.8301 |   |
| 20 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.8789 |   |
| 21 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.9277 |   |
| 22 | 4.61E-02 |                                    |           | 0.9766 |   |
| 23 | 4.61E-02 |                                    |           | 1.0254 |   |

圖 6.27 設定傅立葉分析之輸入範圍及輸出範圍

|    | B         | C                         | D                | E         | F                                   |
|----|-----------|---------------------------|------------------|-----------|-------------------------------------|
|    |           | F2      =66.4302468499997 |                  |           |                                     |
| 1  | 加速度 (gab) | 參數                        | 數值               | 傅立葉轉換(頻率) | 傅立葉轉換振幅(絕對值)                        |
| 2  | 4.61E-02  | N(參數)                     | 2048.0000        | 0.0000    | .66.4302468499997                   |
| 3  | 4.61E-02  | 參數須為2的冪次方倍                | 11.0000000008466 | 0.0488    | -135.4795238591-74.9375591534004i   |
| 4  | 4.61E-02  | dt(時間間隔, 秒)               | 0.0100           | 0.0977    | 560.233372706586-109.825861574034i  |
| 5  | 4.61E-02  | T(總時間長度, 秒)               | 20.4800          | 0.1465    | -188.982675656158+168.5520864646i   |
| 6  | 4.61E-02  | df(頻域間隔, Hz)              | 0.0488           | 0.1953    | 45.1219801175062-104.503739694391i  |
| 7  | 4.61E-02  | f0(截止頻率, Hz)              | 50.0000          | 0.2441    | -193.226581754074-267.340730094344i |
| 8  | 4.61E-02  |                           |                  | 0.2930    | 1040.36722942168+885.183807414623i  |
| 9  | 4.61E-02  |                           |                  | 0.3418    | -1752.30532186356+200.386075449712i |
| 10 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.3906    | 159.841044609056-2546.79312414184i  |
| 11 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.4395    | 1341.6207024347+1120.58504169407i   |
| 12 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.4883    | -597.775850776463-371.421819645639i |
| 13 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.5371    | 2223.52483574188-154.472487648426i  |
| 14 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.5859    | -2204.74281252035+1598.43134275051i |
| 15 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.6348    | -222.61597168521-2258.94265425228i  |
| 16 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.6836    | 508.095592229929+1455.97282221374i  |
| 17 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.7324    | -778.028608939173-4606.35841701665i |
| 18 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.7813    | 4533.2216412083+599.247699457537i   |
| 19 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.8301    | 162.671884071847+2775.41573240852i  |
| 20 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.8789    | 138.789510668834+464.305577226792i  |
| 21 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.9277    | -1407.68313420252-1311.84021825267i |
| 22 | 4.61E-02  |                           |                  | 0.9766    | 2931.69776082795+251.495428747502i  |
| 23 | 4.61E-02  |                           |                  | 1.0254    | -3092.37853573514+2994.74072008165i |
| 24 | 4.61E-02  |                           |                  | 1.0742    | 780.437880520047-3216.17203001305i  |

圖 6.28 傅立葉分析運算完成之數據資料

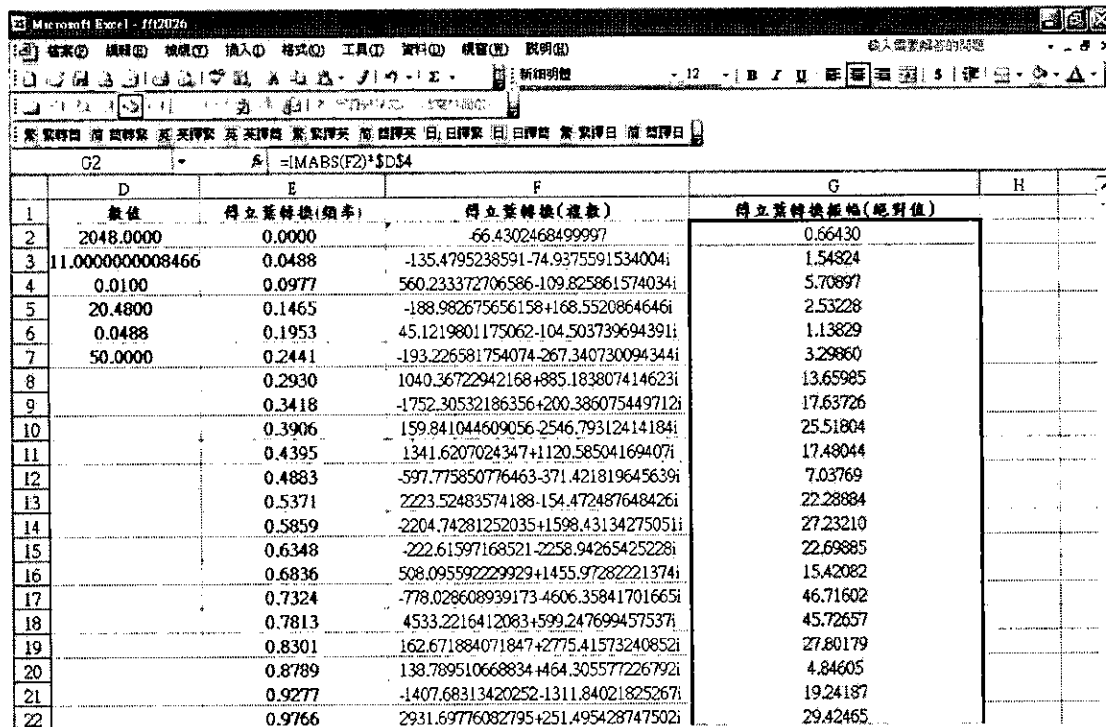
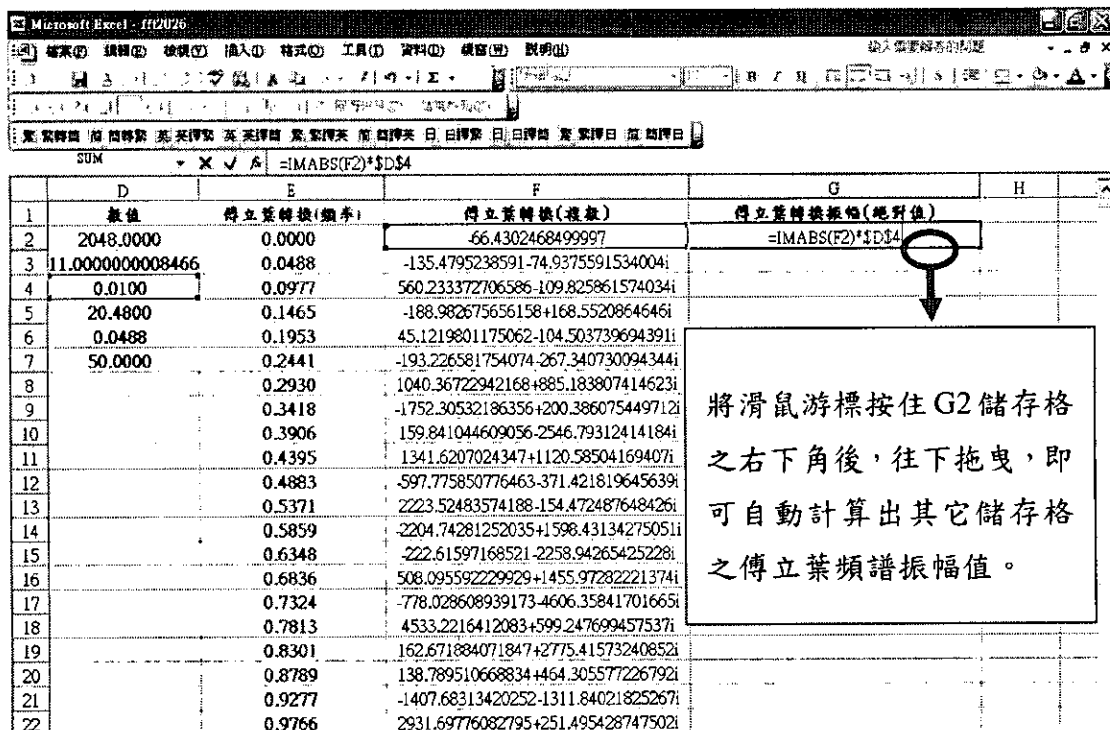


圖 6.29 傅立葉分析所得之複數取絕對值計算其頻譜振幅

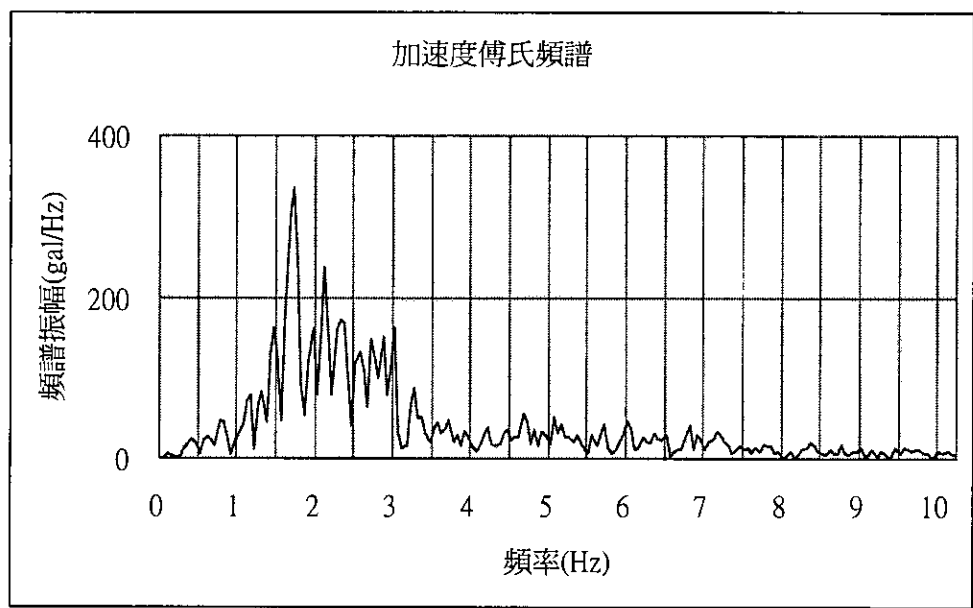
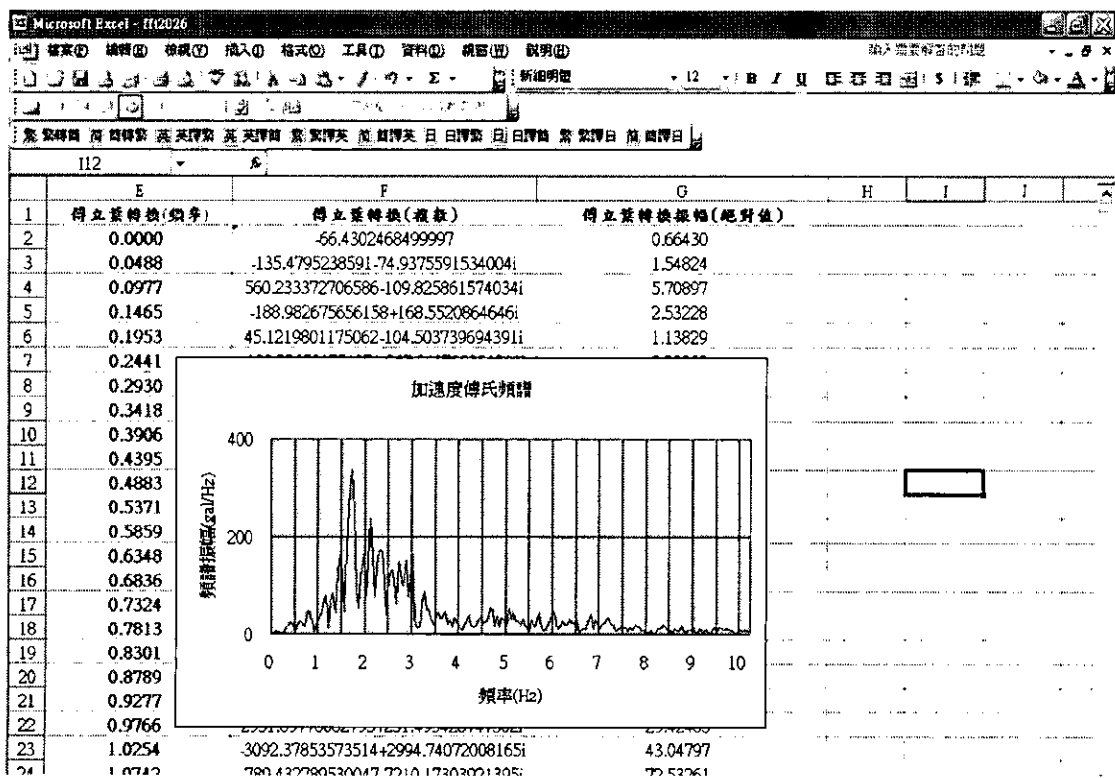


圖 6.30(a) Excel 傅立葉分析所得之加速度頻譜(95.12.26-20:26)

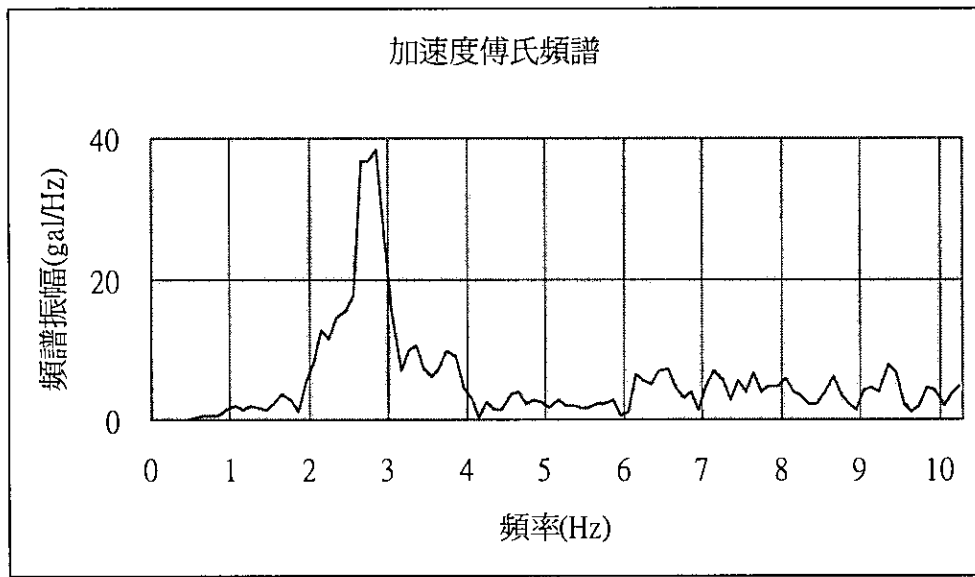
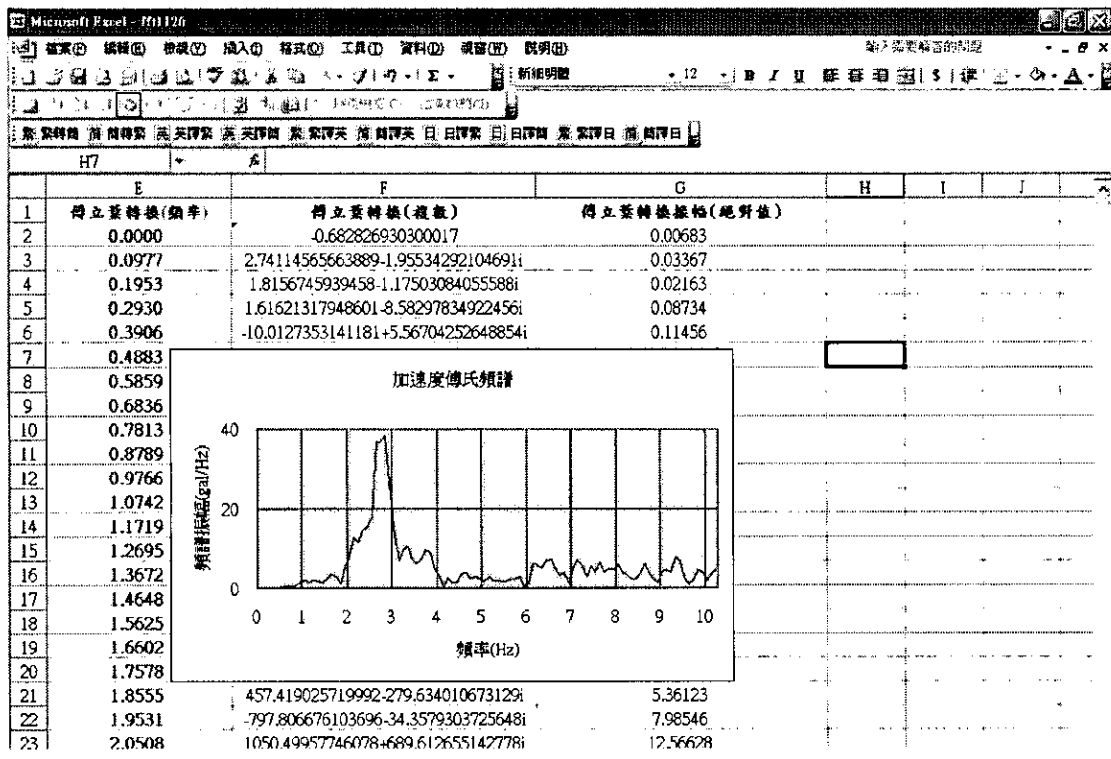


圖 6.30(b) Excel 傅立葉分析所得之加速度頻譜(96.02.14-11:26)



### 6.2.3 系統識別分析

本節將根據 6.1.4 節所述之識別模式針對牡丹水庫壩體之振動特性進行系統識別分析，由於牡丹水庫於壩底與壩頂分別安裝一部地震儀，本研究將以單一輸入(壩底)-單一輸出(壩頂)之 ARX 識別模式進行分析，識別之階數採用 100。此外，根據本案檢視地震儀之歷時資料顯示，壩體上下游加速度反應大於 25gal(訊號之解析度較高)且壩底與壩體地震儀記錄之訊號有同步者，僅 95.12.26(20:26)、96.02.14(11:26)及 96.02.14(11:30)等三次地震事件。本研究將針對此三次地震事件之加速度反應訊號進行系統識別分析。本案進行系統識別分析之程式及使用說明詳附錄八。

圖 6.31(a)為 95.12.26(20:26)地震事件經系統識別分析所得之傳遞函數圖(水位高程為 134.89m)，其最大頻譜峰值所對應之頻率約為 2.24Hz，該峰值頻率即為壩體之自然振動頻率。此外，根據系統識別所得之參數預測壩體加速度振動反應與地震儀量測結果之比較如圖 6.31(b)所示，預測結果與量測結果的趨勢頗為一致，說明識別所得之壩體振動頻率(2.24Hz)相當可靠，識別結果已充分掌握壩體之振動特性。此外，將壩體輸出與壩底輸入之傅氏頻譜相除亦可初步求得傳遞函數(圖 6.31(c))，由圖可知，最大頻譜峰值所對應之頻率約為 2.20Hz，與識別之結果十分接近。

圖 6.32(a)及圖 6.33(a)分別為 96.02.14(11:26)及 96.02.14(11:30)兩次地震事件經系統識別分析所得之傳遞函數圖(水位高程為 132.98m)，二者分別於 2.64Hz 及 2.61Hz 有一顯著峰值出現，該峰值頻率即為壩體之自然振動頻率。此外，根據系統識別所得之參數預測壩體加速度振動反應與地震儀量測結果之比較分別如圖 6.32(b)及圖 6.33(b)所示，預測結果與量測結果相當一致，說明識別所得之壩體振動頻率(平均值為 2.63Hz)十分可靠，系統識別結果已充分掌握壩體之振動特性。

綜上所述，95.12.26 地震事件識別所得之振動頻率為 2.24Hz (壩頂加速度峰值達 256gal，水位高程為 134.89m)，96.02.14 地震事件識別所得之振動頻率則為 2.63Hz (壩頂加速度峰值為 114gal，水位高程為 132.98m)，顯示隨

著水庫之水位高程愈高及地震強度愈大，系統識別所得之壩體振動頻率有降低的現象。

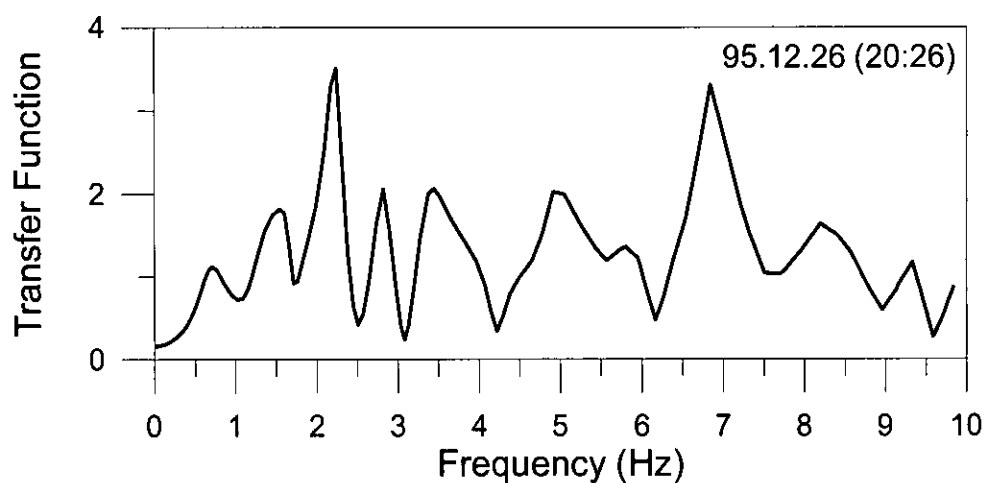


圖 6.31(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(90.02.14-11:26)

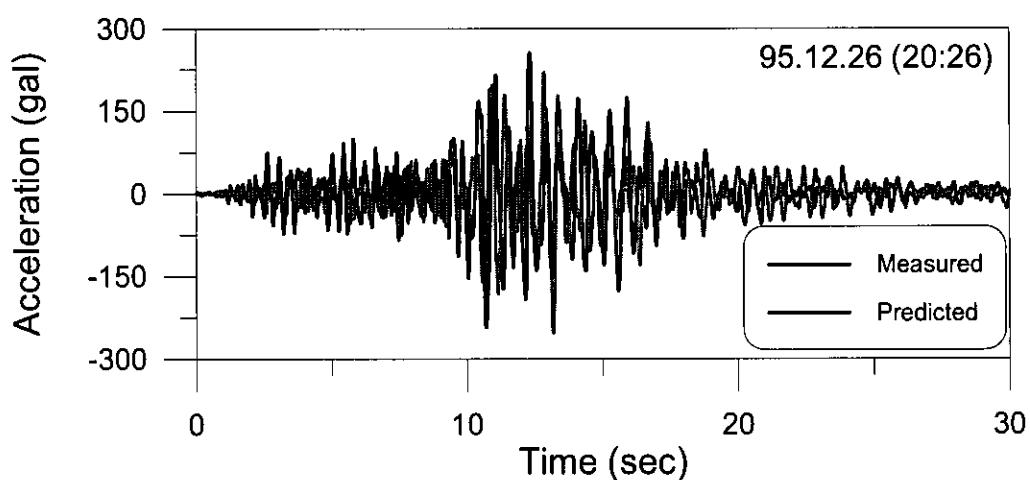


圖 6.31(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(95.12.26-20:26)

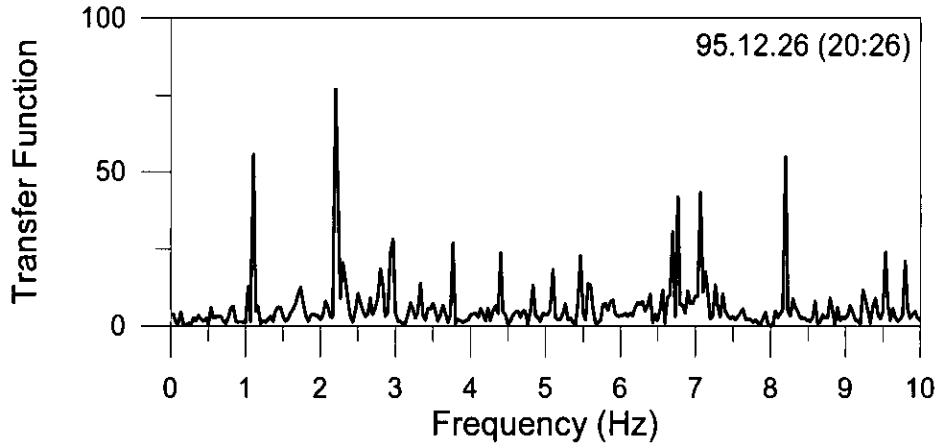


圖 6.31(c) 上下游方向之加速度傳遞函數(95.12.26-20:26)  
(壩體輸出與壩底輸入之傅氏頻譜相除求得)

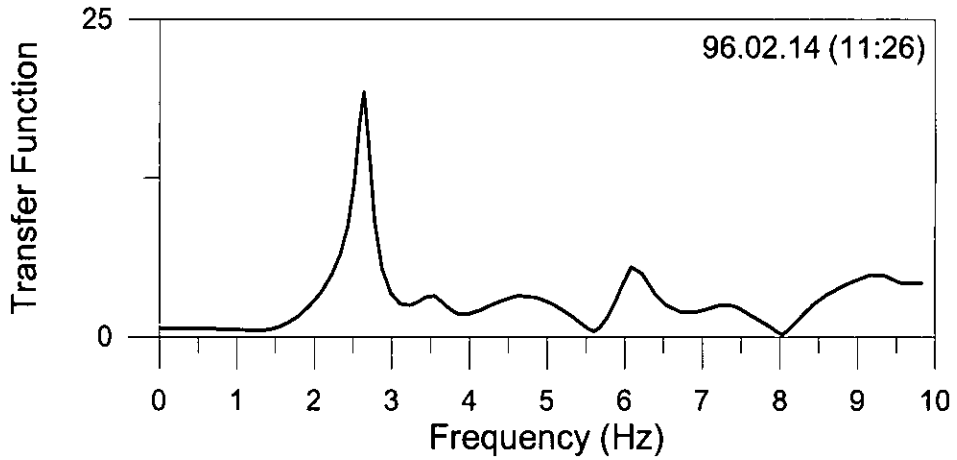


圖 6.32(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(96.02.14-11:26)

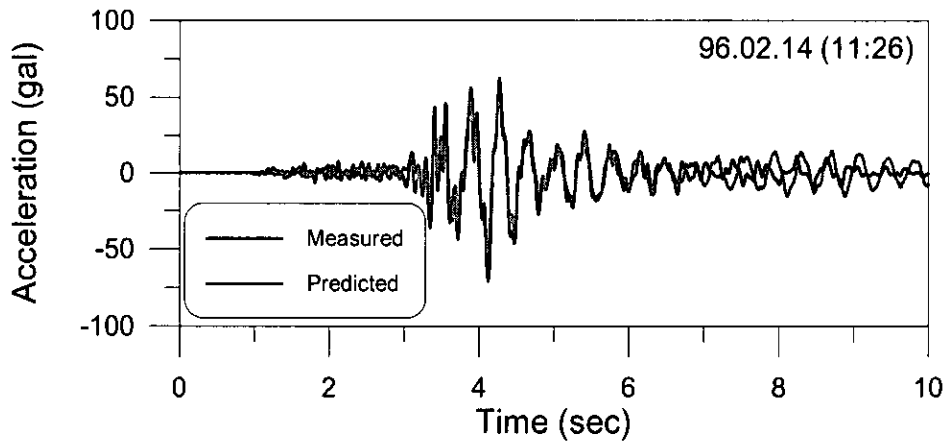


圖 6.32(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(96.02.14-11:26)

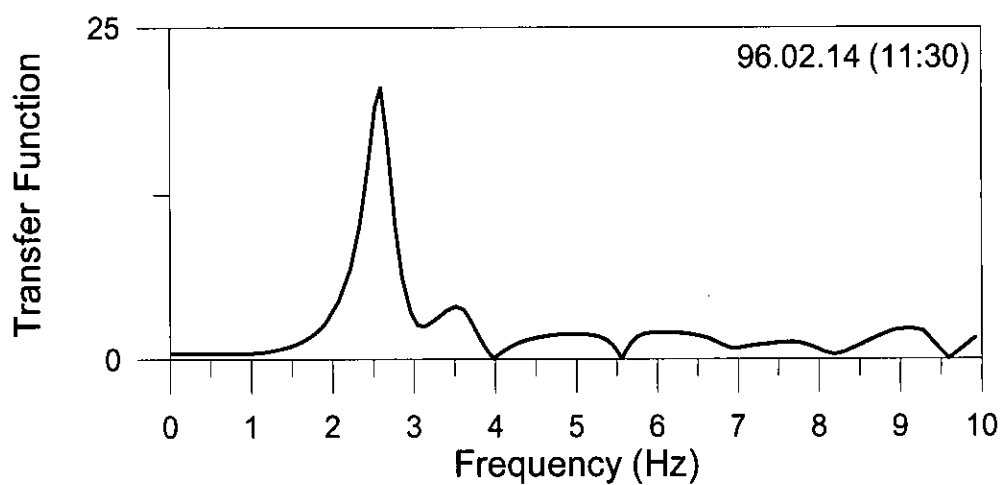


圖 6.33(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(96.02.14-11:30)

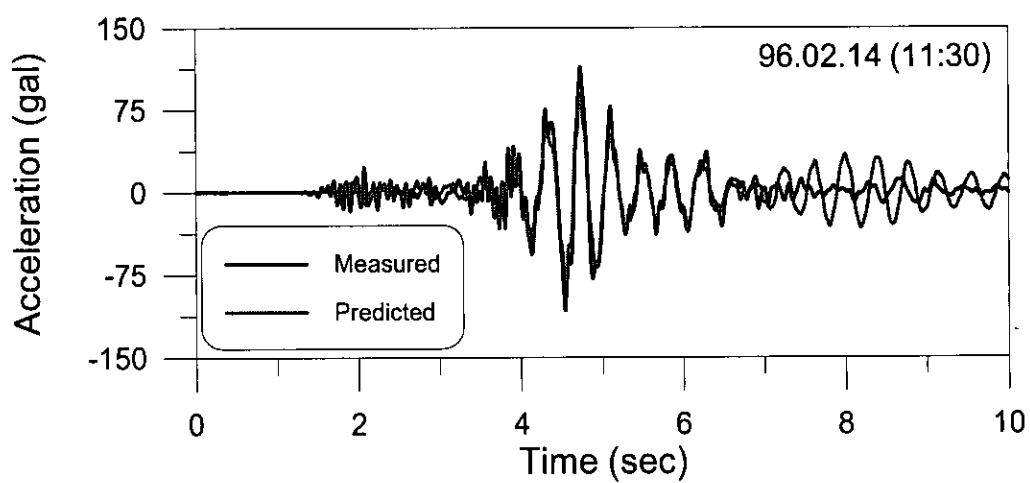


圖 6.33(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(96.02.14-11:30)

### 6.3 鯉魚潭水庫之系統識別分析

鯉魚潭水庫之地震儀配置如圖 6.34 所示，其壩底及壩座附近安裝 3 組地震儀(T4、BASE 及 CREST)，壩體則安裝 4 組地震儀(T1、T2、T3 及 T5)，88 年 9 月 21 日於集集發生規模 7.3 之強震，並陸續發生規模 6.0 之餘震，本水庫亦擷取多筆壩體振動之加速度訊號，壩體各方向加速峰值如表 6.2 所示(僅顯示 BASE 及 T2 測站之部份資料)。此外，從 88 年至 91 年之地震事件記錄資料中，本案從該資料中挑選 7 次地震事件進行後續之分析(BASE 之加速度峰值 $>20\text{gal}$ ，且系統識別分析之預測歷時反應無發散情況者)。

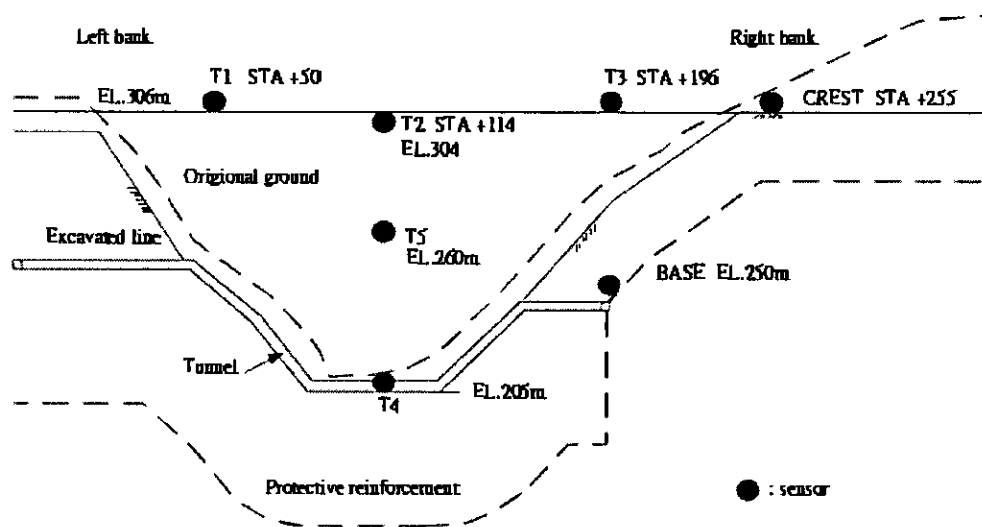


圖 6.34 鯉魚潭水庫之地震儀配置圖(王升錦)

表 6.2 鯉魚潭水庫之地震事件記錄資料

| 時間             | 規模  | BASE 壩底(gal) |        |       | T2 壩頂(gal) |        |        |
|----------------|-----|--------------|--------|-------|------------|--------|--------|
|                |     | 平行壩軸         | 垂直壩軸   | 垂直向   | 平行壩軸       | 垂直壩軸   | 垂直向    |
| 09/21<br>01:47 | 7.3 | 100.49       | 124.82 | 98.52 | 229.57     | 245.26 | 150.77 |
| 09/21<br>01:51 | 6.1 | 122.11       | 90.90  | 32.41 | 162.72     | 116.27 | 39.96  |
| 09/21<br>02:05 | 6.0 | 27.33        | 46.99  | 19.15 | 109.94     | 81.20  | 39.26  |
| 09/21<br>02:11 | 5.5 | 77.79        | 62.80  | 37.21 | 125.93     | 143.49 | 79.77  |
| 06/11<br>02:23 | 6.7 | 36.87        | 37.23  | 25.26 | 88.75      | 100.34 | 55.46  |
| 01/08<br>17:00 | 5.0 | 59.28        | 24.18  | 31.24 | 163.24     | 125.52 | 41.52  |
| 03/31<br>06:52 | 6.8 | 23.29        | 22.80  | 11.94 | 58.07      | 73.94  | 30.04  |

(註：09/21 為 88 年；06/11 為 89 年；01/08 及 03/31 為 91 年)

### 6.3.1 時域分析

時域分析之目的主要是瞭解地震強度的大小並繪製其加速度振動反應歷時，俾清楚呈現地震儀所記錄之振動訊號，同時可檢視地震儀是否正常運作。圖 6.35 至圖 6.41 為部份地震事件之壩體上下游加速度歷時(取 BASE 之加速度峰值>20gal 者)，由圖可知，地震儀之訊號有隨地震波動的趨勢，顯示地震儀及資料擷取系統於上述地震下之功能應為正常狀態。

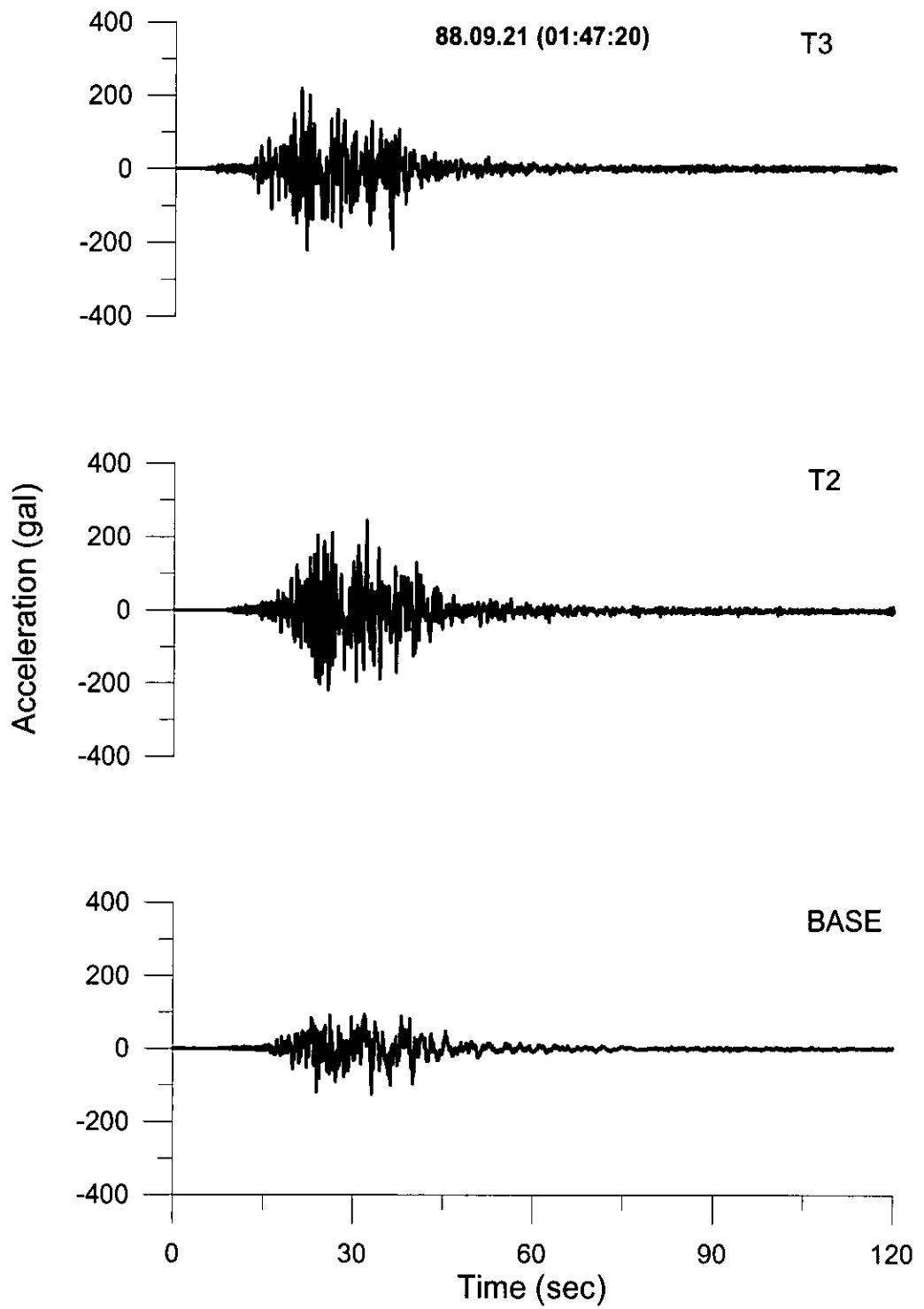


圖 6.35 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-01:47:20)

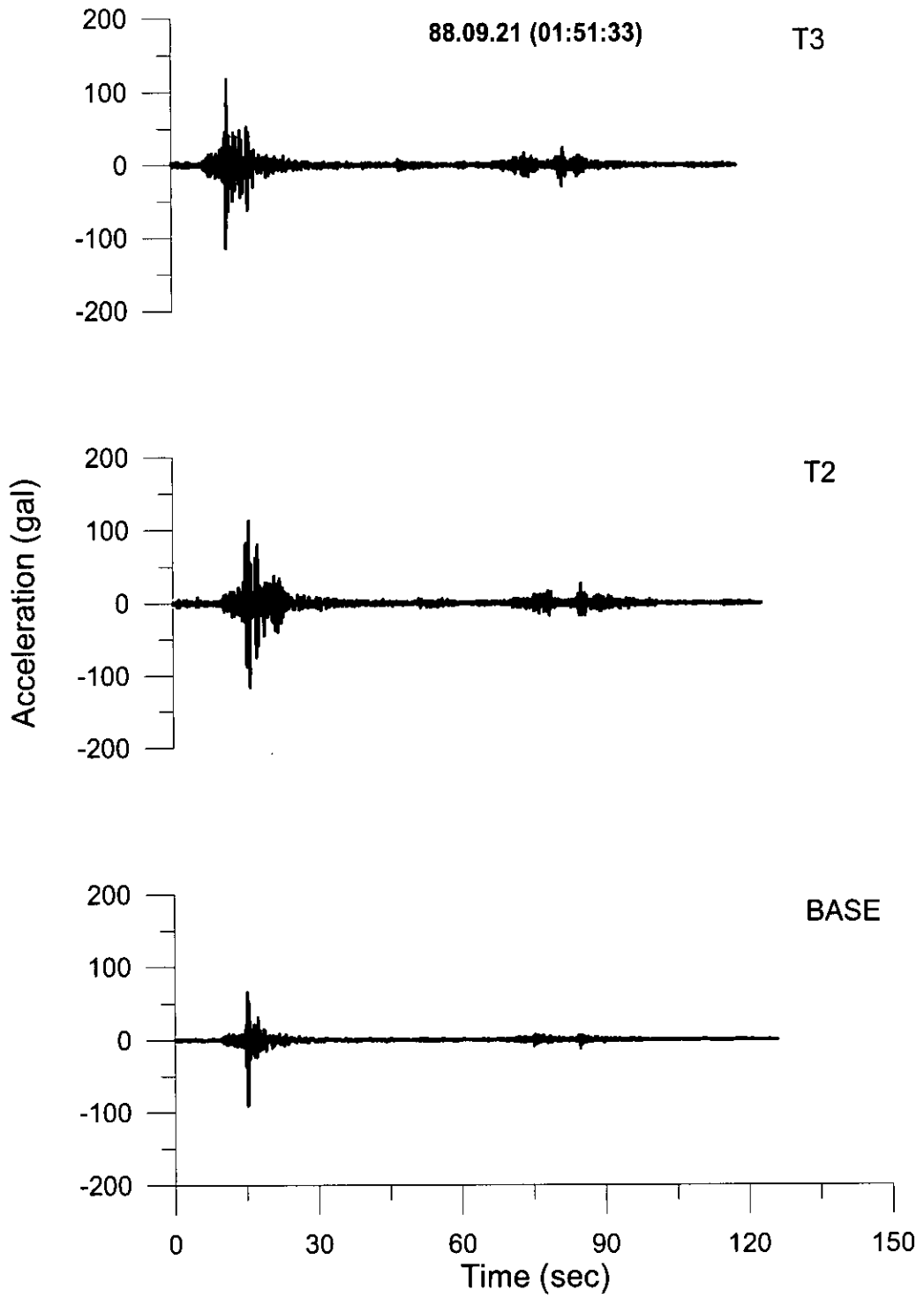


圖 6.36 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-01:51:33)



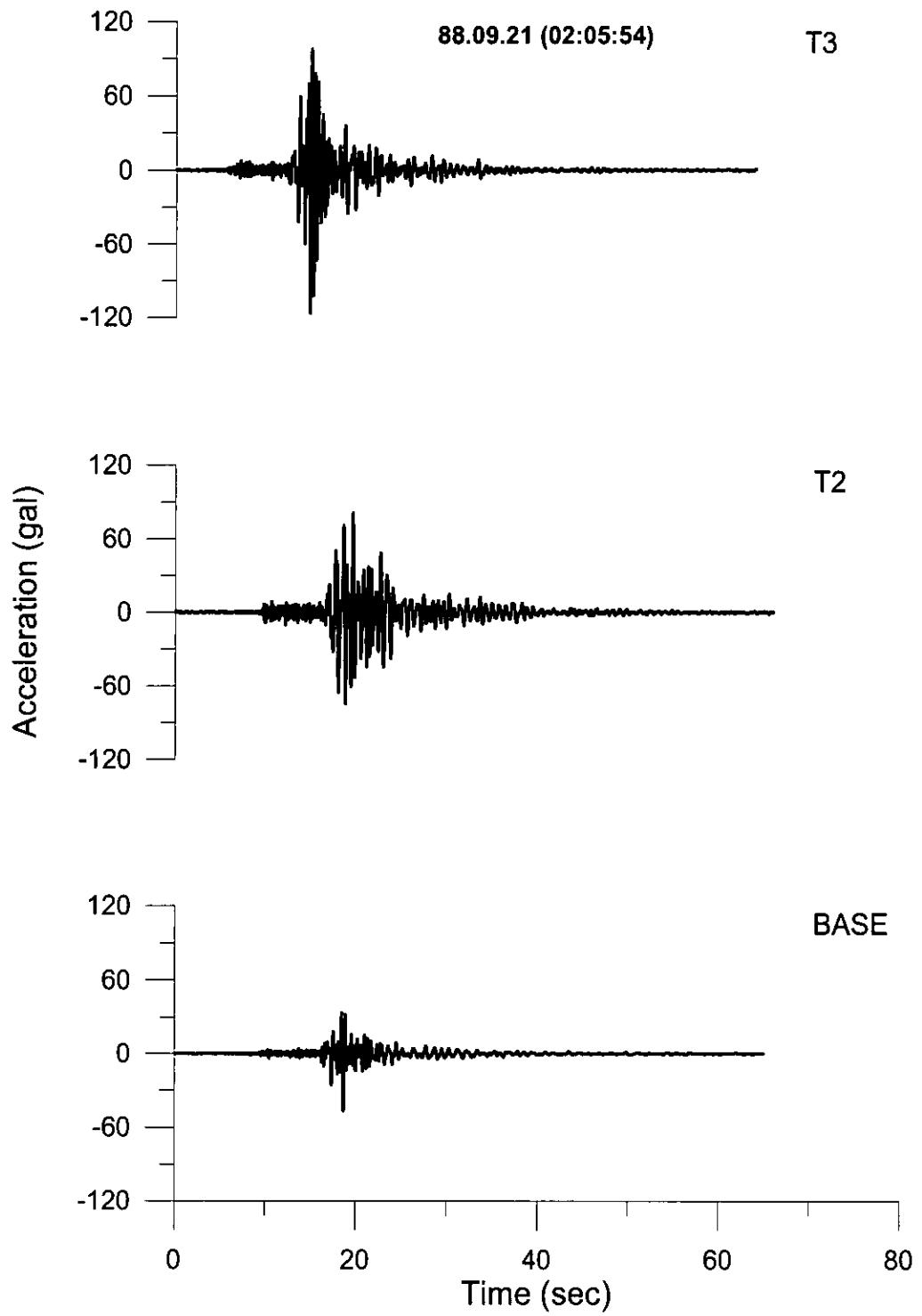


圖 6.37 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-02:05:54)

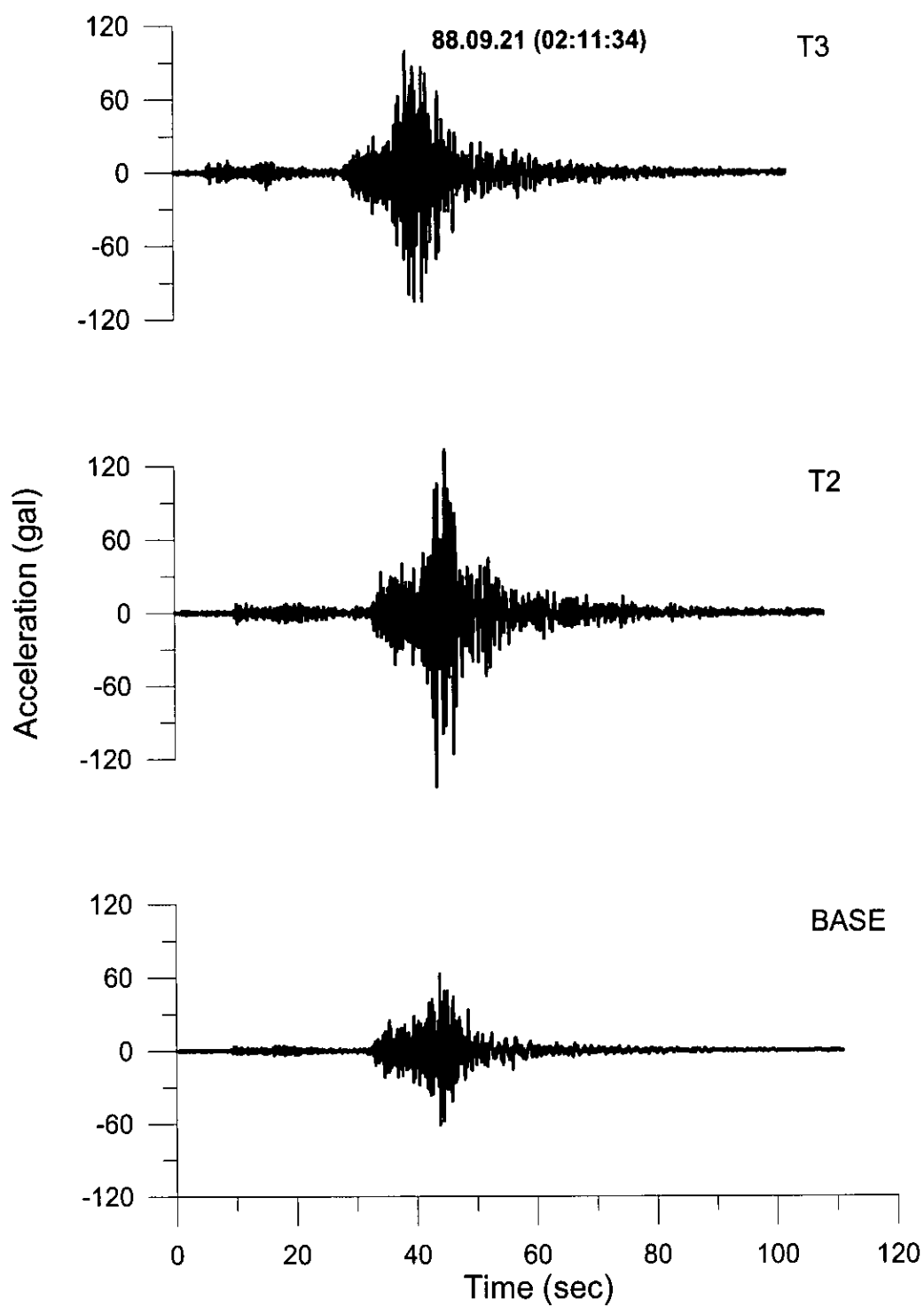


圖 6.38 上下游方向之加速度歷時(88.09.21-02:11:34)

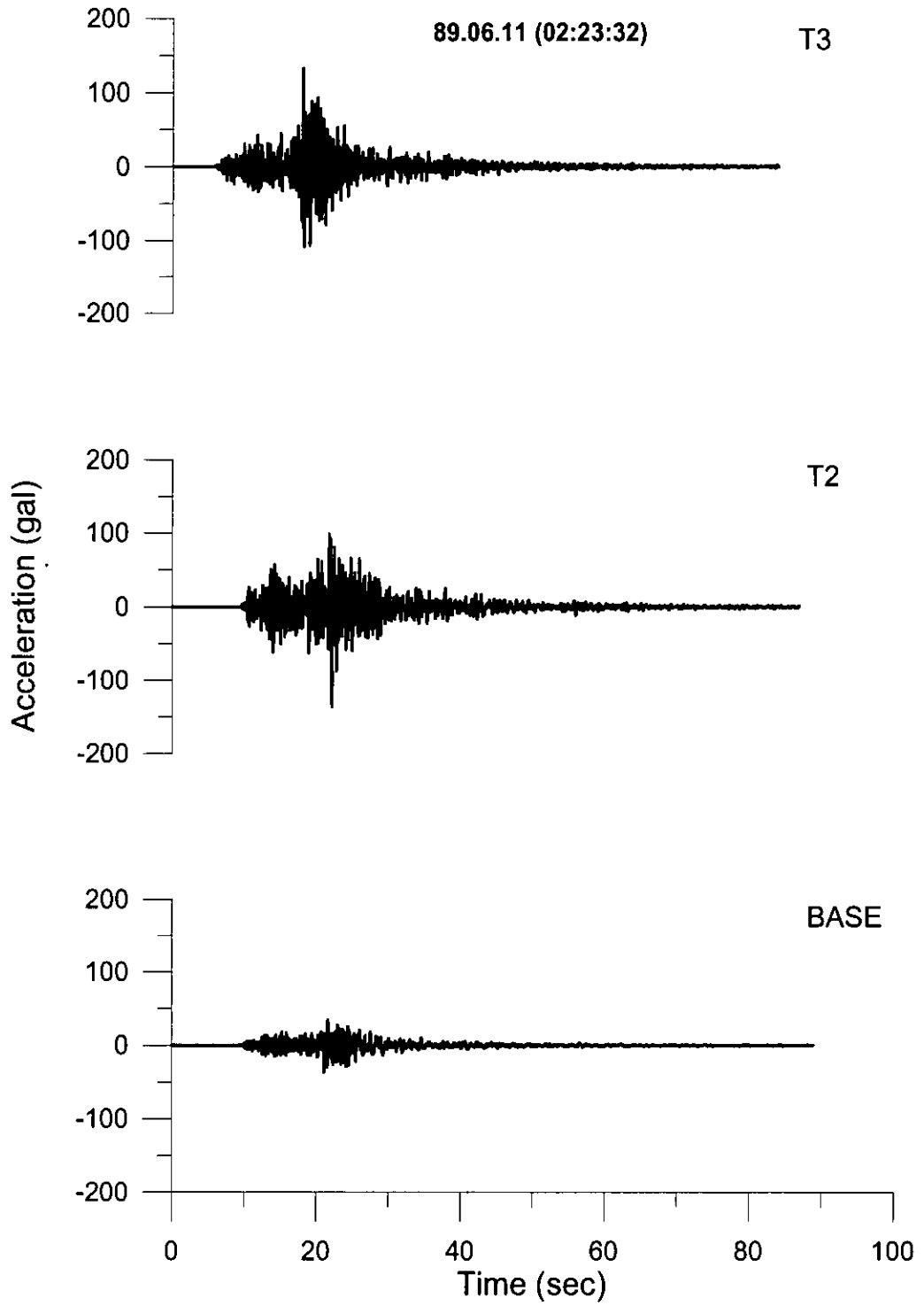


圖 6.39 上下游方向之加速度歷時(89.06/11-02:23:32)

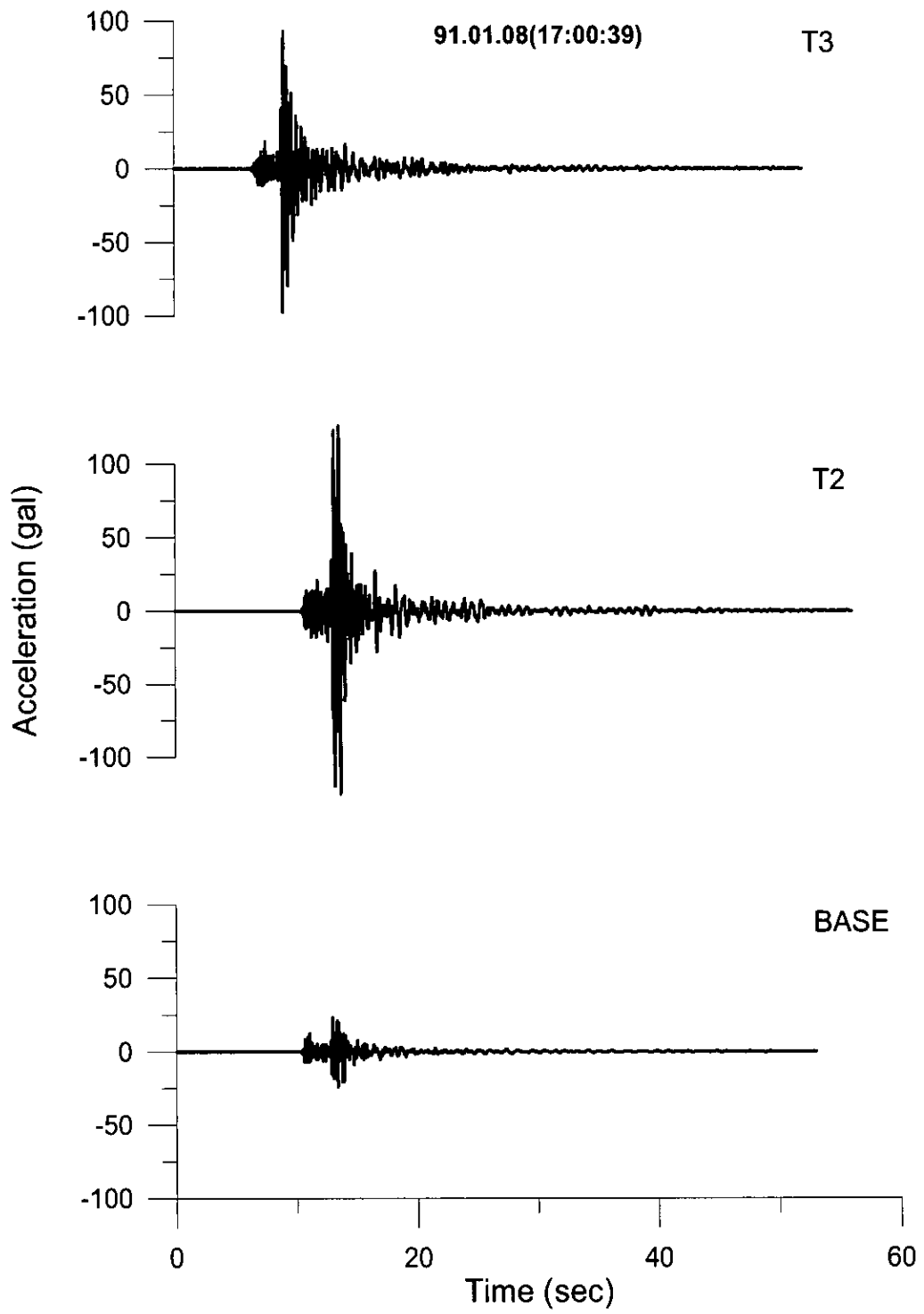


圖 6.40 上下游方向之加速度歷時(91.01.08-17:00:39)

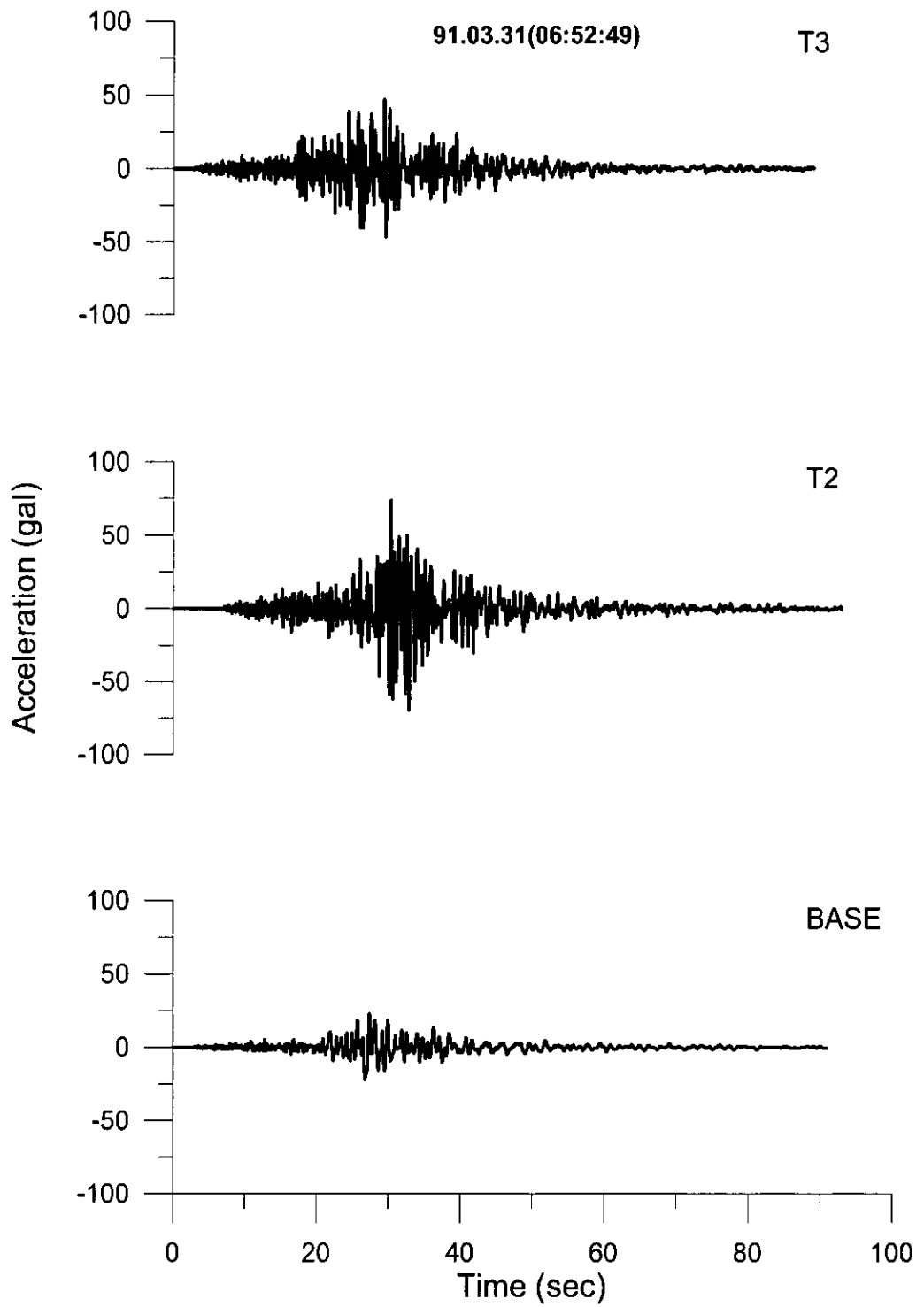


圖 6.41 上下游方向之加速度歷時(92.03.31-06:52:49)

### 6.3.2 頻域分析

圖 6.42 至圖 6.48 為歷次地震事件之 T2、T3 及 BASE 地震儀上下游方向加速度傅氏頻譜。由圖可知，除 91 年 1 月 8 日之壩體顯著頻率內涵分佈達 12Hz 外(由圖 6.40 之歷時圖可知，振動反應時間較為短暫迅速，因此可能將高頻的反應激發)，其餘 6 次地震事件之壩體主要頻率內涵普遍集中在 6Hz 之頻寬範圍內，且最大峰值主要出現在 1Hz~3Hz 附近，上述峰值所對應之頻率即為地表或壩體之主要振動頻率，可透過系統識別分析加以確認。

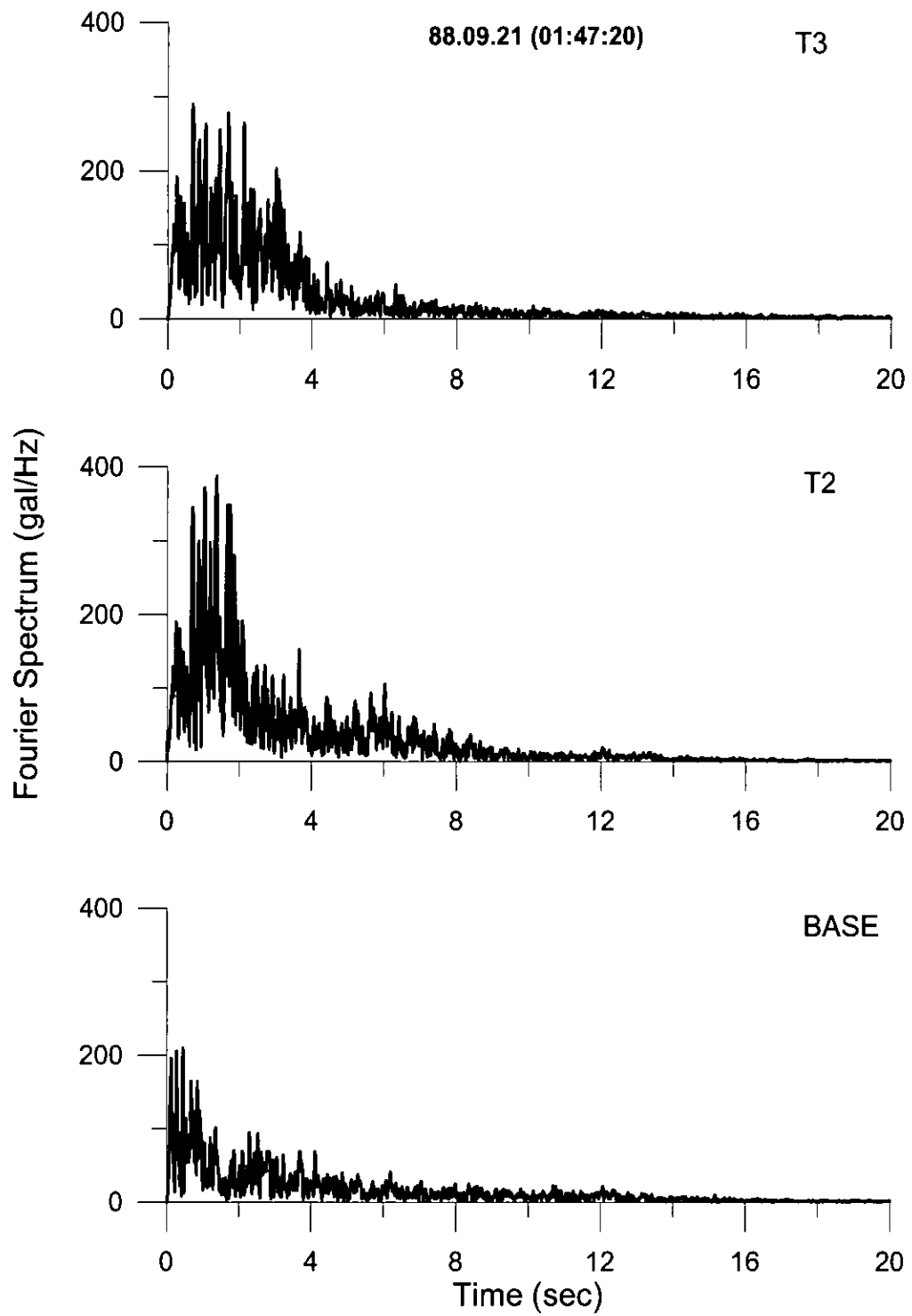


圖 6.42 上下游方向之加速度傅氏頻譜(89.09.21-01:47:20)

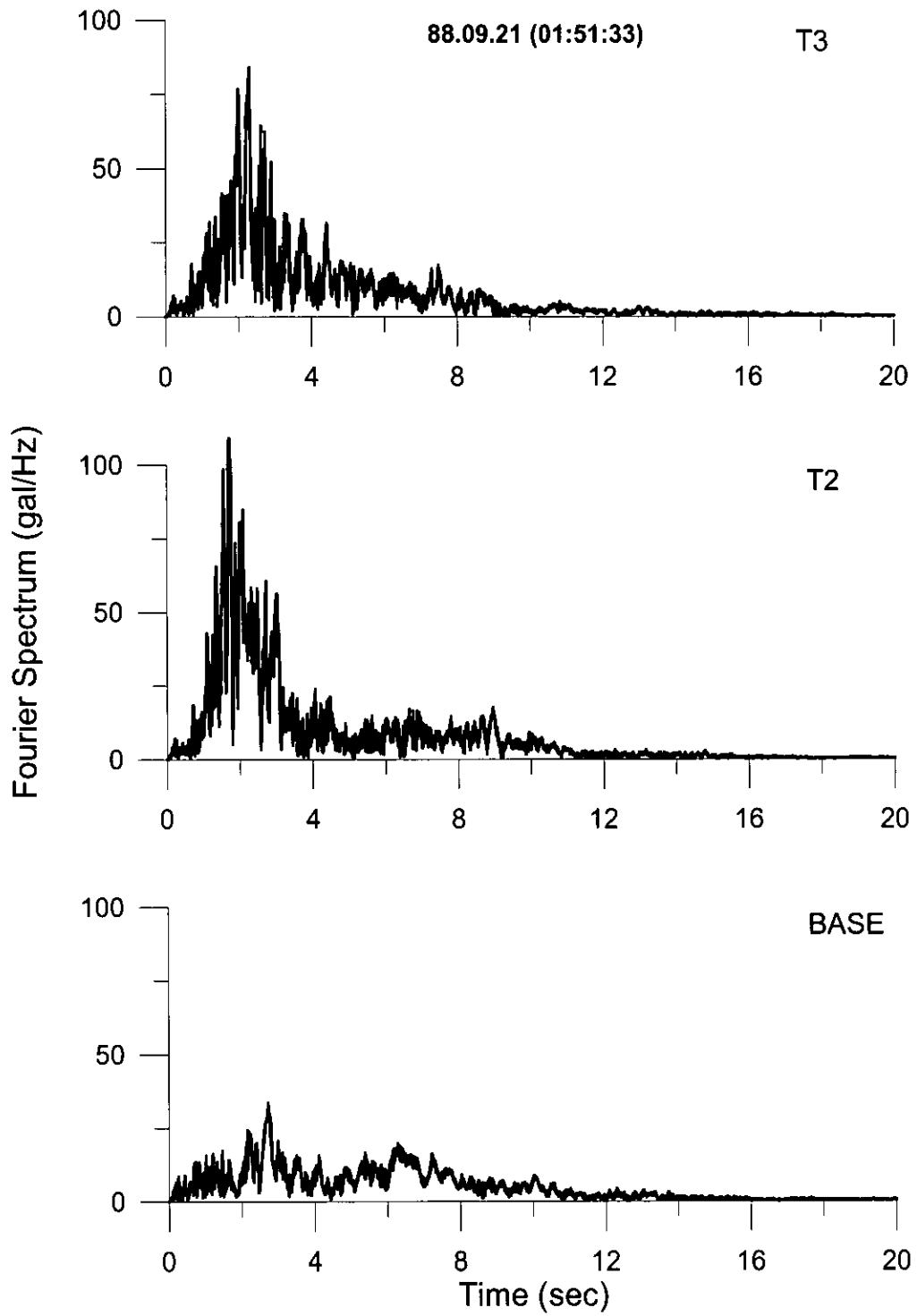


圖 6.43 上下游方向之加速度傅氏頻譜(88.09.21-01:51:33)



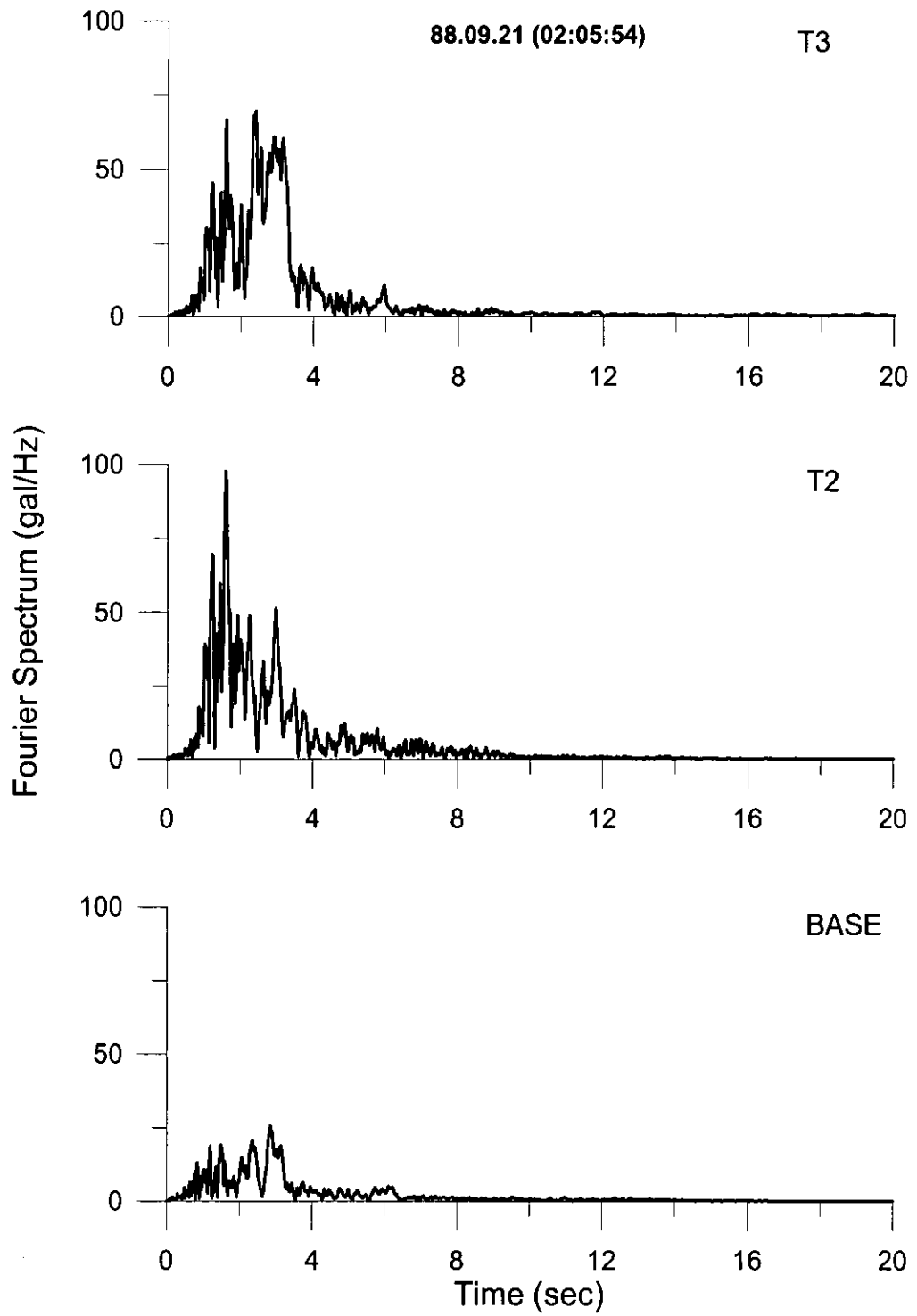


圖 6.44 上下游方向之加速度傅氏頻譜(88.09.21-02:05:54)

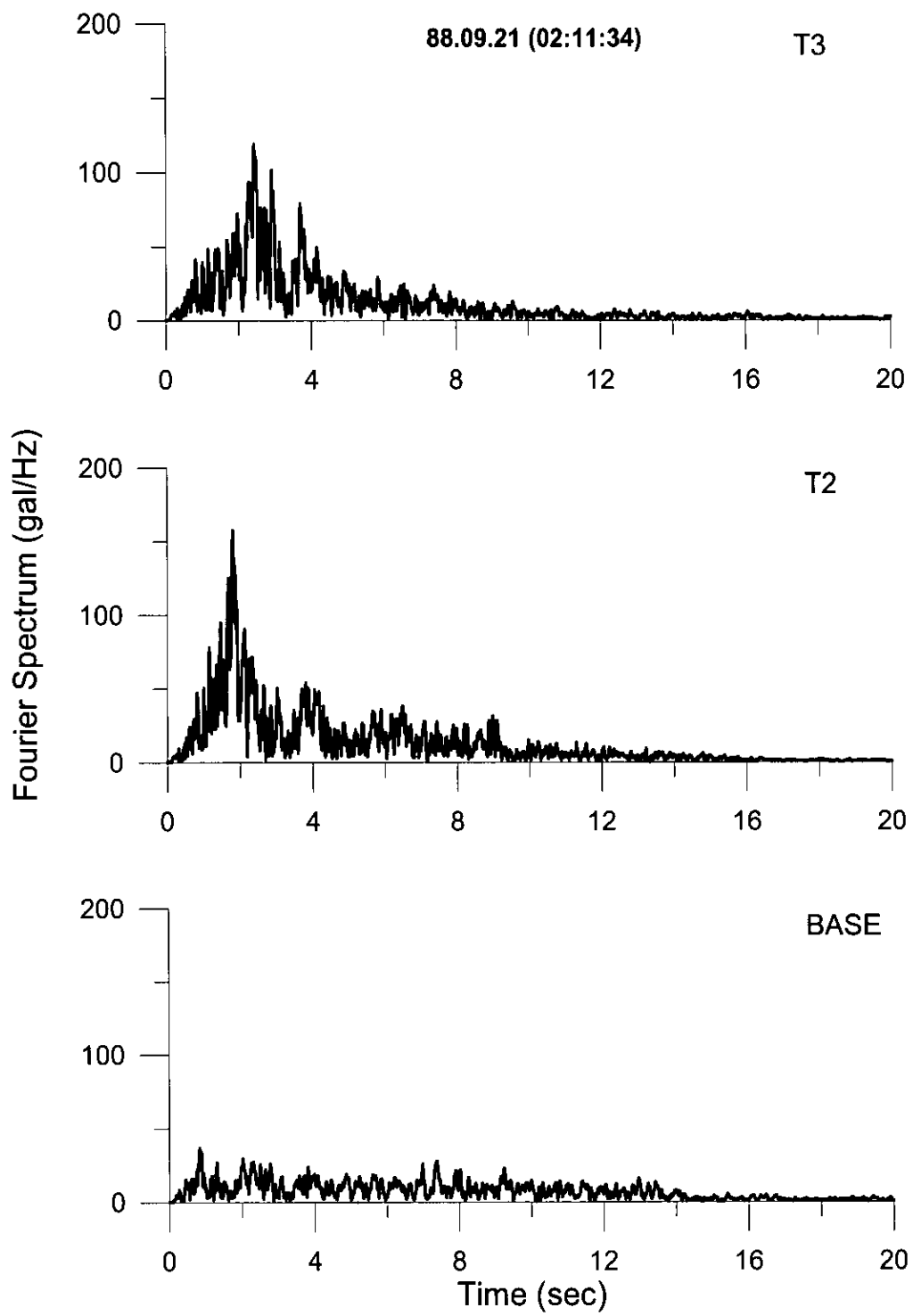


圖 6.45 上下游方向之加速度傅氏頻譜(88.09.21-02:11:34)

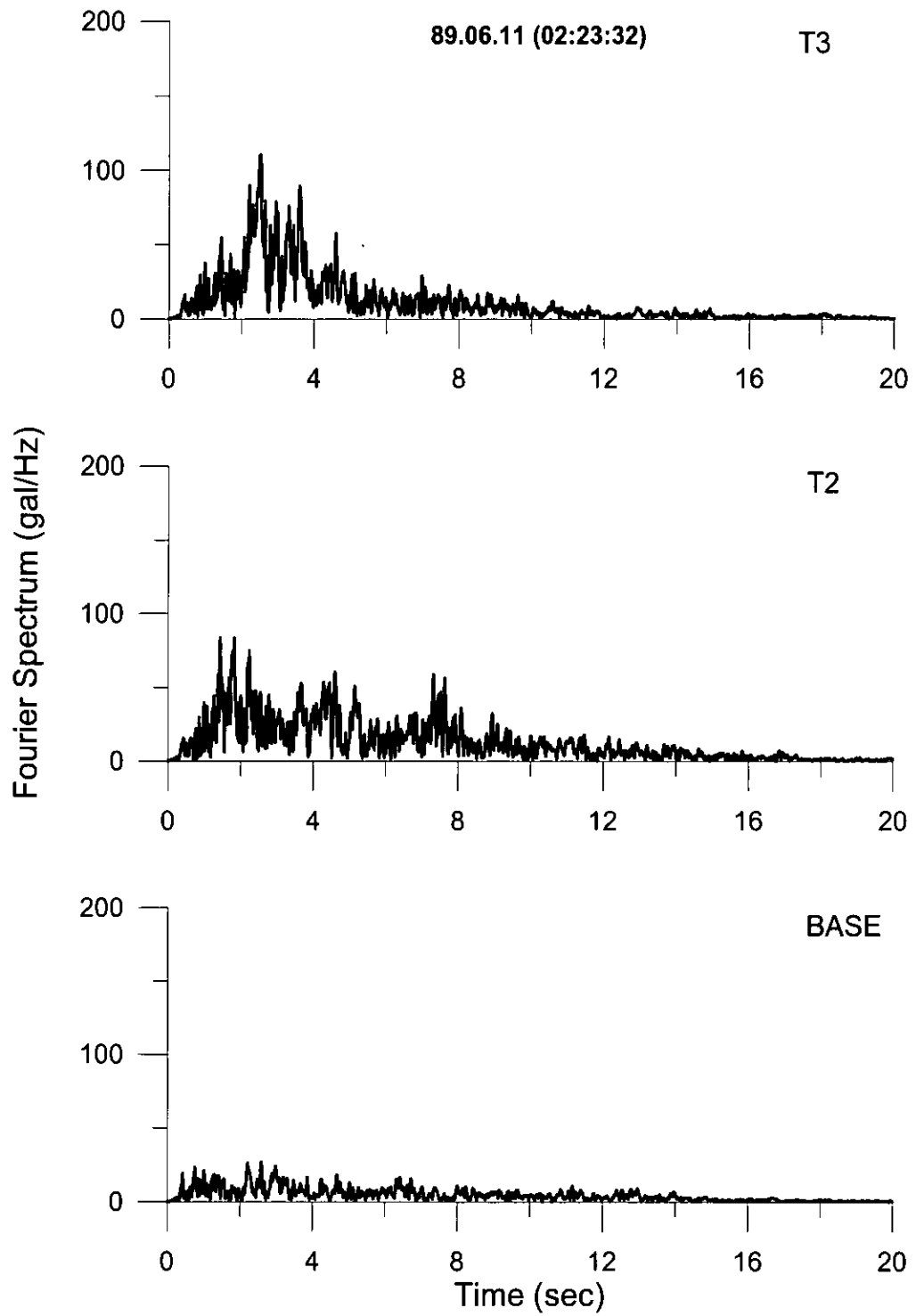


圖 6.46 上下游方向之加速度傅氏頻譜(89.06.11-02:23:32)

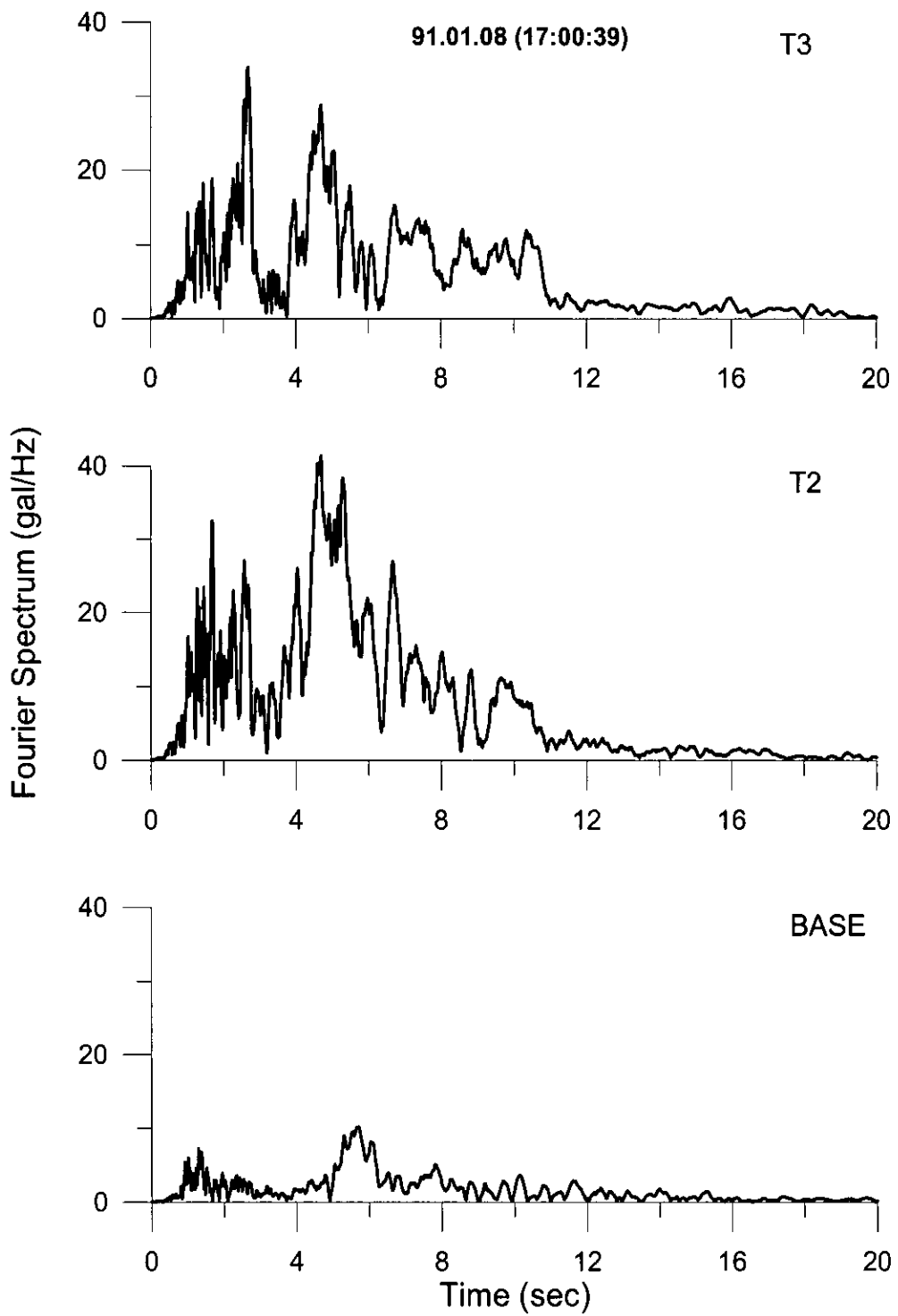


圖 6.47 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.01.08-17:00:39)

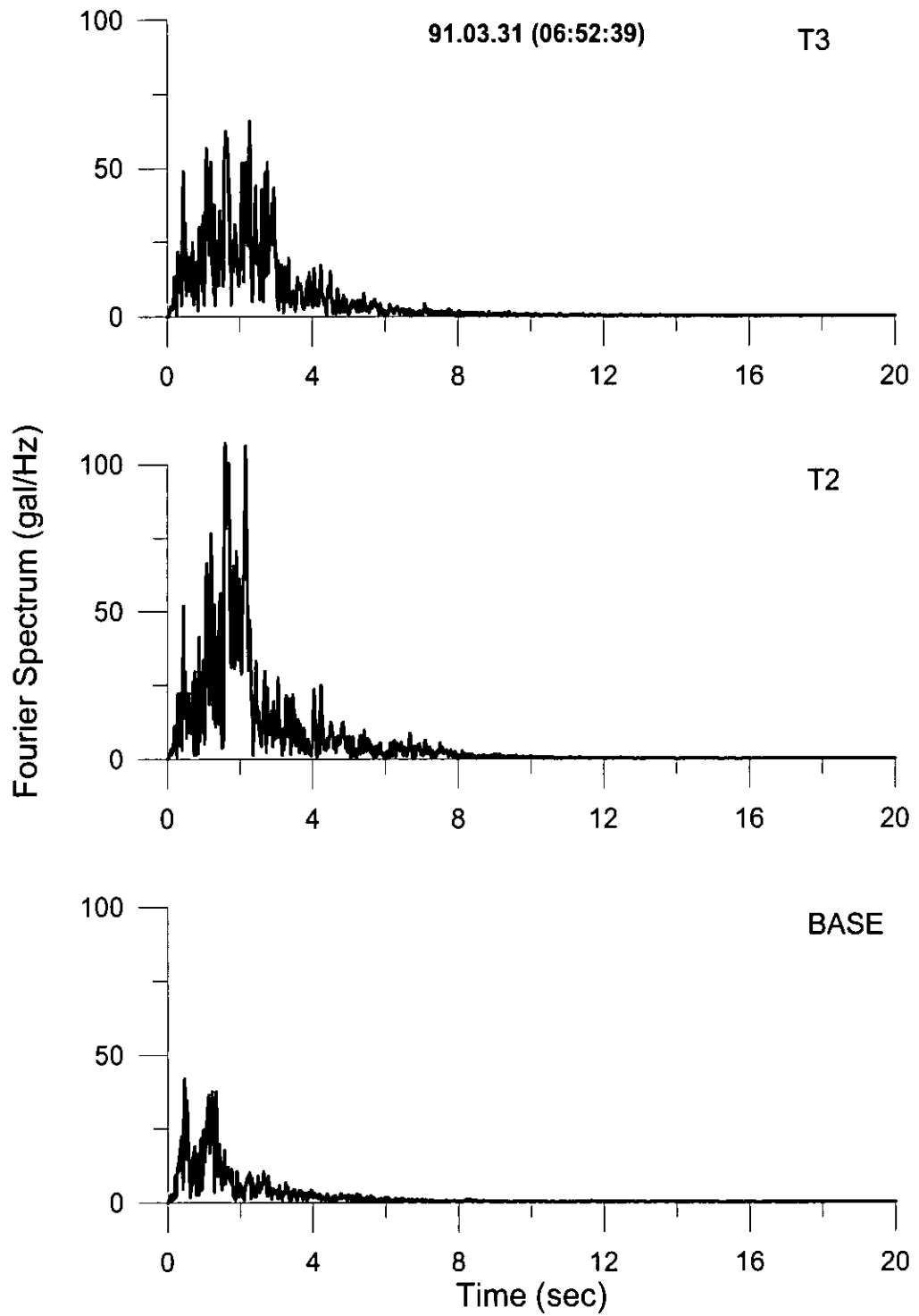


圖 6.48 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.03.31-06:52:39)

### 6.3.3 系統識別分析

本案將根據 6.1.4 節所述之識別模式針對鯉魚潭水庫壩體之振動特性進行系統識別分析，由於鯉魚潭水庫於壩底與壩座附近共設置三部地震儀，壩體則設置四部地震儀，本研究擬以多重輸入(BASE 及壩座測站)-多重輸出(壩頂 T1、T2 及 T3 測站)之 ARX 識別模式進行分析，識別之階數採用 200。

圖 6.49(a)至圖 6.55(a)為歷次(七次)地震事件識別所得之傳遞函數，由圖可知，各顯著峰值出現之頻率約介於 1.03Hz 至 2.61Hz 之間。此外，根據系統識別所得之參數預測壩體加速度振動反應與地震儀量測結果之比較如圖 6.49(b)至圖 6.55(b)所示，預測結果與量測結果的趨勢十分一致(惟預測結果有較實測結果稍低的現象，識別之阻尼比可能有高估的現象)，說明識別所得之壩體振動頻率相當可靠，識別結果已充分掌握壩體之振動特性。

綜上所述，歷次(七次)地震事件識別所得之顯著峰值出現之頻率約介於 1.03Hz 至 2.61Hz 之間(垂直壩軸方向)，王升錦等人曾針對鯉魚潭水庫進行壩體受震反應分析，其於結論中指出”集集地震時垂直壩軸方向的週期為 0.61 秒，平行壩軸方向的主振週期為 0.66 秒；當地震規模較小時，其垂直壩軸方向的主振週期為 0.36 秒”。根據上述說明，其垂直壩軸方向之頻率介於  $1/0.61=1.64\text{Hz}$  及  $1/0.36=2.78\text{Hz}$  之間，其下界頻率(1.64Hz)較本案識別的結果高(1.03Hz)，上界頻率(2.78Hz)則與本案識別的結果(2.61Hz)接近。

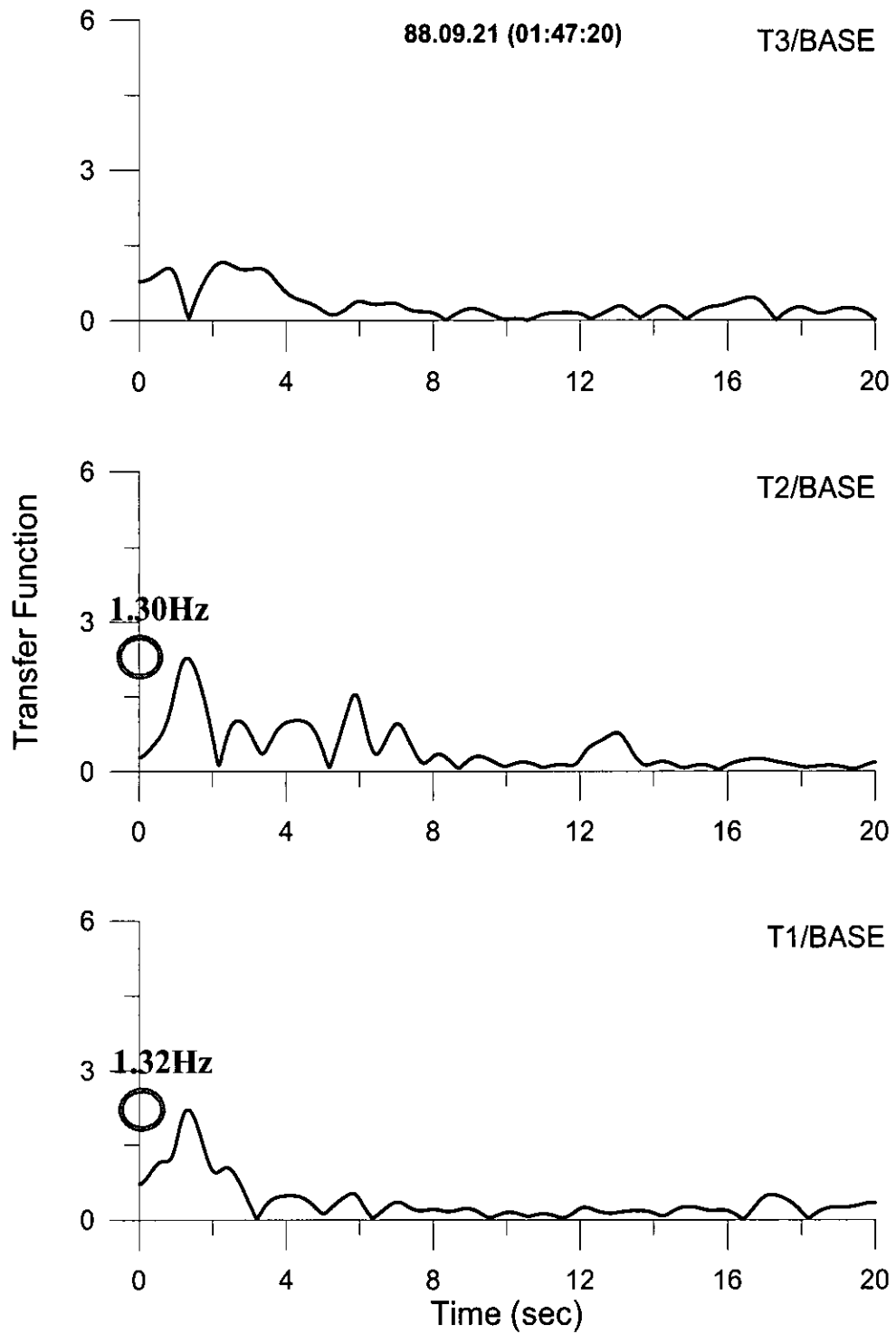


圖 6.49(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(89.09.21-01:47:20)

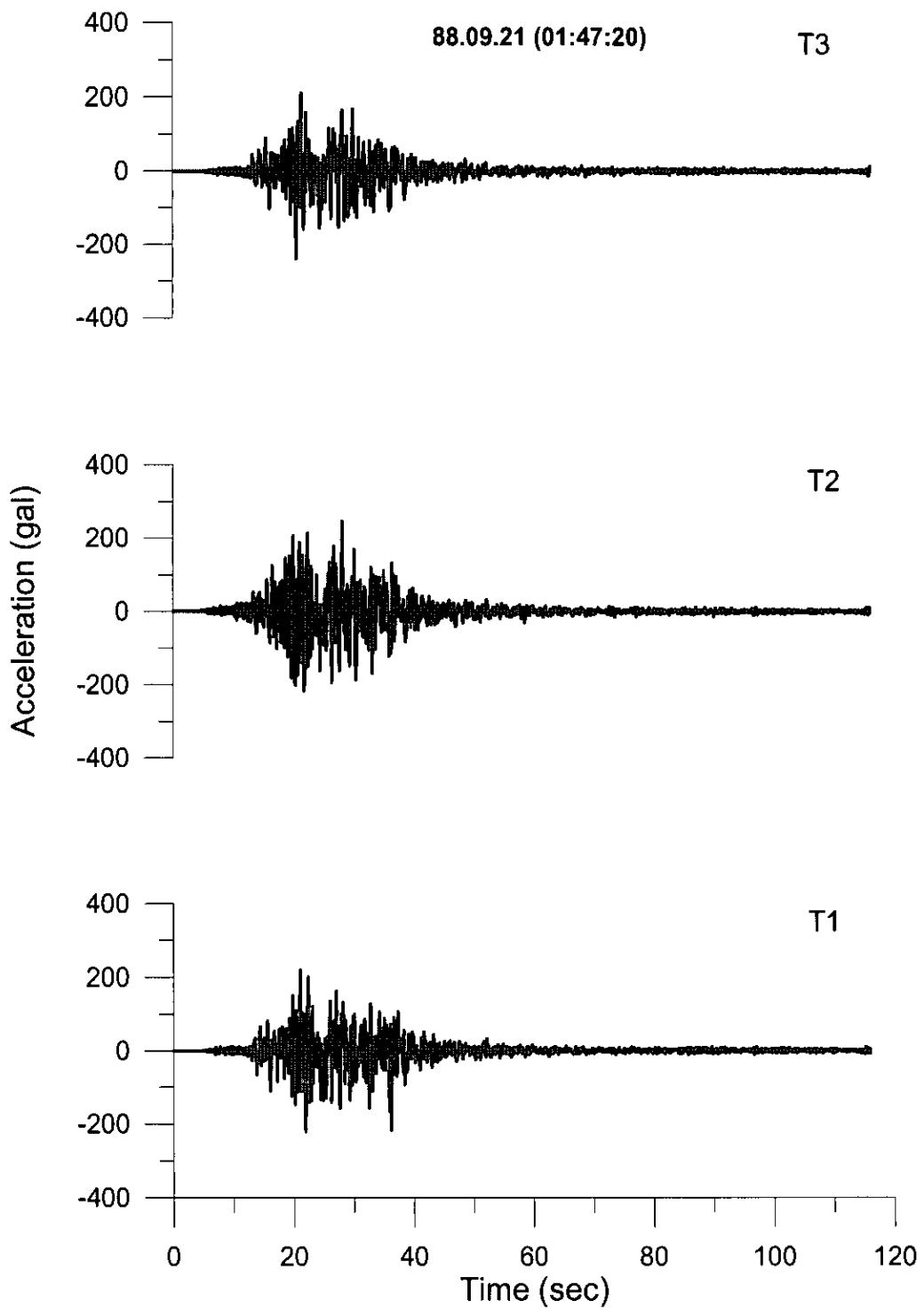


圖 6.49(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(89.09.21-01:47:20)



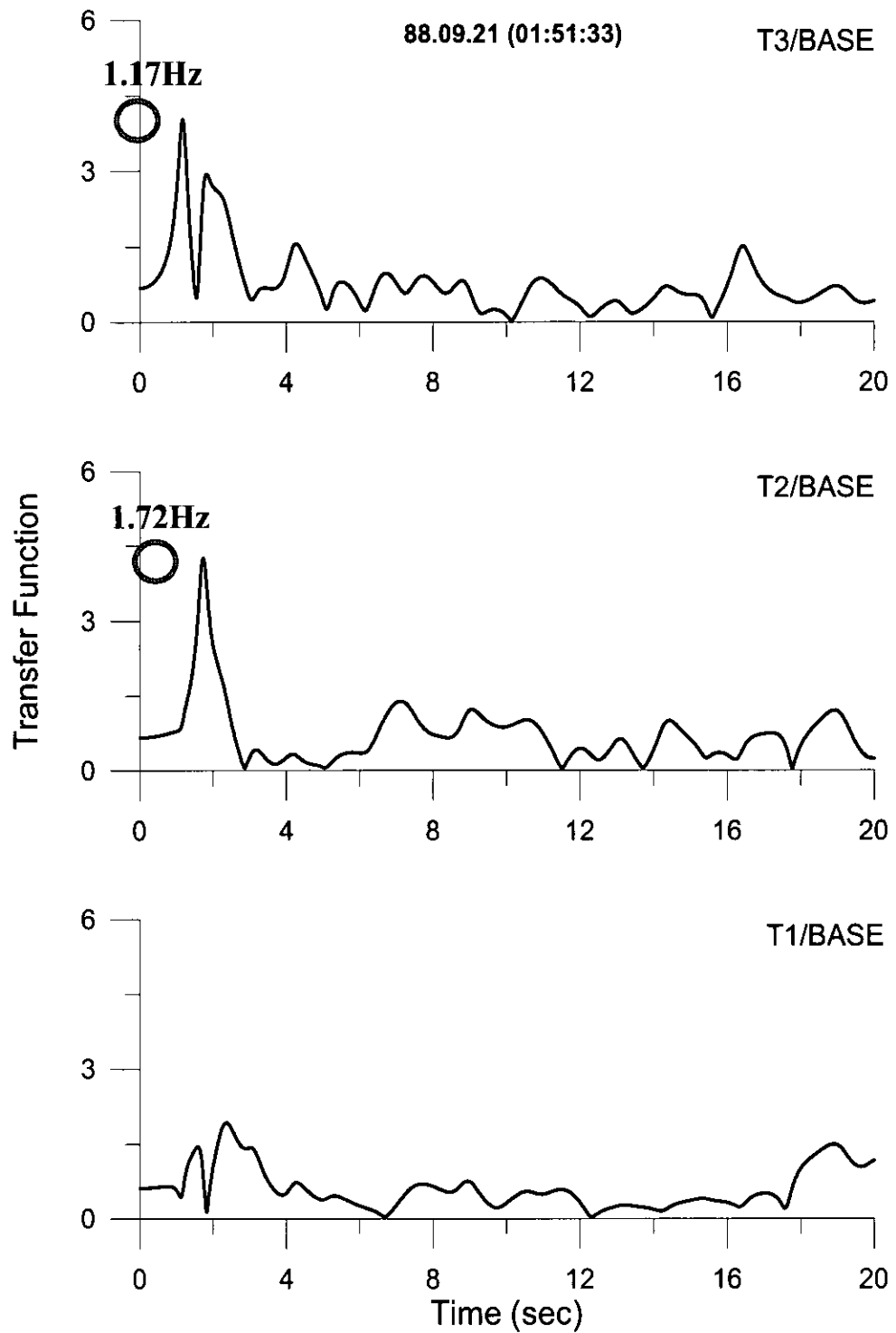


圖 6.50(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(88.09.21-01:51:33)

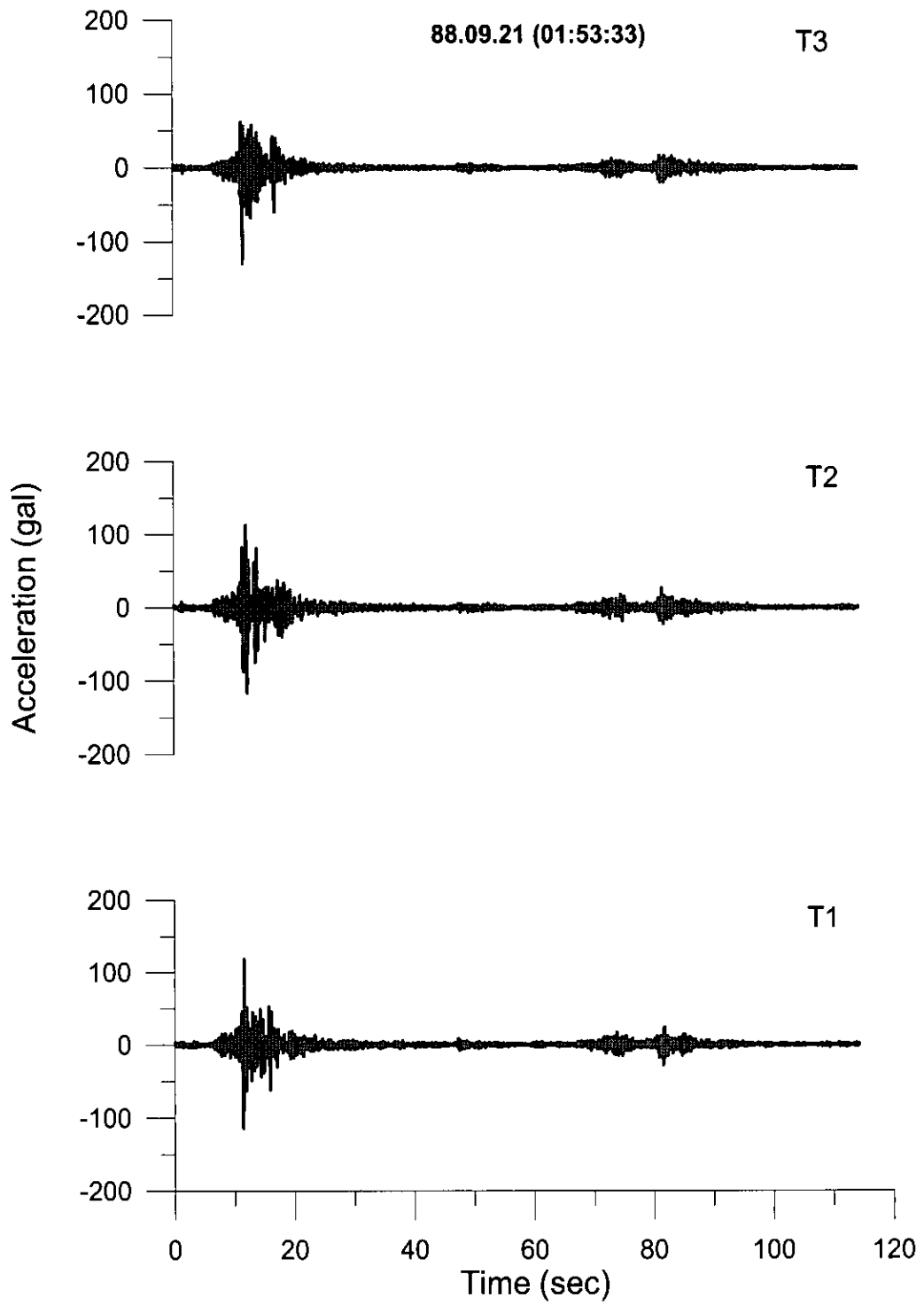


圖 6.50(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(88.09.21-01:53:33)

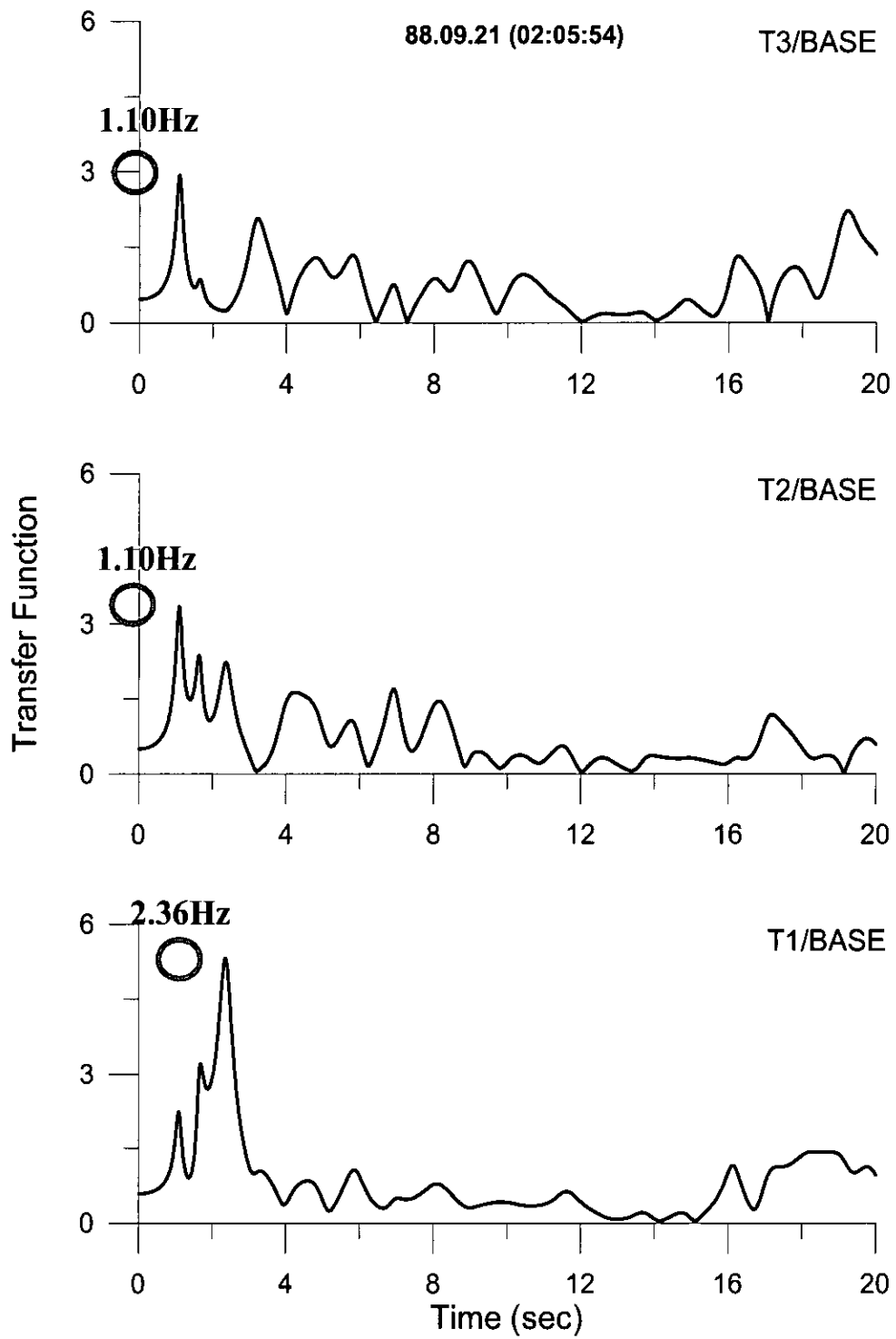


圖 6.51(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(88.09.21-02:05:54)

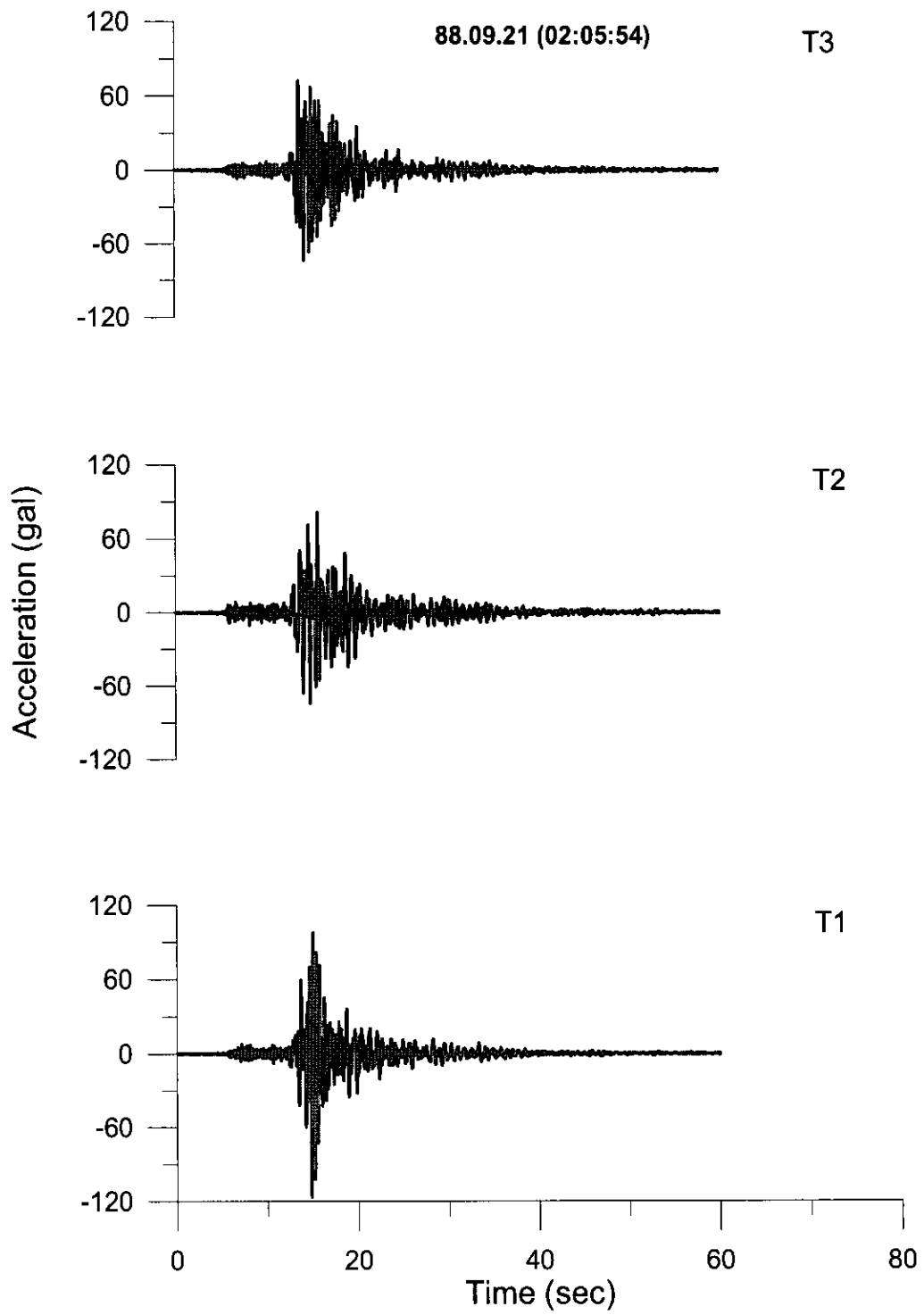


圖 6.51(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(88.09.21-02:05:54)

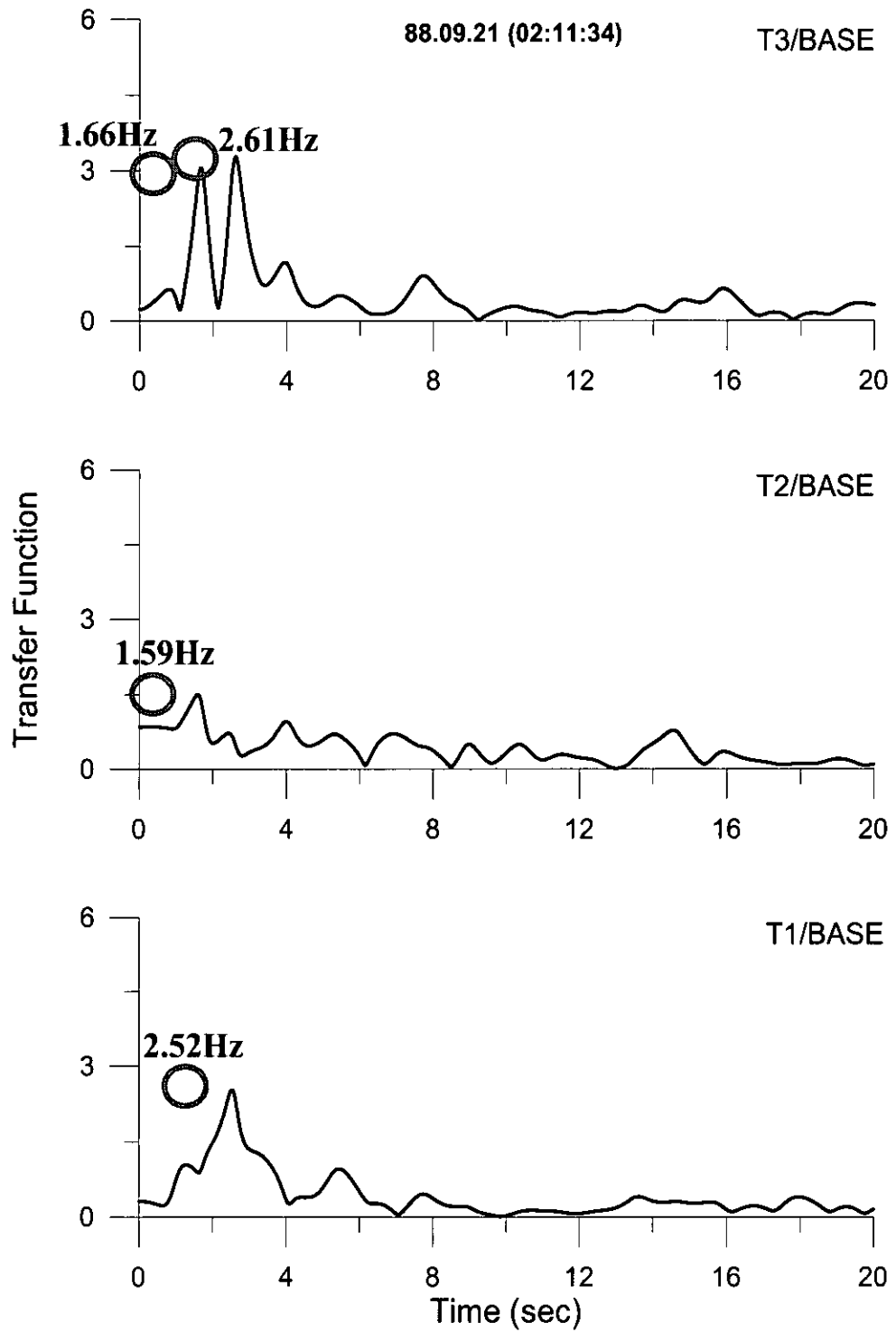


圖 6.52(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(88.09.21-02:11:34)

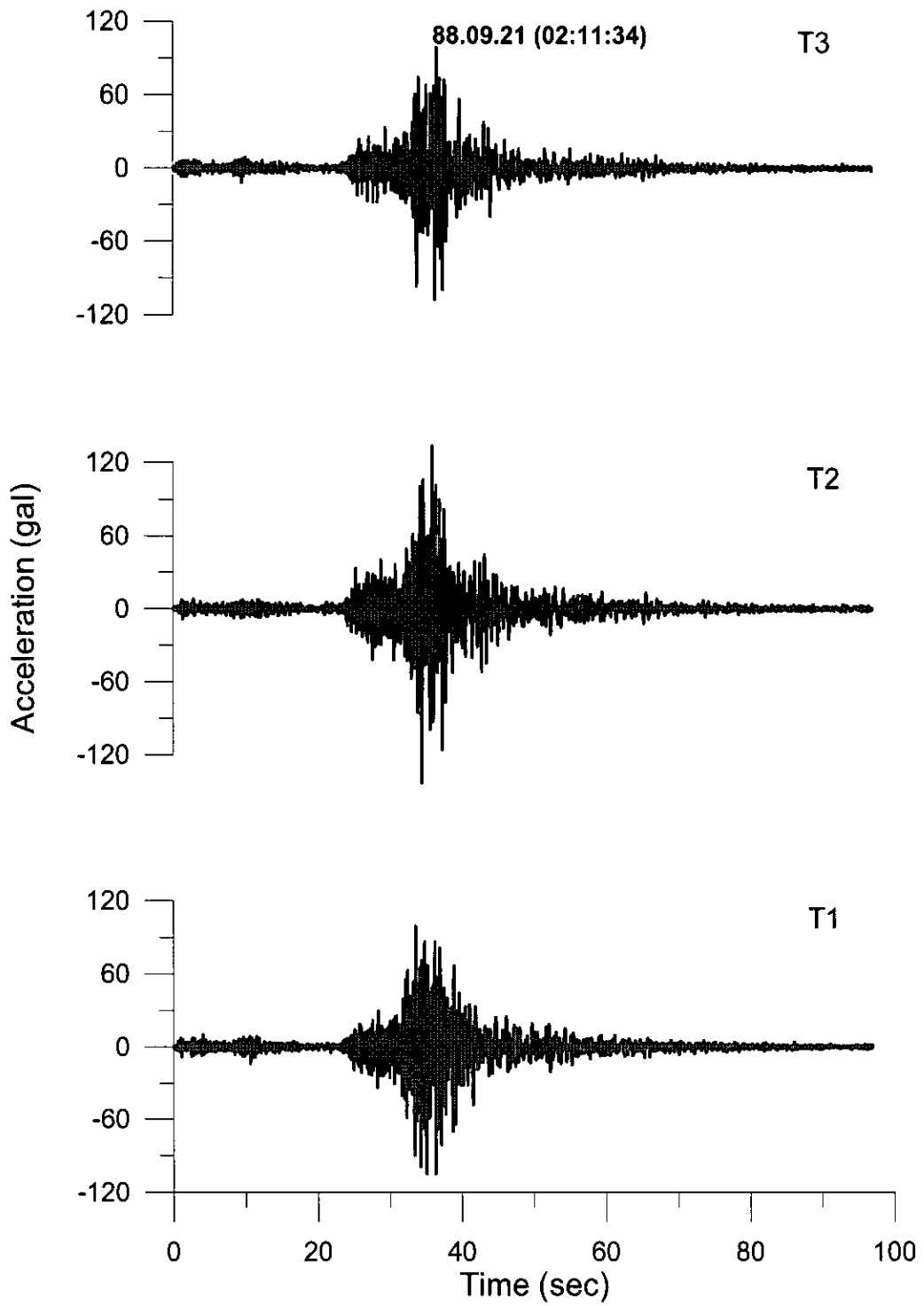


圖 6.52(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(88.09.21-02:11:34)

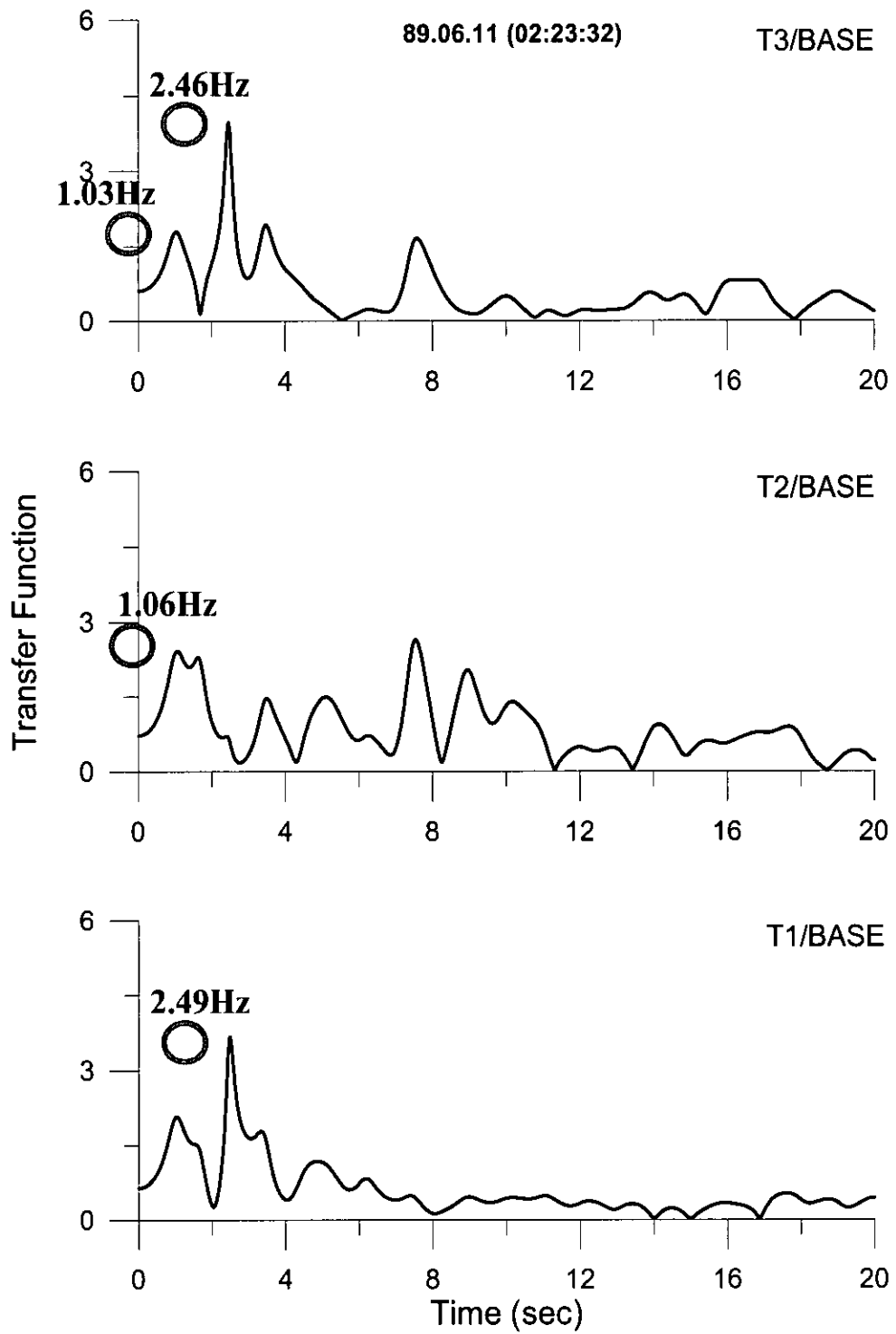


圖 6.53(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(89.06.11-02:23:32)

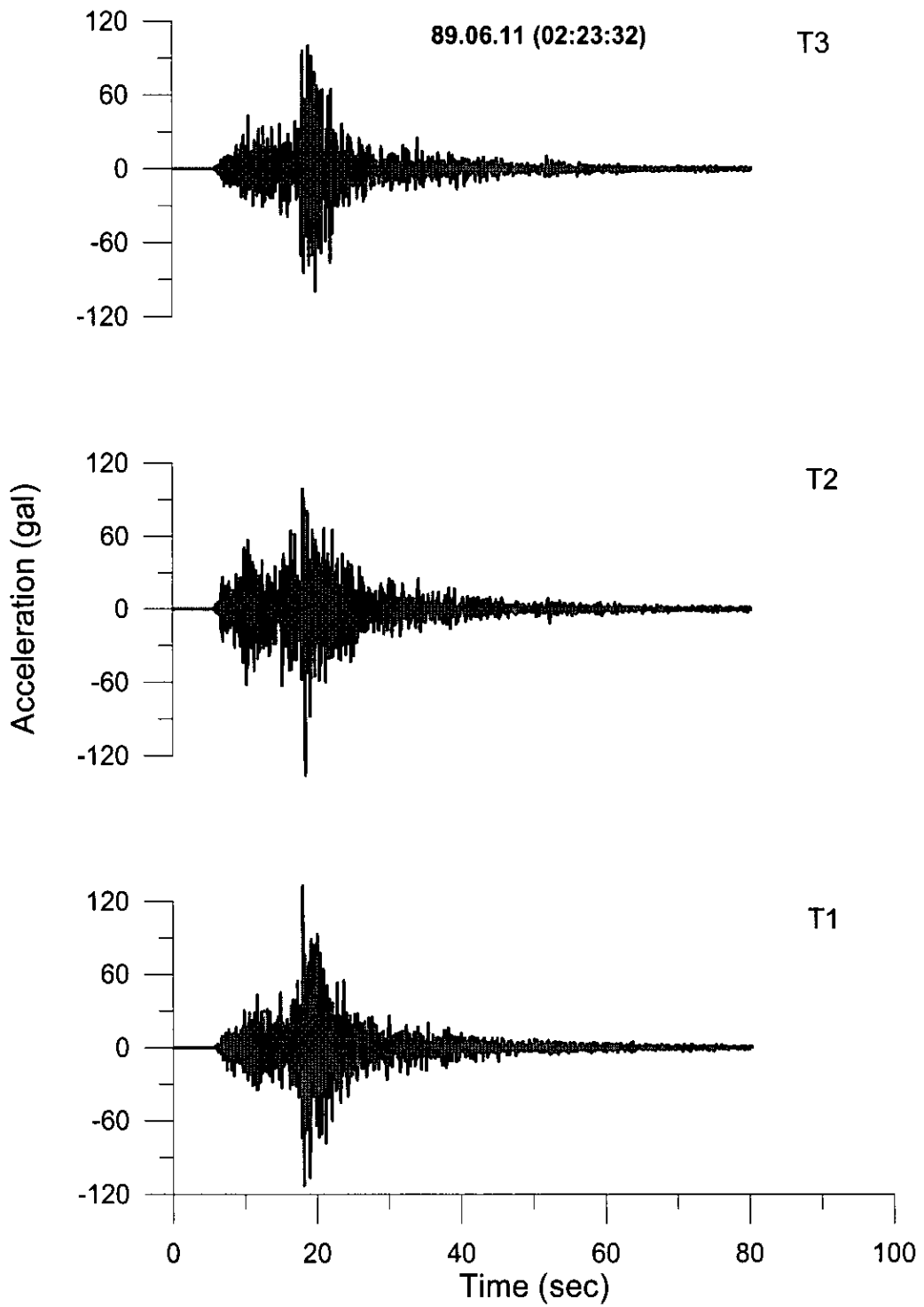


圖 6.53(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(89.06.11-02:23:32)



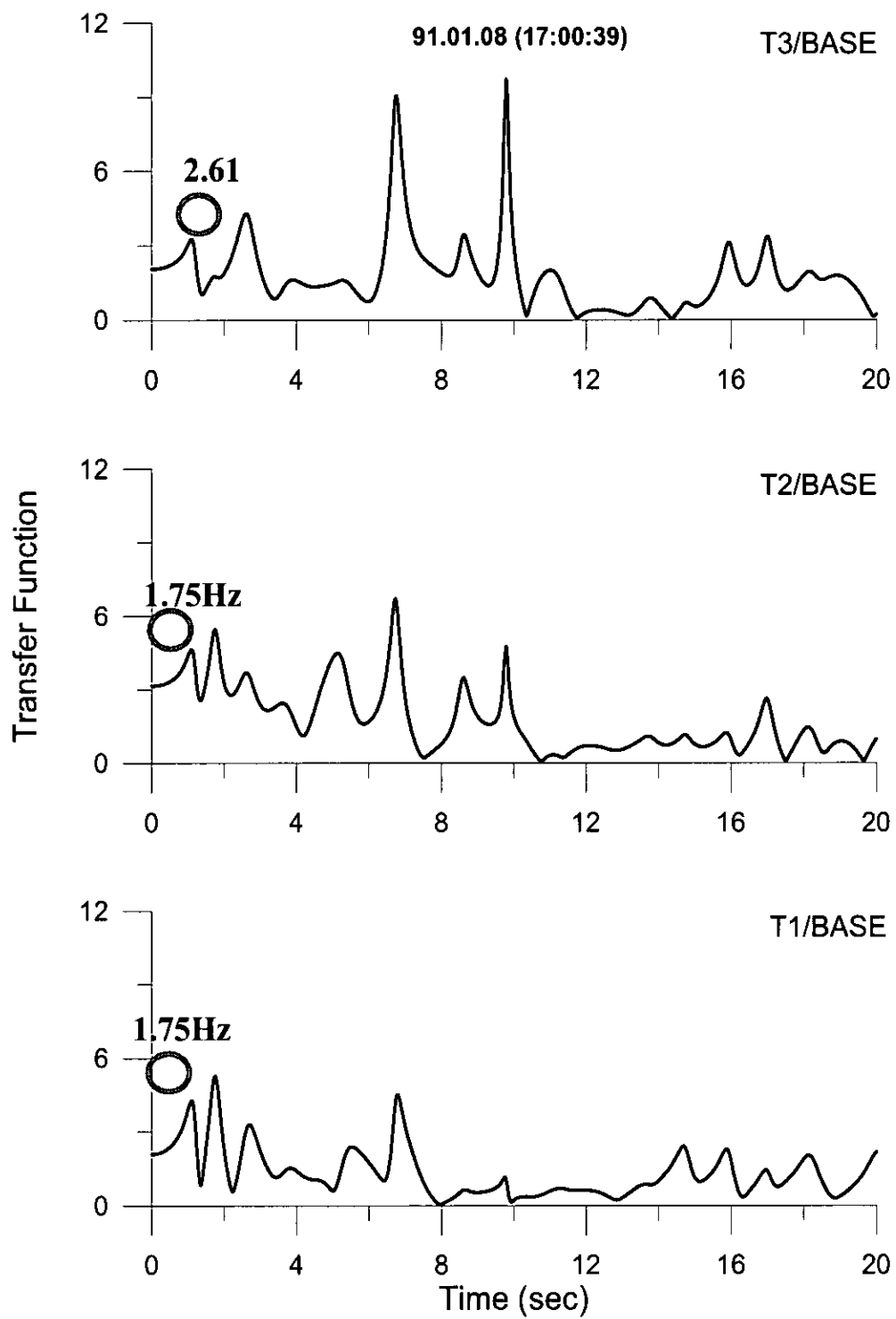


圖 6.54(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(91.01.08-17:00:39)

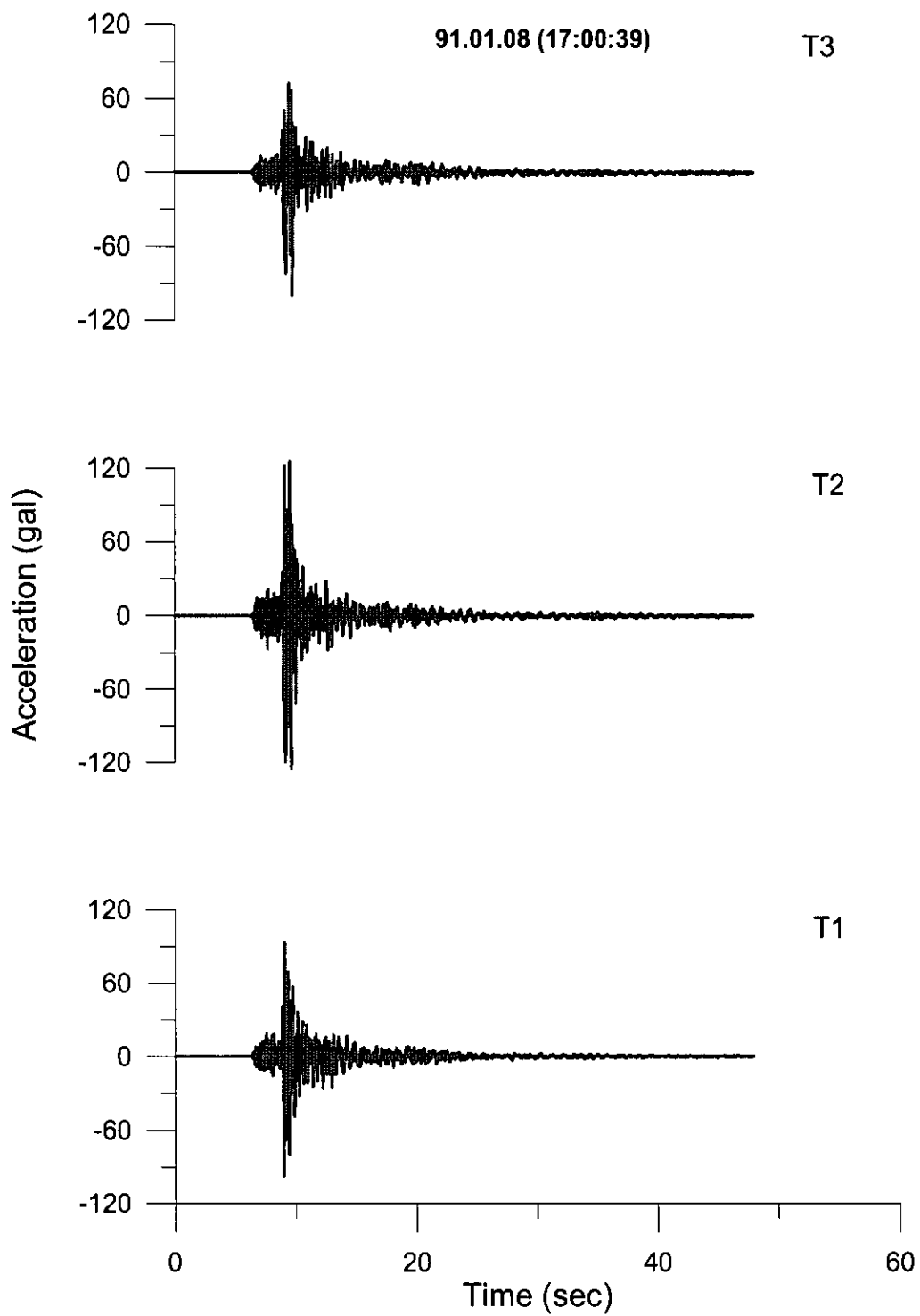


圖 6.54(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(91.01.08-17:00:39)

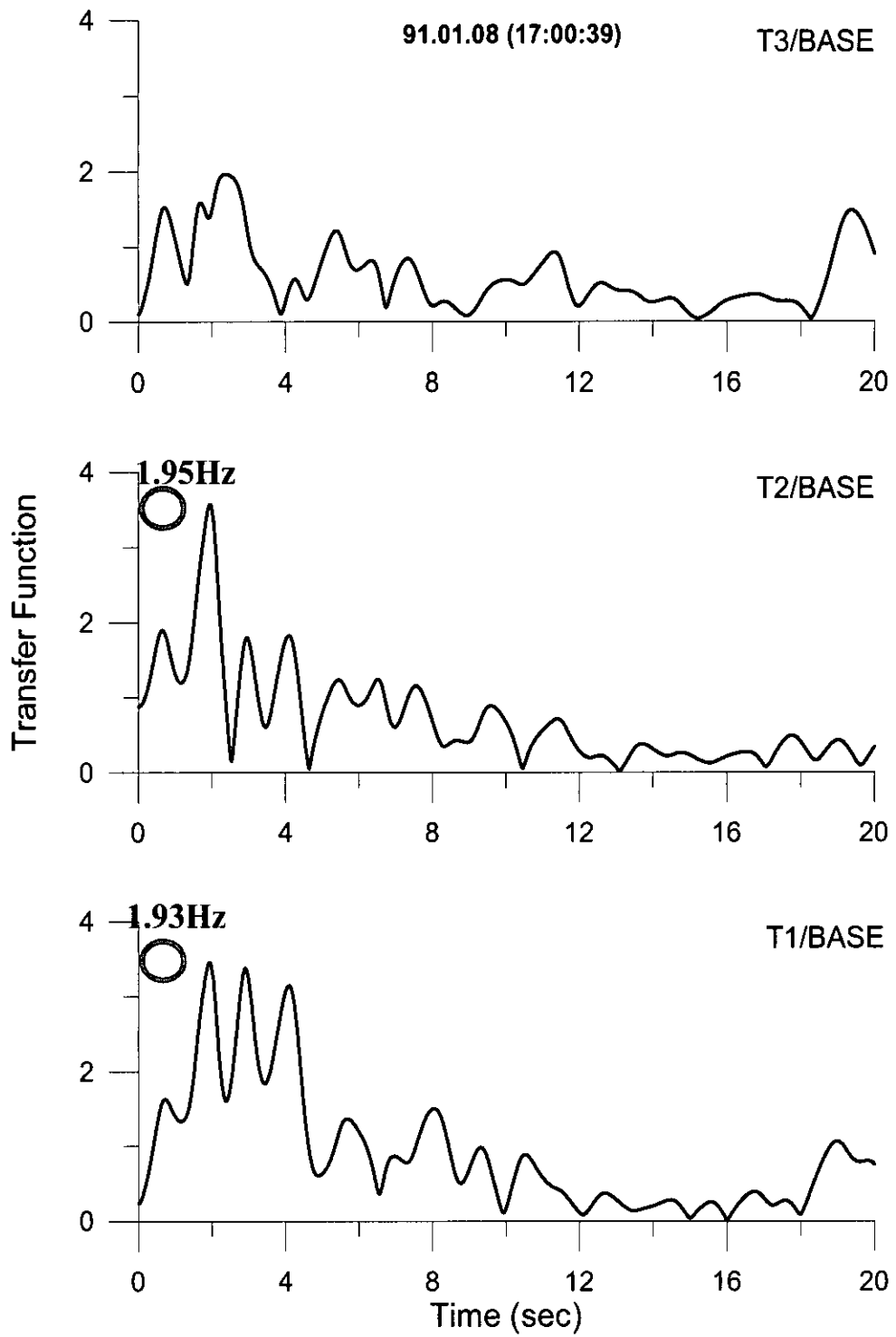


圖 6.55(a) 上下游方向之加速度傳遞函數(91.03.31-06:52:39)

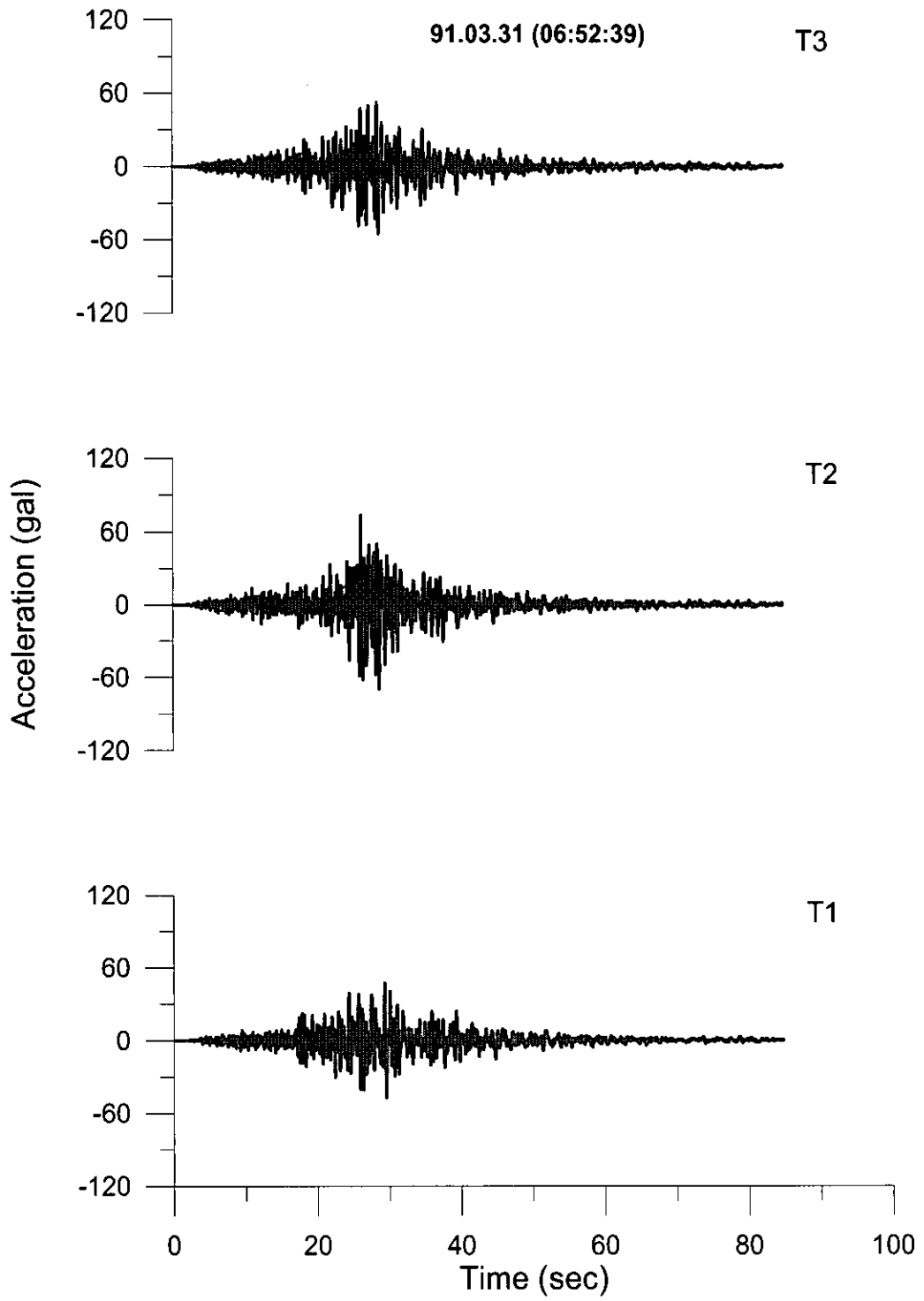


圖 6.55(b) 系統識別預測與量測加速度歷時之比較(91.03.31-06:52:39)

## 七、水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練

本團隊致力於「蓄水庫安全評估報告審查協助與教育訓練」工作經歷數年，深感水庫安全實為重要，而水庫安全評估執行單位之執行能力更為關鍵，其執行能力中又以監測技術與分析實為不足，藉由本計畫教育訓練提昇水庫管理人員、顧問公司人員辦理水庫壩體安全監測、檢測能力及資料判讀評析技術。

本年度教育訓練時間於 97 年 10 月 2 日、3 日在國立交通大學浩然國際會議廳舉行，延續去年度辦理之成果及學員之反應意見進行檢討，在課程的規劃上加強實務課程與互動教學時間，其重點有四：傳輸線式監測技術在水庫安全監測之應用、非飽和土壤觀念、土石壩力壩之系統識別分析及先進傳輸線式監測技術與非破壞性檢測技術參觀與實作，課程時間表及講員簡歷如表 7.1、表 7.2 與表 7.3 所示。教材內容係根據上年度計畫成果及本年度已完成之計畫成果編纂成理論為輔實務操作為主之教材，以達到提昇管理人員、分析人員專業素質及經驗交流傳承目的。

本次教育訓練參加人員超過 70 人(圖 7.1 至圖 7.6)，包括水利署各單位、水庫管理單位及工程顧問公司等，對未來水庫安全相關實務之執行上有相當助益。

表 7.1 教育訓練課程時間表(第一天)

| 時 間         | 講 題  |
|-------------|--|
| 十月二日 (四)    |  |
| 08:00~09:00 | 報到   |
| 09:00~10:20 | 地層內分佈式光纖光柵水壓計量測技術<br>主講人：國立交通大學防災中心 黃教授安斌                                    |
| 10:20~10:40 | 休息時間   |
| 10:40~12:00 | TDR 監測技術於水庫安全監測之應用<br>主講人：國立交通大學防災中心 林教授志平                                   |
| 12:00~13:30 | 午餐   |
| 13:30~16:20 | 先進傳輸線式監測技術參觀與實作：TDR 監測技術與光纖光柵水壓計<br>介紹人：國立交通大學防災中心 黃教授安斌<br>國立交通大學防災中心 林教授志平 |
| 16:20~16:40 | 休息時間   |
| 16:40~17:30 | 水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關專題綜合討論(一)<br><b>【與會講員】</b>                                   |

表 7.2 教育訓練課程時間表(第二天)

| 時 間         | 講 題   |
|-------------|---|
| 十月三日 (五)    |   |
| 09:00~10:20 | 非飽和土壤觀念在水庫集水區邊坡保育之應用<br>主講人：國立台灣科技大學 林教授宏達  |
| 10:20~10:40 | 休息時間  |
| 10:40~12:00 | 土石壩之系統識別分析<br>主講人：國立交通大學防災中心 王教授彥博          |
| 12:00~13:30 | 午餐  |
| 13:30~14:50 | 壩體非破壞性檢測技術<br>主講人：國立交通大學防災中心 林教授志平          |
| 14:50~15:10 | 休息時間  |
| 15:10~16:00 | 水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關專題綜合討論<br>(二)<br><br>【與會講員】 |

表 7.3 教育訓練講員基本簡歷

林宏達 先生 簡歷：

學歷：美國加州大學柏克萊分校 土木工程博士

經歷：

1. 1998/02 至今 國立台灣科技大學營建系教授
2. 2003/08~2006/07 國立台灣科技大學營建系主任
3. 1988/08~1998/01 國立台灣科技大學營建系副教授
4. 2007/04~ 中華民國大地工程學會理事長

黃安斌 先生 簡歷：

學歷：Purdue University 土木工程博士

經歷：

1. 1994/08 至今 國立交通大學教授
2. 1992/08~1994/07 國立交通大學副教授
3. 1986/09~1992/06 Clarkson University 土木工程系所助理教授
4. 1978/06~1982/08 STS Consultants, Inc 工程部大地工程師

王彥博 先生 簡歷：

學歷：美國紐約州立大學水牛城分校 土木工程博士

經歷：

1. 2001/08 至今 交通大學土木系教授
2. 1994/02~2001/07 交通大學土木系副教授
3. 1991/08~1994/01 中華工學院土木系副教授
4. 1991/02~1991/05 美國國家地震工程中心博士後研究
5. 1990/08~ 中華耐震技術發展協會常務理事



表 7.3 教育訓練講員基本簡歷(續)

林志平 先生 簡歷：

學歷： Purdue University 土木工程博士

Purdue University 土木工程碩士

Purdue University 電機工程碩士

經歷：

1. 2007/08 至今 國立交通大學土木工程系教授
2. 2003/08~2007/07 國立交通大學土木工程系副教授
3. 1999/08~2003/07 國立交通大學 土木工程系研究助理教授



圖 7.1 教育訓練會場

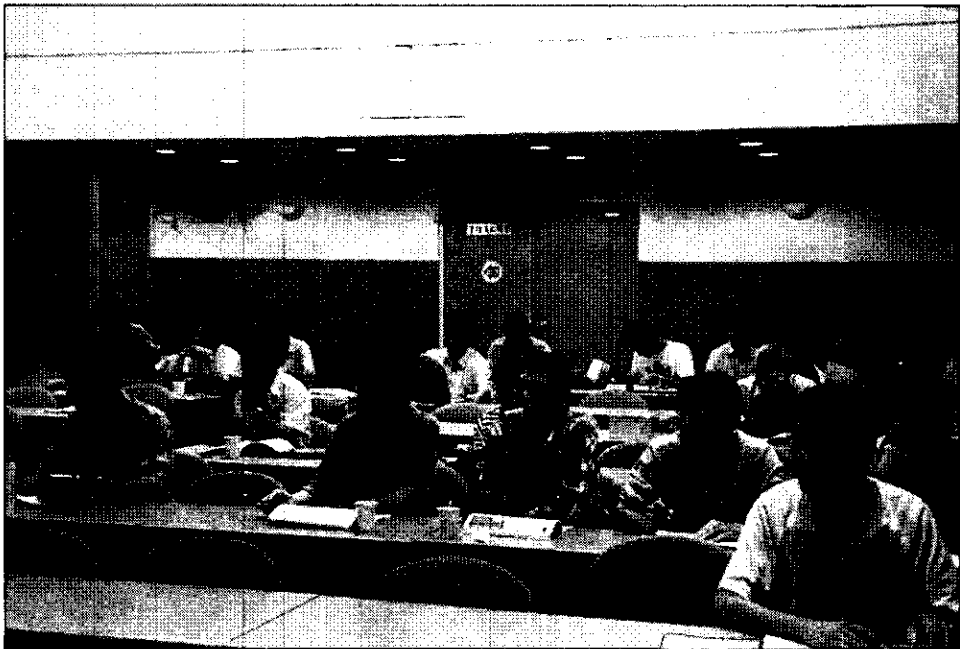


圖 7.2 教育訓練學員上課情形

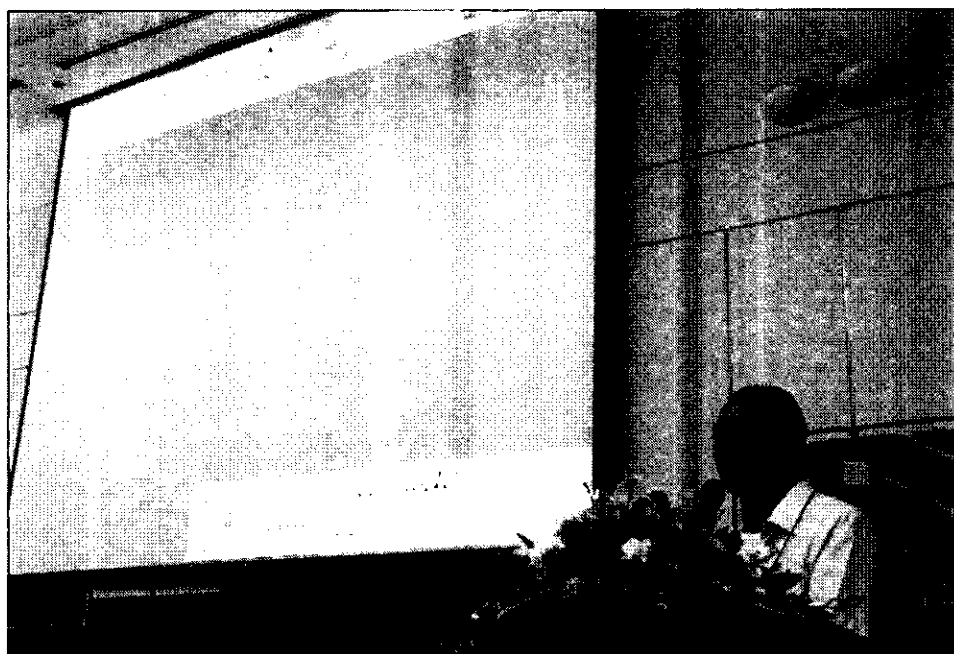


圖 7.3 光纖光柵感測器授課情形

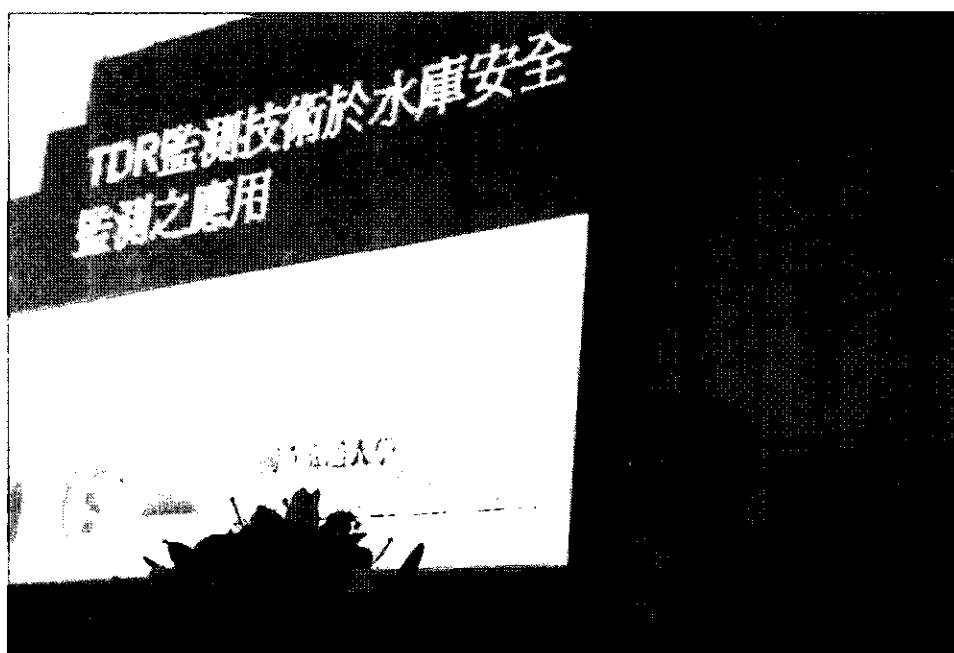


圖 7.4 TDR 感測器授課情形



圖 7.5 光纖感測實驗室參觀情形



圖 7.6 非破壞性檢測實驗室參觀情形

## 八、參考文獻

ASTM, 1999, "Selecting Surface Geophysical Methods", Standard Guide D6429-99

Celebi, M. and E. Safak, 1992, "Seismic Response of Pacific Park Plaza. II : System Identification", J. Struct. Eng. ASCE, Vol.118, No.6, pp.1566-1589.

Chin-Hsiung Loh and Tsu-Shiu Wu, 1996, "Identification of fei-tsui arch dam from both ambient and seismic response data," Soil Dynamics and Earthquake Engineering 15 , pp465-383.

Dowding, C.H., Su, M.B., and O' Connor, 1988, "Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, pp.287-297.

Dowding, C.H., Su, M.B., and O'Connor ,1989, "Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 22, pp.1-23.

Dunncliff, J., 1988, "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", Wiley-Interscience, 527p, New York.

Dutro, H. B. 1977, "Borehole Measurements Using Portable Borehole Deflectometers", in Proceedings of 18th symposium on Rock Mechanics, Keystone, CO, Colorado School of Mines Press, Golden, Co, pp. 5C4-1 to 5C4-5.

Federal Highway Administration, "Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems", 2003, available on line: <http://www.cflhd.gov/agm/index.htm>

Green, G.E., and Mickelsen, P.E., 1988, "Deformation Measurements with Inclometers", Transportation Research Record 1169, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-15

Hill, K.O., Fujii, F., Johnson, D.C., and Kawasaki, B.S., 1978, "Photosensitivity on Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication," Applied Physics Letter, No.32, pp.647-649.

Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T., 2006, "Development of a fiber Bragg grating sensed ground movement monitoring system," Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.

ICOLD, 1984, "Deterioration of Dams and Reservoirs"

Kersey, A.D., 1992, "Multiplexed Fiber Optic Sensors," Proceedings, Fiber Optic Sensors, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp.200-227.

Krauss, T.P., Shure, L., and Little, J.N., 1994, Signal Processing Toolbox User's Guide, MathWorks, Inc., MA.

Kumbhojkar, A. S., Israel, T. D., Arnstan, D., and Lee, S. M., 1991, "Development of a Combination Inclometer-Deflectometer and ADAAS", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol.14, No. 4, pp.451-456.

Lin, C-P, Chung, C.-C., and Tang, S.-H., 2006, "Development of TDR Penetrometer through Theoretical and Laboratory Investigations: 1. Measurement of Soil Dielectric Constant" Geotechnical Testing Journal, Vol. 29, No. 4, Paper ID GTJ 14093.

Ljung, Lennart., 1987, "System Identification: Theory for the Users",

Englewood Cliffs,NJ:Prentice-Hall Inc.

Meltz, G., Morey, W. W., and Glam, W. H., 1989, "Formation of Bragg Grating in Optical Fibers by Transverse Holographic Method", *Opt. Lett.* Vol.14, pp.823-825.

Mickelsen, P.E., 1996, "Field Instrumentation," Special Report 247 on Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., Turner and Schuster editors, pp.278-316.

Measures, R. M., 2001, "Structural Monitoring with Fiber Optic Technology", Academic, California.

Othonos, A., and Kalli, K., 1999, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing," Artech House, Boston, 422p.

Rao, Y.-J, 1998, "Fiber Bragg Grating Sensors: Principles and Applications," *Optic Fiber Sensor Technology*, Edited by K.T.V. Gattan and B.T. Meggitt, Published by Chapman and Hall, London, Vol.2, pp.355-379.

Reynolds, J.M., 1997. "An introduction to Applied and Environmental Geophysics.", Wiley

Su, M.B. (1987), "Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry," Ph.D. Dissertation, Northwestern Univ., Evanston,IL, 112pp.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, New York, New York, 1990.

USCOLD/ASCE, 1975, "Lessons from Dam Incidents, USA".

USCOLD, 1988, "Lessons from Dam Incidents, USA-II".

Yoshida, Y., Kashiwai, Y., Murakami, E., Ishida, S., and Hashiguchi, N., 2002, "Development of the Monitoring System for Slope Deformations," Proceedings, SPIE Vol. 4694, pp.296-302

盧吉勇，2003，「TDR 錯動變形量測之研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

王升錦，鯉魚潭水庫大壩受震反應分析，2003，國立中央大學碩士論文。

向亨台、吳逸文、楊春足、鄭志丕、張簡宏偉、黃安斌，2004“光纖感測技術與植入式光纖測彎計之介紹及測試應用”，第十二屆非破壞檢測技術研討會論文集，日月潭，上冊，pp.273-279.

王文中，統計學與 Excel 資料分析之實習應用，2004 年第五版，博碩，台北。

林文欽，2007，「TDR 錯動變形物理模型與資料分析改良」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。



## 附錄一 委託服務計畫建議書審查意見及辦理情形

## 附錄一 委託服務計畫建議書審查意見及辦理情形

|  |   |
|--|---|
| 林委員連山  |   |
| 委託服務建議書審查意見  | 處理情形  |
| 一、光纖光柵水壓計建議與傳統水壓計作精確度之檢測，以了解兩者間之關係。                | 光纖光柵水壓計讀數將與附近現有水位計讀數做比較來做確認。  |
| 二、現場鑽孔其回填材料及回填工法如何決定？                              | 回填材料之選用會先在試驗室做測試然後決定回填材料及回填工法。  |
| 三、擬於新山水庫右岸山脊鑽孔檢測傾斜，因其位址非在壩體，故本次鑽埋與壩體相關傾斜之埋設並無直接關係。 | 根據「第三次新山水庫安全評估報告初稿」結果，壩體目前較無滑動之虞，為使此次測試能在測試之外亦協助該水庫管理單位進行有效利用，因此考量在有滑動之虞的右岸山脊進行測試。此外，經過工作會議討論，盡量避免在壩體上鑽孔，且右岸山脊亦裝設有測傾管可提供研究比較，因此選定有邊坡滑動之虞之右山脊進行。 |

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <p>四、非破壞性檢測技術導引手冊用在壩體巡查之優勢？</p>      | <p>該手冊之主要目地在於協助水庫管理者得以在對某潛在破壞模式有疑慮時，安排進一步非破壞性調查之方法、招標文件與成果等事項之完善，而非在於水庫管理人員之壩體巡查之用。</p> |
| <p>蘇委員炳勳</p>                         |   |
| <p>委託服務建議書審查意見</p>                   | <p>處理情形</p>   |
| <p>一、光纖光柵監測系統對雷擊防禦能力如何？</p>          | <p>光纖光柵系統本身使用非導體之光纖(玻璃材料)做為感測器，並以光做為傳輸訊號，因此在其先天上便無雷擊之問題。</p>                            |
| <p>二、光纖光柵監測儀安裝如何確保正常？</p>            | <p>光纖光柵監測儀安裝正常與否非常容易從其讀數來判斷</p>   |
| <p>陳委員文政</p>                         |   |
| <p>委託服務建議書審查意見</p>                   | <p>處理情形</p>   |
| <p>一、新山水庫右壩上游山脊邊坡之滑動為非順向坡，其滑動機制為</p> | <p>根據既有資料推測，右岸薄山脊可能因為解壓與風化而具有圓</p>  |

|  |  |
|--|--|
| <p>何？目前均屬推測，期望藉助本次儀器裝設之地質鑽孔(全岩取樣)來研判滑動面之位置。井體攝影是否能藉以補充調查其滑動面位置。鑽孔深度應穿透滑動面。</p> | <p>弧滑動的可能，其滑動機制與水庫急洩降有關。本研究主要目的在於 TDR 技術的評估測試，滑動可能機制僅能就現有資料進行補充探討，於安裝 TDR 時，除取樣外，進行井體攝影，進行不連續面調查。鑽孔深度有根據地質狀況，考量已有之監測資料，使其穿透 W3 所得之最深滑動高程（潛在滑動面）。</p> |
| <p>二、水壓計裝設位置能否針對過去地電阻之成果資料及過去下游坡面呈現異常現象(反應水壓)之孔位來做比對參考。</p>                    | <p>遵照辦理，詳見第 4 章。</p>   |
| <p>陳委員俊宗</p>   |  |
| <p>委託服務建議書審查意見</p>   | <p>處理情形</p>  |
| <p>一、本計畫研究成果除強調研發儀器之創新及優點外，應補充說明儀器使用可能遭遇問題。</p>                                | <p>光纖光柵感測器乃至於光纖體積小，安裝時容易受損，感測器之設計需考慮此一挑戰。</p>  |
| <p>二、各項研發儀器應加強耐久性</p>  | <p>現有光纖光柵感測器都曾進</p>  |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| 精確度之研究。                      | 行長時間之耐久性與穩定性測試。現場安裝也是此測試之一部份。                           |
| 三、為利本計畫研發成果後續推廣，請交通大學提出具體建議。 | 將於本年度計劃完成後，一併於成果報告中提出，研發內容也將於訓練課程內說明。                   |
| 陳委員振欽                        |   |
| 委託服務建議書審查意見                  | 處理情形  |
| 一、本案交大團隊之研究及先期辦理成果值得肯定與期待。   | 感謝陳委員的肯定與支持。  |
| 二、請補充說明 TDR 鑽孔是否加 PVC 套管。    | TDR 安裝之鑽孔，為能較為靈敏反應滑動，並不需加 PVC 套管。TDR 詳細安裝步驟與內容請見 4.3 節。 |
| 三、鑽孔灌漿材料之選定原則請補充說明。          | 鑽孔灌漿材料之選定需在試驗室做試驗測試之後再做決定。                              |
| 四、建請檢討在既設監測鑽孔加裝及比對之可行性。      | 遵照辦理。新設位置請見 4.4 節。FBG 測傾儀安裝於現有鑽孔                        |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>W3 內。先將現有孔內之 IPI 取出，偏斜儀插入前使用手動 IP 紀錄讀數，未來可以再將偏斜儀取出使用手動 IP 於 W3 孔之傾斜管紀錄讀數並與 FBG 偏斜儀結果相比較。</p> |
| <p style="text-align: center;">結論</p>                                      |   |
| <p>一、本案經出席委員評分統計結果，國立交通大學平均分數 87 分，符合平均分數須達 80 分(含)以上方為合格之規定，取得辦理議價資格。</p> | <p style="text-align: center;">感謝各位委員的肯定與支持。</p>  |
| <p>二、各審查委員意見請國立交通大學納入工作執行參考，並於下次報告中加以補充說明。</p>                             | <p style="text-align: center;">遵照辦理，請見附錄一。</p>  |

## 附錄二 期中報告委員審查意見及辦理情形

## 附錄二 期中報告委員審查意見及辦理情形

|   |   |
|---|---|
| 許委員少華   |   |
| 期中報告書審查意見   | 處理情形  |
| 一、本計畫著重新監測技術的研發以及元件的製造，令人鼓舞。                              | 謝謝委員的指導與鼓勵。   |
| 二、若干研究內容甚專業，建議未來報告的撰寫可再深入淺出，尤其是邏輯性、基本原理、目的、與舊有方法的差異及優越性等。 | 遵照委員的建議辦理。  |
| 三、能用 EXCEL 軟體進行頻譜分析很棒，因為是非常普及的軟體。                         | 謝謝委員的指導與鼓勵。   |
| 林委員連山   |   |
| 期中報告書審查意見   | 處理情形  |
| 一、目前氣壓式水壓計普遍使用狀況良好，建議加入與 FBG 水壓計比較優缺點。                    | 遵照辦理，請參照 4.1 節。   |
| 二、FBG 水壓計之單價為何？研發成果如何落實推廣？                                | 目前標準 FBG 水壓計(管線長 1 米)成本單價約為 2 萬元，研發成果將配合水利署與交通大學向產業界推廣。 |
| 三、FBG 水壓計是否可以多點   | 是的，FBG 可以串連多點觀  |



|   |   |
|---|---|
| <p>觀測？可否用在壩基水壓量測上？</p>  | <p>測，並可以應用於壩基水壓量測上。</p>   |
| <p>四、FBG 水壓計設置在新山水庫大壩下游坡面 LL1 與 LL3 的程序為何？如何進行校正？測讀資料應與人工量測結果比對以分析其正確性。</p>                     | <p>已經將光纖水壓計安裝程序與安裝實際過程照片於 4.4 節說明，且已於 4.4 節提出光纖水壓計與人工量測比較結果。光纖水壓計標定與校正過程已於 96 年度報告中提出。</p>  |
| <p>五、新山水庫右山脊於 92 年在 W3 發現 8 公分的明顯滑動，是否已進行相關治理並加強監測工作？TDR 於右山脊新鑽孔 T1 之測試結果是否有其它監測資料可進行比對或分析？</p> | <p>根據第三次新山水庫安全評估報告指出，該處於滑動後已於 93 年新增 8 處傾斜管、3 處水位計以及 2 處地滑計，並全面自動化。由於自動化觀測結果仍有疑慮，因此本計畫將針對需要比對分析之地點，改以人工測讀。T1 之結果擬與 IS-5 之人工傾斜管結果間接比對。</p> |
| <p>蘇委員炳勳</p>  |   |
| <p>一、新山水庫大壩下游僅量測 LL1 與 LL3 兩孔水壓，恐無法明確瞭解觀測資料可靠度與代表之現象，如下游側其他水位孔能一併取得觀測資料，對研判應有助益。</p>            | <p>謝謝委員的指教。本團隊已取得 LL1 與 LL3 的手動式量測資料，並與光纖水壓計進行比較(4.4 節)。另外本年度計劃是選定新山水庫 LL1 與 LL3 孔測試過去所研發的光纖水壓計，並無對壩體的滲流現象與安全進行評估。</p>                    |
| <p>二、LL1 與 LL3 手動量測資料與 FBG 水壓計量測資料差異頗大，難研判其觀測值代表現象。</p>   | <p>謝謝委員的指教，光纖水壓計安裝過程、量測結果與誤差之原因已於 4.4 節說明。</p>  |

|  |   |
|--|---|
| <p>三、大型剪力寬度多重弱面同時變形，TDR 是否可量測判讀。</p>   | <p>TDR 可分辨多重弱面之變形，空間解析度與纜線種類與長度有關，但一般在間隔 1m 以上之滑動面，皆可分辨。</p>  |
| <p>四、TDR 如何研判安裝正常，水泥灌漿材質對儀器之影響如何？</p>  | <p>於 TDR 安裝完成後，進行初次資料擷取，由波形可判斷接頭與末端反射，在兩個反射訊後間維持平整的訊號即屬正常。水泥灌漿材質對儀器之影響已於前期探討完畢，基本上只要灌漿材料維持一定的強度，對於 TDR 觀測結果不會造成影響，詳細建議可見前期之成果報告，期末報告亦會總結安裝建議。</p> |
| <p>五、新山水庫右山脊滑動監測是否配合地下水位觀測較佳。</p>  | <p>已將 FBG 水壓計與 FBG 測傾儀一起安裝至 W3 孔內，同時進行水位變化與地層位移的量測。</p>   |
| <p>陳委員文政</p>   |   |
| <p>期中報告書審查意見</p>   | <p>處理情形</p>   |
| <p>一、右山脊 T1 鑽孔柱狀圖與岩心照片，其地質描述部分過於簡略，可再加強敘述，如何處（公尺）為層理面及節理面，或剪裂帶。岩心照片未置入色卡，另建議岩心應加以妥善保存，以便日後有問題時作為研判工作之輔助。</p> | <p>岩心照片有置入色卡，並如建議交由管理單位妥善保存，柱狀圖較為簡略，但有 Televiewer 及 Caliper 的量測結果補充層理面、節理面及剪裂帶等資訊。</p>  |

|   |  |
|---|--|
| <p>二、目前新增之 LL1 與 LL3 水壓計資料顯示其水位偏高，其水之來源究竟由壩體、左山脊，值得加以釐清。而本計畫完成是否能提供水庫管理單位之安全監測值，讓水庫管理人員有所依循，知何種數據屬異常現象提出預警。</p> | <p>謝謝委員的指教。但是本年度計劃是選定新山水庫 LL1 與 LL3 孔測試過去所研發的光纖水壓計，並無對壩體的滲流現象與安全進行評估，故無法提出安全監測值。</p> |
| <p>陳委員俊宗</p>  |  |
| <p>期中報告書審查意見</p>  | <p>處理情形</p>  |
| <p>一、於新山水庫之測試中，FBG 有被工人拉斷情形，是否顯示所能承受拉力不足？如是，有否改進之方法。</p>  | <p>根據事後檢修狀況，判斷 FBG 水壓計可能是被重物壓斷，已經改良使用鎧裝光纖，加強抗拉力。</p>                                 |
| <p>二、FBG 於新山水庫現地測試中，由於手動量測與 FBG 量測有時間差，造成讀數之疑慮，未來請能同步進行，以確定數據的可靠性。</p>  | <p>謝謝委員的指教，本團隊已於 10 月 9 日裝設 FBG 自動化擷取系統，來驗證數據的可靠性。</p>                               |
| <p>三、於新山水庫 FBG 所得資料請與原設計之滲漏線比較，以判定是否有超量滲水情形。</p>  | <p>謝謝委員的指教，但是本年度計劃是選定新山水庫 LL1 與 LL3 孔測試過去所研發的光纖水壓計，並無對壩體的滲流現象與安全進行評估。</p>            |

|  |   |
|--|---|
| <p>四、非破壞性檢測技術導引手冊中，未來管理單位所應負責角色，如何配合辦理？以及其所需人力、設備、技術亦請說明。</p>  | <p>本導引手冊之目的是在於協助管理單位在有需求時選擇適當方法及訂定適當的招標規格，各方法所需之設備以及技術已列明於各章節中。該導引手冊並非操作手冊，非破壞性檢測屬於特殊專業技術，且儀器昂貴，一般需委由相關技術公司施做，該導引手冊可以讓管理人員了解各技術的特性及功能，訂定合宜的規格與掌握驗收資訊。</p> |
| <p>五、本計畫簡易頻譜分析軟體以 MATLAB 及 EXCEL 為之，宜以其兩種方式所得之資料比對其可信度，另宜以其他方式所得結果做為比較以確定以 MATLAB 或 EXCEL 可做為分析工具。</p> | <p>MATLAB 軟體為訊號處理、電機、控制及資訊工程等領域廣泛應用之軟體，其頻譜分析功能為各界所認可。本研究利用 MATLAB 及 EXCEL 兩種軟體所得之頻譜圖經交互比對(以 95.12.26 日牡丹水庫地震儀資料為例)，其結果一致，確認 EXCEL 頻譜分析工具之適用性。</p>         |
| <p>六、本計畫所研發之成果如涉專利問題，其未來權屬為何？</p>  | <p>依合約規定辦理。</p>   |
| <p>七、請檢討台灣地區目前所使用監測儀器之缺點，於本計畫研發過程予以改善，以增加本研發儀器之實用性。</p>  | <p>關於監測儀器之缺點已於本計畫之前期計劃「水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究」進行過討論，本計畫所進行之研發便是在該討論與檢討下進行。</p>  |
| <p>八、本計畫所研發之儀器未來如何開發、商標、推廣等問</p>   | <p>依合約規定，遵照辦理。</p>  |

|   |  |
|---|--|
| <p>題，請於期末報告說明。</p>                                    |  |
| <p>九、本計畫今年即將結束，未來如何推動，亦請說明。</p>                       | <p>感謝委員的建議，將在附錄九說明未來如何持續推動。</p>  |
| <p>陳委員振欽</p>  |  |
| <p>期中報告書審查意見</p>                                      | <p>處理情形</p>  |
| <p>一、建請提供光纖光柵水壓計及 TDR 安裝步驟及檢核點。</p>                   | <p>遵照辦理。</p>   |
| <p>二、利用既有壩體監測孔洗孔後再安裝光纖光柵水壓計及 TDR 之效果及限制，建請補充說明。</p>   | <p>既有孔位中多有 PVC 管，既有孔位若重新洗孔，可安裝 TDR 錯動變形感測纜線，與新鑽孔無異，但若置於既有 ABS 或 PVC 管，會降低其感測靈敏度，但若 ABS 或 PVC 管已因剪動過大而無法讓人工測讀儀器通過，則可以利用原孔置入 TDR 纜線進行後續觀測。由於光纖光柵水壓計直徑小於 4 公分，所以壩體上的水位孔只要水位管無大變形之情況，則光纖光柵水壓計皆能放入量測。</p> |
| <p>三、有關利用各水庫強震儀記錄進行分析後，建請先與相關單位分析結果比對後再回饋給水庫管理單位。</p> | <p>謝謝委員的建議。本報告鯉魚潭水庫之部分系統識別分析結果已與王升錦等人(中央大學碩士論文)之研究結果進行比較說明(詳報告 6.3.3 節內容)。</p>   |
| <p>台灣自來水公司黃工程師鎮豐</p>                                  |  |

| 期末報告書審查意見  | 處理情形  |
|--|---|
| <p>一、LL1 與 LL3 孔已重新清洗，也放入 FBG 水壓計進行量測，雖然日前不慎損壞，希望能儘速重新安裝。壩體上其它水位孔人工觀測結果可以提供交通大學進行綜合分析。</p> | <p>光纖光柵水壓計與自動化擷取系統已於 10 月 9 日裝設完畢，並開始與人工讀取系統進行比較。</p>                     |
| <p>二、右山脊 T1 鑽孔岩心建議保存於新山水庫管理樓，便於日後地質人員研判之用。</p>   | <p>遵照辦理</p>   |
| <p>本署北水局鄭工程員友誠</p>   |   |
| 期中報告書審查意見  | 處理情形  |
| <p>一、P.102 圖 6-15 其分析資料是否為同軸向，擷取時間點是否有一致性，請再確認。</p>  | <p>資料為相同軸向無誤，惟擷取之初始時間有不一致(時間差)的情況。分析時可將兩筆資料之時間原點(資料觸發之時間)調成一致再進行分析即可。</p> |
| <p>二、建議針對 TDR 訊號衰減部分，與其埋入之壩體材質、使用線材長短...等關係，是否可建立一判斷分析表，供各單位以後建構時參考。</p>                   | <p>如何修正或考慮 TDR 訊號衰減之效應，已於前期報告中詳述。</p>                                     |
| <p>本署中水局侯工程員彥明</p>   |   |
| <p>一、為提高選用導則對基層管理人員規劃選用之助益，建</p>   | <p>由於壩體結構之條件迥異，本計畫仍以潛在破壞模式為導</p>  |

|  |   |
|--|---|
| <p>議未來宜針對所列相關破壞狀況特性，以壩體或結構物可能條件及欲獲得那方面資訊，提出選用說明及適用優先順序。</p>  | <p>向，再依各試驗方法之屬性，提出選用方法之優先順序。</p>  |
| <p>二、導則中表 1.3 對應表與文章內容 (P.14~P.16) 有部分無法配合，如土石壩第 2 種及第 7 種潛在破壞模式之可用檢測法。</p>  | <p>感謝指教，已更正。</p>  |
| <p>三、導則第 1.2 節非破壞簡介與第二~六章內容雷同，建議無需重複。</p>  | <p>1.2 節為概念式之介紹，是做綱要之用，提供對該方法之最基本了解。</p>  |
| <p>四、95 及 96 年非破壞檢測應用改良成果，建議未來納入導則內，以利參用。</p>  | <p>感謝指教，將會將適切之資料援引入報告中使用。</p>   |
| <p>本署南水局盧正工程司炳堃</p>  |   |
| <p>一、P.22 有關新山水庫 W3 孔位有滑動現象，與 P.23 圖 4.2 觀測資料結果不大一致，建議再查核。</p>   | <p>遵照辦理。</p>  |
| <p>二、P.44，4.3.6 新山水庫 FBG 水壓計小節中，提到 LL1 及 LL3 於 7 月 1 日與 7 月 8 日水位變化為 77 公分與 156 公分，其中 LL3 變化與簡報資料 120 公分不同，建議檢討 7 月 1 日至 7 月 8 日降雨情形，與水庫水位變化情形，方能進一步釐清水位</p> | <p>謝謝委員的指教，已修正報告中之資料，但是本年度計劃是選定新山水庫 LL1 與 LL3 孔測試過去所研發的光纖水壓計，並無對壩體的滲流現象與安全進行評估。</p> |

|   |   |
|---|---|
| 變化原因。   |   |
| 三、有關監測手冊部分，建議增加對實際壩體缺陷現象之敘述，及不同採用方法探測之差異。   | 實際壩體缺陷現象常因個案而異，恐無法詳述，本計畫仍以潛在破壞模式為導向，再依各試驗方法之屬性，提出選用方法之優先順序。         |
| 四、有關牡丹水庫地震資料 P.98 提到圖 6.13、6.14 於 97 年 5 月 7 日有異常狀況，經查該日廠商進行維修測試信號，至於 96 年 1 月 25 日壩底與壩頂紀錄時間不同，相差 20 秒，將查明壩頂是否將前置時間 data 收錄造成。有關係統識別分析，建議考量震源之影響。建議修正 P.122 第 1 點相關內容(牡丹水庫有定期維護校正)。 | 謝謝委員的指正。有關 97 年 5 月 7 日訊號”異常”之內容已修正並補充說明該資料係因校正所引起之人為觸發訊號，非地震儀異常所致。 |
| 本署水源經營組邱助理工程司士恩   |   |
| 一、本計畫除研發產品應提送外，歷年來研究過程各項嘗試、改進及驗證結果等成果，請一併於報告內呈現。  | 感謝委員的建議，請參照 3.1 至 3.3 節。  |
| 二、本年度教育訓練課程，建議宜辦理水庫非破壞監(檢)測儀器實務運用相關課程。  | 教育訓練已於 10 月 2 日、3 日在交通大學舉辦結束，並依據委員建議安排實驗室參觀與操作。                     |
| 三、報告內容文字編撰(排)不盡完整，如 p.20、p.40 及   | 遵照辦理。   |



|  |   |
|--|---|
| p.79 等，請改進。  |   |
| 四、本案係屬行政院國科會專案經費補助，計畫研發產品專利權屬請依契約相關規定辦理。   | 依合約規定辦理。  |
| 五、簡報所述新山水庫 FBG 水壓量測水位資料與手動水位比對(僅有一組)意義請說明，建議觀測結果宜與各相鄰之人工觀測孔互為比對研判。   | 將光纖光柵水壓計安裝於 LL1 與 LL3 孔內，並定期於孔內進行人工觀測，兩者比較結果於 4.4 節說明。        |
| 本署水源經營組林副工程司正杰   |   |
| 一、TDR 錯動變形現地監測裝置包括鑽設新孔位、放入纜線、水泥漿填塞等，因鑽孔尺寸、纜線放置位置及灌漿材料厚度等尺寸均可能影響將來纜線、灌漿材料和土壤間之互制，進而影響監測之靈敏度(現地鑽設孔位大小、灌漿厚度應有相關考量)，建議相關裝置之尺寸配置之示意圖納入報告。 | 遵照辦理  |
| 二、P.80 所示破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表，將來是否納入「水庫非破壞性檢測技術導引手冊」參考？其破壞模式列出破壞原因，惟管理單位人員可能只發現現象(如裂縫、滲漏等   | 各類型破壞模式可能可以採用的非破壞檢測方法對應表載於手冊 1.3 節中。對於潛在破壞模式現象背後之原因，因個案之壩體條件與 |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <p>現象)，不易了解原因，故此表利用上可能造成管理單位人員困擾，建議將來制定手冊時，可考量依據現象及待瞭解之資訊，再決定合適之非破壞檢測法。</p> | <p>地質條件等因素迥異，恐無法於手冊中詳述。</p> |
| <p>結論</p>   |                             |
| <p>一、水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊之研訂，請考量水庫管理人員未來參照使用之便易性。</p>                           | <p>遵照辦理。</p>                |
| <p>二、本計畫研發之監測儀器是否適用於新建水庫，請於期末報告中提出建議。</p>                                   | <p>遵照辦理。</p>                |
| <p>三、本計畫研發成果之專利申請權，請交通大學與主辦單位依契約及相關規定釐清。</p>                                | <p>依照契約規定辦理。</p>            |
| <p>四、有關交通大學研提之教育訓練課程，原則同意，請交通大學與主辦單位進一步就細節研訂後據以辦理。</p>                      | <p>遵照辦理。</p>                |
| <p>五、交通大學所提之期中報告原則認可，各審查委員及單位代表意見請交通大學參辦。</p>                               | <p>謝謝各位委員的支持。</p>           |

### 附錄三 期末報告委員審查意見及辦理情形

### 附錄三 期末報告委員審查意見及辦理情形

| 蘇委員苗彬   |  |
|---|--|
| 期中報告書審查意見   | 處理情形   |
| <p>一、P.26 中有關新山壩體大量儀器已損毀部分，是否追查其原因，並應評估有否修復及重建的必要。</p> <p>P.27 中傾斜觀測管所顯示的結果，看不出邊坡變形的型式。</p> | <p>本計年度畫主要是選定新山水庫測試光纖與 TDR 感測技術，並不對過去量測結果與儀器進行分析。新山水庫左壩座目前有溼潤現象與右山脊有滑動現象，有監測之必要性，建議水庫管理單位修復監測設備。</p> |
| <p>二、P.68 中 FBG 測傾儀顯示的結果不明確，為何只選取很短的時間間隔，應補充說明。</p>   | <p>因為 FBG 測傾儀於 10 月中下旬自動化安裝完成，配合 10 月底繳交期末報告，故資料較少，現已更新量測結果，請參照 4.4 節。</p>                           |
| <p>三、相關震動系統識別分析，理論很好，但目前結果仍不明顯，水位高程、地震強度造成頻率降低，則系統本身無辨識性，應尋求頻率只受壩體本身變化的部分。</p>              | <p>由於壩體結構為一連續質量系統，其特性較房屋結構複雜(樓層質量固定且離散集中在樓板，頻率特性變化較容易識別)，且水與壩體結構存在互制效應，二者實為一整體之動力系統，欲單獨探討壩體</p>      |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>本身之動力特性有其困難亦不真實。可搜集本研究及相關單位識別所得之頻率結果作為資料庫，以瞭解水庫處於安全狀態下之頻率容許變化範圍，可作為未來評估壩體於受震後是否有損傷之參考依據。</p> |
| <p>四、本案研發幾種技術，應特別注意其應用性，如何用到實際構造物，並應注意其經濟性與耐久等，方可達整體實用性，建議補充其成本分析，並應持續後續開發研究。</p>                        | <p>光纖光柵監測系統之單價分析、新山水庫與湖山水庫安裝規劃已經放置於附錄 10 與附錄 11，TDR 單價分析放置於附錄 12。</p>                           |
| <p>五、整體而言，相關技術針對水庫安全為非常重要的部分，全省有許多水庫壩體應全面檢查評估到底現況如何，有多少需要整修補充。比照公路的危橋，預先了解掌握問題，以免突生災害，反應不及，建議署方要多注意。</p> | <p>謝謝委員指教。</p>  |
| <p>林委員連山</p>   |   |
| <p>期中報告書審查意見</p>   | <p>處理情形</p>   |

|  |   |
|--|---|
| <p>一、光纖光柵感測器經研究單位之努力，成果堪稱豐碩，其在量測孔隙水壓及測量傾斜均獲致相當成果，稍有不足者則為僅置放於豎管中量測，尚未實際應用於配合壩體填築時埋設於壩體，以作為監測之依據資料，建議交大審慎評估此項替代功能之可行性。</p> | <p>謝謝委員的指導，並於附錄 10 中說明。</p>   |
| <p>二、有關 TDR 錯動變形監測儀器與傳統測傾管有所誤差，似尚需進一步改進修正。</p>   | <p>傳統測傾管所得資料亦受到 ABS 管與回填材料及地層的互制影響，TDR 錯動變形監測結果與測傾管相差僅約 3 mm，差異並不大。錯動變形之監測重點不再其絕對數值，因為管理值與行動值亦難以訂定，TDR 經許多案例顯示可在地表發生明顯裂縫前偵測錯動面發生，具有預警作用，而其後續監測結果變化速率可作為破壞預警的分析。</p> |
| <p>三、有關壩體安全診斷主要係系統識別分析歷次地震事件之壩體頻</p>   | <p>頻譜分析所得之頻率內涵分佈情形為瞭解壩體振動特性之簡易及</p>   |

|  |   |
|--|---|
| <p>譜特性，作為一旦異常時壩體安全與否之參考。本次研究所採用之 MATLAB 頻譜分析過程及其成果證明此種分析法可被採用，唯本項成果欲用到實際面上，似乎尚有很多待完成事項，建議研究單位予以臚列尚待辦理事項供署參考。</p> | <p>迅速的方法之一。本次系統識別分析的對象為土石壩，其由多種材料組構而成，為一非均質的結構系統(相較於混凝土壩而言)，因此其動力特性的變異性較高。本研究分析所得之結果可作為參考比對的基礎資料(庫)，且水庫管理單位可持續搜集有關單位過去之分析結果，若將來有中、強震發生時，可即時進行地震儀資料之頻譜分析或系統識別分析，並將地震訊號之頻譜分析(佈)結果與本研究(或資料庫)的結果進行比對，以瞭解頻譜特性之差異程度，可作為安全檢查項目規劃之參考。</p> |
| <p>四、有關非破壞性檢測技術選用導引可列入台灣各水庫管理單位管理 SOP 作業流程，俾於需要時引用。</p>  | <p>感謝委員之認同，惟該手冊之目的係做為輔助管理人員進行檢測方法之選用，而非 SOP。非破壞性檢測之儀器大多昂貴且解讀上需具一定專業，故建議若非相關專業人員，還應以委外方式辦理為佳。</p>  |
| <p>蘇委員炳勳</p>   |   |

|   |   |
|---|---|
| <p>一、就新山水庫埋設光纖光柵與傳統監測儀器比對結果，功能尚相符，惟光纖光柵現場耐久性與穩定性尚待持續追蹤，故現場埋設儀器如何繼續觀測宜有所決定</p> | <p>謝謝委員指導，本計劃將於今年度12月15日結束，但是本團隊仍就會將FBG自動化讀取系統放至新山水庫一段時間，繼續讀取FBG數據。</p> |
| <p>二、TDR與傳統測傾管比對結果，錯動位置相符，總量稍有差異，另變位過程行為是否有必要一併比對，以便與現場受力環境變化一併評估。</p>        | <p>現場受力環境變化會影響錯動行為，然其監測不易，目前在監測上，大多僅對水壓之影響進行監測。</p>                     |
| <p>三、地電阻影像探測法對老舊水庫異常狀況調查為普遍採用之方法，累積實例建立純熟經驗技術確有必要，似可納入科專計畫發展重點。</p>           | <p>感謝委員之認同，長期累積各水庫之經驗與技術確實係提升地電阻探測分析與判讀之良好方法。</p>                       |
| <p>宋委員恒輝</p>  |   |
| <p>期中報告書審查意見</p>  | <p>處理情形</p>   |
| <p>一、本報告相關圖示未以彩色呈現，無法瞭解圖示代表之意義，建</p>  | <p>圖4.1已修正，以黑白列印容易辨識之方式呈現，另外於成果報告中</p>                                  |



|  |   |
|--|---|
| <p>議報告定稿時，該以彩色呈現之圖示，請以彩色表示，例如圖 4.1 透水性材料與不透水性材料區別。</p>   | <p>將附上彩色檔案之光碟片。</p>   |
| <p>二、由表 4.1、4.2、4.3，本計畫經三年之努力研發，光纖光柵水壓計（FBG 水壓計）及 TDR 之效能及效益確實均較傳統式監測儀器佳，未來值得推廣；惟 FBG 水壓計及 TDR 之成本多少？本報告未著墨，建議交大能提供，俾作為水利署未來改善相關水庫監測儀器時，編列預算之參考。</p> | <p>光纖光柵監測系統之單價分析、新山水庫與湖山水庫安裝規劃已經放置於附錄 10 與附錄 11，TDR 單價分析放置於附錄 12。</p> |
| <p>三、建議“4.3 節（P.31）光纖光柵監測系統”與“第 4.2 節新山水庫現地應用與測試”互換章節，另 P.54 第 4.3.7 “新山水庫壩體 FBG 水壓計安裝”一節保留，俾與原 4.2 節“新山水庫現地應用與測試”有所連貫。</p>                          | <p>遵照辦理</p>   |
| <p>四、P.18 第 4.1 節第 1 段第 4 行“提高使庫安全監測之效能”，其中</p>  | <p>遵照辦理</p>   |

|  |             |
|--|-------------|
| <p>“使庫”請更正為“水庫”。</p>   |             |
| <p>五、P.19 第 2 段第 5 行“但一般至也僅埋設兩組電子式水壓計”，其中“至”係“至多”或“至少”或屬贅字，請查明。</p>                                | <p>遵照辦理</p> |
| <p>六、P.25 第 4.2.1 節第 2 段“台灣省自來水股份有限公司”，其中“台灣省”請更正為“台灣”。</p>  | <p>遵照辦理</p> |
| <p>七、P.31 “4.3.1 光纖簡介”第 2 行“光纖直徑約在 100 至 125m 之間”，其中“100 至 125m”應屬筆誤，請更正。</p>                      | <p>遵照辦理</p> |
| <p>八、P.32 第 1 行“臨界入射角 <math>\alpha_C</math>”，<math>\alpha_C</math> 請更正為 <math>\alpha_c</math>。</p> | <p>遵照辦理</p> |
| <p>九、P.58 圖 4.34 新山水庫水位孔 LL1 清洗工程，與照片不符，請更正為“LL3 清洗工程”。</p>  | <p>遵照辦理</p> |

|   |   |
|---|---|
| <p>十、第 4.3.7 節 (P.54) “新山水庫壩體 FBG 水壓計安裝” 第 1 段陳述於 7 月 1 日與 7 月 8 日分別讀取 LL1 與 LL3 之 FBG 水壓計讀數，及於同日以手動式水位計量測，惟卻於末段陳述 “量測誤差之主要原因在於兩者於不同時間點量測”，似與上述之陳述競合，建議為符實際，各量測時間請補充至上午或下午幾點幾分。</p> | <p>謝謝委員指導，詳細說明請參見第 4.4 節。</p>                           |
| <p>十一、第五章主題 “水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊 (初稿)”，惟目錄五名稱為 “水庫壩體非破壞性檢測運用導引 (初稿)”，P.121 第 2 行又名為 “非破壞性檢測技術之適用性評估方法手冊 (初稿)”，何者正確？建議名稱統一。本手冊並請另付梓成冊送水庫管理單位參考。</p>                                     | <p>遵照辦理，手冊名稱定為 “水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊 (初稿)”</p>              |
| <p>十二、P.120 表 5.2，可用之非破壞性檢測法有多種時，如何研選？是否將經濟性列入考量。</p>   | <p>其選用須先參考 5.2 節中之內容進行篩選，待最後已連現場環境亦考慮完後，若尚有多種方法，係可納</p> |

|   |   |
|---|---|
|   | <p>入經濟性考量，比較提供服務廠商之報價。但在經濟許可下，建議可同時採用多種方式，俾便交互參照之用。</p>   |
| <p>十三、P.132 第 1 行，(5.1) 式，請更正為 (6.1) 式。</p>   | <p>遵照辦理</p>   |
| <p>十四、壩體震後安全診斷系統研究，其結果對水庫管理單位提供那些訊息，請具體陳述，另結論與建議一章，建議第 4 點末段提及“未來若某次地震事件經系統識別分析所得之頻率有較大的差異時，則可能為壩體有結構性的損傷發生，……。”其中頻率較大之差異如何辨別？差異值之範圍如何界定，請說明。</p> | <p>本研究主要進行頻譜分析及系統識別分析，頻譜分析主要可瞭解振動訊號之主要峰值分佈的頻寬範圍；系統識別分析則可掌握壩體於地震擾動作用下之振動頻率。以鯉魚潭水庫為例，於 921 地震(88.09.21)至 2002 年地震事件識別所得之振動頻率介於 1.03Hz~2.61Hz 之間(垂直壩軸方向)。鯉魚潭水庫於上述分析之地震擾動下均未發生壩體結構有損傷的情形，當壩體結構有損傷發生時，結構之振動頻率通常會有降低的趨勢(軟化)。在有效樣本地震事件未累積充份的情況下，或可以本案分析所得之下界頻率(1.03Hz)初步作為參考值，若未來地震事件分</p> |

|   |   |
|---|---|
|   | <p>析所得之振動頻率小於此參考值時，則可針對壩體進行較為詳細之檢查。</p> |
| <p>十五、教育訓練建議能附幾張相片。</p>   | <p>遵照辦理</p>                             |
| <p>十六、水庫壩體非破壞性檢測技術運用導引：</p> <p>P.1 第 7 行“地質改量成效評估等，...。”“改量”請更正為“改良”。</p> <p>P.3 “1.2.1 折射震測法”及”1.2.2 表面波震測法”，建議加註“英文名稱”。</p> | <p>遵照辦理</p>                             |

|   |   |
|---|---|
| <p>P.4 “1.2.2 表面波震測法”一節敘文“簡述”及“應用”之字體請改為粗體黑字，另“應用”一節之內容未說明，請補充。</p>                                       |   |
| <p>十七、建議三年研究之成果能列表並具體的陳述各年度之成果。</p>   | <p>遵照辦理。</p>  |
| <p>郭委員耀程(書面意見)</p>  |   |
| <p>期中報告書審查意見</p>  | <p>處理情形</p>   |
| <p>一、本案為3年連續實施之第3年技術研發成果報告，所提各項診斷技術應有一定量測精度，如依第v頁結論2及3點以「變化趨勢」相同或具一致性描述，似乎研發技術均尚未達可應用階段，未來如何推廣建議應予說明。</p> | <p>目前FBG測傾儀與FBG水壓計經過3年的發展，技術已經趨於成熟。95、96年已經在實驗室驗證成功。今年在新山水庫進行現地測試，由4.2節可以看出各個感測器標定係數與現地應用的結果，使用「變化趨勢」是因為目前現地手動量測數據資料量較少，待日後數據量較多後，可進行進一步分析。未來應用與評估分析如附錄十、附錄</p> |

|   |   |
|---|---|
|   | 十一與附錄十二。  |
| <p>二、就壩體安全診斷系統成果而言，第 x 頁表示因牡丹水庫及鯉魚潭水庫地震事件樣本數量有限，所以建議應再持續收集資料分析壩體振動頻率之安全變動範圍，惟地震事件發生非人為所能控制，建議考量未來選擇翡翠水庫等大壩之長期地震資料(自壩頂至壩底均有分層完整資料)，作為分析對象較為合宜。</p> | <p>謝謝委員的建議。本研究於第一年即進行翡翠水庫拱壩之系統識別分析，分析結果初步驗證識別技術應用於壩體結構分析的可行性。的確，翡翠水庫及鯉魚潭水庫均有長期累積的地震儀記錄資料，惟壩址所在地表震度達 4 級以上之樣本記錄尚屬有限(訊號記錄的解析度及精確度較高，量測結果較為可信)，壩體結構於小地震時不至於產生結構性的破壞，然而遇到中震以上之地震時，壩體則有損傷的可能性，此時因地表擾動的能量較大，壩體結構的動力特性或差異程度比較容易突顯出來，因此，結構損傷探測針對中震以上的地震資料分析較有意義。所幸，近期台灣地區在 921 地震、1022 嘉義地震、331 地震及恆春地震侵襲下，尚未有重大的水庫損傷發生，過去相關單位針對各水庫所分析之結果可作為未來強震儀資料分析結果</p> |

|  |  |
|--|--|
|  | (中、強震時)之比對參考。  |
| 三、P.31 述及光纖直徑約在“100至 125m 之間” 應有誤繕，請修正。  | 遵照辦理   |
| 四、P.68 圖 4.49 顯示 97.10.23 至 10.24 日深度 12~22m 位移量增加超過 1mm，但 97.10.25 及 26 日位移量卻逐漸縮小，因圖中未指明位移方向，其變化狀況是否合理請予說明。 | 因為當時 FBG 測傾儀自動化系統與光纜剛布設完成，系統正在進行調整，故有較大誤差的產生。                          |
| 五、採用 FBG 及 TDR 監測土層傾斜量，其是否具一般人工觀測傾斜儀可監測出土層雙向位移量功能，建請說明（乃研判土層滑動面走向之重要功能）。                                     | FBG 測傾儀可以向傳統測傾儀一樣量測土層雙向位移。TDR 錯動變形監測無法監測出土層之滑動方向，一般而言，滑動方向可由坡向及地質位態研判。 |
| 六、本案研發多項壩體安全檢測及診斷技術，且將諸多學理及監測分析觀念透過教育訓練予各基層管理人員瞭解，實有助於提升國內水庫安全管理品質，應予肯定。                                     | 謝謝委員的鼓勵。   |



| 黃委員鎮豐   |   |
|---|---|
| 期中報告書審查意見   | 處理情形  |
| <p>一、交大團隊已在新山水庫大壩下游坡面將 LL1、LL3 裝設光纖光柵水壓計與自動化擷取系統，建請能就所獲得觀監測資料及配合先前地電阻量測之監測資料，檢討研判大壩下游之滲流範圍及路徑，或有具體建議該水庫壩體監測作業方式及壩體安全檢討評核工作計畫。</p> | <p>先前地電阻量測資料所得之結果已於 95 年度之計畫中研判其可能滲漏路徑。今年度所加設之光纖光柵水壓計安裝數量僅兩個，並位置集中，並無法再加已提供足夠的額外辨識資料。本年度計劃是選定新山水庫 LL1 與 LL3 孔測試過去所研發的光纖水壓計，並無對壩體的滲流現象與安全進行評估。</p> |
| <p>二、新山水庫右山脊已將 W3 加裝水位及位移量測，及新鑽孔 T1 裝設 TDR 錯動變形感測纜線，建請將觀監測資料與原監測結果比對研判是否屬淺層滑動。</p>  | <p>在判斷上需先認知監測資料之結果具有時間與空間之局限，就目前 T1 之 TDR 錯動變形以及 IS-6 之人工測傾管顯示，在今年六月至十一月間之滑動係屬淺層滑動(約地表下三至五米)。W3 目前收集資料時間尚短，暫時無法判定，需長時間觀測後才能判斷。</p>                |
| <p>台灣自來水公司劉工程師德良</p>  |   |

| 期末報告書審查意見  | 處理情形  |
|--|---|
| <p>一、結論壩體安全診斷系統部分所述地震儀平時應定期維護保養及校正，請說明如何落實施作，以利水庫管理單位遵行。</p> | <p>地震儀或擷取系統所在位置應保持乾燥及避免灰塵侵襲，以延長儀器設備的使用壽命。此外，地震儀可以手指輕敲數次，當敲擊時理應有數個突波訊號產生，若無訊號變化，則表示地震儀(或資料擷取系統)有異常的現象。另，某些型式之地震儀若將量測方向垂直指向地表，其讀數應為 1g (1 個重力加速度值，朝上則為-1g)，若非此讀數，則地震儀系統亦可能有異常的情況。上述方式為簡易的檢測方式，年度檢查時可委請廠商協助校正，俾便於地震發生時擷取可靠之歷時訊號。</p> |
| <p>二、建議 1.進行多點孔位與感測器之測試一節，2.請提供單價資料以供後續擴充考量。</p>             | <p>請參考附錄十、附錄十一與附錄十二。</p>  |
| <p>本署南水局盧正工程司炳堃</p>  |   |

| 期中報告書審查意見  | 處理情形  |
|--|---|
| <p>一、文章內容不連貫，閱讀不易，建議調整（如 4.2 節為新山水庫應用與測試，4.3 節為光纖光柵監測系統，4.3.7 節為新山水庫壩體 FBG 水壓計安裝）。</p>   | <p>遵照辦理。</p>  |
| <p>二、P.61 圖 4.40 及 4.41 LL3 於 10 月 10 日有明顯變化，10 月 14 日有明顯變化，10 月 10 日變化可能與該日降雨量（113.5mm）有關，10 月 14 日為何有明顯下降再上升，請查明，而 LL3 及 LL1 分別有 8-9m 與 2m 水頭，宜深入探討原因，提出進一步因應之道。</p> | <p>本年度計劃是選定新山水庫 LL1 與 LL3 孔測試過去所研發的光纖水壓計，並無對壩體的滲流現象與安全進行評估。</p>         |
| <p>三、圖 4.43 (P.63) 與圖 4.44 (P.64) 建議列出傳統測傾儀量測結果，以了解儀器之系統誤差，且圖 4.44 位移量達 1400mm，請說明此位移量意義。</p>  | <p>圖 4.43 與圖 4.44 已經列出傳統儀器量測結果。圖 4.44 所表示之 1400mm 之意義已修正並於 4.4 節說明。</p> |
| <p>四、P.83 4.4.3 TDR 錯動變形監測</p>   | <p>先期之觀測，因其無明顯錯動量，</p>  |

|   |   |
|---|---|
| <p>成果，自 6 月 25 日~10 月 24 日為何僅有 5 筆有效觀測資料，請說明。</p>   | <p>監測頻率為每月一次，後在十月中監測到地表有約 15mm 之錯動後，已將監測頻率提升為每日一次。</p>  |
| <p>五、P.85 圖 4.7.2 IS-6 傾斜管觀測結果，圖中有繪出鑽孔柱狀圖，為原始鑽孔柱狀圖或將 T-1 扣掉表層 2m 柱狀圖？由圖中顯示 10 月 3 日有約 10mm 位移，則 9 月 1 日至 10 月 3 日有明顯降雨事件發生？</p>   | <p>IS-6 之鑽孔柱狀圖是由 T-1 之鑽孔柱狀圖扣掉表層兩米所得，而在九 月一日至十月三日間係有降雨事件發生，根據中央氣象局之基隆站雨量計顯示，該時間內有 852.5mm 之雨量。</p>     |
| <p>六、手冊（附錄六）：</p> <p>1.第一章中有關各種非破壞檢測法介紹，有關進階閱讀參考，建議將文獻出處列出而非僅人名，使有意閱讀者能進一步閱讀。</p> <p>2.P.53 第 5.7 節先天因素，是指透地雷達本身理論．．．,其中透地雷達可能為筆誤，本章節為自然電位法，請查明。</p> <p>3.手冊建議單獨列印成冊，以提供水庫管理單位參考。</p> | <p>1.參考文獻皆於各章之最後，惟漏列部份將予補足。</p> <p>2.P.53 所指正部份係為誤植，已予改正。</p> <p>3.據主辦單位指示，成果報告將分送各水庫單位，因此不需分冊裝訂。</p> |

本署水源經營組邱助理工程師士恩

|   |   |
|---|---|
| <p>一、圖 4-35~42，請補充水庫水位與降雨量觀測情形，以利客觀研判。</p>                                    | <p>遵照辦理，請參考 4.4 節。</p>  |
| <p>二、研究成果應將歷年來試驗規劃、測試、改進、驗證等研究過程列入報告內呈現，包括封裝、金屬薄膜、實驗與實際時間尺度(耐久性)之釐定等相關項目。</p> | <p>請參考 3.1-3.3 節。</p>   |
| <p>三、FBG 及 TDR 等儀器與傳統儀器優缺點比較及適用性限制等，請補充。</p>                                  | <p>請參考 4.1 節。</p>   |
| <p>四、使用 FBG 及 TDR 等儀器標準配備項目、裝配及操作程序、成本费用估算等，請補充以利推廣管理單位參採應用。</p>              | <p>光纖光柵監測系統之單價分析、新山水庫與湖山水庫安裝規劃已經放置於附錄 10 與附錄 11，TDR 單價分析放置於附錄 12。</p> |
| <p>五、本計畫成果是否達成計畫原定目標應有交待，另所提結論及建議內容不夠具體，並請補充。</p>                             | <p>本計劃之成果皆與各年度所提列之工作項目相符。</p>   |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 結論  |                             |
| 一、針對傳統監測儀器之缺點與限制，新研發儀器能否克服，請加強說明。                         | 遵照辦理，請參考 4.1 節。             |
| 二、請交通大學洽本署水源經營組研議選擇一座現有水庫規劃全面性採用本計畫研發之監測系統，以實地探討其實用性與可靠性。 | 遵照辦理，請參考附錄 10 至附錄 12。       |
| 三、請提出於新建水庫(如湖山水庫)埋設本計畫研發儀器之可行性，以作為日後大壩埋設儀器之參考。            | 遵照辦理，請參考附錄 10 至附錄 12。       |
| 四、本計畫研究成果是否已達原訂工作目標，請加以補充說明。                              | 遵照辦理，本計劃之成果皆與各年度所提列之工作項目相符。 |
| 五、交通大學所提期末報告經研商原則認可，請依委員及各單位意見修正補充，並依契約規定提送審定，俾辦理後續結案事宜。  | 謝謝各位委員的支持。                  |

## 附錄四 右山脊 T-1 鑽孔柱狀圖與岩心照片

## 附錄四 右山脊 T-1 鑽孔柱狀圖與岩心照片

| 嘉進地質大地技師事務所 |    | 工程名稱：TDR變形監測技術-新山水庫現地測試右山脊鑽探作業 |                      |                    |     |                 |    | 孔號：BH1 |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
|-------------|----|--------------------------------|----------------------|--------------------|-----|-----------------|----|--------|---|--------|--------|------------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
|             |    | 高程：-                           |                      | 地下水位：-             |     | 鑽探日期：97.6.19~24 |    | 第 1 頁  |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 深度          | 標高 | N值                             | 地質描述                 | 岩心<br>提取<br>率<br>% | RQD | 柱狀<br>圖         | 分類 | 顆粒分析 % |   |        |        | 自含<br>水<br>然<br>量<br>% | 線位<br>單<br>重<br>t/m <sup>3</sup> | 液限<br>性<br>度<br>% | 塑指<br>性<br>數<br>% | 比<br>重<br>GS |
|             |    |                                |                      |                    |     |                 |    | 卵<br>礫 | 砂 | 粉<br>土 | 粘<br>土 |                        |                                  |                   |                   |              |
| 1           |    |                                | 0~1.3m<br>回填砂土       | 90                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 2           |    |                                | 1.3~5.6m<br>黃棕色黏土夾岩塊 | 95                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 3           |    |                                |                      | 85                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 4           |    |                                |                      | 60                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 5           |    |                                |                      | 20                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 6           |    |                                |                      | 70                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 7           |    |                                | 5.6~17.0m<br>灰色頁岩夾砂岩 | 92                 | 20  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 8           |    |                                |                      | 95                 | 40  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 9           |    |                                |                      | 92                 | 20  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 10          |    |                                |                      | 90                 | 10  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 11          |    |                                |                      | 95                 | 70  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 12          |    |                                |                      | 95                 | 40  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 13          |    |                                |                      | 95                 | 60  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 14          |    |                                |                      | 98                 | 30  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 15          |    |                                |                      | 92                 | 20  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 16          |    |                                |                      | 90                 | -   |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 17          |    |                                |                      | 92                 | 40  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 18          |    |                                | 17.0~27.0m<br>白灰色砂岩  | 95                 | 95  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 19          |    |                                |                      | 95                 | 92  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 20          |    |                                |                      | 95                 | 55  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 21          |    |                                |                      | 95                 | 50  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 22          |    |                                |                      | 95                 | 50  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 23          |    |                                |                      | 95                 | 80  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 24          |    |                                |                      | 97                 | 60  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 25          |    |                                |                      | 97                 | 70  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 26          |    |                                |                      | 95                 | 90  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 27          |    |                                |                      | 95                 | 90  |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 28          |    |                                | 鑽探終止                 |                    |     |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 29          |    |                                |                      |                    |     |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |
| 30          |    |                                |                      |                    |     |                 |    |        |   |        |        |                        |                                  |                   |                   |              |

圖 A2-1 鑽孔柱狀圖



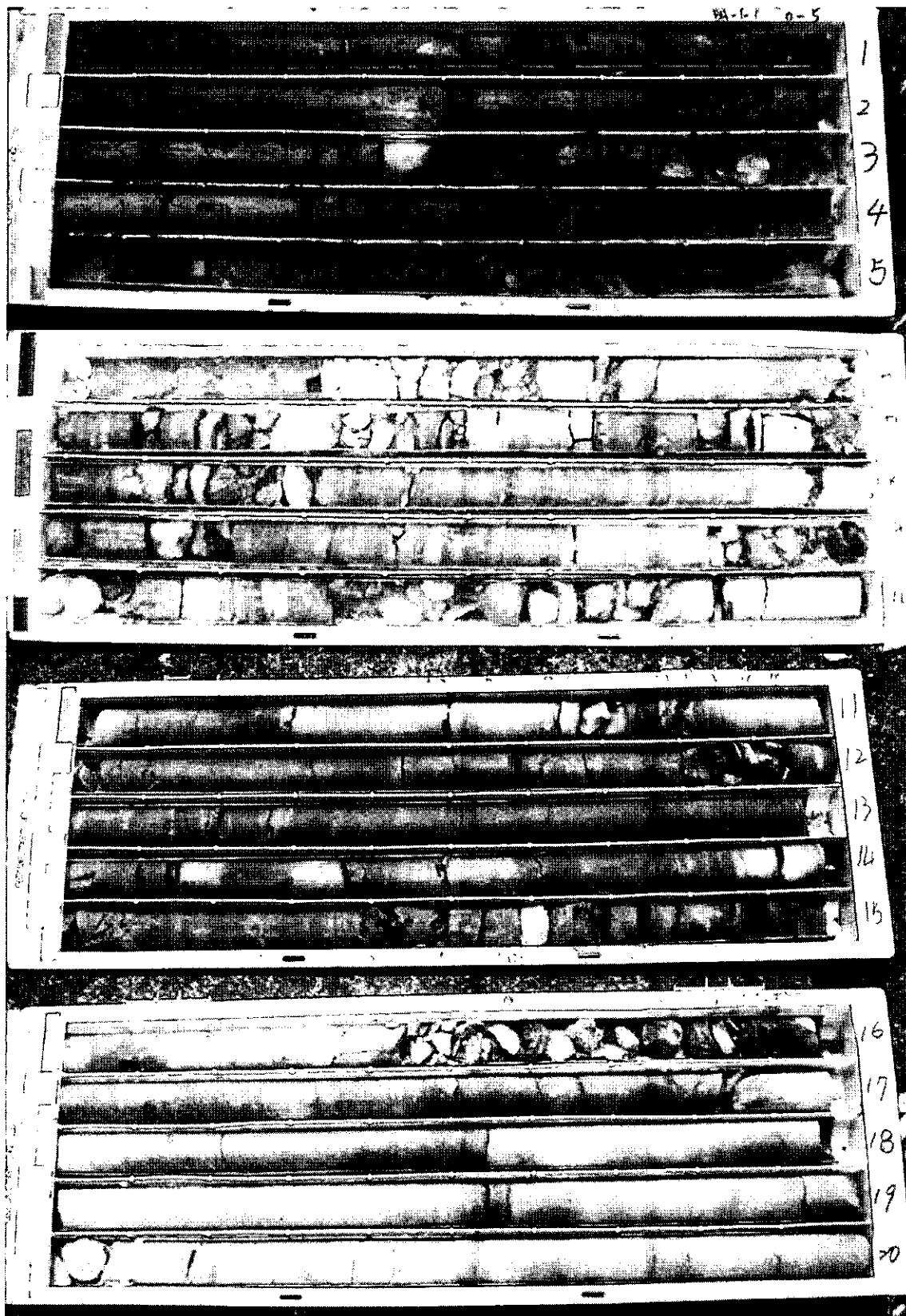
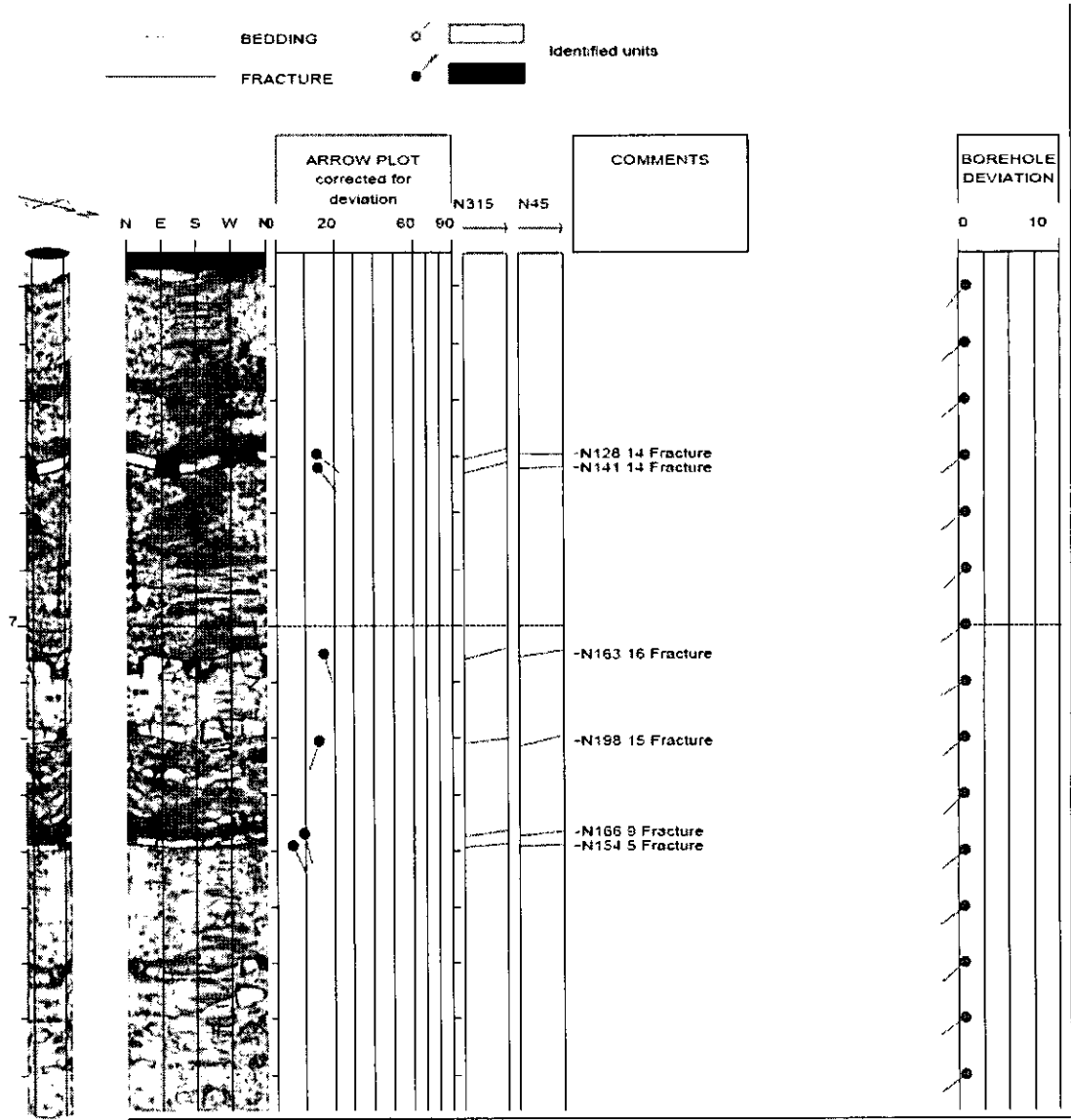


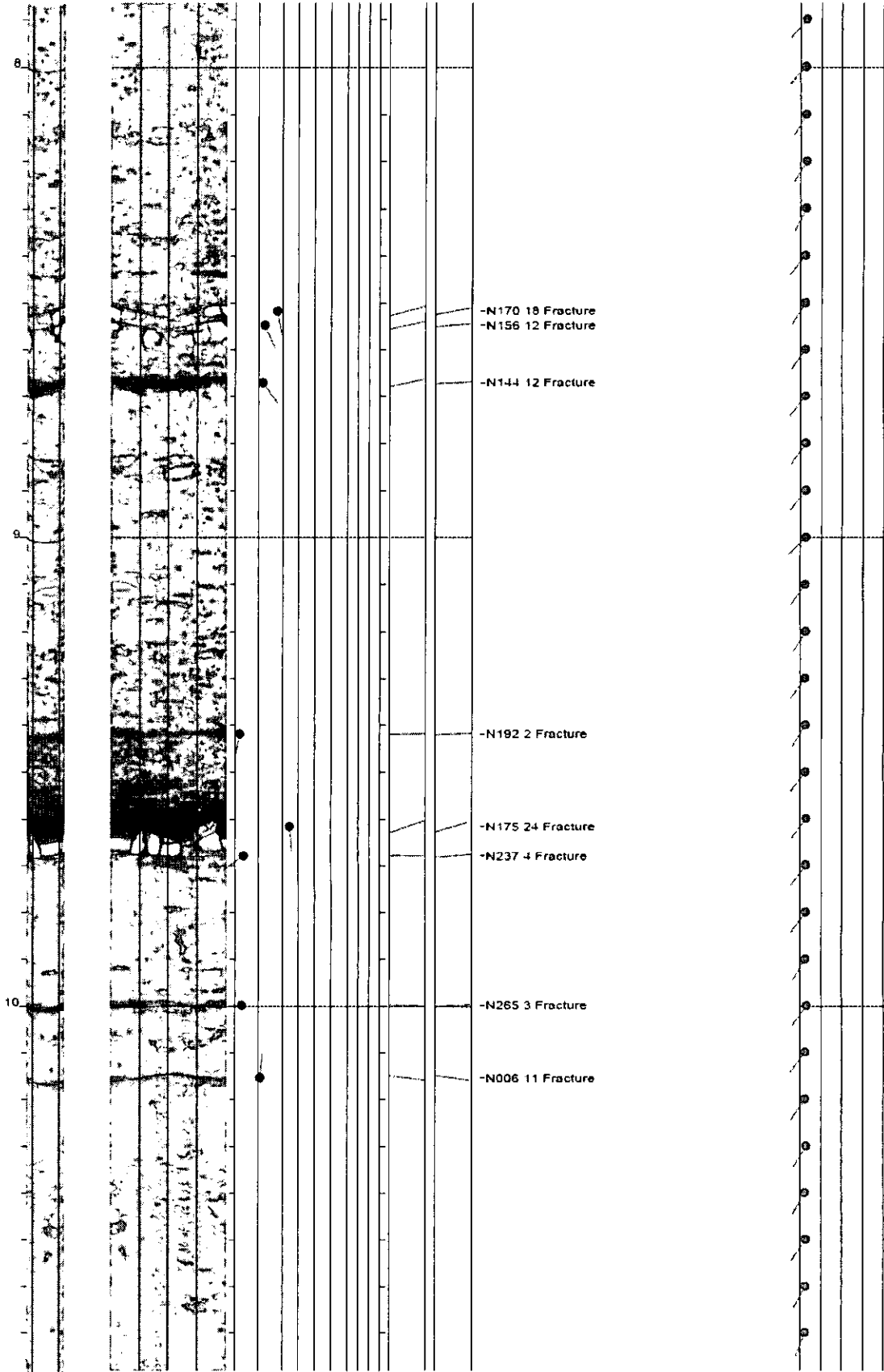


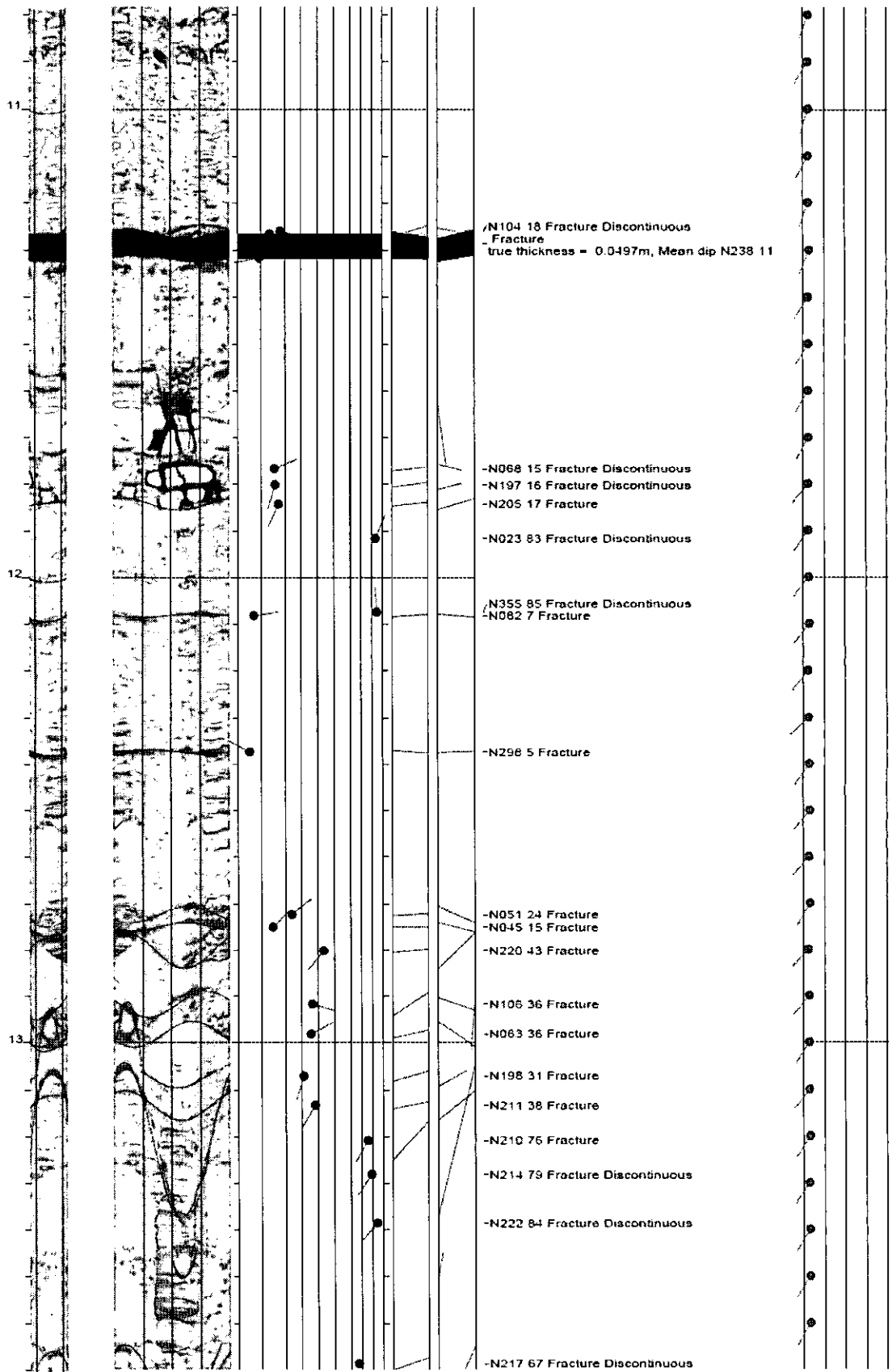
圖 A2-2 鑽孔岩心照

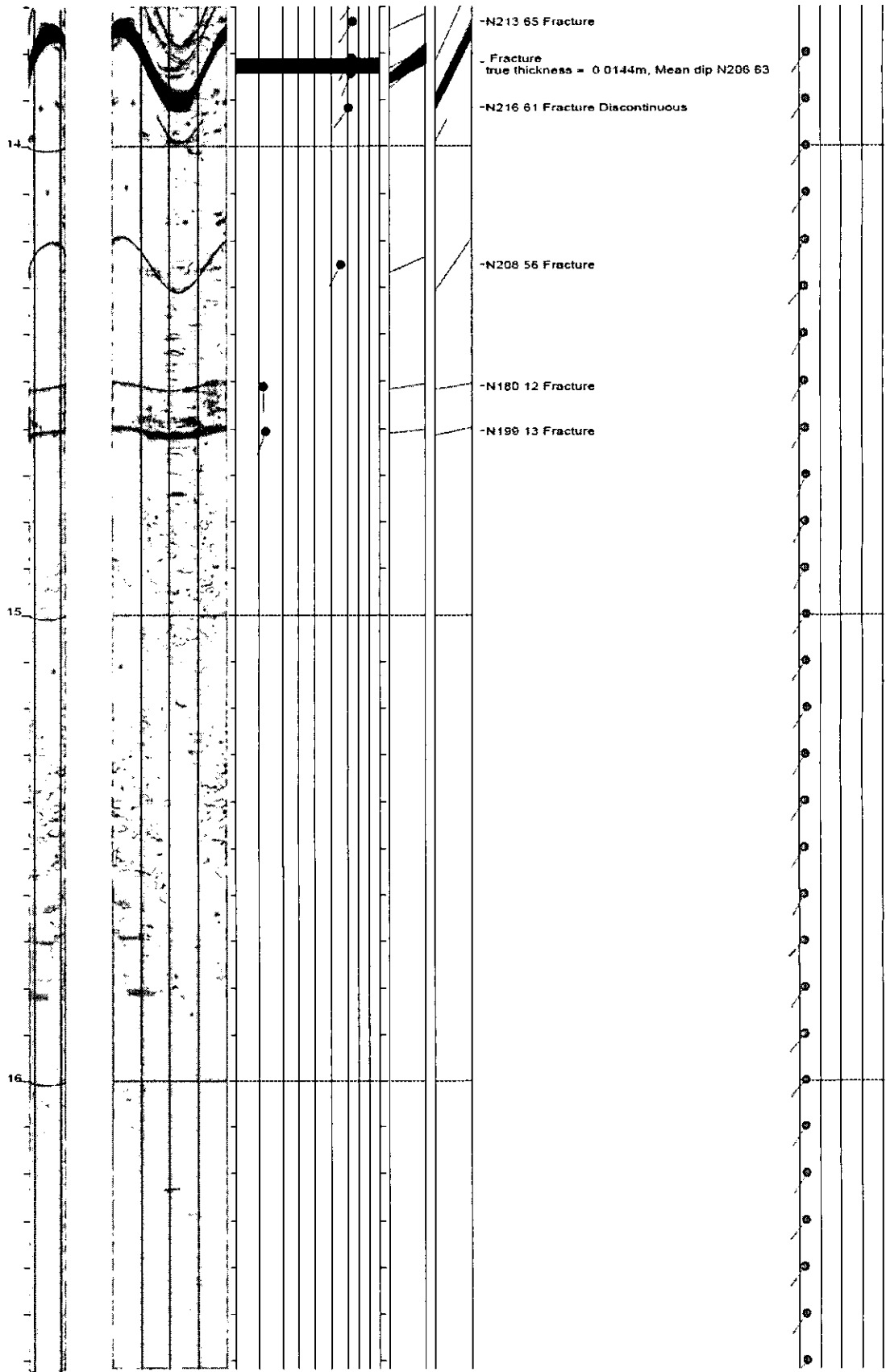
## 附錄五 右山脊 T-1 孔孔內攝影影像

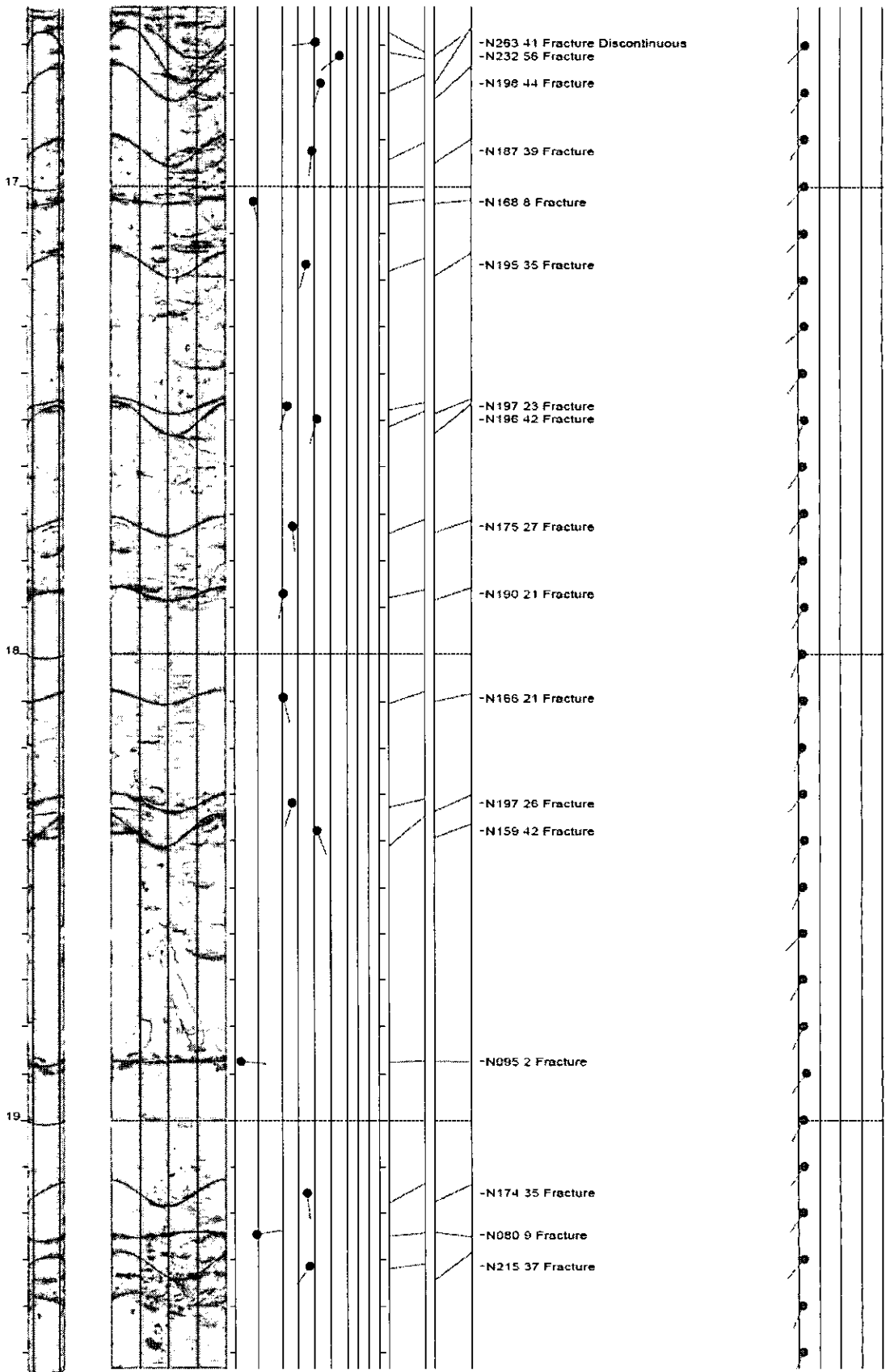
# 附錄五 右山脊 T-1 孔孔內攝影影像



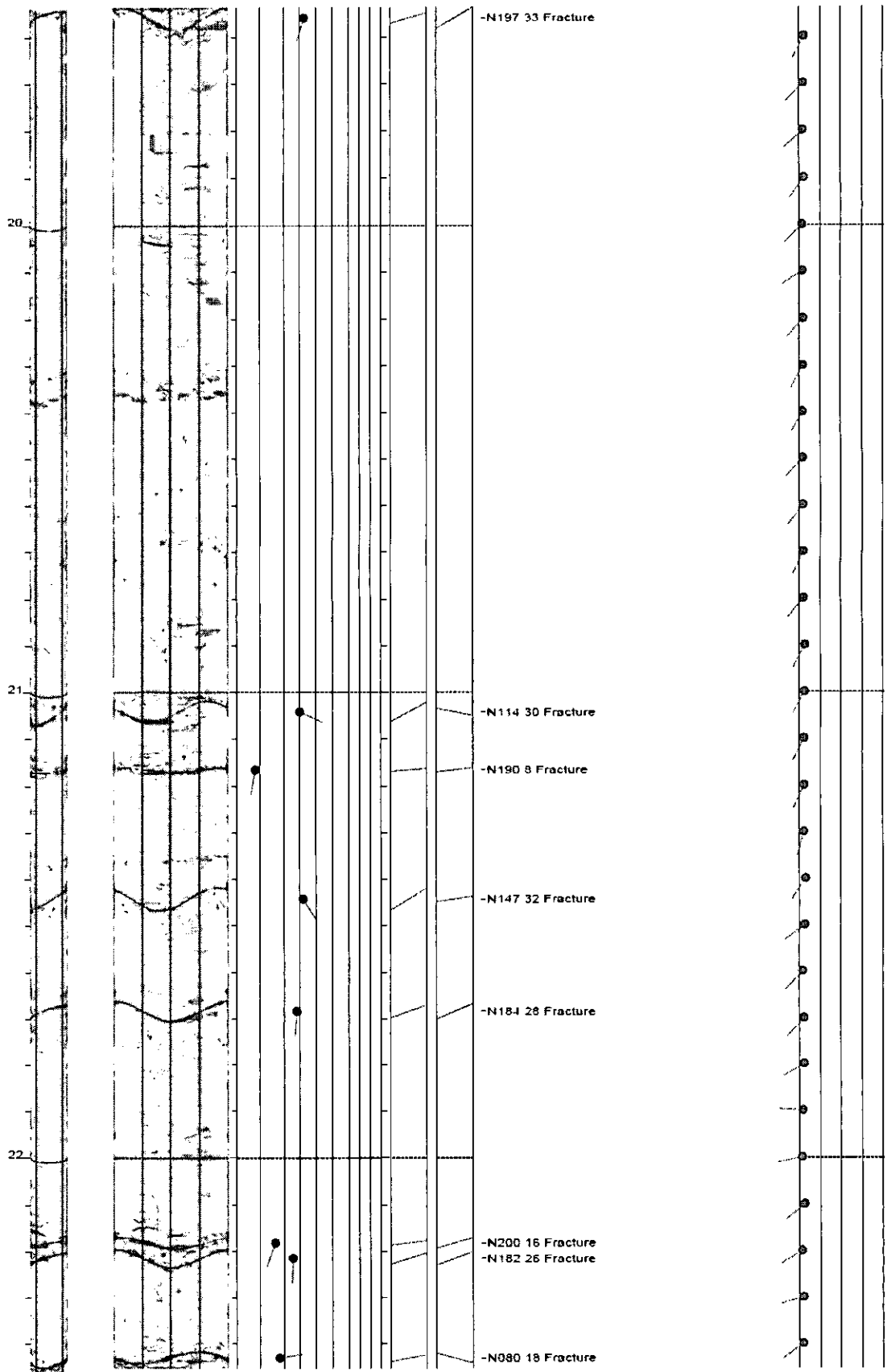


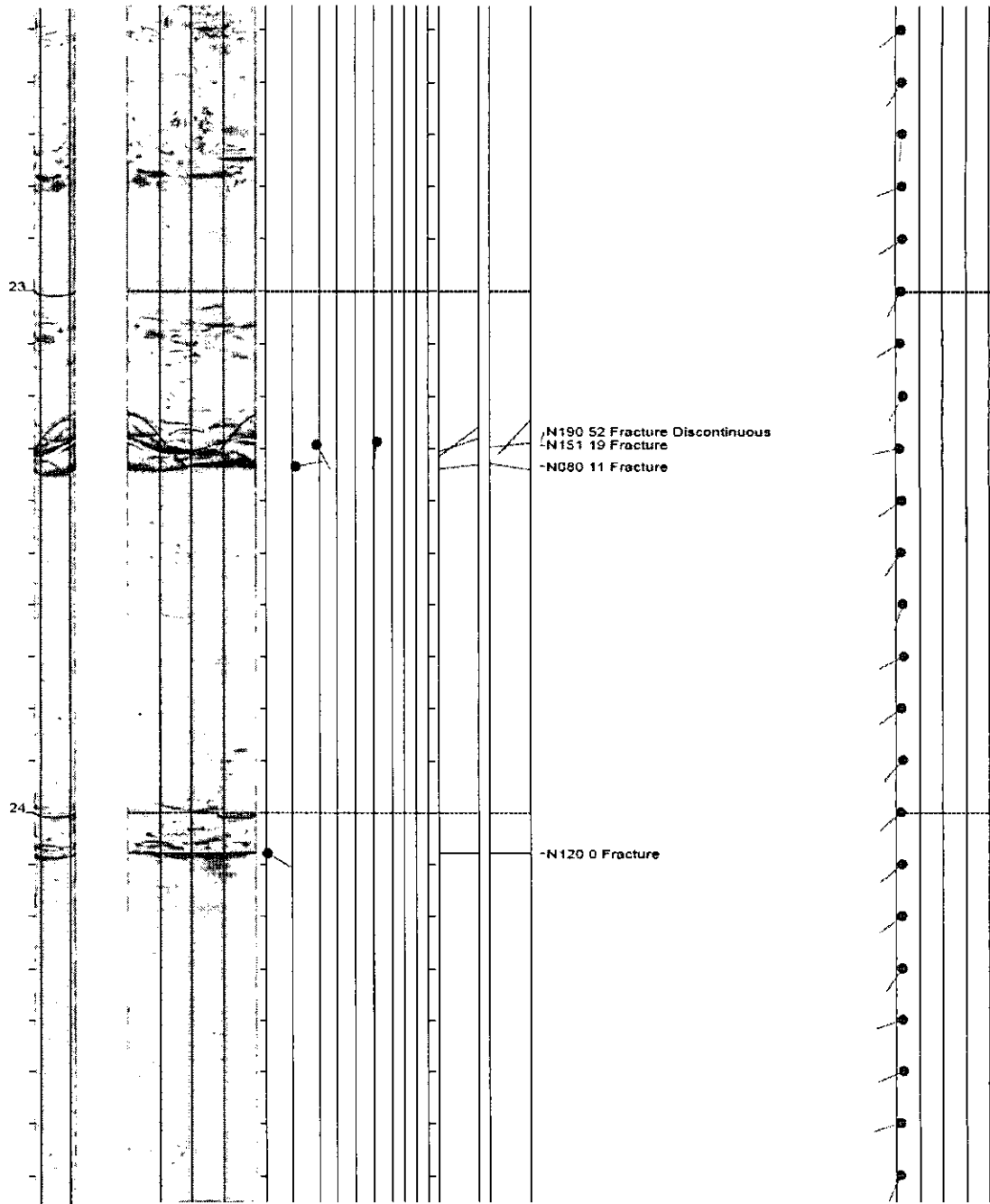








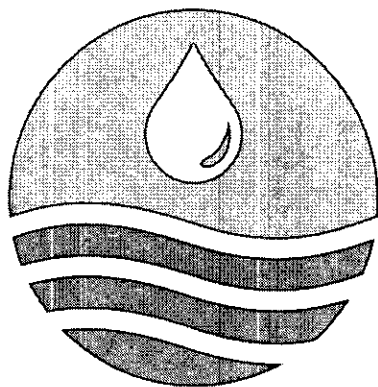




## 附錄六 水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊

# 附錄六 水庫壩體非破壞性檢測技術導引手冊

(初稿)



委託機關：經濟部水利署

受託單位：國立交通大學

執行單位：國立交通大學防災工程研究中心

中華民國九十七年十二月

# 目錄

|  |     |
|--|-----|
| 目錄 .....   | I   |
| 表目錄 .....  | VI  |
| 圖目錄 .....  | VII |
| 一、總論 .....   | 1   |
| 1.1 通則 .....   | 1   |
| 1.1.1 手冊內容與目的 .....                                    | 1   |
| 1.1.2 非破壞性檢測法介紹 .....                                  | 1   |
| 1.1.3 水庫壩體適用之非破壞性檢測法 .....                             | 2   |
| 1.2 水庫壩體適用之非破壞性檢測法簡介 .....                             | 3   |
| 1.2.1 折射震測法(seismic refraction method).....            | 3   |
| 1.2.2 表面波震測法(Surface wave method).....                 | 5   |
| 1.2.3 2D 電阻探測法 (DC Resistivity).....                   | 7   |
| 1.2.4 自然電位法 (Spontaneous Potential, SP).....           | 8   |
| 1.2.5 透地雷達探測法 (Ground Penetrating Radar,<br>GPR) ..... | 10  |
| 1.3 非破壞性檢測法之選用 .....                                   | 12  |
| 1.3.1 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表 .....                          | 12  |

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 1.3.2 | 非破壞性檢測方法特性表 ..... | 16 |
| 1.3.3 | 選用說明 .....        | 16 |
| 1.4   | 參考文獻 .....        | 18 |
| 二、    | 折射震測法 .....       | 20 |
| 2.1   | 應用範圍 .....        | 20 |
| 2.2   | 原理 .....          | 20 |
| 2.3   | 施測方法 .....        | 21 |
| 2.3.1 | 儀器說明 .....        | 21 |
| 2.3.2 | 規劃、定線與施作 .....    | 22 |
| 2.4   | 分析方法 .....        | 24 |
| 2.5   | 資料分析判釋需知 .....    | 27 |
| 2.6   | 報告書內容 .....       | 29 |
| 2.7   | 可能的誤差來源 .....     | 29 |
| 2.8   | 應用限制 .....        | 30 |
| 2.9   | 參考文獻 .....        | 31 |
| 三、    | 表面波震測法 .....      | 32 |
| 3.1   | 應用範圍 .....        | 32 |

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 3.2   | 原理 .....           | 32 |
| 3.3   | 施測與分析方法 .....      | 34 |
| 3.3.1 | 儀器說明 .....         | 34 |
| 3.3.2 | 規劃與定線 .....        | 35 |
| 3.3.3 | 表面波譜法(SASW) .....  | 37 |
| 3.3.4 | 多頻道表面波法(MASW)..... | 39 |
| 3.3.5 | 反算 .....           | 40 |
| 3.4   | 資料分析判釋需知 .....     | 42 |
| 3.5   | 報告書內容 .....        | 45 |
| 3.6   | 可能的誤差來源 .....      | 46 |
| 3.7   | 應用限制 .....         | 47 |
| 3.8   | 參考文獻 .....         | 47 |
| 四、    | 2D 電阻探測法 .....     | 49 |
| 4.1   | 應用範圍 .....         | 49 |
| 4.2   | 原理 .....           | 49 |
| 4.3   | 施測方法 .....         | 50 |
| 4.3.1 | 儀器說明 .....         | 50 |

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 4.3.2 | 測線規劃 .....     | 50 |
| 4.3.3 | 現場施測 .....     | 51 |
| 4.4   | 分析方法 .....     | 51 |
| 4.5   | 資料分析判釋需知 ..... | 51 |
| 4.6   | 報告書內容 .....    | 52 |
| 4.7   | 可能的誤差來源 .....  | 52 |
| 4.8   | 應用限制 .....     | 53 |
| 4.9   | 參考文獻 .....     | 54 |
| 五、    | 自然電位法 .....    | 55 |
| 5.1   | 應用範圍 .....     | 55 |
| 5.2   | 原理 .....       | 55 |
| 5.3   | 施測方法 .....     | 56 |
| 5.3.1 | 儀器說明 .....     | 56 |
| 5.3.2 | 規劃、定線與施作 ..... | 57 |
| 5.4   | 分析方法 .....     | 58 |
| 5.5   | 資料分析判釋需知 ..... | 60 |
| 5.6   | 報告書內容 .....    | 62 |



|       |               |    |
|-------|---------------|----|
| 5.7   | 可能的誤差來源.....  | 62 |
| 5.8   | 應用限制.....     | 63 |
| 5.9   | 參考文獻.....     | 64 |
| 六、    | 透地雷達.....     | 64 |
| 6.1   | 應用範圍.....     | 64 |
| 6.2   | 原理.....       | 65 |
| 6.3   | 施測方法.....     | 65 |
| 6.3.1 | 儀器說明.....     | 66 |
| 6.3.2 | 規劃與定線.....    | 66 |
| 6.3.3 | 施測模式.....     | 69 |
| 6.4   | 分析方法.....     | 72 |
| 6.4.2 | 結果解析.....     | 76 |
| 6.5   | 資料分析判釋需知..... | 77 |
| 6.6   | 報告書內容.....    | 77 |
| 6.7   | 可能的誤差來源.....  | 78 |
| 6.8   | 應用限制.....     | 79 |
| 6.9   | 參考文獻.....     | 79 |

## 表目錄

|  |    |
|--|----|
| 表 1.1 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表 .....  | 13 |
| 表 1.2 非破壞性檢測法特性表 .....   | 16 |
| 表 6.1 常見土層材料之電磁波波速(摘自 Davis and Annan, 1989;<br>Ulriksen,1982) ..... | 74 |

## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 1.1 壓縮波波速影像剖面圖(石門水庫廊道).....                          | 3  |
| 圖 1.2 剪力波波速影像剖面(新山水庫壩基).....                           | 5  |
| 圖 1.3 電阻率影像剖面圖 (石門水庫廊道).....                           | 7  |
| 圖 1.4 二維視電位影像平面圖 (改繪自 Johansson et al., 2005)<br>..... | 9  |
| 圖 1.5 透地雷達 3D 影像(大觀電廠溢洪道).....                         | 11 |
| 圖 1.6 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程圖..                          | 17 |
| 圖 2.1 折射震測法原理示意圖.....                                  | 21 |
| 圖 2.2 折射震測法現場施測參數圖.....                                | 23 |
| 圖 2.3 初達波走時曲線挑選.....                                   | 25 |
| 圖 2.4 折射震測走時震測影像分析原理.....                              | 26 |
| 圖 2.5 二維地層波速剖面.....                                    | 26 |
| 圖 2.6 折射震測法現場資料示意圖.....                                | 28 |
| 圖 3.1 雷利波示意圖 (Bolt, 1976).....                         | 32 |
| 圖 3.2 表面波震測基本原理.....                                   | 33 |
| 圖 3.3 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查....                        | 34 |
| 圖 3.4 雙頻道表面波震測法現場施測參數圖.....                            | 36 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 圖 3.5  | 多頻道表面波震測法現場施測參數圖 .....  | 36 |
| 圖 3.6  | SASW 頻散曲線分析(相位差-頻率圖).....   | 38 |
| 圖 3.7  | SASW 頻散曲線分析結果.....  | 39 |
| 圖 3.8  | 多頻道表面波法頻散曲線分析結果.....  | 40 |
| 圖 3.9  | 地層剪力波速剖面 .....  | 41 |
| 圖 3.10 | 表面波頻散曲線.....  | 42 |
| 圖 3.11 | 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自水庫安全<br>全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究,民國<br>94 年)..... | 43 |
| 圖 4.1  | 地電阻探測量測示意圖 .....  | 49 |
| 圖 4.2  | 地電阻影像探測的各種排列方式.....   | 50 |
| 圖 5.1  | 自然電位法電極構造示意圖(摘自 Reynolds, 1997).                                  | 56 |
| 圖 5.2  | 一維視電位剖面圖(改繪自 Boleve et al., 2007).....                            | 58 |
| 圖 5.3  | 二維視電位影像平面圖 (改繪自 Johansson et al., 2005)<br>.....                  | 59 |
| 圖 5.4  | 壩體滲流影響之電荷分佈與電位量測結果示意圖(摘<br>自 Bulter and Llopis, 1990).....        | 60 |
| 圖 5.5  | 地下水流動造成之電位分佈示意圖(摘自 Sato et al.,<br>1997).....                     | 61 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 6.1 透地雷達施測原理示意圖(改繪自 Reynolds, 1997).           | 65 |
| 圖 6.2 天線頻率與解析度關係圖(修改自 EKKO UPDAT, 1996).....     | 68 |
| 圖 6.3 毛細孔水區厚度對介電度之影響(改繪自 Reynolds, 1997).....    | 69 |
| 圖 6.4 同中點施測法示意圖(改繪自 Reynolds, 1997).....         | 70 |
| 圖 6.5 同中點施測法地層電磁波速反算示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)..... | 71 |
| 圖 6.6 斷層掃描施測法示意圖(摘自 SEGJ, 2004).....             | 72 |
| 圖 6.7 透地雷達二維反射訊號影像(混凝土塊體, 摘自鄧景龍, 1990).....      | 73 |
| 圖 6.8 透地雷達遇有地下掩埋物時之訊號線型示意圖(摘自 SEGJ, 2004).....   | 75 |

# 一、總論

## 1.1 通則

### 1.1.1 手冊內容與目的

水壩工程為國家社會重要之公共設施，不但施工規模浩大且花費甚高，因此如何針對壩體進行有效體檢實乃一重要課題。非破壞性檢測方法常應用於土木及其他工程實務，例如於大地工程上可應用於地層構造推估以及地質改良成效評估等，其對於水庫安全之評估可提供顯著且有效的協助。本手冊將以目前非破壞性檢測技術為應用工具，針對土石壩與混凝土壩常見的破壞模式提供可能之非破壞性檢測法的調查選用，便利水庫管理單位可在對水庫壩體某一破壞模式有所疑慮時，在考量非破壞性檢測法的選用時能有所依據。本手冊所涵蓋的五種非破壞性檢測技術目前都還在持續發展，因此所提供的資訊是以目前國際上以及業界中普遍使用的方法為陳述內容，這些資料是以做為準則為目標而非標準程序，特在此說明。

### 1.1.2 非破壞性檢測法介紹

非破壞性檢測方法主要是利用探測對象之物理性質，以直接或間接方式推估材料之狀況，依探測之物理性質的不同其可分為下列幾項：應力波速（seismic velocity）、電學性質（electrical property）、磁化率（magnetic susceptibility）及密度（density）等。

**應力波速：**應力波速即為材料傳遞應力波動的速度，應力波速包含壓力波速（ $V_p$ ）及剪力波速（ $V_s$ ）。利用材料之應力波速及密度可推估楊氏模數（Young's modulus）、容積彈性模數（Bulk modulus）、

剪力模數 (Shear modulus) 及包松比 (Poisson's ratio) 等重要工程參數；亦可由波傳歷時分析推估地層反射面位置。以應力波傳為理論基礎而得到檢測結果得方法有折射震測、反射震測、跨孔震測掃描及表面波等試驗方法。

**電學性質：**非破壞性檢測方法檢測出之材料電學性質通常為導電度 (conductivity)、電阻 (resistivity) 及介電度 (dielectric constant)。導電度為通過介質之電流與其外加電場間之比例係數，導電度量測可作為電荷通過待測物質能力的指標；電阻即為導電度之倒數；介電度控制電磁波傳遞之速度，與材料之含水量息息相關。以材料電學性質為理論基礎而得到檢測結果得方法有透地雷達 (GPR)、電磁探測 (EM)、電阻探測 (ER)、感應偏振 (IP) 及自然電位法 (SP)。

**磁化率：**磁化率可視為量測材料可被磁化的能力。土工材料中常見磁性礦物包含鐵、鎳及鈷等，若於廢棄物回填區則可能包含大量的鋼。於沖積扇或冰河地形中，磁性礦物亦有可能因重量較大而於沉積過程中大量集中於土壤。有機土壤亦可能出現磁性礦物。

**密度：**在不同的地層材料組成下會有不同的密度存在，而此密度的差異將會改變該地的重力場，例如孔洞的位置的重力場將較下方為金屬礦位置的重力場要小，而使其可應用於調查。在此物理量下的非破壞性減測法有重力場探測。

### 1.1.3 水庫壩體適用之非破壞性檢測法

如前所述，現有之非破壞性檢測技術有十數種可供使用，但各種方法有其特殊之適用性，針對壩體非破壞性檢測可行方法應具有下列

六項重點特性：1.實驗方法為非破壞性、2.檢測深度具穿透性、3.檢測體積具代表性、4.所測的物理量具應用性、5.檢測點具可重複性、6.施作過程具簡易性。在考量壩體尺度與檢測效益後，擇選出五種非破壞性檢測方法：折射震測、表面波震測、透地雷達、電阻探測以及自然電位法做為適用大範圍先期調查的工具。

## 1.2 水庫壩體適用之非破壞性檢測法簡介

### 1.2.1 折射震測法(seismic refraction method)

**簡述：**折射震測法是藉由在地表面設置接收器，用以紀錄由人造震源所產生之震波的傳遞時間 (travel time) 又稱做初達波走時(first arrival time)，被接收之震波包含直接震波(direct acoustic wave)及受到地層變化而折射回地表之折射震波(refracted acoustic wave)。初達波走時的不同與地層壓縮波波速、地形以及地層結構有關，透過反算可獲得地層之壓縮波波速分佈 (如圖 1.1 所示)。

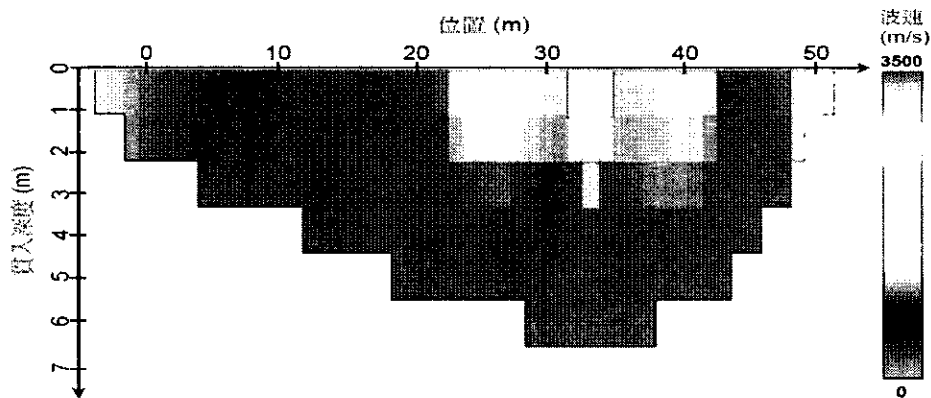


圖 1.1 壓縮波波速影像剖面圖(石門水庫廊道)

**應用：**折射震測法常用於調查土層深度與厚度，並用以描繪出地層結構，此外，所獲得之壓縮波波速可反應出地層材料之品質。倘若



在現場可同時獲得壓縮波波速以及剪力波速，便可獲得現地土層之彈性模數（剪力模數與楊氏模數）。

**探測深度：**一般而言，在使用大鐵錘或彈簧重力等人造震源施測時，其可達最深探測深度為 30-40 公尺，倘若有更深的探測需求則需仰賴使用大型機械或炸藥進行施測。

**試驗特性：**折射震測法在施作上需要在欲探測位置佈設接收器以及纜線，並且需要不停的移動震源位置，屬人力集中型的非破壞性檢測技術。現場施測所得資料需加以進行後續處理才可獲得量化的解讀，其處裡包括初達波走時的挑選以及反算。根據不同的反算技術對於初達波走時尚有不同的後續處理，由簡單至複雜，現有之反算技術有時遲法（delay time）、射線追蹤法（ray tracing）、通用補償法（generalized reciprocal method）以及斷層掃描法(tomography)。此法之最後成果一般是以地層結構剖面或是地層波速等高線圖（影像圖）呈現（如圖 1.1 所示）。

**解析能力：**在垂直的解析上，折射震測法只能解析出具有足夠厚度且下方較上方地層波速為快的地層，一般來說，此法可解析出三至四層的地層結構。而在側向解析度上，其與接收器間距有關，一般而言是 2-6 公尺或更大。此外，為求有較深的探測深度，需要將震源以及接收器的間距加大。

**限制：**1.此技術很容易受到其它震動雜訊的干擾。2.欲有良好之解析，其所探測之地層需是下方較上方地層波速為快。3.此法無法解析出薄地層。4.若欲達到目標探測深度，震源與接收器的最大距離需要是欲探測深度的三到五倍。

**進階閱讀參考：**Haeni(1988)對於折射震測法整體有詳盡的簡介；在針對反算技巧上，Palmer(1980)對於通用補償法有詳細的介紹與推演；Pullammanappallil and Louie(1994)以及 Ammon and Vidale(1993)介紹以不同的反算策略所進行的斷層掃描法。

### 1.2.2 表面波震測法(Surface wave method)

**簡述：**在地表面製造一振動，在地表處會有一受擾動之質點是逆著其行進方向以一橢圓形軌跡滾動是為表面波。表面波傳遞石波傳影響範圍大約侷限於一個波長之深度內，因此，各個不同波長的表面波其所反映之地層深度特性將有所不同，亦即表面波影響深度隨頻率之不同而異。當土層剪力模數隨著深度變化，不同頻率所造成的表面波波速便有所不同，此一特性稱之為頻散現象，將不同頻率所對應之表面波波速集合，可得一曲線，稱之為頻散曲線(dispersion curve)。表面波震測即是於地表佈設受波器，收錄表面波訊號，藉由量測表面波於不同頻率之相位速度，獲得其頻散曲線後再進行剪力波速度層構造之反算解析可得剪力波速剖面（如圖 1.2 所示）。

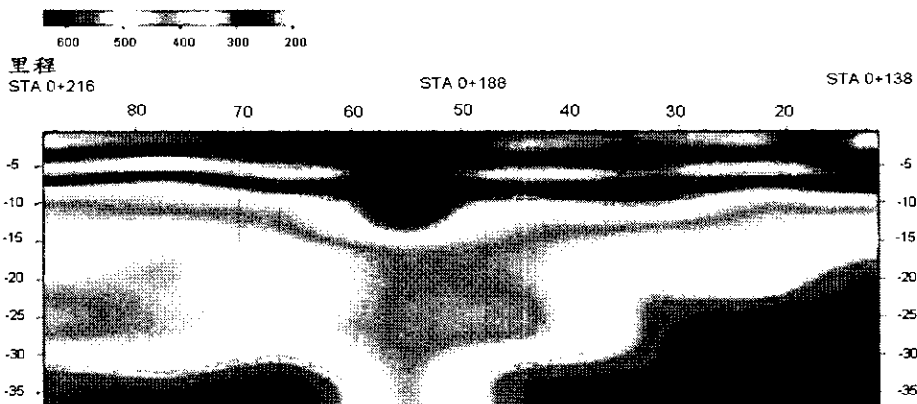


圖 1.2 剪力波波速影像剖面(新山水庫壩基)

**應用：**表面波震測技術已廣泛地應用於土工問題，透過所獲得之

剪力波速剖面，可應用於地層比對、鋪面厚度檢測、土壤改良成效檢測、地下孔洞探測、液化潛能分析以及隧道襯砌與背填灌漿之品質管制等問題。

**探測深度：**表面波震測法之探測深度與測線長度有關，一般而言可保守估計其探測深度與測線長度相等。

**試驗特性：**表面波震測法至目前為止皆是 1D 的分析，因此在施作上除需要在欲探測的區段佈設接收器以及纜線，並且需要不停的移動震源以及受波器位置，屬人力集中型的非破壞性檢測技術。現場施測所得資料需加以進行後續處理才可獲得量化的解讀，其處裡包括頻散曲線分析以及反算。在頻散曲線的分析上有頻譜分析法(spectral analysis)以及波場分析法(wave field analysis)兩種，而後將所得之頻散曲線以反算技術分析。此法之最後成果一般是以多個地層波速剖面組合後以地層波速影像圖呈現（如圖 1.2 所示）。所探測之地層存在地下水與否，對所得之地層剪力波速結果影響不大。

**解析能力：**解析能力可分為側向解析能力以及垂直解析能力說明。在垂直解析上與深度有關，隨著深度的增加解析度會有逐漸降低的情形，但尚無量化的方法，可概略以反算時所使用之土層厚度考慮，一般將探測深度內之地層分為三至十層；而在側向解析能力上，與測線長度有關，測線越長，側向解析度越差。

**限制：**1.解析度隨深度增加有明顯降低之情形，不易在深處測出薄層。2.尚無法以 2D 方式進行解析。3.無法同時達到高解析度且大測深的需求。4.無法反應地下水位位置。

**進階閱讀參考：**Aki and Richards(2002)對於表面波之原理做有詳

盡之推導與介紹；若欲了解表面波之頻散曲線分析方法可參考 Lin and Chang(2004)的整理；而反算技術之部份可參考 O'Neill et al.(2003)所做的整理。

### 1.2.3 2D 電阻探測法 (DC Resistivity)

**簡述：**電阻探測法是在地表上利用兩根電極棒將直流電灌入地下，而後在地表上量測另兩根電極棒間的電壓差。此法是量測大範圍的電阻值，此電阻與土層的組成、飽和度以及土層孔隙中流體的導電度有關，透過反算可獲得地層電阻剖面(如圖 1.3 所示)。

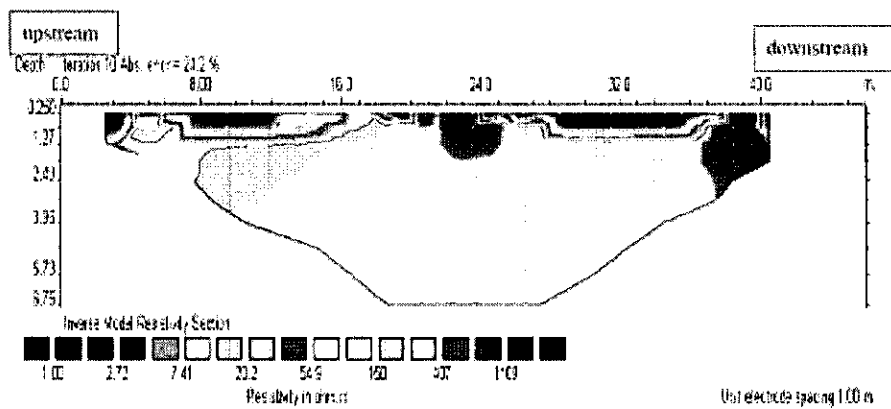


圖 1.3 電阻率影像剖面圖 (石門水庫廊道)

**應用：**電阻探測法可獲得地層之電阻率，由此其可應用於監測地下水之污染調查、地下孔穴之探測、斷層調查、崩坍地調查以及掩埋場洩漏問題的監測。而在壩體之應用上，其可調查可能的滲流位置。

**探測深度：**電阻探測法的探測深度主要與電極棒的間距以及地層的電學特性有關，在有足夠間距以及灌入能量下，目前並無一理論所得之上限值存在，其約略為測線總長 1/2~1/5 倍之間。

**試驗特性：**電阻探測法施測時需將電極棒貫入地面使其與地面緊

密接觸，才可完成佈線，因此在非破壞性檢測法中是屬於較人力密集的施測法。其於現場所量測得之視電阻率以有限元素法或是有限差分法，透過反算過程獲得地層之電阻率值。在結果的呈現上，是將反算後所得之地層電阻率以影像剖面(如圖 1.3 所示)做視覺化的呈現。

**解析能力：**解析能力可以以側向解析度以及垂直解析度分別說明。其側向解析度與電極棒間距有關，電極棒間距越小，其側向解析度越高，以有限元素法或有限差分法所進行之反算，其側向解析度約略在電極棒間距之 0.5~1 倍。而垂直解析度與反算所用層數有關，以有限元素法或有限差分法所進行之反算，依施測時不同的電極棒排列方法，可將地層在探測深度內解析至 10~30 層。

**限制：**在量測地層電阻率時，其量測結果容易受到地下金屬掩埋物（如鐵管、電纜等）影響，對於此些掩埋物，除非可以獲知其電阻率值以及掩埋位置與深度，否則將難以將其影響消除。此外，由於 2D 電阻探測法之探測深度與測線展距密切相關，若無法獲得足夠寬廣的施測空間，將大大減低其應用性。

**進階閱讀參考：**Loke(2003)對於地電阻探測原理及方法有很詳盡的敘述；Telford (1990) 將電極間距與測深之相互關係做一仔細說明及推論，Loke(1999)介紹了不同反算分析之方式與比較；Yang and Lagmanson, (2006)對於三維效應所造成之影響有詳細之解釋。

#### 1.2.4 自然電位法 (Spontaneous Potential, SP)

**簡述：**自然電位法是量測存在於地表的自然電位，通常在量測上是以兩個電極與地面接處，以其中一個電極做為參考點，而後移動另

一個電極，量測此兩點間的電壓差。此電壓差的產生與地層所含有之化學成份、金屬礦物或是電耦(dipole)之運動有關。在水庫壩體之應用上，主要是欲獲得因水流動（電耦運動）而產生的電壓差，對於所測得之結果最後以電壓差之平面空間分佈表示（如圖 1.4 所示）。

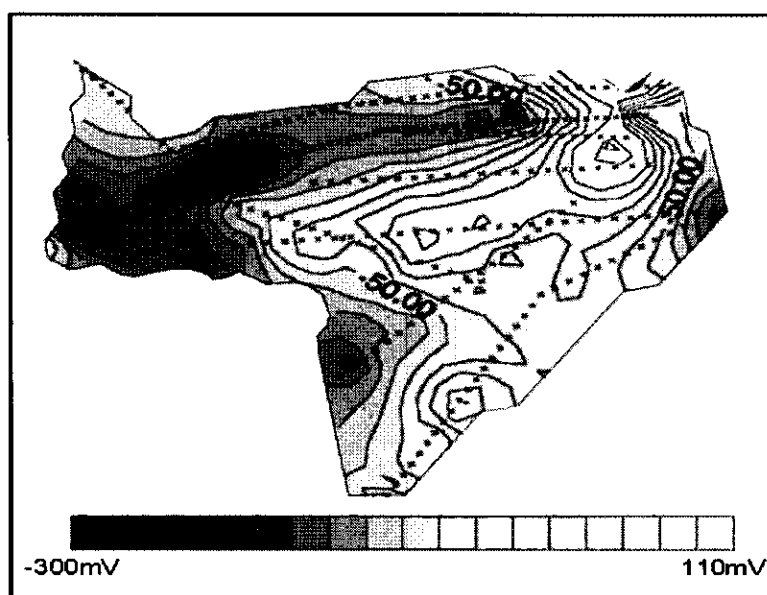


圖 1.4 二維視電位影像平面圖 (改繪自 Johansson et al., 2005)

**應用：**自然電位法主要的應用是在於調查壩體或堤岸的滲流情形，此外其亦可應用在地下水流向調查、崩坍地調查、斷層調查、礦井、隧道調查以及地下污染物調查等方面。

**探測深度：**自然電位法的探測深度受到電壓差來源物的大小、深度所影響，一般而言，其探測深度最大可達 60-100 公尺。

**試驗特性：**自然電位法是採用一個點一個點的量測，在施作上相對來說較容易，然而要注意的是所採用的電極必需能與地面有極良好的接觸，且應將參考點設於不受探測區域影響的位置。對於所收錄的資料可在進行雜訊修正後便直接以空間分佈的方式呈現（如圖 1.4 所

示)，在解讀時有時會採用反算技術進行分析，但大部份皆直接由所得之電壓差空間分佈圖進行滲流路徑或電壓差來源物位置的判定。

**解析能力：**在水平解析度上，其與測點間的間距有關，較小的間距可有較佳的解析度。而在垂直解析度上並沒有一定，會與電壓差來源物的大小及深度有關，一般會隨著深度的增加而降低。

**限制：**自然電位法在現場的量測上極易受到地球的自然電流、土壤種類、地形效應以及微波電流等因素的影響，此些影響不易將其與目標探測物所產生的電壓差分離。

**進階閱讀參考：**對於自然電位法之進一步內容可參考 Crowin(1990)以及 Reynolds(1997)的回顧與整理。

### 1.2.5 透地雷達探測法 (Ground Penetrating Radar, GPR)

**簡述：**透地雷達為一非破壞性探測技術，主要可提供測線地表下高解析度之二維反射面影像。其檢測原理是利用發射天線發出高頻電磁波（10-3000MHz）用以穿透地層或被探測體。電磁波在兩個不同電性介質的界面(如：地層層面、空洞與岩層等等)產生反射訊號，再由接收天線接收反射訊號進而分析處理。將多個 2D 影像依空間位置整合後可得 3D 之立體影像（如圖 1.5 所示）。

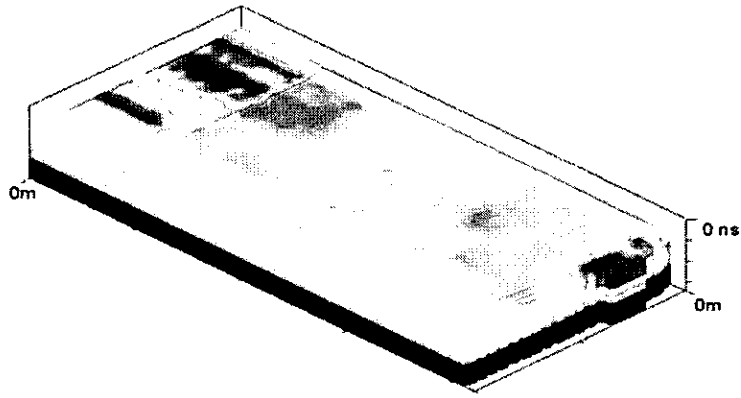


圖 1.5 透地雷達 3D 影像(大觀電廠溢洪道)

**應用：**透地雷達常用於調查掩埋之小物件，例如混凝土中之鋼筋位置、孔洞或縫隙；其亦可應用於路面厚度調查、隧道環片及背填漿調查、地下污染物調查以及地下水位面調查等。

**探測深度：**透地雷達之探測深度與所使用之電磁波頻率及土層性質有極大的關係。通常，頻率越高的電磁波，其探測深度越淺；而在一般的土層中，透地雷達最大探測深度不大於 10 公尺，若在含有金屬礦物或富含電離子之水的土層中，探測深度將不大於 1 公尺。

**試驗特性：**透地雷達在施作上是以人力或機械力拖動的方式移動儀器便可，相對來說是較易施作的檢測法。通常在解讀施測結果時不需要進一步的分析處理，只需將其依空間重組即可(如圖 1.5 所示)。

**解析能力：**在非破壞性檢測法中，透地雷達提供了最高的水平與垂直解析度。針對不同的探測深度與解析度需求，可選擇不同的透地雷達天線頻率，大抵來說，較低的頻率可提供較深的探測深度，但解析度較差；而較高的頻率無法有較深的探測深度，但可有較佳的解析度。其所得之垂直解析度可在幾公分至一公尺的範圍，而水平解析度則需視儀器本身之取樣頻率以及拖拉速度而定。

**限制：**透地雷達主要的限制在於其對於施測土層之狀況敏感度極大，在存在有含有金屬礦物或富含電離子之水的土層處施作，其低於



1 公尺之探測深度將使其難以應用於調查上。

**進階閱讀參考：**Reynolds(1997)以及 Sharma(1997)對於透地雷達有極詳盡之介紹。

### 1.3 非破壞性檢測法之選用

#### 1.3.1 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表

藉由收集世界各地壩體破壞案例歸納得混凝土壩與土石壩之潛在破壞模式，根據破壞模式之特性將其與可使用之非破壞性檢測技術對應歸納如各方法皆有其較適合之應用情況，綜合整理如表 5.1 所示。

表 5.1 非破壞檢測方法特性表

| 檢測方法  | 較佳適用條件                                      | 較不適用條件   |
|-------|---|--|
| 折射震測  | 對飽和土壤及土壤與岩盤介面探測甚佳，可估計材料波速。                  | 無法探測軟弱夾層及厚層中央帶薄層材料；可偵測孔洞存在，但無法直接測繪。                  |
| 表面波震測 | 適合較無側向變化的地層剪力波速量測。                          | 深層解析度差；無法探測地下水位；可探測孔洞，但無法直接測繪。                       |
| 透地雷達  | 施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，適用於複雜構造，如混凝土、鋪面、及地下孔洞探測。 | 探測深度受導電環境（如黏土礦物）影響甚鉅，一般探測深度不足 10 公尺；不易估計電磁波速以得到構造深度。 |
| 電阻探測  | 於高電阻環境中亦能有效量測，可探測較大孔洞。                      | 於高導電性環境下效果不佳（尤其是表面），電極與地表需有良好的耦合；深層解析度差。             |
| 自然電位法 | 其施測作業迅速便利且利於調查地下水滲流狀況。                      | 其空間解析及辨識能力較差。  |

本研究於 96 年度使用 USCOLD 與 ASCE(1975, 1988)以及 ICOLD(1984)所收集之眾多破壞案例為資料庫，參照 ICOLD(1984)以混凝土壩及土石壩兩種壩體型態分別整理，在分類中以造成破壞之原因以及破壞模式為分類依據，歸納所得之混凝土壩主要潛在破壞模式有五種，而土石壩之主要潛在破壞模式有八種，並考量各破壞模式所

能反應之特徵物理量與可量測該特徵物理量之非破壞檢測法，整理得破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表，如表 5.2 所示。

表 5.2 所示。

**混凝土壩之主要潛在破壞模式有五種：**

1. 因結構接縫型式不良、應力集中或壩體形狀及設計位置不當等因素造成混凝土結構行為不良所導致之壩體破壞。此種壩體破壞模式反應在其物理量上的變化對於非破壞性檢測方法而言並不明顯，應透過監測的管理以期能有及早發現的。

表 1.1 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表

|             | 潛在破壞模式  | 可用之非破壞檢測法              |
|-------------|---|------------------------|
| 混<br>凝<br>土 | 1.因結構接縫型式配置不良、應力集中或壩體形狀及設置位置不當等因素造成混凝土結構行為不良所導致之壩體破壞。 | (監測)                   |
|             | 2.因混凝土材料衰壞、工程性質不足、澆置作業不當及結構接縫與防水作業處理不當造成              | 折射震測、表面波震測、電阻法、自然電位法、透 |

|     |  |                |
|-----|--|----------------|
| 壩   | 之壩體本身滲漏或管湧。                              | 地雷達            |
|     | 3.因溢洪道上障礙或設計容量不當所導致之溢流造成之壩趾基礎侵蝕或壩座沖刷掏空。  | 表面波震測、電阻法、透地雷達 |
|     | 4.因透水層、可溶性夾層或岩層的不連續面所造成之基礎管湧或滲漏。         | 電阻法、透地雷達、自然電位法 |
|     | 5.沿基礎軟弱不連續面之滑動。                          | (監測)           |
| 土石壩 | 1.因溢洪道上障礙、設計容量不當或沉陷所導致之溢流造成之土石壩體侵蝕。      | (監測)           |
|     | 2.因溢洪道破壞、輸水管線破壞變形造成之管湧或滲漏及基礎破壞造成之土石壩體侵蝕。 | 電阻法、自然電位法、透地雷達 |
|     | 3.沿出水導管、壩座界面、混凝土接觸面滲漏或管湧；壩體本身集中式管湧。      | 電阻法、自然電位法、透地雷達 |
|     | 4.因透水層、可溶性夾層或岩層的不連續面所造成之基礎管湧或滲漏。         | 電阻法、自然電位法、透地雷達 |
|     | 5.因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動。                 | (監測)           |
|     | 6.沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動。                      | 無              |
|     | 7.差異沉陷造成之裂縫。                             | 表面波震測          |
|     | 8.土壤液化。                                  | 表面波震測          |

2. 因混凝土材料衰減、工程性質不足、澆置作業不當及結構結構接縫與防水作業處理不當造成之壩體本身滲漏或管湧。當壩體開始有滲露或管湧之情形時，水將在非設計區內之壩體存在，由於水與混凝土之電學性質差異甚大，將顯著影響壩體之電學性質，因此可採用電阻法、自然電位法以及透地雷達。而上述五種造成破壞之因素會對壩體材料本身力學表現造成影響，將會反應至應力波速的異常上，因此亦可使用折射震測以及表面波震測。

3. 因溢洪道上障礙或設計容量不當所導致之溢流造成壩趾基礎侵蝕或壩座沖刷掏空。壩趾或壩座受到衝刷後會產生孔洞存在以及該處材料密度之變化，此二物理性質的改變將反應至應力波速的表現上，可透過表面波震測探測；此外，產生孔洞或密度鬆散處將受到水

的侵入而改變其電學性質造成異常現象，因此可使用電阻法或透地雷達。

4. 因透水層、可溶性夾層或岩層的不連續面所造成之基礎管湧或滲漏。水的侵入會造成地層電學性質分佈的改變，使用電阻法、自然電位法或透地雷達可有效檢測。

5. 沿基礎軟弱不連續面之滑動。此一破壞模式並不造成地層材料性質(電學或力學性質)的改變，其為本來存在之潛在問題。軟弱不連續面的滑動可透過監測的方式偵測得知。

#### **土石壩主要之潛在破壞模式有八種：**

1. 因溢洪道上障礙、設計容量不當或沉陷所導致之溢流造成土石壩體侵蝕。此種壩體破壞模式反應在其物理量上的變化對於非破壞性檢測方法而言並不明顯，應透過監測的管理以期能有及早發現的。

2. 因溢洪道破壞、輸水管線破壞變形造成之管湧或滲漏及基礎破壞造成之土石壩侵蝕。水於侵蝕過程或發生管湧、滲漏時侵入至壩體，水之電學性質與土石差異大，將會產生異常之電學性質變化，可使用電阻法、自然電位法或透地雷達檢測。

3. 沿出水導管、壩座界面、混凝土接觸面滲露或管湧；壩體本身集中式管湧。水的存在將造成該處電學性質有明顯異常現象，可採用電阻法、透地雷達或自然電位法。

4. 因透水層、可溶性夾層或岩層的不連續面所造成之基礎管湧或滲漏。水的侵入會造成地層電學性質分佈的改變，可使用電阻法、自然電位法或透地雷達。

5. 因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動。此一問題需透過水壓觀測及穩定分析評估，無法以檢測方式檢測可能異常之物理量。

6. 沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動。此一破壞模式並不造成地層材料性質(電學或力學性質)的改變，其為本來存在之潛在問題。軟弱不連續面的滑動可透過監測的方式偵測得知。

7. 差異沉陷造成之裂縫。可由應力波速了解地層勁度的分佈，了解差異沈陷的可能性，於此可使用表面波震測法。

8. 土壤液化。土壤液化與土石之鬆散程度有關，可使用表面波震測獲得剪力波速資訊加以分析。

由表中可知，除少部份因沿著不連續面滑動以及水壓增加所存在之潛在破壞模式外，大部份都有相對應之檢測方法可供使用。透過非破壞性檢測之造影能力可協助管理人員有效獲得需加以處理的位置與可能之危害程度。

### 1.3.2 非破壞性檢測方法特性表

不同的非破壞性檢冊方法因為使用不同的物理特性與探測原理而有不同的施測特性，根據 1.2 節的介紹，將其整理如表 1.所示。

表 1.2 非破壞性檢測法特性表

| 檢測方法  | 適合場址條件  | 不適合場址條件  |
|-------|---|--|
| 折射震測  | 對飽和土壤及土壤與岩盤介面探測甚佳，可估計材料波速。                    | 無法探測軟弱夾層及厚層中央帶薄層材料；孔洞可能會造成走時異常，但無法直接測繪；地表乾燥疏鬆較不易施測。  |
| 表面波震測 | 適合較無側向變化的地層之剪力波速量測。                           | 不易探測厚層中央薄層材料，深層解析度差；無法探測地下水位；孔洞可能會造成波形及頻率異常，但無法直接測繪。 |
| 透地雷達  | 施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，適用於複雜構造，適合於混凝土、鋪面、及地下孔洞探測。 | 探測深度受導電環境(如黏土礦物)影響甚鉅，一般<10公尺；不易估計電磁波速以得到構造深度。        |
| 電阻探測  | 於高電阻環境中亦能有效量測，可探測較大孔洞。                        | 於高導電性環境下效果不佳(尤其是表面)，電極與地表需有良好的耦合，深層解析度差。             |
| 自然電位法 | 其施測作業迅速便利且利於調查地下水滲流狀況。                        | 其空間解析及辨識能力較差，不適用探測空氣孔洞。                              |

### 1.3.3 選用說明

非破壞性檢測方法於水庫壩體之選用方法的建立以水庫管理者發現特定潛在破壞模式之某些徵兆時，依水壩本身條件參照所提之方法即可選定檢驗方法進行檢測。如圖 1.6 所示，本選用法以三個步驟兩階段的方式進行非破壞性方法選用。三個步驟兩階段是說，1.當水庫管理單位對於壩體有發生某一破壞模式之疑慮，且認為需進行非破壞性檢測協助判斷與確認時，透過 2.查表方式將破壞模式與可相對應

使用之檢測法挑選出，完成第一階段；而後將第一階段中所得到的各個適用檢測法，3.考量檢測法之特性與壩體條件採用一至多個符合之方法進行，完成第二階段之選用。

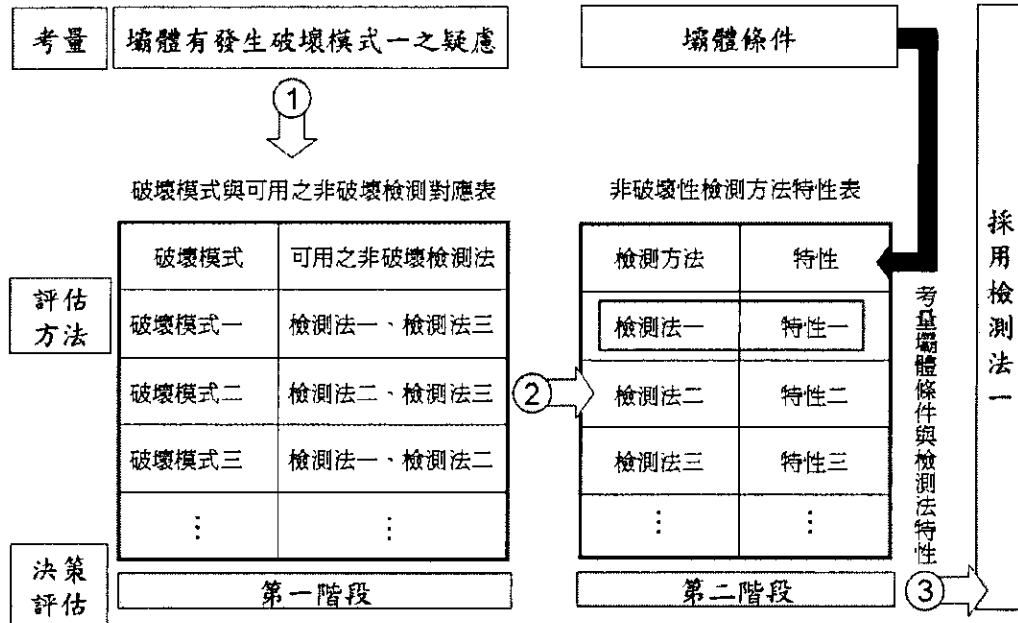


圖 1.6 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程圖

#### 1.4 參考文獻

1. Aki K, Richards PG. Quantitative Seismology, 2en ed.. Sausalito, California:University Science Books, 2002.
2. Ammon, C. J. and J. E. Vidale, "Tomography without rays", Bulletin of the Seismological Society of America, 83, 509-528, 1993.
3. Crice, Douglas B., "Applications for Shallow Exploration Seismographs," In Practical Geophysics for the Exploration Geologist, Northwest Mining Association,

- Spokane, Washington, 1980.
4. Corwin, R.F., "The self-potential for environmental and engineering applications.", In: Ward, S.H. (editor), *Geotechnical and Environmental Geophysics (SEG Investigations in Geophysics, no.5: 127-145., 1990.*
  5. Haeni, F. P., "Application of Seismic-Refraction Techniques to Hydrologic Studies," *U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 2, Chapter D2, 1988.*
  6. Johansson S., Friberg J., Dahlin T., and Sjödaahl P., "LONG TERM RESISTIVITY AND SELF POTENTIAL MONITORING OF EMBANKMENT DAMS – Experiences from Hällby and Sädva Dams, Sweden", *Elforsk Rapport 05:15, 2005.*
  7. Lin, C.-P., Chang, T.-S., "Multi-station analysis of surface wave dispersion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 24/11, pp. 877-886, 2004.*
  8. Loke, M. H., "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys," *Geotomo Software, Malaysia; , 2003*
  9. Loke, M. H., "Time-Lapse Resistivity Imaging Inversion," *5th Meeting of the Environmental and Engineering Society European Section, pp. 1-2.; , 1999*
  10. O'Neill, A., Dentith, M., List, R., 2003, "Full-waveform P-SV reflectivity inversion of surface waves for shallow engineering applications", *Exploration geophysics, 34, pp. 158-73.*
  11. Palmer, D., *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation, Soc. of Expl. Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1980.*
  12. Pullammanappallil S.K. and J. N. Louie, "A generalized simulated-annealing optimization for inversion of first-arrival times", *Bulletin of the Seismological Society of America 84, 1397-1409, 1994.*
  13. Renolds J.M., " *An introduction to applied and environmental geophysics", Wiley Inc., 1997.*
  14. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., *Applied Geophysics, Cambridge University Press, New York, New York, 1990.*
  15. Yang, X. and Lagmanson, M., "Comparison of 2D and 3D Electrical Resistivity Imaging Methods," *Advanced Geosciences. , 2006*
  16. Sharma, P. V., *Environmental and Engineering Geophysics, Cambridge University Press, p. 475, 1997*
  - 17.. Zohdy, A. A., Eaton, G. P., and Mabey, D. R., " Application of Surface Geophysics to Ground Water Investigations," *U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigation, Book 2, Chapter D1, 1974.*



## 二、折射震測法

### 2.1 應用範圍

折射震測法藉由分析後所獲得的地層結構剖面以及地層波速剖面圖，可將其應用在水壩、隧道、構造物基礎、橋樑基礎等材料強度調查上，此外其亦可應用在崩塌地調查、空洞尋找、評估地盤改良效果及地質構造調查方面。

### 2.2 原理

折測震測法係藉由爆炸或衝擊產生人造震波，波傳至地下地層，因地層間速度不同，震波於層面處，依司涅爾定律(Snell's Law)發生折射現象返回地表，經埋設於地表之受波器接收。折射波在震波記錄上表現為初達波，如圖 2.1 所示，初達波係震動到達接收器的第一個訊號，根據其時間距離關係（通稱走時曲線）求出地層之構造。一般來說，折射震測法可經濟且有效地探測出新鮮岩層以上之地質構造形貌，且其探測出之地質構造是以震波波速大小來表示（通稱速度層）。由理論上和實驗上均顯示岩石震波波速與岩石之彈性係數，以及對岩層的地質狀態都有直接關係，因此，折射震測法應用於斷層破碎帶之偵測為工程地質調查中最有效的方法。

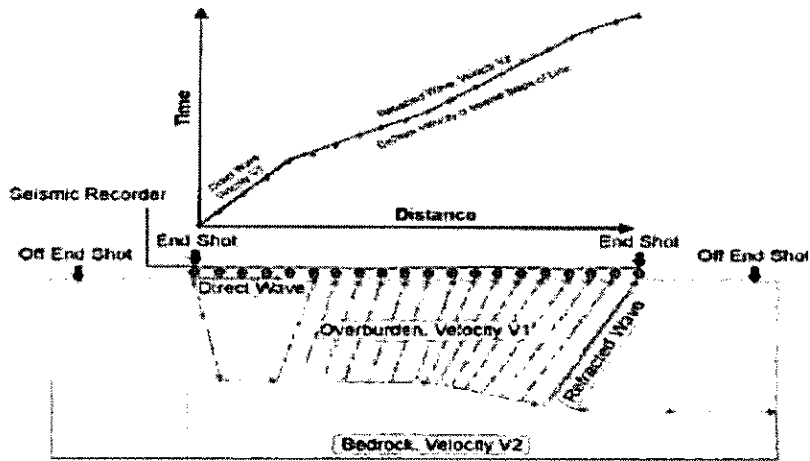


圖 2.1 折射震測法原理示意圖

## 2.3 施測方法

### 2.3.1 儀器說明

震測系統主要包括震源、接收器、接收器纜線、訊號擷取器、起震器以及起震器纜線等，茲分別說明如次：

1. 震源，用以製造人造震動，有長柄鐵鎚、落錘、振動器、或炸藥等不同能量的選擇，視欲探測深度、地質條件、及環境噪音而定。

2. 接收器，用以接收震源所產生的地表振動，能將振動轉為電壓值輸出，一般而言，折射震測所使用的接收器頻率多為 8-14Hz。

3. 接收器纜線，與訊號擷取器連接，用以將接收器所產生之電壓訊號傳回訊號擷取器進行收錄。

4. 訊號擷取器，用以紀錄接收器所接收到的地表振動訊號，其有雙頻道與多頻道的差別，該儀器中應有基本之訊號處理能力，例如

訊號疊加或濾波的功能。

5. 起震器，置於震源處，使用起震器纜線與訊號擷取器連接，用以啟動擷取器進行收錄，通常使用壓電材料元件或加速度規。

6. 起震器纜線，用以連接起震器與訊號擷取器，將起震器所得到之啟動訊號(通常為電壓或電流值)傳回訊號擷取器啟動擷取紀錄的動作。

### 2.3.2 規劃、定線與施作

**規劃：**對於折射震測法之使用，在規劃時應該要先行了解探測的目的為何，根據不同的探測目的而可歸結於兩個主要標的，一是探測深度，另一是解析度。因此兩者在接收器有限的情型下具有互斥的矛盾情形，因次需要先將主要目的確定，以便可行達成。

折射震測法的探測深度以及解析度與所探測的地層有關，在不同的地層情形下會有不同的結果，但一般而言，探測可得之最深度約是測線展距的  $1/4$  至  $1/6$  倍。側向解析度約為接收器間距的  $1/2$  倍，而垂直解析度與其所採用的分析方法有關，但一般而言，在以層狀地層為假設的分析法中可解析 3 至 4 層，以格網地層為假設的分析法中，垂直解析度與側向解析度相近。

**定線：**一旦確定施測目的後便可進行定線的動作，定線包括了測線的施測位置、接收器間距以及炸點位置（如圖 2.2 所示）。測線的施測位置並無一定的規則，其必需綜合考量該處的地質條件、地表情形以及用地使用權以得到較佳的施測結果。但通常最主要是在盡量使測線為直線的前提下，了解該地的地質條件以及地表使用情形，配合

不同的狀況使用合適的分析。例如在具有地形起伏的地方施作便應當對地形的變化進行測量，而後使用可考慮地形效應的分析法進行分析。

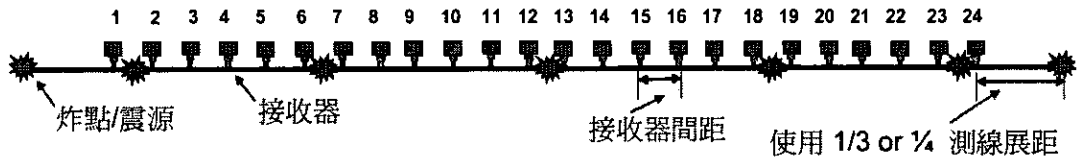


圖 2.2 折射震測法現場施測參數圖

**接收器間距：**待施測位置決定後可決定接收器的間距。接收器間距與所設定的施測目的有關，其決定了探測深度以及解析度。在此要特別說明，探測深度與測線展距相關，在接收器數目固定的情況下，接收器間距同時決定了測線的展距。當接收器間距決定，接收器便以線性方式垂直貫入地表。

**炸點位置：**整個定線最後是設定炸點位置。一般而言，炸點的施測可採用七點法或九點法。顧名思義，七點法就是使用七個炸點，九點法是使用九個炸點，可依需求調整。如圖 2.2 所示為七點法之佈設例子，兩個炸點在測線外測稱做線外炸點，為有最佳的探測深度，其與最近的接收器距離通常是測線長度的  $1/3-1/4$  倍；另有兩個炸點是設在測線的起點與終點；其餘的三點平均分散在測線中。以如此對稱的方式佈設的主意是因為對於探測地層未有任何資料與了解，因而採取如此佈設，倘若對於欲探測的地層已有所了解便可透過正算模擬的方式調整炸點的安排，以其震源所產生的射線能涵蓋所欲探測的地層。

**施作：**震源敲擊地面時，為使儀器與地面會有較好的接觸，會在地表置放一鐵板；通常一個炸點會依現場狀況的不同而有多次施炸的需求，其最主要目的是要透過多次的結果疊加後使得雜訊比降低，而可有較好的資料品質。於現場進行施作時確保收錄到良好的資料品質是施作成功與否的重要關鍵。

## 2.4 分析方法

折射震測資料處理分為兩個步驟：首先利用人工的方式決定初達波之走時曲線；再利用初達波之走時曲線分析波速與地下構造。

**初達波之挑取：**初達波為接收器所接收到的第一個震動訊號，須由所獲得的地層震動訊號中挑選。在實際的挑選上，並非每一條震波訊號逐一辨識即可。震測所獲得的訊號會包含所有的震動，包括有 P 波、S 波以及表面波，而我們所欲挑選的是 P 波(其波速最快)。相較於其它兩種波的震動，P 波震動的振幅較小容易被忽略或是被雜訊干擾而無法判別出來(如圖 2.3 所示)，因此，在挑選初達波時，應比較同一炸點之其他震源結果並利用晉像(Phatoming)之技巧比較其他炸點收集到之波形來決定初達波之走時曲線。

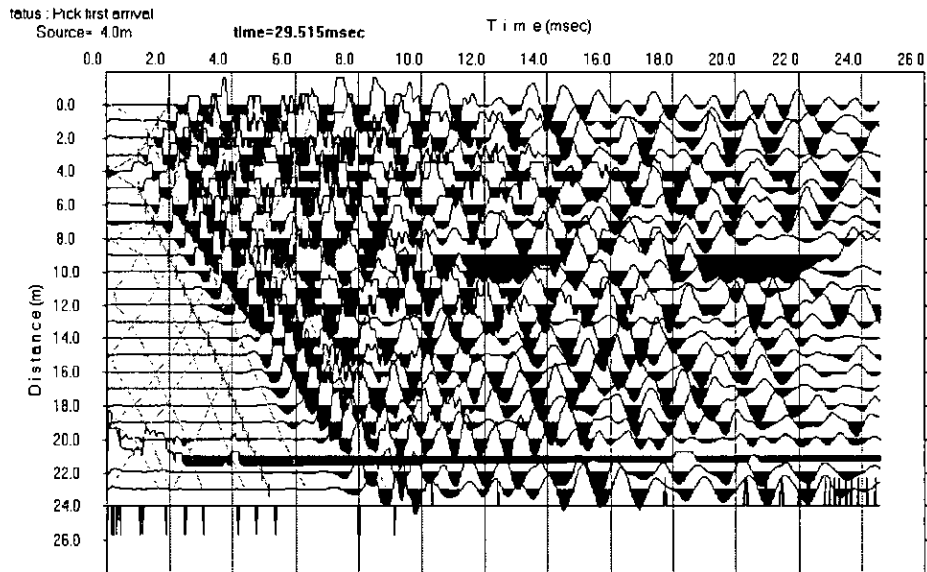


圖 2.3 初達波走時曲線挑選

**反算分析：**對於所獲得的走時曲線，將用以進行反算分析以求獲得地層波速結構。根據對於地層的不同假設，分析的方法分為兩大類，一類是假設地層為平面層狀，一類是假設地層非平面層狀。在地層為平面層狀的分析方法中，最常被使用的方法有時間截距法（intercept time method）以及距離交錯法(crossover distance method)，對於此二法的詳細介紹可參考 Haeni(1988)之文章。在非平面層狀地層的分析方法中，較為常使用的有通用補償法以及斷層掃描法。通用補償法（General Reciprocal Method, Palmer, 1980）是由走時曲線求得簡單之地層速度模式，其最大解析力可接受傾斜約 20 度的地層，已較層狀地層假設高出取多，Palmer(1980)對此法之假設以及分析有詳盡的介紹說明。除此方法外，為能夠提高速度模式之解析度與正確性，斷層掃描法（Tomography, Pullammanappallil and Louie, 1994; Ammon and Vidale, 1993）的發展亦漸受到重視。由走時曲線反算二維之速度剖面，如圖 2.4 所示，將地質構造分為許多元素（cell），由射線追蹤（Ray tracing）理論可計算理論之走時曲線，藉由此數值模

式由量測之走時曲線反算各元素之速度值，進而得到地層之速度影像剖面，如圖 2.5 所示。以走時震測影像法進行地層反算分析，除可分析水平地表情形外，亦可分析具有地形變化的施測，其最後提供地層波速剖面為反算結果。Pullammanappallil and Louie(1994)以及 Ammon and Vidale(1993)對於此一技術有所介紹，其兩者皆運用斷層掃描的概念但提出不同的反算策略。

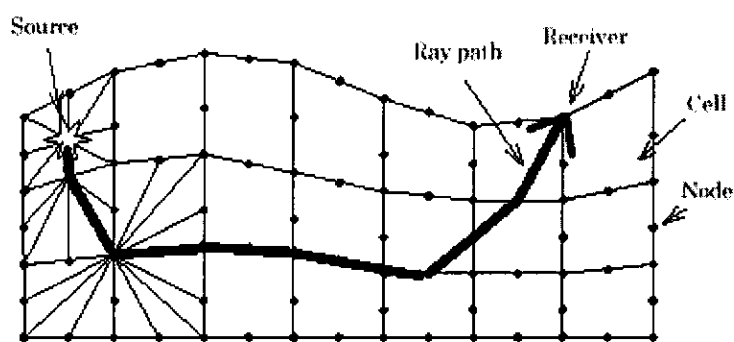


圖 2.4 折射震測走時震測影像分析原理

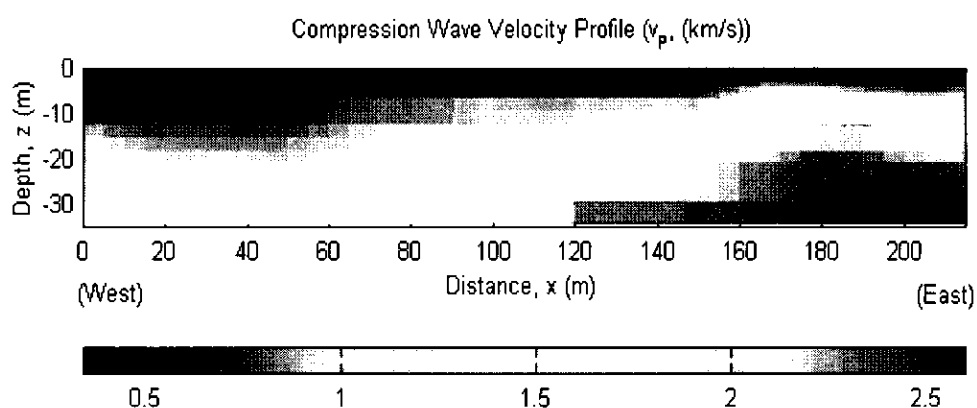


圖 2.5 二維地層波速剖面

## 2.5 資料分析判釋需知

**結果驗證：**對於所有的非破壞性檢測法而言，在一組資料下所獲得的反算結果並不一定具有惟一性，所得到的結果必需與現場所得之鑽探資料以及地質調查結果進行比對，並透過具有專業訓練以及經驗的判釋人員進行解讀，以免對於結果有過度解讀的錯誤產生。倘若判釋的結果是在探測位製無任何可供參考的資料下所進行的，應在報告中提及此點。

**初達波挑選：**在折射震測法的分析過程中，初達波的走時曲線是所分析法的基礎，因此在對於初達波的挑選上必需特別小心。在低雜訊的環境下，初達波訊號跳動的位置十分明顯，對於挑選並不會有太多的問題，然而，在大多的情況下，尤其是在有人文活動的地方，雜訊干擾十分嚴重(如圖 2.6 所示)，因此在挑選初達波時應有一固定的挑選準則，以避免整體初達波的挑選無一致的呈現，例如若挑選初達波的位置是在初達波訊號剛跳動的位置，或是在訊號最大的位置又或是在訊號斜率最大的位置，此一選定準則必需確立。而在某些位置會有難以挑選或根本無訊號的情形發生，此時便需依賴分析者本身的經驗對照前後位置的初達波位置做出最佳的假設。若有此些情形發生，應在報告中提及交代。某些商業化之程式有提供自動挑選初達波的功能，若分析用的初達波走時曲線是由自動化程式所挑選，對於挑選出之結果應當再進行人為確認才可。



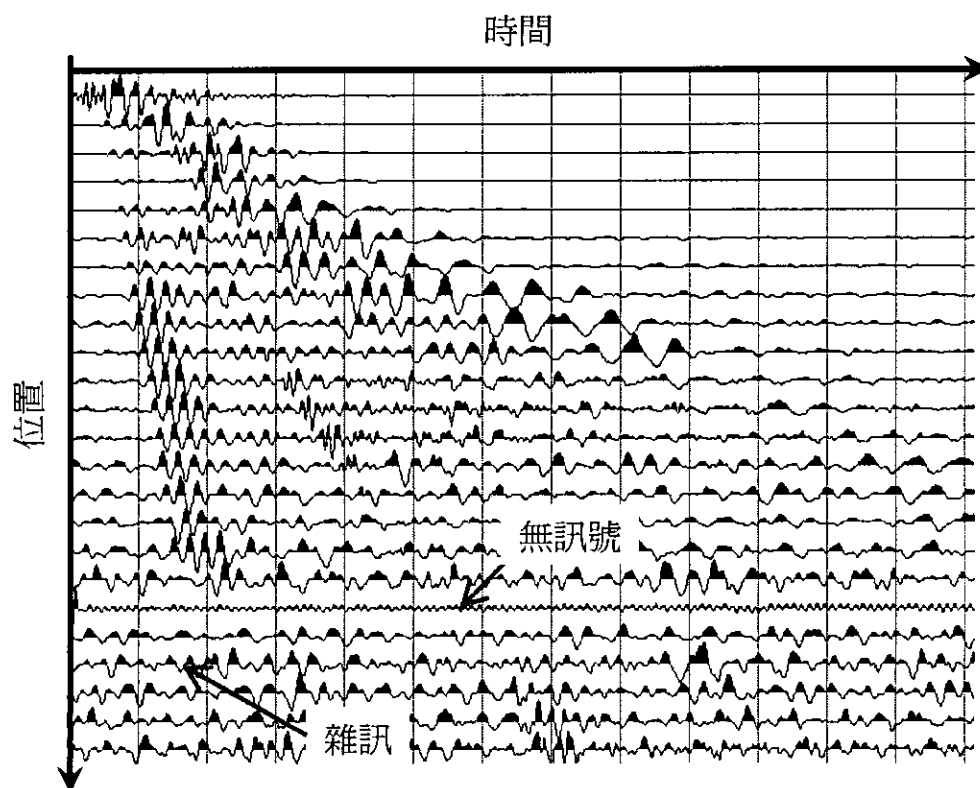


圖 2.6 折射震測法現場資料示意圖

**地形修正：**在試驗的場址處，若有地形的起伏時應當對地形的高程剖面進行測繪，用於後續對於走時曲線的修正使用。地形的變化對於走時曲線有相當的影響，其必需進行修正才可有較良好的分析結果。對於地形的修正，不同的分析方法有其不同的修正方式，需視分析方法而定。

**地層結構與走時曲線：**做為一具經驗的資料判釋者，除了需累積大量的分析比及驗證經驗外，另外應該透過理論的運算對於各種地層模型所可能產生的走時曲線(或是現場資料)有所認識，Zohdy(1974)以及 Crice(1980)提供不少相關結果可供參考。

## 2.6 報告書內容

完成施測與分析判釋後，報告書的撰寫中至少需包含下列幾項內容，以便提供足夠資訊給管理者或其它專業人員對其報告結果進行合理的判斷。其分別為：1.施測的目的與範圍；2.測線的佈設位置；3.現場環境說明；4.現場施測參數，其包含使用的儀器、取樣頻率、收錄的時間長度、訊號處理的使用、炸點位置、接收器間距以及接收器數量；5.初達波挑選的準則；6.挑選出的走時曲線；7.所使用之分析方法及所用於分析的程式軟體；8.分析結果的判釋以及與現有資料的綜合評估；9.註明各個作業環節中的負責人員。

## 2.7 可能的誤差來源

在折射震測法中，其可能造成結果誤差的原因可概分為人為因素、儀器因素、幾何限制以及施測法本身先天因素四種。

**人為因素**，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善。

**儀器因素**，是指對於振動的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但應在施作前先行確認儀器正常運作無受損壞之虞。

**幾何限制**，是指因為定線位置、接收器間距、地形變化以及雜訊所造成的影響。此一因素與現場環境以及地層結構有關。雜訊的影響可透過施作的過程改善，但其餘部份需在定線時進行恰當的考量以使其影響降至最小。

**先天因素**，是指折射震測法本身理論上便無法達到的探測能力。例如其需要地層間有足夠的波速差異做為折射面、需要地層有足夠的厚度、需要下方地層的波速較上方地層為高等條件，是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

為使施測結果良好，對於此些誤差來源應要多加注意，尤其在人為因素以及幾何限制的部份，在用心的注意下其可獲得極為有效的控制。

## 2.8 應用限制

### 非破壞性檢測技術整體限制

非破壞性檢測技術普遍存在由現場資料分析所得結果不具有惟一性的問題，其單獨使用並無法提供足夠的調查結果，因此在其使用搭配鑽孔資料可有最佳的應用。此外，各方法皆有因深度增加而解析能力降低的情形

### 折射震測法限制

在折射震測法的分析中，除斷層掃描法是將地層假設為一個個的元素組成外，其餘各法皆是假設地層為均質、均向得層狀地層，其在解析能力上會因為地層的傾角增加而解析能力降低。折射震測法主要是建立在初達波走時曲線的基礎上，因此對於夾有弱層(下方地層波速較上方為低)的或是上下地層波速相近的地層會無法探測獲得，此被稱為折射震測法的盲區(blind-zone)，其會造成下方的堅硬地層厚度有高估的情形。此外，地層亦需以足夠的厚度以便可反應在走時曲線上，否則將無法探測到。

## 2.9 参考文献

1. Ammon, C. J. and J. E. Vidale, "Tomography without rays", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 509-528, 1993.
2. Crice, Douglas B., "Applications for Shallow Exploration Seismographs," In *Practical Geophysics for the Exploration Geologist*, Northwest Mining Association, Spokane, Washington, 1980.
3. Haeni, F. P., "Application of Seismic-Refraction Techniques to Hydrologic Studies," *U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations*, Book 2, Chapter D2, 1988.
4. Palmer, D., *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*, Soc. of Expl. Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1980.
5. Pullammanappallil S.K. and J. N. Louie, "A generalized simulated-annealing optimization for inversion of first-arrival times", *Bulletin of the Seismological Society of America* 84, 1397-1409, 1994.
6. Zohdy, A. A., Eaton, G. P., and Mabey, D. R., "Application of Surface Geophysics to Ground Water Investigations," *U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigation*, Book 2, Chapter D1, 1974.

### 三、表面波震測法

#### 3.1 應用範圍

透過表面波震測法所獲得之剪力波速剖面影像圖，其可應用於地層分層、液化潛能分析、道路鋪面檢測、土壤夯實成效檢測、地盤改良成效檢測、隧道背填灌漿檢測、地下空洞探測、現地土壤剪力模數試驗、崩坍地調查以及地下管線調查等問題解決上。

#### 3.2 原理

一般所謂之表面波有兩種，一是雷利波 (Rayleigh wave) 另一是勒夫波 (Love wave)，其是地體受到擾動後在地表產生沿著地表面傳遞之波種，不類於在地體中傳遞之壓縮波或剪力波。於工程上使用之表面波震測是應用雷利波之特性做為分析標的。雷利波(為便利用語，後續之表面波專指雷利波)傳遞時，在地表處受擾動之質點是逆著其行進方向以一橢圓形軌跡滾動(如圖 3.1 所示)，其波傳影響範圍大約侷限於一個波長之深度內，因此，各個不同波長的表面波其所反映之地層深度特性將有所不同，亦即表面波影響深度隨頻率之不同而異。

雷利波

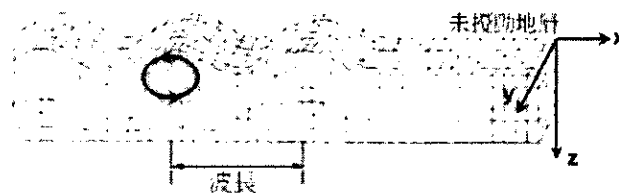


圖 3.1 雷利波示意圖 (Bolt, 1976)

當土層剪力模數隨著深度變化，不同頻率所造成的表面波波速便有所不同，此一特性稱之為頻散現象，將不同頻率所對應之表面波波速集合，可得一曲線，稱之為頻散曲線(dispersion curve)。表面波震測之基本原理即藉由量測表面波於不同頻率之相位速度，獲得其頻散曲線後再進行剪力波速度層構造之反算解析。其可簡分為三大步驟：現場施作、頻散曲線分析以及地層反算(如圖 3.2)。先於欲試驗之場址佈設接收器(geophone)後，製造人造震源產生擾動，將此地表垂直位移訊號收錄後，對其進行訊號分析而獲得表面波頻散曲線，再透過反算技巧對此頻散曲線進行反算分析便可得到現地 1-D 地層剪力波速剖面。

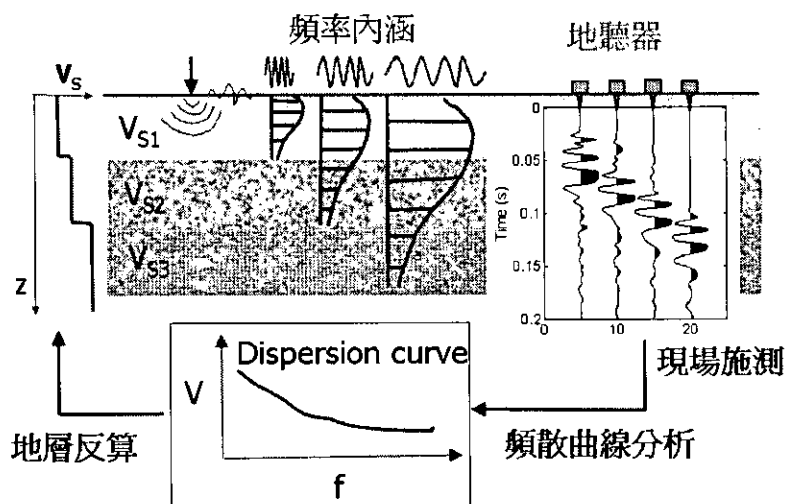


圖 3.2 表面波震測基本原理

每一回施作可獲得一 1D 剪力波速剖面，此一 1D 波速剖面是測線下方土層性值之某一權重組合，在習慣上以測線中點做為代表。藉由不斷移動測線位置便可得到多個不同位置之地層波速剖面，這些不同測線位置之波速剖面反應出各不同位置之地層情形，具有地層構造之側向變化，進而合成得到 2D 剪力波速度剖面影像(如圖 3.3 所示)。

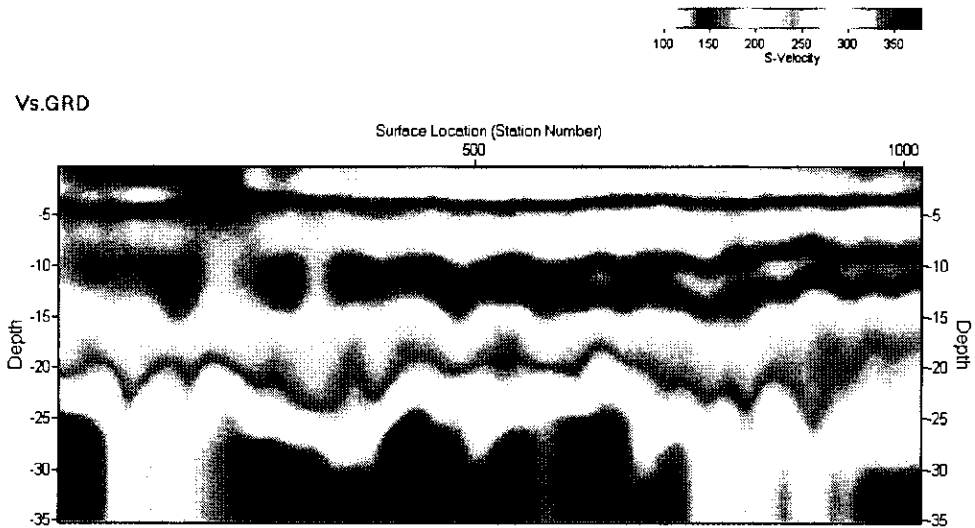


圖 3.3 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查

### 3.3 施測與分析方法

#### 3.3.1 儀器說明

震測系統主要包括震源、接收器、接收器纜線、訊號擷取器、起震器以及起震器纜線等，茲分別說明如次：

1. 震源，用以製造人造震動，有長柄鐵鎚、落錘、振動器、或炸藥等不同能量的選擇，視欲探測深度、地質條件、及環境噪音而定。
2. 接收器，用以接收震源所產生的地表振動，能將振動轉為電壓值輸出，一般而言，折射震測所使用的接收器頻率多為 8-14Hz。
3. 接收器纜線，與訊號擷取器連接，用以將接收器所產生之電壓訊號傳回訊號擷取器進行收錄。
4. 訊號擷取器，用以紀錄接收器所接收到的地表振動訊號，其有雙頻道與多頻道的差別，該儀器中應有基本之訊號處理能力，例如訊號疊加或濾波的功能。

5. 起震器，置於震源處，使用起震器纜線與訊號擷取器連接，用以啟動擷取器進行收錄，通常使用壓電材料元件或加速度規。

6. 起震器纜線，用以連接起震器與訊號擷取器，將起震器所得之啟動訊號(通常為電壓或電流值)傳回訊號擷取器啟動擷取紀錄的動作。

### 3.3.2 規劃與定線

**規劃**；對於表面波震測法之使用，在規劃時應該要先行了解探測的目的為何，根據不同的探測目的而可歸結於兩個主要標的，一是探測深度，另一是解析度。因為此兩者在接收器有限的情形下具有互斥的矛盾情形，因此需要先將主要目的確定，以便可行達成。

表面波震測法的探測深度以及解析度與所探測的地層有關，在不同的地層情形下會有不同的結果，但一般而言，探測可得之信賴深度約是與測線展距相等。側向解析度與每條測線中點之間距有關，在預期地層具有較明顯之側向變化(如有地下結構物，高角度斷層、孔洞或坍塌區)時，每條測線中點的間距應當要加以控制，以便能充份反應地層之側向變化情形；而垂直解析度難以量化，但一般而言，在以層狀地層為假設的分析法中可解析 3 至 10 層。

**定線**：一旦確定施測目的後便可進行定線的動作。定線包括測線的施測位置、接收器間距以及近站支距(如圖 3.4 及圖 3.5 所示)。測線的施測位置並無一定的規則，其必需綜合考量該處的地質條件、地表情形以及用地使用權以得到較佳的施測結果。但通常最主要是在盡量使測線為直線的前提下，了解該地的地質條件以及地表使用情形，



避免在垂直測線的方向上有明顯的變化(如測線緊鄰基礎構物或測線一側為懸崖另一側為懸壁等情形)。

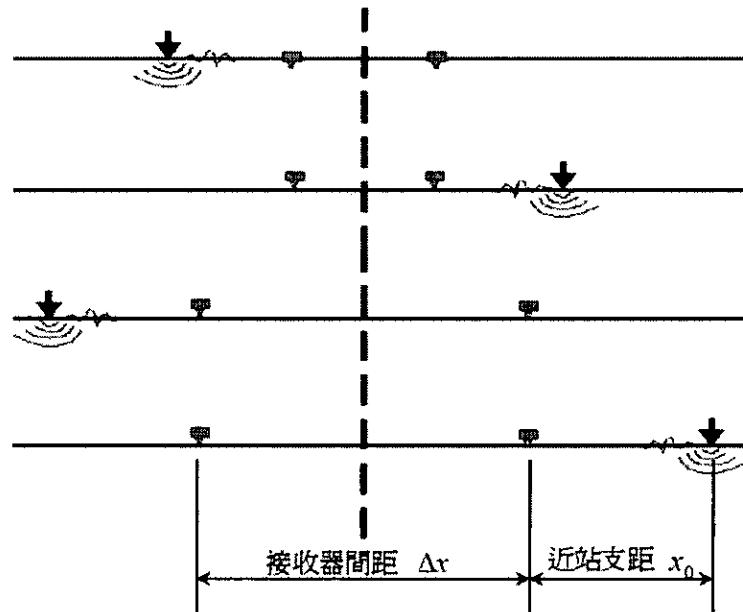


圖 3.4 雙頻道表面波震測法現場施測參數圖

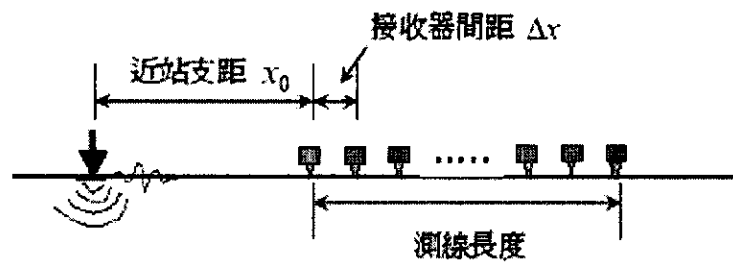


圖 3.5 多頻道表面波震測法現場施測參數圖

對於表面波震測法而言，目前尚未有一標準施作程序，就現地施測，其便有雙頻道以及多頻道施測的差別，且此施測法將影響後續的頻散曲線分析方法。一般以雙頻道施測者稱為表面波譜法(Spectral analysis of surface wave, SASW)，以多頻道施測者稱為多頻道表面波法(Multi-station analysis of surface wave, MASW)。不同的方法有不同

的定線參數與相對應之分析方法，將於下兩小節中分別介紹。

### 3.3.3 表面波譜法(SASW)

**現場施測參數：**表面波譜法是採用雙頻道施測，僅有兩個接收器，在施作時透過不斷改變接收器間距以及近站支距，但不改變兩接收器之中點位置，且為降低側向變化之影響，其炸點會左右改變（如圖 3.4 所示）。以此法施測，其解析度受到最小接收器間距控制，而其探測深度受到最大接收器間距控制。

因此，在定線時，一旦決定好測線位置，便需決定最小接收器間距、最小近站支距以及欲進行幾次接收器間距改變。一般來說，在實際施作上會使近站支距與接收器間距相等（ $\Delta x = x_0$ ），而下一次的接收器間距為此次之兩倍，最後考慮探測深度決定接收器間距變更施作次數。舉例來說，若設定欲探測之最小探測深度在 1 公尺，最大探測深度至少要 20 公尺，則最小接收器間距與最小近站支距設為 1 公尺，至少需變更 5 次接收器間距，使其最大接收器間距達 32 公尺。

**頻散曲線分析：**透過現地施測，每一筆紀錄我們都將可收集到兩個接收器位置的地層震動訊號，此訊號可表示為位置與時間的函數  $u_1(x_1, t), u_2(x_2, t)$ 。透過傅利葉轉換(Fourier Transform)可得到此二函數在頻率域的函數  $U_1(x_1, \omega), U_2(x_2, \omega)$  以及各頻率在  $x_1, x_2$  處的相位角。根據相位速度的計算式

$$c(\omega) = \frac{\omega}{\frac{\Delta\phi(\omega)}{\Delta x}} \quad (3.1)$$

其中， $c(\omega)$ 表示不同頻率時的雷利波波速； $\Delta\phi(\omega)$ 表示不同頻率時在 $x_1, x_2$ 處相位角的相減； $\Delta x$ 表示 $x_2 - x_1$ 。將不同頻率所計算得到的雷利波相位速度畫上，便可得到頻散曲線。如圖 3.6(虛線)所示，由於頻譜分析所得之相位角差僅侷限在 $-\pi \sim \pi$ 之間，因此在計算(3.1)式前須先將其摺開(unwrap)，得到如圖 3.6(實線)的結果。由圖 3.6 中亦可看見，在所得的頻譜分析結果中會有一段資料不佳段，不同的接收器間距會有不同位置及寬度的資料不佳段，因此在施測時收錄多筆不同間距的資料，分別計算完得到頻散曲線後取其算術平均數以為最後頻散曲線結果(如圖 3.7 所示)。

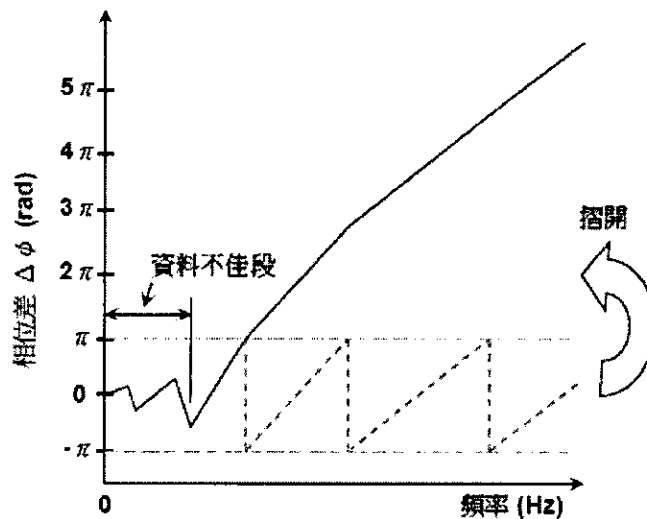


圖 3.6 SASW 頻散曲線分析(相位差-頻率圖)

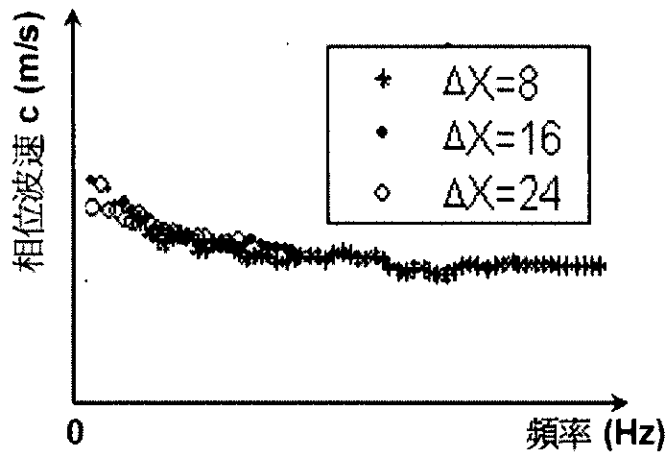


圖 3.7 SASW 頻散曲線分析結果

### 3.3.4 多頻道表面波法(MASW)

**現場施測參數：**多頻道表面波震測法在現地施測時，採用多個在同一直線上的接受器(如圖 3.5 所示)，只需敲擊一次，便可完成。於定線後，需要決定接收器間距、測線長度以及近站支距，而由於其整體測線展距受到接收器數目決定，因此，需同時考量解析度與探測深度的問題，再加以決定接收器間距。而最佳的近站支距會受到不同地層而有所不同，可在現場進行測試後決定，但一般可採用 5 至 15 公尺。以 24 個接收器為例，在第一個受波器之線外取適當近站支距，在施測上以解析度為主要考量，但至少要有 20 公尺的測深，因此設定接收器間距為 1 公尺，則有 23 公尺的展距，施作時反覆在同一震源處施作，將其疊加以消除雜訊之影響，直至收錄到清晰之表面波訊號為止。

**頻散曲線分析：**多個接收器的收錄，提供了更多空間上的訊息，使得多頻道表面波震測法在頻散曲線的分析上可利用二維訊號處理技術分析震測資料，求得訊號品質優良之頻散關係曲線。將多處接收

器位置之二維震測資料 $u(x,t)$ 透過在時間上以及空間上的傅利葉轉換後得到其在頻率-空間頻率域的函數 $U(k,\omega)$ ，又 $c = \frac{\omega}{k}$ 且 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ，對 $U(k,\omega)$ 進行變數變換即可得到波速與頻率的函數 $U(c,f)$ 。若以空間頻率的波譜大小為色階，可得到此波場轉換後的結果如圖 3.8 所示。圖中白線便是頻散曲線位置所在，亦是色階最深色處所在。若仔細注意，會發現在低頻位置的色階分佈較不集中，這是因為在離散的傅利葉轉換中，會因為有限的空間位置而產生的遺漏(leakage)現象，越低頻其波長越長，影響越顯著。

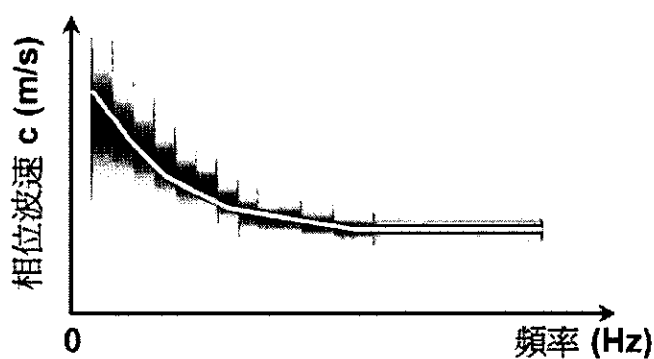


圖 3.8 多頻道表面波法頻散曲線分析結果

### 3.3.5 反算

由上兩小節所述之施測方法皆可得到表面波之頻散曲線，欲由此頻散曲線獲得地層剪力波速剖面（如圖 3.9）需要透過反算的技術。至目前為止，表面波震測之反算僅止於 1D 的反算，亦即是將地層假設為水平層狀地層，其可透過搭配正算模式由試誤而後多次疊代的技巧達成，亦可透過啟法式學習法如類神經網路(artificial neurons network)或退火模擬(simulated annealing)等無需正算模式的學習法達成。

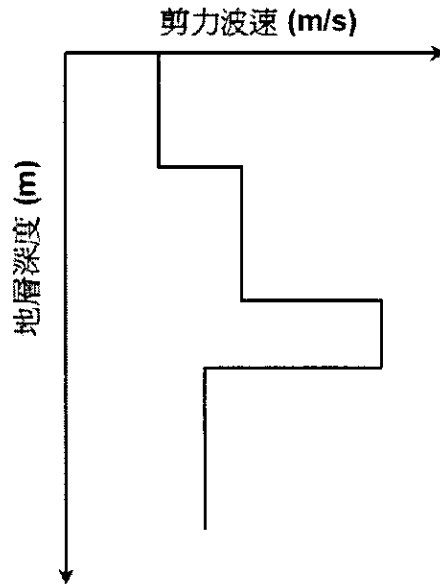


圖 3.9 地層剪力波速剖面

無論其採用之方法為何，在 1D 反算的架構下，其著重者在於以何者為反算標的。如前所述，在表面波震測法中是藉由頻散曲線進行反算，然而，如圖 3.10 所示，在水平層狀地層下所得之頻散曲線是有無限多條，在最低速處的稱為基態，其餘稱做高次態。在反算上可單採用基態，也可採用基態與數個高次態 (Xia et al., 2003, SWM)，另外亦可使用不將其區分為基態或高次態，稱做視頻散曲線 (apparent dispersion curve, Ganji et al., 1998; O'Neill et al, 2003; Bohlen et al., 2004) 做為反算標的。在進行頻散曲線分析時應當要特別注意反算中所使用的標的物為何，將所得到的頻散曲線進行區分。但需注意，以表面波譜法所獲得之頻散曲線無法區分基態與高次態，應以視頻散曲線做為反算標的。

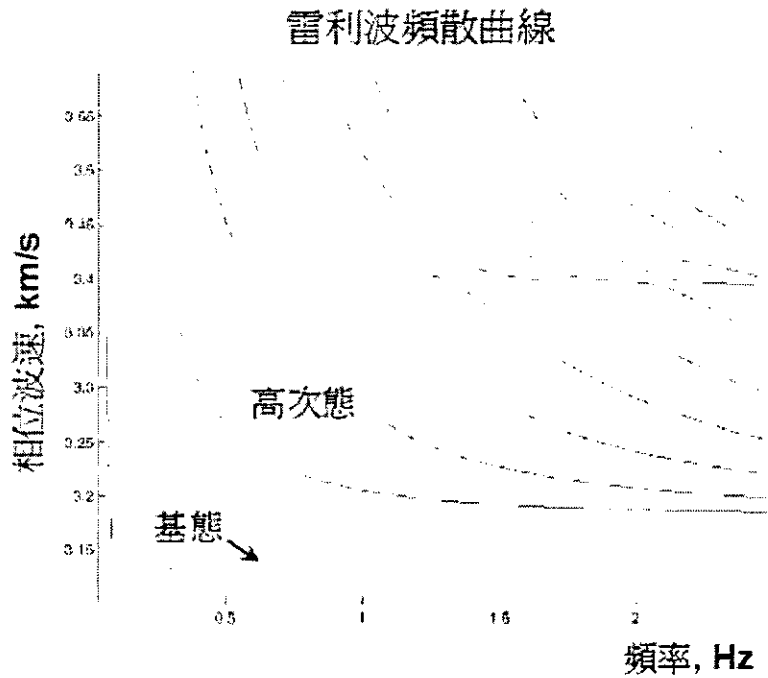


圖 3.10 表面波頻散曲線

無論是使用表面波譜法或是多頻道表面波法皆可獲得 1D 的地層剪力波速剖面(如圖 3.9)，藉由不斷移動測線位置便可得到多個不同位置之地層波速剖面，這些不同測線位置之波速剖面反應出各不同位置之地層情形，具有地層構造之側向變化，進而合成得到 2D 剪力波速度剖面影像(如圖 3.3 所示)。

### 3.4 資料分析判釋需知

**結果驗證：**對於所有的非破壞性檢測法而言，在一組資料下所獲得的反算結果並不一定具有惟一性，所得到的結果必需與現場所得之鑽探資料以及地質調查結果進行比對，並透過具有專業訓練以及經驗的判釋人員進行解讀，以免對於結果有過度解讀的錯誤產生。倘若判釋的結果是在探測位製無任何可供參考的資料下所進行的，應在報告中提及此點。

**頻散曲線分析：**在進行頻散曲線分析中最重要的是配合反算方法對頻散曲線進行辨識，以免造成頻散曲線的誤用而影響結果。以多頻道表面波震測為例，如圖 3.11 所示，在分析所得之頻散曲線影像圖中，不可將紅褐色處不經辨識便提供做為反算之用，若反算是以基態做為反算標的則需辨識出基態段，僅以該段投入反算。

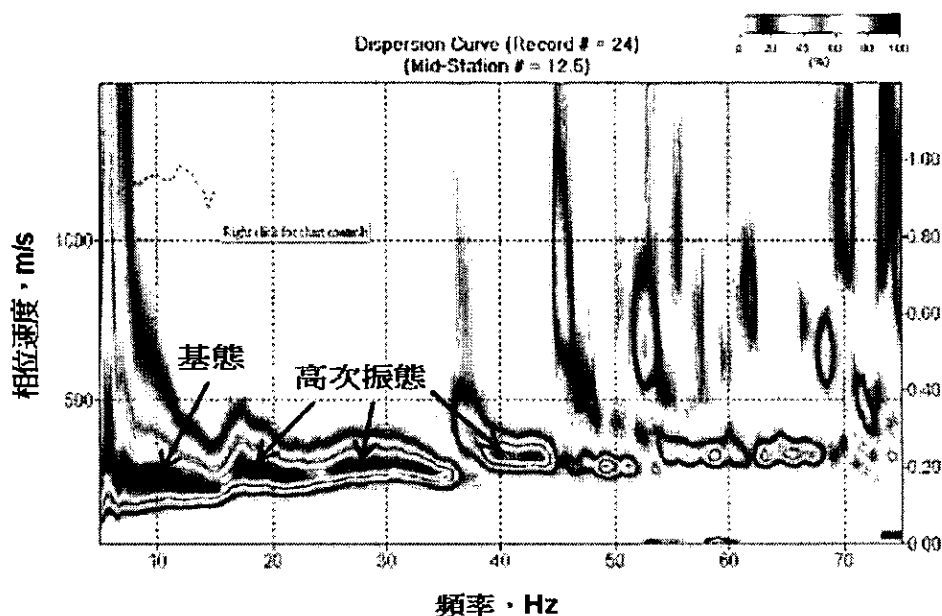


圖 3.11 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究，民國 94 年)

**地形影響：**地形效應在表面波震測中可能會造成兩個影響：一是在頻散曲線上會造成低估的情形，另一是在頻散曲線中會使得高次振態的能量集中有增加的情形，因而會有造成頻散曲線的跳躍現象。就目前表面波震測試驗的研究上，對於存在地形效應時的解析方法尚無法提出一有效且合理的解析技術。主要的原因在於現今的分析技術尚於 1D 的理論架構下，在此架構下要將地形的影響納入僅能採用部份修正的方法，但在複雜的地質情形下，這些修正可能不具有代表性，因此，當在具有地形坡度大於 20 度的位置施作時，應要將其影響納



入考慮後再行解讀。

**高次態影響：**在現行主要以基態振態為反算標的的反算技術下，只要能有效的辨識出基態頻散曲線，則即使在頻寬較為不足的情形下只要有合理數量的頻寬(會隨地層的複雜度而有所不同，但 30Hz 的低頻頻寬已可掌握)便可掌握地層的整體趨勢與結構特徵。在此點上，Zhang and Chan(2003)在其研究中指出，基態頻散曲線的頻寬在低頻處的資料於反算中較高頻處的資料更形重要，只要能確保低頻資料的正確，則反算結果皆可合理地反應出地層特性。而若無法將高次振態與基態振態分辨，則反算的結果將會有較大的誤差，且會有為降低反算誤差而造成的人造地層特徵出現。在現行以基態振態為反算標的的反算技術下，只要能有效的辨識出基態頻散曲線，則即使在頻寬較為不足的情形下只要有合理數量的頻寬(會隨地層的複雜度而有所不同，但以本文所舉之例而言，30Hz 的低頻頻寬已可掌握)便可掌握地層的整體趨勢與結構特徵。在此點上，Zhang and Chan(2003)在其研究中指出，基態頻散曲線的頻寬在低頻處的資料於反算中較高頻處的資料更形重要，只要能確保低頻資料的正確，則反算結果皆可合理地反應出地層特性。而若無法將高次振態與基態振態分辨，則反算的結果將會有較大的誤差，且會有為降低反算誤差而造成的人造地層特徵出現。

**避免高次態影響之方法：**採用目前以基態頻散曲線為反算標的的分析方法獲得足夠頻寬必可與其它振態分離的基態頻散曲線是表面波震測法結果好壞的最重要因素，因此解決方案應以此為施作準則。在實際的做法上，除了可採用新發展之高側向解析法(Lin and Lin, 2007)施作外，於現場的施測參數設定上，Park et al.(2005)建議採用較

短(~1 公尺)的近站支距可降低高次振態能量主導的頻寬範圍(此一短近站支距的使用已包含於高側向解析法中)；此外 O'Neill and Matsuoka(2005)的研究指出，採用非線性的接收器排列進行施測，可使得各振態間的解析度提高，因而提高振態間的分離。此外，O'Neill and Matsuoka(2005)亦建議在尚未採用全波場反算前，頻散曲線的分析應當輔以人為挑選，可降低振態間因分離不足而造成以視頻散曲線反算的誤差。

**地層結構與剪力波速影像剖面：**由表面波震測法所獲得之地層剪力波速影像剖面可用以判別地層結構，然而，各種類的土層與剪力波速並非一對一的關係，並無法以某一範圍內之剪力波速便可辨識其為何者地層，在判斷上應搭配有一鑽孔資料以及該處地質資料做為佐證與比對之用將可使結果更具代表性。此外，剪力波波速可反應地層之剪力強度，由影像圖可得知其相對強弱，若有試驗資料，可搭配經驗公式獲得其可能之強度值。惟在最後判釋上仍應僅記解析度、地形效應以及高次態之影響避免過度解讀結果。

### 3.5 報告書內容

完成施測與分析判釋後，報告書的撰寫中至少需包含下列幾項內容，以便提供足夠資訊給管理者或其它專業人員對其報告結果進行合理的判斷。其分別為：1.施測的目的與範圍；2.測線的佈設位置；3.現場環境說明；4.現場施測參數，其包含使用的儀器、取樣頻率、收錄的時間長度、訊號處理的使用、炸點位置、接收器間距、接收器數量以及組成 2D 剪力波速剖面影像各測線中點的間距；5.所使用之分析方法及所用於分析的程式軟體；6.分析所得之頻散曲線；7.反算用

之參數，如層數、地層厚度等；8.分析結果的判釋以及與現有資料的綜合評估；9.註明各個作業環節中的負責人員。

### 3.6 可能的誤差來源

在表面波震測法中，其可能造成結果誤差的原因可概分為人為因素、儀器因素、幾何限制以及施測法本身先天因素四種。

**人為因素**，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善。

**儀器因素**，是指對於振動的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但應在施作前先行確認儀器正常運作無受損壞之虞。

**幾何限制**，是指因為定線位置、接收器間距、地形變化以及雜訊所造成的影響。此一因素與現場環境以及地層結構有關。雜訊的影響可透過施作的過程改善，但其餘部份需在定線時進行恰當的考量以使其影響降至最小。

**先天因素**，是指表面震測法本身理論上便無法達到的探測能力。例如其假設地層為水平層狀，對於劇烈之側向變化地層以及具有地形變化的地層會有一定的扭區；又在較深處的薄層將在其解析度可解析之能力以外，將難以明顯反應出，此些是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

為使施測結果良好，對於此些誤差來源應要多加注意，尤其在人為因素以及幾何限制的部份，在用心的注意下其可獲得極為有效的控制。

### 3.7 應用限制

#### 非破壞性檢測技術整體限制

非破壞性檢測技術普遍存在由現場資料分析所得結果不具有惟一性的問題，其單獨使用並無法提供足夠的調查結果，因此在其使用搭配鑽孔資料可有最佳的應用。此外，各方法皆有因深度增加而解析能力降低的情形

#### 表面波震測限制

在表面波震測的分析中，是假設地層為均質均向的水平層狀地層，因此在地形或地層傾度大於 20 度的地方施測，會使所得剪力波速結果有所低估或解析能力降低。在較深處或厚層中所存在之薄弱層不易明顯探測到，且因為剪力波波速不太受水的存在而有所變化，因此以此法無法探知地下水水位。此外，表面波震測主要是建立在頻散曲線上，所有的頻散曲線才能反應出地層的所有特性，通常，夾有弱層的地層會有許多能量集中於高次態中，以基態做為反算的方法便不易將此探測出。

### 3.8 參考文獻

1. Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G., Theilen, F., "1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion", *Geophysics*, 69, pp. 330-44, 2004.
2. Ganji, V., Gucunski, N., Nazarian, S., "Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124, pp. 757-70., 1998.
3. Lin, C.-P. and Lin, C.-H., "Effect of Lateral Heterogeneity on Surface Wave Testing: Numerical Simulations and a Countermeasure," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 541-552., 2007.
4. O'Neill, A., Dentith, M., List, R., "Full-waveform P-SV reflectivity inversion of

- surface waves for shallow engineering applications", *Exploration geophysics*, 34, pp. 158-73, 2003.
5. O'Neill, A., Matsuoka T., "Dominant higher surface-wave modes and possible inversion pitfalls", *Journal of environmental and engineering geophysics*, 10, pp. 185-201 , 2005.
  6. Park, C.B., R.D. Miller, N. Ryden, J. Xia and J. Ivanov, "Combined use of active and passive surface wave method", *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, v. 10. p. 323-334,2005.
  7. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., and Tian, G., "Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes", *Journal of Applied Geophysics*, 52, pp. 45-57, 2003.
  8. Zhang S.X., Chan Lung.S., "Possible effect of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion", *Journal of Applied Geophysics*, 53, pp. 17-29, 2003.

## 四、2D 電阻探測法

### 4.1 應用範圍

根據其施測所獲得之地層電阻分佈結果，可應用在地下水、地下污染物、垃圾掩埋、崩塌地、填土、地下孔洞、舊隧道以及金屬礦產的調查上，另外其亦具有發展測定地下水變化、漏水、灌漿效果等方面的監測潛力。

### 4.2 原理

地電阻影像探測的量測原理為藉由外加低頻電流經由圖 4.1 中電流極 C1、C2 流入地層中，再利用電位極 P1、P2 量測地層所反應的電位差值，由該量測的電壓值與電流值經由靜電學理論計算受測土層之視電阻率 (apparent resistivity)。量測空間影響範圍視電極間距而定，展距越大所能探測深度越深，但相對解析能力會有所降低。量測過程藉由改變不同電極間距與位置，獲得不同幾何空間位置上的視電阻率值，稱為似電阻率剖面 (Pseudo-Section)，經由反算分析獲得真實電阻影像剖面，藉以了解地層構造。不同電極排列的幾何參數影響探測的結果會不同，常見的電極排列如圖 4.2 所示。

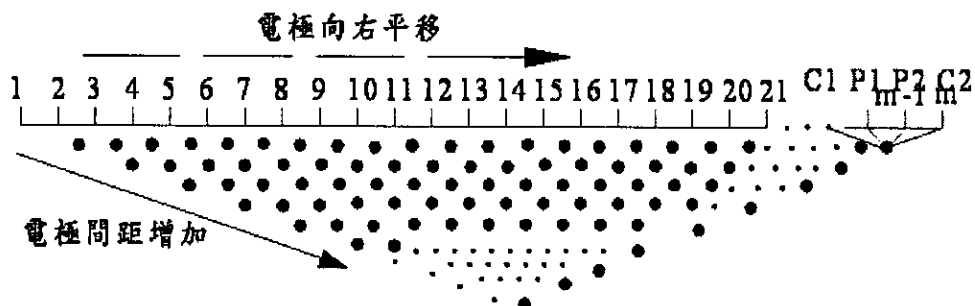


圖 4.1 地電阻探測量測示意圖

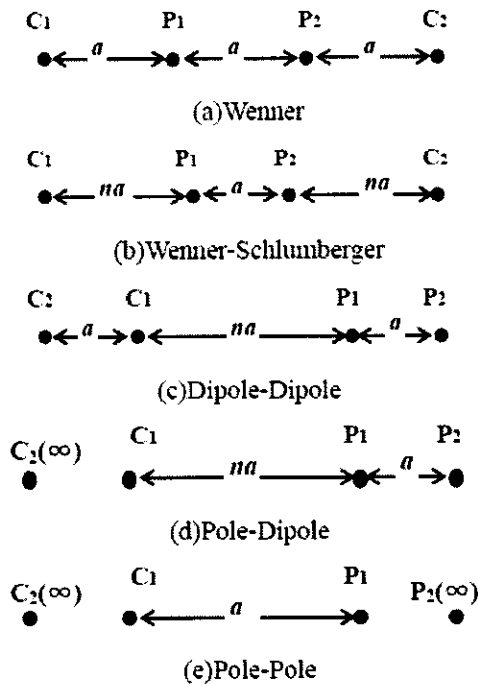


圖 4.2 地電阻影像探測的各種排列方式

### 4.3 施測方法

#### 4.3.1 儀器說明

鋼棒、同軸纜線、電流傳輸線、纜線轉接盒、可放電並紀錄電流、電壓之主機、500 公尺電線。

#### 4.3.2 測線規劃

於地質圖或地形圖尋找構造可能存在的位置，再進行現場勘查作業，並考慮附近是否有鑽孔資料可做為比對；避免測線橫跨過落差太大的溝渠或土堤處，且必須避開高壓電線、電波發射台及地下管線，鋼棒插入時盡量避免在表層為礫石材料；另測線儘可能為直線，避免

轉彎角度或曲折過大。

### 4.3.3 現場施測

依所欲探測之深度、範圍，決定測線總長度、鋼棒間距及施測排列方式。隨後將鋼棒依固定間距(1-D 則需依所決定之排列方式進行佈設，而並非都是等間距)，分別貫入施測點位，至少需貫入二十公分；利用電流傳輸線將同軸纜線與鋼棒相互連接，將所選擇之排列方式設定好，並透過轉接盒將主機所放的電壓傳遞出去，且將量測到之電流及電位差接收回主機，進行記錄；經過計算後，即可得到視電阻率剖面，如地表高程有所變化，則應進行地表高程量測，並於分析中進行高程修正。

## 4.4 分析方法

地電阻量測之擬似電阻率影像剖面表示每一施測幾何（電極配置）所得到之視電阻率，必須透過反算分析方能獲得地層真實的電阻率分佈。反算分析之方法主要以正算模式為基礎，通常假設一電阻率分佈，其量測之視電阻率可依據靜電學理論與有限元素法（finite element）或有限差分法（finite difference）來模擬預測，接著設法改變電阻率分佈，使得預測的視電阻率值盡量逼近量測值，則可估計出地層之真實電阻率分佈，現地由於資料量大，反算分析通常以結合正算模式之最佳化方法來進行。

## 4.5 資料分析判釋需知

資料解釋上，除了需將實際所使用的施測參數其精度加以考量



外，另由於實務上主要以二維地電阻探測為主，故在應用上常忽略了三維效應的影響。所謂三維效應，即二維地電阻剖面外的地質結構，其電阻率映射於二維地電阻剖面上所造成的探測誤差。因二維地電阻探測將地層假設為二維  $(x, y)$  的半無限域空間分佈，不過在真實的地質狀態中，電流卻是在三維的方向  $(x, y, z)$  流動，因而造成非二維剖面上的物體對地電阻電場產生一定程度的擾動，而造成二維剖面上部份不規則電阻率與雜訊。因此在資料判讀上，對於由邊界電阻影像所得之訊息，因其有可能為三維效應所造成之映射，故皆應採較為保守之解釋，不可過度解讀。另由於每種排列施測方法其訊號衰減強度不一，所造成的雜訊影響也不盡同，且其對側向及垂直向之解析度也有所不同，因此在解釋時除了須充分了解現地環境概況外，對於所施測之方法，亦應有相當之了解。

#### 4.6 報告書內容

需將施測所採用的排列方法、鋼棒數目、起點及終點座標，有遠電極時亦需附上遠電極座標、鋼棒間距等施測相關參數列表，並將結果分析後所得到之電阻率剖面及現地相關地質資料等一併附上，以便相互交叉比較；並利用現地實際照片加以輔助說明，對所施測結果做一合理解釋。

#### 4.7 可能的誤差來源

在地電阻探測法中，其可能造成結果誤差的原因可概分為人為因素、儀器因素、幾何限制以及施測法本身先天因素四種。

**人為因素**，是指在現場施測過程以及結果分析過程中所造成的誤

差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善。

**儀器因素**，是指對於電流的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但應在施作前先行確認儀器正常運作無受損壞之虞。

**幾何限制**，是指因為定線位置、電擊棒間距、地形變化以及雜訊等所造成的影響。此一因素與現場環境以及地層結構有關。雜訊的影響可透過反算程式的設定改善，但其餘部份需在定線時進行恰當的考量以使其影響降至最小。

**先天因素**，是指地電阻探測法本身理論上便無法達到的探測能力。例如其地層間需有較明顯之電阻值差異以便能判斷其界面位置、而另因其易受地下水所影響、故水面下方之地層性質亦將無法確切得知等限制，是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

為使施測結果良好，對於此些誤差來源應要多加注意，尤其在人為因素以及幾何限制的部份，在測線規劃以及施測過程中多加注意此些可能之誤差因素，可獲得極為有效的控制。

#### 4.8 應用限制

在地電阻探測法的分析中，係利用量測所得之電流、電位差與測線幾何因子經過計算來求得該點之電位值，故其解析能力會隨測線幾何因子而有所變化，如電擊棒之間距愈大則解析能力愈低等。地電阻法主要是利用顆粒與顆粒之間或顆粒間之孔隙液體來傳遞電流，藉由

地層中各種材料、地質構造其電阻值之差異性來進行量測判斷，因此對於易於造成電流逸散之地層，如地下水含水層等則電流無法有效傳遞至地層下方而造成無法獲得該層之地層參數。另土層中若夾有弱帶(下方電阻值低於上方電阻值)其厚度不足小於電擊間距，則會受精度限制造成無法正確獲得其分布情況；另如上方電阻值過高，則易造成電流有效無法通過，而亦無法有效獲得分層之界面位置，其會造成地層厚度誤判之情形。

#### 4.9 參考文獻

1. Loke, M. H., "Time-Lapse Resistivity Imaging Inversion," 5th Meeting of the Environmental and Engineering Society European Section, pp. 1-2.; , 1999
2. Loke, M. H., "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys," Geotomo Software, Malaysia; , 2003
3. Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., "Applied Geophysics 2nd," Cambridge University Press. , 1990
4. Yang, X. and Lagmanson, M., "Comparison of 2D and 3D Electrical Resistivity Imaging Methods," Advanced Geosciences. , 2006

## 五、自然電位法

### 5.1 應用範圍

由所獲得之一維或二維自然電位剖面，在壩體或堤岸之處其可應用於調查滲流之位置甚或其流動路徑，此外，自然電位法也大量應用於地下水流向調查、崩塌地調查、斷層調查、礦物調查、隧道滲水調查以及地下污染物調查等方面。

### 5.2 原理

自然電位法於其它施測法之不同是在於其屬於被動式量測技術，即表示其並不透過主動產生擾動源，存粹僅量測自然界所存在之物理量特性。此法主要是量測地表上某兩點之電位差，此電位差之來源複雜，但主要者有三，一是由電動位(electrokinetic potentials)或稱為流動電位(streaming potentials)所產生，產生之原因是由於水在孔隙介質中的流動；其二為電化學電位(electrochemical potentials)，主要是由地下水中所含有不同濃度之電解質所造成；第三是由礦化電位(mineral potentials)所產生，由於在地底下存有不同之可導電礦物，且其之間存在有含電解質之地下水，因而有電位差存在。在此三種來源中，水於土壤中流動所產生之流動電位是應用於壩體滲流檢測最為重要之來源，藉由所獲得電位差值之相對大小，可了解該量測區域之滲流位置或其流動方向。

## 5.3 施測方法

### 5.3.1 儀器說明

自然電位法所使用之儀器是所有非破壞性檢測法中最為簡便者，其基本僅需要兩個非極化之具孔隙電極、一個可量測電壓差之電壓計以及傳遞訊號用之訊號線即可，分別說明如下：

**非極化之具孔隙電極：**用以量測現場之電位差。其構造約如圖 5.1 所示，為使電極與地面有量好之接觸，故採用電極棒搭配電解液之方式，且在與地面接觸之一側使用具透水性之材料，以使得電解液可以直接與地面接觸，一般來說，電極棒是採用銅而電解液採用硫酸銅溶液，鋅與硫酸鋅溶液或銀與氯化銀溶液亦可使用。

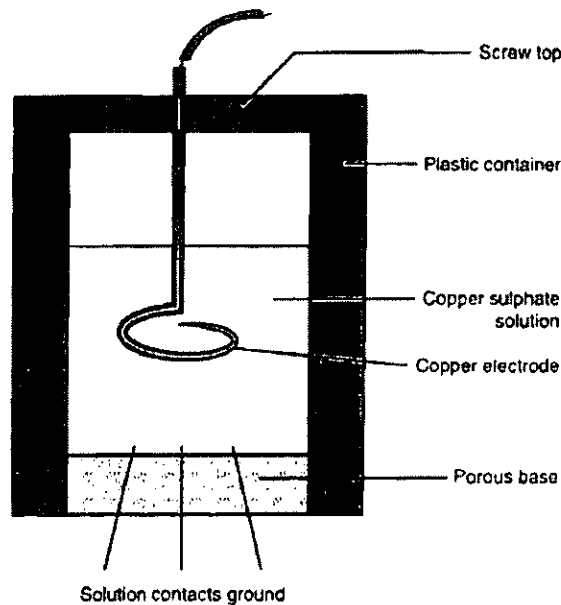


圖 5.1 自然電位法電極構造示意圖(摘自 Reynolds, 1997)

**電壓計：**用以量測電壓差之用。自然電位之電壓值大約在毫伏 (millivolt) 至數伏特之間，因此用於量測此電壓之電壓計需至少可量測

到毫伏之精度，且為避免電壓計本身內然之電阻消耗此自然電位，其內部電阻之電阻值至少需在  $10^8$  歐姆(ohms)以上。

**訊號線：**用以連接電極與電壓計。因在量測上有時距離極遠，訊號線本身之電阻將可能造成自然電位的消耗，因此，除了訊號線本身需使用較佳之導體外，亦應使固定電極端之訊號線較長，移動端電極之訊號線較短，以維持有固定之相對電壓值。

### 5.3.2 規劃、定線與施作

**規劃：**對於自然電位法之使用，於壩體之應用上主要是在於滲流之調查，在規劃時應先行了解調查範圍之大小及可能之深度，並對於調查範圍中可能對量測造成影響之因素有所了解，例如金屬管線、電機裝置等。而後視需求，訂定需要之解析度，一般而言，壩體中之滲流路徑斷面不大，在約略垂直可能滲流路徑之方向上，採用 10 公分至 2 公尺不等之測點間距較可反應出滲流位置。對此法，其探測深度受現場環境條件影響甚大，不易估計，但一般而言，較長之測線，較有機會有較深之探測深度。

**定線：**一旦決定調查範圍以及預定之解析度，便可進行定線。定線包括決定做為基準電壓之固定電極位置以及另一移動電極之測點位置。做為基準電壓之位置，其應要避免置於可能有礦化電位或流動電位之處，而移動電極之測點位置選定可分為一維及二維兩種來說明。在一維之施測上，為能較靈敏感測出滲流位置，應將各測點以直線排列，且此測線走向儘量垂直滲流路徑，並採用較密集之間距(10 公分至兩公尺不等)，而進行二維施測時，以網格狀設置測點為準則，若可估計可能之滲流路徑，則可在其垂直向上設置較密之一維測線，

而以較疏之間距(1 公尺至 5 公尺不等)設置測線形成網格狀測點；但若現場資料不足以推估滲流路徑，可先行均勻佈設較疏之網格點，判斷其可能滲流路徑後，再挑選幾處具代表性之處，垂直滲流路徑進行較密測點之測線施測。

**施作：**自然電位法之施作非常簡單，將固定電極安置於選定之基準電壓位置後，逐次將移動電極置於預定之測點，確認電極與地面接觸良好後，紀錄其電壓值即可，惟為提升雜訊比，在同一測點需進行多次量測後予以平均，此量測次數可依現場訊號之穩定情形適當調整，一般而言，量測 5-15 次已足夠。

#### 5.4 分析方法

**視電位圖解法：**傳統上對於自然電位法之分析是直接對所量測到之電位依空間分佈排列呈現後，根據電位之大小或極化情形進行分析判釋，由於此中之電位是在測點與基準點間各深度與距離所綜合呈現之值，因此名之為視電位。對於一維之施測結果，將其依測線之位置繪出，如圖 5.2 所示；而若為二維之施測結果，根據其平面相對位置，可採用灰階或色階方式呈現，如圖 5.3 所示。

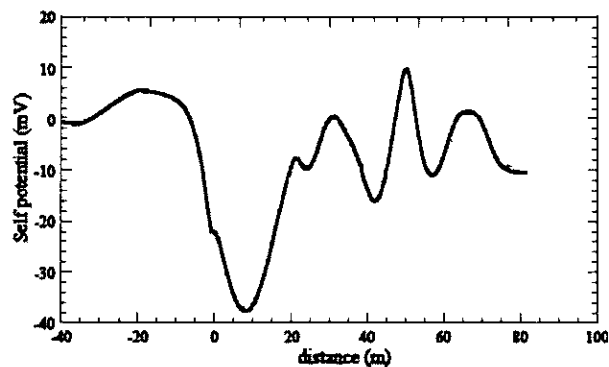


圖 5.2 一維視電位剖面圖(改繪自 Boleve et al., 2007)

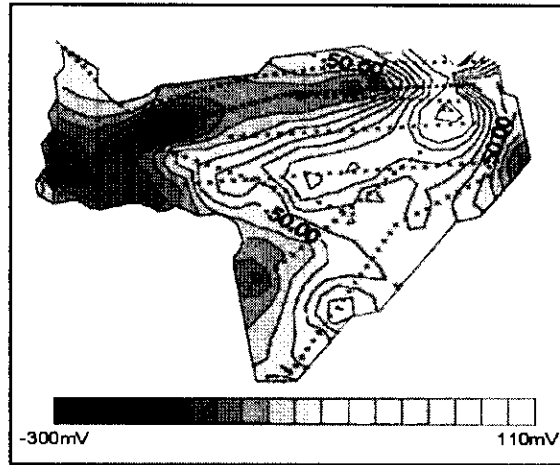


圖 5.3 二維視電位影像平面圖 (改繪自 Johansson et al., 2005)

在欲以上述之圖進行判釋前，尚需對此資料進行修正之動作。在地體中因為地球本身磁場之原因存在有地體電流(telluric currents)，其平面空間梯度約略是 $\geq 100\text{mV/km}$ ，當量測之範圍大至數公里平方時，此一效應將對自然電位之量測造成影響，但在壩體之滲流調查問題上，調查範圍並不會到達如此大的面積，因此可予以忽略，然而，除此一影響外，尚有地形效應之影響需予以修正。在山坡上方之處會有較多的負電荷累積，其將使得該處電位較低，一般而言，於坡度大於 20 度之區域施作便需進行地形效應修正。由於地體電流效應在高程提升之處亦會有所變化，其與地形效應常會共伴發生，要將其完全消除極其困難，僅能做一般性之修正，關於修正之法可參考 Bhattacharya and Roy(1981)與 Bhattacharya(1986)之介紹。

**斷層掃描法：**斷層掃描法是將探測範圍之下方區域分為一個一個的元素/格網，而後透過有限元素法或有限差分法等數值方法做為正算模式，再以反算技巧獲得地表下之實際電位分佈情形，以目前之技術而言，其已可將地形效應納入考率，對於其實際理論與計算可參考 Patella(1997a,b)。惟此一分析法尚屬新發展之技術，針對不同之應用，



其分析結果之準確性與所使用之理論以及分析時之初始模型有極大相關，針對地下水流動之問題，以流動電位為理論基礎進行研究者尚有 Boleve et al.(2007)等，可做為分析時參考之用。在分析上，目前還是以視電位圖解法為主要分析方法。

## 5.5 資料分析判釋需知

**滲流方向與滲流位置：**如圖 5.4 所示，在壩體中產生滲流時，在滲流路徑周邊將開始聚集有負電荷，而使得該滲流位置會有較低之電位，此一特性便是在採用自然電位法時對於可能之滲流位置進行判斷的依據。然而，對於滲流之問題，除了欲得知其在壩體之滲流位置外，亦期望可以獲得其流動方向，關於此點，可由二維之視電位影像平面推估。

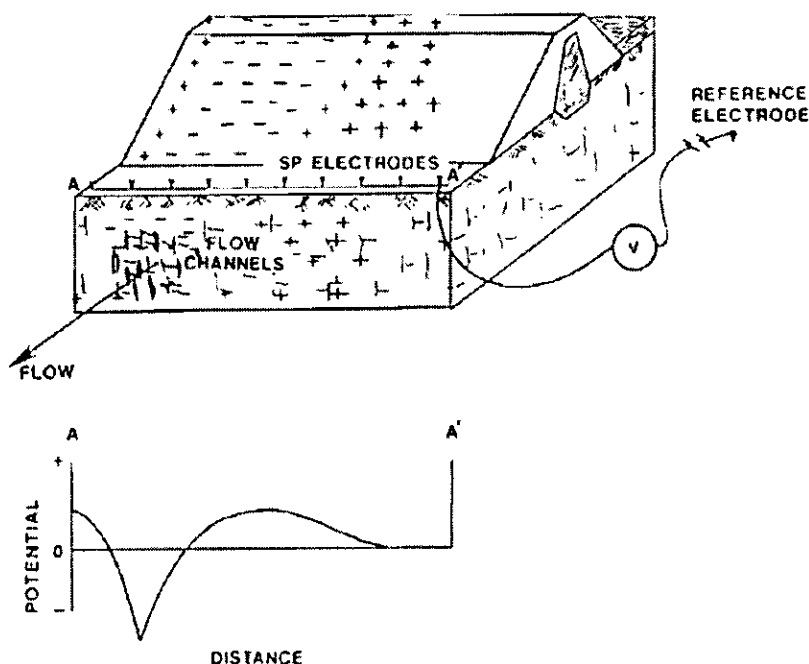


圖 5.4 壩體滲流影響之電荷分佈與電位量測結果示意圖(摘自 Bulter and Llopis, 1990)

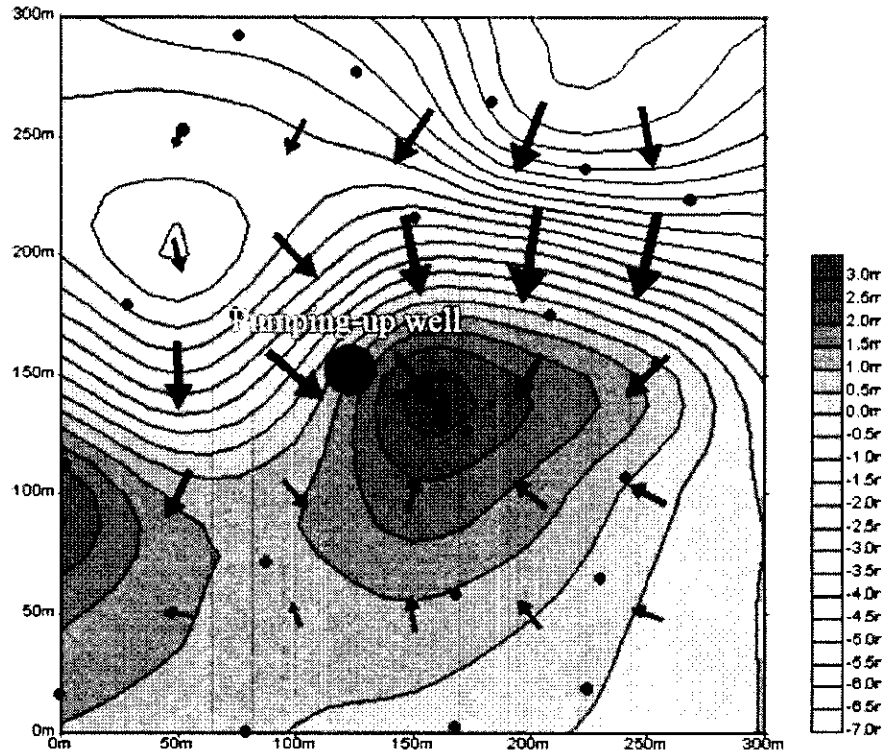


圖 5.5 地下水流動造成之電位分佈示意圖(摘自 Sato et al., 1997)

一般而言，如圖 5.5 所示，其流動是自低電位向高電位方向流動。綜合上述，在無足夠資訊推估滲流路徑之情形下，可先行佈設較疏之二維均勻網格進行初步探測，待由此二維視電位影像平面圖中找出最可能之滲流路徑後，再以垂直該流路之方向佈設幾處密集測點之測線較精確的找出滲流位置。至於滲流所在深度則須依賴斷層掃描之分析，才可有機會獲得。

**地體電流效應與地形效應：**自然電位法之施測除受雜訊、人造電磁波以及金屬管線之影響外，同時亦受到地體電流以及地形效應之影響。當量測範圍達平方公里時應予以考慮，否則可以忽略不計；而當地形之坡度大於 20 度時，需考慮因地形所造成之影響。此兩者之影響並無法完全消除，僅可做一般性修正，修正方法可參考 Bhattacharya and Roy(1981)與 Bhattacharya(1986)之介紹。

**結果驗證：**對於所有的非破壞性檢測法而言，在一組資料下所獲得的分析結果並不一定具有惟一性，所得到的結果必需與現場所得之鑽探資料以及地質調查結果進行比對，並透過具有專業訓練以及經驗的判釋人員進行解讀，以免對於結果有過度解讀的錯誤產生。倘若判釋的結果是在探測位置無任何可供參考的資料下所進行的，應在報告中提及此點。

## 5.6 報告書內容

完成施測與分析判釋後，報告書的撰寫中至少須包含下列幾項內容，以便提供足夠資訊予管理者或其它專業人員對其報告結果進行合理判斷。其分別為：1.施測的目的與範圍；2.測線的佈設位置；3.現場環境說明，除應描述可能之管線以及電機設備等外，若測站有位於高度植被處，應要特別註明；4.施測之方法；5.所使用之儀器設備；6.施測與結果分析所用之程式軟體，以及所進行之資料修正內容；7.分析結果判釋以及與現有資料之綜合評估，在此所做出之判釋結果應搭配施測結果一同呈現；8.註明各個工作環節中的負責人員。

## 5.7 可能的誤差來源

在自然電位法之應用中，其可能造成結果誤差的原因可概分為人為因素、儀器因素、幾何限制以及施測法本身先天因素四種。

**人為因素**，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善，在此可能造成誤差之原因需特別注意電極溫度以及施測時機。電極內含有電極棒以及電解液，當溫度有所變化時，其本身之電學性質將有所改變，如此一來做

為基準電位之處將不再是一固定值而有所變化，造成整體相對電位解讀之錯誤。而施測時機，對於滲流之調查應避免在大雨過後進行，因為大雨過後地表水將自地表往地下滲入，而有往下之水流產生，此水流將會造成地體之自然電位改變，而使得量測有所誤差。

**儀器因素**，是指對於電壓的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但應注意在施測過程中訊號線於固定電極端以及移動電極端是否固定不變，此外，亦應注意自然電位在訊號線中可能的損耗情形。

**幾何限制**，是指因為定線位置、測線間距、地形變化以及雜訊所造成的影響。此一因素與現場環境以及地層結構有關。雜訊的影響可透過施作的過程改善，但其餘部份需在定線時進行恰當的考量以使其影響降至最小。

**先天因素**，是指自然電位法本身理論上便無法達到的探測能力。例如地體電流效應之影響，或是因為滲流位置過深或滲流尚不明顯，不足以有明顯之電位降低發生，此些是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

為使施測結果良好，對於此些誤差來源應要多加注意，尤其在人為因素以及幾何限制的部份，在用心的注意下其可獲得極為有效的控制。

## 5.8 應用限制

自然電位法在現場的量測上極易受到地球的自然電流、土壤種類、地形效應以及微波電流等因素的影響，此些影響不易將其與目標

探測物所產生的電壓差分離。

## 5.9 參考文獻

1. Bhattacharya, B.B., 1986, Reply to comment by N.S. Rajan, N.L. Mohan and M. Narasumha Chary., *Geophysical prospecting*, 34(8), p.1294-1295.
2. Bhattacharya, B.B. and Roy, N., 1981, A note on the use of a nomogram for self-potential anomalies., *Geophysical prospecting*, 29(1), p.102-107.
3. Boleve, A., A. Revil, F. Janod, J.L. Mattiuzzo, and A. Jardani, 2007, Forward modeling and validation of a new formulation to compute self-potential signals associated with ground water flow, *Hydrology and Earth system sciences*, 11, p.1661-1671.
4. Butler D.K. and Llopis, J.L., 1990, Assessment of anomalous seepage conditions., In: Ward, S.H.(ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol2: Environmental and Groundwater*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, p.153-173.
5. Patella., D., 1997a, Introduction to ground surface Self-potential tomography, *Geophysical prospecting*, 45, p.653-681.
6. Patella., D., 1997b, Self-potential global tomography including topographic effects, *Geophysical prospecting*, 45, p.843-863.
7. Reynolds, J.M., 1997, *An introduction to applied and environmental geophysics*: John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England
8. Sato, H., Shima, H., and Sakurai, K., 1997, A study on generation of streaming potential due to pumping-up of groundwater: Proc. of the 97th technical conference of SEGJ, p.279-282 (in Japanese).

## 六、透地雷達

### 6.1 應用範圍

透地雷達之應用甚廣，根據其施測後所獲得之現地反射訊號影像可應用於地下維生管線調查、地下掩埋物調查、柏油路面下方或隧道襯砌內孔洞調查、混凝土內鋼筋調查、地層結構比對、地下污染物調查等以及地下水位面調查等。

## 6.2 原理

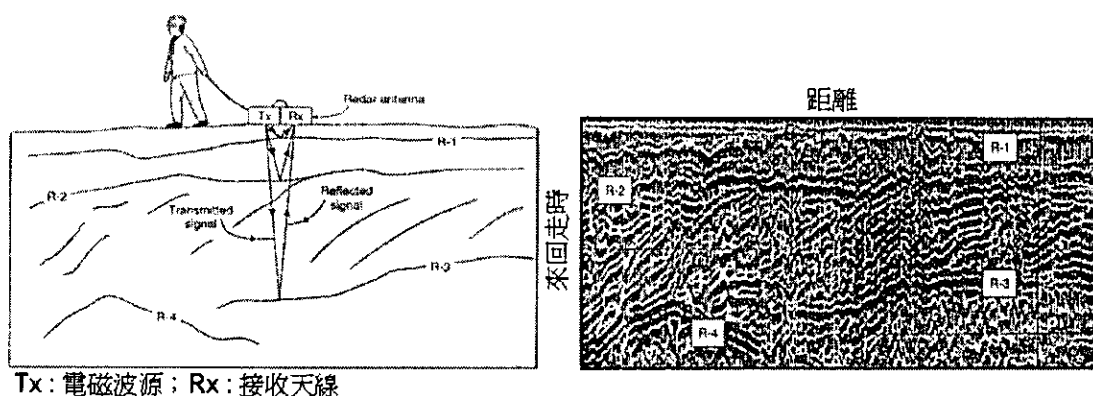


圖 6.1 透地雷達施測原理示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

透地雷達系統主要由一產生電磁脈衝之電磁波源以及可接收電磁波之接收天線組成。如圖 6.1 所示，當由含有數百伏特線圈組成之電磁波源產生一脈衝波（頻率在 1MHz-10GHz）射入地表下後，電磁波以地表下材料之電磁波波速向下傳遞，一旦遭遇有電磁波波速改變之材料界面時(如層面、孔洞位置或地下結構物)，其將有反射之現象發生，此一反射之波將返回地面而被位於地表之接收天線接收。透過在一直線上不斷移動電磁波源與接收天線，可獲得測線地表下高解析度之二維反射面影像，藉由對此一高解析二維反射面影像之訊號分析後，可獲得地表下之構造分佈情形。

## 6.3 施測方法

### 6.3.1 儀器說明

透地雷達之儀器主要包含有電磁波源、接收天線、訊號擷取器以及示波系統，茲分別說明如次：

1.電磁波源，用以製造高頻(80-1500MHz)之電磁脈衝波。

2.接收天線，用以接收傳回地表之電磁波訊號。其根據不同探測需求會有不同之接收頻率，而此天線大小與其頻率有關，一般而言，頻率越高之天線長度越短，頻率越低之天線長度越長，例如用於混凝土探測用之 1.5GHz 天線約 100 公釐長，而可用於地層探測用之 25MHz 天線約要 3 公尺長。

3.訊號擷取器，用以紀錄接收天線所接收到的反射訊號。因為反回地表之電磁波訊號所須之傳遞時間僅約在幾十至幾千奈秒 (nanoseconds,  $10^{-9}$  seconds)，為能有較佳之結果，所用之訊號擷取器應要有能力對此極短時間之訊號進行擷取之能力，且其應有基本之訊號處理能力，如訊號疊加。

4.示波系統，用以現場即時確認所收訊號之品質，其應基本具有顯示波形之螢幕。

### 6.3.2 規劃與定線

**規劃：**對於透地雷達之使用，在規劃時應該要先行確認探測之目的為何，根據不同的探測目的訂定出探測深度以及解析度。此兩者皆與所使用之接受天線頻率有關，然而其間有互斥之矛盾情形：高解析度需要高頻之天線，然而高頻之電磁波所能探測之深度，反之，亦然。

因此，在規劃之初應要將主要目標訂出，以便做為定線施測時之準則。

**定線：**當施測目標確定後，便可進行定線作業。定線作業包含測線位置、測線間距、天線頻率選定以及施測模式選定。

測線之位置設置以及測線間距並無一定準則，應視欲探測物之形狀、大小以及土層特性而定。一般測線之安排以能獲得代表性斷面為目標，對於線性之探測物(如管線等)，測線安排應儘量與其長軸垂直；而在測線間距上，以可最有效率(在最短施測時間內完成，而其結果可達到欲設目標)施測之前提下訂定，對大部份之土木工程應用上來說，1至2公尺為普遍使用之間距，然而若探測目標較小或欲獲得較密集且高解析之網格狀施測結果(做為三維影像分析使用)，其間距可再視需求進行調整縮小。

**天線頻率選定：**在透地雷達之施測上，為能達到預設之解析度與探測深度之目標，其需考慮三項主要因素：1.天線頻率；2.土層之電學特性(導電率及介電常數)；3.探測物與周邊材料之電學性質差異度。此中，第2與第3點皆是現場實際情形無法由我們控制，如此一來，天線頻率的選定無疑是影響成果最重要之一環。



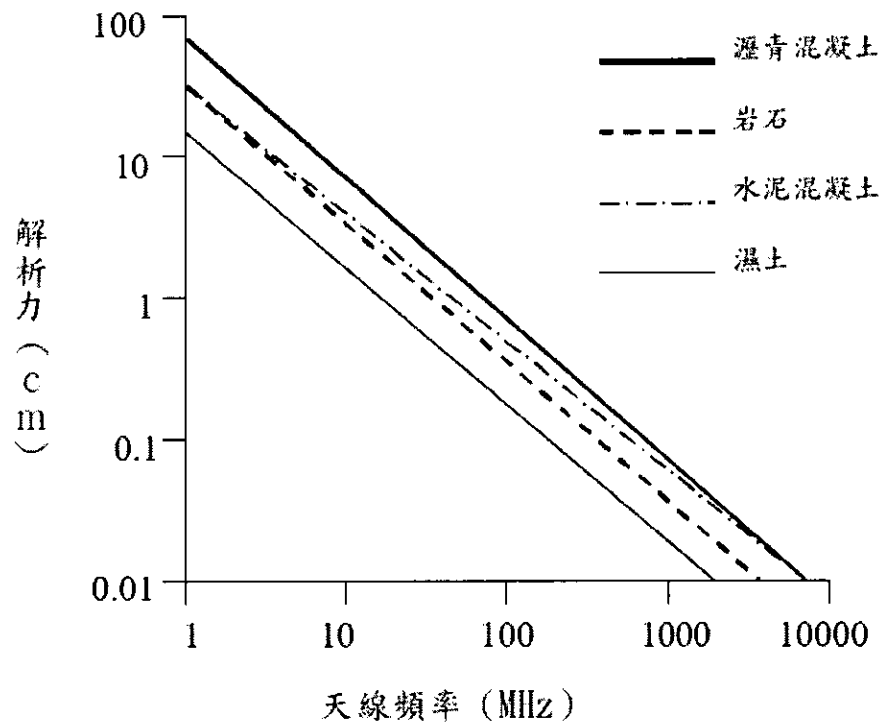


圖 6.2 天線頻率與解析度關係圖(修改自 EKKO UPDAT, 1996)

目前坊間商業化之透地雷達天線可選用之頻率在 25MHz 至 1.5GHz 之間，一般而言，該頻率與解析度及探測深度有一對一的關係，然而，在未知地層電學性質之前，無法獲得此一絕對關係。經由對不同材料之測試，將各頻率天線於不同材料下之解析度圖繪如圖 6.2 所示，可做為選用時之參考指標。由圖中可見，頻率越高時，其具有越佳之解析能力。而在探測深度上，其受材料含水量以及材料本身電學性質影響過大，甚為複雜，僅能以一般性言之。大致而言，天線頻率在 1.5GHz 至 400MHz 之間時，其探測深度約在 0.3 公尺至 2 公尺之間，而再低頻之天線，雖然在良好之情況下，其探測深度可超過 10 公尺，甚至對 25-50MHz 之天線於乾燥之結晶岩中可達 100 公尺以上之探測深度，但保守起見，通常以 10 公尺之探測深度為透地雷達之極限。另需注意，在預期有含水、含有金屬礦物或是含有黏土成份之土層，其探測深度將受影響而有所降低。

在此要特為一提，若欲將透地雷達應用於地下水位之探測上，除上述所提之各項考慮因素外，在選定天線頻率時尚有一需考量之處。如圖 6.3 所示，於飽和土壤與乾燥土壤間會有一含有毛細孔水之土層，此非飽和區土層之存在使得土層之介電度有漸變之情形發生，而造成其不存在有足夠的介電度差異性，無法形成一良好之反射面。為避免此一情形之發生，需限制選用之天線頻率波長大於此含毛細孔水土層之厚度  $d$ ，藉由降低天線頻率使其解析能力降低，而得以無視此一含毛細孔水土層之存在。

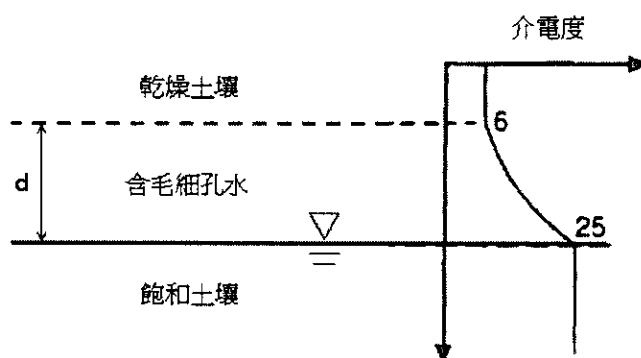


圖 6.3 毛細孔水區厚度對介電度之影響(改繪自 Reynolds, 1997)

### 6.3.3 施測模式

根據不同的電磁波源與接收天線移動方式，透地雷達之施測方式可分為水平剖面法(Radar reflection profiling)、同中點施測(common midpoint sounding)以及斷層掃描法(Radar tomography)，茲分別描述如下：

**水平剖面法：**此法為透地雷達最普遍使用之施測模式，如圖 6.1 所示，其電磁波源與接收天線之距離保持固定，在施測過程中以此固定間距沿著測線移動即可，為使施測更為便利，可將此透地雷達系統

加裝輪子或便於移動之裝置上，以此法施測可直接獲得地表下結構之影像。

**同中點施測法：**此法之施測如圖 6.4 所示，在施測之過程中，測點之移動是以電磁波源與接收天線之中點移動為準，在同一個測點時，需要改變電磁波源與接收天線之間距。此法在施測上較為緩慢，然而對於在無法掌握地下土層電磁波速(用以將來回走時轉換為深度用)之場所，採用此法施測，可獲得土層之電磁波速。由同中點施測所得之某一測點結果以電磁波源與接收天線之間距為橫軸可表示如圖 6.5a)所示，在波形中可見有多條線型產生，最先出現的是為空氣波之直線線形，其次為直達波(direct wave)之直線線型再次為反射波(reflect wave)之拋物線線型，在此中之直達波線型之切線倒數即為第一層之電磁波波速  $V_1$ 。而欲獲得第二層之土層波速，可將垂直及水平軸予以平方(如圖 6.5b 所示)，即可使反射波呈現直線型，該直線之斜率開根號即為第二層之電磁波波速  $V_2$ 。

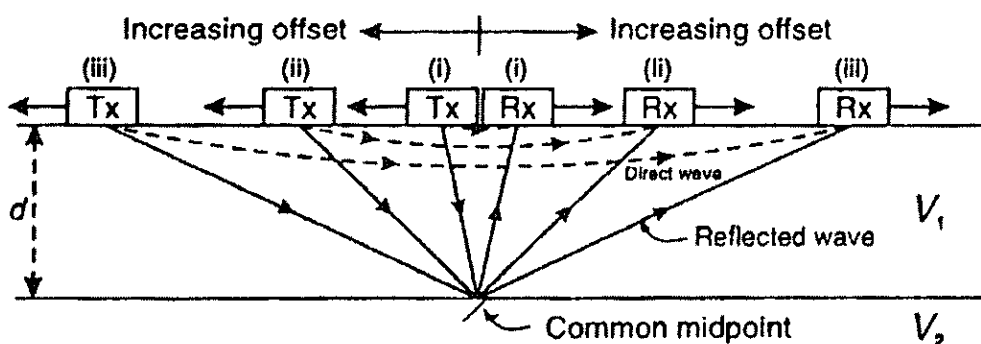


圖 6.4 同中點施測法示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

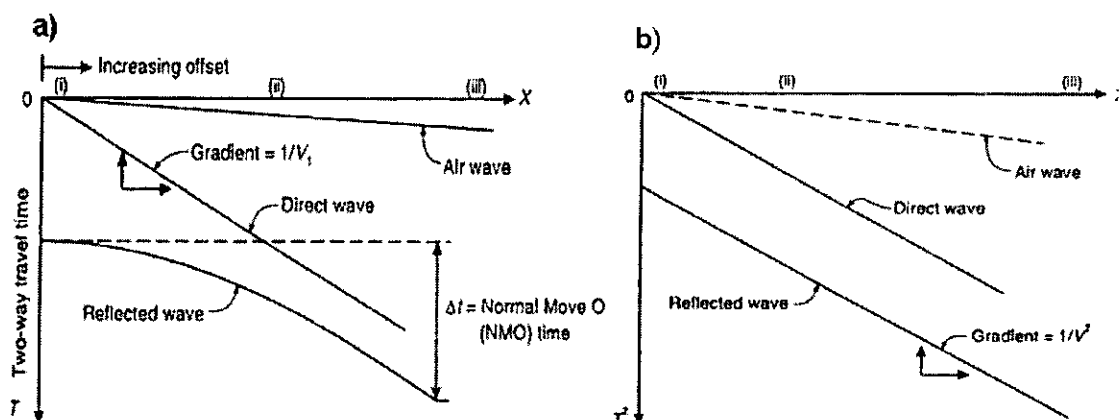


圖 6.5 同中點施測法地層電磁波速反算示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

**斷層掃描法：**此施測法最為耗時且無法直接獲得施測之結果，並且為有足夠良好之結果，通常需伴有鑽孔等增加施測表面之環境，其施測如圖 6.6 所示，於施測時，固定電磁波源於某位置，移動接收天線於欲探測之區域，等完成後再移動電磁波源於第二個位置，移動接收天線於已訂出之測線上，以此類推，直至最後一個電磁波源位置。此施作法之分析同於折射震測中之斷層掃描解析法，需挑選初達波之走時曲線，而後以射線追蹤之理論進行反算以獲得電磁波速之二維剖面，與前述兩法所得之結果不同。因此法於現時之應用上較不常使用，因此關於此法之介紹可參考 2.4 節內容或逕行參考 Pratt and Worthington(1988)及 Vasco et al.(1997)，後續之說明以上述另二法為主，不再於此章中另行介紹。

一般為確保有較佳之資料品質，在施測過程中皆會進行有訊號疊加之動作，其是在同一測點位置連續收錄多筆後加以平均，可降低雜訊所造成之不良影響，其疊加之次數並無一定，可視現場雜訊而有所變更，一般而言，可採用 128 次之疊加次數。

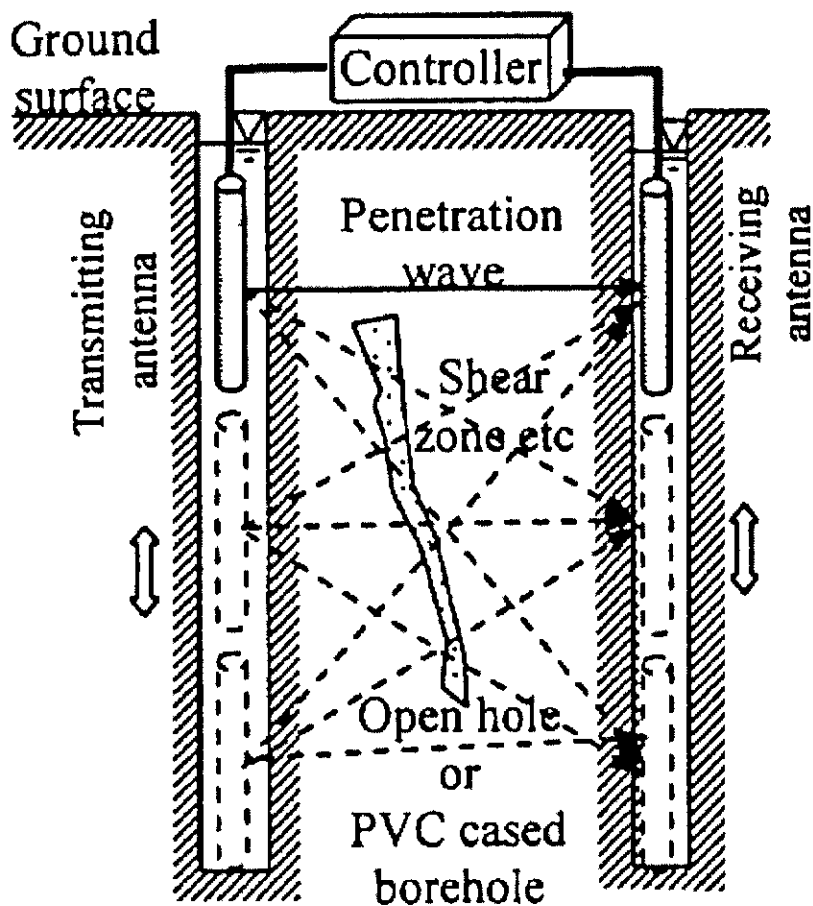


圖 6.6 斷層掃描施測法示意圖(摘自 SEGJ, 2004)

#### 6.4 分析方法

現場施測完後所收錄之資料應首先以電磁波源與接收天線之中點位置為橫軸，而以所收到反射訊號之來回走時為垂直軸進行資料之整理與展示，如圖 6.7 所示者為整理後以灰階展示。於圖中可注意到其垂直軸包含有來回走時時間以及深度同時存在之情形。在所收錄之資料中其是為來回走時，因為此時間是為來回的時距，因此若是在已知土層之電磁波速  $V$  的情形下，深度  $d$  可依下式計算：

$$d = \frac{V * t}{2} \dots\dots\dots (6.1)$$

實務上，電磁波之波速是為未知，除採用同中點施測法假設地層為層

狀結構可獲得試驗數據用以計算深度外，一般是由所收集之資料得知該處土層之可能組成，而後以之電磁波波速進行推估。待此資料之整理與展示完成後，便可以開始對資料進行訊號處理以及結果解析之動作。

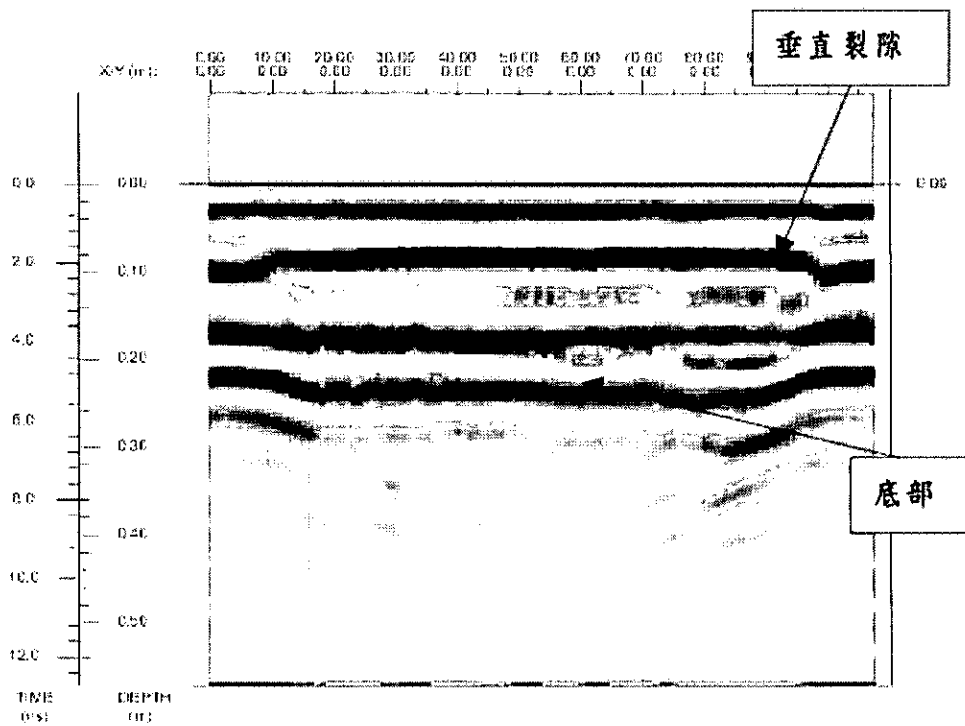


圖 6.7 透地雷達二維反射訊號影像(混凝土塊體，摘自鄧景龍，1990)

表 6.1 常見土層材料之電磁波波速(摘自 Davis and Annan, 1989; Ulriksen,1982)

| 土層材料 | 電磁波波速(m/ns) | 土層材料 | 電磁波波速(m/ns) |
|------|-------------|------|-------------|
| 乾沙   | 0.1-0.12    | 濕玄武岩 | 0.106       |
| 飽和沙  | 0.067-0.055 | 花崗岩  | 0.15-0.122  |
| 粉砂   | 0.134-0.055 | 淡水   | 0.033       |
| 頁岩   | 0.134-0.077 | 混凝土  | 0.09-0.12   |
| 飽和黏土 | 0.134-0.047 | 空氣   | 0.3         |
| 溼土   | 0.055       | 乾石灰岩 | 0.113       |
| 濕砂岩  | 0.122       | 溼石灰岩 | 0.15-0.106  |

#### 6.4.1 訊號處理

所獲得之反射訊號會因雜訊干擾或是波傳遞過程之自然反應而造成解析上之困難，因此在解析前會需要對原始波形進行訊號處理。訊號處理可分為一般性訊號處理以及特殊性訊號處理，一般性訊號處理是對於每一種情況下都需採用之處理方式，而特殊性

訊號處理則需視所得之訊號結果而定。

一般性訊號處理：一般性訊號處理包含初達波拉平(drift remove, 為去除因施測過程中天線與地表垂直向上相對位置改變或是儀器本身紀錄之問題所造成的初達波飄移情形)、自動振幅衰減補償(automatic gain control, 避免遺漏因振幅衰減而產生之微弱訊號)、帶通濾波(band pass filter, 用以濾除高頻及低頻之雜訊)。

特殊性訊號處理：特殊性訊號處理包含有解迴旋(deconvolution filtering)、f-k 濾波(frequency-wavenumber domain filtering)、移位(migration)等。如圖 6.7 所示，當訊號已到達試體底部後，其陸續還會再有反射波出現，此些波是由於波不斷在層面與層面間來回反射而造成，此種迴波(echo)之情形在地層中亦會發生，此將造成解析上之錯誤，因此透過解迴旋或是 f-k 濾波可將其所造成之問題略為降低；而除此之外，如圖 6.8 所示，當透地雷達所發送之電磁波遇到地下掩埋物(如管線)時，其原始訊號所展現出之形狀與介面形狀不同而呈一拋物線狀，對於此一問題，可透過進行移位之訊號處理而使得其訊號線型與實際介面形狀較為接近。

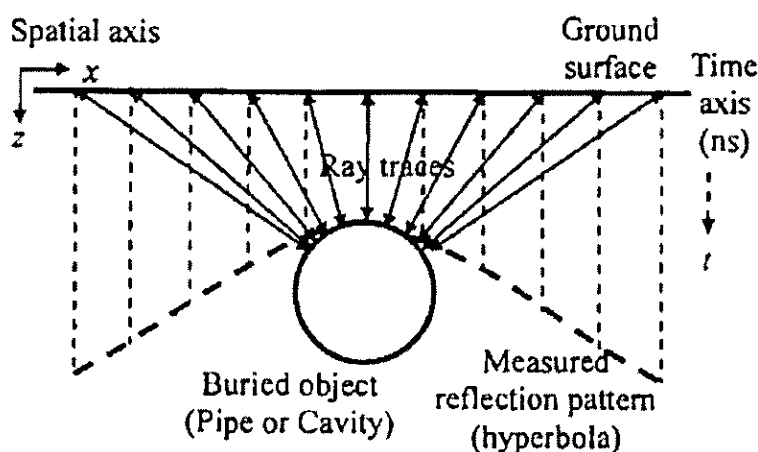


圖 6.8 透地雷達遇有地下掩埋物時之訊號線型示意圖(摘自 SEGJ,



## 6.4.2 結果解析

經過訊號處理過之波形，將其以如圖 6.7 之方式展示為二維影像剖面，對此一影像剖面之解析主要是要對其影像中產生之線型進行辨釋。此一辨釋之解析作業需謹慎小心進行，並對於辨釋出之結果需要與所收集到之資料進行比對確認，必要時應在目標地區進行開挖或鑽探作業以便進行確認並進行修正。

於此中，欲對此二維影像做出良好之判斷應透過數值模擬方法，多了解並熟悉在不同配置下所可能產生之線形特徵，此外，其更需要長時間具回饋驗證之經驗累積。而在此之外，得於電腦輔助軟體之助，透過高密度的網格狀施測，藉由軟體將網格狀空間相對位置建立起，以顏色區分不同之反射強度，而可得三維之影像成果，如圖 6.9 所示。在三維影像中，透過以顏色為群組之觀察，探測標的物以體積之型態出現，其所展示出之整體形狀以及大小將更加提升其可辨識度，進而降低其解析辨識之困難度以及可能的錯誤判斷。

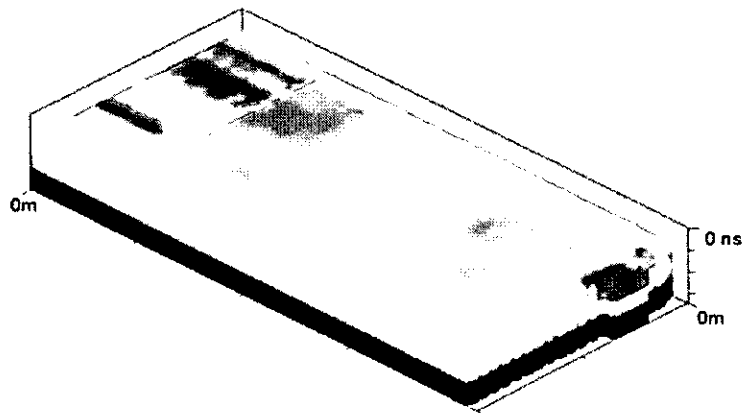


圖 6.9 透地雷達三維影像(大觀電廠溢洪道)

## 6.5 資料分析判釋需知

**地表位置確認：**對於地表面反射訊號之判斷，最簡易之法是於現場資料收集時，透過將透地雷達天線上下移動(天線頻率 $\geq 500\text{MHz}$ 尤佳)可於訊號顯示出一可辨識之反射訊號(強反射且將隨天線之移動有所移動)，該反射訊號即為地表面位置。

**層面回波辨識：**對於層面回波之認定上，由於所收集之訊號中雜含有在反射面上所產生之一次反射、在層與層間的二次反射、多次反射以及雜訊等，此些反射訊號皆會影響對於層面數量以及位置之判斷，此外，波場與波場間之干涉情形亦容易造成側向層面存在的誤判。對此，透過應用解迴旋(deconvolution)之訊號分析方法，可使波場中向下傳遞之波型較明顯而有助辨識主要反射面，利用量化之分析方法搭配辨識所得之主要反射面可有助於降低對於層面回波的過度認定，然而，此問題並不容易完全避免，應搭配較完整之地層資訊綜合解讀，降低過度認定之發生。

**結果驗證：**對於所有的非破壞性檢測法而言，在一組資料下所獲得的反算結果並不一定具有惟一性，所得到的結果必需與現場所得之鑽探資料以及地質調查結果進行比對，並透過具有專業訓練以及經驗的判釋人員進行解讀，以免對於結果有過度解讀的錯誤產生。倘若判釋的結果是在探測位製無任何可供參考的資料下所進行的，應在報告中提及此點。

## 6.6 報告書內容

完成施測與分析判釋後，報告書的撰寫中至少須包含下列幾項內

容，以便提供足夠資訊予管理者或其它專業人員對其報告結果進行合理判斷。其分別為：1.施測的目的與範圍；2.測線的佈設位置；3.現場環境說明；4.施測之方法；5.所使用之透地雷達儀器設備、天線頻率以及取樣時間；6.訊號之處理方法；7.施測與結果分析所用之程式軟體；8.分析結果判釋以及與現有資料之綜合評估，在此所做出之判釋結果應搭配施測結果一同呈現；9.註明各個工作環節中的負責人員。

## 6.7 可能的誤差來源

在透地雷達中，其可能造成結果誤差的原因可概分為人為因素、儀器因素、幾何限制以及施測法本身先天因素四種。

**人為因素**，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善，在此可能造成誤差之原因主要是在於特殊性訊號處理之過程中，分析人員對於各個訊號處理方法之掌握度不足而可能造成有效資料之遺失。此外，對於現場之資料掌握不足，造成在選用地層電磁波波速時有所錯估，而造成結果之誤差。

**儀器因素**，是指對於振動的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但應在施作前先行確認儀器正常運作無受損壞之虞。

**幾何限制**，是指因為定線位置、測線間距、地形變化以及雜訊所造成的影響。此一因素與現場環境以及地層結構有關。雜訊的影響可透過施作的過程改善，但其餘部份需在定線時進行恰當的考量以使其

影響降至最小。

**先天因素**，是指透地雷達本身理論上便無法達到的探測能力。例如對於薄層土層之探測，或是對於電學性質差異不大的兩種地層，又或是具有傾角之層面的探測，此些是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

為使施測結果良好，對於此些誤差來源應要多加注意，尤其在人為因素以及幾何限制的部份，在用心的注意下其可獲得極為有效的控制。

## 6.8 應用限制

透地雷達在高導電度的環境下，電磁波之能量衰減情形嚴重，將會大大降低其有效探測深度，一般而言，若是以探測地表下構造(如孔洞、層面以及人造結構物等)為施測目標，則在水下、含有金屬礦以及黏土質高之地層將難有明顯之訊號返回地表，尤其是在溼潤之蒙脫土或高嶺土處，其探測深度將僅達 1-2 倍的接收天線頻率波長。因此，在施測上，若已了解該處之土壤特性如上所述而將無法達到施測目的時，應考慮採用它種檢測方法。

此外，因透地雷達是透過分析返回地表之反射訊號以達到施測目的，因此對於無法產生良好反射面之處將無法探測得到，此種情形包括有：兩者材料間之電學性質差異不大、土層厚度過薄或是兩者材料間存在有足夠之漸變段，此些情形都將影響透地雷達之探測能力。

## 6.9 參考文獻

1. Pratt, R.G., and Worthington, M.H., 1988, The application of diffraction

- tomography to cross-hole seismic data: *Geophysics*, 53, 1284-1294.
2. Reynolds, J.M., 1997, *An introduction to applied and environmental geophysics*: John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England
  3. Vasco, D.W., J. E. Peterson, and K. H. Lee, 1997, *Ground-penetrating radar velocity tomography in heterogeneous anisotropic media*:

## 附錄七 MATLAB 傅立葉轉換分析程式及使用說明

## 附錄七 MATLAB 傅立葉轉換分析程式及使用說明

若水庫管理單位有 MATLAB 軟體，則可撰寫 FFT 分析程式如下(18 列)，使用時僅須載入欲進行傅立葉轉換之資料路徑及檔名(如第 2 列所示)，若每一地震儀資料檔案內儲存時間及加速度兩行資料，則令檔名第 1 行為時間 T(如第 3 列所示)，令檔名第 2 行為加速度變數 x(如第 4 列所示)，最後若欲儲存分析完成之頻譜資料(一行頻率，一行傅立葉轉換後之頻譜振幅)，則可自行命名欲儲存之檔案名稱(如第 18 列所示，本案例取名為 fft2026.dat)。使用時僅須變更底部有畫線者即可，其餘內容毋須變動。本程式執行完畢時將會展示頻譜圖。

```
clear;

load d:\dam\hist2026.dat;           %載入地震儀之加速度資料(檔名為 hist2026.dat)

T=hist2026(:,1);                   %若載入資料之第 1 行為時間
x=hist2026(:,2);                   %若載入資料之第 2 行為加速度

Ts=T(2)-T(1);

x=x-mean(x);

N=length(x);

df=1/(N*Ts);

f=0:df:(1/2/Ts-df);

fftx=abs(fft(x))*Ts;

X_f=[f fftx(1:N/2)];

plot(f,fftx(1:N/2))

grid

axis([0,10,0,400])

title('傅立葉轉換頻譜')

xlabel('頻率 (Hz)')

ylabel('頻譜振幅 (gal/Hz)')

save fft2026.dat X_f/ascii         %儲存分析完成之頻譜資料(本案例之檔名為 fft2026.dat)
```

表 A-1 MATLAB 程式語法說明

| MATLAB 語法                        | 說明   |
|----------------------------------|--|
| <b>clear;</b>                    | 利用 <b>clear</b> 指令來清除或刪除工作空間內的某一特定或所有變數，以避免記憶體的空置與浪費   |
| <b>load d:\dam\hist2026.dat;</b> | 利用 <b>load</b> 指令來載入欲進行 FFT 之振動訊號(以振動訊號檔名 hist2026.dat 儲存在 d:\dam 子目錄為例，且若 hist2026.dat 檔案內儲存時間與加速度兩行資料) |
| <b>T=hist2026(:,1);</b>          | 將 hist2026.dat 第一行時間資料指定為變數—T  |
| <b>x=hist2026(:,2);</b>          | 將 hist2026.dat 第二行加速度資料指定為變數—x   |
| <b>Ts=T(2)-T(1);</b>             | 將時間 T 之第 2 筆資料減去第 1 筆資料，可得取樣周期，並指定為變數 Ts   |
| <b>x=x-mean(x);</b>              | 利用 mean 指令可計算加速度 x 之平均值，再將原始加速度 x 扣除整體之平均值可將加速度 x 之偏移量歸零   |
| <b>N=length(x);</b>              | 利用 length 指令可得知加速度訊號之筆數，並將筆數指定為變數 N  |
| <b>df=1/(N*Ts);</b>              | 計算頻率解析度，並將計算結果指定為變數 df   |
| <b>f=0:df:(1/2/Ts-df);</b>       | 建立一組頻率向量，由 0 Hz 開始，增量為 df，一直增加到截止頻率-df 為止  |
| <b>fftx=abs(fft(x))*Ts;</b>      | 利用 fft 指令可計算加速度 x 之傅氏級數，再利用 abs 指令可計算傅氏級數之振幅大小，最後再乘上取樣周期 Ts，即可求得傅氏轉換結果，並將其指定為變數 fftx                     |
| <b>X_f=[f' fftx(1:N/2)];</b>     | 將頻率向量與傅氏轉換結果兩行資料指定為變數 X_f  |
| <b>plot(f,fftx(1:N/2))</b>       | 利用 plot 指令可繪製傅氏頻譜圖，頻率 vs 振幅頻譜  |



|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>Grid</b>                        | 利用 grid 指令可繪製圖中之格線                                 |
| <b>axis([0,10,0,400])</b>          | 利用 axis 指令可設定圖示之座標範圍，本例設定為: X 軸頻率 0~10，Y 軸振幅 0~400 |
| <b>title('傅立葉轉換頻譜')</b>            | 利用 title 指令可標示圖示標題                                 |
| <b>xlabel('頻率 (Hz)')</b>           | 利用 xlabel 可標示 X 軸之名稱及單位                            |
| <b>ylabel('頻譜振幅 (gal/Hz)')</b>     | 利用 ylabel 可標示 Y 軸之名稱及單位                            |
| <b>save fft2026.dat X_f /ascii</b> | 利用 save 指令將變數 X_f 儲存為檔名 fft2026.dat，該檔案可供後續分析之用。   |

# 附錄八 MATLAB 系統識別分析程式及使用說明(單一輸入- 單一輸出)

## 附錄八 MATLAB 系統識別分析程式及使用說明(單一輸入-單一輸出)

若水庫管理單位有 MATLAB 軟體，則可撰寫單一輸入-單一輸出之系統識別分析程式如下，使用時僅須載入欲進行識別之壩底與壩體(頂)加速度資料之路徑及檔名(如第 2 列及第 3 列所示)，並設定取樣周期(本案例為  $dt=0.01$  秒，如第 4 列所示)。另，可設定欲分析之資料筆數範圍，本案例分析資料範圍為第 1 筆至第 5000 筆(如第 6 列及第 7 列)。此外，須設定系統識別之階數，本案例之階數為 100(如第 8 列所示)。若每一地震儀資料檔案內儲存時間及加速度兩行資料，則令壩底資料檔名之第 2 行為變數  $xx$ (如第 9 列所示)，壩體(頂)資料檔名之第 2 行為變數  $yy$ (如第 10 列所示)，如此即可執行系統識別分析程式，即使用時僅須變更底部有畫線者即可，其餘內容毋須變動。執行完成後將展現頻率與阻尼比資料、傳遞函數圖及加速度歷時圖(預測值與實測值之比較)。

```
clear;
load d:\dam\low\L0132_2.asc; %載入壩底地震儀之加速度資料(檔名為
                             L0132_2.asc)
load d:\dam\up\U0132_2.asc; %載入壩頂地震儀之加速度資料(檔名為
                             U0132_2.asc)
dt=1/100; %設定取樣周期(本案例為 dt=0.01 秒)
dd=0;
N1=1; %欲分析之起始資料(第 1 筆)
N2=5000; %欲分析之終點資料(第 5000 筆)
order=100; %階數 (本案例取 100 階)
xx=L0132_2(:,2); %令壩底加速度資料為變數 xx(若載入檔案之
                  第 2 行為加速度資料)
yy=U0132_2(:,2); %令壩體加速度資料為變數 yy(若載入檔案之
                  第 2 行為加速度資料)
x=xx(N1:N2)-mean(xx(N1:N2));
y=yy(N1:N2)-mean(yy(N1:N2));
```

```

N=length(x)
tt=[dt:dt:N*dt]';
pp=10^12*eye(2*order+1);
theta(:,order+dd)=zeros(2*order+1,1);
for k=(order+1+dd):N
ld(k)=1;
phi=[-fliplr(y(k-order:k-1)) fliplr(x(k-order-dd:k-dd))]'';
ydot(k)=phi'*theta(:,k-1);
er(k)=y(k)-ydot(k);
ken=ld(k)+phi'*pp*phi;
theta(:,k)=theta(:,k-1)+[pp*phi*er(k)]/ken;
pn=(pp-pp*phi*phi*pp/ken)/ld(k);
pp=pn;
den=[1 theta(1:order,k)'];
num1=[theta(order+1:2*order+1,k)'];
[p q r]=ddamp(den,dt);
k;
end;
den=[1 theta(1:order,N)'];
num=theta(order+1:2*order+1,N)';
[p q r]=ddamp(den,dt);
fre=[q/2/pi r] %會 show 出頻率與阻尼比資料(兩行)
[mag1,phase1,w1]=dbode(num,den,dt);
trf=[w1/2/pi mag1];
coeff=[den;num];
subplot(211),plot(w1/2/pi,mag1) %繪製 Transfer Function 頻譜圖
title('Transfer Function')
xlabel('Freq.(Hz)')
ylabel('Magnitude')
grid
%axis([0,20,0,200])
yp1=filter(num,den,x);
pred1=[tt yp1];

```

```

subplot(212),plot(tt,y)           %繪製原壩體加速度歷時圖
title('Time history(Predicted)')
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Acce.(g)')
hold on
subplot(212),plot(tt,yp1,'r')    %繪製預測之壩體加速度歷時圖(若識別正
                                  確, 則 y 與 yp1 兩歷時資料接近重合)
save pred0132.dat_pred1 /ascii  %儲存預測所得之加速度歷時資料(本案例
                                  之檔名為 pred0132.dat)

```

## 附錄九 後續研究說明

## 附錄九 後續研究說明

### 庫區邊坡安全即時監測與安全評估技術研發

#### 一、緣起

庫區內邊坡是否有劣化狀況以及在現有水庫運作限制條件下進行有效而快速評估方法，缺乏有效之方法。庫區邊坡安裝有許多安全監測系統，包括有傾斜管、水位計與傾斜儀等。這些監測儀器幾乎全部使用手工，需要在儀器現場紀錄讀數。此一量測方式不但費時，在雨季時，現場紀錄儀器讀數可能無法進行或非常危險，而這些情況下也可能是最需要監測儀器讀數的時候。近年來雖有可做自動化監測之電子式監測儀器之研發，但電子式自動化監測系統具有價格昂貴、易受電磁波干擾、雷擊破壞、且儀器設備若長期處於潮濕環境容易短路故障等缺點。本計畫之目的是整合光纖感測與二維地電阻影像探測，以石門水庫上游之義興電廠為標的，進行現場安裝測試以評估使用這些技術為庫區邊坡做即時監測與安全評估之可行性。

#### 二、工作項目與內容

計畫中將規劃安裝前期研究計畫所研發之光纖感測器來量測地層移動與水壓之分佈。水壓量測使用全灌漿式安裝，配合光纖水壓計在安裝效率與品質上應該遠優於傳統分層與電子水壓計的方法，且可以在單一鑽孔內安裝多點水壓計觀測水壓剖面，增進水壓監測之效能。二維地電阻影像探測技術可以非侵入的方法有效偵測地下水位分佈，大幅提昇坡地內部檢測之效能。找出可能有問題並導致發生邊坡

破壞部位和原因，在情況沒有發展到嚴重程度以前，盡快予以加固或做出適當的應變措施。本研究子題將整合這些新監測方法，測試即時邊坡監測與安全評估技術。其之分年工作項目如下：

第一年：庫區壩體邊坡穩定調查與整理分析，初期監測位置選擇與監測儀器安裝，結果與效能分析。

第二年：自動化即時邊坡監測系統架設、管線安裝測試與成果評估。

第三年：長時間即時安全監測系統數據收集與壩體邊坡安全評估系統整合。

### 三、預期效益

1. 提供庫區邊坡即時安全監測系統。
2. 提高庫區邊坡安全度，降低發生破壞的機會。
3. 確保庫區邊坡上水工結構物的安全。
4. 增進庫區邊坡安全檢測效率，降低檢測費用。



附錄十 光纖光柵監測系統單價分析與新建水庫安裝分析(湖  
山水庫)

## 附錄十 光纖光柵監測系統單價分析與新建水庫安裝分析

### (湖山水庫)

光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 地層位移與水壓監測技術已發展至實用的階段，可以在工程中應用以充分展現其優勢。但在應用前首先應該了解 FBG 感測技術與傳統電子式監測系統在功能與現場佈設上基本之差異，以及此差異在監測系統規劃上可能產生之影響。本章節說明 FBG 感測技術與傳統電子式監測系統之差異，以及介紹 FBG 感測技術應用之成本分析。

#### 一、光纖光柵與傳統電子式監測系統之差異

**訊號傳輸媒介之差異：**傳統電子式監測系統使用金屬導線傳輸訊號。為降低雜訊及加強其耐用性，現場監測所用金屬導線直徑通常在 10mm 左右。電子式感測器大多為非分佈式設計，每一感測器使用一條金屬導線。當大量佈設電子感測器時常導致成捆之金屬導線，體積龐大。FBG 使用矽製作之單模光纖傳遞訊號，單模光纖直徑約為 250 $\mu$ m，FBG 為部分分佈式感測器，同一條光纖可以安裝 4-6 個感測器。在現場做大量佈設時，訊號線之數量與體積將遠低於傳統金屬導線。就因為體積小非常脆弱，光纖訊號線之佈設首重保護，將許多光纖集合在 10-25mm 直徑光纜內。常使用之光纜可內含 6 至 216 條單模光纖，光纜之外圍有塑膠皮與金屬薄管來保護其內之光纖如圖 1 所示。所以一條光纜之訊號傳輸功能可取代數百至千條以上金屬電纜。

光纖材料，矽不導電不易氧化，不會受雷擊破壞，耐用性遠高於金屬線，這對野外安裝感測器而言是一重要優點。光訊號沒有受潮短路的問題，也不受電磁波干擾，穩定度極高。FBG 訊號可以傳遞 10 公里以上而無須做訊號放大或處理，而電子訊號通常只能傳遞數百公尺。

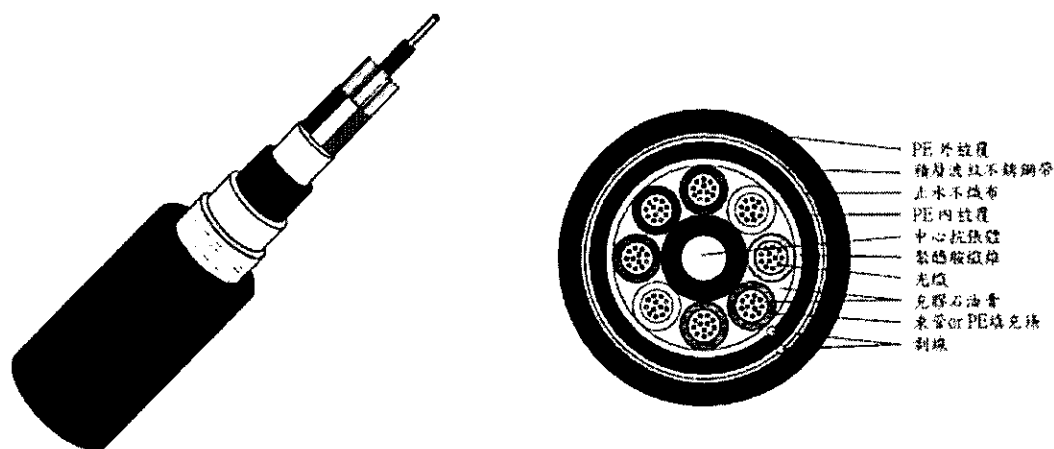


圖 1 光纜結構示意圖（取自 [www.baycom.com.tw](http://www.baycom.com.tw)）

表 1 綜合整理 FBG 感測器相對於電子式感測器之優缺點，並以地層位移與水壓監測為例。

表 1 FBG 與電子式感測器優缺點比較

| 項目      | FBG 感測器                       | 電子式感測器                |
|---------|-------------------------------|-----------------------|
| 雷擊      | 不受影響                          | 容易受雷擊損壞               |
| 電磁波干擾   | 無影響                           | 必須做類比/數位轉換或電/光轉換才能避免  |
| 耐用性     | 非金屬材料（矽）製成，耐用性高，無受潮短路之顧慮      | 金屬材料製成，在潮濕環境下容易氧化，或短路 |
| 自動化監測   | 比較適合長期自動化監測使用                 | 可做長期自動化或手動監測          |
| 供應廠商    | 比較少，但在成長中                     | 比較普遍                  |
| 成本      | 數量越大，總成本越低                    | 數量越大，總成本越高            |
| 安裝後維修保養 | 現地無電子式設備，不易損毀，維修與保養容易，維修保養費低。 | 維修保養費高。               |

**監測系統規劃與安裝之差異：**

基於傳輸媒介之差異 FBG 感測系統在規劃時必須做特殊之考量才能充分發揮其優勢。光在光纖中以全反射之方式傳遞，當光纖彎曲過大時（彎曲直徑小於 30mm）即無法滿足此反射之條件，而有光訊號強度大量降低的現象。光纖非常耐用，但安裝時由於體積細小非常容易被破壞，因此在感測器設計以及系統安裝過程中必須注意避免光纖/光纜有小半徑之彎曲，同時安裝 FBG 感測時有必要之保護方法。光纖/光纜之接續其複雜度遠遠高於金屬電纜。光纖使用熔接器連接，為一耗時而精密之作業，不適合在野外進行。為避免熔接的缺點，光纖接續可以使用接頭，但此類接頭必須在工廠製作。每一次光纖做接續，無論使用熔接或接頭，都會有光強度之額外損耗，必須儘量避免。此外，為充分發揮 FBG 感測器部分分佈式之優點以及多心

光纜之特性，感測器之配置應該儘量成線型配置而非面之分佈。

FBG 感測儀器本身安裝與傳統電子式感測器並無明顯差異。FBG 地層移動感測器與傳統傾斜管匹配，傾斜管可以鑽孔或在土石壩填築過程中逐段安裝。傾斜管安裝完成後再將 FBG 地層移動感測器插入即可。FBG 水壓計安裝尺寸與傳統電子式水壓計類似，其安裝也與傳統電子式水壓計類似，在鑽孔完成後放入 FBG 水壓計，然後依照監測所需在鑽孔與 FBG 水壓計間放入透水材料（如礫石）與隔層（如白皂土）等。鑽孔內感測器之光纖經由孔口匯入光纜然後連接至控制室內之 FBG 解讀與資料擷取/傳輸系統。如前所述，此光纜長度可以在 10 公里以上而無須考慮訊號品質弱化。單一 FBG 解讀系統可以透過光纖切換器與 4、8、16、32 或更多條光纖連接。光纜現場佈設在光纖通領域已有十年以上經驗，相關產業已相當成熟，可以充分提供經驗豐富之現場安裝技術人員，及安裝所需零組件。

## 二、光纖光柵監測系統之成本分析

在地層內安裝 FBG 感測器，其成本約可分成以下幾大項：鑽孔、FBG 感測器單元、光纖/光纜（包括接頭）、光纖切換器、FBG 解讀與資料擷取/傳輸系統等。其中鑽孔與傳統儀器安裝所牽涉之鑽孔完全相同。其他元件之單價如表 2 所示。

表 2 光纖光柵感測系統元件單價

| 項目              | 單價<br>(新台幣元) | 說明  |
|-----------------|--------------|---|
| FBG 水壓計         | 20,000/每個    | 相當於電子/振旋式水壓計，可裝透氣管，同一光纖可安裝 4-6 個，同一鑽孔（直徑 100mm）內可裝 10 個以上 FBG 水壓計                                 |
| FBG 傾斜儀         | 22,000/每個    | 相當於電子/置入式傾斜儀(In Place Inclinator, IPI)，同一光纖可安裝 4-6 個，最小安裝間距 50cm，同一鑽孔（直徑 100mm）內可裝 30 個以上 FBG 傾斜儀 |
| 光纜              | 100-250/m    | 相當於野外安裝感測器所使用電纜，單一光纜內可最多有 216 條光纖   |
| 光纖切換器<br>(1x16) | 70,000/每個    | 相當於電子式類比式感測器所用之 multiplexer，用於各光纖間之切換   |
| FBG 解讀儀         | 400,000/每組   | 相當於電子式感測器之類比/數位轉換器 (A/D converter)，可使用一套解讀設備放至機房進行長距離多點監測。  |
| 資料擷取/傳輸系統       | 100,000/每個   | 工業電腦及相關網路通訊系統   |
| 安裝費用            | 依系統複雜度而變     | 工資、安裝所需零組件（光纖接頭、保護套等）   |

### 三、新建水庫(湖山水庫)光纖光柵感測系統安裝

為測試與展示在實際工程中之應用，建議選擇一新建中水庫進行 FBG 感測系統安裝。根據現有工程評估，在雲林斗六興建中之湖山水庫最為適合。本工程包括長度 578 公尺之湖山主壩、334 公尺湖山副壩，及 609 公尺之湖南壩，壩體最大高度 75 公尺，三壩體均為土石壩。在規劃期間所做地質調查指出，湖山主壩左壩座古崩塌地破壞型式為平面型順向坡破壞，並指出本區岩層層面位態、自然邊坡坡度及摩擦角角度(約  $20^\circ$ )皆相當接近，在長期暴雨或地震的情況下，湖山主壩左壩座仍有沿層面產生平面破壞的潛能。前期地質調查亦顯示，湖山主壩左壩座標高 190 公尺以下多處地表張裂，混凝土路面擠壓破裂、擋土牆傾倒、樹木傾斜，顯示淺層滑動現象，滑動區長寬均達 100 公尺，頂部直達標高 190 公尺高階台地附近。由於湖山主壩左壩座滑動區緊鄰壩軸，為進一步掌握滑動面深度，早期在左壩座邊坡崩塌地區及溢洪道附近坡面曾埋設多組測傾管。壩體基礎岩層透水性高，因此本工程在壩體基礎使用隔水牆來阻隔滲流而非一般之灌漿工法。

基於以上背景，此工程有邊坡穩定與水壓監測之必要性，而且其目的明確。選擇在湖山主壩左壩座，溢洪道區域以及壩體內部安裝 FBG 傾斜儀。天然邊坡內使用鑽孔方法先安裝傾斜管，然後置入光纖光柵傾斜儀。壩體內則是在填築時將傾斜管與光纜逐步埋入。待壩體填築完成後再將光纖光柵傾斜儀置入。FBG 水壓計可以陣列的方式安裝於壩體下游，以水壓分佈的方式來監測壩基滲流。表 3 展示規劃安裝之全自動化 FBG 感測系統數量與預算。

表 3 光纖光柵感測系統數量與預算

| 項目              | 數量                                    | 單價<br>(新台幣千元) | 費用<br>(新台幣千元) |
|-----------------|---------------------------------------|---------------|---------------|
| FBG 傾斜儀         | 湖山主壩左壩座 2 孔，每孔 30m，每 m 一個 FBG 傾斜儀     | 22            | 1,320         |
| FBG 傾斜儀         | 溢洪道附近坡面 1 孔，每孔 30m，每 m 一個 FBG 傾斜儀     | 22            | 660           |
| FBG 傾斜儀         | 壩體內，每個壩體上游面一組 70m 深傾斜管，每 m 一個 FBG 傾斜儀 | 22            | 4,620         |
| FBG 水壓計         | 下游壩基三孔，每孔 60m，每 5m 一個 FBG 水壓計         | 20            | 792           |
| 光纜              | 3000m                                 | 0.25          | 750           |
| PVC 保護管         | 3000m                                 | 0.1           | 300           |
| 光纖切換器<br>(1x16) | 10                                    | 70            | 700           |
| FBG 解讀儀         | 1                                     | 400           | 400           |
| 資料擷取/傳輸系統       | 1                                     | 100           | 100           |
| 安裝費用            | 軟硬體設計、現場安裝、零組件                        | 一式            | 3,500         |
| 總計              |                                       |               | 14,564        |



## 附錄十一 光纖光柵監測系統於新山水庫安裝分析

## 附錄十一 光纖光柵監測系統於新山水庫安裝分析

### 一、背景說明

新山水庫建於基隆河大武崙溪支流上游，位於基隆市安樂區外寮里附近，距基隆港約三公哩，水庫集水區標高介於 100 公尺至 215 公尺間，水系呈樹枝狀，供應基隆、汐止地區之用水。新山水庫於民國六十九年完成第一期工程，壩頂標高 EL. 75 公尺，蓄水容量 400 萬噸，民國八十七年完成第二期壩體加高填築工程，壩頂標高 EL. 90 公尺，蓄水容量增至 1000 萬噸。新山水庫之管理機關為台灣省自來水股份有限公司，民國 88 年由中華工程顧問公司辦理蓄水前安全評估，該評估報告指出，大壩於下游左半坡面有溼潤現象；民國 90 年由和新工程顧問公司辦理第二次安全評估工作，發現水庫右山脊蓄水位以上之坡面有局部地滑之情況；民國 96 年由中興工程顧問公司辦理第三次安全評估工作，報告指出大壩下游左壩座濕潤現象以及自動化監測系統有故障之虞。另外交通大學於 97 年 7 月至 10 月於右山脊量測到 15mm 的滑動，顯示該區域仍有持續局部滑動之現象。

根據中興工程顧問公司對於新山水庫第三次安全評估之報告初稿(台灣自來水公司第一區管理處，民國 96 年)統計指出，目前壩體及壩體周圍自動化監測儀器，包括電阻式、振弦式水壓計與自動化測傾儀功能均為異常，已經無法提供壩體邊坡安全監測，故有更新監測系統之需要。

## 二、新山水庫現有監測儀器狀況

新山水庫監測儀器配置主要配合第一期大壩及第二期大壩加高工程進行裝設，並於民國 89 年與 93 年進行儀器增設與改善，並將新設水壓計、測傾儀與地滑計以自動化方式記錄讀數，目前使用中相關監測儀器如表 1 所示，唯因可能儀器裝設不當或其他因素，大部分自動化儀器功能為異常，已經無法發揮應有監測之功能，故有更新之必要性。

表 1 新山水庫目前使用中之儀器(新山水庫第三次安全評估報告)

| 裝設時間                              | 儀器名稱           | 數量 | 儀器編號  | 備註 |
|-----------------------------------|----------------|----|---|----|
| 第一期工程<br>(69 年以前)                 | 測傾管            | 1  | K1  |    |
| 第二期工<br>程大壩加高<br>(84.07-84.09)    | 壩體孔隙水壓計        | 9  | B3  |    |
|                                   | 測傾管            | 2  | W2、K1   |    |
|                                   | 右山脊開口式水位井      | 3  | Q1~Q3   |    |
|                                   | 右山脊測傾管         | 1  | W3  |    |
| 壩體及左山脊<br>排水設施工程<br>(89.11-90.01) | 壩體開口式水位觀測<br>井 | 11 | L1~L3、<br>M1~M3、<br>N1~N5                                 |    |
| 壩體及右山脊<br>監測改善工程<br>(93.03-93.06) | 壩體電阻式水壓計       | 19 | Q1~Q6、<br>LL1~LL3、<br>MM1~MM3、<br>NN1~NN5、<br>NN1-1、NN5-1 |    |
|                                   | 右山脊電阻式水壓計      | 3  | OW1~OW3   |    |
|                                   | 右山脊電子式測傾儀      | 8  | IS1~IS8   |    |
|                                   | 右山脊電子式地滑計      | 2  | TM1~TM2   |    |

### 三、光纖光柵感測技術

光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 地層位移與水壓監測技術經過多年的研發與測試，已經於新山水庫已發展至實用的階段，可以在工程中應用以充分展現其優勢。但在應用前首先應該了解 FBG 感測技術與傳統電子式監測系統在功能與現場佈設上基本之差異，以及此差異在監測系統規劃上可能產生之影響。本章節說明 FBG 感測技術與傳統電子式監測系統之差異。

傳統電子式監測系統使用金屬導線傳輸訊號。為降低雜訊及加強其耐用性，現場監測所用金屬導線直徑通常在 10mm 左右。電子式感測器大多為非分佈式設計，每一感測器使用一條金屬導線。當大量佈設電子感測器時常導致成捆之金屬導線，體積龐大。常用之光纜可以包括 6 至 216 條單模光纖，每一條光纖可以連接 4 至 6 個光纖光柵感測器，所以在現地使用上可以用一條光纜連接所有的光纖感測器，將可降低傳輸線佈放的成本。光纖感測技術具有許多傳統電子感應技術沒有的優點，包括體積小、耐久性高、不受電磁干擾、不受雷擊影響與可在同一條線上作多點分佈式的監測，其詳細說明如表 2 所示。國內許多研究機構從事光纖監測技術研發已有多年之經驗，這些監測技術使用光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG) 做為感測元件，已發展成功之技術包括可以定量的方法做地層移動與水壓監測之光纖光柵監測系統。

表 2 光纖光柵感測器與電子式感測器比較表

| 項目      | FBG 感測器                       | 電子式感測器                |
|---------|-------------------------------|-----------------------|
| 雷擊      | 不受影響                          | 容易受雷擊損壞               |
| 電磁波干擾   | 無影響。                          | 必須做類比/數位轉換或電/光轉換才能避免。 |
| 耐用性     | 非金屬材料(矽)製成，耐用性高，無受潮短路之顧慮。     | 金屬材料製成，在潮濕環境下容易氧化或短路。 |
| 自動化監測   | 比較適合長期自動化監測使用。                | 可做長期自動化或手動監測。         |
| 供應廠商    | 比較少，但在成長中。                    | 比較普遍。                 |
| 成本      | 數量越大，總成本越低。                   | 數量越大，總成本越高。           |
| 安裝後維修保養 | 現地無電子式設備，不易損毀，維修與保養容易，維修保養費低。 | 維修保養費高。               |

#### 四、新山水庫光纖光柵監測系統布設規劃與成本分析

依據表 1 現有儀使用器狀況，計畫將新山水庫現有功能異常之儀器取出，放入光纖光柵感測器。光纖光柵監測系統主要安裝方式說明如下：

1. 現有傾斜管:將於現有傾斜管內，依據鑽孔深度與現場需要，安裝不同組數之光纖光柵地層感測器，並於每一傾斜管內底部安裝光纖光柵水壓感測器，可同時量測地層位移與水位變化。
2. 現有水位管:現有水位管孔徑為 43mm，將於現有水位管內安裝 4 至 6 組位移地層感測器，並於水位管內底部安裝光纖光柵水壓計，可同時量測水庫壩體與周圍邊坡地層位移與水位變化。
3. 現有地滑計:依據過去監測資料與現地勘查結果，在有潛在破壞之

邊坡區域安裝光纖光柵地滑計。

4. 新鑽孔位:由於現有孔位可能已經損毀或堵塞，將於左、右壩脊邊坡上新鑽監測孔洞，總長度不超過 200 米為限，並於新鑽孔內安裝光纖光柵地層位移與水壓監測感測器。

光纖光柵監測系統之成本可分為幾大項:光纖光柵感測器、鑽孔、光纖/光纜布設、光纖光柵解讀與資料擷取/傳輸系統與光纖切換器，分析如表 3 至表 7 所示:

表 3 新山水庫光纖光柵監測系統總價分析表

| 項次 | 項目                       | 單位 | 數量 | 單價  | 複價         | 備註 |
|----|--------------------------|----|----|-----|------------|----|
| 1  | 光纖光柵感測器                  | 式  | 1  |     | 10,100,000 |    |
| 2  | 光纖資料擷取系統                 | 組  | 1  |     | 2,350,000  |    |
| 3  | 新鑽孔與光纜安裝                 | 式  | 1  |     | 3,150,000  |    |
| 4  | 安全監測系統建置完成後監測(含人事費、差旅費等) | 式  | 1  |     | 4,000,000  |    |
|    |                          |    |    | 總費用 | 19,600,000 |    |

表 4 光纖光柵感測器單價分析

| 號數      | 1  | 工程項目:新山水庫 |        | 單位:個       |    |
|---------|----|-----------|--------|------------|----|
| 工程項目說明  | 單位 | 數量        | 單價     | 總價         | 附註 |
| 光纖光柵水壓計 | 個  | 60        | 20,000 | 1,200,000  |    |
| 光纖光柵測傾儀 | 組  | 400       | 22,000 | 8,800,000  |    |
| 光纖光柵地滑計 | 組  | 2         | 50,000 | 100,000    |    |
| 合計      |    |           |        | 10,100,000 |    |

表 5 光纖光柵資料擷取/分析系統單價分析

| 號數         | 2  | 工程項目:新山水庫 |         | 單位        |                  |
|------------|----|-----------|---------|-----------|------------------|
| 工程項目說明     | 單位 | 數量        | 單價      | 價總        | 附註               |
| 電腦系統       | 式  | 1         | 50,000  | 50,000    | 單組光切換器光通道數為128個。 |
| 光學讀取系統     | 式  | 2         | 400,000 | 800,000   |                  |
| 擷取控制卡      | 式  | 1         | 50,000  | 50,000    |                  |
| 耗材         | 式  | 1         | 50,000  | 50,000    |                  |
| 光纖頻道切換器    | 組  | 2         | 600,000 | 1,200,000 |                  |
| 系統整合(含軟硬體) | 式  | 1         | 200,000 | 200,000   |                  |
| 合計         |    |           |         | 2,350,000 |                  |

表 6 新鑽孔與光纜費用單價分析



|                  |    |           |         |           |    |
|------------------|----|-----------|---------|-----------|----|
| 號數               | 3  | 工程項目:新山水庫 |         | 單位        |    |
| 工程項目說明           | 單位 | 數量        | 單價      | 總價        | 附註 |
| 鑽孔               | 米  | 200       | 6,000   | 1,200,000 |    |
| 光纜費用             | 公里 | 5         | 250,000 | 1,250,000 |    |
| PVC 管            | 公里 | 5         | 100,000 | 500,000   |    |
| 其它設備耗材(集線盒、光纖接頭) | 式  | 1         | 200,000 | 200,000   |    |
| 合計               |    |           |         | 3,150,000 |    |

表 7 光纜安裝費用單價分析

|                           |     |           |           |           |    |
|---------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|----|
| 號數                        | 4   | 工程項目:新山水庫 |           | 單位        |    |
| 工程項目說明                    | 單位  | 數量        | 單價        | 總價        | 附註 |
| 人事費<br>(感測器安裝、光纜架設)       | 第一年 | 1         | 2,200,000 | 2,200,000 |    |
|                           | 第二年 | 1         | 1,000,000 | 1,000,000 |    |
| 差旅費                       | 第一年 | 1         | 300,000   | 200,000   |    |
|                           | 第二年 | 1         | 150,000   | 100,000   |    |
| 其他(電腦耗材、誤餐、油費、保險、報告印刷、租車) | 式   | 1         | 500,000   | 500,000   |    |
| 合計                        |     |           |           | 4,000,000 |    |

## 五、預期成果效益

安裝光纖光柵水監測系統後，預期將有下列幾項效益

1. 即時安全間測:安裝光纖光柵監測系統後，可以提供壩體與壩體周圍環境的即時資訊，將可以有效的達到監測效果。
2. 水庫蓄水位提升監測:將可以提供後續水庫蓄水位提升時，即時的安全監測資料。
3. 減少後續保養與維修成本:光纖光柵監測系統在現地並無任何電子式設備，可大幅將低未來現地設備受雷擊、潮濕與電磁波干擾損毀的機會，且在長期使用的狀況下，精度與耐久性較電子式感測器為好。另外光纖光柵監測系統保養維修方式簡單，在現地只有光纖光柵感測器與光纜傳輸線，所以若有損毀之情況發生，只需至現場將感測器取出更換即可。

## 附錄十二 TDR 監測系統單價分析

## 附錄十二 TDR 監測系統單價分析

| 工料項目                  | 單位 | 數量 | 單價      | 複價      | 備註         |
|-----------------------|----|----|---------|---------|------------|
| 壹、TDR 錯動變形感測器         |    |    |         |         | 以 25 公尺為例  |
| 纜線(P3-500/RG-8)       | 公尺 | 25 | 150     | 3,750   |            |
| 纜線加工器                 | 組  | 1  | 2,000   | 2,000   |            |
| 纜線接頭                  | 組  | 1  | 500     | 500     |            |
| BNC 接頭連接線             | 條  | 2  | 900     | 1,800   | 1 公尺長      |
| 纜線阻水處理                | 組  | 1  | 500     | 500     |            |
| 保護蓋                   | 組  | 1  | 3,000   | 3,000   |            |
|                       |    |    |         |         |            |
| 小計                    |    |    |         | 11,550  |            |
| 貳、監測與分析系統費            |    |    |         |         |            |
| TDR 100               | 組  | 1  | 200,000 | 200,000 |            |
| 資料擷取與分析程式             | 套  | 1  | 30,000  | 30,000  |            |
| 筆計型電腦                 | 套  | 1  | 35,000  | 35,000  |            |
|                       |    |    |         |         |            |
| 小計                    |    |    |         | 265,000 |            |
| 參、自動化系統費              |    |    |         |         |            |
| Campbell CR10X 資料擷取器  | 組  | 1  | 70,000  | 70,000  |            |
| Campbell SDMX50 多工器   | 組  | 1  | 27,000  | 27,000  |            |
| GPRS 傳輸模組             | 組  | 1  | 8,000   | 5,000   | 不含網卡及每月傳輸費 |
| 遠端伺服器                 | 組  | 1  | 65,000  | 65,000  | 含資料庫       |
|                       |    |    |         |         |            |
| 小計                    |    |    |         | 170,000 |            |
|                       |    |    |         |         |            |
| 總計                    |    |    |         | 446,550 |            |
| 註 1. 以單孔 25 公尺感測器為例計算 |    |    |         |         |            |
| 註 2. 不含現場安裝費用         |    |    |         |         |            |
| 註 3. 現場備有市電(110V)     |    |    |         |         |            |

國家圖書館出版品預行編目資料

水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發.(3/3)  
) = Development of monitoring, non-destructive testing, and diagnosis techniques for dam safety. (3/3)/ 國立交通大學編著. -- 初版.-- [台北市]: 經濟部水利署, 2008.12  
面; 公分  
參考書目: 面  
ISBN 978-986-01-6422-0 (平裝)  
1. 水庫 2. 水壩 3. 水利工程 4. 檢驗  
443.6433 97023085

水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(3/3)

---

出版機關：經濟部水利署  
地 址：台中市黎明路二段 501 號  
電 話：(04) 2250-1250  
編著者：國立交通大學  
地 址：300 新竹市大學路 1001 號  
電 話：(03) 571-2121  
傳 真：(03) 5734116  
初 版：2008 年 12 月  
GPN：1009703461  
ISBN：978-986-01-6422-0

---

版權所有，翻印必究