



MOEAWRA0960015

水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(2/3)

Development of monitoring, non-destructive testing, and diagnosis
techniques for dam safety (2/3)



委託機關：經濟部水利署

受託單位：國立交通大學

中華民國九十六年十二月

水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(2/3)

摘 要

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。本計畫之目的在於研究改善水庫安全監測與檢測技術，以利建立壩體安全診斷系統。

在先進傳輸線式監測技術的研發上，本年度的工作重點在於光纖光柵水壓計及 TDR 錯動變形監測技術。光纖光柵技術與 TDR 分別利用光及電磁波對於傳輸線式感應器進行感應，儀器主機置於地表，此技術具有耐久性、抗雷擊且可以一機多工及多點監測，適合水庫長期安全監測之需求。光纖光柵水壓計已完成其封裝與安裝設計，並進行耐久性評估，此外亦完成光纖光柵自動化擷取系統之整合，後續擬將此技術實際應用於現場，進行現場試用測試；TDR 錯動變形監測技術已完成大型 TDR 受剪物理模型的建立，並利用此物理模型進行 TDR 變形率定的工作，探討纜線種類、灌漿材料以及周圍土壤勁度的互制行為，此外，透過小波方法改良 TDR 訊號分析能力，得以提早偵測滑動面的發生。另亦已發展了 TDR 多工監測技術自動化的整合擷取系統，後續擬將此技術實際應用於現場，進行現場測試。

非破壞性檢測技術之應用與改良研究本年度的工作重點在於表面波震測之施測改良與不同問題與壩體條件選用適當檢測技術的評估方法雛型建立。在施測上改良現有施測方法，提出高側向解析法以提升表面波震測空間解析度及探測深度；此外，對於地形效應以及多次振態在表面波震測結果上的影響進行探討，提出可能影響及可能的解決方法以增加對於表面波震測的解讀能力；另已完成非破壞性檢測

技術之適用性評估方法雛形初擬，提出選用流程與手冊架構及大綱內容的建議。

在壩體安全診斷系統研究上，今年度主要在建立混凝土重力壩之受震系統識別分析方法，主要根據台電大甲溪發電廠所提供之谷關壩及天輪壩強震儀記錄進行系統識別分析，探討無輸入擾動時，系統識別分析應用於壩體安全診斷之可行性。分析結果顯示，頻譜趨勢反應出不同壩體(型)之特性，谷關壩(拱壩)有較顯著之單一峰值，而天輪壩(重力壩)頻譜峰值則有呈現分佈於某一頻寬的趨勢，其頻寬範圍大致穩定分佈於 5~20Hz 之間。就此壩體特性的差異顯示，重力壩較不適用於此系統識別分析方法。後續將撰寫簡易頻譜分析軟體及使用手冊，俾便提供給相關水庫管理單位參考使用。另預計將進行簡易系統識別分析應用軟體及使用手冊之開發，可針對地震發生後之強震儀資料即時進行識別分析，掌握壩體之振動特性。

Development of Monitoring, Non-destructive Testing, and Diagnosis Techniques for Dam Safety (2/3)

Abstract

Malfunctions of monitoring system and lack of systematic feedback analysis from monitoring data are common problems for dam safety management in Taiwan. On the other hand, there is a great demand for effective non-destructive methods to examine the interior of the reservoir structures. The objectives of this 3-year study are to develop improved monitoring techniques, evaluate and improve non-destructive testing methods, and eventually establish a more effective diagnosis system for dam safety. This report introduces the results of the second year.

In developing improved monitoring techniques, this year focused on improvement and durability test of Fiber Bragg Grating (FBG) piezometer and the development of standard procedure and quantitative approach of localized shear deformation monitoring by Time domain Reflectometry (TDR). The design of FBG piezometer including its assembly and installation method was improved. The durability of the FBG sensor and piezometer prototype was verified experimentally. A data acquisition system based on Field Programmable Gate Array (FPGA) was also developed. TDR physical model that mimics the field condition was developed to study the effect of soil-grout-cable interaction. Furthermore, a signal processing technique (wavelets analysis) was

proposed to achieve early detection of shear displacement. Installation and data reduction procedure were recommended from experiental results. A TDR data acquisition system capable of interrogating multiple physical parameters based on TDR and integrating conventional monitoring techniques was proposed. Unlike conventional electronic transducers, FBG and TDR techniques are versatile up-hole pulsing methods in which transducers (i.e. the inserted sensing waveguides) require no electronic components and the system can be multiplexed. Such reflectometry systems possess both the mechanical reliability and electronic efficiency. The developed transducers are resistant to humidity, corrosion, and electric surge. The FBG and TDR system will be implemented and tested in the field condition in the following year.

The seismic surface wave method is the focus for this year's study on non-destructive testing methods. A new survey method, named High Lateral Resolution Surface Wave Method, was proposed to overcome the dilemma in selecting field parameters. According to the numerical simulation results, the method can increase the space resolution and depth coverage of surface wave testing. The effects of topography and higher modes on surface wave testing were also discussed and some possible countermeasures were proposed. Furthermore, the guideline for applying non-destructive testing methods in dam safety evaluation was outlined and partly drafted. The guideline draft will be completed in the subsequent research.

The system identification method for safety diagnosis of concrete

dams based on seismograph data was applied to gravity dams. Due to the lack of seismograph data at the foundation level, the feasibility of the system identification method in absence of input excitation data was validated by using the recorded earthquake time history data of Ku-Kuan and Tien-Loon dams provided by Taiwan Power Company. Unlike arch dams, the vibration frequency of the gravity dam does not have a single peak value, implying the system identification approach is less applicable to gravity dams. A user-friendly system identification software and user's manual will be developed to assist identifying the dynamic characteristics of concrete dams based on seismic data immediately after earthquakes.

結論與建議

一、結論

計畫預計以三年為期研究改善水庫安全監測與檢測技術，並研擬壩體安全診斷系統，計畫主要探討重點包括：(1) 先進傳輸線式監測技術之研發；(2) 非破壞性檢測技術與精度之改良；(3) 壩體安全診斷系統之研擬。本年度階段性地完成光纖水壓計與錯動變形監測技術研發及震測技術在壩體應用與改良之研究，並進行混凝土重力壩受震後之系統識別分析，以充分利用較無法直接判讀的地震觀測資料。依據今年度工作項目，其研究成果概述如下：

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。至於連接部份，以相同直徑大小之 PVC 管作銜接以保護光纖傳輸線。在要現場安裝前，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 3kg/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(δ_D)與迴歸初始反應門檻值(δ_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 (δ_D 太大)，軟性纜線較適合軟弱地層，可較早偵測位移 (δ_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 ρ ，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。

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-應力有限差分法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」的情形中只要能有所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。

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。

二、建議

本計畫之目的在於研究改善水庫安全監測與檢測技術，並針對較無法直接判讀的監測資料做進一步的應用研究，期最終能夠研擬一合

理的壩體安全診斷系統，基於第一年度及第二年度工作成果，茲將第三年後續之工作項目建議如下：

1. 先進傳輸線式監測技術之研發

- (1) 光纖光柵水壓計現地測試：擇一水庫場址，依照壩體監測之需求及預算限度決定鑽孔深度與光纖光柵水壓計安裝之數量，但水壓計應以間隔 3m 以上為原則。
- (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，實地測試模型試驗研究所擬定之標準安裝與資料分析程序。

2. 非破壞性檢測技術之應用與改良研究

- (1) 非破壞性檢測技術之適用性評估方法手冊研擬

3. 壩體安全診斷系統研究

- (1) 簡易頻譜分析軟體及使用手冊之開發(MATLAB 版及 EXCEL 版)。
- (2) 簡易系統識別分析應用軟體及使用手冊之開發(MATLAB 版)。
- (3) 混凝土拱壩振動特性變化警戒值之研訂。

4. 水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關教育訓練

目錄

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 摘要 | I |
| Abstract..... | III |
| 結論與建議 | VI |
| 表目錄 | iv |
| 圖目錄 | v |
| 一、計畫緣起及目的 | 1 |
| 二、計畫工作項目 | 3 |
| 三、前期研究成果回顧 | 4 |
| 四、先進傳輸線式監測技術之研發 | 11 |
| 4.1 光纖光柵水壓計之改善研發及耐久性評估 | 11 |
| 4.1.1 光纖光柵水壓計原理..... | 12 |
| 4.1.2 光纖黏貼膠之選擇與黏著性試驗..... | 16 |
| 4.1.3 光纖光柵水壓計之改良..... | 22 |
| 4.1.4 光纖光柵水壓計之封裝與安裝設計..... | 26 |
| 4.1.5 光纖光柵水壓計之耐久性評估..... | 30 |
| 4.2 光纖光柵自動化擷取系統整合 | 34 |
| 4.3 節理式光纖光柵偏斜儀於湖山水庫與義興電廠監測之使用 | 42 |
| 4.3.1 湖山水庫案例： | 42 |
| 4.3.2 義興電廠案例： | 47 |
| 4.4 TDR錯動變形監測資料分析改良 | 49 |
| 4.4.1 TDR錯動變形監測原理..... | 50 |
| 4.4.2 TDR受剪物理模型設計..... | 52 |

| | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----|
| 4.4.3 | 率定試驗規劃..... | 63 |
| 4.4.4 | TDR變形率定試驗結果..... | 71 |
| 4.4.5 | TDR訊號分析法之改良..... | 87 |
| 4.4.6 | TDR錯動變形監測之安裝與資料分析標準程序建議草擬.. | 93 |
| 4.5 | TDR監測系統整合 | 97 |
| 4.6 | 既有壩體之安裝適用性探討 | 102 |
| 4.6.1 | 研發儀器與傳統儀器之比較..... | 102 |
| 4.6.2 | 鑽探作業注意事項..... | 106 |
| 4.6.3 | 鑽探方式建議..... | 109 |
| 五、非破壞性檢測技術之應用與改良研究 | | 110 |
| 5.1 | 壩體表面波震測檢測技術改良 | 111 |
| 5.1.1 | 表面波震測基本原理..... | 111 |
| 5.1.2 | 表面波震測法現況評析..... | 114 |
| 5.1.3 | 高側向解析法..... | 118 |
| 5.1.4 | 震波數值模擬分析程式..... | 121 |
| 5.1.5 | 高側向解析法之數值模擬驗證..... | 125 |
| 5.1.6 | 地形效應對表面波震測之影響..... | 130 |
| 5.1.7 | 高次振態對表面波震測之影響..... | 136 |
| 5.2 | 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形初擬..... | 149 |
| 5.2.1 | 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程..... | 149 |
| 5.2.2 | 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表建立..... | 150 |
| 5.2.3 | 非破壞性檢測技術之適用性評估方法之手冊雛形..... | 156 |
| 六、壩體安全診斷系統研究 | | 159 |
| 6.1 | 混凝土重力壩結構受震之系統識別分析 | 159 |
| 6.1.1 | 分析流程步驟..... | 165 |

| | |
|---------------------------------|------|
| 6.1.2 系統識別之理論介紹..... | 168 |
| 6.2 谷關壩之系統識別分析 | 173 |
| 6.2.1 時域分析..... | 176 |
| 6.2.2 頻域分析..... | 186 |
| 6.2.3 系統識別分析..... | 196 |
| 6.3 天輪壩之系統識別分析 | 207 |
| 6.3.1 時域分析..... | 209 |
| 6.3.2 頻域分析..... | 219 |
| 6.3.3 系統識別分析..... | 229 |
| 七、水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練 | 240 |
| 八、參考文獻 | 247 |
| 附錄一 委託服務計畫建議書審查意見及辦理情形 | A1-1 |
| 附錄二 期中報告審查意見及辦理情形 | A2-1 |
| 附錄三 期末報告審查意見及辦理情形 | A3-1 |
| 附錄四 水庫壩體非破壞性檢測技術選用導引(初稿雛型)..... | A4-1 |
| 附錄五 計畫相關論文發表情形 | A5-1 |

表目錄

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 表 4.1 黏貼膠特性說明 | 18 |
| 表 4.2 LabVIEW環境下各種網路技術的特性 | 36 |
| 表 4.3 不同纜線之種類特性 | 66 |
| 表 4.4 外填材料基本物理性質 | 69 |
| 表 4.5 不同纜線於相同外填材料與水泥配比下之反應特性比較 | 74 |
| 表 4.6 不同灌漿材料順應性下，相同纜線之反應特性比較 | 81 |
| 表 4.7 不同外填材料勁度下，相同纜線之反應特性比較 | 84 |
| 表 4.8 傳統電子式水壓計與光纖光柵水壓計之初步比較 | 103 |
| 表 4.9 傳統測傾管監測技術與TDR錯動變形監測技術初步比較 | 105 |
| 表 5.1 參數數值表 | 124 |
| 表 5.2 地形效應數值模擬參數數值表 | 132 |
| 表 5.3 地層模型參數表 | 139 |
| 表 5.4 非破壞性檢測方法提供之資訊 | 151 |
| 表 5.5 混凝土壩與土石壩潛在破壞模式 | 155 |
| 表 5.6 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表 | 156 |
| 表 6.1 谷關壩之地震事件記錄資料 | 175 |
| 表 6.2 系統識別所得之基本振動頻率(水庫放空) | 197 |
| 表 6.3 天輪壩之地震事件記錄資料 | 208 |

表 7.1 水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練課程時間表241

表 7.2 水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練講員簡歷242

圖目錄

圖 4.1 光纖光柵內連續遞增之漸變應變12

圖 4.2 連續遞增之漸變應變所產生FBG尖峰波長寬度之改變13

圖 4.3 FBG波長飄移分析示意圖13

圖 4.4 漸變週期式FBG水壓計構造示意圖14

圖 4.5 等週期波長式FBG水壓計構造示意圖15

圖 4.6 等週期波長式FBG水壓計標定結果16

圖 4.7 黏貼膠與鋼筋介面之黏著力測試過程圖17

圖 4.8 測試試體於恆濕恆溫相箱示意圖19

圖 4.9 黏貼膠受熱時FBG之讀數變化圖19

圖 4.10 三種黏貼膠於鋼模片之黏著力測試20

圖 4.11 A膠黏著力測試結果圖21

圖 4.12 B膠黏著力測試結果圖21

圖 4.13 C膠黏著力測試結果圖22

圖 4.14 等週期光纖光柵水壓計受力狀態示意圖23

圖 4.15 雙鋼模片之等週期光纖光柵水壓計受力圖24

圖 4.16 單鋼模片之等週期光纖光柵水壓計實體圖24

| | |
|--|----|
| 圖 4.17 雙鋼模片之等週期光纖光柵水壓計實體圖 | 25 |
| 圖 4.18 雙剛模片之等週期光纖光柵水壓計率定圖 | 25 |
| 圖 4.19 等週期光纖光柵實體圖(量測範圍 10kg/cm ²) | 26 |
| 圖 4.20 等週期光纖光柵水壓計率定圖(範圍 10kg/cm ²) | 26 |
| 圖 4.21 等週期FBG水壓計裝置改良示意圖 | 27 |
| 圖 4.22 等週期光纖光柵水壓計於具有篩孔之PVC管配置圖 | 28 |
| 圖 4.23 感測單元實體圖 | 28 |
| 圖 4.24 阻隔層測試架構圖 | 29 |
| 圖 4.25 PVC管壓力封層測試實體 | 30 |
| 圖 4.26 PVC管內壓力隨時間變化圖 | 30 |
| 圖 4.27 等週期式FBG水壓計置於裝滿水之容器示意圖 | 31 |
| 圖 4.28 恆濕恆溫加熱過程示意圖 | 32 |
| 圖 4.29 等週期式FBG水壓計老化試驗結果圖 | 33 |
| 圖 4.30 等週期式FBG水壓計潛變試驗結果圖 | 33 |
| 圖 4.31 等週期式FBG水壓計潛變試驗過程示意圖 | 34 |
| 圖 4.32 監測警戒值發布簡訊 | 39 |
| 圖 4.33 地層變化監測畫面 | 40 |
| 圖 4.34 模擬現地監測流程圖 | 41 |
| 圖 4.35 溢洪道邊坡CB-50 監測儀器方向 | 43 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 4.36 | 湖山左壩座邊坡相關監測儀器方向 | 43 |
| 圖 4.37 | CB-50 測傾管位移變化圖 | 44 |
| 圖 4.38 | CB-50 FGB-SD分析結果 | 44 |
| 圖 4.39 | CB-50 重新安裝FGB-SD分析結果 | 45 |
| 圖 4.40 | CB-73 測傾管位移變化圖(6/22 測傾管已被剪斷) | 46 |
| 圖 4.41 | CB-73 FGB-SD分析結果 | 46 |
| 圖 4.42 | 義興電廠邊坡暨有傾斜孔與光纖感測器裝設位置示意圖 .. | 48 |
| 圖 4.43 | 傾斜管與光纖讀數分析結果圖(06/28-09/07)..... | 49 |
| 圖 4.44 | TDR變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇, 2003) | 51 |
| 圖 4.45 | 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006)..... | 52 |
| 圖 4.46 | 模擬現地邊界條件概念示意圖(改自 Lin and Tang, 2006)..... | 54 |
| 圖 4.47 | 大型直剪儀設計架構圖 | 54 |
| 圖 4.48 | 大型直剪儀各元件示意圖 | 55 |
| 圖 4.49 | 考慮纜線受剪長度之影響 | 56 |
| 圖 4.50 | 剪力盒所考慮影響範圍示意圖 | 57 |
| 圖 4.51 | 剪力盒詳圖 | 58 |
| 圖 4.52 | Tektronix 1502C (a)實體照片(b)操作介面說明(摘自 Tektronix 1502C Service Manual) | 59 |
| 圖 4.53 | P3 系列同軸纜線剖面示意圖(摘自 CommScope User Manual) | 61 |

| | |
|--|----|
| 圖 4.54 (a)傳力設備-油壓千斤頂 (b) Load cell (c) 位移計(LVDT) (d) Load cell與位移計輸出顯示器(正、背面)..... | 61 |
| 圖 4.55 大型直剪儀元件說明 | 62 |
| 圖 4.56 試驗規劃 | 64 |
| 圖 4.57 不同種類同軸纜線 | 65 |
| 圖 4.58 ISRM之地質材料分類(Johnston,1993) | 67 |
| 圖 4.59 水泥-纜線複合材料製作過程..... | 68 |
| 圖 4.60 水泥養護過程..... | 69 |
| 圖 4.61 土壤種類粒徑分佈曲線..... | 69 |
| 圖 4.62 試驗流程圖 | 70 |
| 圖 4.63 不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線..... | 71 |
| 圖 4.64 不同試驗條件下之反射係數-水平位移曲線..... | 72 |
| 圖 4.65 不同纜線試驗之剪應力-水平位移曲線..... | 73 |
| 圖 4.66 不同纜線受剪之反射波形 | 75 |
| 圖 4.67 不同纜線-灌漿材之變形模式..... | 76 |
| 圖 4.68 不同纜線與灌漿材於渥太華砂之靈敏度..... | 76 |
| 圖 4.69 灌漿材料順應性試驗之剪應力-水平位移曲線..... | 78 |
| 圖 4.70 灌漿材料順應性試驗之反射波形 | 79 |
| 圖 4.71 灌漿材料順應性試驗之變形模式 | 79 |

| | |
|--|-----|
| 圖 4.72 灌漿材料順應性試驗之靈敏度 | 80 |
| 圖 4.73 QR-320 型纜線之內導體受拉而產生頸縮 | 82 |
| 圖 4.74 不同外填材料試驗之剪應力-水平位移曲線..... | 83 |
| 圖 4.75 同一纜線於不同勁度外填材料下之反射波形 | 85 |
| 圖 4.76 同一纜線於不同勁度外填材料下之變形模式 | 86 |
| 圖 4.77 纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度 | 87 |
| 圖 4.78 原始波形與去雜訊效果比較 | 89 |
| 圖 4.79 Threshold之選擇 | 89 |
| 圖 4.80 Mode 與level之選擇 | 90 |
| 圖 4.81 RG-8 纜線， $\delta D=5\text{mm}$ | 91 |
| 圖 4.82 RG-8 纜線， $\delta D=9\text{mm}$ | 91 |
| 圖 4.83 RG-8 纜線， $\delta D=12\text{mm}$ | 92 |
| 圖 4.84 P3-500 Unshielded纜線， $\delta D=39\text{mm}$ | 92 |
| 圖 4.85 P3-500 Unshielded纜線， $\delta D=43\text{mm}$ | 93 |
| 圖 4.86 TDR錯動變形監測之標準程序 | 96 |
| 圖 4.87 壩體整合式TDR監測系統示意圖 | 97 |
| 圖 4.88 TDR資料擷取設備 | 99 |
| 圖 4.89 TDR資料擷取設備的實體圖 | 100 |
| 圖 4.90 TDR自動化流程 | 101 |

| | | |
|--------|-----------------------------|-----|
| 圖 4.91 | 即時自動化監測資訊網站示想圖 | 101 |
| 圖 4.92 | 壩體水位及水壓觀測管安裝示意圖 | 102 |
| 圖 5.1 | 表面波震測基本原理 | 113 |
| 圖 5.2 | 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查 | 113 |
| 圖 5.3 | 表面波震測法震源與受波器位置示意圖 | 115 |
| 圖 5.4 | 資料遺漏於多頻道波場轉換法影響示意圖 | 115 |
| 圖 5.5 | 高側向解析施測法概念說明 | 119 |
| 圖 5.6 | 靜態誤差與縫合動作示意圖 | 119 |
| 圖 5.7 | 錯置網格示意圖 | 123 |
| 圖 5.8 | 數值模型參數與配置示意圖 | 124 |
| 圖 5.9 | 地層模型 | 126 |
| 圖 5.10 | 側向變化地層對表面波震測之影響 | 126 |
| 圖 5.11 | 高側向解析施測法驗證之地層模型與施測配置 | 128 |
| 圖 5.12 | 高側向解析施測法數值驗證結果 | 129 |
| 圖 5.13 | 地形效應地層模型 | 131 |
| 圖 5.14 | a地層之頻散曲線影像圖 | 133 |
| 圖 5.15 | b地層之頻散曲線影像圖 | 134 |
| 圖 5.16 | c地層之頻散曲線影像圖 | 135 |
| 圖 5.17 | 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)..... | 137 |
| 圖 5.18 表面波振態理論值與數值模擬值比較..... | 138 |
| 圖 5.19 振態可分離下的現場模擬施測配置..... | 141 |
| 圖 5.20 測線長 47 公尺的頻散曲線影像圖..... | 141 |
| 圖 5.21 不同頻寬之頻散曲線反算結果比較..... | 143 |
| 圖 5.23 測線長 23 公尺的頻散曲線影像圖..... | 145 |
| 圖 5.24 地層模型與視頻散曲線反算結果比較..... | 146 |
| 圖 5.25 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程圖..... | 150 |
| 圖 6.1 系統參數歷時圖..... | 162 |
| 圖 6.2 傳遞函數圖(翡翠水庫)..... | 163 |
| 圖 6.3(a) 谷關壩..... | 164 |
| 圖 6.3(b) 天輪壩..... | 165 |
| 圖 6.4 強震儀之三軸向加速度歷時(翡翠水庫)..... | 166 |
| 圖 6.5 強震儀之三軸向加速度傅氏頻譜(翡翠水庫)..... | 167 |
| 圖 6.6 強震儀之三軸向傳遞函數(翡翠水庫)..... | 167 |
| 圖 6.7 壩體振動頻率與水位高程之關係曲線(翡翠水庫)..... | 168 |
| 圖 6.8 谷關壩之強震儀配置圖..... | 174 |
| 圖 6.9-1 上下游方向之加速度歷時(90.06.08)..... | 176 |
| 圖 6.9-2 上下游方向之加速度歷時(90.08.20)..... | 177 |

| | | |
|----------|-----------------------|-----|
| 圖 6.9-3 | 上下游方向之加速度歷時(90.09.16) | 177 |
| 圖 6.9-4 | 上下游方向之加速度歷時(90.09.27) | 177 |
| 圖 6.9-5 | 上下游方向之加速度歷時(90.12.28) | 178 |
| 圖 6.9-6 | 上下游方向之加速度歷時(91.07.07) | 178 |
| 圖 6.9-7 | 上下游方向之加速度歷時(91.09.16) | 178 |
| 圖 6.9-8 | 上下游方向之加速度歷時(91.09.27) | 179 |
| 圖 6.9-9 | 上下游方向之加速度歷時(91.09.30) | 179 |
| 圖 6.9-10 | 上下游方向之加速度歷時(92.01.22) | 179 |
| 圖 6.9-11 | 上下游方向之加速度歷時(92.04.13) | 180 |
| 圖 6.9-12 | 上下游方向之加速度歷時(92.06.10) | 180 |
| 圖 6.9-13 | 上下游方向之加速度歷時(92.12.10) | 180 |
| 圖 6.9-14 | 上下游方向之加速度歷時(92.12.15) | 181 |
| 圖 6.9-15 | 上下游方向之加速度歷時(93.01.01) | 181 |
| 圖 6.9-16 | 上下游方向之加速度歷時(93.02.15) | 181 |
| 圖 6.9-17 | 上下游方向之加速度歷時(93.05.01) | 182 |
| 圖 6.9-18 | 上下游方向之加速度歷時(93.07.28) | 182 |
| 圖 6.9-19 | 上下游方向之加速度歷時(94.04.30) | 182 |
| 圖 6.9-20 | 上下游方向之加速度歷時(94.05.20) | 183 |
| 圖 6.9-21 | 上下游方向之加速度歷時(94.09.10) | 183 |

| | | |
|-----------|------------------------------|-----|
| 圖 6.9-22 | 上下游方向之加速度歷時(94.10.02)..... | 183 |
| 圖 6.9-23 | 上下游方向之加速度歷時(94.10.07)..... | 184 |
| 圖 6.9-24 | 上下游方向之加速度歷時(95.01.20)..... | 184 |
| 圖 6.9-25 | 上下游方向之加速度歷時(95.02.08)..... | 184 |
| 圖 6.9-26 | 上下游方向之加速度歷時(95.03.07)..... | 185 |
| 圖 6.9-27 | 上下游方向之加速度歷時(95.08.05)..... | 185 |
| 圖 6.9-28 | 上下游方向之加速度歷時(95.12.03)..... | 185 |
| 圖 6.10-1 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.06.08)..... | 186 |
| 圖 6.10-2 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.08.20)..... | 187 |
| 圖 6.10-3 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.09.16)..... | 187 |
| 圖 6.10-4 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.09.27)..... | 187 |
| 圖 6.10-5 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.12.28)..... | 188 |
| 圖 6.10-6 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.07.07)..... | 188 |
| 圖 6.10-7 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.16)..... | 188 |
| 圖 6.10-8 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.27)..... | 189 |
| 圖 6.10-9 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.30)..... | 189 |
| 圖 6.10-10 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.01.22)..... | 189 |
| 圖 6.10-11 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.04.13)..... | 190 |
| 圖 6.10-12 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.06.10)..... | 190 |

| | | |
|-----------|------------------------------|-----|
| 圖 6.10-13 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.12.10)..... | 190 |
| 圖 6.10-14 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.12.15)..... | 191 |
| 圖 6.10-15 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.01.01)..... | 191 |
| 圖 6.10-16 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.02.15)..... | 191 |
| 圖 6.10-17 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.05.01)..... | 192 |
| 圖 6.10-18 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.07.28)..... | 192 |
| 圖 6.10-19 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.04.30)..... | 192 |
| 圖 6.10-20 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.05.02)..... | 193 |
| 圖 6.10-21 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.09.10)..... | 193 |
| 圖 6.10-22 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.10.02)..... | 193 |
| 圖 6.10-23 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.10.07)..... | 194 |
| 圖 6.10-24 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.01.20)..... | 194 |
| 圖 6.10-25 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.02.08)..... | 194 |
| 圖 6.10-26 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.03.07)..... | 195 |
| 圖 6.10-27 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.08.05)..... | 195 |
| 圖 6.10-28 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.03)..... | 195 |
| 圖 6.11-1 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.06.08)..... | 197 |
| 圖 6.11-2 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.08.20)..... | 198 |
| 圖 6.11-3 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.09.16)..... | 198 |

| | | |
|-----------|-------------------------|-----|
| 圖 6.11-4 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.09.27) | 198 |
| 圖 6.11-5 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.12.28) | 199 |
| 圖 6.11-6 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.07.07) | 199 |
| 圖 6.11-7 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.16) | 199 |
| 圖 6.11-8 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.27) | 200 |
| 圖 6.11-9 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.30) | 200 |
| 圖 6.11-10 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.01.22) | 200 |
| 圖 6.11-11 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.04.13) | 201 |
| 圖 6.11-12 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.06.10) | 201 |
| 圖 6.11-13 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.12.10) | 201 |
| 圖 6.11-14 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.12.15) | 202 |
| 圖 6.11-15 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.01.01) | 202 |
| 圖 6.11-16 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.02.15) | 202 |
| 圖 6.11-17 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.05.01) | 203 |
| 圖 6.11-18 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.07.28) | 203 |
| 圖 6.11-19 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.04.30) | 203 |
| 圖 6.11-20 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.05.02) | 204 |
| 圖 6.11-21 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.09.10) | 204 |
| 圖 6.11-22 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.10.02) | 204 |

| | | |
|-----------|-------------------------|-----|
| 圖 6.11-23 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.10.07) | 205 |
| 圖 6.11-24 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.01.20) | 205 |
| 圖 6.11-25 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.02.08) | 205 |
| 圖 6.11-26 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.03.07) | 206 |
| 圖 6.11-27 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.08.05) | 206 |
| 圖 6.11-28 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.12.03) | 206 |
| 圖 6.12 | 壩體振動頻率與其對應之水位高程分佈圖 | 207 |
| 圖 6.13 | 天輪壩之強震儀配置圖 | 207 |
| 圖 6.14-1 | 上下游方向之加速度歷時(90.06.08) | 209 |
| 圖 6.14-2 | 上下游方向之加速度歷時(90.07.09) | 210 |
| 圖 6.14-3 | 上下游方向之加速度歷時(90.09.16) | 210 |
| 圖 6.14-4 | 上下游方向之加速度歷時(90.11.04) | 210 |
| 圖 6.14-5 | 上下游方向之加速度歷時(90.11.21) | 211 |
| 圖 6.14-6 | 上下游方向之加速度歷時(91.03.31) | 211 |
| 圖 6.14-7 | 上下游方向之加速度歷時(91.04.07) | 211 |
| 圖 6.14-8 | 上下游方向之加速度歷時(91.04.22) | 212 |
| 圖 6.14-9 | 上下游方向之加速度歷時(91.06.12) | 212 |
| 圖 6.14-10 | 上下游方向之加速度歷時(91.07.10) | 212 |
| 圖 6.14-11 | 上下游方向之加速度歷時(91.09.27) | 213 |

| | | |
|-----------|------------------------------|-----|
| 圖 6.14-12 | 上下游方向之加速度歷時(92.02.09)..... | 213 |
| 圖 6.14-13 | 上下游方向之加速度歷時(92.04.13)..... | 213 |
| 圖 6.14-14 | 上下游方向之加速度歷時(92.08.03)..... | 214 |
| 圖 6.14-15 | 上下游方向之加速度歷時(92.09.11)..... | 214 |
| 圖 6.14-16 | 上下游方向之加速度歷時(92.12.15)..... | 214 |
| 圖 6.14-17 | 上下游方向之加速度歷時(93.02.10)..... | 215 |
| 圖 6.14-18 | 上下游方向之加速度歷時(93.03.01)..... | 215 |
| 圖 6.14-19 | 上下游方向之加速度歷時(93.05.01)..... | 215 |
| 圖 6.14-20 | 上下游方向之加速度歷時(93.10.26)..... | 216 |
| 圖 6.14-21 | 上下游方向之加速度歷時(94.04.09)..... | 216 |
| 圖 6.14-22 | 上下游方向之加速度歷時(94.04.11)..... | 216 |
| 圖 6.14-23 | 上下游方向之加速度歷時(94.05.19)..... | 217 |
| 圖 6.14-24 | 上下游方向之加速度歷時(94.09.10)..... | 217 |
| 圖 6.14-25 | 上下游方向之加速度歷時(94.09.27)..... | 217 |
| 圖 6.14-26 | 上下游方向之加速度歷時(95.02.24)..... | 218 |
| 圖 6.14-27 | 上下游方向之加速度歷時(95.04.20)..... | 218 |
| 圖 6.14-28 | 上下游方向之加速度歷時(95.08.05)..... | 218 |
| 圖 6.15-1 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.06.08)..... | 220 |
| 圖 6.15-2 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.07.09)..... | 220 |

| | | |
|-----------|------------------------------|-----|
| 圖 6.15-3 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.09.16)..... | 220 |
| 圖 6.15-4 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.11.04)..... | 221 |
| 圖 6.15-5 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.11.21)..... | 221 |
| 圖 6.15-6 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.03.31)..... | 221 |
| 圖 6.15-7 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.04.07)..... | 222 |
| 圖 6.15-8 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.04.22)..... | 222 |
| 圖 6.15-9 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.06.12)..... | 222 |
| 圖 6.15-10 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.07.10)..... | 223 |
| 圖 6.15-11 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.27)..... | 223 |
| 圖 6.15-12 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.02.09)..... | 223 |
| 圖 6.15-13 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.04.13)..... | 224 |
| 圖 6.15-14 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.08.03)..... | 224 |
| 圖 6.15-15 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.09.11)..... | 224 |
| 圖 6.15-16 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.12.15)..... | 225 |
| 圖 6.15-17 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.02.10)..... | 225 |
| 圖 6.15-18 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.03.01)..... | 225 |
| 圖 6.15-19 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.05.10)..... | 226 |
| 圖 6.15-20 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.10.26)..... | 226 |
| 圖 6.15-21 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.04.09)..... | 226 |

| | | |
|-----------|-------------------------|-----|
| 圖 6.15-22 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.04.11) | 227 |
| 圖 6.15-23 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.05.19) | 227 |
| 圖 6.15-24 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.09.10) | 227 |
| 圖 6.15-25 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.09.27) | 228 |
| 圖 6.15-26 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.02.24) | 228 |
| 圖 6.15-27 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.04.20) | 228 |
| 圖 6.15-28 | 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.08.05) | 229 |
| 圖 6.16-1 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.06.08) | 230 |
| 圖 6.16-2 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.07.09) | 230 |
| 圖 6.16-3 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.09.16) | 230 |
| 圖 6.16-4 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.11.04) | 231 |
| 圖 6.16-5 | 上下游方向之加速度傳遞函數(90.11.21) | 231 |
| 圖 6.16-6 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.03.31) | 231 |
| 圖 6.16-7 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.04.07) | 232 |
| 圖 6.16-8 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.04.22) | 232 |
| 圖 6.16-9 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.06.12) | 232 |
| 圖 6.16-10 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.07.10) | 233 |
| 圖 6.16-11 | 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.27) | 233 |
| 圖 6.16-12 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.02.09) | 233 |

| | | |
|-----------|------------------------------|-----|
| 圖 6.16-13 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.04.13)..... | 234 |
| 圖 6.16-14 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.08.03)..... | 234 |
| 圖 6.16-15 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.09.11)..... | 234 |
| 圖 6.16-16 | 上下游方向之加速度傳遞函數(92.12.15)..... | 235 |
| 圖 6.16-17 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.02.10)..... | 235 |
| 圖 6.16-18 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.03.01)..... | 235 |
| 圖 6.16-19 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.05.01)..... | 236 |
| 圖 6.16-20 | 上下游方向之加速度傳遞函數(93.10.26)..... | 236 |
| 圖 6.16-21 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.04.09)..... | 236 |
| 圖 6.16-22 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.04.11)..... | 237 |
| 圖 6.16-23 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.05.19)..... | 237 |
| 圖 6.16-24 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.09.10)..... | 237 |
| 圖 6.16-25 | 上下游方向之加速度傳遞函數(94.09.27)..... | 238 |
| 圖 6.16-26 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.02.24)..... | 238 |
| 圖 6.16-27 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.04.20)..... | 238 |
| 圖 6.16-28 | 上下游方向之加速度傳遞函數(95.08.05)..... | 239 |

一、計畫緣起及目的

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。

本團隊於 94 年度已完成水利署「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之適用性及提升分析精度；另

針對監測與檢測結果回饋分析方面，透過數值分析之協助，研擬異常現象診斷方法；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。

本計畫第一年(95 年)在監測技術改善研發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；非破壞性檢測技術與精度之改良第一年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；在壩體安全診斷方法方面分別以鯉魚潭壩和新山壩為模擬對象進行土石壩滲漏問題之情境模擬分析，探討土石壩之壩體內一旦出現缺陷或裂縫時之滲流可能之異常問題，並建立混凝土拱壩結構之系統識別分析方法。本計畫第二年(96 年)，將持續監測、非破壞性檢測及壩體安全診斷方法之研究。

二、計畫工作項目

本(96)年度工作項目分述如下：

(一) 先進傳輸線式監測技術之研發

- 1.光纖水壓計的封裝與安裝設計及耐久性評估。
- 2.光纖、TDR 監測技術多工化與自動化擷取系統之整合。
- 3.建立大型 TDR 受剪物理模型與變形率定關係，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

- 1.震波檢測技術改良，探討如何提升表面波震測空間解析度及探測深度，以及多次模態與地形效應之影響與對策。
- 2.不同問題與壩體條件選用適當檢測技術的評估方法雛型建立。

(三) 壩體安全診斷系統研究

混凝土重力壩地震儀資料系統識別分析，並以 2 座混凝土重力壩為例，建立以地震儀資料進行混凝土壩系統識別之安全診斷分析方法。

(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

(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 解讀儀可以辯解 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 δ 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帶寬度增加，對應啟動位移量 δ_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形容易受滑動變形。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情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) 垂直裂縫影響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，使部份下游殼層濕潤。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

四、先進傳輸線式監測技術之研發

光纖光柵（FBG）與電磁波時域反射（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。本計畫先進傳輸線式監測技術之研發以三年（95 至 97 年度）為期，其主要工作項目包括：研發光纖、TDR 或其他先進傳輸線式監測技術，包括變形、水壓等被動式感測元件及資料分析方法，並考慮壩體全面性使用之經濟效益，研發多工化與自動化擷取系統，並將研發結果進行監測設備現場安裝測試。

本(96)年度的工作項目如下：

- 1.光纖水壓計的封裝與安裝設計及耐久性評估。
- 2.光纖、TDR 監測技術多工化與自動化擷取系統之整合。
- 3.建立大型 TDR 受剪物理模型與變形率定關係，並研究可提早偵測滑動面發生的訊號分析方法。

4.1 光纖光柵水壓計之改善研發及耐久性評估

有別於傳統電子式感應器，光纖光柵監測具有可在單一傳輸線上串接多點監測、不受電磁波干擾、無電子感應裝置及抗雷擊的特點，利用光纖光柵感應的特色研發適合水庫長期安全監測之光纖光柵水壓計。單一鑽孔內可裝設多點水壓計觀測的特點可降低鑽孔數量，無

電子感應裝置及抗雷擊的特點有助於降低儀器損壞的頻率。於 95 年度之研究中已完成兩個 FBG 水壓計的原型，但基於現地安裝之便利性與新型材料耐久性未知的考量下，感測器之封裝設計與耐久性還需要進一步的發展與評估，其結果詳述於此節中。

4.1.1 光纖光柵水壓計原理

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：

漸變週期式FBG波峰寬度分析：漸變週期式FBG是指FBG內的光柵應變之分部是漸變的(如圖 4.1)，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 4.2所示。

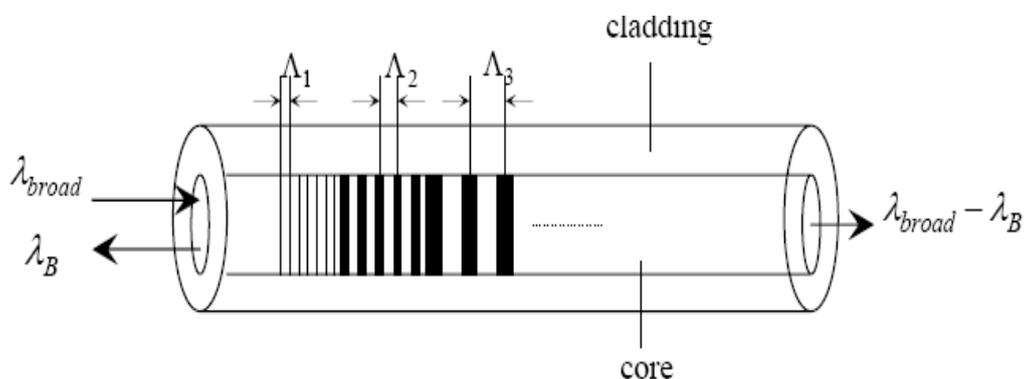


圖 4.1 光纖光柵內連續遞增之漸變應變

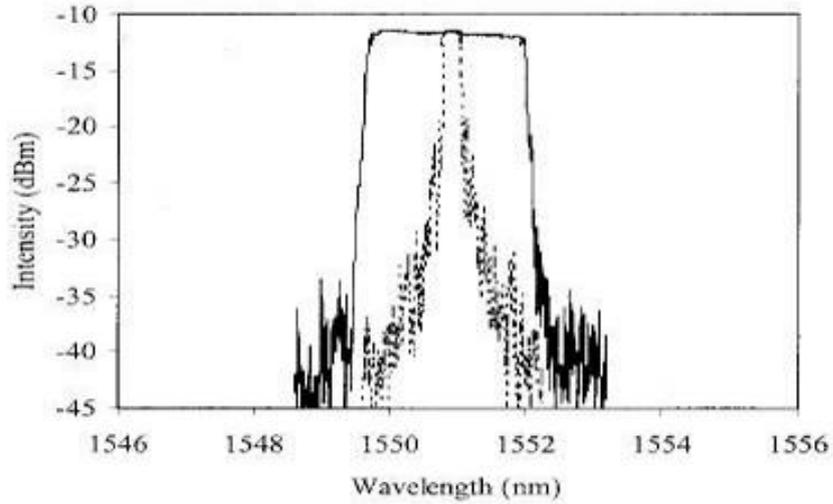


圖 4.2 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變

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 4.3），假設一個FBG初始波長為 λ_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 λ_2 ，而此波峰變寬量會正比於FBG應變量。

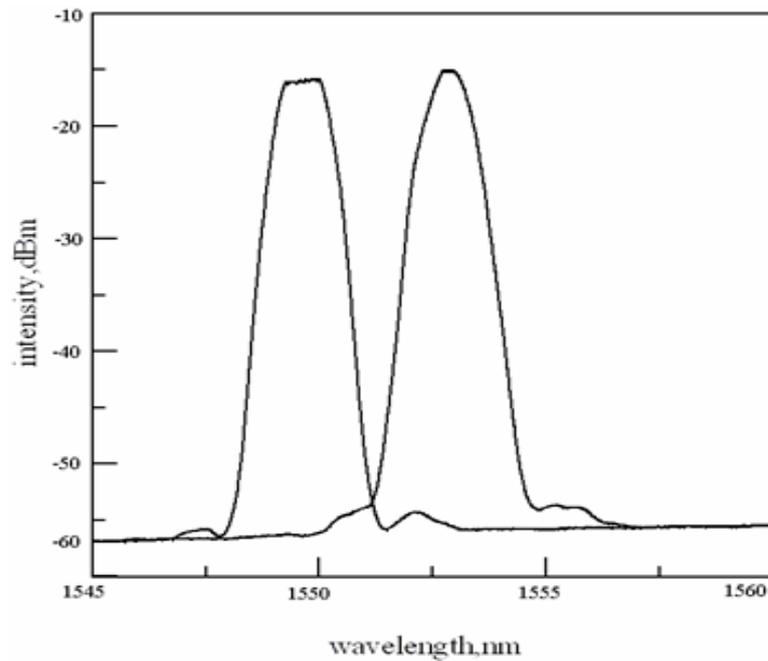


圖 4.3 FBG 波長飄移分析示意圖

採用漸變週期式FBG來製作水壓計如圖 4.4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 4.3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。

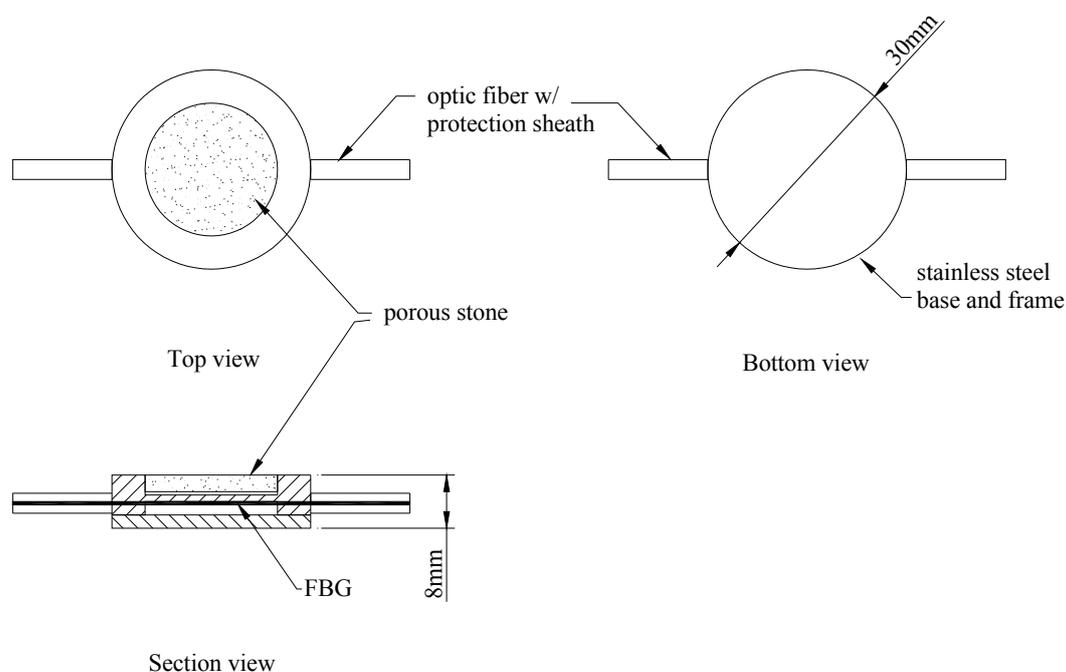


圖 4.4 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖

圖 4.5展示使用等週期式使用FBG波峰飄移與壓力間之關係來設計。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 4.6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 1.5mm，適合於現階段安裝於現有之開孔式水位計內。

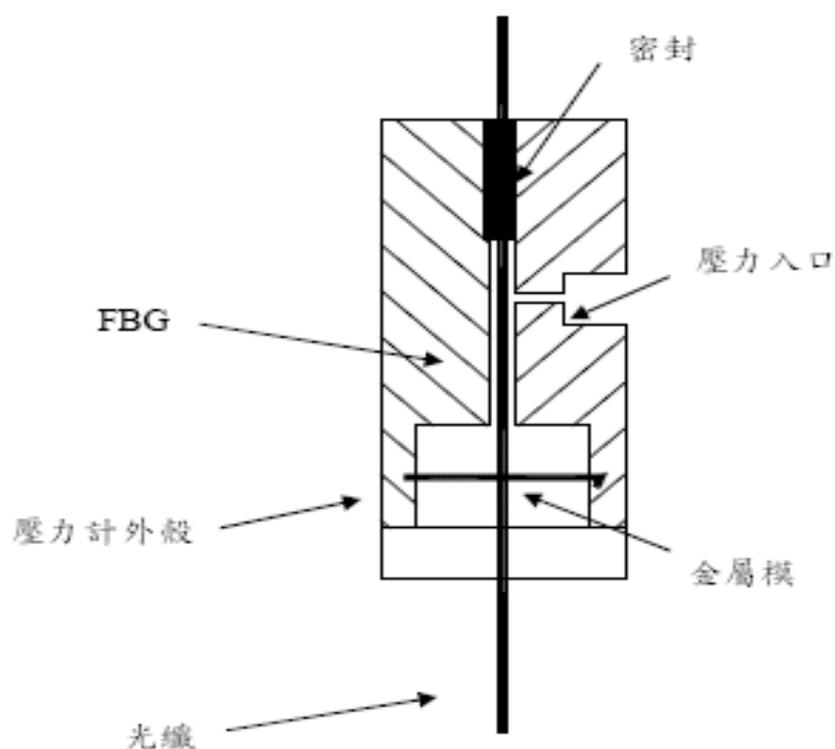


圖 4.5 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

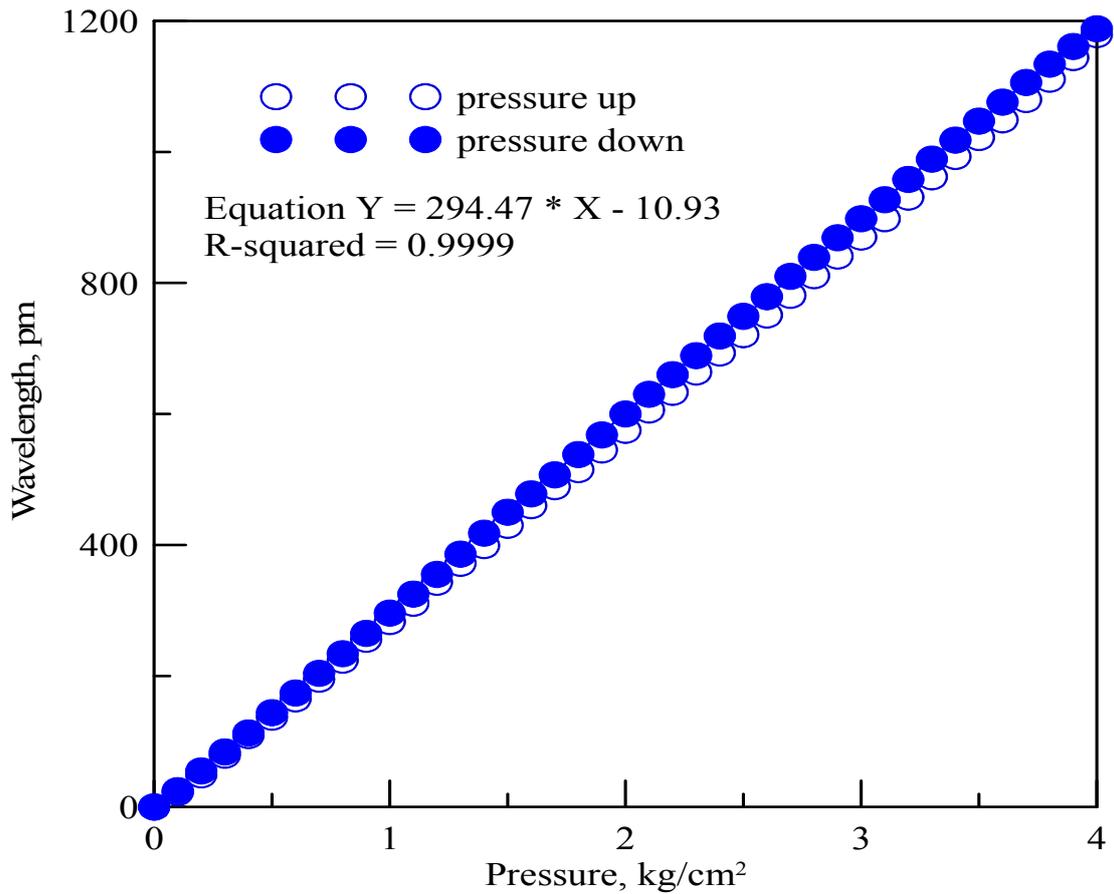


圖 4.6 等週期波長式 FBG 水壓計標定結果

4.1.2 光纖黏貼膠之選擇與黏著性試驗

貼膠與鋼筋介面之黏著力測試，本研究分別使用三種不同種類的黏貼膠作測試，本研究團隊所使用之黏貼膠的材質均為環氧樹脂成分，其型號分別為A膠為JA643、B膠為 353ND及C膠為Power3077，而三種膠的使用方法如表 4.1所示。圖 4.7為黏貼膠與鋼筋介面之黏著力測試過程圖，其測試方法為將光纖一端黏貼於鋼筋表面，另一端黏貼於測微計上方的鋁片。當旋轉測微計之旋桿時，使得測微計上方之鋁片向左移動，而光纖將會趨於緊繃狀態。若破壞處為黏貼膠與鋼筋

介面時，則代表其黏貼膠與鋼筋介面之黏著力不足，反之，破壞處為光纖本體時，代表其黏貼膠與鋼筋介面的黏著力足夠。經測試結果後，其破壞處都於光纖本體，表示此三種類型的黏貼膠黏著力足夠。

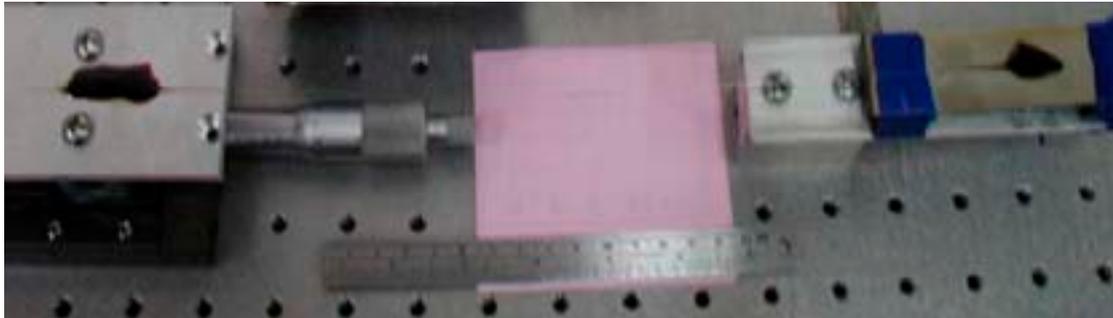


圖 4.7 黏貼膠與鋼筋介面之黏著力測試過程圖

根據前述測試結果得知，所使用之三種類型的黏貼膠對於鋼筋介面的黏著力是足夠的，但因外在環境的不確定因素及耐候性之問題，所以本研究將針對三種類型的黏貼膠作一試驗，其試驗方法為將FBG先施加預力後，分別用三種類型的黏貼膠，黏貼於鋼筋表面，如圖 4.8所示。將黏貼於鋼筋表面之FBG放置於恆濕恆溫箱中，見圖 4.9。

而本研究所設定恆濕恆溫箱的加溫速率為 $20^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ ，最高溫度維持在 80°C 且持續維持 15 小時，降溫速率與加溫速率相同。由圖 4.9可看出，所使用之B和C黏貼膠在溫度 80°C 的情況下，FBG的波長值會隨著時間增加而慢慢降低，尤其以C黏貼膠降低速率愈快，則表示B和C黏貼膠的黏著力會因溫度所影響。反觀所使用之A黏貼膠，其FBG波長值不會因時間增加而降低，代表其黏著力不會因溫度所影響。

表 4.1 黏貼膠特性說明

| 型號 | 外觀 | 黏度(cp) | 耐溫(°C) | 固化時間 | 完全固化 | 特性 |
|------------|-----|--------------|---------|---|-------|--|
| POWER 3077 | 透明 | 1000 | -54~95 | 15~30 秒 | 24 小時 | <ol style="list-style-type: none"> 1.不活化材質 2.高黏度 3.大間隙填補 4.高耐震 |
| 353ND | 琥珀色 | 3000~5000 | -55~250 | 80°C：30 分鐘 100°C：10 分鐘 120°C：5 分鐘 150°C：1 分鐘 | | <ol style="list-style-type: none"> 1.高黏著性 2.高透光性 3.高穩定性 |
| JA643 | 淡黃色 | 90000~110000 | -40~135 | 135°C：45 分鐘 | | <ol style="list-style-type: none"> 1.高穩定性 2.耐衝擊 3.高黏著性 |

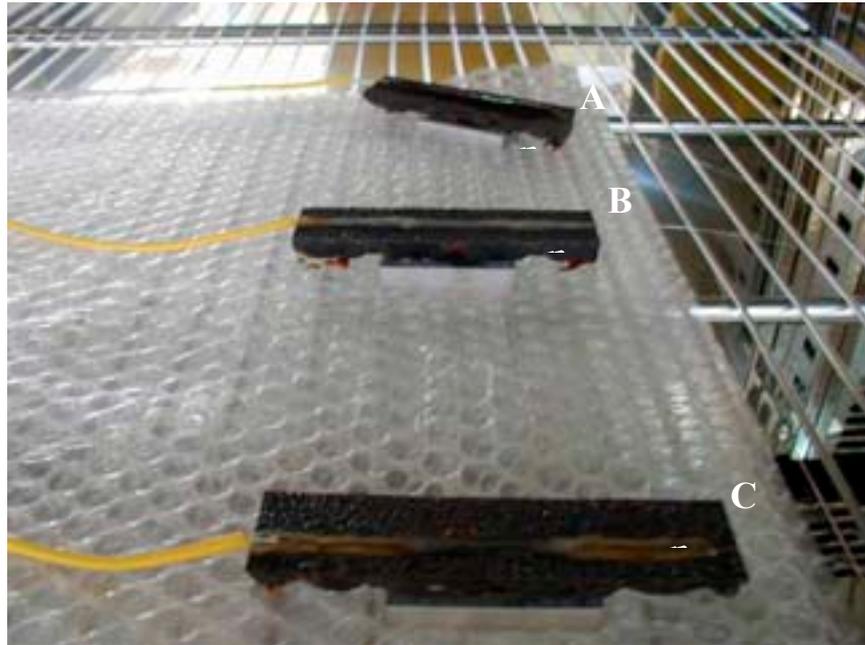


圖 4.8 測試試體於恆濕恆溫相箱示意圖

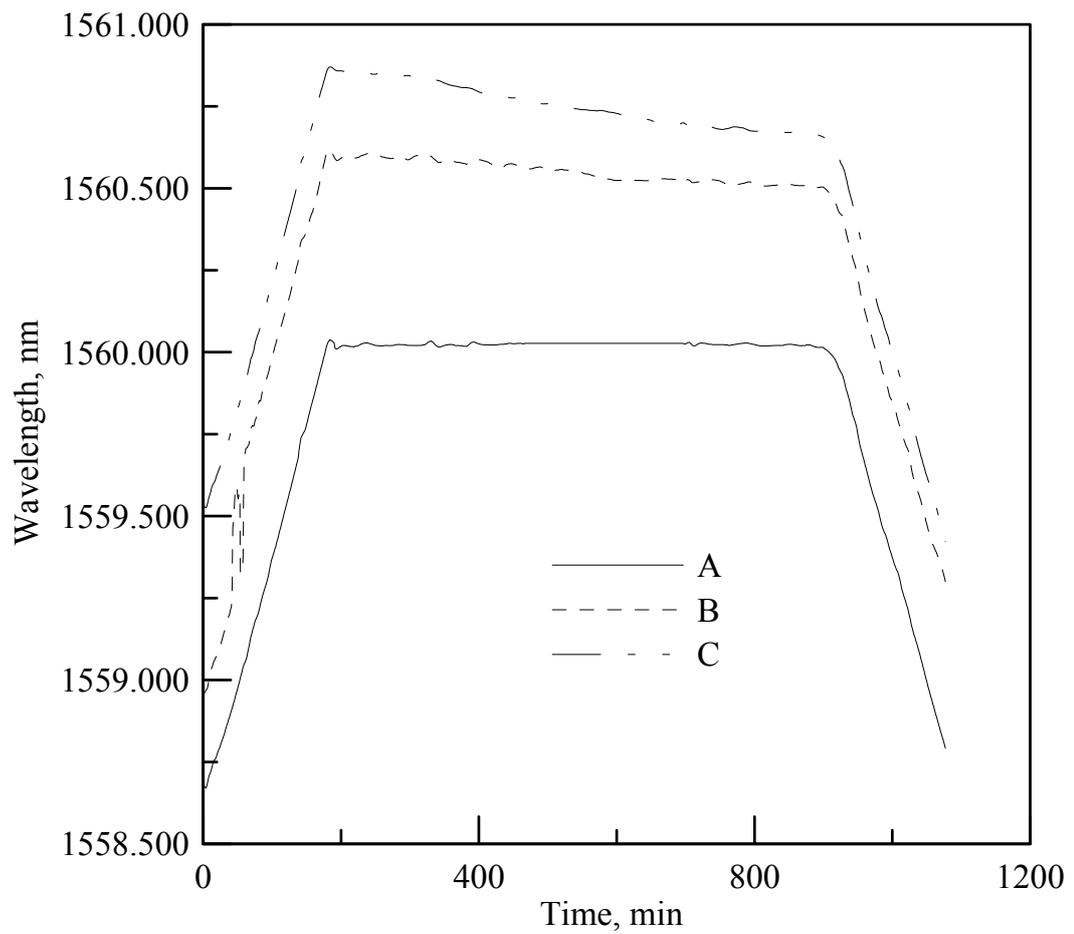


圖 4.9 黏貼膠受熱時 FBG 之讀數變化圖

另外，本團隊再次針對三種黏貼膠，黏貼於鋼模片施作八次來回之-20度至70度溫度測試，如圖4.10所示。圖4.11與圖4.12所呈現結果，該兩種黏貼膠並不會受來回高低溫溫度影響其黏著力大小。圖4.13，當C膠進行第二次來回溫度測試時，可發現其黏著力明顯下降許多，隨後幾次來回溫度測試，黏著力下降幅度趨於平緩。

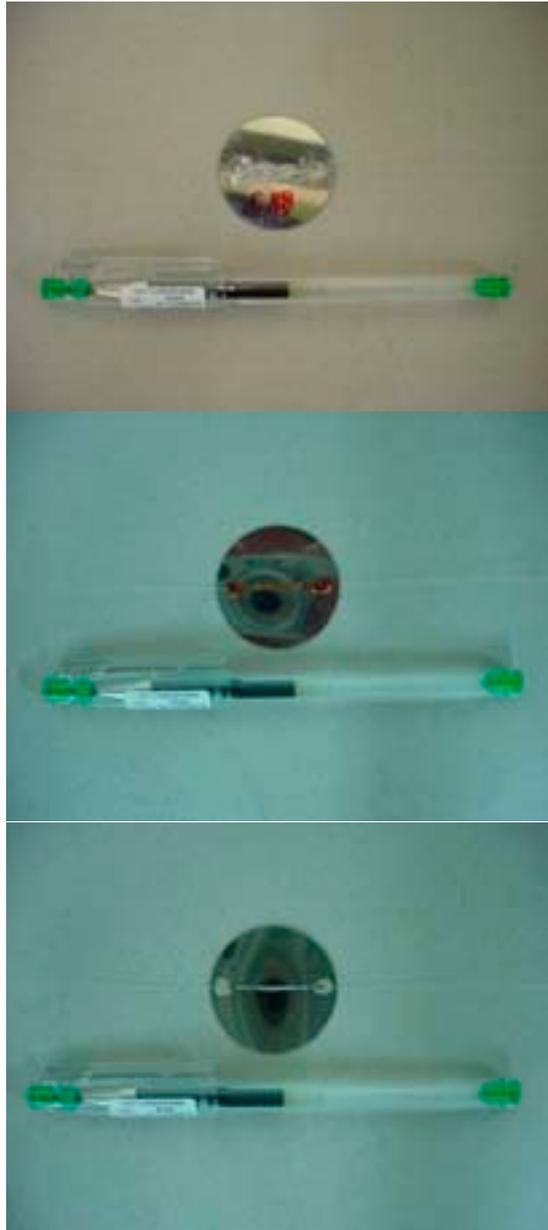


圖 4.10 三種黏貼膠於鋼模片之黏著力測試

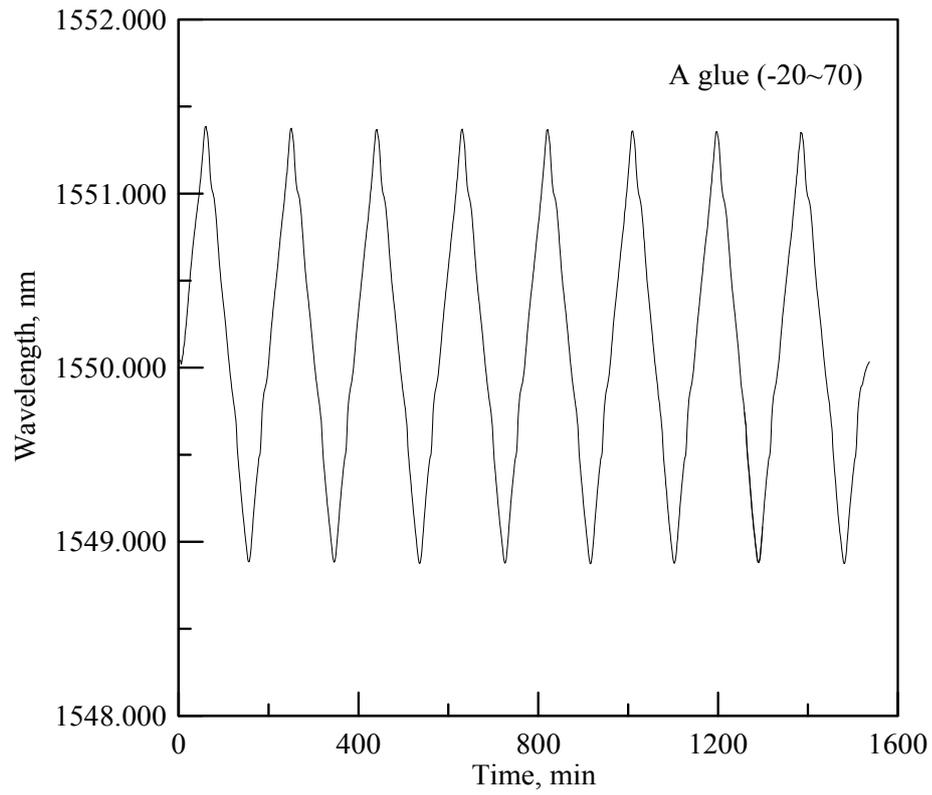


圖 4.11 A 膠黏著力測試結果圖

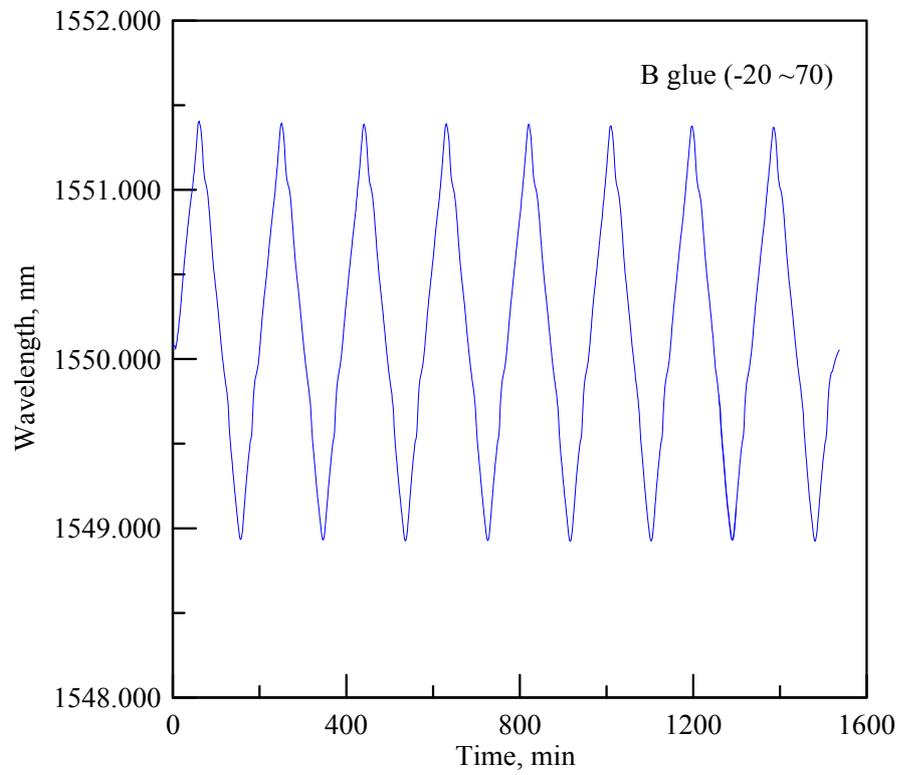


圖 4.12 B 膠黏著力測試結果圖

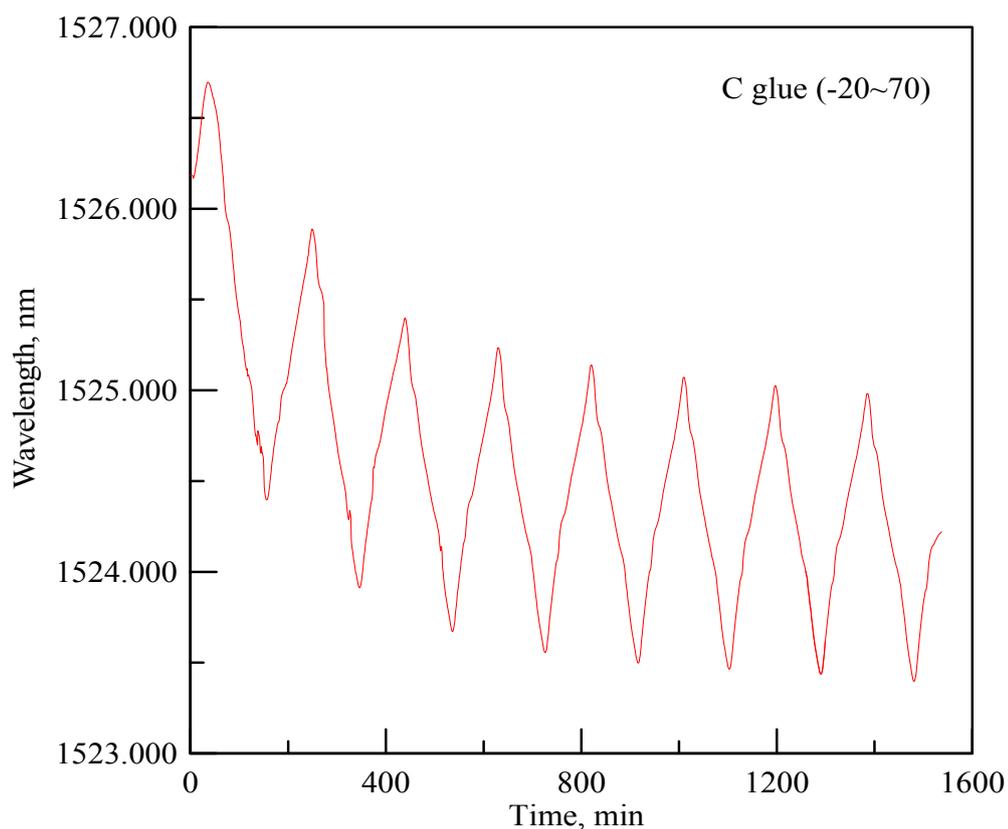


圖 4.13 C 膠黏著力測試結果圖

綜合上述的結果，本研究將採用 A 黏貼膠黏貼 FBG 於鋼筋表面。

4.1.3 光纖光柵水壓計之改良

原等週期式光纖光柵水壓計如圖 4.5 所示，使用單一金屬模，當等週光纖光柵水壓計因水位或水壓發生變化時，其鋼模片會產生一位移量，而等週光纖光柵水壓計靈敏度的高低，主要取決於鋼模片之位移量的大小，一般本研究所研發之光纖光柵水壓計，可感受 2.8~3.5cm 的水位變化，圖 4.14 及圖 4.16 為等週期光纖光柵水壓計受力狀態示意圖與單鋼模片光纖光柵水壓計實體圖。

但對於水位變化甚小的地區，其等週期光纖光柵水壓計之靈敏度較低，本次改進將增加一片金屬模使得光纖光柵兩端都與金屬模連接，如此其靈敏度應該可以增加一倍，如圖 4.15 及圖 4.17 所示。

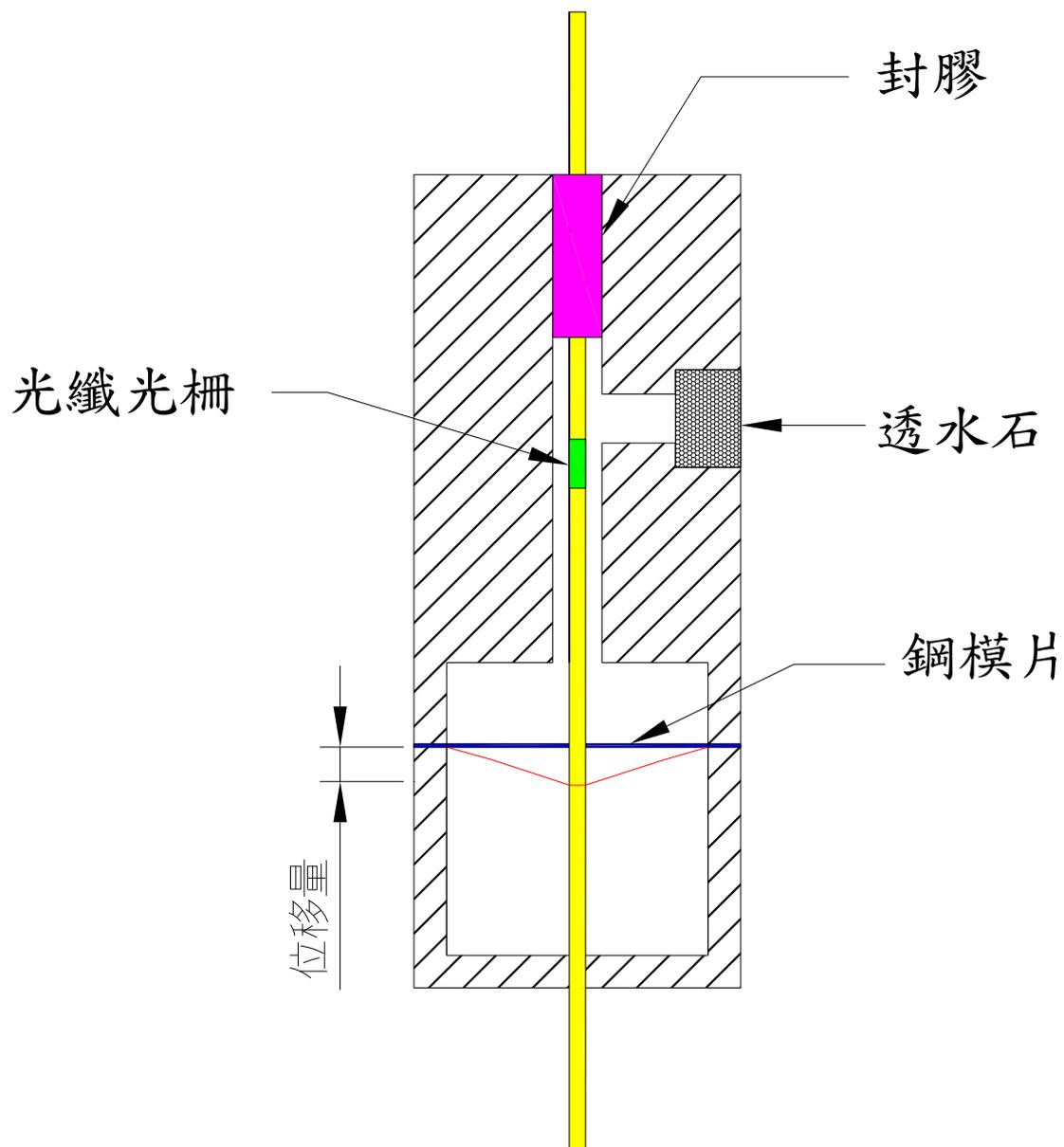


圖 4.14 等週期光纖光柵水壓計受力狀態示意圖

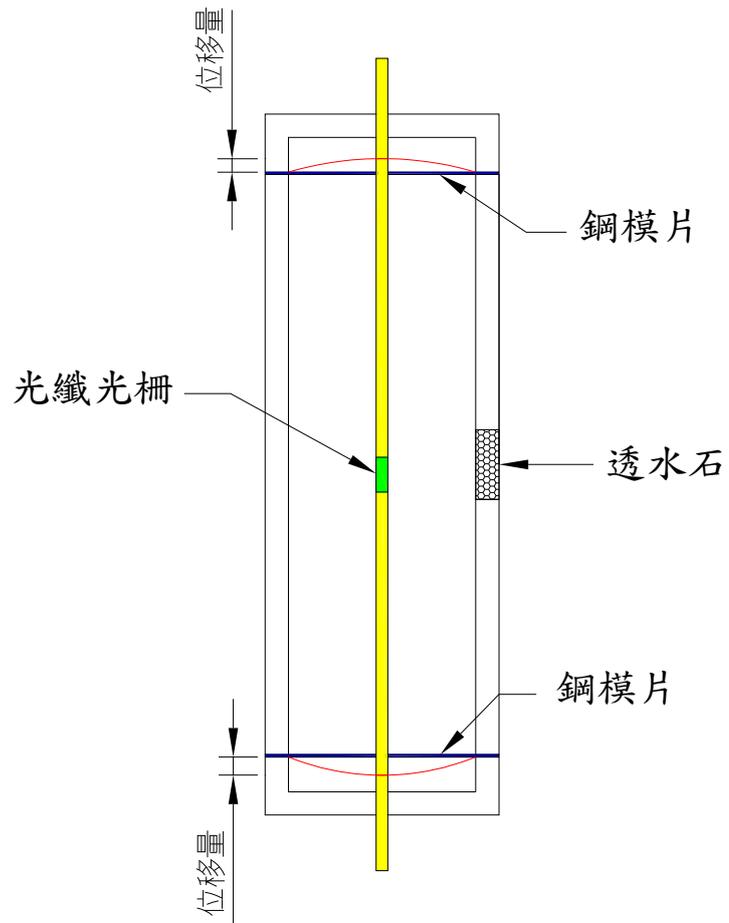


圖 4.15 雙鋼模片之等週期光纖光柵水壓計受力圖



圖 4.16 單鋼模片之等週期光纖光柵水壓計實體圖



圖 4.17 雙鋼模片之等週期光纖光柵水壓計實體圖

圖 4.18為雙鋼模片之光纖柵水壓計之率定圖，其可感測水位之靈敏度為3.17cm的水位變化，與預期可增加一倍的靈敏度有些差異，因等週期光纖光柵水壓計為感測光纖光柵應變變化量，而應變量的大小會受到光纖光柵兩點的固定距離大小而有所改變，故研判為兩鋼模片的距離需減少一半，才可達到所需的靈敏度。

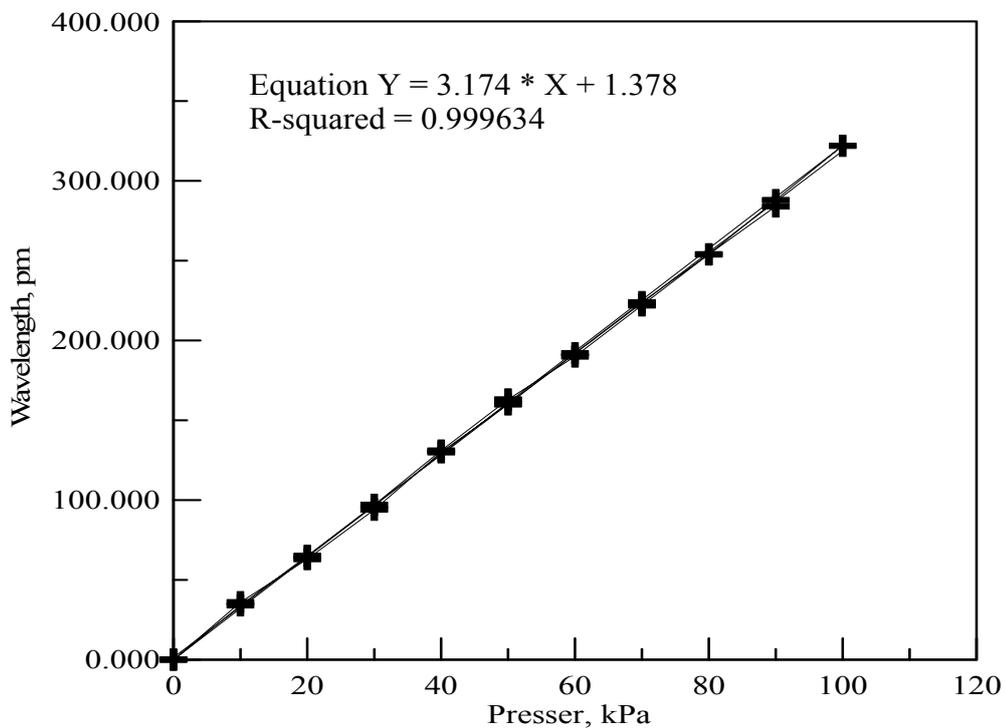


圖 4.18 雙剛模片之等週期光纖光柵水壓計率定圖

考量將等週期光纖光柵水壓計量測範圍提升至 10kg/cm² 的受壓需求，

另設計一光纖光柵水壓計尺寸為長度 7 公分；直徑為 3 公分，而靈敏度可感測 5cm 之水位變化，圖 4.19 為其實體圖，圖 4.20 為其率定圖。



圖 4.19 等週期光纖光柵實體圖(量測範圍 10kg/cm²)

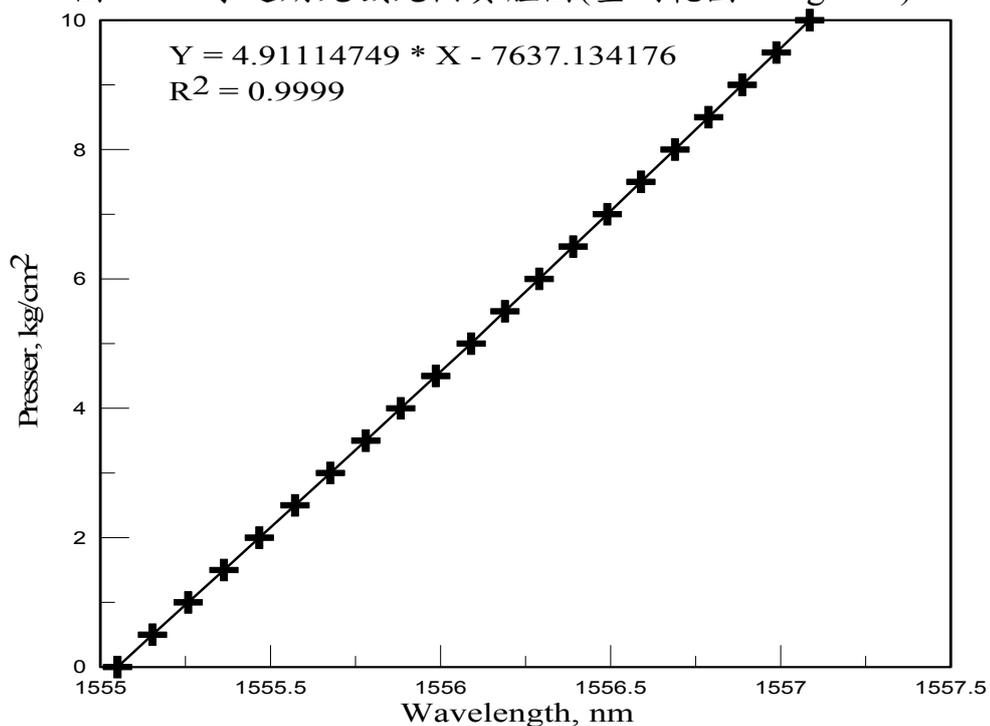


圖 4.20 等週期光纖光柵水壓計率定圖(範圍 10kg/cm²)

4.1.4 光纖光柵水壓計之封裝與安裝設計

傳統開口式水位計以手動的方法量測，由於封層不易，在同一鑽孔中通常只能安裝兩個水位計。近來有用電子式水壓計放入水位計內以便於自動紀錄水位之變化。但電子式設備有耐用性不佳，易受電磁波干擾等之缺

點。本研究預計將採取的方式為將等週期FBG水壓計固定於長 0.5m、直徑約為 2.5mm的PVC管內，而PVC管外將予以打孔和包不織布並在孔內上下處予以隔絕，只能使得該範圍透水，而該部分稱為感測單元。至於連接部份，以相同直徑大小之PVC管作銜接以保護光纖傳輸線，其在鑽孔內之裝設示意圖如圖 4.21所示。此一安排有利於水壓計之現場安裝，光纖光柵水壓計以及其連接之PVC管可以直接安裝於鑽孔中而無須另外安裝水位管。感測單元周圍之鑽孔以透水材料（例如礫石）回填，連接部份周圍則以不透水材料（例如白皂土）回填，如圖 4.21所示。

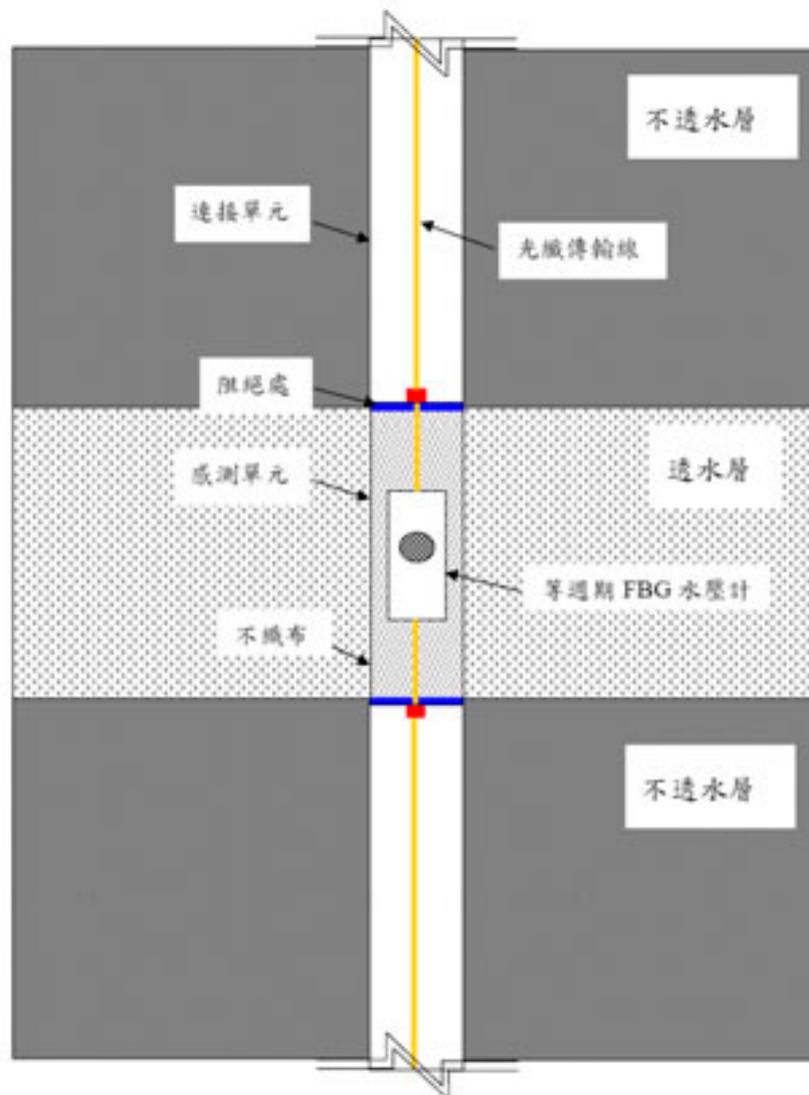


圖 4.21 等週期 FBG 水壓計裝置改良示意圖

圖 4.22所示，將製作完成之等週期光纖光柵水壓計放置於具有篩孔之PVC管中心處，依據需求其具有篩孔之PVC長度可依業主或量測範圍需要而調整，而本次所製作之感測單元長度為 2 公尺，而阻隔層設置於距離PVC管兩端處往內各 15 公分處，其方法是使用現有之水管塞頭並用拉釘與以固定，最後灌注灌注膠增加其阻絕效果。因此，即可量測該範圍之水壓變化，圖 4.23為感測單元實體圖。

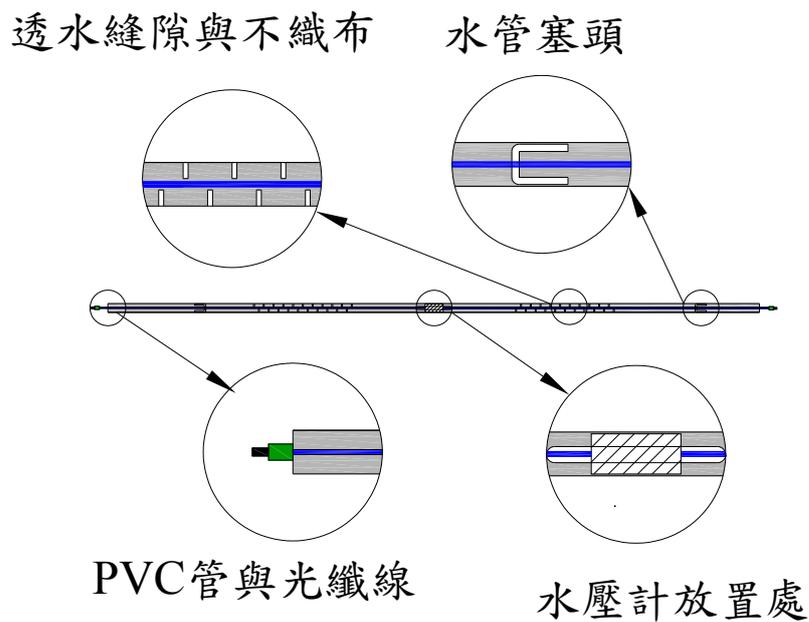


圖 4.22 等週期光纖光柵水壓計於具有篩孔之 PVC 管配置圖



圖 4.23 感測單元實體圖

為了證明阻隔層之阻隔效果，本團隊先利用未具有篩孔之PVC管作測試並在PVC管內埋設光纖傳輸線，其測試架構如圖 4.24與圖 4.25所示。而測試方法如下說明：

步驟一：封層

先使用「水管膠」將套有光纖線的水管塞頭與測試用 PVC 管之間的縫隙予以封住，再以「拉釘」將 PVC 管與水管塞頭固定，最後以「灌注膠」將水管塞頭填滿 5-8 公分，等待膠乾即完成「封層」。

步驟二：壓力測試

將裝有光纖線並封層完成之PVC管一端給予輸入 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 之壓力（約 300kPa ），當PVC管內壓力達到 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 之壓力時，透過輸入壓力之管線所配置之閥門阻斷壓力源，藉由PVC管另一端所配置之電子式水壓計及運用 Agilent 電表連續擷取PVC管管內之壓力變化，假若PVC管內壓力隨時間變小時，則代表阻隔層未阻隔確實。圖 4.26 為連續擷取PVC管內壓力變化圖，由該圖可知PVC管內壓力並未明顯減少，代表此阻隔方法是可行的，而PVC管內壓力微量的變動，在感測儀器誤差範圍之內，主要是電子式水壓計受外界溫度變化所影響，使得量測壓力值有些微的變動。

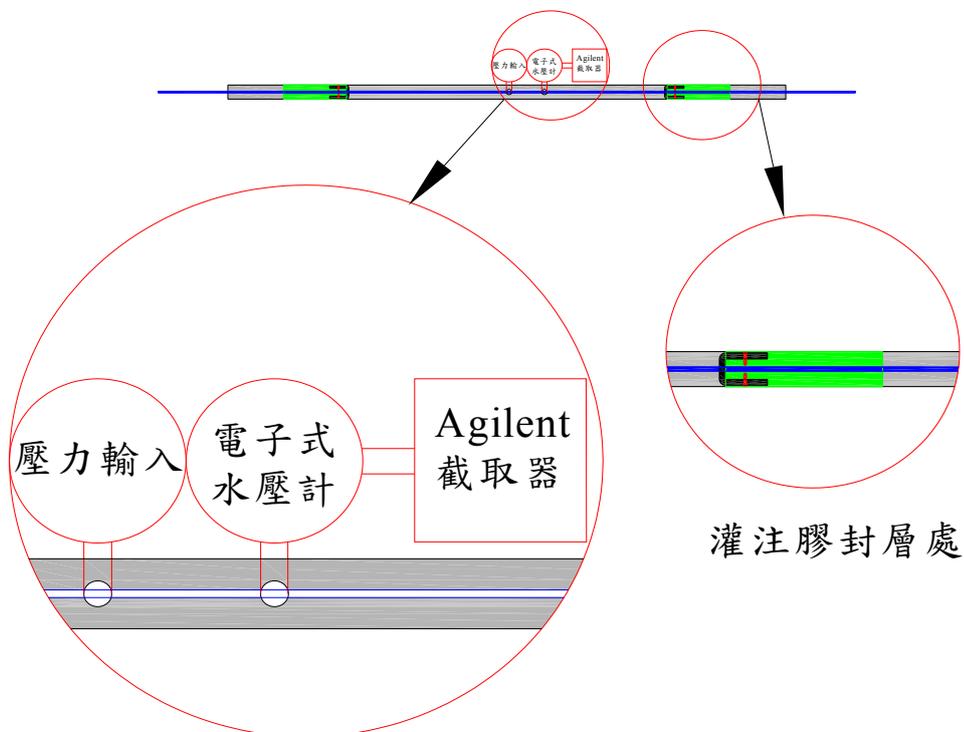


圖 4.24 阻隔層測試架構圖



圖 4.25 PVC 管壓力封層測試實體

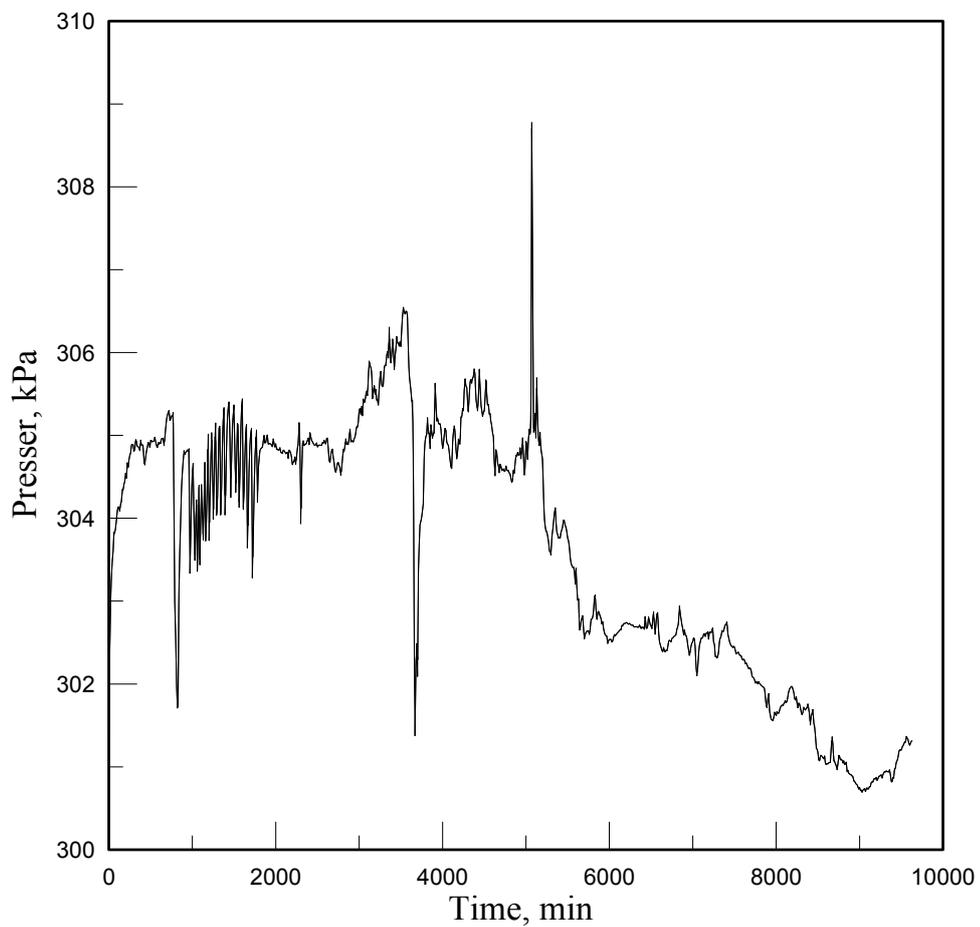


圖 4.26 PVC 管內壓力隨時間變化圖

4.1.5 光纖光柵水壓計之耐久性評估

關於老化試驗本研究根據中華民國國家標準 CNS 3556 進行，其步驟如下：

1. 所用之老化試驗機或類似裝置，其溫度之許可差不得超出 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

2. 老化試驗之溫度為要求為 70°C ，且依照本研究之需要將等週期 FBG 水壓計放入裝滿水之容器裡。
3. 試驗所需時間為 24hr、48hr、96hr、168hr、336hr，每階段皆記錄需要之數據。

如圖 4.27所示，將等週期式光纖光柵水壓計至於裝滿水之容器中，並將水溫加至 70°C 及使得水溫變化不超過規範所規定之容許範圍值(見圖 4.28 所示)。爾後，分別記錄每階段之數據。而圖 4.29顯示本次試驗所得之結果，該圖所呈現當時間增加至 5000 分鐘而FBG波長值變動量約為 70pm，初步評估其等週期式FBG水壓計並未有脫膠現象，但後續仍需將等週期FBG水壓計重新標定並與未施作老化試驗前所做試驗結果相互比較。

圖 4.30所示，為等週期式FBG水壓計置放於密閉式儲存槽中，並予以加壓至 300kPa ($\sim 3\text{kg}/\text{cm}^2$)及維持至 5000 分鐘，由此圖所得出FBG波長變動量約為 20pm，其表示在固定依壓力作用下($\sim 3\text{kg}/\text{cm}^2$)，初步評估等週期式FBG水壓計受潛變效應約 $20\mu\epsilon$ 。圖 4.31為等週期式FBG水壓計潛變試驗過程試驗之架設。



圖 4.27 等週期式 FBG 水壓計置於裝滿水之容器示意圖



圖 4.28 恆濕恆溫加熱過程示意圖

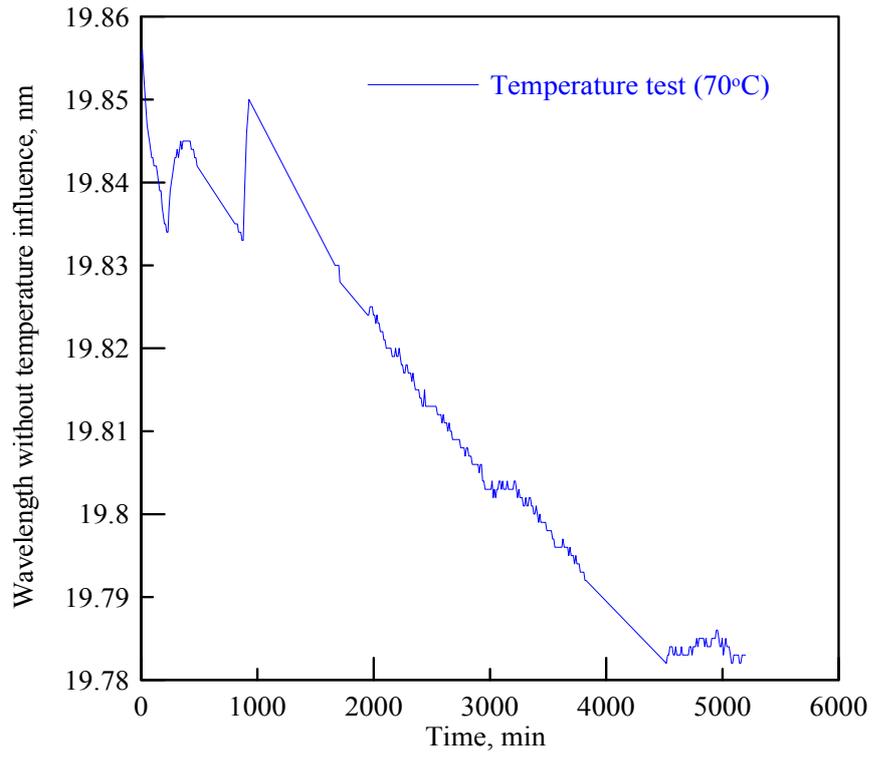


圖 4.29 等週期式 FBG 水壓計老化試驗結果圖

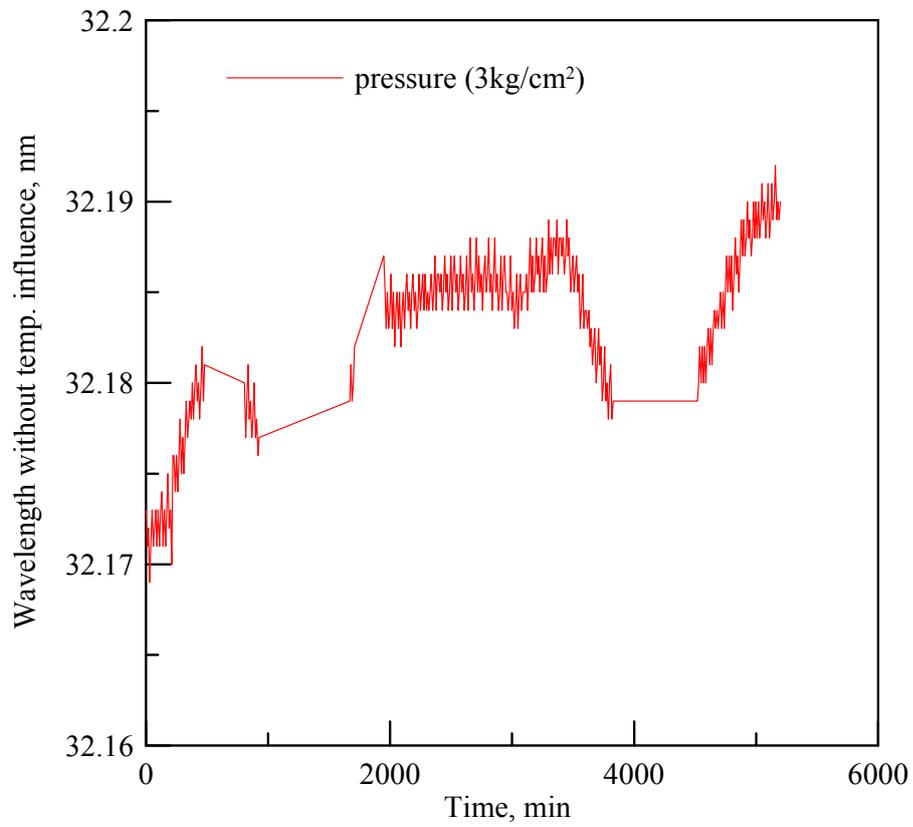


圖 4.30 等週期式 FBG 水壓計潛變試驗結果圖

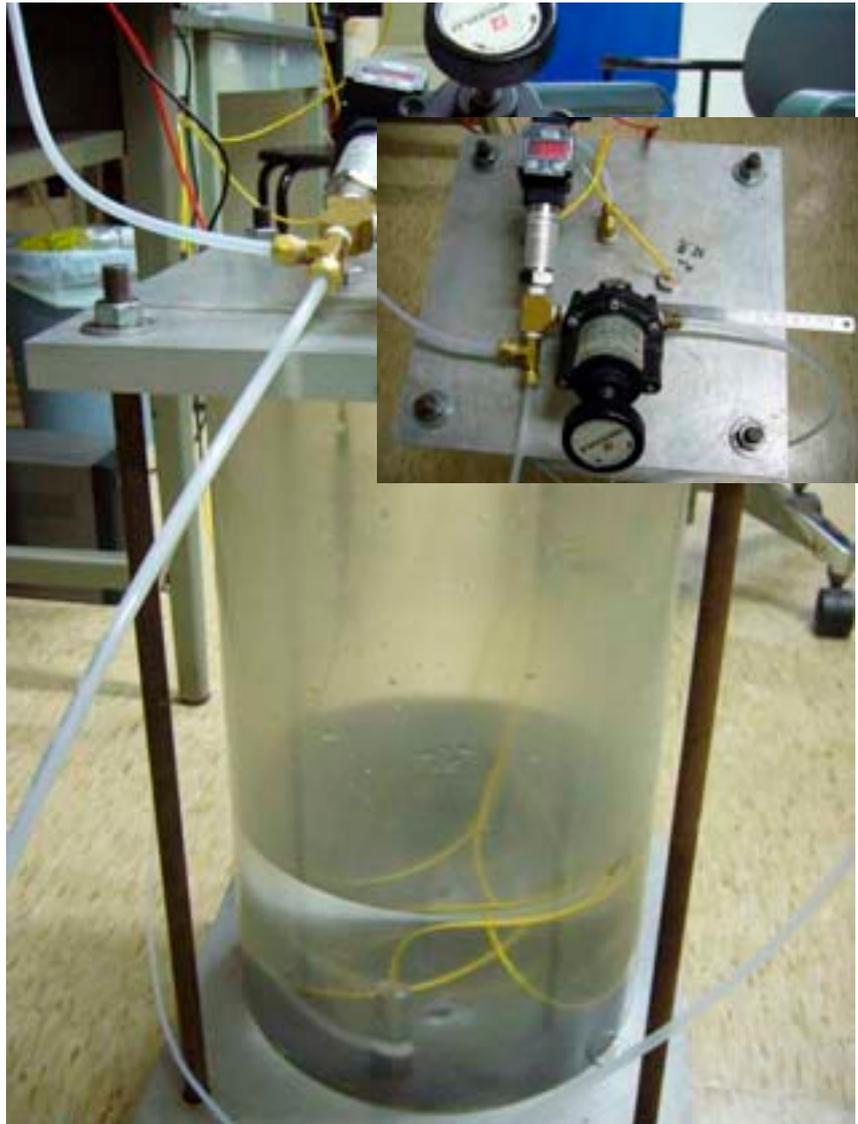


圖 4.31 等週期式 FBG 水壓計潛變試驗過程示意圖

4.2 光纖光柵自動化擷取系統整合

土木工程系統監測，例如橋樑、水庫壩體結構、隧道與天然邊坡等，常需在偏遠，不易到達而潮濕惡劣環境下進行。感測系統之電源需求與耐久性為重要考量因素。光纖光柵感測器使用光做為感應與訊號傳遞之媒介，其功能遠勝於傳統常用之電子式監測裝置。唯現有商業用光纖光柵解讀系統大多使用 PC based 之 DAQ 介面做為光路控制與光訊號分析之用。電子式監測系統常用之 data logger 雖然可以用來做光纖光柵訊號紀錄之用，但在訊號即時解讀與分析之功能有限，系統開發耗時。研究團隊使用

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；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。CompactRIO 只有在需要遠端展示/紀錄數據或發佈預警資訊時才需使用網路與 PC 連接。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。此一系統將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做土木工程系統現地，長期自動化監測之用。而光纖光柵自動化擷取系統主要分為三大技術，其說明如下。

網路傳輸技術：

由於現地的環境惡劣與不安全，傳統使用的測傾儀大多需要人工現場計讀，一方面監測頻率低，另一方面在現地環境惡劣時也不適合人工現場作業。光纖光柵監測系統在使用 Real-Time 控制器與 FPGA 模組後已經可以達到自動化監測、分析的功能，而這些監測資訊也可以透過 LabVIEW 程式語言與網路技術做連結，使得分析運算後的結果可以即時的呈現達到預警的功效，更可以透過網路的傳輸將運算簡化後的資訊傳回使用著端儲存。

目前光纖光柵監測系統所使用的是 LabVIEW 最新的網路技術 Share Variable，它提供廣域變數的技術，可以在 LabVIEW 環境下，透過此一技術在所有的分布式應用中存取任何類型的資料，使用 Share Variable 可以藉由網路的技術分享資料在單一程式的迴圈之中或是介於不同的程式之間，甚至是在不同網路位置的儀器上。相對於在 LabVIEW 中現存的許多技術例如：

TCP (Transmission Communication Protocol)、UDP (Universal Data gram Protocol)、Data Socket與VI Server等技術，Share Variable 是一種典型的簡化技術，而且其底層仍舊是使用TCP/IP的架構，不但傳輸速度快，而且訊號最為準確可靠，參考表 4.2。它可以直接透過屬性的設定，建構出所需要的特定功能，達到分享資料的工作，而略過令人覺得煩雜的TCP/IP等低階的網路設定，與基本的程式碼撰寫工作。

表 4.2 LabVIEW 環境下各種網路技術的特性

| Protocol | Speed | Reliability |
|-----------------|--------------|--------------------|
| TCP | Fast | Lossless |
| UDP | Very Fast | Lossy |
| DataSocket | Fast | Lossy |
| VI Server | Slow | Lossless |

使用 Share Variable 有下列三種的基本變數型態(Variable Type)：single-process、network-published、time-triggered。一般較常使用的部分是 single-process、network-published 這兩種方式：Single-process 大多是使用在單一程式之間的資料分享，例如在許多平行迴圈當中，我們無法直接將某參數拉到另一個迴圈做運算，就可以利用 single-process 的 Share Variable。另一種情況則是在同一個設備儀器中的兩個不同程式，也是需要透過這樣的功能屬性設定，才能將資料做傳遞或是同步運算。這樣的特性相當便利於執行具有決定性影響的即時應用，也可以更進一步藉由 Real-Time FIFO

的技術將這些資料給不同使用者運用，並且確保這些資料不會失真。

Network-published 則是使用在不同儀器設備之間的不同程式之間，也可以簡易的透過網際網路將資料作傳遞或是分享的動作。而在使用 Share Variable 除了上述的類型是需要被適當的選擇：資料型態 (Data Type) 也是需要事先被定義，否則可能因為在不同儀器中的程式所產出的資料型態差異，將導致在不同程式之間資料的傳輸發生錯誤。

光纖光柵解讀系統中的使用者端並不一定都安裝有 LabVIEW 程式，但是我們仍然可以透過 LabVIEW 的環境之下，進行網路權限分享設定，利用超文件傳輸協定 (Hyper Text Transmission Protocol ; HTTP) 的網頁瀏覽格式，讓一般使用者使用網際網路瀏覽器 (Internet Explorer ; IE) 就可以觀看系統的監測資訊，完全不需要任何特殊介面，或是安裝任何其他軟體，達到簡易分享資訊的功能。

資料存取模式：

即時的監測資訊除了可以馬上讓使用者了解現地的情形外，如果可以将監測資訊儲存至遠端使用者的電腦中，這是利用網路技術將資料儲存在使用者的電腦，避免一般長期監測在現地的儀器可能發生的記憶空間不足的缺點。

在 LabVIEW 的環境下可以将資料儲存成文件檔的格式或是動態資料檔的型態。文件檔的優點是檔案位元小不佔記憶體空間，而動態檔案的優

點則是立即將現地的動態資料馬上還原成波形，方便使用者觀看。

即時預警功能：

監測系統除了可以在使用者介面即時觀察現地情況，並將資訊透過網路儲存外，當使用者無法長時間觀看監測畫面時，仍然有辦法可以獲得重大變化的訊息，預警功能就是在這樣的環境下所產生的需求。其可以透過撰寫程式完成警戒功能，將現地的量測物理量與預設管理值、行動值與警戒值做比較，當其超過安全範圍，將透過 E-Mail 或訊息通知等方式將系統所設定的訊息傳達給使用者端。使用者並不限定為一位，甚至可以一次傳送給多人，但是必須配合各家網路公司郵件伺服器是否允許未經驗證的使用者進行轉信，當系統如果轉信失敗會顯示出哪些收件者被拒絕，可以此檢視哪些使用者並沒有收到警訊的電子郵件。

模擬遠端量測試驗：

在系統所有程式都撰寫完成後，在實驗室進行模擬現地的遠端監測、預警測試，假設現地是一片安裝側傾管的山坡地，地質鑽孔深度 12 公尺，約在地下 8 公尺左右有潛在一地質弱面，透過系統觀察感測器的變形資訊，當安裝在孔內的偏斜儀如果超過限定的水平位移量將發送 E-Mail 至指定的信箱，並送出簡訊至指定使用著的行動電話中，警告現地量測的地層位移量超出所範圍。實際上在實驗室中的操作是使用微調儀，將固定在光學桌上的偏斜儀推動，造成一偏斜量使光纖光柵波長飄移，當 FPGA 的 I/O 模組

偵測到光電訊號，經過類比與數位轉換後，再將訊號傳回系統在RT架構下進行運算，解讀實際的感測器偏移量，當測傾管孔頂的偏移量超過 30mm 時，發送E-Mail到指定信箱並送出簡訊圖 4.32是收到簡訊的情形。圖 4.45是地層變化的監測畫面。整體的運作流程如圖 4.34所示。

而在這當中的警戒值、擷取頻率與頻道數目都是使用輸入參數寫在程式中，使用者都可以直接由控制者介面進行調整，例如當現地的光柵頻道變更時，可以直接調整光頻道的數目，也可以控制自動掃描或是對需要了解的頻道改為手動掃描，檢查單一頻道中光柵的情形。或是針對不同的監測深度與感測器量測範圍都是在程式使用者介面可以變更參數，減少更改程式的不便。

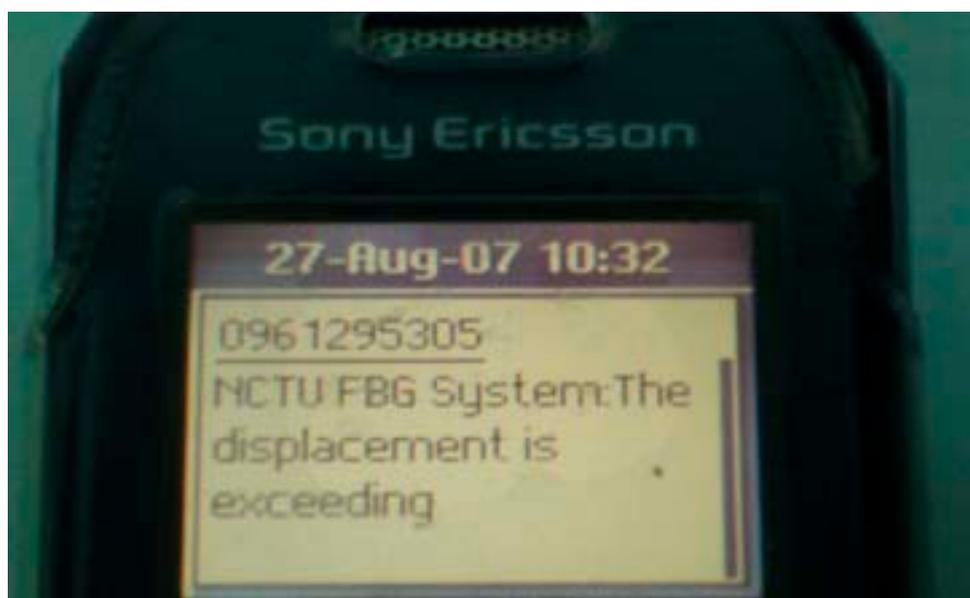


圖 4.32 監測警戒值發布簡訊

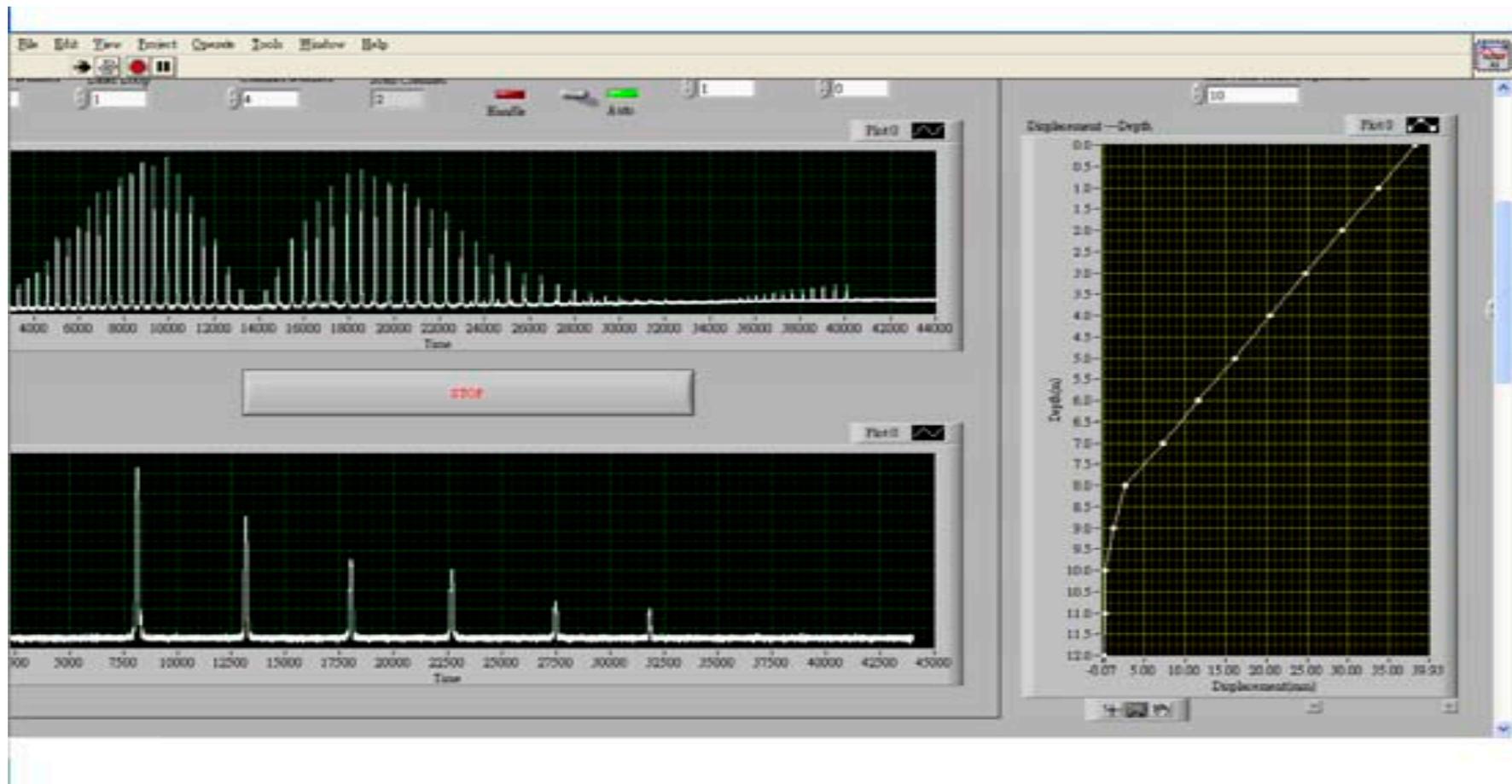


圖 4.33 地層變化監測畫面

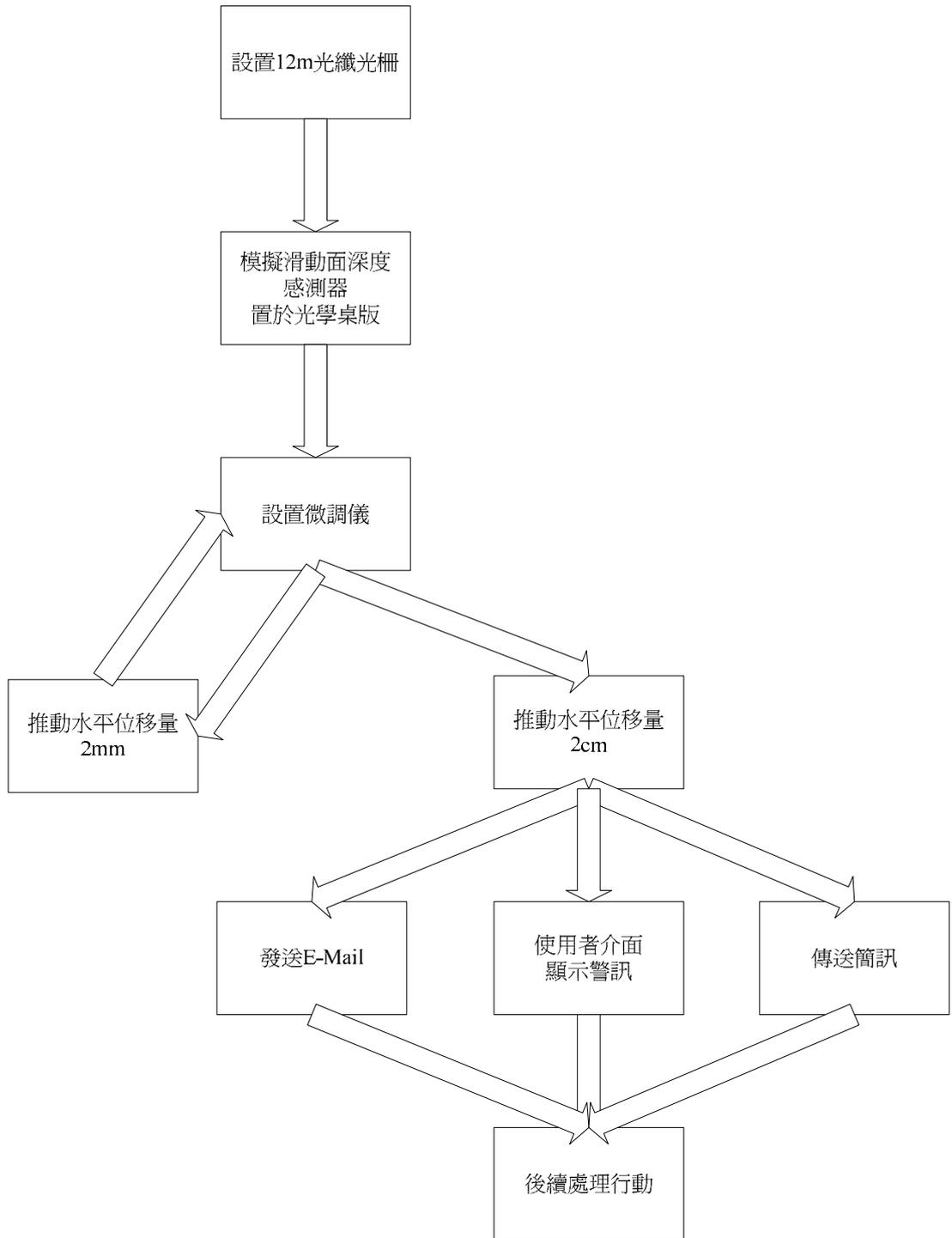


圖 4.34 模擬現地監測流程圖

4.3 節理式光纖光柵偏斜儀於湖山水庫與義興電廠監測之使用

在本計畫執行之前，本研究團隊研發成功光纖光柵偏斜儀(fiber Bragg Grating segmented deflectometer, FBG-SD)。FBG-SD 設計之原理已發表於 Measurement Science and Technology 之中(Ho et al., 2006)，並獲得兩項專利(黃安斌、簡旭君、2004 與黃安斌、何彥德、2006)。關於 FBG-SD 之設計與安裝程序可以參考相關文獻。在 FBG-SD 研發過程中分別於 2005 年年初在湖山水庫預定地之邊坡與 2007 年年中於義興電場壓力鋼管附近使用 FBG-SD 感測邊坡地層內之位移，並在鄰近安置另一根傾斜管使用傳統傾斜探管感測地層位移並做相互比較。

4.3.1 湖山水庫案例：

在湖山水庫之前，研究團隊針對FBG-SD之測試大多使於室內或少量現場之安裝(鑽孔深度小於 10m)。湖山水庫第一次在現地安裝 30m以上之FBG-SD，一共安裝兩組FBG-SD，其一組埋設位置於溢洪道之邊坡，鑽孔編號CB-50 監測深度為 32m，圖 4.35所示(國立交通大學防災中心，民國 94 年)。另一組埋設於主壩左壩座邊坡鑽孔編號CB-73，監測深度為 32m，如圖 4.36。CB-50 所得測傾管讀數如圖 4.37所示，監測區域於 2005 年 5、6 月間連續大雨，測傾管在深度約 4m左右受地層大量移動影響而破裂，6 月 22 日以後既無法繼續使用

此一傾斜管。FBG-SD在測試初期，1至3月之讀數如圖 4.38所示。

當時發現安裝程序有誤，因此將FBG-SD取出，重新整理於5月再度安裝入CB-50，讀數如圖 4.39。重新安裝後適逢大雨，FBG-SD讀數也反應大量位移，但測傾管無破裂現象。

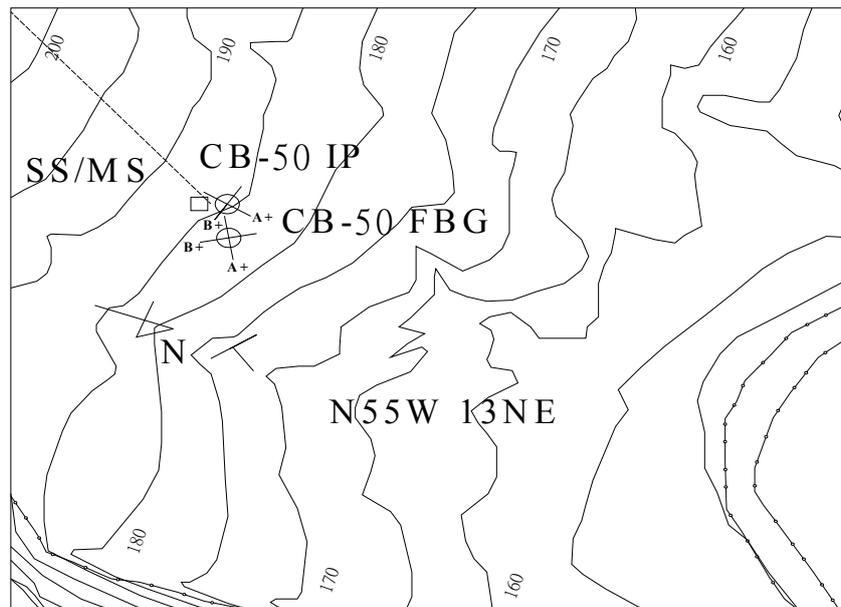


圖 4.35 溢洪道邊坡 CB-50 監測儀器方向

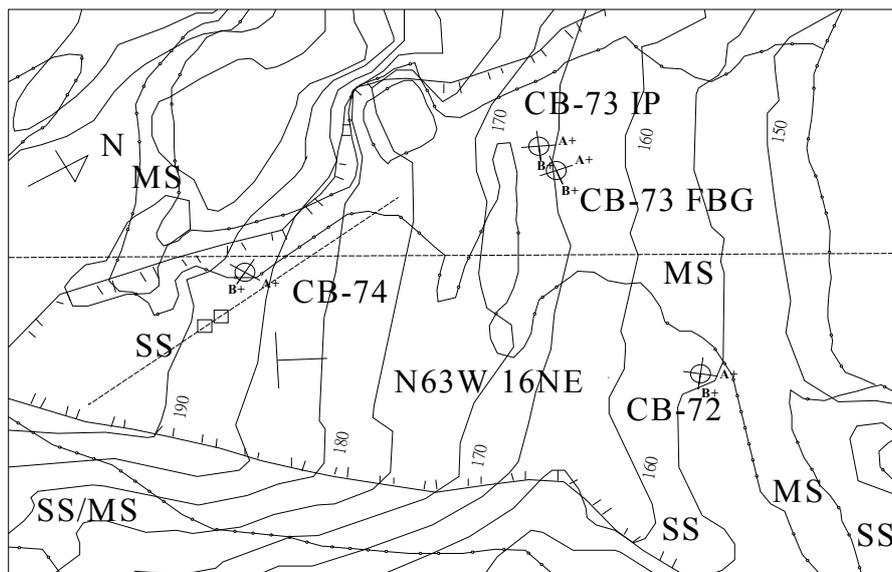


圖 4.36 湖山左壩座邊坡相關監測儀器方向

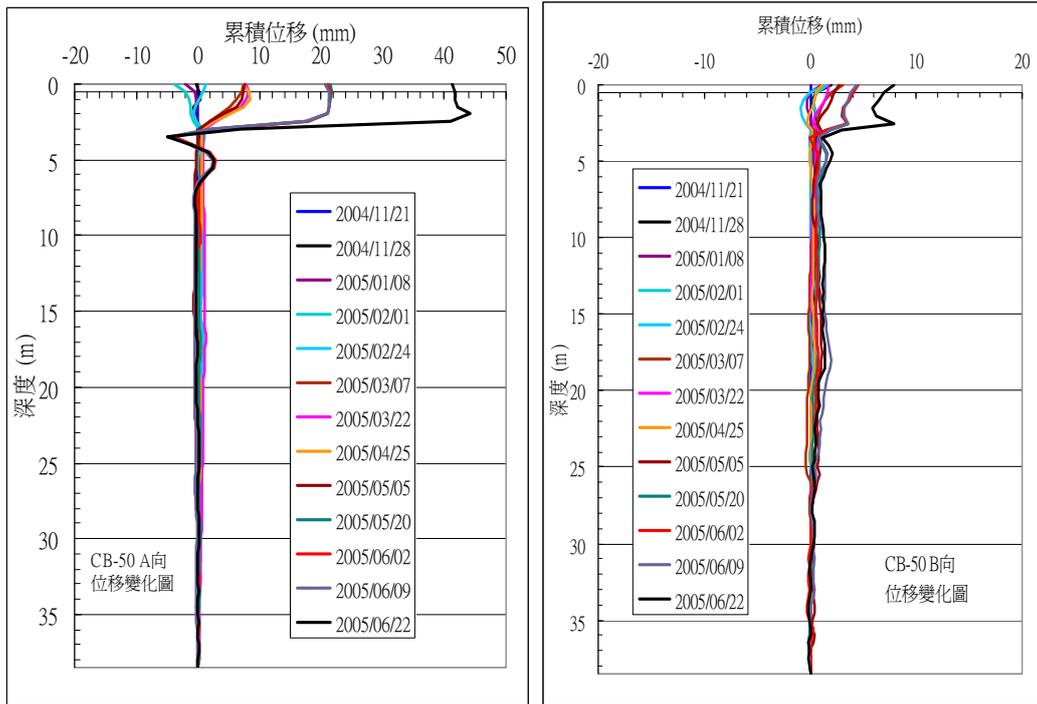


圖 4.37 CB-50 測傾管位移變化圖

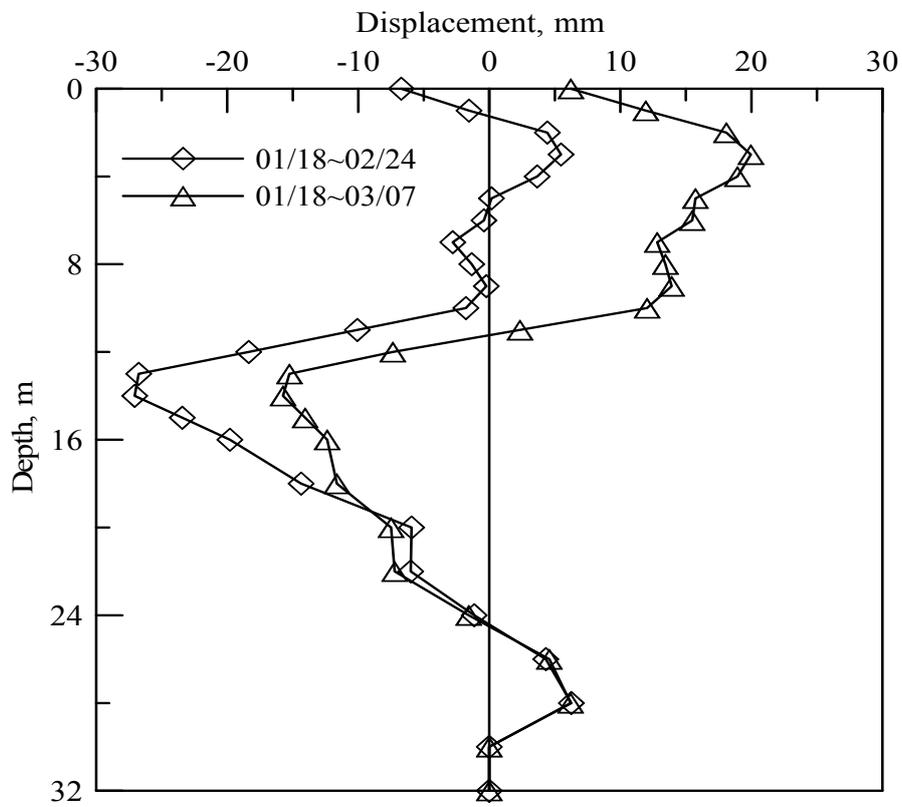


圖 4.38 CB-50 FGB-SD 分析結果

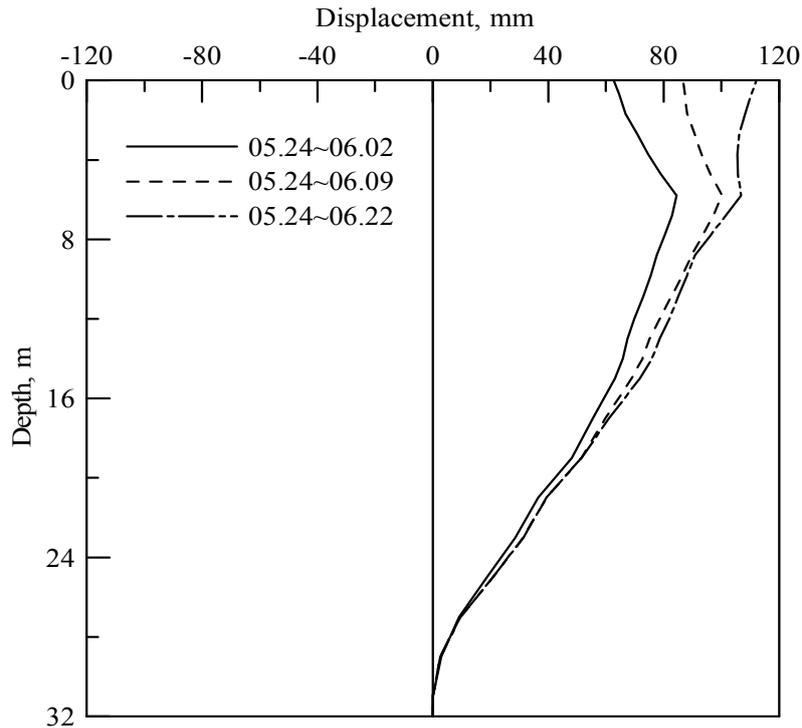


圖 4.39 CB-50 重新安裝 FGB-SD 分析結果

CB-73 測傾儀讀數如圖 4.40 所示。五月中旬梅雨季開始，6 月 22 日測傾管於 3~4 公尺深度量得大量位移，並被剪斷而無法放入測傾儀進行量測。同一時期 CB-73 之 FBG-SD 讀數如圖 4.41 所示。5 月 24 日量測資料顯示 CB-73 發生地滑現象，使得側向位移波形在淺層 3~4 公尺深度位置發生顯著變化，對照同地點的測傾管分析結果，同樣在 5 月 20 日量測得 3.5 公尺位置的剪動。6 月 2 日與 9 日兩筆資料顯示 CB-73 回復穩定，同樣與傳統測傾管分析結果吻合。但是 FBG-SD 置入型的現地監測儀器，因此只要訊號仍能傳回，則仍能獲得相關資料，因此可以發現 6 月 22 日該處再次發生位移量約為 40mm 的滑動，滑動面大約在深度約 3~4 公尺淺層處，與同地點測傾管經由鐵捲尺量測得的 3.5 公尺深度大致相符。

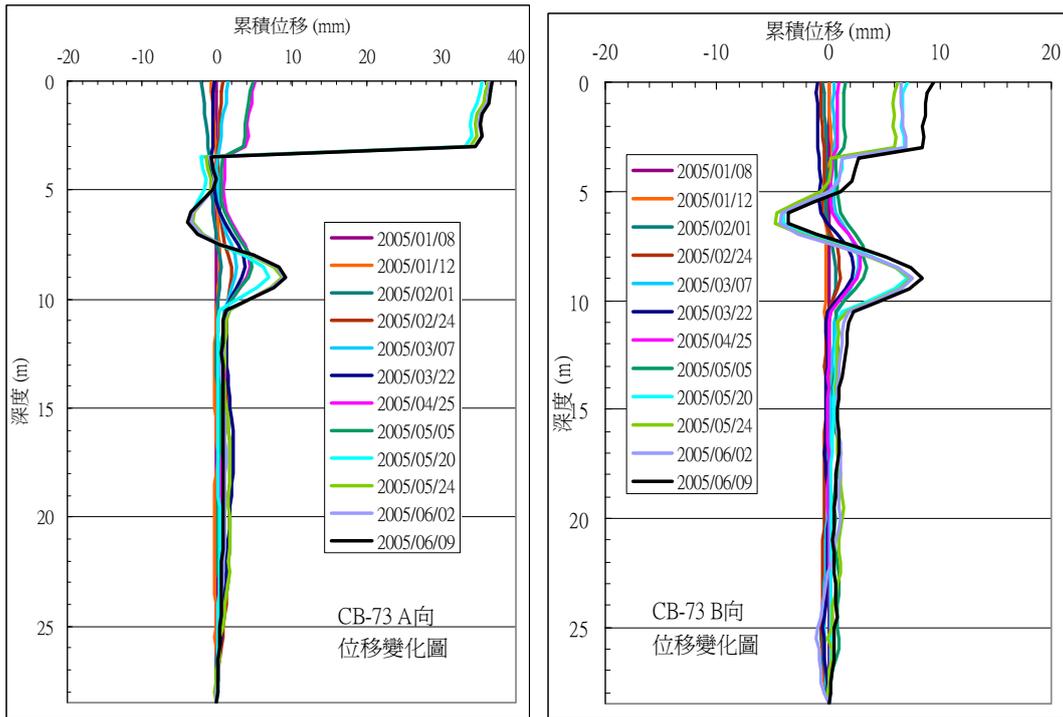


圖 4.40 CB-73 測傾管位移變化圖(6/22 測傾管已被剪斷)

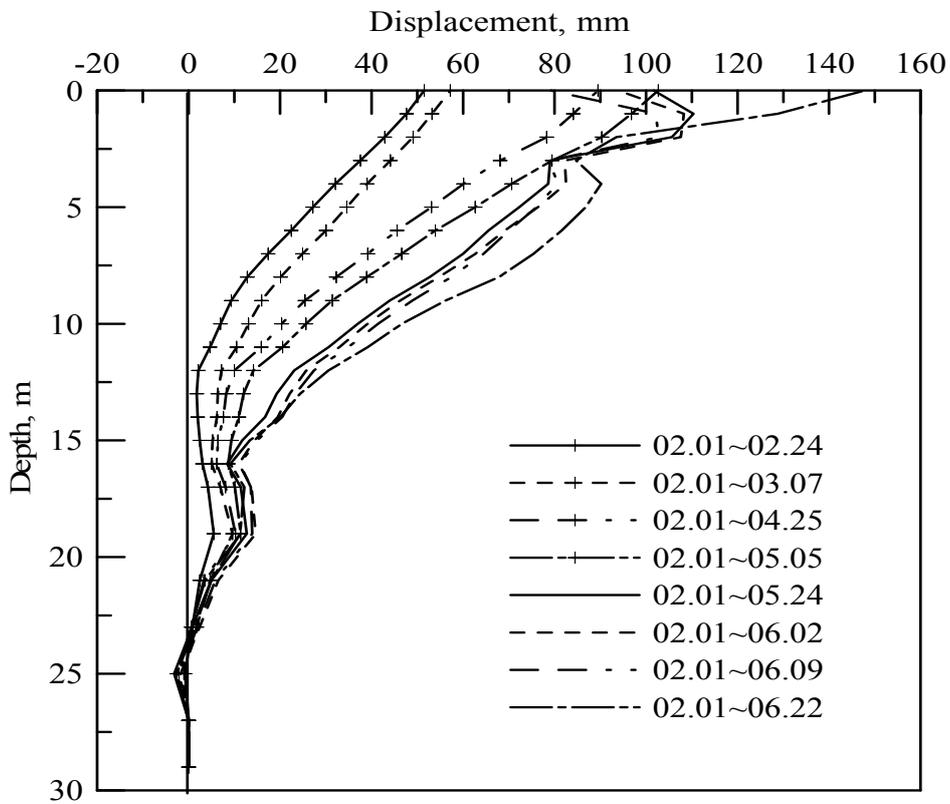


圖 4.41 CB-73 FGB-SD 分析結果

4.3.2 義興電廠案例：

在義興電廠案例中，採用全自動光纖監測系統來擷取數據，FBG-SD埋設深度為 30m，圖 4.42為光纖感測系統安裝配置圖及控制機房位置。現場安裝於 2007 年 6 月 28 日完成。圖 4.43為所測讀數為 2007 年 6 月 28 日至 9 月 7 日之數據，其中 8 月 6 日至 8 月 10 日有帕布颱風暨梧提颱風；8 月 16 日至 8 月 21 日有有聖帕颱風，山區降雨量非常大。在此監測期間FBG-SD與測傾管都一致的顯示有地層移動的現象，最大位移發生在 8m左右之深度，但FBG-SD所顯示之移動量稍大。

綜合上述湖山水庫及義興電廠案例成果，在湖山水庫案例中，顯示 FBG-SD 在量測趨勢上與測傾管一致，但定量方面誤差較大。事後分析結果發現先前所使用 FBG 黏貼方法並不理想，而造成量測數據飄移的現象。因此本團隊自該計畫劃後，重新修改 FBG-SD 之製作材料與黏貼過程。義興電廠既使用修改過後之 FBG-SD，結果顯示經過修改後 FBG-SD 之功能已明顯改善。FBG-SD 為置入型現地監測儀器，只要訊號線沒有受地層移動而剪斷，既能持續獲得地層移動資料。

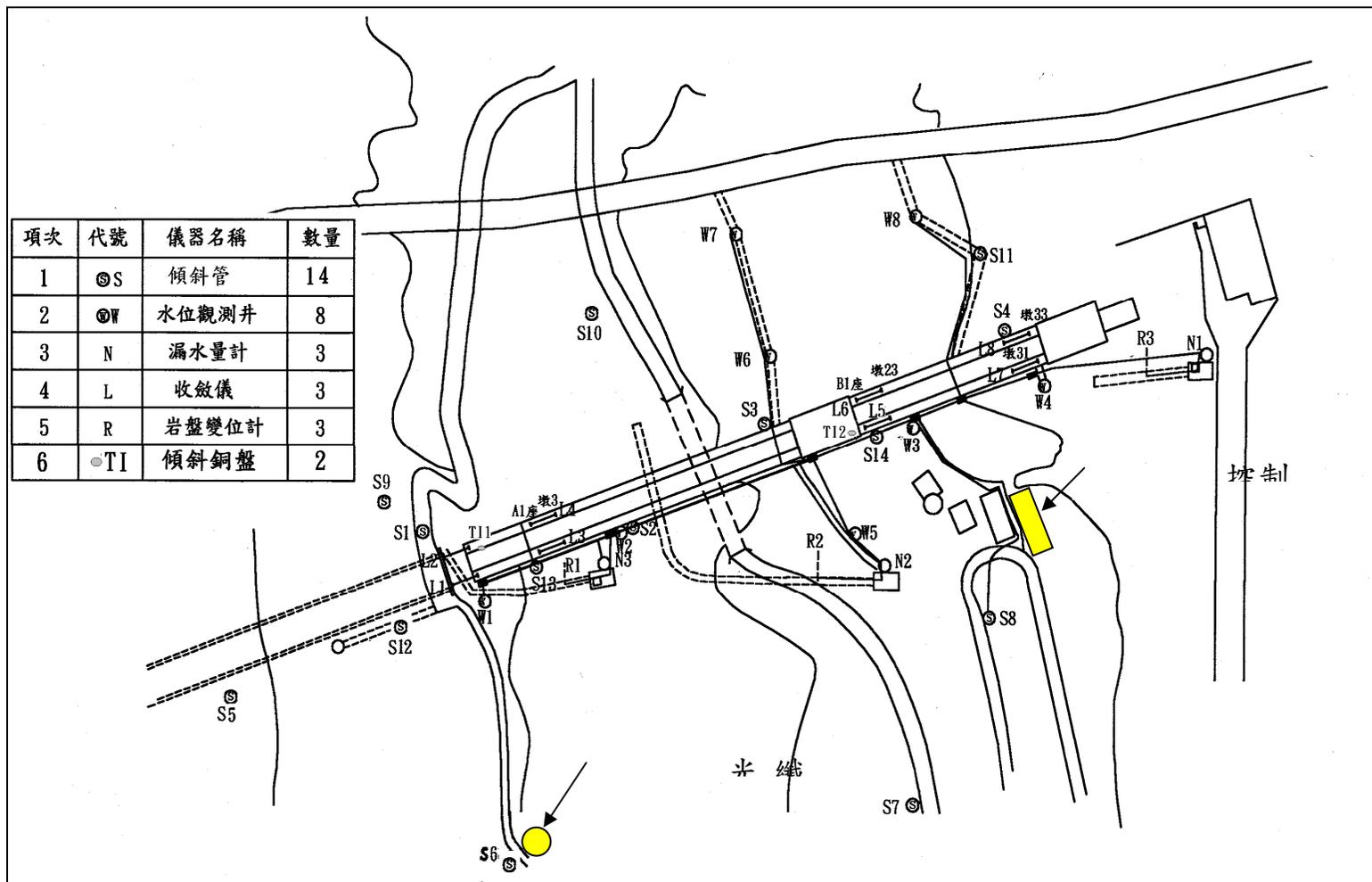


圖 4.42 義興電廠邊坡暨有傾斜孔與光纖感測器裝設位置示意圖

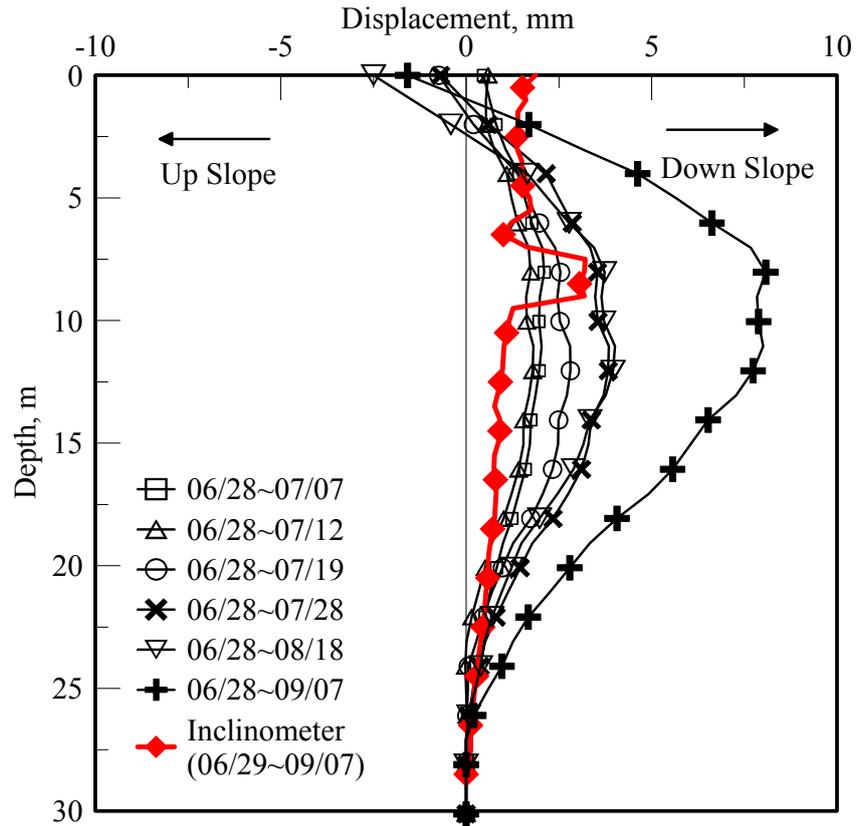


圖 4.43 傾斜管與光纖讀數分析結果圖(06/28-09/07)

4.4 TDR錯動變形監測資料分析改良

地層滑動觀測最常使用的儀器為測傾管搭配傾斜儀，但測傾管的自動化不易且昂貴，TDR 為一新興的地層滑動監測方法，具有空間連續、經濟、可自動化等特色。本研究的目的是再探討影響 TDR 反應與地層位移關係之因子，以提出改良感應靈敏度與資料分析的方法。95 年度的研究成果對於 TDR 材料互制與剪力弱帶等關係已可獲得初步結論，惟該年度試驗設備是在無圍壓(僅有剪力盒閉合時的預力)的情況下施作，與現地情形相較，預期其啟動位移量會遠小於實驗值；再者，實驗設備所設計灌漿材料兩邊的填土寬度每邊只有灌漿

材料直徑的 0.375 倍，實驗儀器可能存在邊界效應(Boundary Effect)；

又，剪力弱帶的模擬可能較適用於軟弱帶發生薄剪行為，對於土層中產生剪應漸變的剪力帶可能較不適用。

基於上述問題，實驗室標定儀器仍有改進空間，本團隊於本年度計畫中研發一更接近現地條件之試驗儀器，用以適當探討材料互制與剪力弱帶所造成影響。

4.4.1 TDR錯動變形監測原理

時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 是一種以電磁波進行監測及探查的方法，基本原理與雷達(Radar)相似，但 TDR 之電磁波局限在一維之傳輸線系統中發送與接收。根據 TDR 量測系統與傳輸纜線的特性可知，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土體變形。首先必須在所量測變形的土體上鑽孔，放入同軸纜線，然後用水泥漿填塞，使纜線、灌漿材料與土體緊密接合。隨著土體變形將應力傳至灌漿材料再傳給同軸纜線使之發生斷面破壞，當土體變形增加，TDR 反射之波形亦會隨之增加。

當同軸纜線安裝完成後，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、受張等情況使同軸線

產生缺陷(幾何形狀之改變), 便輸出於示波器上。如圖 4.44所示, 由 TDR 產生電磁波經同軸電纜至變形感測電纜時, 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之波形上顯現一向下凹之反射波形; 當電磁波至電纜之末端時, 即產生一終點反射, 於TDR之波形上顯示上揚之反射波形。因電纜的波傳速度已知, 由因電纜凹痕引起的反射訊號之時間, 可以得知滑動深度, 反射訊號之大小會隨著錯動變形量增加而增加。

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 4.45、式(4.1)及式(4.2)所示 (Su, 1987)。

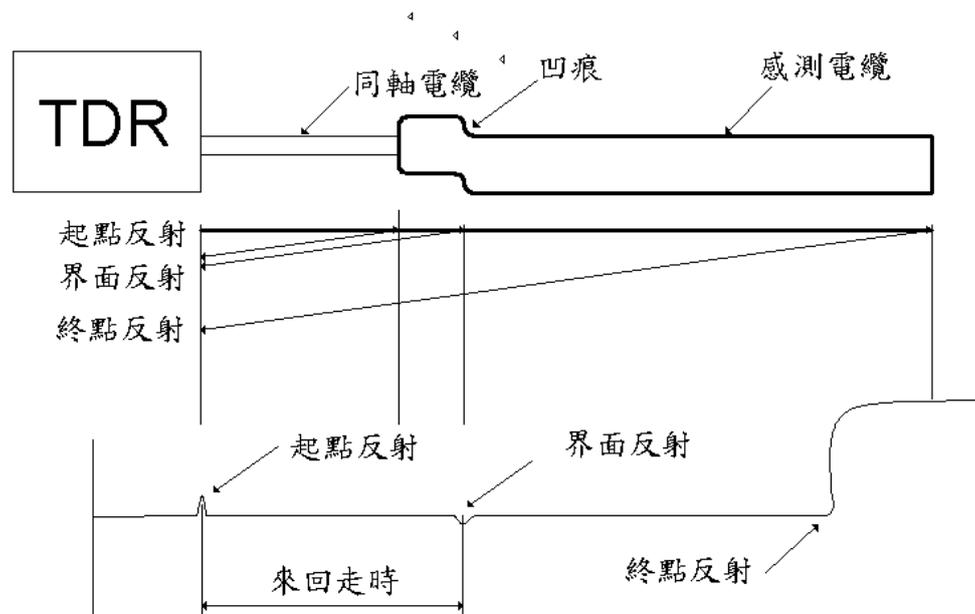


圖 4.44 TDR 變形監測之反射訊號與原理(盧吉勇, 2003)

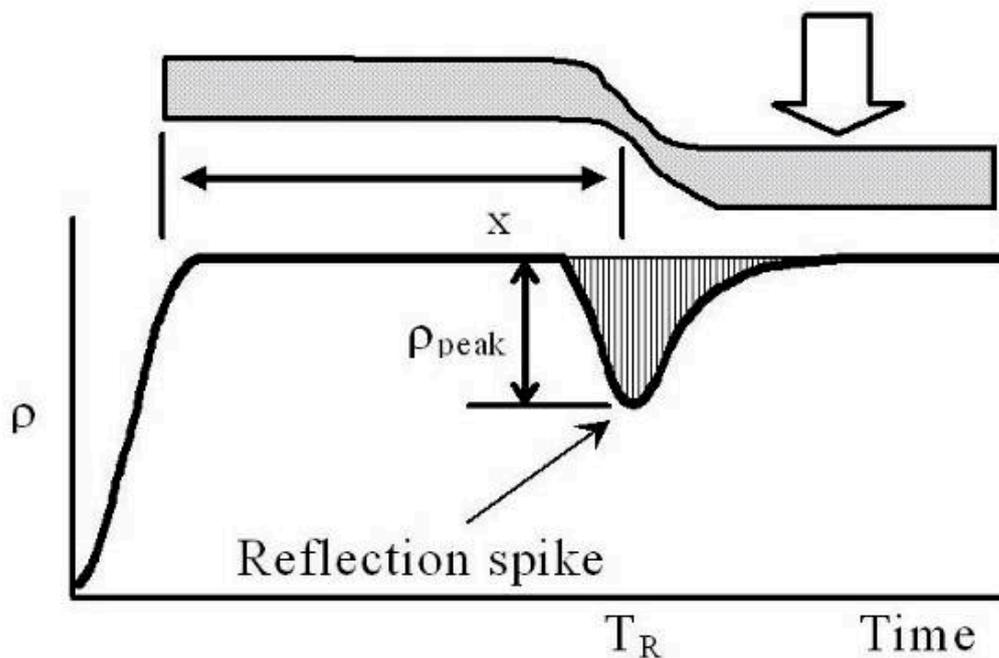


圖 4.45 典型外部位移與纜線反射尖峰關係(Lin and Tang, 2006)

$$x = V_p \frac{T_R}{2} \quad (4.1)$$

$$\delta = (\rho_{\text{peak}}/S) + \delta_0 \quad (4.2)$$

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； δ 為外部位移量， ρ_{peak} 為反射係數峰值， S 為纜線本身的靈敏度； δ_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)。

4.4.2 TDR受剪物理模型設計

前期研究曾在寶二水庫（國立交通大學防災中心，民國 91 年）及湖山水庫（國立交通大學防災中心，民國 94 年）的邊坡進行TDR

錯動變形監測的現地測試，所使用之感測纜線與回填灌漿方法不同，所得到之反應亦不同，有必要進一步探討TDR反應與地層位移關係之影響因子，並提出TDR錯動變形安裝與資料分析的準則。由過去實測經驗及文獻回顧可綜合歸納有關TDR錯動變形量化之影響因子有：(1) 纜線電阻；(2) 纜線-灌漿材-地層材料互制；(3) 剪力弱帶等三項因子。前期研究已針對上述因子進行初步探討並提出修正纜線電阻的方法，為了解現地複雜的剪動機制及纜線-灌漿材-地層材料互制行為，本研究設計一套可適當模擬現地纜線-灌漿材料-現地材料(Cable-grout-soil)複合材料之物理模型：大型直剪儀，並考慮應力影響邊界與不同土壤勁度等，試圖於實驗室模擬現地邊坡滑動時TDR反射訊號之變化，以利TDR錯動變形監測資料之判釋。模型之主要設計概念如圖 4.46所示。

一般的單向度剪力設備在上、下剪力盒剪動過程中會有實驗材料外洩之情形，造成試驗結果與理論有所誤差。為解決上述問題，本試驗儀器將裝設擋版防止實驗材料因剪動過程中外流，並於剪力盒上盒裝設導輪，使剪力盒只有一個方向之自由度，整個大型直剪儀設計架構與各元件示意圖如圖 4.47與圖 4.48所示。

試驗資料之擷取系統主要由 TDR 1502C 製波器以 RS-232 連接筆記型電腦並配合交大撰寫的波形擷取程式將 TDR 反射波形紀錄；

另外，以 Load cell 及位移計(LVDT)紀錄試驗時所加載的水平剪力、圍壓應力與剪力盒位移量。

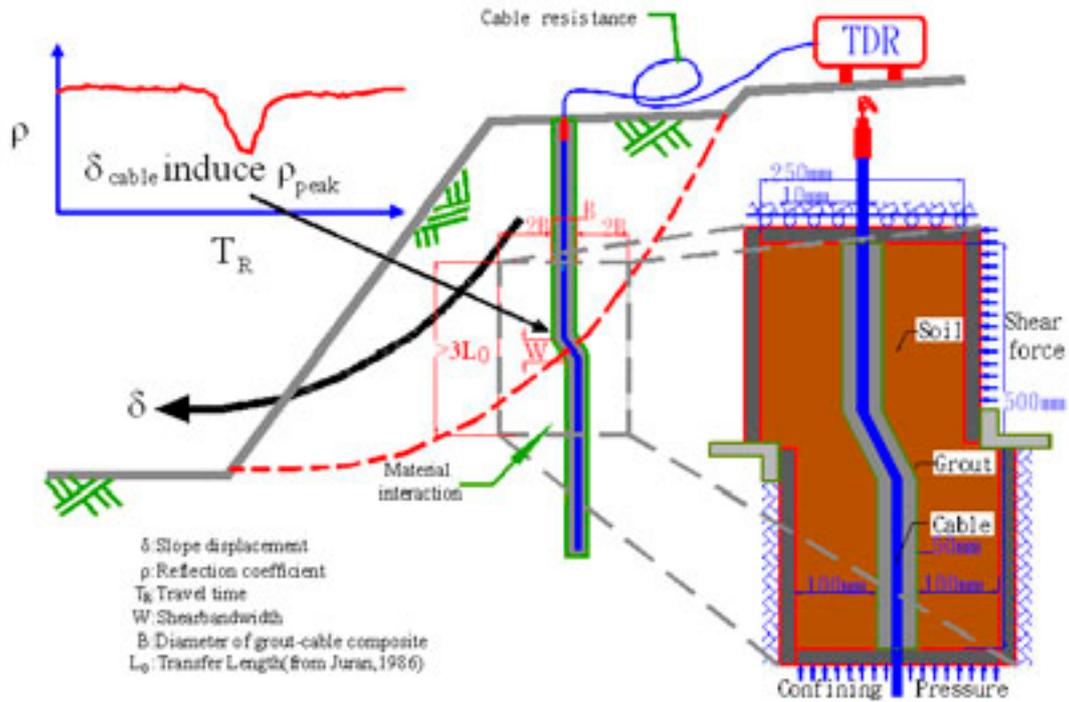


圖 4.46 模擬現地邊界條件概念示意圖(改自 Lin and Tang, 2006)

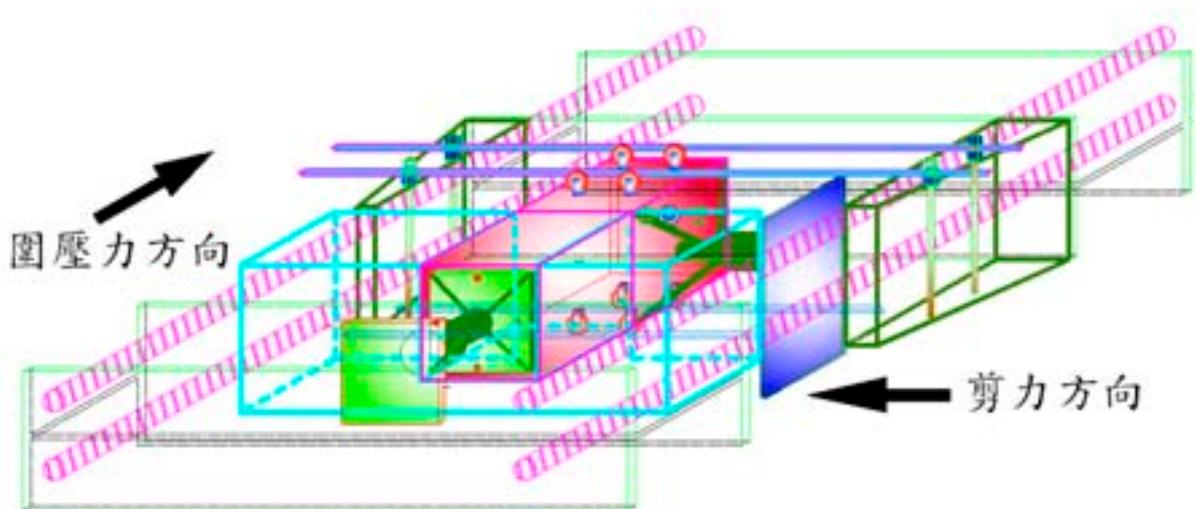


圖 4.47 大型直剪儀設計架構圖

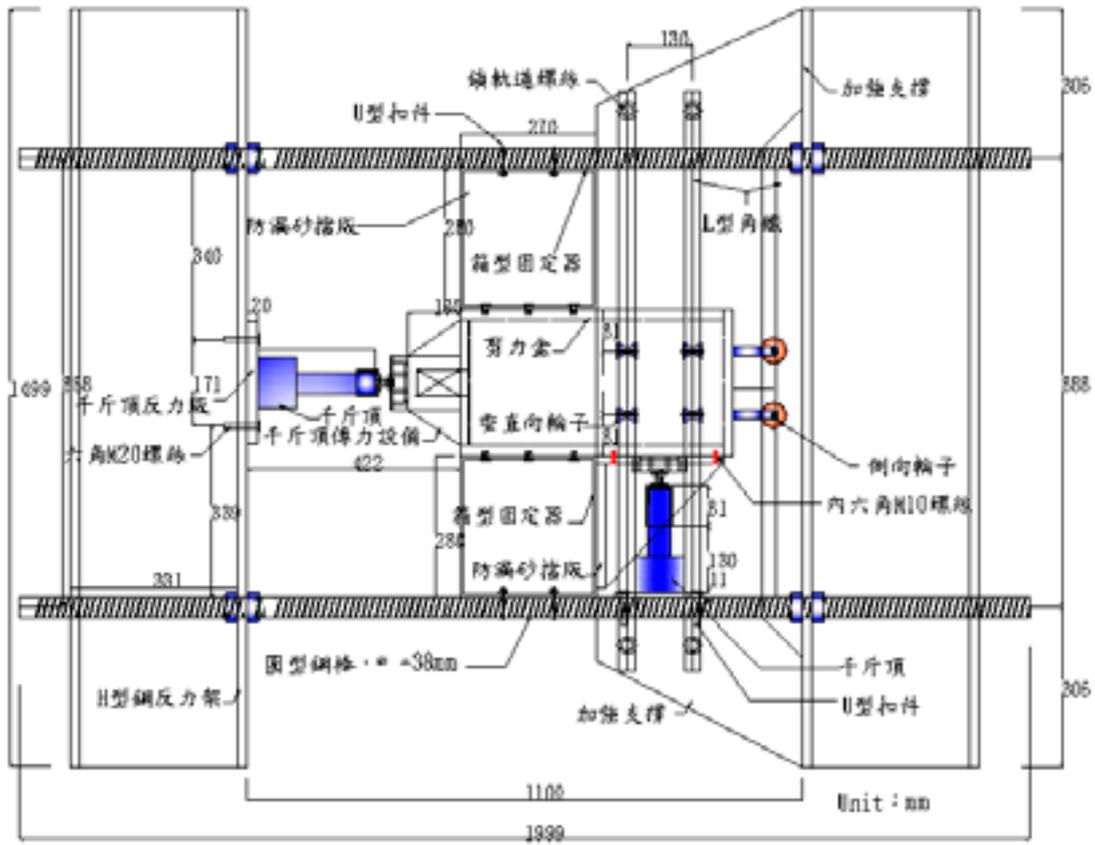


圖 4.48 大型直剪儀各元件示意圖

各試驗設備之詳細規格如下所述：

1. **剪力盒**：為充分模擬現地纜線受剪情況，避免實驗的邊界效應 (Boundary Effect)，需考量纜線受剪時之影響長度與受剪力之影響區域。剪力盒尺寸大小說明如下：

(a) **纜線受剪時之影響長度**：Juran(1986)提出土釘(Soil nail)埋設於邊坡時，錨釘受剪時之影響長度為 L_0 (如圖 4.49)，其計算式如式(4.3)所示。

$$L_0 = \left[\frac{(4EI_0)}{(k_s D)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.3)$$

其中， E 為灌漿材料之勁度， N/m^2 ； I_0 為灌漿材與纜線斷面之慣性矩， m^4 ； K_s 為土壤之地盤反力係數， N/m^3 ； D 為鑽孔直徑， m 。

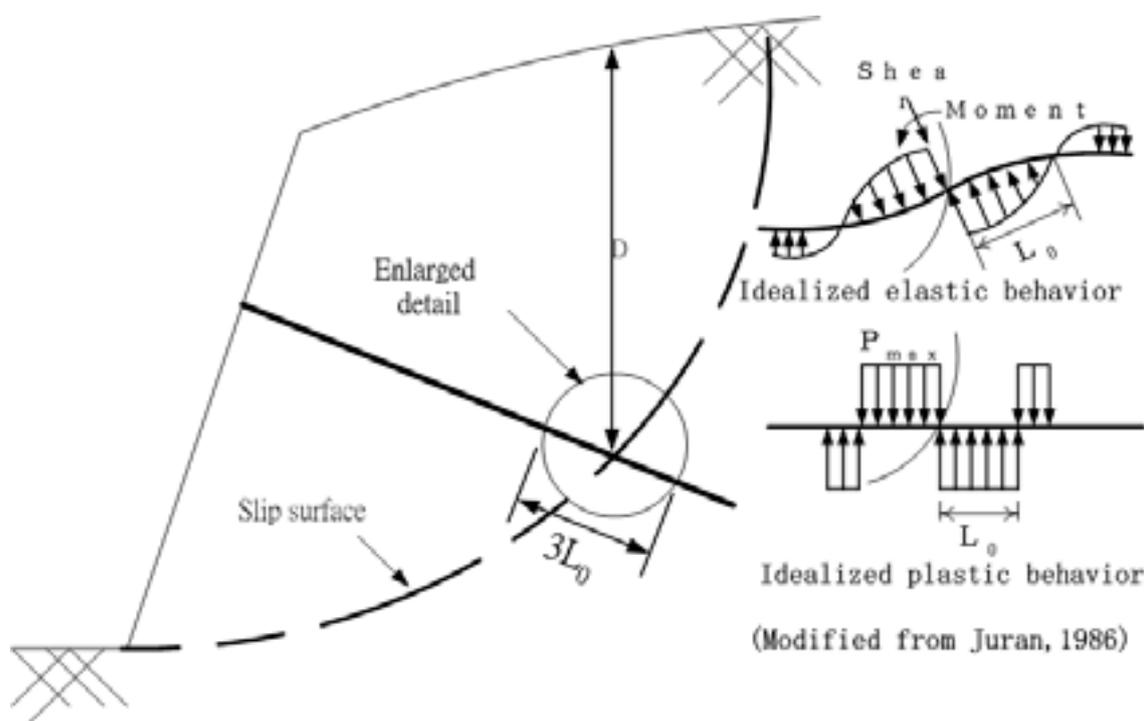


圖 4.49 考慮纜線受剪長度之影響

剪力盒尺寸之考慮以式(4.1)為基礎，灌漿材料之彈性模數 $E=75000 \text{ kPa}$ (Dowding,et.al.,2004)，砂土之地盤反力係數 $k_s=24430 \text{ KN/m}^3$ (Reese, 1983)，計算式如下：

$$\begin{aligned} L_0 &= \left[\frac{(4EI_0)}{(k_s D)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= \left[\frac{(4 \times 75000 \times 10^3 \times \frac{\pi(0.05)^4}{64})}{(24430 \times 10^3 \times 0.05)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= 0.09m = 9cm \end{aligned}$$

由圖 4.49所考慮纜線受剪之影響範圍 3 倍 L_0 為 27 cm，為求保守，本試驗所設計之剪力盒總長度為 50 cm。

(b) 受剪力之影響區域：以 Boussinesq (1885)所提出圓形應力增量概念，視應力主要影響範圍為兩倍基礎寬度。因此，剪力盒尺寸大小將以此概念進行設計，其考慮灌漿材料受剪之影響寬度如圖 4.50所示，於剪力面上灌漿體受剪之單位寬度為 B (即水泥漿-纜線複合材之直徑)，其應力影響範圍以兩倍寬度($2B$)計算，剪力盒詳細尺寸如圖 4.51所示。

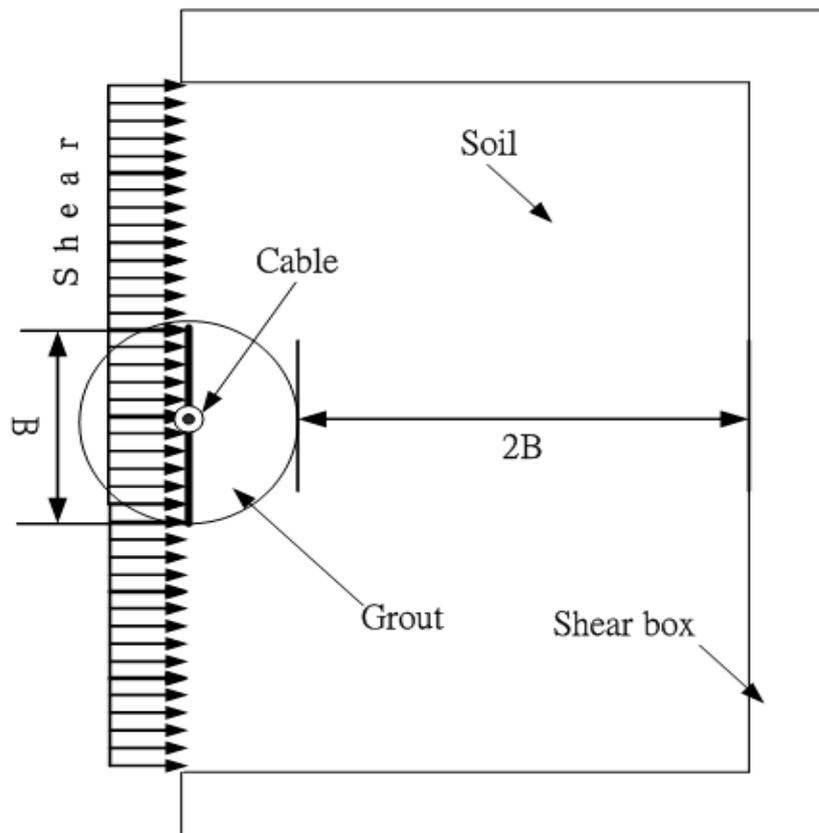


圖 4.50 剪力盒所考慮影響範圍示意圖

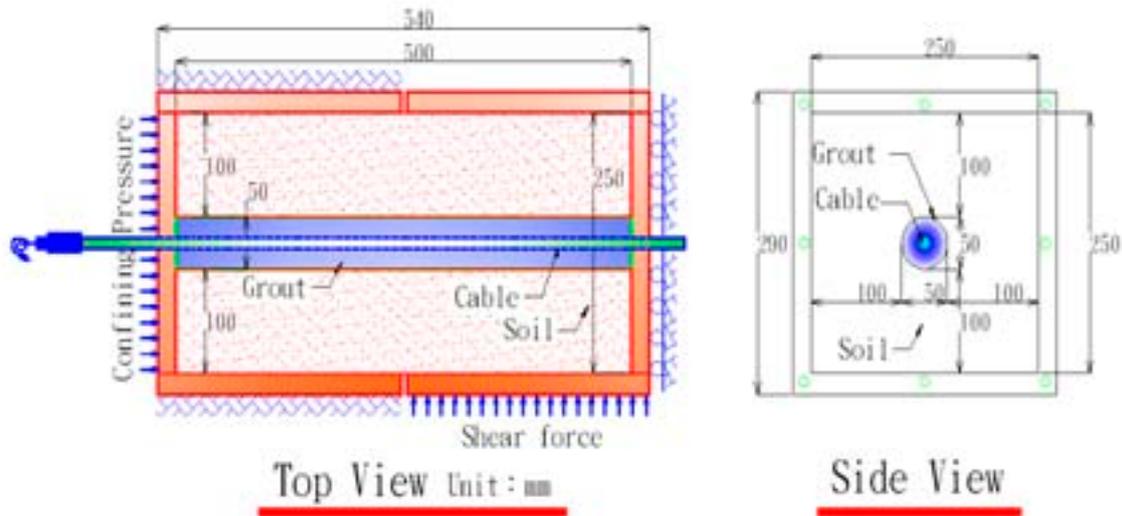


圖 4.51 剪力盒詳圖

2. 剪力及圍壓應力設備：大型直剪儀所使用之傳力設備(剪力及圍壓)為日本MASADA JACK二段式油壓千斤頂，如圖 4.54(a)所示。最大揚程為 180 mm，最大剪動力可達 10 ton，但由於本實驗配置將油壓千斤頂採水平向裝置，預估其最大剪動力將折減為 5 ton。
3. 資料擷取設備：大型直剪儀試驗資料擷取系統主要由 TDR 1502C 製波器以 RS-232 連接埠連接筆記型電腦並配合本研究團隊研發撰寫的波形擷取程式紀錄 TDR 反射波形。另外亦以傳統 load cell 及位移計(LVDT)紀錄試驗時加載水平剪力、圍壓應力與剪力盒位移量，各元件功能與規格詳述如下：

(a) TDR 反射儀

本研究所使用TDR反射儀為Tektronix TDR 1502C，重量約 8.96 kg，攜帶方便且具防水功能，可量測最大距離約 612

公尺(2000 英呎)，輸出阻抗為 50 歐姆(Ω)，最大解析度 (Resolution) 為 0.00122 公尺(0.004 英呎)，可使用的溫度範圍從 -10°C 至 55°C 。實體照片與操作介面說明如圖 4.52 所示。

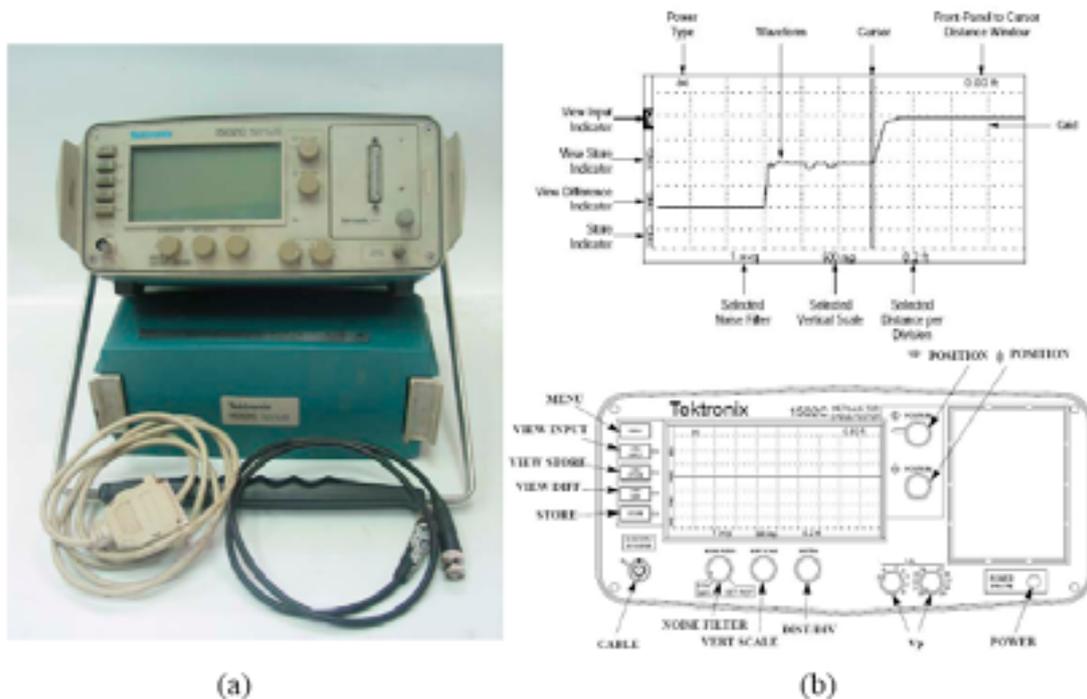


圖 4.52 Tektronix 1502C (a)實體照片(b)操作介面說明(摘自 Tektronix 1502C Service Manual)

(b) 筆記型電腦

利用筆記型電腦透過本研究團隊自行研發撰寫的程式控制 TDR 1502C 紀錄 TDR 反射訊號，試驗時設定適當參數使量測空間解析度為 0.4 cm 。

(c) 應力計(load cell)

load cell 為美國FUTEK公司MODEL LCF450 型，實體如圖 4.54(b)，重約 1.6 kg ，屬輕巧型，其可感測最大能力

(capacity)為 4534 kg (10000 lb),可使用溫度範圍從-50 °C至 93 °C。

(d) 位移計(LVDT)

一般表頭式位移尺與常見LVDT位移行程約 150 mm以內，為配合本研究所研發大型直剪儀需求，選擇最大位移行程為 200 mm，義大利製GEBRAN-LT-M-0200-S位移計，如圖 4.54(c)所示。

(e) 顯示器

顯示器紀錄實驗過程所施加水平剪力、剪力盒位移與側向圍壓應力，選擇高精度的AM5H-A顯示器，精確度可達± 0.1%滿刻度(full scale)，可量測交、直流電壓/電流等多種信號，數值顯示範圍達 5 位數，具自動歸零與警報功能且穩定性高。顯示器實體如圖 4.54(d)所示。

4. 傳輸纜線

市面上纜線種類繁多，導體材質、直徑大小與衰減特性皆有所不同。本試驗以一般常見同軸纜線(Coaxial Cable)為傳輸纜線，其構造由內至外分別為內導體、絕緣介質、外導體與最外層絕緣保護層，同軸纜線為良好導波器(waveguide)，可將電磁波束制其中並防止電磁波外漏。以常使用於TDR監測應用的CommScope公

司生產的P3 系列為例，同軸纜線剖面示意圖如圖 4.53所示。

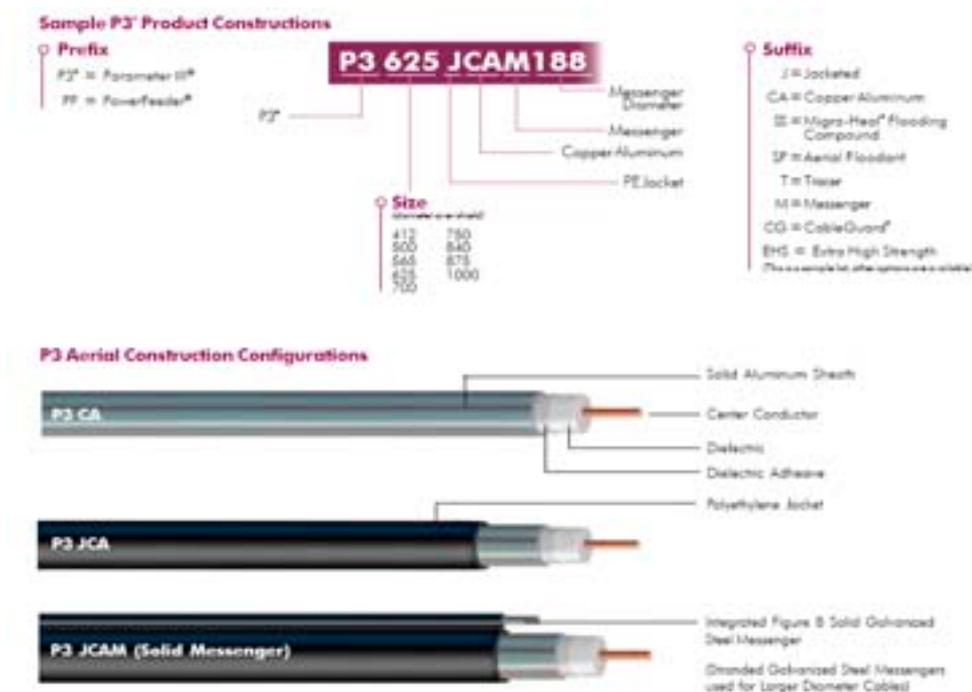


圖 4.53 P3 系列同軸纜線剖面示意圖(摘自 CommScope User Manual)

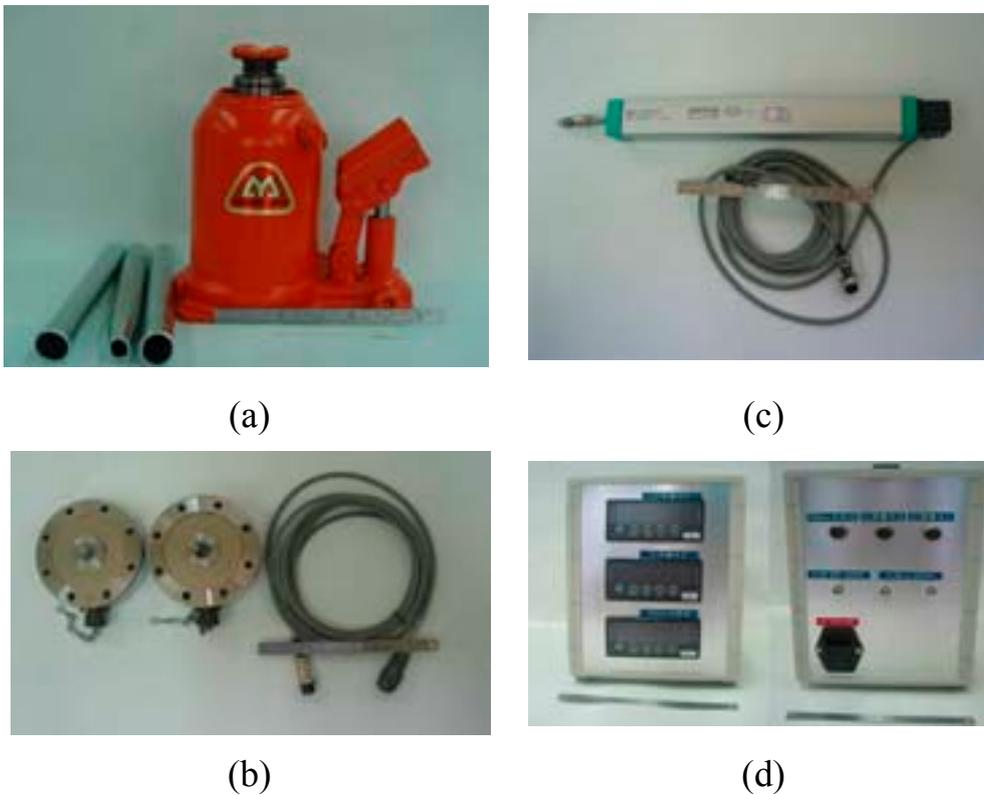
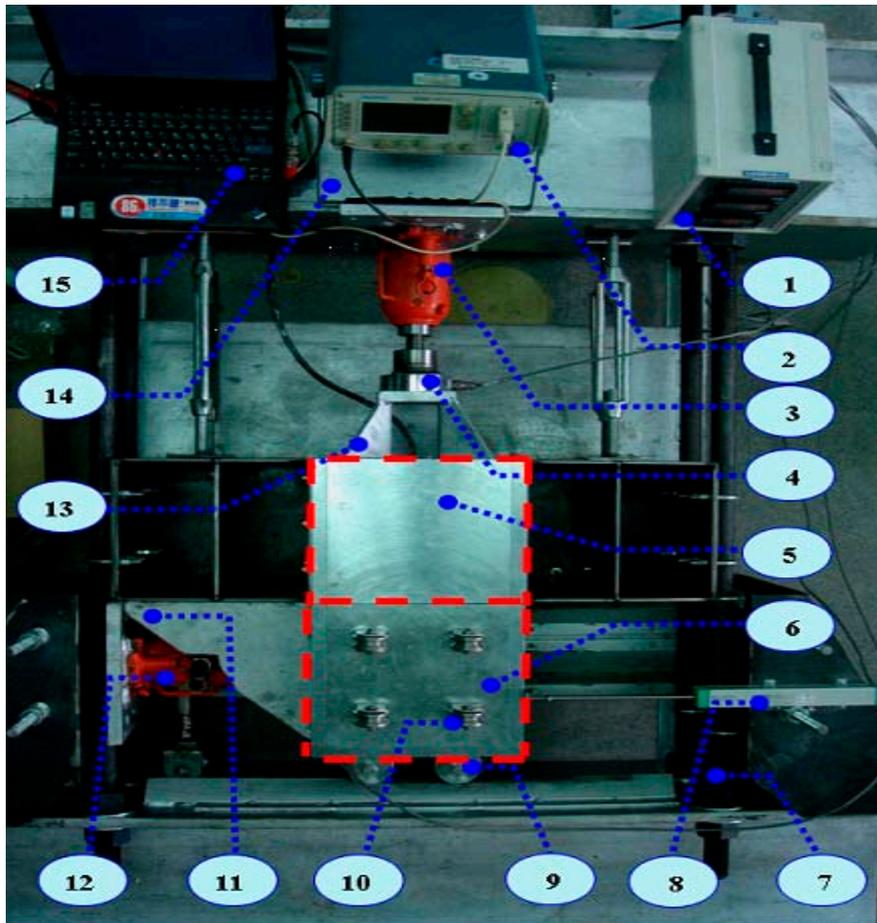


圖 4.54 (a)傳力設備-油壓千斤頂 (b) Load cell (c) 位移計 (LVDT) (d) Load cell 與位移計輸出顯示器(正、背面)

利用上述各個元件可組裝成一大型直剪儀，各個元件與配置之實際照片說明如圖 4.55。最後，將大型直剪儀固定於一台車，提供施作試驗時儀器搬運便利性與機動性。



- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 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 4.55 大型直剪儀元件說明

4.4.3 率定試驗規劃

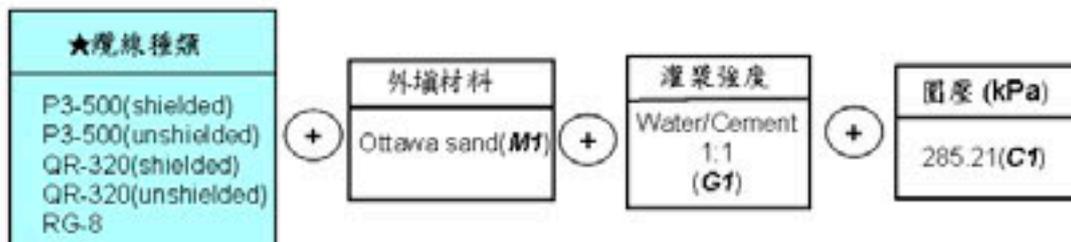
率定試驗主要欲透過室內物理模去了解土壤-纜線-灌漿材料三者受剪時之互制行為，並找出一適用於軟弱土壤監測之纜線，提昇地層滑動感應的靈敏度；探討灌漿是否有效地將地滑趨動力傳給纜線，提出現地安裝適當的灌漿方式；以相同纜線置於不同勁度之土壤下，探討纜線之靈敏度以利進一步量化分析。

茲將上述所探討之因子進行試驗規劃如下列所述並整理如圖 4.56 所示。

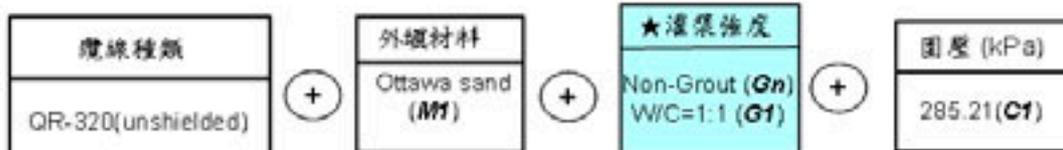
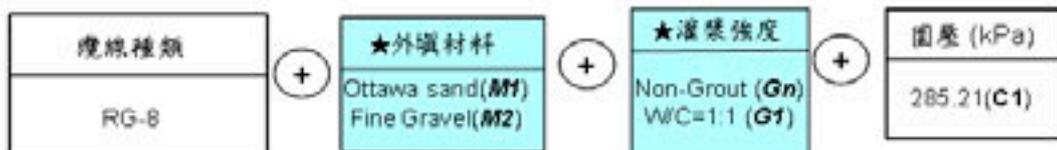
1. 試驗變因規劃：

(a) **傳輸纜線種類(Cable Type)**: 邊坡滑動監測所使用之同軸纜線直徑從 7.2mm 至 22mm 不等，阻抗以 50 或 75(Ω) 歐姆為主，主要不同處為纜線之外導體分有軟性(Braided)與硬性(Solid)兩類。本試驗所使用之纜線種類為 CommScope 之 P3-500 系列(硬性纜線)、QR-320(硬性纜線)與 RG-8(軟性纜線)三種纜線(如圖 4.57)，纜線種類之特性如表 4.3 所示。三種纜線除了直徑不一外，外導體亦有軟性(Braided)與硬性(Solid)之分；此外，硬性纜線之外導體又分為有、無塑膠披覆。進行本試驗主要為了解不同纜線於相同邊界條件下因受剪而產生的反射訊號特性，試圖探討最適用軟弱土層之纜線。

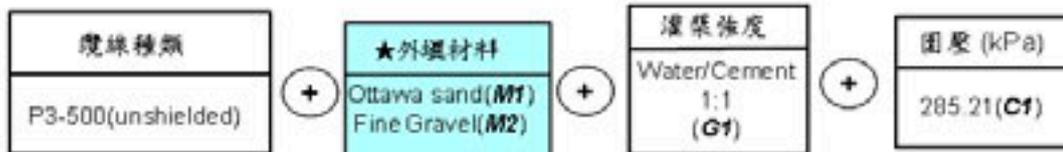
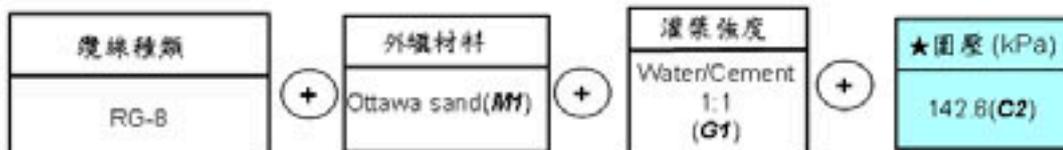
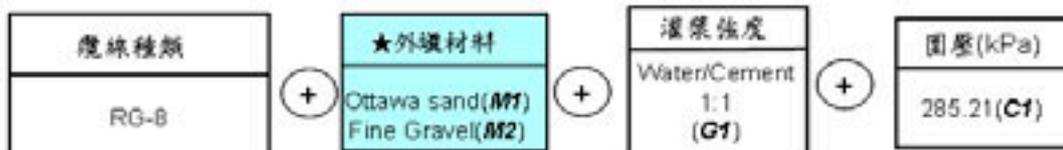
不同纜線種類之探討



灌漿材料順應性之探討



不同土壤勁度之探討



註：★為試驗控制變因。

圖 4.56 試驗規劃



圖 4.57 不同種類同軸纜線

(b) 有無灌漿材料(Grouting)：此試驗目的主要探討灌漿材料是否有效地將外力傳遞至纜線，探討是否需要考慮灌漿材料與周圍土壤的順應性，因此固定其它因子，以灌漿材之有無進行 QR-320(硬)與 RG-8(軟)纜線試驗。灌漿材料使用市面上常見之波特蘭水泥(Portland cement)第一型。為考慮現地灌漿之工作性，本試驗使用水與水泥的比例為 1:1(Water/Cement=1:1，重量比)，待拆模後以濕毛巾進行養護至第三天再進行剪動試驗。

表 4.3 不同纜線之種類特性

| 纜線種類 | QR-320 JCAR | | P3-500 CA | | P3-500 JCA | | RG-8 | |
|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 纜線重量(kg/km) | 83 | | 107 | | 141 | | N/A | |
| 最大曲率半徑 | 50.8 | | 16.5 | | 8.9 | | N/A | |
| 最大拉力極限 | 54.5 | | 136 | | 136 | | N/A | |
| 最小破裂力(kgf) | N/A | | 816 | | 816 | | N/A | |
| 電流容量(nf/km) | 50±3 | | 50±3 | | 50±3 | | 96.8 | |
| 阻抗(ohms) | 75±3 | | 75±2 | | 75±2 | | 50 | |
| 波傳速度(%) | 87 | | 87 | | 87 | | 84 | |
| 直徑(mm) | 10.03 | | 12.4 | | 14.3 | | 10.3 | |
| 衰減特性(20°C) | 頻率 (MHz) | Max.(dB/100m) | 頻率 (MHz) | Max.(dB/100m) | 頻率 (MHz) | Max.(dB/100m) | 頻率 (MHz) | Max.(dB/100m) |
| | 50 | 2.62 | 50 | 1.71 | 50 | 1.71 | 50 | 2.94 |
| | 108 | 4 | 108 | 2.46 | 108 | 2.46 | 100 | 4.58 |
| | 300 | 6.69 | 300 | 4.3 | 300 | 4.3 | 200 | 5.89 |
| | 500 | 8.92 | 500 | 5.67 | 500 | 5.67 | 700 | 11.77 |
| | 1000 | 12.76 | 1000 | 8.27 | 1000 | 8.27 | 1000 | 15.04 |

(c) 不同勁度之外填材料(Soil Stiffness)：本試驗配置主要探討纜線於不同勁度土壤中之靈敏度，以利進一步量化分析。外填材料為外填材料為渥太華砂(Ottawa sand, 簡稱為 M1)、細礫石(fine gravel, 簡稱為 M2)兩種材料，並分別加以不同圍壓應力去代表軟、中與硬之材料。試驗時，控制每次相同重量之外填材料分層填入剪力盒中，簡易地控制外填材料之乾土單位重，以確保每次試驗條件變因。

(d) 圍壓應力(confine)：為充分模擬現地邊界條件，本試驗模型設計可施以圍壓應力之設備，模擬現地某深度下的土體之應力狀態，亦藉所施加應力之不同去代表不同勁度之土壤。試驗所施加之圍壓應力分別為 285.21kN/m^2 (圍壓力=1760 kg)與 142.6kN/m^2 (圍壓力=880 kg)，以渥太華砂而言，試體所模擬之現地深度約為 17.4m 左右；此外，若對應國際岩石力學學會(ISRM)對於地質材料之分類(圖 4.58)，本試驗配置外填材料之勁度以渥太華砂而言約介於硬粘土(Stiff Clay)與結實粘土(Firm Clay)之間。

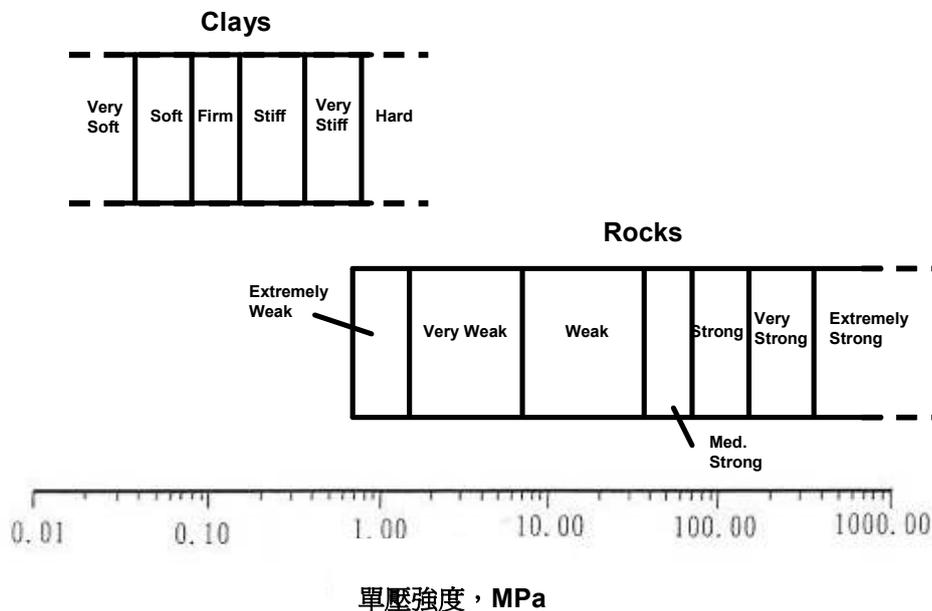


圖 4.58 ISRM 之地質材料分類(Johnston,1993)

2. 試驗準備：試體製作分為兩部分：一為水泥漿試體內包覆同軸纜線；

二為水泥漿試體外之外填材料，製作過程如下所述：

(a) **水泥漿試體包覆同軸纜線**：試體係以直徑(內徑)為 5cm之PVC管為外模，將試驗用之同軸纜線外部以工業酒精擦拭後置於PVC管正中央並固定，以水泥與水(W/C，重量比)之配比攪拌均勻灌入PVC模內，如圖 4.59所示；待水泥乾凝之後進行拆模，拆模後將試體修剪為長度約 50cm，並以濕毛巾裹住水泥試體進行養護(如圖 4.60所示)，從灌模至養護期共三天。



圖 4.59 水泥-纜線複合材料製作過程

(b) **外填材料**：外填材料為細礫石(Fine Gravel)、渥太華砂(Ottawa sand)，其基本物理性質與粒徑分析如表 4.3與圖 4.61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)。試驗時將養護完成之水泥漿試體(合同軸纜線)置於剪力盒中間，控制每次外填材料重量約略一致。外填材料約分三層夯實，夯實完畢後再以上蓋鎖緊再加上預定施加之圍壓應力。



圖 4.60 水泥養護過程

表 4.4 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 (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 |

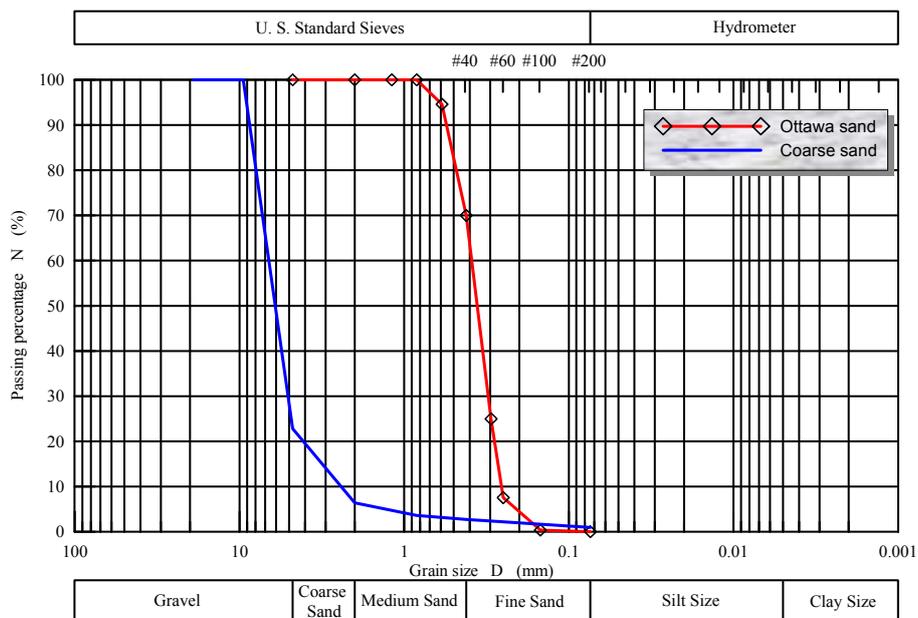


圖 4.61 土壤種類粒徑分佈曲線

3. 試驗流程：試驗流程如圖 4.62 所示。茲將試驗步驟敘述如下：

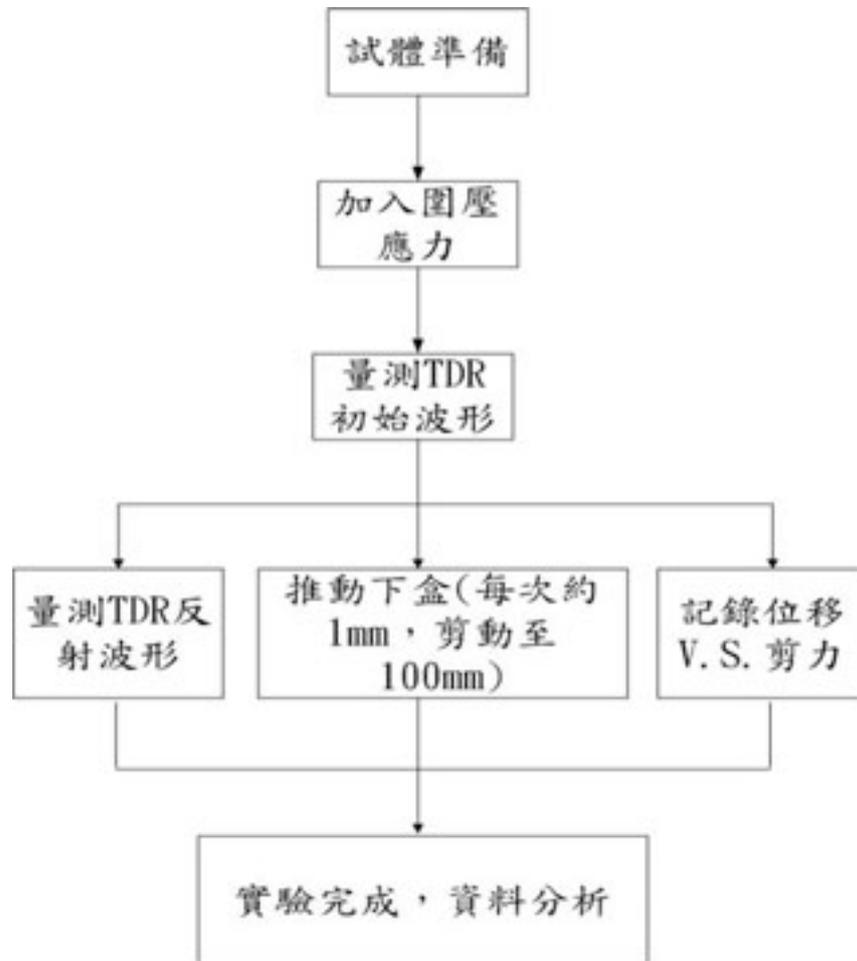


圖 4.62 試驗流程圖

(a) **試體準備**：將水泥-纜線試體置入剪力盒內，以固定土壤重量方式將外填材料分次夯實；另外將上、下盒與擋板接觸處塗抹黃油，剪少擋版與剪力盒之摩擦力。

(b) **擷取器與顯示器架設**：將位移計與剪力、圍壓應力之 Load cell 連接顯示器並將量測值歸零。

(c) **圍壓應力**：待試體重模完成後，施以一固定應力並記錄。

(d) **TDR 初始波形量測**：將纜線與 TDR 1502C 連接，利用交大自行研發之擷取程式記錄 TDR 初始反射訊號。

(e)剪動：以每次約 1mm 之位移量剪動，每剪動一次記錄位移量、剪動力與 TDR 反射訊號，待剪力盒相對位移達 100mm 時試驗即停止。

(f)拆試體：將剪力盒解開以了解水泥試體與纜線因剪動而變形之模式。

4.4.4 TDR 變形率定試驗結果

為充分模擬現地纜線-灌漿材料-土壤三者互制行為，規劃一系列錯動變形，主要目的為找出一適用於軟弱地層監測之同軸纜線，並藉由試驗結果探討不同試驗配置條件下，外部位移量(δ)與TDR反射係數(ρ)之關係，以利後續量化分析工作。隨試驗過程記錄TDR反射訊號、剪力盒相對位移量、圍壓應力及剪應力，不同試驗條件下的剪應力/正向應力-位移曲線整理如圖 4.63，對應剪力盒位移量與反射係數關係則如圖 4.64所示。本試驗以渥汰華砂或細礫石加上 285.21 kN/m² 圍壓應力，整體勁度皆比寶山砂岩之強度小(如圖 4.63)。亦即試驗所規劃外填材料勁度小於軟弱砂岩，以渥汰華砂而言，勁度遠小於寶二砂岩。

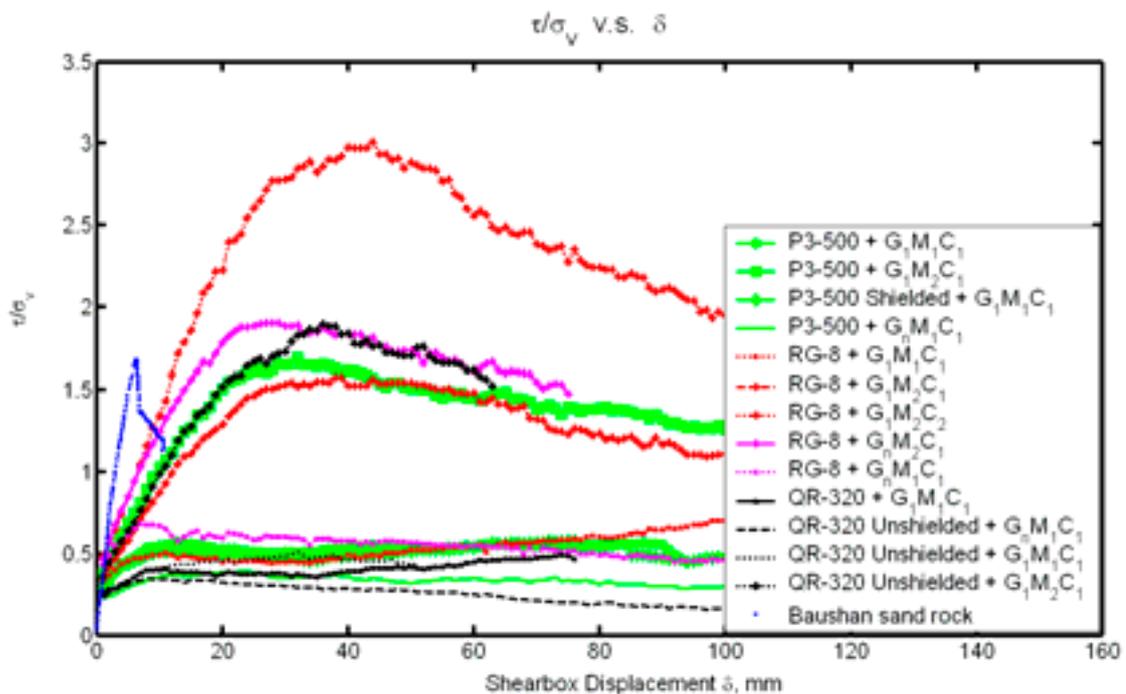


圖 4.63 不同試驗條件下之剪應力-水平位移曲線

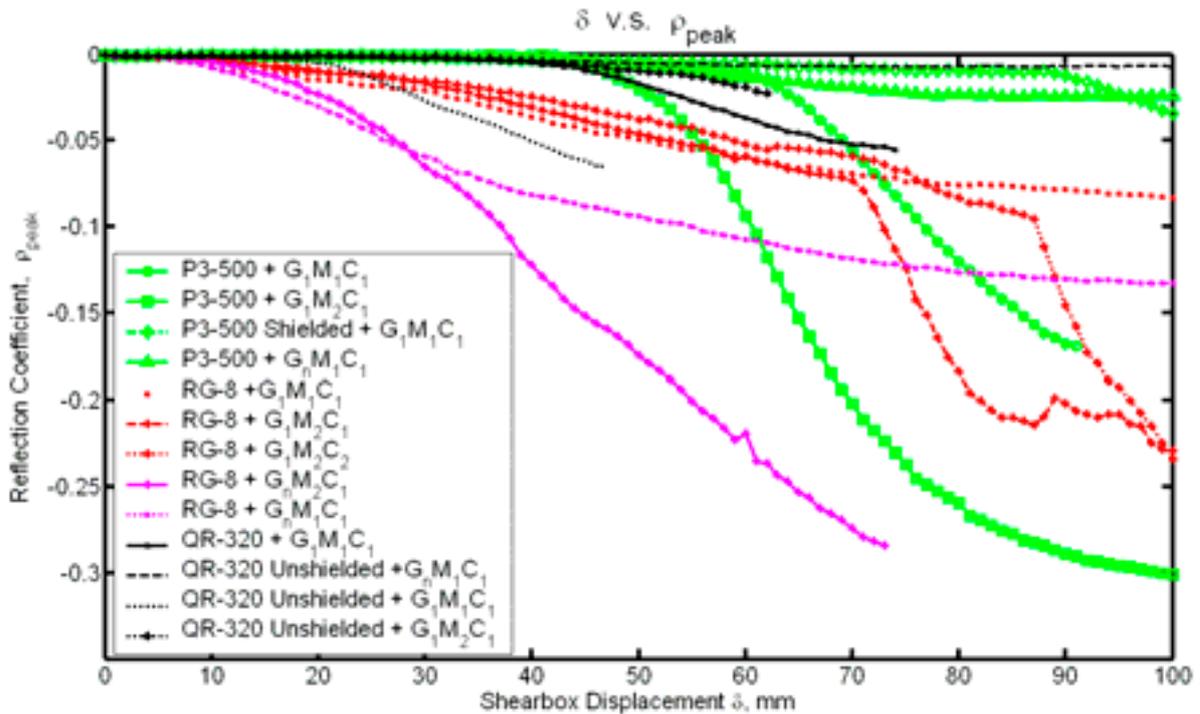


圖 4.64 不同試驗條件下之反射係數-水平位移曲線

茲將室內錯動變形試驗結果分為傳輸纜線受剪特性、灌漿材料之順應性與不同勁度外填材料之影響三個因子，將依序探討如下。

一、 傳輸纜線受剪特性：

傳輸纜線種類繁多且特性不一，此一小節即針對不同種類纜線(硬性與軟性、有無橡膠包覆)，控制灌漿配比($W/C=1:1, G1$)與外填材料為渥太華砂，並於每次試驗前施以固定之圍壓應力(285.21 kN/m^2)以確保每次之邊界條件為相近，探討纜線於固定外填材料與灌漿配比之靈敏度(sensitivity, S)與初始啟動門檻值(trigger threshold value, δ_D)之結果，並據以決定適用於軟弱地層的纜線。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(δ_D)、迴歸啟動門檻值(δ_0)四個部份，其探討如下：

(1) 外填材料-灌漿-纜線複合勁度：

固定條件下，不同纜線之剪應力-位移曲線如圖 4.65所示，對應整體複

合材料剪力勁度(shear stiffness, k_{gs})整理於表 4.5，其中除了P3-500 unshielded 斜率較陡之外(線性段斜率=83)，其餘資料可視為同一區域內(線性段斜率=37~52)，研判此差異是因為P3-500 纜線為硬性(solid)外導體，勁度較其它纜線來得大所致。

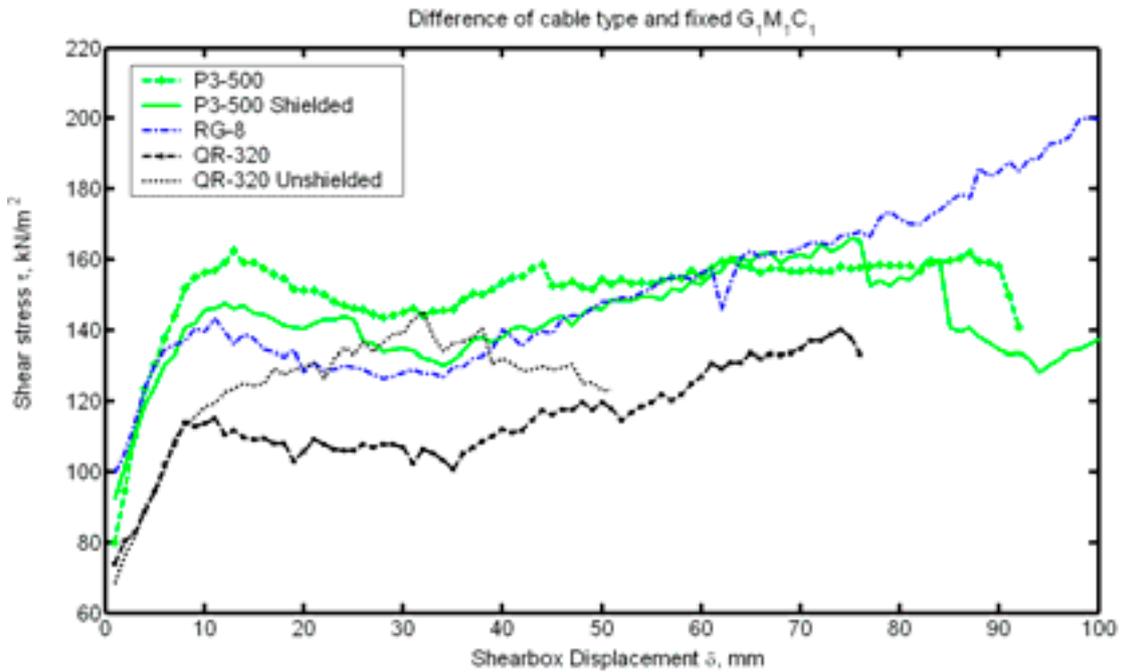


圖 4.65 不同纜線試驗之剪應力-水平位移曲線

表 4.5 不同纜線於相同外填材料與水泥配比下之反應特性比較

| Cable Type | Diameter (mm) | Proportion of Water/ Cement (W/C) | Backfill Soil type | Shear Stiffness, k_{gs} (slope of τ - δ) | Linear Regression | | | | Confining Stress (kN/m ²) | Curing (day) |
|---------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------|---|--|---|-----------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------|
| | | | | | Trigger Threshold Value, δ_D (mm) | Regression Threshold Value, δ_0 (mm) | Sensitivity, S(ρ /mm) | Rsquare, R^2 | | |
| P3-500 (unshielded) | 12.4 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 83 | 39 ^(C) | 59.5411 ^(D) | 0.0056710 ^(A) | 0.9949 | 285.21 | 3 |
| P3-500 (shielded) | 14.3 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 52 | 44 ^(E) | 83.9489 ^(E) | 0.0021006 ^(C) | 0.9891 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 10.3 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 51 | 5 ^(A) | 5.8632 ^(A) | 0.0010713 ^(E) | 0.9905 | 285.21 | 3 |
| QR-320 (shielded) | 10.03 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 37 | 40 ^(D) | 38.8558 ^(C) | 0.0016730 ^(D) | 0.9893 | 285.21 | 3 |
| QR-320 Unshielded | 8 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 41 | 16 ^(B) | 17.8079 ^(B) | 0.0022450 ^(B) | 0.9909 | 285.21 | 3 |

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

(2) TDR 反射波形：

圖 4.66 為各纜線反射係數，相同條件下，以軟性 RG-8 纜線之初始反應較靈敏，只要剪力影響區域內的水泥灌漿圓柱產生破壞，即可有效傳遞外在變形至纜線而產生反射波形。但因本身勁度小，外力不易集中於單一處而造成反射波形出現雙剪(Double Peak)；相對地，硬性纜線 P3-500 與 QR-320 因其纜線本身勁度大，需要較大的外力方能促使纜線產生反應，使得變形初期較不易產生波形反應，外力需將纜線外覆之灌漿材料擠碎後(如圖 4.67)才因應力集中而產生反射訊號且發展趨勢則較具一致性(如圖 4.66)。

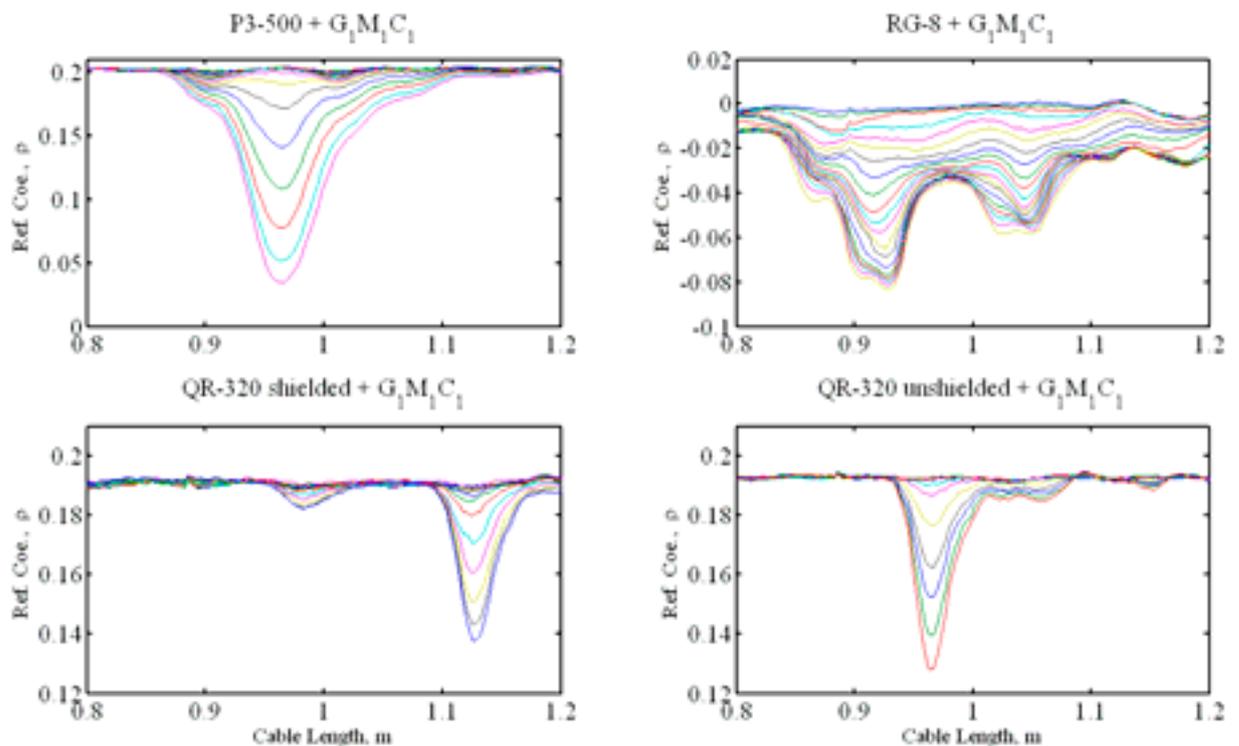


圖 4.66 不同纜線受剪之反射波形

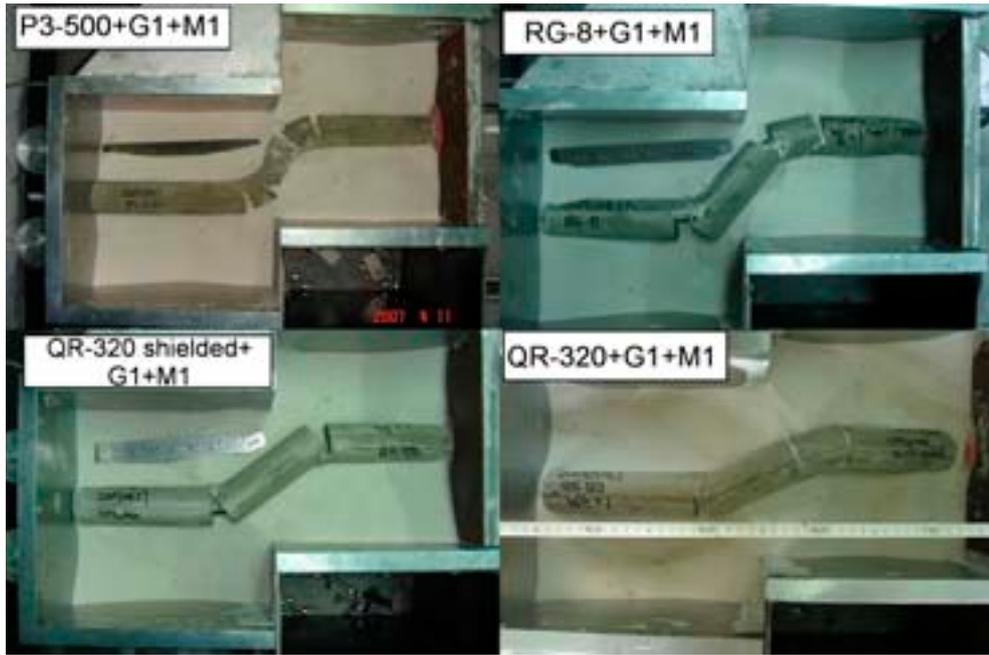


圖 4.67 不同纜線-灌漿材之變形模式

(3) 不同纜線靈敏度與啟動門檻值：

圖 4.68 為不同纜線靈敏度($S, \rho/mm$)，取線性段作一次線性迴歸，所得結果整理於表 4.5。其中，啟動門檻值之定義分為初始啟動門檻值(δ_D)與迴歸門檻值(δ_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(δ)之截距。

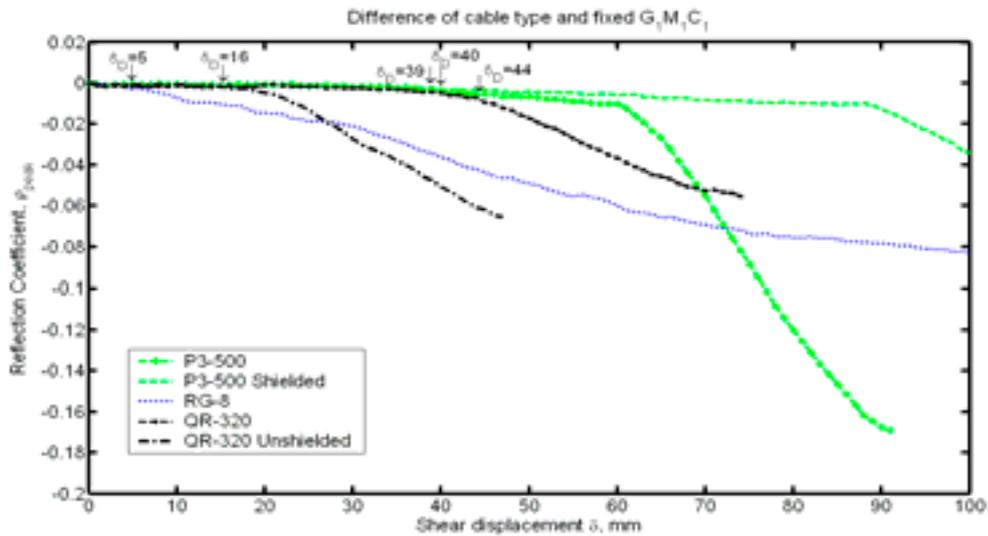


圖 4.68 不同纜線與灌漿材於渥太華砂之靈敏度

比較表 4.5 五種纜線初始啟動門檻值(δ_D)與迴歸門檻值(δ_0)，顯示以 RG-8 的 δ_D 與 δ_0 最小(5 mm, 5.8632 mm)，亦即有最佳之初始反應(最早偵測到滑動)，P3-500 (外導體有橡膠保護) 則最晚產生初始反應，如前所述，造成此現象乃因為 P3-500 纜線勁度較大，所需初始啟動門檻值(δ_D)較大。由圖 4.67 也可發現 P3-500 纜線-灌漿材破壞模式較 RG-8 與 QR-320 碎裂，研判是雖然灌漿材料已產生張力裂縫，但由於纜線本身勁度較大，使得破裂面不易集中而擴大破碎帶。

當變形量超過啟動門檻值，由灌漿材料傳遞與束制作用將使得反射係數與剪力盒位移量呈線性關係發展，回歸此線性段得到斜率亦即靈敏度($S, \rho/\text{mm}$)，如表 4.5，靈敏度以 P3-500 型(外導體無橡膠保護)型靈敏度最高，而外導體有橡膠保護的 RG-8 型最低。

綜觀上述結果，不同的纜線型態對於錯動位移的 TDR 反應不同，若地層滑動屬於岩層的層面或節理面之滑動，目前一般會採用硬殼式(如 P3-500 型)的纜線，但建議採用無塑膠皮披覆的纜線，避免塑膠皮與外導體間之滑動降低感測靈敏度，但必須注意無披覆保護的防腐蝕；若地層屬於軟岩或土壤，則軟式的 RG-8 型纜線似乎比一般習用的硬式纜線更容易提供滑動的預警；此外，由圖 4.68 可得知 P3-500 型與 RG-8 纜線有較大的位移量測範圍(以 P3-500 Unshielded 型而言，至少為 92mm 才斷裂)，可提供較大變位之量測。

二、 灌漿材料之順應性：

本試驗主要目的為探討纜線外灌漿材料之順應性(即灌漿材料與周圍土壤之順應)，並進一步探討是否有助於量化分析。利用試驗之五種纜線進行初步測試，發現 P3-500 型纜線(外導體有橡膠保護)外表披覆塑膠皮會隨剪動過程與內導體產生相對滑動，與現場使用經驗相符，降低靈敏度。QR-320 型纜線(外導體有橡膠保護)初始啟動門檻值為 QR-320 型(外導體無橡膠保

護)的三倍,考慮現地實用性與為了最早察得滑動量,捨棄前述 P3-500 型 (外導體有橡膠保護)與 QR-320 型纜線(外導體有橡膠保護),選出另外三種纜線進行灌漿材料順應性之試驗。試驗結果分為外填土壤勁度、TDR 反射波形、以及與各纜線靈敏度(S)三個因子探討如下:

(1) 外填土壤勁度:

本節試驗控制每次試驗圍壓應力為 285.21 kN/m^2 ,外填材料為渥太華砂,只改變灌漿材料有無,此外,為了解不同外填材料之影響,另外施作一組細礫石作為對照組。將試驗之 $\tau - \delta$ 關係整理成圖 4.69,圖中顯示無論灌漿材料有無,外填材料為渥太華砂的纜線剪應力座落於相近區域,同理,細礫石的資料則座落於較高的相近區域。

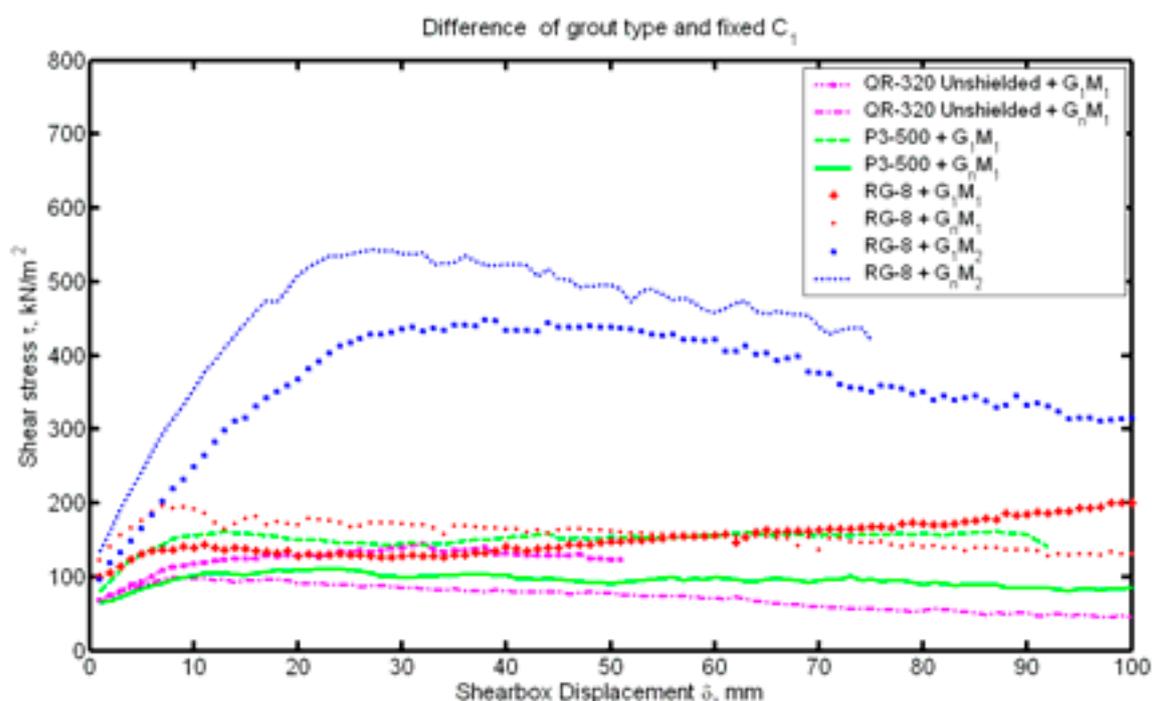


圖 4.69 灌漿材料順應性試驗之剪應力-水平位移曲線

(2) TDR 反射波形:

圖 4.70 為不同纜線探討灌漿材料順應性之反射波形,可以觀察得:硬性纜線(P3-500 型與 QR-320 型),在無灌漿材料(圖 4.70 右側)之順應下,TDR 反射波形發展不一、不易辨識。反之,有灌漿材料之反射波形(圖 4.70 左側)

因為灌漿材料之順應性而有效地將外力傳遞給纜線(圖 4.71)，使得波形易沿單一尖峰狀發展，此現象對於波形判釋與量化分析上有很大的幫助；而軟性纜線(RG-8 型)因本身勁度小，外力易直接轉移給纜線，因此在沒有灌漿材料包覆下之效果比有灌漿的纜線易產生反射訊號(圖 4.70右下側)。

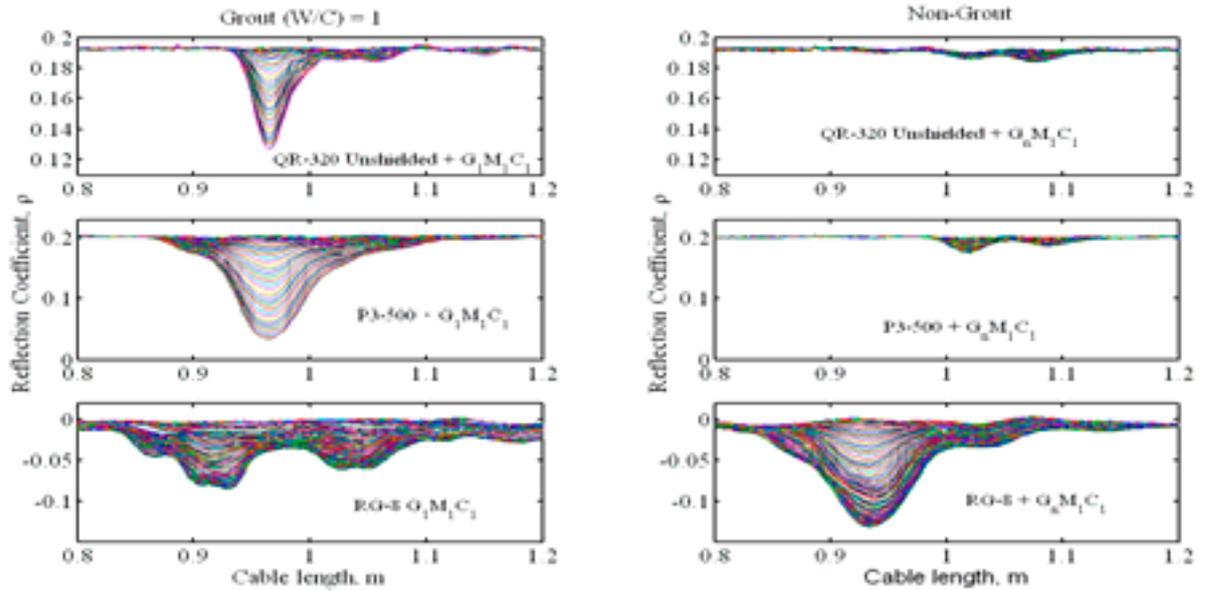


圖 4.70 灌漿材料順應性試驗之反射波形



圖 4.71 灌漿材料順應性試驗之變形模式

(3) 靈敏度：

圖 4.72 為纜線 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 關係，取 $\rho_{\text{peak}}-\delta$ 線性段作一次線性迴歸，結果整理於表 4.6。比較圖 4.72 與表 4.6，顯示 QR-320 型纜線有無灌漿材料束制，其靈敏度相差甚大 (0.0022450 v.s. 0.0000719)，P3-500 型纜線亦有類似情形。此外，RG-8 型纜線因其外導體為軟性編織網狀，受力時較易產生反射訊號，因此即使 RG-8 纜線不加灌漿材料而直接置於外填材料，如渥太華砂或細礫石，剪力仍可直接由外填材料輕易轉稼給纜線；反之，當 RG-8 受灌漿材保護，剪力反而需要破壞灌漿材料後才能有效傳給纜線，造成 RG-8 與 QR-320(或 P3-500) 纜線試驗結果的差異性。

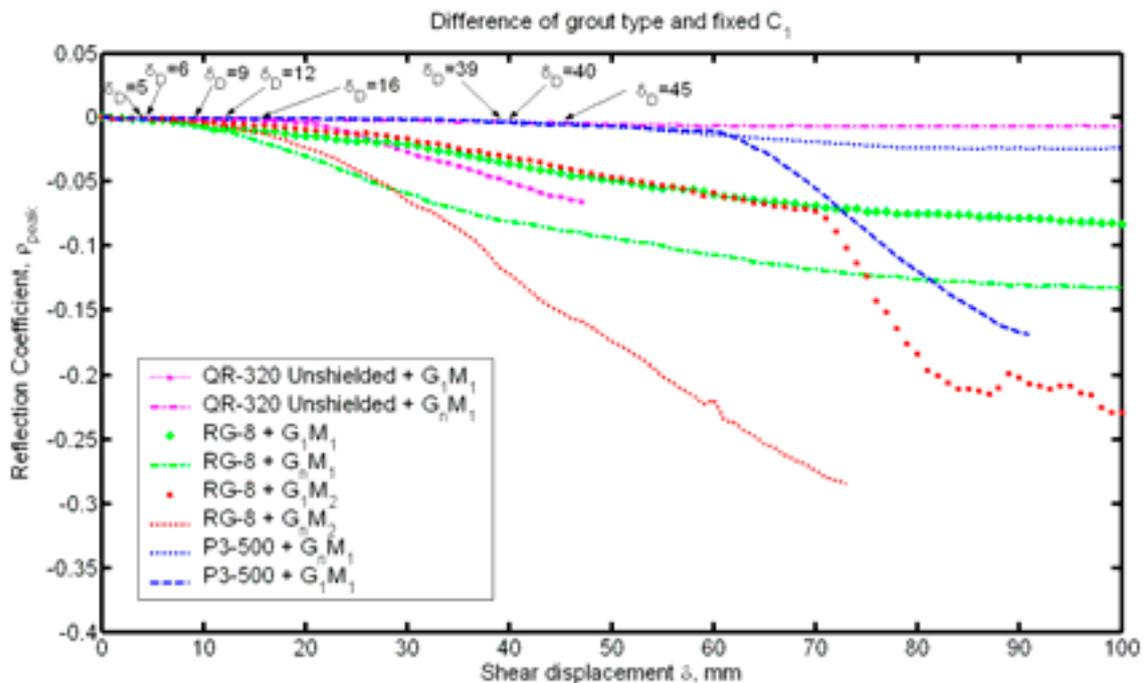


圖 4.72 灌漿材料順應性試驗之靈敏度

上述試驗結果可觀察出：若纜線勁度大於土壤(如本試驗之 P3-500 型與 QR-320 型)，則灌漿材料有助於傳遞剪力變位；反之，若纜線勁度小於土壤(如本試驗之 RG-8 型)，則灌漿材料並無助於剪力之傳遞。但值得注意的是：RG-8 纜線仍需依賴灌漿材料之束制才能使之於不同勁度外填材料下有一致之靈敏度(如圖 4.72)。

表 4.6 不同灌漿材料順應性下，相同纜線之反應特性比較

| Cable Type | Diameter (mm) | Proportion of Water/Cement (W/C) | Backfill Soil type | Shear Stiffness, k_{gs} (slope of $\tau - \delta$) | Linear Regression | | | | Confining Stress (kN/m ²) | Curing (day) |
|--------------------|---------------|----------------------------------|--------------------|---|--|---|---------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------|
| | | | | | Trigger Threshold Value, δ_D (mm) | Regression Threshold Value, δ_0 (mm) | Sensitivity, $S(\rho/mm)$ | Rsquare, R^2 | | |
| RG-8 | 10.3 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 51 | 5 ^(A) | 5.8632 ^(A) | 0.0010713 ^(F) | 0.9905 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 10.3 | W/C=1:1 | Fine Gravel | 103 | 12 ^(D) | 13.9663 ^(D) | 0.0012770 ^(E) | 0.9863 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 10.3 | N/A | Fine Gravel | 41 | 9 ^(C) | 14.358 ^(E) | 0.0048700 ^(B) | 0.9892 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 10.3 | N/A | Ottawa sand | 75 | 6 ^(B) | 7.4867 ^(B) | 0.0014389 ^(D) | 0.9275 | 285.21 | 3 |
| QR-320(unshielded) | 8 | N/A | Ottawa sand | 31 | 45~57 ^(H) | 12.7856 ^(C) | 0.0000719 ^(H) | 0.8345 | 285.21 | 3 |
| QR-320(unshielded) | 8 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 41 | 16 ^(E) | 17.8073 ^(F) | 0.0022450 ^(C) | 0.9909 | 285.21 | 3 |
| P3-500(unshielded) | 12.4 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 83 | 39 ^(F) | 59.5411 ^(H) | 0.0056710 ^(A) | 0.9949 | 285.21 | 3 |
| P3-500(unshielded) | 12.4 | N/A | Ottawa sand | 26 | 40 ^(G) | 27.8549 ^(G) | 0.0003989 ^(G) | 0.9043 | 285.21 | 3 |

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

三、不同勁度外填材料之影響：

本小節試驗主要目的為探討纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度是否一致，若不一致，將造成量化分析上的困難(因個別條件不同，例如：土壤勁度)。因此，擬以室內所建立物理模型(大型直剪儀)，探討此一影響因子。

在施作不同纜線與灌漿材料順應性試驗時，時常發現QR-320 纜線重複性不佳且內導體易受拉扯而頸縮斷裂(圖 4.73)，顯示QR-320 不適合應用於現地監測，故捨棄QR-320 型纜線進行本節相關試驗。

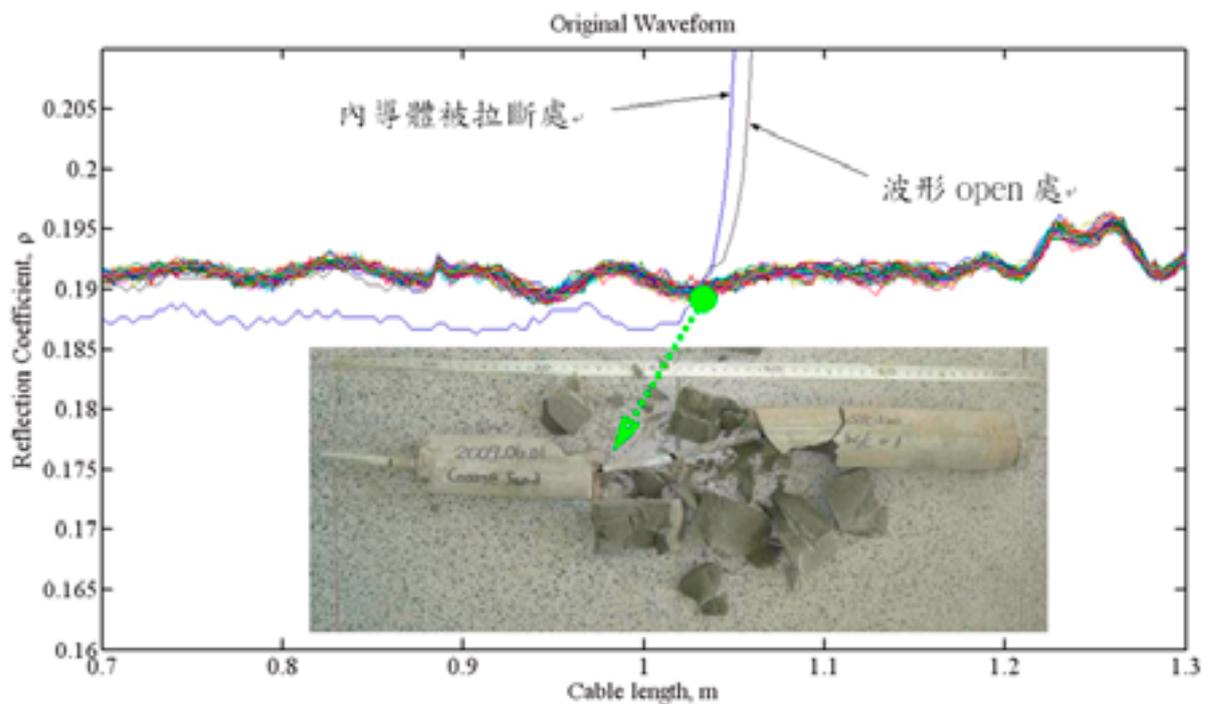


圖 4.73 QR-320 型纜線之內導體受拉而產生頸縮

由不同纜線試驗之結果顯示，以 RG-8 型有最小 δ_D 與靈敏度較佳之 P3-500(無橡膠包覆)進行此系列試驗。為深入了解與確定外填材料勁度對於 δ_D 的影響，首先將針對外填材料勁度與 δ_D 之關係進行探討，其次依序探討 TDR 反射波形與各纜線靈敏度(S)：

(1) 外填土壤勁度與初始啟動門檻值(δ_D)之關係：

固定纜線種類與灌漿配比为 1:1，外填土壤為渥太華砂與細礫石，並於施加不同圍壓應力(285.21 kN/m^2 與 142.6 kN/m^2)藉以得到兩種不同勁度之外

填材料。不同圍壓與不同外填材料之剪應力-位移曲線與整體外填材料之剪力勁度如圖 4.74與表 4.7所示。圖 4.74內剪應力-位移曲線顯示渥太華砂與細礫石尖峰強度之差異甚大，表 4.7亦顯示兩種外填材料剪力勁度具有差異性，能代表兩種不同勁度之土壤。

而不同勁度外填材料下之初始啟動門檻值(δ_D)，以 RG-8 型分別為：5 mm、12 mm 與 9 mm；P3-500 型為 39 mm 與 43 mm。初始啟動門檻值(δ_D)是以目視法去判定反射訊號是否有明顯改變；另外，每次試驗雖儘量控制試驗條件一致，但因外填材料為土壤，可能造成少許誤差等原因而造成初始啟動門檻值(δ_D)之不同。因此，不同勁度外填材料下之初始啟動門檻值(δ_D)仍可視為相近。

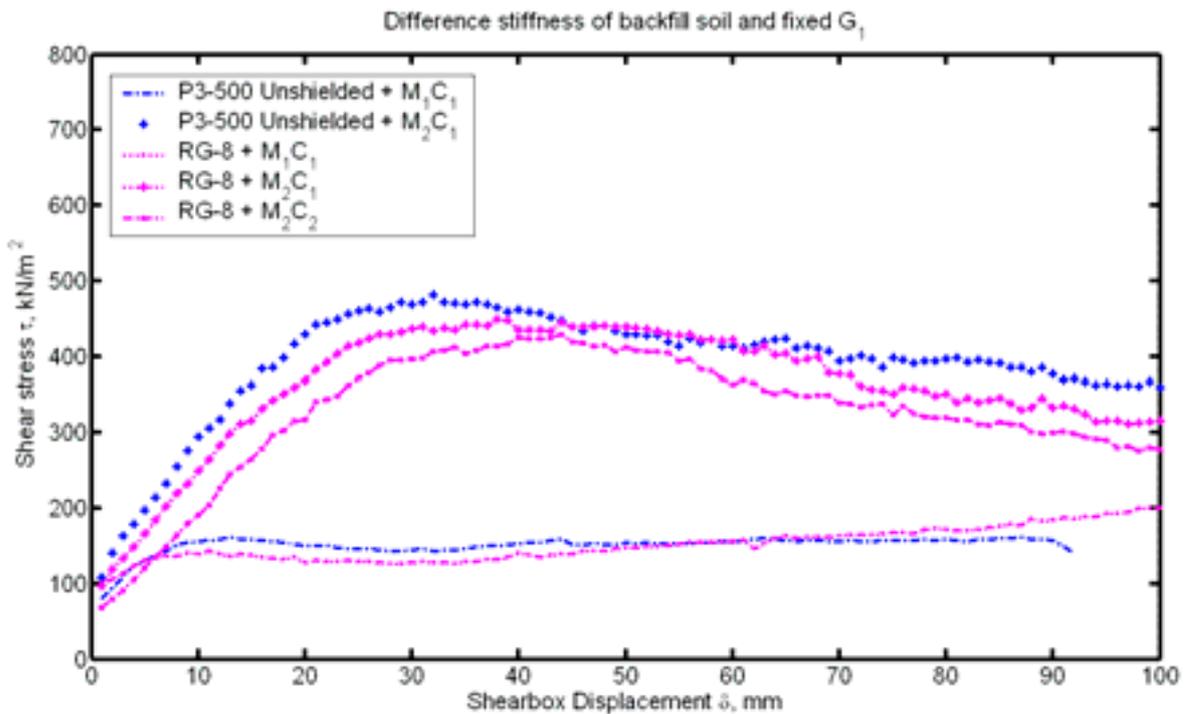


圖 4.74 不同外填材料試驗之剪應力-水平位移曲線

表 4.7 不同外填材料勁度下，相同纜線之反應特性比較

| Cable Type | Diameter (mm) | Proportion of Water/ Cement (W/C) | Backfill Soil type | Shear Stiffness, k_{gs} (slope of τ - δ) | Linear Regression | | | | Confining Stress (kN/m ²) | Curing (day) |
|---------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------|---|--|---|---------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------|
| | | | | | Trigger Threshold Value, δ_D (mm) | Regression Threshold Value, δ_0 (mm) | Sensitivity, $S(\rho/mm)$ | Rsquare, R^2 | | |
| P3-500 (unshielded) | 12.4 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 83 | 39 ^(D) | 59.5411 ^(E) | 0.0056710 ^(B) | 0.9949 | 285.21 | 3 |
| P3-500 (unshielded) | 14.3 | W/C=1:1 | Fine Gravel | 117 | 43 ^(E) | 43.2656 ^(D) | 0.0062864 ^(A) | 0.9393 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 10.3 | W/C=1:1 | Ottawa sand | 51 | 5 ^(A) | 5.8632 ^(A) | 0.0010713 ^(D) | 0.9905 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 10.03 | W/C=1:1 | Fine Gravel | 103 | 12 ^(C) | 13.9663 ^(C) | 0.0012770 ^(C) | 0.9863 | 285.21 | 3 |
| RG-8 | 8 | W/C=1:1 | Fine Gravel | 91 | 9 ^(B) | 10.968 ^(B) | 0.0009791 ^(E) | 0.9740 | 142.6 | 3 |

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

(2) TDR 反射波形：

圖 4.75顯示RG-8 纜線於不同勁度外填材料下之反射波形，分別代表同一複合材料(RG-8 + G1)於不同勁度下之反射波形，可看出於勁度較小之外填材料其對應TDR反射波形帶寬為 12.22 cm，勁度較大者則為 7.38 cm，說明纜線於軟弱土壤與堅硬土壤之TDR反射波形差異性，即是纜線於堅硬地層中(如岩層的層面或節理面之滑動)受剪所造成的反射波形易發展成局部剪力模式(亦即單一尖峰狀)；而纜線於較軟弱地層(如軟岩或土壤)受剪所造成的反射波形易發展成剪力帶模式(亦即兩尖峰狀)。此外，當外填材料較軟弱時，纜線-灌漿材之破裂模式較不集中也較不碎裂(圖 4.76左側)，符合前述外填材料較軟弱時反射波形較不易集中成單一尖峰狀之現象。

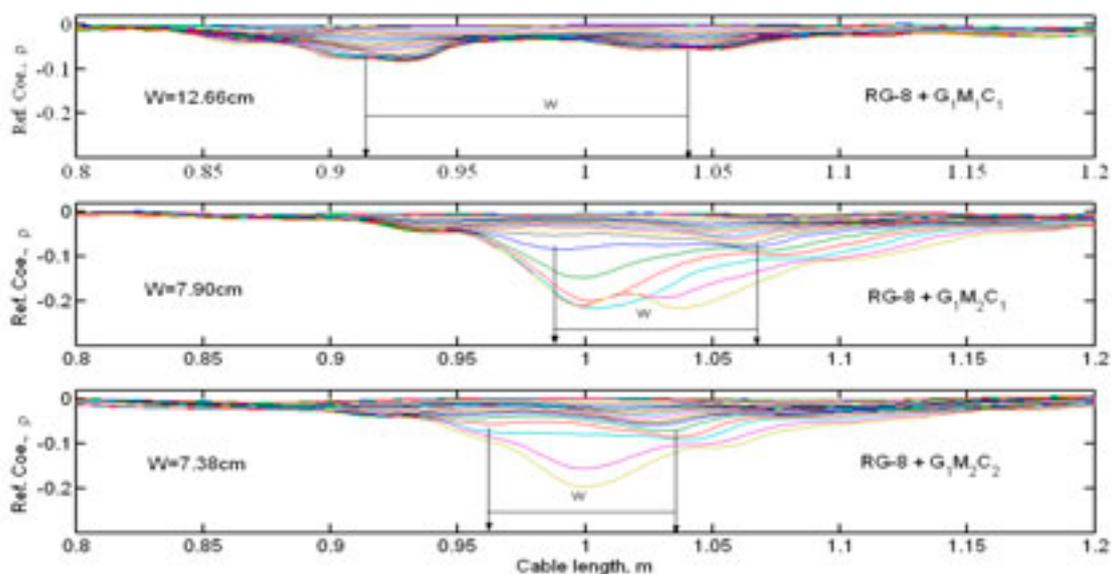


圖 4.75 同一纜線於不同勁度外填材料下之反射波形

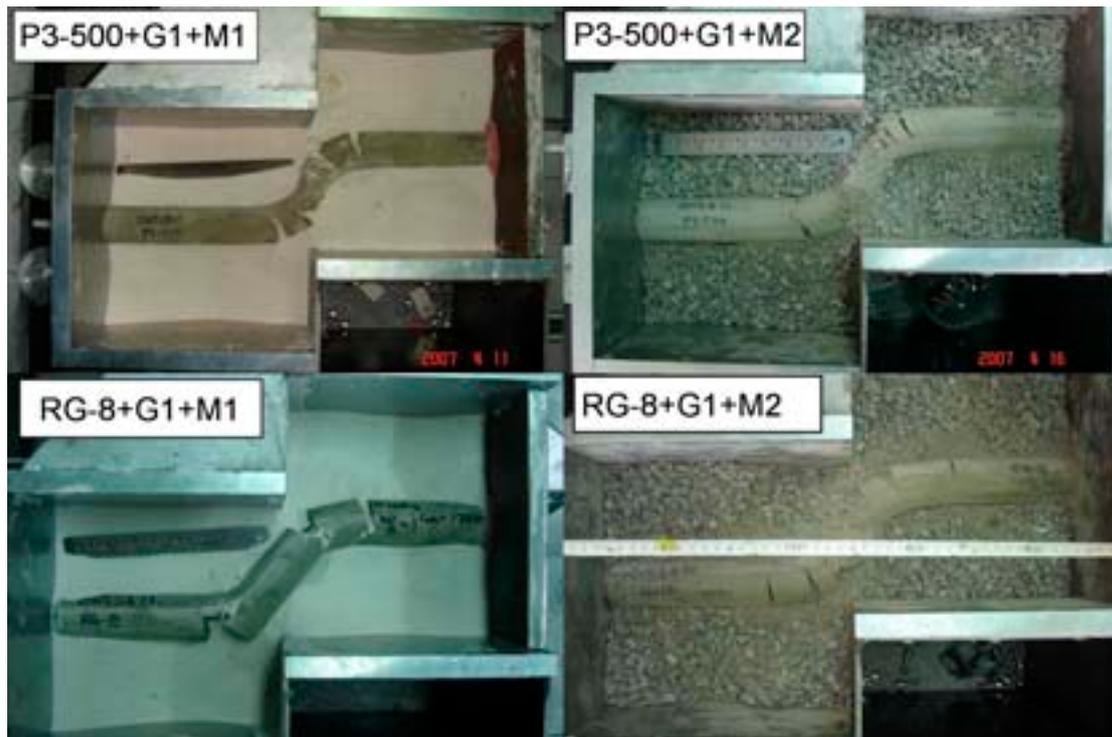


圖 4.76 同一纜線於不同勁度外填材料下之變形模式

(3) 靈敏度：

圖 4.77 為各纜線 $\rho_{\text{peak}} - \delta$ 關係。其中軟性纜線 RG-8 於 70 mm 及 87 mm 處出現斜率轉折，經比對後發現是因為波形由雙剪發展成單剪之交界。這意味此試驗配置之外填材料仍屬軟弱土壤，以致於剪動破壞模式非典型之直剪；另外將 Lin et. al. (2006) 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，發現 RG-8 轉折後之斜率與典型直剪(Lin et. al., 2006)之斜率約略相同(如圖 4.77)，因此判定 RG-8 試驗所出現雙線性曲線是因雙剪模式轉變成直剪模式所造成。因此，RG-8 纜線之迴歸資料只取到 70 mm 及 87 mm (即出現斜率轉折處)，將迴歸所得靈敏度(ρ/mm)、啟動門檻值整理成表 4.7，

結果顯示RG-8 纜線在不同勁度之外填材料下，靈敏度仍會極為相近 (S = 0.0009791、0.0010713、0.0012770)，而P3-500 型(S = 0.0056710、0.0062864)靈敏度僅約略相近。

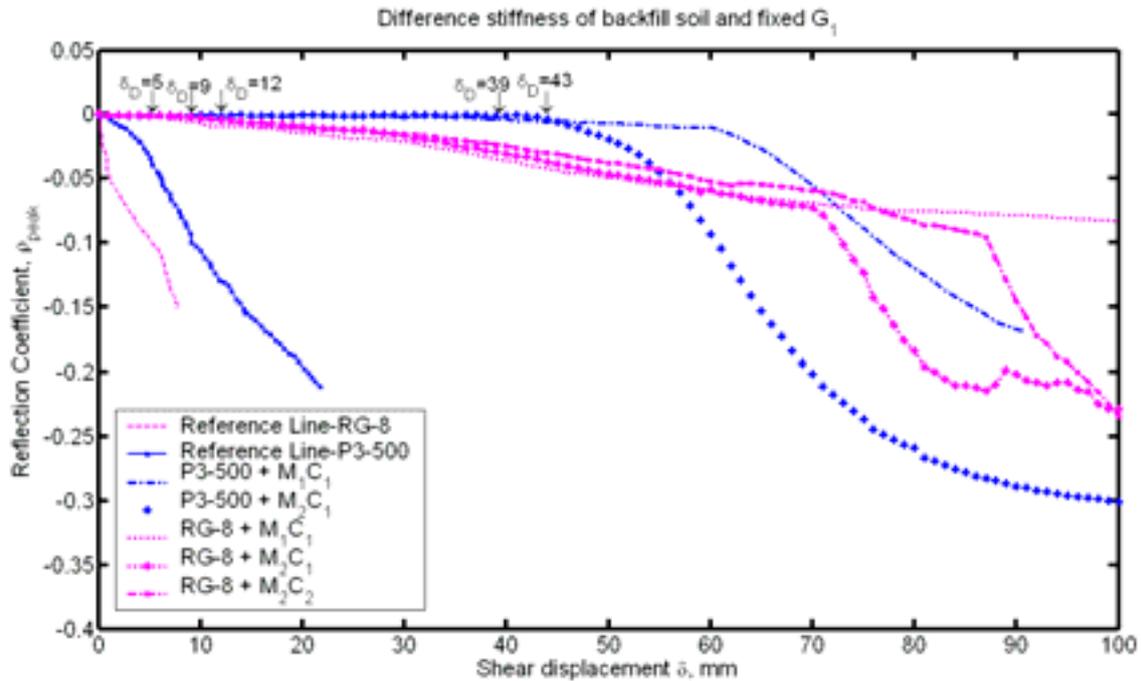


圖 4.77 纜線於不同勁度外填材料下之靈敏度

4.4.5 TDR訊號分析法之改良

為了更清楚辨識 TDR 反射訊號而不受雜訊影響，利用訊號分析方法針對 TDR 反射波形進行處理。所使用訊號分析方法為常見小波方法中的 Daubechies 小波，並引用 [Donoho and Johnstone \(1994\)](#) 所提出之「小波係數臨界法」將雜訊經由小波轉換後，利用設立臨界值 (threshold) 概念去除雜訊。

訊號分析流程主要分為：

(1)雜訊處理(de-noising)：透過 Matlab 工具作處理，選用

Daubechies 3 並配合軟式臨界值過濾雜訊。

(2)反射係數變化量($\Delta \rho$)：將每一筆資料與原始資料之差值

去找出微小變化，將微小變化量定義稱為 $\Delta \rho$ 。其概念如

下式。

$$\Delta \rho_i = \rho_i - \rho_r \quad (4.3)$$

式(4.2)中， i 為量測筆數，通常為量測日期， ρ_r 為初始量測

值。

經由室內試驗結果，選出較適用於軟弱材料之纜線種類-RG-8 型，同時也加入 P3-500 型纜線之試驗結果進行訊號處理，探討訊號處理是否適用於不同種類纜線之可行性。

訊號處理主要步驟為 (1) 將原始 TDR 反射訊號去雜訊，(2) 將去雜訊後的變形與未變形波形相減，獲得反射係數變化量($\Delta \rho$)，期望可藉由這些步驟更清楚辨識滑動面，並透過門檻值的概念，建立並提供日後現地監測警戒值，作為滑動發生後監測頻率調整之參考依據。以下就訊號處理各分析步驟之進行探討：

(1) 去雜訊效果比較：

圖 4.78顯示位移 6 mm之原始訊號與分別使用 $db 3$ 小波方法與smooth 去雜訊後的波形，結果顯示使用小波方法比smooth法較易去除雜訊，

因此後續將以小波方法進行雜訊處理。圖 4.79與圖 4.80為採用不同門檻參數與不同母小波的小波方法去雜訊後訊號與原始訊號比較，其中較適合的門檻參數與母小波為「sqtwolog + soft + sln + Level 3」。

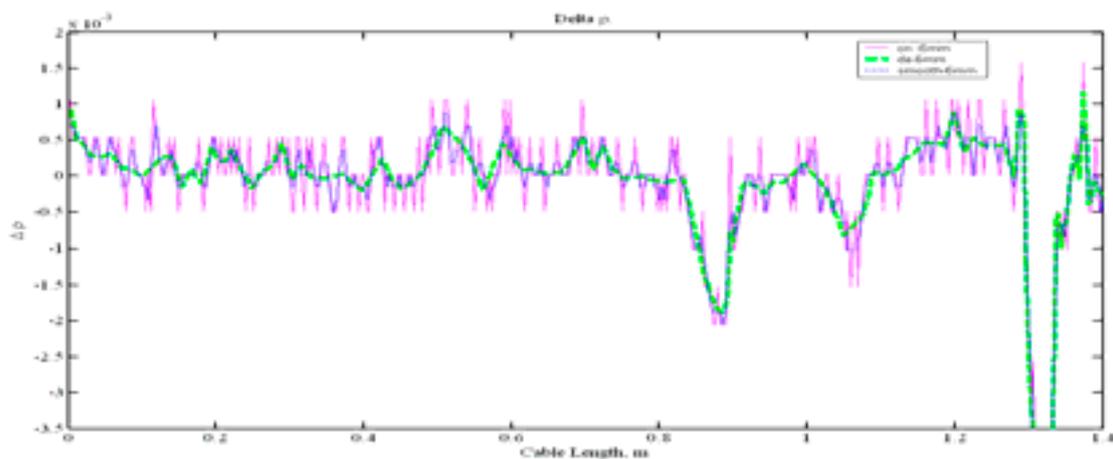


圖 4.78 原始波形與去雜訊效果比較

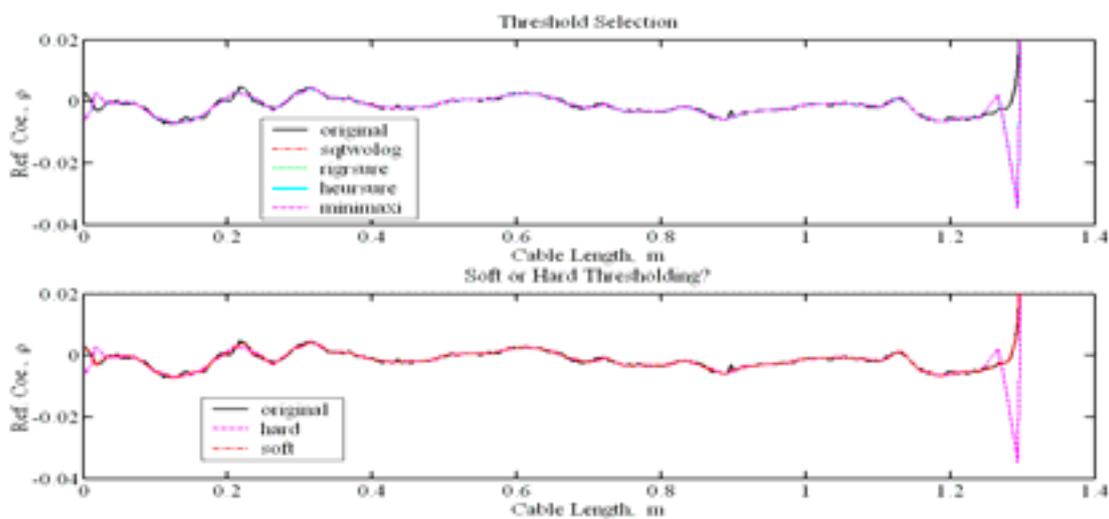


圖 4.79 Threshold 之選擇

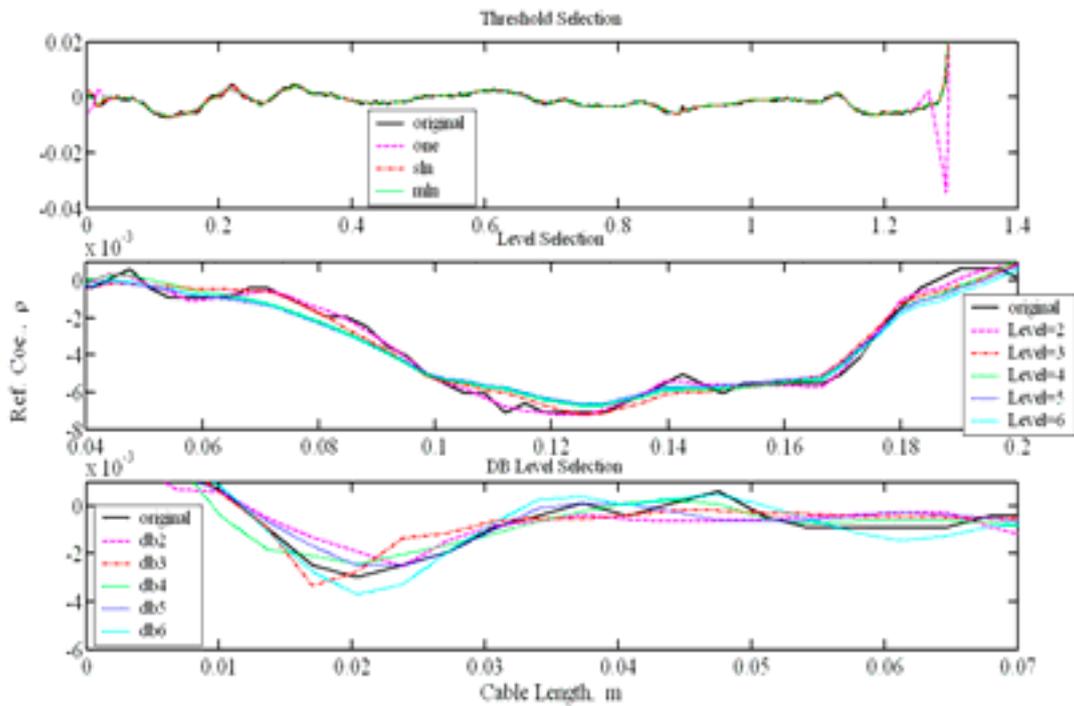


圖 4.80 Mode 與 level 之選擇

決定適當的參數後，針對 RG-8 型與 P3-500 型進行訊號處理，結果如下：

(1) **RG-8 型**：圖 4.81、圖 4.82、圖 4.83 所對應原始波形原本的初始啟動門檻值分別為 5 mm、9 mm 與 12 mm，經訊號處理後，至少可提早約 2 mm 即察得滑動面，圖 4.83 甚至顯示可提早約 3 mm。

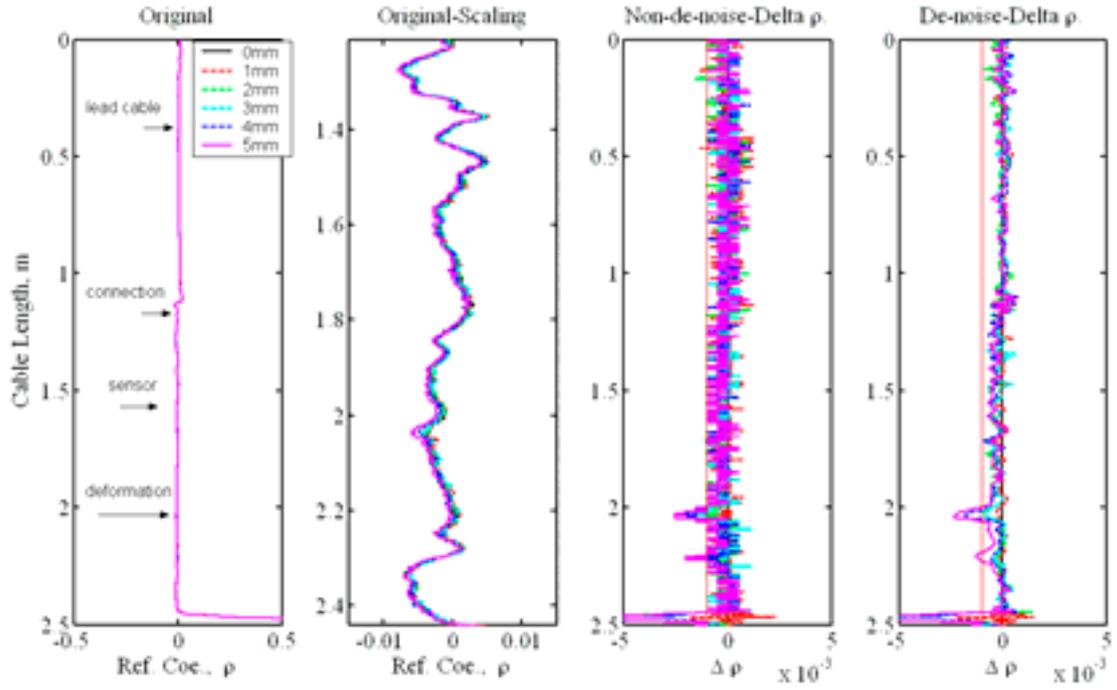


圖 4.81 RG-8 纜線， $\delta D=5\text{mm}$

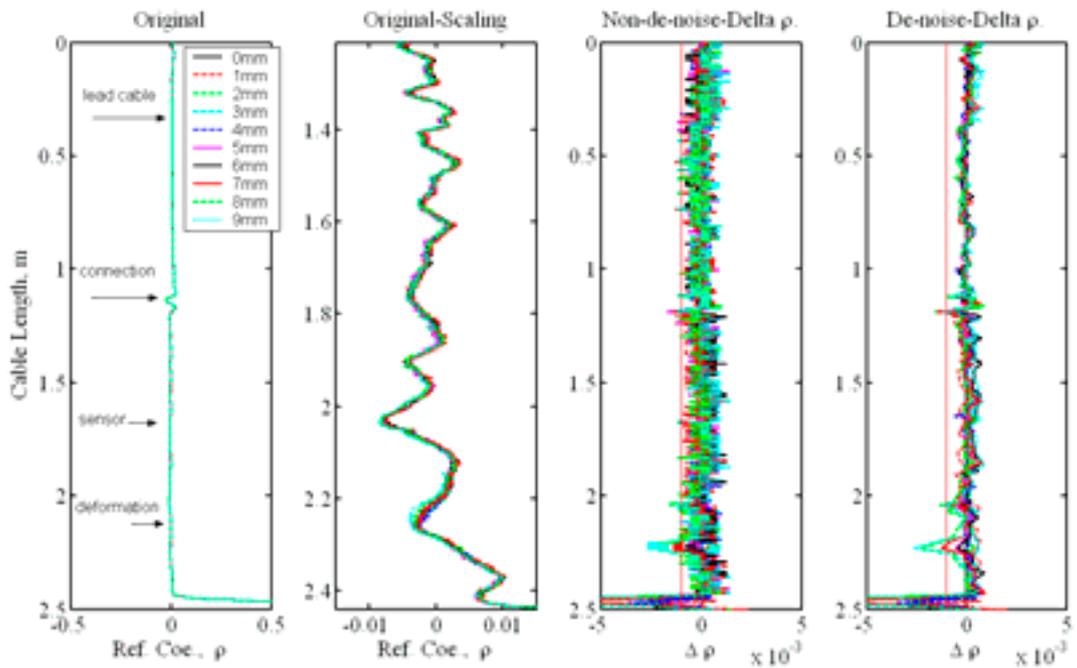


圖 4.82 RG-8 纜線， $\delta D=9\text{mm}$

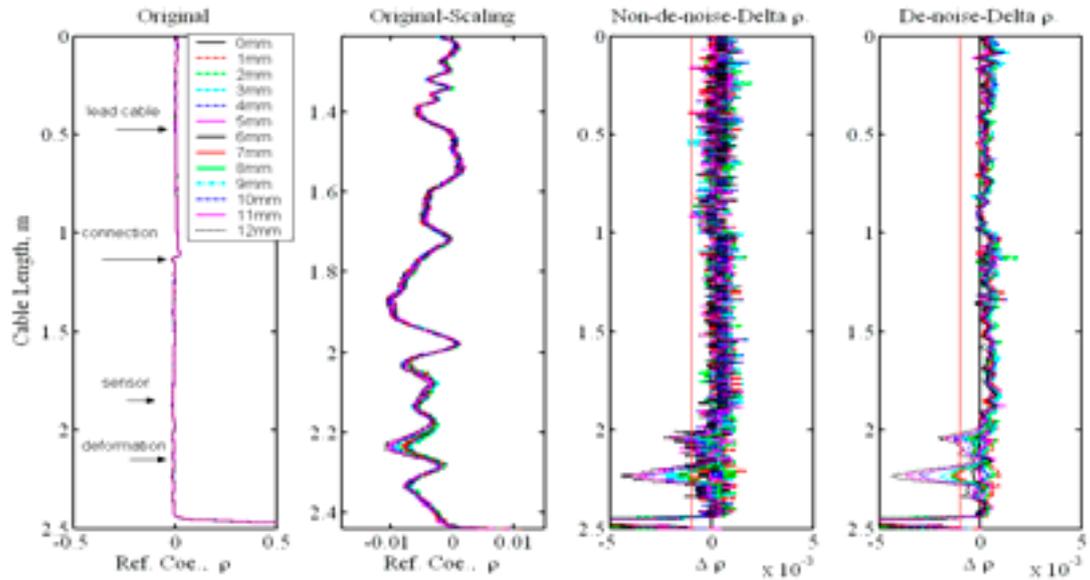


圖 4.83 RG-8 纜線， $\delta D=12\text{mm}$

(2) **P3-500 型**：圖 4.84與圖 4.85所對應原始波形原本的初始啟動

門檻值分別為 39 mm 與 43 mm ，經訊號處理後，可提早約 5 mm

察得滑動面。

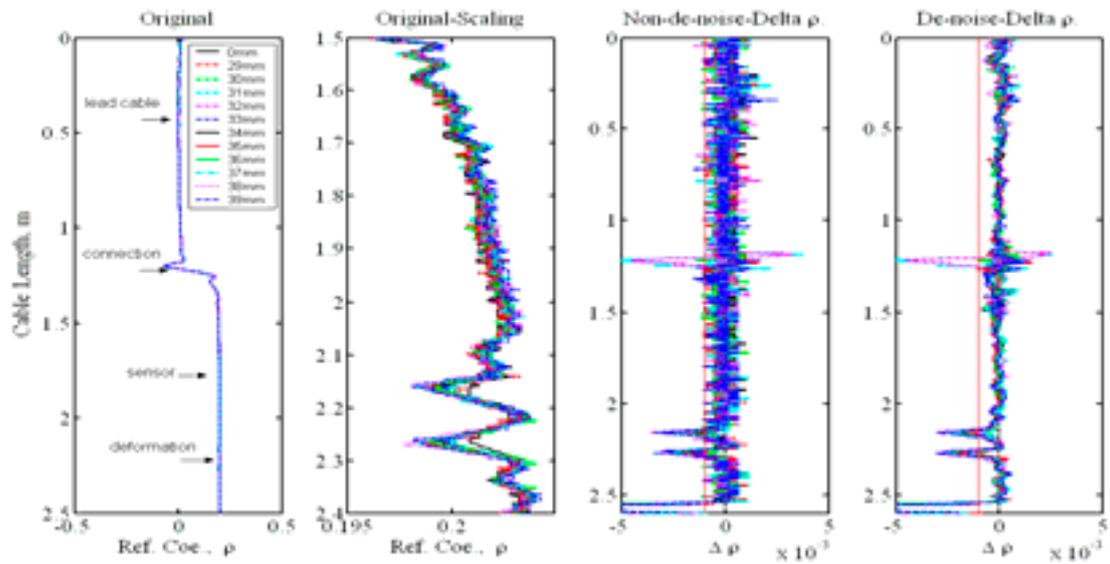


圖 4.84 P3-500 Unshielded 纜線， $\delta D=39\text{mm}$

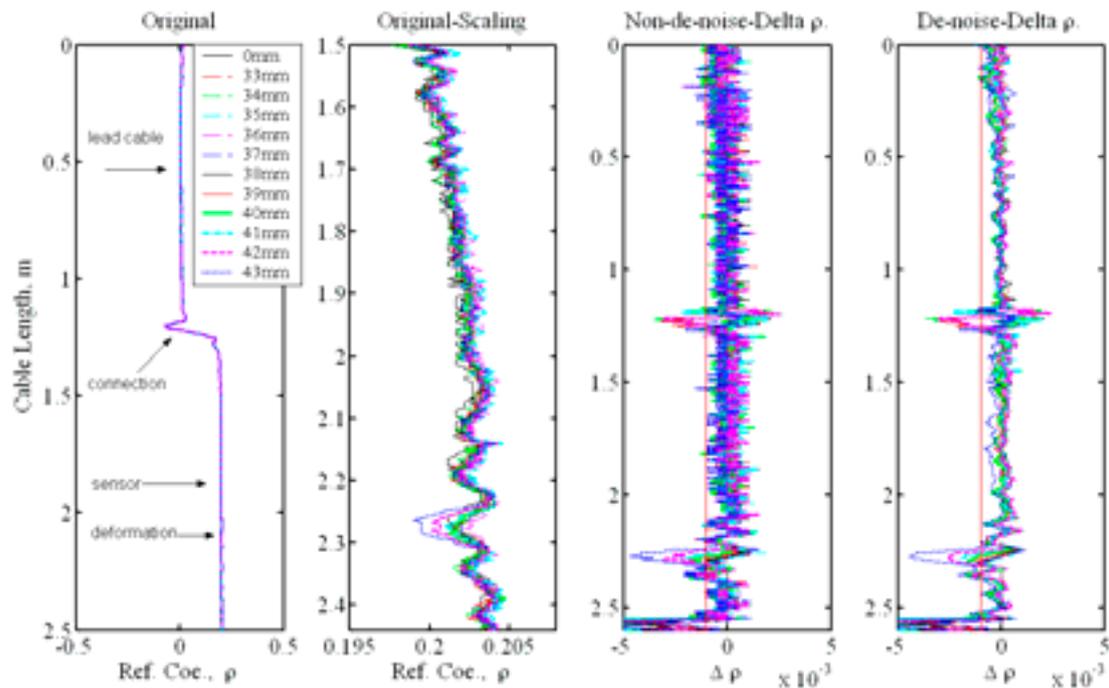


圖 4.85 P3-500 Unshielded 纜線， $\delta D=43\text{mm}$

上述結果顯示TDR波形經過訊號處理後，至少可提早約 2 mm 察得滑動。根據已知滑動量，利用門檻值概念，可由上述分析結果訂出門檻值為 0.001ρ (圖 4.81~圖 4.85 最右側圖片內鉛直紅線)，比對兩種纜線原始試驗結果，顯示門檻值與可目視滑動量相符合，亦即當反射訊號超過門檻值即為土壤已錯動變形纜線。

4.4.6 TDR 錯動變形監測之安裝與資料分析標準程序建議草擬

應用 TDR 技術於邊坡滑動監測已行之多年，但實務應用時往往只考慮纜線本身衰減特性，並無考慮纜線種類於不同土壤之反應，使得纜線種類之選擇並無統一標準與依據。此外，Blackbrun and

Dowding (2004)以數值模型探討纜線外填材料影響，提出灌漿強度為周圍土壤之 1~5 倍左右為最佳灌漿配比，但礙於現地灌漿強度控制不易且水灰比過大亦會造成嚴重縮漿，因此何謂適當的現地灌漿選擇仍是有待探討的問題。在監測資料的分析上，目前的實務僅能定性地判釋 TDR 反應，尚無法進行較定量的解釋。因此，本研究利用室內物理模型進而模擬近似現地之邊界條件，由試驗結果據以提出 TDR 錯動變形監測安裝標準程序與量化分析之初步建議，分述如下：

(a) 安裝程序；透過本研究之實驗與分析結果，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 4.86)。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)，以使得 TDR 錯動變形監測應用更具實務性與便利性。在纜線的選擇上，硬性纜線適合堅硬地層，有較佳的 ρ - δ 靈敏度，但較不適合軟弱地層 (δ_D 太大)，軟性纜線較適合軟弱地層，可較早偵測位移 (δ_D 小)，但 ρ - δ 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)

(b) 資料分析程序：利用小波方法對 TDR 訊號作雜訊處理後，是否產生錯動變形的門檻值初步定為 $\rho=0.001$ 。由不同勁度之外填材料試驗結果顯示，纜線在不同勁度之外填材料下，靈敏度相近(RG8

$S=0.0009791\sim 0.0012770$ ；P3-500 $S=0.0056710\sim 0.0062864$)。現地若屬堅硬土層時，建議安裝 P3-500(unshielded)型纜線且以式(4.3)進行量化分析；若現地屬軟岩或土壤時，建議安裝 RG-8 型纜線，並以式(4.4)進行量化分析。

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.006} + \delta_0(mm) \quad (4.3)$$

$$\delta(mm) = \frac{\rho_{peak}}{0.001} + \delta_0(mm) \quad (4.4)$$

式(4.3)與式(4.4)中 δ 為地層滑動量， ρ_{peak} 為反射係數(與初始量測值之差值)， δ_0 為迴歸門檻值。其中 δ_0 受地層勁度與剪力帶寬度所影響，若地層為堅硬土層時，則 $\delta_0 \approx 0$ ；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， $\delta_0 \approx 5mm \sim 12mm$ 。因此，有關 δ_0 受地層勁度與剪力帶寬度所影響問題，仍需進一步研究。

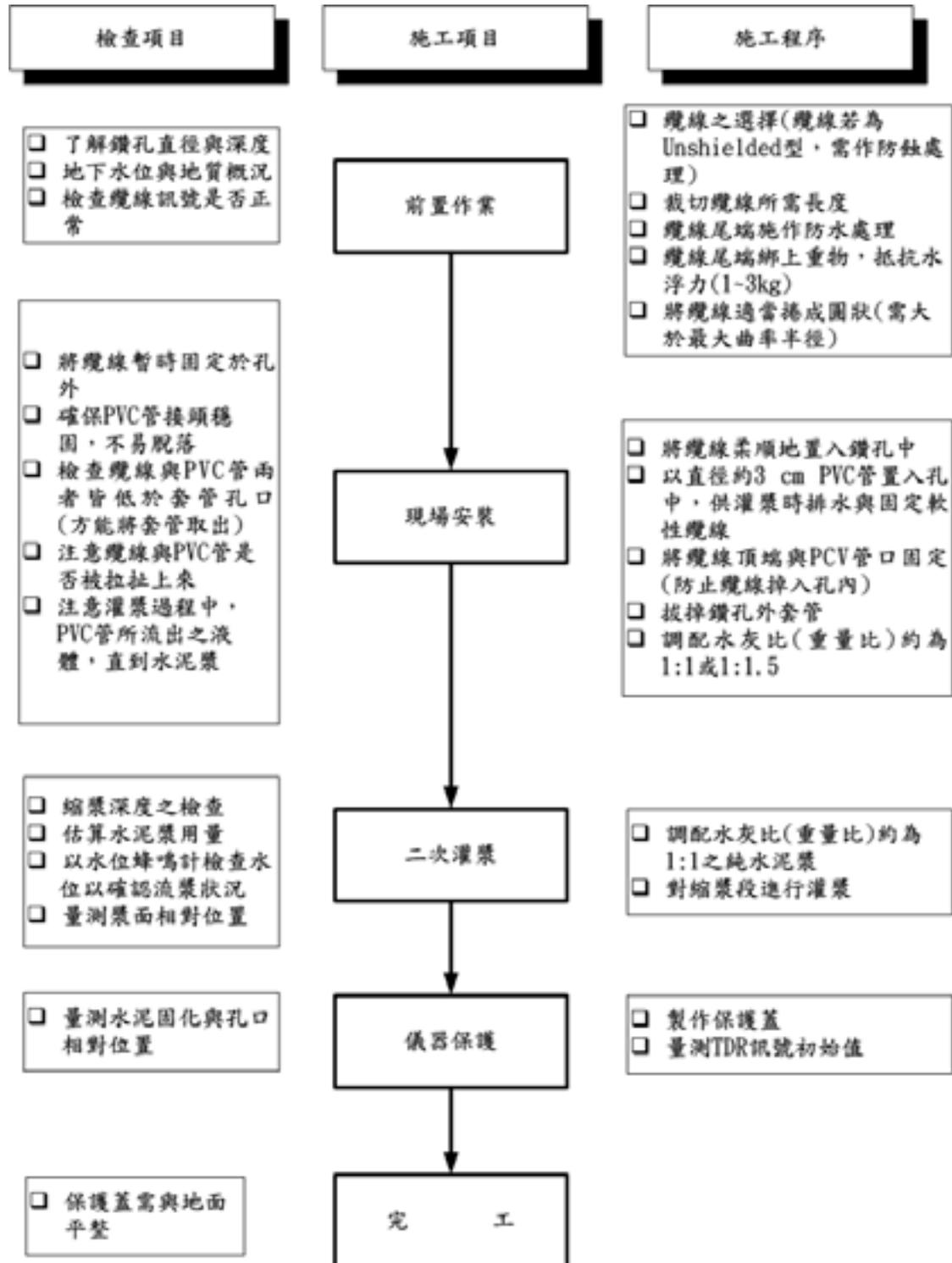


圖 4.86 TDR 錯動變形監測之標準程序

4.5 TDR監測系統整合

TDR為一上孔式概念之新式監測系統，其訊號發射主機以及資料擷取器部分可置於地表，透過多工器（Multiplexer）以及同軸傳輸纜線，將多點TDR不同監測感測器連接，形成一機多工之功能。以圖4.87之壩體現場監測示意圖為例，配合TDR研發階段所提出的新式感測器，除了滑動監測之外，也可一機同時監測雨量、地表變位、地下水位等項目。另外，TDR監測系統中之資料擷取器，也能同時連接傳統電子監測設備，如水位、水壓等。因此藉由新式TDR分析方法和創新之監測感測器研發，TDR系統除了具有成本優勢之外，相較於傳統電子監測設備，更具備多工、耐久性之優點。

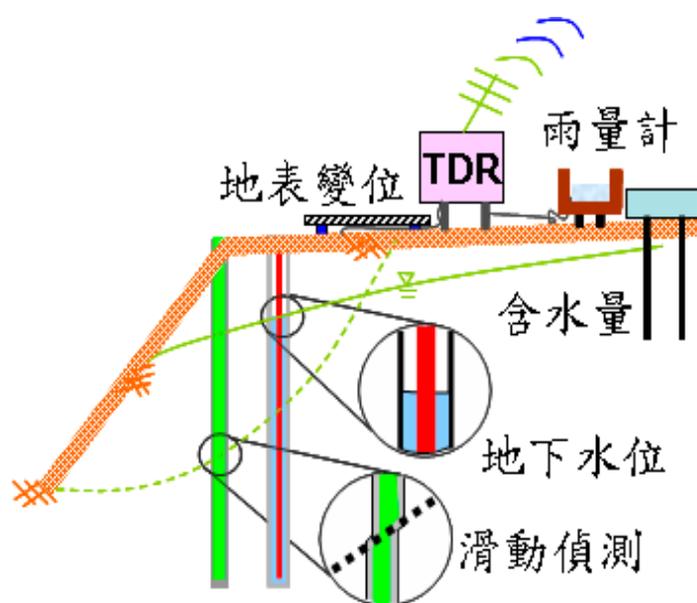


圖 4.87 壩體整合式 TDR 監測系統示意圖

TDR監測自動化系統之流程概況如圖 4.88所示，自傳輸纜線

(Lead Cable)連接多工器(Multiplexer)開始，至監測資料由無線方式傳回到監測站為止，都屬於本系統資料擷取的部分，圖 4.89為資料擷取設備的實體圖片。各儀器元件的功能詳述如下：

1. 多工器(Multiplexer)：多工器主要的功能在於擴充同時監測的感測器數量，以達最大的經濟效益。本研究採用的 TDR 多工器一組可同時連接 8 條傳輸纜線，亦可多組多工器串接，至多可連接 512 條傳輸纜線。

2. 時域反射儀(TDR)主機：時域反射儀(TDR)主機為一脈衝電壓產生器，產生之脈衝電壓傳至同軸電纜線，由內建之訊號採樣器擷取反射訊號，進而利用資料擷取器下載儲存資料。TDR 主機另有 RS232 接孔，可外接電腦透過控制軟體直接操作。

3. 資料擷取器(Datalogger)：資料擷取器為一小型的電腦，可透過內附的程式軟體進行操控，依據擷取資料形態的不同，套用不同的參數執行程式。透過時間排程的設定，可自動化將監測的原始資料收集儲存。資料擷取器除了可接收 TDR 資料外，透過傳統類比 I/O 界面，也可橋接一般傳統電子監測儀器。

4. 資料儲存器(Storage)：資料儲存器即為快閃記憶體，其目的為擴充資料擷取器之內建暫存記憶體，使常駐程式可定期將所擷取的監

測資料儲存於硬碟中，避免資料擷取器資料儲存空間不足。

5. 傳輸系統：透過傳輸系統可遠端下載監測資料，而傳輸系統依照現場需求而有下幾種方案：

- a. GSM/GPRS 無線傳輸，利用手機 SIM 卡之 GSM/GPRS 功能，透過無線傳輸將資料傳送至伺服器端。
- b. 透過電話系統，則可利用 ADSL 模組進行資料傳輸，其優點在於價格便宜，傳輸性穩定。
- c. RF 傳輸介面以及 1.4 GHz RF 天線，可提供 RF 頻段之無線傳輸功能，唯伺服器端也必須架設接收天線，以接收傳輸資料。

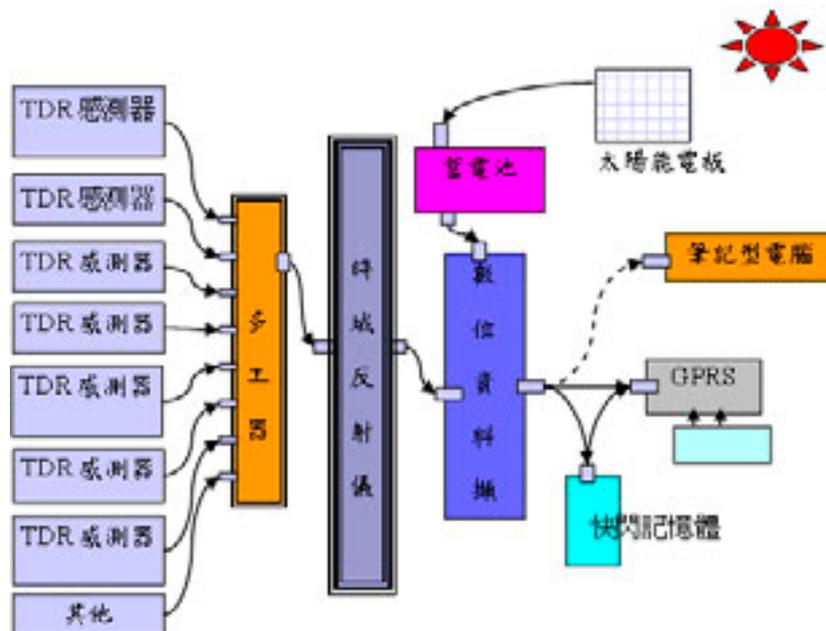


圖 4.88 TDR 資料擷取設備

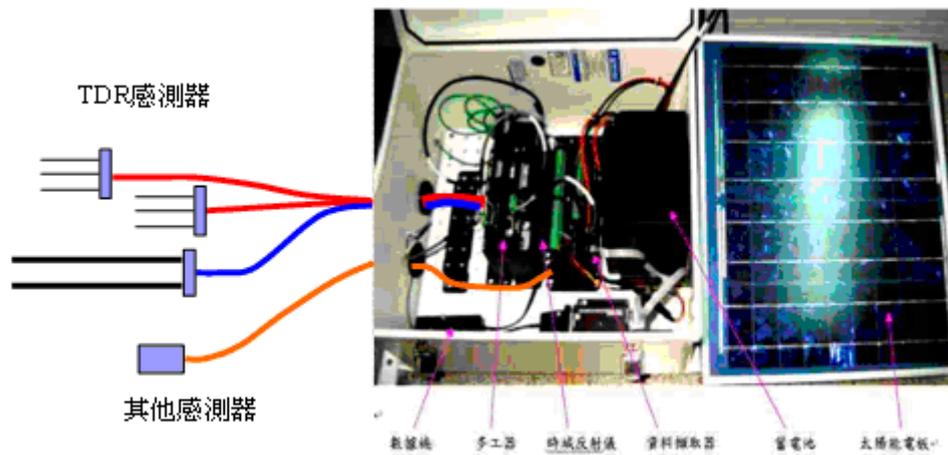


圖 4.89 TDR 資料擷取設備的實體圖

監測資料自動化傳輸過程可參考圖 4.90所示。在規劃構想中之 TDR 監測程序，將研發撰寫一 JAVA 程式，利用監控伺服器之系統平台，如 Windows XP® 所內建之程式排序控制軟體，定時進行 JAVA 程式運行，以處理資料擷取系統所紀錄之 TDR 波形封包，以及其他傳統監測資料。以 Java 語言作為核心程式，除了它具備了跨平台、免費、安全性、及網頁製作便利的優點外，另一主要的因素是 Java 擁有程式錯誤處理的機制，此特點除了平時易於維修除錯外，更重要的是當系統所擷取的原始資料出現錯誤時，會停止執行程式丟出錯誤訊息，不會造成電腦當機。

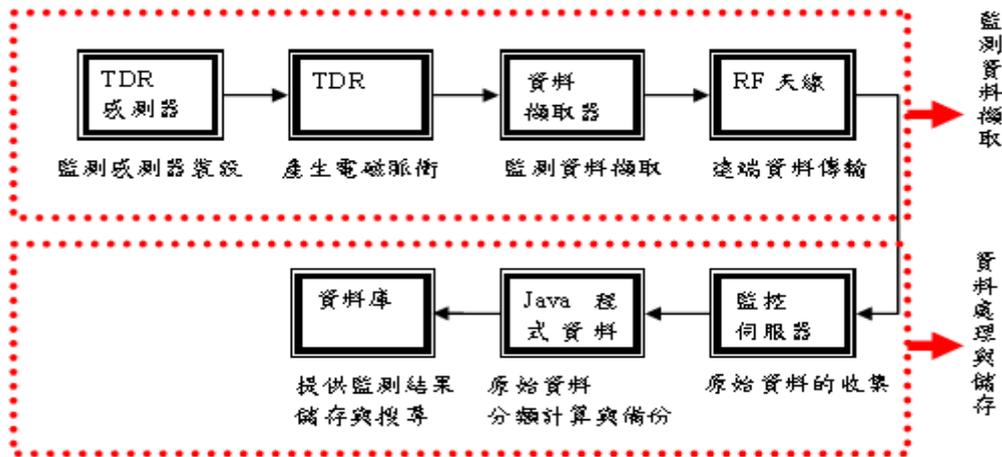


圖 4.90 TDR 自動化流程

透過以上自動化方式，以JAVA applet網頁互動程式撰寫之監測資料查詢界面如圖 4.91所示，本JAVA互動網頁可提供特定日期查詢功能，並配合網頁說明，透過資料庫查詢方式，可直接將TDR感測資料及其他傳統監測資料顯示於網頁。

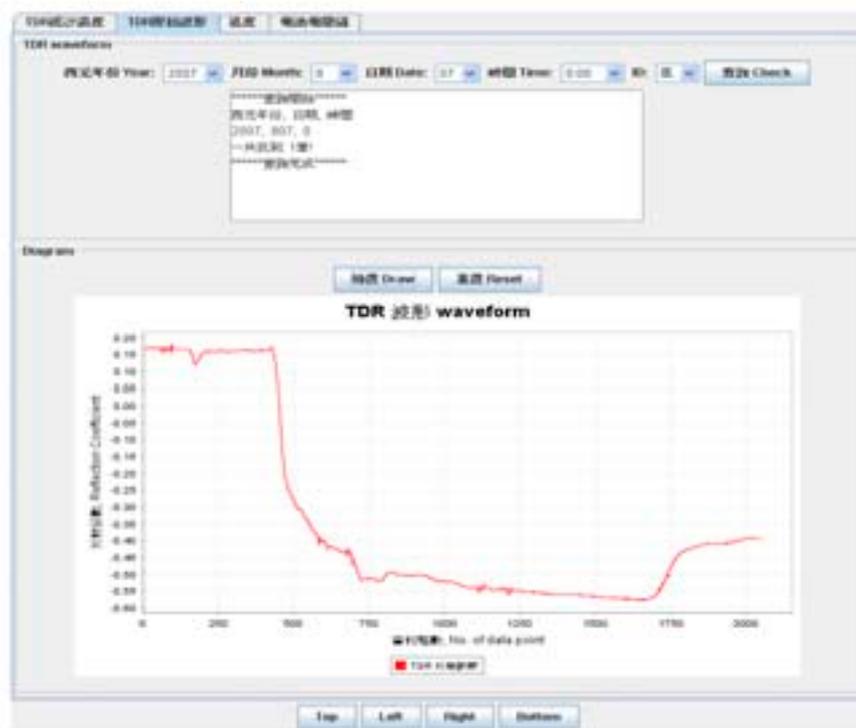


圖 4.91 即時自動化監測資訊網站示想圖

4.6 既有壩體之安裝適用性探討

4.6.1 研發儀器與傳統儀器之比較

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，提高使庫安全監測之效能。

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 4.92 所示。

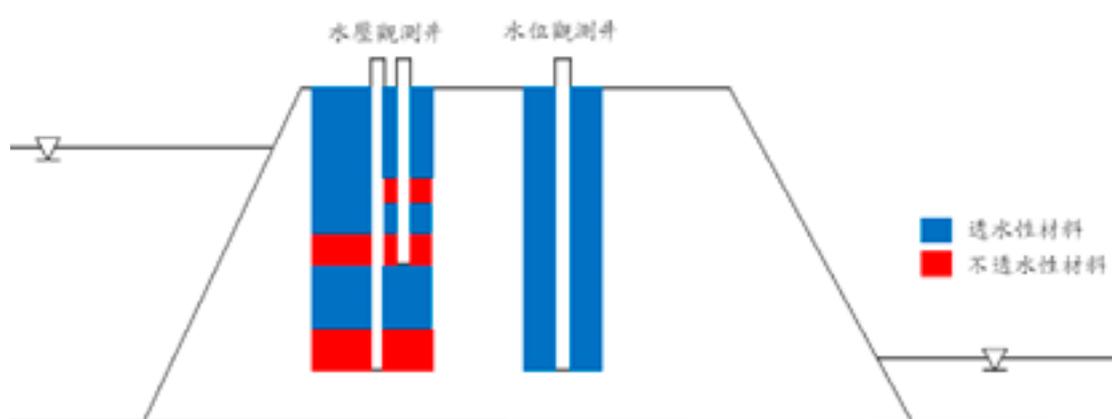


圖 4.92 壩體水位及水壓觀測管安裝示意圖

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所示。

表 4.8 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 |

| 監測技術 | 傳統測水壓計 | FBG 水壓計 |
|----------|--|--|
| 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)： 精密的水壓計本身需置入存在地層內。 | 上孔式(uphole)： 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： 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： 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。 |

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 4.9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 4.9 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。 |

| 監測技術 | 傳統測傾管監測技術 | TDR 錯動變形監測技術 |
|----------|---|---|
| 儀器放置方式 | 下孔式(downhole)： 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)： 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： 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： 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。 |

4.6.2 鑽探作業注意事項

水庫的安全評估，若沒有發現潛在的破壞模式，一般而言除了最基本的監測需求，盡量避免在壩體上安裝需要鑽孔的儀器設備。但若發現異常跡象與可能的潛在破壞模式，則即使需要鑽孔，也應該考慮增設相關監測儀器。在壩體上鑽孔行一定程度的風險存在，然而相對於已在壩體發現若干異常跡象卻無法對整體壩體進行安全監測的潛在極大風險比起，透過對鑽孔工程施工前中後的積極管理可將此風險

降低並獲得控制。以寶二水庫溢洪道陡槽之裂縫與滲漏問題為例，國內與美國 USBR 專家目前的評估，認為原因應該非屬結構不穩定因素造成，但都建議應進行適當的補充鑽孔調查與增設水壓觀測儀器。國內的水庫，至遲至民國 90 年因不同的需求有過許多壩體鑽探的經驗，例如有烏山頭水庫、曾文水庫、白河水庫、明德水庫、蘭潭水庫、鳳山水庫及澎湖赤崁水庫等處，在有效之管理下安全完成鑽探作業。本節中將簡述於土石壩體中進行鑽孔作業之基本注意事項並建議一適當施作方式，未來可以在相關辦法或手冊中明訂在壩體上進行鑽探的條件與標準程序，以明確有效的管理降低水庫安全的風險。

根據國立交通大學防災工程中心於民國 90 年由經濟部水資源局補助之研究案「土石壩鑽探技術之評估研究」報告指出，土石壩因鑽孔產生破壞的主因是在鑽孔作業中有水力破壞或濾層被阻塞的情形發生。報告中提出最容易受鑽探介質而產生水力破壞之位置與情況包括：

1. 表面坡度超過 0.5 : 1 (H : V) 之不透水心層，阻隔溝渠，以及上游面之傾斜心層。
2. 接近壩座表面坡度超過 0.5 : 1；附近坡度極劇改變之區域；或者在基礎中具有高低壓性強烈對比層面上進行鑽探時。
3. 土堤內接近結構物之地區。
4. 浸潤面很高之土堤內。

當鑽孔作業於上述位置進行時，應要多加謹慎要求並嚴格執行鑽孔注意事項。注意事項包括：

1. 鑽孔工作需有現地工程師全程監督，現地工程師需依據現地之初步探查及鑽孔結果，隨時適當調整鑽孔計畫，以達調查目的。
2. 鑽孔前必須在鑽孔位置處整治一適當大小之水平工作面，以利機具之擺設布置及鑽孔角度之精度控制。
3. 鑽探開始之後，作業人員負有控制與監控鑽探界質貫入之壓力，貫入速率，以及鑽探界質循環損失之責任，以確保水力破壞之可能降至最低。
4. 鑽探孔位之垂直度應符合鑽探計畫精度之要求，或由甲方工程師評估之後規定之，一般垂直度之要求應控制在每 30 公尺深度不得偏離孔徑尺寸（或套管之內徑）之三分之二。
5. 鑽孔包括鑽孔與取樣兩部分，採用之設備與方法，應依據工程計畫階段、地盤種類、探查深度、需求之樣品品質與特殊目的等決定。
6. 岩層調查為主之鑽孔應採連續取樣；土層調查為主之鑽孔，得間斷採取擾動與不擾動樣品取代連續取樣；或視不同之調查目的來決定取樣方式，但不論採取何種取樣方式，均需經過現地工程師同意後方可執行。
7. 鑽孔水位，應視地層、地下水狀況及工程需求，以適當方法、儀器、頻率及延時觀測之。對地下水質至少應查明其對地下

結構物之不利影響。

倘若在進行鑽探作業中突然發生鑽探介質流失的現象，應該立刻停止鑽探，並採取手段停止鑽探介質之流失，找出介質流失之原因。倘如鑽探介質流失的主因判斷為水力破壞則應儘速進行通報，以便進行整體安全評估。

4.6.3 鑽探方式建議

在符合上述施作注意事項之前題下，根據工址特有狀況，鑽孔目的，經濟考量，以及現有之工具可決定以下列任一方式進行施作，其包括：1.反循環衝擊/旋轉；2.旋轉衝擊；3.空氣泡沫旋轉；4.泥漿旋轉（白皂土/可生物分解式泥漿）；5.鋼索工具；6.螺旋鑽；7.以水為界質之鑽探。惟在可能之情形下，建議以空氣泡沫旋轉方式(polymer drilling 或 foam drilling)施作較佳，以降低鑽孔對周圍材料之影響。並在鑽探完成後，以孔內攝影技術紀錄孔內之壩體材料各界面之情形。於土石壩體中鑽探技術之細節與空氣泡沫旋轉鑽探技術可參考「土石壩鑽探技術之評估研究，民國 90 年」以及「寶山第二水庫岩石之大地工程特性研究，民國 88 年」報告書。

五、非破壞性檢測技術之應用與改良研究

非破壞性檢測具有不破壞壩體的優點，但由於壩體結構體積龐大，常需藉助地球物理探測的方法，由於利用地球物理方法在壩體上檢測之相關應用與案例較少，且將慣用的地球物理探測方法直接應用在壩體上也常引伸出一些適用性的問題。本計畫非破壞性檢測技術與精度改良項目以三年（95 至 97 年度）為期，其主要工作項目包括：深入了解並嘗試提昇電探、震測與透地雷達等非破壞檢測在壩體檢測應用之可適性，針對施測性、解析度或資料判釋進行改良研究，並於現地進行實例測試研究。本計畫第一年度(95 年度)已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。延續對於非破壞性檢測技術與精度改良之目的，96 年度辦理工作內容如下：

- (1) 壩體表面波震測檢測技術改良，包含空間解析度與探測深度的提升。
- (2) 壩體表面波震測影像探測資料分析精度提升，包括了解高次模態及地形效應對試驗結果的影響與可能之因應對策。
- (3) 不同問題與壩體條件非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛型建立。

5.1 壩體表面波震測檢測技術改良

新近發展之表面波探測法係利用表面波量測剪力波速，相較於傳統量測方法，其不需鑽孔即可測得地層內部之剪力波波速，並藉以進行地層分層。其施測上不但容易、快速、成本低，且量測之取樣體積遠大於傳統方法，可用於大範圍工址之探測，作為傳統鑽探之輔助調查，是為一可加以應用之有效技術。惟以目前之技術欲應用至壩體上尚有需許技術上之問題需解決，本節中將說明此些問題並針對側向解析度及探測深度之提升上加以進行改良。

5.1.1 表面波震測基本原理

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，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。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。

多頻道表面波震測係將一串受波器與震源排列成一列，施作多頻道表面波分析，由多頻道之信號分析較容易分辨出基態及高次振態之表面波頻散曲線，並可容易判斷出有效表面波及無效之雜波，增加量測之準確性。本研究主要是利用多頻道波場轉換法中頻率波數轉換法進行資料的分析(Lin and Chang, 2004)。其在頻散曲線分析上，主要是將震測資料由時間-空間域 ($t-x$ domain) 以離散傅立葉轉換轉換至頻率-空間域 ($f-x$ domain)，再經離散空間域傅立葉轉換(discrete-space Fourier Transform)將頻率-空間域轉換至頻率-波數域($f-k$ domain, Prokis and Manolakis, 1992)，再透過變數轉換而獲得頻率-波速域($f-v$ domain)的結果。其可簡分為三大步驟：現場施作、頻散曲線分析及地層反算(如圖 5.1)。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。

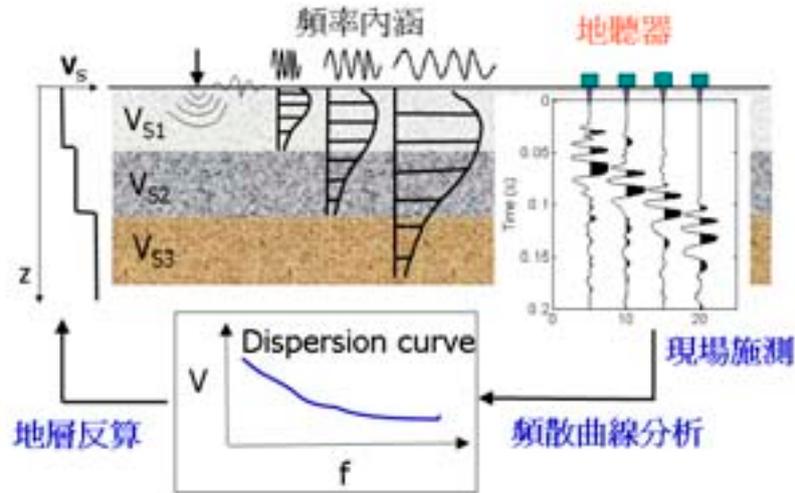


圖 5.1 表面波震測基本原理

每一回施作可獲得一 1-D 剪力波速剖面，此一 1-D 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 2-D 剪力波速度剖面影像(如圖 5.2 所示)。

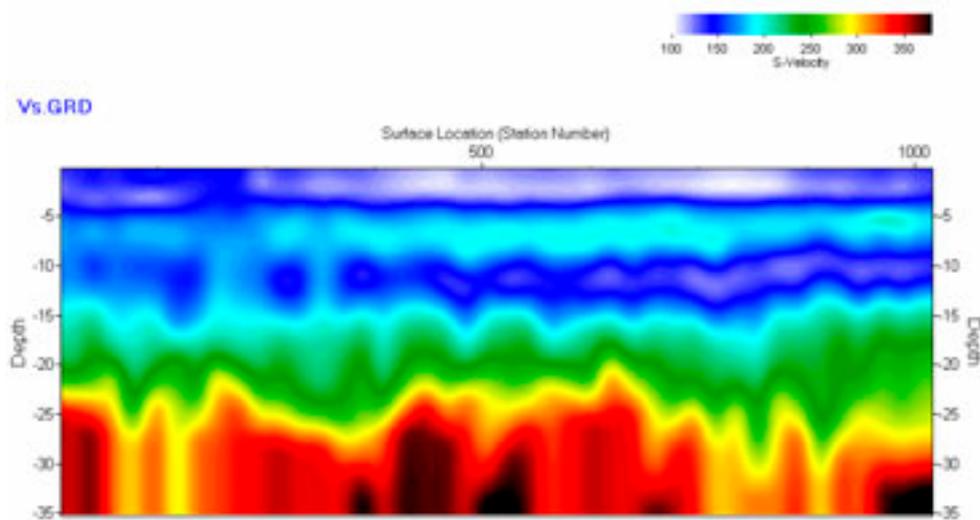


圖 5.2 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查

5.1.2 表面波震測法現況評析

表面波震測技術已廣泛地應用於地工問題之處理。透過所獲得之剪力波速剖面，其成功地應用於地層比對(Gabriels et al., 1987; Park et al., 1999)、鋪面厚度檢測(Foti, 2000; Haegeman and Van Impe, 1997)、土壤改良成效檢測(Ryden et al., 2004)、地下孔洞探測(Andrus et al., 1998; Al-Hunaidi, 1994; Gucunski and Shokouhi, 2004)、液化潛能分析(Lin et al., 2004)以及隧道襯砌與背填灌漿之品質管制(Xu and Butt, 2006)等問題。由於表面波震測具有非貫入性與非破壞性的施測特性，使得在現場的應用上可以快速且有效率的獲得現地不同空間位置上的大量訊息，透過上節所敘述之 2-D 剪力波速剖面造影技術得以將過去如鑽探、標準貫入試驗等點狀結果以二維影像的方式呈現，使其具有將土壤參數視覺化之強大潛力。

單一測線直線展開如圖 5.3 所示，通常要考慮近站支距 (X_1)、接收器間距(ΔX)及遠站支距(X_2)等施測參數。此施測參數的設定主要是為降低現行多頻道表面波之施測存在著以下四點問題：

1. 資料映頻干擾(Aliasing)：在頻譜分析的過程中，離散的震測資料會產生資料映頻干擾(Aliasing, Prokis and Manolakis, 1992)。所謂的映頻效應是說，對於兩個不同波數(wavenumber)的波，以相同間距的點位取值作代表而無法分辨此二者的情形，便稱為映頻效應。在進

行進行頻散曲線時，若受波器間距(Δx)不夠小將導致空間軸離散化的過程取點產生映頻效應，因而導致相位波速計算的誤差。

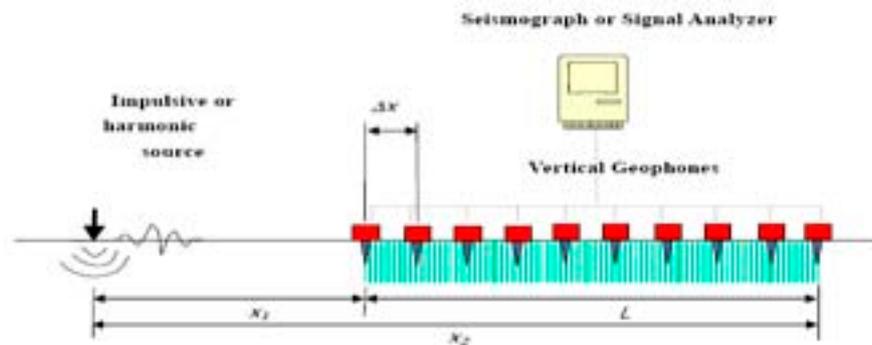


圖 5.3 表面波震測法震源與受波器位置示意圖

2. 資料遺漏(Leakage)及多重振態效應：由於震測資料之空間長度並不能無限延伸，所以進行資料擷取時須先經斬截(truncation)的動作。在斬截的過程中會產生遺漏(leakage)的現象(Prokis and Manolakis, 1992)。資料遺漏會造成波數能量頻譜波峰處有帶寬擴散的現象(如圖 5.4b所示)，而多重模態震波效應也因資料遺漏而有錯誤的波數分佈，並且造成分辨不同振態的困難。此問題須藉由增加測線展距解決。

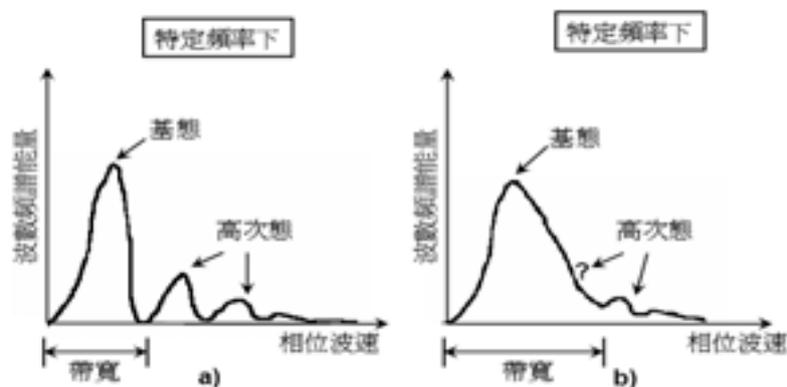


圖 5.4 資料遺漏於多頻道波場轉換法影響示意圖

3.側向解析度：現行測線佈設方式所得頻散曲線，其代表性為測線展距底下土層之平均值，因此單一測線配置所得側向解析度會與測線展距成反比，亦即測線展距越長則側向解析度越差，於要求高解析度的工址調查，勢必以縮短側線展距所得頻散曲線代表其所量測之空間範圍方可滿足側向高解析度。但，應用震測取得地層參數的目標中，除了側向解析處的需求外，亦希望能探測較深度的地層情形。表面波震測法的探測深度與測線展距相關，展距越大可正確量測之波長越長、探測深度越深，在要求側向解析度的前提下，以有限的接收器勢必會造成深度地層探測的困難。

4.近場效應與遠場效應：當 MASW 試驗進行測線佈置需決定近站支距(X_1)，但近站支距的決定會受到近場效應與遠場效應的牽制 (Park et al., 1999)。雖然 MASW 可利用一組測線的配置獲得各個頻率的資料，然近場效應會使得低頻波的資料品質受影響，遠場效應會使得高頻波的資料品質受影響。近站支距決定後，近場效應通常發生在測線較前方之受波器。震源敲擊後，低頻波(波長較長)在測線前幾個受波器處尚未成形，且受到未衰減的實體波干擾，因此前幾個受波器所收到低頻波的品質相對較差。遠場效應通常發生在測線後方受波器，主要因為高頻波(波長較短)的衰減嚴重，導致測線後幾個收波器收到高頻波的品質相對較差。

由上述的問題可知，施測的目標(側向解析度、探測深度)、表面波本身特性以及離散的訊號處理會使得施測參數(近站支距、接收器間距及展距)無法兼顧，而有互相矛盾的情形產生。過去為降低此些影響獲得足夠良好結果進行分析，一般建議近站支距(X_1)要有適當之距離(通常需依現地情形進行調整)，以降低近域影響(Near Field Effect)；接收器間距(ΔX)要小於等於二分之一最小波長，或是大於等於最小探測深度，以避免空間上之映頻混擾；而遠站支距(X_2)等於近站支距加上測線長度(接收器個數乘上接收器間距)之和，需避免產生遠域影響(Far Field Effect)並得有足夠之訊號雜訊比(S/N)。

在不改變施測方式的前提下，為了要提高訊號雜訊比於野外施測時，同一個炸點可反覆疊加，以使得接收到之表面波訊號具有足夠能量；近域與遠域的影響屬表面波波傳特性，僅能藉由調整近站支距獲得較佳訊號，而後透過反算技巧降低其影響；然而對於解析度以及深度的提升上，高側向解析度需使用較小之接收器間距，但在接收器數目固定的限制下，必會造成較短的測線展距，而測線展距正是為獲得更深層訊息的重要參數，若欲獲得較深的地層解析結果則需有較長的測線展距。民國 94 年本團隊執行「水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究」專案時，曾對石門水庫、新山水庫與仁義潭水庫之壩體進行表面波震測。在先前壩體測試中，使用現有施測方

式，對於部分分析結果無法明確顯示接近壩基處之剪力波速分佈，對於深度探測能力的提升是為必要。因此，為克服表面波震測於側向解析度以及深度提升的矛盾，本團隊提出一改善之施測方式稱之為高側向解析法，以便得以達到對於側向解析度以及深度的需求，使此方法更適合應用至壩體之施測上。

5.1.3 高側向解析法

高側向解析法的概念是固定接收器位置，藉由多次改變震源擊發處，而後將這些資料以震源至地聽器距離重新排列，模擬出一極長展距的震測資料，就像是在一個單一地層情況的場址施測所得到的震測資料。舉例來說，如圖 5.5 所示，以四個接收器進行高側向解析法施測，選用近站支距(x_0)為 1 公尺，接收器間距為 1 公尺，將震源位置一次往後移動一個測線展距($L, 3m$)的距離。第一個震源處施作時可得到支距範圍 1m~4m 的資料，第二個震源處施作後可得到支距範圍 4m~7m 的資料，第三個震源施作後可得到支距範圍 7m~10m 的資料。以此類推，進行多個不同震源位置試驗之後則可得到足夠展距範圍的資料。

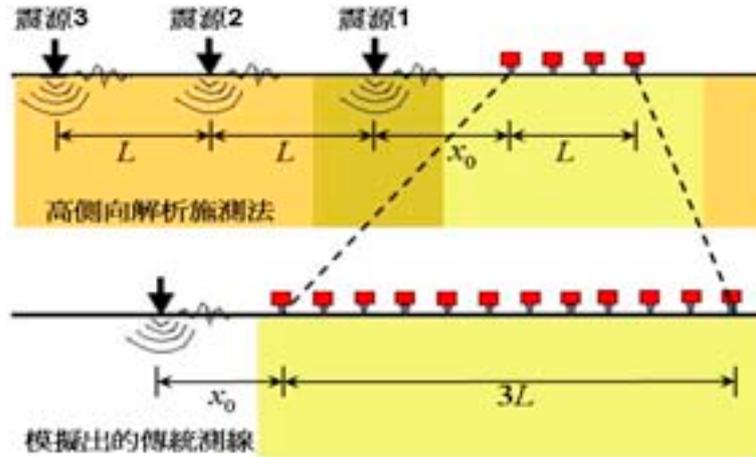


圖 5.5 高側向解析施測法概念說明

當震源移動時，因為地層側向變化的存在會使波傳遞至相同距離時，在相位角上有一靜態的誤差，此一靜態誤差與頻率相關，不同的頻率下會有不同的誤差值。如圖 5.6所示，該圖是以兩個半無限域的側向變化地層模擬出在頻率 65Hz時的結果。為消除此靜態誤差，在將各個震源資料以震源至地聽器距離重新整合時需先進行縫合 (seaming) 的動作，強迫在相同的波傳距離有相同的相位角，而後再進行空間上的傅力葉轉換。

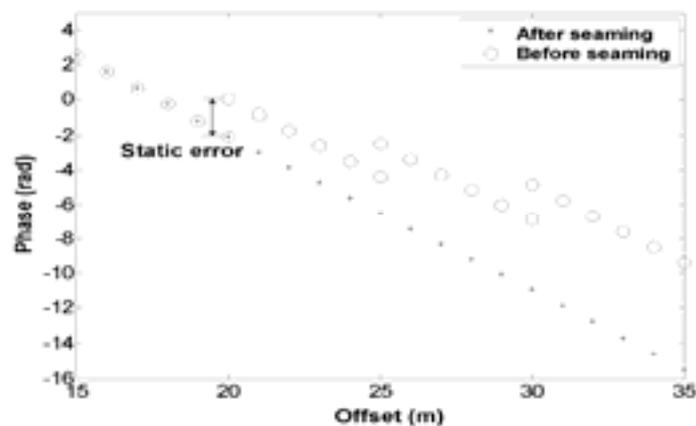


圖 5.6 靜態誤差與縫合動作示意圖

此縫合的動作可以以數學式說明如下：假設所收錄之地表震動歷時對時間進行一次快速傅力葉轉換後為 $U(f_i, x_n)$ ，其資料型態可簡單以 $A_{i,n}^{n_s} \exp(j\phi_{i,n}^{n_s})$ 表示。其中， n 表示接收器位置的索引號； $f_i = \frac{i}{(M-1)\Delta t}$ ，表示頻率； M 是在時間軸上以 Δt 為取樣時間間距的離散數目，亦即在時間軸上所取的紀錄點數； $A_{i,n}^{n_s}$ 表示第 n_s 個震源處震測資料在第 n 個接收器位置上頻率為 f_i 的量值； $\phi_{i,n}^{n_s}$ 表示第 n_s 個震源處震測資料在第 n 個接收器位置上頻率為 f_i 的相位角。而後強制第 n_s 個震源處第 N 個接收器位置的相位角與第 $n_s + 1$ 個震源處第 1 個接收器位置的相位角及量值相等，即是使

$$\phi_{i,1}^{n_s+1} = \phi_{i,N}^{n_s} \quad (5.4)$$

而在 $n_s + 1$ 資料中 2 ~ N 接受器的資料，便以調整相同的相位角及相對的量值做修正，即

$$U_{i,n}^{n_s+1} = A_{i,n}^{n_s+1} \exp(j(\phi_{i,n}^{n_s+1} + \Delta\phi)) \quad (5.5)$$

其中，

$$\Delta\phi = \phi_{i,1}^{n_s} - \phi_{i,N}^{n_s+1} \quad (5.6)$$

如此便完成縫合的動作。將處理後的不同震源結果組合起來(捨去 $n_s + 1$ 重疊的接收器位置資料)，便可以繼續對空間進行離散傅力葉轉換，進而完成頻散曲線的分析。

5.1.4 震波數值模擬分析程式

考量現地地層情形不易掌握，對此尚屬探討階段之新發展技術需先確認其可行性，因此在此將採用數值模擬之方式進行。本節將先就採用之數值模擬方法做一說明。

數值方法：本文所採用之數值模擬方法是由Levander(1988)所發展之四階速度應力錯置網格有限差分法(Forth-Order, stress-velocity, staggered grid finite difference method, 續將以速度應力差分法簡稱之)做為差分運算式。速度應力差分法其運算式與傳統解決波傳方式不同，其不直接對二次微分的二級海格波利克系統(second-order hyperbolic system)微分方程進行差分動作，而是對式 5.7與式 5.8兩組一次微分方程進行差分；

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = b\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) \quad (5.7a)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = b\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right) \quad (5.7b)$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda\frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (5.8a)$$

$$\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda\frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (5.8b)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) \quad (5.8c)$$

其中， v_x, v_z 代表在 x 方向及 z 方向上的速度； b 是 ρ 的倒數； ρ 是密度； λ, μ 是表示材料性質的拉瑪常數(Lame coefficients)。在時間上的一次微分採用二級中央差分式(second-order central difference)，其運

算元如下：

$$D_t a^k = \frac{1}{\Delta t} (a^{k+1/2} - a^{k-1/2}) \quad (5.9)$$

其中， D_t^+ 為對時間一次微分的差分運算元，用以逼近控制方程中的 $\frac{\partial}{\partial t}$ ； a^k 表示在時間離散後的第 k 個時間點的任一物理量； Δt 是表示每一次步進(time-step)的時間間隔。而對於空間上的一次微分是採用四級有限差分式(詳細推導過程請見附錄二)，其運算元如下：

$$D_x a_i = \frac{1}{h} \left[\frac{9}{8} (a_{i+1/2} - a_{i-1/2}) - \frac{1}{24} (a_{i+3/2} - a_{i-3/2}) \right] \quad (5.10)$$

其中， D_x 為對空間一次微分的差分運算元(difference operator)； a_i 表示在空間離散後第 i 個格點(nodal point)上的任一物理量； h 表示離散後每個相鄰隔點的間距。在使用空間中四級有限差分運算元時，若是對 z 方向進行微分，僅需將運算元中 x 處改為 z ， i 處改為 j 即可使用。

錯置網格：在網格上採取錯置網格(staggered-grid)，如圖 5.7 所示，其讓不同的物理量不在同一位置上，如此安排可使下一時間中，空間上一點之物理量位於這一時間點空間物理量的中心，符合差分式所需。在時間上雖採用中央差分式(central difference approximation)，但由於其錯置網格的定義，使其為顯性解法(亦即其下一時間的結果可由這一時間決定)。

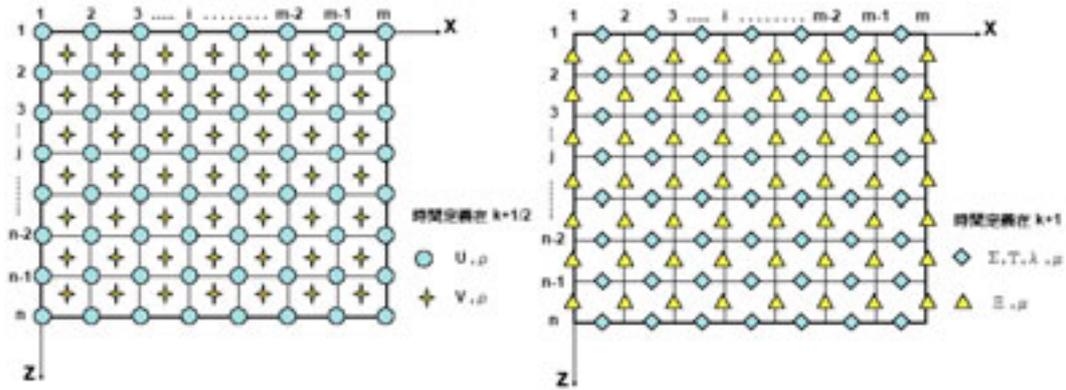


圖 5.7 錯置網格示意圖

邊界定義：在邊界的定義上，可視模擬狀況的要求而有所不同。

一般來說，即使在具有側向變化的地層模型中，我們亦不需要對存在於模型內部的邊界進行定義，位於內部的邊界會自然因為地層材料參數的不同而自然由控制方程式反應出來(Virieux, 1986)，所以，主要需處理的是位於模型外圍的一個水平自由表面(free surface)與三個輻射邊界(radiation condition)。在水平自由邊界上採用 Levander(1988)所提出的映像法(image method)，在三個輻射邊界上採用 Cerjan et al.(1985)所提出之吸收邊界(absorbing boundary)。

數值參數：數值模型之配置與各參數定義如圖 5.8所示，各參數於模擬中之數值如表 5.1所列。在數值模型的配置上，雖在邊界處設有吸收邊界，然而為能更加有效的降低因人造邊界所造成之回波影響，震源與最後一個接收器的區段(study zone)與吸收邊界中都隔有一段距離(extra zone)，此段距離是以地表地層之剪力波速估算，儘量使得在收錄時間內，由震緣處發出的波不會回傳至地聽器處被收錄。此

外，在震源的施加上是以高斯函數一階微分做為點震源模擬函數，以垂直向壓力施加。而網格間距(h)與步進間距(Δt)的取用需根據 Levander(1988)所提出之假頻散現象及穩定度控制進行調整。

表 5.1 參數數值表

| 參數 | 數值 |
|----------------|---------------------------------------|
| Nx (cells) | 1200 |
| Ny (cells) | 600 |
| Vt (cells) | 4096 |
| h (m) | 0.5 |
| Δt (s) | 0.00024 |
| Source Wavelet | $g(t) = -2\alpha t \exp(-\alpha t^2)$ |
| α | 2500 |
| B (cells) | 60 |

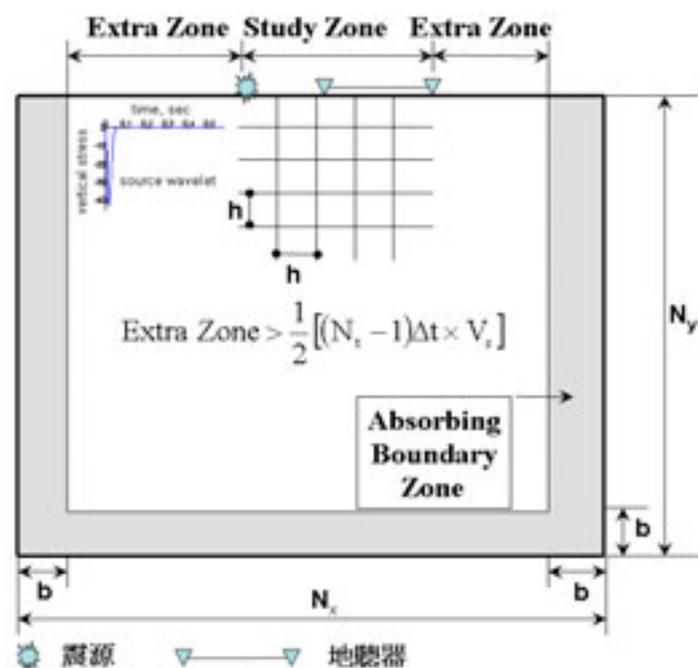


圖 5.8 數值模型參數與配置示意圖

5.1.5 高側向解析法之數值模擬驗證

地層模型：本研究中採用之地層模型為簡單的雙層階狀地層，(如圖 5.9所示)，其係為具有側向變化之地層，可為新施測法提供一基本的可行性了解，並可了解不同頻率的表面波在深度上的反應差異。此階狀地層上方是較軟弱土壤，剪力波速 V_s 是 260m/s，而下方較堅硬土層之 V_s 為 530m/s。地層之階狀高差為 5 公尺，軟弱層最淺處是 5 公尺深，最深處是 10 公尺深。

傳統施測法：為能突顯並明白顯示新施測法確實可達到欲改良的目標，因此亦對傳統施測進行模擬以供對照使用。測線的佈設，如圖 5.10所示，以 24 個間距為 1 公尺之接收器進行表面波震測試驗，以頻率波速法進行頻散曲線分析，圖 5.10 b、c、d分別是圖 5.1圖 5.10圖 5.a中不同測線位置的頻散曲線影像圖，b與d的測線中點與側向變化位置相距 6 公尺。由於不同的反算方法會造成不同之剪力波速剖面結果，為避免反算所造成的差異，因此在此將以側向變化兩側之水平地層之頻散曲線理論解(圖中實線部份，左側曲線為左側地層結果，右側曲線為右側地層結果)做為比較基準，觀察當測線自下方以深地層為主要地層情形轉變至以淺地層為主要地層情形的表面波結果差異。

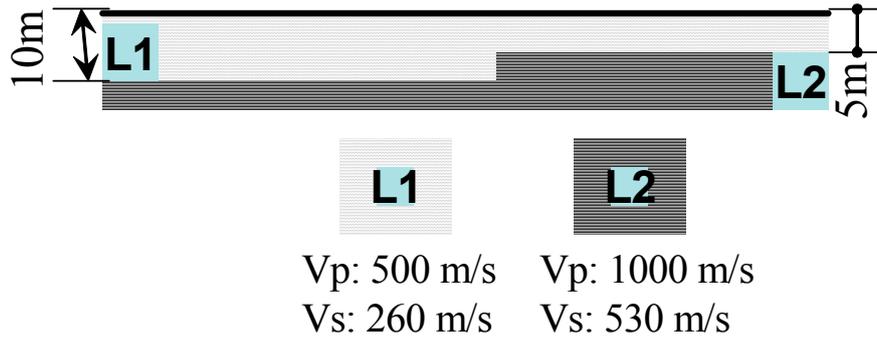


圖 5.9 地層模型

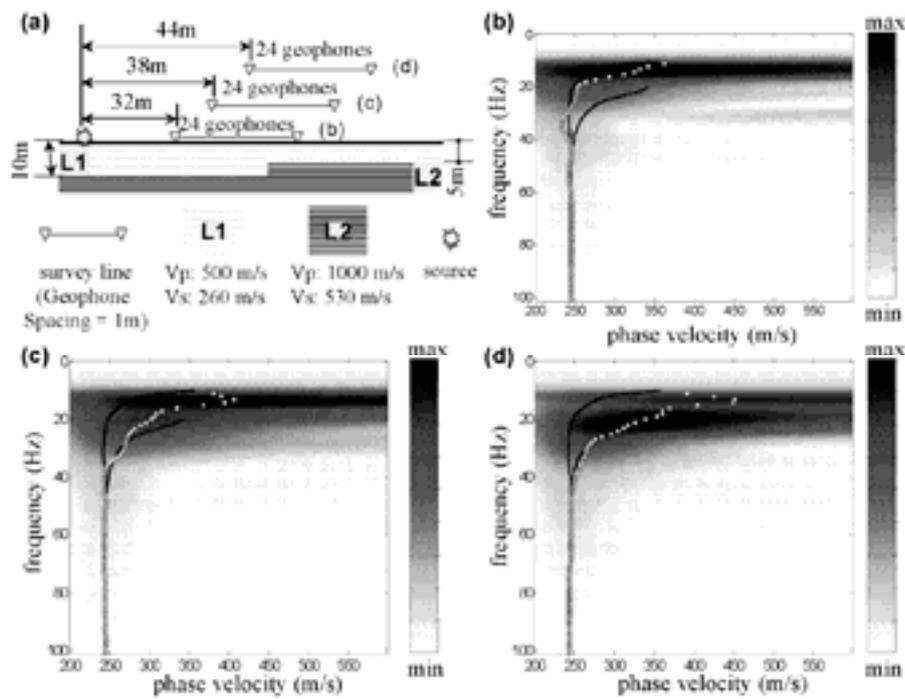


圖 5.10 側向變化地層對表面波震測之影響

由圖中可見，當測線漸往右側地層移動時，視頻散曲線(apparent dispersion curve，白色圓點)亦有自左曲線移往右曲線之現象。然而由於側向變化地層的存在，使得即使測線中點在左側地層中點或右側地層中點時，低頻部份亦不會與理論解相同，而是介在兩者之間。此外，由視頻散曲線亦可觀察到，由於地層側向變化是在地表下 5 公尺後，

因此在高頻處並沒有差異，而是在較低頻的位置以兩者地層頻散曲線的某一種權重結果平滑地變化。

此一結果顯示，在現地施測表面波震測試驗所獲得之視頻散曲線其所反應的並不只是深度方向上的地層資訊，對於側向上的地層訊息亦一併反應。倘若僅以深度上的訊息看待進行分析，將會對地層參數在深度上有所錯估。此一現象便是造成傳統表面波震測側向解析度不佳的主因。

高側向解析法：地層模型與現地施測佈置如圖 5.11 所示。採用與前述相同之地層模型，施測配置上使用六個間距 1 公尺的接收器，測線長 5 公尺，最近的近站支距是 15 公尺，共移動震源九次，圖上僅繪出四次震源位置示意。為測試高側向解析施測法之表現情形，透過改變測線配置與地層側向變化處的關係，建立四種不同的施測情形(a 配置、b 配置、c 配置、d 配置)。a 與 c 中的配置是將震源與接收器置於地層側向變化的兩側，亦即在震波傳遞的過程中需要經過地層側向變化處，但在 a 配置下，震波由較深的地層進入較淺的地層，而在 c 配置下，震波是由較淺的地層進入較深的地層。b 與 d 中的配置，其震源與接收器在同一側，震波在傳遞過程中並不經過地層側向變化處，但 b 配置下的接收器距側向變化處較近，而 d 配置下的接收器距側向變化處較遠。

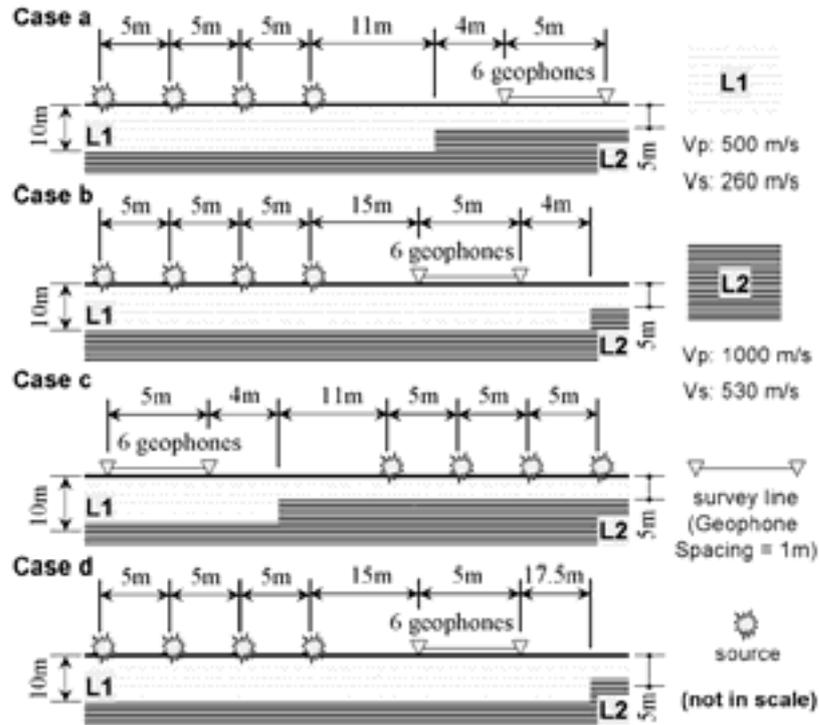


圖 5.11 高側向解析施測法驗證之地層模型與施測配置

數值模擬結果如圖 5.12 所示。圖 5.12a、c、e、g 分別是 a 配置、b 配置、c 配置、d 配置前四個震源所收錄之地表振動歷時。圖 5.12b、d、f、h 分別是 a 配置、b 配置、c 配置、d 配置下分析獲得之頻散曲線影像。左側實線是左側地層頻散曲線之理論解，右側實線是右側地層頻散曲線之理論解，試驗所得之視頻散曲線是白色圓圈。

由視頻散曲線之結果看來，在四種配置下其與理論解穩合度極高，雖在 c 配置下的視頻散曲線在頻率 20Hz 前後有跳動的情形，然而造成這一問題的主要原因是來自於近場效應。雖然在試驗的配置上使用 15 公尺之近站支距以避免近場效應的影響，但在震波傳遞至接收器的過程中，側向變化處對原震波造成的擾動使其亦可視為是另一

震源處，其與接收器相距僅 5 公尺，使得近場效應相對明顯而對結果造成影響。

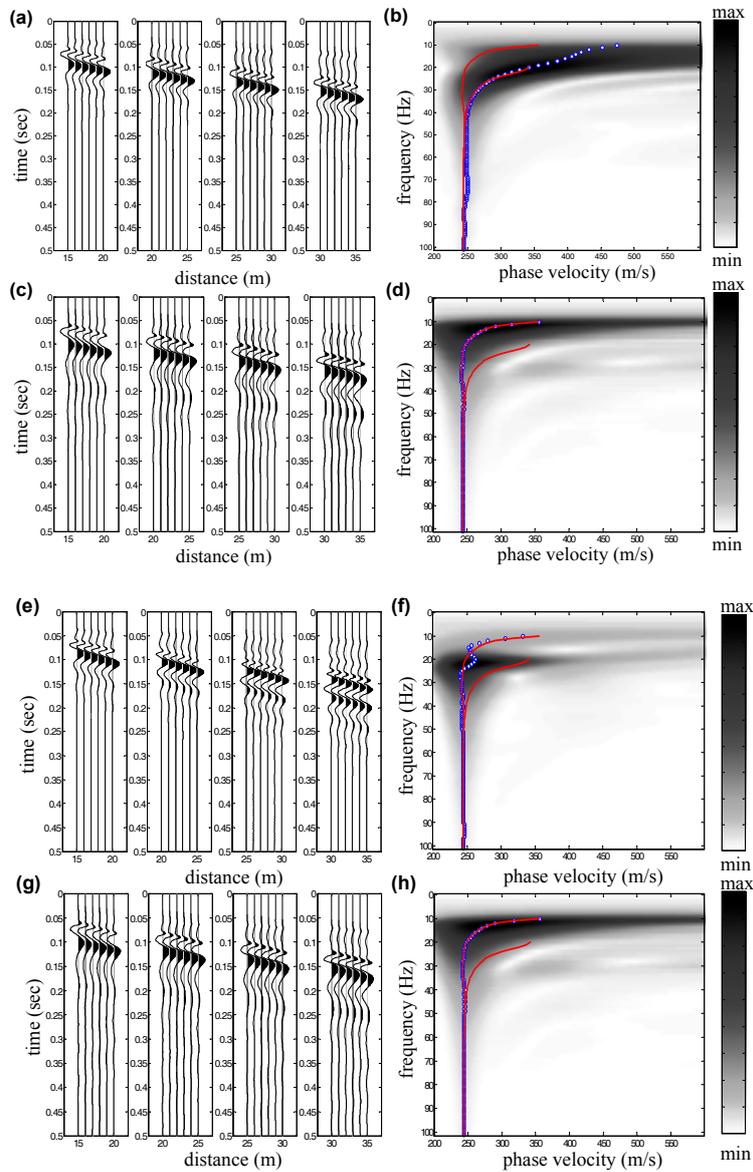


圖 5.12 高側向解析施測法數值驗證結果

一般而言，探測深度與測線長度相同，亦即 5 公尺，然而地層側向變化之影響是在地表下 5 公尺後發生。由模擬之結果可知，在如此測線長度下，採用高側向解析施測法可獲得 5 公尺以下地層差異所造

成的不同頻散曲線結果。又在配置 a、b、c 中，測線中點與地層側向變化處僅有 6.5 公尺的距離，倘若以慣用之施測方式，如圖 10a 中的 b)和 d)配置，其無法在相同的距離下獲得不受側向變化影響之頻散曲線。綜合上述論點可以得知，高側向解析施測法不但實現在較短的測線長度下達到較深的探測深度能力，且其確實能有效提高施測結果之側向解析度。

5.1.6 地形效應對表面波震測之影響

在壩體周邊進行表面波震測常會有需要在具有坡度的區段進行施測的需求，但目前對於地形於表面波震測結果的影響都未有相關文獻予以探討並提供可能的影響情形，在本節中將使用數值模擬的方式對此問題做一初步了解，以期能提升對表面波震測結果的解讀能力。

數值模擬採用 5.1.4 節中所建立的數值程式，在地形的模擬上，在地層以上填以空氣，空氣的部份以極為軟弱的力學參數進行近似模擬，其壓縮波速採用 20m/s，剪力波速採用 10m/s，密度為 0.5g/cm^3 。本小節中共採用三個不同地層模型進行模擬，如圖 5.13 所示，各地層都有一仰角為 20 度的長邊坡，a 地層是一半無限域空間，皆由較軟弱土層(剪力波速為 260m/s)組成；b 地層是在近地表有一與地表平行厚度為 10 公尺的軟弱地層(剪力波速為 260m/s)與下方較堅硬地層(剪力

波速為 530m/s)組成；最後c地層是在堅硬的(剪力波速為 530m/s)水平半無限域上有一仰角 20 度的砌形軟弱(剪力波速為 260m/s)土層。模擬的現地配置亦如圖 5.13所示，在各地層處皆採用 15 公尺的近站支距施炸，接受器間距為 1 公尺，共使用 24 個接受器，測線長 23 公尺。在此間，c地層的測線中點與水平堅硬地層的界面相差 10 公尺。用以進行數值模擬計算的數值參數如表 5.2所示。

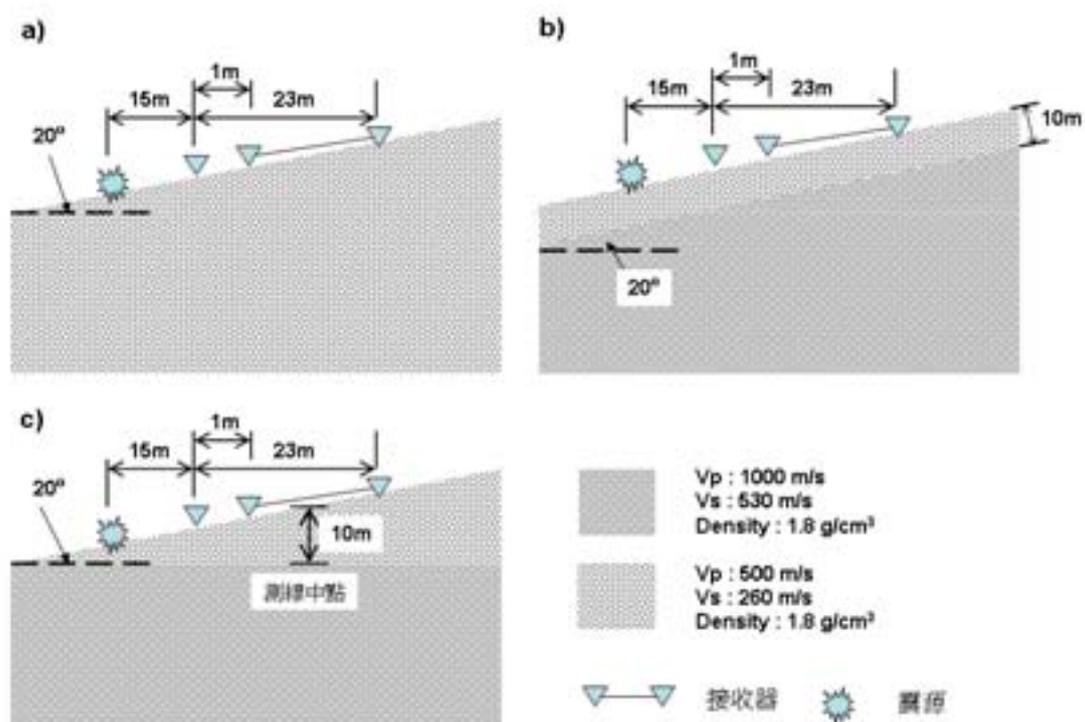


圖 5.13 地形效應地層模型

a地層的頻散影像圖如圖 5.14所示，圓圈是試驗分析所得到的值，實線是在水平地層下的理論值。在水平地層中，單一地層的情況下表面波是不具有頻散現象，然而由圖中可知，由於存在地形的原因

使得此處表面波亦有頻散現象，且該頻散曲線波速整體有較理論值為低的情形，隨著頻率的增加往低速偏移的情形越形嚴重。此外，整個頻散曲線影像的能量也較為分散，在頻率約 70Hz處主控振態有跳躍出原振態的情形。在水平單一地層的理论解中是沒有高次振態存在的可能，因此推測此處的跳躍是地形的存在所引起。於低頻 10-15Hz處的扭曲情形推測是數值模擬所造成的錯誤，因而將不對該段行為進行討論。

表 5.2 地形效應數值模擬參數數值表

| 參數 | 數值 |
|----------------|---------------------------------------|
| Nx (cells) | 800 |
| Ny (cells) | 400 |
| Vt (cells) | 4096 |
| h (m) | 0.5 |
| Δt (s) | 0.00024 |
| Source Wavelet | $g(t) = -2\alpha t \exp(-\alpha t^2)$ |
| α | 2500 |
| B (cells) | 60 |

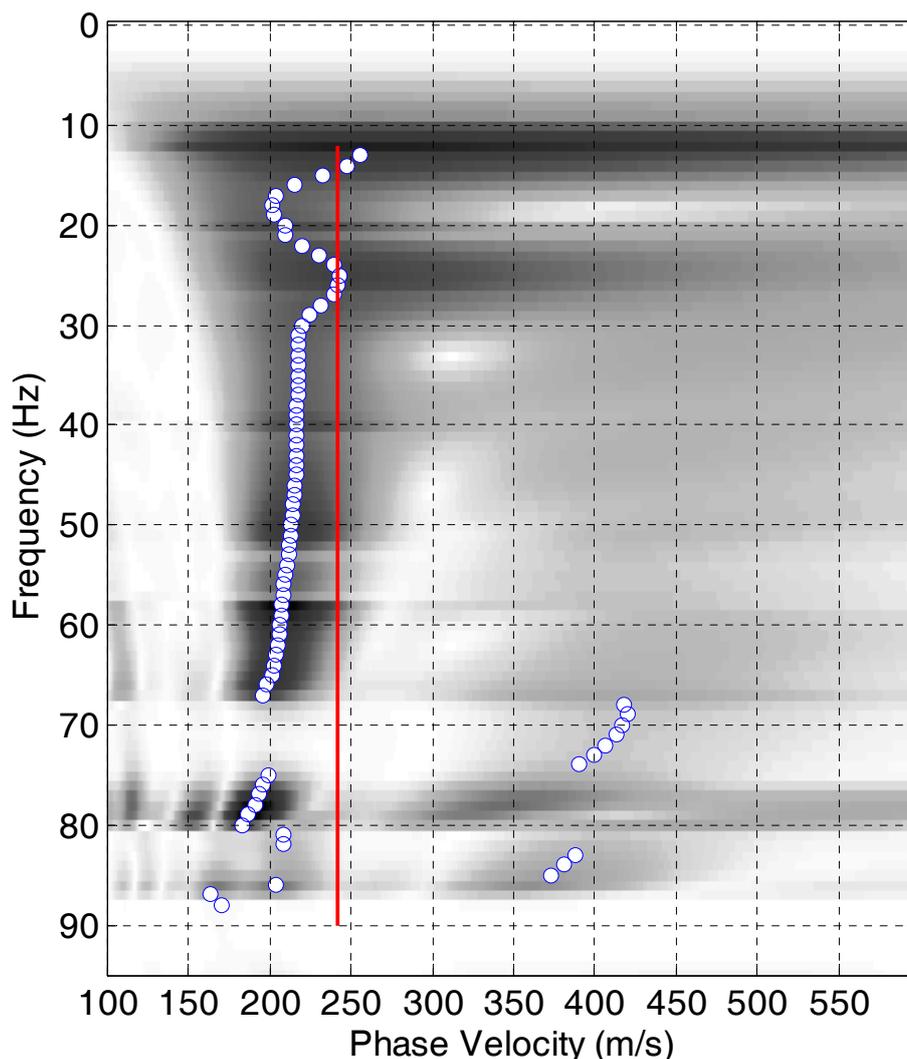


圖 5.14 a 地層之頻散曲線影像圖

b地層的頻散影像圖如圖 5.15所示，圓圈是試驗分析所得到的值，實線是以厚度 10 公尺的軟弱地層(剪力波速為 260m/s)以及較堅硬的半無限域地層(剪力波速為 530m/s)所組成的水平層狀地層所得之基態頻散曲線理論值。整體而言其所反應出的情形與a地層相似，其頻散曲線有較理論值的基態頻散曲線波速為低的現象，並且隨著頻率的增加往低速偏移的情形越形嚴重。此外在頻散曲線影像上，於此例中可看見在影像中波速在 300-550m/s的區段中已有較明顯的

高次振態存在。在用於理論解的水平層狀地層中，這樣的地層配置是不會有高次振態主控的情形發生，然而圓圈的頻散曲線於頻率 35Hz、55Hz 以及 70Hz 處皆有振態跳躍的現象存在，更加佐證了地形效應在一定程度上是會對於高次振態的產生造成影響。

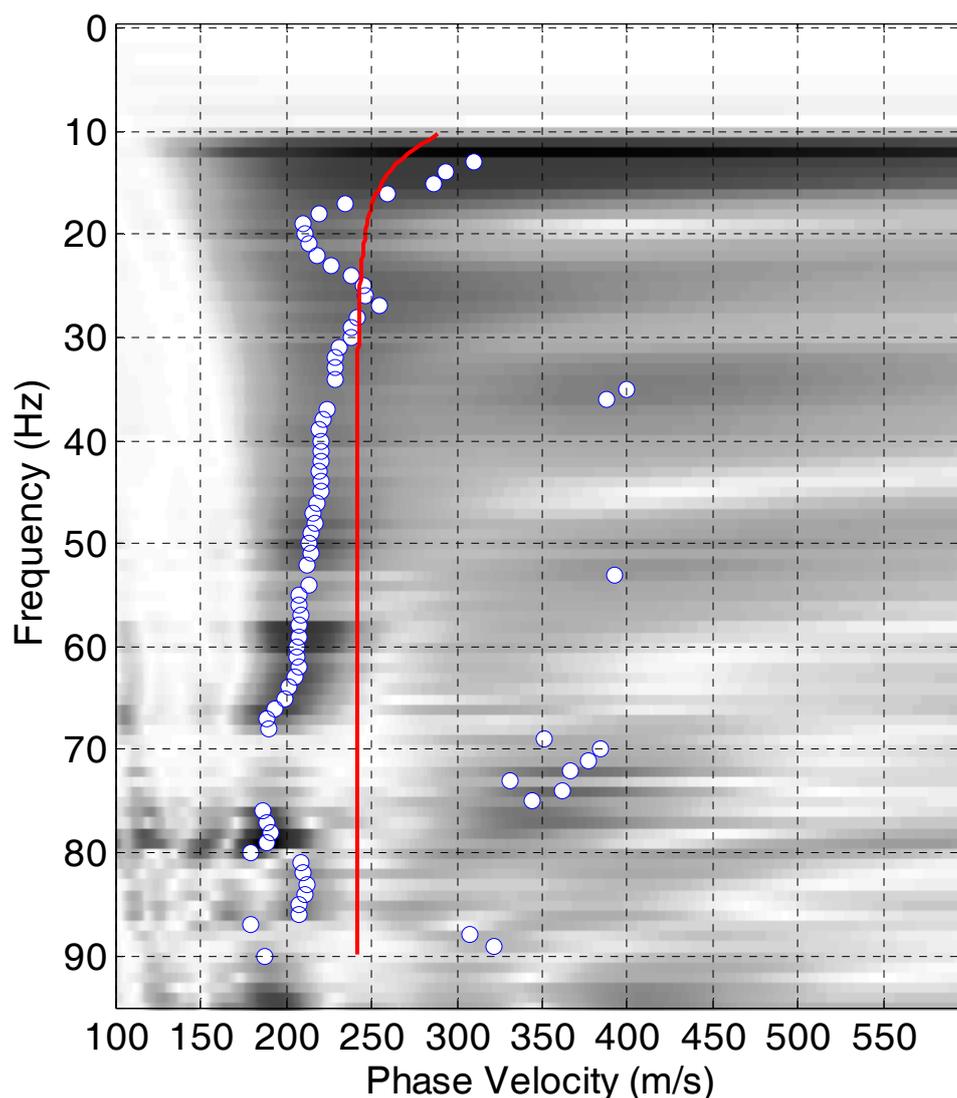


圖 5.15 b 地層之頻散曲線影像圖

c 地層的頻散影像圖如圖 5.16 所示，圓圈是試驗分析所得到的值，實線是以厚度 10 公尺(地層模形中測線中點至水平地層界面的厚度)的軟弱地層(剪力波速為 260m/s)以及較堅硬的半無限域地層(剪力

波速為 530m/s)所組成的水平層狀地層所得到之基態頻散曲線理論值。整體而言其所反應出的情形其它兩個地層模形結果相似，其頻散曲線有較理論值的基態頻散曲線波速為低的現象，並且隨著頻率的增加往低速偏移的情形越形嚴重。但在此的頻散曲線影像中，其與b地層所顯示出有較多高次振態能量集中的情形不同，整個能量分佈反較近似a地層。估計此一原因是因為在測線的佈設上測線下方的地層隨著離震源越遠而有越深的情況，由震源處產生的震波傳遞至界面反射時不如b地層中容易被接收到，因而整體行為較類似a地層。

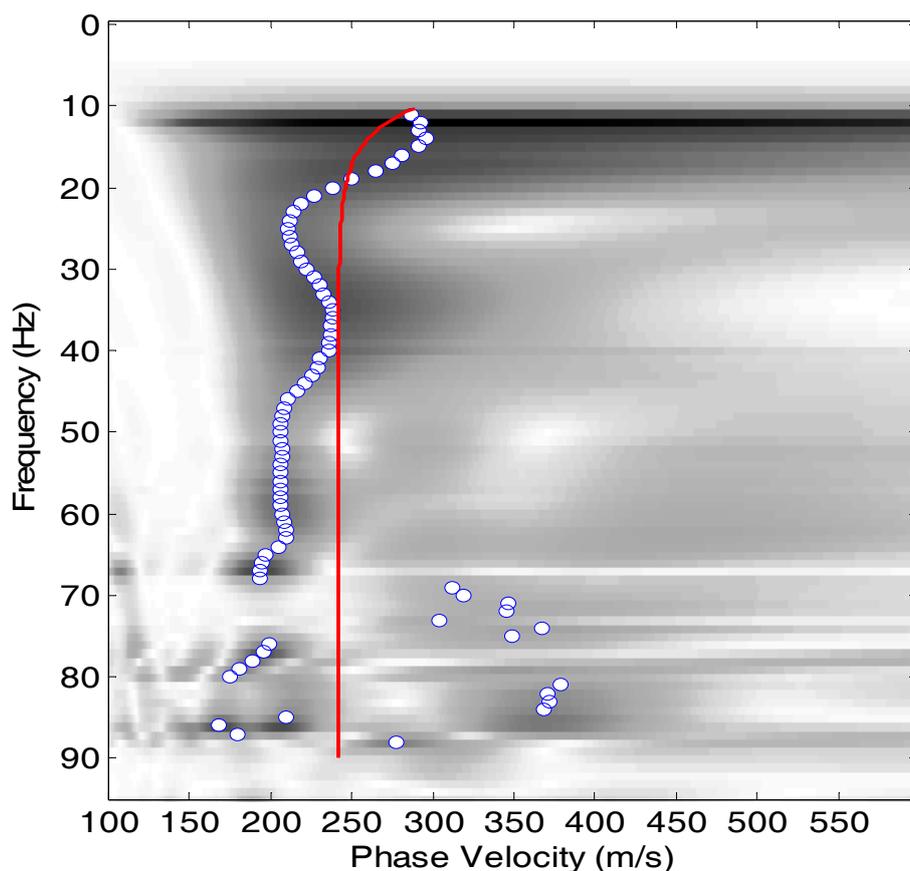


圖 5.16 c 地層之頻散曲線影像圖

經由上述三個模擬可大致歸結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。在目前採用有限差分法的數值工具探討下，對於此兩種現象僅能以定性為主，尚無法量化其可能的影響程度。但在了解此一可能的影響下，當解讀一在具有地形效應的表面波震測結果時，便可對此結果抱持較為保守的態度，以免有過度解讀的情形發生。

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 1-D 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，目前還僅能對 1-D 的解析結果進行適當的合理解讀會是較恰當的做法。

5.1.7 高次振態對表面波震測之影響

過去的表面波震測分析中以所得之基態頻散曲線為主，惟根據民國 94 年本團隊執行「水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究」專案於石門水庫、新山水庫與仁義潭水庫之壩體所獲得之表面波震測測試結果顯示(如圖 5.17所示)，常有高次振態出現於試驗

結果中，此情形對頻散曲線分析影響頗大，因此有進一步探討其影響的需要。

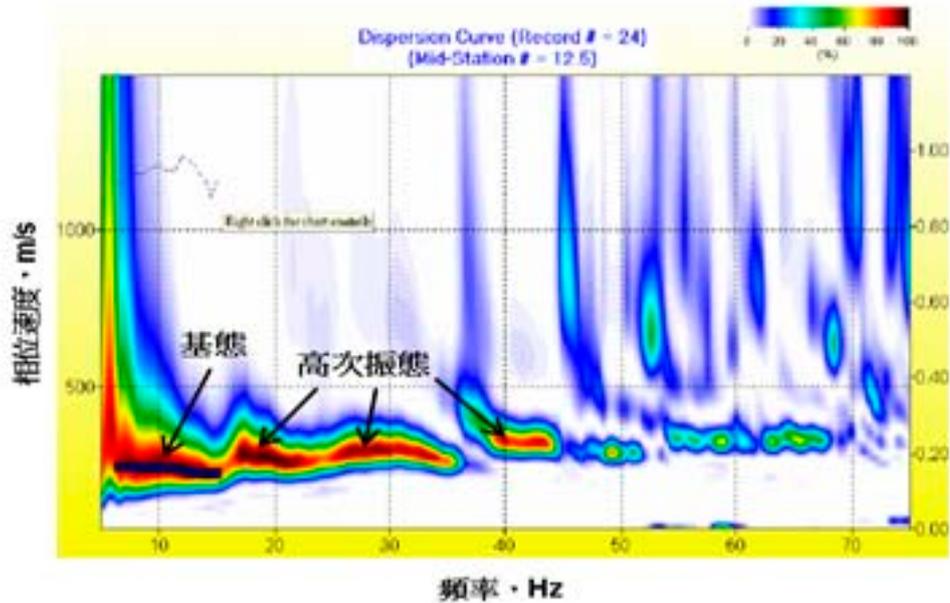


圖 5.17 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究，民國 94 年)

在水平層狀地層中，以純彈性理論對地層進行解析可獲得一地層的表面波頻散曲線，如圖 5.18 實線所示。此頻散曲線由任一頻率自低速往高速依序被命為基態頻散曲線、第一高次振態頻散曲線、第二高次振態頻散曲線等次序而下，此些振態為該地層所可能產生的所有振動模式，但在實際的試驗結果中，會因為地層特性、震源的不同以及施測參數(近站支距、接收器位置等)的不同而會有不同的能量集中(如圖 5.18 的影像所示)。在頻散曲線的分析上，每個頻率上最大能量的位置稱做主控振態，過去都假設此主控振態會是基態，然而由圖 5.18

影像中可知，能量的集中會隨著頻率的不同而在不同振態上甚至是集中在振態與振態間。由過往文獻與經驗總結，高次振態做為主控振態主要是地層特性造成，對於夾弱層之地層或是在近地表 2 公尺內有非線性的快速波速增加的地層常可發現。於 5.1.2 小節對於表面波震測法的現況評析中已提及在測線展距不足的情況下將會有資料遺漏情形，進而造成對於各振態間的解析度不足而無法進行各振態的確認。因此，在對於高次震態對於表面波震測結果影響之探討中，將對於其影響分為兩部份進行討論，一是在振態可被辨識的情形下，另一是在各振態無法被分離辨識的情形。

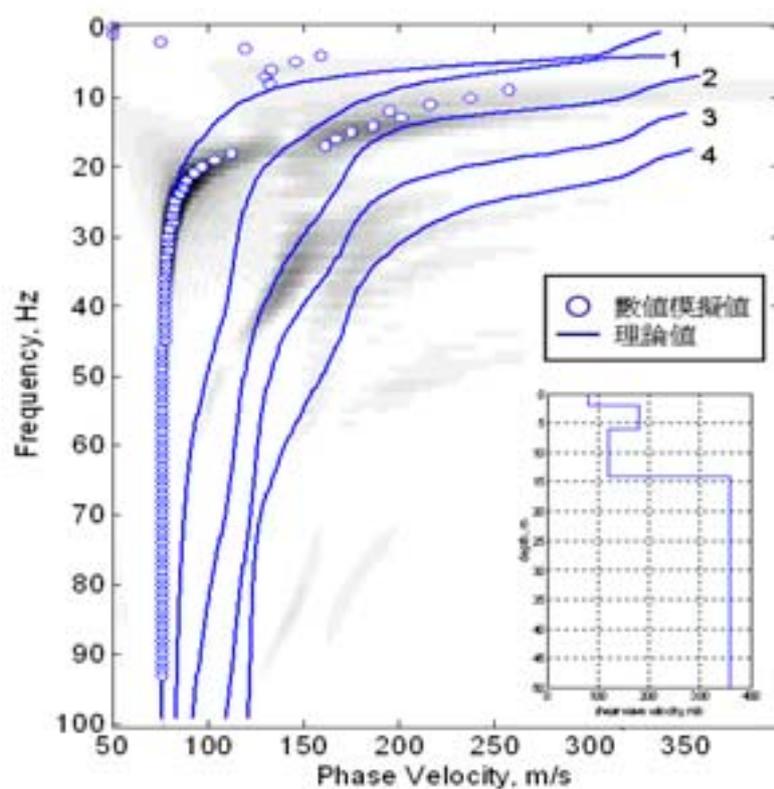


圖 5.18 表面波振態理論值與數值模擬值比較

在本探討中所採用的解析值以及數值模擬程式是由 Herrmann(2002)所撰寫，使用的震測模擬方法是振態疊加法(modal summation method)。而在反算部份是使用Kansas University團隊所發展的Surfseis v1.8 進行，為使此探討更符合在現地施作後的分析情形，因此對於反算中的參數設定，除半無限域深度外皆以其內設值進行(參數包含土層層數、土層密度、土層卜松比、土層厚度以及半無限域深度，其中土層層數為以 10 層進行，厚度採用隨深度漸增，卜松比為 0.4，密度為 2 g/cm^3 ，半無限域深度根據所得頻散曲線之最大波長為其值)。使用於探討用的地層參數如表 5.3所示，此地層共有四層，各層厚度漸增，第四層為半無限域空間，剪力波速在第二層中較第一層及第三層為低，使此地層有夾弱層的特性用以製造出高次振態的影響。

表 5.3 地層模型參數表

| 層序 | 厚度(m) | 密度(g/cm^3) | 壓縮波速(m/s) | 剪力波速(m/s) |
|----|-------|-----------------------|-----------|-----------|
| 1 | 2 | 1.8 | 300 | 140 |
| 2 | 4 | 1.8 | 300 | 120 |
| 3 | 8 | 1.8 | 360 | 180 |
| 4 | -- | 1.8 | 750 | 360 |

1. 振態分離可辨識的情形

模擬時的現場施測配置如圖 5.19所示，採用敲擊式震源，以 15 公尺的近站支距施炸，接受器間距為 1 公尺，共使用 48 個接收器，測線總長 47 公尺。對其結果進行頻散曲線分析後，得到頻散曲線如圖 5.20所示。圖中圓圈是由進行頻散曲線分析所得到的頻散曲線值，實線的是由解析解所獲得的地層頻散曲線。由圖中可清楚的發現，由分析所得的頻散曲線在不同頻率上是由不同的振態主控，在頻率 5~40Hz是由基態主控，而 40~70Hz是由第一高次振態主控，70~100Hz是由第二高次震態主控。因為所採用的展距 47 公尺對此地層來說已數足夠，因此可以看見不同的振態間會有很明確的不連續產生，而可使我們得以分辨其不同振態。在此頻散影像中可發現，在一個頻率下，除了最大能量集中而得到的主控振態外，在其他振態的地方亦會有較淺色的能量存在，此等現象顯示，只要有能量在該振態中存在，分析者便有機會將該振態的頻散曲線挑選出用以地層反算。

由此地層所得到的頻散曲線結果可了解，在基於基態頻散曲線為反算標的的前提下，若可將振態分離，則高次振態存在對於表面波震測的影響將主要是使得所獲得的基態頻散曲線頻寬變小(以圖為例，此頻散分析所得到的頻寬是 5~100Hz，但是可用於反算的基態頻寬僅有 5~40Hz)。接下來將透過對不同頻寬的反算與此地層模型進行比對

以了解其對於反算結果的影響。

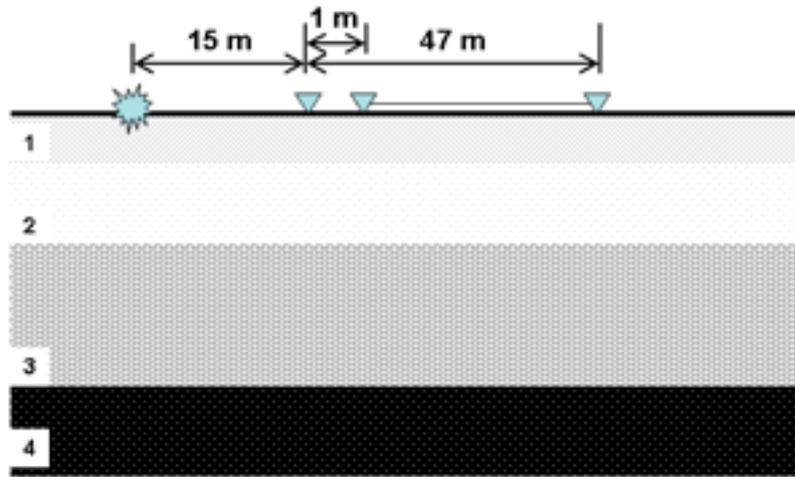


圖 5.19 振態可分離下的現場模擬施測配置

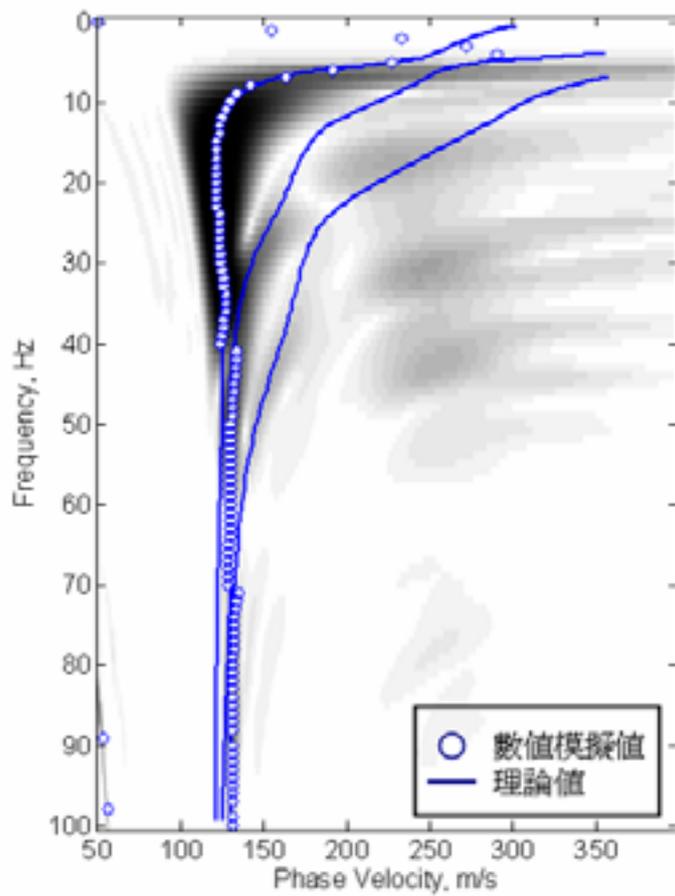


圖 5.20 測線長 47 公尺的頻散曲線影像圖

在前文已提及，在頻散曲線影像中於頻率高於 40Hz 後的主控振態由基態跳至第一高次振態，但仍可在影像中看見基態延續的位置，藉由人工挑選可增長基態頻寬。基於在現地施測的經驗顯示，現場的收錄到的訊號頻寬以 10-60Hz 為主，因此，在反算中將使用二種基態頻寬的頻散曲線進行反算，此二種頻寬分別是 10-60Hz 以及 10-40Hz。第一頻寬帶是用以觀察在較好的資料品質下以基態頻散曲線進行反算所獲得之最佳結果與實際地層的差異；第二頻寬帶是用以觀察在獲得此頻散曲線後，實際使用所得之基態頻散曲線頻寬所得之反算結果。

反算所得之結果如圖 5.21 所示，此反算之 RMS 值皆僅 1%，在試驗值與反算所得之理論值間有良好的吻合度。由圖中可見，10-60Hz 及 10-40Hz 的結果極為相似，其主要的差異是產生在近地表 4 公尺內，此結果明確地顯示在缺少高頻段資料時將對於近地表的地層探測產生較大的差異。將真實的地層與反算所得之地層比對可發現，反算所得之地層在 6 公尺後有低估波速的情形，但在整體趨勢上確實地顯示出約略在 2 至 6 公尺深度段有夾弱層存在的情形。反算的結果因為在反算過程中並沒有限制亦沒有給定地層厚度，因此在地層變化處會有一定的誤差。

此外，在地表下 6 公尺後與真實的給定地層有較大的誤差存在，

造成此一影響的除了因為在反算中缺乏基態頻散曲線較低頻(<10Hz)的資訊外，根據 Xia et al.(2000)的研究指出，在相同的頻率下，高次振態與基態比起可攜有較深層的地層資訊，而可有助於對較深處的地層解析。

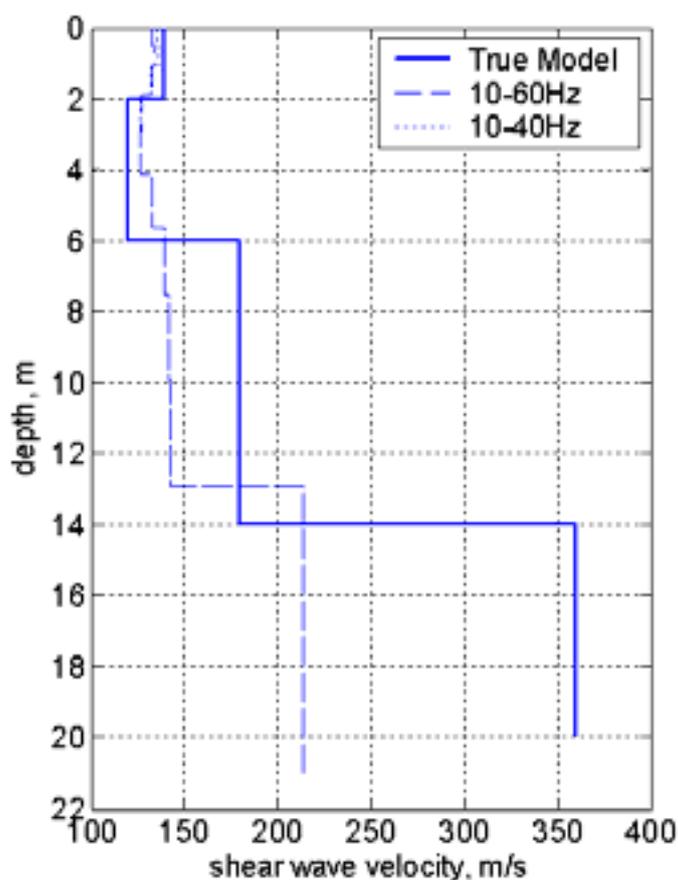


圖 5.21 不同頻寬之頻散曲線反算結果比較

2. 振態無明顯分離的情形

使用相同的地層模型，緊改變施測的展距，其模擬時的現場施測配置如圖 5.22所示，採用敲擊式震源，以 15 公尺的近站支距施炸，接受器間距為 1 公尺，共使用 24 個接收器，測線總長 23 公尺。對其

結果進行頻散曲線分析後，得到頻散曲線如圖 5.23 所示。圖中圓圈是由進行頻散曲線分析所得到的頻散曲線值，實線的是由解析解所獲得的地層頻散曲線。由圖中可清楚的發現，原先於圖 5.20 中可清楚分離的不同振態在這裡並沒有很明顯的斷點不連續，在不同振態間的跳躍會有漸變過渡的情形。在此狀況下所獲得的頻散曲線可稱之為視頻散曲線(apparent dispersion curve)或有效頻散曲線(effective dispersion curve)。由圖中亦可發現，在較高頻的位置(~70Hz)因為不同振態間的差距縮小，不同振態的轉換更加平滑，在不知其實際高次振態的位置時，是完全無法感受到其可能混有兩個以上振態的可能。

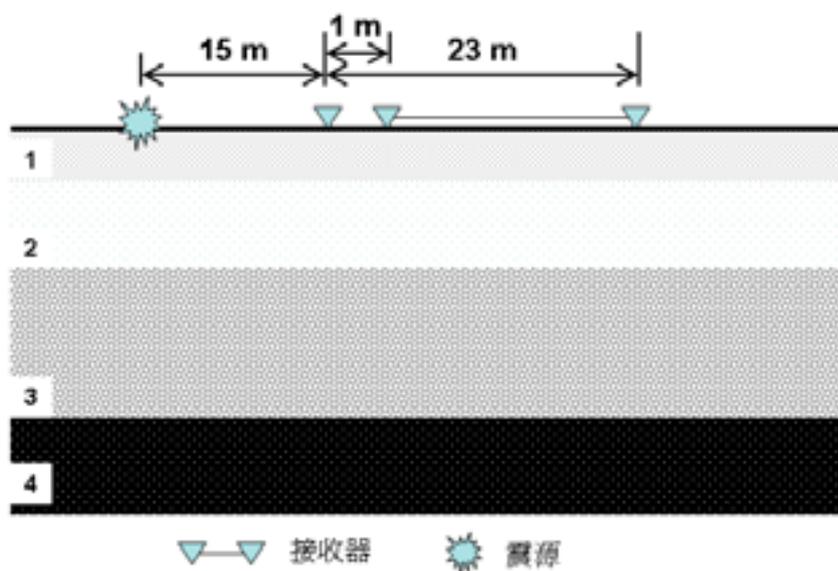
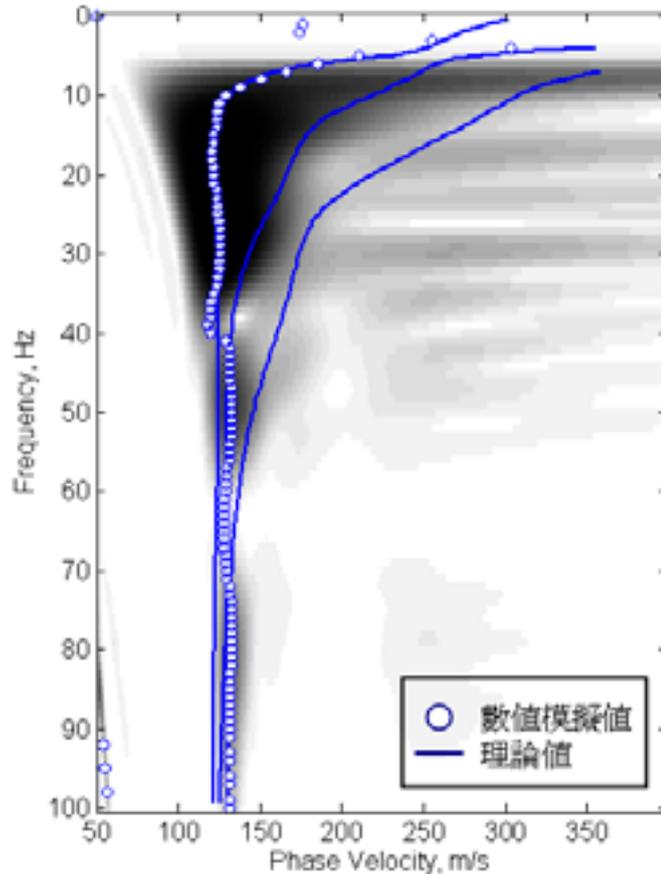


圖 5.22 振態無明顯分離下的現場模擬施測配置



測線長23公尺

圖 5.23 測線長 23 公尺的頻散曲線影像圖

在此採用 10-60Hz 頻寬段的視頻散曲線資料進行反算，反算所得之結果如圖 5.24 所示，反算的誤差值為 3%。由圖中可見在近地表 6 公尺以下的反算地層與單使用基態進行反算所得的結果相類似。一般認為各深度的波速與波長相關，因此在相同的頻寬段使用相同的頻散曲線時，雖然會稍為受到其它頻寬的影響，但大致相去不遠。然而在近地表 6 公尺以內反算結果與地層模型比起，不但無法顯示出地層的趨勢，且使地層有些人造現場產生。反算所得的地層顯是在近地表有兩個夾弱層的結構，一個極薄約 1 公尺厚位於地表下 2 公尺處，另

一個弱層約 4 公尺厚，在地表下 4 公尺至 8 公尺的位置。此一反算地層所造出的結果顯示出將 40-60Hz 頻寬段的第一高次振態做為基態振態與 10-40Hz 頻寬段一起反算時將可能使得結果有極大的不合理。

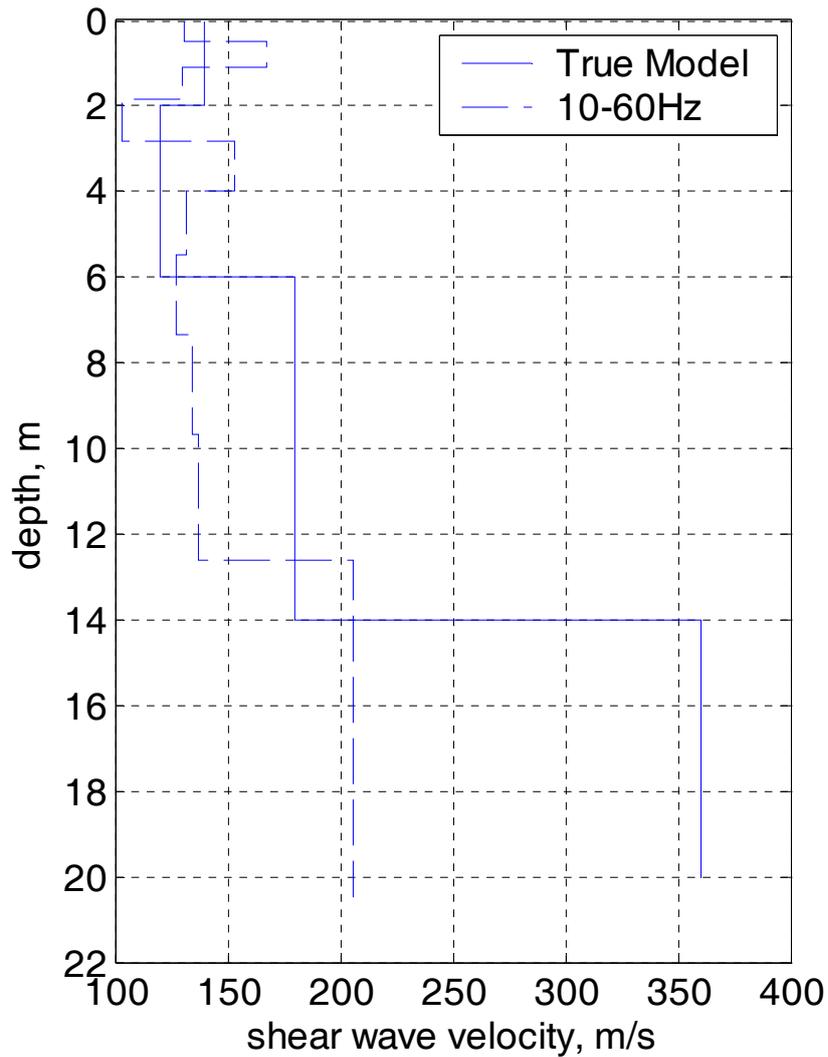


圖 5.24 地層模型與視頻散曲線反算結果比較

由上述兩種高次振態在頻散曲線中的不同存在情形可了解，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。

可能的解決方案：其一，考量現行已發展完整的表面波震測反算工具的使用，於試驗分析中獲得地層之基態頻散曲線仍是首要目標(Zhang and Chan, 2003)，在此一目的下，於 5.1.3 小節中所提出之高側向解析法將為一良好之應用方法。如前所述，高側向解析法可有效提升表面波震測的側向解析度並提高探測深度，其概念便是在於利用較短的測線的多次炸點移動的縫合而獲得一個較長的擬測線資料。此一較長的擬測線資料便有助於降低頻散曲線影像解析度不足而無法將基態與其它高次振態分離的問題。惟此法目前僅適用於對於基態頻散曲線之獲得，尚無法有效的獲得高次振態部份。

其次，於學術發展的討論上已有多位學者提出使用多振態以及全波場(full-wavefield)反算的概念。多振態反算 (Xia et al., 2003, SWM)

的概念主要是將現場所得到的頻散曲線影像中分離出的各振態挑選出，進行振態確認後以多個振態的頻散曲線進行反算。此一反算方式在可正確給定振態模式時確實可行，然而根據 O'Neill(2005)的研究指出，不同振態間的出現並沒有依序遞增出現的情形，亦即，頻散曲線影像中的相鄰振態可能是基態與第一振態，但也可能是基態與第九振態。如此，將高次振態納入反算後的結果將反而使結果更加失去準確性。

全波場反算根據其反算標的的不同又可分為視頻散曲線（apparent dispersion curve, Ganji et al., 1998; O'Neill, 2003; Bohlen et al., 2004）以及頻散曲線影像(Forbriger, 2003a.b; Ryden et al., 2004)的反算兩種。全波場反算的精神是並不特別去辨識出頻散曲線的振態，避免因為辨識過程中造成的可能錯誤。如此的反算技巧可免去只採用基態反算的資訊浪費（所有的頻散曲線皆可提供地層訊息），亦可避免多振態反算的缺點，因此近年來受到許多學者極大的重視，只是這樣的反算方式所需要決定的未知數甚大，常常會有無法收斂的情形（O'Neill, 2005），為求有一收斂結果便需要對其它變數進行變數束制以達到期望結果，但整體來說其效率不足尚處於發展階段。

在解決方案發展完整前：採用目前以基態頻散曲線為反算標的的分析方法，如前文所述，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，在解決方案發展完整前應以此為施作準則。在實際的做法上，除了可採用本報告所發展的高側向解析法施作外，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。

5.2 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形初擬

5.2.1 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程

此節最終目的是建立依不同問題與壩體條件選用適當檢測技術的評估方法。方法的建立擬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 5.25 所示，本適用性評估法雛型擬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。

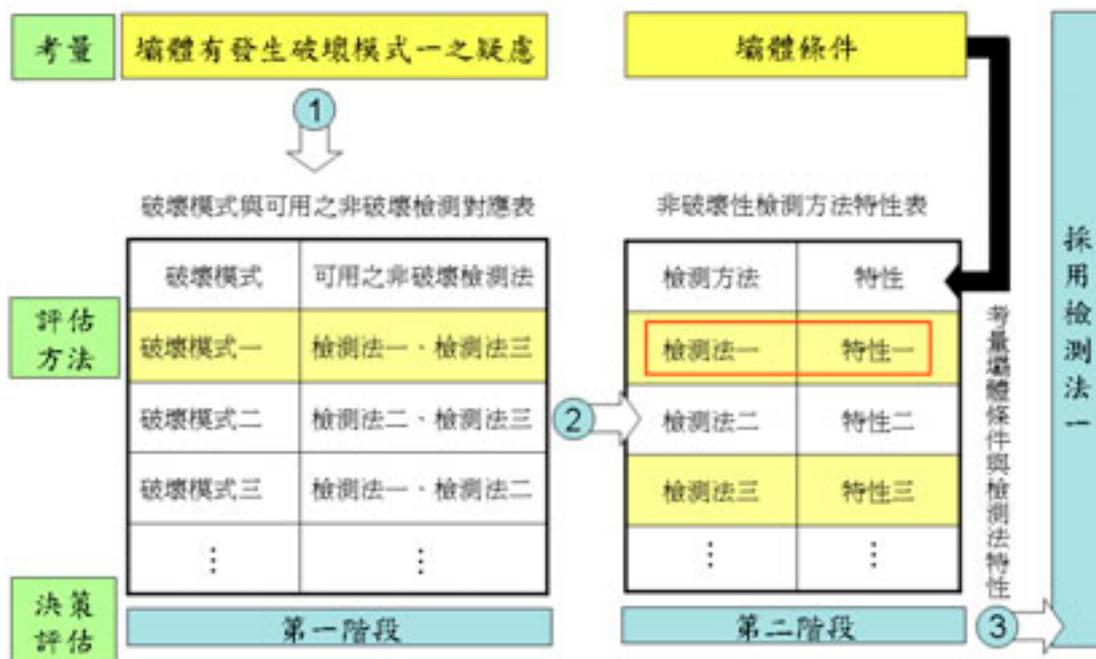


圖 5.25 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程圖

5.2.2 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表建立

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。針對上述施測方法結果所能提供之資訊整理成表

5.4所示。由表中可知，折射震測與表面波震測可提供壓力波速做為力學性質參考，而電阻探測、自然電位法以及電磁探測可提供電學性質資訊。透地雷達雖也是利用電磁波進行探測，但一般在分析上並不進行反算，而是藉由其反射之訊號獲得壩體中電學性質不連續面。

表 5.4 非破壞性檢測方法提供之資訊

| 檢測方法 | 量測資料 | 所得物理性質 | 所得物理模型 | 工程應用 |
|-------|-------------|--------------------|-------------------|---------------|
| 折射震測 | 壓力波之初達波走時 | 地層壓力波波速 | 壓力波波速之深度二維剖面 | 地層、壩體彈性係數推估 |
| 表面波震測 | 表面波波場之歷時振幅 | 地層剪力波速 | 剪力波速 vs 深度之剖面 | 地層、壩體動態性質推估 |
| 透地雷達 | 電磁波之反射歷時及振幅 | (電磁波速) 電學性質不連續面 | 反射層之二維或三維剖面 | 地層、壩體內部異常區域偵測 |
| 電阻探測 | 人造電流造成之電位差 | 地層電阻 | 電阻之深度二維或三維剖面 | 地層、壩體含水特性變化 |
| 自然電位法 | 自然電位差 | 地層自然電位 | 地層自然電位之平面二維空間分佈差異 | 水壩或破碎岩層之滲流路徑 |

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以及可能異常之可檢測物理量如表 5.5 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。

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。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，因此亦會反應至應力波速的異常上。

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，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。

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，而管湧與滲露的產生將在透水層造成鬆散帶、於可溶性夾層造成孔洞，使得地層之應力波速亦有變化情形產生。

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。壩體受到侵蝕將會產生孔洞與壩體材料密度的變化，直接影響其應力波速的表現，於管湧或滲露發生時之土石鬆散帶亦會影響，可使用表面波震測檢驗；又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、電磁法或透地雷達檢測。

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、電磁法或自然電位法；又若有管湧情形將會使該處土石鬆散，造成應力波速變化，可採用表面波震測法檢驗。

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、電磁法、自然電位法或透地雷達；而管湧與滲露的產生將在透水層造成鬆散帶、於可溶性夾層造成孔洞，使得地層之應力波速亦有變化情形產生，可使用折射震測或表面波震測檢驗。

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；此外，裂縫的存在會影響該區域地層之電學性質，可使用電阻法、電磁法或地雷達。

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。

整合表 5.4與表 5.5的結果並考量檢測法之適用性，便可得到評估方法雛形流程中第一階段所需的破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表，如表 5.6所示。

表 5.5 混凝土壩與土石壩潛在破壞模式

| | 潛在破壞模式 | 可能異常之檢測物理量 |
|------|---|-----------------|
| 混凝土壩 | 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) |
| | 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。 | 電學性質、應力波速 |
| | 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。 | 電學性質、應力波速、孔洞、密度 |
| | 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。 | 電學性質、應力波速 |
| | 沿基礎軟弱不連續面之滑動。 | (監測) |
| 土石壩 | 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) |
| | 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 | 電學性質、應力波速、孔洞、密度 |
| | 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 | 電學性質、應力波速 |
| | 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 | 電學性質、應力波速 |
| | 因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動 | (監測) |
| | 沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動 | (監測) |
| | 差異沉陷造成之裂縫 | 應力波速 |
| 土壤液化 | 應力波速 | |

表 5.6 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 |

5.2.3 非破壞性檢測技術之適用性評估方法之手冊雛形

在制訂標準方法或建議準則手冊，以 ASTM 最具代表性，在此本計畫將參考國際使用經驗及已建立之 ASTM 準則，提出非破壞性檢測技術之適用性評估方法之手冊雛形，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之適用性評估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 5.25 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等方法。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。又考量本手冊將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適用性評估方法手冊雛形實體請參考附錄三，在此中其為手冊雛型，目前僅將第一章總論部份內容、第二章折射震測法以及第三章電阻探測法納入文中。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、壩體安全診斷系統研究

本研究主要利用強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及歷次地震分析結果之差異程度。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。本年度則探討系統識別應用於重力壩安全診斷之可行性，由於多數重力壩僅於壩體安裝強震儀，其壩底並無安裝強震儀，因此輸入擾動的資訊無法得知。本年度將根據台電大甲溪發電廠所提供之谷關壩及天輪壩強震儀記錄進行系統識別分析，以探討無輸入擾動時，系統識別分析應用於壩體安全診斷之可行性。

6.1 混凝土重力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。

過去水庫管理單位對於強震儀加速度歷時訊號的應用有限，往往只讀取加速度歷時之峰值，以作為相關緊急應變措施之參考，惟對於壩體實際之振動行為則毫無所悉。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)，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。95 年度之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，本年度將探討系統識別應用於重力壩安全診斷之可行性。

重力壩主要是靠壩體本身之巨積混凝土塊自重抵抗水壓力，因此若水壓力或地震力所引起之傾倒力矩大於壩體自重所能抵抗之回覆力矩，則重力壩將產生晃動(rocking)反應，即壩底會有上揚的現象發生。由於重力壩之壩體非整體澆鑄，各壩體間存在接縫，即各壩體可視為獨立之元素，當地震強度不大時，重力壩是以連續體進行二維度之振動；當地震強度較大時，各壩體即獨立振動，因此長向伸縮縫(立面)常會因劇烈碰撞而產生混凝土剝落的情況。

本研究將以 ARX(或 AR)單一輸入(壩底)單一輸出(壩頂)模式識

別混凝土重力壩之主要振動頻率(或阻尼比)，同時確立 ARX 模型之階數及系統參數。

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，若壩體結構之強震儀數量夠多，即可採用單一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：

$$y(k)+a_1y(k-1)+\dots+a_{n_a}y(k-n_a)=b_0u(k)+b_1u(k-1)+\dots+b_{n_b}u(k-n_b)+e(k)$$

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。若壩底無強震儀記錄(無輸入資料)，僅有壩體之強震儀記錄資料，則可嘗試利用 AR 模式進行識別，其線性差分方程式可表示如下：

$$y(k)+a_1y(k-1)+\dots+a_{n_a}y(k-n_a)=e(k)$$

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)與系統參數 a 有關，因此吾人只要識別出系統參數便可得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。

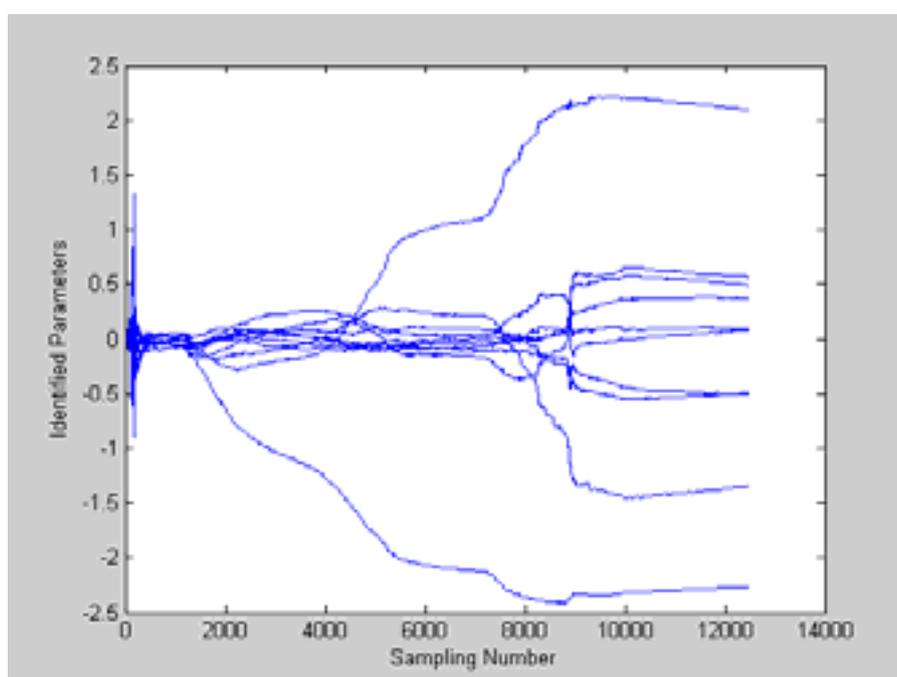


圖 6.1 系統參數歷時圖

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。

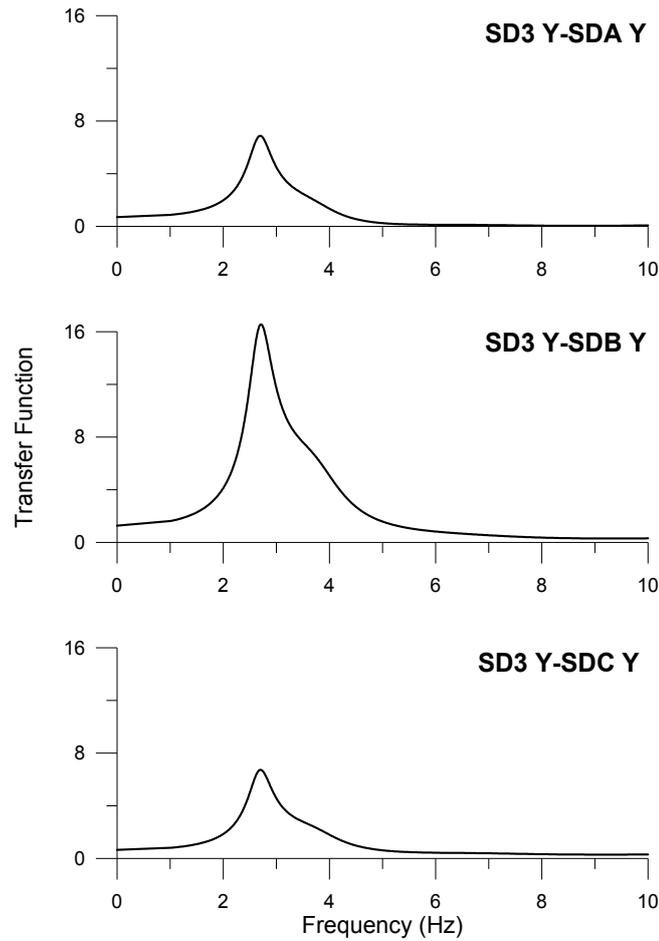


圖 6.2 傳遞函數圖(翡翠水庫)

本研究將根據上述之分析模型識別重力壩過去幾年地震發生時之振動頻率(或阻尼比)，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重力壩安全診斷之可行性。本案分析之兩座壩體分別為谷關壩(經查詢後實為一拱壩)及天輪壩(圖 6.3)，其基本資料說明如下：

谷關壩：

壩頂標高 952 公尺
最大壩身高度 85.1 公尺
壩頂長度 149 公尺
壩頂寬度 4 公尺
壩體積 77,770 立方公尺

天輪壩：

壩頂標高 753.21 公尺
最大壩身高度 54 公尺
壩頂長度 92 公尺
壩頂寬度 5.5 公尺
壩體積 88,000 立方公尺



圖 6.3(a) 谷關壩



圖 6.3(b) 天輪壩

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，俾清楚呈現強震儀所記錄之振動訊號，同時可初步檢視強震儀是否正常運作。圖 6.4 為強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氏轉換(Fourier Transform)，強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。

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，因此最後則須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。本年度將建立重力壩之系統識別分析模式，並識別重力壩過去幾年於地震發生時之振動頻率(或阻尼比)，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。此外，若地震發生時有同步記錄水位高程資料，則可進一步探討水位高程與重力壩振動頻率之關係，如圖 6.7 所示，壩體之振動頻率有隨著水位高度增加而降低的趨勢。

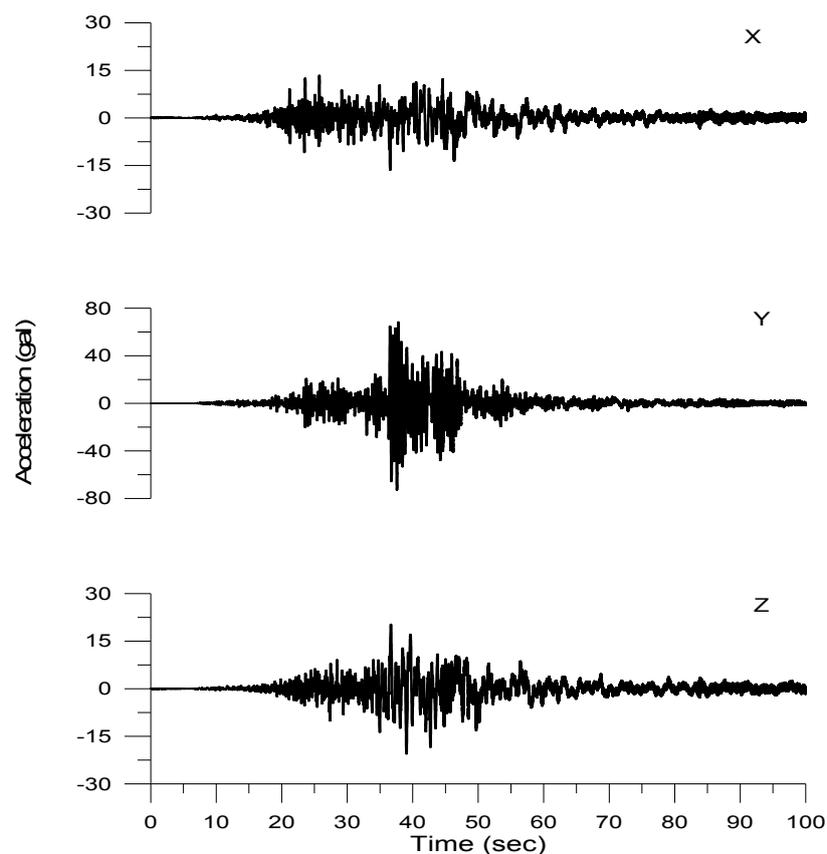


圖 6.4 強震儀之三軸向加速度歷時(翡翠水庫)

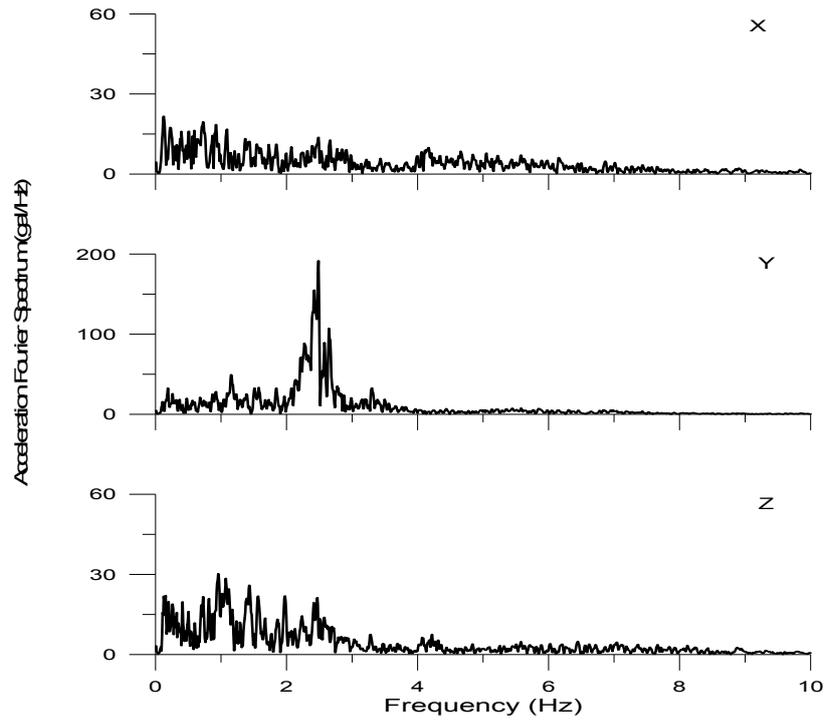


圖 6.5 強震儀之三軸向加速度傅氏頻譜(翡翠水庫)

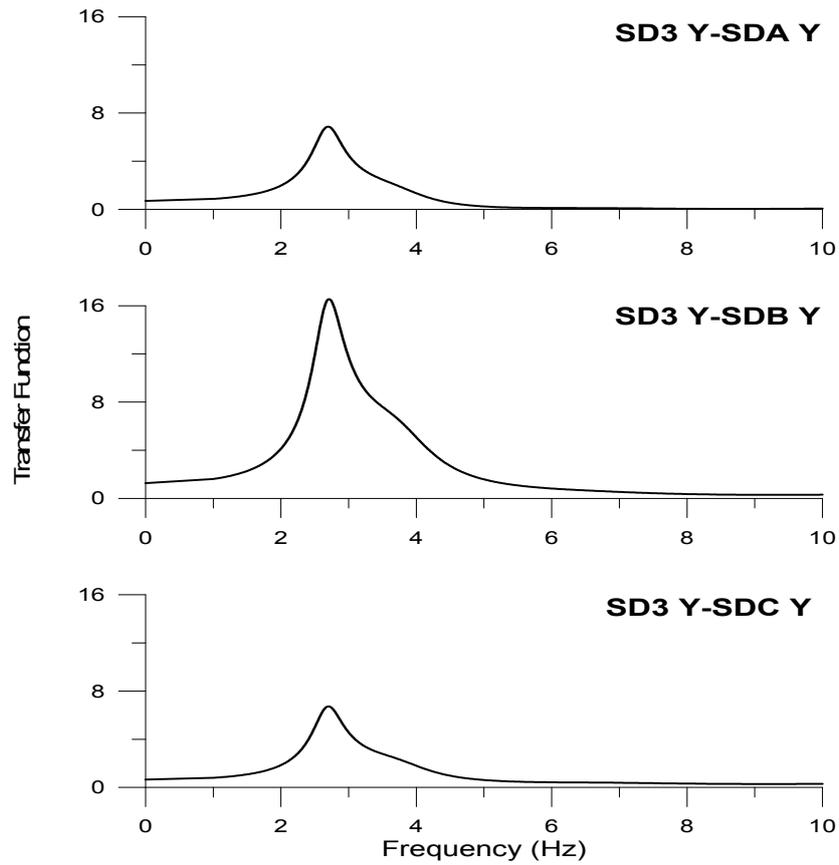


圖 6.6 強震儀之三軸向傳遞函數(翡翠水庫)

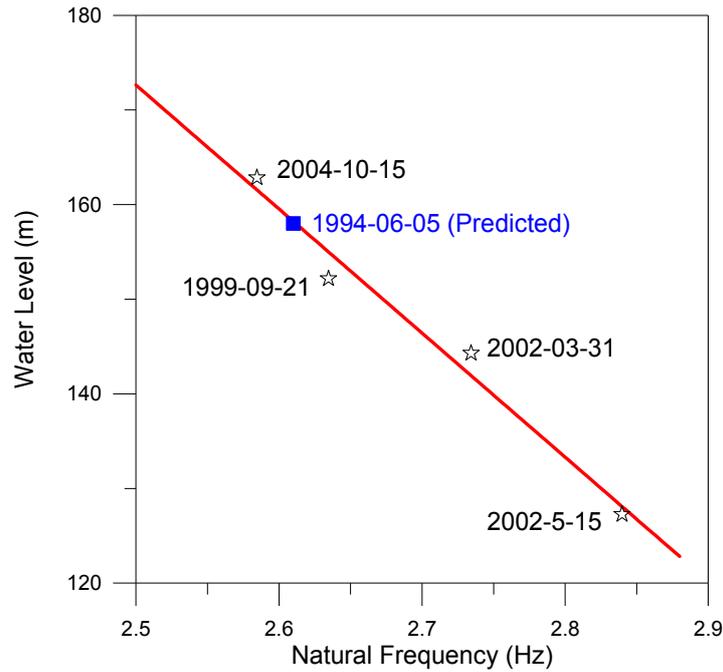


圖 6.7 壩體振動頻率與水位高程之關係曲線(翡翠水庫)

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，

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (6.3)$$

$$B(q) = b_0 + b_1 q^{-1} + \cdots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (6.4)$$

若對式 (6.2) 取 z 轉換，得

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

$$\text{其中，頻率響應函數 } H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (6.6)$$

$y(z)$ 與 $u(z)$ 分別為 $y(k)$ 與 $u(k)$ 之 z -轉換， $A(z) \cdot B(z)$ 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 (6.6) 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 ξ_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。

6.1.2.1 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

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

其中，

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

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

若為單一輸入多重輸出(SIMO)模式時，

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

其中，

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

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

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

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 θ 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 θ 完全正確，則 $\varepsilon(k, \theta) = e(k)$ 。

6.1.2.2 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，

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

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

λ 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 θ ，進而求得拱壩之自然振動頻率((6.10)與(6.11)式)。

6.2 谷關壩之系統識別分析

谷關壩之強震儀配置圖如圖 6.8 所示，其壩體共安裝一部強震儀，於 90 年至 95 年間共記錄 28 筆地震資料，如表 6.1 所示，其中，

有 5 次地震事件為水庫放空的情況下所記錄到之壩體振動訊號。

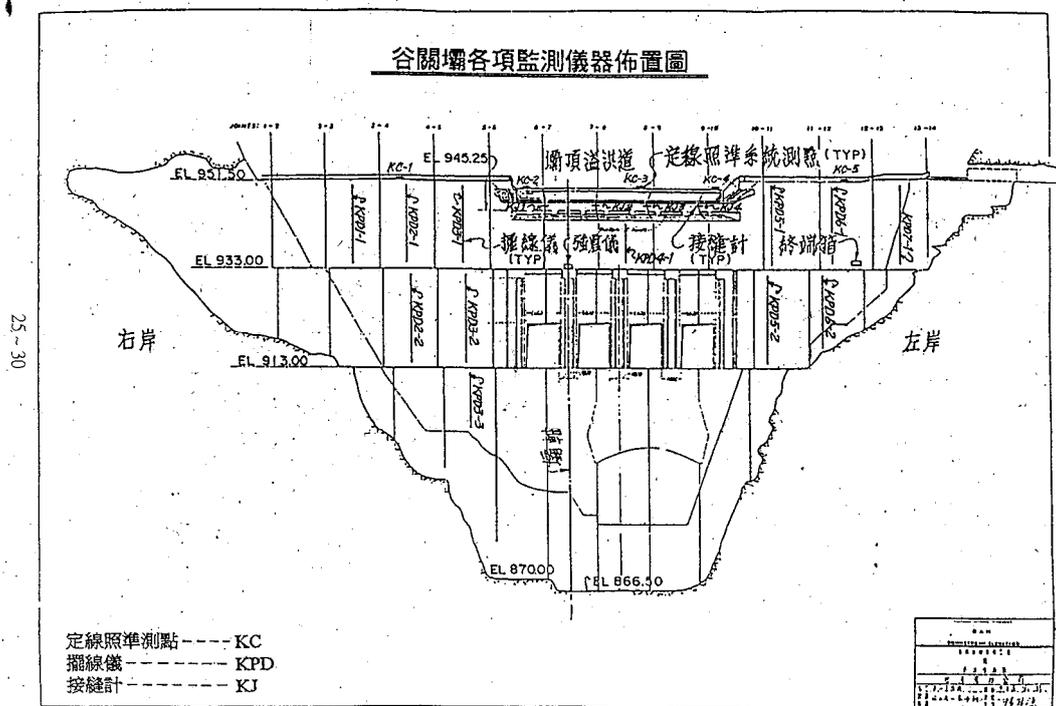


圖 6.8 谷關壩之強震儀配置圖

表 6.1 谷關壩之地震事件記錄資料

| 日期 | 時間 | 重力加速度 | | | 地震震度 | 水庫水位 (EL.) | 備註 |
|----------|----------|-----------|------|------|------|------------|------|
| | | X軸 | Y軸 | Z軸 | | | |
| 90.06.08 | 12:07:41 | 22 | 10 | 9 | 3 | 931.45 | |
| 90.08.20 | 03:10:08 | 13 | 4 | 3 | 3 | 925.50 | |
| 90.09.16 | 20:24:44 | 42 | 18 | 12 | 4 | 931.65 | |
| 90.09.27 | 10:25:28 | 16 | 6 | 2 | 3 | 927.60 | |
| 90.12.28 | 18:41:42 | 42 | 17 | 10 | 4 | 913.30 | 水庫放空 |
| 91.07.07 | 11:37:23 | 5.3 | 3.5 | 2.2 | 2 | 932.80 | |
| 91.09.16 | 08:04:48 | 6 | 3.6 | 1.9 | 2 | 932.20 | |
| 91.09.27 | 13:08:17 | 16.4 | 11.3 | 10.9 | 3 | 913.30 | 水庫放空 |
| 91.09.30 | 16:36:10 | 3.8 | 1.4 | 0.8 | 2 | 913.30 | |
| 92.01.22 | 14:52:12 | 10.2 | 3.2 | 2.5 | 3 | 913.30 | 水庫放空 |
| 92.04.13 | 15:33:15 | 10.4 | 9.1 | 5.3 | 3 | 934.00 | |
| 92.06.10 | 16:44:29 | 13.8 | 5 | 4.8 | 3 | 934.20 | |
| 92.12.10 | 12:41:04 | 11.3 | 4.3 | 2.9 | 3 | 933.50 | |
| 92.12.15 | 07:19:06 | 10.9 | 7.7 | 9.2 | 3 | 935.20 | |
| 93.01.01 | 11:17:58 | 7.7 | 3.3 | 2.8 | 2 | 931.80 | |
| 93.02.15 | 21:32:40 | 5.5 | 2.9 | 2.7 | 2 | 941.15 | |
| 93.05.01 | 15:56:25 | 9.4 | 7 | 5.1 | 3 | 933.40 | |
| 93.07.28 | 17:40:54 | 5.9 | 4.1 | 3.4 | 2 | 913.30 | 水庫放空 |
| 94.04.30 | 22:49:08 | 8.8 | 2.8 | 2.5 | 3 | 930.60 | |
| 94.05.02 | 03:49:42 | 14 | 5 | 5.5 | 3 | 934.30 | |
| 94.09.10 | 19:50:24 | 8.9 | 8.9 | 6.2 | 3 | 914.00 | |
| 94.10.02 | 15:16:55 | 24.5 | 9.3 | 8.5 | 3 | 918.00 | |
| 94.10.07 | 19:23:06 | 11.3 | 9.9 | 5.4 | 3 | 918.00 | |
| 95.01.20 | 13:11:30 | 5.1 | 4.7 | 5.1 | 2 | 933.05 | |
| 95.02.08 | 07:54:28 | 5.1 | 2.4 | 1.6 | 2 | 932.00 | |
| 95.03.07 | 07:40:15 | 6.1 | 3.6 | 7.8 | 3 | 913.30 | 水庫放空 |
| 95.08.05 | 23:26:08 | 3.7 | 3.1 | 2.2 | 2 | 937.00 | |
| 95.12.03 | 13:38:13 | 4.4 | 2.5 | 2.0 | 2 | 932.81 | |

(註：重力加速度之單位為 gal，水庫水位之單位為 m)

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，俾清楚呈現強震儀所記錄之振動訊號，同時可初步檢視強震儀是否正常運作。本案於期中報告時先行選擇 5 筆水庫放空(表 6.1)之振動訊號進行分析，本次期末報告則針對所有地震事件進行分析。各軸向之加速度峰值整理如表 6.1 所示(單位:gal)，其中，X 向為壩體上下游方向，Y 向為壩軸方向，Z 向則為垂直向。由於壩體之振動通常以上下游方向最為顯著，因此本研究將以壩體上下游方向(X 向)之振動加速度歷時訊號進行系統識別分析。

圖 6.9-1 至圖 6.9-28 為歷次地震事件之壩體上下游方向加速度歷時，由圖可知，強震儀之訊號均有隨地震波動的趨勢，顯示強震儀及資料擷取系統之功能應為正常狀態。此外，峰值較大之振動反應多數集中發生在 5 秒以內，而 92 年 06 月 10 日(圖 6.9-12)及 92 年 12 月 10 日(圖 6.9-13)之加速度反應則有延時較長的現象，此可能與地震本身的擾動特性有關。

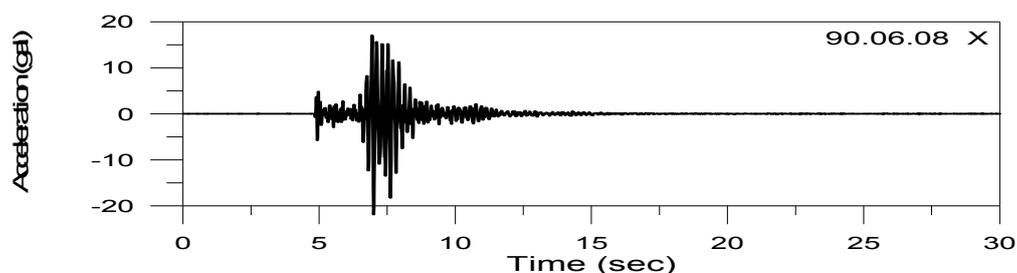


圖 6.9-1 上下游方向之加速度歷時(90.06.08)

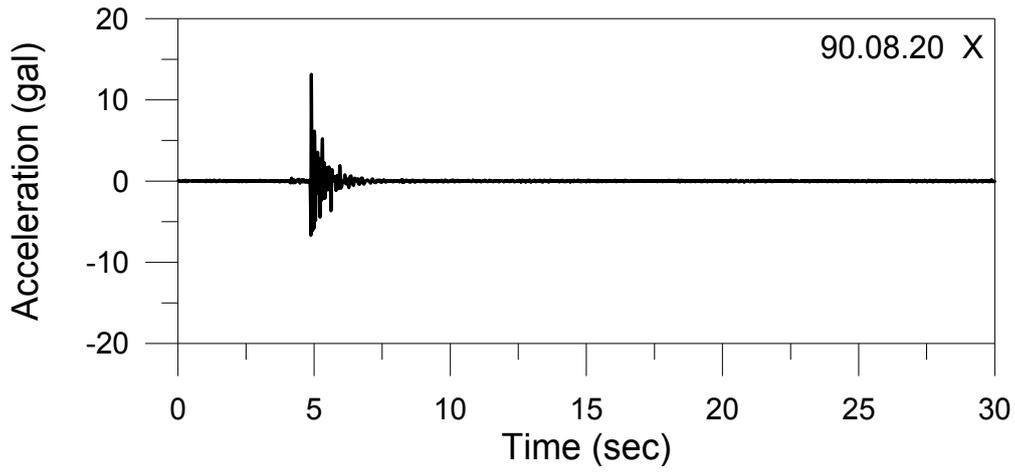


圖 6.9-2 上下游方向之加速度歷時(90.08.20)

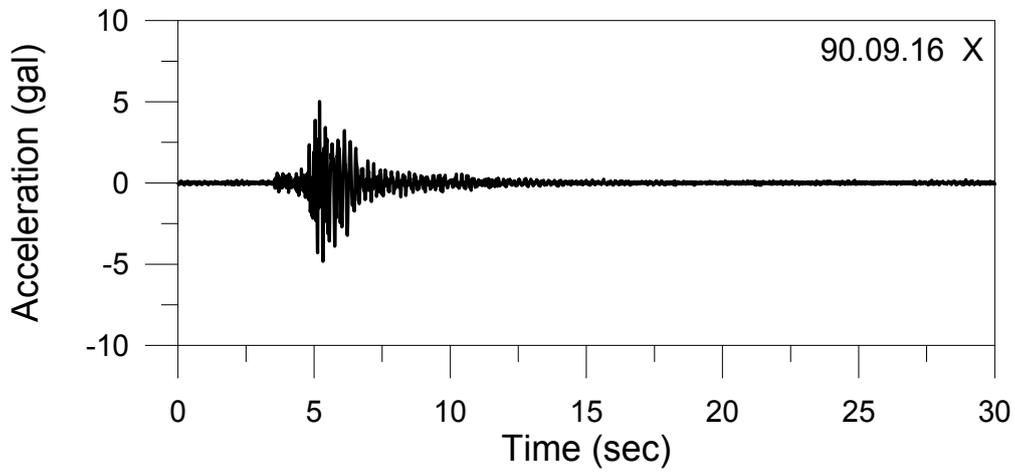


圖 6.9-3 上下游方向之加速度歷時(90.09.16)

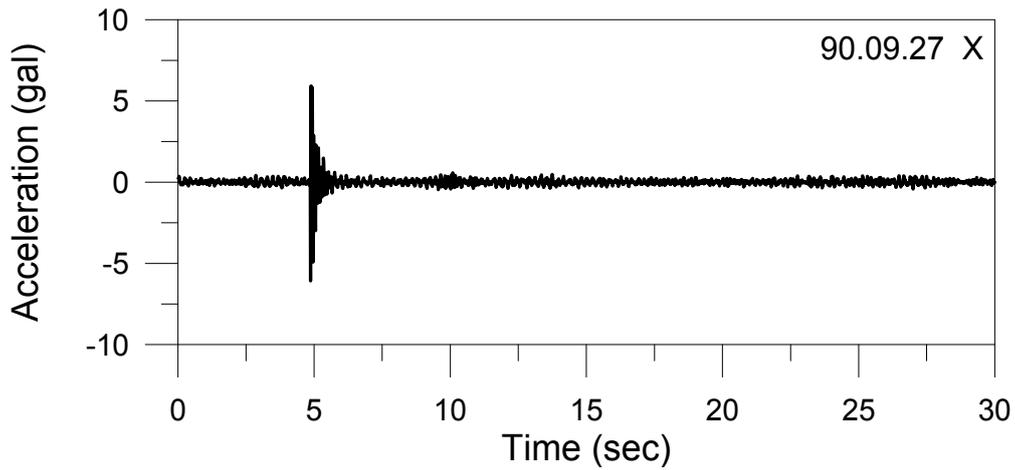


圖 6.9-4 上下游方向之加速度歷時(90.09.27)

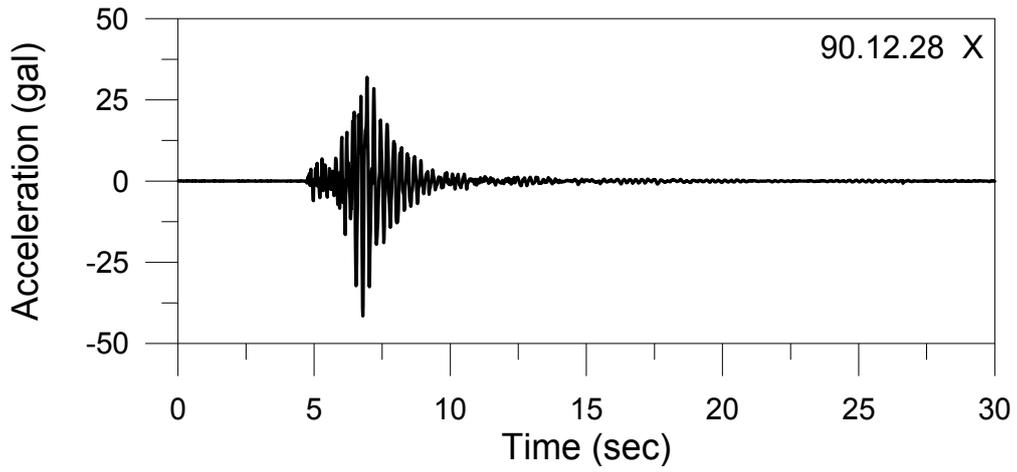


圖 6.9-5 上下游方向之加速度歷時(90.12.28)

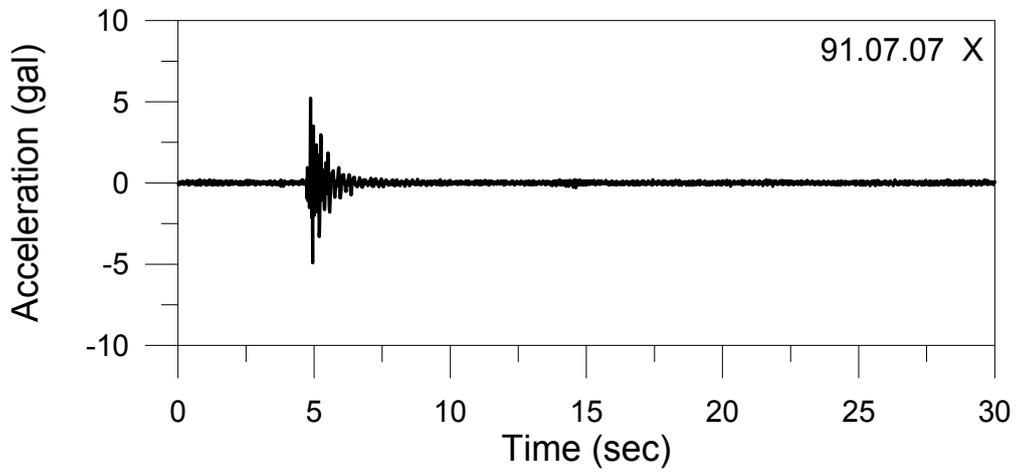


圖 6.9-6 上下游方向之加速度歷時(91.07.07)

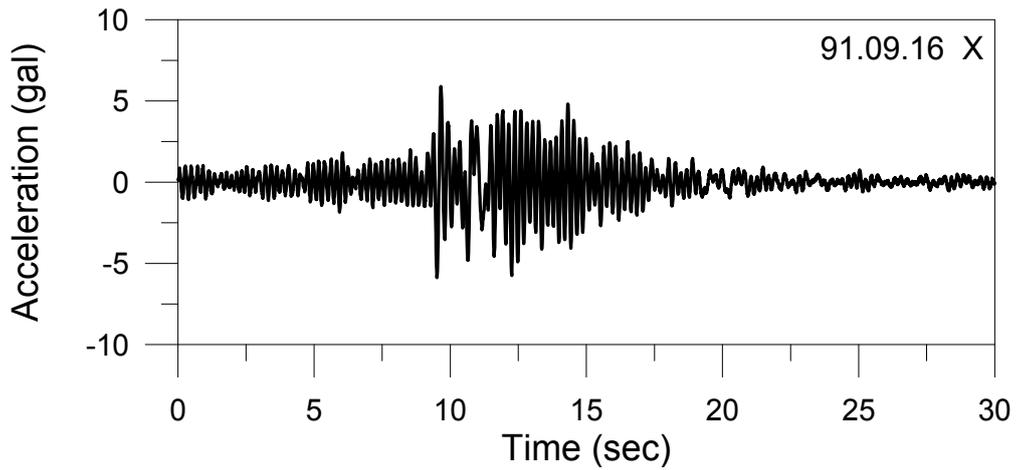


圖 6.9-7 上下游方向之加速度歷時(91.09.16)

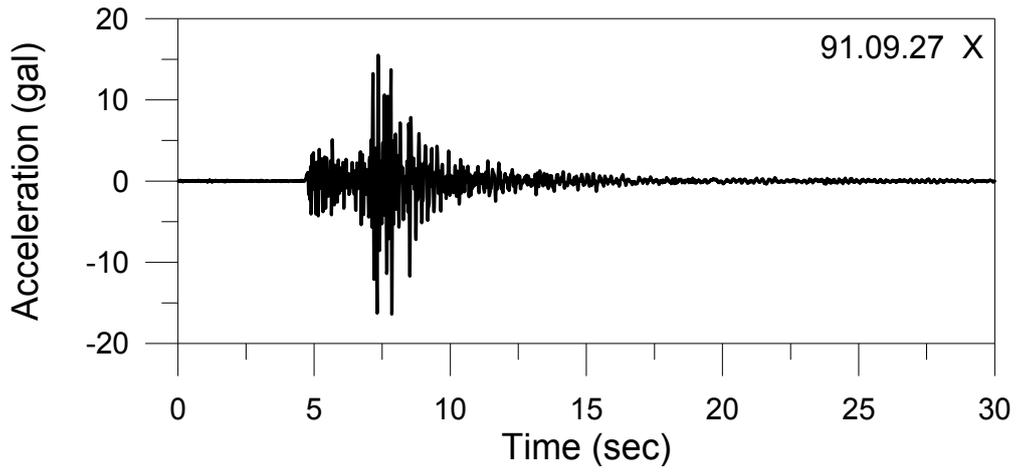


圖 6.9-8 上下游方向之加速度歷時(91.09.27)

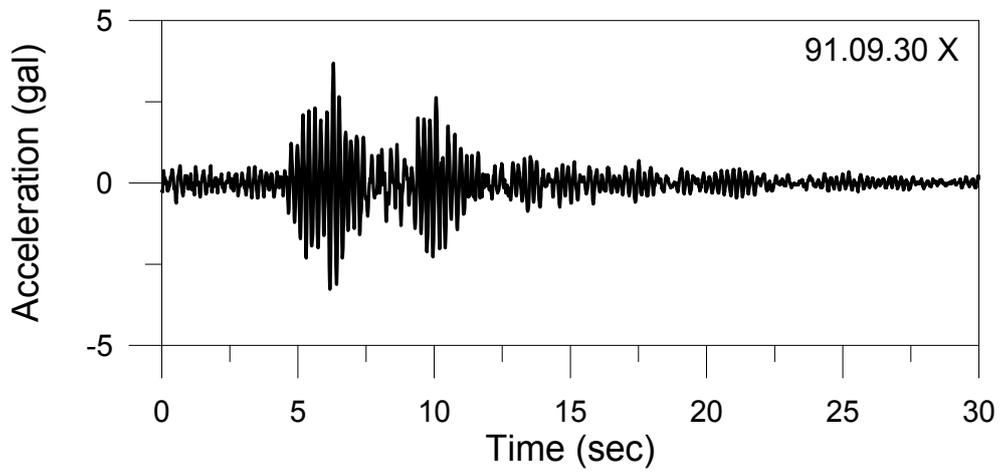


圖 6.9-9 上下游方向之加速度歷時(91.09.30)

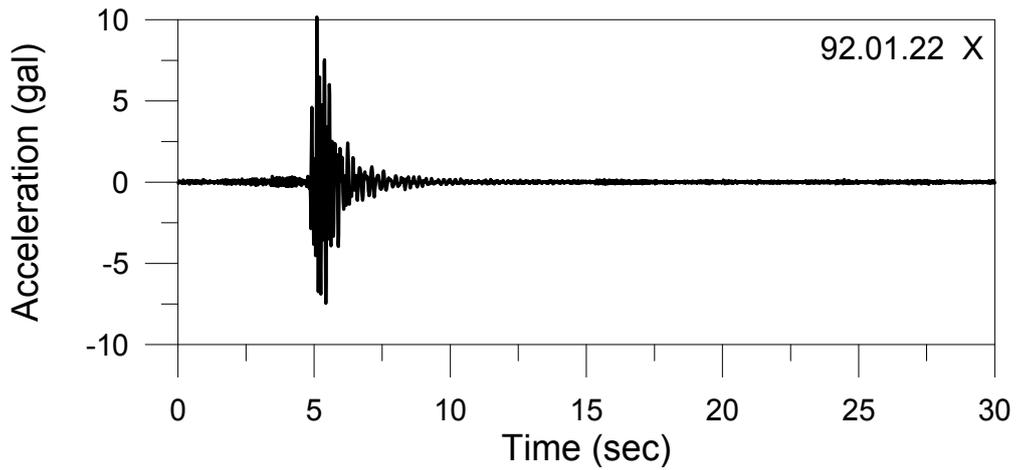


圖 6.9-10 上下游方向之加速度歷時(92.01.22)

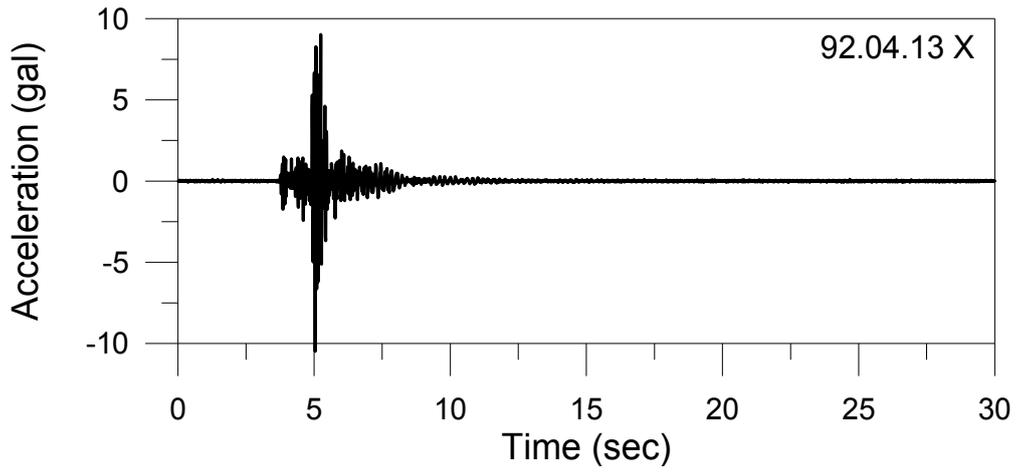


圖 6.9-11 上下游方向之加速度歷時(92.04.13)

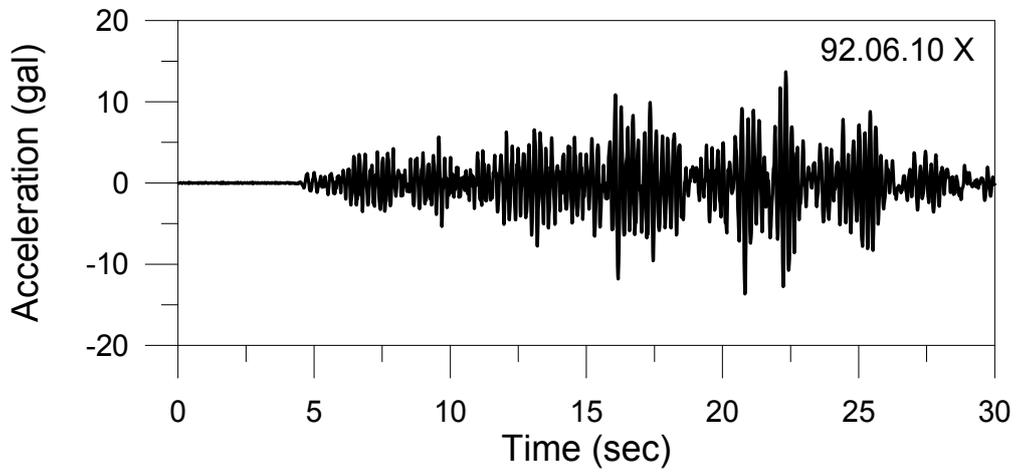


圖 6.9-12 上下游方向之加速度歷時(92.06.10)

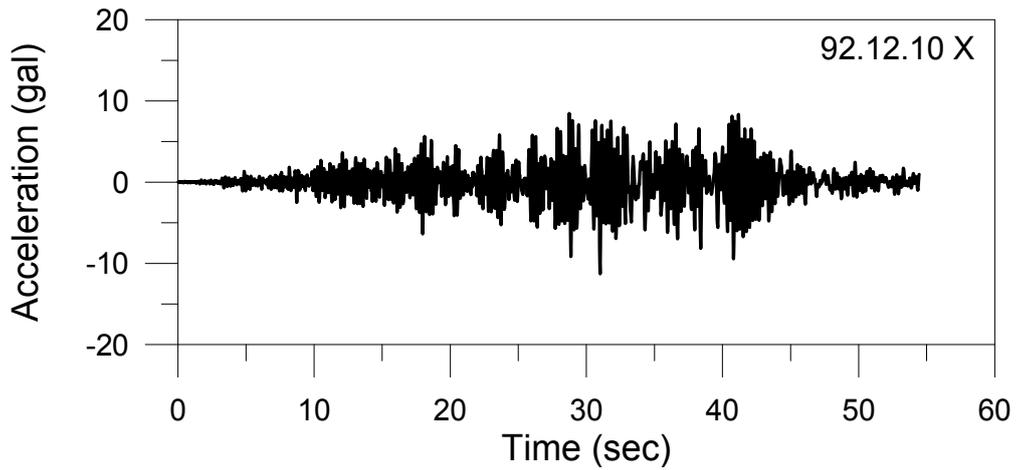


圖 6.9-13 上下游方向之加速度歷時(92.12.10)

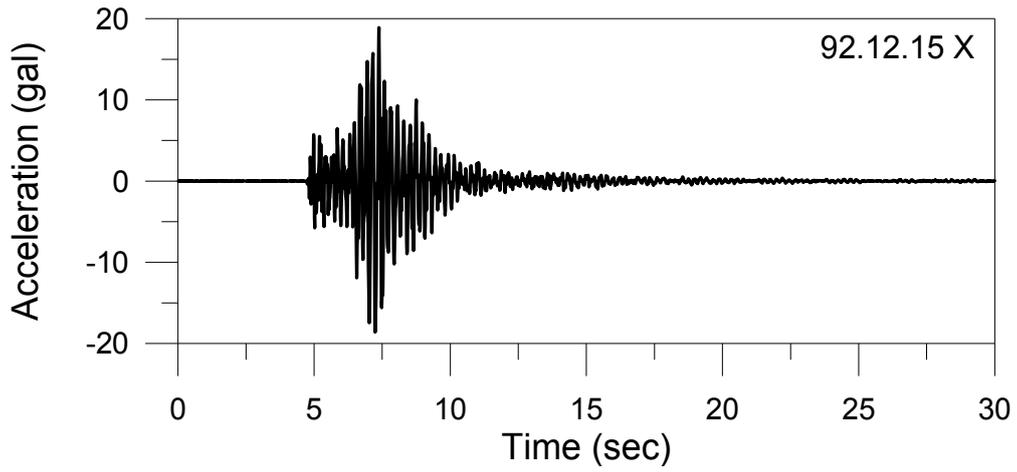


圖 6.9-14 上下游方向之加速度歷時(92.12.15)

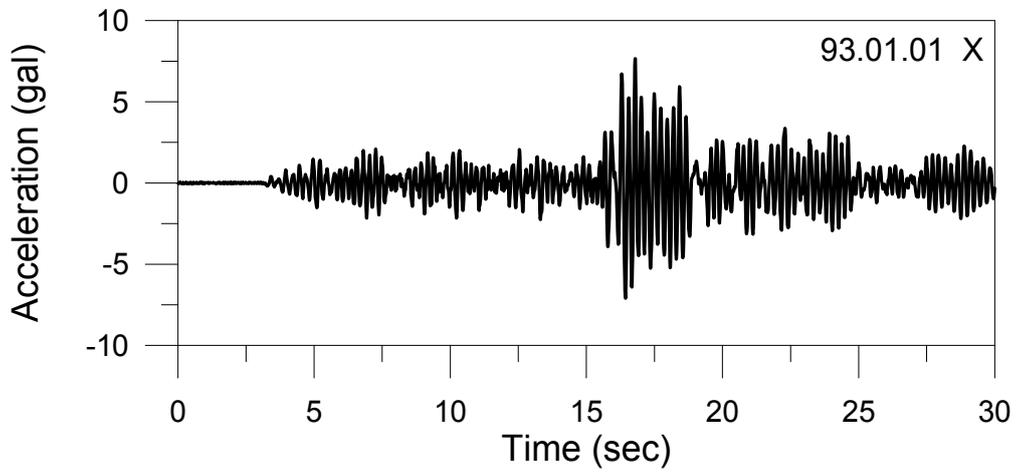


圖 6.9-15 上下游方向之加速度歷時(93.01.01)

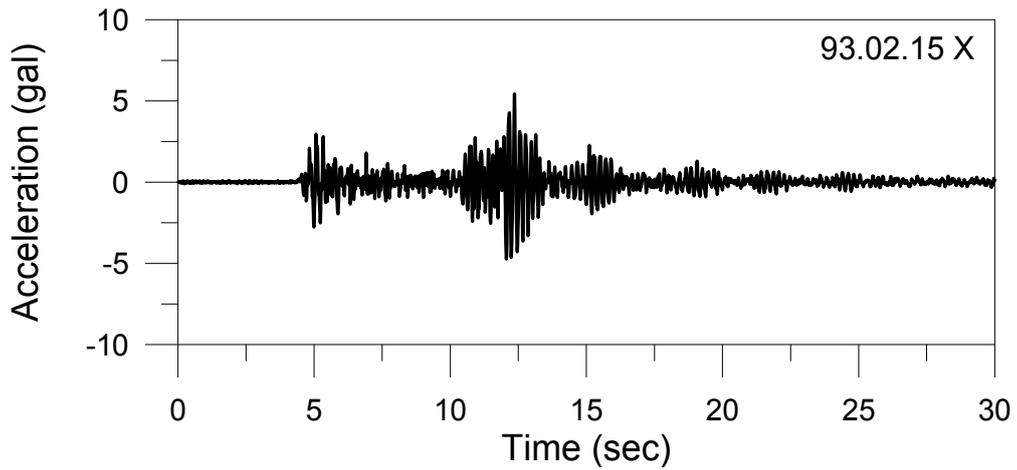


圖 6.9-16 上下游方向之加速度歷時(93.02.15)

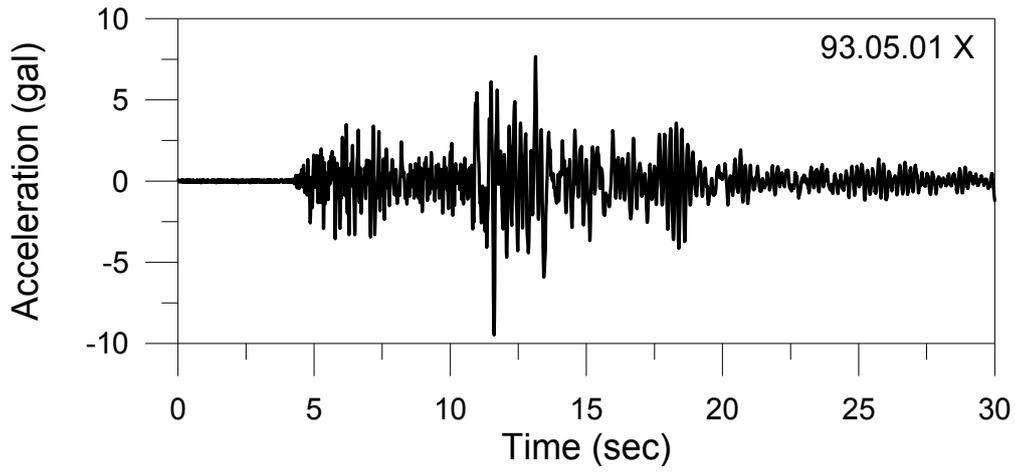


圖 6.9-17 上下游方向之加速度歷時(93.05.01)

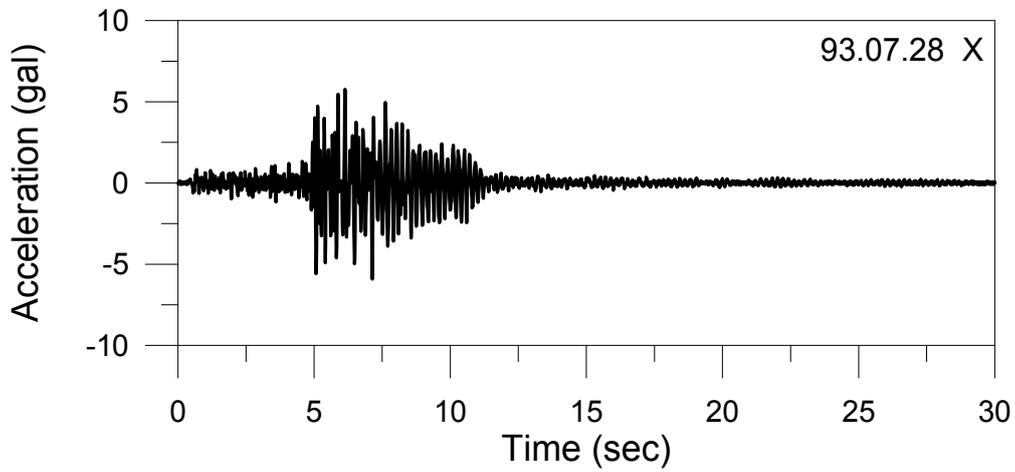


圖 6.9-18 上下游方向之加速度歷時(93.07.28)

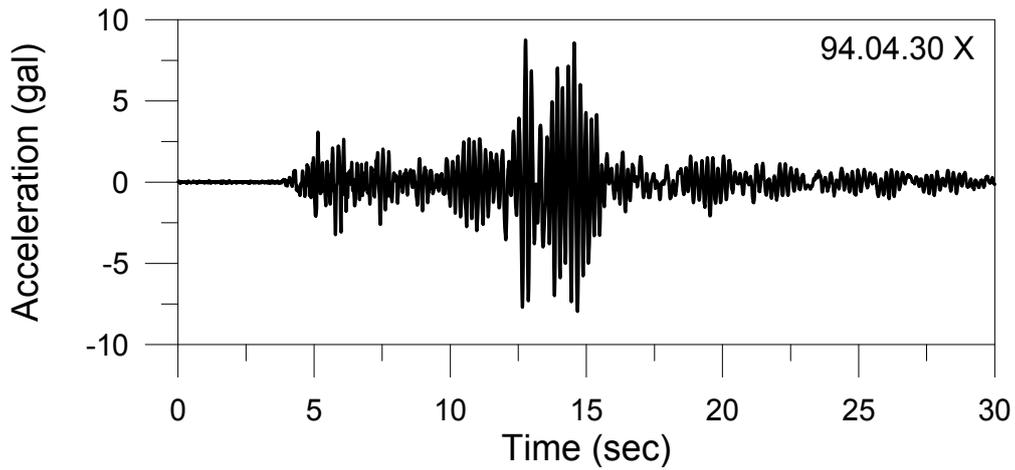


圖 6.9-19 上下游方向之加速度歷時(94.04.30)

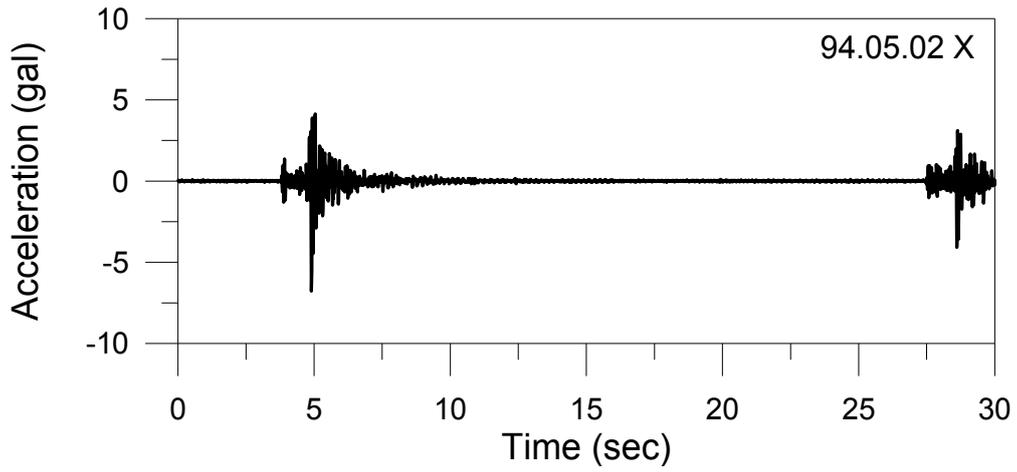


圖 6.9-20 上下游方向之加速度歷時(94.05.20)

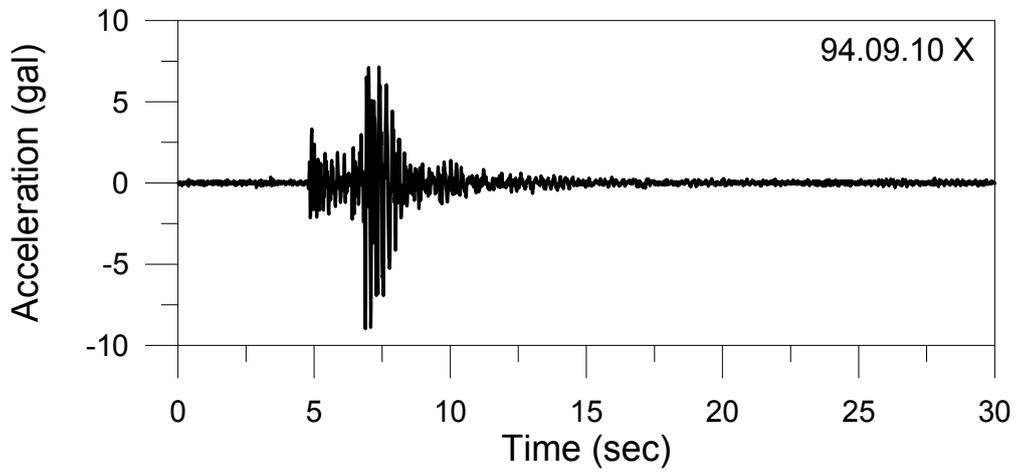


圖 6.9-21 上下游方向之加速度歷時(94.09.10)

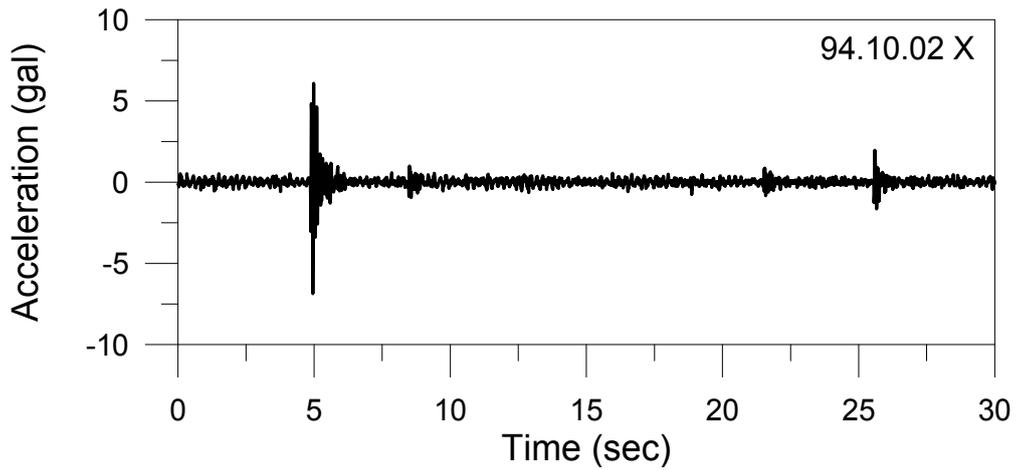


圖 6.9-22 上下游方向之加速度歷時(94.10.02)

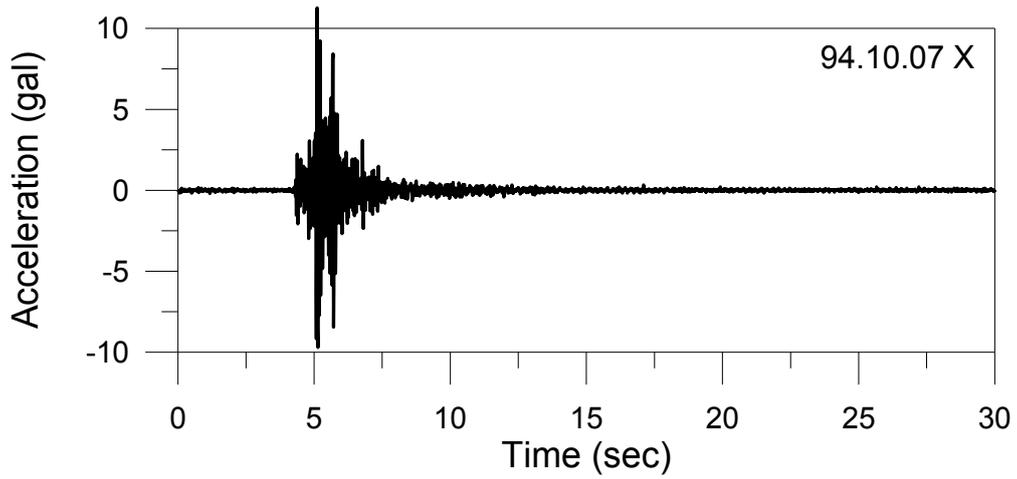


圖 6.9-23 上下游方向之加速度歷時(94.10.07)

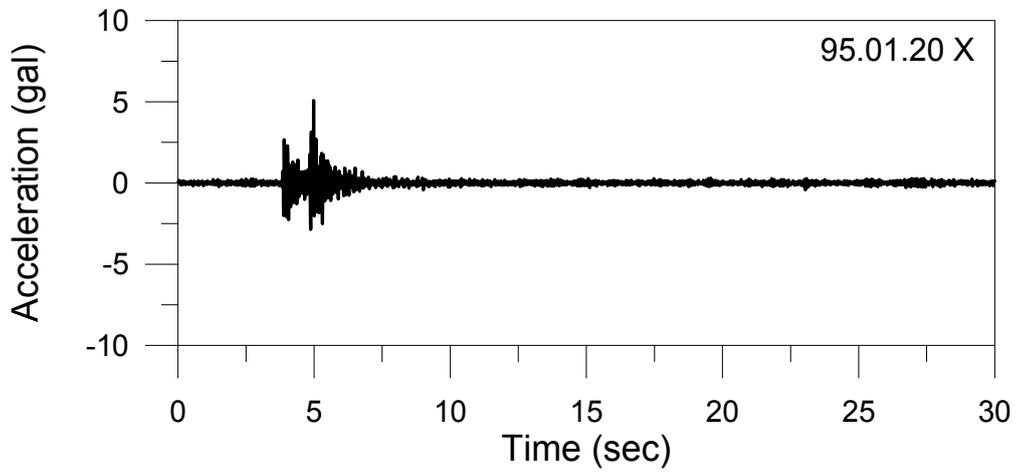


圖 6.9-24 上下游方向之加速度歷時(95.01.20)

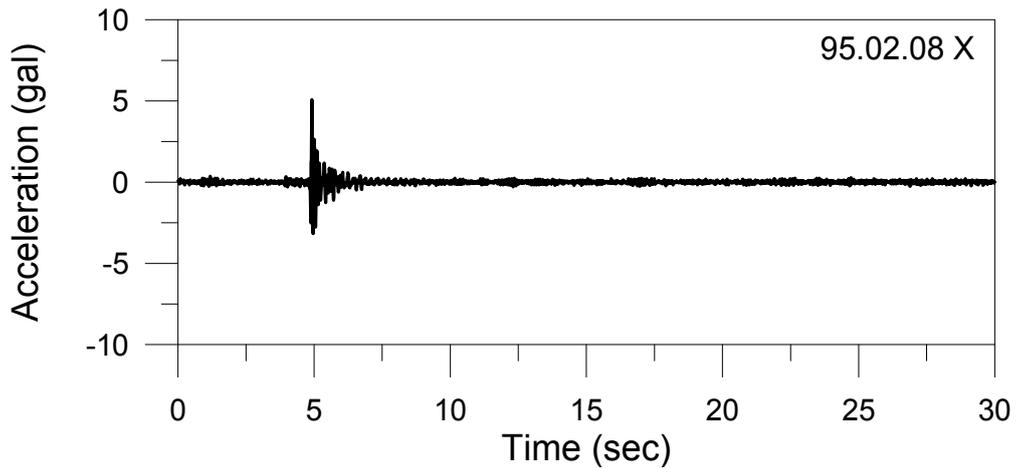


圖 6.9-25 上下游方向之加速度歷時(95.02.08)

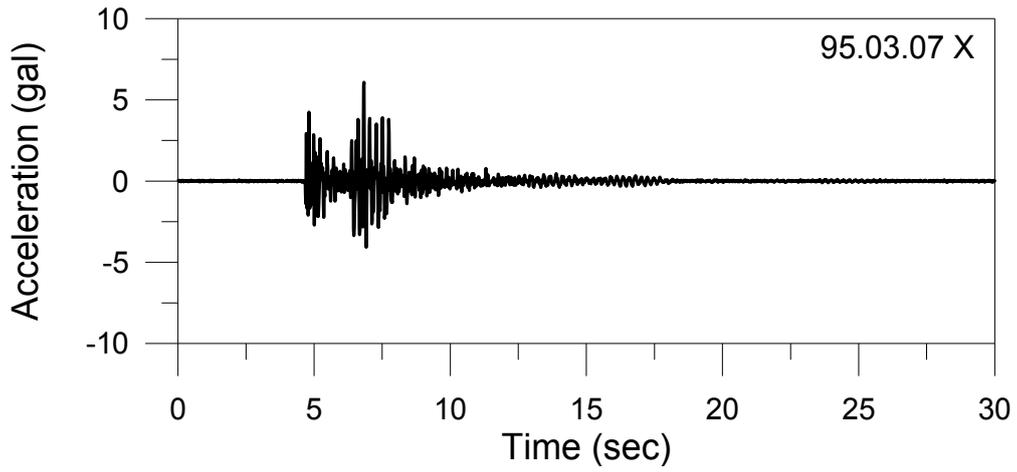


圖 6.9-26 上下游方向之加速度歷時(95.03.07)

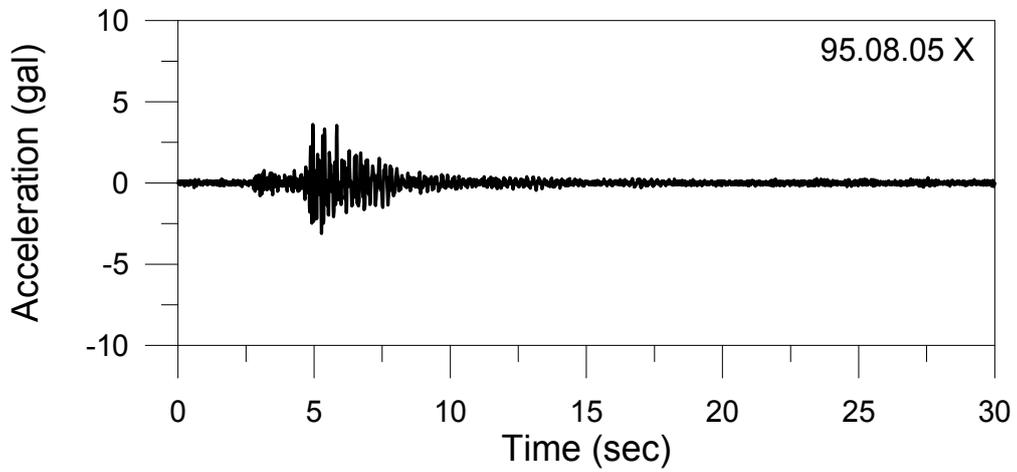


圖 6.9-27 上下游方向之加速度歷時(95.08.05)

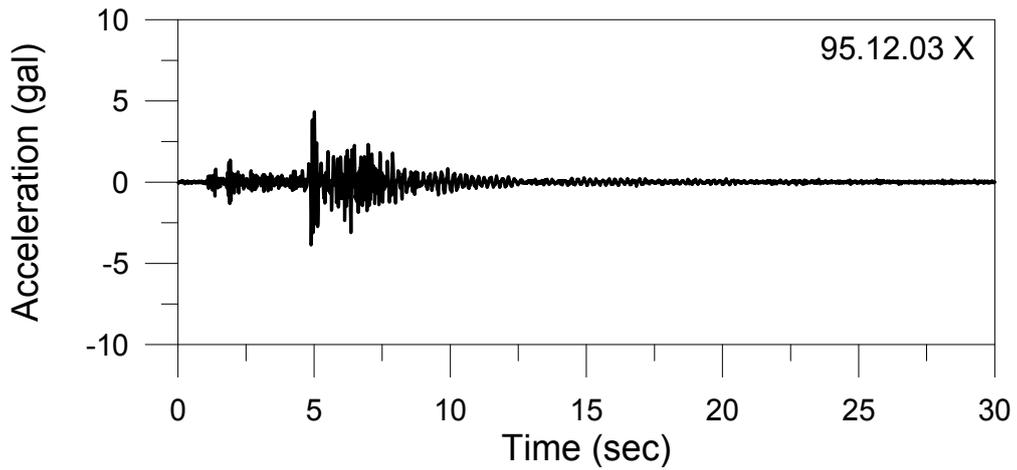


圖 6.9-28 上下游方向之加速度歷時(95.12.03)

6.2.2 頻域分析

頻域分析之目的主要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等特性。頻域分析主要是進行傅氏轉換(Fourier Transform)，圖 6.10-1 至圖 6.10-28 為歷次地震事件之壩體上下游方向加速度反應傅氏頻譜。由圖可知，頻率內涵普遍集中在 20Hz 以內之頻寬範圍(20Hz 以後之頻譜已十分接近於零)，且峰值出現之位置即為地表或壩體之主要振動頻率，其第一個峰值(基本振頻)普遍出現在 4Hz~5Hz 之間，顯示壩體之振動頻率落在此一頻寬範圍內。此外，某些地震事件之頻譜尚有其它峰值出現，該峰值可能為地表之振動頻率或壩體較高頻之振動頻率。

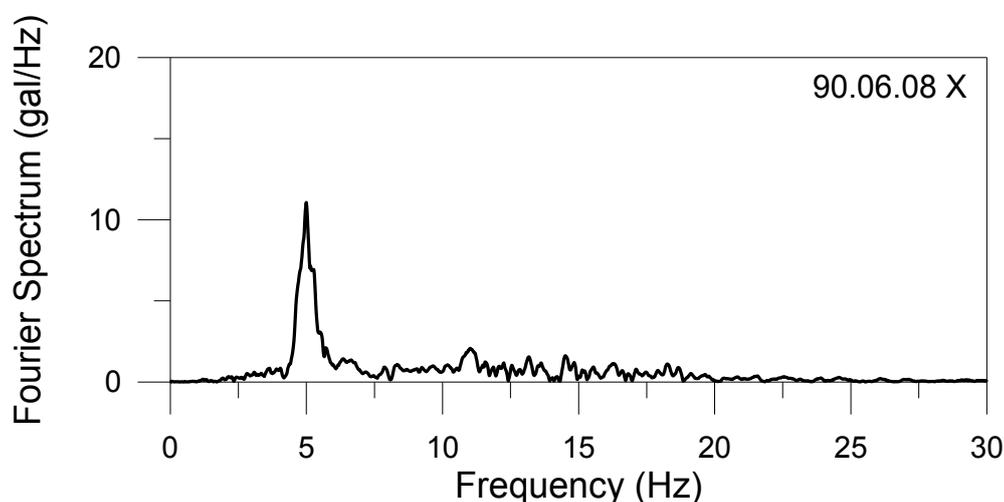


圖 6.10-1 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.06.08)

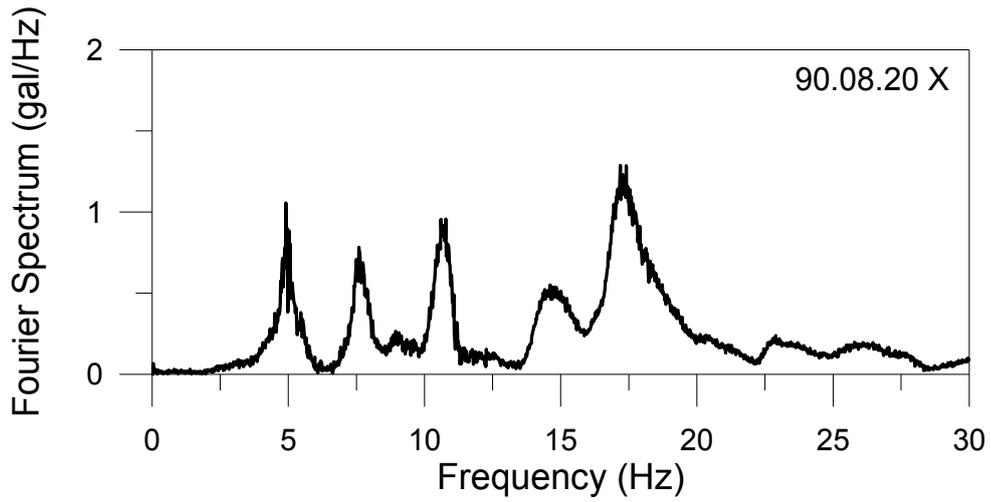


圖 6.10-2 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.08.20)

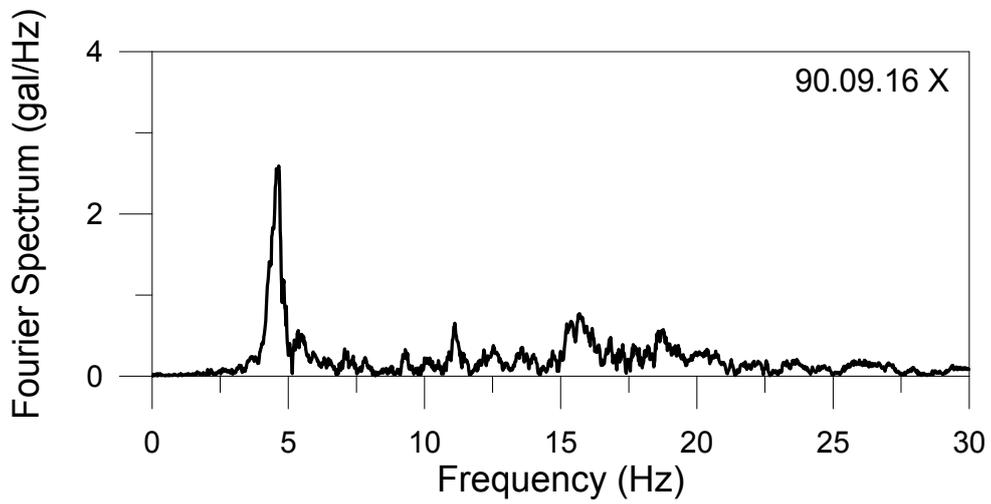


圖 6.10-3 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.09.16)

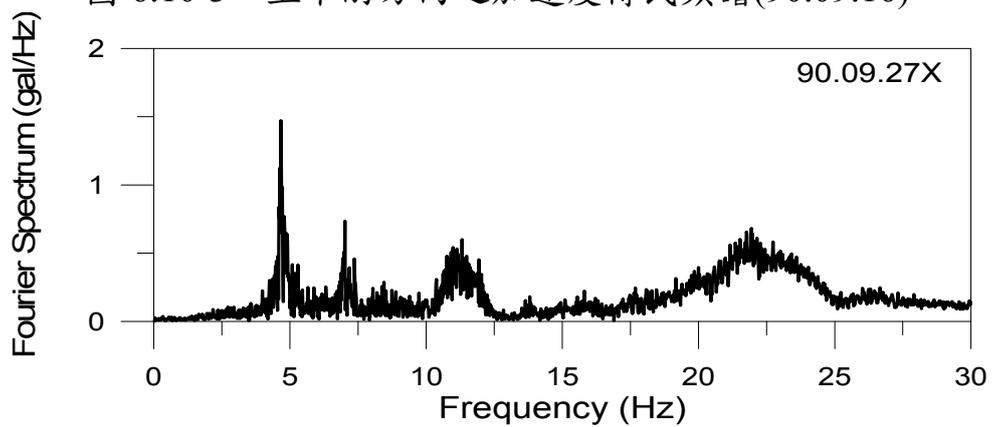


圖 6.10-4 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.09.27)

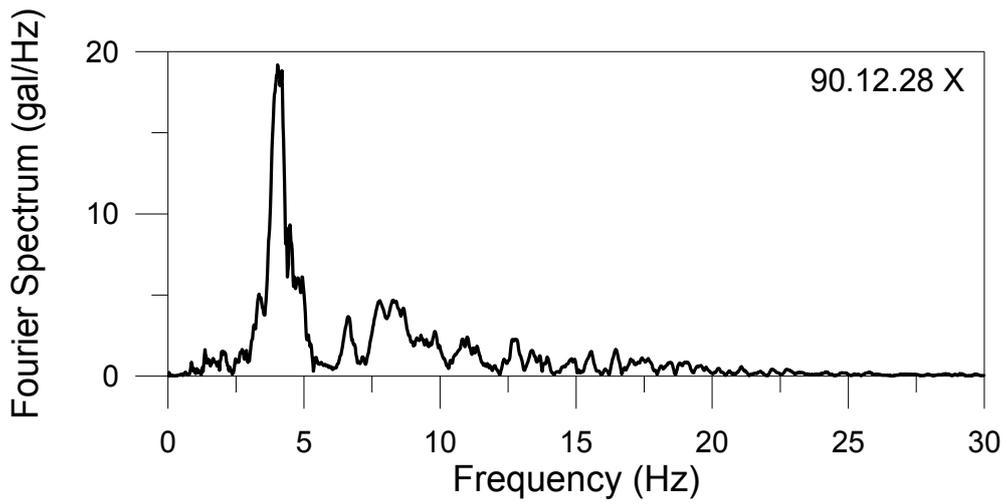


圖 6.10-5 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.12.28)

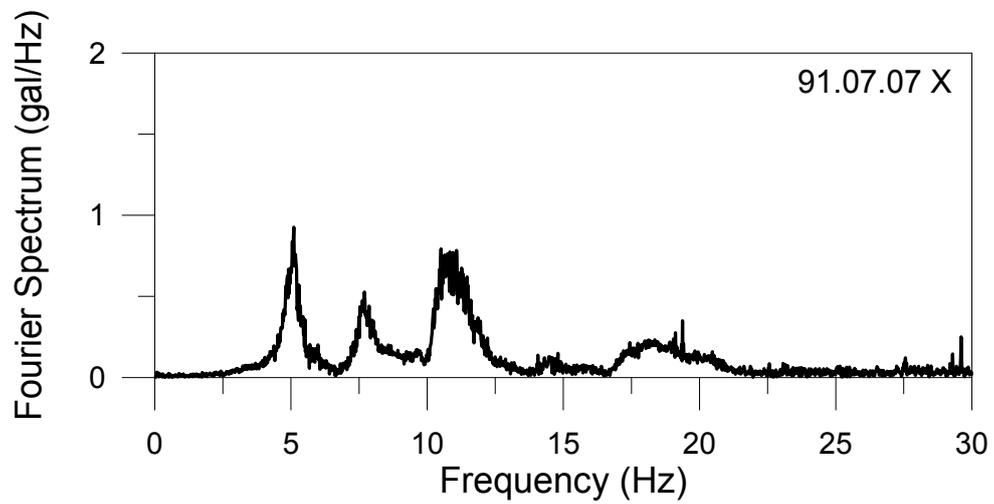


圖 6.10-6 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.07.07)

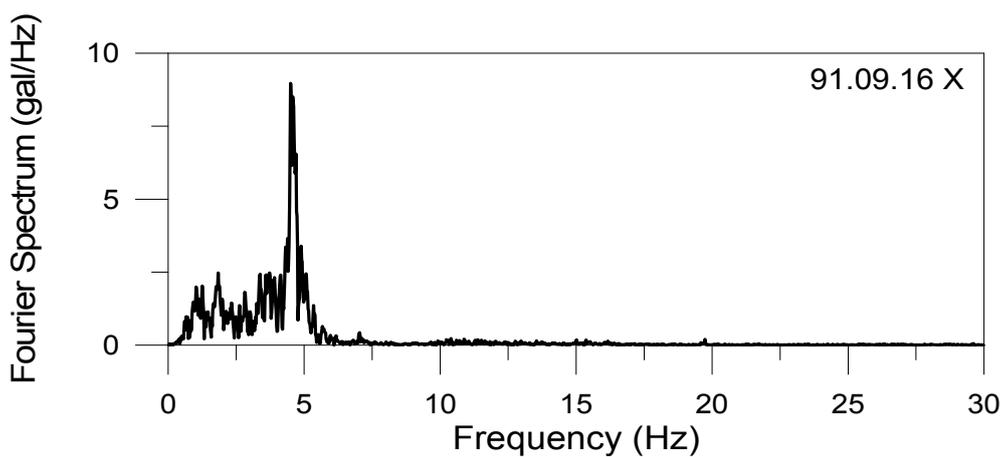


圖 6.10-7 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.16)

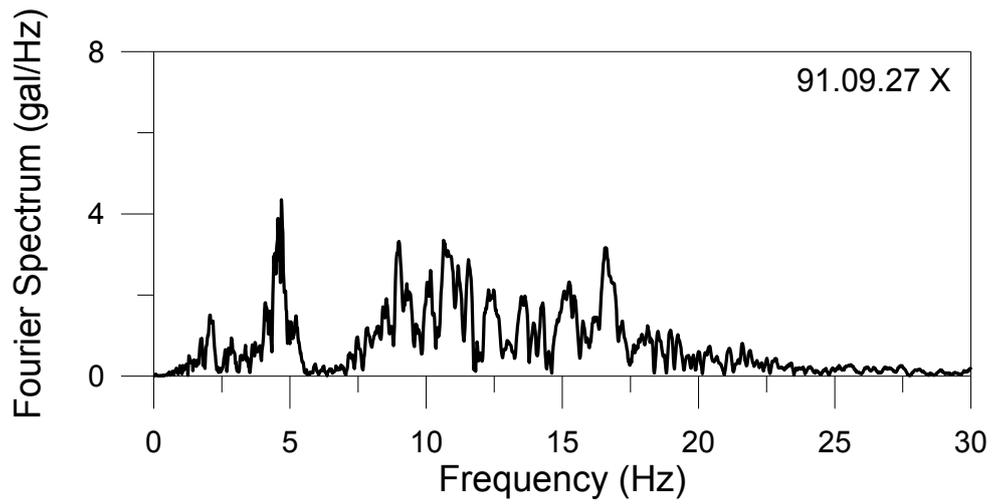


圖 6.10-8 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.27)

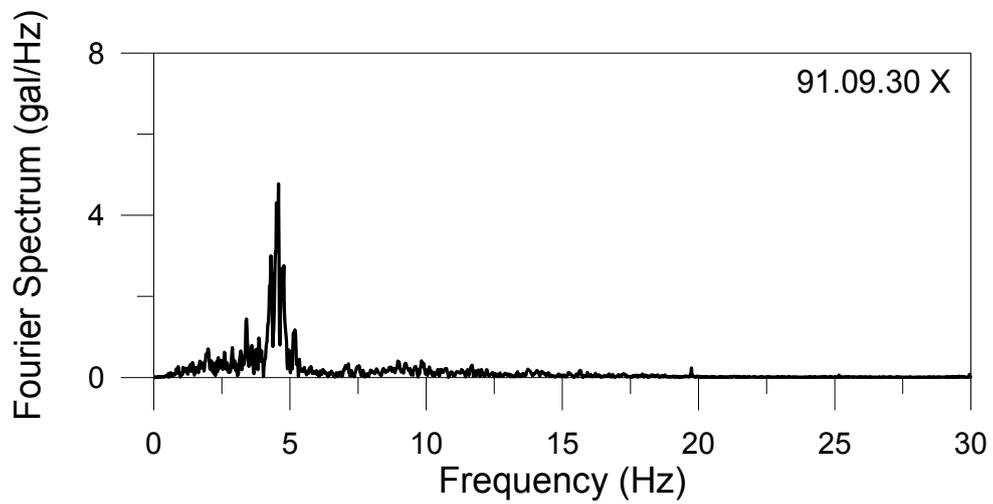


圖 6.10-9 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.30)

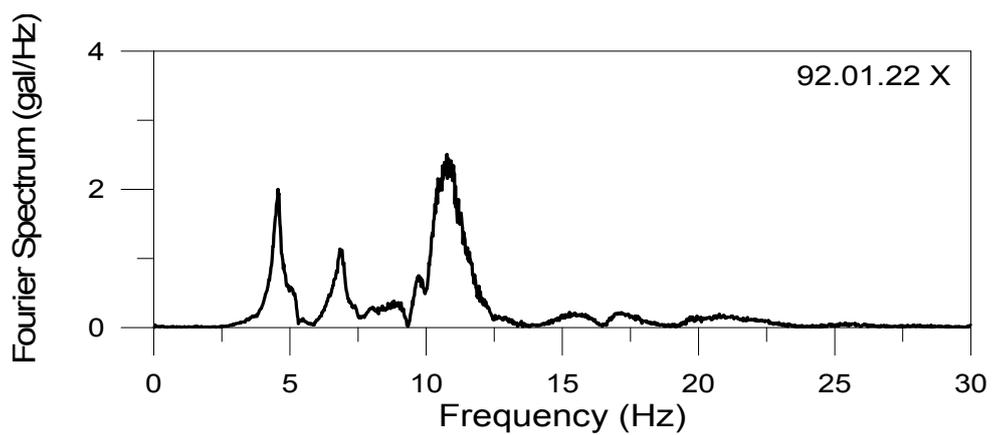


圖 6.10-10 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.01.22)

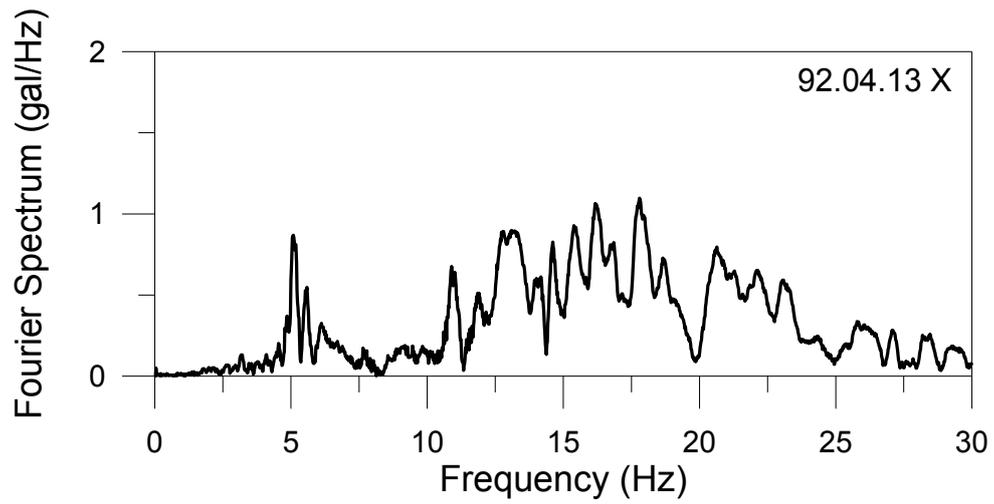


圖 6.10-11 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.04.13)

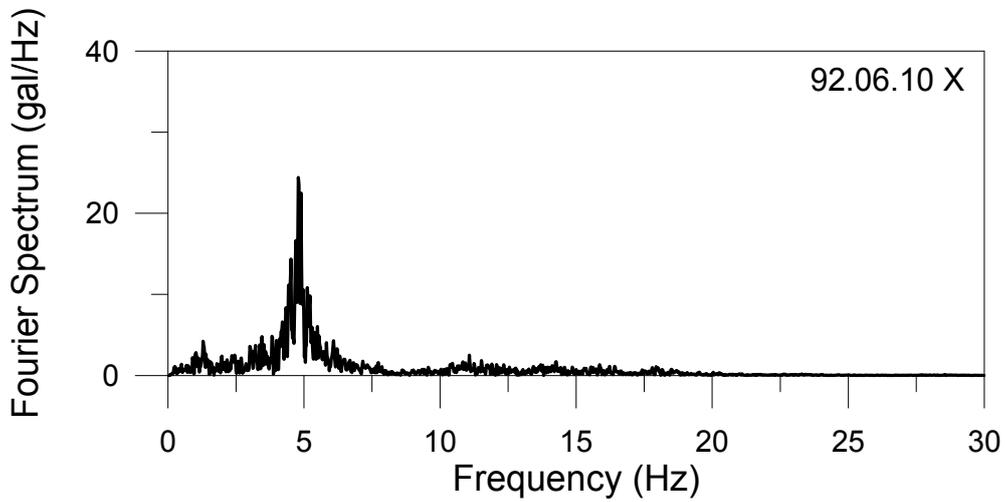


圖 6.10-12 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.06.10)

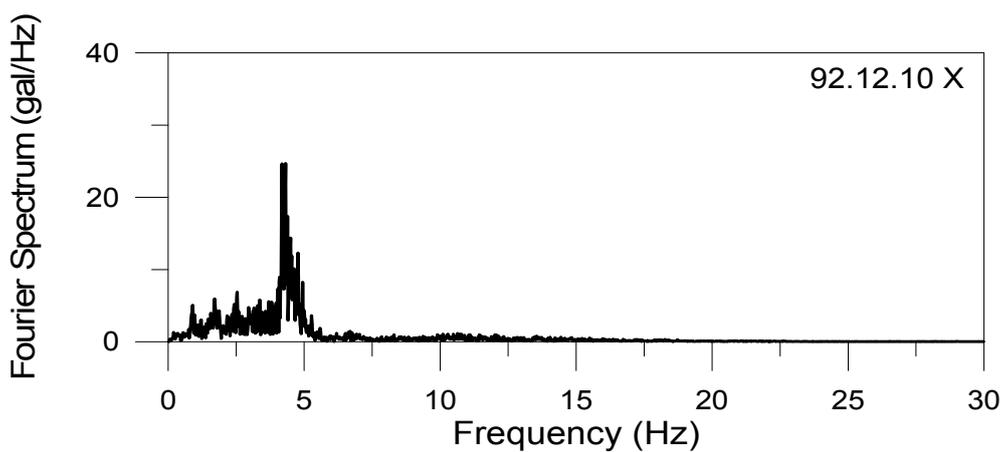


圖 6.10-13 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.12.10)

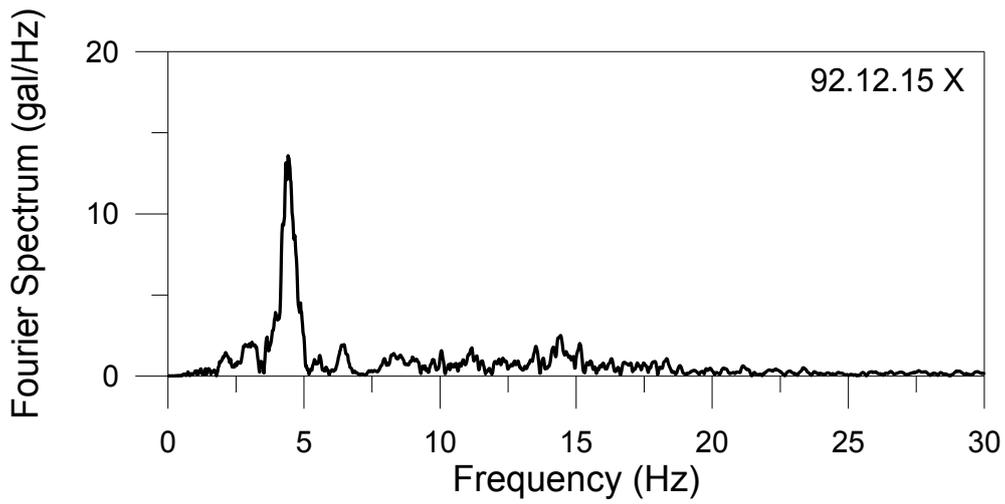


圖 6.10-14 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.12.15)

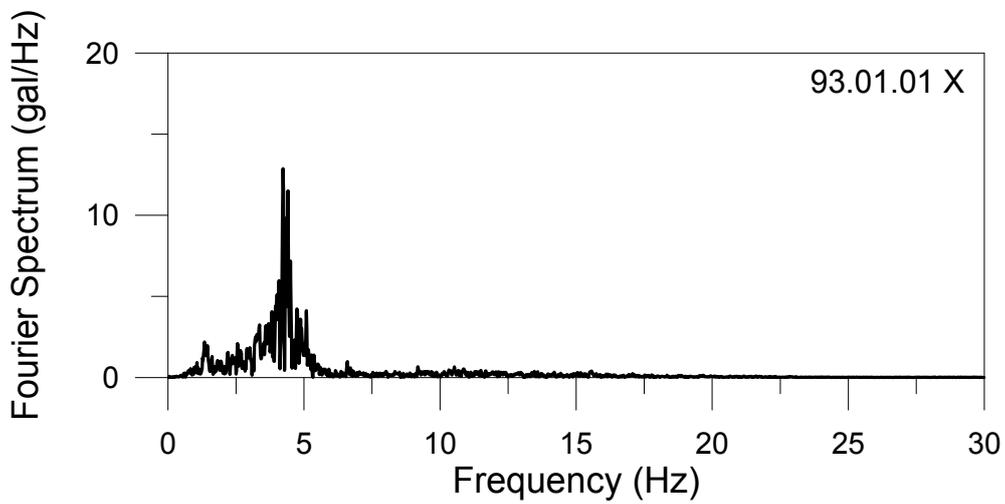


圖 6.10-15 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.01.01)

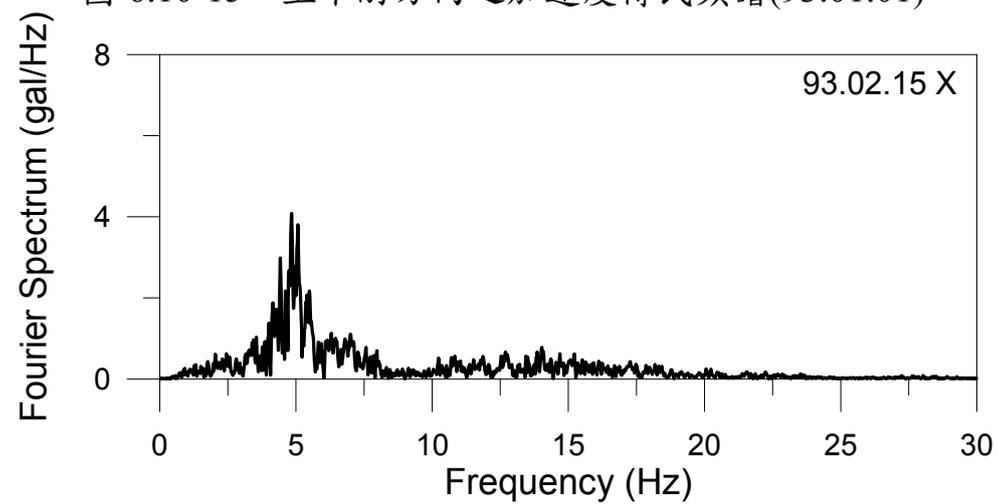


圖 6.10-16 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.02.15)

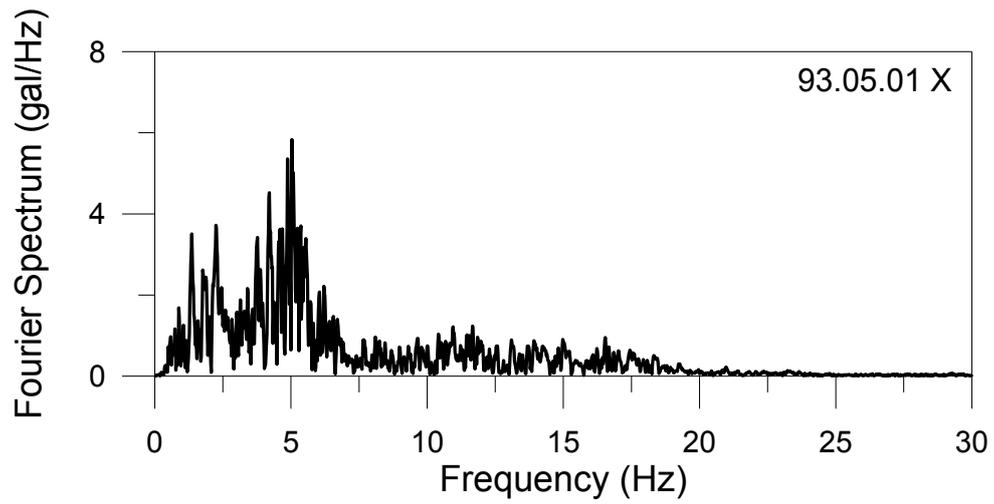


圖 6.10-17 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.05.01)

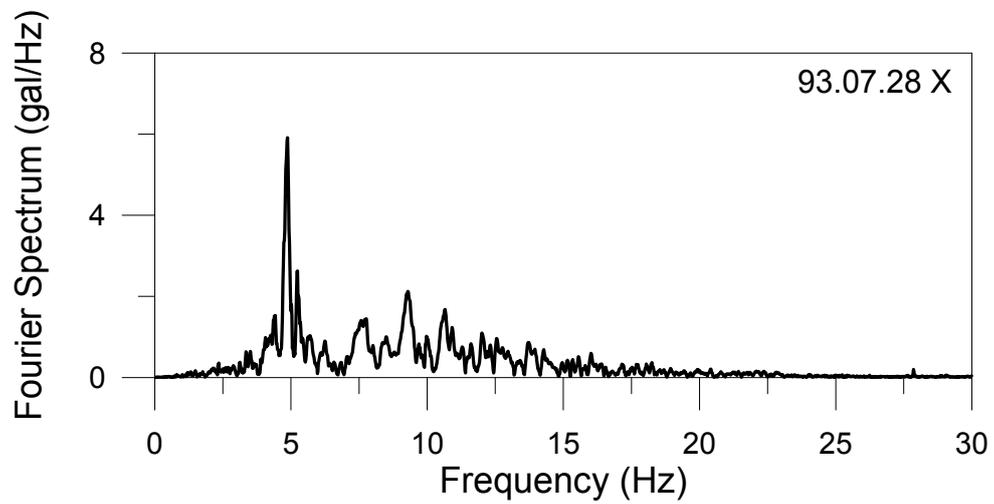


圖 6.10-18 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.07.28)

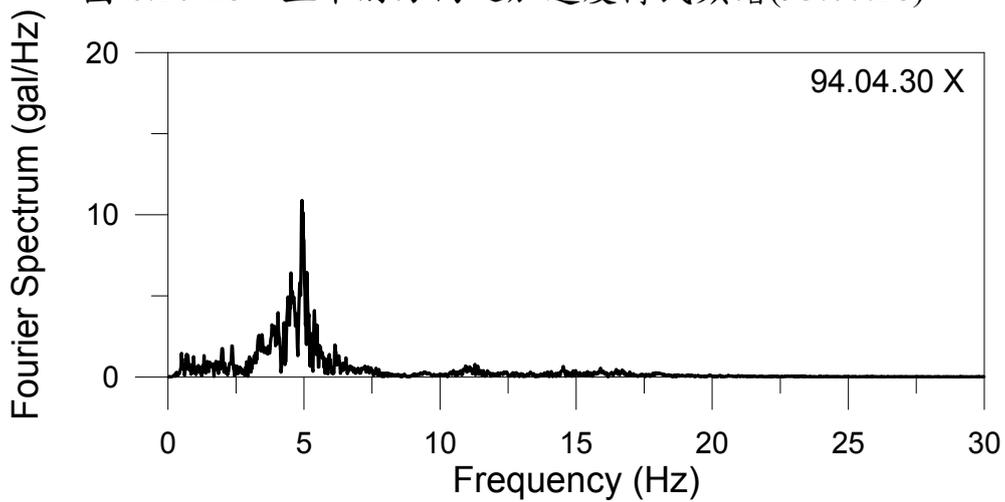


圖 6.10-19 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.04.30)

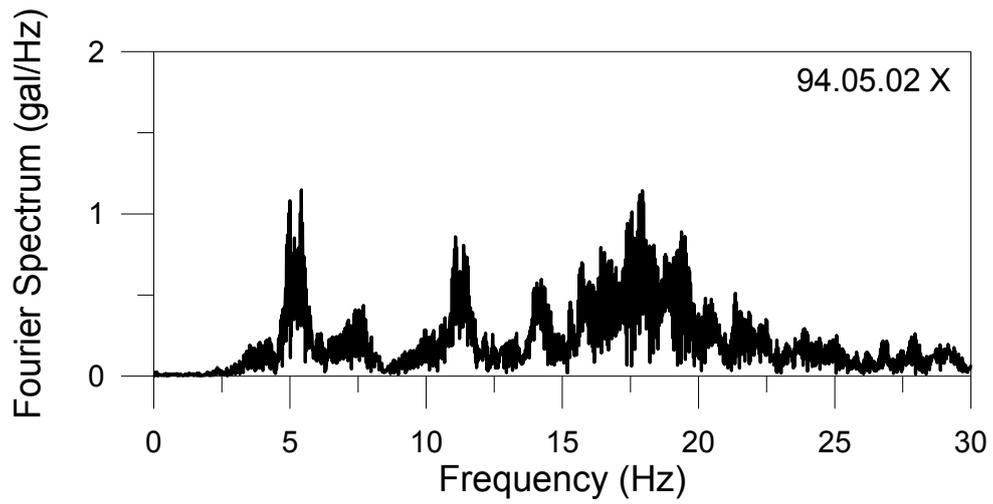


圖 6.10-20 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.05.02)

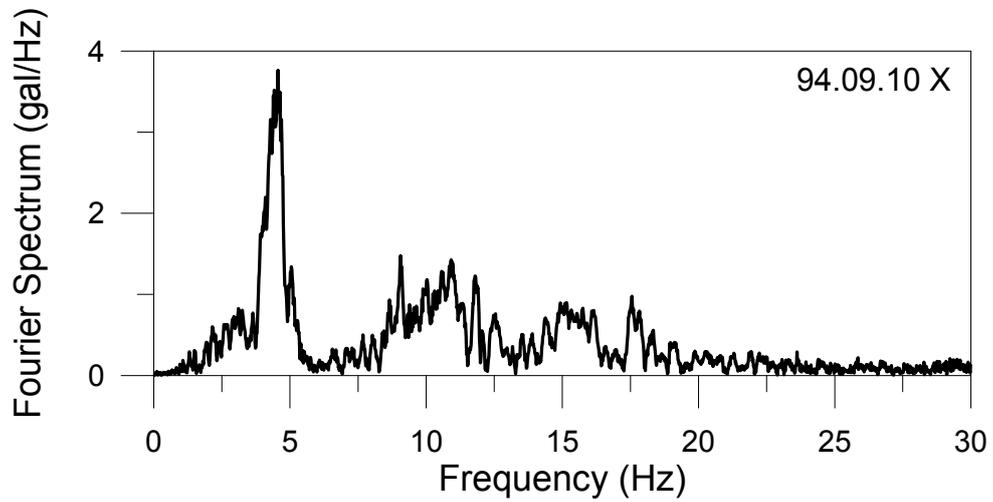


圖 6.10-21 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.09.10)

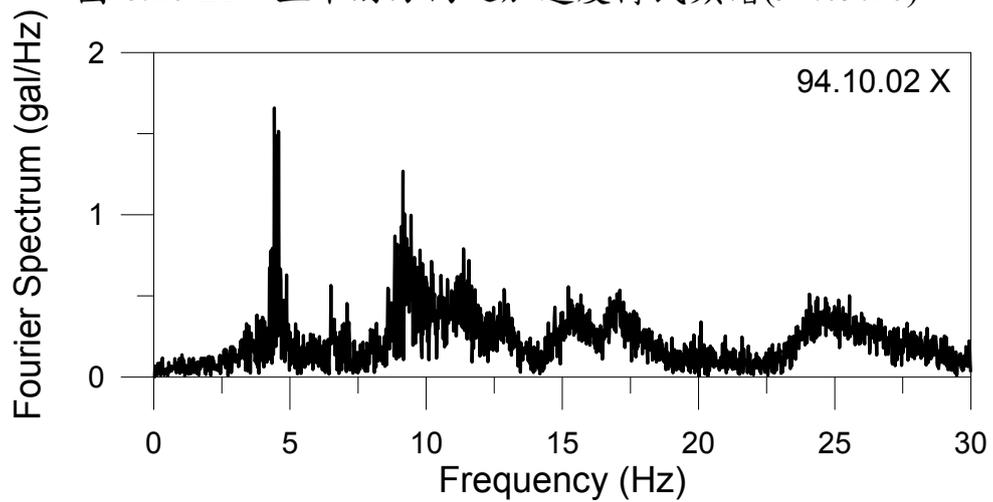


圖 6.10-22 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.10.02)

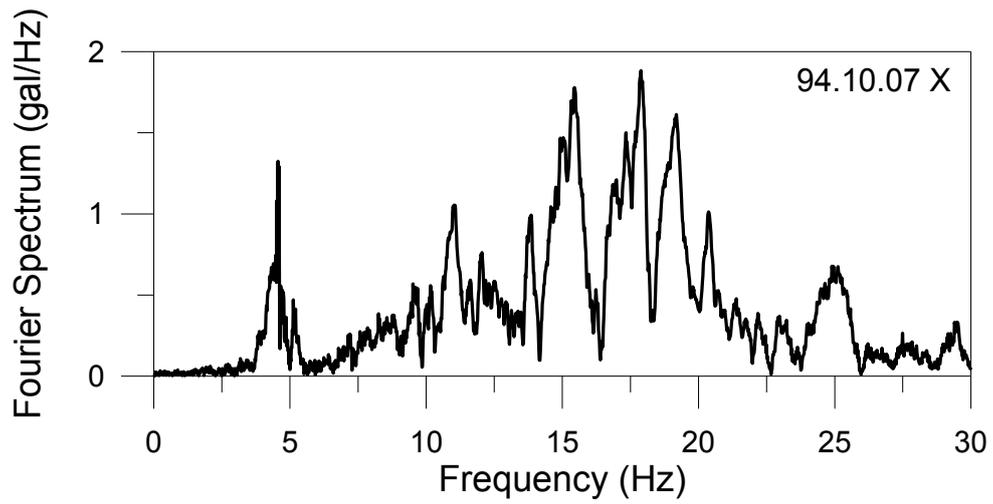


圖 6.10-23 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.10.07)

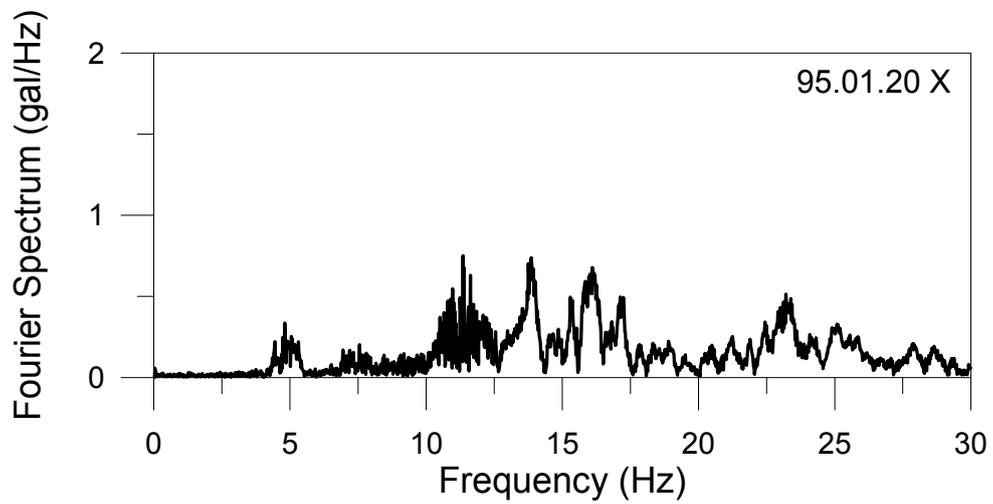


圖 6.10-24 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.01.20)

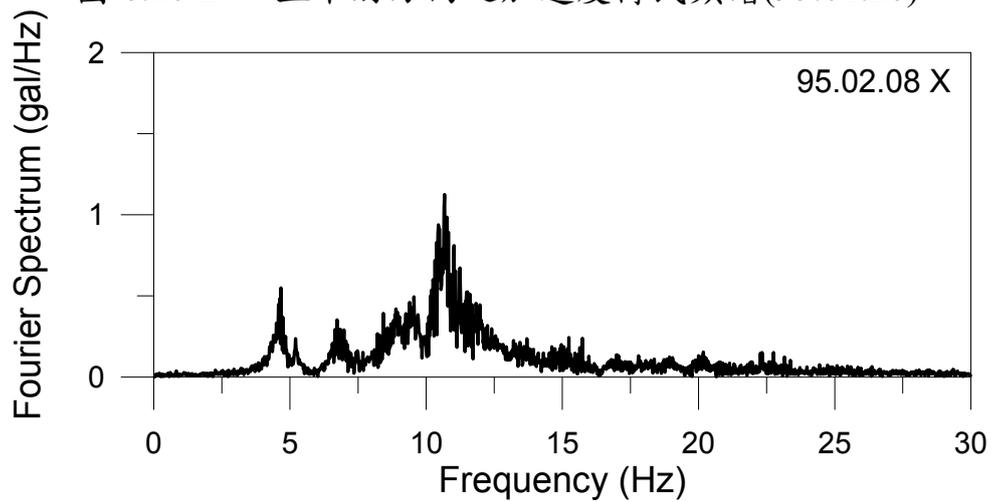


圖 6.10-25 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.02.08)

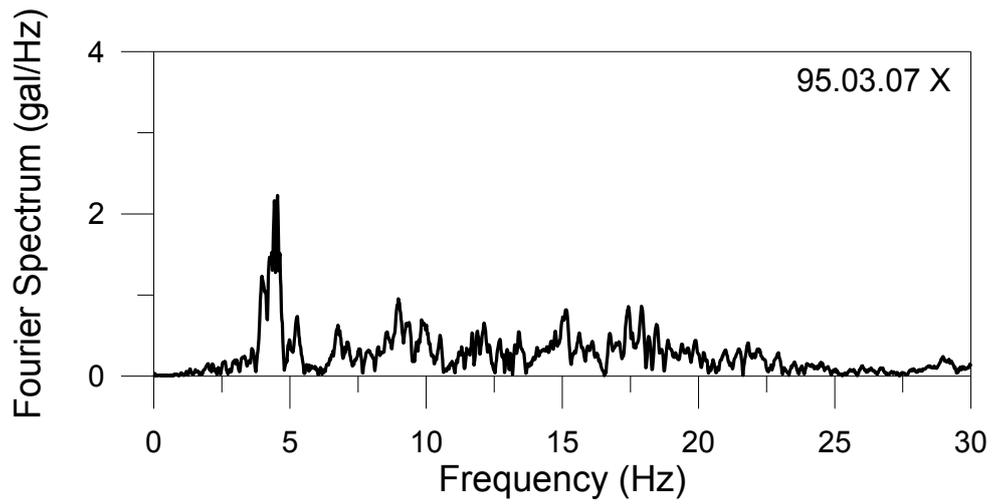


圖 6.10-26 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.03.07)

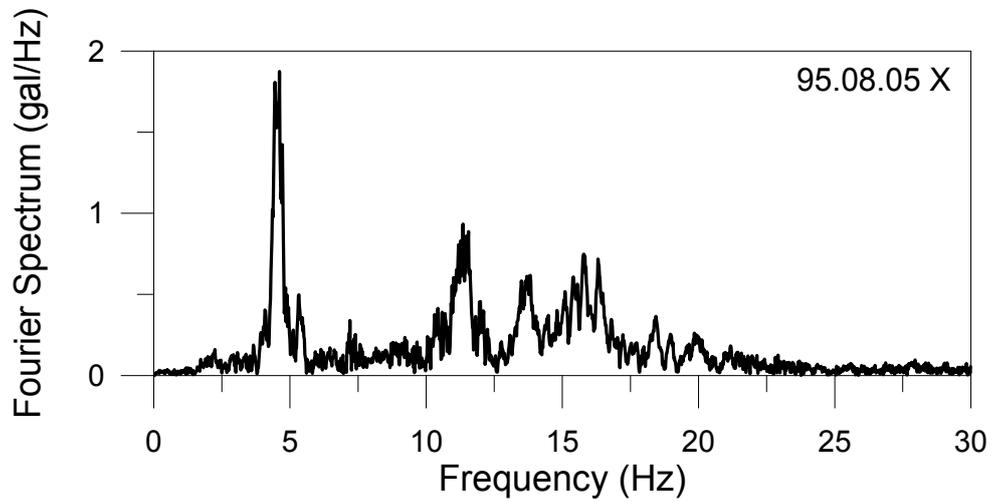


圖 6.10-27 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.08.05)

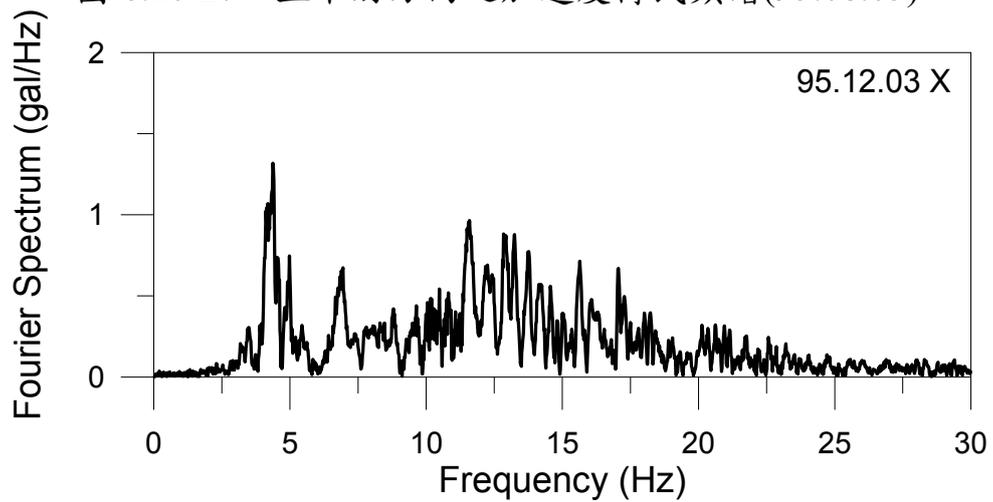


圖 6.10-28 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.12.03)

6.2.3 系統識別分析

本案將根據 6.1.2 節所述之識別模式針對谷關壩之振動特性進行系統識別分析，由於谷關壩僅於壩體安裝一部強震儀，且壩底無安裝強震儀(即無輸入擾動資料)，因此本案將採用 AR 識別模式進行分析，識別之階數採用 100。

圖 6.11-1 至圖 6.11-28 為歷次地震事件之壩體上下游方向經系統識別所得之傳遞函數，由圖可知，傳遞函數之趨勢與傅氏頻譜的趨勢十分相近。水庫放空時識別所得之基本振動頻率與阻尼比整理如表 6.2 所示，由結果可知，振動頻率除 90.12.28 地震事件所得之振動頻率(3.98Hz)偏離稍大以外，91 年至 95 年識別所得之頻率均十分接近，介於 4.47Hz~4.85Hz 之間，變化的程度約為 $(4.85-4.47)/4.47=8.5\%$ 。90.12.28 之壩體加速度為 42gal (較大)，其餘 4 次之壩體加速度則界於 6gal~14gal 之間，加速度大小可能對於分析結果亦有所影響。此外，若將歷次地震事件識別所得之振動頻率與水位高程進行繪圖，其分佈如圖 6.12 所示，圖中頻率主要分佈於 4.0Hz~5.25Hz 之間，其變異性較大，振動頻率與水位高程似無一顯著之線性關係。由於本案之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)，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可能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的趨勢較不顯著。

表 6.2 系統識別所得之基本振動頻率(水庫放空)

| 日期 | 頻率(Hz) | 阻尼比(%) |
|----------|--------|--------|
| 90.12.28 | 3.98 | 4.20 |
| 91.09.27 | 4.58 | 2.18 |
| 92.01.22 | 4.47 | 2.65 |
| 93.07.28 | 4.85 | 1.64 |
| 95.03.07 | 4.45 | 2.16 |

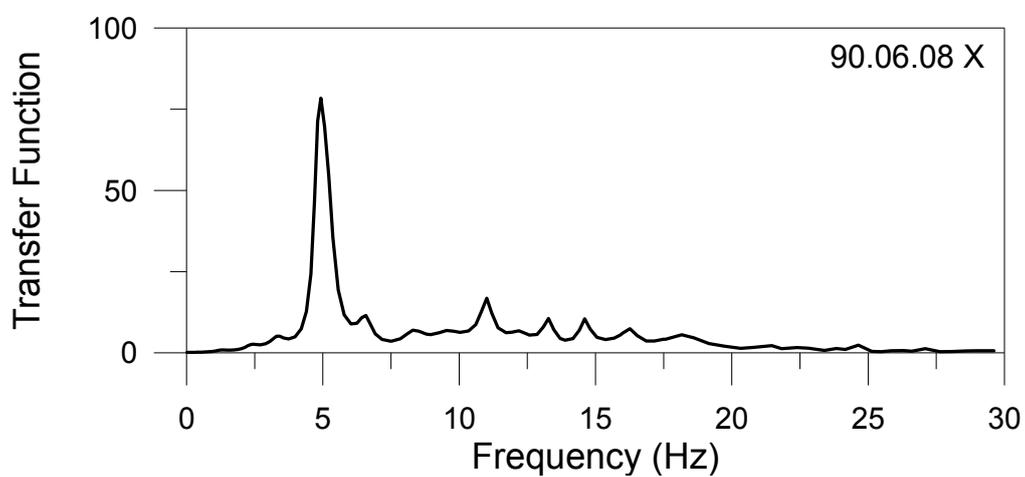


圖 6.11-1 上下游方向之加速度傳遞函數(90.06.08)

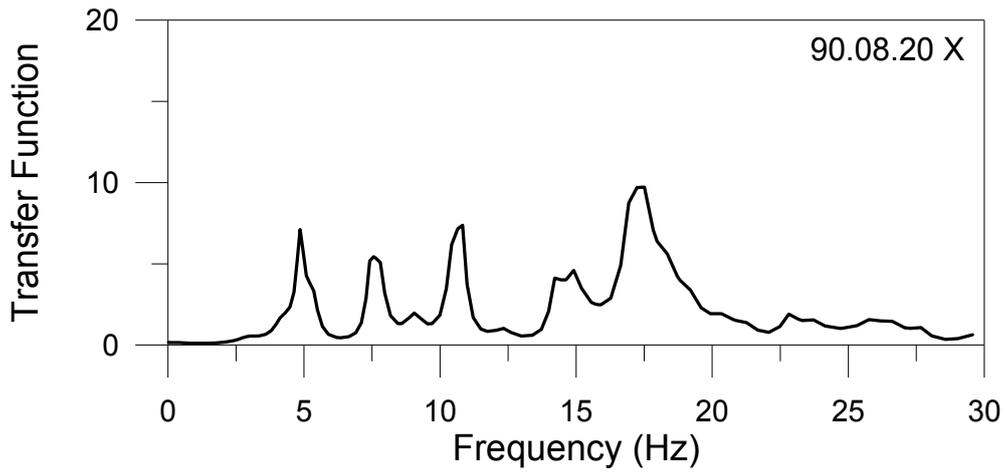


圖 6.11-2 上下游方向之加速度傳遞函數(90.08.20)

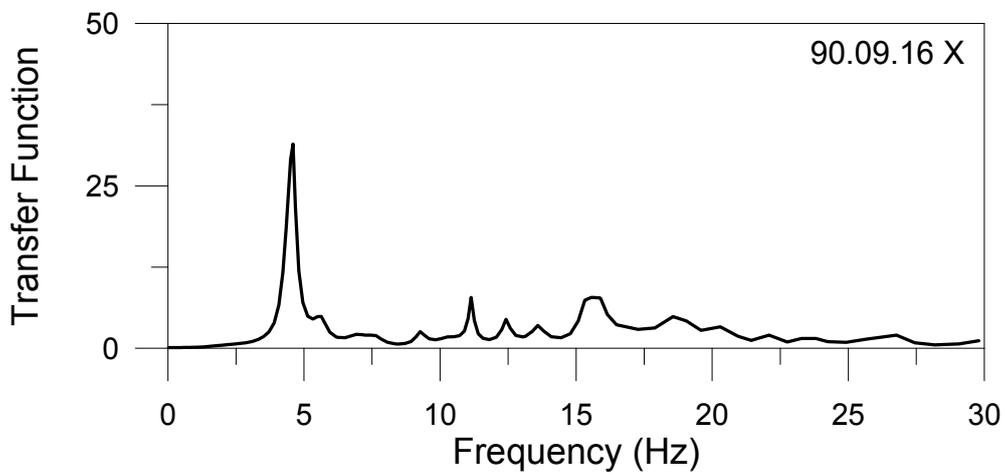


圖 6.11-3 上下游方向之加速度傳遞函數(90.09.16)

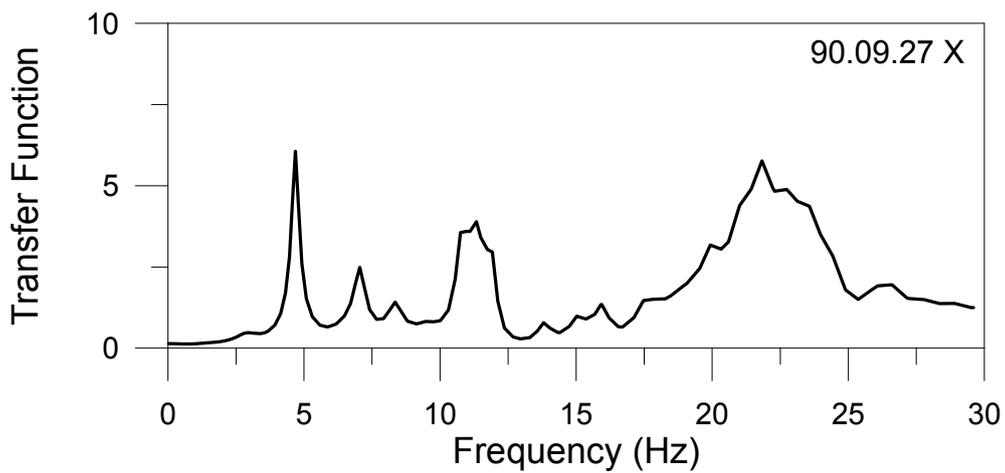


圖 6.11-4 上下游方向之加速度傳遞函數(90.09.27)

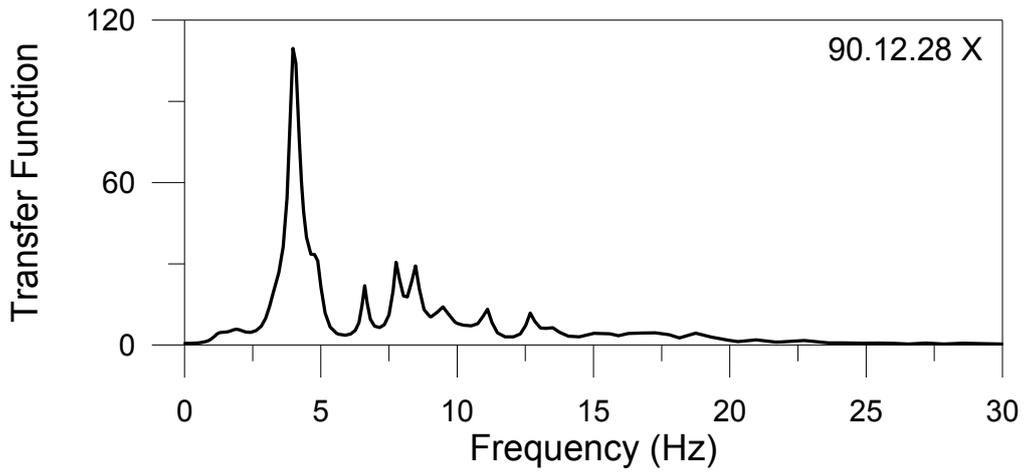


圖 6.11-5 上下游方向之加速度傳遞函數(90.12.28)

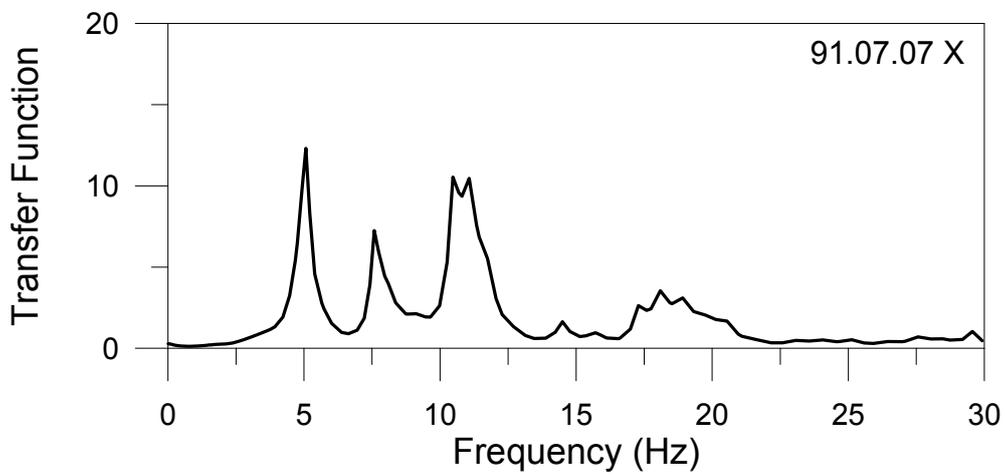


圖 6.11-6 上下游方向之加速度傳遞函數(91.07.07)

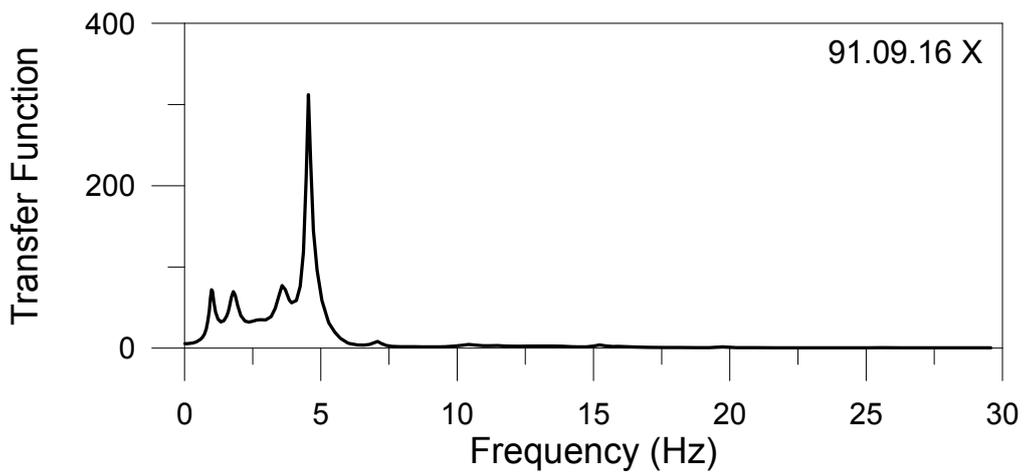


圖 6.11-7 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.16)

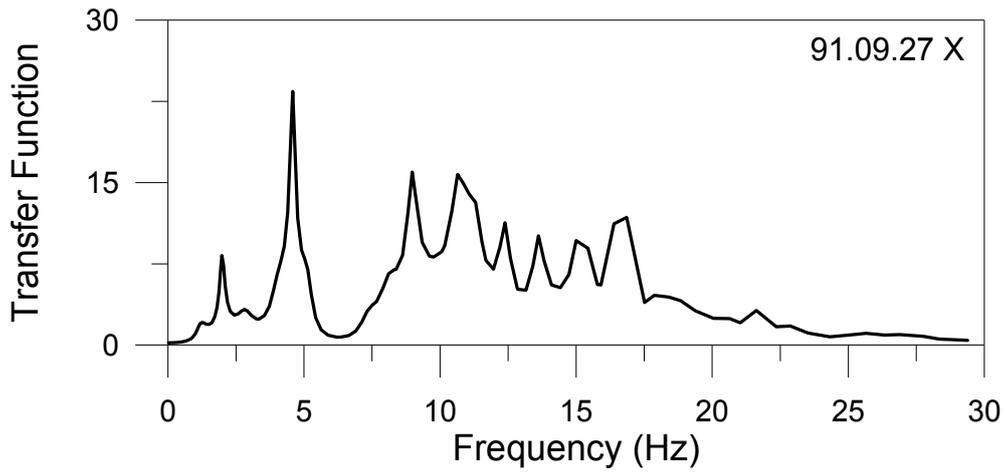


圖 6.11-8 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.27)

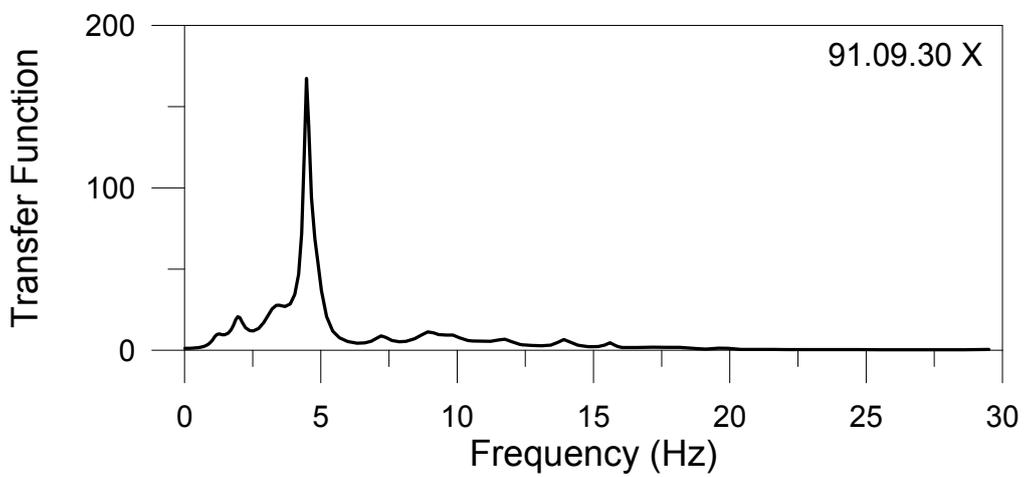


圖 6.11-9 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.30)

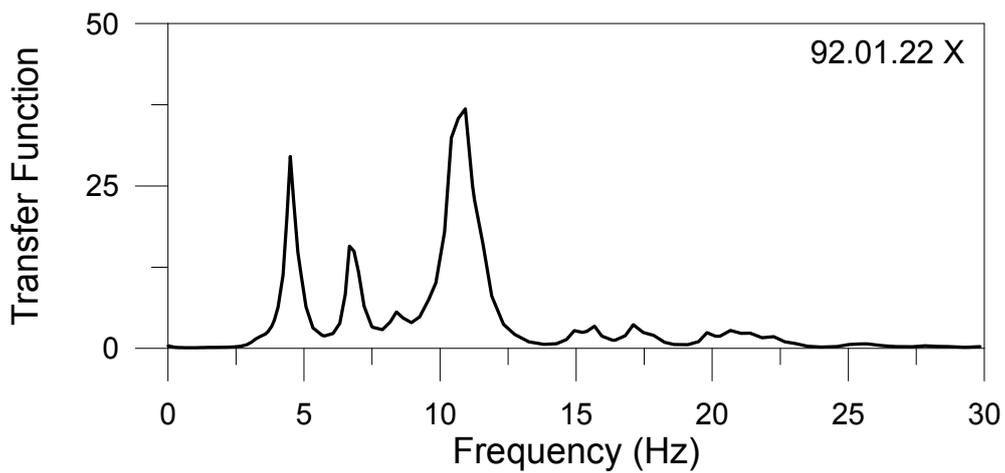


圖 6.11-10 上下游方向之加速度傳遞函數(92.01.22)

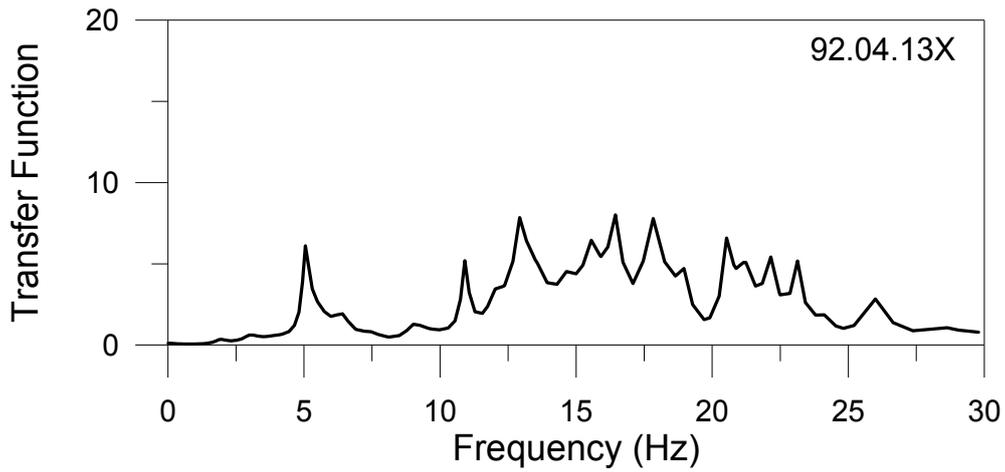


圖 6.11-11 上下游方向之加速度傳遞函數(92.04.13)

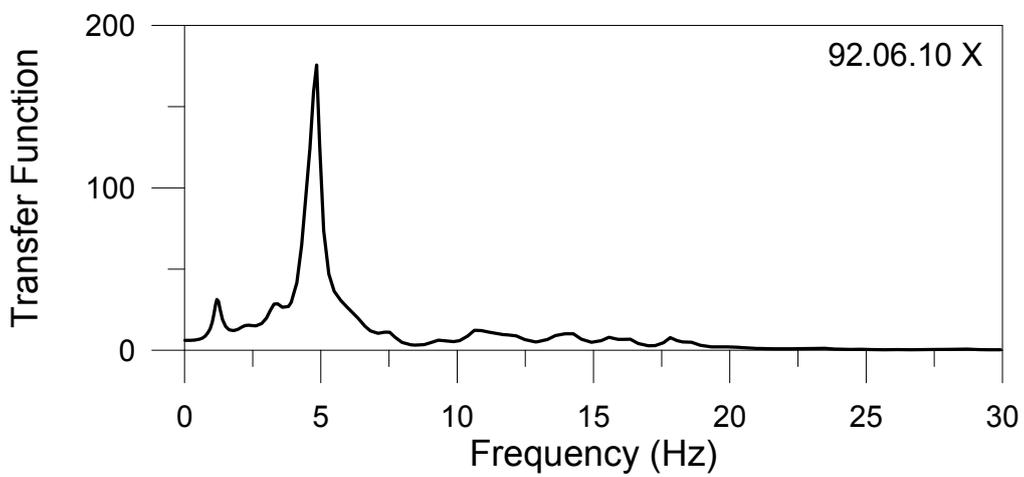


圖 6.11-12 上下游方向之加速度傳遞函數(92.06.10)

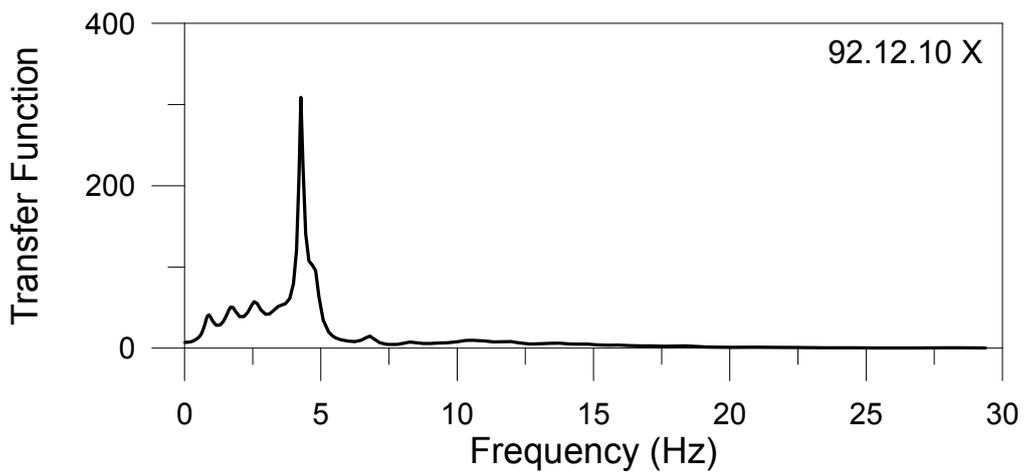


圖 6.11-13 上下游方向之加速度傳遞函數(92.12.10)

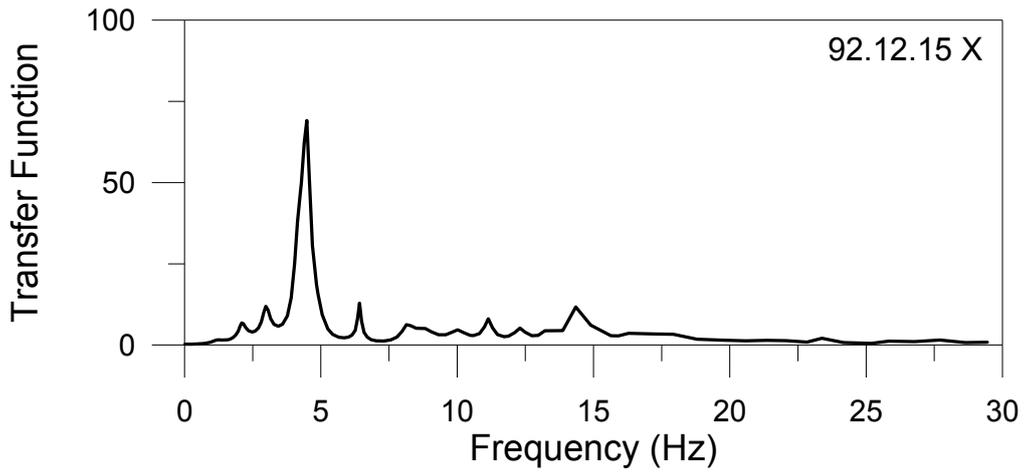


圖 6.11-14 上下游方向之加速度傳遞函數(92.12.15)

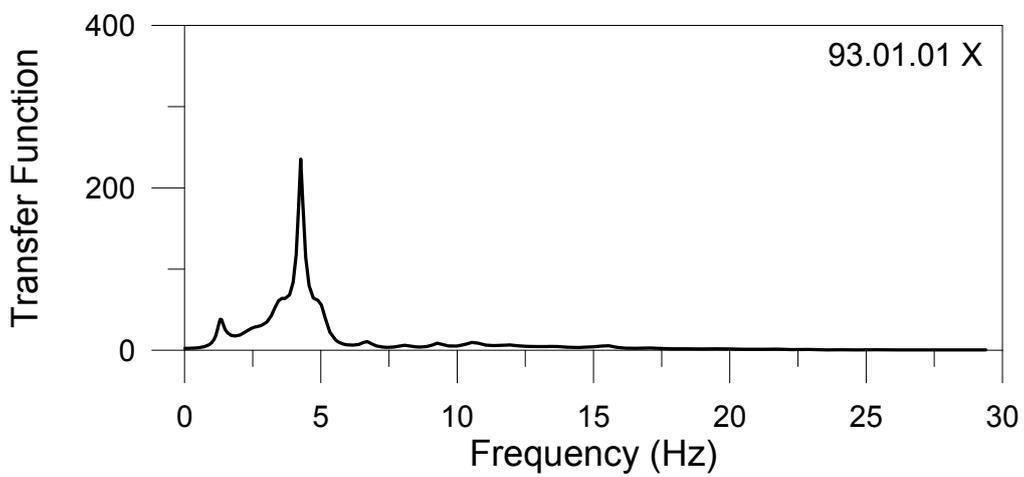


圖 6.11-15 上下游方向之加速度傳遞函數(93.01.01)

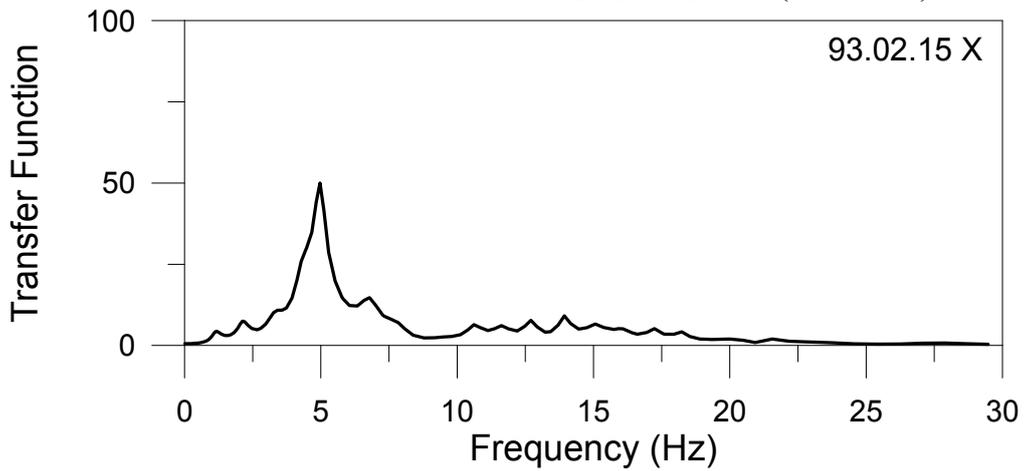


圖 6.11-16 上下游方向之加速度傳遞函數(93.02.15)

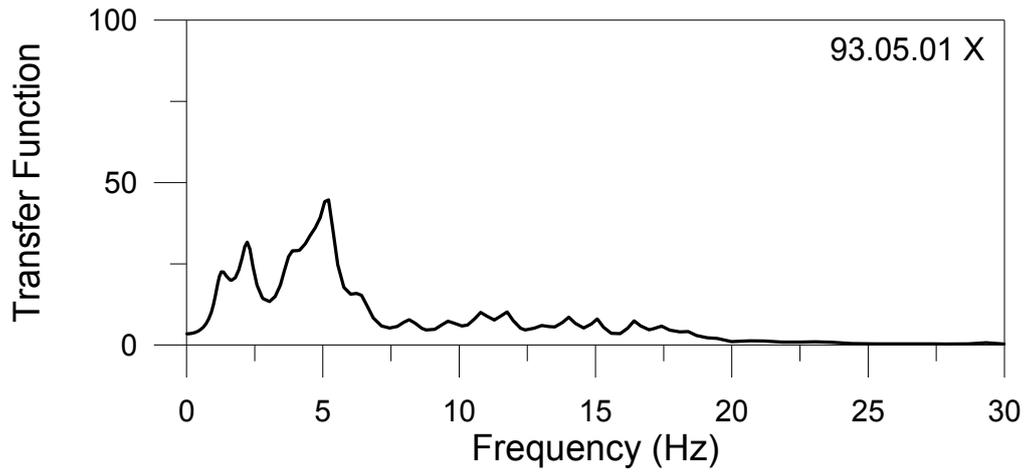


圖 6.11-17 上下游方向之加速度傳遞函數(93.05.01)

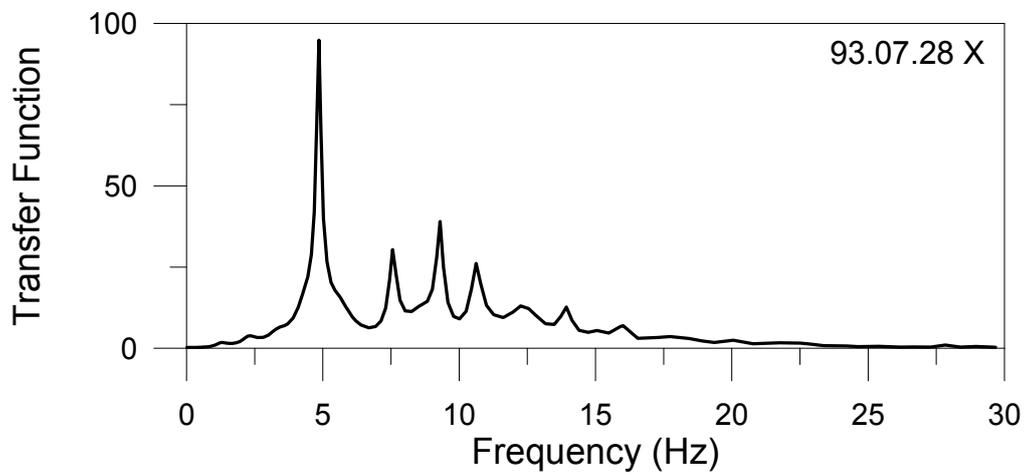


圖 6.11-18 上下游方向之加速度傳遞函數(93.07.28)

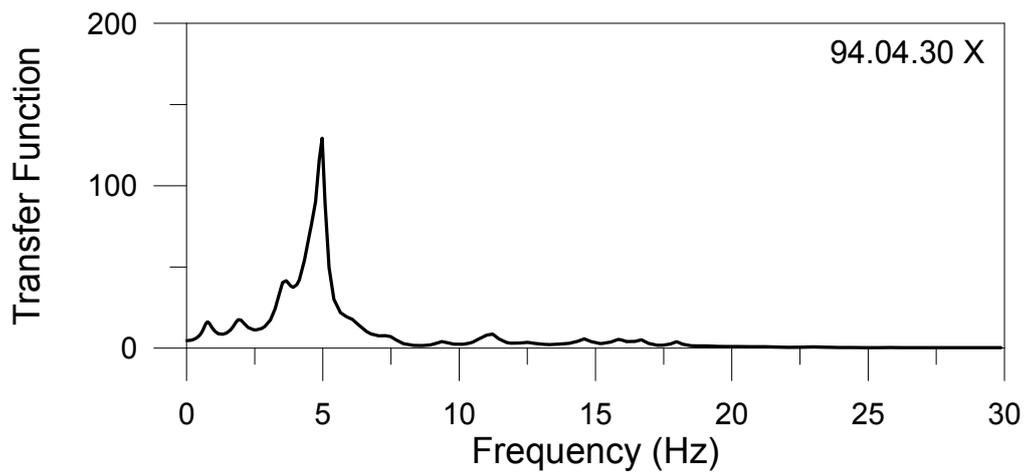


圖 6.11-19 上下游方向之加速度傳遞函數(94.04.30)

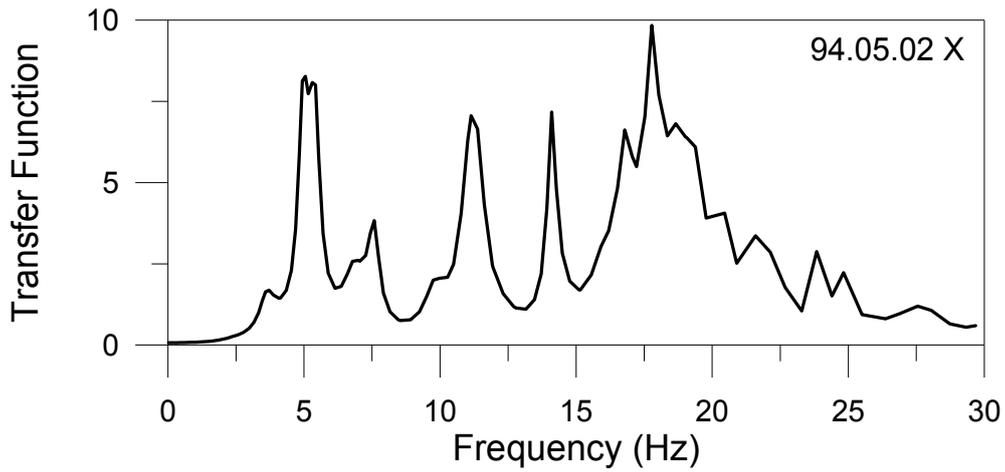


圖 6.11-20 上下游方向之加速度傳遞函數(94.05.02)

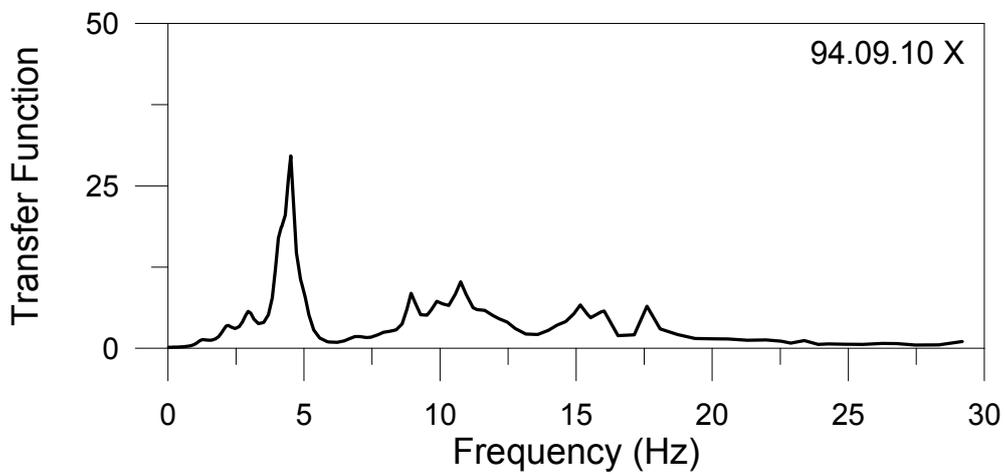


圖 6.11-21 上下游方向之加速度傳遞函數(94.09.10)

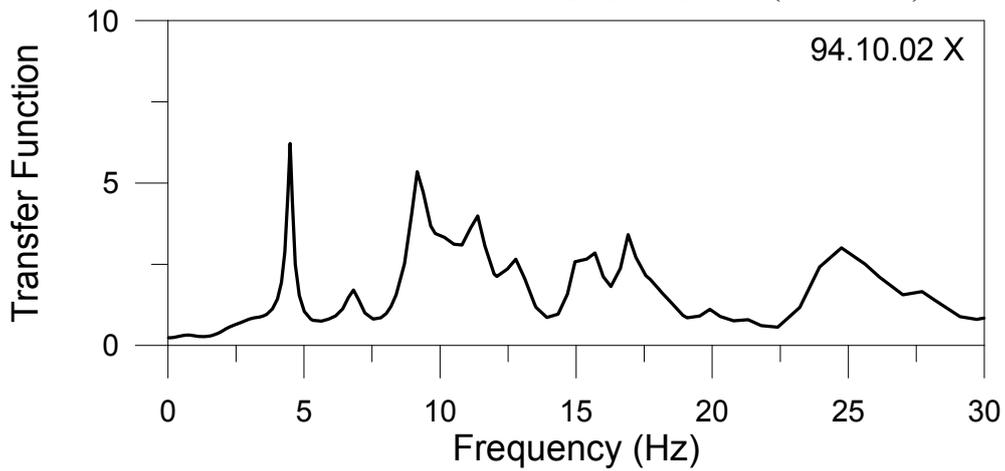


圖 6.11-22 上下游方向之加速度傳遞函數(94.10.02)

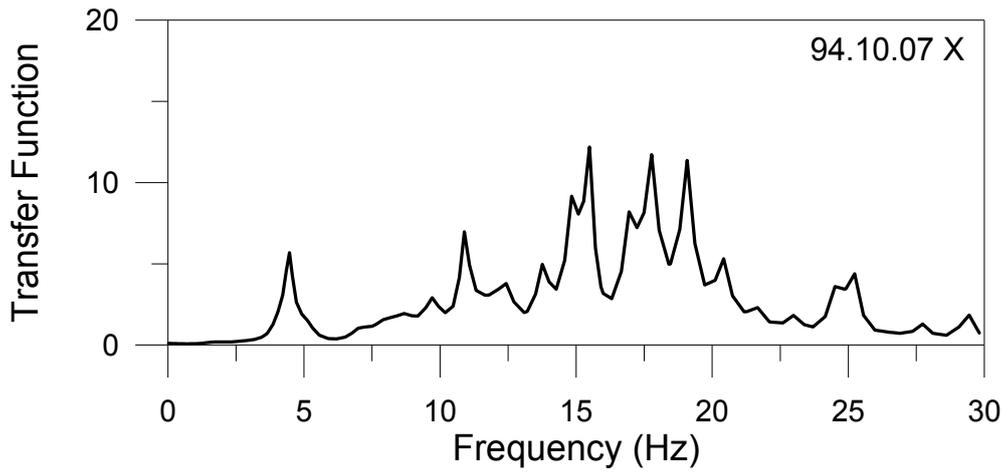


圖 6.11-23 上下游方向之加速度傳遞函數(94.10.07)

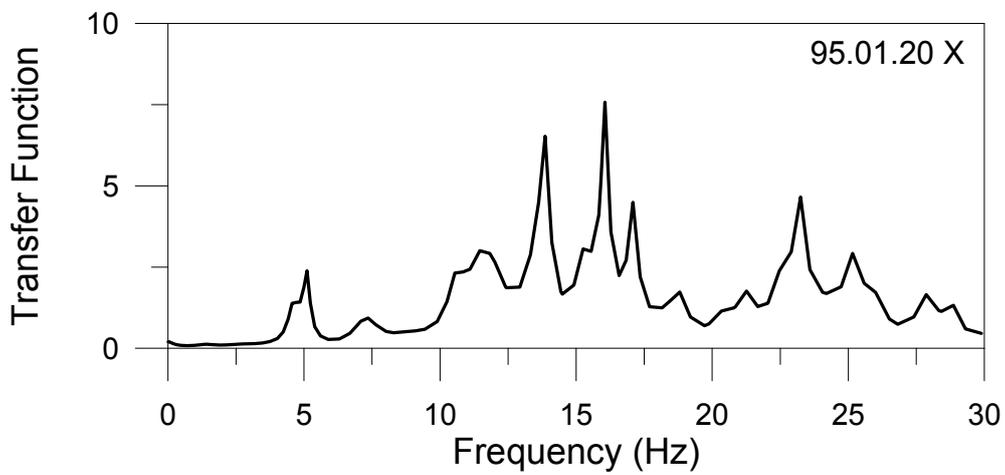


圖 6.11-24 上下游方向之加速度傳遞函數(95.01.20)

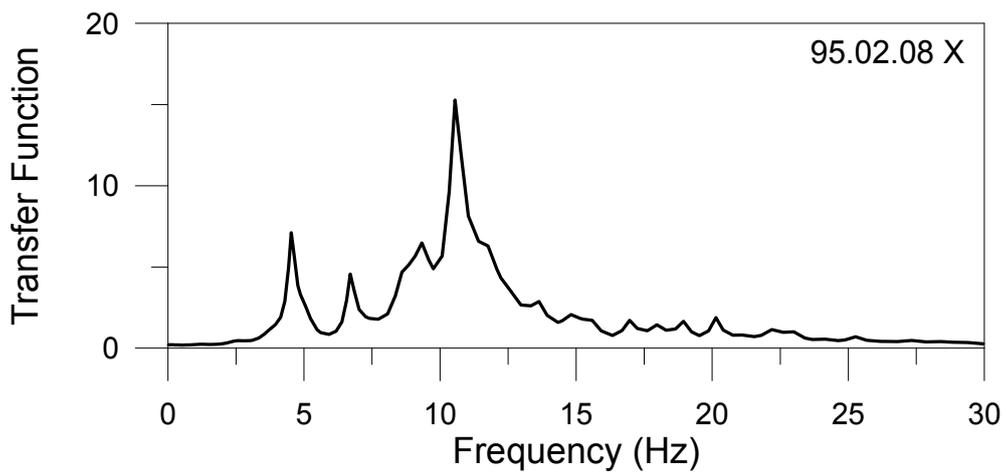


圖 6.11-25 上下游方向之加速度傳遞函數(95.02.08)

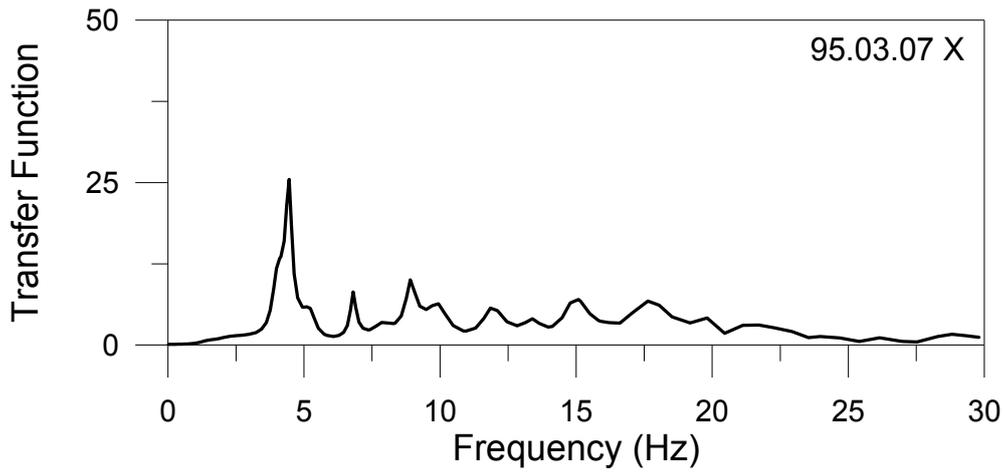


圖 6.11-26 上下游方向之加速度傳遞函數(95.03.07)

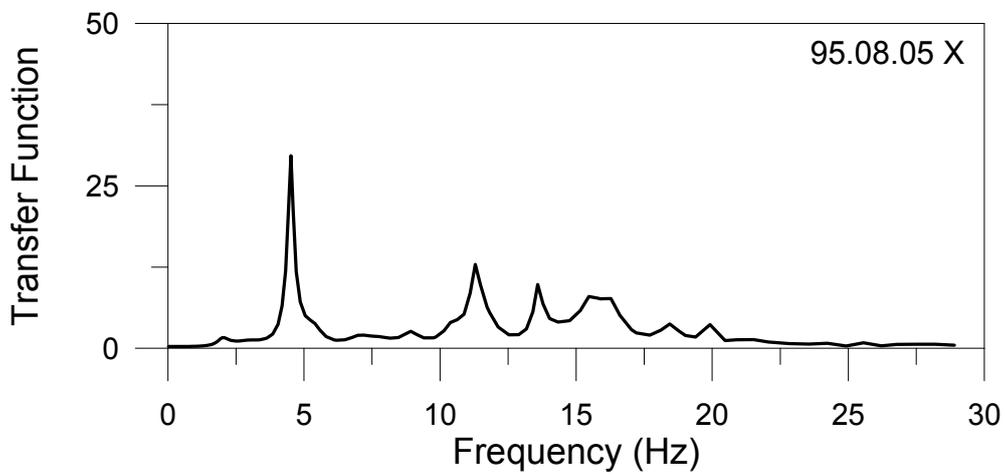


圖 6.11-27 上下游方向之加速度傳遞函數(95.08.05)

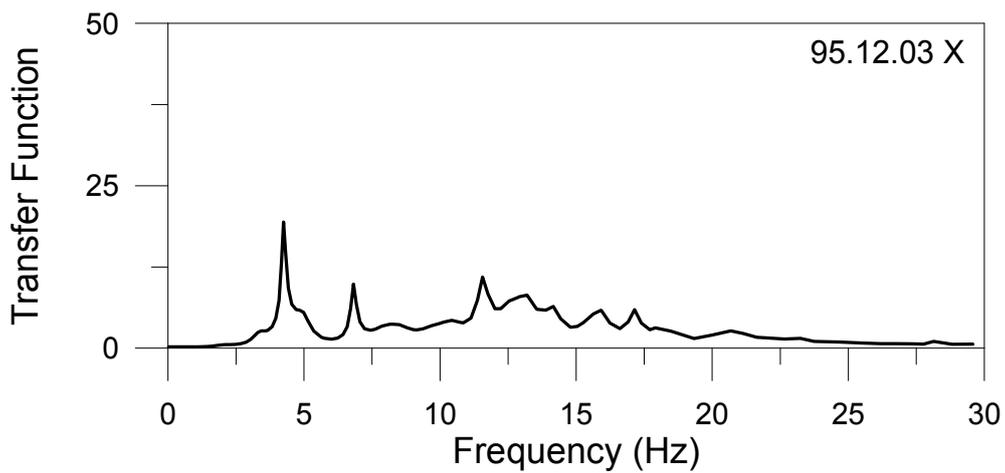


圖 6.11-28 上下游方向之加速度傳遞函數(95.12.03)

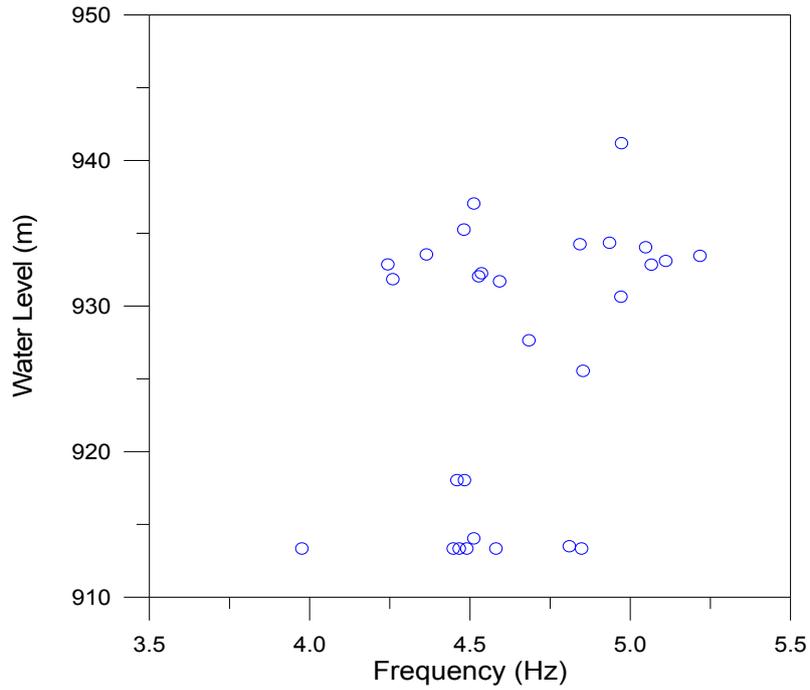


圖 6.12 壩體振動頻率與其對應之水位高程分佈圖

6.3 天輪壩之系統識別分析

天輪壩之強震儀配置圖如圖 6.13 所示，其壩體共安裝一部強震儀，於 90 年至 95 年間共記錄 28 筆地震資料，如表 6.3 所示。

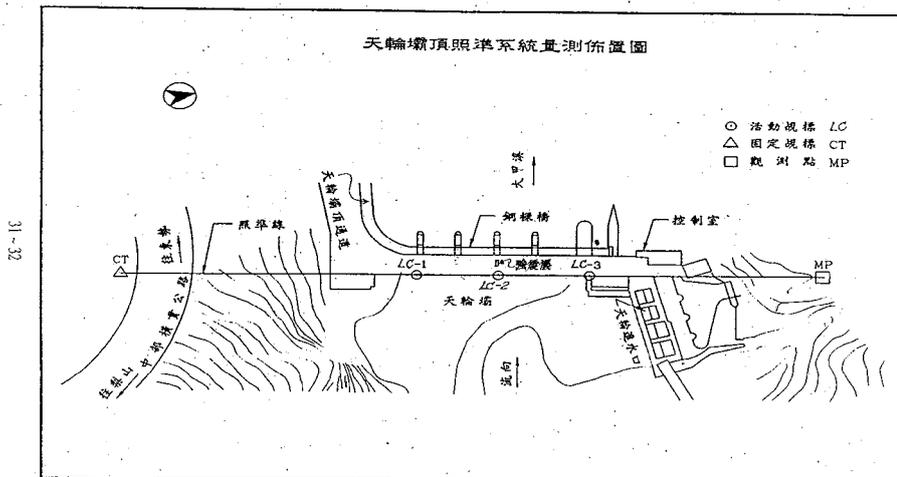


圖 6.13 天輪壩之強震儀配置圖

表 6.3 天輪壩之地震事件記錄資料

| 日期 | 時間 | X軸 | Y軸 | 震度 | (EL.) | 備註 |
|----------|----------|------|------|----|--------|----|
| 90.06.08 | 12:08:05 | 18.0 | 17.0 | 3 | 745.90 | |
| 90.07.09 | 02:45:19 | 10.0 | 24.0 | 3 | 746.20 | |
| 90.09.16 | 20:23:42 | 58.0 | 63.5 | 4 | 745.90 | |
| 90.11.04 | 16:45:55 | 8.0 | 8.0 | 3 | 746.10 | |
| 90.11.21 | 16:27:58 | 6.0 | 17.0 | 3 | 746.10 | |
| 91.03.31 | 14:53:58 | 8.0 | 10.0 | 3 | 746.30 | |
| 91.04.07 | 22:48:09 | 13.0 | 16.0 | 3 | 746.50 | |
| 91.04.22 | 20:48:53 | 21.0 | 18.0 | 4 | 746.30 | |
| 91.06.12 | 19:48:39 | 10.0 | 14.0 | 3 | 745.30 | |
| 91.07.10 | 16:51:54 | 16.8 | 13.3 | 3 | 746.50 | |
| 91.09.27 | 12:58:35 | 23.5 | 55.8 | 4 | 747.90 | |
| 92.02.09 | 13:23:11 | 5.8 | 10.0 | 3 | 746.00 | |
| 92.04.13 | 05:53:19 | 10.0 | 20.5 | 3 | 746.50 | |
| 92.08.03 | 23:07:04 | 3.8 | 8.5 | 3 | 746.50 | |
| 92.09.11 | 06:25:01 | 7.8 | 9.5 | 3 | 746.30 | |
| 92.12.15 | 07:11:26 | 53.5 | 59.3 | 4 | 744.40 | |
| 93.02.10 | 08:19:56 | 2.8 | 2.3 | 2 | 746.80 | |
| 93.03.01 | 01:49:00 | 5.8 | 8.5 | 3 | 746.30 | |
| 93.05.01 | 15:46:55 | 3.8 | 7.5 | 2 | 746.20 | |
| 93.10.26 | 05:09:02 | 8.3 | 8.3 | 3 | 733.50 | |
| 94.04.09 | 07:55:46 | 7.5 | 3.0 | 2 | 733.60 | |
| 94.04.11 | 19:18:22 | 12.5 | 3.3 | 3 | 734.00 | |
| 94.05.19 | 06:07:04 | 3.5 | 8.3 | 3 | 739.10 | |
| 94.09.10 | 19:41:04 | 4.0 | 7.8 | 3 | 738.50 | |
| 94.09.27 | 03:59:59 | 2.8 | 10.3 | 3 | 735..3 | |
| 95.02.24 | 04:07:52 | 7.3 | 5.3 | 2 | 745.89 | |
| 95.04.20 | 15:19:03 | 5.3 | 5.5 | 2 | 745.84 | |
| 95.08.05 | 23:15:53 | 8.8 | 9.5 | 3 | 745.99 | |

(註：重力加速度之單位為 gal，水庫水位之單位為 m)

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，俾清楚呈現強震儀所記錄之振動訊號，同時可檢視強震儀是否正常運作。本案於期中報告時先行選擇 5 筆壩體加速度大於 20gal 之振動訊號進行分析，雙軸向之加速度峰值整理如表 6.3 所示(單位:gal)，其中，X 向為壩軸方向，Y 向為壩體上下游方向。由於壩體之振動通常以上下游方向最為顯著，因此本研究將以壩體上下游方向(Y 向)之振動加速度歷時訊號進行系統識別分析。

圖 6.14-1 至圖 6.14-28 為歷次地震事件之壩體上下游方向加速度歷時，由圖可知，強震儀之訊號普遍有隨地震波動的趨勢，惟部份地震事件之歷時訊號與其它訊號之趨勢差異較大，如圖 6.14-6，或是因振動反應較小，歷時訊號之解析度較差，較顯著者如圖 6.14-17、6.14-21、6.14-22 等。解析度不足之歷時訊號於頻譜分析時將有較多雜訊的影響，頻譜圖的趨勢將較無法清晰呈現。

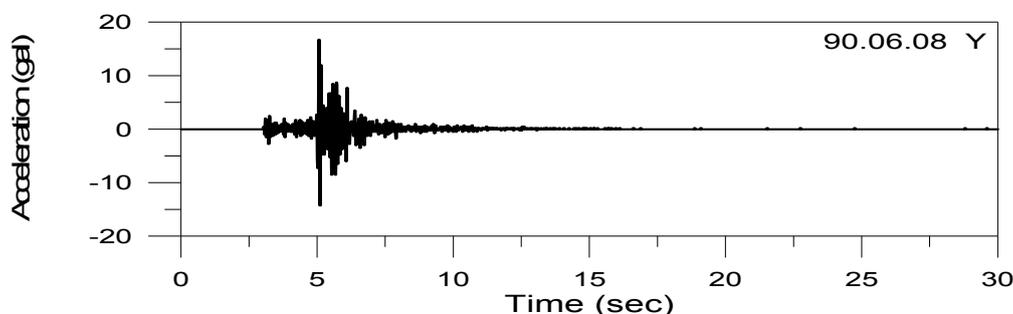


圖 6.14-1 上下游方向之加速度歷時(90.06.08)

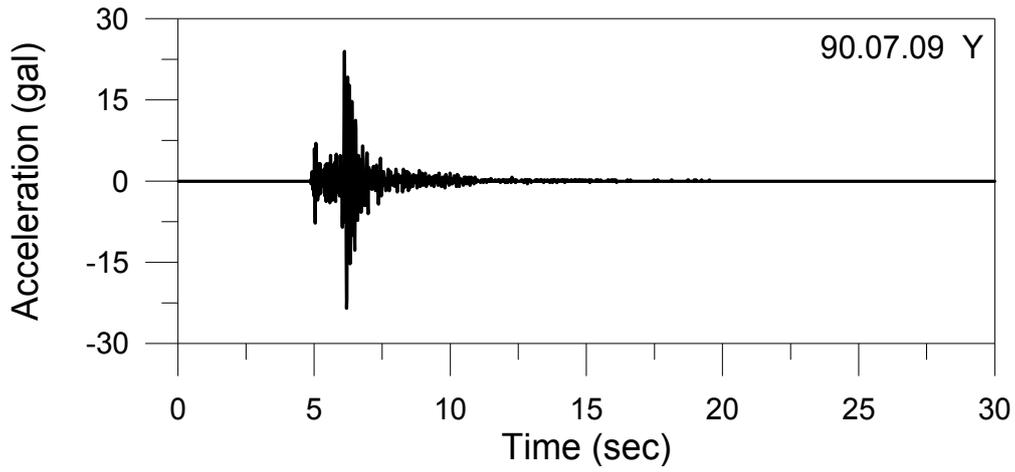


圖 6.14-2 上下游方向之加速度歷時(90.07.09)

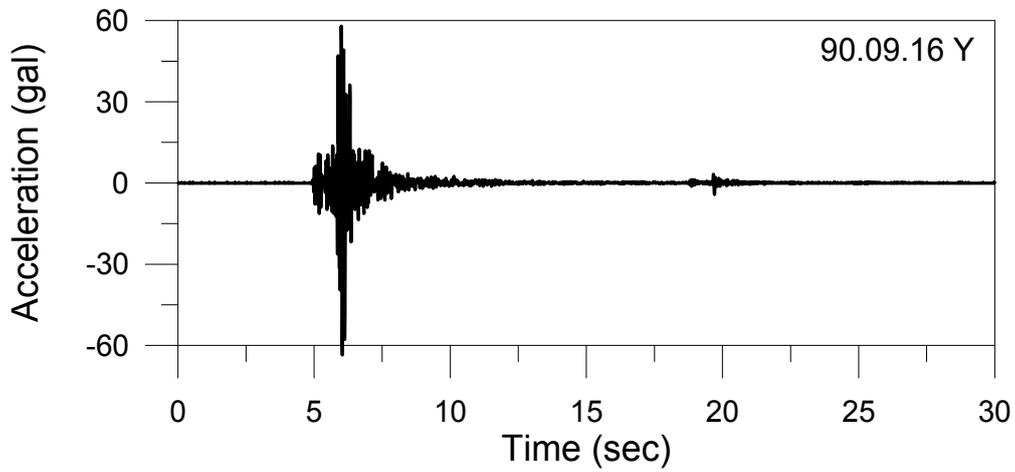


圖 6.14-3 上下游方向之加速度歷時(90.09.16)

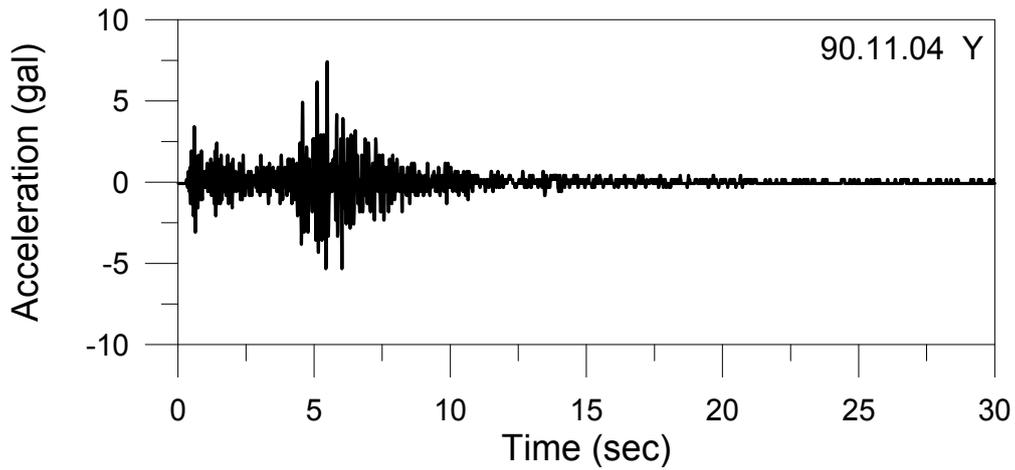


圖 6.14-4 上下游方向之加速度歷時(90.11.04)

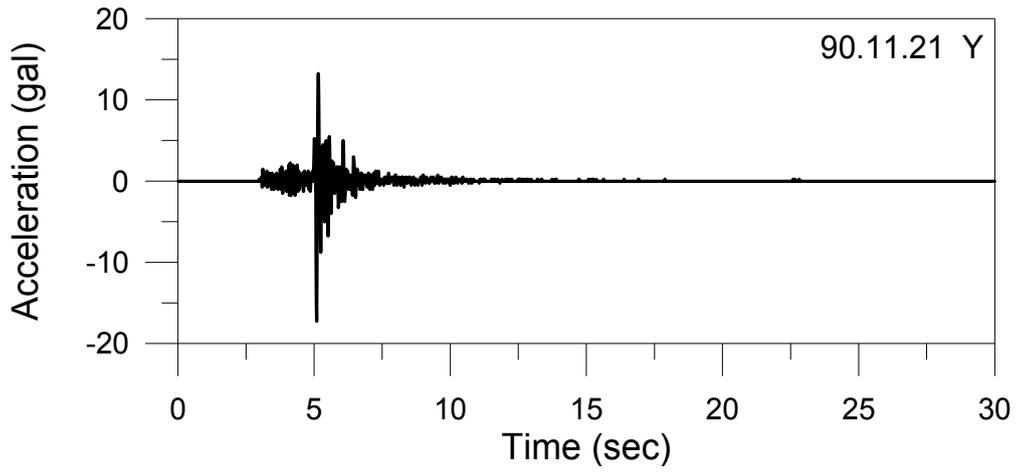


圖 6.14-5 上下游方向之加速度歷時(90.11.21)

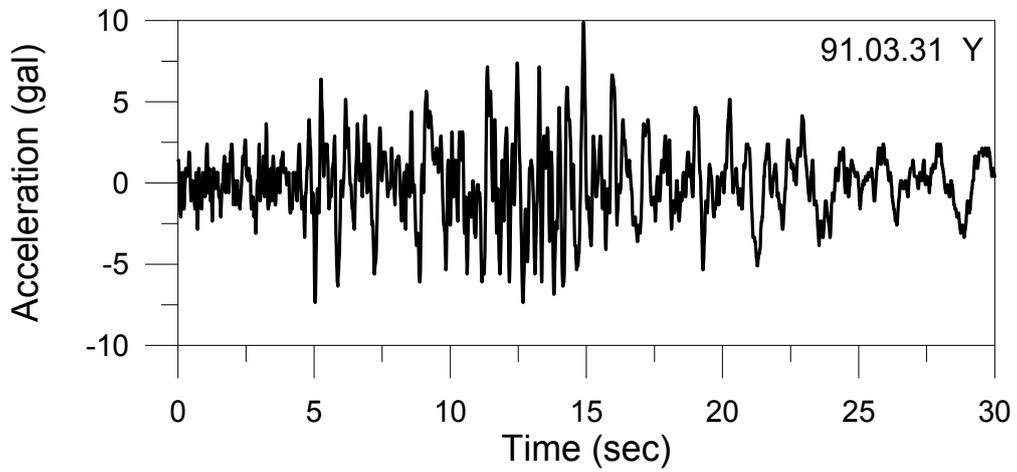


圖 6.14-6 上下游方向之加速度歷時(91.03.31)

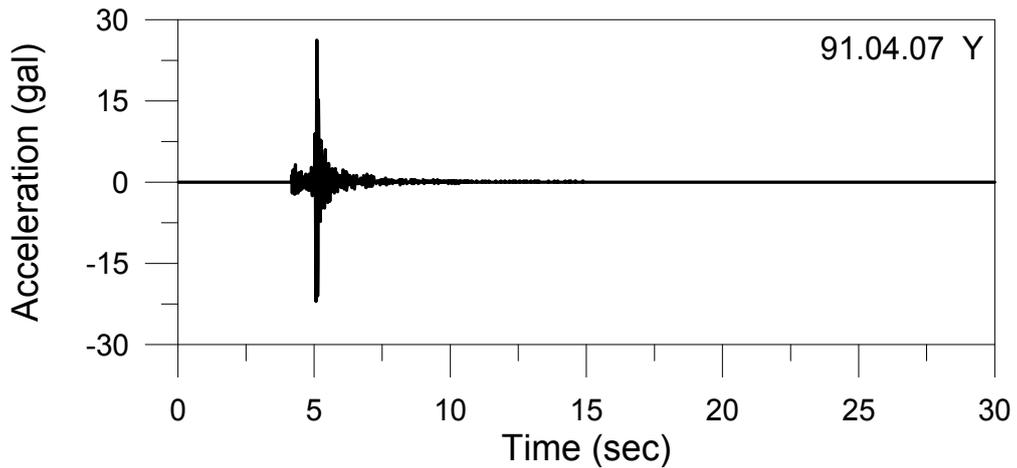


圖 6.14-7 上下游方向之加速度歷時(91.04.07)

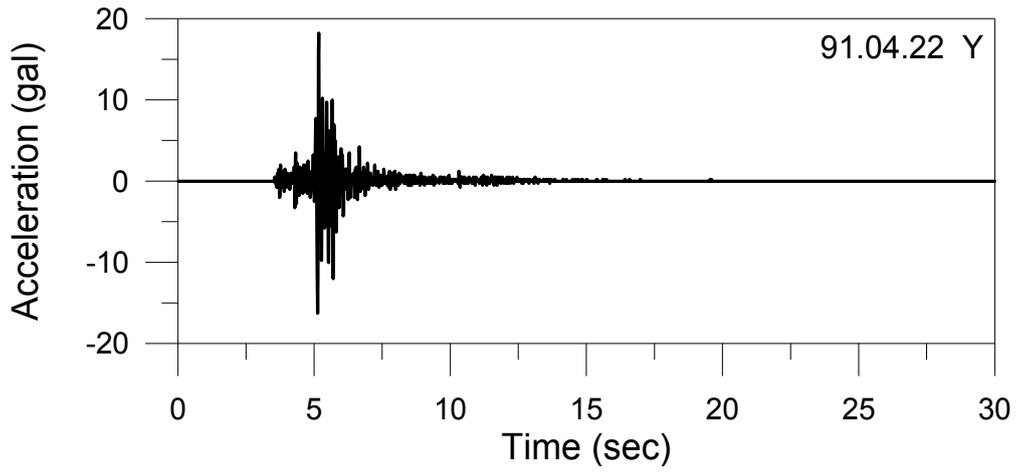


圖 6.14-8 上下游方向之加速度歷時(91.04.22)

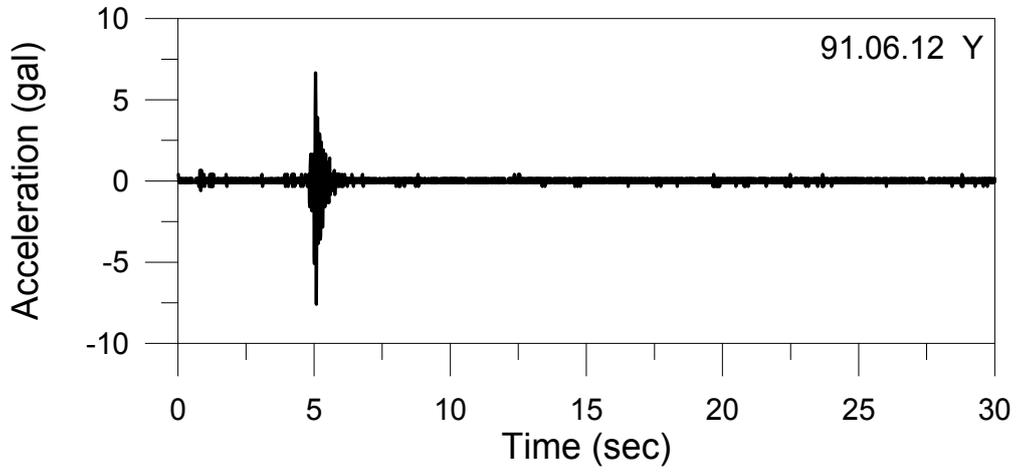


圖 6.14-9 上下游方向之加速度歷時(91.06.12)

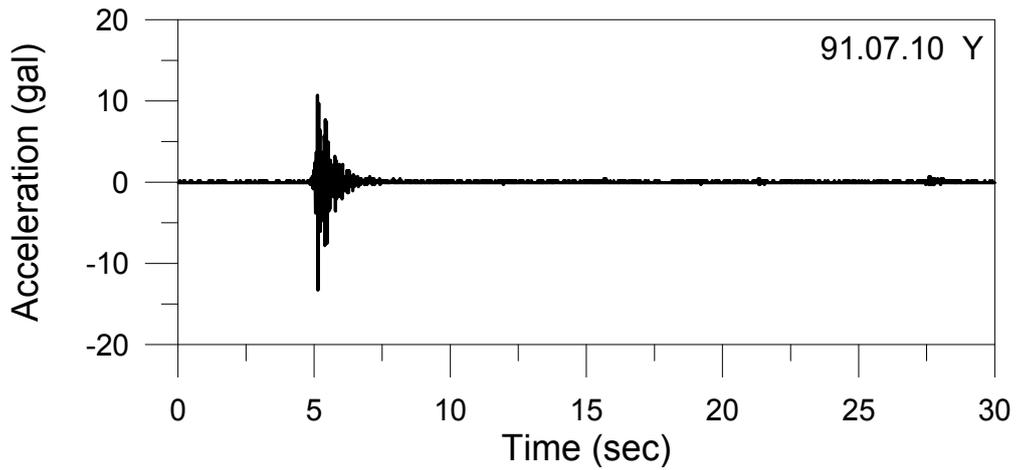


圖 6.14-10 上下游方向之加速度歷時(91.07.10)

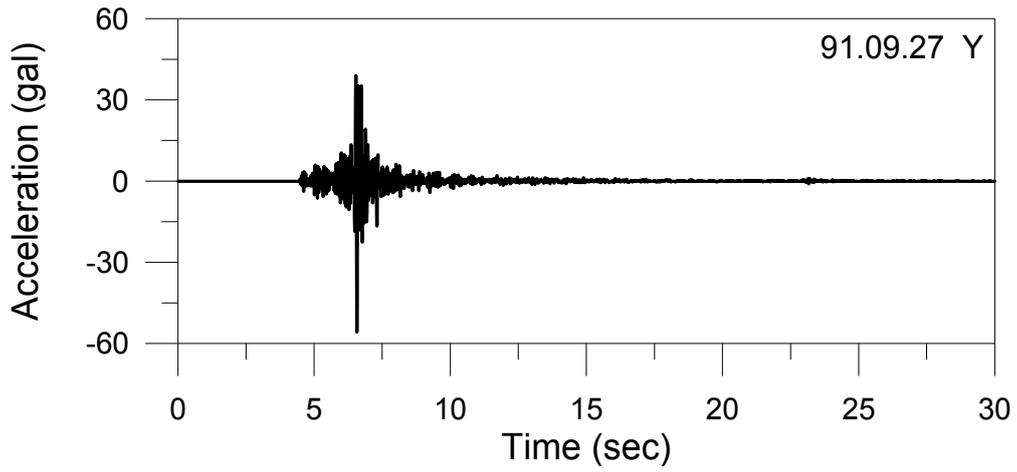


圖 6.14-11 上下游方向之加速度歷時(91.09.27)

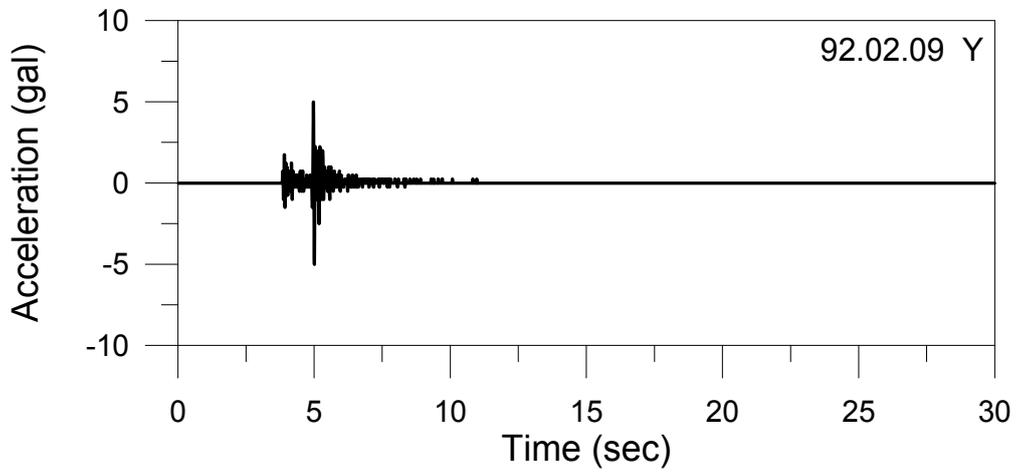


圖 6.14-12 上下游方向之加速度歷時(92.02.09)

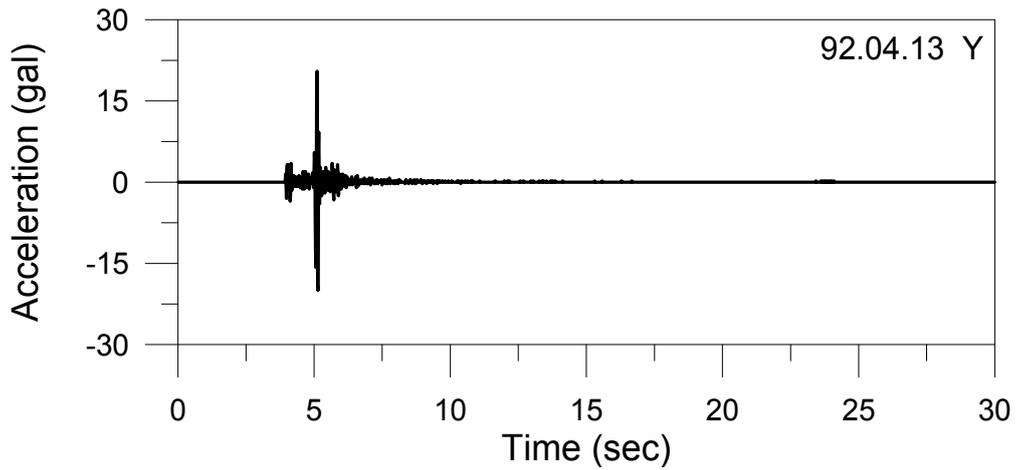


圖 6.14-13 上下游方向之加速度歷時(92.04.13)

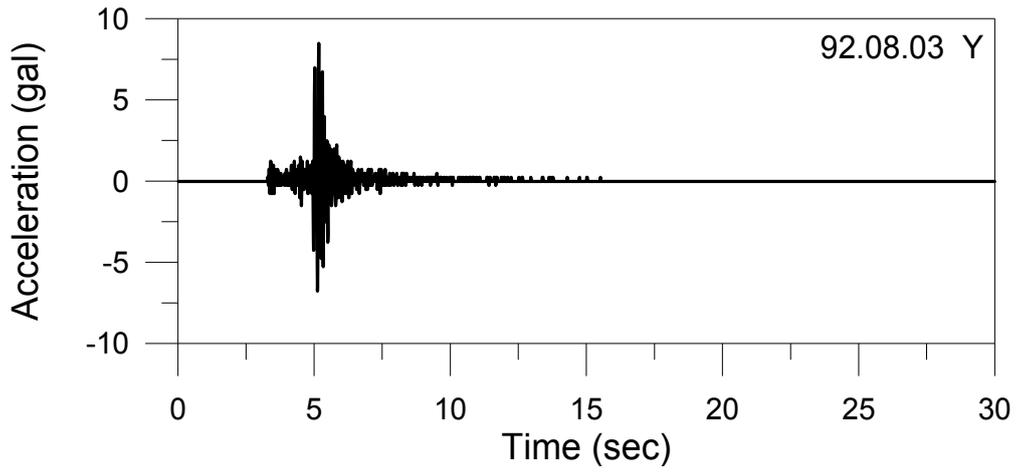


圖 6.14-14 上下游方向之加速度歷時(92.08.03)

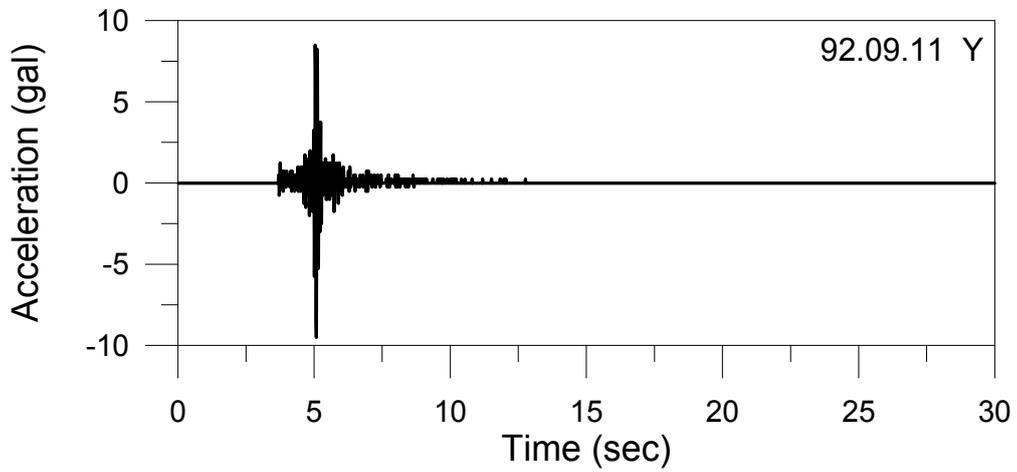


圖 6.14-15 上下游方向之加速度歷時(92.09.11)

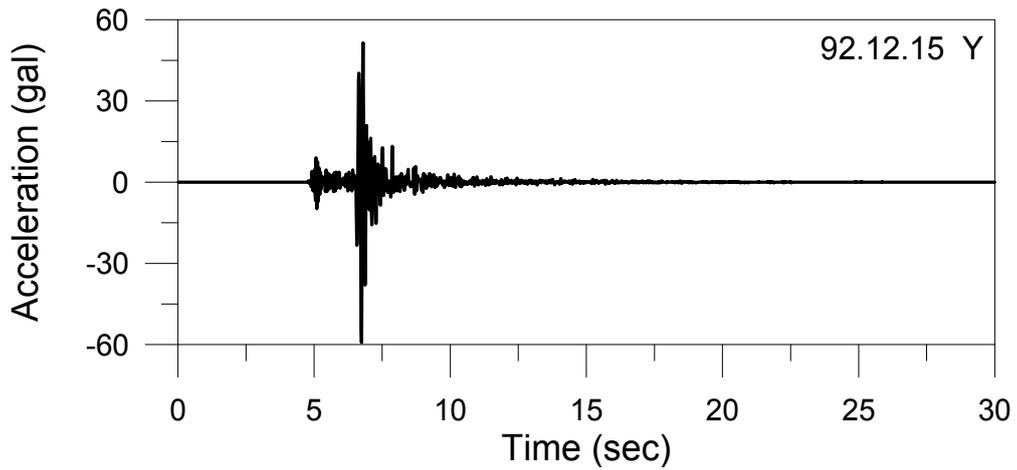


圖 6.14-16 上下游方向之加速度歷時(92.12.15)

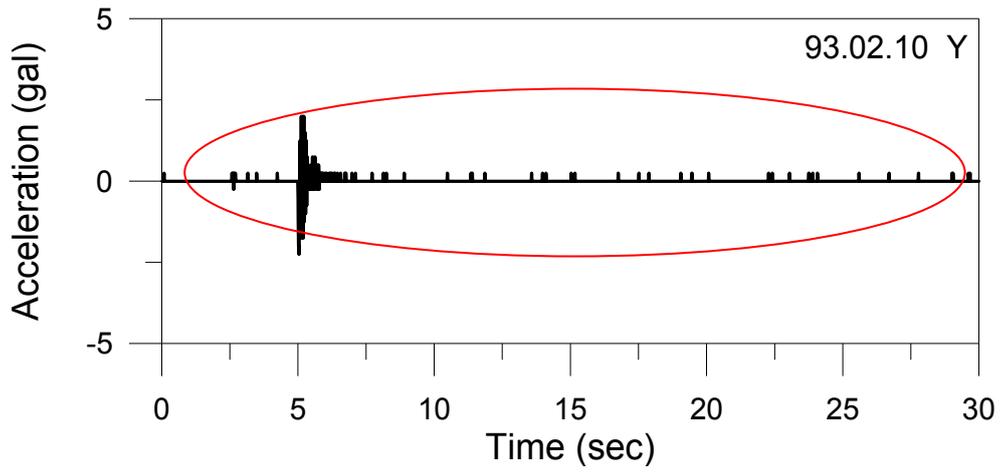


圖 6.14-17 上下游方向之加速度歷時(93.02.10)

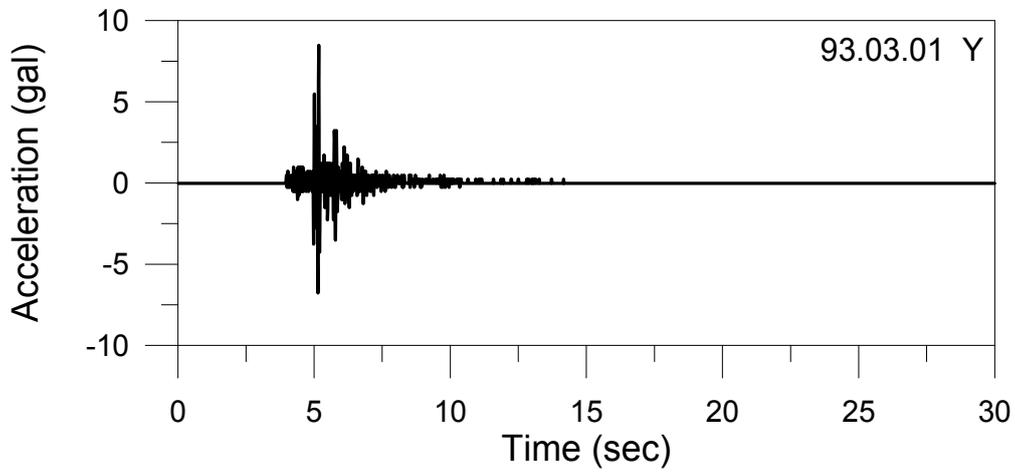


圖 6.14-18 上下游方向之加速度歷時(93.03.01)

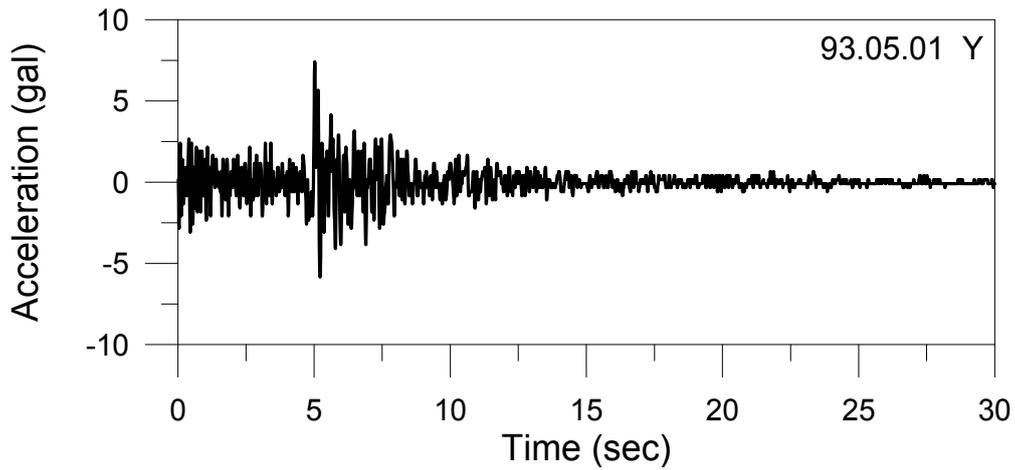


圖 6.14-19 上下游方向之加速度歷時(93.05.01)

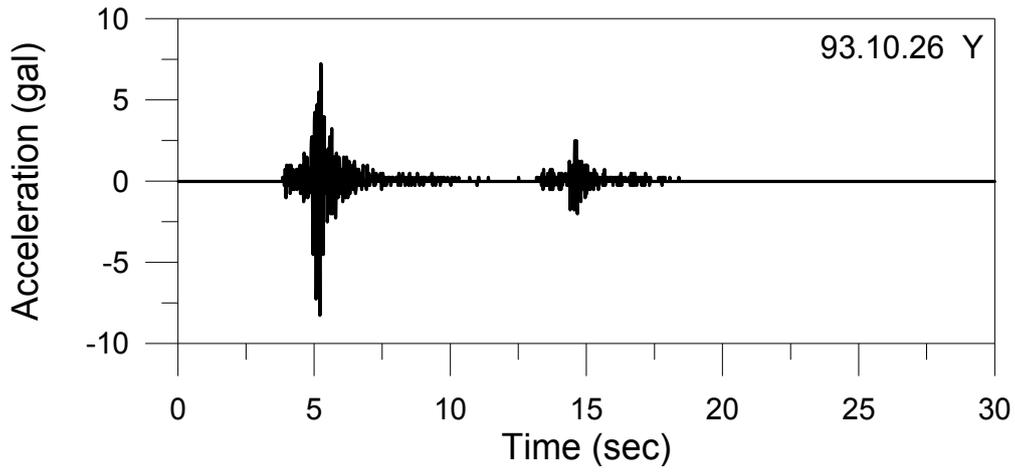


圖 6.14-20 上下游方向之加速度歷時(93.10.26)

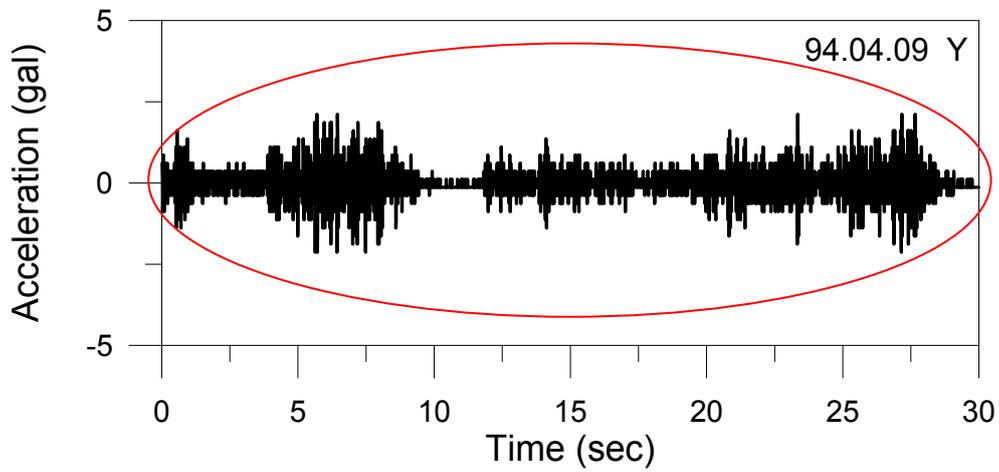


圖 6.14-21 上下游方向之加速度歷時(94.04.09)

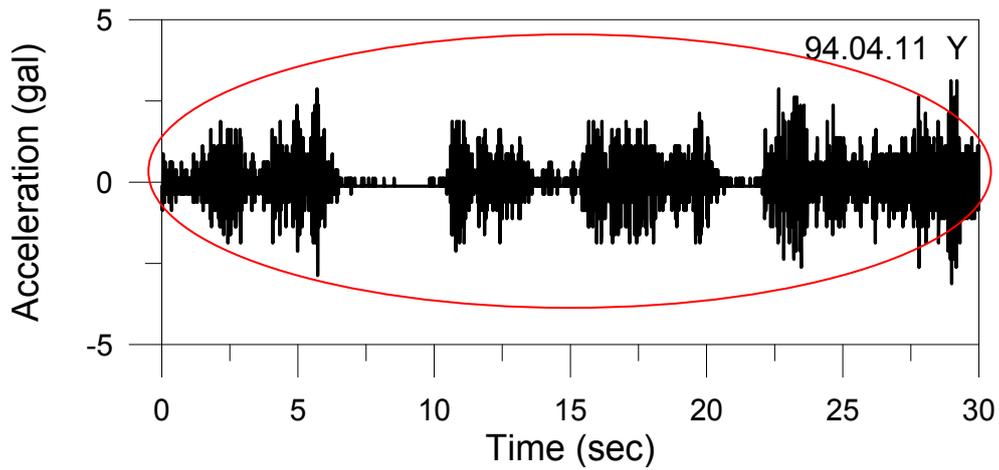


圖 6.14-22 上下游方向之加速度歷時(94.04.11)

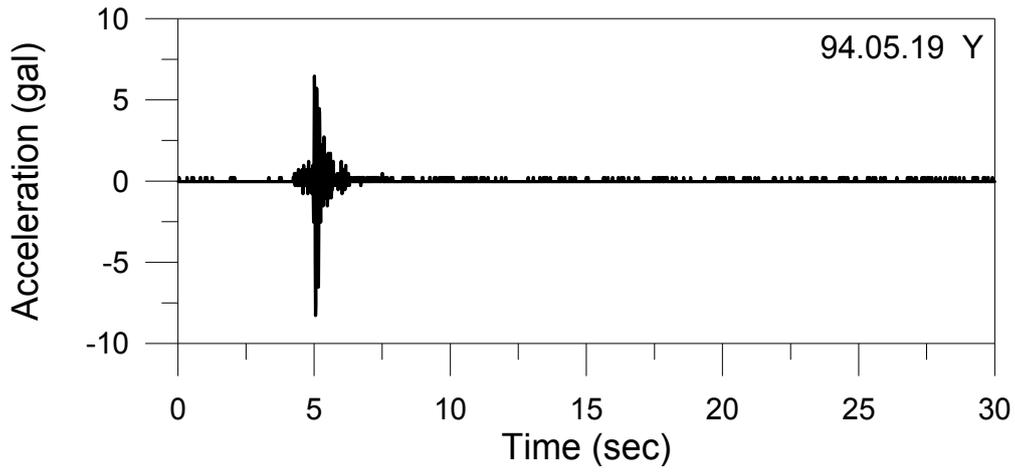


圖 6.14-23 上下游方向之加速度歷時(94.05.19)

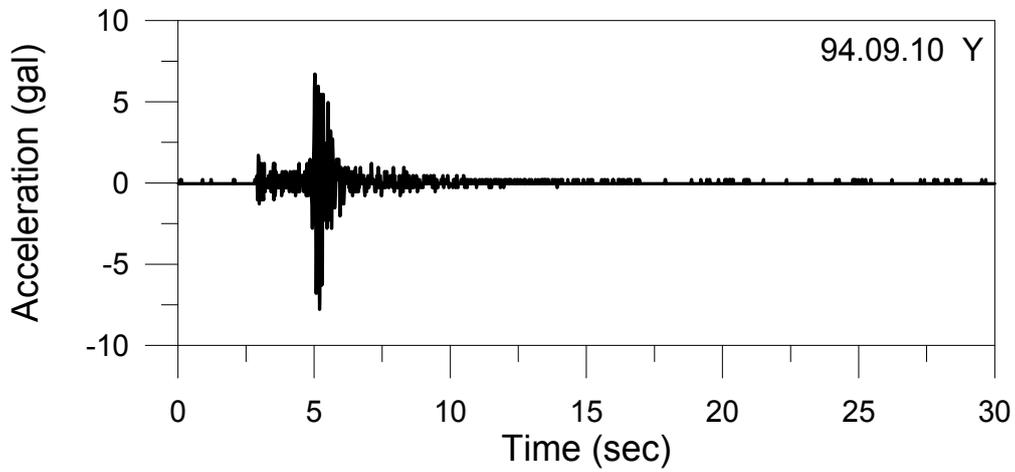


圖 6.14-24 上下游方向之加速度歷時(94.09.10)

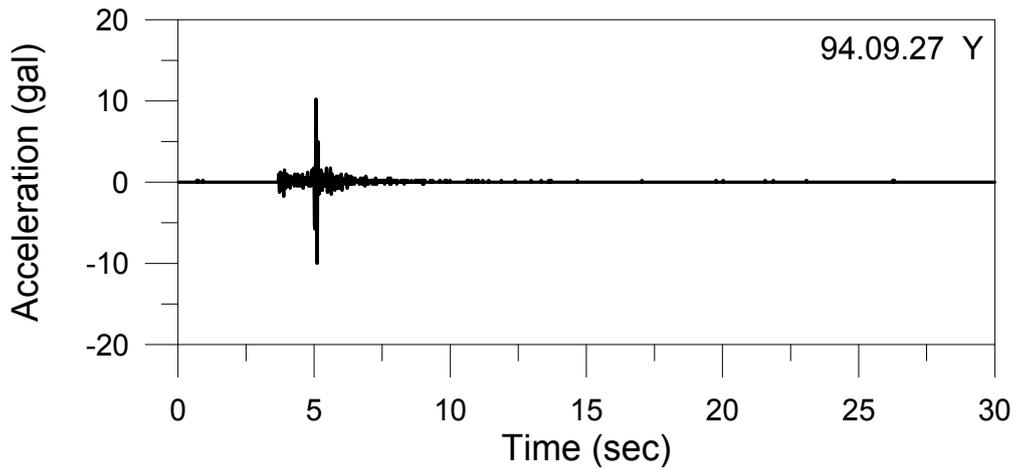


圖 6.14-25 上下游方向之加速度歷時(94.09.27)

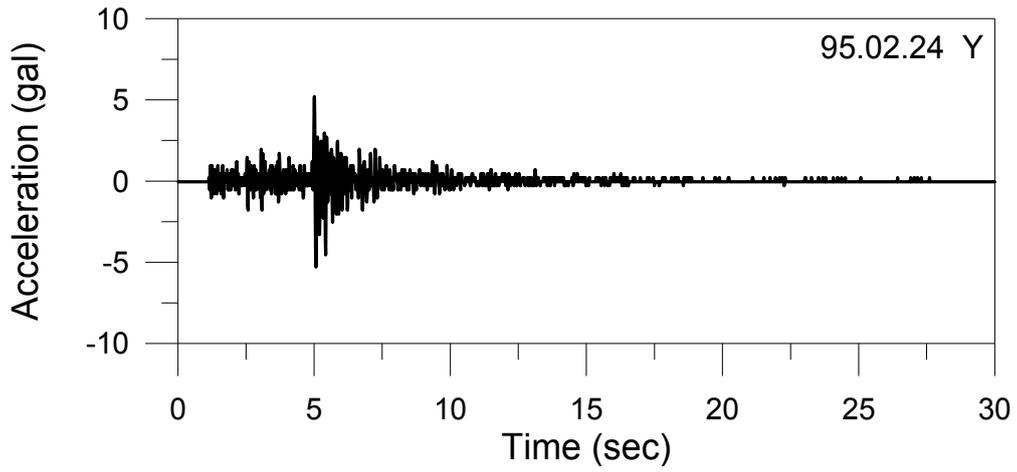


圖 6.14-26 上下游方向之加速度歷時(95.02.24)

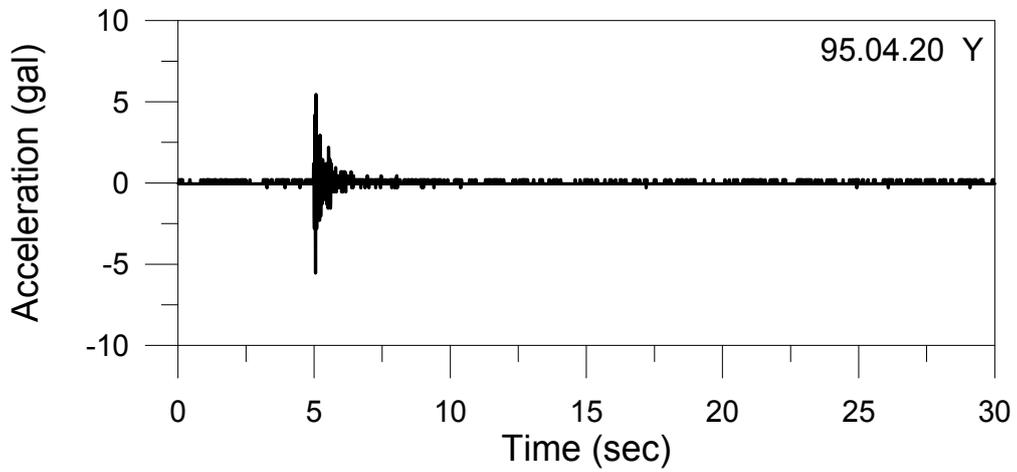


圖 6.14-27 上下游方向之加速度歷時(95.04.20)

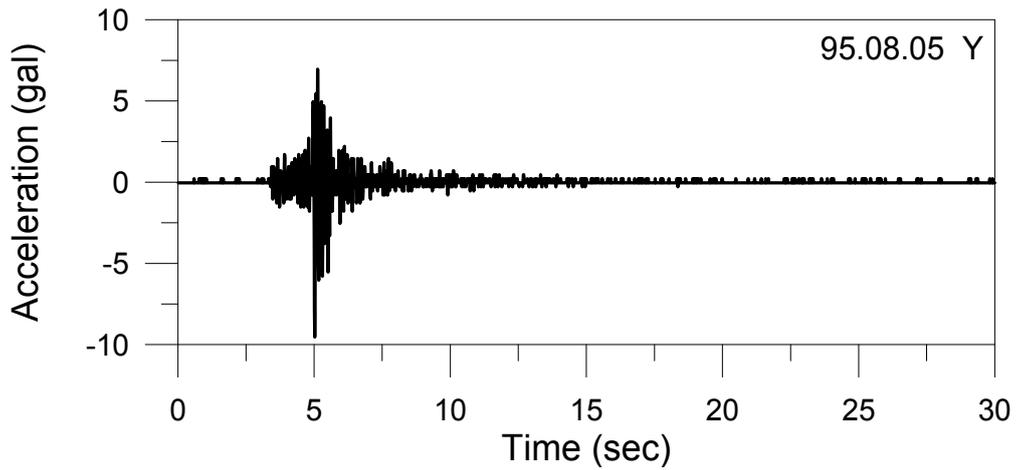


圖 6.14-28 上下游方向之加速度歷時(95.08.05)

6.3.2 頻域分析

頻域分析之目的主要是瞭解時域振動訊號之頻率內涵，即初步掌握壩體之振動頻率等特性。頻域分析主要是進行傅氏轉換，圖 6.15-1 至圖 6.15-28 為歷次地震事件之壩體上下游方向加速度反應傅氏頻譜。由圖可知，部份地震事件之頻譜有異常的現象，較顯著者如圖 6.15-9 及 6.15-17 等，其頻譜無較顯著的峰值存在(平緩)，顯示強震儀可能無擷取到壩體實際的振動反應訊號。此外，多數頻譜曲線較為密集(粗黑)，如圖 6.15-6、6.15-19 及 6.15-21 等，其趨勢較不清晰，此應為歷時訊號解析度不足所致。頻譜圖較為清晰者如圖 6.15-1、6.15-2 及 6.15-3 等，其峰值出現之位置分佈於較廣的頻寬範圍，與谷關壩有較顯著單一峰值出現的型式有所差異。由於谷關壩經查證後應為一拱壩，其壩體之振動行為較為一致，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，主要分佈於 5Hz~20Hz 之間。

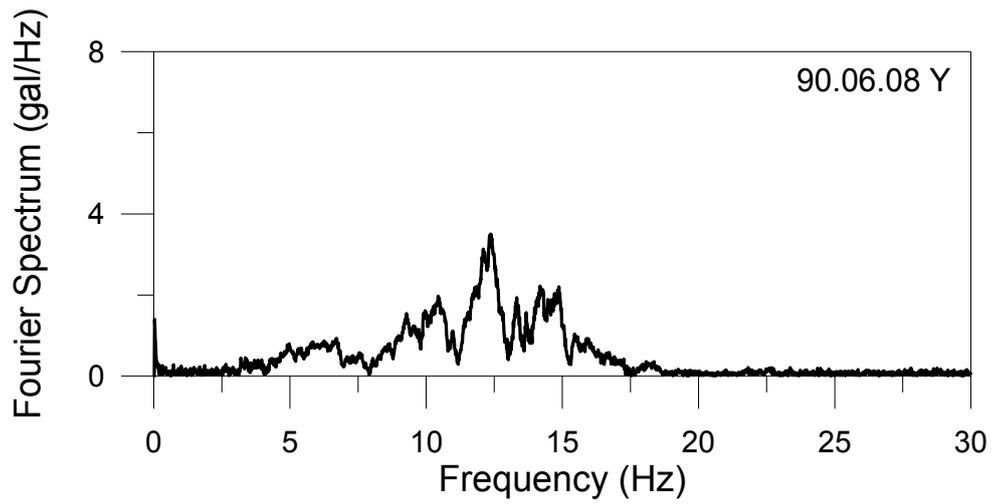


圖 6.15-1 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.06.08)

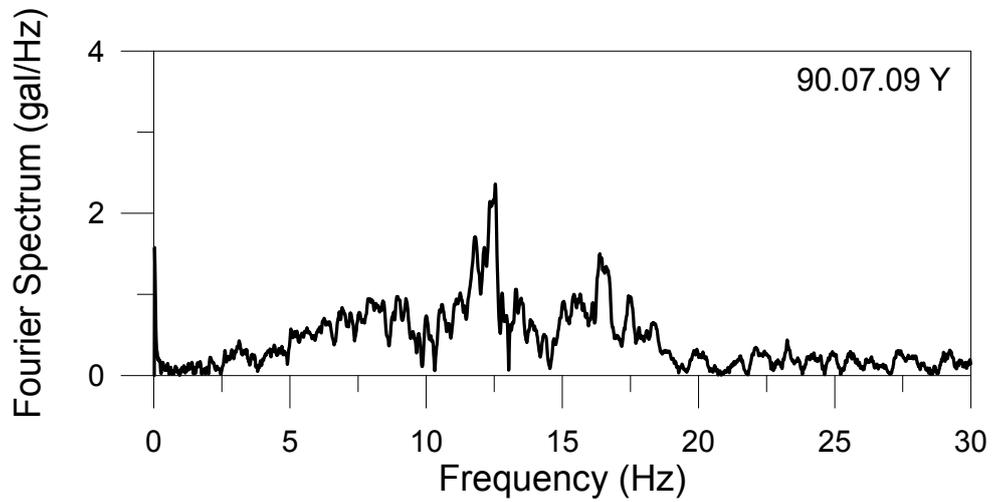


圖 6.15-2 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.07.09)

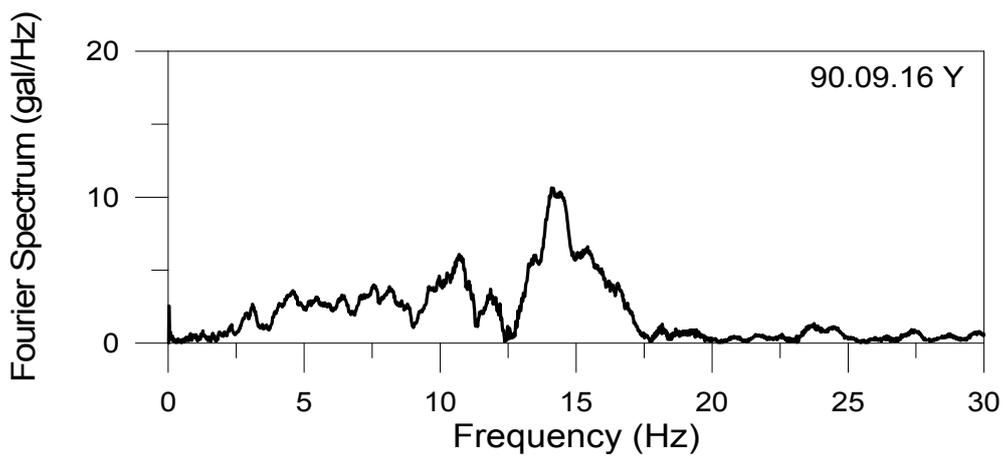


圖 6.15-3 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.09.16)

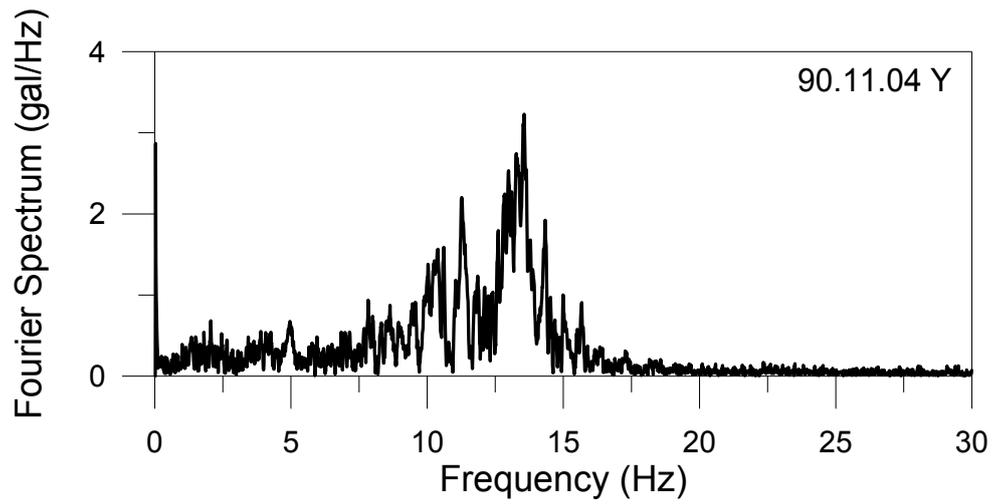


圖 6.15-4 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.11.04)

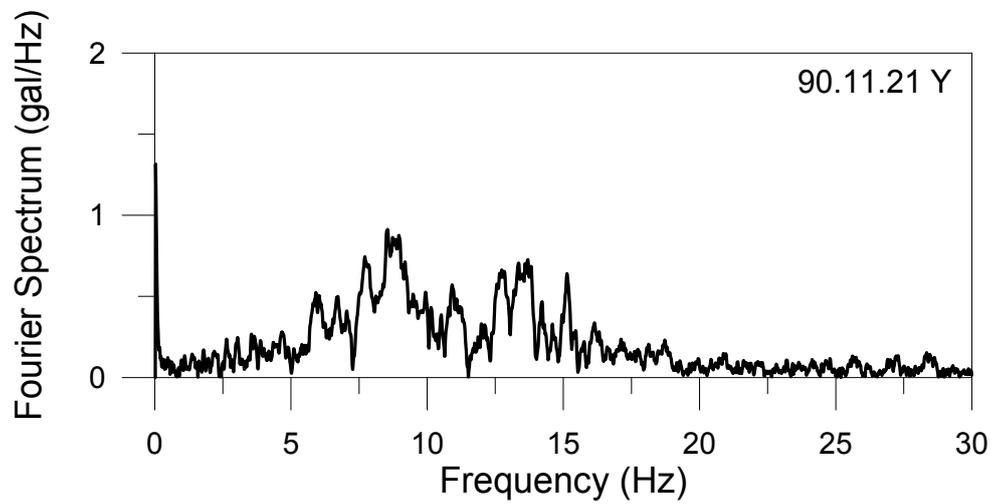


圖 6.15-5 上下游方向之加速度傅氏頻譜(90.11.21)

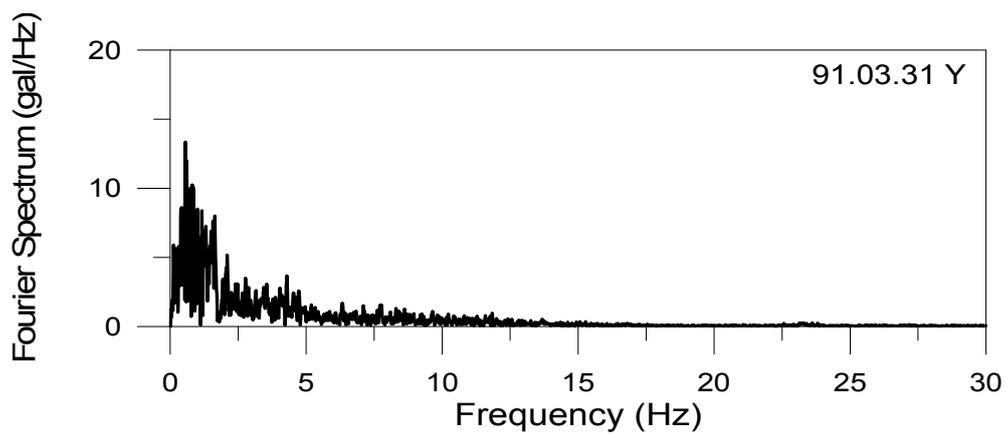


圖 6.15-6 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.03.31)

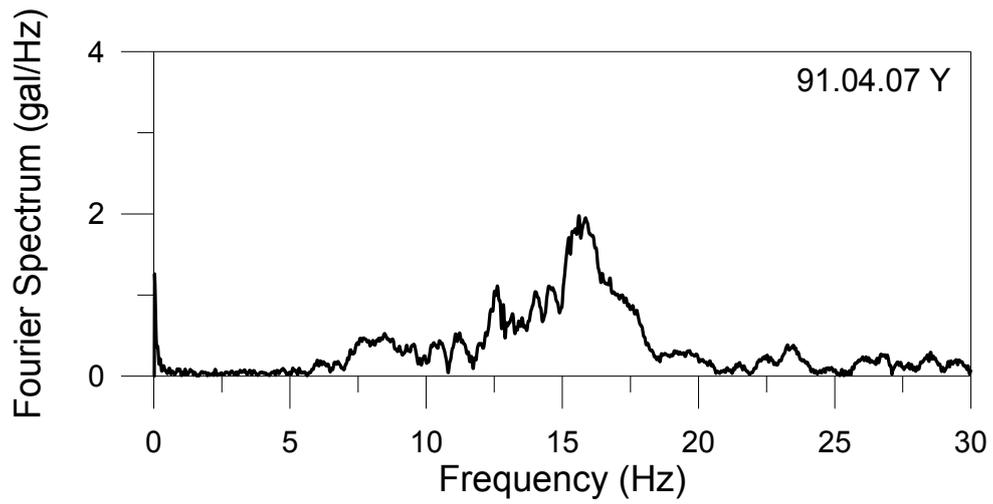


圖 6.15-7 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.04.07)

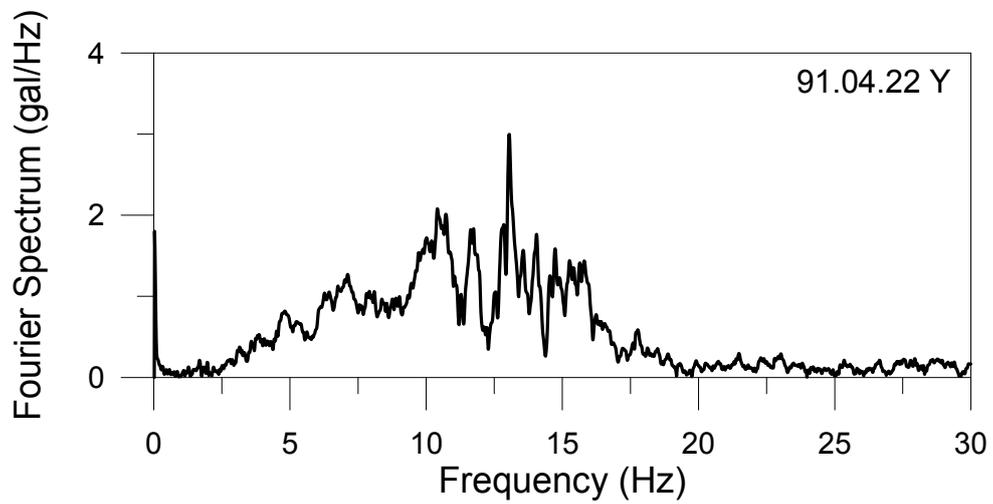


圖 6.15-8 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.04.22)

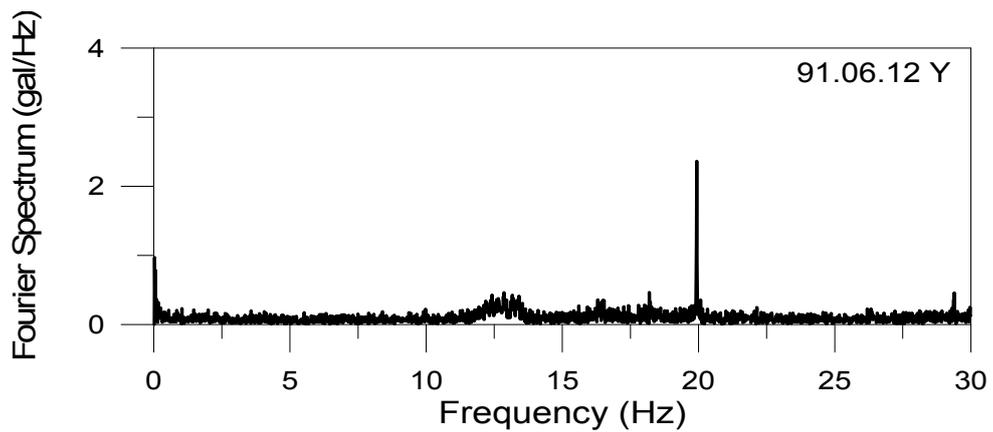


圖 6.15-9 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.06.12)

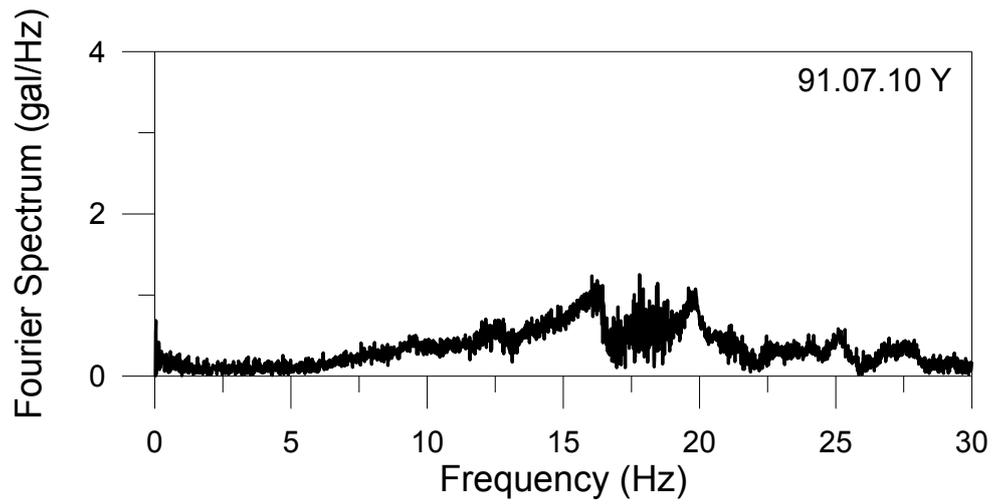


圖 6.15-10 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.07.10)

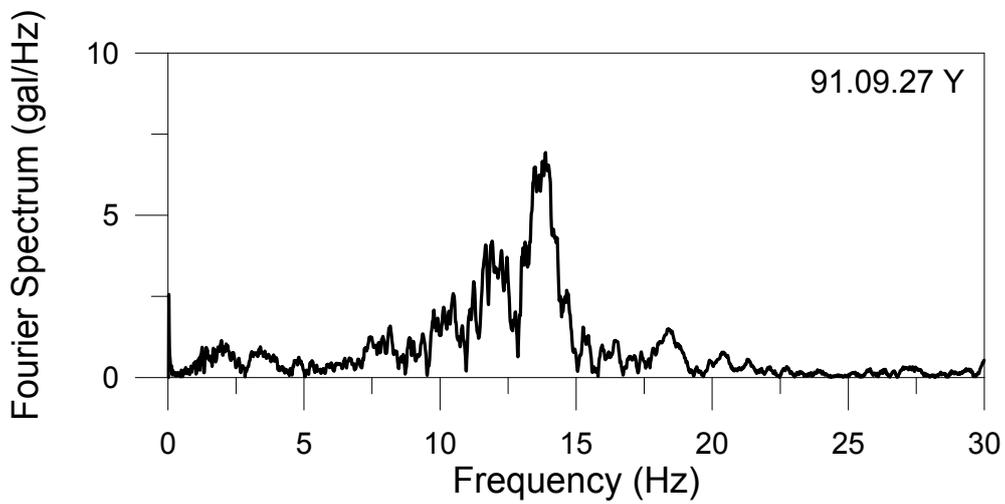


圖 6.15-11 上下游方向之加速度傅氏頻譜(91.09.27)

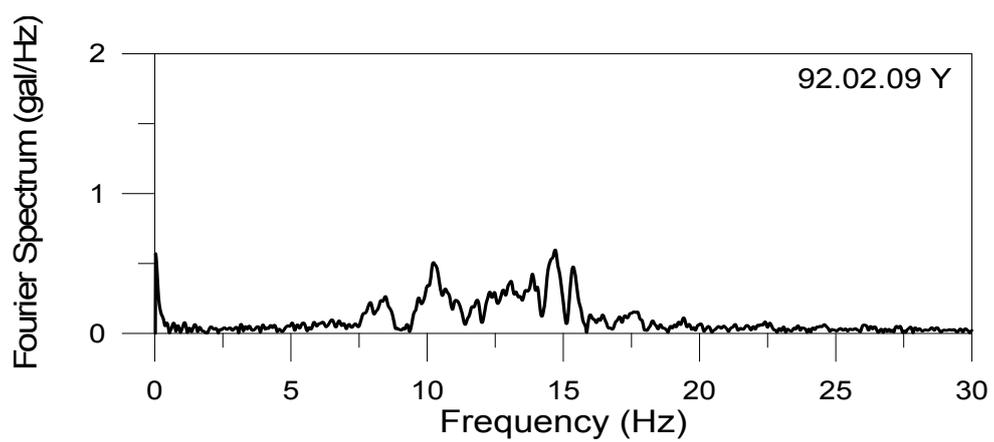


圖 6.15-12 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.02.09)

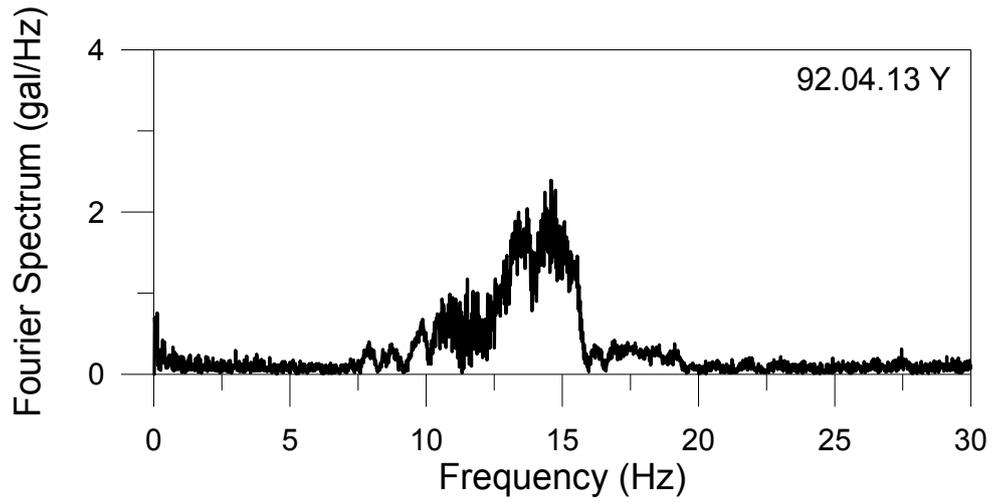


圖 6.15-13 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.04.13)

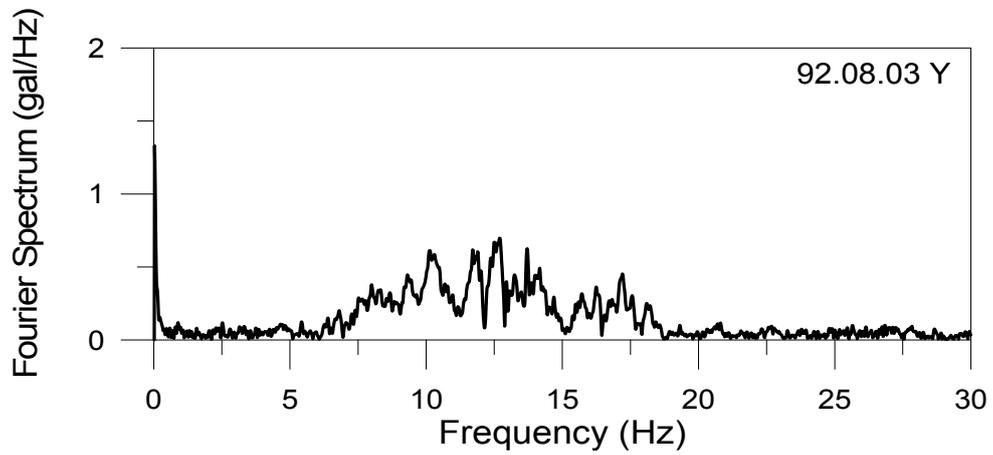


圖 6.15-14 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.08.03)

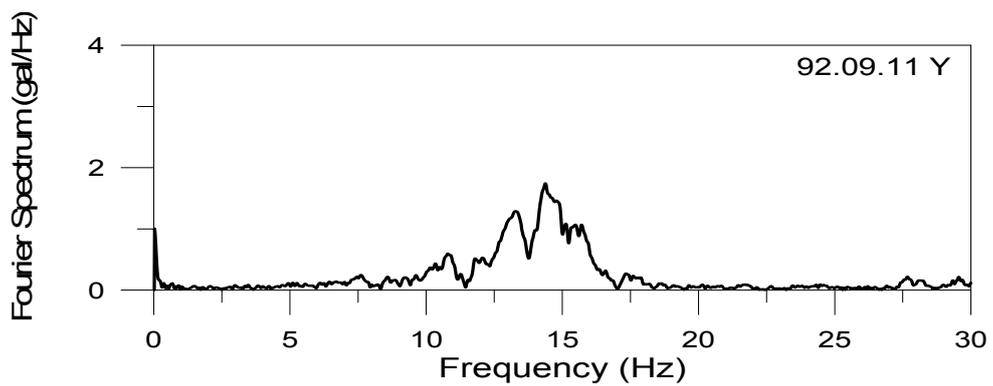


圖 6.15-15 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.09.11)

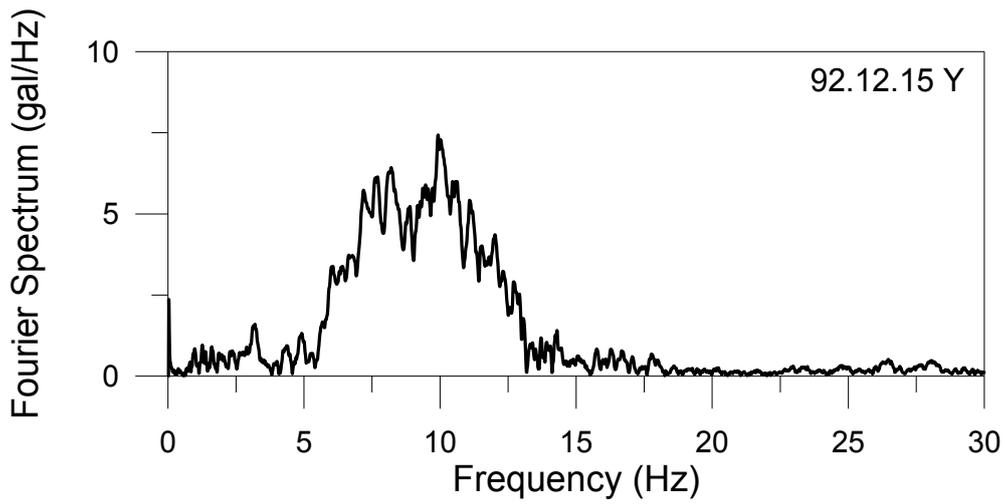


圖 6.15-16 上下游方向之加速度傅氏頻譜(92.12.15)

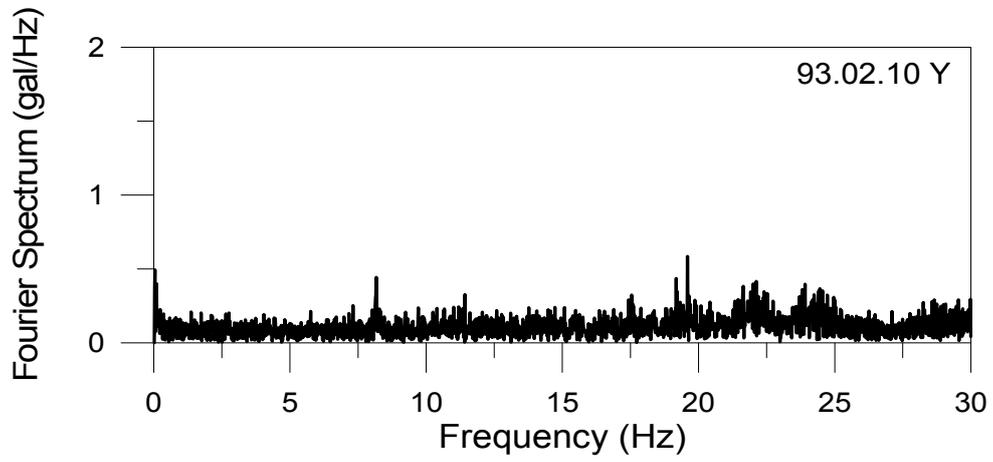


圖 6.15-17 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.02.10)

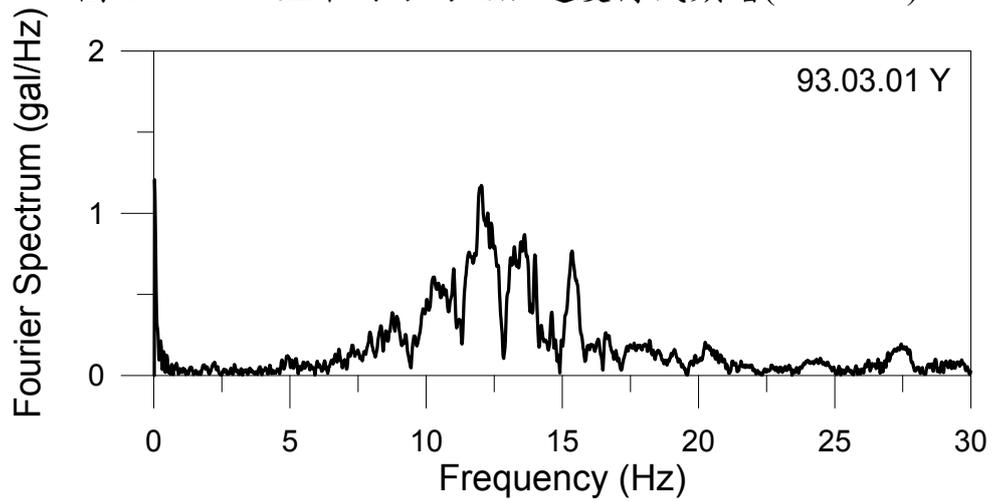


圖 6.15-18 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.03.01)

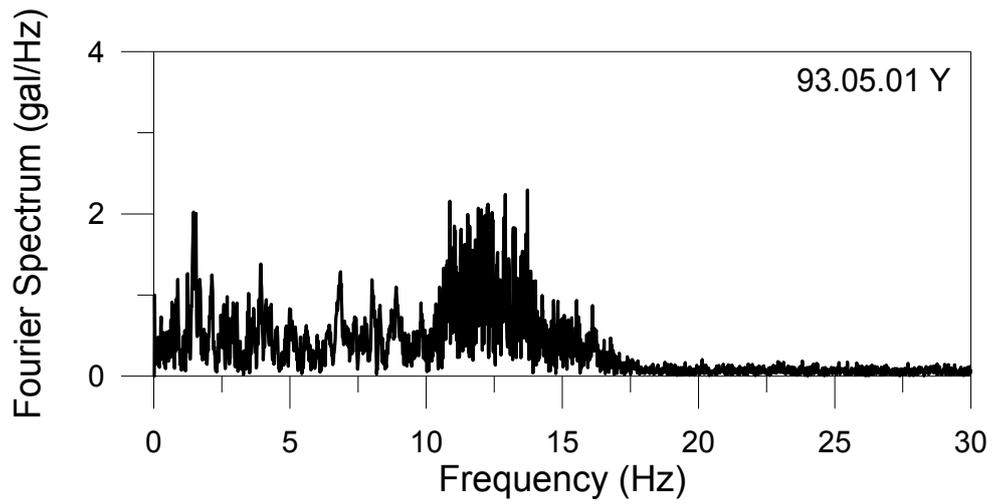


圖 6.15-19 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.05.10)

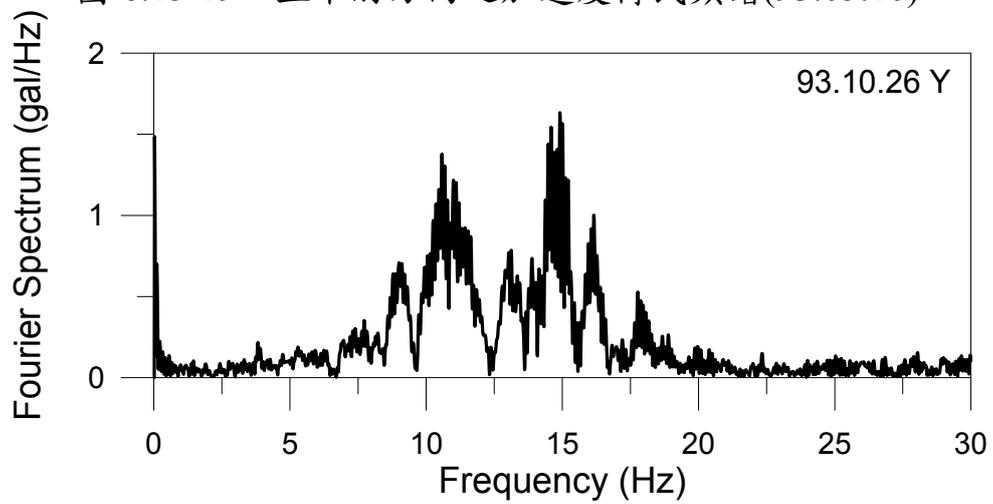


圖 6.15-20 上下游方向之加速度傅氏頻譜(93.10.26)

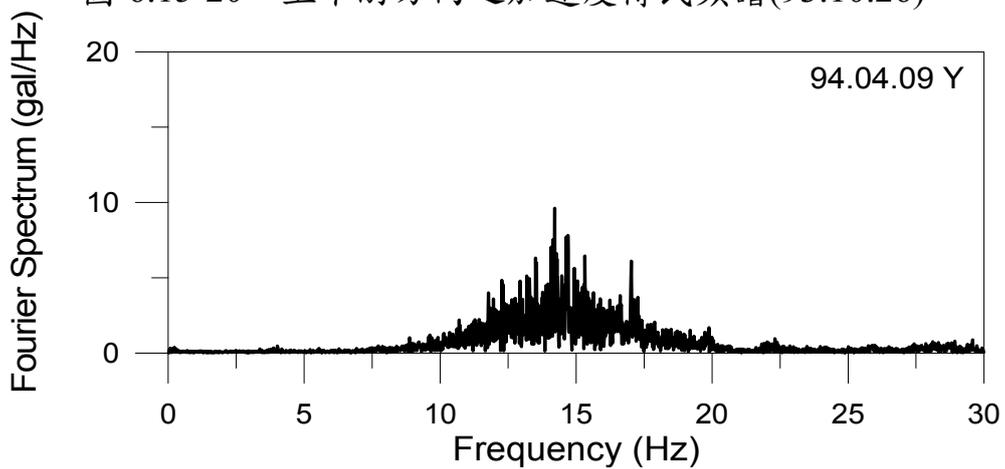


圖 6.15-21 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.04.09)

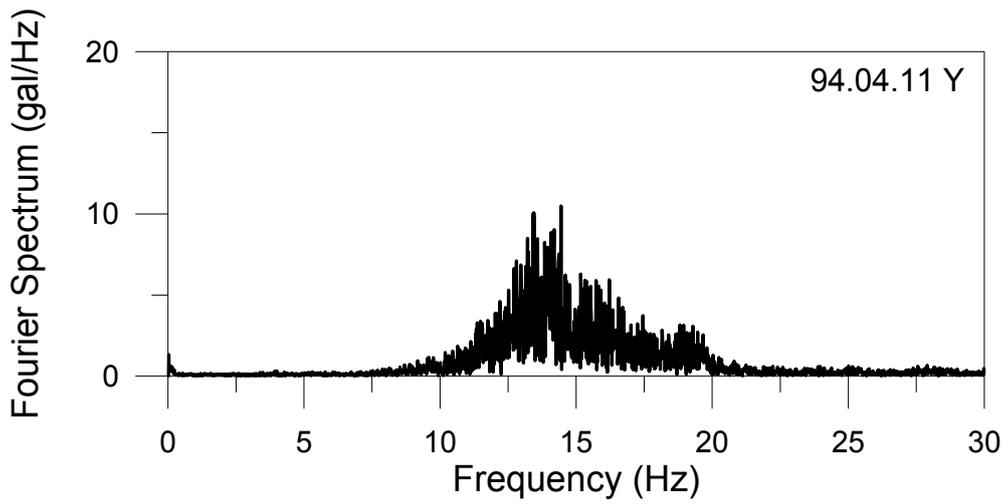


圖 6.15-22 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.04.11)

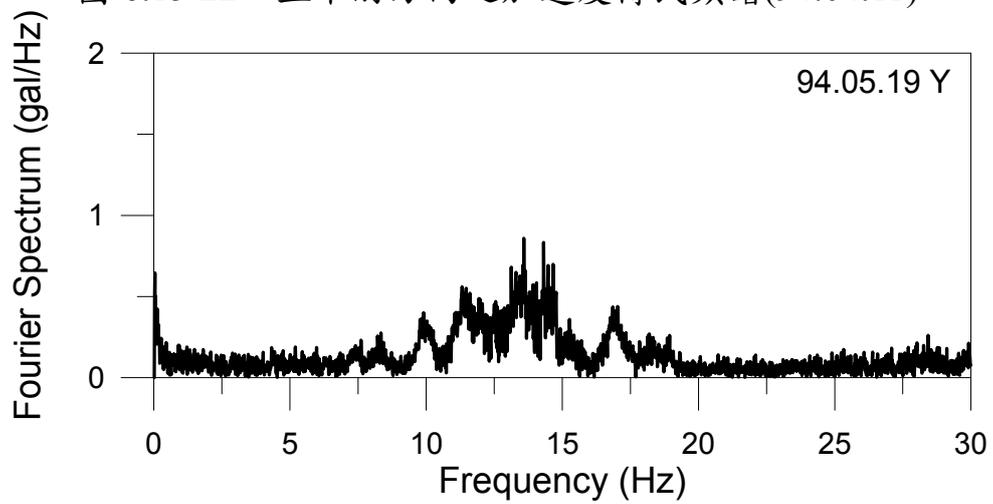


圖 6.15-23 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.05.19)

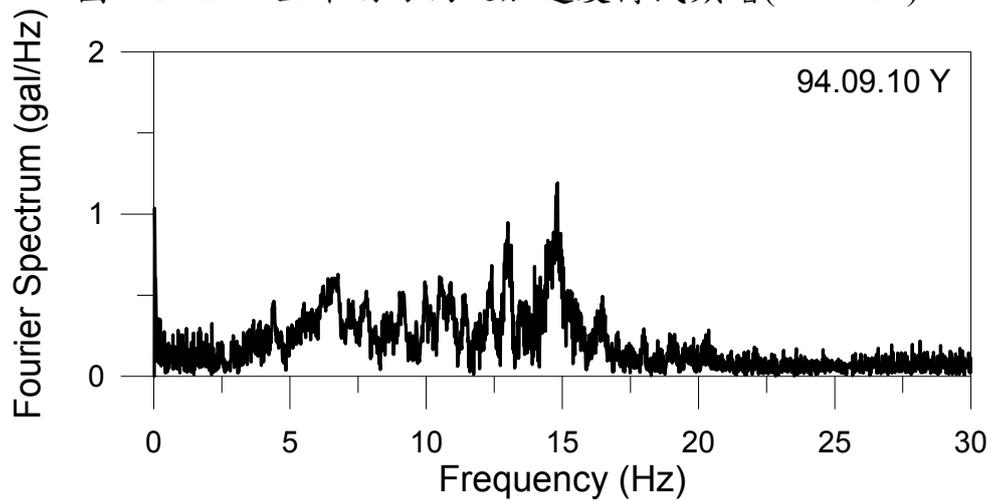


圖 6.15-24 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.09.10)

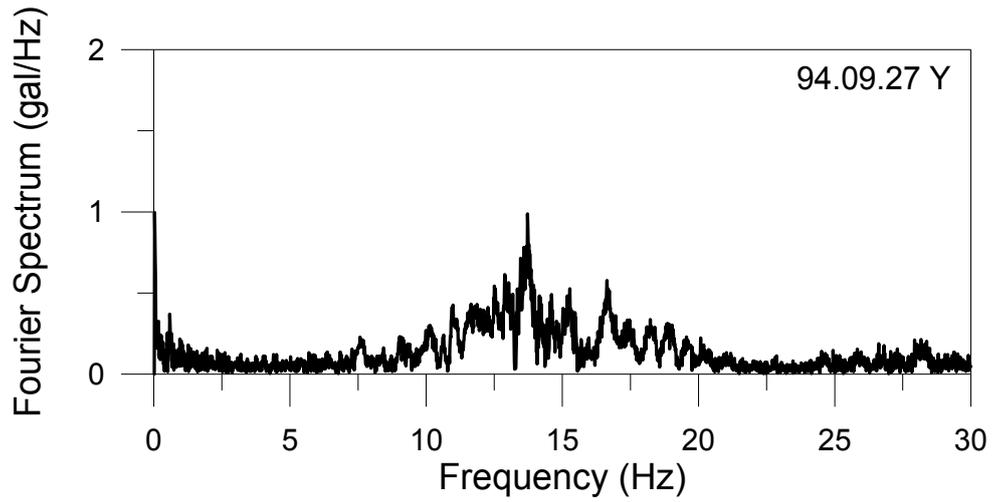


圖 6.15-25 上下游方向之加速度傅氏頻譜(94.09.27)

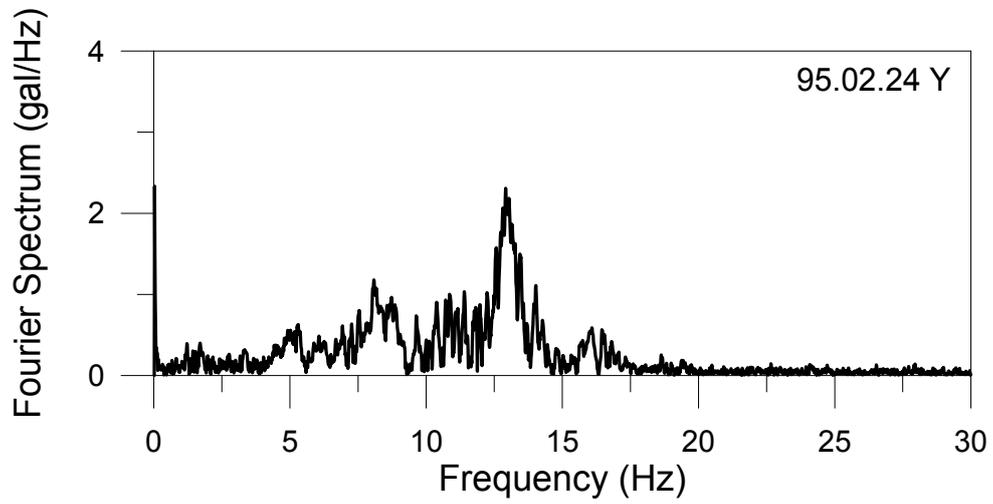


圖 6.15-26 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.02.24)

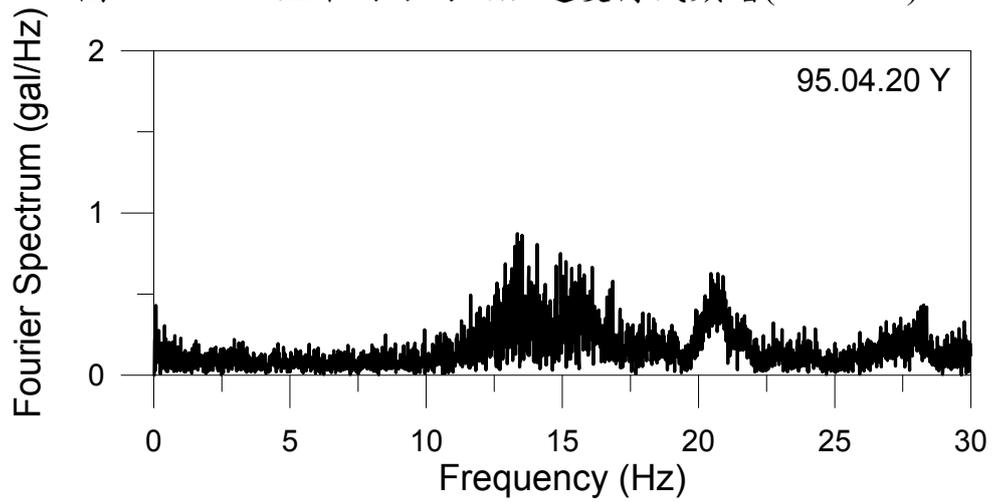


圖 6.15-27 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.04.20)

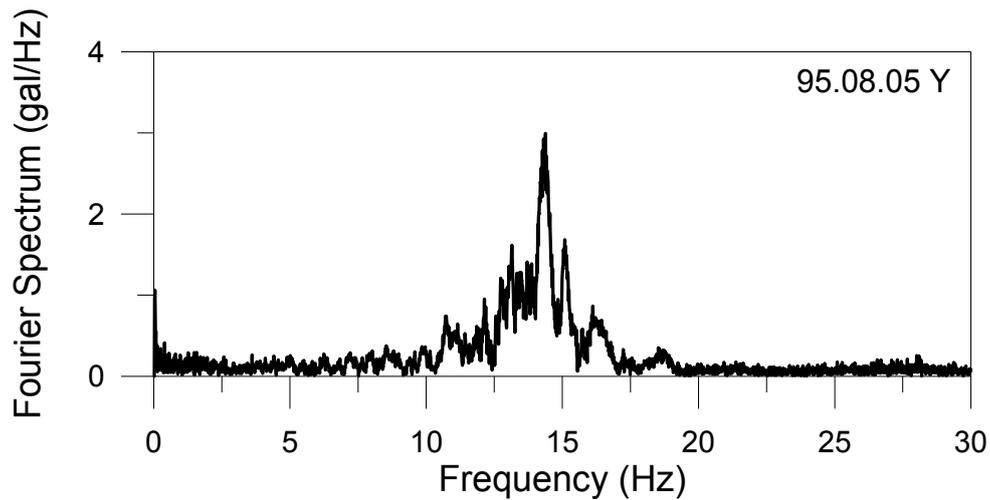


圖 6.15-28 上下游方向之加速度傅氏頻譜(95.08.05)

6.3.3 系統識別分析

本案將根據 6.1.2 節所述之識別模式針對天輪壩之振動特性進行系統識別分析，由於天輪壩只於壩體安裝一部強震儀，且壩底無安裝強震儀(即無輸入擾動資料)，因此本案將採用 AR 識別模式進行分析，識別之階數採用 100。

圖 6.16-1 至圖 6.16-28 為歷次地震事件之壩體上下游方向經系統識別所得之傳遞函數，由圖可知，整體而言，天輪壩傳遞函數之趨勢與傅氏頻譜的趨勢相近，惟谷關壩契合的程度較天輪壩高。如頻域分析結果所述，因重力壩不同塊體間可能有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，使得傳遞函數峰值出現的位置有呈現分佈於某一頻寬之現象(5Hz~20Hz)。此外，傳遞函數於 7.5Hz 附近常有峰值出現，此可能為壩體之主要振動頻率之一。谷關壩與天輪壩共有 8 次地震事件於同日期均有地震記錄(如

90.06.08、90.09.16、91.09.27 等), 惟二者因壩體型式與振動特性不同, 因此其傳遞函數之分佈趨勢亦有所差異。

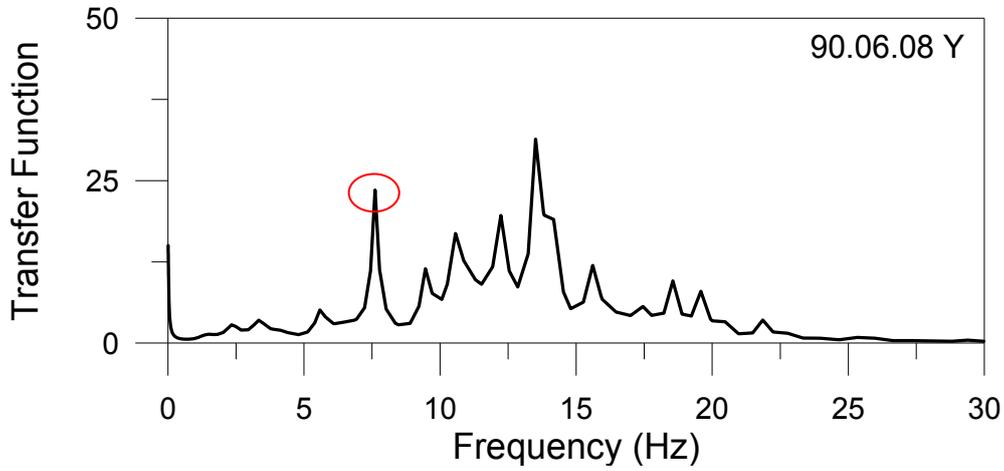


圖 6.16-1 上下游方向之加速度傳遞函數(90.06.08)

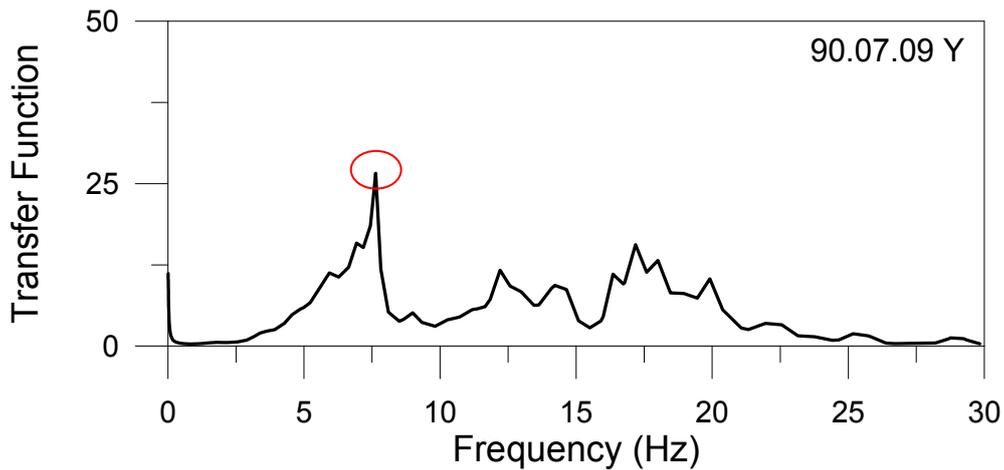


圖 6.16-2 上下游方向之加速度傳遞函數(90.07.09)

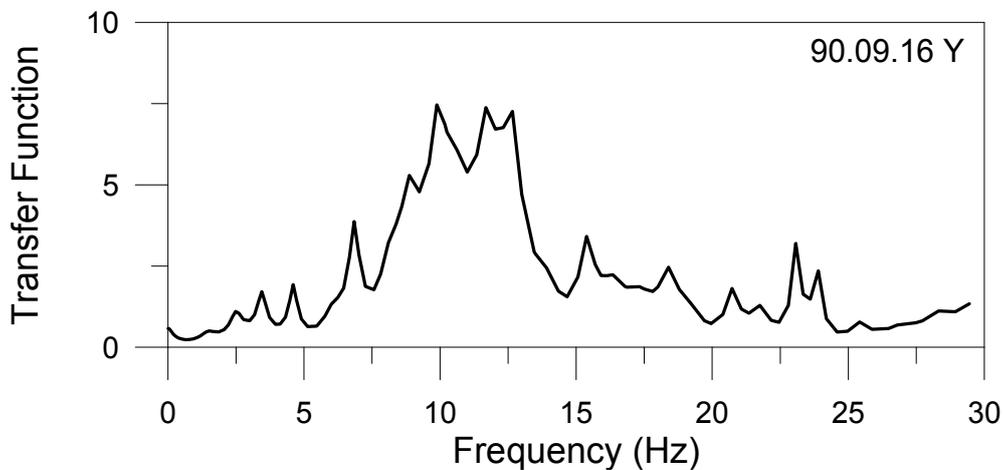


圖 6.16-3 上下游方向之加速度傳遞函數(90.09.16)

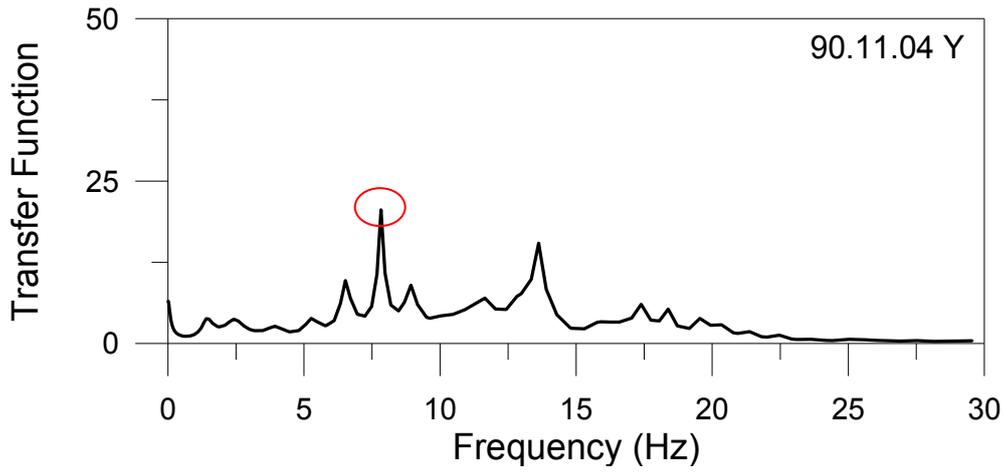


圖 6.16-4 上下游方向之加速度傳遞函數(90.11.04)

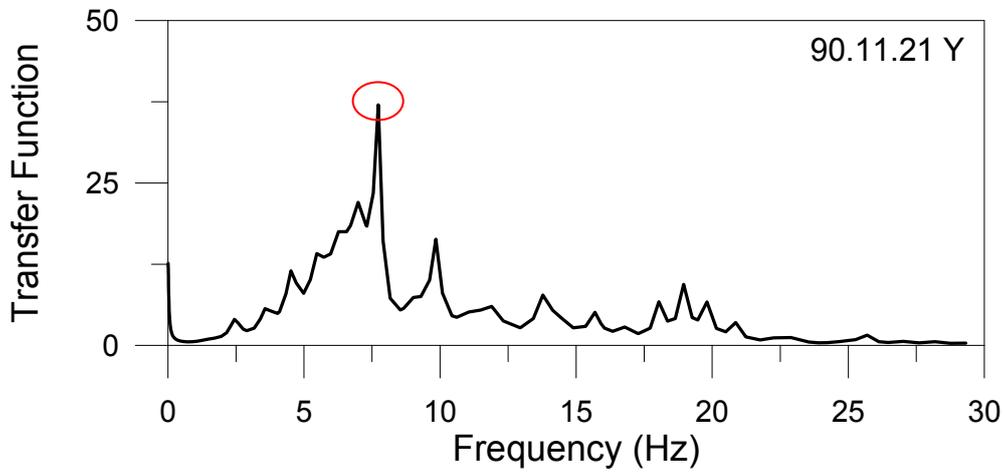


圖 6.16-5 上下游方向之加速度傳遞函數(90.11.21)

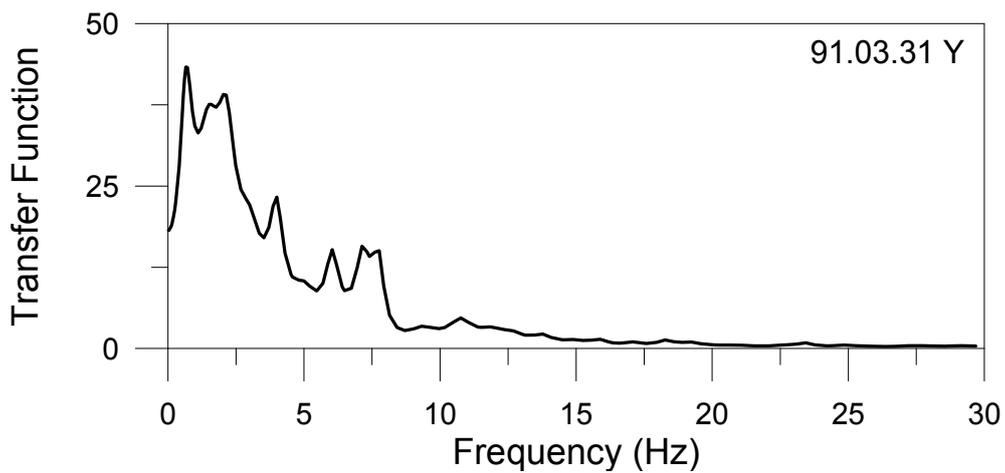


圖 6.16-6 上下游方向之加速度傳遞函數(91.03.31)

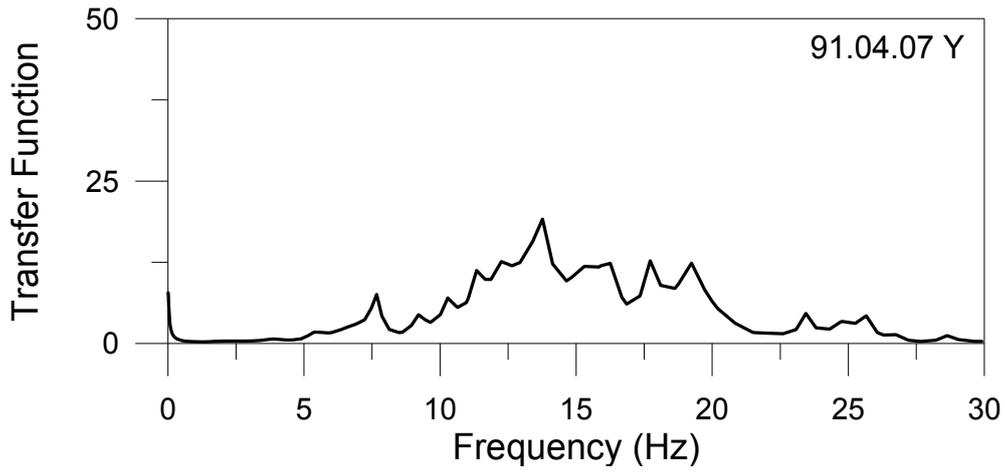


圖 6.16-7 上下游方向之加速度傳遞函數(91.04.07)

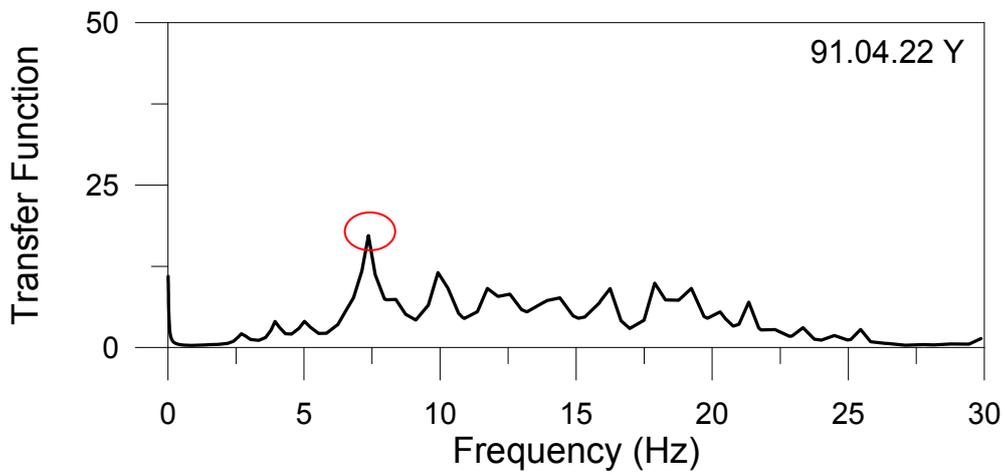


圖 6.16-8 上下游方向之加速度傳遞函數(91.04.22)

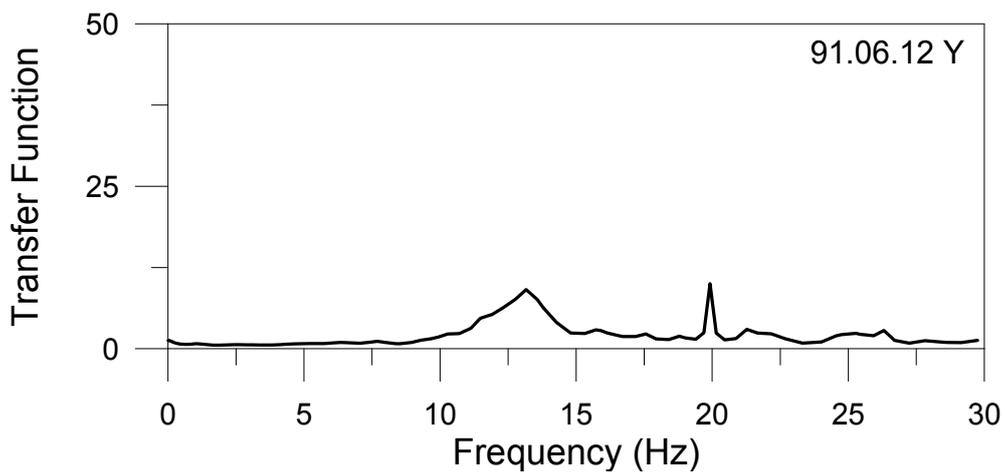


圖 6.16-9 上下游方向之加速度傳遞函數(91.06.12)

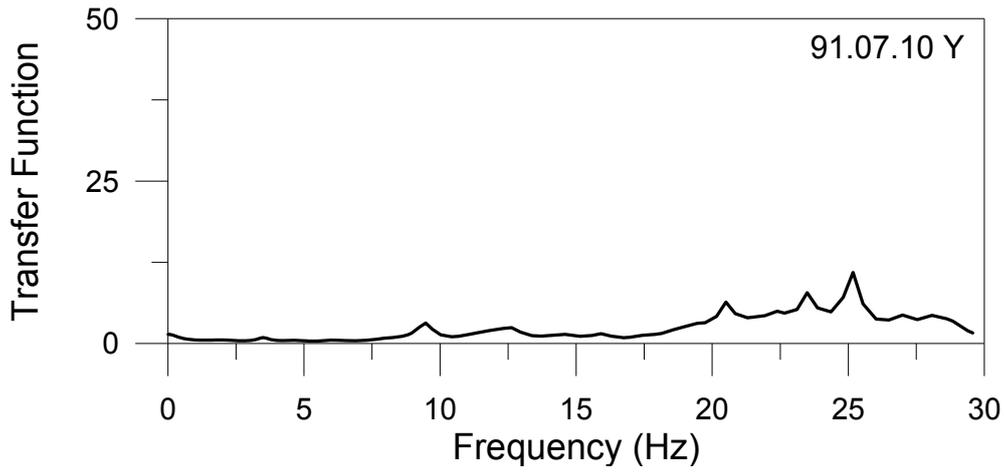


圖 6.16-10 上下游方向之加速度傳遞函數(91.07.10)

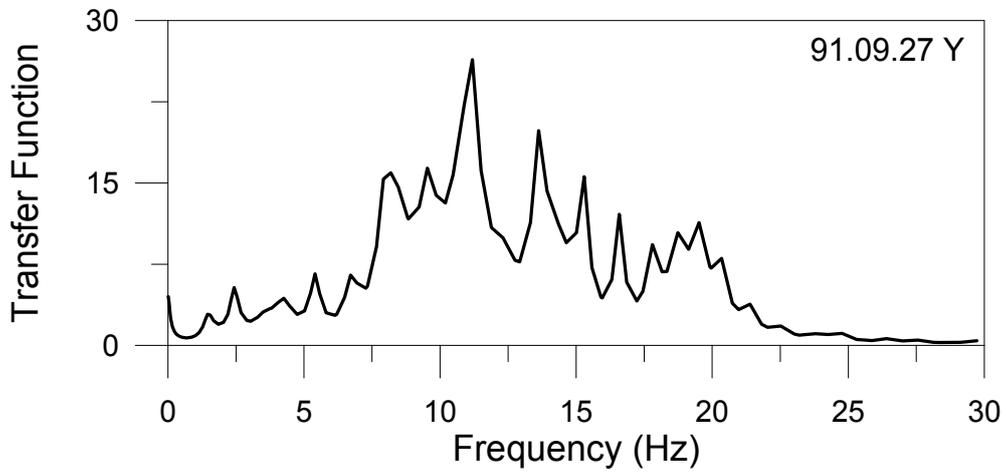


圖 6.16-11 上下游方向之加速度傳遞函數(91.09.27)

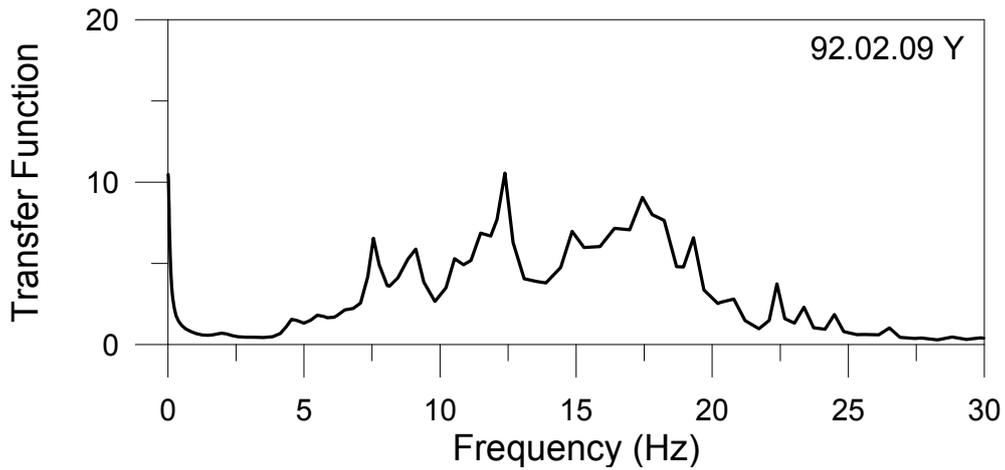


圖 6.16-12 上下游方向之加速度傳遞函數(92.02.09)

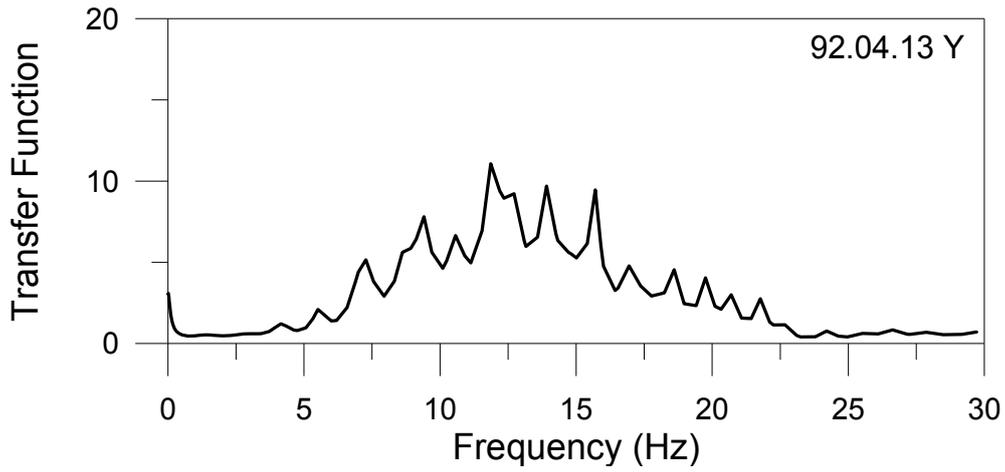


圖 6.16-13 上下游方向之加速度傳遞函數(92.04.13)

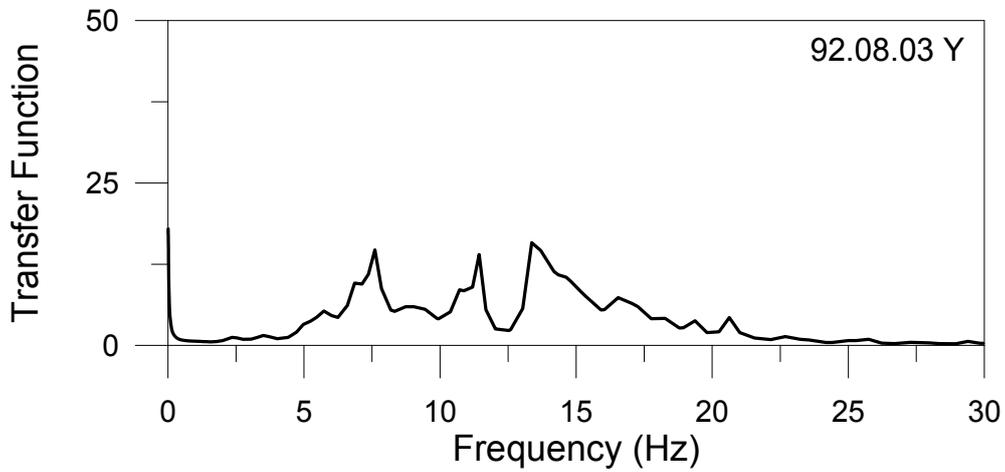


圖 6.16-14 上下游方向之加速度傳遞函數(92.08.03)

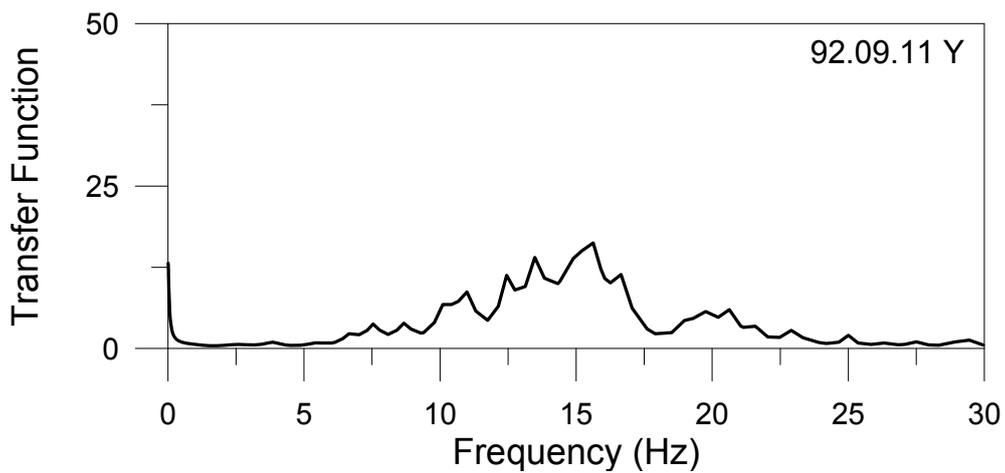


圖 6.16-15 上下游方向之加速度傳遞函數(92.09.11)

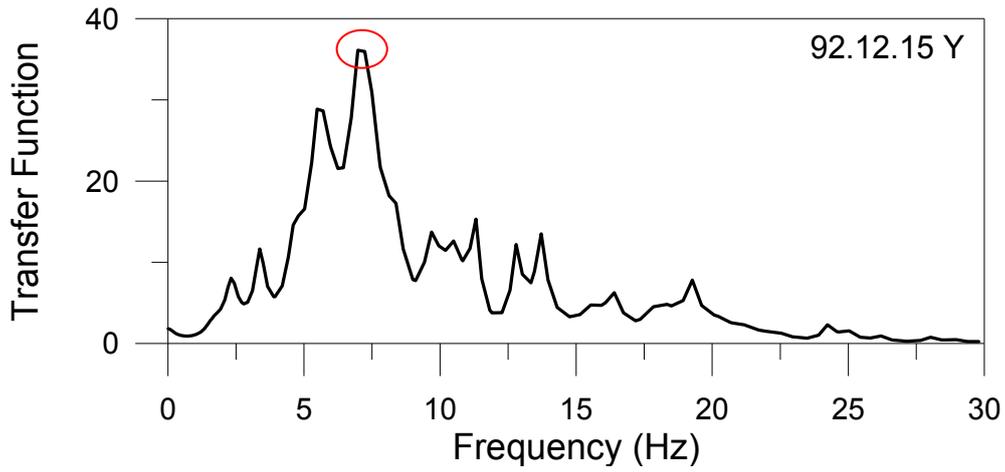


圖 6.16-16 上下游方向之加速度傳遞函數(92.12.15)

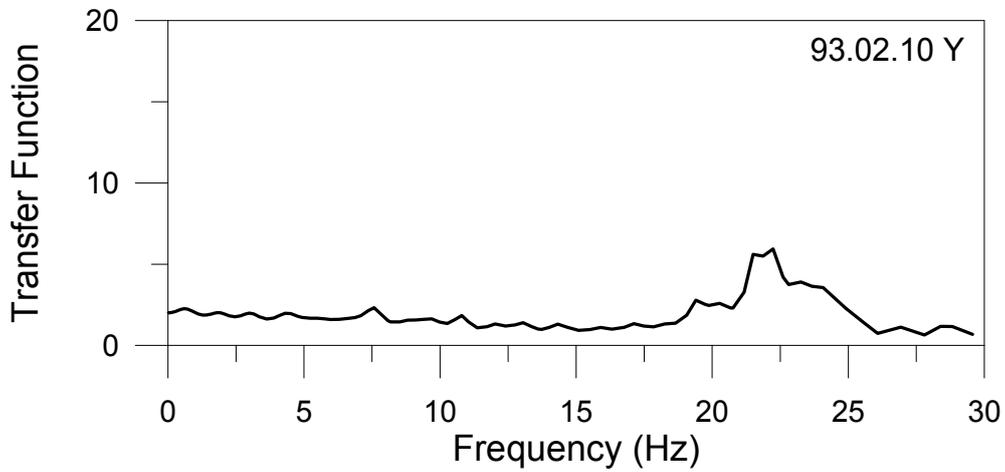


圖 6.16-17 上下游方向之加速度傳遞函數(93.02.10)

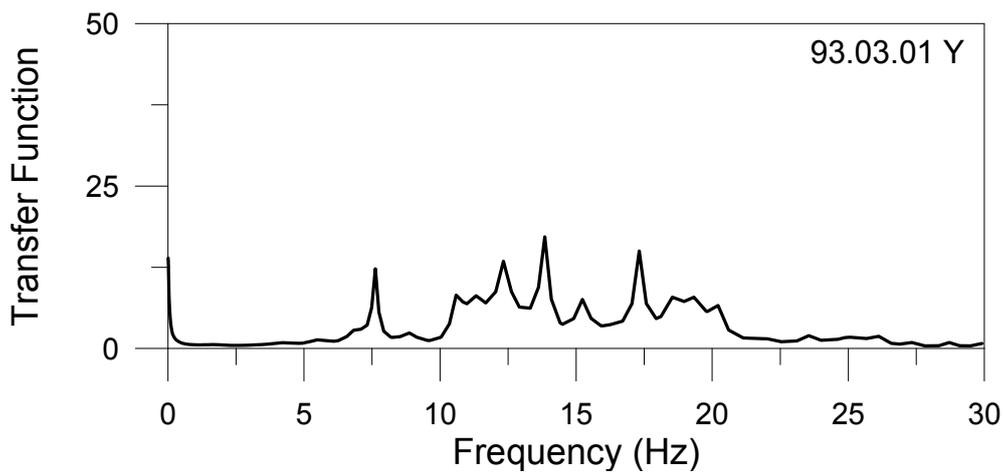


圖 6.16-18 上下游方向之加速度傳遞函數(93.03.01)

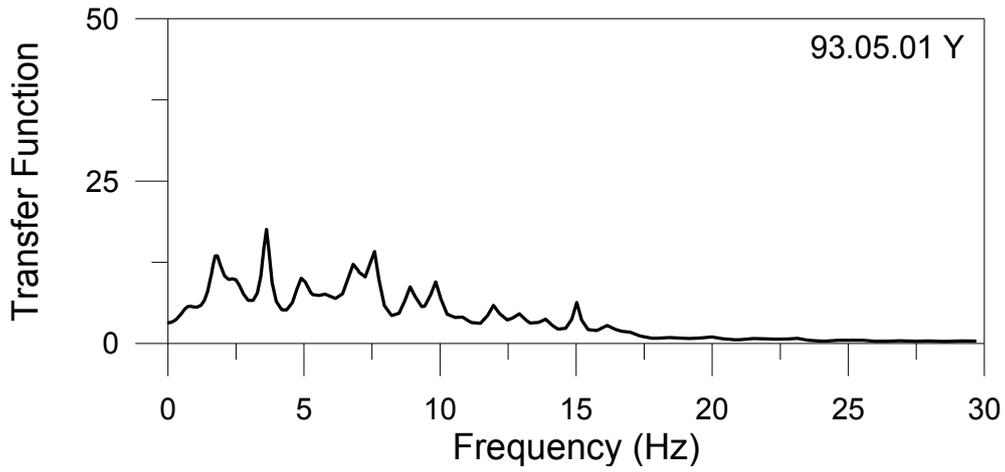


圖 6.16-19 上下游方向之加速度傳遞函數(93.05.01)

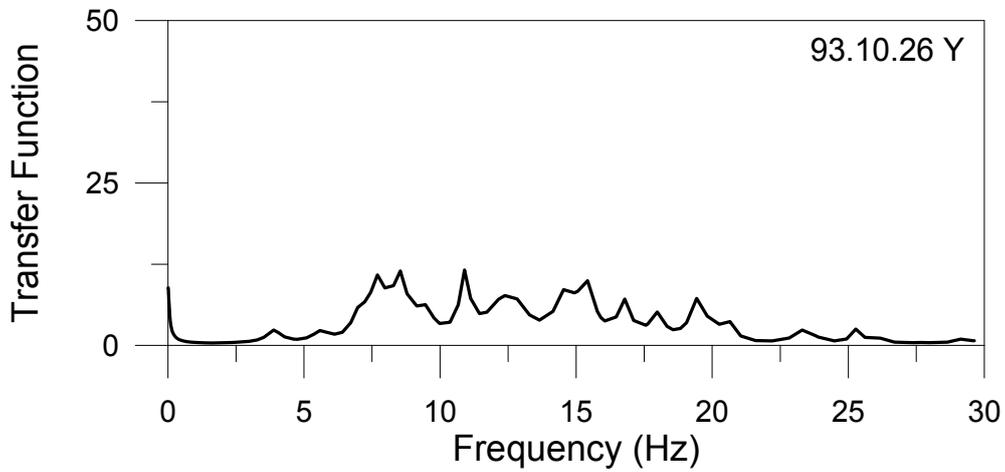


圖 6.16-20 上下游方向之加速度傳遞函數(93.10.26)

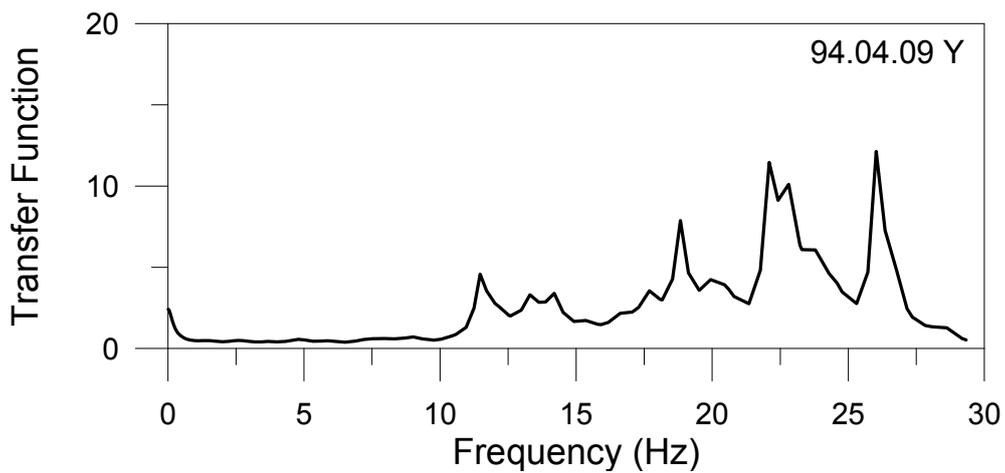


圖 6.16-21 上下游方向之加速度傳遞函數(94.04.09)

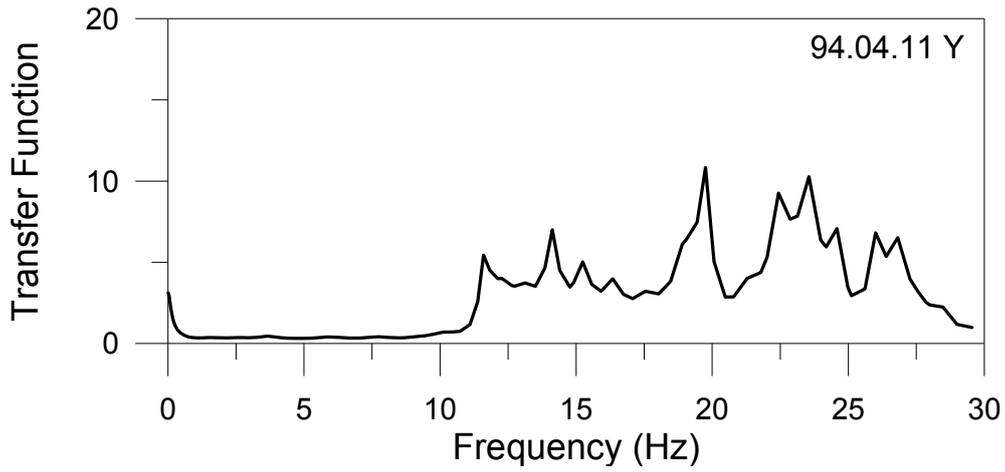


圖 6.16-22 上下游方向之加速度傳遞函數(94.04.11)

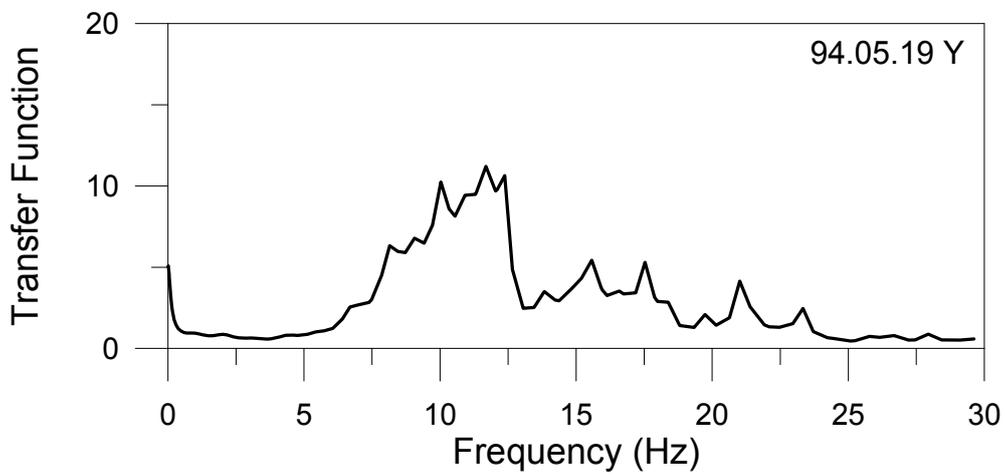


圖 6.16-23 上下游方向之加速度傳遞函數(94.05.19)

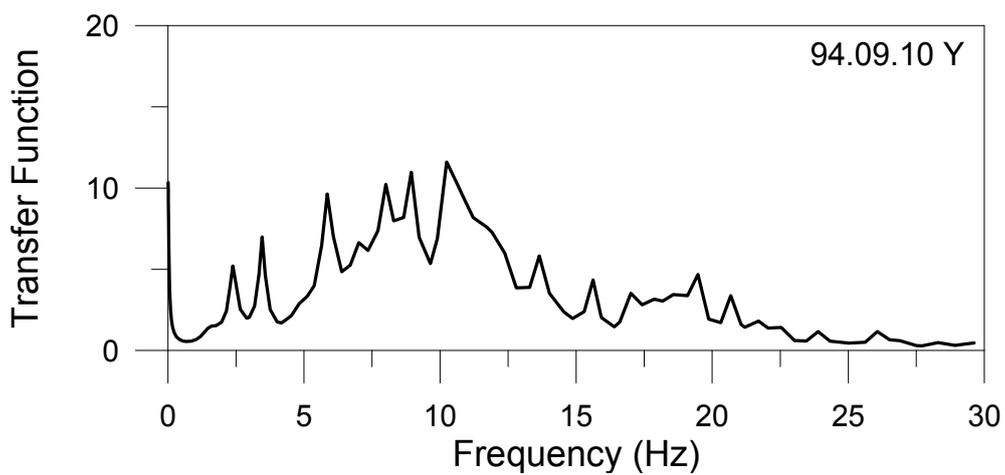


圖 6.16-24 上下游方向之加速度傳遞函數(94.09.10)

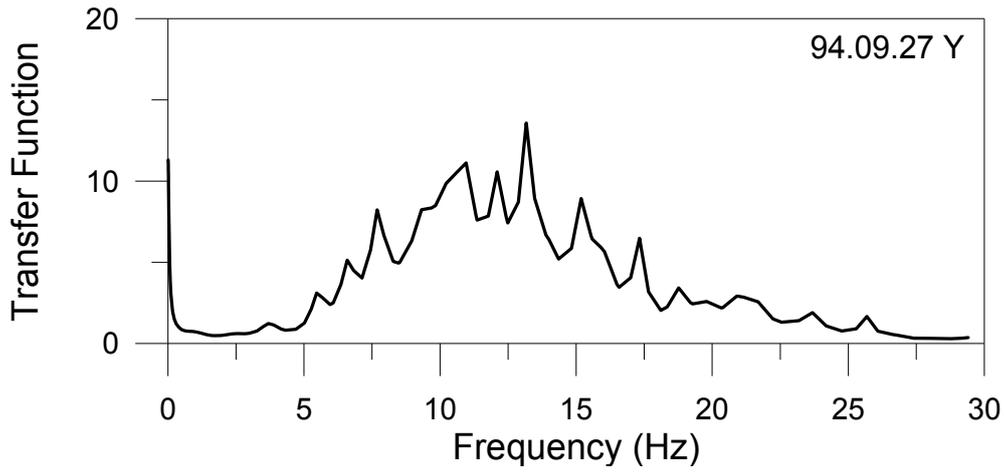


圖 6.16-25 上下游方向之加速度傳遞函數(94.09.27)

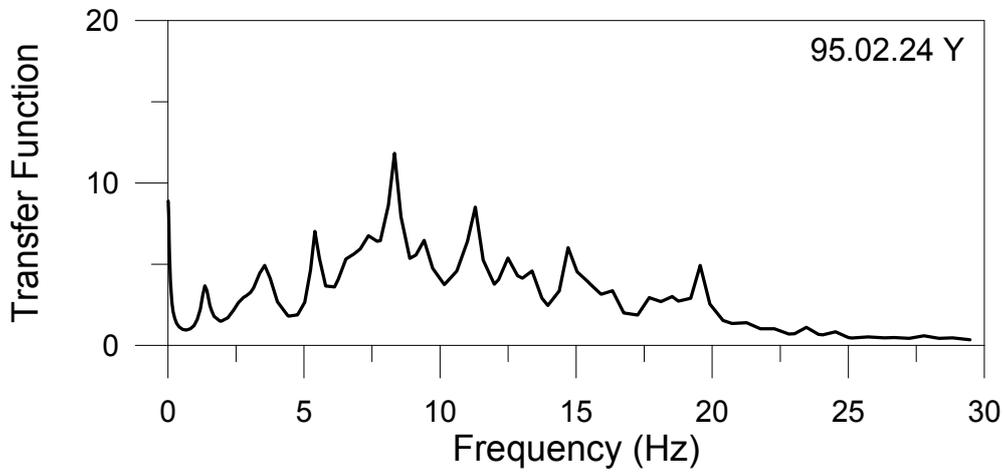


圖 6.16-26 上下游方向之加速度傳遞函數(95.02.24)

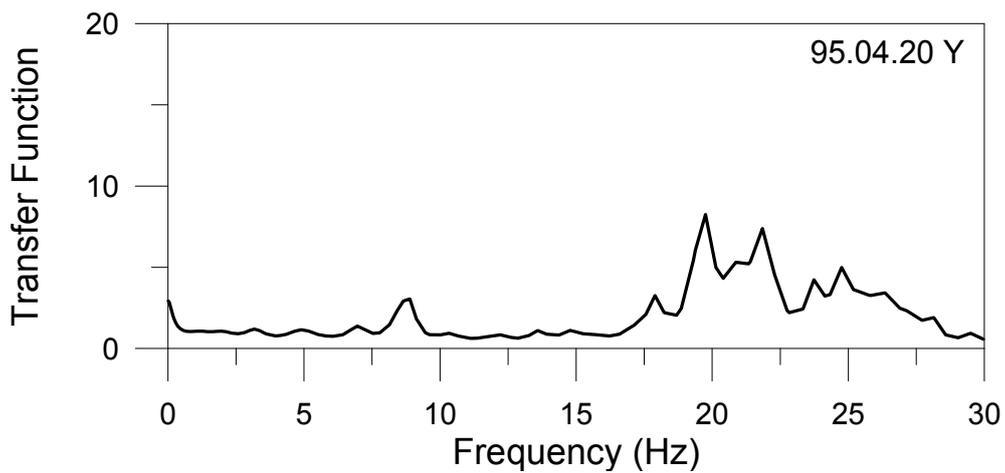


圖 6.16-27 上下游方向之加速度傳遞函數(95.04.20)

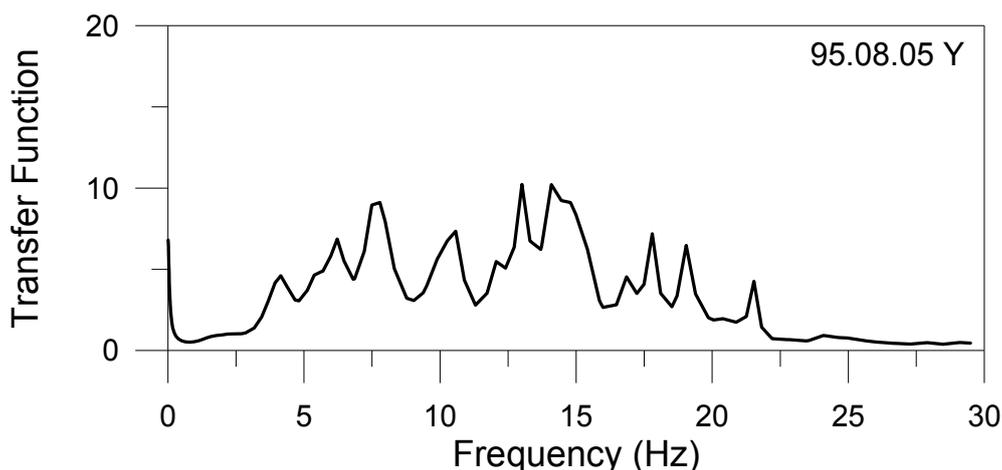


圖 6.16-28 上下游方向之加速度傳遞函數(95.08.05)

本研究主要利用谷關壩及天輪壩之壩體振動歷時進行結構系統識別分析，俾便瞭解壩體之動力特性是否有異常變化的情況及歷次地震分析結果之差異程度。根據本案之分析結果顯示，頻譜趨勢反應出不同壩體(型)之特性，谷關壩(拱壩)有較顯著之單一峰值，而天輪壩(重力壩)頻譜峰值則有呈現分佈於某一頻寬的趨勢，其頻寬範圍大致穩定分佈於 5~20Hz 之間。此外，90 年至 95 年地震儀所記錄之加速度峰值普遍小於 20gal，兩壩體之土木結構應無結構性的損傷發生。系統識別分析主要係根據強震儀所記錄之加速度反應歷時求得壩體結構整體之動力特性(如振動頻率)，因此可作為壩體(土木結構)安全診斷之參考依據，若本次地震與先前地震事件分析所得之振動特性差異較為顯著，則壩體結構可能有損傷發生，系統識別的結果可發揮預警的作用，並提醒相關單位針對壩體結構之局部區域進行檢查(如壩體、壩座或壩基)，以瞭解壩體結構受震後的狀況，若有損傷，則可即時採取相關緊急應變措施。

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 96 年 10 月 4 日至 5 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，在課程的規劃上增加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、水庫安全監測資料之分析與研判實務、混凝土重力壩之系統識別分析及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 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包括水利署各單位、水庫管理單位及工程顧問公司等共 64 人，對未來水庫安全相關實務之執行上有相當助益。教育訓練之實際執行情形如所示。

表 7.1 水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練課程時間表

| 時 間 | 講 題 |
|-------------|--|
| 十月四日 (四) | |
| 08:00~09:00 | 報到 |
| 09:00~10:30 | 傳輸線式監測技術在水庫安全監測之應用：光纖監測技術 主講人：國立交通大學防災中心 黃教授安斌 |
| 10:30~10:40 | 休息時間 |
| 10:40~12:00 | 傳輸線式監測技術在水庫安全監測之應用：TDR 監測技術 主講人：國立交通大學防災中心 林教授志平 |
| 12:00~13:00 | 午餐 |
| 13:00~16:20 | 先進傳輸線式監測技術分組參觀與實作： （一）光纖安全監測技術 （二）TDR 安全監測技術 （三）TDR 泥砂濃度量測技術 介紹人：國立交通大學防災中心 黃教授安斌、林教授志平 |
| 16:20~17:40 | 水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關專題綜合討論(一) 【與會講員】 |
| 十月五日 (五) | |
| 08:30~10:30 | 水庫安全監測資料之分析與研判實務 主講貴賓：台北翡翠水庫管理局 羅正工程司克信 |
| 10:30~10:40 | 休息時間 |
| 10:40~12:00 | 混凝土重力壩之系統識別分析 主講人：國立交通大學防災中心 王教授彥博 |
| 12:00~13:00 | 午餐 |
| 13:00~14:20 | 非破壞性技術於水庫安全檢測之應用 主講人：國立交通大學防災中心 林教授志平 |
| 14:20~14:30 | 休息時間 |
| 14:30~16:20 | 非破壞檢測技術實作：表面波震測、地電阻量測 介紹人：國立交通大學防災中心 林教授志平 |
| 16:20~17:40 | 水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關專題綜合討論(二) 【與會講員】 |

表 7.2 水庫壩體監測及檢測與安全診斷教育訓練講員簡歷

羅克信 先生 簡歷：

學歷：國立交通大學 土木工程所碩士

經歷：

1. 2005/04 至今 臺北翡翠水庫管理局正工程司
2. 2001/02~2005/03 臺北翡翠水庫管理局副工程司
3. 1999/01~2001/01 臺北翡翠水庫管理局幫工程司

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 交通大學土木工程系教授
2. 1994/02~2001/07 交通大學土木工程系副教授
3. 1991/08~1994/01 中華工學院土木工程系副教授
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

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
4. 1995/05~1999/07 Purdue University 土木工程系 研究助理
5. 1994/08~1995/05 Purdue University 土木工程系 教學助理



圖 7.1 教育訓練報到情形



圖 7.2 教育訓練開幕情形



圖 7.3 教育訓練上課情形



圖 7.4 茶敘時間意見交流



圖 7.5 光纖安全監測技術參觀與實作



圖 7.6 TDR 安全監測技術參觀與實作



圖 7.7 TDR 泥砂濃度量測技術參觀與實作



圖 7.8 課程綜合討論時間

八、參考文獻

1. 國立交通大學防災中心，民國 88 年，「寶山第二水庫岩石之大地工程特性研究」，行政院經濟部水利署。
2. 國立交通大學防災中心，民國 90 年，「土石壩鑽探技術之評估研究」，行政院經濟部水利署。
3. 國立交通大學防災中心，民國 91 年，「寶山第二水庫蓄水後邊坡穩定性研究」，行政院經濟部水利署中區水資源局。
4. 國立交通大學防災中心，民國 94 年，「湖山水庫工程計畫：光纖監測系統應用於蓄水庫邊坡穩定之研究」，行政院經濟部水利署中區水資源局。
5. 盧吉勇，民國 92 年，「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。
6. Al-Hunaidi M.O., 1994, "Analysis of dispersed multi-mode signals of the SASW method using the multiple filter/crosscorrelation technique." , Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 13, pp. 13-24.
7. Andrus R., Chung R., Stokoe II, K., and Bay, J., 1998, "Delineation of densified sand at Treasure Island by SASW testing in Geotechnical Site Characterization" , Proceedings of the 1st International Conference on Site Characterization-ISC' 98, Robertson, P. K. and Mayne, P. W.(eds.), vol. 1, Balkema, pp. 459 – 464.
8. Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G., Theilen, F., 2004, "1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion" , Geophysics, 69, pp. 330-44.
9. Boussinesq, J., 1885, "Application des Potentiels à L'Étude de L' Équilibre et due Mouvement des Solides Élastiques", Gauthier-Villars, Paris.
10. Cerjan C, Kosloff D, Kosloff R, Reshef M., 1985, "A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations." , Geophysics, vol. 50, pp. 705-8.

11. Donoho, D.L. and I.M. Johnstone, 1994, "Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage," *Biometrika*, vol.81, pp.425-55
12. Black J.T., Dowding, C., 2004, "Finite Element Analysis of TDR Cable-Grout-Soil Mass Interaction During Localized Shearing" , *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130, pp. 231-39.
13. Forbriger, T., 2003, "Inversion of shallow-seismic wavefields: II. Inferring subsurface properties from wavefield transforms" , *Geophysical Journal International*, 153, pp. 735-52.
14. Foti S., 2000, "Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves.:", Politecnico di Torino, Ph.D. Dissertation.
15. Gabriels P, Snieder R, Nolet G., 1987, "In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves." , *Geophys Prospect*, vol..35, pp.187 – 96.
16. Ganji, V., Gucunski, N., Nazarian, S., 1998, "Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves" , *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124, pp. 757-70.
17. Gucunski N., and Shokouhi P., 2004, "Application of Wavelets in Detection of Cavities Under Pavement by Surface Waves." , *Proceedings of the 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, paper 10.09.
18. Haegeman W., Van Impe W.F., 1997, "Stiffness parameters for soils – SASW experiences" , *Third Geotech. Eng. Conf. – Cairo*.
19. Herrmann R.B., 2002, "Computer programs in seismology" , *Sanit Louis University, U.S.A.*
20. Juran I., 1986, "Soil Nailing in Excavations" , *Notes prepared for the Cooperative Program, Project 24-2, C.B. Villet and J.K. Mitchell, Eds., Appnd.*

- 3.A., VI.
21. Levander AR., 1988, "Fourth-order finite-difference P-SV seismograms." , Geophysics, vol. 53, pp. 1425-36.
 22. Lin C-P, Chang T-S., 2004, "Multi-station analysis of surface wave dispersion." , Soil dynamics and earthquake engineering, vol. 24, p. 877-86.
 23. Lin, C-P., Chang, C-C., and Chang, T-S., 2004, "The Use of MSASW Method in the Assessment of Soil Liquefaction Potential" , Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, pp. 689-698.
 24. Lin, C.-P., Chang, T.-S., and Lin, C.-H., 2005, "Towards the Standardization of Multi-station Surface Wave Method for Site Investigation, " Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 18th Annual Meeting SAGEEP 2005, Atlanta, USA, pp. 199-214.
 25. Lin, C-P, Chung, C.-C., and Tang, S.-H., 2006a, "Development of TDR Penetrometer through Theoretical and Laboratory Investigations: 2. Measurement of Soil Electrical Conductivity" Geotechnical Testing Journal, Vol. 29, No. 4, Paper ID GTJ 14315.
 26. Lin, C-P, Chung, C.-C., and Tang, S.-H., 2006b, "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.
 27. 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.
 28. O' Neill, A., Matsuoka T., 2005, "Dominant higher surface-wave modes and possible inversion pitfalls" , Journal of environmental and engineering geophysics, 10, pp. 185-201.

29. Park CB, Miller RD, Xia J., 1999, "Multichannel analysis of surface waves: Geophysics" , vol. 64, pp. 800-808.
30. Prokis JG, Manolakis DG., 1992, "Digital signal processing-principles, algorithms, and applications" , 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
31. Reese, L.C., 1983, "Handbook on Design of Pile and Drilled shafts Under Lateral Load," U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington ,D.C..
32. Ryden N., Park C.B., Ulriksen P. and Miller, R.D., 2004, "Multimodal approach to seismic pavement testing" , Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, vol. 130, pp. 636-645.
33. Virieux J., 1986, "P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference methos." , Geophysics, vol. 51, pp. 889-901.
34. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., 2000, "Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher-modes." , 70th SEG Ann. Mtg. Exp., pp. 1295-98.
35. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., and Tian, G., 2003, "Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes" , Journal of Applied Geophysics, 52, pp. 45-57.
36. Xu C., and S.D. Butt., 2006, "Evaluation of MASW techniques to image steeply dipping cavities in laterally inhomogeneous terrain." , Journal of Applied Geophysics, vol.59, pp.106-116.
37. Zhang S.X., Chan Lung.S., 2003, "Possible effect of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion" , Journal of Applied Geophysics, 53, pp. 17-29.

附錄一 委託服務計畫建議書審查意見及辦理情形

| 蘇委員苗彬 | |
|---|--|
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、本計畫為延續性計畫，應有較明確的說明，以了解過去完成的成果及相關技術的回顧。 | 在未來報告中增加前期研究成果之回顧，參考期中報告第三章。 |
| 二、報告中仍偏概念，應加強說明實用性，如何在實地可運用，以利主辦單位了解。研究的部份為研究單位所關心，主辦單位應較關心能幫現場什麼忙，能解決什麼樣的問題。 | 本計劃以技術研發為主要目標，惟為便利主辦單位之需求，現地應用之說明將於後續加強。 |
| 三、本案研發應注意可行性，如要在舊壩上鑽孔佈置，可能很難被現地單位接受，如何安裝佈置可能很重要。 | 參考委員意見，在監測研發的章節增加一子章節討論此一問題，參考期中報告4.3節。 |
| 四、本案名稱監測、檢測與安全診斷，相關技術應放在同平台上作檢討與評估，只集中在少數新技術的研發，在推廣與實施上可能不容易，非集中在工作構想，應加強實施方法的說明，以確定其可行性。 | 本計劃分三年進行，各年度有其研發重點，未來研究報告會納入前期成果回顧。若工作內容涉及未進行研究改善之相對定型的方法，將加強實施方法說明。 |
| 五、研究成果到可行到成為規範納入經常性工作，仍有很長的距離，仍得經過很多驗證、辯論、檢討及測試，才能納入實施。 | 感謝委員之鼓勵，本研究團隊將持續推動研究成果之驗證、測試等工作，期最終能對於壩體監測與檢測有新的貢獻。 |
| 楊委員朝平 | |
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、請多蒐集相關潰壩原因及安全診斷判釋標準之資料，以瞭解研究定位及此成果於壩體安全檢測之應用方向。 | 感謝楊委員指教。潰壩原因及安全診斷判釋標準之資料已整理於第一年計畫期末報告中，在未來報告中增加前期研究成果之回顧，請參考期中報告第三章。 |
| 二、儀器之耐久性評估，請考慮計畫期程。 | 關於光纖感測器耐久性試驗，其參考國家標準 CNS3556 之老化試驗法，詳細規則請見 4.1.4 節。目的藉由加溫的方式加 |

| | |
|---|--|
| | 速光纖感測器老化速度以模擬時間之效用，實際試驗時間約一個月左右。 |
| 三、期盼有實做及傳統監測數據之驗證結果。 | 光纖感測器耐久性試驗為室內之實測，在室內檢驗時可與傳統壓力計做比較。第三年度的工作內容將有實做部分。 |
| 陳委員文政 | |
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、壩體安全診斷系統研究挑選天輪壩及谷關壩，兩個壩體所在位置較接近，相距約 10 公里，其地層亦相似(前者為白冷層，後者為達見砂岩)。建議另擇一離 921 地震震央較近之壩體，如水里附近之下池壩或水里壩，或不同地層(廬山層)之霧社水庫壩體，做為進行研究對象。 | 謝謝委員的建議。由於當初搜集混凝土重力壩之地震儀資料時，以本案所提之兩座水庫較為完整(有加速度歷時轉檔資料，水里壩則無加速度歷時資料)，因此本案遂初步決定以天輪壩及谷關壩作為研究對象。 |
| 陳委員俊宗 | |
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、本計畫宜界定於技術研發的範疇，以求得大壩壩體行為為目標。 | 遵照委員意見，在研究背景加強說明。 |
| 二、本計畫目標如能達成，對未來大壩管理維護助益大，值得肯定。 | 感謝委員之肯定。 |
| 三、台灣地區未來新建大壩機會不多，故未來對舊有壩之監測為重要工作，因此研究方向宜對新儀器如何設置於舊有壩體，應予以重視。 | 在監測研發的章節增加一子章節討論此一問題，參考期中報告 4.3 節。 |
| 四、為提高本計畫研發儀器之可信度，宜研究於湖山水庫大壩設置對照組，另亦請研究於寶二水庫溢洪道設置之可能性。 | 本計畫屬新技術研發，若能有機會於所建議場址進行對照監測，增加監測系統之贅餘性，將全力配合。 |
| 五、震波震測之深度能到達範圍請予研究，且在不同之材料內其精確度如何？請說明。 | 就本計劃所標的之表面波震測而言，在允許足夠測線展距下可達 50 米。其精確度與材料沒有直接關係，依需求而定。 |
| 六、耐久性之比較除了追求儀器之耐久性外，宜著重於與傳統儀器之比較。 | 因本計畫著重於所研發之光纖光柵水壓計之耐久性評估，但本團隊會盡可能蒐 |

| | |
|---|--|
| | 收集市面上所販售之儀器相關測試報告並予以比較。 |
| 七、TDR 錯動變形量觀測是否會受不同材料性質變化之影響。 | 在良好控制回填水泥砂漿情形下不會有明顯影響。 |
| 八、本研究計畫之各種儀器之監測方法宜研定手冊，以利現場人員操作。 | 遵照辦理，將於期末成果報告中研擬。 |
| 九、有關地震事件記錄及水位高程資料，請交大儘速提出，由水利署協助取得。 | 遵照辦理。 |
| 十、未來有關自動監測可能性予以研究，以利完整監測資料之取得。 | 遵照辦理。 |
| 十一、本研究之儀器研發請注意量產之可行性。 | 遵照辦理。 |
| 陳委員振欽 | |
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、p.45 預定進度甘梯圖年度誤植為 95 年度，應修正為 96 年度。 | 遵照辦理，已修正。 |
| 二、本計畫研發之技術可否利用原有之觀測井(或 PVC 管)? 另其耐久性及將來維護與更新之可行性，請說明。 | 這部將於監測技術研發章節中增加一子章節說明，詳 4.3 節。 |
| 水源經營組宋科長恒輝 | |
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、先進傳輸線式監測，係以另鑽孔之方式安裝後量測，而目前於壩體鑽孔困難度高，是否可利用舊孔，或建議解決方案。 | 這部分在 4.3 節中討論。 |
| 二、地震行為之系統識別分析，簡報提到多少 gal 時要做特別檢查，水利署現階段規定係地震規模 4 級以上須做特別檢查，至級數與 gal 量間之關係如何，因壩之特性以及高度不同，如何以 gal 量做為判斷地震後檢查之依據，值得探討，請提供建議。 | 根據水利署目前之規定，4 級(以上)地震相當於氣象局震度分級標準之中震，其地表加速度範圍為 25~80gal，若為 5 級(相當於強震)，其地震之地表加速度範圍為 80~250gal，因此，水利署現階段規定震度 4 級以上須做特別檢查應屬合宜。 |

| | |
|--|--|
| <p>三、p.12，圖 4.2 橫座標壓力單位建議改以 kg/cm²，以符合目前水庫管理單位人員之習慣。</p> | <p>已將kPa單位更改於kg/cm² 的單位，請見p.16，圖 4.6。</p> |
| <p>四、p.5 傳輸線式係採上孔式設計，將精密儀器置於地表，未來之防護請一併檢討。</p> | <p>遵照辦理。</p> |
| <p>水源經營組邱工程司士恩</p> | |
| <p>委託服務計畫建議書審查意見</p> | <p>處理情形</p> |
| <p>一、本計畫委託之目的，係擬透過改善、研發進而提升監測效能與非破壞檢測技術，以強化及落實蓄水庫安全檢查，故其成果應能有效提供現地實務之使用，鑒於本項工作業已邁入第 2 年度，且其第 1 年度已獲具初步成果，為利本年度工作執行驗收需要，暨續供未來年度經費爭取憑據，建請受託單位提出可供檢視之具體成果（包括執行階段預期及實際驗證或達成情形、遭遇困難待解決突破事項、相關成品與操作手冊初稿等）。</p> | <p>壩體實際驗證部份為第三年計劃內容，實驗室試驗成果可先行提出，執行階段預期、遭遇困難待解決突破事項、相關成品與操作手冊初稿部份，遵照辦理。</p> |
| <p>二、壩體安全診斷系統工作之執行，除從事建構合宜之系統識別外，如何透過該系統診斷技術，分析壩體異常現象或問題可能原因，並預測危害程度，即時提供水庫管理單位安全維護與應變參考等之相關研究成果，亦宜列屬年度工作重點。</p> | <p>本年度工作之定位在於研發改良壩體監測與檢測之工具及提昇監測資料分析方法，第三年工作將綜合研究成果提出各潛在破壞模式之安全診斷 guideline。</p> |
| <p>三、所提教育訓練課程，除簡報所列各項內容外，宜適當安排實地操作作業，並為達雙向互動效果，建請於研討會前設計討論議題（不限問卷），事先函送與會單位或人員，同時儘先蒐集（回收）意見，屆時彙提會中探討。</p> | <p>遵照辦理。</p> |

| 水源經營組 | |
|--|-----------|
| 委託服務計畫建議書審查意見 | 處理情形 |
| 一、有關光纖及 TDR 系統之研發，97 年度預定進度為進行現場安裝測試，故本年度應加速完成包括感測變形、水壓及資料分析方法，完成多工、多點、自動化擷取系統之研發整合，並進行初步測試。 | 遵照辦理。 |
| 二、有鑑於去年計畫執行，德基水庫因資料格式問題無法進行分析，宜儘速了解谷關水庫、天輪壩其強震儀記錄資料是否周全且適合分析。 | 遵照辦理。 |
| 三、依契約條款規定，本計畫期中、期末報告書提送時限分別為 96 年 7 月 15 日及 10 月 31 日，請修正 p.45 預定進度甘梯圖。 | 遵照辦理，已修正。 |
| 結論 | |
| 一、本研究計畫已獲致初步成果，宜適時發表論文或陳報主管瞭解，以爭取認同及後續推動。 | 遵照辦理。 |
| 二、本計畫研發之新技術，可利用教育訓練廣為宣導，或於研發技術成熟後納為規範辦理。 | 遵照辦理。 |
| 三、寶二水庫溢洪道陡槽裂縫滲水問題，若適用本計畫研發技術進行探測調查，請交通大學協助辦理。 | 遵照辦理。 |
| 四、各審查委員及主辦單位意見請交通大學參照。 | 遵照辦理。 |
| 五、交通大學所提之委託服務計畫建議書原則認可。 | 遵照辦理。 |

附錄二 期中報告審查意見及辦理情形

| 郭委員耀程 | |
|--|---|
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、本計畫引用新進技術進行監測設備及系統研發，有助於水庫安全管理技術提升，主辦及執行單位的用心與努力，深表讚同與肯定。 | 感謝委員之認同與肯定。 |
| 二、水庫安全管理係長期投入的工作，建議類似本計畫之技術研發應妥善規劃及持續辦理，並有系統將各項研發資料與技術建檔，以利水庫管理單位參考及經驗傳承。 | 感謝委員之認同，後續若繼續有相關計畫定當全力投入執行。 |
| 三、各項技術研發應有其動機，建議就本計畫研發之設備與系統，應於成果報告進行現有及傳統觀測設備與系統之比較，並指出研發標的的適用範圍與條件，以利各單位未來採用，不致造成管理困擾。 | 遵照辦理，請參閱 4.6.1 節。 |
| 四、目前係期中報告審查，主要為本計畫理論及研發過程之文字說明，建議於成果報告務必提出現地觀測成果及分析，以利未來實務應用前參考採用。 | 本年度計畫之執行以研發為主要目標，現地觀測成果將於明年度計畫中執行。 |
| 五、各項監測設備之研發，除其監測精度及準確性之追求，亦應考量日後維護及校驗之便利性及成本，否則將使其未來推廣及採用受限。 | 遵照辦理。光纖光柵感測器是在交通大學研發製作，維修與校驗都沒有問題。TDR 之變形監測感測器為一般電纜其取得容易。而光纖光柵解讀儀已進入研發階段，其目地亦是希望能將此一技術本土化，以便於未來之推廣。 |
| 陳委員在中 | |
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、在先進傳輸線式監測光纖部分，請將光纖的壽命亦納入特性說明及考 | 本計畫前半段之重點就是測試光纖光柵壓力計之耐用性，其結果已展示於期中 |

| | |
|--|---|
| <p>量，另光纖的孔隙水壓亦請採現況測試並室內試驗採 10kg/cm² 作標準測試。</p> | <p>報告。現已完成新製作之一組光纖光柵水壓計且可適用於 10kg/cm² 的壓力，該光纖光柵水壓計之率定曲線如圖 4.20 所示。</p> |
| <p>二、在非破壞性檢測技術應用部分，請將烏山頭水庫與新山水庫所做成果做一建議與分析說明，俾供管理單位在操作與監測或改善方面之參考。</p> | <p>烏山頭水庫為私人顧問公司之委託案，不便自行提供。新山水庫之案例已整理於上年度報告中，敬請參閱。</p> |
| <p>三、壩體安全診斷系統部分請將圖 6.7 水位與自然頻率線性關係做一補充說明，另圖 6.10(c)為何在 92.1.22 的傅氏頻譜有雙波峯請說明，另請利用相同地震事件同時評析天輪與谷關二不同壩型下的動力特性，至於有無破壞或有問題的壩體其傅氏頻譜很難予認定，可否由試驗探討作類比分析。</p> | <p>1. 圖 6.7，水位與自然頻率線性關係將遵照委員建議於報告中加以補充說明。</p> <p>2. 土木結構或壩體之振動反應係由數個模態(modes)之振動反應疊加而得，通常以第一模態或稱為基本模態(fundamental mode)所佔的比例較大。由圖 6.9(c)之加速度歷時反應可知，壩體振動延時的時間較短，可能因該次地震擾動的時間短且迅速，因此把其它較高頻的振動模態激發所致(如第二個峰值)，該峰值可能為壩體的第二振動模態或地表本身之振動模態。</p> <p>3. 本案於期中報告中僅先針對兩座水庫各取五次地震事件進行分析，後續將進行其它地震事件之分析，並比較於相同地震事件之下，天輪與谷關兩種不同壩型之動力特性差異。</p> <p>4. 由於壩體結構極為龐大，欲進行有效的人為動力試驗有其難度。此外，壩體結構僅有一組地震儀記錄資料，所得資訊不夠全面，亦增加吾人研判的困難度。然而，地震的發生猶如已針對壩體結構進行真實的結構動力試驗，吾人可根據歷年所發生之地震事件進行頻譜分析或系統識別分析，透過頻譜分析所得之頻率內涵分佈情形或峰值所在位置之變化程度進行比對分析，以初步研判壩體是否有結構性的損傷。</p> |

| 中水局林工程員士元 | |
|--|---|
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、一般定義之強震紀錄為大於 50gal，未達強震其反應譜之輪廓亦僅能供參考，本計畫谷關壩 4 級以上之紀錄僅 2 筆，天輪壩 4 筆，其樣本數與可靠度是否足夠，建請考量。 | 若地震儀配合資料擷取系統的解析度不足，則振動反應的確要大於某一門檻值(或雜訊限度)方能獲得清晰的加速度振動反應訊號。惟管理單位所提供之地震記錄資料極其有限，選擇不多。本計畫對於分析結果之解讀上會考量可信度加以斟酌。 |
| 二、水利署現階段規定震度 4 級以上須做特別檢查，地震國家災害應變中心地震應變編組開設查報規定為震度 5 級以上，因 4 級震地表加速度範圍為 25~80gal，而 50gal 以下又未達一般定義強震，建請酌予調高辦理特別檢查為 50gal 以上。 | 一般而言，50gal 以下之地震對大壩安全並無影響，委員有關地震強度達 50gal 以上方辦理特別檢查之建議應屬合理。中央氣象局所訂地震分級標準，在同一級數內之地震強度上下限確有顯著之差異，純以地震級數達四級即啟動特別檢查確有檢討之必要。 |
| 南水局盧副工程司炳堃 | |
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、p.8 有關新山水庫模擬結果與實際是否相符，如相符，則代表新山水庫蓄水位是否不能升高？及需檢討新山水庫緊急洩降能力？ | 模擬結果所發現之現象與前期電探及現地觀察結果相符，但庫水進入殼層所造成穩定性之影響，需要根據所發現之現況另外評估。 |
| 二、p.54 提到電子感應器易受山區雷擊的影響...受損無法使用。此處電子式水壓計失敗完全考慮因雷擊而失效，是否需考慮其他因素？(如水密性)。 | 感謝委員指教。文中僅以提雷擊一例說明電子感應器亦受現場環境影響而破壞，並非認定其完全受雷擊破壞。文中措辭失當導致誤解，已行改進。 |
| 三、p.87.88 表 5.3 及 5.4 潛在破壞模式可能檢測物理量及方法，建議再釐清。 | 遵照辦理，已重新檢討如表 5.5 及表 5.6 所示。 |
| 水源經營組宋科長恒輝 | |
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |

| | |
|---|--|
| 一、目前多座水庫監測系統老舊或故障者甚多，本計畫之研發可否支援應用，請說明其可行性，明年可否試辦。 | 光纖光柵水壓計於既有壩體之安裝與傳統監測儀器並無重大差異，可以支援應用於現有水庫。明年若經費許可當可試辦。 |
| 二、FBG 與 TDR 分別利用光及電磁波之原理達到監測之目的，傳輸線式監測技術具有耐久性、抗雷擊且可一機多工及多點監測，於水庫長期安全監測具適宜性，惟傳輸線是否有距離之差異性，未來主機置於地面，建議應考量日曬雨淋之影響。 | 遵照辦理。主機之置放以臨近監測位置之可遮蔽結構物為考量。 |
| 三、P.14 FBG 水壓計構造示意圖之右圖 (Botton view) 英文名詞未完整，請修正。 | 遵照辦理，已修正如圖 4.4 所示。 |
| 四、P.18 圖 4.9 是否屬於恆溫情況下之圖示，亦或受溫度影響之變化曲線，請說明。 | 本光纖光柵水壓計含兩個不同波長的光纖光柵，當外在水壓改變時，其中一光纖光柵波長值會受外力而產生飄移，另一光纖光柵只對外在溫度變化而改變。圖 4.9 所呈現的圖形是已作溫度修正。 |
| 五、FBG 水壓計之耐久性，建議能進一步評估確認，以為未來與傳統式做比較，若價格合理且壽命較長，將廣為宣傳利用。 | FBG 耐久性試驗持續在進行，將在未來之報告中納入最新結果。唯現有結果已充分顯示其穩定性與耐用性，價格也合理，已達推廣利用之標準。 |
| 六、P.16 提及光纖黏貼膠黏著力之測試，最後陳述三種類型黏貼膠之黏著力均足夠，惟未說明那三種類型，建議補充 (如材料性質)。 | 遵照辦理，請參閱表 4.1 所示。 |
| 水源經營組邱助理工程司士恩(書面意見) | |
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、本技術研發執行階段之預期成果、辦理情形、仍待驗證事項等，宜請列表呈現。 | 本年度預計進行之內容已全數完成，相關進一步情形已統整於結論中。 |
| 二、上述研發工作辦理過程，進行相關驗證所列相對假設條件，包括檢測之限制範圍 (含影響因子)、靈敏精度、解析等，宜併述明。 | 各相關假設條件已說明於各探討及驗證章節中。 |

| | |
|---|--|
| 三、本年度有關先進傳輸線式監測技術之研發，應辦之光纖及 TDR 監測技術多工化與自動化擷取系統整合工作，宜於期末報告補充說明。 | 遵照委員建議，請參閱 4.2 及 4.5 節。 |
| 四、有關光纖及 TDR 監測技術，運用於既有壩體安裝適用性部分，宜將近年來曾安裝於湖山水庫、義興電廠邊坡等成果驗證情形，列入報告內。 | 相關成果請參閱 4.3 節。 |
| 五、非破壞性檢測技術，有關壩體表面波震測檢測技術改良部分，宜將改良前後情形，提升成果列入報告內。 | 其改良前後情形已於數值模擬中獲得提升成果，已列於報告 5.1.5 節中。 |
| 六、壩體安全診斷系統有關識別分析研究，本年度選擇谷關壩及天輪壩等，並擷取 90 至 95 年度地震資料，分析是否客觀，建議增加取樣資料，同時考量將 921 地震收錄資料列入。 | 水庫管理單位並未提供 921 地震記錄。由於 921 地震時有些水庫因停電而未能儲存地震記錄，將詢請水庫管理單位提供 921 地震記錄資料。 |
| 七、本報告宜有前言及摘要，請於期末報告補充，另建議於各項技術研發章節末，宜有階段成果討論，以利成果驗收參考。 | 第一、二及三章內容與前言之目的相同；摘要已完成請參閱。 |
| 八、教育訓練課程，有關近年來曾運用或安裝於現地成果，包括新山、寶二、翡翠、霧社、湖山、烏山頭、谷關、天輪等情形，請列入課程分享及供未來可能推廣參考。 | 遵照辦理。 |
| 水源經營組林助理工程司正杰 | |
| 期中報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、TDR 實際應用於現地監測土體變形時，纜線材質、灌漿材料種類、及不同土壤之適用性皆可能影響監測數據判讀之靈敏度及正確性，建議於研究成果中可提出不同現地條件下各項材料選用原則，以利將來實際運用時有所依循。 | 遵照辦理。請參閱 4.3.6 節。 |
| 二、TDR 灌漿材料保護層之厚度是否影 | 本試驗均採用 5cm 是為了控制剪力盒的 |

| | |
|--|--|
| <p>響纜線反應靈敏度及啟動門檻值？ （本報告試驗均採用 5cm）灌漿材料保護層厚度可能影響將來鑽孔之孔徑大小，建議於研究成果報告可提出最適當之灌漿材料厚度及孔徑之建議值。</p> | <p>尺寸相較於灌漿材料直徑足夠大，以避免邊界效應。灌漿材料之面積越大，破壞灌漿材料所需之位移可能增加。鑽孔尺寸之建議請見 4.3.6 節。</p> |
| <p>結論</p> | |
| <p>一、本計畫研發之新技術，應就試用條件、試用範圍、耐久性及推廣應用等方面，加強研究及說明。</p> | <p>遵照辦理。請參閱 4.1 及 4.2 節。</p> |
| <p>二、本計畫之成果將有助於水庫安全管理技術提升，宜持續推動辦理。</p> | <p>感謝認同與肯定，後續有機會定當全力投入研發工作。</p> |
| <p>三、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配合辦理。</p> | <p>遵照辦理。</p> |
| <p>四、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照。</p> | <p>遵照辦理。</p> |

附錄三 期末報告審查意見及辦理情形

| 蘇委員苗彬 | |
|---|---|
| 期末報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、本案主題在技術研發，應特別注意技術本身成熟的強度與將來使用的可靠度，當然包括其耐久性與經濟性，委託單位本身為使用單位，重點應著眼在可使用性，應用方法較重要。 | 感謝委員之建議。本團隊研發改良之最終目標與委員意見一致。 |
| 二、在 p.9 摘要中建議下一年度對同一鑽孔施設不超過 10 個水壓計，目的為何，同一鑽孔是否可量得不同資料與結果，應再考量。 | 感謝委員指教。同一鑽孔施設不超過 10 個水壓計之目的為當初計畫構想，該數量已足夠滿足使用需求，並無其他因素考量。同一鑽孔若安裝多個水壓計時，對於該孔位之水壓隨深度之大小，可得整體的非線性水壓力剖面，對於日後監測及數值分析可大幅突破。 |
| 三、對非破壞性檢測技術之應用與改良，應注意一致性及普遍性，每一種可行已有之技術應平行測試以評定較佳較適用之工具。 | 非破壞性試驗之改良皆是在現有技術下的施測與解讀改良。各適用技術之選用可參考第一年之成果報告。 |
| 四、由水利署出錢支持的技術研發，將來的所有權有關研究成果是否屬水利署擁有，在快到結案時可能要先考慮。 | 有關智慧財產的問題將依相關規定辦理。 |
| 五、期末報告應注意校稿，如 p.45 圖名標示不符，p.47 中兩圖顯示結果並不相符，圖 4.40 中有 S 型的變形顯示管子本身的變形壓縮不太像邊坡變形應有之變化。 | 遵照辦理，已加強校稿修訂錯誤部分。測傾管的變形壓縮可能肇因於灌漿不良，使得測傾管在剪動帶附近受到剪動後其本身勁度作用使灌漿失去與土壤之束制而有變形壓縮產生。 |
| 六、在壩體安全診斷系統研究中，相關理論非常好，但距離真正問題的判釋仍有待進一步深入的探討，是否真正可達成發掘如表 5.5 的各種破壞模式不同的變化，否則系統判釋 | 表 5.5 為潛在破壞模式所能造成的可能異常物理量表，但無一對一關係。使用非破壞性檢測法應先行了解，其做為眾多資訊收集而非惟一使用之工具的角色。 |

| | |
|---|---|
| 目的何在？ | |
| 陳委員在中 | |
| 期末報告審查意見 | 處理情形 |
| <p>一、P.16 圖 4.6 FBG 的水壓計其標定範圍在 4kg/cm²，當壓力上升或下降在高壓部分有偏移現象，請問是否在誤差範圍內，當水壓計在 10kg/cm² 時其趨勢如何？請檢討說明水壓計的適用條件範圍與允許誤差。</p> | <p>感謝委員指教。P.16 圖 4.6 FBG 的水壓計標定圖未顯示該標定數據之 R-squared 值，已修正於 P.16 圖 4.6。該圖顯示其 R-squared 為 0.9999，代表同一壓力狀況下，實際測得的變化量與迴歸曲線所得的值做比較時，其兩點差值已可忽略。而本水壓計所設計之感測範圍為 0~4kg/cm²，故感測 4kg/cm² 以上之水壓時，其率定曲線可能呈現非線性，若到達臨界壓力時，會使得該水壓計破壞。</p> |
| <p>二、對於 TDR 的選線，硬土層配硬線、軟弱層配軟線，另考量灌漿等工法或改善地質條件，請朝 SOP 來將各種適用土質與工法條件加以分類，俾供選取觀測方法時參照。</p> | <p>遵照辦理。本年度計畫中已提出建議草擬，請見 4.3.6 節，將於下年度中以此草擬 SOP 進行現地試用測試。</p> |
| <p>三、先進傳輸線式監測技術為何在同一鑽孔內不得超過 10 個水壓計？其考量原因為何？</p> | <p>感謝委員指教。同一鑽孔施設不超過 10 個水壓計之目的為當初計畫構想，其已可滿足使用需求，並無其他因素考量。同一鑽孔若安裝多個水壓計時，對於該孔位之水壓隨深度之大小的變化可得實際水壓力剖面，對於日後監測及數值分析可有極大助益。</p> |
| <p>四、對於非破壞檢測技術請將前一年與今年研究成果加以彙整，俾在未來建立非破壞檢測技術選用導引時能說明導入，故建議在導引手冊中能增加適用條件，再引入選用觀測方法，另觀測成果分析考量項目與歸類，其成果報告格式及建議改善方案宜在其導引手冊內加以要求，此外有無可能舉二個壩體（一土石壩，一混凝土壩）作實際案例說明，供水庫管理單位參照。</p> | <p>手冊內容遵照辦理，實測部份將與主辦單位協調後另訂。</p> |

| | |
|---|---|
| <p>五、對於混凝土壩的地震震譜反應有區分谷關壩在 20Hz，天輪壩在 25Hz，其研判認定的依據？另單一峰值與頻寬多峰的物理意義應有不同，若考量受地震傳遞能譜不同之影響，應盡速在所選取壩底安裝強震儀，加以釐清，俾了解實際物理意義與壩體安全問題。</p> | <p>謝謝委員的建議。兩座壩體從 90 年至 95 年共分別記錄 28 次地震事件資料，經彙整所有地震事件所得之頻譜可知，谷關壩地震儀訊號之頻率內涵於 20Hz 以後、天輪壩於 25Hz 以後之頻譜已趨近於零，顯示更高頻成份的貢獻度已降低。上述頻率(寬)係根據頻譜值大小加以判定。</p> <p>因本案地震儀所記錄之加速度反應不大(多數小於 20gal)，兩壩體應無結構性的損傷發生，分析所得之頻譜趨勢應為不同壩體(型)既有之特性，谷關壩(拱壩)有較顯著之單一峰值的趨勢，而天輪壩(重力壩)則有呈現分佈於某一頻寬的趨勢，且歷次地震事件分析所得之頻寬大致穩定分佈於 5~20Hz 之間。此外，誠如委員所建議之內容，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。</p> |
| <p>郭委員耀程(書面意見)</p> | |
| <p>期末報告審查意見</p> | <p>處理情形</p> |
| <p>一、本計畫案針對地震資料進行簡易識別系統軟體及使用手冊開發，有助於管理單位因應地震事件能儘速掌握大壩結構安全資訊，並適時採取必要對策，深表認同。</p> | <p>感謝委員的認同與支持。</p> |
| <p>二、第 IX 頁，本計畫案第三年建議之工作內容中，列水壓計以間隔 3m 以上，同鑽孔內不超過 10 個水壓計為原則進行研究，其考量原因請說明。</p> | <p>感謝委員指教。同一鑽孔施設不超過 10 個水壓計之目的為當初計畫構想，其已可滿足使用需求，並無其他因素考量。</p> |
| <p>三、TDR 受剪物理模型未來推廣應用時，請考量是否能滿足監測預警需求，並建議對結構位移後之持續監測方式進行研討，以利掌握整體破</p> | <p>TDR 受剪物理模型主要在研究 TDR 錯動變形安裝方式的最佳化與資料分析方法，未來將根據研究成果制訂相關的標準流程，TDR 錯動變形監測技術可以提</p> |

| | |
|--|--|
| 壞模式。 | 供剪力破壞的預警需求，並監控剪力帶的持續發展。 |
| 四、本計畫研發之監測儀器精度，應為所研發監測儀器未來推廣使用成功之關鍵，惟報告內未見研發監測儀器與傳統儀器（或人工監測）之資料比較，無法了解研發監測儀器之精度是否為管理單位滿足，建議補充或列為第三年研發重點。 | 感謝評審委員指教。請參閱表 4.8、表 4.9。 |
| 五、P.48 述及 FBG-SD 在湖山水庫應用量測趨勢上與測傾管一致，但定量方面誤差較大，又義興電廠應用述及經修改 FBG-SD 功能已明顯改善，惟未見後續相關現地監測資料說明，請補述。 | 感謝委員指教。請參閱圖 4.43 為 S6 傾斜觀測管與光纖光柵偏斜儀結果比較 |
| 六、本計畫交大團隊研發之產品，未來各管理單位若欲應用仍需透過政府採購法規範，其可能涉專利問題建議應妥為考量。 | 感謝委員提醒，有關智慧財產的問題將依相關規定辦理。 |
| 北水局李副工程司永安 | |
| 期末報告書審查意見 | 處理情形 |
| 一、P.50 圖 4.43 義興電廠傾斜管光纖讀數分析圖內，測得孔口後約地面下 2.5m 有往上波面移動趨勢，似不合理，建請補充說明，另如傾斜孔愈深的話其差量是否更大？ | 感謝委員指教。請參閱圖 4.42 義興電廠邊坡暨有傾斜孔與光纖感測器裝設位置示意圖。根據 S6 傾斜觀測管監測結果目前邊坡滑動方向為朝右上方(以圖 4.42)，而新設之光纖光柵偏斜儀之孔位位於 S6 之下方，中間隔著約 1 公尺寬度水泥鋪面道路，當邊坡滑動時，S6 傾斜觀測管所監測的結果為喇叭形的變形趨勢，而光纖光柵偏斜儀所監測結果為一大肚形狀趨勢，研判因受 1 公尺寬水泥鋪面道路影響，使得兩監測管之變形受限於此道路，所以造成光纖光柵偏斜儀孔位之地面下 2.5m 處有往上坡面之趨勢。監測數據結果與傾斜管深度並無關係，只與量測範圍大小有關，例如一般傳統傾斜儀，若量測 30m 的範圍，則有 |

| | |
|--|---|
| | 6mm 之誤差。 |
| 二、在先進傳輸線式監測光纖部分，請補充說明系統故障、檢修、維護、更新等之費用、技術性及維修後之耐用性總合評估，俾利管理單位參考。 | 感謝委員指教。關於先進傳輸線式監測光纖部分之系統故障、檢修、維護費，估計約為總安裝設備儀器經費之一成費用；而維修後之耐久性約為一年。 |
| 三、報告內有稱「本署」、「本計畫」、「本團隊」、「本研究」，建議稱謂予以統一。 | 感謝委員提醒，已依文中各使用時機進行修正。 |
| 四、文字勘誤：P.I 第 12 行；P.III 倒數第 3 行；P.IV 第 3 行、第 5 行；P.11 最後一行；P.41 流程圖有誤；P.90 4.3 式；P.97 4.3、4.4 式。 | 遵照辦理，已全數修正。 |
| 中水局林工程員士元 | |
| 期末報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、P.167 報告說明本研究首先進行時域分析，來呈現強震儀所紀錄之震動訊號，並同時初步檢視強震儀是否正常運作，建議可補充檢視地震儀的檢測紀錄、維護時之測試紀錄等，除可確認強震儀運作正常，亦可強化地震儀蒐錄資料的可靠性。 | 謝謝委員的建議。的確，地震儀加速度歷時資料有隨地震波動僅可作為初步評估儀器設備是否正常運作的參考，其值是否精確仍有賴於管理單位之維護與校正確認。部份水庫管理單位之強震儀較為老舊，且無轉檔成加速度歷時並儲存之功能(或該相關轉檔程式已遺失)，若經費允許，可設置新式的地震儀，同時定期進行檢查與校正，以延長地震儀之使用壽命。 |
| 二、後續研究工作建議欲進行簡易頻譜分析軟體及使用手冊開發部分，建議請考量不同廠牌地震儀之適用性(如紀錄訊號格式轉換問題)。 | 謝謝委員的建議。本研究未來所開發之簡易頻譜分析係針對地震儀及其資料擷取系統可記錄加速度歷時且該資料可轉換並儲存為一般文字檔(ASCII)格式者。不同廠牌之地震儀可將加速度歷時轉換為 ASCII 格式，則簡易頻譜分析軟體即可進行運算分析。 |
| 水利署水源經營組宋科長恒輝 | |
| 期末報告審查意見 | 處理情形 |

| | |
|---|---|
| <p>一、本報告請補附英文摘要，封面格式請依水利署規定格式撰寫。</p> | <p>遵照辦理，已依水利署規定格式撰寫。</p> |
| <p>二、本研究計畫在光纖光柵水壓計之改良，其設計更改為雙鋼模片，惟經試驗結果，靈敏度並未較單鋼模片增加兩倍，探討其原因，乃雙鋼模片間距過大，而結論以估計將雙鋼片距離減半便可得到預期效果，請問此變化是否得到驗證。</p> | <p>感謝委員指教。光纖光柵水壓計感測機制，請參閱 P.22。而光纖光柵感測為應變變量的大小，根據應變的定義為單位長度的變化量，當變形量為定值時，若長度變長時，則應變量會變小，反之亦然。所以若雙鋼模片的距離減半後，則感測器的靈敏度會提升。經過理論分析計算後，當採用鋼模片直徑為 16mm，厚度為 0.3mm，兩鋼模片距離為 50mm 時，可感測 2.2cm 的水位變化；同樣之膜片直徑與厚度，兩鋼模片距離變更為 25mm 時，可感測 1.1cm 的水位變化。</p> |
| <p>三、P.41 圖 4.34 模擬現地監測流程圖，標示多處空白，請補正。</p> | <p>遵照辦理，已將其補正如圖 4.34。</p> |
| <p>四、FBG-SD 研發過程中，分別於 2005 年初在湖山水庫預定地之邊坡與 2007 年中於義興電廠壓力鋼管附近使用 FBG-SD 感測邊坡地層內之位移，並在鄰近安置另一根傾斜管使用傳統傾斜探管感測位移並做相互比較，目前是否已得比較之結果。</p> | <p>感謝委員指教。請參閱圖 4.43，其為 S6 傾斜觀測管與光纖光柵偏斜儀結果比較。</p> |
| <p>五、壩體安全診斷系統研究，主要利用強震儀所記錄之壩體振動反應進行系統識別分析，瞭解壩體之動力特性是否有異常變化，本計畫年度對谷關壩及天輪壩做研究，其分析結果壩體之動力特性是否有異常變化，請簡要於報告中說明。另對未安裝強震儀之水庫，是否可做壩體安全診斷。</p> | <p>謝謝委員的建議。本案分析所得之頻譜趨勢反應出不同壩體(型)之特性，谷關壩(拱壩)有較顯著之單一峰值的趨勢，而天輪壩(重力壩)頻譜峰值則有呈現分佈於某一頻寬的趨勢，且其頻寬大致穩定分佈於 5~20Hz 之間。此外，地震儀所記錄之加速度反應不大(多數小於 20gal)，兩壩體應無結構性的損傷發生，請參閱 p.239。</p> <p>因地震儀可於地震發生的過程中即時記錄壩體之加速度歷時(time history)反應，該歷時資料可透過頻譜分析或系統識別分析求得壩體結構整體之動力特性(如振動頻率)，因此可作為壩體(土木結構)安全診斷之參考依據。若無安裝強震儀，則無法得知壩體之振動特性或歷次</p> |

| | |
|---|---|
| | 地震事件壩體振動特性之變化情形，惟地震時或地震過後水庫管理單位仍可針對相關監測儀器所測得(或人員現地檢測記錄)之數據與地震發生前之數據進行比對，以瞭解壩體局部區域是否有異常的情況發生(如沉陷、傾斜、滲漏等)。 |
| 六、P.177 表 6.1 與 P.210 表 6.3 之格式請一致，重力加速度及水庫水位欄請列出單位 | 謝謝委員的指正，已於表格中加註重力加速度及水位高程之單位。 |
| 七、附錄三水庫壩體非破壞性檢測技術選用導引”五、自然電位法”與”六、透地雷達”章節內容，請補附。 | 感謝委員指教，於本年度中，附錄中該導引為初擬雛型，整體導引將於下年度完成。 |
| 八、各種檢測儀器，出廠時都有其適用範圍、原理及分析方法，附錄三是否宜以導引定位，建議再檢討。 | 感謝委員指教，該導引只牽涉方法，並未涉及各種檢測儀器。 |
| 九、研究單位本年度已完成光纖光柵水壓計之封裝與安裝設計，並進行耐久性評估，亦完成自動化擷取系統之整合，另 TDR 錯動變形監測技術已完成大型 TDR 受剪物理模型的建立，基本上可提早偵測滑動面的存在。以上兩者研究單位擬進行現場試用測試，惟報告及簡報中未強調適合測試之水庫？以及其構想方法，本來如何辦理之步驟等，請列為報告中之建議。 | 感謝委員指教，現地測試的水庫場址暫不納入本年度報告中，詳細內容將與主辦單位協調後，另行撰文說明。 |
| 水利署水源經營組邱助理工程司士恩 | |
| 期末報告審查意見 | 處理情形 |
| 一、本案係第 2 年度延續計畫，相關研究成果是否達成預期，宜請檢視，另研究過程遭遇問題，已解決情形及待後續處理事項等，請併列表說明，俾供未來年度工作計畫擬定參考。 | 感謝委員指教。第一年度研究結果發現水庫安全診斷分析的專家系統難以在研究計畫規模下執行，是以本年度計畫與原整體規畫內容有所差異，然本年度依照第一年度之成果建議項目進行，已全數完成，因此在此並不另行列表說明。未來年度工作計劃已列於建議事項中。 |
| 二、光纖光柵自動化擷取系統所稱「即 | 感謝委員指教。所謂自動化擷取系統之 |

| | |
|---|--|
| <p>時能力」，請說明功能程度，及其與相關傳統儀器優劣比較。</p> | <p>「即時能力」，代表監測範圍中之感測器受到自然因素、人為因素等，能藉由自動化擷取系統讀取資料後，經計算結果並與預設管理值、行動值與警戒值做比較後，發送訊息至管理單位人員，並依據訊息程級是否需至現場勘查或行動。而傳統監測儀器之優劣比較，請參閱表 4.8、表 4.9。</p> |
| <p>三、本案相關監測及檢測研發儀器，購置所需成本及後續維護經費，請補充說明。</p> | <p>感謝委員指教，本研究主要考量技術改善與提昇，儀器與維護的成本將依整體市場機制而定。</p> |
| <p>四、壩體安全診斷系統，主要目的為透過現象探討成因，提供水庫管理單位參考，報告所述系統識別所建壩體行為現象內容甚少著墨，建請補充。</p> | <p>謝謝委員的建議。系統識別分析主要係瞭解壩體結構於地震發生時之整體振動特性(振動頻率)，並瞭解歷年地震事件壩體振動特性之變化情形，若本次與先前地震事件分析所得之振動特性差異較為顯著，則壩體結構可能有損傷發生，系統識別結果可發揮預警的作用，並提醒相關單位針對壩體結構之局部區域進行檢查(如壩體、壩座或壩基)，以瞭解壩體結構受震後的狀況，若有損傷，則可即時採取相關緊急應變措施。</p> <p>本案分析所得之頻譜趨勢可反應出不同壩體(型)之特性，谷關壩(拱壩)有較顯著之單一峰值的趨勢，而天輪壩(重力壩)頻譜峰值則有呈現分佈於某一頻寬的趨勢，且其頻寬大致穩定分佈於 5~20Hz 之間。此外，歷年地震儀所記錄之加速度反應不大(普遍小於 20gal)，兩壩體應無結構性的損傷發生，請見 p.239。</p> |
| <p>五、p.48，義興電廠埋設光纖觀測成果，宜與既有監測儀器觀測值互作比較，並說明驗證結果及檢視該儀器可靠度。</p> | <p>感謝委員指教。請參閱圖 4.43 為 S6 傾斜觀測管與光纖光柵偏斜儀結果比較。</p> |
| <p>六、簡報所述 97 年度壩體安全診斷系統工作，將延續混凝土壩之研究，查與原整體計畫擬辦「土石壩」要求不同，請依原定內容辦理。</p> | <p>感謝委員指教。在整體計畫中原規劃土石壩與混凝土壩安全診斷系統之專家系統研發，唯第一年研究結果發現水庫安全診斷分析的專家系統難以在研究計畫規模下執行，且不像人體構造，不同水庫之結構差異大，不容易發展通用型的</p> |

| | |
|--|---|
| | <p>診斷系統。因此，第一年已建議修改後續的工作內容，著重監測與檢測技術研發在土石壩上的可適性，而混凝土壩方面主要發展利用地震資料進行系統識別的診斷分析。利用本計畫研發改良的監測技術、改良的檢測技術與使用導引、地震資料的系統識別分析，提昇水庫安全評估所需的決策支援資訊，而水庫安全的診斷分析建議仍照現行的水庫安全評估辦法，個別水庫的安全評估委由專業顧問進行相關分析，發展通用的診斷專家系統現階段可行性不高。</p> |
| <p>結論</p> | |
| <p>一、交通大學所提之期末報告原則認可，請參照委員及各單位意見補充修正，並依契約規定提送修正稿。</p> | <p>遵照辦理。</p> |
| <p>二、本計畫已獲初步成果，原訂第三年之計畫有繼續辦理之必要，請交通大學依據本年度工作內容及成果，研擬後續工作項目並提出建議。</p> | <p>遵照辦理。</p> |
| <p>三、有關本計畫研發成果擬於現有結構體進行測試，主辦單位與交通大學雙方宜先研商決定適當地點及測試方法。</p> | <p>遵照辦理。</p> |

附錄四 水庫壩體非破壞性檢測技術選用導引(初稿雛型)

水庫壩體非破壞性檢測技術選用導引

(初擬雛型)



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

中華民國九十六年十二月

目錄

| | |
|---|----|
| 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 | 3 |
| 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 | 3 |
| 1.2.2 表面波震測法 | 5 |
| 1.2.3 電阻探測法 (DC Resistivity) | 5 |
| 1.2.4 自然電位法 (Spontaneous Potential, SP) | 7 |
| 1.2.5 透地雷達探測法 (Ground Penetrating Radar, GPR) | 7 |
| 1.3 非破壞性檢測法之選用 | 8 |
| 1.3.1 破壞模式與可用之非破壞檢測法對應表 | 8 |
| 1.3.2 非破壞性檢測方法特性表 | 11 |
| 1.3.3 選用說明 | 12 |
| 1.4 參考文獻 | 13 |
| 二、折射震測法 | 15 |
| 2.1 應用範圍 | 15 |
| 2.2 原理 | 15 |
| 2.3 施測方法 | 16 |
| 2.3.1 儀器說明 | 16 |
| 2.3.2 規劃與定線 | 17 |
| 2.4 分析方法 | 19 |
| 2.5 資料分析判釋需知 | 22 |

| | | |
|----------------|----------------|----|
| 2.6 | 報告書內容 | 25 |
| 2.7 | 可能的誤差來源 | 25 |
| 2.8 | 應用限制 | 26 |
| 2.9 | 參考文獻 | 27 |
| 三、表面波震測法 | | 28 |
| 3.1 | 應用範圍 | 28 |
| 3.2 | 原理 | 28 |
| 3.3 | 施測方法 | 28 |
| 3.4 | 分析方法 | 28 |
| 3.5 | 資料分析判釋需知 | 28 |
| 3.6 | 報告書內容 | 28 |
| 3.7 | 可能的誤差來源 | 28 |
| 3.8 | 應用限制 | 28 |
| 3.9 | 參考文獻 | 28 |
| 四、電阻探測法 | | 29 |
| 4.1 | 應用範圍 | 29 |
| 4.2 | 原理 | 29 |
| 4.2.1 | 2-D電阻探測法 | 29 |
| 4.2.2 | 1-D電阻探測法 | 30 |
| 4.3 | 施測方法 | 32 |
| 4.3.1 | 儀器說明 | 32 |
| 4.3.2 | 測線規劃 | 32 |
| 4.3.3 | 現場施測 | 33 |
| 4.4 | 分析方法 | 33 |
| 4.5 | 資料分析判釋需知 | 34 |

| | | |
|---------------|----------------|----|
| 4.6 | 報告書內容 | 34 |
| 4.7 | 可能的誤差來源 | 35 |
| 4.8 | 應用限制 | 35 |
| 4.9 | 參考文獻 | 35 |
| 五、自然電位法 | | 36 |
| 5.1 | 應用範圍 | 36 |
| 5.2 | 原理 | 36 |
| 5.3 | 施測方法 | 36 |
| 5.4 | 分析方法 | 36 |
| 5.5 | 資料分析判釋需知 | 36 |
| 5.6 | 報告書內容 | 36 |
| 5.7 | 可能的誤差來源 | 36 |
| 5.8 | 應用限制 | 36 |
| 5.9 | 參考文獻 | 36 |
| 六、透地雷達 | | 37 |
| 6.1 | 應用範圍 | 37 |
| 6.2 | 原理 | 37 |
| 6.3 | 施測方法 | 37 |
| 6.4 | 分析方法 | 37 |
| 6.5 | 資料分析判釋需知 | 37 |
| 6.6 | 報告書內容 | 37 |
| 6.7 | 可能的誤差來源 | 37 |
| 6.8 | 應用限制 | 37 |
| 6.9 | 參考文獻 | 37 |

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，此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

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。

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，在使用大鐵鎚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。

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

簡述：

應用：

探測深度：

試驗特性：

解析能力：

限制：

進階閱讀參考：

1.2.3 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。

應用：在 1-D 的應用上，其根據不同的施測方式可將其分為垂直探測 (sounding) 與側向探測 (profile)，垂直探測可用於探測土層的厚度以及深度，而側向探測可用於探測在同一深度下的土層側向變化，利如無機污染物或垃圾掩埋的探測。在施測上，垂直探測是藉由不斷增加電極的間距但中點不變的方式而得到一個位置的深度變化，而側向探測是固定電極間距透過不斷移動中點位置獲得資料。目前已經 2-D 的應用，其是採用多個電極棒 (>4) 採線性佈設後，同時施做垂直探測與側向探測，因此同時可有兩種 1-D 方法的應用。

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 $1/2 \sim 1/5$ 倍之間。

試驗特性：

解析能力：

限制：

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：

應用：

探測深度：

試驗特性：

解析能力：

限制：

進階閱讀參考：

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

簡述：

應用：

探測深度：

試驗特性：

解析能力：

限制：

進階閱讀參考：

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表 5.6 所示。

表 1.7 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 |

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。

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。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，因此亦會反應至應力波速的異常上。

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，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。

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，而管湧與滲露的產生將在透水層造成鬆散帶、於可溶性夾層造成孔洞，使得地層之應

力波速亦有變化情形產生。

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。壩體受到侵蝕將會產生孔洞與壩體材料密度的變化，直接影響其應力波速的表現，於管湧或滲露發生時之土石鬆散帶亦會影響，可使用表面波震測檢驗；又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、電磁法或透地雷達檢測。

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、電磁法或自然電位法；又若有管湧情形將會使該處土石鬆散，造成應力波速變化，可採用表面波震測法檢驗。

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、電磁法、自然電位法或透地雷達；而管湧與滲露的產生將在透水層造成鬆散帶、於可溶性夾層造成孔洞，使得地層之應力波速亦有變化情形產生，可使用折射震測或表面波震測檢驗。

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；此外，裂縫的存在會影響該區域地層之電學性質，可使用電阻法、電磁法或地雷達。

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 1.8 所示。

表 1.8 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夾帶薄層材料；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。 | 不易探測厚層中夾薄層材料，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<10m；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 5.25 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。

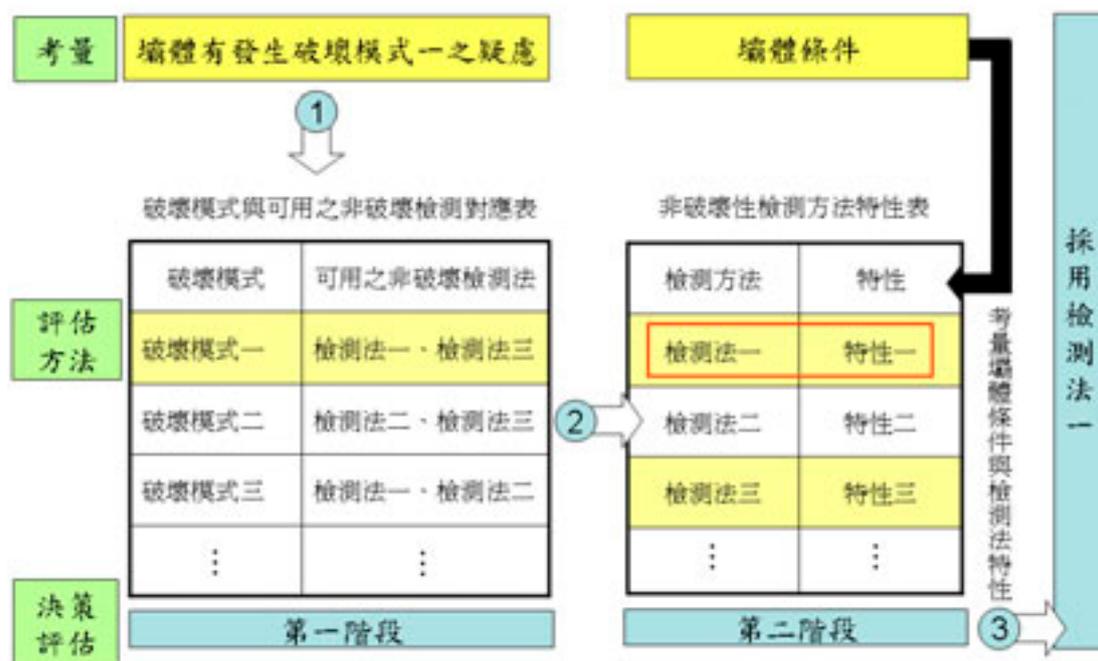


圖 1.26 非破壞性檢測技術之適用性評估方法雛形流程圖

1.4 參考文獻

1. Crice, Douglas B., "Applications for Shallow Exploration Seismographs," In Practical Geophysics for the Exploration Geologist, Northwest Mining Association, Spokane, Washington, 1980.
2. 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.
3. Loke, M. H., "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys," Geotomo Software, Malaysia; , 2003
4. Loke, M. H., "Time-Lapse Resistivity Imaging Inversion," 5th Meeting of the Environmental and Engineering Society European Section, pp. 1-2.; , 1999
5. Palmer, D., The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation, Soc. of Expl. Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1980.

- 6.. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., Applied Geophysics, Cambridge University Press, New York, New York, 1990.
7. Yang, X. and Lagmanson, M., “Comparison of 2D and 3D Electrical Resistivity Imaging Methods,” Advanced Geosciences. , 2006
- 8.. 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 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。

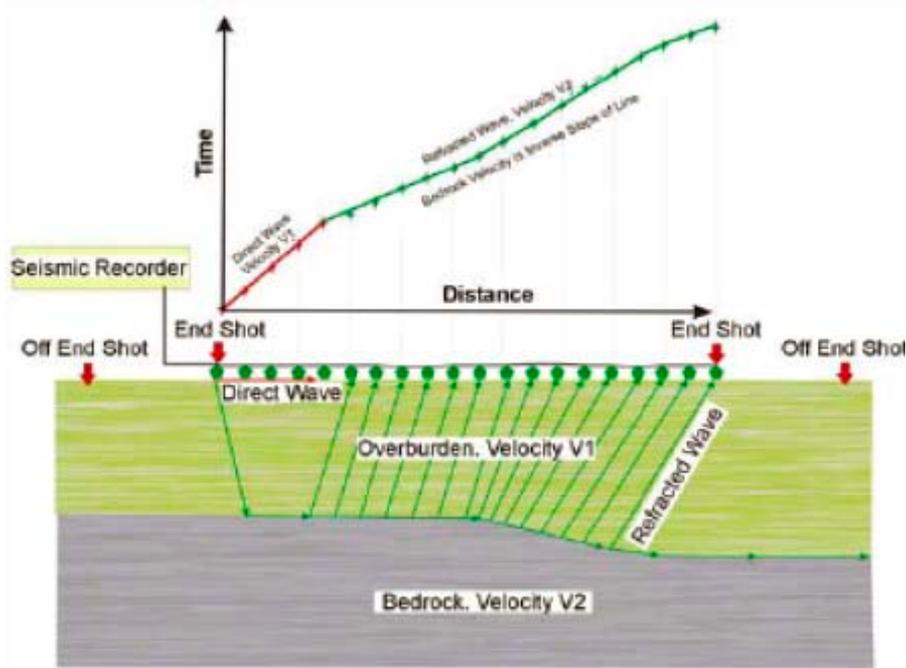


圖 1 折射震測法原理示意圖

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 規劃與定線

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 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。

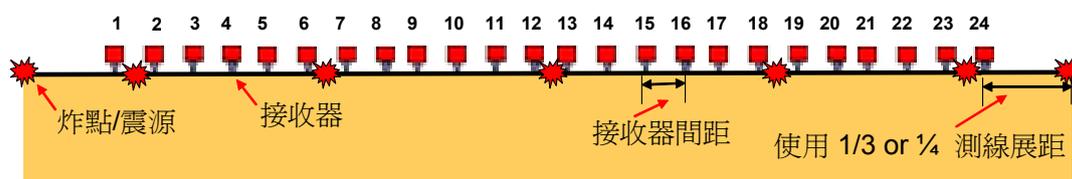


圖 2 折射震測法現場施測參數圖

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 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 $1/3-4/1$ 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 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。

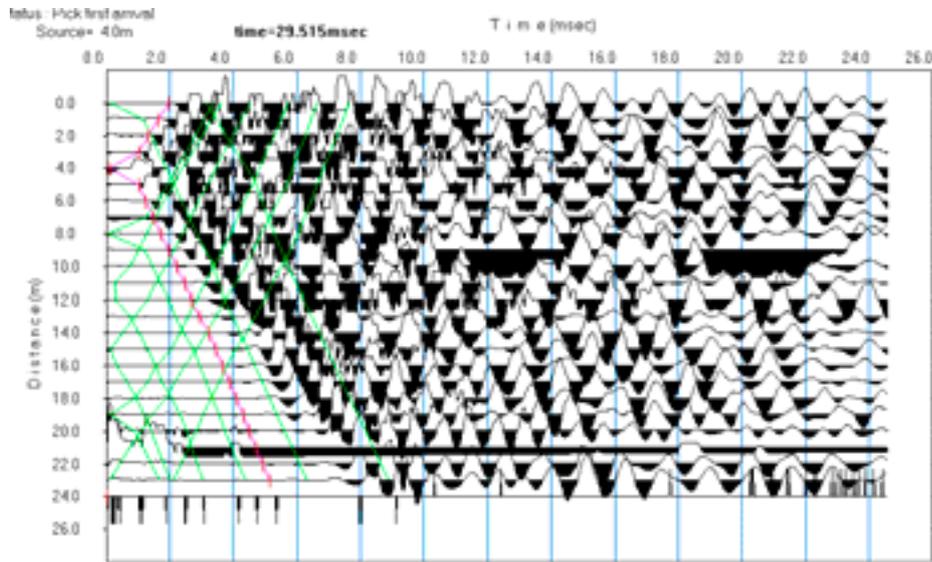


圖 3 初達波走時曲線挑選

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 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 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。

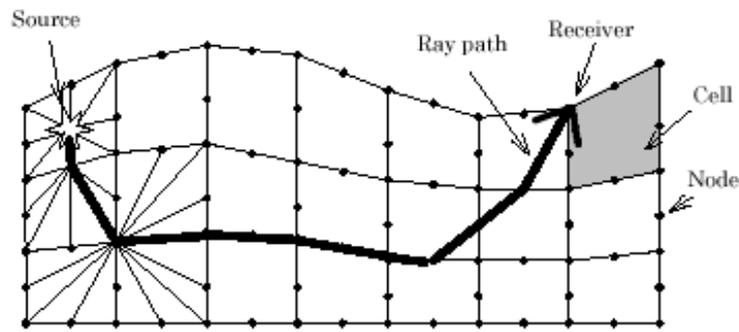


圖 4 折射震測走時震測影像分析原理

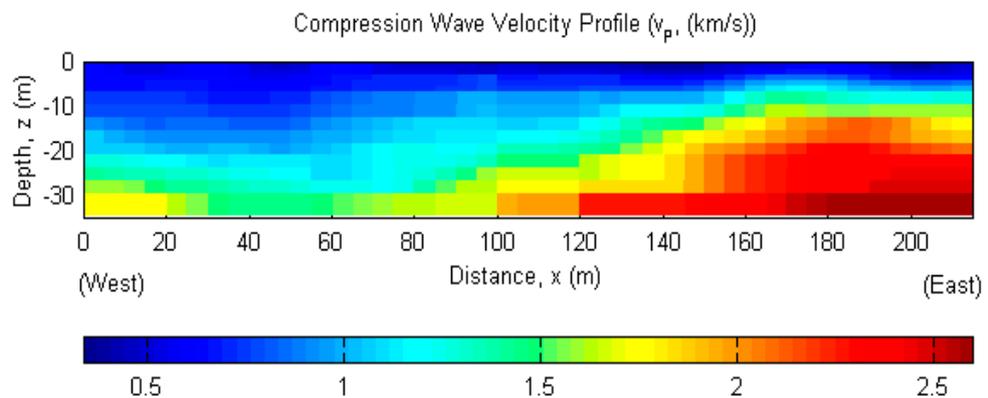


圖 5 二維地層波速剖面

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唯一性，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 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。

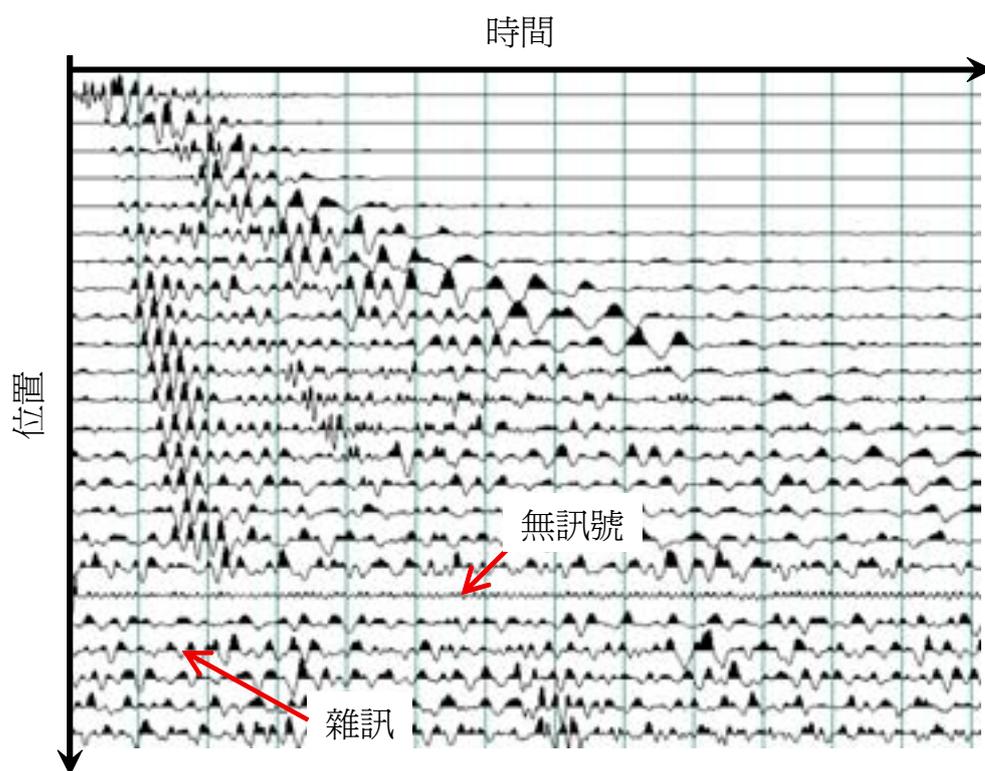


圖 6 折射震測法現場資料示意圖

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 參考文獻

1. Crice, Douglas B., "Applications for Shallow Exploration Seismographs," In Practical Geophysics for the Exploration Geologist, Northwest Mining Association, Spokane, Washington, 1980.
2. 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.
3. Palmer, D., The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation, Soc. of Expl. Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1980.
4. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., Applied Geophysics, Cambridge University Press, New York, New York, 1990.
5. 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
- 3.2 原理
- 3.3 施測方法
- 3.4 分析方法
- 3.5 資料分析判釋需知
- 3.6 報告書內容
- 3.7 可能的誤差來源
- 3.8 應用限制
- 3.9 參考文獻

四、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

4.2.1 2-D電阻探測法

地電阻影像探測的量測原理為藉由外加低頻電流經由圖 7 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 8所示。

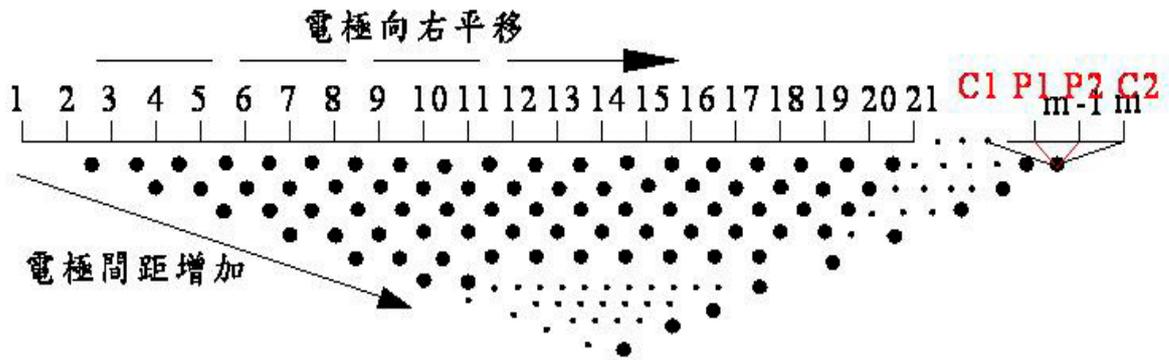


圖 7 地電阻探測量測示意圖

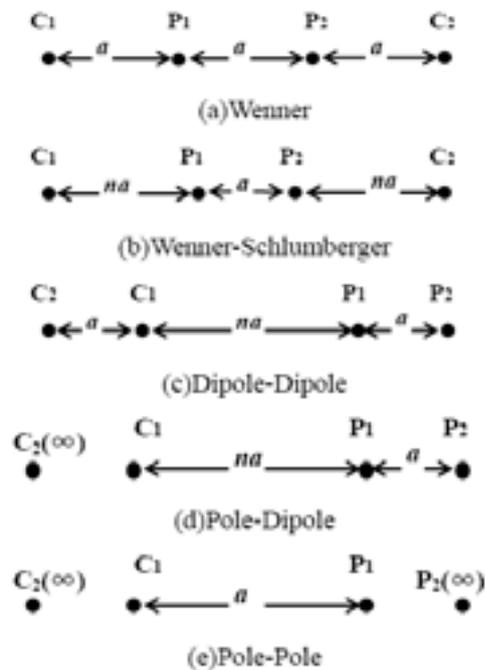


圖 8 地電阻影像探測的各種排列方式

4.2.2 1-D電阻探測法

在一維地電阻探測方法中，主要可分為垂直電探法（Vertical Electrical Sounding）與側向電探法（Lateral Electrical Profiling），茲分別說明如下。垂直電探法主要應用於探測地質狀態隨深度的水平層狀

變化，較常使用的電極排列方式為 Wenner array 以及 Wenner-Schlumberger array，時，一般工程實務上於地表佈設四根電極棒，分別為一組電流極（C1、C2）與一組電位極（P1、P2），而在施測過程中逐步擴大電流極間距與電位極間距，當電流極間距逐漸增加時，電流有自地表淺層逐漸向深層流動的趨勢，如圖 9 所示。

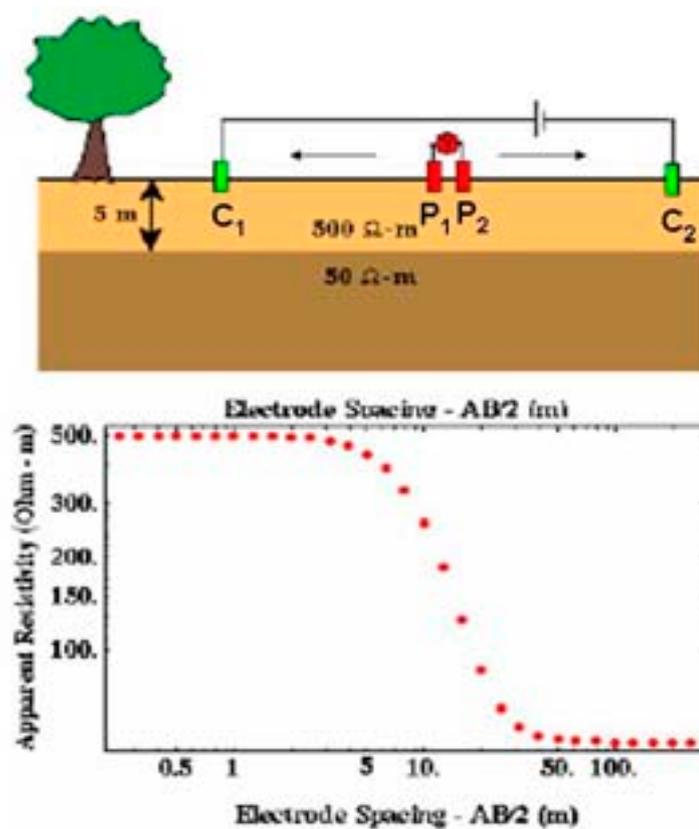


圖 9 垂直電探法（sounding）施測範例

側向電探法則是應用於探測地質狀態的垂直側向變化，在實務上一般先施測垂直電探法，視所欲探測目標位置的深度來決定電極間距大小，再固定此電極間距，將各電流極（C1、C2）與電位極（P1、P2）於地表沿測線方向水平移動，以獲得該深度下地層的側向視電阻

率變化。以圖 10 為例。

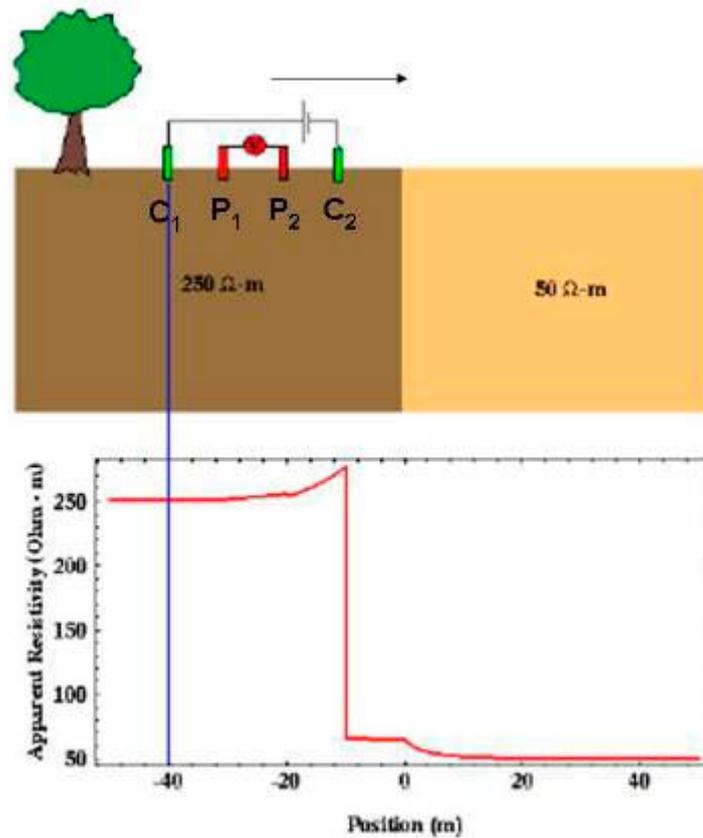


圖 10 側向電探法 (profiling) 施測範例

4.3 施測方法

4.3.1 儀器說明

30 公分鋼棒、同軸纜線、電流傳輸線、纜線轉接盒、可放電並計錄電流、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 30 公分之鋼棒依固定間距(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，則事後需進行高程修正。

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 3 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

量測時，與測線垂直方向(y)之電阻率變化過大；地下水位過高，施測目標深度受到影響；地表環境太複雜，造成淺層資料受干擾；地形變化太大，使資料量測效果不佳；地層電阻太高，傳遞效能不佳。

4.8 應用限制

應避免淺層電阻率比值太大，如下雨天或雨天過後地表積水等；因如上層是非常不導電物質，則下層不會有電流通過；反之，則電流集中在上層無法進入到下層。另測線彎折過多或轉彎角度過大，無法使測線成為一直線，則應避免使用 ERT 進行實測。

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
- 5.2 原理
- 5.3 施測方法
- 5.4 分析方法
- 5.5 資料分析判釋需知
- 5.6 報告書內容
- 5.7 可能的誤差來源
- 5.8 應用限制
- 5.9 參考文獻

六、透地雷達

- 6.1 應用範圍
- 6.2 原理
- 6.3 施測方法
- 6.4 分析方法
- 6.5 資料分析判釋需知
- 6.6 報告書內容
- 6.7 可能的誤差來源
- 6.8 應用限制
- 6.9 參考文獻

附錄五 計畫相關論文發表情形

1. 監測技術研發相關論文

Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. “Development of a Chirped/Differential Optic Fiber Bragg Grating Pressure Sensor,” submitted to Journal of Measurement Science and Technology.

Lin, C.-P., “TDR as Geo-Nerve: A Slope Monitoring System Example,” Proceeding of The 3rd World Forum of Chinese Scholars in Geotechnical Engineering Aug. 20-21, 2007.

Lin, C.-P., Chung, C.-C., Tang, S.-H., and Lin, C.-H. (2007), “Some innovative developments of TDR technology for geotechnical monitoring,” 7th International Symposium on Field Measurement in Geomechanics September 24-27, 2007, Boston, MA.

Tang, S.-H., Lin, C.-P., Lin, W.-C., and Chung, C.-C., “Quantification of Cable Deformation with TDR: Implications to Localized shear deformation Monitoring,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (Revised)

Lin, C.-P., Tang, S.-H., and Chung, C.-C (2006), “Quantification of Localized Shear Deformation with Time Domain Reflectometry,” TDR 2006: 3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications, September 2006, Purdue University, West Lafayette, IN.

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.

林志平、湯士弘、鐘志忠、林文欽 (2007), "時域反射技術於大地工程監測之創新發展", 中華民國第十二屆大地工程學術研討會。(最佳論文獎)

2. 非破壞性檢測研究相關論文

Lin, C.-P., Hung, Y.-C., and Yu, Z.-H. (2008), "Application of ERT to Leakage Investigation: A Case Study at the Shin-Shan Earth Dam," Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 21th Annual Meeting SAGEEP 2008, Philadelphia, USA.

Lin, C.-P., and Lin, C.-H. (2008), "High Lateral Resolution Surface Wave Method," 3rd International Conference on Site Characterization, Taipei, Taiwan, 2008.

Lin, C.-P. and Lin, C.-H. (2007), "Effect of Lateral Heterogeneity on Surface Wave Testing: Numerical Simulations and a Countermeasure," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27, pp. 541-552.

Lin, C.-P. and Lin, C.-H. (2006), "Effect of Lateral Heterogeneity on Surface Wave Testing: Numerical Simulations and Countermeasure," Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 19th Annual Meeting SAGEEP 2006, Seattle, USA.

林志平、尤仁弘、洪瑛鈞、鄒和瀚, "電阻剖面影像法於霸體滲漏調查之應用", 先進工程學刊, (Accepted)

林志平、林俊宏、鄒和翰、尤仁弘、鍾志忠 (2007), "壩體地球物理

檢測之發展與應用", 中華民國第十二屆大地工程學術研討會。

林志平、林俊宏 (2007), "表面波震測二維剪力波速剖面造影技術：

潛力與限制", 中華民國第十二屆大地工程學術研討會。

林志平、張宗盛、鄒和瀚、尤仁弘、鍾志忠、陳在中 (2006), "蓄水

庫壩體安全檢測：地球物理方法", 第十五屆水利工程研討會。